



KR0000193

KAERI/RR-2031/99

최 종 보 고 서

방사선 및 방사성 동위원소 이용연구

**Studies on Application of Radiation and
Radioisotopes**

중성자 방사화분석 이용기술 개발

**Applied Research and Development of
Neutron Activation Analysis**

주관연구기관
한국원자력연구소

과 학 기 술 부

31 / 40

**Please be aware that all of the Missing Pages in this document were
originally blank pages**

제 출 문

과 학 기 술 부 장 관 귀하

본 보고서를 “방사선 및 방사성 동위원소 이용연구” 과제 (세부과제
“중성자 방사화분석 이용기술 개발”)의 최종보고서로 제출합니다.

2000. 5. .

주관연구기관명 : 한국원자력연구소

주관연구책임자 : 정 용 삼

연구 원 : 문 종 화
김 선 하
백 성 렬
박 용 철
김 영 기
정 환 성
박 광 원
강 상 훈

요 약 문

I. 제 목

중성자 방사화분석 이용기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

중성자 방사화 분석법(Neutron Activation Analysis, NAA)은 각종 시료 중의 극미량 원소를 분석하는데 매우 효과적인 방법으로써 미지시료를 적절히 선택한 시간 동안 연구로에서 (n, γ) 반응에 의해 방사화시켜 생성된 방사성 핵종들로부터 방출되는 특정 감마선을 측정하여 소량의 광범위 시료로부터 극미량의 성분 원소들을 비파괴적으로 동시에 정량할 수 있다. 핵분석기술(Nuclear Analytical Techniques, NAT)가운데서도 활용도가 아주 큰 분석기술이며 최근에는 고분해능의 고순도 게르마늄 반도체 검출기가 연결된 다채널에너지분석기(Multichannel Analyzer, MCA)와 컴퓨터를 이용함으로써 검출감도와 분석시간 및 자료처리 속도가 현저히 진보되고 있어서 그 분석능력이 크게 향상되었다.

계량에 대한 국가표준제도의 시행과 함께 기초과학, 응용연구개발 및 산업발전을 위한 품질관리 및 보증에 이용되는 신뢰성이 있는 강력한 고감도분석의 지원은 필수적이며, 선진외국에서도 각종 연구개발에 적극 활용하고 있는 중성자 방사화분석 절차의 국가적, 국제적 표준화는 무역상 기술장벽을 해소할 수 있는 국제 경쟁력과 직결되는 시급한 문제이므로 항상 지원 가능한 광범위하고 다양한 측정분석능력(Best Measurement Capability)을 확보해야 한다. 또한 국가의 거대 연구시설인 하나로의 이용 극대화와 관련 기반기술의 확립 및 원자력기술의 실용화가 필요하다. 이외에도 사회적 측면에서 볼 때 방사선 및 RI의 의료, 생명과학 및 산업적 이용이 삶의 질 향상에 직·간접으로 기여하는 파급효과를 적극 홍보함으로써 국민과 함께하는 원자력이라는 공감대를 형성하여 원자력에 대한 국민이해도 및 수용성을 증대시키는 일에도 기여한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1) 하나로의 중성자 방사화분석용 중성자 조사·계측장치의 개선 및 자동화시스

탐의 개발.

Al으로 제작된 기존의 분리기(Diverter)와 폴리에틸렌으로 된 이송관의 이음부분이 평활하지 못하여 캡슐이 이동될 때 일시적인 걸림현상과 각임현상이 발생하여 공압이송장치(Pneumatic Transfer System, PTS)의 안전운전에 큰 장애요인이 되므로 모든 이음새부분을 coupling 방식으로 연결하고자 하였다. 기존의 공압이송장치(PTS #1&2)는 운영상에 작업자의 방사선 피폭 및 실내 방사능 준위에 문제가 있었다. 공압이송관내의 높은 방사능 준위는 조사된 시료 및 공기중의 Ar기체의 방사화에 의한 것으로 추정되므로 공급 기체를 대체시킬 방법을 고려하였다. 또한 조사된 시료의 회수시 생성방사능의 준위에 따라 원격조정하는 두개의 회수기(Receiver)를 사용하여 안전성을 확보하고자 하였다.

안정적이고 효율적인 활용을 위해서 PTS #2 의 자동조사·계측시스템의 개선 및 기 개선된 장치의 운영을 포함하는 전산프로그램과 중성자 방사화분석용 통합 전산코드를 개선하였다. 고가의 PTS용 시료조사캡슐을 국산 제작하여 수입대체효과를 얻도록 고분자재료의 정밀 분석법을 개발하고 폴리에틸렌 캡슐재료의 조사특성연구를 수행하여 기반자료를 확보하였다.

조사된 시료의 감마선 계측시 장수명 핵종의 경우 상당히 긴 계측시간이 소요되며, 한번에 다량의 시료를 조사시키므로 많은 계측시간과 대기시간이 필요하므로 자동 시료교환기(Automatic Sample Changer)를 계측시스템에 연결하여 야간에도 무인운영이 가능토록함으로써 인력소모 및 연속적인 작업상의 간섭을 감소시켜 효율을 증대시키고자 하였다.

2) 분석절차 개선 및 분석정도관리시스템 구축

환경, 생물시료의 정확, 정밀한 일상 분석시스템을 확립하기 위하여 인증표준시료(Standard Reference Material, SRM)를 이용한 분석절차의 개발 및 측정의 소급성을 유지시키고자 하였다. 분석감도의 개선을 위한 방법으로 상기의 시료를 대상으로 매질효과와 간섭현상을 제거 또는 감소시킬 수 있는 여러가지 방사화 분석법(INAA/ENAA/RNAA)의 선택성 및 특성을 조사하여 최적의 분석절차를 확립코자하였다.

분석정도관리(Analytical Quality Control and Assurance)를 위한 연구로서 국내의 공인 분석기관에서 실시하는 실험실간 비교연구(Data Intercomparison Study; 예, IAEA AQCS Program)와 숙련도 시험(Proficiency Test)에 참여하여 분석자료를 상호비교 평가함으로써 신뢰성과 객관성을 확보하며, 한국시험소인정

기구(KOLAS)에서 시행하는 측정불확도 평가와 비교속련도 시험에 참여함으로써 인증기관의 기본 자격요건을 확보하고자 하였다.

3) 중성자방사화분석을 이용한 산업/보건환경 응용연구 개발 및 표준화

최근의 급속한 산업발전, 도시인구 집중화, 자동차 증가의 부산물인 환경오염에 대한 인식과 규제가 증가하고 쾌적한 주변환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 대기, 물, 토양, 생물 등과 같은 여러 가지 환경시료에 대한 분석을 통하여 오염의 정도를 파악하고 오염원을 규명하여 이를 통제하기 위한 노력이 뒤따르고 있다. 중금속 및 유해원소의 분석에 대한 표준적이고 일상적인 분석법의 확립은 오염원의 규명을 위한 필수적인 첫 단계이며, 특히 대기분진은 자연적이고 인위적인 발생에 의한 다양한 원소들을 함유하고 있기 때문에 대기관측시료로 이용되고 있으며, 특히 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 분진의 질량농도(TSPM)나 원소의 농도가 높을 때 장·단기적으로 인체 보건에 큰 영향을 미치고 있으므로 대기오염을 관리하기 위한 저비용 분석기술로 평가되고 있는 중성자 방사화분석법을 이용한 대기환경관측연구와 영양 및 인체보건(Nutrition and Human Health)연구와 관련하여 생물, 환경시료의 미량원소분석에 응용하기 위하여 정확한 분석절차를 확립한 후, 오염지역과 비오염지역에서 수집된 시료를 정량하여 요소분석을 통해 각 원소들의 발생원을 추정하고 시료간의 상관성 고찰, 오염기여도 및 인체위해도 평가등을 수행하고자 하였다.

기타 중성자 방사화분석의 적용성 확보를 위한 분석대상의 확대와 국제협력사업 및 공동연구를 수행함으로써 최적의 분석품질을 검증하고자 하였다.

IV. 연구개발 결과

1) 하나로의 중성자 방사화분석용 중성자 조사·계측장치(PTS/MCA)의 개선 및 자동화 시스템 개발.

13개의 기존 분리기의 이음새부분을 coupling 방식으로 연결되도록 제작설치하여 캡슐의 이송시에 안정성을 확보하고 문제점을 해결하였다. 하나로의 방사화분석장치 개선 및 특성시험 자료의 구축을 위하여 반자동으로 운영할 수 있는 장시간 조사 시료의 인출을 위한 PTS #1 Receiver 제작하여 시료저장실(차폐실)내에 제작 설치하였고, 반자동으로 운영되는 단시간 조사(1-2분)시료의 인출만을 위한 PTS #2 Receiver를 Hood 내에 제작 설치하였으며 PTS #2 운전용 전산 프로그램을 개발하였다. 방사선 방호를 위하여 기존의 공기 공급장치를 액체질소를

이용한 N₂ 공급장치로 전환시켜 제작 설치하였다.

공압이송장치에 사용할 2종의 조사캡슐을 국산제작하였으며 새 조사캡슐의 내열성, 내방사성 및 기계적 특성을 시험하여 안정성을 확보하였다. 또한 소용량의 고순도 폴리에틸렌 시료용기를 국산으로 제작하여 다양한 배열로 조합시킬 수 있도록 5종의 inner capsule(용량 : 1~10 ml)과 2종의 outer capsule(용량 : 5~20 ml)로 설계하여 제작하였으며 뚜껑은 편의성을 고려하여 가열밀봉을 하는 대신 개폐가 용이하도록 snap cap형태로 제작하였다. 방사선안전관리에 이용할 수 있도록 제작된 모든 캡슐의 불순물 농도를 측정하였다.

고가장비인 계측용 Automatic Sample Changer를 다양한 계측조건과 용기를 선택하여 사용할 수 있게 설계 제작하여 국산화하였다.

감마선 분광분석시스템(GammaVision) 및 중성자 방사화분석용 통합 전산프로그램을 DOS에서 WINDOWS로 전환시키고 Y2K 문제를 개선하였다.

2) 분석절차 개선 및 분석정도관리시스템 구축

6종의 생물, 환경표준시료(NIST SRM: Peach leaves, Citrus leaves, Total Diet, Bovine Liver, Oyster Tissue, Wheat Flour)를 이용하여 분석오차를 검증하고(상대오차 : 10% 이내의 원소 15종, 상대표준편차 : 15% 이내의 원소 20종), 분석감도의 개선을 위해 공침법과 이온교환법을 혼용한 U, Th의 RNAA 분석절차를 개발(검출감도 : >0.5ng)하였고 생물시료중의 극미량 I, Sr 검출을 위한 ENAA 분석절차를 개발(검출감도 : >0.1ppm)하였다.

한국 시험검사인정제도(KOLAS)의 구축을 위한 자격요건(품질시스템, 분석요원, 시험장비, 시험방법, 시설 및 환경)을 갖추고 적용훈련 및 측정불확도 평가와 비교속련도 시험을 수행하였다.

분석결과의 신뢰성과 객관성을 검증하기위하여 Dust, Soil, Coal flyash, Sediment, Algae시료등 12종 시료에 대한 실험실간 비교연구를 수행하였으며 비교적 우수한 결과를 얻었다.

3) 중성자 방사화분석을 이용한 산업/보건환경 응용연구 개발 및 표준화

표준물질(SRM)과 비교분석을 이용한 분석법의 개발 및 표준화 연구를 수행하여 대기분진 표준물질(NIST SRM 1648, NIES CRM-8)의 분석검증 및 표준 분석절차를 확립하였다.

중성자 방사화분석을 이용한 대기환경오염 관측연구로서 Gent stacked low

volume sampler 와 Membrane filter(Coarse particle: 2.5~10 μ m, Fine particle: <2.5 μ m)를 이용하여 도시지역과 농촌지역, 도시 공단지역에서 시료를 수집하였다. Blank filter의 불순물 농도를 측정하여 보정자료로 이용하였고 시기별('97~'99), 지역별(주거/공단지역) 중금속 및 미량원소 농도, TSPM의 농도를 측정하여 오염발생원의 추정 및 원소간 상관성 분석을 통해 오염원의 통계해석기법을 연구하였다.

중성자 방사화분석을 이용한 생물학적 시료(Foods, Human tissue)의 보건환경 응용연구로서 5종의 생물학적 표준시료를 분석하여 측정오차를 확인하였으며, 주물작업장 실내 공기중 부유입자 내의 미량원소와 관련 작업자의 모발과 혈액내의 미량원소 분포를 연구하였다. 국산 건강보조식품의 분석, 6종의 한국과 중국 한약재에 대한 성분원소의 비교분석, 한국인의 total diet와 대표식품 내의 미량원소 분포연구를 수행하였다.

플라스틱류(재료 및 가공품)의 중성자 방사화분석 이용한 미량분석법 개발로서 X-선 형광분석법, 유도쌍 플라즈마 분광분석법과의 비교분석을 통한 중성자 방사화분석법의 검증 및 최적 분석조건 결정, 냉동파쇄 기술의 개발, 중성자 방사화분석용 캡슐 제작을 위한 플라스틱소재(PE, PP)의 첨가제/무기성분 분석법의 개발을 수행하였으며 플라스틱 소재의 유해성분 용출특성을 측정하였다.

중성자 방사화분석법을 이용한 대전공단지역의 대기중 독성 중금속(As, Cr(6), Ni(subsulfide) 및 Be, Cd)의 산술 평균농도를 구한 후, 인체위해도 및 오염기여도를 평가하였다.

국제협력사업(UNDP/RCA/IAEA Project)의 수행으로 회원국간의 공통적 관심이 있는 주제(동위원소·방사선의 산업,환경분야 이용기술 개발 : 핵분석기술)에 대한 지역간 협동연구를 통해 해당 기술협력을 도모하였으며, 이와 관련된 국제협력 공동연구도 수행하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 1) 하나로 공동이용 활성화를 위한 기반 구축에 활용.
- 2) 국가/국제표준에 맞는 시험분석 품질시스템의 구축(ISO/IEC 17025)을 통한 신뢰성과 객관성이 확보된 데이터를 제공(분석과 적합성 평가 : 계량법, 표준, 시험, 품질).
- 3) 국내, 외 비교 숙련도시험을 통한 시험분석 측정능력의 향상(핵분석기술의 활

용도 제고).

- 4) 기초·응용 연구개발, 산업생산, 시험검사 현장등에서 QA/QC 기법으로 활용
(분석과 국제 무역통상).
- 5) 산업보건, 환경오염 연구분야에 적용함으로써 공공복지 및 삶의 질 향상에 기여함.
- 6) KOLAS 인증을 확보할 경우에 방사화분석지원사업의 활성화를 기대할 수 있으며 시험분석 품목의 지속적인 확대로 적용범위를 확장시킴.

S U M M A R Y

I. Project Title

Applied Research and Development of Neutron Activation Analysis

II. Objective and Importance of the Project

With the recent development of a high performance gamma-ray counting system including the high resolution of an HP Ge-semiconductor detector and multichannel analyser coupled to PC, Neutron Activation Analysis(NAA) has become one of the most powerful methods in Nuclear Analytical Techniques, NAT, for the non-destructive simultaneous multi-element analysis of trace level components in various samples. The capability of rapid and accurate analysis for a variety of samples with the help of a computer and automation makes instrumental NAA a wide application.

In connection with the implementation of a national standard system, the service of powerful, highly sensitive and reliable analytical method is indispensable to apply quality control and quality assurance for basic science, applied research and development, and industrial applications. In the case of a developed and/or advanced country, NAA has been strongly applied for diverse research and development. Therefore, international standardization for the procedure of NAA should be well established to overcome international trade barriers and the capability of wide and various applications should be maintained to increase international competitive power. For these objectives, the maximization of utilization for a research reactor, which is a nationally huge research facility, the establishment of relevant fundamental techniques and practical use are absolutely necessary. From a social aspect, it is also important to enlarge the level of public acceptance for nuclear energy by advertisement of the repercussion effects that applications of radioisotopes and radiation in medical, life science and industries are contributing to the

improvement quality of life. The formation of a consensus that nuclear power does benefit the general public is needed.

III. Scope and Contents of the Project

- 1) Improvement of neutron irradiation facilities, counting system and development of an automatic system for NAA in HANARO.

The connection of a diverter that consists of Aluminum and polyethylene tubes is replaced to remove the instability of capsule transfer using a coupling method. The installed NAA facilities(PTS #1 & #2) have some problems with radiation exposure for workers and the indoor activity level when the system is operating. It was assumed that both the irradiated sample and the activation of Ar gas induced a high activity level in the PTS tube, and we first intended to change the supplying-gas. On the other hand, when the irradiated sample was taken out, we also intended to insure the worker's safety for radiation exposure using two remote-controlled receivers in the shielded area due to the produced activity. For stable and effective operation, integrated operation software, including an improved automatic irradiation and counting system in PTS #2 and integrated calculation software for NAA were upgraded. For the manufacture of irradiation capsule for PTS, accurate analytical methods for polymeric material by NAA have been developed and the characteristics of irradiation for a polyethylene capsule was examined.

When the irradiated sample was counted for long half-life nuclides, due to the long counting time of a number of samples, it was intended to reduce the time-consumption of the analysis and to remove interruptions for continuous work by the operation of the counting system connected with an automatic sample change system.

- 2) Improvement of analytical procedures and establishment of an analytical quality control and assurance system.

To establish an accurate, precise routine analytical system for environmental and biological samples, the development of analytical procedures

and maintainance of the traceability of measurements using standard reference materials(SRMs) have been implemented. Selectivity, sensitivity and characteristics for various NAA methods(INAA/ENAA/RNAA) have been investigated to remove or to reduce the matrix and interference effects applying to the above-mentioned samples, that is, to establish optimum analytical procedures.

In a study on analytical quality control and assurance, we participated in a data intercomparison study to verify the reliability and validity of data and also participated in proficiency test that was implemented by the IAEA and KOLAS to qualify the best measurement capabilities under the laboratory accreditation scheme.

3) Applied research and development for the environment, industry and human health by NAA and its standandization.

Recognition and regulation for environmental pollution, which is caused by rapid industrial development, urbanization, vehicle increment, etc., and public concerns about clean, comfortable surroundings have increased. For these reasons, intensive efforts to control pollution sources and to examine contamination levels through the analysis of various environmental samples such as air, water, soils, animals and plant materials are being followed up. The establishment of standardized routine analytical methods for heavy metals and toxic elements are necessarily as a first step to clarify pollution source. Since air dust contains many kinds of elemental components which are derived from natural and anthropogenic origin, it has been used as an air monitor sample. When the mass concentration of $PM_{2.5}/PM_{10}$ and elemental concetration are high, the impact on human health is specially influenced for a short and long period. After accurate analytical procedures for the analysis of trace elements in biological and environmental samples and air pollution monitoring by NAA, which was evaluated as a cost-effective technique to control the air environment, are established, the samples collected from polluted and cleaned areas will be analyzed and the origin of each element is estimated using factor analysis and the relationship between the parameters

of the samples will also be investigated.

In addition, analytical quality is verified through performing an international cooperation project and joint coordinated research with the expansion of analytical subjects.

IV. Results of the Project

- 1) Improvement of neutron irradiation, the counting system and the development of an automatic system for NAA in HANARO

The connection part of 13 diverters using the coupling method were completed and an examination of stability and function was carried out. To improve the NAA facility in HANARO and to build up a number of data for a characteristic test for irradiation, a semi-automatic PTS #1 receiver and controller for the return of a sample rabbit irradiated for a long period of time was manufactured and installed in the sample storage room. The PTS #2 receiver, which was semi-automatically operated for short irradiation(1-2 min.) was manufactured and set up in a shielded box in the hood. The software programs for the operation of PTS #2 were developed and upgraded. The air pressure system was changed into a system supplied from liquid nitrogen.

Two kinds of irradiation capsules for PTS were manufactured using a high density polyethylene material produced by the domestic industry and some stability and physical tests such as heat-resistance, radiation-resistance and mechanical characteristics were also carried out. Five kinds of inner capsules(volume: 1~10ml) and two kinds of outer capsules(volume: 5~20 ml) made of pure high density polyethylene for the preparation of a small sample were designed to assemble the capsules as a combination of various configurations and manufactured by our techniques. The lid of the capsule was made as a snap-cap type to easy opening and shutting and to avoid heat sealing. The impurity concentration of the produced capsules were measured for the use of radiation protection and the safety of the workers.

Because a commercial automatic sample changer for gamma-ray counting is expensive, a domestic product was designed and manufactured so that the device operated according to the selected counting conditions and the size of the sample capsules.

The Software for gamma-ray analysis (GammaVision) and an integrated computer DOS program for NAA was converted into a program for WINDOWS and the Y2K problem was solved.

2) Improvement of analytical procedures and establishment of an analytical quality control and assurance system

With the analysis of six kinds of biological and environmental standard reference materials(NIST SRM : Peach Leaves, Citrus Leaves, Total Diet, Bovine Liver, Oyster Tissue, Wheat Flour), the analytical error was identified(15 elements were within 10% of the relative error, and 20 elements were within 15% of the relative standard deviation) and a radiochemical separation procedure(RNAA) for U and Th to improve the analytical sensitivity(> 0.5 ng) was developed by using the co-precipitation and ion exchange resin methods and the ENAA method for I and Sr determination (sensitivity : >0.1 ppm) was also examined.

The fundamental qualification(quality system, staffs, devices, method, facility and environment) for the application of the Korea Laboratory Accreditation Scheme (KOLAS) was prepared, and education and training for practical application, evaluation of measurement uncertainty and proficiency test were performed.

To verify the reliability and validity of the analytical results, intercomparison studies between laboratories for twelve kinds of samples such as dust, soil, coal fly ash, sediment, algae, etc., were carried out and excellent results were obtained.

3) Applied research and development of the environment, industry and human health by NAA and its standardization.

A study on the development of analytical methods and the standardization

of a procedure for the analysis of airborne particulate matter were carried out using standard reference materials(NIST SRM 1648, NIES CRM-8) and the laboratory intercomparison work.

An air pollution monitoring study was performed by using NAA and a Gent stacked low volume sampler and membrane filter(coarse particle : $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$, fine particle : $<2.5 \mu\text{m}$). The air samples were collected from urban, rural and urban industrial area. The concentration of impurities in the blank filters were estimated and used as a correction factor. The concentration of heavy metals, trace elements and total suspended particulate matter(TSPM) in the air were measured for the sampling period(1997~1999) and the sampling areas(rural, residential/industrial area). From the measured data, the air pollution source was statistically treated with a presumption of the source origin and a correlation analysis between TSPM and the elements.

Concerning the applied research on human health and the environment using NAA of biological samples, five kinds of biological standard reference materials were analyzed and the measurement error of the analytical results was evaluated. The amounts of trace elements in the air dust samples collected from inside of a foundry working place were analyzed and the distribution of trace elements in the hair and blood of corresponding workers were measured to investigate a correlation. In addition, the identification of the elemental distribution in healthy supplementary foodstuffs, the comparison of component elements of six kinds of herb medicines in Korea and China, the distribution of trace elements in the Korean total diet and representative foods were studied.

In connection with the analysis of trace elements in plastics(raw material and fabricated products) using NAA, the identification of the results by NAA and comparison with those by the XRF and ICP methods, the optimum analytical conditions for NAA were determined, a new freezing-crushing technique for the preparation of a polymer sample was developed, the analysis of inorganic components and additive agents in plastic materials(PE, PP) was carried out for the manufacture of irradiation rabbits and sample capsules, and the elution characteristics of toxic elements in plastic materials was also

evaluated.

After the arithmetic mean of toxic heavy metals (As, Cr(6), Ni, Be, Cd) in the air dust of an industrial area in Taejon was calculated, the health risk assessment and the contribution of contamination were evaluated.

In relation to the implementation of an international cooperation project (UNDP/RCA/IAEA Project), regional coordinated research on the subject of interest between the member states(The Use of Isotopes and Radiation to Strengthen Technology and Support Environmentally Sustainable Development: Nuclear Analytical Techniques) were examined to attempt technical collaboration.

V. Applications for Results of the Project

- 1) Application for the establishment of a foundation to activate common utilization of HANARO.
- 2) Supplying data with reliability and validity through the construction of a quality system(ISO/IEC 17025) of tests and analysis which is suitable for, a national and international standard(analysis and conformity assessment : metrology, standards, testing, quality).
- 3) Improvement of the best measurement capabilities for test analysis using a national and international proficiency tests(promotion for applicability of NAT).
- 4) Application in the fields of basic and applied research and development, industrial production, and tests and examinations as a QA/QC technique(analysis and international trade).
- 5) Contribution to the improvement of public welfare and quality of life by applying to the fields of industries, human health and environmental pollution.
- 6) In the case of that an NAA laboratory becomes KOLAS, it is expected that an analytical service using NAA will be activated and the application fields will be expanded by persistent enlargement of the test items.

C O N T E N T S

I. Introduction	1
1. Objective and Importance of the Project	1
2. Scope of the Project	2
II. Current Status in Technological Development	3
1. Current Status in Internal Technological Development	3
2. Application and Current Status in External Technological Development	6
3. Review of Epithermal Neutron Activation Analysis	9
4. Review of Radiochemical Neutron Activation Analysis	10
III. Contents and Results of the Project	19
1. Improvement and Installation of Facilities for Neutron Activation Analysis in HANARO Research Reactor	19
2. Development of Advanced Software Program for Neutron Activation Analysis	24
3. Manufacture of Irradiation Capsules	26
4. Manufacture of Automatic Sample Changer	28
5. Improvement of Procedure and Sensitivity of Analysis	28
6. Analytical Quality Control and Estimation of Analytical Condition	36
7. Applied Research of Environmental Pollution Monitoring by Airborne Particulates	47
8. Study on the Precise Analysis Method for Plastic Materials by the Use of NAA	56
9. Study on Human Health and Environment by Neutron Activation Analysis of Biological Samples	62
10. Source Contribution and Risk Assessment of Airborne Toxic Metals by Neutron Activation Analysis in Taejon Industrial Complex Area	66

IV. Accomplishment for Goal of the Project and Contribution	73
V. Proposal for applications of results	77
VI. References	79
VII. Annex	267

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성	1
제 2 절 연구개발범위	2
제 2 장 국·내외 기술개발 현황	3
제 1 절 국내기술 개발 현황	3
제 2 절 국외기술 개발 및 이용현황	6
제 3 절 열외중성자방사화분석법 고찰	9
제 4 절 방사화학적 중성자방사화분석법 고찰	10
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	19
제 1 절 하나로 중성자방사화분석시설 개선 및 설치	19
제 2 절 방사화분석용 통합 전산코드 개발	24
제 3 절 조사용 캡슐의 제작	26
제 4 절 자동시료교환기 제작	28
제 5 절 분석절차 및 분석감도 개선	28
제 6 절 분석조건의 결정 및 분석정도관리	36
제 7 절 대기분진을 이용한 대기환경 관측연구	47
제 8 절 플라스틱 소재의 정밀분석법 개발	56
제 9 절 생물학적 시료에 의한 보건, 환경응용연구	62
제10 절 대전공단지역 대기중 독성 중금속의 인체위해도 및 오염기여도 평가	66
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	73
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	77
제 6 장 참고문헌	79
부 록 연구실적 및 방사화분석절차서	267

표 목 차

Table 1.	Current status of research reactor in the world.
Table 2.	Advantage factor of epithermal neutron activation analysis.
Table 3.	Elements suitable for determination in rock sample by thermal and epithermal neutron activation analysis.
Table 4.	Measured thermal, epithermal and fast neutron flux of NAA Irradiation holes and cadimium ratios at 22MW thermal power.
Table 5.	Physical property of PE irradiation capsule used and temperature measurement on PTS irradiation holes(22MW).
Table 6.	Physical and polymeric characteristics of the old rabbit.
Table 7.	Inorganic elemental concentration($\mu\text{g/g}$) of the old rabbit.
Table 8.	Physical properties of HDPE pellets.
Table 9.	Elemental concentration($\mu\text{g/g}$) of candidate HDPE irradiation rabbit by NAA.
Table 10.	Nuclear data of elements for Neutron Activation Analysis.
Table 11.	Detection limits by neutron activation analysis at a flux density of $10^{14} \text{ n/cm}^2\cdot\text{s}$.
Table 12.	Nuclear properties and detection limit of nuclide used.
Table 13.	Statistical function for data analysis applied in environmental studies.
Table 14.	Analytical results of U and Th in standard reference material and mixed diet sample by RNAA.
Table 15.	Typical conditions for analysis of environmental samples.
Table 16.	The analytical results of the standard reference materials by Neutron Activation Analysis.
Table 17.	Analytical results of urban particulate matter, NIST SRM 1648 by INAA.
Table 18.	Results of statistical data treatment for measured elements in urban dust.
Table 19.	Results of statistical data treatment for measured elements in loaded filter sample.

- Table 20. Homogeneity data expressed as relative standard deviation(%) for listed elements in IAEA-0390 algae materials.
- Table 21. Data intercomparison with IAEA results for IAEA-0391, low level.
- Table 22. Data intercomparison with IAEA results for IAEA-0392, Environmental level.
- Table 23. Data intercomparison with IAEA results for IAEA-0393, Contaminated level.
- Table 24. The analytical results of the standard reference materials by Instrumental Neutron Activation Analysis.
- Table 25. Analytical results of Estuarine Sediment, NIST SRM 1646.
- Table 26. Analytical results of Buffalo River Sediment, NIST SRM 2704.
- Table 27. Analytical results of Marine Sediment, NRCC CRM BCSS-1.
- Table 28. Data intercomparison between laboratories for IAEA's sediment samples(SED-1).
- Table 29. Data intercomparison between laboratories for IAEA's sediment samples(SED-2).
- Table 30. Estimation of analytical results of IAEA's sediments between laboratories(n=4).
- Table 31. Analytical data between laboratories for KORDI's coastal sediment samples.
- Table 32. Data intercomparison between laboratories for KORDI's coastal sediment samples(I). Unit : mg/kg.
- Table 33. Data intercomparison between laboratories for KORDI's coastal sediment samples(II). Unit : mg/kg.
- Table 34. Estimation of analytical results of KORDO's coastal sediments between laboratories.
- Table 35a. Nuclear data and elemental concentrations obtained from natural water using Neutron Activation Analysis.
- Table 35b. Nuclear data and elemental concentrations obtained from natural water using Neutron Activation Analysis.
- Table 36. Nuclear properties of nuclide and the concentration level and

sensitivity of uranium in natural fresh water.

- Table 37. Result of standard addition method of uranium to groundwater sample.
- Table 38. Comparison of analytical results between various methods.
- Table 39. Content of uranium in groundwater collected with sampling date using direct method(^{239}U).
- Table 40. Content of uranium in groundwater collected from sampling sites of Choongchung area using direct method(^{239}U).
- Table 41. Example of report of estimation on measurement uncertainty.
- Table 42. KOLAS Proficiency Test of geological sample(99-9A, 99-9B).
- Table 43. Blank elemental concentrations in membrane filter used in low volume sampler.
- Table 44. Elemental composition of filter materials(ng/cm^2).
- Table 45. Monthly meteorological data with sampling period.
- Table 46. Analytical results of airborne particulate matter at urban site monthly(ng/m^3).
- Table 47. Analytical results of airborne particulate matter at rural site monthly(ng/m^3).
- Table 48. Elemental concentration in TSPM of urban area.('96.04-'98.05)
- Table 49. Elemental concentration in TSPM of rural area.('96.04-'98.05)
- Table 50. Correlation matrix for environmental analytical data of urban area.
- Table 51. Correlation matrix for environmental analytical data of rural area.
- Table 52a. Analytical results of air pollution monitoring at Taejon site(DC).
- Table 52b. Analytical results of air pollution monitoring at Taejon site(DF).
- Table 52c. Analytical results of air pollution monitoring at Taejon site(KC).
- Table 52d. Analytical results of air pollution monitoring at Taejon site(KF).
- Table 53. Monthly mass concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of TSPM at sampling areas.
- Table 54. Elemental concentration with particle size and its ratio.
- Table 55. Ratio of elemental concentration for non-working day and working day.
- Table 56. Enrichment factor and its ratio of the elements with sampling site and particle size.
- Table 57. Enrichment factor and its ratio between non-working day

and working day with sampling site and particle size.

- Table 58. Correlation coefficients between of elements, Sc and TSP.
- Table 59. Monthly mass concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of black carbon at sampling areas.
- Table 60. Analytical conditions for the detection of nuclides in PE.
- Table 61. Analytical results of NIST 1632b coal SRM for the evaluation of NAA procedures(ppm).
- Table 62. Trace elements in various polypropylene pellets by NAA and ICP-AES(ppm).
- Table 63. Trace elements in plastic containers and their raw materials by NAA(ppm).
- Table 64. Analytical results of inorganic elements in nineteen LEGO toys from Korean markets (ppm).
- Table 65. Concentration and leaching properties of LEGOs by ICP-AES and NAA(unit : ng/cm^2).
- Table 66. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HCl/LDPE bottle.
- Table 67. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HCl/HDPE bottle.
- Table 68. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HCl/PP System.
- Table 69. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HCl/amber-HDPE bottle.
- Table 70. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HCl/Glass bottle.
- Table 71. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HNO_3 /LDPE bottle.
- Table 72. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HNO_3 /LDPE bottle.
- Table 73. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HNO_3 /PP bottle.
- Table 74. Variations of specific activity as a function of storage period in

2~5% HNO₃/amber-HDPE bottle.

Table 75. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HNO₃/Glass bottle.

Table 76a. Daily food consumption of Korean people.

Table 76b. Daily food consumption of Korean people(continued).

Table 77. Analytical result of Korean total diet by NAA.

Table 78. Analytical result of Korean boiled rice by NAA.

Table 79. Analytical result of Korean kimch'i by NAA.

Table 80. Analytical result of mackerel by NAA.

Table 81. Analytical result of Korean mixed pork and beef by NAA.

Table 82. Elemental concentration in supplementary foods.

Table 83a. Elemental concentration of Korean and Chinese medicine by INAA.

Table 83b. Elemental concentration of Korean and Chinese medicine by INAA.

Table 83c. Elemental concentration of Korean and Chinese medicine by INAA.

Table 83d. Elemental concentration of Korean and Chinese medicine by INAA.

Table 83e. Elemental concentration of Korean and Chinese medicine by INAA.

Table 83f. Elemental concentration of Korean and Chinese medicine by INAA.

Table 84. Elemental concentrations in different biological materials and air to see elemental deposition in hair.

Table 85. Airborne concentration of toxic metal in PM-10 in 1999.

Table 86. Average carcinogenic risk by toxic metals from inhalation exposure in Taejon 1,2 industrial complex.

Table 87. Non-carcinogenic risk by toxic metals from inhalation exposure in Taejon 1,2 industrial complex.

그 림 목 차

- Figure 1. Diagram of PTS facilities for INAA.
- Figure 2. Diagram of control circuit for PTS #1.
- Figure 3. Electronic diagram of controller for PTS #1.
- Figure 4. Connection between photosensor and controller for PTS #1.
- Figure 5. Photograph of Pneumatic Transfer System #1.
- Figure 6. Diagram(Mimic Board) of PTS #2.
- Figure 7. Emergency control switch of PTS #2.
- Figure 8. Photograph of Pneumatic Transfer System #2.
- Figure 9. Thermal neutron flux monitoring of irradiation hole(NAA #1) at 20MW thermal power.
- Figure 10a. Main manu of PTS #2 for computer operation.
- Figure 10b. Automatic processing manu of PTS #2 for computer operation.
- Figure 10c. Manual processing manu of PTS #2 for computer operation.
- Figure 11. Manu for remote monitoring using available Internet.
- Figure 12. Main manu of Labview program for INAA.
- Figure 13. Shap and description of irradiation capsules for PTS.
- Figure 14. Shap and description of irradiation sample capsules.
- Figure 15. Schematic diagrams of automatic sample changer(a-c).
- Figure 16. Sample loaders and automatic sample changer for INAA.
- Figure 17. Gamma-Ray spectrometry system for INAA.
- Figure 18. Schematic diagram of the SFU sampling line.
- Figure 19. Blown-up view of the black polyethylene container with a stacked filter cassette inside.
- Figure 20. Stein Smoke Reflectometer for measurement of black carbon.
- Figure 21. Energy calibration of Gamma-Ray spectrometric system.
- Figure 22. Efficiency calibration of Gamma-Ray spectrometric system.
- Figure 23. Radiochemical separation scheme for the determination of $U(^{239}\text{Np})$.
- Figure 24. Radiochemical separation scheme for the determination of $\text{Th}(^{233}\text{Pa})$.
- Figure 25. Diagram of analytical procedure for APM sample by INAA.

- Figure 26. The loading process of dust sample on the filter.
- Figure 27. Graphical presentation of z-score for the measurand in urban dust.
- Figure 28. Graphical presentation of z-score for the measurand in loaded filter.
- Figure. 29 Data intercomparison by statical evaluation for Al in urban dust on air filters and in urban dust.
- Figure 30. Data intercomparison by statical evaluation for Cr in urban dust on air filters and in urban dust.
- Figure 31. Data intercomparison by statical evaluation for Mn in urban dust on air filters and in urban dust.
- Figure 32. Graphical presentation of z-score for the measurand in IAEA-0391.
- Figure 33. Graphical presentation of z-score for the measurand in IAEA-0392.
- Figure 34. Graphical presentation of z-score for the measurand in IAEA-0393.
- Figure 35. Data intercompatison by statistically evaluation for As of IAEA-0392, IAEA-0393.
- Figure 36. Data intercompatison by statistically evaluation for Cr of IAEA-0391, IAEA-0392, IAEA-0393.
- Figure 37. Data intercompatison by statistically evaluation for Co, Cu, Zn of IAEA-0391.
- Figure 38. Data intercompatison by statistically evaluation for Br, Sc, V of IAEA-0392.
- Figure 39. Data intercompatison by statistically evaluation for Cd, Hg, Ti of IAEA-0393.
- Figure 40. Graphical presentation of z-score for elements in IAEA-0327N.
- Figure 41. Graphical presentation of z-score for elements in IAEA-0394.
- Figure 42. Graphical presentation of z-score for elements in IAEA-0395.
- Figure 43. Graphical presentation of z-score for the measurand in Korean Marine sediment.

- Figure 44. Calibration curve of U Standard Solution.
- Figure 45. Gamma-ray spectra of ^{239}U and ^{239}Np in water samples.
- Figure 46a. Gamma-ray spectra of U in water samples.
- Figure 46b. Gamma-ray spectra of U in water samples.
- Figure 47. Mass concentration distribution of $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ particles with sampling date.
- Figure 48. Seasonal distribution of mass concentration of air filtered sample($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$).
- Figure 49. Average concentration distribution of $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ particles collected in urban and rural site.
- Figure 50. Seasonal average concentration of trace elements in APM at urban site.
- Figure 51. Seasonal average concentration of trace elements in APM at rural site.
- Figure 52. Enrichment factors vs. elements for fine and coarse airborne particulate matter.
- Figure 53. Typical results of regression analysis for the crustal origin element(Fe) vs. Sc and TSPM.
- Figure 54. Typical results of regression analysis for the anthropogenic origin element(As) vs. Sc and TSPM.
- Figure 55. Monthly variation of mass concentration of TSP.
- Figure 56. Ratio of elemental concentration between $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} .
- Figure 57. Ratio of elemental concentration between non-working day and working day.
- Figure 58. Ratio of enrichment factor between $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} .
- Figure 59. Ratio of enrichment factor between non-working day and working day.
- Figure 60. Monthly variation of crustal origin elements.
- Figure 61. Correlation between crustal origin elements and Sc.
- Figure 62. Monthly variation of anthropogenic elements.
- Figure 63. Monthly variation of black carbon concentration($\text{PM}_{2.5}$).
- Figure 64. Correlation between BC and TSP($\text{PM}_{2.5}$).

- Figure 65. Flow chart for the preparation of large plastic samples.
- Figure 66. Elemental concentrations in indoor air, human blood and human hair.
- Figure 67. Radiochemical separation scheme for determination of $\text{Sr}^{(87\text{m})}\text{Sr}$.
- Figure 68. Radiochemical separation scheme for the determination of $\text{I}^{(128)}\text{I}$.
- Figure 69. Procedure of sampling, analysis and risk assessment.
- Figure 70. Average concentration and standard error of carcinogenic metal(1999).
- Figure 71. Average concentration and standard error of non-carcinogenic metal(1999)

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

세계적으로 연구용 원자로를 보유하고 있는 나라는 70여개국에 이르며 현재 운영되고 있는 연구로의 수는 300여기에 이르며 이러한 연구로에는 대부분 중성자방사화분석 활용설비를 갖추고 이에 관련된 연구개발업무를 수행하고 있다. Table 1에는 IAEA에서 조사한 세계 연구로 운영현황을 나타냈다.

중성자 방사화 분석법(Neutron Activation Analysis, NAA)은 각종 시료 중의 극미량 원소를 분석하는데 매우 효과적인 방법으로써 미지시료를 적절히 선택된 시간 동안 연구로에서 중성자로 (n, γ) 반응에 의해 방사화시켜 생성된 방사성 핵종들로부터 방출되는 특정 감마선을 측정하여 소량의 광범위 시료로부터 극미량의 성분원소들을 비파괴적으로 동시에 정량할 수 있다. 핵분석기술(Nuclear Analytical Techniques, NAT)가운데서도 활용도가 아주 큰 분석기술이며 최근에는 고분해능의 고순도 게르마늄 반도체 검출기가 연결된 다채널 파고분석기(Multichannel Analyzer, MCA)와 컴퓨터를 이용함으로써 검출감도와 분석시간 및 자료처리 속도가 현저히 진보되고 있어서 그 분석능력이 크게 향상되었다.

계량에 대한 국가표준제도의 시행과 함께 기초과학, 응용연구개발 및 산업발전을 위한 품질관리 및 보증에 이용되는 신뢰성이 있는 강력한 고감도분석의 지원은 필수적이며, 선진외국에서도 각종 연구개발에 적극 활용하고 있는 중성자 방사화분석 절차의 국가적, 국제적 표준화는 무역상 기술장벽을 해소할 수 있는 국제 경쟁력과 직결되는 시급한 문제이므로 항시 지원 가능한 광범위하고 다양한 측정분석능력(Best Measurement Capability)을 확보해야 한다. 또한 국가의 거대 연구시설인 연구용 원자로의 이용 극대화와 관련 기반기술의 확립 및 원자력기술의 실용화가 필요하다. 이외에도 사회적 측면에서 불 때 방사선 및 RI의 의료, 생명과학 및 산업적 이용이 삶의 질 향상에 직·간접으로 기여하는 파급효과를 적극 홍보함으로써 국민과 함께 하는 원자력이라는 공감대를 형성하여 원자력에 대한 국민이해도 및 수용성을 증대시키는 일도 중요하다.

(1) 기술적 측면

중성자 방사화분석기술의 표준화와 검증기술을 확립하고 국제적 인증기술을

개발하여 국가 경쟁력을 제고한다. 신속, 정확한 고감도 중성자 방사화분석기술의 자동화 및 첨단화를 이룩한다. 환경시료 및 첨단재료의 중성자 방사화분석기술을 통한 환경보존기술 및 재료과학기술의 고도화를 달성한다.

(2) 경제적 · 산업적 측면

산업기술의 고도화에 따라 국제적으로 청정에너지이면서 에너지 절약형인 방사선 및 RI를 이용한 첨단 중성자 방사화분석기술이나 추적자 이용기술(후방사화분석)의 다변화 및 수요 증대를 도모한다. 의학, 농학, 공학적으로 확대하여 다양화되는 RI 이용 분석관련 장비 개발을 통하여 경제적, 산업적 발전에 일조한다. RI 특성을 이용한 첨단 중성자 방사화분석기술을 확립하고 산업적 응용기술을 개발하여 적극 활용함으로써 국가 산업발전을 도모한다.

(3) 사회 · 문화적 측면

원자력의 균형적 발전을 도모하여 원자력에 대한 국민이해도 및 수용성을 증대하므로써 원자력 선진국 진입의 첩경을 마련해야 한다. 방사선 및 RI의 의료, 생명과학 및 산업적 이용은 삶의 질 향상에 직·간접으로 관여하여 그 파급효과가 크므로 국민과 함께 하는 원자력이라는 공감대 형성에 결정적 역할을 한다. 세계 연구용 원자로가 대부분 노후화되어 그 사용실적이 저조하거나 폐로단계에 있으나 우리나라의 ‘하나로’는 국가 원자력 연구개발사업의 중요시설로서 가장 최근에 가동(1995.12월)되어 그 활용의 극대화를 도모해야 할 절실한 시점에 있다.

제 2 절 연구개발의 범위

- 표준물질과 비교연구를 통한 다용도 분석기술의 개발(분석기술의 QA/QC : 측정의 소급성 유지, 측정불확도 평가, 정확도 측정 및 보정, 비교속련도시험)
- Data Processing System 의 표준화(NAA용 통합 전산코드 개발 및 분석품질 관리시스템 구축)
- 산업응용기술 개발 및 표준화(고분자재료, 환경 · 생물학시료의 분석 및 검증)
- ‘하나로’ 중성자 방사화분석시설 개선, 보완(다용도 분석장치의 개발)
- 중성자 방사화분석기술 상용화(방사화분석지원 및 실용화사업 추진)

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구개발 현황

국내에서 중성자 방사화분석의 이용연구는 한국원자력연구소에서 1962년에 가동을 시작한 kW급의 TRIGA Mark-II 연구용 원자로를 활용할 수 있게 된 이후이며 감마선 계측장비의 성능에 따라 방사화화학적 방법을 병행한 분석기술의 개발 및 이용을 주로 수행하였다. 1972년에는 MW급의 TRIGA Mark-III 연구용 원자로를 활용할 수 있게 되었으며 즉발 감마선 계측법에 의한 붕소 분석법 고찰, 지발중성자 계측에 의한 U, Th 분석법 고찰, 생물시료의 분석법 개발 및 응용연구, 연대추정 연구등이 있었다. 1980년대에는 우라늄 중 균분리에 의한 희토류 원소 분석 기술 개발, 지르칼로이 중 불순성분 원소의 분석법 개발(W 차폐체를 이용한 계측), 모발분석에 의한 개인식별 연구, thermal column을 이용한 고순도 알루미늄 분석법 개발 등이 있었다. 1990년대에는 원자력병원과의 공동연구로서 체내 중성자 방사화 분석법 연구와 INAA에 의한 인체장기 조직의 미량원소 분석연구를 수행하였고, 1992년부터 '원자력연구개발 중장기과제'가 시작되면서 열외중성자를 이용한 지질시료의 분석법 개발 및 조사장치 설치, 계측 자료 수집 및 해석의 전산화, 핵종분석 및 방사능 계측기술 개발, 고순도 전해동의 중성자 방사화분석 연구, 환경 무기시료(coal flyash, 대기분진, 토양, sediment)의 분석법 개발, 환경 생물시료(Pine Needle, Rice, Human Milk, Human Hair, Algae)의 분석법 개발, 국제협력 연구사업과 병행한 대기분진시료를 이용한 대기오염 monitoring 연구, 표준 식물시료의 제작에서 방사화 분석에 의한 중금속 및 미량원소의 정량, '하나로'내 방사화분석시설(PTS)설치 및 성능/조사특성시험, 환경 표준시료(IAEA)의 Data Intercomparison Study등을 수행하였다.[1] 다음은 원자력연구개발 중장기사업과 관련된 연도별 연구개발 내용을 요약하였다.

【1992년도 연구개발 실적】

- Coal Flyash (NIST's SRM)의 분석법 개발 및 검증.
- 분석감도 개선기법 연구(열 및 열외중성자방사화분석법).
- 환경 monitoring (대기분진 시료 수집 및 분석) 기초실험.
- 소내,외 방사화분석지원 및 공동연구.
- 학술논문 발표 및 게재 : 4편

【1993년도 연구개발 실적】

- 대기분진 표준시료 (NIST's, SRM) 분석 및 데이터의 intercomparison.
- 분석감도 개선기법 연구(열 및 열외중성자방사화분석법).
- 환경 monitoring (대기분진 시료 수집 및 분석).
- '하나로'내 NAA 시설 (PTS) 설치 검토.
- 국제협력사업(UNDP/RCA/IAEA Project) 수행.
- 소내,외 방사화분석지원 및 공동연구.
- 학술논문 발표 및 게재 : 4편

【1994년도 연구개발 실적】

- 대기분진 표준시료 (NIST's, NIES's, IAEA's) 분석 및 품질보증을 위한 데이터의 상호비교 연구(AQCS/IAEA, Asia CRP).
- 환경 monitoring (대기분진 시료 수집 및 분석) 및 데이터 해석.
- '하나로'내 NAA 시설 (PTS) 설치 및 성능시험.
- 국제협력사업 (RCA/IAEA, Asia CRP, AQCS/IAEA, 한-우즈벡 협력) 수행.
- 산.학.연 협동연구회 운영 (방사화분석기술 이용연구회, 1차년도).
- 소내,외 방사화분석지원 및 공동연구.
- 학술논문 발표 및 게재 : 4편

【1995년도 연구개발 실적】

- 환경 표준시료의 분석에 의한 분석법 검증.
 - 3종(river, estuarine, marine sediments, NIST & NRCC)시료 분석 : 33원소
 - 정확도 10% 이내 : 16원소, 정밀도 10% 이내 : 25원소
- 대기분진을 이용한 환경오염 Monitoring(urban & rural area)
 - 월별, 지역별(도시 및 농촌지역) 대기분진 수집 및 농도 분석 및 특정원소의 방출원 규명.
- '하나로' NAA 시설 설치 및 성능시험 완료.
 - 공력이송관(PTS)의 작동시험 및 시스템 점검 : 운전절차서 작성.
 - 물리적 특성시험(PE용기 조사시험, 중성자속 측정, 조사공의 온도 측정)
- 중성자방사화분석의 환경연구를 위한 통합 Code의 개발 (위탁연구)
 - 데이터 I/O의 정확.정밀도 향상 및 편이성 증대.
- 국제협력사업(UNDP/RCA/IAEA Project) 수행 및 국제공동연구.
 - Data Intercomparison(AQCS/IAEA Program) : 2종 IAEA's sediments 분석 및 분석결과 상호 비교.

- 대기분진을 이용한 환경 Monitoring(HV & LV air sampler): Sampling 절차 작성 및 필터, 수집시료의 분석.
- 전문가초청 세미나 개최 : 국내, 국외 각 1회.
- 분석법 및 데이터 처리기술 표준화에 대한 전문가회의(RCA/IAEA)참가.
- 상기 표제에 대한 Regional Training Workshop 개최(1996. 6. 24.-7. 5., 13 회원국 35명참가).
- 산.학.연 협동연구회 운영 (방사화분석기술 이용연구회, 2차년도).
- 소내,외 방사화분석지원 및 공동연구.
- 학술논문발표 및 게재 : 7편
- 【1996년도 연구개발 실적】
- 환경시료(8종)의 고감도 방사화분석 이용기술 개발 및 1단계 종합평가.
 - 환경표준시료(NIST, IAEA SRM : Sediment, Algae)에 의한 다원소 함량 분포 및 분석오차 검증.
 - 분석결과의 타당성 및 환경오염 응용연구 (국내.외 협동 연구).
 - 대기환경 monitoring (대기분진시료의 분석).
 - Sampling : PM 10 High volume sampler 와 Quartz filter 이용.
 - Gent stacked Low volume sampler 와 Membrane filter 이용.
- *전문가초청 세미나, Workshop, 해외 교육훈련(IAEA Regional Training Course) 활용.
- 데이터 해석을 위한 전산프로그램 개발 (위탁연구 과제).
 - Calibration & Correction Factor Updating, K_0 Method 도입.
 - MCA emulation software 보완 및 '하나로' NAA system 지원.
- '하나로'내 방사화분석 시설 (PTS) 보완 및 특성시험
 - 조사공, 조사용 capsule 실험.
 - Counter End 차폐장치 및 고정도 감마선 계측장치.
- 국제협력사업(UNDP/RCA/IAEA Project) 수행 및 국제협력 공동연구
 - UNDP/RCA/IAEA 협동연구과제('95-'97) 수행 : 1차년도 연구보고서 작성.
 - IAEA AQCS Program : QA/QC를 위한 Data Intercomparison Study
- 산.학.연 협동연구회 운영 (방사화분석기술 이용연구회, 3차년도).
- 소내,외 방사화분석지원 및 공동연구.
- 학술논문발표 및 게재 : 8편

제 2 절 국외 연구개발 및 이용 현황

국제적으로 환경, 생명과학분야에서 중성자 방사화분석의 이용연구가 주류를 이루고 있으며 최근에는 산업화를 목적으로 환경, 생명과학분야에의 실질적인 활용이 증가되고 있는 추세이고 수많은 이용연구결과가 보고되고 있다. 응용연구로는 조성분석, 오염원소 검출, 금속원소의 체내대사의 해석, 질병의 요인이 되는 원소의 규명, 금속효소의 구조해석, 핵의학진료, 유액성분의 조제 및 검사, 임상 검사, 환경 화학시료의 분석, 제약, 식품 등 각 분야에 적용하고 있다. 대표적인 몇가지 예를 들었다.

환경과학 분야에서는 대기분진이나 토양, 물, 동식물시료등 환경시료의 분석, 모발시료중 40종 이상의 미량원소의 정량에 이용되며, 국제적으로 환경모니터링을 위한 분석도구로 활용하고 있다. 특히 미국, 일본, 호주등 선진국의 환경기관에서는 중성자 방사화분석법을 주로 이용하여 대기오염의 실태를 파악하는 중요한 자료로 이용하고 있다. 열외 중성자 방사화분석에 의한 회토류 원소중 우라늄의 특성분석과 검출등이 있다.

의학·의료학 분야에는 생체조직, 뼈, 뇨, 혈액의 원소분석, 후방사화분석(Activable Tracer Method), 체내방사화분석(*In-Vivo* activation analysis) : 공중위생 환경분석등에 이용되고 있다. 질병과 금속과의 동태를 파악하기 위해서 간암, 유방암 조직을 후방사화분석법으로 정량하였고, 모발, 손톱, 발톱중의 중금속 원소 및 미량원소의 분석에 이용되고 있다.

치의학 분야에서는 금속 피복물의 화학적 거동을 파악하기 위한 금속의 정량, 치과재료중 Ag, Au, Pt, Pb, 할로젠원소등의 분석에 이용되었다.

약학 분야에서는 의약품에 함유된 특정원소의 체내에서의 거동을 중성자방사화분석을 이용하여 연구하였고, 식물성 생약중에 존재하는 미량원소의 분석에도 이용하고 있다.

동물학·수의학 분야에서는 동물의 조직, 체액, 모피등의 분석 및 동물의 질병과 미량원소와의 상관성 및 거동을 연구하기 위하여 중성자 방사화분석, 후방사화분석을 이용하고 있다. 특히 식물학·농학 분야에서 중성자 방사화분석을 많이 이용하고 있으며 식물의 영양학적, 환경학적 관점에서 토양원소의 분석, 식물성장과 원소와의 관계, 수목에서 미량원소의 동태, 식물체의 동위원소비의 측정, DNA의 손상과 금속과의 관련성에 대한 연구를 위해 중성자 방사화분석법을 이용하고 있다.

영양학 분야에서는 무기 영양물시료로부터 미량원소 함량을 정량하고 있으며, 세포수준에서 기본적 영양학적 필요조건을 중성자 방사화분석 및 방사성 추적자를 이용하여 연구하였다. 농축된 안정 동위원소를 사용하여 인체내의 영양학적이고 생물학적인 유효성과 필수 미량원소의 흡수를 연구하는데 이용하고 있다.

향후 많은 연구개발과제로 남아있는 해양생물학 분야에서는 금속원소의 생체농축과 관련하여 플랑크톤이나 해조류의 P, N 원소의 농축, 어류의 중금속 농축, 멧개와 같은 원색동물의 V 농축에 대한 연구와 조개류의 껍질 형성시에 환경수중의 Mn, Br, I 등 물의 미량원소의 농축에 관한 연구등이 수행되고 있다. U, Hg, Cu, Au, V 등의 이온교환수지의 금속흡착능력에 필적하는 미생물의 종류와 생체농축 및 생체내 거동을 연구하는데 이용되고 있다.

생화학 분야에서는 높은 비방사능의 방사성 추적자의 이용이 있었다. 예로 1000Ci/g 의 비방사능을 갖는 ^{75}Se 는 독립효소와 다른 생화학적으로 중요한 단백질의 발견에 이용되었다.

현재 선진 외국의 국립 연구기관, 대학, 기업연구소, 범죄수사기관 및 공공법인체 등에서는 다양한 중성자 방사화 분석기술을 개발하여 환경시료, 해양시료, 원자로 재료, 우주항공 재료, 전기전자 통신재료와 같은 첨단 신소재, 범죄 수사시료, 식품영양학 분야등 다종 다양한 시료에서 극미량 불순물 원소의 고감도 신속 반자동 분석을 수행함으로써 환경보전관리 및 재료개발, 범죄수사의 도구로 실용화하고 있다.

IAEA에서는 1970년대부터 이분야의 국제협력사업을 지속적으로 추진하고 있으며, 모든 RCA 회원국이 참여하는 국제회의, 워크샵 및 세미나, 지역간 훈련사업을 통해서 핵분석기술의 응용연구를 활발히 수행하고 있으며, 분석기술의 표준화를 위한 국제인증절차(ISO/IEC Guide, EURACHEM/WELAC Guidance, CITAC Guide, ISO/CASCO, ISO/DIS, UPAC/ISO/AOAC, ANSI 등)적용훈련, 표준시료의 Data Intercomparison Study 및 데이터 검증 및 해석을 위한 통계처리기술의 정기적인 연구결과 보고서, 기술보고서등을 발간하고 있다.

가. 열중성자 방사화분석(Thermal Neutron Activation Analysis)

- Use of elemental or enriched isotopic(activable) tracer : ^{116}Cd , ^{58}Fe , ^{65}Cu , ^{153}Sm , ^{165}Dy
- Background reduction : Multisample β - γ coincidence spectrometry, simultaneous counting(Planer and coaxial Ge detector)
- Application of computational techniques : Optimization of NAA parameter,

automated Gamma-ray counting and data processing

- Use of standards : Monoelemental standard, Preparation and use of primary standard
- Multielemental analyses : Bulk sample with complex matrix
- Use of short-lived activity(short irradiation) : Counting system for signal analyzing and analysis of spectra, application of cyclic NAA
- Program development: Absolute NAA(Ko factor), single comparator method
- Combination with other techniques such as ion beam analysis, Mossbauer spectrometry, AAS, ICP-MS/AES, XRF, PIXE SIMS, HPLC, etc.)

나. 열외중성자 방사화분석(Epithermal Neutron Activation Analysis)

정량한계의 향상을 위한 분석기술로 P, Al, Si, Ti, Cu, Mg, As, Cr, Ni, Halogen, U, Th 등의 분석에 유리함.

- Use of multi-isotopic flux ratio monitor(Zr)
- Examination of reactor neutron factor and resonance energy
- Application of Filtered Epithermal NAA : Use of W, Na, Hf filter

다. 방사화학적 중성자 방사화분석(Radiochemical Neutron Activation Analysis)

최근에 검출기(Detector & MCA)의 성능 향상으로 INAA 의 이용을 선호하게 됐으나 특정시료 분석에서는 분석감도를 저하시키는 문제점이 남아있음.

Interfering Radionuclides : ^{24}Na , ^{32}P , ^{38}Cl , ^{42}K , ^{82}Br 등. 따라서 시료를 방사화시키기 전에 또는 후에 Interference 의 제거 또는 목적원소의 분리가 필요함. RNAA의 경우 고려할 사항은 미량원소화학과 관련된 adsorption loss, reagent contamination 등이며 주요 방사화학적 조작은 다음과 같다 :

- Transfer of irradiated sample
- Addition of carrier
- Mineralization of sample
- Chemical separation of interfering radionuclides and/or interesting radionuclides
- Determination of chemical yield
- Computer controlled chemical separation

라. 즉발감마선 방사화분석(Prompt Gamma Activation Analysis, PGAA)

즉발감마선 방사화분석(PGAA)은 B, Cd, Sm, Gd와 같은 중성자 흡수단면적이 아주 큰 동위원소를 갖고 있는 여러 가지 원소의 미량분석($\sim \mu\text{g/g}$)에 유용하게 사용되고 있으며 농도가 좀 더 높은 다른 원소들(C, N, P, Al, S, K, Ca, Na, Ti, Fe)의 정량도 가능하다. 또한 시료의 모양, 크기 또는 화학조성에 비교적 제한을 받지 않으며, 시료의 방사선에 의한 손상과 열전도가 거의 없고, 무시할 정도의 잔여 방사능을 남기므로 필요한 경우에 재분석이 가능한 비파괴 분석법이라는 것이 큰 장점이기도하다. 또한 감마선 계측시 핵종의 붕괴와 불감시간의 변화에 의한 오차가 없다.

- Nuclear reactor activation technique
- Charged particle activation technique
- Photon activation technique

마. Delayed Neutron Activation Analysis, DNAA

바. Radioactivable Tracer Technique

사. Cyclic Neutron Activation Analysis, CNAA

- 전산코드이용 초단수명핵종 분석
- Application of K_0 standard method
- Loss free counting method

제 3 절 열외중성자 방사화분석법 고찰

중성자 방사화분석법에서도 분석감도나 정확도를 향상시키기 위하여 시료를 중성자로 조사시키기 전 또는 조사시킨 후에 화학적인 개별분리나 군분리 과정을 거쳐 정량하는 방법이 있는데 이것을 Radiochemical Neutron Activation Analysis, RNAA라고한다. 그러나 전처리과정중 시료의 오염과 손실의 가능성을 배제할 수 없고 번거로운 작업이 수반되기 때문에 직접 비파괴분석을 통하여 정량하는 방법인 INAA가 많이 이용되며 주로 열중성자 또는 열외중성자를 이용한다. 이 경우에 분석감도 또는 검출한계를 향상시키기 위하여 몇가지 중성자의 조사 특성을 이용할 수가 있다.

열외중성자 방사화분석법(Epithermal Neutron Activation Analysis, ENAA)은

열중성자 흡수 반응 단면적이 큰 붕소 또는 Cadmium 필터를 이용하여 시료의 Matrix로 부터 생성되는 강한 방사능을 감소시켜, 즉 Background를 낮추어 줌으로서 여러가지 미량원소를 보다 좋은 분석감도로 검출할 수 있으며 동일한 조건에서 몇몇 원소를 추가로 정량할 수 있는 방법이다.[2, 3] 일반적으로 연구용 원자로의 조사공은 흑연과 같은 감속재를 이용한 열중성자주(thermal column)와 같은 특별한 조사장치를 제외하고 열중성자보다 더 큰 에너지의 중성자가 공존한다. 따라서 적당한 에너지의 필터를 이용하여 중성자 Cut-off energy가 0.5 eV 인 붕소 또는 Cadmium 필터와 그것의 두께에 따라 280 eV 까지 선별 조사가 가능하다. 원소에 따라서는 열외중성자에 대한 공명 핵반응 단면적이 아주 큰 것이 있어서 이러한 원소를 정량할 때는 ENAA를 이용하면 좋다. 이경우에 분석에 방해가 될 수 있는 열중성자 방사화단면적이 큰 핵종(예, ^{24}Na , ^{38}Cl , ^{56}Mn 등)은 방사화가 억제되는 반면 열외중성자 또는 공명중성자 방사화단면적이 큰 핵종은 상승되어 분석이 유리해지게 되며 특히 단수명 핵종의 분석에 강점을 갖고 있다. 예를 들면 생물시료의 분석에서 열중성자로 방사화시킬 경우 정량 가능한 원소가 제한될 수 있지만 1mm 정도 두께의 Cd filter를 사용하면 ^{28}Al (2.3m), ^{29}Al (6.6m), $^{125}\text{m}\text{Sn}$ (9.5m), ^{27}Mg (9.5m), ^{128}I (25m), $^{111}\text{m}\text{Cd}$ (48m), $^{87}\text{m}\text{Sr}$ (2.8h) 등의 단수명 핵종과 ^{76}As (1.1d), ^{115}Cd (2.3d), ^{198}Au (2.7d), ^{99}Mo (2.75d) 등의 중수명 핵종을 검출할 수 있다.[4, 5] 여러 가지 시료에서 미량원소의 분석에 큰 방해가 되는 원소중의 하나는 ^{24}Na 에 의한 것이며, 이것과 목적핵종의 상대적 방사능비를 측정함으로써 방해요인 억제효과를 추정할 수 있다. Table 2에는 몇가지 핵종에 대해 측정한 A. G. Hanna [6]의 ENAA 에 대한 Advantage Factor를 나타내었다. 지질시료의 열외중성자법과 열중성자법의 비교에서 44종의 측정 원소중 20여 원소가 유리함이 알려졌다.[7] 실례로 Table 3에는 두가지 암석표준시료를 분석 비교한 Y. S. Chung [8]의 연구결과를 나타내었다. 그러나 이 방법을 대기분진시료에 적용한 예는 국내외적으로 드물기 때문에 분석감도의 향상을 위해 몇가지 환경시료에 ENAA를 적용할 수 있을 것이다.

제 4 절 방사화학적 중성자방사화분석법 고찰

1) 방사화학적 중성자방사화분석(RNAA)의 개요[9]

최근에 감마선 검출기(Detector & MCA)의 성능 향상으로 INAA의 이용을 선

호하게 되었으나 특정시료 분석에서는 ^{24}Na , ^{32}P , ^{38}Cl , ^{42}K , ^{82}Br 등의 주성분 원소에 의한 핵적 간섭(nuclear interferences), 분광학적 간섭(spectral interference)의 영향으로 인해 분석감도를 저하시키는 문제점이 남아있다. 따라서 시료를 방사화시키기 전에 또는 후에 interference의 제거 또는 감소를 위한 목적원소의 분리가 필요하다. 방사화학적 중성자방사화분석의 경우 고려할 사항은 미량원소 화학과 관련된 adsorption loss, reagent contamination등이며 주요 방사화학적 조작단계는 다음과 같다 : ① Transfer of irradiated sample, ② Addition of carrier ③ Mineralization of sample, ④ Chemical separation of interfering radionuclides and/or interesting radionuclides, ⑤ Determination of chemical yield(참고문헌 : Recent references and proceedings of MTAA and MARC).

RNAA의 적용에서 기초적으로 고려해야할 사항은 중성자와의 방사화과정에서 몇가지 위험한 일이 발생할 수 있음이다. 예를 들면 조사후의 화학형의 변화, 방사화과정중 열에너지 또는 되튐에너지(recoil energy)에 기인한 핵자의 방출 또는 화학결합의 파괴이다. 이외에도 유기물질의 방사선 분해효과(radiolysis effect), 고온에서 확산 및 휘발에 의한 특정 미량원소의 손실, 기체방출로 인한 증기압의 상승, 되튐효과에 의한 유기물질로부터의 방사성 핵종의 이동등이 있다. 방사성 핵종의 취급시의 위험은 높은 감마선에 의한 방사선 장해 및 알파, 베타방출체에 의한 오염이다.

원소가 저농도($< 1 \mu\text{g/g}$) 일 때 아주 다른 거동을 할 수 있으며 화학평형법칙, 열역학법칙이 적용이 되지 않는다. 더욱이 극히 묽은 용액인 경우 표면효과와 흡착과정이 거동을 결정하는 중요한 역할을 할수도 있다. 예를 들면, 콜로이드의 형성은 용액내 불균일 분포, 용기벽이나 입자, 필터 등에 비가역적 흡착, 이온교환체에 비특성 흡착 등의 거동을 한다. 이러한 문제점은 담체(Carrier)의 첨가로 해결이 가능하다. 즉 미시적 양을 거시적 양으로 바꾸는 것이다. 일반적으로 담체는 용액내 미소량 원소 또는 방사성 물질과 화학적 성질이 같거나 유사한 물질로서 동일한 거동을 하도록 첨가해 주는 물질(약0.1-20mg)을 말하며 방사화학에 사용한다. 종류로는 개개의 화학적 수율(chemical yield)을 정량하는 동일한 원자가상태와 화학형의 isotopic carrier, group separation에 이용하는 non-isotopic carrier, 두원소가 공존하는 계에서 목적원소를 분리 추출할 때 비목적원소를 잔류시키기 위해 첨가하는 담체인 hold-back carrier 등이 있다.

2) 시료의 전처리

(1) 시료의 준비

중성자 방사화분석에서 시료준비과정은 INAA 나 RNAA가 동일하다. 아울러 지질시료가 생물시료보다 간단하다. 시료준비는 화학약품이나 먼지로부터 오염 및 손실방지를 위해서 청정실(clean room)에서 실시한다 ; crushing and mixing 을 할 때는 cross contamination을 고려하여 agate, mortar의 재질을 선택한다. Washing은 증류수, 산 및 유기용매를 사용하며 100℃ 이상에서 Sn, Hg 등의 손실을 고려하여 Drying의 온도와 Vacuum의 조건을 정한다. Ashing을 할 때는 500℃ 이상에서 Ag, As, Co, Cr, Hg, I, K, Na, Pb, Sb, Se, Te등 손실이 발생할 수 있음에 유의한다. 균질화는 Cryogenic homogenization technique과 Brittle fracture technique을 이용한다. Weighing시에는 Balance의 감도를 고려하며 시료의 손실이나 오염을 방지하기 위하여 항상 추천된 표준방법을 사용하는 것이 좋다.

(2) 시료의 운반

조사용기로 부터의 시료 이동은 조사된 물질의 복잡성, 조사용기의 형태, 중성자속 및 조사기간에 따라 조작방법이 다양하다. 조사후 물리적 변화가 없을 경우에 무게, 부피 측정은 조사용기(폴리에틸렌 용기)를 그대로 사용할 수 있다. 이중포장을 안했을 경우에는 외부오염을 제거해야한다. 실리카 앰플을 사용할 경우에는 상승된 내부압력, 휘발을 고려하여 개봉시 주의를 요한다. 예를 들면 개봉전에 냉각(LN₂)시키거나 적당한 물, 산, 알칼리용액에서 처리한다. 시료의 물리적 회수는 오차의 요인이 되는 용기의 세척에 의한 용해과정(mineralization)에서 용기벽으로부터의 방사성 핵종의 되튐, 투과 등에 유의한다. 용기개봉시 저농도 원소의 바탕(Mn, Cr, As, Sb 등)을 고려한다.

(3) 담체의 첨가

정량적 회수를 위하여 가능한 한 신속히 분리과정과 광화작용이 시작되는 단계에서 담체를 첨가해야한다. 담체의 양은 적어도 분석하려는 원소농도의 100배 이상 되어야한다. 예를 들면, 미량원소(5mg carrier/g sample), 초미량원소(1 μg carrier/g sample). 미소량 원소와 담체는 그들이 동일하게 거동하는 것을 확인하기 위하여 동일한 형태와 산화상태로 전환되어야한다. 담체의 첨가는 분리과정에 대한 화학적 수율의 정량을 가능케 한다. 화학적 수율의 정량방법은 일반 화학분석법과 시료의 재방사화 또는 기지량의 labeling을 이용하는 방사화학적 방법이 있으며 최근의 방사화학적 절차는 높고 재현성이 있는 담체의 회수가 가능하다.

(4) 광화작용, Mineralization

고체시료는 여러 가지 방법에 의해 분해시킬수 있다 ; 산 및 산혼합물의 첨가, Bisulphite fusion, peroxide fusion. Fusion process는 방해이온의 부가, 휘발성 원소의 손실등 오염의 위험성이 있다. 시료의 분해에는 산(HNO_3 , HClO_4 , H_2SO_4 , HCl 등)이나 산혼합물($\text{H}_3\text{PO}_4/\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{HNO}_3/\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{HCl}/\text{HNO}_3/\text{HF}$ 등)의 이용을 선호하고 개방, 반개방 및 밀폐장치를 이용할 수 있다. 휘발에 의한 손실은 시약, 온도, 시간등의 분해조건에 의존한다 : 온도(Hg, halogens), 시약(Cr in hot perchloric acid, Sb, Sn, As, Hg, Se in strong halide system). 휘발성 원소의 손실을 감소시키기 위해 Reflux system(Bethge apparatus)을 이용한다. 신속한 분해기술로 microwave oven 또는 digestion system을 이용한다 : Shoniger technique, Teflon-covered stainless steel pressure bomb or Carius tube : wet ashing

3) 방사화학적 분리

(1) 분리특성

방사화학적인 분리의 목적은 간섭현상을 감소시키고 계측통계를 개선하기위한 것이고 분석정량의 정확도 및 정밀도를 향상시키기 위한 것이다 : 분리도식은 간섭 또는 목적원소의 분리로 구성하며 방사화학적 분리과정은 특정 matrix 내에 특정 미량원소, 감도, 정밀도, 정확도, 회수율, 속도, 자동화 가능성등 특정조건 및 기준에 맞춘다.

• Decontamination factor : 분리효율의 척도

분리전후의 오염물과 시료의 방사능비로 표시.

$$F = [A'_c/A'_d] / (A_c/A_d) \quad (1)$$

A'_c : 분리전 오염물의 방사능

A'_d : 분리전 목적 핵종의 방사능

A_c : 분리후 오염물의 방사능

A_d : 분리후 목적 핵종의 방사능

상기의 factor는 간혹 separation factor, S로 이용되고 F의 역수로 정의한다.

$$S_{c/d} = (A_c/A_d) / [A'_c/A'_d] = 1/F \quad (2)$$

방사화학적 분리에서 또하나 중요한 factor는 회수 또는 회수율, R 이며 다음 식에 의해 F 와 관계된다.

$$F = (A'_c/A_c) * R_d \quad (3)$$

R_d : 목적핵종에 대한 fractional recovery or yield

Heydorn은 (A'_c/A_c) 값을 decontamination factor 로 정의하였고 유효값, f 라고 하는 방사화분석에서 간섭을 설명하기 위한 또 하나의 항을 소개하였다.

$$I_c = S_{c/d} * f \quad (4)$$

여기서 f 는 목적원소의 농도를 정량할 때 오차에서 오염물의 기여에 대한 척도(μg 목적원소 / μg 방해원소). f 는 조사, 냉각시간, 선택된 계측장비, 데이터 환산법에 의존.

Overall decontamination factor는 각 단계의 decontamination factor의 곱이다. 대부분의 분리는 두상(phase I and II)간의 원소의 분배이고 평형에서 Phase I 의 분율은 다음과 같다.

$$\theta = (DV_R) / (1 + DV_R) \quad (5)$$

여기서 D 는 두상간 분배, V_R 는 양 또는 부피비

식(1) 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = [D_d(1 + D_cV_R)] / [D_c(1 + D_dV_R)] \quad (6)$$

여기서 D_d 와 D_c 는 각각 목적원소와 오염물의 분배비

분리는 $D_dV_R > 1$ 일때와 $D_cV_R < 1$ 일 때 가장 잘됨.

중성자 방사화분석을 위한 다원소 방사화학적 분리의 개발은 1970년대에 가장 많았고, 이온교환법이 주류를 이뤘고 이어서 용매추출법이 개발되었다. 지질시료

보다는 생물시료에 더 많이 적용되었다.

(2) 지질시료

지질시료에 대한 방사화학적 과정은 희토류 원소(rare earths)와 귀금속 원소의 분리로 나뉘고 개별분리, 군분리를 병행한다.

A) Rare earths :

Anion exchange methods(AG1-X10, Dowex 2, Dowex 50W-X8, Dowex 1W-X8, Dowex 1 등) 및 hydroxide precipitation techniques, solvent extraction techniques(TBP, HDEHP 등).

B) Noble metals :

암석, 광석에는 아주 낮은 수준의 귀금속이 존재하고, 불균일하게 분포되어 있다. 따라서 대표성을 얻기위해 대량분석을 하며 흔히 사전농축기법을 이용한다 ; Selective chelating ion exchange resin, fusion($\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{NaOH}$), co-precipitation, Radiochemical fire-assy technique, Solvent extraction techniques 등.

C) Other trace elements

시료의 매질 및 목적원소에 따라 분해 및 분리방법이 다르다.

- 산용해, Alkali fusion
- 침전법, 이온교환법, 용매추출법, Reversed-phase chromatography

(3) 생물시료

방사화학적 분리도식의 대부분은 생체시료에 대해 개발된 것이다. 재고찰된 66 가지 과정중의 절반 이상이 개별분리 기술을 사용한 한 두 개 원소의 분리에 이용되었다.

A) 원소의 개별분리

조사된 시료로 부터 단일원소로 분리할때는 간섭이 없는 계산된 검출한계에 근접된 양으로 정량이 가능하고, 저분해능 검출기(β -sensitive counter, NaI(Tl) detector 등)로도 정밀하게 검출 가능하다. 표준 생물시료 및 검체중 Pt, Hg, Sn, Cr 의 고감도 방사화학적 분리과정이 개발 되었다.

- ^{198}Pt (n, γ) $^{199}\text{Pt} \rightarrow ^{199}\text{Au}$ 분리 : 고온에서 Au의 자동 환원반응을 이용(검출 한계 : $5 \times 10^{-6} \mu\text{g/g Pt, Au}$)
- ^{51}Cr 의 경우 낮은 감마에너지(320 keV)로 인해 백그라운드에 의한 정량에 간섭효과가 있음. $\rightarrow$ RNAA 필요(용매추출/역추출/침전/계측, DL = $1 \mu\text{g/g}$).
- Hg, Sn 개별분리 ($< 1 \text{ ng/g}$).

Hg : 용해, $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$ 추출, NiDDC in chloroform $\rightarrow$ 계측

Sn : 용해, $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HF} \rightarrow$ 추출, SnI_4 in toluene $\rightarrow$ 역추출,
5%EDTA-1%NaOH $\rightarrow$ 계측

- Zn, Cu, La, Hg, Cd, Se 의 개별분리 : 이온교환, 용매추출(킬레이트 추출),
침전법 이용. 추출제 : HINAP, HETAcAc, 2-HMBT, TTA
- 단일원소 분리과정중 용해단계에서 손실에 주의.

(B) 원소의 군분리

생물시료에서 개별원소의 분리는 고유의 장점이 있지만 분석소요시간 측면에서 비경제적 일수도 있으므로 다원소 분리과정을 개발하게 되었으며 고감도, 고분해능의 계측기가 필요하게 되었다(NaI(Tl) detector $\Rightarrow$ HP Ge detector). 1970 년대에만 80가지이상, 80년대에 20가지 이상이 개발되었고, 최근에도 많은 분리도식이 개발되고 있다.

(C) Ion-retention media

여러과정으로 발생하는 용액으로부터 원소를 제거할수 있는 생성물들을 말하며 불용성 무기화합물들은 이러한 성질을 나타낸다. 예를 들면 Hydrated Antimony Pentaoxide, HAP는 강산성 용액에서 Na를 제거하는데 이용되며 column method(resin matrix)를 사용한다. 1980년대 이후에 많이 사용된 방법은 HMD column(milk powder, food, diet 의 분석), Zinc Ferrocyanide, Magnesium Oxide column(Cd 흡착), Activated carbon/membrane filter sorption system(50 mg layer)등이다. 최근에 금속이온의 선택적 착물화를 이용한 C_{18} 결합 Silica-gel의 사용으로 빠른 분리속도(column flow rate : 10-20 ml/min.)를 얻기도 하였다.

4) 방사화학적 분리의 자동화

동일한 시료의 대량분석을 위해 sample dissolution, distillation, sorption, elution과 같은 조작을 자동화 시켜 분석시간의 절약, 정밀도의 향상, 조작오차의 제거등 분리방법을 개선하고 있다. 현재 20여가지의 방사화학적 분리장치가 자동화에 적합함이 알려졌다.

5) 향후 전망

1970년대중반 이후 현재까지 신속한 기기분석법의 요구, 경험있는 방사화학자의 단절등으로 방사화학적 분리과정의 개발은 급격히 감소되었다. 최근 INAA의 개발동향은 단수명 핵종을 이용한 신속한 고감도 미량원소 분석을 이용하고 있다. 예를 들면, ^{75}Se (120d) $\rightarrow$ ^{77}Se (17.5s). 최신 화학분석법(ICP-MS)에 대한 경

쟁력, NAA의 고유한 장점의 제고(예를 들면, ICP-MS의 문제점인 고체시료 분석 불가능, 시약의 blank value의 한계, As, Sb, Se 분석에 방해가 되는 spectral interference, Ar plasma, Cl 등). 신속하고 간단한 분리기술 개발(PGAA, CNAA 등). 타분석법에 의한 분석 불가능 원소의 분석법 개발.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 하나로 중성자 방사화분석장치 개선 및 설치

1. 시료조사 입인출장치 설치 및 조사공 특성시험

하나로를 이용한 중성자 방사화분석 기반시설로서 분석시료의 중성자조사를 위해 조사용기가 원자로 조사공과 실험실을 왕래할 수 있도록 공압 이송장치(Pneumatic Transfer System, PTS)가 1995년말에 설치되어 운영되어오고 있다. [10-13] 본 장치의 용도는 미량성분 분석을 위한 시료/재료의 열, 열외중성자 조사장치로서 산업계에서의 품질관리/보증을 위한 성분분석, radioactive tracer 제조, 의료용 단수명 핵종의 제조에 이용되며, 학계에서는 기초과학 연구용의 시료/재료 미량원소 분석, 중성자 조사특성 연구 등에 이용되고, 연구기관등에서의 기반기술 연구, 산업응용 연구를 위한 미량원소 분석등에 이용된다.

본 연구에서는 기존의 장치를 안전성, 활용성 증대를 위해 개선하였으며 일부 입인출장치를 추가로 제작 설치하였다. 공압 이송장치는 세 개의 원자로내 조사공을 이용하도록 설치되어 있으며, 수동식(PTS#1)과 자동식(PTS#2)으로 운전하도록 되어 있다. 또한 인터넷을 이용한 원격감시가 가능하도록 하였다[14]. Figure 1에는 PTS의 주요기능과 배치를 개략적으로 나타냈다. 기존의 PTS 이송관에는 여러개의 분리기가 설치되어 조사용 캡슐의 이송경로를 전환시켜주는 역할을 하고 있다. 그러나 알루미늄(Al)으로 제작된 분리기와 폴리에틸렌으로 된 이송관의 이음부분이 평활하지 못하여 캡슐이 이동될 때 일시적인 걸림현상과 각임현상이 발생하여 PTS의 안전운전에 큰 장애요인이 되므로 모든 이음새 부분을 coupling 방식으로 연결되도록 제작 설치하여 문제점을 해결하였다. 한 방식으로 되어있는 시료의 이송 및 회수장치를 사용의 편의성 및 방사선 방호를 위한 안전성 확보를 위하여 추가로 입인출장치를 제작 설치하였다. PTS#1에는 시료를 장시간 조사후 차폐저장실로 보내어 냉각시킬수 있도록 원격조정 할 수 있는 분리기와 회수기를 설치하였다. PTS #2에는 조사만 할 경우에 계측기(counter end)를 거치지 않고 직접 회수할수 있도록 추가로 인출장치를 제작 설치하였다. 또한 비상제어 스위치 반에는 운전모드 선택 스위치와 비상시 또는 시험시에 솔레노이드를 수동으로 조작할 수 있도록 솔레노이드 ON/OFF 스위치를

설치하였다. 운전모드는 Computer, Emergency의 2가지 방식이 있으며 이들의 운전모드는 전기적으로 격리되어있다. 즉, Computer 운전모드를 선택하면 컴퓨터 프로그램을 이용한 자동운전이 가능하며, Emergency 운전모드를 선택하면 Emergency Toggle 스위치를 이용하여 솔레노이드를 작동시킴으로써 경로를 설정하고 캡슐을 이송 시킬 수 있도록 하였다. 개선된 부분의 PTS#1 과 controller의 도면 그리고 사진을 각각 Figure 2, Figure 3, Figure 4, 및 Figure 5에 나타냈으며 PTS#2의 도면, 비상제어스위치 반의 모양 그리고 PTS #2의 사진을 각각 Figure 6, Figure 7 과 Figure 8에 나타냈다.

방사화분석을 위해 현재 이용할 수 있는 조사공의 열중성자속(thermal neutron flux)은 $10^{13} - 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{s}$ 범위이다. 분석측정의 정확도와 직접 관련이 있는 조사공의 특성실험중의 하나로서 세 조사공의 22MW 원자로 출력에 따른 중성자속의 측정, 카드뮴비의 측정등을 하였으며 Table 4에 요약하였다. 조사공의 조사시간 변화에 따른 중성자속의 변동율을 확인하기 위하여 NAA #1 조사공에 대해 중성자속을 측정하였다. 측정은 20MW 출력에서 실행하였고, 조사시간은 총 11시간 이었으며 단시간(30초)과 장시간(1시간) 조사로 나누어 시험하였다. 장시간 조사 구간보다는 단시간 조사구간에서 약간 큰 변화를 보였다. 전체 조사기간에서의 중성자속의 변동은 $1.72 \pm 0.025 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{sec}$ 으로 약 1.5 %의 변동율을 보였다. 20MW 출력운전시 NAA #2(Cd)의 중성자속은 $1.30 \pm 0.05 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2\text{sec}$, NAA #3의 중성자속은 $7.19 \pm 0.45 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{sec}$ 이었다. 시험결과를 Figure 9에 나타냈다.

폴리에틸렌 캡슐을 사용하는 PTS 조사공의 온도는 시험분석에서 기본적인 인자이며 시료 및 용기의 안전성을 확보할수 있는 자료이다. 이를 위해 20-120℃까지의 온도 측정범위를 갖는 Thermo-Label을 이용하였고 조사시간 증가에 따른 온도변화를 측정하였으며 그 결과를 Table 5에 요약하였다. 공압 이송장치의 자세한 내용은 보고서 및 운전 매뉴얼을 참고할 수 있다.

2. 공압 이송장치 운영 프로그램 개발

일차로 PTS #2의 DOS용 공압이송장치의 자동운영 전산프로그램(v.1, 등록번호 98-01-21-5156)을 개발하였고 입인출장치의 일부를 개선하여 추가 설치함에 의한 기능 개선과 Y2K등 주위환경의 변화에 따라 Windows98을 이용한 프로그램(v.2)으로 개선하였다. 운영을 위한 소프트웨어의 구성은 Microsoft Visual

Basic 6.0 language와 Hardware(Digital I/O card) driving library인 PCI-30369S-1 master link S/W library(ver 4.0)로 되어있다.

운영 소프트웨어의 설계는 시작화면, 주화면, 캡슐장전, 수동운전, 자동운전, 비상운전 그리고 원격감시 프로그램으로 구성하였다.

(1)주화면(main menu)

주화면이 열릴 때 Digital I/O Board의 hardware 와 software 의 초기화를 수행하며 다음과 같은 menu를 가진다.

- LoadCap-Irrad only : counter end 를 거치지 않는 캡슐 장전 및 자동 운전
- Load Cap-No Delay : delay 가 없는 캡슐 장전 및 자동 운전
- Load Cap- Delay : delay 가 있는 캡슐 장전 및 자동 운전
- Manual : 수동 운전
- Exit : 프로그램 종료
- 원격 감시를 위한 인터넷 서비스 상태를 표시

(2) 수동운전(Manual Control)

수동운전의 기본 요건은 다음과 같으며 연계작동을 한다 :

- 모든 Solenoid는 화면상의 Button에 의하여 각각 On/Off 한다(3차원 check box에 의하여 상태도 표시함).
- Diverter의 위치는 Limit SW에 의하여 화면상의 Mimic에 붉은 색의 선으로 표시한다(ON 일 때).
- Hand Loader의 문이 열린 것을 Mimic에 표시한다.
- Drop Out End의 문이 열린 것을 화면상의 Mimic 에 표시한다.
- Irradiation Time, Delay Time, Count Time을 시, 분 초 단위로 표시한다.
 - * Irradiation Time : Pool end의 Flag On(PD가 처음 ON 되었다가 OFF 될 때) 부터 Flag OFF (PD가 두 번째 ON)될 때 까지의 시간.
 - * Delay Time : Pool end의 Flag가 OFF (PD가 두 번째 ON)될 때부터 counter end의 flag가 ON(PD 가 처음 ON)될 때까지의 시간.
 - * Count Time : Counter End의 Flag가 On(PD가 처음 ON 되었다가 OFF) 될 때 부터 Counter End의 Flag가 Off (PD가 두 번째 ON)될 때 까지의 시간.
- PD가 작동되면 화면상의 위치에 표시한다.

- AutoLoader, Delay Stacker는 capsule의 위치를 사각형으로 화면상에 표시한다(Limit SW 이용).
- Flag가 발생(ON)되면 (Pool, Counter, GM tube, Drop Out) 노란색 사각형을 해당 위치에 표시한다.
- 화면상에 현재 시간을 표시한다.
- PS1,PS2,HI_Rad 신호가 발생되면 화면에 Alarm을 나타낸다.
 - * PS1 : "Air Press. LOW 1"
 - * PS1 : "Air Press. LOW 2"
 - * HI_Rad : "Radiation High"
- 화면에 표시된 timer 시간은 " Clear Time" 에 의하여 reset 시킨다.
- "Exit to Menu" button 으로 Menu 화면으로 돌아간다.
- "To manual" button으로 화면이 열린 경우는 flag, 캡슐번호 정보를 그대로 유지한다.
- 화면에 capsule 번호를 표시한다(pool, counter, drop out, total delay).
- 결과는 file에 기록한다.

(3) 캡슐장전은 세가지 모드(Load Capsule for Delay, No_delay, Irrad Only process)로 실행되며 interlock장치가 되어 있고 기본요건은 다음과 같다 :

- 먼저 Capsule을 넣고 "Load Cap" button에 의하여 loading 한다.
- 화면에서 입력한 시간 등의 자료는 PD-13이 ON될 때 memory에 기억된다.
- 시간은 200시간 분, 초는 60까지만 입력된다.
- 시료의 무게는 999.999 까지 입력된다.
- 입력 자료는 "save file" 의하여 저장된다.
- "delete file" 에 의하여 file을 지울수 있다.
- "Prev Capsule", "Next Capsule " button에 의하여 입력된 자료를 검색한다.
(전후로 검색하되 입력된 자료까지만 가능)
- "Duplicate Values" button에 의하여 화면에 이전 capsule의 자료와 동일한 값을 표시한다.
- 현재 표시된 자료는 "Update Record" button에 의하여 수정한다.
- Capsule 순서는 바꿀 수 없다.(PD-13 의 통과 수에 의하여 결정됨)
- Pool end 에서는 pool end 또는 lined pool end 중의 하나만 선택 가능하다.
- Counter end 에서는 Counter end 또는 window Counter end 중의 하나만

선택 가능하다.

- 한 batch가 끝나고 새로 시작할 때는 "File beginning" button을 눌러 변수 초기화하여야 한다.(모든 자료를 초기화)
- "Clear record" button에 의하여 현재 표시된 화면 위의 값을 지우고 초기 값을 표시한다.
- "Print File" 에 의하여 임의의 file을 인쇄한다.
- "Load Abort" button에 의하여 sol_6을 off 시킨다.
- "Start" button으로 auto. process를 시작한다.
- "Exit to Menu"로 menu 로 돌아간다.
- 한 batch 에 load 되는 capsule은 100개로 제한한다.
- sol_6 on 시간동안 "Load Air ON" 을 표시한다.
- I/O update 시간은 50 msec 이다.
- 비이상적인 상황이 발생되면 경고 문구가 표시된다.

(4) 자동운전(Automatic Processing)

자동운전의 기본 요건은 다음과 같다 :

- 화면이 열릴 때 변수를 초기화 한다.
- Load 화면에서 입력한 자료에 따라서 모든 작업이 자동으로 이루어진다.
- 단계별 진행은 관련된 PD의 작동에 의하여 시작 또는 정지된다.
- 다음과 같은 정보가 화면에 표시되어야 한다.
- 총 capsule의 갯수.
- Autoloader, delaystacker, each pool end, each counter end, GM tube에 현재의 capsule 번호 표시.
- 배출된 총 capsule의 갯수 표시.
- Pool end, counter end, delay stacker 에서의 잔여시간 표시(감소).
- GM tube에서 holding time 표시(증가).
- PD의 상태.
- Flag 상태(Capsule 모양 표시).
- Diverter의 위치(해당 LS).
- PS1, PS2, High Radiation의 상태.
- 현재 시간.
- Alarm.

- mimic dia.
- 가동부(diverter, autoloader, delay stacker)의 표시는 전원 가압시 "적색", 전원 제거시 "하늘색" 으로 한다.

운영프로그램의 초기 메뉴화면, 자동운전화면, 수동운전화면을 각각 Figure 10a, 10b, 10c에 나타냈다. 개발된 프로그램은 전산프로그램 등록(등록번호 2000-01-12-1238)을 하였다.

3. 공압 이송장치 원격감시 프로그램 개발

공압 이송장치의 원격감시 프로그램을 개발하여 연구소 네트워크를 이용하여 PTS실험실 외의 다른 곳에서도 쉽게 운전상황을 감시할 수 있도록 하여 안정성과 편의성을 높였다.

개선된 프로그램은 공압 이송시스템을 실시간 제어를 하면서 원격감시를 가능하게 서비스를 한다. 원격감시를 위하여 프로그램에서 인터넷에 PTS #2의 기기의 작동 상태를 전송한다. 그리고 인터넷에 연결된 컴퓨터에서는 원격 감시 프로그램을 실행시켜 감시할 수 있다. 원격감시 프로그램의 화면은 메뉴화면을 Figure 11에 나타냈다. 개발된 프로그램은 전산프로그램 등록(등록번호2000-01-12-1237)을 하였다.

제 2 절 중성자 방사화분석용 통합 전산프로그램 개발

DOS용 방사화분석용 통합 전산코드(v.1, 등록번호 98-01-21-4639)의 개발에 이어 분석정도 관리시스템 구축과 상업용으로 이용하는 감마분광분석 프로그램의 Y2K 해결 프로그램 도입등 주위환경의 변화에 따라 Windows98을 이용한 방사화분석용 통합 전산코드(v.2, 등록번호 2000-01-12-1246)를 개선하였다.

LabView 라는 첨단 프로그래밍 방법은 기기의 조작과 인터페이스가 아주 편리한 'G language'라고 불리우는 일종의 그래픽적 프로그래밍 방법이다. Fortran 이나 C language 등, 다른 언어와 달리 반드시 사용하고자 하는 컴퓨터에 반드시 이 프로그램이 설치가 되어 있어야 하나 편리한 프로그래밍과 사용 조작이 아주 간편하여 일반 기기나 가전제품등의 하드웨어를 사용하 듯이 손쉽게 프로그램을 이용할 수 있다. 또한 검출기에 자동 시료교환기(automatic sample

changer)를 설치하거나 그 외의 기기를 통합 운영할 시에 간편하게 인터페이스 할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 LabView를 이용한 중성자 방사화분석용 프로그램을 개발하여 향후 첨단 기기간의 인터페이스에 대비하고 보다 누구나 편리하고 손쉽게 사용할 수 있도록 하였다.

LabView를 이용하면 Windows98 환경내에서 작동하는 다른 프로그램과의 상호소통이 원활하고 추후 개선이 쉬우며 windows 환경의 GUI(Graphic User Interface) 구현이 가능하여 소위 이용자에게 친숙한 프로그램의 개발이 가능하다. 또한 모듈 지향적인 언어이므로 완전히 독립적으로 데이터를 관리할 수 있어 독립성이 보장되어 나중에 이를 수정하거나 유지, 보수하기가 쉬워진다. 따라서 이러한 특징을 가진 언어로 중성자 방사화분석용 프로그램을 개발하여 사용하면 방사화분석에 의해 얻을 수 있는 다량의 데이터를 활용하여 다양한 분야에서 즉각적으로 응용할 수 있다. 예를 들면, 감마선 측정후 환경연구에 중요한 enrichment factor를 확인하여 곧 바로 오염원을 추정할 수 있는 프로그램도 쉽게 개발할 수 있으며, 분석 후 바로 통계처리가 가능하고 또한 쉽게 관련 데이터의 그래프를 작성함으로써 데이터의 해석이 용이하다.[15] 이는 windows 프로그램의 장점이며 그 활용의 범위는 사용자에 따라 아주 다양할 것이다.

이에 새로이 개발한 전산코드, Power NAA는 windows 환경 내에서 dialogue box 등을 이용하여 사용자가 시각적으로 계산을 위한 과정을 확인하며 프로그램을 선택 진행할 수 있어 쉽고, 편안하며 무엇보다도 실수에 의한 오차를 줄일 수 있다.

Figure 12에서 볼 수 있듯이 Power NAA의 첫 입력 화면은 우선 중성자 방사화분석의 방법을 선택하는 것이다. 만일 비교체법을 선택한다면 시료의 총 질량과 비교 원소의 종류, 시료 중의 무게를 입력하면 감마선의 방사능 세기(계측수)를 비교하여 쉽게 목적 원소의 정량이 가능하다. 만일 ko method를 선택하면 우선 관련 ko factor를 입력하고 그 후 프로그램 내의 관련 상수들은 자동으로 찾아 수행된다. 만일 INAA를 선택하면 UNICAL에서는 DOS에서 운영되었던 관련 입력값들이 GUI 형태로 쉽게 입력된다. 또한 중성자속 및 계측효율 데이터를 지정된 값으로 변경시킬 수 있으며 이전에 고정된 값으로 사용하였던 검색단위를 임의로 조정 가능하며 예상되는 핵종의 선택도 편리하고 정확하게 할 수 있도록 프로그래밍하였다. 본 프로그램을 실행할 때, 핵종에 관한 데이터를 추가하기 위한 sub Virtual Instrument(sub VI, 일종의 subroutine)를 독립적으로 만들어 손쉽게 편집을 할 수 있도록 하였다. 운영에 관한 절차는 전산프로그램 등

록서에 첨부하였으며 중성자 방사화분석 지침을 이용할 수 있다.

제 3 절 조사용 캡슐의 제작

시료를 중성자로 조사시킬 때 시료의 이송에 사용되는 PTS용 HDPE(High Density Polyethylene) 캡슐 2종과 용도에 따라 조합하여 사용할 수 있는 크기가 다른 7종의 시료 밀봉용 캡슐을 국산 제작하였고 특성 시험을 하였다.

1. PTS용 조사캡슐의 제작

중성자 방사화분석에서 중성자 조사를 위한 용기로는 고순도 알루미늄과 HDPE(High Density Polyethylene)로 제작한 캡슐을 사용하는 것이 보통이며 하나로 PTS에는 HDPE 조사용 캡슐을 사용하도록 되어있다. 알루미늄 캡슐은 내열성, 내방사선 및 기계적 강도가 비교적 큰 반면에 중성자 조사시에 생성되는 $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$ 핵반응 생성물인 ^{28}Al 의 반감기가 2.24분으로 짧기 때문에 장시간 조사, 장시간 냉각 조건에서 주로 이용된다. 1시간 미만의 단시간 조사와 단시간 냉각 조건에서는 HDPE를 사용하는데 고분자물의 주성분인 C, H, O가 방사화되지 않기 때문에 조사후 취급에서 방사선 지장을 받지 않기 때문이다. HDPE 캡슐의 경우는 TRIGA Mark-III 연구로에 사용하기 위해 과거에 수입제품과 유사한 원료를 이용하여 국산화를 시도하였으나 중성자조사시 용기로부터 방출되는 감마선의 세기, 그리고 중성자조사시 뒤틀림과 내마모성, 내열성의 부족 등으로 인하여 안전에 문제점이 있었다. 본 연구에서는 조사용 캡슐의 국산제작을 위해 플라스틱소재의 정밀 무기분석기술 개발에 참여한 위탁연구기관과 함께 관련기업 전문가, 기존 캡슐과 동일한 구조로 금형가공을 위한 제작업체와의 협의를 통해 조사용 캡슐의 국산화가 가능하리라 판단되었고, 국산 제작의 핵심은 기존의 외국산 재질과 유사한 고순도의 우수한 물리적 특성을 갖는 국산 재료의 선정과 정밀한 제조방법을 이용하는 것이었다.

(1) 외국산 캡슐의 특성분석

조사캡슐로서 적당한지를 시험하기 위해서는 다음 사항들을 필히 확인하여야 한다 ; 불순물 농도를 측정하는 바탕시험, 조사공내에서의 내열성 및 내방사선

시험, 공압이송할 때의 충격이나 마찰에 대한 기계적 강도 시험, 금형사출에 적합한 물성조건 등의 물리, 화학적 특성시험. 따라서 우수한 원료의 선정을 위하여 기존 캡슐의 물리적 특성과 고분자 특성을 조사하였다. Table 6에 수입해 사용해오던 기존 캡슐(old rabbit)의 물리/고분자 특성의 측정 결과를 나타내었다. 기존의 외국산 캡슐의 원료소재는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE ; high density polyethylene)이며 분자량의 폭이 좁고 가교결합(cross kinking)이 없으며, 특수 첨가제가 없는 comonomer로서 순수한 재료임을 확인 할 수 있었다. 성형의 용이성을 나타내는 용융지수(MI ; melting Index)는 15정도이며, 밀도는 0.952로서 사출성형이 가능한 원료이었다. 중성자조사시에 방사능의 세기를 예측할 수 있는 무기성분의 분석은 NAA 및 ICP-AES방법으로 정량하였다. Table 7에 기존 캡슐의 무기성분 함량을 나타내었다. Ca, Mg, Al의 세 무기성분의 함량이 100 ppm급으로 높았으나 30분 혹은 1시간의 중성자조사에서는 큰 문제가 없음을 확인하였다. 오히려 함량이 낮은 Na와 Cl의 경우는 중성자조사 조건에 따라서는 주의를 기울여야 할 대상이었다.

(2) 국산 원료소재 선정을 위한 특성분석

국내에서 생산되는 7 종의 후보재료를 1차 선정하고, 기존 캡슐과 유사한 물리적, 고분자특성 및 무기성분의 함유량을 측정하였다. Table 8에 조사용 캡슐의 국산화를 위해 조사한 후보 재료의 물리적 특성을 나타내었다. 무기 촉매 및 불순물의 함량을 NAA 및 ICP-AES를 이용하여 분석하였다. Table 9에 조사용 캡슐의 후보재료들에 대한 무기성분의 분석결과를 나타내었다. 조사용 캡슐의 후보재료의 무기성분의 분석결과로부터, 중성자 방사화분석에서 분석방해가 비교적 심한 Na, Mn, As, Br, La의 단반감기 핵종과 중반감기 핵종의 함량이 낮으면서 비교적 물리적 특성이 좋은 재료를 선정하여 제작을 하였다. Figure 13에는 완성된 캡슐의 제원과 실제 모양을 보였다. 조사캡슐의 국산화로 큰 수입대체 효과와 제작기술을 축적할수 있었으며 기술지원도 가능하게 되었다.

2. PTS용 시료캡슐의 제작

시료 캡슐은 내부 및 외부오염을 방지하기 위하여 항상 이중포장을 하게되며 주로 가열밀봉하는 방법을 이용하였기 때문에 시료의 준비과정에서 많은 시간과 노력을 들여야 했다. 이를 개선하기 위하여 간단히 시료준비를 할수 있도록 개폐가 용이한 뚜껑(snap cap)을 포함한 여러 가지 크기의 속 및 바깥용기와 조합하여 사용할 수 있게 제작하였으며 시료의 양이나 필요에 따라 효율적으로 조사시

키고 계측할 수 있도록 하여 분석결과의 정도를 향상시킬 수 있도록 개선하였다. 재료는 “가”에서 사용한 것과 동일한 것으로 하였고 Figure 14에는 완성된 캡슐의 제원과 실제 모양을 나타냈으며 여러 가지 조합형태를 예시하였다.

제 4 절 자동 시료교환장치 제작

장수명 핵종의 감마선 계측을 효율적으로 수행하기 위하여 자동 시료교환기 (Auto Sample Changer)를 개발하여 감마분광 시스템과 연결 설치하였다. 한번에 40개까지 시료를 장전할 수 있도록 하였으며 MCA 프로그램상의 job control 메뉴에서 계측할 시료수와 필요한 계측시간과 계측위치를 설정해 줌으로서 무인작동이 될 수 있게 하였으며 계측된 감마스펙트럼은 자동으로 컴퓨터에 저장되도록 하였다.[16] Figure 15에는 시료교환기의 개요도를 보였으며 Figure 16에는 시료의 양에 따라 선택할수 있도록 한 5가지 종류의 시료장전기의 모양과 시료교환기의 실물을 나타냈다.

시료교환기의 구성은 H/W와 S/W로 되어있으며 H/W의 구성은 기구물의 설치를 위한 캐비넷, XY축을 설치하기 위한 알루미늄 frame, 시료장전기 및 시료의 장착과 보관을 위한 납차폐체, rotor index 그리고 front panel, PLC, 전원공급기(24V, 5A), 통풍기(220V, 120 ϕ), PC interface unit, air compressor 등의 제어 시스템등으로 되어있다. 시스템의 구동을 위한 S/W의 구성은 감마선 계측데이터를 수집하는 MCA 프로그램, 구동부위의 시퀀스프로그램인 PLC(LG K500), 이동거리, 이동속도, 운전파라미터등의 설정을 위한 POSP 데이터등이 유기적으로 운용되도록 작성하였다.

제 5 절 분석절차 및 분석감도 개선

1. 실험기기 및 장치

가. 중성자조사 및 계측장치

- HANARO Research Reactor, KAERI : PTS irradiation system, thermal

- neutron flux; $10^{13} - 10^{14}$ n/cm²s.
- Gamma-Ray Spectrometry System.(Figure 17)
 - HP Ge Semiconductor Detector, EG&G ORTEC; GMX series (3 keV -10 MeV), GEM Series (50 keV-10 MeV); 25% relative efficiency, 1.9 KeV resolution at 1332 keV of ⁶⁰Co ; peak to compton ratio ; 45:1.
 - Low Background Pb Shield for Ge Detector, EG&G ORTEC: 4π-10 cm thick low background virgin lead, graded Cu & Cd Liner, 28 x 41 cm cavity ; Pb shielding box(35 x 40 cm, 40 x 45 cm cavity, Cu & Cd liner).
 - LN₂ Automatic Transfer System.
 - Multichannel Analyser, EG&G ORTEC: 918A MCB; 8k-channel ADC (10μs), 8K C data memory, counting loss correction ; 919A MCB; 16k channel ADC(7μs), 64k C data memory, digital Stabilizer MASTRO-II emulation software.
 - Application Software for NAA; Gamma-ray spectrum analysis software : Gamma Vision for Windows 98.
 - MINIGAM ; data acquisition and analysis, on-line, EG&G ORTEC
 - OMNIGAM ; advanced data acquisition and analysis, wide variety of spectral correction routine, on-line, EG&G ORTEC
 - Power-NAA(Labview) ; private data analysis program for NAA

나. 대기분진수집 및 전처리 장치

- Air Sampler (Figure 18, 19) :
 - Low volume sampler : The 'Gent' stacked filter unit sampler, PM₁₀ /PM_{2.5} cut-off point impactor, stacked filter cartridge; coarse and fine filter, average flow rate; 15-16 l/min.
- Filter :
 - Polycarbonate membrane filter, Nuclepore, pore size; coarse(8μm) and fine(0.4μm)
- Stein Smoke Reflectometer for measurement of black carbon (Figure 20)

- Microbalance, Mettler : 1 μ g readability
- Microwave Oven
- Automatic Dry Oven and Vacuum Desiccator
- Freezed Dry Oven

2. 시료준비 및 전처리

가. 표준시료의 준비

모든 표준시료는 대부분 미세 분말로서 인증서에 나와 있는 제조공급자가 추천한 표준방법으로 전처리하여 사용하였다. 예를들면, 분진시료의 경우 dry oven에서 105℃ 로 8시간 동안 건조시킨 후 desiccator에서 자연냉각시켰다. 조사를 위한 시료를 준비하기 위해서 Microbalance를 이용하여 시료를 분석조건에 따라 10~100 mg 범위에서 정확하게 칭량하여 작은 시료용기에 넣은 후 가열밀봉하였다. 열외중성자 방사화분석을 위한 시료의 준비도 동일한 방법으로 준비하였다. 한편 공동분석연구를 위한 IAEA 의 시료도 추천한 표준방법에 따라 dry oven에서 105℃ 로 2시간 동안 건조시켜 Dry/Wet Ratio 를 구한후, 50~200 mg 을 취하여 사용하였다. 실험에 사용한 모든 Sample vial은 고순도의 polyethylene 제품으로 미리 spectro grade의 묽은 질산과 아세톤으로 세척하여 사용하였으며, 불순물의 농도를 확인하기 위하여 blank test를 실시하여 불순물의 농도 및 분석에 미치는 영향을 확인하였다.

3. 시료의 조사

시료의 열중성자 조사를 위하여 ‘하나로’의 공압이송관($\Phi_t = 1.7 \times 10^{13}$ n/cm²s)을 사용하였다. Au, Cu 그리고 Mn 등의 neutron flux monitoring용 activation wire (Reactor Exp. Inc., R/X Activation wire, 99.99% purity)를 사용하여 열 및 열외 중성자속을 monitoring 하였다.

시료는 미리 설정한 분석조건에 따라 단시간 및 중, 장시간으로 나누어 각각 1-5분, 30-60분, 1-4시간 동안 조사시켰다.

4. 방사능의 계측

중성자 조사된 시료는 다음과 같은 계측장치를 사용하여 방사능 측정 및 γ -Spectrum을 얻었다. 고순도 Germanium반도체 검출기(EG&G ORTEC, GMX-25190P)의 검출부는 외부 방사능의 계수율을 최소로 줄이고 차폐체 및 주변물질과 γ -선과의 상호작용을 고려하여 내부벽을 0.1 cm의 카드뮴과 동판으로 내장하여 제작한 10 cm 두께의 lead shielding box(75 x 90 x 90 cm) 안에 설치하였다. 검출기는 coaxial type으로 25%의 relative efficiency와 ^{60}Co 의 1332 keV에서 1.9 KeV의 분해능(resolution; FWHM)을 가지며 Peak to Compton Ratio는 45:1 이다. 이것을 NAA용 application software가 내장된 personal computer 및 8k-multichannel analyser (EG&G ORTEC, 919A MCB, Mastro-II)와 연결하여 방사능 계측 및 자료분석을 위한 γ -Spectrometry로 구성하였다. γ -선 에너지의 교정 및 geometry에 따른 검출효율의 측정은 NIST에서 검증한 혼합 표준선원(Radioactive Reference Source, NEN Products Inc., NES-602, 1" diameter disc type)을 사용하였다. Figure 21과 Figure 22에는 에너지 교정곡선과 계측효율 검정곡선을 나타냈다. 계측기의 불감시간(Dead Time)은 5% 이하로 유지하였으며 decay correction, pile-up correction과 함께 자동으로 보정되게 하였다.[17-19]

5. 데이터의 처리

가. 함량의 계산

계측 자료로부터 함량 계산에 이용할 핵종의 방사능을 정해진 분석조건하에서 얻은 γ -Spectrum 으로부터 신속, 간편하게 처리하기 위하여 새로 작성한 전산 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램은 계측조건, 각 핵종과 해당 γ -에너지, 생성 방사능, 각 보정인자, 함량 및 계측오차, 불감시간 그리고 검출한계 등을 포함한다. 측정된 방사능 계측수, 즉 피이크면적은 Covell Method[20]에 의해 구해진 것이다. 함량계산은 직접법을 이용하여 다음과 같은 방사능 생성식을 이용하여 구하였다.

$$W = A M / \Phi \sigma N_A a \epsilon b [1 - e^{-\lambda t_i}] e^{-\lambda t_d} \quad (7)$$

여기서 W : 성분원소의 무게, g
 N_A : Avogadro Number, $6.025 \times 10^{23}/\text{mol}$
A : 측정된 방사능, cps
M : 성분원소의 원자량, g/mol
a : 동위원소 존재율, %
b : 특정 γ -선 방출율, %
 Φ : 열중성자 속밀도, $\text{n}/\text{cm}^2\text{s}$
 σ : 열중성자 흡수 단면적, $\text{barn} = 10^{-24}\text{cm}^2$
 ϵ : 검출기의 측정효율, cps/dps
 t_i : 조사시간
 λ : 붕괴상수, $\ln 2 / T_{1/2}$
 t_d : 조사후 냉각시간

Table 10 에는 함량계산에 이용한 핵자료들을 수록하였다.[21, 22] 열외중성자방사화분석법에서 비교표준체를 이용한 함량의 비교계산의 경우는 조사 및 측정을 동일한 조건으로 하였기 때문에 식(7)에서 Φ , σ , N_A , a, M 등은 상수로 놓을 수 있으므로 다음식에 의해 검체시료와 표준체의 방사능 및 보증값을 직접 비교하여 정량할 수 있고 핵적자료의 불확실성에 의한 오차를 없앨 수 있다.

$$W_X = W_{STD} [A_X / A_{STD} (e^{-\lambda \Delta t_d})] \quad (8)$$

여기서 첨자 STD 와 x 는 표준체와 검체시료를 나타내며 괄호항은 counting interval에 따라 보정되어야 하는 냉각시간 및 측정시간이다.

나. 검출한계의 측정

중성자 방사화 분석에서 개별원소에 대한 일반적인 분석감도는 해당 분석조건 하에서 생성 방사능의 이론값으로부터 구할수 있으며 Table 11과 같다. 그러나 실제로 검출한계는 검체시료 중 성분 원소의 종류 및 함량 분포에 따른 핵종간의 상호작용에 의해 크게 좌우된다.[23, 24] 일반적으로는 미량 성분 원소의 함량을 측정하기 위하여 일상적으로 사용되고 있는 생성 방사능의 계산을 통해서 적절히 선정된 분석조건하에서 검출한계를 계산한다. 일반적으로 방사능 측정에서 검출한계는 Currie의 정의에 따라 다음과 같이 계산하였다.[25]

$$\text{검출한계, Detection limit} = (K_Q^2 / 2)[1 + \{1 + (4B / K_Q^2)\}^{1/2}] \quad (9)$$

여기서, B 는 natural background count rate로 자연 방사능과 scattering 및 electronic noise를 모두 합한 것이 되며 K_Q 는 100을 실험에서 허용하는 불확실도로 나눈 값이다. 실례로 대기분진시료에 대해 계산된 검출한계를 Table 12에 나타내었다.

다. Advantage Factor의 계산

열중성자와 열외중성자에 의한 개선효과를 알아보기 위한 advantage factor의 계산은 동일한 검체시료와 표준시료를 각각 일반 조사공(PTS)과 카드뮴 피복조사공(Cd)에서 동일한 조건으로 함께 조사시켜 생성된 두시료의 상대적 방사능비로 계산한다. 이때 주요 방해 핵종은 ^{24}Na 를 기준으로 하였다.

$$\text{Advantage factor, AF} = [A_{x, \text{epi}} / A_{r, \text{epi}}] / [A_{x, \text{th}} / A_{r, \text{th}}] \quad (10)$$

여기서, A_x 와 A_r 는 각각 목적핵종과 방해핵종의 방사능이고 첨자 epi 와 th 는 각각 열외중성자와 열중성자를 의미한다.

라. 수집된 대기분진 농도의 계산

일반적으로 환경연구에서 대기중의 원소의 농도는 공기의 단위부피당 원소의 양($\mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 나타낸다. 따라서 필터를 통해서 수집된 공기의 총량은 수집기의 유속과 시료의 수집시간, 사용한 필터의 크기 등을 이용하여 다음식으로 계산하였다.

$$V = 1/2(F_i + F_f) \times T \times 0.001 \quad (11)$$

여기서, V = 필터를 통해 수집된 공기의 총량 (m^3)

F_i = 시료수집을 시작할 때의 공기 유속(l/min),

F_f = 시료수집이 끝날 때의 공기유속(l/min)

T = 시료의 수집시간(min)

실제로 필터와 함께 분진의 농도를 정량하였기 때문에 일차로 얻어진 각 원소의 측정값(C_1)에서 filter blank 값(B)을 빼준 값이 대기중의 실제 원소농도(C_2)가 된

다. 이를 위해 다음식으로 농도를 계산하였다.

$$C_2 = [(C_1 \times F_c) / F_a] / V \quad (12)$$

여기서, F_c = 분석검증으로 얻어진 보정인자

F_a = 사용한 필터의 단위면적(cm^2)

마. Enrichment Factor의 계산

오염 방출원의 조사를 위한 데이터 해석의 일단계는 Enrichment Factor (EF)의 계산이다.[26] 원소의 EF는 대기분진시료중의 기준원소와 목적원소의 비를 기준물질 (e.g. rock, soil, seawater, etc.)중의 기준원소와 목적원소의 비로 나눈 값으로서 (7)식과 같이 정의한다.

$$\text{Enrichment Factor, EF} = (X_i/C_i)_{\text{APM}} / (X_i/C_i)_{\text{REF}} \quad (13)$$

여기서 X는 interest element의 농도이고, C는 reference element의 농도이다. 하첨자 APM과 REF은 각각 대기분진시료와 기준물질을 의미한다. 일반적으로 대기분진에서 rock, soil 기준물질에 대한 EF의 계산은 기준원소를 Al 또는 Sc으로 한다. 본 연구에서는 비교적 편차가 적은 Sc를 기준원소로 선정하여 계산하였다.

바. 환경데이터의 기본통계량 계산

본 연구에서 구한 모든 측정값에 대한 데이터들은 방사선계측시 고려해야하는 백그라운드의 통계오차를 고려하여 기술통계법을 바탕으로 컴퓨터의 EXCEL 프로그램을 이용하여 Table 13에 나타난 기본 통계량으로 산정하여 표와 그림을 작성하였다.

표준시료의 측정값은 평균값, 표준편차, 범위로 나타냈고, 보증값과의 상대오차를 계산하였다. 한편 상호비교연구를 위한 표준시료의 분석결과에 대해서는 분석법간 또는 실험실간 신뢰도를 확인하였다.

환경관측을 위해 수집한 대기분진의 농도와 측정된 모든 원소는 월별로 평균값을 구하여 각 원소에 대한 통계량으로 나타냈으며 이와함께 전체 수집기간에 대한 빈도분포 돛수분포표를 작성하였다. 또한 상관성 검토를 위하여 측정된 모든 원소들에 대해서 선형 회귀분석을 하였고 상관도표를 작성하였으며, 뚜렷한

특징을 나타낸 원소들에 대해서는 상관관계를 추정하였다.

6. 분석감도 개선

중성자 방사화분석을 시작할 때의 첫단계는 사고실험을 통하여 해당시료의 성분조성을 미리 파악한 다음 중성자 조사 특성과 관련 핵반응에 의해서 발생할 수 있는 여러가지 nuclear interference 및 spectral interference 를 조사하여 그 영향을 최소화시키거나 제거시켜 주어야 하며, 경우에 따라서는 보정인자를 이용하여 정확하고 감도 높은 결과를 얻을 수 있도록 조치를 취해야 한다.

본 연구에서는 무기 환경시료의 경우에는 주로 비파괴법(INAA/ENAA), 생물 환경시료의 경우에는 파괴법(RNAA)을 적용하였다. 방사화학적 분리법으로는 공침법과 이온교환수지법을 병용하였으며 특히 원자력 환경과 관련이 깊은 U, Th, Sr, I, Cs을 대상으로하였다. 생물시료의 열외중성자 방사화분석법의 관찰에서 석탄재나 토양과 같은 무기시료에서 크게 얻었던 이론적, 실험적 감도 개선효과는 보이지 않았으며 ENAA보다는 RNAA를 통한 개선효과가 우세하였다. 따라서 관심대상의 생물학적 시료중 ppb 수준의 우라늄과 토륨을 정량하는 법을 고찰하였다. 생물학적 시료(식품 및 생체조직)중의 극미량 우라늄 농도의 정량은 환경방사능 및 보건물리 분야의 중요한 응용연구 중의 하나이다. 현재까지 우라늄을 정량 분석하는데 각종 화학분석 및 핵분석법이 이용되어 왔으며 각각의 적용능력을 갖고 있다. NAA중 비파괴분석법(INAA)의 우라늄에 대한 검출한계는 감마선 백그라운드를 증가시키는 Na, Mn, P 등에 의한 매질효과로 인해 50 ng/g으로서 약간 높은 편이다. 따라서 검출감도를 높이기 위해서는 사전농축분리법(RNAA)의 병행이 필수적이다. 이러한 경우 우라늄의 검출한계는 0.1 ng/g까지 낮출 수가 있다. Figure 23에 나타낸 우라늄의 사전농축분리법으로는 시료를 혼합산으로 분해 한 후 음이온교환수지(Dowex 1×8-200)를 이용하였으며, Th의 농도는 Figure 24 에 나타낸 방사화학적 절차로 정량하였으며 본 화학분리 절차의 검증을 위해 인증 표준시료(NIST SRM 1566a, Oyster Tissue, Pine Needle)를 이용하였다. 표준물질인 NIST SRM 1566a, Oyster Tissue의 분석에서 $94.5 \pm 1.8\%$ 이상(n=6)의 수득률을 얻었다. Table 14에는 분석결과를 나타냈다. 인공적으로 준비한 한국산 종합식품내의 U와 Th 의 농도는 각각 35.4 ppb 와 3.4 ppb로 분석되었다. RNAA 방법에 의한 생물학적시료에서 우라늄 분석에 필요한 분석조건을 확립함으로써 여러 가지 식품 및 생체시료에 존재하는 극미량의 우라늄 분석에

적용할 수 있었다.

제 6 절 분석조건의 결정 및 분석정도관리

1. 분석조건의 결정

미량의 다원소 동시분석에서는 정량할 시료중의 각종 원소의 농도가 아주 다양하기 때문에 중성자속, 조사시설, 시료의 조사시간, 냉각시간, 계측시간 등과 같은 분석 조건의 설정이 검출한계 및 정확도나 정밀도의 결정에 중요한 요인으로 작용한다. 특히 대기분진시료와 같이 원소의 조성이 다양하고 함량수준이 낮은 경우에는 기기의 조건과 분석조건의 설정에 주의를 기울여야 한다. 중성자속 밀도, 분석시료의 질량과 검출기의 효율에 따라 조사시간은 변할수 있지만 일반화된 도식을 고수할 수 있다. 전형적으로 두 번의 조사를 수행한다; 단수명 핵종(수분)과 중·장수명 핵종(수시간에서 1일). 이러한 중성자 조사는 동일한 시료에 대해 행한다. 열외 중성자 방사화분석(특히 단수명 핵종의 분석감도를 증가시키기 위한)이 필요하다면 부가적인 조사가 필요하다. 단수명 핵종을 생성하기위한 방사화분석에 대해 조사시간은 1-10분을 적용하였다. Table 15 에는 문헌에 보고된 표준시료의 함량분포를 바탕으로 수차례의 반복 실험을 통하여 반정량적으로 S/N ratio를 구하여 작성한 정량에 이용한 원소 및 최적의 조사, 냉각, 계측시간등 가장 적절한 분석조건을 나타내었으며 분석절차를 Figure 25에 나타냈다. 일반적으로 검출한계는 시료중의 성분 원소의 종류 및 함량분포에 따라 핵종간 상호 방해작용에 의해 크게 좌우된다. 본 실험에서는 Currie의 정의에 따라 정해진 조건하에서 중성자속의 변화, 검출효율, 관련 핵자료, 그리고 실험조작등에 의해 유발되는 계통오차를 포함하여 10%의 불확실도를 허용할 때의 검출한계를 계산하였다. 미량 성분의 검출한계는 10~0.01 ppm 범위로 핵종에 따라 측정된 함량값의 1/2~1/100 수준이었다.

2. 분석정도관리

분석정도관리의 기본은 측정의 소급성 유지이며 이를 확보하기 위한 방법으로는 인증표준시료 또는 2차 표준물질을 이용한 품질관리, 통계적 기법을 이용한

품질관리, 실험실간 비교시험 또는 숙련도시험 프로그램의 이용, 동일하거나 상이한 방법을 사용한 반복 또는 재현성 시험등이 있다. 본 연구에서는 먼저 인증 표준물질을 이용하여 분석절차를 검증한 후 보정하는 방법과 국내,외 비교시험 및 국가 시험소 제도하의 숙련도 시험에 참가하여 분석결과를 평가하였다.

가. 인증 표준물질의 분석

환경연구에 이용하기위한 중성자방사화분석법의 검증을 위해서 세계적으로 공통이용하고 있는 환경 표준시료[27]중에서 환경오염연구에 필요하거나 관련이 있는 시료를 선정하여 분석하였다. 본 연구에서는 18종의 표준시료를 분석검증하였으며 원소의 농도 및 범위, 상대 표준편차, 보증값과의 상대오차등을 구하여 분석의 정확도와 정밀도를 확인하였고 분석결과에 대한 평가를 하여 일상분석에 이용할 수 있도록 하였다. 또한 일부 시료에 대해서는 실험실간, 분석법간에 데이터의 상호비교를 통해서 분석결과의 신뢰도를 확인하였으며, 분석감도를 개선하기위하여 열외중성자 방사화법을 이용하기도 하였다. 분석법의 확립에 이용한 시료의 종류는 다음과 같다 ; Airborne particulate matter 2종, Coal flyash, Soil 3종, Sediment 5종, Biological samples 6종 등이다. Table 16에는 6가지 생물 표준시료의 분석결과를 분석대상 원소에 대해 적용한 방법과 함께 종합적으로 나타냈다. 상기의 환경시료 분석법 개발 및 응용연구와 관련하여 수편의 논문이 관련 국내외 학술지에 보고되었으며[28-46] 초록을 부록으로 첨부하였다.

나. 상호 비교시험

(1) 대기분진시료

대기분진은 자연적이고 인위적인 발생에 의한 다양한 무기원소들을 함유하고 있기 때문에 대기질 평가를 위한 관측시료로 이용되고 있다. 더우기 호흡기관을 통해서 인체에 흡입되는 $10\mu\text{m}$ 이하의 입자크기인 PM_{10} 분진의 총질량농도나 분진 중의 중금속 및 독성원소의 농도는 장·단기적으로 인체 건강에 큰 영향을 미치고 있다. 현재 대기측정결과들은 역학연구, 오염발생원의 규명, 장거리 이동현상의 연구, 인체 위험도 및 위해도 평가 등 여러분야에서 매우 유용하게 적용되고 있다. 측정분석결과의 객관성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 적용된 분석방법에 대한 검증이 필수적이며 이를 위한 방법중의 하나가 인증표준물질을 이용하거나 비교시험에 참여하여 분석결과를 확인하는 방법이다.[37, 38, 42] 비파괴분석을 할 수 있는 핵분석기술(Nuclear Analytical Techniques)이 대기분진과 같은 환경시료의 미량분석에 이용되어 왔으며 이 가운데에서도 중성자방사화분석법은 80

여종의 원소분석이 가능한 광범위한 적용범위를 갖고 있다.[47, 48] 최근에는 대기오염 측정분석과 관련하여 중성자 방사화분석(NAA), 하전입자 유도 X-선방출 분석(PIXE), X-선 형광분석(XRF)등과 같은 핵분석기술이 미국 환경청(U.S. EPA)에서 표준 분석시험법[49]으로 활용되고 있으며 방사화분석팀에서는 이를 번역서로 발간하였다. 국제원자력기구(IAEA)에서는 오래 전부터 분석정도관리 프로그램(Analytical Quality Control Service, AQCS)을 통하여 인증표준물질(Certified Reference Material, CRM)의 제작이나 표준화사업에 이용하여 왔으며, 세계 각국의 많은 분석연구실이 최신 분석장치와 기술을 이용하여 실험실간 데이터 비교검증 프로그램(Data intercomparison exercises)에 참여하고 있으며, 그 결과를 분석법 검증, 숙련도 평가(Proficiency test) 또는 측정의 소급성(Traceability) 유지를 위한 자체의 분석품질 관리 및 보증에 활용하고 있다.[50].

대기환경시료인 도시분진시료와 인공적으로 준비한 월터상 도시분진시료중의 미량원소를 중성자방사화분석법을 사용하여 비파괴 분석하였다.[51] 분석정도관리를 위하여 미국 표준기술원의 인증표준시료(Urban Dust, NIST SRM 1648)를 이용하였다. 분석결과를 Table 17에 나타냈으며 37종의 검출된 원소의 상대오차와 상대 표준편차를 계산하였으며 각각 10%와 15%이내이었다. 도시분진시료는 오스트리아의 Vienna General Hospital (AKH)의 공조시스템으로 1994년 9월부터 1995년 12월에 걸쳐 9kg 씩 3개의 बै치로 포집되었다. 월터상 도시분진시료는 Figure 26에 보여준 바와 같이 혼합기, 수조, 초음파 교반기, 입자크기 측정기로 구성된 장치를 사용하여 준비하였다. 도시분진시료로부터 29종의 원소, 월터상 도시분진시료로부터 21종의 원소를 정량하였으며 그 결과를 Table 18를 Table 19에 나타냈다. 측정결과의 신뢰도 및 숙련도 평가를 위하여, 중성자방사화분석법, 하전입자유도 X-선방출분광법, X-선 형광분석법과 원자흡수분광법을 이용한 세계 39개 실험실이 참여한 실험실간 비교시험에 참여하였으며 수집된 결과를 통계처리하였다. 신뢰도 및 숙련도 평가지표로써 IUPAC 지침서[52]에 근거하여 전체 평균값, μ 와 표준편차, σ 그리고 각 실험실의 평균값, x 으로부터 구한 z -값($\mu - x/\sigma$)을 나타냈으며 z -값이 ± 3 보다 큰 것은 화살표로 표시하였다. Figure 27과 Figure 28에 보여준 평균값과 표준편차로 계산한 z -score는 몇개의 원소를 제외하고 모두 $-1 < z < +1$ 사이에 들어오는 좋은 결과를 얻었다.

중성자 방사화분석법을 이용한 비교분석을 위한 IAEA의 두 시료에 대한 측정 결과로부터 독성 원소인 Cr과 대기분진의 오염원 중 토양으로부터의 기여도가 크다고 생각되는 Al과 Mn 원소에 대한 분석결과의 통계적 비교를 그래프로 작

성하여 각각 Figure 29, Figure 30 과 Figure 31에 나타내었다. 그래프의 각 점은 각 실험실의 평균값과 오차범위를 나타내었으며, 평균값, 95% 신뢰구간(1.96σ)과 3배의 95% 신뢰구간을 표시해 놓았다. X-축은 방법간 비교가 가능하게 실험실 번호와 분석방법(중성자 방사화분석법; N, 양성자유도 X-선 방출분광법; P, X-선 형광분석법; X, 원자흡수분광법; A)을 함께 표시해 놓았다.

두 시료에서 우리의 측정값들은 세원소 모두 95% 신뢰구간 내에 있는 것을 볼 수 있으며, 각 원소의 분석결과는 주어진 농도에서 정확, 정밀도가 좋은 것으로 나타났다. 이상과 같은 분석결과로 부터 몇가지 오차요인을 제거하면 환경시료중의 미량원소 분석에 중성자 방사화분석법이 유용하게 적용될 수 있음을 알 수 있었으며, 특히 독성원소로 알려져 있는 As, Cr 및 Hg을 0.1~100ppm 검출한계 범위에서 비파괴 분석법으로 환경오염 연구에 효과적으로 이용할 수 있음을 알 수 있었다.

(2) Algae 시료

세계의 측정분석 연구실 및 표준 연구기관에서는 분석절차의 검증에 이용되는 다양한 표준물질들을 제작하고 있으며, 분석값의 비교 평가를 통하여 각종 표준물질의 인증값을 함께 제공하고 있다. 이러한 검증 절차는 정해진 표준절차에 의해 수행되며 분석자료는 객관적인 수학적, 통계적인 처리과정을 거쳐서 평가된다. 국제원자력기구(IAEA)에서는 오래 전부터 분석정도관리 프로그램(Analytical Quality Control Service, AQCS)을 표준물질의 제작 및 보증값의 확보에 이용하고 있으며, 세계 각국의 많은 우수 분석연구실이 자체적으로 개발 보유한 최신 분석기술을 이용하여 프로그램중의 하나인 Data intercomparison study에 참여하고 있으며, 자체의 분석 품질관리 및 보증에 활용하고 있다. 핵분석기술, 특히 방사화분석법은 오래전부터 정밀분석도구로 이용되어온 절대 분석법으로 미지시료의 초기분석 및 검증에 사용되었고, 1970년대 이후로 기기 중성자 방사화분석법은 동, 식물시료를 포함한 다양한 환경시료와 생체시료의 미량 원소분석에 유용하게 사용되어 왔으며[53, 54] 이러한 결과로부터 중성자 방사화분석법은 환경오염의 정도를 관측하기 위한 정확, 정밀한 분석법임이 입증되기도 하였다.

본 연구는 생태학연구에 자주 이용되어오고 있으며, 환경지표 시료로 사용될 수 있는 Algae 시료[55]를 중성자 방사화분석법에 의해 원소 분석한 결과[56]를 세계 각국의 실험실과의 비교분석 및 검증을 통하여 본 실험실의 분석의 숙련도 및 신뢰도를 확인하기 위해 수행되었다. 이를 위해 국제원자력기구(IAEA)로부터

균질도가 검증된 3종의 Algae 시료를 추천된 전처리과정을 거쳐 분석하고 각 분석값을 150여 실험실에서 수행한 X-선 형광분광법, 유도플라즈마분광법, 원자흡수분광법, 입자유도 X-선 방출분광법 및 질량분석법(MS)등 35가지의 다양한 분석법으로 얻은 분석결과 값과 통계적으로 비교평가하였다.[36]

Algae시료 3종(IAEA-0391, 0392, 0393)는 체코의 트레본에 있는 체코 과학아카데미의 미생물연구소에서 특정조건에 따라 각각 재배된 것이며 살균처리 및 균질도시험을 거친것이다. 즉, IAEA-0391 시료는 Chlorella로서 Ultra pure Chemicals를 사용하여 유해한 독성원소의 함량수준을 낮추기 위한 청정조건으로 재배되었으며 IAEA-0392 시료는 Scenedesmus obliquus 208로서 일반적인 조건에서 재배된 것이다. 또한 IAEA-0393 시료는 Chlorella로서 납, 수은, 비소, 카드뮴 및 크롬과 같은 유해 중금속을 증배시켜 재배되었다[57, 58]. 이상과 같이 재배된 시료를 ^{60}Co 선원의 25 kGy가량 감마선으로 조사하여 살균시키고 시료의 균질화에 필요한 과정이 수행되었다. 시료의 균질도 시험을 위한 분석자료의 통계적 평가는 유의수준 0.05에서 편측 분산분석(single factor ANOVA)을 수행하여 시료의 불균일도로부터 발생하는 표준편차를 다음식($S_{\text{homo}} = S_{\text{between bottles}}^2 - S_{\text{within bottles}}^2$)으로 계산하여 시험한 측정원소의 함량에 따라 상대표준편차로 표시하였으며, 그 결과를 Table 20에 나타내었다. 실험실간, 분석법간 측정값의 비교연구를 위한 통계처리를 위하여 전체 평균값, 95% 신뢰구간 및 Dixon test, Grubb test coefficient of Skewness and Kurtosis test[59]등(유의수준 0.05)을 사용하여 전체평균과의 편차가 크게 난 실험실의 분석값을 outlier로 제외시킨 후의 채택가능한 평균값(accepted value)등을 제시하여 각 실험실의 분석값이 어느 수준에 포함되는가를 쉽게 알 수 있게 자료를 정리하였다. 물론 각 실험실의 평균분석값에 대한 표준편차도 함께 도시하였다. Table 21-23에는 이들 분석값과 세종류의 Algae시료로부터 측정한 INAA의 분석결과를 요약하였다. 분석 정도관리를 위하여 미국표준연구소에서 인증한 표준물질(NIST SRM 1566a-Oyster Tissue, SRM1572-Citrus Leaves)을 미국표준연구소에서 추천한 전처리과정에 따라 절대분석하여 각 원소의 분석평균값의 차이를 보정해주는 기준물질로 사용하였다. 이 표준물질에 대한 분석결과표를 Table 24에 나타내었다.

신뢰도 및 숙련도 평가지표로써 IUPAC 지침서[52]에 근거하여 전체 평균값, μ 와 표준편차, σ 그리고 각 실험실의 평균값, χ 으로부터 구한 z-값($\mu - \chi / \sigma$)을 Figure 32, Figure 33과 Figure 34에 나타냈으며 z-score는 몇개의 원소를 제외하고 모두 $-1 < z < +1$ 사이에 들어오는 좋은 결과를 얻었다.

중성자 방사화분석법을 이용한 Algae시료의 측정결과로부터 세 부류의 몇가지 원소에 대한 분석결과의 통계적 비교를 그래프로 작성하여 Figure 35-39에 나타내었다. Figure에서 실선은 전체 분석결과의 평균이며 점선은 95% 신뢰구간을 나타낸다. 분석결과로 부터 몇가지 오차요인을 제거하면 동, 식물시료중의 미량원소 분석에 중성자방사화분석법이 유용하게 적용될 수 있음을 알 수 있으며, 특히 독성원소로 알려져 있는 As, Cr, Cd 및 Hg을 0.1~100ppm 범위에서 비파괴 분석법으로 환경오염 연구에 효과적으로 이용할 수 있음을 입증하고 있다.

(3) Sediment 시료

여러가지 환경시료 ‘대기, 물, 토양, 생물 등’에 대한 분석을 통하여 오염도 및 위해도의 수준을 파악하고 오염원을 규명하여 이를 통제할 수 있는 방법의 개발을 위한 노력이 뒤따르고 있다. 현재 여러 가지 환경 보전관리를 위한 대책중 중금속 및 유해 원소의 일상적인 표준 분석법의 확립은 시급하고 중요한 일이며, 환경연구를 위한 필수적인 첫 단계라 아니할 수 없다. 이를 위해 중요한 환경시료중의 하나인 퇴적물에 대한 중성자 방사화분석을 이용한 미량원소 분석법을 확립하므로서 실시료의 분석을 통한 오염원의 추적 및 이동경로 등의 규명에 적용할 수 있을 것이다. Cortes Toro 등[60]에 의해 보고된 데이터에 따르면 퇴적물은 지역의 특징적인 환경조건에 따라 많은 원소들의 농도분포가 넓은 범위에 걸쳐 변화를 나타내고 있다. 그러므로 퇴적물중의 미량성분 원소의 분석에 의해 산업 폐기물, 생활 오수, 제철소 등과 같은 오염원을 규명하고 조절에 이용할 수 있으며, 이를 위해서는 특정 지역의 정기적인 관측이 필요하다. 퇴적물의 분석을 위해 현재 다양한 화학적인 기기분석법을 사용하고 있으나 미량원소의 경우 화학적 전처리과정중의 손실이나 오염을 완전히 배제할 수 없으므로 비파괴 동시다원소 분석의 강점과 고감도($10^{-3} \sim 10^{-7} \mu\text{g}$)를 갖고 있는 기기 열중성자 방사화 분석을 이용하면 신뢰도 있는 데이터를 구축할 수 있다. 퇴적물 시료에 대한 방사화 분석의 표준화된 분석절차를 확립하고 신뢰도 있는 데이터의 구축을 위해 NIST(National Institute of Standard and Technology) SRM 2종과 NRCC(National Research Council Canada) CRM 1종에 대해 비파괴 열중성자 방사화분석을 수행하였다. 또한 환경시료에 대한 핵분석기술(Nuclear Analytical Technique)의 확립을 위한 상호 데이터 비교를 하기위해 IAEA의 AQCS (Analytical Quality Control Service) Program의 일환으로 IAEA에서 제공한 Sed-1(Baltic Sea Sediment)과 Sed-2(New-York Harbor Sediment)시료를

NRCC CRM을 비교체로 사용하여 비교분석하고 ICP-MS, AAS, WD-XRF에 의해 분석한 데이터와 상호비교하여 본 분석법의 신뢰도를 구축하기 위한 데이터로 이용하였다.

각 표준물질에 대해 적어도 5개 이상의 시료를 취하여 각각의 분석값을 통계적으로 처리하여 평균값, 표준편차, 상대표준편차, 상대오차 및 개별분석값의 범위로 표시하였다. 표준물질중의 성분원소에 대한 보증값이 있는 원소는 본 분석법의 정밀도와 정확도를 정량적으로 비교할 수 있으나 참고값인 원소는 정성적으로 비교할 수밖에 없었으며 보증값과 참고값이 없는 원소에 대해서는 정밀도만을 확인할 수 밖에 없었다. 일반적으로 95%의 신뢰도를 갖기 위한 평균분석값은 정규분포인 경우 보증값에서 $\pm 2\sigma$ 의 범위안에 있어야 한다.

Estuarine Sediment(NIST SRM 1646)의 분석에서 30종의 원소를 정량하였고 이에 대한 결과를 Table 25에 나타내었다. 분석결과값들의 보증값에 대한 계통오차를 알아보기 위하여 95%의 신뢰도를 정해 t-test [$t = (\mu - X_{\text{average}}) / (s / \sqrt{n})$]를 하여[61] 신뢰도 95%, 자유도 4, 양측검정인 경우 이론적인 값, $t = \pm 2.776$ 을 얻었으며 As, Ca, Co, Cr, Fe, K, Mn, Rb, Sb 및 V과 같은 원소들은 허용가능한 계통오차를 보여주고 있으므로 직접법을 적용할 수 있으며 나머지 10개 원소는 핵적 또는 분광학적 간섭에 의해 발생 가능한 보정인자를 적용하거나 비교법을 사용하여야 함을 알 수 있었다. 또한 20개 원소의 상대 표준편차는 10%이내의 값들을 보여 정밀한 분석이 이루어졌음을 나타냈다.

Buffalo River Sediment(NIST SRM 2704)의 분석에서 32종의 원소를 정량하였고 그 결과를 Table 26에 나타내었다. 분석원소에 대한 t-test를 수행하였으며 Ba, Br, Co, Cr, Dy, Fe, K, Na, Rb, Sc, Ti, U, Yb과 같이 13개 원소는 허용가능한 계통오차를 나타내고 있다. Se, Ta, Tb, Ti, U을 제외하고 10%이내의 상대표준편차를 나타냈다.

Marine Sediment(NRCC CRM, BCSS-1)의 분석에서 33종의 원소를 정량하였고, 그 결과를 Table 27에 나타내었다. t-test를 수행하여 본 결과 As, Ca, Co, Cr, K, Sb, Ti, V과 같은 8개 원소들은 허용가능한 계통오차를 나타내었다. As, Ba, Se, Tb, U, V, Yb을 제외하고 10%이내의 상대표준편차를 나타냈다.

국제 공동분석연구로 IAEA로부터 입수한 두가지의 실제시료를 동일한 방법으로 분석하였고, 참가한 실험실의 전체 데이터를 이용하여 숙련도 평가지표인 Z-score를 구하였으며 Figure 40, Figure 41 과 Figure 42에 나타내었다. 몇가지 원소를 제외하고 비교적 우수한 것으로 평가할수있었다. 내부적으로 분석법간 비

교를 위해 Al, As, Co, Cr, Fe, Sb, Zn과 같은 7가지 원소에 대하여 ICP-MS, AAS 및 WD-XRF의 분석결과와 상호비교하였다. 분석결과를 Table 28, 29에 나타내었으며, 분석법간 평균함량값이 비교적 잘 일치하고 있음을 보였다. 중성자 방사화분석법으로 분석한 7개 원소에 대해서 실험실 1과 다른 실험실의 분석결과와의 신뢰도를 비교 평가하기 위하여 IAEA의 data intercomparison study에서 이용하고 있는 간단한 방법으로 통계처리를 하였고 그 결과를 Table 30에 나타냈다. 비교건수, n 이 적기는 하지만 분석원소의 평가성적(Z-score)은 0 과 1 범위내에 들어왔다. 따라서 본 방사화분석 결과는 신뢰성이 높은 것으로 간주할 수 있으며, 퇴적물시료의 일상 분석법으로 이용가능함을 확인할 수 있었다.

국내 환경관련 연구기관들의 분석자료의 신뢰도 확보를 위한 국내 품질관리 체계의 수립을 목적으로 99년 한국해양연구소가 주관한 퇴적물내 미량 중금속 분석에 대한 상호검정연구에 참여하였다. 분석시험 대상은 오염된 연안에서 채취한 퇴적물시료이며 참여기관들의 분석결과를 종합하여 Table 31에 나타냈으며 Table 32, 33에는 각 실험실의 분석결과를 나타냈고 본 연구실은 Lab code 9이다. Table 31의 평균과 표준편차를 이용한 통계처리로 본 실험실의 분석수행능력을 평가하여 Table 34에 나타냈다. 비교연구에 참가한 실험실의 전체 데이터를 이용하여 숙련도 평가지표인 Z-score를 구하였으며 Figure 43에 나타내었다. 비교건수가 13건으로 다소 적기는 하지만 분석원소의 평가성적(Z score)은 0 과 1 범위내에 들어왔다. 따라서 비파괴 방사화분석 결과는 신뢰성이 높은 것으로 간주할 수 있었다.

(4) 음용수 시료

담수나 해수와 같은 자연수중의 우라늄(U)의 농도는 수 ppb 수준이하로서 극미량 원소분석법을 필요로 한다. 보고된 자료에 의하면 담수와 해수중의 우라늄의 농도범위는 각각 0.019~12(평균 1.5) $\mu\text{g/L}$, 1.2~4.2(평균 2.7) $\mu\text{g/L}$ 로 알려져 있다[9]. 본 연구는 고감도의 비파괴법인 중성자 방사화분석법을 이용하여 지하수중의 우라늄을 신속, 정확하게 정량할 수 있는 방법에 대하여 시료를 증발농축 전처리하는 방법과 직접 분석하는 방법을 비교 검토하였다. Table 35에는 중성자 방사화분석법으로 측정한 자연수중의 원소농도 및 관련 동위원소의 핵적 특성을 나타냈다.

분광분석용 우라늄 표준용액으로 만든 0.5~100 ppb 농도범위의 7가지 희석용액을 이용하여 직접법(^{239}U)에 의한 검정곡선을 작성하였으며 Figure 44에 나타

냈다. 주어진 농도범위에서 검정곡선의 평균편차는 2% 이하를 나타냈으며, 중성자 방사화분석에 의한 각 측정값의 상대표준편차는 2-12% 이내이었다. 높은 농도 범위(>10 ppb)보다 낮은 농도에서 큰 계통오차를 나타냈다. 이것은 용액을 제작할 때 발생하는 오염이나 손실 및 원소의 농도가 낮을 때 낮은 방사화율에 의한 적은 계측수에 따른 통계오차의 증가에 기인한 것으로 판단된다. Table 36에 보인 바와같이 주어진 농도범위에서 Currie의 정의에 의해서 계산한 직접법과 사전 농축법(^{239}Np)의 검출판정한계는 각각 1~3 ppb, 0.1~1.5 ppb 범위내에 있었다. 직접법을 이용할 경우 약 10 % 이하의 오차내에서 극미량 우라늄의 정량이 가능한 것을 알 수 있었다. Figure 45에는 동일한 지하수시료에 대한 직접법과 농축법간의 감마선 스펙트럼을 비교를 위해서 함께 나타냈다. 지하수시료에서 미지의 화학종으로부터 매질 간섭효과의 가능성을 조사하기 위하여 비례 계통오차의 발생을 평가하거나 특정시료의 교정곡선을 결정할 때 필요한 표준체 부가법을 이용하여 회수를 실험을 하였다. 우라늄 농도가 다른 다섯가지 표준용액을 선정된 지하수시료에 첨가하여 직접법으로 정량하였다. Table 37에 분석결과를 나타냈으며 정량 회수율은 평균 96.5% 이상이었다. 또한 Figure 46a, b에 보인 바와같이 감마선 스펙트럼상에서 간섭효과는 나타나지 않았다.

직접법과 농축법에 의한 분석결과의 비교에서 Table 36에 보인 바와같이 비파괴 중성자 방사화법을 이용한 우라늄의 분석에서 핵적성질, 특히 반감기의 장, 단에 따라 조사시간이 다른 직접법이 사전 농축법보다 분석감도는 낮으나 수용 가능한 정확도를 가질 경우에 신속한 일상 분석법으로서 대량의 시료분석에 유리할수도 있다. 그러나 74.7 keV의 감마선을 측정하여 정량하는 경우에 검출기 차폐물질인 납과의 상호작용에 의한 약 75 keV 부근의 Pb KX-선 및 Al, Ca, Cl, Na, Mg, Mn, K등과 같은 단수명 핵종의 간섭영향을 충분히 검토해야한다. 본 실험에서 사용한 감마선 측정시스템(GEM 25185p, EG&G ORTEC)에서 75 keV 부근의 Pb KX-선의 영향을 알아보기 위한 혼합 표준선원을 이용한 감마선의 측정에서 Pb KX-선 피이크 계측수는 0.01 cps 이하로 무시할 수 있는 수준이었다. 농축법을 이용하는 경우에는 핵적, 분광학적 간섭이 없는 277.6 keV 감마선을 이용하여 분석하였으며 조사된 시료를 충분히 냉각시킨후 계측하기 때문에 측정오차에 영향을 주는 감마분광학적 간섭영향은 적으나 시료의 농축과 계측에 소요되는 분석시간이 길다는 단점이 있었다. 사전농축시에 우라늄의 회수율은 약 88 %이었다. 효과적인 우라늄의 정량법을 비교하기 위하여 농도가 다른 세종류의 지하수시료를 선정하여 직접법과 농축법간 분석결과를 비교하였으며,

다른 화학분석법에 의한 측정결과와 함께 Table 38에 나타냈다. 두방법으로 얻은 결과로부터 UW-1과 UW-2 측정값의 상대표준편차는 5 % 이내이었으나 농도가 10배 이상 낮은 UW-3는 크게 나타났다. 직접법과 농축법에 의해 구한 평균값간의 편차는 20 % 이었으며, 농도가 낮은 UW-3의 경우에는 더 큰 편차를 나타내었으며, 직접법에 의해 구한 값이 크게나타났다. 이것은 표준선원을 이용한 백그라운드의 영향과는 달리 실시료의 측정에서 저에너지 감마선 영역의 백그라운드가 1 MeV 이상의 고에너지 감마선의 강한 방사능에 의해 일부 증가된 영향으로 추정된다. 타 방법에 의한 분석결과를 포함한 우라늄의 평균값은 UW-1의 경우는 12.88 ± 1.91 ppb, UW-3의 경우에는 1.64 ± 0.73 ppb이었으며, 낮은 농도에서 방법간의 큰 편차를 나타내었다. 이상의 결과로부터 농축법에 의한 결과가 보다 정확한 것으로도 볼수있으나 수일 이상의 측정기간을 고려할 때, 1 시간 이내의 짧은 분석시간으로 유사한 불확도를 갖는 직접법이 유용함을 알 수 있었으며, 일상 분석법으로 이용가능한 것으로 평가할 수 있다.

지하수시료내 우라늄의 농도는 시료의 채취시기에 따라 변할 수 있으며 분석결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 임의로 선정한 장소에서 2개월간의 수집시기별 지하수시료의 우라늄의 농도변화를 측정하였다. Table 39에 직접법에 의한 측정결과를 나타냈으며 각 측정값의 상대표준편차는 2~12 %이었고, 채집시기별 측정값의 평균 표준편차는 10.3 %이었다.

본 분석법을 실제 시료에 적용하기위해 식수로 사용하고 있는 대전 및 충청지역 일원의 17개 관정에서 채취한 지하수 시료중의 우라늄 농도를 ^{239}U 법으로 측정하였다. Table 40에 보인바와같이 측정된 우라늄의 농도분포는 지역에 따라 많은 차이가 있었고 1 ppb에서 80 ppb 수준인 것으로 확인되었으며 최근에 보고된 Lee등[62]의 결과와 유사하였다. 각 측정값의 상대표준편차는 4~30 % 범위에 있었다. 농도분포에 대한 통계처리에서 대전지역의 농도범위는 2.5~77.2 ppb 이었고 기하평균과 표준편차는 21.2 ± 0.5 ppb 이었으며, 충북지역의 농도범위는 3.7~42.8 ppb 이었고 기하평균과 표준편차는 11.3 ± 0.4 ppb 이었다. 지역에 따라 우라늄의 농도가 자연수중의 평균 분포값보다 비교적 높게 나타난 것은 충청지역에 널리 분포되어있는 우라늄광의 영향때문인 것으로 추정할 수 있다. 본 방법은 대량의 지하수시료를 신속하게 분석해 낼 수 있는 일상 분석기술로서 이용할 수 있음을 알 수 있었다.

다. 측정불확도 평가 및 숙련도 시험

시험·검사기관 인정제이란 법률 또는 국제기준에 적합한 인정기구가 해당 기준(ISO/IEC 17020, 17025)[63]에 따라 시험·검사기관의 품질시스템과 능력을 평가하여 특정 분야에 시험·검사능력이 있다는 것을 공식적으로 승인하는 것이다. 중성자 방사화분석의 품질관리시스템 구축과 관련하여 한국 시험소 인정제도(Korea Laboratory Accreditation Scheme, KOLAS)[64] 및 ISO에서 요구하는 시험소의 자격요건인 적절한 품질시스템, 자격 및 경험을 갖춘 직원, 교정된 시험장비, 유효한 시험방법, 적합한 환경 및 시설을 준비하였다. 시험소 인정이 필요한 이유는 시험소 품질시스템의 체계적 구축, 시험결과의 품질과 기술적 신뢰성 보증, 고객 및 법률적 요구사항의 충족, 시험성적서의 공인성 확보 및 국제적 수용, 대외적인 신뢰성 확보와 기업(시험소) 이미지 제고등을 들 수 있다. 시험분석결과의 측정표준과의 비교 고리인 측정의 소급성 유지[65]와 최대 측정능력을 평가할 수 있는 측정의 불확도 평가[66]는 국제기구인 ISO의 품질 및 기술요건에 포함이 되었으며 객관성과 신뢰성이 있는 시험분석성적서를 발행하기 위해서는 세계의 모든 분석시험소는 이것을 적용하는 품질시스템을 운영하여야 한다. 품질시스템의 첫 단계는 관련 문서의 준비와 시행이다.[67-70] 본 연구에서는 이 제도의 도입을 위하여 시험자, 품질책임자, 기술책임자의 교육을 이수하고 KOLAS 사무국에 등록을 하였다.

측정불확도란 충분히 타당성이 있는 이유에 의해 측정량에 영향을 미칠 수 있는 값들의 분산을 특성화한 파라미터로서 측정값 $\pm$ 불확도로 표현한다. 측정불확도 인자는 측정표준, 시험편 및 측정량, 측정장비, 측정방법, 환경, 시험자, 기타 불확도 인자들이며 이들에 대한 영향을 고려하여 ‘원자로 중성자 방사화분석에서 측정 표준불확도 표현’ 절차에 따라 작성한 측정불확도 평가의 한 예를 Table 41에 예시하였다.

시험소 품질보증의 한 방법은 숙련도 시험이다. 숙련도 시험이란 시험소간 시험비교방법을 통하여 시험소의 시험 수행능력을 판정하는 것으로 국제표준에 부합되는 여러 가지 방법을 이용할 수 있다. 숙련도 시험은 특정 시험이나 측정에 있어서 개별 시험소의 능력을 확인하고 시험소가 갖고 있는 문제점을 확인하여 초기에 개선하는 활동. 개인의 능력 또는 계측기기의 교정과 관련된 문제점을 도출하며 새로운 시험 또는 측정방법의 유효성을 확립하고 시험소 이용자들에게 신뢰감을 부여하며 시험소간 차이점을 도출하며 표준물질의 값을 설정하고 특정 시험이나 측정절차에 사용하기 위한 적합성 평가를 목적으로 한다. 숙련도 시험의 활용 및 효과는 분석시험방법을 유효화시킬 수 있으며 기술적 능력의 객관적

인 인정을 받을수 있고 시험소 분석수행능력을 향상시킬수 있으며 시험소 이용 고객에게 신뢰감 부여할 수 있고 시험소의 내부 품질관리 절차를 개선시킬수 있으며 인정평가 또는 사후관리 기능을 보완하여 시험소의 시험능력에 대한 외부 감사 기능을 제공하고 국가 또는 국제적으로 소급능력에 대한 추적성 확보가 용이하다.

숙련도 시험 프로그램에서 사용하는 통계학은 ISO/IEC guide 43-1을 기준으로 하며 각 시험소의 분석결과들을 로버스트 통계처리에 의해 구한 Z-score로 분석수행능력을 평가하고 있다. 전체 데이터의 중위수(median)에 근접하는 정도를 수치화한 Z값이 0인 경우에는 분석수행능력이 아주 우수한 것으로 평가하며 ± 1 인 경우에는 만족, $\pm 2 - \pm 3$ 인 경우는 의심스러운 것으로, ± 3 이상일때는 불만족한 것으로 평가하여 outlier로 분류하였다.

본 연구에서는 99년 11월에 KOLAS사무국에서 실시한 지질광물시료(99-9A, 99-9B)에 대한 숙련도 시험에 참가하였으며 그 결과를 Table 42에 나타냈다. 9개 기관이 참가하여 통계처리를 위한 자료로는 부족하였으나 본 시험소의 기관 번호는 4번으로 두시료에서 outlier는 나오지 않았다. A시료에서는 Mn과 K를 제외하고 우수한 것으로 평가할 수 있었으며 B시료에서는 모두 만족할 만한 결과를 얻었다.

제 7 절 대기분진을 이용한 대기환경 관측연구

1. Filter Blank의 분석결과

실제 필터에 채집된 대기분진시료를 정확히 분석하기 위해서는 대기분진을 채집하는데 사용하는 필터내의 극미량 불순성분 원소들의 함량을 알아야만 한다. 채집된 PM_{2.5}와 PM₁₀ 분진시료는 소량으로 필터와 함께 비파괴 분석을 하기 때문에 분진중의 원소의 정확한 농도를 구하기 위해서는 미리 공필터중의 불순물 농도를 측정한 후 필요에 따라 보정을 해야한다. 특히, 저유량 수집기에 의해 수집되는 분진의 양이 상대적으로 적어 농도가 낮기때문에 공필터의 분석은 필수적으로 선행되어야한다. Table 43에는 시료수집에 사용한 두 필터에 대한 분석결과를 나타냈다. Polycarbonate membrane 필터는 단수명 핵종의 분석에 방해가 되는 Al, Cl, Mn, Be, Na 등과같은 원소와 Cr, Ti, V 등과 같은 목적원소의 농도

가 상대적으로 낮은 것으로 나타났으며 중성자 방사화분석에 적합한 것으로 평가하였다. 참고자료로 몇가지 대기분진의 채집에 이용되는 필터의 원소조성을 Table 44에 나타냈다.

2. 저유량 SFU 샘플러를 이용한 도시와 농촌지역의 대기분진 관측연구

(1) 개 요

최근의 급속한 산업 발전, 도시인구 집중화, 자동차 증가의 부산물인 환경오염에 대한 인식과 규제가 증가하고 쾌적한 주변 환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 대기, 물, 토양, 생물 등과 같은 여러가지 환경시료에 대한 분석을 통하여 오염의 정도를 파악하고 오염원을 규명하여 이를 통제하기 위한 노력이 뒤따르고 있다. 위 과정에서 중금속 및 유해원소의 분석에 대한 표준적이고 일상적인 분석법의 확립은 오염원의 규명을 위한 필수적인 첫 단계라 아니할 수 없다. 대기분진은 자연적이고 인위적인 발생에 의한 다양한 원소들을 함유하고 있기 때문에 대기관측시료로 이용되고 있으며, PM_{10} 총분진의 질량농도(TSPM)나 원소의 농도가 높을 때 장·단기적으로 인체보건에 큰 영향을 미치고있다. 특히 최근에는 $PM_{2.5}$ 부유분진에 포함된 중금속에 의한 인체에 미치는 영향에 관심이 집중되고 있으며 부유분진의 수집과 측정분석도 입자크기별로 분별하여 실행하고있다. 중성자 방사화분석법(Neutron Activation Analysis)은 핵반응을 통해 생성시킨 방사성 동위원소로부터 방출되는 방사선을 검색하여 성분원소를 정량하는 핵분석기술(Nuclear Analytical Techniques)중의 하나로써 소량의 시료로부터 미소량원소의 비파괴, 동시 다원소분석이 가능하고 분석감도($10^{-3} - 10^{-7} \mu g$)가 탁월한 분석기술이다. 따라서 대기분진중의 극미량 원소분석에 적합한 것으로 인식되어 있으며[71-77], 일찌기 Dams 등[78] 과 Zoller 등[79]이 대기분진의 분석에 이용하였으며 지금까지 많은 연구보고가 있다. 분석결과는 역학연구, 방출원의 규명, 장거리 이동현상의 연구, 오염도 및 위해도 평가 및 인체보건 및 영양 관련 환경연구 등에 이용되어 왔으며, 대기오염을 관리하기 위한 저비용 분석기술로 평가되고있다. 특히, 97년도의 동남아지역에서 발생한 화재에 의한 연무현상, 동북아지역에서의 지속적인 봄철의 황사현상과 같이 대기 오염물질은 특성상 광범위한 지역에 영향을 미칠 수 있으므로 경우에 따라서는 인접한 국가간의 외교적인 문제로까지 확대되는 경우가 종종 발생된다. 최근에 우리 나라와 중국은 중국 동북구(산둥, 랴오둥 반도)지역의 공업화로 인한 대기오염물질의 이동경로 조사연구

를 양국 합동으로 추진하고 있다. 이렇게 국가간 또는 실험실간의 측정 결과를 상호비교하기 위해서는 분석방법에 대한 검증이 필수적이다. 이와 관련하여 최근에는 국제원자력기구의 주관의 국제협력사업이 NAA, PIXE, XRF 등과 같은 핵분석기술을 비롯하여 ICP, AAS등을 이용한 대기환경오염 응용연구가 지역간 협동연구과제(UNDP/RCA/IAEA Project on Air Pollution and Its Trends)로 수행되고 있기도 하다. 본 연구는 중성자 방사화분석을 대기먼지중의 미량원소의 정량을 위해 인증 표준시료를 이용하여 분석결과를 비교 검증한 후, 선정된 조건하에서 포집한 부유분진시료의 동시 다원소분석을 실시하였고, 두 지역에서 수집된 입자크기별 부유분진의 질량 및 시료내 중금속 및 미량 원소를 정량하여 지역별, 시기별 농도 분포를 구하고 그들의 발생원을 추정하고 상관성을 고찰하였다.[37, 38, 41]

(2) 대기분진시료의 수집

대기분진 수집을 위하여 오염가능성이 있는 도시지역과 비교적 청정한 농촌지역을 선정하였고, 1.5m 높이로 설치한 두 대의 저유량 분진수집기(Gent stacked filter unit)로 미세입자($<2.5\mu\text{m}$)와 조대입자($2.5-10\mu\text{m}$)로 구분하여 polycarbonate filter($\phi 47\text{mm}$, Nuclepore)상에 수집하였다. 시료 수집시기의 환경 기상조건(기압, 온도, 상대습도, 풍향, 풍속, 날씨)들을 기록하고(Table 45), 초기유속은 약 18 l/min 로 조정하여 24시간동안 주 2회씩 수집하였다. 각 시료수집장소에 설치하기 전에 동일한 조건하에서 두 수집기의 효능을 시험하였으며 압력, 유량, 유속 및 분진수집량등에 약간의 차이가 있었으나 무시할 수 있는 정도임을 확인하였다. 수집된 필터시료는 항온(25°C), 항습상태(50%)의 저장고에서 1일간 보관한 후 전기적 하전을 중화시키기 위해 ^{210}Po 선원이 넣어둔 저울(Mettler, readability : $0.1 \mu\text{g}$)에서 칭량하였다.

(3) 대기분진시료의 분석

분진시료는 1996년 4월부터 1998년 5월까지 장기간 수집하였다. 두 지역에 대한 월평균 PM_{10} 총분진량(TSPM)과 21종 원소(Al, As, Br, Ce, Cl, Co, Cr, Fe, K, I, La, Mg, Mn, Na, Sb, Sc, Se, Sm, Ti, V, Zn)의 월평균농도를 구하였다. 도시지역과 농촌지역의 측정결과를 각각 Table 46과 Table 47에 나타냈다. 일반적으로 중금속 원소의 농도는 4, 5월에 높게 나타났으며, 다른 시기에 지표로부터 기인된 원소의 농도는 큰 변화를 보이지 않았다. 이것은 대륙으로부터 날라오는 황사의 영향에 대한 가능성을 배제할수 없음을 예시한다. Figure 47과 Figure 48에는 각각 시료 전 수집기간 동안 측정된 수집일별 TSPM의 농도와 계절별

평균농도를 나타냈다. Figure 49에는 전 수집기간 동안 측정된 TSPM중의 원소의 평균농도를 나타냈다. Figure 50과 Figure 51에는 도시와 농촌지역의 계절별 원소의 평균농도를 나타냈다. Table 48와 Table 49에 나타낸 바와같이 전 측정기간 동안의 도시지역과 농촌지역의 년평균 TSPM의 농도는 각각 $59.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $41.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 한편 두 지역의 총분진량에 대한 기하학적 년평균농도는 각각 $48.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $35.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 월평균농도는 정규분포함수에 가까운 것으로 볼 수 있다. 이들 농도는 국내 대기환경 기준치($80\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 크게 낮은 수준으로서 농촌지역이 더 낮았으며, 시료수집 장소가 다른 지역에 비해 비교적 청명하였음을 가르킨다. 두 지역에서 조대입자의 질량농도가 미세입자보다 높았으며, 도시지역과 농촌지역의 TSPM에 대해 그 비는 각각 0.74, 0.79이었다. 또한 인위적인 발생원소의 비는 자연발생적인 원소의 비보다 큰 것으로 나타났다.

분진입자의 크기에 따른 원소농도의 비교에서, 도시지역에서는 As, I, Sb, Se, V, Zn을 제외하고 조대입자중의 농도가 미세입자에서 보다 높았다. 원소의 농도간 차이는 대기분진의 입자크기에 의존하였고 지표면으로부터 유래된 원소의 농도는 인위적으로 발생된 것보다 높았다. 두 지역에서 As, Cd, Cr, Zn, V등과 같은 유해 중금속 원소들의 농도는 도시지역이 높았으며 미세입자에서 두드러진 현상을 보였다.

(4) 발생원의 확인

오염원을 확인하는 간단한 방법은 Enrichment Factor, EF를 구하는 것이다. 원소의 EF값은 다음식과 같이 시료중의 분석대상원소와 기준원소의 비를 기준물질, REF(e.g. 암석, 토양, 해수 등)과 대기분진, APM 중의 분석대상원소와 기준원소의 비로 나눈 값이다; Enrichment Factor, $EF = (X_i/C_i)_{\text{APM}} / (X_i/C_i)_{\text{REF}}$. 여기서 X와 C는 각각 분석대상원소와 기준원소의 농도이다. 일반적으로 대기분진에서 EF를 계산할 때 기준원소는 토양이나 암석에서 일정한 양으로 존재하는 Al 이나 Sc를 이용한다. EF값이 10 이상일때는 인위적인 발생원으로 간주한다. 본 연구에서는 Mason의 데이터와 기준원소로 Sc 를 이용하여 EF를 계산하였다.[80, 81] Figure 52 에는 두 지역의 각 원소에 대한 EF값을 나타냈으며 그 값은 $10^0 \sim 10^4$ 범위이었다. 측정결과로부터 두 부류의 방출원으로 분류됨을 알수 있으며 도시지역의 값이 농촌지역의 값 보다 좀 더 큰 것으로 나타났다. 두 지역 모두 As, Br, Cl, Cr, Cu, I, In, Sb, Se, V, Zn 과같은 금속 원소의 EF값 크게 나타났고 인위적인 요인으로 추정할 수 있다. 이러한 경향은 대기오염원이나 방

출수준을 평가하는데 이용할수 있음을 가르킨다. 특히, 입자별 EF값의 비교에서 중금속 원소와 같은 인위적 원소는 미세입자의 경우가 조대입자보다 더 크게 나타났다으며 농촌지역의 결과에서 두드러지게 나타났다. 이것은 부유분진의 입자크기에 따라 인체에 대한 위험도 및 위해도의 기여정도에 큰 차이가 있을수 있음을 예시한다.

(5) 통계적 상관성 분석

회귀분석은 두 계량값간의 상관성 즉, 다른 환경조건간의 상관관계를 조사하고 환경인자의 변화를 예시하기 위한 정보를 제공하는 환경데이터의 통계처리에 이용된다. 자연적 발생원소 및 인위적 발생원소와 TSPM간의 상관성을 알아보기 위하여 Fe, Sc와 TSPM 및 As, Sc와 TSPM에 대하여 각각 선형 회귀분석을 하였으며 Figure 53와 Figure 54에 나타났다. 전자의 경우에 두 계량값간의 회귀선의 기울기는 0.8~1 범위이었으며 상관성이 높은 것으로 나타났다. 후자의 경우에는 상관성이 적거나 없는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 조대입자의 경우에 현저하였다. 분석결과로부터 TSPM은 주로 자연적 발생원소들이 구성 성분이며 인위적 발생원소는 TSPM의 질량농도에 크게 기여하지 않는다는 것을 암시한다. 한편 두 계량값간의 선형관계의 척도로 이용가능한 상관계수(일반적으로 -1~+1 사이)를 두 지역에서 입자별로 각 원소와 TSPM 간의 값으로 계산하여 Table 50과 Table 51에 나타냈으며 상관성 분석의 결과와 유사한 경향이 있음을 알수 있었다.

실제 수집시료로부터 21종의 원소를 정량하였으며, 분석결과를 간단한 통계처리법에 대기오염 방출원을 조사하는데 이용하였고 회귀분석에 의한 상관성을 검토하여 예측결과와 일치함을 통하여 간접적으로 분석결과의 상대적인 신뢰도를 확인할 수 있었다. 기준자료로서 국내의 각 오염발생원에 대한 source profile을 이용할 수 있을 경우에는 수용모델이나 CMB모델등 고급 해석기법을 이용하여 보다 정확하고 구체적인 오염 방출원 및 위해도 평가에 대한 해석도 가능할 것이다.

3. 저유량 SFU 샘플러를 이용한 도시 공단지역의 대기환경 관측연구

본 연구는 핵분석기술을 이용한 대기환경오염연구의 지역간 국제협력사업의 일환으로 수행한 국제 공동연구과제(UNDP/RCA/IAEA Project on Air Pollution

and Its Trends)로서 중성자 방사화분석법과 저용량 대기분진 채집기(Gent Stacked Air Sampler)를 이용하여 수집된 소량의(< 1mg) 환경시료중의 미량 원소분석에 응용하기 위하여 대기분진중 원소의 농도 및 발생원이 상이할 것으로 예상되는 대전의 두 지역(주거지역과 공단지역)을 선정한 후 오염원의 분류가 가능할것으로 추정되는 주중과 작업을 하지 않는 주말로 나누어 수집된 시료를 정량하여 각 원소들의 농도준위를 결정하였으며 Enrichment Factor의 계산에 의하여 발생원을 크게 두가지로 분류하고 회귀분석을 이용한 간단한 통계처리에 의해 상관성을 고찰하였다.

(1) 시료수집 및 처리

대기면지의 수집을 위하여 대전지역의 대화동1,2공단과 연구단지내 한곳(한국 원자력연구소)을 선정하였고, 1998년 11월부터 1999년 10월까지 저용량 Gent SFU 분진수집기로 미세입자(<2.5 μm)와 조대입자(2.5-10 μm)로 구분하여 Polycarbonate Membrane Filter(47mm ϕ , 0.4, 8 μm pore size, Nuclepore) 상에 수집하였다. 시료 수집시기의 환경 기상조건 및 주위조건들을 기록하고, 유속은 18 L/min 로 조정하여 24시간동안 주 2회씩, 금요일과 토요일에(근무일과 휴무일로 고려) 수집하였다. 수집전·후의 필터시료는 항온(25 $^{\circ}\text{C}$), 항습상태(50%)에서 약 1-2일간 보관한 후 전기적 하전을 중화시키기 위해 ^{210}Po 알파방출 선원이 놓여진 Mettler사의 저울(측정능력: 1 μg)로 칭량하였다. 또한 수집된 대기분진중의 black carbon의 양을 결정하기 위하여 IAEA로부터 제공받은 Smoke Stain Reflectometer(Model 43D)를 사용하여 수집전·후의 반사율을 정해진 절차에 따라 측정·기록하였다.

(2) 중성자 방사화분석

분석시료의 방사화를 위하여 한국원자력연구소의 연구용 원자로, HANARO의 공압 이송관($\Phi_{\text{th}} = 1.7 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$)으로 설치된 조사시설을 이용하였다. 모든 시료는 동일한 기하학적 조건에서 조사하여 조사시간 동안의 중성자속의 변화등에 영향을 받지 않게 하여 분석오차를 최소화시켰으며, 정확한 중성자속을 측정하기 위하여 activation wire(Au, Cu, Mn, Fe : Reactor Exp. 회사의 순도 99.99%) 를 사용하였다.

조사된 시료의 특정 방사성 핵종으로부터 방출되는 특성 감마선을 반감기에 따라 구분된 일정시간 동안 계측하여 각 원소의 방사능 계수율을 측정하였다. 방사능 계측에 사용한 고순도의 게르마늄 반도체 검출기는 EG& G ORTEC사 제품으로서 25% relative efficiency, ^{60}Co 의 1332 keV에서 1.9 keV FWHM 및

Peak to Compton ratio가 45 : 1 이며, 10cm 두께의 납으로 차폐시켜 자연 방사능 및 외부 방사선의 영향을 최소화 하였고, 데이터 수집 및 해석을 위한 16K-Multichannel Analyzer와 personal computer에 연결하였다. 또한 에너지 및 검출 효율을 교정해주기 위해 NIST로 부터 보증받은 NEN사의 디스크형 표준 복합선원을 사용하였다. 계측시간 동안의 통계적 오차를 줄이기 위해 불감시간은 5%이하로 유지하였으며 감쇠 및 pile-up의 보정은 MCA와 주증폭기에서 자동적으로 수행되도록 구성하였다. 계측된 데이터로부터 원소의 농도를 계산하기 위하여 Labview로 작성한 중성자 방사화분석용 계산프로그램을 사용하였다.

분석값의 품질관리를 위하여 NIST SRM 1648, Urban Particulate Matter와 역시 NIST의 표준용액을 분석하여 각 원소에 대한 보정계수로 사용하였으며 또한 IAEA에 의해 주판된 데이터 상호 비교연구를 통하여 신뢰도를 평가하였다. 수집된 실제시료는 예비실험을 통해 정해진 조사시간, 냉각시간 및 계측시간등의 일정한 조건에 따라 일상적으로 분석이 수행되었다.

(3) Black carbon의 분석[68]

측정된 반사율을 이용하여휠터면적 cm^2 당의 black carbon의 양을 결정하기 위하여 IAEA에 의해 주판된 훈련과정에서 Dr. Cohen이 제시한 아래의 수식을 사용하였다.(PM_{2.5}에만 적용됨)

$$\text{Black Carbon} = [100/2e]\text{Ln}[R_o/R] \quad (\text{단위} : \mu\text{g}/\text{cm}^2) \quad (14)$$

여기서 e : Mass absorption coefficient, Dr. Cohen의 제안값 $7 \text{ cm}^2/\mu\text{g}$,

R_o : 초기반사율, 일반적으로 100,

R : 후기 반사율

대기중의 black carbon의 농도를 구하기 위하여 윗식에 의해 계산된 값에 휠터의 면적 17.34 cm^2 를 곱한 후 채집공기부피로 나누어 주어 단위 대기부피당(m^3)의 black carbon의 농도를 계산하였다.

(4) 대기분진농도 및 원소농도의 측정

1998년 11월부터 1999년 10월까지 수집된 대기분진시료의 측정분석결과를 기상자료와 함께 Table 52에 종합하여 정리하였다. 두 채집지역과 입자크기에 따른 월평균 TSPM 농도의 변화와 년평균 농도와 입자크기별 비를 구하였고 그 결과를 Table 53에 나타내었으며 Figure 55에 월별 농도변화를 도시하였다. 또한 Al, As, Cr, Hg, Sb, Zn를 비롯한 25종 원소의 년평균 농도와 입자크기별 비를 구하

였고, 측정결과를 Table 54에 나타냈다. 월평균 질량농도의 변화에 대해 두 시료 채집지역을 비교하면 일반적으로 조대입자의 TSPM이 대화동공단에서 높게 나타났다으며 미세입자의 경우에는 연구소가 높게 관측되었다. 또한 3월에서 5월 사이에 조대입자의 TSPM이 다른 달에 비해 두 지역모두에서 크게 나타났다. 이것은 대륙으로부터 날라오는 황사의 영향에 대한 가능성을 배제할수 없음을 예시한다. 조대입자와 미세입자의 TSPM을 비교하면 대화동의 경우에는 조대입자의 농도가 크게 나타났으나 연구소의 경우에는 2월에서 5월을 제외하고는 미세입자가 높게 관측되었다.

원소농도의 지역간 비교에서, 대화동지역에서는 모든 원소에서 조대입자중의 농도가 연구소보다 높게 나타났으며 미세입자의 경우에는 원소에 따라 다른 결과를 보여주었다. 입자크기에 따른 비교에서, 대화동지역에서는 I를 제외한 조대입자의 모든 원소농도가 미세입자보다 높았으나 연구소의 경우에는 원소에 따라 다르게 관측되었다. 또한 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 의 비율로 대화동과 연구소를 비교한 결과 대부분의 원소에서 연구소가 더 큰 값으로 나타나 예상과는 다른 결과를 나타냈다. 이에 대한 결과를 Figure 56에 도시하였다.

근무일과 휴무일로 나누어 원소농도의 평균을 구하여 비교하여 본 결과 I과 In이 휴무일의 값이 크게 나타나 이상값으로 나타났고 다른 원소들은 거의 비슷한 농도로 관측되었다. 이는 근무일에 원소농도가 크게 나타날 것이라는 예상과는 다른 결과를 나타냈다. 이에 대한 결과를 Table 55과 Figure 57에 나타내었다.

(5) 발생원의 확인

오염원을 확인하는 간단한 방법은 Enrichment Factor, EF를 구하여 분류하는 것이다. 원소의 EF값은 시료중의 목적원소와 기준원소의 비를 기준물질(e.g. 암석, 토양, 해수 등)중의 목적원소와 기준원소의 비로 나눈 값이다. 일반적으로 대기분진에서 EF를 계산할 때 기준원소는 토양이나 암석에서 일정한 양으로 존재하는 Al 이나 Sc를 이용한다. EF값이 10 이상일때는 인위적인 발생원으로 간주한다. 본 연구에서는 Mason의 데이터와 기준원소로 Sc를 이용하여 EF를 계산하였다.[80, 81] Table 56에는 두 지역의 각 원소 및 입자크기에 따른 EF값을 나타냈으며 EF의 값 10을 기준으로 크게 두 부류의 방출원으로 분류됨을 알수 있었다. 즉 자연발생원에 의한 원소는 Al, Fe, Ca, Ti, Na, La 등으로 볼 수 있으며 As, Cr, Hg, Sb, Se, Zn 등과 같은 중금속 원소들은 두 지역 모두에서, 특히 미세입자에서 EF값이 크게 나타났고 인위적인 방출요인으로 추정할 수 있다. 이러한 경향은 대기 오염원이나 오염수준을 평가하는데 이용할 수 있음을 가르킨다.

입자별 EF값의 비교에서 거의 모든 원소에서 미세입자의 EF값이 조대입자보다 크게 나타났으며 앞서 언급했듯이 특히 중금속 원소와 같은 인위적 원소는 미세입자의 경우가 조대입자보다 5배 이상 크게 나타났다. 이에 대한 결과를 Figure 58에 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 에 대한 EF의 비율로 나타내었다. 근무일과 휴무일로 분류하여 EF를 계산한 결과 원소농도와 같이 I과 In을 제외하고는 커다란 차이를 보이지 않았다. 이에 대한 결과를 Table 57와 Figure 59에 나타내었다.

(6) 기준원소와의 상관성 분석

기준원소 Sc와 타원소와의 상관성 분석을 위하여 EF값에 의한 오염 발생원을 분류한 두 집단에서 각각 대표적인 4개의 원소를 선정하여 원소별 상관계수를 구하여 상관성을 고찰하였다. 즉 자연발생원으로 추정되는 원소로 Al, Fe, K, La를 인위적원으로 고려되는 As, Cr, Sb, Zn를 선택하였다. 자연발생원에 의한 원소는 조대입자의 경우 높은 상관성을 나타냈으며 미세입자의 경우에는 Al, La는 높은 상관성을 Fe, K는 낮은 상관성 결과를 보였다. 자연발생원인 4개 대표원소에 대한 월별농도의 변화를 Figure 60에 나타냈으며 이는 TSP의 월별 농도의 변화량과 비슷한 추이를 보이고 있다. 또한 기준원소인 Sc와의 상관성에 대한 그림을 Figure 61에 도시하였다. 또한 인위적원인 4개 대표원소의 월별변화를 Figure 62에 나타내었다. 인위적 발생원에 의한 원소는 조대입자의 경우에는 As 원소가 낮은 상관성을 보였으며 다른 원소들은 입자크기에 상관없이 거의 상관성이 없는 결과를 나타냈다. 위에 언급한 8개원소와 기준원소 Sc 및 TSP에 대한 상관계수 Matrix를 Table 58에 나타내었다. 앞에서 고찰한 바와 같이 상관성은 두부류의 원소들간에 나타났다.

(7) Black carbon의 측정결과

반사율의 측정에 의한 미세입자중의 black carbon의 대기중 농도를 계산하였다. 월별 평균값을 Table 59에 나타내었으며 Figure 63에 도시하였다. 년평균값의 계산결과 대화동의 경우에는 평균값이 $2.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 연구소의 경우에는 $3.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 또한 미세입자의 질량농도와의 상관성을 알아보기 위하여 상관계수를 구한결과 R^2 값이 대화동의 경우 0.67, 연구소의 경우 0.69로서 상관성이 있는 결과를 나타냈다. 즉 질량농도가 높아질수록 black carbon의 양이 비례적으로 증가함을 알수 있다. 이에 대한 결과를 Figure 64에 도시하였다.

제 8 절 플라스틱 소재의 정밀 분석법 개발 [82]

1. 연구개발의 목적 및 필요성

가. 목 적

- (1) 플라스틱소재의 정밀 무기분석을 위한 중성자 방사화분석기술 확립
 - 분석과정 확립 : 무오염 전처리기술 및 시료용기 파손 방지기술 확립
 - 분석과정의 최적화 : 시료 양, 중성자 조사조건, 냉각조건 및 측정조건
 - 플라스틱 소재 중 무기성분의 용출 및 용액중 금속이온의 흡착 특성
 - 분석수준 향상 : 10 ppm급 → 10 ppb급, 10% RSD → 5% RSD
- (2) 중성자 방사화분석을 기존 분석기술의 검증 및 보완을 위한 지표 분석체계 구축
 - ICP-AES : 시료 전처리 과정
 - XRF : 표준시료 제조 및 검증

나. 중요성

산업이 발달하고 인류의 생활 환경이 향상되면서 전문분야에서 뿐만 아니라 일반 대중에 이르기까지 분석화학에 대한 필요성과 중요성이 크게 고조되고 있다. 분석의 대상과 성분도 이전보다 훨씬 다양해지고 극미량까지도 정확하게 분석할 수 있는 첨단 분석의 필요성이 점차 대두되고 있다. 원료에서 유용, 유해 성분의 정확한 분석과 최종 제품에서의 불순물의 분석, 그리고 이들 원료 및 제품이 환경 친화적 인가를 확인하는데는 다양한 분석방법이 총 동원되어야 할 정도로 복잡해져 가고 있다. 이중 원소분석은 소재의 물리화학적 특성에 미치는 영향이 매우 클 뿐만 아니라 환경학적인 측면에서도 지표가 되고 있는 분석의 근간이라 할 수 있다. 다양한 소재 및 환경시료 중의 원소분석에는 여러 가지 분석법이 있으며, AAS(Atomic Absorption Spectrometry), ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry), ICP-MS (ICP-Mass Spectrometry), XRF(X-ray Fluorescence) 등이 널리 이용되어 왔다.[83, 84] 이들 각 분석법은 각각 특징이 있고 고유의 장점과 단점을 가지고 있으므로, 주어진 시료와 분석하고자 하는 성분의 종류 및 요구되는 검출한계(Detection Limit)를 충분히 고려하여 분석방법을 선택하고, 선택된 분석방법의 최적조건을 잡는 것이 분석의 정도라고 할 수 있을 것이다. 따라서 새로운 분석법의 개발은 물론 기존의 분석방법들에 대해서도 이러한 산업과 사회구조 변화에 적절히 대응하기

위해서 지속적으로 연구해야만 할 것이다.

플라스틱 소재는 일상 생활용품으로 그 사용 범위가 매우 광범위하며, 최근 금속 소재의 대용품으로 특수소재의 개발이 활발히 진행되고 있는 차세대 소재 중의 하나이다. 완구, 식품 및 의약품기와 같은 일상 용품은 그 용도에 따라서 중금속과 같은 인체 유해한 성분의 엄격한 규제가 필요하고, 고순도시약 용기, 실험기구와 같은 특수 목적의 용도의 소재는 역시 용도와 무기성분의 종류에 따라서는 극미량까지도 측정해야 할 필요가 있다. 예로서, 반도체 시약용기는 담겨있는 시약으로 소재 내에 함유되어 있는 불순물이 용출 되지 않아야 할 것이며, 중성자 조사용기와 같은 특수용도의 플라스틱 소재는 중성자와 반응확률이 높은 성분이 극미량이라도 존재하면 조사용기의 재료로 사용할 수 없으므로 극미량의 성분 대한 고감도 분석이 필요하다. 이러한 플라스틱 소재는 무기용매에 잘 녹지 않고, 표준물질이 상용화되어 있지 않기 때문에 무기성분의 분석이 범용의 분석법으로는 매우 곤란하여 비파괴/절대분석이 가능한 중성자 방사화분석법의 확립이 매우 필요한 분야이다. 그러나, 중성자 방사화분석을 이용하여 플라스틱 소재를 분석기 위해서는 중성자 조사용 시료캡셀의 크기에 맞도록 대형시료를 파쇄해야 하나 이 과정에서 금속제 기구를 사용하기 때문에 극미량의 금속성분분석에 커다란 오차의 요인으로 작용하고 있다. 또 한 가지 중성자 방사화분석에서 해결해야 할 사항은 플라스틱 시료를 중성자조사시 시료 자체로부터 생성되는 수소, 메탄 등의 기체에 의한 시료용기의 파손 문제를 우선 해결해야 한다. 본 연구를 통하여 시료전처리과정의 금속성분의 오염문제와 중성자 방사화분석만의 독특한 문제인 시료용기 파손문제를 해결하고자 하였다. 또한 연구과제 수행 중에 새로이 착안한 것은, 중성자 조사에 필수적인 플라스틱 캡셀을 국산화하는 것이었다.

2. 연구개발 수행내용 및 결과

가. 개 요

중성자 방사화분석(NAA : Neutron Activation Analysis)은 세계적으로도 범용의 분석법은 주로 어려운 전처리과정이 필수적인 환경시료, 지질, 광물자원 중의 유용성분 및 지화학적 성분의 분석에 이용되어 왔으나 최근에 고순도소재 분야와 환경측정 분야에서 극미량의 무기원소 분석에 이용도가 급격히 늘어나고 있는 추세에 있다.[85-87] 중성자 방사화분석은 비파괴 측정분석을 할 수 있으며 점정(calibration)과정이 단순하고 정확성이 높다는 것이다. 이것은 시료의 방사화

를 위해 사용되는 중성자 및 측정되는 γ -선이 하전입자나 X-선과 달리 시료매질을 거의 완전히 투과하므로 matrix 방해 효과를 거의 무시할 수 있기 때문이다. 고감도, 낮은 오염위험성, 간단한 시료준비, 검정(calibration)의 용이성, 그리고 핵반응을 이용하는 특징 때문에 중성자 방사화분석은 비교실험(intercomparison runs)에 가장 빈번히 사용되고 있다.[88-92] 소재의 전기, 전자적 특성 및 기계적, 열적 특성은 소재 자신의 물리화학적 성질에 따라서 결정되지만 소재에 함유되어진 미량 혹은 극미량의 불순물에 의해서도 매우 큰 영향을 받는다.[93-96] 고순도 소재 중에 함유되어 있는 불순물은 두 종류로 구별할 수 있는데, 한가지는 소재자체와 물리화학적 성질이 매우 유사하여 분리되지 않고 잔존하는 친소재성 불순물이고 다른 한가지는 소재의 제조 혹은 가공 중 기구나 주변으로부터 유입되는 유입 불순물이다. 이러한 고순도 소재의 분석에서 가장 주의해야 할 것은 제 3의 불순물이라고 할 수 있는 분석과정 중 시약이나 기구로부터 오염불순물이다. 중성자 방사화분석은 비파괴 분석이 가능하여 이러한 오염불순물에 의한 분석오차를 배제할 수 있는 방법으로 고순도소재의 분석에 매우 적합하다 할 수 있을 것이다. 특히 난용성 혹은 불용성의 주 소재중의 극미량 불순물 분석에서 중성자 방사화분석이 탁월한 장점으로 이용되어지고 있다.

고분자 소재의 경우, 화학의 오랜 역사에 비하여 그리 길지 않은 역사를 가지고 있으나, 그 진보 속도가 매우 빨라서 전자공학, 원자력과 함께 현대의 기술혁신의 중요한 주축을 이루고 있다. 고분자는 인간의 의식주와 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며 그 역할이 매우 크다고 할 수 있다. 천연 고분자를 시작으로 합성 고분자, 생체 고분자 분야 등으로 그 영역이 날로 확대되고 있다. 이와 같이 여러 가지의 의식주에 편리한 신기술의 개발에 고분자가 차지하는 비중이 크며, 그리고 이러한 고분자의 개발에 고분자 분석이 기초적인 역할을 하고 있다는 것을 알 필요가 있다.[96] 고분자중의 불순물의 분석으로서 공업재료의 내열성에 관련한 고분자 분석의 일종이며, 사회적인 관련성을 근거로 하면 고분자식품중의 불순물의 분석이 중요시되어 왔다. 특히 최근에 이용 가능성이 확인되고 있는 유기반도체 혹은 원자로 재료 물질과 같은 특수 목적에 이용되는 경우, 극미량의 무기성분에 대한 정확한 분석 및 규제가 필요하게 되었다.[97, 98] 고분자 소재 중의 무기불순물의 분석에는 AAS, ICP-AES와 같은 용액화 분석법과 범용의 XRF방법이 주로 이용되었다. 그러나 고분자 소재를 용해시키기 위해서는 회화(ashing) 및 용해의 두 단계를 거쳐야 하며 이 과정은 시간과 노력이 많이 드는 것은 물론이고 미량 불순물의 분석에서 가장 우려되는 오염의 위험성이 매우 높

다. 비파괴 분석측면에서 보면 XRF 방법이 있겠으나 이 역시 Disc나 pellet 형태로 제작해야 되기 때문에 여전히 불순물의 오염 우려가 높고 분석감도가 떨어지는 단점을 가진다. 중성자 방사화분석의 경우 고분자 소재를 회화시키거나 용해시키지 않고도 비파괴로 그리고 고감도로 용이하게 분석이 가능하다. 더욱이 고분자물질의 주성분인 탄소, 수소, 산소, 질소 등은 중성자 방사화분석에서 분석 방해 현상이 전혀 없기 때문에 가장 용이한 시료라고도 할 수 있다. 다만, 중성자 방사화분석을 이용하여 고분자 소재 중의 미량 무기성분을 분석하는데 있어 문제점은 중성자 조사시에 고분자 사슬의 절단 및 산화반응 등으로 인하여 생성되는 기체압력에 의하여 시료용기가 파손될 수 있다는 것이다. 또 한가지 주의 사항은 중성자 조사용기의 크기가 제한되어 있기 때문에 시료의 크기를 알맞게 절단해야 한다는 것이다. 이 절단 과정은 여타 분석에서도 같은 문제로 작용할 것이나, 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하여 고분자 소재 중의 미량 혹은 극미량 무기 불순물의 분석법을 개선하고자 하였다.[99, 100]

나. 연구수행내용

- (1) 고감도, 고정밀 분석을 수행하기 위해서는 기존의 대형시료 절단방법인 금속제기구 이용은 오염의 원인이 될 수 있어 액체질소를 이용한 냉동파쇄 기술을 개발하여 시료 전처리과정을 확립하였다.
- (2) 중성자에 플라스틱시료를 조사시키는 과정에서 생성되는 수소 및 메탄에 의한 시료용기 파손방지 기술을 개발하였다.
- (3) 기존의 분석법으로 전문기업체에서 사용해오던 ICP 및 XRF의 분석과정 검증 및 표준시료의 개발을 선도하였다. (Table 60-65)
- (4) 일상용 플라스틱 중의 인체 유해성분의 분석 및 장기간의 용액보관시 무기성분의 용출/흡착특성 측정 기술을 개발하였다.
- (5) 중성자 방사화분석의 필수품인 중성자 조사용 캡슐의 국산화를 위한 국산 원료선정에 활용하여 결과적으로 외화유출을 방지하는데도 기여한다.

다. 연구개발 결과

- (1) 액체질소를 이용한 냉동파쇄 방법으로 대형 플라스틱 소재의 준비 과정에서의 오염을 방지할 수 있는 시료전처리 기술을 개발하였다.(Figure 65)
- (2) 이중 용기 및 aperture method를 이용하여 중성자 조사시 시료용기의 파손을 방지하고 다량의 시료를 장시간 중성자 조사시킬 수 있게 함으로서 결

과적으로 분석의 감도 및 정확도를 향상시킬 수 있었다.

- (3) 일상용 플라스틱 제품의 인체 유해성분의 용출 특성을 국가 시험규격과 비교한 결과 타 측정 기술보다 감도가 훨씬 우수함을 확인하였다.(Table 66, 67)
- (4) 반도체시약 혹은 고정밀 분석에 사용하는 표준시약의 보관조건에서 무기성분의 용출/흡착측정 기술을 개발하여 그 특성을 밝히었다. (Table 68-75)
- (5) 개발된 고감도 분석기술을 이용하고, 기업연구소의 협조를 얻어 전량 수입에 의존해 오던 중성자 조사용 캡슐의 국산 제작을 통하여 연간 약 5,000만원의 수입대체효과를 획득하였다.
- (6) 연구결과를 국외전문잡지(J. Radioanal. Nucl. Chem.) 및 국내전문지(고분자 과학과 기술-지상강좌, 대기환경학회지, 자원연구소 기관지)에 게재하였고, 관련학회 발표(한국분석과학회, 한국대기환경학회, 한국고분자학회)에 발표하여 중성자 방사화분석기술의 이용성을 극대화하는데 일조하였다.

3. 목표 달성도 및 대외기여도

가. 목표 달성도

본 연구의 목표는 플라스틱 소재에 함유되어 있는 미량 혹은 극미량의 무기성분의 고정밀분석을 위한 중성자 방사화분석기술의 확립이었다. 이는 또 과제인 “중성자 방사화분석 이용기술 개발”의 목표와 잘 일치하는 것은 물론 분석과학 분야에서 매우 어려운 분석법중의 하나로 알려져 있는 고분자 소재의 무기분석법을 개발하고 향후에도, 일반 분석법으로 어렵거나 불가능한 분석분야를 중성자 방사화분석을 이용하여 개척함으로써 국내 중성자 방사화분석 기술수준의 위상제고를 통하여 국내 분석수준을 한 단계 향상시키는 물론 나아가서 관련분야의 발전을 촉진할 수 있을 것이라 판단한다.

목표의 달성도는 결론적으로 말해서 100% 이상이다. 이유는 중성자 방사화분석법 개발이라는 당초의 목표를 성공적으로 달성하였음은 물론 일반 분석법(예, ICP-AES)의 분석과정을 동시에 확립할 수 있었고, 국외로부터 전량 수입에 의존하던 중성자 조사용 캡슐을 국산화하는데 결정적인 역할을 담당하여 연간 약 5,000여만원의 외화를 절감할 수 있게 되었기 때문이다. 중성자 조사용 캡슐의 국산화는 연구비 절감에도 한 몫을 담당하여 연간 약 4,000만원의 연구비를 절약할 수 있게 될 것이다. 이러한 외화유출 억제, 연구비 절감 효과는 향후 중성자

방사화분석의 이용이 더욱 활발해질 것을 감안한다면 그 효과는 더욱 증가하게 될 것이다.

나. 대외 기여도

연구개발 결과의 대외활용을 위하여, 관련 학회(한국고분자학회)에서 특강발표를 하였고, 내용을 정리하여 관련학술지(고분자 과학과 기술)를 통하여 지상강좌를 하였다. 또한 분석관련 학회(한국분석과학회, 한국 환경분석학회) 및 국제 학술지(J. Radioanal. Nucl. Chem.)에도 논문의 발표 및 투고를 하여 중성자 방사화 분석 이용의 극대화를 모색하였다. 플라스틱 소재 관련 연구기관 및 산업체에 대한 기여내용은 크게 두 가지로 요약 할 수 있다. 첫 번째는 신소재 개발에 필요한 플라스틱 소재중의 극미량 무기성분의 분석분야이었고, 두 번째는 XRF나 다른 분석법에 사용할 표준물질의 제조분야 이었다. 또한 식품 및 의약품 그리고 완구와 같은 일상 생활에 널리 이용되는 플라스틱 소재의 인체 유해성 평가분야에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또 다른 특별한 분야는, 중성자 조사용 캡슐의 경우에서와 같이 특수 용도로 사용되는 플라스틱 소재의 품질검사 분야가 될 것이다.

4. 연구개발결과의 활용계획

1) 분석분야

- 플라스틱 소재 중의 촉매 및 첨가성분
- 고분자 실험기구의 오염 영향 정량적 측정
- 기능성 미량 혹은 극미량 성분

2) 표준물 제조분야

- 분말 플라스틱 소재의 균질도 측정
- NAA 이외의 타 분석에 필요한 분석 표준물의 개발

3) 소재개발 분야

- 반응기구(reaction mechanism) 규명
- 유기금속(organometallic) 촉매의 반응성 측정
- 유기반도체 개발에서, 초극미량 불순물의 제어 자료
- 특수용도(중성자 차폐용 등) 플라스틱 소재의 품질검사

4) 환경/보건 분야

- 식/의약품기의 인체 유해 중금속
- 인체 유해성분의 용출 특성 규명
- 폐 플라스틱의 환경오염 분야

제 9 절 생물학적 시료에 의한 보건, 환경 응용연구 [101]

1. 연구개발의 목적 및 중요성

가. 목 적

다양한 생물학적 시료(모발, 식품) 내에 존재하는 극미량 원소에 대한 간편한 초정밀 정량분석법의 개발.

- 인체 내로 유입되는 각종 source에 존재하는 미량원소들에 대한 보건 환경학적 평가
- 유입 미량원소들의 보건 환경학적 영향 규명.

나. 중요성

하나로를 이용한 기존의 기기적 중성자 방사화분석 기술을 방사화학적 분리를 통한 중성자 방사화분석등으로 다양화 시켜 그 적용 범위를 확대 시킨다.

생물학적 시료에 존재하는 극미량 원소의 분석 및 해석 기술의 개발을 통해 새로운 식품의 개발에 적용하며, 적극적 환경제어 대책 수립 및 의료수준 향상에 기여한다. 또한 분석 대상 군이 광범위해질 수 있어 하나로를 범국가적으로 상시 활용할 수 있는 체계를 구축할 수 있다.

핵기술을 통해 국민보건과 건강증진, 의료수준 향상을 꾀할 수 있어 핵 기술 이용에 대한 국민적 합의를 얻는데 도움이 된다.

2. 연구개발 수행내용 및 결과

가. 개 요

현대사회가 발전하면서 환경과 보건의 문제는 이제 소수 전문가의 영역을 벗어나 현대인 모두가 화제로 삼고 있는 주제가 되었다. 보건과 환경과 관련된 연구 분야는 그 범위가 무척 넓지만 본 연구에서는 체내로 유입될 수 있는 다양한 원소에 중점을 두었으며 주로 식품과 공기를 통해 유입되는 원소의 분석을 위해 생물학적 시료의 비파괴 분석에 다양한 장점을 보유하고 있는 중성자 방사화분석을 활용하였다. 또한 하나로를 이용한 기존의 기기적 중성자 방사화분석 기술을 방사화학적 분리를 통한 분석(RNAA) 등으로 다양화 시켜 그 적용 범위를 확대시켜 활용하였다. 최근 식품내의 미량원소는 그 독성 보다 미량 영양소(micronutrients)로서의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 1996년 WHO, IAEA, FAO 등이 공동으로 출판한 'Trace Elements in Human Nutrition and Health(영양과 보건 측면에서 본 미량원소)'[102]에서 그 중요성을 설명하고 있으며 WHO Expert Committee의 인체 영양의 미량원소에 대한 보고서에서, 미량 원소 영양에 대해 중요하고 일반적인 권고가 있었다. 그 권고는, ① 음식물(특히 우유) 속에 포함된 미량원소에 대한 신뢰성 있는 정보획득의 필요성, ② 농업과 산업분야가 미래에 어떻게 변화해야 하는가에 대한 대책 수립, ③ 특히 유아와 어린아이를 위한 규정된 음식의 디자인 등의 표준 음식물을 고려한 미량 원소의 요구량 설정, ④ 인체 속의 미량 원소연구를 위한 국제적 센터의 필요와 국제 분석 표준화 연구실의 필요, ⑤ 섭취 요구량의 최신정보를 위한 미량원소 영양물의 더 많은 관찰에 대한 것이다. 게다가, 수많은 기술의 개선과 여러 발견을 통해 인체 건강에서 미량 원소의 역할에 대한 지식이 상당히 향상되었다. 과거에는 충분하다고 여겨졌던 미량 원소가 환경에서 부족하기 때문만 아니라 음식 속에 불충분하기 때문에 문제가 될 수 있다는 새로운 인식도 형성되었다. 그러한 불균형은 정맥으로 영양을 보충하여 유지하는 환자와 성장기에 있는 아동, 영양실조를 치료하고 있는 유아, 아동 그리고 낮은 미량 원소 함유의 음식을 섭취하여 국부적으로만 소비하고 생체 이용률이 낮은 성인에게서 관찰되어 왔다. 미량원소의 불균형적 섭취는 기아에 영향을 받는 지역에 있는 사람들에게 미량 원소는 부적절하게 함유 되었으면서 에너지와 단백질만 풍부한 음식을 food aid programmes을 통해 공급할 때 발생되었다. 그러므로 음식 내의 미량 영양소의 적절성을 모든 공중보건 전문가들은 반드시 고려해야만 한다.[103-108] 구리(Cu), 요오드(I), 셀레늄(Se) 등의 결핍과 그에 의한 질병 발생에 대해서는 많은 연구가 수행되었으며 추후 단순히 학문적 관심보다 질병에 관련된 미량 원소 결핍의 위험에 대한 생체에 미치는 영향을 화학적, 생리적으로 증명하는 작업이 특히 필요하며 이와함께 관련 기능성 식품을 보충하는 방법의 마련이 시급하다. 이를 위해 본 연구에서는 미량 영양소 관련 연구의

기반을 확보하는 역할을 하고자 하였다.

생물학적 시료에 존재하는 극미량 원소의 분석 및 해석 기술을 이용해 새로운 식품의 개발에 적용할 수 있으며, 적극적 환경제어 대책 수립 및 의료수준 향상에 기여할 수 있다. 또한 분석 대상 군이 광범위해질 수 있어 하나를 범국가적으로 상시 활용할 수 있는 체계를 구축할 수 있으며 핵기술을 통해 국민보건과 건강증진, 의료수준 향상을 꾀할 수 있어 핵기술 이용에 대한 국민적 합의를 얻는데 도움이 된다.

나. 연구수행내용

- 연구목적을 위한 대상의 선정 및 분석 결과의 통계해석을 위한 연구대상의 식생활에 대한 survey 및 sampling하였다.
- 생물학적 시료(모발, 혈액, 식품, total diet) 내의 극미량 원소 분석을 위한 원소별 최적 분석법을 개발하였다.(Figure 67, Figure 68)
- 연구 대상군별 체내 유입 source 내의 미량원소 및 in vitro 미량원소를 정량분석하였다.
- 미량원소의 체내 유입에 대한 보건 환경학적 평가를 하였다.

다. 연구개발 결과

- 한국인의 일일 음식소비량을 조사한후(Table 76a, b) total diet(Table 77), 대표 식품(Table 78-81) 내의 미량 원소의 함량 분포를 최초로 확인하였다.
- 건강 보조 식품 내의 미량 원소의 함량분포를 측정하였다.(Table 82)
- 한국과 중국산 대표 한약재 내의 미량 원소의 함량분포를 측정하였다.(Table 83a-f)
- 한약 복용자의 모발 분석을 통해 ingestion을 통한 미량원소의 체내 유입량을 평가하였다.
- 주물공장의 실내 공기와 관련하여 작업자의 혈액과 모발 분석을 통해 흡입을 통한 미량원소의 체내 유입량을 평가하였다.
- 식품과 모발 등 생물학적 시료의 중성자 방사화분석을 통해 다양한 환경보건학적 평가의 기반을 확립하였다. (Table 84)

3. 목표 달성도 및 대외기여도

생물학적 시료에 존재하는 극미량 원소의 중성자 방사화분석 및 해석 기술의 개발을 통해 새로운 식품의 개발에 적용하며, 적극적 환경제어 대책 수립 및 국민 보건수준 향상에 기여하는 것이 본 연구의 최종 목표이며 이를 위해 다양한 시료를 적절하게 채취하고 제조하며 보존하는 방법의 수립은 물론 목적하는 미량 원소를 정확하고 정밀하게 분석할 수 있는 방법을 개발하는 것이 중요하다. 이에 목표에 부합되는 대상과 시료를 채취하고 관련 survey를 실시하였으며 분석 결과를 보건 환경학적으로 평가할 수 있는 기반을 마련하였다. 1차년도에서 확립된 freeze dry를 통한 식품, 한약 시료의 제조 및 보존, 항응고제를 사용한 total blood 시료의 제조, 자연 응고 시료의 원자로에 직접 조사등을 통한 결과와 더불어 특정 유해 작업장의 분진의 분석과 관련 작업인의 모발, 혈액 분석을 통해 중성자 방사화분석의 작업환경에의 응용성을 높였으며, 자주 사용되는 한약재의 분석을 통해 특정 원소의 체내 누적 경로를 파악코자 하였다. 또한 대표 식품의 지속적인 분석을 통해 추후 미량 영양소가 추가된 기능성 식품의 개발 연구에 활용할 수 있는 기반을 마련하였다. 즉 중성자 방사화분석을 다양한 생물학적 시료의 분석에 응용하여 그 활용 범위를 넓힐 수 있도록 하였다.

즉 본 연구를 통하여 생물학적 시료의 sampling, sample preparation, sample preservation method를 확립하였으며 연구목적에 위한 대상의 선정 및 분석 결과의 통계해석을 위한 연구대상의 식생활을 survey하여 시료 채취에 활용하였다. 또한 미량 원소별 최적의 중성자 방사화분석법을 개발(INAA, ENAA, RNAA 등)하여 생물학적 시료(모발, 뇨, total diet) 내의 극미량 원소 분석을 위한 원소별 최적 분석법을 개발하였다. 이를 통해 연구 대상군별 체내 유입 source 내의 미량원소 및 in vitro 미량원소를 정량분석하여 미량원소의 체내 유입에 대한 보건 환경학적 평가를 하였다.

앞으로 중성자 방사화분석법을 생물학적 시료의 분석에 적극적으로 활용하기 위하여 시료 절대 개수의 확대를 통한 대표성 있는 데이터의 생산, 일반 주거환경의 평가를 통한 일반인들에 대한 표준자료의 확보, 한약 상시 복용자의 모발 분석을 통한 특정 원소 체내 유입 경로의 확인 등이 지속적으로 이뤄져야 할 것이다. 특히 중성자 방사화분석에 기반한 기능성 식품의 개발은 국민의 식품보건과 노인 인구의 건강보존에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 장기적으로 연구할 수 있는 기반의 구축이 필요하다. 또한 이전 연구기간 동안의 다양한 시료의 분석 결과를 체계적으로 정리하여 구체적이고 개별적인 방향의 연구개발이 요구된다.

식품과 모발 등 생물학적 시료의 중성자 방사화분석을 통해 다양한 환경 보건학적 평가가 가능하다는 사실이며 적극적인 데이터의 확보와 다양한 평가 기법의 개발을 통하여 생물학적 시료의 중성자 방사화분석을 통해 Health Safety와 Health Status Enhancement가 가능하다는 사실이다.

4. 연구개발결과의 활용계획

- 하나로 방사화분석시설의 생물학적 시료의 분석이 요구되는 다양한 분야에 대한 범국가적 상시 활용체계의 구축을 위한 이용기반 확립.
- 보건, 환경, 의료 연구의 분석지원.
- 미량원소 강화 건강식품 개발공정에 활용.
- 적극적인 추가 데이터의 확보와 다양한 평가 기법의 개발을 통하여 health safety와 health status enhancement에 활용.

제 10 절 대전공단지역 대기중 독성중금속의 인체위해도 및 오염기여도 평가 [109]

1. 연구개발의 목적 및 필요성

가. 목 적

본 연구는 대전시내에서 가장 오염된 지역중 하나인 대전 1,2 공단지역을 대상으로 발암 금속 6종을 포함한 15종의 독성 금속의 대기중 농도를 1년 동안 지속적으로 매주 1회 채취하여 분석하고 이 분석 자료를 이용하여 인체의 발암 및 비발암 위해도를 평가하고자 한다. 어떤 물질이 인체에 암을 유발할 가능성이 있는 경우, 이 발암성은 물질의 화학적 형태 및 피폭경로와 관련될 것이다. 따라서 본 연구의 위해도 평가시 발암물질의 발암 등급의 중요성과 더불어 물질의 발암성이 갖는 피폭경로와 대기중의 화학적 형태가 고려될 것이다.

나. 필요성

도시 대기중의 중금속의 농도는 낮지만 독성이 크기 때문에 이로 인한 인체

위해도는 그 밖의 유해 대기오염물질로 인한 것보다 작지가 않다. 특히, 공단지역의 경우 발암 금속을 포함한 독성 금속으로 인한 인체 위해도는 상당히 크리라 예상되지만, 공단지역을 대상으로 독성 금속의 지속적인 농도 분석과 이에 바탕한 인체 위해도 평가는 국내에서 거의 수행된 바가 없다. 우선, 인체 위해도 평가를 하기 위해 As, Cr(6), Cd 와 같은 발암 금속을 포함한 독성 금속의 장기간 농도 자료를 찾기가 어려운 실정이다.

국내 대기오염의 합리적인 원인 규명 및 관리를 위해서는 유해 대기오염물질에 대한 기초 조사가 진행되어야 하고, 이를 통한 장기간의 대기질 자료의 확보가 필수적이다. 인체 위해도 평가가 지역 주민이 일생동안 받을 수 있는 만성적인 위해도를 평가하는 주 목적을 갖기 때문이다. 이를 바탕으로 대기질 관리를 위한 합리적인 환경기준 설정의 근거로 선진 각 국들이 활발히 활용하고 있는 위해도 평가를 우리도 논의, 수용할 수 있을 것이다.

2. 연구개발 수행내용 및 결과

가. 개 요

보건복지부는 1999년 5월 2일 전국 121개 병원을 대상으로 '97년도 신규 암 환자 수를 조사한 결과, '96년의 72,323 명보다 9% 증가한 78,797 명이 '97년 1년간 새로 암에 걸린 것으로 나타났다고 발표했는데, 전체 암 발생의 80% 정도만 파악된 것으로 보이기 때문에 '97년도의 실제 암 발생 환자수는 10만 여명에 이를 것으로 추정된다. 통계청에 따르면 '97년 한해동안 총 사망자수 24만 여명 중 22.2% 인 53,000여명이 암으로 사망한 것으로 나타났으며 이 수치는 같은 해 교통사고 사망자 수(11, 603명)의 약 5배나 된다. 이를 거칠게 근사해 보면, 배경 오염원들(background sources)로부터 암 발생 위해도가 1.8×10^{-1} 이고 자동차로 인한 평생 사망 위해도는 2.03×10^{-2} 이다. 미국의 경우, 배경 오염원들로부터 암 발생 위해도는 2.5×10^{-1} 이고 자동차로 인한 평생 사망 위해도는 2.0×10^{-2} 인데 따라서, 배경 오염원들로부터 국내 암 발생 위해도는 미국의 약 70 %에 육박하는 것을 알 수 있다.

도시 대기중의 중금속의 농도는 낮지만 독성이 크기 때문에 이로 인한 인체 위해도는 그 밖의 유해 대기오염물질로 인한 것보다 작지가 않을 것이다. 특히, 공단지역의 경우 발암 금속으로 인한 인체 위해도는 상당히 크리라 예상되지만, 공단지역을 대상으로 독성 금속의 지속적인 농도 분석과 이에 바탕한 인체 위해도 평가는 거의 시도된 바가 없다. 우선, 인체 위해도 평가를 하기 위

해 필수적인 As, Cr(6), Cd 와 같은 발암 금속을 포함한 독성 금속의 장기간 농도 자료를 찾기가 어려운 실정이다. 따라서 본 연구는 대전시내에서 가장 오염된 지역중 하나인 대전 1,2 공단지역을 대상으로 발암 금속 6종(As, Be, Cd, Cr, Ni 와 Pb)을 포함한 15종의 독성 금속의 대기중 농도를 1년 동안 지속적으로 매주 1회씩 채취하여 분석하고 이 분석 자료를 이용하여 인체의 발암 및 비발암 위험도를 평가하고자 한다. 비발암 금속의 경우 기준 선량(reference dose)에 의해 인체의 위험도를 정성적으로 평가하고, 발암 금속에 대해서는 최적 선량반응 모델을 이용하여 인체의 발암 위험도를 정량적으로 평가한다. 어떤 물질이 인체에 암을 유발할 가능성이 있는 경우, 이 발암성은 물질의 화학적 형태 및 노출경로와 관련될 것이다. 따라서 본 연구의 위험도 평가시 발암 물질의 발암 등급의 중요성과 더불어 물질의 발암성이 갖는 노출경로와 대기중의 화학적 형태가 고려될 것이다.

국내 대기오염의 합리적인 원인 규명 및 관리를 위해서는 유해 대기오염물질에 대한 기초 조사가 진행되어야 하고, 이를 통한 장기간의 대기질 자료의 확보가 필수적이다. 특히, 유해 대기오염물질로 인한 인체 위험도를 평가하기 위해서는 계절별 1회의 단기 조사로는 목적인 바를 이룰 수 없고 적어도 월별 3년 이상의 지속적인 장기 조사가 필요한 바, 이는 인체 위험도 평가가 지역 주민이 일생동안 받을 수 있는 만성적인 위험도를 평가하는 주 목적을 갖기 때문이다. 이를 바탕으로 대기질 관리를 위한 합리적인 환경기준 설정의 근거로 선진국들이 활발히 활용하고 있는 위험도 평가를 우리도 논의, 수용할 수 있을 것이다. 그리고 대기오염 및 공공 위험도(public risk)가 이미 사회 문제화 되어가는 우리나라의 선진화 경향에 발맞추어, 대기오염 위험도를 전면적으로 평가해야 하고 이 평가 결과에 근거하여 대기중의 비규제 오염물질의 기준 설정이 이루어져야 할 것이다. 인체 위험도 평가는 이와 같이 비규제 오염물질로부터 인체를 보호하기 위한 목적으로도 이용되는 합리적인 수단이며 대기질에 관한 불신과 비과학적인 논쟁을 과학적인 근거에 입각한 논의로 전환시키는 훌륭한 도구로 가능하게 된다.

나. 연구수행내용

(1) 시료채취

연구 대상지역은 소규모의 금속, 기계, 고무/플라스틱, 화학제품 관련 업체를 비롯하여, 대규모의 비누, 화장품 생산업체 등 100여개 이상의 생산업체가 밀집

되어 있는 지역으로 대전시내 대기중 독성금속의 농도가 가장 높을 것으로 예상되는 지역중 한 곳이다. 대기중 부유분진(PM-10)은 대전 1,2 공단내 대화동 동사무소 건물 옥상에 설치한 high-volume air sampler (Graseby Andersen SAUV-10H Model)를 약 0.85 m³/min으로 운전하여 시료당 공기량이 약 1,200 m³가 유지되도록 포집하였다.

여지는 유리섬유여지 (Whatman EPM 2000, 8"×10")를 사용하였고, 1999년 4월부터 2000년 1월까지 매주 주중에 각 여지당 24시간씩 포집하였다. High volume air sampler의 유속 변화에 따른 공기 흡입량은 유량 기록지를 이용하여 시료 채취 시작부터 종료까지 연속적으로 유량을 측정하여 환산하였고, 500시간 경과 후 motor brush를 교환할 때마다 orifice calibrator (GMW-25)를 이용하여 유속을 보정하였다. 분진을 채취한 여지는 실험실에서 건조시켜 평량하고 무게를 잰 후, 시료 분석전까지 데시케이터에 보관하였다.

(2) 위해도 평가 방법

위해도 평가 방법은 미국 NAS(National Academy of Sciences)가 1983년, 위해도 평가 과정을 1) 위해의 확인(hazard identification), 2) 노출량 평가(exposure assessment), 3) 용량-반응 평가(dose-response assessment) 및 4) 위해도 결정(risk characterization)의 4단계로 정의하면서 보다 뚜렷하게 정립되었고 이를 크게 위해의 확인(hazard identification) 및 위해의 정량화(hazard quantification)라는 두 단계로 나눌수 있다. 위해의 확인 평가시 이용하는 대표적인 분류체계는 U.S. EPA 체계[110]와 IARC(International Agency on Cancer Research) 체계[111, 112]인데, 두 분류체계중 EPA의 분류체계를 채택하고 EPA의 1999년 IRIS(Integrated Risk Information System)[113]에 근거하여 독성금속의 발암 등급을 평가하였다.

시료 포집, 농도 분석 및 위해도 평가까지의 과정을 Figure 69에 나타냈다.

다. 연구개발 결과

본 연구는 대전시내 대기중 독성금속의 오염이 가장 심하리라 예상되는 지역중 한 곳인 대전 1,2 공단지역을 대상으로 15종의 독성금속에 대해 1년간에 걸쳐 지속적으로 농도를 분석하였고 대기중 독성금속의 호흡으로 인한 지역 주민의 인체 위해도를 평가하였다. Figure 70과 Figure 71은 1999년의 독성금속의 산술 평균농도와 표준오차를 보여주고 있고 Table 85에 보인바와 같이 인체 발암물질

인 As, Cr(6), Ni(subsulfide)의 대기중 산술 평균농도는 각각 6.05, 2.40, 2.81 ng/m³이며 인체에 유력한 발암물질인 Be, Cd, Pb의 평균농도는 각각 0.06, 3.92, 145.99 ng/m³로 나타났다. 그리고 비발암 물질인 Mn의 평균 농도는 44.60 ng/m³이다. Table 86 와 Table 87에 보인바와 같이 위해도 평가 결과, 독성금속의 호흡으로 인한 발암 위해도는 7.0×10^{-5} 으로 허용 위해도 기준인 10^{-5} 을 초과하고 있다. 인체 발암물질인 As, Cr(6), Ni(subsulfide)으로 인한 위해도가 6.2×10^{-5} 이고 유력한 발암물질인 Be, Cd로 인한 위해도는 8.0×10^{-6} 이다. 인체 발암물질(human carcinogen: Group A)인 As과 Cr(6)으로부터의 위해도가 독성금속 위해도의 약 86 %를 점유하고 있어 이 두 물질에 대한 적절한 관리가 필요하다.

3. 목표 달성도 및 대외기여도

가. 목표 달성도

도시 대기중의 중금속의 농도는 낮지만 독성이 크기 때문에 이로 인한 인체 위해도는 그 밖의 유해 대기오염물질로 인한 것보다 작지가 않고 특히, 공단지역의 경우 발암금속을 포함한 독성금속으로 인한 인체 위해도는 상당히 크리라 판단되어 본 연구가 수행된 바, 연구 결과는 역시 허용 위해도 기준을 초과하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 대전 1, 2 공단지역은 인체 발암물질(human carcinogen: Group A)인 As과 Cr(6)으로부터의 위해도가 독성금속 위해도의 약 86 %를 점유하고 있고 따라서, 이 두 물질에 대한 배출원 조사 및 저감이 필요한 것으로 판단되었다. 본 연구의 또 다른 목표인 15종의 독성금속의 대기중 농도를 파악하기 위해 1년 동안 지속적으로 매주 1회, 24시간씩 PM-10 시료를 채취하여 분석하고자 한 바, 시료채취지점의 대표성이 기상자료의 분석을 통해 확인되었고 미량분석의 신뢰성은 각 금속의 산술평균농도에 비해 표준오차가 상당히 작게 나타난 것으로 확인되었다. 한편, 농도에 대한 확률론적 분석이 수행되었는데, 이러한 분석을 위해서는 여전히 시료 수가 부족하여 지속적인 조사가 필요하고 이에 바탕한 각 독성금속의 농도분포 형태가 향후 확인 되어야 할 것이다.

나. 대외 기여도

국내 대기오염의 합리적인 원인 규명 및 관리를 위해서는 유해 대기오염물질에 대한 기초 조사가 진행되어야 하고, 이를 통한 장기간의 대기질 자료의 확보가 필수적이다. 특히, 유해 대기오염물질로 인한 인체 위해도를 평가하기 위해서는

계절별 1회의 단기 조사로는 목적인 바를 이룰 수 없고 적어도 월별 3년 이상의 지속적인 장기 조사가 필요한 바, 이는 인체 위해도 평가가 지역 주민이 일생동안 받을 수 있는 만성적인 위해도를 평가하는 주 목적을 갖기 때문이다. 이를 바탕으로 대기질 관리를 위한 합리적인 환경기준 설정의 근거로 선진 각 국가들이 활발히 활용하고 있는 위해도 평가를 우리도 논의, 수용할 수 있을 것이다. 그리고 대기오염 및 공공 위해도(public risk)가 이미 사회 문제화 되어 가는 우리나라의 선진화 경향에 발맞추어, 대기오염 위해도를 전면적으로 평가해야 하고 이 평가 결과에 근거하여 대기중의 비규제 오염물질의 기준 설정이 이루어져야 할 것이다. 인체 위해도 평가는 이와 같이 비규제 오염물질로부터 인체를 보호하기 위한 목적으로도 이용되는 합리적인 수단이며 대기질에 관한 불신과 비과학적인 논쟁을 과학적인 근거에 입각한 논의로 전환시키는 훌륭한 도구로 기능하게 된다.

4. 연구개발결과의 활용계획

본 연구의 결과는 대기중의 비규제 오염물질들의 평가와 기준 설정을 위한 기본 자료로서의 의미가 있고 대기중 독성금속의 저감방안 마련시 우선 고려 대상 물질의 확인이 가능함을 보여 주고 있으며 향후, 수용 모델링을 위한 기본 자료로 이용될 것이다. 한편, 유해 대기오염물질에 대한 이제까지의 국내 대부분의 인체 위해도 평가는 위해도에 대한 단일 평가치(point estimate)를 결정하는 방법을 사용해 왔다. 단일 평가치 분석(point-estimate analysis)은 3 가지 큰 제한점을 갖는다.[114] 첫째, 입력 변수에 따라 평균 값, 보수적인 값과 최악의 가정들을 결합하여 위해도를 평가함으로써 위해도 평가자나 관리자 모두 평가에 내재된 보수적인 정도(the degree of conservatism)를 알 수가 없으며 일반적으로 충분한 불확실성 분석을 결하고 있기 때문에 단일 평가치에 대하여 전망을 가지기 어려운 실정이다. 둘째, 최대 개인 위해도의 경우, 많은 변수들 각각의 불확실성을 압도할 정도로 높은 편향(bias)을 설정함으로써 위해도 평가는 실제 거의 발생하기 어려운 시나리오에 대한 것이 된다. 마지막으로, 단일 평가치 방법은 대부분 평가시 많은 입력 변수들에 대하여 거의 최대값을 사용하여 평가하기 때문에 최종 단일 평가치의 불확실성을 결정하기 위하여 수행되는 전통적인 민감도 분석 즉, 각 입력 변수 값의 $\pm 10\%$ 또는 $\pm 25\%$ 에서 계산하는 민감도 분석의 의미가 근본적으로 없어진다.

확률론적 위험도 분석(probabilistic risk analysis)은 이러한 단일 평가치 방법(point-estimate analysis)의 제한점을 해결할 수 있는 방법[115, 116]이며 단일 평가치에 내재된 불확실성을 뚜렷한 방식으로 제공하기 때문에 위험도 관리자나 공중은 평가된 위험도의 전모(whole picture)에 더 가까이 다가갈 수 있다. 그리고 미국 연방 환경청(U. S. Environmental Protection Agency)은 1986년의 발암 위험도 평가 지침(Guidelines for Carcinogen Risk Assessment of 1986) 이후로 10년이 지난 1996년에, 그 간의 발암과정에 대한 진보적인 연구 결과를 바탕으로 보다 현실적인 위험도 평가를 요구하는 새로운 지침을 제안했으며(Proposed Guidelines for Carcinogen Risk Assessment)[117] 현재 최종 지침을 마련중에 있다. 제안된 새로운 발암 위험도 평가 지침은 위험도결정(risk characterization) 시 위험도 관리자를 위하여 위험도 평가의 전체 결론과 더불어 위험도 평가의 신뢰도를 제공하도록 권고하고 있다. 그러므로 향후, 국내의 위험도 평가는 확률론적 위험도 분석을 지향해야 하지만 국내 이 분야의 연구에 있어 아직도 분석에 필요한 환경 대기중 독성금속의 장기간 농도자료와 제반 변수에 대한 확률밀도함수가 미비한 실정이다. 따라서 이러한 독성금속의 장기간 농도분석과 확률밀도함수의 개발, 그리고 이를 이용한 확률론적 위험도 분석이 매우 시급한 실정이다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

1. 연구개발목표 달성도

단계목표 및 연구내용을 100% 달성하였으며 품질정도 관리시스템의 구축은 완료되었으나 KOLAS 제도인정은 환경여건 변화에 따라 2000년에 달성을 목표로 하고 있다. 부록으로 첨부한 각 연구개발 결과물인 시험분석 제작물, 논문발표 및 게재, 프로그램등록, 기술보고서등은 목표를 초과달성하였다.

가. ‘하나로’ 중성자 방사화분석시설 개선, 보완 (다용도 분석기술 및 장치 개발, 분석기술의 QA/QC)

- (1) ‘하나로’ 중성자 방사화분석장치중의 하나인 공압 이송장치의 성능 개선(편의성과 안전성)을 위한 2-way Diverter, Loader, Receiver의 제작 설치, 및 특성시험자료의 구축.
- (2) 함량계산을 위한 감마분광 데이터 처리용 통합 전산코드(DOS)의 개발.
- (3) PTS#2 시스템의 운전을 위한 전산 프로그램(WINDOWS)의 개발.
- (4) NAA용 PTS#2에 Auto-receiver 제작 설치 및 운영 및 원격감시용 전산프로그램의 개발.
- (5) NAA프로그램(MCA : Gamma-Vision S/W)의 Upgrading.
- (6) Auto-Sample Changer(5 Racks, Controller)의 개발.
- (7) 함량계산을 위한 감마분광 데이터 처리용 통합 전산코드(WIN98 : Labview)의 Upgrading.
- (8) Irradiation PE Capsule(2종) 및 시료밀봉용기(2건 7종)의 국산 제작.
- (9) 연구성과물 : 전산프로그램 등록 5건, 기술보고서 1편.

나. 분석절차 개선 및 분석 정도관리 시스템 구축

- (1) 분석감도를 개선하기 위한 열/열외 중성자 조사, 감마선 계측기법 및 방사화학적 분리기법을 이용한 분석법 개발 : 동·식물시료(6 SRM 이용)의 분석

법 개발(INAA/ENAA/RNAA).

- (2) 분석품질시스템 구축을 위한 국제협력사업 및 국가인증(ISO/IEC, KOLAS)을 추진하여 국가 시험검사 인정제도(KOLAS)의 기본요건(ISO 17025)에 맞는 문서화 작업을 추진함.
- (3) 시험소 품질보증을 위한 품질시스템 구축을 위하여 국내외 인정기관에서 시행하고 있는 비교 숙련도 시험(12 환경시료)에 참여하여 측정능력을 평가함.
- (4) 연구성과물 : 연구논문 3편, 절차서, 품질매뉴얼, 절차서, 지시서, NAA지침, NAA교재, 시험보고서(KOLAS/IAEA).

다. 산업 응용기술 개발 및 표준화

- (1) NAA응용기술 개발을 위해 환경 및 인체보건 연구를 위한 분석절차를 확립하고, 데이터 해석을 통하여 분석 대상물의 영향평가 기법을 개발하였다.
- (2) 인증표준물질(SRM)과 비교분석을 이용한 분석법 개발 및 표준화.
- (3) 중성자 방사화분석을 이용한 대기환경 관측 응용연구.
- (4) 생물학적 시료의 중성자 방사화분석에 의한 보건, 환경응용연구.
- (5) 중성자 방사화분석을 이용한 플라스틱 소재의 정밀분석법 개발.
- (6) 방사화분석법을 이용한 대전공단지역 대기중 독성 중금속의 인체위해도 및 오염기여도평가.
- (7) 국제협력 공동연구 : 중성자 방사화분석법을 이용한 대기오염관측연구의 QA/QC 적용 및 훈련 ; 환경시료(8시료)의 Data Intercomparison Study.
- (8) 연구성과물 : 연구논문 17편, 기술보고서 5편, 절차서/지침서, 국제협력사업(RCA/IAEA) 보고서 및 연구보고서, IAEA기술보고서 2편).

2. 대외 기여도

- (1) 상기의 “하나로 중성자방사화분석기술” 을 이용한 연구개발결과를 통하여 원자력 기술의 유용함에 대한 PA와 이용자의 확대를 기대할 수 있으며, 핵분석 기술의 국가 공인 시험분석법으로서 인증될 가능성이 크며, 환경, 생체시료의 대

량분석 능력 확보로 지속적인 환경관측기술로 이용될 수 있으며, 산업용 고순도, 기능성 재료의 품질관리 기술로 이용될 수 있을 것이다.

(2) 정확, 정밀한 분석결과와 이 결과에 대한 신뢰성과 객관성의 확보는 국가 간 무역상 장벽의 해소를 위한 기본사항이며, 연구기관의 분석능력 향상과 공인 시험분석시스템을 구축하는 길이다. 본 결과는 분석시설의 개발과 함께 분석품질 관리에 중점을 두었으며 산업 응용기술로 확대시켰다. 향후 국가 표준기본법의 시행과 함께 QA/QC의 관리가 엄격해질 전망이며, 시험·교정인정기관의 확대는 정부의 방침이며, 모든 연구기관의 시험분석 실험실은 조속히 KOLAS 인정제도를 도입해서 국가측정표준에 맞추거나 ISO인증을 획득하여야할 것이다 :

3. 증성자 방사화분석법은 그 활용면에서 중요한 고감도 분석기술이며 각종 시료 분석에 꼭 필요한 미량 원소 분석법이다. 특히 현재 활발한 연구가 진행되고 있는 첨단 재료과학 분야나 환경과학 분야를 비롯한 여러 산업 분야에서 절실히 요구되고 있는 극미량 원소 분석에 아주 적합한 방법으로 계속적인 연구 개발이 필요하다. 특히 환경과학 분야는 지속적으로 광범위한 테이타의 수직이 필요하며, 높은 수준의 분석기술은 물론이고 보다 정확하고 체계적인 시료수집과 통계 처리 기술이 확립되어야만 효과적으로 환경관측을 할 수 있고 통계해석할 수 있으므로 관련 분야 학자들과의 공동 연구를 활발히 진행하여 증성자 방사화분석 기술은 널리 이용하여야 할 것이다. 최근에는 본 분야(해분석기술, NAT)의 국제 협력사업의 활성화를 위해 IAEA의 지역간 협력사업(RCA), 국제 표준시표 상호 비교 연구사업(Intercomparison Runs, AQCS Program), 아시아지역 CRP 사업, 한.소 협력사업등을 통하여 원자력 기술분야에 대한 아국의 위상을 정립시키고자 노력하고 있으며 국내에서는 산.학.연 협동연구회를 운영하여 해분석기술 개발을 위한 연구개발을 추진하고 있다. 또한 국내 유원의 연구용 원자로의 효율적인 활용을 위해서 그 이용도를 극대화시키기 위한 이용체계 확립 방안도 강구하고

2. 연구결과에 활용은 국가/국제표준에 맞는 시험분석 품질시스템의 구축 (ISO/IEC 17025)를 통한 신뢰성과 객관성이 확보된 데이터를 제공할 수 있으며 국내, 외 비교 측면도 시험을 통한 시험분석 측정능력을 향상시켜 연구개발, 산업 생산, 시험검사 현장등에서 QA/QC 기법으로 활용될 수 있는 기반을 마련하였으 며 KOLAS 인증을 확보한 경우에 방사화분석 지원사업(자체사업)의 활성화를 기대할 수 있고 시험분석 품질의 지속적인 확보로 적용범위도 확장시킬 수 있음

이다.

1. 연구로 이용분야중 활용도가 비교적 높은 증성자 방사화분석법은 고유한 특성으로 "absolute method" 또는 "referee method"로 평가받는 시험분석기술중에 서 중요한 역할을 하고 있는 해분석기술이다. 향후 국가 표준기본법의 시행과 함께 QA/QC의 관리가 엄격해질 전망이며, 시험·표정인정기관의 확대는 정부의 방침이며, 모든 연구기관의 시험분석 실험실은 조속히 국가(KS) 및 국제표준 방법이며, 연구로 이용분야중 활용도가 비교적 높은 증성자 방사화분석법은 고유한 특

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

있다. 그러나 외국에 비해서 현재 본 분야의 국내 연구인력이 절대적으로 부족한 상태로서 연구분야 확대와 대내외 분석지원사업의 활성화를 위하여 무엇보다도 관련 기자재 및 연구 인력의 확보를 위한 지속적이고 적극적인 지원이 요구된다.

- (1) 하나로 공동이용 활성화를 위한 기반구축.
- (2) 국가/국제표준에 맞는 시험분석 품질시스템 구축(ISO/IEC 17025)을 통한 신뢰성과 객관성이 확보된 데이터를 제공(분석과 적합성 평가 : 방법, 표준, 시험, 품질).
- (3) 국내, 외 비교 숙련도시험을 통한 시험분석 측정능력 향상(핵분석기술의 활용도 제고).
- (4) 기초·응용 연구개발, 산업생산, 시험검사 현장등에서 QA/QC 기법으로 활용(분석과 국제 무역통상).
- (5) 산업보건, 환경오염 연구분야에 적용함으로써 공공복지 및 삶의 질 향상에 기여함.
- (6) KOLAS 인증을 확보할 경우에 방사화분석 지원사업(자체사업)의 활성화 기대.
- (7) 시험분석 품목의 지속적인 확대로 적용범위 확장.

제 6 장 참 고 문 헌

1. 정용삼 외, 방사화분석이용연구, 연구보고서, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1745/96 (1996).
2. Z. B. Alfassi, 'Epithermal Neutron Activation Analysis', *J. Radioanal. and Nucl. Chem., Articles*, **90/1**, 151 (1985).
3. T. Nakanishi and B. Sansoni, 'Epithermal Neutron Activation Analysis Using Monostandard Method Extension to Other Elements', AED-Conf-75-638-005, INIS Atomindex 7(1976) RN 257136(1976).
4. S. J. Parry, *J. Radioanal. Chem.*, **72**, 195(1982).
5. E. S. Glandney et. al., *Analytica Chimica Acta*, **104**, 121(1979).
6. A. G. Hanna et al., *J. Radioanal. Chem.*, **37**, 581 (1977).
7. K. Tomura ; *BUNSEKI*, **12**, 878(1978).
8. Y. S. Chung, S. Y. Cho, T. Y. Eom and Y. J. Chung, *J. the Kor. Nucl. Soc.*, **24**, 4, 352(1992).
9. Z. B. Alfassi, Activation Analysis, vol. I, II, CRC Press (1990).
10. End of Manufacturing Report PTS 1 & 2, Intertech World-widw Company, Feb. 1992.
11. Installation, Operation and Maintenance manual, Intertech World-widw Company, Feb. 1993.
12. PTS 설계 도면, Intertech World-widw Company, (1993).
13. PTS 설계 도면, KAERI, (1995).
14. KAERI/NAA, PTS #1&2 Operation Manual (1999).
15. KAERI/NAA, POWER-NAA Operation Manual (1999).
16. KAERI/NAA, Autosample changer Manual (1999).
17. M. Bruin, S. S. Then, P. Bode and P. J. M. Korthoven, 'A Simple Dead time Stabilizer for Gamma-Ray Spectrometers', *Nucl. Instr. Meth.*, **121**, 611 (1974).
18. T. Nakanishi and B. Sansoni, 'Low Energy Photon Spectrometry in Nondestructive Neutron Activation Analysis', *J. Radioanal. Chem.*, **37**, 945 (1977).
19. G. P. Westpahl, 'Real-Time Correction of Counting Losses in Nuclear

- Pulse Spectroscopy', *J. Radioanal. Chem.*, **70**, 387 (1982).
20. D. F. Covell, *Anal. Chem.*, **31**, 11 (1959).
 21. G. Erdtmann, 'Neutron Activation Tables', Vol.6, NewYork(1976).
 22. IAEA ; Handbook on Nuclear Activation Analysis Data, IAEA Tec. Rep. No.273 (1987).
 23. R. Dams, 'Selection of Short-Lived Isotopes for Activation Analysis with Respect to Sensitivity', *J. Radioanal. Chem.*, **61**, 13 (1981).
 24. K. N. DeSilva and A. Chatt, 'A Method to Improve Precision and Detection Limits for Measuring Trace Elements Through Short-Lived Radionuclides', *J. Trace and Microprobe Techniques.*, **1**, 307 (1982).
 25. L. A. Currie, *Anal. Chem.*, **40**, 586 (1968).
 26. K. H. Wedepohl, Origin and Distribution of the Elements, Pergamon Press, London, 999 (1968).
 27. IAEA, 'Survey of reference materials, Vol. 2, IAEA-TECDOC-880, Vienna, Austria(1996).
 28. Y. S. Chung, Y. J. Chung, K. H. Cho and J. H. Lee, 'Determination of trace and toxic elements in Korean rice CRM by INAA, ICP and AAS', *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **215**, 1, pp129-134 (1997).
 29. S. Y. Cho, O. D. Awh and Y. S. Chung, 'Trace element exposure in human by instrumental neutron activation analysis of hair', *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **217**, 1. p107-109 (1997).
 30. S. Y. Cho, S. G. Jang and Y. S. Chung ; 'Human Hair Identification by Instrumental Neutron Activation Analysis', *J. Radioanal. Nucl. Chem. Letters*, **229**, 1-2 (1998) 143-147.
 31. S. J. Moon, J. Y. Kim, Y. J. Chung, Y. S. Chung, 'The Iodine Contents in Common Korean Foods', *Korean J. Nutrition*, **31**, 2, (1998) 206-212.
 32. S. J. Moon, J. Y. Kim, Y. J. Chung, Y. S. Chung, 'The Determination of Iodine in Human Milk and Cow Milk by Iodide Specific Ion Electrode and Neutron Activation Analysis', *Korean J. Nutrition*, **31**, 2(1998) 213-219.
 33. Y. S. Chung, J. H. Moon, S. H. Kang and K. W. Park, 'Study on Determination of Th in Biological Samples by INAA and RNAA',

- Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, p351, Seoul, Korea, October 1998.
34. Y. S. Chung, J. H. Moon, Y. J. Chung, K. Y. Lee, Y. Y. Yoon, 'Determination of Toxic and Trace Elements in Algae by Instrumental Neutron Activation Analysis', *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **240**, 1 (1999)95.
 35. Y. S. Chung, J. H. Moon, S. H. Kang and K. W. Park, 'Study on Determination of Th in Korean Total Diet by RNAA', Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, p451, Pohang, Korea, May 1999.
 36. Y. S. Chung, J. H. Moon, K. W. Park, K. Y. Lee, Y. Y. Yoon, 'Data intercomparison and determination of toxic and trace elements in Algae by Instrumental Neutron Activation Analysis', *Analytical Science & Technology*, **12**, 4 (1999) 346.
 37. Y. S. Chung, Y. J. Chung, E. S. Jung and S. Y. Cho, 'Comparison and determination of environmental standard samples by instrumental neutron activation analysis', *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **217**, 1, pp71-76 (1997).
 38. Y. S. Chung, Y. J. Chung, E. S. Jeong and S. Y. Cho, 'Study on air pollution monitoring in Korea using instrumental neutron activation analysis', *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **217**, 1, pp83-89 (1997).
 39. J. H. Lee, J. S. Kim, K. H. Cho, J. C. Woo, M. S. Han and Y. S. Chung, 'Determination of Trace Elements in High Purity Copper by INAA, GFAAS and ICP-AES', *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **234**, 1-2 (1998) 77-83.
 40. Y. S. Chung, J. H. Moon, Y. J. Chung, Y. J. Park, K. Y. Lee, Y. Y. Yoon, S. H. Lee, K. T. Kim, 'Intercomparison and Determination of Sediment by Instrumental Neutron Activation Analysis', *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, **5**, 2(1998)116.
 41. Y. S. Chung, J. H. Moon, Y. J. Chung, S. Y. Cho, S. H. Kang, 'Study on Air Pollution Monitoring in Korea using Low Volume Air Sampler by Instrumental Neutron Activation Analysis', *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **240**, 1 (1999)79.
 42. K. Y. Lee, S. K. Shim, Y. Y. Yoon, Y. S. Chung, G. H. Lee, 'An

- accurate and Sensitive Analysis of Trace and Ultra Trace Metallic Impurities in Plastics by Neutron Activation Analysis', *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **241**, 1 (1999)129.
43. Y. S. Chung, J. H. Moon, Y. J. Chung, Y. J. Park, 'Determination of Uranium in Groundwater by Instrumental Neutron Activation Analysis', *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, **5**, 4 (1999) 210.
 44. K. Y. Lee and Y. S. Chung, 'Analysis of Inorganic Elements in Polymer Materials by NAA', *Polymer Science and Technology*, **10**, 3 (1999) 395.
 45. Y. H. Seo, B. K. Lee, Y. S. Chung, Y. J. Chung, J. H. Moon, K. Y. Lee, S. K. Shim, W. Hong, H. W. Choi and K. H. Kim, Interlaboratory Comparison for the Sampling and Chemical Species measurement of PM₁₀, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **15**, 4 (1999) 485.
 46. Y. S. Chung, J. H. Moon, Y. J. Chung, K. W. Park, K. Y. Lee, Y. Y. Yoon, S. K. Shim, K. H. Cho, M. S. Han and J. H. Lee, Multielement Analysis in Airborne Particulate Matter(PM₁₀) by INAA, ICP and AAS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **15**, 4(1999) 495.
 47. T. Kouimtzis and C. Samara, Airborne Particulate Matter, Vol. 4 Part D, Springer, NewYork(1995).
 48. S. Landsberger and M. Creatchman, Elemental Analysis of Airborne Particles, Vol. 1, Gordon and Breach Science Publishers, USA(1999).
 49. EPA, EPA Standard methods for APM analysis based on nuclear method, U.S. Environmental Protection Agency, June 1999 ; KAERI/TS-112/99 (1999) ; KAERI/TS-116/99 (1999) ; KAERI/TS-119/99 (1999).
 50. A. Bleise and B. Smadis, Intercomparison run (NAT-3) for the determination of trace and minor elements in urban dust artificially loaded on air filters, NAHRES-43, Vienna, August 1999.
 51. Y. S. Chung, J. H. Moon, S. H. Kim, K. W. Park, S. H. Kang, 'Intercomparison and Determination of Trace Elements in Urban Dust by Neutron Activation Analysis', *Analytical Science & Technology*, **13**, 2 (2000) 10.
 52. M. Thomason, R. Wood "The international harmonized protocol for the

- proficiency testing of analytical laboratories" Pure & Appl. Chem., Vol.65, No. 9, 2123-2144 (1993).
53. IAEA, Proceedings of an international symposium on Nuclear Activation Techniques in the Life Sciences, IAEA, Vienna, 22~26 May, (1978).
 54. IAEA, Elemental Analysis of Biological Materials, Current Problems and Techniques with Special Reference to Trace Elements, IAEA, Vienna, (1980).
 55. L. Elliot Shubert, Algae as Ecological Indicators, Academic Press, New York, USA, (1984).
 56. J. Doucha and K. Livansky; Novel Outdoor Thin Layer High Density Microalgae Culture System: Productivity and Operational Parameters, Arch. Hydrobiol. 106/Algolog, stud. **76**, 129~147 (1995).
 57. J. Doucha and K. Livansky; *Equipment for Outdoor Thin Layer Cultivation of Algae*, Czech. pat. no. **279**, 579 (1995).
 58. IAEA, Information sheet on intercomparison study on the determination of toxic and other main and trace elements in algae IAEA-390(1996); Preliminary statistical evaluation of the Intercomparison run IAEA **390**, IAEA/AL/101P (1998).
 59. R. Dybezynski, *Anal. Chim. Acta*, **117**, 53 (1980).
 60. E. Cortes Toro, R. M. Parr, S. A. Clements, Biological and environmental reference materials for trace elements, nuclides and organic contaminants, IAEA/RL/128 (Rev.1), IAEA, Vienna (1990).
 61. J. C. Miller and J. N. Miller, Statistics for analytical chemistry, 2ed., John Wiley & Sons (1988).
 62. Lee, M. H., Shin, H. A., Choi, G. S., Choi, Y. H., Lee, C. W. (1998) Determination of uranium isotopes in the ground water, Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Seoul, Korea, October 338p.
 63. ISO/IEC 17025, 'General requirements for the competence of testing and calibration laboratories', International Organization for Standardization, 1999.
 64. 산업자원부 기술표준원, 시험·검사기관 인정제도 관련규정, KOLAS-99-7,

- 1999.
65. 국립기술품질원, 측정결과의 소급성 유지를 위한 지침(국립기술품질원 고시 제 1998-61호).
 66. 국립기술품질원, 측정결과불확도 표현 및 평가지침(국립기술품질원 고시 제 1998-62호).
 67. 한국원자력연구소, 중성자방사화분석시험 운영절차서, 1999.
 68. 한국원자력연구소, 중성자방사화분석시험 지침서, 1999.
 69. 한국원자력연구소, 중성자방사화분석시험 지침; 원자로 중성자방사화분석에서 품질보증 및 관리, 측정 표준불확도, 검출한계의 표현, 1999.
 70. 정용삼, KOLAS 인정제도(내부교육자료), 1999/NAA/HANARO, 한국원자력연구소, 1999.
 71. A. Alian and B. Sansoni, 'A Review on Activation Analysis of Airborne Particulate Matter', *J. Radioanal. and Nucl. Chem., Articles*, **89**, (1985) 191.
 72. A. Alian and B. Sansoni, 'Activation Analysis of Airborne Particulate Matter', Central Department for Chemical Analysis, Report Jul-Spez-475, ISSN 0343-7639, Kernforschungsanlage Julich GmbH, D-5170 Julich, Federal Republic of Germany, 99 (1988).
 73. Composition and Size Distribution for Atmospheric Particulate Matter in Boston Area, *Environ. Sci. Technol.*, **8**, 551.
 74. R. Dams, J. Billiet and J. Hoste, 'Neutron Activation Analysis of F, Sc, Se, Ag and Hf in Aerosols Using Short-lived Isotopes', *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, **4**, (1975) 141.
 75. W. D. Ehmann and D. E. Vance, 'Advances in Neutron Activation Analysis', CRL Critical Reviews in *Anal. Chem.*, **20**, (1989) 405.
 76. E. S. Gladney, W. H. Zoller, A. G. Jones and G. E. Gordon, 'Composition and Size Distribution for Atmospheric Particulate Matter in Boston Area', *Environ. Sci. Technol.*, **8**, (1974) 551.
 77. J. Tolgyessy and E. H. Klehr, 'Nuclear Environmental Chemical Analysis', Ellis Harwood Series in Analytical Chemistry, John Wiley and Sons (1987).
 78. R. Dams, J. A. Robbins, K. A. Rahn and J. W. Winchester, *Anal. Chem.*,

- 42, (1970) 861.
79. W. H. Zoller and G. E. Gordon, 'INAA of Atmospheric Pollutants Utilizing Ge(Li) γ -ray Detector', *Anal. Chem.*, **42**, (1970) 257.
 80. IAEA, 'Sampling and Analytical Methodologies for Instrumental Neutron Activation Analysis of Airborne Particulate Matter', Training Course Series No.4, IAEA-TCS-4, Vienna, 1992.
 81. B. Mason ; *Principles of Geochemistry*, 3rd ed. 1966.
 82. 이길용 외, '플라스틱 소재의 정밀분석법 개발', 위탁연구보고서, 한국원자력연구소, KAERI/CM-374/99 (1999).
 83. S. Sakakibara, Y. Uwamino, H. Morikawa, *Analyst*, 114(1989) 1663.
 84. P. F. S. Jackson and J. Whitehead, *Analyst*, 91(1966) 418.
 85. S. J. Parry, *Activation Spectrometry in Chemical Analysis*, John Wiley and Sons, Inc.,(1991) 196-209.
 86. R. Caletka, R. Hausbek, V. Krivan, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 20 (1988) 319.
 87. IAEA-TECDOC-564, Practical Aspects of Operating a NAA Laboratory, IAEA, Vienna, (1990) 20-33.
 88. G. Erdtman and H. Petri, *Nuclear Activation Analysis*, Ed. by Philip J. Elving, John Wiley and Sons, Inc.,(1986) 422-425.
 89. R. Zeisler, V. P. Guinn, *Nuclear Analytical Methods in the Life Sciences*, Humana Press · Clifton, (1989)1-7.
 90. R. Zeisler, V. P. Guinn, *Nuclear Analytical Methods in the Life Sciences*, Humana Press · Clifton, (1989) 671-682.
 91. A. Wyttenbach, S. Bajo and L. Tobler, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 114(1), (1987)137.
 92. G. Kennedy., and A. Fowler, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 78(1983)165.
 93. R. I. Jaffee, *Titanium 80 Science and Technology*, Vol.1(1980)53.
 94. K. Takahashi, *Titanium 80 Science and Technology*, Vol.1(1980)15.
 95. R. Pialot, *Titanium 80 Science and Technology*, Vol.4(1980) 3095.
 96. B. B. Rath, B. A. MacDonald, *ibid.*, Vol. 2(1980) 1185.
 97. Japan Analytical Science Society, *Hand book of polymer Analysis*, (1985) 106-118.

98. P. Bode, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 167(1993) 361.
99. E. W. Haas, H. Schnabel, R. Hofmann, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 68(1993) 403.
100. M. Kobayashi, *J. Poly. Sci.*, 17(1979) 293.
101. 조승연 외, '생물학적 시료에 의한 보건, 환경 응용연구', 위탁연구보고서, 한국원자력연구소, KAERI/CM-375/99 (1999).
102. Trace Elements I Human Nutrition and Health, WHO, (1996).
103. Y. Igarashi et al., "Daily Intakes of ^{232}Th and ^{238}U in Japanese Males," *Health Physics*, Vol. 63, No. 2, August (1992).
104. N. Fukuzaki and N. Moriyama, "Non-destructive NAA Studies on a Withering Disease of Lowland Rice Occurring Near an Iodine Plant," *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*, Vol. 90-1, 197~205 (1985).
105. R. Schelenz, "Dietary Intake of 25 Elements by Man Estimated by Neutron Activation Analysis," *J. of Radioanalytical Chemistry*, Vol. 37, 539~548, (1977)
106. S. Ahmad et al., "Determination of Toxic Elements on Tea Leaves by INAA," *J. of Radioanalytical Chemistry*, Vol. 78, No 2, 375~383, (1983).
107. Tu. Shu-De, W. Hanf and K. H. Lieser, "Monostandard INAA of Chinese Biological Standard Reference Material Using Short-Lived Radionuclides," *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*, Vol. 83-2, 283~290, (1984).
108. Xiaolin Hou et al, 'A study of six elements daily dietary intake of Chinese people', *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 222, No. 1-2(1997) 165.
109. 이진홍 외, '대전공단지역 대기중 독성중금속의 인체위해도 및 오염기여도 평가', 위탁연구보고서, 한국원자력연구소, KAERI/CM-376/99 (1999).
110. U. S. EPA, Guidelines for Carcinogenic Risk Assessment, Federal Register, 51(185) : 33992 (1986).
111. IARC Working Group, An Evaluation of Chemicals and Industrial Processes Associated with Cancer in Humans Based on Human and

- Animal Data : IARC Monographs Volumes 1 to 20, Cancer Research, 40, 1 (1980).
112. IARC Working Group, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans: Supplement 4, IARC, Lyon (1982).
 113. U. S. EPA, Integrated Risk Information System (IRIS), U. S. EPA (1999).
 114. Thompson, K. M., Burmaster, D. E. and Crouch, E. A. C., Monte Carlo techniques for quantitative uncertainty analysis in public health risk assessment, Risk Analysis, 12(1), 53 (1992).
 115. Finley, B. and Paustenbach, D., The benefits of probabilistic exposure assessment: three cases studies involving contaminated air, water, and soil, Risk Analysis, 14(1), 53 (1994).
 116. Yu, D. H. and Lee, J. H., Use of a probabilistic analysis for environmental risk assessments., Proceeding of '95 KSEE Spring Conference, Incheon, 405 (1995).
 117. U. S. EPA, Proposed guidelines for carcinogenic risk assessment, Federal Register, 61(79), 17960 (1996).

Table 1. Current status of research reactor in the world(1999, IAEA Data).

No.	Country	OPR	SHOT/ DECOM	PLAN/ CONS	No.	Country	OPR	SHOT/ DECOM	PLAN/ CONS
1	Algeria	2	0	0	56	Switzerland	3	3	0
2	Argentina	6	1	0	57	Syrian Arab Republic	1	0	0
3	Australia	1	2	1	58	Taiwan	3	3	1
4	Austria	3	0	0	59	Thailand	1	0	1
5	Bangladesh	1	0	0	60	Tunisia	0	0	1
6	Belarus	0	1	0	61	Turkey	1	2	0
7	Belgium	4	2	0	62	Ukraine	1	0	0
8	Brazil	4	0	0	63	United Kingdom	4	0	0
9	Bulgaria	0	1	0	64	U.S.A	54	173	0
10	Canada	9	7	3	65	Uruguay	0	1	0
11	Chile	2	0	0	66	Uzbekistan	1	0	0
12	China	13	2	3	67	Venezuela	0	1	0
13	Colombia	1	0	0	68	Viet Nam	1	0	0
14	Czech Republic	3	2	0	69	Yugoslavia	1	1	0
15	Dem. P.R.K	1	0	0					
16	Dem. R. Congo	1	1	0		합 계	290	323	20
17	Denmark	2	1	0					
18	Egypt	2	0	0					
19	European Union	0	1	0					
20	Finland	1	1	0					
21	France	15	16	1					
22	Georgia	0	1	0					
23	Germany	15	31	1					
24	Ghana	1	0	0					
25	Greece	2	1	0					
26	Hungary	2	1	0					
27	India	5	4	0					
28	Indonesia	3	0	1					
29	Iran	4	0	1					
30	Iraq	0	2	0					
31	Israel	1	1	0					
32	Italy	5	9	0					
33	Jamaica	1	0	0					
34	Japan	20	4	0					
35	Kazakhstan	3	0	0					
36	Korea, Republic	2	2	0					
37	Latvia	1	1	0					
38	Malaysia	1	0	0					
39	Mexico	3	1	0					
40	Morocco	0	0	1					
41	Netherlands	3	2	0					
42	Nigeria	0	0	1					
43	Norway	2	0	0					
44	Pakistan	2	0	0					
45	Peru	2	0	0					
46	Philippines	0	1	0		* Age distribution(%) of RR in the world			
47	Poland	1	3	0	years	0 - 9	7.9		
48	Portugal	1	0	0		10 - 19	12.5		
49	Romania	2	2	0		20 - 29	18.9		
50	Russian	62	29	2		30 - 39	50.2		
51	Slovakia	0	0	2		40 - 49	10.2		
52	Slovenia	1	0	0					
53	South Africa	1	0	0					
54	Spain	0	4	0					
55	Sweden	2	2	0		http://www.iaea.org/worldatom/rrdb/			

Table 2. Advantage factor of epithermal neutron activation analysis.

Nuclide	Shield Material	
	Cadmium	Boron
^{76}As	7.5	42
^{198}Au	12.5	8
^{82}Br	9.2	54
^{111}Cd	18	160
^{128}I	16	54
^{27}Mg	—	32
^{99}Mo	18	160
^{122}Sb	16	37
$^{125\text{m}}\text{Sn}$	23	92
$^{87\text{m}}\text{Sr}$	11	36
$\text{Si}(^{28}\text{Al}, ^{29}\text{Al})$	35	320

* ^{24}Na : Interfering activity

* A. G. Hanna et al ; J.Radioanal.Chem.,37, 581(1977)

Table 3. Elements suitable for determination in rock sample by thermal and epithermal neutron activation analysis.

Element	(n, γ) Product Nuclide	Half Life	I/σ_{th} ^{a)}	Selected γ -Energy KeV	Irradiation Mode				b) Advantage Factor
					TS	ES	TL	EL	
Na	²⁴ Na	15.03 h	0.60	1368.4	O				*
Mg	²⁷ Mg	9.46 m	0.77	1014.1	O				6.48
Al	²⁸ Al	2.3 m	0.75	1778.9	O				0.98
Cl	³⁸ Cl	37.2 m	0.71	1642	O				0.80
K	⁴² K	12.36 h	0.96	1524.7	O				0.90
Ca	⁴⁹ Ca	8.72 m	0.83	3083	O				0.88
Sc	⁴⁶ Sc	84 d	0.42	889.4			O		0.38
Ti	⁵¹ Ti	5.8 m	0.67	320	O				0.95
V	⁵² V	3.75 m	0.53	1434	O				0.26
Cr	⁵¹ Cr	27.7 d	0.51	320			O		0.49/0.54
Mn	⁵⁶ Mn	2.58 h	1.04	1810.7	O				1.43
Fe	⁵⁹ Fe	44.6 d	1.09	1098.6			O		1.91
Co	⁶⁰ Co	5.272 y	1.68	1173.2			O	O	0.69
Ni*	⁵⁸ Co	71.3 d	-	810.3				O	N.D
Zn	⁶⁵ Zn	265 d	1.84	1115.4			O	O	3.93/3.27
Ga	⁷² Ga	14.1 h	6.60	834.1		O			3.51
As	⁷⁶ As	26.4 h	13.62	559.2				O	N.D
Se	⁷⁵ Se	120 d	9.92	264.6				O	N.D
Br	⁸² Br	35.4 h	18.59	617		O		O	8.98
Rb	⁸⁶ Rb	18.7 d	11.46	1076.6				O	4.40
Sr	⁸⁵ Sr	64.9 d	11.79	514				O	N.D
	^{87m} Sr	2.9 h	5.70	388.5		O			5.25
Zr	⁹⁵ Zr	65 d	6.0	756.6				O	N.D
Mo	⁹⁹ Mo(^{99m} Tc)	66.7 h	56.15	140.6				O	10.56
In	^{116m} In	54 m	16.05	417		O			7.20
Sb	¹²² Sb	2.8 d	34.24	564				O	27.37
	¹²⁴ Sb	60.1 d	29.92	602.6				O	N.D
Cs	^{134m} Cs	2.89 h	12.0	127.4		O			N.D
	¹³⁴ Cs	2.05 y	16.0	795.8				O	17.59
Ba	¹³¹ Ba	12 d	20.8	216.1				O	21.12
	¹³⁵ Ba	83 m	0.89	165.8	O	O			2.73
La	¹⁴⁰ La	40.27 h	1.37	1595.4		O	O	O	1.06
Ce	¹⁴¹ Ce	32.5 d	0.84	145.4			O		0.46
Nd	¹⁴⁷ Nd	11.3 d	1.93	91.4			O	O	6.99
Sm	¹⁵³ Sm	47.1 h	14.37	103.2		O	O	O	8.62
Eu	^{152m} Eu	9.3 h	0.57	121.8	O				1.35
	¹⁵² Eu	12.3 y	0.60	1407.4			O	O	
Tb	¹⁶⁰ Tb	73 d	17.24	879.4				O	2.05
Dy	¹⁶⁵ Dy	2.37 h	0.24	94.6	O				1.45
Yb	¹⁶⁹ Yb	31 d	8.79	177			O	O	N.D/3.44
	¹⁷⁵ Yb	4.2 d	0.53	396.1			O		
Lu	¹⁷⁷ Lu	6.7 d	1.81	208.4			O	O	3.29
Hf	¹⁸¹ Hf	43 d	2.67	482.2			O	O	1.21
Ta	¹⁸² Ta	115 d	33.35	1221.6				O	4.43
W	¹⁸⁷ W	23.8 h	13.24	685.7				O	N.D
Th*	²³³ Pa	27 d	82.3	311.8				O	16.94
U*	²³⁹ Np	2.35 d	276.3	277.5				O	32.86

a) E. Gryntakis, D. E. Cullen, G. Mundy ; Handbook on Nuclear Activation Data, Tech. Report Series, No.273, IAEA, Vienna, 1987

b) Experimental Data ; All Calculation are based on ²⁴Na as the interfering activity.

Table 4. Measured thermal, epithermal and fast neutron flux of NAA irradiation holes and cadimium ratios at 22MW thermal power.

Irradiation Hole	Neutron flux, n/cm ² sec.			Cadimium Ratio(Au)
	Thermal, ϕ_t	Epithermal, ϕ_e	Fast, ϕ_f	
NAA 1	$1.75 \pm 0.02 \times 10^{13}$	$3.62 \pm 2.13 \times 10^{10}$	$3.25 \pm 0.14 \times 10^{10}$	205
NAA 2 (Cd lined)	$5.78 \pm 0.56 \times 10^{11}$	$3.40 \pm 0.41 \times 10^{10}$	$3.85 \pm 0.31 \times 10^9$	35
NAA 3	$7.60 \pm 0.06 \times 10^{13}$	$4.35 \pm 1.85 \times 10^{11}$	$6.80 \pm 0.70 \times 10^{11}$	13

Table 5. Physical property of PE irradiation capsule used and temperature measurement on PTS irradiation holes(22MW).

Time (min) Irradiation & Temperature(°C)	0.5	1	5	10	30	60	Neutron Flux (n/cm ² s)	Dose Rate (rads/s)
PTS #1	< 40	< 40	< 40	< 45	< 50	< 60	1.75 E+13	3500
PTS #2 (Cd)	< 40	< 70	< 90	-	-	-	6.05 E+11	
PTS #2	< 40	< 60	< 75	-	-	-	7.50 E+13	

* Temperature Monitor : Thermo Label and Tape (30-120°C Range), Japan.

* Proerties of PE Irradiation Capsule :

Melting Index : 20.7

Melting Point : 132 °C

Density : 0.95

Impurities : < 1-100 ppm

Table 6. Physical and polymeric characteristics of the old rabbit.

Analysis	Method	Results	Remarks
Av MW (minimum) (maximum)	GPC	94800 23700 301300	narrow range of MW good mechanical property
Melting- Index	190°C, 2160kg	15.1g/10min	good flow injection property
Cross- Link	ASTM	No	
Material	FT-IR	Pure HDPE	
Additive	GC NMR	No No	No antioxidants Comonomer HDPE
Density	ASTM	0.952	

Table 7. Inorganic elemental concentration($\mu\text{g/g}$) of the old rabbit.

Element	Ca	Mg	Al	Ti	Na	Fe	Zn	Cl	Mn	As
Content	220	140	74	6.1	1.3	2.3	0.06	38	0.17	0.0005
Element	Br	Sb	La	Cr	Hf	Co	Eu	Sc	Ce	Sm
Content	0.009	0.0031	0.01	0.31	0.0007	0.0043	<0.01	<0.0001	0.05	0.00007

Table 8. Physical properties of HDPE pellets.

Property New Material	MI	D	H	ST	TT
New-1	7.0	0.949	21	125	72
New-2	25	0.953	9.0	120	69
New-3	8.0	0.961	6.0	125	70
New-4	18	0.958	4.0	123	67
New-5	18	0.962	4.0	120	70
New-6	5.5	0.962	12	120	70
New-7	7.5	0.962	8.0	120	69

*MI : melting index(g/10min), D : density(g/cm³)

H : IZOD Impact Strength(kg.cm/cm), ST : Softening Point(°C)

TT : Heat Deflection Temperature(°C)

Table 9. Elemental concentration($\mu\text{g/g}$) of candidate HDPE irradiation rabbit by NAA.

Element	New-1	New-2	New-3	New-4	New-5	New-6	New-7
Ca	150	160	130	300	130	160	140
Mg	110	110	23	26	17	15	20
Al	76	52	13	23	71	70	100
Ti	4.1	5.2	9.4	13	2.4	2.5	3.5
Na	0.20	0.43	0.13	0.92	0.43	0.12	0.41
Fe	1.5	<0.75	0.52	0.81	2.2	0.92	2.2
Zn	<0.034	0.11	<0.030	0.055	0.091	<0.050	<0.053
Cl	100	79	140	140	89	80	93
Mn	<0.006	<0.006	<0.006	0.010	0.0094	<0.006	<0.010
As	<0.0007	0.0007	<0.0003	<0.0004	0.0038	<0.0003	0.0028
Br	<0.0024	0.003	0.0030	0.051	0.0055	0.0029	0.0039
Sb	<0.0011	0.0029	0.0044	0.055	0.0014	0.0022	0.0009
La	<0.0002	<0.0001	<0.0001	0.00072	0.0005	<0.0001	0.0002
Cr	0.021	0.020	0.0052	0.012	<0.015	0.013	0.026
Hf	<0.0007	<0.0007	<0.0004	<0.0008	<0.001	<0.0010	0.0022
Co	0.0092	0.0086	0.0028	0.0034	0.0043	0.0022	0.0069
Eu	<0.020	0.0017	<0.0008	<0.0003	0.0016	0.0027	0.0021
Sc	<0.0001	0.00023	0.00007	0.00005	0.0001	0.00013	<0.0001
Ce	0.0095	<0.0059	<0.0028	<0.0028	0.012	<0.0086	<0.011
Sm	0.00023	<0.0001	0.00013	0.00006	0.0002	<0.0001	0.0002

Table 10. Nuclear data of elements for Neutron Activation Analysis.

Element	Nuclear Reaction	Abundance (%)	Thermal Cross Section	Half-life	Atomic Weight	γ - Energy (%)
Na	$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$	100	0.534	15.0 h	22.99	1368.4(47) 2753.6(52)
Mg	$^{26}\text{Mg}(n,\gamma)^{27}\text{Mg}$	11.17	0.027	9.51 m	24.31	1014(43)
Al	$^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$	100	0.235	2.31 m	26.98	1778.9(100)
K	$^{41}\text{K}(n,\gamma)^{42}\text{K}$	6.88	1.24	12.5 h	39.10	1524.7(100)
Ca	$^{48}\text{Ca}(n,\gamma)^{49}\text{Ca}$	0.185	1.1	8.75 m	40.08	3083(100)
Sc	$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$	100	15	84.0 d	44.96	889.4(100)
Ti	$^{50}\text{Ti}(n,\gamma)^{51}\text{Ti}$	5.34	0.14	5.80 m	47.90	320(100)
V	$^{51}\text{V}(n,\gamma)^{52}\text{V}$	99.76	4.9	3.75 m	50.94	1434.4(100)
Cr	$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$	4.31	17.0	27.8 d	52.0	320(100)
Mn	$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$	100	13.3	2.58 h	54.94	846.9(99)
Fe	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	0.33	1.2	45.0 d	55.85	1098.6(56)
Co	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	100	17.2	5.26 y	58.93	1173.1(100) 1332.5(100)
Rb	$^{85}\text{Rb}(n,\gamma)^{86}\text{Rb}$	72.15	0.7	18.68 d	85.47	1076.6(100)
Sr	$^{86}\text{Sr}(n,\gamma)^{87}\text{Sr}$	9.86	0.8	2.9 h	87.62	388.5(100)
Te	$^{122}\text{Te}(n,\gamma)^{123}\text{Te}$	2.46	1.1	104 d	127.60	158.8(100)
Cs	$^{133}\text{Cs}(n,\gamma)^{134}\text{Cs}$	100	29	2.06 y	132.91	604.7(98)
Ba	$^{130}\text{Ba}(n,\gamma)^{131}\text{Ba}$	0.101	11	12.0 d	137.34	124.2(58)
Cl	$^{37}\text{Cl}(n,\gamma)^{38}\text{Cl}$	24.47	0.43	37.7 m	35.45	1642(81)
La	$^{139}\text{La}(n,\gamma)^{140}\text{La}$	99.91	8.2	40.22 h	138.91	1596.2(96)
Ce	$^{140}\text{Ce}(n,\gamma)^{141}\text{Ce}$	88.48	8.2	32.5 d	140.12	145.5(100)
Nd	$^{146}\text{Nd}(n,\gamma)^{147}\text{Nd}$	17.22	10	11.3 d	144.24	531(20)
Sm	$^{152}\text{Sm}(n,\gamma)^{153}\text{Sm}$	26.72	210	47.1 h	150.40	103.2(28)
Eu	$^{151}\text{Eu}(n,\gamma)^{152}\text{Eu}$	47.82	5700	12.3 y	151.96	344(97)
Gd	$^{158}\text{Gd}(n,\gamma)^{159}\text{Gd}$	24.87	3.5	18.5 h	157.25	363.5(100)
Tb	$^{159}\text{Tb}(n,\gamma)^{160}\text{Tb}$	100	46	72.0 d	158.93	298.6(83)
Dy	$^{164}\text{Dy}(n,\gamma)^{165}\text{Dy}$	28.18	951	2.3 h	162.50	94.7(100)
Ho	$^{165}\text{Ho}(n,\gamma)^{166}\text{Ho}$	100	64	26.7 h	164.93	80.6(100)
Er	$^{170}\text{Er}(n,\gamma)^{171}\text{Er}$	14.88	9	7.5 h	167.26	308.2(100)
Tm	$^{169}\text{Tm}(n,\gamma)^{170}\text{Tm}$	100	127	130 d	168.93	84.3(100)
Yb	$^{168}\text{Yb}(n,\gamma)^{169}\text{Yb}$	0.135	5500	32 d	173.04	177(35)
Lu	$^{176}\text{Lu}(n,\gamma)^{177}\text{Lu}$	2.59	4000	6.7 d	174.97	113(6.5)
Th	$^{232}\text{Th}(n,\gamma)^{233}\text{Th}$ (^{233}Pa)	100	7.4	27 d	232.04	311.9(80)
U	$^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$ (^{239}Np)	99.74	2.7	2.35 d	238.04	228.2(12.7)
Hf	$^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}$	35.24	12.6	43.0 d	178.49	133.1(43)
Ta	$^{181}\text{Ta}(n,\gamma)^{182}\text{Ta}$	99.99	21	115 d	180.95	1221.6(14)
W	$^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$	28.41	38	23.8 h	183.85	479.3(84)

Table 11. Detection limits by neutron activation analysis at a flux density of 10^{14} n/cm².s.

Detection limit (g)	Irradiation time (1 hr)	Irradiation time (1 week)
$10^{-14} \sim 10^{-13}$	Dy ^l	Eu ^l , Dy ^l
$10^{-13} \sim 10^{-12}$	Co, Rh ^{*z} , Ag ^{*z} , In ^l , Eu ^l , Ir	Mn, Co, Rh ^{*l} , Ag ^{*z} , In, Sm ^l , Ho, Re ^l , Ir, Au.
$10^{-12} \sim 10^{-11}$	V, Mn, Se [*] , Br ^l , I ^l , Pr, Er [*] Yb [*] , Hf [*] , Th ^l	Na, Sc, V, Cu ^z , Ga ^l , As, Se [*] , Br ^l , Pd. Sb, I ^l , Cs, La, Pr, Er [*] , Tm ^l , Yb [*] , Lu, Hf [*] , W, Hg, Th ^l .
$10^{-11} \sim 10^{-10}$	Mg, Al, Cl ^l , Ar, Cu ^l , Ga ^z , Nb Cs, Sm, Ho, Lu, Re, Au, U	Mg, Al, Cl ^l , Ar, K ^l , Cr ^l , Ni ^l , Ge ^l , Kr. Y ^β , Nb, Ru, Gd ^l , Tb ^l , Tl ^l , Os ^l , U.
$10^{-10} \sim 10^{-9}$	F [*] , Na, Ge ^l , As, Kr, Pb ^l , Sr Mo, Ru, Pd, Sb, Te ^l , Ba, La, Nd ^l , Gd ^l , W, Os, Hg, Tl ^β	F [*] , P ^β , Zn, Rb ^l , Sr, Mo, Te ^l , Ba, Ce. Nd, Pt, Tl ^β .
$10^{-9} \sim 10^{-8}$	Ne [*] , Si ^β , K, Sc, Ti, Ni, Y ^β , Cd, Sn, Xe, Tb ^l , Tm, Ta, Pt	Ne [*] , Si ^β , Ti, Cd, Sn, Xe, Bi ^β .
$10^{-8} \sim 10^{-7}$	P ^β , Cr ^l , Zn, Ce	S ^β , Ca ^β , Fe, Zr.
$10^{-7} \sim 10^{-6}$	S ^β , Zr, Pb ^β , Bi ^β	Pb ^β
$10^{-6} \sim 10^{-5}$	O [*] , Ca ^β	O [*]

* The radionuclides produced from these elements have half-lives ranging from 1 sec to 1 min. Therefore, for quantitative determination, a decay rate of the order of 100 Bq is necessary and the elements have been placed in the next group.

β ; Only beta-rays, no gamma-rays.

1,2) The percentages of the gamma-transitions are low. Therefore, if the activity is measured with a gamma-spectrometer, the detection limits are lower by the number of orders of magnitude indicated by the superscript.

Table 12. Nuclear properties and detection limit of nuclide used.

Element	Isotopes	Half-life	Gamma energies used, (Kev)	Detection limit (ppm)	S/N ratio
Short-lived isotopes					
Al	Al-28	2.24 min	1778.9	5.6E + 02	52.45
Ba	Ba-139	83.3 min	165.9	2.1E + 03	0.08
Br	Br-80	17.7 min	616.2	1.9E + 02	0.72
Ca	Ca-49	8.72 min	3084.4	1.8E + 04	-
Cl	Cl-38	37.3 min	1642.4, 2167.8	1.2E + 03	11.62
Cu	Cu-66	5.1 min	1039	1.6E + 03	0.22
Dy	Dy-165	2.33 hr	94.7	9.6E + 00	0.07
I	I-128	25.0 min	442.3	1.1E + 02	0.11
In	In-116m	54.2 min	416.9, 1097.3	3.6E + 00	0.10
K	K-42	12.36 hr	1524.7		
Mg	Mg-27	9.45 min	1014.4		
Mn	Mn-56	2.58 hr	846.7, 1810.7	8.8E + 01	10.23
Na	Na-24	15.02 hr	1368.4, 2754.1	1.4E + 03	12.32
Sr	Sr-87m	2.81 hr	388.4		
Ti	Ti-51	5.76 min	320.1	2.4E + 03	0.49
U	U-239	23.5 min	74.6		
V	V-52	3.76 min	1434.2	2.3E + 01	2.57
Medium-lived isotope					
As	As-76	26.3 hr	559.1	9.5E + 01	1.54
Au	Au-198	2.7 da	411.8	4.3E - 02	0.03
Ba	Ba-131	11.7 da	123.8, 496.3	1.2E + 03	0.18
Br	Br-82	35.3 hr	554.3, 776.5	9.7E + 01	2.82
Cd	In-115m	53.5 hr	336.3	4.5E + 02	0.05
Ga	Ga-72	14.1 hr	834.4, 629.9		
Ge	Ge-77	11.03 hr	265.3		
Ho	Ho-166	26.8 hr	80.6		
K	K-42	12.38 hr	1524.7	1.3E + 04	1.20
La	La-140	40.23 hr	487.0, 1596.2	4.6E + 01	12.28
Lu	Lu-177	6.7 da	208.4	1.5E + 00	0.08
Mo	Mo-99	66.9 hr	140.5	4.5E + 01	0.03
Na	Na-24	15.02 hr	1368.4, 2754.1	4.0E + 03	21.80
Sb	Sb-122	2.72 da	564.1	7.2E + 00	3.76
Sm	Sm-153	46.7 hr	103.2	6.0E + 00	0.92
U	Np-239	2.35 da	277.5	2.6E + 00	0.04
W	W-187	23.9 hr	685.8	4.9E + 00	0.09
Zn	Zn-69m	13.9 hr	438.6	5.6E + 03	0.08

(continued)

(continued)

Element	Isotopes	Half-life	Gamma energies used, (Kev)	Detection limit (ppm)	S/N ratio
Long-lived isotopes					
Ag	Ag-110m	252 da	657.7, 884.4	5.7E + 00	0.44
Ce	Ce-141	32.5 da	145.5	1.6E + 01	0.59
Co	Co-60	5.26 yr	1173.2, 1332.5	3.4E + 00	6.13
Cr	Cr-51	27.72 da	320.1	3.0E + 01	4.26
Cs	Cs-134	2.06 yr	795.6	6.3E + 00	0.16
Eu	Eu-152	12.3 yr	121.8, 1407.9	6.5E - 01	5.47
Fe	Fe-59	44.6 da	1099.3, 1291.6	2.4E + 03	26.85
Hf	Hf-181	42.4 da	482.2	2.8E + 00	0.55
Hg	Hg-203	46.6 da	279.2	6.1E + 00	0.18
Lu	Lu-177m	161 da	378.5	1.5E + 00	0.08
Nd	Nd-147	10.99 da	91.4	6.8E + 01	0.08
Rb	Rb-86	18.7 da	1076.6	1.8E + 02	0.28
Sb	Sb-124	60.1 da	1691.0	1.8E + 01	25.95
Sc	Sc-46	83.8 da	889.4, 1178.0	4.9E - 01	5.29
Se	Se-75	118.5 da	264.6	2.9E + 01	0.34
Sn	Sn-113	115 da	391.7		
Sr	Sr-85	64.9 da	514.0		
Ta	Ta-182	115 da	1221.4	3.5E + 01	5.10
Tb	Tb-160	72.4 da	879.4	1.6E + 00	0.09
Th	Pa-233	27.0 da	311.9	2.9E + 00	0.71
Tm	Tm-170	129 da	84.3	4.4E + 00	0.07
Yb	Yb-169	31 da	177.0	4.7E + 00	0.09
	Yb-175	4.19 da	396.3	7.0E + 00	0.16
Zn	Zn-65	265 da	1115.4	1.4E + 02	16.70
Zr	Zr-95	64 da	756.7		

Table 13. Statistical function for data analysis applied in environmental studies.

POPULATION ("All" measurements)	SAMPLE (Sample of n-measurements)
	$x_1, x_2, \dots, x_n$
Arithmetic Mean, μ	$\bar{x} = (1/n) \sum x_i$
Standard Deviation, σ	$s = \frac{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{(n-1)}}$
Variance, σ^2	s^2
Standard Error of Mean	$s_x = s/\sqrt{n}$
Geometric Mean,	$GM = (\prod x_i)^{1/n}$ or antilog of $[(\log x_1 + \log x_2 + \dots + \log x_n)/n]$
Skewness,	$g_1 = (1/ns^3) \sum (x_i - \bar{x})^3$
Kurtosis,	$g_2 = (1/ns^4) \sum (x_i - \bar{x})^4$

Table 14. Analytical results of U and Th in Standard Reference Material and mixed diet sample by RNAA.

U	Sample	SRM Oyster Tissue (Certified value : 132 ± 12 ppb)			Mixed Diet Sample		
	Run No.	1	2	3	1	2	3
	Analytical value (ppb)	114	113	112	39.1	37.8	29.2
	Counting error (%)	8.7	13.3	2.0	9.0	10	4.4
	Mean ± SD	113 ± 1 ppb			35.4 ± 4.4 ppb		
Th	Sample	SRM Pine Needle (Certified Value : 37 ± 8 ppb)			Mixed Diet Sample		
	Run No.	1	2		1	2	
	Analytical Value(ppb)	33	37		3.2	3.6	
	Counting error (%)	1.5	1.8		3.1	2.8	
	Mean ± SD	35 ± 3 ppb			3.4 ± 0.2 ppb		

Table 15. Typical conditions for the analysis of environmental samples.

Irradiation facility	Neutron flux (n/cm ² sec)	Sample weight	Irradiation time	Cooling time	Counting time	Element detected
PTS	1×10^{13}	5-10 mg	2 m	10 m	300 s	Al, Ba, Br, Ca, Cl, Cu, Dy, Eu, I, In, K, Mg, Mn, Na, Ti, V
PTS	1×10^{13}	50-100 mg	10 h	5-7 d	2000 s	As, Au, Ba, Br, Cd, K, La, Mo, Na, Sb, Sm, U, W, Zn
PTS	1×10^{13}	50-100 mg	10 h	15-30 d	4000 s	Ag, Ce, Cr, Cs, Co, Eu, Fe, Hf, Hg, Lu, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Ta, Tb, Th, Tm, Yb, Zn

Table 16. The analytical results of the standard reference materials by Neutron Activation Analysis.

Ele't	Method (I/R/E/P)	Wheat Flour, NIST SRM 1567a			Peach Leaves, NIST SRM 1547			Total Diet, NIST SRM 1548			Bovine Liver, NIST SRM 1577b			Oyster tissue, NIST SRM 1566a			Citrus Leaves, NIST SRM 1572		
		Certi. value Mean±SD	Exp. value Mean±SD	RE (%)	Certi. value Mean±SD	Exp. value Mean±SD	RE (%)	Certi. value Mean±SD	Exp. value Mean±SD	RE (%)	Certi. value Mean±SD	Exp. value Mean±SD	RE (%)	Certi. value Mean±SD	Exp. value Mean±SD	RE (%)	Certi. value Mean±SD	Exp. value Mean±SD	RR (%)
Ag	I										0.039±0.007	-		1.68±0.15	1.72±0.19	2.4	-	-	
Al	I	5.7±1.3	5.72±0.46	0.3	249±8	249±6.5	0.1	(33)	34.4±3.6		(3)			202.5±12.5	206±22.3	1.7	92±15	90±14	2.2
As	I, (R)	(0.006)			0.060±0.018						(0.05)			14.0±1.2	12.8±1.96	8.6	3.1±0.3	2.9±0.3	6.4
Au	I													(0.01)	0.011±0.001		-	-	
Ba	I				124±4	126±3.3	1.8							-	-		21±3	20.5±4.68	2.4
Br	I, E	(6)			(11)	11.4±0.3					(9.7)			-	51.2±2.52		(8.2)	6.9±0.6	
Ca	I	191±4	188±9	1.5	15600±200	14950±140	4.2	1740±70	1735±13	0.3	116±4	113±8	2.5	1960±190	1790±260	8.7	31500±1000	31800±1200	1.0
Cd	I, (R)	0.026±0.002			0.026±0.003			0.028±0.004			0.50±0.03			4.15±0.38	3.72±1.04	10.4	0.030±0.010	-	
Ce	I				(10)	10.8±1.5								(0.4)	0.5±0.05		(0.28)	0.44±0.04	
Cl	I	(565)	535±5		360±19	312±0.3	13.2	8700±400	8460±480	2.8	2780±60	2657±23	4.4	8290±140	7090±160	14.5	(414)	370±11	
Co	I	(0.006)	0.006		(0.07)	0.074±0.003					(0.25)	0.26±0.002		0.57±0.11	0.65±0.08	14.0	(0.020)	0.025±0.004	
Cr	I				(1)	1.18±0.01								1.43±0.46	1.46±0.27	2.1	0.8±0.2	0.86±0.03	7.5
Cs	I, R, E							(14)	0.014±0.0008					(0.02)	-		(0.098)	0.088±0.011	
Cu	I, (R)	2.1±0.2	2.14±0.18	1.9	3.7±0.4			2.6±0.3			160±8	174±2	8.7	66.3±4.3	59.7±15.1	9.9	16.5±1.0	16.6±0.7	0.6
Eu	I				(0.17)			(0.4)						(0.01)	-		(0.01)	0.01±0.001	
Fe	I	14.1±0.5	14.3±0.1	1.7	218±14	238±5.6	9.3	32.6±3.6	34.2±4.2	4.8	184±15	188±6	2.2	539±15	486±34.3	9.8	90±10	89±8	1.1
Hg	I, (R)	(0.0005)			0.031±0.007						(0.003)			0.0642±0.0067	-		0.080±0.020	-	
I	I, R, E	(0.0009)			(0.3)									4.46±0.42	4.08±0.65	8.5	1.84±0.03	1.66±0.14	9.8
K	I	1330±30	1271±45	4.5	24300±300	23140±30	4.8	6060±280	5620±70	7.2	9940±20	9238±360	7.1	7900±470	6960±620	11.9	18200±600	18300±300	0.5
La	I				(9)	11.1±1.6								(0.3)	0.20±0.018		(0.190)	0.20±0.03	
Mg	I	400±20	405±9	1.3	4320±80	4310±120	0.3	556±27	551±33	1.0	601±28	620±9	3.1	1180±170	1130±190	4.2	5800±300	6100±250	5.2
Mn	I	9.4±0.9	8.45±0.02	10.2	98±3	95.1±2.1	3.0	5.2±0.4	5.25±0.02	0.9	10.5±1.7	10.1±0.3	3.4	12.3±1.5	11.1±1.33	9.7	23±2	24±1	4.3
Na	I	6.1±0.8	6.25±0.08	2.4	24±2	22.8±0.7	5.2	6250±260	6460±130	3.4	2420±60	2345±33	3.1	4170±130	3630±150	12.9	160±20	154±15	3.7
Rb	I, E	0.68±0.03	0.73±0.09	7.9	19.7±1.2	20.9±1.9	5.8	(4.8)	4.92±0.16		13.7±1.1	14.9±1.4	8.6	(3)	3.83±0.19		4.84±0.06	4.73±0.5	2.3
Sb	I, E				(0.02)						(0.003)			(0.01)	-		(0.04)	0.042±0.005	
Sc	I				(0.04)	0.050±0.003								(0.06)	0.051±0.005		(0.010)	0.0098±0.0010	
Se	I, E, (R)	1.1±0.2	1.15±0.04	4.4	0.120±0.009			0.245±0.005	0.257±0.013	4.8	0.73±0.06	0.72±0.02	1.5	2.21±0.24	2.46±0.49	11.3	(0.025)	-	
Sm	I, E				(1)	1.18±0.05								(0.06)	0.057±0.004		(0.052)	0.045±0.005	
Sr	I, R, E				53±4	51.7±4.8	2.4				0.136±0.001			11.1±1.0	-		100±2	98.5±4.9	1.5
U	I, R, E	(0.0003)			(0.015)				0.035±0.0004										
Th	I, R, E				(0.05)	0.051±0.002				0.003				(0.04)	-		-	0.025±0.003	
V	I	(0.011)	0.015		0.37±	0.366±0.022	1.0				(0.123)	0.11±0.007		4.68±0.15	4.44±0.53	5.1	-	-	
Zn	I, E	11.6±0.4	12.2±0.13	4.7	17.9±	17.7±0.5	1.2	30.8±1.1	34.2±3.6	10.9	127±16	139±10.9	9.4	830±57	730±30	12.0	29±2	28.3±0.31	2.4

Table 17. Analytical results of urban particulate matter, NIST SRM 1648 by INAA.

Element	Nuclide	Exp. Value(mg/kg)		Certified Value(mg/kg)*	Relative Error(%)
		Range	Mean(rsd, %)		
Al(%)	²⁸ Al	2.42 - 3.99	3.47 (15.4)	3.42±0.11	1.5
As	⁷⁶ As	89.7 - 146	102.9 (17.5)	115±10	10.5
Au	¹⁹⁸ Au	0.036 - 0.069	0.05 (23)		
Ba	¹³¹ Ba	610 - 894	729.7 (15.9)	(737)	
Br	⁸² Br	441 - 580	523.6 (8.5)	(500)	
Ca(%)	⁴⁹ Ca	0.588 - 0.845	0.708 (12)		
Cd	¹¹⁵ Cd	67 - 86.1	76.57 (12.5)	75±7	2.1
Ce	¹⁴¹ Ce	41.4 - 48.6	44.86 (1.94)	(55)	
Cl(%)	³⁸ Cl	0.399 - 0.605	0.479 (16.6)	(0.45)	
Co	⁶⁰ Co	16.8 - 20.5	7.62 (5.7)	(18)	
Cr	⁵¹ Cr	382 - 412	397 (2.9)	403±12	1.5
Cs	¹³⁴ Cs	2.6 - 3.6	3.11 (11.9)	(3)	
Cu	⁶⁶ Cu	565 - 642	595 (33.6)	609±27	2.3
Dy	¹⁶⁵ Dy	2.4 - 4.2	3.25 (16.8)		
Eu	¹⁵² Eu	0.75 - 0.79	0.77 (2.13)	(0.8)	
Fe(%)	⁵⁹ Fe	3.38 - 3.82	3.60 (4.0)	3.91±0.1	7.9
Hf	¹⁸¹ Hf	4.03 - 4.83	4.34 (5.9)	(4.4)	
Hg	²⁰³ Hg	2.72 - 4.85	3.67 (17.2)		
I	¹²⁸ I	20.1 - 27.6	23.28 (12.2)	(20)	
In	^{116m} In	0.92 - 1.43	1.12 (17.9)	(1.0)	
K(%)	⁴² K	0.967 - 1.22	1.052 (9.2)	1.05±0.01	0.2
La	¹⁴⁰ La	36.8 - 38.4	37.7 (3.7)	(42)	
Lu	¹⁷⁷ Lu	0.44 - 0.62	0.51 (10.5)		
Mn	⁵⁶ Mn	618 - 1060	845 (15.7)	(860)	
Mo	⁹⁹ Mo	31.3 - 49.6	37.53 (17.6)		
Na(%)	²⁴ Na	0.340 - 0.520	0.406 (15.2)	0.425±0.002	4.5
Nd	¹⁴⁷ Nd	24.8 - 31.9	27.96 (9.4)		
Rb	⁸⁶ Rb	47.0 - 66.1	53.7 (13.9)	(52)	
Sb	¹²⁴ Sb	43.6 - 44.1	43.8 (4.7)	(45)	
Sc	⁴⁶ Sc	6.0 - 6.1	6.1 (3.3)	(7)	
Se	⁷⁵ Se	22.4 - 23.5	22.8 (15.3)	27±1	15.4
Sm	¹⁵³ Sm	4.8 - 5.2	5.085 (4.1)	(4.4)	
Ta	¹⁸² Ta	5.4 - 10.2	8.44 (17.3)		
Th	²³³ Pa	6.6 - 8.7	7.73 (7.8)	(7.4)	
Ti(%)	⁵¹ Ti	0.24 - 0.58	0.41 (2.86)	(0.40)	
U	²³⁹ Np	2.9 - 3.6	3.05 (12)	5.5±0.1	44.5
V	⁵² V	104 - 173	139 (15.9)	140±3	0.7
W	¹⁸⁷ W	3.8 - 6.4	5.3 (19.6)	(4.8)	
Yb	¹⁷⁵ Yb	2.21 - 3.38	3.09 (14)		
Zn(%)	⁶⁵ Zn	0.397 - 0.63	0.433 (6.9)	0.476±0.014	9.0

* Data in parenthesis are those of informative values.

Table 18. Results of statistical data treatment for measured elements in urban dust.

Element	Measured values, mg/kg			
	Range	Overall Mean	Standard Deviation	This work (Mean $\pm$ SD)
Ag	1.19~1.58	1.39	0.19	1.6 $\pm$ 0.3
Al(%)	3.024~4.210	3.629	0.276	3.660 $\pm$ 0.127
As	16.7~32.0	24.2	3.49	24.6 $\pm$ 3.1
Ba	600~700	643	38.5	620 $\pm$ 78
Br	29.9~49.9	38.1	5.65	36.1 $\pm$ 1.4
Cd	0.56~10.6	4.45	3.36	31.4 $\pm$ 8.0
Ce	25.0~39.9	34.5	4.61	34.1 $\pm$ 2.9
Cl(%)	0.174~0.406	0.287	0.060	0.249 $\pm$ 0.018
Co	12.1~16.8	14.5	1.25	14.5 $\pm$ 0.2
Cr	190~274	236	20.7	234 $\pm$ 3
Cs	2.10~4.81	3.75	0.78	3.5 $\pm$ 0.1
Cu	463~1040	768	134	1021 $\pm$ 236
Eu	0.58~0.72	0.66	0.07	0.69 $\pm$ 0.02
Fe(%)	3.580~4.693	4.070	0.280	3.921 $\pm$ 0.069
Hf	2.10~2.83	2.53	0.23	2.55 $\pm$ 0.04
K(%)	1.038~1.397	1.232	0.103	1.223 $\pm$ 0.194
La	15.7~21.2	18.1	1.76	19.7 $\pm$ 0.3
Mn	653~948	808	84.6	814 $\pm$ 30
Na(%)	0.583~0.692	0.646	0.032	0.634 $\pm$ 0.014
Rb	43.7~67.5	55.7	6.07	52.7 $\pm$ 3.7
Sb	93.7~144	114	13.9	117 $\pm$ 2
Sc	4.44~6.07	5.42	0.48	5.7 $\pm$ 0.1
Se	5.15~8.60	6.43	1.10	7.3 $\pm$ 0.4
Sm	2.36~2.80	2.57	0.14	2.80 $\pm$ 0.04
Th	4.12~5.49	5.05	0.43	5.0 $\pm$ 0.1
Ti(%)	0.160~0.289	0.222	0.033	0.289 $\pm$ 0.064
V	68.3~125	94.3	13.5	99.0 $\pm$ 7.1
W	5.63~7.10	6.60	0.59	5.6 $\pm$ 0.8
Zn(%)	0.295~0.528	0.398	0.057	0.377 $\pm$ 0.006

Table 19. Results of statistical data treatment for measured elements in loaded filter sample.

Element	Measured values, mg/kg			
	Range	Overall Mean	Standard Deviation	This work (Mean $\pm$ SD)
Al(%)	1.663~5.256	3.409	0.863	3.646 $\pm$ 0.233
As	21.6~24.4	23.0	0.93	23.8 $\pm$ 2.9
Ba	58.7~877	753	102	850 $\pm$ 360
Br	2.81~141	60.0	49.2	3.0 $\pm$ 0.2
Ce	4.16~49.3	33.6	15.2	42.4 $\pm$ 8.1
Cl(%)	0.018~0.321	0.143	0.085	0.070 $\pm$ 0.015
Co	1.49~40.2	18.8	9.4	16.3 $\pm$ 1.0
Cr	67~785	412	198	353 $\pm$ 39
Cu	623.7~984	807	98	828 $\pm$ 257
Fe(%)	3.816~6.176	4.831	0.576	4.910 $\pm$ 0.330
Hf	3.05~4.08	3.48	0.37	3.6 $\pm$ 1.3
K(%)	0.825~1.120	0.979	0.090	1.040 $\pm$ 0.058
La	17.6~27.2	21.9	3.17	24.1 $\pm$ 1.9
Mn	316~834	558	121	493 $\pm$ 14
Na(%)	0.221~0.417	0.336	0.059	0.378 $\pm$ 0.003
Sb	105~140	127	11	136 $\pm$ 15
Sc	5.56~7.28	6.33	0.46	7.3 $\pm$ 0.4
Sm	1.75~4.25	3.10	0.89	7.5 $\pm$ 1.6
Ti(%)	0.183~0.351	0.260	0.043	0.245 $\pm$ 0.006
V	25.0~142	94.5	29.7	89.6 $\pm$ 11.7
Zn(%)	0.240~0.500	0.398	0.059	0.437 $\pm$ 0.032

Table 20. Homogeneity data expressed as relative standard deviation(%) for listed elements in IAEA-0390 algae materials.

Element	As	Br	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Ni	Sb	Zn
IAEA-391		9		2	10	1.7	4.5	0.6	1.6	2		10	3.5
IAEA-392		1.7		0.5	0.9	3.5	1.7	1.5	1	1.4		6	3.5
IAEA-393	5	3	5	5	3.6	2.3	7.6	0.7	2.7	4.6	5.4	8.3	4.6
Analytical method	INAA	INAA	INAA AAS	INAA	INAA	ICP	INAA ICP	ICP	ICP	INAA	INAA	INAA	INAA AAS

Ref. : IAEA, Information sheet on intercomparison study on the determination of toxic and other main and trace elements in algae IAEA-390.

Table 21. Data intercomparison with IAEA results for IAEA-0391,
low level.

Element	Overall Laboratories(ppm)			This Work(ppm)		
	Accepted range	95% confidence interval	Mean	Mean	RSD(%)	R.E(%)
Al	1.169~30.37	9.293~15.67	12.48	13.1	8.7	5.0
Ca	147.6~530	324.7~361.2	342.9	336.7	17.4	1.8
Cl	193.5~326.7	230.2~264.8	247.5	258.1	8.2	4.3
Co	6.125~10.72	8.568~9.025	8.797	9.7	2.1	10.3
Cr	0.08333~2.093	1.044~1.214	1.129	1.2	2.5	6.3
Cu	38.27~66.65	49.46~51.46	50.31	49.35	32.7	1.9
Fe	177.7~420	282.2~299.4	290.8	339.9	8.5	16.9
K	7310~11330	9322~9861	9592	9430	7.9	1.7
Mg	5528~9660	7479~7931	7705	7374	1.9	4.3
Mn	20.8~47.74	33.41~35.23	34.23	34.78	1.5	1.6
Na	653~1146	878.1~944	911.1	932.0	1.5	2.3
Zn	22.2~64.67	39.72~42.28	41.00	42.22	10.1	3.0

Table 22. Data intercomparison with IAEA results for IAEA-0392,
Environmental level.

Element	Overall Laboratories(ppm)			This Work(ppm)		
	Accepted range	95% confidence interval	Mean	Mean	RSD(%)	R.E(%)
Al	14.8~69.68	33.26~41.25	37.26	35.44	2.9	4.9
As	0.0279~0.3367	0.1423~0.1847	0.1635	0.14	14.3	14.4
Br	1.378~2.59	1.913~2.122	2.018	2.01	7.5	0.4
Ca	1828~3817	2615~2782	2698	2603	11.4	3.5
Cl	594.7~1076	753.3~877	815.1	802.2	3.5	1.6
Co	2.393~4.44	3.179~3.369	3.274	3.1	3.0	5.3
Cr	0.01~8.967	4.05~4.684	4.367	4.37	7.1	-0.1
Cu	0.042~44.83	20.96~23.79	22.38	22.70	19.4	-1.4
Fe	231.2~732.5	476.5~504.8	490.7	491.7	15.0	-0.2
K	6651~9714	7924~8300	8112	7913	2.7	2.5
Mg	1314~3162	2227~2401	2314	2563	4.8	-10.8
Mn	43.65~90	64.9~67.88	66.39	64.11	3.3	3.4
Na	437.8~826.5	636.6~685.7	661.1	647.8	3.1	2.0
Sc	0.0052~0.00849	0.006193~0.00728	0.0067	0.008	12.5	-18.8
V	0.6333~1.65	1.004~1.257	1.13	1.0	7	13.7
Zn	84~164.5	123.2~128.1	125.6	125.7	6.1	0

Table 23. Data intercomparison with IAEA results for IAEA-0393,
Contaminated level.

Element	Overall Laboratories(ppm)			This Work(ppm)		
	Accepted range	95% confidence interval	Mean	Mean	RSD(%)	R.E(%)
Al	37.8~181.7	89.27~106.9	98.1	97.1	20.8	1.0
As	54.65~172.7	104.5~172.7	109.2	108.7	11.1	0.5
Br	1.23~3.067	1.831~2.142	1.987	1.58	5.1	20.5
Ca	1414~3867	2733~2940	2837	2909	4.9	-2.5
Cd	0.064~344.4	165.3~184.5	174.9	181	6.6	-3.5
Cl	502.5~803.6	587.3~663.3	625.3	622.1	7.0	0.5
Co	2.783~5.5	3.807~4.058	3.933	4.2	7.6	-6.8
Cr	252~580.9	319~353.4	336.2	300	6.5	10.8
Cu	6.818~15.32	10.88~11.53	11.2	13.6	21	-21.0
Fe	560.5~2035	1202~1288	1245	1225	4.1	1.6
Hg	0.2012~68.33	37.29~43.99	40.64	36.67	7.3	9.8
K	7653~12720	10270~10810	10540	10670	8.1	-1.2
Mg	2930~5108	3845~4053	3949	3821	5.4	3.2
Mn	89.9~209.8	142.9~150.2	146.5	136.6	4.0	6.8
Mo	1.333~4.333	2.444~2.88	2.662	2.61	23.5	2.0
Na	245~470	344.9~374.4	359.7	368.3	5.9	-2.4
Sc	0.012~0.02	0.0153~0.01739	0.0163	0.016	18.7	2.1
Ti	1.017~57.25	23.31~41.21	32.26	37.3	15.8	-15.6
V	0.9333~1.602	1.17~1.37	1.27	1.1	37.5	13.4
Zn	90.66~219	151.7~159.5	155.6	162.4	4	-4.4

Table 24. The analytical results of the standard reference materials by Instrumental Neutron Activation Analysis.

Element	Oyster tissue, NIST SRM 1566a			Citrus Leaves, NIST SRM 1572		
	Certi. value ^{a)} Mean±SD	Exp. value Mean±SD	Rel. error (%)	Certi. value ^{a)} Mean±SD	Exp. value Mean±SD	Rel. error (%)
Ag	1.68 ± 0.15	1.72 ± 0.19	2.4	-	-	
Al	202.5 ± 12.5	206 ± 22.3	1.7	92 ± 15	90 ± 14	2.2
As	14.0 ± 1.2	12.8 ± 1.96	8.6	3.1 ± 0.3	2.9 ± 0.3	6.4
Au	(0.01)	0.011 ± 0.001	10.0	-	-	
Ba	-	-		21 ± 3	20.5 ± 4.68	2.4
Br	-	51.2 ± 2.52		(8.2)	6.9 ± 0.6	15.8
Ca	1960 ± 190	1790 ± 260	8.7	31500 ± 1000	31800 ± 1200	1.0
Cd	4.15 ± 0.38	3.72 ± 1.04	10.4	0.030 ± 0.010	-	
Ce	(0.4)	0.5 ± 0.05	25.0	(0.28)	0.44 ± 0.04	57
Cl	8290 ± 140	7090 ± 160	14.5	(414)	370 ± 11	10.6
Co	0.57 ± 0.11	0.65 ± 0.08	14.0	(0.020)	0.025 ± 0.004	25
Cr	1.43 ± 0.46	1.46 ± 0.27	2.1	0.8 ± 0.2	0.86 ± 0.03	7.5
Cs	(0.02)	-		(0.098)	0.088 ± 0.011	10.2
Cu	66.3 ± 4.3	59.7 ± 15.1	9.9	16.5 ± 1.0	16.6 ± 0.7	0.6
Eu	(0.01)	-		(0.01)	0.01 ± 0.001	0
Fe	539 ± 15	486 ± 34.3	9.8	90 ± 10	89 ± 8	1.1
Hg	0.0642 ± 0.0067	-		0.080 ± 0.020	-	
I	4.46 ± 0.42	4.08 ± 0.65	8.5	1.84 ± 0.03	1.66 ± 0.14	9.8
K	7900 ± 470	6960 ± 620	11.9	18200 ± 600	18300 ± 300	0.5
La	(0.3)	0.20 ± 0.018	50	(0.190)	0.20 ± 0.03	5.3
Mg	1180 ± 170	1130 ± 190	4.2	5800 ± 300	6100 ± 250	5.2
Mn	12.3 ± 1.5	11.1 ± 1.33	9.7	23 ± 2	24 ± 1	4.3
Na	4170 ± 130	3630 ± 150	12.9	160 ± 20	154 ± 15	3.7
Rb	(3)	3.83 ± 0.19	27.7	4.84 ± 0.06	4.73 ± 0.5	2.3
Sb	(0.01)	-		(0.04)	0.042 ± 0.005	5.0
Sc	(0.06)	0.051 ± 0.005	15.0	(0.010)	0.0098 ± 0.0010	2.0
Se	2.21 ± 0.24	2.46 ± 0.49	11.3	(0.025)	-	
Sm	(0.06)	0.057 ± 0.004	5.0	(0.052)	0.045 ± 0.005	13.5
Sr	11.1 ± 1.0	-		100 ± 2	98.5 ± 4.9	1.5
Th	(0.04)	-		-	0.025 ± 0.003	
V	4.68 ± 0.15	4.44 ± 0.53	5.1	-	-	
Zn	830 ± 57	730 ± 30	12.0	29 ± 2	28.3 ± 0.31	2.4

a) Certified values of Ca, Hg and Sr are determined by other chemical methods;
Values in parentheses are recommended value.

Table 25. Analytical results of Estuarine Sediment, NIST SRM 1646.

Element	Nuclide	Exp. Value (ppm)		Certified Value (ppm)	Relative Error (%)
		Range	Mean $\pm$ S.D		
Al	²⁸ Al	55150 - 60490	57446 $\pm$ 2159	62500 $\pm$ 2000	8.1
Ca	⁴⁹ Ca	7459 - 8762	8055 $\pm$ 485	8300 $\pm$ 300	2.9
Fe	⁵⁹ Fe	29080 - 34590	32294 $\pm$ 1676	33550 $\pm$ 1000	3.7
K	⁴² K	12470 - 15010	13762 $\pm$ 823	(14000)	1.7
Na	²⁴ Na	16190 - 19530	17629 $\pm$ 999	(20000)	11.9
Ti	⁵¹ Ti	5090 - 5804	5446 $\pm$ 330	(5100)	6.8
As	⁷⁶ As	8.66 - 13.5	10.5 $\pm$ 1.99	11.6 $\pm$ 1.3	9.7
Ba	¹³¹ Ba	470 - 597	513 $\pm$ 43.5		
Cr	⁵¹ Cr	70.8 - 85.8	77.7 $\pm$ 4.4	76 $\pm$ 3	2.2
Co	⁶⁰ Co	9.07 - 10.7	9.94 $\pm$ 0.49	10.5 $\pm$ 1.3	5.3
Sb	¹²² Sb	0.35 - 0.48	0.43 $\pm$ 0.04	(0.4)	6.7
Mn	⁵⁶ Mn	355 - 426	380 $\pm$ 25	375 $\pm$ 20	1.6
V	⁵² V	88.5 - 108	97.0 $\pm$ 7.8	94 $\pm$ 1	3.2
Zn	⁶⁵ Zn	90.6 - 113	98.9 $\pm$ 7.1	138 $\pm$ 6	
U	²³⁹ Np	4.34 - 6.39	5.48 $\pm$ 0.80		28.3
Br	⁸² Br	110 - 140	129 $\pm$ 9.1		
Ce	¹⁴¹ Ce	65 - 77	70.3 $\pm$ 3.6	(80)	
Cs	¹³⁴ Cs	3.86 - 4.56	4.23 $\pm$ 0.24	(3.7)	12.2
Eu	¹⁵² Eu	0.82 - 0.99	0.87 $\pm$ 0.04	(1.5)	14.4
Dy	¹⁶⁵ Dy	5.35 - 6.87	5.91 $\pm$ 0.52		41.9
Hf	¹⁸¹ Hf	10.9 - 13.2	12.0 $\pm$ 0.61		
I	¹²⁸ I	67.1 - 77.2	71.6 $\pm$ 3.9		
La	¹⁴¹ La	35.5 - 40.0	37.6 $\pm$ 1.3		
Rb	⁸⁶ Rb	83.3 - 113	93.2 $\pm$ 8.9	(87)	7.1
Sc	⁴⁶ Sc	9.49 - 10.8	10.2 $\pm$ 0.4	(10.8)	5.8
Se	⁷⁵ Se	1.26 - 2.10	1.74 $\pm$ 0.25	(0.6)	
Th	²³³ Pa	9.05 - 11.6	10.9 $\pm$ 0.7	(10)	9.1
Yb	¹⁶⁹ Yb	2.27 - 2.71	2.42 $\pm$ 0.13		
Nd	¹⁴⁷ Nd	31.8 - 43.8	38.1 $\pm$ 4.1		
Ta	¹⁸² Ta	1.03 - 1.59	1.22 $\pm$ 0.15		

Table 26. Analytical results of Buffalo River Sediment, NIST SRM 2704.

Element	Nuclide	Exp. Value (ppm)		Certified Value (ppm)	Relative Error (%)
		Range	Mean $\pm$ S.D		
Al	²⁸ Al	56380 - 61490	58403 $\pm$ 2073	61100 $\pm$ 1600	4.4
Ca	⁴⁹ Ca	25950 - 28840	27810 $\pm$ 1318	26000 $\pm$ 300	7.0
Fe	⁵⁹ Fe	38650 - 43550	41119 $\pm$ 1731	41100 $\pm$ 1000	0.05
K	⁴² K	17050 - 21080	19073 $\pm$ 1522	20000 $\pm$ 400	4.6
Na	²⁴ Na	4710 - 5864	5421 $\pm$ 331	5470 $\pm$ 140	0.9
Ti	⁵¹ Ti	3940 - 5576	4752 $\pm$ 668	4570 $\pm$ 180	4.0
As	⁷⁶ As	16.2 - 23.1	19.2 $\pm$ 2.2	23.4 $\pm$ 0.8	18.0
Ba	¹³¹ Ba	363 - 485	432 $\pm$ 40	414 $\pm$ 12	4.3
Cr	⁵¹ Cr	120 - 146	136 $\pm$ 8.7	135 $\pm$ 5	1.1
Co	⁶⁰ Co	13.5 - 15.2	14.0 $\pm$ 0.5	14.0 $\pm$ 0.6	0.03
Sb	¹²² Sb	3.60 - 4.80	4.36 $\pm$ 0.34	3.79 $\pm$ 0.15	15.1
Mn	⁵⁶ Mn	628 - 651	641 $\pm$ 10	555 $\pm$ 19	15.6
V	⁵² V	105 - 109	107 $\pm$ 1.8	95 $\pm$ 4	12.5
Zn	⁶⁵ Zn	349 - 408	375 $\pm$ 18	438 $\pm$ 12	14.3
U	²³⁹ Np	2.93 - 4.93	3.61 $\pm$ 0.69	(3.13)	15.3
Br	⁸² Br	6.06 - 9.17	7.49 $\pm$ 0.90	(7)	7.0
Ce	¹⁴¹ Ce	48.8 - 68.6	60.2 $\pm$ 5.4	(72)	16.4
Cs	¹³⁴ Cs	6.30 - 7.61	7.03 $\pm$ 0.40	(6)	17.1
Eu	¹⁵² Eu	0.80 - 0.91	0.84 $\pm$ 0.04	(1.3)	35.4
Dy	¹⁶⁵ Dy	5.78 - 6.66	6.26 $\pm$ 0.32	(6)	4.5
Hf	¹⁸¹ Hf	7.60 - 9.46	8.74 $\pm$ 0.53	(8)	9.2
Lu	¹⁷⁷ Lu	0.65 - 0.83	0.72 $\pm$ 0.07	(0.6)	20.8
La	¹⁴⁰ La	30.3 - 35.6	32.9 $\pm$ 1.7	(29)	13.4
Rb	⁸⁶ Rb	96 - 115	104 $\pm$ 6	(100)	4.2
Sc	⁴⁶ Sc	10.6 - 12.5	11.5 $\pm$ 0.5	(12)	4.5
Se	⁷⁵ Se	1.87 - 2.94	2.39 $\pm$ 0.36	1.12 $\pm$ 0.05	
Sm	¹⁵³ Sm	6.59 - 7.83	7.38 $\pm$ 0.36	(6.7)	10.1
Th	²³³ Pa	8.73 - 11.9	10.4 $\pm$ 0.9	(9.2)	12.7
Yb	¹⁶⁹ Yb	2.33 - 3.0	2.66 $\pm$ 0.22	(2.8)	5.2
Nd	¹⁴⁷ Nd	28.8 - 35.5	31.8 $\pm$ 2.0		
Tb	¹⁶⁰ Tb	0.77 - 1.27	1.03 $\pm$ 0.16		
Ta	¹⁸² Ta	0.84 - 1.29	1.07 $\pm$ 0.14		

Table 27. Analytical results of Marine Sediment, NRCC CRM BCSS-1.

Element	Nuclide	Exp. Value (ppm)		Certified Value (ppm)	Relative Error (%)
		Range	Mean $\pm$ S.D		
Al	²⁸ Al	57700 - 61490	60114 $\pm$ 1514	62610 $\pm$ 2200	4.0
Ca	⁴⁹ Ca	4577 - 5858	5462 $\pm$ 468	5430 $\pm$ 530	0.6
Fe	⁵⁹ Fe	31580 - 33740	32658 $\pm$ 885	36543 $\pm$ 1090	10.6
K	⁴² K	16110 - 19550	18504 $\pm$ 1260	18014 $\pm$ 330	2.7
Na	²⁴ Na	19770 - 20270	19868 $\pm$ 342	20981 $\pm$ 1620	5.3
Ti	⁵¹ Ti	3794 - 4975	4379 $\pm$ 413	4400 $\pm$ 14	0.5
As	⁷⁶ As	7.30 - 16.8	12.33 $\pm$ 3.04	11.1 $\pm$ 1.4	11.1
Ba	¹³¹ Ba	330 - 486	409 $\pm$ 51		
Cr	⁵¹ Cr	107 - 135	126 $\pm$ 8	123 $\pm$ 14	2.3
Co	⁶⁰ Co	10.6 - 12.8	11.7 $\pm$ 0.6	11.4 $\pm$ 2.1	2.3
Sb	¹²² Sb	0.55 - 0.76	0.65 $\pm$ 0.06	0.59 $\pm$ 0.06	10.7
V	⁵² V	76.4 - 104.3	91.4 $\pm$ 11.5	93.4 $\pm$ 4.9	2.2
Zn	⁶⁵ Zn	71.9 - 91.0	82.7 $\pm$ 5.5	119 $\pm$ 12	30.5
U	²³⁹ Np	3.96 - 6.29	5.05 $\pm$ 0.89		
Cl	³⁸ Cl	11560 - 13100	12392 $\pm$ 539	11200 $\pm$ 500	10.6
Br	⁸² Br	92.0 - 117	104 $\pm$ 9		
Ce	¹⁴¹ Ce	48.0 - 62.5	54.5 $\pm$ 3.6		
Cs	¹³⁴ Cs	3.75 - 5.19	4.38 $\pm$ 0.47	(4)	9.4
Eu	¹⁵² Eu	0.65 - 0.83	0.74 $\pm$ 0.06		
Dy	¹⁶⁵ Dy	4.07 - 5.11	4.58 $\pm$ 0.37		
I	¹²⁸ I	93.4 - 118	110 $\pm$ 9		
Hf	¹⁸¹ Hf	6.13 - 7.22	6.66 $\pm$ 0.28		
La	¹⁴¹ La	29.8 - 35.2	32.4 $\pm$ 1.8		
Rb	⁸⁶ Rb	78.8 - 98.5	89.5 $\pm$ 6.7		
Sc	⁴⁶ Sc	10.1 - 12.2	11.0 $\pm$ 0.6		
Se	⁷⁵ Se	1.25 - 2.80	1.74 $\pm$ 0.52	(0.43)	
Sm	¹⁵³ Sm	6.47 - 7.41	7.02 $\pm$ 0.31		
Th	²³³ Pa	7.64 - 9.72	8.79 $\pm$ 0.61		
	¹⁶⁹ Yb	1.62 - 2.36	2.02 $\pm$ 0.24		
Yb	⁹⁵ Zr	239 - 305	279 $\pm$ 23		
Zr	¹⁴⁷ Nd	30.4 - 35.1	32.5 $\pm$ 1.7		
Nd	¹⁶⁰ Tb	0.75 - 1.16	0.97 $\pm$ 0.15		
Tb	¹⁸² Ta	0.80 - 1.07	0.95 $\pm$ 0.09		
Ta					

Table 28. Data intercomparison between laboratories for IAEA's sediment samples(SED-1).

element	Experimental Data, SED-1 (ppm)			
	Lab. 1 ^a	Lab. 2 ^b	Lab. 3 ^c	Lab. 4 ^d
Al	69240 ± 3260		63640 ± 2246	77130 ± 950
As	48.9 ± 1.6	25.2 ± 0.2	20.3 ± 0.05	47.5 ± 1.9
Cd			0.205 ± 0.05	0.283 ± 0.005
Co	21.1 ± 0.9	17.0 ± 0.2		22.1 ± 0.6
Cr	98.3 ± 3.5	93.2 ± 2.1	105 ± 1	
Cu			51.2 ± 0.6	49.2 ± 0.85
Fe	72670 ± 1340	53500 ± 1300	70160 ± 49	63630 ± 1290
Ni			53.9 ± 1.12	50.0 ± 1.5
Pb			125 ± 2	55.8 ± 0.85
Sb	1.35 ± 0.12	0.82 ± 0.08		1.24 ± 0.05
Sn				5.53 ± 0.14
Zn	242 ± 28	181 ± 4	206 ± 1	227 ± 7

Analytical method : a; INAA, b; INAA, c; WD-XRF, d; ICP-MS and AAS

Table 29. Data intercomparison between laboratories for IAEA's sediment samples(SED-2).

element	Experimental Data, SED-2 (ppm)			
	Lab. 1 ^a	Lab. 2 ^b	Lab. 3 ^c	Lab. 4 ^d
Al	48900 ± 2150		56800 ± 1601	52470 ± 900
As	17.8 ± 0.4	9.3 ± 0.9	37.1 ± 0.1	15.7 ± 1.1
Cd			1.49 ± 0.03	9.10 ± 0.09
Co	13.0 ± 0.3	10.9 ± 0.5		13.9 ± 0.5
Cr	260 ± 14	260 ± 7	276 ± 1	
Cu			462 ± 0.4	411 ± 4
Fe	38716 ± 697	31500 ± 1300	36500 ± 0.0	33000 ± 1400
Ni			84.4 ± 1.0	77.0 ± 3.4
Pb			335 ± 2	305 ± 36
Sb	4.28 ± 0.33	2.8 ± 0.3		5.24 ± 0.07
Sn				42.8 ± 1.5
Zn	657 ± 6	500 ± 9	716 ± 1.2	712 ± 4

Analytical method : a; INAA, b; INAA, c; WD-XRF, d; ICP-MS and AAS.

Table 30. Estimation of analytical results of IAEA's sediments between laboratories(n=4).

IAEA's Sediment-1					
Determinant	Laboratory 1		Overall		Score*
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation	
Al	6.92E+04	3.3E+03	7.00E+04	5.5E+03	-0.14 (0)
As	4.89E+01	1.6E+00	3.55E+01	1.3E+01	1.04 (1)
Co	2.11E+01	9.0E-01	2.01E+01	2.2E+00	0.45 (0)
Cr	9.83E+01	3.5E+00	9.88E+01	4.8E+00	-0.10 (0)
Fe	7.27E+04	1.3E+03	6.50E+04	7.4E+03	1.04 (1)
Sb	1.35E+00	1.2E-01	1.14E+00	2.3E-01	0.91 (1)
Zn	2.42E+02	2.8E+00	2.14E+02	2.3E+01	1.22 (1)

IAEA's Sediment-2					
Determinant	Laboratory 1		Overall		Score*
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation	
Al	4.89E+04	2.2E+03	5.27E+04	3.2E+03	-1.18 (-1)
As	1.78E+01	4.0E-01	2.00E+01	1.0E+01	-0.21 (0)
Co	1.30E+01	3.0E-01	1.26E+01	1.3E+00	0.32 (0)
Cr	2.60E+02	1.4E+00	2.65E+02	7.5E+00	-0.07 (0)
Fe	3.87E+04	7.0E+02	3.49E+04	2.8E+03	1.33 (1)
Sb	4.28E+00	3.3E-01	4.11E+00	1.0E+00	0.17 (0)
Zn	6.57E+02	6.0E+00	6.46E+02	8.7E+01	0.13 (0)

* Score : Laboratory Mean - Overall Mean / Overall Standard Deviation.

Table 31. Analytical Data between laboratories for KORDI's coastal sediment samples.

Element	Exp. Value(mg/kg)		Certi. Value (mg/kg)
	Mean	S.D	
Sb	14±3	11.5 ~ 12.2	11.3±2.6
As	23.8±2.8	19.5 ~ 27.6	26.2±1.5
Be	1.35±0		1±0.2
Cd	2.2±0.3	1.78 ~ 2.78	2.11±0.15
Cr	106±54	39.812 ~ 240.8	90.7±4.6
Co	10.9±2.1	6.51 ~ 12.5	11.5±0.3
Cu	292±18	259.705 ~ 316	310±12
Pb	162±39	79.08 ~ 203.8	183±8
Li	28±11	15.9 ~ 35	32±2
Mn	413±56	331.25 ~ 482.6	440±19
Hg	2.82±0.28	2.44 ~ 3.071	3.04±0.2
Mo	6.5±1.5	4.8 ~ 7.71	5.43±0.28
Ni	38±6	30.2 ~ 45.6	39.5±2.3
Se	1.4±0.2	1.3 ~ 1.42	0.92±0.22
Ag	1.99±0.59	1.38 ~ 2.56	1.22±0.14
Sr	267±41	210 ~ 309	276±30
Tl	0.84±0		0.6
Sn	22±3	20 ~ 25.7	19.8±2.5
U	3.2±1.4	2.2 ~ 4.11	3
V	129±15	109 ~ 145	133±5
Zn	377±48	320 ~ 456	364±23

Table 32. Data intercomparison between laboratories for KORDI's coastal sediment samples(I). Unit : mg/kg.

Element	lab(a)	lab(b)	lab(c)	lab(d)	lab(e)	lab(f)
Sb			12.2±0.2		12±1	
As	25.12±1.91		27.6±0.6		19.5±0.5	
Be						
Cd	2.23±0.19	2.3±0.1	2.22±0.11	1.891±0.092	2.16±0.07	1.932±0.57
Cr	89.95±3.52	98.2±1.2	87.9±3.2	39.812±3.871	83±2	240.8±66.4
Co		12.2±0.5	11.6±0.2		9.9±0.2	
Cu	309±2.65	308.6±1.9	316±6	259.705±1.32	296±1	278±72.99
Pb	185.77±4.88	203.8±6.9	177±4	149.226±2.784	191±2	79.08±56.84
Li					35±1	
Mn		482.6±8.7	449±14		426±5	
Hg		2.82±0.06		3.071±0.013		
Mo					4.8±0.1	
Ni		39.7±1.1	38.7±0.1		34±1	
Se					1.3±0.1	
Ag						
Sr					273±2	
Tl						
Sn			20.7±0.2		20±1	
U					2.2±0	
V					128±1	
Zn	363.56±6.73	375.2±10	383±4	357.444±1.924	331±3	436.6±121.2

Table 33. Data intercomparison between laboratories for KORDI's coastal sediment samples(II). Unit : mg/kg.

Element	lab(g)	lab(h)	lab(i)AAS	lab(i)AES	lab(i)MS	Lab(i)AMA	lab(j)
Sb	11.5±1.3				18.7±7.1		
As	24.6±1.8	22.1±2.4		23.7±1.3			
Be					1.35±0.2		
Cd			1.78±0.29		2.78±0.19		
Cr	107±5	104±5		102.2±5.4			
Co	11.3±0.5	12.1±0.8	6.51±0.44		12.5±1.6		
Cu			284±4		293±24		285.73±6.18
Pb			153±6		154±21		
Li			15.9±5.8		34±5.5		
Mn	430±12		362±44				331.25±12.3
Hg	2.44±0.17					2.96±0.02	
Mo	7.07±0.58				7.71±0.85		
Ni			30.2±1.7		45.6±6.2		
Se	1.42±0.15			1.6±0.07			
Ag	1.38±0.09		2.56±0.06		2.04±0.23		
Sr	276±45			210±4	309±27		
Tl					0.84±0.04		
Sn					25.7±2.8		
U					4.11±0.42		
V	132±3			109±0	145±42		
Zn	443±7	456±26	323±8	320±2			361.7±6.66

Table 34. Estimation of analytical results of KORDI's coastal sediments
between laboratories.(mg/kg)

Element	Range	Overall Mean	Standard Deviation	This work (Mean±SD)	Certi. Value	Z-score*
Ag	1.38~2.56	1.99	0.59	1.38±0.09	1.22±0.14	-1.0
As	19.6~27.6	23.8	2.8	24.6±1.8	26.2±1.5	0.3
Co	6.51~12.5	10.9	2.1	11.3±0.5	11.5±0.3	0.2
Cr	39.81~240.8	106	54	107±5	90.7±4.6	0.0
Hg	2.44~3.07	2.82	0.28	2.44±0.17	3.04±0.2	-1.4
Mn	331.2~482.6	413	56	430±12	440±19	0.3
Mo	4.8~7.7	6.5	1.5	7.07±0.58	5.43±0.28	0.4
Sb	11.5~12.2	14	3	11.5±1.3	11.3±2.6	-0.8
Se	1.3~1.42	1.4	0.2	1.42±0.15	0.92±0.22	0.1
Sr	210~309	267	41	276±45	276±30	0.2
V	109~145	129	15	132±3	133±5	0.2
Zn	320~456	377	48	443±7	364±23	1.4
* Z-score : (laboratory mean - overall mean) / standard deviation. 95% confidence level.						

Table 35a. Nuclear Data and Elemental Concentrations obtained from
Natural Water using Neutron Activation Analysis.

원소	핵종	반감기	감마선에너지 (keV)	분석감도* (μg)	분석농도($\mu\text{g}/\text{l}$)	
					담수(평균)	해수(평균)
단수명 핵종						
Mg	Mg-27	9.46 m	844	20	220-12100 (3400)	-
Al	Al-28	2.24 m	1779	0.75	3-2900 (310)	1.1-7.4 (4.3)
Cl	Cl-38	37.3 m	1642	14	730-16000 (8700)	-
Ca	Ca-49	8.72 m	3084	270	420-126000(34000)	-
Ti	Ti-51	5.76 m	320	5.4	2.8	1.2
V	V-52	3.75 m	1434	0.040	0.006-18 (2.2)	0.45-2.1 (1.3)
Mn	Mn-56	2.58 h	847	0.12	0.1-74 (20)	0.17-1.9 (1.4)
Cu	Cu-66	5.10 m	1039	3.7	0.5-78 (19)	0.22-2.3 (1.3)
Br	Br-80	17.4 m	616	0.79	2.9-415 (77)	-
In	In-116m	54.1 m	1294	0.013	0.1-6.7 (2.4)	-
Sn	Sn-125m	9.52 m	332	20	10	0.2
Te	Te-131	25.0 m	150	2.1	0.68	-
I	I-128	25.0 m	443	0.37	0.46-40 (7.7)	-
Dy	Dy-165	2.33 h	95	0.031	0.003-0.005 (0.004)	0.0007-0.0037(0.0022)
Th	Th-233	22.3 m	87	0.82	0.023-0.22 (0.076)	0.0002
U	U-239	23.5 m	75	0.11	0.019-12 (1.5)	1.2-4.2 (2.7)
중수명 핵종						
Na	Na-24	15.0 h	1369	0.54	530-74700 (14900)	-
K	K-42	12.4 h	1525	33	500-14900 (4800)	-
Cu	Cu-64	12.7 h	511	0.30	0.5-78 (19)	0.22-2.3 (1.3)
Zn	Zn-69m	14.0 h	439	8.1	1.1-106 (25)	1.1-63 (16)
Ga	Ga-72	14.1 h	834	0.34	0.082	0.024
As	As-76	26.3 h	559	0.23	0.18-4.4 (1.5)	0.35-1.9 (1.2)
Br	Br-82	35.3 h	554	0.65	2.9-415 (77)	-
Pd	Pd-109	13.5 h	88	1.0	0.0004	0.00022
La	La-140	40.3 h	487	0.21	0.001-0.94 (0.11)	0.0029-0.032 (0.017)
Pr	Pr-142	19.1 h	1576	5.2	-	0.0006
Sm	Sm-153	46.7 h	103	0.016	0.0025-0.040 (0.012)	0.0004-0.008 (0.0038)
Eu	Eu-152m	9.3 h	122	0.0023	0.0005-0.046 (0.0066)	0.0001-0.001 (0.0005)
Ho	Ho-166	26.8 h	81	0.050	0.0075	0.00022
Er	Er-171	7.5 h	112	1.8	-	0.00061
W	W-187	23.9 h	480	0.34	0.002-0.93 (0.24)	0.11-0.12 (0.12)
Hg	Hg-197m	23.8 h	134	4.7	0.006-2.2 (0.35)	0.003-1.2 (0.23)

분석감도는 다음의 분석조건하에서 1000개수의 감마선 피이크먼트를 생성하는 각 원소의 μg 양으로 구함.

HP Ge 검출기 : EG&G ORTEC, GMX 15% Efficiency, 2.0keV FWHM, 열중성자속 : $1 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$.

단수명 핵종 : $T_i = 10\text{분}$, $T_c = 3\text{분}$, $T_m = 100\text{초}$

중수명 핵종 : $T_i = 1\text{시간}$, $T_c = 1\text{일}$, $T_m = 1000\text{초}$

장수명 핵종 : $T_i = 1\text{일}$, $T_c = 7\text{일}$, $T_m = 10000\text{초}$

Table 35b. Nuclear Data and Elemental Concentrations obtained from Natural Water using Neutron Activation Analysis.

장수명 핵종						
Ca	Ca-47	4.54 d	1297	820	420-126000 (34000)	-
Sc	Sc-46	83.8 d	889	0.0028	0.0013-0.31 (0.037)	0.0006-0.045 (0.011)
Cr	Cr-51	27.7 d	320	0.19	0.041-11 (2.0)	0.14-4.6 (1.5)
Fe	Fe-59	44.6 d	1099	34	1-530 (100)	2-250 (23)
Co	Co-60	5.27 y	1173	0.079	0.006-5.7 (0.68)	0.01-1.3 (0.34)
Ni	Co-58	70.8 d	811	0.65	3.9-40 (15)	1.2-2.4 (1.6)
Zn	Zn-65	244 d	1115	2.0	1.1-106 (25)	1.1-63 (16)
Se	Se-75	118 d	265	0.17	0.026-0.5 (0.23)	0.004-0.13 (0.06)
Rb	Rb-86	18.8 d	1077	1.6	0.2-16 (3.7)	105-200 (154)
Sr	Sr-85	64.8 d	514	17	11-593 (163)	7700-8600 (8200)
Zr	Zr-95	64.0 d	757	19	160	-
Mo	Tc-99m	2.75 d	141	0.19	0.36-3.4 (1.8)	1.5-12 (8.0)
Ag	Ag-110m	252 d	658	0.17	0.011-0.86 (0.21)	0.009-0.36 (0.22)
Cd	In-115m	2.23 d	336	0.46	0.44-0.82 (0.63)	0.2-1.5 (0.92)
Sb	Sb-122	2.68 d	564	0.010	0.009-7.1 (0.61)	0.006-1.6 (0.46)
Sb	Sb-124	60.2 d	1691	0.29		
Cs	Cs-134	2.06 y	796	0.06	0.003-0.32 (0.051)	0.16-0.4 (0.25)
Ba	Ba-131	12.0 d	496	3.9	2.5-52 (16)	0.57-4.8 (2.7)
Ce	Ce-141	32.5 d	145	0.077	0.03-0.48 (0.22)	0.001-0.034 (0.022)
Nd	Nd-147	12.0 d	91	0.1	0.4	0.002
Eu	Eu-152	13.0 y	344	0.0072	0.0005-0.046 (0.0066)	0.0001-0.001 (0.0005)
Gd	Gd-153	242 d	97	0.14	-	0.0006
Tb	Tb-160	72.1 d	299	0.011	0.0014-0.0028 (0.0017)	0.0009
Tm	Tm-170	129 d	84	0.016	0.015	0.00013-0.003 (0.0016)
Yb	Yb-169	30.0 d	198	0.016	0.0025-0.044 (0.018)	0.00052-0.0026 (0.0016)
Yb	Yb-175	4.19 d	396	0.051		
Lu	Lu-177	6.71 d	208	0.0024	0.0002-0.015 (0.0062)	0.0001-0.007 (0.0025)
Hf	Hf-181	42.4 d	482	0.022	0.005-0.13 (0.067)	-
Ta	Ta-182	115 d	1221	0.10	0.2	-
Ir	Ir-192	74.2 d	317	0.00038	0.000003	-
Au	Au-198	2.70 d	412	0.00035	0.0005-0.015 (0.0082)	0.0001-0.072 (0.019)
Hg	Hg-197	2.67 d	77	0.011	0.006-2.2 (0.35)	0.003-1.2 (0.23)
Hg	Hg-203	46.8 d	279	0.053		
Th	Pa-233	27.0 d	312	0.0036	0.023-0.22 (0.076)	0.00016
U	Np-239	2.35 d	278	0.0032	0.019-12 (1.5)	1.2-4.2 (2.7)

분석감도는 다음의 분석조건하에서 1000계수의 감마선 피이크먼트를 생성하는 각 원소의 μg 양으로 구함.
 HP Ge 검출기 : EG&G ORTEC, GMX 15% Efficiency, 2.0keV FWHM, 열중성자속 : $1 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$.
 단수명 핵종 : $T_i = 10\text{분}$, $T_c = 3\text{분}$, $T_m = 100\text{초}$
 중수명 핵종 : $T_i = 1\text{시간}$, $T_c = 1\text{일}$, $T_m = 1000\text{초}$
 장수명 핵종 : $T_i = 1\text{일}$, $T_c = 7\text{일}$, $T_m = 10000\text{초}$

Table 36. Nuclear properties of nuclide and the concentration level and sensitivity of uranium in natural fresh water.

Element	Nuclide	Half-Life	Gamma-Ray (keV)	Sensitivity, ng* (Detection Limit, $\mu\text{g/l}$)	Concentration reported ($\mu\text{g/l}$)	
					Fresh water(Average)	Sea water(Average)
U	^{238}U	23.5 m	74.7	10 (1 - 3)	0.019 - 12 (1.5)	1.2 - 4.2 (2.7)
	^{239}Np	2.35 d	277.6	0.3 (0.1 - 1.5)		

* Sensitivity is given in ng of element resulting 1000 counts of gamma peak area under the following analytical conditions : HP Ge-detector : EG&G ORTEC, GEM 25% Efficiency, 1.85keV FWHM, thermal neutron flux : $1.7 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s.}$: ^{238}U : $T_i = 10\text{m}$, $T_d = 10\text{m}$, $T_c = 300\text{s}$; ^{239}Np : $T_i = 1\text{h}$, $T_d = 7\text{d}$, $T_c = 10000\text{s}$

() Detection Limit by Currie's definition : $2.33 \sigma_B$.

Table 37. Result of standard addition method of uranium to groundwater sample.

U added, ng/ml	U found, ng/ml	Spike Recovery	
		ng/ml	%
0.0	19.9 ± 2.7	0.0	100
7.5	27.4	7.5	100
15.0	34.1	14.2	95
22.5	41.8	21.9	97
30.0	48.2	28.3	94
37.5	56.8	36.9	98

Table 38. Comparison of analytical results between various methods.

Analytical Method	U concentration, ng/ml		
	UW-1	UW-2	UW-3
INAA(^{239}U)	15.8 $\pm$ 0.8	24.7 $\pm$ 1.2	1.84 $\pm$ 0.22
INAA(^{239}Np)	12.7 $\pm$ 0.4	19.5 $\pm$ 0.8	1.11 $\pm$ 0.50
ICP-MS	12.1 $\pm$ 0.35	–	0.62 $\pm$ 0.013
Fluorospectrometry	10.0 $\pm$ 0.51	–	1.88 $\pm$ 0.41
α -spectroscopy	13.8 $\pm$ 0.28	–	2.76

Table 39. Content of uranium in groundwater collected with sampling date using direct method(^{239}U).

Code No.	U concentration, ng/ml	Sampling Date
UW01	16.4 $\pm$ 1.9	06/11/98
UW02	14.2 $\pm$ 0.9	06/18/98
UW03	14.6 $\pm$ 0.5	06/25/98
UW04	14.6 $\pm$ 1.0	07/02/98
UW05	17.1 $\pm$ 0.5	07/09/98
UW06	15.0 $\pm$ 1.5	07/16/98
UW07	17.5 $\pm$ 0.5	07/23/98
UW08	15.0 $\pm$ 0.4	07/30/98
UW09	18.1 $\pm$ 1.8	08/06/98
UW10	19.1 $\pm$ 0.9	08/13/98
Mean $\pm$ SD	16.2 $\pm$ 1.7 (10.3%)	

Table 40. Content of uranium in groundwater collected from sampling sites of Choongchung area using direct method(²³⁹U).

Code No.	U concentration, ng/ml	Statistics
TJ01	2.49 ± 0.73	
TJ02	5.88 ± 0.73	
TJ03	14.8 ± 2.4	Range : 2.49~77.2
TJ04	16.2 ± 1.2	Arithmetic Mean : 33.1 ± 27.2
TJ05	27.7 ± 2.8	Geometric Mean : 21.2 / 0.5
TJ06	30.4 ± 6.0	Median : 27.7
TJ07	58.7 ± 5.6	
TJ08	64.7 ± 2.5	
TJ09	77.2 ± 4.4	
CB01	3.66 ± 0.38	
CB02	4.31 ± 0.37	
CB03	5.42 ± 0.99	Range : 3.66~42.8
CB04	7.83 ± 1.77	Arithmetic Mean : 16.3 ± 14.4
CB05	13.0 ± 1.5	Geometric Mean : 11.3 / 0.4
CB06	23.3 ± 2.7	Median : 10.4
CB07	30.4 ± 2.3	
CB08	42.8 ± 2.4	

Table 41. A Example of Report of Estimation on Measurement Uncertainty.

<LOP-I-07-02>

측정불확도평가보고서

일련번호 : 00-01

시험항목	중성자방사화분석(As)			구 분	☐ 분석시험 ☒ 숙련도시험	
시험방법	비파괴 성분분석			시험설비	PTS & 감마분광분석장치	
시험환경	온도: 25 ℃ 습도: 50 %			시료명(번호)	대기분진(S-01)	
시 험 자	정 용 삼			시험일자	19 년 월 일	
불확도 성분 (X_i)	형태 (A,B)	확률분포 (N,R,T)	표준불확도 (U_{xi})	감응계수 (C_i)	자유도 (ν)	상대불확도 (%)
1) 계측통계	A	N	0.861 %	1	4	0.861 %
2) 반복측정	A	N	0.025 %	1	4	0.025 %
3) 시료칭량	B	N	0.006 %	1	∞	0.006 %
(표준용액)	B	R				
4) 시료조사	B	N	0.87 %	1	∞	0.87 %
5) 검출효율	B	R	2.154 %	1	11	2.154 %
6) 표준물질	B	N	1.932 %	1	∞	1.932 %
7) 핵적상수, 보정	B	N	2.5 %	1	∞	2.5 %
$U_c = \{(U_{ST})^2 + (U_{OB})^2 + (U_{BW})^2 + (U_{NF})^2 + (U_{EF})^2 + (U_{RM})^2 + (U_{PA})^2\}^{1/2}$ $= \{(0.861)^2 + (0.025)^2 + (0.006)^2 + (0.87)^2 + (2.154)^2 + (1.932)^2 + (2.5)^2\}^{1/2}$ $= 4.015 \% (0.7125 \mu\text{g/g})$						
신뢰구간	95 %	유효자유도(ν_e)		범위인자(k)	2	
확장표준불확도(U)	8.030 % (1.425 $\mu\text{g/g}$)			측정결과	17.746 $\mu\text{g/g}$	
기 타 검토의견						
작성자	(인)	검토자	(인)	승인자	(인)	

Table 42. KOLAS Proficiency Test of Geological Sample(99-9A, 99-9B).

기관 기호		Al	Ca	Fe	Mg	Mn	K	Si	Na	Ti	Outlier
1	시료 A	0.00	1.28	-3.28	-0.40	-0.98	0.05	-1.73	0.19	0.49	1
	시료 B	0.78	0.00	-4.16	-1.14	-1.09	1.46	-0.77	0.77	0.25	1
2	시료 A	1.07	-1.41	0.06	-0.39		-1.00	0.37		-0.41	
	시료 B	-0.61	-1.19	0.39	0.21		-0.73	0.53		0.06	
3	시료 A	-0.74	1.01	0.36	0.84	-0.11	-0.42	-0.53	-2.00	0.72	
	시료 B	-1.24	0.10	0.23	0.13	-0.08	-1.09	-0.32	0.22	0.73	
4	시료 A	0.89	0.00	-0.40		2.78	2.44		-0.19	-0.18	
	시료 B	0.00	1.58	-1.16	-1.94	1.91	0.62		-0.48	-0.65	
5	시료 A	1.27	1.15	0.07	0.39	0.11	5.04	-0.39	8.48	-4.90	3
	시료 B	2.00	-0.69	0.00	0.26	0.08	4.01	0.21	1.96	-1.97	1
6	시료 A	-0.46	-56.4	-1.39	-0.53	-1.07	-4.76	1.78	1.06	-1.97	2
	시료 B	0.13	-4.93	-1.07	-0.64	1.57	-2.08	2.46	24.93	-4.36	3
7	시료 A	-0.06	-0.06	0.00	1.15	0.74	0.66	-0.37	0.71	0.18	
	시료 B	-0.15	0.16	0.12	-1.60	-0.17	-0.16	-0.39	-0.22	-0.06	
8	시료 A	0.62	-0.20	-1.28	3.57		0.00	0.65	-1.29	1.14	1
	시료 B	3.75	1.44	-1.30	2.86		0.00	2.53	-0.22	6.75	2
9	시료 A	-0.70	2.16	0.46	-3.87		-0.69	5.08	-0.30		2
	시료 B	-0.57	-1.54	0.19	0.00		0.00	-0.21	-0.47		
계		1	2	2	2		3	1	2	3	16

Table 43. Blank elemental concentrations in membrane filter used in low volume sampler.

Element	Concentration (ng/cm ²)	
	Coarse filter	Fine filter
Al	6.55 ± 1.31	1.24 ± 0.9
Br	22.1 ± 1.72	13.3 ± 0.55
Cl	17.7 ± 3.94	9.68 ± 2.33
Co	2.28 ± 0.33	2.08 ± 0.37
Cr	8.85 ± 2.00	11.1 ± 2.58
Cu	0.39 ± 0.18	0.38 ± 0.09
I	0.042 ± 0.020	0.04 ± 0.03
In	0.001 ± 0.0007	0.0015 ± 0.0006
Mg	5.06 ± 2.01	3.70 ± 6.87
Mn	0.11 ± 0.01	0.10 ± 0.06
Na	3.50 ± 1.61	5.34 ± 6.07
Nd	6.52 ± 2.92	4.43 ± 2.95
Sr	1.77 ± 1.23	1.96 ± 0.33
Ti	1.00 ± 0.87	0.77 ± 0.68
V	0.005 ± 0.002	

Table 44. Elemental composition of Filter Materials(ng/cm^2)¹.

Metal	Polystyrene ² (Delbag)	Cellulose ester ^{2,3} (Millipore® 0.45 μm)	Cellulose paper ² (Whatman No. 41)	Glass fiber ⁴	Organic membrane ⁴	Silver membrane ⁴
Ag	2		2			
Al	20	10	12			
As		2.6		80		
Ba	500	100	100			
Be				40	0.3	200
Bi					1	
Ca	300	250 1000	240			
Cd					5	
Cl		1360				
Co	0.2	1	0.1		0.02	
Cr	2	14 30	3	80	2	60
Cu	310	40	4	20	6	20
Fe	85	300 30	40	4000	30	300
Hg	1	1	0.5			
K		410				
Mg	1500	200 660	80			
Mn	2	2 22	0.5	400	10	30
Mo					0.1	
Na		2040				
Ni	25	50 12	10	80	1	100
Pb		18		800	8	200
Rb		4.9				
Sb	1	3 0.7	0.15	30	0.1	
Sn		4.9		50	1	
Ti	70	5 9.6	10	800	2000	200
V	0.6	0.1	0.03	30	0.1	
Zn	515	20 20	25	160000	2	10
Zr		0.4				

1. Alain, A. and Sansoni, B., A review on activation analysis of air particulate matter, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 89, 191(1985).
2. Dams, R, Robbins, J.A., Rahn, K.A. and Winchester, J.W., Quantitative relationships among trace elements over industrialized N.W. Indiana, Proc. SNTEP, International Atomic Energy Agency, Vienna, (1971), 139 ; *Anal. Chem.*, 6, 441, (1972).
3. Kato, T., Sato, N. and Suzuki, N., Nondestructive multielement photon activation analysis of environmental materials, *Talanta*, 23, 517(1976).
4. Hwang, J.Y., Trace metals in atmospheric particulates and atomic absorption spectrometry, *Anal. Chem.*, 44, 14, 20A(1972).

Table45. Monthly meteorological data at sampling during April 1996 to May 1998.

URBAN AREA	98.					97.										98.											
	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar	Apr.	May.	
Pressure(hPa)																											
Mean	1017.7	1012.6	1006.7	1008.5	1009.0	1013.7	1019.2	1022.8	1023.2	1023.5	1023.5	1021.8	1016.3	1008.5	1007.8	1007.2	1008.8	1014.5	1018.4	1022.3	1025.9	1025.3	1022.4	1020.9	1015.4	1014.0	
Temperature()																											
Mean	10.2	18.0	22.1	25.2	26.1	20.5	13.7	6.7	1.1	-2.5	0.8	6.8	12.9	17.8	22.8	25.6	26.0	20.1	13.4	8.6	1.8	-0.9	3.5	7.3	15.7	18.6	
Max.	16.8	24.9	26.5	29.9	31.0	27.2	20.8	12.0	7.6	3.3	7.9	14.2	19.2	23.4	28.5	29.7	30.8	26.1	20.1	14.5	6.9	3.7	9.1	14.0	21.7	24.6	
Min.	3.9	11.8	18.4	21.5	22.6	15.1	8.3	1.9	-4.2	-7.5	-5.3	0.9	6.5	12.4	17.5	21.7	22.0	14.8	6.8	3.7	-2.6	-5.2	-1.4	1.3	10.8	12.7	
Relative Humidity(%)																											
Mean	54.0	60.0	77.0	73.0	75.0	74.0	75.0	74.0	74.0	70.0	67.0	64.0	56.0	68.0	73.0	80.0	80.0	71.0	63.0	72.0	69.0	69.0	62.0	54.0	71.0	66.0	
Min.	31.0	34.0	59.0	54.0	55.0	44.0	43.0	46.0	43.0	46.0	38.0	35.0	33.0	45.0	45.0	59.0	57.0	43.0	32.0	42.0	43.0	45.0	36.0	24.0	40.0	38.0	
Wind Speed(m/s)																											
Mean	2.1	1.8	1.6	2.2	1.7	1.0	1.1	1.3	1.1	1.3	1.4	1.7	1.9	2.2	1.3	1.3	1.9	1.4	1.5	1.2	1.2	1.4	2.0	1.9	1.8	1.5	
Wind direction	ESE	SSE	SW	S	ESE	ESE	ESE	NW	WNW	SSW	NW	S	ESE	ESE	SSE	S	WSW	E	WNW	ESE	NW	ENE	E	ENE	SSE	E	
Rain Fall(mm)																											
Total	259.3	160.4	411.4	257.4	114.4	230.6	90.8	77.1	28.6	15.6	51.5	37.1	55.4	200.9	267.5	424.2	463.5	30.2	7.7	168.2	44.5	33.3	36.3	31.1	154.3	119.5	
RURAL AREA	98.					97.										98.											
	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar	Apr.	May.	
Pressure(hPa)																											
Mean	1017.3	1012.5	1006.5	1007.5	1008.5	1012.9	1018.5	1022.0	1022.4	1022.7	1022.7	1021.1	1015.6	1005.6	1007.3	1006.7	1008.2	1014.3	1017.4	1021.8	1025.2	1024.5	1022.0	1020.2	1015.0	1013.4	
Temperature()																											
Mean	9.8	17.5	22.1	24.4	25.1	19.6	12.3	4.6	-1.2	-5.2	-1.3	5.3	12.1	16.5	22.1	25.0	25.5	18.2	11.6	6.6	-0.5	-2.7	1.2	6.4	15.2	18.2	
Max.	16.3	24.7	27.2	29.9	30.5	27.1	19.7	10.5	6.0	1.2	5.9	12.6	19.1	22.6	28.2	30.0	30.8	24.2	18.7	13.1	5.0	2.5	7.4	13.0	21.4	24.6	
Min.	2.5	10.9	18.1	20.1	21.2	14.1	6.6	-0.4	-6.6	-10.8	-7.7	-1.3	5.2	11.1	16.5	21.2	21.2	13.2	4.8	1.0	-5.1	-7.4	-4.3	-0.5	9.1	12.3	
Relative Humidity(%)																											
Mean	68.0	65.0	81.0	82.0	81.0	77.0	77.0	74.0	73.0	72.0	68.0	64.0	62.0	76.0	74.0	79.0	77.0	70.0	67.0	77.0	77.0	70.0	70.0	62.0	72.0	70.0	
Min.	87.0	32.0	56.0	57.0	54.0	42.0	40.0	40.0	37.0	43.0	35.0	31.0	33.0	47.0	45.0	55.0	54.0	42.0	42.0	49.0	52.0	46.0	42.0	31.0	43.0	39.0	
Wind Speed(m/s)																											
Mean	1.8	1.2	1.0	1.0	0.7	0.6	0.6	0.9	0.8	1.1	1.1	1.3	1.5	1.2	0.9	0.8	0.9	0.7	1.0	0.8	0.8	1.2	1.1	1.5	1.2	1.0	
Wind direction	WNW	WSW	SW	SW	NNW	SSE	WNW	NW	WNW	WSW	WSW	WSW	WSW	SSE	SSW	SSE	SSE	WNW	W	WSW	WNW	NE	NE	WSW	SSE	SSW	
Rain Fall(mm)																											
Total	47.0	19.7	235.5	283.7	203.7	21.6	64.1	45.8	17.6	18.1	38.4	22.8	59.1	183.1	185.2	385.7	272.7	97.0	20.1	112.5	43.1	16.7	36.9	38.9	115.5	85.0	

Table 46. Analytical results of airborne particulate matter at urban site monthly(ng/m³)

(a) Fine particulate matter

	96.										97.										98.									
	Apr.	May	Jun	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan	Feb	Mar	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May				
Ti	15.6	23.9	5.4	~	15.5	-	13.8	7.7	18.1	13.3	8.5	8.9	12.0	10.6	1.5	6.5	2.5	6.4	9.8	6.1	-	-	-	15.3	12.7	22.1				
Sc	0.05	0.15	0.12	~	-	0.01	0.02	0.03	0.12	0.05	0.03	0.04	0.04	0.03	0.01	0.01	0.39	0.01	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.07	0.06	0.04				
Al	316	528	252	143	182	54	148	221	750	319	171	302	326	168	51	50	46	71	259	212	314	276	325	413	341	246				
Fe	-	-	528	461	-	73	163	183	394	188	138	254	171	144	30	52	-	86	-	188	241	142	142	270	237	159				
Na	109	133	113	77	363	165	136	108	216	156	138	228	88	133	38	82	42	117	189	90	100	171	145	183	97	95				
K	288	342	281	366	157	-	272	287	514	179	204	420	258	375	58	39	40	109	-	296	300	322	284	401	181	287				
Mn	9.1	14.1	12.5	8.0	20.8	2.1	11.5	12.7	19.3	9.3	8.5	13.5	11.0	8.4	3.0	1.6	1.5	7.6	22.7	11.2	13.6	9.0	11.9	10.9	7.5	10.6				
Sm	0.04	0.06	0.04	-	-	-	0.02	0.03	0.10	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	-	0.01	0.03	0.70	0.70	0.28	0.20	0.23	0.20	0.15				
La	0.19	0.37	0.39	0.14	-	-	0.15	0.15	0.42	0.18	0.12	0.19	0.10	0.13	0.04	0.03	0.02	0.05	-	0.19	0.18	0.14	0.20	0.25	0.20	0.17				
V	8.5	5.6	8.6	2.4	5.0	4.3	11.0	4.7	7.4	5.4	6.0	6.0	3.1	2.3	1.7	1.7	0.3	5.6	2.5	4.1	4.4	2.2	5.5	3.8	2.0	1.8				
Cr	1.4	5.0	9.5	0.1	28.8	-	2.7	-	1.4	1.4	8.3	1.1	1.8	1.3	0.8	0.3	1.1	2.2	-	0.7	4.8	-	0.2	1.4	1.0	2.9				
Ce	-	2.68	2.97	-	-	-	0.47	0.23	1.22	0.56	0.29	0.52	0.40	0.54	-	-	-	-	-	-	-	-	0.50	0.37	0.40	0.26				
Cu	-	-	-	-	-	9.0	13.2	4.2	16.3	14.0	7.2	17.2	6.8	10.8	2.7	10.2	8.2	9.8	-	17.4	18.5	-	9.8	8.0	2.3	2.4				
In	-	-	-	-	-	0.003	0.007	0.030	0.020	0.030	0.008	0.040	0.050	0.010	0.001	-	0.002	0.010	0.223	0.088	0.078	0.067	0.018	0.016	0.013					
Cl	20.6	52.3	39.6	-	-	18.1	45.8	40.1	51.9	50.0	32.5	58.1	37.6	42.5	15.6	14.9	14.4	46.3	422	303	179	40.7	41.9	21.5	44.1					
Zn	53	169	89	64	96	33	85	67	88	47	70	145	52	52	30	2	26	85	58	126	80	37	66	73	35	46				
As	1.56	2.41	5.07	1.70	2.65	-	5.19	9.82	2.20	3.68	5.57	3.37	3.96	1.63	0.38	0.28	0.09	1.51	2.07	1.56	1.97	2.24	3.63	3.05	2.03	1.56				
Br	6.8	5.5	4.5	0.5	17.3	1.5	12.0	0.5	8.3	7.4	17.6	16.8	4.8	2.9	1.6	0.3	3.2	5.8	9.2	10.0	7.2	1.7	6.9	11.2	3.1	1.7				
I	-	-	-	-	-	0.72	1.77	1.35	1.37	1.21	0.88	2.75	1.71	1.07	0.33	0.78	0.24	0.58	0.02	0.88	1.14	1.71	2.70	3.22	1.50	1.39				
Se	5.63	-	-	-	-	0.33	0.54	0.58	1.08	0.34	0.42	0.58	0.34	1.22	0.11	0.25	-	0.34	1.11	0.25	0.56	0.74	0.53	0.92	0.47	0.40				
Sb	4.0	4.6	5.9	3.8	13.8	0.8	11.3	3.3	7.0	4.8	5.3	8.6	4.0	2.9	3.6	1.8	3.3	4.4	2.9	6.2	5.9	1.3	9.2	4.6	2.0	3.4				
TSP (< 2.5 μm)	41545	29489	42781	43592	43919	6703	23833	18078	38898	15753	22836	33855	22188	23081	19156	9974	7001	20600	40528	31159	27194	22803	20849	27357	17895	13121				

continued

(b) Coarse particulate matter

	<u>96.</u>												<u>97.</u>												<u>98.</u>											
	Apr.	May	Jun	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan	Feb	Mar	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May										
Ti	124	167	110	-	55	14	34	38	123	58	29	61	77	32	10	17	26	18	62	45	55	28	53	96	91	33										
Sc	0.35	0.65	0.29	0.11	0.12	0.04	0.10	0.11	0.54	0.21	0.09	0.21	0.23	0.10	0.03	0.03	0.04	0.05	0.26	0.14	0.30	0.14	0.14	0.38	0.42	0.10										
Al	3036	5162	2457	623	1636	437	949	1053	4116	1723	844	2237	2262	993	291	498	718	566	1998	1432	2199	707	1051	2437	3121	519										
Fe	755	2224	616	-	-	187	491	432	1737	662	340	774	817	355	170	199	186	286	916	627	1111	439	499	1286	1386	254										
Na	452	782	314	109	803	414	425	314	1010	457	222	448	264	186	73	201	86	181	1171	504	720	148	290	599	467	173										
K	683	1417	649	202	440	110	2232	258	933	396	197	687	461	244	145	170	134	167	631	363	691	-	242	739	773	186										
Mn	343	53	24	6.1	21	4.9	14	15	49	21	12	29	26	11	4.9	4.7	7.0	7.3	22	17	25	5.5	10	29	31	6.7										
Sm	0.24	0.42	0.22	-	0.10	0.05	0.12	0.11	0.47	0.18	0.10	0.20	0.22	0.11	0.04	0.05	0.04	0.06	0.29	1.07	3.72	0.76	0.31	0.88	2.99	0.24										
La	1.26	2.30	0.90	0.21	0.82	0.14	0.48	0.40	2.23	0.70	0.35	0.95	0.79	0.35	0.12	0.22	0.19	0.24	1.13	0.76	1.31	0.56	0.50	1.35	1.23	0.35										
V	11.3	12.1	6.4	1.6	2.3	1.3	4.5	3.0	13.0	7.9	4.8	6.2	5.2	1.5	1.1	0.8	0.6	2.3	2.4	4.3	5.8	1.1	2.7	7.2	6.4	1.1										
Cr	4.7	5.2	19.6	-	68.7	1.2	4.9	1.3	3.7	3.7	8.7	5.1	2.5	0.5	0.4	-	-	2.8	0.20	0.79	2.09	-	0.13	1.4	2.49	0.20										
Ce	4.28	6.85	-	-	-	0.44	1.19	1.04	5.84	1.90	1.01	1.82	1.73	0.86	0.35	0.48	0.56	0.48	-	1.56	2.11	1.12	1.09	2.61	2.54	0.72										
Cu	-	-	-	-	-	-	9.1	-	15.8	15.6	9.9	14.6	-	-	11.4	5.6	-	6.4	-	15.0	-	-	-	-	-	-										
In	-	-	-	-	-	-	-	0.015	0.016	0.012	0.014	0.067	0.027	-	0.005	-	-	-	-	0.022	0.079	0.036	0.013	0.027	0.015	0.003										
Cl	81	292	-	-	-	279	187	281	413	368	125	77	70	38	18	22	52	115	-	562	664	428	178	186	45	27										
Zn	59	103	80	-	-	8	38	29	96	51	30	82	42	16	17	8	8	24	48	82	91	28	25	77	35	20										
As	1.04	2.14	4.29	-	-	-	4.15	4.98	2.28	2.72	2.81	2.92	2.29	0.16	0.47	-	0.07	0.51	0.82	1.12	2.94	1.08	1.63	3.46	1.88	0.89										
Br	5.32	13.92	-	-	0.04	0.69	1.08	0.89	16.11	19.00	3.35	5.67	2.57	-	0.86	0.60	-	3.11	-	7.67	14.89	6.12	4.91	14.94	5.16	4.40										
I	-	-	-	-	-	-	0.27	-	0.91	0.69	0.33	1.89	0.56	-	0.12	-	-	0.31	-	0.24	0.44	-	-	1.36	-	0.15										
Se	-	-	-	-	-	-	-	-	1.06	-	-	1.24	0.74	-	-	0.15	-	0.24	0.42	-	0.42	-	-	-	0.57	-										
Sb	2.39	4.78	1.40	0.42	2.14	0.21	2.28	1.50	7.90	4.74	1.28	3.36	2.78	0.41	1.94	0.34	0.35	0.84	0.96	3.65	5.19	-	1.93	3.90	1.85	0.87										
TSP (2.5 - 10 µm)	67434	71718	37871	17437	32095	9217	18453	21164	67503	30274	17231	43912	28585	19382	28283	12919	6177	15057	39162	36477	48802	16183	12633	43540	53754	10299										

Table 47. Analytical results of airborne particulate matter at rural site monthly(ng/m^3)

(a) Fine particulate matter

	96.												97.												98.											
	Apr.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May												
Ti	14.6	40.2	-	-	7.8	12.8	7.9	4.6	7.0	5.3	9.1	-	-	-	1.1	-	2.6	4.3	8.6	2.1	2.8	10.5	9.0	5.7												
Sc	0.058	0.151	0.002	0.005	0.196	0.029	0.019	0.023	0.026	0.010	0.032	0.007	0.002	0.004	0.003	0.001	0.016	0.018	0.030	0.017	0.027	0.030	0.025	0.014												
Al	460	812	17	56	221	248	183	156	147	110	234	29	29	39	22	32	82	130	245	73	206	228	179	109												
Fe	636	436	24	57	126	126	110	132	86	65	115	26	21	68	31	-	35	135	144	48	132	142	99	68												
Na	150	177	119	42	38	71	59	97	48	25	70	33	30	162	27	28	49	91	109	65	103	109	76	92												
K	255	689	35	78	188	157	185	382	144	54	392	93	67	139	58	65	108	219	277	70	258	287	177	221												
Mn	10.6	21.2	0.7	4.4	7.7	9.1	6.1	12.4	5.4	2.4	10.0	2.3	2.1	3.2	3.2	3.3	3.3	8.5	9.9	2.0	7.2	9.5	5.3	4.3												
Sm	0.053	0.048	-	0.006	0.012	0.034	0.024	0.023	0.024	-	0.025	0.006	0.002	0.005	-	-	0.245	0.912	0.535	0.280	0.464	0.299	0.348	0.371												
La	0.25	0.21	0.02	0.04	0.14	0.21	0.33	0.49	0.10	-	0.16	0.03	0.03	0.06	0.02	0.03	0.09	0.11	0.22	0.08	0.17	0.15	0.11	0.10												
V	3.62	3.50	0.90	1.72	18.80	4.44	2.84	7.76	2.44	0.39	1.43	0.80	0.57	0.53	0.43	0.68	0.55	2.12	4.23	0.38	2.47	2.68	2.06	1.02												
Cr	5.33	9.21	0.53	0.80	0.11	1.39	1.88	1.87	1.19	0.49	0.14	0.61	-	0.91	1.25	-	3.55	2.86	2.09	1.07	0.24	0.03	0.76	-												
Ce	3.30	1.74	-	0.20	0.38	0.46	0.77	1.05	0.10	-	0.12	-	-	-	-	0.01	1.22	2.57	1.84	0.63	1.13	2.16	2.41	0.77												
Cu	-	-	2.46	3.77	11.37	19.43	4.28	13.55	3.42	0.91	2.03	4.30	7.02	5.13	2.77	1.80	2.86	-	7.27	-	16.25	11.21	4.17	3.40												
In	-	-	-	0.006	0.010	0.020	0.009	0.009	0.010	0.011	0.026	0.003	0.005	0.023	-	-	0.009	0.007	0.042	0.019	0.049	0.018	0.028	0.013												
Cl	33.4	38.4	18.6	15.1	29.0	23.0	18.5	27.7	197.0	13.4	18.0	47.6	207.3	10.8	4.5	9.5	13.7	13.5	43.3	9.0	26.1	21.8	30.3	26.8												
Zn	86.0	-	8.2	15.2	45.1	64.8	31.9	67.0	18.5	8.3	34.7	11.8	11.1	29.9	8.0	0.1	25.2	45.8	33.1	12.0	50.1	51.9	26.2	30.7												
As	1.63	2.20	0.14	1.50	3.07	6.92	5.09	2.45	2.28	0.01	1.43	0.31	0.82	0.98	0.27	0.97	1.17	1.22	2.58	0.57	5.86	2.21	1.83	1.88												
Br	3.86	2.58	10.69	0.37	1.56	2.81	1.06	8.30	2.26	-	2.29	0.55	-	0.82	1.03	0.50	1.34	3.24	6.26	1.73	5.17	7.87	3.13	4.29												
I	-	-	2.18	0.63	0.78	0.77	0.79	1.51	0.66	0.32	1.74	0.36	0.49	0.47	0.25	0.32	0.42	0.75	1.09	0.38	1.08	1.35	0.74	1.06												
Se	-	1.59	-	0.22	0.29	0.30	0.45	0.94	0.47	-	0.66	0.21	0.12	0.16	0.11	0.003	0.087	0.389	0.741	0.148	0.703	0.493	0.258	0.358												
Sb	2.09	1.07	0.63	0.85	1.40	4.65	1.09	2.44	1.07	0.31	1.07	0.31	0.50	0.67	0.29	0.47	0.495	1.548	1.796	0.206	2.401	2.177	1.382	0.781												
TSP (< 2.5 μm)	23485	19065	61728	21219	13503	27006	23148	19290	11574	7716	13503	15432	15432	15432	15432	15432	9654	13458	20062	7330	17308	16394	17740	22418												

continued

(b) Coarse particulate matter

	96.										97.										98.									
	Apr.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May						
Ti	70.0	126.7	6.0	16.4	15.5	39.8	29.2	31.3	46.6	31.4	58.4	11.2	8.4	11.5	5.3	12.2	36.5	26.2	54.5	22.4	38.4	59.8	47.5	25.6						
Sc	0.395	0.670	0.019	0.047	0.113	0.167	0.067	0.084	0.157	0.074	0.194	0.014	0.033	0.029	0.022	0.023	0.160	0.124	0.292	0.061	0.143	0.266	0.143	0.081						
Al	2482	4193	214	427	823	1429	622	701	1164	697	2241	147	299	281	161	253	822	1125	1375	557	1215	1994	1323	787						
Fe	1287	1741	95	233	305	587	274	347	448	230	566	104	175	157	87	134	558	496	956	182	448	883	459	283						
Na	634	627	467	152	57	188	127	200	179	98	227	94	91	52	482	74	304	348	592	147	234	489	160	210						
K	707	1149	73	171	202	366	230	260	319	138	457	134	128	88	82	129	362	333	460	123	299	426	310	200						
Mn	26.1	52.6	2.0	5.2	23.6	17.5	7.4	11.8	16.7	7.8	20.3	2.4	3.9	3.6	3.1	4.4	11.2	11.5	16.9	4.5	11.3	24.0	13.7	7.9						
Sm	0.236	0.408	0.020	0.055	0.060	0.188	0.066	0.084	0.101	0.062	0.177	0.015	0.037	0.030	0.015	0.025	0.980	0.635	0.858	-	-	0.627	-	1.023						
La	1.31	1.86	0.14	0.38	0.59	0.79	0.50	0.56	0.80	0.23	0.76	0.14	0.18	0.14	0.10	0.12	0.63	1.32	1.07	0.27	0.61	1.13	1.25	0.33						
V	4.45	7.38	0.43	0.88	1.53	3.55	1.27	3.63	3.77	0.89	3.79	0.35	0.45	0.39	0.33	0.64	1.28	2.59	2.81	0.76	2.37	3.71	2.25	1.27						
Cr	4.02	9.31	-	2.20	0.91	8.66	3.81	3.23	0.78	2.01	3.41	0.35	1.98	2.00	-	1.24	0.63	1.76	3.12	-	-	2.36	0.96	-						
Ce	3.57	5.16	-	0.78	1.14	1.30	0.89	1.32	1.51	0.44	1.36	0.55	0.28	0.23	0.20	0.48	1.22	2.57	1.84	0.63	1.13	2.16	2.41	0.77						
Cu	-	-	-	3.91	4.35	15.37	4.71	6.94	14.58	-	15.39	3.64	2.16	3.21	-	2.33	-	-	-	-	5.99	5.33	-	-						
In	-	-	-	-	-	0.010	-	-	-	0.012	0.025	-	-	-	-	-	0.002	-	0.033	0.004	0.058	0.026	0.013	0.004						
Cl	93	426	193	15	22	26	20	32	18	40	33	43	33	25	366	20	157	145	89	102	124	64	22	50						
Zn	57.0	44.5	3.8	11.8	26.0	38.4	36.1	49.0	22.8	6.7	42.7	12.2	13.3	6.7	12.6	14.3	24.8	39.2	42.7	8.7	31.5	60.8	26.3	17.3						
As	2.34	1.94	0.08	0.29	0.77	7.72	-	0.89	2.94	0.67	1.45	0.07	0.50	0.11	0.39	0.37	2.08	0.70	3.16	0.16	3.24	2.17	1.30	0.95						
Br	3.05	0.06	3.26	3.24	4.29	1.37	2.98	3.33	1.68	2.13	3.15	2.21	2.53	3.49	2.36	0.48	2.32	1.99	6.34	2.14	2.46	4.74	3.57	1.97						
I	-	-	0.219	0.261	0.199	0.319	0.182	0.285	0.779	-	0.978	0.198	0.093	-	0.246	-	-	0.280	-	-	-	-	-	0.224						
Se	-	-	0.121	0.133	0.080	-	-	0.088	0.262	-	0.474	0.144	0.071	0.048	-	-	-	0.123	-	-	0.115	0.262	-	-						
Sb	0.80	0.52	0.20	0.34	0.35	1.79	0.32	0.81	1.14	0.25	0.86	0.14	0.28	0.16	0.10	0.22	0.425	0.942	1.347	0.114	0.931	1.769	0.738	0.412						
TSP (2.5 - 10 µm)	38939	35842	15432	19290	17361	23148	11574	7716	27006	7716	7716	13503	23148	27006	38580	15432	14853	20833	34336	12539	19578	30777	25319	15962						

Table 48. Elemental concentration in TSPM of urban area. ('96.04-'98.05)

Ele.	PM 2.5 (ng/m ³)					PM 2.5 - 10 (ng/m ³)					Ratio (PM _{2.5} / PM ₁₀)
	Range		Mean	±	Geo. Mean	Range		Mean	±	Geo. Mean	
Ti	1.53 ~ 65.8		13.3 ± 12.5		9.49	9.79 ~ 812		85.0 ± 122		53.5	0.56
Sc	0.01 ~ 0.38		0.07 ± 0.10		0.04	0.03 ~ 2.71		0.29 ± 0.44		0.17	0.24
Al	33.3 ~ 1266		285 ± 261		206	280 ~ 15440		2149 ± 2431		1461	0.13
Fe	30.0 ~ 1305		225 ± 223		164	165 ~ 8672		1009 ± 1366		650	0.22
Na	22.2 ~ 335		141 ± 79		119	73.1 ~ 3520		504 ± 561		354	0.28
K	0.18 ~ 863		300 ± 200		211	110 ~ 5816		736 ± 1038		439	0.41
Mn	1.46 ~ 34.4		11.6 ± 7.24		9.41	4.32 ~ 222		26.8 ± 33.9		17.6	0.43
Sm	0.003 ~ 1.06		0.14 ± 0.21		0.06	0.03 ~ 5.14		0.58 ± 1.02		0.24	0.24
La	0.02 ~ 19.2		0.90 ± 3.18		0.19	0.12 ~ 12.4		1.22 ± 1.87		0.71	0.73
V	0.31 ~ 20.1		5.19 ± 4.24		3.87	0.61 ~ 62.6		6.56 ± 9.10		4.03	0.79
Cr	0.16 ~ 26.1		3.96 ± 5.66		1.82	0.89 ~ 58.5		5.72 ± 10.4		2.32	0.69
Ce	0.10 ~ 46.7		2.62 ± 8.01		0.69	0.35 ~ 716		17.8 ± 103		1.78	0.15
Cu	2.66 ~ 181		15.7 ± 29.4		9.9	4.22 ~ 29.9		13.2 ± 8.08		11.0	1.19
In	0.0008 ~ 0.42		0.04 ± 0.07		0.02	0.005 ~ 0.12		0.03 ± 0.03		0.02	1.41
Cl	2.69 ~ 672		68.5 ± 111		39.1	0.84 ~ 1049		197 ± 248		91.7	0.35
Zn	1.54 ~ 602		89.5 ± 106		62.0	7.53 ~ 336		65.0 ± 68.1		43.2	1.38
As	0.09 ~ 12.5		3.07 ± 2.51		2.22	0.07 ~ 8.34		2.38 ± 1.89		1.63	1.29
Br	0.08 ~ 25.5		6.78 ± 5.56		4.20	0.59 ~ 140		11.9 ± 26.7		4.20	0.57
I	0.024 ~ 4.01		1.38 ± 0.95		1.05	0.12 ~ 3.53		0.80 ± 0.85		0.54	1.73
Se	0.11 ~ 6.48		0.74 ± 1.01		0.52	0.14 ~ 36.8		3.05 ± 8.49		0.80	0.24
Sb	0.64 ~ 21.8		5.43 ± 4.20		4.11	0.21 ~ 31.6		3.13 ± 4.61		1.84	1.73
TSP	3329 ~ 51088		25224 ± 12121		21985	3676 ~ 105996		33957 ± 24386		26366	0.74

Table 49. Elemental concentration in TSPM of rural area. ('96.04-'98.05)

Ele.	PM 2.5 (ng/m ³)			PM 2.5 - 10 (ng/m ³)			Ratio (PM _{2.5} / PM ₁₀)
	Range	Mean	Geo. Mean	Range	Mean	Geo. Mean	
Ti	1.12 ~ 43.0	10.4 ± 7.91	8.30	5.31 ~ 275	43.8 ± 46.2	30.7	0.24
Sc	4.21 ~ 0.17	0.030 ± 0.033	0.02	0.009 ~ 0.88	0.18 ± 0.19	0.11	0.17
Al	9.79 ~ 663	171 ± 135	121	109 ~ 5285	1197 ± 1006	852	0.14
Fe	0.28 ~ 749	120 ± 138	73.9	87.0 ~ 2593	634 ± 603	419	0.19
Na	16.9 ~ 261	89.0 ± 56.4	72.5	51.6 ~ 1123	318 ± 267	229	0.28
K	17.9 ~ 760	205 ± 154	153	72.83 ~ 1762	392 ± 349	285	0.52
Mn	0.12 ~ 23.2	7.02 ± 4.68	5.20	1.52 ~ 72.3	15.2 ± 14.4	10.5	0.46
Sm	0.003 ~ 1.72	0.20 ± 0.31	0.06	0.01 ~ 19.5	1.17 ± 3.19	0.24	0.17
La	0.0002 ~ 0.80	0.16 ± 0.16	0.09	0.08 ~ 3.46	0.86 ± 0.73	0.57	0.19
V	0.03 ~ 7.76	2.39 ± 1.88	1.59	0.19 ~ 9.73	2.57 ± 2.16	1.75	0.93
Cr	0.025 ~ 11.7	2.27 ± 2.85	1.02	0.11 ~ 12.3	3.29 ± 3.45	1.76	0.69
Ce	0.006 ~ 3.89	0.59 ± 0.85	0.30	0.20 ~ 9.93	1.85 ± 1.90	1.24	0.32
Cu	0.90 ~ 32.5	7.70 ± 6.93	5.60	2.16 ~ 16.0	7.61 ± 5.44	5.79	1.01
In	0.003 ~ 0.07	0.02 ± 0.01	0.01	0.003 ~ 0.11	0.02 ± 0.03	0.02	0.78
Cl	4.48 ~ 207	36.4 ± 44.1	23.9	6.20 ~ 469	83.3 ± 101	48.3	0.44
Zn	0.14 ~ 320	46.0 ± 54.0	27.0	3.83 ~ 98.3	33.0 ± 24.1	24.8	1.40
As	0.01 ~ 20.2	2.41 ± 3.36	1.28	0.05 ~ 10.4	1.82 ± 2.16	0.93	1.32
Br	0.05 ~ 11.1	3.44 ± 2.97	2.12	0.24 ~ 7.26	2.88 ± 1.48	2.45	1.19
I	0.014 ~ 2.18	0.81 ± 0.56	0.60	0.09 ~ 0.98	0.34 ± 0.24	0.27	2.37
Se	0.003 ~ 1.75	0.50 ± 0.44	0.33	0.05 ~ 2.11	0.34 ± 0.51	0.20	1.44
Sb	0.03 ~ 4.65	1.46 ± 1.20	1.00	0.07 ~ 3.00	0.70 ± 0.58	0.50	2.08
TSP	3086 ~ 61728	18220 ± 9871	16072	5401 ~ 77160	23140 ± 13828	19728	0.79

Table 50. Correlation matrix for environmental analytical data of urban area.

	Ti	Sc	Al	Fe	Na	K	Mn	Sm	La	V	Cr	Ce	Cu	In	Cl	Zn	As	Br	I	Se	Sb	TSP
Ti	1.00																					
Sc	0.89	1.00																				
Al	0.95	0.96	1.00																			
Fe	0.93	0.98	0.98	1.00																		
Na	0.85	0.91	0.90	0.92	1.00																	
K	0.95	0.97	0.98	0.99	0.91	1.00																
Mn	0.96	0.96	0.99	0.98	0.91	0.84	1.00															
Sm	0.74	0.76	0.78	0.77	0.71	0.31	0.30	1.00														
La	0.98	0.91	0.96	0.96	0.88	0.97	0.97	0.31	1.00													
V	0.93	0.91	0.93	0.92	0.85	0.81	0.96	0.27	0.95	1.00												
Cr	0.18	0.29	0.60	0.52	0.45	0.61	0.64	0.01	0.55	0.63	1.00											
Ce	0.97	0.94	0.97	0.97	0.91	0.83	0.98	0.27	0.98	0.94	0.64	1.00										
Cu	0.72	0.68	0.75	0.75	0.54	0.74	0.79	0.88	0.72	0.53	-0.07	0.70	1.00									
In	0.38	0.31	0.30	0.31	0.27	0.43	0.35	0.84	0.47	0.19	0.20	0.18	0.57	1.00								
Cl	0.51	0.44	0.44	0.45	0.65	0.36	0.45	0.44	0.48	0.47	0.19	0.43	0.41	0.19	1.00							
Zn	0.78	0.72	0.81	0.80	0.68	0.69	0.82	0.32	0.85	0.79	0.40	0.91	0.88	0.53	0.40	1.00						
As	0.60	0.58	0.61	0.59	0.54	0.76	0.61	0.25	0.59	0.59	0.34	0.38	0.56	0.26	0.38	0.53	1.00					
Br	0.88	0.82	0.82	0.83	0.85	0.70	0.85	0.31	0.88	0.93	0.45	0.83	0.34	0.24	0.62	0.64	0.54	1.00				
I	0.50	0.66	0.60	0.65	0.58	0.86	0.70	0.63	0.69	0.45	0.30	0.53	0.51	0.91	0.07	0.69	0.72	0.44	1.00			
Se	0.23	0.33	0.31	0.53	0.37	0.49	0.49	0.02	0.59	0.38	0.15	0.42	0.96	0.89	0.33	0.76	0.82	0.49	0.82	1.00		
Sb	0.88	0.82	0.86	0.86	0.85	0.74	0.88	0.34	0.90	0.94	0.68	0.86	0.56	0.24	0.58	0.71	0.60	0.96	0.34	0.18	1.00	
TSP	0.83	0.78	0.86	0.77	0.75	0.81	0.89	0.32	0.83	0.80	0.61	0.83	0.88	0.51	0.20	0.73	0.33	0.49	0.76	0.90	0.60	1.00

Coarse Particle

	Ti	Sc	Al	Fe	Na	K	Mn	Sm	La	V	Cr	Ce	Cu	In	Cl	Zn	As	I	Br	Se	Sb	TSP
Ti	1.00																					
Sc	0.45	1.00																				
Al	0.83	0.53	1.00																			
Fe	0.72	0.96	0.78	1.00																		
Na	0.53	0.48	0.62	0.58	1.00																	
K	0.63	0.56	0.74	0.71	0.62	1.00																
Mn	0.44	0.45	0.67	0.70	0.70	0.64	1.00															
Sm	0.60	0.05	0.17	0.12	-0.09	0.15	0.18	1.00														
La	0.61	0.74	0.96	0.91	0.68	0.76	0.68	0.18	1.00													
V	-0.03	0.23	0.11	0.16	0.38	0.33	0.58	-0.09	0.29	1.00												
Cr	0.17	0.54	0.08	0.27	0.49	0.45	0.39	0.08	0.58	0.30	1.00											
Ce	0.37	0.92	0.67	0.92	0.42	0.53	0.62	0.12	0.99	0.49	0.73	1.00										
Cu	0.15	0.12	0.41	0.51	0.56	0.40	0.55	0.48	0.42	0.44	0.21	0.43	1.00									
In	0.14	-0.04	0.31	0.28	0.20	0.25	0.43	0.66	0.21	0.08	0.29	0.06	0.49	1.00								
Cl	0.17	0.13	0.18	0.12	0.32	0.38	0.40	0.84	-0.08	0.25	0.20	0.04	0.43	0.81	1.00							
Zn	0.19	0.36	0.29	0.34	0.47	0.46	0.66	0.08	0.54	0.70	0.27	0.05	0.65	0.39	0.20	1.00						
As	-0.01	0.22	0.11	0.12	0.28	0.33	0.45	-0.11	0.41	0.38	0.28	0.01	-0.06	-0.13	-0.05	0.45	1.00					
Br	0.09	0.09	0.12	0.19	0.56	0.20	0.36	0.12	0.16	0.46	0.38	-0.03	0.63	0.17	0.14	0.41	0.15	1.00				
I	0.49	0.43	0.51	0.47	0.52	0.54	0.37	0.08	0.45	0.21	-0.07	0.13	0.23	0.34	-0.07	0.27	0.23	0.38	1.00			
Se	0.50	0.19	0.48	0.60	0.43	0.58	0.48	0.08	0.30	0.37	-0.02	0.38	0.52	0.08	-0.07	0.06	-0.07	0.21	0.26	1.00		
Sb	0.12	0.37	0.17	0.20	0.57	0.42	0.54	0.09	0.36	0.70	0.48	0.24	0.48	0.28	0.10	0.63	0.41	0.65	0.44	0.08	1.00	
TSP	0.13	0.27	0.32	0.77	0.53	0.51	0.68	0.24	0.36	0.54	0.41	0.37	0.86	0.37	0.17	0.42	0.24	0.49	0.34	0.60	0.57	1.00

Fine Particle

Table 51. Correlation matrix for environmental analytical data of rural area.

	Ti	Sc	Al	Fe	Na	K	Mn	Sm	La	V	Cr	Ce	Cu	In	Cl	Zn	As	Br	I	Se	Sb	TSP
Ti	1.00																					
Sc	0.91	1.00																				
Al	0.94	0.94	1.00																			
Fe	0.84	0.95	0.89	1.00																		
Na	0.69	0.81	0.71	0.84	1.00																	
K	0.92	0.98	0.95	0.96	0.80	1.00																
Mn	0.93	0.96	0.97	0.92	0.71	0.96	1.00															
Sm	0.20	0.26	0.28	0.22	0.24	0.25	0.18	1.00														
La	0.86	0.93	0.91	0.91	0.75	0.94	0.91	0.27	1.00													
V	0.87	0.92	0.94	0.92	0.72	0.93	0.96	0.15	0.90	1.00												
Cr	0.47	0.59	0.53	0.60	0.52	0.64	0.58	0.03	0.62	0.60	1.00											
Ce	0.90	0.91	0.88	0.89	0.79	0.93	0.89	0.16	0.95	0.87	0.62	1.00										
Cu	0.89	0.91	0.92	0.86	0.67	0.90	0.90	0.81	0.87	0.92	0.54	0.80	1.00									
In	0.80	0.90	0.74	0.89	0.85	0.80	0.81	0.01	0.63	0.73	0.15	0.61	0.90	1.00								
Cl	0.27	0.39	0.27	0.31	0.45	0.35	0.36	0.20	0.25	0.25	0.30	0.30	0.35	0.01	1.00							
Zn	0.62	0.61	0.62	0.70	0.60	0.65	0.64	0.05	0.65	0.74	0.36	0.71	0.70	0.85	0.02	1.00						
As	0.36	0.44	0.41	0.46	0.31	0.43	0.43	0.35	0.44	0.46	0.35	0.34	0.76	0.77	0.13	0.58	1.00					
Br	0.42	0.47	0.45	0.64	0.56	0.53	0.47	0.11	0.47	0.48	0.40	0.48	0.27	0.90	-0.05	0.54	0.23	1.00				
I	0.77	0.80	0.81	0.71	0.17	0.79	0.78	0.32	0.54	0.70	0.12	0.53	0.84	-	-0.15	0.45	0.76	-0.11	1.00			
Se	0.91	0.88	0.95	0.85	0.61	0.83	0.90	0.47	0.69	0.79	0.28	0.67	0.89	-	0.04	0.76	0.47	0.40	0.93	1.00		
Sb	0.52	0.45	0.58	0.46	0.43	0.47	0.53	0.16	0.53	0.59	0.24	0.46	0.84	0.78	-0.12	0.76	0.52	0.43	0.54	0.79	1.00	
TSP	0.76	0.76	0.74	0.76	0.74	0.77	0.74	0.18	0.71	0.71	0.35	0.73	0.38	0.71	0.30	0.54	0.31	0.50	-0.06	0.30	0.47	1.00

Coarse Particle

	Ti	Sc	Al	Fe	Na	K	Mn	Sm	La	V	Cr	Ce	Cu	In	Cl	Zn	As	Br	I	Se	Sb	TSP
Ti	1.00																					
Sc	0.82	1.00																				
Al	0.86	0.88	1.00																			
Fe	0.68	0.86	0.85	1.00																		
Na	0.75	0.73	0.69	0.81	1.00																	
K	0.78	0.77	0.75	0.69	0.69	1.00																
Mn	0.80	0.83	0.88	0.81	0.66	-0.11	1.00															
Sm	-0.21	-0.08	-0.07	-0.05	0.11	0.12	-0.11	1.00														
La	0.31	0.50	0.62	0.79	0.47	0.54	0.72	-0.13	1.00													
V	0.65	0.67	0.71	0.67	0.61	0.73	0.85	-0.15	0.76	1.00												
Cr	0.62	0.68	0.67	0.76	0.52	0.60	0.69	-0.12	0.62	0.46	1.00											
Ce	0.74	0.78	0.79	0.86	0.21	0.67	0.80	-0.28	0.73	0.59	0.46	1.00										
Cu	0.62	0.55	0.48	0.67	0.49	0.49	0.53	0.52	0.46	0.48	0.12	0.40	1.00									
In	0.11	0.56	0.40	0.47	0.58	0.43	0.24	0.69	0.21	0.10	-0.16	-0.16	0.66	1.00								
Cl	0.39	0.59	0.36	0.67	0.55	0.48	0.43	-0.03	0.28	0.54	0.18	0.38	0.24	0.11	1.00							
Zn	0.77	0.83	0.79	0.83	0.72	0.73	0.88	-0.05	0.81	0.83	0.59	0.41	0.88	0.41	0.56	1.00						
As	0.16	0.19	0.33	0.36	0.23	0.35	0.45	0.23	0.49	0.44	0.33	0.26	0.81	0.60	0.13	0.51	1.00					
Br	0.51	0.27	0.38	0.34	0.56	0.56	0.46	0.46	0.38	0.48	0.15	0.17	0.53	0.45	0.17	0.55	0.27	1.00				
I	0.55	0.40	0.42	0.40	0.61	0.65	0.59	0.42	0.44	0.41	-0.13	0.26	0.31	0.37	0.24	0.51	0.30	0.78	1.00			
Se	0.49	0.64	0.66	0.91	0.60	0.70	0.71	0.07	0.76	0.45	0.70	0.82	0.57	0.57	0.30	0.53	0.41	0.73	0.41	1.00		
Sb	0.81	0.62	0.70	0.64	0.60	0.69	0.78	0.04	0.58	0.82	0.33	0.23	0.66	0.43	0.24	0.88	0.81	0.53	0.31	0.53	1.00	
TSP	0.50	0.52	0.52	0.68	0.47	0.56	0.54	-0.03	0.64	0.56	0.50	0.50	0.44	0.24	0.34	0.65	0.39	0.31	0.39	0.47	0.58	1.00

Fine Particle

Ba	sBa	Br	sBr	Ca	sCa	Ce	sCe	Cl	sCl	Co	sCo	Cr	sCr	Cu	sCu	Fe	sFe	Hg	shg	I	sl	In	shn
34.63	4.16	7.24	0.56	831.7	121.0	2.018	0.164	179.7	15.1	0.628	0.050	8.008	0.611			1074.4	82.7			1.726	0.615	0.078	0.023
33.69	10.36	3.05	0.86	2275.6	654.9	3.837	1.082	109.8	31.1	0.541	0.157	11.286	3.164			1409.6	396.2			1.880	0.769	0.117	0.021
28.80	6.86	7.08	1.05	1299.5	216.8	2.613	0.439	46.2	8.9	0.675	0.111	10.885	1.628	18.51	7.14	1423.6	216.3			0.531	0.264	0.024	0.010
19.74	7.19		0.00	784.3	263.4	1.850	0.688	26.3	8.9	0.316	0.108	7.090	2.336			986.8	327.3						
14.24	3.88		0.00	445.8	103.2	1.143	0.278	11.4	2.7	0.359	0.079	3.334	0.676			567.5	118.9						
31.44	9.53	1.74	0.47	1408.2	396.9	3.033	0.853	41.3	11.7	0.710	0.200	13.033	3.542	15.06	7.78	1404.6	384.7			1.888	0.629	0.035	0.013
23.27	4.63	87.41	14.38	677.8	126.0	1.809	0.359	42.5	7.5	1.876	0.320	6.789	1.130	14.98	6.01	1051.8	178.0			0.825	0.416	0.018	0.006
24.22	3.68	0.54	0.05	612.1	87.7	1.516	0.196	279.4	24.9	0.353	0.046	2.490	0.223	19.01	5.33	804.9	77.2			1.198	0.485	0.020	0.008
32.67	8.91	29.99	7.62	608.9	165.8	2.088	0.599	84.1	21.8	1.183	0.311	2.666	0.683	26.56	8.48	1143.9	294.6			0.613	0.181	0.011	0.004
28.12	3.91	8.35	0.73	1025.3	116.0	1.522	0.172	88.2	6.6	0.877	0.084	10.276	0.904	28.64	6.81	1002.8	90.5						
17.24	2.65	1.52	0.12	732.4	74.0	1.219	0.182	18.3	2.4	0.232	0.030	8.203	0.649	13.39	3.35	737.6	64.9			0.798	0.245	0.044	0.010
35.71	7.89	24.36	4.97	1329.4	286.1	1.936	0.405	46.0	9.7	0.930	0.192	11.451	2.341	72.15	16.36	1343.2	275.0			0.982	0.404	0.054	0.007
33.31	3.80	7.24	0.17	878.9	73.2	1.987	0.138	40.8	3.6	0.680	0.038	7.824	0.229	23.94	5.99	1305.0	41.7			0.457	0.182		
13.67	2.17	0.50	0.04	691.9	72.0	0.957	0.089	65.5	6.1	0.221	0.020	9.238	0.796	4.69	1.96	635.5	55.2			0.753	0.277	0.025	0.006
16.77	3.14			627.3	70.5	1.240	0.128	34.4	4.2	0.191	0.020	4.771	0.403			641.9	56.2						
												0.128	0.077			31.8	19.8						
												1.976	0.511			27.5	8.1						
												2.176	0.112	10.33	1.48	436.4	26.6						
												2.742	0.483	13.02	3.47	462.7	84.0			0.387	0.118		
												3.829	0.517	4.96	1.74	271.4	39.2						
												1.647	0.104			292.5	24.4						
												18.656	2.998			751.6	123.8			0.758	0.284		
												15.043	4.038	8.68	4.25	525.0	143.2			0.816	0.441		
												21.583	2.170			467.8	50.3					0.150	0.041
												13.313	3.521			338.3	90.7					3.186	0.318
												18.037	2.121	8.91	2.07	331.6	39.5					0.024	0.008
												16.917	1.985			355.8	45.5						
												12.939	1.741			262.6	39.0					0.071	0.011
												12.970	2.025			221.8	39.1					0.146	0.007
												24.556	0.380			1072.6	28.8						
												13.783	0.435			424.3	21.0						
												24.315	3.325	8.36	2.47	539.7	74.9					0.429	
												36.593	4.586	10.52	3.29	942.1	118.6					3.632	0.455
												26.355	1.565	7.59	2.17	381.7	25.2					2.676	0.163
												32.417	4.981	14.91	4.01	892.1	137.9					2.587	0.399
												37.647	0.881			901.3	23.1					2.583	0.065
												15.926	0.354			641.6	15.8					2.700	0.062
												21.359	1.168			614.8	34.5					2.913	0.161
												28.906	1.038			757.5	28.4					2.891	0.106
												22.369	0.980			289.1	13.9					2.313	0.103
												14.079	1.313			217.9	22.2					3.310	0.309
												100.957	5.757			3301.3	195.9					3.337	0.237
												23.749	0.267			671.7	18.5					0.943	0.046
												91.853	20.351			2631.2	584.4					3.710	0.829
												117.470	6.864	22.00	3.74	1401.2	83.0					0.768	0.057
												63.807	1.076			1786.9	42.7					1.877	0.085
												26.107	2.302			1133.9	100.4					0.844	0.078
												39.945	4.111	28.23	5.44	2896.8	277.8			1.448	0.357	0.092	0.013
												32.745	0.333	14.67	4.09	912.1	19.9					2.040	0.046

Mn	sMn	Na	sNa	Sb	sSb	Sc	sSc	Se	sSe	Sm	sSm	Ti	sTi	V	sV	Zn	sZn
5.41	0.53	302.8	24.5	16.02	1.30	0.014	0.002	0.767	0.242	0.055	0.009	5.61	4.68	5.857	0.482	41.53	3.51
12.16	0.45	468.8	6.9	5.75	0.09	0.103	0.005	1.194	0.408	0.224	0.005	19.44	4.63	2.164	0.055	151.76	4.01
11.65	0.44	162.1	6.0	3.09	0.12	0.028	0.002	1.468	0.257	0.090	0.006	16.82	4.67	4.591	0.181	48.59	2.41
29.79	5.75	331.0	63.8	5.89	1.14	0.068	0.014	7.873	1.650	0.213	0.044	24.87	10.06	6.052	1.171	210.80	40.89
16.75	0.43	118.1	3.0	10.24	0.26	0.019	0.002			0.075	0.006	11.13	7.13	3.363	0.130	40.17	1.61
16.66	2.48	158.7	23.6	8.73	1.30	0.024	0.004	0.554	0.263	0.109	0.018	30.23	8.39	3.656	0.548	131.48	19.64
1.12	0.08	223.5	15.3	15.68	1.07	0.018	0.003	3.155	0.431	0.113	0.014	18.98	9.21	8.742	0.606	170.27	11.88
8.32	1.02	220.6	25.3	15.64	1.80	0.018	0.003	0.791	0.410	0.054	0.010	12.26	6.07	4.810	0.557	120.57	14.06
1.96	0.14	7.3	0.5	0.59	0.04	0.001	0.000			0.194	0.014			0.576	0.062	5.22	0.46
15.36	1.20	187.4	14.6	21.93	1.70	0.031	0.004	2.046	0.704	0.105	0.014	8.70	5.35	5.916	0.465	128.00	10.47
9.99	0.60	75.4	4.5	7.29	0.44	0.006	0.001	0.443	0.084	0.020	0.003			1.623	0.110	43.24	2.63
5.24	0.48	69.6	6.3	4.80	0.44	0.006	0.001	0.311	0.089	0.114	0.011	7.35	3.33	1.743	0.165	39.82	3.66
6.24	0.38	31.7	1.9	2.92	0.18	0.005	0.001	0.338	0.064	0.575	0.035			1.533	0.101	36.13	2.24
9.76	0.38	182.8	6.9	10.86	0.41	0.026	0.001	1.554	0.110	0.071	0.004	6.21	3.61	3.221	0.137	60.94	2.38
9.11	0.91	76.0	7.6	5.81	0.58	0.006	0.001	0.688	0.123	3.957	0.395			1.823	0.188	104.02	10.44
7.88	0.35	28.0	1.3	1.76	0.08	0.001	0.000	0.132	0.069	0.096	0.005			1.990	0.096	24.16	1.17
18.02	1.83	294.2	29.8	4.95	0.50	0.043	0.005	0.404	0.177	0.889	0.071	16.87	6.01	5.300	0.543	110.29	11.32
15.74	1.64	304.9	30.1	4.67	0.46	0.045	0.013			0.198	0.022	24.42	8.53	6.188	0.621	71.42	11.17
49.39	8.29	315.9	53.0	6.91	1.16	0.019	0.004			1.407	0.237			3.804	0.643	294.33	49.48
82.26	1.27	170.7	2.8	5.07	0.09	0.028	0.001	0.446	0.128	0.495	0.009			3.563	0.097	84.11	1.75
27.48	4.11	322.5	48.2	7.10	1.06	0.054	0.009	2.930	0.569	0.846	0.127	19.03	7.34	8.956	1.342	108.42	16.41
17.56	1.38	224.2	17.6	16.93	1.34	0.030	0.003	1.512	0.268	0.297	0.029	12.61	6.35	4.042	0.328	63.60	5.17
37.55	1.47	271.8	9.2	5.49	0.20	0.032	0.002	0.763	0.248	0.194	0.009	11.98	7.52	5.033	0.194	147.09	5.47
11.15	0.51	143.5	6.5	4.51	0.21	0.008	0.002			0.475	0.022			2.327	0.124	32.18	1.97
34.67	2.27	180.0	11.8	3.42	0.23	0.015	0.002	0.407	0.178	1.062	0.070			6.379	0.426	89.21	5.99
4.90	0.10	98.1	1.7	4.53	0.09	0.010	0.001	0.627	0.101	0.635	0.013			4.567	0.109	34.76	0.79
25.58	0.94	334.8	12.2	3.49	0.13	0.022	0.002			0.573	0.022	16.94	6.71	10.524	0.402	88.31	3.73
14.42	0.86	111.2	6.6	4.80	0.29	0.013	0.002			1.550	0.092	43.38	9.02	7.360	0.457	27.42	1.99
4.67	0.20	139.0	5.9	0.83	0.04	0.010	0.001			0.073	0.004			1.978	0.100	21.14	1.25
3.07	0.21	128.6	8.7	1.01	0.07	0.011	0.002			0.299	0.020	10.32	3.86	2.112	0.153	18.73	1.53
2.33	0.41	10.4	1.8	0.26	0.05					0.160	0.028			0.381	0.072	6.28	1.49
10.26	0.84	246.7	20.1	6.75	0.55	0.052	0.005			0.422	0.035	22.44	7.48	4.859	0.407	50.97	4.53
10.42	1.23	134.6	15.8	1.54	0.18	0.020	0.004			0.174	0.021			1.830	0.235	108.81	13.00
16.36	2.33	165.5	23.5	12.83	1.84	0.070	0.010	1.440	0.372	0.307	0.052			6.007	0.878	56.06	8.10
2.06	0.17	183.4	15.1	0.86	0.08	0.009	0.001	0.308	0.098	0.228	0.020			3.476	0.295	14.04	1.23
21.36	1.63	272.3	19.3	1.26	0.10	0.016	0.002	0.589	0.305	0.094	0.010			2.976	0.222	24.60	2.12
3.33	0.36	45.5	4.8	1.89	0.20					0.233	0.025			1.313	0.152	16.10	2.42
5.58	0.80	90.3	12.8	4.95	0.71	0.039	0.007			0.221	0.033			4.108	0.598	26.12	4.38
44.05	1.84	456.9	19.1	3.52	0.15	0.016	0.001	0.440	0.125	0.368	0.016			8.861	1.396	131.49	5.58
18.41	1.75	271.7	25.9	15.99	1.53	0.045	0.005	1.080	0.209	0.483	0.050	23.53	9.18	8.598	0.828	102.27	9.79
11.05	10.05	190.5	17.3	7.52	6.83	0.019	0.017			0.231	0.210			5.234	4.759	56.56	51.44
4.31	0.49	242.3	27.4	2.72	0.31	0.019	0.003			0.422	0.048	10.86	5.14	1.624	0.195	20.26	2.55
28.32	3.24	212.6	23.2	4.69	0.54	0.043	0.005			0.220	0.025					77.86	8.95
3.20	0.05	765.0	8.6	27.74	0.39	0.010	0.001			1.795	0.068	10.19	3.92	0.648	0.043	11.79	0.63
18.85	2.14	87.4	9.9	18.55	2.10	0.047	0.006	1.208	0.398	0.544	0.062	30.49	9.94	3.258	0.382	67.78	7.91
5.76	0.07	143.1	0.4	5.06	0.04	0.018	0.001	0.706	0.167	5.418	0.015	14.11	5.15	3.560	0.087	34.42	0.81
2.01	0.17	9.6	0.8	0.30	0.03					0.252	0.021			0.258	0.041	7.52	1.17

Mn	sMn	Na	sNa	Sb	sSb	Sc	sSc	Se	sSe	Sm	sSm	Ti	sTi	V	sV	Zn	sZn
1.12	0.09	69.5	5.3	0.47	0.04	0.006	0.002	2.532	0.756	0.132	0.011	16.42	7.79	0.528	0.058	7.49	0.99
16.54	4.62	195.2	54.5	4.13	1.16	0.037	0.011	2.599	0.471	0.345	0.097			2.595	0.729	64.72	18.17
1.59	0.24	19.2	2.9	0.43	0.07	0.038	0.006	1.005	0.481	0.132	0.020			0.379	0.065	66.42	10.00
15.25	5.01	115.5	38.0	3.72	1.23	0.027	0.009	1.005	0.481	0.094	0.032			4.154	1.369	43.41	14.38
3.32	0.67	73.4	14.8	6.27	1.26	0.014	0.003	0.441	0.303	0.044	0.009	11.67	4.96	3.277	0.665	25.65	5.36
10.26	2.78	120.0	32.5	1.60	0.44	0.021	0.006	1.635	0.470	0.078	0.021	14.79	6.86	2.054	0.561	41.59	11.30
0.22	0.04	6.7	1.1	0.15	0.03	0.002	0.001			0.030	0.005			0.085	0.019	2.61	0.72
8.41	0.73	185.1	16.1	2.09	0.18	0.036	0.003	0.354	0.118	0.122	0.011	20.02	7.20	2.154	0.210	20.69	1.90
1.36	0.35	47.5	12.1	4.34	1.10	0.005	0.002			0.470	0.119			1.449	0.371	13.61	3.49
11.46	1.00	492.9	42.8	14.65	1.28	0.000	0.000		0.000	0.098	0.013	23.83	5.66	7.524	0.658	0.00	0.00
4.93	0.38	216.7	16.5	3.98	0.30	0.016	0.002	0.864	0.271	0.601	0.046	8.67	4.85	2.916	0.231	35.76	3.03
7.25	1.48	73.0	14.9	5.99	1.22	0.021	0.005	0.485	0.221	0.166	0.038			3.752	0.770	30.04	6.21
3.35	0.09	73.1	1.7	12.14	0.27	0.013	0.001			0.092	0.003	11.56	3.75	2.584	0.077	25.89	1.24
12.55	1.09	124.2	10.7	3.78	0.33	0.018	0.002			0.035	0.004	12.39	4.76	4.053	0.355	50.76	4.40
6.71	0.56	90.7	7.6	3.08	0.27	0.025	0.002	1.091	0.143	0.054	0.008			2.640	0.229	26.11	2.28
0.18	0.11		0.0							0.028	0.017					3.10	1.98
0.33	0.09		0.0							0.016	0.005			0.156	0.049	1.32	0.49
11.49	0.56	64.6	3.2	5.34	0.27	0.005	0.001			0.176	0.010	25.11	5.87	8.403	0.421	53.60	2.86
5.12	0.90	134.3	23.5	2.28	0.40	0.008	0.002			0.043	0.008	18.89	5.69	0.853	0.156	38.60	6.77
2.41	0.33	116.2	15.6	0.88	0.12	0.003	0.001	0.297	0.077	0.012	0.002			1.071	0.147	12.51	1.71
1.89	0.12	94.0	5.7	0.79	0.05	0.004	0.001			0.019	0.002			1.537	0.105	13.01	0.94
6.14	0.98	82.9	13.2	0.97	0.16	0.014	0.003	0.982	0.236	0.046	0.008			1.352	0.221	22.75	3.74
5.14	1.38	39.8	10.6	0.91	0.24	0.011	0.003	0.517	0.164	0.022	0.006			1.398	0.377	15.34	4.12
0.69	0.69	89.1	8.9	1.61	0.16	0.007	0.001	0.600	0.187	0.019	0.003			2.168	0.222	26.37	2.80
3.69	0.98	100.2	26.5	1.02	0.27	0.005	0.002	0.437	0.167	0.020	0.006			1.110	0.296	15.80	4.22
2.76	0.33	42.9	5.0	1.71	0.20	0.025	0.003			0.018	0.003			0.523	0.067	12.88	1.56
0.45	0.06	74.5	8.7	0.43	0.05					0.025	0.003			0.266	0.039		
3.67	0.49	113.6	15.1	1.36	0.18					0.027	0.004	13.41	3.57	1.414	0.193	12.43	1.81
0.51	0.08	54.1	8.4	0.31	0.05					0.018	0.003			0.265	0.047	3.21	0.67
6.50	0.08	96.7	0.9	3.78	0.04					0.023	0.002			1.720	0.048	36.29	0.96
5.49	0.16	110.8	3.0	3.22	0.09	0.016	0.001	0.341	0.137	0.070	0.002			2.063	0.075	20.23	0.94
9.55	1.31	64.6	8.8	1.51	0.21	0.005	0.001			0.014	0.002			1.402	0.196	21.61	3.01
6.87	0.86	85.8	10.7	1.17	0.15	0.008	0.001	0.209	0.066	0.017	0.002			0.790	0.104	17.47	2.22
10.46	0.62	129.3	7.6	1.40	0.08			0.250	0.065	0.015	0.001			2.261	0.145	51.98	3.11
10.52	1.62	233.7	35.9	5.08	0.78	0.012	0.002	0.871	0.156	0.028	0.005			3.095	0.479	61.74	9.50
7.81	0.19	617.3	14.2	4.48	0.11	0.008	0.001	0.441	0.091	0.020	0.003			1.893	0.066	75.32	1.98
9.83	0.23	114.8	2.5	3.27	0.07	0.014	0.001	1.037	0.100	0.035	0.002			1.912	0.066	50.27	1.28
21.16	1.16	149.4	8.1	5.85	0.32	0.009	0.001	0.924	0.092	0.026	0.002			3.071	0.175	78.11	4.32
11.06	0.40	383.0	13.7	6.07	0.22	0.019	0.001	1.830	0.161	0.031	0.002			2.366	0.109	70.87	2.67
12.17	0.54	148.1	6.5	2.92	0.13	0.006	0.001	0.233	0.072	0.020	0.002			2.651	0.129	31.07	1.44
1.53	0.15	56.4	6.2	0.39	0.04	0.004	0.001			0.199	0.018			0.649	0.067	7.82	0.78
23.76	1.35	305.9	17.3	7.51	0.43	0.025	0.002			0.069	0.008	22.76	6.03	3.065	0.187	78.24	4.60
8.83	0.07	357.0	1.0	6.85	0.07	0.017	0.002	0.754	0.248	1.920	0.013			2.865	0.068	133.27	1.80
27.35	6.06	135.9	30.1	10.86	2.41	0.023	0.005	1.523	0.386	0.051	0.022	21.12	7.59	2.828	0.630	111.37	24.68
11.03	0.65	100.4	5.9	9.62	0.57	0.018	0.002			0.052	0.008			2.869	0.182	57.98	3.57
21.08	0.33	131.7	2.0	8.40	0.13	0.058	0.001	0.465	0.114	0.087	0.004	28.20	6.99	3.089	0.089	89.06	1.55
9.68	0.86	127.2	11.2	8.09	0.71	0.047	0.004	0.451	0.133	0.084	0.008	16.48	6.01	2.966	0.271	53.44	4.75
8.17	0.84	62.6	6.4	2.44	0.25	0.011	0.002			0.049	0.006			0.918	0.103	34.47	3.65
4.04	0.06	330.5	2.1	3.74	0.07	0.012	0.001	0.411	0.098	0.021	0.007			1.412	0.047	39.34	0.79

Ba	sBa	Br	sBr	Ca	sCa	Ce	sCe	Cl	sCl	Co	sCo	Cr	sCr	Cu	sCu	Fe	sFe	Hg	sHg	I	sI	In	sIn
10.91	4.90	14.87	1.19	147.6	11.0	0.943	0.167	623.46	52.12	0.256	0.034	2.86	0.32	18.13	3.71	496.9	48.5			0.757	0.213	0.092	0.010
		14.20	0.22	147.6	11.0	1.640	0.144	11.72	0.32	0.223	0.024	5.84	0.45	30.87	4.28	808.5	36.5					0.018	0.008
19.45	6.17	22.19	4.28	361.9	64.7	0.890	0.181	350.91	16.62	0.254	0.030	5.84	0.45	30.87	4.28	808.5	36.5					0.018	0.010
7.31	2.34	23.10	0.57	173.6	33.4	0.772	0.050	137.30	5.72	0.268	0.012	8.90	0.57	0.00	0.00	1044.9	216.2						
		15.02	2.23	179.3	39.0	0.992	0.219	22.37	3.77	0.131	0.023	8.90	0.57	0.00	0.00	394.7	13.3						
		0.43	0.03	187.1	39.4	0.529	0.129	9.89	1.06			2.86	0.32	18.13	3.71	198.1	41.1					0.018	0.005
10.25	2.98	12.94	1.49	298.7	60.3	1.521	0.340	3.17	0.85	0.334	0.052	5.84	0.45	30.87	4.28	245.3	29.5					0.010	0.003
17.47	2.98	23.94	1.70	585.3	59.1	1.301	0.293	81.21	6.75	0.575	0.079	5.84	0.45	30.87	4.28	502.4	73.8			0.757	0.213	0.021	0.006
10.96	3.30	13.14	1.02	535.7	59.0	1.513	0.271	30.60	3.16	0.119	0.023	3.37	0.29	17.63	4.46	639.1	69.6					0.078	0.008
5.82	2.57	30.22	1.83	214.2	30.4	1.486	0.216	210.51	13.59	0.887	0.072	8.90	0.57	0.00	0.00	913.7	70.9						
16.76	3.51	26.78	2.43	524.8	63.5	1.659	0.264	135.68	13.24	0.237	0.031	0.86	0.06	20.57	4.38	654.6	73.1			0.786	0.314	0.064	0.008
20.91	3.92	9.56	0.58	580.2	71.6	1.363	0.217	85.18	6.48	0.993	0.078	0.87	0.04	12.16	3.70	560.7	48.2					0.020	0.006
16.03	3.84	5.42	0.21	845.2	61.1	1.069	0.355	73.16	5.80	0.363	0.047					1071.7	81.0					0.078	0.009
11.73	3.76	-0.01	0.00	493.4	70.6	1.148	0.216	64.69	7.61							445.7	57.3			0.947	0.284	0.062	0.009
14.47	2.92	7.52	0.36	496.8	53.5	3.216	0.336	42.09	3.54	0.087	0.012			12.81	3.66	785.2	64.4					0.063	0.007
		-1.00	0.10	222.6	36.2	0.823	0.181	239.87	25.12	0.029	0.004					304.1	40.1						
8.86	2.59	-0.07	0.01	304.6	42.4	1.645	0.268	472.97	47.24	0.043	0.007					650.3	77.9						
		1.54	0.28	464.6	93.4	1.334	0.232	758.08	127.71	0.026	0.004					466.0	79.1					0.090	0.017
9.34	2.90	1.16	0.03	268.6	39.0	1.519	0.253	212.37	7.31			6.06	0.91			519.6	41.6			0.429	0.221	0.035	0.005
27.24	5.28	5.70	0.86	848.1	166.5	2.185	0.331	267.18	40.32	0.436	0.066					997.7	149.6					0.024	0.007
15.55	3.84	3.75	0.30	1399.3	136.8	1.828	0.231	117.96	10.90	0.387	0.047	4.96	0.40	19.45	5.87	860.3	76.9						
9.74	3.60	2.24	0.09	476.6	46.9	1.681	0.180	737.67	26.85	0.185	0.019	2.63	0.11			642.8	38.5					0.016	0.006
12.13	3.42	4.85	0.23	578.1	49.3	1.013	0.083	279.72	14.96	0.101	0.007	2.02	0.09	7.04	3.39	508.1	27.4					0.026	0.005
6.75	2.62	1.43	0.10	265.5	34.9	1.131	0.086	275.94	18.82	0.177	0.013	5.24	0.34			480.8	33.3					0.026	0.005
11.84	2.82	1.84	0.04	455.5	40.8	1.161	0.125	199.31	6.62	0.184	0.016					482.3	26.4			0.806	0.271	0.010	0.004
8.91	3.45	3.25	0.13	171.4	20.9	1.985	0.171	595.91	23.15	0.405	0.034	1.75	0.07			995.0	48.7						
11.18	2.97	2.94	0.18	298.9	44.6	1.267	0.160	152.68	11.27	0.246	0.026	1.70	0.11			553.4	42.8						
		-0.88	0.03					10.83	1.26			3.08	0.14			46.2	8.9						
9.61	2.04	0.92	0.06	259.3	27.7	1.164	0.130	393.27	27.23	0.053	0.007	2.48	0.18			453.8	37.4			0.835	0.301	0.017	0.006
20.25	3.84	2.11	0.15	1248.3	137.6	2.801	0.262	335.34	23.66	0.371	0.045	5.37	0.39			1362.9	103.2					0.014	0.007
10.10	3.83	3.71	0.26	485.4	77.0	1.633	0.155	1135.23	77.90	0.222	0.022	6.02	0.42			805.5	60.1						
10.62	3.36	1.88	0.33	388.6	83.7	1.129	0.236	857.83	150.27	0.182	0.036	4.94	0.87			639.2	115.0						
16.88	3.66	2.15	0.18	743.5	96.5	1.727	0.186	196.07	17.02	0.301	0.035	5.24	0.44			799.5	70.0						
24.33	4.73	19.69	2.32	1214.3	168.7	2.614	0.409	86.19	11.08	1.084	0.149	15.90	1.90	30.14	7.00	1438.0	177.2			1.698	0.400	0.034	0.008
11.56	4.70	12.21	1.74	888.8	151.3	1.583	0.297	73.74	11.27	0.409	0.067	9.67	1.39			745.8	110.1			2.774	0.652	0.445	0.064
		1.91	0.16	212.6	44.3	0.555	0.060	1087.29	90.11	0.051	0.005	3.25	0.27			243.0	21.2					0.014	0.004
9.41	3.93	1.55	0.11	299.2	50.4	0.569	0.055	1214.97	86.87	0.100	0.008	5.92	0.42			409.8	30.0					0.008	0.003
6.68	2.19	0.38	0.04	267.6	49.7	0.502	0.141	128.44	14.00	0.070	0.010	4.75	0.51			326.8	40.0					0.056	0.010
14.87	3.68	0.52	0.07	725.4	130.1	2.116	0.333	126.47	18.73	0.309	0.062	4.82	0.67			1004.8	146.8					0.031	0.005
7.95	2.87	2.04	0.09	321.3	44.6	1.485	0.145	604.74	26.48	0.053	0.007	2.13	0.10			518.2	35.9			0.708	0.188	0.152	0.018
25.01	4.81	3.30	0.32	913.5	121.8	1.500	0.248	30.79	5.40	0.413	0.055	4.88	0.46			758.4	83.1			0.689	0.851	0.016	0.015
19.75	18.11	5.22	4.75	551.7	504.0	1.380	1.278	155.45	141.36	0.990	0.902	14.20	12.91			899.6	819.0					0.009	0.004
		0.35	0.04			0.245	0.119	19.83	2.75	0.232	0.034	4.37	0.50			284.8	38.0			0.487	0.199	0.025	0.006
12.57	2.95	1.84	0.21	427.4	98.5	1.491	0.248	16.98	2.53	0.262	0.041	4.59	0.54			781.0	95.1			0.980	0.416	0.016	0.005
21.32	3.25	9.30	0.14	1113.0	106.6	2.017	0.227	44.97	3.53	0.323	0.035	5.12	0.16			1126.1	45.0			0.732	0.257	0.000	0.000
13.06	3.24	1.69	0.19	1000.4	152.0	2.454	7.74E-62	52.30	6.63	0.384	0.065	5.88	0.67			1101.0	134.2						
10.09	2.23	0.87	0.01	450.0	54.6	1.031	0.138			0.206	0.018	6.07	0.55	13.20	0.25	542.7	25.1						

Ba	sBa	Br	sBr	Ca	sCa	Ce	sCe	Cl	sCl	Co	sCo	Cr	sCr	Cu	sCu	Fe	sFe	Hg	sHg	I	sI	In	sIn
16.63	2.68	1.52	0.13	470.5	75.5	1.812	0.251	21.68	2.47	0.110	0.020	3.69	0.32			728.4	71.0			0.637	0.196	0.012	0.004
9.43	2.18	0.52	0.04	227.8	46.4	0.771	0.073	27.72	3.17	0.079	0.007	6.08	0.46			398.5	31.3			2.263	0.647	0.131	0.033
30.74	8.70	5.76	1.41	1447.1	376.2	3.546	0.881	62.45	15.69	0.520	0.132	7.96	1.95			1335.6	328.2			1.350	0.525	0.062	0.016
22.75	6.21	2.80	0.65	720.1	179.7	2.036	0.497	18.98	4.95	0.322	0.080	10.79	2.50			898.7	210.4			1.058	0.266	0.034	0.005
14.68	3.01	0.26	0.02	395.8	54.6	1.272	0.123	12.57	1.79	0.120	0.012	2.71	0.25	7.88	3.33	598.5	55.5			0.230	0.124	0.006	0.002
6.65	1.51	3.87	0.42	238.2	33.2	0.700	0.081	1.60	0.37	0.179	0.020	1.52	0.17	5.37	1.75	337.3	36.9			0.981	0.201	0.022	0.005
12.83	2.46	1.67	0.10	773.4	67.9	1.551	0.148	18.34	1.97	0.261	0.026	5.13	0.32	4.33	3.56	621.1	44.6			0.600	0.285	0.010	0.007
11.21	2.13	2.60	0.21	411.4	49.1	1.061	0.159	8.00	1.21	0.191	0.026	0.84	0.08			451.7	45.5			0.662	0.198	0.013	0.004
15.13	2.84	0.57	0.06	601.2	83.9	1.654	0.227	207.06	22.87	0.187	0.029	0.84	0.08			808.8	93.1			0.391	0.200	0.016	0.004
7.51	2.08	9.10	1.26	366.8	61.7	1.370	0.254	25.65	4.16	0.424	0.070	9.84	1.38	6.56	2.28	534.5	80.1			0.224	0.118		
8.03	2.15		0.00	376.3	67.2	0.904	0.180	16.44	2.81	0.126	0.024	1.30	0.20			439.4	71.4			0.474	0.235	0.008	0.003
13.38	3.01		0.00	296.4	56.3	0.895	0.204	6.51	1.40	0.125	0.025	1.54	0.26	10.16	3.47	444.1	77.4			0.600	0.285	0.010	0.007
8.96	4.66		0.00	489.6	121.3	2.066	0.423	111.44	22.89	0.000	0.000	2.79	0.56			904.1	181.5			0.839	0.323		
9.97	2.11	2.47	0.19	443.0	46.1	1.044	0.143	26.37	3.12	0.315	0.036	0.53	0.06			508.3	44.4			0.227	0.089		
3.09	1.42	0.70	0.07	95.6	20.6	0.412	0.070	23.45	2.55	0.000	0.000	1.58	0.15			179.8	20.4			0.466	0.256	0.012	0.004
6.11	2.06	0.15	0.01	176.9	28.4	0.829	0.092	21.61	2.30	0.014	0.002	0.61	0.09	3.42	1.98	368.0	27.2					0.009	0.003
6.52	1.91		0.00	216.7	44.6	0.517	0.084	11.75	2.02	0.013	0.002	0.81	0.09			248.0	38.3						
6.81	2.39		0.00	358.3	74.5	0.631	0.119	5.16	1.17		0.000		0.00			298.5	53.8						
94.09	22.71		0.00	57.8	9.7	0.187	0.055				0.000		0.00			83.1	15.8						
5.98	1.56		0.00	98.1	22.5			19.28	2.63		0.000	0.53	0.06			113.8	16.3						
			0.00			0.199	0.049	8.50	1.13		0.000	2.56	0.28			106.2	14.2						
2.94	1.68		0.00			0.192	0.056	62.16	7.84		0.000	0.71	0.08			122.1	16.4						
13.85	3.47	0.08	0.01	400.3	79.5	1.046	0.218	11.59	2.50	0.321	0.065	15.70	2.86			393.5	74.9						
11.03	2.29	0.07	0.01	374.3	47.6	0.899	0.122	17.62	2.51	0.303	0.039	11.75	1.22			382.4	42.5						
4.97	1.36	1.06	0.11			0.093	0.054	6.93	0.99	0.126	0.016	12.14	1.23			87.9	11.9						
5.41	2.09	0.19	0.03			0.237	0.047	95.45	16.25	0.071	0.012	11.60	1.90			187.6	31.1						
3.81	1.50	35.21	6.53					60.51	11.46	0.032	0.007	13.44	2.49			39.8	9.1						
	0.00	6.67	0.81			0.106	0.045				0.000	13.51	1.65			31.6	6.4						
		9.96	3.48			0.229	0.103	71.75	25.20	0.170	0.061	17.89	6.25			64.4	24.4						
	5.41	0.75				0.103	0.043	47.04	6.86	0.017	0.004	12.00	1.66			44.1	8.5						
	6.69	1.05				0.398	0.086	11.89	2.04	0.094	0.018	12.04	1.90			106.0	19.0						
	7.56	1.16				0.253	0.081	0.32	0.06	0.102	0.018	15.01	2.30			105.2	17.7	2.164	0.332				
	6.73	0.87				0.251	0.064	1.47	0.30	0.204	0.031	17.94	2.33			139.7	20.5	2.085	0.273				
		6.17	0.30						0.00	0.108	0.012	12.95	0.64			46.0	7.1	2.173	0.111				
	6.53	0.83				0.183	0.038	3.03	0.56	0.022	0.003	15.80	2.00			95.5	12.7	2.714	0.345				
6.41	2.09	13.98	2.01	537.6	85.7	0.436	0.068	156.59	22.78	0.367	0.054	13.07	1.88			238.1	34.7	2.212	0.318				
6.29	2.04	9.19	1.34	466.7	75.6	0.536	0.095	86.55	13.00	0.077	0.013	16.88	2.46			209.4	31.9	2.675	0.390				
		6.43	0.74			0.099	0.034		0.00	0.017	0.002	13.46	1.55			70.0	9.0	2.066	0.239				
		6.29	0.43					3.96	0.56	0.010	0.001	11.17	0.77			48.6	5.8	2.070	0.145	2.418	0.255		
		7.63	0.68	191.5	29.9	0.152	0.046	189.72	17.49	0.205	0.021	12.05	1.09			104.0	11.5	4.426	0.399				
		6.83	0.53			0.104	0.037	41.00	3.86	0.169	0.016	19.72	1.54			37.1	5.8	2.742	0.215				
		5.63	0.82			0.144	0.045	31.99	4.89	0.003	0.001	11.65	1.71			106.4	17.1	0.802	0.120				
		8.05	1.23			0.379	0.071	233.88	36.16	0.049	0.009	10.16	1.55			209.5	32.8	0.389	0.062				
4.62	1.45	8.60	1.35			0.271	0.068	5.64	1.03	0.039	0.008	12.43	1.96			144.0	24.4	0.716	0.116			0.015	0.004
7.88	2.33	9.28	1.65	408.0	86.6	0.429	0.102	49.63	9.27	0.129	0.026	11.90	2.12			238.9	44.5	0.539	0.102			0.027	0.006
17.09	4.48	1.39	0.22	853.2	146.8	2.296	0.372	469.20	74.85	0.413	0.068	11.28	1.80			1128.6	180.0	1.363	0.219			0.040	0.010
7.41	2.93	9.20	1.39	334.3	60.6	1.037	0.177	350.27	53.32	0.166	0.029	9.55	1.45			397.1	62.2	1.105	0.172			0.014	0.006
8.08	1.80	8.85	0.93	322.7	45.1	0.790	0.116	33.36	3.95	0.135	0.020	10.57	1.13			310.0	36.1	0.861	0.098			0.015	0.004
		3.06	0.44	209.0	39.6	0.268	0.056	1583.38	227.65	0.045	0.008	9.20	1.33			177.2	26.5	0.795	0.116				

Na	sNa	Sb	sSb	Sc	sSc	Se	sSe	Sm	sSm	Ti	sTi	V	sV	Zn	sZn
221.4	18.0	16.53	1.34	0.028	0.003			0.136	0.015	13.04	4.38	3.310	0.275	48.86	4.35
316.0	5.0	9.37	0.16	0.150	0.005	0.942	0.411	0.381	0.015	67.41	17.17	4.731	0.181	54.74	2.05
249.9	9.4	7.75	0.29	0.027	0.003	1.820	0.351	0.109	0.010	14.07	5.86	2.875	0.131	52.60	2.91
549.2	105.9	16.77	3.24	0.128	0.026	10.306	2.180	1.424	0.275	28.64	13.56	5.252	1.019	244.91	47.58
128.9	3.2	23.17	0.57	0.021	0.002			0.150	0.012	8.06	4.44	2.486	0.082	67.48	2.31
103.6	15.4	7.53	1.12	0.022	0.004	1.764	0.535	0.196	0.030	10.79	4.78	1.926	0.292	75.00	11.47
125.0	8.5	9.24	0.63	0.032	0.003	2.054	0.365	0.582	0.041			4.385	0.311	89.34	6.46
204.6	23.5	37.96	4.36	0.035	0.005			0.950	0.111	10.80	5.55	4.133	0.480	120.45	14.22
112.5	8.0	15.89	1.13	0.011	0.002	2.097	0.396	0.392	0.031	10.71	5.56	5.162	0.374	88.36	6.61
386.6	30.0	42.01	3.26	0.065	0.007	4.351	0.978	0.621	0.051	24.23	8.79	4.280	0.342	189.57	13.76
180.7	9.6	12.18	0.73	0.021	0.002	0.844	0.192	0.075	0.010			3.186	0.219	50.55	3.23
288.3	26.1	20.75	1.88	0.019	0.002	1.364	0.243	0.064	0.013			5.443	0.508	106.41	9.68
242.4	14.7	29.72	1.80	0.032	0.003	2.211	0.314	0.612	0.040			5.387	0.351	112.05	7.04
235.1	9.0	14.84	0.57	0.069	0.004	3.356	0.294	1.020	0.043			4.334	0.198	88.14	3.77
189.6	19.0	15.11	1.52	0.059	0.006	3.308	0.358	0.456	0.050			6.271	0.635	109.94	11.02
224.3	9.9	14.48	0.63	0.039	0.003	3.301	0.277	0.488	0.024			6.518	0.306	129.31	5.83
173.3	17.6	2.13	0.22	0.071	0.008			0.389	0.041	24.94	7.32	1.561	0.173	24.38	2.76
172.5	17.1	1.60	0.16	0.075	0.008			0.265	0.028	30.12	8.55	1.309	0.148	19.23	2.19
253.2	42.5	11.29	1.90	0.074	0.013	1.146	0.304	0.263	0.046	22.01	9.34	2.490	0.428	57.69	9.81
280.3	4.4	10.32	0.18	0.074	0.003	0.999	0.256	0.575	0.019			4.747	0.158	51.13	1.71
457.4	68.4	30.89	4.62	0.081	0.012	3.603	0.610	1.314	0.470	23.42	8.74	7.930	1.190	104.06	15.64
522.9	40.9	22.41	1.76	0.078	0.006	3.965	0.368	0.829	0.065	40.26	9.32	4.224	0.345	108.77	8.59
388.7	13.3	4.63	0.18	0.079	0.003	0.461	0.160	6.292	0.215	33.41	9.87	2.674	0.141	35.70	1.45
542.6	24.5	11.15	0.52	0.039	0.003	1.207	0.239	0.535	0.030	18.67	7.94	5.418	0.263	64.80	3.24
414.8	27.1	9.78	0.65	0.041	0.003	0.902	0.163	11.863	0.775	26.50	6.99	4.929	0.332	45.81	3.09
334.9	5.7	11.63	0.24	0.028	0.001	1.097	0.149	3.866	0.068			6.478	0.149	45.43	1.13
264.3	9.7	14.63	0.55	0.045	0.003	0.000	0.000	0.770	0.030	12.50	6.16	2.593	0.121	37.53	2.08
170.8	10.3	18.38	1.12	0.049	0.004	1.323	0.495	1.575	0.099	14.50	7.25	4.849	0.307	34.49	2.85
0.6	0.0	0.06	0.01					0.175	0.009			0.099	0.014	3.47	0.31
161.4	11.0	1.34	0.13	0.050	0.004			0.340	0.028	25.03	5.90	1.298	0.105	10.24	0.93
348.6	23.6	6.72	0.49	0.134	0.010	2.417	0.447	0.564	0.045			0.000	0.000	82.17	6.12
337.8	22.9	4.63	0.33	0.058	0.005	2.607	0.465	0.308	0.025	30.02	7.80	1.826	0.143	22.25	2.23
313.8	54.9	4.74	0.83	0.054	0.010			0.263	0.046			1.068	0.195	8.32	1.97
189.0	15.4	5.24	0.43	0.062	0.006	0.666	0.338	0.210	0.018	16.96	6.97	1.895	0.154	34.86	3.33
97.3	11.4	5.69	0.67	0.045	0.006	0.462	0.241	0.290	0.036			2.264	0.279	38.17	4.67
102.3	14.6	3.32	0.48	0.046	0.007	0.745	0.184	0.210	0.031	16.15	6.24	2.104	0.308	28.40	4.09
306.9	25.3	1.42	0.13	0.016	0.002			0.226	0.022			1.207	0.112	26.85	2.40
235.5	16.7	1.45	0.12	0.007	0.001	0.363	0.127	0.317	0.028			1.523	0.119	11.04	0.99
125.4	13.2	1.82	0.19	0.020	0.002	0.831	0.148	0.294	0.031			2.381	0.262	24.38	2.63
200.6	28.5	2.29	0.33	0.113	0.016	0.771	0.178	0.557	0.079	34.18	9.67	2.014	0.294	28.47	4.11
348.8	14.6	6.85	0.33	0.050	0.002	1.191	0.153	1.211	0.056			2.696	0.152	49.08	2.20
231.8	22.0	11.45	1.09	0.052	0.005	1.580	0.324	1.253	0.119	23.14	9.43	4.152	0.409	68.21	6.63
302.5	275.0	12.97	11.79	0.020	0.018	0.657	0.617	4.589	4.171	13.03	13.49	8.826	8.024	113.92	103.56
53.9	6.1	1.29	0.15	0.005	0.001	0.000	0.000	0.191	0.022			5.091	0.584	6.65	0.99
258.4	29.6	8.40	0.96	0.050	0.006	2.608	0.400	0.372	0.043	17.26	7.13	3.483	0.407	81.58	9.45
42.1	0.5	3.10	0.05	0.039	0.002	0.877	0.206	0.288	0.005	19.04	5.94	1.757	0.073	38.31	1.31
180.1	20.4	9.70	1.10	0.060	0.007	1.839	0.256	0.642	0.073	20.88	8.01	2.969	0.349	71.56	8.15
211.2	0.7	15.85	0.12	0.042	0.002	1.405	0.342	0.237	0.011	22.83	6.37	3.697	0.082	64.05	1.59

Na	sNa	Sb	sSb	Sc	sSc	Se	sSe	Sm	sSm	Ti	sTi	V	sV	Zn	sZn
149.3	12.4	3.90	0.33	0.048	0.004	3.206	0.396	2.513	0.209	22.20	7.11	3.227	0.282	56.26	4.89
149.2	11.3	3.85	0.29	0.013	0.002	0.396	0.185	12.505	0.951			1.578	0.130	25.38	2.13
330.2	80.6	5.70	1.39	0.065	0.014	4.457	1.117	0.219	0.054	23.56	9.56	3.510	0.862	90.63	22.18
129.0	29.8	2.88	0.67	0.042	0.010	2.405	0.610	0.212	0.049	15.78	7.55	2.085	0.487	64.67	15.00
90.4	8.3	4.25	0.40	0.019	0.002	1.192	0.150	0.163	0.016	8.53	4.05	2.716	0.256	31.40	2.93
176.3	19.0	10.95	1.18	0.016	0.002	0.975	0.162	0.127	0.014	10.72	4.01	4.390	0.478	45.75	4.98
304.7	18.4	6.73	0.41	0.049	0.004	4.310	0.394	0.080	0.006	13.48	5.58	2.378	0.156	90.57	5.80
267.7	21.9	10.08	0.83	0.036	0.003	1.914	0.291	0.085	0.007	20.83	6.45	3.166	0.270	55.94	4.77
255.3	27.6	11.33	1.23	0.064	0.007	0.759	0.267	0.124	0.014	30.63	7.53	1.940	0.221	18.43	2.30
314.7	43.3	39.50	5.44	0.030	0.005	0.444	0.303	0.323	0.045	31.91	8.09	4.340	0.603	55.93	7.87
184.8	28.2	7.79	1.19	0.036	0.006	2.121	0.442	0.188	0.029	18.65	6.89	3.797	0.585	88.89	13.71
168.3	27.7	4.89	0.81	0.028	0.005	1.261	0.299	0.051	0.009	13.72	5.67	3.421	0.568	49.57	8.30
172.3	34.4	7.51	1.50	0.043	0.009			0.096	0.020	22.03	11.95	4.070	0.824	46.20	9.70
94.3	7.0	6.66	0.50	0.020	0.002			0.110	0.011	14.10	5.21	2.195	0.173	29.78	2.53
39.7	3.8	6.84	0.65	0.009	0.001	0.541	0.149	0.045	0.005	8.19	3.14	1.882	0.184	17.57	1.79
96.5	5.5	5.55	0.33	0.025	0.002	1.346	0.211	0.109	0.009	15.98	4.96	2.800	0.175	34.23	2.26
187.4	28.6	4.72	0.73	0.024	0.004	1.498	0.257	0.049	0.011			2.534	0.391	38.26	5.88
130.3	23.3	4.88	0.87	0.036	0.007	2.849	0.580	0.074	0.014	19.34	6.91	3.226	0.582	43.92	7.97
57.5	9.3	3.12	0.51	0.008	0.001			0.067	0.011					15.49	2.58
51.4	6.0	1.98	0.23	0.015	0.002	0.727	0.192	0.028	0.004					18.93	2.38
117.1	12.8	2.50	0.28	0.006	0.001	0.827	0.132	0.049	0.008					38.51	4.24
268.4	30.6	4.88	0.56	0.007	0.001	0.314	0.158			18.92	6.92	3.104	0.567	62.79	11.45
165.4	30.0	2.94	0.53	0.034	0.006	2.878	0.552	0.079	0.015			2.687	0.282	61.85	6.35
141.5	14.4	6.55	0.67	0.036	0.004	2.330	0.266	0.059	0.007			2.262	0.237	29.87	3.20
112.2	11.3	4.21	0.42	0.009	0.002	0.859	0.248	0.032	0.006			1.209	0.204	17.28	2.96
119.8	19.6	3.80	0.62	0.005	0.001			0.006	0.003			0.716	0.138	9.80	1.87
66.6	12.3	3.02	0.56					0.010	0.001			0.503	0.068	2.52	0.44
335.3		1.22	0.15					0.084	0.030			1.169	0.411	12.99	4.64
170.7	59.6	0.88	0.31					0.006	0.002			0.813	0.119	6.88	1.12
164.6	22.7	0.39	0.06					0.012	0.002			0.916	0.148	14.90	2.31
54.5	8.5	1.38	0.22	0.006	0.001	0.795	0.188	0.013	0.006			1.365	0.213	24.37	3.76
67.4	10.3	8.30	1.27	0.006	0.001	0.995	0.166	0.020	0.008			1.188	0.161	28.95	3.79
128.7	16.7	2.42	0.32	0.014	0.002			1.085	0.200			0.634	0.041	80.44	4.12
46.1	2.2	6.63	0.33					0.006	0.003			2.138	0.277	30.42	3.89
71.5	9.1	3.29	0.42	0.006	0.001	1.092	0.170	0.018	0.003			1.245	0.185	40.03	5.78
339.4		3.27	0.47	0.019	0.003	0.848	0.159	0.030	0.006			1.893	0.282	45.94	6.69
252.9		3.11	0.45			0.892	0.153	0.035	0.006			1.231	0.148	22.59	2.64
58.1		2.91	0.34	0.006	0.001	0.657	0.112	0.071	0.008			1.935	0.144	37.98	2.89
223.1	15.1	3.10	0.21	0.036	0.003	1.850	0.197	0.082	0.006	26.46	5.70	0.631	0.065	14.29	1.35
78.0	7.0	1.28	0.12	0.006	0.001	0.334	0.083	0.052	0.005			0.118	0.019	4.00	0.40
40.6	3.2	0.21	0.02	0.001	0.000			0.016	0.002			0.770	0.117	19.09	2.83
82.2	12.0	4.54	0.67	0.008	0.001	0.482	0.107	0.022	0.004			0.601	0.097	16.87	2.60
61.4	9.3	1.52	0.23	0.012	0.002	0.318	0.106	0.024	0.004			0.970	0.157	26.87	4.28
64.9	10.2	2.97	0.47	0.010	0.002	0.648	0.155	0.017	0.003			1.845	0.332	34.80	6.17
167.7	29.8	7.15	1.27	0.014	0.003	0.779	0.163	0.024	0.005			0.658	0.116	22.16	3.59
107.1	17.0	1.98	0.32	0.048	0.008	0.279	0.129	0.076	0.012	21.89	6.29	0.710	0.114	10.29	1.67
82.1	12.4	3.84	0.58	0.025	0.004			0.046	0.007			1.486	0.163	33.77	3.59
98.3	10.3	2.90	0.31	0.025	0.003	1.465	0.176	0.041	0.004			0.452	0.071	8.63	1.33
424.4	60.9	1.61	0.23	0.008	0.001	0.352	0.107	0.015	0.003						

Table 53. Monthly Mass Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of TSPM at Sampling Areas.

Site Date	DC	DF	KC	KF
1998. 11.	29.16	33.09	19.53	32.76
1998. 12	35.26	13.97	24.64	36.34
1999. 01	27.94	13.65	21.69	22.58
1999. 02	21.06	7.16	17.08	12.05
1999. 03	50.85	7.41	23.16	13.46
1999. 04	33.03	14.81	20.28	20.44
1999. 05	37.23	10.99	23.89	22.43
1999. 06	23.18	12.48	14.47	26.36
1999. 07	15.24	9.34	8.45	17.26
1999. 08	16.01	9.53	3.08	11.92
1999. 09	17.20	14.23	6.84	15.51
1999. 10	38.31	12.26	10.11	10.27
Mean	28.71	13.24	16.10	20.12

Table 54. Elemental concentration with particle size and its ratio.

Elements	DC (ng/m ³)	DF (ng/m ³)	DF / DC	KC (ng/m ³)	KF (ng/m ³)	KF / KC
Al	934	134	0.14	606	171	0.28
As	1.90	1.58	0.83	1.29	2.92	2.26
Ba	22.5	7.60	0.34	11.2	5.33	0.48
Br	13.2	9.95	0.75	6.26	11.6	1.86
Ca	724	149	0.21	406	73.7	0.18
Ce	1.71	0.68	0.40	0.94	0.50	0.53
Cl	329	72.8	0.22	156	58.8	0.38
Co	0.80	0.33	0.41	0.16	0.18	1.14
Cr	23.1	6.15	0.27	9.53	4.61	0.48
Cu	43.4	12.2	0.28	10.7	13.0	1.21
Fe	102	167	0.16	405	155	0.38
Hg	2.42	2.32	0.96	1.77	2.71	1.53
I	1.14	1.29	1.13	0.80	1.68	2.09
In	0.15	0.07	0.45	0.03	0.06	1.67
K	497	212	0.43	254	317	1.25
La	0.71	0.12	0.16	0.38	0.15	0.39
Mn	29.9	11.1	0.37	9.66	8.27	0.86
Na	598	162	0.27	319	167	0.52
Sb	7.02	5.15	0.73	2.67	6.70	2.51
Sc	0.18	0.02	0.11	0.10	0.03	0.31
Se	2.87	1.01	0.35	0.81	1.33	1.65
Sm	2.93	0.33	0.11	2.93	0.57	0.19
Ti	73.8	16.9	0.23	45.9	17.6	0.38
V	5.98	2.96	0.50	1.73	2.29	1.32
Zn	76.5	53.5	0.70	21.2	40.5	1.90

Table 55. Ratio of Elemental Concentration for Non-working day and working day.

Elements	DC	DF	KC	KF
In	0.65	1.84	1.85	1.40
Sc	0.98	1.05	0.94	1.07
La	0.96	1.35	0.94	0.95
Co	0.75	1.42	0.89	1.10
I	0.99	0.94	1.29	1.11
Ce	0.91	0.50	0.96	0.77
As	1.12	1.01	1.27	1.19
Hg	0.82	1.12	0.90	0.94
Se	0.29	1.07	0.90	1.02
Sm	0.54	1.21	1.44	0.85
V	0.89	0.75	1.03	1.04
Sb	1.17	1.16	1.07	1.12
Br	1.06	1.08	0.68	1.18
Ba	0.87	1.06	0.73	1.03
Cr	0.60	1.09	1.01	0.88
Mn	0.93	0.67	0.97	1.00
Cu	2.89	0.97	0.71	1.26
Ti	0.84	0.87	0.98	1.20
Zn	0.60	0.76	0.88	0.97
Cl	0.89	1.07	0.90	0.99
K	0.97	1.07	0.93	1.04
Na	1.02	0.98	0.95	1.12
Ca	0.89	1.06	0.97	1.35
Al	0.98	1.09	1.17	1.17
Fe	0.83	0.85	0.93	1.03

Table 56. Enrichment factor and its ratio with sampling site and particle size.

Elements	DC	DF	DF/DC	KC	KF	KF/KC
Al	1.4	1.8	1.31	1.6	1.5	0.93
Ti	2.0	4.2	2.10	2.3	2.9	1.26
K	2.3	9.1	3.90	2.1	8.8	4.08
Ca	2.4	4.5	1.89	2.4	1.4	0.59
Fe	2.4	3.7	1.49	1.8	2.2	1.26
Na	2.5	6.3	2.48	2.5	4.2	1.72
La	2.8	4.3	1.50	2.8	3.5	1.26
Ce	3.4	12	3.65	3.4	6.0	1.73
Mn	3.8	12	3.39	2.2	6.3	2.80
Co	3.8	14	3.73	1.4	5.2	3.73
V	5.3	24	4.52	2.8	12	4.33
Ba	6.4	19	3.09	5.8	9.0	1.56
Cr	28	68	2.43	21	33	1.58
Sm	59	61	1.03	108	68	0.63
Cu	95	246	2.57	43	171	3.79
As	128	970	7.58	158	1174	7.41
Zn	132	846	6.38	67	418	6.23
In	179	738	4.11	73	403	5.46
I	277	2866	10.32	355	2432	6.84
Cl	307	620	3.02	266	327	1.23
Br	641	4408	6.87	553	3368	6.08
Hg	3680	32153	8.74	4900	24583	5.02
Sb	4263	28500	6.68	2956	24266	8.21
Se	6973	22387	3.21	3578	19341	5.41

Table 57. Enrichment factor and its ratio between Non-working day and Working day with sampling site and particle size.

Elements	DC	DF	KC	KF
Al	0.93	0.95	1.38	1.08
Ti	0.82	0.95	1.07	1.03
K	0.93	1.04	0.57	1.00
Ca	0.89	0.36	1.03	0.56
Fe	0.86	0.75	0.96	0.97
Na	1.09	0.97	1.04	1.29
La	0.98	1.36	0.83	0.86
Ce	0.97	0.26	1.03	0.68
Mn	0.92	0.73	0.96	0.92
Co	0.73	0.91	0.69	1.05
V	0.69	0.79	1.10	1.07
Ba	0.89	0.78	0.28	0.89
Cr	0.80	1.00	1.00	1.11
Sm	0.81	0.89	1.53	1.42
Cu	1.78	1.21	0.88	0.93
As	1.12	0.95	1.05	1.20
Zn	0.68	0.72	0.78	0.86
In	0.18	1.42	1.74	1.17
I	1.00	2.35	6.72	1.02
Cl	1.00	0.93	1.11	1.03
Br	0.91	0.90	0.45	1.15
Hg	0.85	1.05	0.92	1.40
Sb	1.04	1.13	0.71	0.94
Se	0.12	0.91	0.94	0.83

Table 58. Correlation Coefficients between of Elements, Sc and TSP.

(a) DC, (b) DF, (c) KC and (d)KF

	Sc	Al	Fe	k	La	As	Cr	Sb	Zn	TSP
Sc	1.00									
Al	0.93	1.00								
Fe	0.92	0.90	1.00							
k	0.92	0.72	0.87	1.00						
La	0.98	0.69	0.90	0.96	1.00					
As	0.75	0.51	0.65	0.71	0.74	1.00				
Cr	0.46	0.03	0.73	0.47	0.49	0.29	1.00			
Sb	0.52	0.57	0.62	0.65	0.59	0.37	0.45	1.00		
Zn	0.61	0.24	0.83	0.67	0.67	0.42	0.85	0.65	1.00	
TSP	0.78	0.68	0.84	0.89	0.85	0.60	0.65	0.73	0.73	1.00

(a)

	Sc	Al	Fe	k	La	As	Cr	Sb	Zn	TSP
Sc	1.00									
Al	0.87	1.00								
Fe	0.77	0.59	1.00							
k	0.64	0.38	0.38	1.00						
La	0.76	0.27	0.29	0.63	1.00					
As	0.51	0.49	0.52	0.55	0.34	1.00				
Cr	0.13	0.28	0.36	0.01	0.14	0.17	1.00			
Sb	0.25	0.29	0.34	0.39	0.58	0.42	0.38	1.00		
Zn	0.46	0.44	0.76	0.41	0.17	0.48	0.27	0.37	1.00	
TSP	0.40	0.35	0.38	0.70	0.20	0.76	0.05	0.39	0.45	1.00

(b)

	Sc	Al	Fe	k	La	As	Cr	Sb	Zn	TSP
Sc	1.00									
Al	0.96	1.00								
Fe	0.97	0.60	1.00							
k	0.91	0.57	0.87	1.00						
La	0.97	0.13	0.96	0.21	1.00					
As	0.60	0.24	0.61	0.44	0.57	1.00				
Cr	-0.1	-0.0	-0.0	-0.0	-0.1	-0.1	1.00			
Sb	0.36	0.21	0.48	0.50	0.09	0.24	0.14	1.00		
Zn	0.05	0.36	0.66	0.72	0.62	0.45	0.12	0.80	1.00	
TSP	0.88	0.54	0.89	0.86	0.35	0.57	-0.1	0.51	0.71	1.00

(c)

	Sc	Al	Fe	k	La	As	Cr	Sb	Zn	TSP
Sc	1.00									
Al	0.94	1.00								
Fe	0.93	0.85	1.00							
k	0.48	0.40	0.52	1.00						
La	0.90	0.80	0.89	0.57	1.00					
As	-0.3	0.48	0.65	0.55	0.65	1.00				
Cr	0.52	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	1.00			
Sb	-0.3	0.16	0.25	0.20	0.24	0.24	-0.2	1.00		
Zn	-0.3	0.25	0.49	0.68	0.50	0.59	-0.2	0.59	1.00	
TSP	0.32	0.34	0.43	0.74	0.47	0.63	-0.2	0.46	0.83	1.00

(d)

Table 59. Monthly Mass Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of Black carbon
at Sampling Areas.

Date \ Site	DF	KF
1998. 11.	5.84	5.52
1998. 12	2.82	7.24
1999. 01	3.47	4.24
1999. 02	1.86	2.65
1999. 03	1.92	2.20
1999. 04	3.03	3.47
1999. 05	1.91	3.49
1999. 06	2.75	3.43
1999. 07	1.87	2.31
1999. 08	2.84	2.43
1999. 09	4.10	2.48
1999. 10	3.77	1.90
Mean	3.01	3.45

Table 60. Analytical conditions for the detection of nuclides in PE.

Weight	T _{irrad}	T _{cool}	T _{count}	Nuclides
5g	1m	5min	500s	²⁷ Al, ⁵¹ Ti, ²⁸ Mg, ⁵² V, ⁶⁶ Cu
		40min	500s	⁴⁹ Ca, ³⁸ Cl
		120min	500s	⁵⁶ Mn
10g	30m	2day	2,000s	²⁴ Na, ⁷⁶ As, ⁹⁹ Mo, ⁸² Br, ¹⁴⁰ La, ¹⁹⁸ Au, ⁴² K, ¹⁵³ Sm, ¹⁸⁷ W, ⁷² Ga, ¹¹⁵ Cd
		20day	4,000s	¹²⁴ Sb, ⁵⁹ Fe, ⁵¹ Cr, ¹⁸¹ Hf, ²⁰³ Hg, ⁶⁰ Co, ⁶⁵ Zn, ¹³⁴ Cs, ¹⁵² Eu, ¹³¹ Ba, ⁴⁶ Sc, ¹⁴¹ Ce, ⁸⁶ Rb, ²³³ Pa(Th)

*. T_{irrad}, T_{cool} and T_{count} are Irradiation, cooling and counting period, respectively.

Table 61. Analytical results of NIST 1632b coal SRM for the evaluation of NAA procedures(ppm).

Element	NIST			NAA			Uncertainty(%)
Al,%	0.86	±	0.02	0.90	±	0.04	5.2
Ca,%	0.20	±	0.01	0.21	±	0.01	3.3
Fe,%	0.76	±	0.05	0.77	±	0.08	1.2
K,%	0.075	±	0.003	0.076	±	0.005	1.1
Na,%	0.052	±	0.001	0.053	±	0.002	2.3
Ti,%	0.045	±	0.002	0.046	±	0.002	2.1
As	3.7	±	0.1	3.9	±	0.1	3.4
Ba	68	±	2	69	±	4	2.7
Co	2.3	±	0.2	2.3	±	0.1	2.1
Mn	12	±	1	13	±	1	2.2
Rb	5.1	±	0.1	5.4	±	0.3	6.5
Th	1.3	±	0.1	1.4	±	0.2	6.2
U	0.44	±	0.01	0.48	±	0.08	10
Zn	12	±	1	13	±	2	5.5
Sb	0.24			0.25	±	0.02	2.1
Br	17			18	±	2	5.8
Ce	9			9.7	±	1.1	8.1
Cs	0.44			0.46	±	0.03	4.9
Cl	1300			130	±	16	1.7
Cr	11			12	±	2	8.3
Eu	0.17			0.18	±	0.02	7.4
Hf	0.43			0.47	±	0.04	10
La	5.1			5.4	±	0.5	5.6
Sm	0.87			0.90	±	0.09	2.9
Sc	1.9			1.9	±	0.3	1.2
Sr	100			110	±	23	11
V	14			16	±	2	13

Table 62. Trace elements in various polypropylene pellets by NAA
and ICP-AES(ppm).

Element	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5
Ca	150	89	120	15	440
	85	29	3.9	2.1	72
Mg	<5	64	100	62	5.3
	1.6	6.1	110	73	1.7
Al	35	25	72	58	63
	60	38	100	87	64
Ti	4.0	14	36	<0.67	68
	36	0.79	32	0.75	0.74
Na	0.19	0.039	78	0.21	5.3
	0.86	0.77	93	0.83	0.74
Fe	4.6	<0.79	<3.7	<0.76	<0.51
	4.8	0.053	0.55	0.17	0.53
Zn	0.13	<0.047	<0.25	0.17	<0.048
	4.9	1.9	0.73	0.20	1.0
Ba	<0.0005	<0.0008	0.0025	<0.0006	<0.0008
	0.12	0.015	0.003	0.15	0.003
Mn	0.0075	<0.003	<0.006	<0.006	0.034
	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
V	<0.002	<0.002	<0.004	<0.003	<0.007
	0.03	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cu	<0.18	<0.21	<0.005	<0.2	<0.05
	0.041	<0.001	0.095	0.008	0.003
As	0.00543	0.0043	0.0077	<0.001	0.01
	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cr	0.11	0.013	0.12	<0.01	0.14
	0.13	<0.001	0.035	0.008	0.046
Co	0.0039	0.0041	0.007	<0.002	<0.001
	0.042	<0.001	0.038	0.005	0.044
Cl	60	25	73	23	140
K	<0.23	<2.3	<1.9	2.9	0.55
Br	0.012	<0.03	<0.002	<0.003	0.013
Sb	0.0067	0.0047	<0.005	0.0014	0.0024
La	0.00044	<0.00009	<0.0007	<0.0001	0.0011
Cs	0.0043	<0.003	<0.01	0.004	<0.003
Eu	<0.0003	0.0013	<0.002	0.0022	<0.002
Sc	<0.00008	<0.00008	<0.0003	0.00014	0.00009
Au(ppm)	65	31	<50	180	0.079
TSP	600	130	930	280	330

Table 63. Trace elements in plastic containers and their raw materials
by INAA(ppm).

Element	Food Container(PE)			Drug Container(PP)		
	Pellet	Container	Pigment(Y)	Pellet	Container	Pigment(R)
Na	0.66	0.94	190	1.4	0.20	130
Mg	28	31	1400	9.1	14	170
Al	20	23	460	11	9.9	5.3
Ca	270	570	13%	220	73	2.4%
Ti	8.8	11	<30	1.7	1.9	<14
Mn	0.014	0.12	19	0.029	0.031	0.26
Zn	<0.046	73	3.6%	0.11	<0.32	<24
Cd	<0.016	170	8.1%	<0.021	810	8.5%
Cu	<15	<17	0.33%	<13	<18	<0.19%
Fe	<0.63	<3.7	0.18%	2.2	<3.8	<490
Cr	<0.012	34	1.5%	0.015	<0.39	<31
Ba	<110	180	7.6%	<97	270	3.3%
V	<0.0022	<0.0034	<0.2	0.22	0.22	<0.019
K	<0.23	<12	400	<0.25	<5.4	<690
Cl	130	13	370	60	56	94
Se	<10	15	0.64	<15	920	10%
Rb	<0.045	0.86	90	0.17	<0.27	<28
Ru	<0.31	1.4	740	<0.33	2.8	270
Co	0.0033	0.042	13	0.0049	0.018	7.7
Sc	0.00018	0.001	<0.2	0.00023	<0.0003	<0.024
Br	0.0019	<0.013	1.9	0.011	<0.014	<1.3
Sb	0.0001	<0.009	<0.09	0.0018	<0.008	1.7
La	0.00046	<0.001	0.82	<0.00022	<0.003	0.16
Hf	<0.0009	0.042	12	<0.001	<0.016	<1.1
Eu	0.0018	0.0076	0.43	0.0015	<0.004	0.82
As	<0.0006	<0.007	<1.3	0.0031	<0.02	<0.56

Table 64. Analytical results of inorganic elements in nineteen LEGO toys from Korean markets (ppm).

Elements	Green(4)	Red(5)	Blue(3)	Yellow(4)	Others(3)
Al	39~65	8.7~35	25~440	26~290	15~210
Ca	28~260	52~490	11~350	6.6~300	15~130
Fe	11~28	4.2~9.1	2.6~20	4.5~14	2.0~18
K	35	42~160	16~160	30~62	120~140
Mg	160~360	75~320	120~210	160~410	140~210
Mn	0.04~22	0.03~0.10	0.03~0.06	0.06~0.37	0.05~0.06
Na	21~63	14~120	16~190	17~71	61~160
Ti	680~1600	130~1900	720~8000	1400~13000	650~17000
Ba	4.5~290	1.0~300	0.05~250	0.15~290	17~69
Co	0.51~0.96	0.13~42	0.66~0.71	1.1~6.0	0.51~0.86
Cr	0.34~23	0.06~0.22	0.14~0.55	0.35~43	0.14
Ni	0.21~130	0.17~0.21	0.11~0.23	0.18~0.38	340**
Sr	0.42~5.6	0.24~0.74	0.09~0.25	0.18~8.7	<0.1
V	0.41~0.87	0.04~0.61	0.26~2.0	0.62~5.6	4.2
Cu	43~96	0.34~3.4	2.1~400	0.99~69	28
Nb	1.1	0.42~1.3	0.61~4.9	1.3~7.5	1.0
Pb	9.5	0.49~1.1	0.83~4.2	1.5~4.8	1.5
Zn	0.09~0.95	0.18~1.1	0.41~0.72	0.06~0.48	0.01~180
Zr	0.23	0.07~12	0.06~45	0.09~40	0.01~7
Cd	<0.1	<0.01	<0.1	<0.1	<0.1
As	<1	<1	<1	<1	<1
Cl	1900	3.8~15	3.3~11	3.6~220	-
Br	8.9	0.91	0.03	0.02~4.2	-
Sb	0.09	0.14	0.06	0.08~7.6	-

Table 65. Concentration and leaching properties of LEGOs by ICP-AES
and NAA(unit : ng/cm²)

Element	ICP-AES	NAA		
	Acetic acid	Acetic acid	Nitric	Hydrochloric
Al	<0.5	<0.1	<0.1	<0.1
Ca	<0.5	<0.1	<0.1	<0.1
Fe	<0.5	<0.01	<0.01	<0.01
K	<5.0	<0.01	<0.01	<0.01
Mg	<0.5	<0.1	<0.1	<0.1
Mn	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
Na	<5.0	160	87	83
Ti	<0.5	<1	<1	<1
Ba	<0.5	<0.1	<0.1	<0.1
Co	<0.5	<0.001	<0.001	<0.001
Cr	<5.0	5.3	3.5	<0.001
Ni	<0.5	<1	<1	<1
Sr	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
V	<0.5	<1	<1	<1
Cu	<5.0	<1	<1	<1
Nb	<5.0	-	-	-
Pb	<5.0	-	-	-
Zn	<5.0	<0.01	<0.01	<0.01
Zr	<5.0	<1	<1	<1
Cd	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
As	<5.0	<0.01	<0.01	<0.01

Table 66. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HCl/LDPE bottle.

Tracer	1H	1D	2D	3D	6D	9D	20D	48D	80D
⁴⁵ Sc	0.82	0.86	0.9	0.85	0.91	0.81	0.85	0.73	0.77
⁵⁹ Fe	0.89	0.94	0.96	0.94	0.95	0.91	0.97	0.92	1.02
⁶⁰ Co	0.97	1.05	1.04	1.01	1.04	1.05	0.99	0.98	1.01
⁶⁵ Zn	1.09	0.94	0.81	0.86	0.86	0.98	0.98	0.95	0.91
⁷⁵ Se	1.05	1.01	1.05	1.05	1.03	1.09	0.98	1.02	0.99
⁸⁵ Sr	0.9	0.85	0.87	0.9	0.87	0.88	0.91	0.84	0.81
⁹⁵ Zr	1.05	1.03	0.95	1.01	0.94	0.95	0.95	0.94	0.97
¹¹³ Sn	0.87	0.77	0.73	0.74	0.85	0.82	0.73	0.74	0.77
^{114m} In	1.09	1.03	1.02	1.04	0.99	0.95	0.96	0.97	0.83
¹⁴¹ Ce	0.94	1.08	0.95	0.96	0.94	1.01	0.97	1.03	1.03
¹⁵² Eu	0.93	1.03	1.04	1.01	0.97	1.08	0.98	0.99	0.98
¹⁵³ Gd	0.91	0.95	0.96	0.99	0.96	0.95	0.9	0.97	1.0
¹⁶⁰ Tb	0.93	1.03	1.06	1.0	1.09	1.02	1.06	1.07	1.08
¹⁶⁹ Yb	1.1	0.95	0.98	0.96	0.98	0.94	1.0	1.05	1.05
²⁰³ Hg	0.92	1.02	0.99	1.08	1.04	1.01	1.02	0.94	1.0
²³³ Pa	0.94	0.92	0.89	0.9	0.89	0.89	0.86	0.87	0.8

Table 67. Variations of specific activity as a function of storage period in
2~5% HCl/HDPE bottle.

Tracer	1H	1D	2D	3D	6D	9D	20D	48D	80D
⁴⁶ Sc	0.93	0.71	0.73	0.77	0.78	0.82	0.88	0.78	0.79
⁵⁹ Fe	0.98	0.93	1.04	0.96	1.02	0.98	0.86	0.76	0.81
⁶⁰ Co	1.03	1.03	0.98	0.98	0.98	0.96	0.98	0.98	0.97
⁶⁵ Zn	0.99	1.03	0.88	0.99	0.94	1.07	1.03	0.79	0.88
⁷⁵ Se	1.04	1.02	1.07	1.02	0.98	0.98	0.99	1.0	1.04
⁸⁵ Sr	0.91	0.85	0.82	0.76	0.8	0.87	0.82	0.62	0.67
⁹⁵ Zr	1.03	0.94	1.02	0.96	0.97	0.94	1.0	1.02	1.03
¹¹³ Sn	0.98	0.77	0.78	0.78	0.82	0.82	0.8	0.85	0.90
^{114m} In	1.01	1.03	1.02	1.01	1.04	1.04	1.07	1.03	-
¹⁴¹ Ce	0.93	0.94	0.96	1.0	0.9	1.0	1.05	0.95	1.03
¹⁵² Eu	0.99	0.97	1.04	0.89	0.92	0.92	0.92	0.94	0.89
¹⁵³ Gd	1.01	0.96	0.91	0.99	1.01	1.02	0.93	0.99	1.05
¹⁶⁰ Tb	0.99	1.01	0.96	0.93	0.94	1.01	1.04	0.93	0.97
¹⁶⁹ Yb	1.02	1.0	0.99	1.01	1.01	0.97	1.02	0.91	1.03
²⁰³ Hg	0.95	0.99	1.02	0.99	1.07	0.99	1.01	0.95	0.96
²³³ Pa	1.02	0.84	0.83	0.72	0.72	0.84	0.88	0.84	0.75

Table 68. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HCl/PP System.

Tracer	1H	1D	2D	3D	6D	9D	20D	48D	80D
⁴⁶ Sc	0.96	1.01	1.02	0.96	0.94	0.95	1.1	1.0	1.03
⁵⁹ Fe	1.01	1.1	1.07	1.02	0.96	1.04	1.05	1.04	0.92
⁶⁰ Co	1.02	0.96	1.08	1.08	1.04	1.05	1.02	0.99	0.99
⁶⁵ Zn	0.99	1.03	0.92	1.03	1.08	1.08	1.11	0.72	0.64
⁷⁵ Se	0.99	0.93	0.95	0.96	0.93	1.03	1.03	0.97	1.03
⁸⁵ Sr	1.03	1.01	0.99	1.08	1.06	1.07	1.01	0.94	1.05
⁹⁵ Zr	0.96	0.89	0.95	0.87	0.97	0.86	0.9	0.93	0.95
¹¹³ Sn	1.03	1.01	0.94	1.08	1.06	1.07	1.01	0.96	1.05
^{114m} In	0.9	0.94	1.06	1.05	0.92	0.85	0.86	0.78	—
¹⁴¹ Ce	0.97	1.08	1.06	1.05	0.99	1.08	0.99	1.04	0.88
¹⁵² Eu	1.08	1.0	1.04	1.04	1.05	1.0	1.09	1.01	1.04
¹⁵³ Gd	1.03	0.99	1.04	0.93	1.01	0.97	0.92	1.03	1.06
¹⁶⁰ Tb	0.99	0.9	0.98	1.08	0.96	1.09	1.07	0.76	0.51
¹⁶⁹ Yb	1.05	1.05	1.03	0.96	1.01	1.01	1.0	1.01	1.03
²⁰³ Hg	0.95	1.0	0.96	1.03	0.95	0.93	1.01	0.97	0.92
²³³ Pa	1.01	0.97	1.0	1.07	1.06	0.95	0.97	0.89	0.9

Table 69. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HCl/amber-HDPE bottle.

Tracer	1H	1D	2D	3D	6D	9D	20D	48D	80D
⁴⁶ Sc	0.96	1.05	0.93	0.83	0.93	1.01	0.98	0.87	0.68
⁵⁹ Fe	1.03	1.07	1.03	0.98	1.03	0.91	1.06	1.01	0.93
⁶⁰ Co	0.96	1.04	1.0	0.98	1.04	0.96	1.05	0.93	1.0
⁶⁵ Zn	1.01	0.85	0.99	0.86	0.98	1.0	0.95	0.77	0.78
⁷⁵ Se	0.9	1.02	0.93	1.04	0.92	1.07	1.02	0.91	0.91
⁸⁵ Sr	1.01	1.01	1.04	0.99	0.95	1.0	1.05	1.01	0.92
⁹⁵ Zr	0.91	0.92	1.01	0.91	0.89	0.93	0.99	0.93	0.91
¹¹³ Sn	0.76	0.74	0.7	0.7	0.64	0.71	0.72	0.78	0.77
^{114m} In	1.09	1.09	1.01	1.07	1.09	1.07	0.93	1.07	0.98
¹⁴¹ Ce	1.05	1.02	1.02	1.04	1.06	1.03	1.05	1.05	ND
¹⁵² Eu	1.02	1.05	1.05	1.02	1.08	1.11	1.02	1.08	0.98
¹⁵³ Gd	1.04	0.99	1.02	1.02	1.02	1.06	1.09	1.05	1.09
¹⁶⁰ Tb	1.02	0.99	1.01	1.05	1.03	1.08	0.84	0.99	0.94
¹⁶⁹ Yb	1.04	1.02	1.01	0.99	0.97	0.99	0.97	1.05	1.05
²⁰³ Hg	1.03	0.97	1.03	1.03	1.09	1.09	1.02	0.96	0.98
²³³ Pa	1.03	1.05	1.04	1.05	1.09	1.04	1.04	1.07	0.92

Table 70. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HCl/Glass bottle.

Tracer	1H	1D	2D	3D	6D	9D	20D	48D
⁴⁶ Sc	1.01	1.06	0.97	0.92	1.02	1.07	1.07	1.09
⁵⁹ Fe	0.96	1.0	1.05	1.07	1.07	1.05	1.07	1.05
⁶⁰ Co	0.98	1.09	1.0	1.11	1.04	1.01	1.04	1.08
⁶⁵ Zn	0.98	1.13	1.03	1.05	1.0	1.13	1.17	1.1
⁷⁵ Se	0.98	0.91	0.96	1.02	0.99	1.07	1.04	1.04
⁸⁵ Sr	1.0	0.99	1.03	1.05	1.06	1.03	1.01	0.98
⁹⁵ Zr	0.96	1.04	1.04	0.98	1.02	0.93	1.03	0.97
¹¹³ Sn	0.8	0.8	0.86	0.95	0.9	0.91	0.79	0.82
^{114m} In	0.98	1.08	1.02	0.93	1.03	1.07	1.0	0.89
¹⁴¹ Ce	0.95	0.92	0.96	1.0	0.91	0.98	1.06	1.06
¹⁵² Eu	0.89	0.93	0.89	0.93	0.86	0.92	0.93	0.93
¹⁵³ Gd	0.93	0.93	0.87	0.9	0.95	0.77	0.78	0.85
¹⁶⁰ Tb	0.91	0.95	0.93	1.0	1.05	1.01	1.02	0.81
¹⁶⁹ Yb	1.02	0.99	0.97	1.03	0.94	1.01	1.01	0.99
²⁰³ Hg	1.0	0.98	1.0	1.01	1.07	1.06	1.02	1.05
²³³ Pa	0.84	0.9	0.83	0.97	1.0	0.85	0.95	0.85

Table 71. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HNO₃/LDPE bottle.

Tracer	1H	1D	2D	3D	6D	9D	20D	48D	80D
⁴⁶ Sc	0.97	0.96	1	0.96	0.9	0.92	0.91	0.96	0.95
⁵⁹ Fe	0.93	0.95	0.97	0.93	1	0.97	0.9	0.98	1.01
⁶⁰ Co	0.95	1.04	0.97	0.99	0.94	0.96	0.98	0.97	0.98
⁶⁵ Zn	0.91	0.95	1.04	0.95	1	0.85	0.86	0.87	1.01
⁷⁵ Se	0.92	0.95	0.94	1.06	1.02	0.83	0.95	1.08	1.02
⁸⁵ Sr	0.95	1	1.03	1.05	1.01	1.04	1.01	1.03	1.01
⁹⁵ Zr	1.01	1	0.92	1.01	1.02	0.99	1	1.02	1.03
¹¹³ Sn	0.77	0.89	0.75	0.82	0.68	0.74	0.76	0.76	0.73
¹³⁴ Cs	1.04	0.97	1.05	1.06	0.94	0.98	1	1.03	1.02
^{114m} In	0.97	0.98	1.03	1.01	1.02	0.91	0.94	0.97	0.99
¹⁴¹ Ce	1.05	0.94	0.96	0.99	1.03	0.98	1.03	1.08	1.03
¹⁵² Eu	1.06	1.03	1.05	1	1.05	1.05	1.04	0.94	0.98
¹⁵³ Gd	0.96	1	1.01	0.99	1.03	0.91	0.95	1.05	0.93
¹⁶⁰ Tb	0.98	0.95	1.09	0.97	1	0.97	1	0.84	0.84
¹⁶⁹ Yb	0.97	1.06	1.01	1.04	0.99	0.98	1	1.03	1.01
²⁰³ Hg	0.9	0.99	1.05	1.05	0.98	1.01	1.02	1.03	1.05
^{110m} Ag	0.87	0.92	0.91	0.93	0.93	0.93	0.95	0.86	0.9

Table 72. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HNO₃/HDPE bottle.

Tracer	1H	1D	2D	3D	6D	9D	20D	48D	80D
⁴⁶ Sc	1.05	0.98	1.05	0.99	0.98	0.97	1.04	1.02	0.95
⁵⁹ Fe	1.09	1.05	1.03	1.09	0.88	1.02	1.02	1.01	1.02
⁶⁰ Co	1.04	0.98	0.99	0.98	1.03	0.99	1.02	1.03	0.98
⁶⁵ Zn	1.03	1.09	1.08	1.04	0.96	1.05	1.03	1.04	1.01
⁷⁵ Se	0.92	0.95	0.89	0.97	0.96	0.94	0.96	0.95	1
⁸⁵ Sr	0.99	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.94	1.02	1.04
⁹⁵ Zr	1.03	1.03	1	0.94	0.92	1.03	0.97	0.91	1.05
¹¹³ Sn	0.78	0.8	0.75	0.82	0.76	0.8	0.84	0.83	0.80
¹³⁴ Cs	0.96	0.99	1.05	0.9	1	1.01	0.96	1	0.99
^{114m} In	0.96	0.92	1.06	1.01	0.96	1.05	0.98	0.96	1
¹⁴¹ Ce	0.95	1.03	1.02	1.08	1.06	1.01	1	0.98	1.02
¹⁵² Eu	1.04	0.94	1.04	0.99	1.05	1.07	1.04	1.06	0.93
¹⁵³ Gd	1.04	1.03	1.05	1.02	1.07	0.98	0.97	1.03	0.98
¹⁶⁰ Tb	0.93	0.99	0.94	1.01	0.97	0.98	0.94	0.98	0.91
¹⁶⁹ Yb	1	1.01	1	0.99	1	0.95	0.99	1.04	0.99
²⁰³ Hg	1.01	1.02	0.96	0.97	1.08	1.02	1.01	1.01	1
^{110m} Ag	1.01	1.05	1.04	0.94	1.03	0.99	0.99	0.97	0.96

Table 73. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HNO₃/PP bottle.

Tracer	1H	1D	2D	3D	6D	9D	20D	48D	80D
⁴⁶ Sc	1.05	1.01	0.95	0.94	1.05	0.95	1.04	0.86	0.89
⁵⁹ Fe	1.01	1.05	0.91	0.92	1.02	0.95	0.95	1.04	1.07
⁶⁰ Co	1.04	0.99	1.02	1	1	1.01	1.04	1	1.01
⁶⁵ Zn	1.06	1.03	0.99	0.98	1.01	0.92	1.08	0.94	0.9
⁷⁵ Se	0.93	1.08	1.04	0.97	0.98	0.97	1.03	1.03	0.98
⁸⁵ Sr	0.85	0.87	0.85	0.9	0.81	0.87	0.85	0.76	0.87
⁹⁵ Zr	0.9	0.96	0.97	0.92	0.91	0.88	0.86	0.88	0.94
¹¹³ Sn	0.92	0.84	0.89	1.03	1.01	0.99	0.92	1	0.9
¹³⁴ Cs	0.99	0.94	0.93	0.96	0.99	0.99	0.94	0.94	0.9
^{114m} In	1.01	0.96	0.92	1.01	1	1.02	0.97	1.03	1
¹⁴¹ Ce	1.02	1.01	0.99	1.04	1.01	0.96	1.06	1.02	1.07
¹⁵² Eu	0.98	1.04	1.04	1	1.07	1.02	1.08	1.06	0.93
¹⁵³ Gd	0.91	1.07	0.99	1.03	1.02	0.8	0.84	0.85	0.91
¹⁶⁰ Tb	0.92	0.83	0.72	0.89	0.91	0.85	0.91	0.86	1.05
¹⁶⁹ Yb	1.03	1.01	0.97	0.96	1.06	1	1.01	0.99	1
²⁰³ Hg	1.01	0.98	0.99	1.05	1.01	1.02	0.97	0.93	1.07

Table 74. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HNO₃/amber-HDPE bottle.

Tracer	1H	1D	2D	3D	6D	9D	20D	48D	80D
⁴⁶ Sc	0.97	0.94	1	0.96	0.92	1.04	0.96	0.96	1.04
⁵⁹ Fe	0.99	0.93	0.95	0.96	1.01	1.03	0.97	0.98	0.98
⁶⁰ Co	1	1.02	1.01	1.01	0.96	0.99	0.98	0.99	0.96
⁶⁵ Zn	1.06	1.07	1.06	0.94	0.99	1.09	0.98	0.93	1.03
⁷⁵ Se	1.06	1.07	1.02	0.96	0.97	0.96	0.95	0.94	0.97
⁸⁵ Sr	0.86	0.89	0.86	1	0.93	1	0.95	1.01	1.01
⁹⁵ Zr	1	1.03	1.08	0.98	0.94	0.9	0.96	0.94	1.02
¹¹³ Sn	0.99	1.05	1.06	0.99	1.06	1.04	1	1.04	0.99
¹³⁴ Cs	1	0.97	1.04	0.93	1.02	0.99	1.01	1.04	1.03
^{114m} In	1.04	1.01	1	1.04	1.02	1.04	0.96	0.98	0.96
¹⁴¹ Ce	1.05	0.99	1.04	0.97	1.03	0.97	0.95	0.84	0.94
¹⁵² Eu	1.01	1	1.08	0.95	0.98	0.99	0.91	0.97	0.91
¹⁵³ Gd	0.91	1.07	0.98	1.02	1.01	0.99	0.89	0.91	1.05
¹⁶⁰ Tb	0.78	0.79	0.73	0.78	0.84	1.01	0.85	0.7	1
¹⁶⁹ Yb	1.02	1.04	1.01	1.03	1.04	1.02	0.99	0.96	1.03
²⁰³ Hg	1.04	1.02	1.03	1.05	0.97	1.03	1.01	0.99	1.05
^{110m} Ag	1	0.99	0.98	0.99	0.99	1	1.01	0.93	1

Table 75. Variations of specific activity as a function of storage period in 2~5% HNO₃/Glass bottle.

Tracer	1H	1D	2D	3D	6D	9D	20D	48D	80D
⁴⁶ Sc	0.99	0.96	1.02	1.02	0.92	0.99	1.02	0.96	1.03
⁵⁹ Fe	1.03	1.07	0.96	1.08	0.96	0.98	0.98	1.06	1.06
⁶⁰ Co	1.08	1.03	1.02	1.03	1.01	0.94	1.03	1.03	1.01
⁶⁵ Zn	1.03	1.07	1.03	1.05	0.95	0.95	1.05	0.97	1.02
⁷⁵ Se	0.88	0.83	0.91	0.93	0.92	0.85	0.82	0.89	0.86
⁸⁵ Sr	0.94	0.96	0.91	0.93	1.03	0.98	0.95	1.03	1.05
⁹⁵ Zr	0.98	0.93	0.95	0.92	0.94	0.95	0.92	1.04	0.95
¹¹³ Sn	0.97	1.01	1	0.97	0.99	0.99	0.93	0.94	1.01
¹³⁴ Cs	0.94	0.98	0.85	0.89	0.92	0.98	0.87	0.81	1
^{114m} In	1.03	0.96	0.93	0.94	0.98	1.01	0.97	1.01	0.99
¹⁴¹ Ce	0.95	0.87	0.89	1.05	1.03	0.96	1.08	0.99	1.02
¹⁵² Eu	0.93	1.04	0.93	0.94	1.02	0.94	0.95	1.06	0.98
¹⁵³ Gd	1.01	0.84	0.84	1.01	1.05	1	1.04	1.05	1.05
¹⁶⁰ Tb	0.93	1	1.05	1.07	1.03	1.04	0.95	1.07	1.01
¹⁶⁹ Yb	0.96	0.91	0.9	0.89	0.97	0.93	0.91	0.93	0.94
²⁰³ Hg	1.05	1.05	1.04	1.02	1.06	1.02	1.01	1.02	1.02
^{110m} Ag	1.05	1.06	1.06	1.02	1.02	1.01	1.01	0.98	1.04

Table 76a. Daily Food Consumption of Korean People.

	50's	40's	30's	20's	전체평균
쌀밥	2.33 [#]	2.48	2.14	1.76	$2.18 \times 210g = 457.8g$
김치	2.20	2.64	2.40	1.81	$2.26 \times 60g = 135.7g$
된장찌개	0.26	0.68	0.60	0.27	$0.45 \times 180g = 81g$
김치찌개	0.36	0.30	0.31	0.23	$0.30 \times 180g = 54g$
생선찌개	0.17	0.27	0.17	0.20	$0.20 \times 180g = 36g$
미역국	0.21	0.07	0.10	0.12	$0.13 \times 350g = 45.5g$
고기국	0.24	0.32	0.29	0.31	$0.29 \times 350g = 101.5g$
콩나물국	0.10	0.20	0.13	0.07	$0.13 \times 350g = 45.5g$
두부찌개	0.02	0.09	0.08	0.03	$0.06 \times 180g = 10.8g$
라면	0.10	0.11	0.14	0.24	$0.15 \times 120g = 18g$
짜장면	0.02	0.05	0.04	0.07	$0.05 \times 520g = 26g$
우동	0.00	0.02	0.00	0.04	$0.02 \times 750g = 15g$
국수	0.06	0.07	0.17	0.03	$0.08 \times 90g = 7.2g$
짬뽕	0.00	0.04	0.01	0.02	$0.02 \times 790g = 15.8g$
잡채	0.14	0.02	0.01	0.05	$0.06 \times 200g = 12g$
피자	0.02	0.00	0.00	0.05	$0.02 \times 200g = 4g$
햄버거, 샌드위치	0.02	0.00	0.01	0.09	$0.03 \times 200g = 6g$
케이크	0.06	0.04	0.02	0.01	$0.03 \times 100g = 3g$
파이	0.00	0.02	0.00	0.02	$0.01 \times 100g = 1g$
도너츠	0.04	0.02	0.01	0.01	$0.02 \times 100g = 2g$
식빵	0.00	0.09	0.05	0.09	$0.06 \times 100g = 6g$
양배추	0.00	0.02	0.01	0.12	$0.04 \times 70g = 2.8g$
무	0.18	0.09	0.24	0.20	$0.18 \times 70g = 12.6g$
파	0.04	0.05	0.10	0.05	$0.06 \times 20g = 1.2g$
버섯	0.06	0.07	0.01	0.09	$0.06 \times 70g = 4.2g$
콩나물	0.08	0.09	0.14	0.13	$0.11 \times 70g = 7.7g$
상추	0.04	0.07	0.14	0.09	$0.09 \times 40g = 3.6g$
마늘	0.04	0.04	0.04	0.04	$0.04 \times 10g = 0.4g$
고추	0.02	0.09	0.08	0.06	$0.06 \times 20g = 1.2g$
오이	0.04	0.09	0.06	0.16	$0.09 \times 70g = 6.3g$
깻잎	0.12	0.00	0.07	0.06	$0.06 \times 20g = 1.2g$
시금치	0.10	0.21	0.13	0.09	$0.13 \times 70g = 9.1g$
당근	0.10	0.00	0.01	0.07	$0.05 \times 70g = 3.5g$
양파	0.02	0.00	0.01	0.07	$0.03 \times 40g = 1.2g$
호박	0.02	0.04	0.01	0.02	$0.02 \times 70g = 1.4g$
도라지	0.16	0.00	0.02	0.05	$0.06 \times 70g = 4.2g$

Table 76b. Daily Food Consumption of Korean People(continued).

	50's	40's	30's	20's	전체 평균
두부	0.31	0.86	0.46	0.37	$0.50 \times 80g = 40g$
쇠고기	0.43	0.52	0.19	0.11	$0.31 \times 60g = 18.6g$
돼지고기	0.20	0.38	0.44	0.37	$0.35 \times 60g = 21g$
닭고기	0.04	0.11	0.19	0.08	$0.13 \times 60g = 7.8g$
* 계란	0.30	0.38	0.71	0.49	$0.47 \times 50g = 23.5g$
참치	0.06	0.00	0.07	0.04	$0.04 \times 70g = 2.8g$
고등어	0.18	0.30	0.18	0.07	$0.18 \times 70g = 12.6g$
멸치	0.18	0.27	0.12	0.06	$0.16 \times 13g = 2.1g$
오징어	0.04	0.02	0.06	0.16	$0.07 \times 70g = 4.9g$
동태	0.08	0.00	0.04	0.08	$0.05 \times 70g = 3.5g$
꽁치	0.00	0.04	0.00	0.01	$0.01 \times 70g = 0.7g$
조개류	0.04	0.07	0.00	0.02	$0.03 \times 30g = 0.9g$
어묵	0.00	0.02	0.12	0.05	$0.05 \times 50g = 2.5g$
김	0.71	0.95	0.74	0.42	$0.71 \times 3g = 2.1g$
미역	0.06	0.20	0.08	0.05	$0.10 \times 70g = 7g$
파래	0.02	0.04	0.00	0.04	$0.03 \times 70g = 2.1g$
** 우유	48.98	140.18	20.24	96.19	76.40
아이스크림	0.00	0.00	0.04	0.09	$0.03 \times 100g = 3g$
요구르트	0.33	0.34	0.15	0.26	$0.27 \times 180g = 48.6g$
사과	0.71	0.59	0.58	0.23	$0.53 \times 100g = 53g$
감	0.51	0.30	0.10	0.09	$0.25 \times 100g = 25g$
귤	0.06	0.39	0.29	0.20	$0.24 \times 100g = 24g$
배	0.06	0.05	0.10	0.05	$0.07 \times 100g = 7g$
** 맥주	3.06	2.68	89.29	82.16	44.30
** 소주	21.43	13.39	63.93	31.49	32.56
** 막걸리	0.00	0.00	0.00	4.86	1.22
** 청주	6.12	0.00	4.76	0.86	2.94
** 커피	29	50	48	77	51
** 콜라	6	10.5	16.5	39	18
** 탄산음료	3	3	3	7.5	4.5
** 식혜	6	3	0	1.5	3
** 오렌지쥬스	0	10.5	22.5	10.5	10.5
** 울무차	2	0	0	2	1
** 녹차	4	4	8	3	5
** 홍차	0	0	1	3	1

meal number / day

* Number

** Volume in ml

Table 77. Analytical Result of Korean Total Diet by NAA.

Element	Nuclide	This Work		
		Range	Mean Value	Standard Deviation
< ppm level >				
Al	Al-28	16.1~18.3	17.6	1.28
Br	Br-80	9.59~10.6	9.95	0.58
	Br-82			
Ca	Ca-49	1358~1496	1418	70.9
	Ca-47			
Cl	Cl-38	10870~11780	11353	458
Fe	Fe-59	23.7~26	25.2	1.32
I	I-128	1.50~1.77	1.64	0.19
K	K-42	5394~5706	5579	134
Mg	Mg-27	807~896	850	44.4
Mn	Mn-56	8.46~8.78	8.65	0.16
Na	Na-24	10080~10470	10298	162
Rb	Rb-86	5.43~5.49	5.46	0.03
Sr	Sr-87m	5.3~5.80	5.55	0.36
	Sr-85			
Zn	Zn-65	31.57~33.74	32.48	1.13
< ppb level >				
As	As-76	493~603	526	51.8
Co	Co-60	29.6~31.6	30.8	1.06
Cr	Cr-51	348~420	393	39.4
Cs	Cs-134	10.6~11.6	11.1	0.71
Sc	Sc-46	3.2~3.6	3.43	0.21
Se	Se-75	223~328	276	74.5
Sm	Sm-153	46.1~47.5	46.8	0.99
Th	Pa-233	2.38~2.82	2.6	0.3
U	Np-239	31.5~38.6	35	5.0

Table 78. Analytical Result of Korean Boiled Rice by NAA.

Element	Nuclide	This Work		
		Range	Mean Value	Standard Deviation
< ppm level >				
Al	Al-28	0.87~1.19	1.03	0.23
Ca	Ca-49	83.3~87.2	85.2	2.77
	Ca-47			
Cl	Cl-38	298~331	316	16.6
Fe	Fe-59	2.22~2.34	2.28	0.085
K	K-42	757~786	775	12.3
Mg	Mg-27	65.9~68.9	67.1	1.61
Mn	Mn-56	3.23~3.36	3.27	0.072
Na	Na-24	109~112	110	1.25
Zn	Zn-65	16~17.3	16.6	0.69
< ppb level >				
As	As-76	103~142	130	18.09
Au	Au-198	0.17~0.23	0.2	0.044
Br	Br-80	645~742	679	43.9
	Br-82			
Co	Co-60	4.64~5.5	5.01	0.44
I	I-128	77~120	100	30
Mo	Mo-101	268~384	326	82
	Mo-99			
Rb	Rb-86	452~510	486	24.2
Sc	Sc-46	1.8~2.46	2.17	0.34
Sr	Sr-87m	770~910	840	10
	Sr-85			
Th	Pa-233	0.1~0.12	0.11	0.02
U	Np-239	2.7~4.2	3.5	1.0

Table 79. Analytical Result of Korean Kimch'i by NAA.

Element	Nuclide	This Work		
		Range	Mean Value	Standard Deviation
< ppm level >				
Br	Br-80	182~210	197	11.56
	Br-82			
Ca	Ca-49	4022~4480	4284	236
	Ca-47			
Cl	Cl-38	115900~120500	118433	2335
Cr	Cr-51	1.1~1.44	1.3	0.16
Fe	Fe-59	49.2~54.8	51.4	2.97
K	K-42	27320~30770	29535	1604
Mn	Mn-56	26.6~30.6	29.1	2.22
Na	Na-24	97790~104500	99843	3167
Rb	Rb-86	22.8~28	26.1	2.47
Sr	Sr-87m	22.3~25.2	23.8	2.06
	Sr-85			
Zn	Zn-65	42.5~46.5	44.7	1.7
< ppb level >				
Co	Co-60	346~392	365	23.8
Cs	Cs-134	69.5~71.8	70.9	12.4
Sc	Sc-46	30~33.8	31.6	1.75
Th	Pa-233	4.1~5.75	4.9	1.2

Table 80. Analytical Result of Mackerel by NAA.

Element	Nuclide	This Work		
		Range	Mean Value	Standard Deviation
< ppm level >				
Al	Al-28	12.6~15.8	13.8	1.77
As	As-76	6.28~6.92	6.5	0.37
Br	Br-80	16.3~18.5	17.3	1.01
	Br-82			
Ca	Ca-49	3448~3973	3675	270
	Ca-47			
Cl	Cl-38	22980~24170	23747	665
Cr	Cr-51	0.88~1.37	1.14	0.21
Fe	Fe-59	45.3~49.4	47.6	1.75
K	K-42	11250~11790	11510	223
Mg	Mg-27	649~694	675	23.4
Na	Na-24	2183~2289	2230	53.3
Rb	Rb-86	1.06~1.39	1.17	0.15
Se	Se-75	2.91~3.1	2.97	0.1
Sr	Sr-87m	6.4~7.54	7.0	0.8
	Sr-85			
Zn	Zn-65	35.7~39.8	37.3	1.89
< ppb level >				
Au	Au-198	1.2~1.7	1.45	0.35
Cs	Cs-134	53.6~66.2	61.1	5.45
Hg	Hg-203	67.9~72.6	70.6	2.46
Sc	Sc-46	3.2~3.8	3.5	0.42
Th	Pa-233	0.85~1.07	0.96	0.15

Table 81. Analytical Result of Korean Mixed Pork and Beef by NAA.

Element	Nuclide	This Work		
		Range	Mean Value	Standard Deviation
< ppm level >				
Al	Al-28	17.6~21.4	19.5	2.68
Br	Br-80	13.3~13.9	13.5	0.24
	Br-82			
Cd	Cd-115	1.55~1.58	1.56	0.02
Cl	Cl-38	26020~26840	26343	436.6
Fe	Fe-59	39.8~46	43.4	2.81
K	K-42	11500~11930	11625	205
Mg	Mg-27	603~674	635	36.05
Na	Na-24	2110~2205	2162	41.13
Rb	Rb-86	18.6~21.6	20.8	1.45
Zn	Zn-65	119~131	124	5.83
< ppb level >				
As	As-76	72.5~107	85	15.7
Co	Co-60	13.6~17.3	15.4	1.74
Cr	Cr-51	337~683	515	143
Cs	Cs-134	34.6~46.2	40.2	5.62
Hg	Hg-203	33.8~36.9	35.4	2.19
I	I-128	150~250	200	70
Se	Se-75	449~606	527	79.1
Sm	Sm-153	7.2~7.3	7.25	0.07
Sr	Sr-87m	640~870	760	150
	Sr-85			
Th	Pa-233	0.44~0.53	0.48	0.05

Table 82. Elemental concentration in Supplementary Foods.

(ppm)

Element	흑염소	호박	개소주	붕어
Al	42.18±3.37	30.62±2.45	25.18±2.01	61.15±4.89
As	--	0.107±0.026	--	0.633±0.153
Ba	7.65±1.28	8.88±1.26	6.66±1.35	7.82±1.72
Br	15.84±2.38	2.57±0.39	5.51±0.44	10.91±0.87
Ca	1041±73	1558±109	883±62	1151±81
Ce	--	--	--	0.17±0.05
Cl	4151±62	1951±29	3339±50	3328±50
Co	0.174±0.011	0.122±0.007	0.1±0.007	0.161±0.009
Cr	0.403±0.056	0.151±0.042	0.271±0.058	0.892±0.079
Cs	0.0481±0.0079	0.047±0.006	0.0804±0.0103	0.0741±0.0098
Fe	59.08±4.38	38.38±3.05	100.8±6.0	76.70±4.98
Hg	0.033±0.016	--	--	--
K	10905±273	22788±217	12233±420	16679±480
Mg	1001±130	1549±201	1735±226	1580±205
Mn	21.08±1.68	20.49±1.64	18.01±1.44	3.04±0.24
Na	3986±14	152.8±1.6	4231±15	4000±15
Rb	13.72±0.47	19.06±0.49	27.62±0.68	17.36±0.55
Sc	0.0074±0.0006	0.0021±0.0004	0.0023±0.0004	0.0132±0.0008
Sr	5.18±1.40	7.60±1.30	6.73±1.68	7.94±2.08
Th	0.0138±0.0058	--	--	0.0194±0.0073
Zn	13.72±0.44	32.70±0.51	49.93±1.05	14.13±0.44

Table 83a. Elemental Concentration of Korean and Chinese medicine
by INAA.(ppm)

Element	황기 (한국산)			황기 (중국산)		
	Range	Mean Value	Standard Deviation	Range	Mean Value	Standard Deviation
Al	42.3 ~ 46.4	44.4	2.1	227 ~ 239	233	6
As	0.052 ~ 0.055	0.054	0.002	0.13 ~ 0.16	0.143	0.015
Au						
Ba						
Br	0.75 ~ 0.78	0.767	0.015	45.1 ~ 47.6	46.4	1.3
Ca	1150 ~ 1275	1198	68	1038 ~ 1208	1114	86
Ce	0.10 ~ 0.12	0.107	0.011	0.28 ~ 0.34	0.307	0.031
Cl	625 ~ 629	627	2	155 ~ 164	159	5
Cr	0.78 ~ 0.97	0.875	0.134	0.50 ~ 0.63	0.570	0.066
Cs	0.020 ~ 0.047	0.034	0.019	0.03 ~ 0.036	0.033	0.004
Cu	6.98 ~ 9.36	8.23	1.20	10.3 ~ 14.7	12.5	3.1
Fe	64.1 ~ 72.8	68.9	4.4	123 ~ 135	130	6
K	8697 ~ 9016	8845	161	8190 ~ 8554	8361	183
La	0.19 ~ 0.23	0.206	0.021	0.096 ~ 0.106	0.100	0.005
Mg	1720 ~ 1825	1789	60	1565 ~ 1705	1622	73
Mn	11.9 ~ 12.8	12.3	0.5	7.76 ~ 8.17	8.00	0.21
Mo	2.78 ~ 2.97	2.85	0.11	6.34 ~ 8.33	7.49	1.03
Na	41.8 ~ 42.4	42.2	0.35	366 ~ 397	384	16
Rb	8.43 ~ 9.29	8.90	0.43	9.97 ~ 10.4	10.2	0.2
Sb						
Sc	0.0075 ~ 0.0080	0.0078	0.0003	0.035 ~ 0.043	0.039	0.004
Sm	0.027 ~ 0.030	0.029	0.002	0.027 ~ 0.034	0.031	0.004
Sr				16.1 ~ 18.0	17.1	1.34
Th				0.038 ~ 0.043	0.041	0.004
V				0.39 ~ 0.53	0.46	0.07
Zn	31.8 ~ 32.8	32.2	0.5	12.3 ~ 13.8	13.1	0.75

Table 83b. Elemental Concentration of Korean and Chinese medicine
by INAA.(ppm)

Element	백출 (한국산)			백출 (중국산)		
	Range	Mean Value	Standard Deviation	Range	Mean Value	Standard Deviation
Al	177 ~ 181	180	2	147 ~ 251	250	2
As	0.028 ~ 0.032	0.030	0.002	0.130 ~ 0.181	0.157	0.025
Au	0.0024 ~ 0.0028	0.0026	0.0002			
Ba	152 ~ 157	154	3	56.2 ~ 60.8	58.3	2.3
Br	0.69 ~ 0.72	0.703	0.015	0.50 ~ 0.57	0.537	0.035
Ca	12020 ~ 12820	12813	790	15060 ~ 16300	15493	699
Ce	0.89 ~ 0.99	0.937	0.050	0.50 ~ 0.53	0.510	0.017
Cl	550 ~ 601	571	27	825 ~ 867	848	21
Cr	0.42 ~ 0.52	0.463	0.051	0.55 ~ 0.63	0.593	0.040
Cs	0.032 ~ 0.036	0.034	0.003	0.034 ~ 0.037	0.035	0.002
Cu	8.04 ~ 9.58	8.66	0.81	10.6 ~ 12.2	11.2	0.9
Fe	140 ~ 179	162	20	108 ~ 122	116	7
K	7204 ~ 7634	7479	239	7519 ~ 7750	7615	120
La	0.54 ~ 0.60	0.577	0.032	0.36 ~ 0.40	0.377	0.021
Mg	698 ~ 826	747	69	952 ~ 1141	1033	97
Mn	31.2 ~ 33.7	32.2	1.3	22.3 ~ 23.9	22.9	0.9
Mo						
Na	64.2 ~ 67.0	65.6	1.4	51.2 ~ 53.0	52.3	1.0
Rb	7.64 ~ 8.95	8.37	0.67	9.2 ~ 10.3	9.93	0.64
Sb						
Sc	0.040 ~ 0.046	0.042	0.003	0.038 ~ 0.043	0.041	0.003
Sm	0.059 ~ 0.071	0.067	0.007	0.043 ~ 0.050	0.047	0.004
Sr	70.8 ~ 89.6	79.7	9.4	49.1 ~ 69.3	59.6	10.1
Th	0.043 ~ 0.049	0.046	0.004	0.044 ~ 0.052	0.048	0.004
V	0.14 ~ 0.18	0.157	0.021	0.21 ~ 0.26	0.240	0.026
Zn	36.9 ~ 39.6	38.0	1.4	38.1 ~ 46.0	41.4	4.1

Table 83c. Elemental Concentration of Korean and Chinese medicine
by INAA.(ppm)

Element	시호 (한국산)			시호 (중국산)		
	Range	Mean Value	Standard Deviation	Range	Mean Value	Standard Deviation
Al	1333 ~ 1356	1344	11	679 ~ 716	700	19
As	0.36 ~ 0.64	0.457	0.159	0.19 ~ 0.23	0.207	0.021
Au	0.0021 ~ 0.0032	0.0025	0.0006	0.0010 ~ 0.0012	0.0011	0.0001
Ba	33.3 ~ 40.8	38.1	4.2	34.5 ~ 37.3	35.5	1.5
Br	0.84 ~ 0.95	0.900	0.056	0.48 ~ 0.62	0.530	0.078
Ca	4032 ~ 4357	4152	179	5060 ~ 5437	5223	194
Ce	0.91 ~ 1.05	0.980	0.070	0.67 ~ 0.72	0.697	0.025
Cl	287 ~ 336	308	25	928 ~ 1023	973	48
Cr	2.05 ~ 4.50	3.60	1.35	1.82 ~ 1.90	1.86	0.04
Cs	0.12 ~ 0.16	0.143	0.021	0.073 ~ 0.083	0.078	0.005
Cu						
Fe	542 ~ 593	556	32	320 ~ 342	329	11
K	7026 ~ 7402	7265	208	5611 ~ 5744	5693	72
Hg	0.043 ~ 0.066	0.055	0.016	0.11 ~ 0.16	0.135	0.035
La	0.58 ~ 0.68	0.617	0.055	0.40 ~ 0.43	0.413	0.015
Mg	2093 ~ 2321	2210	114	2201 ~ 2793	2554	312
Mn	38.3 ~ 40.3	39.2	1.0	43.9 ~ 45.9	45.0	1.0
Mo						
Na	405 ~ 457	425	28	454 ~ 458	456	2
Rb	6.63 ~ 7.65	7.28	0.57	5.08 ~ 5.74	5.45	0.34
Sb	0.040 ~ 0.043	0.042	0.002	0.032 ~ 0.036	0.034	0.003
Sc	0.16 ~ 0.19	0.173	0.015	0.11 ~ 0.13	0.116	0.012
Sm	0.15 ~ 0.18	0.160	0.017	0.10 ~ 0.12	0.108	0.010
Sr	14.5 ~ 23.3	18.6	4.4			
Th	0.18 ~ 0.24	0.203	0.032	0.12 ~ 0.13	0.125	0.007
V	2.34 ~ 2.73	2.543	0.196	1.09 ~ 1.48	1.267	0.198
Zn	19.3 ~ 22.1	21.0	1.5	17.2 ~ 19.5	18.2	1.2

Table 83d. Elemental Concentration of Korean and Chinese medicine
by INAA.(ppm)

Element	택사 (한국산)			택사 (중국산)		
	Range	Mean Value	Standard Deviation	Range	Mean Value	Standard Deviation
Al	24.8 ~ 26.6	25.7	0.9	198 ~ 226	209	15
As	0.058 ~ 0.089	0.077	0.017			
Au	0.00073~0.0099	0.00086	0.00018			
Ba	19.8 ~ 22.3	21.1	1.3	19.9 ~ 22.6	21.1	1.4
Br	2.89 ~ 2.99	2.94	0.05	1.28 ~ 1.38	1.33	0.05
Ca	1902 ~ 2336	2079	228	447 ~ 497	474	25
Ce				0.52 ~ 0.57	0.543	0.025
Cl	2005 ~ 2335	2180	166	1086 ~ 1194	1133	55
Cr						
Cs	0.025 ~ 0.036	0.031	0.006			
Cu	47.6 ~ 49.7	48.4	1.1	23.7 ~ 32.7	27.3	4.8
Fe	53.2 ~ 61.7	58.0	4.4	80.2 ~ 91.6	85.6	5.7
K	11950 ~ 12780	12290	435	9143 ~ 9476	9296	168
La	0.088 ~ 0.091	0.089	0.002	0.21 ~ 0.22	0.217	0.006
Mg	1077 ~ 1541	1308	202	1884 ~ 2488	2157	306
Mn	553 ~ 573	564	10	507 ~ 512	509	3
Mo						
Na	124 ~ 136	129	6	129 ~ 136	133	4
Rb	11.5 ~ 12.8	12.0	0.7	14.8 ~ 16.3	15.6	0.8
Sb						
Sc	0.0015 ~ 0.0016	0.00157	0.00005	0.015 ~ 0.019	0.017	0.002
Sm				0.021 ~ 0.031	0.026	0.005
Sr						
Th				0.038 ~ 0.041	0.040	0.002
V						
Zn	94.5 ~ 101	98.8	3.8	72.6 ~ 79.8	75.9	3.6

Table 83e. Elemental Concentration of Korean and Chinese medicine
by INAA.(ppm)

Element	후박 (한국산)			후박 (중국산)		
	Range	Mean Value	Standard Deviation	Range	Mean Value	Standard Deviation
Al	336 ~ 381	352	25	184 ~ 212	199	14
As						
Au	0.00074~0.00088	0.00082	0.00007			
Ba	60.4 ~ 66.3	64.2	3.3	42.0 ~ 47.4	45.1	2.8
Br	1.93 ~ 2.27	2.12	0.17	41.3 ~ 42.4	41.7	0.6
Ca	11310 ~ 12091	11600	427	4445 ~ 4942	4741	262
Ce	0.42 ~ 0.48	0.440	0.035	0.19 ~ 0.22	0.203	0.015
Cl	446 ~ 465	453	10	182 ~ 199	193	9
Cr	0.75 ~ 0.92	0.827	0.086			
Cs	0.045 ~ 0.055	0.050	0.005	0.073 ~ 0.076	0.074	0.002
Cu						
Fe	281 ~ 289	285	4	45.8 ~ 54.9	49.1	5.0
K	4917 ~ 5736	5222	447	1429 ~ 1869	1665	222
La	0.24 ~ 0.25	0.243	0.006	0.14 ~ 0.17	0.157	0.015
Mg	987 ~ 1330	1132	178	462 ~ 489	471	15
Mn	321 ~ 368	340	25	298 ~ 331	313	17
Mo						
Na	161 ~ 178	170	9	138 ~ 161	147	12
Rb	5.98 ~ 6.49	6.24	0.26	11.4 ~ 14.7	13.3	1.7
Sb	0.026 ~ 0.032	0.029	0.003	0.031 ~ 0.034	0.033	0.002
Sc	0.065 ~ 0.073	0.069	0.004	0.013 ~ 0.014	0.0133	0.0006
Sm	0.058 ~ 0.062	0.060	0.002	0.031 ~ 0.035	0.033	0.002
Sr	29.6 ~ 37.9	33.8	5.9	21.4 ~ 24.7	23.1	2.3
Th	0.059 ~ 0.069	0.064	0.005	0.062 ~ 0.071	0.066	0.005
V	0.39 ~ 0.47	0.430	0.040			
Zn	24.2 ~ 25.2	24.8	0.6	8.61 ~ 9.08	8.88	0.24

Table 83f. Elemental Concentration of Korean and Chinese medicine
by INAA.(ppm)

Element	향부자 (한국산)			향부자 (중국산)		
	Range	Mean Value	Standard Deviation	Range	Mean Value	Standard Deviation
Al	88.1 ~ 93.4	91.5	3.0	52.3 ~ 56.5	54.7	2.2
As	0.14 ~ 0.16	0.147	0.011	0.15 ~ 0.17	0.163	0.012
Au						
Ba	10.1 ~ 11.2	10.8	0.59	3.83 ~ 3.94	3.88	0.06
Br	0.63 ~ 0.70	0.657	0.038	0.81 ~ 0.88	0.847	0.035
Ca	611 ~ 628	621	9	606 ~ 682	640	39
Ce						
Cl	818 ~ 826	823	4	824 ~ 860	837	20
Cr	0.67 ~ 0.70	0.705	0.049	0.25 ~ 0.30	0.273	0.025
Cs	0.029 ~ 0.038	0.033	0.005	0.023 ~ 0.029	0.026	0.003
Cu	2.51 ~ 2.69	2.57	0.10	5.69 ~ 6.61	6.07	0.48
Fe	71.8 ~ 78.0	74.7	3.1	65.5 ~ 66.8	66.2	0.7
K	5421 ~ 5653	5556	121	6247 ~ 6765	6432	289
La	0.16 ~ 0.17	0.167	0.006	0.13 ~ 0.14	0.137	0.006
Mg	838 ~ 896	860	31	838 ~ 969	906	66
Mn	19.5 ~ 24.4	22.6	2.7	32.2 ~ 33.7	33.1	0.8
Mo						
Na	45.3 ~ 50.8	48.0	2.8	48.3 ~ 51.8	49.9	1.8
Rb	1.59 ~ 1.89	1.75	0.15	4.15 ~ 4.58	4.34	0.22
Sb						
Sc	0.009 ~ 0.011	0.010	0.001	0.009 ~ 0.011	0.010	0.001
Sm	0.021 ~ 0.027	0.023	0.003	0.017 ~ 0.022	0.019	0.003
Sr						
Th	0.046 ~ 0.053	0.050	0.005	0.015 ~ 0.020	0.017	0.003
V						
Zn	23.2 ~ 29.4	25.9	3.2	27.1 ~ 29.4	28.4	1.2

Table 84. Elemental Concentrations in Different Biological Materials and Air to See Elemental Deposition in Hair.

Element	Ingestion [ppm]		Inhalation [ng/m ³]		Hair [ppm]		
	Total Diet	Tonic	Ambient Air	Foundry Air	Common Person	Foundry Worker	Tonic Taker
Al	17.6	307	2305	-	25.9	14.6	20.7
As	0.526	0.159	9.09	163	0.234	0.107	0.232
Br	9.95	8.29	8.02	133	1.21	1.76	29.7
Ca	1418	5012	407	-	909	1097	2190
Cl	11353	759	577	-	142	598	597
Cr	0.393	1.09	5.73	1510	-	1.01	-
Cu	-	15.6	40.2	-	14.6	-	32.8
I	1.64	-	4.13	-	0.724	1.50	1.63
K	5579	5570	346	-	16.7	-	-
Mg	850	1399	-	-	114	175	396
Mn	8.65	162	13.9	-	1.19	1.20	2.13
Sb	-	0.031	5.59	40	0.328	0.08	-
Sc	0.003	0.048	0.054	74	-	0.06	-
Sr	5.55	21.9	-	6680	4.94	-	22.0
Th	0.0026	0.133	0.086	121	-	-	-
U	0.035	-	0.694	-	-	-	-
Zn	32.5	52.3	91.3	26800	410	241	205

Table 85. Airborne concentration of toxic metal in PM-10 in 1999.

(Unit : ng/m ³)					
All sites Metal	No. of samples	Range	Arithmetic mean	Standard error	Geometric mean
<u>Carcinogenic metals</u>					
As	32	0.29~19.62	6.05	0.93	3.89
Be	32	0.002~0.18	0.06	0.01	0.04
Cd	35	0.10~8.17	3.92	0.51	2.52
Cr(6)	36	0.00~19.97	2.40	0.59	1.46
Ni(subsulfide)	36	0.07~9.53	2.81	0.35	1.92
Pb	35	24.59~578.31	145.99	20.44	106.66
<u>Non-carcinogenic metals</u>					
Mn	36	3.24~210.04	44.60	7.34	30.88
<u>Other metals</u>					
Co	36	0.06~4.15	0.99	0.13	0.76
Cu	36	11.35~98.24	30.13	3.13	26.25
Fe	35	173.45~3989.78	1053.37	120.23	881.13
Sb	31	0.03~14.63	2.14	0.50	1.22
Se	17	0.46~3.58	1.60	0.26	1.28
Ti	34	1.62~66.63	28.85	3.40	20.80
V	35	0.81~29.48	10.62	1.30	7.99
Zn	36	6.01~755.21	151.71	23.73	106.57
<u>PM-10 (μg/m³)</u>					
	36	23.99~142.08	70.98	4.78	65.42

Table 86. Average carcinogenic risk by toxic metals from inhalation exposure in Taejon 1,2 industrial complex.

Metal	Carcinogenic group	arithmetic mean ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Unit risk ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹	Carcinogenic risk
As	A	6.05×10^{-3}	4.8×10^{-3}	2.9×10^{-5}
Be	B2	5.91×10^{-5}	2.7×10^{-3}	1.6×10^{-7}
Cd	B1	3.92×10^{-3}	2.0×10^{-3}	7.8×10^{-6}
Cr(6)	A	2.40×10^{-3}	1.3×10^{-2}	3.1×10^{-5}
Ni(subsulfide)	A	2.81×10^{-3}	5.3×10^{-4}	1.5×10^{-6}
Pb	B2	1.46×10^{-1}	NA ^{a)}	
Total carcinogenic risk				7.0×10^{-5}

a) Not Available

Table 87. Non-carcinogenic risk by toxic metals from inhalation exposure
in Taejon 1,2 industrial complex.

Metal	Arithmetic mean ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RfC (mg/m^3)	Hazard index
Be	5.91×10^{-5}	2×10^{-2}	3.0×10^{-6}
Cr(6)	2.40×10^{-3}	1×10^{-4}	2.4×10^{-2}
Mn	4.46×10^{-2}	5×10^{-5}	0.9
Total hazard index			0.9

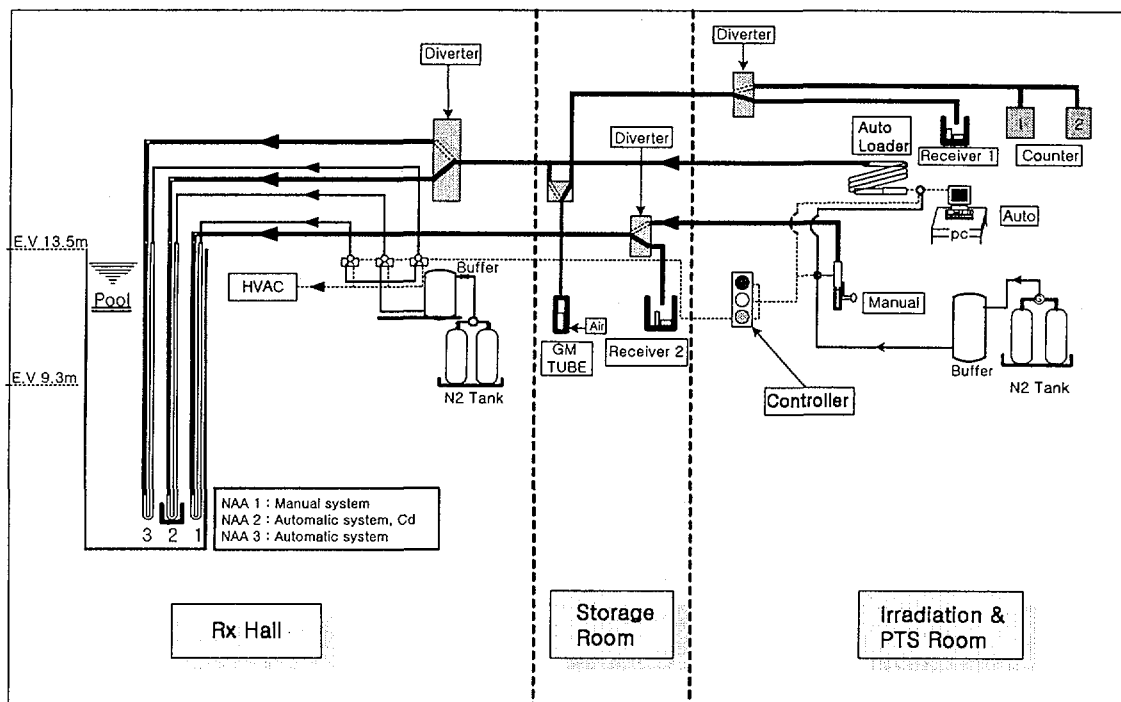


Figure 1. Diagram of PTS facilities for INAA.

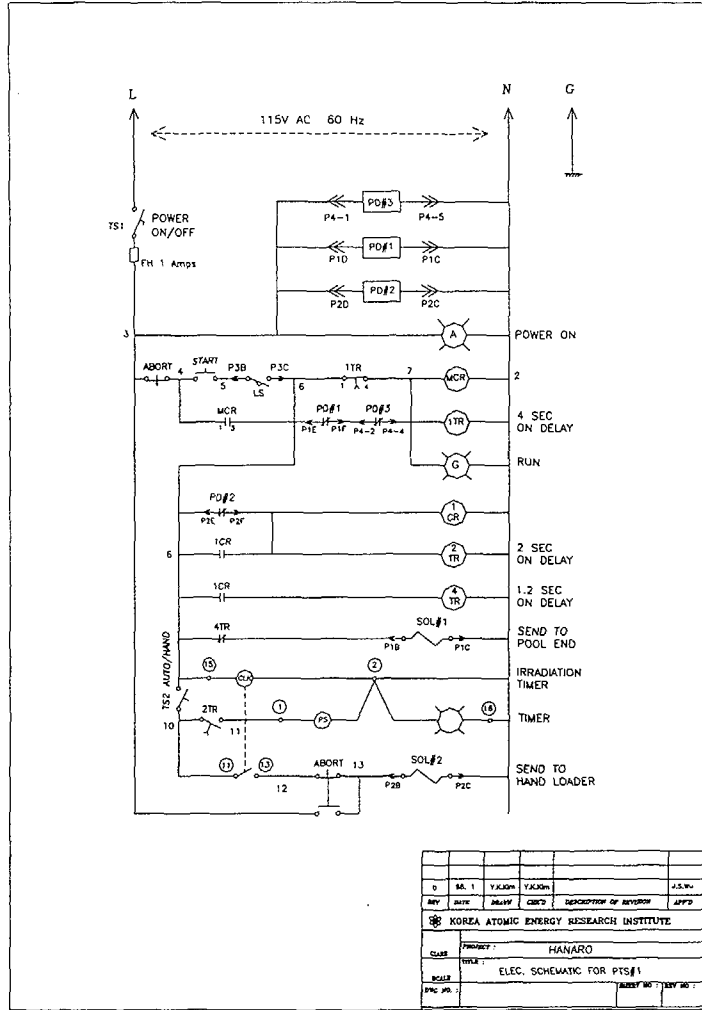


Figure 2. Diagram of control circuit for PTS #1.

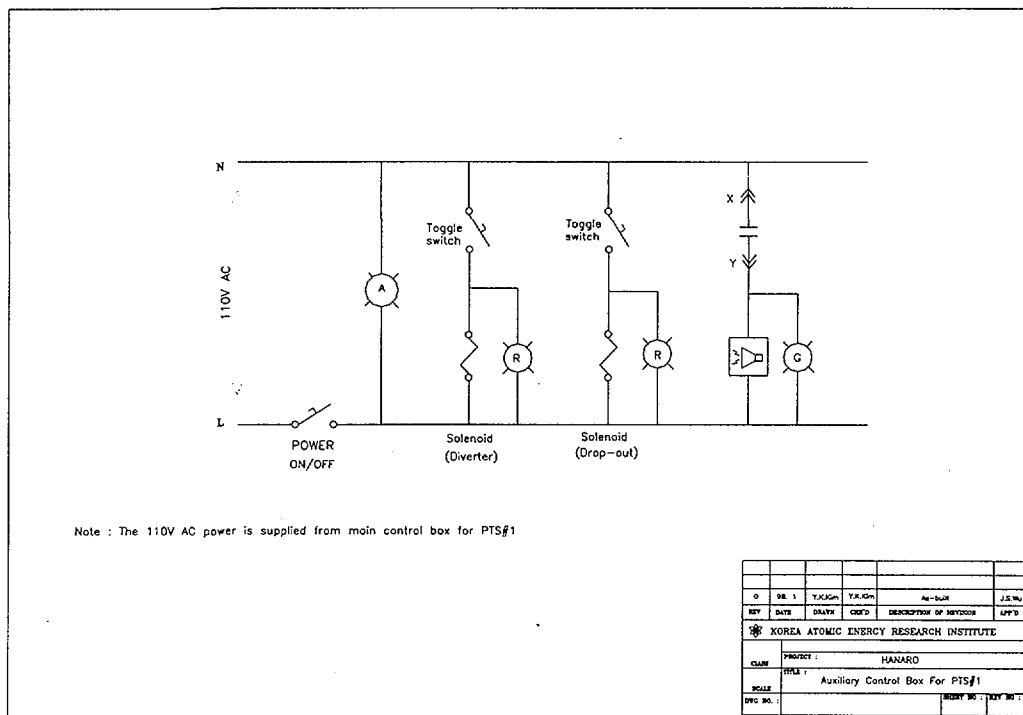


Figure 3. Electronic diagram of controller for PTS #1.

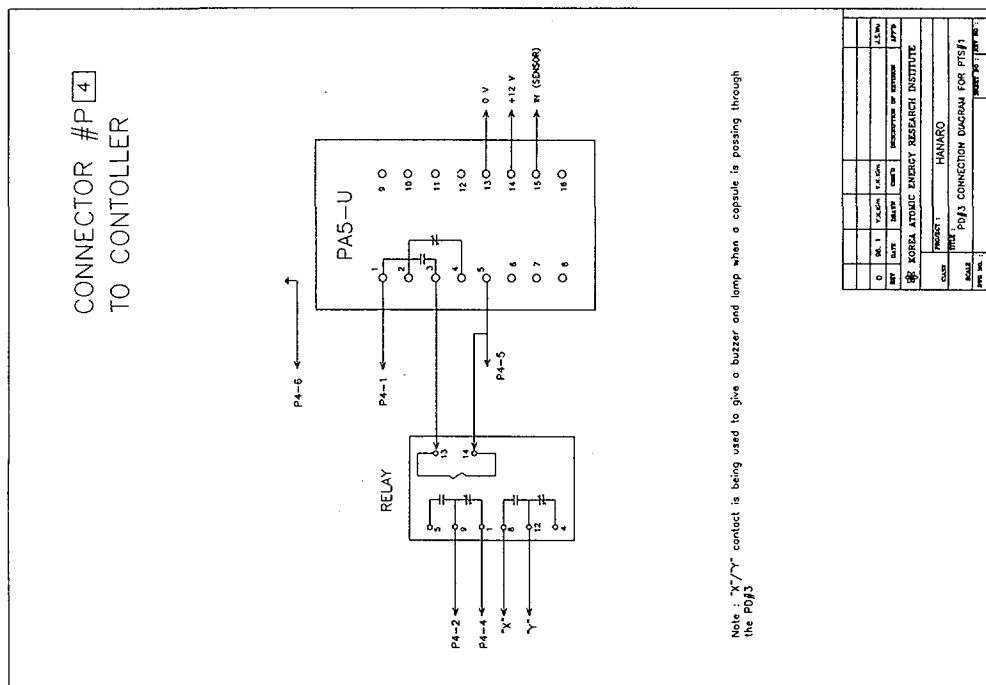


Figure 4. Connection Diagram between Photosensor and Controller for PTS #1.

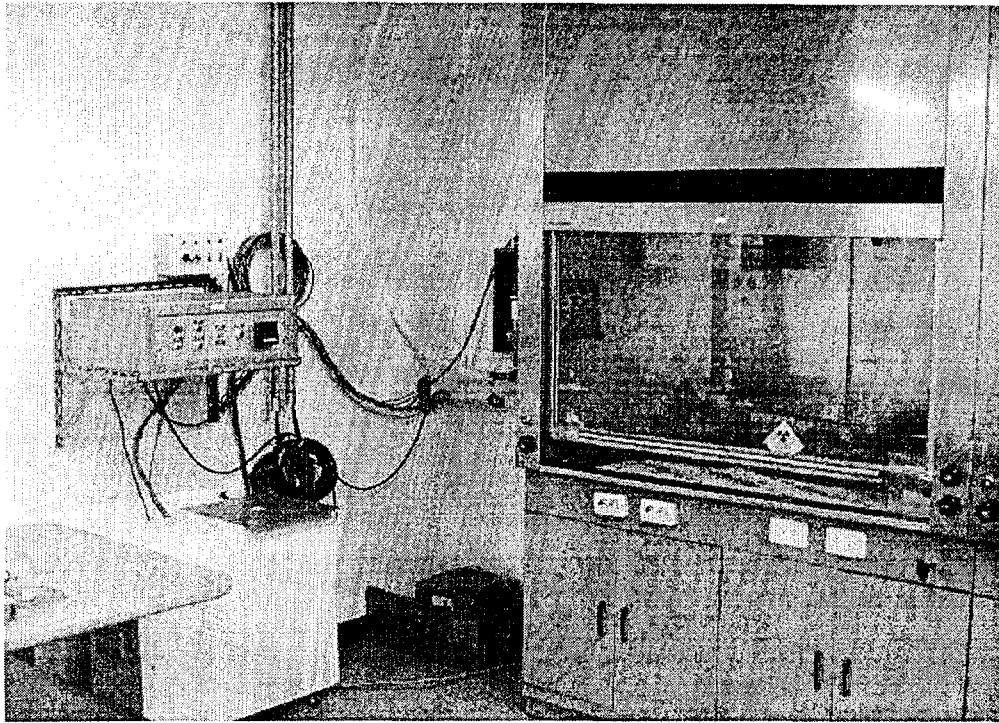


Figure 5. Photograph of PTS #1.

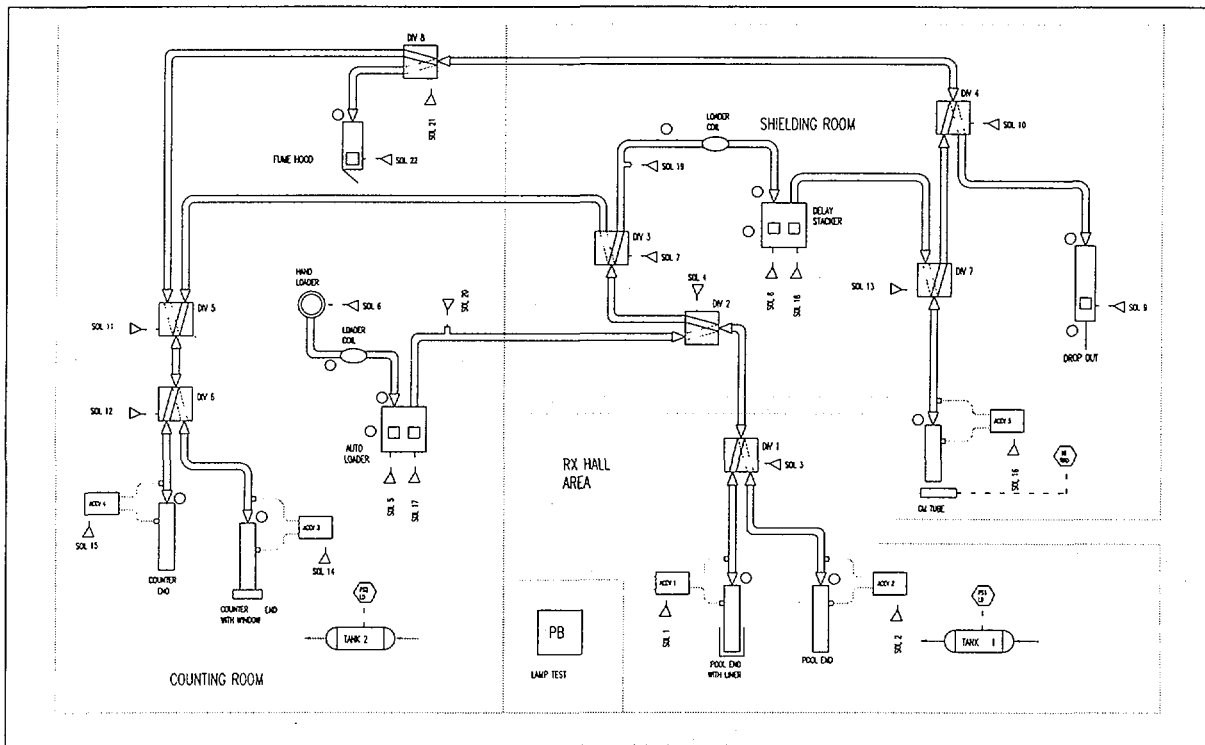


그림 8 Mimic Board 모양

Figure 6. Diagram(Mimic Board) of PTS #2.

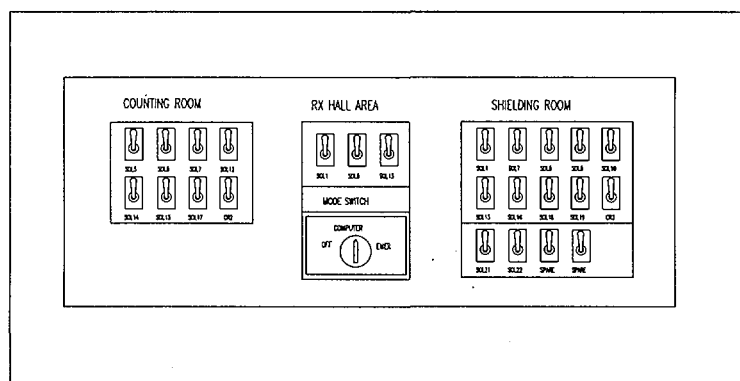


그림 9 비상 제어 스위치 반

Figure 7. Emergency Control Switch of PTS #2.

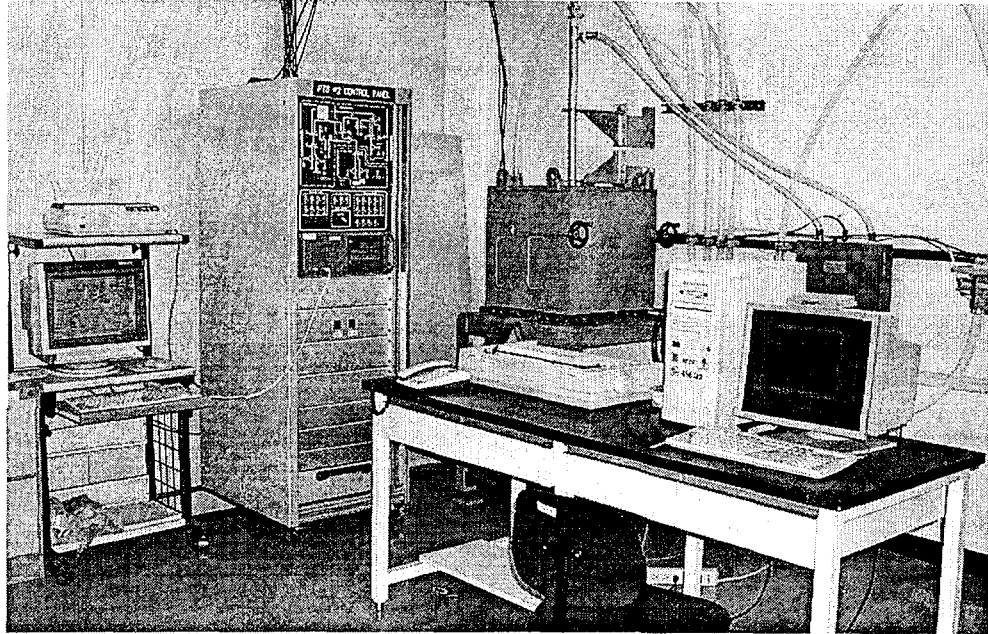


Figure 8. Photograph of PTS #2.

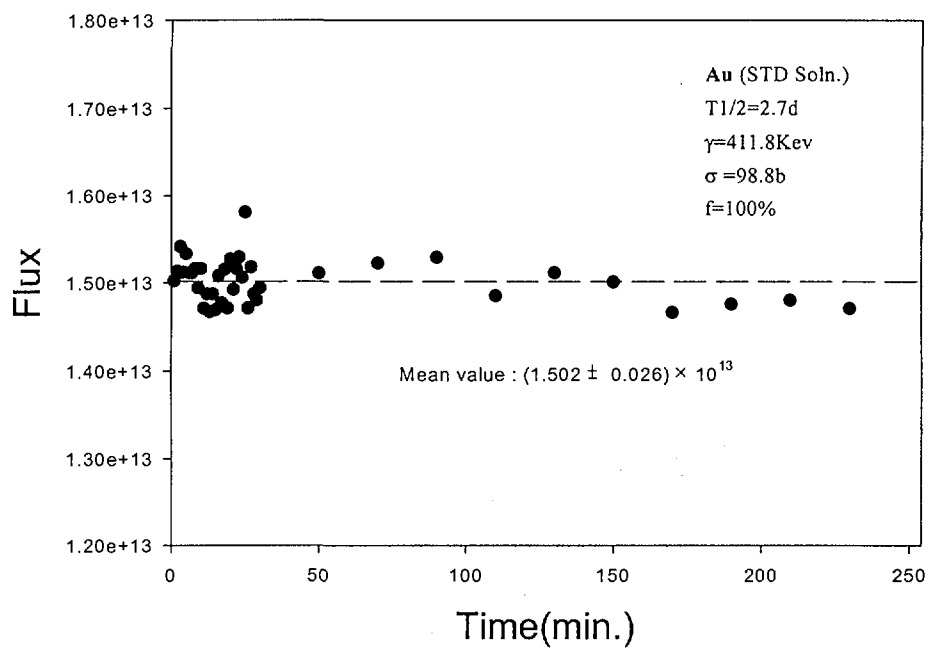
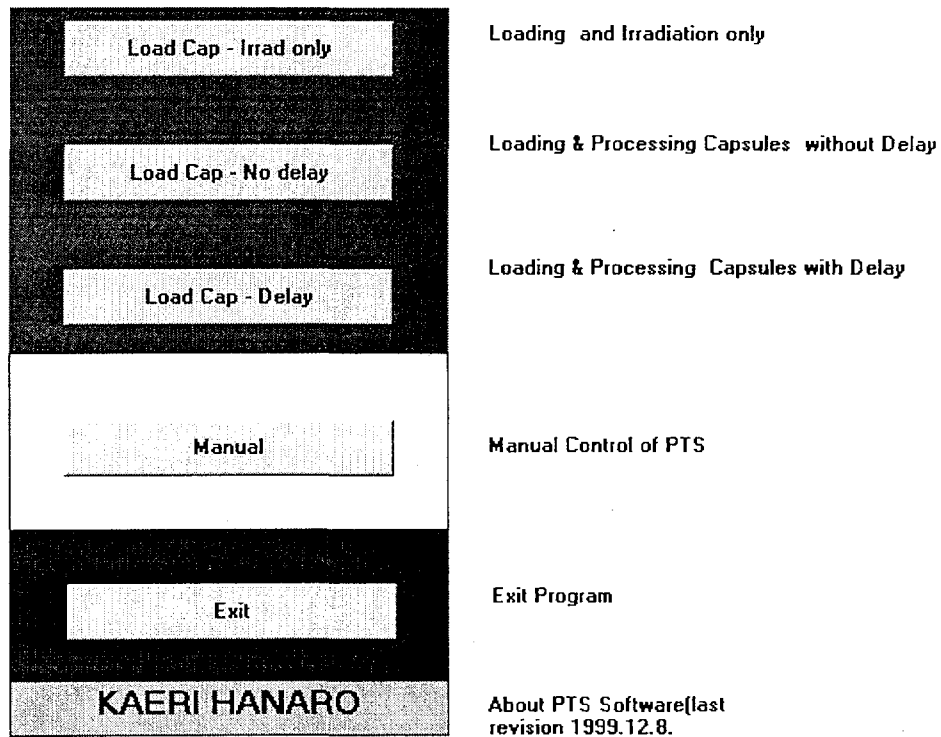


Figure 9. Thermal neutron flux monitoring of irradiation hole(NAA #1) at 20MW thermal power.

HANARO PNEUMATIC TRANSFER SYSTEM



Data
Server data transfer

그림 12 주 (MAIN) 화면

Figure 10a. Main manu of PTS #2 for computer operation.

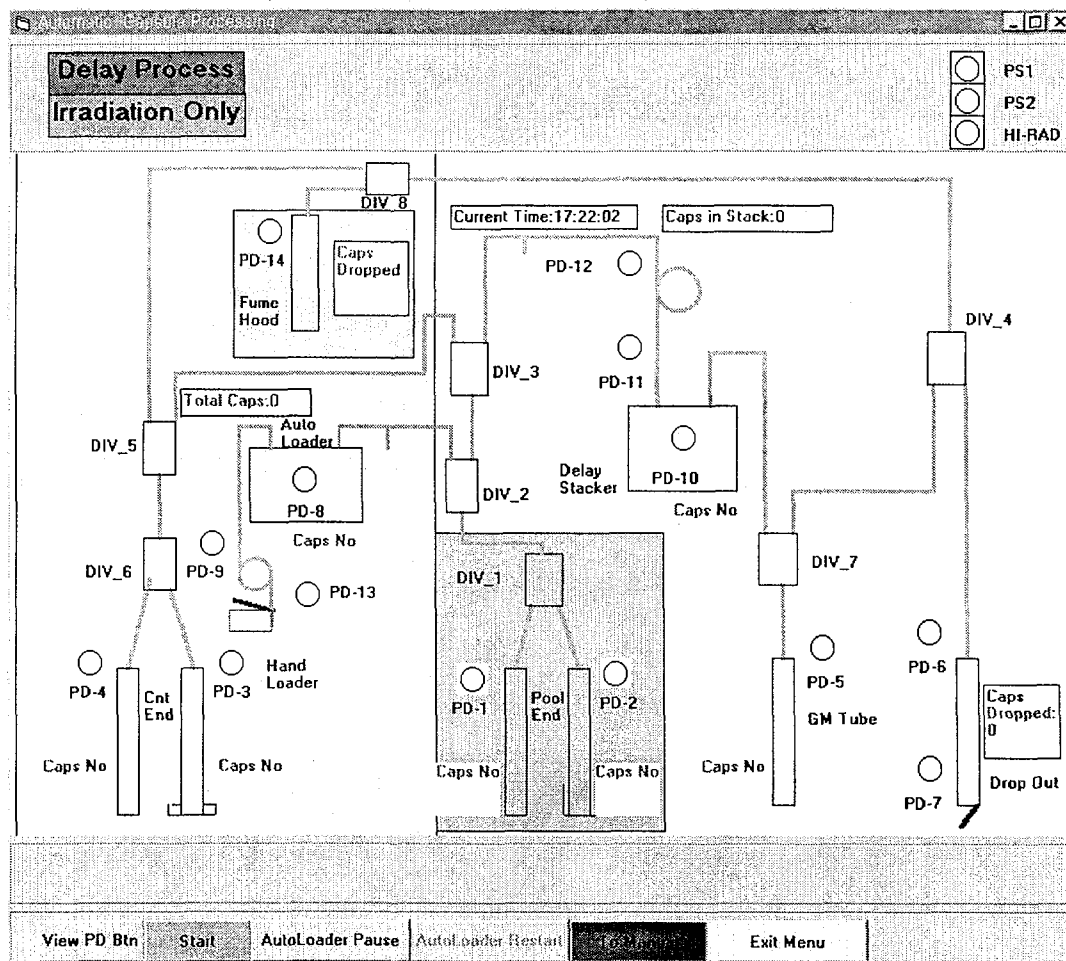


그림 13 자동운전 화면

Figure 10b. Automatic processing manu of PTS #2 for computer operation.

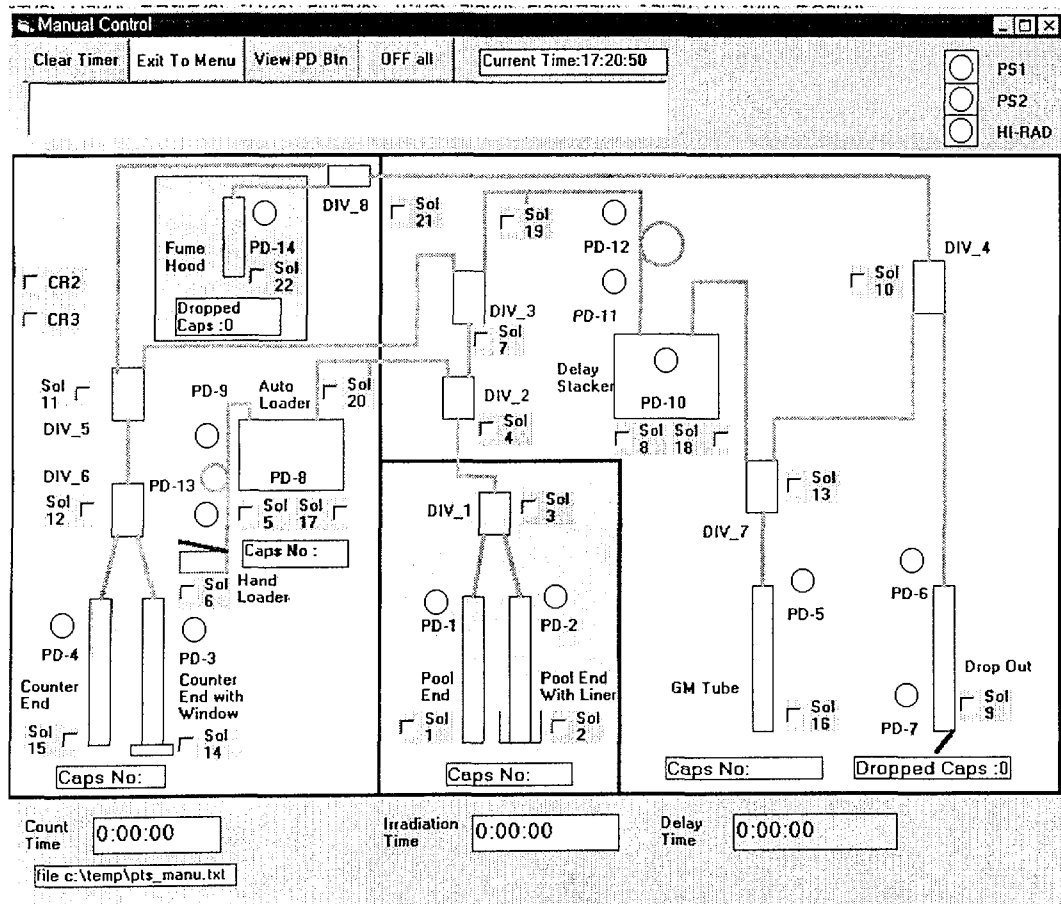


그림 14 수동(MANUAL) 제어 화면

Figure 10c. Manual processing manu of PTS #2 for computer operation.

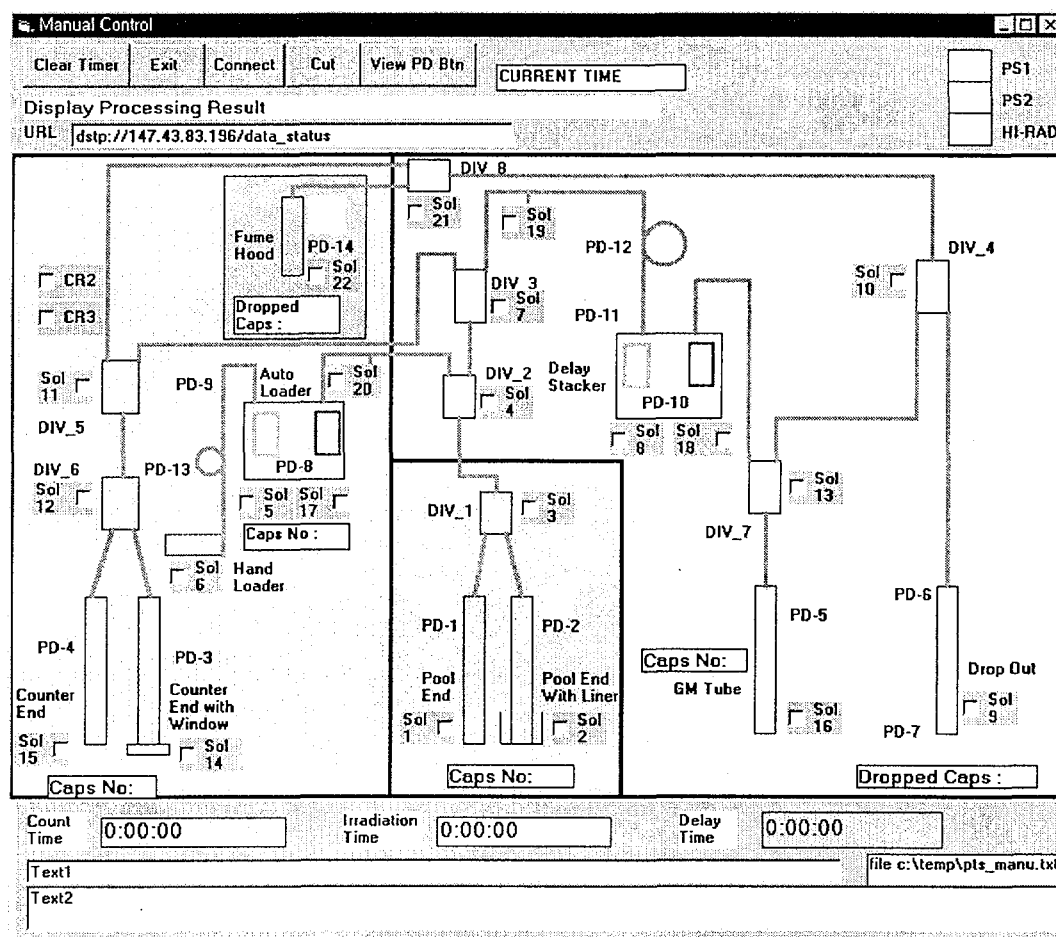


그림 15 원격 감시 화면

Figure 11. Manu for remote monitoring using available Internet.

Efficiency File Path : c:\efficiency\Wlin-4.txt

Method Selection : Absolute Method

Input Data Type : Gamma Vision's New *.RPT

Efficiency Function : Linear Fit with Knee Value

Detection Limit : Currie Limit

4.00

1.7000E+13

Search for Nuclides by File ? ☐ YES ☒ NO

Searching Nuclides

Shelf Number 

Print Output ? ☐

Sample Code :
Sample Description :
Efficiency Code :
Analyst : Date : 1999-
Detector Type : Oxford

ANALYTICAL RESULTS

Absolute Method, Efficiency Function : Linear Fit with Knee Value

End of Irradiation : 1999-10-29 12- 0- 0
When Counted : 1999-10-30 15-46- 8

Slot # 5 Used to Count Sample

NEUTRON FLUX : 1.7000E+13 n/(cm²*sec)
IRRADIATION TIME : 4.00 H
SAMPLE WEIGHT : 3.0000E-3 mg
DETECTION LIMIT : Currie Limit

REAL TIME (31000.90 s), LIVE TIME (30000.70 s), DEAD TIME (3.23 %)

COOLING TIME : 1666.13 Min. (27.77 Hour, 1.16 Day)

NUCLIDE	Half Life	GAMMA	DPS at IRR	WGT in mg	Conc.-PPM	DET LIMIT	S/N	ERR %	GROSS	NET
Cd-109	461.900 D	88.0	1.606E+3	4.321E+2	1.440E+11	1.413E+9	7.08	1.74	4527	3967
Co-57	271.800 D	122.1	1.500E+1	1.214E-2	4.046E+6	7.712E+4	3.68	2.72	2574	2024
Co-60	5.270 Y	1173.2	3.036E+2	4.661E-2	1.554E+7	5.120E+4	33.28	1.20	7713	7488

Figure 12. Main manu of Labview program for INAA.

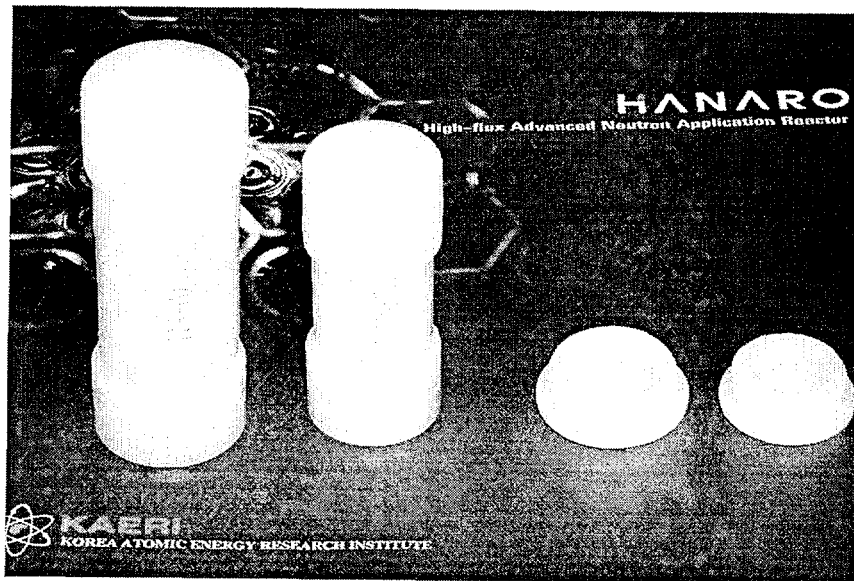


Figure 13. Shape and description of irradiation capsules for PTS.

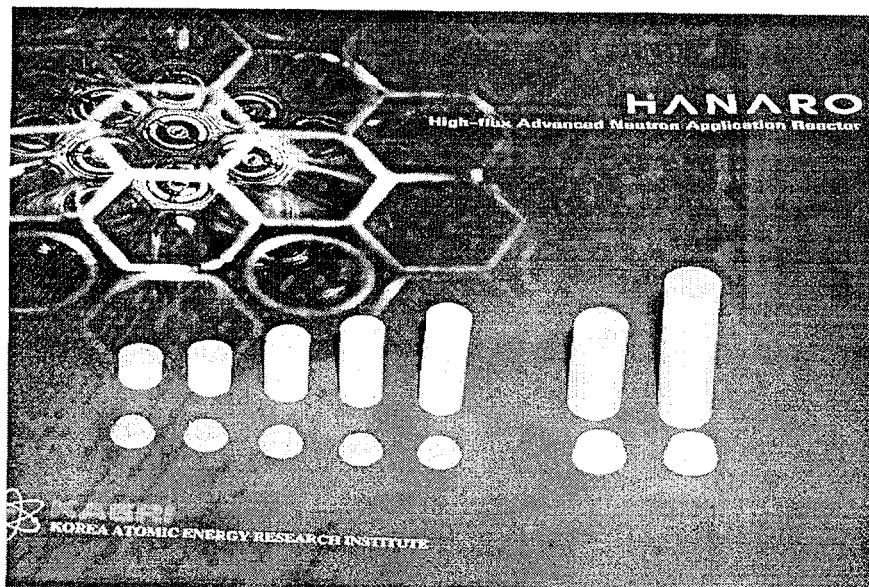


Figure 14. Shape and description of irradiation sample capsules.

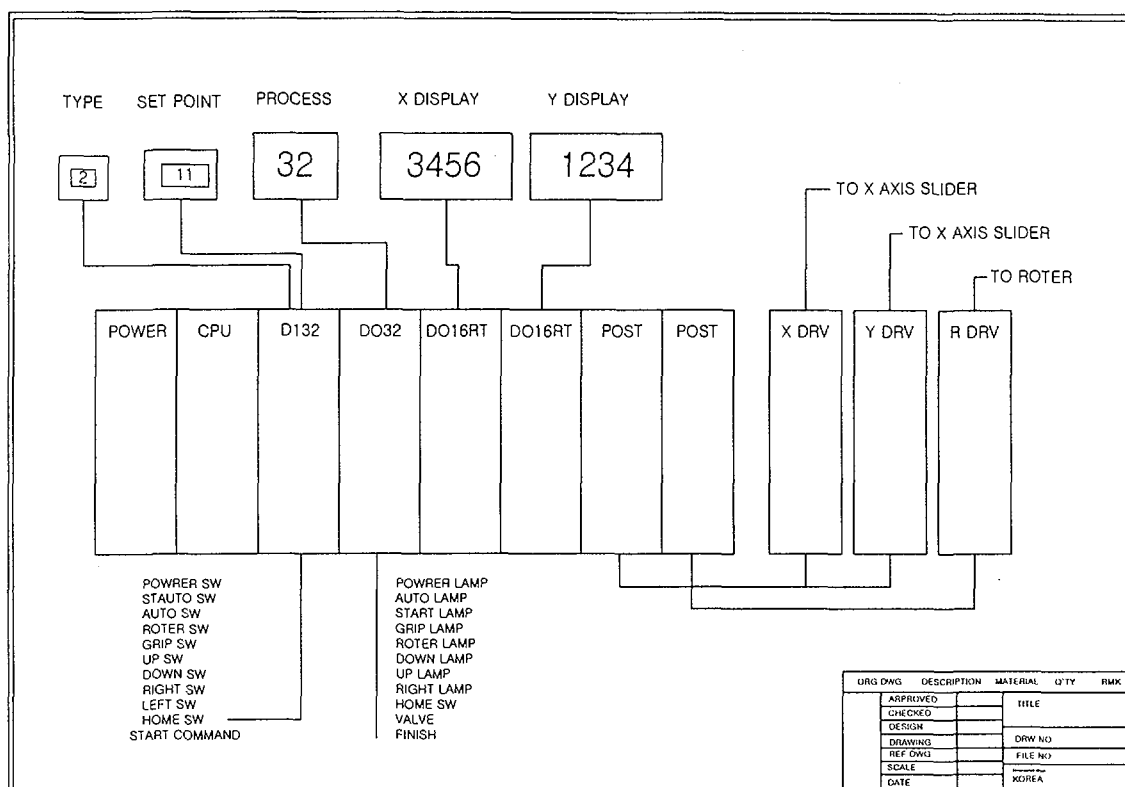


Figure 15a. Schematic diagrams of Automatic Sample Changer.

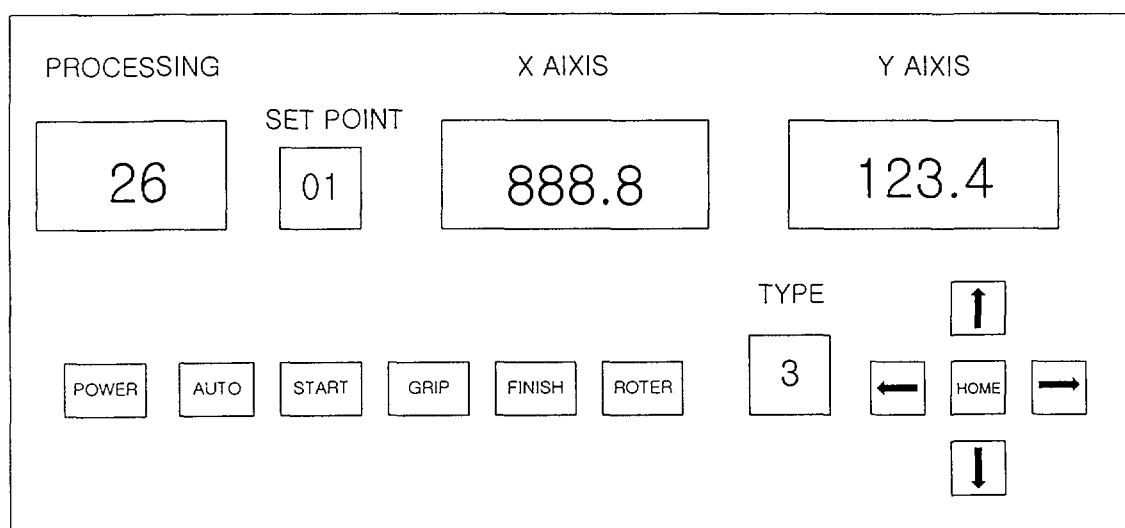


Figure 15b. Control panel of Automatic Sample Changer

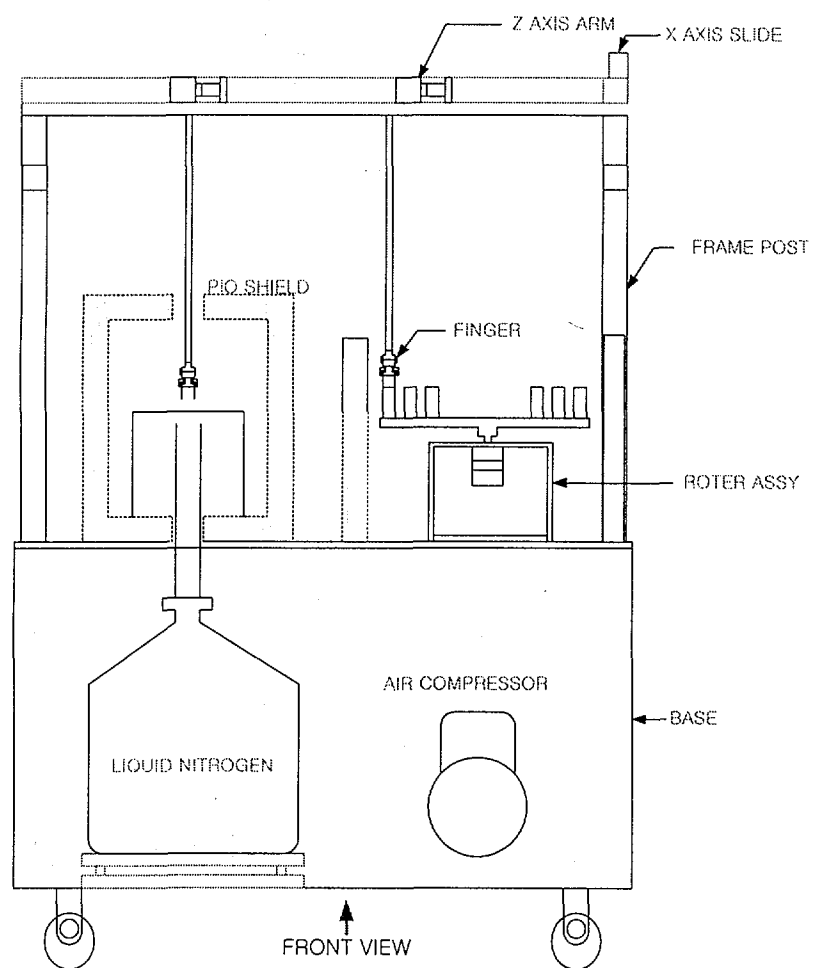


Figure 15c. Layout of Automatic Sample Changer.

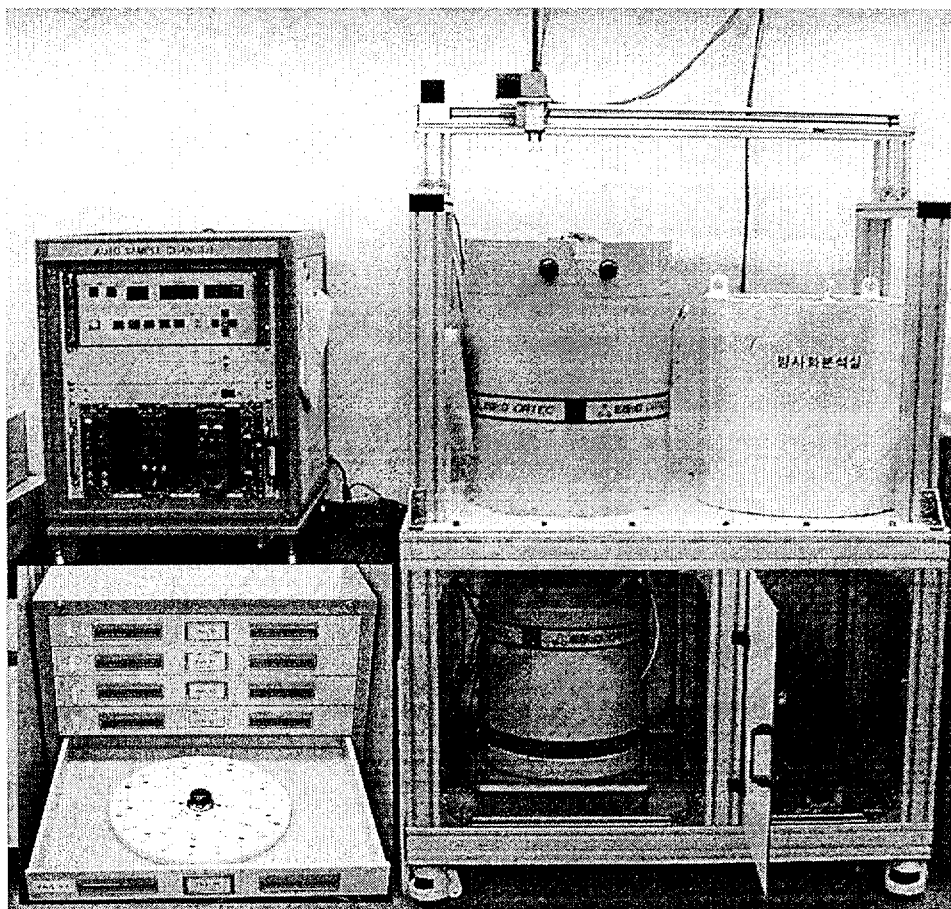


Figure 16. Sample loaders and Automatic Sample Changer for INAA.

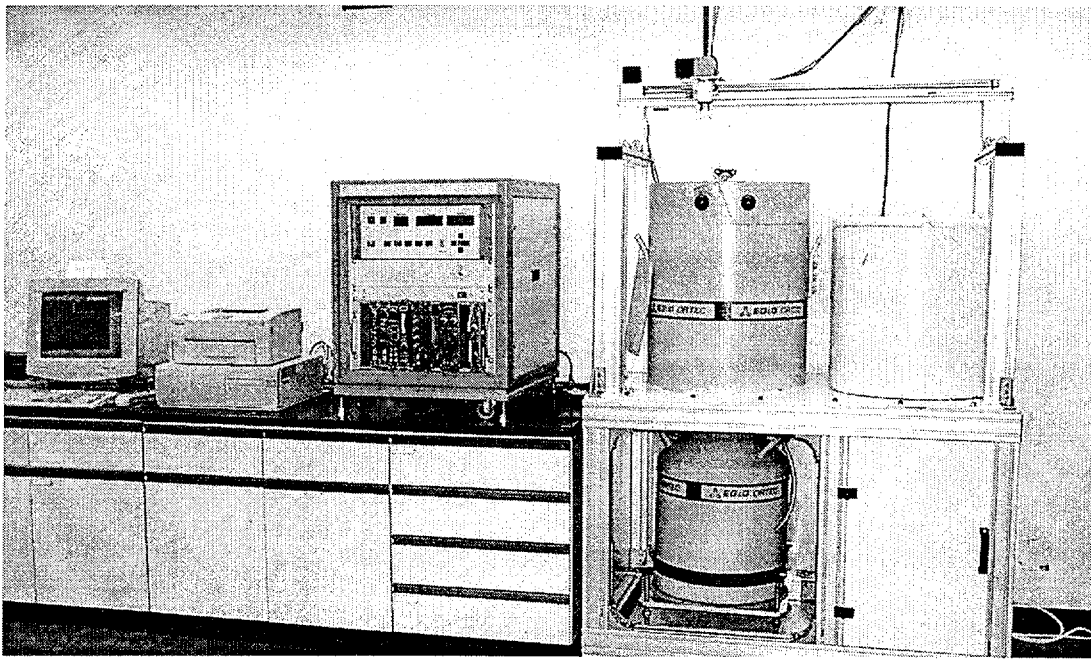


Figure 17. Gamma-Ray spectrometry system for INAA.

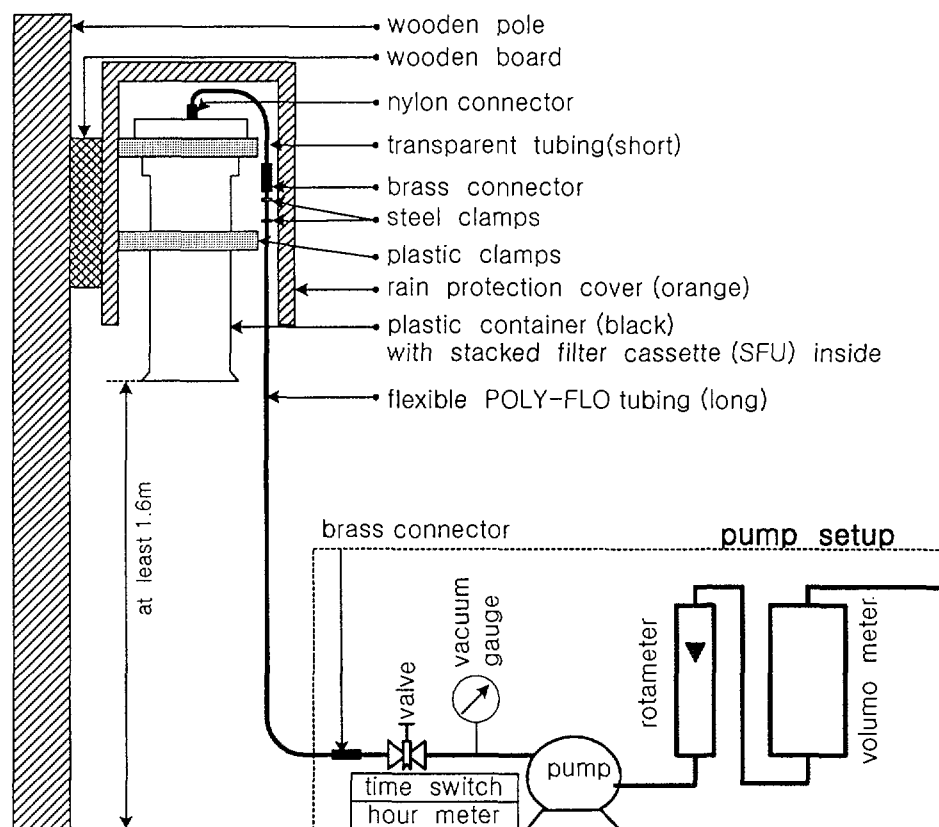


Figure 18. Schematic diagram of the SFU sampling line.

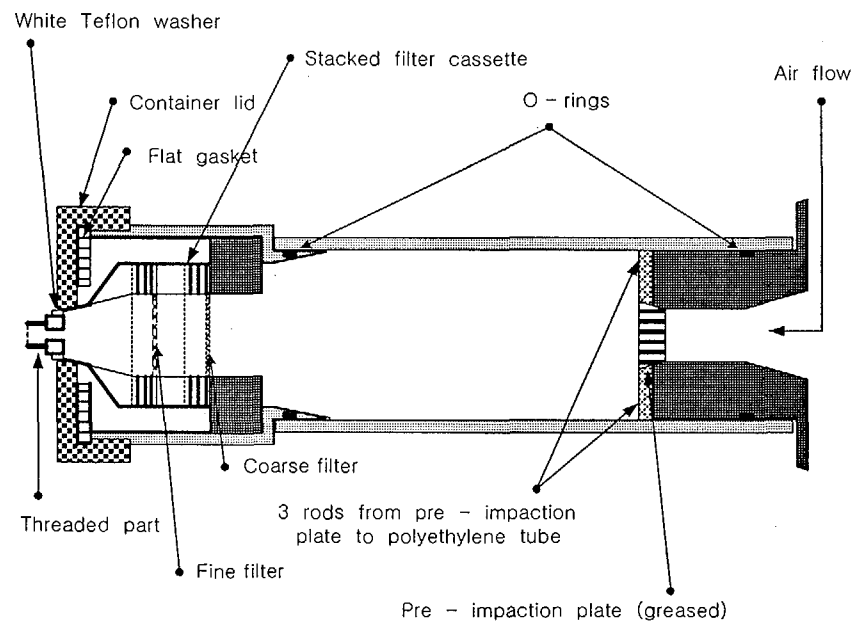


Figure 19. Blown-up view of the black polyethylene container with a stacked filter cassette inside.



Figure 20. Stein Smoke Reflectometer for measurement of black carbon.

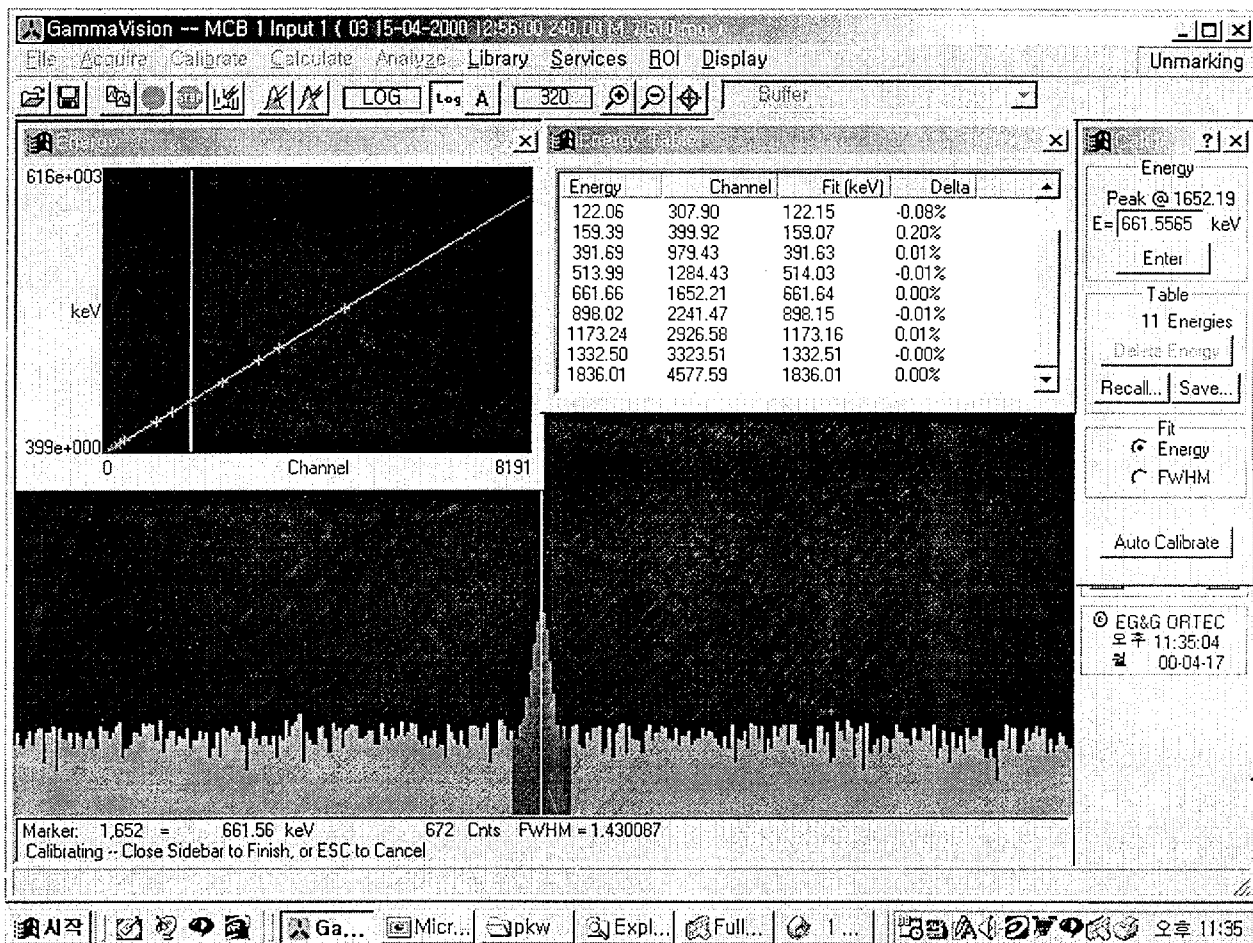


Figure 21. Energy calibration of gamma-ray spectrometric system.

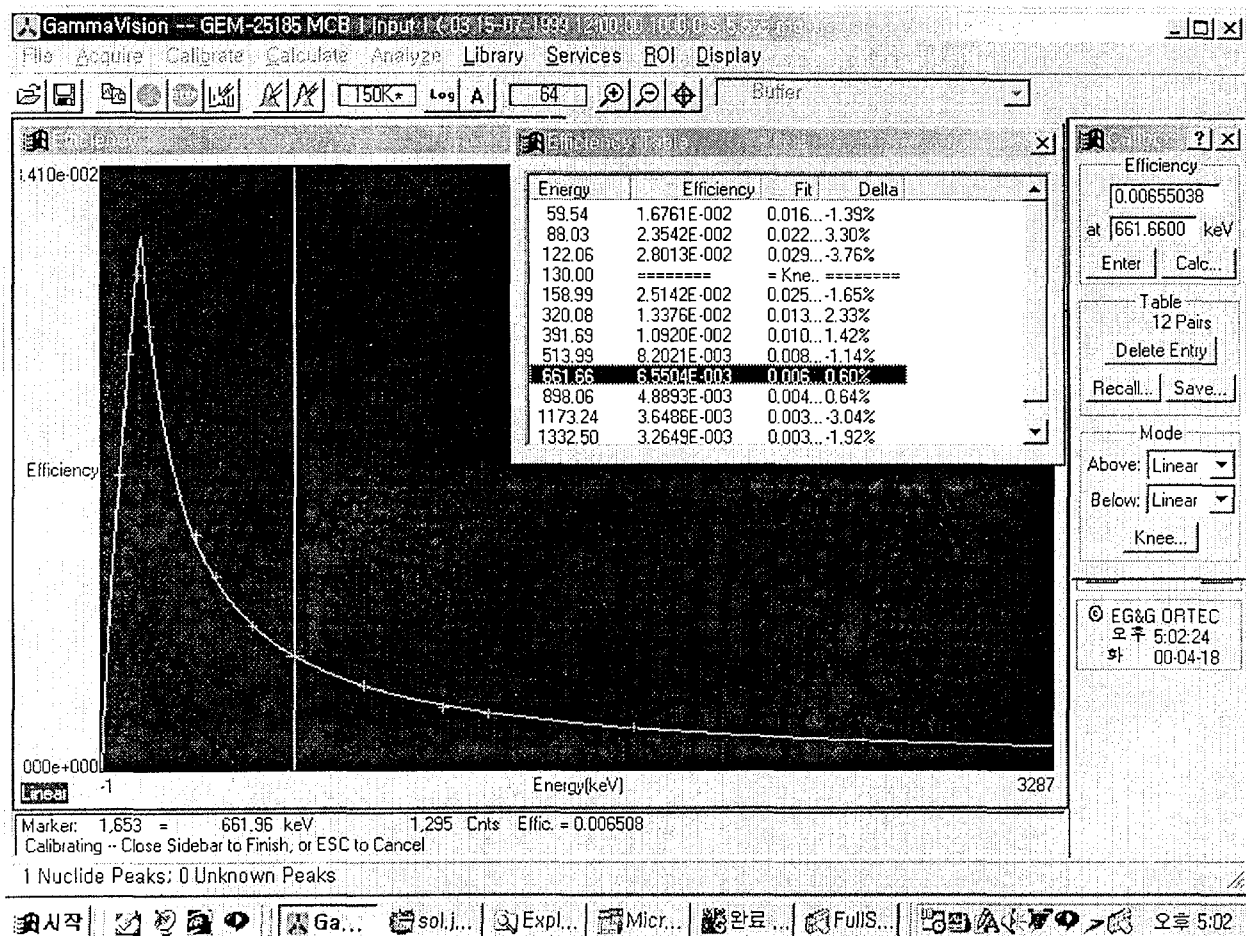


Figure 22. Efficiency Calibration of Gamma-Ray Spectrometric System.

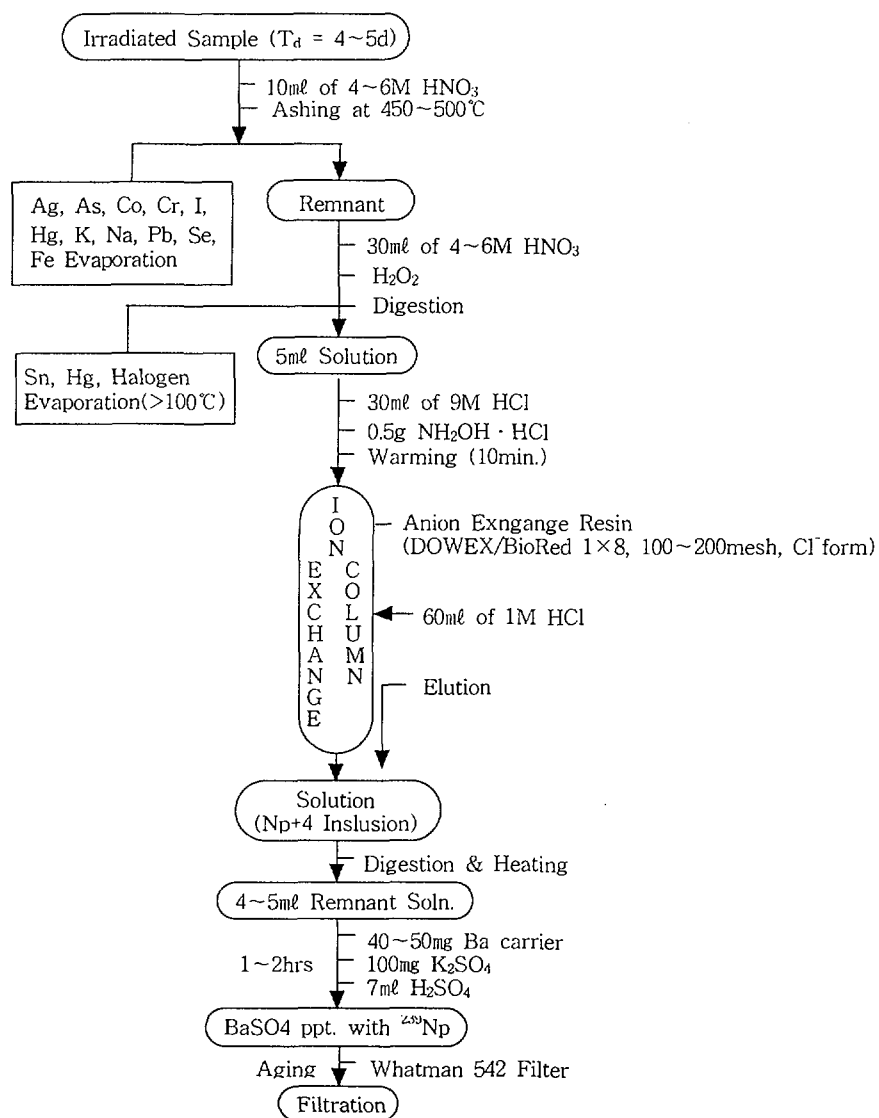


Figure 23. Radiochemical separation scheme for the determination of $U(^{239}Np)$.

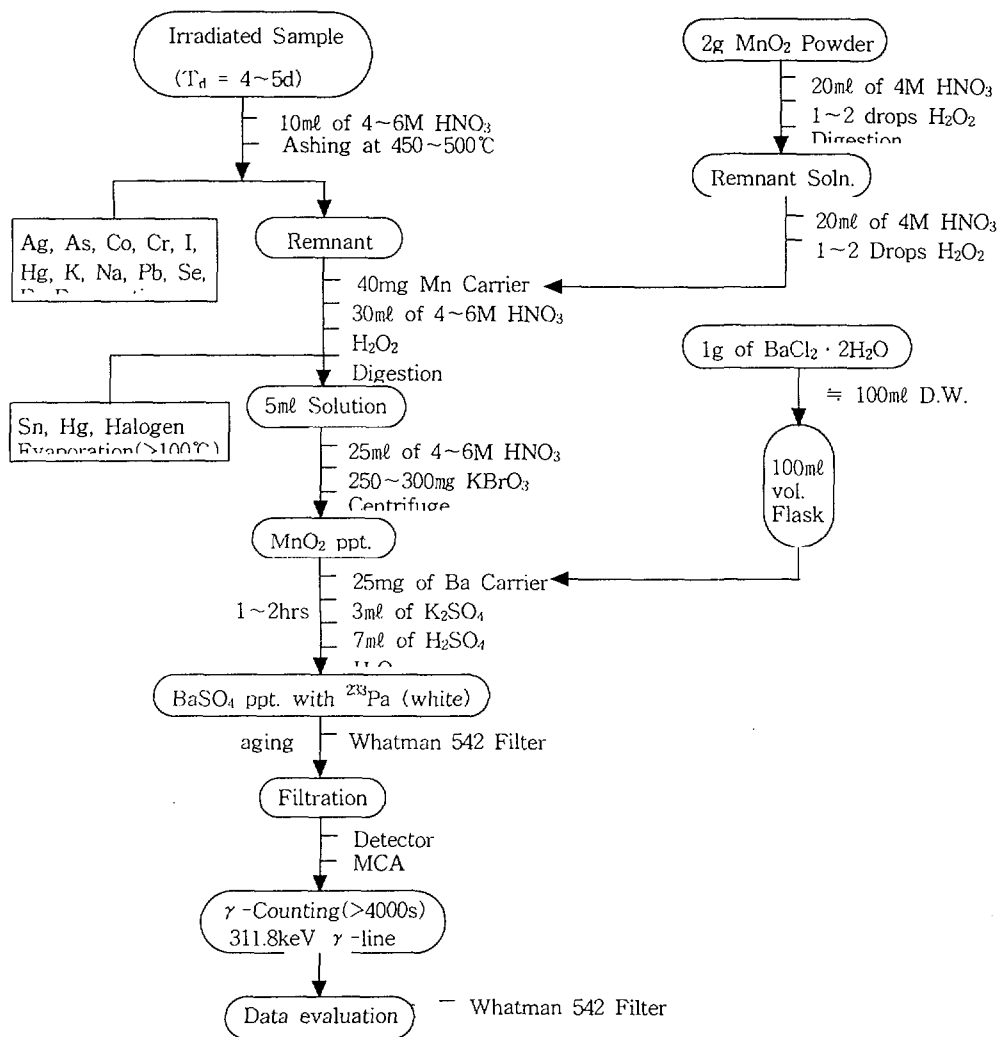
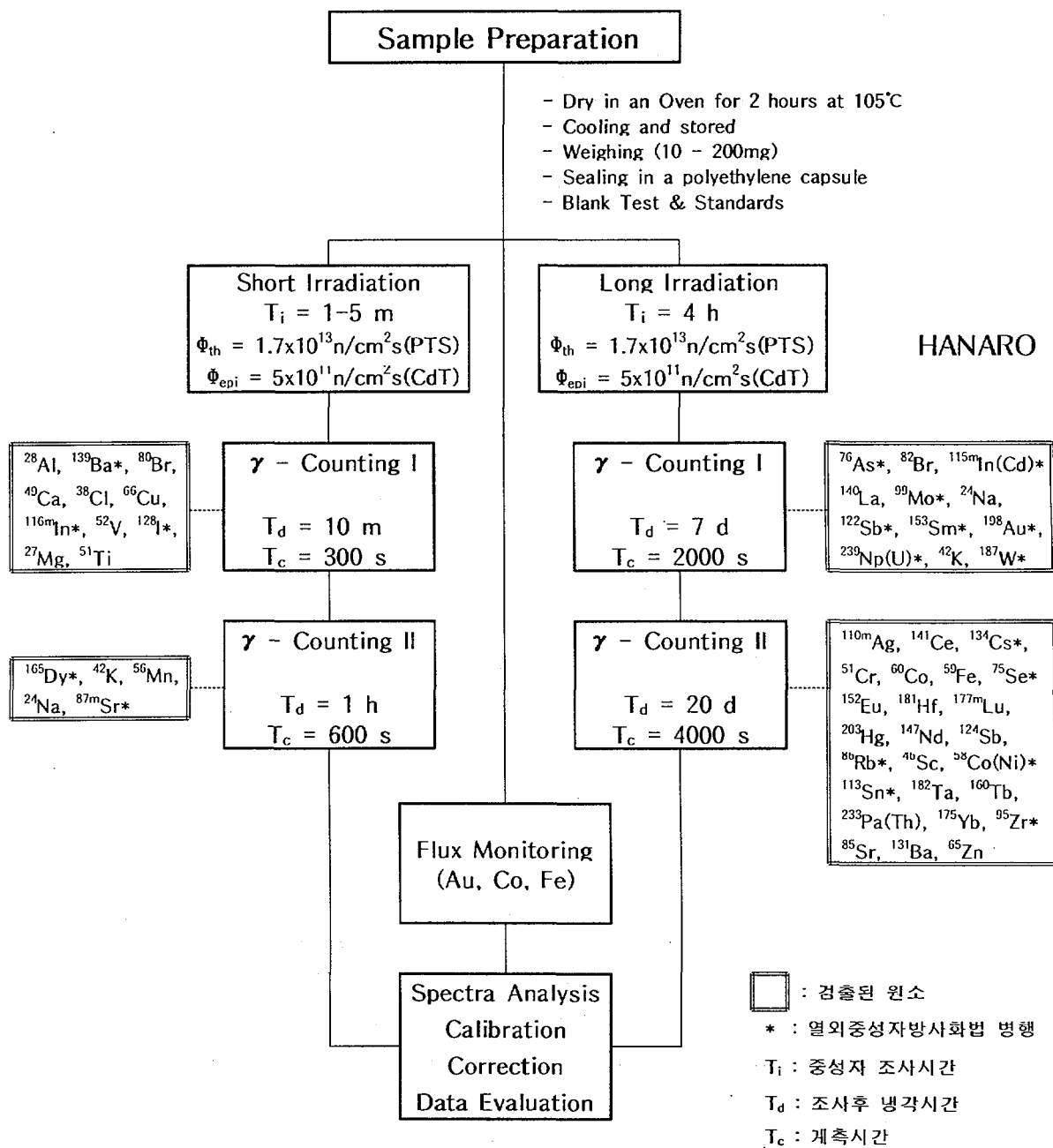


Figure 24. Radiochemical separation scheme for the determination of Th(^{233}Pa).



Flux Monitoring
(Au, Co, Fe)

Spectra Analysis
Calibration
Correction
Data Evaluation

: 검출된 원소

* : 열외중성자방사화법 병행

T_i : 중성자 조사시간

T_d : 조사후 냉각시간

T_c : 계측시간

Figure 25. Diagram of analytical procedure for APM sample by INAA.

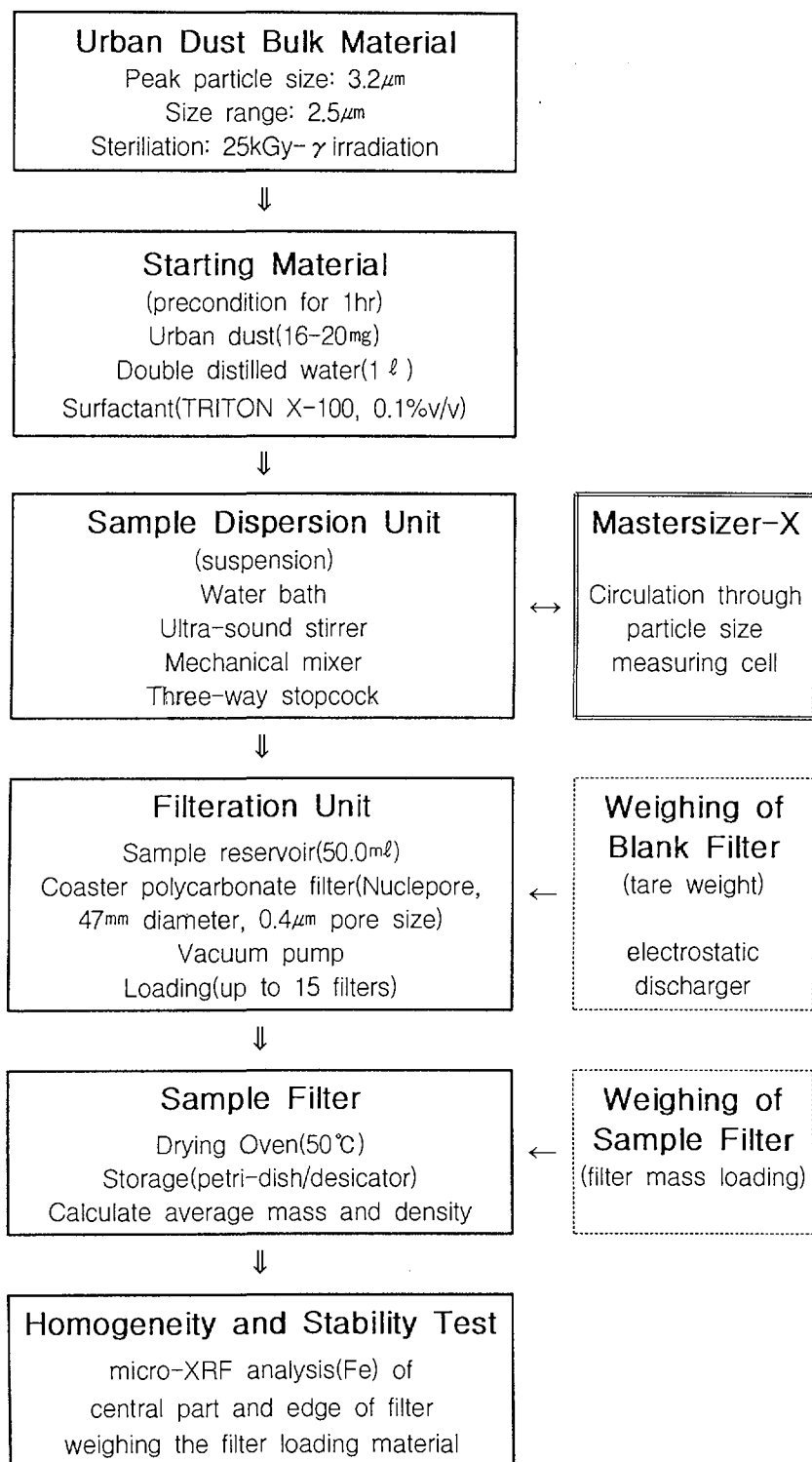


Figure 26. The loading process of dust sample on the filter.

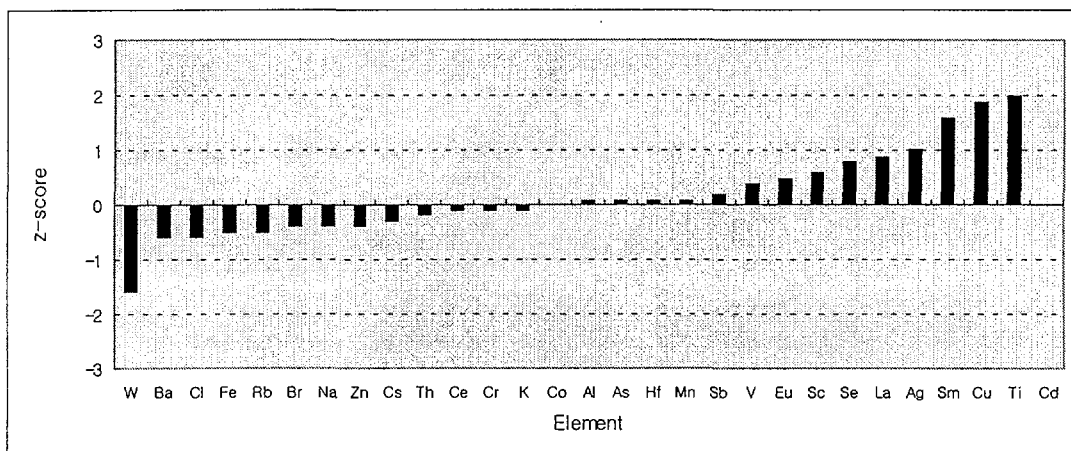


Figure 27. Graphical presentation of z-score for the measurand in urban dust.

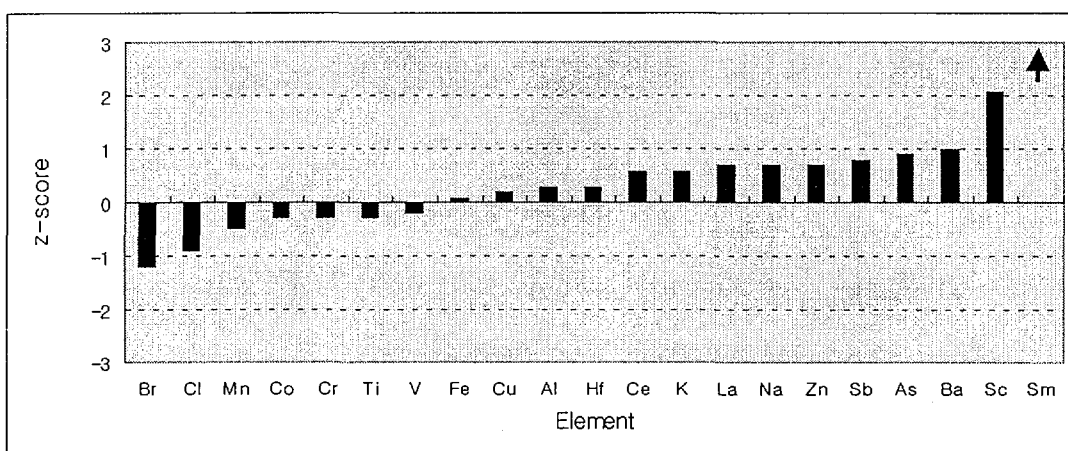


Figure 28. Graphical presentation of z-score for the measurand in loaded filter.

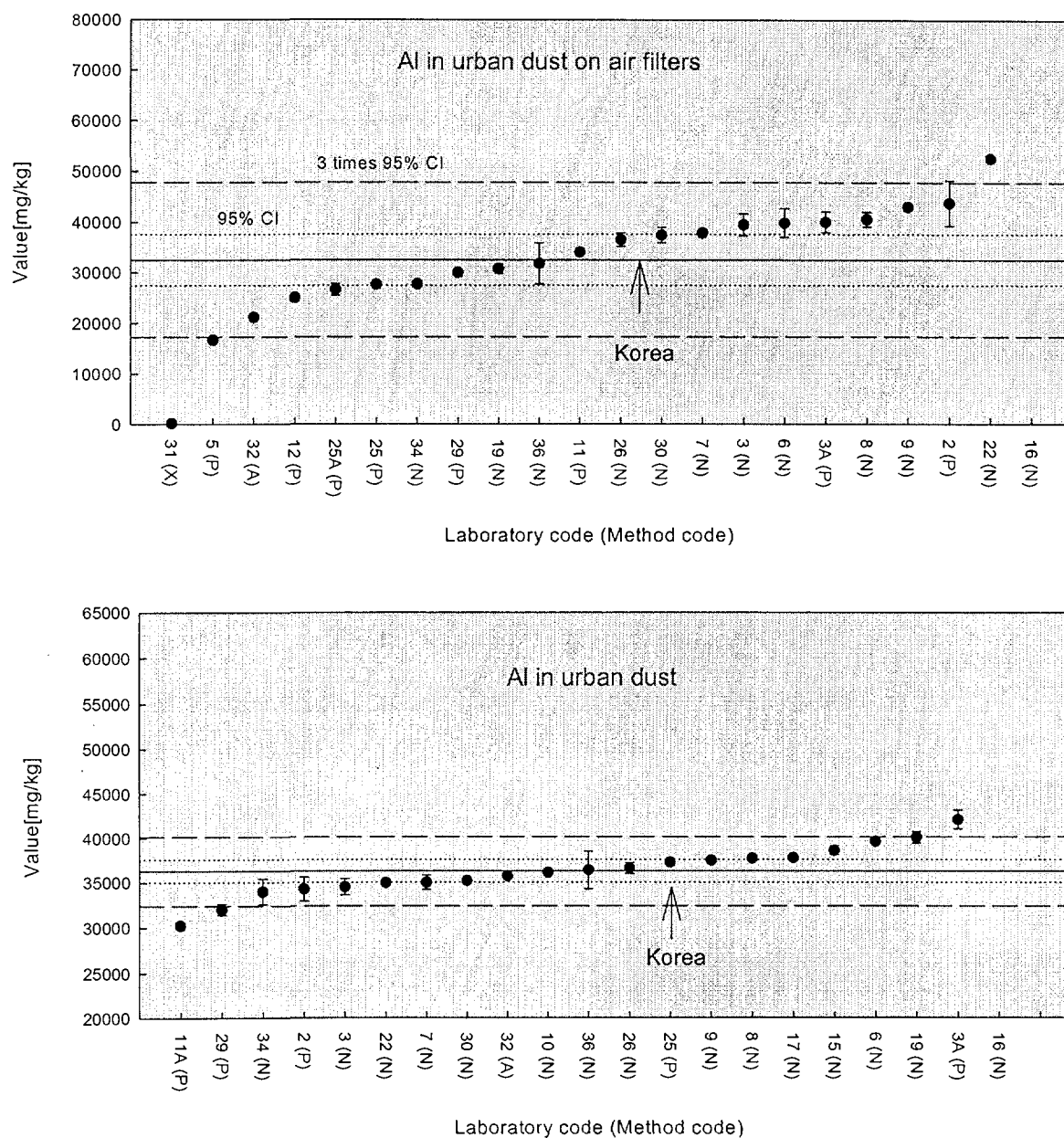


Figure. 29 Data intercomparison by statical evaluation for Al in urban dust on air filters and in urban dust.

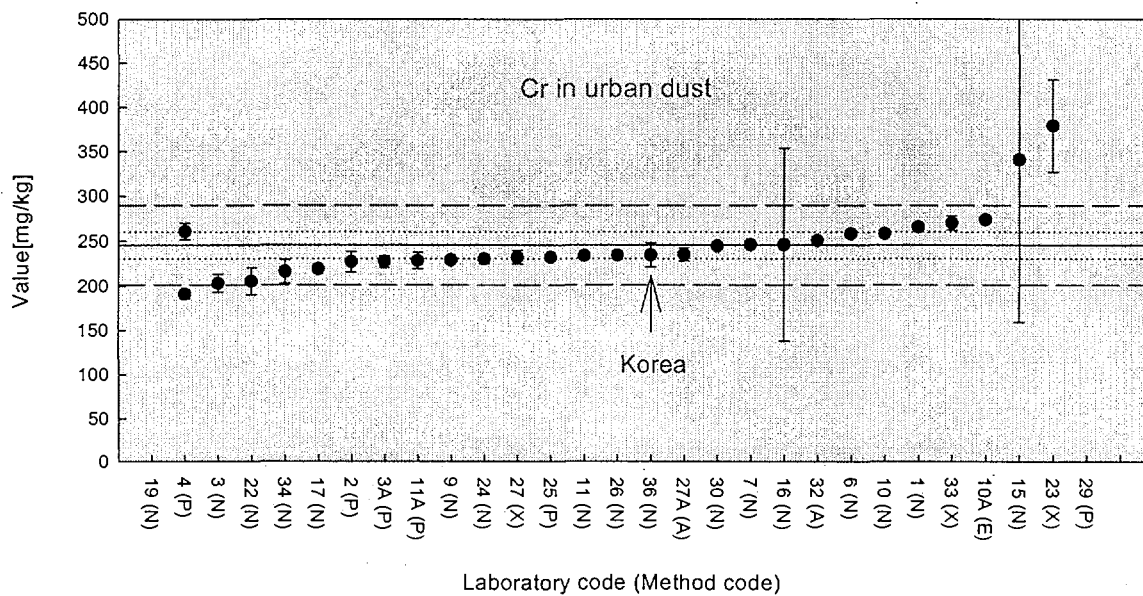
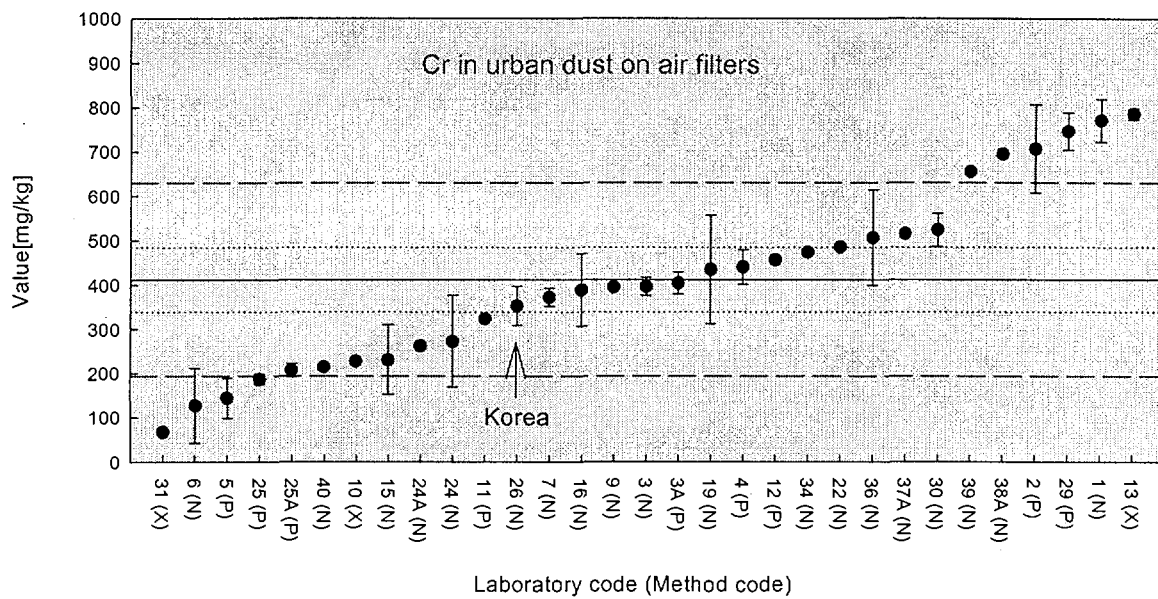


Figure 30. Data intercomparison by statical evaluation for Cr in urban dust on air filters and in urban dust.

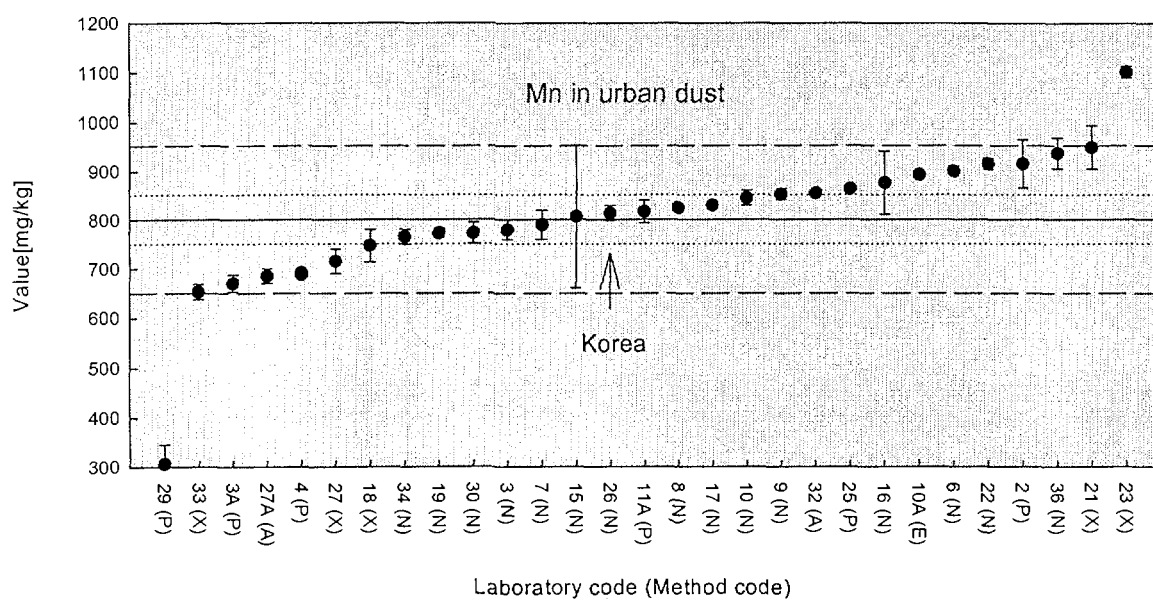
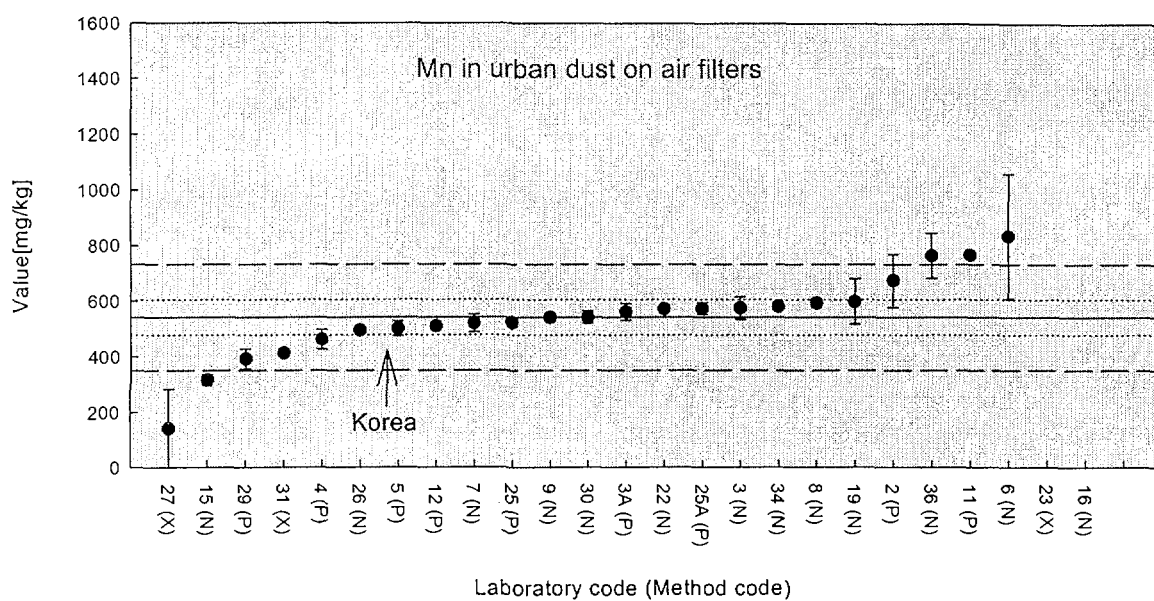


Figure 31. Data intercomparison by statical evaluation for Mn in urban dust on air filters and in urban dust.

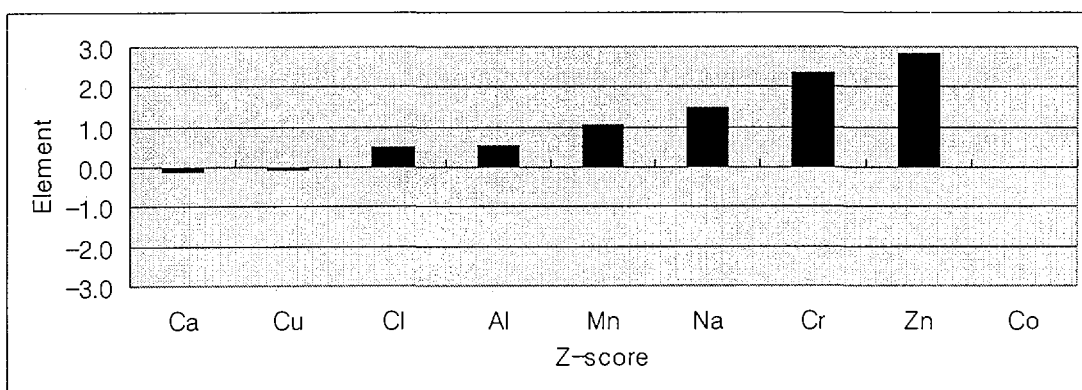


Figure 32. Graphical presentation of z-score for the measurand in IAEA-0391.

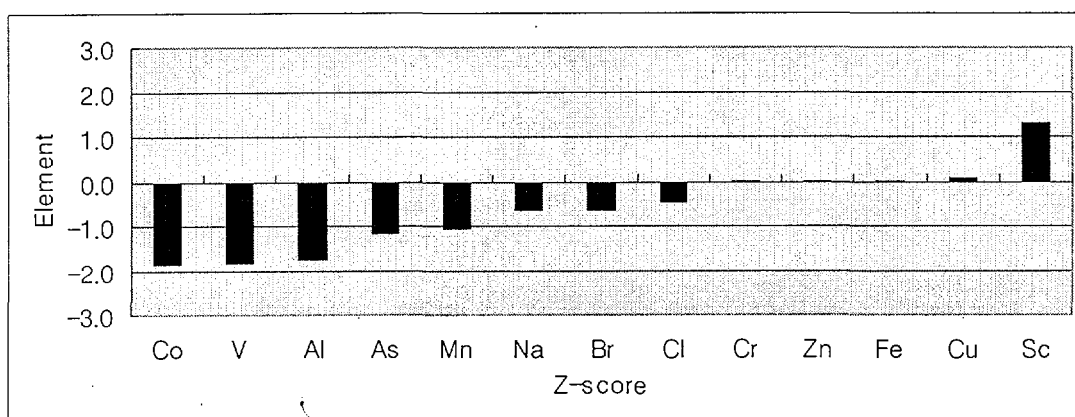


Figure 33. Graphical presentation of z-score for the measurand in IAEA-0392.

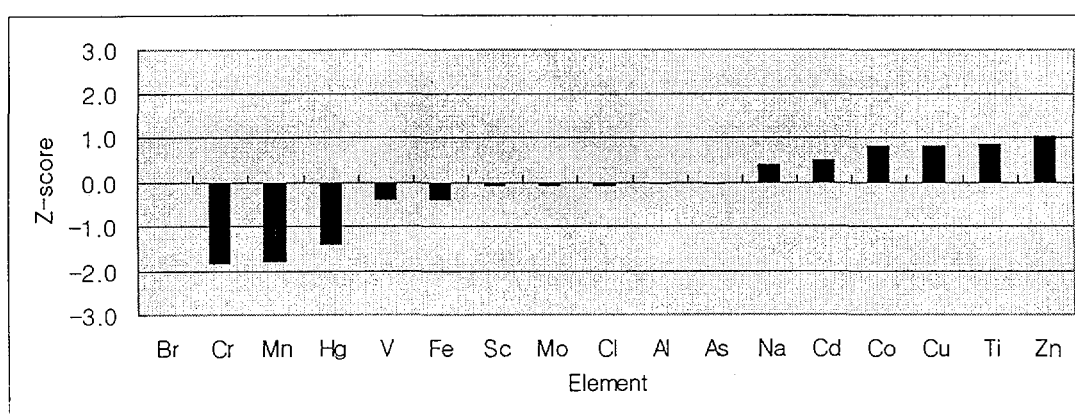


Figure 34. Graphical presentation of z-score for the measurand in IAEA-0393.

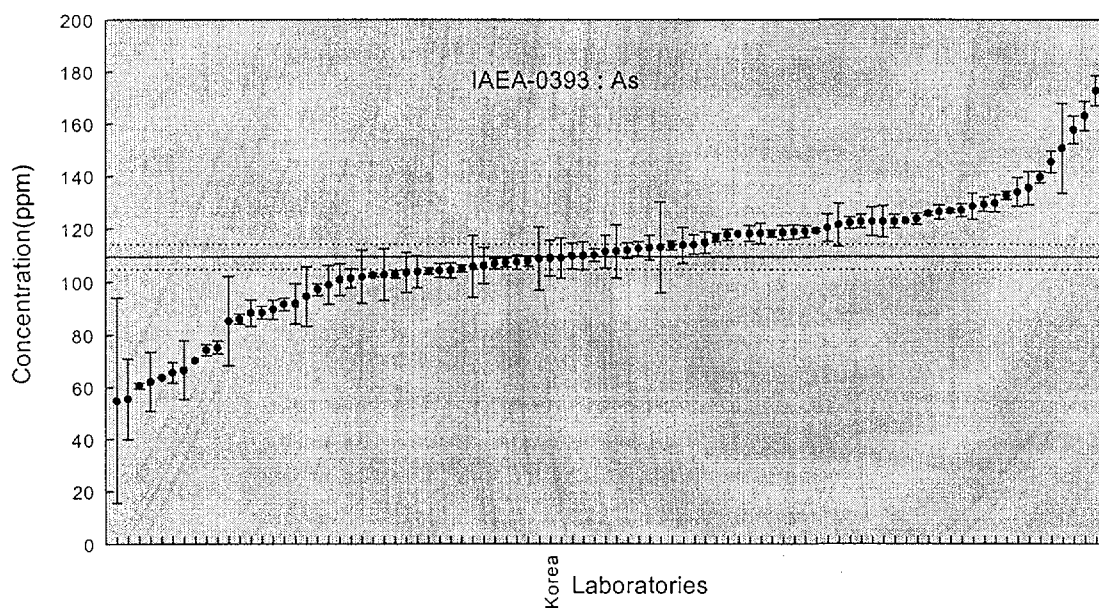
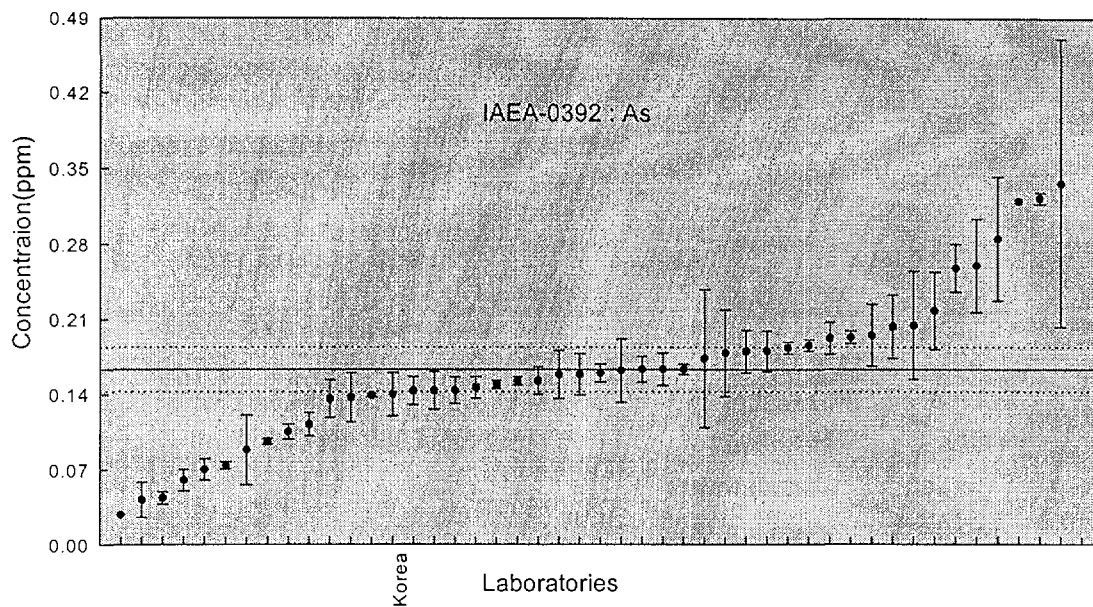


Figure 35. Data intercompatison by statistically evaluation for As of IAEA-0392, IAEA-0393.

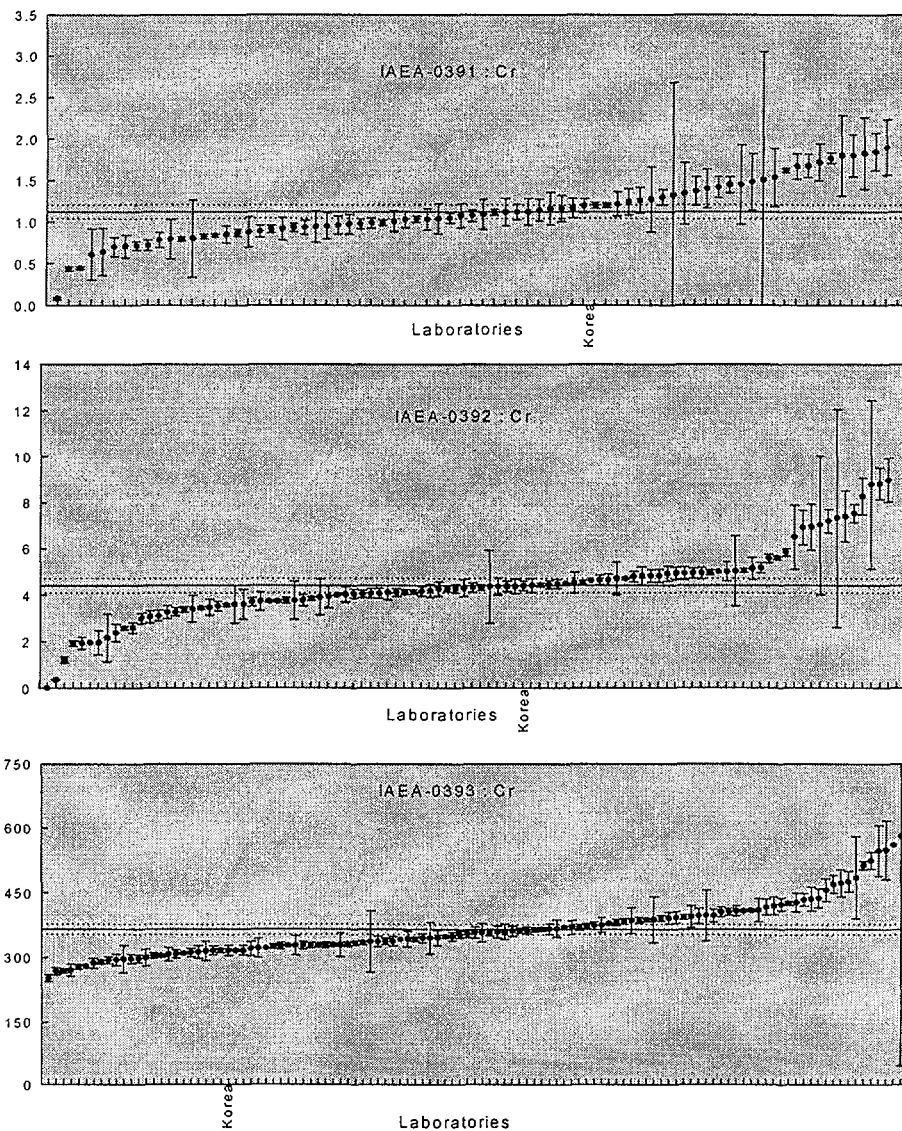


Figure 36. Data intercomparison by statistically evaluation for Cr of IAEA-0391, IAEA-0392, IAEA-0393.

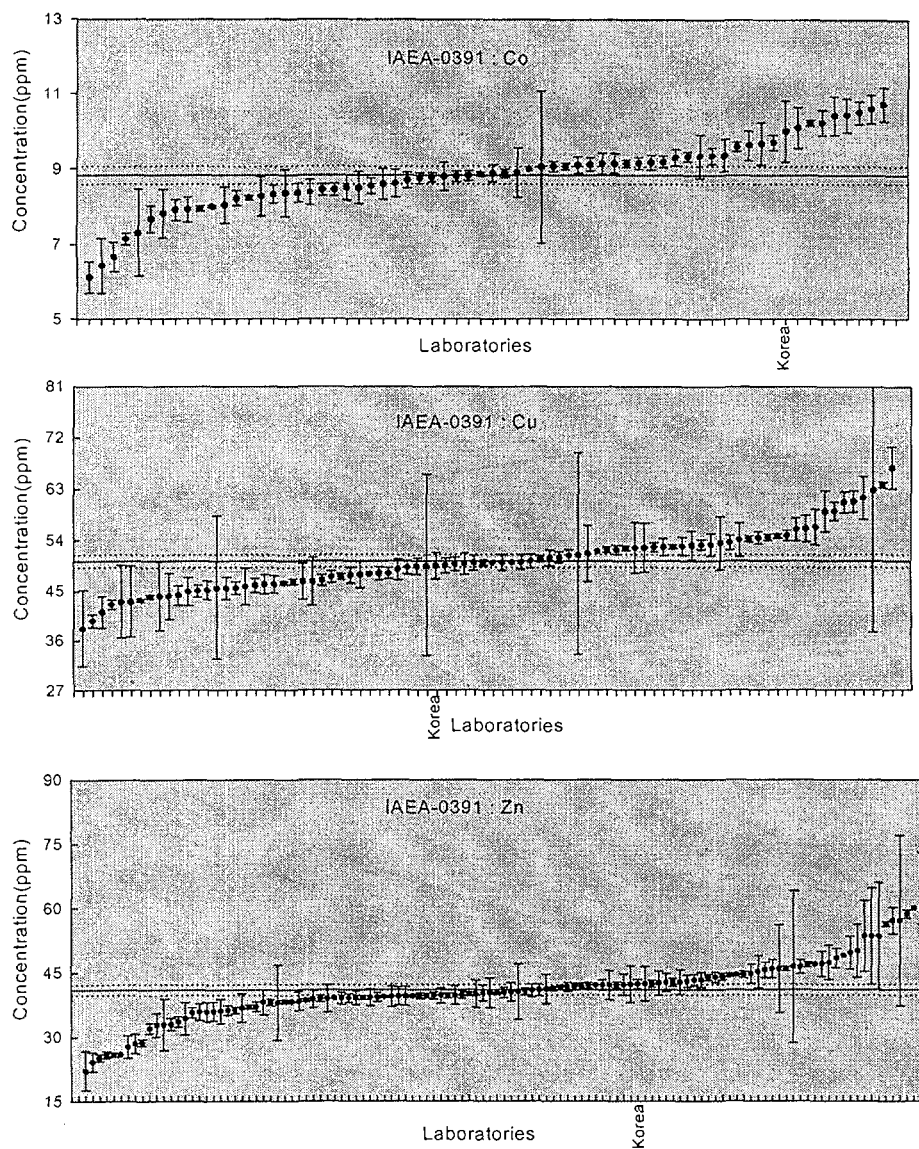


Figure 37. Data intercomparison by statistically evaluation for Co, Cu, Zn of IAEA-0391.

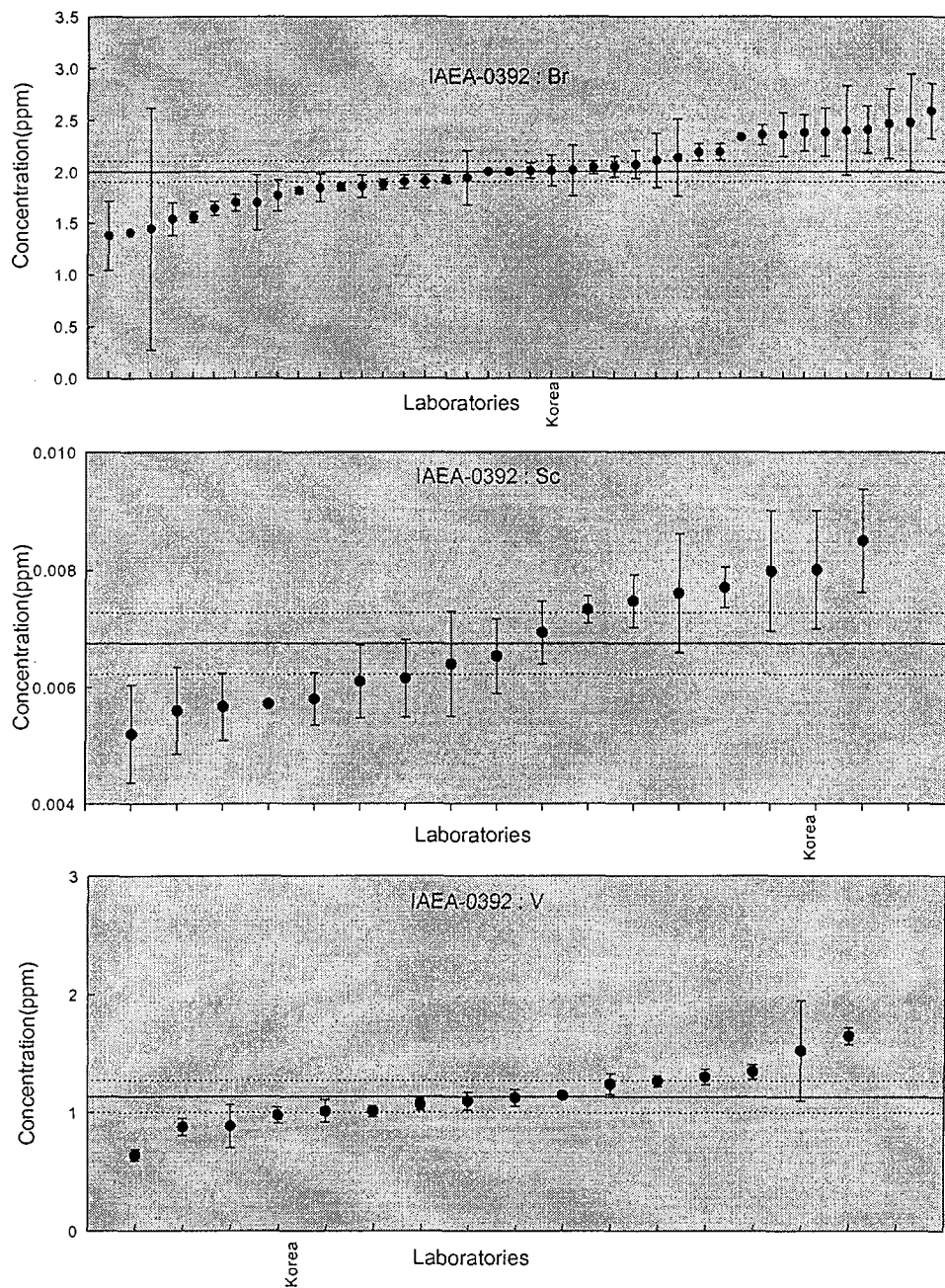


Figure 38. Data intercomparison by statistically evaluation for Br, Sc, V of IAEA-0392.

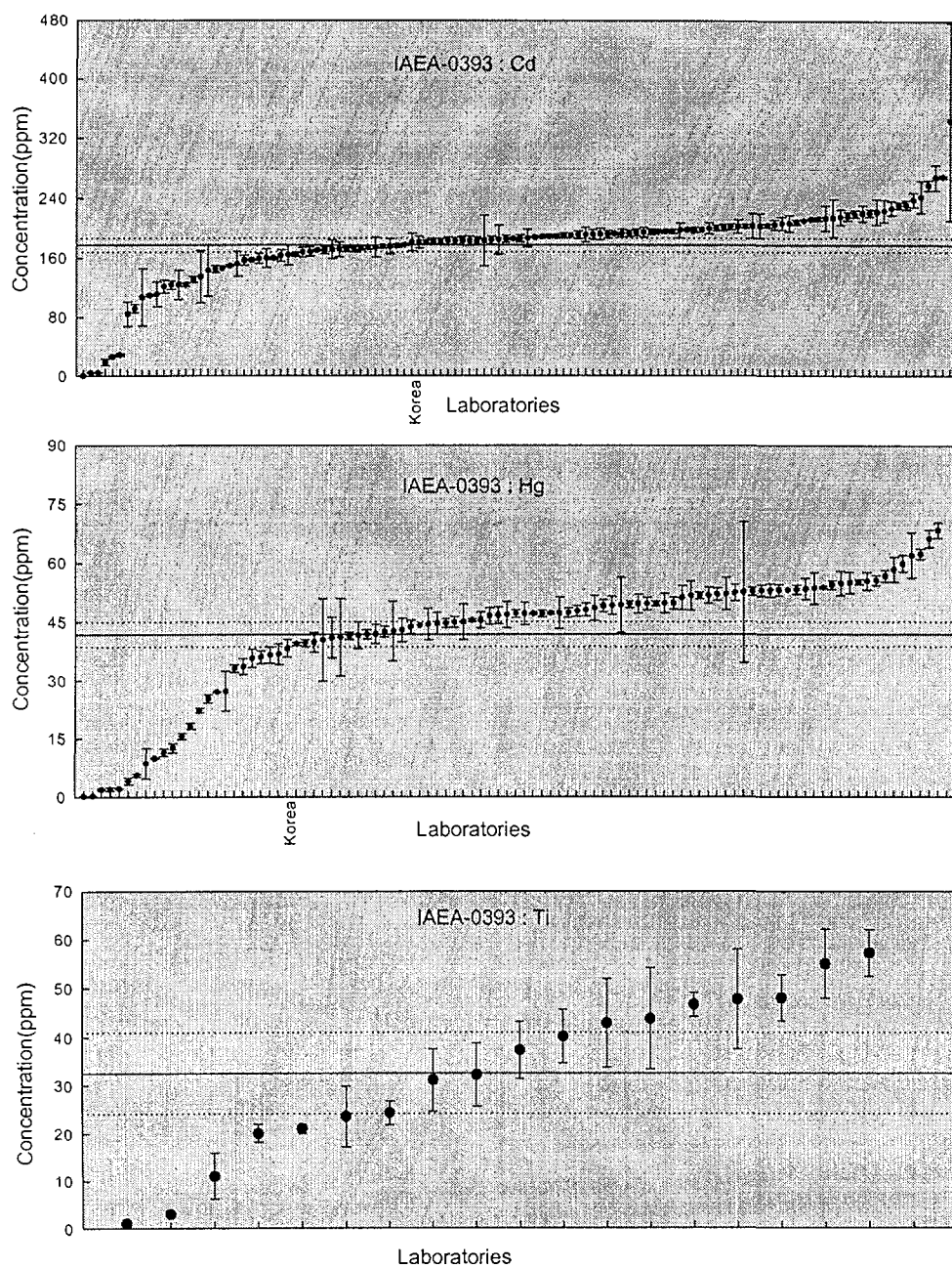


Figure 39. Data intercomparison by statistically evaluation for Cd, Hg, Ti of IAEA-0393.

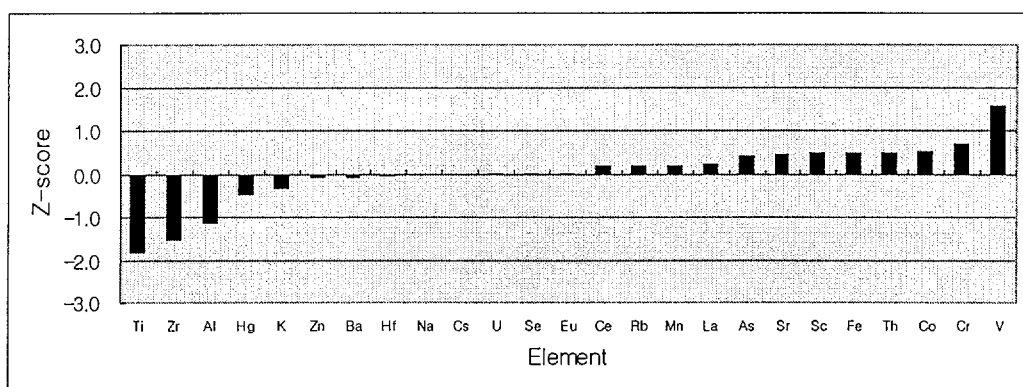


Figure 40. Graphical presentation of z-score for elements in IAEA-0327N.

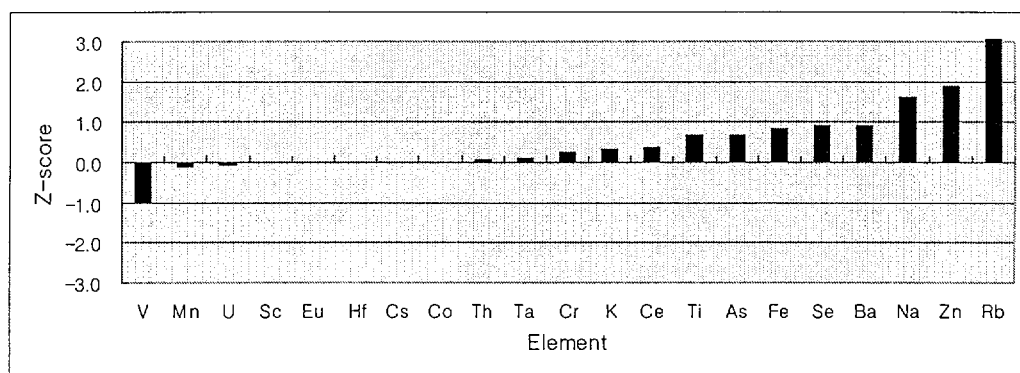


Figure 41. Graphical presentation of z-score for elements in IAEA-0394.

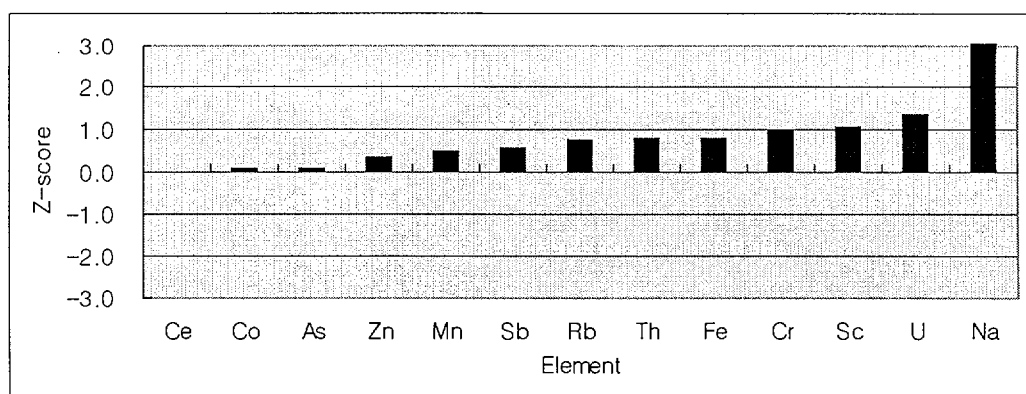


Figure 42. Graphical presentation of z-score for elements in IAEA-0395.

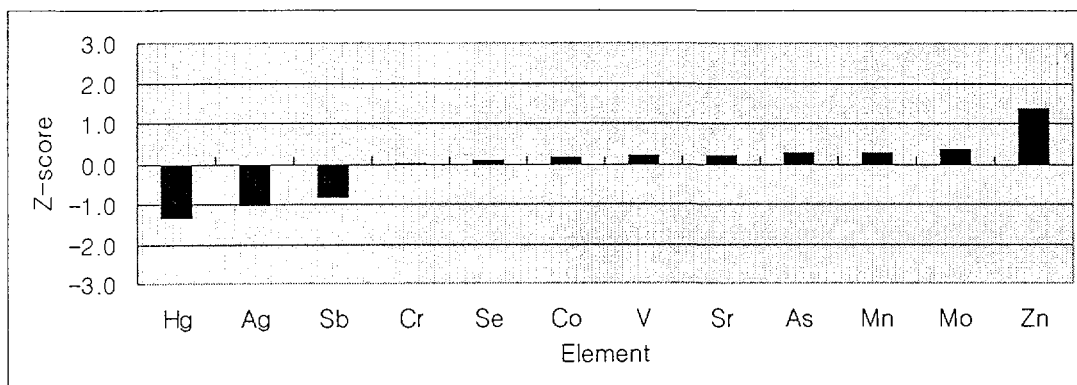


Figure 43. Graphical presentation of z-score for the measurand in Korean Marine Sediment.

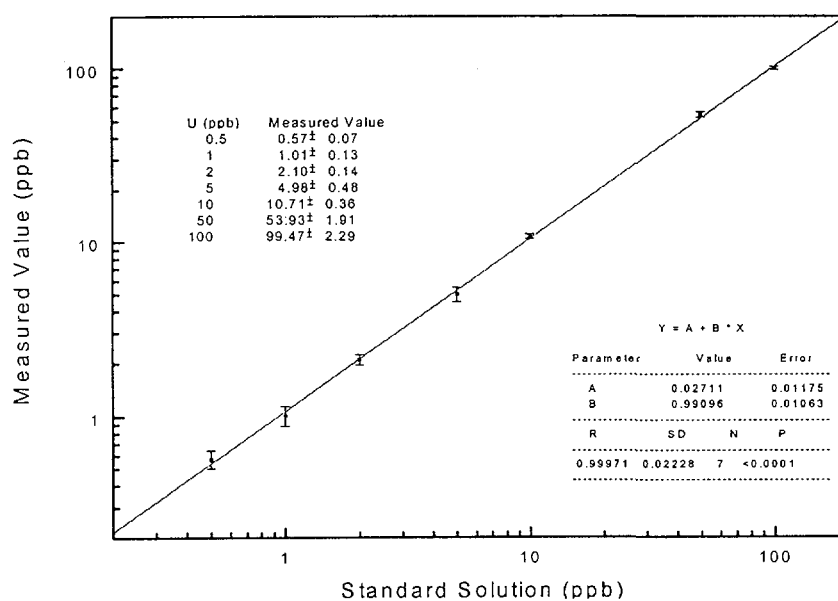


Figure 44. Calibration curve of U standard solution.

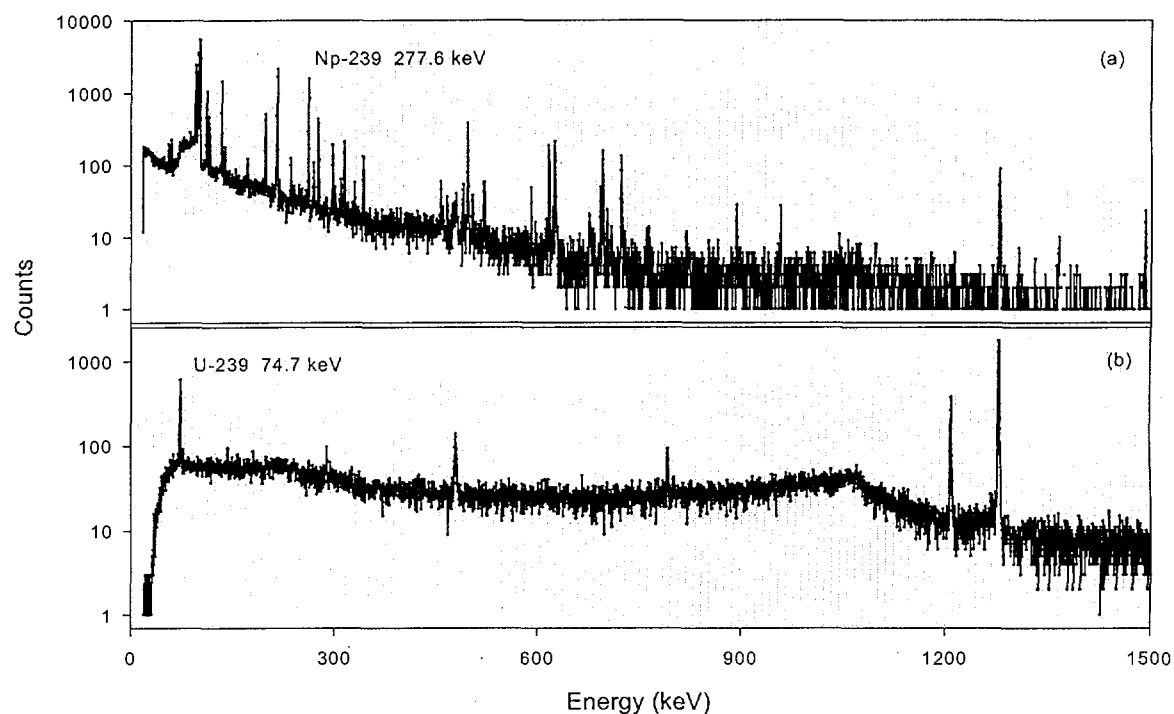


Figure 45. Gamma-ray spectra of ^{239}U and ^{239}Np in water samples.

sample irradiation : pneumatic transfer system of HANARO Reactor(neutron flux : $1.7 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{s}$)

counting system : HP Ge-detector(GEM 25185, EG&G ORTEC, 25% efficiency, peak to compton ratio ; 62:1)

(a) Ti : 2h, Td : 7d, Tc : 4000s ; (b) Ti : 20m, Td : 20m, Tc : 1000s

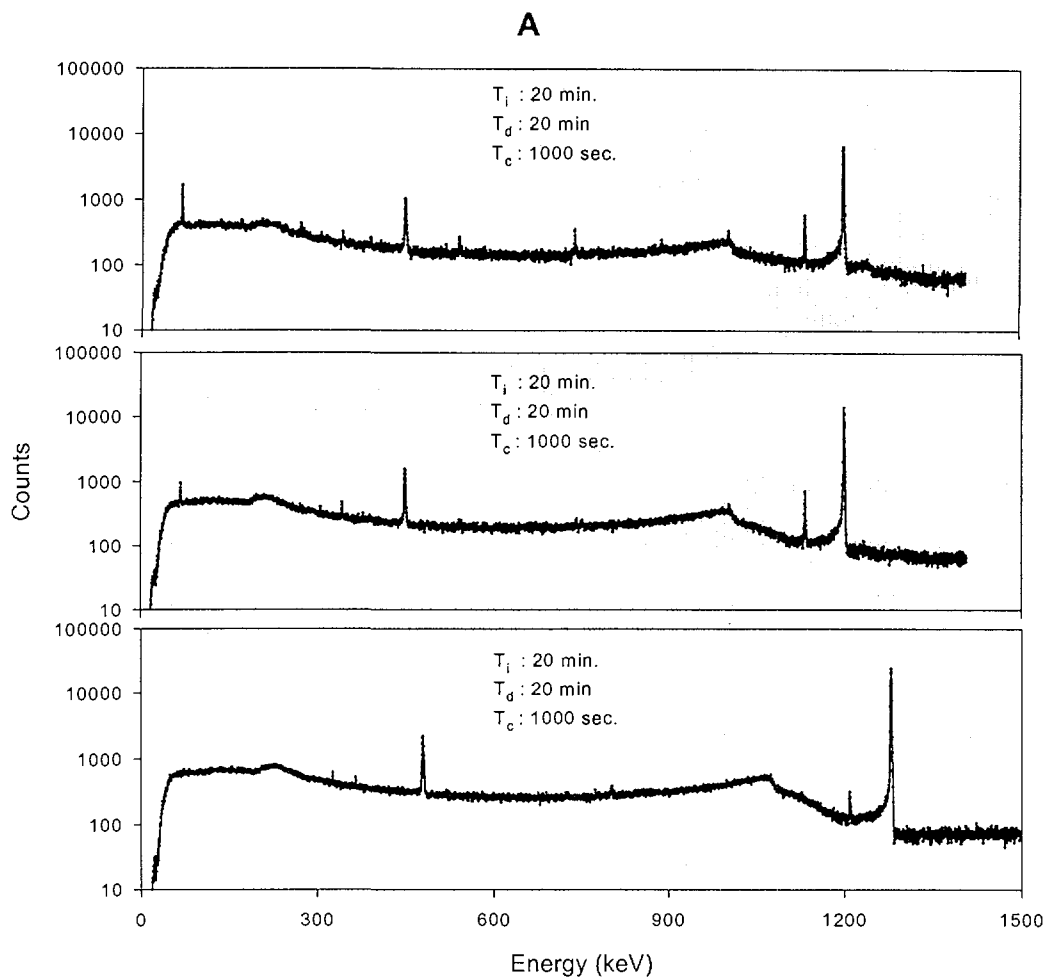


Figure 46a. Gamma-ray spectra of U in water samples.

Sample irradiation : pneumatic transfer system of HANARO Reactor(neutron flux : $1.7 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{s}$)

Counting system : HPGe-detector(GEM 25185, EG&G ORTEC, 25% efficiency, peak to compton ratio; 62:1)

(a) T_i : 20m, T_d : 20m, T_c : 1000s (b) T_i : 20m, T_d : 80m, T_c : 2000s (c) T_i : 20m, T_d : 400m, T_c : 4000s.

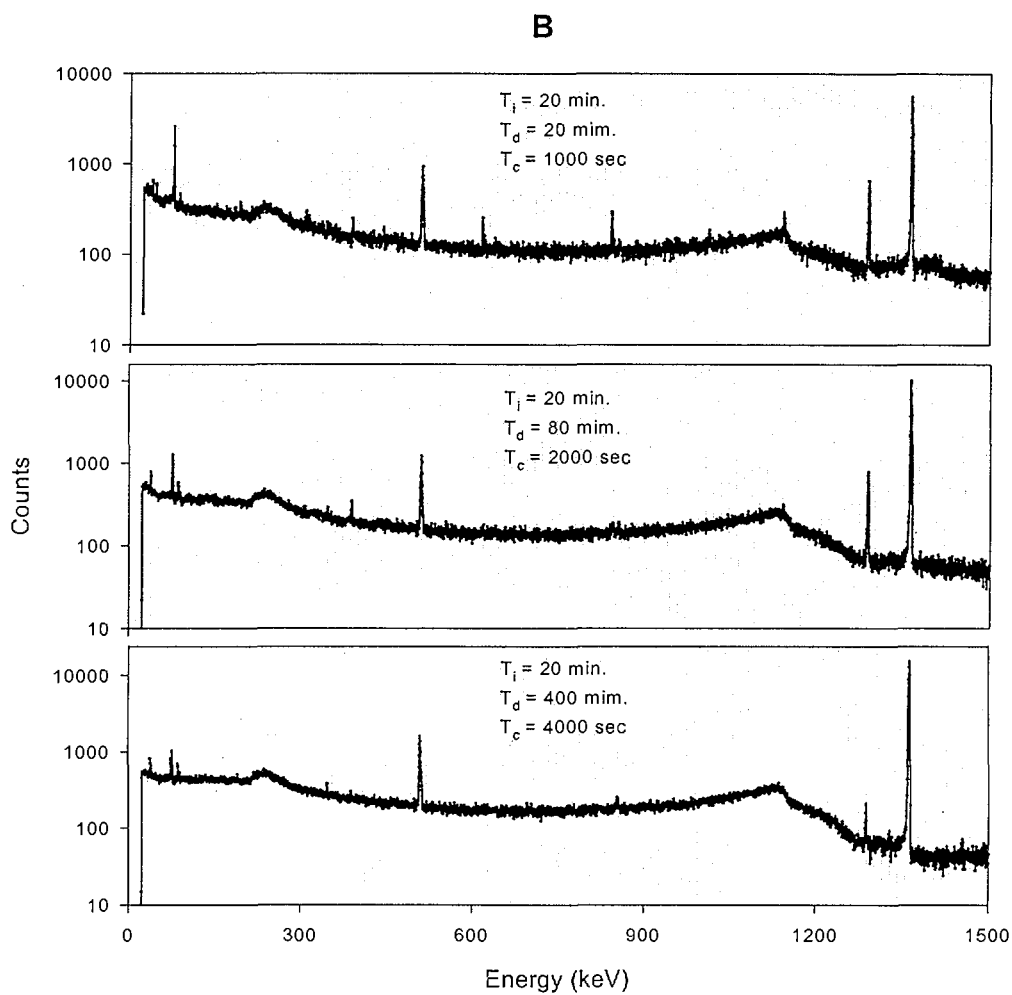


Figure 46b. Gamma-ray spectra of U in water samples.

Sample irradiation : pneumatic transfer system of HANARO Reactor(neutron flux : $1.7 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{s}$).

Counting system : HP Ge-detector(GMX 25190, EG&G ORTEC, 25% efficiency, peak to compton ratio; 45:1)

(a) $T_i : 20\text{m}$, $T_d : 20\text{m}$, $T_c : 1000\text{s}$ (b) $T_i : 20\text{m}$, $T_d : 80\text{m}$, $T_c : 2000\text{s}$ (c) $T_i : 20\text{m}$, $T_d : 400\text{m}$, $T_c : 4000\text{s}$.

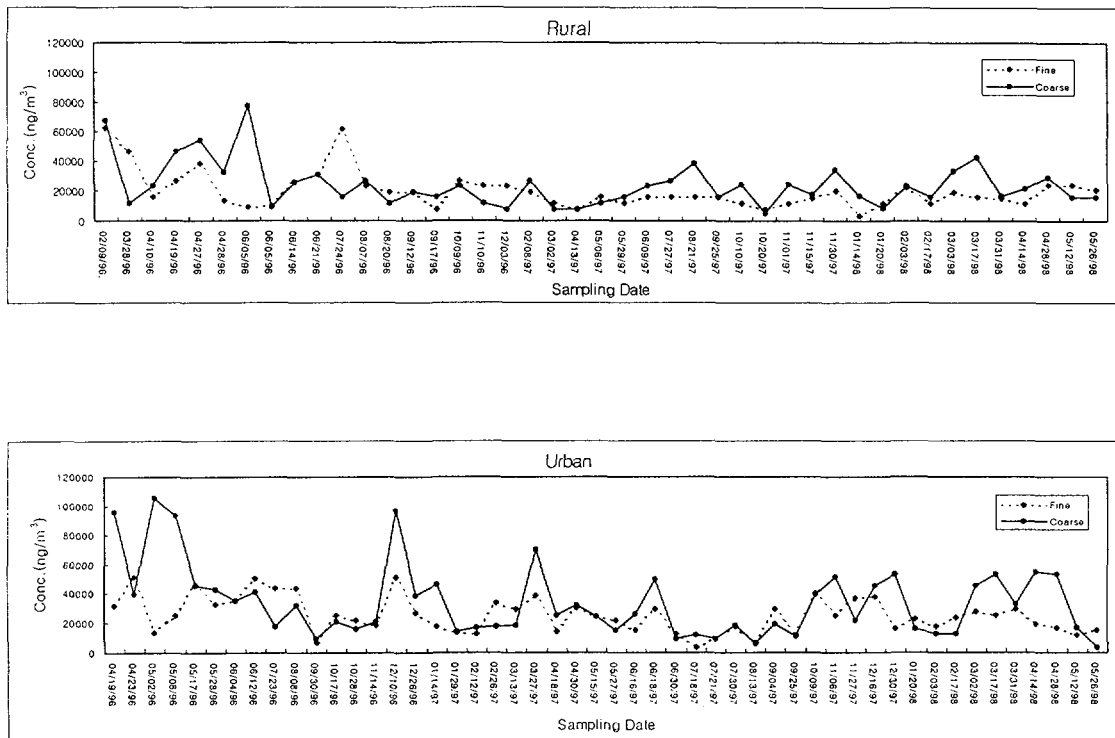
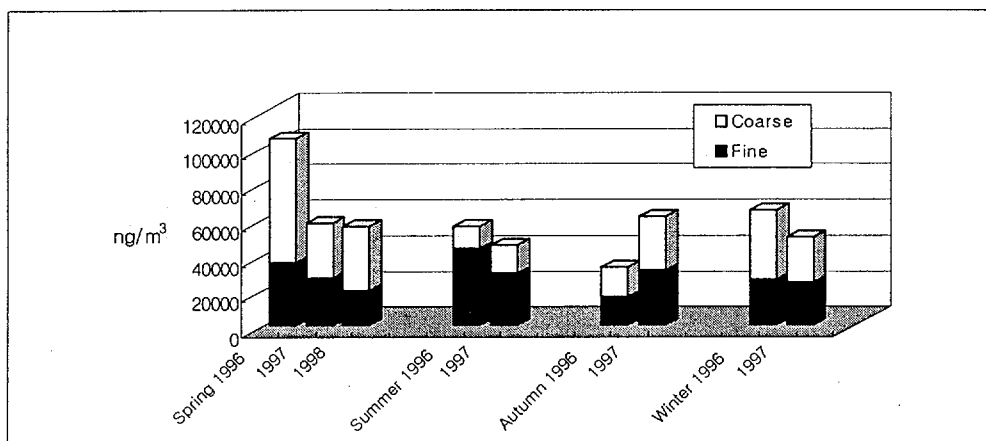


Figure 47. Mass concentration distribution of PM_{2.5}/PM₁₀ particles with sampling date.

(Urban site)



(Rural site)

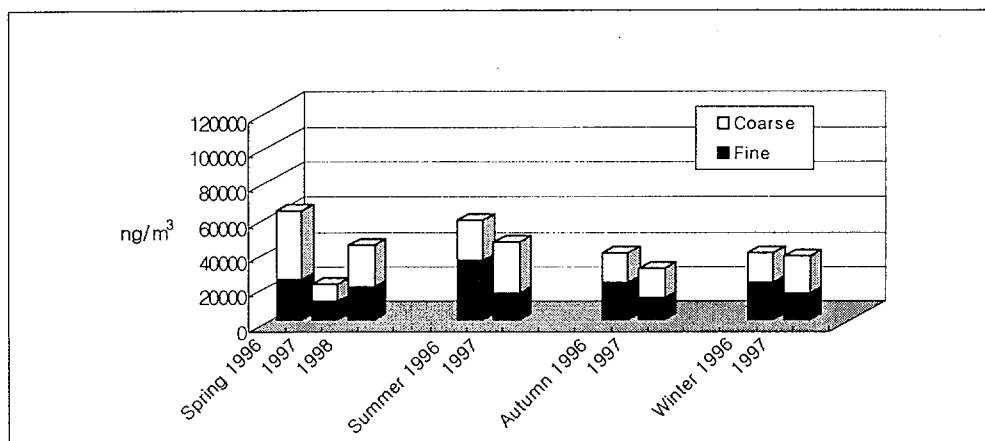


Figure 48. Seasonal distribution of mass concentration of air filtered sample (PM_{2.5}/PM₁₀).

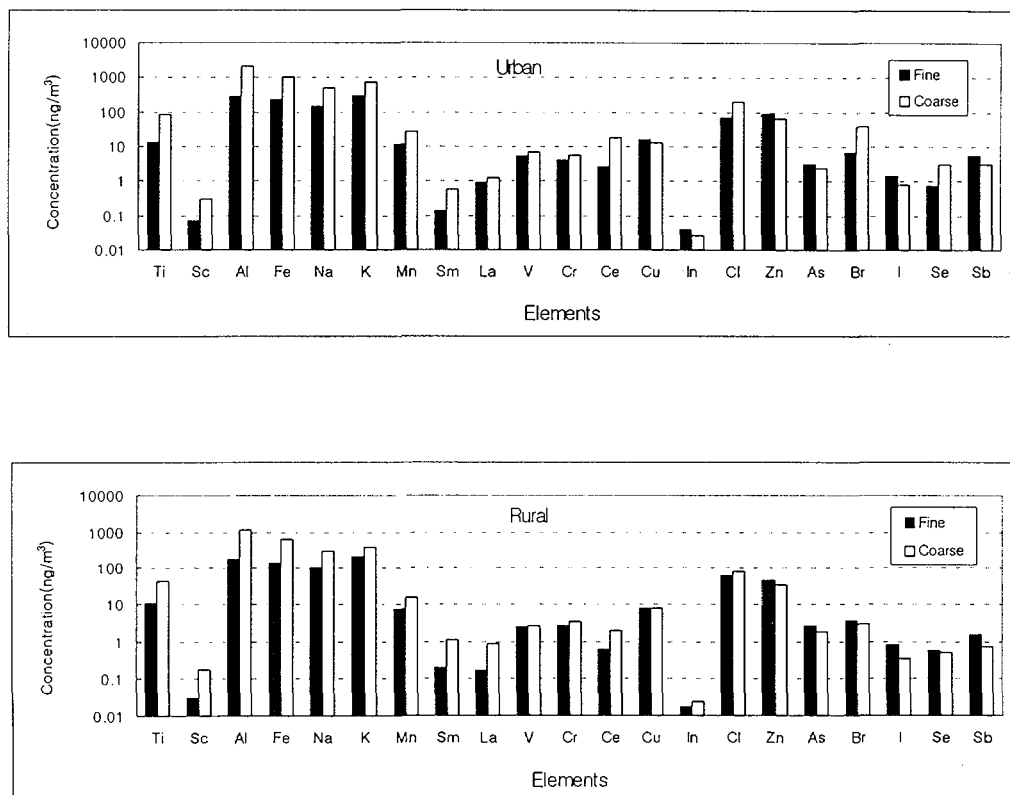


Figure 49. Average concentration distribution of PM_{2.5}/PM₁₀ particles collected in urban and rural site.(1996. 4 -1998. 5)

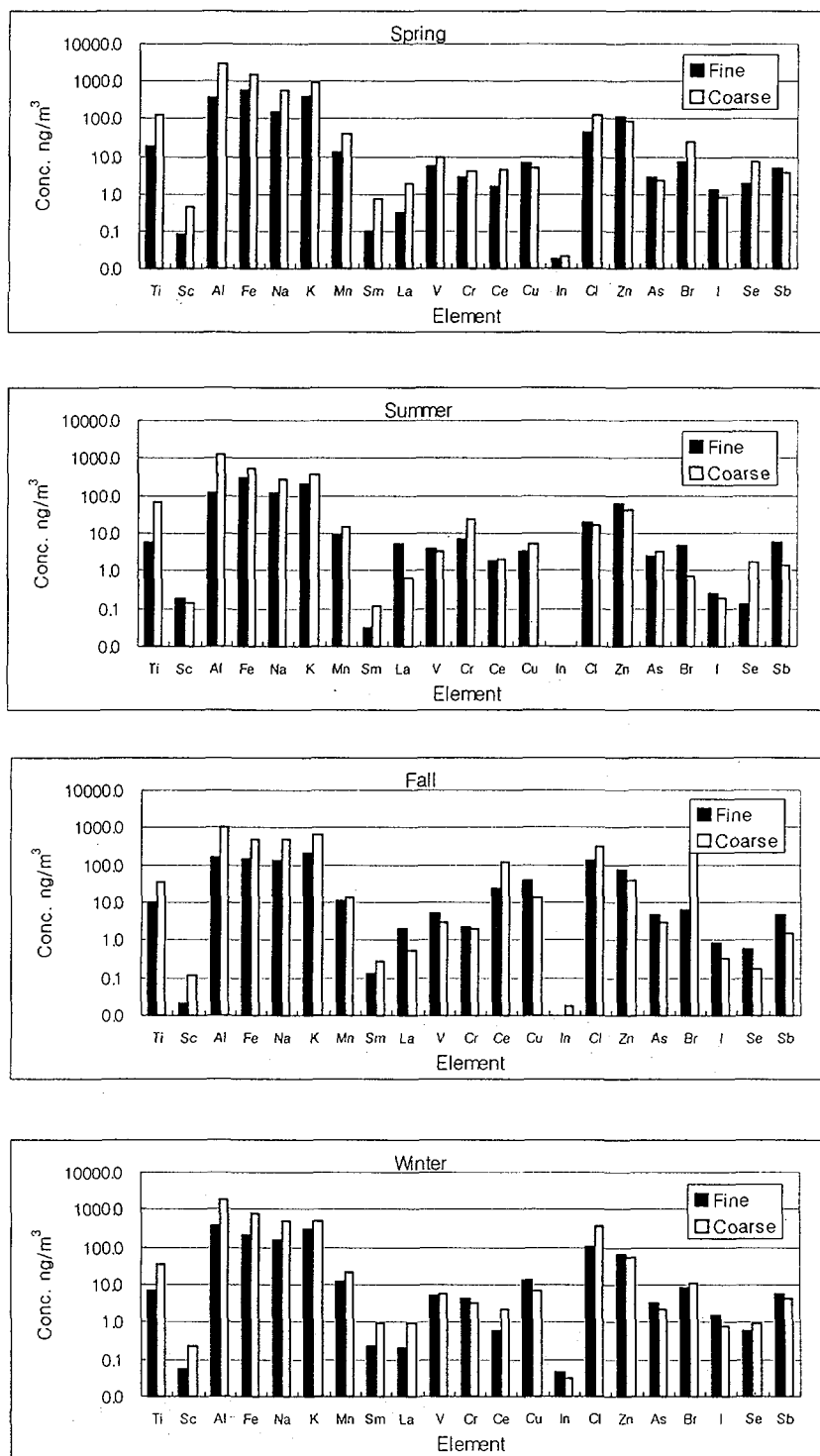


Figure 50. Seasonal average concentration of trace elements in APM at urban site.

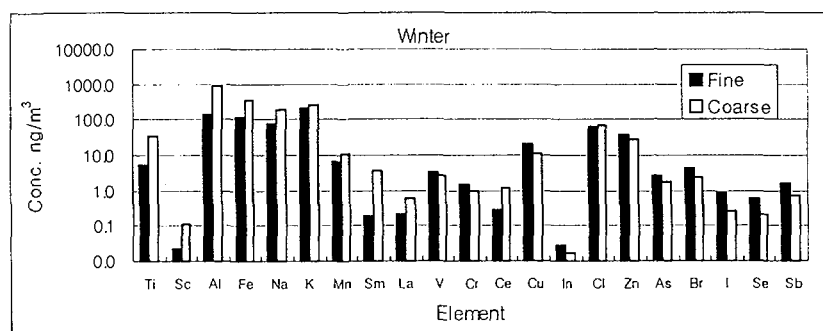
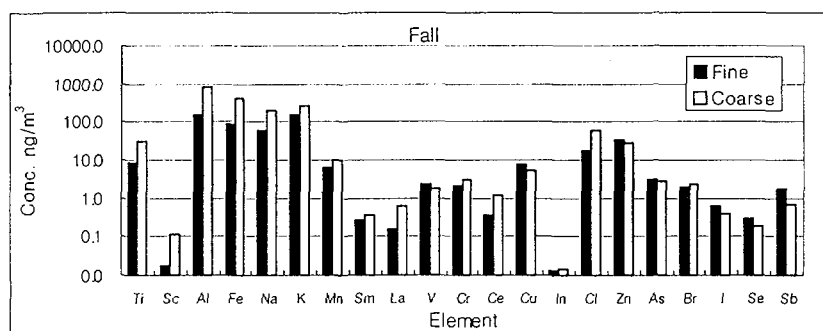
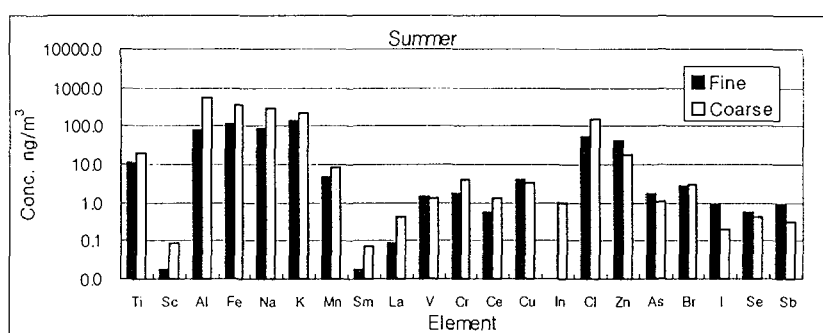
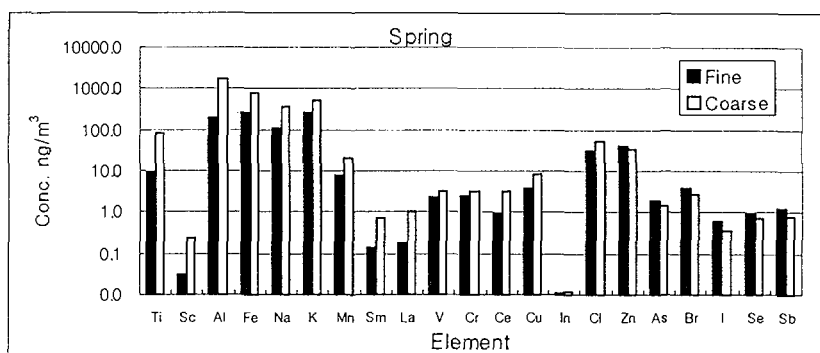


Figure 51. Seasonal average concentration of trace elements in APM at rural site.

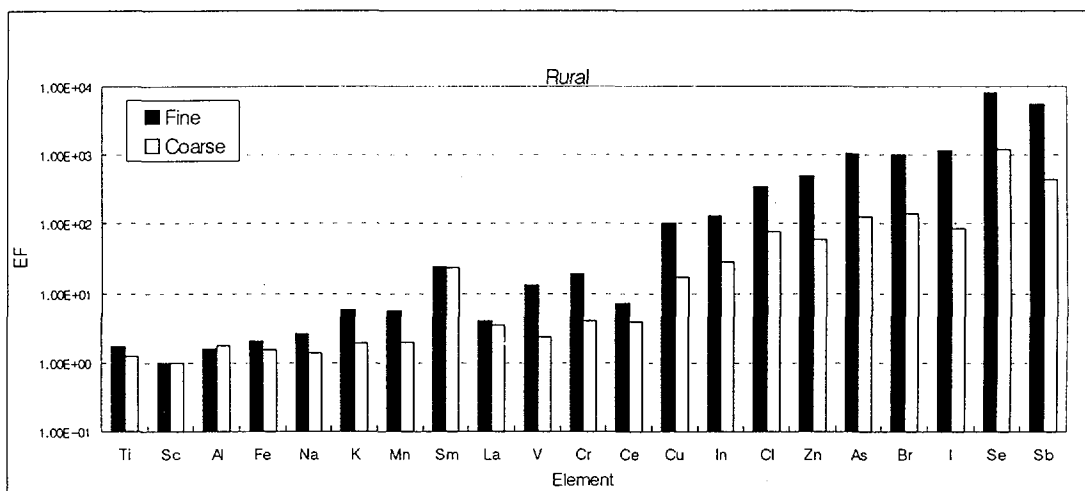
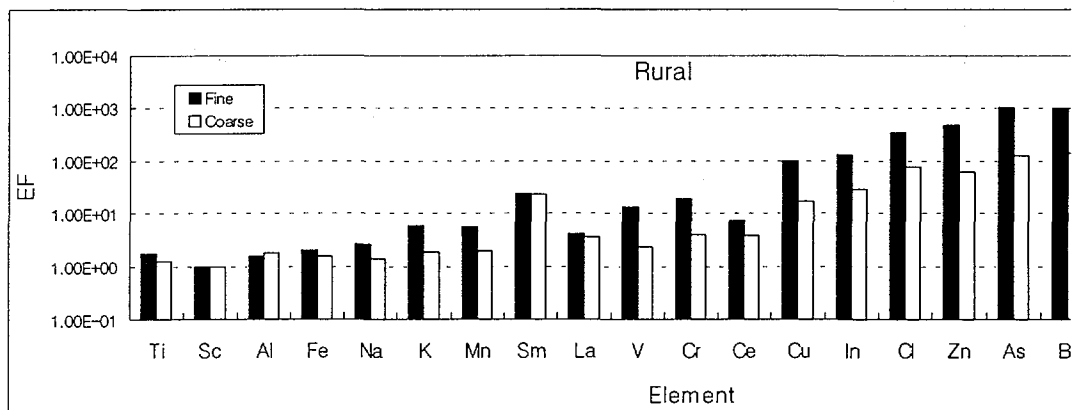


Figure 52. Enrichment factors vs. elements for fine and coarse airborne particulate matter.

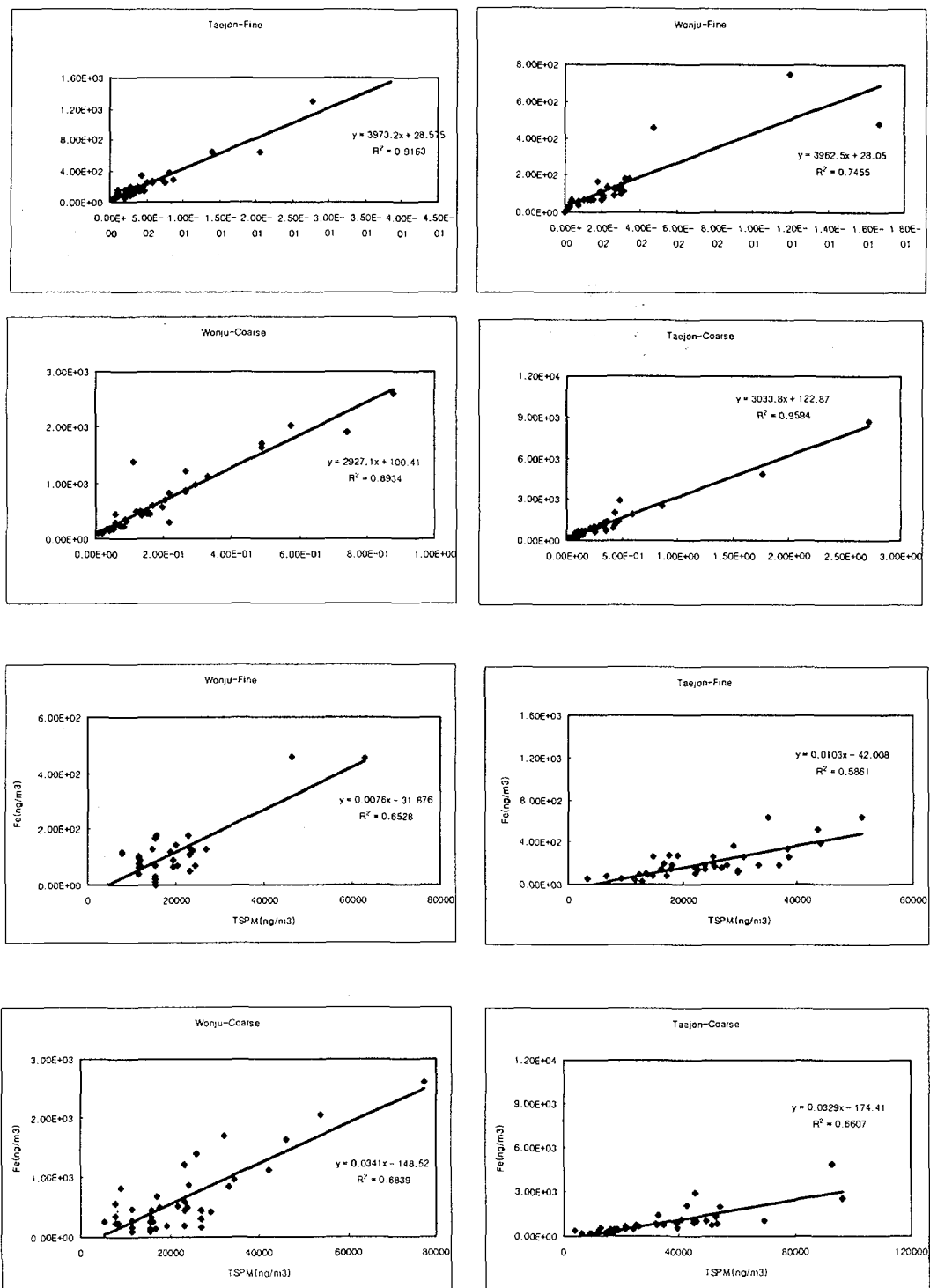


Figure 53. Typical results of regression analysis for the crustal origin element(Fe) vs. Sc and TSPM.

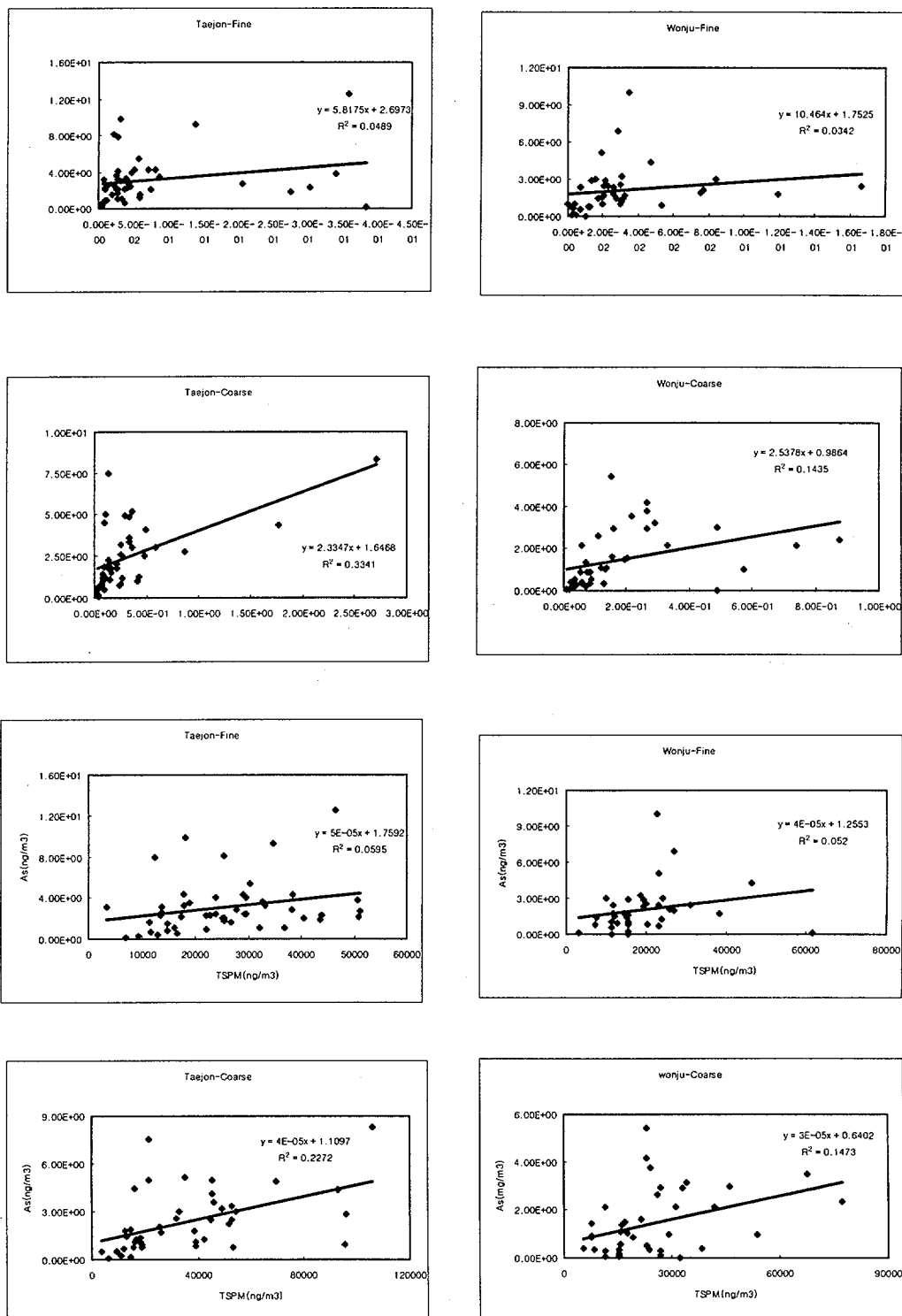


Figure 54. Typical results of regression analysis for the crustal origin element(As) vs. Sc and TSPM.

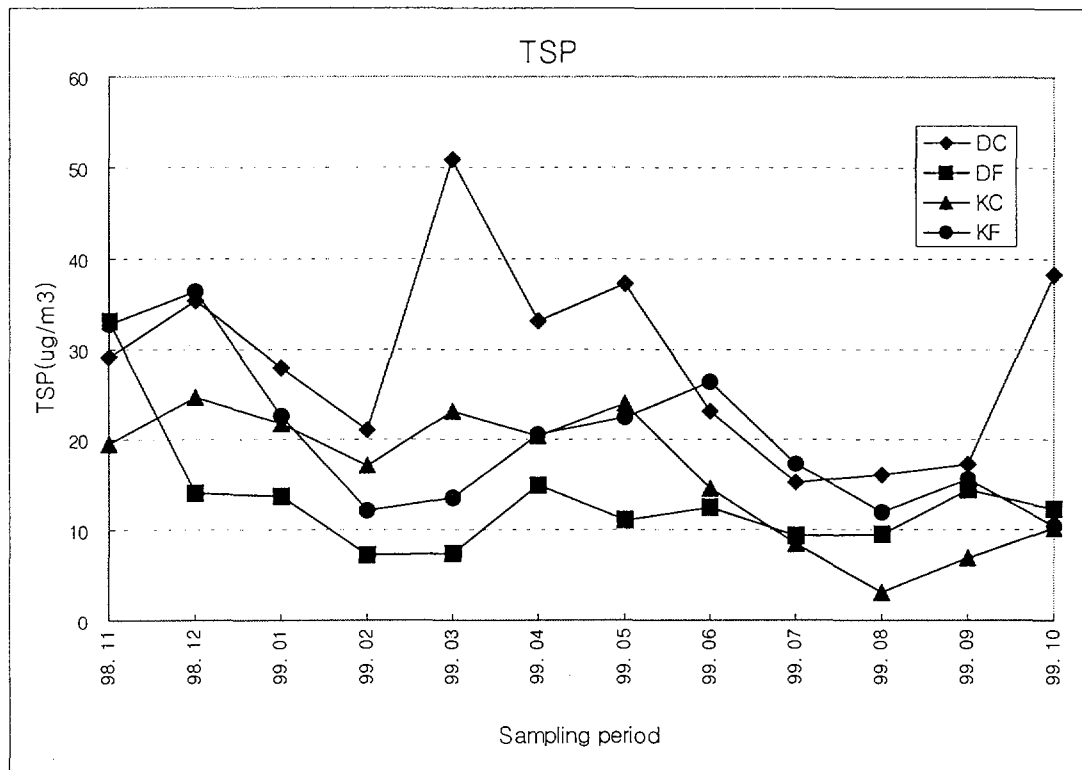


Figure 55. Monthly variation of mass concentration of TSP.

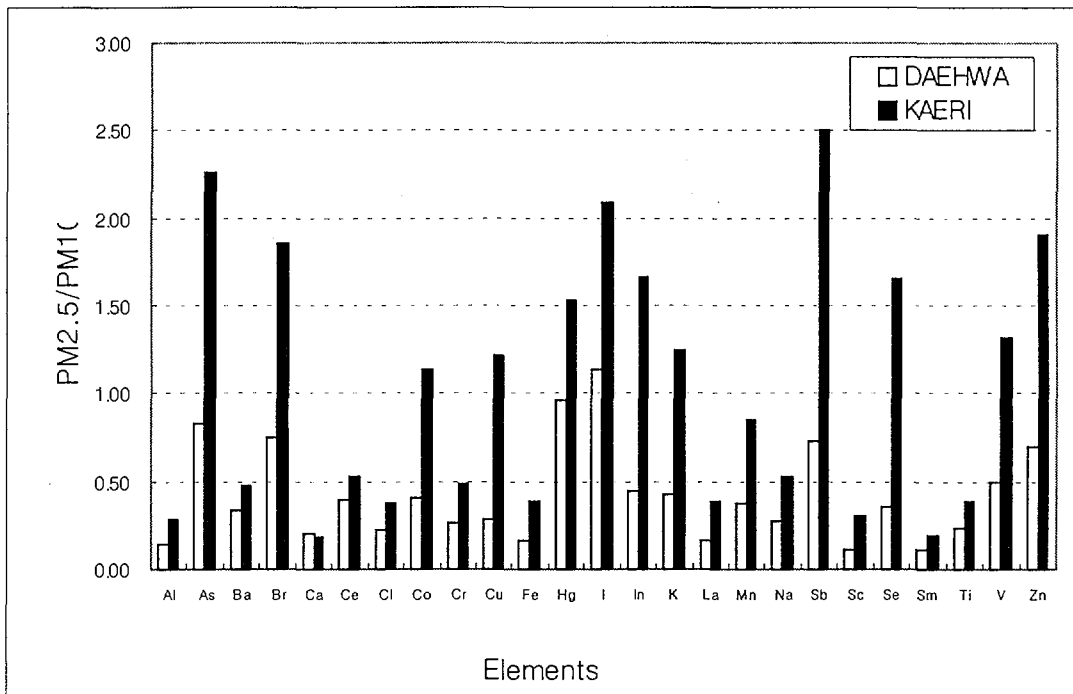


Figure 56. Ratio of elemental concentration between PM_{2.5} and PM₁₀.

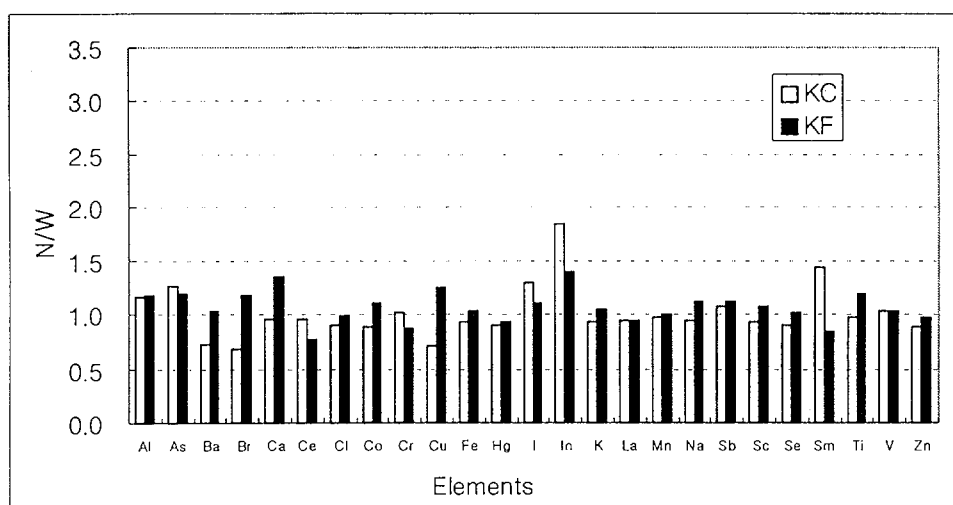
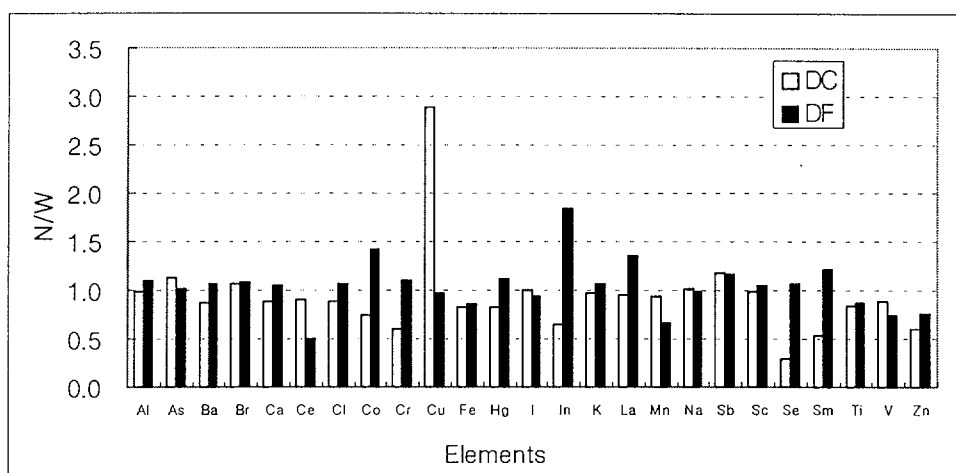


Figure 57. Ratio of elemental concentration between non-working day and working day.

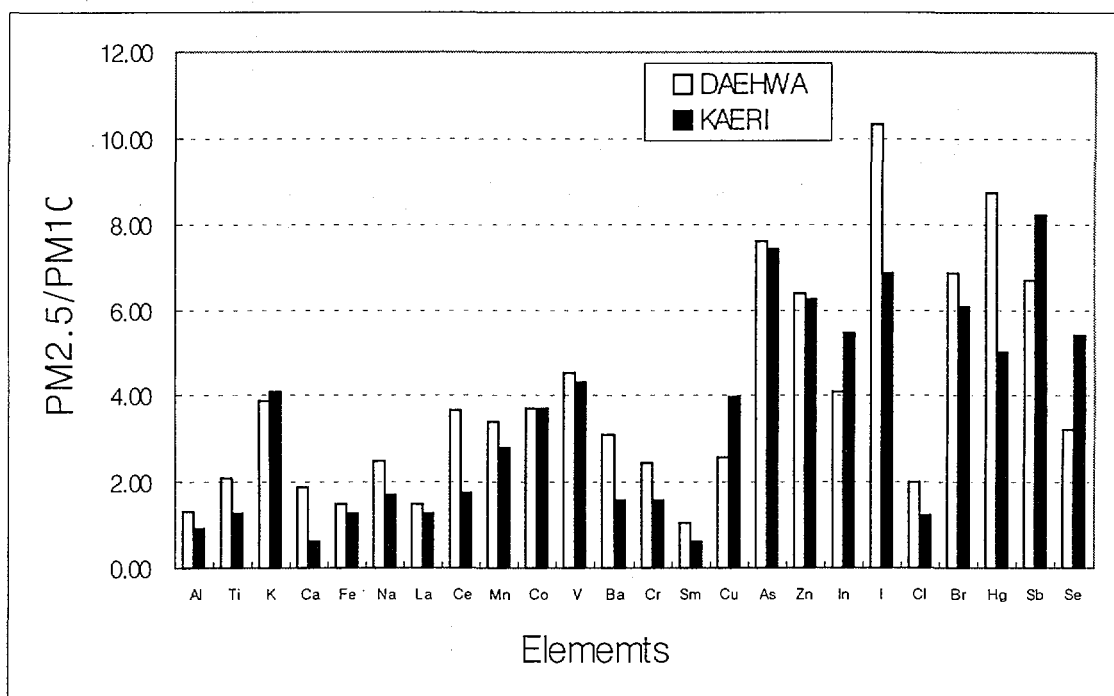


Figure 58. Ratio (PM2.5/PM10) of Enrichment Factor.

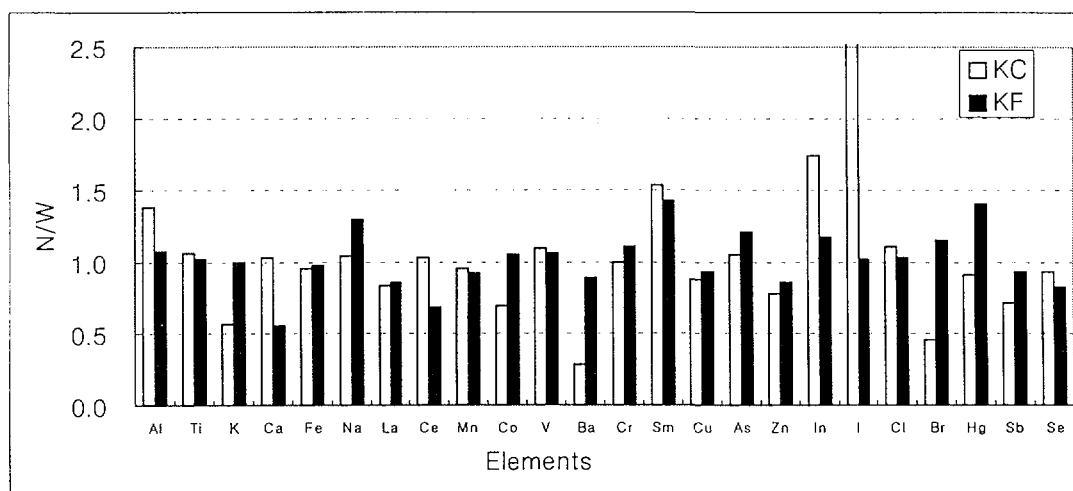
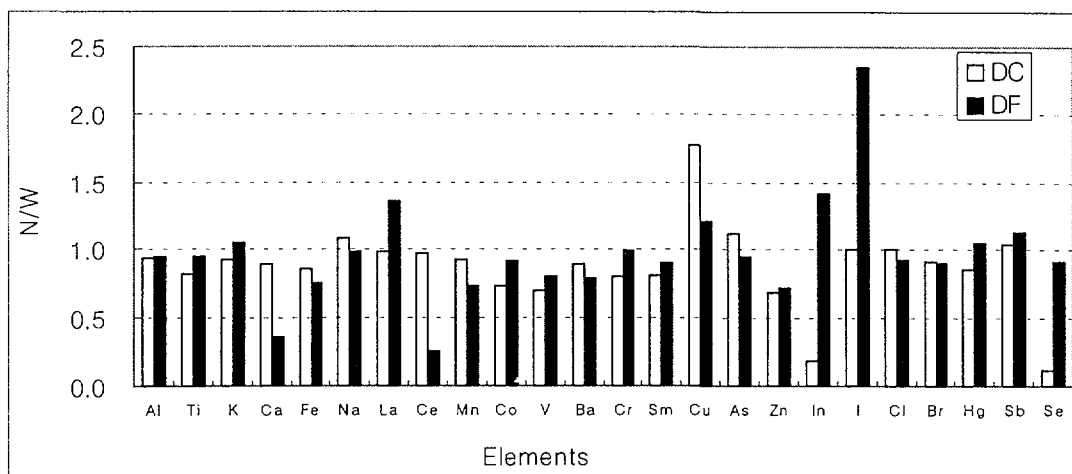


Figure 59. Ratio of enrichment factor between non-working day and working day.

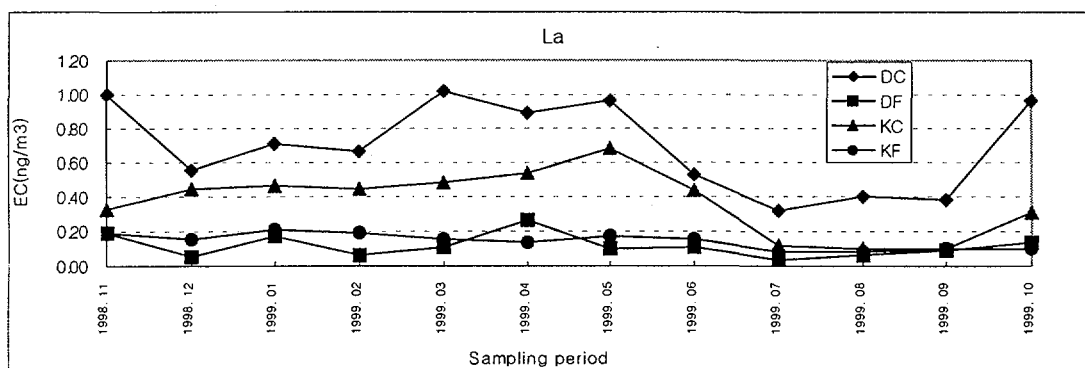
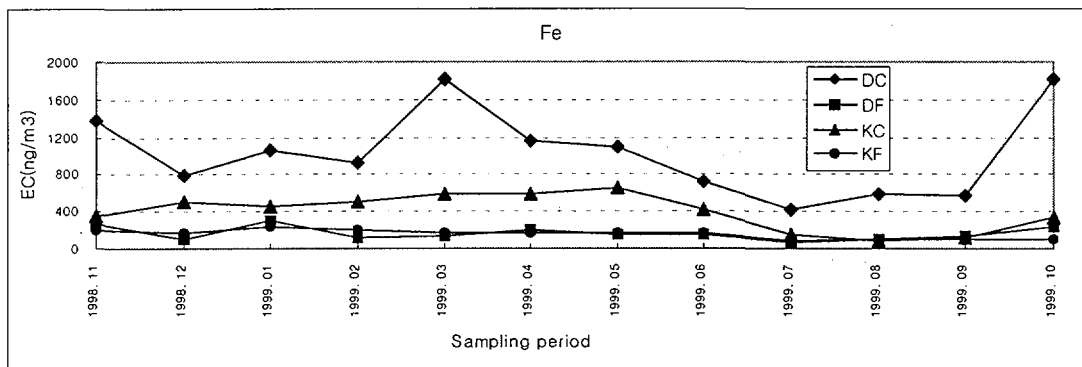
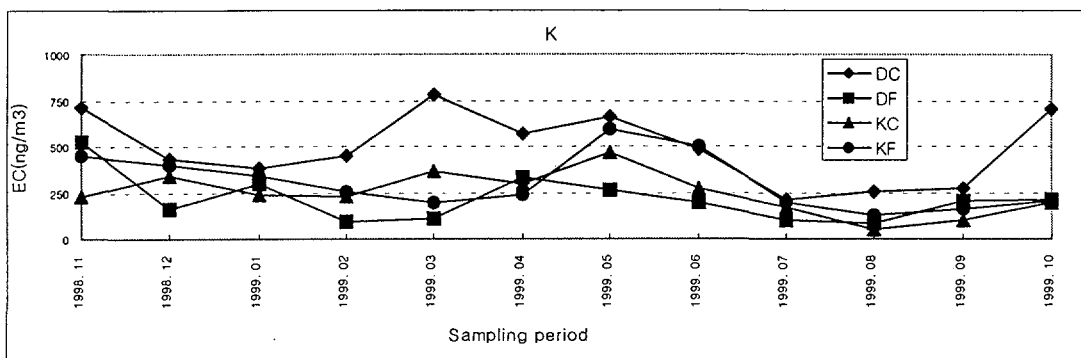
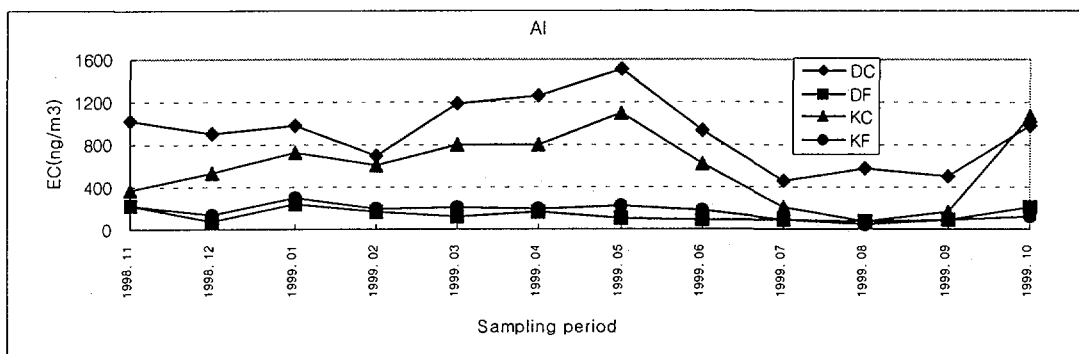


Figure 60. Monthly variation of crustal origin elements.

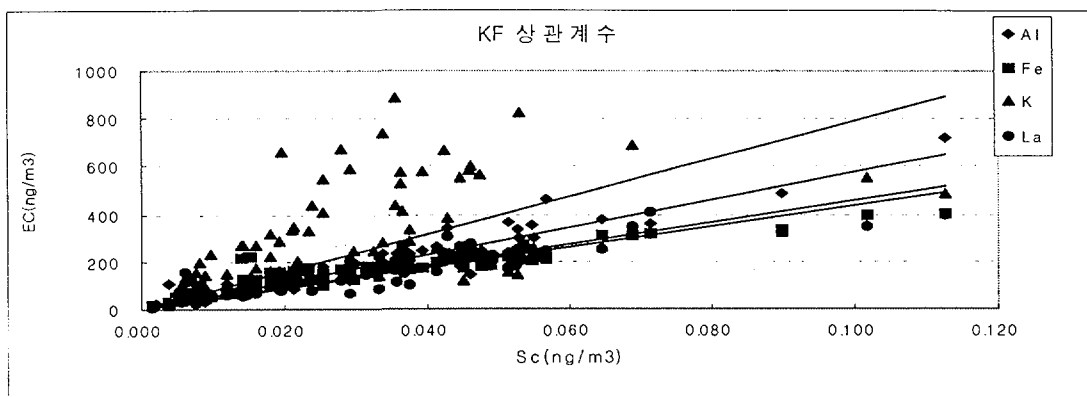
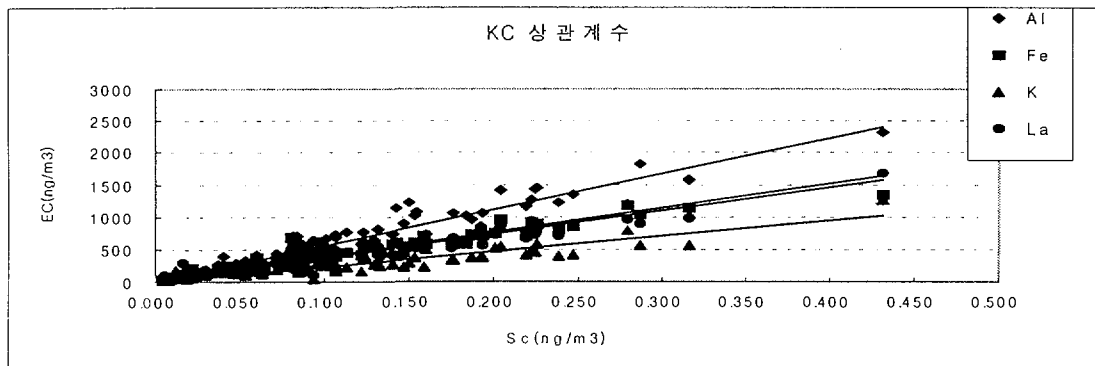
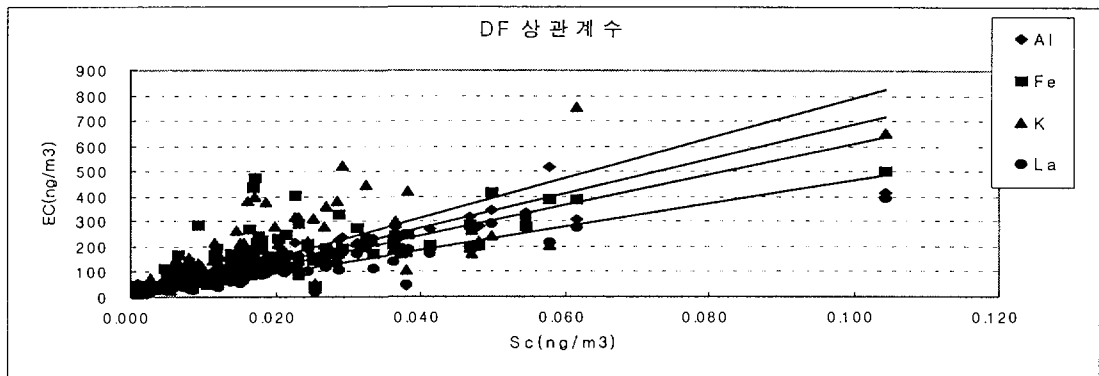
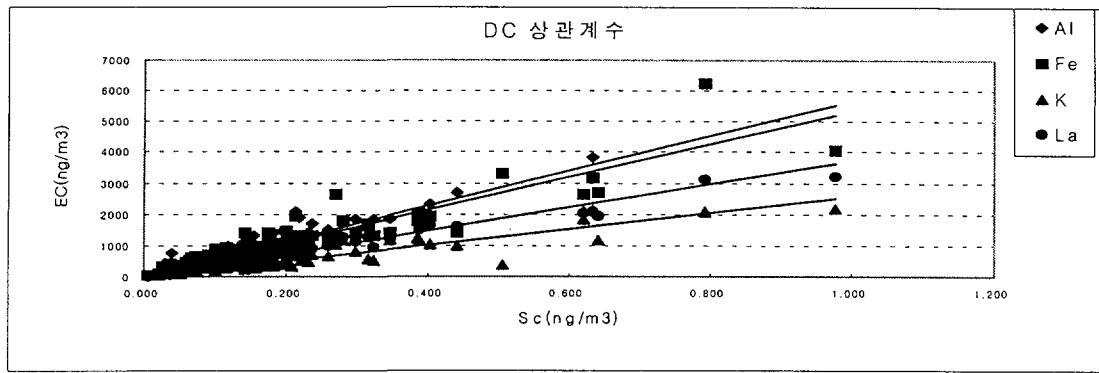


Figure 61. Correlation between crustal origin elements and Sc.

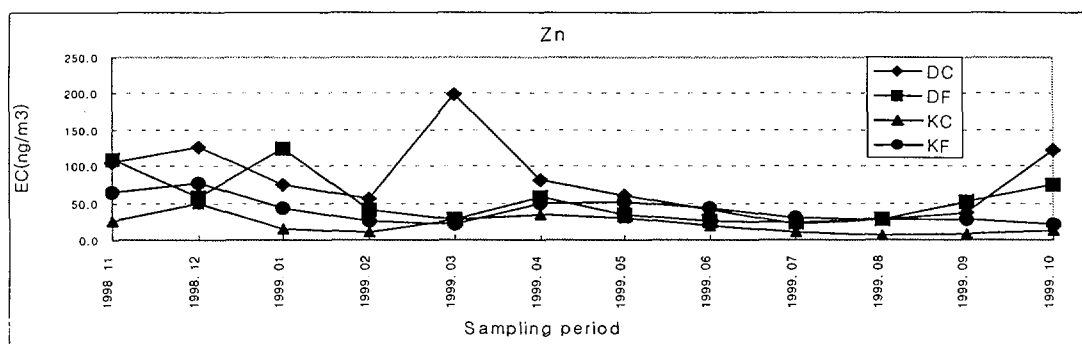
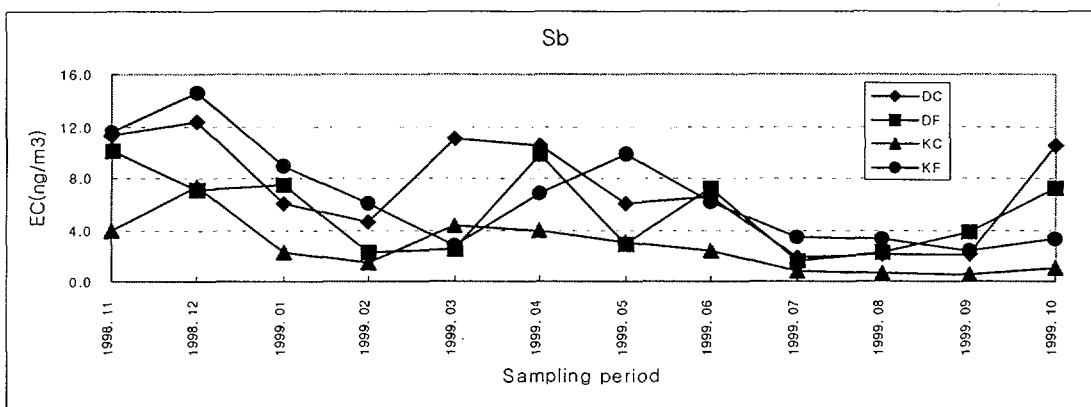
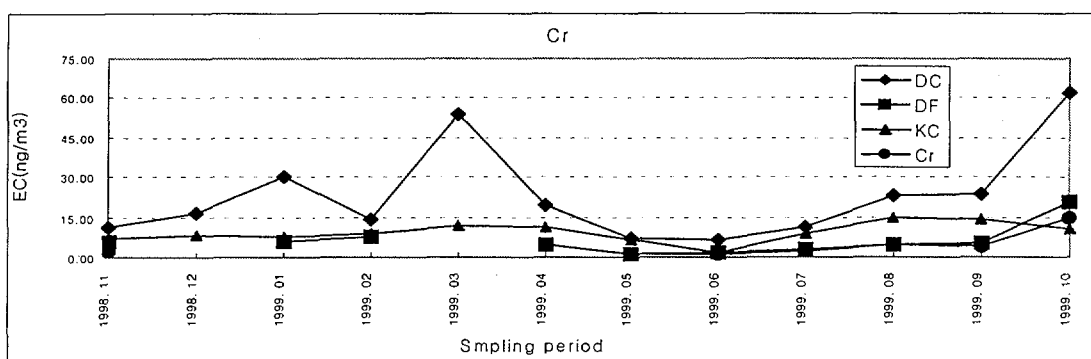
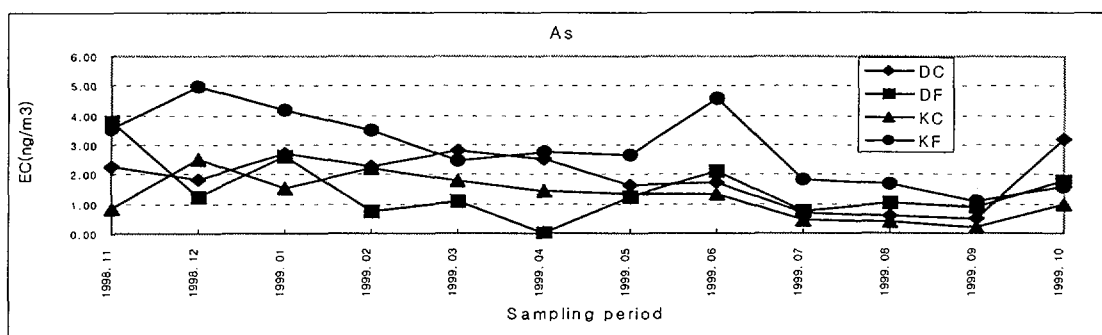


Figure 62. Monthly variation of anthropogenic elements.

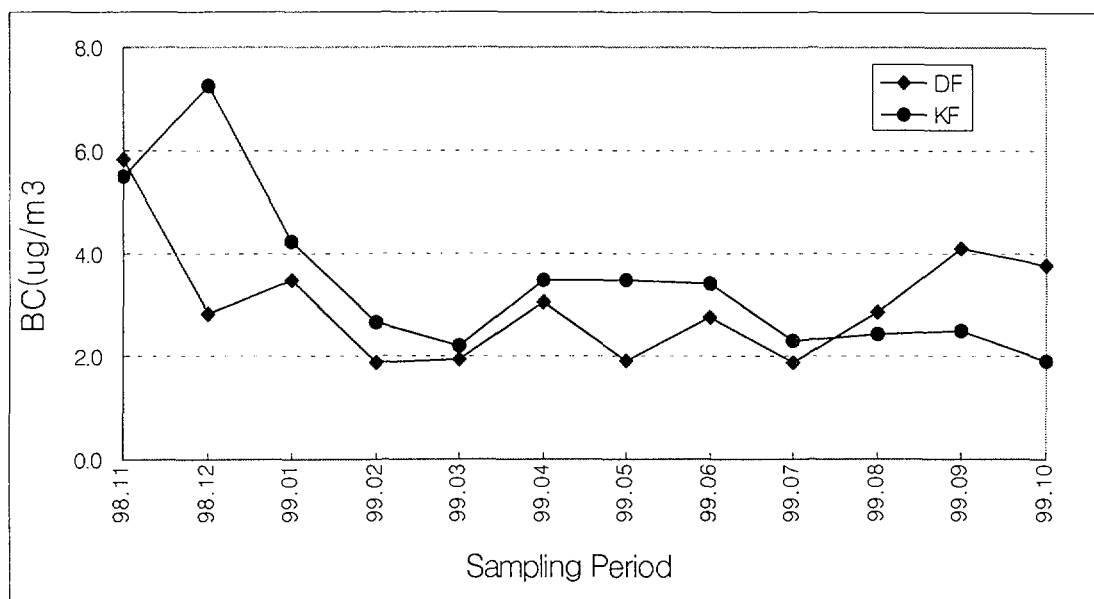
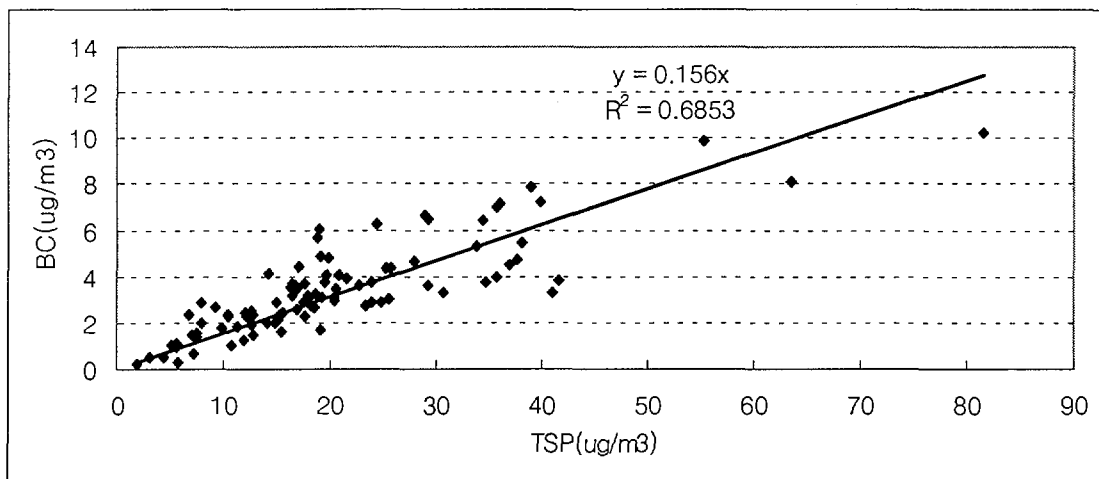
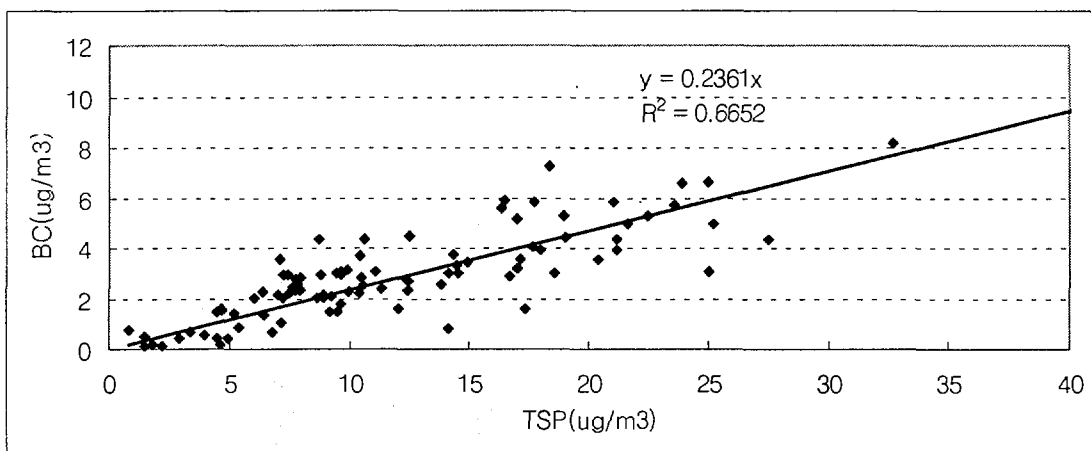


Figure 63. Monthly variation of Black carbon concentration($\text{PM}_{2.5}$).



(a) Correlation between BC and TSP(PM_{2.5}) in KAERI



(b) Correlation between BC and TSP(PM_{2.5}) in DAEHWA-Dong

Figure 64. Correlation between BC and TSP(PM_{2.5}).

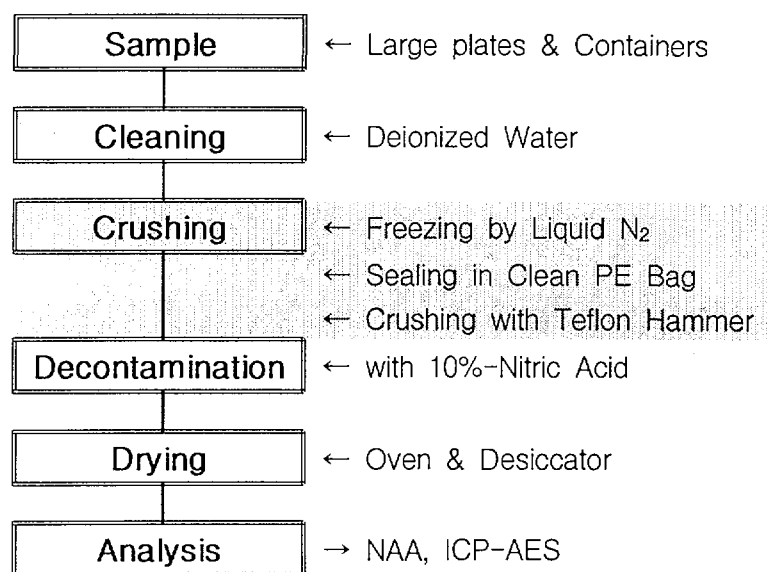


Figure 65. Flow chart for the preparation of large plastic samples.

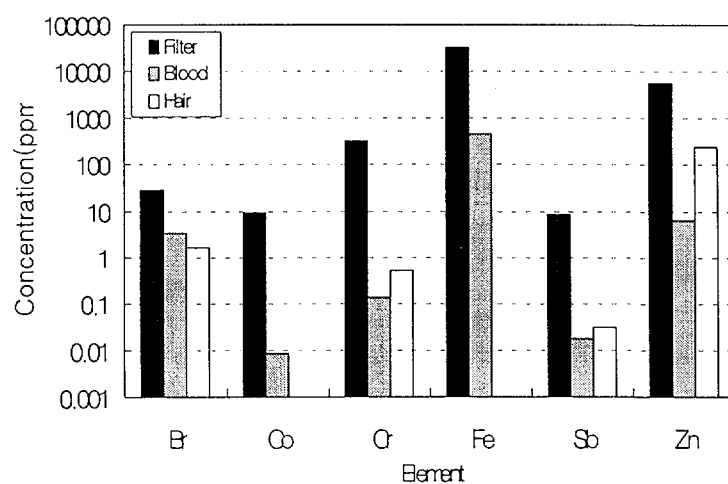


Figure 66. Elemental concentrations in indoor air, human blood and human hair.

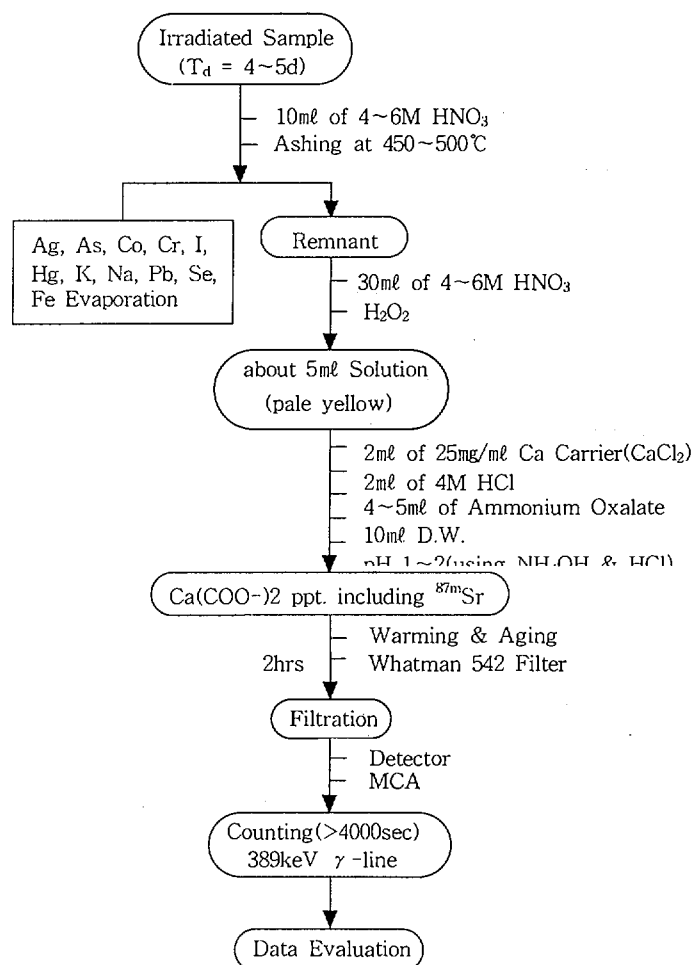


Figure 67. Radiochemical separation scheme for determination of $\text{Sr}^{(87\text{m})\text{Sr}}$.

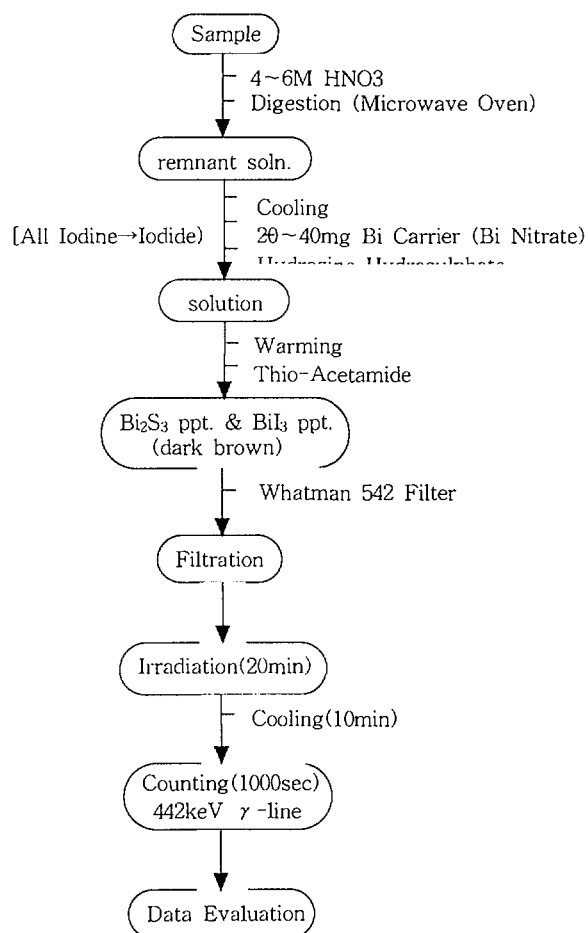


Figure 68. Radiochemical separation scheme for the determination of $I(^{128}I)$.

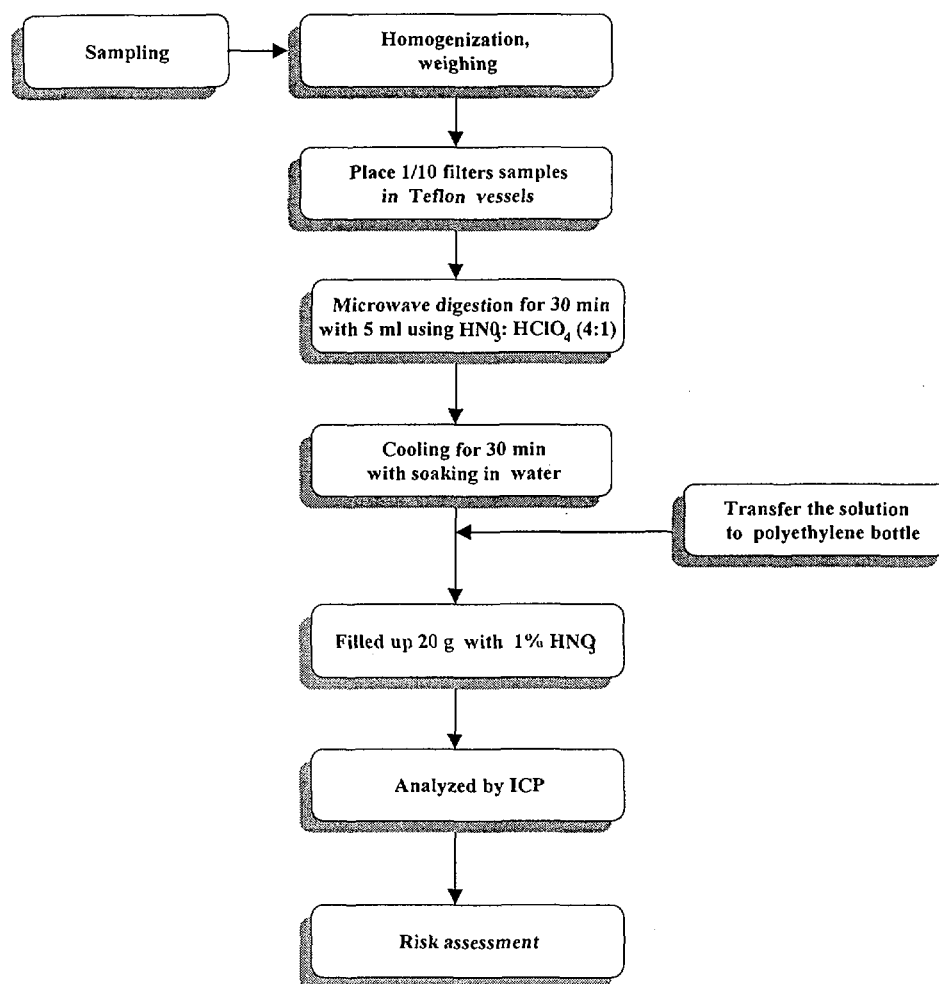


Figure 69. Procedure of sampling, analysis and risk assessment.

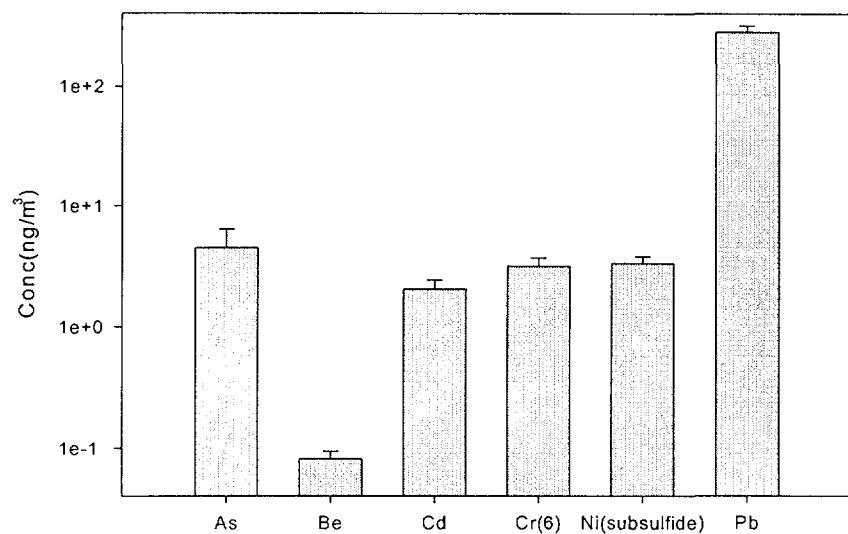


Figure 70. Average concentration and standard error of carcinogenic metal(1999).

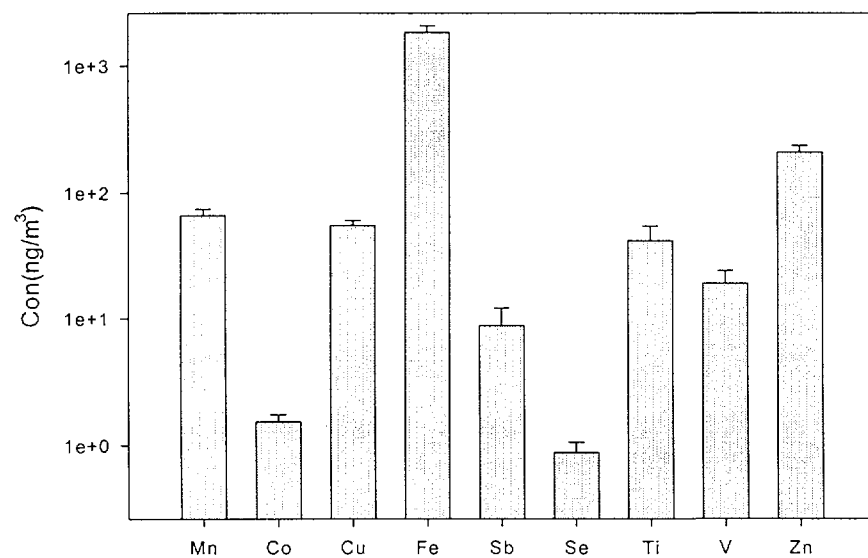


Figure 71. Average concentration and standard error of non-carcinogenic metal(1999)

부 록

- 1) 논문게재 및 발표 실적
- 2) 지적재산권 출원·등록 실적
- 3) 기술이전 실적
- 4) 기술보고서 및 번역서
- 5) 중성자 방사화분석 절차서
- 6) 중성자 방사화분석 지침
- 7) 방사화분석 시설 활용실적
- 8) 국제협력사업

1) 논문게재 및 발표 실적

학 위	게 제	1	Comparison and determination of environmental standard samples by instrumental neutron activation analysis	Journal of Radioanalytical & Nuclear Chem. (SCI)	1997/217/1	IIAC, Hungry	정용삼, 정영주 정의식, 조승연
		2	Determination of trace and toxic elements in Korean rice CRM by INAA, ICP and AAS	Journal of Radioanalytical & Nuclear Chem.	1997/215/1	IIAC, Hungry	정용삼, 정영주 조경행, 이종해
		3	Trace element exposure in human by instrumental neutron activation analysis of hair	Journal of Radioanalytical & Nuclear Chem.	1997/217/1	IIAC, Hungry	조승연, 오옥두, 정용삼
		4	Study on air pollution monitoring in Korea using instrumental neutron activation analysis	Journal of Radioanalytical & Nuclear Chem.	1997/217/1	IIAC, Hungry	정용삼, 정영주 정의식, 조승연
		5	Human Hair Identification by Instrumental Neutron Activation Analysis	Journal of Radioanalytical & Nuclear Chem.	1998/229/1	IIAC, Hungry	조승연, 장성길, 정용삼
		6	Determination of Trace Elements in High Purity Copper by INAA, GFAAS and ICP-AES	Journal of Radioanalytical & Nuclear Chem.	1998/234/1	IIAC, Hungry	이종해, 조경행, 우진춘, 한명섭, 정용삼
		7	Study on Air Pollution Monitoring in Korea using Low Volume Air Sampler by INAA	Journal of Radioanalytical & Nuclear Chem.	1999/240/1	IIAC, Hungry	정용삼, 문종화, 정영주, 강상훈, 조승연
		8	Determination of Toxic and Trace Elements in Algae by INAA	Journal of Radioanalytical & Nuclear Chem.	1999/240/1	IIAC, Hungry	정용삼, 문종화, 정영주, 이길용, 윤운열
		9	An accurate and Sensitive Analysis of Trace and Ultra Trace Metallic Impurities in Plastics by NAA	Journal of Radioanalytical & Nuclear Chem.	1999/241/1	IIAC, Hungry	이길용, 심상권, 윤운열, 정용삼, 이계호
	발 표	1	Determination of APM using INAA for Environmental Monitoring	Workshop on Utilization of Research Reactor	1997/AP-5/A-6	JAERI	문종화, 정용삼
		2	Determination of trace elements in high purity copper by INAA, GFAAS and ICP-AES	Int'n Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry(Forth)	1997. 4.	Kailua-Kona, Hawaii	이종해, 조경행 한명섭, 정용삼
		3	Correction of interferences in NAA for the analysis of rock sample with a new reactor(KMRR)	Int'n Conference on the analysis of geological & environmental materials(3rd)	1997. 6.	Vail Colorado, USA	이길용, 윤운열 정용삼, 정영주
		4	Utilization and Facility of Neutron Activation Analysis	Meeting of the International Group on Research Reactor	1998. 4.	Taejon, KAERI	정용삼, 문종화, 정영주
		5	Studies in Korea on Ingestion of Trace Elements of Importance in Radiological Protection	International Conference on Modern Trends in Activation Analysis,MTAA-10	1999. 4.	Bethesda, Maryland, USA	조승연, 강상훈, 정용삼
		6	Study on air pollution Monitoring in Korea by INAA	UNDP/RCA/IAEA Meeting on Air Pollution	1999.10.	ENV, Singapore	정용삼

구분	연번	논문제목	학술지(회의)	연도/권/호	주관단체	연구(발표)자
개재	1	중성자방사화분석법응용	동위원소회지	1997/12/1	RI협회	정용삼
	2	인체모발 식별에 관한 과학적 연구	과학수사연보	1997/29/	국과수(연)	장성길, 정용삼, 정영주, 조승연
	3	한국인의 상용식품내 요오드 함량	한국영양학회지	1998/31/2	한국영양학회	문수재, 김정연, 정영주, 정용삼
	4	INAA와 ISIE에 의한 모유와우유내 요오드함량분석방법비교	한국영양학회지	1998/31/2	한국영양학회	문수재, 김정연, 정영주, 정용삼
	5	중성자방사화분석을 이용한 퇴적물의 정량 및 비교연구	대한지하수환경학회지	1998/5/2	대한지하수환경학회	정용삼, 정영주, 문종화, 이길용, 윤윤열, 김정태, 이수형
	6	NAA에 의한 지하수중 우라늄의 정량	대한지하수환경학회지	1999/5/4	대한지하수환경학회	정용삼, 문종화, 정영주, 박광원
	7	NAA에 의한 고분자물질중의 무기원소의 분석	고분자과학과 기술	1999/10/3	한국고분자학회	이길용, 정용삼
	8	INAA에 의한 해조류내 독성 미량원소의 비교분석	한국분석과학회지	1999/12/4	한국분석과학회	정용삼, 문종화, 박광원, 이길용, 윤윤열
	9	PM-10의 채취와 조성물질의 실험실간 동시측정 비교연구	한국대기환경학회지	1999/15/4	한국대기환경학회	서영화, 이병규, 정용삼, 정영주, 문종화, 이길용, 심상권 외
	10	INAA, ICP, AAS를 이용한 대기먼지의 다원소분석	한국대기환경학회지	1999/15/4	한국대기환경학회	정용삼, 문종화, 정영주, 박광원, 이길용, 윤윤열, 심상권 외
	11	NAA법에 의한 생물학적시료(쌀밥)의 미량원소분포연구	보건과학논집	1999. 9	연세대학교	조승연, 이상순, 강상훈, 정용삼
국내 발표	1	대기분진의 중성자방사화분석에 의한 환경관측연구	한국원자력학회 (추계)	1997.10.	한국원자력학회	정용삼, 문종화, 박광원, 강상훈
	2	중성자방사화분석에 의한 대기오염관측연구	한국환경위생학회 (춘계)	1998. 6.	한국환경위생학회	정용삼, 문종화, 강상훈, 조승연
	3	핵분석기술에 의한 담배연기 내의 원소분포연구	한국환경위생학회 (춘계)	1998. 6.	한국환경위생학회	조승연, 정용삼, 정영주, 강상훈
	4	중성자방사화분석법에 의한 플라스틱재료중 미량원소 분석	한국분석과학회 (춘계)	1998. 5.	한국분석과학회	이길용, 심상권, 윤윤열, 정용삼
	5	INAA/RNAA에 의한 생물시료중 Th의 정량연구	한국원자력학회 (추계)	1998.10.	한국원자력학회	정용삼, 문종화, 강상훈
	6	대기분진(PM-10)의 실험실간 동시측정연구	한국대기보전학회 (추계)	1998.11.	한국대기보전학회	서영화, 이병규, 정용삼, 문종화, 정영주 외
	7	INAA, ICP, AAS에 의한 PM10 대기입자의 미량원소 비교측정	한국대기보전학회 (추계)	1998.11.	한국대기보전학회	정용삼, 문종화, 박광원, 이길용, 윤윤열 외
	8	INAA에 의한 지하수중 우라늄의 정량	한국분석과학회 (추계)	1998.11.	한국분석과학회	정용삼, 문종화, 정영주, 박광원
	9	INAA를 이용한 해조류중 중금속 및 미량원소분석 비교검증	한국분석과학회 (추계)	1998.11.	한국분석과학회	정용삼, 정영주, 문종화, 이길용
	10	토양 및 식물체중 무기성분의 분석 및 분포측정	한국환경분석학회 (추계)	1998.11.	한국환경분석학회	이길용, 정용삼, 이계호 외
	11	주물작업장 실내공기중 부유 입자내의 미량원소분포연구	한국환경위생학회 (추계)	1998.11.	한국환경위생학회	조승연, 이상순, 강상훈, 정용삼
	12	비파괴 NAA법을 이용한 고분자소재중 무기성분 분석	한국고분자학회 (춘계)	1999. 4.	한국고분자학회	이길용, 윤윤열, 심상권, 정용삼
	13	XRF와NAA에 의한 태국 토양내 금속의 반정량분석	한국분석과학회 (추계)	1999. 5.	한국분석과학회	박용준, T.Choosri, 정용삼
	14	RNAA 에 의한 생물시료내 U의 분석	한국분석과학회 (추계)	1999. 5.	한국분석과학회	정용삼, 문종화, 박광원, 강상훈
	15	RNAA에 의한 한국산 종합식품내 Th의 분석	한국원자력학회 (춘계)	1999. 5.	한국원자력학회	정용삼, 문종화, 박광원, 강상훈
	16	NAA에 의한 의약품캡슐 및 고분자착색용안료중의 중금속분석	한국분석과학회 (춘계)	1999. 5.	한국분석과학회	이길용, 윤윤열, 심상권, 정용삼
	17	RNAA법을 이용한 생체시료중의 우라늄, 토륨의 정량분석	대한화학회 (추계)	1999.10.	대한화학회	박광원, 정용삼, 문종화
	18	RNAA와 ²³⁹ Np 추적자를 이용한 한국식품중 U의 정량	한국원자력학회 (추계)	1999.10.	한국원자력학회	정용삼, 문종화, 박광원, 강상훈
	19	NAA법을 이용한 대기분진중 미량원소의 농도측정에 관한 연구	한국대기환경학회 (추계)	1999.10.	한국대기환경학회	정용삼, 문종화, 김선하, 박광원, 강상훈
	20	NAA법을 이용한 대기분진중 미량원소의 비교분석	한국분석과학회 (추계)	1999.11.	한국분석과학회	정용삼, 문종화, 김선하, 박광원, 강상훈

2) 지적재산권 출원·등록 실적

구분	연 번	명칭	국명	출원/등록일	출원/등록번호	발명(연구) 자
프 로 그 램	출 원	1				
		2				
		3				
		4				
		5				
	登 록	1	한국	98. 7. 1.		정용삼외 3인
				98. 8. 31.	98-01-21-4639	
		2	한국	98. 8. 21.		정용삼외 3인
				98.10. 16.	98-01-21-5156	
		3	한국	00. 1. 18.		정용삼외 3인
				00. 2. 24.	00-01-12-1238	
		4	한국	00. 1. 18.		정용삼외 3인
				00. 2. 24.	00-01-21-1237	
		5	한국	00. 3. 10.		정용삼외 3인
					프로그램00-000	

3) 기술이전 실적

이전기술내용	업체명	방법 (용역/자문/ 수탁)	경비(기술료)	기간	비고
모발의 NAA분석기술	국립과학수사연	자문		3년	소장/장관 공로상
NAA측정기술 및 도자기 분석	문화재관리연	자문		1개월	
모유의 요오드 NAA 분석	연세대 학교	자문		6개월	

4) 기술보고서 및 번역서

KAERI/TR-898/97

중성자방사화분석을 이용한 대기환경관측기술의 고찰

Applied Research of Environmental Monitoring
using Instrumental Neutron Activation Analysis

한국원자력연구소

KAERI/TS-56/98

방사화분석을 위한 감마선 측정법

The Measurement of Gamma-Ray for Activation Analysis

한국원자력연구소

**양성자유도 X-선 방출분광법을 이용한
대기입자중의 금속의 정량**

**Determination of Metals in Ambient Particulate Matter
using Proton Induced X-Ray Emission(PIXE) Spectroscopy**

한국원자력연구소

X-선 형광분광법을 이용한 대기입자중의 금속의 정량

**Determination of Metals in Ambient Particulate Matter
using X-Ray Fluorescence(XRF) Spectroscopy**

한국원자력연구소

중성자 방사화분석법을 이용한 대기입자중의 금속의 정량

**Determination of Metals in Ambient Particulate Matter using
Neutron Activation Analysis(NAA) Gamma Spectrometry**

한국원자력연구소

**EPA STANDARD METHODS
FOR APM ANALYSIS
BASED ON NUCLEAR METHODS**

***INAA
PIXE
XRF***

June 1999

U.S. Environmental Protection Agency

5) 중성자 방사화분석 절차서

중성자방사화분석 절차서



한국원자력연구소

1. 개 요

여러가지 형태의 시료중에 존재하는 성분원소를 정량하기 위하여 시료를 원자로의 중성자로 방사화시킨 후 방출하는 해당 원소의 감마선 핵종을 측정분석하기 위해 시료와 동일조건의 다핵종 표준선원(60~1400 keV 범위)을 사용하여 HpGe 검출기의 에너지 및 계측효율을 교정한 후, EG & G ORTEC 회사의 GAMMA VISION software를 이용한 감마선 다중 채널분광분석기(MCA)로 방사능을 측정하고 합량계산 프로그램으로 원소의 양 또는 농도를 구한다.

2. 적용범위

본 측정법은 측정원소의 핵적성질(자연존재비, 방사화단면적, 반감기 등) 및 방사화 방식에 따라 ng/g~w% 범위의 분석감도로 다종다양한 매질 시료중 성분원소의 정량에 적용할수 있으며, 핵적, 분광학적 간섭 보정이 요구된다.

3. 기기 및 시약

- 3.1 Coaxial type의 저준위 HpGe detector와 납차폐체
- 3.2 High voltage(HV) power supply, spectroscopic amp. 등 MCA 주변기기
- 3.3 MCA system, 16000 Channel
- 3.4 표준감마선원 : 0.1~5 μ Ci 복합 표준선원(Disc type), 60 - 1400 keV 범위
- 3.5 표준시료 및 인증표준물질
- 3.6 Chemical Balance
- 3.7 중성자 조사장치(원자로 및 공압이송관) 및 Auto-Timer(또는 Stopwatch)
- 3.8 중성자 조사용기(PE Rabbit) 및 시료용기(PE Capsule)
- 3.9 Radiation Survey Meter, Personal Dosimeter(Pocket dosimeter 또는 TLD)
- 3.10 방사성 시료보관함(Lead Box)

4. 분석과정

4.1 감마분광 분석기의 작동

4.1.1 NIM Bin 전원스위치를 켜고 HV Supply의 Knob을 조절하여 서서히 Detector HV를 검출기의 특성에 따라 조절한다. 이때 만약 LN₂ monitor가 작동하던지 HV Inhibitor가 작동하면 액체질소를 채워 넣고 8시간 이상 방치했다가 재작동시킨다.

4.1.2 MCA/PC를 작동시켜 GAMMA VISION Software를 가동시키고, 시료의 계측을 할 수 있도록 모든 상태를 맞추어 놓는다.

4.2 복합 표준선원을 이용한 MCA의 감마선 에너지 교정

4.2.1 감마 표준선원을 검출기에 설치한 시료지지대의 일정한 위치(5~10cm)에 올려놓고 알짜피이크 면적에서 적어도 20,000 counts(0.7% 계측불확도)를 얻을 수 있도록 일정시간 동안 계측하여 감마선 스펙트럼 파일(*.CHN)을 얻는다.

4.2.2 에너지교정 모드를 선택한 후, 해당 스펙트럼 파일을 띄워서 감마핵종들의 해당 감마에너지 peak에 일치하는 centroid 채널로부터 각 MCA 채널에 대한 에너지를 정한다.

4.2.3 커저를 이동시켜 교정된 에너지를 확인하고, 측정된 에너지가 원하는 정확도(± 0.2 keV 이하)밖에 있다면 에너지교정을 다시한다.

4.3 복합 표준선원을 이용한 HpGe 검출기 계측효율 교정

4.3.1 측정하려는 시료와 같은 기하학적 위치를 갖는 표준선원을 검출기에 설치한 시료 지지대의 지정한 위치에 올려놓고 일정시간 동안 계측하여 감마선 스펙트럼 파일(*.CHN)을 얻는다. 4.2에서 얻은 스펙트럼 파일을 그대로 사용할 수 있다).

4.3.2 검출효율 모드를 선택하여 해당 감마선 peak로부터 알짜면적을 구하여 감마선 에너지에 따른 계측효율 관계식을 얻어 놓는다(GAMMA VISION으로 연산방식에 따라 효율곡선의 파라미터 자동계산).

4.4 시료의 방사화

- 4.4.1 방사화시킴 시료는 고체상태로 하며 특수처리를 하는 경우에는 액체나 기체도 가능하다. 정확히 칭량된 고체시료를 증성자 조사용 시료용기에 취하고 가열밀봉한 후 조사용 캡슐(Rabbit)에 넣는다. 시료는 조사하는 동안의 안전성과 오염을 고려하여 항상 이중포장을 원칙으로 한다.
- 4.4.2 공압 이송관을 이용하여 선택한 조사공으로 시료를 보내어 지정된 시간(t_i)동안 조사(방사화)를 시킨다. 조사시간은 Auto-timer 또는 Stopwatch를 이용하여 측정한다.
- 4.4.3 분석조건에 따라 방사화된 시료의 방사능 감쇠를 위해 지정된(t_d) 시간동안 냉각시킨다. 이때 시료는 납차폐상자에 보관한다.
- 4.4.4 조사된 시료를 조사공으로부터 인출할 때 및 방사능 계측을 위해 옮기거나 이동시킬 때는 반드시 Survey Meter로 방사능 준위를 관측한 후 실행하며 “방사화분석실험실에서의 방사선 안전관리 수칙”을 준수해야한다.

4.5 시료의 방사선 계측

- 4.5.1 분석조건에 따라 냉각시킨 시료를 그대로 또는 새로운 계측용기에 옮기어 지정된 위치의 검출기에 올려놓고 검출핵종의 수명(반감기)에 따라 일정시간 동안 계측한다; 단수명 : 300~600초, 중수명 : 1,000~2,000초, 장수명 : 4,000~10,000초.
- 4.5.2 계측기의 불감시간(dead time)이 적어도 10%를 넘지않도록 시료와 검출기간의 거리를 조절한다.
- 4.5.3 바탕값 보정을 하는 경우에는 동일하게 조사, 냉각된 빈 계측용기를 검출기에 올려놓고 시료의 계측시간과 동일하게 계측하여 바탕 스펙트럼을 얻는다(실제 시료용기의 바탕값 및 검출기의 백그라운드는 수십 차례 이상의 바탕값을 얻어 미리 확립해 놓는다).
- 4.5.4 시료의 스펙트럼으로부터 각각 바탕 또는 백그라운드 스펙트럼을 빼준 후 프로그램상에서 Master Library (Nuclide Navigator)를 실행시키어 스펙트럼상에 나타난 감마선 방출핵종을 확인한 후 peak 면적으로부터 각 방사성 핵종의 방사능과 원소의 농도를 계산한다. 전 과정은 OMNIGAM/GAMMA VISION Software 및 방사화분석용 통합 전산코드(Labview)에서 단계적으로 수행되어 최종적으로 각 방사성 핵종의 방사능, Bq(dps), 원소의 양 및 농도, 계측오차, S/N ratio 등이 보고서(NAA-01/NAA-02)로 작성되어 출력된다.
- 4.5.5 필요한 경우에는 감쇠보정, 반감기보정을 하며 인증표준시료의 보증값과 분석결

과를 비교검증한다.

5. 계산 및 결과표시

5.1 OMNIGAM Software, EG & G ORTEC 및 중성자방사화분석용 함량계산 전산코드로 자동계산.

5.2 방사화분석에서 이용되는 함량의 계산식(절대법)

$$A = \sigma \Phi \theta (\omega/M) N_A \epsilon \gamma SDC \quad (1)$$

여기서,

A : 생성물로부터 측정된 방사능, Bq

σ : 방사화단면적, cm^2

Φ : 중성자속, $\text{n/cm}^2\text{s}$

θ : 방사화된 동위원소의 자연존재비

ω : 정량된 원소의 양, g

M : 정량하려는 원소의 원자량, g/mole

N_A : 아보가드로 상수, $6.022 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$

ϵ : 측정된 감마선 에너지에 대한 검출효율

γ : 에너지에 따른 광자의 방출률

S : 포화인자, $[1 - \exp(-\lambda t_i)]$; t_i 는 조사시간

D : 붕괴인자, $\exp(-\lambda t_d)$; t_d 는 붕괴시간 또는 냉각시간

C : 계측시간 동안의 핵종붕괴의 보정인자, $[1 - \exp(-\lambda t_c)/\exp(-\lambda t_c)]$;

t_c 는 계측시간

λ : 방사성 생성물의 붕괴상수

(1)식을 함량계산식으로 다시 쓰면

$$\omega = A \cdot M / N_A \theta \sigma \Phi [1 - \exp(-\lambda t_i)] \quad (2)$$

여기서, $A = (\text{계수/초}) / \varepsilon \gamma \exp(-\lambda t_d)$

$$\omega = (\text{계수/초}) M / N_A \theta \sigma \Phi \varepsilon \gamma [1 - \exp(-\lambda t_i)] \cdot \exp(-\lambda t_d) \cdot f(-\lambda t_c) \quad (3)$$

(3)식에서 원자량(M), 아보가드로수(N_A)와 동위원소존재비(θ)는 잘 알려진 상수이다. 단면적(σ)은 상기의 방사화식과 알려진 원소의 질량의 측정을 이용하여 계산하나 보통은 핵자료집의 문헌값을 이용한다. 붕괴상수(λ)와 방출율(γ)는 정밀하게 알려져있으며 문헌값을 이용한다. 중성자속(Φ)과 검출효율(ε)의 결정은 기하학적 위치에 따라 실험적으로 측정하여 만들 수밖에 없다.

비교(체)법을 이용한 함량의 계산은 성분의 양을 알고 있는 비교체를 이용하여 시료와 비교체의 분석조건($t_i = t_d = t_c$)이 동일한 경우에 다음식으로 계산할 수 있다.

$$\omega_x = \omega_s \cdot (A_x / A_s) \quad (4)$$

여기서,

ω_x : 시료중의 성분원소의 양 A_x : 시료중의 해당핵종의 방사능

ω_s : 비교체중의 성분원소의 양 A_s : 비교체의 해당핵종의 방사능

만약 시료와 비교체의 분석조건인 t_i , t_d , t_c 가 다른 경우에는 (1)식에서 S, D, C 인자에 대한 보정을 다음과 같이 해주어야한다.

$$\omega_x = \omega_s \cdot (A_x / A_s) \cdot (S_s / S_x) \cdot (D_s / D_x) \cdot (C_s / C_x) \quad (5)$$

시료와 비교체에서 조사 및 계측조건이 다르면, 식(1), (4), (5)의 미리 필요한 조건들이 교란되어 계통오차가 발생하기 때문에 주의해야한다.

5.3 측정불확도를 평가한후, 다음과같이 측정값을 표현한다.

측정값 $\pm$ 표준편차(신뢰수준)

5.4 검출한계는 Currie의 정의에 의해 백그라운드 계수치를 이용한다.

6. 오차범위

이 측정법의 불확도는 방사능의 계측에서 오는 통계적 계측오차(10% 이내)를 포함하며, 상대 표준편차는 대상원소와 시료의 매질에 따라 다르며 대부분 $\pm 15\%$ 이내이다.

Peak 오차의 계산 :

$$\text{백그라운드오차} = \left[\frac{\text{백그라운드 면적}(A_b) \times \text{peak 폭}(W)}{\text{저평균폭} + \text{고평균폭}} \right]^{1/2}$$

$$A_g : \sum C_i$$

$$A_b : 1/2(B_l + B_h) \times W$$

$$\text{총면적오차} = [\text{총면적}(A_g)]^{1/2}$$

$$\text{알짜면적오차} = [(\text{총면적오차})^2 + (\text{백그라운드오차})^2]^{1/2}$$

7. 간섭 및 방해

비파괴 동시다원소 측정법이기에 때문에 감마선을 측정할 때 발생하는 방사화된 시료로부터 방출하는 감마선과 물질과의 상호작용에 의한 분광학적간섭, 유사한 감마에너지의 중첩, 다른 핵반응에 의해 생성되는 감마선 방출핵종의 핵적 간섭등을 고려하여야 한다. 또한 조사할때의 중성자속의 변화, 열외중성자에 의한 방사화율의 차이, 계측위치의 변동 등에 의해 오차를 유발할 수 있다.

8. 참고문헌

8.1 放射化分析 の 實際

8.2 IAEA/TR 273

8.3 ANSI, N42.14-1978

8.4 NCRP/R No.58

8.5 OMNIGAM/GAMMA-VISION/Nuclide Navigator Software Manual, EG & G
ORTEC

9. 첨부양식

9.1 중성자방사화분석보고서(I) : NAA-01

9.2 중성자방사화분석보고서(II) : NAA-02

6) 중성자 방사화분석 지침

중성자 방사화분석 지침

품질보증 및 관리

측정불확도의 평가 및 표현

검출한계

원자로 중성자방사화분석에서 품질보증 및 관리

1. 정 의

품질보증시스템(QA) : 정해진 품질의 표준에 부합됨을 검증하는 분석데이터의 이용자 또는 생산자에게 제공하기 위한 목적을 갖는 활동. 두 개의 분리된 관련활동으로 구성된다; 품질관리 및 품질검사.

목적 : 품질은 정확, 정밀한 시험결과를 산출하는 것이며, 이는 객관적이고 통계적인 기법에 의해 증명되어야한다. 이러한 증명은 수시로 계획하여 실시하고 그 결과는 피드백되어야함.

- 1) 품질관리시스템(QC) : 이용자의 요구에 부합되도록 분석데이터의 품질을 관리하기 위한 목적을 갖는 모든 활동.
- 2) 품질검사시스템 : 품질관리 활동은 효과적으로 이루어진다는 것을 검증할 목적을 갖는 모든 활동. 이것은 생산된 데이터의 품질과 분석시스템의 수행도의 연속적인 평가를 포함한다.

2. 품질보증을 위한 방법

- 시험소간 비교나 숙련도시험 프로그램 참가.
- 통계적 기법을 사용한 품질관리 제도.
- 인증표준물질 또는 2차 표준물질을 활용한 품질관리.
- 동일하거나 상이한 방법을 사용한 반복 또는 재현 시험 등.

3. 관련 용어 및 해설

- 측정(Measurement) : 어떤 양을 기준으로 사용하는 양과 비교하면서 수치를 사용하여 나타내는 일련의 조작.
- 측정의 불확도(Uncertainty of measurement) : 측정량에 귀속된 값의 산포를 특성짓는 측정결과와 관련된 매개변수.
- 내부 품질관리(Internal quality control, IQC) : 시험소의 시험결과가 충분히

신뢰할수있는지의 연속적인 감시를 위하여 행해지는 시험소 내부의 모든 행위와 과정; IQC는 재료의 batch단위별로 시험결과의 정확도를 점검하고, 시험재료의 반복분석을 통하여 정밀도를 점검한다.

NAA에서의 내부품질관리는 다음 사항들을 포함한다 ;

- ① 정량하려는 원소에대한 하나 이상의 indicator 핵종. 예, Ca는 ^{47}Ca , ^{47}Sc , ^{49}Ca 이용하여 정량할 수 있음(핵자료집을 이용).
- ② 한 indicator 핵종에 대해 하나 이상의 감마선에너지. 예, ^{24}Na 의 정량에는 1368 keV와 2754 keV를 이용할 수 있음.
- ③ 한 indicator 핵종의 계측을 여러방법(계측시간, 위치)으로 할 수 있음.
- ④ 동일한 피이크에 대한 여러 가지 peak fitting법을 사용. 피이크면적에 의심이 있을 때 추가로 다른 방법을 이용하여 검사할 수 있음.
- ⑤ 상대비교 및 k_0 법에 의한 표준화.
앞에서 열거한 관리절차들은 부가적인 조사 및 계측이 없이 감추어진 계통오차를 검출하고 제거 또는 축소하는 수단을 분석자에게 제공한다.
- ⑥ 여러 가지 조사 및 계측조건의 이용. 예, 열, 열외, 속중성자의 이용 및 검출에너지에 따른 검출기의 종류 및 다른 계측기법 이용.

- 품질보증 체계(Quality assurance system/program) : 시험소 인정을 위해 요구되는 표준 분석능력을 갖추기위 해 행해지는 시험소의 모든 활동들; IQC와 숙련도 시험은 품질보증 체계의 아주 중요한 성분이며 직원훈련, 행정절차, 관리조직, 감사등을 포함한다. 인정기구는 이 체계를 바탕으로 시험소를 판정한다.
- 시험(Test) : 주어진 제품, 공정, 또는 서비스의 특성(들)을 규정된 절차에 따라 결정하는 일련의 기술적 조작.
- 시험소(Testing laboratory) : 시험을 수행하는 시험소.
- 시료(Test item) : 숙련도시험을 목적으로 참가 시험소에 제공되는 물질이나 가공품.
- 시험방법(Test method) : 시험의 수행을 위하여 규정된 기술절차.
- 시험결과(Test result) : 규정된 측정방법을 완전히 수행하여 얻은 특성값.
- 시험소 숙련도 시험(Laboratory proficiency testing) : 시험소간 비교를 통하여 시험소의 시험 수행도를 판정하는 것.

- 시험소간 비교(Interlaboratory comparison) : 미리 설정된 조건에 따라 같거나 유사한 시료에 대하여 시험의 구성, 수행 및 평가를 둘 이상의 시험소가 실시하는 것.

분석법간 비교는 다른 원리를 갖는 분석법간 비교이며 지금까지 품질관리를 위해 자주 사용되고 있다.

- 표준물질(Reference material, RM) : 하나 이상의 특성값이 충분히 확정되어 있는 균질한 소재 또는 물질로서 측정기기의 교정이나 측정방법의 평가 또는 물질의 특성값을 결정하는데 사용하는 물질.
- 인증표준물질(Certified reference material, CRM) : 특성치를 표현하는 단위의 정확한 실현을 위하여 확립된 소급절차에 따라 하나 또는 그 이상의 특성값을 인증한 인증서가 첨부된 표준물질로서 각 인증값에는 정해진 신뢰도 수준에서 불확도를 표시해야함. 미국 표준연구소에서는 Standard reference material, SRM 이라는 용어를 사용한다.

NAA에서 인증표준물질의 분석을 통한 품질관리는 다음의 실제적 사항들을 포함한다 ;

- 인증표준물질은 분석정확도의 검증, 불확도의 최소화, 최적 분석조건 설정, 분석자 또는 기술의 정확도에 대한 정보의 제공 그리고 새로 개발된 분석법의 검증을 위해서 사용할 수 있다.
- 분석정확도의 품질관리나 검증을 위하여, 실시료에서 예상되는 분석대상원소의 농도범위에 속하는 유사한 매질의 인증표준물질을 두 개 이상 미지의 검체시료와 사전에 또는 함께 분석해야한다.
- 인증표준물질은 미지시료와 함께 수시로 분석해야하며 품질관리를 위해 Control chart를 보관해야한다. Control chart는 시간에 따른 관련 파라메타의 그래프이다. 그것은 분석에 포함되는 수행의 안정성을 감시한다. 감시해야할 파라메타중에는 중성자속, 검출기의 효율 및 분해능이 있으며, 사용한 인증표준물질 중 다원소에 대한 분석결과는 가장중요하다.
- 사용한 인증표준물질에 대한 분석결과는 항상 분석보고서와 간행물에 미지시료에 대한 것과 함께 첨부해야한다. 미지시료의 원소농도는 분석값과 인증표준물질의 인증값을 비교함으로써 검증할 수 있다. 다음의 판정을 추천한다;

$$|X_e - X_c| < [(S_e^2 + S_c^2)]^{1/2} \quad (1)$$

식(1)일 때, 관련원소의 정량이 검증된 것으로 생각한다. X_e , X_c 는 분석값과 인증값이며, S_e , S_c 는 95% 신뢰구간에서의 분석값과 인증값의 표준불확도이다.

중성자 방사화분석의 장점중의 하나는 상대적으로 매질에 무관하다는 것이다. 예를 들어 대기분진을 분석할 때 QA를 위한 CRM은 침적물, 토양, 석탄, 석탄비산재 등을 사용해도 무방하다. 단, 시료의 크기나 부피가 클때는 검출효율을 실험적으로 또는 파라미터를 이용하여 정규화시켜야한다.

사용한 CRM의 인증서에 포함된 모든 조언을 따르는 것은 중요한 일이다 : 인증기간, 보관조건, 분석을 위해 취해야하는 최소량, 건조조건, 다른 용도의 소개등.

CRM은 일상분석에서 좋은 정확도와 정밀도(예, 2% 이하의 불확도)의 표준체로 사용할수 있지만, 인증값의 불확도(화학표준체의 불확도 1%이하에 비해서 보통 5-10%)가 좋지않고, 가격이 비싸며 후보 CRM의 분석에 적당치않기 때문에 다원소 표준체로 사용하는 것은 추천하지 않는다. 끝으로 CRM은 전 분석과정을 검정할 수 없다. 시료수집에서의 불확도와 시료처리 부분의 불확도는 CRM에 의해서 검출할 수가 없다.

- 소급성(Traceability) : 명시된 불확도를 갖고 연속적 비교를 통하여 명문화된 기준(국가 또는 국제표준)과 연결될 수 있는 측정결과 또는 표준값의 특성.
- 반복성(Repeatability) : 반복성 조건하에서 구해진 시험결과들 사이의 일치성; 여기서, 반복성 조건이란 균질한 재료로부터 임의로 채취한 시편을 사용하여 짧은 시간에 동일한 시험소, 장비, 시험방법, 작업자에 의해 시험결과가 얻어지는 조건을 말함.
- 재현성(Reproducibility) : 재현성 조건하에서 구해진 시험결과들 사이의 일치성; 여기서, 재현성 조건이란 다른 시험소에서 동일한 재료에 대해 동일한 시험방법으로 시험결과가 얻어지는 조건을 말함.
- 정밀도(Precision) : 규정된 조건하에서 얻은 독립적 시험결과 사이에 일치하는 근접정도.
- 정확도(Accuracy) : 시험결과와 인정된 기준값 사이에 일치하는 근접정도.
- 편의(Bias) : 시험결과들의 평균과 인정된 기준값 사이에 일치하는 근접정도.
- 이상값(Outlier) : 다른 일련의 값들과 일치하지 않는 값.
- 극결과(Extreme result) : 다른 일련의 데이터들과 크게 일치하지 않는 값

및 이상값. 평균이나 표준편차와 같은 통계량에 큰 영향을 미칠 수 있다.

- 로버스트 통계기법(Robust statistical technique) : 극결과가 평균이나 표준편차의 추정값에 미치는 영향을 최소화하기 위한 기법.

원자로 중성자 방사화분석에서 측정결과의 평가

1. 불확도 평가 및 표현

1) A Type 불확도

A형 불확도는 통계적 방법에 의해 평가된 불확도 항목들로 정의한다. 가장 일반적인 표현은 표준불확도(표준편차)와 그것의 확장(정해진 신뢰구간내에서)이다.

원자로 중성자 방사화분석에서, 계측통계량은 A형 불확도의 피할 수 없는 성분이다. 이것은 대부분의 중성자 방사화분석용 전산프로그램을 통해 수치적으로 평가된다. 시료의 칭량, 시료의 균질성, 중성자속, 기하학적 계측위치, 방사화학분리에서의 화학적 수율등에서의 변동은 절차를 반복함과 표준불확도를 계산함에 의해 A형 불확도를 만들 수 있다.

한 물질의 시료 m 개로부터 구한 한 원소의 결과를 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_m$ 이라고 가정하면, 단일 측정에 의한 표준불확도(편차), S_{At} 는 식(1)로 표현한다.

$$S_{At} = \{ \sum (N_i - \bar{N})^2 / (m-1) \}^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } S_{At}^2 = S_c^2 + S_n^2 \quad (2)$$

여기서, S_c 와 S_n 는 각각 계측과 비계측 기여분으로부터의 A형 불확도이다. S_{At} 는 A형 총불확도이다.

실제로 다음 세가지의 상황이 있다.

- i) $S_{At} > S_c$: 비계측 A형 불확도가 존재함을 가르킴.
- ii) $S_{At} \approx S_c$: 계측통계량이 A형 불확도를 지배함을 가르킴.
- iii) $S_{At} < S_c$: 한정된 수의 시료로부터 얻은 결과중에서 '비정상적인 일치'를 의미한다. 이경우에는, S_{At} 보다는 오히려 S_c 를 A형 총불확도로 사용해야한다.

평균에 대한 표준불확도, S_{At}' 는 식(3)으로 표현한다.

$$S_{At}' = S_{At} / \sqrt{m} \quad (3)$$

2) B Type 불확도

B형 불확도는 비통계적 방법에 의해 평가된 불확도 항목들로 정의한다. B형 불확도의 수치는 간혹 구하기 어렵다. 요령은 다음과 같은 이용할 수 있는 모든 관련정보를 사용하는 것이다 :

- 사전에 측정된 데이터(기존의 자료)
- 물질이나 장비의 거동이나 특성의 일반적 지식이나 경험
- 제조자의 사양(시방서)
- 다른 보고서나 계산으로부터 얻은 데이터
- 핸드북으로부터의 참고데이터의 불확도

A형 불확도와와의 결합을 위해서, 다음의 방법에 의해 B형 불확도 항목의 분포 모델과 다른 표현을 표준불확도로 전환할 필요가 있다 :

- 신뢰구간이 정해진 경우
 - 여러 신뢰구간의 정규분포에 대하여, 표준불확도로 전환(90, 95, 99 및 99.73%의 신뢰구간에 대해 각각 1.6, 1.96, 2.576 과 3으로 나눔; 50 과 68.3%의 신뢰구간에 대해 각각 1과 1.48로 나눔)
- 신뢰구간이 정해지지 않은 경우
 - 직사각형 분포와 '범위' 표현에 대해 $\sqrt{3}$ 으로 나눔.
 - 삼각형 분포와 '범위' 표현에 대해 $\sqrt{6}$ 으로 나눔.

직사각형 분포는 다른 어떠한 정보도 없을 때, 합리적인 선행모델이다. 그러나, 한계의 중심 근처에 의심되는 양의 수치가 한계에 근접한 값 이상으로 알려졌다면, 삼각형 또는 정규분포가 더 좋은 모델일수도 있다.

원자로 중성자 방사화분석의 전과정의 각 절차에서, B형 불확도의 완전한 분석은 이들 불확도를 제거하거나 감소시키는 수단을 취하고, 나머지 성분을 평가하는 것이 기본사항이다.

원자로 중성자 방사화분석에서 B형 불확도의 가능한 발원은 다음사항들을 포함한다 :

- i) 시료와 표준체의 준비에서 칭량불확도(예, 시료의 총무게에서 불확도의 원인이 되는 일정하지 않은 수분량).
- ii) 시료준비에서 구해야할 원소의 손실 또는 오염(예, 시료의 처리 및 운반 과정에서 발생될 수 있는 것).
- iii) 시료와 표준체에서 결정해야 할 원소의 표적핵종의 자연 동위원소 존재

비의 차이(주목할 만한 것은 U은 시료와 표준체에서 농축형태 또는 소모된 형태로 존재할 수 있다. 핵분열물질을 indicator로 사용 할 때 불확도가 발생 할 수 있다).

iv) 표준용액의 피펫팅, 저장, 준비에서 삽입된 원소농도의 변동(예, 관련원소의 흡착 및 용매의 증발).

v) 속밀도의 증감이나 자기차폐에 의한 시료와 표준체/비교체에 의해 받아들인 중성자속의 차이.

vi) 불감시간 손실과 펄스 파일업에 대한 부정확한 보정과 중첩된 피이크의 나쁜 분리(poor deconvolution).

vii) 핵반응과 감마선 스펙트라로부터 간섭에 대한 부정확한 보정이나 간과.

viii) RNAA에서 부정확한 화학적 수율.

ix) 시료와 표준체에 대한 기하학적 계측위치에서의 차이(또는 여러 계측위치에 대한 부정확한 정규화).

암모니아수에 KI를 용해시킴에 의한 요오드 표준체의 준비에서 B형 불확도에 대한 예가 아래에 주어졌다.

- ① 요오드표준체를 만들기위해 사용된 표준체는 UK회사로부터 구한다. 제조자에 의해 주어진(표시된) I 의 함량은 >99.5%이다.
 - 이 정보로부터, 화학시약의 상대적 불확도는 $\pm 0.25\%$ 이며 사각형 분포를 갖는다.
 - KI의 함량은 독립된 시약과 CRM으로 검증할 필요가 있다.
- ② 시약병 A에 @ 100mg의 KI(@ 80mg의 I)를 칭량하여 넣는다.
 - 이 단계에서 상대적 불확도는 $\pm 0.2\%$ 이다(천평눈금자 $\pm 0.1\text{mg}$, 두 번 칭량).
- ③ @ 16g의 증류수를 칭량하여 시약병 A에 넣어 KI를 용해시킨다(용액을 염기성으로 만들기위해 소량의 암모니아수를 가한다).
 - 이 단계에서의 불확도는 무시한다.
- ④ 농도가 일정하게 유지될때까지 용액을 흔들어준다.
- ⑤ @ 750mg의 용액 A를 시약병 2로 옮긴다.
 - 이 단계에서의 불확도는 무시한다.
- ⑥ @ 19g의 증류수를 칭량하여 시약병 B에 넣어 용액 A를 희석시킨다.
 - 이 단계에서의 불확도는 무시한다.

- ⑦ 농도가 일정하게 유지될때까지 용액 B를 흔들어준다.
- ⑧ @ 28mg의 용액 B를 각 여과지위에 점적한다.
- 이 정보로부터, 화학시약의 상대적 불확도는 $\pm 0.7\%(0.2/28)$ 이며 사각형 분포를 갖는다.
- ⑨ PE봉지에 각 I 휠터표준체를 넣고 밀봉한다. 각 I 휠터표준체는 @ $5.5\mu\text{g}$ I를 함유한다.
- ⑩ 따라서, 각 I 휠터표준체의 총 상대표준불확도는 다음과 같다.
- $$[(0.25/\sqrt{3})^2 + (0.2/\sqrt{3})^2 + (0.7/\sqrt{3})^2]^{1/2}\% = 0.45\%$$

3) 합성표준불확도

이제 모든 A형과 B형 성분을 표준불확도로 표기한다. 전체 불확도는 오차의 전파법칙을 이용하여 이들 모든 성분을 합성하여 표현할 수 있다. 일반적인 기준으로 “합의 제곱근”(root-sum-of-squares, RRS)” 즉, 표준편차로써 추정된 불확도 요소를 결합하는 법을 사용한다. 즉,

$$S_{At} = \sqrt{\sum S_{Ai}^2} \quad (4)$$

$$S_{Bt} = \sqrt{\sum S_{Bi}^2} \quad (5)$$

$$S_t = \sqrt{(S_{At})^2 + (S_{Bt})^2} \quad (6)$$

여기서, S_{Ai} 와 S_{Bi} 는 각각 A형 및 B형 불확도 성분이다. S_{At} , S_{Bt} 및 S_t 는 각각 총 A형, 총 B형 그리고 전체 표준불확도이다.

4) 확장불확도

표준불확도, S_t , 를 분석결과의 불확도를 표현하는데 직접 사용할수있지만, 더 높은 신뢰도를 갖는 불확도를 주기위해서는 간혹 이것을 요구한다(표준불확도에 대한 신뢰도는 약 68%이며, 자유도에 의존한다). 이 경우에, 범위인자, k ,를 사용한다.

$$S = kS_t \quad (7)$$

신뢰도는 k가 2와 3일 때 각각 대략적으로 95%와 99%이다.

참 고 :

- 측정결과불확도 표현 및 평가지침(국립기술품질원 고시 제 1998-62호)

[표준절차에 따른 응용예]

NAA의 측정불확도 평가 및 표현

1. 불확도 산출절차

1.1 시험분석자는 시험항목에 대한 불확도를 산출함.

1.2 불확도를 산출하는 경우 다음과 같은 순서를 적용하여 산출함.

1.2.1 수식적 모델의 설정.

1) 측정량과 입력량의 관계를 수식적으로 표현.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$$

Y : 측정량, f : 함수관계, $X_1, X_2, \dots, X_n$: n 개의 다른 입력량.

2) 불확도 계산에 필요한 파라미터(예, 상수, 표준물, 측정항목 등)를 조사하고 이들간의 상관관계를 확인.

1.2.2 불확도에 영향을 미치는 요인을 파악하여 “불확도 평가계획서”를 작성.

1) 분석기기

(1) 표준기기(Standard/Reference)

측정시 기준이 되는 표준기기를 말하며, 상위 표준기와의 비교를 통해 불확

도 값이 성적서에 표기됨(예, 저울 등 측정관련 계량기).

(2) 측정기기

측정에 사용되는 장비를 말하며, 기기자체의 특성(예, 분해능, 검출한계, 직진성 또는 안정성, 영점변화, 자동보정값 등) 및 사용방법에 따라 측정량에 영향을 미치는 불확도 요인이 됨.

2) 시험분석자

측정을 수행하는 사람에 의해 나타나며, 체온의 영향, 숙련도, 눈금의 판독에서 오는 편의(bias), 개인적 습관 등이 포함됨.

3) 측정환경

온도, 습도 등에 의한 요인.

4) 시료 채취 및 특성

대표성, 균질도, 조성 및 매질 등에 의한 요인.

5) 이론 및 자료

(1) 인용된 자료의 상수 또는 파라미터의 부정확도에 의한 요인.

(2) 측정방법과 측정절차에서 사용되는 근사값과 여러 가지 가정에 의한 요인.

6) 반복측정

외관상 같은 조건이지만 반복적인 측정에서 나타나는 변동이 포함됨.

7) 기타

측정량에 영향을 미칠 수 있는 모든 불확도 인자를 포함됨.

1.3 A형 표준불확도의 추정.

1.3.1 계측통계량

1) NAA에서 계측통계량은 피할 수 없는 A형 불확도임. 이것은 NAA용 전산 프로그램을 통해 수치적으로 추정됨.

2) 불확도의 전파법칙을 이용한 계측량의 오차(NAA report 결과 이용).

1.3.2 반복측정량

- 1) 반복 측정된 결과에 의해 평균값, 표준편차, 평균표준편차, 자유도($\nu_i = n-1$)를 산출.

$$S_A = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{(n-1)} \right\}} \quad \therefore U_A = S_A / \sqrt{n}$$

- 2) n 이 증가하면 U_A 는 감소하며, $n \rightarrow \infty$ 일 때 U_A 는 0이 됨.

1.4 B형 불확도의 추정.

1.4.1 상기(1.3항)의 A형 불확도 외의 불확도 요인들에 대해 표준불확도를 각각 산출함.

- 1) 이용가능한 정보의 활용.

- (1) 사전에 측정된 데이터(기존의 자료)
- (2) 물질이나 장비의 거동이나 특성의 일반적 지식이나 경험
- (3) 제조자의 사양(시방서)
- (4) 다른 보고서나 계산으로부터 얻은 데이터
- (5) 핸드북으로부터의 참고데이터의 불확도

1.4.2 조사한 불확도 표현 방법에 따라 다음과 같이 계산방법을 구분함.

- 1) 신뢰구간이 정해진 경우

- (1) 정규분포로 보아 반범위 a 에 신뢰구간의 확률에 해당하는 포함인자값, k 로 나누어 계산.
- (2) 여러 신뢰구간의 정규분포에 대하여, 표준불확도로 전환(90, 95, 99 및 99.73%의 신뢰구간에 대해 각각 포함인자 1.6, 1.96, 2.576 과 3으로 나눔; 50 과 68.3%의 신뢰구간에 대해 각각 포함인자 1과 1.48로 나눔)

- 2) 신뢰구간이 정해지지 않은 경우

- (1) 직사각형 분포 : 반범위 a 를 $\sqrt{3}$ 으로 나누어 계산.

(2) 삼각형 분포 : 반범위 a 를 $\sqrt{6}$ 으로 나누어 계산.

1.4.3 필요한 경우 자유도를 산출함.

1) B형 표준불확도에 대한 자유도는 다음식에 의해 산출함.

$$\nu \approx \frac{1}{2}[u(x)/\Delta u(x)]^2 = \frac{1}{2}[100/R]^2$$

여기서, $u(x)$: x 값의 표준불확도, $\Delta u(x)$: $u(x)$ 의 불확도

$R(\text{reliability})$: 어떤값이 가지고 있는 불확도에 대한 불확도의 신뢰도, %

2) 확률이 100%임을 나타내는 경우, $R=100-100=0$ 이 되며, $\nu_i = \infty$ 이 됨.

3) 확률이 50%임을 나타내는 경우, $R=50$ 이 되며, $\nu_i = \frac{1}{2}[100/50]^2 = 2$ 이 됨.

1.4.4 NAA에서는 일차로 B형 불확도 요인을 감소하거나 제거시키는 수단을 취하고 나머지 성분을 추정하는 것이 기본임(A형 불확도의 영향을 고려).

1) NAA에서 B형 불확도의 가능한 요인

(1) 시료와 표준체의 준비에서 무게 불확도(예, 시료의 총무게에서 불확도의 원인이 되는 일정하지 않은 수분량).

(2) 시료준비에서 구해야할 원소의 손실 또는 오염(예, 시료의 처리 및 운반 과정에서 발생될 수 있는 것).

(3) 시료와 표준체에서 결정해야 할 원소의 표적핵종의 자연동위원소 존재비의 차이(예, 농축된 형태와 소모된 형태의 U).

(4) 표준용액의 피펫팅, 저장, 준비에서 삽입된 원소농도의 변동(예, 관련원소의 흡착 및 용매의 증발).

(5) 선속밀도의 증감이나 자기차폐에 의한 시료와 표준체나 비교체의 중성자속의 차이.

(6) 불감시간 손실과 펄스 파일업에 대한 부정확한 보정과 중첩된 피이크의 좋지 않은 분리(poor deconvolution).

(7) 핵반응과 감마선 스펙트라로부터 간섭에 대한 부정확한 보정.

(8) 시료와 표준체에 대한 기하학적 계측위치에서의 차이(또는 여러 계측위

치에 대한 부정확한 정규화).

1.5 합성 표준불확도를 추정.

1.5.1 감응계수의 계산.

- 1) 각 성분요소가 전체 불확도에 미치는 영향을 감응계수라고 하며, 다음식에 의해 구함.

$$C_i = \sigma(y) / \sigma(x_i)$$

여기서, $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, $i = 1, 2, \dots, n$

1.5.2 상관계수의 계산

- 1) 입력량간의 상관관계에 대한 상관계수(correlation factor)를 다음식으로 구함.

$$r(x_i, x_j) = s(X_i, X_j) / s(X_i)s(X_j)$$

- 2) 입력량간의 상관관계가 없는 경우 위식의 결과는 0이 됨.

1.5.3 합성 표준불확도의 계산

- 1) 합성 표준불확도는 불확도 전파법칙에 따라 다음식으로 계산.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)}$$

- 2) 불확도 단위는 측정량과 동일하게 함(감응계수 고려).

1.6 확장 불확도를 추정.

1.6.1 국제기준에 의한 포함인자, k를 구함.

- 1) 유효자유도는 확장불확도 산출시 필요한 범위인자 “k” 를 산출하기 위해 계산하나 국제기준에 의해 포함인자 값이 제시(1.4.2절의 2항)되어 있으므로 이에 따름.

1.6.2 이외의 경우에는 다음식에 의해 산출함.

- 1) 유효자유도의 산출.

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{[u_c(y)]^4}{\frac{[c_1 u(x_1)]^4}{\nu_1} + \frac{[c_2 u(x_2)]^4}{\nu_2} + \frac{[c_3 u(x_3)]^4}{\nu_3}}$$

- 2) 범위인자 “k”의 계산.

위식에서 구한 유효자유도(ν_{eff})와 구하고자 하는 신뢰구간에 따라 Table 1에 나타낸 Student-t Table을 이용하여 k를 구함.

1.6.3 확장불확도의 계산

- 1) 합성 표준불확도에 1.4와 1.6에서 구한 범위인자를 곱하여 계산.

$$U = k u_c \quad (\text{국제적으로 신뢰구간은 95\%, } k = 2 \text{ 로 한다}).$$

2. 불확도의 표현(보고)

- 2.1 시험분석요원은 상기의 방법으로 산출한 불확도를 “불확도 평가보고서”에 기록하고 산출내용과 함께 책임자에게 보고함.

Table 1. 분포의 p부분을 포함하는 구간 $-t_p(v)$ 에서 $+t_p(v)$ 를 정의하는 자유도 v 에 대한 t-분포로부터 $t_p(v)$ 값.

유효자유도 (ν_{eff})	퍼센트로 나타낸 부분 p					
	68.27 ^(a)	90	95	95.45 ^(a)	99	99.73 ^(a)
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.80
2	1.31	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
30	1.02	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
35	1.01	1.70	2.03	2.07	2.72	3.23
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.660	1.984	2.025	2.626	3.077
∞	1.000	1.960	1.960	2.000	2.576	3.000

(a) 기대값 μ_z , 그리고 표준편차 σ 를 가진 정규분포에 의해서 설명된 양적인 값 z 에 대해서 구간 $\mu_z \pm k\sigma$ 는 각각 $k=1,2,3$ 에 대한 분포에 대해 $p = 68.27, 95.45$ 그리고 99.73 퍼센트를 포함한다.

측정불확도평가 계획서

작성일자 : 2000 년 02 월 02 일

작성자 : 정 용 삼 (인)

분 류	평가항목	적용여부	평가방법	비 고
1. 산출항목	1) 측정 파라미터	O	수식 설정	
	2) 관련 수식	O	"	
	3) 참고자료			
2. 영향인자	1) 측정기기(교정)	O	중대한 영향을 주는 인자 파악	
	2) 시험요원	O	숙련도 시험 결과 이용	
	3) 시험환경(T, H, P)	O	관리기준	
	4) 시료준비	O	대표성, 균질도 시험	
	5) 시료이력			
	6) 관련 데이터	O	표준물	
	7) 반복성/재현성	O	표준물	
	8) 기타			
3. A형 불확도	1) 측정횟수(자유도)	O	반복측정/계측통계	
	2) 평균(산술/기하)	O	반복측정/계측통계	
	3) 표준편차	O	반복측정	
	4) 평균표준편차	O	반복측정/계측통계의 A형 불확도	
4. B형 불확도	1) B형 불확도 요인(No.)	O	해당 B형 불확도성분 적용(3-5)	
	2) 신뢰구간	O	해당 성분	
	3) 분포형태	O	"	
	4) 자유도(R)	O	"	
5. 합성불확도	1) 감응계수	O	상관성 검토	
	2) 상관계수			
	3) 계산(불확도의 전파)	O	정해진 불확도성분을 모두 포함	
6. 확장불확도	1) 유효자유도			
	2) 범위인자(k)	O	k=2 (95% CL)	
	3) 계산(신뢰구간)	O	범위인자 적용	

<LOP-I-07-02>

측정불확도평가보고서

일련번호 : 00-01

시험항목	중성자방사화분석			구 분	□ 분석시험 □ 숙련도시험	
시험방법	비파괴 성분분석			시험설비	PTS & 감마분광분석장치	
시험환경	온도: 25 ℃ 습도: 50 %			시료명(번호)	대기분진(S-01)	
시 험 자	정 용 삼			시험일자	2000 년 2 월 2 일	
불확도 성분 (X _i)	형태 (A,B)	확률분포 (N,R,T)	표준불확도 (U _{xi})	감응계수 (C _i)	자유도 (ν)	상대불확도 (%)
1) 계측통계	A	N	0.861 %	1	4	0.861 %
2) 반복측정	A	N	0.025 %	1	4	0.025 %
3) 시료칭량	B	N	0.006 %	1	∞	0.006 %
(표준용액)	B	R				
4) 시료조사	B	N	0.87 %	1	∞	0.87 %
5) 검출효율	B	R	2.154 %	1	11	2.154 %
6) 표준물질	B	N	1.932 %	1	∞	1.932 %
7) 핵적상수, 보정	B	N	2.5 %	1	∞	2.5 %
합성표준불확도(U _c)		$U_c = \{ (U_{ST})^2 + (U_{OB})^2 + (U_{BW})^2 + (U_{NF})^2 + (U_{EF})^2 + (U_{RM})^2 + (U_{PA})^2 \}^{1/2}$ $= \{ (0.861)^2 + (0.025)^2 + (0.006)^2 + (0.87)^2 + (2.154)^2 + (1.932)^2 + (2.5)^2 \}^{1/2}$ $= 4.015 \% (0.7125 \mu\text{g/g})$				
신뢰구간	95 %		유효자유도(ν _e)		범위인자(k)	2
확장표준불확도(U)		8.030 % (1.425 μg/g)		측정결과		17.746 μg/g
기 타 검토의견						
작성자	(인)		검토자	(인)		승인자 (인)

예제) 중성자 방사화분석법으로 침적물 분말시료중의 As를 정량하고자 한다. 아래와 같은 분석조건과 NAA Report 결과를 이용하여 측정불확도를 산출하라.

<NAA-01>

NAA REPORT

Sample Code : S-01
Sample Description : Sediment(Marine)
Efficiency Code : GEM-1

Analyst : Y. S. Chung Date analyzed : 2000. 02. 20
Detector Type :
Analyzed File : C:\YSMCA\SED\sed-111a.rpt
Absolute Method, Efficiency Function : Linear Fit with knee value 130
End of Irradiation : 0000-00-00 00-00-00
When Counted : 0000-00-00 00-00-00
Slot # 7 used to count Sample

Neutron Flux : 1.7000E+13 n/cm².s
Irradiation Time : 240.00 M
Sample Weight : 9.857E+1 mg
Detection Limit : Currie Limit-3
Real Time (8727.80 S), Live Time (8000.00 S), Dead Time (8.34 %)
Cooling Time : 9137.43 M (152.29 H, 6.35 D)

NUCLIDE	Half Life	GAMMA	DPS at IRR	WGT in mg	Conc.-ppm	DET LIMIT	S/N	ERR%	GROSS	NET
---------	-----------	-------	------------	-----------	-----------	-----------	-----	------	-------	-----

■ 시험분석으로부터 구한 측정량 : A형 불확도

1) 계측통계량(U_{ST})

1 1.91 %
2 2.03
3 1.87
4 1.85
5 1.97

2) 측정량(U_{OB})

1 17.23 ppm
2 17.35
3 18.01
4 18.25
5 17.89

산술통계량 :

$$\bar{x}' = 17.746$$

$$s = 0.438$$

$$s_{\bar{x}} = 0.196$$

$$n = 5$$

$$\sum x_i = 88.73$$

$$\bar{x}' = 1.926$$

$$U_{OB} = 0.196/17.746 \times 100 = 0.025 \%$$

$$s_{\bar{x}'} = 0.861$$

$$U_{ST} = 0.861 \%$$

■ 불확도 산출절차

1) NAA로 As의 농도를 측정하는 계산식 :

$$C_{As}(\text{ppm}) = AM / \theta \cdot N_A \cdot \sigma \cdot \Phi \cdot \varepsilon \cdot \gamma \cdot S \cdot D \cdot C$$

- (1) 계측통계 불확도 요인 : A, γ
- (2) 반복측정 불확도 요인 : C_{As}, G
- (3) 시료준비 불확도 요인 : M, N_A, θ
- (4) 시료조사 불확도 요인 : Φ, S, G
- (5) 검출효율 교정 불확도 요인 : ε , 표준선원 및 G
- (6) 핵적상수, 보정인자 불확도 요인 : σ, D, C
- (7) 기타 표준물 불확도 요인 : 균질도, 인증값

2) 각 성분인자에 대한 표준불확도 계산.

(1) 시료의 무게 측정시 불확도(U_{BW}) 계산 : B형 불확도

- ▶ ① 저울 제조회사의 성적서에 명기된 0~20g 사이의 무게측정 재현성과 선형성은 0.001mg과 0.01mg 이다. 시료의 무게의 불확도(정밀도)는 두 번 측량한 차이에 해당. 따라서 선형성에 대한 불확도는 2를 곱한후 시료의 무게에 대한 표준불확도를 구하면 :

$$\text{B형 표준불확도 : } U(w_s) = \sqrt{(0.001)^2 + 2(0.01)^2} = 0.0142 \text{ mg}$$

$$\text{상대불확도 : } 0.0142/98.57 \times 100 = 0.014 \%$$

② 상기 불확도를 시료의 무게로 나누어 백분율오차(상대불확도)를 계산함.

(예, 0.1mg : 10%, 1mg : 1%, 10mg : 0.1%, 100mg : 0.01%)

③ 기존 실험값 또는 교정성적서상의 불확도를 직접 이용 : $\pm 0.001 \text{ mg}$

$$\text{B형 표준불확도 : } U_B = 0.001/2 = 0.0005 \text{ mg}$$

$$\text{상대불확도 : } 0.0005/98.57 \times 100 = 0.0005 \%$$

- ▶ 일정치 않은 수분량에 의한 불확도는 건조과정을 거친 경우에 무시.
- ▶ 시료의 전처리과정에서 발생할 수 있는 원소의 손실과 오염에 의한 불확도는 무시.
- ▶ 표준용액을 준비하여 사용할 경우에는 합성 불확도를 계산하여 포함시킴.
(예, 중성자방사화분석지침: $U_{SS} = \{(U_{시약}/\sqrt{3})^2 + (U_{부계}/\sqrt{3})^2 + (U_{용액}/\sqrt{3})^2\}^{1/2}$.)
- ▶ B형 합성불확도 : $U_{BW} = \{(U_B)^2 + (U_{SS})^2 + \dots + (U_i)^2\}^{1/2}$.

(2) 시료조사시의 불확도(U_{NF}) 계산 : A형 또는 B형 불확도

- ▶ 원자로의 중성자속에 대한 불확도는 기존의 실험값을 이용하며, 새로 측정하여 사용할 경우 A형 불확도로 적용할 수 있음.
- ▶ 기존의 측정량을 이용하여 산출.
측정된 중성자속 : $1.502 \pm 0.026 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$

$$\text{B형 불확도 : } U_F = 0.026/2 = 0.013 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$$

$$\text{상대불확도 : } 0.013/1.502 \times 100 = 0.87 \%$$

- ▶ Geometry에 대한 불확도는 동일한 조건으로 맞추어 조사할 때 무시함.

$$\text{▶ B형 합성불확도 : } U_{NF} = \{(U_F)^2 + (U_G)^2 + \dots + (U_i)^2\}^{1/2}$$

(3) 계측효율의 불확도(U_{EF}) 계산 : B형 불확도

- ▶ 표준선원의 불확도는 검교정 성적서에 명시된 값을 이용하여 산출.

$$\text{B형 불확도 : } U_s = 3.53/2 = 1.77 \%$$

- ▶ 검출장치의 안정성 및 선형성에 대한 불확도는 검교정 성적서에 명시된 값을

이용하여 산출.

$$\text{B형 합성불확도 : } U_{DM} = \{(0.025/\sqrt{3})^2 + (0.05/\sqrt{3})^2\}^{1/2} = 0.208 \%$$

▶ 검출효율 교정결과에 대한 불확도 산출.

$$\text{B형 불확도 : } U_e = 2.42/2 = 1.21 \%$$

▶ Geometry에 대한 불확도는 동일한 조건으로 맞추어 측정할 때 무시함.

$$\begin{aligned} \text{▶ B형 합성불확도 : } U_{EFF} &= \{(U_s)^2 + (U_{DM})^2 + (U_e)^2 + (U_G)^2 \dots (U_i)^2\}^{1/2} \\ &= \{(1.77)^2 + (0.208)^2 + (1.21)^2\}^{1/2} \\ &= 2.154 \% \end{aligned}$$

(4) 표준물질의 불확도 산출(U_{RM}) : B형 불확도.

▶ 사용한 인증표준물질의 해당원소에 대한 보증값을 이용하여 산출.

$$\text{SRM의 As 인증값 : } 20.7 \pm 0.8 \mu\text{g/g} (\pm 3.865 \%)$$

$$\text{B형 불확도 : } U_{RM} = 3.865/2 = 1.932 \%$$

▶ 건조시의 손실이나 비균질도에 대한 불확도를 산출하여 합성.

$$\text{▶ B형 합성불확도 : } U_{RM} = \{(U_{RM1})^2 + (U_{RM2})^2 + (U_G)^2 \dots + (U_i)^2\}^{1/2}$$

(5) 핵적상수 및 보정에 대한 불확도(U_{PA})의 산출

▶ 핸드북에서 인용한 핵적 파라미터들(σ , $T_{1/2}$) 과 보정인자(감쇠, 불감시간)의 불확도를 합성하여 산출.

총 불확도를 5 %로 가정하면

$$\text{B형 불확도 : } U_{PA} = 5/2 = 2.5 \%$$

3) 합성 표준불확도(U_C)의 산출

합성표준불확도 :

$$\begin{aligned}U_C &= \{(U_{ST})^2 + (U_{OB})^2 + (U_{BW})^2 + (U_{NF})^2 + (U_{EF})^2 + (U_{RM})^2 + (U_{PA})^2\}^{1/2} \\&= \{(0.861)^2 + (0.025)^2 + (0.0005)^2 + (0.87)^2 + (2.154)^2 + (1.932)^2 + (2.5)^2\}^{1/2} \\&= 4.015 \%\end{aligned}$$

평균 측정값이 17.746 $\mu\text{g/g}$ 이므로

합성표준불확도는 $17.746 \times 4.015/100 = 0.7125 \mu\text{g/g}$ 이 됨.

4) 확장불확도(U)의 산출

확장불확도 : $U = kU_C$

$$= 2 \times 4.015 = 8.030 \%$$

$$= 2 \times 0.7125 \mu\text{g/g} = 1.425 \mu\text{g/g}$$

범위인자는 95% 신뢰구간으로 2로 함.

5) 감응계수는 독립변수로 가정하여 1로 함.

원자로 중성자방사화분석에서 검출한계

1. 검출한계의 분류

다음과 같은 검출한계의 세가지 개념이 Currie L.A.에 의해 설정되었으며 일반적으로 방사선 계측실험에서 흔히 사용되고 있다.

1) 결정한계(Decision Limit, L_C)

검출기로부터 관측된 신호를 확실하게 인식할 수 있는 알짜 기기감응 이상을 의미한다.

$$L_C = 2.33 \sqrt{C_B} \quad (1)$$

여기서, C_B 는 분석하려는 원소의 목적 핵종의 피이크 영역에 대한 총 백그라운드 계측수이다. L_C 의 물리학적 의미는 피이크의 알짜 계측수가 $C_S > L_C$ 라면, 피이크가 95% 신뢰수준에서 실체라고 추정할 수 있다. L_C 는 계측수로 나타낸 결정한계임을 말해준다. 이것은 피이크 면적으로 처리함에 의해 원소 무게 또는 농도의 결정한계, $L_C(m)$ 로 전환할 수 있다.

2) 검출한계(Detection Limit, L_D)

검출을 하기전에 예상할 수도 있는 실제 알짜신호 수준을 의미한다.

$$L_D = 2.71 + 4.65\sqrt{C_B} \quad (2)$$

L_D 의 물리학적 의미는 알짜 피이크면적, C_S 가 적어도 L_D 와 같을 때, 95% 신뢰수준에서 관련 원소를 검출할 수 있다는 것이다. 여기서도 L_D 는 계측수로 나타낸 결정한계임을 말해준다. 이것은 피이크 면적으로 처리함에 의해 원소 무게 또는 농도의 결정한계, $L_D(m)$ 로 전환할 수 있다. 원소가 검출되지 않을 때, 통상 분석보고서에는 $<L_D(m)$ 로 나타낸다. 만약 통계 프로그램이 완전하게 채워진 데이터세트를 요구한다면, $1/2 L_D(m)$ 값 또는 random number

generator에 의해 0과 $L_D(m)$ 사이의 값을 검출되지 않은 원소에 사용할수도 있다.

3) 정량한계(Determination Limit, L_Q)

정량분석을 위한 아주 정확, 정밀한 수준을 의미한다.

$$L_Q = \frac{1}{2}K_Q^2 \{1 + (1 + 8C_B/K_Q)\}^{1/2} \quad (3)$$

L_Q 의 물리학적 의미는 알짜 피이크면적, C_S 가 적어도 L_Q 와 같을 때, 95% 신뢰수준에서 관련 원소를 $1/K_Q$ 의 상대 표준편차로 정량할 수 있다는 것이다. 가령 원소의 정량을 위한 요구된 상대 표준편차가 10%라고 가정하면, $L_Q = 50 \{1 + (1 + 0.08 C_B)\}^{1/2}$ 이 된다. 위와 같은 방법으로 L_Q 도 원소무게 또는 농도의 결정한계, $L_D(m)$ 로 전환할 수 있다.

7) 방사화분석 시설 활용실적

(1) 이용시설 :

- 중성자조사시설 : 공력이송관 : PTS #1 (manual system) & PTS #2(automatic system)
- 방사선계측장비 : 감마선계측장치(4 SET)/Auto-sample changer 1
- 시료전처리장비 : 각종 PE/AI 조사용기 및 기타 화학실험 장비

(2) 이용건수

가. 분석건수(시료수)

분 류		1996	1997	1998	1999
연구개발 및 교육훈련	소내	4 (800)	8 (1,200)	20 (860)	80 (1,050)
	소외	2 (80)	4 (200)	4 (325)	35 (650)
	계	6 (880)	12 (1,400)	24 (1,185)	42 (1,700)
분석지원	소내	6 (130)	9 (166)	90 (381)	105 (3,500)
	소외	6 (50)	16 (209)	37 (354)	77 (800)
	계	12 (180)	25 (375)	127 (735)	182 (4,300)

※ 연구개발 : 원자력연구개발 중장기과제, 수탁과제, 산학연협동연구, 외부기관연구개발

※ 분석지원 : 중성자조사, 핵종분석, 성분분석으로 분류, 자체사업, 산학연협력 및 지원

※ 학생실습 : 서울대, 한양대, KIST, 조선대 원자력공학과 및 제주대 방사선과(32시간/1주)

나. PTS 사용횟수

분 류		1996	1997	1998	1999
시료조사	소내	500	800	790	860
	소외	100	300	520	730
	계	600	1,100	1,310	1,590

※ 조사시설 평균이용시간 : 1시간/시료 (범위 : 1 - 120분/시료)

계측장치 평균이용시간 : 2시간/시료 (범위 : 5 - 300분/시료)

[illegible]

8) 국제협력사업

Joint UNDP/RCA/IAEA Project
on 'Better management of the environment, natural resources and
industrial growth through isotopes and radiation technology'

1) the sub-project on 'Nuclear Analytical Techniques',

NAT(RAS/8/076)

2) the sub-project on 'Air pollution and its
trends'(RAS/97/030/A/01/18)

Overall Objective

To assess and compare air pollution levels in strategically chosen areas in the
region through the use of nuclear and complementary analytical techniques.

To identify and apportion critical air pollution sources.

To accumulate accurate air pollution data for future work on transboundary
transport of airborne particulate matter(APM).

Country Activities for RCA National Homepage

1. Nuclear Analytical techniques(1993-1996) : Phase I

This cooperative project was initiated in 1993 as the joint UNDP/RCA/
IAEA Project on Nuclear Analytical Techniques, NAT(The Use of Isotopes
and Radiation to Strengthen Technology and Support Environmentally

Sustainable Development, RAS/92/073).

Korea has carrying out the environmental research project in this field as a part of the long term nuclear research and development program from 1993 and KAERI is performed the identification of the environmental standard samples such as NIST SRM 1648, NIES CRM No.8, NIST SRM 1633a, NIST 2709 soil and IAEA soil-7 for data interpretation, air pollution research and the routine analyses of airborne particulate matters collected in urban and rural area by INAA, respectively.

The national-institutional network among industry-university-research institute for applied research and development of neutron activation analysis mainly and related nuclear techniques was performed from September 1994.

In 1994, four research institutes(KAERI, KIGAM, NIER, KORDI) in Korea are participated in 'data intercomparison study' of the IAEA's environmental samples(air dust, coal flyash, soil). KAERI is participated in additional intercomparison exercise of hair sample as the IAEA/AQCS Programme.

In 1995, the four research institutes are participated in 'Data intercomparison study' of the IAEA's two sediments. KAERI and KIGAM were participated in 'new intercomparison run IAEA-390, toxic and trace elements in Algae as the IAEA/AQCS Programme in 1996.

Two Korean specialist(KAERI/NEMAC, Yonsei University) are participated in 'Workshop on NATs in environmental research and monitoring', Singapore, 3-7 July 1995.

The Ninth International Conference on Modern Trends in Activation was held in Seoul, Korea, 24-30 September 1995 and it take place overlapping the Expert Advisory Group Meeting, Seoul, Korea, 25-30 September 1995 for NAT participants on the theme of computer software for NAA, nuclear spectroscopy and associated data evaluation.

The workshop and training course on application of ISO guide 25 and other international standards in laboratories employing nuclear and complementary techniques for environmental analysis was held in KAERI, Korea, from 24 June to 5 July 1996, under arrangement of KAERI's NAA group.

The KAERI's NAA group is performed "Applied research on air pollution monitoring in Korea using a NAA" as a new CRP RCA/IAEA('96-'98).

2. Air pollution and its Trends(1997-2002) : Phase II

This cooperative project was initiated in the end of 1997 as the joint UNDP/RCA/IAEA Project on better management of the environment, natural resources and industrial growth through isotopes and radiation technology(1) the sub-project on 'Nuclear Analytical Techniques, NAT(RAS/8/076), (2) the sub-project on 'Air pollution and its trends'(RAS/97/030/A/01/18).

National coordinator(KAERI) is participated in the project formulation meeting to define project proposal, Kuala Lumpur (MINT), 9-13 March 1998.

For air pollution study, selection of sampling sites(urban and industrial areas) and sampling of APM using "Gent SFU air sampler and analysis of collected samples are began, and received from IAEA the filter for air sampling, static eliminator for filter, analyzer for black carbon, software packages for data evaluation and interpretation.

There was an expert mission for quality assurance and quality control in NAA, 4-15 January 1999.

KAERI researcher is participated in regional training course on chemometrics and carbon black analysis, Jarkarta, Indonesia, March 1999.

National coordinator(KAERI) is participated in the Mid-Term Review Meeting (18-22 October 1999, Singapore) to review the progress, to revise the work plan, if needed, to plan future activities including an RCA Web site, to discuss data evaluation and interpretation and to plan future QC exercises : review of work plan('99-'00) and extension of project('01-'02).

We are currently carried out analysis of airborne particulate matter as well as other environmental samples(including geological and biological samples) for environmental pollution studies. It was a part of our long term project related to a study on utilization of Neutron Activation Analysis. To make a success of these projects, we are collaborated with RCA member states for standardization and harmonization of nuclear analytical techniques such as a sampling and sample preparation, analytical procedure and data evaluation, interpretation and so on. It has been including inter-exchange of relevant

information, intercomparison study and/or proficiency test for QA/QC of data analyzed, collaboration and organization of working group in country (including other users or potential users), participation in the workshop/seminar and other meetings regularly, promotion of public awareness or acceptance on nuclear techniques.

ANNEX 6

SUMMARY OF ACTIVITIES PLANNED AND COMPLETED TO 30 JULY 1999

Output 1.3: Air Pollution and its Trends

Activities for 1998

	<i>Task</i>	<i>Date/Duration</i>	<i>Status</i>
1	Project formulation meeting to define project proposal [MINT, Kuala Lumpur]	March ; 1 week	Done
2	Project implementation meeting to define detailed work plan [Vienna]	July, 1 week	Done
3	Selection of sampling sites, to be reported to LC [All 13 countries]	August,	Done
4	Procurement of filters for the samplers to be purchased centrally; 200 coarse and 200 fine per country [All 13 countries]	August	Done
5	Procurement of additional "Gent" samplers to be purchased centrally [IND, INS, MAL, MYA, PAK, SIN, THA]	September	Done
6	Sampling airborne particulate matter (APM) using the existing "Gent" SFU samplers [All countries]	September for duration of sub-project	Done
7	Analysis of the collected samples [All countries]	September for duration of sub-project	Done
8	Procurement of analysers for black carbon to be purchased centrally [BGD, CPR, IND, INS, KOR, MYA, PAK, PHI, SIN, SRL, THA, VIE]	November	Done
9	Procurement of software packages for data evaluation and interpretation to be purchased centrally [All 13 countries]	November	Done
10	Expanded and updated SeaCarp listserver	December	Done
11	Procurement of static eliminators for filters to be purchased centrally [All 13 countries]	December	Done
12	Preparation of guidelines for sampling APM using the "Gent" stacked filter units (SFUs). Handbook should not exceed 40 pages, detailed outline will be prepared by LC and TOs.	December	March 2000
13	Supplies to be purchased for individual participants (e.g. spare parts for samplers, consumables, reference materials) [All 13 countries]	as required	Done
14	Submission of progress report to LC [All countries]	December	Postponed

Activities for 1999

	<i>Task</i>	<i>Date/Duration</i>	<i>Date/Duration</i>
15	Continuation of sampling APM using the "Gent" SFUs [All countries]	All year	In progress
16	Analysis of the collected samples [All countries]	All year	In progress
17	Procurement of filters for the samplers to be purchased centrally; 300 coarse and 300 fine per country [All 13 countries]	March	Done
18	Supplies to be purchased for individual participants (e.g. spare parts for samplers, consumables, reference materials) [All 13 countries]	As required	In progress
19	National seminars. Already identified: (1) Health impacts of APM; duration: 3 days; external lecturers: 1 from IND (toxicology), 1 from DEN (toxicology) (2) XRF applications in air pollution for environmental managers; duration: 3 days; external lecturers: 1 from SIN, 1 from BEL (3) Environmental pollution monitoring techniques; duration: 3 days; external lecturers: 1 from BEL, 1 from AUL (4) To be decided (5) To be decided	2 nd Quarter	As requested As requested To be in November Done
20	Individual expert services. Already identified: (1) Quality assurance and quality control in NAA; duration: 2 weeks; from CPR, PAK (2) Modelling; duration: 1 week; from USA (3) XRF analysis software; 3 weeks; from SIN (4) Quality assurance and quality control in nuclear analytical techniques; 3 weeks; from SIN (5) Quality assurance and quality control in NAA for air pollution studies; 2 weeks; from CPR, PAK, or NED (6) Chemometrics and modelling; 3 weeks; USA	2 nd half of year	As requested Done As requested Done As requested As requested As requested
21	Individual fellowship training. Already identified: (1) Neutron activation analysis of APM; duration: 1 month; place: CPR, PAK, IND (2) Neutron activation analysis of APM; duration: 1 month; place: PAK (3) XRF techniques for analysing APM; duration: 2 month; place: SIN, IND, PAK (4) XRF techniques for analysing APM; duration: 3 weeks; place: PAK (5) XRF techniques for analysing APM; duration: 3 months; place: SIN	All year	As required As requested In progress As requested In progress As requested
22	Workshop on chemometrics and black carbon analysis [All countries]. Up to 24 participants; proposed lecturers: 2 external: P. Hopke (Potsdam, USA), D. Cohen (ANSTO, AUL), P. van Espen (BEL - as alternative), IAEA staff (B. Smadis).	March	Done
23	Web site information update, every 6 months	March & September	Pending
24	Manual (SOP) on analysing filters loaded with APM using NAA. Handbook should not exceed 40 pages,	June	March 2000

	detailed outline will be prepared by CPR, LC and TOs.		
25	Manual (SOP) on analysing filters loaded with APM using XRF. Handbook should not exceed 40 pages, detailed outline will be prepared by PHI, LC and TOs.	June	March 2000
26	Manual (SOP) on analysing filters loaded with APM using PIXE. Han. should not exceed 40 pages, detailed outline will be prepared by AUL, LC and TOs.	June	March 2000
27	Submission of progress report to lead country [All countries]	June	A few outstanding
28	Subcontract for processing regional data. Proposed consultant: P. Hopke, Potsdam, USA. Job description: (1) To act as the data co-ordinator for the sub-project, reviewing the quality of the analytical data being collected, and identifying outliers or possible analytical problems by finding points or correlations that appear to be anomalous; (2) To examine the frequency distributions of values, and to compare the exposure to various particulate species among the various areas being studied; (3) To perform exploratory receptor modelling using Principal Component Analysis and to identify potential major sources contributing to the observed concentrations; (4) To prepare summary reports for the meetings with the results of these statistical evaluations; (5) To prepare a handbook on recommended statistical evaluation of the collected data.	July	March 2000
29	Mid-term review meeting with participation of regional authorities and end-users to (1) review the progress, (2) rectify the work plan, if needed, (3) plan the future activities, including an RCA Web Page, (4) discuss data evaluation and interpretation, (5) plan future QC exercises. Participants: 15 PCs, national/regional authorities responsible for air quality standards, end-users, 2 IAEA TOs, 2 consultants.	October	October
30	Workshop on NAA and XRF techniques [All countries]. Up to 20 participants. Proposed lecturers: 4 external, several local: Tian (CPR), Djojotubroto (INS), Orlic (SIN), Voutchkov (JAM).	November	November
31	Manual (SOP) on recommended statistical evaluation of the collected data. Handbook should not exceed 40 pages, detailed outline will be prepared by USA, LC and TOs.	December	December
32	QC exercise on filters loaded with APM [All countries]; samples are expected to be sent out in October and results obtained by February 2000	December	July 2000
33	Submission of progress report to lead country [All countries]	December	December

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/RR-2031/99	KAERI/CM-374/99 KAERI/CM-375/99 KAERI/CM-376/99		
제목 / 부제	중성자 방사화분석 이용기술 개발		
연구책임자 및 부서명	정용삼 (동위원소 방사선 응용연구팀)		
연구자 및 부서명	문종화, 김선하, 백성열 (동위원소방사선응용연구팀) 박광원 (Post Doc), 강상훈 (학연) 박용철, 김영기, 정환성(하나로운영팀)		
출 판 지	대 전	발행기관	한국원자력연구소
발행년	2000. 5.		
페 이 지	345 p.	도 표	있음(0), 없음()
크 기	26 cm.		
참고사항	원자력연구개발 중장기과제('97-99)		
비밀여부	공개(0), 대외비(), _____ 금비밀	보고서 종류	연구보고서
연구위탁기관	한국자원연구소 연세대학교, 충남대학교	계약 번호	
초록 (15-20줄내외)	이 연구보고서는 하나로의 중성자 방사화분석용 중성자 조사·계측장치의 개선 및 자동화시스템의 개발, 분석절차 개선 및 분석정도 관리시스템의 구축, 중성자 방사화분석을 이용한 산업/보건환경 응용연구개발 및 표준화를 연구목표로 '하나로' 방사화분석 이용시설인 공압이송장치의 개선, 운영프로그램의 개발과 계측장비, 조사캡슐등을 제작하였다. 분석품질관리 시스템의 구축과 함께 분석법의 검증 및 표준화, 분석감도의 개선을 위해 환경, 생물시료를 정량분석하여 측정불확도를 평가하였고, 실험실간 비교시험 및 숙련도 시험을 수행하였다. 대기환경의 대표적인 지표시료인 대기분진을 이용하여 도시와 농촌지역의 시기별 분진농도와 중금속 및 미량원소의 농도를 측정한후 통계처리하여 방출원과 위해도를 평가하였다. 국제협력사업의 수행을 통해 원자력기술의 확보와 이용방안을 마련하였다.		
주제명키워드 (10단어내외)	연구용원자로, 중성자방사화분석, 공압이송장치, 조사용캡슐, 방사화분석용 전산코드, 품질관리시스템, 비교 숙련도시험, 환경오염관측, 고분자물분석, 인체보건연구, 인체위해도평가		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/RR-2031/99		KAERI/CM-374/99 KAERI/CM-375/99 KAERI/CM-376/99			
Title / Subtitle		Applied Research and Development of Neutron Activation Analysis			
Project Manager and Department		Yong Sam Chung (Utilization of Radioisotopes & Radiation Team)			
Researcher and Department		Jong Hwa Moon, Sun Ha Kim, Sung Ryel Bak(Utilization of Radioisotopes & Radiation Team), Yong Chul Park, Young Ki Kim, Hwan Sung Chung(Hanaro Management Team) Kwang Won Park, Sang Hun Kang			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2000. 5.
Page	345 p.	Fig. & Tab.	Yes(0), No ()	Size	26 cm.
Note	Nuclear Research and Development Project ('92-96)				
Classified	Open(0), Restricted(), _____ Class Document		Report Type	Research Report	
Sponsoring Org.	KIGAM, Yonsei Uni., Chungnam Uni.		Contract No.		
Abstract (15-20Lines)		This report is written for results of research and development as follows : improvement of neutron irradiation facilities, counting system and development of automation system and capsules for NAA in HANARO ; improvement of analytical procedures and establishment of analytical quality control and assurance system; applied research and development of environment, industry and human health and its standardization. For identification and standardization of analytical method, environmental biological samples and polymer are analyzed and uncertainty of measurement are estimated. Also data intercomparison and proficiency test were performed. Using airborne particulate matter chosen as a environmental indicators, trace elemental concentrations of sample collected at urban and rural site are determined and then the calculation of statistics and the factor analysis are carried out for investigation of emission source. Internation cooperation research project was carried out for utilization of nuclear techniques.			
Subject Keywords (About 10 words)		Research Reactor, Instrumental Neutron Activation Analysis, Pneumatic Transfer System, Irradiation Capsule, NAA Software, Analytical Quality Control System, Data intercomparison, proficiency test, Air Pollution Monitoring , Polymer analysis, Human ealth Study, Human Risk Assessment			

주 의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.