



KR0000033

KAERI/RR-1920/98

최종보고서

핵종변환기술 및 장치개발

Development of Accelerator-Based
Transmutation Technology

빔 이용/응용기술 개발

Development of Beam Utilization/Application
Technology

연구기관

한국원자력연구소

과학기술부

KAERI/RR-1920/98

최종보고서

핵종변환기술 및 장치개발 **Development of Accelerator-Based** **Transmutation Technology**

빔 이용/응용기술 개발
Development of Beam Utilization/Application
Technology

연구기관
한국원자력연구소

과학기술부

제 출 문

과 학 기 술 부 장 관 귀하

본 보고서를 “빔 이용/응용기술 개발에 관한 연구” 과제 의 최종보고서로 제출합니다.

1999. 5. .

주관연구기관명	: 한국원자력연구소
주관연구책임자	: 최 병 호
연 구 원	: 김 용 균(한국원자력연구소)
연 구 원	: 송 태 영(")
연 구 원	: 이 재 형(")
연 구 원	: 장 종 화(")
연 구 원	: 주 포 국(")
연 구 원	: 한 장 민(")
공동연구기관명	: 한국 가속기 및 플라즈마 연구협회 (KAPRA)
공동연구책임자	: 이 강 옥(KAPRA)
연 구 원	: 정 기 형(서울대학교)
연 구 원	: 노 승 정(단국대학교)
연 구 원	: 남 용 운(서울대학교)
연 구 원	: 허 진 영(KAPRA)

요 약 문

I. 제 목

빔 이용/응용기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구는 핵종변환장치의 전단부터 개발되는 양성자 가속기가 단계별로 완성되었을 때 이를 조속히 이용할 수 있게 사용자 프로그램과 빔 이용/응용기술 개발을 확립하여 대형 양성자 가속기 시설의 효율적인 이용과 사용자들의 합의점을 도출할 목적으로 수행되었다. 대용량 양성자 가속기는 필수 국가 기반연구시설로서 선진국에서는 지금까지 원자력 연구개발과 불가분의 관계로 사용되어 왔으며, 미래원자력기술 개발의 열쇠로서 간주되고 있다. 이 대용량 가속기는 가속기 앞단부터 건설되는 입사기, RFQ, CCDTL 등 부속가속기로부터 발생하는 3MeV, 20MeV, 100MeV빔 등을 단계적으로 일반산업분야, 방위산업분야, 의료분야, 환경분야, 기초학술연구로 다양하게 이용할 수 있으므로, 원자력분야의 사용을 국한하는 것보다 확장된 국가 기반연구시설로서 사용처를 확보하기 위하여 대용량 양성자 가속기 시설에 대한 사용자 프로그램의 합리적인 추진방향을 결정하고, 양성자 가속기의 입사기 및 RFQ로부터 생성되는 양성자빔의 산업적 활용방안을 연구할 필요가 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

빔 이용/응용기술은 가속기가 건설되었을 때 이용할 분야를 미리 창출하는 개념으로 MeV빔 이용분야 발굴, 입사기빔 산업적 이용기술 개발, 사용

자 프로그램 개발 등의 3가지분야를 도출하였다.

1. MeV빔 이용분야 발굴

가. 전력반도체 이송자 수명제어

전력반도체란 전류용량으로 1암페어 이상 또는 차단전압 100볼트 이상의 동작특성을 갖는 반도체소자로서 이송자 수명제어가 필요한 분야는 IGBT, 다이오드, 사이리스터 및 일부 파워 IC 소자 등이다. 이송자 수명제어 방법으로는 전자선조사, 천연금속확산, 양성자조사 등으로, 현재 금 도우핑과 전자선조사 기술이 산업에 적용되고 있으나, 국부적인 수명제어가 가능한 양성자 조사가 차세대 전력반도체 생산에 필수적으로 사용될 전망이며, 현재 GTO 생산에 적용되고 있다. 이에 양성자 가속기를 이용하여 이송자 수명제어 기술 시장현황 및 전망에 대하여 조사하였다.

나. 특정원소 탐지기술

양성자가속기로부터 나온 1.75MeV 양성자빔을 표적에 조사하여 방출된 감마선과 특정원소 즉, 질소와의 광핵공명반응을 이용하여 지뢰 및 폭발물을 탐지할 수 있는 기술 개발이 가능하다는 것을 이론과 기초실험을 통하여 확인하였다.

다. 방사성 동위원소 생산

현재 동위원소생산 방법은 2 가지로 나누어지는데 원자로의 중성자나 fission product를 이용해 생산하거나 양성자 및 중이온을 가속해 표적과 핵반응을 이용하는 방법이 있다. 국내에서도 원자력연구소의 하나로와 원자력병원의 MC-50 싸이클로트론을 이용해 동위원소를 생산하고 있는데 국내 수요의 많은 부분이 수입에 의존하고 있다. 따라서 개발을 계획하고 있는 1

GeV, 20mA 대용량 양성자가속기를 이용해 부차적으로 동위원소를 생산할 수 있는 방법을 도출해 봄으로서 가속기 동위원소생산의 가능성과 초보적인 경제성을 파악하였다.

라. MeV 양성자 빔을 이용한 중성자생산 및 이용

양성자가속기의 초기단계인 3 MeV RFQ에서 양성자 빔이 인출 될 때의 가능한 이용분야로서 양성자를 직접 이용하는 것 외에 적합한 표적을 선정해 중성자를 생산하고 그 중성자를 이용하는 것이 있다. 20mA 양성자 빔의 경우 최대 10^{13} n/sec 급의 중성자 생산이 가능하므로 이러한 중성자를 이동식 라디오그래피, BNCT 등에 이용할 수 있는 가능성을 검토하였다.

마. 입사기 빔(50keV) 산업적 이용기술 개발

완성된 입사기를 이용하여 반도체소자 Package용 플라스틱 Tray의 정전기 방지를 위한 표면전도성 향상 기술개발에 실제 적용하여 산업화 가능성을 확인하였다.

2. 가속기 사용자 프로그램 개발

대용량 가속기 사용자 프로그램을 마련하기위하여 이미 선진국에서 정착단계에 있는 대형 가속기의 User Program 및 현재 본 대 과제에서 개발 중에 있는 KOMAC(KOrea Multi-purpose Accelerator Complex)과 동급인 세계의 가속기 이용자의 현황조사를 학회 참석, 현지 방문, 전문가 면담, Seminar 개최, Internet등을 통하여 수행하였다. KOMAC의 이용/응용 분야 설정과 더불어 4차에 걸쳐 사용자의 요구 및 수요분야 조사를 e-mail, 우편조사, 직접 및 전화방문 등을 통하여 행하였다. 또한 Home Page 작성, 학회개최로 KOMAC Project를 홍보하여 많은 사람들에게 참여기회를 제공하였으며, 수집된 자료의 분석을 통하여 KOMAC의 Near Future Research Potential Area를 도출하였다.

IV. 연구개발결과

1. MeV빔 이용분야 발굴

가. 전력반도체 이송자 수명제어

현재 고속 스위칭 전력반도체 제작에 여러 가지 제조기술이 적용되고 있으며, 금 확산법, 전자선조사 등이 그 대표적이다. 그러나, 앞으로는 국부적인 수명제어가 가능한 양성자 조사가 차세대 전력반도체 제조의 핵심으로 될 전망이다. 다음 표는 이들 기술에 대한 비교이다.

구분	금(Au)	백금(Pt)	전자선 조사	proton 조사
trade-off 특성	가장우수	우수	보통	우수
τ_H/τ_L 비	가장우수	우수	보통	우수
필요장치	spin coater, 확산로	좌동	전자가속기	양성자가속기
제어변수	source 종류, 확산온도, 시간	좌동	가속에너지 주입조사량	좌동
재현성	보통	보통	우수	우수
균일성	보통	보통	우수	우수
온도증가에 따른 누설전류 증가	가장크다	크다	작다	작다
온도증가에 따른 life time변화	작다	작다	크다	크다
life time 회복성	회복안됨	회복안됨	150℃이상에서 경시 변화 350℃이상에서 완전회복	150℃이상에서 경시 변화 350℃이상에서 완전회복되지 않음

나. 특정원소 탐지기술

폭발물 및 마약 탐지 기술에 관한 연구는 기존 기술에 대한 현황 분석과 국내외의 수요를 조사하였으며, 이를 바탕으로 양성자 가속기를 이용한 장치를 만들 경우 경제성과 신뢰성에 있어 기존 장치와 비교할 때 비교 우위가 있음을 확인하였다. 이와 관련해서 양성자 가속기를 이용한 폭발물 탐지 장치에 대한 특허를 출원한 바 있고, 이 장치설계에 필요한 감마선의 특성을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하여 등록하였고, 장치 개발을 위해 기존 기술에 대한 현황 분석을 마쳤다. 또한 Tandem 가속기를 이용한 실험을 통하여 폭발물 및 마약 탐지 기술에 대한 실현 가능성을 확인하였으며, 실험의 결과로서 공명흡수를 이용한 폭발물 탐지 기술의 타당성을 실험적으로 검증하는데 성공하였다. 그러나, 공명 산란에 의한 폭발물 탐지기술은 원리 확인에는 성공하였으나, 실제 적용을 위한 타당성을 검증하기 위해서는 보다 큰 빔 전류가 필요하며, 향후 3차 실험을 통하여 검증하고자 한다. 본 실험의 결과는 1999년 춘계 한국물리학회에 발표하였으며, 이 기술의 실용화를 위하여 1999년 민군겸용과제를 제안해 놓고 있다.

다. 방사선 동위원소 생산

양성자가속기 이용 동위원소생산 주요방법으로는 표적에 양성자를 조사하여 (p, γ) , (p, d) 등의 핵반응을 일으켜 RI를 생산하는 방법과 표적에 고속양성자를 조사하여 핵파쇄(Nuclear Spallation)로 생성된 고속 또는 열중성자를 다시 다른 표적에 조사하여 (n, γ) , (n, p) , (n, xn) 등의 핵반응으로 RI를 생산하는 방법들을 도출하였다. 또한 양성자 또는 핵파쇄 중성자를 U 또는 Th에 조사하여 핵분열 생성물로부터 RI를 분리 생산하는 방법을 조사하였다.

대용량 양성자가속기 단계별 활용계획으로 1단계 CCDDL 20MeV 양성자 빔

으로는 ;

- $^{100}\text{Mo}(p, pn)^{99}\text{Mo}$ 를 이용한 Mo-99(Tc-99m) 생산
- Ga-67, Tl-201, Co-57, I-123
- C-11, N-13, O-15, As-74 등의 PET핵종

2단계 CCDTL 100MeV 양성자 빔으로는 ;

- Tl-201, I-123
- ^{232}Th , $^{238}\text{U}(p, f)^{99}\text{Mo}$ 에 의한 Mo-99(Tc-99m) 생산
- (p, n) 반응의 고속 중성자를 이용한 동위원소 생산

260MeV 양성자 빔으로는 ;

- U-238 등 중핵파쇄에 의한 동위원소 생산(1000여종의 동위원소 동시생산 가능)

1GeV 양성자 빔으로는 ;

- U-238 등 중핵파쇄에 의한 동위원소 생산 및 핵파쇄중성자를 이용한 동위원소 생산(약 2000여종의 동위원소 동시 생산 가능)

라. MeV 양성자 빔을 이용한 중성자생산 및 이용

(1) 중성자 생산

수 MeV 양성자빔을 이용해 중성자를 생성시키는 반응은 주로 (p,n) 반응인데 일반적으로 많이 알려진 반응들은 $\text{Li}^7(p,n)\text{Be}^7$, $\text{H}^3(p,n)\text{He}^3$, $\text{Sc}^{45}(p,n)\text{Ti}^{45}$ 등이 있다.

Target	Reaction	Threshold Energy (MeV)	Neutron Production at 0° (proton=3MeV)	
			flux(n/cm ² .sec/mA) (1m from target)	Energy Range (keV)*
Li-7	Li ⁷ (p, n)Be ⁷	1.88	~10 ⁷	~30 - ~1300
H-3	H ³ (p, n)He ³	1.02	~10 ⁷	~60 - ~2000
Sc-45	Sc ⁴⁵ (p, n)Ti ⁴⁵	2.91	~10 ⁹	~10 - ~50

(2) 중성자 이용분야

MeV 양성자를 이용해 생산된 중성자를 이용할 수 있는 분야로 BNCT(Boron Neutron Capture Therapy), 중성자 래디오그래피, 중성자 방사화분석이 있다.

Applications	Neutron		
	flux (n/cm ² .sec)	Energy	Mode
BNCT (Boron Neutron Capture Therapy)	>10 ⁹	epithermal	CW
이동식 중성자 래디오그래피	>10 ⁶	thermal	CW
이동식 중성자 방사화분석	-*	-*	CW

* 분석대상 핵종이나 background 등에 따라 변함

(3) 표적시스템

3 가지 이용분야 중에서 가장 많은 중성자를 요구하는 분야는 BNCT이므로 가속기 전류는 BNCT에 맞추어 설정한다. 3 가지 이용분야는 열중성자나 열외중성자를 이용하므로 Li 표적이 가장 적합하고 여기에 맞추어 감속재,

반사체를 포함한 표적시스템을 설계한다.

마. 입사기 빔(50keV) 산업적 이용기술 개발

반도체소자 Package용 Tray(MPP0)의 표면에 입사기 빔을 조사한 후 표면저항이 절연 저항에서 $10^6 \sim 10^9 \Omega/\square$ 로 감소하여 실용화에 요구되는 범위에 있음을 확인하였다.

2. 가속기 사용자 프로그램 개발

KOMAC Project의 소개와 이용/응용 분야를 Web Site에 띄움으로써 국내·외에 KOMAC Project를 홍보하였으며, 일반인들의 참여를 유도하여 지지기반확보에 도움이 되었다. 국내·외 전문가 초청 및 Seminar, 현지방문, 또한 KOMAC과 동급인 세계의 가속기 현황조사로 최종목표 20mA, 1GeV (CW), 20MW인 다목적 대용량 양성자 가속기 KOMAC은 현재 전세계적으로 해결하여야 할 시급한 문제인 사용후 핵처리 및 에너지 문제의 기반을 해결할 수 있는 세계 최첨단 가속기일 뿐만 아니라, 특히 중간에 빔을 유도·인출하여 산업적 응용이 가능하도록 한 KOMAC Project의 idea가 최근 선진국에서도 긍정적으로 평가되어 점차 확산되는 경향을 띄어가고 있어 KOMAC Project 설정이 합리적이라는 것이 International Review Meeting [제 1차: 1997년 9월 3~4일, 서울대학교 교수회관, 제 2차: 1998년 2월 9~10일, 중앙대학교 안성캠퍼스, 제 3차: 1999년 2월 4~5일, 한국원자력연구소]에서의 평가를 통하여 확인되었다 또한 국가가 어려운 경제난에 직면하고 있는 현재, 이 어려움을 극복하기 위하여는 KOMAC과 같은 거대 Project를 수행하여 고용창출의 효과와 더불어 세계 최고의 가속기를 국내에 건설할 수 있다는 자긍심을 불러 넣어 희망적인 생각을 지닐 수 있도록 함이 중요하다는 결론을 모을 수 있었다. 4차에 걸친 이용/응용 수요조사결과 High Flux Neutron Science 분야에 많은 관심을 보였으며, 한국 핵물리학 연구회의 전문가들께

서 연구과제 도출, 파급효과 등을 자세히 기록하여 적극적인 지지를 표명하였다. 수요조사 분석 결과 대체로 자신이 속한 그룹과 비슷한 분야, 혹은 이제까지 경험했거나 자료가 있는 분야에 국한되어 응답한 것으로 미루어 보아 교육의 중요함이 입증되었으며 따라서 지속적인 User Program 개발이 매우 필요하다.

V. 연구개발결과의 활용계획

빔 이용/응용기술 개발 연구는 양성자 가속기가 단계별로 완성되었을 때 이용할 분야를 개발하는 것으로 이미 완성된 입사기로 반도체소자 package 용 플라스틱 용기 양산 적용가능성을 확인하였고, MeV빔 이용분야에서는 전력반도체 생산, 상용 양성자주입장치 개발, 특정원소 탐지기술로는 지뢰 및 폭발물 탐지 등에 활용하고, 동위원소 생산분야는 이 분야의 기본방향을 제시하여 국내의 다른 동위원소 생산 기관과 상호 보완적인 협력을 통해 효율적인 동위원소생산 시스템 구축에 활용 할 예정이며, 중성자 생산 및 이용으로는 중성자 생산을 위한 표적시스템을 디자인하고 동시에 μ A급 가속기를 이용한 중성자 생성 실험을 수행해서 3MeV, 20mA 양성자가속기가 원자력 연구소에 설치되면 중성자를 생산해서 이용분야에 활용할 예정이다.

2. 가속기 사용자 프로그램 개발

21세기는 민간 주도의 기술 발전시대, 국가가 제공하는 기본시설을 이용한 학·연·산의 다양한 분야의 R&D 결실이 요망된다. 따라서 시설의 개발과 병행하여 Potential User의 창출 및 교육을 지속적으로 하여, 시설이 설치완료 되었을 때 이용기반이 갖추어지도록 유도함으로써 건조된 장치의 이용 효율을 극대화시켜주어야 함이 무엇보다 중요하다고 판단되었다. 현재

국가적 경제 사정과 KOMAC의 초기 건설단계라는 시점에서 이용자 프로그램이 자칫 소홀하여 질 수 있으나, KOMAC 프로그램이 효율적으로 목적을 달성하려면 장치가 건설되어 가는 단계에 맞추어 이를 산업 및 학술연구에 적용하여 산업적 측면으로는 고부가가치의 산업육성 및 고용창출을, 학문적 측면으로는 기초학문의 연구 및 발전에 이용되도록 하여주는 것이 총체적 이득을 획득함이 명백하다. 현재로서는 KOMAC 건설 각 단계별 이용/응용 분야의 도출과 효율적 이용을 유도할 젊은 Leader의 지속적인 육성이 가장 시급하다 하겠다. KOMAC과 동급인 세계가속기 시설에 각 부문에서의 선발된 Potential User를 파견하여 훈련을 받게 하여 미래에 이 분야에서의 Leader로서 건조된 장치의 효율적 이용을 이룩하게 할 수 있다.

- 이용자 창출 및 미래를 선도할 이용자 육성 프로그램 운용예산의 확보
- 단일 창구를 통한 이용자 의견 수렴 및 교육
- 다양한 설명회 등으로 KOMAC의 홍보 및 폭넓은 지지기반을 확보하여 전 국민의 미래복지를 위한 가속기임을 알릴 기회를 확대하여야 한다고 판단되었다.

S U M M A R Y

I. Project Title

Development of the Beam Utilization/Application Technique

II. Objectives and Necessity of the Project

High power proton accelerator is considered as one of national fundamental research facilities and a key to advanced nuclear technology development, having been widely used in an undetachable relationship with nuclear research in advanced countries. Our High Power Proton Accelerator will be installed in several phases as an upfront facility of the Nuclear Waste (Nuclide) Transmutation System. It is expected that a common understanding and a general agreement over proper utilization of the Accelerator should be deduced and that a User Program for beam utilization and application should be firmly established in time for the completion of each phase of the accelerator. This High Power Proton Accelerator will consist of several component accelerators and, from upfront, accelerators such as Beam Injector, RFQ, CCDTL, etc. will be installed in sequence and deliver respectively at each stage beams of 3Mev, 20Mev, 100Mev, etc. to be variously utilized for general industries, defence industry, medical treatment, environmental protection and basic science research. In order for the Accelerator to be fully utilized as a

national fundamental research facility beyond nuclear field, it is necessary to formulate a proceeding plan of the User Program for the Accelerator and to cultivate industrial utilization/application studies of proton beams accelerated by Beam Injector or RFQ of the Accelerator.

III. Scope and Contents of the Project

In preparation for proton accelerator which is proposed to be built, the MeV beam applications, industrial applications of the injector beam and user program in development of the beam utilization/application technology are developed.

1. Development of the MeV beam applications

a. Application study of power semiconductor carrier lifetime control technique

The definition of power semiconductor devices is based on blocking voltage $\geq 100V$ and current rating $\geq 1A$. At present time, carrier lifetime control techniques apply to IGBT, Diode, Thyristor and a part of Power IC Devices. There are several techniques such as transition metal diffusion, electron irradiation and proton irradiation as the method of carrier lifetime control. Now gold doping and electron irradiation techniques are the more common ones in industry. As local lifetime control technique, proton irradiation is useful tool in the fabrication of advanced power semiconductor and applied to the production of GTO. Therefore we studied the carrier lifetime control

techniques, market trend and prospect by using proton accelerator.

b. Development of a specific element detection technique

Possibility of mine and explosive detection technique by using the photo-nuclear resonant reaction between a specific element and the gamma-rays is confirmed by the theory and basic experiments. The gamma-rays are produced by nuclear reactions that occur when an carbon target is bombarded with a 1.75MeV proton beam which is obtained from the proton accelerator.

c. Radioisotope Production

General usage of RI's is studied and it is summarized how to produce major RI's. The production methods include conventional ones and ones which use high power proton accelerator. Then we summarize the history and status of producing and using RI's. We establish the strategie to produce RI's by using 1 GeV, 20 mA proton accelerator.

d. Production and Utilization of Neutrons Produced by MeV Proton

We investigate the characteristics of nuclear reactions of target material irradiated by 3MeV(RFQ) proton beam and neutrons produced by nuclear reactions. Then we describe 3 different applications, which are BNCT(Boron Neutron Capture Therapy), movable neutron radiography, movable neutron activation analysis.

e. Development of industrial applications of the injector beam

As the injector beam irradiate to increase the electrical

conductivities of the surface on semiconductor packaging tray to protect static electricity, we confirmed the possibility of industrial application.

2. Development of user program

To prepare the high power accelerator user program, foreign user programs for large accelerator facilities, which are well organized and already settled down as a result of many years' or decades' operation experience, were surveyed and the user related status of the KOMAC class accelerators under construction was also surveyed. The survey was conducted through conference attendances, visits, interviews, seminar openings, or internet searches. In addition, the utilization as well as application areas of the KOMAC are categorized and four surveys of user's requests and markets were conducted via e-mails, mails, telephones, or visits. An internet home page and seminars for the KOMAC user program were provided. As results, lots of accelerator relate person and even publics could join or get acquainted with the KOMAC program. The research potential area for the KOMAC of near future was suggested and provided through the analysis of collected data and informations.

IV. Results of the Study

1. Development of the MeV beam applications

a. Application study of power semiconductor carrier lifetime control technique

There are several techniques currently employed by various manufacturers in the fabrication of fast switching power semiconductors. Gold doping and irradiation by electron beams are among the more common ones. In the future, the proton irradiation which will be accepted as a reliable tool for local lifetime control is a major technique in the fabrication of advanced power semiconductors. The following table shows the comparison of gold, platinum, electron irradiation and proton irradiation for controlling carrier lifetime in power semiconductors.

Contents	Au	Pt	electron irradiation	proton irradiation
Trade-off	excellent	good	medium	excellent
τ_H/τ_L	excellent	good	medium	good
Equipment	spin coater, furnace	spin coater, furnace	electron accelerator	proton accelerator
Control	source, diffusion temp., time	source, diffusion temp., time	energy, dose	energy, dose
Reliability	medium(poor)	medium(poor)	good	good
Uniformity	medium(poor)	medium(poor)	good	good
Temp. dependence of leakage current	very large	large	small	small
Temp. dependence of carrier lifetime	small	small	large	large
Recovery of carrier lifetime	no	no	150 °C (some) 400 °C (most defects recover)	150 °C (some) 350 °C (some)

b. Development of a specific element detection technique

In the study of explosives and drug detection technology, we analysed the present technology and investigated the domestic and

internal-external demand. From the analysis, we confirmed that the explosive detection device using proton accelerator and gamma resonance scattering should be relatively superior to the present devices in economics and accuracy. We also have applied for a patent of the explosive detection device using proton accelerator and registered a computer code to calculate gamma ray characteristics. A state-of-art report of the present mine detection technology was published for the development of a land-mine detector using proton accelerator. The probability on the development of explosives and mine detection technology by using gamma resonance scattering was confirmed in the experiments using the Tandem accelerators. As a result of pre-experiment, the gamma resonance absorption technology to detect explosives was verified successfully. And the principle of resonance scattering technology was confirmed. But for the verification of field application, a higher beam current is needed. We have a plan to perform another experiment for the verification. The result of present experiment was reported at the spring meeting of the Korean Physical Society 1999. In order to commercialize the explosives and mine detection technology, we proposed it to the 1999 dual-use technology development program.

c. Radioisotope Production

There are some methods to produce RI's by using proton accelerator. One is to use nuclear reaction by proton irradiation such as (p, γ) , (p, d) and another is to use nuclear reaction by neutron produced by proton such as (n, γ) , (n, p) , (n, xn) . We can also irradiate proton or

neutron produced by proton on U or Th.

Production of RI's at each stage of accelerator completion is following.

We use 1st stage CCDTL 20 MeV proton ;

- Using $^{100}\text{Mo}(p, pn)^{99}\text{Mo}$ for Mo-99(Tc-99m) production
- Ga-67, Tl-201, Co-57, I-123
- PET nuclids such as C-11, N-13, O-15, As-74

2nd stage CCDTL 100 MeV proton ;

- Tl-201, I-123 can
- Using ^{232}Th , $^{238}\text{U}(p, f)^{99}\text{Mo}$ for Mo-99(Tc-99m) production
- Using fast neutrons produced by (p, n)

260 MeV proton ;

- Using spallation reation of U-238 etc(more than 1,000 RI's)

1 GeV proton ;

- Using spallation reation of U-238 etc(more than 2,000 RI's)

d. Production and Utilization of Neutrons Produced by MeV Proton

(1) Neutron production

Target	Reaction	Threshold Energy (MeV)	Neutron Production at 0° (proton=3MeV)	
			flux(n/cm ² .sec/mA) (1m from target)	Energy Range (keV)*
Li-7	$\text{Li}^7(p, n)\text{Be}^7$	1.88	$\sim 10^7$	$\sim 30 - \sim 1300$
H-3	$\text{H}^3(p, n)\text{He}^3$	1.02	$\sim 10^7$	$\sim 60 - \sim 2000$
Sc-45	$\text{Sc}^{45}(p, n)\text{Ti}^{45}$	2.91	$\sim 10^5$	$\sim 10 - \sim 50$

(2) Neutron application

Applications	Neutron		
	flux (n/cm ² .sec)	Energy	Mode
BNCT (Boron Neutron Capture Therapy)	>10 ⁹	epithermal	CW
Movable Neutron Radiography	>10 ⁶	thermal	CW
Movable Neutron Activation Analysis	-*	-*	CW

* Varies according to analyzing elements and background

(3) Target system

BNCT requires the highest neutron flux, therefore proton current is decided according to BNCT requirement. Li target is the most appropriate for the 3 applications and we design the target system including moderator and reflector.

e. Development of industrial applications of the injector beam

The surface resistance decreased from insulation resistance to 10⁶ ~ 10⁹ Ω/□ after irradiating the injector beam on the semiconductor packaging Tray(MPPO). From the results we know that it is in the range of industrial application.

2. Development of user program

- Description of the KOMAC project and its utilization/application areas were provided at an internet website in order to internationally introduce the KOMAC project and in order to receive strong support

from the public.

• Seminars and interviews with scholars of international reputation, visits of advanced facilities, and surveys on accelerators of the KOMAC's class, were conducted and the results can be summarized as the following. The KOMAC of 20mA, 1GeV(CW), and 20MW, is an internationally advanced accelerator which could provide solutions for nuclear spent fuel and energy problems. The multi-purpose idea of extracting diverse beams in energy and current for industrial applications receives internationally positive evaluation and this idea gradually spread into the international accelerator community. For detailed informations, see the results of 1'st-3'rd International Review Meetings. (1'st meeting: September 3-4, 1997, SNU Faculty Club, 2'nd meeting: February 9-10, 1998, Chungang University Ansung Campus, 3'rd meeting: February 4-5, Korea Atomic Energy Research Institute.) Now, Korea is face with severe economic difficulties. By carrying out a big national project such as the KOMAC, lots of jobs are newly created, new employments are achieved, and, above all, self-confidence of constructing world-best facility in Korea by our own ability will give a positive hope to the public.

• As a result of four surveys on user's markets, high flux neutron science related fields received much interest and many scholars of the Korea Nuclear Physics Research Group gave strong support by providing much information on research topics and spin-off impacts. In many cases, the responses were limited to the experiences and informations of their research fields. Thus, long-term user education and user

program development are found to be very important.

V. Future Applications

The main objective of the Development of Beam Utilization/Application Technology is to develop the various fields of using proton accelerator which will be installed in several phases. we know that one of them is in the range of the possibility of industrial applications in the production of a semiconductor packaging Tray using injector beam. In the MeV beam applications, we will put it to practical use in the production of power semiconductors, development of commercial proton accelerator, then detection of the explosive or land mine as one of a specific element detection technique. The basic strategy for RI production is established for 1 GeV, 20 mA proton accelerator. Based on this, we will establish a RI production system with the cooperation of other institutes. In production and utilization of neutrons produced by MeV proton, We will design the Li target system and simultaneously perform the bench mark experiment of neutron production by using μ A proton accelerator. And then We will install the examined target system and use neutrons for the 3 applications when 3 MeV proton beam is available at KAERI.

2. Development of user program

In the 21'st century, the technology development will be mainly derived by the civil and commercial organization and diverse R&D products from universities, research institutes, and industries are requested by using basic facilities furnished by the government. Thus, the creation and education for the potential user should be performed continuously in parallel with the facility development in order to maximize the operation and utilization efficiency when the facility development is finished. Considering the domestic economic difficulties and the beginning stage of the KOMAC construction, the importance and priority of the user program could be under evaluated. However, in order to efficiently achieve the aim of the KOMAC program, its user program should be well prepared and investigated with the facility construction. By applying these results to industrial and academic researches, we can cultivate the industries of high profit, create new employment, achieve academic development, and finally develop national competitive power. Now, the cultivation of the young leader who will derive the new application areas and users at each construction step is the most urgent one. Through the training of selected potential users at diverse accelerator facilities of the KOMAC class, they will successfully lead the KOMAC facility and its user program in the future.

- Budget approval for the user creation and user program development.
- Single channel for the survey of user requests/opinions and the user education.

- By receiving strong support from the public through diverse meetings or public hearings, we should introduce to the public that the KOMAC is the clean, green, and peaceful project for the well-beings of all the citizen in the future.

목 차

국 문 요 약	i
영 문 요 약	xi
국 문 목 차	xxiii
영 문 목 차	xxvii
제 1 장 서론	1
제 2 장 MeV빔 이용 전력반도체 기술개발	3
제1절 전력반도체	3
1. 서론	3
가. 개념	3
나. 분류	4
다. 전력반도체 산업의 현황과 전망	6
라. 국내외 연구개발 현황	11
제2절 전력반도체 이송자 수명제어 기술	13
1. 서론	13
2. 기술동향	17
가. 외국의 경우	17
나. 국내의 경우	18
다. 국내외 기술수준 비교	19
3. 주요 기술사항	19
가. 외국의 경우	19
나. 국내의 경우	20
4. 결론	25
제 3 장 지뢰 및 폭발물 탐지장치	27
제 1 절 개요	27
제 2 절 연구개발 필요성	30
1. 기술적 측면	30

2. 사회적/경제적 측면	31
3. 군사적 측면	31
제 3 절 지뢰 탐지 장치 현황	31
1. 금속 탐지기 (Pulse Induction)	32
2. 지뢰 및 폭발물 탐지 건	33
3. Bridge Impedance	33
4. Ground Penetrating Radar (GPR)	33
5. Microwave Impulse Radar	36
6. Acoustic mine detector	36
7. X-ray 탐지 장치	37
8. 복합 탐지 장치	37
9 Vehicle Mine Ordnance Detector (VMOD)	40
10. Teleoperated Multisensor Mine Detector (ILDPA)	41
11. Vehicular Mounted Mine Detector (VMMD)	42
12. Vehicular Array Mine Detection System (VAMIDS)	43
제 4 절. 양성자 가속기를 이용한 지뢰 탐지장치	44
1. 장치 제원	44
2. 성능	45
3. 기술현황 분석	46
4. 국내 기술현황	47
5. 연구개발 기대 성과 및 파급효과	48
제 5 절 폭발물 탐지 원리 확인 실험	52
1. 감마선 공명흡수 실험	52
2. 실험 결과	53
제 4 장 방사성 동위원소 생산	61
제 1 절 동위원소의 이용	61
제 2 절 동위원소 생산방법	65
1. Mo-99(Tc-99m)	66
2. In-111	74
3. Ga-67	75

4. Tl-201	76
5. I-123	77
제 3 절 생산 및 이용 현황	79
1. 국외	79
2. 국내	80
제 4 절 대용량 양성자가속기를 이용한 동위원소 생산	83
1. 주요생산품목 선정	83
2. 주요수입동위원소	84
3. 시설별 생산 핵종	85
4. 양성자가속기(KOMAC) 단계별 활용계획	85
5. 결론	86
제 5 장 MeV 양성자 빔을 이용한 중성자생산 및 이용	89
제 1 절 중성자 생산	89
1. $\text{Li}^7(\text{p},\text{n})\text{Be}^7$ 이용	90
2. $\text{H}^3(\text{p},\text{n})\text{He}^3$ 이용	92
3. $\text{Sc}^{45}(\text{p},\text{n})\text{Ti}^{45}$ 이용	93
제 2 절 중성자 이용분야	93
1. BNCT(Boron Neutron Capture Therapy)	95
2. 이동식 중성자 라디오그래피	97
3. 이동식 중성자 방사화분석	99
제 3 절 표적시스템	101
제 6 장 입사기 빔(50keV) 산업적 이용기술 개발	104
1. 입사기 빔 이용 플라스틱 표면개질 실험	104
제 7 장 가속기 사용자 프로그램 개발	108
제 1 절 서 론	108
제 2 절 미래선도 분야	110
1. 양성자빔 이용 분야	111
2. 중성자빔 이용/응용 전망	113
3. 활용분야	120

제 3 절 연구개발 수행내용 및 추진방향	125
1. 수행내용	125
2. 추진방향	128
제 4 절 국내·외 가속기 이용자 그룹 현황	129
1. 국내	129
가. 포항 가속기 (Pohang Light Source; PLS)	129
2. 국외	134
가. APS	134
나. ESRF	143
다. SPring-8	150
라. ISIS	158
마. IPNS	168
바. SNS	173
사. ESS	180
아. NSF	191
제 5 절 KOMAC 이용/응용 수요조사	195
1. 이용/응용 수요조사	195
2. 분석	200
3. 결과	201
제 6 절 결론	204
1. 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도	204
2. 연구 성과	204
3. 결언	205
제 7 절 기대 효과	207
1. 과학기술분야에의 파급 효과	207
2. 산업분야에의 파급 효과	207

Contents

Summary(Korean)	i
Summary(English)	xi
Contents(Korean)	xxiii
Contents(English)	xxvii
Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Development of Power Semiconductor by using MeV Beam	3
Section 1. Power Semiconductor	3
1. Introduction	3
a. Concept	3
b. Classification	4
c. Present Status and Prospect in Power Semiconductor Industries .	6
d. Present Status of Foreign/Domestic R & D	11
Section 2. Carrier Lifetime Control of Power Semiconductor ...	13
1. Introduction	13
2. Trends in Technique	17
a. Foreign Circumstance	17
b. Domestic Circumstance	18
c. Comparison of Domestic with Foreign Technique Level	19
3. Items of the Principal Technique	19
a. Foreign Circumstance	19
b. Domestic Circumstance	20
4. Conclusions	25
Chapter 3. Mine and Explosive Detection System	27
Section 1. Introduction	27

Section 2. Necessity of Research and Development	30
1. Technical Considerations	30
2. Social/ Economical Considerations	31
3. Military Considerations	31
Section 3. Present Status of the Mine Detection System	31
1. Metal Detector	32
2. Mine and Explosive Detection Dog	33
3. Bridge Impedance	33
4. Ground Penetrating Radar (GPR)	33
5. Microwave Impulse Radar	36
6. Acoustic Mine Detector	36
7. X-ray Detection System	37
8. Complex Detection System	37
9. Vehicle Mine Ordance Detector	40
10. TMMD	41
11. VMMD	42
12. VAMDS	43
Section 4. Mine Detection System by the Proton Accelerator .	44
1. System Elements	44
2. Performance	45
3. Present Status of the Detection System	46
4. Present Status of Internal Technique	47
5. Development Effect of the Detection System	48
Section 5. Explosive Detection Experiment	52
1. Gamma-ray Resonance-Absorption Experiment	52
2. Results	53
Chapter 4. Production of Radioisotopes	61
Section 1. Utilization of Radioisotopes	61
Section 2. Methods of Radioisotope Production	65
1. Mo-99(Tc-99m)	66

2. In-111	74
3. Ga-67	75
4. Tl-201	76
5. I-123	77
Section 3. Status of Radioisotope Production and Utilization ...	79
1. Overseas Status	79
2. Domestic Status	80
Section 4. Production of Radioisotopes by High Power Proton Accelerator	83
1. Selection of Major Radioisotopes	83
2. Major Imported Radioisotopes	84
3. Facilities for Radioisotope Production	85
4. Strategy of Utilizing High Power Proton Accelerator	85
5. Conclusion	86
Chapter 5. Production and Utilization of Neutrons Produced by MeV Proton Beam	89
Section 1. Neutron Production	89
1. $\text{Li}^7(\text{p},\text{n})\text{Be}^7$	90
2. $\text{H}^3(\text{p},\text{n})\text{He}^3$	92
3. $\text{Sc}^{45}(\text{p},\text{n})\text{Ti}^{45}$	93
Section 2. Neutron Utilization	93
1. BNCT(Boron Neutron Capture Therapy)	95
2. Movable Neutron Radiography	97
3. Movable Neutron Activation Analysis	99
Section 3. Target System	101
Chapter 6. Development of the Industrial Application Technique by Using Injector Beam	104
1. Experiment of the Plastics Surface Reconstruction by Using Injector Beam	104

Chapter 7. Development of KOMAC User Program	108
Section 1. Introduction	108
Section 2. Leading Fields in Future	110
1. Proton-Beam Utilization Field	111
2. Prospect of Neutron-Beam Utilization/Application	113
3. Application Fields	120
Section 3. Driving Direction and Performance of R & D	125
1. Performance	125
2. Driving Direction	128
Section 4. Present Status of User Group in Domestic/Foreign Accelerator	129
1. Domestic Status	129
a. Pohang Light Source	129
2. Overseas Status	134
a. APS	134
b. ESRF	143
c. SPring-8	150
d. ISIS	158
e. IPNS	168
f. SNS	173
g. ESS	180
h. NSF	191
Section 5. Survey of the KOMAC Utilization/Application Fields	195
1. Survey of the Utilization/Application Fields	195
2. Analysis	200
3. Results	201
Section 6. Conclusions	204
1. Accomplishment of R & D Goal and Contributions	204
2. Achievements	204

3. Concluding Remarks	205
Section 7. Expectations	207
1. Spin-Off to Science and Technology	207
2. Spin-Off to Industry	207

제 1 장 서론

대용량 양성자가속기는 필수 국가 기반연구시설로서 선진국에서는 지금까지 원자력 연구개발과 불가분의 관계로 사용되어 왔으며, 앞으로 미래원자력기술개발의 열쇠로서 간주되고 있으며, 또한 양성자 가속기는 그 장치 기술 자체가 첨단기술의 종합체일 뿐만 아니라, 입자빔 이용/응용 기술은 현대 산업의 신기술 및 신제품 개발의 원천이다. “핵파쇄 장치개발”과제에서 개발되고 있는 대용량 가속기는 가속기 앞단부터 건설되는 RFQ, CCDTL 등 부속가속기로부터 발생하는 3MeV, 20MeV, 100MeV, 260MeV, 1GeV빔을 에너지 대별로 다양하게 일반산업분야, 방위산업분야, 의료분야, 동위원소분야, 환경분야, 기초학술연구로 다양하게 이용할 수 있다. 따라서 원자력분야에서 사용을 보다 확대하여, 국가 기반연구시설로서 사용처를 확장할 필요성이 있으며, 이는 3회에 걸친 “양성자가속기 Workshop” 과 이를 통한 국내외 전문가의 의견 수렴을 통하여 가속기 완성을 대비하여 빔 이용/응용 기술과 사용자 프로그램개발의 필요성을 확인하였다. 이는, 과거에 운영되었거나 현재 운영중인 국내 대형연구시설의 경우, 사용자 프로그램이 미약하고 활용성이 계획같이 활발하지 못하다는 전반적인 지적으로부터 얻은 교훈이다. 따라서 프로그램 기획 및 추진 초기부터, 철저한 시설 사용자/활용처의 조사와 이를 적절히 계획에 반영하기 위하여, 본 양성자가속기개발 프로그램에서는 이를 초기부터 적극 보완, 프로그램에 반영할 필요성이 있으므로 본 과제는 단계별로 완성되는 양성자 가속기의 조기활동에 대비하기 위하여 이를 위한 시설별 사용자 프로그램 개발 및 빔 이용기술 개발로 세분화하여 추진하여,

사용자프로그램의 개발은

- 국가 기반연구시설로서 원자력분야 등 여러 분야의 국내·외 사용자 개발 및 조기 확보
- 사용자들의 가속기 시설에 대한 요구사항을 가속기 설계시 반영
- 사용자들의 합의를 모아 대형 프로그램의 합리적인 추진방향 설정을 목표

로하여 프로그램을 개발

빔 이용기술 개발은 연차별로 완성되는 입사기(50keV), RFQ(3MeV), CCDTL (20MeV)로부터 생성된 빔을 현재 장치 시장이 형성중인 분야에 조기에 적용 하기 위하여 장치 완성시점을 겨냥한 기초연구를 하도록 개발할 필요가 있다. 즉 입사기 및 RFQ로부터 생성되는 3MeV의 양성자빔은 산업용으로 전력 반도체 제조공정, 초강도 플라스틱 제조 등에 직접 활용되고 있으나 국내에는 시설이 없어 외국의 장치를 의존하여 시료처리를 함으로써 고가의 처리 비용은 물론 인력 및 시간 낭비를 초래하고 있어 국내 관련 연구소 및 업체들이 산업용장비 확보를 기대하고 있는 실정으로 향후 필요성이 대두되고 있는 방위산업분야의 지뢰 등 폭발물 탐지 및 마약 검색 등에 양성자가속기를 이용한 감마선 생성에 의한 광핵공명반응 원리를 이용한 새로운 탐지기술이 개발 중에 있으므로 이 분야에도 널리 사용될 것이므로 이에 대한 선행연구 또한 필요하여 본과제의 연구개발목표를 MeV빔 이용기술개발, 입사기 빔 산업적 이용기술개발, 사용자 프로그램개발로 하였다.

제2장 MeV빔 이용 전력반도체 기술개발

제1절 전력반도체 [1]

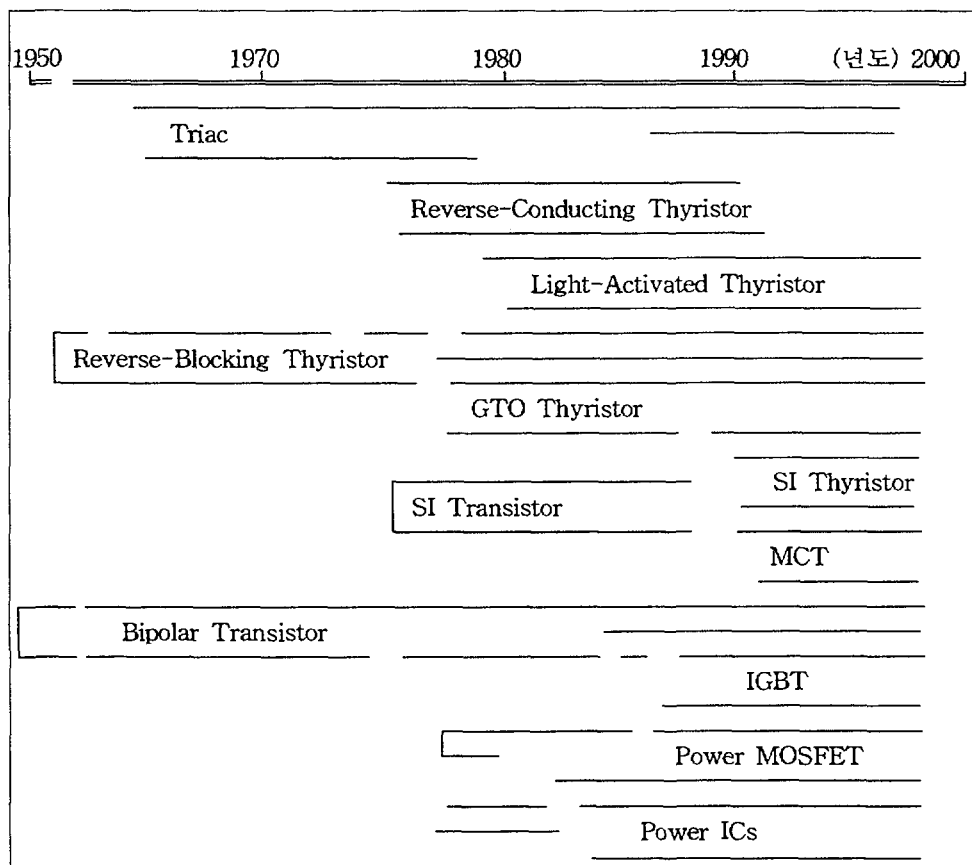
1. 서론

가. 개념

(1) 전력반도체 소자의 정의

전력용량으로 1와트(watt) 이상, 전류용량으로 1암페어(ampere) 이상 또는 차단전압 100볼트(volt) 이상의 동작특성을 갖는 반도체 소자.

(2) 전력반도체 소자의 발전추이



나. 분류

(1) 전력반도체소자의 종류

분 류				최대 정격전 류 (Amps.)	최대 정격전 압 (Volts)
전력 반도 체	개별 전력 반도체소자 (Discrete Power Semiconductor Devices)	정류 다이오 드	일반용	8,000	12,000
			고속 스위칭	1,000	4,500
			쇼트키	3,000	350
		트랜지스터	바이폴라 Tr.	800	2,500
			MOSFET	50	1,500
			정전유도 Tr.	150	1,500
			IGBT	100	1,200
		사이리스터	사이리스터(일반용)	6,000	12,000
			사이리스터(고속용)	1,500	2,500
			광 사이리스터	1,500	6,000
			역도통 사이리스터	1,000	2,500
			정전유도 사이리스터	600	4,000
			GTO 사이리스터	6,000	6,000
			Triac	300	1,200
			MCT	100	1,000
			IEGT		
	전력소자 모듈	다이오드 모듈		250	2,000
		사이리스터 모듈		400	1,600
		바이폴라 트랜지스터 모듈		600	1,600
		GTO 사이리스터 모듈		600	1,600
		MOSFET 모듈		100	1,000
		BiMOS 모듈		300	1,000
		IGBT 모듈		400	1,200
	인텔리전트 소자	Smart Power ICs		10	500
		Intelligent Power Modules(IPM) (BJT, MOSFET, IGBT, SCR 등)			

(2) 전력반도체 소자의 성능비교

(O:양호, X:미흡, △:보통, ◎:아주 양호)

	BJT	BJT Module	MOSFET	MOSFET Module	IGBT	GTO	Thyristor	MCT
구동방식	전류	전류	전압	전압	전압	전류	전류	전압
스위칭 주파수(Hz)	10000	10000	500000	70000	20000	2000	400	20000
고내압화	0	0	△	△	0	◎	◎	0
대전류화	0	0	△	△	0	◎	◎	△
고속화	△	△	◎	◎	0	△	△	0
단락 SOA	0	0	0	0	△	△	△	
포화전압	◎	△	△	△	0	◎	◎	◎
병렬접속	0	0	0	0	0	0	0	0
직렬접속	X	X	X	X	X	◎	◎	X

(3) 응용분야

(가) 소자별 응용분야

소 자	응 용 분 야
Bipolar Transistor	모타구동, 전원장치(UPS, SMPS), HDTV, Induction Heater, 지하철 차량, 칼라TV, EDTV, 고/초고정세 모니터, 전자식 안정기
MOS FET	전자식 안정기, 모타구동, RF신호발생기, Car-Booster, 컨버터, 전자식 안정기, 전원장치(SMPS), Automotive, OA, HA
IGBT	전원장치(UPS, SMPS), 컨버터, 인버터, 모타구동, Automotive, 전기자동차
Diode	전원장치, TV 및 고정세도 모니터, 고속전철 및 지하철 전력변환장치, Automotive, 전자식 안정기, Car-Booster, SMPS
Thyristor	DC모타구동, 대용량 전원장치, HVDC 송전, 전력계통(SVC 등), 모터제어, 냉장고, 세탁기, 믹서기, 전자레인지, 무접점 스위치, SMPS, Strobo Flash, 초퍼
GTO Thyristor	SMPS, UPS, Fan Controller, 인버터, 컨버터, 초퍼, 모터제어, 에어컨, 고속전철 및 지하철 전력변환장치, 대용량 전원장치, 전력계통(FACTS 등)
Intelligent Power Module (IPM) 및 Smart Power ICs	- 산업용 : Relay/Solenoid 구동, 램프안정기, 모타구동, 전원장치 - 자동차 전장용 : 엔진제어, 모타구동(window, antenna, sun roof), 자동변속, 스마트 스위치, Solenoid 구동(도어록, trunk release), Display 구동, 유도제어 - 가전용 : VCR, CDP, LDP, TV, Audio, 에어컨, 냉장고, 전자렌지 - 통신용 : 무선전화기 스위치, Cross Point 스위치, 전화기등 전원 - 데이터 처리 : 컴퓨터 및 관련 주변기기 전원(Hard Disk, 프린터, 복사기, 팩시밀리 등)

(나) 전력전자 분야 발전추이

연대	1950	1960	1970	1980	1990	2000
동향	FA ----- OA ----- HA ----- HE					
지금까지	전차용 정류장치 화학공장의 전해전원	직류전동기	전차용 초퍼장치 무정전전원	교류전동기 스위칭전원	산업용로봇 NC 공작기계	
확대되는 응용분야	<요구사항> *에너지, 자원절약화 *고도제어기술화 *우수한 환경성 *생활의 쾌적성			전력	교류, 직류 변환장치 전력저장 변환장치 FACTS HVDC 송전	
				산업	AC 및 DC 모터제어 전원장치(UPS, SMPS) 펄스 파워기술	
				교통	고속전철, 지하철 경전철, 전기자동차	
				가전 민생분야	TV, HDTV, 전자렌지 Audio, 에어컨, 냉장고 홈 오토메이션 휴먼 일렉트로닉스	

다. 전력반도체 산업의 현황과 전망

(1). 세계수요의 현황과 전망

전력반도체는 전체 반도체시장의 10.1%('96)을 점유하고 있으며, 매년 개별 소자와 IPMs는 10%, Smart Power ICs는 약 20% 정도로 성장하고 있다.

(Dataquest '96 단위 백만불)

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	AGR (~95)	AGR (95~)
Power Total	10,55	12,50	14,28	15,76	16,98	18,84	20,91	23,09	11.7	10.0
Total Discrete	9,084	10,75	12,28	13,49	14,38	15,85	17,46	19,11	11.2	9.1
Transistor	5,202	6,286	7,307	8,132	8,747	9,720	10,71	11,81	13.4	9.8
S/S Tr.	2,145	2,520	2,870	3,041	3,083	3,212	3,539	3,729	12.3	5.2
Bip. Power	1,854	2,319	2,388	2,590	2,707	2,951	3,052	3,141	6.1	4.9
MOSFET	1,094	1,470	1,812	2,168	2,503	2,982	3,385	3,917	27.8	15.9
IGBT	109	158	238	332	454	575	734	1,027	47.7	32.6
Diode	2,685	3,050	3,352	3,570	3,739	4,015	4,424	4,741	8.4	7.3
Thyristor	696	790	909	972	1,006	1,063	1,172	1,249	8.4	6.5
Others	501	632	720	822	896	1,052	1,160	1,306	8.0	12.3
Total Power IC	1,475	1,750	1,995	2,265	2,600	2,990	3,449	3,981	14.8	15.1
G/P Power	776	900	1,015	1,125	1,250	1,390	1,561	1,753	11.3	11.7
Smart Power	699	850	980	1,140	1,350	1,600	1,888	2,228	19.2	18.2

Total Semiconductor (100M\$)	85,5	1,109	1,358	1,560	1,761	2,028	2,342	2,674	22.8	14.4
Power Ratio(%)	12.3	11.3	10.5	10.1	9.6	9.3	8.9	8.6	-9.1	-3.9

(2) 수요팽창 요인

(가) 공장에서의 자동화, 고정밀제어화, 에너지절약 제어화

(나) 사무자동화

(다) 가전제품의 고기능화

(라) 전기(지하철, 전철, 고속전철, 경전철 등)철도의 인버터화

(마) 자동차의 자동제어화, 전기자동차의 실용화

(바) 공장설비(제철, 제강, 발전설비 등)의 인버터화

(사) 빌딩의 고층화 및 인텔리전트화

(아) 산업용 전원장치의 고기능화

(자) 정보통신장치 전원의 인버터화

(차) 개발도상국의 사회간접자본(항만설비, 전기철도 등)의 투자확대

(3) 주요 생산업체의 국제시장 점유율(단위: %, 1993년)

전력반도체 분야는 일본기업들이 세계시장을 장악하고 있으며, 모토로라, IR, 토플슨 등이 이를 추격하고 있는 실정이다. 특히 대용량 고전압소자의 경우 전세계시장의 50% 이상을 일본이 점유하고 있으며 기술적인 우위를 바탕으로 당분간 그 독보적인 위치를 유지할 것으로 생각된다.

(WSTS, '94 Data Quest에 의함)

생산업체	전체	BJT	IGBT, MOSFET	Diode, Thyristor	비고
Toshiba	12.4	14.6(1)	6.8(3)	9.5(2)	IGBT(2)
Motorola	11.6	12.5(2)	9.3(2)	8.3(3)	
NEC	7.0	7.4(4)	5.7(5)	3.0	
SGS-Thomson	6.7	8.0(3)		3.4	
Hitachi	6.1	5.9(5)	6.7(4)	9.9(1)	IGBT(1)
IR	5.7		20.4(1)	1.7	IGBT(4)
Sanken	4.9	5.5(6)		4.8(7)	
Fuji	4.5	4.8(8)	3.7(10)	5.2(6)	IGBT(5)
Matsushita	4.4	5.0(7)		4.1(9)	
Philips	3.7	4.1(9)		7.6(5)	
Rohm		4.0(10)		3.9(10)	
Siliconix			5.7(6)		
Fusitsu			4.6(7)		
Harris			4.6(7)		IGBT(7)
Samsung			3.7(9)		MOSFET
GEC				7.9(4)	
Shidenken				4.8(7)	
Mitsubishi					IGBT(2)
Eupec					IGBT(8)
기타	33.0	28.2	28.8	21.0	

비고 1. 괄호내는 품목별 점유순위

2. BJT = Bipolar Junction Transistor
3. IGBT = Insulated-Gate Bipolar Transistor
4. MOSFET = Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
5. 삼성은 MOSFET만 생산, IGBT는 시제품 출하단계.

국내시장	금액(백만불)	세계시장 점유율(%)	전년대비 수요 성장률(%)
'93	573	5.4	-
'94	688	5.5	20.1
'95	800	5.6	16.3
'96	898	5.7	14.2
'97	1,002	5.9	11.6
'98	1,149	6.1	14.8
'99	1,318	6.3	14.7
2000	1,500	6.5	13.8
증가률 (%/년)		2.5	15.1

국내시장 규모

(4) 국내수요의 현황과 전망

WSTS의 Data Quest '93에 의하면 '93년 국내의 시장규모는 5억 7천 3백만 불로 전세계시장의 9% 정도에서 2000년대에는 최소 10% 15억불에서 최대 15%선인 23억 불에 달할 것으로 예측하고 있다. 그러나 일부 소용량 소자를 제외하고는 전량 수입에 의존하고 있으며, 특히 전체 수입량 중에서 대인 수입 의존도가 70%에 달하고 있다.

(5) 생산업체별 국내시장 점유율(% , 1993년).

국내 생산기반의 취약으로 국내시장의 대부분을 외국업체에 내어주고 있다. 특히 일본업체에 대한 의존성이 커, 자본재 기술의 대일 의존성을 심화시키고 있다. 삼성의 경우 power IC와 MOSFET 및 가전용 bipolar transistor의 일부 품목을 생산하고 있다.

(미국 IR사의 자료)

생산업체명	전체	BJT	IGBT, MOSFET	Diode, Thyristor	비고
Fuji	12.5	16.5(2)	30.5(1)	11.4(4)	IGBT 강점
Sanrex	11.5	19.4(1)	9.5(4)	12.5(3)	중소용량 강점
IR	7.0		8.5(5)	10.5(5)	MOSFET 강점
Mitsubishi	6.5	8.0(4)	9.8(3)	13.4(2)	사이리스터 강점
GEC	6.0	5.9(6)	6.5(6)	17.9(1)	전철용 GTO 강점
Toshiba	5.5	9.5(3)	11.4(2)	9.0(6)	MOSFET 강점
Semicon	5.0	7.5(5)		8.8(7)	Diode 강점
Hitachi	4.5	5.0(8)	3.0(10)	5.2(8)	
ABB	4.0			3.5(9)	전기제품용
Philips	3.5	4.5(9)			
Motorola		4.0(10)	3.5(9)		
Sanyo		45.5(7)	5.5(7)		고내전압 BJT 강점
SGS-Thomson			4.0(8)		100A 이하
Westcode				2.5(10)	
기타	34.0	14.2	7.8		

비고: 괄호 안은 품목별 점유율 순위.

라. 국내외 연구개발 현황

項 目		最高水準 (100)	러 시 아	韓 國	備 考
전력 반도체 칩 제조	NTD wafer 기술	일본, 프랑스 독일, 캐나다	85	20	한국원자력연구소에 서 제조시설을 건설 중
	기타 소재 기술	일본, 미국 독일, 프랑스	85	30	
	설 계	기본설계	100	30	
		최적화 기술	70		
	이송자 수명 조절	중금속 확산법	100	80	실용화에 가까이 와 있습
		고 에너지 입자선 조사법	100	10	
실장 (disc형)	공 정	상동	80(시설노 후)	90	
	소재·부품 (가공기술 포함)	상동	85	40	일부 적용가능한 유 사기술 보유
	설 계 (열설계 포함)	상동	100	40	중용량 모듈 package기술개발에 서 기초기술 확보
	조립기술	상동	90	30	

(1) 미국

Power IC, MOSFET 분야의 연구개발이 활발하고 IGBT분야도 경쟁력이 있다. 고전압/대용량 분야의 연구는 GE의 전력반도체분야의 사업포기로 전체 적으로 연구가 미약하며, 다만 MCT분야에 대한 기술은 가장 앞서 있는 것으로 생각된다. 개념연구는 주로 RPI, NCSU 등에서 주도되고 있다.

(2) 일본

전 분야에 대해서 가장 활발한 연구활동을 벌이고 있으며, 경쟁력 또한 가장 뛰어나다. 고전압/대용량 분야는 세계적으로 기술을 선도하고 있는 실정이다. 특히 기업들에 의하여 연구가 주도되고 있다.

(3) 유럽

대용량/고전압 소자의 경우, Eupec(AEG+Siemens), ABB, GEC 등이 주축이 되어 이끌어가고 있으며 중·소 용량의 경우에는 톰슨, 모토롤라(유럽) 등이 경쟁력을 확보하고 있다. 대학의 경우 스위스연방공대, 프랑스 리옹공대 등 많은 연구를 하고 있다.

(4) 러시아와 동유럽

과거에는 원천기술분야에서 미국과 견줄 만한 능력을 가지고 있었지만 90년대 이후에는 연구개발이 거의 중단된 상태이다. 연구기관으로는 러시아 연방전기연구소, 이요폐물리기술연구소 등이 있으며, 기업체로는 대용량분야에서는 러시아의 Electropromitel 등 3개업체, 중·소 용량의 경우는 우즈베키스탄의 Qaurk사 등 5개업체 등이 있으나, 현재에는 서방세계의 하청업체로 전락한 단계이다. 그러나 연구를 위한 하부구조는 튼튼한 것으로 파악된다.

(5) 국내

연구는 산발적으로 여러 군데에서 수행하고 있으나, 체계화된 접근이 되지 못하고 있다.

제2절 전력반도체 이송자 수명제어 기술

1. 서론

전력반도체 소자의 소수 이송자 수명을 조절하는 방법으로는 Au, Pt 등의 천이금속을 실리콘 bulk내 확산시킴으로써 에너지 밴드갭 내에 deep level을 형성시키거나, 전자선 조사에 의한 격자결함 유기 또는 양성자, argon 등의 이온주입에 의한 격자결함 유기에 의해서 이송자 수명 등의 제어를 통해서 스위칭 시간 개선이 가능하다 [2]. 따라서 소자의 설계구조와 사용하는 재료특성의 최적화가 이루어져야 하는데, GTO, 사이리스터 등의 대용량 소자와 최근에 개발되고 있는 3세대 전력용 소자의 경우 이송자 수명을 근본적으로 제어하지 않고 설계기술 만으로는 원하는 스위칭 시간을 얻기가 어렵다. 한편 이송자 수명을 조절하는 것은 소자의 타 특성과 상호 trade-off 관계를 고려해야 한다. 일반적으로 스위칭 시간이 빠르게 제어되면 순방향 전압강하와 누설전류 증가를 초래한다. 순방향 전압강하의 원인은 전자 및 정공이 deep level에 의해 제거되어 농도가 감소하기 때문이며, 누설전류 증가는 deep level에 의한 생성전류의 증가에 기인된다. 따라서 동일한 소자설계 구조와 사용재료의 특성에서 trade-off를 고려하여 최적의 조건을 얻는 것이 핵심기술이다. 천이금속에 의한 이송자 수명 제어기술은 이미 외국에서는 보편화된 기술이지만 국내에서는 완전한 기술자립 단계에는 도달하지 못한 상태이다. 또한 보다 정밀한 제어를 위해서 전자선조사 및 양성자 주입 기술의 적용이 필수적이며, 전자선 조사(electron irradiation)를 소자에 적용하여 수명제어에 이용하는 실험은 70년대에 본격적으로 이루어져 80년대부터는 일반화된 기술이다. 전자선 조사방법은 전력용 소자에 주로 사용되고 있다. 전자선 조사는 실리콘 격자를 변화시켜 deep level을 형성하기 때문에 수 MeV의 이상의 고 에너지가 필요하다. 이러한 고 에너지는 실리콘 결정내의 정상적인 격자 위치로부터 실리콘 원자를 변위 시키고 치환형 결함(vacancy)과 침입형 결함(interstitials)을 형성한다. 이러한 이유로 금지대 내에 에너지 준위를 유기하게 되며 이것이

trap center로 작용한다. 전자선 조사의 장점은 소자제작이 완료된 이후에 스위칭 시간의 제어가 가능하고, 균일성과 재현성이 뛰어난 점이며, 단점으로는 다수 이송자 주입(high level injection) 수명과 소수 이송자 주입(low level injection) lifetime의 비(τ_h/τ_L)가 천이금속(Au, Pt)에 비하여 작게되며 이는 대전류 동작시에 trade-off에 불리하게 작용한다. 또한 전자선 조사에 의해 유기된 격자결함이 쌍으로 존재하기 때문에 시간에 따라 소멸되어 온도에 민감하게 스위칭 시간이 변화되는데 특히 150℃ 이상의 온도에서는 심각한 문제를 유발한다. 그러나 이송자 수명을 정확히 제어할 수 있으며 소자가 만들어진 다음에 제어가 가능하므로 전력용 반도체 소자에 가장 많이 사용되는 기술이다. 전자선 조사는 특별한 장치가 필요하며 Van de Graff-type 전자가속기를 이용하여 전자를 조사시킨다. 전자가속 에너지는 일반적인 대 전력용 소자에서는 2MeV~7MeV 사이를 가장 많이 이용하며 n 층의 두께가 50~100 μm 일 때에는 3MeV가 가장 일반적으로 이용된다. 전자조사 주입량은 rad라는 단위를 사용하며 일반적으로 Mrad(mega-rad)를 주입해야만 효과가 있는 것으로 알려져 있다. Proton 주입의 경우도 전자선 조사와 유사한 경향을 가지나, 현재까지 보고된 자료에 의하면 전자선 조사의 경우 보다 우수한 장점을 가진 것으로 나타났다 [3,4,5,6]. proton 주입이 실리콘의 격자결함을 유기하여 deep level을 형성한다는 점에서 전자선 조사와 거의 유사하나 그림 2. 에서와 같이 양성자가 주입된 깊이 근처에 특별하게 많은 결함을 국부적으로 형성하는 특징을 가지고 있다. 이 영역은 양성자 주입 근처의 수 μm 이내이며 이 영역 이외의 결함수 보다 훨씬 많은 수의 결함을 유기한다. 이러한 점이 전자선 조사보다도 우수한 특성을 가지도록 하는 요인이 되며 국부적인 결함 유기에 의해 trade-off 특성이 전자선 조사 보다 우수하다. 양성자 주입에 대한 실험은 미국의 GE社에서 1986 년도에 IGBT에 적용한 예가 있다. 현재에는 대용량 GTO 사이리스터에 상업적으로 적용하고 있다.

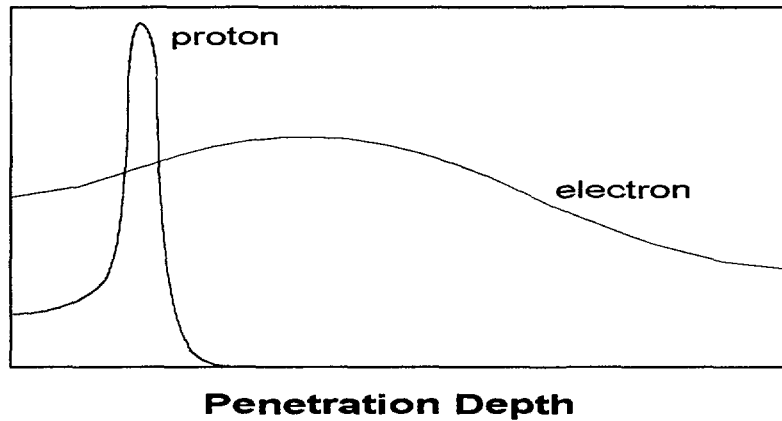


그림 2.1 전자·양성자 조사에 의한 침투 깊이특성

전력 Thyristors는 스위치, 전력제어소자, 인버터, 주파수 변환기 등에 널리 이용되는 반도체소자이다. 여러 가지 이용 중에서 “on” 상태에서 “off” 상태로 스위칭 속도가 최대한 빨라야 하는, 즉 스위칭 시간이 짧은 것이 바람직하다. 고속 스위칭 능력은 이송자 트랩이나 재결합 센터를 만들어서 모재의 소수 이송자 수명을 줄이는 것인데, 이 경우 순방향 전압강하를 줄이고 스위칭 시간을 짧게하기 위해선 정확한 위치에 트랩이나 재결합 센터를 만들어 주어야 하는데 현재 사용되는 금 도우핑이나 전자빔 조사 방법은 트랩의 위치를 정확히 제어할 수 없다는 문제점이 있다. 이에 대하여 양성자 에너지의 정확한 제어로 Thyristor를 만드는 방법을 살펴보면 그림 2.1에서 왼쪽으로부터 들어온 양성자 빔은 얇은 알루미늄 박막을 통과하여 소자에 고르고 넓게 조사되고, 시준기는 정확한 위치에 양성자 빔이 조사되도록 시편에 밀착시킨다. Profile Shaper는 두 개의 다른 두께를 한 원판으로서 반도체 소자 내 두 개의 다른 곳에 동시에 양성자 조사를 쉽게 하기 위해 이원적인 에너지 빔을 낼 수 있는 회전 원판이다. 그림 2.2를 보면 양성자 빔은 두께가 다른 Profile Shaper를 통과할 때 에너지 손실 차가 발생하여 원판의 얇은 부분을 통과한 빔은 좀더 깊은 곳에서 변위 손실이 일어나고, 두

꺼운 부분을 통과한 빔은 에너지 손실이 많아서 그림 2.3에서와 같이 표면과 가까운 곳에 변위 영역을 만든다. 이와 같이 고속 스위칭 Thyristor를 제작하는데 새로운 이원적인 에너지 양성자 빔 조사 기술을 이용한다 [7]. 이때 필요한 양성자 빔 에너지는 1 ~ 10MeV 정도이고, 조사선량은 $10^{11} \sim 10^{14}/\text{cm}^2$ 이므로 RFQ, DTL 가속기를 변형 적용하면, 양질의 소자를 다량으로 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

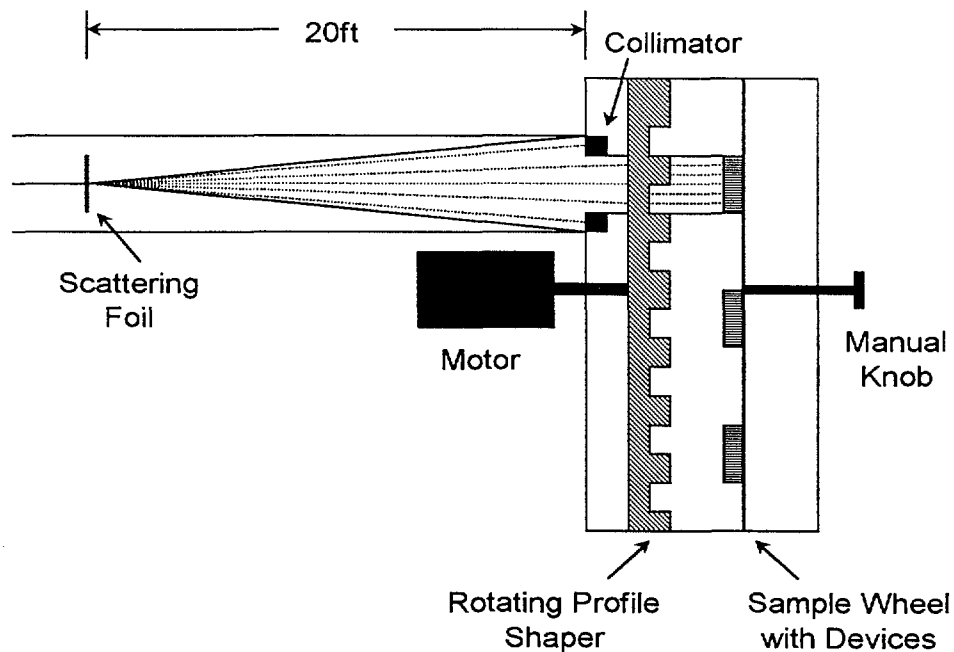


그림 2.2 Sketch of Experimental Arrangement

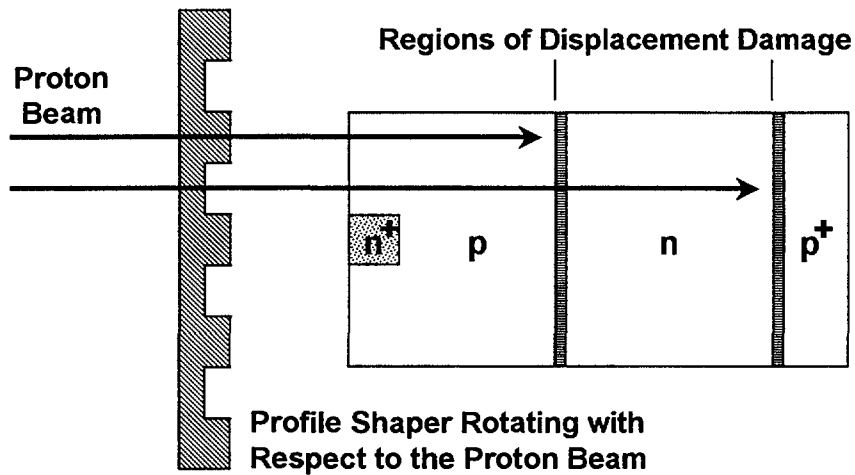


그림 2.3 Sketch of Profile Shaper

2. 기술동향

가. 외국의 경우

(1) 일본

일본은 명실상부한 전력반도체 소자분야의 선진국으로써 개별소자인 전력 다이오드, 바이폴라 전력 트랜지스터, 전력 MOSFET, IGBT등과 전력용 모듈(Module)제품 및 전력집적회로 등 전력반도체 전체분야에서 선진국 기술을 주도하고 있다. 특히 전력반도체의 특성제어를 위하여 전자선 조사장치, 양성자 가속기 등을 이용한 이송자 수명제어기술 연구에 가장 앞서 있으며, 최초로 상용의 대용량 GTO 사이리스터 소자에 양성자 조사기술을 적용한 바 있다. 일본 내에 전자선 및 양성자를 전문적으로 조사해 주는 기관이 스미토모, 미쯔비시외에 다수 있다.

(2) 미국

미국의 반도체 메이커는 대부분이 Micro Processor, 메모리, 주문형 반도체 등에 주력하는 경향으로 인해 동 분야에서는 일본에 비해 다소 뒤지나, 과거 GE 등에서 수행해온 전력반도체 기반기술연구를 기초로 NCSU, RPI 등의 학계와 전문 전력반도체 회사인 HARRIS, SPCO, IR(International Rectifier) 등을 중심으로 다양한 이송자 수명제어기술을 연구해 왔으며, 전자선 및 양성자 가속기 서비스 센타가 다수 있다.

(3) 유럽

유럽은 유럽최대의 반도체사인 프랑스의 SGS-Tomson(SGS 와 Thomson CSF 사와의 합병회사)과 독일 EUPEC(독일 AEG사와 지멘스와의 합작회사) 및 ABB를 중심으로 연구하고 있으며, 동유럽의 경우 체코, 폴란드를 중심으로 전자선, 양성자, 이온 조사 등의 다양한 이송자 수명제어기술을 연구하고 있다.

(4) 러시아 및 중국

러시아는 VEI, Ioffe 연구소를 중심으로 전자선 및 양성자 조사기술을 연구하고 있으며, 전자선 조사기술은 대용량 전력반도체 제조에 상업적으로 이용하고 있다. 중국의 경우 서안 전력전자연구소를 중심으로 대용량 전력반도체의 특성향상을 위해서 전자선 조사기술을 이송자 수명제어방법으로 적용하고 있다.

나. 국내의 경우

전력반도체 특성향상에 필수적인 이송자 수명제어기술 연구는 전무함. 다만 일부 기업에서 천이금속(Au, Pt)을 이용한 이송자 수명제어 방법을 연구한 경험이 있음

다. 국내외 기술수준 비교

항목		최고수준(100)	러시아 중국	한국	비고
이송자 수명제어	천이금속 확산법	일본, 미국 독일, 프랑스	100	80	실용화단계
	전자 및 양성자조사 기술	일본, 미국 독일, 프랑스	100	10	

3. 주요 기술사항

가. 외국의 경우

(1) 전자선 조사(electron irradiation)

80년대 이후부터 전력반도체의 이송자 수명제어를 위해서 사용되어 왔으며, 현재 전력반도체를 생산, 연구하는 대부분의 국가에서 상업적으로 적용되고 있다.

(2) 양성자 조사(proton irradiation)

최근 들어서 활발히 연구되고 있는 분야로, 국부적인 이송자 수명제어가 가능하고, 소자특성간의 trade-off 개선효과가 다른 방법에 비해서 우수하기 때문에 양산공정에 적용할 수 있는 기술이 확보되면 전력반도체의 이송자 수명제어에 급속도로 사용될 것으로 기대된다. 1986년에 GE에서 IGBT 소자에 적용한 예가 발표된 바 있고, 최근에는 대용량 GTO 사이리스터에 도시바에서 상업적으로 적용한 제품을 발표하고 있다.

(3) 이송자 수명제어 평가

반도체 소자의 물성 해석을 위한 기반기술로 선진국의 경우 대부분의 반도체 관련 기업이 자체적으로 이송자 수명 평가기술을 확보하고 있으며, 설

계 및 공정기술 향상에 활용하고 있다. 특히 미국, 일본, 헝가리 등에서 상업용 이송자 수명 측정장비를 개발하여 고가로 판매하고 있는데, 비교적 저렴한 제품이 주변장치를 포함하여 20만불 정도로 판매되고 있다. 미국의 경우 국공립 연구소, 반도체 업계, 학계에서 오래 전부터 꾸준한 연구를 해왔고, 일본은 RRT(Reverse Recovery Transient), photo-conduction, microwave reflection 방법 등, 다양한 방법의 이송자 수명 측정기술을 활용하고 있으며, 최근에는 도시바 등에서 전력반도체 소자 해석을 위해서 여러 분석방법을 복합 적용하여 소수 이송자 수명 및 다수 이송자 수명을 측정, 분석하는 방법을 연구하고 있다.

나. 국내의 경우

(1) 전자선 조사(electron irradiation)

한국전기연구소에서 2500 V, 1500 A 고속 스위칭 사이리스터 개발에 전자선 조사기술을 적용한 경험이 있으며, 일부 기업에서 전력반도체 연구를 위해서 일본의 서비스 센터에 의뢰해서 전자선 조사를 하고 있는 정도로, 핵심기술 확보를 위한 체계적인 연구는 이루어지지 않고 있다.

(2) 양성자 조사(proton irradiation)

전력반도체의 이송자 수명제어를 위한 양성자 조사를 수행한 예가 없다.

(3) 이송자 수명 평가

학계에서 부분적으로 연구하고 있으나, 전력반도체 소자의 물성평가에 직접 적용할 정도의 체계적인 연구경험이 없다.

다. 기존에 개발된 기술

천이금속(Au, Pt) 확산에 의한 이송자 수명제어기술 Deep level을 형성하는 천이금속으로는 Au, Pt가 일반적으로 사용된다. 이들 천이금속은 원자 구조에서 d-궤도를 가지고 있는 것이 특징이며, 이 궤도의 spin 수와 회전

방향에 의해 실리콘 결정 내부에서의 성질이 달라진다. 이들은 실리콘 반도체의 에너지 금지대역 내에 불순물 준위를 형성하며, 특히 진성준위 (intrinsic level) 근처에 deep level을 형성하는 데 일반적으로 에너지 밴드갭 내에 $E_v+0.35\text{eV}$, $E_c-0.54$ 의 에너지 준위를 형성시킨다. 이들 준위는 trap center를 형성하여 다수 이송자의 killer로써 역할을 하게 된다. 이들은 소자의 스위칭 특성개선 이외에 타 특성에 안좋은 영향을 미칠 수 있으므로 천이금속의 농도제어가 대단히 중요하다. 일반적으로 천이금속(Au) 확산 방법은 크게 두가지 방법이 있다. 첫째는 웨이퍼 이면에 Au 증착을 이용하는 방법으로써, 이때 웨이퍼 이면에 다른 막으로 덮혀 있는 것을 제거하기 위하여 horning 또는 grinding을 실시한다. 두번째 방법으로는 염화금산액에 담가서 열처리를 한다. MOS 구조의 경우는 표면상태가 매우 중요하므로 표면 도포방법 보다 이면 도포방법이 유용하다. 백금(Pt)의 경우에도 금(Au)의 경우와 유사한 행동을 하며, deep level은 에너지 밴드갭 내에 $E_v+0.42\text{eV}$, $E_c-0.32$ 의 에너지 준위를 기지는 데 금의 경우보다 진성준위에 덜 가깝기 때문에 trap center로써의 효율은 떨어지지만 순방향 전압강하와 누설전류, 온도특성 등에서 금보다 유리하다. 백금의 경우에는 증착이 불가능하기 때문에 염화백금액을 이용한다.

라. 개발중인 기술

(1) 이온 조사(ion irradiation) 및 감마선(gamma ray) 조사기술

헬륨 원자핵(He^{2+})과 같은 알파입자(alpha particle)를 이용한 이송자 수명제어기술은 양성자 조사의 경우처럼 국부적인 특성제어가 가능하고, 양성자 조사의 경우보다 단순한 결함구조(vacancy-related defects)를 나타내며, 소자의 특성간에 trade-off 개선효과가 우수한 것으로 보고되고 있다. 감마선의 경우는 투과율이 높아서 결정내에 균일하게 결함을 생성시키며, 대량 조사가 가능한 특징이 있다.

마. 기술적 평가

전자선 및 양성자 조사에 의한 전력반도체의 이송자 수명제어 기술은 제조 과정중 뿐만 아니라 제조가 완료된 상태 또는 패키징된 상태에서도 적용이 가능하고, 특성을 바꾸기 위해서 한번 적용된 소자에 대해서 여러번 수행하는 것도 가능하며, 특성이 만족스럽지 못하면 조사(irradiation)과정에서 발생된 결함을 고온처리(전자선 조사의 경우 400 °C 이상)로 제거하고 다시 수행할 수 있는 장점이 있다. 그러나 에너지 세기, 조사량에 따른 연구, 소자의 여러 특성간의 trade-off, 온도특성 등에 관한 연구가 필요하다. 표 3에 현재 적용되고 있는 이송자 수명제어방법의 특성을 비교해 놓았다.

Table2.1 Comparison of Gold, Platinum, Electron irradiation, and Proton irradiation for Controlling Carrier lifetime in Power Semiconductors

Contents	Au	Pt	electron irradiation	proton irradiation
Trade-off	excellent	good	medium	excellent
τ_H / τ_L	excellent	good	medium	good
Equipment	spin coater, furnace	spin coater, furnace	van de graff type electron accelerator	ion accelerator
Control	source, diffusion temp., time	source, diffusion temp., time	energy, dose	energy, dose
Reliability	medium(poor)	medium(poor)	good	good
Uniformity	medium(poor)	medium(poor)	good	good
Temp. dependence of leakage current	very large	large	small	small
Temp. dependence of carrier lifetime	small	small	large	large
Recovery of carrier lifetime	no	no	150 °C(some) 400 °C(most defects recover)	150 °C(some) 350 °C(some)

바. 경제적 평가

전자선 조사기술은 대량생산 공정에 적용하기 쉽고, 천이금속 확산에 의한 이송자 수명제어방법에 비해서 공정이 간편하고, 재현성이 우수하기 때문에 기존의 천이금속 확산법 보다 경제성면에서도 유리하므로 현재 대부분의 전력반도체 소자에 적용되고 있다. 양성자 조사기술은 소자 특성간의 trade-off 개선 효과가 우수해서 현재 일부 대용량 소자에 적용되고 있으며, 양산화 기술개발이 진행되고 있다. 이에 필요한 장비는 국가적으로 구축하여 공동활용 한다면 기업의 원가절감과 국제경쟁력향상 측면에서도 유리할 것으로 판단된다.

사. 산업기술에 미치는 파급효과

전력반도체 소자의 산업화 및 연구개발에 필수적인 이송자 수명제어 및 평가기술을 확보함으로써 국내 전력반도체 산업의 활성화 및 관련 연구개발 효율을 높일 수 있고, 따라서 연구결과를 산학연이 공동활용 하면 관련산업의 국제경쟁력 향상에 기여할 것으로 기대된다.

아. 관련기술

전력반도체 소자의 이송자 수명을 전자선 및 양성자 조사에 의해서 제어하기 위한 사항과 관련된 제반기술은 다음과 같다.

(1) 결함구조 해석

전자선 또는 양성자의 조사에 의해서 발생하는 결정내의 결함구조 해석. 실리콘 웨이퍼에 전자선 조사를 한 경우의 결함구조는 세계적으로 많은 연구가되어 왔으나, 양성자를 조사한 경우는 결함구조가 복잡하기 때문에 현재 활발히 연구 중에 있다. 보통 분석장비로는 DLTS(Deep Level Transient Spectrometer)가 이용되고 있다. 결함구조는 반도체 소자 설계시, 이송자의 거동에 직접적인 영향주고, 정확한 설계를 위해서 반도체 소자설계용 소프

트웨어에 이러한 결함구조에 관한 정보를 이용할 수 있도록 하는 추세에 있다.

(2) Annealing 기술 연구

전자선 및 양성자를 반도체 소자에 조사하면 여러 종류의 결함이 생기게 되는데, 전력반도체 소자의 경우 동작 중에 국부적으로 온도가 올라가서 일부 결함은 소멸된다. 따라서 이러한 경우 전력반도체의 특성이 변하게 되므로 소자의 신뢰성에 문제가 생기게 된다. 따라서 적절한 온도(전자선 조사의 경우 200 - 400 °C)에서 미리 annealing을 해서 저온에서 회복되기 쉬운 결함을 제거해 주어야 한다.

(3) 이송자 수명 평가기술

반도체 소자의 이송자 수명을 정확히 평가하는 것은 소자의 설계 및 제조공정 안정화에 매우 중요하고, 또한 이송자 수명제어기술 연구의 성공적인 수행에 필수적인 기술이다.

(4) 반도체 소자에의 적용연구

전자선 및 양성자 조사기술은 최종적으로 제작이 완료된 칩 또는 패키지 상태의 소자에 대해서 적용이 가능한 장점이 있기 때문에 세계적으로 활발히 적용되고 있다. 따라서 제작된 소자의 종류에 따른 각각의 특성간의 trade-off를 연구하는 것이 실제적인 적용에 매우 중요하다.

이외에 조사 에너지 세기 및 조사량에 따른 특성연구, 이송자 수명의 온도특성연구, 국부적인 이송자 수명제어기술 등도 필요한 연구분야이다.

4. 결론

전력반도체 이송자 수명제어는 소자특성 향상(스위칭특성, 누설전류, 온도특성), 신뢰성 있는 소자제작(대면적에 따른 이송자 수명 편차제어), 특

성간의 Trade-o-Off향상(온-전압등), 경제성 있는 제작기술 확보 등에 필요한 기술로 산업용 전력반도체의 경우(MeV, mA)급의 대용량 양성자 가속기가 필요함.

참고문헌

- [1] 한국전기연구소 전력반도체 연구팀 제공(한국원자력연구소와 공동소유 자료)
- [2] B. J. Baliga, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-24, No. 6, pp685-688, 1977
- [3] D. Silber, E.D. Nowak, W.Wondrak, B. Thomas, H. Berg, IEDM Technical digest, pp.162-165, 1985.
- [4] W. Wondrak, W .D. Nowak and B. Thomas, Proceeding of ISPSD'88, Tokyo, Japan, pp.147-152, 1988.
- [5] Mietek Bakowski, Norbert Galster et al, Proceeding of ISPSD'97, Weimar, Germany. pp. 77-80, 1997.
- [6] K. Tomii, M. Maeda et al. The Trans. of IEE of Japan Vol.115-D, No.6, June, 1995.
- [7] D. C. Sawko and J. Bartko, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-30, 1756(1983).

제 3 장 지뢰 및 폭발물 탐지장치

제 1 절 개요

전 세계에 매설되어 있는 대인 지뢰는 무려 1억 1천만 개에 달하며 각국이 보유하고 있는 지뢰도 총 2억 개로 추산되고 있다. 대인 지뢰의 제조와 사용은 다른 살상 무기에 비해 손쉬운 편이지만 매설된 지뢰를 제거하려면 많은 비용- 지뢰 1개당 \$1,000- 과 위험성이 따르게 되며, 탐지가 어려운 비금속 지뢰는 더욱 큰 문제가 되고 있다. 지뢰는 1차대전시 전차에 대한 방어수단으로 주로 사용되었고, 2차 대전 중에는 저지 및 지연수단으로 급속히 사용 빈도가 증가되어 구 소련의 경우 2.2억 개, 독일이 0.8억 개, 미국이 0.17억 개의 대전차 지뢰를 사용한 바 있다. 특히 6.25 전쟁에서 북한 전차의 38.1%가 지뢰에 의해 파괴된 바 있다. 걸프전에서 이라크는 방어벽 설치에 대인 및 대전차 지뢰를 대량으로 사용하였고, 최근 캄보디아, 보스니아, 모잠비크, 앙골라, 소말리아, 이라크, 아프카니스탄, 중남미 등 국지전에서 지뢰가 대량으로 매설되고 있다. 현재도 매설량이 제거량을 훨씬 웃돌고 있다. 캄보디아, 앙골라, 동유럽 등 62개국에서는 내전이 끝난 후에도 지뢰가 제거되지 않고 있어 민간 피해는 물론, 전후복구 및 경제 개발에 심각한 장애 요인이 되고 있다. 유엔 통계에 의하면 지금도 전세계에서 대인 지뢰로 인한 민간 사상자가 매일 70명 정도 발생되고 있고, 이 가운데 20%가 15세 미만의 어린이이며 특히 캄보디아에서는 국민 230명당 한 명이 지뢰로 인해 숨지거나 다친 것으로 나타났다. 현재 캄보디아의 경우 35,000명 정도가 다리가 잘린 채 살아가고 있다. 내전을 겪고 있는 보스니아 또한 그 피해가 엄청남을 보여준다. 지뢰로 인한 경작지의 손실에 의한 경제적 피해도 심각한 수준에 이르고 있다. 그림 3-1은 전세계의 지뢰에 의한 피해 현황을 보여준다

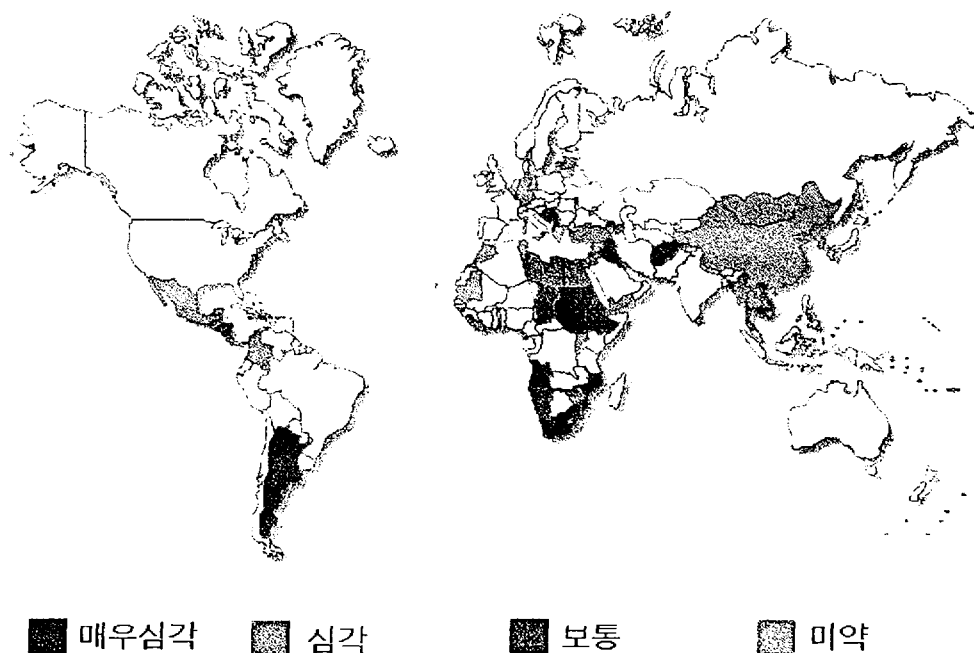


그림 3-1. 전세계의 지뢰 피해 현황

이러한 이유로 말미암아 70년대 초부터 지뢰 및 부비트랩 등 민간인에게도 무차별적 살상을 초래하는 소위 비인도적 무기에 대한 국제적 관심이 높아지면서 이러한 무기의 규제를 위한 국제협상이 유엔을 중심으로 진행되었으며 그 결과 CCW 협약이 1982년 발효되었다. 특히 1990년대로 들어오면서 대인지뢰를 규제해야 한다는 여론이 국제적으로 광범위하게 논의되기 시작했으며, 대인 지뢰 사용 규제를 강화한 CCW 협약 지뢰의정서가 1996년 5월 개정되었다. 그러나 지뢰의정서 만으로 지뢰 피해를 방지하기에는 미흡하다고 판단한 캐나다, 오스트리아 등 서방 선진국들은 대인 지뢰를 금지하기 위한 국제 협약을 추진하게 되었으며, 그 결과 1996년 11월 유엔 총회에서는 전면금지 협약을 조속히 설립할 것을 촉구하는 결의안을 141:0 표결로 채택하였다. 그러나 지뢰 생산 및 수출의 주요 국가인 미국, 러시아, 중국, 일본, 인도, 이스라엘 등이 대인 지뢰 전면금지 협약에 동참하고 있지 않기 때문에 실효성에 많은 의문이 제기되고 있다.

1996년 5월 개정된 지뢰의정서는 탐지 불가능한 대인 지뢰의 사용을 금지하고 신형지뢰도 자폭기능을 갖추게 하는 등 지뢰의 사용을 엄격하게 제한하고 있으며, 지뢰 이전을 통제하기 위하여 비 회원국들에게는 지뢰 및 관련 기술의 이전을 금지하도록 규정하고 있다. 또한 사용 후 지뢰 제거가 용이하도록 모든 지뢰지대는 매설 제원을 기록 유지하고 차단물과 표지를 설치하도록 의무화하고 있다. 한국의 경우, 현재 지뢰가 매설되어 있는 지역은 군사분계선을 중심으로 남북 4-5 km의 폭을 가진 250km 비무장지대이다. 일반적으로 이 지역의 지뢰는 철책으로 차단되어 있으며 군의 감시 하에 있어 민간인이 접근하기 어려운 지역이다. 그러나 6.25 전쟁시 매설된 지뢰와 미확인 폭발물에 의한 인명 피해가 지속적으로 발생하고 있고, 최근 수해로 인한 대인 지뢰의 대량 유실로 말미암아 임진강 및 한탄강 유역, 군부대 주변에서 인명 피해가 우려되고 있는 실정이다. 더 나아가 통일 후 비무장 지대에 묻혀있는 다량의 지뢰 및 폭발물 처리는 인명 피해 및 처리비용 문제로 인해 사회 문제화될 가능성이 큰 것으로 지적되고 있다. 앞으로 지뢰 및 폭발물의 경우 국제적인 규제에 의해 사용량이 어느 정도 감소할 것으로 보인다. 그러나 현재 중요한 문제는 기존의 매설되어 있는 지뢰 및 폭발물을 어떤 장비에 의해 효율적으로 빠른 시간 내에 찾아내고 제거하느냐 하는 것이다. 예를 들어 금속탐지기의 경우 탐지 속도는 대략 1인당 1m²/일 정도이다. 현재의 탐지 및 제거 기술에 의해 전세계에 매설되어 있는 지뢰를 제거하는데 드는 비용은 330억 달러 정도이고, 기간은 1100년 정도 걸릴 것으로 추정되고 있다. 따라서, 지뢰 및 폭발물을 신속하고 정확하게 탐지할 수 있는 새로운 기술을 개발하고자 한다. 새로운 기술 가운데 하나로서 양성자 가속기를 이용하여 가속시킨 1.75MeV 양성자빔을 ¹³C 표적에 조사하여 발생시킨 9.17MeV 감마선과 지뢰 및 폭발물 내에 필수적으로 포함된 질소(¹⁴N)핵과의 광핵공명반응을 이용하여 정확하게 지뢰 및 폭발물 탐지하는 기술과 탐지장치에 대하여 연구하였다.

제 2 절 연구개발 필요성

1. 기술적 측면

- 대인 및 대전차 지뢰 및 각종 폭약의 탐지 장치 기술 개발에 있어 핵심은 신뢰성(탐지정확도), 안전성, 기동성이다.
- 최근에 개발된 비파괴 탐지 장치로 X-선, IR파, 중성자를 이용한 장치들이 고안되고 실용화되었다. X-선, IR파를 이용한 장치의 경우 신뢰성에 문제가 있고, 중성자의 경우 근본적으로 질소(^{14}N) 등 폭약 구성원소의 중성자흡수 단면적이 매우 낮으므로 원리적으로는 가능하지만 실용성이 매우 낮다. 또한 중성자는 침투성이 강하기 때문에 차폐, 즉 안전성에 문제가 있다.
- 이들이 갖고 있는 문제점인 신뢰성과 안전성을 향상시키기 위해 9.17 MeV 감마(γ)선을 이용한 탐지장치를 개발하고자 한다. 기본 원리는 다음과 같다. 공명 에너지가 1.75 MeV인 양성자(p)를 탄소(^{13}C) 표적에 쏘일 경우 양성자 포획반응 $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 에 의해 9.17 MeV 감마선들이 생성된다. 생성된 감마선들을 질소(^{14}N) 핵에 쏘여 사방(4π 방향)으로 퍼져나온 감마선의 양을 검출기를 이용하여 측정한다.
- 이 경우 지뢰 및 각종폭약에 필수적으로 포함되어 있는 질소핵과 감마선의 광핵공명반응 (Photo-nuclear Resonance Reaction)을 이용하기 때문에 존재 유무에 대한 판별력의 신뢰도가 90% 이상으로 크게 향상되고, 탄소표적으로부터 생성된 감마선의 에너지는 협소한 각도 안에 존재하기 때문에 차폐 문제를 손쉽게 해결할 수 있어 안전성 또한 문제가 되지 않는다.
- 세 번째, 기동성은 높은 신뢰성과 안전성을 유지시키면서 이루어져야 한다. 감마선 탐지장치의 경우, 10mA 이상의 높은 빔 전류를 제공하면서 동시에 전체 장치의 길이가 3m, 폭 1m 이내로 차량에 탑재가 가능하여 기동성을 갖추고 있다. 탐지속도는 폭 5m x 5-8 km/h 이다.
- 즉 위에서 논의한 세 가지 특성은 지금까지 개발된 다른 탐지장치에 대

하여 기술적인 측면에서 특히 정확도 측면에서 다른 단일탐지장치가 10% 내외임을 비추어 볼 때 비교우위를 점하고 있어 개발의 필요성이 확실하다.

2. 사회적/경제적 측면

- 남북 통일을 대비하여 비무장지대에 묻혀 있는 지뢰 및 각종 폭발물을 신속하게 제거함으로써, 남북간 철도, 도로 개설과 인명 보호에 효과적으로 이용할 수 있다.
- 탐지장치를 민수에 이용할 경우, 공항이나 항만에서의 폭발물 탐지에 사용할 수 있기 때문에 최근 국제문제가 되고 있는 여객기 납치, 테러 등을 사전에 방지할 수 있다. 탐지속도는 여행용가방- 64000 cm^3 -의 경우 2600개/h 이다.
- 지뢰로 인하여 베트남, 캄보디아, 아프카니스탄, 러시아 등 냉전종식국가와 보스니아, 앙골라, 유고 등 내전국가에서 일년에 수 만명의 민간인이 희생되고 있고, 또한 경작지의 감소로 인하여 기아 난민의 수가 급격히 증가하고 있다. 이들 문제점들을 해결하기 위해 신속하고 정확하게 탐지할 수 있는 장비의 조속한 개발이 필요하다.
- 개발시 수입 억제 효과와 더불어 탐지 기술 및 장비 수출에 따른 경제적 인 효과를 동시에 기대할 수 있다.

3. 군사적 측면

- 작전시 전차, 차량 및 전투병 이동 경로의 신속한 확보를 위해 대인 및 대전차 지뢰와 폭약 탐지 장치 개발이 필요하다.

제 3 절 지뢰 탐지 장치 현황

지뢰는 많은 사람들을 불구의 몸으로 만들고 이로 인해 엄청난 정신적 충격을 주는 반드시 제거해야될 무기이다. 앞으로 지뢰의 사용을 원천적으로

금지하기 위한 많은 노력이 진행중이나, 현 상태에서 무엇보다도 중요한 것은 땅속에 묻혀있는 지뢰를 신속하고 정확하게 탐지하고 제거하는 것이다. 이 과정에서 제거보다 탐지의 중요성이 요구되고 있으나 현실적으로 볼 때 현재 존재하는 탐지 장치의 특성상 탐지의 정확도는 단일 탐지장치의 경우 수%미만이다. 여러 가지 특성이 결합된 장치의 경우 정확도는 약 10% 내외이다. 대인 지뢰와 대전차 지뢰, 기타 매설된 폭발물의 탐지에 사용되는 장치들은 크게 휴대용 탐지기, 차량장착용 탐지기, 원거리 탐지기 등으로 나눌 수 있다. 지금부터 이들 탐지기에 관하여 자세히 설명하고자 한다.

1. 금속 탐지기 (Pulse Induction)

금속탐지기의 작동원리는 다음과 같다. 탐지장치 밑 부분에 있는 전송코일 (transmitting coil)에 전기적 펄스를 가하면 이것에 의해 자기장이 형성된다. 형성된 자기장에 의해 탐지장치 주변에 있는 금속성 물체에 와동전류(eddy current)를 유도시킨다. 이들 와동전류는 감지코일(receiving coil)에 의해 감지되는 이차 자기장을 발생시킨다. 감지된 신호를 전자공학 장치들에 의해 분석함으로써 금속의 유무를 판별한다. 최근에 주로 사용되고 있는 금속 탐지기는 비금속 지뢰 탐지에 매우 취약하고, 지하에 매설된 작은 금속 등에도 민감하게 반응하기 때문에 오경보가 빈번히 발생한다. 즉, 사람이 일일이 전부 검색해야 하는 관계로 속도 면에서 부적격하고 또한 탐지병의 생존성이 보장되지 않는 점이 사용에 큰 제약을 주고 있다. 그림3-2는 AN-19/2금속 탐지기를 보여준다.

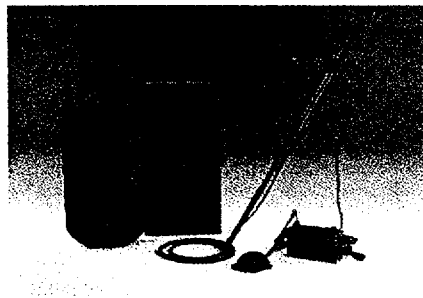


그림 3-2. AN-19/2 금속 탐지기

AN-19/2는 NATO와 미군이 주로 사용하는 금속지뢰 탐지기로 소량의 금속이 함유된 지뢰를 찾기위해 만들어졌고 구성품은 Electronics unit, Search head with telescopic pole, Headphone, Carry bag, Transport case 등으로 이루어져있다.

2. 지뢰 및 폭발물 탐지 견

지뢰에 함유된 미세한 화약냄새를 감지함으로써 지뢰 및 폭발물의 유무를 판별은 할 수 있으나 정확한 매설 위치를 탐지하지 못하는 약점이 있다. 그림 3-3은 Free-leash K-9 탐지 견을 보여준다.



그림 3-3. Free-leash K-9 탐지견

3. Bridge Impedance

발사된 전자파의 반사파를 감지하여 분석함으로써 밀도차가 있는 모든 지하매설물 -금속, 비금속, 암석 등-에 대하여 경고음을 발생시키는 장치로 정확성이 부족하다.

4. Ground Penetrating Radar (GPR)

전자파를 발사한 후 반사파를 신호 처리하여 물체의 형상을 영상으로 표시해주는 장치로 지하 매설물의 형상 식별을 가능하게 해주는 장치이다. 플라스틱 지뢰 탐지에 주로 사용된다. 최근 가장 많이 사용되는 탐지방법 가운데 하나이다.

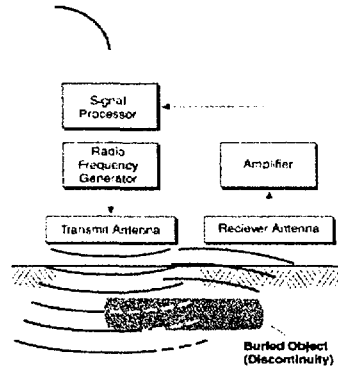


그림 3-4. GPR의 작동원리

그림 3-4는 GPR의 작동원리를 보여준다. GPR을 이용한 지뢰탐지장치의 개발은 1995년부터 시작되었고 그림3-5는 1996년 캄보디아에서 금속지뢰를 탐지하기 위해 사용된 DETEC-1을 보여준다.

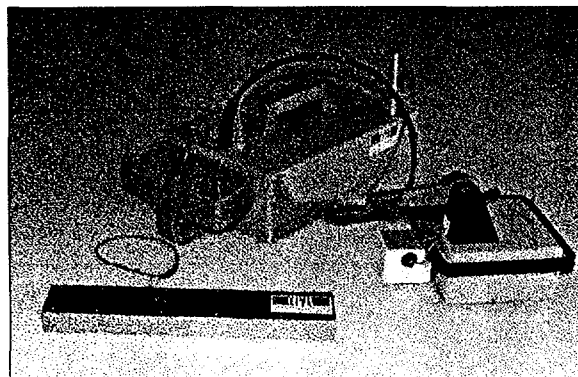


그림 3-5. 지뢰탐지기 DETEC-1

그림 3-6은 DETEC-1의 개량형인 DETEC-2이다. 그림 3-7는 DETEC를 이용하여 지뢰를 탐지하고 있는 모습을 보여준다.

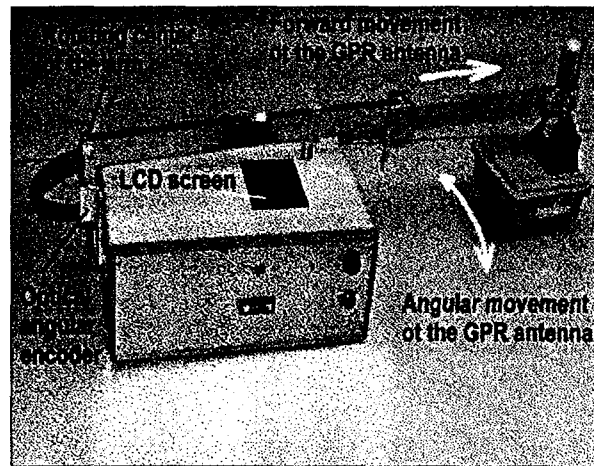


그림 3-6. DETEC-2



그림 3-7. DETEC을 이용하여 지뢰를 탐지하고 있는 모습

5. Microwave Impulse Radar

극초단파 (microwave)를 이용하여 땅속에 파묻힌 물체의 크기, 모양을 3차원 영상 처리하여 보여주는 탐지장치로서 컴퓨터에 의해 지뢰의 유무를 판별한다. 그림 3-8는 이러한 원리를 이용하여 지뢰를 탐지하는 Microwave Impulse Radar 탐지장치를 보여준다.



그림 3-8. Microwave Impulse Radar

6. Acoustic mine detector

음향 기기를 이용한 지뢰탐지 방법은 땅속에 음파를 보낸 후 반사되는 음파의 성질을 분석함으로써 지뢰의 유무를 판별하는 것으로 그림 3-9는 이들 장치와 탐지 모습을 보여준다.

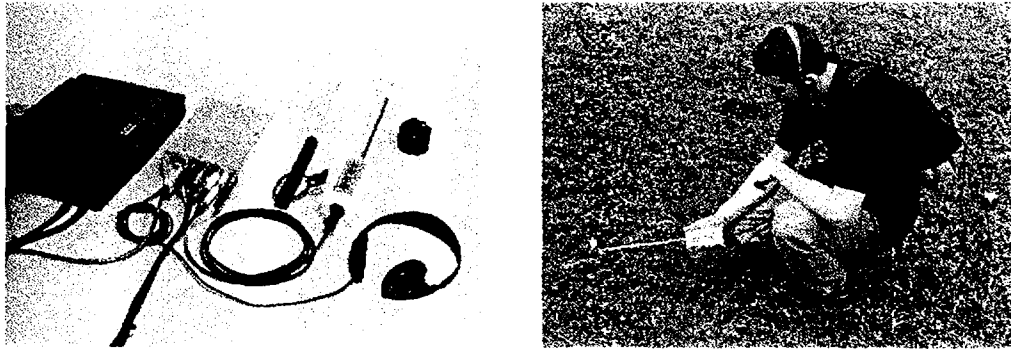


그림 3-9. Acoustic mine detector 와 탐지 모습

7. X-ray 탐지 장치

X-ray를 땅속에 조사하여 땅속의 물체로부터 되 튕겨 나오는 X-ray를 분석하여 영상 처리함으로써 지뢰의 유무를 판별하는 장치로서 최근 많은 연구가 진행 중에 있다. 이때 사용되는 물리적 특성은 Compton backscattering이고, 흙과 지뢰와의 구분은 지뢰가 금속성일 경우, 흙이 지뢰에 비해 낮은 흡수성과 높은 산란성을 갖는 점을 이용하고, 반대로 지뢰가 비금속성일 경우, 흙이 지뢰에 비해 높은 흡수성과 낮은 산란성을 갖는 점을 이용한다. 그림 3-10은 X-ray 탐지장치의 원리를 보여준다.

8. 복합 탐지 장치

가. Drop-in Ground Penetration Radar Sensor (DIGS)

최근 GPR과 다른 탐지원리를 복합한 탐지장치들이 다수 개발되고 있는데 이것은 하나의 탐지 능력으로는 높은 탐지 효율을 기대할 수 없기 때문이다. 그림 3-11은 이들 합성장치 가운데 하나인 Drop-in Ground

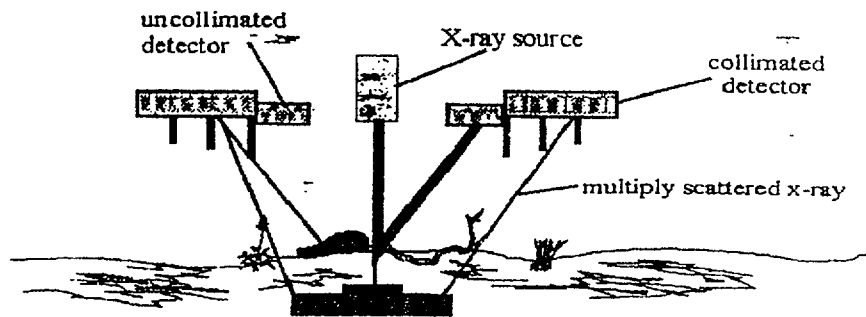


그림 3-10. Backscattered X-rays를 이용한 탐지원리

Penetration Radar Sensor (DIGS)로서 금속탐지기인 AN-19/2와 GPR을 합성시킨 지뢰 탐지기이다.

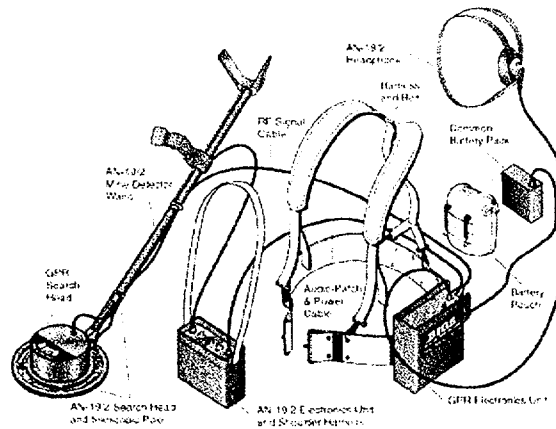


그림 3-11. Drop-in Ground Penetration Radar Sensor (DIGS)

나. GIS

GIS 탐지장치는 탐지속도를 향상시키기 위해 GPR과 Infrared imaging을 접합시킨 것이다. [그림 3-12 참조]



그림 3-12. GIS 탐지장치

다. Close-In, Man-Portable Mine Detector (CIMMD)

CIMMD탐지장치는 GPR, electromagnetic induction, forward-looking infrared (FLIR) thermal imaging 기술들을 복합시킨 장치로서 오 경보를 줄인 것이 특징이다. [그림 3-13]



그림 3-13. CIMMD 탐지 장치

9 Vehicle Mine Ordnance Detector (VMOD)

VMOD는 전자기파를 이용하여 폭 2-4m, 깊이 50-100cm 이내의 금속성 지뢰를 탐지하는 장치로서, 넓은 영역을 신속하게 탐지할 수 있는 것이 특징이다. [그림 3-14 참조].

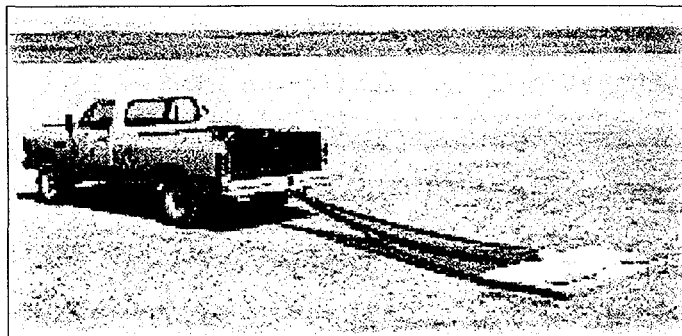


그림 3-14. VMOD 탐지장치

이를 변형시킨 장치로 teleoperated metallic mine detector system JINGOSS [그림 3-15 참조]이 있다.

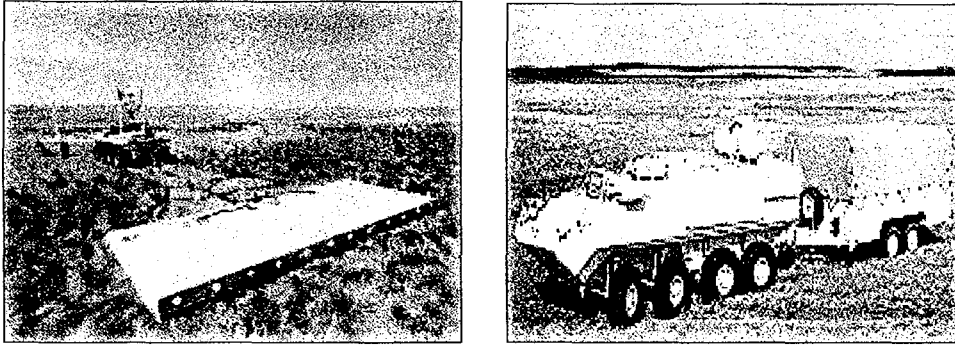


그림 3-15. JINGOSS 와 Vehicle Control Station(VCS)

JINGOSS 탐지장치는 무인시스템으로 운영이 가능한 장비로서 인명손실을 줄인 것이 특징이다. JINGOSS는 VCS에 의해 운행과 탐지가 5km이내에서 조정되며 VMOD 탐지판의 폭 4m 까지 가능하고, 탐지된 지뢰를 손쉽게 표시하는 기능을 갖고 있다. 이 장치는 199년에 실용화되었고, 지뢰지도를 만들기 위한 Global Positioning System (GPS)을 갖추고 있다.

10. Teleoperated Multisensor Mine Detector (ILDLP)

ILDLP는 현재 실험중인 무인 탐지장치로서 metal detector array, IR, GPR, thermal neutron activation (TNA) detector로 이루어진 무인복합탐지장치이다. [그림 3-16 참조]

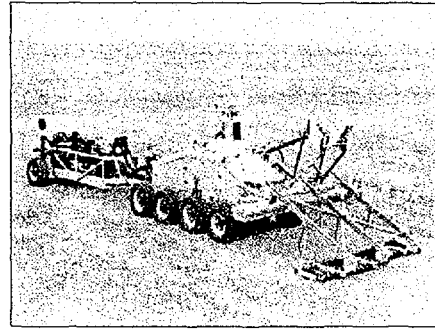
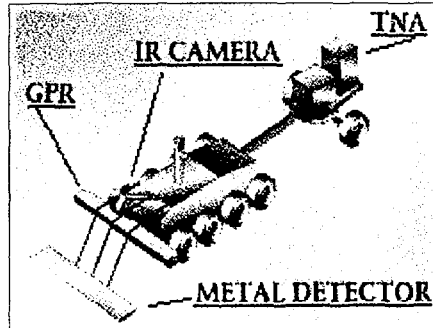


그림 3-16. Improved Landmine Detector Project (ILDP)

11. Vehicular Mounted Mine Detector (VMMD)

VMMD는 GPR과 forward looking infrared (FLIR)장치를 차량에 장착하여 최대 30m 이내에 있는 모든 형태 지뢰를 탐지할 수 있는 탐지장치이다. 모든 종류의 지뢰를 탐지하기 위해 진동수가 0.5 - 4 GHz인 cw wave를 사용하고, 이를 위해 3개의 horn antennas를 장착하고 있다. [그림 3-17 참조]

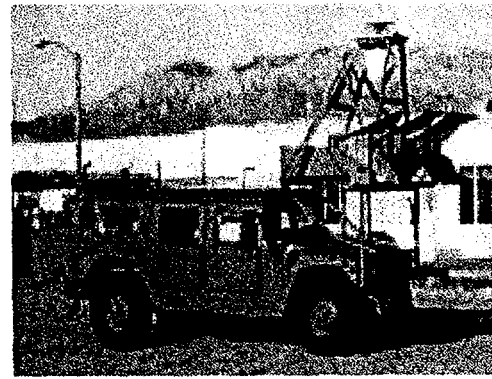
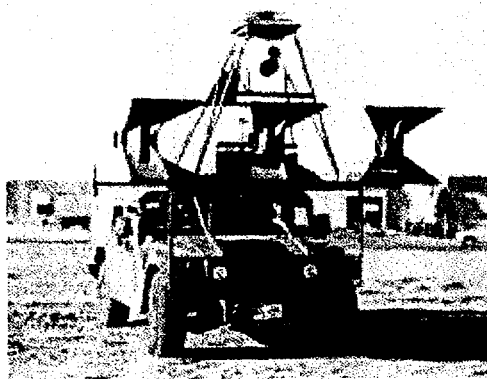


그림 3-17. VMMD 탐지장치 (1)

그림 3-18은 근접탐지를 위한 flexible metal detection array, 이동 중에 탐지가 가능한 infra-red (IR)와 ultraviolet (UV) sensors, 지뢰 지도 작성을 위한 Differential Global Positioning System (DGPS)를 탑재한 VMDD이다.

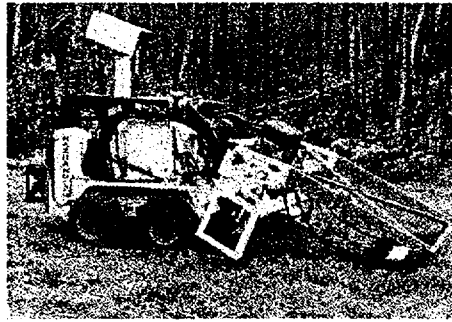


그림 3-18. VMDD 탐지장치 (2)

12. Vehicular Array Mine Detection System (VAMIDS)

VAMIDS는 금속성지뢰와 땅속 깊이 -수 m- 파묻혀 있는 미확인 폭발물을 탐지하는 것이 주목적이다. [그림 3-19 참조] 특히 도로가 없는 지역에서 탐지를 수월하게 해준다.



그림 3-19. VAMIDS 탐지장치

최근의 지뢰 및 폭발물 탐지 장치의 발전 추세를 보면 여러 가지 센서 기능을 복합한 형태가 주를 이룬다. 예를 들어 GPR, IR, Bio 센서를 이용한 탐지장치가 개발되어 실용화 단계에 와 있으나, 경제성과 오경보율이 문제가 되고 있다. 또한 청각을 이용하기 보다 컴퓨터를 이용한 영상 처리 장치가 비교우위를 점하고 있다. 영상처리의 경우, 700여 가지에 이르는 지뢰를 구분해내기는 현실적으로 힘들다. 운용방식 또한 탐지병의 생존 가능성을 높이기 위하여 휴대용 보다 차량 혹은 항공기 탑재형이 적용되고 있고 더 나아가 최근에는 무인 탐지 시스템의 개발이 보편화되고 있다. 이러한 경우 지뢰제거가 필수적이므로 탐지의 정확성에 문제가 발생하고 있다. 현재 사용 중인 복합 탐지장치의 경우, 정확도가 낮은 것이 가장 큰 문제점으로 나타나고 있다. 이러한 문제점의 해결 방안으로서 4절에서 논의하게 될 지뢰내의 화약성분을 직접 탐지할 수 있는 기술을 개발하는 것이다. 국내의 경우 금속탐지기가 주로 사용되고 있어 비금속지뢰에 대한 대처가 미흡하고, 전세계에서 유일한 분단국가로서 전투지역 전단에서 사용 가능한 탐지 장비의 확보가 시급하다. 또한 최근에 자주 발생하고 있는 폭우에 의한 지뢰 유실시 이에 대한 확실한 탐지방안을 갖지 못한 점이 문제점으로 부각되고 있다.

제 4 절. 양성자 가속기를 이용한 지뢰 탐지장치

1. 장치제원 (그림 3-20 참조)

- 양성자빔 인출장치 : 1.75MeV, 10mA 양성자 가속기
- 표적계 : Carbon13 ($150 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) 사용
- 검출계 : Bismuth Germanate (BGO) 또는 NaI 사용
- 데이터 분석계 : Neural Network 사용
- 제어계 : PLC를 이용한 Control system
- 보조장치 : Global Positioning System (GPS), 색소분무기 등.

2. 성능

- 탐지 속도 : 시간당 폭 5m x 길이 5-8 km 탐지 (평지기준)
- 탐지 정확도 : 90 % 이상 (참고 : 현재 운용되고 있는 탐지장치의 경우 대부분 여러 가지 탐지장치를 복합한 형태이며, 단일장치의 경우 정확도는 10% 이내이고, 복합장치의 경우 50% 이내이다.)

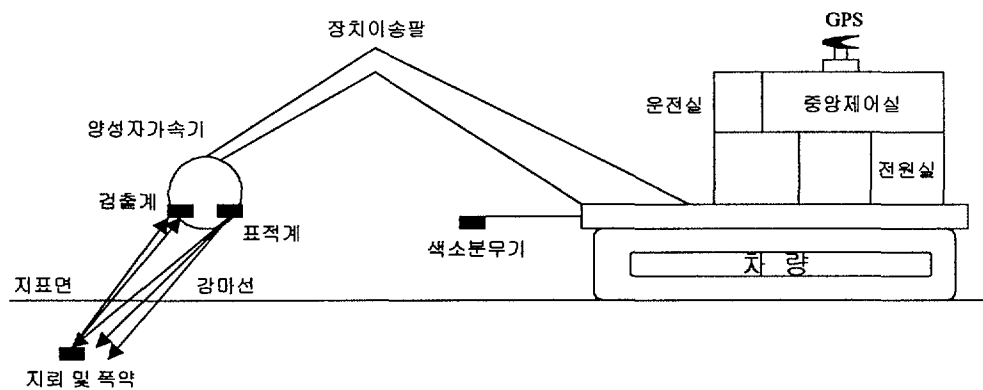


그림 3-20. 지뢰/폭발물 탐지장치 차량 탑재시 개념도.

3. 기술현황 분석

연구 대상 분야	구성품	소요기술
장치 분야	양성자가속기	○ 이온원 기술 ○ 이온광학 기술 ○ 고전압 발생기술 ○ 고전압 절연기술 ○ 고진공 기술 ○ 빔 진단 기술 ○ 가속기 조종제어기술
	보조장치	○ GPS 운용기술 ○ 표식기술
탐지 분야	표적계	○ 표적설계기술 ○ 표적냉각기술
	검출계	○ 검출계 구성기술 ○ 시준기 구성기술 ○ 방사선 차폐기술
	데이터 해석계	○ 해석계통 구성 기술 ○ 해석 프로그램 개발
	제어계	○ PLC 회로 구성 기술 ○ 광신호 전송기술

4. 국내 기술현황

지뢰 및 폭약 탐지 장치에 관한 국내 연구는 1997년까지 자료수집단계에 머물렀다 [1] . 그러나, 가속기를 이용한 지뢰 및 폭약 탐지 기반기술의 경우, 그 동안 탐지장치에 관한 기술현황분석보고서가 [2] . 발간되었고, 관련장비에 대한 특허를 출원 중에 있으며 [3] , 양성자가속기로부터 검출계까지의 감마선량을 계산할 수 있는 프로그램 [4] 을 개발하여 등록한 바 있다. 또한 한국자원연구소에 있는 탄뎀 가속기를 사용하여 질소로부터 감마선 방출에 관한 실험을 1998년 6월부터 1999년 1월까지 수행하여 그 결과의 일부를 제3회 양성자 가속기 워크샵에 발표하였고 [5] , 또한 1999년 춘계 물리학회에도 발표할 예정이다 [6] . 한편, 중성자 선원을 이용하여 화학무기를 검색하는 직접적인 기술의 경우 국내에서 연구가 진행되었다는 결과가 보고된 바가 없다. 그러나 중성자를 조사하여 이로부터 방출되는 γ -선 분광 기술은 70년대부터 한국원자력연구소를 중심으로 하여 한국자원연구소, 각 대학에서도 널리 개발되어 사용되고 있다.

5. 연구개발 기대 성과 및 파급효과

가. 연구개발 기대성과

방사선은 이미 산업용, 의료용, 군사용, 연구용 등의 다방면에서 널리 이용되고 있으며, 선원으로는 주로 방사선동위원소(RI), X선발생기, 전자가속기, 양성자가속기, 연구용 원자로 등이 이용되고 있다. 이중 RI를 제외하면 이동이 거의 불가능한 정지형 장치들이다. 지뢰 및 폭약 탐지를 주목적으로 하는 본 장치에서는 강력한(2MeV, 10mA) 소형양성자가속기(Electrostatic Accelerator)를 이용한 탐지장치를 특수차량이나 소형 운반 기구에 탑재하여 험준한 지형에도 접근가능하며, 신속하게 광범위한 지역의 지뢰, 폭약 또는 화학무기 탐지 가능한 System을 출현시킬 것이다. 이는 종래의 수동식 탐지방식을 신속 정확한 자동방식으로 발전시킬 뿐만 아니라 대형 방사선이용 장비를 이동형으로 만들어 폭넓은 응용을 가능케 하는 효시가 될 것이다. 이 기술을 곧바로 적용하여 공항, 항만 등의 대량화물 처리시설에서 화약과 마약을 신속 정확히 탐지할 수 있는 고정용 또는 이동형 장비의 상용화를 이룩할 수 있다. 동일한 형식의 장비에서 화약의 질소성분을 판별하는 표적과 마약의 염소성분을 판별하는 표적을 사용함으로써 양성자가속기를 이용한 화약 및 마약 자동탐지System 구축이 가능하다. 이러한 자체기술에 의한 장비들을 활용하여 공항과 항만의 보안을 철저히 확보할 수 있다면 국위선양과 아울러 간접적인 경제적 이득이 지대할 것이다. 또한 본 장치의 실용화 단계에서 부수적으로는 대용량 양성자가속기 설계제작기술, 탄소 및 유황을 이용한 표적기술, γ 선 계측기술, 탐지물의 영상화기술 등 여러 관련분야 기술의 국산화를 이룩하고 그 응용가능성을 제고할 것이다.

나. 파급효과

(1) 기술적 측면

이동형 대용량 방사선이용 장치의 개발은 현실적으로 자연이나 작업현장에 장치의 접근을 가능케 함으로서 방사선의 산업, 환경, 의료 등 다방면에서의 방사선의 이용을 활성화할 것이며 일반대중에게 방사선의 두려움을 극복하는 계기를 마련해 줄 것이다. 특히 가속기기술은 이미 물질의 성분분석, 구조분석 반도체제조, RI생산 등에 이용되고 있으며 공해물질의 탐색 및 처리, 식품의 방사선조사처리 등 다방면의 응용이 가능하므로 이동형 가속기 장비개발은 신속 정확한 탐색 또는 처리를 필요로 하는 많은 분야에 고부가가치기술을 제공하게 될 것이다. 표적기술과 방사선 계측기술은 원자력산업과 핵물리 연구에서 필수적으로 이용되는 기본기술로서 본 과제에서의 이 분야 기술개발은 앞으로의 많은 원자력연구 및 장치개발에 응용이 가능할 것이다. 지하 매립 폭발물 탐지기술은 본 과제에서 개발된 기술을 바탕으로 지하 1m 근처까지 탐색 가능한 방사선원의 개발을 촉진시킬 것이며, 해상 또는 해저에서의 탐색에도 응용이 확대될 수 있을 것이다. MeV급 소형 양성자가속기의 산업적인 응용은 구미 선진국들에서 활발히 연구 개발되고 있으나 현재 세계시장에서 대량생산되는 소형가속기는 주로 200keV 이내의 반도체 생산용 기기가 주종을 이룬다. 특히 MeV급 가속기는 주문생산으로 매우 고가여서 이를 이용한 국내 연구개발은 거의 불가능한 실정이다. 본 과제를 통하여 이러한 MeV급 소형 가속기가 실용적인 가격으로 공급 가능하게 되면 전력반도체 기술개발 및 생산, 소재의 표면처리 기술개발 등 다방면에서의 기술개발과 산업화를 가능하게 할 것이다. 또한 국내 산업기술의 고도화에 따라 정밀분석 기기들의 수요가 증가할 것이며, 본 과제에서의 가속기 설계제작기술을 바탕으로 가속기이용 장비인 AMS(Atomic Mass Spectrometer), RBS(Rutherford Back Scattering), PIXE(Particle Induced X-ray Emission)와 같은 가속기이용 초정밀 분석장치의 국산화도 시도할 수 있을 것이다.

(2) 군사적 측면

지뢰 및 폭발물 탐지기술은 전술적으로 신속한 공격통로의 확보를 위하여 필요할 뿐만 아니라 전시가 아닌 평시의 경우에도 다양한 목적으로 필요로 하고 있다. 미수거 지뢰 및 폭발물에 의한 사고는 이미 우리사회의 일상생활의 일부가 되어 전후방을 가리지 않고 민군에 수많은 사상자를 내고 있으며 이를 줄이기 위하여 많은 노력이 경주되고 있다. 테러리스트들이 숨겨놓은 폭발물을 찾는 일은 분초를 다투는 사안이다. 이러한 지뢰 및 폭발물 탐지는 생명을 담보로 하고 있으므로 정확하여야 하며 군사적으로는 매우 신속한 탐지 및 처리가 가능하여야 하는 바, 본 과제의 기술개발은 이를 목표로 하고 있다. 지뢰의 정확한 탐지를 가능케 함으로서 시간당 ~10km의 공격통로 확보를 가능케 할 것이며 주변의 정확한 지뢰매립 정보를 보유함으로써 방어 및 공격의 원활한 수행을 가능케 할 것이다. 자동 지뢰탐지 장비의 확보는 군의 사기를 진작시킬 것이며, 민군의 희생자를 줄일 뿐만 아니라 군의 대민 관계 개선에도 큰 도움이 될 것이다.

(3) 경제적 측면

지뢰로 인한 피해는 전란을 겪은 세계 수많은 국가들에 산재한 전 세계적인 관심사로 작년에는 지뢰사용금지 국제협약이 체결되기에 이르렀다. 자동 지뢰탐지장비의 수요는 군사적인 목적에서만 아니라 전후 복구가 필요한 지역에서 매우 크다고 할 수 있다. 중동지역, 인도차이나반도, 발칸반도, 아프리카 등의 전쟁을 장기적으로 겪은 국가들에서 전후 복구에 수동식 지뢰탐지 장비를 활용하고 있으며 완전한 복구에는 천문학적인 비용과 시간을 필요로 하고 있다. 본 과제로 개발되는 자동지뢰탐지장비의 투입이 가능하다면 현실적인 비용과 시간으로 이 문제를 해결하여 불필요한 인명피해를 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라 경작지 확보 등의 경제활동을 신속히 재개할 수 있어 경제재건에 큰 도움을 줄 것이다. 현재 이러한 전후 복구 대상 국가들은 대부분 가난한 나라들로 국제사회가 지뢰제거비용을 부담하려는 움직임이 보이고 있다. 반면에 이러한 자동장비들은 군사적 이용도 가능하

므로 수출에 제한이 따를 것이며 장비의 수출보다는 지뢰제거 용역사업을 국제협력형식으로 수행하는 것이 바람직할 것이다. 우리나라의 경우에도 자동지뢰탐지장비의 확보는 매우 긴요한 사항이다. 경제적 측면에서 자동지뢰탐지장비의 산업화에 따르는 국내수요는 연간 약 50대(민수용 약 5대 포함) 이상으로 약 300억원 이상의 시장규모가 될 것으로 추정된다. 기술적으로 이에 크게 성능이 떨어지는 외국산 장비를 수입할 경우에도 대당 약 3~5M\$이 소요된다. 본 과제에서 개발되는 장비자체의 산업화로 얻어지는 기업의 이익에 비하여 이를 활용함으로써 얻어지는 사회경제적인 이득은 막대할 것이다. 해마다 수십명의 인명피해를 일으키는 폭발물들의 능동적 제거를 가능케 할 것이며 건설현장 또는 고고학탐사현장 등에서의 활동을 원활하게 하고 등산로의 안전확보 또는 관광지의 개발 등의 활동을 위한 공간확보가 용이해 질 것이다. 이러한 사항들은 국가 경제적으로 작은 규모로 보일 수 있으나 경제활동의 안전도를 한 차원 높이는 효과를 줄 것이며, 더욱이 남북통일 또는 남북간의 경제협력이 본격화할 경우에는 비무장지대 지뢰의 신속 정확한 제거 필요성은 거론할 필요가 없을 것이다. 일차적으로 경제활동을 위한 안전한 통로 및 건설공간의 확보에도 지뢰제거는 필수적이다. 현재 비무장지대에는 UN군 측에서 매립한 재래식 장비로는 탐지가 불가능한 플라스틱 대인지뢰가 1백만여 발로 매설지역은 여의도 면적의 334배 규모인 992km²에 달하는 것으로 군당국이 추정하고 있으며 (동아일보 1999/02/25 기사) 이를 제거하는 비용이 30~100억불에 이를 것으로 예상(동아일보 1998/10/29 국회 국방위 국정감사 관련기사)하고 있다.

제 5 절 폭발물 탐지 원리 확인 실험

1. 감마선 공명흡수 실험

가. 실험 목적

본 실험의 목적은 첫째, 양성자 빔과 ^{13}C 표적핵의 Compound Reaction에 의하여 생성되는 9.17 MeV 감마선의 발생량을 실험적으로 검증하여, 지뢰 및 폭발물 탐지에 사용할 가속기의 빔 전류량을 결정하는 자료로 활용하고자 하는 것이다. 둘째, 9.17 MeV 감마선이 ^{14}N 핵과 공명 흡수 반응을 일으킬 때의 투과량 감소를 이용하여 폭약을 탐지하는 기술의 원리를 검증하고, 실제 탐지 장치의 검출계를 설계, 구성할 때 필요한 기초 자료를 확보하는 것이다. 기존의 핵자료를 이용한 Simulation의 결과로서 장치 개발의 타당성은 확인할 수 있으나, 실제 적용할 때는 Background나 Noise 등에 의하여 측정 결과가 예상값과 달라질 수 있으므로 예비 실험을 통하여 검증하는 것이 필수적이다.

나. 실험 장치

한국자원연구소의 1.7MV 탄뎀 가속기를 이용하여 1.75MeV의 양성자 빔을 얻고, ^{13}C 99% 농축 foil 표적에 입사하여 9.17MeV 감마선을 발생시키고, 이를 이용한 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 ^{13}C 표적의 두께는 $121.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 이며, $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 핵반응이 양성자 에너지 1.75MeV에서 공명 감마선 생성량을 측정하고, 이 결과와 Melamine 흡수 시료에 의한 흡수 결과를 비교하였다. γ -선 검출기로는 $2'' \times 2''$, $3'' \times 3''$ NaI(Tl) scintillator를 사용하였다. 흡수 시료로 사용한 Melamine Powder는 10cm, 20cm 길이의 직경 5cm 실린더 용기에 담아 실험에 사용하였다. 본 실험을 위하여 0.3mm Mylar 창을 가진 산란함을 제작하였으며, 가속기의 빔 라인에 부착된 산란함을 그림 3-21에서 볼 수 있다.

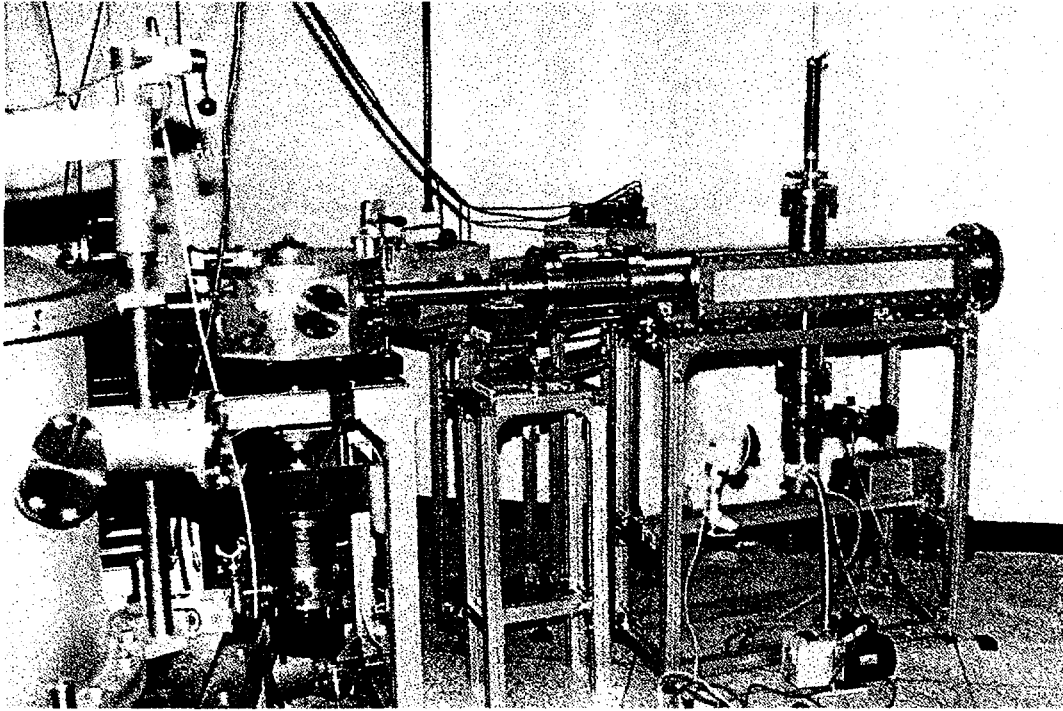


그림 3-21. Gamma Resonance Absorption 실험의 산란함

2. 실험 결과

가. Excitation Function의 측정

측정된 $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 핵반응의 Excitation Function을 다음 표에 나타내었다. 표에 나타난 양성자의 에너지는 탄뎀 가속기의 Terminal Voltage를 2배한 값에 이온원의 Bias 전압을 더하여 얻은 결과이며, 그림 3-22는 이 결과를 그래프로 나타낸 것으로 공명핵반응이 있음을 바로 확인할 수 있다.

Terminal Voltage (MV)	Energy of Proton (keV)	Count of 9.17 MeV γ -선
0.869	1766	459
0.868	1764	461
0.867	1762	492
0.866	1760	579
0.865	1758	559
0.864	1756	574
0.863	1754	633
0.862	1752	679
0.861	1750	737
0.860	1748	1019
0.859	1746	1266
0.858	1744	1243
0.857	1742	40
0.856	1740	20

감마선의 생성량이 최대가 되는 Terminal Voltage가 양성자의 공명에너지에 해당하므로, Terminal Voltage 0.859MV에서 다음 단계의 실험을 수행하였다. 양성자 에너지 1.75MeV에서의 $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 핵반응의 공명강도는 약 34eV이며, $^{14}\text{N}(\gamma, \gamma)^{14}\text{N}$ 핵반응의 단면적은 5.5barn 임이 알려져 있다 [7] .

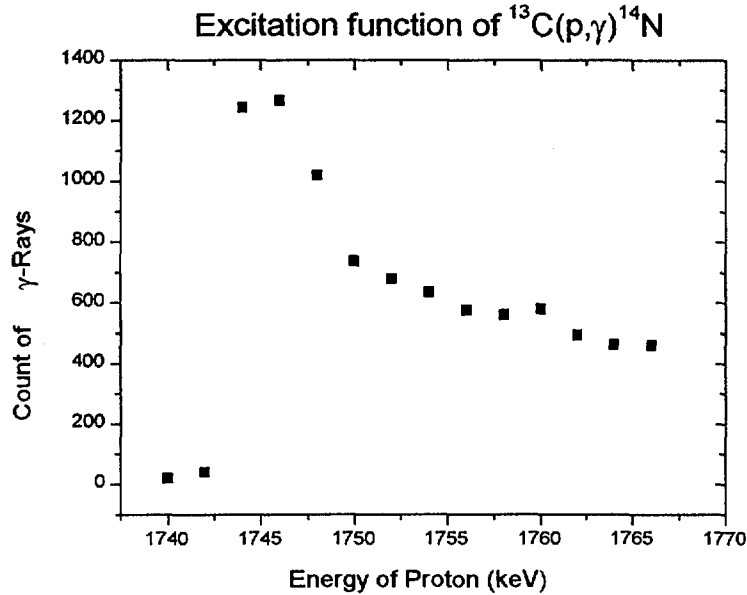


그림 3-22. $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 핵반응의 Excitation Function 측정 결과

나. ^{14}N 핵에 의한 공명 흡수 실험

질소 핵과 9.17MeV γ -선의 공명흡수 및 공명산란 반응을 이용하여 폭약을 탐지하는 원리를 실험적으로 검증하기 위한 시료로서 폭약과 질소원자 밀도가 유사한 Melamine($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$) 분말을 사용하였다. Melamine 분말의 밀도가 0.772 g/cm^3 이 되도록 시료를 제작하였으며, 이때 질소원자의 밀도는 약 0.51 g/cm^3 으로서 폭약과 유사하다. 질소핵에 의한 9.17MeV γ -선의 공명반응은 $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 핵반응의 Lab. Angle $80.7^\circ \pm 0.7^\circ$ 영역 내에서만 일어나므로 공명 흡수 및 산란에 의한 폭약탐지 원리를 실증하기 위하여 다음의 순서로 측정을 수행하였다. 첫째, Melamine 시료가 없는 상태에서의 9.17 MeV γ -선 생성량을 측정하였다. 통계적인 오차가 1% 이내가 되도록 충분한 양성자 빔을 조사하여 측정하며, γ -선 Collimator 및 Shielding 조건을 다음 단계에서도 동일하게 유지한다. 둘째, Melamine 시료를 그림 3-23과 같

이 검출기 앞에 위치하고 9.17 MeV γ -선의 투과량을 측정한다. 이 측정에서는 질소핵에 의한 공명흡수 및 Melamine 자체에 의한 γ -선의 Attenuation이 동시에 일어난 결과를 얻는다. 셋째, 앞 단계와 같은 조건에서 검출 위치만 Lab Angle 85° 로 바꾸어 측정한다. 이때는 공명반응이 일어나지 않으므로 Melamine에 의한 Attenuation을 측정할 수 있다. 또한, 공명 산란된 γ -선을 측정하기 위한 검출기를 입사 감마선의 방향에 직각으로 장치하여 실험을 수행하였다. 측정 중, 양성자 빔의 전류는 약 $1\mu\text{A}$ 로 유지하였으며, 적산 전하량 $5000\mu\text{C}$ 으로 규격화하여 측정하였다.

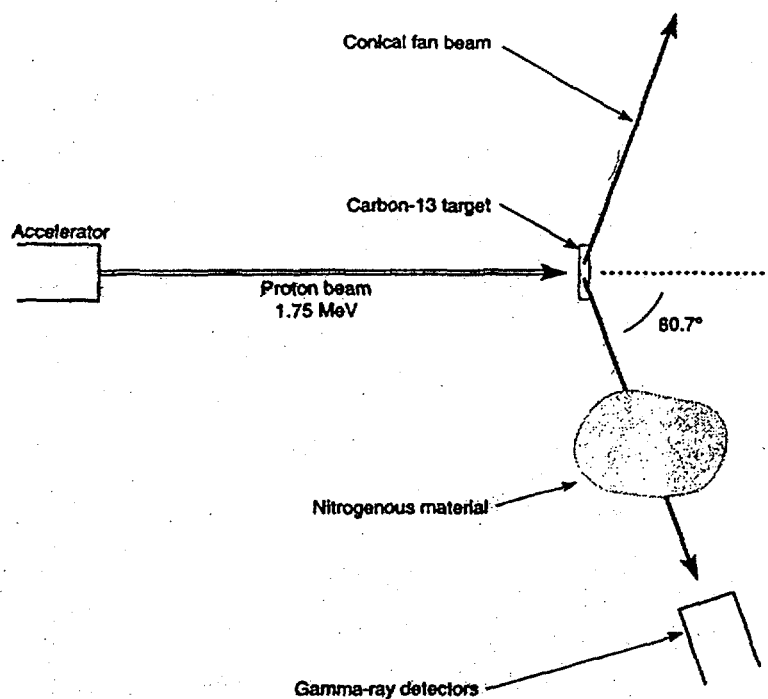


그림 3-23. 질소 함유 시료에 의한 9.17 MeV γ -선의 공명흡수 실험

다. 실험 결과의 분석

실험에서 측정된 9.17 MeV 감마선의 스펙트럼을 그림 3-24에 비교하여 나타내었다. 그림의 오른쪽에 나타난 3개의 연속된 Peak들이 9.17 MeV 감마선에 의한 것으로 오른쪽부터 각각 Photo Peak, Single Escape Peak, Double Escape Peak라 한다. Background의 영향을 최소화하기 위하여 계수 영역을 최소화하였으며, Compton Edge 부분은 제외하여 분석하였다. 실험의 결과로 얻은 공명흡수에 의한 감소율 변화를 다음과 같이 나타내었다.

Lab. Angle	80.7° ± 0.7° 이내	80.7° ± 0.7° 외부
공명흡수	○	×
감소율 측정	0.793 ± 0.028	0.861 ± 0.039

이 결과로부터 공명 위치에서의 감소량이 비 공명 위치에 비하여 증가함을 확인할 수 있었다. 그러나, 공명 산란을 일으킨 감마선 측정에서는 만족할 만한 결과를 얻지 못하였으며, 향후 재 실험을 통하여 결과를 얻고, 이 결과를 이용하여 실제 지뢰 탐지장치의 설계에 활용할 예정이다. 그림 3-25는 멜라민에 의하여 산란된 감마선을 측정한 결과로서, 측정된 감마선의 Statistics가 좋지 못하여 충분한 결과를 얻지는 못하였다. 핵자료를 이용한 평가에서는 산란 감마선의 100#/sec 측정을 위하여 양성자 가속기의 빔 전류가 약 12mA 필요한 것으로 계산되었는데, 예비실험에서는 사용 가능한 장치가 제한되어 있는 까닭에 약 1μA로 측정할 수밖에 없었다. 향후 실험에서는 양성자 빔 전류 20μA가 사용 가능한 서울대학교의 3MV 탄뎀가속기를 사용할 예정이며, 지뢰 탐지 장치의 원리 검증 및 설계에 필요한 실험자료를 얻는 것이 가능하리라 예측된다.

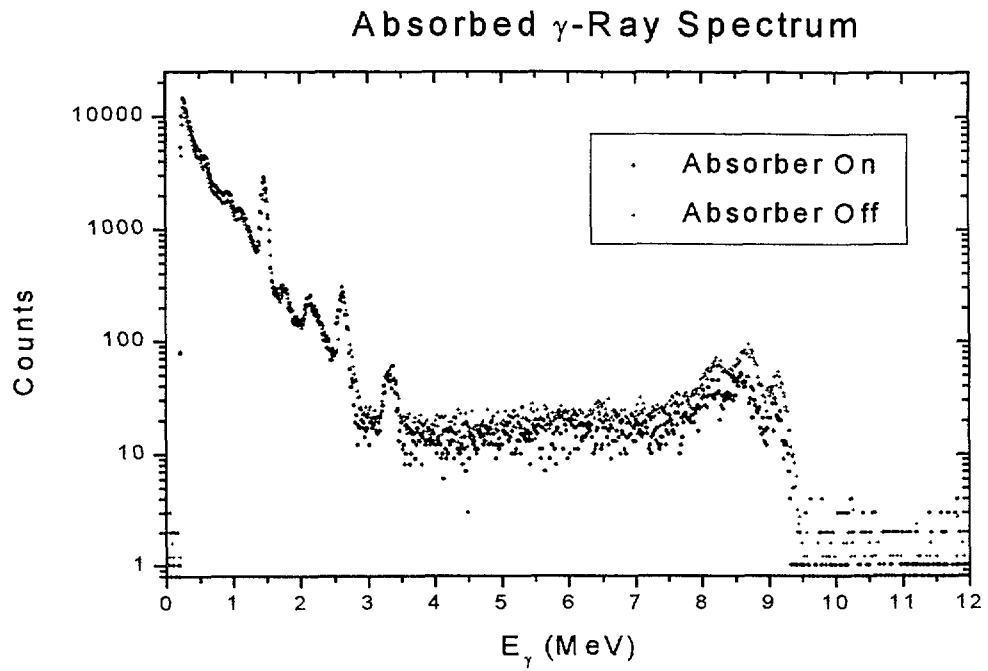


그림 3-24. 멜라민 분말에 의한 공명흡수 실험 결과

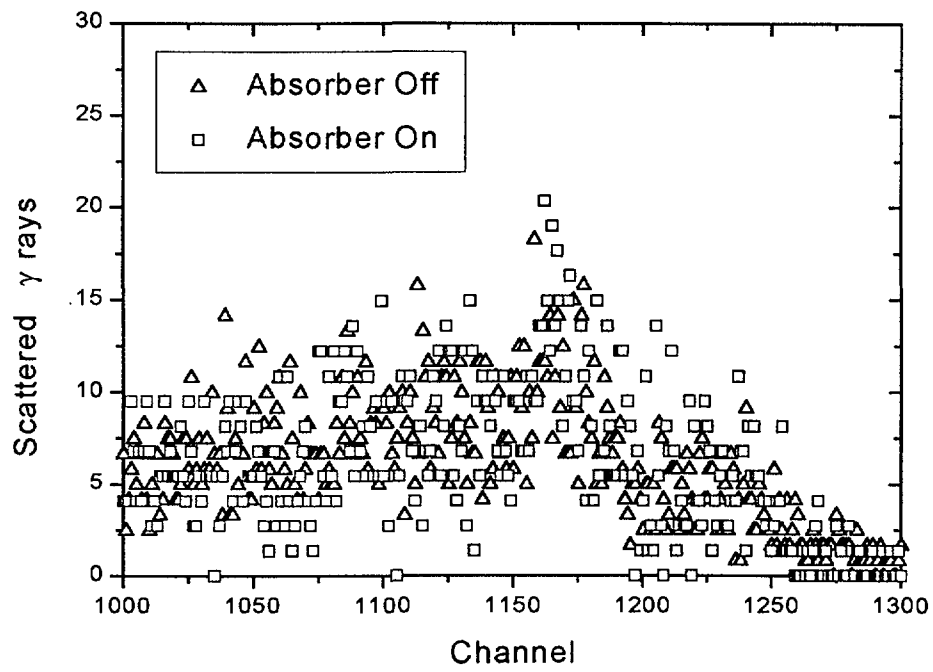


그림 3-25. 질소핵에 의하여 산란된 9.17MeV 감마선 스펙트럼 비교

참고문헌

- [1] “대지뢰전 무기체계”, 제5회 지상무기체계 발전세미나, 1997.
- [2] “지뢰기술현황분석보고서”, 한장민 외, KAERI/AR-514, 1998.
- [3] “양성자가속기를 이용해 발생시킨 감마선과 질소핵의 광핵공명반응을 이용한 지뢰 등 폭발물 탐지기술과 그 장치”, 이재형 외, 특허출원번호 제 17891호, 1998.
- [4] “Gamma Ray Calculation(GRC)”, 한장민 외, 등록번호 9801124638, 1998.
- [5] “Specific Element Detection Technique by using Proton Accelerator”, 제3회 양성자 가속기 워크샵, 김용균, 1999.
- [6] “ γ -ray resonance absorption of ^{14}N nuclei”, 김용균 외, 한국물리학회, 1999
- [7] F. Ajzenberg-Selove, Nuclear Physics A523 (1991) 1.

제 4 장 방사성 동위원소 생산

제 1 절 동위원소의 이용

자연적으로 존재하는 또는 인위적으로 생산한 핵종의 방사선을 여러 용도로 사용할 수 있다. 방사선은 α , β^+ , β^- , γ 가 주를 이루고 핵종에 따라 일정한 반감기와 방사선 에너지를 갖는다. 용도는 2 가지로 분류할 수 있는데 응용분야에 따라 산업, 농업, 의료, 기초과학으로 분류할 수 있고, 이용하는 방식에 따라 추적자로 이용, 물질과의 반응차이를 이용, 방사선 에너지를 이용하는 방식으로 분류할 수 있다. 각 분류방법에 따른 구체적인 용도를 보면 표 4.1과 같다.

표 4.1 각 분류별 동위원소 사용용도

	산업	농업	의료	기초과학
추적자로 이용	-leak detection -mixing test -wear test -유량, 토사, 하수, 공기 흐름	-광합성분석 -비료흡수추적 -가축영양흡수추적	-질병진단	-화학반응분석
물질과의 반응차이 이용	- γ radiography -두께, 밀도, 수위 측정 -유전, 광산 물질 및 형태분석			
에너지 이용	-화학물질제조 촉매 -방사열을 이용한 전기생산	-해충박멸 -박테리아살균 -감자저장 -품종개량	-암치료 -의료기구소독	
기타	-정전기예방 -smoking detect -발광물질			

산업적 이용중 추적자로 사용되는 경우에는 유속측정, 누설탐사(Kr-85 gas 이), 마모도 측정, 혼합도 측정, 바람/모래/토사 이동측정, 유전/지하수/광 산 개발 등이 있고 물질과의 반응차이를 이용하는 경우에는 두께측정, 준위 측정(Co-60, Cs-137, Am-241의 γ 선을 이용), 밀도측정 (Co-60, Cs-137 의 γ 선을 이용), radiography(Co-60, Ir-192, Cs-137 의 γ 선을 이용) 등이 있다. 표 4.2에 두께 측정시에 이용되는 동위원소와 그 특성들을 나타내었다.

표 4.2 동위원소 이용 두께측정

동위원소	선원량	측정범위
Cs-137(γ)	30Ci	4-100mm(철)
Am-241(γ)	0.5Ci	0.1-8mm(철)
Sr-90(β -)	0.02Ci	100-5,000g/m ²
Kr-85(β -)	1Ci	10-1,200g/m ²
Pm-147(β -)	0.5Ci	5-100g/m ²

에너지를 이용하는 경우에는 방사열을 이용한 thermoelectric 효과로 건전 지로 사용하는 경우가 있고 기타로 정전기 제거, 야광물질 등에 이용된다. 농업분야에서는 추적자로 이용하는 경우에 비료성분 추적(P-32등), 농약성분 추적(Hg-203, S-35, Ca-45), 광합성연구(C-14, H-3, P-32), 가축영양섭취 경로 연구 등이 있고 에너지를 이용하는 경우로는, 해충박멸, 식품멸균저 장, 품종개량 등이 있다.

의료분야에서는 추적자로 이용하는 경우는 다음과 같다.

- 골밀도 측정 : Gd-153의 γ 선을 이용
- 혈액검사 : 피 속의 염분에 있는 Na-23 대신 Na-24를 주입해 혈액순환 검사, Cr-51을 이용해 적혈구 수와 수명 측정/심장 송출 혈액양 측정/ 위장속 출혈 측정/혈장량 측정/사구체여과, Fe-59나 Fe-55을 이용한 빈혈측정
- 방사면역측정(RIA:Radioimmunoassay) : 혈청/뇨/타액 등의 미량물질의

양을 측정해 질병진단

- 방사면역검출(Radioimmuno-detection) : γ 선을 내는 Tc-99m, In-111, I-123, I-131을 이용해 항체 표지물이 항원과 반응하는 분포를 γ 카메라를 이용해 측정
- Tc-99m화합물(심장계통은 I-131 화합물도 사용)을 주사해 특정부위에서 나오는 γ 선을 γ 카메라로 단순 촬영하거나 단층촬영 (SPECT : Single Photon Emission Computed Tomograph)해서 질병 진단
- 초 단 반감기 핵종인 C-11(뇌, 간, 심장), N-13, O-15(폐, 혈류, 순환기), F-18(뇌, 암)에서 나오는 양전자가 전자와 결합하면서 2개의 0.51 MeV 광자를 발생해 병소의 위치를 입체적으로 확인 (PET : Positron Emission Tomograph). β^+ 붕괴 핵종이므로 10-20MeV 사이의 양성자 싸이클로트론으로 생산하며 초단반감기이므로 PET장치와 동위원소 생산장치가 한곳에 있어야 한다. F-18을 가장 많이 사용.
- 수십 MeV 양성자가속기 생산 핵종인 I-123(갑상선), Ga-67(암), Tl-201(뇌), In-111(뇌)의 EC를 이용해 진단

의료분야에서 에너지를 이용하는 경우는 다음과 같다.

- Teletherapy : 동전모양의 Co-60 (γ 선)을 직경 1 cm 정도의 작은 용기에 밀봉해 암치료
- Co-60이나 Ir-192(γ 선) 등을 종양 주위에 삽입해 암치료
- 갑상선질환의 경우 P-32나 I-131(β^-)을 주입해 갑상선 조직에 모이게 해 치료
- 관절염 치료에 Y-90, Dy-185등이 사용되고, Ho-166, Sm-153, Re-186도 사용될 예정
- Sr-89, Sm-153 의 β^- -선을 이용해 암세포가 전이된 골격세포의 통증완화
- Co-60을 이용해 의료장비나 의약품을 멸균소독
- 방사면역치료(Radioimmunotherapy) : β^- -을 내는 I-131, Y-90, Re-186, Sm-153, Ho-166을 항체에 표지하여 종양세포 치료

이상의 설명을 바탕으로 주로 사용되는 동위원소를 나열하고 그것들의 용

도, 반감기, 생산방법을 정리하면 표 4.3과 같다.

표 4.3 주요 동위원소의 특성

동위원소	용도	반감기	생산방법
Co-60	공업:준위, 밀도, 라디오그래피 의료:암치료(삽입, tele), 멸균소독	5.3y	원자로
Ir-192	공업:라디오그래피, 의료:삽입암치료	74.4d	원자로
Ho-166	피부암, 간암치료, 관절염치료, 방사면역치료	27h	원자로
Dy-165	관절염치료	2.3h	원자로
Y-90	관절염치료, 방사면역치료	64h	원자로Y89(n, γ)Y90, FP
Sm-153	관절염치료, 골격세포통증완화, 방사면역치료	47h	원자로Sm152(n, γ)Sm153
Re-186	관절염치료, 방사면역치료	89h	원자로Re185(n, γ)Re186
Sr-89	골격세포통증완화	51d	원자로
P-32	농업, 갑상선주사치료	14.2d	원자로S32(n, p)P32
Hg-203	농업	47d	원자로
S-35	농업	87.2d	원자로
Ca-45	농업	165d	원자로
C-14	농업	5760y	원자로
H-3	농업	12.3y	원자로
Cs-137	공업:준위, 밀도, 라디오그래피, 두께	30y	FP
Am-241	두께, 준위	458y	
Sr-90	두께	28y	FP
Kr-85	두께, gas leak	10.6	FP
Pm-147	두께	2.6y	원자로, FP
Gd-153	골밀도	236d	원자로
Tc-99m	γ 스inti그라프	6h	원자로Mo99(β^-)Tc99m
C-11	뇌, 간, 심장 PET	20m	가속기B11(p, n)C11 B10(d, n)C11
N-13	PET	10m	가속기C12(d, n)N13 O16(p, α)N13
O-15	폐, 혈류, 순환기 PET	2m	가속기N14(d, n)O15
F-18	뇌, 암 PET	112m	가속기O16(α , pn)F18
Na-24	혈액계통진단	15h	원자로
Cr-51	혈액계통진단	27.8d	원자로Cr50(n, γ)Cr51
Fe-59	혈액계통진단	45d	원자로Fe58(n, γ)Fe59
Fe-55	혈액계통진단	2.7y	원자로
I-131	γ 스inti그라프, 방사면역치료, 갑상선주사치료	8d	원자로Te130(n, γ), Te131(β^-)I131, FP
I-125	갑상선삽입치료	60d	원자로Xe124(n, γ), Xe125(EC, 17h)I125
I-123	갑상선진단, γ 방사선면역검출	13h	가속기Te122(d, n)I123
Ga-67	암진단	78h	가속기Zn67(p, n)Ga67 Zn64(α , n)Ga67
Tl-201	뇌진단	73h	가속기Pb203(p, 3n)Tl201
In-111	뇌진단, γ 방사선면역검출	2.8d	가속기Cd111(p, n)In111
Mo-99	fission Mo	67h	원자로Mo98(n, γ)Mo99, U(n, f)

제 2 절 동위원소 생산방법

표 4.3에 나타낸 것과 같이 생산방법은 원자로와 가속기를 이용하는 2가지로 크게 나눌 수 있다. 원자로를 이용하는 경우에는 원자로 중성자를 이용하는 방법과 핵연료에 남아있는 핵분열물질을 분리 회수하는 방법이 있다. 가속기를 이용하는 경우에는 수십 MeV의 양성자의 (p,n) 반응 등을 이용하는 경우, 수백 MeV 양성자의 핵파쇄반응후 방사화 물질을 이용하는 경우, 양성자외의 α , d, He-3 등과의 핵반응을 이용하는 경우, 양성자 등의 입자로 중성자를 만들고 원자로의 중성자를 이용하는 것과 같이 그 중성자를 이용하는 경우로 나눌 수 있다. 주로 많이 사용되는 핵종중 Mo-99, In-111, Ga-67, Tl-201, I-123의 5 가지를 선정해서 생산방법을 알아본다. 참고로 가속기를 이용한 동위원소 생성량 계산과 관련해 알아야 할 사항은 다음과 같다.

- 동위원소 생성 후 시간 t에서의 Activity

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$A_0 = \sigma NI(1 - e^{-\lambda t_{irr}})$$

A_0 : 빔 조사직후의 붕괴율

N : 단위 면적 당 표적핵의 수.

I : Beam Intensity

λ : 생성 동위 원소의 붕괴 상수. $0.693/T_{1/2}$.

t_{irr} : 빔 조사시간.

$$N = \frac{N_a \rho x}{M}$$

N_a : Avogadro Number

ρ : density

x : thickness

M : mass number

- 전류 20 mA = $20 \times 10^{-3} / 1.6 \times 10^{-19}$ particles/sec
= 1.25×10^{17} particles/sec

1. Mo-99(Tc-99m)

가. 기존의 원자로 중성자를 이용한 방법

원자로의 중성자를 이용한 (n, γ) , (n, f) 방법이 있는데 표 4.4에 차이점을 비교하였다. 자연 Mo의 조성은 Mo-92 (14.8%), Mo-94 (9.3%), Mo-95 (15.9%), Mo-96 (16.7%), Mo-97 (9.6%), Mo-98 (24.1%), Mo-100(9.6%)이고 생성량 계산은 다음과 같이 이루어졌다.

-Mo 자연 1g

$$\begin{aligned} &: \text{flux} \times \text{cross-section} \times \text{atom number per gram Mo} \times \text{Mo-98\%} \\ &= (10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}) \times (0.13 \times 10^{-24} \text{ cm}^2) \times (1/(95.9 \times 1.66 \times 10^{-24})) \times 0.24 \\ &= 2 \times 10^{10} \text{ Mo-99/s} \end{aligned}$$

-U-235 1 g

$$\begin{aligned} &: (10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}) \times (35 \times 10^{-24} \text{ cm}^2) \times (1/(235 \times 1.66 \times 10^{-24})) \text{ Mo-99/s} \\ &(10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}) \times (140 \times 10^{-24} \text{ cm}^2) \times (1/(235 \times 1.66 \times 10^{-24})) \text{ 안정Mo/s} \end{aligned}$$

동위원소는 생성과 함께 붕괴도 동반하므로 $N(t) = (S/\lambda) \times (1 - e^{-\lambda t})$ 이 (S : 생성량, λ : 붕괴상수 $= 0.693/T_{1/2}$) 되고 시간이 지나면 S/λ 에 수렴하므로 조사시간을 늘인다고 잔존량이 증가하는 것은 아니다. 조사시간이 $T_{1/2}$, $2T_{1/2}$, $3T_{1/2}$, $4T_{1/2}$ 일 때 최대수렴 잔존량의 50, 75, 87, 94%에 도달하므로 동위원소 생산시 조사시간은 보통 반감기의 2-3배에서 결정된다. Mo-99는 반감기가 66시간이므로 조사시간을 100 시간으로 하였다. 생성량이나 조사시간에 따른 잔존량 계산시 중성자 자기 흡수 효과, burn-up 효과, indirect production 등을 고려해야 하고 또한 조사시간에 따른 잔존량과 비방사능 변화는 다를 수 있다는 것을 고려해야 한다. (n, f) 방법은 (n, γ) 방법보다 열발생이 많고 U를 분리시켜야 하는 단점이 있으나 전체 Mo 중에 Mo-99의 비율인 비방사능이 높다는 장점이 있다.

표 4.4 원자로의 중성자를 이용한 Mo-99 (n, γ), (n, f) 생산방법 비교

	(n, γ)	(n, f)
표적	Mo-98 (자연Mo에 24% 존재, 농축표적 사용 가능)	U-235(자연U에 0.7% 존재. 농축표적사 용가능. 핵규제 없는 경우 93% 까지 농축해 사용. 농축도 높으면 중성자자 기흡수효과 발생)
반응단면적	열중성자 0.13 b	열중성자 fission 582 b, Mo-99 핵분열 생성율 6%, 안정 Mo 핵분열 생성율 24%, (Mo-99 생성단면적 35 b 안정 Mo 생성단면적 140 b)
10^{14} n/cm ² .s 열중성자 조사시 Mo-99 생성량	자연 Mo 1g : 2×10^{10} Mo-99/s	U-235 1 g : 9×10^{12} Mo-99/s 3.6×10^{13} 안정Mo/s
10^{14} n/cm ² .s 열중성자 100시간 조사직후 Mo-99 생성량	0.35 Ci/g Mo	158 Ci/g U-235 U-235 476 g 에 Mo 1 g 생성 → 75200 Ci/g Mo
열발생문제		-fission 열 때문에 냉각 필요. -저농축 U 일수록 냉각 유리. -냉각기간에 방사능양 감소
분리. 정제		-분리 : 사용되지 않은 U 회수. 고농축 U 일수록 처리량 작음. -정제 : U 분리후 남은 물질에서 Mo 추출. Mo 회수율 70%. -분리. 정제기간에 방사능양 감소

Mo-99를 이용한 Tc-99m 발생기는 크로마토형, 승화형, 용매추출형의 3 가지로 분류할 수 있는데 승화형이나 용매추출형은 Tc-99m의 이용자 입장에서 간편하게 쓸 수 없으므로 공급자가 사용해 Tc-99m을 추출한 후 공급하는 형태가 되므로 Tc-99m의 반감기 6시간을 고려하면 Tc-99m 추출후 바로 공급이 이루어져야 되서 근거리의 기관에만 매일 공급하는 방식이 된다. 크로마토형은 사용자가 쉽게 Tc-99m을 취득해 사용할 수 있는 잇점이 있어 사용기관이 매일 일정량의 Tc-99m을 추출해 사용할 수 있다. 따라서 현재 크로마토형이 Tc-99m 발생기의 주류를 이루는데 크로마토형이 compact한 portable 크기가 될려면 Mo-99의 비방사능(Mo 1 g당 Mo-99방사능)이 클수록 유리하

다. 따라서 (n, γ) 에 의한 방법보다는 (n, f) 에 의해 생성된 fission Mo가 주류를 이루고 있다. 높은 비방사능은 compact한 크로마토형 Tc-99m 발생기를 만들 수 있다는 장점외에 추출된 Tc-99m의 농도도 높아져 질 좋은 Tc-99m 화합물을 만들 수 있다는 장점도 있다. 현재 국내생산 Tc-99m은 (n, γ) 와 용매추출형 방식으로 생산한다. 98% Mo-98 농축표적은 고가(1\$/mg)이나 (n, f) Mo-99의 가격이(US\$167/Ci) (n, γ) Mo-99 가격에 비해 4배 높다. Fission Mo의 경제성에 가장 큰 요소는 단위방사능의 Mo-99를 생산하는데 생기는 폐기물의 양이고 따라서 농축도 높고 중성자속 높을수록 경제성이 좋아진다. 그러나 농축도 높을수록 냉각문제에 신경써야 한다. 참고로 하나로를 이용한 (n, f) Mo-99 생산 계산 예로서 19.75 w/o LEL UO₂ 표적봉(높이 40 cm) 7개를 하나로 OR 조사공(3.36×10^{14} n/cm².s) 1개에 장전하는 방식으로 4개의 OR공에 모두 27개의 표적봉 장전했을때 표적봉 1개당 17.1 g의 U-235 존재하므로 MCNP[1]와 ORIGEN[2]으로 7일 조사, 1일 냉각, 1일 용해, 6일 경과를 가정으로 계산을 수행한 것이 있다[3]. 결과는 U이 모두 2455 g이고 8283 Ci의 Mo-99가 생성 되었으며 비방사능이 9718 Ci Mo-99/g Mo인 1.17 g의 Mo가 생성된 것으로 나타났다.

나. 가속기 중성자 이용

GeV 급의 양성자를 Pb, W, U 등의 중핵물질에 조사하면 핵파쇄 반응에 의해 양성자 1 개당 수십개의 중성자가 생성된다. 이렇게 생성된 중성자의 평균에너지는 수 MeV 정도인데 이를 열중성자로 감속시켜 원자로의 중성자를 이용하는 것처럼 Mo-99를 생산할 수 있다. 그림 4.1은 지름 10 cm, 1 GeV, 20 mA 양성자 빔의 경우에 납표적 표면에서의 중성자속을 LAHET[4]로 계산한 것이다. 위에서 설명한 하나로 이용의 경우와 비슷한 중성자속을 가지므로 하나로 경우에 사용했던 것과 같은 표적봉 27개를 그림 4.1의 중성자 생성 표적 주위에 0.5 cm 간격으로 둘러놓으면 표적봉 1개의 지름이 1.5 cm 이므로 대략 중성자생성 표적 둘레의 60%를 에워쌀 수 있다. 표적봉을 통과하는 중성자도 있으므로 겹겹이 배치가 가능 할 수도 있다. 실제 중성

자 생성 표적을 이용해 동위원소를 생산하려면 생성중성자 평균에너지가 2 MeV 정도이므로 열중성자로 만들기 위해 표적주위에 moderator를 넣어야 한다. 이 경우에 중성자 탈출 표면이 넓어져 중성자속이 작아지므로 같은 양의 Mo-99 생산을 위해서 더 많은 표적봉을 사용해야 하는데 이 경우 분리처리 비용이 증가하게 된다. 이러한 단점을 줄이기 위해 U 표적의 fission 중성자를 활용하는 미임계로 형태의 방법도 고려할 수 있다. 양성자에너지가 낮아질수록 같은양의 Mo-99 생산을 위해 k 값이 1에 더 가까워지는 미임계로 형태가 되어 한다. 가속기를 이용하는 경우의 장점으로 표적을 수시로 교체 할 수도 있다는 것이다. 가속기를 이용하는 경우의 보다 정밀한 계산을 위해서는 LAHET, MCNP, ORIGIN을 이용한 노심계산이 필요하다.

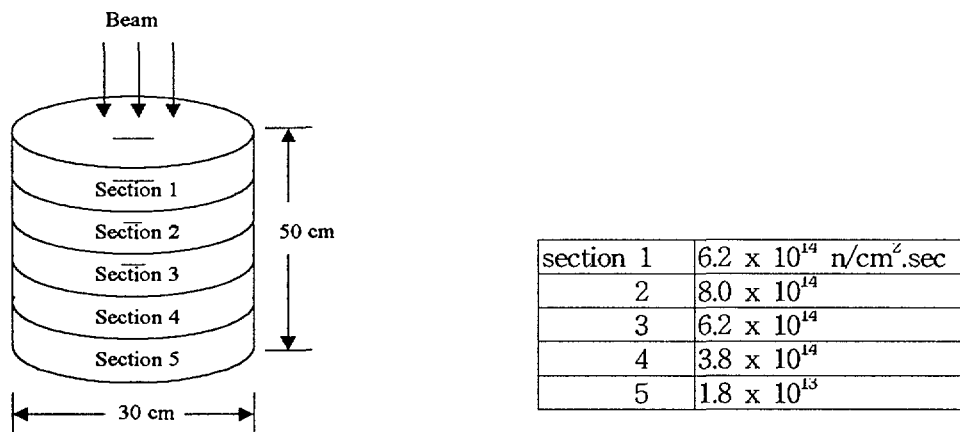


그림 4.1 납표적과 1 GeV, 20 mA 양성자를 이용한 중성자 생성

가속기 중성자를 이용하는 경우의 경제성은 원자로 중성자를 이용하는 경우에 비해 안 좋으나 다른 목적으로 가속기 또는 가속기와 중성자 생성 표적 시스템까지 지어진 상태에서 그것을 Mo 생산 목적에 이용할 경우에는 경제성 측면에서도 고려할 수 있는 가능성이 있다.

다. 양성자 직접조사

핵반응후 직접 생성되는 경우도 있고 다른 핵종 생성후 붕괴나 2차입자와 반응에 의해 생길 수도 있고 이 모든 것이 다 일어날 수 있으므로 방법이 많을 수 있다. Mo-99의 양성자가속기를 이용한 생산을 고려한다면, 수십 MeV에서의 핵반응을 고려하거나 High Energy proton에 의한 spallation reaction을 생각해 볼 수 있는데 spallation을 이용한 동위원소 생산은 물론 핵종의 종류가 아주 다양하고, 원하는 핵종의 생성율이 특히 높은 경우를 찾기도 어렵다.

(1) 30 MeV 양성자를 Mo-100에 조사

$^{100}\text{Mo}(p, d)^{99}\text{Mo}$ 의 cross-section은 18.3-29.5MeV 구간에서 110-182 mb이다. Mo-100을 표적으로 이용한다면, 100% 농축표적, 양성자 빔 20 mA일 경우 Mo의 Atom Density가 $6.407 \times 10^{22} \text{ \#/cm}^3$ 이므로 30MeV 양성자가 입사되어 18MeV로 에너지를 잃고 지나가는 두께 0.1cm 표적인 경우, $150 \times 10^{-27} \text{ cm}^2 \times 0.02 / (1.6 \times 10^{-19}) \text{ sec}^{-1} \times 6.407 \times 10^{21} \text{ \#/cm}^2 = 1.2 \times 10^{14} \text{ \#/sec}$ 의 Mo-99가 생성된다.

(2) 100 MeV 양성자를 Th-232에 조사

$^{232}\text{Th}(p, f)^{99}\text{Mo}$ 의 반응을 이용하는데 Th-232 (natural 100%)의 charged particle fission cross-section은 양성자 에너지 17.0-21.9 MeV 구간에서 29.8-38.5 mb이다. Th metal을 표적으로 사용한다고 가정하면, 20 mA의 경우 Th의 Atomic Density가 $3.06 \times 10^{22} \text{ \#/cm}^3$ 이므로 100 MeV 양성자가 입사되어 100 MeV 에너지를 잃고 지나가는 두께 1.5cm 표적의 경우, $35 \times 10^{-27} \text{ cm}^2 \times 0.02 / (1.6 \times 10^{-19}) \text{ sec}^{-1} \times 4.59 \times 10^{22} \text{ \#/cm}^2 = 2 \times 10^{14} \text{ \#/sec}$ 의 Mo-99가 생성된다.

(3) 1 GeV 양성자를 Mo-100에 조사

LAHET를 이용해 계산이 가능(20 MeV 이하 중성자의 영향 포함되지 않았음)한데 1 GeV, 20 mA, 지름 10 cm 원형 빔을 지름 10 cm, 두께 1 cm 실린더 Mo-100 표적에 조사했을 때 (p,pn)이나 (n,2n)에 의해 0.0051 Mo-99/proton이 생성된다. 따라서 6.4×10^{14} Mo-99/s 이고 표적이 835 g이므로 7.6×10^{11} Mo-99/s per g Mo이고 100 시간 조사후 13.3 Ci/g Mo가 생성된다. 표적 두께가 0.1 cm일 때 0.0003 Mo-99/proton이 생성된다.

(4) 1 GeV 빔을 Tc-99에 조사

1 GeV, 20 mA, 지름 10 cm 원형 빔을 지름 10 cm, 두께 1 cm 실린더 Tc-99 표적(원자로 1기에서 연간 25 kg 배출, 장반감기로 소멸처리대상 핵종, 계산시 밀도, 원자밀도는 Mo-100과 같은 값 사용)에 조사했을 때 (n,p)에 의해 0.0003 Mo-99/proton이 생성됨을 LAHET를 사용해 계산할 수 있다. 이 경우는 안정 Mo도 생성되는데 0.0145 안정Mo/proton이 생성된다. 따라서 3.8×10^{13} Mo-99/s, 1.8×10^{15} 안정Mo/s이고 표적이 835 g이므로 4.5×10^{10} Mo-99/s, 2.2×10^{12} 안정Mo/s per g Tc 이고 100 시간 조사후 0.79 Ci/g Tc가 생산된다. Tc 835 g에 Mo 0.11 g이 생성(6153 Ci/g Mo) 된다. 표적두께를 0.1 cm 로 하거나 빔에너지를 100 MeV로 하면 Mo-99의 생성이 없었다. 두께 10 cm 로 하면 0.0029 Mo-99/proton, 0.2021 안정Mo/proton이 생성되었고 따라서 생성량은 10 배 증가하나 비방사능은 떨어짐을 알 수 있다. 조사시간을 줄이면 비방사능이 증가가능하나 생산량이 떨어진다. U(n,f) 방법에 비해 분리처리량이 증가한다. 표 4.5와 4.6에 지금까지 언급한 Mo-99 생산 방법들의 특성을 비교하였다.

표 4.5 표적물질이 Mo인 경우의 Mo-99 생산 방법 비교

표적	Mo-100	Mo-100	자연 Mo	자연 Mo
양성자에너지	1 GeV	30 MeV	1 GeV	
표적두께	1 cm(835 g)	0.1 cm(83.5 g)		
Mo-99 생성반응	1차 및 2차입자에 의한 (p,d), (p,pn), (n,pn) 등	(p,d), (p,pn) 등	양성자를 Pb에 조사해 중성자 만들고 그 중성자로 자연 Mo 표적에 (n, γ) 반응 이용해 Mo-99 생산	원자로 중성자를 이용해 자연 Mo 표적에 (n, γ) 반응 이용해 Mo-99 생산
Mo-99 생성/sec	6.4×10^{14}	1.2×10^{14}	10^{14} n/cm ² .s 열중성자를 가정하면 자연 Mo에 조사시 2×10^{10} Mo-99/s per g Mo	원쪽과 같음
100 시간 조사직후 비방사능(Ci/ g Mo)	13.3	25.1	0.35	원쪽과 같음
100 시간 조사직후 Mo-99 방사능(Ci)	11,106	2,095	0.35 Ci/g Mo	원쪽과 같음

*가속기 이용의 경우는 20 mA, 지름 10 cm 양성자 빔을 지름 10 cm 실린더형 표적에 조사

표 4.6 표적물질이 Mo가 아닌 경우의 Mo-99 생산 방법 비교

표적	Tc-99	Th-232	U-235	U-235
양성자에너지	1 GeV	100 MeV	1 GeV	
표적두께	1.0 cm(835 g)	1.5 cm(1378 g)		
Mo-99 생성반응	2차 중성자에 의한 (n, p)	(p, f)	양성자를 Pb에 조사해 중성자 만들고 그 중성자로 U-235 표적에 (n, f) 반응 이용해 Mo-99 생산.	원자로 중성자를 이용해 U-235 표적에 (n, f) 반응 이용해 Mo-99 생산.
Mo-99 생성/sec	3.8×10^{13} 안정 Mo/Mo-99=48	2.0×10^{14}	10^{14} n/cm ² .s의 열중성자를 가정하면 9×10^{12} Mo-99/s per g U-235	왼쪽과 같음
100 시간 조사후 비방사능 (Ci/ g Mo)	6153 Ci/ g Mo		75200 Ci/g Mo	왼쪽과 같음
100 시간 조사후 Mo-99 방사능 (Ci)	660 Ci (Mo 0.11g 생성)	3,554	158 Ci/g U-235 (U-235 476g에 Mo 1 g 생성)	왼쪽과 같음
분리. 정제	Mo 0.11 g 생성을 위해 835 g의 Tc 분리. 정제		-조사 직후 냉각 1-2일후 분리. 정제에 1-2일 소요 -Tc에 비해 분리. 정제량 작음	왼쪽과 같음

*가속기 이용의 경우는 20 mA, 지름 10 cm 양성자 빔을 지름 10 cm 실린더형 표적에 조사

2. In-111 [5, 6, 7]

- 암 진단용
- 자연계 ^{113}In -4.28%, ^{115}In -95.72%
- 반감기 2.83d
- Main γ -ray energy : 171.29 keV (90%)
245.35 keV (94%)
- Electron capture decay (100%)를 거쳐 Cd-111로 됨
- Ga-67보다 다양한 표지 화합물 합성이 용이

표 4.7 In-111 생산 반응

핵반응	표적	입사에너지 (MeV)	표적두께 (mm)	수율 (mCi/ $\mu\text{A}\cdot\text{h}$)
$^{112}\text{Cd}(p, 2n)$	^{nat}Cd	22	0.5	1.0
	99% ^{112}Cd	28-18	0.95	4.0
$^{113}\text{Cd}(p, 3n)$	97% ^{113}Cd	38-28	1.26	8.9
$^{111}\text{Cd}(p, n)$	^{nat}Cd	12	0.25	0.12
$^{109}\text{Ag}(\alpha, 2n)$	^{nat}Ag	24	0.064	0.06
$^{109}\text{Ag}(^3\text{He}, n)$	^{nat}Ag	32	0.25	0.02

- 화학적 분리 : 용매추출법 diisopropyl ether-HBr
이온교환 수지법
공침전법
- Z가 같고 A가 다른 원소는 화학적 분리가 안되므로 가속기 빔 조사 과정에서 원하는 동위원소만을 생산하도록 빔에너지, 표적 재료의 선택, 표적의 두께 등을 적절히 선택하여야 함.

3. Ga-67 [5, 6, 7]

- 인체 내 악성 종양의 위치와 범위를 결정하는데 사용
- EC decay를 하여 Zn-67이 됨.
- 반감기 3.261d.
- 방출 γ -선 에너지 : 93.3keV (38%)
 184.6keV (23%)
 300.2keV (19%)
 393.6keV (5%)

표 4.8 Ga-67 생산 반응

핵반응	표적	입사에너지 (MeV)	Impurity	수율 (mCi / μ A*h)
$^{63}\text{Cu}(\alpha, 2n)$	^{nat}Cu	30-15	^{66}Ga	0.001-0.16
$^{64}\text{Zn}(\alpha, n)^{65}\text{Ge}$	^{nat}Zn	25-19	^{66}Ga	0.08-0.17
$^{nat}\text{Zn}(p, xn)$	^{nat}Zn	21-30	^{66}Ga	0.4-1.5
$^{nat}\text{Zn}(d, xn)$	^{nat}Zn	0-50	^{65}Zn , ^{66}Zn	0.03-0.35
$^{66}\text{Zn}(p, 2n)$	^{66}Zn	22-28	^{66}Ga	5.7
$^{67}\text{Zn}(p, n)$	^{67}Zn	18-0	^{66}Ga	4.1
$^{66}\text{Zn}(d, n)$	^{66}Zn	16-0	^{66}Ga	0.95

- 천연 표적과 농축 표적

천연 표적을 사용할 때는 여러 가지 불순 핵종이 생기므로 표적 조사 후 냉각 시간이 반드시 필요하다. 특히 Zn 천연 표적을 사용할 경우는 주 불순 핵종인 ^{66}Ga (반감기 9.7hr)을 1%이하로 줄이기 위하여 100시간 정도의 냉각 시간이 필요하다. 농축 표적(^{67}Zn , ^{68}Zn)을 사용할 때는 불순 핵종이 생성되는 경쟁반응이 일어나지 않도록 빔에너지와 표적 두께를 조절하여 불순 핵종의 생성을 억제시킴으로써 별도의 냉각 시간이 필요하지 않고 주 생성 핵종의 수율이 높기 때문에 대량 생산이 용이하나 표적 가격이 비싸므로 표적

제조 및 화학처리 후 표적 회수 기술이 확립된 후에만 가능하다.

- 천연 아연 표적에서 Ga-67의 화학적 분리법

: 용매 추출법

침전법

이온교환수지법

alumina column법 - 주로 ^{68}Ge - ^{68}Ga 발생장치에 사용.

cf.) ^{68}Ge - ^{68}Ga 발생장치 : PET용 positron emitter

4. Tl-201 [5, 6, 7]

- 심장 촬영이나 종양의 발견에 이용 - Potassium 유사체

- EC decay 하여 Hg-201로 됨

- 반감기 73시간

- 방출 감마선 : 69-83keV Hg K X-ray 98%

135keV γ -ray 2%

167keV γ -ray 8%

표 4.9 Tl-201 생산 반응

핵반응	표적	입사에너지 (MeV)	Impurity	수율 (mCi / $\mu\text{A}\cdot\text{h}$)
$^{nat}\text{Hg}(p, xn)^{201}\text{Tl}$	Hg, HgO, HgCl	20-0	$^{198}, ^{199}, ^{200}, ^{202}\text{Tl}$	0.3
$^{201}\text{Hg}(p, n)^{201}\text{Tl}$	^{201}Tl			
$^{nat}\text{Tl}(p, xn)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$	Tl metal, Tl_2SO_4	28-20	$^{200}, ^{201}\text{Tl}$	0.7
$^{203}\text{Tl}(p, 3n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$	^{203}Tl	30-20	^{202}Tl	2.2
$^{205}\text{Tl}(p, 5n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$	^{205}Tl	46-38	$^{200}, ^{202}\text{Tl}$	1.9
$^{nat}\text{Pb}(p, xn)^{201}\text{Bi} \rightarrow ^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$	Pb metal	55-47	^{200}Tl	0.61

- Natural Hg를 이용하는 방식은 불순 핵종으로 인하여 좋은 영상을 얻을 수 없고 환자의 피폭량을 증가시켜 거의 이용되지 않는다.

- ^{201}Hg 표적은 불순 핵종 문제는 없으나 생성량이 적고 표적 값이 비싼 것

이 문제이다.

- $^{nat}\text{Pb}(p, xn)^{201}\text{Bi} \rightarrow ^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$ 를 이용하는 것이 고순도의 ^{201}Tl 을 얻기에 적합함. 단, 60MeV 이상의 양성자가 필요함.

- 원자력 병원의 경우는 Thallium metal 표적을 사용함.

- 화학적 분리

: 이온교환수지법

용매추출

침전법.

5. I-123 [5, 6, 7]

- 유기화합물의 수소와 치환이 용이한 할로겐족 방사성 동위원소

- 반감기 13.2hr

- EC decay

- 감마선 에너지 159keV(85%)

표 4.10 I-123 생산 반응(direct method)

핵반응	표적	입사에너지 (MeV)	Impurity	수율 (mCi / μ A*h)
$^{121}\text{Sb}(\alpha, 2n)^{123}\text{I}$	Nat. Sb, 98% ^{121}Sb	25.1-35.6	^{124}I	0.15-0.93
$^{121}\text{Sb}(^3\text{He}, n)^{123}\text{I}$	98% ^{121}Sb	4.5-14.0		Extremely Low
$^{123}\text{Sb}(^3\text{He}, 3n)^{123}\text{I}$	Nat. Sb	23-40	^{124}I	0.024-0.17
$^{123}\text{Te}(p, n)^{123}\text{I}$	77-91.5% ^{123}Te	15-19.5	$^{124}, ^{130}\text{I}$	0.44-4
$^{122}\text{Te}(d, n)^{123}\text{I}$	95-96% $^{122}\text{TeO}_2$	7-12.7	$^{124}, ^{130}\text{I}$	0.1-1
$^{124}\text{Te}(p, 2n)^{123}\text{I}$	91-99.8% $^{124}\text{TeO}_2$	22-30	^{124}I	4.2-45
$^{125}\text{Te}(p, 3n)^{123}\text{I}$	95.5% ^{125}Te	36	^{124}I	0.85

표 4.11 I-123 생산 반응(indirect method)

핵반응	표적	입사에너지 (MeV)	Impurity	수율 (mCi / μ A*h)
$^{122}\text{Te}(\alpha, 3n)^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$	95-96% ^{122}Te	42-46	^{129}I	0.3-0.45
$^{122}\text{Te}(^3\text{He}, 2n)^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$	91% ^{122}Te	25	low	0.3
$^{123}\text{Te}(^3\text{He}, 3n)^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$	76.5% ^{123}Te	30	low	0.8
$^{120}\text{Te}(\alpha, n)^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$	45% ^{120}Te	23	^{122}I	0.002
$^{127}\text{I}(p, 5n)^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$	I_2 , CH_2I_2 , NaI , KI , LiI	52-70	^{129}I	3.0-18
$^{127}\text{I}(d, 6n)^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$	NaI	70-80	^{129}I	5.7-8
$\text{T}(p, \text{spallation})^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$	La , Cs , Ba	450-660	^{121}Te , ^{129}I	≤ 10

- Precursor ^{123}Xe 이 2.1시간의 반감기로 붕괴하면서 ^{123}I 을 얻는 간접법이 장점이 있다.

- ① Xe 분리에 의한 고순도 ^{123}I 을 얻을 수 있다.
- ② On-line Xe 분리가 가능하다. - 기체유동법.
- ③ 염가의 천연표적 사용 가능.
- ④ 단원자 ^{123}I 를 생산 가능.

제 3 절 생산 및 이용 현황

1. 국외

1896년 베크렐과 큐리 부인이 우라늄에서 방사선 발견하고 그후 큐리 부부가 우라늄 광산에서 Po와 Ra 발견했다. 특히 Ra는 다량으로 추출해서 방사능의 존재를 확실케 했다. Ra는 방사능이 세서 당시 독성을 몰랐던 작업자들에게 피해를 주었고 1903년 큐리 부부가 방사능 발견으로 노벨상을 수상했다. 1932년 Al과 Be에 α 입자를 조사했을 때(α 는 Po으로 부터 나옴) 다른 성질의 방사능이 나옴을 발견했는데 이는 중성자였고 중성자의 존재가 확인되었다. 1933년에 줄리에트큐리가 Al에 α 조사시 양전자도 방출됨을 확인했고 이는 $Al + \alpha \rightarrow P + n$, $P \rightarrow Si + \beta^+$ 으로 최초의 인공 방사선 동위원소 합성이 되었다. 1930년대 후반부터 하전입자를 가속해 동위원소를 얻기 위해 Cockcroft-Walton과 사이클로트론 등의 중이온 가속기 개발이 본격화 되었고 인공동위원소생산도 본격화되었다. 그중 한 방법으로 Po등으로부터 나온 α 선이나 가속된 α 선과의 핵반응으로부터 중성자를 얻고 중성자를 다시 흡수시키는 방법이 사용되었는데 1939년 U에 중성자를 조사시키는 과정에서 Otto Hahn이 fission을 발견했다. 1942년 Fermi에 의해 실험용 원자로 운전이 성공했고 이후 캐나다와 미국에 다수의 원자로를 핵폭탄 제조를 위해 운전했다. 이들 원자로를 전쟁후인 1946년 인공동위원소 합성에 이용해 C-14이 최초의 원자로생산 동위원소로 미국 병원에서 사용되었고 이후 원자로를 발전과 동위원소생산에 적극활용하고 동위원소이용 방법개발이 본격화되었다. 초기에는 주로 중성자반응을 통해 생산된 동위원소를 이용했고 가속기를 사용해 핵파쇄반응 등을 통해 중성자를 생산해 이용하는 방법도 연구는 되었으나 경제성이나 원자로의 부각 등으로 주로 원자로를 사용했다. 1950년대 초에 영국, 프랑스, 캐나다, 러시아 등도 동위원소를 생산했으며 1960년대 중반경에는 19개국 25개 기관에서 생산했다. 1960년에 호주의 HIFAR이 가동되었고 1958년 ORNL에 최초의 대규모 fission product 공장이 건설되어 핵폐기물인 fission product의 동위원소로의 이용이 본격화되었다. fission

product(특히 장반감기 핵종)의 이용이 본격화된 이유중의 하나는 핵폐기물 처분을 용이하게 하려는 의도에서였다.

현재 각 국가별 동위원소 생산 현황을 보면 다음과 같다[8].

- 호주 : ANSTO 산하 자회사인 ARI에서 HIFAR를 이용해 fission-Mo 생산
- 중국, 인도 자급 자족
- 인도네시아 : 연구로가동 Tc-99m 기술 GE에서 도입해 말레이시아에 수출
- 베트남 : I-131, Tc-99m 자체 생산
- 캐나다 : CANDU에서 Co-60세계시장 80%생산. NRU원자로에서 fission-Mo 세계시장 80% 생산. 동위원소생산 전용 원자로 2기 건설 예정
- 벨기에 : BR-2 에서 Tc-99m 발생기 공급
- 남아공 : SAFAR-1에서 Tc-99m 발생기 공급
- 일본 : JAERI 담당. 다이치, Nihon Medi-Physics 에서 의약품 생산.

캐나다로부터 fission-Mo 수입해 Tc-99m 발생기 제조. 70년대 초 가속기핵종 생산시작. 80년대초까지 매년 50% 씩 이용 증가. 현재 도 증가 추세

1995년 기준으로 RI 세계시장이 10억불이고 이중 fission Mo 세계시장이 5억불이며(fission Mo : 0.5억불, Tc 발생기 : 1억불, Tc 이용 관련 : 3.5억불) Mo-99의 세계수요는 30만 Ci/yr이다 (국내수요 : 2,000Ci/yr). 2004 년 까지 60만 Ci로 수요 증가가 예상된다[3].

2. 국내

국내에서의 동위원소생산은 연구용 원자로인 TRIGA-MARK를 이용해 시작되었고 가속기를 이용한 동위원소 생산도 원자력병원의 MC-50 싸이클로트론(50MeV H⁺, 25MeV D, 66MeV He³, 50 MeV He⁴)을 이용해 80년대 중반부터 시작되었다. 최근에는 원자력연구소의 하나로가 완성되어 동위원소생산과 이용이 더욱 활발해지고 있다. 1995년에는 서울대병원(TR-13 싸이클로트론,

H-, 350 μ A)과 삼성의료원(MC-17 싸이클로트론, H-, 70 μ A)에서 PET용 싸이클로트론을 도입했으며 원자력병원에서는 동위원소생산 전용 MC-30 싸이클로트론의 도입도 고려하고 있다. 표 4.12와 4.13에 핵종별 및 이용분야별 동위원소 생산/수입 현황이 나타나 있다. 대부분이 수입에 의존함을 알 수 있다. I-125는 비용중 화합물이 차지하는 비중이 90%이다. 가속기 생산핵종 중 I-123은 반감기가 짧아 수입이 어렵고 가속기 생산 핵종의 국내 사용량은 일본의 수 %에 불과하다. 가속기생산 핵종의 경우 2000년초에 국내시장이 50억으로 성장 가능하다[8].

표 4.12 핵종별 생산 및 수입(1994년)(단위 : 억원)

		핵종	생산금액	수입금액	총계금액
주요 핵종	원자로	I-125		62(36)	62(35)
		Tc-99m	0.8(18)	18(10)	18.8(11)
		Co-60		8(5)	8(5)
		Ir-192	0.1(2)	6(3)	6.1(3)
		I-131	2.5(55)	1(1)	3.5(2)
		Mo-99	0.06(1)		0.06(0)
		Cs-137		16(9)	16(9)
		C-14		3(2)	3(2)
	가속기	Ga-67	0.4(8)	0.3(0)	0.7(0)
		Tl-201	0.6(12)	2(1)	2.6(1)
		I-123	0.08(2)	0.08(0)	0.16(0)
기타 핵종			(2)	(33)	(32)
합계			4.6	173	177.6

()는 %

표 4.13. 이용분야별 현황(단위 : 억원)

이용분야	생산금액	수입금액	총계금액
의료	4.6(100)	89(51)	93.6(53)
산업	0.01	78(45)	78(44)
연구		6(4)	6(3)
합계	4.6	173	177.6

()는 %

제 4 절 대용량 양성자가속기를 이용한 동위원소 생산

본 절에서는 지금까지 알아본 동위원소생산 방법과 국내외 수요/생산 현황을 고려해서 1 GeV, 20 mA 양성자 가속기(KOMAC)를 이용해 동위원소를 생산하는 계획을 수립한다.

1. 주요생산품목 선정

대용량 양성자가속기를 이용해 생산 가능한 주용 품목을 선정했다.

표 4.14 선정된 주요 생산 품목

종류	반감기	년간국내수요 (Ci)	금액 (백만원)	용도	선정기준
Mo-99 (Tc-99m)	66.7hrs	2,842	2,773	의료용	A
I-123	13.3hrs	2.7	38	"	B ₂
Tl-201	74hrs	49.5	618	"	B ₂
Ga-67	77.9hrs	9.3	78	"	B ₂
H-3	12.26yrs	18,381	473	산업용/연구용	B ₁

※선정기준

- A. 연구로에서 생산 가능하나 짧은 반감기로 시장 수급상 Backup Supply 필요 품목
- B. 연구로에서 생산 불가능하며 양성자가속기로만 생산 가능한 품목
 - B1 : 소형가속기로 생산이 어려우며 수요가 큰 품목
 - B2 : 국내 기존 또는 계획중인 Cyclotron 소형가속기에 의한 생산량이 부족하여 다량 수입하는 품목

2. 주요수입동위원소 (1995) ¹⁾

표4.15 주요 수입 동위원소

품 목	수입 수량 (Ci)	금 액 (1000U\$)	국내생산방안	핵종구분		용 도
				양성자 과잉	중성자 과잉	
Mo-99 (Tc-99m)	2,464	2,725	하나로 생산계획 KOMAC 지원		○	의료진단용
I-125	1.3	53,338 ²⁾	하나로		○	의료진단용
I-131	55.8	164	"		○	치료용
S-35	1.7	219	"		○	기초과학
P-32	1.9	263	"		○	생명공학
C-14	17.6	378	"		○	표지화합물 합성
Ir-192	57,590	897	"		○	산업용
Co-60	209,000	342	월성 원전 생산검토		○	식품멸균, 산업용
Kr-85	37	11	(사용후핵연료 재처리부산물)		○	산업용
Cs-137	0.9	43	"		○	"
Pm-147	49	70	"		○	"
Am-241	2	67	"		○	"
H-3	18,381	592	KOMAC	○		산업용, 생명과학
Tl-201	28.7	515	KOMAC	○		의료진단용
Ga-67	3.4	42	KOMAC	○		"

1) 기기내장 RI제외, 수입금액 15위 이내, 과학기술부(1995) 자료 인용

2) 주로 표지화합물가격임

3. 시설별 생산핵종

표 4.16 시설별 생산핵종

시 설	구 분	품 목
연구로 (하나로)	수입대체 및 수출유망	Mo-99, S-35, P-32, C-14, Ir-192
	국내수요충당	I-125, I-131, Co-60(의료용), Ho-166
	수출유망(생산미정)	Sm-153, Y-90, Ni-63
양성자가속기 (KOMAC)	연구로 Backup	Mo-99, Ho-166
	수입대체	H-3, Ga-67, I-123, Tl-201
	기타생산가능품목	Fe-52, Co-57, Co-58, Rb-81(K-81m) In-111, Tm-149, PET용 동위원소 등
소형양성자 가속기 (Cyclotron)	PET용	C-11, N-13, O-15, F-18, Mg-28, Ge68(Ga68), Sr-83, Sr-82(Rb-82), As-74
	기타의료용	Ga-67, I-123, Tl-201, In-111
중수발전로 (월성원전)	수입대체 및 수출유망 (생산검토중)	Co-60 (공업용)
사용후핵연료 재처리	해외수입	Cm-244, Am-241, Pm-147, Cs-137, Sr-90, Sr-89, Kr-85

4. 양성자가속기(KOMAC) 단계별 활용계획

가. 20MeV proton

- $^{100}\text{Mo}(p, pn)^{99}\text{Mo}$ 를 이용한 Mo-99(Tc-99m) 생산
- Ga-67, Tl-201, Co-57, I-123
- C-11, N-13, O-15, As-74 등의 PET핵종

나. 100MeV proton

- Tl-201, I-123은 높은 에너지의 양성자조사에 의한 생산이 더 효율적임.
- ^{232}Th , $^{238}\text{U}(p, f)^{99}\text{Mo}$ 에 의한 Mo-99(Tc-99m) 생산
- (p, n) 반응의 고속 중성자를 이용한 동위원소 생산

다. 260MeV proton

- U-238 등 중핵파쇄에 의한 동위원소 생산, 1000여종의 동위원소 동시생산 가능

라. 1GeV proton

- U-238 등 중핵파쇄에 의한 동위원소 생산 및 핵파쇄중성자를 이용한 동위원소 생산, 약 2000여종의 동위원소 동시 생산 가능.

5. 결론

- 대용량 양성자가속기로는 원자로에서 생산되는 중성자과잉핵종의 RI들도 생산 가능함. 특히, 반감기가 짧고 수요가 많은 Mo-99 (Tc-99m)의 경우에는 하나로의 Backup Supply원으로서 고려될 수 있어 하나로의 운영에 보완적인 면이 있음.
- 양성자가속기만으로 생산가능한 양성자과잉 핵종중 선진국들에서 의료용 수요가 급증하고 있는 I-123, Tl-201 등의 다량생산이 가능하여 국내수요를 창출할 수 있음.
- 초단수명핵종 RI들도 양산 가능하여 인근지역의 병원 및 연구기관들을 지원할 수 있음.
- 1GeV양성자가속기로는 2천종 이상의 거의 모든 RI를 생산할 수 있으므로 의료용, 산업용 및 연구용으로 각종 RI이용 활성화가 가능하며, 향후 새로운 특성의 RI생산이 가능함.

- 향후 대용량 양성자가속기(KOMAC)에 의한 RI제조의 경제성 (타 시설과의 경제성 비교 포함)을 핵종별로 상세히 검토할 필요 있음.
- 가속기에서의 RI생산은 빔을 인출 사용함으로써 생산시설의 설치 및 운영이 단순하고 편리함.

참고문헌

- [1] J. F. Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A", LA-12625-M, 1993
- [2] A. G. Groff, "A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code", ORNL/TM-7175, ORNL, 1980
- [3] 윤병목 외 16인, "Fission Mo 제조기술 개발", KAERI/RR-1752/96, 1996
- [4] R. E. Prael et al., "User Guide to LCS : The LAHET Code System", LA-UR-89-3014, LANL, 1989
- [5] 이종두 외 19인, "싸이클로트론 방사성 핵종 개발", KAERI/RR-805/88, 1988
- [6] 이종두 외 17인, "싸이클로트론 방사성 핵종 개발(II)", KAERI/RR-915/90, 1990
- [7] 이종두 외 7인, "싸이클로트론 방사성 핵종 생산", KAERI/RR-1091/91, 1991
- [8] 최영명 외 19인, "방사선 및 방사성동위원소 이용진흥 종합계획 수립", KAERI/RR-1691/96, 1996

제 5 장 MeV 양성자 빔을 이용한 중성자생산 및 이용

제 1 절 중성자 생산

수 MeV 양성자 빔을 이용해 중성자를 생성시키는 반응은 주로 (p,n) 반응인데 일반적으로 많이 알려진 반응들은 $\text{Li}^7(\text{p,n})\text{Be}^7$, $\text{H}^3(\text{p,n})\text{He}^3$, $\text{Sc}^{45}(\text{p,n})\text{Ti}^{45}$ 등이 있다. 표 5.1에 각 반응들의 threshold energy와 생성되는 중성자의 특성들이 나타나 있다.

표 5.1 수 MeV 양성자의 중성자 생성 반응 특성

Target	Reaction	Threshold Energy (MeV)	Neutron Production at 0° (proton=3MeV)	
			flux(n/cm ² .sec/μA) (1m from target)	Energy Range (keV)*
Li-7	$\text{Li}^7(\text{p,n})\text{Be}^7$	1.88	$\sim 10^7$	$\sim 30 - \sim 1300$
H-3	$\text{H}^3(\text{p,n})\text{He}^3$	1.02	$\sim 10^7$	$\sim 60 - \sim 2000$
Sc-45	$\text{Sc}^{45}(\text{p,n})\text{Ti}^{45}$	2.91	$\sim 10^5$	$\sim 10 - \sim 50$

Threshold energy는 H^3 표적을 이용한 경우가 가장 작고 다음으로 Li^7 , Sc^{45} 순임을 알 수 있다. 중성자생산량 측면에서는 양성자 빔 에너지를 3 MeV로 했을 때 Li^7 , H^3 표적을 이용한 경우가 비슷하고 Sc^{45} 를 이용하는 경우가 상대적으로 낮았다. 생성되는 중성자의 에너지는 전방에서 Li^7 , H^3 표적의 경우 MeV 정도까지 가능한데 반해 Sc^{45} 의 경우에는 수십 keV 정도임을 알 수 있다. 따라서 일반적으로 많은 중성자량이 필요한 경우에는 Li^7 , H^3 표적을 사용하는데 필요로 하는 중성자의 에너지가 일반적으로 열중성자나 열외중성자이므로 이런 경우에는 Li^7 이 중성자에너지를 H^3 에 비해 효율적으로 감소할 수 있으므로 유리하다. 각 반응에 대해 알아보면 다음과 같다.

1. $\text{Li}^7(p,n)\text{Be}^7$ 이용

$\text{Li}^7(p,n)\text{Be}^7$ 반응이 일어나기 위한 threshold 에너지는 1.88 MeV이고 양성자빔 에너지가 2.37 MeV를 초과하면 중성자 방출이 Be^7 의 ground state와 1st excited state에서 발생해 2개의 monoenergetic 중성자 생성이 이루어진다. 양성자 에너지가 5.5 MeV 정도까지는 90% 이상의 중성자가 Be^7 의 ground state에서 발생되는데 그림 5.1에 이러한 방출 중성자중 양성자빔과 같은 방향인 forward 방향으로 발생하는 중성자의 에너지별 생성 단면적이 나타나 있다[1]. 그림 5.2는 양성자에너지 변화에 따른 forward 방향에서의 반응단면적과 모든 방향에서의 중성자생성량을 비교한 것이다. 양성자에너지가 2.3 MeV 근방에서 peak를 이룸을 알 수 있다. 생성되는 중성자는 방출 각도에 따라 생성량과 에너지가 차이를 보이는데 forward 방향에서 방출량과 에너지가 최대가 된다. 그림 5.3은 양성자에너지 변화에 따른 평균 중성자 방출각도와 평균 중성자에너지의 변화를 나타낸 것이다.

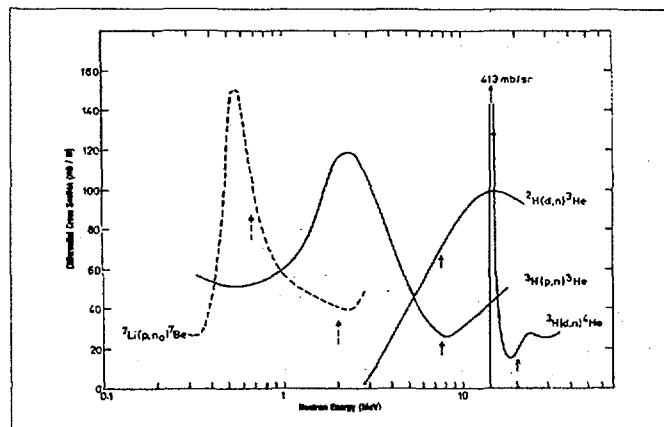


그림 5.1 각 핵반응시에 forward 방향으로 생성되는 중성자의 에너지별 생성 단면적

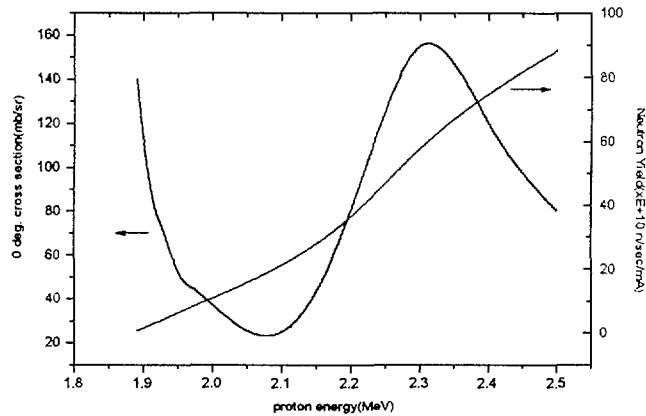


그림 5.2 양성자에너지에 따른 0°에서의 $\text{Li}^7(p,n)\text{Be}^7$ 반응단면적과 모든 방향에서의 중성자 생성량

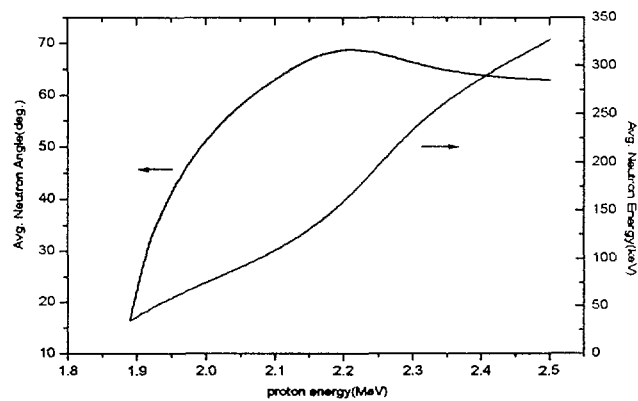


그림 5.3 양성자에너지에 따른 평균 중성자 생성각도와 평균 중성자에너지

전을 시키거나 backing물질을 공기나 물로 냉각시키는 것을 고려해야 한다. backing 물질로는 열전도가 좋고 background 중성자가 발생하지 않는 것이 좋다. Li 표적은 보통 양성자빔의 전류가 크지 않을 때는 evaporation시킨 후에

W, Al, Ag 등의 backing에 부착시켜 사용하나 대전류에서는 열발생 문제가 발생할 수 있으므로 액체 Li 표적도 고려해 볼 수 있고 고체로 사용할 때에는 회

2. $H^3(p,n)He^3$ 이용

그림 5.1에서 볼 수 있는 것처럼 $H^3(p,n)He^3$ 반응에 의해 생성되는 중성자는 Li 표적을 사용했을 경우보다 높은 에너지의 중성자를 생성하는데, peak는 2 MeV 정도에 있음을 알 수 있다. $H^3(p,n)He^3$ 반응의 threshold 에너지는 1.02 MeV이고 양성자 에너지가 8.35 MeV 정도일 때까지는 monoenergetic 중성자를 생성한다. 생성되는 중성자의 양은 일반적인 표적을 사용했을 때 forward 방향에서 $10^7 - 10^8$ n/sr. μA 정도가 생성된다[1]. H^3 를 표적으로 이용시에는 gas 형태로 사용하거나 titanium 등에 흡수시킨 후 Li 표적의 경우와 같이 열전도가 좋은 backing 물질에 evaporation 시켜서 사용하는 2 가지 방법이 있다. Evaporation 시켜 사용하는 경우에 고려해야 할 사항은 Li의 경우와 동일하나 그 외에 수소가 흡수물질로부터 outgasing되지 않도록 온도를 어느한도 이내로 유지시켜야 한다는 것이 추가로 고려해야 할 사항이다. 흡수물질이 titanium의 경우에 제한온도는 250 °C 정도이다. Gas 형태로 사용할 때에는 beam window와 beam stop이 필요한데 beam stop 물질로는 backing에 사용되는 물질들이 이용될 수 있다. gas 표적의 경우 가장 중요한 부분이 beam window 인데 보통 빔전류가 수십 μA 의 경우 수 μm 두께의 Mo, Ni, W, Havar (alloy of Co, Fe, Cr, Ni) 등이 사용된다. beam window는 beam loss를 줄이기 위해 가능한 한 얇으면서도 견고함을 유지해야 하는데 대전류 일 경우에는 열 발생 문제가 심각히 대두되므로 beam window를 냉각시키는 방법도 고려해야 한다. 표적 gas 자체를 냉각시킬 수도 있고 여러층의 beam window를 만들어 사이사이에 냉각수를 유입시키는 방법도 고려할 수 있다.

3. $Sc^{45}(p,n)Ti^{45}$ 이용

Threshold energy는 2.91 MeV 이고 이 에너지에서 생성되는 중성자는 전방에서 5.6 - 52 keV의 에너지분포를 가진다. 2.95 MeV에 도달하면 제 1 여기 상태에 도달하게 되어 다른 에너지그룹의 중성자가 생성된다. 양성자 에너지가 3 MeV에 도달하면 ground state와 제 1 여기상태에서 생성되는 중성자의 양이 비슷하게 된다.

제 2 절 중성자 이용분야

GeV 급이하의 에너지를 갖는 양성자를 이용해서 만들어진 가속기 중성자를 이용할 수 있는 분야를 표 5.2에 나열하였다.

표 5.2 GeV 급 이하의 양성자가속기를 이용해 생산된 중성자 이용분야

이용분야	양	에너지	빔형태
미임계로	10^{18} n/s	수 MeV(고속로형태)	CW
고체물질 구조분석	pulse 당 10^{20} n/s	thermal 이하	pulse
중성자 단면적 측정		수십 MeV 이하	pulse
핵융합 재료시험	10^{15} n/cm ² .s	10 - 20 MeV	CW
BNCT	10^9 n/cm ² .s	epithermal	CW
동위원소 생산		thermal	CW
radiography	10^6 n/cm ² .s	thermal	CW
방사화 분석		수십 MeV 이하	CW

Capture Therapy), 중성자 래디오그래피, 중성자 방사화분석이 있다. 이러한 이용분야 중에서 미임계로, 고체물질 구조분석, 핵융합 재료시험, 동위원소생산 등은 필요로 하는 중성자의 양이 MeV 급 양성자가속기를 사용해서 생산하기 어렵다. 중성자 단면적 측정의 경우에는 pulse beam을 필요로 하는데 개발 계획중인 양성자가속기가 CW 형태이므로 제외한다. 따라서 MeV

양성자를 이용해 생산된 중성자를 이용할 수 있는 분야로 BNCT(Boron Neutron Capture Therapy) 분야들은 지금까지 원자로 중성자를 이용하여 활발한 연구들이 이루어져 왔다. MeV 양성자를 이용해 생산된 중성자의 선속은 원자로의 선속에 비해 작으므로 원자로 중성자를 이용해 연구가 진행중인 분야를 반복해서 하는 것은 의미가 없다. 그러나 MeV 가속기 중성자원이 원자로 중성자원과 다른 특징은 중성자원이 compact하고 설치가 용이하다는 것이다. 먼저 BNCT의 경우에 뇌종양 치료를 목적으로 병원에 설치되어야 하는 시스템이므로 원자로의 형태가 되어서는 일반 대중에게 받아들여지기가 어렵다. 가속기의 경우에는 병원에 이미 진단 및 치료의 목적으로 많이 보급되어 있으므로 설치의 어려움이 없다. 라디오그래피나 방사화 분석의 경우에는 장치가 간편하므로 이동식으로 만들어 조사대상이 있는 현장으로 가서 결과를 냄으로서, 규모가 커서 원자로로 가져올 수 없는 물체나, 검사 결과를 실시간으로 알아야 되는 경우에 원자로가 할 수 없는 일을 할 수 있다. 따라서 표 5.3에 나타낸 것과 같이 이동식 시스템에 MeV 가속기 중성자를 이용할 수 있다.

표 5.3 MeV 양성자를 이용해 생성된 중성자 이용 가능 분야

Applications	Neutron		
	flux (n/cm ² .sec)	Energy	Mode
BNCT (Boron Neutron Capture Therapy)	>10 ⁹	epithermal	CW
이동식 중성자 라디오그래피	>10 ⁶	thermal	CW
이동식 중성자 방사화분석	-*	-*	CW

* 분석대상 핵종이나 background 등에 따라 변함

이동식 중성자원으로 사용할 수 있는 것으로 가속기 중성자원외에 더 간편한 Cf²⁵²나 (α ,n) 반응을 이용한 소형 중성자원이 있는데 이들은 중성자

선 속에서 한계를 가지고 있다.

1. BNCT(Boron Neutron Capture Therapy)

가. 원리

B^{10} 함유물질을 암조직에 넣고 열중성자를 통과시키면 $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ 반응이 발생한다. 그림 5.4에 반응 과정이 나타나 있는데 암세포의 크기가 보통 $10\ \mu m$ 이고 반응결과 발생하는 He^4 와 Li^7 의 이동거리는 $9\ \mu m$, $6\ \mu m$ 정도이다. 따라서 평균 $2.3\ MeV$ 정도인 He^4 와 Li^7 의 에너지가 암세포에 전달되어 암세포를 죽이게 된다. 따라서 정상세포에는 잘 침투하지 않고 암세포에만 선택적으로 침투하는 B^{10} 화합물과 중성자가 있으면 효율적으로 암세포를 죽일 수 있다. 이러한 치료법은 기존의 암치료법인 수술, 화학요법, 방사선치료 등이 잘 듣지 않는 glioblastoma multiforme(GM) 등의 뇌종양 치료에 주로 적용을 한다. GM은 미국에서만 연간 11,000 명의 사망을 유발시키고 있다[2].

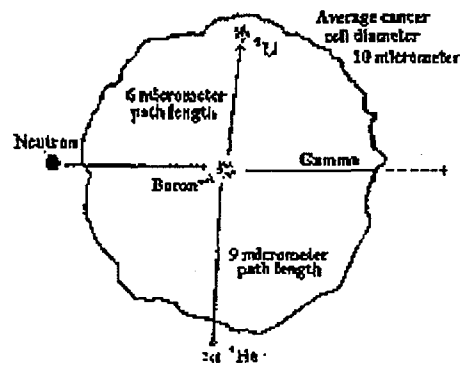


그림 5.4 암세포 내에서의 $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ 반응

나. 현황

1938년경에 미국에서 붕산이나 붕소를 이용해 연구를 시작하였고 1950년대에 들어와 암세포에 주로 침투하는 B^{10} 화합물과 열중성자를 이용해 주로

뇌종양 치료에 사용하는 방법으로 발전이 되어왔다. 미국의 BGRR (Brookhaven Graphite Research Reactor)과 BMRR (Brookhaven Graphite Research Reactor)을 사용한 초기에는 투과력이 약한 열중성자의 사용과 붕소화합물이 암세포에 집중적으로 모이지않는 이유 등으로 부작용이 심해 좋은 결과를 얻지 못하였다[3]. 1970년대에 일본에서 새로운 붕소화합물의 개발과 뇌뼈를 절개해 암세포에만 중성자를 조사하는 방법의 이용 등으로 개선된 치료 결과를 발표하면서 BNCT에 대한 관심이 다시 커지게 되어 1980년대 초반부터 세계학회도 개최되기 시작하였다[4]. 현재도 계속 효율적인 붕소화합물 개발과 적합한 중성자조사 조건을 찾기 위한 연구가 계속되고 있는데 현재는 열외중성자를 이용한 연구가 주류를 이루고 있다. 미국에서는 BMRR과 MITR을 이용해 연구를 수행하고 있고 일본, 유럽 등에서도 연구가 이루어지고 있다. 근래에 와서는 붕소 화합물 외에 열중성자흡수 단면적이 254,000 barn 이나 되는 Gd^{157} 등을 이용한 방법도 연구가 되고 있어 BNCT가 아닌 NCT의 개념으로 확장이 되어 가고 있다. 또한 병원 설치용으로 적합한 중성자원으로 MeV 급 양성자가속기를 이용한 중성자 생산방법에 대한 연구도 이루어지고 있다[5]. 국내에서는 1996년부터 BNCT 연구가 시작되어 현재 하나로를 이용한 연구가 진행중이나 하나로에서는 BNCT에 적합한 열외중성자를 얻을 수가 없어서 이의 해결책이 필요한 실정이다[4]

다. 필요한 중성자 조건

일반적으로 BNCT 1회 치료시 필요한 중성자 조사량은 10^{12} n/cm^2 정도인데 이는 $10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 의 중성자속으로 1시간 가량 조사하면 된다. 따라서 BNCT 용도로 중성자속은 $10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 이상이어야 하고 뇌종양에서 열중성자로 사용되려면 뇌뼈 등의 통과 과정에서 감속되는 것을 고려하여 중성자 에너지는 1 - 10 eV 정도의 열외중성자가 적합하다.

2. 이동식 중성자 라디오그래피

가. 원리

라디오그래피는 방사선을 이용한 비파괴검사로서 일반적으로 많이 사용되는 것은 X-선이나 감마선을 이용하는 경우이다. 경제적 측면에서 X-선 혹은 감마선 라디오그래피가 유리하나 검사물의 특성상 X-선이나 감마선 라디오그래피가 어려운 검사물 들 특히 방위산업 부품, 우주/항공 산업 부품 등 장약, 복합경금속 정밀부품의 결함검사 및 최근 문제가 되고 있는 플라스틱 폭탄류의 감지에는 중성자 라디오그래피가 필수적으로 요구된다. 중성자의 경우에는 X-선이나 감마선에 비해 투과력이 좋아서 두꺼운 중금속 안에 있는 내용물의 검사에 유리하고 수소핵과의 반응도가 좋아서 물이나 습기를 검사하는데 좋다. 또한 동위원소에 대한 반응이 X-선이나 감마선과 달리 차별화 되므로 그러한 내용물의 식별에도 유리하다. 현재 중성자 라디오그래피는 주로 원자로 중성자를 이용하고 영상을 필름에 담아 현상하는 방식인데 원자로 중성자를 이용하는 경우에는 검사대상 물체를 원자로가 있는 장소까지 옮겨야 하므로 중성자 라디오그래피 이용 활성화에 장애요인으로 작용해 왔다. 특히 중성자 라디오그래피의 주 적용분야인 항공기의 경우는 이동이 어려우므로 이동식의 장점을 살릴 수 있는 대상이다. 일반적으로 중성자 라디오그래피에 필요한 중성자는 중성자속 10^6 n/cm².sec 이상의 열중성자인데 이러한 중성자는 compact한 가속기를 이용해 충분히 생산이 가능하므로 이동식 중성자 라디오그래피 시스템 구성이 가능하다. 또한 중성자 라디오그래피 화상 기술에서도 현재 대부분 필름에 영상을 현상하는 방식으로 아날로그 방식이라 할 수 있는데 아날로그 방식은 필름의 현상과정에서 최상의 화질을 얻기 위한 세심한 주의가 필요하며 필름의 현상시간이 상당히 소요되고, 필름이 노후화 되는 등의 단점이 있어서 디지털 방식의 고감도 Digital Image Plate를 개발하고 있다. 이 방법을 이용하면 화상처리 시간이 수초 이내로 다량의 샘플에 대한 처리시 전체 처리시간이 줄어들고 얻어진 디지털 영상정보의 재처리, 저장, 전송등이 용이해져서 중성자속 10^5 n/

cm²/sec로도 image 형상 요건을 충족시킬 수 있다. Digital Image plate 및 real-time image processing system을 사용할 때 10 frames/sec 이상 (Micro-channel plate를 사용할 때 100 frames/sec 까지 가능)의 image를 computer에 입력 가능하여 검사물 내 입자의 동적 운동도 관찰이 가능하다.

나. 현황

국외에서는 원자로를 이용한 연구가 주로 이루어져 왔고 미국 Argonne National Lab.에서 양성자가속기를 이용한 이동식 래디오그라피의 개발 시도가 있었다. 영국에서는 Rolls-Royce and Associates와 Oxford Instruments의 공동연구로 양성자가속기를 이용한 이동식 시스템을 개발한 상태이다[6]. 또한 이동식 시스템의 기능을 강화시킬 수 있는 Digital Image Plate 시스템에 대한 연구도 일본의 Fuji사에서 연구가 수행된 상태이다. 국내에서는 한국원자력연구소에서 하나로를 이용한 중성자 래디로그라피에 대한 연구가 수행되어 현재 하나로 중성자 래디오그라피 장치를 이용한 기술수준은 ASTM (American Standard Test Measurement) 측정법에 의하여 카타고리(category) I ~ V 중 카타고리 I의 기술수준에 있다. 방위산업분야 기존수행실적은 다음과 같다.

- 1995년 8-9월 : 20MM HEIT-SD, KM246 예광제 충전상태 검사.
(풍산금속)
- 1996년 5-8월 : 현무용 화공품 꼭지관의 비파괴검사.
(주식회사 한화)
- 1997년 12월-1998년 2월: Jet Engine 터빈브레이드 (Turbine blade)
내부결함검사 시도. (삼성항공)

원자력병원에서도 50 MeV 싸이클로트론과 Be 표적으로 생산된 중성자를 이용한 래디오그라피 연구를 수행해 왔다.

3. 이동식 중성자 방사화분석

가. 원리

중성자가 물질과 반응시 나타나는 현상중의 하나가 감마선의 방출인데 이는 중성자흡수나 비탄성충돌에 의해 반응 물질 핵으로부터 나오는 것으로서 물질별로 방출되는 감마선의 에너지가 다른 특성을 가지고 있다. 이러한 특성을 이용해 방출되는 감마선의 에너지를 측정함으로써 검사대상 물질의 구성성분을 알아내는 것이 중성자 방사화분석이다. 필요로 하는 중성자의 선속이나 에너지는 분석대상 물질의 종류나 background 등에 따라 다른데 중성자 선속은 클수록 조사시간이 단축되고 미량원소를 검출할 수 있어 유리하다. 중성자 에너지는 일반적으로 흡수반응이 잘 일어나는 열중성자를 많이 이용하는데 상황에 따라 열외중성자나 MeV 급 중성자를 이용할 수도 있다. 중성자 방사화 분석을 적용할 수 있는 예 3 가지에 대해 알아본다.

(1) 토양, 물, 공기중의 미량원소 분석

환경오염에 대한 관심이 높아지면서 대기분진의 위험물질 등을 분석하는데 이용될 수 있는데 중성자 방사화 분석법은 여러 종류의 미량원소를 동시에 분석할 수 있다.

(2) 화학무기 검사

화학무기는 화학물질이 용기 안에 있으므로 화학물질을 직접 분석하려면 용기를 파괴해야 하는 불편함이 있고 또한 그러한 방식의 검사는 검사자에게 위험을 초래할 수 있다. 이러한 경우에 중성자를 투과시켜 내부의 화학물질과 반응해 나오는 감마선을 측정하므로써 비파괴 검사가 가능한 장점이 있다.

3) 지뢰 및 폭발물 탐지

지뢰나 폭발물에는 다량의 질소가 함유되어 있는데 질소는 열중성자와

반응하여 (n, γ) 에 의해 10.8 MeV의 감마선을 방출한다. 이러한 원리를 이용하여 중성자를 지뢰나 폭발물 수색지역에 조사하고 방출되는 감마선의 에너지를 측정하면 지뢰 및 폭발물의 유무 여부를 판단할 수 있다.

위에서 3가지 중성자 방사화 분석 적용 예를 들었는데 적용 대상에 따라 요구되는 중성자 특성이 다르다. 중성자 선속이 많이 필요한 경우에는 원자로를 이용해야 하므로 시료를 원자로로 가져가야 하고 따라서 현장에서의 검사가 불가능하다. 중성자 선속이 어느 정도 이하로 요구 될 때는 가속기 중성자를 이용할 수 있으므로 현장에서의 검사가 가능해서 실시간 분석이 가능하다. 상대적으로 미약한 중성자 선속으로도 검사가 가능하면 Cf-252 등의 동위원소를 사용한다. 따라서 이동식 가속기 중성자원은 Cf-252와 원자로 중성자가 낼 수 있는 중성자 선속들의 중간 정도의 중성자가 요구되는 검사로 현장에서의 실시간 검사를 할 때 이용될 수 있다.

나. 현황

국내외에서 중성자 방사화 분석은 원자료를 이용해 주로 수행해 왔으며 국내에서는 하나로를 이용한 대기중의 분진성분 분석 등의 연구가 수행되고 있다[7]. 이동식의 경우에는 미국에서 D-T 반응을 통해 생성된 중성자를 이용해 지뢰를 탐지하는 방식이 제안된 적이 있고[8] Cf-252를 이용한 화학무기 검사 시스템이 상용화되어 있다.

제 3 절 표적시스템

1절에서 MeV 양성자를 이용해 중성자를 생산할 수 있는 방법에 대해 알아보았고 2절에서 그러한 중성자를 이용할 수 있는 3 가지 분야에 대해 알아보았다. 본 절에서는 언급한 3 가지 이용분야에 모두 활용될 수 있도록 중성자를 낼 수 있는 표적시스템에 대해 알아본다. 각각의 이용분야에 대한 가장 적합한 시스템은 차이가 있으므로 3 가지 다른 표적시스템과 그에 맞는 가속기 제원을 설정해야 하지만 1차적인 목적은 3가지 용도에 다 이용할 수 있는 시스템을 설계하는 것으로 설정한다. 3 가지 이용분야 중에서 가장 많은 중성자를 요구하는 분야는 BNCT이므로 가속기 전류는 BNCT에 맞추어 설정한다. 3 가지 이용분야는 열중성자나 열외중성자를 이용하므로 Li 표적이 가장 적합하다. 표 5.1과 5.3으로부터 BNCT용으로는 2-3 MeV, 10 mA 정도는 필요함을 알 수 있는데 계획중인 대용량 양성자가속기가 3 MeV, 20 mA 이므로 표적시스템을 여기에 맞추어 설계한다. 그림 5.5에 개략적인 시스템을 나타내었는데 반사체는 Al_2O_3 , Li_2CO_3 등을 고려할 수 있고 감속재로는 H_2O , D_2O , BeO , $Al/AlF_3/LiF$ 등을 고려할 수 있다. 열중성자나 열외중성자를 선택적으로 만들기 위해 감속재의 크기를 조절할 수 있는 시스템이 필요하다. 표적은 알루미늄 등의 backing에 Li 막을 씌우는 형태가 되는데 60 kW의 열이 발생하므로 물로 냉각하고 단위 면적당 열발생량을 감소시키기 위해 표적을 tilting시킨다. 향후 MCNP Code를 사용해 자세한 계산을 수행할 예정이다.

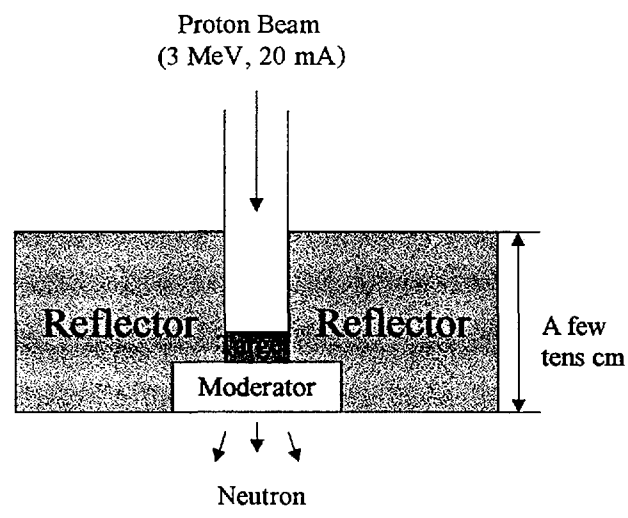


그림 5.5 표적시스템 개략도

참고문헌

- [1] S. Cierjacks, "Neutron Sources for Basic Physics and Applications", Pergamon Press, 1983
- [2] R. J. Kudchadker et al., "An Accelerator Based Epithermal Neutron Source for BNCT", 6th ICONE, 1998
- [3] D. N. Slatkin, "A History of BNCT of Brain Tumors", Brain 114, 1609-1629, 1991
- [4] 전병진, "중성자 포획 암 치료", KAERI/AR-517/98, 1998
- [5] C. K. Wang et al., "Neutronic Study of an Accelerator Based Neutron Irradiation Facility for BNCT", Nuclear Technology, 84, 93, 1989
- [6] A Venture to Commercialise Neutron Radiography, Oxford Instruments & Rolls-Royce and Associates, 1997
- [7] 정용삼 외 14인, "방사화분석 이용연구", KAERI/RR-1745/96, 1996
- [8] H. S. Uhm, "Shallow-Water Mine Detection", Naval Surface Warfare Center, 1992

제 6 장 입사기 빔(50keV) 산업적 이용기술 개발

1. 입사기 빔 이용 플라스틱 표면개질 실험

가. 실험 목적

폴리머는 공유결합 절연체로서 이온조사에 매우 민감하며, 이온조사에 의해 분자구조의 비가역변환을 유도할 수 있어 박막의 물리적 화학적 특성을 제어, 변환할 수 있다. 이온빔과 폴리머간의 주요 반응은 사슬절단, 응집, 이중결합형성, 분자방출 등으로 폴리머의 조성, 분자량, 온도와 이온빔의 에너지, 질량, 선량, 선량율에 의해 광학적, 전기적, 기계적, 화학적 변화가 나타난다 [1,2]. 폴리머의 이온주입을 통해 얻을 수 있는 특성중 전기적 특성을 변화시켜 전도성을 얻고자하는 노력이 계속되어 왔으며 [3,4], 화학적으로 도핑된 전도성 폴리머의 경우 금속에 버금가는 전도성과 플라스틱의 장점을 갖춘 획기적인 물질로 각광을 받았으나 불용성의 문제와 공기 또는 습기에 대한 불안정의 문제로 인해 산업적인 활용성이 제한되어 왔다. 이에 비해 이온주입을 통해 얻어지는 전기적 특성은 안정적이며, EMI 및 RF차폐, 정전기 방지제, 배터리 전극 등 다양한 활용이 예상된다 [5]. 이에 따라 대용량 양성자 가속기 개발의 앞단인 입사기의 빔 인출 특성을 반도체소자 Package용 플라스틱 Tray표면저항 품질 검사 규격인 $10^5 - 10^{11} \Omega/\square$ 이되는 실제 현장 제품 규격에 적합한 기술을 개발하고자한다.

나. 입사기 장치

그림 6.1은 대용량 양성자 가속기의 앞단인 입사기로서 빔 에너지 (50keV), 빔전류는 수소(50mA), 질소(10mA), 빔 에미턴스($0.2\pi\text{mm mrad(rms, Nor.)}$), 빔 사이즈(8mm)의 특성을 가지고 있으며, 그림 6.2는 본 실험에 적용한 질소 이온 빔 인출 특성이다.

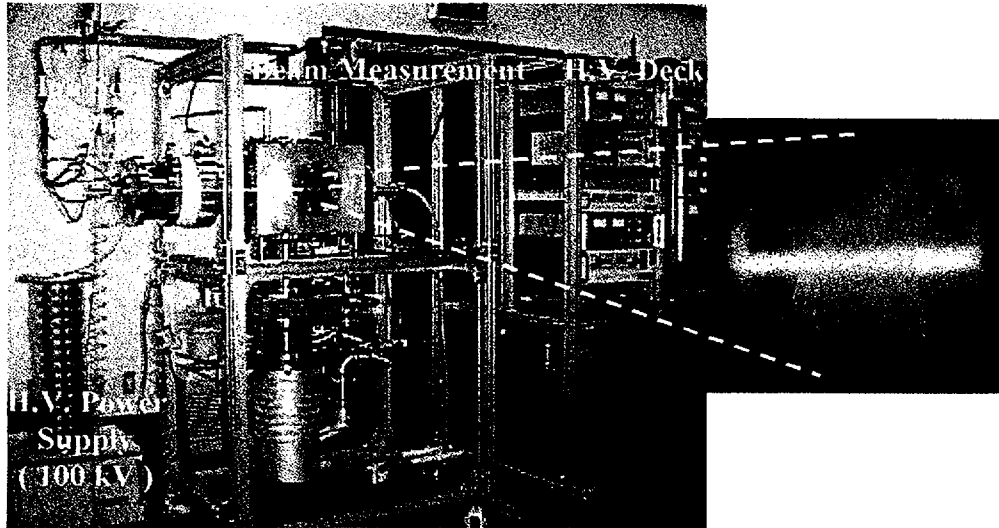


그림 6.1 입사기 장치와 인출 빔 Profile

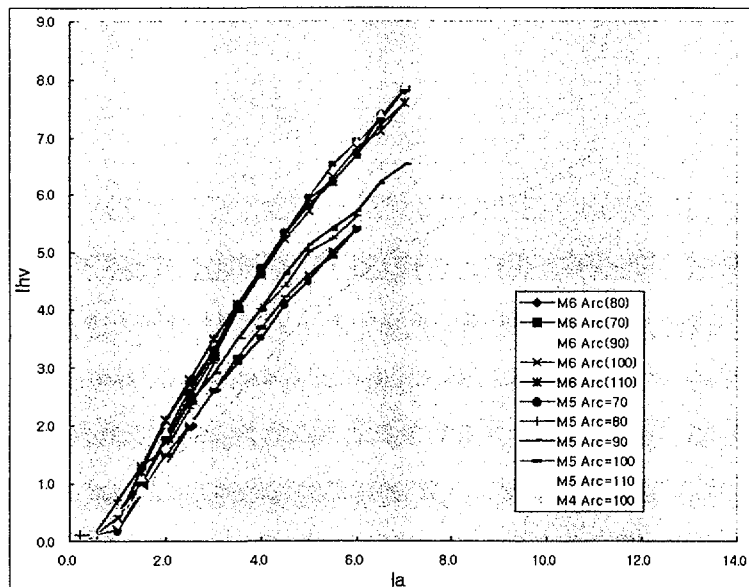


그림 6.2 질소 이온 빔 인출특성

다. IC Tray 재료특성(MPPPO)

- PPO보다 가공이 용이, 사용온도($-40^{\circ}\text{C} \sim 130^{\circ}\text{C}$)가 넓고, 강인한재료
- 수성 환경에 현저한 내성, 내세재성, 충격 강도나 내열성
- 열가소성 엔지니어링 플라스틱, 내산, 내알칼리성 방향족, 염화 탄화수소 용매에 침식, 자기소화성, 24시간 0.07% 흡수성
- 자외선성 빈약, 마스터 배치나 드라이 칼라등을 이용하면 물성이 현저히 감소하거나 박리 현상이 일고, 자가 착색은 보통 하지 않음. 흑색 도는 회색은 내자외선성을 갖음. 보통 컴파운딩으로 불투명색으로 사용
- GE사가 NORYL 상품명으로 세계시장 석권. 일본 아사이 화학이 이를 피해 PPE(XYRON)로 1980년 생산. 국내는 전량 수입.

라. 질소이온 주입실험

- 재료 : MPPPO(Modified-Polyphenylene Oxide)
- 에너지 : 50keV
- 전류 : $40 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
- 선량 : $5.0 \times 10^{15} \sim 10^{17} \text{ ions}/\text{cm}^2$

마. 실험결과 및 결론

대용량 양성자 가속기 개발의 앞단인 입사기를 개발 완료하여 이 입사기의 빔 인출 특성을 이용, 현재 반도체 주변산업의 하나인 반도체 Tray 재질인 MPPPO(Modified-Polyphenylene oxide)의 전도도를 향상시켜 반도체 Tray 표면저항을 품질검사 규격인 $10^5 - 10^{11} \Omega/\square$ 값 이내의 $10^6 - 10^9 \Omega/\square$ 을 얻어 반도체소자를 Packing하여 수출할 때 문제가 되고 있는 정전기에 의한 소자의 절연파괴 문제를 해결하여 대전방지용 Tray의 표면처리 기술을 개발하였다.

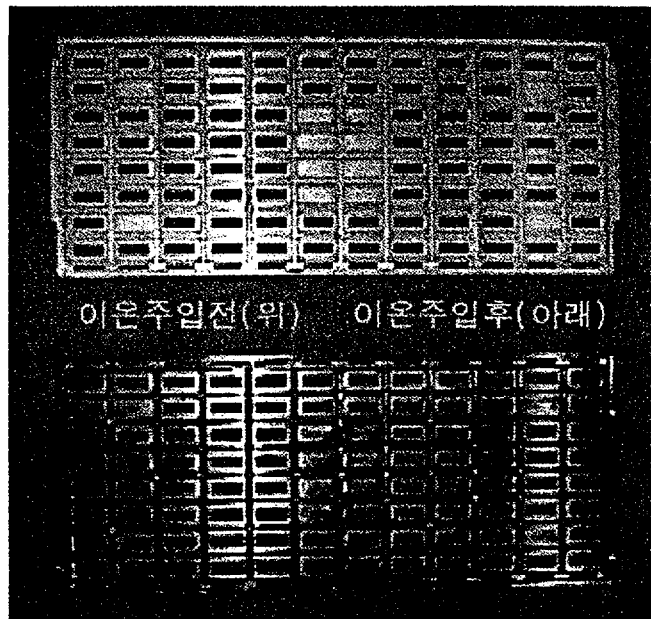


그림 6.3 반도체 Tray에 질소 이온을 주입한 전후 사진

참고문헌

- [1] L. Calcagno, G. Compagnini and G. Foti, Nucl. Instr. & Meth. B65(1992)413.
- [2] L. Calcagno, Nucl. Instr. & Meth. B105(1995)63.
- [3] E. H. Lee, Y. Lee, W. C. Oliver and L. K. Mansur, J. Mater. Res., 8(1993)377
- [4] J. Davenas, X. L. Xu, G. Boiteux and D. Sage, Nucl. Instr. & Meth., B74(1993)326.
- [5] L. B. Bridwell and Y. Q. Wang, SPIE, 1519(1991)878

제 7 장 가속기 사용자 프로그램 개발

제1절 서 론

가속기는 기초연구, 의료용, 군사용 및 산업용으로 사용되고 있는 첨단 기술 종합체로써 대형 전자석 설계 건설, 초정밀 가공기술, 초고전압 기술, 고진공 기술, 고주파 기술, 초전도 기술, 극저온 기술, Computer Control 등 가속기 기술 보유시 학술 연구뿐만 아니라, 군사적, 의료적, 산업적 응용 등 그 파급효과가 대단히 크다. 한국원자력연구소 및 각 학계를 중심으로 우리 나라에 건설하게 될 대용량의 다목적 양성자 가속기(KOMAC: KOrea Multipurpose Accelerator Complex)는 과학계, 산업계, 아울러 모든 국민에게 자긍심을 줄뿐만 아니라 이에 따른 산업적 파급효과로 어려움에 빠져있는 현 상황에 희망을 주는 미래지향적 Project이다. KOMAC은 최종 목표 1 GeV, 20 mA (20 MW)인 고밀도의 중성자 속(flux)을 얻어 현재 핵폐기물화하고 있는 U-238과 지표에 널려있는 Th-232을 핵연료화하며, 또한 방사능 반감기를 1세기 이하로 줄여 환경 친화적이며 새로운 청정에너지 개발로 국민 복지 향상을 도모하는 것을 주목적으로 한다. 이외에도 KOMAC은 가속기가 단계별로 건설되는 것을 고려하여 각 단계별로 부속 가속기가 완성되었을 때, 그 에너지의 Beam을 이용하도록 설계하여 이용 분야를 다양화하고 효율이 극대화하도록 계획되었다. 또한, 가속기가 완성된 후에도 1 GeV 및 그보다 낮은 에너지에서 미임계로 이외의 핵 파쇄 중성자원으로서의 활용 및 산업적 이용을 목적으로 Beam을 인출할 수 있도록 되어 있는 것이 현재 다른 대형 양성자 가속기 프로젝트와 구분되는 특징이다. 가속기 건설에 투입되는 비용과 인력, 시간 등을 고려하여 볼 때, KOMAC의 효율적 이용은 건설 못지 않게 매우 중요하다. KOMAC의 효율적인 가동을 위하여 추진 초기부터 철저한 사용자 시장조사 및 계획으로 Beam 이용/응용 수요에 대한 각 계 각 층의 의견을 조사·수렴하여 가속기 설계 및 이용시설에 적극 반영하여 그

이용 효율을 극대화하는 데에 초점을 맞추어야 할 필요가 있다. 본 과제는 이용자들이 제공하는 정보를 KOMAC에 맞도록 분석·재편하여 이용 분야별 중요도 분배인자(Weighting Factor)를 결정함과 동시에 KOMAC 이용 목적 및 국익에 부합되도록 추진하는데 그 목적이 있다. 본 보고서의 제 2절은 미래 선도분야를, 3절에서는 KOMAC의 사용자 프로그램 개발 연구방향과 이의 추진방법을, 제 4절에서는 국내·외 가속기 사용자 현황에 대하여 현재 추진 중이거나 이미 시행되고 있는 KOMAC과 동급인 가속기 현황과 더불어 국내·외의 방사광 가속기 이용자 프로그램에 대하여 소개한다. 제 5절에서는 KOMAC의 이용/응용 분야에 대한 소개 및 4차에 걸쳐 시행한 KOMAC 이용/응용 수요조사의 내용 및 결과를, 제 6절·7절에서는 결론·기대효과를 기술한다.

제 2 절 미래선도 분야

21세기에서 KOMAC 에 의한 미래선도 분야의 전망은 단순한 희망이 아니라, 현재의 지식 수준에 바탕을 둔 실현 가능한 것으로서의 세계적 위상에 걸맞는 비전 (Vision)을 소개하는 것이다. KOMAC 이 생산하는 고에너지 양성자 빔은 다양한 용도로의 과학 기술 분야에 쓰이게 된다. 이를 블록화하면 그림7.1과 같다.

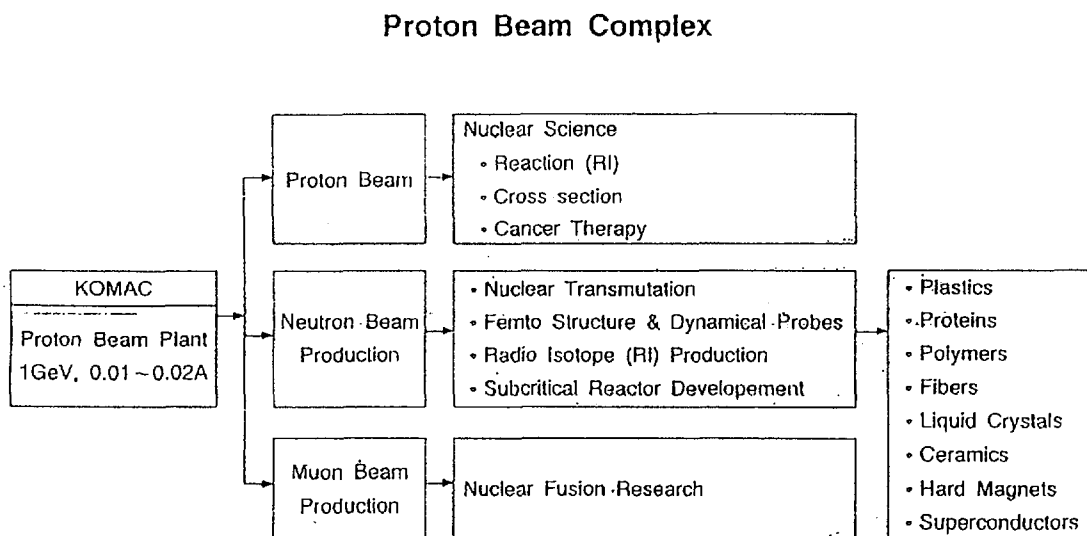
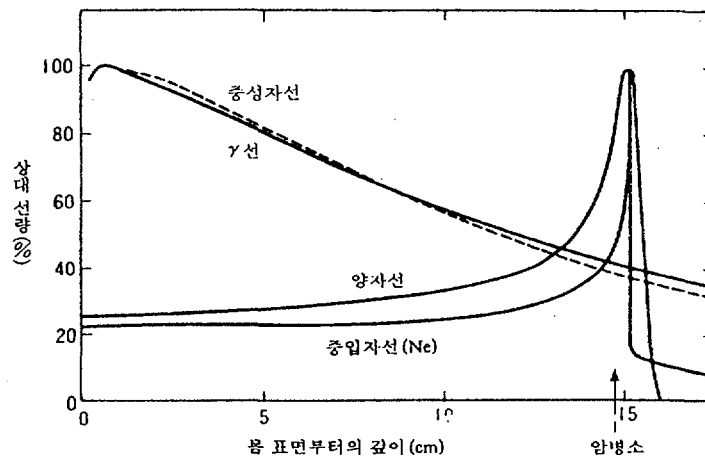


그림 7.1 KOMAC에 의하여 생산된 고에너지 - 고속(High Flux) 빔의 활용 분야

이 양성자빔은 고에너지·고속 (High flux) 빔이므로 그 자체를 이용하는 분야, 중성자를 발생시켜 이용하는 분야와 Meson 류의 입자들을 발생시켜 이용하는 분야로 대별할 수 있다.

1. 양성자빔 이용 분야

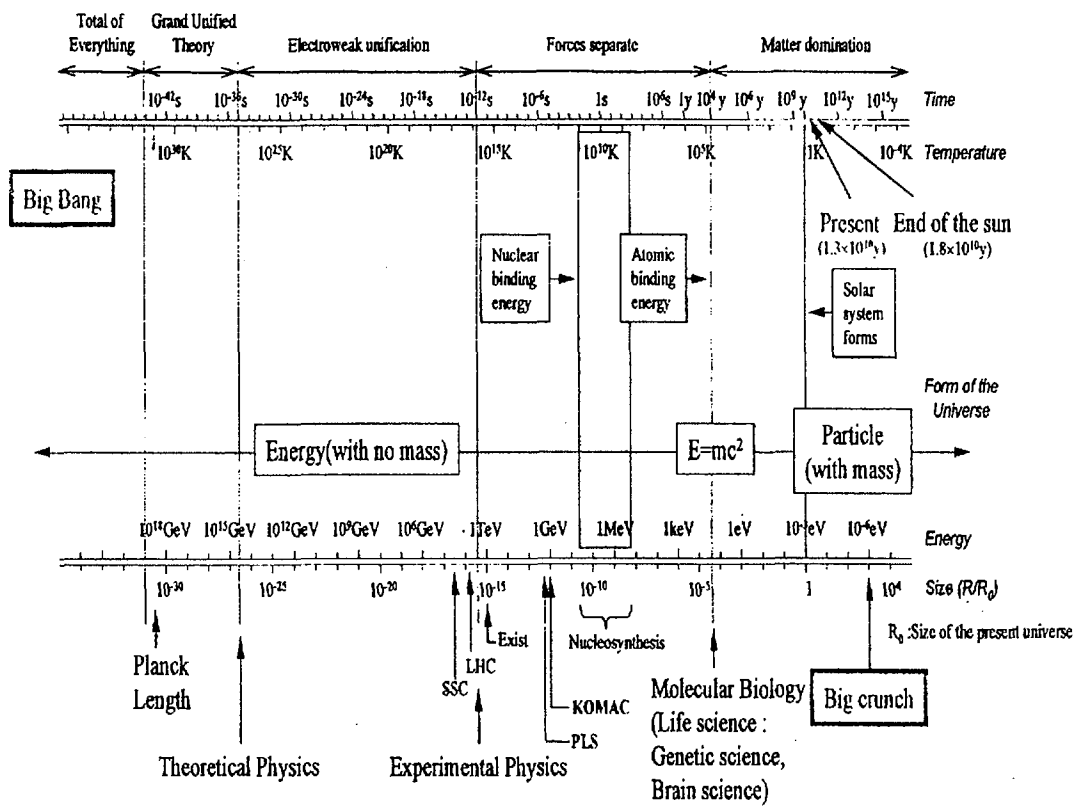
핵과학기술 (Nuclear Science & Technology)에서 이제까지 개척된 영역이나 앞으로 연구될 분야는 무한하다. 이제까지 밝혀진 소립자만 하더라도 200여종이나 되고 이 입자를 생산하는 것에 양성자빔을 쓴다. 각종 소립자는 전하량, 질량, 결합 방법, 다른 입자와의 충돌 단면적 등이 모두 다르기 때문에 이들 빔에 관한 연구 및 이용/응용 분야는 가히 무한하다고 할 수 있다. 양성자 가속기의 산업 이용은 초기단계이며 국제적으로 선도그룹에 속하려면 적극적으로 이 사업을 추진하고 홍보하여 많은 사용자에게 동기를 부여하고 산업 원천 기술을 확보하도록 해야 할 것이다. 고에너지 양성자빔은 각종 소립자를 생산할 뿐만 아니라 유용한 동위원소를 생산하여 산업 · 의료분야 · 학술연구 등에 이용한다. 특히 양성자와 물질과 상호작용시 에너지에 따른 특이한 선량분포의 변화 (그림7.2)는 의학분야에서의 종양치료와 신소재 분야에 많은 활용성을 내포하고 있어서 다양한 이용이 기대된다.



※ 중입자선의 Bragg peak는 양성자선보다 예리하나, 물질과의 상호작용의 영향이 피크 뒤편에 남아있다 (fragmentation).

그림7.2 방사선 치료에 쓰이는 방사선의 선량분포분야

학술분야로서는 소립자분야와 관련한 천체물리학분야 (그림7.3) 와 방위산업분야의 입자빔 무기체제로의 전환에 따른 우주에서의 위험물 제거 즉, 우주환경의 정화를 위한 도구로, 또 큰 유성의 파괴 등에 적용될 수 있다. 이에 관한 개념도를 그림7.4에 보인다. 전자파 기술력은 우주에서의 무선조정을 정확하게 하여 이용의 자립도를 넓히게 한다.



Leading Edge in Science at Present Day

그림 7.3

Missile Killer

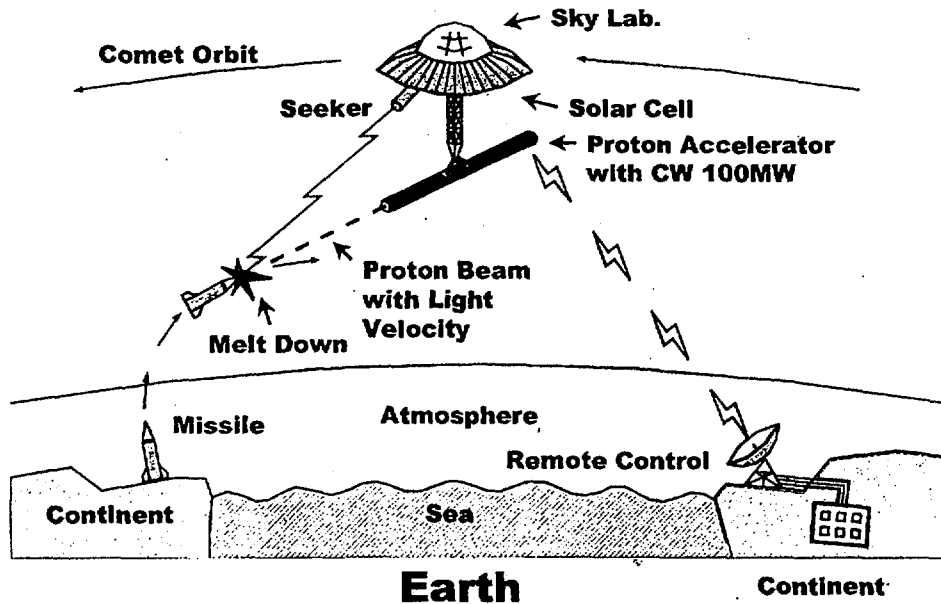


그림 7.4 대출력 양성자 가속기에 의한 성층권에서의 Missile 파괴 개념도, 양성자 빔 출력은 최대 1.7 MW 연속이다.

2. 중성자빔 이용/응용 전망

BC 400년 희랍시대 이후 인간의 욕망은 임의 원소를 변화시켜 금을 얻는 기술을 개발하여 왔으며 수많은 화학자들이 연구개발을 추진하여 왔다. 이 분야를 연금술 (Alchemy) 이라고 부른다. 그러나 이 꿈은 많은 화학반응에 관한 지식은 축적했음지언정 연금술을 체계화하여 목적을 이루지는 못 하였다. 1930년대 중반에 이르러 중성자가 발견되고 부터 연금술이 가능하게 된 것이다. 이와 같이 중성자는 오랜 인류의 숙원을 풀어준 소립자 중의 하나일 뿐만 아니라 그 특성상 여러 분야에 유용하게 쓰이고 있고 또 쓰일 전망이다. 먼저 중성자빔을 얻는 문제, 에너지별 분류, 중성자의 특성과 그 이용 전망 분야를 차례로 소개하고자 한다.

중성자빔 속 (flux) 이 $10E6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 이하인 경우는 Cf-252 나 혹은 Am/Be 의 sandwich Panel source로부터 얻는 것이 값싸고 쉽다. 그러나 $10E14$ 범위의 것은 핵분열형 원자로로부터 얻는다.

大強度核破砕中性子源用ターゲット開発

原研と米工ネ省が共同実験

[illegible]

「中性科学設計計画」を進めているが、従来のターゲツトに比べて開きが非常に大きいなか、開発に当たっては熱心な調整が困難な技術問題がある。その点、BNNのAQSSは、四角錐は熱調整を施さなくても、円錐は唯一の施設であり、共同で実験を行うことができれば、ターゲツトに関する設計・製作に必要な情報が取得できる。設計では、与行わなければならない中性子源の水素ターゲツトの構造設計データの取得に期待している。

中性のエネルギーを活性化し、このエネルギーが衝突する。このとき、中性のエネルギーを活性化させることによって、核分裂を起させエネルギーを取り出し、再び核種の分裂を促進した上り、あるいはエネルギーを下り、あるいは跳ね返されたり、折れ、散乱、この折れで、分子、生物物質を断断レベルで壊れることができて、この用途、周知知らないと言われている。

二つしたことを実施するたため、中性子は現有的なものより一桁程度の大きさ、ものが必用であるため、陽子では、それが、それと知は、専任技術者採用したた、陽子加速器を開発し、生成し

今回のDOEでの協力取決、
トーマスは照研本部で
DOEとEメール、I・
研究部長代理として、学文展
研事を行った。

- 114 -

이보다 더 높은 중성자 속은 양성자 가속기에 의하여 발생시킬 수 있으며 이 분야의 선도 역할을 해온 것이 미국 Los Alamos National Lab. (LANL) 의 LAMPF 와 영국의 Rutherford Appleton Lab. 의 ISIS 이며, 이를 기반으로 미국의 LANL 이 Accelerator Production of Tritium (APT)을 설계하고 개발에 대한 연구를 하고 있다. 따라서 문제는 값싸게 고속의 중성자를 얻는 것이며 이에 관한 결론으로서 양성자빔 에너지가 1~1.7 GeV 이고 가급적 양성자빔의 전류를 크게 하는 것이다. 현재 가속기로서는 기존의 상전도 가속 방식 외에 초전도 가속기가 개발되고 있고, 일본 원자력연구소와 미국 Brookhaven 국립 연구소의 협력으로 수은 표적에 관한 중성자 발생 실험 연구가 진행되고 있다 (소식 7.1 참고). 또한 가속기를 쓴 중성자 발생으로 상업용 핵융합로의 Plasma Facing Material을 개발하기 위한 고속중성자 장치의 건설 제안이 선진국들 사이에 논의되고 있어서 고속중성자원에 대한 필요성은 증가하고 있다. 이에 관한 개념도가 그림 7.5 에 소개되고 있다.

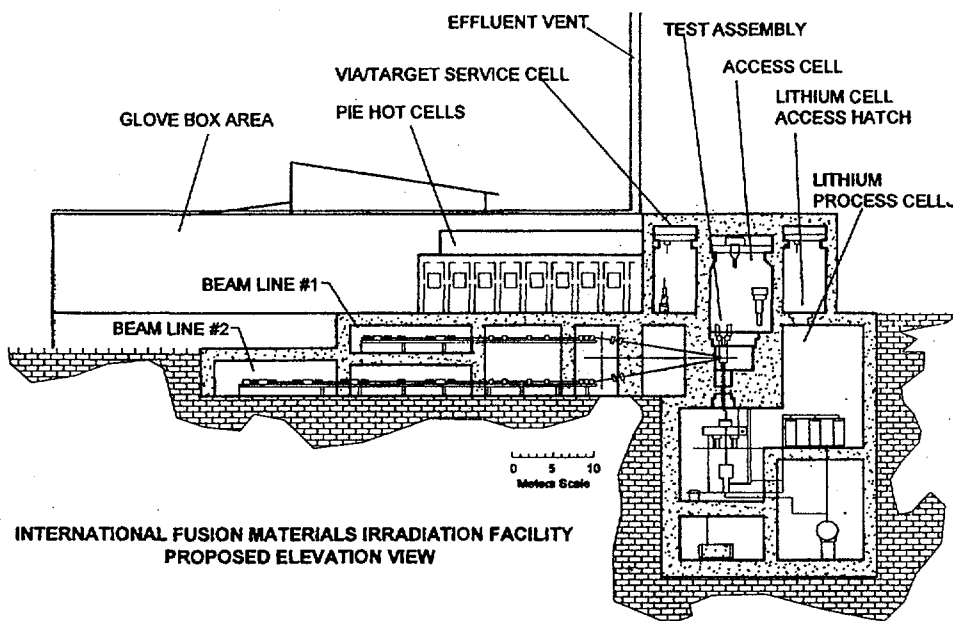
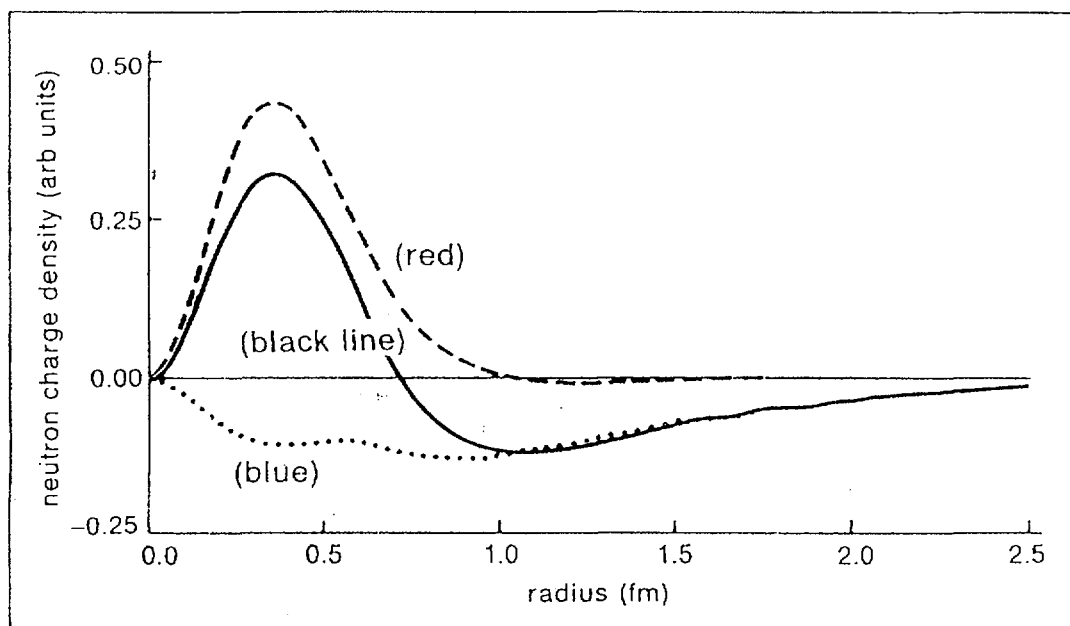


그림 7.5 International Fusion Materials Irradiation Facility

나. 중성자빔의 특성

자유공간에 있는 중성자는 12분의 반감기를 가지며 또 관측거리가 3 Femtometer (Fm) 이상에서는 전기적으로 중성입자로 나타내어지나 3~sub Fm 에서는 음전하 입자로 되고 그 이하에서는 양 전하로 나타난다. 이러한 다양성은 중성자의 에너지별 산란 단면적이 복잡하게 나타남을 말해준다 (그림 7.6) 전기적으로 중성인 영역에서는 다른 입자와의 상호작용이 적기 때문에 재료에는 침투 길이가 X-선에 비하여 길고 (그림 7.7) 가까이 까지 접근하며 (그림 7.8), 산란길이가 원소마다 달라 성분 분석에 유효한 특징을 갖는다.



Calculations indicate that the neutron has a positive core and a negative outer region (black line). The different contributions of the valence quarks (red) and sea quarks (blue) are shown. From A Z Görksi et al. 1994 *Phys. Lett.* **B278** 24 *Physics World* February 1996

그림 7.6

NEUTRON, ELECTRON, AND X-RAY PENETRATION DEPTHS

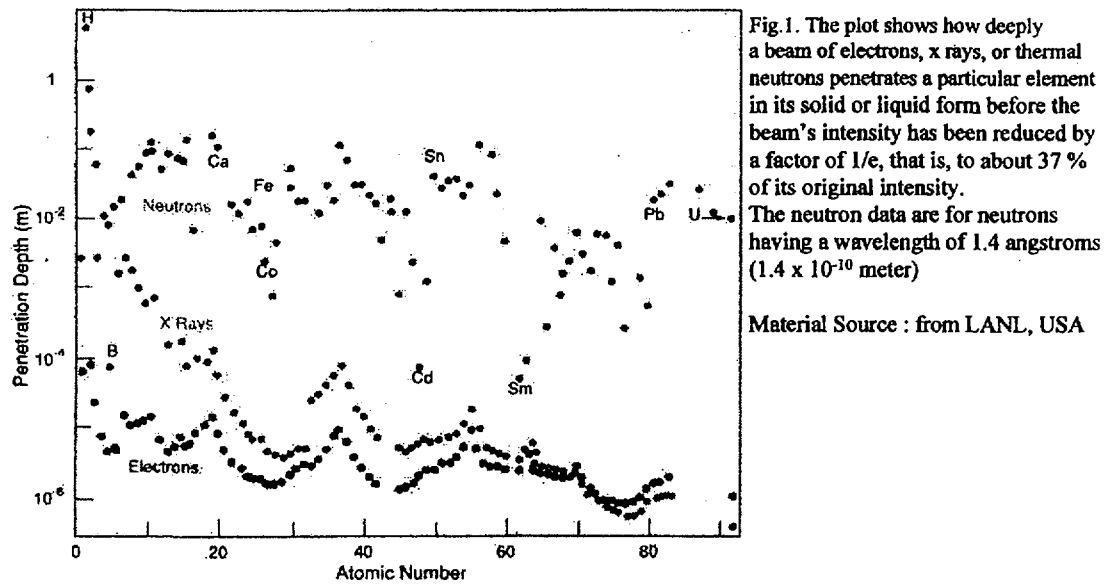


그림 7.7 : Neutron, Electron, and X-ray Penetration Depths

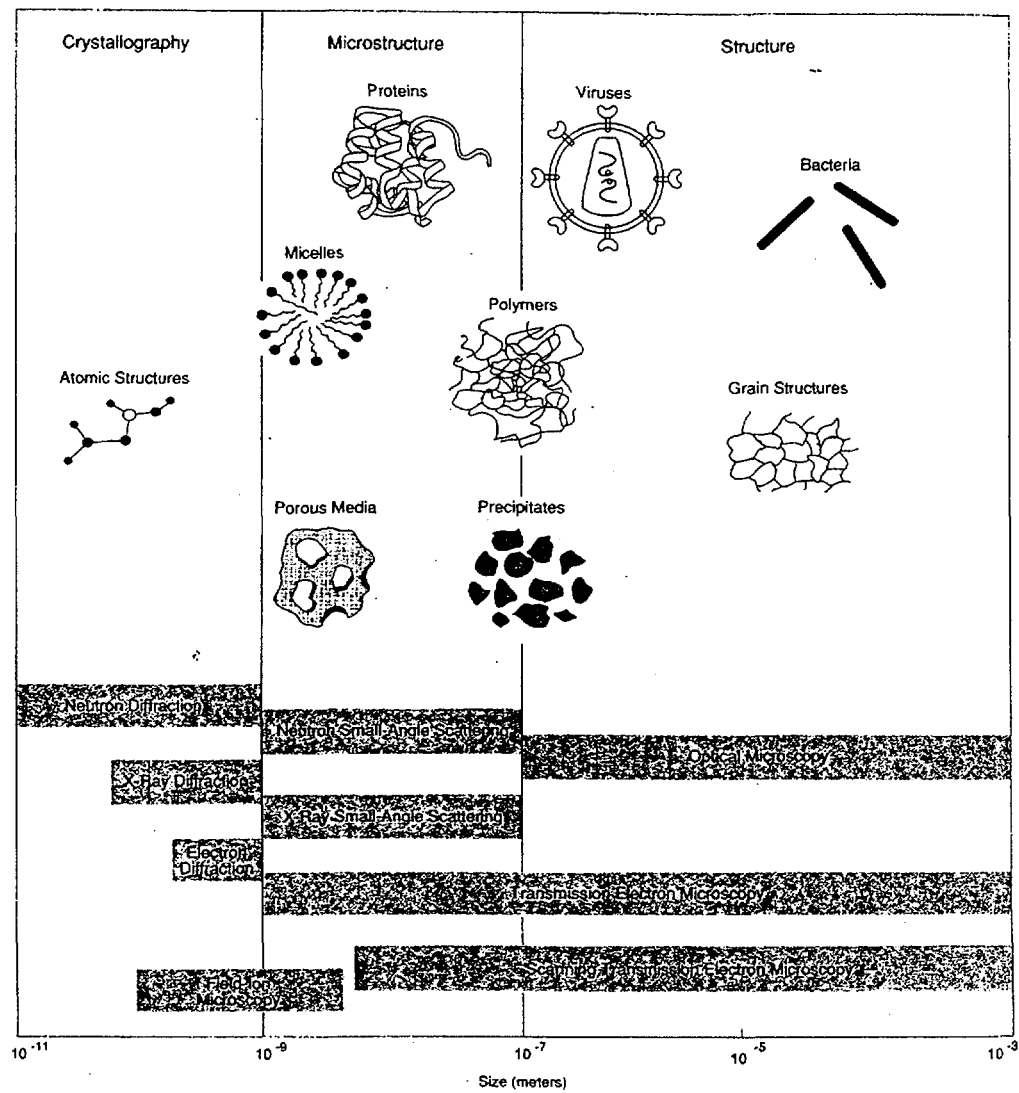


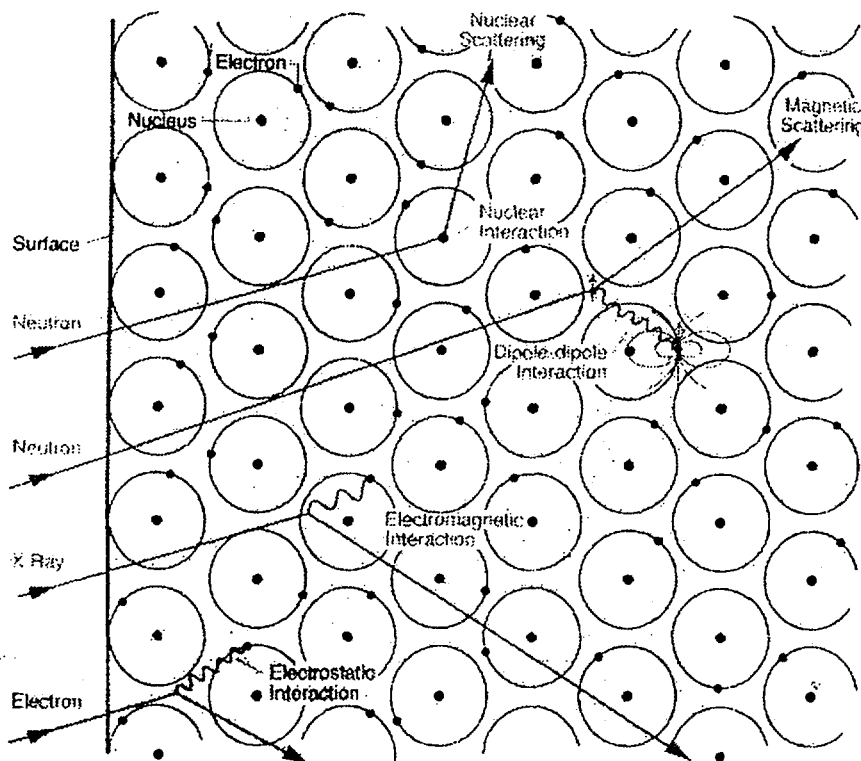
그림 7.8 Neutron Scattering - A Primer

Neutron Diffractometer는 $10E-11 \sim 10E-9$ m영역에서 분석이 가능하다.

이외에도 Duality, Electric Dipole Moment 와 Magnetic Dipole Moment를 가지며 (그림 7.9) 붕괴시에는

$n \rightarrow p + e + \nu$ (n : 중성자, p : 양성자, e : 음전자, ν : 중성미자)로 된다.

SCATTERING INTERACTIONS



Beams of neutrons, x rays, and electrons interact with material by different mechanisms. X rays (blue) and electron beams (green) both interact with electrons in the materials; with x rays the interaction is electromagnetic, whereas with an electron beam it is electrostatic. Both of these interactions are strong, and neither type of beam penetrates matter very deeply. Neutrons (red) interact with atomic nuclei via the very short-range strong nuclear force and thus penetrate matter much more deeply than x rays or electrons. If there are unpaired electron in the material, neutrons may also interact by a second mechanism: a dipole-dipole interaction between the magnetic moment of the neutron and the magnetic moment of the unpaired electron.

Material Source : from LANL, USA

그림 7.9 Scattering Interactions

고에너지 중성자는 표적으로 입사하는 양성자 에너지에 비례하여 커지므로 연속 스펙트럼의 중성자를 얻을 수 있다. 따라서 연속적으로 변화시킬 수 있는 de Broglie 파장을 가질 수 있고 이것은 동적 (Dynamic) 미시 세계를 관찰할 수 있게 한다

3. 활용분야

가. 중성자 빔의 활용 분야

중성자를 에너지 대역별로 분류하면 표 7.1 과 같다. 이 빔은 분열형 원자로, 핵변환과 이에 따른 동위 원소 생산, 물질의 구조와 성분 탐침 (probe), 그리고 동적 상태 조사 탐침 등의 획기적 역할을 기대할 수 있다. 이들에 관한 활동 분야를 세분하면 다음과 같다.

◆ Classification of Neutron Energy, E_n

Classified Neutron	Energy Range
Fast Neutron	$E_n > 1 \text{ MeV}$
Intermediate Neutron	$1 \text{ MeV} \geq E_n > 1 \text{ eV}$
Slow Neutron	$E_n < 1 \text{ eV}$

◆ Classification of Slow Neutron

	Classified Neutron	Energy Range
Slow Neutron	Epithermal	$1\text{eV} \geq E_n > 0.025 \text{ eV}$
	Thermal	$E_n \approx 0.025 \text{ eV}$ $2.2 \text{ km/s}, \lambda_r = 1.8 \text{ \AA}$
	Cold	$0.025 \text{ eV} \geq E_n \geq 5 \times 10^{-5} \text{ eV}$
	Very Cold	$5 \times 10^{-5} \text{ eV} > E_n > 2 \times 10^{-7} \text{ eV}$
	Ultra Cold	$E_n < 2 \times 10^{-7} \text{ eV}$

◆ Resonance Region of Neutron

$$100 \text{ eV} > E_n > 1 \text{ eV}$$

표 7.1 중성자의 에너지별 분류정의

나. 핵변환 분야 (Nuclear Transmutation Field)

현존하는 원자로는 수명이 긴 (약 100만년) Actinide 계열의 원소를 포함하는 핵폐기물을 생산하고 있다. 더욱이 고준위 핵폐기물의 저장소 건설에 대한 반대 여론과 시위는 원자력발전소의 건설을 어렵게 하고 있다. 따라서 이를 재활용하여 연료 자원화 할 필요가 있다. 지난 30년간 미국의 드리마일아일랜드와 러시아의 체르노빌에서 대형사고를 일으켰고, 대중의 뇌리에는 지극히 위험한 에너지원으로 기억되고 있어 보다 안전한 원자로 발전 방식이 요구되고 있다. 그러므로 IAEA 가 의견 조율을 하고 있는 Accelerator Driven System을 연구개발 할 필요가 있다. 현존하는 원자로는 U-235 만을 연료로 하고 있어 광물로부터 연료화 하는데 많은 비용이 들뿐만 아니라 자원 자체가 21세기초부터 고갈 국면으로 들어갈 것이 예측되고 있고, 호주의 원주민들은 우라늄 광물 채광 자체를 반대하고 있다. 이와 같은 측면에서 볼 때 보다 합리적인 원자력 발전 방식이 요구되며 고준위 핵폐기물까지도 연료화 할 수 있고, Thorium 자체까지도 핵연료로 쓸 수 있는 핵변환기술이 확립되어야 할 것이다. 더욱이 화석연료는 CO₂ 발생에 의한 환경 파괴를 일으키고 있고, 핵융합 에너지가 등장하기 전까지는 핵변환에 의한 광물 자원에 의존할 수밖에 없을 것이다. (그림 7.10)

(지구에너지 자원 활용로의 교정)

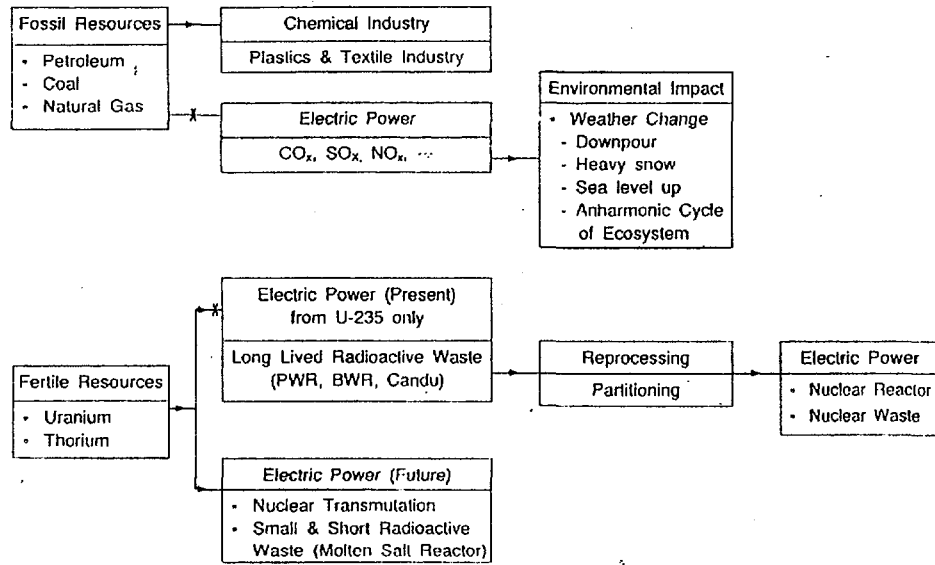


그림 7.10

다. 동위원소 생산 분야

21세기초부터는 살균·살충 분야에서 화공약품에 의한 처리가 국제적으로 규제되며 방사선 특히 γ 선에 의한 처리 방법이 주류를 이루게 된다 (Montreal Agreement). 이에 따라 농·축산물, 임산물 등의 수출입시에 다량으로 쓰일 γ 선원의 수요가 일어날 것이 예상되며, 이에 대한 대비책을 세워야 한다. 현재는 주로 캐나다와 미국이 공급하고 있고, 최근에는 러시아가 서방세계의 물량을 일부 공급하고 있다. 따라서 아시아 지역의 동위원소 시장은 밝은 전망을 보이고 있으며, γ 선원의 해상 수송, 공중 수송 및 육로 수송 중 어느 것도 용이치 않다는 관점에서 볼 때 한국이 이 분야에 진출하면 시기 적절하다고 볼 수 있다. 동위원소의 수요는 의학 분야에서도 I-123, Bi-232, Cf-252 등등 수백 종을 열거할 수 있고, 고부가성 산업이므로 육성되어야 하며 이에 필요한 학·기술의 연구·개발이 필요하다.

라. 중성자 산란 분야

이제까지 일반적으로 사용하는 중성자 회절은 생략하고 극초냉중성자 (Ultra Cold Neutron)를 사용한 Small Angle Neutron Scattering (SANS) 분야를 소개하면 Genomics 분야에서 DNA의 구조는 방사광원이나 X-선으로 알 수 있고 구조를 형성하고 있는 원소의 종류 판별은 방사광으로는 불가능하며 Scattering length가 원소마다 크게 차이를 이루는 Neutron 분석이 월등하다. 따라서 유전 정보를 명확하게 아는 것으로부터 생명과학기술의 발전에 혁신적인 기여를 할 수 있다. 또한 중성자의 구조에 따른 성분 분석은 단백질 연구뿐만 아니라 Engineering Plastic 분야에도 새로운 유기화합물을 비롯한 섬유 개발에 현저히 월등한 정보를 얻게 한다. 이외에도 중성자의 에너지를 연속으로 변화 (즉 중성자의 De Broglie Wavelength의 연속 변화)를 이용한 상변환 (Phase change)를 규명할 수 있고, 재료의 결함 규명, Stress 분석, 가동 기계의 해체 없이 운전 중의 관련 문제 즉 기름의 운동, 냉각 작용 등을 밝힐 수 있다. 이 같은 문제는 항공기나 자동차 등의 개발에 더없이 좋은 정보를 주어 고부가화를 이룩할 수 있게 한다. 이

외에도 Neutron 의 기본 성질을 이용한 초고집적 disket, tape, 어떤 온도 영역에서 선팅창계수가 zero 인 재료 개발, 고온초전도체 개발, CO₂ 가스의 Polymer 화 개발을 가능케 하며, 전자빔, X-선, 이온빔과 같이 중성자 특유의 분석 분야를 이루게 된다. 특히 중성자속밀도가 낮아 실험에 어려움이 있었던 Ultra Cold Neutron 사용 분야는 충분히 해결될 것이다. 따라서 여러 가지 실험 환경 즉 낮은 온도로부터 높은 온도까지 넓은 범위의 압력, 각종 역학적 압력 전자장 등에서 단백질 연구, 복합 물질 연구, 다공성 재료 연구 합금의 상변환 연구, 폴리머 연구, 세라믹 연구 등 헤아릴 수 없이 많은 새로운 연구 분야와 상품화 분야가 전개될 것이다 (Intense Pulsed Neutron Source Progress Report 1991-1996, 15th Anniversary Edition - Vol. 1, Argonne National Lab. 참조).

마. Muon (μ) 빔 분야

고속 μ 의 생산은 핵융합 기술의 획기적 발전의 전기를 마련한다. μ 은 질량이 전자의 200배 정도로서 쉽게 D 와 T 의 핵이 핵력권내로 접근할 수 있도록 해주는 촉매이다. 그러나 수명이 짧은 것이 결함이며 반면에 고속으로 값싸게 얻을 수 있다면 핵융합로 개발을 앞당길 것이다.

제 3 절 연구개발 수행내용 및 추진방향

1. 수행내용

이용자 프로그램의 주요 내용은 가속기 건설 초기단계부터 가속기 활용에 대한 적극적인 홍보와 동시에 수요 조사를 수행함으로써 각 분야별 이용자 그룹을 형성·그룹별 대표자 선정 및 예비 Proposal 도출 (연구분야, 연구 Item, 소요예산, 소요기간 등을 자세히 기록하여 제출) 을 유도한다. 제출된 예비 Proposal은 객관적인 선별과정등 철저한 심사 (미래 지향적인 기초 기반기술과 물리적 연구에의 기대효과, 산업적 파급효과에 대한 심사) 과정을 거친 후 가속기 건설시 이를 고려한다. User들 즉 이용자 개인이나 그룹에 대하여 각각의 Beam 에너지에서의 합당한 연구테마나 혹은 기술의 우수성으로 산업적 파급 효과가 크다고 판단되는 내용에 대한 사전 조사를 하여 전체적 수요의 윤곽을 잡게된다. 수요도에 따른 중요도 (Weighting Factor) 는 Project의 Funding에 반영된다. 또한 국제 협력 프로그램 도출과 함께 국내 이용자 기반 및 유지 프로그램을 마련한다. 빔 이용 응용 기술개발과제의 하나인 본 과제는 4개년 계획 중 1차년도에 해당되어 우선 단계적 건설에 따른 KOMAC시설의 가능한 이용/응용 분야의 도출과 동시에 KOMAC Home Page, 전국 이공학회 및 대학을 중심으로 4회의 수요조사를 실시함으로써 KOMAC Project를 널리 홍보하고 국민들의 관심을 높여 장래 이용자 육성에 도움이 되도록 추진하였다.

수행내용은 다음과 같다.

가. KOMAC Home Page 작성으로 KOMAC Project의 홍보 및 다양한 Potential User들의 관심유발과 참여유도(<http://www.kapra.snu.ac.kr/komac>)

나. 국제 및 국내 학회 참석으로 이미 시행되고 있거나 시행예정인 Project에 대하여 의견 교환 및 자료 수집

학회참석:

- LINAC98 XIX International Linac Conference (Aug. 23, 1998. 8, 23 ~ Sep. 1, 1998. 장소: The Fairmont Hotel, Chicago, Illinois, U.S.A)
- OECD/NEA Workshop참가 (Oct. 12, 1998. ~ Oct. 16, 1998, 장소: SannoMaru Hotel, Mito, Japan)

다. 선진국의 연구소 방문 및 User Group 담당자와의 면담으로 국제교류 추진 및 연구 협력, 자료 수집, 정보 교환

연구소 방문:

- 미국 Fermi Lab., Argonne National Lab. APS (Advanced Photon Source) 의 User Facility Office 방문 및 면담, User Facility & Program 조사)
- 일본 JAERI (Tokai, Naka) (Neutron Science Center User Office 방문 면담, User Facility & Program 조사)
- 일본 SPring-8 방문 (User Office 방문, User Program 조사)
- 일본 KEK User Facility 방문

라. 국내 및 국외의 전문가를 초청하여 Seminar 개최와 더불어 자문으로부터 최근의 세계 가속기 경향 및 User Program에 대한 정보입수와 KOMAC Project에 대한 평가를 수용함으로써 최적의 방향으로의 추진을 유도

마. KOMAC 이용/응용 수요조사로 Potential Area의 도출 및 중요도를 판정하여 건설에 반영 (가속기 및 플라즈마 학회 회원, 전국 이·공 학회, 전국 대학의 공대. 이과대 학장님 앞으로 수요조사 설문지 우송 - 회람 요청, 생물분야의 전문가)

이미 건설되어 사용 중에 있거나 건설예정인 KOMAC과 동급의 세계적 가속기를 특성을 표7.2에 나타내었다. 이 표에서 알 수 있듯이 사용 후 핵연료의 변환, 에너지 문제와의 활용과 더불어 국가 기반산업 및 기초과학에의 활용이 가능한 KOMAC Project의 우수한 장점을 살려, 세계 다른 가속기와의 차별성을 국외에 알리고 개방함으로써 외국인들의 참여도 유도하여 국민에게 자긍심을 고취시키는 국가적 Project로 키우는 것이 바람직하다. 표 7.2의 시설에 대하여 현지 방문, internet, 학회 참석, Seminar, 전문가 초청

등을 통하여 그 들 시설 들의 진행상황과 이용분야, 장치이용현황 등을 조사 연구하여 KOMAC Project에 참고가 되도록 하였다.

Accelerator Parameters	IPNS upgrade	LANSE	APT	SNS	NSP	ITEP	ISIS	ESS	SINQ	KOMAC
Laboratory /Country	ANL /USA	LANL /USA	LANL /USA	ORNL /USA	JAERI /Japan	ITEP /Russia	Rutherford Appleton /England	EU	PSI /Swiss	KAERI /Korea
Beam Energy at Goal (GeV)	2 (2.2)	0.8	1.7	1.0	1.5	0.1~1	0.8	1.3	0.8	1.0
Average Beam Current (mA)	0.5	0.16	100	1.0	5.3	10~ 100	200 μ A	3.7	1.6	20
Beam Power (MW)	1.0	0.16	170	1.0	8	9 90	0.16	5	1	20
Pulse Length/ Repetition Rate	<1 μ s /30 Hz	150 μ s /70 Hz	CW	0.54 μ s /60	2 ms, CW	CW	1 μ s /50 Hz	2ms /50 Hz	CW	CW
Accelerator Type	Synch- rotron	Linac	Linac	Linac	Linac	Linac	Synch- rotron	Linac	Ring Cyclotron	Linac
Status	Running	Running	R&D	Begining in 1999	R&D	Design R&D	Running	Design	Running	R&D
Applica- tions	Neutron Science	Neutron Science	Tritium Produc- tion	Neutron Science	Transmu- tation, Neutron Science	Neutron Science	Neutron Science	Neutron Science	Neutron Science	Energy Amplifier, Transmu- tation

표 7.2 Accelerator Comparison for Neutron Science and Technology

2. 추진방향

중간 빔을 인출하여 산업 및 기초연구에 이용하는 특성을 갖는 산·학·연 협력 Program인 KOMAC Project의 효율적 가동을 위하여 그림 7.11에서와 같이 User Program을 맡고 있는 KAPRA에서 각 분야의 의견을 수렴·종합, 수집된 의견을 분석·평가하여 한국원자력연구소에 자료를 제공하면 이를 바탕으로 빔 장치 개발을 수행하는 형태를 취하는 것이 바람직하다. 상호 연계의 친밀성이 우선되어야 한다.

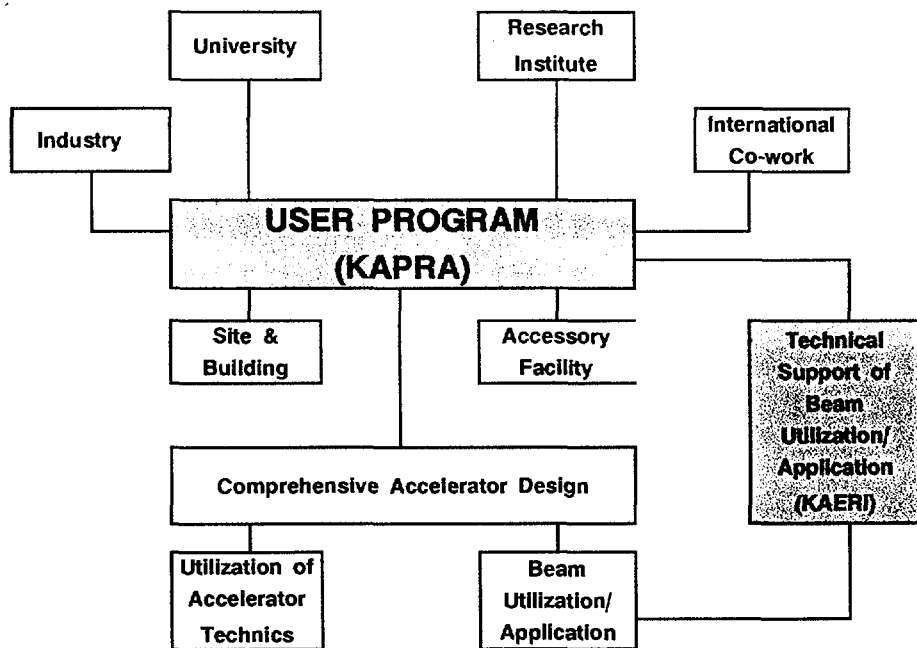


그림 7.11 추진 조직도

제 4 절 국내 · 외 가속기 이용자 그룹 현황

1. 국내

가. 포항 가속기 (Pohang Light Source: PLS)

(1) 장치 현황

국내 유일의 대형 가속기로 방사광이다. 1988년 방사광 가속기 건설본부가 발족된이후 1991년 착공하여 1994년 12월에 준공되었다. 이후 1995년 9월부터 방사광 이용 시설을 개방하였다.

(가) 가속기

가속기는 크게 선형가속기와 저장링으로 구성되어 있다. 선형 가속기에서 2 GeV까지 가속된 전자는 저장링에 입사되어 약 8시간 저장되고, 이 때 발생하는 방사광을 이용한 연구가 진행중이다. 그림 7.12은 PLS의 정경이고, 규격은 표 7.3과 같다.

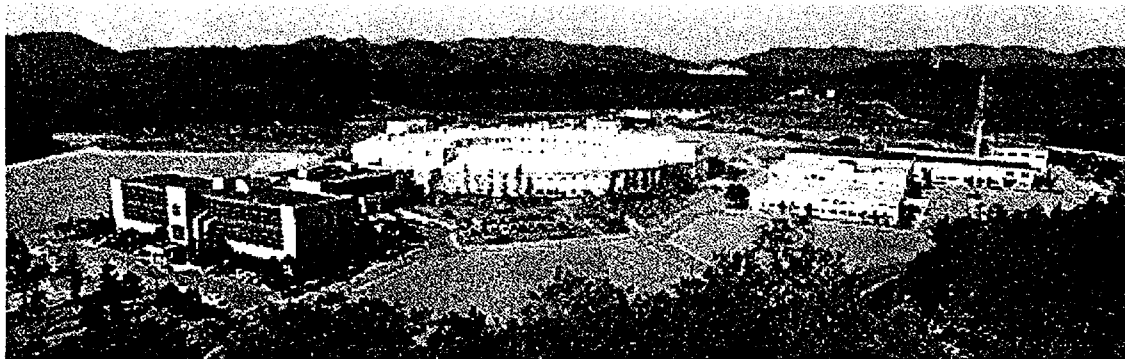


그림 7.12 PLS 가속기

Parameter	Value	Remark
LINAC (선형가속기)		
Energy	2 GeV-2.5 GeV	
Beam Pulse Length	~ 1 ns	normal operation value
Beam Current	~ 1 A	normal operation value
Beam Repetition Rate	10 pps	normal operation value
Emittance (nm.rad)	295 @ 2GeV	design value
Bunch Length	17-20ps	measured value
Energy Spread	< 0.3%	design value
Storage Ring (저장링)		
Lattice Type	TBA	
Circumference (m)	280.56	
Harmonic Number	468	
RF frequency (MHz)	500.087	
RF Voltage at 2 GeV(MV)	1.8	
Natural Emittance(nm.rad)	12.1	
Bending Radius	6.306	

표 7.3 PLS 주요 규격

그림 7.13은 가속기 가동현황 최근 data이다.

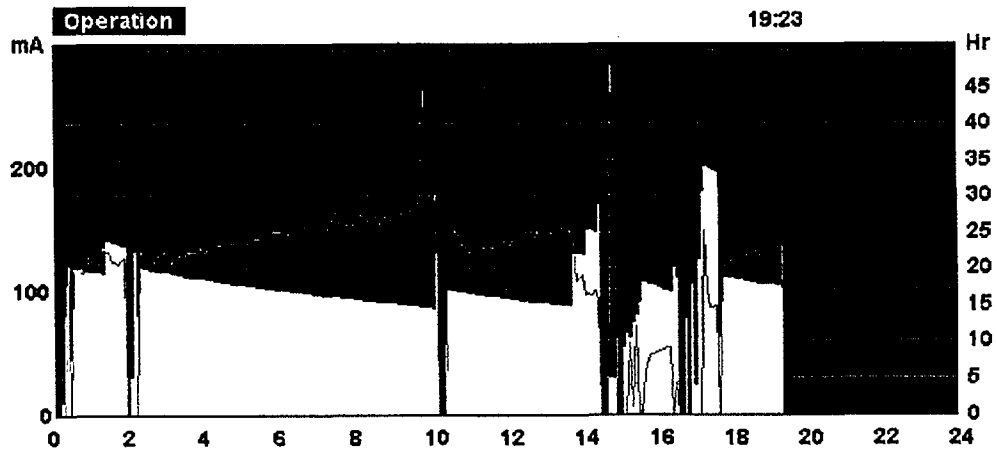


그림 7.13 1999년 4월 14일 가속기 가동 현황

(나) 빔라인

2002년까지 총 23개의 빔라인을 준비할 예정이고, 현재 아래에 열거된 11개의 빔라인이 사용되고 있다.

- 1B2 Whitebeam/ Microprobe Beamline
Type : Bending magnet
Photon energy range : 4-12 keV
- 2B1 VUV Photoelectron Spectroscopy
Type : Bending magnet
Photon energy range : 20-1230 eV
- 3B1 Normal Incidence Monochromator
Type : Bending magnet
Photon energy range : 5-35 eV
- 3C1 EXAFS
Type : Bending magnet
Photon energy range : 2-14 keV
- 3C2 X-ray Scattering
Type : Bending magnet
Photon energy range : 4-12 keV
- 4B1 Photoemission Electron Microscopy
Type : Bending magnet
Photon energy range : 200-1000 eV
- 4C2 Small-angle X-ray Scattering
Type : Bending magnet
Photon energy range : 4-16 keV
- 5C2 X-ray Diffraction(K-JIST)
Type : Bending magnet
Photon energy range : 20-2000 eV
- 8A1 High-resolution Spectroscopy and Spectromicroscopy

- Type : Undulator
Photon energy range : 4-12 keV
- 9C1 Deep Etch X-ray Lithography/LIGA
Type : Bending magnet
Photon energy range : 4-20 keV
- 11B1 X-ray Lithography
Type : Bending magnet
Photon energy range : 800-3300 eV

(다) 이용 분야 현황

각 빔라인의 연구 분야는 표7.4와 같다.

빔라인	연구분야
1B1	X-ray Fluorescence Microprobe, Phase Contrast Imaging, LIGA
2B1	고체 표면의 전자 상태 연구 (photoemission spectroscopy and magnetic circular dichroism)
3B1	gas-phase experiment in 5-35 eV 고체 표면 반사를 측정
3C1	각종 X-선 흡수 분광 실험
3C2	X-선 산란 실험, 박막의 X-선 반사도 측정
4B1	고체 표면의 전자 상태 연구 (photoemission spectroscopy, magnetic circular dichroism and photoemission electron microscopy)
4C2	polymer 재료 등의 small angle x-선 산란 실험
5C2	X-선 산란 실험
8A1	고 분해능 spectroscopy와 spectromicroscopy
9C1	deep etch X-선 lithography
11B1	Giga bit DRAM용 sub quarter μm 분해능 X-선 lithography

표7.4 PLS 방사광 이용분야

(라) 장치 이용 현황

PLS의 이용 아래의 계획표와 같다. 1999년에는 182일이 user service 기간으로 계획되어 있다.

1999 Accelerator Operation Schedule

 User Service

 Maintenance

 Machine Study

S M T W T F S

S M T W T F S

1

						1	2
3	4	5	6	7	8	9	
10	11	12	13	14	15	16	
17	18	19	20	21	22	23	
24	25	26	27	28	29	30	
31							

7

						1	2	3
4	5			7	8	9	10	
11	12	13	14	15	16	17		
18	19	20	21	22	23	24		
25	26	27	28	29	30	31		

2

		1		3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13	
14	15	16	17	18	19	20	
21	22		24	25	26	27	
28							

8

1	2	3	4	5	6	7	
8	9	10	11	12	13	14	
15	16	17	18	19	20	21	
22							
29	30						

3

		1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13	
14	15	16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	26	27	
28	29	30	31				

9

				1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11	
12	13	14	15	16	17	18	
19	20	21	22	23	24	25	
26	27	28	29	30			

4

					1	2	3
4	5	6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	16	17	
18	19	20	21	22	23	24	
25	26	27	28	29	30		

10

					1	2	3
3	4	5	6	7	8	9	
10	11	12	13	14	15	16	
17	18	19	20	21	22	23	
24	25	26	27	28	29	30	
31							

5

						1	
2	3	4	5	6	7	8	
9	10	11	12	13	14	15	
16	17	18	19	20	21	22	
23	24	25	26	27	28	29	
30							

11

		1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13	
14	15	16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	26	27	
28	29	30					

6

		1	2	3	4	5	
6	7	8	9	10	11	12	
13	14	15	16	17	18	19	
20	21	22	23	24	25	26	
27	28	29	30				

12

			1	2	3	4	
5	6	7	8	9	10	11	
12	13	14	15	16	17	18	
19	20	21	22	23	24	25	
26	27	28	29	30	31		

2. 국외

가. APS (Advanced Photon Source), 미국

(1) 장치 현황

APS(Advanced Photon Source)는 Chicago에서 남서쪽으로 약 25마일 거리에 있는 Argonne National Laboratory에 위치하고 있는 국가적인 방사광 이용시설이다. APS는 방사광원으로 insertion device를 수용할 수 있는 제3세대 방사광 시설로서 현재 전세계에 걸쳐있는 세 개의 그러한 시설 중의 하나이다. APS는 현재 미국에서 가장 강력한 방사광원으로서 생물학, 의학, 재료과학, 화학, 지질학, 농업, 토양과학, 물리학 그리고 제조업에 이르는 광범위한 연구분야에 이용되고 있다. 그림7.14에 시설의 정경을 보였다.

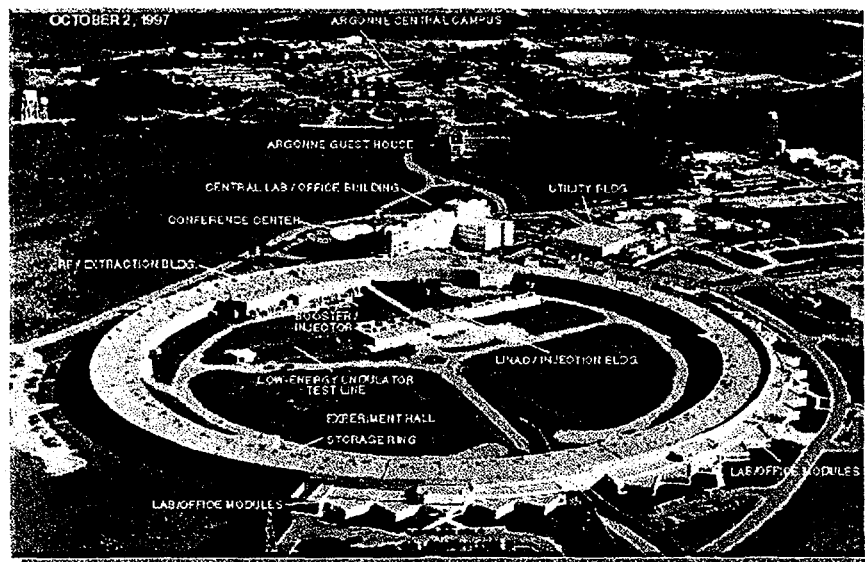


그림 7.14 APS 정경

연구자들은 APS를 CAT(Collaborative Access Teams)로서 내지는 II(Independent Investigators)의 자격으로 이용하고 있는데 CAT는 insertion-device(ID) beamline과 bending-magnet(BM)으로 이루어진 sector로 구성된 beamline의 설계, 건설 및 가동을 책임지고 있다. 각각의 beamline은 특정한 타입의 연구프로그램을 위해 설계되었는데 각 목적에 맞도록 최적화 되어있다. APS의 parameter들은 다음과 같다. 그리고 최근 일주일 동안의 storage ring의 가동 상태를 그림7.15에 나타내었다.

(가) 주요 Parameters

Beam Energy	7 GeV
Beam Current	100 mA
Beam Lifetime	10 hrs
Beam Particle	Positrons
Injection Energy	7 GeV
Number of Bunches in the Lattice	1 - 60
Bunch Duration (rms width)	73 ps
Horizontal Emittance	10×10^{-9} mrad
Circumference	1104 m
Number of Straight Sections to Extract Radiation Beams	35
Straight Section Length	5 m
Number of Insertion Devices per Straight Section	1 to 2
Straight Section Vertical Aperture (Mature Operations)	8 mm
Radiation Sources	Undulators, wigglers, bending magnets
Sector	Insertion device beamline and adjoining bending magnet beamline
Front End Installation	20 sectors currently being installed

(나) Source Parameters

Undulator A Parameters

Magnet material	Nd-Fe-B
Pole material	Vanadium permendur
Period length,	3.30 cm
Number of periods	72
Length, L	2.4 m
Minimum gap	10.5 mm
Maximum gap taper	2 mrad
Deflection parameter, Keff (Kpeak) (10.5-mm gap)	2.57 (2.62)
Maximum field, Beff (Bpeak)	0.835 (0.849)T
First harmonic energy (10.5-mm gap)	3.2 keV
Rms peak magnetic field errors (11.5-mm gap)	<0.5%
Rms phase errors (11.5-mm gap)	<8°

Wiggler A Parameters

Undulator Period,	8.5 cm
Number of Periods, N	28
Device Length, L	2.4 m
Magnetic Gap	2.1 cm
Maximum Magnetic Field	1.0 T
Deflection Parameter, K	7.9
First Harmonic Energy, E1	0.17 keV
Critical Energy, Ec	32.6 keV
Total Power	7.4 kW
Peak Power Density	73 kW/mrad ²
Peak Normal Heat Flux @ 30 m	81 W/mm ²

(다) Accelerator Parameters

① Linear Accelerator

Linac e-	200 MeV at 1.7 amp
Linac e+	450 MeV at 8 mA
Target	Tungsten
e+/e- Conversion Efficiency	1/200

② Positron Accumulator Ring (PAR)

Circumference	30.6 m
Revolution time	102 ns
Energy	450 MeV
Bend Magnet	8
Bend Radius	1.0 m

24 Linac bunches are accumulated into 1 PAR bunch

③ Booster Synchrotron

Circumference	368 m
Revolution time	1.2 nsec
Lattice	40 cell FODO
Bend Magnets	68
Bend Radius	33 m
Energy	7 GeV

④ Storage Ring

Energy	7 GeV
Current (multi bunch)	100 mA
---(single bunch)	5 mA
Lattice	Chasman-Green

Circumference	1104 m
Bunch Length	73 ps
Bend Magnets	80
Bend Radius	39 m
Bend Field	0.7 T
Quadrupoles	400 (10/period)
Sextupoles	280 (7/period)
Skew Quadrupoles	20
Correction Dipoles	318
RF	351.93 MHz
Revolution Time	3.68 nsec
Injection	Full Energy
No. of RF Cavities	16

⑤ Vacuum System (Storage Ring)

Material	6063 TS Al
Horizontal Aperture	85 mm
Vertical Aperture	42 mm
Vacuum Pressure	1 nTorr

⑥ Diagnostics (Storage Ring)

4-Button Pick Ups	360
ID Chamber Pick Ups	2/ Straight Section

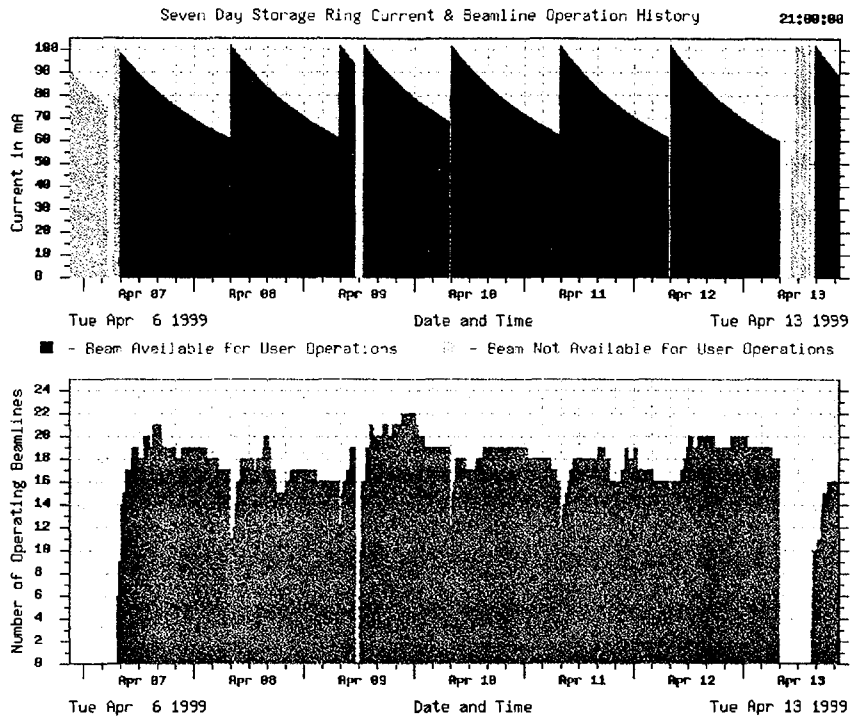


그림 7.15 최근 일주일 동안의 storage ring 가동 상태

그림 7.16에 CAT (Collaborative Access Teams)를 보였는데 CAT를 정리하면 다음과 같다.

BESSRC	Basic Energy Sciences Synchrotron Radiation Center
BioCAT	Biophysics Collaborative Access Team
CARS	Consortium for Advanced Radiation Sources
CMC	Complex Materials Consortium
DND-CAT	DuPont-Northwestern-Dow Synchrotron Research Center
IMCA-CAT	Industrial Macromolecular Crystallography Association
IMM CAT	IBM-McGill-MIT
MHATT-CAT	Center for Real-Time X-ray Studies
MRCAT	Materials Research Collaborative Access Team

PNC-CAT	Pacific Northwest Consortium Collaborative Access Team
SBC	Argonne Structural Biology Center
SRI-CAT	Synchrotron Radiation Instrumentation Collaborative Access Team
UNI-CAT	A University - National Laboratory - Industry Collaborative Access Team.

SECTOR LOCATIONS FOR
APS COLLABORATIVE ACCESS TEAMS (CATs)
To visit a CAT's home page, click on its name on the diagram below.
(Note: Only underlined names are currently linked.)

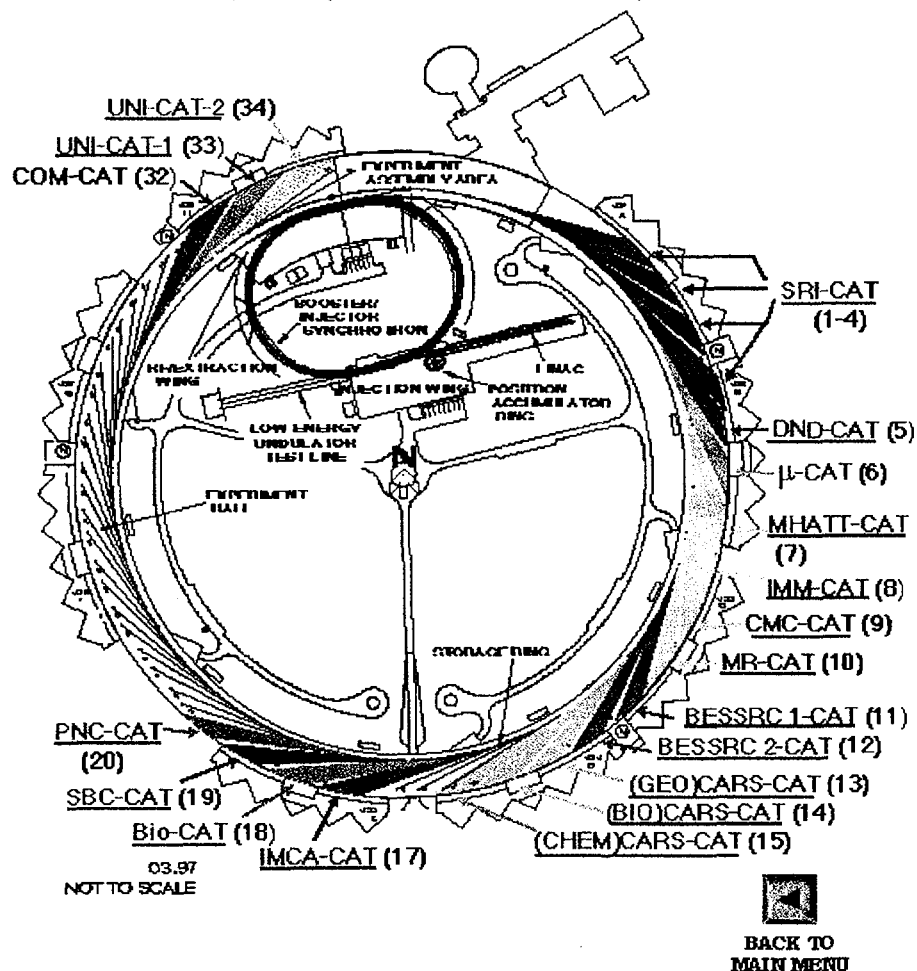


그림 7.16 APS에서 CAT구성

(라) 이용분야현황

현재 APS는 CAT가 중심이 되어 각각의 연구 중심분야를 가지고 이용되고 있다. 그중 가장 중점적인 과제에는 다음과 같은 것들이 있다.

MAD Analysis of FHIT at the Structural Biology Center

Advances in High-Energy-Resolution X-ray Scattering at Beamline 3-ID

X-ray Imaging & Microspectroscopy of the Mycorrhizal Fungus-Plant Symbiosis

Measurement & Control of Particle-Beam Trajectories in the Advanced Photon Source Storage Ring

(마) 장치 이용 현황

현재 APS에서 이용가능한 시간의 75%를 CAT에 할당하고 있으며 나머지 25%가 II(Independent Investigators)에 할당되어 있는데 II에 의해 제출된 과제계획서는 CAT에 의해 선별되어 APS에서 인정을 받게된다. APS User Office에 과제계획서가 제출되게 되면 거기서 과제계획서를 검사한 후 등록하게되고 이후 검토계획을 수립하여 적절한 CAT로 넘기게 된다. 과제계획서 서식은 인터넷을 통해 다운받을 수 있는데 인터넷 주소는 다음과 같다.

http://www.aps.anl.gov/xfd/communicator/useroffice/IIprop_form.html.

참고로 1999년도 APS 장기 운영계획은 다음과 같다.

1999 APS Operations Long-term Schedule

This schedule is current as of December 22, 1998 @ 9:57 AM.

January							February							March						
M	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S
				1*	2	3														
4	5	6	7	8	9	10	8		10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
11	12	13	14					15	16	17	18	19	20	15	16	17	18			
				21	22	23	24	22		24	25	26	27	22		24	25	26	27	28
25		27	28	29	30	31								29		31				

April							May							June						
M	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S
				1	2	3						1*	2*							
		7	8	9	10	11	3	4	5	6	7	8	9	7		9	10	11	12	13
12		14	15	16	17	18	10	11	12	13	14	15	16	14		16	17	18	19	20
		21	22	23	24	25	17	18	19	20	21	22	23	21		23	24	25	26	27
26		28	29	30*			24									30				

July							August							September						
M	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S
				1	2	3							1							
5		7	8	9	10	11	2		4	5	6	7	8	6*		8	9	10	11	12
12	13	14	15	16	17	18	9	10	11	12	13	14	15			15	16	17	18	19
19	20	21	22	23	24		16	17	18	19	20	21	22	20		22	23	24	25	26
25	26	27	28	29	30	31	23		25	26	27	28	29	27	28	29				

October							November							December						
M	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S
				1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	6	7	8	9	10	11	12
4	5	6	7	8	9	10	8	9	10	11	12	13	14	13	14	15	16	17	18	19
11	12	13	14	15	16	17	15	16	17	18	19	20	21	20	21	22	23	24*	25*	26
18	19	20	21	22	23	24	22	23	24	25*	26*	27	28	27	28	29	30	31*		
25	26	27	28	29	30	31	30	30												

User Operations	
Start Up/Machine Studies	
Scheduled Maintenance	
To Be Determined	
Laboratory Holidays	*
ANL Open House - Schedule Subject to Change	**

New Years Day	Jan. 1
Memorial Day	May 31
Independence Day	July 4
Labour Day	Sept. 6
Thanksgiving Day	Nov. 25 & 28
Christmas Eve & Day	Dec. 24 & 25
New Years Eve	Dec. 31

나. ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), EU

(1) 장치 현황

ESRF(European Synchrotron Radiation Facility)은 1988년부터 건설에 착수하여 15개의 beamline에 대해 1994년 9월부터 가동을 시작하였다. 현재 총 beamline의 개수는 56개로 이중 40개의 beamline이 사용자들에 개방되어 24시간 운영중이다.

ESRF는 현재 15개국이 참가하여 운영되는 다국적 연구 시설로서 X-ray 영역의 강력한 광원을 제공하여 물리, 화학, 재료과학 및 생명과학 분야에서의 기초적인 연구 및 응용연구를 목적으로 건설되었다. 1988년 건설 당시 참가국 사이의 협정에 따라 ESRF는 프랑스법에 따르는 비영리 사업으로 운영되고 있으며 각국에서 파견된 인원으로 구성된 위원회에서 관리를 하고 있다. 장치의 정경을 그림 7.17에 나타내었다.

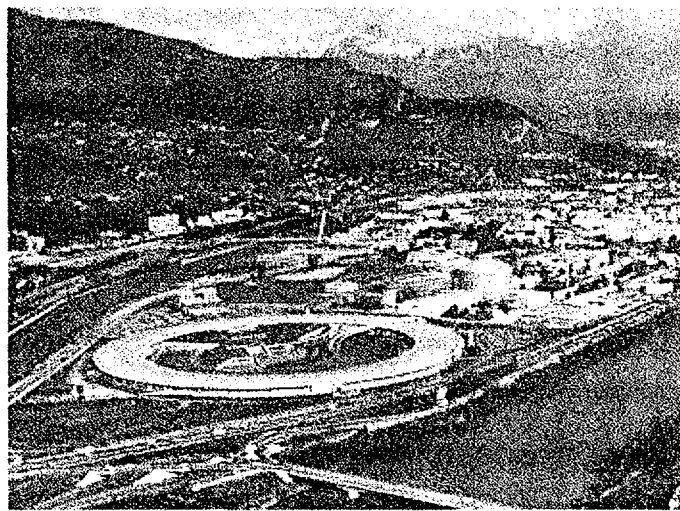


그림 7.17 ESRF의 정경

주요 참가국과 참여율은 표 7.5와 같다.

국가	참여율	국가	참여율
프랑스	27.5%	스페인	4%
독일	25.5%	스위스	4%
이탈리아	15%	벨기에	6%
영국	14%	스웨덴	4%

표 7.5 ESRF 주요 참가국과 참여율

ESRF의 preinjector는 16m 길이의 선형가속기인데 이곳에서 전자빔이 형성되어 200 MeV까지 가속이 된다. 그리고 둘레길이 300m의 10 Hz cycling synchrotron에서 전자빔을 storage ring으로 injection하기 전에 6 GeV까지 가속을 시키게 된다.

storage ring은 둘레길이가 844m로서 beamline으로의 access를 위해 64개의 beamport가 분포되어있다.

ESRF의 주요 parameter들은 다음과 같다.

- Storage Ring

Energy	6 GeV
Circumference	844 m
Nominal Intensity	200 mA
Magnet Bending Radius	24.95 m
RF Frequency	352.2 MHz
Harmonic Number	992

- Synchrotron Injector

Repetition rate	10 Hz
Energy	6 GeV
Circumference	300 m
Emittance at 6 GeV	$1.2 \cdot 10^{-7}$ mrad

- Preinjector

Repetition rate	1 Hz/10 Hz
Pulse length	1000 - 2 ns
Electron current	25-2500 mA

ESRF는 세계에서 최초로 운영을 시작한 제3세대 방사광원으로서 다양한 분야에 걸쳐 이용되고 있는데 이용자들에게 개방된 40개의 beamline을 표7.6에 나타내었다.

beamline	title	beamline	title
ID1	Anomalous Scattering	ID15A	High Energy Diffraction
BM1A	Crystal Diffraction	ID15B	HE Inelastic Scattering
BM1B	Powder Diffraction	ID16	Inelastic Scattering
ID2A	SAXS	BM16	Powder Diffraction
ID2B	PX	ID17	Medical Beamline
BM2A	Anomalous Scattering	ID18	Nuclear Resonance
BM2B	Small Angle Scattering	ID19	Topography
ID3	Surface Diffraction	ID20	Magnetic Scattering
BM5	Open Bending Magnet	BM20	Radiochemistry
BM8	Diffraction & Absorption	ID21	X-ray Microscopy
ID9	White Beam Station	ID22	Micro FID
ID10A	TROIKA A	ID24	Dispersive EXAFS
ID10B	TROIKA B	BM25	Absorption & Diffraction
ID11	Material Science	ID26	XAUS
ID12A	Circular polarization	BM26	Spectroscopy
ID12B	DRAGON	BM28	Magnetic Scattering
ID13	MICROFOCUS	BM29	XAFS
ID14A	Macromolecules A	ID30	High Pressure
ID14B	Macromolecules B	ID32	SEXAFS
BM14	MAD	BM32	Interface Studies

⌘ 7.6 ESRF beamlines

(2) 이용분야 현황

(가) 분자 생물학

분자 생물학의 기본원리는 조직의 생물학적 기능이 단백질, 효소, 바이러스 등과 같은 거대하고 복잡한 분자들에 의해 지배를 받는다는 것이다. 이러한 거대분자가 생명 현상을 지배하는 방식을 이해하기 위해서는 공간 3차원적인 구조를 밝히는 것이 필수적이다. 이러한 목적으로 사용되는 기술이 X-ray 회절이다. ESRF에서 과학자들은 분자들의 구조에 관한 연구를 수행하고 있고 또한 시간에 따른 구조적 변형 등을 연구하기 위한 새로운 기술들을 개발하고 있다. 이 분야에서 지금까지 훌륭한 성과를 올리고 있으며 이에 따라 생물학자들에 의한 방사광의 사용은 증가하고 있는 추세이다.

(나) 화학

화학 분야에서 과학자들은 ESRF의 방사광을 이용한 absorption spectroscopy, diffraction, surface scattering 등의 방법을 사용하여 화학반응에서 통상적으로 얻을 수 있는 결과 이상을 얻고 있다.

ESRF의 강력한 X-ray beam은 극히 미세한 샘플의 화학반응을 시간에 따라 연구하는 것을 가능하게 해준다. 특히 이러한 접근방법을 통해 초전도 polymer의 형성에 대한 깊이있는 연구가 가능하였다.

(다) 재료과학

물질에 관한 많은 성질들은 그것의 미세구조를 밝힘으로써 이해될 수 있다. 이러한 미세구조 분석은 spectroscopy, diffraction, imaging 등 다양한 X-ray 기술들을 사용하여 통상적으로 수행되고 있다. 특히 ESRF의 방사광은 미세구조 분석에 있어서 측정의 한계를 넓히고 있다.

(라) 의학분야

X-ray는 진단에서부터 치료에 이르기까지 의학분야에서 중요한 역할을 지니고 있다. ESRF의 방사광은 세련된 기술의 개발과 결합되어 재래의

X-ray의 한계를 극복하고 있다. 특히 medical imaging 분야에서 탁월한 성과를 올리고 있는데 ESRF의 small spot size X-ray는 인체조직에 대해 마이크로미터 정도의 분해능으로 3차원 영상을 얻는 것을 가능하게 한다.

(마)물리학

ESRF를 통해 지구내부와 같은 초고압환경 등과 같은 극한환경에 대한 모사가 가능해짐에 따라 수많은 물리학적 실험이 수행되어 좋은 결과를 얻고 있다.

(3) 장치 이용 현황

ESRF에서 연구과제는 Scientific Review Committee에서 결정이 되는데 이곳에서 제출된 과제계획서를 검토하여 등급을 매기게 된다. 기금을 출자한 주요 참가국의 경우 ESRF를 무료로 사용하는 것이 가능한데 단, 연구결과를 공개적으로 발표해야만 한다. 또한 주로 기업체 등이 비공개로 진행하는 연구는 유료로 ESRF에서 수행하는 것이 가능하다. 1998년도 당시 beam time은 1월에서 6월까지, 그리고 7월에서 1999년 1월까지로 2분기로 나누어서 할당되었다. 가동시간은 평균 6주에서 7주 정도 지속되었고 이후 유지보수를 위한 shutdown period를 가지는 식으로 운영되었는데 1998년에 최초로 beam 사용가능 시간이 95%를 넘었고 장치 등의 문제로 인한 손실 시간은 5% 미만이었다. 1998년도에 제출된 과제계획은 총 1380개에 달했는데 이중 약 절반에 해당하는 746개의 과제가 선정되어 수행되었다. 이를 통해 339편의 논문이 발표되었으며 실험보고서의 수는 542편에 이른다. 그림 7.18는 1999년도 가동 계획서이다.

ESRF

1999 Operation schedule

ESRF

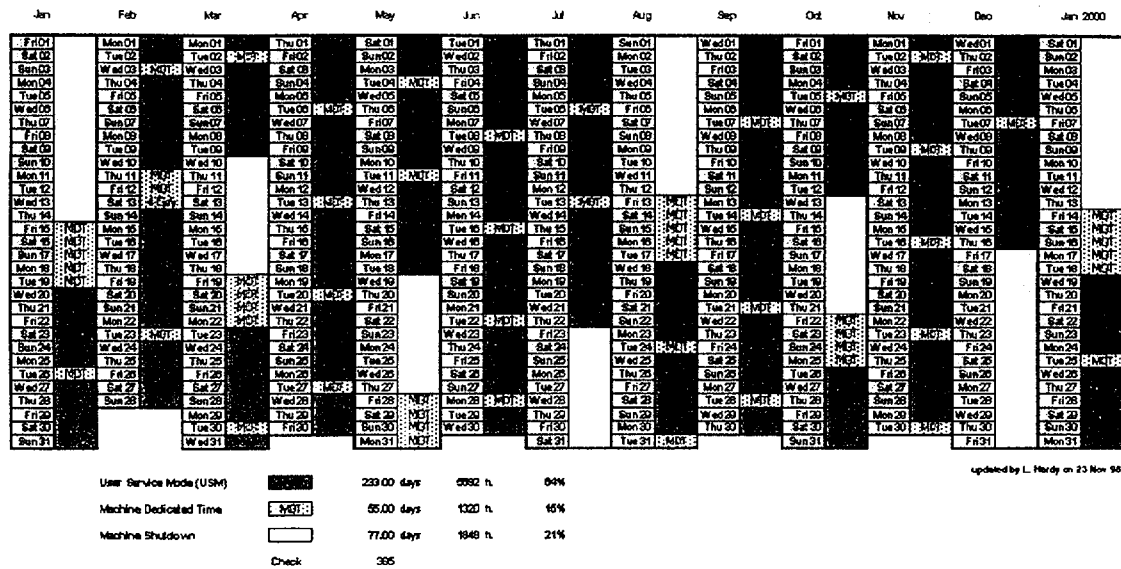


그림 7.18 ESRF 1999년도 운영계획

다. SPring-8 (Super Photon ring 8 GeV), 일본

(1) 장치 현황

SPring-8의 건설은 1991년에 시작되었다. 그후 1997년 3월에 최초로 방사광을 생산하였고 1997년 10월부터 가동이 시작되어 현재 61개의 beamline을 가지고 운영되고 있다. 1997년 10월 가동 당시 SPring-8은 세계에서 가장 강력한 제3세대 방사광 장치였다. SPring-8의 ultra-brilliant X-rays는 현재 재료과학, 지구과학, 생명과학 그리고 의학분야에 걸쳐 흥미로운 기회를 제공하고 있다. SPring-8의 정경을 그림 7.19에 나타내었다.



그림 7.19 SPring-8 정경

일본의 Science and Technology Agency는 SPring-8을 전세계 사용자들에게 공개되는 국제적인 연구 중심센터로 구상하였다. 그리고 일본 원자력 연구소(JAERI)와 일본 이화학 연구소(RIKEN)가 SPring-8의 계획과 건설을 담당하였고 특별히 SPring-8의 가동, 유지 및 보수, 장치의 개선을 위해 일본 방사광 연구소(JASRI)가 설립되었다. SPring-8는 프로젝트의 초기부터 여러 나라의 정부와 학계와 산업계로부터 지원을 받아오고 있는데 특히 Hyogo Prefecture Government는 프로젝트의 성공에 크게 기여하였다. SPring-8는 Super Photon ring 8 GeV의 줄임말로써 8 GeV의 storage ring에서 높은 에

너지의 photon이 생산됨을 의미한다. SPring-8에서 생산되는 photon은 종래의 일반적인 x-ray장치에 비해 1억배 정도로 brilliant한데 파장과 brightness의 관계를 그림 7.20에 나타내었다.

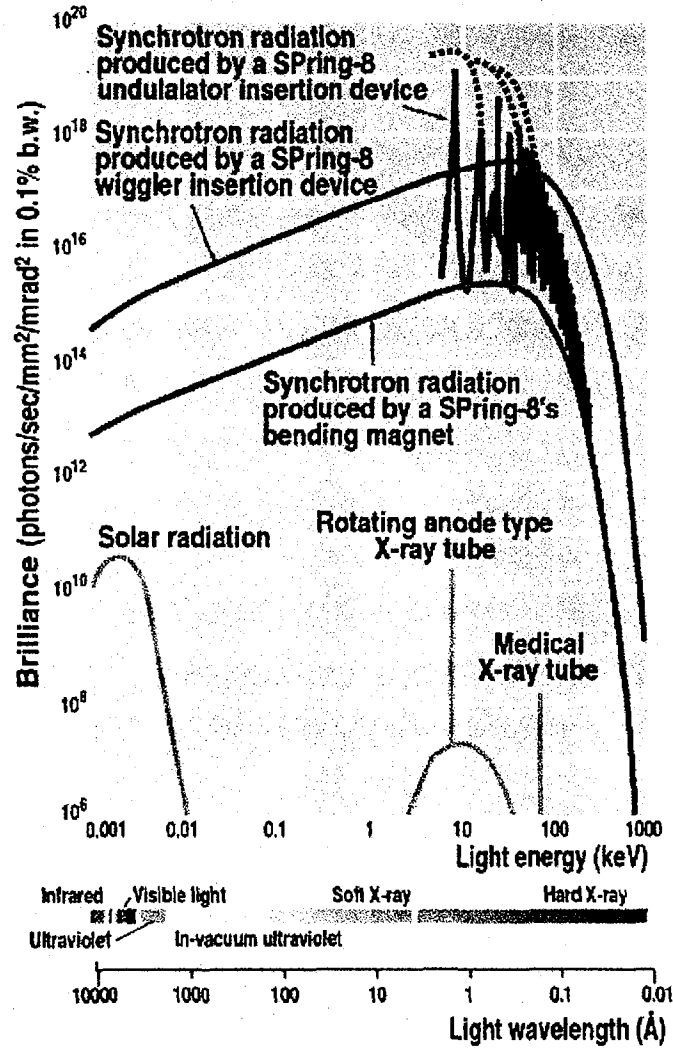


그림 7.20 SPring-8에서의 방사광

(가) 선형가속기

-Acceleration Energy : 1GeV

-Length : 140m

전자빔은 26개가 직선으로 배열된 3m 길이의 high-frequency accelerators에 의해 1GeV까지 가속된다.

(나)_Synchrotron

-Acceleration Energy : 8GeV

-Circumference : 396m

1GeV까지 가속된 전자빔은 bending magnets에 의해 원형 궤도를 따라 움직이며 8GeV까지 가속된다.

(다) Storage Ring

-Acceleration Energy : 8GeV

-Circumference : 1,436m

SPring-8의 storage ring은 전자빔을 8GeV에서 20시간 이상 유지시킬 수 있다. 네 개의 RF 장치가 있어서 방사광에 의한 에너지 손실을 보충하게 된다.

(라) Beamlines

-Bending Magnet Beamlines : 23

-Insertion Device (4.5m) Beamlines : 34

-Long Insertion Device (30m) Beamlines : 4

SPring-8에서 개발한 in-vacuum type undulator들은 진공 내에서 자석들을 밀봉하고 있다. 이런 undulator들은 빔을 증가된 magnetic force의 영향 아래에 두게 하는데 이로써 고출력의 shorter-wavelength 방사광을 발생시키게 된다. beamline의 현황을 표7.7에 정리하였다.

beamline	구분	이용 분야	현황
BL01B1	public beamline	XAFS	가동중
BL02B1	public beamline	결정 구조해석	가동중
BL04B1	public beamline	고온 연구	가동중
BL08W	public beamline	고에너지 비탄성 산란	가동중
BL09XU	public beamline	핵 공명 산란	가동중
BL10XU	public beamline	extremely dense state	가동중
BL11XU	JAERI beamline	표면 과학	건설중
BL14B1	JAERI beamline	고압 연구	가동중
BL15XU	contract beamline	WEBRAM	설계중
BL16XU	contract beamline	재료 과학	건설중
BL16B2	contract beamline	재료 과학	건설중
BL20B2	public beamline	의학 및 이미지	건설중
BL23SU	JAERI beamline	actinoide 연구	가동중
BL24XU	contract beamline	Hyogo beamline	가동중
BL25SU	public beamline	soft x-ray spectroscopy	가동중
BL27SU	public beamline	soft x-ray photochemistry	가동중
BL29XU	RIKEN beamline	coherent x-ray 광학	건설중
BL33B2	contract beamline	레이저 연구	건설중
BL39XU	public beamline	물리화학 분석	가동중
BL41XU	public beamline	bio-crystallography	가동중
BL44XU	contract beamline	거대분자 집합체	건설중
BL44B2	RIKEN beamline	구조 생물학 II	가동중
BL45XU	RIKEN beamline	구조 생물학 I	가동중
BL46XU	RIKEN beamline	R&D 2	건설중
BL47XU	RIKEN beamline	R&D 1	가동중

표 7.7 Beamline 현황

(2) 이용 분야 현황

(가) XAFS

에너지 범위 4.5~97 keV 영역에서 XAFS의 다양한 응용연구를 수행한다.

(나) 결정 구조해석

에너지 범위 5~90 keV 영역에서 회절과 산란에 관한 다양한 실험을 수행한다.

(다) 고온 연구

bending magnet에서부터 나오는 white x-ray를 이용하여 고온 고압하에서 재료의 구조와 물성에 관한 연구를 수행한다.

(라) 고에너지 비탄성 산란

에너지 범위 100~150 keV와 100~300 keV 영역에서 선형 내지는 타원형으로 편극된 x-ray를 이용하여 Compton 산란 분광분석을 수행한다.

(마) 핵 공명 산란

hard x-ray undulator를 써서 핵 공명 산란을 이용한 Mossbauer spectroscopy나 표면구조분석 등의 연구를 수행한다.

(바) Extremely Dense State

in-vacuum type undulator에서 나오는 high brilliance x-rays를 이용하여 극한상태에서의 물질의 구조와 물성을 연구한다.

(사) 재료 과학

다양한 분광분석법을 사용하여 산업계에서 개발된 재료들의 물성을 평가하는 실험을 수행한다.

(아) Actinoide 연구

soft x-ray 분광법을 이용하여 actinoide를 포함한 방사성 재료의 물성을 연구하는 실험을 수행한다.

(자) Soft X-ray Spectroscopy of Solid

high energy-resolution circularly polarized soft X-ray를 이용하여 고체의 전기적 상태 및 표면구조 연구를 수행한다.

(차) Soft X-ray Photochemistry

soft x-ray photochemistry 및 soft x-ray CVD에 관한 연구를 수행한다.

(카) 물리화학 분석

hard x-ray undulator를 사용하여 x-ray magnetic scattering/absorption 및 재료 과학과 생물학 분야에서 x-ray micro-analysis 연구를 수행한다.

(타) 거대분자 집합체에 관한 연구

생물학적 거대분자 집합체에 대한 결정구조분석을 수행한다.

(파) R&D

x-ray undulator beam. 특히 hard x-ray 영역에 대한 과학적, 기술적 R&D를 수행한다.

(3) 장치 이용 현황

1999년도 SPring-8 가동 스케줄

1999 Spring-8 Operation Schedule

User Service

Maintenance

Machine Study

S M T W T F S

1

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24						

2

	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28						

3

	1	2	3	4	5	6
7	8		10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

4

					1	2	3
4	5	6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	16	17	
18	19	20	21	22	23	24	
25	26	27	28	29	30		

5

						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

6

		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

S M T W T F S

7

					1	2	3
4	5	6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	16	17	
18	19	20	21	22	23	24	
25	26	27	28	29	30	31	

8

1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

9

			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		

10

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

11

	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30				

12

				1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11	
12	13	14	15	16	17	18	
19	20	21	22	23	24	25	
26	27	28	29	30	31		

(가) 1999년도 상반기 이용자 현황

1999년도 상반기에 SPring-8에서 수행될 전체 과제수는 258개인데 이를 국가별, 기관별로 분류하면 표 7.8과 같다.

이용국가	이용기관	과제수
일본	대학	140
	연구소	96
	기업체	13
	일본 소계	249
독일	대학	2
	연구소	1
중국	대학	1
	연구소	1
미국	대학	1
스페인	대학	1
인도	대학	1
이탈리아	대학	1
	외국 소계	9
	총계	258

표 7.8 1999년 상반기 사용자 현황

라. ISIS, 영국

(1) 장치 현황

ISIS는 영국의 Oxford 근방에 위치한 Rutherford Appleton Laboratory에 있는 spallation neutron source (핵파쇄 중성자원)이고, 현재 가동되고 있는 가속기를 이용한 중성자원 중 세계 최대 규모이다. 1977년에 장치 건설 승인을 받고, 1984년에 commissioning을 마치고 중성자를 발생하는데 성공하였고, 1985년에 대형 공공 연구 시설로 쓰기 시작했다. 그 이후 매년 장치를 보완하여 양성자 빔의 전류를 올리고 있으며, 물질의 구조 파악분야를 위주로 사용되고 있다. ISIS는 펄스 (pulse) 형태로 중성자와 muon 빔을 제공하며, 각종 실험을 위한 계측 및 연구 시설을 보유하고 있다. ISIS program은 기본 학술적인 분야는 물론, 전략적인 분야, 산업 분야 등을 포함하고 있으며 산학 협동연구가 활발히 진행되고 있다. 지난해에는 약 1,600 명의 사용자가 600 종의 실험을 수행하였다. 가속기는 선형 가속기와 synchrotron로 구성되어 있고 각각 70 MeV, 800 MeV까지 가속을 담당한다. 선형가속기까지는 H^- 이온이 가속되고, synchrotron로 입사될 때 전자를 stripping하여 양성자로 바꾼 후 가속된다. 가속된 양성자는 depleted Uranium이나 Tantalum과 같은 재료로 제작된 target에 충돌하여 spallation 반응으로 고속 밀도 (high flux density) 중성자를 발생시킨다. 그리고 graphite target을 삽입하여 pion을 발생시키는데, pion은 muon으로 decay 하게 된다. 뿐만 아니라 pion과 muon은 neutrino를 발생시킨다. 즉 중성자, muon, 그리고 neutrino가 ISIS에서는 대강도로 발생되고, 관련 연구를 수행할 수 있는 설비가 구축되어 있다. 그림 7.21 은 ISIS 장치의 전체 평면도이고 기본 규격은 표 7.9 에 정리되어있다.

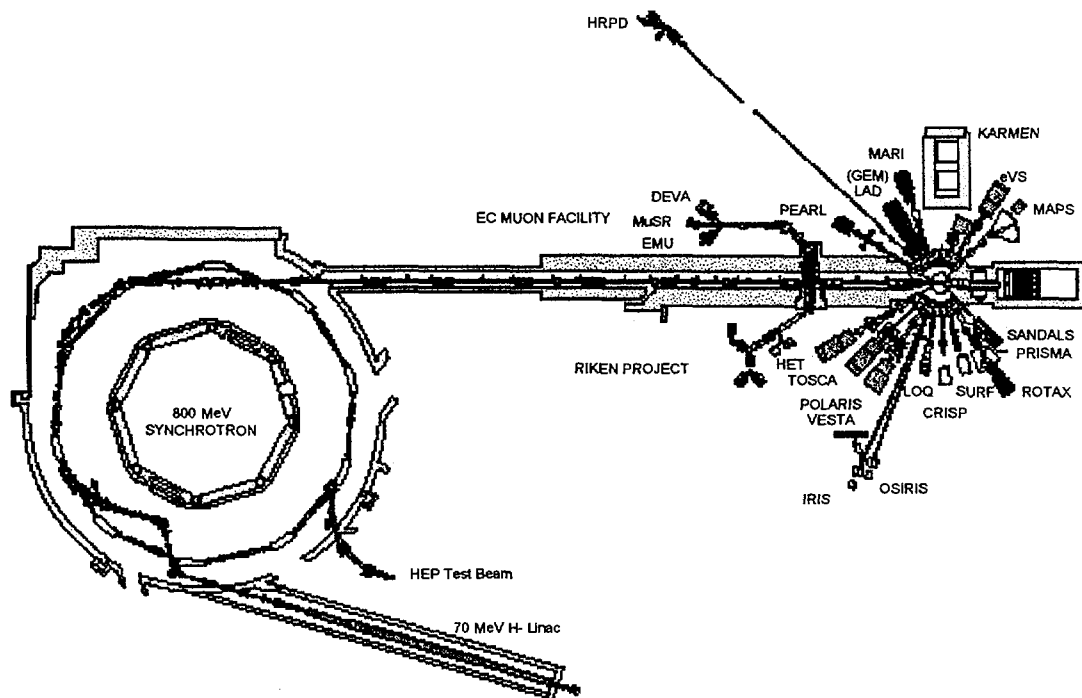


그림 7.21 Plane view of ISIS

Ion source		H- source (Cs vapor used)
pre-acceleration		665 kV (Cockcroft-Walton type)
Injector	Type	DTL (four tanks)
	Energy	70 MeV
	pulse length	200 μ s
	peak current	22 mA
Synchrotron	Diameter	52 m
	No. of protons	2.8×10^{13} #/pulse
	RF acceleration	second harmonic
	micro pulse	100 ns
	bunch separation	230 ns
	repetition rate	50 Hz
	Energy	800 MeV
	Average current	$\sim 200 \mu$ s
	Average beam power	160 kW

표 7.9 ISIS의 가속기의 주요 규격

Target 재료로는 주로 Tantalum이 사용되는데, spallation 반응에 의한 중성자 yield는 약 15 neutrons/proton이다. 냉각은 수냉식이다. 최근 들어 보다 다양한 실험 위하여 평균 양성자 빔 전류를 300 μA 로 올리기 위한 작업을 수행하고 있다. 먼저 Cockcroft-Walton을 이용한 pre-acceleration을 Radio Frequency Quadrupole (RFQ)로 대체하는 작업이다. 이 작업은 ISIS의 신뢰성과 빔 전류를 올리기 위해서이다. 그리고 300 μA H^- ion source 개발 작업이 ISIS와 ESS (European Spallation Source)를 위해 수행중이다. Synchrotron에는 현재 6개의 second harmonic RF cavity가 설치되어 운전되는데 여기에 4개의 cavity를 더 설치할 예정이다. 그림 7.22, 23, 24는 ISIS 가속기에서 target으로 전달된 양성자 빔 전류의 통계를 나타낸 것이다. 가동율이 해마다 증가함을 알 수 있다. 표 7.10은 1991년부터 1997년까지 ISIS 가동 현황을 나타낸 것이다.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
총 이용 시간 (일)	175	174	168	168	168	168	168
총 target 이용 시간 (일)	135	148	152	155	151	152	153
총 누적 전류 (mA · hrs)	366	533	623	653	661	621	672
target에서 평균 빔전류 (μA)	113	149	171	176	182	171	183
최대 평균 빔 전류 (μA)	145	181	187	184	201	204	197
년간 평균 빔 전류 (μA)	87	128	145	145	162	153	167
총 전력 소모 (GWh)	43	44	45	50	46	47	45
에너지 효율 (mA · hrs/GWh)	8.5	12.1	13.8	13.1	14.4	13.1	14.9

표 7.10 ISIS 가동 현황

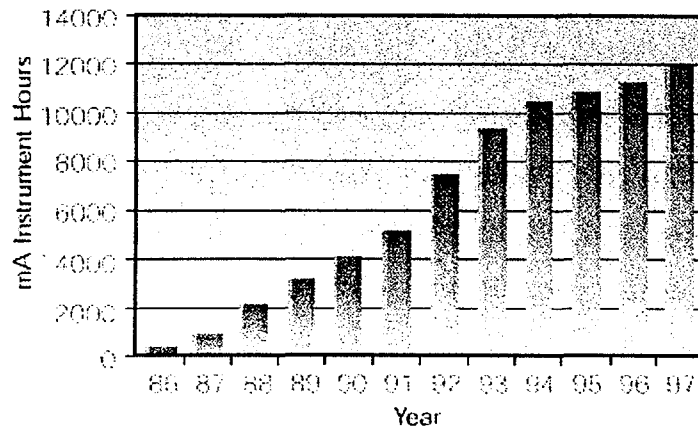


그림 7.22 Total integrated ISIS proton beam current

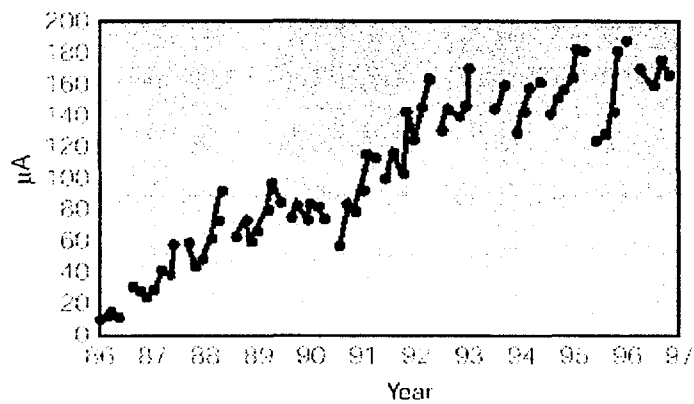


그림 7.23 Average daily ISIS proton beam current

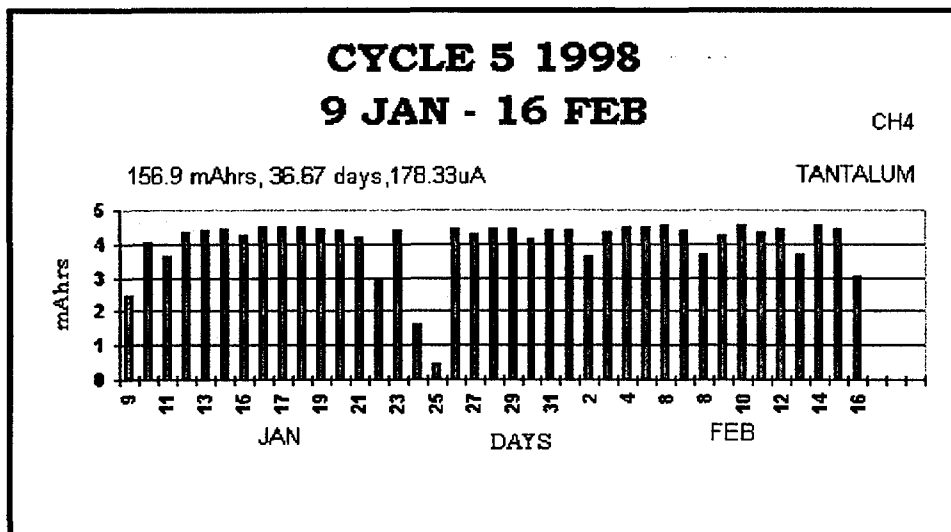


그림 7.24 Recent daily ISIS proton beam current statistics

그림 7.25는 ISIS에 설치된 각종 실험 장치이다. 각각을 설명하면 다음과 같다.

MAPS : Single Crystal Excitations, 단결정에서 고 에너지 여기 실험

eVS : Electron Volt Spectroscopy, 원자의 운동량 분포 측정 실험

SXD : Single Crystal Diffraction, Wavelength sorted Laue diffraction and diffuse scattering

MARI : $S(Q, \omega)$ Vibrational and Magnetic Spectroscopy, 3° 부터 135° 까지 연속적으로 측정할 수 있는 Chopper 분광계

LAD : Liquids and Amorphous Diffraction, glass, liquid, gas의 structure factor 측정, 자기 회절

PEARL : High Pressures and Engineering, 응력 측정, 고압 회절

HRPD : High Pressure Powder Diffraction, 고 분해능 분말 회절

DEVA : Muon Test Beam, Muon development beam (user-supplied)

MuSR : Implanted Muon Spectroscopy, 종방향, 횡방향 & '0' field

EMU : Implanted Muon Spectroscopy, 종방향 & '0' field

SANDALS : Small Angle Liquids and Amorphous Diffraction,

PRISMA : Coherent Excitations and Single Crystal Diffraction, 단결정에 phonon & magnon 측정, 고 분해능 단결정 회절

ROTAX : Multipurpose Instrument, 분말 & 단결정회절, texture 분석, 결정 분광

CRISP: Specular Reflection from Surfaces and Interfaces, 중성자 반사계

SURF : Specular Reflection from Interfaces, 중성자 반사계

LOQ : Small Angle Scattering, 큰 규모의 구조 연구를 위한 중성자 산란

OSIRIS : Polarization Analysis Spectroscopy and Diffraction

IRIS : Low Energy Spectroscopy and Long d-spacing Diffraction

POLARIS : High Intensity Diffraction

TOSCA : Molecular Spectroscopy and Crystal Fields

HET : Excitations at Low Momentum Transfer

RIKEN : Muon Instrument

이상 23종의 각종 Instrument가 설치 완료되어 사용되고 있다.

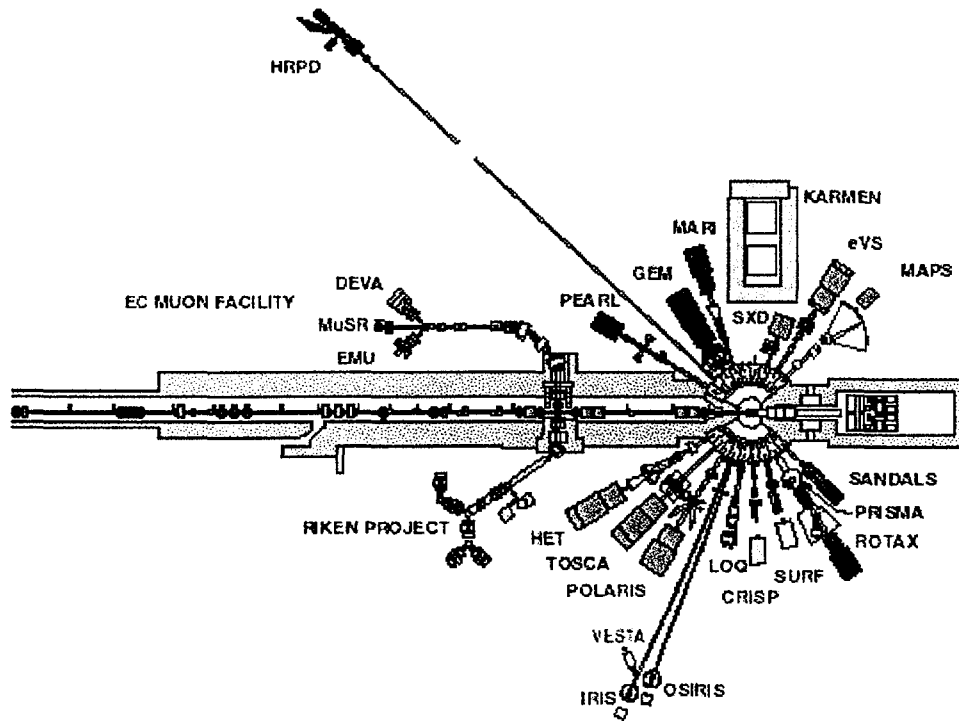


그림 7.25 ISIS instruments

(2) 이용 분야 현황

(가) CRYSTALLOGRAPHY

crystallography program은 주로 two powder diffractometer HRPD와 POLARIS 그리고 single crystal instrument SXD를 사용한다. 또한 LAD, ROTAX, IRIS 그리고 PEARL instrument를 사용하는 실험도 있다.

(나) DISORDERED MATERIALS

이 분야의 연구에는 현재 Liquids and Amorphous Diffractometer, LAD와 Small Angle Neutron Diffractometer for Amorphous and Liquid Samples, SANDALS 두 대의 Diffractometer가 사용되고 있다. 그리고 200 대의 계측

element가 곧 설치될 예정이며, 새로이 GEM (General Materials Diffractometer)가 설계되고 있다. GEM은 LAD를 대체할 것이다.

(다) LARGE SCALE STRUCTURES

Soft matter, complex fluids, 표면 그리고 계면 연구에 SANS (Neutron Reflectometry and Small Angle Neutron Scattering) 장비가 주로 사용되고 있다. 그리고 pulsed형 중성자원의 특징을 관찰하기 위해 LOQ, CRISP, 그리고 SURF 등의 장비가 사용되고 있다.

(라) EXCITATIONS

이 분야의 연구에는 HET와 MARI 두 대의 chopper 분광계와 간접 geometry 분광계인 PRISMA, 그리고 다용도 회절계인 ROTAX가 사용된다. PRISMA는 critical 산란과 회절 측정에 사용되기도 한다. ALF 장치는 단결정 정렬과 특성 파악에 사용된다.

(마) MOLECULAR SPECTROSCOPY

전 영역의 분자 진동을 연구할 수 있는 분광계를 제공하고 있다. high flux의 저에너지 중성자와 높은 분해능을 통해 느린 확산과정에 있는 분자나 빠른 tunnelling 과정중의 분자들에 대한 동특성 연구가 가능하다.

(바) MUONS

Condensed matter와 재료 과학 분야에서 muon 분광을 위해서 MuSR, EMU, 그리고 ARGUS 세대의 분광계가 설치되어 활용되고 있다.

(사) ENGINEERING AND INDUSTRIAL USES OF ISIS

ENGIN PREMIS programme에 따라 1995년 12월에 EC가 완성됨과 더불어 현재 ENGIN의 건설과 commissioning이 완료된 상태이다. 특히 작년 1년간 ENGIN instrument에 sample 배열을 위한 폐쇄회로 TV와 laser가 설치되는 등 상당한 개선이 있었다. 또한 최초로 항공우주 분야에 쓰이는 재료인 silicon carbide reinforcing fibers에 대한 stress 측정, 복합재료에 대한 thermal cycle-induced strain의 dynamic monitoring, 전자빔 용접후 열처리에 관한 연구 등이 이루어지는 등 많은 공학적인 연구가 가능한 상태이다.

(아) INDUSTRIAL USES OF ISIS

산업체에서 ISIS를 이용하는 경로로는 현재 세 가지가 가능하다. 먼저 직접 경비를 지불하여 beamtime을 구입하는 방법이 있다. 이 방법을 사용할 경우 연구결과를 공개적으로 발표해야하는 등의 제약 없이 비공개적인 연구를 수행할 수 있다. 다음으로 대학과 연계하여 사용하는 방법이 있는데 이 방법은 특히 small angle and reflectometry 연구에서 주로 이용되고 있다. 끝으로 ISIS를 계속적으로 사용할 대학 등에 연구를 위임하는 방법이 있다. LAD의 elastic scattering instrument에서 이루어지고 있는 FINEMET glass에 관한 연구, SANDALS에서 이루어지고 있는 CFC refrigerant에 관한 연구 등 현재 ISIS에서 이루어지고 있는 과학적 성과의 상당부분이 산업체와 긴밀한 연관을 지닌 것이다.

(자) RIKEN

RIKEN muon facility는 현재 세계에서 가장 강력한 pulsed decay muons (m^+/m^-)과 m^+ surface muons을 제공하고 있다. muon catalyzed fusion 연구를 위한 port가 현재 완성이 되었다. 또한 ARGUS라고 하는 mSR 실험을 위한 port가 건설되고 있다. RIKEN에서는 현재까지 exotic magnetism, high T_c superconductors, conducting polymers and semiconductor 등과 관련해 중

요한 성과를 올리고 있다.

(차) KARMEN

KARMEN experiment는 1990년부터 장기과제로 시작되었는데 그 후로 약 2000회의 neutrino interaction이 기록되어 분석되었다. 앞으로 KARMEN detector에서는 neutrino oscillation과 anomaly observed neutral event에 중점을 두고 연구를 진행할 계획이다.

(카) CONDENSED MATTER THEORY

이 분야에서의 연구에는 neutron Compton scattering, inelastic scattering of circularly polarized X-ray등을 포함하고 있다.

(3) 장치 이용 현황

이용자들을 위해 ISIS에서는 이용자 연락사무국(User Liaison Secretariat, ULS)을 운영하고 있는데 이곳이 이용자의 접수와 과제의 조직에 중심적인 역할을 하게된다. ISIS의 beam을 사용하기 위한 과제계획서는 해마다 1000편 이상이 접수되고 있다. 이들은 ISP(ISIS Scheduling Panels) meeting을 위해 이용자 연락사무국에서 종합적으로 기록되게 된다. 현재 과제계획서 서식은 인터넷을 통해 구할 수 있다. ISIS의 인터넷 주소는 다음과 같다.

<http://www.isis.rl.ac.uk>

1998년도와 1999년도의 ISIS schedule을 표7.11과 표7.12에 나타내었다.

Cycle	Start	End	Duration
Cycle 98/1	25 Mar 98	30 Apr 98	36.3 days
Cycle 98/2	13 May 98	18 Jun 98	36.3 days
Cycle 98/3	30 Sep 98	05 Nov 98	36.3 days
Cycle 98/4	18 Nov 98	17 Dec 98	29.3 days
Cycle 98/5	06 Jan 99	11 Feb 99	36.6 days

표 7.11 ISIS 1998년도 schedule

Cycle	Start	End	Duration
Cycle 99/1	19 May 99	24 Jun 99	36.3 days
Cycle 99/2	07 Jul 99	12 Aug 99	36.3 days
Cycle 99/3	29 Sep 99	04 Nov 99	36.3 days
Cycle 99/4	17 Nov 99	19 Dec 99	32.6 days
Cycle 99/5	12 Jan 00	17 Feb 00	36.3 days

표 7.12 ISIS 1999년도 schedule

마. IPNS(Intense Pulsed Neutron Source)

(1) 장치 현황

IPNS는 1981년부터 가동을 시작하였다. IPNS의 구성은 다음과 같다.

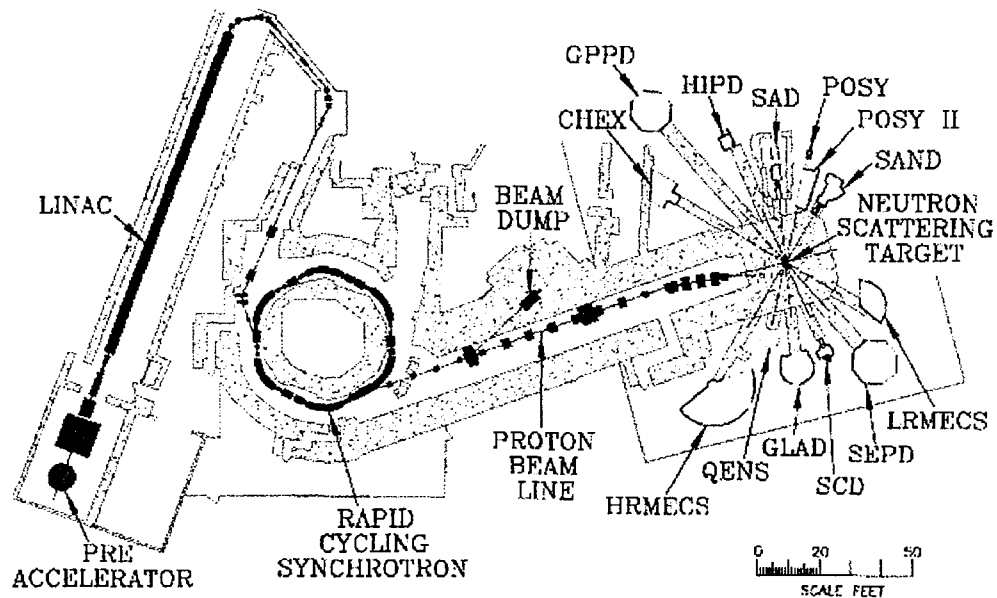


그림 7.26 IPNS의 구성도

IPNS의 가속기는 H⁻ ion source, a Cockcroft-Walton preaccelerator, a 50 MeV Alvarez linac, a 500 MeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS), transport lines 그리고 ancillary subsystem (controls, diagnostics, services)으로 구성되어 있다. 가속기는 통상 average beam current가 14에서 15 μ A에서 동작하며 초당 30회의 펄스로 3×10^{12} protons (450 MeV)을 target으로 보내게 된다. preaccelerator와 linac은 1961년부터 동작을 시작하였으며 1979년에 shutdown하기 전까지 12.5 GeV Zero Gradient Synchrotron (ZGS)의 injector로 사용되었다. RCS는 1970년대 중반부터 ZGS의 booster로서 개발되기 시작하였는데 ZGS가 shutdown됨에 따라 개발계획이 중단되었다. 대신, RCS가 초기에 (1977-1980) ZING experimental target

으로 beam을 공급하는데 쓰이다가 1981년부터 현재의 IPNS target으로 beam을 공급하였다.

(가) Ion Source and Preaccelerator

H-ion source와 부대설비비들은 750kV Cockcroft-Walton preaccelerator의 terminal로 장착되어 있는데 H-ion source는 magnetron type으로서 negative ion은 source cathode의 표면에서 형성되는 hydrogen plasma로부터 직접 인출되는 구조이다. extractor electrode와 magnet pole은 terminal ground potential이고 source 자체와 H- 형성에 크게 기여하는 cesium supply 등은 negative 20 kV potential이 된다. H- beam은 우선 인출이 된 후 전자들을 제거하기 위해 magnetic dipole에 의해 90° 로 휘게되고 세 개의 quadrupole magnet에 의해 집속이 된 다음 preaccelerator로 들어가게 된다. preaccelerator에서는 약 30 mA, 750keV, 70 μ s pulse를 약 30 Hz의 repetition rate로 생성시킨다.

(나) Linac

linac은 직경 0.94m, 길이 33.5m의 copper-clad-steel structure이다. linac은 11개의 section으로 구성되어 bolt로 연결되어 있는데 dc quadrupole magnet을 포함하는 총 124개의 drift tube로 되어있다. magnet의 경우 12개의 series group으로 나누어져 있는데 service floor에 위치한 12 개의 dc power supply에서 전력을 공급한다. linac의 진공도는 통상 $2-3 \times 10^{-7}$ torr 정도인데 7대의 ion pump와 2대의 cryo pump로 유지된다. 냉각 방식은 closed-loop의 수냉식으로 동작 중 cavity의 tuning을 유지하기 위해 온도변화는 0.2 $^\circ$ F 이하로 유지된다. 200 MHz pulsed rf power는 4-stage amplifier로부터 얻어지는데 amplifier의 output stage는 7835 triode로서 normal operating level이 3 MW, peak-power rating이 5 MW이다. linac에서부터 나오는 50 MeV beam은 직경이 약 1cm 정도이고 pulsed current가 약 10mA 정도이다.

(다) Rapid Cycling Synchrotron (RCS)

RCS는 강한 집속력을 지닌 다기능 synchrotron으로서 six-period machine인데 magnet structure는 DOOFDF0이고 둘레길이는 42.95m 이다. ring magnet은 0.28T에서 1.0T의 자기장을 생성하여 beam이 50MeV에서 500MeV까지 가속되는 동안 일정한 beam orbital radius를 유지하게 한다. 그리고 두 개의 sextupole magnet은 30Hz programable power supply에 의해 구동되는데 이를 통해 betatron tune correction과 manipulation이 가능하다.

(2) 이용 현황

현재 IPNS에 장착되어 운영되는 instrument를 그림 7.27에 나타내었는데 이를 이용 현황별로 정리하면 다음과 같다.

(가) Diffractometers for Measuring Atomic Positions

GLAD (Glass Liquid and Amorphous Diffractometer)

GPPD (General Purpose Powder Diffractometer)

HIPD (High Intensity Powder Diffractometer)

SCD (Single Crystal Diffractometer)

SAD (Small Angle Diffractometer)

SAND (Small Angle Neutron Diffractometer)

SEPD (Special Environment Powder Diffractometer)

(나) Spectrometers for Measuring Atomic Motions

HRMECS (High Resolution Medium Energy Chopper Spectrometer)

LRMECS (Low Resolution Medium Energy Chopper Spectrometer)

QENS (Quasi-Elastic Neutron Spectrometer)

CHEX (Chemical Excitation Spectrometer)



IPNS EXPERIMENT FACILITIES

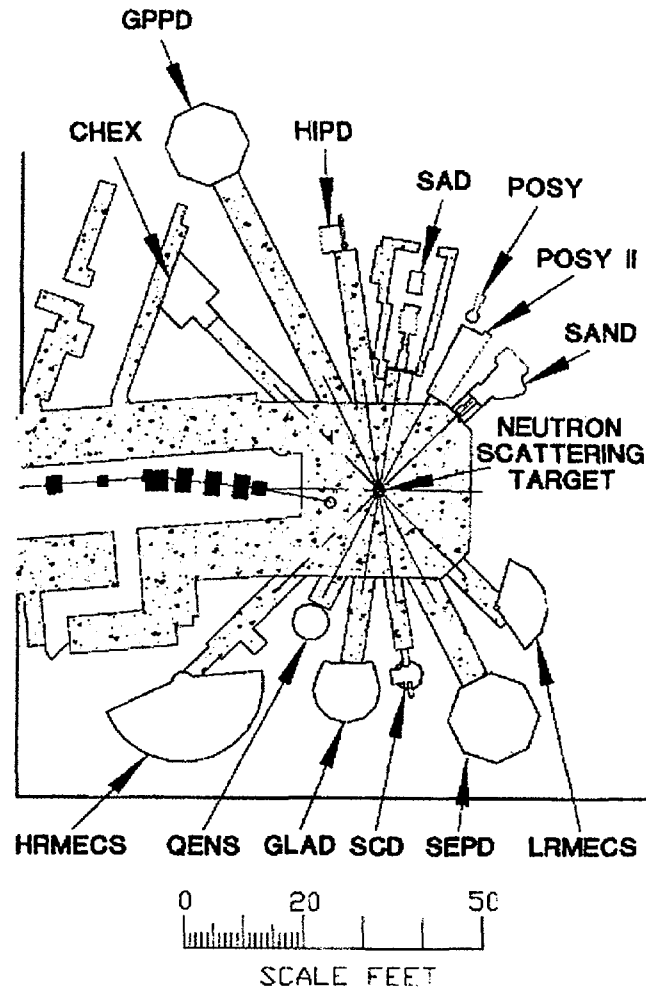


그림 7.27 IPNS에 장착된 Instruments 구성도

Reflectometers for Measuring Surface Properties

POSY (Polarized Neutron Reflectometer)

POSY II (Unpolarized Neutron Reflectometer)

그리고 그림 7.28에는 1998년 10월부터 1999년 9월 (FY1999) 까지의 IPNS 운영계획을 보였다.

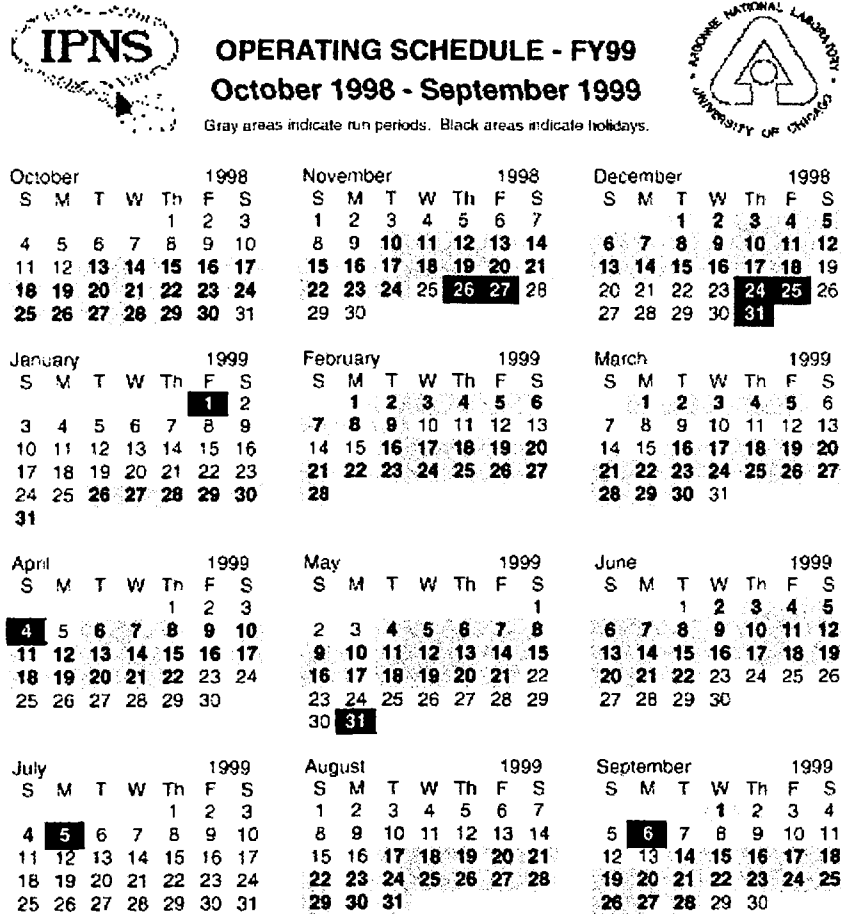


그림 7.28 FY1999 IPNS Operation Schedule

바. SNS (Spallation Neutron Source), 미국

(1) 장치 현황

SNS는 가속기 구동형 중성자원으로서 1996년부터 개념 설계에 들어가 있고, 2000년 초에 부지 작업을 시작하여 2005년에 완공할 계획이다. 총 사업 규모는 약 13억 \$이다. ISIS (Rutherford Appleton Lab, UK)와 같이 spallation에 의해 중성자를 생산해 내는 형식이나, 그 규모나 파워 (중성자속, 최대 peak 출력, 평균 출력) 면에서, 현재 예산이 확보되어 있는 과제 중 최대이다. 그림 7.29는 현재 가동되고 있는 중성자 발생 시설과 SNS의 중성자속을 비교한 것이다. ESS (European Spallation Source, EU), NSP (Neutron Science Project, Japan) 등은 이보다 더 큰 출력으로 설계되고는 있으나 SNS가 가장 근간에 건설될 것이며, 그 후 수 년간은 이 분야의 과학, 기술을 이끌 전망이다. SNS는 ORNL (Oak Ridge National Laboratory)을 중심으로 과제를 수행하고는 있으나 실제적인 일은 미국의 5개 국립 연구소 (Argonne, Brookhaven, Lawrence Berkeley, Los Alamos, and Oak Ridge)가 공동으로 수행한다. 각 연구소는 각자의 전문 분야를 맡아, 그 부분의 설계, 건설, 조립, 그리고 최종 설치 전부를 책임진다. 이러나 과제 수행 체계는 대형 과제 수행의 새로운 접근 방식으로 앞으로 전개될 대형 과제의 모델이 될 것으로 전망된다. 그림 7.30은 SNS 건설 계획표이며 그림 7.31은 SNS 장치 조감도이다. 장치의 주요 규격은 표 7.13과 같다.

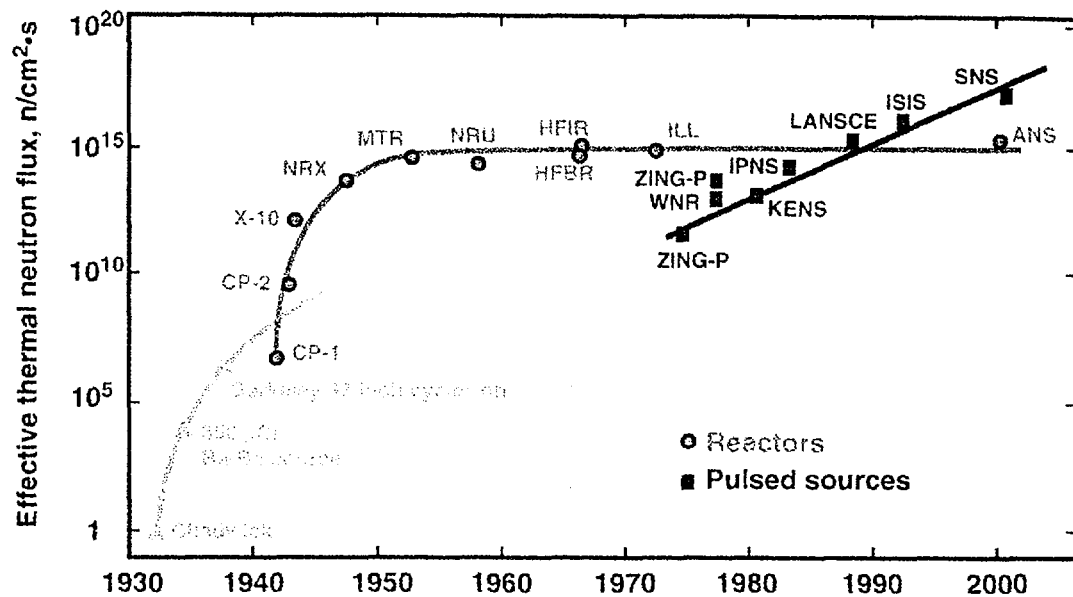


그림 7.29 중성자원 비교 도표

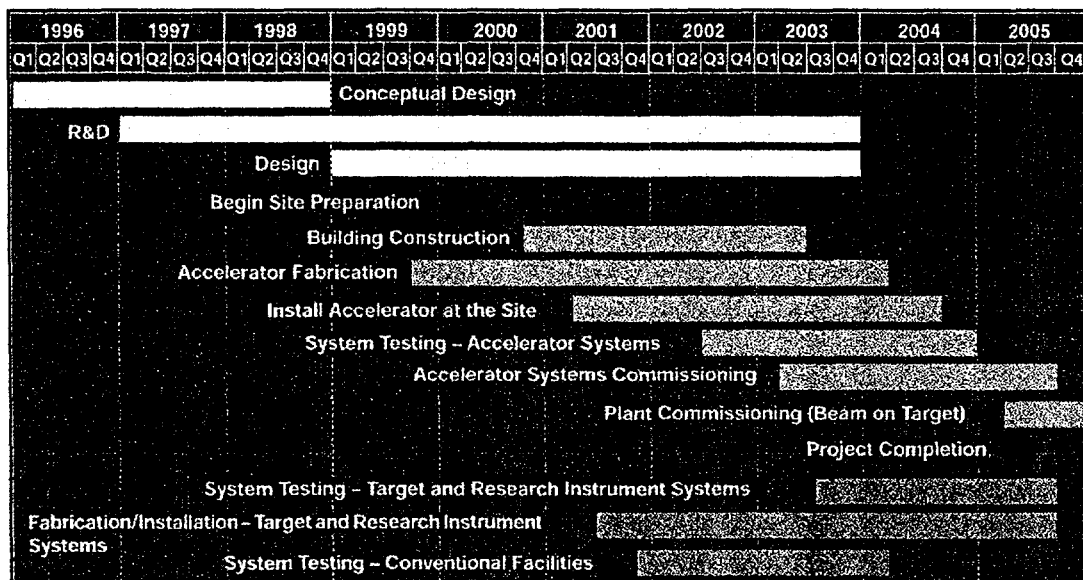


그림 7.30 SNS 건설 계획

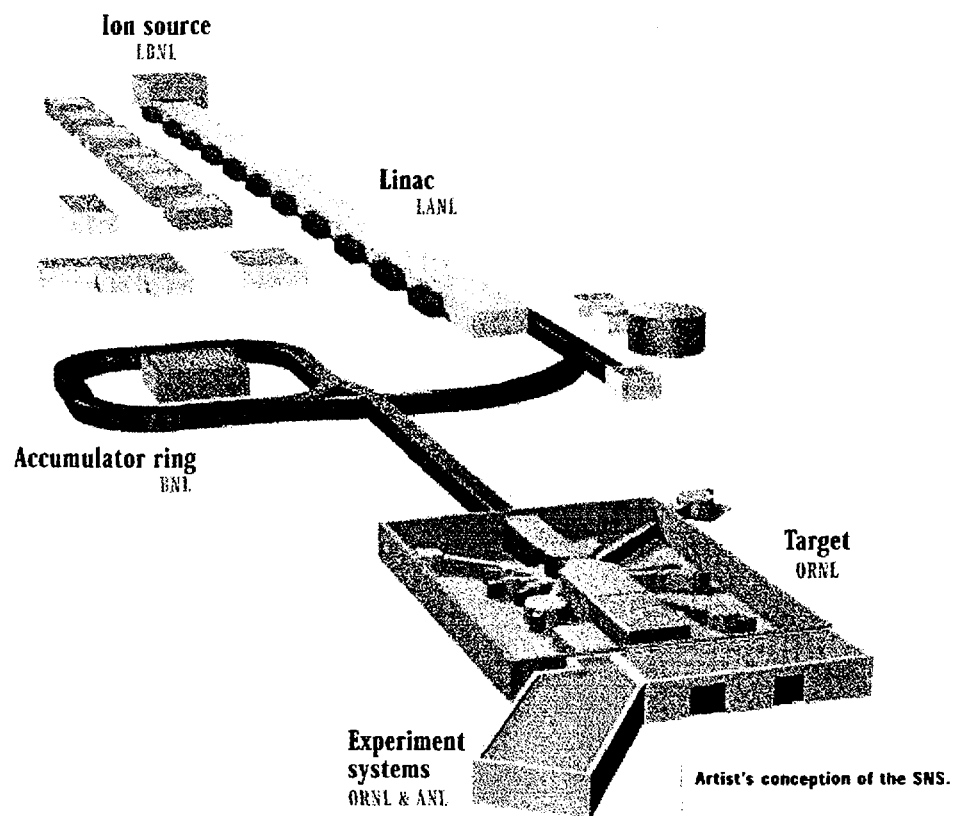


그림 7.31 SNS 조감도

	INITIAL 1.0 MW	UPGRADE TO 2.0 MW
Pulse repetition rate (Hz)	60	
Peak ion source H - current (mA)	35	70
Front-end efficiency (%)	>80	
Linac length (m)	493	
Linac capture-acceleration efficiency (%)	100	
Linac beam duty factor (%)	6	
Linac final beam energy (GeV)	1.0	
Accumulator ring circumference (m)	220.7	
Ring controlled injection loss (%)	<4	
Ring orbit rotation time (ns)	841	
Pulse length at ring injection (ns)	546	
Kicker gap at ring injection (ns)	295	
Ring filling fraction (%)	65	
Number of injected turns	1158	
Ring filling time (ms)	0.97	
Protons per pulse on target	1.04×10^{14}	2.08×10^{14}
Protons per second on target	6.3×10^{15}	1.25×10^{16}
Time average beam current on target (mA)	1.0	2.0
Target	Hg	
Beam power on target (MW)	1.0	2.0

표 7.13 SNS 장치 규격

(가) Ion Source

Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)

ion source : H- ion

beam formation

control hardware

low-energy beam transport & acceleration system : up to 2.5 MeV

(나) Linac

Los Alamos National Laboratory (LANL)

acceleration : from 2.5 to 1000 million electron volts (1 GeV).

linac length : approximately 1500-feet-long

beam handling & diagnostic systems

(다) Accumulator Ring

Brookhaven National Laboratory (BNL)

Role : bunching & intensifying ion beam

linac에서의 빔 pulse보다 약 1000 배 이상 압축

pulse width : $< 1 \mu\text{sec}$

pulse repetition rate : 60 Hz

(라) Target (그림 7.32)

Oak Ridge National Laboratory (ORNL)

liquid mercury target

moderator : water (상온 중성자 생산)

20 K 수소 (저온 중성자 생산)

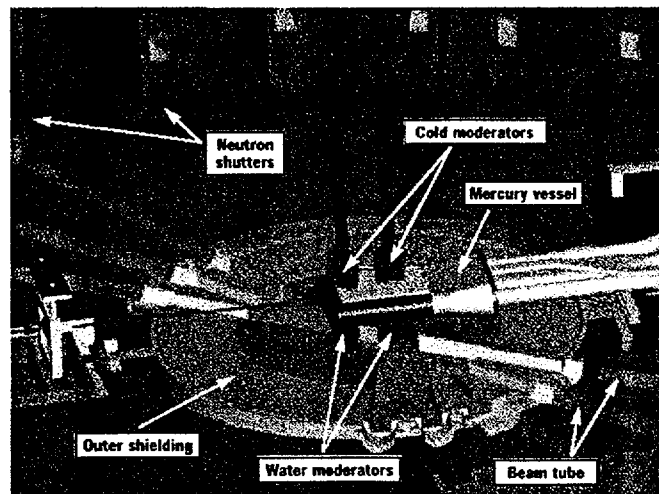


그림 7.32 SNS target

(마) Instrument

Argonne National Laboratory (ANL)

정확한 설비는 아직 결정이 안되었지만 대략 그림 7.33과 같이 구성된다.

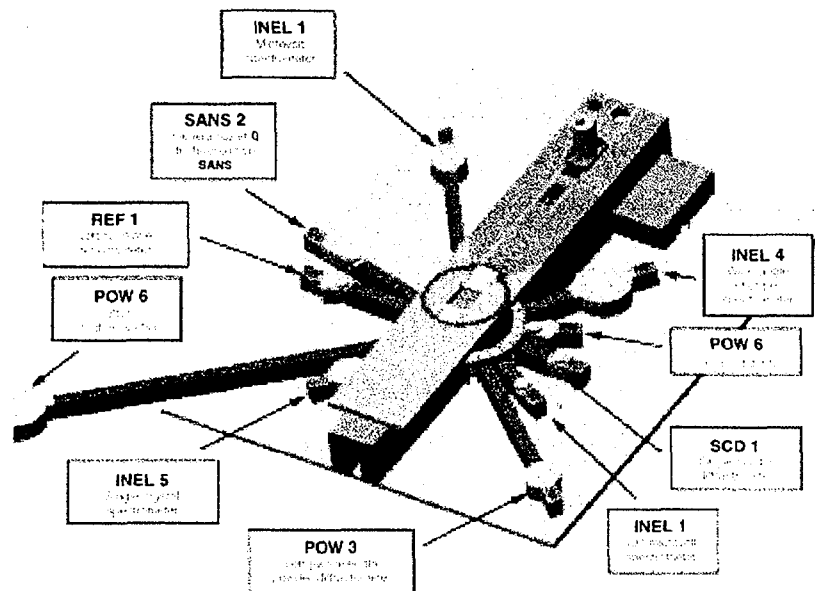


그림 7.33 SNS instruments 개략도

장치 초기 ;

target station : 1개

(water moderator; 2개, 20 K hydrogen moderator; 2개)

18 beam line

(2) 장치 이용 현황

대부분의 중성자 장치는 10 여년전에 지어진 것으로, 물질의 정확한 구조 파악이라든지 새로운 재료의 개발에는 많은 한계를 갖고 있다. 이러한 한계를 극복하고 새로운 세계를 열기위해서 SNS에서는 다음에 열거된 분야에서 중추적인 역할을 담당할 것이다.

화학

자기 & 초전도

단결정 재료

생물

Polymer

Disordered Material

Complex Fluid

공학

(3) 이용 예측

SNS에는 산업체와 연구계에서 대략 연간 1,000 명에서 2,000 명 정도가 사용할 것으로 예측하고 있다. 사용자가 중성자 실험에 전문가가 아닌 경우를 대비해 SNS 측은 instrument 작동을 위해 과학자, 기술자를 유치해 사용자의 편의를 도모할 예정이다. 1996년에 개최된 Users Workshop on Instrumentation Needs and Performance Metrics에서 사용자측은 장치 완성 초기에 10개의 중성자 실험 instrument를 설치할 것을 권장했다.

사. ESS (European Spallation Source), EU

(1) 장치 현황

현재 ISIS, LANSCE, IPNS 등의 대강도 중성자원이 있기는 하나, 중성자 산란 실험은 그 강도의 제한으로 실험의 한계를 갖고 있다. 모든 과학 분야의 중성자 이용자들의 한결같은 의견은 '더 높은 정밀도와 분해능'이다. 원자로에서 발생하는 중성자는 이미 그 한계가 들어 났다. 현재 요구되는 중성자 강도는 ISIS보다 30배 이상이다. 즉 열중성자 속이 최대 $1 \sim 2 \times 10^{17} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 정도이다. ESS는 이와같은 사회적인 요구 조건을 충족시키기 위해서 제안된 가속기 구동형 중성자원이다.

ISIS보다 30배 강한 빔과 첨단의 pulsed 중성자원을 위한 instrument를 결합하게 되면 실제로는 약 수 천배까지의 effective intensity gain을 얻을 수 있다. 이럴 경우 여러 분야에서 그 위력을 발휘하게 된다. 열거하면 다음과 같다.

- 시간과 공간적 모두에서 고 분해능을 얻을 수 있다.

- precise structure refinement of increasingly complex systems,
 - excitation spectra of more complex systems,
 - dynamics of quasi-crystals,
 - spectral studies of biomolecules

- 미세 신호를 감지할 수 있다.

- full polarization analysis
 - (separation of coherent and incoherent scattering; magnetism),
 - subtle effects in controlling the behaviour of new materials
 - (e.g. high T_c superconductors)
 - smaller differences in the technique of isotope substitution
 - (biology, biotechnology, pharmaceuticals)

- 매우 짧은 시간에 측정을 할 수 있다.

extend the parameter space, i.e. more measurements possible with variations in pressure, temperature, magnetic or electric field, concentration etc., real time studies of chemical reactions, structural and dynamic measurements of catalysis, kinetic processes and materials behaviour under non-equilibrium conditions, industrial process optimization,

- 소규모의 시스템으로 양질의 측정을 할 수 있다.

inherently small samples such as a crack tip, small samples only available (biomolecules; new materials; isotopically enriched specimens), surfaces and interfaces, solutions at low concentrations (important for studying biomolecular interactions)

- 보다 극한 조건을 만들어 줄 수 있다.

very high pressure (25 GPa and beyond), extremely low temperatures (nK to pK), stable only over a limited time, magnetic fields beyond 15 Tesla (can be obtained in pulsed mode only)

이와 같은 분위기에서 ESS는 기획되었고, 참여 국가는 Austria: Belgium: Czech Republic: Denmark: France: Germany: Hungary: Italy: Netherlands: Norway: Poland: Russia: Spain: Sweden: Switzerland: United Kingdom: 이다. 아래에는 그 역사를 정리한 것이다.

1977 - 1984 ISIS 개발

1979 - 1985 National German Spallation Source SNQ 타당성 조사
(Beam power : up to 5.5 MW)

1984 ISIS 첫 가동

1985 German SNQ 계획 무산

1990 CEC 위원단 권고 : 차세대 중성자원 연구 시작

1991 - 1992 Joint initiative from Forschungszentrum Jülich and Rutherford Appleton Laboratory (UK): ESS 개념 정립 Workshop 개최

1993 ESS Scientific Council 설립

1993 - 1996 5 MW ESS에 대한 EU 국가 연구 시작

Dec. 1996 ESS 최종 보고서

Vol I - The European Spallation Source

Vol II - The Scientific Case

Vol III - The Technical Study

1997 - 2001 ESS R&D Phase

현재 추진되고 있는 R&D는 다음과 같다.

ESS Accelerator

R&D work on Accelerator Components, at FZ Jülich

ESS Targets

R&D work on Materials Investigations, at FZ Jülich

R&D work on Nuclear Investigations on Spallation Sources, at FZ Jülich

R&D work on Target Engineering, at FZ Jülich

ESS Instruments

R&D work on Simulation of Virtual Instruments, at HMI Berlin

R&D work on Single Crystal Diffraktometer on Spallation Sources, at HMI Berlin

R&D work on Neutron-Spin-Echo-Spectroscopy on Spallation Sources,

at FZ Jülich

R&D work on Multiplexing on Spallation Sources, at FZ Jülich

(2) 장치 설명

ESS는 선형가속기, accumulator ring 그리고 두 개의 target station으로 설계되었다. 그림 7.34는 ESS 장치의 조감도이고 그림 7.35는 개략도이다.

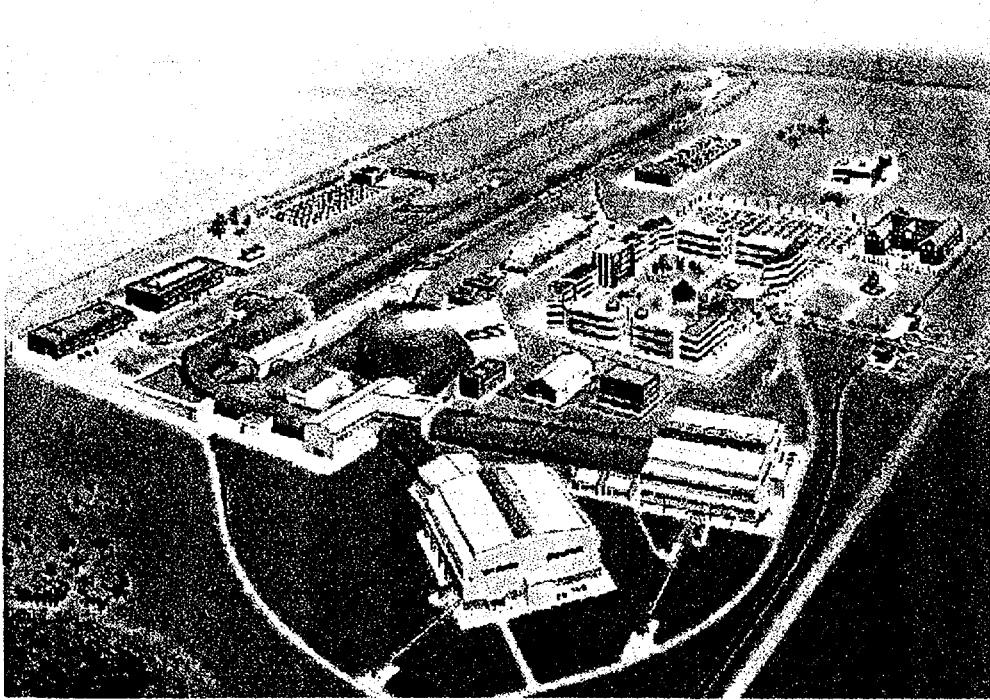


그림 7.34 ESS 조감도

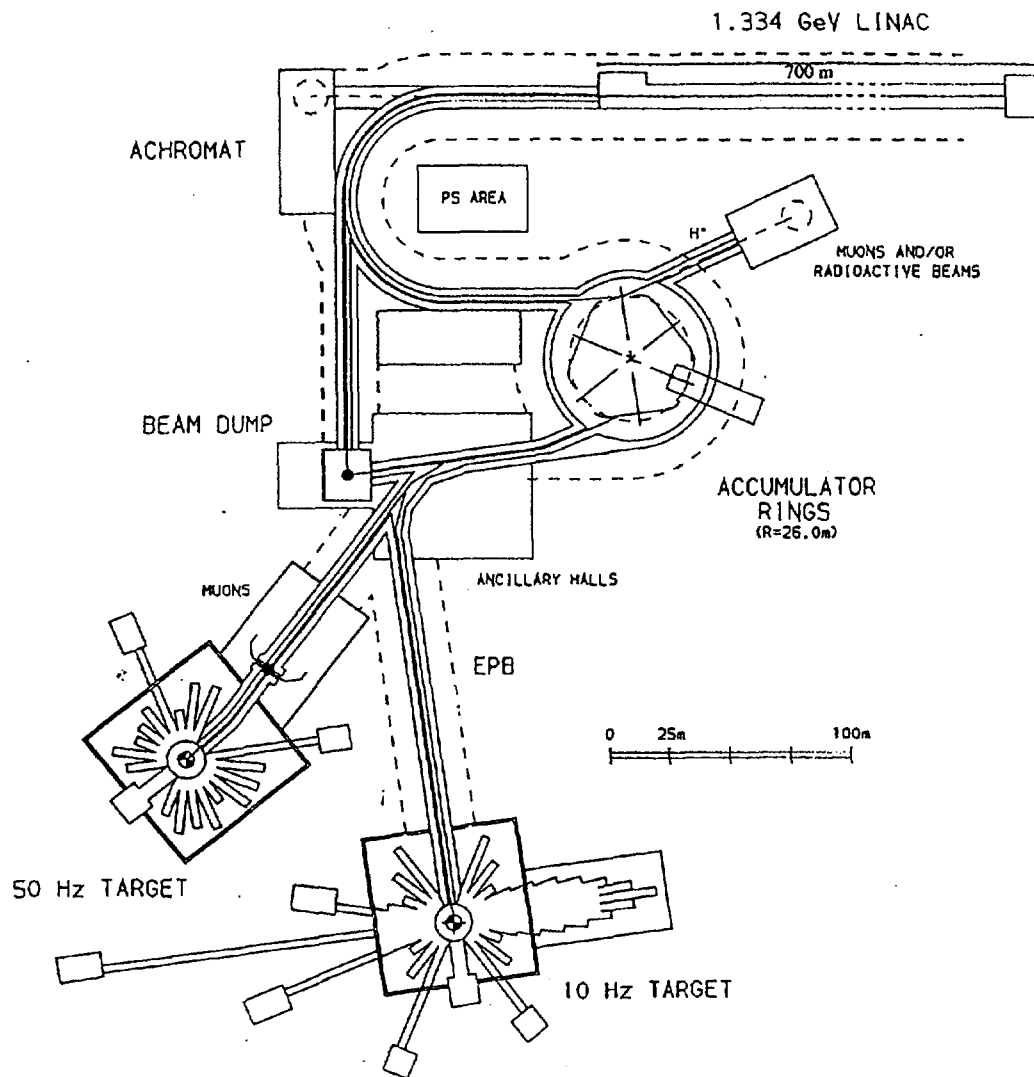


그림 7.35 ESS layout

ESS source 규격

ESS source 규격은 다음에 열거된 사항에 기반을 둔다.

50 Hz로 양성자 빔 평균 출력 5 MW;

Target에서 양성자 빔 pulse 폭 $1 \mu s$ 이하;

50 Hz target station에서 5 MW 빔을 수용;

10 Hz target station에서 1 MW 빔을 수용;

표 7.14는 ESS의 주요규격을 정리한 것이다.

Accelerator (target에서 빔 출력 : 5 MW)		
Linac	Beam Energy	1.334 GeV (H-)
	Beam Power (Average)	5.1 MW
	Average/Peak Power	3.8/107 mA
	Repetition Rate	50 Hz
	Beam Pulse Duration	2 x 0.6 ms
	Beam Duty Cycle	6.0 %
	Length (75% filling factor)	~710 m
Two accumulato r rings	Frequency of Parallel Operation	50 Hz
	Number of circulating protons per ring	2.34×10^{14}
	Revolution Frequency	1.6714 MHz
	Bench Length at injection	0.4 μ s
	Dual Harmonic RF System	h=1, h=2
	Mean Radius	26 m
Two target stations	Beam Power	4 or 5 MW 1MW
	Energy per Proton	1.334 GeV
	Time Structure per Proton Pulse	2 x 0.4 μ s
	Energy Content of Proton Pulse	100 kJ
	Repetition Rate	50 Hz 10 Hz
	Proton Beam Dimension at Target (Elliptical shape)	60 mm x 200 mm
	Target	Flowing mercury target (Horizontal injection)
	Moderator	상온 H ₂ O 액체 H ₂ 초임계 H ₂
	Reflector	Pb, D2O 냉각
	Average Thermal Flux	7×10^{14} n/cm ² s
	Peak Thermal Neutron Flux	2×10^{17} n/cm ² s
	Decay Time of Flux	150 μ s

표 7.14 ESS 주요 규격

두 대의 target station으로 설계되어 있는데 하나는 10 Hz/1 MW로 장 파장 중성자 이용을 위한 것이고, 다른 하나는 50 Hz/4 MW로 대강도, 고 분해능을 위한 것이다.

ISIS의 경험을 바탕으로 첨단의 중성자 instrument를 계획하고 있는데 다음과 같다.

Table 1 : Target Station 1 - High Frequency 50 Hz

a) Ambient High Resolution Moderator (9 Instruments)

Name	Description	Length
1d	High Intensity Powder Diffractometer	15 m
2d	Liquids and Amorphous Diffractometer	10 m
3d	Single Crystal Diffractometer	10 m
1s	High Energy Chopper Spectrometer	10,6 m
2s	Polarised High Energy Chopper Spectrometer	10,4 m
3s	Electron Volt Spectrometer	15 m
4s	Medium Energy Chopper Spectrometer	10,3 m
5s	Molecular Spectrometer	15 m
1n	Nuclear Physics Instrument	50m

b) Cold High Resolution Moderator (15 Instruments)

Name	Description	Length
4d	Biology Diffractometer	20 m
5d	High Pressure Powder Diffractometer	12 m
6d	Special Environment Single Crystal Diffractometer	15 m
7d	High Intensity Small Angle Scattering Instrument	10 m
6s	Low Energy Chopper Spectrometer	10,6 m
7s	Polarised Low Energy Chopper Spectrometer	10,3 m
8s	Polarised Crystal Analyser SX Spectrometer	25 m + guide
9s	Crystal Monochromator Spectrometer	10,2 m
10s	Multi-Chopper Low Energy Spectrometer	15 m + guide
11s	Near-Backscattering Spectrometer	40 m + guide
12s	Backscattering Spectrometer	15 m + guide
1e	Engineering Diffractometer	15 m
2e	Engineering Diffractometer	15 m
3e	Radiography and Tomography Instrument	10, 30, 100 m
2n	Ultra Cold Neutron Nuclear Physics Instrument	10 m

Table 2 : Target Station 2 - Low Frequency 10 Hz

a) Cold High Intensity Moderator (8 Instruments)

Name	Description	Length
8d	High Intensity Reflectometer	10 m
9d	Chemistry Reflectometer	15 m
10d	Small Angle Scattering Instrument	20 m + Guide
11d	Polarised Beam Small Angle Scattering Instrument	10 m
13s	High Intensity Single Crystal Spectrometer	40 m + Guide
14s	Polarisation Analysis Near-Backscattering Spectrometer	35 m + Guide
15s	Spin Echo Spectrometer	12 m
3n	Nuclear Physics Instrument	20 m + Guide

b) Cold High Resolution Moderator (12 Instruments)

Name	Description	Length
12d	High Resolution Powder Diffractometer	75m + Guide
13d	Ultra High Resolution Powder Diffractometer	150 m + Guide
14d	Polarised High Intensity Powder Diffractometer	10 m
15d	Magnetic Powder Diffractometer	50 m + Guide
16d	Liquides and Amorphous Diffractometer	25 m
17d	Magnetic structures SX Diffractometer	20 m
18d	Extreme Conditions Diffractometer	40 m + Guide
19d	Physics Reflectometer	15 m
20d	Small Q Diffractometer	20 m + Guide
16s	Polarised Crystal Analyser SX Spectrometer	40 m + Guide
17s	Backscattering Spectrometer	90 m + Guide
18s	Molecular Spectrometer	25 m + Guide

(2) 이용 분야 현황

ESS도 SNS와 마찬가지로 새로운 재료의 개발과 정확한 물성의 파악이 주요 이용분야이다. 이 분야의 중요성이 부각되는 것은 거의 대부분의 이공학이 중국에는 재료의 특성 한계로 인해서 벽에 부딪히는 경우가 많기 때문이다. 즉, 정확한 물질의 특성 파악이 새로운 물질의 개발에 밑거름이 되고 이로부터 보다 경제적이고, 강하고, 가볍고, 극한 상황에서 사용할 수 있는 신 재료를 개발하여 새로운 과학 문명의 장을 연다는 것이 기본 연구 방침이라고 할 수 있다. 이용 분야는 다음과 같다.

- Polymers and soft matter
- Disordered materials
- Structural materials chemistry
- Chemical reactivity & molecular motions
- Biology and biotechnology
- Earth and environmental Sciences
- Engineering
- Condensed matter and materials physics
- Fundamental neutron physics

이 외에도 ESS에서는 아래의 실험을 계획하고 있다.

- Muon spectroscopy for condensed matter science and muon particle physics
- Neutrino studies
- Radioactive nuclear beams
- Irradiation for fusion materials research & development
- Isotope production

(가) 이용 예측

유럽의 17개국의 대표로 구성된 European Neutron Scattering Association (ENSA)에서 ESS의 이용 program을 주도할 것이다. 해마다 약 4,400 명의 이용자가 있을 것으로 예상하고 있으며, ESS 추진으로 ESS 건설 이후 이 분야에서 약 25년간 유럽이 전 세계에서 우위를 유지한다는 야심찬 포부를 갖고 있다.

아. NSF(Neutron Science Project), 일본

(1) 장치 현황

NSF는 현재 일본 원자력 연구소(JAERI)에서 추진하고 있는 프로젝트로서 1.5 GeV 5.3 mA 양성자 가속기 시설의 개발을 그 근간으로 하고 있다. NSF와 관련하여 원자력 분야에서 가장 큰 이슈중의 하나는 사용후 연료의 재처리 과정에서 발생하는 고준위 방사성 폐기물의 관리 문제인데 일본 원자력 위원회(Japan Atomic Energy Commission)는 이와 관련하여 1988년에 고준위 방사성 폐기물의 partitioning과 transmutation 연구프로그램인 OMEGA 프로젝트를 제안한 바 있다. 그 후 JAERI에서는 accelerator-driven transmutation system에 대한 연구에 착수하였다. 또한 근래에 기초과학 분야나 다양한 공학 분야에서의 응용을 위한 강력한 중성자원에 대한 관심이 증대되면서 기존에 중성자원으로 사용되던 fission reactor를 대체할 중성자원의 개발이 요구되었다. 그리하여 최근에는 강력한 양성자 가속기에 기반을 둔 새로운 중성자원의 기술로서 NSF가 제안된 것이다. 현재 NSF는 방사성 폐기물의 transmutation 외에도 meson/muon production, spallation RI beam, radio isotope production 등 다목적으로 이용 가능한 복합연구시설로 진행되고 있다. 그림 7.36에 NSF의 개념도를 나타내었다.

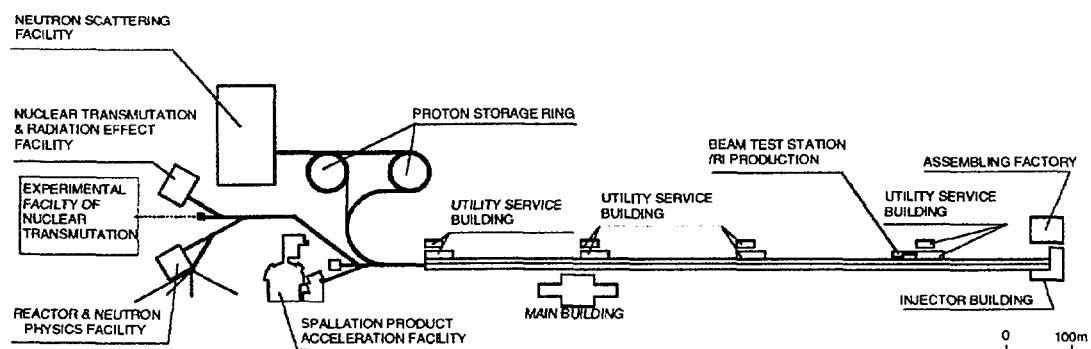


그림 7.36 Conceptual Layout for Neutron Science Project

JAERI에서는 원래 OMEGA 프로그램에 기반을 두고 1.5 GeV 에너지와 100 mA peak current, 10%의 duty factor를 가지는 선형가속기를 계획했었다. 이후 기초과학 분야와 transmutation 등 다양한 응용분야에서의 요구를 만족시키기 위하여 초전도 선형가속기 개념을 도입하는 것으로 계획을 변경하였다. 초전도 가속기는 우선 1단계로 핵파쇄를 위한 중성자원으로 pulse로 동작할 계획이며 이후 2단계로 CW로 upgrade할 예정이다. 초전도 선형가속기는 bore size가 커서 beam손실을 줄일 수 있고 선형가속기의 길이도 줄어드는 등의 장점을 지니고 있다. 그림2에 초전도 선형가속기의 기본 parameter들을 보였다.

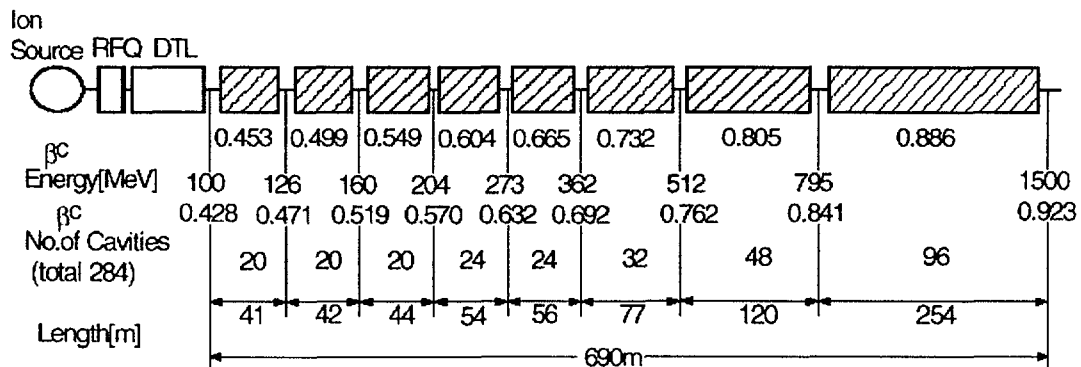


그림 7.37 Basic Parameters for Superconducting(SC) Accelerator

현재 NSF와 관련하여 진행중인 R&D item에는 다음과 같은 것들이 포함된다. 그리고 표 7.15에는 NSF 선형가속기의 주요 parameter들을 정리하였다.

- 1) the beam dynamic calculation including the high b linac.
- 2) the development of the negative ion source and the fabrication of high power test models for CW-RFQ and CW-DTL.
- 3) the SC cavity development with the KEK electron SC group
- 4) the high intensity proton storage ring
- 5) high power RF source development.

Energy	
Accelerated particle	1.5GeV
Beam current: 1st stage:	Negative and positive hydrogen ion Pulse average 1mA, peak 16.7mA (duration 2ms, repetition rate 50Hz)
2nd stage:	CW maximum 5.3mA Pulse average 5.3mA, peak 30mA
Low energy part	RFQ, DTL/SDTL Normal-conducting linac: 200MHz
High energy part	Super-conducting linac: 600MHz
Intermediate pulse width	400ns (interval 270ns)
Chopping factor	60%

表 7.15 A specification of the JAERI NSP-LINAC

Accelerated particle	H ⁻ 70keV
Energy	50mA
Current	0.1 π mm.mrad
Emittance(rms)	Single/multi-aperture
Type	Volume type

Specification of Negative Ion Source

	Pulse CW	Energy
Current	0.07 2MeV	0.07 2MeV
Frequency	20 - 40mA	-7mA
Peak field	200MHz 1.65Ek	200MHz 1.5Ek
Length	3.58m	3.91m
Pulse width	6ms	CW
Synchronize phase	-30°	-30°
Wall loss(60%Q)	325kW	300kW

Specifications of the RFQ

	DTL	SDTL
Energy	2-50MeV	50-100MeV
Current	30mA	30mA
Frequency	200MHz	200MHz
Accelerating gradient	1.5MV/m	1.5MV/m
Synchronize phase	-55° - -30°	-30°
Number of cells	179	85
Length	50.2m	47.8,
Focus gradient	50.8-5.0T/m	8.5-7.9T/m
Total wall loss(70%Q)	3.6MW	2MW

Preliminary Specifications of CW-DTL/SDTL

Kinetic energy	1.5 GeV
Repetition frequency	50 Hz
Harmonic number	1
Revolution frequency	1.49 MHz
Circumference	185.4 m
Magnetic rigidity	7.51 Tm
Circulating current	99.5 A
Number of circulating protons	2.08×10^{14} protons

Parameters for two 2.5 MW ring scheme

제 5 절 KOMAC 이용/응용 수요조사

1. 이용/응용 수요조사

4차에 걸쳐 KAPRA 회원, 전국 이·공 학회, 전국 이·공 대학, 생물분야의 전문가를 대상으로 KOMAC 이용/응용 수요조사를 실시하였다. KAPRA 회원의 경우, 1998년 6월 27일 KAPRA 정기 Workshop 개최시 참석한 회원에게 직접 수요조사를 실시하였으며, 추후 e-mail로 수요조사를 재실시하였다. 전국 이·공 학회 및 전국 이·공 대학을 1차적으로 선정한 이유는 첫 째, 본 연구가 가속기 사용자 프로그램 1차년 연구로 우선 가속기 분야에 관심이 있는 분야의 의견을 파악하고, 새로운 요구 사항을 미리 반영하여 이용/응용 분야를 다양화시키고자 함이었다. 추후 인문계를 비롯한 비전문가와 국민 전체의 의견과 관심 및 참여를 유도하는 방향으로 나아가야 할 것으로 판단된다. 둘째, 학회 및 학과장님의 경우 회람을 요청하여 주위 분들에게도 알려 가능한 한 많은 참여를 유도할 수 있는 점으로 그 파급 효과가 클 것으로 판단되었기 때문이다. 하였다. 또한, 수요조사 결과 Neutron Science 분야에 관심이 많이 집중되었으므로 이에 대하여 보다 자세한 정보를 얻기 위하여 생물 분야의 전문가들을 중심으로 수요조사를 실시하였다. 다음은 송부한 수요조사서 및 제안서이다 (예로써, 3차만 수록하였다. 이해를 돕기 위하여 필요한 자료 및 책자도 함께 첨부하여 발송하였다.)

가. 이용/응용 의향조사서 및 제안서

대용량 다목적 양성자 가속기(KOMAC) 이용/응용 3차 수요조사

안녕하십니까?

저희 사단법인 한국가속기 및 플라즈마 연구협회 (KAPRA: Korea Accelerator and Plasma Research Association)에서는 다목적 대용량 양성자 가속기 (KOMAC: KOrea Multipurpose Accelerator Complex)의 이용/응용에 대한 1차 수요 조사 (1998년 6~7월)와 2차 수요 조사 (1998년 11월)에 이어 3차 수요조사를 실시하고자 합니다. 1차·2차에 응답하여 의견을 제시한 분 들께 감사를 드립니다. 응답하여 주신 자료들은 KOMAC 추진 방향 및 빔 라인 설계시 반영이 되어 수요자 여러분의 연구에 도움이 됩니다.

첨부한 자료를 참고로 관심 있는 연구자 및 기관(사업체 포함)의 많은 참여 바랍니다.

첨부:

1. KOMAC 이용/응용분야, 적용공정 사용 의향서
2. 제안서
3. “물리학과 첨단기술” - 10월호 특집 (KOMAC 이용/응용) 한국물리학회 발간
4. “넓어지는 방사광” - 방사선과 산업 60 (1993)
방사선조사진흥협회, 다까사끼사업소, 일본

1999년 1월 6일

서울시 관악구 신림동 산 56-1

서울대학교 공과대학 원자핵공학과

사단법인 한국 가속기 및 플라즈마 연구협회

(KAPRA: Korea Accelerator and Plasma Research
Association)

책임 연구원 이 강옥

연락처:

- 이 강옥 ▶ e-mail: kangok@paragon.snu.ac.kr
Phone: 02-883-0904
Fax: 02-887-6327
- 남 용운 ▶ e-mail: fusion@plaza1.snu.ac.kr
Phone: 02-883-0904
Fax: 02-887-6327

※ 첨부 1 KOMAC 이용/응용 의향조사서

구분	이용/응용 분야	적용공정	분류번호	사용의향	비고
I. 저 에너지 이용 시설	전력용 반도체 조사	전력용 반도체소자의 스위칭 특성제어	I-1		• 10 MeV 이하
	지뢰 및 폭발물 탐지	절소핵과 감마선의 광핵 공명반응 이용, 물질의 질소농도 측정	I-2		
	플라스틱 표면 강화처리	플라스틱 제품에 고에너지 주입	I-3		
	이동식 중성자 Radiography	이온주입에 의한 표면특성의 변화	I-4		
	BNCT(Boron Neutron Capture Therapy)	양성자 빔을 조사시켜 생성된 중성자 이용 Radiography	I-5		
II. 중 에너지 이용 시설	우주항공 재료 개발	$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ reaction	II-1		• 20 MeV - 100 MeV
	TLA(Thin Layer Activation)	우주항공소자의 내방사선 안정성 시험	II-2		
	양성자 Radiography	양성자빔을 직접 이용해 고속현상을 고해상도로 관찰하는 Radiography	II-3		
III. 동위 원소 생산 시설	새로운 의학용 단 반감기 핵종 개발	양성자 및 2차 중성자와의 핵반응 이용 RI 생산	III-1		• 20 MeV 이상
IV. 고속 중성자 생산 및 이용 시설	핵융합로 재료 시험	20MeV 양성자를 Li, Be 표적에 조사하여 평균에너지 10 MeV 이상의 중성자생산	IV-1		• 20 MeV - 1 GeV
	원자로 재료시험	원자로 재료 고속 중성자 조사 시험	IV-2		
	핵자료 생산	중성자 반응단면적 측정	IV-3		
	생명과학	단백질/DNA 구조 연구	IV-4		
	물성연구	중성자산란을 이용한 물질 특성 연구	IV-5		
V. 동위원소 분리시설 (ISOL:Isotope Separator On Line)	on-line 동위원소 분리에 의한 방사성 핵종 빔이용	고전류 일차빔을 이용하여 온라인 동위원소 분리에 의한 방사성 핵종 빔 장치의 개발, 기초물리학에의 파급효과 기대	V		• 50 MeV~1 GeV, 1mA ※ 이용자주요조사 결과 제안된 내용
VI. 의학용 이용 시설	양성자선을 이용한 종양 치료	Bragg Peak 이용, 선량을 원하는 표적 부위에 국한하여 조사, 암의 치료효과 향상	VI		• 260 MeV, 1 mA
VII. 고에너지 양성자 빔 이용시설	기초 물리 현상 연구	· 대칭성 비보존 실험 · $\nu_e \cdot \nu_\mu$ 빔을 이용한 ν 빔 연구 Pulse μ SR 연구 및 초저속 뮤온 빔 생성하여 표면과학 연구 · pion: 핵물리 연구 · 고밀도의 중성자 빔	VII.		• 1 GeV
	재료 시험 및 연구	Positive Muon 이용 물질의 자기적 성질 연구	VII.		
	뮤온 촉매 핵융합 연구	고에너지 양성자를 탄소표적에 부딪혀 +, - 파이온 생성, 이로부터 뮤온이 형성됨, Negative 뮤온은 DT ionic 분자를 형성 핵융합 촉진	VII.		
VIII. 미입계 시스템 실험 시설	경수로 사용 후 핵 연료에 내재한 장수명 핵 종 변환 시험	유효 중배수가 1보다 작은 가속기구조 이용, 사용후 핵연료를 재처리한 후 분리된 장 반감기의 초우란 원소를 가속기 미입계 시스템에 사용	VIII		• 1 GeV, CW 양성자 빔 18mA
	토륨 연료를 이용한 새로운 원자력 에너지 생산 장치 시험	토륨 연료 주기에 U-238 혼합하여 분열성 핵종의 함량을 12%이하로 감소 → Th-228 → U-233, Ti-208(토륨을 233으로 핵변환, U-238을 첨가하여 보관)	VII		

첨부 2. 제안서

앞에 기술한 내용 이외의 이용/응용 가능한 분야나 요구 사항을 기록하여 주십시오. (첨가 연구하고자 하는 분야도 포함)	
에너지:	
전분:	
이용/응용 분야:	
목적:	
기대효과:	
요구사항:	
★연구회를 구성할 경우 참여를 희망하시는 분야를 기록하여 주십시오.	
I. 에너지 이용 분야	
II. 에너지 이용시설	
III. 동위 원소 생산 분야	
IV. 고속 중성자 생산 및 이용 분야	
V. 동위원소 분리시설 (ISOL: Isotope Separator On Line) 분야	
VI. 의학용 이용시설	
VII. 고에너지 양성자 빔 이용 분야	
VIII. 미인계 시스템 실현시설 분야	
이름:	e-mail:
전화:	주소:
이름:	fax:
기타의견	

2. 분석

표 7.16은 4차에 걸쳐 수행된 수요조사 실시 결과를 함께 나타낸 것이다. 이를 표7.17과 표7.18에 이를 나타내었다. (※ 표7.16의 첫 번째 Classification 난의 괄호 안의 숫자는 KOMAC 이용/응용 분야를 크게 7분야로 나누었을 때의 수요를 백분율로 나타낸 것이며, Results 난의 괄호는 각 Classification의 세부항목에 대한 비를 백분율로 표시한 것이다). 수요조사결과는 IV항의 High Flux Neutron Science에 가장 높은 관심을 보여주었으며, 중성자의 특성 및 이용 분야에 대하여 이미 제 2절 미래 선도 분야에서 기술하였다. 대체로 수요자 자신이 속하고 있는 분야에 국한되어 응답하였다. 이는 User 교육 Program에 따라 그 중요도가 바뀔 수 있다는 것을 암시하는 것이기도 하여 User Program의 중요성을 반영하는 것임을 알 수 있다. 현재 일본 JHF (Japan Hadron Facility) Group에 관계되어 연구하고 계시는 한국 핵물리학 연구회의 전문가들께서 별도의 제안서에 연구과제 도출, 파급효과, 국외의 현황 등을 포함한 제안서를 별도로 작성하시어 구체적으로 그 들의 요구를 보내 주셨으며, KOMAC Project에 적극적인 지지를 주셨다 (표의 Classification V). 본 과제 시작과 종료 시점에서의 차이를 든다면, 많은 사람들이 과제 종료시에는 이미 KOMAC에 대하여 많이 알고 있었으며 관심 또한 커져 있다는 것을 알 수 있었다. 이는 1년이란 기간 속에서 상당히 홍보가 잘 되었다고 평가할 수 있다. 또한 응답에 응하지 않았던 사람에 대하여 수요조사 후 직접 및 전화 방문의 재조사를 통하여 상당수가 수요조사서 및 첨부 자료를 읽고 난 후 KOMAC Project에 대하여 관심이 높아졌으며, 아울러 현재의 추진현황을 묻는 경우가 많이 있었다. 참여를 원하나 실질적 내용을 자세히 몰라 못하는 경우가 상당히 많아 User Program안에 충분한 그리고 장기간에 걸친 교육이 절실하게 필요하다는 결론을 내릴 수 있었다. KOMAC 시설이 완성되어가는 시점에 맞추어 이를 효율적으로 이용할 수 있는 User들을 교육시켜 역동적인 Leader로의 육성이 절대적으로 필요하다고 판단되었다.

3. 결과

Classification	Utilization/Application Field	적용공정	No.	Results (%) total, sub	Remarks
I. Low Energy (19.5%)	Semiconductor Irradiation for Electric Power	전력용 반도체소자의 스위칭 특성제어	I-1	2.2 (11.8)	• ≤ 10 MeV
	Explosives Detection	질소핵과 감마선의 광핵 공명반응 이용, 물질의 질소농도 측정	I-2	KAERI	
	Plastic Surface Treatment & Polymer Improvement	플라스틱 제품에 고에너지 주입 이온주입에 의한 표면특성의 변화	I-3	7.0 (35.3)	
	Portable Neutron Radiography	양성자 빔을 조사시켜 생성된 중성자 이용 Radiography	I-4	7.0 (35.3)	
	BNCT (Boron Neutron Capture Therapy)	$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ reaction	I-5	3.3 (17.6)	
II. Medium Energy (3.6%)	Aerospace Material Development	우주항공소자의 내방사선 안정성 시험	II-1	1.2 (33.3)	• 20 MeV - 100 MeV
	TIA(Thin Layer Activation)	양성자빔으로 방사화시켜 마모도 측정	II-2	1.2 (33.3)	
	Proton Radiography	양성자빔을 직접 이용해 고속현상을 고해상도로 관찰하는 Radiography	II-3	1.2 (33.3)	
III. Isotope Production (6.9%)	Short-Lived New Medical Isotope Production	양성자 및 2차 중성자와의 핵반응 이용 RI 생산	III-1	6.9	• ≥ 20 MeV
IV. High Flux Neutron Production & Application Facility (25.2%)	Nuclear Fusion Furnace Material Test	20MeV 양성자를 Li, Be표적에 조사하여 평균에너지 10 MeV 이상의 중성자생산	IV-1	4.6 (18.2)	• 20 MeV - 1 GeV
	Nuclear Reactor material Test	원자로 재료 고속 중성자 조사 시험	IV-2	5.7 (22.7)	
	Neutron Cross Section Measurement	중성자 반응단면적 측정	IV-3	5.7 (22.7)	
	Protein/DNA Structure Research	단백질/DNA 구조 연구	IV-4	2.3 (9.1)	
	Matter Property Research	중성자산란을 이용한 물질 특성 연구	IV-5	6.9 (27.3)	
V. Isotope Separation Facility (ISOL: Isotope Separator On Line) (20.7%)	Radiolotope Utilization by ISOL	고전류 일차빔을 이용하여 온라인 동위원소 분리기에 의한 방사성 핵종 빔장치 개발, 기초물리학에의 파급효과 기대	V	20.7	• 50 MeV ~ 1 GeV, 1mA ※ Proposed by User
VI. Medical Science Facility (1.2%)	Tumor Therapy by Proton Beam	Bragg Peak 이용, 선량을 원하는 표적 부위에 국한하여 조사, 암의 치료효과 향상	VI	1.2	• 260 MeV, 1 mA
VII. High Energy Proton Beam Facility (17.2%)	Fundamental Physics Phenomenon Research	• 대칭성 비보존 실험 • ν_e, ν_μ 빔을 이용한 ν 빔 연구 Pulse μ SR 연구 및 초저속 뮤온 빔 생성하여 표면과학 연구 • pion: 핵물리 연구 • 고밀도의 중성자 빔	VII-1	8.0 (46.7)	• 1 GeV
	Material Test & Research	Positive Muon 이용 물질의 자기적 성질 연구	VII-2	6.9 (40)	
	Muon-Catalyzed Nuclear Fusion	고에너지 양성자를 탄소표적에 부딪혀 +, - 파이는 생성, 이로부터 뮤온이 형성됨, Negative 뮤온은 DT ionic 분자를 형성 핵융합 촉진	VII-3	2.3 (13.3)	
VIII. Subcritical Reactor Utilization (5.7%)	Long-lived Nuclear Waste Treatment Test	유효 증배수가 1보다 작은 가속기구동 이용, 사용후 핵연료를 재처리한 후 분리된 장 반감기의 초우란 원소들 가속기 미입계 시스템에 사용	VIII-1	5.7	• 1 GeV, CW, 18mA Proton Beam
	New Nuclear Energy Production Facility Test by Thorium	토륨 연료 주기에 U-238 혼합하여 분열성 핵종의 함량을 12%이하로 감소 → Th-228 → U-233, Th-208(토륨을 233으로 핵변환, U-238을 첨가하여 보관)	VIII-2	KAERI	

표7.16 수요조사결과: Possible Utilization/Application Fields of KOMAC

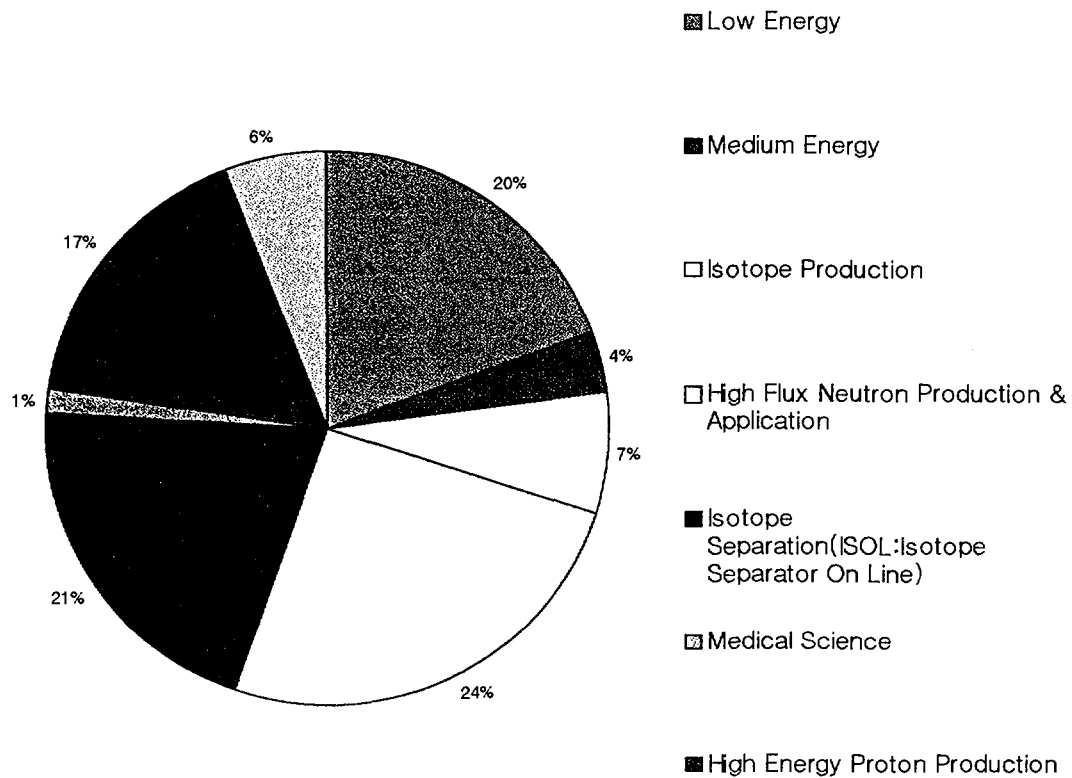


표 7.17 수요조사 결과 (I ~ VIII 항의 이용자 이용 선호 분포표)

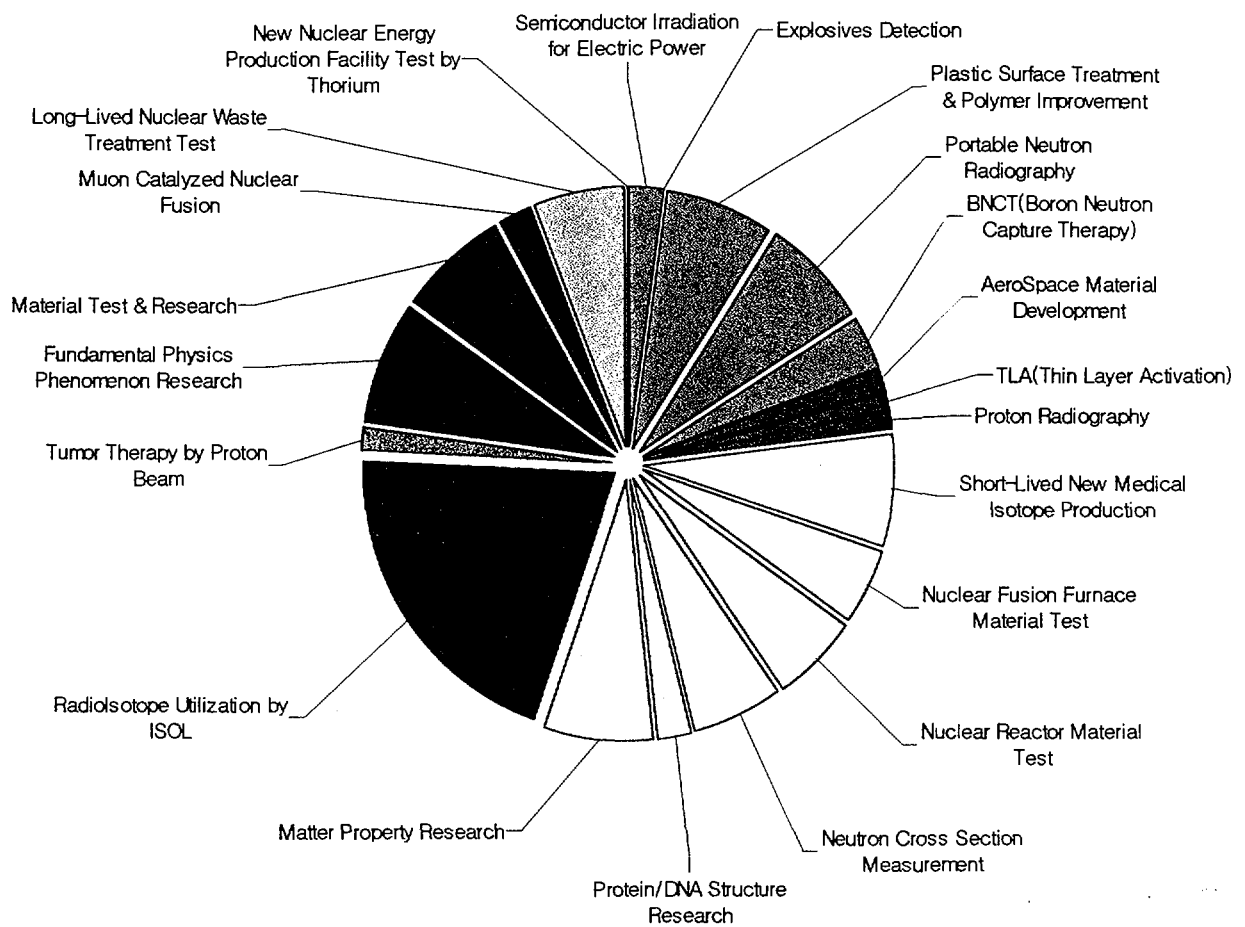


표 7.18 수요조사 결과

(I ~ VII 항의 세부 항목에 대한 이용자 이용 선호 분포표)

제 6 절 결론

1. 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

본과제의 제안서에서 제시한 연구개발 목표에 부합되도록 차질없이 수행되었다. 수 차례의 연구소 방문, 학회 참석, KOMAC 이용/응용 수요 설문 조사 및 전화 방문 그리고 KOMAC HOME PAGE 작성 등을 통하여 KOMAC의 연구분야 설정의 타당성을 입증, 국내 수요자 현황 파악, 그리고 국내·외에 KOMAC PROJECT 홍보에 많은 기여를 하였다고 판단된다.

2. 연구 성과

본 과제를 수행하면서 국내 2건의 논문 게재 2건의 발표, 그리고 국외

구분		논문제목	학술지 (회의) 연도/권/호	주관기관 (단체)	연구 (발표)자
국내	게재	KOMAC User Program Development	Proceedings of "1998 KAPRA & KPS/DPP Joint Workshop (June 27, 1998)"	· KAPRA (사단법인 한국 가속기 및 플라스마 연구협회) · KPS/DPP (한국물리학회/플라즈마 분과)	이강욱, 정기형, 남용운, 노승정
		KOMAC 이용/응용 분야	물리학과 첨단기술/1998년도, 10월호/제7권 제8호	한국물리학회	이강욱, 정기형
	발표	KOMAC User Program Development	1998 KAPRA& KPS/DPP Joint Workshop	· KAPRA (사단법인 한국 가속기 및 플라스마 연구협회) · KPS/D에 (한국물리학회/플라즈마 분과)	이강욱
		KOMAC User Program	제 3차 양성자 가속기 및 핵변환 Workshop	· KAERI (한국원자력연구소)	이강욱
국외	게재	-	-	-	-
	발표	KOMAC User Program	Advanced Photon Source, Chicago, U.S.A./Aug.27, 1998.	User Office	이강욱
		KOMAC User Program	JAERI(일본원자력연구소, Tokai site)/ Oct. 15, 1998	User Office, Neutron Science Center	이강욱
		Present Status KOMAC Project	· Kyoto University (Dec.21, 1998) · JAERI (NAKA, TOKAI) (Feb.5, 7, 1999) · SPring-8, Dec. 24, 1998	일본과학재단, 한국과학재단	정기형
		Overview of the KOMAC Project	SLAC, Stanford, CA, USA/ (Feb. 22, 1999)	User Office	노승정

표 7.19 논문게재 및 발표

4건의 발표가 있었으며, 그 내용을 표7.19에 나타내었다. 참고로 게재된 논문의 경우는 부록에 첨가하였다.

3. 결론

가. 수요조사를 통하여 확인된, 수요 및 관심이 많은 분야는 집중적이고 적극적인 교육적 지원을 하여 시설이 완성되었을 때 효율적으로 이용할 수 있도록 Leader 육성이 필요하다. 이 밖에도 Potential User들을 위한 다양한 Program이 준비되어야 한다.

나. 미국 및 일본에서 개최된 가속기 학회의 참석으로, 과학과 기술의 총체적 결과인 가속기 산업이 그 나라의 국력을 가늠하는 중요한 척도임을 확인할 수 있었다. 또한, 외국의 경우와 비추어 KOMAC 목표 및 이용/응용 분야의 설정이 합리적이라는 결론을 내릴 수 있었으며, 특히 중간 빔 인출로 산업에 응용할 수 있는 KOMAC의 특성은 다른 국가의 참석자들로부터 많은 관심과 호응을 얻었다. 이는 또한, 3 차례의 International Review Meeting [제 1차: 1997년 9월 3~4일, 서울대학교 교수회관, 제 2차: 1998년 2월 9~10일, 중앙대학교 안성캠퍼스, 제 3차: 1999년 2월 4~5일, 한국원자력연구소]에서의 평가를 통하여도 확인되었다.

다. 미국 및 일본의 가속기 연구소 방문을 통하여 가속기 발전에는 국민의 지지와 협력이 절대 필요하며, User Program의 경우 Project 초기부터 체계적이고 조직적인 관리와 연구자에 대한 배려 및 Leader의 조기발굴·육성할 수 있는 교육 Program의 시행이 매우 필요한 것임을 확인할 수 있었다. 국내에 세계적인 대형가속기를 건설함으로써 국외에 나가있는 실력있는 국내 과학자들을 국내에 불러들여, 국내의 발전에 이바지할 수 있는 여건을 만들어 줌과 동시에, 우수한 외국인 과학자들도 유치하여 서로 발전적인 여건을 형성하여야 한다고 판단되었다. 가속기를 이용한 실험을 국내에서 하지 못하고 국외로 나가서 수행하고 있는 과학자들과의 만남에서 국내의 가속기 건설에 대한 강한 열망을 들을 수 있었다.

라. 지속적인 발전을 위하여 User들의 단일 의견 수렴 창구가 마련되어야 한다고 판단되었다.

마. User 들의 요구 및 영향이 가장 두드러진 미국 APS (Advanced Photon Source, 시카고) 의 User Office 방문 결과, 1986년도부터 DOE의 승인이 있기까지 6 ~ 7 년 동안 꾸준히 가속기 건설에 대한 다양한 User들의 요구가 있었으며 이에 따라 다양한 기초 조사가 수행되는 등 User들의 요구가 가속기 건설을 유도하는 등 User들의 영향이 매우 중대함을 관리자와의 대화 및 자료를 통하여 알 수 있었다.

제 7 절 기대 효과

KOMAC Program 은 학계, 연구계, 및 산업계에 미치는 효과가 다대하므로 본체 자체의 건설·운영은 정부에 의하여 주도되고 이용자들에게는 가속기의 완성과 더불어 즉시 사용할 수 있도록 기획되어야 한다. 장치의 이용을 극대화하는 국제경쟁력 향상에도 크게 기여하는 것이며 지식 산업으로의 도약을 이룩하게 된다.

1. 과학기술분야에의 파급 효과

다양한 이용자의 양성은 소립자과학, 핵과학, 물성과학, 생명과학, 뇌과학 분야에 선진국형 연구자를 양성하게 된다. 공학분야도 이제까지와는 달리 전자공학, 원자핵공학, 기계공학, 자원공학에 동기 부여에 따른 첨단기술의 실용화로 산업기반기술 구축과 동시에 국가적으로 인력 Infrastructure를 확고히 하는 결과를 가져올 것이다.

2. 산업분야에의 파급 효과

KOMAC을 활용한 인력 확보는 다양한 산업을 선도하게 된다. 전력 공급의 안정화는 물론 연료자원 부족으로부터 해방되고, 핵쓰레기의 적체와 관리비의 부담을 해소하게 된다. 전력공급의 잦은 변동과 전력단가의 고가로 인하여 경제성이 없었던 기초 소재 산업을 일으킬 수 있으며 산업 구조를 견실하데 다져놓는 효과를 가져오게 한다. 강력한 전자파 기술력의 확보로 방위 산업과 우주에서의 무선제어기술, 고속 (High Flux) 저 에너지 중성자에 의하여 진단되는 재료 산업의 신 전개와 엔진 내연 구조 가동 피스톤에서의 냉각 구조 등의 영상 가시화는 새로운 엔진 개발을 가능케 하며 모든 수송기로 확산될 것이 확실하다. 그 외에도 생물산업의 마술적 발전을 주도하면서 미래시장의 선도권으로 이어지게 된다. 이와 같이 각 분야로의 발전전개는 KOMAC 의 건설과 함께 유능한 이용자의 양성이 좌우하게 되며 앞서서 개척해야 가능한 것이다.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/RR-1920/98			
제목 / 부제	빔 이용/응용기술 개발		
연구책임자 및 부서명	최병호(미래원자력기술개발단)		
연구자 및 부서명	김용균(미래원자력기술개발단), 송태영("), 이재형("), 주포국("), 한 장민("), 장종화(신형동력로개발단), 이강옥(KAPRA), 허진영(") 정기형(서울대학교), 남용운("), 노승정(단국대학교)		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
발행년	1999.5.	크기	29.7 Cm.
페이지	229 p.	도표	있음(•), 없음()
참고사항			
비밀여부	공개(•), 대외비(), _ 급비밀	보고서종류	연구보고서
연구위탁기관	사단법인 한국 가속기 및 플라즈마 연구협회	계약 번호	
본 연구는 핵종변환장치의 전단부터 개발되는 양성자 가속기가 단계별로 완성되었을 때 이를 조속히 이용할 수 있게 사용자 프로그램과 빔 이용/응용기술 개발을 확립하여 대형 양성자 가속기 시설의 효율적인 이용과 사용자들의 합의점을 도출할 목적으로 수행되었다. 대용량 양성자 가속기는 필수 국가 기반연구시설로서 선진국에서는 지금까지 원자력 연구개발과 불가분의 관계로 사용되어 왔으며, 미래원자력기술 개발의 열쇠로서 간주되고 있다. 이 대용량 가속기는 가속기 앞단부터 건설되는 입사기, RFQ, CCDTL등 부속가속기로부터 발생되는 3MeV, 20MeV, 100MeV빔 등을 단계적으로 일반산업분야, 방위산업분야, 의료분야, 환경분야, 기초학술연구로 다양하게 이용할 수 있으므로, 원자력분야의 사용을 국한하는 것보다 확장된 국가 기반연구시설로서 사용처를 확보하기 위하여 대용량 양성자 가속기 시설에 대한 사용자 프로그램의 합리적인 추진방향을 결정하고, 양성자 가속기의 입사기 및 RFQ로부터 생성되는 양성자빔의 산업적 활용방안을 연구 하였다.			
주제명키워드 (10단어내외)	입사기, 빔 이용, 사용자 프로그램, 특정원소 탐지, 이송자 수명제어, 양성자 가속기, 동위원소, 중성자		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/RR-1920/98							
Title / Subtitle		Development of Beam Utilization/Application Technology					
Project Manager and Department		B. H. Choi(Advanced Nuclear Technology Development)					
Researcher and Department		Y.K.Kim(Advanced Nuclear Technology Development), T.Y.Song(""), J.H.Lee(""), P.K.Joo(""), J.M.Han(""), J.H.Chang(Advanced Reactor Technology), K.O.Lee(KAPRA), J.Y.Heo(""), K.H.Chung(Seoul National University), Y.U.Nam(""), S.J.Noh(Dankook University)					
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI		Publication Date	May 1999	
Page	229 p.	Ill. & Tab.	Yes(•), No ()		Size	29.7 Cm.	
Note							
Classified	Open(•), Restricted(),_Class Document			Report Type			
Sponsoring Org.		KAPRA		Contract No.			
High power proton accelerator is considered as one of national fundamental research facilities and a key to advanced nuclear technology development, having been widely used in an undetachable relationship with nuclear research in advanced countries. The high power proton accelerator will be installed in several phases as an upfront facility of the nuclear waste transmutation system. It is expected that a common understanding and a general agreement over proper utilization of the accelerator should be deduced and that a user program for beam utilization and application should be firmly established in time for the completion of each phase of the accelerator. This high power proton accelerator will consist of several component accelerators and, from upfront, accelerators such as injector, RFQ, CCDTL, etc. will be installed in sequence and deliver respectively at each stage beams of 3MeV, 20MeV, 100MeV, etc. to be variously utilized for industries, defence industry, medical treatment, environmental protection and basic science research. In order for the accelerator to be fully utilized as a national fundamental research facility beyond nuclear field, it is necessary to formulate a proceeding plan of the user program for the accelerator and to cultivate industrial utilization/application studies of proton beams accelerated by injector or RFQ of the accelerator.							
Subject Keywords (About 10 words)		Injector, Beam Utilization, User Program, Specific Element Detection Carrier Lifetime Control, Proton Accelerator, RI, Nuutron					

주 의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 위탁연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가 과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개 하여서는 아니됩니다.