



第9回タンデム加速器及びその周辺技術の 研究会報告集

1996年7月4日－5日

日本原子力研究所 東海研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

まえがき

『第9回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会』は1996年7月4日、5日の両日、日本原子力研究所・東海研究所において開催致しました。東海研究所においての開催は初めてですが、第1回も原研加速器管理室が開催した経緯があり、2巡目に入ることとなりました。月日の移り変わりとともに、人員の移動等もあり初めての東海研究所での開催と交通等の不便さを考えたとき、2日の研究会は維持できるのだろうかとの心配しましたが、多くの参加を得て盛大に行うことができ、世話人、実行委員一同感謝しているところであります。

今回の研究会でも、加速器の現状と将来計画、加速器関連技術、イオンビーム分析研究そしてイオンビーム応用研究の4分野にわたり、合計28件の発表と活発な御討議をいただきました。参加人員も112名に及び2日間の研究会は盛大に実施できました。また、恒例となっております施設見学会では、原研内の2施設に加え、隣接する東京大学原子力研究総合センターのご協力のもと、この施設も合わせて見学会を行った結果30分の時間超過を招き、ご迷惑をお掛けすることとなってしまいました。東海のタンデム加速器についてはちょうど整備期間中という事もあり、内部についても見学を実施することができました。日本最大のタンデム加速器であり折り返し型の複雑な構造は、他の加速器のご参考になれば幸いです。また、御参加いただいたメーカーさんには展示会等を実施していただき、ご協力有り難うございました。ご多忙中にも拘わりませず遠方よりご参加いただいた皆様、種々ご教授いただいた皆様に世話人及び実行委員一同厚く御礼を申し上げます。

第10回の研究会は前回からこの会に参加を頂いている“国立環境研究所”に快く幹事をお引き受けいただきました。2年続けての茨城では有りますが、首都圏に近く便利な筑波です。今回同様沢山のご参加を頂き、活発なタンデム加速器の研究会になることをお願いいたします。

1996年12月

研究会担当世話人

日本原子力研究所 東海研究所

加速器管理室

吉田 忠

自由電子レーザー研究室

峰原 英介

研究会実行委員

加速器管理室

神田 将、竹内末広、荘司時雄

堀江活三、大内 勲、月橋芳廣

花島 進、阿部信市、金沢修平

石崎暢洋、田山豪一、松田 誠

小林千明*

第9回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会

目 次

加速器の現状と将来計画

筑波大タンデム加速器の現状 ----- 1 (筑波大加速器センター)	石原豊之、大島弘行、石井 聡、田島義一、木村博美 高橋 努、大和良広、皆倉輝志、小松原哲郎 島 邦博、静間俊行、古野興平
国環研タンデム加速器分析 ----- 6 施設の現状 (国立環境研究所)	久米 博、柴田康行、田中 敦、米田 稔 熊本雄一郎、植弘崇嗣、森田昌敏
TIARA静電加速器施設の現状 ----- 10 (原研高崎)	田島 訓、高田 功、水橋 清、斎藤勇一、宇野定則 大越清紀、石井保行、中嶋佳則、酒井卓郎
京大理タンデム加速器の現状 ----- 14 (京大)	高橋清二、中村正信、村上哲也、興曾井 優 松本 博、広瀬昌憲、瀧本清彦、坂口治隆、今井憲一
名古屋大学タンデトロン加速器 ----- 18 年代測定施設の現状 (名大年代測定資料研究センター)	中村俊夫、池田晃子、太田友子(名大年測セ) 奥野 充、伊藤誠介(名大人間情報学) 小田寛貴、青木 浩(名大理)、足立 守(名大年測セ)
原研東海タンデム加速器の現状 ----- 22 (原研東海)	吉田 忠、神田 将、竹内末広、花島 進、荘司時雄 大内 勲、堀江活三、月橋芳廣、阿部信市、金沢修平 石崎暢洋、田山豪一、松田 誠
九大タンデム加速器の現状 ----- 26 (九大)	中村裕之、森信俊平、中島孝夫、郷農靖之、相良建至 杉光 強、御手洗志郎、池田伸夫、森川恒安、 古賀義博、前田豊和
東大タンデム加速器研究設備(MALT) ----- 29 の現状 (東大原子力研究総合センター)	小林紘一、羽鳥 聡、中野忠一郎、春原陽子

加速器関連技術

接地から見た加速器設備の ノイズ対策 (東大原総センター)	安本 勝	34
核研製ストリッパフォイルによる 50keV/amu Auイオンのタンデム加速 器トランスミッション及び寿命測定 (筑波大加速器センター)	石井 聡、高橋 努、島 邦博(筑波大加速器セ) 菅井 勲、小柳津充広(東大原子核研)	38
原研タンデム超電導ブースター の現状 (原研東海)	竹内末広、松田 誠、金沢修平、吉田 忠 大内 勲、荘司時雄	42
国環研タンデム加速器分析施設 の現状 その2 試料調製について (国立環境研究所)	熊本雄一郎、柴田康行、久米 博、田中 敦 米田 穰、植弘崇嗣、森田昌敏	45
東大原子力研究総合センター 重照射研究施設における新規 設備 (東大原総センター)	柴田裕実、岩井岳夫、鳴井 誠、尾亦孝男	49
ペレットチェーンと回転シャフト用 モータのインバータ駆動 (原研東海)	堀江活三 小林千明(日本アドバンステクノロジー㈱)	51
小型タンデム加速器の パソコン制御システム (日新ハイボルテージ㈱)	高山博史、河野和宏、篠崎正孝	53
原研タンデム加速器の制御システム の現状--1995年度に多発した障害に ついて-- (原研東海)	花島 進、堀江活三、月橋芳廣、石崎暢洋、荘司時雄	57
シングルイオンヒットシステム用 パルス化技術の開発 (原研高崎)	酒井卓郎、濱野 毅、平尾敏雄、神谷富裕	60

シェンケル回路とその特徴	64
(日新ハイボルテージ㈱)	木村寿男、山田正広、中澤 真、岩本英司

イオンビーム分析研究

京大タンデム加速器における	68
加速器質量分析	中村正信、田澤雄二、松本 博、広瀬昌憲(京大理)
(京大)	萩野晃也、河野益近、船場潤之(京大工)
加速器質量分析法による樹木年輪	72
試料の ^{14}C 年代測定	小田寛貴(名大理)、米延仁志(鳴門教育大)
(名大理)	池田晃子、中村俊夫(名大年測セ)
	古川路明(名大理)

イオンビーム応用研究

イオン注入を利用したシリコン	76
単結晶の自立薄膜化加工法と	斎藤和雄、中尾節男、丹羽博昭、宮川草児
その応用	
(名古屋工業技術研究所)	
半導体中に生成した超高速な電荷	80
挙動の測定について	平尾敏雄、酒井卓郎、濱野 毅、梨山 勇
(原研高崎)	根本規生、松田純夫(宇宙開発事業団)
シングルイベントバーンアウト	84
(SEB)の研究に対する高エネルギー	羽田尚志、青木司郎、中村正夫、松田純夫
加速器の利用	平尾敏雄、梨山 勇(原研高崎)
(宇宙開発事業団)	広瀬孝幸、大平秀春、永井由紀(菱栄テクニカ㈱)
カロリメーター法による	88
イオンエネルギー測定	水橋 清、田島 訓
(原研高崎)	Suwat Bunak(OAEP in Thailand)
イオンビーム・プラズマ相互作用の	92
測定実験計画	小栗慶之、阿部 悟、作美 明、岡崎 永、渡辺 武
(東工大)	

D(d, p)T反応を利用した注入重陽子の探索 (筑波大)	田岸義宏、片渕竜也、水越和満、山田直樹	96
タンデム加速器を用いた分子イオン加速(Ⅱ) (原研高崎)	斎藤勇一、水橋 清、田島 訓	100
タンデム加速器ビーム再加速についての考察 (九大理)	中島孝夫、森信俊平、郷農靖之、相良建至、杉光 強 御手洗志郎、中村裕之、池田伸夫、森川恒安	103

筑波大タンデム加速器の現状

筑波大加速器センター

石原豊之、大島弘行、石井聡、田島義一
木村博美、高橋努、大和良広、皆倉輝志
小松原哲郎、島邦博、静間俊行、古野興平

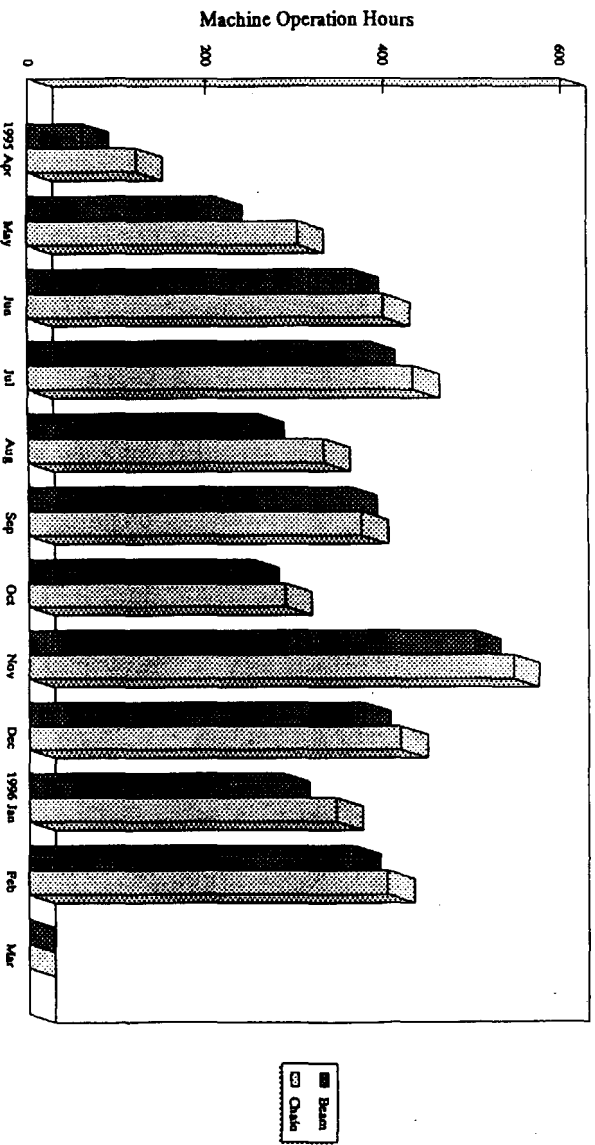
1. はじめに

筑波大学のタンデム加速器 (12UDベクトル) は、設置以来21年間運転を続けている。運転時間の合計は1996年3月31日現在で61,822時間になる。ここでは1995年度のタンデム加速器運転状況および実験分野別使用状況等について報告する。周辺機器の整備は「放射線監視システム」の更新および「放射線管理区域出入管理システム」の新設をした。その他平成8年度に加速電圧1MVのタンデトロンを管理換えして設置し、以前は出来なかった低エネルギー領域の共同利用実験も可能にする計画について報告する。

2. 1995年度の運転状況

加速器の運転総時間は3966時間であり、その内イオン加速時間は3427時間 (86%で前年度より15%UP) であった。図1. に「月別運転時間」を示した。4月の運転時間が少ないのは前年度工事の継続で定期点検整備の他に1) ストリップ・ホル・チェンジャー (120枚入) の増設。保守用ゴンドラの定期検査。2) チャージ・エター系の分電盤及び絶縁ガス (SF₆) 系の分電盤改修工事を行ったためである。これで1989年度より開始した加速器系全体の更新整備が完了した。平均年間2940時間の運転をしながら6年間かかった。「今後10年は通常整備で運転できるだろう」と昨年度の報告で述べたが、1995年度は目的の4000時間の運転が実現した。8月の夏期停止期間後も好調な運転が続いた。10月の減少はチャージ・エターへの荷電用高電圧ケーブルの導入端子が、放電で絶縁不良のおそれが生じたので、主タンクを開放して修理したためである。その他は順調で最高加速電圧12MVでの運転も少し行った。

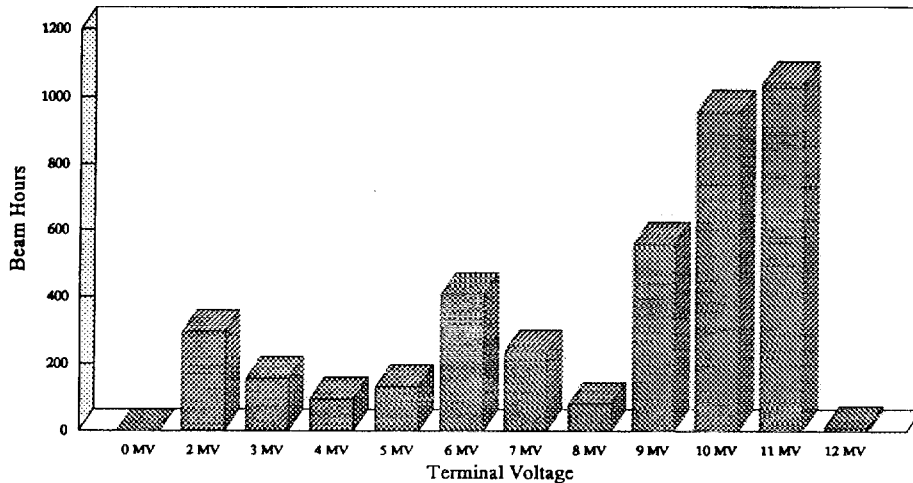
図1. 月別加速器運転時間



3月は定期点検整備を他に、「放射線監視システム」の更新(約5000万円)および「放射線管理区域出入管理システム」の新設(約1000万円)をしたので「運転せず」でした。

図2. に「加速電圧別イオン加速時間」を示した。加速器は好調で12MVでの使用も9.7時間あった。2004時間使用した10MV以上は原子核実験グループで51%を占めている。2～3MV付近はPIXEやRBSの実験に使用された。6MV付近は放射線物理(イオン照射や2次電子分析)やAMSに使用された。

図2. 加速電圧別イオン加速時間



3. イオン源

共同利用に使用している2台のイオン源の使用状況を図3. に「加速イオン別の運転時間比」で示した。軽イオン源(偏極)は37%の使用で、ビーム強度は陽子, 重陽子の偏極ビームで入射電磁石の出口で300-350 nA, 加速して分析電磁石の出口で100 nA程度が主に使用された。偏極度は80%程度である。重イオン源は加速イオン使用時間の63%を占めている。取り出しイオンは陽子、重陽子から炭素、金まで20種類が使用された。重イオン源でのビーム強度は20～800 nAが各々ターゲット上で得られている。

図3. 加速イオン別運転時間比

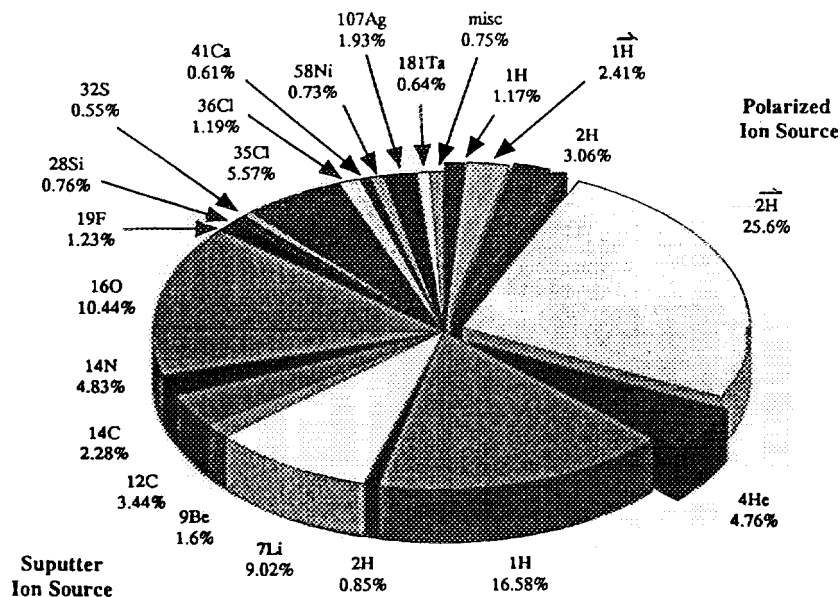
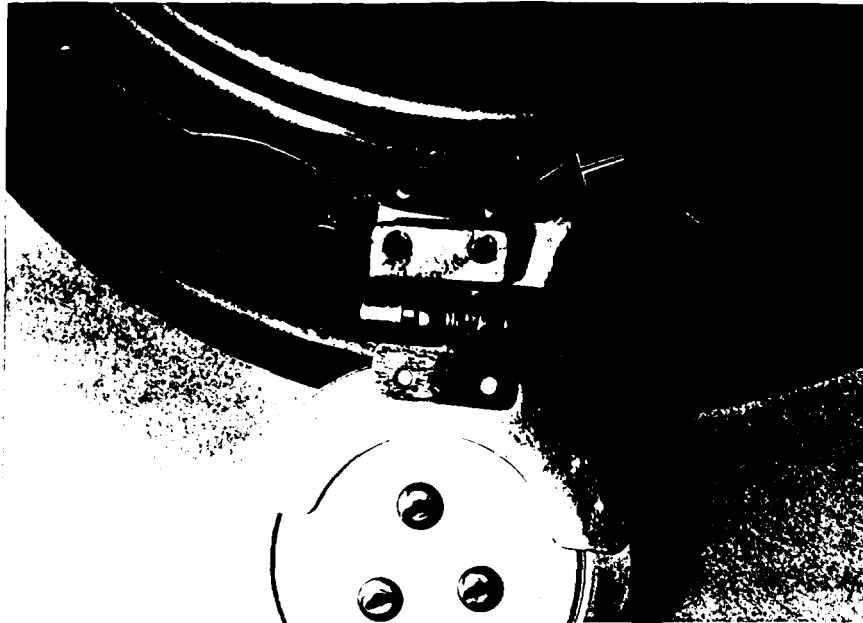


写真1. コロナ針の脱落



「どうしてA」リベットで固定してあるコロナ針が脱落するのか？」調べると写真でも判るようにリベットの穴が黒く大きくなっている。この原因はリベットがチェーンの走行振動で緩んで振動しているところにコロナ電流が常時流れ「放電加工現象」が生じて、リベットの箇所が溶け穴も大きくなり、コロナ針が脱落したと思われる。4000時間程度運転すると起こることが予想される。同様な放電加工現象が加速管のコロナ・ギャップやショータリング・ロッドの接触部品にもあった。これらの対策としては

- 1) 明るい照明で目視検査をすると接触部が放電で黒く変色している。
- 2) さわるとガタあり緩みを感じる。
- 3) 上記の症状のある箇所を丁寧に探し出し、確実に固定する。

これらの作業によってタンク・スパークの誘発が防がれ安定な運転ができるようになったと思っている。

6. 更新および新設

更新：タンデム加速器の付帯設備の更新として補正予算で「放射線安全監視システム」の予算がついた。システムの概要は、コントロール室に「中央監視盤」を設置し、屋外の放射線管理区域境界に「中性子モニタリングポスト」を3ヵ所（南、西、北）、屋内の各実験室に「中性子エリアモニター」と「γ線エリアモニター」を一組とし、6ヵ所配置した。測定値の記録等は長期使用に適する様にパソコンは使用しないで、シンプルなレートメータと打点式レコーダで構成した。また 中性子検出器は ^3He 比例計数管を、γ線検出器は円筒型電離箱を採用した。設置後は順調に稼働している。

新設：概算要求（特別設備費）や補正予算では予算が得られなかったが、放射線安全管理の強化に対する時代の要請（茨城県の行政監察）と「放射線安全監視システム」の更新

重イオン源は現在「1000時間メンテナンス・フリー運転」を行っていて好調にビームが出ている。。その他、加速器質量分析用イオン源も新設されテスト運転が行われている。

4. 共同利用状況

表1. 2. に「実験分野別使用状況」および「加速器保守等」の日数の内訳を示した。核物理、放射線物理および分析の利用者が昨年より増加した。表2. で定期保守の他に「放射線監視システム」の更新および「放射線管理区域出入管理システム」の新設をした。故障修理や電圧コンデショニングは8%と9%であった。

表1. 分野別使用状況

核物理	104日	51%
検出器開発	15日	7%
放射線物理	37日	18%
分析 (PIXE)	27日	13%
分析 (AMS)	15日	7%
学生実験	4日	2%
生物照射	3日	2%

合計 205日 100%

表2. 加速器保守等

定期保守, 監視システム改修	31日	19%
電圧コンデショニング	14日	9%
故障修理	13日	8%
イオン源, 分析電磁石切替	21日	13%
点検日/実験準備	13日	8%
停止日 (休日を含む)	68日	43%
合計	160日	100%

加速器総運転時間 3966時間

イオン加速時間 3427時間

新規採用テーマ数 4テーマ

加速器使用延べ数 93テーマ, 1967人・日

発表論文数 53件

口頭発表数 90件

5. 故障修理

故障1: 8月はじめの点検で、縦型のタンクの底にある+側のチャージング電極用フィードスルー (MAX. +50KV, 材質: ナイロン) が放電ギャプの箇所では焦げて絶縁不良になっているのを見つけた。放電の原因は、最初はチェーン沿いの放電で放電ギャプの箇所が炭化し、それに沿ってインダクター電圧で炭化が拡大したのだと思われる。このフィードスルーは5気圧のSF₆ガスをタンクの内側のOリングで止めているが、この故障の箇所はタンクの外側なので炭化した部分をカットしてOKとした。ところが10月始めに再び同じ箇所で炭化が生じたので、フィードスルーの内部も炭化している恐れがあると判断し、加速器タンクを開放して点検した。その結果、フィードスルー (チェーンへの荷電用高電圧ケーブルの導入端子) は外側のみの炭化で絶縁ガス漏れの心配がないことが判った。約7年間使用したので新品のフィードスルーに交換して修理を完了した。

故障2: 10月のタンク内整備で「加速管のコロナ針が1枚脱落していた。」場所は#18-3-4である。写真1. に脱落箇所と同じ写真を示した。

を機会に、「放射線管理区域出入管理システム」の新設をした。これは教職員並びに大学院学生の放射線作業の安全を確保するために是非とも必要であるとの、放射線統括管理者および主任者等の判断から設置計画の策定に至ったものである。計画実施のためにはセンター運営費では大きく不足なのでセンター長が経理部等に要望書を提出して実現した。システム概要は、常時出入口の3ヶ所（放射線測定室出入口、1階通路、2階通路）のドアに電気錠を取り付け、フイルム・バックシーツに張ったバースコードを出入りの際に読み取らせて、個人情報データベースと照合しOKならば電気錠が解錠するシステムである。個人情報データベースは、

1) 放射線業務従事者登録がされているか。

2) 健康診断を受診しているか。期限切れになっていないか。

3) 教育・訓練を受講しているか。期限切れになっていないか。

以上をパソコン(PC-98)でチェックしてドアの解錠をする。また入退室データベースや滞在時間等は個人別に1ヵ月単位でプリント・アウトして保管している。

7. 1MVタンデロンの設置計画

現有のタンデムは加速電圧が2MV以下では使用できない。以前からもっと低い加速電圧の加速器も要望されていた。今年度、つくば市の電総研で8年使用してプロジェクタ終了したGIC社(USA)の1MVタンデロンのR1実験室(非密封R1は未使用)を廃止して放射線測定室に改名し設置することにした。ビームコースは、次の5本(±30°, ±15°, 0°)の予定である。1) RBS、学生実験コース, 2) 基礎実験コース, 3) フラッシュ加速コース, 4) γ 100-e-L, PIXEコース, 5) 電子分光コース, である。今年度に設置して、来年度より共同利用を開始する予定である。

以上

国環研タンデム加速器分析施設の現状

国立環境研究所

久米 博、柴田 康行、田中 敦、米田 穰
熊本 雄一郎、植弘 崇嗣、森田 昌敏

1. はじめに

国立環境研究所では、1993 年以来、環境科学への応用を目的としたタンデム加速器分析施設の導入を検討してきた。その結果、1995 年 9 月になって、2 種類の分析装置を設置することができた。ひとつは、5 MV のタンデム加速器を中核とした加速器質量分析専用装置である。もうひとつは、1 MV のタンデム加速器に表面分析システムを接続したいわゆる高エネルギーイオンビーム分析装置であり、主に PIXE 測定に使用される予定である。ここでは、両装置の概要と現状について述べる。

2. 加速器質量分析装置

図 1 に示すように、この装置は大きく 4 つの部分に分けることができる。

2.1 イオン源と負イオン入射システム

イオン源としては、2 種類 (MC-SNICS および MGF-SNICS) 有している。どちらも Cs スパッタによって負イオンを生成するが、前者は固体試料用であり、いちどに 40 個の試料を測定することができる。後者は、気体の CO_2 から直接 C^- を生成するイオン源としてあらたに開発されたものであり、12 個の試料の連続自動測定が可能ないように設計されている。

入射システムも 2 種類備えている。ひとつは、高速逐次入射システムであり、測定の対象となる同位体イオンを時間的に分割して加速器に入射することができる。炭素同位体比の測定の場合は、 ^{12}C 、 ^{13}C 、および ^{14}C をそれぞれ、たとえば 0.3 ms、1.5 ms、そして 100 ms という時間幅で入射する分析サイクルを繰り返す。現在、このシステムは MC-SNICS イオン源に接続されている。一方、MGF-SNICS イオン源には同時入射システムを接続している。これは、炭素同位体比の特に高精度な測定を行うために開発されたものであり、上記 3 種の炭素同位体イオンビームを 2 台の電磁石によって空間的に分割し、再度統合した後、加速器に入射する。その分割と統合の間に、 ^{12}C のビームを適当な強度に減少させることができる。いずれの入射システムも、イオン源のふらつきなどによる分析精度の低下を最小限に抑えることがその基本設計思想となっている。

2.2 加速器

加速器は、米国 NEC 社製の横置きベロトロンタンデム加速器 15SDH-2 を用いている。ターミナル電圧は最大 5 MV で、S シリーズの加速器としては最大のものである。2 本の

チャージングチェーンにより、最大250 μ Aの電流をターミナルに供給することができる。荷電変換は、カーボンフォイルあるいはAr ガスで行うが、Ar ガスは2台のターボモレキュラーポンプにより循環させながら使用する。

2.3 高エネルギー分析システム

高エネルギーの同位体イオンビームは、分解能 $M/\Delta M=725$ の分析電磁石で分離される。この磁石の直後には、3台の可動型ファラディカップが備えられている。炭素同位体比測定の場合、 ^{14}C の強度は後述の多電極気体検出器で測定するが、 ^{12}C と ^{13}C の強度はこれらのファラディカップで計測する。残り1台は、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比の測定時に、 ^{27}Al の計測に用いられる。

2.4 微量同位体ビームライン

^{14}C などの微量同位体はこのビームラインに導かれ、最終的に多電極気体検出器で計測される。この検出器は、イオンの全エネルギーを測定する1枚のカソードと、エネルギー損失を測定する4枚のアノードから構成されている。封入ガスは、Arと CH_4 を9対1の割合で混合したものを使用している。また、この検出器の上流には、3 mの飛行距離を持つTOF ビームラインが備えられている。タイミングは時間分解能が700 ps以下の2次電子放射カウンタでとり、 ^{36}Cl や ^{129}I などの重い核種の測定が可能となっている。

2.5 制御システム

装置のほとんどの制御ならびにデータ収集は、CAMAC システムを介して行われる。電磁石の電源はRS-232C ポートを持っているので、その制御はEthernet 経由で行われる。制御用コンピュータは486 ベースのマイクロコンピュータであり、LynxOSと呼ばれるマルチタスクオペレーティングシステムを搭載している。

2.6 現状

装置全体の設置が終了した後、炭素同位体比のテスト測定をMC-SNICSと逐次入射システムを用いて行っている。試料は、NISTのシュウ酸をグラファイト化したものや、POCOと呼ばれる純グラファイトを用いているが、現在のところ満足な結果が得られていない。特に、試料カソード間のばらつきが大きく、精度0.5% (mg量の試料の場合)あるいは0.3% (試料量に制限を設けない場合)を達成するにはほど遠い状態である。この原因を調べるのが急務であるが、最近、2重収束型であるはずの逐次入射システムの90°電磁石が、その機能を十分に果たしていないことが判明した。すなわち、磁石出射後のX方向とY方向の収束位置が同一でないために、その後の加速器の透過効率が悪くなっている可能性が指摘された。このことと測定値のばらつきとの因果関係は明白ではないが、ビーム光学系を正常にもどすことは、測定以前の基本的な問題であり早急に対処しなければならない。NEC社としては、90°電磁石の上流に磁場型の2重4極子レンズを追加し、それによってビームの軌道を修正することを提案している。軌道計算によれば、たしかにこの方法でうまくいくはずであるが、実際に精度のよい測定データが得られるか否かは、今後の作業の進展を待たねばならない。

3. イオンビーム分析装置

この装置は、NEC 社製の 1MV ベレトロンタンデム加速器 (3SDH) に米国 Charles Evans & Associates 社製の表面分析システム (RBS400) を組み合わせたもの (3S-R10) である。

3.1 1MV タンデム加速器

S シリーズ最小の加速器であり、200 μ A の電流をターミナルに供給できるチャージングチェーンを 1 本備えている。負イオン源はアルファトロスと呼ばれているものであり、RF イオン源と Rb 荷電変換セルで構成されている。この加速器は、プロトンならびにヘリウムイオンともに、最大 200 nA のビーム電流を試料に照射することができる。

3.2 表面分析システム

この分析システムは、一度に 40 個の試料の自動測定を可能にしている。試料ステージは 4 軸のゴニオメータに載せられており、チャネリング測定にも対応できる。環境試料測定では、PIXE 分析が重要であるが、そのための Si(Li) 検出器 (Kevex 社製、分解能 155 eV) を備えている。その他、2 個の SSB 検出器があり、RBS ならびに ERDA 測定も行えるようになっている。

3.3 現状

残念ながらこの装置も、定常的に運転できる状態には至っていない。イオン源にわずかなリークがあり、バイアス電圧を十分にかけられなくなることが断続的に生じてきたためである。ようやく最近になって、ガス流量調整バルブがリークしていることがわかり、急遽新しいものに交換した。現在、その成果を調べている。その他、分析システムに付属しているアンプなどの電子機器類が比較的ノイズを拾いやすく、測定が妨害されることも頻発する。特に、上記の Si(Li) 検出器には専用のパルスプロセッサ (Kevex 社製) が用意されているが、これが正常に動作していない。通常、波形整形時間を長くすると分解能がよくなるというのが、Si(Li) 検出器を含めた計測システムの特徴である。ところが、このプロセッサの場合、波形整形時間を長くするにつれて大きなノイズを拾ってしまい、事実上測定が不可能になってしまう。これについても、早急に対処しなければならない。

以上、両装置の概要と現状について述べた。設置以来、すでに 1 年になろうとしている。今後は、能率的に立ち上げ作業を進め、なるべく早い時期に本格稼働ができるようにしたいと考えている。

FLOOR PLAN

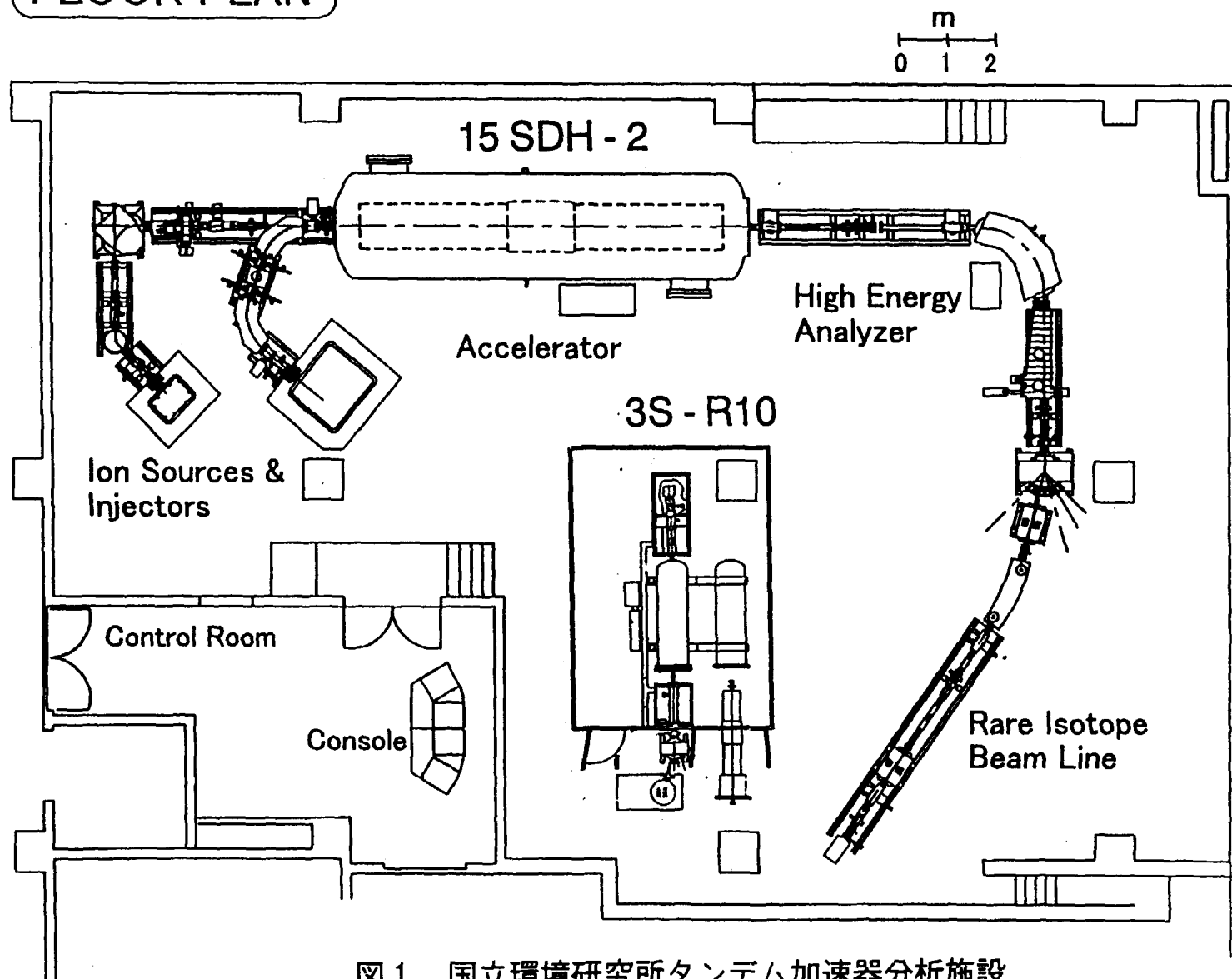


図1 国立環境研究所タンデム加速器分析施設

TIARA 静電加速器施設の現状

原研高崎 田島訓、高田功、水橋清、斎藤勇一、宇野定則、大越清紀
石井保行、中嶋佳則、酒井卓郎

1 はじめに

原研高崎イオン照射研究施設 (TIARA) に設置された静電加速器¹⁾、3 MV タンデム加速器、3 MV シングルエンド加速器及び 400 kV イオン注入装置、はイオンビームによる材料科学を主体とした放射線高度利用研究に使用されている。これらの加速器の利用は原研内に限らず、大学、国公立研究機関 (民間会社を含む) に広く開放されており、平成 7 年度においては約 40 % が所外の利用となっている。7 年度に採択された実験課題数は 47 で、その研究分野は宇宙環境材料、核融合炉材料、新機能材料、バイオ技術及び基盤技術の 5 つに区分されている。

2 各加速器の運転状況

各加速器は朝起動して夜停止するデイリー運転を行っており、平成 7 年度における年間運転時間は、タンデム加速器、シングルエンド加速器及びイオン注入装置に対して、それぞれ 1201 時間、1705 時間そして 1505 時間であった。月別の運転時間は図 1 に示してある。これらの加速器では TIARA の特徴を生かした利用、すなわち、3 台の加速器による複合ビーム実験 (トリプル、デュアル)、タンデム加速器とシングルエンド加速器に設置されたマイクロビーム形成装置によるマイクロビーム実験、シングルエンド加速器による電子照射実験、そしてイオン注入装置のビームラインに設置されたビーム導入型分析電子顕微鏡による観察などが精力的に行われた。もちろん、RBS や NRA などのイオンビーム分析、イオン注入、バイオサンプルの照射などの一般利用も数多く実施された。各加速器の利用形態別内訳を図 2 に示す。

最近では実験利用が本格化して、利用希望日数がマシンタイム日数を大幅に上回ってきたこと、利用者から一日の実験利用時間の延長の要望が強くなったこと、などから各加速器を深夜 (最長 23 時) まで延長して運転する準備を進めている。延長運転には運転員の 2 交代勤務が必要ため、平成 7 年度までは各加速器 1 名であった委託運転員を平成 8 年度から 2 名に増員した。この延長運転は平成 8 年の第 2 マシンタイム (9 月から 12 月) から実施する予定で、現在、新しい運転員の教育訓練を実施している。

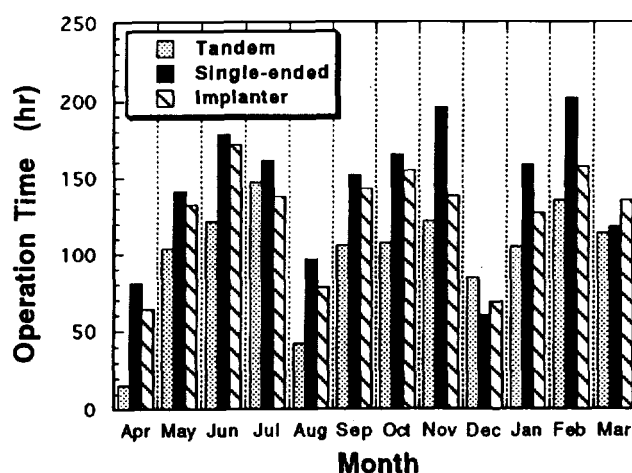


図 1 平成 7 年度における月別運転時間

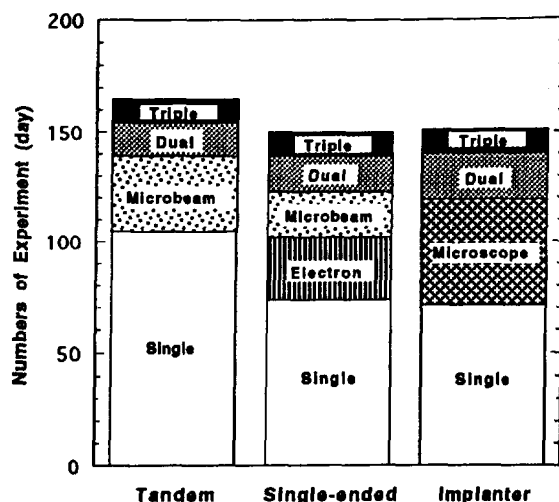


図2 各加速器の利用形態内訳

3 トラブル

シングルエンド加速器に使用されているイオン源ガス調整用のサーモメカニカルバルブのSF₆ガスによる腐食及び高電圧抵抗体の抵抗値劣化の問題については昨年の報告で詳しく述べた²⁾。このうち、サーモメカニカルバルブについては全数を耐腐食性の材質を使用したもの（Vivirad製）に交換し、これまでに最も使用頻度の高いもので700時間以上使用したがトラブルは発生していない。また、頻繁に抵抗値劣化のある加速管分割抵抗については、日新ハイボルテージ社で既に採用して劣化が少ないとされている無誘導型の金属皮膜抵抗に交換するべく準備をすすめている。

タンデム加速器では、SNICSイオン源のカソード交換時の大気突入によるターボポンプの破損、高電圧ターミナルのピックアップブリーの消耗破損、ストリッパガス導入パイプの放電破損などのトラブルが発生した。ガス導入パイプの破損は、実験のため通常使用している窒素ガスをヘリウムに代えたときに発生したもので、ヘリウムの絶縁耐力が窒素に比べて数倍劣るということを経験に調査しなかったミスであった。このトラブルでヘリウムが絶縁ガス中に数パーセント漏れ込んだため、絶縁ガスを全部新しいものと交換した。

シングルエンド加速器では、最大定格の3MVで運転中に突然電圧振動が発生するトラブルがあった。この振動の振幅は数kVで、繰り返し16~17Hzの非常にゆっくりしたもので、電圧が2MV付近で発生し、一旦振動が起きると0.5MV程度まで下げないと止まらないという再現性のある現象であった。緊急にタンクを開けて内部点検を行ったが特に異常が認められなかったため、電圧安定化システムを主体とした徹底的な調査を実施した。その結果、安定化回路や発振回路にも異常はないとの結論に達し、再度タンク内点検を行った。振動状態でかなりの期間運転したためか、この点検で一方のRF電極にコロナ放電の痕跡があり、この位置に相対する位置のシールド電極の間隙が小さく、ほとんど接触に近い状態にあることが確認された。この間隙を正規に修正することによって、振動はなくなったが、シールド電極の接近によって低周波の電圧振動が発生する原因はまだ解明されていない。しかし、スパークなどの電氣的ショックによる力でシールド電極の取付位置が変わるような電極支持金具の構造ではまずいのでこれを改良することとした。

4 ビーム利用の多様化

タンデム加速器によるビーム利用多様化として、1) 高エネルギー分子イオン、2) 低エネルギー負イオン、3) ポストストリッパによるフルストリップに近い多価イオン、4) メッシュアテニエータによる低強度イオンの利用、などが試みられている。このうち、分子イオンと低強度イオンについては既にマシンタイムで実験に使用されている。高エネルギー分子イオンはイオン源で発生した分子負イオンをガスストリッパで荷電変換する

ときになるべく壊さないようなガス条件で加速するもので、詳しくは別項で述べる。低エネルギー負イオンはイオン源で発生した負イオンを加速器をビームラインとして使用してそのまま透過させ、既設の実験チェンバーで利用し、多価イオンは本体で加速された多価イオンを加速器出口付近に設置したポストストリッパ（フォイル）で、さらに価数を増加させて利用するものである。低強度のイオンは入射ラインに金属メッシュを挿入して、強度を1/10単位で3デガード任意に減弱して利用するものである。本稿では低エネルギー負イオンとメッシュアテニエータについて少し詳しく述べる。

4. 1 低エネルギー負イオンの加速器透過

絶縁物等にイオン注入するとき表面のチャージアップが防止できることから負イオンの利用が注目されている。負イオンを利用するにはタンデム加速器の負イオン源を利用するのが簡便であるが、このためには新たに照射チェンバーを加速器本体室に設置する必要がある。さらに、本体室中に利用者の装置が設置されると加速器の通常の運転が制約されたり、タンク開作業などの保守作業に支障を及ぼす。実験チェンバーが設置されているターゲット室のビームラインに負イオンが輸送できれば、既設の装置がそのまま利用できるのが好都合である。この場合、低エネルギー（70 keV以下）のビームがストリッパカナルのある加速器本体をどの程度透過できるかが問題となる。ビーム輸送試験を行った結果、本体透過率は負イオンのエネルギーに依存すること、加速管の加速/減速のレンズ効果が大きいことなどが分かった。図3は負イオンのエネルギーをパラメータとして、加速器の加速電圧と透過率の関係を示したものである。負イオンのエネルギーが50 keV程度するとき、加速電圧を350 kV程度に設定すれば50%近いビームが加速器を負イオンのまま透過するので、十分照射実験に利用できる。

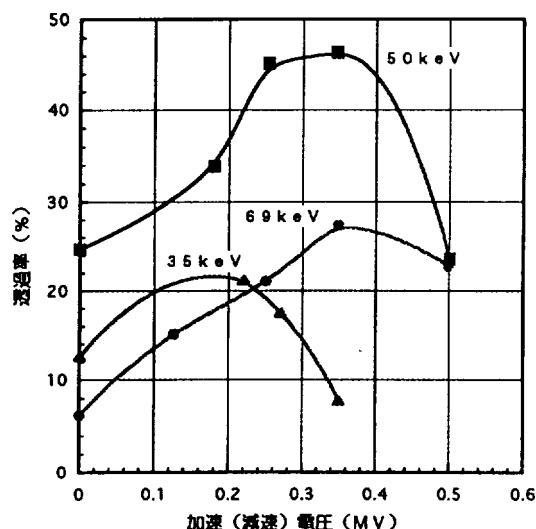


図3 負イオンの加速器本体の透過率

4. 2 メッシュアテニエータ

マイクロビームを使用したシングルイオンヒットの実験やビーム強度を μA から nA 以下まで広い範囲で変えて照射する実験などに対して、メッシュアテニエータは有効である。すなわち、イオン源の出力を落として安定に運転することが難しいこと、イオン源出口の可変スリットでビームを制限すると強度によりビーム形状が変わること、ファラデーカップやプロファイルモニター等のビーム診断機器の最大感度が nA 程度なので、これ以下の強度のビーム輸送は難しい、などの問題があった。あらかじめ減衰率の求められたアテニエータを使用することにより、イオン源が安定で、診断機器が十分な精度で動作する範囲

のビーム強度で調整を行い、その後、必要な減衰率のメッシュを挿入することで上の問題は解決できる。

このため、タンデム加速器の入射ラインに設計減衰率1/10と1/100の可動メッシュを設置した。メッシュは100 μm 厚のSUS板にエッチングで直径100 μm （精度 $\pm 25\%$ ）の穴を面積比が設計減衰率になるような間隔で空けたものを使用した。2枚のメッシュの間隔は10 cmで、これを圧空で出し入れすることにより、1/10、1/100及び1/1000の減衰率が得られる。入射ラインのビームエネルギーは70 keV程度なので、最大電流を30 μA としても、メッシュの発熱量は約2 Wで特に冷却の必要はない。図4にアテニエータの構造、表1にビーム減衰率の実測値の例を示す。1/10のメッシュの減衰率はほぼ設計通りであるが、1/100のそれは約1/80になっている。入射ラインと加速後のターゲットラインで測定した減衰率はほぼ等しく、また、プロファイルモニタで測定したビーム形状もメッシュの有無でほとんど変わらなかった。

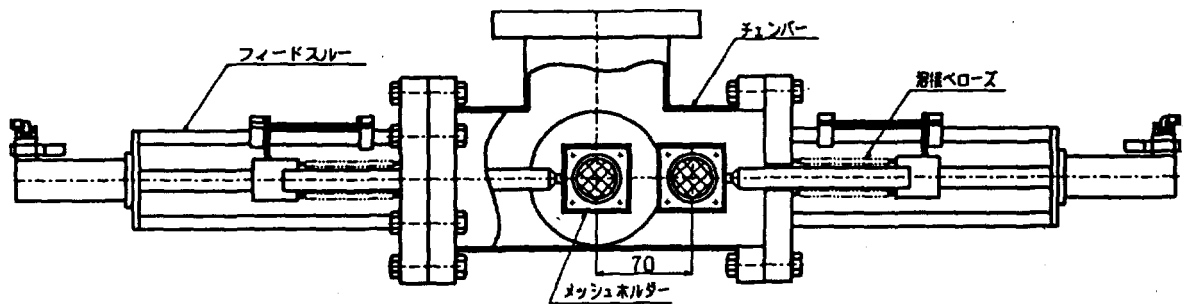


図4 メッシュアテニエータの構造

表1 アテニエータによる減衰率の測定結果例

Au^{3+} 12MeV

mesh	入射ライン		ターゲットライン	
	ビーム電流	減衰率	ビーム電流	減衰率
なし	$8.32^{-6}(\text{A})$		$2.00^{-6}(\text{A})$	
1/10	8.48^{-7}	1/9.8	2.04^{-7}	1/9.8
1/100	1.02^{-7}	1/81.5	2.51^{-8}	1/79.6
1/1000	1.04^{-8}	1/800	2.33^{-9}	1/858

参考文献

- 1) 田島、高田、水橋、宇野他：JAERI-Tech 96-029 (1996)
- 2) 田島、高田、水橋、斎藤他：第8回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集 (1995), p10

京大理タンデム加速器の現状

高橋 清二・ 中村 正信・ 村上 哲也・ 與曾井 優・松本 博
広瀬 昌憲・ 瀧本 清彦・ 坂口 治隆・ 今井 憲一

京都大学理学部物理学第二教室

* 1 はじめに

京都大学理学部8UDHタンデム加速器は利用を開始してから6年半が過ぎ、現在平成8年度前期(第12回)共同利用が行われています。今年度も一般ユーザーにたいしてはターミナル電圧7MV以下に制限して実験が行われています。又加速器グループとしては加速器の保守・整備に加えて、昨年度に引き続き核物理のプロジェクトであるPISと学際プロジェクトであるAMSを重点的に開発が行われています。昨年第8回研究会から1年間と開始から96年6月までの加速器の運転状況、故障状況、利用状況を報告する。

* 2 加速器の運転

1) 運転状況

1995年10月～1996年7月までの運転におけるターミナル電圧(図1)ペレットチェーン運転時間(図2)に示す。

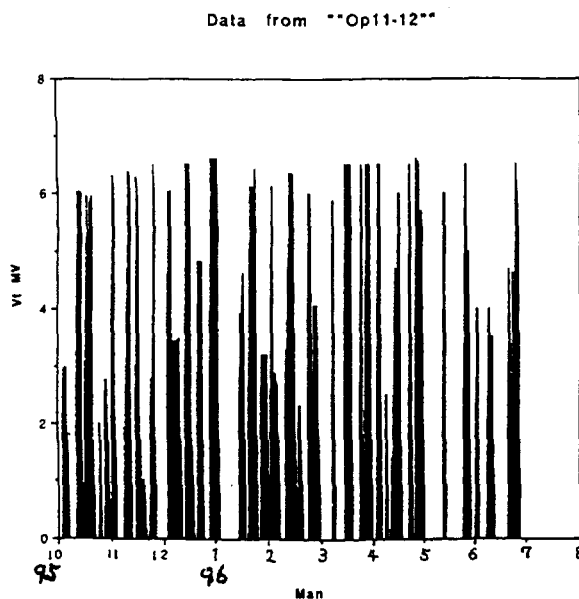


図 1

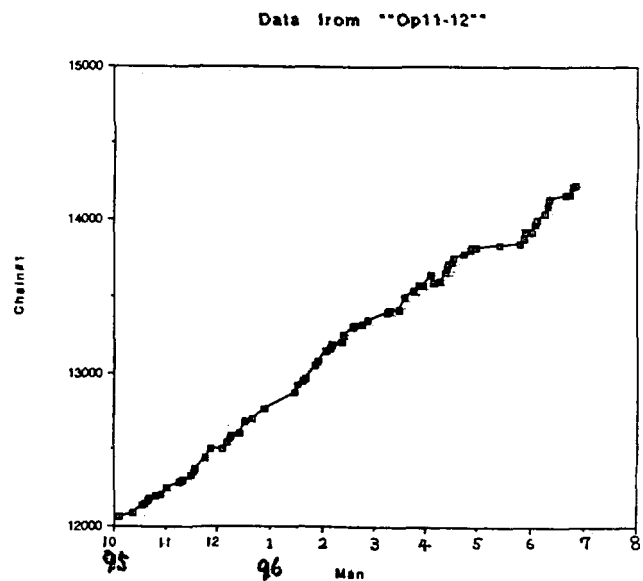


図 2

ペレットチェーン等の回転運動部品が1994年に予想より早く破損が続きましたが、現在小康状態です。開始から今までに交換したカラムテンションロッド(図3)チェーン(図4)の本数、箇所、時間を示す。

Data from "ROD96"

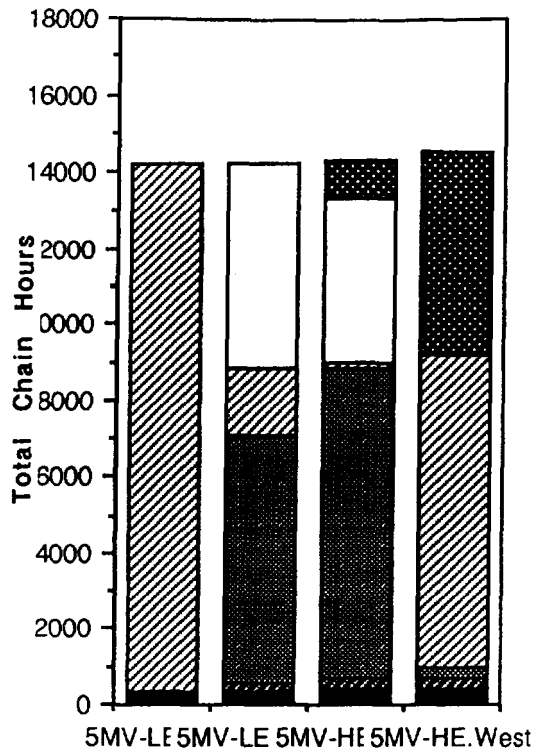


図 3

Data from "Untitled Data #2"

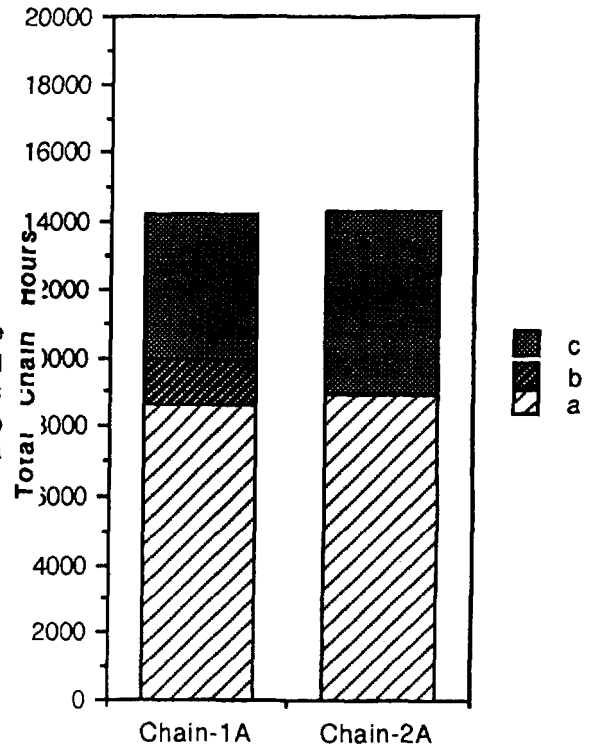


図 4

2) 運転(改良, 故障)等の経過

1995年7月~1996年6月

この一年間の改良, 故障修理の経過を下記に示す。

1995年

- 7月 * (タンク開) テンションロッド HE 5M 東側
 * ショーテイングロッド オリングシール交換
 * ナイロンロッド交換
 * チエンテンションブーリー交換
 * 加速管アライメント
 * SF6 GASドライヤー アルミナ交換
 8月 * ファースト アクチング バルブ 故障
 * 7度 冷却水 チラーコンプレッサー 交換
 9月 * 加速器コントロール用 CRT エミゲン

96年

- 14インチCRTを17インチに交換
 4月 * αトロス ガス切り替え器 マニホールド取り付け
 5月 * 加速器コントロール用コンピューター ハードデスク
 IF交換 (PDP-11)
 6月 * SF6 ガス補充
 * ショーテイング ロッドオリング シール ガス漏れ
 * 高圧ガス定期検査

3) 改良、故障と処置等

① テンションロッド

カラムテンションロッドの損傷に対する対応は済んでいません、1994年の夏に一部改造して、一番破損の多いターミナル側(5MV)のロッドを取り除く事がこころみられましたが、カラムの水平を保てずに中断しています、現在NECから新しい部品が届けられていて、この秋に取り付ける予定です。

② チェン

チェン本体及びジョイント、かしめ部分には異常はない。
昨年7月に大2、小4個のチェンテンションプーリーを交換した、
(ベアリングの異常及びプーリーの摩耗)

③ ショテイングロッド

ショテイングロッド、ナイロン製ロッドの表面が傷が多くつき、ガスリークがおきた為、新品と交換、国産 ナイロン66で加工した。

④ プロアーベルト

SF6(絶縁ガス)をGASドライヤーを通り、タンクへ循環するプロアーを駆動するベルト、約8000時間位で交換している。

⑤ GVM

96年7月タンク開時に、分解オーバーホールした。9月からの実験で調べる。

⑥イオン源

α トロス イオン源ガスは ^4He のみであったが、 ^3He ・ ^4He 他のガスを切り替え及び混合出来るように、マニホールドを取り付けた。
SNICSイオン源のカソードの自作、カソードブランクを自作し、NECのものよりスパッターされる穴を大きく、浅くした、現在p、 ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^7Li 、 ^6Li などのカソードを自作して使用している。

*3 利用の採択

この一年の利用は1995年10月～1996年3月(第11回)利用として申し込み総数 94日あり 83日 23課題を採択した。1996年4月～1996年10月までの(第12回)利用として申し込み込数80日21課題あり65日を採択した。その間今年度のプロジェクトとしてAMS、PIS、講習会等も含まれている、下記に図5、図6分野別利用割合を示す。

11th (1995.10-1996.3)

核物理21% 学際43% 教育28%

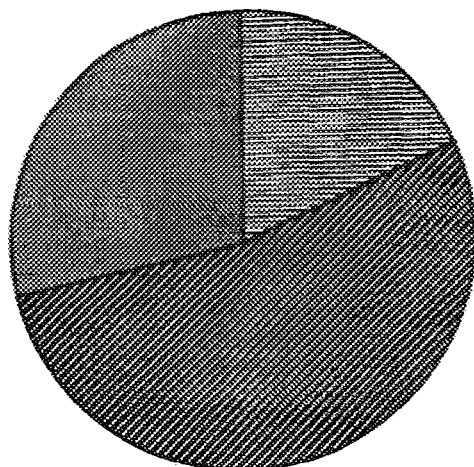


図5

12th (1996.4-1996.7)

物理37% 学際47% 教育16%

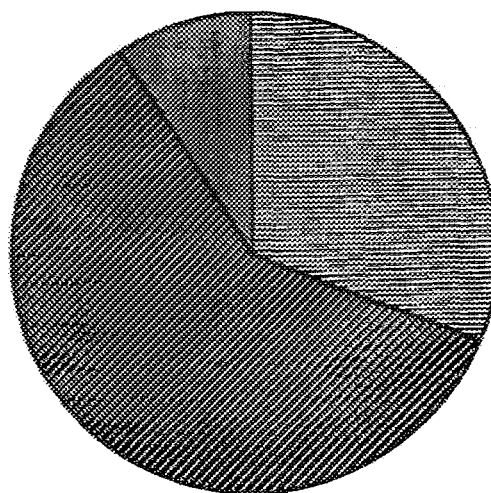


図6

*5 おわりに

京大タンデム加速器はいくつかの不安定箇所、消耗品的な部品の破損も年々増えつつあるが、この夏、GVMの安定化、10月にカラムテンションロッドの改造、プロジェクトのAMS、PIS、他、以上の課題を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 中村 正信、他、第3回タンデム加速器とその周辺技術の研究報告集
京都大学理学部(1990)
- 2) 中村 正信、他、第5回タンデム加速器とその周辺技術の研究報告集
京都大学理学部(1992)
- 3) 高橋 清二、他、第6回タンデム加速器とその周辺技術の研究報告集
京都大学理学部(1993)

名古屋大学タンデトロン加速器年代測定施設の現状

中村俊夫¹⁾・池田晃子¹⁾・太田友子¹⁾・奥野 充²⁾・小田寛貴³⁾・
青木 浩⁴⁾・伊藤誠介⁵⁾・足立 守⁶⁾

- 1)名古屋大学年代測定資料研究センター
- 2)名古屋大学人間情報学研究科 (D3)
- 3)名古屋大学理学部化学科 (D2)
- 4)名古屋大学理学部地球惑星科学科 (M2)
- 5)名古屋大学人間情報学研究科 (M1)
- 6)名古屋大学年代測定資料研究センター長, 理学部地球惑星科学科

*)連絡先: 464-01 名古屋市千種区不老町
Tel:052-789-2578, Fax: 052-789-3095
e-mail: g44466a@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

名古屋大学にタンデトロン加速器質量分析計が1982年3月に導入されて、はや14年が経過した。この間、 ^{14}C をトレーサーとした環境 ^{14}C 濃度分布に関する研究及びさまざまな環境試料の ^{14}C 年代測定が行われ、1995年末の測定数は5,800個を越える。タンデトロン分析計は、学内共同利用機器として研究・教育に利用され、また、国内やロシア、マレーシア、ブラジルを始めとする諸外国の研究者の共同研究の場としても盛んに利用されている。現在までの共同利用研究として、 ^{14}C 年代測定では、地質学、堆積学、古環境学、海洋学、地震学、活断層科学、雪氷学、水理学、考古学、人類学、文化財科学などの分野で、また環境 ^{14}C 濃度測定では、地球化学、環境科学、海洋科学、木材科学、保健物理学、食物科学などの分野で利用されている。これらの研究成果は、名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 I (1989)、II (1991)、III (1992)、IV (1993)、V (1994)、VI (1995)、VII (1996)で報告されている。

2. 名古屋大学タンデトロン加速器質量分析計の運転・利用の状況

タンデトロン分析計の諸性能は現在以下のとおりである。炭素をグラファイト化 (Kitagawa *et al.*, 1993) したターゲットを用いるようになって、グラファイト化を行うための CO_2 の量として0.2~1 mgで ^{14}C 測定が可能となった。測定可能な古い年代の限界は4~5万年前である。測定誤差は、グラファイトターゲットを用いると、数千年前の比較的若い試料については、 $\pm 0.8 \sim \pm 1.0\%$ (^{14}C 年代値の誤差で $\pm 60 \sim \pm 80$ 年) が2~3時間の測定で達しうる。測定時間を10時間程度に延ばせば、 $\pm 0.5\%$ (± 40 年) 程度まで小さくできるが、実質的にはこれが限界であろう (中村, 1995)。

図1に、最近測定した試料について、 ^{14}C 年代値とその誤差を示した。2万年前より若い試料については、1標準偏差 ($\pm 1\sigma$) でほぼ ± 100 年以下 ($\pm 60 \sim 80$ 年) の誤差で年代測定が可能である。一方、2万年前を越える古い試料では年代値が大きくなるに従って、誤差も次第に大きくなる。

次に、 ^{14}C 濃度測定(NUTE-)、 ^{14}C 年代測定(NUTA-)及び分析計の調整のためのテスト測定と ^{14}C バックグラウンド測定を含めた測定試料総数の積算を図2に、毎年の測定数の変動を図3に示す。また、図4には、各年度に分析計が使用された積算時間を示す。1995年度は、前の年度に比較して、使用日数が70日、使用時間が1400時間減少したが、この間の測定試料数はほとんど変化がない。これは、グラフィイト化したターゲットの利用がルーティンに用いられて1試料あたりの測定時間が短縮されたためである。また、分析計の測定準備の立ち上げ時間に平均3時間を要する。この時間を無駄にしないように、効率よく試料の測定を進めたことが使用時間の短縮に寄与したと考えられる。以上のように、タンデトロン分析計を用いた共同利用研究は、近年益々活発に行われていることがわかる。

これまでの年代測定の実績からすると、年間あたりの測定可能な試料数を規定するのは分析計の使用時間ではなくむしろ、試料処理、測定用ターゲットの製作に要する手間、時間である。今後処理数を増やすには、試料処理の方法や人手を確保することが不可欠である。

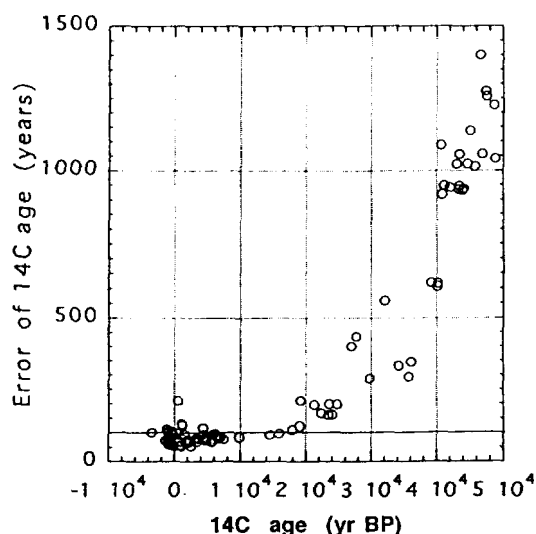


図1 タンデトロン分析計で測定した ^{14}C 年代値と誤差 ($\pm 1\sigma$) の関係

Operations of the Tandetron AMS at Nagoya Univ.

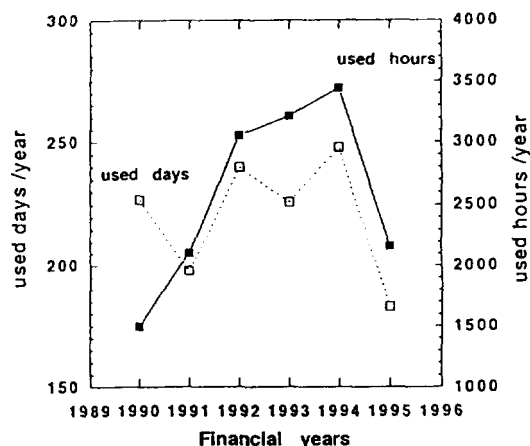


図4 タンデトロン分析計の年度毎の使用積算時間の変化

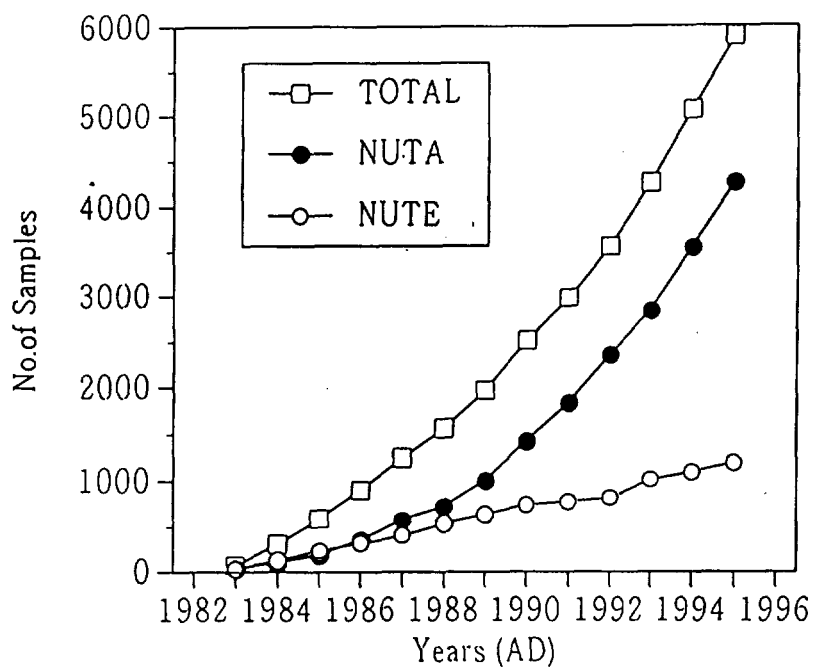


図2 名古屋大学タンデトロン加速器質量分析計による
 ^{14}C 測定数の積算

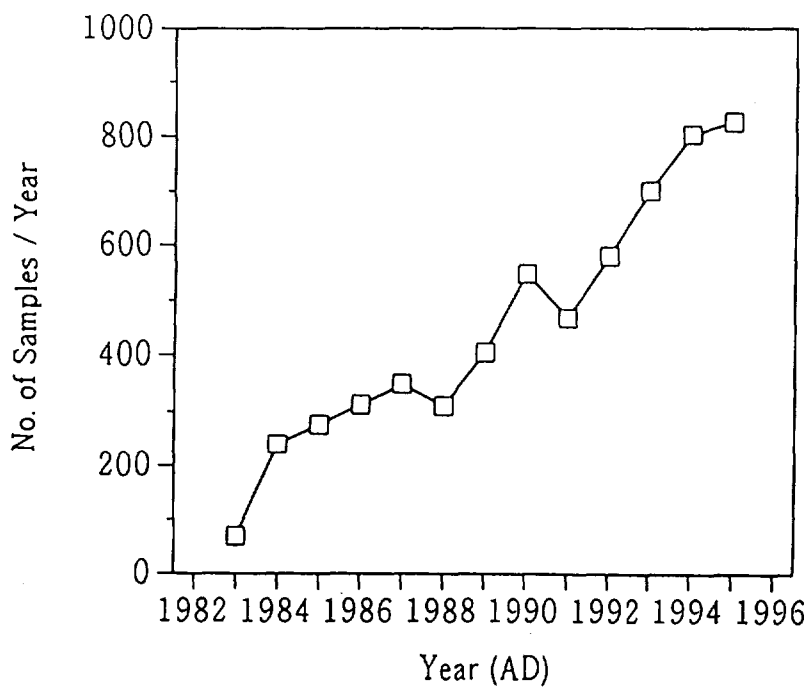


図3 名古屋大学タンデトロン加速器質量分析計による
 ^{14}C 測定数の経年変化

3. タンデトロン加速器質量分析計 2 号機の導入

名古屋大学では、平成 7 年度に新たに加速器質量分析専用の加速器を導入した。High Voltage Engineering Europa B.V. (Amsterdamseweg 63, 3812 RR, Amersfoort, the Netherlands)製のCarbon Dating System (Model 4130-AMS)で、日本の代理店は丸文株式会社である。米国wood-hole海洋研究所、オランダ・グローニンゲン大学、ドイツ・キール大学に続く世界の第 4 号機である。諸事情により、装置が完全に組みあがるのが1997年 3 月末頃であり、 $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の測定調整が同年夏頃、 ^{14}C 年代測定のルーティンランを開始するは1997年の末以降になると予想される。また、日本原子力研究所むつ事業所（青森県むつ市）では、同型のタンデトロン分析計が平成 8 年度末に導入される。

4. おわりに

東京大学や国立環境研究所に導入された米国NEC社製のAMS用タンデム加速器 (SD-15H, Kobayashi et al, 1993) でもオランダHVEE社製のAMS専用のタンデトロン加速器 (4130-AMS, Mous et al, 1993) でも、イオン源の能力が格段に強化され、グラファイトターゲットで最大 $150\mu\text{A}$ の出力があるという。また、ビーム光学系も整備されてイオンの輸送効率もよくなっている。従って、AMS 専用の両装置でも、統計誤差は比較的簡単に $\pm 0.5\%$ 以下にできるであろう。すると、AMSによる同位体存在比の測定の精度を決めるのは、マシンの時間的安定性である。マシンの安定性は、同一試料の測定の再現性を調べることでわかるが、このテストはきわめて重要である。ルーティンの運転で、どの程度の再現性が得られるのか今後の楽しみである。

参考文献

- アイソトープ総合センター：名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, I (1989)
- Kitagawa, H., Masuzawa, T., Nakamura, T. and Matsumoto, E.: A batch preparation method of graphite targets with low background for AMS ^{14}C measurements. *Radiocarbon*, 35, 295-300 (1993)
- Kobayashi, K., Hatori, S. and Nakano, C.: AMS system at the University of Tokyo. *Nucl. Instrum. and Methods*, B92, 31-34 (1994)
- Mous, D.J.W., Gottsdang, A. and van der Plicht, J.: Status of the first HVEE ^{14}C AMS in Groningen. *Nucl. Instrum. and Methods*, B92, 12-15 (1994)
- 名古屋大学年代測定資料研究センター：名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, II~VI (1991~1995)
- 中村俊夫：加速器質量分析 (AMS) 法による ^{14}C 年代測定の高精度化および正確度向上の検討. 第四紀研究, 34, 173-185 (1995).

原研タンデム加速器の現状

吉田 忠、神田 将、竹内末広、花島 進、莊司時雄
大内 勲、堀江活三、月橋芳広、阿部新市、金沢修平
石崎暢洋、田山豪一、松田 誠

日本原子力研究所 東海研究所 加速器管理室
319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

1. 原研タンデム加速器の概要

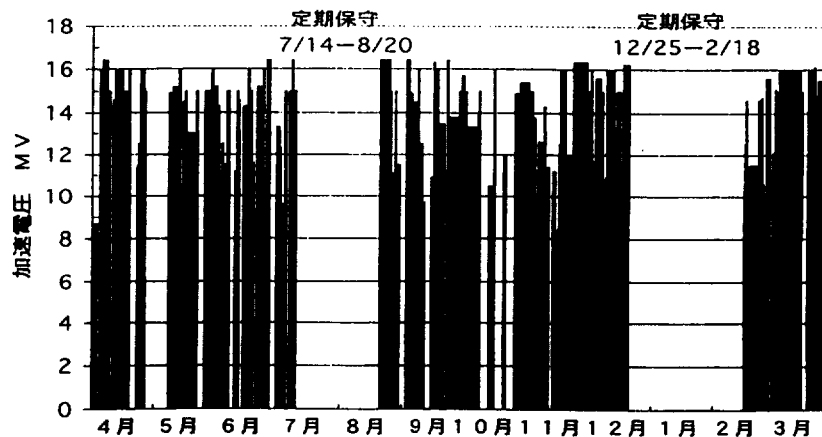
原研タンデム加速器は米国NEC社製のタンデム加速器である。折り返し構造の加速器であるため、高電圧端子には大型のマグネットを有し、大径の回転シャフト（ルーサイト製）により発電機を回し電力を供給する構造となっている。このシャフトは2本あり、カラム途中にあるショーテッドセクションにもこのシャフトから発電機を駆動する方式により、イオンビーム制御に必要な装置駆動用電力を得ている。制御系は全てカムックにより制御を行い、高電圧端子部への通信は赤外線による通信により制御している。折り返し型のため、多くの電子回路を有し、放電時に生ずるサージに対しては2重シールドを施すなどして、放電から生ずるサージから電子回路を保護している。

2. 加速器の現状

本格的な実験を開始してから14年、試験運転から17年、多くの開発を行い現在では非常に安定した加速器になっている。年間の整備期間も2回、合計3カ月の整備により充分な安定度を確保できている。運転形態は加速電圧を17MV以下に抑さえ、イオン源及びストリッパフォイルに負担をかける形態で行っている。前回等でも報告してきているように、これ以上の加速電圧は放電時に制御回路をこわす確率は相当に高く、1度のタンク開放修理に要する時間は最短でも1週間を要するため、加速電圧は極力抑さえる運転を心がけている。

第1図に運転電圧と稼働状況を示す。

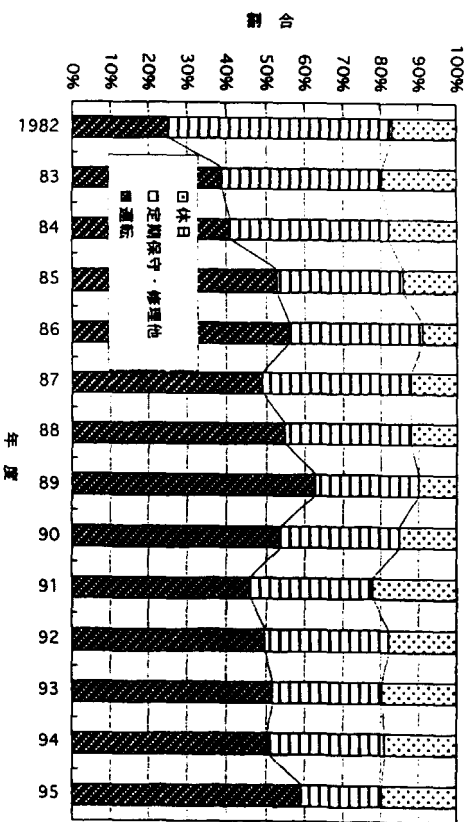
これまでチェーンの故障はほとんど無かったが最近故障が出てきている。故障の原因はほとんどがオイルに起因していると思われる。毎回の整備には同じ手順で同じ整備を施してはいるが、わずかな違いが生じている可能性があるが、確定はしていない。



第1図加速器の運転電圧と稼働状況

シャフト及びチェーンのモーター電源はインバータを使用した起動方式の電源に1996年1月変更した。チェーン及びシャフトのうち、軽負荷の方は特に問題なく動作したが、重負荷

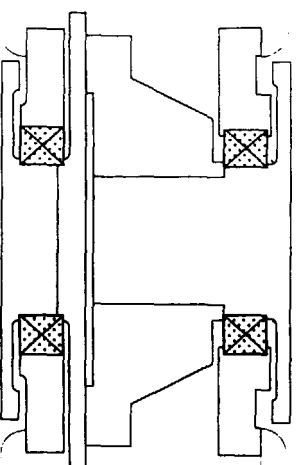
のシヤフト側は、負荷の増加とともに急激にモーター電流が増えることから、従来の起動方式に戻した。(これに関する報告は別の詳細な報告を御参照下さい) 制御系の計算機装置は大きな故障はなく、静電気によると思われるノイズにより時々停止することがあったが、おおむね順調に稼働することができた。また、この1年周辺機器も大きな故障はなく順調に作動した。特にブラスターが完成したことにより運転日数は、前年より大幅に増加している。第2図に加速器の利用割合を示す。



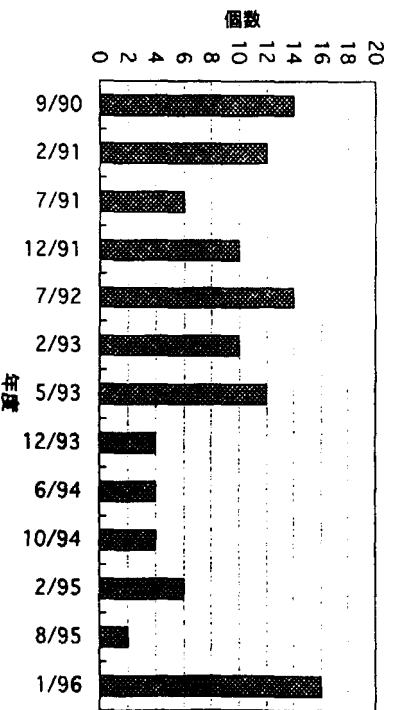
第2図 タンデム加速器の利用割合

3. 加速器の整備

タンデム加速器の整備は約1カ月余の時間を要する。主な整備項目はチェーン、シヤフト関連が主である。また1年に1度程度フオイル装填がある。その他電子回路、機械的部分の整備があるが、近年はほとんど細かい整備で十分な状況となっている。チェーンの整備ではオイルが重要な役割をしているため、ピンのゆるみ、油膜の付き具合、そしてアイドラーの点検調整は重要であり、これらの整備は慎重に行っている。もつとも大がかりな整備の一つはシヤフトベアリングの整備である。概略を第3図に示す。2本のシヤフトは28カ所の軸受け部を持ち、それぞれ2個のベアリング、中間にフレキシブルカップリングがあり、全体はベアリングホルダーによりカムキヤスティングに固定されている。1991年頃よりベアリングは完全封止式のシールを持つ形式に交換したところ寿命は飛躍的



第3図 回転シヤフト用カップリング部



第4図 各整備時のベアリングの交換個数

4. イオン源の整備

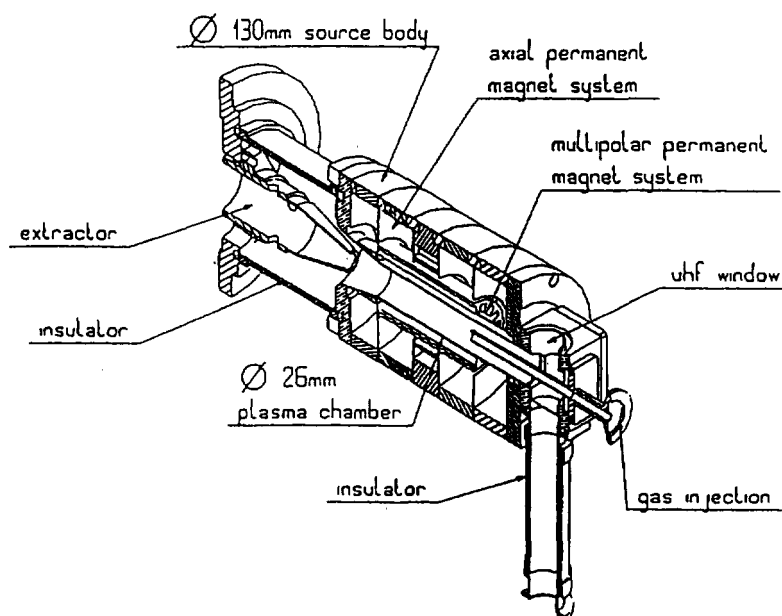
発を進める予定である。第6図にECRイオン源の断面図を示す。タンデムブースターにより加速できるイオンの速度は光速の約5%以上であり、これ以下の速度のイオンは加速できない。ECRイオン源は高多価のしかも電流量の多いイオンを発生することができ、これにより大電流で加速エネルギーの高い、重いイオンの加速が可能となり、ブースターを有効に使用することができるようになる。

5. タンデム加速器系の利用

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	III B	IV B	V B	VI B	VII B	O
H																	He
Li	Be												B	C	N	O	Ne
Na	Mg												Al	Si	P	S	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te		Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

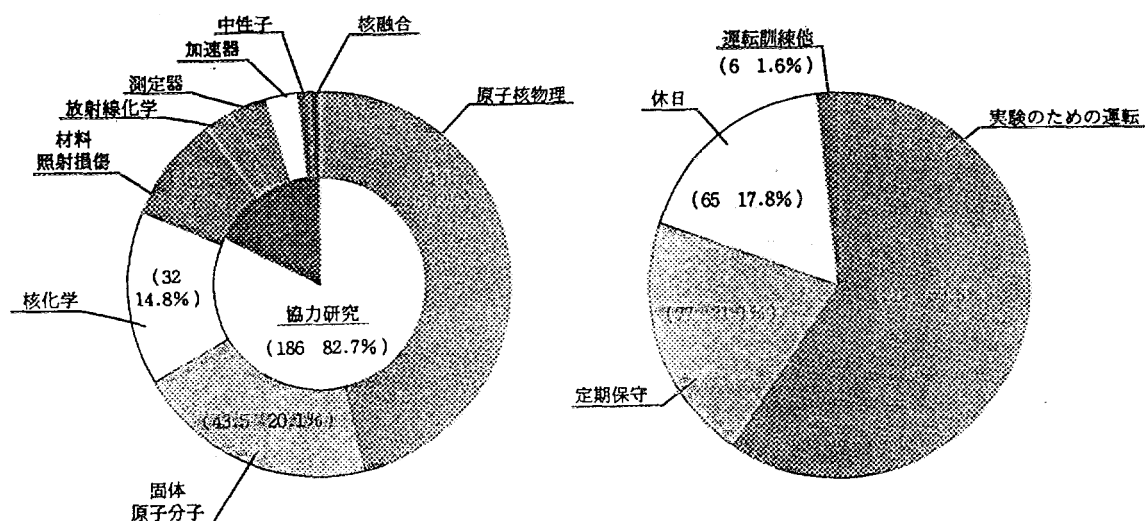
 : 加達済み
  : 開発中
  : 今後の目標

第5図 タンデム加速器で加速可能なイオン種



第6図 パンテクニク社製イオン源

生成核分離装置の完成により加速器を利用した実験は新たな展開を始めている。さらにガンマ線を効率よく測定できるクリスタルボールの実験も幾つかの大学と協力し開始され、原子核物理の新たな展開をみている。これに伴い、タンデム加速器及びブースターの運転も増加の傾向を見せている。世界的にも有数の加速器となったタンデム加速器の有効な利用に向け、さらに安定な加速器の構築をめざして改良を進めている。第7図に平成7年度の加速器利用状況を示す。



第7図 平成7年度加速器の利用状況

平成8年度の後半には物性関係の実験装置も整備され、より多くの実験希望が予想される。大型の実験装置の予算要求は現在も続けているが、現在は認められていない。できるだけ早く整備を行い、原研のみならず広く外部の研究者にも使用され、有効な研究が進むよう実験技術の支援等の業務も進めている。

参考文献

- 1) 小林、第7回タンデム加速器とその周辺技術の研究会
- 2) 加速器管理室、タンデムブースターの開発と建設 JAERI-tech 95-034
- 3) 原子炉工学部、JAERI TANDEM & V.D.G. ANNUAL REPORT 1994

九大タンデム加速器の現状

九大理 中村裕之、森信俊平、中島孝夫、郷農靖之、相良建至、
杉光強、御手洗志郎、池田伸夫、森川恒安、古賀義博、前田豊和
(E-mail: nakamura@kutl.kyushu-u.ac.jp)

1. 運転状況

加速器はおおむね順調に稼働している。この1年間での蓋開け回数は数回でそのほとんどはC-foilの交換である。1995年の運転時間は約2500時間で前年とほとんど同じである。

図1に、年間運転時間の変遷を示す。この2年間偏極実験グループが実験装置の開発と外部での実験を進めていたため運転時間が減少している。図2には、この1年間に使用されたビームの核種を示す。核分光グループの使用していた核種が、Si, S から B 等の軽重イオンへ変わって来ている。Ni 近傍の核は、fission track の測定グループ等のタンデム加速器応用での利用である。

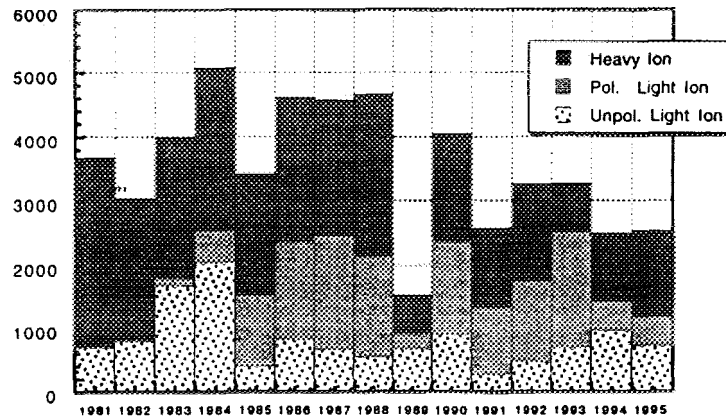


図1. 年間運転時間の推移 (1981-1995)

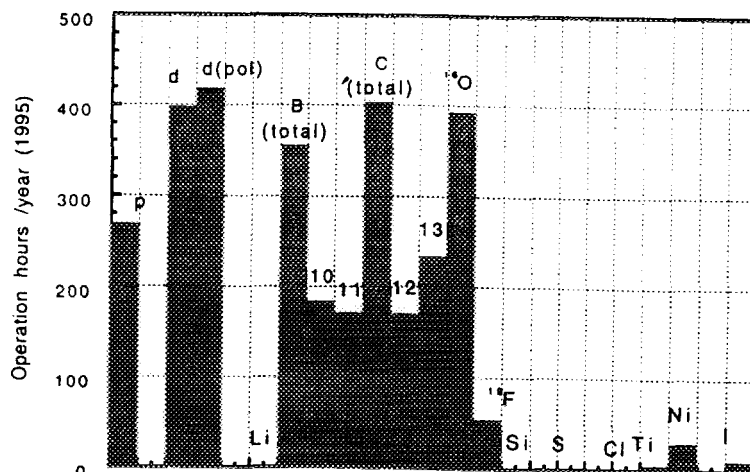


図2. 核種毎の年間運転時間

2. その他の変更改造等

- 振り分け電磁石コイル

20年間使用して来たコイルの電流リークのため、磁場が不安定であったため昨年(1995年)夏、交換した。アナライザーマグネットについて2個目。交換後は特に問題はない。

- モレキュラーシープスタワー

SF₆ガスの純化のためタンクにガスを詰める時、モレキュラーシープス中を通していた。吸収した水分を除去するためガス充填の前に真空に引きながら100度C以上にタワーを加熱してモレキュラーシープスの再生を行なっている。このモレキュラーシープスタワーが10年以上の熱履歴と湿度のため、ヒーターに1番近い筒の部分から腐食し、真空洩れをおこした。図3にモレキュラーシープスタワーの全体図と詳細図を示す。

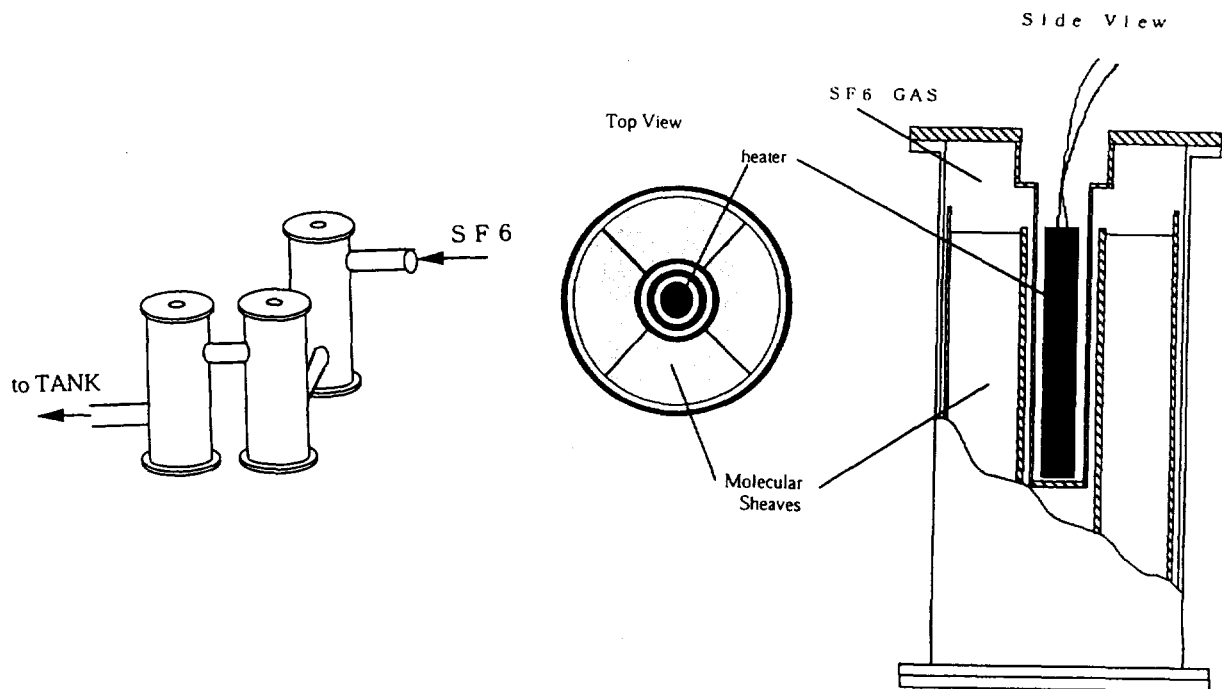


図3. モレキュラーシープスガス純化装置

- 反跳粒子分析装置

古いQDQシステム(16トンマグネット)を廃止し、新たにQQDDQQの電磁石を設置した。現在真空チェンバーを組み込み中である。

- AMS

³⁶Clの分析のため、^{35,37}Clとの時分割運転を行ない、³⁶Clを検出器で^{35,37}Clをファ

ラデーカッブで測定する。第1回テストが終了した。

- ヘリウム加速

筑波大(田岸氏)の方法で、偏極イオン源からヘリウム負イオンを取り出し実験に使用した。負イオン強度は、偏極ビームと同程度得られた。タンデム加速器を通過するまでの負イオンの寿命による減衰はほとんどなかった。

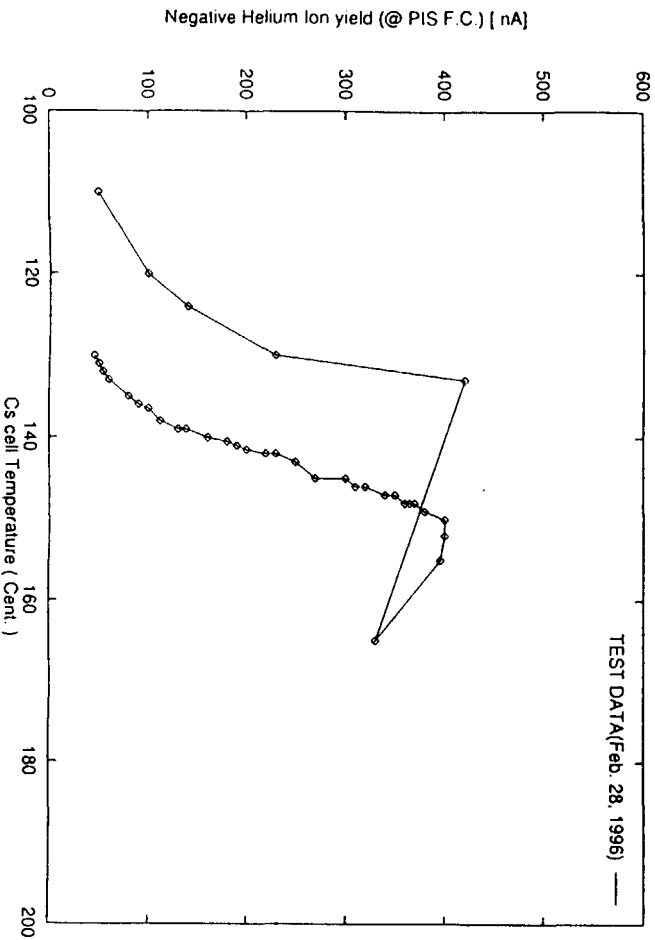


図4. セシウムセル温度とヘリウム負イオン出力. 通常の偏極イオン源としての運転より10〜20度程高いところが最良の温度であった。

- BIGT

BIGT(吹き込み型窓なしガスターゲット)の開発が行なわれた。このタイプのものが核研、理研でも使用予定で製作中である。九大タンデムでは、ターミナルのガストリッパーにも使用予定である。

東大タンデム加速器研究設備(MALT)の現状

東京大学原子力研究総合センター

小林 紘一、羽鳥 聡、中野 忠一郎、春原 陽子

1. はじめに

1991年から1994年3月にかけて更新された東大タンデム加速器は、約1年間の調整期間の後1995年4月から学内共同利用を開始した。この間多くの種類の研究が行われ、年間約3,500時間を越す運転時間を記録した。この施設は、AMS, PIXEやNRA等の微量分析及び原子分子物理学等に関する研究を行う施設であり、MALT(Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator)と称している。 ^{14}C , ^{10}Be および ^{26}Al の微量分析を可能とするAMS測定法の開発に重点をおいて支援をしてきたが、 ^{14}C -AMSの精度が実用レベルに達せず、現在までに実試料の年代測定はほとんど行われていない。一方では ^{10}Be -AMSと ^{26}Al -AMSはほぼ実用レベルに達しており、実試料の測定も行われている。

本稿では、昨年度の運転・利用状況、メンテナンスなどについて述べ、 ^{14}C -AMSの精度を悪くしている原因および対策について簡単に触れる。

2. 運転・利用状況

MALTは、2本のペレットチェーンを電荷搬送体としている。通常は、両方のチェーンを使用しているが、その内1本による搬送電流が少し不安定であることが判り、高い安定度が要求される実験については、チェーン1本による運転も行われた。(この件については、次章において詳細を述べる) 1995年10月1日から1996年6月25日までの約9ヶ月間のチェーン#1とチェーン#2による加速器の運転時間はそれぞれ2554時間と2785時間であった。即ちチェーン#2のみによる運転時間は約230時間であったことになる。これら全運転時間の約20%は加速器のコンディショニング時間である。また、約38%が加速電圧4.5~5.0MVの実験に使用されている。

図1のa、bおよびcは1995年10月から1996年9月までの1年間の、測定手法ごと、研究分野ごとの共同利用採択件数の分布、および採択日数分布を示す。利用件数ではAMSおよびPIXEによる研究が約90%を占めている。これらは、地球科学、宇宙科学、環境科学、考古学などのいわゆる学際分野研究であり、全申請課題数の約70%であった。全採択日数は162日であり、AMSとPIXEによる研究に約80%が割り当てられた。

MALTの利用状況を概観すると、

- PIXE, NRA, RBSや原子、原子核物理実験などの様に、プローブとなるイオンビームの加速器全系への透過率が測定精度に対して無関係である分析法の場合は、通常レベルの精度による測定が可能となっている。
- AMSの様に、分析イオンビームの加速器透過率の変動が測定値に直接影響する場合には、高い精度が得られていない。特に ^{14}C -AMSは1%以上の高い測定精度が要求されることが多く、現状では、ほとんど実試料の測定が行われていない。一方、 ^{10}Be -AMSと ^{26}Al -AMSはほぼ実用レベルに達しているため、多くの応用研究が行われている。

3. 最近の MALT における不具合箇所およびその後の対応

①加速器の電圧不安定性

MALT の加速器は通常、最大搬送電流 $150 \mu\text{A}$ のペレットチェーン 2 本(合計 $300 \mu\text{A}$)により運転されているが、最近、5MV 発生時の電圧変動が $\pm 1\text{kV}$ 程度かそれより悪い状況になっていた(加速器設置の初期の頃は $\pm 500\text{V}$ 以下であった)。種々の調査の結果、加速管および絶縁コラムポストの絶縁不良ではなく、搬送電流の不安定性が原因であることが判明した。電流の不安定なチェーンは 1 本のみであり、相互の交換、張力調整、プーリー位置の調整など多くの試みがなされたが、電流不安定性は解決せず、その原因は不明であったが、最終的には、チェーンに薄くオイルを塗布する事により不安定性は解消した。NEC 社からのアドバイスにより、最初は揮発性の高いオイルやターボ分子ポンプの潤滑オイル等が試されたが、乾燥するために 1 週間程度の期間、効果が認められたのみであった。その後グリース状の固めのフッ素系オイル(Dupont 社製、KRYTOX : fluorinated grease)を試しているが、3 ヶ月後の現在、電圧変動は $\pm 500\text{V}$ 以下(at 5MV)に抑えられて安定に運転されている。

この問題については変動の原因が不明であるので、オイル塗布による効果の理由も不明である。但し、チェーンとプーリー間の接触面の状態がある状態になると、摩擦により発生する負の電荷が多くなるとともに、その負電荷発生効率の不安定であることが原因であろうという意見が聞かれたが、1 本のチェーンのみがその状態になるという理由が説明できない。

昔の NEC 社製ペレトロン的大部分には、チェーンへのオイル塗布装置(オイラー)がついていたはずであるが、最近制作された 5MV 程度の小型ペレトロンからはその機構がはずされている。これについて「昔はペレットチェーンの潤滑のために必要であったが、最近の小型加速器の場合には、オイラーは不要である」という説明を NEC 社から受けた記憶がある(理由不明であるが)。電圧不安定性については見落としていたのだろうか。

②イオン源支持機構の改善

NEC 社の加速管は丈夫であるためか、イオン源の支持機構は単純である。即ち、高電圧部を支持する方法として、前段加速管に直にイオン源及びレンズ系を取り付けて片持ちで支持するという方法を探っていた。ところが、丈夫であるはずの加速管も両フランジへの碍子の接続部にはベローズ機構を持っているので、片持ち支持によりそのベロー部が伸びて加速管が曲がり、正確なアラインメントが不可能であった。これを避けるための対策として、1 年前より、高電圧電源架台からエアーストロンによりつり上げる方法がとられていたが、試料交換毎にアラインメントが狂う等と、支持方法としては不安定な方法であった。

その後、AMS 分析の再現性の悪さの原因の一つとしてこの問題が検討され、現在は、グラウンド側のビームライン支持架台から絶縁性板(5cm 厚デルリン板)による腕を伸ばして下から支えるという方法により固定している。イオン化試料交換の度にイオン源位置が微妙に変化するというトラブルは無くなり、更に、副次的ではあるが、イオン化試料の交換作業が楽になり、作業時間も短縮された。

③加速器のビーム透過率の改善

AMS 測定において、精度や再現性に影響を及ぼすのは、イオンビームの透過効率である。イオン光学系のいかなる部分においても、各種電源類の不安定性によるイオン軌道の変動を十分の余裕を持って受け得るほどアクセプタンスが大きい場合には、測定精度はほとんどイオン計数の統計によるとして良い(イオン源内でのクロスコンタミネーションや標準試料の選定などの問題は除くとして)。

現在の MALT における AMS 測定精度は、 ^{10}Be (同時入射法)の場合は $\pm 3\sim 5\%$ 、 ^{26}Al (交互入射法)が $\pm 1\sim 4\%$ であり、どちらも高い精度を必要としない場合が多いのでほぼ実用的な測定が可能となっている。これに対して ^{14}C は $\pm 2\sim 5\%$ (同時入射法)あるいは $\pm 4\sim 8\%$ (交互入射法)であり、年代測定のように高精度が要求される測定が全く不可能な状態になっている。

加速器へのイオンビームのトランスミッション測定は時々行われているが、その値は $50\sim 70\%$ (電荷分布を考慮に入れた全透過率)程度であり測定毎に変動し安定していない。

図 2 は、交互入射法による ^{14}C -AMS のテスト中のデータである。入射分析電磁石の物点位置にあるダブルスリットを全開位置から徐々に一つずつ閉めていった場合の、入射電流値 C と加速後の C^{3+} 電流値の比(トランスミッションに比例する)を ^{12}C と ^{13}C の各同位元素毎にプロットしたものである。スリットを絞ることによりトランスミッションの向上が見られるであろうことが期待されたのであるが、図に見られるように、トランスミッションの変化は、各同位元素毎に異なっており、しかも、イオンビームを切る方向によっても異なっている。ビームを切ることによりトランスミッションが却って悪くなることもあるということは、なかなかイメージしにくい、一つの可能性として、各同位元素のビームがストリッパーチャネルの中心を通らず、それぞれが異なる位置を通っており、しかもその透過率が非常に悪いということにより説明できる。

このような状態で AMS の精度が向上するはずがなく、NEC 社と共に検討した結果、入射電磁石の設計ミス、即ち、磁極間隙の大きい電磁石にとっては入射・出射角度の設定が甘く、二重収束になっていないらしいということが判明した。その検討結果が正しいとすると、中央電極内のストリッパーチャネル位置にはビームが楕円形に収束する事になり、100%のトランスミッションは望むべくもないということを意味している。これに対しては、磁石の直前に磁気 Q レンズを設置し、X と Y 方向のレンズ効果を個別に補正することにより、二重収束を実現するという方向で対処することになった。NEC trace によるイオン軌道計算によれば、この補正が正しく行われた場合には、100%のトランスミッションが期待できるはずである。

他の解決方法としては、電磁石本体の再設計、作り直し、およびストリッパーチャネルの大口径化を挙げることができるが、経費と作業時間を考えると、どちらの場合も簡単に試すことはできない。しかしながら、Q レンズによる効果が見られなかった場合には、最終的にはストリッパーチャネルの設計変更までも決心しなければならないかもしれない。

4. おわりに

MALT は学内共同利用施設であるため、一度共同利用を走らせると、途中で臨時に大規模の修理期間を設けることが困難である。しかしながら、今回のトランスミッション改善対策は MALT にとって最重要事項であるので、今後もまだ多くの共同利用マシンタイムを臨時の改善作業に充てざるを得ないと覚悟すると共に、次回の研究会においては満足できる成果を発表できるものと期待している。

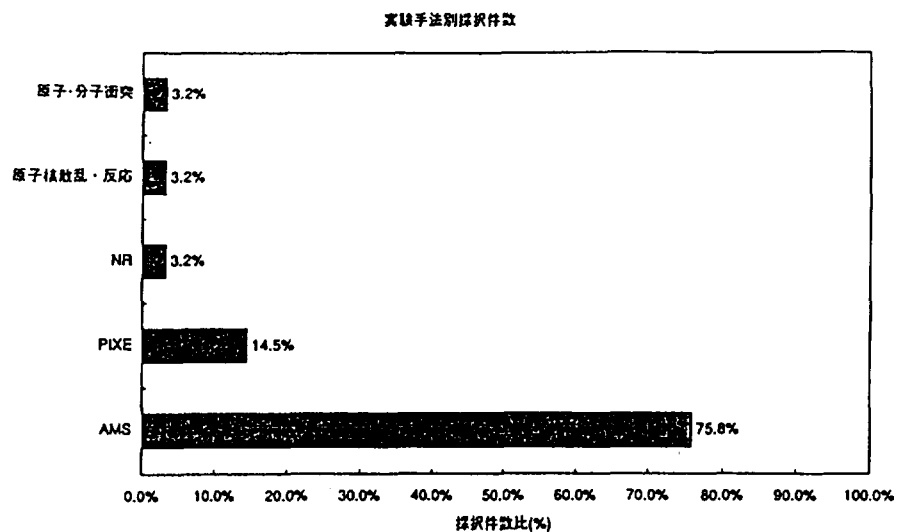


図 1 - a. 実験手法別の共同利用申請(採択)件数(全 62 件)

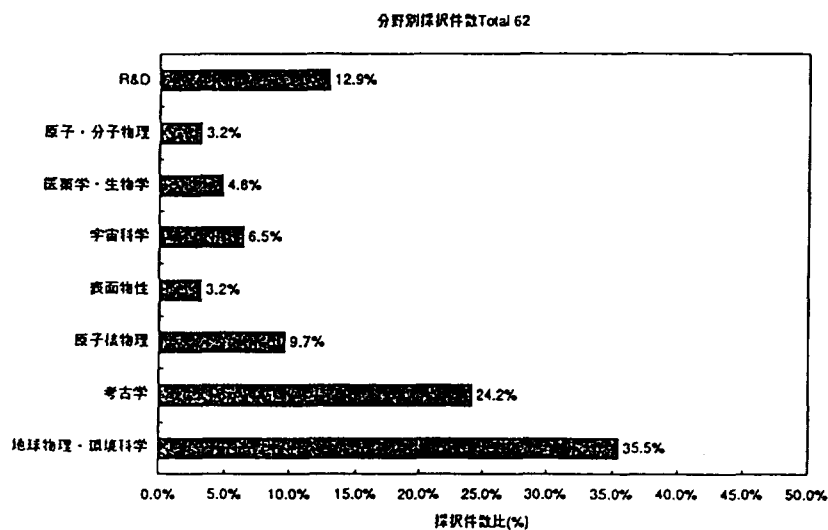


図 1 - b. 研究分野別の採択件数(全 62 件)

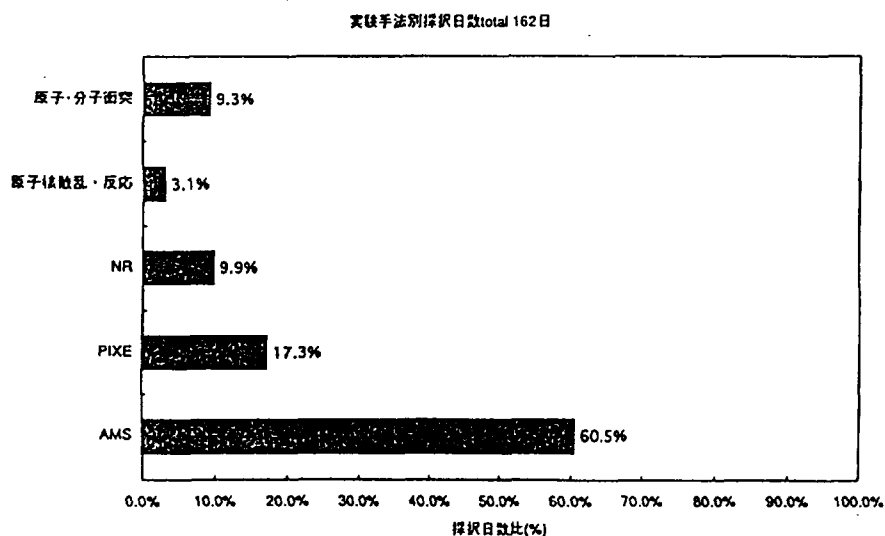


図 1 - c. 実験手法別の採択日数(マシンタイム：全 162 日)

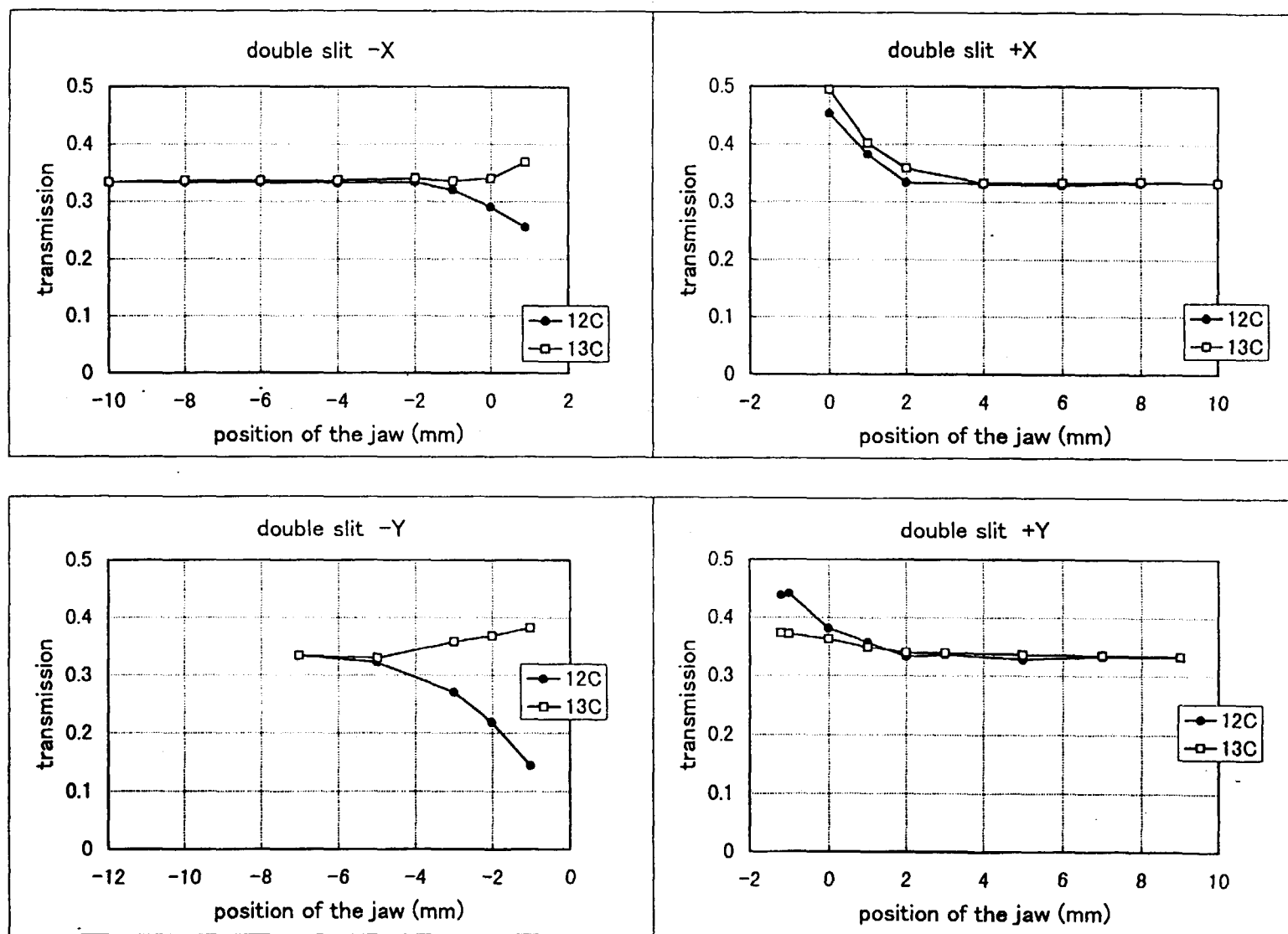


図2. 入射電磁石の物点スリット位置を変えた時のトランスミッションの変化。

入射電磁石チェンバーにバイアス電圧をかけ、 ^{12}C 及び ^{13}C イオンを交互に入射し、
加速前後のイオン電流の比を測定。

接地から見た加速器設備のノイズ対策

東京大学原子力研究総合センター 安本 勝

1. 始めに

ノイズ対策の観点から見ると各実験施設での接地システムは不適切である場合が一般的である（一例として独立接地方式）。これをノイズ対策にかなった接地システムにするだけでも、耐ノイズ性を大きく高めることが可能であると考えている。その場合、接地方法と同時に設備の特徴からそれにふさわしい対策技術を適用する接地システムにすることも重要である。本報では、接地から見た加速器設備の特徴を明らかにし、その接地システムの在り方について報告する。

2. 加速器設備の特徴

(1) 大型加速器及びその建物構造物（ここでは鉄筋コンクリート建物を想定）の中で、建物内部に広がりを持つ加速器設備の低抵抗のビームダクト及びその支持機構などの導体構造物（以下加速器導体構造物）が導体のノイズ循環路の抵抗値を決める支配的部分を占めることになる。

(2) その導体は、實際上、建物導体構造物から絶縁することは困難である。

(3) 加速器設備には、一般的に真空ポンプ、ビーム・オブティック・デバイスなど様々な電気使用機器が加速器導体構造物に据え付けられている。そのためこれらの機器にノイズ源が混入した場合、加速器導体構造物がノイズ循環路の一部を構成すると考えてよい。

(4) 荷電粒子ビームの戻り電流路確保のため、原則的には、ビームダクトの途中を絶縁させることができない。

3. 耐ノイズ性を高める接地システムの基本技術

3-1 誘導遮蔽⁽¹⁾ 電源ラインのコモンモードノイズ電流が流れる電源ライン、接地ライン、及び建物等導体の等価回路は図1になる（信号、ビーム各ラインでも同じようになる）。被遮蔽対象を建物ノイズ電流 i_e とすると、接地線の遮蔽効果 $|i_e/i_l|$ は次式になる。

$$\left| \frac{i_e}{i_l} \right| = \frac{r_s}{r_s + r_e} \cdot \left| \frac{1 + j\omega L_0/r_s}{1 + j\omega L_{se}/(r_s + r_e)} \right| \quad (1)$$

$$L_{se} = (L_s + L_e - 2M_{se}), \quad L_0 = \{(L_s - M_{ls}) - M_{se} + M_{el}\}$$

この式の周波数特性は、図2で表せる。

(1) 抵抗依存域 この周波数成分のノイズ電流は、抵抗のみに依存し、従って抵抗の大きさが無視できない建物等導体構造物に広範囲に拡散しやすい。接地ラインが電源ラインを流れるノイズ電流を遮蔽する効果の改善は、(1)式から r_s を小さくし、一方 r_e を大きくすることである。具体的には、接地ラインの r_s は、できるだけ大面積導線にして抵抗を下げ、一方 r_e は、電気

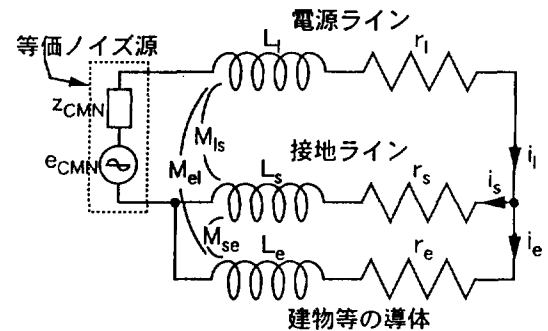


図1 ノイズ電流循環路の等価回路

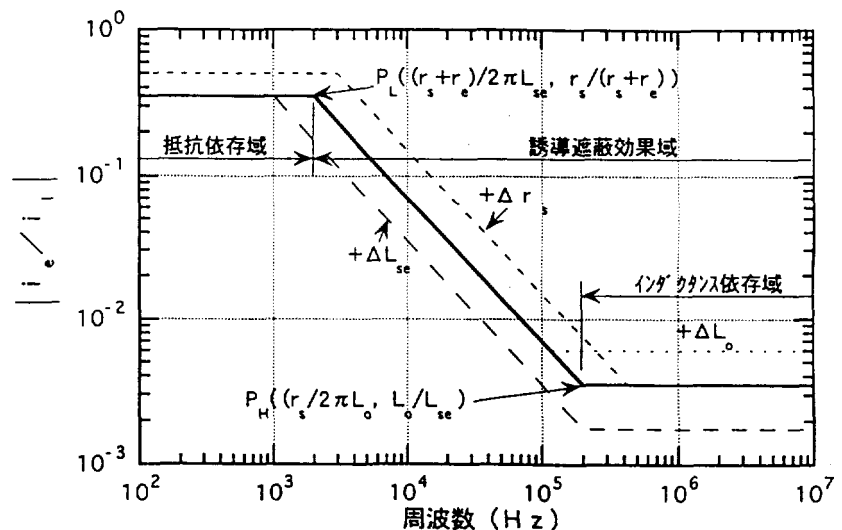


図2 $|i_e/i_l|$ の周波数特性

機器の筐体をできるだけ加速器及び建物の導体構造物から絶縁させ高めることである。

(2) インダクタンス依存域 この周波数域での遮蔽効果の改善は、 L_o を下げ、一方 L_{se} を大きくすることによって可能である。 L_o は、接地ラインを線から被覆に代えることによって著しく下げることが可能である。 L_{se} は、接地ラインと建物導体構造物を作るループの面積を大きくするか、超高透磁率トロイダルコアに接地線付ケーブルを通すことによって大きくできる。

3-2 低インピーダンス化（内部ノイズ源の対策）⁽²⁾ インダクタンス依存域周波数成分は、接地ラインのインダクタンスを下げることによって可能になり、抵抗依存域周波数成分は、接地ラインの抵抗を小さくすることによって可能になる。全周波数域の対策では、両者を併用することが必要になる。

(1) 各種シールドケーブルの遮蔽特性 (図3) ⁽¹⁾ 遮蔽効果の測定結果は、線シールドよりも被覆シールドの方が40dB以上良好である。被覆ケーブルでも銅テープ巻とブレイドとは、前者の方がまだ直線域が延びる傾向にあり、特性が良いことが分かる。この被覆の違いによる特性の違いは、誘導電荷が内表面を滑らかに移動できるかどうかによる違いから生じるものと置き換えて考えることができる。

(2) 低インピーダンスの実現方法

インダクタンス依存域での等価回路は、図4に示すものになる。測定結果は、線を被覆にすることによって著しく L_o が小さくなることを示している。従って、線を被覆にすることが接地ラインの等価的インダクタンスを小さくできるのでインピーダンスも小さくでき、理想的な接地ラインが得られることになる。

図4 ノイズ電流循環路の等価回路 (インダクタンス依存域)

インピーダンスが可能になることを分かりやすく示したものが図5である。電源ラインを円柱、被覆シールド接地ラインを円筒として、そこにコモンモードノイズ電流が流れると、円筒外では電流の収支は0になるので、磁束は0になる。また、高周波では円筒を流れる電流は表皮効果により円筒内面の極薄い層になる。従って、円筒（被覆シールド）内のノイズ源に対しては、実質上、

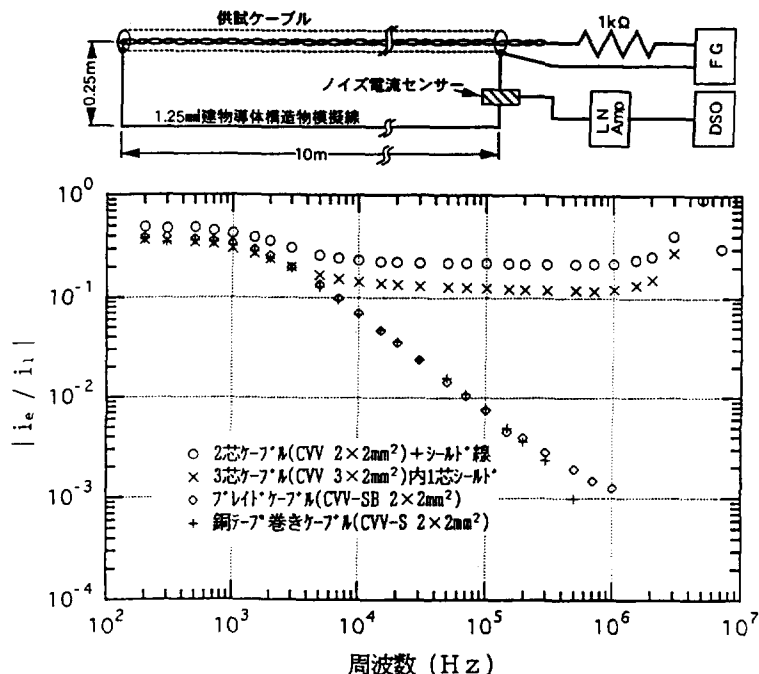


図3 ケーブル種類による $|i_e/i_i|$ 周波数特性

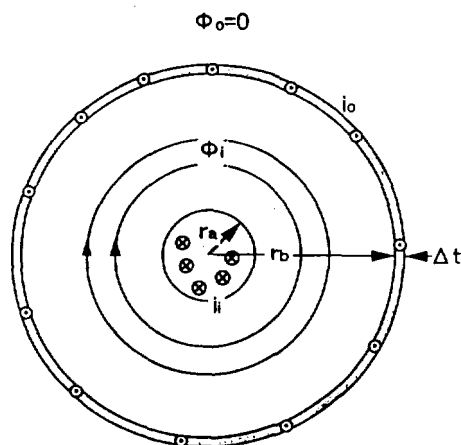
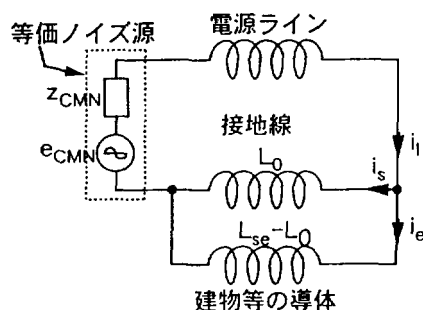


図5 同軸上の円柱導体（電源ラインに対応）と円筒導体（被覆シールド接地線に対応）を流れる電流 $(i_i=i_o)$ が作る外部磁束

円筒のインダクタンスは0に近くでき、理想的な接地ラインが得ることができる。これは外部ノイズ源ノイズには成り立たない。

3-3 同相（外部ノイズ源）ノイズの吸収

(1) 方法（図6） ケーブルがノイズ侵入原因の大半になると考えられ、電源・信号ラインと接地ラインいずれにも同じノイズ電圧降下が生じるようにすることによって、ノイズ電圧を吸収できる。内部では両ラインで相殺され、その電圧降下の影響はない。この同相のノイズ電圧降下を実現する方法は、超高透磁率材トロイダルコアにケーブルを通すことによって作ることができる。

(2) 超高透磁率材の特性 最近では、図7に示すように、比透磁率が非常に高い透磁率材があり、このノイズ電圧降下の目的に適したものが現れている⁽³⁾。この特性は、バイアス電流が無い場合のもので、流れている場合、外径38φ×内径19φ×高12.5の供試トロイダルコア（日立金属、ファインメット、FT-1L）では、インダクタンス（比透磁率に比例）は図8に示すように低下する⁽⁴⁾。これは高透磁率材の一般的特性であり、最大性能を引き出すため、バイアス電流を流さない対策を併せて行なうことになる。

3-4 干渉ノイズ電圧の抑制

(1) 共通インピーダンスの低減

共通インピーダンス部分にノイズ電流が流れるとその共通インピーダンス部分のノイズ電圧降下が干渉ノイズ電圧になる。できる限り一点接地にして共通インピーダンス部分を少なくすることが基本になる。しかし、実質的に困難な場合も多いので、接地ラインはできるだけ低インピーダンスにすることが併せて必要になる。

(2) 循環ノイズ電流の抑制

干渉ノイズ電圧の抑制のため、ノイズ電流を流さないようにすることが必要である。そのためノイズ源の混入を防止し、万一混入した場合でもノイズ電流が流れないように循環路を遮断する必要がある。一般的には接地側での遮断は困難であるため、電源ライン側でノイズカットトランスやフィルター等で遮断することになる。

4. 具体的対策方法

4-1 加速器建屋内接地システム（図9） 基本的に、以下の点を考慮して構成した。

(1) 共通インピーダンスの構成部分をできるだけ少なくする。

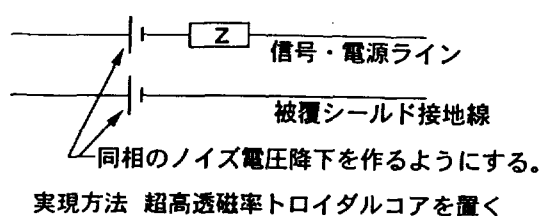


図6 外部ノイズの対策

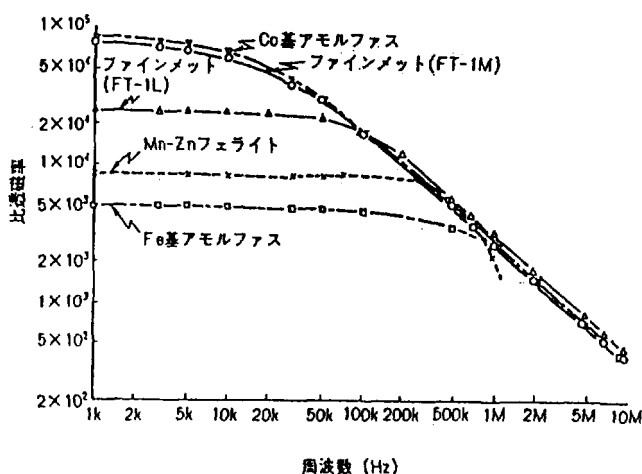


図7 高透磁率材比透磁率の周波数特性（文献(3)より転載）

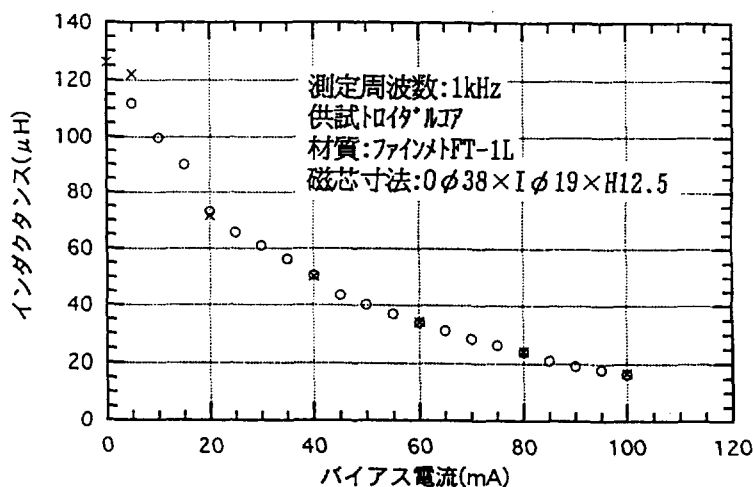


図8 バイアス電流によるインダクタンス変化
（○：減少時測定値、×：増加時測定値）

(2) 抵抗依存域循環ノイズ電流を抑制する。

(3) 共通インピーダンスで問題になるケーブル接地ラインのインピーダンスを下げる。

(4) 外部ノイズ源によるノイズはトロイダルコアで吸収する。誘導遮蔽のより内部ノイズを外に出さない。

4-1-1 接地極の構成 ①加速器及び建物導体構造物の電位を代表する建物導体側共通接地極を設ける。外部からの引き込み線接地線はこの接地極に接続し電位を合わせる。②建物内部の電源設備・電気機器などの共通接地極を設ける。③両接地極間に抵抗依存域の建物循環ノイズ電流抑制用抵抗を入れ、更に電位差を0.7V以内に抑えるゼロ電位確保用ダイオードを接続する。④各変圧器第2種接地線には地絡時系統間干渉防止用の適値の抵抗を入れる。

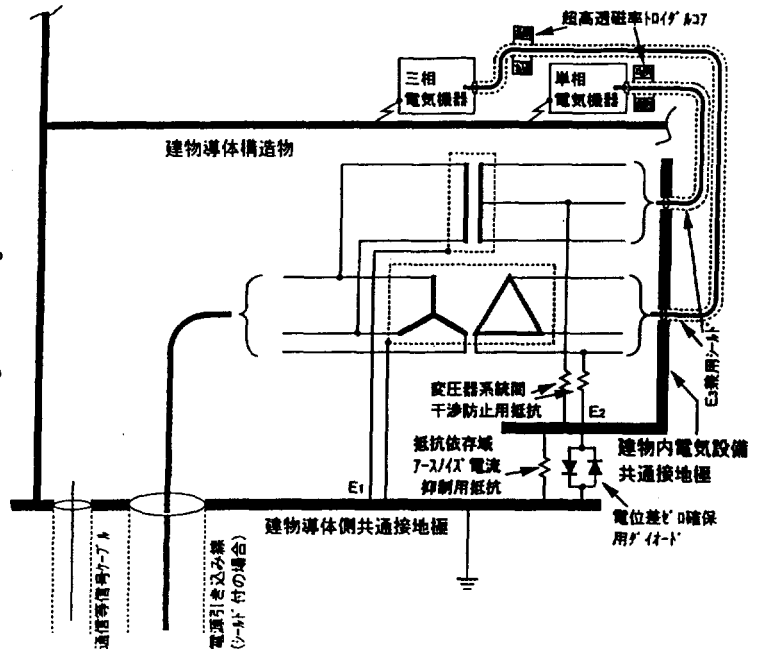


図9 建物ノイズ電流の抑制を考えた接地システム

4-1-2 電源ラインの対策 ①同一の部屋及びシステムの電源系統は同一のもので統一する。②接地ラインは、電源ラインと対にし、更に被覆にして、接地ラインのインピーダンスを小さくする。③接地ラインの各接続区間毎に、接地ラインと対をなすケーブルに超高透磁率トロイダルコアを置く。④電源と対になる接地ラインは室単位及びシステム単位でまとめ接続点を一個所にする。⑤ノイズ電流の循環路は、ノイズカットトランス、フィルターなどにより、電源ラインで遮断する。

4-2 ビームライン⁽⁵⁾ ①ビーム電流の戻り電流路をビーム・ダクトによって確保する。抵抗依存域成分は広範囲に拡散しやすい。大電流パルスビームの場合、ビームダクトで絶縁された個所が大きなノイズ発生源になる。②ビームライン以外の排気系ダクトなどはノイズ電流循環路を作らないようにできるだけ絶縁する。

5. 終わりに

今後、実際への適用を進めるため、耐ノイズ性の定量的評価方法、施行上の問題点などについて、具体的に提示できるものにしたい。提案した方法は安全対策とも十分両立できるものと考えている。

【文献】

- (1) 安本：「誘導遮蔽によるノイズ対策方法」，第10回東大工学部技術発表会，33-36('95-7)。
- (2) 安本：「アノイズ電流対策を考えた接地システムの提案」，第5回建築学会電磁環境研究会 EME95-006('95-11)。
- (3) 吉沢他：「ファインメットの磁性部品への応用」，日立金属技法，6,19-26('90)。
- (4) 安本：「電源ラインに起因するアノイズ電流を誘導遮蔽により低減する方法」，平成7年度電気設備学会研究発表会A-6,19-22('95-9)。
- (5) 安本：「荷電粒子ビームの戻り電流によるノイズ」，第42回応用物理学関連連合講演会講演予稿集，28a-TD-1(1995-3)

核研製ストリッパーフォイルによる 50 keV/amu Au イオンの タンデム加速器トランスミッション及び寿命測定

筑波大加速器センター 石井 聡、高橋 努、島 邦博
東大原子核研究所 菅井 勲、小柳津充広

§ 1. Introduction

ストリッパーフォイルの役割は、イオンの電荷交換にある。フォイル中のイオンの電荷交換がある深さで平衡に達すると、それ以上の深さでは、ビームのトランスミッションを低下させるだけである。電荷交換の平衡到達厚さは、イオンの速度が遅くかつ重くなるほど薄くなる。従って、ストリッパーフォイルには、(1)長寿命という要請の他に、(2)低速、重イオンの場合には、フォイル厚さが薄いという要請が加わる。

東京大学原子核研究所(核研、INS)製ストリッパーフォイルが長寿命であることは10数年来、定評があり、最近の、ロスアラモスの 800MeV/u H⁺ イオンのストリッパーテストでも世界の並みいるブランド製品に比べて群を抜いて長寿命であることを示した。他方、筑波大I2UDベレトロンタンデム加速器では、Au や Bi などの重イオンを使用したいというユーザーの要望に応えるために、長寿命ストリッパーフォイルを使用する必要に迫られた。何故なら、通常の市販フォイルでは数分以内に破損するからである。そのため、核研製のフォイルに対し、Au イオン照射による寿命、及びAuイオンのトランスミッションの測定を4度に分けて行った。タンデムのエネルギー領域(10MV)に於けるAuイオンのような(M200)、低速重イオンでも核研製のフォイルが、寿命、トランスミッションの両面で有効かどうかを調べるのが今回の目的である。

§ 2. Experimental Procedure

ストリッパーフォイルの寿命は、低速、重イオンになるに連れて格段に短くなる。今回のテストの特徴は、第1に、低速 Au イオンという、フォイルにとって苛酷な条件で照射を行ったことと、第2に、フォイルをターミナルの正規のストリッパー位置に置き、加速管を通ったAuイオンの電流の経時変化を測定したため、寿命のみならず(多重散乱、エネルギーストラグリングの効果がビーム輸送系にくり込まれた)ビームのトランスミッションの経時変化をも観測したことである。

2-1 Measurement

測定の配置を Fig.1a に示す。タンデムの加速管に入射するAu⁻イオンの電流を一定、すなわち $I(\text{Au}^-) = 0.6 \mu\text{A}$ に保ち、50keV/amu のAu イオン(ターミナル10MV)をターミナルに設置したストリッパーフォイルに照射し、更にタンデムの後半の10MV分のエネルギーを得た後、分析電磁石で分析されたAu¹²⁺の電流 $I(\text{Au}^{12+})$ の経時変化を測定した。測定例をFig.1b に示す。この図の場合のフォイルの寿命は63分ということになる。

10 MeV のAu イオンのカーボンフォイル通過後の Au¹²⁺の平衡電荷分率は $F(\text{Au}^{12+}) \approx 7\%$ であることが分かっているので、加速管入射後、輸送系を経由してAu¹²⁺の測定点に至るまでのビームトランスミッション $\text{Tr}(\text{Au})$ は以下のように定義できる。

$$\text{Tr}(\text{Au}) = \{I(\text{Au}^{12+})/12\} / F(\text{Au}^{12+}) / I(\text{Au}^-) \quad (1)$$

上式を使えば、Fig.1b の場合の $\text{Tr}(\text{Au})$ はビーム照射直後は 6.0 % であり、ビームの照射に伴い $\text{Tr}(\text{Au})$ はフォイルの破損に至るまで増加し続けた(照射直後の2倍以上)ということを意味している。

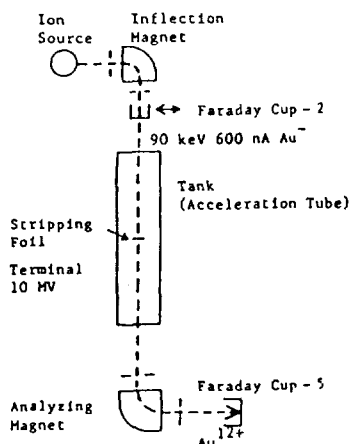
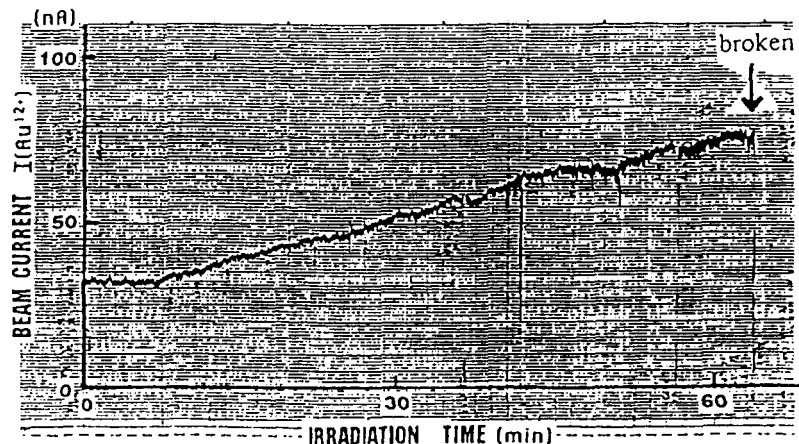


Fig.1 (a)測定配置



(b)ファラデイカップ5で測定されるAu¹²⁺の電流 $I(\text{Au}^{12+})$ vs 照射時間の1例

測定は4回に分け、毎回、約25-40枚のフォイルが照射された。核研製フォイルの他に市販（アリゾナカーボン社製）フォイルや、他のタンデム加速器で使われている長寿命フォイルも比較のために照射された。

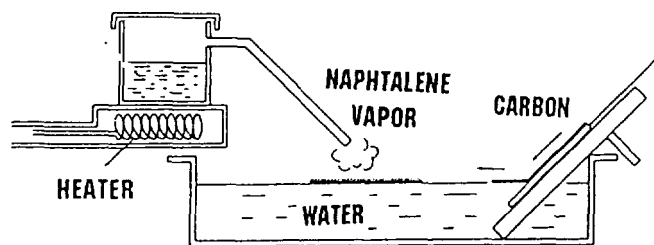
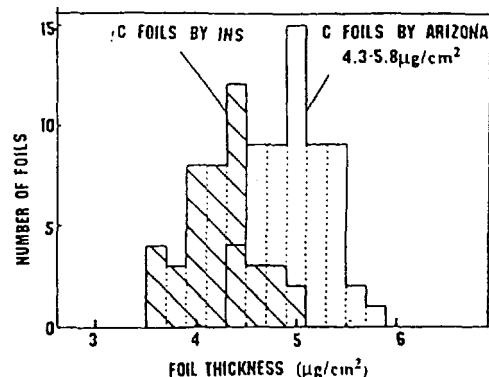


Fig.2 フォイル補強のための金魚掬いの前処理 (上)

Fig.3 ビームトランスミッション法で決定された核研製、及び市販フォイルの厚さと枚数の関係 (右)



2-2 Foil Preparation

フォイルの作製は核研で行われた。菅井によって開発された新アーク法と呼ばれる方法は他に詳述されているので重複は避けるが、基本は、カーボン電極間のアーク放電を起こさせるのに、DC と AC の両方を用いると言うものである。菅井は複雑な製法を避けるためと、長寿命フォイルをもたらし本質に迫るために、電極の形状とか放電の際の微量の気体の導入とか、さらにはアーク放電以外のスパッター法による長寿命フォイルの探求を精力的に試みてきたので、今回使用した4回にわたるテストの全てのフォイルが同一の手法で作られたものではないが、大多数は新アーク法によるものである。

ガラス上に蒸着されたフォイルを水中で剥離し直径 3/8 インチの SUS 製枠に掬い上げる作業は筑波大で行った。フォイルの厚さは3.6 - 20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ にわたるが、アリゾナカーボンに比して核研製フォイルは脆いため、薄くなると、SUS 製枠に掬い上げる際に破損しやすいので、最も薄いものを使用した第4回照射のフォイル (3.6 - 5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) は全て、Fig.2 に示す手順で掬い上げた。すなわち、はんだこての先にナフタリン入り容器をくくりつけ、水に浮かべたカーボンフォイル表面にナフタリン蒸気を吹き付け、ナフタリンの補強のもとに金魚掬いを行った。数時間後にはナフタリンが昇華してカーボンだけが枠に残るこの方法では、フォイルの破損は無かった。

2-3 Foil Thickness

先ず、厚さの判っている (20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下) 異なる厚さのアリゾナカーボンで、ターミナル10MVの酸素イオンのトランスミッション vs カーボン厚さの関係を測定し、この関係を基準にして、未知の厚さのフォイルの同様のトランスミッションの測定値より、その厚さを決定した。Fig.3 に、この方法で決定された、第3回照射用に用意した核研製フォイルの厚さと枚数の関係を示す。

§ 3. Result and Discussion

3-1 Lifetime of the foils by INS product

第1回 から 第4回 に行った、寿命及びトランスミッションの測定結果の概要を Table I に示す。

	フォイル厚さ	寿命	トランスミッション
第1回 (1986年11月) 新アーク(混合)	10 - 20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	長寿命 (平均95分)	低い (平均8%)
第2回 (1988年 5月) 新アーク(層状)(混合)	10 - 20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	長寿命 (平均110分)	低い (平均7%)
第3回 (1994年 5月) 新アーク (N_2 の混入率)	8 - 20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 5 - 7 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	長寿命 (平均104分) やや短寿命 (平均19分)	低い (平均9%) やや低い(平均12%)
第4回 (1996年 5月) 新アーク (N_2 の混入率)	3.6 - 5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	長寿命 (平均49分)	良好 (平均27%)
市販フォイル (アリゾナカーボン)	4.3-5.8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	(平均2.9分)	良好 (平均18%)

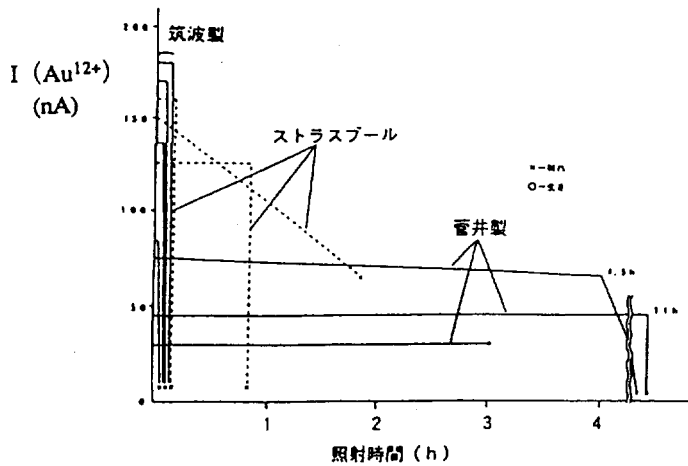


Fig.4 第1回foilテスト結果

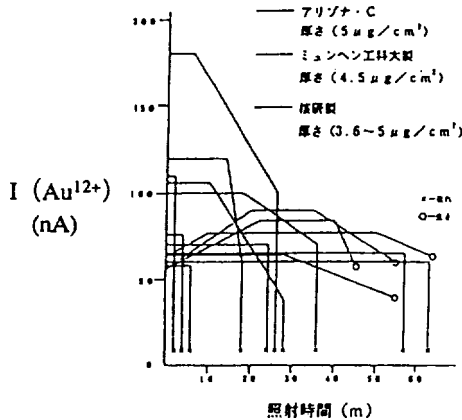


Fig.5 第4回foilテスト結果

Table I に記述された市販foilとはアリゾナカーボンのことで、測定された約60枚のアリゾナカーボンの平均寿命は2.9分である。Table I から判るように、第1回から第3回の照射で、厚さ $10 - 20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の核研製foilの平均寿命は市販foilの数10倍、第4回の照射で、厚さ $3.6 - 5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の核研製foilの平均寿命は市販foilの20倍である。厚さ $10 - 20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、及び厚さ $3.6 - 5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ のfoilの代表として第1回目と第4回目に観測された Au^{12+} の電流値 $I(\text{Au}^{12+})$ 対照射時間の関係の典型的なものをそれぞれFigs.4、Fig.5 に示す。図には核研製以外の長寿命foilに対する照射結果も表示されている。図から判るように、核研製foilは、これらと比較し得る、あるいはそれ以上の寿命を持つことが実証された。

3-2 Transmission -- Foil Thickness Dependence

市販のアリゾナカーボンの厚さがいずれも $4.3 - 5.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ と揃っているために、トランスミッション(Tr)もほぼ一定の値を示し、 $I(\text{Au}^{12+})$ の初期値の平均は約90nA、式(1)に従うと約18%ということになる。Fig.4のfoilは $4.3 - 5.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ より厚く、Fig.5のfoilは薄いため、両者の著しい違いは照射開始の時点に於て、Trすなわち $I(\text{Au}^{12+})$ の初期値が90nAより低いか (Fig.4)、高いか (Fig.5) ということである。

Trがカーボンfoil厚さにどのように依存するかを見るために、Fig.6 にターミナル10MVに於ける酸素イオンと金イオンのトランスミッション(Tr)をカーボンfoilの厚さに対して観測した値を示す。高速軽イオンの O^{16} ($625\text{keV}/\text{amu}$) に比して、低速重イオンの Au^{197} ($50\text{keV}/\text{amu}$) のTrのfoil厚さ依存性が著しいことが分る。すなわち、低速重イオンになればなるほど、Trは、 $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下、僅かなfoil厚さの差に敏感に効くことを示している。実際、タンデムで使う数10keV/amuの重イオンのカーボンfoilに於ける電荷状態は、 $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ では平衡に達して久しいから、foilが薄い程、電荷状態は保持されたまま、Trにとって有利であると言える。

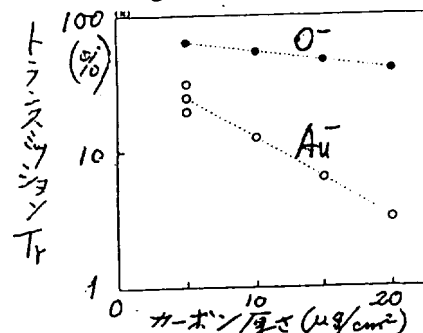


Fig.6. 10MeV 酸素、10MeV 金イオンのTrの、カーボンfoil厚さ依存性。

3-3 Transmission -- Time Dependence (Dose Dependence)

Fig.7に、2回目の照射テストで観測されたTrのビーム照射時間に対する変化の代表的なものを示す。これをFig.4, Fig.5に示される、1回目、4回目の照射テストの結果と比較してみると、如何に掲げるように、概して、Figs.4,5に多くみられるパターンとFig.7に多く見られるパターンのあることに気がつく。

- (1) トランсмッションTrが一貫して不変のままでフォイルの破損に至る。
 - (2) Trの増加が起り続け、遂にフォイルが破損する。一般に言われているようにフォイルのthickeningが起るために、Trがビームの照射とともに減少し続けるという現象は、今回の一連の測定では認められなかった。
- 何故この様な異なるパターンを持つTrの変化が現れるのか、考えられる要因を模式的に画いたのがFig.8である。先ず、Trの減少はフォイルのthickeningによるものであり、その可能性として、
- (1) イオンビームとカーボンを含む気体分子との衝突による解離、フォイル表面への付着、
 - (2) 高温状態のビーム照射カーボンエリアへのフォイル内カーボン原子の易動、が挙げられる。
- 一方Trの増加をもたらす要因としては、
- (3) 反跳によるフォイル内カーボンの損失によるフォイルのthinning (今回のイオンエネルギー、フォイル厚さでは、スパッタリングの寄与は少ない)。
 - (4) ビーム照射エリアの結晶化に伴うチャネリング効果、が考えられる。

照射前に非結晶であったフォイルが照射で結晶化することは菅井によって確かめられている。そのために、ビームはチャネリングにより、フォイルの透過率及びその後の軸方向への平行性も非結晶状態のフォイル通過の場合より高くなり、Trは高くなる。

(1) から (4) はフォイルの温度 (ビーム電流の密度)、フォイル周辺の真空度、フォイル厚さ等様々な要素によって左右されるであろうから、Trの経時変化をもたらす主要因がフォイル厚さの変化 ((1) から (3)) によるのかチャネリング効果 ((4)) によるのかは、現段階では議論できない。ただし、(1) Trが一貫して不変の現象が多く見られた1回目、3回目、4回目と、(2) Trの増加が起り続けて遂に破損に至る現象が多く見られた2回目の相違を敢えて探そうとすると、ビーム照射の電流密度の違いが挙げられる。すなわち、2回目の照射のみ、フォイルへの入射電流が他の1.6倍であり、更にビーム照射径が他の7mmと異なり、カナルを狭くして、5.5mmであったため、電流密度は、2回目と他の場合とは約3:1であった。ビーム照射時の温度上昇は明らかに異なることになるので、このことがTrのパターンの相違をもたらしている可能性はある。このことを探求するにはまだ多方面からのテストが必要であるが、1つの問題提起として指摘しておきたい。

§4. Summary

1. 今回のテストで、核研製フォイルはもともと長寿命で定評のあった10-20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の領域のみならず、5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下でも長寿命であることを示した。
2. 5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下のフォイルは、数10keV/amuの、タンデム領域の重イオンの、高いトランсмッションでの加速にとって極めて有用である。
3. 2-3 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の長寿命フォイルは、低速重イオンになればなるほど重要である。小型タンデム使用のガスストリッパーの代用 (high charge 成分が使える) を可能にするべく更に薄いフォイルの開発に着手した。
4. 長寿命をもたらすフォイル製法上の種々の要因、ビーム照射中にもたらされるフォイルの質的変化の種々の要因は、不明の点が多く、これらの解明のためには、泥臭い、地道な努力の積み重ねが必要である。

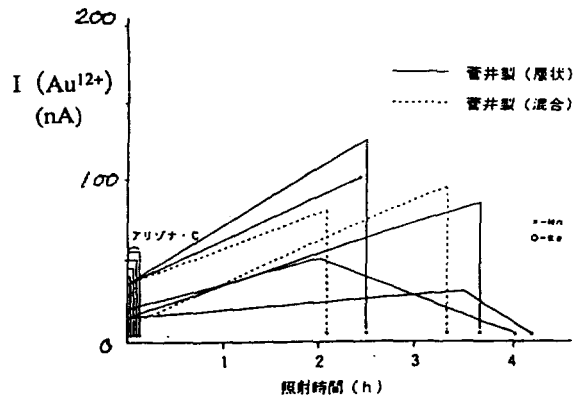


Fig.7. 2回目の照射テストで観測されたTrと照射時間の関係。

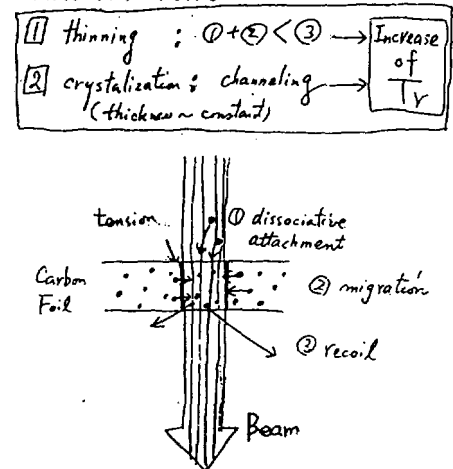


Fig.8 トランсмッションの増加の源

「原研タンデム超電導ブースターの現状」

竹内末広、松田 誠、金沢修平、吉田 忠、大内 勲、荏司時雄

日本原子力研究所 東海研究所

原研東海のタンデム加速器の後段加速器として建設してきた超電導ブースターは1993年10月全系が完成し、ビーム加速テストと再調整を経て翌年9月設計性能を達成した。1994年11月から1995年4月までターゲット室において反跳生成核分離装置の据付調整を行い、1995年6月利用を開始した。ブースターで再加速されたビームは主に核分光の実験に利用され、筑波大学等から検出器を集めて造ったミニクリスタルボールを使った共同研究が展開されている。

ブースターの加速部は40個の1/4波長型で周波数130MHzのニオブ製超電導加速空洞からなる位相独立設定型のリニアックで、1空洞は4Wの高周波消費電力に対し5MV/mの加速電界または1個当たり0.75MVの加速電圧（最適速度 $0.1 \times$ 光速の入射粒子に対する値）を発生でき、全体で30MVの電圧を発生できる。空洞は10台のクライオスタットに4空洞ずつ収納されている。リニアックの前には2周波数のダブルドリフトハーモニックバンチャーがあり、タンデムからの直流イオンビームの60%を130MHzのCWのパルスビームを形成し、リニアックに入射している。加速されたビームは、デバンチャーでエネルギーの広がりを打消し、2重集れん90度分析電磁石で分析した後、ターゲット室へ導かれる（Fig.1）。

ヘリウム冷却装置は2系統あり、ブースターの前段部と後段部を分けて冷却している。液体ヘリウムの冷凍能力は250W/1系統で、そのうち空洞の高周波負荷に対し供給しうる冷凍能力は約200Wである。

加速テストではSi, Cl, Ni, Ge, Ag, I, Au のイオンを加速し、全加速電圧は設計値の30MVを達成し、期待するエネルギー性能を得ている（Table 1）。実験への利用ではGe, I, Zrを加速した。ブースターの立ち上げは40余空洞の位相設定の作業であるが2時間以内で完了することができる。空洞は安定しており、週末を含む長期間のマシントイムでも安心して稼働できることがわかった。利用開始してからこれまでの1年間の利用日数は25日で、冷却装置の運転日数は延べ135日であった。今後はもっと多くの利用が望まれる。

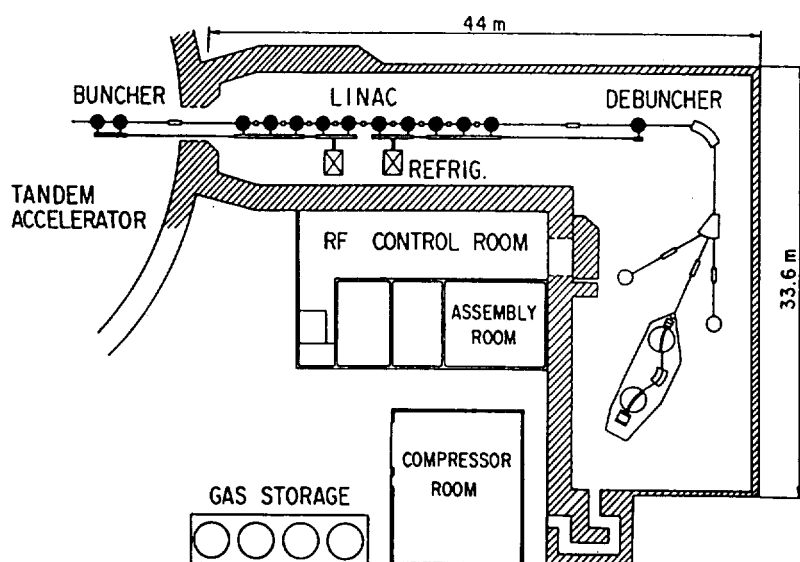


Fig.1 Layout of the JAERI Tandem-Booster facility

Table 1. Beam acceleration record of the booster since 1994

Ions	Energy(MeV)		Current(nA)		Total acceleration voltage(MV) (No. of resonators)	Synchronous phase (deg)
	initial	final	in	out		
(Beam tests in 1994)						
³⁵ Cl ¹⁰⁺	164	351	130	40	24.6 (37)	-30
³⁵ Cl ¹⁴⁺	164	446	80	16	27.6 (38)	-25
⁵⁸ Ni ²⁰⁺	190	628	80	30	28.2 (38)	-30
⁵⁸ Ni ²⁰⁺	190	658	170	100	27.7 (37)	-18
¹⁰⁷ Ag ²⁵⁺	231	798	45	15	27.6 (37)	-21
¹²⁷ I ²⁷⁺	225	812	20	4	28.3 (38)	-25
¹²⁷ I ²⁷⁺	225	880	100	23	30.2 (38)	-18
¹⁹⁷ Au ²⁵⁺	340	912	19	3	30.7 (39)	-22
(in 1995)						
²⁸ Si ¹⁰⁺	180	327	80	20	17.3 (39)	-22
⁷⁴ Ge ¹¹⁺	180	326	110	60	17.3 (39)	-35
⁹⁰ Zr ¹²⁺	200	384	10	5	18.9 (40)	-21
⁹⁰ Zr ¹²⁺	230	459	20	3	15.8 (38)	-31
(in 1996)						
⁹⁰ Zr ¹²⁺	205	418	69	15	21.8 (40)	-32
⁹⁰ Zr ¹²⁺	205	389	43	13	19.4 (36)	-32
¹²⁷ I ²⁸⁺	205	583	24	4	17.5 (40)	-22
⁷⁴ Ge ²²⁺	205	650	64	35	22.0 (39)	-22

問題点としては、①水素吸蔵を起こした空洞を冷凍機によりゆっくり冷却したときに120K付近で起こる水素化ニオブの析出によるQ値の低下の問題 [1]、②前段部冷却系に対する高周波負荷が80Wを超えるとクライオスタットのデュアーの中の液面が変動し空洞に有害な圧力変動が起こる問題、③加速中のビーム透過率が必ずしも良くない等の問題があった(表1のビーム電流について、入射ビーム電流の60%がバッチされてから加速され分析されるので理想的な出射ビーム電流は入射ビーム電流の60%である [2])。

①については、前段部の第1-4加速ユニットの空洞で大きなQ値の低下が起こっている。第5-10加速ユニットについては幸い問題となるほどのQ値の低下は起こっていない [3]。この違いは製作時期の違いと対応しており、表面処理、取扱履歴等における何らかの違いに原因があるはずである。例えば、電解研磨中発生する水素ガスを窒素ガスのバブリングによって脱ガスすることを第5-10加速ユニットの空洞に対して行っており、その効果があったものと考えられる。Q値の低下を抑制する方策として、ヘリウムガスの回路は並列分配であるので、クライオスタットを2つのグループに分けて130K - 90Kの温度範囲だけ時間的にシリーズに分割冷却することで冷却速度の改善を試みている。最近の結果では、冷却速度が約12K/hから17-27K/hに増加し、Q値は、析出のないオフラインテスト結果の値を100%として、平均すると約40%が約60%までに回復した。加速電界は約0.5MV/mの回復が初期の試みで得られている [4]。最近では高電界(約4MV/m以上)では電子電界放出による高周波損失が増加しており(空洞内面に多少ほこりが付着し始めた)、以前との加速電圧の比較が困難となっている。このような原因で低下した加速電界は大出力の

パルス・コンディショニングによって回復させることができるが、現状では必要最小限にしている。

一方、この問題の根本的な解決は空洞自身が水素化ニオブの析出を起こさないようにすることであるが、いまのところ有効な処方がない。今後に残された研究課題である。

②については、これまで液の溜まりにくかった第5加速ユニット（クライオスタット）への分配弁の開度を他と比べ非常に大きくするによって（70%、他は10-15%）安定な範囲が140Wまで改善した。140Wの許容負荷は1空洞あたり7Wに相当し、高周波損失の基準としている4W/1空洞に対しほぼ十分となった。これによって、運転中個々の空洞の高周波負荷が多少増大しても、全体として安定が保たれるはずである。

③については、クライオスタット、4重極電磁石、アパーチャー等の要素の整列が先ず疑われる。イオン・ビームを用いて各要素によるイオン・ビームの偏向を測定したところ、偏向は大きく、要素の位置の修正が必要であることがわかった。レーザー・アライメント装置等の信頼性を改善あるいは確認した上で整列を調べたところ、多くの要素で1-2mm、ごく少数の要素で3-5mmのずれが見つかり、位置の修正を行った。これまでのところ1-2回のマシンタイムだけであるがほぼ理想的な透過率を得ている（Table 1の1番下のGeのデータ；理想的な出射ビーム電流は入射ビーム電流の60%である）。

以上のように心配された問題はほぼ解決され、ブースターの完成度は一段と高くなった。タンデム加速器の後段加速器としてのブースターは、炭素から金のような重い元素のイオンを1GeV近くまで加速できる、あるいは核反応可能なエネルギーまで加速できる。そして、安定性と信頼性の高い加速器である。利用者の益々の利用と実験への貢献を期待するものである。

文献

- [1] T. Ishii, M. Shibata and S. Takeuchi, Nucl. Instr. and Methods A382(1993)231-235.
- [2] S. Takeuchi, T. Ishii, H. Ikezoe and Y. Tomita, Nucl. Instr. and Methods A287(1990)257-262.
- [3] M. Shibata, S. Takeuchi and T. Ishii, Proc. of the 6th Workshop on RF Superconductivity, Newport News, Oct.4-8(1993)pp895-899
- [4] S. Takeuchi, T. Ishii, M. Matsuda, Z. Yan and T. Yoshida JAERI-Conf 95-021, Proc. of the 10th Sympo. on Accelerator Science and Technology, Hitachinaka, Oct. 25-27(1995)pp194-196.

国環研タンデム加速器分析施設の現状

その2 試料調製について

国立環境研究所

熊本 雄一郎、柴田 康行、久米 博、

田中 敦、米田 穰、植弘 崇嗣、森田 昌敏

【はじめに】

1995年9月に、5MVのタンデム加速器（15SDH-2）を中核とするAMS専用装置が国環研に導入された。入射部は、固体試料用負イオン源（MC-SNICS）と逐次入射システムの組み合わせ、及び気体試料用負イオン源（MGF-SNICS）と同時入射システムの組み合わせで構成されている。我々は、装置の調整に必要なMC-SNICS用固体試料を供給することを当面の目的として、 ^{14}C 測定用グラファイトターゲット調製を行ってきた。

【クリーンルーム】

試料調製は、AMS試料調製用に新たに増築されたクリーン施設内で行った。施設は、前室、更衣室、エアーシャワー×2、クリーンルームAとB（ともにクラス1000）から成る（図1）。試料は、前室からバスボックスを通して搬入する。クリーンルーム内には電子天秤、高純水製造装置、電気炉などを設置し、すべての試料処理をクリーンルーム内で行った。また、特に試料汚染の危険性が高い作業はクリーンルーム内の6つの安全キャビネット内で行い、酸バスなど、汚染源となり得るものはクリーンルームBのドラフト内に設置した。試料調製に必要な高純度水素ガスは、ガスボンベを戸外のボンベ庫に設置しステンレス管を用いてクリーンルーム内に導入している。

【グラファイト調製法】

試料は、国際的な標準物質であるNISTのシュウ酸（SRM4990C）を用いた。5-10mg（約1-2mg炭素）のシュウ酸を酸化銅、還元銅、及び銀箔とともにPyrex管に入れ、550℃で8時間加熱することによって二酸化炭素に酸化した（Minagawaら,1984）。二酸化炭素ガスは、クリーンルーム内に設置したガラス真空ライン（図2）に導入し、ドライアイス/エタノールと液化窒素を用い精製した。グリースからの汚染を抑えるため、真空ラインのコックはすべてグリースレスコックを用いた。グラファイトの調製は、Kitagawaら（1993）の鉄触媒水素還元法によった。精製した二酸化炭素ガスを、あらかじめ還元処理した鉄粉約2mg（Aldrich Chemical, 325mesh）、および二酸化炭素ガスに対して約2.1倍の高純度水素ガスとともに石英管（900℃/2時間前処理）に封入後、650℃で6時間加熱することによって鉄粉とグラファイトの混合物を得た。

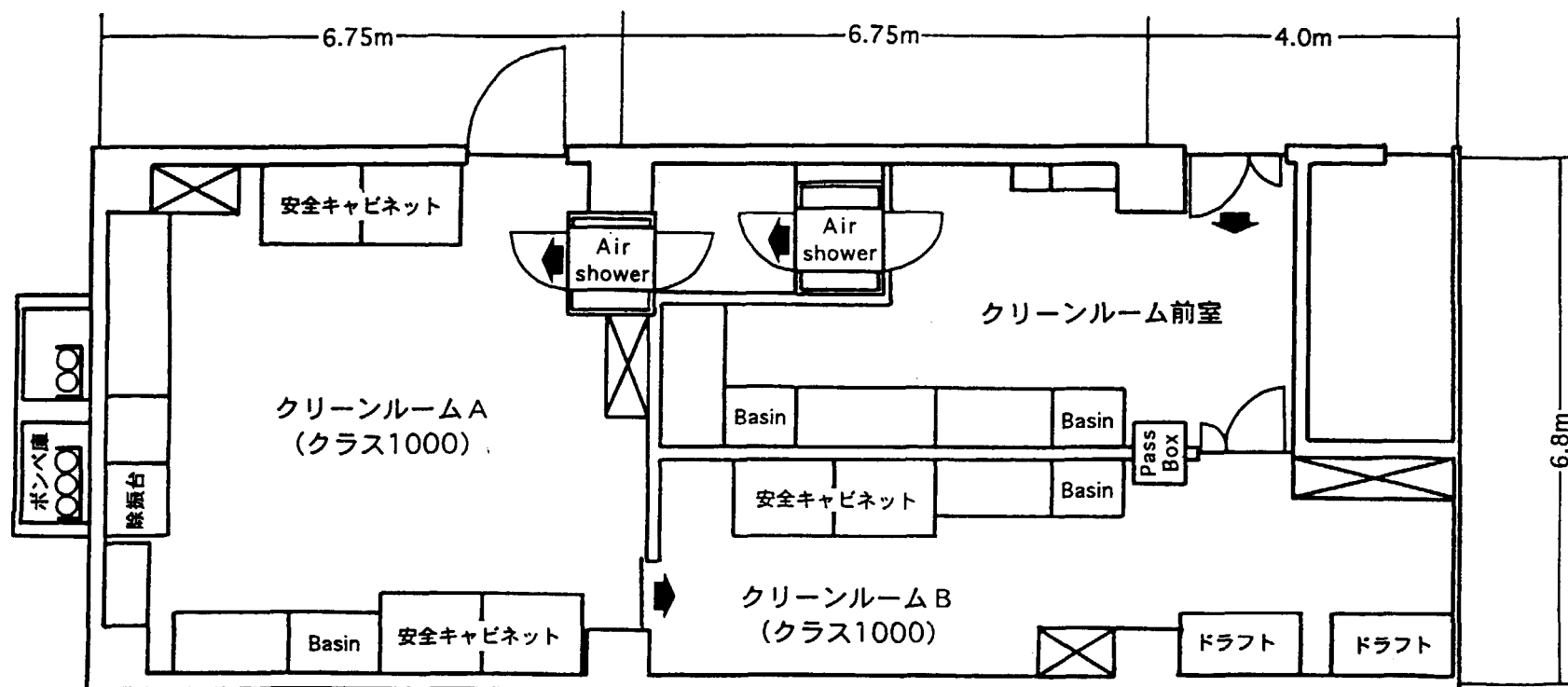


図1 試料調製室（クリーンルーム）平面図

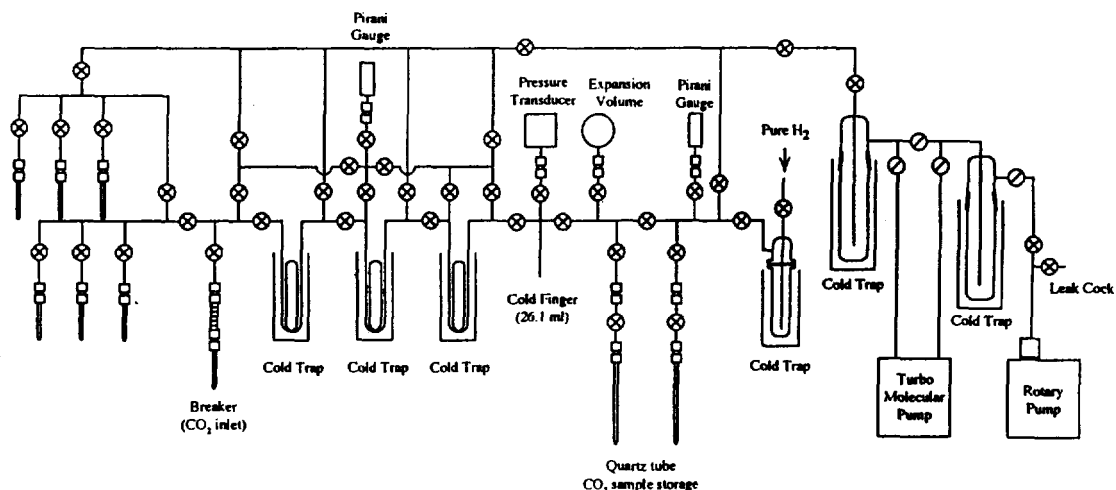


図2 ガラス真空ラインの模式図

【同位体分別効果と ^{14}C ビーム強度】

AMSによる ^{14}C 測定を高精度で行うためには、グラファイトターゲット調製時の同位体分別をできるだけ小さくする必要がある。試料とグラファイトの安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) が5%異なると、年代換算で約80年の誤差を生じる。図3にシュウ酸から二酸化炭素への酸化効率 (白ヌキ) とその二酸化炭素からグラファイトへの還元効率 (斜線) を棒グラフで示した。シュウ酸は二酸化炭素にほぼ100%酸化されており、二酸化炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、シュウ酸の値を反映していると考えられる。一方、二酸化炭素からグラファイトへの還元効率は、グラファイトを酸化銅とともに石英管に封じ、1000℃で8時間処理することにより得られた二酸化炭素の量から計算した。このグラファイトから二酸化炭素への酸化効率を正確に評価していないため、求められたグラファイト化の還元効率は見かけ値であるが、少なくとも85%の二酸化炭素がグラファイト化し、その際の同位体分別効果は約-0.5%程度であることがわかった。この程度の同位体分別は、 ^{14}C の測定にはほとんど影響を与えない。

AMSシステムが現在まだ調整の段階であり、本格的な ^{14}C の測定は行っていない。調整作業として行われた測定では、NISTシュウ酸から調製したグラファイトの ^{14}C カウント値として5分間 (0.1秒×3000回) の積算値で約2000という値が得られた。また、この測定の結果からグラファイトをターゲットホルダーに詰め込む際の圧力の違いによって、ビーム強度が変化することがわかった。当然これは測定精度に影響すると予想され、国外のいくつかのAMSグループで使用されているグラファイトターゲット自動プレス機の必要性を示唆している。

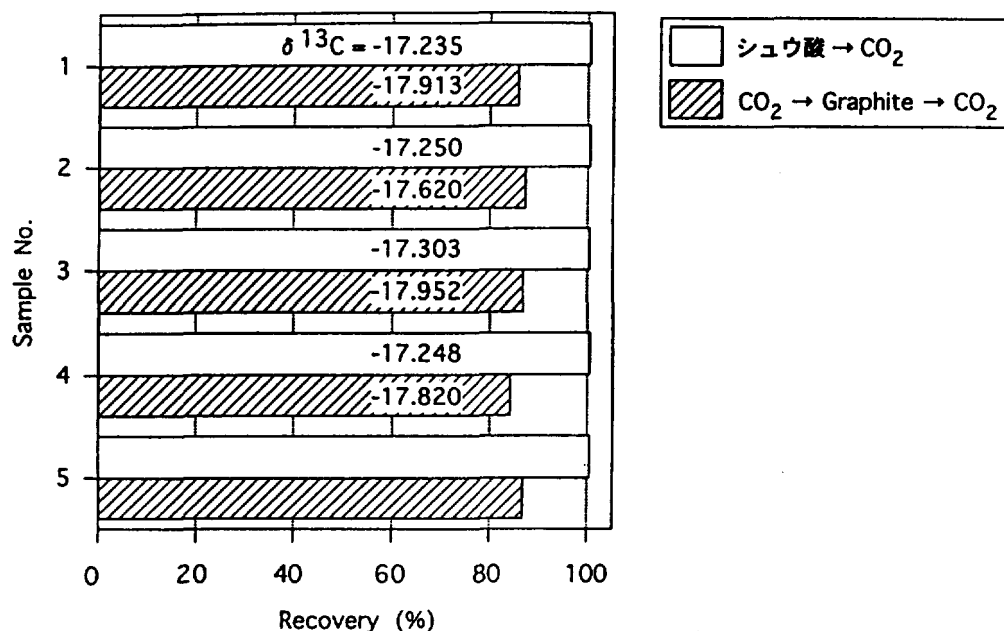


図3 グラファイト化効率と同位体分別効果

【今後の検討項目】

シュウ酸からグラファイトを生成する際の同位体分別は、ほとんど無視できることがわかった。しかし、グラファイト生成効率は二酸化硫黄などの微量ガスの混入により大きく変化するといわれており、今後はシュウ酸以外のサンプルについてもこのような同位体分別効果の程度を調べる予定である。¹⁴Cの測定はAMSシステムの本格的な稼働後になるが、試料調製時の¹⁴Cの汚染評価を行うために¹⁴Cを含まない化石燃料由来の有機物、二酸化炭素ガスからのグラファイト調製を現在行っている。

【参考文献】

Minagawa, M., D. A. Winter and I. R. Kaplan (1984): Comparison of Kjeldahl and combustion methods for measurement of nitrogen isotope ratios in organic matter. *Analytical Chemistry*, 56, 1859-1861.

Kitagawa, H., T. Masuzawa, T. Nakamura and E. Matsumoto (1993): A batch preparation method for graphite targets with low background for AMS ¹⁴C measurements. *Radiocarbon*, 35, 295-300.

東京大学・原子力研究総合センター・重照射研究施設 における新規設備

東京大学・原子力研究総合センター

柴田 裕実、岩井 岳夫、鳴井 誠、尾亦 孝男

東京大学・原子力研究総合センター・重照射研究設備（HIT）では平成7年度に加速器関連設備として、1. 重イオンマイクロビーム分析装置、2. フーリエ変換赤外顕微測定装置、3. ピコ秒2次元蛍光測定装置、4. フェムト秒波長可変パルスレーザー照射装置、などの装置を新たに設置した。これまでの重照射研究設備の特色である二重照射やパルスビーム照射実験等に加え、新設備を用いて材料照射実験の高度化を行っていく予定である。

〔設備の概要〕

1. 重イオンマイクロビーム分析装置

新設備の中核となるマイクロビームラインは1MV タンデトロン加速器のビームラインの一つとして建設された。ビームライン増設のため、静電ディフレクターを電磁石に置き換え、加速器側より見て左15度にマイクロビームラインを新設した。設計・製作は日新ハイボルテージ社が行い、現在、システム全体の調整を行っている。仕様はビーム最小径、約1 μm 、焦点距離200 mmで Au^{2+} (3MeV)まで輸送可能である。マイクロビームはスクレイパースリット、マイクロスリット、発散制限スリット、バッフルスリット及び精密4重極レンズによって生成され、ターゲット上を100 μm x 100 μm の範囲でビーム走査できる。試料はゴニオメータ上にセットされ、X, Y, Z, θ の移動が可能である。またシングルイオンヒットの実験にも使用できるように設計されていて、その生成は2次電子検出器と高速ビームスイッチの組み合わせで行う。

2. フーリエ変換赤外 (FT-IR) 顕微測定装置

マイクロビームラインに設置された測定用チャンバー内にカセグレン方式の顕微鏡をセットすることにより、FT-IR装置（日本分光：FT/IR-550）からの赤外分析光をビーム軸に沿ってを導き、フーリエ赤外顕微分光ができるように設計された〔図1〕。仕様は赤外光束径は5 μm 以上、測定波数は4000~800 cm^{-1} である。この装置によりイオンビームを照射中あるいは照射直後に試料の赤外分光を行うことができ、イオンビーム照射に伴う構造変化の測定が可能となる。また、可視光を導入することにより光学顕微鏡として用いることができるので試料の照射位置や照射中の状態変化をTVカメラでモニターしながらビーム調整ができる。

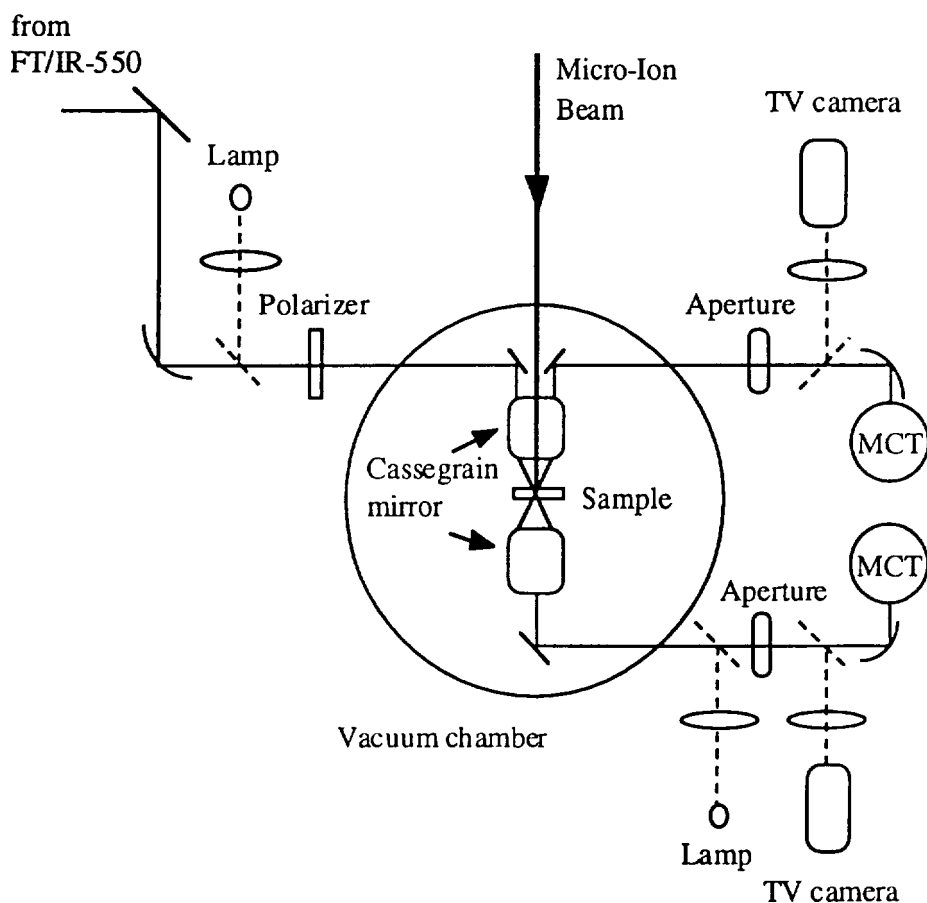
3. ピコ秒2次元蛍光測定装置

既設のパルス用ビームライン及び新設マイクロビームラインにおいて、パルスイオンビームと組み合わせた時間分解分光測定を行うためにピコ秒2次元蛍光測定装置（浜松フォトニクス：C4780）が導入された。仕様は時間分解能15psec、波長範囲200~800 nm、繰り返しはシングルショット~2 MHzで、検出器にはストリークカメラ方式を用い、シング

ルフォトン測定が可能である。加速器のパルスビームに同期させて波長と時間スペクトルを同時に測定することができ、測定時間の大幅な軽減が期待される。また、下記のレーザーと組み合わせることによって紫外から近赤外領域のピコ秒からナノ秒領域の分光測定が可能となる。

4. フェムト秒波長可変パルスレーザー照射装置

このレーザー（Coherent : Innova400, Mira 900, RegA 9000, OPA-9400）は既設のパルス用ビームラインの側に設置された。パルスイオンビームに同期したレーザーパルスを生じさせて試料を照射することにより、イオンビーム励起遅延スペクトロスコーピーやレーザービーム励起イオンビーム実験等を行う予定である。システムはアルゴンレーザー、チタンサファイアレーザー、再生増幅器、光パラメトリック増幅器から成り、パルス幅は 150 fsec、可変波長領域は 250～2400 nm、出力は 0.2～500 mW で再生増幅器、光パラメトリック増幅器の繰り返しは 10～300 kHz の間で利用でき加速器の繰り返しと同期させることが可能である。



〔図1〕 重イオンマイクロビーム照射下「その場観察」FT-IR 顕微測定装置

ペレットチェーンと回転シャフト用モータのインバータ駆動

原研東海

日本アドバンステクノロジー（株）

堀江活三

小林千明

1. はじめに

原研タンデム加速器本体系の起動制御盤の更新を機に、ペレットチェーンと回転シャフト（高電圧端等への電力供給のための）駆動をインバータ化した。インバータ化の主たる目的は起動時の機械的衝撃を防止することである。

ここでは、はじめに本体駆動系の改良への取り組みを簡単に振り返り、次にインバータ化によって生じたと思われる問題点と、さらにはこれから加速器システムにインバータを採用するに当たっての留意点について述べてみたい。

2. 本体駆動系の改良

ここでいう加速器本体系とは、ペレットチェーンと回転シャフトを指すが、このうちペレットチェーンの駆動系に関しては、オイラー故障による油切れチェーン切断を一度経験したものの、比較的順調に稼働を続けてきた。しかし回転シャフトについてはここまで稼働率を上げるまでには乗り越えなくてはならないひとつの山があった。

それは加速器ターミナルにて $750\text{rpm} \longrightarrow 1714\text{rpm}$ 増速機構の更新であった。加速器ターミナルでは400Hz電力を必要とすることからこの増速機構は不可欠のものであるが、当初のシステムはゴムベルト方式のもので、たび重なる故障とそれによりゴミをタンク内に撒き散らす事態が生じていた。

そこで担当スタッフはギヤー方式の採用に踏み切り、[特殊ギヤー・ボックス]の開発設計に着手した。加速器ターミナルに多量の潤滑油を内蔵したギヤー・ボックスを設置することは勇気のいる選択であったが、現在5万時間以上の運転時間を達成している。

3. インバータの導入をまえに考えたこと。

心配した点

- ・回転シャフト用モータが同期電動機である。果たしてうまく起動運転可？
- ・加速器放電に伴うサージが混入してインバータを破壊しないか？

期待した点

- ・ソフトスタートで起動時の衝撃が緩和でき、駆動系の保守負担が軽減される。
- ・従来のような直入起動時の突入電流が流れない。
- ・ペレットチェーンの速度を落としての運転（チャージ電流に余裕のある時には）などの応用が可能となる。

4. 実際にインバータ運転してみて。

本来のインバータの持つ特質から見て、当然といえば当然ながら上記の

期待した点

は期待どうり満足のいく結果をもたらしてくれた。即ち起動時の衝撃は従来と比して比べ物にならないくらいに緩和できたし、また突入電流による起動抵抗器の発熱の心配からも解放された。さらに

心配した点

については、同期電動機の始動および定格電流は標準誘導電動機に比べかなり大きいことから、2ランク上のインバータ容量を選定することで実用化出来た。また加速器放電に伴うサージには、アレスターと後述のフィルター（図1）を設置することで対策をとった。

ところで試験運転を終え、圧力タンクにSF6ガスを充填してマシンタイム運転に入ったところ思わぬ問題点⁽¹⁾が出現した。それは加速器ターミナルのベンディング・マグネットに大電流を流し、回転シャフトに重負荷をかけたところインバータ出力電流が試験運転時とは異なる高い値を示したことである。

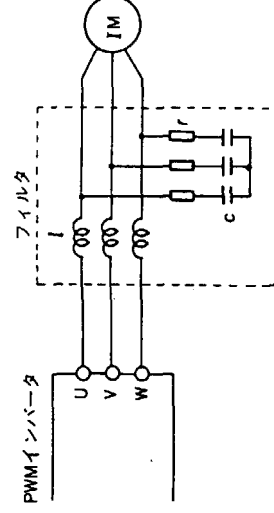
原因はインバータの基底周波数の設定が初期値60Hzのままであったことから、V-F特性により50Hz時の電圧が低すぎたことによるが、SF6ガス圧4~5Kg/cm²が電動機の冷却ファンにとって、かなりな負担になっていることをあらためて思い知らされた。

さらにはこの原因の究明の過程で、PWM方式のインバータは配線定数に起因するサージ電圧をモータ端子に発生する事が言われるので、オシロスコープで観測してみたところ、高速スイッチング波形にサージと思われる波形の重畳がみられたので、インバータの2次側に抑制フィルタを設置することを決めた。

5. まとめ

今日のメカトロニクスの発展の一翼を担っているインバータは、加速器関連の分野でも自在に使いこなす事が求められてこよう。ここでは幾つかの気の付いた事を記しておく。

- ・ 加速器システムの中には、輸入品のモータが組み込まれている場合も多いが、インバータ駆動が可能かどうか素性を確かめておく必要がある。
- ・ 殊に400V級モータは、絶縁強化したモータあるいはインバータ駆動専用モータを採用しておきたい。そうでない場合は配線定数に起因するサージ電圧がモータ端子に発生し絶縁劣化をおこす危険のある事を知っておく。
- ・ 400V級モータの場合、インバータの2次側にサージ電圧抑制フィルタ（専用品）を設けることが推奨されている。但し高価であるが、これは加速器放電に伴うサージの混入からインバータを守る役割をも果たすと考えられる。
- ・ インバータからモータまでの配線長を短く。30m以内が望まれる。
- ・ 制御盤にインバータをセットする場合、冷却ファンならびに電解コンデンサの交換が容易にできる配置にしておく。（一般の電子機器では、冷却ファンの交換に長年苦勞させられてきた。）



(図1) サージ電圧抑制フィルター

小型タンデム加速器のパソコン制御システム

日新ハイボルテージ（株）

MeV技術部

高山博史、河野和宏、篠崎政孝

タンデム加速器を用いた分析装置に於いては、その制御パラメータ多さのため、盤面に配置される制御部品の点数も多くなり、その結果として盤面が複雑になり操作性が悪くなる帰来があった。よって、これらの改善を目的として従来のハード部品主体の制御盤構成に対してパソコンを使用した制御システムの開発設計を行ったので、その概要につき以下にのべる。

主な特徴は以下の通りである。

1. 制御盤構造が簡単になり、コンパクトになる。

マンマシンインターフェースとしてパソコンを使用し、盤面のハードデバイスを必要最小限としているので、パネル面がすっきりしている。

2. 制御速度が早い。

加速器システムをブロック毎にわけ、各々にシーケンサネットワークのローカル局を配置して、シーケンス制御が各々ブロック内で閉じるようにしているため、通信時間による制御応答の遅れが無い。

3. 拡張性が高い

新しいビームラインを増設する場合、シーケンサローカル局をネットに割り込ませるだけであとはパソコン画面を修正するのみでよく、既設側のハードの改造が少ないためスマートかつ簡単に制御回路の変更ができる。

4. 制御システムが廉価に構築できる。

大型のシステムではユニックスを使ったシステムがあるが、これらに比較するとパソコンではハードのコストも安く、プログラムも容易に組むことができるため安価にシステムを構築できる。

（制御盤構成）

第1図参照

主制御操作作用としてパソコンを用い、CRT上のグラフィック画面に対し、マウス及びキーボードにてアクセスを行う。

また卓上用の操作器も装備し、即応性が要求される操作、表示に対してはハードの押しボタンスイッチ及びアナログメータを割り当て、必要最小限の機能がカバーできるようにしている。

(制御システム)

第2図参照

各システムブロック毎にシーケンサローカル局を配置し、制御はこのローカル局内で処理される。これらのローカル局とマスター局は光ファイバーを使用したネットワークにより結ばれている。主制御操作用のパソコンはマスター局のシーケンサCPUに対し、イーサネットにて接続されている。補助操作用の卓上操作器はマスター局のシーケンサに対しハードワイヤーにより接続されている。

(パソコン仕様)

CPU	GXMT5166	DELL
	166 MHz	Pentium
HDD	1.6 GB	
RAM	32 MB	
キャッシュメモリ	512 kB	
FDD	3.5 inch	
CD-ROM	4 倍速	
CRT	21 inch	
OS	Windows NT Ver3.51	
パッケージソフト	Fix Dmacs	インテリジョン株式会社

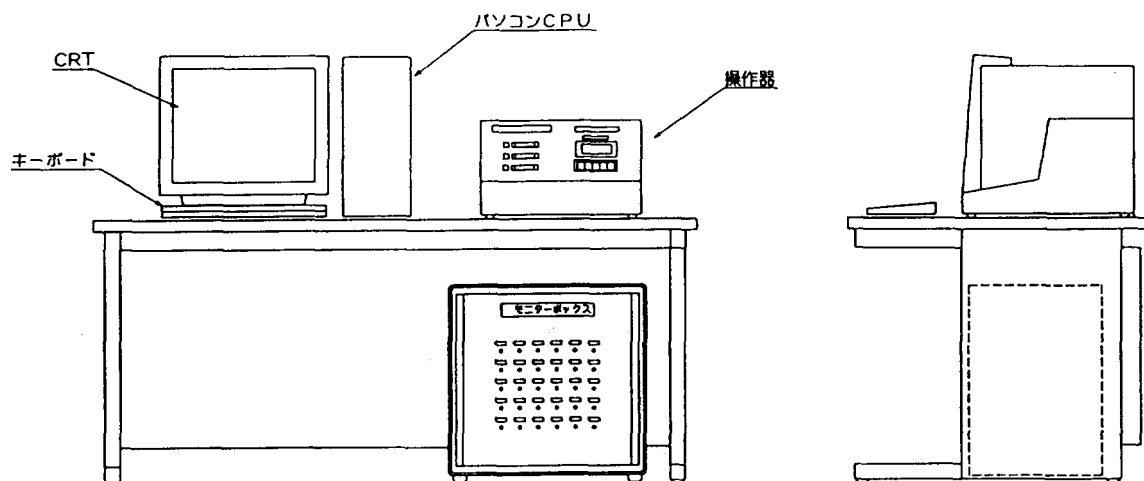
(シーケンサリンクの伝送処理時間)

シーケンサローカル局間のデータ送受信時間	10 ~ 20 msec
リンクデータのリフレッシュ時間	10 msec 以下
各ローカル局内の単独シーケンサのスキャンタイム	10 ~ 20 msec

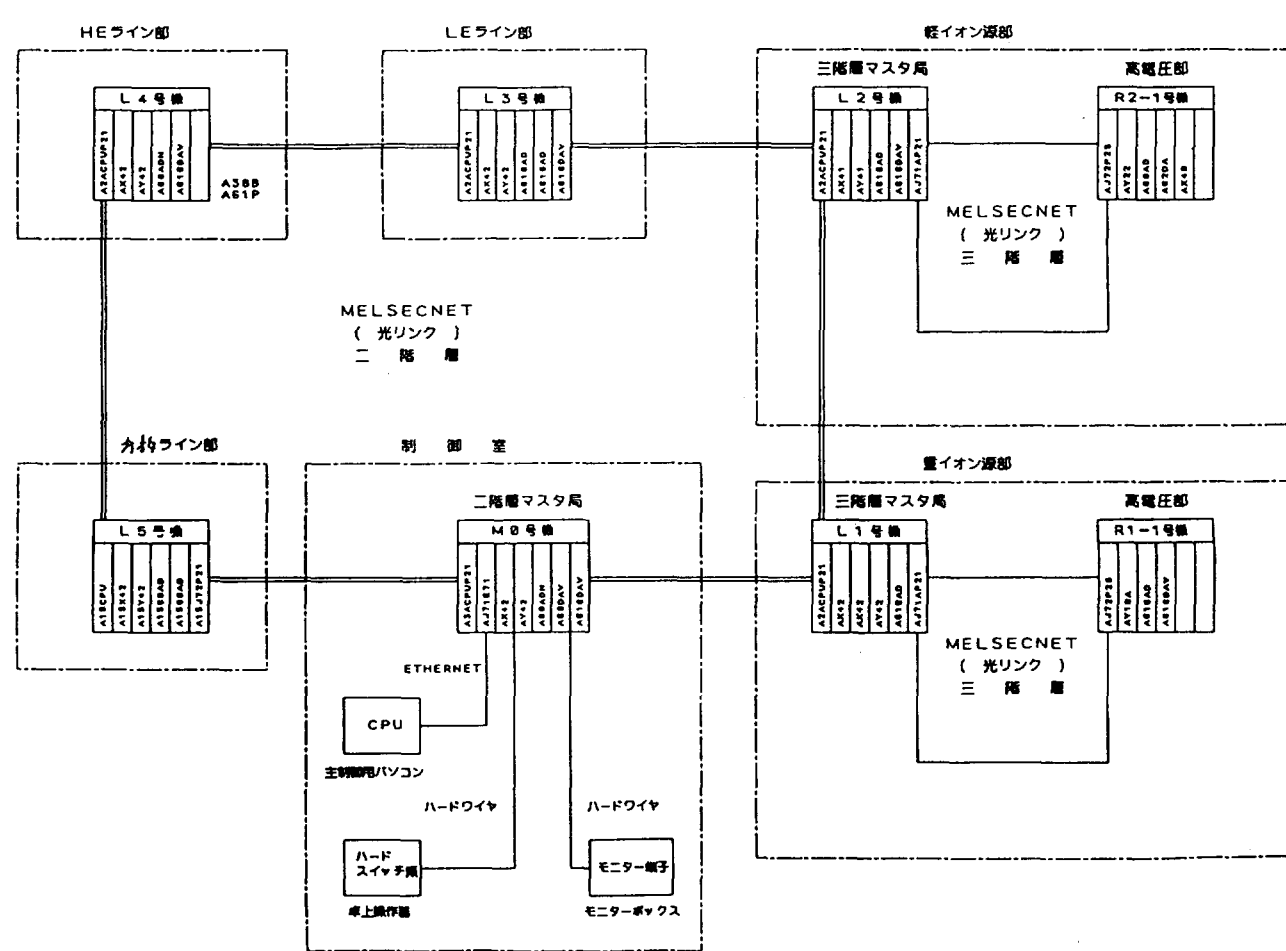
(イーサネットユニット仕様)

通信方式	TCP/IP	
オープン方式	Unppassive	ネットワーク内のすべての他ノードに対して、Activeなオープン要求待ちの状態
データ伝達速度	10 Mbps	
アクセス方式	ランダム	
バッファ	12 kバイト (6 kワード)	
伝送処理時間	対パソコン	30 ~ 40 msec
	対シーケンサ	40 ~ 50 msec

以 上

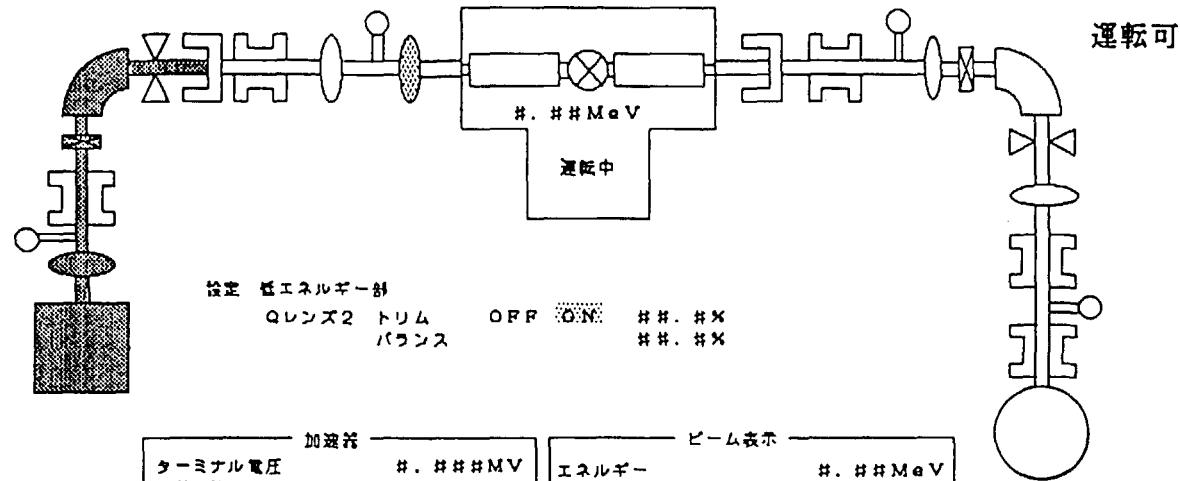


第 1 図 制御盤構成図



第 2 図 制御システム図

ビームライン機器制御画面



加速管	
ターミナル電圧	##.##MV
負荷電流	##.##uA
低エネルギー デバイダ	##.##uA
高エネルギー デバイダ	##.##uA
ストリッパガス	##.##%

ビーム表示	
エネルギー	##.##MeV
ビーム電流	##.##uA
低エネルギースリット H	##.##uA
L	##.##uA
高エネルギースリット H	##.##uA
L	##.##uA

イオン源	
Co ヒーター	##.##℃
アイオナイザー	##.##%
TMリーク	##.##%
カソード電圧	##.##kV
電流	##.##mA
引き出し電圧	##.##kV
電流	##.##mA

真空	
イオン源	##.##E##Pa
低エネルギーライン	##.##E##Pa
高エネルギーライン	##.##E##Pa
注入ライン	##.##E##Pa

低エネルギーライン	
アインツェル	##.##kV
ステアラ Y	##.##kV
分析電磁石	##.##A
ステアラ X	##.##A
Y	##.##A
Qレンズ1 トリム	##.##%
バランス	##.##%
Qレンズ2 トリム	##.##%
バランス	##.##%

高エネルギーライン	
Qレンズ トリム	##.##%
バランス	##.##%
ステアラ X	##.##kV
Y	##.##kV
偏向電磁石電流	##.##A
磁場	##.##kG

注入ライン	
Qレンズ トリム	##.##%
バランス	##.##%
ステアラ X	##.##kV
Y	##.##kV
スキャナー X	##.##kV
Y	##.##kV

第 3 図 制御画面図

原研タンデム加速器の制御システムの現状

--1995年度に多発した障害について--

日本原子力研究所 加速器管理室

花島 進

原研タンデム加速器は1992年より、複数のマイクロプロセッサと並行処理プログラミングによる並行処理制御システムで制御されている。この制御システムは、使用開始時より順調に動作していたが、1995年の後半に多くのシステムダウンを経験するようになった。システムダウンの後では、恒常的な損傷は発見されず、通常の再起動操作で回復するものであった。図1に原研タンデム加速器の制御システムのブロック図を示す。本システムは加速器周りの制御インターフェイスにCAMACのシリアル・ハイウェイ・システムを使用している。4つのシリアル・ハイウェイはおののトランスピュータ内臓のシリアル・ハイウェイ・ドライバによって制御されている。多発する障害はこのシリアル・ハイウェイ・ドライバのいずれか（単数または複数）がシリアル・ハイウェイのデータ転送をやめてしまうというものであった。

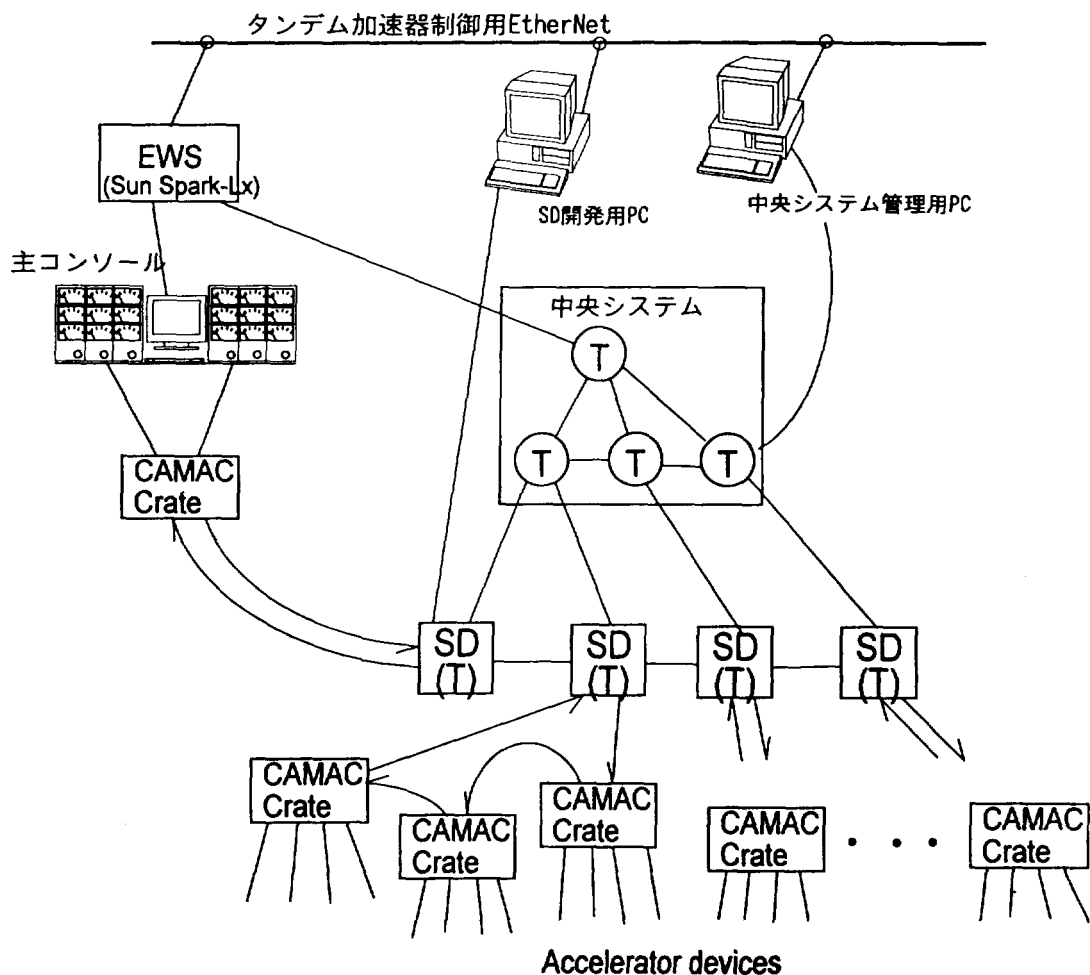


図1. 原研タンデム加速器制御システム構成図：

T: トランスピュータ, SD: シリアル・ハイウェイ・ドライバ

停止状態をデバッガで調べてみると、いずれも、おのこののトランスピュータは一見動作状態であるが、停止したドライバではトランスピュータがシリアル・ハイウェイに接続されているトランスピュータ・リンクの出力完了待のままになっていることがわかった。このシリアル・ハイウェイ・ドライバでトランスピュータはシリアル・ハイウェイに送るべきデータバイトをトランスピュータのシリアル・リンクから送信する。リンクから送られた信号はC011リンク・アダプターを通してCAMACシリアル・ハイウェイ規格の信号に変換される。このプロセスのどこかで障害が起きていることが推測できた。

また、いろいろな試行錯誤の結果、シリアル・ハイウェイ・ドライバにプログラムをダウンロードするとき使用する制御線を外して置くと障害の頻度が極端に減少することが分かった。

回路図、及び実回路を分析した。そしていくつかの欠陥を見つけた。

- 1、リセット及びアナライズ信号を受信するホトカブラのオープン・コレクタ出力にプルアップ抵抗が接続されていなかった。
- 2、使用したホトカブラの入力電流感度が高く、通常のTTL出力のハイ・レベルの仕様に対してノイズ・マージンが無いような設計になっていた。
- 3、システム・コントロールのコードの遮へいが十分でなかった。

これらのことなどからこの障害の原因はリセットまたはアナライズの信号線にノイズが入り、誤動作を起こしていたものと推測した。前記の症状は、リセット信号線に混入したノイズが、トランスピュータはリセットしないがリンク・アダプタをリセットし、それがトランスピュータが1byteを送り出してアダプタからの返信を待っている間に起きたと考えるとつじつまがあう。

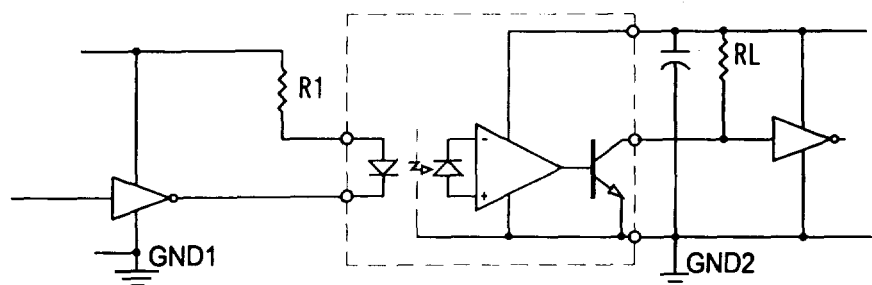
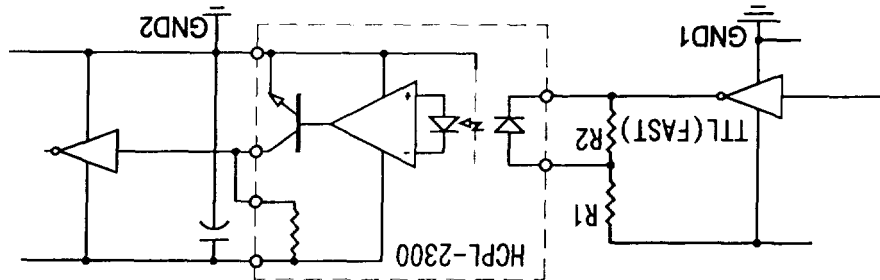


図 2：典型的なホトカブラ回路

図 2 に典型的なホトカブラの使用例を示す。図の中でホトカブラのオープン・コレクタ出力は外付けの抵抗でプルアップされている。我々が使用した素子、HCPL-2300は、この抵抗が内蔵されているため外部に抵抗を付ける必要はないが、接

見つけれられた顕著な欠陥については回路を修正した。その結果、システムダウンの頻度は格段に減ったが、今回の現象が起きる前に水準には至らなかった。当面加速器の運転を優先し、制御線を外した状態で運用することにした。今期は室内空気が異常に乾燥していた。このシリアル・ハイウエイドライバは1992年から使用してきたものでこれまでにこのようなトラブルは無かった。にもかかわらず、多数回のシステムダウンを起こした要因は、もともと持っていた弱点に加えて、静電気放電の多発によるのではないかと推測している。根本的な解決は制御室の湿度制御と、シリアル・ハイウエイ・ドライバを現在製作中の新型に置き換えることで行う方針とした。

図3：ホトカプ、HCPL-2300を使う場合の回路



第2のホトカプ部の欠陥について説明する。図2に示す典型的な例では、TTL論理出力の低電圧レベルでカプのLEDを光らせている。高電圧レベルの時はLEDにかかる電圧がわずかなため多くのカプでは図2の回路で出力をオンにすることはできない。しかし、我々が使用した素子・HCPL-2300は特別に入力感度が高く、図2の典型的な回路ではドライバ側がTTL (FAST)の規格の最悪条件ではハイ・レベルの時、LEDを十分オンにすることができない。オンの動作を確実にするためには、図3に示すように抵抗を付加して一部の電流をバイパスし、感度を上げる必要があった。このことはドライバ側のICとカプ双方の規格が十分検討されていれば明らかなるものであったが、常識的な回路の中で定数を決めればよしとする過ちを犯したものである。

続配線が必要である。にも関わらず、接続されていないかった。

シングルイオンヒットシステム用パルス化技術の開発

原研高崎 ○酒井 卓郎、濱野 毅、平尾 敏雄、神谷 富裕

1、はじめに

高エネルギー重イオンが物質に入射すると、その飛跡に沿って高密度の電離、励起を引き起こす。特に、半導体素子にこのようなイオンが入射するとシングルイベントと呼ばれるビット反転を生じたり、最悪の場合には素子そのものが破壊される現象が引き起こされる。現在の半導体のセルは、その集積度にもよるが、数 μm 四方程度の大きさになっている。このような微細な領域にイオンが入射することによって引き起こされるシングルイベント現象を詳細に解析するためには、 $1\mu\text{m}$ 以下の空間分解能を持つ重イオンビームを一個一個試料へ入射することができる技術が必要である。

この技術を開発するため、重イオンマイクロビーム形成装置に試料へのビームの入射を制御する静電式高速ビームスイッチと試料にイオンが入射したのを検出するシングルイオン検出器の設置を行った。本報告では、シングルイオンの制御技術に関する現状報告とその問題点、またその解決方法であるパルス化技術に関して述べる。

2、シングルイオンヒット技術

2.1、シングルイオンの検出、制御技術

シングルイオンヒットシステムは原研高崎の重イオンマイクロビーム形成装置に設置されている。この重イオンマイクロビーム形成装置は3MVタンデム加速器からの各種重イオンを $1\mu\text{m}^2$ 以下のビームサイズにすることができる[1-2]。図1にシングルイオン

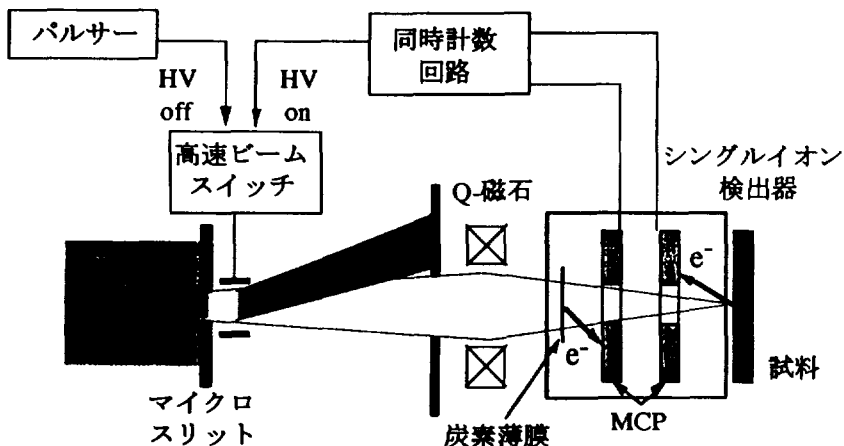


図1 シングルイオンヒットシステム模式図

ヒットシステムの構成を示す。シングルイオンの検出は試料の直前に置かれたシングルイオン検出器で行う。この検出器は、炭素薄膜と2組の穴あき型MCPで構成されている。イオンの入射により発生する炭素薄膜と試料からの二次電子をそれぞれのMCPで検出し、

この信号の同期をとることにより、ノイズによる誤計数を防ぐ構造になっている。検出効

率を表面障壁型半導体検出器と比較した結果を表1に示す。NiやSiなどの比較的LETの高いイオンに対しては、100%の検出効率を達成した。またノイズによる誤計数は、MCP 1組の場合に対して4桁以上低減することができた。イオンの入射制御は、この検出信号で静電式の高速ビームスイッチに+500Vが印加され、後続のイオンの入射を妨げることで行われる。このビームのスイッチング時間はイオンの入射から検出器が検出信号を出すのに要する時間（～30nsec）、高速ビームスイッチの高圧が立ち上がる時間（～150nsec）、イオンが高速ビームスイッチから試料までの間を飛行する時間（～500nsec）の和である。ビーム電流を2fAとすると、この間に次のイオンが含まれる確率は1%以下になる。また、ノイズによる誤計数の確率は 10^{-5} 台であり、ほとんど無視できる程度である。以上の方法でシングルイオンの検知・制御を行えることが確認できた。

表1 15MeV各種イオンの検出効率

イオン種	炭素膜側MCP 相対検出効率(%)	半導体検出器側MCP 相対検出効率(%)	半導体検出器に対する 相対検出効率 (%)
C	97.8	99.3	97.1
O	98.9	100	98.9
Si	100	100	100
Ni	100	100	100

2.2、現在の問題点

上記の方法で、シングルイオンヒットを行うことは可能ではあるが、マイクロビーム形成においては、炭素薄膜によるビームの多重散乱が無視できず、ビーム径を1 μ mに保つことができず、目的とするマイクロビームによるシングルイオンヒットを行うことができないことが判明した。

このビームの散乱を避けるため、炭素薄膜を取り除かなければいけないが、そのためにはノイズを抑制する技術を開発する必要がある。

3、ビームパルス化

3.1、パルス化によるノイズの低減

2組のMCPの出力の同期信号を検出信号とする方法は、ノイズを低減するのに確実な方法であるが、ビームをパルス化し、このパルス幅のゲートとMCPの検出信号の同期をとり、ノイズの低減を行い、シングルイオンヒットを行うことも可能である。これはパルス化を行うことで、パルス内のビーム電流を上げ、見かけ上のS/N比を向上させること

ができるからである。

3.2、ビームパルス化技術

目標とするのはビームのシングルイオン化であるので、バンチングは行わず、ビームパルス化は静電偏向とコリメーションで行うことにした。当初、この静電偏向は新たに平行平板を製作して行う予定であったが、現在設置されている高速ビームスイッチとその高圧電源において十分パルス化を行うことが可能であることが判った。図2にパルスのトリッガーと高速ビームスイッチに印加されている高圧のモニター波形をオシロスコープで観測した結果を示す。また図3にこの方法で $10\mu\text{sec}$ の幅にパルス化されたビームの時間スペクトルを示す。この測定の際には、1パルスに含まれるイオンの個数を0.01個程度にして、1パルスに複数のイオンが入る確率を少なくしている。この方法でパルス幅は500nsec程度まで短縮できることを確認している。

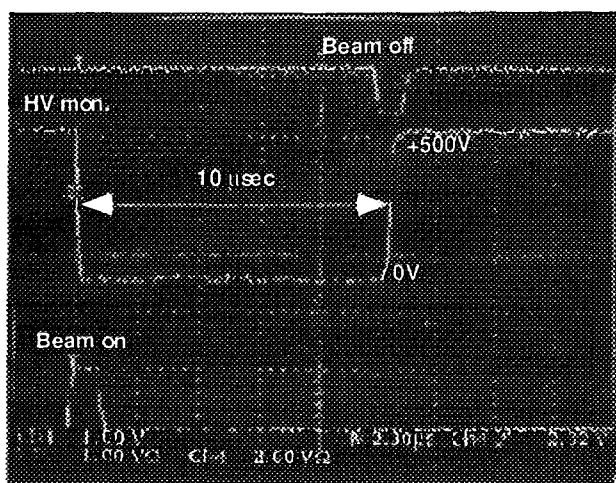


図2 高圧電圧の波形

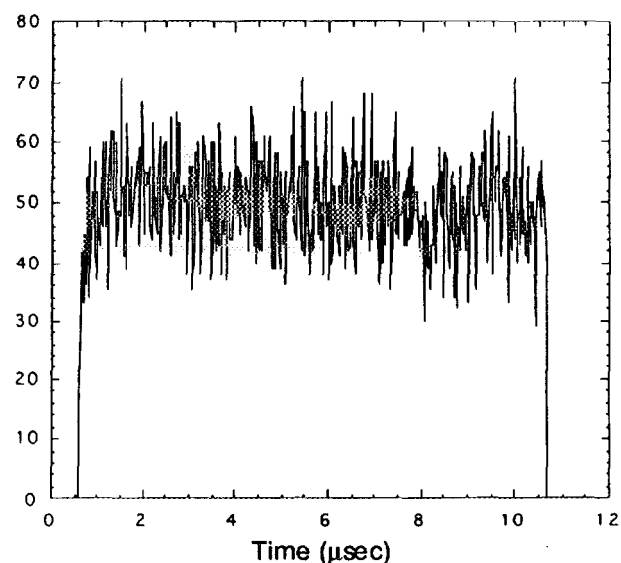


図3 ビームの時間スペクトル

4、まとめ

原研高崎のシングルイオンヒットシステムは、現在までにシングルイオンの検出・制御技術、パルス化によるノイズの抑制を行うことに成功し、シングルイオンヒットの基盤技術の開発を終えた。今後、実際の試料にシングルイオンの打ち込みを行い、その精度を評価する予定である。

参考文献

[1] T. Kamiya, M. Utsunomiya, E. Minehara, R. Tanaka, and I. Ohdomari, Nucl. Instr. and Meth. B64 (1992) 362.

[2] T. Kamiya, T. Suda, and R. Tanaka, to be published in Nucl. Instr. and Meth. B.

[3] T. Sakai, T. Hamano, T. Suda, T. Hirao, and T. Kamiya, to be published in the proceedings of the 7th Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research

シェンケル回路とその特徴

「NHVイオン加速器用直流電源について」

木村寿男、山田正弘、中澤真、岩本英司

(日新ハイボルテージ(株)MeV技術部)

1. はじめに

直流高電圧を発生させるには、高電圧交流を整流し得る方法と、バンデグラフ型直流電源に代表される静電発電式の2つの方法がある。

これらの直流高電圧電源としては、運転負荷として要求される電流量に見合う十分な出力容量を有することが必要であり、又イオン加速器に採用するに際しては、それに加え、十分な出力安定性が必要とされる。

今回の報告では、一般に利用されている各種直流高電圧発生回路の概要と、その中で日新ハイボルテージ社として、イオン加速器用に採用しているシェンケル型直流電源の特徴について述べる。

2. 直流高電圧発生回路概略

静電式としてバンデグラフ回路、整流式としてコッククロフト・ウォルトン回路及びシェンケル回路の各基本回路構成を図1、2及び3に示す。

一般に静電形においては、回路構成部材が少なく、小型かつシンプルな直流電源を構成することが可能であるが、静電荷を絶縁体の表面へ帯電させ、機械的にアース電位より高圧電位側へと運搬する形となるため、取り出せる電流量はおのずと微少となる。

これに対し、整流式では電源構成の決定に際し、出力電流による制約はほとんど無く、サイズ及び安定性の要求レベルに応じ、回路定数選択が可能である。

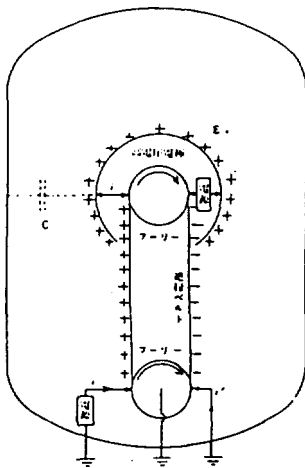


図-1 バンデグラフ回路

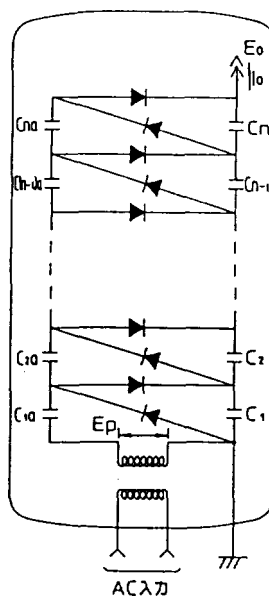


図-2 コッククロフト・ウォルトン回路

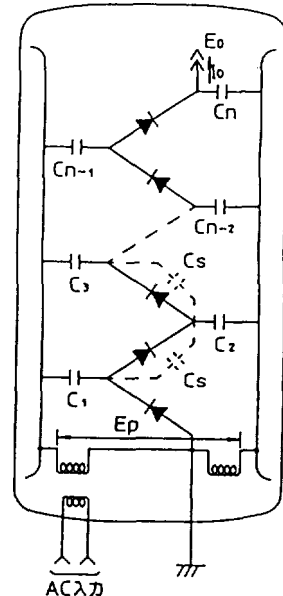


図-3 シェンケル回路

各回路における最終発生電圧基本式を次式に示す。

バンデグラフ回路

$$E_o = \frac{Q}{C} = \frac{it}{C}$$

コッククロフト・ウォルトン回路

$$E_o = \underbrace{2nE_p}_{\text{基本項}} - \underbrace{\frac{2n^3 I_o}{3fC}}_{\text{電圧降下項}}$$

シェンケル回路

$$E_o = \underbrace{\frac{(n-1/2)E_p}{k}}_{\text{基本項}} - \underbrace{\frac{nI_o}{kcf}}_{\text{電圧降下項}}$$

C:充電容量(昇圧回路,RF電極間容量)
(実際には浮遊容量を利用)

$$k = 1 + \frac{4Cs}{C} \quad (\text{結合係数})$$

$C = C_1 = C_2 = C_3 \cdots \cdots = C_n$
Cs:シャント容量(整流コラム間浮遊容量)

各回路における特性比較概要を表・(1)に示す。

本比較表に示す様に、各電源各々長短所を併せ持っており、組み込まれる加速器の種別に応じた要求仕様に合わせ、回路選択を行うことが重要である。

項目 回路方式	充電方式	発生可能電圧	最大負荷電流	最大出力容量	電源効率	安定度 (リップル)	充電エネルギー	寸法	用途
バンデグラフ	機械式 静電誘導 方式	2.5 MV	1.5 mA	2 kW	<10%	<±0.1%	小	小	高エネルギー 分野研究用
コッククロフト	直列 充電方式	5 MV	150 mA	150 kW	<75%	<±2%	大	大	電子加速等工業用 大電流加速器用
シェンケル	並列 充電方式	5 MV	150 mA	100 kW	<45%	<±0.05% (<0.001%)	中	中	イオン加速用 分析&注入用

表-1 昇圧回路特性比較

注1:数値は各メーカーカタログ等からの集合にて作成。

注2:本表記載最大負荷電流は直流高電圧発生回路単体としての数値であり、電子加速器に使用されるレベル値を示す。イオン加速器においてはその負荷要求により、約一桁少い値が通常である。

3. NHVタンデム加速器へのシェンケル電源回路の採用について

(1) 発生電圧よりの要求

イオン加速器用直流高電圧電源に要求される発生電圧値を、各用途別にビームエネルギーで示すと、

- ①高エネルギーイオン注入用として : 0.4MeV~8MeV
- ②RBS、PIXE及びERDA等分析用として : 1MeV~5MeV
- ③他の加速器(シンクロトロン等)へのインジェクター用として : ~10MeV

の3つのグループに大別できる。

更にいずれの電圧クラスにおいても、 1×10^{-3} 以下の電圧安定度が要求される。これらに対し、タンデム加速を基本加速システムとして採用することを条件とした時、現状での製作可能上限電圧が5MVクラスにあるシェンケル回路がベストな選択となる。

又、シェンケル回路の採用により、

- ①電圧安定度：普通形で $<0.05\%$ 以下を達成でき、ビームエネルギー安定化が容易である。

(バランス形においては $<1 \times 10^{-5}$ も得られる。)

- ②電源構成：シェンケル回路の特徴である充電用コンデンサに浮遊容量を利用することにより、小形・コンパクト化が計れる。

のシステムメリットが得られる。

(2) 負荷電流よりの要求

前項でも述べた様に、イオン加速器用途における要求電流量は、整流形直流発生回路としては少電流レベルに属し、結果として、直流変換効率に劣るシェンケル回路の採用に有利な条件となっている。現在、実際のタンデム加速器に要求されている出力ビーム負荷電流値を各用途別に整理すると、

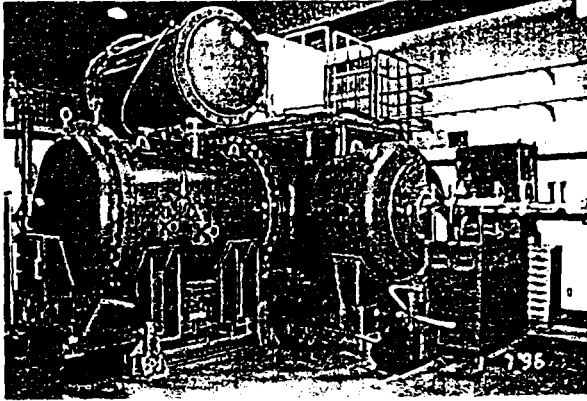
- ①高エネルギーイオン注入用として ~1mA
- ②RBS、PIXE及びERDA等分析用として ~1 μ A
- ③シンクロトロンインジェクター用として ~10mA (パルスビーム)

の値となり、タンデム入・出射搬送効率を考慮した場合、上記値の約2倍程度の電源負荷容量が要求される。このトータル負荷要求に対しても、シェンケル回路方式は低変換効率を差し引いても十分に許容でき、小形、簡素、更には高安定化を必要とするイオン加速器に適している。

上記の判断に基づき、弊社のイオン加速器用直流電源として、シェンケル回路方式を採用している。

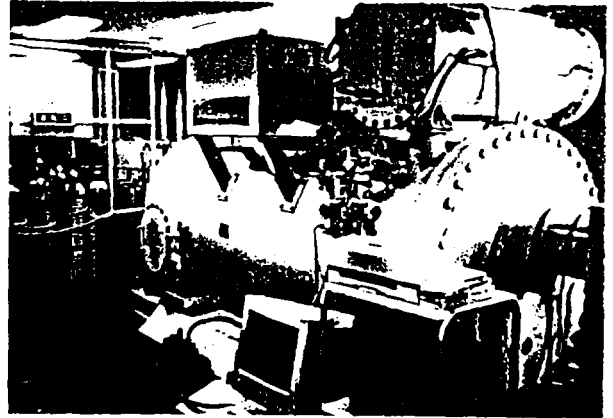
4. NHVシェンケル型直流電源の実際とその特長

納入装置代表例を写真－1、－2に示す。



写真－1

2MV-10mA タンデム(T形)

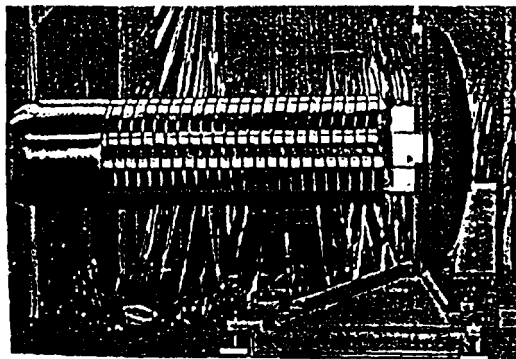


写真－2

1.7MV-2MA タンデム(I形)

又、実際の回路構成上の特長を次に述べる。

- (1) 回路全体構成は、ギャップ及び抵抗を組み込むことにより、放電耐力向上が計られている。
- (2) 構造部材には、アルミニウム一体成形品の採用による形状均一化、及び対称性の均一化を図り、シェンケル回路特有の幾何学形状に起因する安定性を向上させている（写真－3 参照）。
- (3) RF共振を利用した昇圧トランス収納タンクは、渦電流対策として、従来より採用されている銅板内張り方式に替え、タンク自体を総アルミニウム化する事により、冷却効果アップと、システムの小型化と発生熱損失低減が計られている。



写真－3

参考文献

1. 河村、他 「高電圧工学（改訂版）」電気学会 刊 (1972.11)
2. 木村、他 「MV級高安定化直流電源」
日新電機技報 Vol. 40, No. 2, 1995

京大タンデム加速器における加速器質量分析

中村正信、田澤雄二、松本博、広瀬昌憲
京都大学理学研究科物理学第二教室

荻野晃也、河野益近、船場潤之
京都大学工学研究科原子核工学教室

1 はじめに

1990年に京都大学理学部のタンデム加速器は最高ターミナル電圧が5MVのパンデグラフから8MVのペレトロンに更新された[1]。そこで宇宙線、年代測定、環境測定等に有効なAMSを学際研究の1つの柱とした。更新において高エネルギービームトランスポートは旧タンデムのものを使用しているために、磁石が小さく制限があるけれども、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{129}I 等の重い元素の長半減期放射性同位体の超高感度測定を目指している。中型タンデムの特徴を生かし、まず ^{36}Cl 測定を目標としているが、標準技術として ^{14}C 測定を開発している[2]。

2 AMSシステム

京大タンデムAMSシステムの構成を図1に示す。

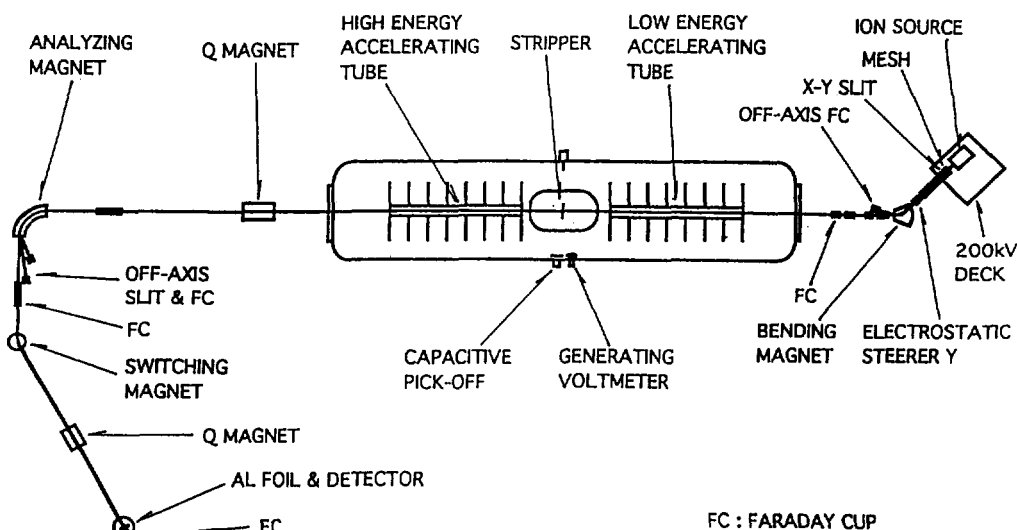


図1；京大タンデムAMSシステムの構成。

2-1 多重標的型スパッターイオン源

AMS法では試料をイオン化して加速し、計数することにより極微量同位体比を決定する。この時イオン化率や加速効率、検出効率等の絶対値を全て正確に知ることが理想であるが容易ではない。そこで同位体の比率の分かっている標準試料を出来るだけ同じ条件で測定し、求める未知の試料の同位体比を相対的に決定することがよく行われている。そのためにはイオン源や加速器の条件を出来るだけ変えずに試料を交換したい。また年代測定や環境測定では多数の試料を系統的に比較する必要があるので、このためにも多数の試料を交換して測定できるイオン源が必要となる。そこでAMS専用のイオン源として59サンプル交換可能なHVEE製846Aを導入した。これはパソコンによる自動サンプル交換機能を持ち、カソードのx-y2次元位置の移動が制御できる。タンデムのアクセプタンスを考えると高い入射電圧は必須であるので、AMS測定の際は200kVデッキ上に標準のSNICSイオン源と入れ替えて取り付ける。導入初期からカルーセルの回転の位置出しの再現性が時々悪くなり、しかも致命的なトラブルに至らないようなインターロックを組み込むことが困難であった。現在暫定的にパソコンによる自動サンプル交換ではなくポテンシオメータとITVによる位置のモニターにより手動でモータを制御し、サンプルを交換している。ベンチテストでも再現性の悪いことが起こるが、実際の使用には電源電圧の変動や放電によるサージの対策も必要である。

2-2 負イオン入射系

200 kVのデッキの上にはアインツェルレンズ、ビームエミッタ制限用スリット、ビーム強度減衰用(1/10)のメッシュがある。スリットは固定幅だが2つを選択できる。このスリットはタンデム入射ビームのエミッタンスを小さくし加速効率を安定化させるために用いている。前段加速は150 kVで良い透過率が得られた。負イオン分析系の質量分解能は約45である。分析後にはBPMとFCがあるが加えてオフアキシスのFCを設置し、 ^{14}C 入射時の ^{12}C -電流を測定する。加速効率を測定するためには強度の分かっている同位体イオンを入射して測定するための工夫が入射系に必要である。一般に複数のイオンを入射するには分析後逐次切り替えて入射する方法と分析後再度収束させてから入射する新しい方法がある。後者は質量分散のない入射分析系が必要である。前者は通常分析電磁石は一定にしておいて前段加速の有効電圧を短時間に切り替えて選択する方法が採られている。我々の入射系は前段加速の電圧が高く、絶縁等困難が多いので分析電磁石を変化させる方法をテストし、切り替えられることを確認している。

2-3 タンデム加速器

ターミナル電圧は最大8 MVだが横型構造に用いられるテンショニングロッドの損傷が大きいので通常7 MV以下で運用している。 ^{14}C の場合は6.5 MVで4+を用いている。ストリッパはガス(窒素)とフォイルストリッパが装備されている。バックグラウンドを少なくできることと高い荷電状態を使いたいの炭素フォイルを用いた。今回用いたフォイルの厚さは $10\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ である。この入射系は ^{12}C や ^{13}C の入射切り替えや再収束機能を持っていないので、まず高く安定なビーム透過を探した。入射系に於いてx方向(入射電磁石)とy方向(静電偏向板)の変化による ^{12}C 4+の透過率の安定性を図2に示す。 ^{12}C の透過率測定はシステムの安定性を見るためにも随時行った。

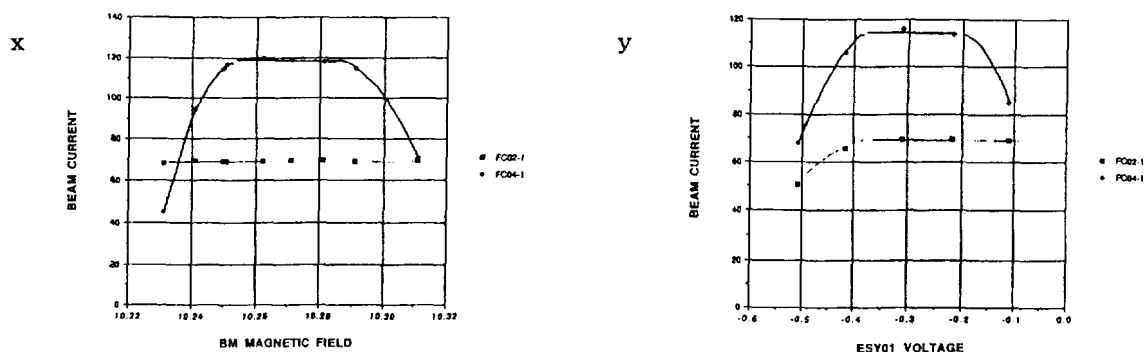


図2；入射系に於いてx方向(入射電磁石)とy方向(静電偏向板)の変化による ^{12}C 4+の電流値。

2-4 正イオン分析系

加速器の通常運転ではターミナル電圧はスリット電流制御を行い、GVMとCPOをモニターとして用いている。AMSにおける微少ビームではスリット電流制御は出来ないのでGVMによる制御の安定性を調べた。特に重イオン加速でローディング等が起こりX線が多量に発生するとGVMの値が小さくなり、2/3程度になることもある。またビームを絞ってX線の発生を押さえても小さなドリフトは起こっていた。このドリフトは；回転数の変化ではない；プリアンプより下流の温度変化ではない。プリアンプより下流のX線の効果ではない。；タンク表面温度との相関は小さい；等を確認した。 ^{14}C 加速に於いては、 ^{14}C -と同時に入射されている ^{13}CH -がストリッパで分解し ^{13}C 4+となって加速されたものを分析して安定化に用いた。分析電磁石のボールの幅は本来狭いので、出口部に鉄片を追加して端を通る ^{13}C 4+などビーム軌道の歪みを少なくした。また加速器運転の再現性をよくするために入射電磁石と振り分け電磁石の磁場設定はホール素子を用い、分析電磁石はNMRを用いている。Q電磁石と振り分け電磁石の強さは分析電磁石の強さに連動している。またイオン源のパラメーターの表示は標準の2桁を3桁と増やし、またGVMの設定値も10 kVから1 kVの分解能に変更して、透過率等の再現性が良くなった。

2-5 検出器システム

検出器上での分散が小さいように正イオンビームトランスポートの振り分け電磁石のシムを調整した。このトランスポートは電磁石のみで静電デフレクターをもたないが、検出器に入るバックグラウンドは多くなくて半導体検出器で測定できる。 ^{14}C の場合、バックグラウンドのなかで酸素の量は時間やサン

ブルにより大きく異なる。14Nはこれまでは見えていないが7Li₂は見えることが多い。どちらも3μmのAlフォイルでエネルギーロスさせることにより半導体検出器(PIPS)のみで分離している。静電デフレクターを用いていないので3+のバックグラウンドが多く、長時間の測定では検出器の損傷(分解能の劣化)を引き起こしている。またガスdE検出器等を用いていないので12C 3+のバイラルアップのテイルの差し引きにおける誤差が少なくない。

3 サンプル処理

サンプルは当初煤や炭化物を用いたがNBSのSRM4990C萘酸をモダンの標準試料として測定するためにグラファイト化の装置を作った[3]。用意したガラス製反応容器が小さくて1回で処理出来る試料が少なく、Agを混ぜてターゲットの穴に詰めた。今回触媒の鉄が多いためか負イオンビームが少なく、酸素が多かった。比較のために菜種油から煤を作りこれをグラファイト化した。まだ経験が少なく、処理に関しては再現性が良くない。ベンゼンから作った煤をデッドとして準備した。

4 結果

14Cイオンの透過率を求めるために12Cと13Cイオンの透過率を測定した。透過率は以下のように定義した。

$$[\text{透過率}] = \frac{C^{n+}}{C^{-}}$$

$$= [\text{はぎ取り効率}] \times [\text{イオン光学的透過率}]$$

ここで電子はぎ取り効率は20μg/cm²の炭素フォイルによる12Cイオンの測定値[4]を用いた。また荷電分布は速度の関数で炭素イオンの質量にはよらないと仮定した。透過率の測定値等は表1に示される。

イオン	電圧 [MV]	透過率(測定値)				はぎ取り効率 4+ [%]	イオン光学的透過率				イオン源
		3+ [%]	4+ [%]	5+ [%]	6+ [%]		3+ [%]	4+ [%]	5+ [%]	6+ [%]	
12C	6.5	7	45	24	23	59	72	75	84	94	846A
13C	6.5		46	21		62		75	84		846A
14C	6.5					63					
12C	6.5		45	24		59		75	84		SNICS
12C	7.0		43	28				79	88		SNICS

表1; イオンの透過率

6. 5MVにおいて求められた12C 4+と13C 4+のイオン光学的透過率は等しいので以下の議論では14C 4+も同じ値だとする。

14C/12Cの比は以下のようにして求めた。

$$\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}} = \frac{{}^{14}\text{C}^{-}}{{}^{12}\text{C}^{-}} = \frac{{}^{12}\text{C}_{\text{OFF}}^{-}}{{}^{12}\text{C}^{-}} \frac{{}^{14}\text{C}^{4+}}{{}^{12}\text{C}_{\text{OFF}}^{-}} \frac{{}^{14}\text{C}^{-}}{{}^{14}\text{C}^{4+}}$$

ここで

$$\frac{{}^{14}\text{C}^-}{{}^{14}\text{C}^{4+}} = \frac{{}^{12}\text{C}^-}{{}^{12}\text{C}^{4+}} \frac{[12\text{Cの6.5 MVのはぎ取り効率}]}{[14\text{Cの6.5 MVのはぎ取り効率}]}$$

一点の測定時間は約1000秒である。モダンのサンプルとしてNBS試料をグラファイト化した試料とデッドのサンプルとしてスリランカ産の鉱物グラファイトの測定値を図3に示す。図に示すように再現性の良いデータが得られた。絶対値についても悪くない値を得た。

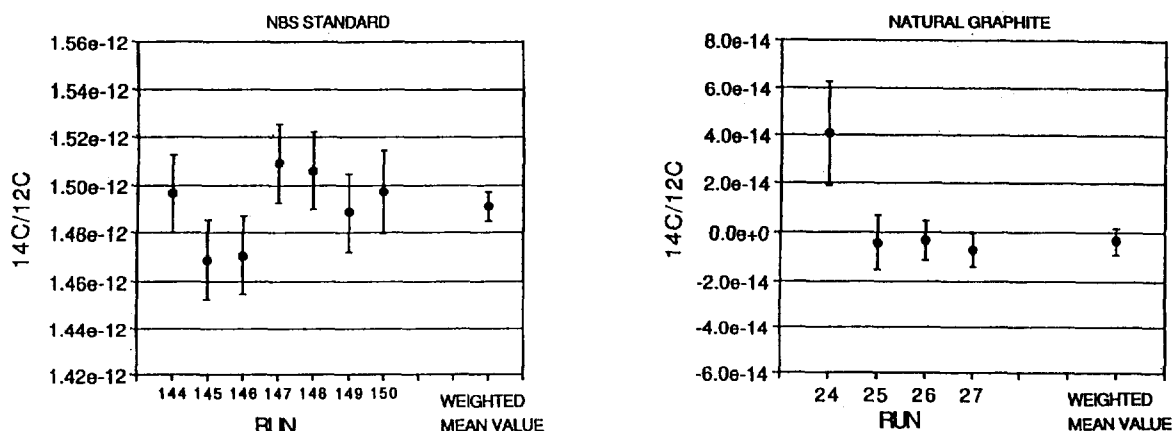


図3 ; $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の比の測定値。(a) NBS試料をグラファイト化した試料、(b) スリランカ産の鉱物グラファイト

5 まとめ

京都大学タンデム加速器における加速器質量分析について述べた。負イオン源にスリットを取り付けて入射ビームのエミッタンスを小さくすることにより、安定で高いビーム透過率を得ることが出来た。NBS 蓚酸をグラファイト化したモダンのサンプルとスリランカ産の鉱物グラファイトのデッドのサンプルに対して $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の比を測定し、システムの再現性の良いことを示した。今後は逐次入射の方法の開発を進め、実際の炭素試料の測定を行う予定である。

参考文献

- [1] M. Nakamura, S. Shimoura, K. Takimoto, H. Sakaguchi and S. Kobayashi, Nucl. Instr. and Meth. A268 (1988) 313.
- [2] 広瀬昌憲、中村正信、松本博、田澤雄二、荻野晃也、河野益近、船場潤之、第8回タンデム加速器とその周辺技術の研究会報告集 1995 p.61.
- [3] Ch. Stoller, M. Suter, R. Himmel, G. Bonani, M. Nessi and W. Wolfli, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-30 (1983) 1074.
- [4] H. Kitagawa, T. Masuzawa, T. Nakamura and E. Matsumoto, Radiocarbon 35 (1993) 295.

加速器質量分析法による樹木年輪試料の ^{14}C 年代測定

小田寛貴¹⁾，米延仁志²⁾，池田晃子³⁾，中村俊夫³⁾，古川路明¹⁾

¹⁾ 名古屋大学理学部 : 〒464-01 名古屋市千種区不老町

²⁾ 鳴門教育大学学校教育学部 : 〒772 鳴門市鳴門町高島

³⁾ 名古屋大学年代測定資料研究センター : 〒464-01 名古屋市千種区不老町

<はじめに>

従来より ^{14}C 年代測定法は、炭素を含む試料を測定対象とし、現代から数万年前までを適用範囲とすることから、考古学的資料についての極めて有効な「理化学的」年代測定法であった。さらに、古文書をはじめとする歴史時代文化財資料は、貴重であるがゆえ破壊分析に供しうる量に限度があり、測定対象とされることがなかったが、加速器質量分析法(AMS)の開発にともない、1 mg(β 線計数法の約1/1000)の試料での測定が可能となり、これら貴重な資料についても ^{14}C 年代測定が可能となるに至った。これによって、 ^{14}C 年代測定の適用範囲は、より現代に近い時代にまで拡張されたといえることができる。ただし、かかる試料の年代測定では、少量での測定の他に、高い時間分解能が要求される。しかしながら、 ^{14}C 年代は、試料を ^{14}C 濃度の経時変化を示さない仮想大気であると仮定して得られる数値であり、実際の暦年代とは異なるものである。適用範囲が現代に近づくにともない、 ^{14}C 年代測定法に、暦年代と ^{14}C 年代との誤差を明確化する必要が生じるに至った。

本研究は、暦年代が既知であるような樹木年輪について ^{14}C 年代測定を行うことで、 ^{14}C 年代と暦年代との誤差を明確化することを目的に据えている。同様の研究は、M. Stuiver, G.W. Pearsonらによって行われているが、その校正曲線は、アメリカ・アイランド産の樹木を用いたものであり、それ以外の地域・研究機関における試料への適用については、十分吟味されたものであるとはいえない。このため、樹輪校正曲線適用の正当性は、各地域・研究機関において、吟味されるべきものであるといえる。

<実験・測定>

本研究においては、樹齢950年に達する木曽ヒノキの1年毎の年輪を測定試料として用いた。また、同ヒノキの最外年輪の暦年代は、年輪年代学に基づき1923年と決定された。ただし、材の中心部は腐朽しており年輪の採取は不可能であったため、1120年頃以降の年輪を試料とした。また辺材付近は、各年輪の厚みが薄く、採材が困難であったため、現生のヒノキを測定試料としてもちいた。

木材細胞は、細胞壁を構成する主成分と細胞内含有物である副成分とから成る。年輪は一年毎に形成されるが、副成分および主成分の一部(リグニンなど)は、各年輪の間を移動する可能性をもっている。このため、本研究においては、木材細胞の構成成分のうちで最も安定した成分である α -セルロースを、各年輪から調製した。試料調製法は以下のとおりである。サイコロ状に採材した木片から、ミクロトームを用いて年輪を連続的に剥離し1年単位の年輪試料を得た。これらから、まず超音波洗浄によって付着不純物を除去し、HCl-NaOH交互洗浄により副成分を除去した。つぎに、

NaClO₂によるリグニンの除去・NaOHによるβ・γ-セルロースの除去を行うことで、各年輪のα-セルロースを得た。約8mgのα-セルロースを、CuOとともに2時間加熱(950℃)しCO₂に変換した。さらに、このCO₂を精製したのち、H₂および触媒のFeとともに6時間加熱(650℃)し、グラファイトに還元した。得られたグラファイトを専用の手動圧縮装置によって圧縮し、これをターゲットとして名古屋大学タンデトロン加速器質量分析計による測定を行った。この際、測定の標準体にはNBSシュウ酸SRM-4990(通称OLDシュウ酸)を用いた。また、同位体分別効果の補正を行うべく、精製後のCO₂のδ¹³C値をトリプルコレクター式気体用質量分析計(Finnigan MAT社製MAT-252)により測定した。

<解析>

測定によって得られた試料の¹⁴C/¹³Cと標準体の¹⁴C/¹³Cの比 $R \pm \Delta R$ 、および、試料・標準体のδ¹³C値から、下式にしたがい¹⁴C年代 t [BP]を求めた。

$$t = - \frac{1}{\lambda_{Li}} \times \ln \left(\frac{R \cdot E \cdot F}{f} \right)$$

ここで、 λ_{Li} はLibby半減期に基づく壊変定数、 E は¹²C-¹³C換算項、 F は同位体分別効果に対する補正項、 f は標準体固有の係数であり、

$$\lambda_{Li} = \frac{\ln 2}{5568} \quad [y^{-1}]$$

$$R = \frac{(^{14}\text{C}/^{13}\text{C})_{sa}}{(^{14}\text{C}/^{13}\text{C})_{od}}$$

$$E = \frac{1 + \delta^{13}\text{C}_{sa}/1000}{1 + \delta^{13}\text{C}_{od}/1000}$$

$$F = \frac{1 - 2(25 + \delta^{13}\text{C}_{sa})/1000}{1 - 2(19 + \delta^{13}\text{C}_{od})/1000}$$

$$f = 0.95$$

として与えられる。なお、添字 sa, odはおのおの試料、OLDシュウ酸を示すものである。

<考察>

得られた各試料の¹⁴C年代を図1に示した。なお、図中の破線は大気中¹⁴C濃度に経時変動が無いとした場合の理論曲線である。

この図より、(1)12~13世紀では測定される¹⁴C年代が実際の暦年代より古い値をとり(すなわち、実在大気中の¹⁴C濃度が仮想大気中のそれに比べて低い値をとる)、(2)17世紀後半~18世紀前半では、逆に、¹⁴C年代が暦年代より新しい値をとるという傾向がみられる。

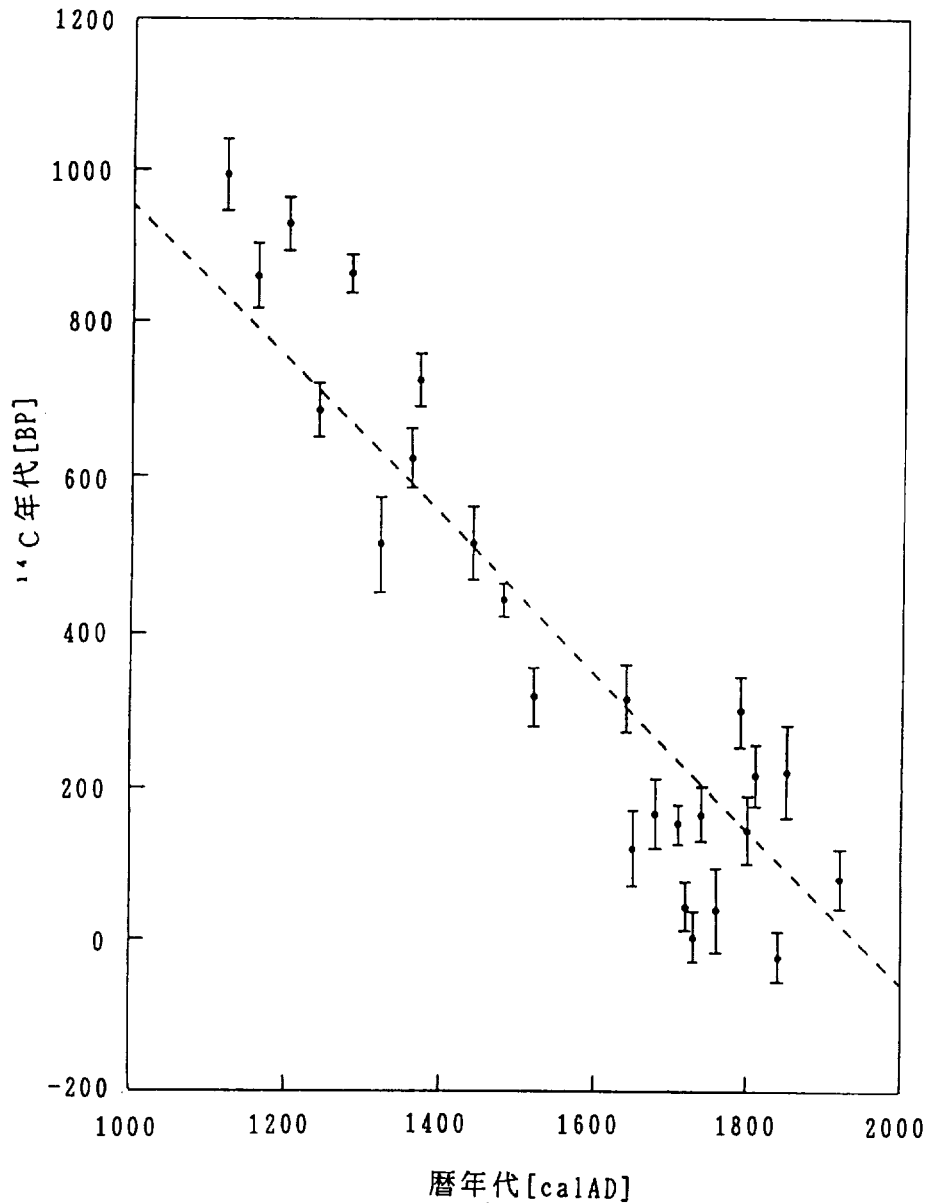


図1. 木曽ヒノキ年輪試料の暦年代と ^{14}C 年代

また、1993年に Stuiver & Pearson によって提唱された樹輪較正曲線（20年輪単位の較正曲線）^{*)}との差 ΔT をとると、その平均は $13 \pm 17[\text{BP}]$ であり、両曲線はほぼ一致するものであるといえる。しかしながら、個々の ΔT 値の分散が、統計誤差から推定されるそれを越えて大きな値を示していることを問題点として挙げる事ができる。すなわち、個々の測定点の誤差が、 $40 \sim 60[\text{BP}]$ であるのに対し、 ΔT の分布が示す不偏分散の平方根は約 $80[\text{BP}]$ を示している。この相違の原因には、(1)本研究の試料が1年単位の年輪であるのに対し、Stuiver & Pearson の曲線が20年単位の年輪を試料として作成されたものであるということと、(2)グラファイト化・イオン化に際して生じる同位体分別効果が試料と標準体とで異なることが考えられる。

<おわりに>

^{14}C 年代測定法をはじめとする「理化学」的年代測定法とは、その考古学的資料が物質であるがゆえに有する物理学的属性のとしての年代を測定するものである。したがって、その年代値は“自然科学的抽象化”を受けた値であり、実際の暦年代とは異なるものである。本研究は、この相違を明確にするべく、暦年代が既知であるような樹木年輪について ^{14}C 年代測定を行ったものである。しかしながら、かような樹輪較正によってえられる暦年代もまた、その試料が実在大気に対して閉鎖系を形成してきた期間を示すだけのものであり、歴史学的年代（その資料が道具として存在した年代）とは異なることになる。したがって、歴史学的な年代の決定を目的とするとき、樹輪較正後の暦年代と歴史学的年代との関係を明示するような新たな較正曲線が必要となると考えている。

<参考文献>

- *) M. Stuiver and G. W. Pearson "High-precision bidecadal calibration of the radiocarbon time scale, AD1950-500BC and 2500-6000BC." Radiocarbon 35(1), 1-23, 1993

イオン注入を利用したシリコン単結晶の自立薄膜化加工法とその応用

名古屋工業技術研究所

斎藤和雄、中尾節男、丹羽博昭、宮川草児

1. はじめに

MeVオーダーのイオン注入と選択エッチングを用いて数 μm の厚さのシリコン単結晶自立薄膜を作成する方法について、前々回の当研究会等で発表した^{1,2)}。この試料は高エネルギーイオン照射と薄膜成長を組み合わせたエピタキシャル成長の実験³⁾用の基板としてその加工法を確立したものである。本材料の特徴は、①膜厚の均一性と制御性に優れていること②結晶性が良好であること③機械的な強度があること等であり、基礎研究から実用的な研究にまで様々な分野での応用が期待される。本稿では、良質の単結晶自立薄膜を効率的に作成する工程を確立する目的で行われたその後の実験結果⁴⁾及び本材料を用いて行ったいくつかの実験例などに関して簡単に報告する。

2. 薄膜化工程

単結晶自立薄膜の作成工程を図1に示した。全工程の概要に関しては既に発表した文献を参照されたい¹⁻³⁾。ここでは、その後明らかになったいくつかの留意点のみを簡単に述べる。

この手法の中心は、選択エッチング(図中④)である。この工程では表面に形成された酸化物層と固体中の高濃度のボロン不純物層を難腐食層として、この間の部分のみが残される。従って、難腐食効果を有効に働かせる条件を整えることが重要である。

イオン注入量は最も重要な要素であり、先の報告では $1 \times 10^{16} \text{ions/cm}^2$ を難腐食効果を働かせるために十分な注入量とした。しかしながら、照射損傷の低減化、注入時間の節約という観点から、注入量はなるべく低く抑ええることが好ましい。我々は、注入量を順次下げて薄膜化加工を試みた結果、 $3 \times 10^{15} \text{ions/cm}^2$ の低注入量でも自立膜の形成は可能であること、ただし、自立膜形成の成功確率(選択エッチング中に穴が開かない確率)が順次減少すること、そして成功確率はそれ以前のプロセスの条件と密接な関連があること、等が明らかになった。

注入量とともに重要なパラメーター

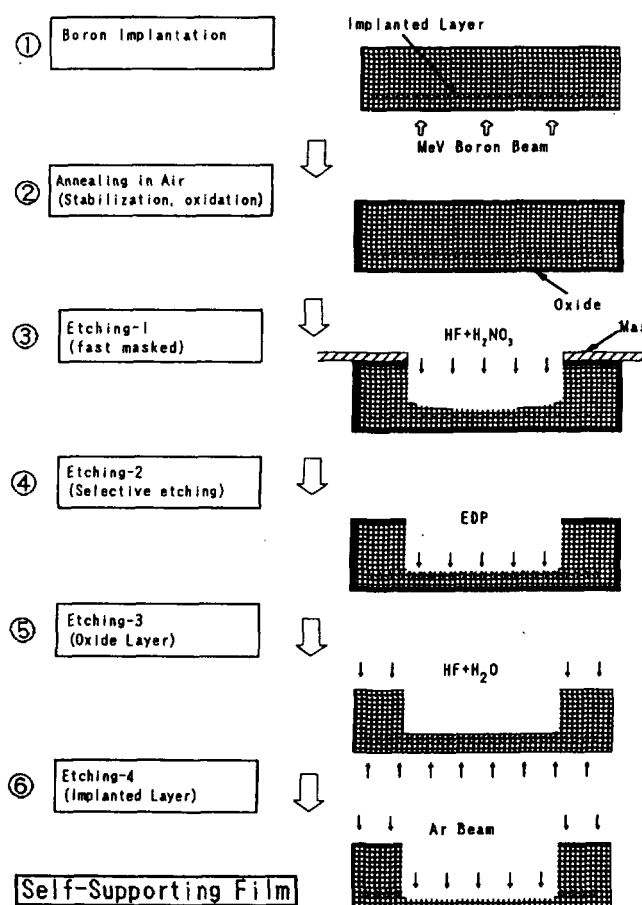


図1 シリコン単結晶自立薄膜の作成工程図

は注入後のアニール条件である。アニールの目的は、注入ボロン不純物の安定化、照射損傷の回復及び注入表面への酸化物層の形成にある。これらの目的のためには、席の報告における条件（950℃、1時間）より高温、長時間が望ましいと考えられるが、一方、熱拡散によるボロンの深さ分布の変化も考慮しなければならない。例えば、アニール温度を990℃にした場合、同じ条件での選択エッチングでは殆どの膜に穴が開いてしまった。これはアニール中の熱拡散によってシリコン中に注入されたボロン不純物の最大濃度が下がるためであり、アニール温度は必要最小限に押さえるべきであるということが分かった。エッチング速度が 10^{-19} atomes/cm²台の不純物ボロン濃度に極めて敏感なこの選択エッチングの特徴である。

このほか、注入ボロン濃度の不均一性、高速マスクエッチングにおけるエッチング速度の不均一性、プロセス中のゴミの影響など、良質の単結晶自立薄膜を効率的に作成するためのプロセス中のいくつかの問題点が明らかになった⁴⁾。

3. 単結晶自立薄膜の特性

作成した自立薄膜の特性を様々な角度から検討した。例えば、イオンチャネリングの手法を用いると、単結晶自立薄膜の性能の一部を比較的簡便に知ることが出来る。図2に作成した自立薄膜を2.7 MeVのヘリウムイオンによるRBSチャネリングで測定した結果を示した。<100>アライン入射の場合の後方散乱スペクトルは、ランダムに比べて充分低く（5%以下）、単結晶自立薄膜の結晶性が、バルクの単結晶に比べて遜色ない程度に良好であることを示している。

図3は自立薄膜にヘリウムイオンをランダム及び<100>アライン方向から入射した場合の透過イオンのエネルギースペクトルである。比較のため、入射イオンのエネルギースペクトルも示してある。測定は、試料後方に置かれた炭素基板金の極薄膜（約1.5 nm厚）からの後方散乱から得たものであり、入射ビーム径は4 mmである。チャネリングイオンに対する阻止能がランダムに比して少ないということを反映し

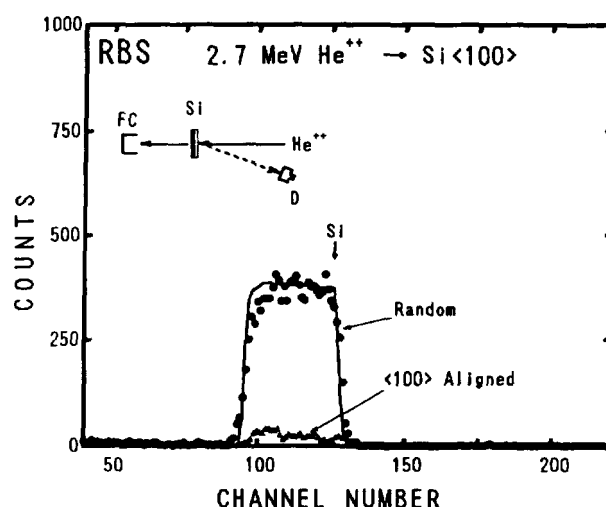


図2 自立薄膜のRBSチャネリング測定結果

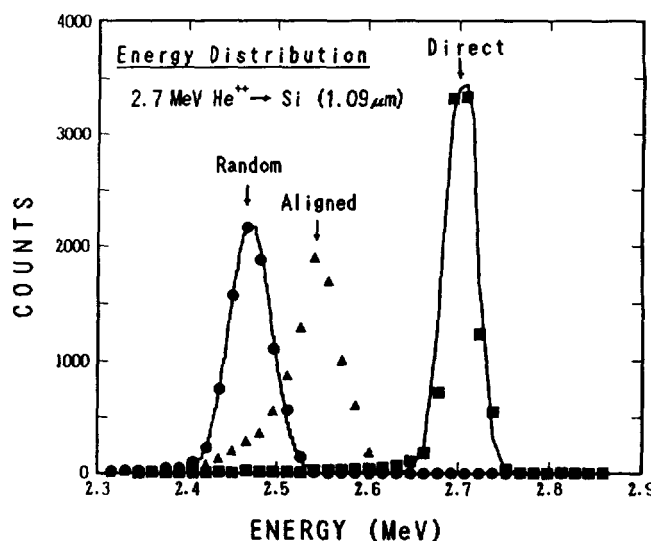


図3 透過ヘリウムのエネルギースペクトル

て、アライン入射の場合の透過エネルギーはランダムより高い位置にある。この結果から次のことが言える。①ランダムピークの幅はエネルギー損失の揺らぎ及び測定の分解能を考慮すると妥当な値を示す。これは、自立膜の膜厚が直径4 mmの円形内の範囲で均一であることの反映であり、膜厚の均一性を再確認することが出来た。②アライン入射の場合、透過イオンの殆どはランダムのそれより高いエネルギーを持つ。これは、透過イオンの殆どがチャネリング状態入射していることを示している。この意味は、直径4 mmの範囲で $\langle 100 \rangle$ 軸の方向と入射ビームの方向がチャネリングの臨界角(約 0.4°)以内に揃っていることを示している。言い換えると、自立膜が直径4 mmの領域にわたって、極めて平坦であるということを意味している。

一方、いくつかの欠点も最近明らかになった。作成した自立膜を透過光のもとで詳細に顕微鏡で観察すると、多くの試料に複数のピンホールが存在する事が分かった。現在、この原因について検討しているが、イオン注入時に表面に付着している微少な粒子(ゴミ)によるものと思われる。このようなピンホールの存在は、デバイス関連への応用の際には極めて深刻な問題となるため、プロセスをよりクリーンな環境のもとで行う必要がある。

図4は選択エッチングで停止した表面の微視的な形態を原子間力顕微鏡(AFM)で観察したものである。比較のため、デバイスグレードの鏡面仕上げ面も示した。図から明らかなように、イオン注入層によってエッチングの停止した表面は、鏡面仕上げの面に比べてかなり凹凸が激しく、この傾向は注入量にもあまり影響されない。このような表面が、デバイス等への応用の際にどのように影響するかは明らかではないが、微視的な平滑性を得る方策を考える必要がある。

4. 自立薄膜の応用

冒頭でも記したように、この研究の目的は、高エネルギーイオンが透過した表面上で結晶成長を行った場合のイオン照射効果を調べることにあった。我々は、この観点からの基礎実験を行い、この手法の特徴を明らかにした³⁾。また同様な考え方で、電子ビームやレーザービームなどを薄膜基板の裏側から作用させ、成膜場に対する影響を調べることもできる。この場合、アシストビームの入射する空間と成膜空間を自立薄膜基板によって完全に遮断する

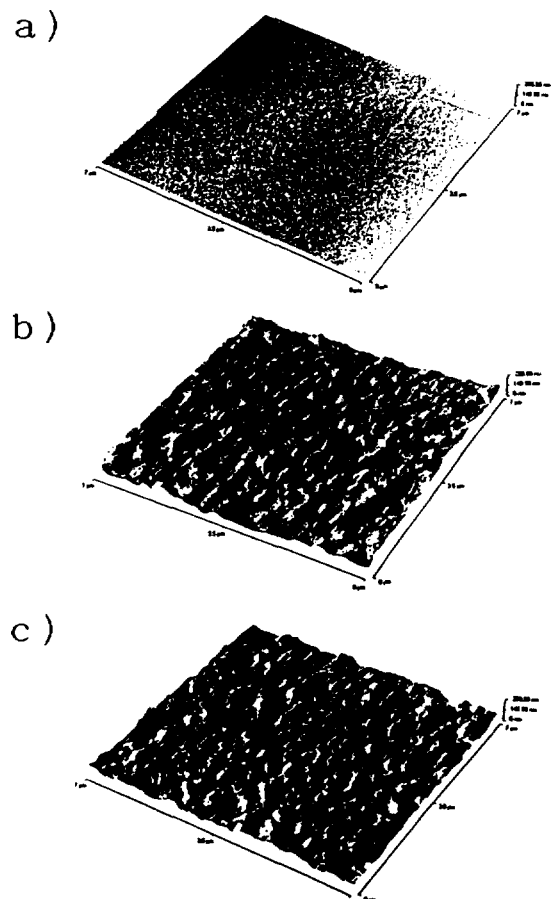


図4 自立薄膜表面のAFM像 a) 注入面(鏡面仕上げ) b) エッチストップ面(3×10^{15} ions/cm²) c) エッチストップ面(6×10^{15} ions/cm²) .

ことが可能であるため、比較的成膜時の圧力の高いCVDや液体状態での結晶成長などにも適用可能である。

高エネルギーイオンを真空中から大気中に導き、各種のイオンビーム分析を行うことは測定対象の大きな広がりをもたらすものと思われる。シリコンの自立薄膜はその構造が機械的に比較的強いため、真空と大気を隔てる窓材として使用することが可能である。我々は、名大原子核と共同で、シリコンの自立薄膜を高エネルギーRBSによる固液界面の分析に利用することを試みた。この研究では、直径約3mmで5 μ mの厚さの自立薄膜を作成し、9MeVのヘリウムビームにより大気圧側（固液界面）の表面に付着した重金属のRBS分析を行うことが出来た⁶⁾。

本研究で得られた自立薄膜の薄さを利用したいいくつかの応用が考えられる。例えば、放射線、原子核実験でよく用いられる粒子弁別用のdE/dX透過型検出器がこの材料から作ることが出来ると、現在の市販品（最も薄いもので100 μ m程度の厚さ）に比べて画期的に薄くなることから、検出エネルギーの限界を大幅に下げることや、検出核種の範囲を広げることが出来る。このような検出器は、数MeVのイオンビームを用いたERD法（弾性反跳検出法）等でも極めて有用になるものと思われる。このほかにも、温度センサー、加速度・振動センサーなどセンサーデバイスへの応用、X線リソグラフ用の窓材、SORなどのビームスプリッターなど、単結晶の薄い自立膜を利用する応用分野は比較的広い。

5. まとめ

イオン注入と選択エッチングを利用したシリコン単結晶自立薄膜の作成とその評価について簡単に報告した。イオンチャネリングの実験からこの試料の膜厚の均一性、平坦性および結晶性が優れていることが分かった。また、ピンホールや表面のモルフォロジーなど、まだ改良点が残されており、デバイスへの応用などに関しては、より繊細なプロセスの確立が必要であることも分かった。また、この材料を透過イオンビーム照射下でのエピタキシャル成長用の基板や大気圧中でのイオンビーム分析の基礎実験に用いることにより、この分野での基礎研究に有用であることが分かった。

参考文献

- 1) 斎藤他、第7回タンデム研究会報告集
- 2) K.Saitoh, H.Niwa, S.Nakao and S.Miyagawa, Proc. of the X-th Inter. Conf. on Ion Impl. Tech. (1995) 998.
- 3) K.Saitoh, H.Niwa, S.Nakao, Y.Miyagawa and S.Miyagawa: to be published in Nucl. Instrm. and Methods (in press).
- 4) K.Saitoh, H.Niwa, S.Nakao and S.Miyagawa, to be published in Proc. of the X-th Inter. Conf. on Ion Impl. Tech. (1996).
- 5) K.Morita et al, to be published in TIARA Annual Report

半導体中に生成した超高速な電荷挙動の測定について

原研高崎：平尾敏雄、酒井卓郎、濱野 毅、梨山 勇

宇宙開発事業団：根本規生、松田純夫

1. はじめに

現在の急速な半導体素子の進歩に伴い、様々な分野への用途が拡大している。宇宙環境においても、ロケット及び人工衛星の姿勢制御・通信系の信頼性および機能の充実を図るために、小型、軽量、低消費電力、高信頼性を有し高機能を備えた半導体デバイスの利用が進められている。しかし、宇宙環境で用いる半導体素子は、シングルイベント等の放射線場に対する影響を考えなくてはならない。

シングルイベント現象¹⁾の種類には、デバイスの構成により SEU (Single-Event Upset)、SEL (Single-Event Latchup)、SEB (Single-Event Burn out) 等がある。

半導体素子のシングルイベント現象の基礎過程は、入射粒子の侵入による電子・正孔対の発生と、逆バイアスされている pn 接合部への少数キャリアの収集である。この収集過程には 200ps 程度の速い収集過程と数 ns にも及ぶ遅い収集過程があり、この速い収集過程には空乏層内でのドリフトと空乏層より深いところより電荷収集の起こるファネリング^{2,3,4)} があることは良く知られている。従って、半導体素子の基本構造である p n 接合ダイオードを用いた電荷収集の直接観察^{5,6,7)}を行いシングルイベントパラメータを取得することが宇宙環境で使用される半導体素子の耐放射線性素子の開発を行う上で重要な課題となっている。

現在、高崎研では TIARA 照射施設のサイクロトロンを用いて実デバイスにおけるシングルイベント現象の実験が実施されている^{8,9,10)}。一方、タンデム加速器に設置されている重イオンマイクロビームを用いてシングルイベント現象のメカニズムの解明等の実験が進められている^{8,9,10,11,12)}。

本報告では、重イオンマイクロビームが半導体素子に入射したときに生成した超高速な電荷の収集について測定した実験結果の報告を行う。

2. 実験方法

照射試験は、原研高崎の TIARA 照射施設の 3M V タンデム加速器に接続されている重イオンマイクロビーム形成装置と半導体デバイス微少領域照射試験装置を用いて行った。この実験に使用したイオンは 6MeV のヘリウムイオンと 15MeV のエネルギーを持った炭素、酸素、シリコンであり、試料へ入射するイオン数は、イオンの入射に伴う放射線損傷¹³⁾ を考慮して、約 100~300cps 程度で行っている。粒子計測は、約 1 μ m 径に絞り込んだマイクロビームを使用し半導体検出器を用いて行った。試験試料は、図 1 に示すように不純物濃度として $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ で感応面積として 50 μ m 径を持った半導体素子の基本的な構造であるシリコン p n 接合ダイオードである。

表 1 実験に用いたイオン種の特長

イオン種	エネルギー MeV	飛程 μm	LET $\text{MeV}(\text{mg}/\text{cm}^2)$	発生電荷量 $\text{fC}/\mu\text{m}$
ヘリウム	6.0	31.04	0.554	5.724
炭素	15.0	13.98	4.130	42.651
酸素	15.0	9.66	6.911	71.382

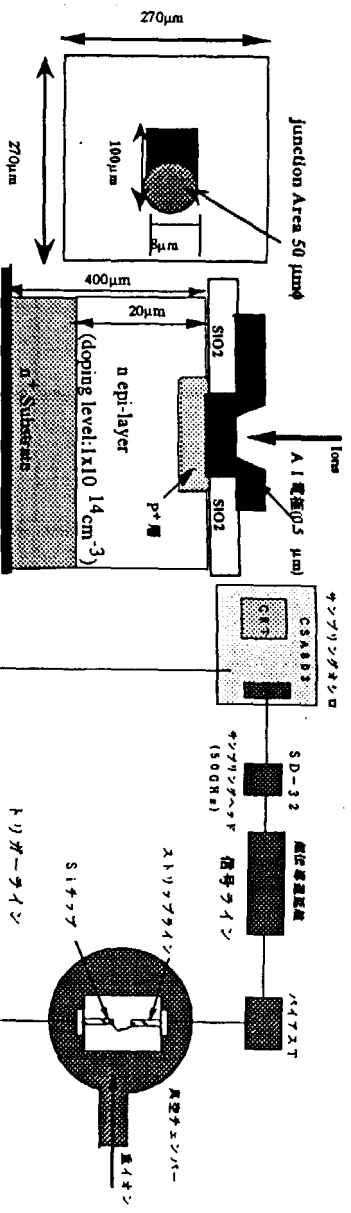


図 1 試験試料の構造図

図 2 測定系の構成 (40 GHz 帯域で統一)

イオンが試験試料に入射した時に発生するピコ秒台での収集電荷を正確に測定するために、我々は、図 2 に示すように測定装置として 50 GHz の周波数帯域を備えたサンプリングオシロスコープと超伝導遅延回路装置を用い、全て 40 GHz の高周波帯域で統一した測定システムを構築している。なお、収集電荷は測定されたシングルイベント過渡電流波形を積分し計測システムの 50Ω で除すことで求めている。

3. 実験結果及び考察

図 3 にヘリウムの 6MeV、炭素と酸素の 15MeV イオンが入射した時に生じたシングルイベント過渡電流波形の -3V での電圧の関係を示している。この図よりシングルイベント過渡電流波形は、LET が大きくなるとピークが高くなり収集される電荷も多くなっていることが分かる。また、図 4 は図 3 で得られたそれぞれのシングルイベント過渡電流波形のピークを 1 として規格化し重ね合わせた結果を示している。この結果、各イオン

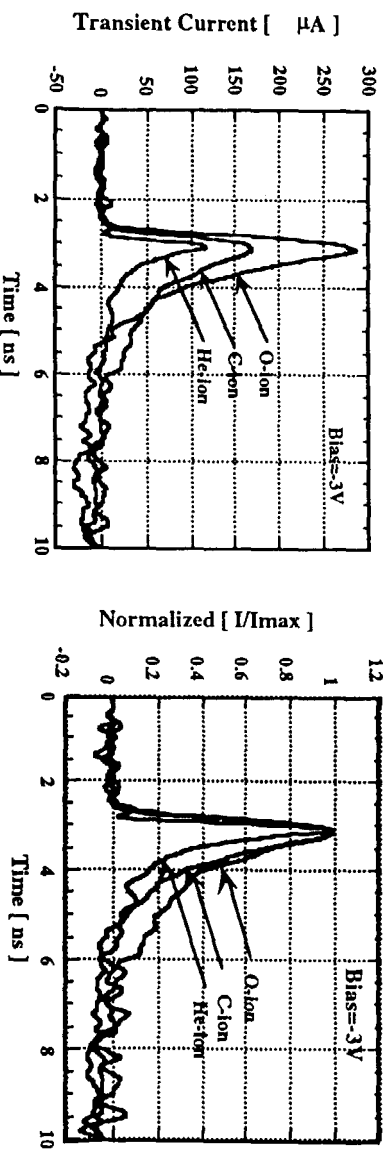


図 3 シングルイベント過渡電流波形のイオン種の違いによる影響

図 4 規格化したシングルイベント過渡電流波形のイオン種の違いによる影響

種で発生した過渡電流波形の立ち下がりには LET の増加に伴い長時間側へシフトしていることが分かる。表 1 に示すように使用したイオン種のエネルギーでの飛程と印加電圧 -3V の空乏層幅との関係よりイオンの飛程は十分に空乏層の厚さより長い、したがって、この状態で発生したシングルイベント現象による電荷の収集はプロシト成分 (空乏層内での収集とフアナリシテによる収集) と拡散成分からなっていると考えることができ

表 2 各イオン種に対する半値幅、立ち上がり時間、立ち下がり時間及び収集電荷量の比較

イオン種及びエネルギー	空乏層幅 μm	印加電圧 V	半値幅 FWYTH ps	立ち上がり時間 Tr (ps)	立ち下がり時間 Tf (ps)	空乏層内での 収集電荷量 Q1 (fC)	実装で得られた 収集電荷量 Q2 (fC)	比率 Q2/Q1	電荷収集長 μm
ヘリウム (6MeV)	6.259	-3	446	181	263	35.826	74.11	2.07	6.69
炭素 (15MeV)	6.259	-3	966	256	1101	266.952	303.70	1.14	0.863
酸素 (15MeV)	6.259	-3	1042	317	1510	446.779	553.40	1.24	1.495

る。表 2 に図 3 及び図 4 で得られた各イオンに対する収集電荷量等の結果を示している。なお、空乏層内での収集電荷量は、各イオンの単位長当たりで発生する電荷量に空乏層の厚さを掛けることにより求めることができる。この表より、シングルイベント過渡電流波形の立ち上がり、立ち下がり時間は LET の増加に伴い増加し、逆に電荷収集長は短くなっていることが分かる。ここでの電荷収集長とは、イオンが入射して電荷収集に及ぼす全収集長に対して空乏層幅を差し引いた長さを示している。すなわち、ヘリウム 6MeV のイオンに於いてはシリコン中の飛程が約 $31\mu\text{m}$ であり、イオンは図 1 に示すようにエド層を通り抜け基板まで到達していることになる。しかし、このような長いイオントラックに対し電荷の収集に及ぼす長さは、全体で約 $13\mu\text{m}$ であり空乏層幅より $6\mu\text{m}$ 離れた位置から電荷が収集されていることを示している。一方、LET の増加に伴い立ち下がり時間が増加している原因としては、高 LET ほど電荷収集過程での拡散成分による影響が現れていると考えられる。

図 5 は、酸素イオンを用いて求めたドリフト成分とフエネリング及び拡散成分とに分離したシングルイベント過渡電流波形の違いを示している。図中の印加電圧が -25V の時の

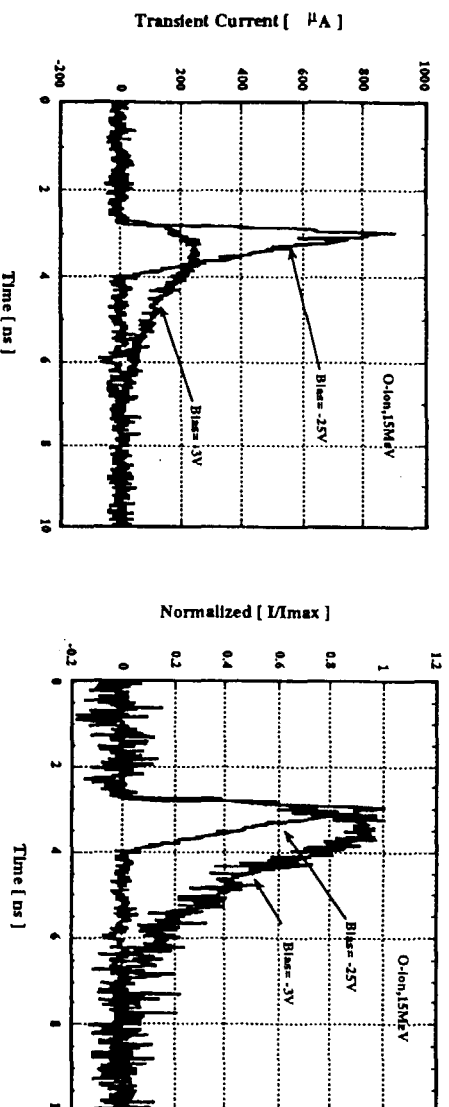


図 5 シングルイベント過渡電流波形の電圧依存性

図 6 規格化したシングルイベント過渡電流波形の電圧依存性

空乏層幅は、約 $18\mu\text{m}$ であり、酸素イオンでのシリコン中の飛程は、表 1 に示すように $9.66\mu\text{m}$ である。従ってこのときに発生したシングルイベント過渡電流は、ほとんどドリ

フト成分による収集と考えることができる。一方、印加電圧が -3V の時の空乏層幅は、約 $6\mu\text{m}$ でありイオンの飛程よりも短い、従って電荷収集としてはファネリングと拡散からも収集されていることと考えられる。図6には、図5で得られたシングルイベント過渡電流波形のピークを1として規格化した波形を重ねて示している。同図に見られるようにドリフトでの電荷収集とファネリング等による電荷収集を比較した場合、ドリフトでの電荷収集は、半値幅及び収集時間ともファネリング等による挙動より約半分の値を示していることが分かる。従って、バイアス電圧 -25V で得られた過渡電流波形の立ち下がりバイアス電圧 -3V での立ち下がり時間の差がファネリングと拡散による収集電荷の挙動と考えられる。

REFERENCES

- 1) D.Binder, E. C. Smith, A. B. Holman, "Satelite Anomalies from Galactiv Cosmic Rays", IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-22, No.6 pp.2675, 1975
- 2) C.M.Hsieh, P.C.Murley, and R.R.O'Brien, "A Field-Funneling Effect on the Collection of Alpha-Particle-Generated Carriers in Sillicon devices", IEEE Electron Device Letters, EDL-2, No.4, pp.103-105, 1989
- 3) G.C.Messenger, "Collection of Charge on Junction Nodes from Ion Tracks", IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-29,pp2024,1982
- 4) H.L.Grubin, "Funneling in Sillicon Device", IEEE Trans. on Nucl.Sci.NS-31,pp1161,1984
- 5) R. S. Wagner, J. M. Bradley, C. J. Maggiore, J. G. Beery, and R. B. Hammond, "An Approach to Measure Ultra-Fast Funneling Current Transients," IEEE Trans. on Nucl.Sci. NS-33,No.6, pp.1651-1655 (1986)
- 6) R. S. Wagner, J. M. Bradley, Nicole Bordes, D. N. Sinha, C. J. Maggiore, and R. B. Hammond, "Transient Measurements of Ultra-Fast Charge Collection in Semiconductor Diodes," IEEE Trans. on Nucl.Sci. NS-34,No.6, pp.1640-1645 (1987)
- 7) R. S. Wagner, Nicole Bordes, J. M. Bradley, C. J. Maggiore, A. R. Knudson and A. B. Campbell, "ALPHA-, BORON-, SILICON- AND ION-ION- INDUCED CURRENT TRANSIENTS IN LOW-CAPACITANCE SILICON AND GaAs DIODES," IEEE Trans. on Nucl.Sci. NS-35,No.6, pp.1578-1584 (1988)
- 8) TIARA ANNUAL REPORT (Vol.2) ,JAERI-93-241 (1992)
- 9) TIARA ANNUAL REPORT (Vol.3) ,JAERI-94-005 (1993)
- 10) TIARA ANNUAL REPORT (Vol.5) ,JAERI-95-019 (1994)
- 11) TIARA ANNUAL REPORT (Vol.1) ,JAERI-93-047 (1992)
- 12) I. Nashiyama, T. Hirao, T. Kamiya, H. Yutoh, T. Nishijima and H. Sekiguchi, "Single-Event Current Transients Induced by High-Energy Ion Microbeams" , IEEE Trans. Nucl. Sci. NS- 40, No.6, PP1935-1940 (1993)
- 13) T.Hirao, I. Nashiyama, T. Kamiya, T. Nishijima," Effect of micro-beam induced damage on single-event current measurements",Nucl. Instrum. Methods in Phys, Res.B104 (1995) 508-514

シングルイベントバーンアウト (SEB) の研究に対する 高エネルギー加速器の利用

宇宙開発事業団 : 羽田尚志、青木司郎、中村正夫、松田純夫
原研材料開発部 : 平尾敏雄、梨山 勇
三菱テクニカ (株) : 広瀬孝幸、大平秀春、永井由紀

1. はじめに

宇宙空間では、銀河宇宙線や太陽フレアからの放射線といった多くの粒子が飛び交い、それが半導体に飛び込んだ場合、シングルイベントという誤動作 (ソフトウェア) や破壊 (ハードウェア) に至る現象を起こすことは良く知られている。

パワーMOSFETは、スイッチング時間がバイポーラ・トランジスタと比較して、一桁以上速いという特徴から高周波回路、高速電力スイッチング回路および電源回路に広く使用されており、将来、JEM (宇宙ステーション取付型日本実験モジュール) を始めとする宇宙用電子機器に採用する計画がある。このパワーMOSFETとシングルイベント現象との関係には、シングルイベントバーンアウト (以下SEBと記す) がある。

SEBとは、主にパワーMOSFET内に存在する寄生トランジスタに重粒子が通過する事により電子・正孔対を発生させ、ゲートにバイアス電圧を印加しないOFF状態で寄生トランジスタがONしてしまい、そこに電流が集中し破壊してしまう現象である。したがってパワーMOSFETは、電源系や駆動系を直接制御するデバイスであるために、SEBが起こればシステム全体に影響を及ぼし、致命的な宇宙機の故障となることが考えられる。そのため、SEBのメカニズムの究明を行い、さらに対策をとる事が宇宙環境で使用するパワーMOSFETの耐放射線素子の開発に向けた重要な課題となってきた。

従来、シングルイベント機構の解明には、放射性物質である ^{252}Cf の核分裂片を用いていたが、Linear Energy Transfer (LET) 範囲が広く、さらに飛程が $15\mu\text{m}$ (Si) 程度と短いために、電荷収集領域 (一般に空乏層) の長いパワーMOSFETの解析には限界があり宇宙環境をシミュレートした実験にはなりにくい。このため、SEBの機構解明には飛程の長い、単一エネルギーを持った荷電粒子ビームを発生することのできる加速器を利用した照射実験が必要不可欠となってきた。

本報告では、高エネルギー加速器を用いたシングルイベントバーンアウト現象の実験結果についての報告を行う。

2. 実験方法

測定は、入射粒子のLETと飛程に対応した電荷スペクトルをバイアス用電源、チャージアンプ、PHA (Pulse Height Analyzer) で構成されている測定システムを用いて行った。図1にSEBの実験に用いた測定系の構成図を示す。また、表1には実験に用いた加速器の一覧を示す。実験は、照射粒子のフルエンス率を $100\text{個}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$ 程度とし、照射損傷による試験試料の影響を軽減して実施した。

試験試料に対するイオンの入射は、加速器からの入射方向に対して 45° の位置に設置した散乱薄膜 (厚さ $500\text{\AA}$ の金箔膜) を用いて照射を実施している。散乱照射系の概要を図2に示す。

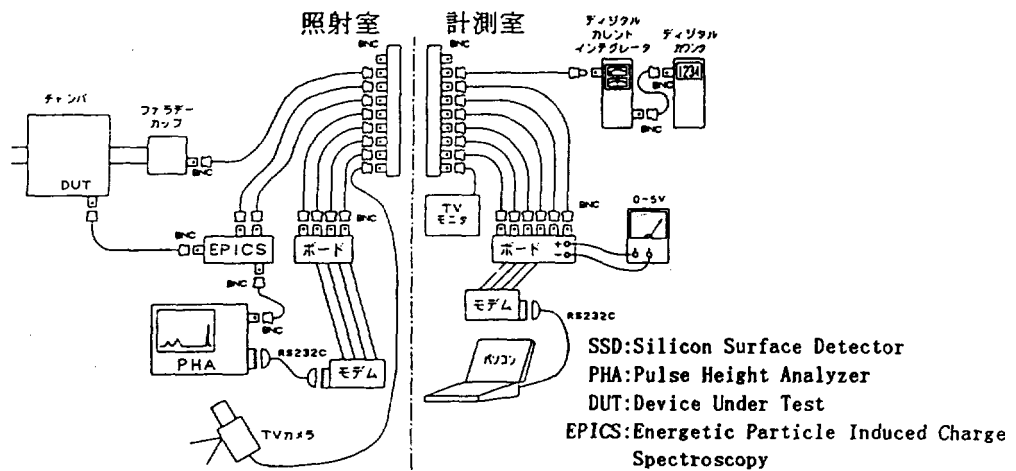


図1 測定系の全体構成

表1 SEB計測に使用している加速器及び照射イオン

機関	加速器	照射イオン	チャンバー
原研東海研究所	タンデム加速器	Br, C, Si, Ni, Au	N1照射室

照射粒子のフルエンスの測定は、照射時のビーム電流をファラデーカップによりモニタしながら制御を行い、試験素子に対する照射粒子フルエンスの計測は、試験試料近傍に設置した半導体検出器 (SSD) を用いて行った。

照射実験に用いたパワーMOSFETは、500V 耐圧を持つNチャネルパワーMOSFETで、宇宙用として開発した2SK2271 とその原型となつている民生品2SK725 の2品種である。

SEBの発生メカニズムは、ドレイン電圧が上昇するにつれ重粒子の通過による電荷がベース電位を上昇させ、トランジスタが活性化し一気にソース電極からの電子が注入されるために、この電流がトランジスタのベース電位を保持する様なフィードバックループを形成し発生していると考えられる。パワーMOSFETは、MOSFETセルを1000～10000個並列に配置した構造をしており、寄生的にトランジスタ及びダイオードが存在する。この寄生トランジスタに重粒子が通過しターン ONすると、パワーMOSFETのドレインーソース間に加わっている高電圧によりセルの一部に電流が集中して流れ破壊に至ってしまう。このパワーMOSFETがONし始める時の電荷量を Q_{TH} (しきい値電荷) と呼んでいる。パワーMOSFETの SEBと等価回路を図3に示す。

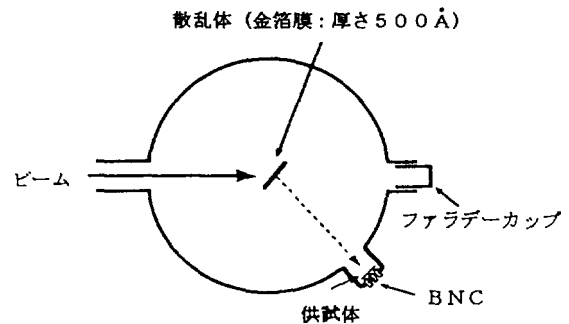


図2 散乱照射系の概要

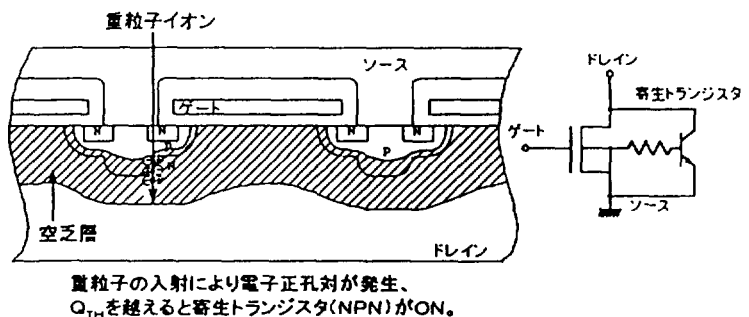


図3 パワーMOSFETのSEBと等価回路

SEBの計測は、図4に示すEPICS

(Energetic Particle Induced Charge Spectroscopy) システムを使用して実施した。このEPICSは、SEBの発生に伴うパワーMOSFETと測定回路自身の破壊を防止する為の保護回路を備えており、5桁のダイナミックレンジを持つチャージアンプ(およそ $0.5 \text{ pC} \sim 50 \text{ nC}$)と広ダイナミックレンジのデータを容易に解析できる対数変換器を有している。

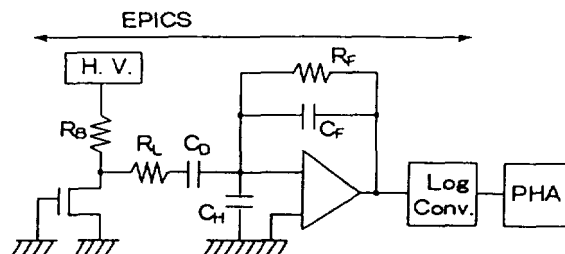


図4 SEB 測定回路

SEBは、荷電粒子の入射により発生し増倍される電荷量が、ドレインの空乏層の厚さと電界強度に依存するため、ドレイン電圧を変化させながらそれぞれの電圧で発生した電荷の量を測定し観察することとした。なお動作温度については、室温条件としている。

3. 実験結果及び考察

民生用パワーMOSFET (2SK725) と宇宙用パワーMOSFET (2SK2271) に 200 MeV のNiイオンを照射した時に得られた電荷スペクトルを図5及び図6に示す。両図より、印加電圧(V_{DS})の上昇につれて、収集した電荷量に2つのピークが現れ、収集電荷量も増加する事がわかる。さらに印加電圧を上昇させると、2SK725では 280 V 以上で、2SK2271では 320 V 以上でSEBの発生が観測されている。

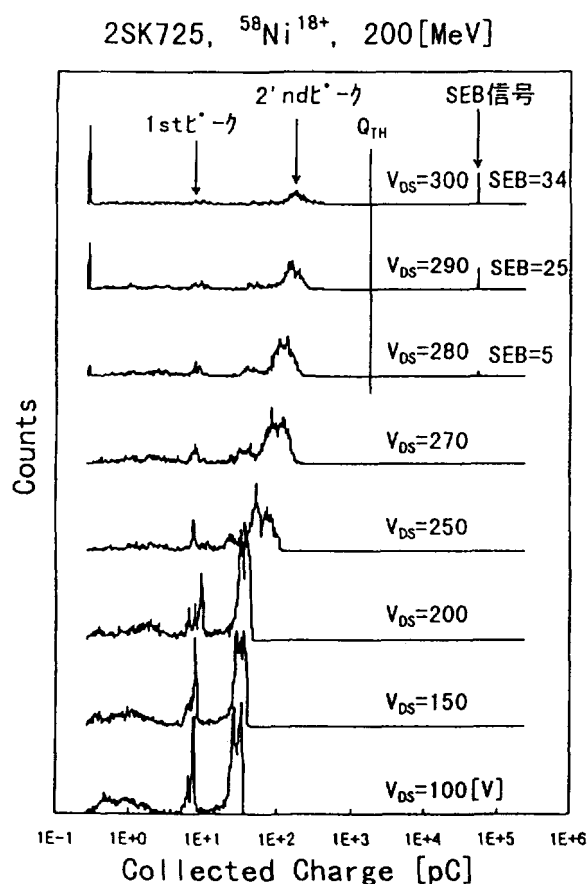


図5 民生用パワーMOSFET(2SK725) のSEB

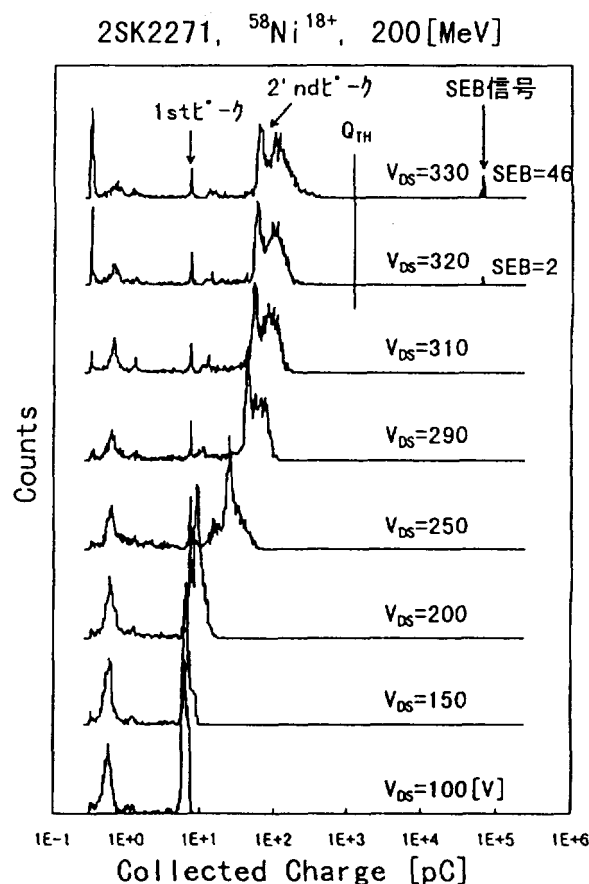


図6 宇宙用パワーMOSFET(2SK2271) のSEB

両図の収集電荷量と印加電圧の関係において、それぞれの印加電圧に対して観測された収集電荷量の2つのピークは、パワーMOSFETの寄生ダイオード(PN)と寄生トランジスタ(NPN)のいずれかに重粒子が入射して発生した収集電荷量の位置の違いと考えられる。この2つのピーク(1stピークと2ndピーク)の間隔は、ドレイン電圧の変化に対して一定であり更に、このピーク的位置は印加するドレイン電圧の上昇に伴って右方向に(電荷量の大きい方)シフトしていることが分かる。このことは、ドレイン電圧と収集電荷量との関係において、印加電圧が200V程度までは空乏層の広がりに対応した収集電荷量の増加を示しており、200V以上の電圧条件では、空乏層以上の収集電荷量が観測されていることを表している。この理由としては、入射粒子により直接生成した電子・正孔対がドレインの空乏層中の電界によって加速され、新たな電子・正孔対を生成するアバランシェ増倍効果によるものと考えることができる。

また、ドレイン電圧の上昇に伴い収集電荷量が或る量(Q_{TH} =しきい値電荷)に達すると、SEBの現象として2桁を越える電荷のピーク(図5及び図6のSEB信号)が観測されている。

この Q_{TH} は異なるLETと飛程を持つイオンの入射によっても同様の電荷量を示すことより、試験試料の接合の構造、寸法、不純物濃度等に依存するデバイス固有のパラメータであると考えることができる。

そこで、寄生トランジスタのベース領域の不純物濃度を大きくすること及びベース幅を広げ、寄生トランジスタの電流増幅率(h_{FE})を低く抑える事が、SEB耐性向上につながると考え宇宙用パワーMOSFETの開発を行った。
一般に、 h_{FE} の関係は、(1)式で表される。

$$\frac{1}{h_{FE}} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{W_B}{L_{nB}} \right)^2 + \underbrace{\frac{N_{AB}W_B}{D_{nB}}}_{\text{ベースでの再結合}} \cdot \underbrace{\frac{D_{pE}}{N_{DE}W_E}}_{\text{エミッタへの注入}} + \underbrace{\frac{N_{AB}W_B}{D_{nB}}}_{\text{空乏層中での再結合}} \cdot \frac{W_{EB}/t_0}{2n_i e^{qV_{EB}/2kT}} \dots\dots\dots (1)$$

その結果、図5及び図6に示すように民生品パワーMOSFET約280Vの耐性に対し、宇宙用のそれは約320Vと約40V改善された結果が得られている。

今後は、この結果を踏まえさらに耐性の向上を図るとともに、民生技術をベースとしたパワーMOSFETの品種拡大に努めていく計画である。

Reference

- 1) S. Kuboyama et al : IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-39, No6, 1698(1992)

カロリメータ法によるイオンエネルギー測定

水橋 清、SUWAT BUNAK*、田島 訓

原研高崎 放射線高度利用センター

*Office of Atomic Energy for Peace(OAEP) in THAILAND

1.はじめに

高崎研の3MVタンデム加速器ではエネルギー値がより確かである等、質の良いビームの発生に心がけている。イオンエネルギーを測定するための GVM (Generating Volt Meter)の校正には共鳴核反応 $^1\text{H}(^{15}\text{N}, \alpha \gamma)^{12}\text{C}$ 法を用いている。3MVタンデム加速器用GVMの校正にこの共鳴核反応を用いる利点は同加速器のエネルギー範囲において2つの共鳴核反応点 (6.385 MeV, 13.355 MeV) が存在することで、GVMが直線性の良い電圧特性をもっている¹⁾ことから、2点で校正することでより正確な校正が行えることにある。しかし、この方法は測定操作や装置が比較的複雑であったり、特殊なターゲット材料を使用しなければならない等の簡便さには欠ける。したがって、簡易的なエネルギー測定方法として測定精度的には劣るがカロリメータを用いる方法を試みた。また、カロリメータ法は測定するイオン種やイオンエネルギーに拘束されことなく、任意の条件での測定が可能であるため、イオン注入装置のように校正用としての適当な核反応を持たない低エネルギー加速器のエネルギー測定に応用させたいと考えている。

2.カロリメータ法によるエネルギー測定

カロリメータ法は (1) 式によって表わされ、吸収体の照射中の温度変化、照射電流およびカロリメータの熱容量から計算によってエネルギーを求める方法である。

$$E = \frac{4.184 \times \Delta T \times C_p \times n}{I \times t} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 E: イオンのエネルギー (MeV), ΔT : 温度変化 (°C)
C_p: カロリメータの熱容量 (cal/°C), n: イオンの価数
I: 照射電流 (μA), t: 照射時間 (sec)

カロリメータ法は測定操作が単純で、共鳴核反応法とは異なり1つのエネルギーを求めるのに多数のデータを取る必要はなく、測定装置も比較的単純で原理的には電流計と温度計だけ良い。使用するターゲット材料もカロリメータでは一般的な材料を使用するのに対し、 $^1\text{H}(^{15}\text{N}, \alpha \gamma)^{12}\text{C}$ 法では水素を除去したシリコンウエハーの表面に1原子層程度の水素を吸着させた特殊な試料を使用している。²⁾また、カロ

リーメータ法では任意のエネルギーおよび任意のイオン種での測定が可能であるが、測定精度は 10^{-2} 程度と共鳴核反応法と比較し良くない。これらの特徴によって、カロリーメータ法は3MVのタンデム加速器だけではなく電子加速器やイオン注入装置のエネルギー測定が可能である。但し、測定できるイオンエネルギーはあくまでも測定中の平均エネルギーであり、カロリメータの測定精度よりもエネルギー安定度が良い加速器であることが必要である。

3 カロリーメータの概要

図1にカロリーメータの構造を示す。本カロリーメータはイオンの吸収体、2次電子サプレッサーおよびアパーチャスリット等から構成される。吸収体は熱伝導や耐熱性が良く、ビームが後方散乱され難い材質によって制作した。熱電対には測定精度が1%、直径が0.5mm ϕ の電氣的な絶縁を施したCC熱電対を使用し、イオン電流測定用リード線には直径0.5mm ϕ の酸化絶縁皮膜線を使用した。また、吸収体の対面は鏡面仕上げとし、吸収体は絶縁体である4本の小さなビスによって保持されている。サプレッサーおよびアパーチャスリットは位置調整できる構造とした。本測定ではサプレッサー特性結果から測定値が安定する950Vで行った。

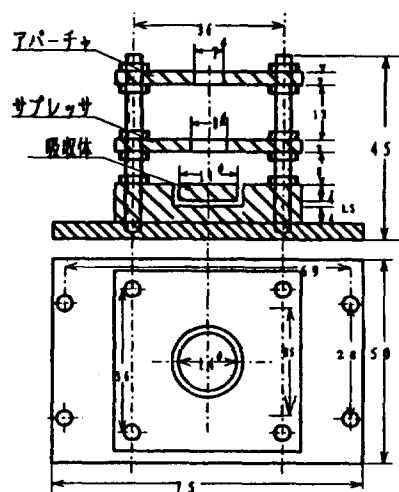


図1 カロリーメータの構造

4 熱容量の校正

カロリーメータの熱容量は吸収体、熱電対、リード線および吸収体を支える4本の絶縁体のビス等によって決定され吸収体の比熱だけでは決定されない。したがって、エネルギー量が明確で、その総てがカロリーメータに吸収される方法で校正する必要があり今回は校正されたイオンビームを用いて行った。イオンエネルギーの校正は

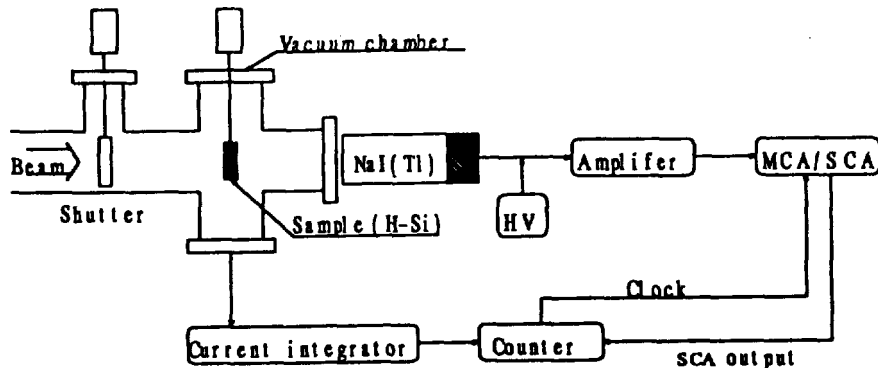


図2 共鳴核反応 ${}^1\text{H}({}^{15}\text{N}, \alpha \gamma){}^{12}\text{C}$ に伴う γ 線計測装置

図2に示した計測装置によって、 $^1\text{H} (^{15}\text{N}, \alpha \gamma) ^{12}\text{C}$ 共鳴核反応を用いて行った。ターゲットには水素を排除したシリコンウエハーの表面に1原子層程度の水素を吸着させたものを使用し、核反応によって生じる γ 線の計測は NaI (TI) シンチレータを用いた。NaI (TI) からの信号は MCA によってエネルギー分析を行い、 γ 線の発生量の測定は計測効率を高める

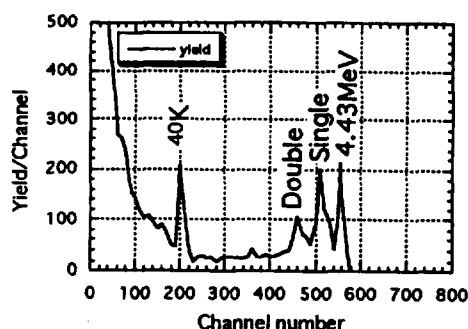


図3 $^1\text{H} (^{15}\text{N}, \alpha \gamma) ^{12}\text{C}$ 反応 γ 線エネルギー・スペクトル

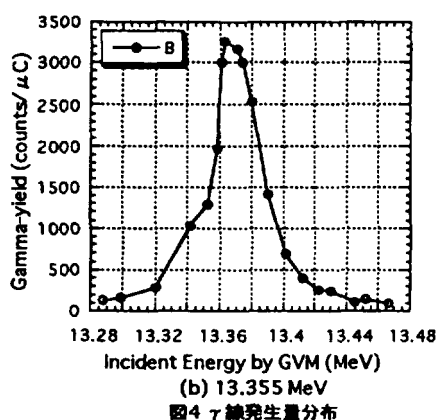
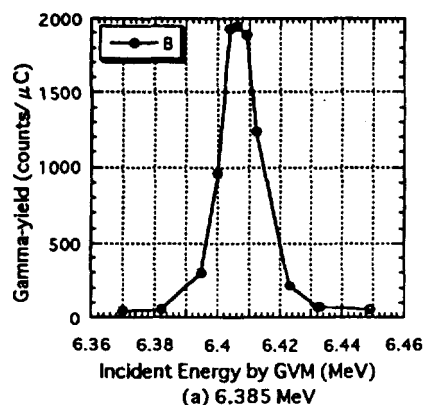


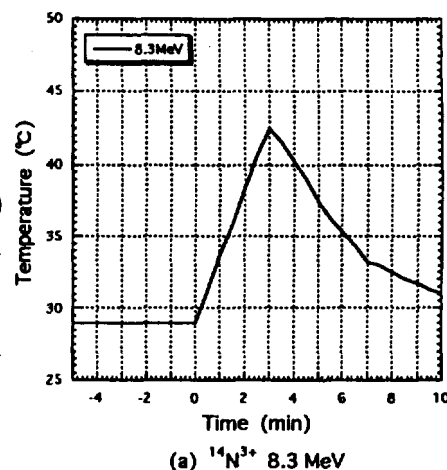
図4 γ 線発生量分布

ため 4.43MeV peak, single escape peak, double escape peak の3つのピークを含む範囲で行った。図3に $^1\text{H} (^{15}\text{N}, \alpha \gamma) ^{12}\text{C}$ 反応の代表的なエネルギー・スペクトルを示した。図に表されている様に、バックグラウンドである ^{40}K からの 1.461MeV ピークおよび核反応によって生じた 4.43MeV peak, single escape peak, double escape peak の3つのピークが現れている。図4に共鳴核反応点 (a) 6.385MeV および (b) 13.355MeV における γ 線の発生量分布を示した。X 軸は GVM によって求めたエネルギーを表し Y 軸は μC 当たりの γ 線の発生量を表した。これらの分布は 10~20 keV 程度づつエネルギーを変えて測定した。また、測定はイオンビーム照射によってターゲットに吸着された水素が失われることによる測定誤差を防止するため、エネルギーを増加減させる2方向で測定した。以上の結果から 6.385MeV に対して 6.406 MeV, 13.355MeV に対して 13.368 MeV と +0.329% および +0.097% の誤差を計測した。これらの値から GVM の校正係数 0.999 を得た。

この校正係数から得たエネルギーの炭素イオン (5.994 MeV) によって、カロリメータの熱容量 1.347 (cal/°C) を求めた。

5 結果

図6に ^{14}N イオンビームを照射した時のカロリメータの温度変化を示した。(a) は $^{14}\text{N}^{3+}$, 8.3 MeV、(b) は $^{14}\text{N}^{2+}$, 6MeV、(c) は $^{14}\text{N}^{1+}$, 3.6 MeV のイオンをそれぞれ3分間照射した時のデータである。これらのデータから (a) と (b) は温度上昇変化が直線的で比較的良好なデータであるが、(c) は直線的ではなく良いデータとは言えない。また、保温性もそれほど良くはなく、



(a) $^{14}\text{N}^{3+}$ 8.3 MeV

照射終了後の減衰が大きい。したがって、照射中の温度変化分として、照射後の各データの放熱特性から同じ温度勾配であれば同じ時間内に失う温度減衰分はほぼ等しいと判断し、照射停止後の同一時間内減衰分を照射中の損失分として加算した値を使用した。以上の条件によって求めた結果を表1にまとめた。これらの結果から、8 MeV および 6 MeV のデータの様に照射中の温度上昇変化が直線性を保っている場合には誤差が数パーセント程度の結果を得ている。一方、3.6 MeV のデータの様に照射中の温度変化が寝てしまっている場合には、この寝ている間のエネルギーロス分が補償できないために悪い結果となっている。また、今回の実験では電流積分計が不調であったことによってアナログメータの平均電流値を使用したこと等が原因して、数パーセントのバラツキを生じている。したがって、電流積分計を使用すること等によって、1パーセント程度の誤差で安定に測定できるものと期待している。

表1 エネルギー測定結果

イオン種	エネルギー (MeV)	電流 (nA)	計測エネルギー (MeV)	誤差 (%)
$^{14}\text{N}^{3+}$	8.339	224.5	8.434	+1.14
$^{14}\text{N}^{3+}$	8.339	180.0	8.081	-3.09
$^{14}\text{N}^{2+}$	5.994	200.0	5.882	-1.86
$^{14}\text{N}^{2+}$	5.994	244.5	6.096	+1.70
$^{14}\text{N}^{1+}$	3.646	52.5	3.112	-14.65

6 まとめ

カロリメータ法によるイオンエネルギーの測定は 10^3 以下のエネルギー安定度を有する加速器の簡易測定として有効である。特に、適当な核反応がない低エネルギーイオン加速器やイオン注入装置には有効であると考えられる。また、カロリメータの最適化および電流積分計やより高精度の温度センサを使用することによって、1% 以下の精度で安定に測定できれば、より有効であると考えられる。

References

- 1) .熊谷 寛夫、実験物理学講座 28,151
- 2) .S.Yamamoto, P.Goppelt-Langer, et al. "Analysis of Hydrogen in Nb/Cu Multilayers Using ^{15}N NRA " JAERI Review 1993 (vol.3) ,141

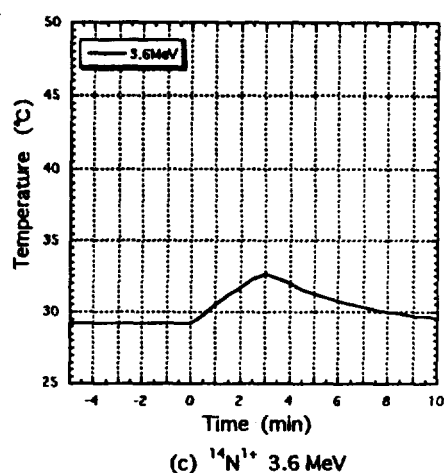
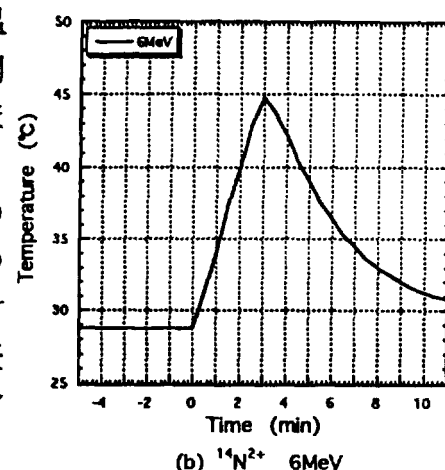


図5 カロリメータ温度変化データ

イオンビーム・プラズマ相互作用の測定実験計画

東京工業大学原子炉工学研究所

小栗慶之, 阿部 悟, 作美 明, 岡崎 永, 渡辺 武

1. はじめに

大強度重イオンビームを用いる慣性閉じ込め核融合においては、プラズマ加熱の後半では既にプラズマ化した標的物質に更にイオンビームが入射して加熱が続行される。従ってプラズマへの重イオンビームのエネルギー付与をはじめとするイオンビーム・プラズマ相互作用に関する知識は、重イオン慣性核融合の燃料標的設計に不可欠なデータである。

東京工大原子炉研では、重イオン慣性核融合の基礎研究の一環として、これまでビームドライバとしての大強度重イオン加速器について、加速構造およびビーム挙動の実験的研究と計算機シミュレーション研究を行ってきた。昨年度より本研究所の1.7 MVタンデム加速器からの低速重イオンビームを用いて上記のビーム・プラズマ相互作用測定のための準備研究を開始した。以下に研究計画の概要と予備的実験及び計算等の結果について簡単に述べる。

2. プラズマ標的発生システム

図1に実験装置系の概念図を示す。東京工大原子炉研の1.7 MVタンデムペルトロン加速器からのイオンビームをプラズマ標的に照射し、通過してくるビームの荷電状態、エネルギー損失等を測定してこれらの相互作用を調べる。

高密度のプラズマを発生するために、固体ペレットにパルスレーザーを照射して標的プラズマを発生する。使用するレーザーは最大エネルギー4 J、パルス幅30 nsのNdガラスレーザー($\lambda=1054$ nm, B.M. Industries 511DNS12)である。ペレットとしては、平均原子番号が小さいため高い電離度が得られ、しかも常温で固体のため取扱いも比較的容易な水素化リチウム(LiH)の薄片を用いた。ペレットの直径は数10 μm であり、これに焦点直径100 μm 程度のレーザー光を命中させる。このために真空中でペレット位置を数 μm の精度で設定するメカニズ

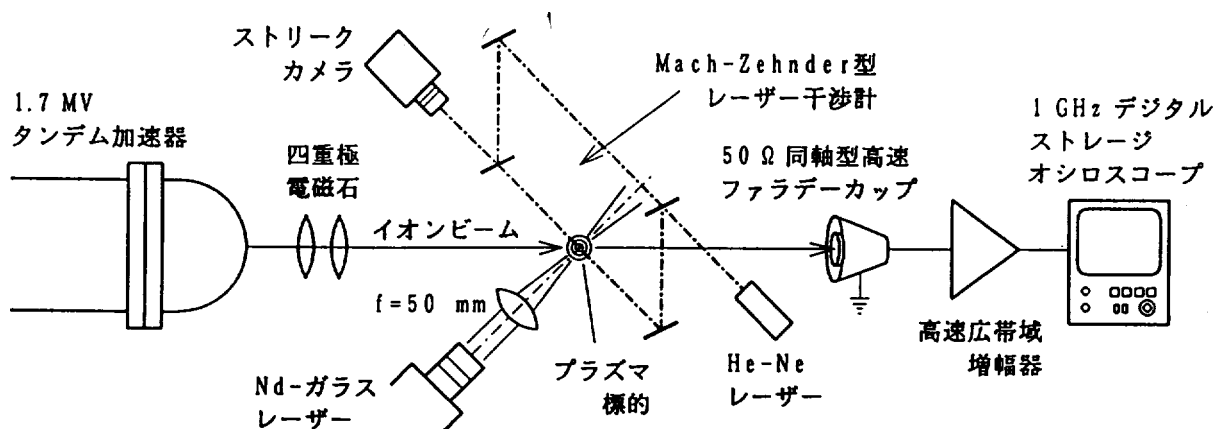
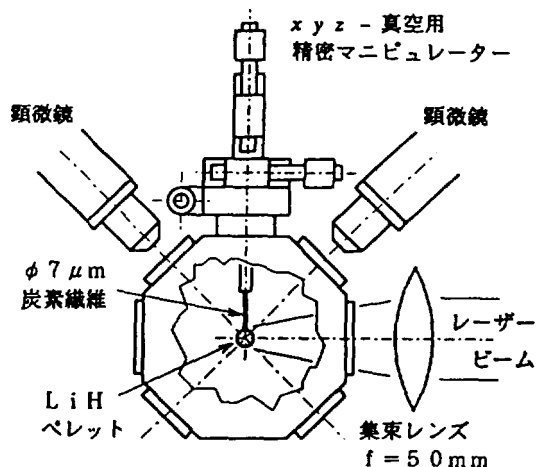


図1:ビーム・プラズマ相互作用測定実験装置系の全体図.

ムを開発した. 図 2 にこのペレット位置出し及び照射装置を示す. ペレットは直径 $7\text{ }\mu\text{m}$ の炭素繊維の先端に接着剤で固定される. この繊維は真空用精密 xyz マニピュレーターに取り付けられ, 位置の設定精度は $\pm 3\text{ }\mu\text{m}$ 程度である. レーザーの焦点位置はマイラー薄膜を照射して痕跡を付けることにより決定した. ペレットとレーザーの焦点位置は互いに直角に配置された2本の顕微鏡を用いて3次元的に合致させた.



3. 標的プラズマの診断測定

図 2: ペレット位置出し及び照射装置.

標的プラズマの診断測定では, まず自由電子密度の空間分布を時間分解測定して標的としての厚さを確定することが重要である. このために図 1 に示すように Mach-Zehnder 型のレーザー干渉計を開発した. 加速器からのイオンビーム及びプラズマ発生用パルスレーザーと空間的に干渉しないように縦形の配置を採用した. 光源には出力 50 mW の直流 He-Ne レーザー ($\lambda = 633\text{ nm}$) を用いた. プラズマからの強い発光をカットするために, ストリークカメラの前には He-Ne レーザー光用のバンドパスフィルターを置いた. 干渉系の鏡を調整して縦縞状の干渉パターンを作り, 横長のスリットでその一部を切り出してストリークカメラで高速流し撮りを行った.

図 3 に干渉縞のストリーク像を示す. ガラスレーザーは時刻 $t = 300\text{ ns}$ に照射され, パルス幅 30 ns , エネルギー 1.5 J である. プラズマ発生に伴う自由電子密度の増加により干渉パターンのフリンジが移動しているのが分かる. レーザー照射開始から 100 ns の間は He-Ne レーザー光の透過率が低く, フリンジを明瞭に観測できなかった. とりあえず密度分布を球対称と仮定し, 各位置におけるフリンジ移動量データを Abel 変換して自由電子密度分布を求めると図 5 が得られる. 幅が数 mm の範囲において, 電子密度 10^{17} cm^{-3} 以上のプラズマ自由電子密度が得られることが分かった.

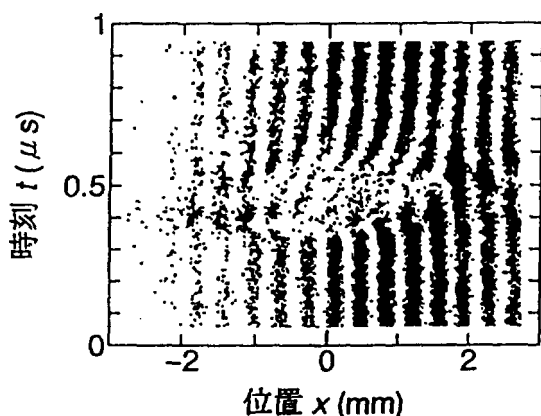


図 3: 干渉縞のストリーク像.

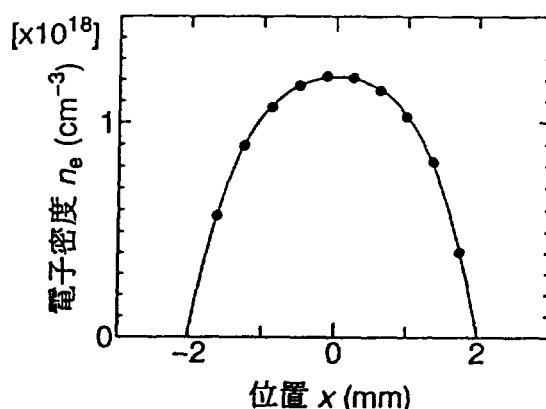


図 4: レーザー照射後 250 ns における自由電子密度の動径方向分布.

4. イオンビーム・プラズマ相互作用の測定

ビーム・プラズマ相互作用に関する実験として、プラズマ標的を通過したビームの平均荷電状態の測定を準備している。平均荷電状態 z_{eff} は次式で定義される:

$$z_{\text{eff}} = \sum_{z=0}^{i_p} z P_z.$$

ここで z_p は入射イオンの原子番号、 P_z は入射イオンのうち荷電状態 z を持つものの存在率で、

$$\sum_{z=0}^{i_p} P_z = 1$$

が成立する。入射イオンの阻止能 $-dE/dx$ はこの z_{eff} の二乗に比例して増大するので、 z_{eff} はビーム・プラズマ相互作用において極めて重要なパラメーターである。ビームの粒子束を F (個/s) とすれば、まず荷電状態 z のイオンのみによるビーム電流 i_z は

$$i_z = eFz$$

と書ける。ただし e は電気素量である。一方、標的通過後のビームは多数の荷電状態を含むので、粒子数の損失がなければ電流計で測定されるビーム電流 i は

$$i = \sum_{z=0}^{i_p} i_z = \sum_{z=0}^{i_p} eFzP_z = eF \sum_{z=0}^{i_p} zP_z = eFz_{\text{eff}}$$

となる。従って標的通過後のイオンの平均荷電状態は次式で求められる:

$$z_{\text{eff}} = \left(\frac{i}{i_{z_0}} \right) z_0.$$

ここで、 z_0 は基準となる荷電状態、つまり標的通過前の荷電状態である。従って i_{z_0} は標的プラズマを発生させる前に測定される直流ビーム電流である。

標的プラズマの寿命は 100 ns 程度であり、この間に荷電状態の変化に伴うビーム電流の変化を測定する必要がある。図 1 に示されているように、この測定のために同軸構造の高速ファラデーカップを準備している。120D 高周波同軸給電管の内部導体にビームを入射させる構造で、特性インピーダンスは 50 Ω である。二次電子放出は前方に配置した電極に電圧を印加して抑制する。この信号は帯域幅 1~500 MHz、増幅率 45 dB の高速広帯域増幅器 (Trontech W500C) で増幅され、1 GHz のデジタル・ストレージ・オシロスコープ (Tektronix TDS486A) で標的プラズマと同期して観測、記録される。実験ではビーム電流 1 μA を予定している。

一方、完全電離プラズマ標的通過後に予想される平均荷電状態のシミュレーション予測を行っている。荷電状態は入射イオンの電離と電子再結合の競争で決定される。電離過程としては自由電子及びプラズマイオンとの衝突による電離、再結合過程としては自由電子の放射捕獲、二電子再結合及び三体再結合を仮定した。Nardi ら[1]に従い、これら 5 つの原子過程について、それぞれの相互作用断面積、さらに反応率を計算した。荷電状態 z のイオンの存在率 P_z に関して、電離と再結合のバランスを表す連立方程式

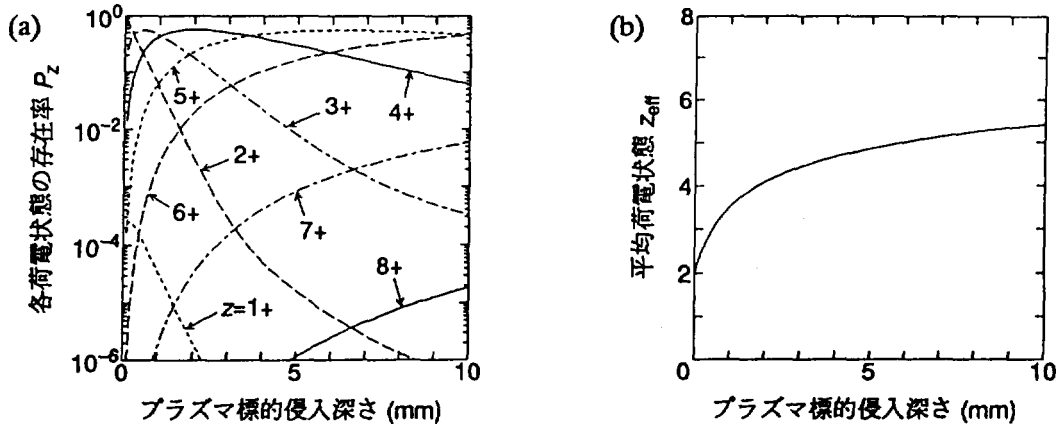


図 5: プラズマ標的に入射した 225 keV/u の $^{16}\text{O}^{2+}$ イオンの荷電状態の変化.

$$\frac{dP_z}{dt} = P_{z-1}\alpha_{I1}^{z-1} - P_z(\alpha_{I1}^z + \alpha_R^z) + P_{z+1}\alpha_R^{z+1} \quad (z = 0, 1, 2, \dots, z_p)$$

を解き各イオンの存在率を時間的に追跡した. 上式で α_I^z, α_R^z はそれぞれ荷電状態 z のイオンの電離及び再結合率である. 図 5 に 3.2 MeV の $^{16}\text{O}^{2+}$ イオン (225 keV/u) が電子密度 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 温度 50,000 K の LiH 完全電離プラズマに入射した場合の予備的な計算の結果を示す. 図(a)は各荷電状態の存在率, (b)は平均荷電状態の変化を示す. 荷電状態は標的侵入距離 2 mm 程度までに急速に増加し, 1 cm で平均荷電状態は約 5.4+に達する. これは常温炭素箔における平衡状態の平均荷電状態[2]に比較しても 1.3 倍程度大きい.

5. 結言

レーザープラズマ標的発生及び診断測定系の開発により, ビーム・プラズマ相互作用測定に供される自由電子密度 10^{17} cm^{-3} 以上, 寿命 100 ns 程度のプラズマ標的が発生できる見通しを得られた. 予備的な計算によればプラズマを通過したイオンの荷電状態は常温標的の場合に比較して大きくなることが期待され, したがって阻止能の大幅な増加が予想されるとともに加速器用電子ストリッパへの応用も考えられる. 磁場型スペクトロメーターと高速プラスチックシンチレーターを用いてプラズマ標的を通過したビームのエネルギー損失を時間分解測定する計画も進行中である.

参考文献

- [1] E.Nardi and Z.Zinamon, *Phys. Rev. Lett.* 49 (1982) 1251.
- [2] K.Shima, N.Kuno, M.Yamanouchi and H.Tawara, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 51 (1992) 173.

D(d, p)T反応を利用した注入重陽子の探索

筑波大学・物理学系 田岸義宏、片渕竜也、水越和満、山田直樹

1. はじめに

今回我々は、重陽子融合反応、D(d, p)T反応からの反応陽子の計数率およびそのエネルギーを重水素ビームを連続的に照射しながら測定する事によって、物質に注入された重水素原子の深さ方向に対する分布を実時間 (Real Time) で観察する方法を開発した。種々の物質に対する観測結果ならびに物質中における重水素原子の拡散の新しい測定法としてこの方法の有用性について報告する

2. 注入された重水素原子の測定法

標的物質に低エネルギー (~ 100 keV) の重水素ビームを連続的に照射する。入射重水素ビームは、物質中でそのエネルギーを失いその飛程付近で止り、物質中に拡散してゆく。拡散によって標的の表面近くに移動してきた重水素原子は、入射してくる重水素ビームと衝突し重陽子融合反応D(d, p)T, D(d, n) 3 Heを起こす。低エネルギー領域 (~ 100 keV) では、これらの反応の断面積は、入射重陽子のエネルギーが低くなると急激に減少するので、これらの反応は、主として標的物質の表面近くで起こる。従って反応陽子を計数することによって標的の表面近くに現れる重水素原子を感度よく捉える事ができる。一定量の重陽子ビームを照射しながら核反応で生じた陽子あるいは、中性子の計数率の照射時間依存性を測定する事によって標的の表面に拡散してくる重陽子原子数の時間変化が観測できる。また反応の運動学から放出陽子のエネルギーの値から反応時の重陽子のエネルギー値が分かる。標的中の重陽子のエネルギー損失が分かれば反応を起こした深さを知る事ができる。標的物質中での重陽子の深さ方向に関する分布を知るには、一様な深さで重陽子が分布している厚いターゲット例えば重陽子のポリエチレン (CD_2)_n に重陽子ビームを照射しそのエネルギースペクトルを測定する事によってゼロから入射エネルギー値のすべてのエネルギー領域にわたっての反応断面積の情報が得られる。このエネルギースペクトルを基準とし、実際に重陽子の照射で得られたエネルギースペクトルをこの基準のスペクトルでわり算する事によって標的中の重陽子数の分布が得られる。

3. 実験

実験は、筑波大学加速器センターのラムシフト型偏極イオン源からのビーム入射系に散乱槽 (直径400 mm, 深さ200 mm) を接続し90 keVに加速した無偏極なD⁻ビームを用いて行なった。散乱槽内には、2個のSi半導体検出器、一つの検出器は、 $\theta = 145^\circ$ (立体角 ~ 400 msr) に設置し反応陽子の数を計測し、もう一方の検出器は、 $\theta = 160^\circ$ (立体角 ~ 20 msr) に設置し反応陽子のエネルギーを測定した。 $\theta = 145^\circ$ からの信号を、波高分析 (MCA) に導き Multichannel Scaling Mode (MCS) で反応陽子の計数率の時間変化を測定した。

4. 測定結果

種々の金属 (Au, Ta, Mo, Pd) に90 keV, 約3 μ A、ビーム径約4 mmのD⁻ビームを室温にて連続して照射した時、照射開始直後からのD(d,p)反応によって放出される陽子数の時間変化を図1に示す。図の横軸は、ビーム強度変化のばらつきを補正するために照射ビーム量の積分値に直して表示してある。縦軸は、20 μ Cあたりの反応陽子の計数を示す。一般にproton yieldは、照射開始後徐々に増加しやがて飽和に達するかあるいは、増加の割合が少なくなる。その様子は、図1から分かるように照射物質の種類によって著しく異なる。これはまさにそれぞれの物質中での重陽子の動き易さ即ち拡散の違いを反映しているものと思われる。例えば、よく知られているようにパラジウム中では、重水素原子の拡散が大きい。この事は、図1で示されているようにProton yeildは照射量と共にすばやく立ち上がりすぐに飽和してしまいそのときの計数率が低い。即ち照射領域での重陽子密度が小さい。これとは対照的に、金の場合反応陽子のyeildが照射量と共に直線的に増加している。このことは、注入された重陽子が殆ど動いていないことを示している。

Proton yieldの照射量に対する変化が重水素原子の拡散に関する情報を表していることは、図2に示す結果から明らかである。即ち図2では、室温および液体窒素温度近くのパラジウム標的に同じビーム条件で照射した時のproton yieldの違いを示している。この違いは、重陽子の温度による拡散の違いを反映しているものと思われる。次に反応陽子のエネルギースペクトルの一例をTiとPd標的に関して図3に示す。すでに述べたよう反応の運動学から反応陽子のエネルギーの値から反応を起こした重陽子のエネルギーが分かる。図3のエネルギースペクトルを一樣な深さで重陽子が分布している厚い重陽子のポリエチレン (CD₂)_n 標的からのエネルギースペクトルでわり算する事によってこれらの標的中の重陽子数の分布が得られる。その結果を図4に示す。ここで横軸1 channelは約100 Åの深さに対応する。図から分かるようにTiとPdで重陽子の分布が非常に異なっているのが分かる。チタンでは、重陽子の分布が飛程付近から表面まで指数的に変化しているが、パラジウムでは、飛程付近と表面にほぼ同じ程度分布しており、確かに重陽子の拡散が大きいことを示している。これらの例が示すように、放出陽子のエネルギー分布は、照射重陽子の振る舞いを観測する上で極めて有用な情報を与えてくれる。

5. まとめ

今回我々は、物質に重陽子ビームを連続的に照射しながら反応陽子の計数率およびそのエネルギースペクトルを測定する事によって、注入重陽子の深さ方向に関する分布の時間変化が観測される事を示した。この方法は原子核実験技術としては、ごく普通な方法ではあるがそこからは、極めて興味ある情報が得られる。この方法では、測定しようとする試料をいろいろな環境の下に設置する事はそれほど難しくはなく原子核実験技術の物性物理および材料工学等への新しい応用が期待できる。

今回の測定では、反応陽子のエネルギー検出器は、 $\theta=160^\circ$ に設置されそのエネルギー分解能は約30 keVであった。これは反応重陽子のエネルギー分解能になおすと約20 keVに対応し深さ方向に対しては約1000 Åの分解能に対応する。アニュラー型の検出器を用いる事によって $\theta\sim 180^\circ$ で反応陽子が検出でき運動学の関係から今回より深さ方向に関してより良い分解能が期待できる。今後さらに定量的な測定を行うことによって今回新しく開発した重陽子融合反応を利用した拡散の測定法の有用性を確立しその実用化を図りたい。

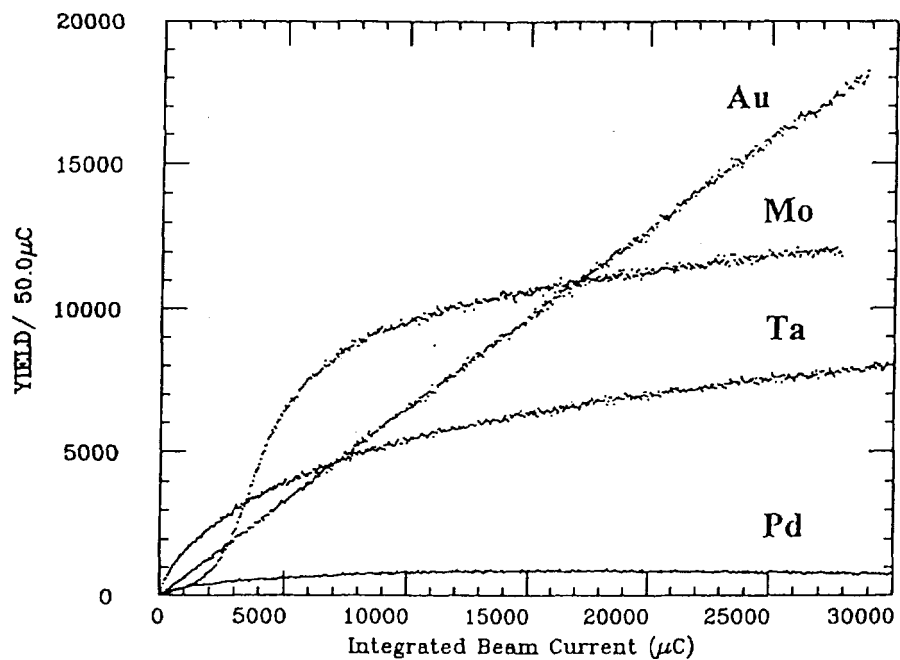


図1。金、モリブデン、タンタル、パラジウムに90 keV, 3 μ AのD⁻ビームを連続照射した時D(d, p)反応から放出された陽子の計数率のビーム照射量に対する変化。

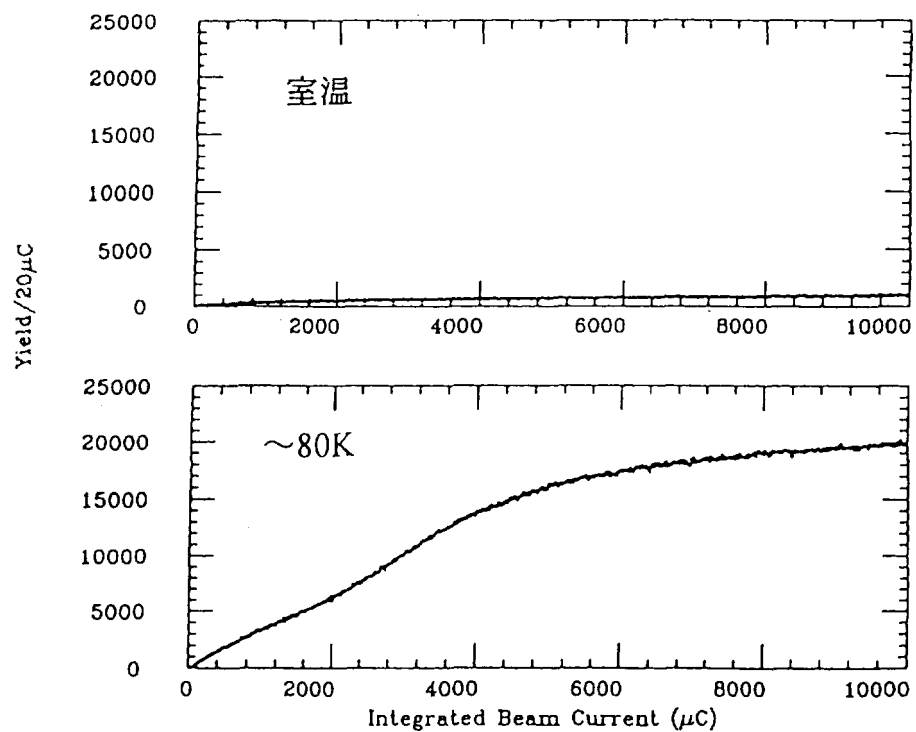


図2。パラジウムにD⁻ビームを室温および液体窒素付近の温度で連続照射した時D(d, p)反応から放出された陽子の計数率のビーム照射量に対する変化。

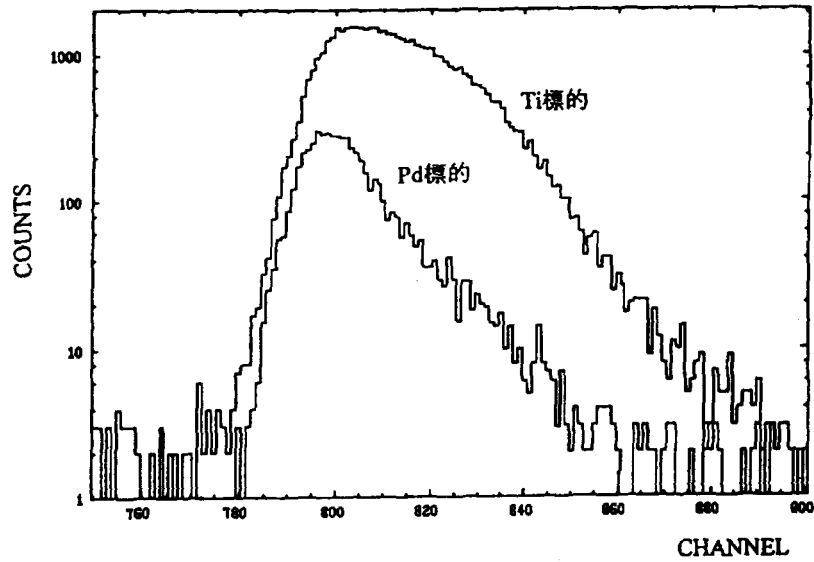


図3。チタンおよびパラジウムにDビームを照射したときD(d, p)T 反応からの反応陽子のエネルギースペクトル。

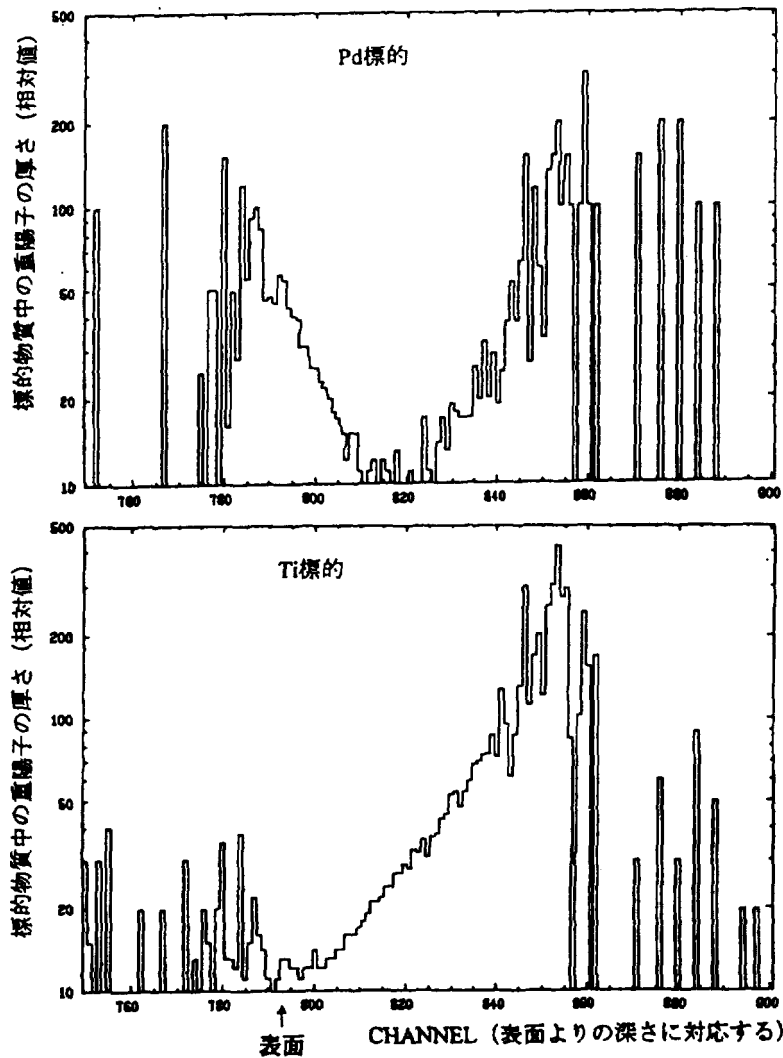


図4。チタンおよびパラジウム中における注入重陽子の深さ方向の分布。

タンデム加速器を用いた分子イオン加速 (II)

日本原子力研究所
放射線高度利用センター
斎藤勇一、水橋清、田島訓

はじめに

高エネルギークラスターイオンは、多数の原子がターゲットのオングストロームサイズの領域に同時に衝突するため、過渡現象として個々の原子が衝突するときより激しい相互作用が予想される。その結果生じる様々な新現象[1]及びそれらの材料開発への応用は新しい研究対象として魅力的になりつつある。例えば、クラスターとその単原子では同じ速度において物質中での阻止能に違いがあるという報告があり[2]、近接効果として機構の解明が急がれている。また、2つ以上の異なる原子から構成される異原子分子イオンを用いればターゲットの同位置に異なる原子の同時注入が可能となり、新材料等への応用が期待できる。

T I A R A 複合ビーム照射施設では、3 MV タンデム加速器 (9SDH-2) を用いて、クラスタービームを MeV エネルギー、nA 以上の電流で照射・注入実験に供給するための技術開発を行っており、すでに C_{2-8} 、 Si_{2-4} 、及び O_2 の 6 MeV への加速に成功している[3]。これらに加え、今回、 B_{2-4} と LiF の生成、加速を行った。

負クラスターイオン生成

負クラスターイオンは既存のセシウムスパッター型イオン源をそのまま用いて生成され、70 keV のエネルギーでタンデムに輸送される。試料カソードをセシウムがスパッターすることにより、原子、分子、クラスターと様々な質量のイオンがイオン源から引き出される。これらの割合は、物質そのものの性質とイオン源の運転状態（試料温度、スパッター電圧、試料形状等）により変化する。金属及び半導体はクラスターに成長しやすく、ホウ素については

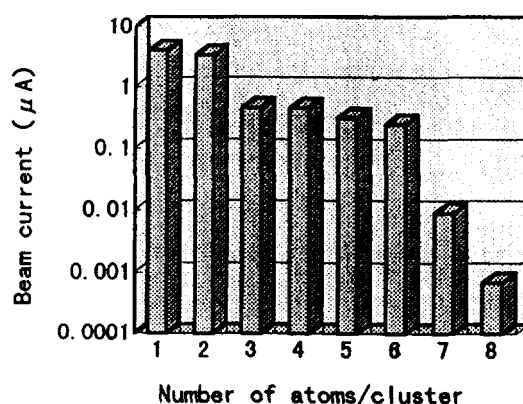


図1 Bクラスター質量分布

図1に示すように B_6 まで 100 nA 以上の電流が得られた。カソード試料はホウ化アルミ (nec 製ホウ素用カソード) を用い、またスパッター電圧は 6 kV である。

次に、異なる原子から構成される分子イオンを生成するためにフッ化リチウム (LiF) を試料に用いてテストを行った。イオン源から引き出されたビームは電流値が多い順に F (20 μ A)、 7 Li (660nA)、LiF (350nA)、 LiF_2 (100nA) である。ビーム強度の点から LiF_2 をタンデムに入射した。

クラスターイオン加速

負イオンはタンデム加速器中央部にある高電圧ターミナルに向かって加速され、ターミナル内の荷電変換セルで窒素ガスとの衝突により電子を失い正イオンとなり再び加速される。この衝突により、ほとんどのクラスターは原子イオン等に分解するが、窒素ガス圧を調整することにより、正クラスターイオンを得ることができる。現在のところ多価クラスターイオンは観測されておらず、すべて1価イオンである。加速電圧が3 MV (エネルギー6 MeV) のときのホウ素クラスタービーム電流値及びその生存確率と窒素ガス圧の関係をそれぞれ図2、3に示す。ここで、生存確率とは質量分析後の高エネルギークラスタービーム電流値を加速器入射前の低エネルギービーム電流値で除した値とし、タンデム加速器自体の透過効率も含まれる。また、ガス圧はタンク入り口直前のCCGでモニターしており、荷電変換部ではおおよそ4桁悪い。ビーム電流値の最大は窒素ガス圧 10^{-8} Torr 台にあり (単原子イオン加速のときは 10^{-7} Torr 台で運転)、 B_2 (64nA)、 B_3 (4.4nA)、及び B_4 (2.7nA) を得た。また、生存確率の最大値は、同じ原子数の他のクラスター (炭素、シリコン) と比べ最も良い値を得た。

フッ化リチウムについても同様な試みを行った。入射した LiF_2 はフアラダイ

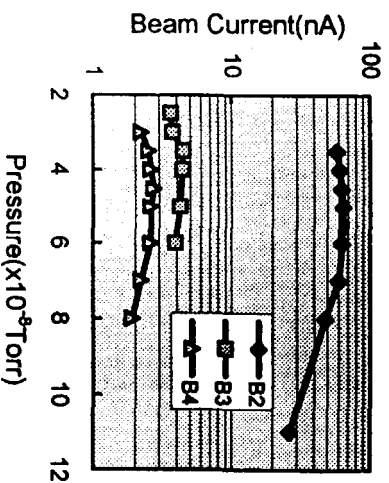


図2 加速された Bn イオンと荷電換

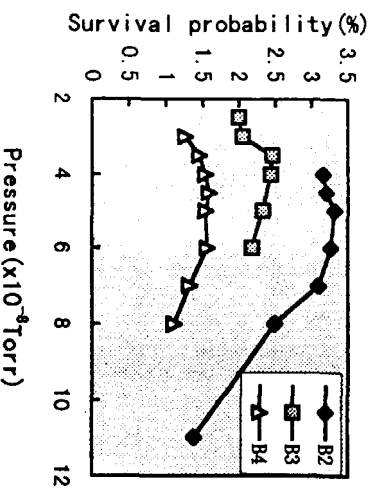


図3 Bn の生存確率とガス圧の関係

一カップでは計測されなかったが、その分解生成物の中にエネルギー4.7 MeVの LiF^{+1} が得られ、異原子分子イオン注入が可能となった。しかし、生存確率は最大でも0.4%と LiF_2 を加速器に入射したときに得られる LiF と窒素ガス圧の関係を図4に示す。ここで、例えば、4.7 MeVの LiF をシリコンに注入したとき、TRIMで飛程を計算すると、 Li (エネルギー: 1.27 MeV)は $3.3 \mu\text{m}$ 、 F (エネルギー: 3.44 MeV)は $2.9 \mu\text{m}$ となり注入深さに $0.4 \mu\text{m}$ の差が生じるので実際の注入のときは注意する必要がある。

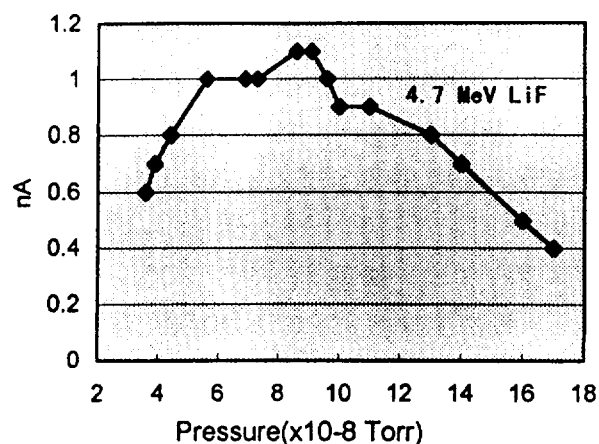


図4 LiF ビーム電流と荷電変換ガス圧との関係

まとめ

原研 TIARA 3 MV タンデム加速器を用いた分子・クラスターイオン加速に、新たに B_n ($n=2\sim 4$) 及び LiF を加えることができた。今後、さらに金属イオンクラスター及び組み合わせの異なる異原子分子イオンの発生・加速を試み、照射可能イオン種を増加させていく。また、荷電変換ガスの種類と生存確立の関係を調べるため、現在窒素を用いているガスの種類を変えて、加速実験を行う予定である。

参考文献

- [1] K. Baudin, A. Brunelle, M. Chabot, S. Della-Negra, J. Depauw, D. Gardès, P. Håkansson, Y. Le Beyec, A. Billebaud, M. Fallavier, J. Remillieux, J. C. Poizat, J. P. Thomas, Nucl. Instr. and Meth. B 94 (1994) 341-344
- [2] Ch. Tomaschko, D. Brandl, R. Kügler, Schurr, H. Voit, Nucl. Instr. Meth. B 103 (1995) 407-411
- [3] 斎藤、田島、高田、水橋、宇野、大越、中島 「第8回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」 報告集(名古屋大学) p. 32-35 (1995)

A Study of Reflex Tandem Accelerator

(タンデム加速器ビーム再加速についての考察)

九大理 中島孝夫 森信俊平、郷農靖之、相良建至
杉光強、御手洗志郎、中村裕之
池田伸夫、森川恒安

はじめに

平成7年度から公募の始まった科研費(COE形成基礎研究費)に、九大原子核実験グループとして名乗りをあげるべく、九大工学部、総理工の研究者も参加した研究者集団によって、九大タンデム加速器施設を基盤とした「発展性ある研究テーマとそれを可能にする実験設備」についての検討が進められている。独自性の高いCOEを形成するためにはタンデム加速器施設の能力を飛躍的に増大させ得るような実験設備の整備・改造もしくは斬新な技術開発が不可欠であるとの認識に基づき、様々なアイディアの提案とそれらの検討・調査がなされてきたが、ここでは“タンデムによるビーム再加速”についての考察の結果について報告する。

ビーム再加速の2つの方式

- 1) タンデム加速ビーム(1次ビーム)による核反応で生成された短寿命不安定核を負イオン化して、同じタンデムで再び加速する。
 - ・短寿命RIビームによる研究は未開拓の領域であり先駆的研究が可能である。
 - ・世界各地でこの種のイオン源の開発的研究が進みつつあり、情報が得られる。
 - ・得られる不安定核ビームによって天体核反応、核構造の研究を進める。
- 2) タンデム1次加速ビームに複数の電子を再結合させて電荷数を減じ(或いは負イオン化し)同じタンデムで再加速する。
 - ・ビーム強度は低下するにしても、ビームエネルギー領域が大きく広げられる。特に核分光学的研究においてはビーム強度が相当弱くても十分利用価値がある。

I ビーム循環方式

上記 1), 2) のビーム再加速を併立させるため、タンデムからの1次加速ビームを電磁石によって入射側に戻す方式を検討した(Fig.1 参照)。

A ビーム輸送系

① タンデム入射系

- ・1次イオンビーム用負イオン源は旧ヴァンデグラーフ加速器室に移設し、ビームバンチング装置を経た後、90度静電デフレクターによって2次ビームと合流させる。
- ・加速粒子に電子を付加して再加速を行う方式では入射ビーム軸上にエネルギーの大きく異なる2種のビームが併存するので、ビーム合流後のレンズ系は1次ビームの収束用に用い、これらによっては殆ど作用を受けない高エネルギーの2次ビームの為の収束レンズは合流前に置くことにする。

② 再加速ビームのタンデム加速管ビーム輸送の問題

- ・2) の方式では重イオンの場合、複数個の電子を付加したとしても負イオンビームとしてタンデムに入射することになる。この問題については、ビーム光学計算により入射ビームのエネルギーが荷電数当たりで10MeVを超える領域では、タンデム加速管のレンズ作用は非常に弱く働き、再加速ビームについてのタンデム高電圧部のストリッパまでのビーム輸送には全く問題が無いことが確かめられた。

またストリッパ通過後における後段加速管でのビーム輸送にも問題ないことが確認された。

③ タンデム出口部 (H E - s i d e) でのビーム分離

同一軌道でタンデム加速管から出てきた1次, 2次ビームは, それぞれタンデム入射部, ターゲット室へと導かれるが, 一般的に1次, 2次ビーム間の磁気剛性の差は想定するイオン種毎に異なり, またその値は比較的小さく, 限られた空間において電磁石によってビームを都合良く分離することには困難がある。

電子付加による再加速の場合について考察すると,

1次ビームのエネルギー値: $(Z1+1)V$ $Z1$: 荷電数 V : ターミナル電圧

2次ビームのエネルギー値: $(Z2+m+1)V$ $Z2$: 荷電数 m : 付加電子数

B ρ 比 (2次/1次) : $r = (Z1/Z2) \cdot ((Z2+m+1)/(Z1+1))^{1/2}$

ここで $m=2$ として, 水素, 炭素, 塩素を例として考えると,

p, d $r=1.414$ ($Z1 = Z2 = 1$)

C $r=1.021$ ($Z1=5, Z2=6$)

Cl $r=0.754$ ($Z1=8, Z2=15$)

となる。また, 静電デフレクターを用いての分離も考えられるが, この場合には非常な高電圧電場を要し実現困難である。

パルス化ビームと高周波電場による分離

タンデム入射部にビームバンチャーを設置することによって, タンデム出口部で数MHz周期, 1~2 ns幅のパルス化ビームを生成することが出来る。タンデム出口部にrf電場によるデフレクター電極を設置し, バンチング周期と同期した高周波高電圧を印加しておき, 2次ビーム通過時に電圧零, 2次ビーム通過時にピーク電圧となるようにビーム位相を設定することにより, 10KV/cm程度の電圧で, 第1図に示したようなビーム分離が可能である。

B 2次ビーム生成効率についての考察

① 電子再結合の効率

数10MeVのビームに電子を附加しての再加速が実用可能ではないかと考えるに至った出発点は, ラムシフト型偏極イオン源において 500eVの H^+ イオンが 10^{16} atms/cm²のCs蒸気中を通過するとき, 約15%のイオンが H^- となる事実である。仮にこのCsからの電子移行反応と自由電子捕獲の断面積が同程度であれば, タンデム加速後の H^+ イオンと同速度の電子ビームを併走させることによって10%以上の効率で H^- イオンビームを得ることが可能になる。20MeVの陽子の速度は大体10keVの電子に対応する。この陽子が 10^{15} particles/cm²の電子と10mの距離で出会うものとして, 必要となる電子ビームの電流値は950A/cm²となる。このような大電流電子ビームが可能であるかどうかは定かではないが, ビームパルス化による所要平均電流の低減化等の途も考えられ, 十分検討する価値があると考えられた。また, 電子ビームの所要電力は9.5MWと巨大な数値になるが, これは回収可能な電力である。

イオンによる自由電子捕獲の過程にはRadiative Recombination(RR)と Dielectric Recombination(DR) の二つのプロセスがあり, RR は相対エネルギー零で最大値をとり, 概ね Z^2/E に比例する, 一方DR は電子の自由状態と捕獲状態のエネルギー差 δE とイオンの励起エネルギー順位差が等しくなる条件で共鳴的に起こる。

イオンによる自由電子捕獲過程の効率（相良による調査の要約）

近年、クーラーリング実験等によって電子とイオンの衝突過程の本格的な研究が進められているとは云え、未だ解明の進んでいない研究分野であり、正確な効率の算定には困難がある。RR過程の断面積はイオンと電子の相対エネルギーに逆比例する量であり、相対エネルギーを0.1eV以下にすることは相当に困難であることを考慮すると、理論的な計算では断面積は、期待している 10^{-15}cm^2 より3桁以上小さい値となる。しかしこれまでに得られている実験値は一般的に理論値とは合わず数倍も大きい値を示している。またレーザー光入射により20倍以上の効率向上を報告している実験もある。一方、DR過程については幅の狭い個々の共鳴過程の集積した断面積であり、原子の種類、相対エネルギーの広がり等に依存する量であるが、実験データから推定すると、大体RRと同程度の捕獲効率に止まるものと考えられる。

イオンと電子の相対速度の広がりを極力抑え、レーザー等の助けを借り、且つ再加速ビームの相当な強度減少を覚悟すればこの方式の有用性を否定し去ることは出来ないが、現時点でのCOE計画への採用は思い止まざるを得ないという結論に達した。

② 短寿命RI負イオンビーム生成の効率

RI生成負イオン源としては表面電離型負イオン源、正イオン源+荷電変換による負イオンビーム生成、BLAKE型スパッター負イオン源等が考えられる。タンデムからの陽子ビーム或いは軽重イオンビームによる核反応生成核を、最も効率よく負イオン化しうる方式を検討中であるが本稿では省略する。

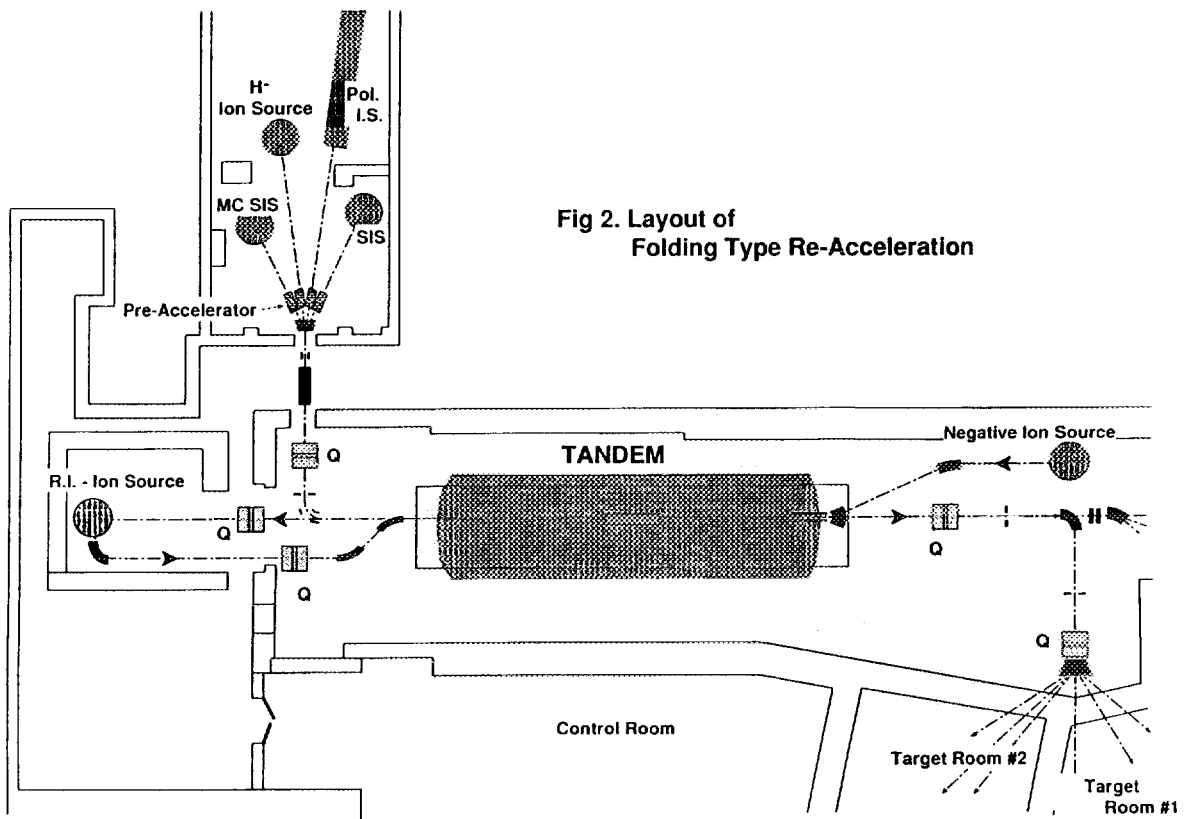
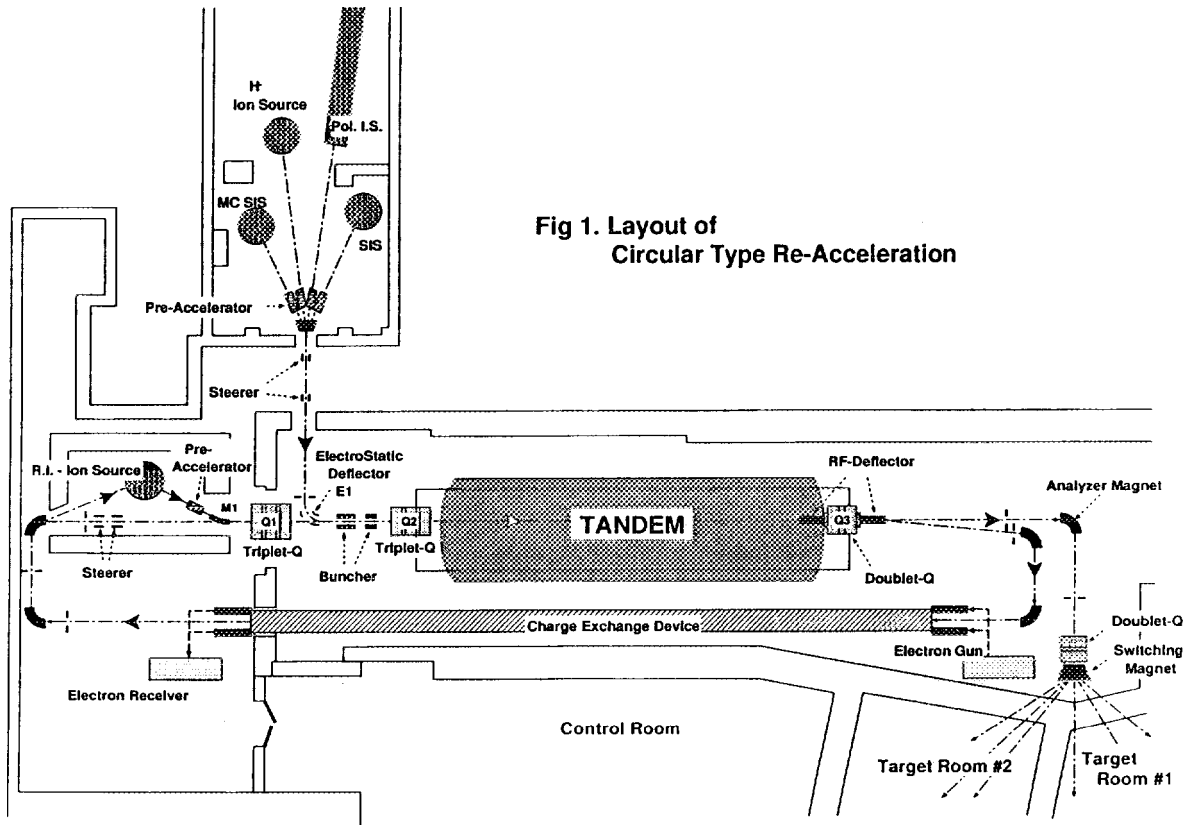
II 折り返し方式

タンデム加速器は基本的に高電圧電極に対して左右対称の構造になっており、何れの方からのビーム入射に対しても同様に加速が行われる。もし、前述の長大な荷電変換部が必要なければ、加速ビーム分離等に問題のある上記の循環方式を採らなくとも、第2図に示すようなビームを折り返す方式が可能である。この場合1次ビームのイオン源は、通常使用でのタンデム高エネルギー側に設置されることになる。

実験が必要とする強度と質を備えたRIビームを生み出すためには多くの技術開発を要するが、再加速の方式としては本質的な問題は少なく、現在、この方式での計画実現を目指している。

おわりに

九州大学は福岡市内の元岡地区へのキャンパス移転を決定しており、約十年後には原子核実験室も新キャンパスに移ることになる。新キャンパスでは、かねて計画の新しい加速器実験施設（粒子線応用研究センター）を現実のものとし、二十一世紀における西日本地区での加速器利用科学研究の中核としての飛躍的發展を望みたい。そのためには現状での研究活力・能力の更なる向上を図り、実りある研究成果を生み出してゆかなければならない。この目標が、私達が現在COE科研費獲得にむけて努力している原動力である。



タンデム研究会参加者名簿

No	氏 名	勤 務 先	〒	住 所
1	三水 祐一	(株)トーキン 東京支店第三営業部	107	港区北青山 2-5-8 ハザマビル16F
2	小西 郁夫	(株)島津製作所	101	千代田区神田錦町 1-3
3	畠中 達也	(株)東芝 研究開発センター 環境研	210	川崎市幸区小向東芝町 1
4	岡田 敏秀	(株)伯東	160	新宿区新宿 1-1-13
5	高木	(株)伯東	160	新宿区新宿 1-1-13
6	牧田 肇	(株)伯東	160	新宿区新宿 1-1-13
7	鈴木 佐江子	(株)伯東 システム第一事業部	160	新宿区新宿 1-1-13
8	Craig A Schultz	(株)伯東 システム第一事業部営業二部	160	新宿区新宿 1-1-13
9	庵下 稔	(株)伯東 システム第一事業部営業二部	160	新宿区新宿 1-1-13
10	金子 昌史	(株)伯東 システム第一事業部営業二部	160	新宿区新宿 1-1-13
11	神保 健一	(株)伯東 システム第一事業部営業二部	160	新宿区新宿 1-1-13
12	中川 靖広	(株)伯東 システム第一事業部営業二部	160	新宿区新宿 1-1-13
13	井上	(有)光信理化学製作所	171	豊島区池袋本町 1-39-2
14	菊池 誠	(有)光信理化学製作所	171	豊島区池袋本町 1-39-2
15	小平 彰	(有)光信理化学製作所	171	豊島区池袋本町 1-39-2
16	渡辺 寛	(有)光信理化学製作所	171	豊島区池袋本町 1-39-2
17	羽田 尚志	宇宙開発事業団	305	つくば市千現 2-1-1
18	松崎 一浩	宇宙開発事業団 要素技術研究部電子部 品技術研究室	305	つくば市千現 2-1-1
19	松田 純夫	宇宙開発事業団 要素技術研究部電子部 品技術研究室	305	つくば市千現 2-1-1
20	H Van Oosterhout	丸文株式会社	103	中央区日本橋大伝馬町 8-1
21	高久 雄一	丸文株式会社	103	中央区日本橋大伝馬町 8-1
22	村越 義修	丸文株式会社 科学機器部	103	中央区日本橋大伝馬町 8-1
23	中村 正信	京都大学理学研究科物理学第二教室	606	京都市左京区北白川追分町
24	高橋 清二	京都大学理学部物理 タンデム加速器実 験棟	606	京都市左京区北白川追分町
25	中村 裕之	九州大学 理学部	812	福岡市東区箱崎 6-10-1
26	中島 孝夫	九州大学 理学部物理原子核実験室	812	福岡市東区箱崎 6-10-1

タンデム研究会参加者名簿

No	氏 名	勤 務 先	〒	住 所
27	田中 敦	国立環境研究所	305	つくば市小野川 16-2
28	久米 博	国立環境研究所 化学環境部	305	つくば市小野川 16-2
29	熊本 雄一郎	国立環境研究所 化学環境部	305	つくば市小野川 16-2
30	柴田 康行	国立環境研究所 化学環境部	305	つくば市小野川 16-2
31	米田 穰	国立環境研究所 化学環境部	305	つくば市小野川 16-2
32	西原 善明	住重試験検査(株) サイクロトン利用技術部	799-13	愛媛県東予市今在家 1501
33	熊谷 正夫	神奈川高度技術支援財団	213	川崎市高津区坂戸 3-2-1 K S P 内
34	松岡 健次	大阪大学理学部 原子核実験施設	560	大阪府豊中市待兼山町 1-1
35	皆倉 輝志	筑波大学 加速器センター	305	つくば市天王台 1-1-1
36	高橋 努	筑波大学 加速器センター	305	つくば市天王台 1-1-1
37	石井 聡	筑波大学 加速器センター	305	つくば市天王台 1-1-1
38	石原 豊之	筑波大学 加速器センター	305	つくば市天王台 1-1-1
39	大島 弘行	筑波大学 加速器センター	305	つくば市天王台 1-1-1
40	大和 良広	筑波大学 加速器センター	305	つくば市天王台 1-1-1
41	田島 義一	筑波大学 加速器センター	305	つくば市天王台 1-1-1
42	島 邦博	筑波大学 加速器センター	305	つくば市天王台 1-1-1
43	木村 博美	筑波大学 加速器センター	305	つくば市天王台 1-1-1
44	田岸 義宏	筑波大学 物理学系	305	つくば市天王台 1-1-1
45	関口 弘幸	電子技術総合研究所	305	つくば市梅園 1-1-1
46	西島 俊二	電子技術総合研究所	305	つくば市梅園 1-1-1
47	新井 栄一	東京工業大学	145	大田区北千束 1-64-10
48	阿部 悟	東京工業大学 原子炉工学研究所	152	目黒区大岡山 2-12-1
49	作美 明	東京工業大学 原子炉工学研究所	152	目黒区大岡山 2-12-1
50	小栗 慶之	東京工業大学 原子炉工学研究所	152	目黒区大岡山 2-12-1
51	登坂 健一	東京工業大学 原子炉工学研究所	152	目黒区大岡山 2-12-1
52	福田 一志	東京工業大学 原子炉工学研究所	152	目黒区大岡山 2-12-1

タンデム研究会参加者名簿

No	氏 名	勤 務 先	〒	住 所
53	安本 勝	東京大学 原子力研究総合センター	113	東京都文京区弥生 2-11-16
54	岩井 岳夫	東京大学 原子力研究総合センター	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-22
55	柴田 裕実	東京大学 原子力研究総合センター	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-22
56	小林 紘一	東京大学 原子力研究総合センター	113	東京都文京区弥生 2-11-16
57	尾亦 孝男	東京大学 原子力研究総合センター	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-22
58	鳴井 誠	東京大学 原子力研究総合センター	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-22
59	小島 一二	東京電子株式会社	141	品川区東五反田 1-21-10
60	金子	日新ハイボルテージ(株)	371	群馬県前橋市総社町総社 2121
61	岩本 英司	日新ハイボルテージ(株) MeV技術部	371	群馬県前橋市総社町総社 2121
62	高山 博史	日新ハイボルテージ(株) MeV技術部	371	群馬県前橋市総社町総社 2121
63	木村 寿男	日新ハイボルテージ(株) MeV技術部	371	群馬県前橋市総社町総社 2121
64	坂本 修	日新電機(株) 開発営業部	101	千代田区神田和泉町1 神田和泉町ビル
65	野口 美德	日新電機(株) 開発営業部	101	千代田区神田和泉町1 神田和泉町ビル
66	宇佐美 力	日本アドバンステクノロジー(株) 東海事業所	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
67	小林 千明	日本アドバンステクノロジー(株) 東海事業所	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
68	荒巻 能史	日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室	035	むつ市港町 4-24
69	宇野 定則	日本原子力研究所 高崎研究所 イオン加速器管理課	370-12	群馬県高崎市綿貫町 1233
70	高田 功	日本原子力研究所 高崎研究所 イオン加速器管理課	370-12	群馬県高崎市綿貫町 1233
71	斎藤 勇一	日本原子力研究所 高崎研究所 イオン加速器管理課	370-12	群馬県高崎市綿貫町 1233
72	酒井 卓郎	日本原子力研究所 高崎研究所 イオン加速器管理課	370-12	群馬県高崎市綿貫町 1233
73	水橋 清	日本原子力研究所 高崎研究所 イオン加速器管理課	370-12	群馬県高崎市綿貫町 1233
74	大越 清紀	日本原子力研究所 高崎研究所 イオン加速器管理課	370-12	群馬県高崎市綿貫町 1233
75	田島 訓	日本原子力研究所 高崎研究所 イオン加速器管理課	370-12	群馬県高崎市綿貫町 1233
76	根本 伝次郎	日本原子力研究所 高崎研究所 イオン加速器管理課	370-12	群馬県高崎市綿貫町 1233
77	田中 隆一	日本原子力研究所 高崎研究所 放射線高度利用センター	370-12	群馬県高崎市綿貫町 1233
78	平尾 敏雄	日本原子力研究所 高崎研究所 技術開発課	370-12	群馬県高崎市綿貫町 1233

タンデム研究会参加者名簿

No	氏 名	勤 務 先	〒	住 所
79	小林 勝利	日本原子力研究所 東海研究所 R I 製 造	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
80	小沢 皓雄	日本原子力研究所 東海研究所 エレク トロニクス課	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
81	松崎 誼	日本原子力研究所 東海研究所 エレク トロニクス課	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
82	美留町 厚	日本原子力研究所 東海研究所 エレク トロニクス課	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
83	阿部 信市	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
84	花島 進	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
85	吉田 忠	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
86	金沢 修平	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
87	月橋 芳広	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
88	松田 誠	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
89	神田 将	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
90	石崎 暢洋	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
91	荘司 時雄	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
92	大内 勲	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
93	竹内 末広	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
94	田山 豪一	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
95	堀江 活三	日本原子力研究所 東海研究所 加速器 管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
96	須貝 宏行	日本原子力研究所 東海研究所 研究開 発課	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
97	左高 正雄	日本原子力研究所 東海研究所 固体物 理研究室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
98	光岡 真一	日本原子力研究所 東海研究所 重イオ ン未知重核研究グループ	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
99	池添 博	日本原子力研究所 東海研究所 重イオ ン未知重核研究グループ	319-11	那珂郡東海村 白方白根 2-4
100	小原 和弘	日本原子力研究所 東海研究所 分析セ ンター	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
101	永井 由紀	菱栄テクニカ㈱	305	つくば市千現 2-1-1 つくば宇宙セ ンター電子機器部品試験棟内
102	広瀬 孝幸	菱栄テクニカ㈱	305	つくば市千現 2-1-1 つくば宇宙セ ンター電子機器部品試験棟内
103	大平 秀信	菱栄テクニカ㈱	305	つくば市千現 2-1-1 つくば宇宙セ ンター電子機器部品試験棟内
104	斎藤 和雄	名古屋工業技術研究所 融合材料部	462	名古屋市北区平手町 1-1

タンデム研究会参加者名簿

No	氏 名	勤 務 先	〒	住 所
105	中村 俊夫	名古屋大学 年代測定資料研究センター	464-01	名古屋市千種区不老町
106	小田 寛貴	名古屋大学 理学部	464-01	名古屋市千種区不老町

タンデム加速器及びその周辺技術の研究会

開催状況

第1回	日本原子力研究所・東京工業大学	1988年7月 6日～ 7日
第2回	東京工業大学原子炉研究所	1989年7月13日～14日
第3回	京都大学理学部	1990年7月19日～20日
第4回	日本原子力研究所高崎研究所	1991年7月11日～12日
第5回	筑波大学加速器センター	1992年7月 9日～10日
第6回	九州大学理学部	1993年7月12日～13日
第7回	東京大学原子力研究総合センター	1994年6月28日～29日
第8回	名古屋大学年代測定資料研究センター	1995年7月 6日～ 7日
第9回	日本原子力研究所東海研究所	1996年7月 4日～ 5日
第10回	国立環境研究所	1997年（予定）

タンデム研究会世話人名簿

No	氏 名	勤 務 先	〒	住 所
1	中村 正信	京都大学理学研究科物理学第二教室	606	京都市左京区北白川追分町
2	森信 俊平	九州大学 理学部物理原子核実験室	812	福岡市東区箱崎 6-10-1
3	中島 孝夫	九州大学 理学部物理原子核実験室	812	福岡市東区箱崎 6-10-1
4	柴田 康行	国立環境研究所 化学環境部	305	つくば市小野川 16-2
5	古野 興平	筑波大学 加速器センター	305	つくば市天王台 1-1-1
6	石原 豊之	筑波大学 加速器センター	305	つくば市天王台 1-1-1
7	小栗 慶之	東京工業大学 原子炉工学研究所	152	目黒区大岡山 2-12-1
8	羽鳥 聡	東京大学 原子力研究総合センター	113	東京都文京区弥生 2-11-16
9	柴田 裕実	東京大学 原子力研究総合センター	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-22
10	小林 紘一	東京大学 原子力研究総合センター	113	東京都文京区弥生 2-11-16
11	田中 隆一	日本原子力研究所 高崎研究所 放射線高度利用センター	370-12	群馬県高崎市綿貫町 1233
12	吉田 忠	日本原子力研究所 東海研究所 加速器管理室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
13	峰原 英介	日本原子力研究所 東海研究所 自由電子レーザー研究室	319-11	那珂郡東海村白方白根 2-4
14	中村 俊夫	名古屋大学 年代測定資料研究センター	464-01	名古屋市千種区不老町