

# Annual Report of NIES-TERRA

Vol. 2, 1998

第10回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会

報 告 書

1997年7月7日～8日

国立環境研究所タンデム加速器分析施設レポート

NIES-TERRA

National Institute for Environmental Studies

Tandem accelerator for Environmental Research and Radiocarbon Analysis

『第10回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会』報告集をここにお届けします。第10回研究会は、1997年7月7日～8日の2日間にわたり、茨城県つくば市の国立環境研究所大山記念ホールにて開催されました。公共の交通機関が少なく交通の便・宿泊の便の悪いところでの開催にもかかわらず、多数の皆様のご参加と33題と多数のご発表をいただき、実行委員一同感謝しております。

例年にならい、申し込みいただいたご講演を、加速器の現状と将来計画、加速器周辺技術、イオンビーム応用の3つの主題にわけ、あわせて6つのセクションに分かれて2日間にわたってご発表いただきました。また、私共の研究所の加速器施設見学、並びに電気自動車の試乗会等をあわせて開催いたしました。予想を上回る多数の講演申し込みをいただき、講演時間の割り振りで見学会等の時間割の調整に苦心いたしました。全体的に窮屈な日程になってしまったことをお詫び申し上げます。

私共の研究所に加速器質量分析装置を中心とするタンデム加速器分析施設の設置が決まったのは平成5年度のこと、平成6年の第7回研究会から本研究会に参加させていただくこととなりました。以来、タンデム加速器の基礎から応用にいたる様々な面で先行諸機関のこれまでの貴重な経験・工夫などをうかがうことができ、当研究所の加速器施設並びに関連研究の立ち上げに様々な形で生かすことができたと思っております。そうした感謝の気持ちを表す意味もあり、本年度の研究会の幹事を引き受けさせていただきました。いろいろと不慣れな点、至らない点が多く、皆様にご迷惑をおかけした点多々あるのではないかと恐れます。また、何人かの方からわかりやすい色刷りの原稿をお送りいただきましたが、予算の都合で白黒印刷にさせていただきました。これらの点につき、深くお詫び申し上げます。

今回の第11回研究会は、東京工業大学原子炉工学研究所にお世話いただくことになりました。多数の方々にご参加いただき、これまでも増して盛んな研究会となることを祈念しております。

1998年2月

研究会担当世話人

国立環境研究所 化学環境部 動態化学研究室 柴田康行  
研究会実行委員

動態化学研究室 田中 敦、米田 穰  
計測技術研究室 久米 博

# 第10回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会

1997年7月7日、8日

於 国立環境研究所 大山記念ホール

## 目次

### 加速器の現状と将来計画 I

|   |  |
|---|--|
| 筑波大タンデム加速器の現状 ----- 1<br>(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<br>高橋 努、大和良広、皆倉輝志、小松原哲郎、島 邦博<br>静間俊行、古野興平   |
| 国立環境研究所タンデム加速器の現状 ----- 6<br>(国立環境研究所)                            | 久米 博、柴田康行、田中 敦、米田 穰、植弘崇嗣<br>森田昌敏、熊本雄一郎*  |
| 九大タンデム加速器の現状 -----10<br>(九大理)                                     | 中島孝夫、森信俊平、郷農靖之、相良建至、杉光 強<br>御手洗志郎、中村裕之、池田伸夫、森川恒安、古賀義博<br>前田豊和、落石宏之   |
| 東大タンデム加速器 MALT の現状 特に AMS と PIXE について ----- 13<br>(東大原子力研究総合センター) | 小林絃一、羽鳥 聡、中野忠一郎、春原陽子、山下 博  |
| 超高速微粒子 (ダスト) 加速実験計画 ----- 22<br>(東大ほか)                            | 柴田裕実、小林絃一、岩井岳夫、羽鳥 聡、西村民雄、<br>鳴井 誠、尾亦孝男 (東大原子力研究総合センター)<br>佐々木晶、濱辺好美 (東大理)<br>藤原 顕、矢野 創、長谷川直 (宇宙科学研・惑星研究系)<br>大橋英雄 (東京水産大・水産)<br>野上謙一 (獨協医大・物理) |
| 京大タンデム加速器の現状 ----- 24<br>(京大理)                                    | 中村正信、村上哲也、與曾井優、松本 博、高橋清二<br>広瀬昌憲、今井憲一  |

### 加速器の現状と将来計画 II

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| TIARA 静電加速器施設の現状 ----- 28<br>(原研高崎) | 田島 訓、高田 功、水橋 清、宇野定則、大越清紀<br>中嶋佳則、斉藤勇一、石井保行、酒井卓郎、神谷富裕                   |
| 原研タンデム加速器の現状 ----- 32<br>(原研東海)     | 吉田 忠、神田 将、竹内末広、花島 進、荘司時雄<br>大内 勲、堀江活三、月橋芳広、阿部新市、金沢修平<br>石崎伸洋、田山 豪、松田 誠 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 原研・むつタンデトロン加速器分析施設の現状 -----           | 35 |
| (原研むつ事業所) 水島俊彦、郡司勝文、荒巻能史、山本忠利         |    |
| 東濃地科学センターにおけるタンデム型加速器導入計画 -----       | 38 |
| (動燃東濃地科学センター) 伊藤 茂、徐 勝、阿部雅人、渡辺雅人、岩月輝希 |    |
| 東工大原子炉研の粒子線加速器計画 -----                | 41 |
| (東工大原子炉研) 小川雅生、小栗慶之、服部俊幸、堀岡一彦、志甫 諒    |    |

### 加速器周辺技術 I

|   |    |
|---|----|
| ケーブルのノイズ対策 -----  | 43 |
| (東大原子力研究総合センター) 安本 勝  |    |
| 大容量メモリーを搭載した PC による多チャンネル高速同時検出システムの開発 -----                  | 47 |
| (原研高崎ほか) 酒井卓郎、内藤 豊、濱野 毅、平尾敏雄、神谷富裕<br>(原研高崎)                   |    |
| 室園啓介、井上淳一、松山成男、岩崎 信、石井慶造<br>(東北大工)                            |    |
| 環状デュオプラズマトロンを用いたイオンビーム間の衝突による T-D 反応中性子源の考案 ---               | 50 |
| 磯矢 彰  |    |
| 静電加速器による低エネルギー大電流電子ビームの加速及び遠赤外域から硬 X 線域までの<br>大強度電磁波の発生 ----- | 56 |
| (原研東海) 峰原英介   |    |
| 原研重イオンマイクロビームシングルイオンヒット実験 -----                               | 60 |
| (原研高崎) 神谷富裕、酒井卓郎、内藤 豊、濱野 毅、平尾敏雄                               |    |
| 原研タンデム加速器の並行処理制御システムの現状 -----                                 | 64 |
| (原研東海) 花島 進   |    |
| 吹き込み型ガスストリッパに関する基礎実験 -----                                    | 68 |
| (九大理) 相良建至、緒方研太郎、中村雅子、占部晴樹、鶴田 薫                               |    |

### イオンビーム応用 I

|  |    |
|--|----|
| 原研・むつ AMS を用いた研究計画 -----                             | 72 |
| (原研むつ事業所) 荒巻能史、水島俊彦、山本忠利                             |    |
| 京大理タンデムにおける AMS の現状 -----                            | 76 |
| (京大理ほか) 松本 博、中村正信、廣瀬昌憲、田澤雄二 (京大理)<br>荻野晃也、船場潤之 (京大工) |    |
| $^{14}\text{C}$ 年代測定用鉄試料からの湿式炭素抽出法 -----             | 80 |
| (名大ほか) 小田寛貴、中村俊夫 (名大年代測定資料研究センター)<br>古川路明 (四日市大)     |    |
| NIES-TERRA における AMS 研究の現状と将来計画 -----                 | 84 |
| (国立環境研究所) 柴田康行、熊本雄一郎*、米田 稔、久米 博、田中 敦<br>植弘崇嗣、森田昌敏    |    |

## 加速器周辺技術Ⅱ

|  |                          |
|--|--------------------------|
| Beam Bunching System -----               | 88                       |
| (九大理)                                    | 中島孝夫、董裕明、前田豊和            |
| イオンビーム・プラズマ相互作用測定のためのビームパルス化装置の開発 -----  | 93                       |
| (東工大原子炉研)                                | 渡辺 武、作美 明、岡崎 永、柴田 恭、小栗慶之 |
| タンデム・ブースターにおける常用範囲外低速入射重イオンの加速の可能性 ----- | 97                       |
| (原研東海)                                   | 竹内末広                     |

## 加速器周辺技術Ⅲ

|                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| マイクロクラスターイオンビームの開発 -----          | 101                      |
| (原研高崎)                            | 斉藤勇一、水橋 清、酒井卓郎、神谷富裕、田島 訓 |
| 超マイクロイオンビーム形成技術の開発 -----          | 105                      |
| (原研高崎)                            | 石井保行、磯矢 彰、田中隆一           |
| 原研タンデム加速器のターミナル ECR イオン源の開発 ----- | 109                      |
| (原研東海)                            | 松田 誠、竹内末広、小林千明*          |

## イオンビーム応用Ⅱ

|  |   |
|--|---|
| 宇宙用シリコン太陽電池に対する低エネルギー高線量プロトン照射実験 ----- | 112   |
| (宇宙開発事業団ほか)                            | 松田純夫、久松 正 (宇宙開発事業団)<br>中尾哲也 ((株)エー・イー・エヌ)<br>森田洋右、大島 武、梨山 勇 (原研高崎)                              |
| 結晶 Si におけるイオンビーム照射効果 -----             | 115   |
| (筑波大物理)                                | 片淵竜也、河地有木、山田直樹、田岸義宏   |
| 宇宙用パワー MOSFET の開発と高エネルギー加速器の利用 -----   | 119   |
| (宇宙開発事業団ほか)                            | 修行新一、松崎一浩、杉本憲治、米丸充規、鈴木隆博<br>松田純夫 (宇宙開発事業団)<br>平尾敏雄、梨山 勇 (原研材料開発部)<br>廣瀬孝幸、大平秀春、永井由紀 (菱栄テクニカ(株)) |
| プラズマ中の MeV イオンビームの阻止能測定 -----          | 123   |
| (東工大原子炉研)                              | 小栗慶之、作美 明、岡崎 永、渡辺 武、柴田 恭<br>小川雅生  |
| SOI 中に生成した収集電荷の測定について -----            | 127   |
| (原研高崎ほか)                               | 平尾敏雄、酒井卓郎、濱野 毅、梨山 勇 (原研高崎)<br>松田純夫、根本規生 (宇宙開発事業団)   |

# 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ベトロ) は、設置以来 22 年間運転を続けている。運転時間の合計は 1997 年 3 月 31 日現在で 65,037 時間になる。ここでは 1996 年度 (平成 8 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。また 定期整備時に見つかった修理箇所についても述べる。その他 平成 8 年度に加速電圧 1 MV のタンデトロンを管理換えして設置し、ビーム取り出し等の調整を行い平成 9 年 5 月 7 日に最初のビームを得ることが出来た。これで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なる。これらに就いても報告する。

## 2. 1996 年度の運転状況

加速器の運転総時間は 3215 時間であり、その内イオン加速時間は 2512 時間 (78%) 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) 保守用ゴンドラの定期整備および検査。2) 一般空調機 (120t/day) の改修工事を行った為である。8 月の夏期停止期間後も好調な運転が続いた。9 月の減少は利用申込みが少なかったためである。3 月は定期・点検整備のため停止した。平成 8 年度は運転開始以来はじめて 1 年間 (3215 時間) 途中でタンクを開けて修理することなく運転が継続できた。使用ターミナル電圧が 11.0 MeV 以下が多かったからであろう。しかし 後の故障修理の項で述べるが主タンクを開けて点検したら損失箇所が通常より多く、途中の 2000 時間前後で一度点検整備すべきだと反省した。

図 1. 月別加速器運転時間

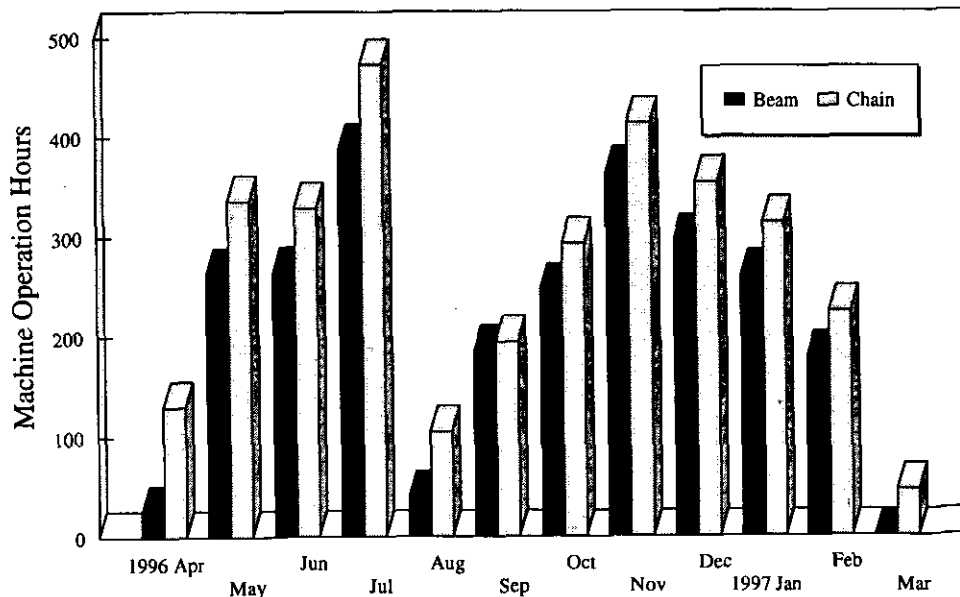
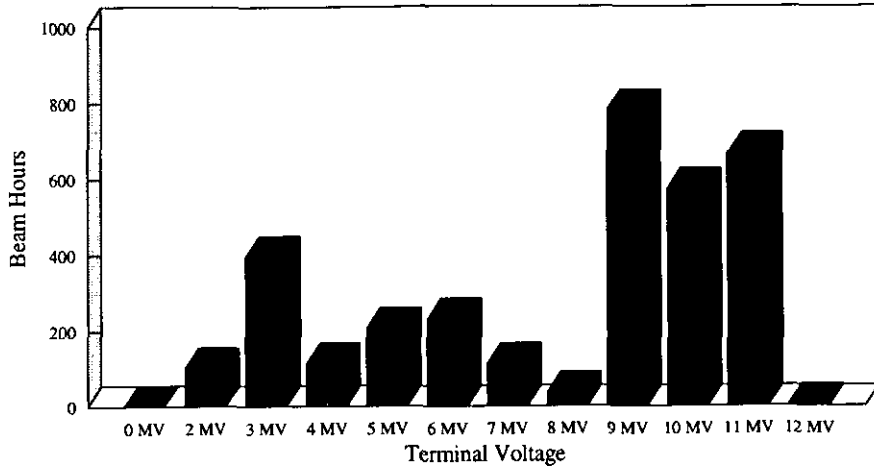


図2. に「加速電圧別イオン加速時間」を示した。加速器は好調であった。1236時間使用した10MV以上は、原子核実験グループ（偏極重陽子やガンマ線分光実験）で38%を占めている。9MVおよび6MV付近は、放射線物理（イオン照射や2次電子分析）やAMSに使用された。2～3MV付近はPIXEやRBSの実験に使用された。

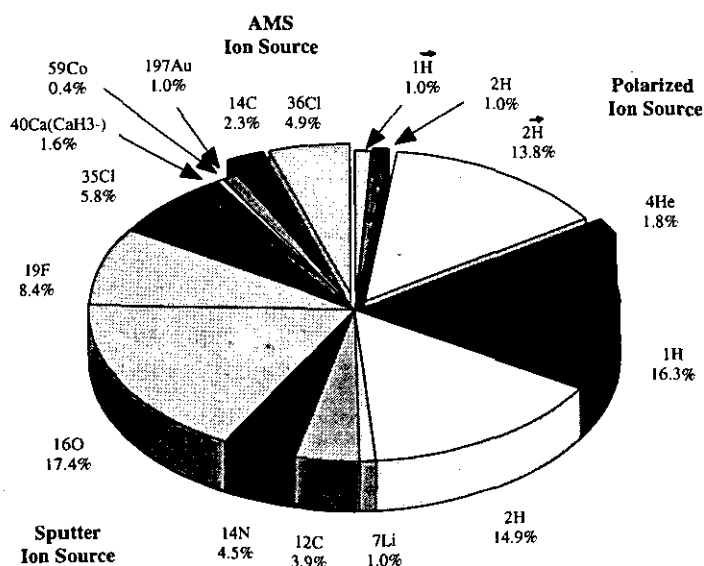
図2. 加速電圧別イオン加速時間



### 3. イオン源

共同利用に使用している3台のイオン源の使用状況を図3. に「加速イオン別運転時間比」で示した。軽イオン源（偏極）は17.6%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75.2%を占めている。取り出しイオンは陽子、重陽子からコバルト、金まで12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。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

図3. 加速イオン別運転時間比



ムが出ている。その他に加速器質量分析用イオン源も新設され7.2%の使用で、ビームは炭素14および塩素36が使用された。

#### 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。昨年より分析の利用者が増加した反面、核物理および放射線物理の利用者が減少した。

表2. で定期保守の他に「一般空調機」の更新をした。故障修理は0.8%、電圧コンデショニングは8.8%であった。

表1. 分野別使用状況

|           |      |       |
|-----------|------|-------|
| 核物理       | 74日  | 20.3% |
| 検出器開発     | 16日  | 4.4%  |
| 放射線物理     | 33日  | 9.1%  |
| 分析 (PIXE) | 11日  | 3.0%  |
| 分析 (AMS)  | 28日  | 7.7%  |
| 学生実験      | 2日   | 0.5%  |
| 生物照射      | 4日   | 1.0%  |
| 合計        | 168日 | 46%   |

表2. 加速器保守等

|               |      |       |
|---------------|------|-------|
| 定期保守, 一般空調改修  | 37日  | 10.2% |
| 電圧コンデショニング    | 32日  | 8.8%  |
| 故障修理          | 3日   | 0.8%  |
| イオン源, 分析電磁石切替 | 30日  | 8.2%  |
| 点検日/実験準備      | 11日  | 3.0%  |
| 停止日 (休日を含む)   | 84日  | 23.0% |
| 合計            | 197日 | 54%   |

#### ・利用概況および実績

|          |                |         |        |     |
|----------|----------------|---------|--------|-----|
| 加速器総運転時間 | 3215時間         | イオン加速時間 | 2512時間 | 78% |
| 共同利用者数   | 428名           |         |        |     |
| 新規採用テーマ数 | 5テーマ           |         |        |     |
| 利用延べ数    | 75テーマ, 1922人・日 |         |        |     |
| 発表論文数    | 76編            |         |        |     |
| 口頭発表数    | 57編            |         |        |     |

#### 5. 故障修理

平成8年度は主にターミナル電圧10.5MV以下が使用出来れば共同利用実験が出来たので、1年間主タンクを開けずに3215時間運転を継続した。

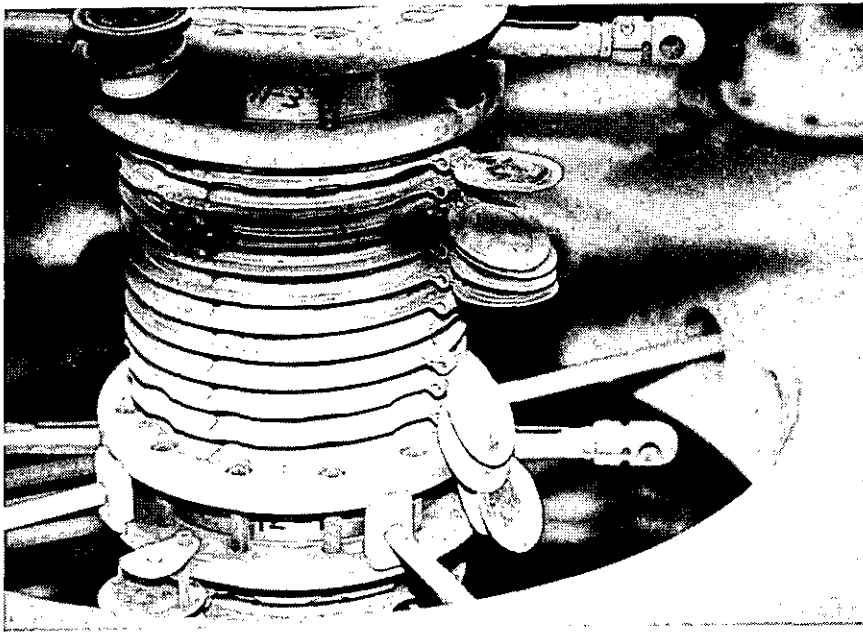
しかし 運転中にイオン源側から数えて11番目のユニットに「異常あり」はショーティング・ロッド操作で確認できていたが10.5MV以下での運転には支障がなかったのでそのまま使用した。タンクを開ける前の予想では「加速管のコロナ針が1~2枚垂れ下がっている程度、その他」だと思っていた。

故障1:ところが3月の定期整備で見つけた11ユニットのコロナ針の脱落状況は写真1. で判るように予想以上であった。このような状況で電位分布の乱れがあっても、よく10.5MVの電圧が維持できたと思う。22年間の運転経験で初めてのことである。

故障場所は#11-3-1~11である。写真1. で判るようにこの故障は11個のコロナ針中9個が取り付け不良になり、その内3個が脱落している。この他にもコロナ針が1枚垂れ下が



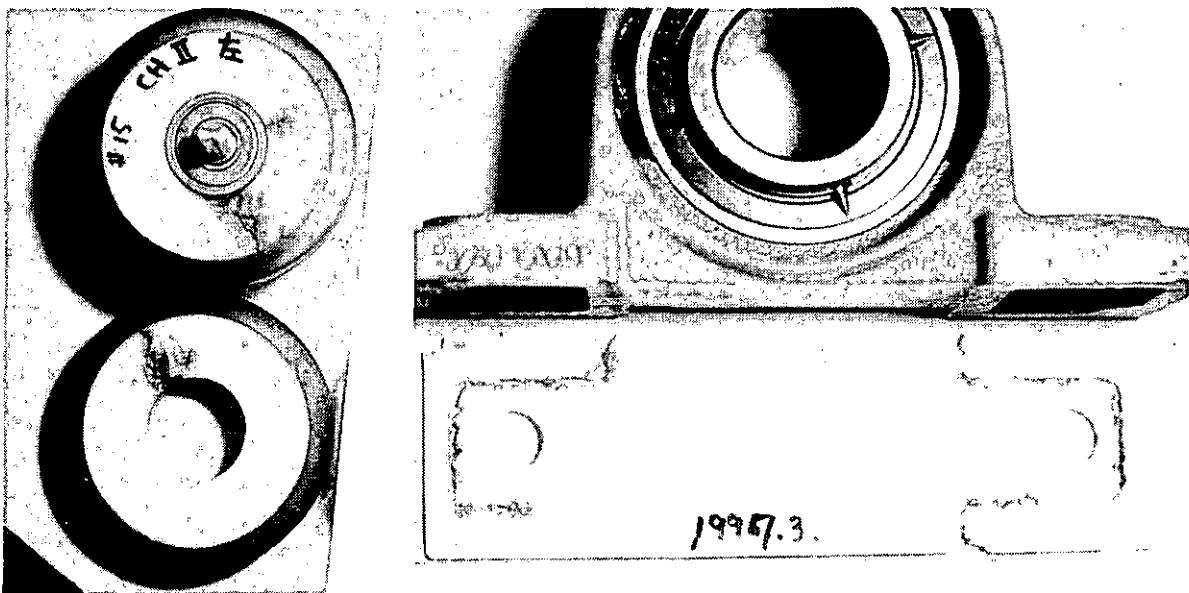
写真1. コロナ針の脱落



ったユニットが3カ所あった。

原因は明白で、固定ネジの「締めつけ不足」である。世代交代で「整備する人が1部変わった」ことと「締めつけチェックが不十分であった」と反省している。この付近は少しでも緩いとチャージング・チェーンの回転振動で緩みが拡大されるおそれがある。それにコロナ電流が流れているので接触不良が生じると放電加工されますます緩みが大きくなり最後には脱落する。固定ネジの締めつけ具合は「間隔が揃えられた11個のコロナ針を人指し指で強くなで下ろしても間隔に変化が生じない」程度である。数値的には「ネジが緩む方向でコロナ針の皿上に約 1.2 Kg の荷重を乗せても耐えられる」締めつけである。

図4. アイドラおよびベアリングシートの損傷



故障2：チャージング・チェーン沿いのスパークによると思われる損傷部品を図4. に示した。図4. の左側はチェーンの振れ止めアイドラの絶縁物（ナイロン）損傷で、スパ

ークに因って1㎤程度も欠けるいる。このようなイドラが5個（全体の14%）あった。イドラの使用個数はチェーン1本に付き18個（3個1組×3ヵ所×往復）で、チェーンが2本あるので合計36個である。

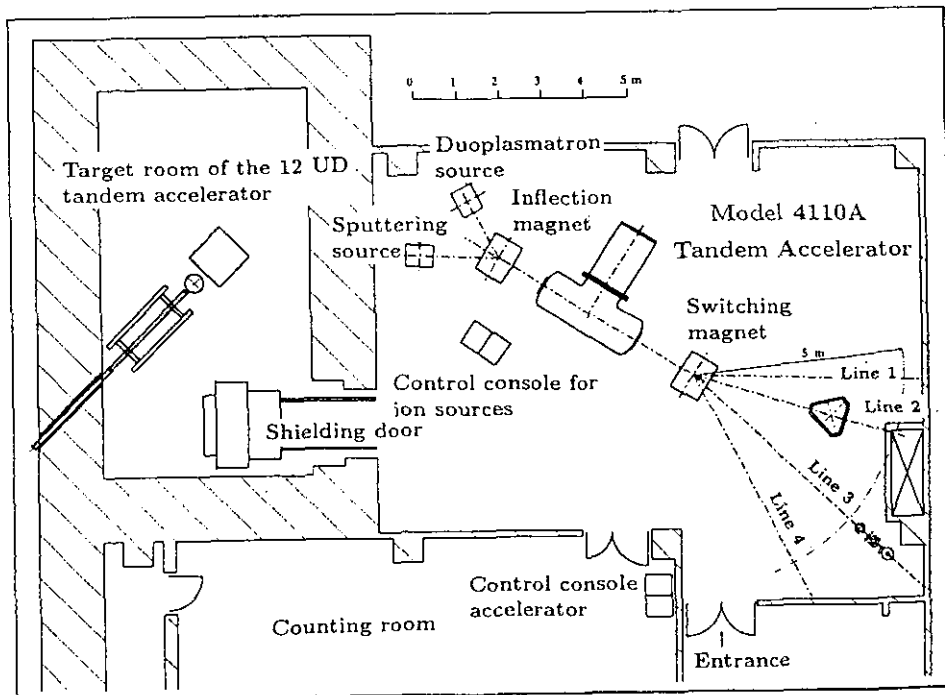
図4. の右側はチャージング・チェーンをドライブしているプーリーのベアリングと絶縁シートである。この絶縁シートはチャージング電流を測るために電氣的に浮かすためである。絶縁シートが図のようにベアリングケースの尖った所でスパークして溶けていた。スパーク・ギャップはボルトのところ2ヵ所に設置してあるが大きい放電には不足である。絶縁シートがこのようなになるとチャージング電流計がリーク電流で変動するようになるり絶縁シートの不良を知ることが出来る。

## 6. タンデトロンの設置状況

図5. に1MVタンデトロン（Model 4110A 米国G I C社）の設置場所を示した。この場所は以前R I実験室であったのを廃止する変更承認を得て、放射線測定室2に改名し設置した。 昨年の11月に電総研に行って我々の手で解体し業者に運搬を依頼した。毎年の1.2MVタンデムの定期点検・整備が終わった3月末から組立・配線・調整を集中的に行い5月7日には、初ビーム $E_p=1.4$  MeV 数 nA のビームをターゲットまで取り出すことができた。その後アライメント等再度微調整を行いスパッター・イオン源で6月19日に $E_p=1.5$  MeV 1200 nA のビームをターゲットまで取り出すことに成功した。次はデュプラ・イオン源の組立・調整を行いHeイオンの加速テストを行う予定である。

これに平行して4本の実験コースの測定系（イオン誘起電子分光、マイクロ・ビームPIXE、RBS、学生実験等）の設置を実験グループが行い、秋には共同利用実験を部分的にでも開始する予定である。 尚、タンデトロンの使用承認は平成9年4月22日付けで承認されている。また近日中に施設検査を受ける。

図5. 1MVタンデトロン実験室配置図



以上

# 国立環境研究所タンデム加速器の現状

国立環境研究所

久米 博、柴田 康行、田中 敦、米田 穰、  
植弘 崇嗣、森田 昌敏、熊本 雄一郎（現  
海洋科学技術センター）

## 1. はじめに

現在、国立環境研究所は2種類のタンデム加速器分析装置を保有している。すなわち、5MV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と、1MV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る。1995年9月の設置以来、たち上げ作業と試験運転を行ってきたが、ここでは現在までの稼働状況について述べる。

## 2. 加速器質量分析装置

### 2.1 概要

負イオンの生成は、2種類のCsスパッタイオン源（MC-SNICSおよびMGF-SNICS）で行っている。前者は固体試料用であり、後者は気体のCO<sub>2</sub>から直接にC<sup>-</sup>を生成するために新たに開発されたものである。入射システムも、高速逐次入射と同時入射の2種類備えており、それぞれMC-SNICSとMGF-SNICSに接続されている。

加速器は、最大ターミナル電圧が5MVの横置きペレトロン（NEC社製、15SDH-2）である。荷電変換はArガスあるいはカーボンフォイルで行う。

高エネルギーの同位体イオンビームは、分解能 $M/\Delta M=725$ の分析電磁石で分別する。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おり、<sup>12</sup>Cや<sup>13</sup>C、あるいは<sup>27</sup>Alなどの計測に用いられる。一方、<sup>14</sup>Cなどの微量同位体は、1枚のカソードと4枚のアノードを持つ多電極気体検出器で計測する。封入ガスは、ArとCH<sub>4</sub>を9対1の割合で混合したものである。また、3mの飛行距離を持つTOFビームラインも備えており、<sup>36</sup>Clや<sup>129</sup>Iなど重い核種の測定が可能となっている。

### 2.2 運転状況

装置全体の調整は、炭素同位体比の高精度測定を指針として行ってきたが、その間に以下の項目を検討した。

#### 2.2.1 MC-SNICS

カソード付近および負イオン引き出し領域の真空度の向上は、ビームの強度と質を高めるのに重要である。そのため、Cs<sup>+</sup>ビームの収束、負イオンの引き出しおよび収束を行う各電極の形状を変更し、より排気効率が高くなるようにした。

前回、炭素同位体比の測定において、カソード間でデータがばらつくことを報告した。

この原因のひとつとして、 $\text{Cs}^+$ ビームでスパッタされる場所が40個のカソードで違っていることが考えられた。そこで、図1に示すように、カソード回転軸とカソードホルダの間に、厚み約60 $\mu\text{m}$ のTa製のシムを挿入することにした。その結果、スパッタ位置のずれは無視できる程度になった。さらに $\text{Cs}^+$ のビーム径を広げ、試料面全体が均一にスパッタされるようにしている。負イオンビームの輸送に関しては、イオン源直後のスリットの絞り込みを行い、90°入射電磁石前後のビームの質を向上を図っている。

また、カソード回転軸が回らなくなる現象が起きたが、これはアクチュエータの動作タイミングを調整することで解決した。

### 2.2.2 高速逐次入射系

炭素同位体比のデータの悪さを引き起こしているもう一つの原因は、90°入射電磁石が2重収束の機能を果たしていないことであった。これに関してNEC社は、この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試みた。その結果、電磁石通過後のXならびにY軸方向の収束位置が一致するようになり、それに伴って、加速器の透過効率も $^{12}\text{C}$ については80%以上となった。

### 2.2.3 加速器

これは前回報告しなかったことであるが、設置後の昇圧が順調に行われなかったことがあって、低エネルギー側の初段の加速管と分割抵抗の一部を交換した。また、一度大きな放電が起き、高エネルギー側の加速管を直接に支持しているアクリルサポートの一部が破損し、同時に光ファイバーケーブルも断線したため、どちらも速やかに交換した。なお、ペレットチェーンへはフッ素系オイル(Dupon社製、KRYTOX)を塗布した。これは、東大MALTにおいて、ターミナル電圧の安定度向上に実績のあった方法である。それぞれの処置の結果、図2の運転時間に示されるように順調に稼働している。ただし、エージングにそれほど時間を割り当てることができなかつたため、今のところ定常運転は4.5MVで行っている。

### 2.2.4 高エネルギー分析部

この分析部には、振り分け電磁石の下流に20°静電偏向器が設置されている。試料測定中に偶然、この偏向器からX線が発生していることがわかった。それゆえ直ちに、X線発生を防ぐ方法を検討するようNEC社に要請した。そして、水素放電による電極面の清浄化と、絶縁ガイシのサンドブラスター処理が行われた結果、X線発生を抑えることができるようになった。この偏向器は、入射側と出射側に接地されたスリットを持っている。おそらく今回のX線は、電極とスリットの間で起きた放電によって発生したものではないかと考えている。

### 2.2.5 制御系

装置の制御およびデータ収集を円滑に行えるよう、3台のコンピュータのバージョンアップを行った。ところが、コンピュータ間の通信に関すると思われる問題が発生したため、現在は2台だけを使用している。また、制御ソフトウェアにもいくつかの不備が見つかったため、それらの改良を継続中である。

以上に述べた作業を実行し、それに加えてイオンビーム輸送に関わる装置パラメータ

の微調整を施した結果、炭素同位体比の測定に関しては、ほぼ満足する結果が得られるようになった。これについての詳細は、本研究会の柴田らの報告を参照されたい。

今後は、炭素同位体以外の核種の測定ができるようにすることと、ほとんど手つかずの状態である、MGF-SNICSと同時入射システム、そしてTOF ビームラインの調整を速やかに行う予定である。

### 3. イオンビーム分析装置

#### 3.1 概要

NEC社製の1MVベロトロンタンデム加速器(3SDH)は、200 nAの $H^+$ と $He^{2+}$ を試料に照射することができる。この加速器には、Charles Evans & Associates社製の表面分析システム(RBS400)を組み合わせており、一度に40個の試料について、RBS、ERDAそしてPIXEの自動測定が可能である。

#### 3.2 運転状況

これまでのところ、加速器は順調に稼働している。一方のRBS400に関しては、測定中にゴニオメータが予期しない位置に移動してしまう事態がときおり発生している。これについては、原因究明を行っている最中である。また、PIXE測定におけるスペクトルの分解能の悪さを前回報告したが、リニアアンプをTennelec社製のTC244に交換することによってこの問題を解決し、現在では147eVの分解能で測定を行っている。

### 4. おわりに

残された課題は多いものの、たち上げ作業はどちらの装置についてもほぼ完了した。これからは、担当者の装置への習熟度を高めることによって、種々の研究テーマの開拓と将来起こりうる問題への迅速な対応を行っていくつもりである。

図1 カソードホルダーの固定方法の改良

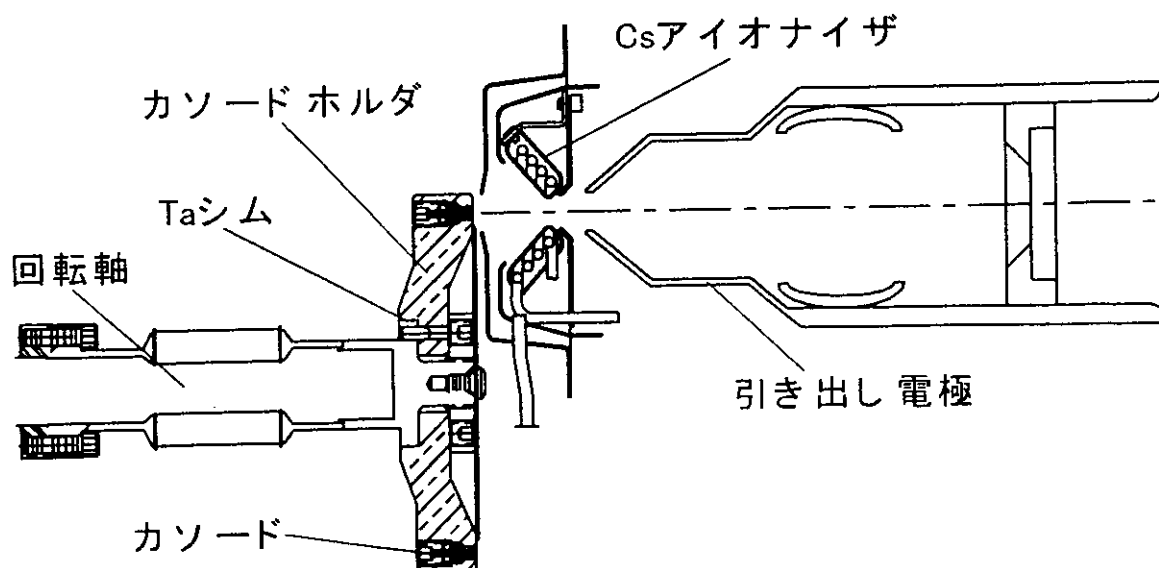
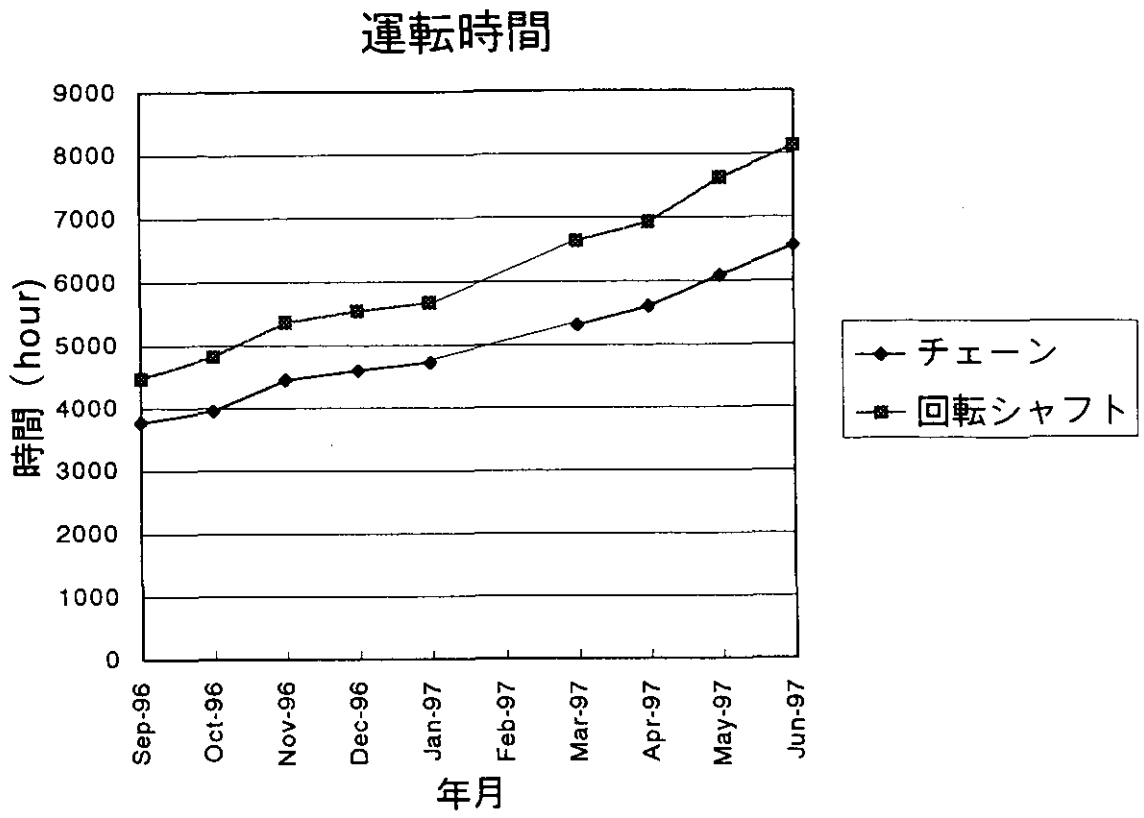


図2 加速器の運転時間



# 九大タンデム加速器の現状

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、古賀義博  
 前田豊和、落石宏之

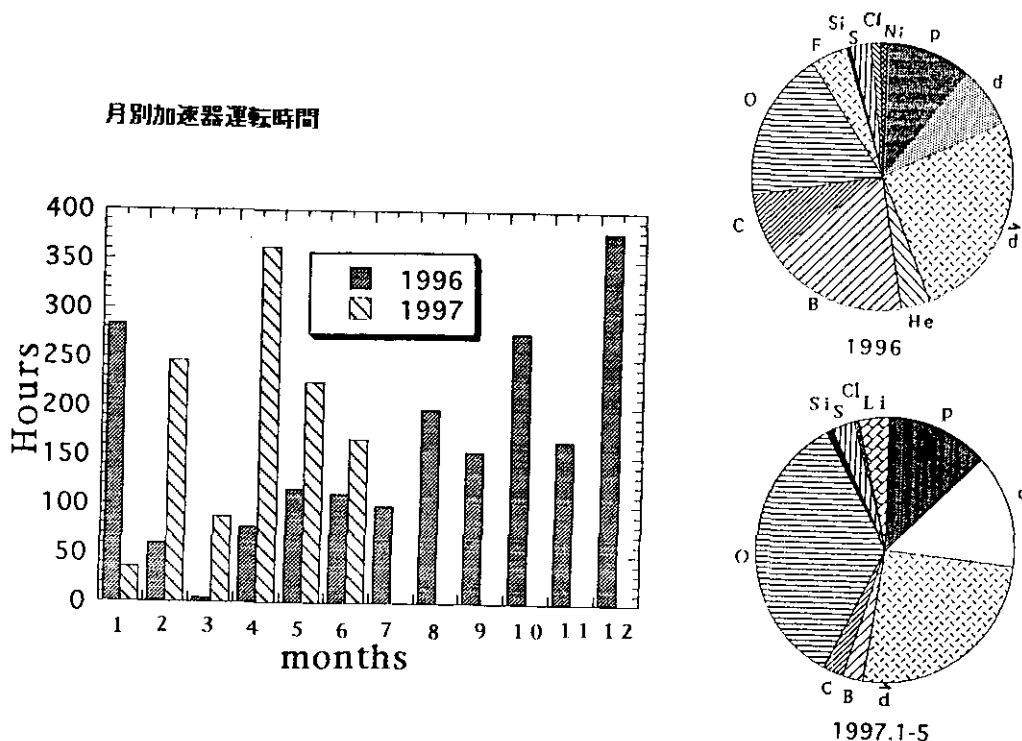
## 1 はじめに

九大タンデム加速器は既に20年に及ぶ運転歴を有し、付帯設備に一部老朽化による問題点を抱えつつも、現在比較的安定した稼働を続けている。SF6ガス操作系、真空排気系、コンピュータシステムについては数年前に補正予算による設備更新がなされたが、取り残されている冷却水系、各種電源等がトラブルソースになっている。

九州大学はキャンパス移転計画が進行中であり、新キャンパスには新規の加速器施設の実現を目指している。しかし、現タンデム加速器施設の稼働はまだ10年程度は続けられるものと考えており、この間における加速器性能の維持を確保すると共に研究活動をさらに活性化し、新キャンパスでの飛躍的な発展に結びつけるため、現タンデム加速器を共同利用施設化する「粒子線応用研究センター」の早期実現にむけて努力中である。

## 2 タンデム加速器の運転状況

九大タンデム加速器の最近における運転状況を下図に示した。



### 3 トラブル処理、改良等

#### (1) ペレットチェーンのブレイクダウン

九大タンデムの荷電機構は、九大で開発した独自のペレットチェーンを用いており、まずは安定した性能を保持しているが、最近2回程、新作チェーンが試運転の段階で芯線（ウレタンゴムをコートしたテトロンコード）に電氣的ブレイクダウンを起こした。この芯線に沿ってのスパークは、ターミナル電圧 1MV 程度の空気中での発電テスト中に発生したものと推測される。このようなトラブルはペレットチェーン開発時において既に経験しており、数度に亘る芯線処理法の改善によって克服された問題である。この問題の再発の原因は現時点で未だはっきり分かっていないが、チェーン製作の最終段階での芯線コードの脱気処理装置に問題があるのではないかと考えている。

#### (2) 加速管のローディング

加速管の老化によるものではないかと思われるが、加速管ローディングの閾値が異常に低下する傾向が見られるようになり、水素放電ベーキング処理を施すと一旦は回復するが持続時間が短い。ローディングは加速管のベース側端部に偏在して起こっていることが確認されたので、アース側端部の加速管1ユニット（25cm）の部分の電位勾配が約 1/2 になるよう、この加速管ユニット及び当該コラムユニット（50cm）の電圧分割抵抗の値を調整した。この処置によって顕著な改善を見ることが出来た。

#### (3) 高電圧電極内回路のリモートコントロール装置

タンデム高電圧電極内の機器のコントロールは、加速器タンクの外からガラス窓を通じて4本のレーザー光によって行われている。タンデム建設当初から He-Ne レーザー管が用いられてきたが、最近安価に入手可能になった半導体レーザー素子に交換した。交換直後はタンデムのスパーク時の破損に悩まされたが、フォトカプラー素子を利用してレーザー素子回路の電位をタンク壁と切り離すことにより、スパーク時の故障を回避出来るようになった。

#### (4) SF<sub>6</sub> ガス乾燥装置（モレキュラーシーブスタワー）の漏洩事故

モレキュラーシーブを充填した SF<sub>6</sub> ガス乾燥装置につながるステンレス管からの SF<sub>6</sub> ガスの漏洩が生じた。事故の原因は、乾燥装置に直結したステンレス配管の腐食によるものであった。モレキュラーシーブは再生のため、年間5～6回は 200℃での加熱脱気処理を行っており、処理時にはステンレス損傷部は 800℃の高温になりうる。このような高温と腐食性を持つ SF<sub>6</sub> ガス分解生成物の存在が原因となり、過去 20 年間に亘る年月を経てついに漏れを生じるに至ったものである。修復に当たって、より肉厚の配管を用いることにした。

#### (5) 反跳核分析装置 電磁石電源の改善

建造・性能テスト中の反跳核分析装置の電磁石電源は、旧くからの直流発電機（3KV 電動機＋ 3KW ダイナモ＋アンプリダイン発電機）に頼っていたが電流安定度が不足であること及び今後の維持に問題があることから、予算を投入して整流型の安定化直流電源に切り替えた。

#### (6) ラムシフト型偏極イオン源のビーム偏極度低下の問題

ラムシフトイオン源からの偏極重陽子ビームの偏極度が 40%程度まで低下する現象が生じ、原因究明のためスピフィルター部を含むイオン源全系のオーバーホール等の性能



回復を計ったが殆ど改善が見られなかった。これと前後してデュオプラズマトロン正イオン源部での真空度が低下する現象が見られていたので、リークテストを行ったが漏れは発見されず、排気系に問題があるとの結論になった。同部分の主排気系は 10"及び 8"の 2 台の油拡散ポンプであるが、内 10"ポンプの排気速度が大幅に落ちていることが判明し、ポンプ内部を点検したところオイルが固化を起こしていることが分かった。このオイルは単原子水素ガスに対する耐性に富むシリコンベースオイル（信越化学 F4）である。調べたところ、このオイルは約 10℃で固化する一方、液体への復元は約 60℃までの昇温が必要であった。たまたま、ある時期に拡散ポンプの冷却液（R113）の温度が 10℃以下になったことが原因になったものと考えられている。オイル交換処理によって真空の問題、ひいては偏極度の異常低下の問題も併せて解消した。

(7) R113 廃止に伴う代替品のテスト

-200KV の電位で稼働する各種負イオン源の冷却には R113 フロン液が使用されており、とくに偏極イオン源では H+イオン源部、スピンフィルター部の磁場発生コイルの冷却のため、多量の R113 液を循環させている。今後の R113 の継続使用は地球環境の問題があること、加えて入手が困難になることが必然の情勢となってきたので、代替品を模索している。巷で云ういわゆるフロン代替品とは、冷媒、洗浄目的のものであり、我々の必要とする、純水に代わり得る液体（電気絶縁性能、熱容量）としての代替えについては、納入業者からもなかなか有効な提案は得られなかった。最近、旭精機 K.K からパーフルオロ・ポリエーテル液、ADH-210（アウジモンド社 GoldenD80 相等品）の提供を受け SNICS-II イオン源のカソード冷却系の R113 と交換して通常運転条件（-200KV）で使用テストを行っている。数ヶ月に亘っての使用で今迄のところ何らの問題も生じていない。

特性比較

|               | CFC-113 (R113) | ADH-210 |
|---------------|----------------|---------|
| 沸点 (°C)       | 47.6           | 84      |
| 凝固点 (°C)      | -35.0          | -79     |
| 密度 (g/cm)     | 1.57           | 1.73    |
| 比熱 (cal/g °C) | 0.218          | 0.23    |

# 東大タンデム加速器 MALT の現状

## 特に AMS と PIXE について

小林 紘一、羽鳥 聡、中野 忠一郎、春原 陽子、山下 博  
東京大学原子力研究総合センター

### 1. はじめに

東大原子力研究総合センターの 5MV タンデム加速器(NEC; 5UD ペレトロン)は、平成 7 年度から本格稼動に入り学内共同利用を開始した。それ以来発生した様々な初期故障を克服し、多くの不具合箇所を改善した結果、最近では、加速器へのビームトランスミッションの不完全さ等の 2,3 の問題および小規模故障を除いては比較的安定な状態になっている。

ここでは、これら諸問題および最近行われた PIXE の性能向上に関する試みについて述べる。

### 2. MALT の現状

本設備は、MALT (Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator) の愛称を持っている。その名が示すように、タンデム加速器から発生するイオンビームのエネルギーの安定性とイオン種の多様性という特色を生かして、種々の微量分析や基礎科学の研究を行う実験設備であり、装置自体が高精度の精密微量分析装置として機能するように様々な工夫とイオン光学的設計が施されている。加速器は加速電圧 5MV のタンデム加速器であり、周辺の分析系は ME 値 150 を越す重イオンを分析利用できる様に設計されている。

MALT で現在行われている主な加速器分析技術は、AMS (Accelerator Mass Spectrometry : 加速器質量分析)、PIXE (Particle Induced X-ray Emission analysis : 粒子励起 X 線分析)、RBS (Rutherford Back Scattering analysis : ラザフォード後方散乱分析)、NR (Nuclear Reaction analysis : 核反応分析) 等であり、イオンビームを 1 ミクロンサイズに絞って局所分析を行うマイクロビーム分析も整備中である。MALT ではこれら分析技術毎に専用ビームラインを用意しており、更に利用者の準備する特殊装置を搭載する専用コースとともに、効率の良い測定環境を提供している。これら分析法の特色を一言でいうと、 $10^5 \sim 10^{10}$  個程度という極少数の原子を相手に出来るほどに高感度である、ということである。特に、長半減期放射性核種の検出定量を得意とする AMS は、元素によっては  $10^3$  個程度の同位元素の個数測定が可能であり、それによる応用研究範囲が拡大している。

以下に装置及びビームコースの概要を示す。

- ・イオン源： MC-SNICS (個体試料用 ; セシウムスパッター型負イオン源)  
40 試料装類、イオン電流大 ( $C \sim 100 \mu A$ )  
Alphatros (気体試料用 ; RF 荷電変換型負イオン源)

- ・ 加速器： 5MV タンデム加速器：Pelletron 5UD (米国 NEC 社製)  
電圧安定度；±300 V at 5MV (GVM + CPO feedback)  
荷電変換装置；ガスストリッパ(2 turbo pumps)  
フォイルストリッパ(フォイル、250 枚)
- ・ イオン入射系、分析系：  
45° 静電分析器(r = 30cm,  $E/\Delta E = 100$ )  
90° 分析入射電磁石(r = 45cm,  $m/\delta m = 200$ )  
高速逐次入射システム  
LE 側マルチファラデーカップ  
広質量範囲分析電磁石(ME 値 150, r=1.27m)  
HE 側マルチファラデーカップ
- ・ ビームコース：  
AMS； 20° 静電分析器(r = 6m,  $E/\Delta E = 450$ )  
重イオン検出器；SSD(アブソーバー付き)、  
ガスカウンター( $\Delta E-E$ ) (作成中)  
ガス充填電磁石 (整備中)  
PIXE； 30cm 試料チェンバー、30 cm 試料ホルダー、  
pure Si および CZT X線検出器  
原子物理； 利用者の整備する特殊実験装置  
表面物性； 利用者の整備する超高真空装置  
マイクロビーム； ビーム径  $1\mu\text{m}$  の P, He による  
PIXE, RBS 等 (整備中)  
学生実験； 理学部物理(原子核物理) 小型散乱箱  
；工学部システム量子(RBS) 小型散乱箱  
汎用； 予備 2 コース (未整備)

MALT では、この内、汎用性の高い AMS、PIXE、マイクロビームの 3 コースを重点的に整備し、その他のコースは、特殊の実験装置を必要とする利用者が独自に設置することを原則にしている。

PIXE コースは、標準のレベルの測定が可能な状態にまでは整備されているが、希望の多い大気中測定システムの整備が将来に残されている。マイクロビームは、コースの大部分が完成しており、測定器および試料台等が整備され次第、共同利用に対応できる状態になっている。

- ・ 運転制御システム：

イオン源からビームコースの終端(測定器を除く)までの全系が、マイクロコンピューター 4 台により制御されている。

### 3. MALT の利用状況

平成 8 年度の加速器運転時間は 3,036 時間であり、加速管のコンディショニングなど

の加速器調整に使われた時間を除く約 2,300 時間の内訳は以下の通りである。

|   |   |     |
|---|---|-----|
| AMS 関係( $^{10}\text{Be}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{26}\text{Al}$ および $^{36}\text{Cl}$ , $^{129}\text{I}$ 開発実験<br>; 宇宙・地球科学、考古、医学、環境科学、<br>農学、生物学、基礎科学など) | : | 55% |
| PIXE 関係(3MeV proton ; 考古、医学、環境試料)   | : | 15% |
| 表面物性( $^{15}\text{N}$ による水素の分析)   | : | 8%  |
| 原子分子( $^{12}\text{C}$ ; 二次電子分布)   | : | 17% |
| 学生教育(p, d による原子核反応)   | : | 5%  |

加速管のコンディショニングは実際には大部分が共同利用実験前後の準備中に行われており、その時間を利用時間に含めると、平成 8 年度の運転時間の大部分は、共同利用実験に使われたことになる。

#### 4. 諸問題

##### 4-1 ペレットチェーン(2本の内の1本)の搬送電流不安定性

この問題については前回の本研究会において、チェーンに堅めのオイル(グリース)を塗布することにより、不安定性が減少する、と報告した。この効果はその後の 3 月末の定期点検時までの約半年の間、持続していたようである。しかしながら今回、チェーンの汚れを拭き取り、再度、同じオイルを塗布して発電してみたが、どういう訳か不安定性があまり減少せず、大きな効果が得られていない。チェーンのドライブプーリーの振動改善、汚れの除去など、様々な対策を試みてみたが、効果がなく、未だに原因がつかめていない。

##### 4-2 GVM フィードバックの不安定性

AMSに限らず、加速電圧の安定化を、スリットフィードバックではなく、GVM+CPO 併用によるフィードバックで行うことが多い。この場合、2~3 日の連続運転をする時に、加速ビームの透過率が少しずつ減少するという現象が発見された。種々検討の結果、加速電圧を少しずつ下げれば透過率が回復することが判明し、原因究明中である。これは何らかの原因で GVM による電圧読みとりの効率が徐々に悪くなる場合に起こることであり、 $\text{SF}_6$  ガスの誘電率の温度変化、GVM 回転数の変化、GVM 装置そのものの欠陥などについて調査検討中である。

##### 4-3 加速器へのビームトランスミッションの改造

前回の本研究会において、トランスミッションの悪さおよびその対策について報告した。原因については、メーカー NEC 社との検討の結果、入射電磁石のイオン光学的設計の不完全性によりストリッパーチャンネル位置でのビーム像が楕円形になるためとされた。それに対して、電磁石の直前に補助 Q レンズを新たに設置して、X と Y 両方向のレンズ効果を個別に補正することにより 2 重収束を実現し、チャンネルへのトランスミッションを

向上させることとした。その後、多くのテスト実験の結果、トランスミッションは、以前の60~70%から80~90%へとある程度の改善が見られた。しかしながら、この程度の改善ではトランスミッションのフラットトップ特性が得られるはずがなく、AMSにとっては致命的であるので、更なる改善が望まれていた。

これに対して、電磁石本体の再設計、作り直し、およびストリッパチャンネルの大口径化を挙げて検討していたが、次の策としてのNEC社の提案はチャンネルの大口径化であり、共同利用の停止する夏期の調整期間に交換することとした。図1は、新たに制作されたチャンネルの設計図である。旧チャンネルの口径8mmから11mmへの大口径化によりトランスミッションの向上とフラットトップ特性の改善が期待されている。チャンネルの大口径化はストリッパガスの加速管への流入が増え、AMSバックグラウンドの増大が危惧されるので、2台のターボ分子ポンプによるガスの循環機構も再設計し、差動排気が効率よく働く構造になっている。このガスの閉じこめ機能については、NEC社により慎重な計算とテストが繰り返されており、良好な結果が期待されている。

今までにAMS精度向上に向けて多くの試みがなされてきたが、いずれも対症療法的な改造であり、不完全な結果に終わってきた。今回のチャンネルの大口径化は、様々な原因によるイオンビームの方向の変化やエミッタンスの変動に対応する余裕を与えるので、精度向上にとっては良い方向である。しかしながら、根本的な対処は入射電磁石のイオン光学的不具合の解消であり、そのためにはポールピースの再設計、作り直しを決心せざるを得ないものと考えている。

## 5. CZT X線検出器のPIXEへの応用

MALTにおけるPIXEの通常のパラメーターを以下に示す。

|          |   |                                   |
|----------|---|-----------------------------------|
| 照射イオンビーム | : | 3MeVのプロトン: 1~2nA(max. 50nA)       |
| ビームサイズ   | : | 直径0.5mm<br>(グラフィイト + Beによるコリメーター) |
| 試料チェンバー  | : | 総アルミニウム製、直径30cm                   |
| 試料ステージ   | : | 長さ30cm, ±15cm、±2mmに位置可変           |
| X線検出器    | : | pure Si X線検出器; ±45°               |

PIXEは多元素同時分析が可能であると言われるが、実際には必ずしも同時分析が実現できるわけではない。例えば古代ガラスあるいは岩石などを試料とする場合には、80%以上を占めるSiO<sub>2</sub>に含まれるNa, Mg, Al, Fe, Zn, Cd, Baなどの微量元素を、定量分析することになる。この様な場合、圧倒的多数のSiのK-X線のパイルアップを避けながら他の微量元素を検出する必要があり、様々な工夫がなされる。通常は適当な厚さのアブソーバーにより、SiからのX線の大部分を吸収させてパイルアップを防ぎつつイオン電流を増すことにより、X線検出効率の低いCdやBaなど原子番号の高い元素を検出する。この方法では、原子番号の低い元素の検出が困難になるため、再びアブソーバーを取り除き、イオン電流を少なくしてパイルアップを防ぎ、Si以下の軽い元素を検出するための測定

をもう一度行う必要がある。この様に、ガラスや岩石試料などに含まれる Na、Mg、Al などの軽い元素から、Ba あるいは Pb などの重い元素までを、1台の X 線検出器のみで同時に定量分析することは、ほとんど不可能である。これを克服するために、100keV 程度の高エネルギー X 線まで高い検出効率をもつ CZT 検出器と従来の pure Si 検出器の2台の組み合わせによる同時測定を試み、満足する結果を得たので、報告しておく。

2台の検出器の性能などは以下の通りである。

Pure Si detector : Si 単結晶

結晶サイズ : 10mm<sup>2</sup> x 3mm

分解能 : 126eV (5.9keV, Mn K $\alpha$ )

検出器窓 : 15  $\mu$ m 厚 Be

冷却 : 使用中に液体窒素による冷却を要する

CZT detector : Cd<sub>0.9</sub>Zn<sub>0.1</sub>Te 結晶

結晶サイズ : 3mm x 3mm x 2mm

検出効率 : 100keV 以下の X 線に対して約 100%

分解能 : 1.5keV (122keV, <sup>57</sup>Co)

検出器窓 : 10 mil 厚 (250  $\mu$ m) Be

冷却 : 電子冷却による (-30 °C)

pure Si + CZT の組み合わせによる同時測定

試料までの距離(可変 ; ビーム後方 $\pm$ 135° 方向に設置)

Si : max. ~ 120mm

CZT : min. ~ 30mm

Si 検出器を試料から最大限離し、CZT 検出器を限度一杯まで近づけることにより、立体角で約 16 倍の差をつけることが可能。この組み合わせにより、イオン電流 2 ~ 5nA でパイルアップの少ない同時測定が可能となった。

CZT 検出器は液体窒素を要しないので取り扱いが楽であるし、また Si 検出器に比べて安価である(半額以下)という点も魅力的である。

図 2-a は、NBS の標準ガラス試料(NBS-1412)からの X 線を Pure Si で測定した場合のスペクトルである。Pure Si の試料からの位置は約 120mm とし、パイルアップを少なくするためにプロトン電流は 1~2 nA 以下に抑えて測定された。このスペクトルの例では Na, Mg, Al がきれいに測定されており、定量値を出すことは困難ではない。しかしながら、この標準ガラスは ZnO, BaO, SrO, PbO, CdO をそれぞれ約 4.5%程度も含んでいるので、Zn, Pb, Sr に対してはそれなりの感度で測定できるが、Cd, Ba, などのより重い元素のピークはほとんど見られず、Cd の様にたとえ見えたとしても定量に耐え得るほどの計数を得ることは非常に困難である。これに対して図 2-b は、同時に CZT により測定されたスペクトルである。この場合には、CZT を試料から 30mm の位置に近づけ検出効率の向上を図っているが、250  $\mu$ m の Be ウィンドウと 10  $\mu$ m のマイラーによる真空保持膜により吸収されて、本来は大強度である Si-KX 線はほとんどなくなり、K-KX 線

あたりから上 (High Z 側) から測定に掛かるようになる。4.5%程度も含まれている Zn、Pb、Sr のピークが pure-Si によるスペクトルに比べて1桁以上も高くなり、しかも、pure Si には見られなかった Ba からの X線がはっきりと現れ、Cd とともに十分な強度で定量測定が可能であることが示される。この様に、pure Si と CZT 検出器を組み合わせることにより、ガラスや岩石試料中の Na、Mg あるいは Al などの軽い元素から U などの重い元素までの微量元素の定量が一度の測定により可能であることが示された。

## 6. AMS の現状

AMS では、イオンビームの質、ビームの透過率などの変動が測定精度を決めるので、AMS の精度の向上をはかる場合には、加速器そのものの基本的な性能向上に関与することになる。そのために、MALT では、AMS の性能向上が即ち他の測定法の性能向上につながるものとして、AMS の整備に力を入れてきた。4 節の諸問題のところでも述べた改造作業はまさにそのためのものであったが、そこでも述べたように、改造は予算と時間の制限もありあまり著しく進んではない。その原因の一つは、多くの共同利用を抱えながらの改造作業であるということにあり、AMS 専用装置ではないというところにも困難な問題点が現れている。

現在、MALT-AMS では、 $^{10}\text{Be}$  と  $^{26}\text{Al}$  に関しては実用的測定が行われており、特に  $^{26}\text{Al}$  の測定精度については世界最高レベルでの測定が行われている。 $^{14}\text{C}$  は  $\pm 1\%$  を切る高精度の測定が要求される場合が多いので、完全に実用化されたとは言い難いが、5,000 年程度より古い  $^{14}\text{C}$  年代を持つ考古学試料の年代測定は可能となっている。AMS の測定精度を決める一番大きな要素は全系のビーム透過率、即ちトランスミッションであり、別の見方をすると各エレメントのフラットトップ特性である。フラットトップ特性が完全でない現在の MALT による  $^{14}\text{C}$ -AMS が高精度を出せない原因がここにあり、今後の改造作業もまたこの点に集中することになる。

極微量同位元素を定量測定する AMS では、規格化のための安定同位元素に対する同位体比を測定する必要があるが、MALT では、旧タンデム加速器の時代に開発された内部ビームモニター法 (IBMM) と逐次入射法 (SIM 法、ジャンピング法) と呼ばれる 2 種類の全く異なる方法により同位体比を測定する。これらの詳細については様々な場で述べているので省略するが、それぞれに特徴があり測定核種により異なる方法が適応される。

上記 3 核種以外に、 $^{36}\text{Cl}$  と  $^{129}\text{I}$  の測定法を開発中であり、次回のこの研究会においてある程度の結果を報告できるものと思っている。

次ページ表 1 に、現在までに得られた MALT-AMS の性能をまとめておく。

表 1. MALT-AMS の性能

| 核種        | 試料化学型                          | イオン種               | イオン電流<br>( $\mu A$ ) | AMS 法* | 粒子識別法**<br>ECA + | 最小検出<br>感度( $X^*/X$ ) | 精度<br>(%) |
|-----------|--------------------------------|--------------------|----------------------|--------|------------------|-----------------------|-----------|
| $^{10}Be$ | BeO                            | BeO <sup>-</sup>   | 1                    | IBMM   | G-SSD (GC)       | $3 \times 10^{-14}$   | 2-3       |
| $^{14}C$  | 不定形C                           | C, CH <sup>-</sup> | 5                    | IBMM   | H-SSD            | $3 \times 10^{-16}$   | 3-5       |
|           | グラファイト                         | C <sup>-</sup>     | 20                   | SIM    | H-SSD            |                       | 5-7       |
| $^{26}Al$ | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sup>-</sup>    | 0.5                  | SIM    | H-SSD (GC)       | $3 \times 10^{-14}$   | 1-2       |
| $^{36}Cl$ | AgCl                           | Cl <sup>-</sup>    | 20                   | SIM    | GC, GFM, IPIXE   |                       |           |
| $^{129}I$ | AgI                            | I <sup>-</sup>     | 20                   | SIM    | TOF              |                       |           |

\* IBMM : internal beam monitor method

\* SIM : sequential injection method

\*\* ECA : electrostatic cylindrical deflector

\*\* G-SSD : gas absorber + SSD

\*\* H-SSD : Havar foil + SSD

\*\* GC : gas counter  $\Delta E-E$

\*\* TOF : time of flight

\*\* GFM : gas filled magnet

\*\* IPIXE : inverse PIXE



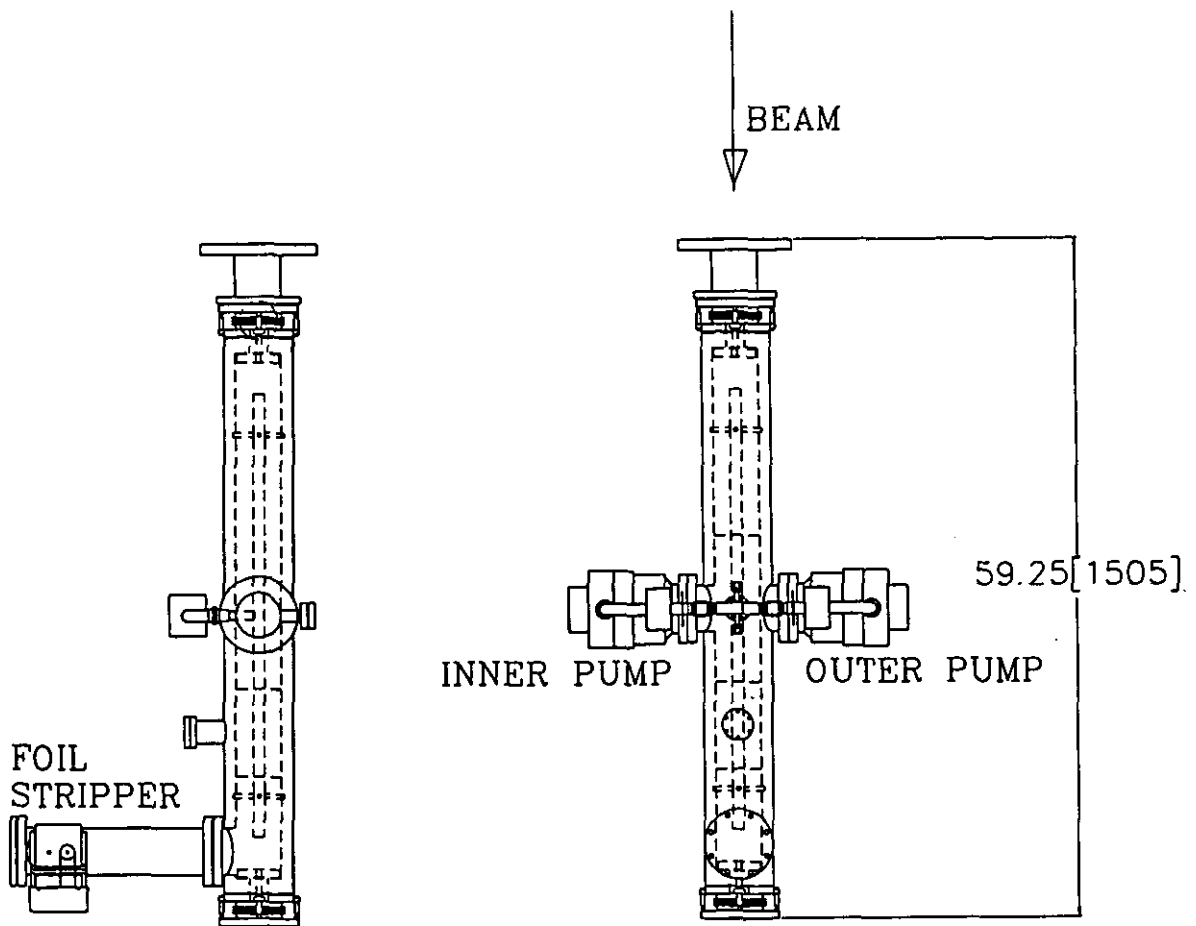


図1. 新しいストリッパーチャンネル。

チャンネル部の内径は11mm、実質的な荷電変換部の長さは約1mである。

チェンバーは3層になっており、最外部と中間のダクトを2台のターボ分子ポンプで別々に排気し、中央のストリッパーチャンネルに荷電変換ガス（アルゴン）を戻す仕組みになっている。この差動排気システムにより、ガスの閉じこめを行い、加速管へのガスの流入を抑えている。

検出器 Pure Si NBS -1412 ZnO 4.48wt% BaO 4.67wt% SrO 4.55% PbO 4.4% CdO 4.38%

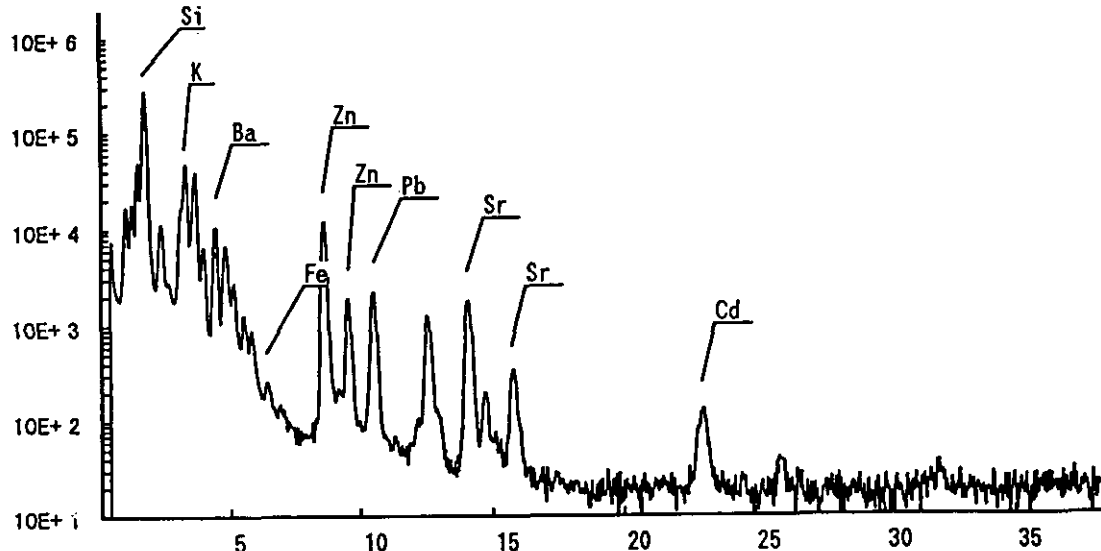


図2-a. NBS標準ガラス(NBS-1412)のPIXEスペクトル。Pure Si 検出器による測定。  
横軸はX線エネルギー(keV)

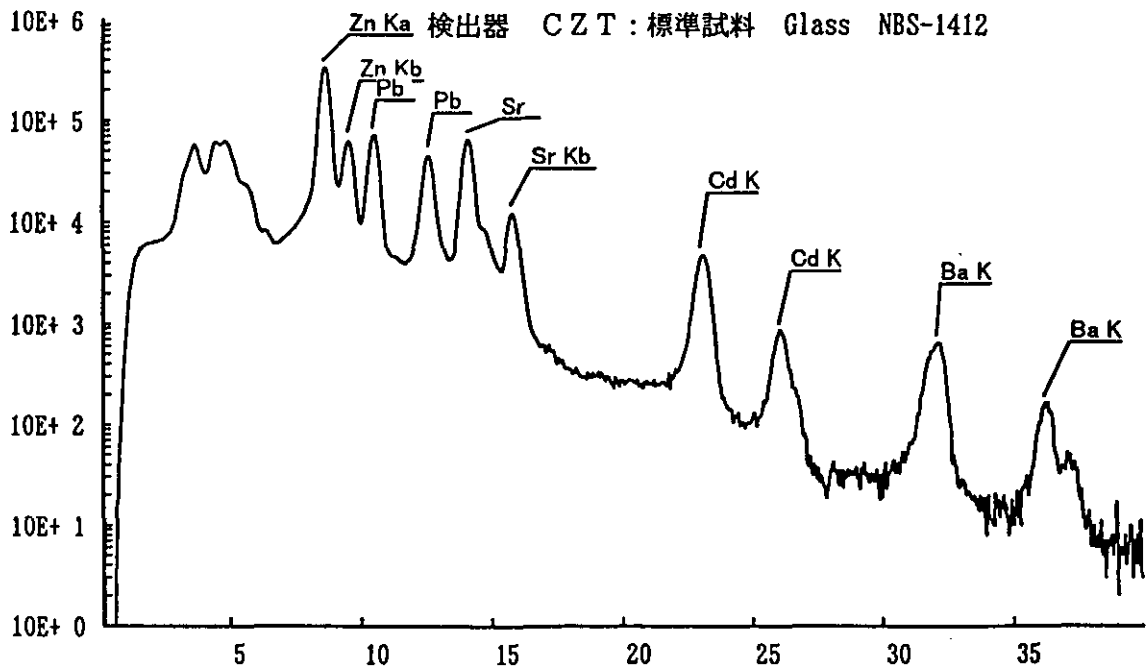


図2-b. CZT 検出器により同時に測定されたPIXEスペクトル。  
横軸はX線エネルギー(keV)

# 超高速微粒子（ダスト）加速実験計画

|                  |   |
|------------------|---|
| 東京大学・原子力研究総合センター | 柴田裕実、小林紘一、岩井岳夫、羽鳥 聡、西村民雄、<br>鳴井 誠、尾亦 孝男 |
| 東京大学・理学系研究科      | 佐々木 晶、濱辺好美                              |
| 宇宙科学研究所・惑星研究系    | 藤原 顕、矢野 創、長谷川 直                         |
| 東京水産大学・水産学部      | 大橋英雄                                    |
| 獨協医科大学・物理学教室     | 野上謙一                                    |

## 【計画の概要】

わが国の宇宙探査計画の中に星間ダスト（微粒子）の分析や星間起源および周惑星ダストの直接検出を目指すものがあり、国産の火星探査機や月探査、小惑星探査、宇宙ステーションにダスト分析器の搭載が検討されるなど、わが国における宇宙ダストの研究が新展開を迎えている。また、地球周辺の衛星の残骸（スペースデブリ）などには、多くの微小粒子が含まれていて、スペースシャトルや人工衛星、宇宙探査や宇宙活動などに与える影響が大きな問題となっている。これらダスト計測・分析器の開発・校正実験、及び宇宙開発に適する材料の研究を行うためには地上での超高速ダストの衝突シミュレーション実験が必要となってくる。これらの研究を行うための微粒子（ $0.1\text{-}1\ \mu\text{m}$ ）を数  $10\ \text{km/s}$  に加速できる超高速ダスト加速器は日本にまだ存在せず、世界的にもドイツ・ハイデルベルク・マックスプランク核物理学研究所、英国カンタベリー・ケント大学、米国オークリッジ研究所で稼働しているのみである。日本において独自のダスト加速器を整備することは日本の宇宙理工学において非常に大きな貢献をすることが期待されるのみならず、材料研究においても微粒子衝突による表面改質や新物質生成に新しい成果が期待される。

このような要請を受けて今年度より原子力研究総合センター・重照射研究設備（HIT、東海村）にある  $3.75\text{MV}$  バン・デ・グラーフ加速器を利用した超高速微粒子衝突実験用のダスト加速器およびダストビーム検出法を開発し、衝突シミュレーション実験を行うことを計画している。

## 【ダスト加速器】

ダスト加速器はダストイオン源、加速器、ビーム計測用ビームライン、衝突用チャンバーから成る。バン・デ・グラーフ加速器の  $0^\circ$  コースに微粒子加速ビームラインを建設した。ダストイオン源（図 1）では直径  $0.1\text{-}1\ \mu\text{m}$  の導電性微粒子をイオン化して、加速管へと引き出す。微粒子の試料は図中の Tongue の下に置かれている。この Tongue にかける高電圧（約  $12\ \text{kV}$ ）を振ることで微粒子が飛び出し、Needle tip に触れて帯電する。重要なのは針の先が球になっていることで、この球と微粒子の大きさとの関係で電荷量が決まる。今年度は炭素微粒子を加速する計画であるが、このときの電荷は数百から数千で、HIT のバン・デ・グラーフで加速すると約数  $10\ \text{km/s}$  となる。図 3 に微粒子加速ビームラインと微粒子の電荷、速度計測システム及び速度による微粒子選別回路系を示す。図 2 には電荷量を測定する円筒コンデンサー型の荷電粒子モニターを示す。加速後の微粒子は電荷と質量

の分布を持っており、それらを識別するために、このモニターを3台使い、チャージ・センシティブ・アンプによって誘起される電荷量を測定するとともに、3台のモニターの間での飛行時間（TOF）を測定し、速度を弁別する。これらの測定によって必要とする電荷と速度の微粒子だけを静電デフレクターを用いて選別し、衝突チャンバーに導き実験に用いる。衝突チャンバーは実際に人工衛星に搭載する TOF 質量分析器等の計測器をそのまま真空中に入れ、色々な角度からの照射が可能ないように設計されている。微粒子加速実験は今年度7～8月と平成10年2～3月にかけて行う予定である。

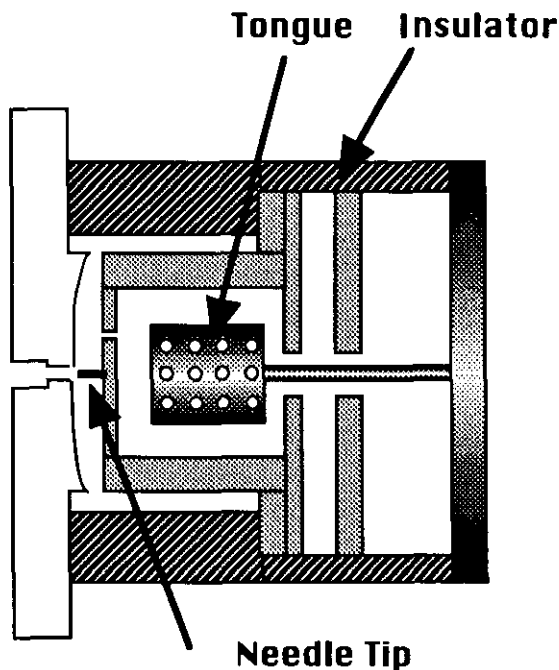


図1 ダストイオン源（上から見た断面図）

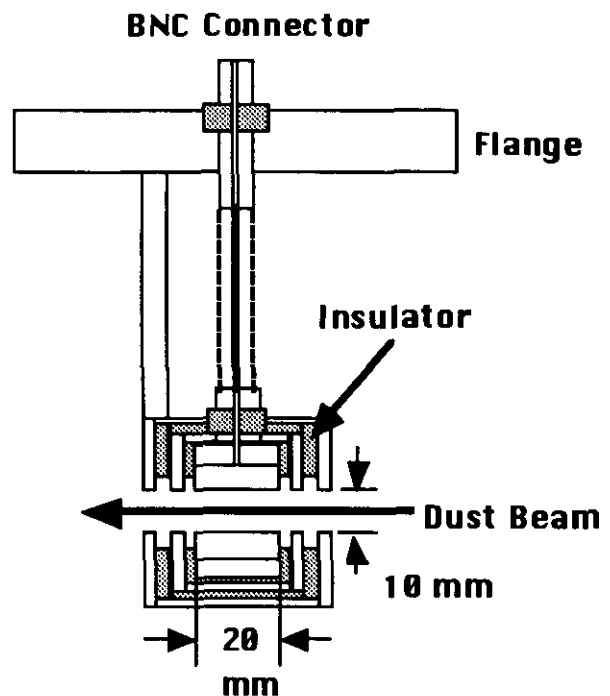


図2 微粒子電荷モニター断面図

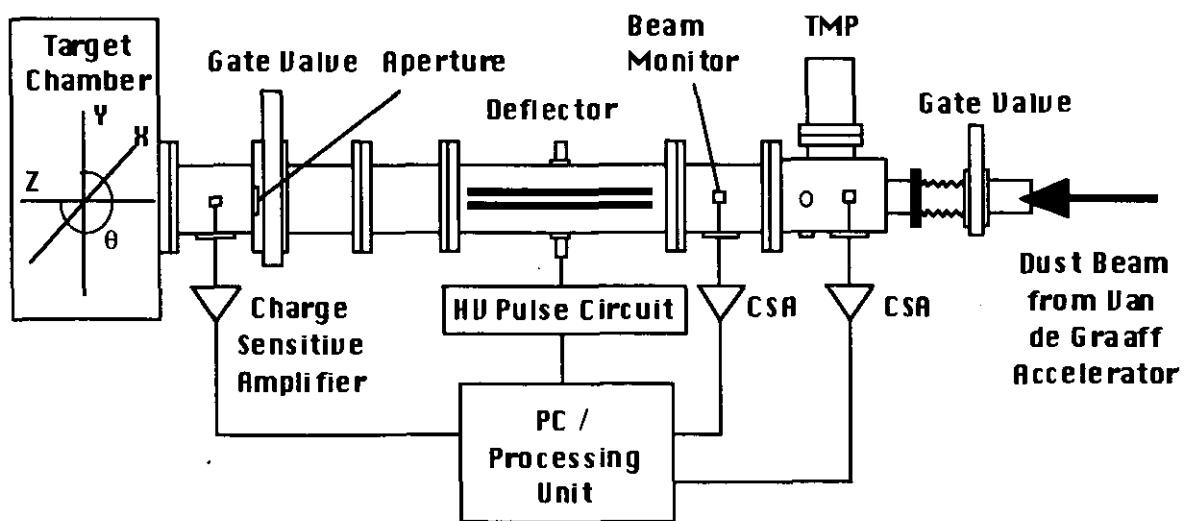


図3 微粒子加速ビームライン及び微粒子速度弁別回路系

## 京大タンデム加速器の現状

中村 正信、村上 哲也、與曾井 優、松本 博、  
高橋 清二、広瀬 昌憲、今井 憲一

京都大学理学部物理学第二教室

### 1 はじめに

更新された京大タンデム加速器は1990年に利用を開始し、毎年2700時間程度が研究と教育に利用されてきた。今期はタンデムで進めていた偏極イオン源 (PIS) と加速器質量分析 (AMS) の2つのプロジェクトが3年目の区切りの年であった。この1年間の加速器運転とその利用状況及びプロジェクトの現状について述べる。

### 2 加速器運転

#### 1) 運転時間、ターミナル電圧

加速器運転の目安として荷電搬送チェーンの運転時間の変化を図1に示す。利用が固定化していく傾向がある。なお、月曜日はメンテナンスとしてビームは出さず、実験準備が出来る。また土、日は一般ユーザーの利用を制限している。加速電圧は暫定的な上限値7MVを変えていない。利用される加速電圧は1.5MV～6.5MVの範囲で頻繁に変わっている。

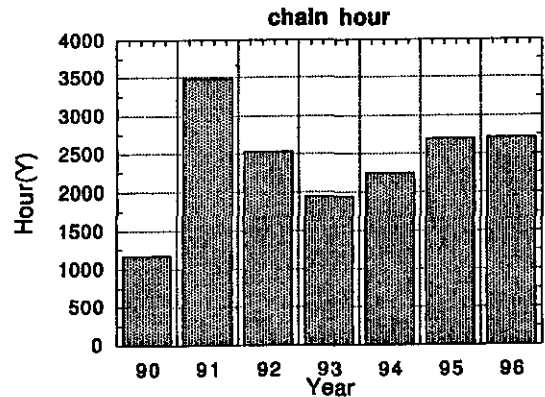


図1. タンデム加速器年間運転時間

#### 2) タンク開作業

毎年7月後半をタンク内作業にあてて、定期保守や故障修理を行っている。加速器利用が不可能となる故障としてもタンク内作業を必要とするものがある。

- 1996年7月 定期作業、GVM配線修理
- 1996年10月 テンションロッド改造
- 1997年1月 GVMベアリング修理
- 1997年4月 コロナポイント交換

10月に更新以来懸案となっていたテンションロッドの改造をNEC社により行われた。詳細は1994度の報告[1]にあるが、前回の改造部品取付の場合に比べると、今回特に圧縮スプリングを強化し、中央部の垂れ下がりを防いでいる。

GVM関係では7月の点検でステーターの配線の間違いを発見し、修理したところ出力が安定した。AMSの実験中における変化から推定するとドリフトは数keV/日以下である。X線等の発生においてもGVMの変化は見られない[2]。なお、ベアリングは1月に故障し交換した。

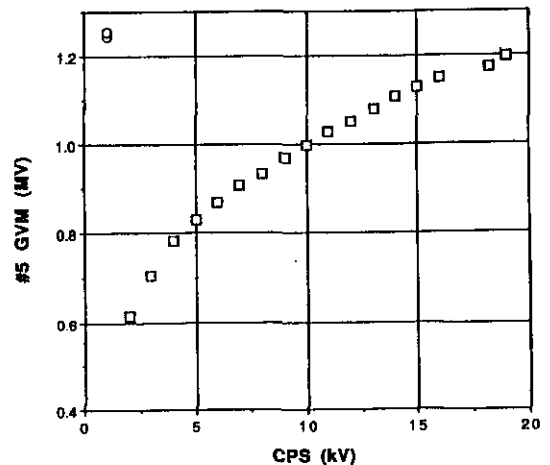


図2. 加速管 (#5) の電圧。  
○: 交換前、□: 交換後。

12月にターミナル電圧に数kV以上の大きな揺れが発生した。これは強いX線の連続した発生を伴った。この時の1つの加速管(#5)はチェーンへの荷電供給電圧(CPS)を下げて高い電圧を示した(図2参照)。ターミナル電圧は加速管(#5)を1段だけ常にショートすることにより安定となり、AMSの測定も可能であった。4月にタンクを開けて電圧分割用のコロナポイントを交換したところ、CPSと一段の発生電圧との関係は正常となったが、ターミナル電圧の揺れやX線の発生は止まらなかった。1997年7月の作業で加速管の交換を予定している。

### 3) 修理・改良

#### ・846イオン源標準化

HVEE社製846イオン源は59サンプルを装着でき、AMS測定には必須のものである。これまではAMS測定の度に標準のSNICSと交換して取り付けていたので、立ち上げや復旧に1週間程度必要で負担が大きかった。この846イオン源も漸く運転方法が確立してきたことから1997年4月から暫定的に一般利用においても使用することにした。4月からの一般ユーザーの加速イオンは1H、2H、6Li、7Li、12C、13C、14N、28Siであり、これらのサンプルが全て装着されているので、どれでも数分で加速可能となる。なおこの間の14CのAMS測定において7Li<sub>2</sub>や14Nのバックグラウンドの増加は見られていない。

#### ・PISによる $\alpha$ 加速

これまで $\alpha$ 加速は専用イオン源(アルファトロス)をSNICSと交換して取り付けるので年1度にまとめて加速を行っていた。しかしこの負担も軽くなく、PISの開発が進んだことから、PISによる $\alpha$ 加速の準備を進めている。これはPISのECRアイオナイザー部に直接Heガスを流し、イオン化して引きだし、荷電変換してHe<sup>-</sup>を作る。この方法により、846等の固体イオン源と並行して $\alpha$ イオン源を運転することが可能となる。

#### ・BPM連続運転の停止

我々は通常イオン源のモニターとして、負イオン側のビームプロファイルモニター(BPM)を連続運転してきた。このBPMではワイヤーがビームを横切ることから、当然ビームを減らしているが、これまでその効果を見逃してきた。AMS測定においてビーム強度を高速でサンプルしていると見かけのビーム強度の振れが大きかった。当初は電氣的ノイズによるものと考えてノイズ対策をしたが消えなかった。図3に示す様にBPMの使用により10%以上の強度の減少が起こっていた。BPMの停止によりビーム強度の読み出しは安定した。

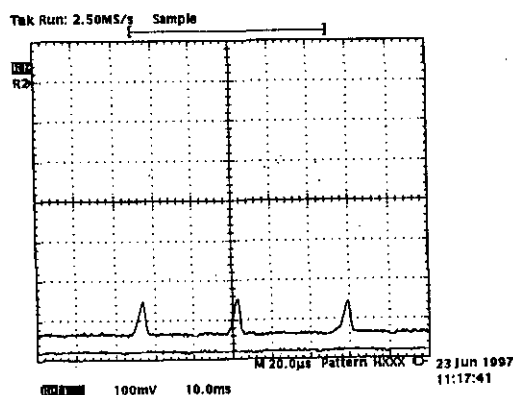


図3. 負イオン電流の時間変化.  
上: BPM運転、下: 停止

#### ・インバーター化

荷電搬送チェーン(1本)のインバータ化に続き、ブローアのインバーター化の準備をしている。現在はブローアの起動時のショックが大きくて、モーターとブローアを繋ぐベルトの破損が大きな問題である。インバーターの導入により起動時のショックが大幅に軽減できると考えられ、ベルト破損の防止に役立つと期待される。

### 3 加速器利用

最近のテーマ毎の利用状況を図4に示す。P I Sの遅れからモーメント測定等の核物理のテーマが進んでいない。相対的には学際的比重が増加している。学部教育は1995年度から3回生の課題演習が少人数化されてテーマが増えている。学部教育ハイテク予算で整備された専用コースは良く利用されている。

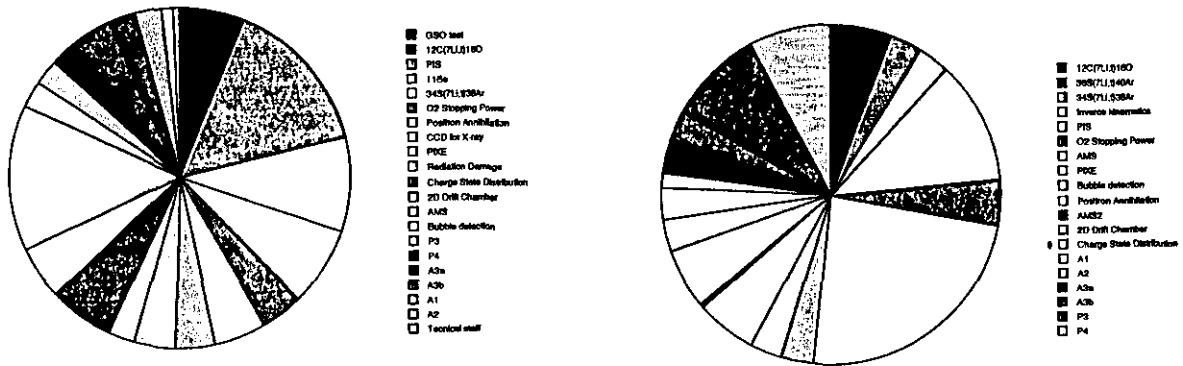


図4. 1996年度前期(第12回)と後期(第13回)のテーマ毎の加速器使用状況。

### 4 プロジェクト

#### 1) 偏極イオン源 (P I S)

京大タンデム原子線型偏極負イオン源の構成を図5に示す[3]。1996年初めにタンデムに入射し、偏極度の測定を行ったがその値は大変低く、システムの検討を行ってきた。ECRの漏れ磁場のRF T部への影響を小さくし、RF T部の発生高周波電圧の増強等を行ったが依然事態は改善しなかった。そこで原子線の軌道計算を行ったところ、光学系が悪く、ECR部で大きな非偏極バックグラウンドを発生していることが明らかとなった。原子線部の最適化を行う必要がある。また分析要素無しでタンデムに入射していたのでバックグラウンドイオンの影響があり、ビーム調整がやりにくかった。そこでP I S入射系にも偏向電磁石を準備している(図6参照)。

1996年度末においてビーム偏極度、ビーム強度共に不十分で更なる開発が必要であったが、一方プロジェクトとしてのまとめも必要であった。検討の結果もう1年だけ延長して、その時点で今後の進め方を議論することになっている。

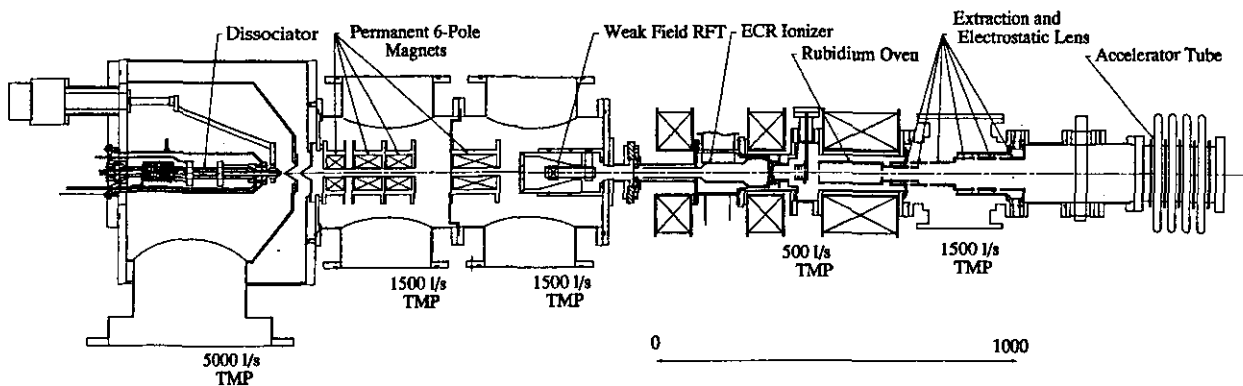


図5. 京大タンデム原子線型偏極負イオン源の構成

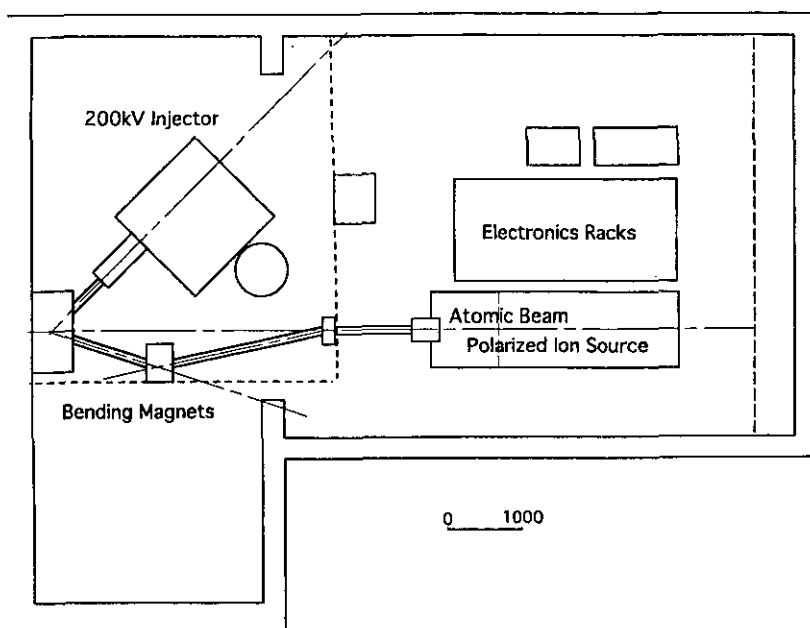


図6. 京大タンデムイオン源室の配置

## 2) 加速器質量分析 (AMS)

基本的な問題は見通しがついた。詳細は松本により報告される [4]。

## 5 今後

このタンデム加速器は原子核物理学の研究室で維持管理している。しかし研究室のほとんどの大学院生は共同利用研究所等の大型の加速器を用いて研究を行っている。現在タンデムは検出器の開発等にも一部利用されている。しかし魅力的な研究課題へと繋げていくことが今後の課題の1つである。

## 参考文献

- [1] 松本 博ほか； 第7回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、1994、p5.
- [2] 中村 正信ほか； 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、p68.
- [3] 桑本 秀一ほか； Proceedings of the Third Workshop on Negative Ion Formation and Beam Handling, KEK Proceedings 93-20, 1994, p85.
- [4] 松本 博ほか； 第10回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、(本報告集) 1997.



# T I A R A 静電加速器施設の現状

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

## 1. はじめに

T I A R A 静電加速器施設<sup>1)</sup>はイオンビームによる宇宙環境材料、核融合炉材料、高機能材料の研究開発やバイオ技術の研究を主体とした放射線高度利用研究のための加速器群で、3台の加速器による複合照射実験が行えることが大きな特徴である。平成6年1月からすべての加速器の研究利用運転を開始し、これまでの各加速器の積算運転時間は3MVタンデム加速器、3MVシングルエンド加速器及び400kVイオン注入装置について、それぞれ7700時間、6500時間そして5500時間に達している。

## 2. 運転状況

各加速器は運転開始以来、運転員の勤務時間上の制約などから原則勤務時間内のデイリー運転を実施してきたが、各種実験が本格化することにより実験者から利用時間の延長が強く望まれていた。幸い、平成8年度から各加速器当たり1名の運転員を2名に増員することが認められたため、9月から運転員の交代勤務による最大23時までの夜間延長運転を開始した。この延長運転の採用により平成8年度の各加速器の運転時間は、7年度に比べてタンデム加速器で32%、シングルエンド加速器及びイオン注入装置でそれぞれ9%及び20%増加した。さらに、これまでマシンタイム日数の1.5~2倍の利用申込があったのが、延長運転開始後は1.2~1.3倍程度の適正倍率になっている。図1に年度毎の各加速器の年間運転時間を示す。

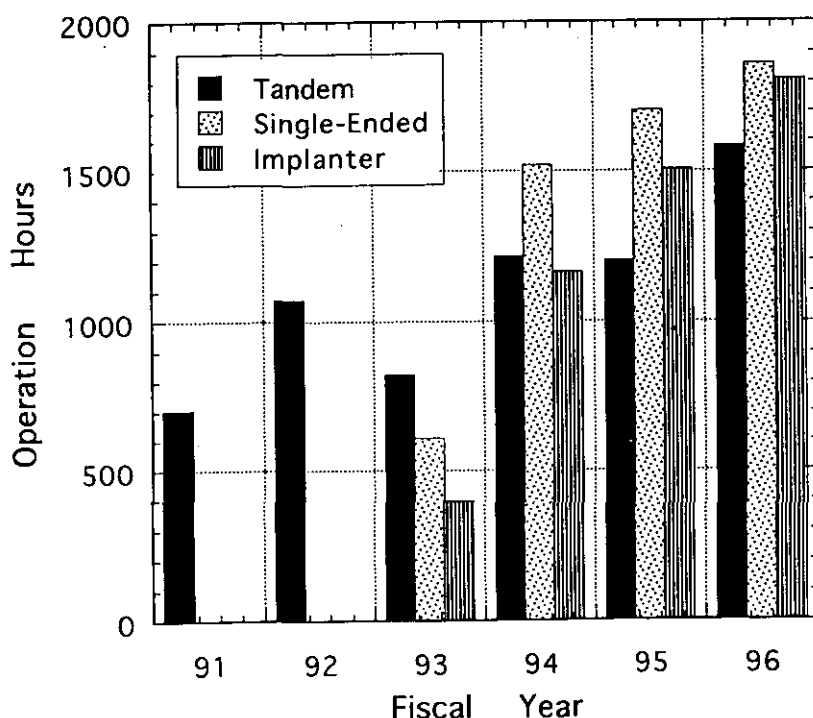


図1 各加速器の年間運転時間

### 3. 装置改良

#### 3.1 シールド電極支持金具改良／シングルエンド加速器

平成7年に加速電圧の異常振動（変動幅約3 kV、周波数約17 Hz）が発生した。原因はシェンケル昇圧回路を構成するシールド電極の一部で隣接する電極相互が異常に接近して放電した結果であることが判明した。このため電極を支持する金具をこれまでのアルミ板加工品からアルミ鋳造品に変更することにより、強度を高めて位置精度が正確に保てるようにした。交換作業は全支持金具232個について平成8年12月に実施した。

#### 3.2 ビームラインへのターボポンプ設置／シングルエンド加速器及び注入装置

これらのビームラインは基本的にイオンポンプのみで真空保持を行い、立ち上げ時の荒引きは移動型排気装置を使用することを前提として構成されている。このため、ビームラインの保守や長期にわたる停止の後には、真空復帰にかなりの時間と作業量を要していた。このため、各加速器のビームラインのキーステーションに固定してターボポンプを設置した。

#### 3.3 メッシュアテニエータの設置／イオン注入装置

タンデム加速器入射ラインへのメッシュアテニエータ設置については昨年報告したが<sup>2)</sup>、これが実験利用上に非常に有効であったため、イオン注入装置のビームラインにも設置することとした。タンデム入射ラインではビームエネルギーが70 keVと低いため問題にならなかったが、注入装置の場合は最大エネルギーが400 keVであるため、あらかじめビームによるメッシュの温度上昇を測定した。その結果、ビームパワーが15 W以下であればメッシュ温度は650℃を越えず、冷却も必要ないことが分かった。

### 4. トラブル

#### 4.1 電圧安定化システム／タンデム加速器

平成9年4月にタンデム加速器の加速電圧が設定値に保てず降下してしまうトラブルが発生した。電圧制御回路には異常がなく、ロス電流がかなり多かったことから、コロナプローブの絶縁を重点的に調査した結果、プローブと3極管を繋ぐ高圧ケーブル（RG8U）に絶縁不良があることが判明した。3極管が非導通のとき、プローブの電位は数十kVまで上昇するので、絶縁不良箇所にはリーク電流が流れて電圧が下降してしまう結果となったものであった。

#### 4.2 リップル調整器ケーブル損傷／シングルエンド加速器

リップル調整器は並列シェンケル回路相互のバランスをとって加速電圧のリップルを低減化するための可変インダクタンスである。このリップル調整器は本体と別置きになっており、高周波トランスとの間がケーブルで接続されている。通常、このケーブルには42 kHzで約40 Aの電流が流れる。当初、リップル調整器の電流導入端子には6 mm径の真鍮が使用されており、端子の温度上昇による端子近傍のケーブルの劣化が問題になっていた。この温度上昇は接続部の接触抵抗に因ると考えられ、これを減らすため8 mm径の鉄製の端子に交換した。しかし、2.7 MVで運転中、異臭により点検した結果、同端子付近のケーブルが焦げているのを確認した。運転中の端子付近の温度上昇を赤外カメラ

を使って測定した結果、最も温度が高い箇所は端子で、加速電圧 2.7 MV では 115℃、2.8 MV では 135℃ に達すること、また、ケーブル自体の温度は数十℃ で問題ないことが分かった。端子の温度上昇は直流的には考えにくく高周波による加熱が予測されたため、比抵抗の少ないアルミ製の端子材を使って試験した結果、2.8 MV でも端子温度を 40℃ 程度に押さえることができた。最終的には 10 mm 径の銅製端子に交換することで、問題は解決された。

## 5. オンラインビームモニターの検討

イオン照射実験において、ビーム強度を長時間にわたり一定に保つことは難しい。これは、イオン源の状態が時々刻々と変化することが主な要因で、このためサンプルに当たるビーム電流を計測し、積分して照射量を決定することが一般的である。しかし、サンプルが絶縁体の場合や高低温照射の場合などでは、照射ビーム電流を計測できないことがある。さらに、トリプルやデュアルなどの複合照射では総ビーム電流が計測できても個別に分離することができない。現状では定期的に照射を中断して上流のファラデーカップ (FC) でビーム電流を確認しており、特に複合照射ではこの確認をビームの種類毎に行うため照射の中断が長引く。このような照射の中断を無くし、ビーム電流の計測が間欠的であるための照射量の不正確さを改善するため、照射を中断せずにビーム電流を計測するオンラインビームモニターを検討している。

現在、 $nA \cdot \mu A$  オーダーの直流ビームを非接触で測定することは難しいので、ビーム中に損失の少ないプローブを挿入して、その電流を直接、或いは 2 次電子を測定するのが現実的である。ビームのサイズ・形状による影響を避けるため、プローブはビーム中をスキャンするか、ビーム径より広い面積のメッシュを使用する必要がある。今回は NEC 製のビームプロファイルモニター (BPM) を使って、スキャンワイヤーからの 2 次電子とビーム強度の関係を、イオン種、ビームエネルギーをパラメーターとして測定した。

### 5.1 測定方法

タンデム加速器の入射ライン及びターゲットビームラインに設置されている BPM を使って、円筒型のコレクター (90mm  $\phi$  × 138mm  $\ell$ ) に収集された 2 次電子を直接電流積分計 (ORTEC439) で、また、基準となるビーム強度は BPM 直後の FC で測定した。使用したビームはエネルギーが 6.9 keV ~ 1.8 MeV の陽子、炭素、ニッケル及び金の 4 種類で、ビーム強度を数 nA から数十  $\mu A$  の範囲で変化させた。BPM のプローブは 0.5 mm 径のモリブデンワイヤーで、駆動モーターが 1 回転する毎にビーム中を 2 回走査する。モーターの回転数は約 16 rps (50Hz) である。ワイヤーがビームを横切ることによるビーム損失は約 0.6% で、ほとんど問題にならない。図 2 に測定系の構成を示す。

### 5.2 結果

ビーム強度に対する 2 次電子電流は各種イオンに対して、広いエネルギー範囲で良い直線性を示す。図 3 にエネルギーを変えたニッケルイオンに対するビーム強度と 2 次電子電流の関係を示す。安定に計測可能なビーム電流強度は入射ライン (約 70 keV) で数十 nA、ターゲットライン (1 ~ 2.0 MeV) で数 nA である。また、2 次電子の収集効率：

粒子電流単位で表したビーム電流に対する2次電子電流の割合：はイオン種とそのエネルギーによって異なり、モリブデンに対する同じ条件で計算した電子阻止能とほぼファクター2の範囲で一致した。図4に陽子、炭素及びニッケルイオンに対するエネルギーと2次電子収集効率の関係を示す。

これらの結果から可動針プローブの2次電子を計測する方法は、オンラインビームモニターとして可能性があることがわかったので、今後、可動針の電流を直接計測する方法や、可動針を固定メッシュに置き換える方法などの実験を行い、これらの結果を総合的に比較検討して実用化を目指す。

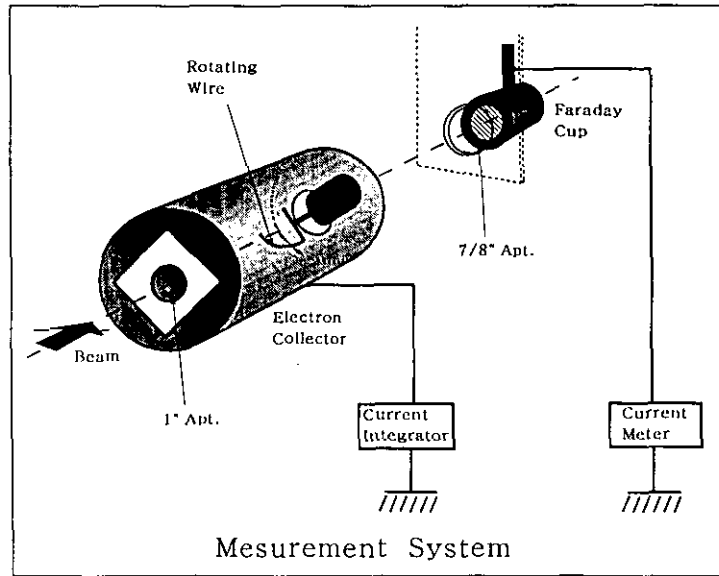


図2 BPMによる2次電子電流の測定系

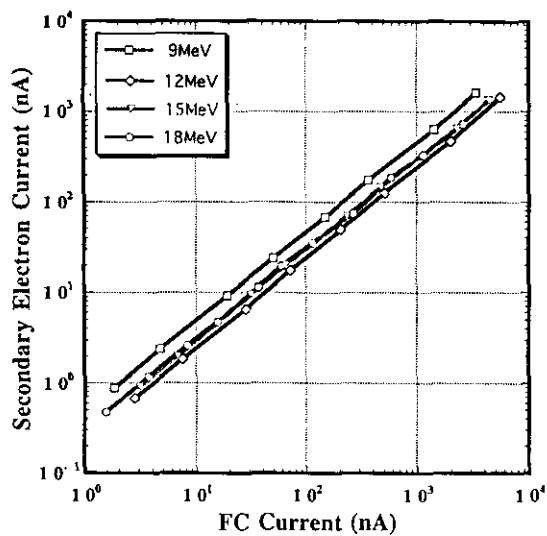


図3 Niビーム電流に対する2次電子電流

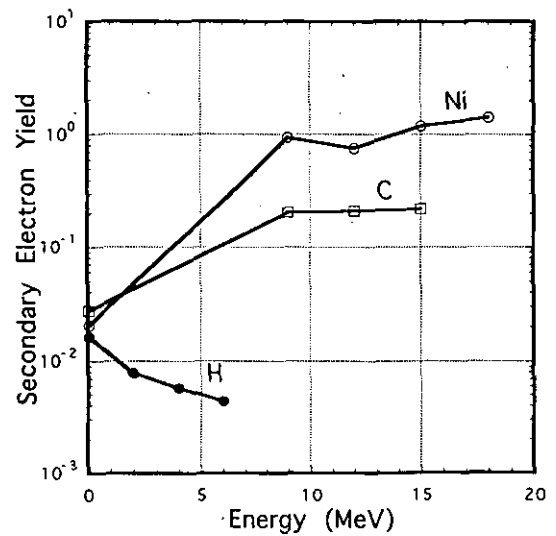


図4 エネルギーと2次電子収集効率

参考文献

- 1) 田島、高田、水橋他：JAERI-Tech 96-029 (1996)
- 2) 田島、高田、水橋他：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)

# 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、荘司時雄  
大内 勲、堀江活三、月橋芳広、阿部新市、金沢修平  
石崎伸洋、田山 豪、松田 誠

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

## 1. はじめに

原研タンデム加速器は、昭和57年に完成以来15年間安定な運転を継続している。この間の整備は、安定性の向上と多くの研究に効率よく利用できるよう、開発と改良を含めた整備を進めてきた。昨年度には、タンデムブースターによる研究も本格的に開始され、利用希望は増加してきている。しかし、性能維持のために改良等の行われていない老朽化した部分が残っていることもあり、更新等による整備が必要な時期となってきている。ブースター関連では、加速イオン種及び電流増強を行うため、イオン源の開発、設置計画を進めている。

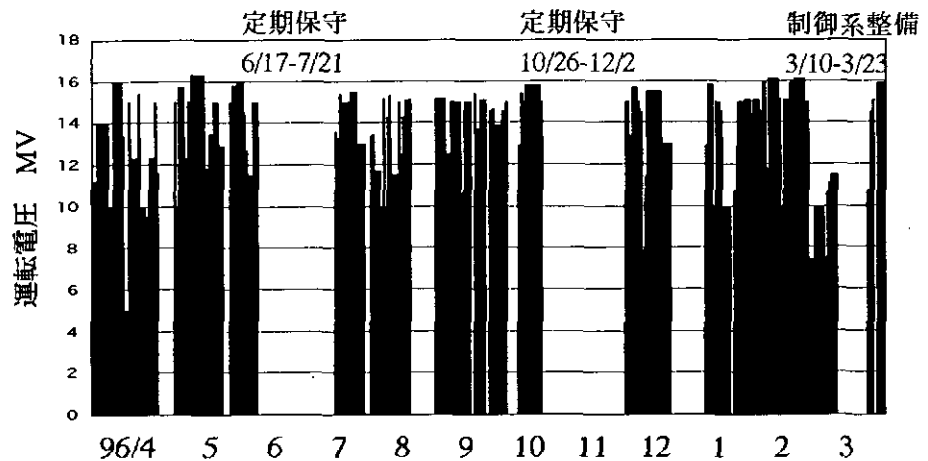
## 2. タンデム加速器、ブースターの運転状況

タンデム加速器の平成8年度のマシンタイムは、3回計画され実施された。この間の大きな故障は、8月末に発生した加速器制御電源関係の故障があり、9日間の利用を中断し修理を行った。原研タンデム加速器は大型の加速器であり、折り返し構造のため、多くの制御回路を有している。この回路の電源

は回転シャフトにより発電器を回し得られているが、発電器の故障により停止せざるを得なかったためである。

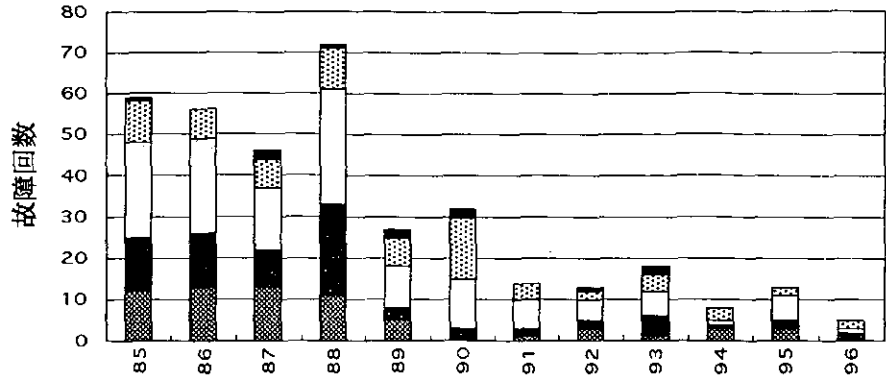
第1図に平成8年度のタンデム加速器運転状況を示す。加速電圧の特に低い所は、軽イオンの低エネルギー実験による要求によるものである。また、ブースター制御室に新たに補助制御卓を設置し、ブースター加速時におけるビームハンドリングが効率的に行えるようになった。

タンデム加速器の運転は、通常24時間を基本に運転されている。平成8年度の運転時間は、231日、5260時間を越えた。また、ブースターの運転もタンデム加速器の運転に合わせ実



第1図 タンデム加速器の運転状況

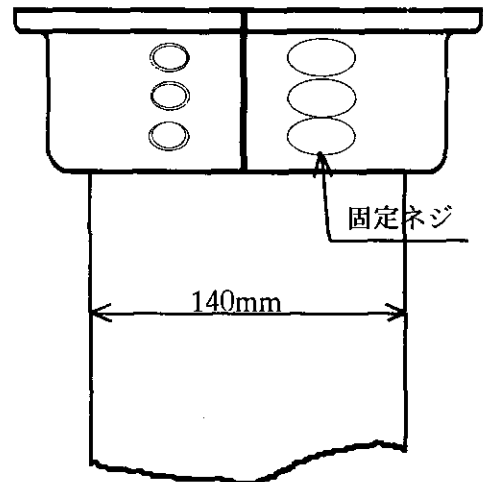
施され、合計35日間の加速を行った。これに伴い、冷凍機の運転は3回行われ、合計149日間の運転を実施した。加速器の故障は平成元年頃より減少し現在では年間10件以下の件数となっており、安定に稼働している。この故障も深刻なものは無く、短時間に修復できている。第2図に年度毎の故障状況を示す。



第2図 年度毎加速器故障回数

### 3. 加速器の整備

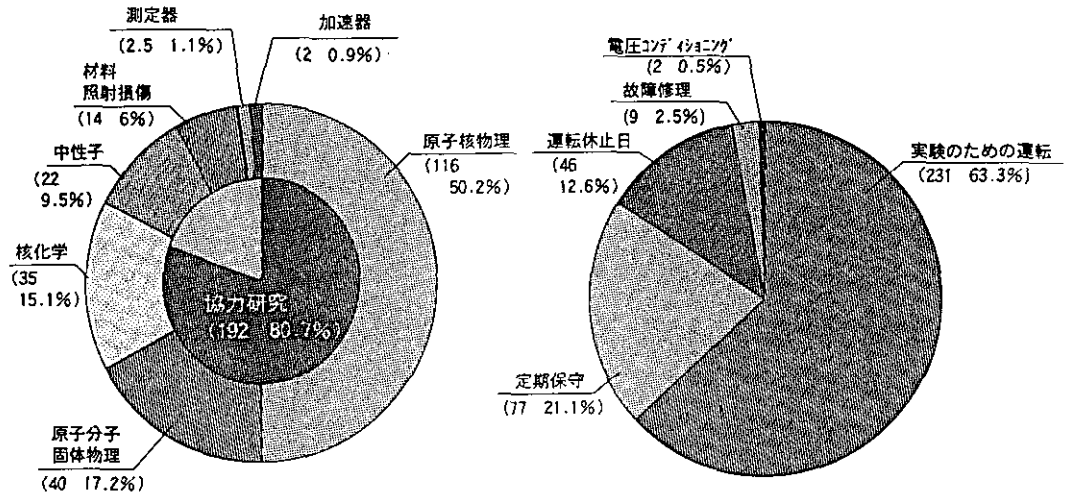
定期整備は2回実施され、それぞれ5週間に要した。最も多くの時間を必要とする整備は回転シャフトの整備である。昨年も同様の報告をしたが、さらに経年劣化及びアライメント不足によるものと思われる故障が出てきている。回転シャフトは毎分750回転と低い回転ではあるが、15KW及び3KWの発電機を駆動するため、非常に大きな径の絶縁シャフトによりドライブしている。大きなトルクのかかるフランジ部は、2分割したアルミニウム合金製のフランジにより締め付けられ回転しているが、このフランジの調整不良はシャフト全体のバランスを崩していると思われる。さらにこれを支えるベアリングに悪影響を与えている可能性が大きく、今後の整備の課題となっている。このほか重要な整備の一つにチェーンの整備、点検がある。原研の場合、チェーンのオイルは必要不可欠であり、アイドルと共に整備を行っている。チェーンのオイルはタイマーにより毎日一定時刻に一定時間の給油を行うようにしている。これにより、チャージング電流は安定していることが確認されている。このほかタンデム加速器の整備として内部イオン源の整備も進めた。下準備としてのビームラインの整備を行い、平成9年度に予定しているイオン源の設置に向けての整備を進めた。イオン源についてはこの報告集の別項目に詳細を発表している。また、制御系の整備では、原研独自の制御系を構築しており、現在連動制御による加速器の制御技術を進めている。このプログラム及びハードウェアの整備が終了すれば近い将来運転形態は大きく変化させることが出来る。制御系についても別項目の報告を参照されたい。



第3図 アクリルシャフト固定部

#### 4. タンデム加速器系の利用

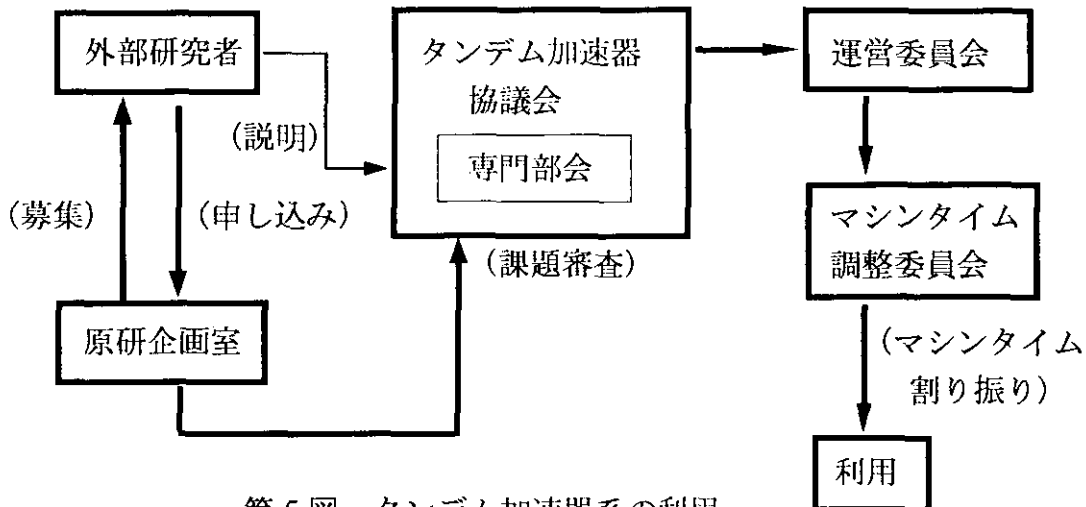
タンデムブースターを利用した研究の進展に合わせ、タンデム加速器の利用日数は昨年 compared 比べて確実に増加している。特に今年度は9日の実験取り消しにも拘わらず昨年より増加した。このうちの半分のマシンタイムは原子核物理の研究に使用され、原子核構造の研究、新アイソトープの合成研究等に使用された。第4図に平成8年度の加速器利用状況を示す。



第4図 平成8年度タンデム加速器利用状況

原研タンデム加速器は、建設当初から協力研究による利用が可能なような研究施設として建設された。近年は総マシンタイムの70%以上をこの協力研究により利用されている。しかし、協力研究による利用方法が解りにくいとの外部からの意見があり、原研内部での調整を進めている。平成9年度分の募集は経過処置として加速器管理室から募集案内を行ったが、平成10年度分以降については、原研企画室からの募集となる予定である。

タンデムブースターの完成と共に整備された反跳型生成核分離装置、多重ガンマー線検出器を利用した原子核物理関連研究も可能であり、さらに、低温照射を可能にした物性用照射チェンバーの整備も完了したことにより、多くの研究者に利用されることを希望している。第5図にタンデム加速器の利用に関するフローチャートを示す。



第5図 タンデム加速器系の利用

# 原研・むつタンデトロン加速器分析施設の現状

日本原子力研究所 むつ事業所

水島 俊彦、郡司 勝文、荒巻 能史、山本 忠利

## 1. はじめに

平成7年10月1日に、海洋環境における放射性核種の移行挙動に係る研究を行う目的で、青森県むつ市 日本原子力研究所 むつ事業所に、海洋調査研究室が発足した。海洋研究に有効な加速器質量分析装置の導入が決まり、ようやく平成9年4月に加速器質量分析装置を設置することができた。

現在、加速器質量分析装置の調整を開始した段階であり、概ね1年半を費やして本装置の詳細なる調整を行い、測定精度を確認する予定である。本稿では、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

本装置は、主に炭素の同位体比を測定するラインと質量数の重いヨウ素の同位体比を測定するラインから構成されている。また、本装置は、イオン源及びイオン入射システム部、タンデム型加速器部、高エネルギーイオン質量分析部の3つの部分に分けられる。図に加速器質量分析装置の配置を示す。

### 2.1 イオン源及びイオン入射システム部

イオン源は、炭素、ヨウ素とも同タイプのセシウムスパッター型負イオン源で、コンピュータにより59試料を自動的に連続測定できるように設計されている。セシウムイオンビームは、350 $\mu$ mまで収束することができ微量の試料でも測定が行える。また、コンピュータにより試料を自動的にX-Y方向に走査することにより、イオンビームのスパッターによるクレーター効果を抑えることができる。

炭素のイオン入射システムは、リコンビネータと呼ばれる入射系を採用しており、4台の45°電磁石と2台の静電型スロットレンズから構成されている。<sup>12</sup>C、<sup>13</sup>C、<sup>14</sup>Cのイオンを同時に入射させることにより、装置に起因する同位体効果をなくすることができる。また、リコンビネータの中間部において、高速回転するチョッパーで<sup>12</sup>Cビームを約1/80に低減させ<sup>14</sup>Cビーム強度を相対的にあげている。このことにより、加速器の負担を抑えて分析時間の短縮を図っている。

ヨウ素のイオン入射システムは、アナライザー電磁石に内蔵されたバウンサー機構を有している。この機構は、電磁石の磁界を変化させずに高速でイオンの加速エネルギーを変化させることにより、個々の質量を持ったイオンを逐次透過させ加速器に入射させることができる。



## 2.2 タンデム型加速器部

タンデム型加速器部は、高電圧発生部、Q-Snout レンズ、低エネルギー加速管、荷電変換部、高エネルギー加速管、四重極型レンズから構成されている。加速器本体は、ターミナル電圧が3 MVまで昇圧できるコッククロフト・ウォルトン型電圧発生方式を採用し、加速器タンク内の絶縁にはSF<sub>6</sub> ガスを使用している。加速管は、大口径（外径32cm）のものを使用しているため真空排気特性が向上され、高電圧ターミナル近傍で良い真空度が得られる設計となっている。さらに、高電圧ターミナル部の荷電変換部の口径を大きくすることができ、加速器に入射されたイオンがQ-Snout レンズにより全て荷電変換部に取り込める構造となっている。この荷電変換は、高電圧ターミナルのウィンドレス荷電変換カナルで、低圧アルゴンガス循環方式で行われる。

## 2.3 高エネルギーイオン質量分析部

高エネルギーイオン質量分析部は、炭素ラインとヨウ素ラインから構成されている。

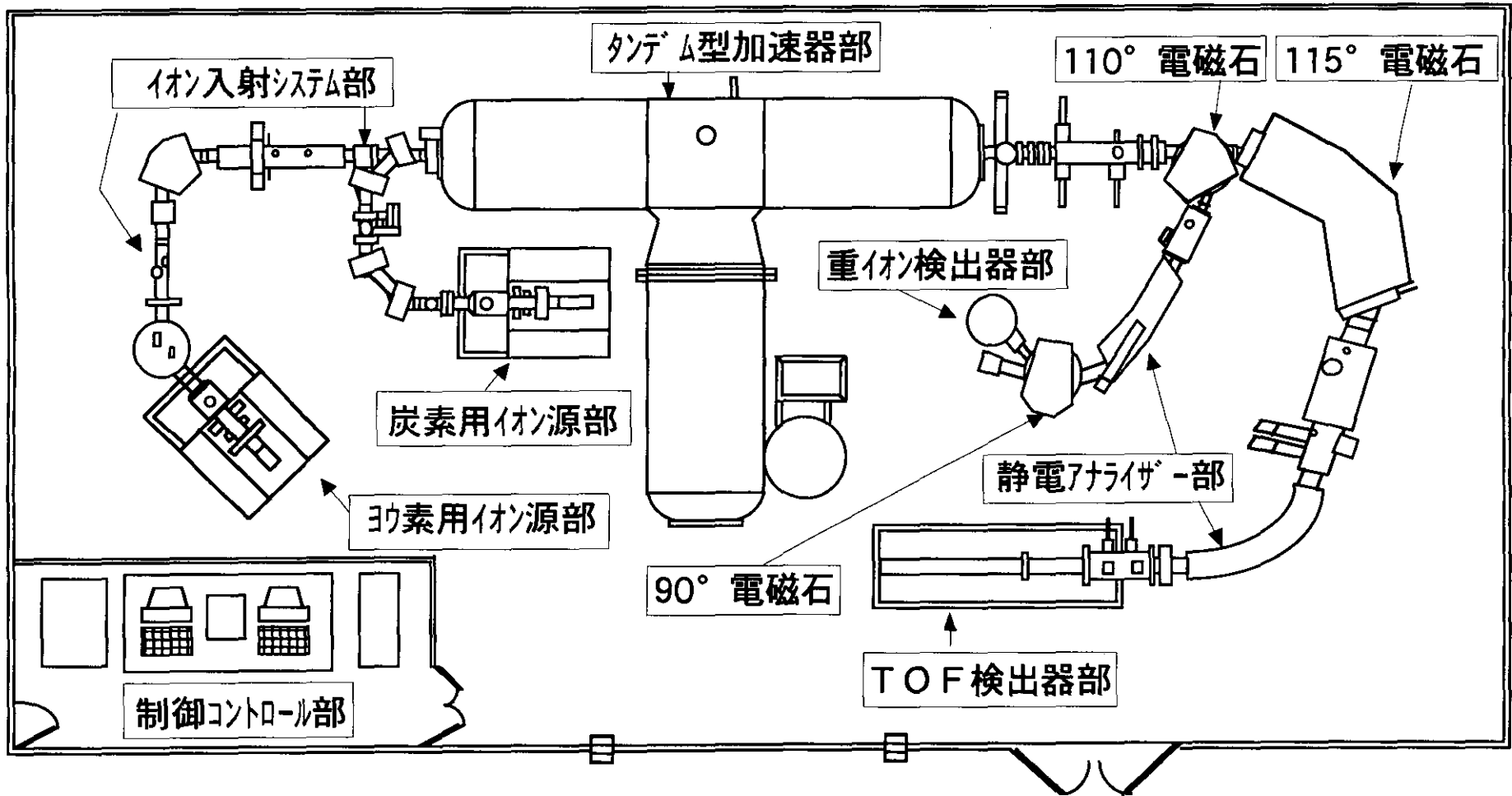
炭素ラインの高エネルギーイオン質量分析部は、110° 電磁石、90° 電磁石、静電アナライザー、重イオン検出器から構成されている。加速器を通過した<sup>12</sup>C、<sup>13</sup>C、<sup>14</sup>C のイオンは、初段の110° 電磁石によりそれぞれのチャンネルに導かれ、<sup>12</sup>C と<sup>13</sup>C イオンビームは、ファラディカップにより電流測定される。<sup>14</sup>C のイオンは、さらに静電アナライザー、90° 電磁石で分析され重イオン検出器でパルスカウントされる。<sup>13</sup>C イオンビーム測定には、ターミナル電圧の変動に伴う測定誤差を抑えるため、スリット内蔵ファラディカップを採用しターミナル電圧をフィードバック制御している。

ヨウ素ラインの高エネルギーイオン質量分析部は、115° 電磁石、静電アナライザー、飛行時間型検出器から構成されている。加速器を通過したヨウ素のイオンは、初段の115° 電磁石により質量分離され、飛行時間型検出器でそれぞれのイオン速度の違いから目的とするイオンを識別している。

## 3. おわりに

本装置の主な使用目的は、<sup>14</sup>C の同位体比を測定して深海海水の年齢、海水の循環及び大気-海水間における炭酸ガスの分配過程を解明することと、原子力施設等から放出される環境中の<sup>129</sup>Iの同位体比を測定して環境評価研究に役立てることである。

今後は、本装置の詳細なる調整を行いながら、標準試料を用いて同位体比の測定精度（くりかえし精度）を確認する予定である。さらに、この期間内に炭素ライン及びヨウ素ラインの切替えに必要なコンデショニング等を確認しながら運用方法を決めて行く予定である。



加速器質量分析装置配置図

## 東濃地科学センターにおけるタンデム型加速器導入計画

東濃地科学センター 伊藤 茂、徐 勝、阿部 雅人、渡辺 雅人、岩月 輝希

### 1 はじめに

動燃事業団・東濃地科学センターでは、平成8年度に各種同位体分析を目的としてタンデム型加速器が導入された。本件では、その現状、研究内容、今後のスケジュール等について報告する。

### 2 目的

地下水や岩石等の各種環境試料に含まれる極微量の放射性元素の同位体比を測定することによって、地下水の流動状況や地層の形成史、地質環境の長期安定性などに関する研究を行う。

### 3 装置概要

装置の性能を以下に示す（各部は図1参照）。

|         |                              |
|---------|------------------------------|
| 装置      | : NEC 製 ベレトロン 15SDH-2        |
| 加速エネルギー | : $5 \times (n + 1)$ MeV     |
|         | n : 電荷                       |
| ビーム電流   | : $\sim 1 \mu\text{A}$ (測定時) |
| イオン源    | : 固定試料用、気体試料用 (逐次入射型)        |
| 加速粒子    | : C、Cl、Ca、Be、Al、I            |

### 4 現状

現在の装置性能を以下に示す。

|         |  |
|---------|--|
| ターミナル電圧 | : 最大 5 MV                                      |
| ビーム電流   | : $^{12}\text{C}^{+4}$ で最大 $10 \mu\text{A}$    |
| 測定精度    | : $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の測定精度 0.5% 以下 |

また、測定に関する誤差のうち、再現性精度についての確認を行った。NIST しゅう酸から抽出された炭素試料を用いて  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  比を測定し、再現性精度  $\pm 0.5\%$  を得た。（表1、図2）

### 5 今後

平成9年度は測定精度、確度の確認を行う。平成10年度以降、各種同位体を分析するための前処理技術及び測定技術の開発を行っていく（図3）。

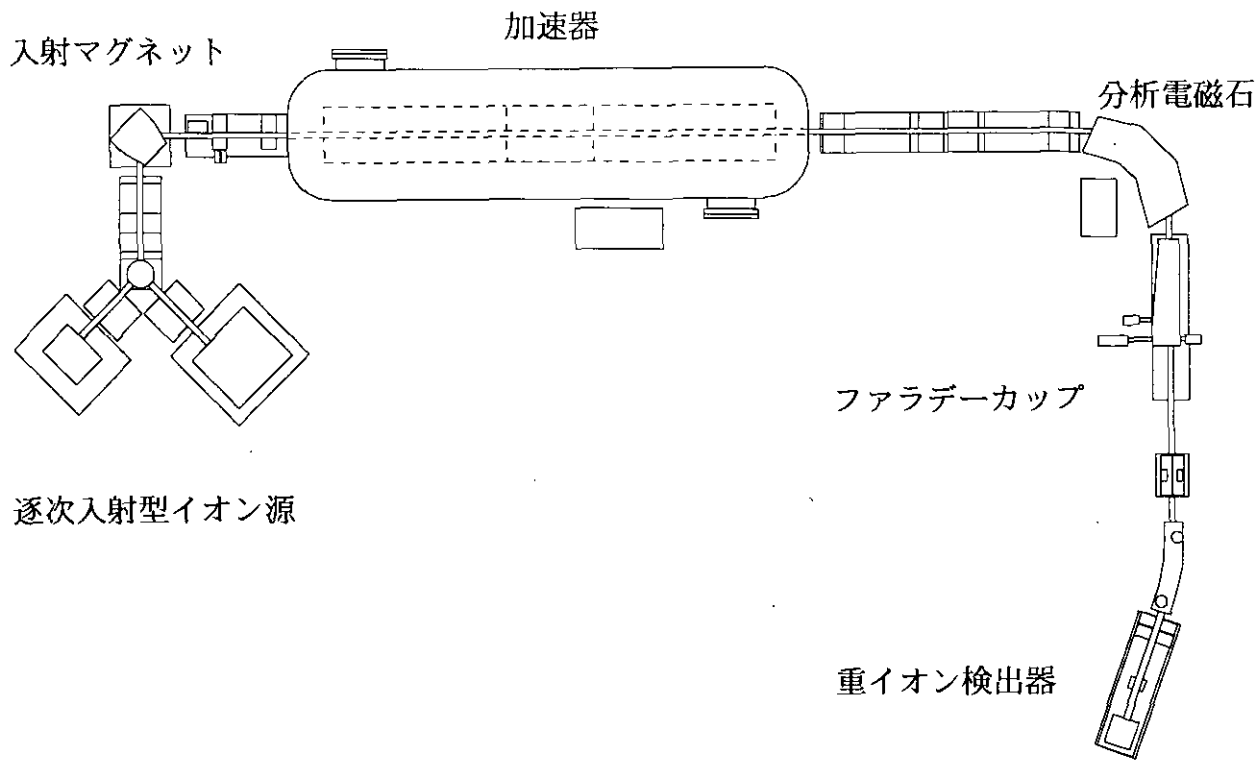


図1 タンデム型加速器質量分析計 (ペレトロン 15SDH-2)

表1  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  比の測定

| 試料       | $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比 |
|----------|---------------------------------|
| Sample 1 | $9.74 \times 10^{-13}$          |
| Sample 2 | $9.65 \times 10^{-13}$          |
| Sample 3 | $9.70 \times 10^{-13}$          |
| Sample 4 | $9.65 \times 10^{-13}$          |
| 平均値      | $9.68 \times 10^{-13}$          |
| 標準偏差     | $0.0446 \times 10^{-13}$        |

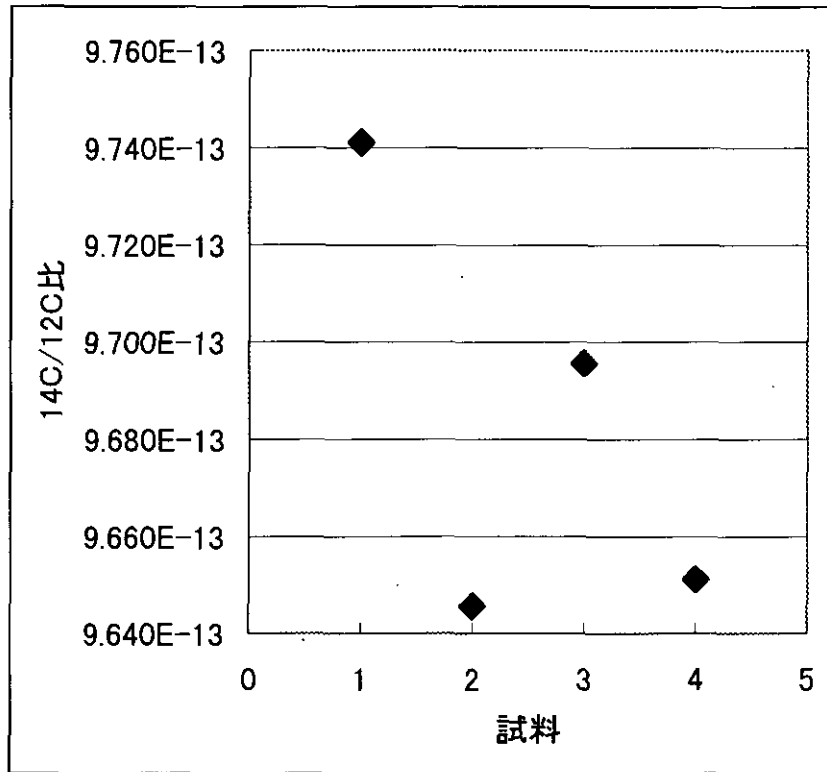


図2  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  比の測定

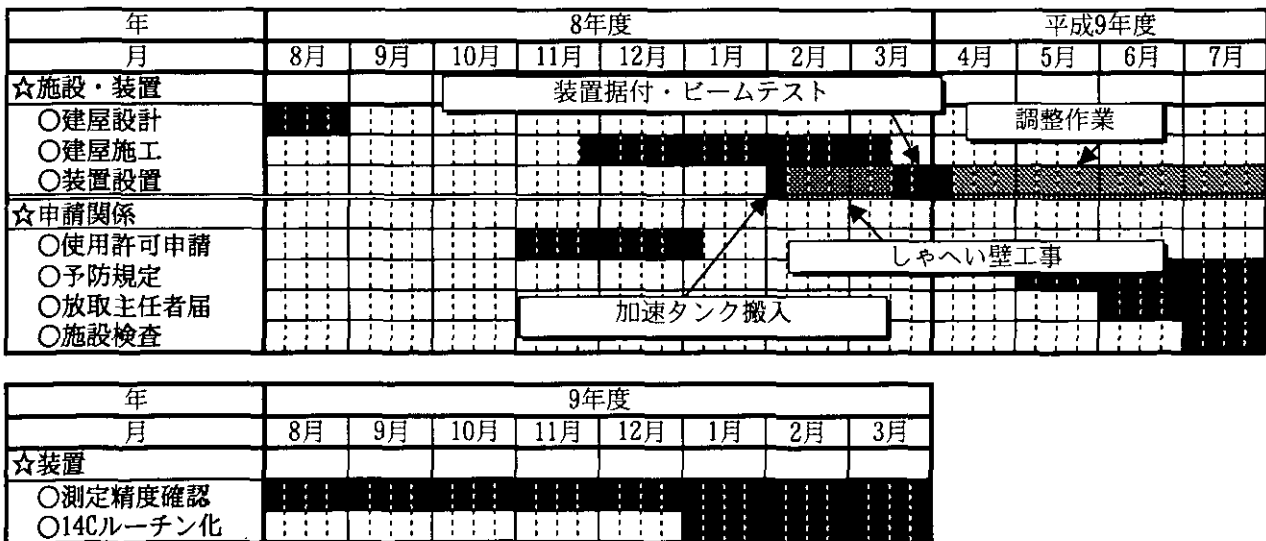


図3 現在までの経緯

## 東工大原子炉研の粒子線加速器計画

東京工業大学 原子炉工学研究、総合理工学研究科  
小川雅生、小栗慶之、服部俊幸、堀岡一彦、志甫諒

### 1) はじめに

我々は重イオン慣性核融合、原子力応用、高温・高エネルギー密度状態の物理などの研究を目指して、大電流イオンの加速技術の開発を考えている。例えば、重イオンと高温・高密度プラズマとの相互作用を調べる場合、プラズマ標的はレーザー照射や大電流放電により生成される。このように生成されるプラズマ状態の時間スケールは $ns \sim \mu s$ と短かく、短い時間幅の中で相互作用するイオン数を確保するためには、入射するビームは大電流であることが望ましい。具体的には、ターミナル電圧が $3 \sim 4 MV$ の重イオン大電流タンデムの導入、誘導型線形イオン加速器の開発、RFQ線形加速器ビームと重イオンの複合照射、タンデムビームのバンチングなどを計画している。大電流電子線の加速に関しては種々の成果があるけれども、空間電荷効果が効く大電流のイオン加速については、特に低 $\beta$ の領域では未知の分野が多い。そこで、低 $\beta$ 領域の加速技術、大電流イオンビームの振る舞いなどが研究の対象となる。ビーム利用の面では、短いパルスの中に多くのイオンを詰めたビームの照射により、ターゲット物質の急速加熱が可能となる。この加熱プロセス自身が興味の対象となると同時に、プラズマ化した標的をプラズマ・イオン相互作用に利用することができる。

### 2) 現在の準備状況

**重イオン・プラズマ相互作用実験**：レーザー生成プラズマに $1.7MV$ タンデムからの重イオンビームを照射し、ビームのエネルギー損失や荷電状態の分布を測定する。利用できるレーザーは2種類あり、 $CO_2$ レーザー ( $\lambda = 10 \mu m$ ,  $E = 3 J$ ,  $\Delta t = 1.6 \mu s$ ) と+ポリエチレン板、Ndレーザー ( $\lambda = 1 \mu m$ ,  $E = 3 J$ ,  $\Delta t = 30 ns$ ) +LiHペレットの2種類の方法で生成される。ポリエチレンプラズマについては $0.9 MeV Li$ ビームの荷電変換とエネルギー損失が測定されている。

**プラズマ標的の診断**：プラズマ標的の電子密度はレーザー干渉計測およびモノクロメーターを用いた分光計測により診断される。急速膨張するプラズマの電子密度は時間および空間の関数として計測される。分光計測から数 $\sim 10 eV$ の電子温度が得られた。

**Beam Chopper**：タンデムのDCビームをパルス化するために、 $1/4$ 波長の $90MHz$ 同軸型空洞共振器を作製した。これを用いて $3.6 MeV O_2^+$ ビームのパルス化に成功している。

**Induction加速試験**：大電流の $H^+$ イオンを生成するプラズマガン方式のイオン源が試作された。Inductionコアーは外径 $375 \phi$ 、内径 $135 \phi$ 、厚さ $60$ の珪素鋼を3個束ねたものであり、 $10 kV$ の電圧を発生する。この磁気コアーを用いて空間電荷制限電流密度 $J_{CL}$ の $80\%$ に相当する $30 mA/cm^2$ のイオン加速が観測された。

**イオンビームによるプラズマ生成**： $0.2 MeV/u$ のRFQ線形加速器が $1993$ 年に完成し、 $2 mA$ の $He^+$ ビームを供給することができる。高速キッカーを用いてビーム電流を $1$ マイクロパルスの時間で立ち上げ、そのビームを水素ガスに照射する。 $He^+$ ビーム照射による水素のプラズマ化を調べることが可能になっている。

### 3) 計画中の設備

大電流重イオン照射実験装置：

ターミナル電圧が3～4MVのタンデム加速器

目標加速電流～1mA

バンチング装置の開発

パルス電流～10mA

高温高密度プラズマ生成装置：

100J/pulse級のNdガラスレーザー

プラズマの電子密度～ $10^{21} \text{ cm}^{-3}$

誘導型線形イオン加速試験装置：

加速電圧は100～200kV×4段

磁気コアーモジュールの開発を含む

RFQビーム励起評価装置：

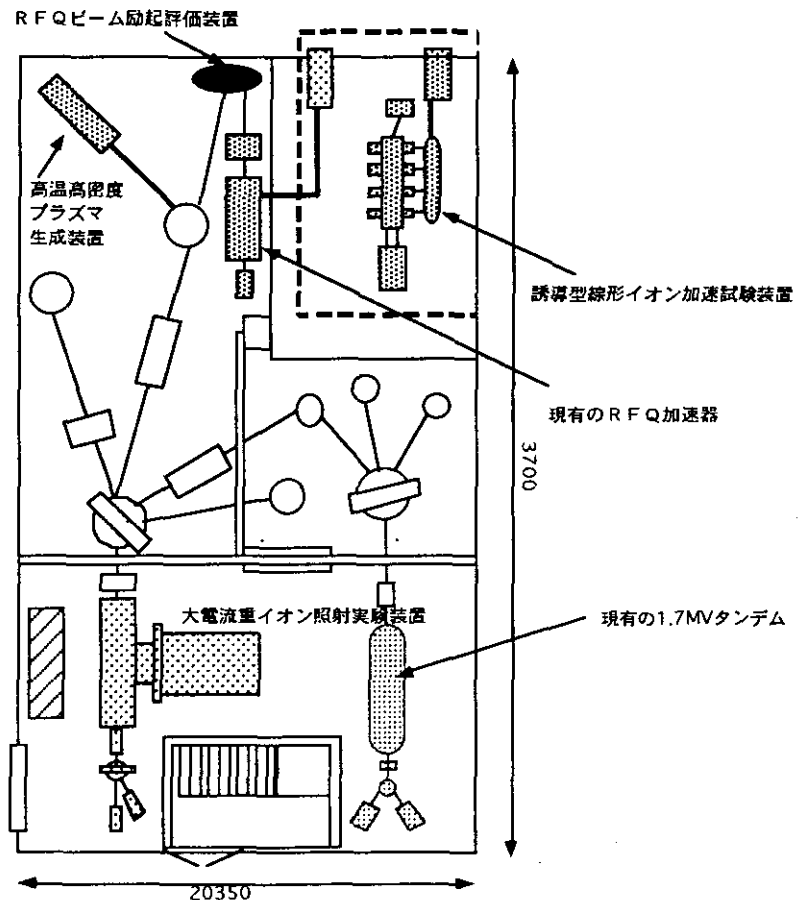
RFQ加速器ビームとタンデムビームの重照射

1.7MVタンデム：

現有タンデムであり分析用

4) 今後の課題

機種や仕様はまだ十分に詰めていないので、開発要素の見極めを含めて検討することが必要である。基本的な大型設備はカタログ品を購入し、これに接続する特殊な機器は自主開発をする。設置場所も問題であり、現行の建物の増改築、アイソトープ総合センター建物の新設などが想定される。折からの国家財政の厳しい状況の下で、予算獲得に向けて大いなる努力をする予定である。



# ケーブルのノイズ対策

## 1. はじめに

加速器設備では制御用、実験測定用ケーブルを多用し、且つ長い。これらのケーブルの接地系統を流れるノイズ電流は、ケーブルでノルマルモードノイズ電圧に変換される。それが、制御・測定回路系に侵入して制御系の誤動作、測定系の分解能の低下などをもたらす原因になる。従って、この対策に簡易で効果的方法があれば、加速器設備には非常に有用なものになる。本報告は、「柔構造的」接地システムをもとにした対策方法として、特にケーブルに適用した場合についてのノイズ抑制効果を測定評価し、設備で可能と思われる対策方法の提案をする。

## 2. 「柔構造的」接地システム<sup>(1)</sup>

「柔構造的」接地システムの概念図は、図1になり、接地電位差を許容して柔軟に対応できる方法と建物の柔構造で逃げる方法とのアナロジーから「柔構造的」接地システムとしている。ノイズ発生源で分類し、それぞれに適切な対策手段を適用するものである。

### (1) 内部ノイズ源対策手段

線状の接地線は寄生インダクタンスを取り除くことはできず、理想的にはならない。しかし、電気機器・システム内ノイズについては接地線を被覆構造にすることによって外部磁束をゼロ近くにすることができるため、インダクタンスを著しく下げることが可能で、高周波に対してもインピーダンスが小さい理想的な接地線にすることができる。

(2) 外部ノイズ源対策手段 外部ノイズによって生じる電気機器間ノイズ電圧は、機器間の接地インピーダンスを下げ、外部ノイズ電圧降下による電位差を小さくすることができるが、限界がある。そこで、その影響を抑制するため、伝送線路に同相成分のノイズ電圧降下を作ることによって、システム内部の回路には外部ノイズの影響が現れないようにできる。この電圧降下は、超高透磁率トロイダルコア（以下コア）によって実現できる。

(3) 引き込み線への対策 電源、信号引き込み線の接地線は、引き込み線接地電位と電気機器筐体電位と一致するように、電気機器筐体電位を代表する接地極に接続する。

## 3. ノイズ対策方法

### 3-1 ケーブルへのノイズの侵入

ケーブルにノイズ電流が流れる原因は、図2(a)に示すノイズの侵入があり、ノイズ電流循環路でノイズ電圧を抑制する電気機器Bの接地インピーダンス $r_{EB}$ が $0\Omega$ にならないことによる。

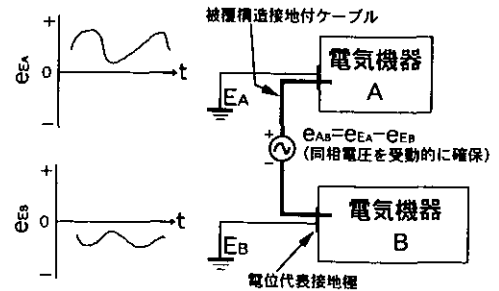
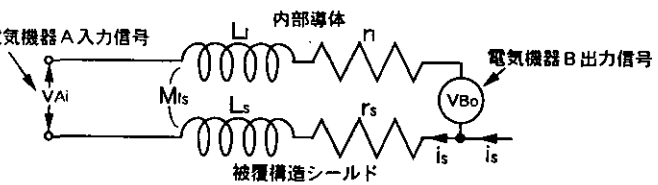
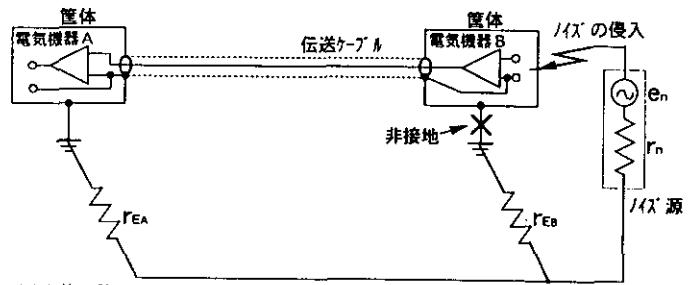


図1 柔構造的接地システムの構成



$$V_{Ai} = V_{Bo} + \{r_s + j\omega(L_s - M_{ls})\} \cdot i_s$$

図2 ケーブルでのノイズ侵入機構



そのため、(b)の等価回路のようにノイズ電流が流れ、図の式に示すケーブルでのノイズ電圧が電気機器Aの入力に加わることになる。

### 3-2 ノイズ対策方法 (図3)

(1) ノイズ源混入対策  
ノイズ対策の基本は、まずノイズ源がシステム内に混入しないようにすることである。さらに、もし混入しても、影響を受け難くするため、その電流が流れる電気機器筐体の周辺導体構造物との接地インピーダンス $r_{Eb}$ はできるだけ小さくして、ケーブルに加わるノイズ電圧を下げる必要がある。このことによってケーブルに流れるノイズ電流を小さくすることができる。

### (2) ケーブルでのノイズ対策

ケーブルでの対策は、図3に示すように、コアを用いて同相成分の電圧降下を受動的に確保することになる。しかし、コアのみで実現するには1個当たりで得られる電圧降下は小さい。短絡用接地線を用いてインピーダンスを下げる

ことによって電位差が小さくなるので、コアの小さな電圧降下でも効果を発揮できるようにすることができる。図3は、図4の等価回路になる。

電気機器Aの入力に加わる $V_{Ai}$ は次式で表せる。

$$V_{Ai} = r_s i_s + j\omega(L_s - M_{1s})i_s - j\omega(M_{se} - M_{e1})i_e + V_{Bo} \quad (1)$$

$$L_s = M_{1s}, M_{se} = M_{e1} \text{ならば、} V_{Ai} = r_s i_s + V_{Bo} \quad (1)'$$

$L_s = M_{1s}$ は、ケーブルを同軸のような被覆構造にして、ほぼ実現できる。一方、 $M_{se} = M_{e1}$ はケーブルを同軸構造や複数線であっても充分燃化して、実現可能である。

(1)'式は、ノイズ電流 $i_n$ によって、電気機器Bの出力信号に $r_s i_s$ のノイズ電圧が加わることを表している。なお、 $i_s$ は次式になる。

$$i_s = \frac{r_e + j\omega\{L_e - M_{se} - M_{er} + M_{sr}\}}{(r_s + r_e) + j\omega\{(L_s + L_e) - 2M_{se}\}} i_n \quad (2)$$

(1)'式から被覆接地線にサージ電流が流れることにより生じる被覆接地線の電圧降下が回路システムのサージ電圧になるので、できるだけ抑制することが必要である。

### 3-3 ケーブルでの対策効果の測定

図5の測定系で模擬して測定した。ノイズ源は、最も質の悪いものとして電流源を仮定し、正弦波発信器出力に1kΩを直列に入れて模擬した。測定可能周波数は、

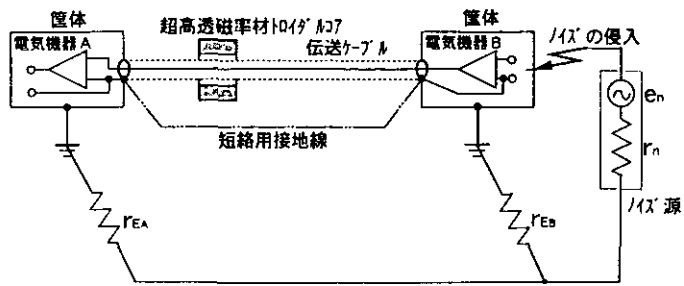


図3 ケーブルでのノイズ侵入対策方法

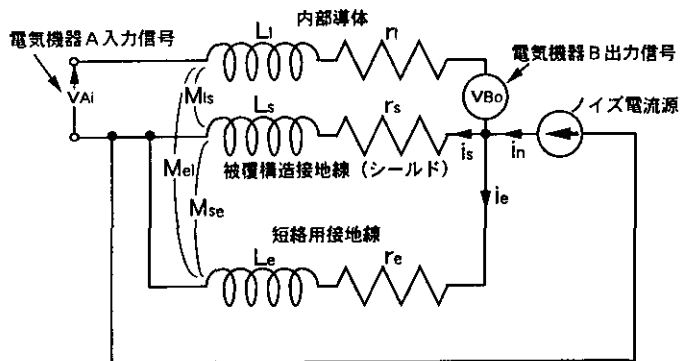


図4 ノイズ対策を考えた電気機器間ケーブルの等価回路

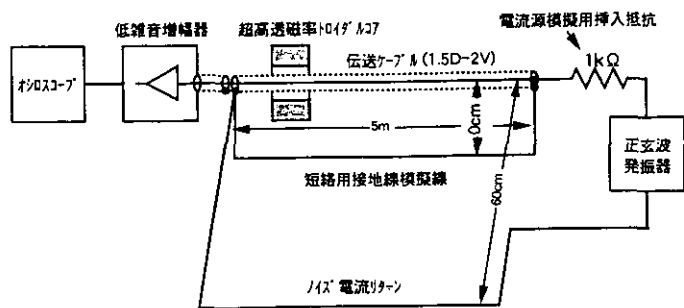


図5 ケーブルでのノイズ侵入抑制効果の測定回路

この回路のインダクタンス (15.2 $\mu$ H) から約1MHzが限界である。

コアは、2種類用い、一つは「日立金属 フェライト MP-10T KN-19 磁芯寸法:外径38mm×内径19mm×厚12.5mm」(以下MP-10Tコア)、もう一つは「日立金属 ファインメット FT-1L KN-19 磁芯寸法: 外径38mm×内径19mm×厚12.5mm」(FT-1Lコア)である。短絡用接地線は、1.25mm<sup>2</sup>単線、12.7mm幅×0.035mm厚銅テープ、及び25.4mm幅

×0.035mm厚銅テープを用いた。前2者について、それぞれコア無し、MP-10Tコア1個、FT-1Lコア1個について測定し、25.4mm幅銅テープについてはコア無しで、それぞれ1kHzから1MHz迄測定した。測定結果は図6に示した。

**3-4 測定結果の考察** (1) 短絡用接地線の特性 (2)式より、抵抗依存域低周波域の特性は各短絡用接地線の抵抗値から予想される特性を示した。またインダクタンス依存域高周波域の特性は、各短絡用接地線のインダクタンスから予想される特性を示した。

(2) 短絡用接地線とコアの併用効果 抵抗依存域では短絡用接地線の抵抗値が、またインダクタンス依存域ではインダクタンスが小さいと、大きな効果が現れている。コア材質は高い比透磁率が得られるファインメットのほうがフェライトよりも特性がよい。

最大減衰幅で見ると、短絡用接地線が1.25mm<sup>2</sup>単線の場合、MP-10Tコアで-13dB、FT-1Lコアで-20dBの抑制効果がある。12.7mm幅銅テープの場合、MP-10Tコアで-21dB、FT-1Lコアで-28dBの抑制効果がある。何も無い場合は約0.3(V/A)になるので、短絡用接地線とFT-1Lコアとの組み合わせで、抑制効果は最大で-40dBが見込まれる。

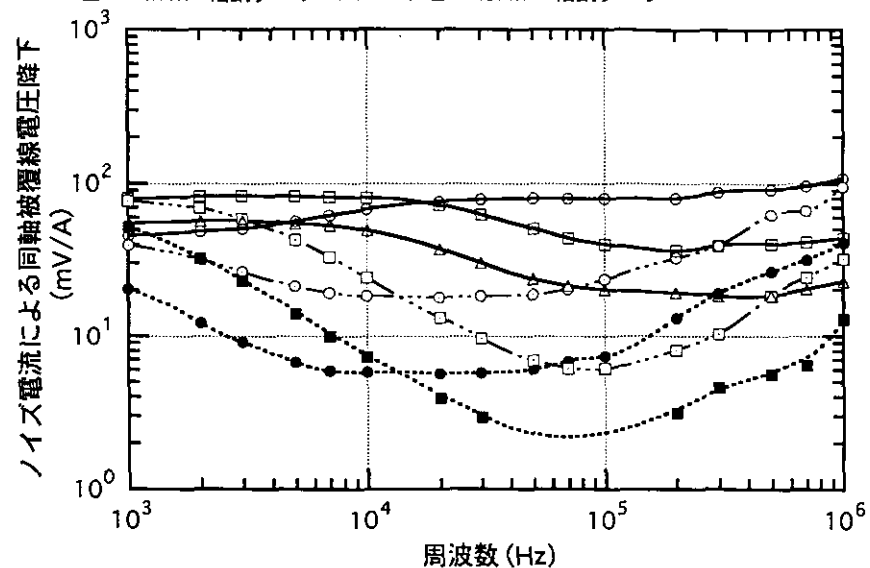
(3) 高周波での対策 周波数が高くなると(1)式のインダクタンス成分のインピーダンスが無視できなくなる。できるだけインダクタンス成分は小さくなるような構成にすることが必要である。

#### 4. 対策方法

**4-1 ノイズ源の対策** 受電設備は、変圧器の二次側が第2種接地されていることによって準定常的なノイズ源になっている。大きなノイズ源の一つで、これを抑制するだけでも耐ノイズ性を高められるものと考えている。受電設備への対策方法は、前回提案した「柔構造的」接地システムによる対策方法<sup>(2)</sup>によって効果を上げることができ、既存の施設への適用は困難な点もある。そこで既存の施設にも適用可能な簡易な対策方法を図7に提案する。図の結線方法により、第2種接地線を通るノイズ電流は、第3種接地線に集めることができ、建物に流れるノイズ電流は著しく小さくできる。しかし、図に示すノイズ電流抑制用抵抗を入れないと、第3種接地線に大きなノイズ電流が流れる場合も考えられるので、各変圧器第2種接地線にはノイズ電流抑制用抵抗 $r_r$ を入れることが必要である。このことによって地絡時の変圧器系統間の相互干渉<sup>(3)</sup>も防止できる。

**4-2 接地の接続** よく見られる例は、コモンモードノイズ源電気機器をシステムに組み込むことにより、システムに問題が生じる場合である。一般的に電源ラインと接地線を循環路に

図6 ノイズ電流による同軸被覆線シールド部の電圧降下  
○: 1.25mm<sup>2</sup>単線、⊙: 1.25mm<sup>2</sup>単線+MP-10T、●: 1.25mm<sup>2</sup>単線+FT-1L  
□: 12.7mm幅銅テープ、⊠: 12.7mm幅銅テープ+MP-10T、  
■: 12.7mm幅銅テープ+FT-1L、△: 25.4mm幅銅テープ



するので、安全上、また信号レベル上、接地が必要な場合は、電源ラインにノイズ遮断トランスなどで循環路を断ち切ることが必要である。接地の必要性が無い場合は、循環路を構成しないように、かえって浮かした方がノイズ対策効果がある。

**4-3 配線への対策** 配線は、電源系統と信号系統との相互の結合を避けるため、分離して距離をとるようにし、電源系統の第3種接地系統は、内部ノイズ源対策のため、それぞれの電源ラインの被覆構造導体を基本にする。信号系統は、図8のようにすることが望ましい。コアはAL値を大きくすることが望ましいが施工やコストによる限界がある。従って、低インピーダンス接地連接体（できれば被覆構造導体が好ましい）内にコアを通した導電性ダクトに一括して収めるようにし、特に高信頼性を要求される信号ケーブルには個々にコアを通すことが、コスト面など現実的であると考えている。

**5. 終わりに**

「柔構造的」接地システムを基に構成することによりシステムの耐ノイズ性を高められると考えている。本報は、具体的な適用を考えて、ケーブルのノイズを中心にまとめてものである。

終わりに、測定器の借用を受けた岩通電子の藤原氏、NF回路設計ブロックの千葉氏、高透磁率トロイダルコアのサンプル提供を受けた日立金属の岡田氏、荒川氏の各氏に感謝する。

**【文献】**

- (1)安本:「新しい接地システムの考え方」, 第11回東大工学部技術発表会技術報告, 5-8('96.7.24).
- (2)安本:「接地から見た加速器設備のノイズ対策」, 第9回タケム加速器とその周辺技術の研究会, 34-37('96.7).
- (3)安本:「電源の対地電圧上昇事故解析による感電ノイズ対策」, 第8回東大工学部技術発表会, 39-42('93.7).

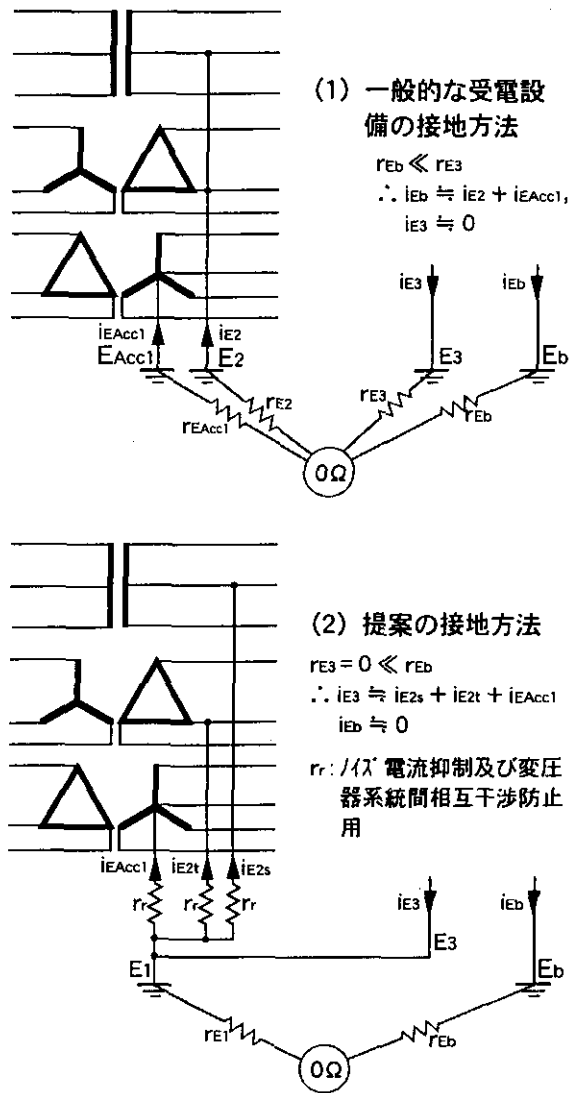


図7 受電設備に起因する建物を流れるノイズ電流の簡易対策方法

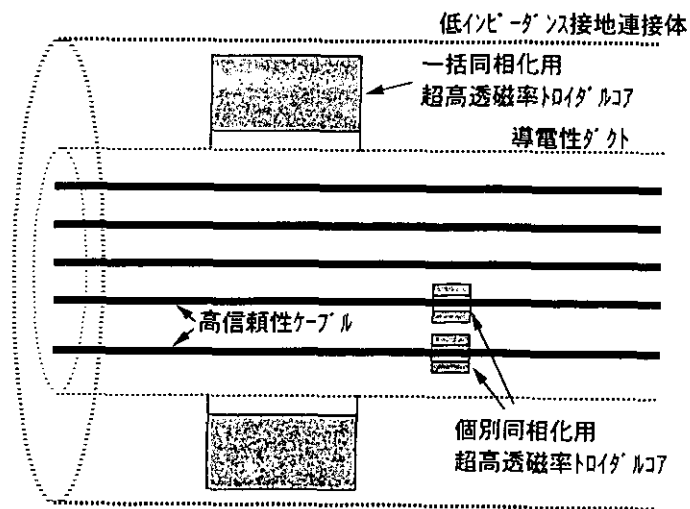


図8 信号系統の対策方法

# 大容量メモリーを搭載したPCによる 多チャンネル高速同時検出システムの開発

(原研高崎) ○酒井 卓郎、内藤 豊、濱野 毅、平尾 敏雄、神谷 富裕  
(東北大工) 室園 啓介、井上 淳一、松山 成男、岩崎 信、石井 慶造

## 1、背景・概要

走査イオンマイクロビームを用いて、生物細胞や半導体素子などの微細な構造をもつ試料の2次元分析を行うためには、プローブビームにより引き起こされた現象と、そのビームの照射位置を関連づけて計測を行う必要がある。即ち、ビーム位置 (x, y) と検出信号のパルス波高 (E) の3パラメーターを同時に検出、A/D変換、コンピューターに転送、データ処理という一連の過程が必要であり、高輝度ビームの照射により試料が損傷を受けるのを避けるため、高速な処理が要求される。このためのシステムとして、大容量メモリーを搭載した市販のパーソナルコンピューター (PC) を基に開発を行った。このシステムを原研高崎に設置されている軽・重イオンマイクロビーム形成装置に組み合わせ、PIXEやRBS法による元素の2次元分析や重イオンの照射により半導体のpn接合部に誘起される電荷収集の分布測定 (IBIC) を行った。

## 2、多チャンネル高速同時検出システム

マイクロビーム走査系と多チャンネル同時検出系の模式図を図1に示す。データ収集システムは、PC (NEC PC-9821Ra20 P6-200MHz RAM 128MByte) とA/D変換ボード (ADC ; CONTEC AD12-16U(98)EH) により構成されている。このADCは12bitの分解能で変換速度は1  $\mu$ sec/chであり、入力を16ch持つ。このうちの2chはビーム走査信号の読み込みに、他のchは各種検出器からの検出信号の読み込みに使用される。また、検出器からの信号を分岐して、タイミングシングルチャンネルアナライザーに入力し、これにより論理信号を形成する。この信号を変換開始トリガーとして、A/D変換を行う。検出信号のパルス波高とビーム走査信号の値は、サンプル・ホールド回路により変換中一定に保たれる。

マイクロビーム走査及び二次電子マッピングは、別のPCにより制御されている。このPCから出力される信号で高圧電源の制御を行い、静電偏向によりビーム走査が行われる。マイクロビームは設定された範囲 (15MeV 4価イオンで最大200  $\mu$ m  $\times$  200  $\mu$ m) を150step  $\times$  150stepでビーム走査され、各点における二次電子強度に基づき、

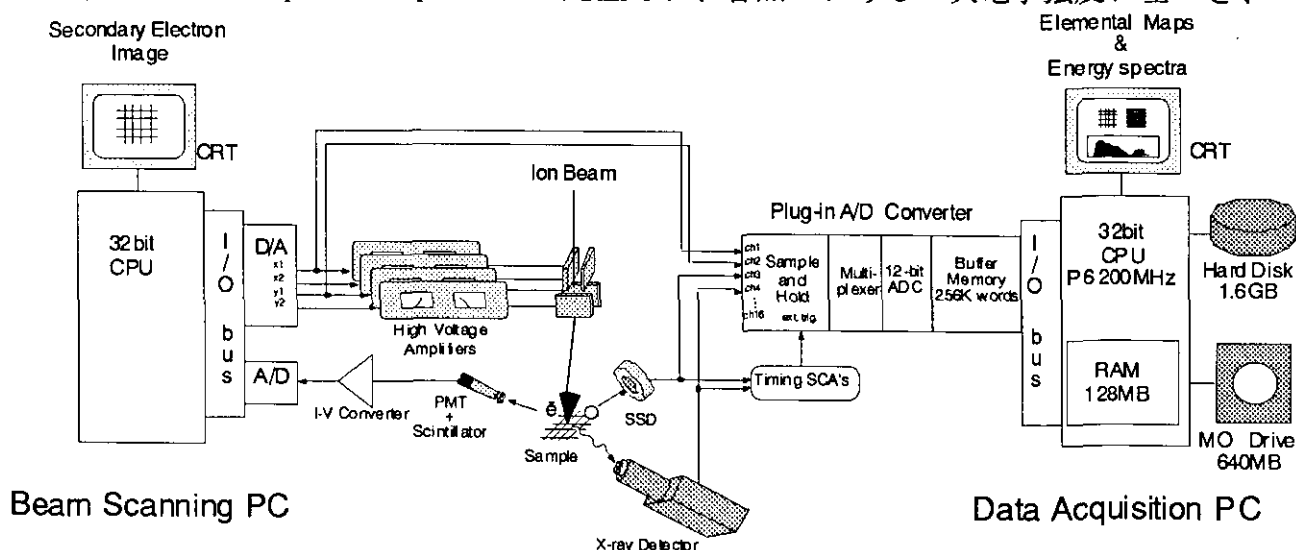


図1 マイクロビーム走査系と多チャンネル同時検出システム模式図

CRT画面上に二次電子像が表示される[1]。

データ収集・処理プログラムは、Microsoft Visual BASICで書かれており、WindowsNT上で動作している。デジタル値に変換されたデータはADCボード上のバッファメモリー(256k words)に一時的に保管され、PCからのリクエストに応じて、I/Oバスを通してPCに読み込まれる。各イベントは、リストとして記憶されるのではなく、3次元配列[(x, y, E)=(150,150,1024)]内の対応する要素の値が増加することにより計数される。この配列は22MByteの容量を持ち、各分析法毎に定義される。これらのデータに基づき、画面上のエネルギースペクトルや各種マップは更新される。イベントデータをリストとしてでなく、配列で扱っているため、ソーティングの必要が無く、高速な処理が可能であり、オンラインで各分析法同士のデータの相関をとることも可能である。これらのデータ収集と処理は独立して行われる。

データ処理速度は、ソフトウェア上での処理の複雑さや、PCの処理能力に依存するが、今回行った条件(3つの元素マップ、2つのエネルギースペクトル、1つの相関をとったエネルギースペクトルを表示)では、5k events/secの処理能力がある[2]。

### 3、マイクロビームによる2次元元素分析

#### 3.1 PIXE、RBSによる元素分析

このシステムの有効性を確認するため、軽イオンマイクロビームによるPIXEとRBSの同時測定を試みた。分析を行った試料は銀ペースト上の銅メッシュ(1000 mesh/inch)であり、2.7MeV Heビームを $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ の範囲に走査して照射した。図2に、このときに得られた二次電子像、PIXE法で得られた銀と銅の2次元元素分布を示す。また、PIXEの元素分布でRBSイベントにフィルターをかける処理をオンラインで行った。全体のRBSイベントから、PIXEにより銀または銅が同定された場所のイベントのみを取り出し、別のスペクトルとして表示を行った。図3に全体のRBSスペクトルと元素フィルターをかけたスペクトルを示す。全体のスペクトルが、銀もしくは銅元素による後方散乱粒子のエネルギースペクトルに分離できており、システムが正常に動作していることが確認できた。

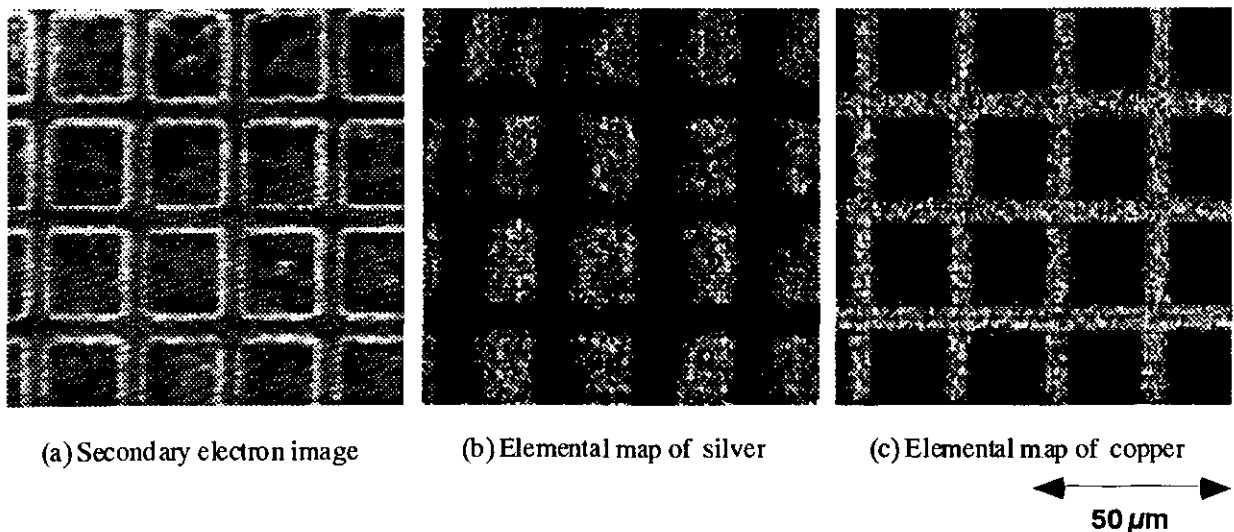


図2 銅メッシュ(1000 mesh/inch)試料の二次電子像と銀と銅の元素分布

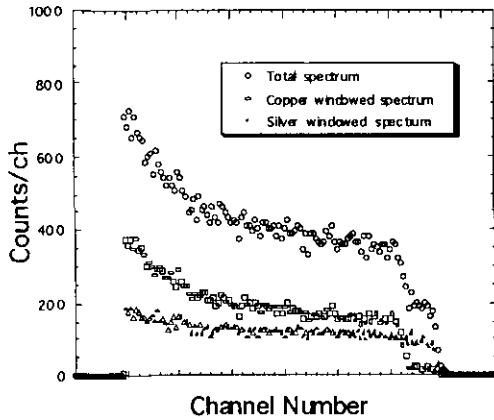


図3 銅メッシュ試料からのRBSスペクトル

に得られたIBICイメージを示す。pn接合部より離れた場所でも生成された電荷が収集されていることが明確に確認できる。また、この方法を用いてビーム照準を行えば、ビーム径と同じ精度で照射を行うことが可能になる。

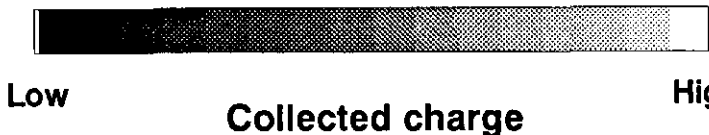
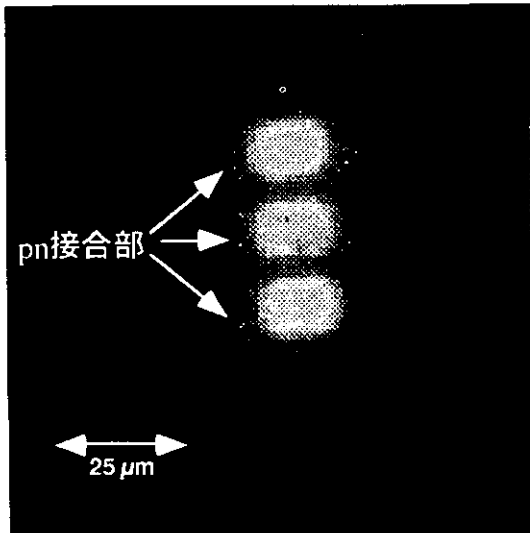


図4 3-finger型pnダイオードにおけるIBICイメージ

### 3.2 重イオン照射による電荷収集分布の測定 (IBIC)

IBIC (Ion Beam Induced Current) イメージングは、イオン照射により半導体中に生成された電荷の収集分布を2次元表示するものであり、宇宙空間における半導体素子の放射線耐性の評価などに有効な手段の一つである。

重イオンマイクロビームを、過渡電流波形の測定[3]に用いた3-finger型のシリコンpnダイオードに走査して照射を行い、イメージングを試みた。試料のpn接合部は $8\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ の大きさのものが $18\mu\text{m}$ 間隔で3箇所、縦に並んでおり、印加電圧は20Vである。照射条件は、15MeV Siイオンを数100ions/secのビーム電流で照射した。図4

### 4、まとめ

市販のPCを基にした多チャンネル高速同時検出システムの開発を行い、軽・重イオンマイクロビーム形成装置に組み込むことで、各種2次元分析を行うことが可能になった。

このシステムはCAMACなどの専用計測システムに比べ安価で、高速処理が可能である。また拡張性も高く、マルチパラメータ計測・処理に適している。

今後、多数のX線検出器から構成される大立体角X線検出システムの開発を行い、このシステムと組み合わせ、主に生物試料の分析を目的としたマイクロPIXEシステムの開発を行う予定である。

### 参考文献

- [1] T. Kamiya, T. Sakai, T. Hamano, T. Suda and T. Hirao, to be published in Nucl. Instr. and Meth. B.
- [2] T. Sakai, T. Hamano, T. Hirao, T. Kamiya, K. Murozono, J. Inoue, S. Matsuyama, S. Iwasaki and K. Ishii, submitted to Proc. of 13th Int. Conf. on Ion Beam Analysis.
- [3] T. Hirao, I. Nashiyama, T. Kamiya, T. Suda, T. Sakai, and T. Hamano, to be published in Nucl. Instr. and Meth. B.

# 環状デュオプラズマトロンを用いたイオンビーム間の衝突による T-D 反応中性子源の考案

磯矢 彰

日本原子力研究所 (客員研究員)

(平成 9 年 7 月 7 日)

## I. 序

ここに云う環状デュオプラズマトロンとは、通常のデュオプラズマトロンの放電管を横方向に引き伸ばして、イオン引き出し口を円弧状の slit にしたものである。slit の各部から引き出されたイオンビームを円弧の中心に向けて加速して中心点に集中させることにより、イオン電流の密度を極度に高めることがきでる。本稿の著者は数年前このようなタイプのイオン源を用いた T-D 反応による強力中性子源の構想を発表した 1)。

この装置は、中心軸に沿って円筒シース状の重水のジェット流を走らせ、その側面全周を環状イオン源からのトリトンビームで照射することによって、ターゲットシース内の狭いスペースに強度  $\sim 1 \times 10^{15} [\text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}]$  の中性子フラックスを発生させようと云うものである。(因みにこのフラックス強度は当時達成されていた世界最高の強度を 2 桁上回るものである。)

イオンビーム照射によって気化した重水は、高温高圧の超音速気流となるが、急激な断熱膨張によって極低温に冷却し、超音波を発生した後、通常のガス状態になって回収される。しかしこの装置は技術的に未解決の問題を含んだために実現の見込みは薄かった。ただ環状イオン源に関しては、テスト装置を作って実験を行った結果、このタイプのイオン源の設計・製作に関するノウハウを得ることが出来た 2)。

今回発表する中性子源は、環状イオン源の中心に集中する高密度イオンビーム間の衝突によって中性子を発生させるもので、重陽子ビームでトリチュームターゲットを叩く通常の方式の中性子源の場合の 100kV レゾナンスが、約 1/4 の加速電圧、即ち 25kV で達成されることになる。

## II. 装置の概要

図 1 は環状デュオプラズマトロンを用いた中性子源全系の構成を示す。図 2 は、イオン源と同電位の外側電極とセンターターミナル電極の詳細である。ここに示されている電極配置は次のような考察から生まれた。外側電極の円弧 A-B の部分は O 点を中心とする半径  $r_0$ 、幅  $l$  の帯状の球面をなしている。イオンはこの球面の各部分より 0 エネルギーで出発し、中心点 O に向け直線的に加速される。平衡状態においては、球面の各部分からのビーム強度は、空間電荷によって制限される飽和値に達している。

このようなイオンビームの状況は、同心の 2 個の球面電極の間に流れる空間電荷制限状態のイオン電流の部分として実現されるもので、動径に沿う電位分布はよく調べられている 3)。イオン電流が存在しないビームの外側の領域の電位分布、従って 2 つの電極の形状は Pierce<sup>4)</sup> によって求め方が示されている。特に球面部分に接する外側の電極の形は接点 A、B の近くで角度  $\angle OAD$ 、 $\angle OBE$  が  $67.5^\circ$  (Pierce Angel) になっている。

1) 磯矢 彰：日本真空 K.K. 技術開発部研究資料 (昭 62.4 月)

磯矢 彰：東海大学開発技術研究所研究会資料集 7 (1989) P.33

2) 磯矢 彰：科学研究費補助金(試験 I) 研究成果報告書 (平成 3 年 3 月)

3) I. Langmuir and K.B. Blodgett, Phys. Rev. 24, 49(1924)

4) J.R. Pierce, Jour. Appl. Phys. Vol2, August, 1940

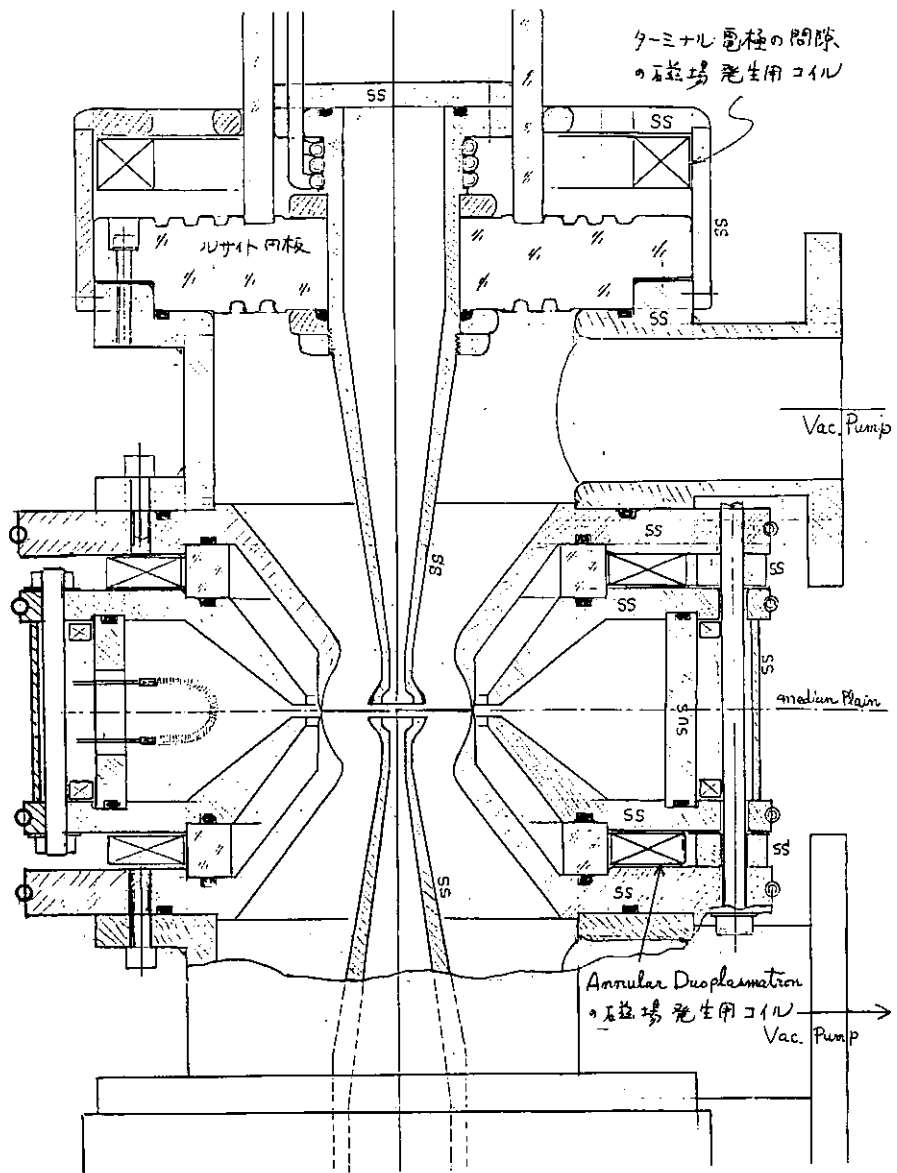


図1. 環状デュオプラズマトロンを用いたイオンビーム衝突によるT-D反応中性子源の断面図

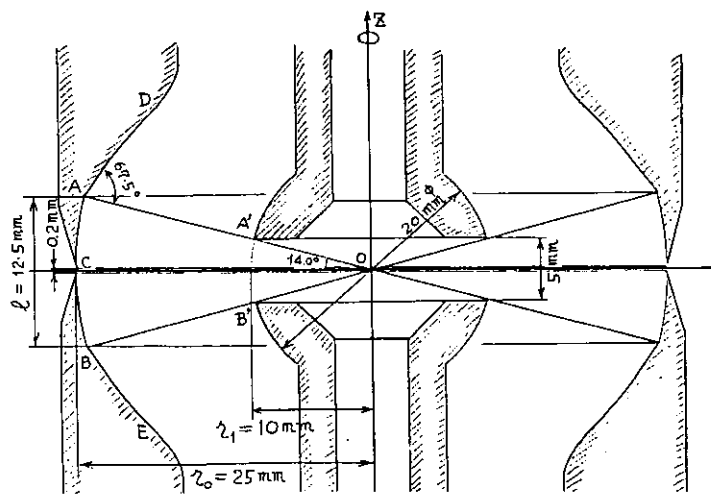


図2. 同心球面電極の配置の詳細



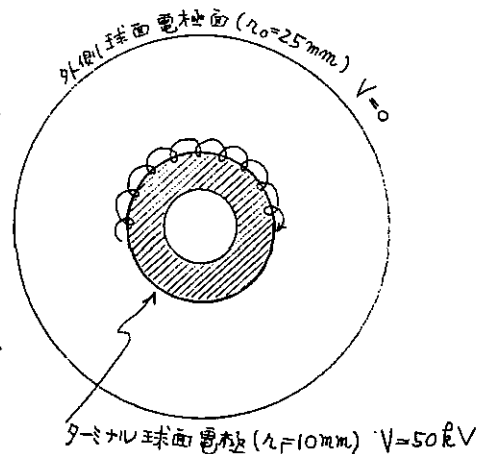
球形ターミナル電極のイオンビームを通すための開口部の処理は、技術的に難しい。開口部を完全に開いたままにして置くと、ターミナル電極の中に入り込んだ電場が入射ビームの発散を起こさせるために、中心点へのビームの集中が失われる。開口部に金属メッシュを張ることによってこの問題は一応解決されるが、入射イオンビームを部分的に遮ることになる。ここで実施しようとしている方法は、ターミナル電極の間隙の周辺部にZ方向の磁場を発生させ、低エネルギー電子雲を間隙の外縁にトラップすることによって、加速電場をこの位置で終結させることである。個々の電子は加速電場とこれに直交する磁場の作用により、Cycloidal motion を行いながらターミナル電極の間隙の外縁を周転することになる（図3参照）。磁場の強さを変えることにより、加速電場とターミナル電極内部の実効的な境界の位置をずらし、この部分のレンズ作用を調節する機能をもたせることも可能であろう。図1には、この磁場を発生するための磁気回路が示されている。

図3. センターターミナル電極の間隙周辺に沿う電子の Cycloidal Motion

$$f_{\text{electron}} = \frac{E}{B^2} \frac{m_e c^2}{e} \quad (\text{in cgs Gauss Unit})$$

$$E = 30,000 \text{ [V/cm]} = 100 \text{ [電流 esu]}$$

$$\text{に対して } f = 1 \text{ mm にすために必要な磁場は } B = 1306 \text{ [Gauss].}$$



ターミナル電極の内部、特に中心点の近傍においては、イオンビームの電流密度が非常に高まるため、空間電荷によるビームの発散が問題になる。これを抑止するため電子雲によってイオンの電荷を打ち消すことが不可欠である。このため低エネルギー電子の供給源として、ターミナル電極内部の金属面をストレイオンが叩くときに放出される二次電子を利用することも考えられるが、それが十分でないときは、ターミナル内部に電子銃を設置しなければならない。

以上の説明は、空間電荷制限によって飽和したイオン電流が、外側電極の球面全体にわたって一様な密度で存在することを前提にしているが、実際の装置ではイオン源からのイオンの供給は、帯状球面の中央の狭い slit (幅 0.2mm) から行われる。イオン引き出しの開始直後には、加速されたイオンはターミナルの中心点を通過して反対側の加速ギャップに到り、ここで減速されて0エネルギーとなって外側電極面に達する。このときに電極に捕捉される可能性もあるが、いろいろの原因によって少しでもエネルギーを失っていれば反発され、行きのコースを逆に辿って出発点に戻ってくる\*。最初の間はイオンビームの存在する範囲は、引出し slit によって張られる薄い円盤状のスペースに限られるが、空間電荷が蓄積してくるにつれてビームは外側に広がって、A-Bの全域を満たすに到る。

個々のイオンは、走行中にガス分子または他のイオンとの衝突によってエネルギーの損失や散乱を受ける。これを避けるためにビーム領域の真空度は出来るだけ高いことが望ましいが、イオン源の引出し slit から流出するガス量は相当多量であり、また電極配置に関する強い制約によってビーム領域の排気コンダクタンスを十分大きくすることが出来ないため、達成される真空度は  $10^{-4}$  torr 代と推定される。しかし、この程度の真空度であればイオンビームの形成に支障を来すことはないと考えられる。

\* 若し加速電場が完全な中心力であるならば、中心点Oのまわりの角運動量が保存則するため、中心を少しでも外れているイオンは外側の球面電極に達することはなく、またこのイオンが中心に戻って来たときの中心からの外れの距離は元と同じになる。

またイオン電流の密度については、中心近傍が他所に比べて圧倒的に高いが\*\*、後述（第V章）のように多重散乱によるイオンビームの発散の度合いはイオンの進路全体としては微少であるので、上述のようなイオンビーム形成の描像が可能となる。個々のイオンは中心点でその進路の折れ曲がりを生ずることはあるが、中心点を外れることは少なく、動径に沿っての往復運動を繰り返すことになる。イオンの進路が中心点を外れた場合には、ターミナル電極の開口部の角  $A'$  または  $B'$  点に衝突することによってビームから失われる。

### III. 中性子源の運転条件について

環状イオン源には重水素とトリチウムの 50:50 の混合ガスが使用され、この 2 種類のイオンが同じ割合で生成されるが、イオン源の放電の強さによって原子イオンと分子イオンの割合が変わってくる。分子イオンを使用する場合には、T-D 反応のレゾナンスを使用する立場から、ビームエネルギーを原子の場合の 2 倍に高めなければならない。これに伴って電極間の飽和電流は空間電荷制限則 ( $j \propto V^{3/2}/M^{1/2}$ ) に従って 2 倍に増加する。更に入射およびターゲットイオンが共に 2 個の原子を含むこと（但し異種のイオンの衝突確率は  $1/2$  である）を考慮すると、反応粒子の流れの強さは 4 倍に増すことになり、発生する中性子数は  $4^2 (=16)$  倍に増大する。

分子イオンを使用し加速電圧を 50kV にした場合、図 2 に示されているスケールの電極配置に対する飽和電流の大きさは、イオンの平均質量を  $M=4.85[\text{amu}]$  とおくことにより  $I_{00}=0.568\text{A}$  となる\*。この電流値は加速ギャップを内向きと外向きに流れる同量の電流値の和に等しいので、一方向に流れている電流はその  $1/2$ 、即ち  $I_1=0.284\text{A}$  となる。

イオン源の引き出し slit の幅 (0.2mm) は球面電極の帯幅の 2% であるので、上記平衡状態において slit より出ていくイオン電流は 4.54mA、その電流密度は  $145 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  に過ぎない。この値はデュオプラズマトロンの出力としては微弱なものであるので、引き出されるイオンは分子イオンが主成分となり、本装置の使用目的に叶っている。

50kV の電圧の掛かっている電極間に 0.568A のイオン電流を流すと云う運転条件は一見厳しいことのように思われるが、電極間隙が狭く、大部分の電流が電極に触れることなく往復運動を繰り返しているだけであるので、実際には全く安全な状態であるのかもしれない。またターミナル電極の間隙にかけてある磁場は、電極間のスパーク放電を抑制する効果をもつことが期待される。

### IV. 14MeV 中性子の発生強度の推定

14MeV 中性子の強度は、センターターミナルの中心にどれだけ鋭くイオンビームを集中させることが出来るかに懸かっている。しかし、集中の度合いを予測することは難しい。集中を乱す原因として先ず考えられるのは、電極の形状と配置の工作・組立に関する誤差である。通常の工作精度の限界は 0.01mm と見られるので、0.01mm より高い精度で中心点が定まることはあり得ない。またイオン源の放電プラズマの"ゆらぎ"によって slit より引出されるイオン電流の強度が一様でなく時間的にも揺らぐと考えられる。このゆらぎに基づいて加速イオンビームの形成が不安定になり、ビーム集束点の"ボケ"を生ずることになる。

更に各方向からのビームがセンターターミナルの中心の一点に向けて入射したとしても、中心点付近のイオン密度が高くなるにつれて、クーロン散乱のためにビーム

---

\*\*後述の標準運転状態において中心付近 ( $r < 0.01\text{mm}$ ) のイオン密度は、ガス圧にして 0.1torr 程度の高さになる。

\*同心球面電極の空間電荷制限電流  $I_{00}$  は、同一の電圧に対して電極の大きさに関係なく  $r_0 / r_1$  の比のみによって定まり、この値が小さいほど  $I_{00}$  は大きくなる。ここでは  $r_0 / r_1 = 2.5$  に対して  $I_{00} = 0.568\text{A}$  を得たが、 $r_0 / r_1 = 2.0$  に対して  $I_{00} = 1.16\text{A}$ 、 $r_0 / r_1 = 1.8$  に対しては  $I_{00} = 1.72\text{A}$  と大幅に増加する。

の発散が起こる可能性がある。またイオンビームの空間電荷の中和が不完全なために、ビーム円盤の厚さが拡大することも考えられる。

ここでは上記の各問題点が存在しないとしたときに、センターターミナル内に形成される理想的なイオンビームの形状として図4に示したものを想定する。半径  $r_1$  の円周全体から一様に入射するイオンビームはエネルギー  $T=50\text{keV}$ 、電流  $I_1=0.284\text{A}$  であり、D<sup>+</sup>イオンと T<sup>+</sup>イオンを同じ割合で含むものとする。この入射ビームは中心部を通過した後、反対側に入射時と同じ形状、同じ強さの外向きビームとなって出て行く。内向き、または外向きビーム中のイオン密度は次の式で表される。

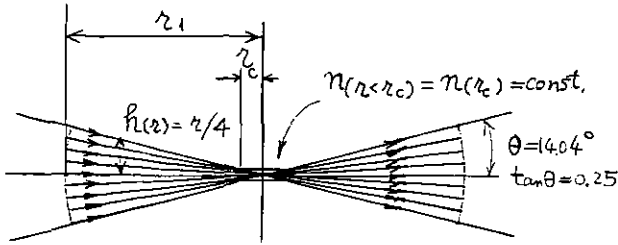


図4. センターターミナルの中心に集中するイオンビーム形状の想定図

$$n(r) = \frac{I_1/e}{4\pi r h(r) v} = \frac{I_1/e}{\pi v r^2} \quad \text{但し } r_1 \geq r \geq r_c. \quad (1)$$

ここで  $v$  はセンターターミナル内のイオンの速度、 $h(r)$  は半径  $r$  の位置におけるイオンビーム円盤の厚さの  $1/2$  である ( $h(r) = r/4$ )。  $r < r_c$  の範囲は"錯乱域"とも称すべき領域で、集束性を異にするビームの各成分の集束点がこの範囲に分布していると考えられる。この領域におけるイオン密度  $n(r)$  は一定であると仮定して、内向き外向きの各成分に対して

$$n(r) = \frac{I_1/e}{\pi v r_c^2} \quad \text{但し } r < r_c. \quad (2)$$

1個の入射イオンが  $r+dr$  と  $r$  の間で中性子を発生する確率  $P(r)dr$  は、(1) 入射イオンとターゲットイオンが共に2個のD、またはT原子を含み、(2) 確率  $1/2$  で異種のイオン間の衝突が起こること、(3) イオン間の衝突は必ず正面衝突として起こるためにその反応断面積はレゾナンス値  $\sigma_{res}$  ( $\sim 5 \times 10^{24} \text{cm}^2$ ) に一致すること、また(4) 入射イオンとターゲットイオンは同一速度  $v$  で互いに反対方向に走っていることを考慮すると、

$$P(r)dr = 4\sigma_{res}n(r)dr \quad (3)$$

$r_1$  と  $r_c$  の間で発生する中性子数は(3)式を  $r_1$  から  $r_c$  まで積分し、入射イオン数  $I_1/e$  をかければ得られる。

$$N(r_1 \geq r \geq r_c) = \frac{I_1}{e} \int_{r_c}^{r_1} P(r)dr = \frac{4(I_1/e)^2 \sigma_{res}}{\pi v} \left( \frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (4)$$

中心の錯乱域 ( $r < r_c$ ) においても同様の考察により

$$N(r_c \geq r \geq 0) = \frac{4(I_1/e)^2 \sigma_{res}}{\pi v} \frac{1}{r_c} \quad (5)$$

$r_1 \gg r_c$  であるので(4)、(5)式の値は殆ど一致する。従って中性子の全発生数は次の式で与えられる。

$$N \simeq \frac{8(I_1/e)^2 \sigma_{res}}{\pi v r_c} = 2.84 \times 10^5 \frac{1}{r_c} [\text{sec}^{-1}] \quad (6)$$

ここでパラメータの値として  $I_1=0.284\text{A}$ 、 $I_1/e = 1.773 \times 10^{18}[\text{sec}^{-1}]$ 、 $v = 1.406 \times 10^8[\text{cm sec}^{-1}]$  (イオンの平均質量  $M=4.85[\text{amu}]$ ) を用いた。

$$(6) \text{ から } \begin{array}{ll} r_c=0.01\text{mm} \text{ に対して} & N=2.84 \times 10^8 [\text{sec}] \\ r_c=0.1\text{mm} \text{ に対して} & N=2.84 \times 10^7 [\text{sec}] \end{array} \quad \text{を得る。}$$

前章の欄外に附記したように、 $r_0 / r_1$  を減らせば  $I_1$  の値、従って  $N$  の値は増加する。例えば  $r_0 / r_1=1.8$  とするならば、 $I_1$  は 3.05 倍に増加し、同じ  $r_c$  の値に対して中性子発生数  $N$  を約 1 桁増加させることができる。

## V. イオンの多重散乱によるビーム発散角度の推定

前述の中性子発生数の算定は、センターターミナルの中心に鋭く集束するイオンビームの存在を前提に行われたが、この仮定が許されるためにはイオンビームの形成がイオン間の散乱によって乱されてはならない。1 個の入射粒子がセンターターミナルを横切るときの多重散乱による偏向角の大きさは、金属薄膜通過に際するイオンビームの発散の問題に準じて求めることができる。ここでは Fermi の Nuclear Physics の lecture note (1949) に従って計算を行った。今の問題に対して考慮すべき点は、質量と速度が入射イオンとほぼ同じターゲットイオンが入射イオンと反対方向に動いていること (即ち、重心が近似的に静止していること)、またターゲットイオンのクーロン力は固体中の原子に比べてはるかに遠くまで達していることの 2 点である。イオンの空間電荷が電子雲によって中和されている条件下では、その到達距離はビーム中のイオンの平均距離の半分程度とおけばよい。

以上の修正によってターゲットイオンの密度  $n$ 、入射イオンの通過距離  $D$  の場合の散乱角  $\theta$  の 2 乗平均は次のように表わされる。

$$\overline{\theta^2} = nD \left( \frac{e^2}{T} \right)^2 \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}}, \quad b_{\max} = \frac{1}{2} n^{-1/3}, \quad b_{\min} = \frac{e^2}{2T}$$

センターターミナルを横切る粒子の散乱角に対する  $\overline{\theta^2}$  は、上式をイオンが通過した進路に沿って積分することによって得られる。

$$r_1 \geq r \geq r_c \text{ の間で } \quad \overline{\theta^2}_{r \geq r_c} = \frac{I_1/e}{2vr_c} \left( \frac{e^2}{T} \right)^2 \left[ \ln \frac{T/e^2}{\left( \frac{I_1/e}{\pi vr_c^2} \right)^{1/3}} + \frac{2}{3} \right] \quad (7)$$

$$r_c \geq r \geq 0 \text{ の間で } \quad \overline{\theta^2}_{r \geq 0} = \frac{I_1/e}{2vr_c} \left( \frac{e^2}{T} \right)^2 \ln \frac{T/e^2}{\left( \frac{I_1/e}{\pi vr_c^2} \right)^{1/3}} \quad (8)$$

従って入射粒子がセンターターミナルを 1 回横切った場合には

$$\overline{\theta^2} = 2(\overline{\theta^2}_{r \geq r_c} + \overline{\theta^2}_{r < r_c}) = \frac{2I_1/e^2}{vr_c} \left( \frac{e^2}{T} \right)^2 \left[ \ln \frac{T/e^2}{\left( \frac{I_1/e}{\pi vr_c^2} \right)^{1/3}} + \frac{1}{3} \right] \quad (9)$$

(9)式は  $r_c = 0.01\text{mm}$  に対して  $\overline{\theta^2} = 6.24 \times 10^{-4}$ 、 $\sqrt{\overline{\theta^2}} = 7.9 \times 10^{-4} = 0.045[\text{deg}]$  を与える。この結果は、イオン間のクーロン散乱によるビーム発散度はイオンビーム形成の支障になるほど大きくないことを示している。

静電加速器による低エネルギー大電流電子ビームの加速及び遠赤外域から硬X線域までの大強度電磁波の発生  
Intense Photon Generation ranging from FIR to Hard-X Rays by a High-Current and Low-Energy Electron Beam  
accelerated by an Electrostatic Accelerator

峰原英介 E.J.Minehara

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茨城県那珂郡東海村白方白根2-4番地  
Free Electron Laser Laboratory, Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute  
2-4 Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11 JAPAN

要旨

自由電子レーザーは、クライストロン等の高周波発振管の原理を可視光やもっと短波長の電磁波の発生に応用したものである。電子エネルギーは基本的には波長と直接的な電子ビームの関係式があり、厳しい制限を課しているが、アンジュレーター周期等を短くし、電子のパンチを波長程度に短くしさえすれば小型の静電加速器を自由電子レーザー駆動源として動作させることが可能である。発振させる為には、大量の電子の塊が狭い空間に閉じこめられている必要があるが、これが満たされず、発振に必要な増幅率を確保できなくても有用な強度の大きな、短波長の電磁波源として利用できる。小型の静電加速器で生成可能な電流値は限られるが、レーザー光源と自発放射光源を組み合わせることにより、遠赤外域から硬X線域までの広い範囲の電磁波を生成できることを議論し、この新しい光源を提案する。

1.はじめに

図1は電子ビームが物質に入射したときに電子ビームが失うエネルギーのエネルギー依存性と原子番号依存性を説明したものである。このように低いエネルギーでは衝突損失が大きく、放射損失は少ない。図1.放射損失と衝突損失の電子エネルギー依存性。

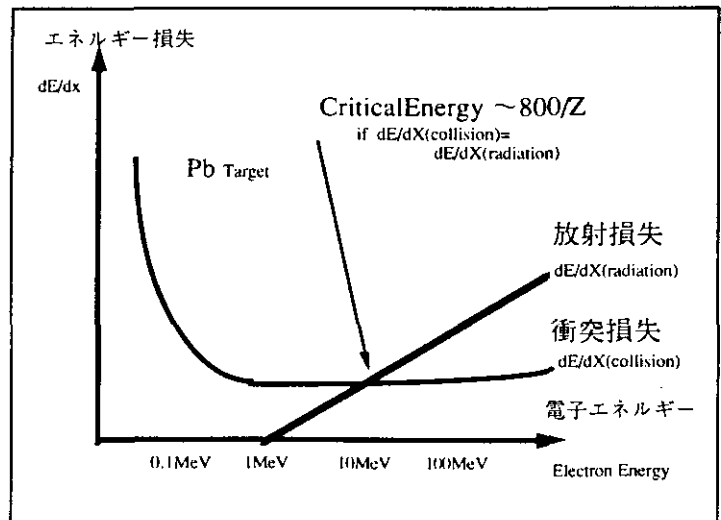
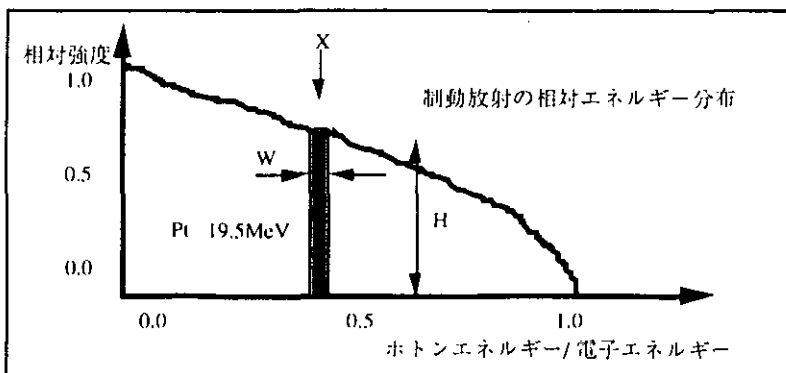


図1は電子ビームが物質に入射したときに電子ビームが失うエネルギーのエネルギー依存性と原子番号依存性を説明したものである。このように低いエネルギーでは衝突損失が大きく、放射損失は少ない。この二つが等しくなるのは臨界エネルギーと呼ばれる電子エネルギー値で、大体 $800/Z$  (MeV)である。鉛付近では10MeV程度となる。正確な計算では6.9MeVとなる。放射損失は僅かなチェレンコフ等を除くと、大部分が制動放射である。図2は制動放射分布とこの制動放射によるホトンの発生量を三角形近似評価の説明である。図にある様にPtターゲットに対する19.5MeV電子ビームの制動放射の実験データを用いたが、下の式のように三角形で近似してこの面積が放射損失であると考えて評価した。

2.バンド幅と光子数強度の放射損失からの見積

ターゲットのZを選んで電子ビームを臨界エネルギー  
図2、制動放射による光子数の見積。



$H = 1.0 - X$   $S = 0.5$   $dS(X) = W * H$   $dS/S = 2 * W * H$

エネルギー付近にあわせるとターゲットにより失われたビームエネルギーの約50%が制動放射で損失する。このうち2結晶分光器により切り出された光子のエネルギー幅は薄膜ターゲットによる制動放射損失分である50%の更に係数 $dS/S$ 分少なくなる。ここでターゲットは鉛付近の重金属を用いるとする。以下の表1は光子総数の概略の評価である。電子エネルギーはセグレの臨界エネルギーの評価よりも少し高い値に設定した。4章の加速器の回収型を使用すると電流を1万倍増加することが可能で13乗程度のフラックスが期待できる。

表1、ホトン総数の概略の評価

|                              |  |   |
|------------------------------|--|---|
| 電子エネルギー (臨界エネルギー6.9MeV)      | f1                                     | 8MeV  |
| ビーム電流                        | f2                                     | 100mA   |
| 臨界エネルギー付近                    | f3                                     | 50%   |
| ホトンエネルギー $\times=0.25$       | f4                                     | 2MeV(1.6 $\times 10^{-19}$ J/eV)                  |
| ホトンエネルギーバンド幅                 | f5                                     | 0.1%  |
| 切り出した制動放射損失分                 | f6                                     | 0.75 $\times 0.001 \times 0.5 \times 2 = 0.00075$ |
| 薄膜ターゲットでの電子エネルギー損失分          | f7                                     | 0.1% 0.8W   |
| ビームエネルギー                     | f8=f1 $\times f2$ (W)                  | =800W   |
| ホトン総エネルギー量                   | f9=f8 $\times f7 \times f6 \times 0.5$ | =0.3mW  |
| ホトン総数                        | f10=f9/f4                              | =0.9375 $\times 10^9$ /s                          |
| エネルギー回収時 ホトン総数 f2 10000倍(1A) | ---                                    | f10=f9/f4=0.9375 $\times 10^{13}$ /s              |

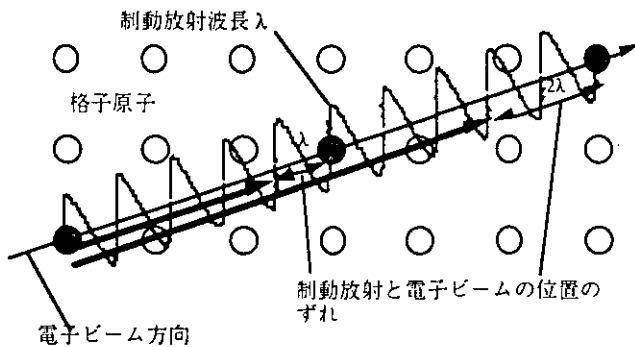
3. 可干渉性及び非可干渉性制動放射と2結晶分光器による単色化

図3、格子アンジュレーターと可干渉性制動放射

格子アンジュレーター

超格子から軽元素金属格子まで

空間的干渉制動放射

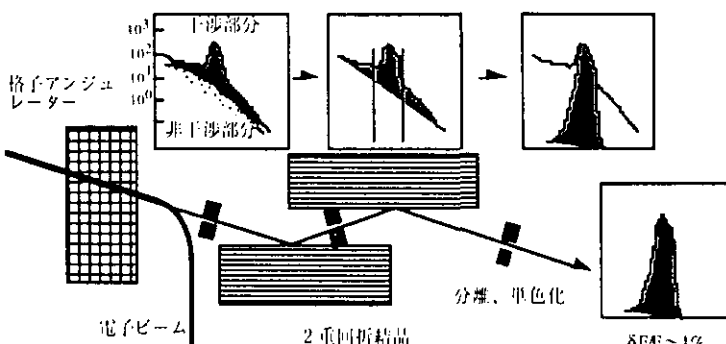


軟X線、硬X線、 $\gamma$ 線領域の可干渉性及び非可干渉性電磁波の発生方法としてテーバード超格子アンジュレーター、格子アンジュレーター等を考える。可干渉性制動放射は各結晶平面での平均的なポテンシャルの変化により、加速度運動を行い、図3に説明してあるようなホトンと電子の行程の差が丁度ホトンの波長の整数倍になるものが空間的に干渉して大強度の光源として動作する。その波長は、100nm~1pmの領域にあり、格子の繰り返し周期を $\lambda_u$  (=数 $\mu$ m ~ 数nm) とすると波長の計算式は自由電子レーザーや挿入光源のアンジュレーターの式と同一の $\lambda_u = 2\gamma^2$ となる。この時 $\gamma = 10$ 数MeVとした。格子アンジュレーターを用いて発生されたホトンのエネルギースペクトラムは図4に示されるように通常非可干渉性制動放射とピーク

図4、可干渉性制動放射と2結晶分光器による単色化

コヒーレント制動放射光源

干渉により  $10^2$ の増加  $\delta E/E \sim 1\%$



全電子ビームエネルギーの大部分(50%以上)が制動放射に変換  
 ホトンのエネルギー分解能と個数は逆比となる 1% 1W  
 2重回折結晶の透過率は10%弱、結晶1個につき数1%

になった可干渉性制動放射から構成されている。これを単色化するために2個の結晶から構成される分光器を用いる。これにより偏極したホトン源とする事ができる。これにより高エネルギー単色高輝度のポジトロン発生が可能となり、物性科学応用が考えられる。また高エネルギー単色波長可変 $\gamma$ 線として核物理への応用することも可能である。

図5 単色ホトンによる高エネルギー単色高輝度のポジトロン発生

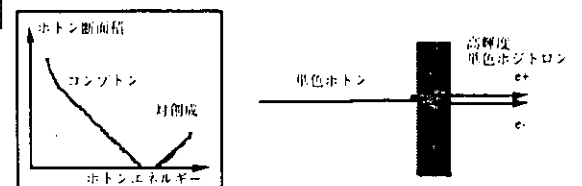
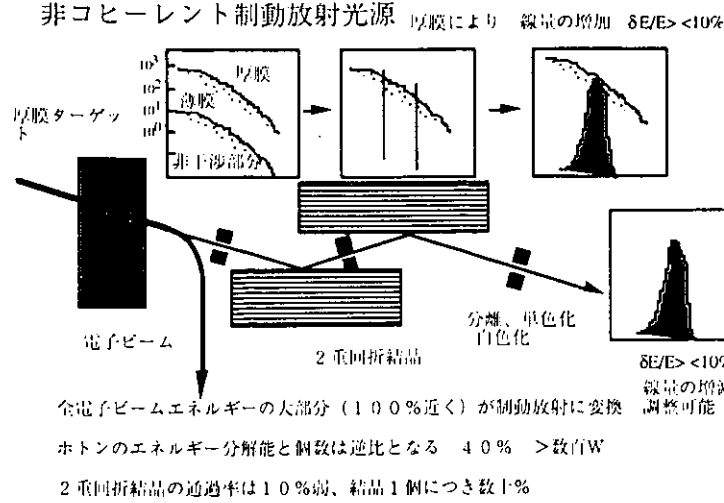
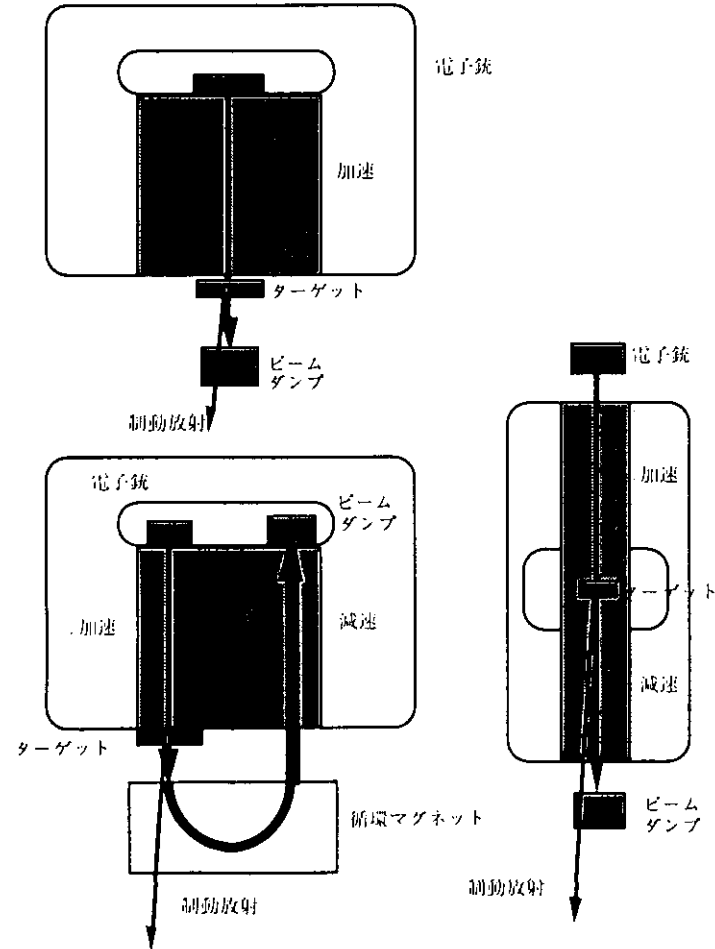


図6、非可干渉性制動放射と2結晶分光器による単色化



4. 低エネルギー大電流電子ビームを発生する静電加速器の諸元の具体例

図7、低エネルギー大電流電子ビームを発生する静電加速器



期待される波長、アンジュレーター周期、電子エネルギー、出力等は、 $3\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$ 、レーザー波長 $=\lambda_U/2\gamma^2$ 、 $\lambda_U = \text{数cm}$ 、 $\gamma = \text{数MeV}$ 、 $P = \text{数MW} \sim \text{GW}$ である。

第10回タンデム加速器とその周辺技術の研究会  
 冷却された厚膜ターゲットを用いて発生させ

た光子のエネルギー Spektrum は図5に示されるように非可干渉性制動放射のみでピークは存在しない。これを2結晶分光器により単色化する。非常にフラックス強度が大きいので、強度が必要な以下の応用が期待される。

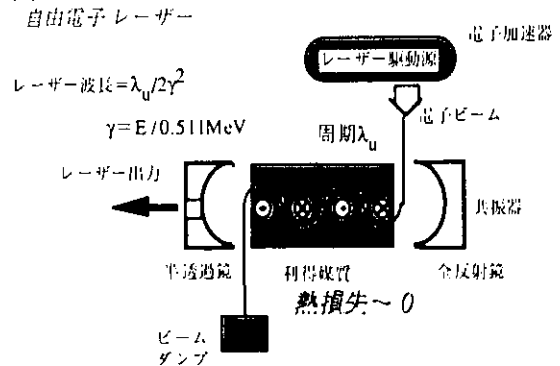
- 1) 医学応用とγメス用準単色波長可変高輝度大強度γ線源、Xメスは今までセンチサイズであったが、γメス同様のミリサイズ以下の非侵襲手術が可能となる。
- 2) 産業応用とリソグラフィ用非コヒーレント非単色大強度軟X線源、大強度軟X線、単色化、白色化(微細線引きに有利)、更に任意のバンド幅が可能である。

図7は低エネルギー大電流電子ビームを発生する静電加速器の具体例である。諸元の概略は以下にまとめる。図7上の1種類は1) シングルエンド型で電流は平均数百μAから数百mA、回収はしない。下の2種類は2) ダブルエンドまたはフォールド型、回収するため1A程度以上が可能で、回収率99%~99.99%以上である。

5. ミリ波、遠赤外領域の可干渉性及び非可干渉性電磁波の発生方法

図8での説明にあるように永久磁石及び電磁石型アンジュレーター等を用いてミリ波、遠赤外領域の可干渉性及び非可干渉性電磁波を発生する。小型静電加速器では高いエネルギーの電子は得られないため長波長光源として、天文学、表面、バイオ諸科学用のミリ波乃至遠赤外領域レーザー光源とすることができる。

図8、自由電子レーザーの説明図



6. 近赤、可視、紫外領域の可干渉性及び非可干渉性電磁波の発生方法

近赤、可視、紫外領域の可干渉性及び非可干渉性電磁波の発生は、5章と同様に、通常型の十分の1から数分の1短い周期の永久磁石及び電磁石型マイクロアンジュレーターと小型静電加速器を用いて可能である。近赤、可視、紫外領域光源として期待される波長、アンジュレーター周期、電子エネルギー、出力等は、 $3\mu\text{m}\sim 0.2\mu\text{m}$ 、レーザー波長 $=\lambda_U/2\gamma^2$ 、 $\lambda_U$ =数mm、 $\gamma$ =十数MeV、 $P$ =数MWである。

7. 軟X線、硬X線、 $\gamma$ 線領域の可干渉性及び非可干渉性電磁波の発生方法

軟X線、硬X線、 $\gamma$ 線領域の可干渉性及び非可干渉性電磁波の発生は、3章述べたように、超格子アンジュレーター、格子アンジュレーターと小型静電加速器を用いて可能である。軟X線、硬X線、 $\gamma$ 線領域光源として期待される波長、アンジュレーター周期、電子エネルギー、出力等は、 $100\text{nm}\sim 1\text{pm}$ 、レーザー波長 $=\lambda_U/2\gamma^2$ 、 $\lambda_U$ =数 $\mu\text{m}\sim$ 数nm、 $\gamma$ =十数MeV、 $P$ =数kWである。超格子アンジュレーターは、金属多層膜でできており、格子アンジュレーターが格子の層による平均ポテンシャルの電子に対する加速度運動による制動放射であるのに対して、超格子アンジュレーターはこの多層膜間の平均ポテンシャルによるものである。

8. 小型静電加速器とその他の利用可能な加速器との比較

小型静電加速器とその他の利用可能な加速器との比較を表2にまとめる。

表2、加速器の種類と光源用駆動源としての可能性

| 加速器     | NC Microtron                        | NC RF Linac                          | SC RF Linac     | DCLinac(VdG)                         | Storage Ring  |
|---------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|---------------|
| エネルギー   | 1MeV~200MeV                         | 10MeV~10GeV                          | 10MeV~4GeV      | 200KeV~20MeV                         | 300MeV~8GeV   |
| 平均電流    | 0.1 $\mu\text{A}\sim 10\mu\text{A}$ | 0.1 $\mu\text{A}\sim 100\mu\text{A}$ | 0.1mA~100mA     | 0.1 $\mu\text{A}\sim 200\mu\text{A}$ | 0.1mA~100mA   |
| 総効率Duty | 0.001%                              | 0.001%                               | 1%~100%         | 100%                                 | 100%          |
| エネルギー幅  | 0.5%                                | 2%~20%                               | 0.01%~0.3%      | 0.001%~0.1%                          | 0.1%          |
| 回収可能性   | 原理的に可能                              | 原理的に可能                               | 原理的に可能、実験はすでに終了 | ポテンシャルとして回収                          | すでに可能         |
| 備考      |                                     |                                      |                 |                                      | 軌道の変更は最小の要有り。 |

9. まとめ

小型の静電加速器で生成可能な電流値は限られるが、回収型静電加速器でこの制限を3~4桁増加させ、通常型アンジュレーターから格子アンジュレーターまで領域に応じて準備すれば、可干渉光源と非可干渉光源の両方同時にではなく、どちらかを提供することで条件を緩和すれば、遠赤外域から硬X線域までの広い範囲の電磁波を生成、利用できることを議論し、この新しい光源を提案した。



# 原研重イオンマイクロビームシングルイオンヒット実験

神谷富裕、酒井卓郎、内藤 豊、濱野 毅、平尾 敏雄

日本原子力研究所高崎研究所

## 1. はじめに

原研高崎の重イオンマイクロビーム装置[1, 2]においては、高エネルギー重イオン入射によって引き起こされる半導体素子のシングルイベント効果の研究のために、シングルイオンヒットシステムの開発を進めてきた。このシステムは、シングルイオン検出器およびビームパルス化システムによって構成される。シングルイオンヒットにおける多重ヒットおよびミスヒットを抑制するためにはそれぞれシングルイオンの試料への入射を検出する効率をより高く、検出信号に対するノイズの頻度をより低くすることが必要である。我々はイオン入射により発生する二次電子を中心穴開き型MCPを用いて検出するシングルイオン検出器を開発し、15MeVのSi等のシングルイオン検出効率100%を達成した。また、静電偏向式の高速ビームスイッチを用いてビームをパルス化し、これと同期した二次電子検出系へのゲート制御によりMCPのノイズの影響が大幅に低減した。このシステムを用いて1 $\mu$ m以下に集束された15MeV SiイオンのCR-39へのシングルイオン照射を行い、格子状のエッチピットの観測に成功した[3]。

しかし、半導体素子のシングルイベント効果のイオンの照射位置依存性などを精度よく観測するためには、測定の再現性の向上に加えてシングルイオン照射系を測定系からの信号により制御する必要がある。このため、マイクロビーム走査による二次電子像描画およびビーム照準システム[4]とシングルイオンヒットシステムとを組み合わせ、それに加えてイオンヒット位置と個数を予め設定できるプログラムを作成し、自動ビーム照準シングルイオンヒットシステムを開発した。

今回は、システムの概要について述べるとともに、これを用いて行った予備的なCR-39へのシングルイオン照射実験の結果について報告する。

## 2. シングルイオン検出器

シングルイオン検出器として従来は中心穴開き型MCP二次電子検出器を用いていた[2, 3]が、今回は図1に示すようなセラトロンを使用した二次電子検出器を試作した。セラトロンの特徴は穴あき型のMCPに比べて暗電流が少なくノイズ計数率が低くなることと、 $10^7$ 以上の高利得が容易に得られること、比較的取り扱いが容易なことに加えて安価であることである。

検出効率の測定では、図1の試料位置にシリコンPINフォトダイオードを置き、タンデム加速器からの15MeV Siビームの電流を減弱し、パルス状ビームの1パルスあたりの平均のイオンの個数を1個以下にしてシリコンPINフォトダイオードに入射し

た。そしてビームパルスと同期したシリコンPINフォトダイオードとシングルイオン検出器からの検出信号の計数の比より検出効率を求めた。この結果最大でも44%の値しか得られなかった。この原因は、検出器の設置に大きなスペースが必要で穴あき型のMCPのように試料前面近くに配置できないために二次電子の収集効率が低下したものと考えられる。同じ検出器の条件で質量がほぼ2倍の15MeV

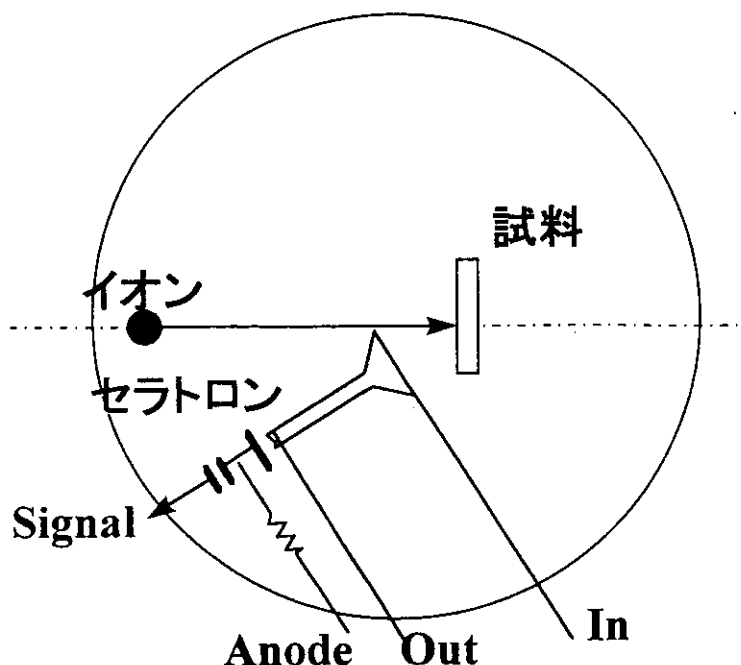


図1 セラトロンを用いたシングルイオン検出の概念図

Niの測定を行ったところ最大の検出効率は95%であった。この結果は二次電子の放出率の違いを反映したものと考えられる。

セラトロンを用いた検出器の改善策としては、幾何学的に検出器をさらに試料に近づけて、二次電子収集効率を向上する工夫をすることが考えられる。最終的には穴あき型のMCPとセラトロンのどちらを用いるかを決定する予定である。

### 3. 自動ビーム照準シングルイオンヒットシステム

図2に自動ビーム照準シングルイオンヒットシステムの概念図を示す。ビームのパルス化のためのビームのOn, Offは、それぞれ高速ビームスイッチの高電圧のOff, Onによってなされる。この制御には2チャンネル出力のパルスジェネレータが用いられる。また、パルス中にイオンが存在し、試料からの二次電子でシングルイオン検出信号が形成されると、この信号がビーム off のトリガー信号として用いられる。シングルイオン検出信号はコンスタントフラクシオンディスクリミネータ(CFD)からの論理信号として取り出されるが、その出力はビームパルス信号によりゲートがかけられているため、ビームがoffの時にも出力されるノイズが除去される。また、パルスジェネレータにはゲート入力があり、ゲートがOnの時のみパルス出力をさせることが出来る。CFDから出力されるシングルイオン検出信号の計数にプリセット値が設定されたカウンターの動作信号をゲート信号とすることにより、1照射あたりのイオンの入射個数を制御することが可能となる。このカウンターはGPIBインターフェースを備えており、計算機からのリモートコントロールが可能である。マイクロビーム走査二次電子マッピングプログラムにカウンター制御機能を組み込むことにより、試

料の二次電子像に基づいて予め設定した位置に任意の個数のシングルイオン照射を自動的に行うことが可能になった。

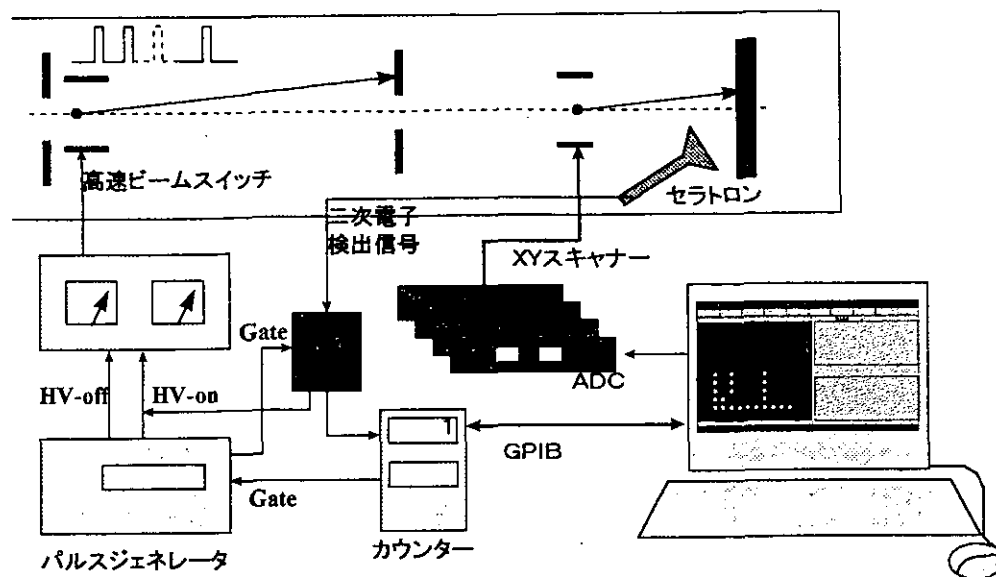


図2 自動ビーム照準シングルイオンヒットシステム

#### 4. CR-39へのシングルイオン照射実験

本システムを用いて15 MeV SiのマイクロビームをCR-39上に $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ の領域で格子状の点に照準して、各点1個ずつのシングルイオン照射を試みた。ここでは $20 \times 20$ 点に照射した後、6 NのNaOH溶液を用いてエッチングした試料を光学顕微鏡にて観察した結果を図3に示す。

ほぼ $10\ \mu\text{m}$ 間隔でエッチピットが規則正しく並ぶ格子点がみられるが、それぞれの格子位置でエッチピットが広がって見えるのは多重ヒットのためである。前に述べたようにセラトロンを用いた検出器の検出効率は、シリコンPI

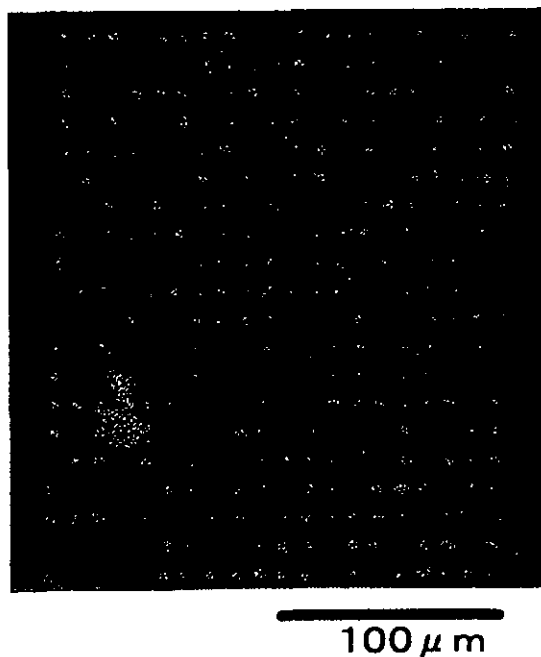


図3 CR-39上に15 MeV Siを $20 \times 20$ の格子状にシングルイオン照射しエッチピットを観察した光学顕微鏡写真。

Nフォトダイオードをターゲットとした場合で50%を下回っていた。CR-39を使用した場合はターゲット元素の原子番号はシリコンよりもさらに小さくなるため、同じイオンの入射によっても二次電子の発生量はさらに小さく、そのため検出効率はさらに低くなって多重ヒットが増加したと考えられる。また、格子の位置にエッチピットがみられないのはノイズの影響によるミスヒットであるが、この確率は多重ヒットに比べてはるかに小さいのが分かる。なお、左下の白い領域は照射以外による表面の損傷あるいは汚れによるものと考えられる。

## 5. まとめ

TIARAの重イオンマイクロビーム装置において、マイクロビーム走査二次電子マッピングとシングルイオンヒットシステムとを組み合わせた自動ビーム照準シングルイオンヒットシステムを開発した。これまでに中心穴あき型のMCPを用いて100%のシングルイオン検出効率が確認されているので、予め設定したイオンヒット位置に対して自動的に任意の数ずつイオンを照射する技術が完成したことになる。セラトロンを使用したシングルイオン検出器を用いた今回の実験では、今のところ100%の検出効率が得られていないため多重ヒットが多数観測されたが、予め設定した格子位置への自動ビーム照準システムが正常に動作することが確かめられた。今後はシングルイオンの検出効率を100%にするための検出器の改善を図っていく。

## 参考文献

- [1] T.Kamiya, N.Utsunomiya, E.Minehara, R.Tanaka and I.Ohdomari: Nucl. Instr. Meth., B64 (1992) 362.
- [2] T.kamiya, T.Suda and R.Tanaka: Nucl. Instr. Meth., B118(1996) 423.
- [3] T.Sakai, T.Hamano, T.Suda, T.Hirao and T.Kamiya: Proc. Of 5<sup>th</sup>. Int. Conf. on Nuclear Microprobe Technology and Applications., to be published in Nucl. Instr. Meth., B.
- [4] T.Kamiya, T.Sakai, T.Hamano, T.Suda and T.Hirao : Proc. Of 5<sup>th</sup>. Int. Conf. on Nuclear Microprobe Technology and Applications., to be published in Nucl. Instr. Meth., B.

# 原研タンデム加速器の並行処理制御システムの現状

日本原子力研究所 加速器管理室  
花島 進

## 1 導入

原研タンデム加速器の制御システムは数個のトランスペュータを使用する並行処理システムである[1, 2]。このシステムは1992年より稼働している。当初は原研のタンデム加速器だけを制御していたが、タンデム加速器に超伝導後段ブースタが設置されたため、二つの加速器を効率よく運転するための対応が要求されてきた。円滑な連携運転のためには、ひとつの制御システムで、二つの加速器を制御することがもっとも望ましい。しかし、我々の場合、ブースタの制御システムはタンデム加速器の制御システムの理念と無関係に作られてきたため、両者の統合は簡単ではない。そこで我々はタンデムの制御を行えるコンソールをブースタのRF制御室に

設けることにした。この改造を中心に近年の本システムの改良について報告する。第1図に現在の制御システムの構成図を示す。

## 2、副制御コンソールの設置

第2図に新しい副制御コンソールの正面図を示す。ウインドウ・ディスプレイ1台、アサインابل・メータ8基、値設定器（シャフト・エンコーダ）4基を持つ。ここから、主制御コンソールとほぼ同じ制御ができる。ウインドウ・ディスプレイはワークステーションによって制御され、他の部分はトランスペュータによって制御される。これらのプロセッサは光ファイバーによるリンクで中央のプロセッサとつながっている。そのほかワークステーションは制御システム用のイーサネットにもつながっている。

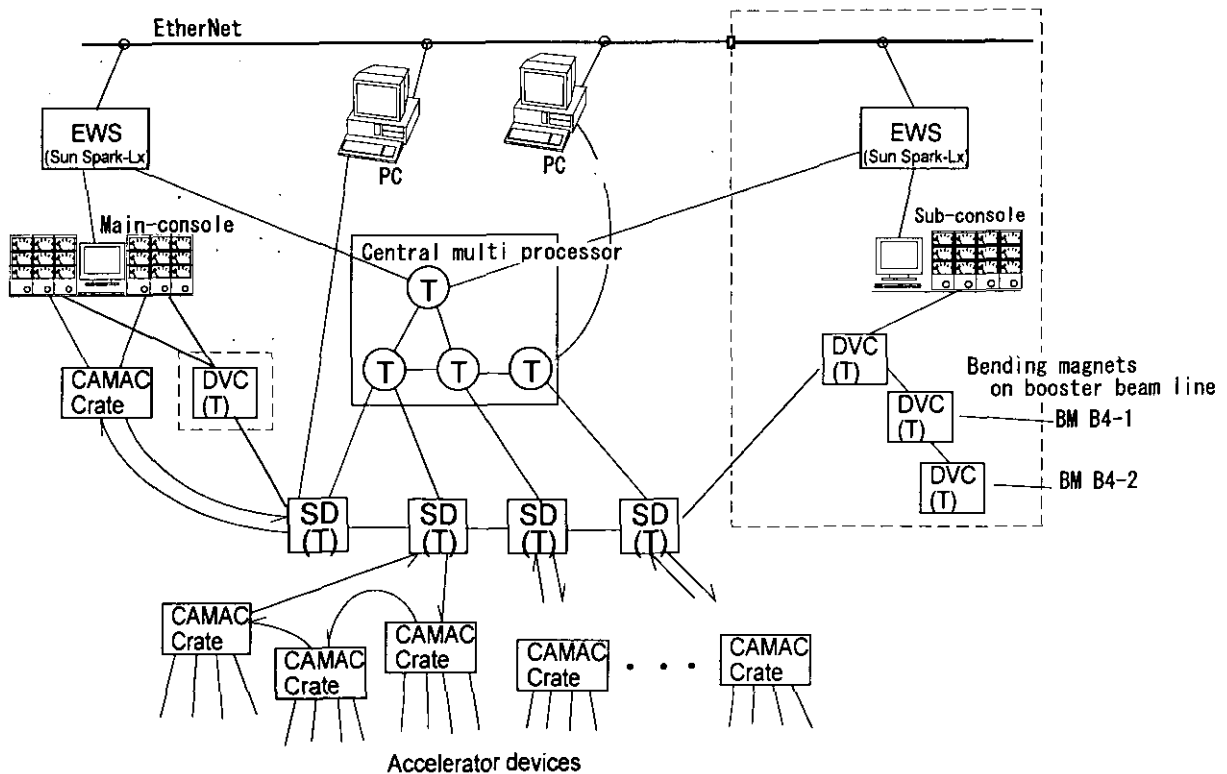


Fig.1 Configuration of control system for JAERI tandem accelerator.

T: transputer, SD: Serial highway driver,  
DVC: Device controller. Dashed lines denote present expansion.

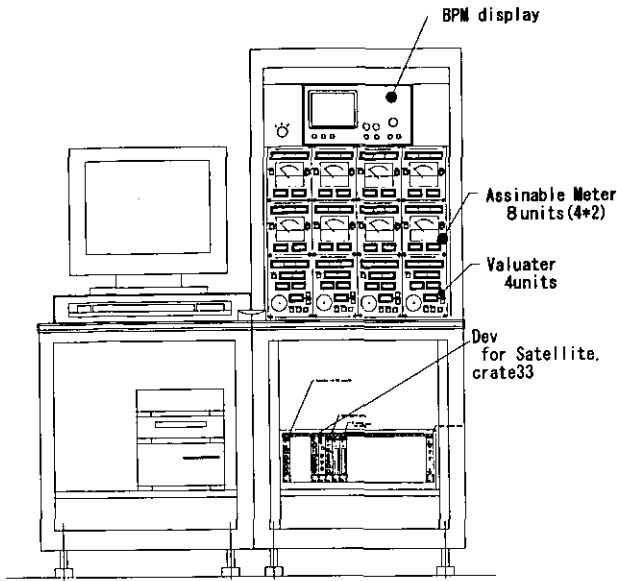


Fig. 2 Front view of the second console.

二つの制御コンソールを持つにあたり、別々のコンソールから同じデータ点に対して値の変更を行おうとするような場合に、どのように制御するか決めなければならない。我々の制御システムでは以前から、複数の値設定器が同じデータ点に同時につなげられることを許している。第3図はデータ点を制御する信号の流れを示している。値設定器での値変更の要求は、値の変化量として検知され、データ点の値を管理するプロセスに送られる。このしかけは、複数の値設定器が同時に同じデータ点にアサインされていても同様に働く。つまり、運転者の動作は単純に加算される。この方式では制御の衝突を回避するために複雑な制御を行う必要がない。この方式は仮想データ点を通した連動制御とともに取り入れられた。こうすると、データ点が連動制御されている時でも、同時に個別の制御を行うことができる。

### 3、CAMACシリアル・ハイウェイ・ドライバの更新

シリアル・ハイウェイ・ドライバ[3]はCAMACシリアル・ハイウェイと制御コンピュータとのつなぎにあたる。我々は新形のドライバを開発し、まえのものを置き換えた。図4aと4b

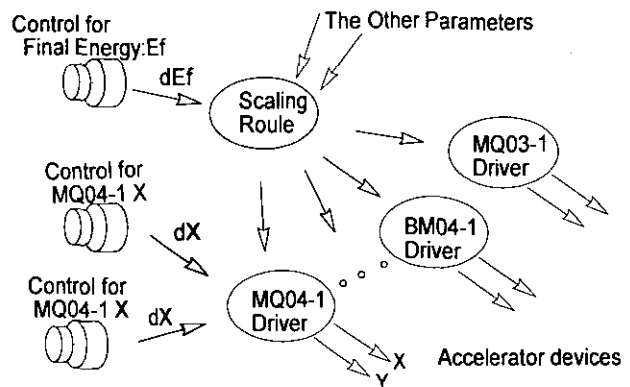


Fig. 3 Signal flows controlling data points.

にブロックダイアグラムを示す。新形は制御プロセッサと、ひとつまたは複数のシリアル・ハイウェイ・インターフェイスからなる。このインターフェイスは旧型のドライバがソフトウェアで行っていた、メッセージ・パケットの生成と分析など、多くをハードウェアで行う。制御プロセッサは簡単なフィールドバス経由でインターフェイスを制御する。新型は旧型ができなかったバイト・シリアル転送も行える。インターフェイスの論理回路のほとんどは1つのFPGA（フィールド・プログラマブル・ゲイトア

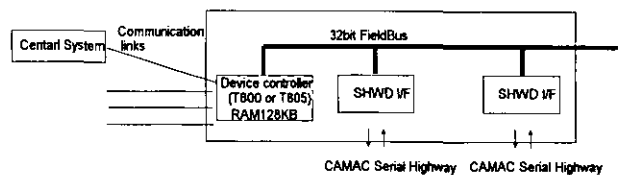


Fig. 4.a Serial highway driver of Accell system.

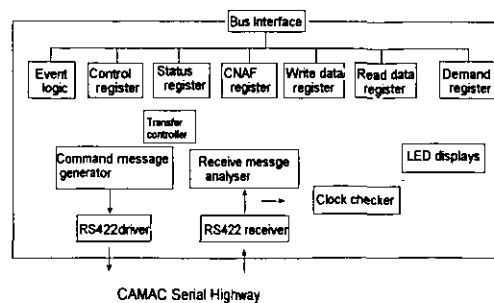


Fig. 4.b Internal block diagram of SHWD I/F board.

レイ)に組み込まれている。

#### 4、主制御コンソールの値設定器の改良

主制御コンソールの値設定器をゼロ通る正負の変化を入力できるようにした。以前の仕様ではダイヤルの回転に対して指数関数的に値を変えたため、正負の間の値の行き来ができなかった。新型では値はダイヤルの回転に対して線型に変化する。この改良で制御システムの連動制御機能とのマッチングも改善された。

#### 5、中央システム、マルチプロセッサのプロセッサ・モジュールの交換

中央システムはこの制御システムの実時間制御の中核である。4つのトランスペュータ・モ

ジュールが相互に接続され、マルチプロセッサを構成している。新しいモジュールは以前のものと同様同じプロセッサを使用しているが、信号接続の信頼性が改善された。新しいモジュールはデバイスコントローラと同じケースに実装できる。図5に新型のシリアル・ハイウェイ・ドライバとともに実装された状態を示す。

#### 6、2つの偏向電磁石の制御の設置

ブースタ・ビームラインの2つの偏向電磁石をタンデム制御システムに組み込んだ。これらはシリアル・ハイウェイ・ドライバと同様にトランスペュータによるデバイス・コントローラによって制御される。将来このコントローラによって磁場の負帰還制御を組み込むつもりでいる。

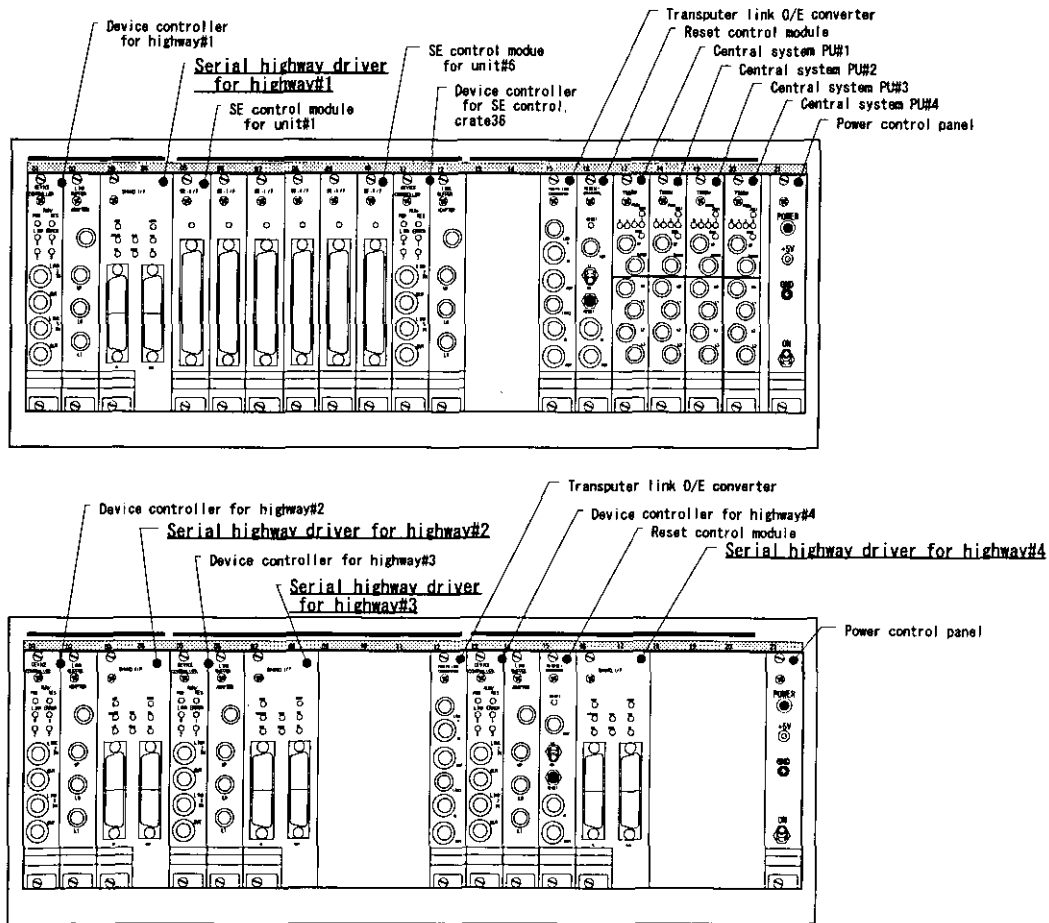


Fig.5 Front view of the central processor modules and serial highway drivers.

## 7、ソフトウェア

ハードウェア構成の変化に伴い、ソフトウェアもいくつかの点で変更された。データ点のアドレス・スキーム、中央システムとシリアル・ハイウェイ・ドライバ間のプロトコル、シリアル・ハイウェイ・ドライバのソフトウェアなどが変更された。主制御プログラムは二つの制御コンソールとCAMACを経由せずに直接トランスピュータで制御されるデータ点を扱えるように拡張された。

## 8、まとめ

後段ブースタのRF制御室へのタンデム加速器の制御コンソール増設を中心としたタンデム制御システムの改良について報告した。この改良によって2つの加速器の連携運転が以前より円滑に行えるようになり、また制御システムの信頼性が向上した。

### 参考資料

[1]S.Hanashima, JAERI TANDEM & V.D.G. Annual Report 1993 pp7-8.

[2]S.Hanashima et al., Transputer/Occam Japan 5 IOS Press, 1993 pp69-81.

[3]S.Hanashima, JAERI TANDEM & V.D.G. Annual Report 1995 pp7.



# 吹き込み型ガスストリッパーに関する基礎実験

九大理

相良建至，緒方研太郎，中村雅子，占部晴樹，鶴田薫

**はじめに** 新しい吹き込み型の窓無しガスターゲットを九大で開発し，成功を収めた [1,2]．それと同じ方式で，タンデム加速器で用いるガスストリッパーが作れるかどうかを調べつつあるので，途中経過を報告する．

**ガスストリッパー開発の動機** 九大タンデム加速器は炭素薄膜ストリッパーだけを装着している．ターミナル電圧を 8 MeV 以上で使用するのが通常であったので，ガスストリッパーへの要求はこれまではなかった．しかし最近，逆運動学を利用した天体核反応実験が計画され，低エネルギーの高強度重イオンビームが要求されるようになった．それ故ガスストリッパーが必要となった．どうせガスストリッパーを導入するなら，今までにない高性能のものを製作してやろう，と考えた．幸い九大では新しい吹き込み型の窓無しガスターゲットを成功裡に開発したばかりである．この方式で高性能のストリッパーが出来るのではないかと，この期待の下に開発に着手した．

**吹き込み型の原理** これまでの差分排気型のガスターゲットの中心部は，図 1 下部に示すように，ターゲット中央部の側壁からガスを噴出し，狭いビーム通過口をガスが流れる時の抵抗を利用してガスを実効的に閉じ込めるものである．これに対し，吹き込み型では図 1 上部に示すように，ビーム通過口側壁からターゲット中央部に向かって斜めにガスを吹き込む．軸対称であるから円錐状に吹き込むことになる．吹き込まれたガスは，ターゲット中央部にあるガスと衝突してそれを押し込み，やがて初速度を失ってビーム通過口から流れ出てゆく．この押し込み作用でガスを閉じ込めようとするのが，吹き込み型の原理である．吹き込み型に対し，従来のものを吹き出し型と呼ぶ．

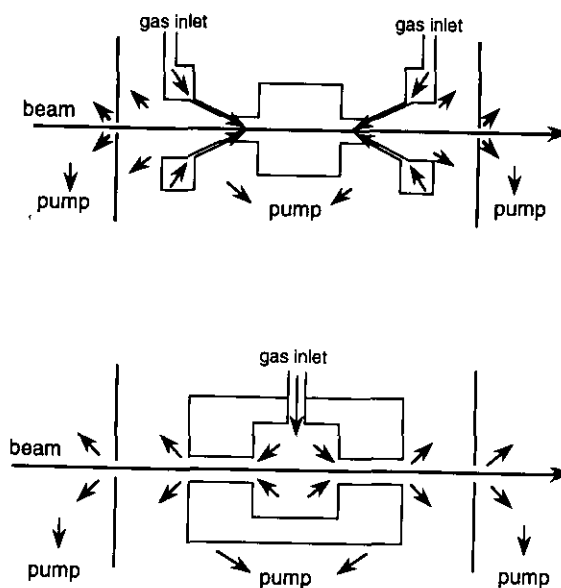


図 1．吹き込み型（上）と従来型（下，吹き出し型と呼ぶ）の原理．

### 吹き込み型ターゲットの出来ばえ

ターゲットのガス圧分布を陽子ビームの90度散乱を利用して測定した。同じ装置を吹き込み型、吹き出し型両方に使用して比較した。結果を図2に示す。

吹き出し型では予想通りに圧力が単調に減少することが確認された（点線）。これに対し吹き込み型では、ターゲット圧力が高く、ターゲット部で圧力が一定で、吹き込み部で圧力が急激に減少する、ことが判った。

圧力が一定なのは、吹き込みに依って左右から同じ圧力で押されて、ターゲットガスが静止しているためである。つまりターゲット部がよどみ点になっている。また、図2では測定点を単に直線で結んだが、吹き込み部ではもっと急激に圧力が変化している筈である。ターゲットが一様高圧でその境界がはっきりしているの、非常に優れた標的であると言える。

ヘリウムで約 10 Torr、窒素で約 30 Torr の圧力が実現された。ビーム入口に径 3 mm の円形スリットを挿入すれば窒素圧は 70 Torr になった。窒素 70 Torr x 3 cm で  $0.35 \text{ mg/cm}^2$  になる。固体標的並の厚さが実現された。

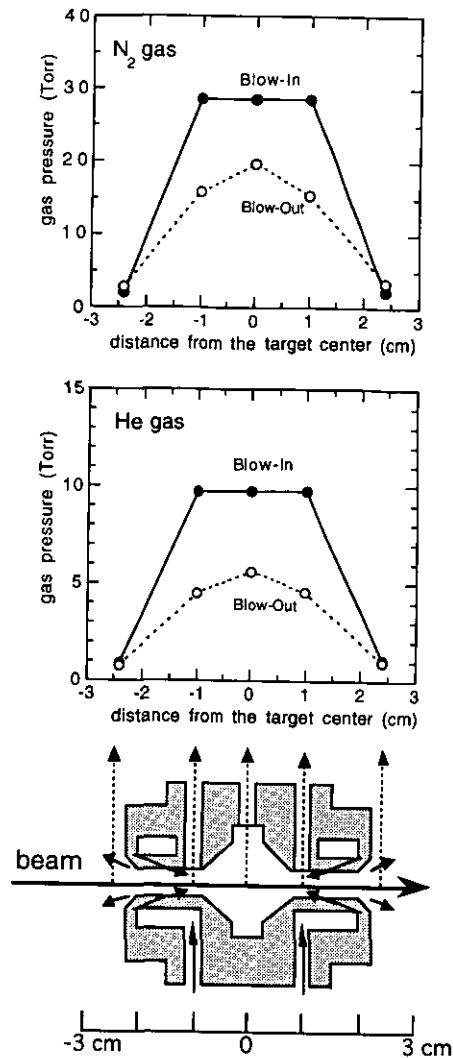


図2. 吹き込み型（実線）と従来の吹き出し型（破線）ターゲットの圧力分布。

**吹き込み型ガスストリッパ開発の問題点** 通常ガスストリッパの厚さは約  $2 \mu\text{g/cm}^2$  以下である。現存のストリッパは口径が 6 - 8 mm、長さが 60 - 100 cm である。この細長い管ではビームの通りが悪いので、口径が大きくて短いストリッパが渴望されている。

当面ストリッパ長さの製作目標を 40 cm とする。この長さで窒素  $2 \mu\text{g/cm}^2$  のガスストリッパを作るとガス圧は  $2 \times 10^{-2}$  Torr になる。ビームエネルギーが低くなると、ストリッパ厚さはこれより 1 桁以上薄くてよい。

問題は、 $10^{-2}$  Torr では窒素の平均自由行程が約 5 mm になり、管口径と同程度になることである。つまり、分子流に近づいて行って分子衝突が少なくなり、吹き込み効果が薄れて行くのではないかと心配される。どの圧力まで吹き込み効果があり、どのように効果が薄れて行くのか、を知ることが第一の仕事であった。

**テスト装置** 図3に示す装置でテストを行った。吹き込み部を重ねて段数を増やせ

るようにした（図3では2段吹き込み）．吹き込み部の口径は 8 mm とした．ビームを使わないベンチテストをしたので，全長 60 cm の6インチダクト両端は孔なしフランジで真空止めをした．排気には 150 l/sec のターボ分子ポンプを用いた．タンデム内では排気ガスを再び吹き込む方式をとるが，テストでは大気中に放出した．ゲージG1とG2で真空度P1とP2を測定した．

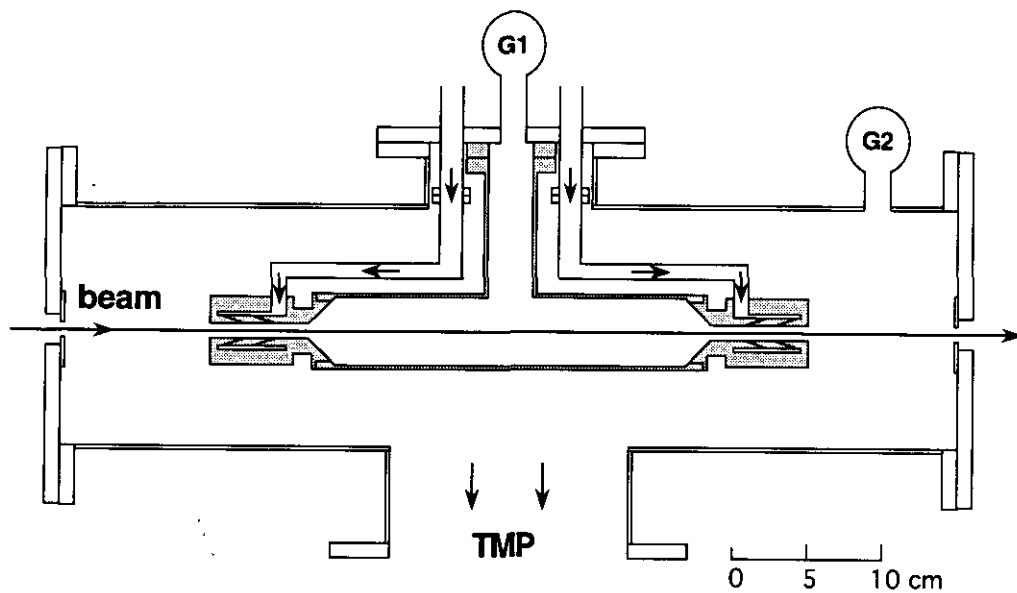


図3．吹き込み型ガストリッパーテスト装置．

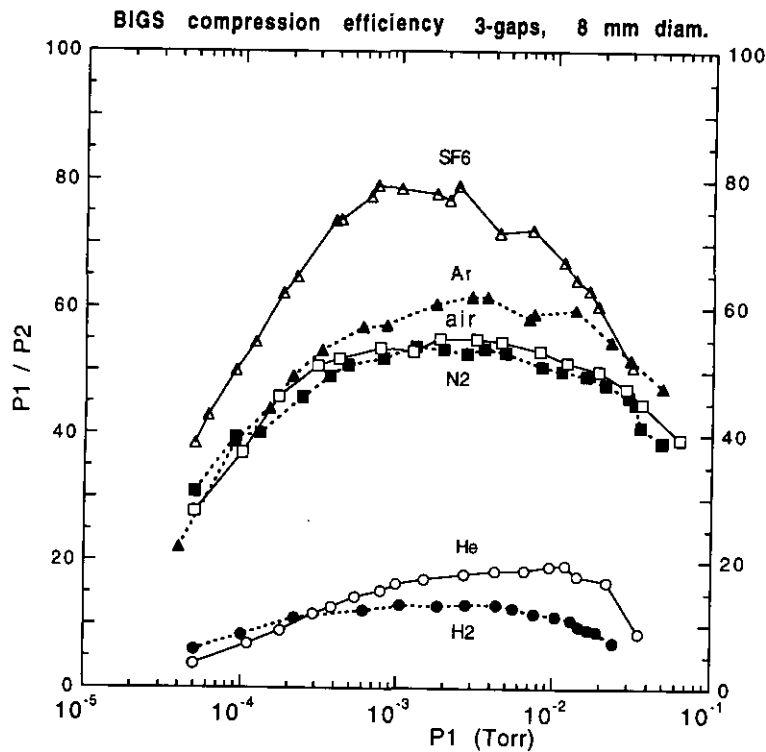


図4．吹き込み型ガストリッパーのガス閉じ込め効率 (P1/P2) の測定結果．

**テスト結果** まず、P2を電離真空計で、P1を圧力領域に応じてピラニ、ペニング真空計で測定した。同種ガスを流した場合、3段吹き込みの閉じ込め効率 (P1/P2)は1段吹き込みのそれより約2倍高いことが判った。しかし測定結果はばらつきが大きく、更にピラニ、ペニング真空計での測定のつなぎ領域 (~0.01 Torr) で、P1/P2が増大する結果を得た。

そこで高感度のキャパシタンス・マンメーターを購入し、補正不要の絶対圧測定を行った。3段吹き込みに対する結果を図4に示す。

- 1) スムーズなデータが得られ、P1/P2の異常増大はないことが確認された。
- 2) 単原子、多原子ガスの違いはあるが、分子量が増えるにつれて吹き込み効果が大きいことが判った。窒素で約50倍の閉じ込め効率 (P1/P2)が実現された。
- 3) 平均自由行程が10 cmになるP1値の位置に矢印をつけたが、そのP1値付近まで閉じ込め効率が大きく、それ以上ガスが希薄になると閉じ込め効率が徐々に減少することが判った。何故平均自由行程の長すぎる領域まで閉じ込め効率が保持されるのか、今は説明が出来ないが、非常に有用な結果である。
- 4) 高压側でも閉じ込め効率が減少するが、減少し始めるP2値は、ターボ分子ポンプの排気量が減少し始める値より約1桁低い。この原因は今の所不明である。

**結語** 吹き込み型は相当希薄な気体でも有効であることがわかった。今後の課題は、何故ここまで有効なのかの理論的な解明と、この性質を利用して効率の良いガストリッパーを製作すること、である。

最終的なガストリッパーの長さは40 cm程度でもよいだろうが、口径は8 mmから増やす必要がある。現在14 mmの口径のテスト装置を製作中である。8 mmの場合よりも口径面積が約3倍増えるから、閉じ込め効率は1/3程度に落ちることを覚悟しなければならないだろう。その落ち込みを、吹き込み部の改良(多段型やその他)で取り戻したい。

大口徑でしかもガス閉じ込め効率のよいガストリッパーを開発し、天体核反応実験のみならず、加速器質量分析、強力ビーム加速に貢献し、更にガストリッパーを装着すればフォイルストリッパー使用時にもビームが通過しにくくなる現状を改善して一般実験をも促進するのが最終目的である。

#### 参考文献

- [1] K. Sagara et al, Nucl. Instr. and Methods **A378** (1996) 392.
- [2] 相良建至 日本物理学会誌 **Vol.51, No.7** (1996) 510.

# 原研・むつAMSを用いた研究計画

○荒巻能史 水島俊彦 山本忠利  
(日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室)

平成9年4月、日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室にタンデトロン加速器質量分析装置 (HV社 4130-AMS) が導入された。当装置は、主に海洋試料中の  $^{14}\text{C}$ 、 $^{129}\text{I}$  等の測定を行うことを目的としている。現在、 $^{14}\text{C}$  については本格的な測定に向けて調整を続けており、 $^{129}\text{I}$  については来年度の運用を目指している。そこで我々は、 $^{14}\text{C}$  測定のための海水試料の化学的前処理方法を新たに開発、作製し、測定のための準備を進めている。

## 1. 当研究室における $^{14}\text{C}$ 測定の重要性

当研究室は、平成7年10月に海洋環境における放射性核種の挙動の調査、研究を行うことを目的として発足した。そこで海洋における物質の循環、特に海水の循環過程に注目し、物理的アプローチとして流速計、CTD等を用いた海洋の物理量の直接測定、化学的アプローチとして化学トレーサーを用いた物質循環の解明及び放射性核種の直接測定に主眼を置き、それらの統合から「海洋における放射性核種の移行モデルの構築」を最終目標とした。その中において海水中の  $^{14}\text{C}$  の測定、特に溶存無機炭酸中の  $^{14}\text{C}$  の測定は、深層循環のトレーサー、大気-海洋間での気体交換の推定など地球化学的解析を行ううえで極めて重要である。

## 2. 海水試料からのグラファイト試料の作製

海水中溶存無機炭酸の $^{14}\text{C}$ の測定を行うには、まず海水試料から二酸化炭素を抽出し、その後グラファイト試料を作製しなければならない。そこで二酸化炭素の抽出については、McNichol et al. (1994)をもとに当研究室で新たに開発した方法及び装置 (図1) を使用し、グラファイト作製については、Kitagawa et al. (1993)を参考にした鉄触媒による還元法を用いている (図2、装置)。以下には海水試料からの二酸化炭素の抽出法を簡単に述べる。

船上において採取した海水試料500mlをデュラン製耐熱耐圧ガラス瓶に分取し、飽和塩化水銀溶液100 $\mu\text{l}$ を加え、実験室に持ち帰る。試料瓶を真空ガラスラインに接続後、試料300mlを超高純度窒素ガス (99.9999%) を用いてラインの反応カラムに導入する。ライン内を窒素雰囲気 (約1気圧) にした後、85%リン酸4mlを反応カラムに注入し、循環ポンプによって発生してきた二酸化炭素と海水から蒸発した水蒸気をライン内で循環させる (7分間)。その間、二酸化炭素を液体窒素、水蒸気を液体窒素-エタノールによって捕集する。捕集した二酸化炭素は、液体窒素を用いて $\Delta^{14}\text{C}$ 測定用 (約200 $\mu\text{mol}$ )、 $\delta^{13}\text{C}$ 測定用 (約100 $\mu\text{mol}$ )、保存用 (約300 $\mu\text{mol}$ ) に分配されるように加工した定容ガラス管に移動させ、捕集する。この分析法では、いくつかの検討を行った。以下にその結果と考察を示した。

### (1) 抽出二酸化炭素試料中の $\text{H}_2\text{O}$ の除去

上述の装置では、酸性化された海水から発生する二酸化炭素をポンプを用いてライン内を循環させている。そのため海水から蒸発してきた水蒸気も大量に発生し、循環することが予想される。水蒸気については、2段階の液体窒素-エタノールトラップで捕集しているが (図1a参照)、一部が捕集されずに二酸化炭素捕集用の液体窒素トラップに捕集されている可能性がある。そこで図1aのTP3に捕集された試料を $\Delta^{14}\text{C}$ 測定用のガラス管に移す際にTP3を室温にした場合と、液体窒素-エタノールトラップで約-100 $^{\circ}\text{C}$ とした場合でその試料中の $\delta^{13}\text{C}$ 値を測定し、比較した (表1)。

| Sample No. | トラップなし (室温) | Sample No. | トラップあり (-100 $^{\circ}\text{C}$ ) |
|------------|-------------|------------|-----------------------------------|
| 01         | 0.700       | 04         | 0.595                             |
| 02         | 0.656       | 05         | 0.602                             |
| 03         | 0.742       | 06         | 0.598                             |

( $\pm 0.01\%$ )

表1  $\text{H}_2\text{O}$ 除去操作の有無による $\delta^{13}\text{C}$  (%) 値の比較

「トラップあり」では、誤差範囲内で一致し、「トラップあり」ではデータのばらつきがみられる。この結果から二酸化炭素捕集用トラップに海水試料から蒸発してきた水蒸気の一部が捕集されていることが分かった。また、TP3に捕集された試料を $\Delta^{14}\text{C}$ 測定用のガラス管に移す際、TP3に液体窒素-エタノールトラップをつける

ことによってH<sub>2</sub>Oを除去すれば、二酸化炭素試料中の同位体分別効果を無視できることが分かった。

(2) 試料の分配による同位体分別効果

本装置では、300mlの海水試料から得られた二酸化炭素試料を真空中で3つの異なる体積のガラス管に分配する。二酸化炭素試料が均一に拡散すれば、理論上、同位体分別効果を考える必要はない。しかし、本装置では正確に $\Delta^{14}\text{C}$ 測定用、 $\delta^{13}\text{C}$ 測定用、保存用に分配されるようにガラス管が局所的に変形している(図1b参照)ため、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ に変動が起こる可能性ある。そこで我々は、 $\Delta^{14}\text{C}$ 測定用、 $\delta^{13}\text{C}$ 測定用、保存用に分配された二酸化炭素試料の $\delta^{13}\text{C}$ 値を測定し、比較した(表2)。

| Sample No. | $\Delta^{14}\text{C}$ 用 | $\delta^{13}\text{C}$ 用 | 保存用   |
|------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| 01         | 0.602                   | 0.637                   | 0.595 |
| 02         | 0.602                   | 0.626                   | 0.599 |

(±0.01‰)

表2  $\Delta^{14}\text{C}$ 測定用、 $\delta^{13}\text{C}$ 用、保存用試料の $\delta^{13}\text{C}$ (‰)値の比較

2つの試料しか測定できていないが、 $\Delta^{14}\text{C}$ 用と保存用の値は誤差範囲内で一致した。 $\delta^{13}\text{C}$ 用については他に比べ、多少大きい値になる傾向を示した。これは、図1bに示すように、他の部分のガラス管のほとんどが9φであるのに対し、体積の関係から採取部分が6φになっていることに起因すると思われる。しかし、もし同位体分別効果を受けているのならば、 $\delta^{13}\text{C}$ 用の値が大きくなるのが妥当であり、この点についてはまだ解明できていない。なお、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値の計算には、以下の式が用いられる。

$$\Delta^{14}\text{C}(\text{‰}) = \delta^{14}\text{C} - 2 \times (\delta^{13}\text{C} + 25) \times (1 + \delta^{14}\text{C}/1000)$$

表2に示した $\delta^{13}\text{C}$ の誤差は、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値の計算時の誤差範囲内にあるため $\Delta^{14}\text{C}$ 値に影響はない。

3. AMSを用いた今後の研究計画

今年度以降に本研究室が計画している研究テーマについて以下に述べる。

- (1) 日本海水の循環過程の研究 / 津軽海峡周辺海域における物質の循環過程の研究
- (2) 西部北太平洋海域における海水流動及び炭素循環の研究

核実験が開始される前の海洋環境中での $^{14}\text{C}$ は、大気と海洋の気体交換によって二酸化炭素の状態に取り込まれ、海水とともに拡散混合しながら、時間とともに放射壊変によってその絶対量を減らしていく。そのため、循環に2000年を要すると考えられる深層水の流動過程を解明するためのトレーサーとして広く利用されてきた。逆に1950年代に始まった核実験によってそれまでの平衡状態が崩れてしまった表層では、この過剰分の $^{14}\text{C}$ を推定することで、1) 大気海洋間での気体の交換過程、2) 表層中深層間の混合過程等の解明に利用可能である。

そこで我々は、日本海及び西部北太平洋海域で得られた試料の $^{14}\text{C}$ 分析をもとに(1)と(2)のテーマのもと研究を進めている。

- (3) 貝殻に記録された放射性炭素の変動を用いた海洋環境変動の研究

貝殻やサンゴは、周辺の海水を同化させることによって成長している。そのため地球科学者は、サンゴを年輪ごとに区切って、その $^{14}\text{C}$ 分析を行うことからその海域の $^{14}\text{C}$ の時間変動を復元することに成功した(Nozaki et al., 1978; Druffel and Linick, 1978)。海洋中の $^{14}\text{C}$ は大気との気体交換によりもたらされるので、大気中 $^{14}\text{C}$ と同様にほぼ一定の濃度を保っていた。しかし、1950年代初頭に始まった核実験によってその濃度は大きく変化した(Nozaki et al., 1978; Druffel and Linick, 1978... etc.)。この変動を時間的に追跡することは、周辺海域にもたらされる放射性核種の影響を知るばかりではなく、その海域の海水の循環機構を解明する手がかりとなる。しかしサンゴの生育域の関係から熱帯、亜熱帯域に限って適用できた。ところが、近年のAMSの進化を背景にWeidman and Jones(1993)は、高緯度域に生息する二枚貝を「年輪」に区切って分析することによって、北緯40度付近の沿岸域の $^{14}\text{C}$ の時間変動の復元に成功し、深層循環研究に重要な示唆を与えた。

そこで海域を日本海周辺地域に絞り、北海道大学との協力研究により、水族館や

水産試験場等から「年輪」を持つとされる二枚貝の種を限定して収集し、X線解析等を用いて「年輪」にカットし、その $^{14}\text{C}$ 濃度を分析することから日本海の沿岸域での核実験由来の $^{14}\text{C}$ 濃度の時間変動を復元するとともに、これら海域の表層水の循環過程の解明に資する。

参考文献

Druffel, E. M. and T. W. Linick (1978): Radiocarbon in annual coral rings of Florida. *Geophys. Res. Lett.*, 5, 913-916  
 Kitagawa, H., T. Masuzawa, T. Nakamura and E. Matsumoto (1993): A batch preparation method for graphite targets with low background for AMS  $^{14}\text{C}$  measurements. *Radiocarbon*, 35, 295-300  
 McNichol, A. P., G. A. Jones, D. L. Hutton, Gagnon and R. M. Key (1994): The rapid preparation of sea water  $\Sigma\text{CO}_2$  for radiocarbon analysis at the National Ocean Science AMS Facility. *Radiocarbon*, 36, 237-246  
 Nozaki, Y., D. M. Rye, K. K. Turekian and R. E. Dodge (1978): A 200 year record of carbon-13 and carbon-14 variations in a Bermuda coral. *Geophys. Res. Lett.*, 5, 825-828  
 Weidman, C. R. and G. A. Jones (1993): A shell-derived time history of bomb  $^{14}\text{C}$  on Georges Bank and its Labrador Sea implications. *J. Geophys. Res.*, 98, 14577-14588

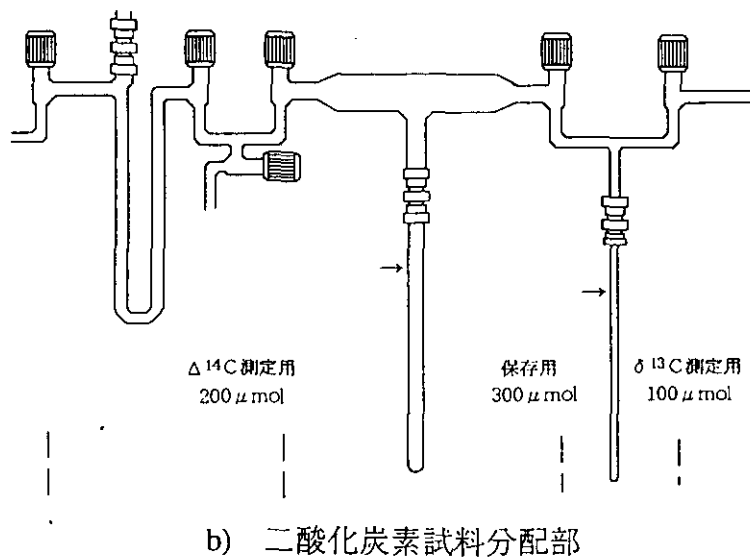
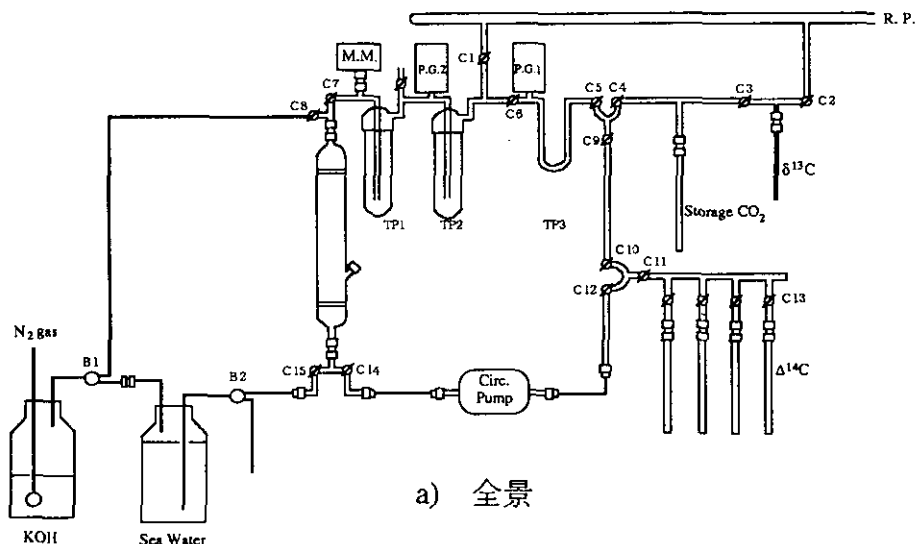


図1 海水中溶存炭酸抽出装置

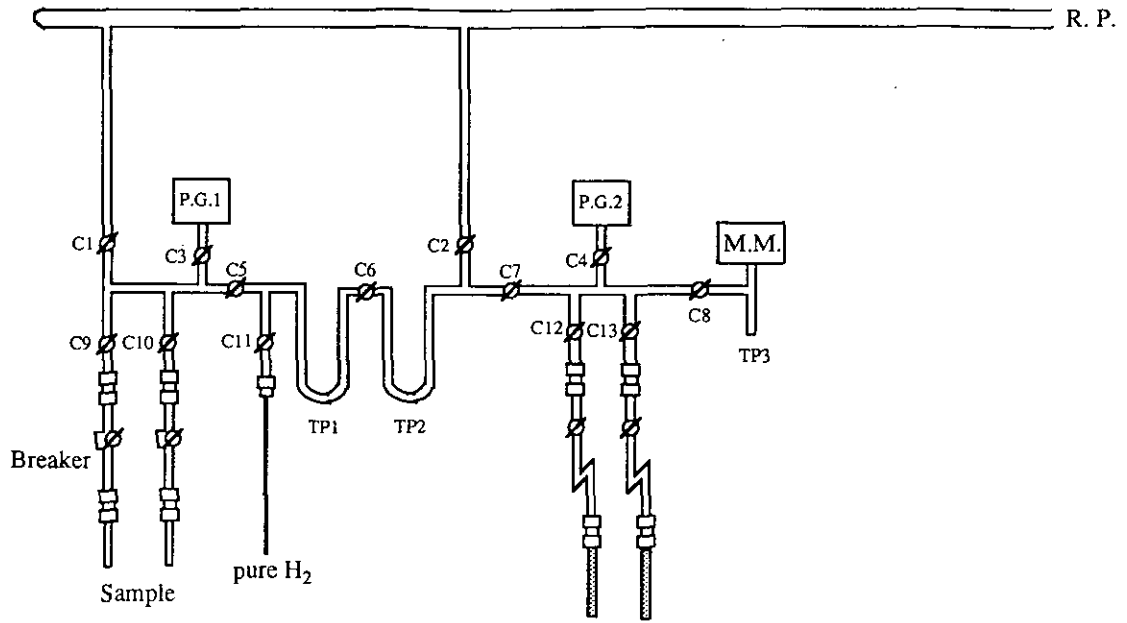


図2 グラファイト作製装置



# 京大理工学におけるAMSの現状

京大理工学研究科物理学第二教室  
松本 博, 中村正信, 廣瀬昌憲, 田澤雄二

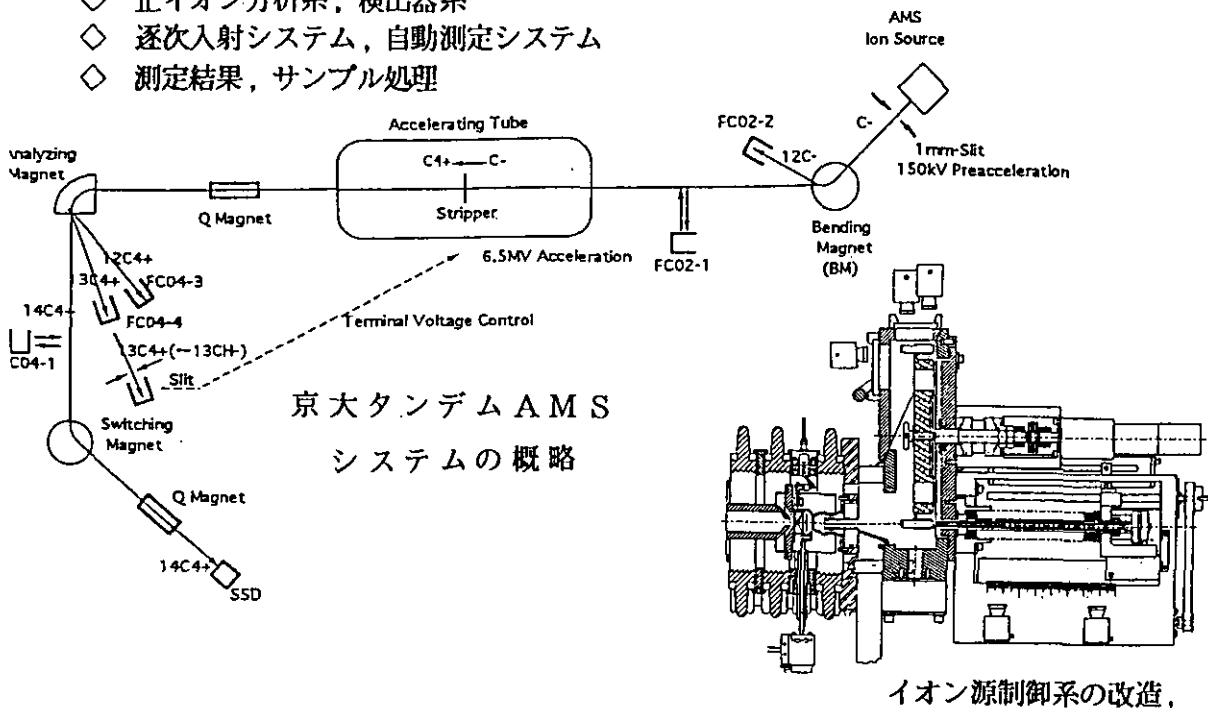
京大工学研究科原子核工学専攻  
萩野晃也, 船場潤之

## 1. はじめに

京都大学理学部物理学第二教室のタンデム加速器では、工学科原子核のメンバーと共同で学際分野のプロジェクトとして、加速器質量分析法AMSの開発を進めてきた。まず、標準技術として標準試料の手に入りやすい $^{14}\text{C}$ 測定を開発した。

京大タンデムAMSシステムの概略を下图に示す。以下それぞれの現状について報告する。

- ◇ 負イオン源及びイオン源制御系の改造, 負イオン入射系
- ◇ タンデム加速器
- ◇ 正イオン分析系, 検出器系
- ◇ 逐次入射システム, 自動測定システム
- ◇ 測定結果, サンプル処理



## 2. 負イオン源及びイオン源制御系の改造, 負イオン入射系

負イオン源は、200kVデッキ上に設置された、HVEE社製の846Aで、59のサンプルを装着することができる。今年の3月までは、SNICS IIを常設イオン源としてきたが、4月からは、846Aイオン源を常設とし、すべての実験に使用している。

この846Aイオン源は導入初期より、カルーセルの回転の位置だしの再現性が、時々わるく、しかもたびたび致命的な故障がおきた。たとえば機械的故障は暴走によるアームの爪の破損、カソードのクランプの破損、制御系では、DCモータのエンコーダの故障、モータ制御ICの故障、制御の心臓部で有るGALIL社のモーションコントローラ本体も故障した。そこで全面的に制御系を改造した。改造で留意した事は、放電に強い事、各部の動きが直接、目で見える事、操作が約15m離れた制御室より行える事です。

カソード移動のX, Y 2次元移動軸, サンプルロードのZ軸には, リニアポテンシオメータを取付け, その抵抗の変化を最終的にはデジタルで, ミリメータで表示する. 加えて, Z軸は荷台にスケールを張り付け, 稼働部に針を取付けて2台のCCDカメラで位置情報を得る. 右のCCDカメラはカラーセル付近の位置情報を, 左のカメラはターゲットがロードされた位置を詳しく見れるようにセットした.

ターゲットチェンバーの蓋たにガラス窓を2箇所あけて, カラーセルの回転位置情報を, CCDカメラで見れる様にした. また別のカメラは下の, ロードされるターゲットの動きを見るためにセットした. 使用したターゲットの面を見るため, カラーのCCDカメラも取り付けた. 此のカメラはAMS以外の実験のカソード使用状態のチェックに利用する.

DCモータ, 駆動電源とPWMの制御方法は変更してない. 制御部の入力には放電対策のスパークプロテクション回路を入れた. リミットスイッチは, X, Y, Z軸とも取り付けた. またインターロックも強化した.

操作は, テレビモニタ, デジタル表示計を見ながら, 押しボタンスイッチ, トルグスイッチで行う. パソコンとのインターフェースも用意したが, 今の所使用していない. カソードの交換時間は, ベテランで1分程度, 初めての人で5分程度で行える.

セシウムオープン部も改造したが, 温度勾配に少し問題があるので, 近いうちに改造する.

200kVデッキ上には, アインツェルンレンズおよびビームエミッタンス制限用のスリットと, ビーム強度減衰用の10分の1メッシュが取り付けられている. スリットはX, Y方向とも, 現在は1ミリ巾を使用している. このスリットはイオン源の状態の多少の変動に対しても, 加速器の透過効率を安定させる効果があるが, ビーム量は数分の一になる.

負イオンは165kVで加速され, 静電偏向板で, 縦の方向が調整されたのち, 負イオン分析電磁石(BM)に入射される. 14C入射時に12C-電流を測定するファラディカップも設置されている.

### 3, タンデム加速器

加速器はNEC, 8UDH, 8MVペレトロン加速器で, 通常は7MV以下で運用している. AMSでは高いビーム透過効率と長期間, 安定な加速が必要なので, ターミナル電圧は, 6.5MV, 電荷数+4価を用いている. ストリッパーは, 炭素フォイルを用いている. 径は通常の実験は8mmφ, AMSでは10mmφを用意した. ターミナル電圧の制御は, GVMを用いている, ローディングが起こらないように, 入射ビーム量をしばれば非常に安定な運転が出来る.

### 4, 正イオン分析系, 検出器系

タンクの出口にQ電磁石と上下, 左右の2組のステアラーを設置している.

分析電磁石はNMRとパソコンを組み合わせたシステムで制御されている.

分析電磁石のポール幅は10cmと狭いので出口の部分に鉄片を追加して, 12C4+などのビーム軌道のゆがみを少なくした, 12Cビームの透過効率を測定するためのファラディカップと13Cビームの透過率測定用のファラディカップも設置した. 14Cの加速時に14Cの同重分子イオンである13CH-から生じた13C+4をスリットで検出し, 加速電圧のゆっくりとしたドリフトの制御に用いている. 図-4は12C4+透過率測定用のファラディカップ付近のビームのプロファイルです

タンク出口のステアラー, 及びQ電磁石の最適化により10mmφ程度にビームをしばる事ができた. これにより12C4+の測定は, 良い結果を得ている.

14C+4ビームは, 振り分け電磁石で振り分けられた後, Q電磁石でフォーカスされ, 半導体検出器に入射して, エネルギースペクトル分析される.

静電ディフレクターを用いていないので, 12C3+のパイルアップ, バックグラウンドが多く長時間の測定では, 検出器の分解能の劣化が問題となる.

コースのダクトには、 $^{14}\text{C}$ 加速時以外の時にビームストッパーを入れて、検出器を保護している。

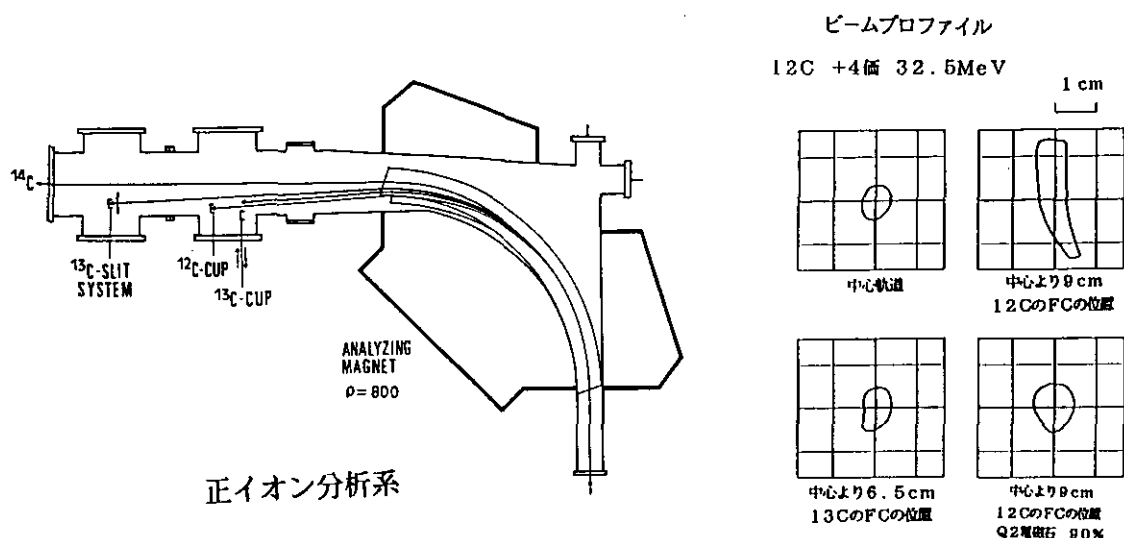


図-4

#### 5. 逐次入射方式、自動測定システムについて

$^{14}\text{C}$ の透過効率を求めるには、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$ 等の同位体イオンの入射を切り替えて加速し透過率を測定しこれに補正を施す事により得ている。我々の入射系は前段加速の電圧が165kVと高いため電圧を高速で変えて入射きり替えを行う方法は困難なので、低速ではあるが、分析電磁石を変化させる方法を採用している。図-5は逐次入射システムの時間経過を表して、偏向電磁石(BM)の磁場を変える事により、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ を逐次入射する、 $^{12}\text{C}$ の加速の時は正イオン分析系のQ電磁石の磁場を最適化するとともに、減衰用メッシュを入れてビームを弱くして、加速管のローディングを防ぐ、ビーム切り替え時にBMの磁場が安定するまでビームを加速器に入射しないよう垂直方向の静電偏向板の電圧を変えて、入射防止装置とし過渡的なビームローディングの発生を押さえる。

また $^{14}\text{C}$ の加速時以外の時間は散乱槽の直前にビームストッパーを入れSSDを保護している。 $^{12}\text{C}$ の測定は減衰用メッシュの入っている時と、入っていない時の2回微小電流計を用い、GPIBでパソコンに取り込んでる。 $^{13}\text{C}$ 測定用のファラディカップは、測定ときのみ、ビームコースに入れるようにしている。BMの磁場の切り替えは約8秒で安定する、入射防止装置の静電偏向板の電圧の安定に時間がかかるため、一連のシーケンスに約2分かかっている。図-6に自動測定システムを示す、SSDで $^{14}\text{C}$ を測定し、プリアンプ、アンプ、ADC、マルチチャンネルアナライザー(MCA)によってスペクトル化され、パーソナルコンピュータにより表示、ファイルセーブ、プリントアウトされる。このMCAシステムの操作はキーボードよりコマンドを入れる事により行ない、他のパソコンとの通信機能は用意されていない。

自動測定用のパソコンは、逐次入射透過率自動測定の開始と、透過率測定データ等の読み込みを行い、ファイルにセーブする、 $^{14}\text{C}$ の測定時には、 $^{12}\text{C}$ 電流はカレントデジタルに入力されスケーラーで計数され、パソコンに読み込まれる。計測数が設定数になれば、自動測定を終了する。ADC、及びスケーラーのゲートの開閉はこのパソコンから操作される。またこのパソコンはPC98のキーボード信号を作り出す事ができるのでMCAの操作(セーブ、プリントアウト、測定開始、停止)もできる。 $^{14}\text{C}$ 測定時間と透過率測定の時間配分も管理する。データ整理は、マックのエクセルで処理され、プリントアウトされた数値を手で入力する事により、直ちに、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}$ の比等の必要なデータが得られる、

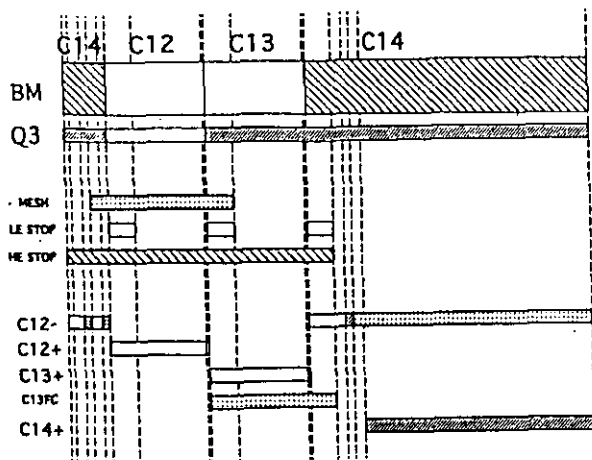


図-5 逐次入射システム

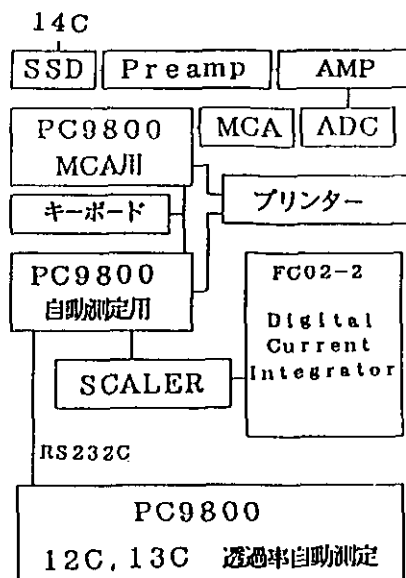
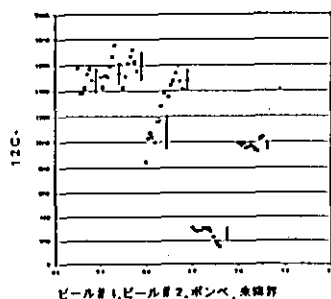


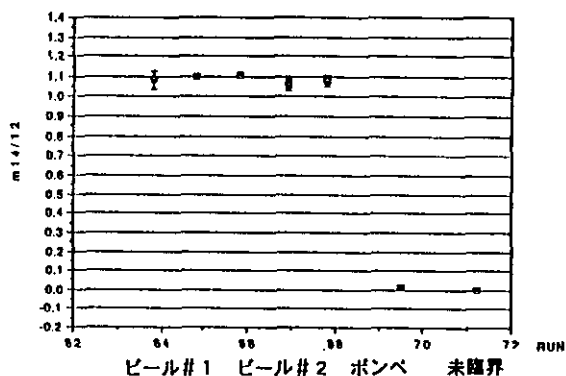
図-6 自動測定システム

## 6. 測定結果, サンプル処理

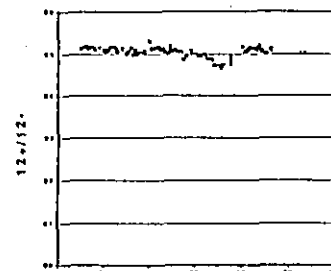
サンプルとしてビールの発酵から生じた炭酸ガス, 市販のポンベ入りの炭酸ガスをグラファイト化した試料を測定した。放射実験室未臨界実験装置で使用されていたグラファイトも試料とした。ビームの強度は時間とともに変化するが, 透過率50%前後とあまり変っていない, また14C, 12Cの比と14C, 13Cの比も再現性の良い値がえられた。炭酸ガスからのグラファイト化は上手くいっているが, 試料の前処理と炭酸ガス化は経験も少なく満足する結果は得られていない。



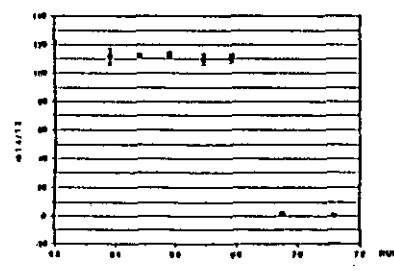
ビール#1, ビール#2, ポンベ, 未臨界



ビール#1, ビール#2, ポンベ, 未臨界



ビール#1, ビール#2, ポンベ, 未臨界



ビール#1, ビール#2, ポンベ, 未臨界

## 7. まとめ

負イオン源の制御, 加速器高電圧の制御, 逐次入射システム, 自動測定システム, 炭酸ガスのグラファイト化については, 一応の結果を得たと考えているが, 今後の課題としては, イオン源デッキ上のスリットを改良して, ビーム量を増やす事と, 入射防止装置の機械的方法への改良で, 透過率測定時間の短縮と, システムの測定精度の向上をはかり, 測定誤差1%以下を目指す事。 静電ディフレクターの設置, サンプル処理の技術力を向上し, 実際のサンプルをルーティン化して測定する事。 また, 中型タンデムの特徴を活かした, 塩素36等の重い元素の長半減期放射性同位元素の, 超高感度測定も推進したいと考えている。

## 参考文献

- 中村正信 平成4年度, 科研費, 研究成果報告書「加速器質量分析法による重元素同位体比の超感度測定法の開発」  
船場潤之 修士学位論文 「加速器質量分析法による, 14C/12C比精密測定」

## $^{14}\text{C}$ 年代測定用鉄試料からの湿式炭素抽出法

小田寛貴<sup>1)</sup>，中村俊夫<sup>1)</sup>，古川路明<sup>2)</sup>

1)名古屋大学年代測定資料研究センター，2)四日市大学環境情報学部

<はじめに>

実用金属器たる鉄器は，日本の場合，主に砂鉄を木炭で還元することで作製されてきた。このため，鉄器中にはその作製段階で用いられた木炭が，極少量ながら含まれていることが知られている。したがって，この炭素を効率よく，かつ，高純度で抽出することができるならば， $^{14}\text{C}$ 年代測定法を鉄器に適用することが可能となる。

鉄器から $^{14}\text{C}$ 年代測定用の炭素を抽出する方法としては，鉄試料を助燃剤とともに高周波燃焼炉内に挿入し，酸素気流中において燃焼させることで，炭素を二酸化炭素の形で鉄から分離する方法（乾式炭素抽出法）が知られている（Nakamura et al. 1995）。しかしながら，同抽出法においては，現代の大気中二酸化炭素が混入する危険性があること，および，炭素含有量の高い試料においては炭素回収率が低いことが指摘されていた。同方法に若干の改良を加えたことで，現代炭素の汚染防止・含有炭素の高回収率が可能であることが判明したものの（小田ら，1997），同抽出法では，炭素含有量の低い試料については一回の燃焼で十分な量の炭素が抽出できない場合があること，一連の操作をほぼ一日休止することなく行う必要があること，また現代炭素の汚染防止に熟練を要することといった問題点が残っている。

本研究の目的は，乾式法によらない炭素抽出法，すなわち，鉄試料中のFeのみを，選択的に水溶液として溶解させ，残った炭素粒子を捕集するという湿式の炭素抽出法を確立するところにある。鉄試料には，炭素含有量既知の鉄鋼標準試料を用い，塩酸による方法，塩化銅水溶液による方法の開発・検討を行ったため，その結果を本稿において報ずる。

<塩酸を用いた湿式炭素抽出法>

同抽出法の検討には，鉄試料としてLECO社製鉄鋼標準試料（炭素含有量4.67%）を用いた。

2 N H C l によって、鉄試料を溶解させた場合、残存する炭素はほとんどピーカーの器壁に吸着し、これを効率よく回収することは不可能であった。

そこで、6 mmφ のガラス管に石英綿を充填し、その上に鉄試料100~150mgをのせ、ガラス管上端から2 N H C l を数日かけて流すことによって、F e を溶解させ残存炭素を石英綿上に捕集するという方法をとった。得られた炭素をC u O によって酸化しC O<sub>2</sub> に変換したうえで、その定量を行った。表1 に結果を示す。

表1. 塩酸を用いた湿式炭素抽出法

| 試料      | 炭素含有量<br>[%] | 試料の重量<br>[mg] | 収量 (収率)<br>[mg] ( [%]) |
|---------|--------------|---------------|------------------------|
| LECO Fe | 4.67         | 109.34        | 0.939 (18.4)           |
| LECO Fe | 4.67         | 146.89        | 2.57 (37.5)            |
| LECO Fe | 4.67         | 159.45        | 3.33 (44.7)            |

しかしながら、塩酸による炭素抽出法は、

- (1) 炭素粒子の捕集効率が悪い (20~40%)
- (2) 反応に要する時間が長い
- (3) 特に、炭素含有率の低い試料の場合、発生するH<sub>2</sub>気泡がガラス管内にとどまり、さらに反応を遅延させる

といった問題点が挙げられ、<sup>14</sup>C年代測定用の炭素抽出法としては不十分なものであることが示された。

#### <塩化銅水溶液を用いた湿式炭素抽出法>

塩酸による抽出法において、炭素の回収効率が低い原因として、充填した石英綿を通過し得るほどに炭素粒子が小さいことが考えられる。この場合、炭素粒子は塩酸水溶液中においてコロイド粒子として分散しているものとみることができる。一般に、コロイド粒子は帯電して溶媒中に分散しており、また、炭素コロイドをはじめとする疎水コロイドは、少量の電解質添加によって不安定化され、凝結する性質を有している。疎水コロイドの凝結現象は、コロイド粒子の電荷と反対の電荷を持つイオンの濃度が高いほど、また、その電荷の価数が大きいほど顕著になる。

本実験の予備実験として炭素コロイドの電荷の決定を行った。炭素コロイドの凝結の性質を、正に帯電することで広く知られている  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  コロイドのそれと比較することによって、炭素コロイドの帯電電荷が負であることが結論づけられた。

炭素コロイドは負に帯電しているため、正の価数の高いイオンの添加により凝結をおこすことになる。塩酸を用いた湿式抽出法では、炭素粒子が小さく、石英綿上への捕集の効率が低いという問題点があった。そこで、 $\text{Fe}$  を溶解した後、電解質を添加し炭素をコロイド粒子として石英綿上に捕集する方法の検討を行った。電解質としては、正二価のイオンをもち、また同時に、酸化還元電位の相違により  $\text{Fe}$  を溶解させる  $\text{CuCl}_2$  を選定した。同抽出法の検討には、LECO社製鉄鋼標準試料（炭素含有量4.67%）、日本鉄鋼協会製標準試料（炭素含有量 0.196%、0.050%）の三種類を用いた。

まず、約2倍当量の  $\text{Cu}^{2+}$  イオンを含む塩化銅水溶液を用いて、鉄試料を溶解させた。この操作によって、炭素コロイドが生成され凝結するとともに、単体の  $\text{Cu}$  が析出した。しかるのち、酸素存在下において塩酸によって単体  $\text{Cu}$  を溶解させ、残存した炭素を、ガラス管（6mmφ）内に充填した石英綿の上に捕集した。

これを、 $\text{CuO}$  とともに真空中において加熱（850℃）し  $\text{CO}_2$  に変換した。得られた  $\text{CO}_2$  を、 $\text{H}_2$  と鉄触媒とによって還元することで、グラファイトに変換した。同グラファイトをターゲットとして、名古屋大学タンデロン加速器質量分析計によって  $^{14}\text{C}$  年代を測定した。また、精製後の  $\text{CO}_2$  の一部を分取しておき、トリプルコレクター式 気体用質量分析計（Finnigan MAT社製 MAT252）によって、 $\delta^{13}\text{C}$  値を測定し、 $^{14}\text{C}$  年代の同位体分別効果の補正にあてた。同抽出法の結果を表2に示す。

表2. 湿式抽出法（塩化銅水溶液）による鉄標準試料の  $^{14}\text{C}$  年代

| 試料(炭素含有量)<br>([%]) | 試料の重量<br>[g] | 収量(収率)<br>[mgC]([%]) | $^{14}\text{C}$ 年代<br>[BP] | $\delta^{13}\text{C}$ 値<br>[‰] |
|--------------------|--------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------|
| LECO Fe (4.67)     | 0.159        | 6.15 (83.0)          | 37150 ± 330                | -25.19 ± 0.09                  |
| LECO Fe (4.67)     | 0.067        | 2.66 (84.8)          | 36290 ± 330                | -25.05 ± 0.09                  |
| JSS Fe (0.196)     | 1.53         | 2.65 (88.4)          | 25980 ± 270                | -23.00 ± 0.09                  |
| JSS Fe (0.050)     | 6.04         | 2.61 (86.4)          | 19330 ± 140                | -24.24 ± 0.09                  |

得られた<sup>14</sup>C年代は、改良後の乾式抽出法において得られた年代値と良い一致をしており、同抽出法、ならびに改良後の乾式抽出法が、現代炭素による汚染の少ない方法であることが示された。また、回収率についても、80～90%という結果が得られた。さらに、乾式抽出法においては、一回の燃焼に用いる鉄試料は最大2gであったため、炭素含有量の低い鉄試料では<sup>14</sup>C年代測定に十分な量のグラファイトが生成されないという問題点があったが、湿式抽出法は、反応系を大きくすることによって必要な量の炭素が抽出できるという利点を有していることが示された。殊に、文化財資料の年代測定においては、長時間の測定に耐え得るターゲットを調製することが肝要となるため、この利点は湿式法の重要な特徴であるといえることができる。

#### <まとめ>

本研究では、鉄試料からの塩酸・塩化銅水溶液を用いた湿式炭素抽出の検討を行った。その結果、塩化銅による湿式抽出法が、高回収率・低バックグラウンドという特性を持つ方法であること、また、同方法によって低炭素含有量の鉄試料からの十分な炭素抽出が可能であることが示された。

本研究は、かように鉄器の<sup>14</sup>C年代測定の方法論的確立を目的としたものであった。次段階においては、歴史学的な年代の既知であるような資料についての測定を実施し、鉄器の<sup>14</sup>C年代と歴史学的年代の関係を審らかに必要があると考えている。

#### <参考文献>

Nakamura, T., Hirasawa, M. and Igaki, K. 1995 "AMS Radiocarbon Dating of Ancient Oriental Iron Artifacts at NAGOYA University" Radiocarbon, Vol. 37, No. 2, p629-636

小田寛貴, 山田淳子, 中村俊夫, 平沢政広, 井垣謙三, 古川路明. 1997

"<sup>14</sup>C年代測定用鉄試料からの乾式炭素抽出法"

平成7～8年度科学研究費補助金・基盤研究(C)研究成果報告書

"加速器質量分析法による古代鉄の放射性炭素年代測定の基礎研究" p10-18



## NIES-TERRAにおけるAMS研究の現状と将来計画

柴田康行、\*熊本雄一郎、米田 穰、久米 博、田中 敦、植弘崇嗣、森田昌敏  
国立環境研究所 (\*現海洋科学技術センター)

### 1. はじめに

国立環境研究所に設置された加速器質量分析(AMS)施設(NIES-TERRA)は、設置作業開始後約1年半あまりを経て、実試料の分析とそれに付随した様々な条件検討に着手する段階にいたった。現時点では固体試料の $^{14}\text{C}$ 分析条件並びに試料前処理条件の検討が中心であるが、早急に $^{10}\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}$ 等、他の元素同位体の分析条件の検討と実試料の分析にも取りかかる予定である。以下、 $^{14}\text{C}$ 測定に関する調整作業の概要と現状を報告する。なお、加速器本体に関する概要はKume et al. (1997)、Shibata et al.(1997)、久米ら(1997)を参照されたい。また、試料調製法については、熊本ら(1996)並びに米田ら(1997)を参照されたい。

### 2. 同位体比の測定精度

設置作業開始後1年半余の間に、様々な箇所でも問題点が明らかになり、改良が進められた。詳細については久米ら(1997)を参照いただきたいが、以下に述べる測定精度の向上を主な目的として行った改良作業の多くは、当然のことながらイオン源から加速器に至る入射系を中心として行われている。

昨年報告した段階では、標準試料に関する $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の同一カソード内、並びにカソード間のバラツキを、数%以下に抑えることができない状態であった。BPMで見たビームの形状等から入射磁石のイオン光学系に問題があると考えられたため、磁場型Qレンズを入射磁石の前(ギャップの後ろでジャンピングに伴い電圧の変化する部分)に追加して補正ができるようにした。その結果、加速器後方のファラディカップで見た時にいわゆるフラットトップが確認できるようになった。また、安定同位体比( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ )については最高0.1%の精度まで到達したが、同時に測定した $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比はあいかわらず数%台であった。

同一標準試料のカソードをホイール上に等間隔に設置し、順に繰り返し測定した結果を

眺めると、同一カソードでの繰り返しの結果のバラツキはカソード間のバラツキより小さい。また、各カソードにあたるCsビームの焦点位置がホイール上のカソード位置によって変化していく傾向が認められた。即ちカソードホイールを回転軸にはめる際に微妙な位置のずれが生じ、それが結果に影響を及ぼしていることが予想された。そこで、Ta製シムを回転軸との間に挿入してずれを抑えた。また、イオン源の徹底的なクリーニング並びに軸調整をやりなおした。これらの改良作業の結果、本年2月になって、同一標準試料をつめた10個のカソードを順に測定した結果が $\pm 0.65\%$ に収まるようになった(図1)。以後、約半年に渡って炭素試料の測定を継続しているが、各測定毎の標準試料のバラツキは同等ないしそれ以上のレベルに維持されている(最高で $\pm 0.3\%$ )。また、IAEAから出されているC1~C6の6種類の標準試料について $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を測定した結果は、保証値とよい一致を示した(図2)。

検出系には $^{14}\text{C}$ を含めて $\Delta E$ -Eプロットで区別できる3つのピークが認められたが、これらは互いに完全に分離しており、バックグラウンドはグラファイト化のプロセスを含めて $10^{-16}$ レベルを達成している(IAEA C1の測定結果より)。他の2つのピークは未同定であるが、これらは石英の破片が混入した際に劇的に大きくなったこと、又 $\text{C}^{3+}$ の検出では消えてしまったことから、少なくとも1つは $^7\text{Li}^{2+}$ に由来するものと考えている。

もう一方のガスイオン源と同時入射系の組合せについては、 $\text{CO}_2$ ガスからの $5\sim 10\mu\text{A}$ の $\text{C}^-$ イオンの定常的な引き出し、並びに $^{14}\text{C}$ シグナルの検出に成功した。さらに高精度化を目指し、検討を続けている。

### 3. 測定条件の検討

Csビームによるスパッタリングで $\text{C}^-$ を引き出す際に試料表面に形成されるクレーターによって同位体分別効果が引き起こされるとされ、本システムではCsビームをデフォーカスしてなるべく均一に削る形をとっている。その効果を確認するため、詰めたグラファイトに穴があいてビームが減少するまで長時間連続測定を行い、同位体比への影響を調べた。また、グラファイトと鉄の比率を変えて、同位体比への影響を調べた。なお、以上の結果は6月に行われたAMSシンポジウム(米田ら(1997))で報告しており、ここでは結果に簡単に触れるに止める。

NISTの標準試料HOxIIを1.1mgつめた試料の場合、測定開始後30分程度でビーム強度が減少を始め、3.5時間ほどで最初の1/10まで落ちる。一方、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比はその間目立った

変動を示さない（ビーム強度が弱くなるため、誤差は次第に増加する）。逆に多量（3.1mg）の試料を詰め、ビーム強度が数時間に渡って一定の場合にも、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の変動は認められなかった。以上の結果はCsビームのデフォーカスによって同位体分別が効果的に抑えられ、少ない試料を有効に測定できることを示している。一方、グラファイトに対する鉄の割合を増やした場合は、増えるに従って見かけの $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比が減少する傾向が認められた。こうした結果はこれまでも報告されており、その原因として試料調製過程での「古い」炭素の混入と解釈する説の他、ビーム強度の変化に伴う空間電荷効果の可能性も指摘されている。同じ比率に調整した標準試料で規格化することで見かけの偏差は小さくなったが、完全には抑制できなかった。特に微量の試料中の同位体比を測定する上で鉄との比率を変えることは避けて通れない問題であり、この原因を明らかにし、抑制法ないし補正法を確立することが今後の大きな課題の一つと考えられる。

#### 4. NIES-TERRAを用いた環境研究

海水中DICの $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を測定して日本海における海水循環（深さ方向）を明らかにする研究のほか、化石燃料が $^{14}\text{C}$ を含まないことを利用して大気中臭化メチルの起源を探る研究が現在進められている。また、 $^{10}\text{Be}$ 等の長寿命放射性核種についても予備的な測定を開始しており、数百万年前まで遡りうる絶対年代決定法の実用化を目指して研究が進められている。さらに、ガスイオン源を利用してGCで分離した微量成分中の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を測定するGC-AMSシステムの開発研究も本年度から開始されており、多くの応用研究に利用できる実用的なシステムの構築を目指している。

#### <文献>

久米博ほか：国立環境研究所タンデム加速器分析施設の現状、本報告集(1997)

H. Kume, et al.: The AMS facility at the National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan, Nucl. Instr. and Meth. B123, 31 (1997)

Y. Shibata et al.: A Preliminary Report on the Characteristics of a  $\text{CO}_2$  Gas Ion Source MGF-SNICS at NIES-TERRA, Nucl. Instr. and Meth. B123, 554 (1997)

熊本雄一郎ほか：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、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)

米田穰ほか：極微量サンプルの放射性炭素年代測定にむけて、AMSシンポジウム報告集(1997)

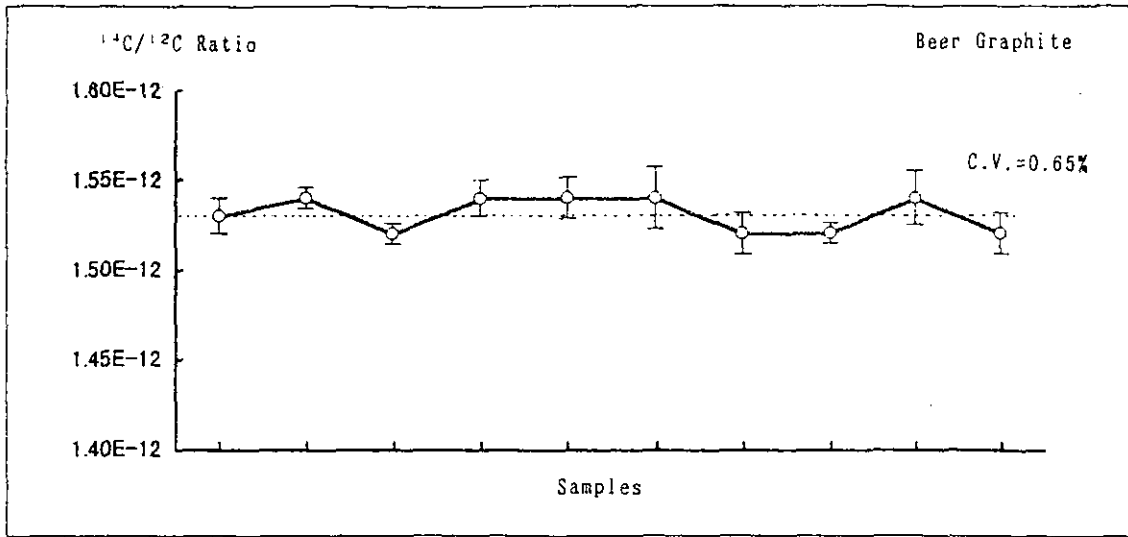


図1 ビール会社製二酸化炭素から作成したグラファイト試料の測定結果の一例  
(最初に繰り返し精度1%を切ったときの結果)

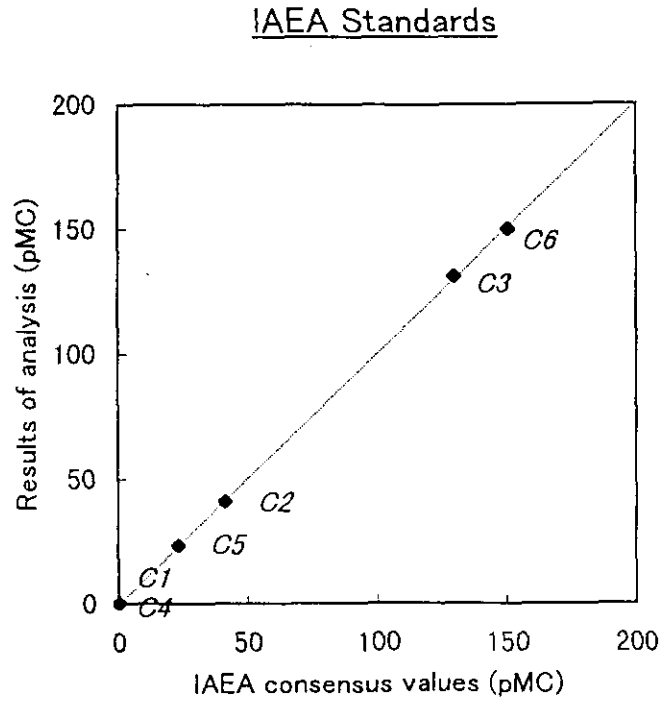


図2 IAEA (国際原子力機関) 作成の標準試料 (C1 ~ C6) の測定結果

# Beam Bunching System

九大理 中島孝夫, 董裕明, 前田豊和

## 1. はじめに

九大タンデム加速器はこれまでパルスビーム装置を持たず、DC ビームのみで実験を行ってきたが、最近各種の実験でビームの時間情報を求める要求が高まってきている。AMS 実験においてもバックグラウンド粒子の除去に、イオン源から検出器に至る測定粒子の飛行時間測定は非常に有効と考えられる。これらの目的のため、ターゲット上 1nsec 程度の幅のバンチビームを得ることを目標として、タンデム入射系ビームバンチング装置の設計、製作を進めてきた。ビーム繰り返し周期は 100 ~ 200nsec で、陽子、重陽子から中重核ビームまでのバンチングが可能となるように設計した。バンチング効果を高めるためのイオン源部のプレバンチャー及びバンチング幅から外れたビームを除去するビームチョッパー等は未だ設計中の段階にあるが、一応のバンチビームを生成することが出来た。第1図にビームバンチング装置のユニットの断面図を示した。

## 2. 装置の構成

ビームバンチング装置は①プレバンチャー、②2段式バンチャー、③ビームチョッパー、の3デバイス構成を考えている。

### ① プレバンチャー部

イオン源から出力される負イオンの、出来れば 90%以上をパルスビームとして有効に利用するため、イオン源の引き出し電圧に鋸歯状波電圧の変調を加え、②のバンチャー電極入射部においてバンチング周期の 50%以下程度までの幅のパルスビームを生成するものである。この目的のためには 200V 程度の振幅で、立下がり時間 10nsec 程度の鋸歯状波電圧源が必要となる。現在未だ電源回路を試作中の段階である。

### ② 2段式バンチャー部

本装置の中心部であり、タンデム入射のための前段加速 (200KeV) の後のタンデム入射系に置かれる。2段のユニットから成り、各々基本周波数とその2倍の周波数の正弦波電場による加減速をビームに加えることにより、タンデム出口部において約 2nsec 程度のパルスビームが得られる予定である。高周波電圧が印加される電極は各々 32cm, 16cm の円筒管から成り、この電極長は基本周波数 6 ~ 10MHz の範囲でプロトンから中重核イオンに至る広範囲のビームをパルス化出来るように定められた。この装置は一応完成しており性能テストが行われた。

### ③ ビームチョッパー部

イオン源から出力したビームの 100%をバンチングさせることが出来ない以上、一部のビームはパルス時間幅から外れたバックグラウンドを形成する。2段式バンチャーにより約 2 nsec 幅のパルスビームがタンデムから出力されるが、ビーム強度の約 50% (プレバンチャーによって最終的には 10% 以下に抑える予定) の off-bunch ビーム成分がターゲットに入射することになり、TOF 測定の妨げになる。ビームの不要成分を除去する手段としては、タンデム出口部に平行電極板デフレクター電極を設け時間的にビームを掃引し

て、ビーム分析電磁石の入口側スリットでバックグラウンド粒子を除去する方式を取ることにした。このビームチョッパーによって B.G.除去が出来るだけでなく、パンチャーによって生成されるパルス幅よりさらに短いビームパルス幅が要請される実験においては、ここでビームの一部を切り捨てることによって必要なパルスビームをターゲット上に生成することが可能になる。

### 3. 2段式ビームパンチング装置

走行中のイオンビームにビーム電圧に比べて微少な加減速電界を加えてビーム軸下流の一点に時間収束させるビームパンチング法では、時間的に直線的に立ち上がり瞬時に立ち下がる、いわゆる鋸歯状波波形の電界が理想的である。この鋸歯状波波形電場は、そのフーリエ級数成分の正弦波電場を重ね合わせることによって原理的には実現するが、実際問題としてここでは基本正弦波と2倍周波数正弦波の重ね合わせによって得られる直線部を利用する方式を取っている。第2図に単一の正弦波電場  $V_0 \sin \omega t$  による1段式と、2段式の  $V_0(\sin \omega t - \xi \sin 2 \omega t)$  の重ね合わせ電場の比較を示した。

第3図に電極の配置を模式的に示している。イオンビームが高周波電極を通り抜ける時間は高周波の  $(2n+1)\pi$  の位相変化に一致していなければならない。但し  $n=0,1,2, \dots$  本文末に各イオンビームに対する2段式パンチャーの適合周波数と所要電圧を示した。高周波電源としては第1段、第2段共に連続定格 100W 出力の無線用の汎用電源を利用して製作した。電極を含む LC 回路(第1図参照)で発生した高周波高電圧は 20W 出力時に約 2,000V が得られた。

### 4. ビームパンチャーのテスト実験

$^{16}\text{O}$  ビームを用いてビームパンチングのテスト実験を行った。第4図にパンチャーとして第1段の  $f_0$  周波数電極のみを働かせた場合のターゲットでのビーム幅の測定値を示した。パンチャー電極に入射した直流ビームの約 50% がターゲット上で FWHM 5.9nsec のパルスビームを形成していることが確かめられた。このテスト実験は 40MeV の  $^{16}\text{O}$  ビームを Au の薄膜ターゲットにあて、弾性散乱した  $^{16}\text{O}$  粒子を Si-半導体検出器で捕らえ、その飛行時間を測定したものであるが、検出器からのタイミング信号の分解時間に限界があり、2 $f_0$  パンチャーを作動させての、より幅の狭いパルスビームの確認には至らなかった。

### 5. ビームチョッパー部

#### ①電場デフレクターの仕様

電極長: L 電極間 gap: d 印加電圧: V ビーム電圧: E ビーム荷電数: n  
として、ビーム偏向角  $\theta$  は、

$$\theta = nVL / (2dE)$$

タンデム加速管出口直後に  $L=50\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$  の電極を設置した場合、  
デフレクターからスリットまでの距離: 約 6 m スリット幅: 2 mm より、  
ビーム遮断に必要なビーム偏向角  $\theta_{\min} = 1/6000 = 0.00017$  .

このときのデフレクター印加電圧  $V = 0.000027 E/n$  .

タンデムターミナル電圧 10MV として、

|            |                                |
|------------|--------------------------------|
| p.d ビームの場合 | $V = 540 \text{ volt}$         |
| H.I.ビームの場合 | $V \approx 300 \text{ volt}$ . |

②ビームチョッパー方式について

1) 高速パルス電圧によるチョッパー

デフレクターの一方の電極に直流電圧  $-V$  volt を印加しておき、他方の電極に  $+V$  volt の高速パルス (幅  $2\text{ns}$ , 周期  $f_0$  Hz) を印加する事によって, off-bunch 成分を切り捨てる事が可能である. 併し, デフレクター電極を通過するイオンの速度は  $2\text{ns}$  当たり 数 cm から  $10\text{cm}$  の程度である. 従って上式における電極長  $L$  は有効ではなく, 必要なパルス波高は  $10\text{KV}$  のオーダーとなり, このような高速且つ高電圧パルスの実現はかなり難しい.

2) 正弦波電圧によるチョッパー

a) パルスビーム周期の半分の周期 ( $f_0/2$  Hz) の正弦波電圧をデフレクター電極に印加すればビームパルス通過時刻と正弦波電圧のゼロクロス時を一致させることによって off-bunch ビーム成分をカットする事が出来る. この場合, イオン速度の問題は生じないが相当の高電圧を発生することが必要となる.

$$\text{高周波電圧 } V = V_0 \sin \omega t, \quad \omega t \ll 1 \quad \text{では } V = V_0 \times \omega t$$

$$3\text{MHz の場合, } \omega = 1.9 \times 10^7 \quad t = 2\text{ns} \text{ として } \omega t = 0.038,$$

$$V_0 = V / 0.038 = 14,000 \text{ Volt (for p,d),}$$

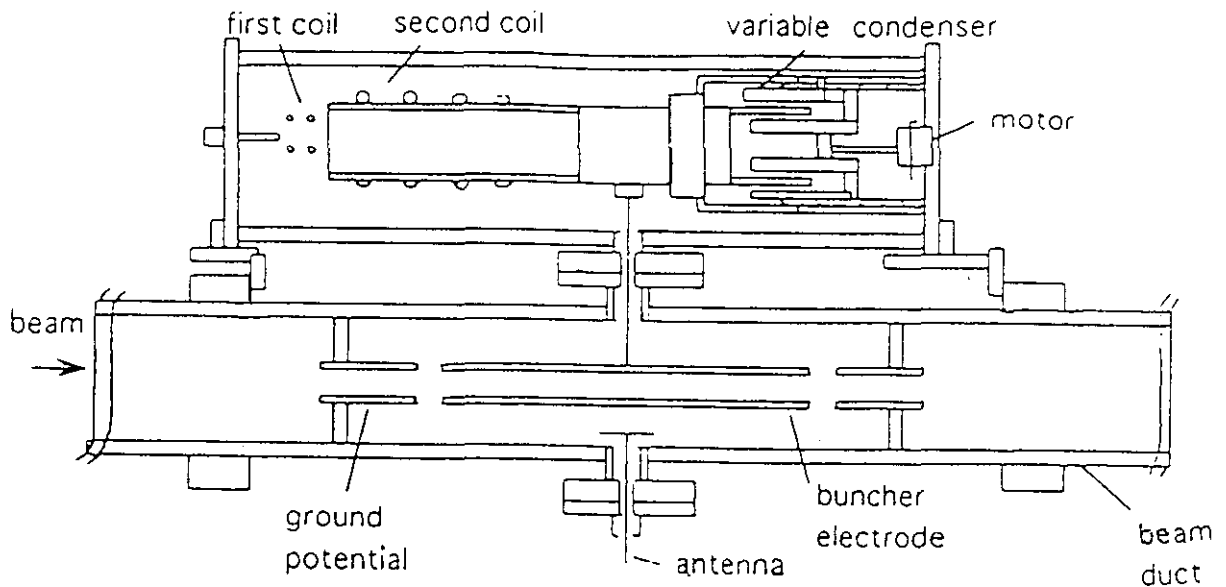
$$= 7,900 \text{ Volt (for H.I.).}$$

b) 必要な電圧が非常に高くなるのは  $\omega$  値が小さいことからきている. 従って高い周波数の電圧を用いれば低い電圧で機能を持たせることが可能になる. 併しこの場合, 周期的に off-bunch 成分のビームパルスの一部を通してしまうことになる. そこで上記の  $f_0/2$  周波数の電圧に加えて, 周波数の高い高周波電圧をデフレクターに印加する方法が考えられる. 仮に  $100\text{MHz}$  の電圧をデフレクターに加えたとき, 必要な印加電圧は,  $100\text{MHz} : 500\text{Volt}$  及び  $3\text{MHz} : 1,500\text{Volt}$  程度の電圧で十分である. この方法の短所は装置の複雑化・高価格化を伴うことであろう.

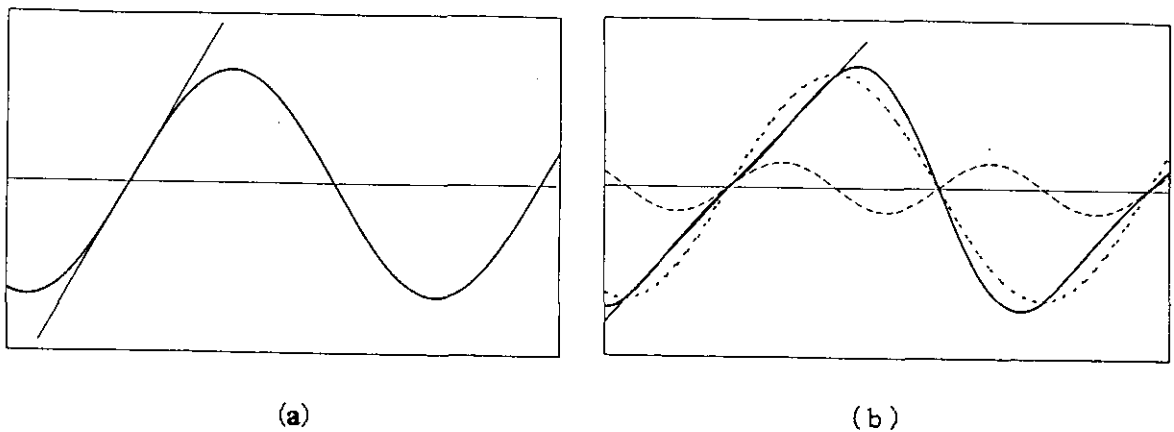
現在の方針としては, 特に機能不足が問題にならない限り a) の方法を進める予定である.

表 2 段パンチャーの運転条件 ( $\text{H}^+$ - $\text{H}^+$  :  $200\text{KeV}$ , 収束点迄の距離 :  $7\text{m}$  とする)

| ビーム種類                                | H         | D         | $^{12}\text{C}$ | $^{35}\text{Cl}$ |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------------|------------------|
| イオンの速度 ( $10^8\text{cm/sec}$ )       | 6.2       | 4.4       | 1.79            | 1.03             |
| 第1段電極の通過時間 $t_0$ ( $\mu\text{sec}$ ) | 0.052     | 0.073     | 0.178           | 0.31             |
| 基本周波数 $F = 1/2t_0$ (MHz)             | 9.6       | 6.8       | 2.8             | 1.61             |
| 運転周波数 $f_0 = n \times F$ (MHz)       | 9.6 (n=1) | 6.8 (n=1) | 8.4 (n=3)       | 8.1 (n=5)        |
| 高周波電圧 $V_0(f_0)/V_0(2f_0)$ (KV)      | 4.5/1.0   | 4.5/1.0   | 1.52/0.33       | 0.90/0.20        |



第1図 ビームパンチャー断面図



第2図 2段式パンチャーの機能

(a) 1段のみを使用した場合 ( $\sin \omega t$ )

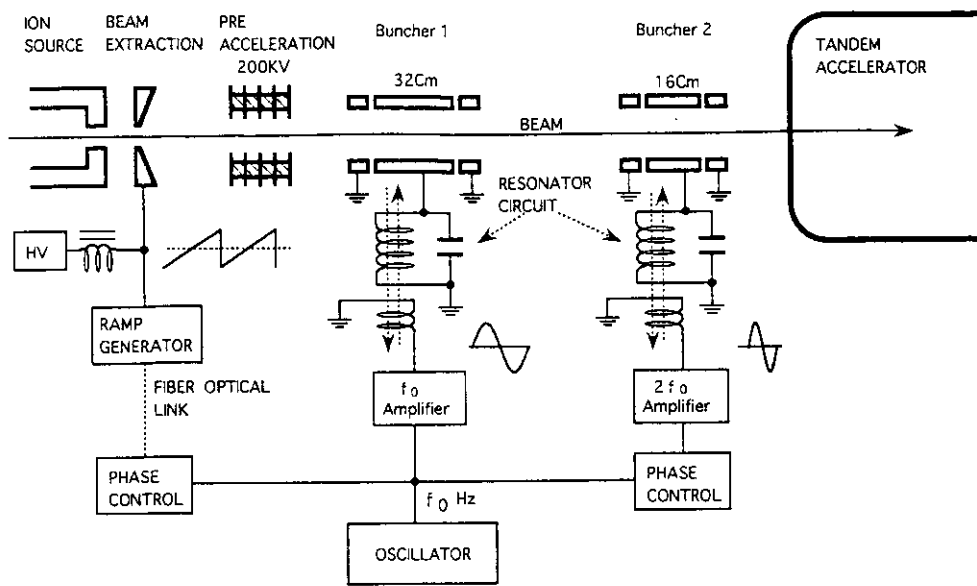
パルス周期の  $1/100$  の幅にパンチングさせるとき、全体の  $30\%$  以下のビームしか利用出来ない。

(b) 2段式の場合 ( $\sin \omega t - 0.2 \sin 2 \omega t$ )

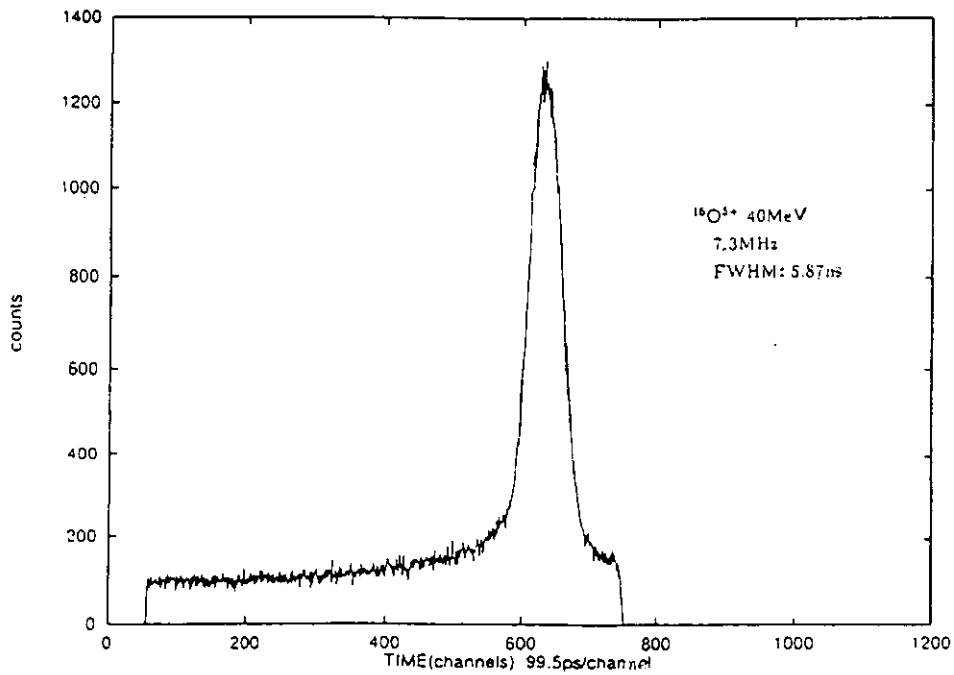
ビーム全体の  $60\%$  近くをパルス内に収束させることが出来る。

図中、実線の曲線が  $\sin \omega t$  と  $\sin 2 \omega t$  の合成波形である。





第3図 タンデム加速器入射系におけるビームバンチャー配置のブロック図



第4図 ビームバンチングのテスト実験の結果。

Au ターゲットにより散乱された  $^{16}\text{O}$  イオン (40MeV) の時間分布。

Si-SSD からの信号とバンチャー高周波位相との時間差を測定したもの。

# イオンビーム・プラズマ相互作用測定のための ビームパルス化装置の開発

東京工業大学原子炉工学研究所

渡辺 武、作美 明、岡崎 永、柴田 恭、小栗 慶之

## 1. はじめに

重イオンビームをドライバーとする慣性閉じ込め核融合においては、ターゲットにイオンビームを照射することにより瞬時にターゲットはプラズマ化し、さらにこのプラズマをイオンビームにより加熱する。よって、イオンビームによるプラズマ加熱の過程を知るうえでプラズマとイオンビームの相互作用に関するデータが重要になる。一般に、プラズマ中ではイオンビームの電子捕獲が小さくなることから、イオンビームの有効電荷が大きくなり阻止能は常温物質よりプラズマ中の方が大きくなることが予想されている。そこで、我々はこの予想を確かめるべく、プラズマ中でのイオンビーム阻止能の実験データを取得する為に本研究を行っている。相互作用実験にはレーザー生成プラズマを用いている。プラズマの持続時間は約 100 ns であり、飛行時間法を用いてプラズマ中のイオンビーム阻止能を測定するには数 ns 間隔のパルスビームが必要になる。本稿では主に飛行時間法を用いた測定に必要なビームパルス化装置、パルスビーム検出器及びパルスビームを測定した結果について述べる。

## 2. 実験装置

イオンビームとしては東工大 1.7 MV タンデム加速器から得られる、数  $\mu\text{A}$ 、3.6 MeV の  $^{16}\text{O}^{2+}$  ビームを用いた。このビームをチョッパーにより 180 MHz のパルスビームにし、高速偏向装置によりプラズマの発生に同期してプラズマ中に入射させる。ビームの時間構造は MCP を用いて測定する。図 1 に装置全体図を示す。阻止能は相互作用前後でのパルスビームの飛行時間変化を測定することにより求めることができる。

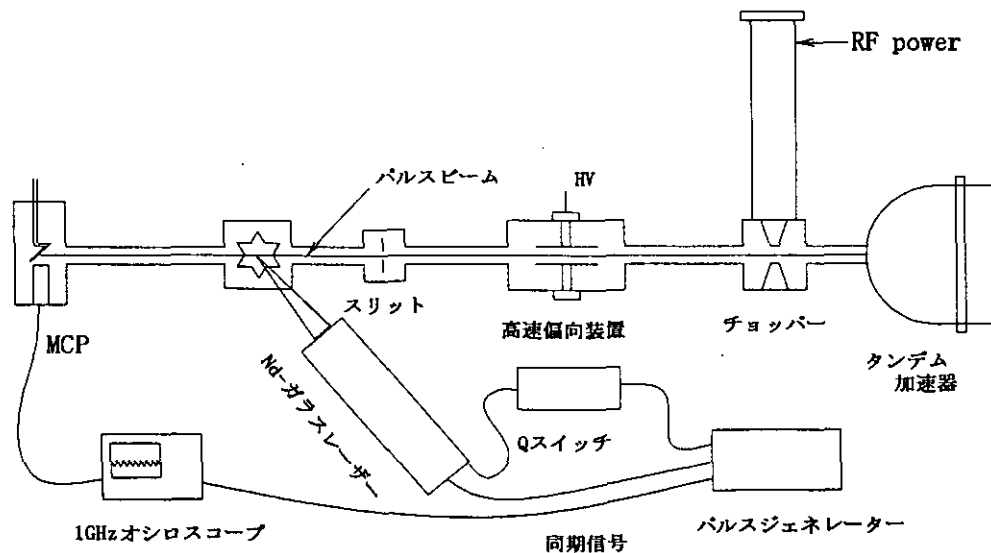


図 1 装置全体図

## 2.1. チョッパー

タンデム加速器から得られるイオンビームはまず、チョッパーにより上下に偏向されスリットによってパルス化される。図2にチョッパーの構造を示す。このチョッパーは90 MHz 同軸型空洞共振器からなり、偏向電極にはこの共振器から発生する交流高電圧が加えられる構造になっている。空洞共振器の無負荷のQ値は3500であった。信号発生器から得られる高周波を高周波アンプにより1kWに増幅し、50Ωにマッチングされたカプラーを通じてこの空洞共振器に入力することで計算上9kVの高電圧が得られる。チョッパーへの入力電力波形を図3に示す。電極間隔は2cmである。まず、有効電極長はイオンビームが最も良く偏向されるようにイオンビームの速度及び共振器の周波数から37mmに決められた。次に、摂動体法による電極間の電場分布の測定結果(図4)から有効電極長がこの値になるように実際の電極長を決定した。このパルス化装置を用いることにより(90×2=)180MHzのパルスビームが得られる。

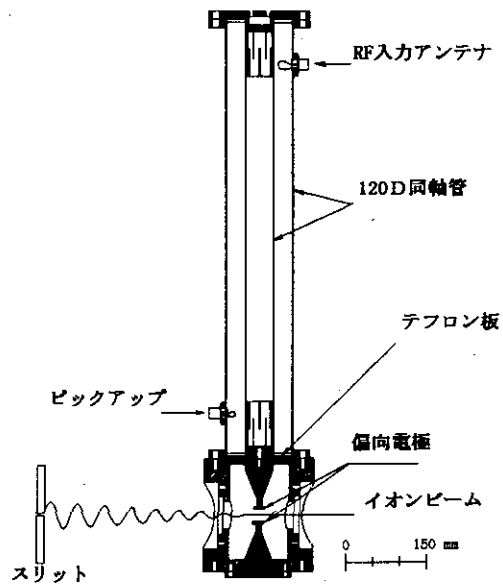


図2 チョッパー

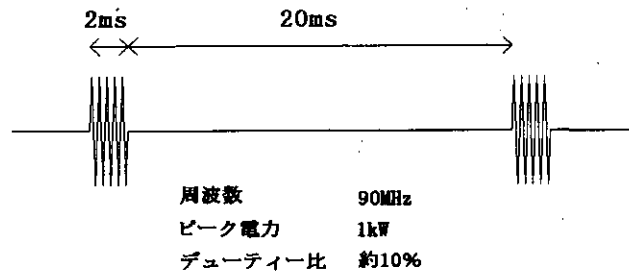


図3 チョッパー入力電力波形

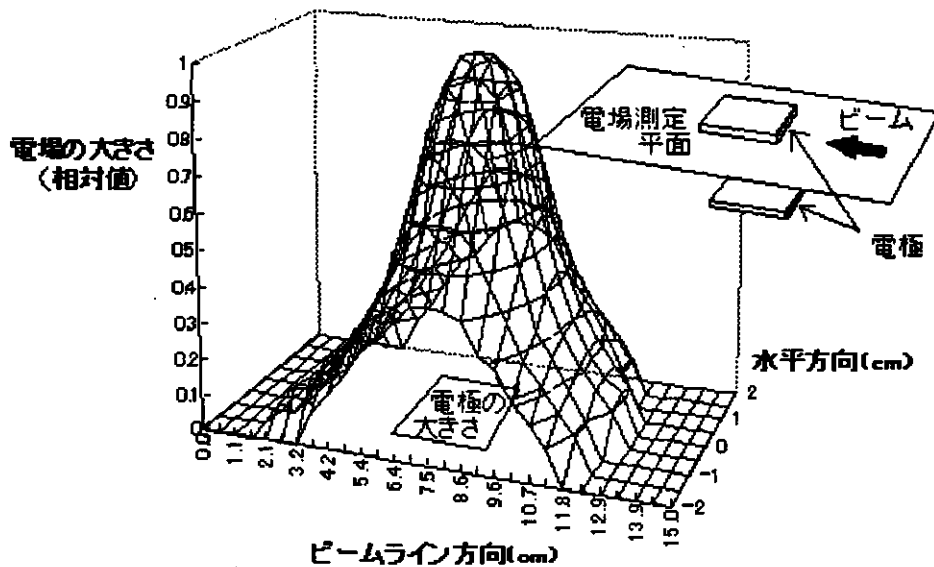


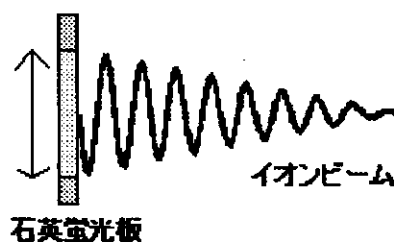
図4 電極間電場分布

## 2.2 . MCP を用いたパルスビーム測定システム

当初、パルスビームの測定にファラデーカップを用いることを計画していたが、ビーム電流が弱くノイズに埋もれてしまい測定できなかつたので MCP を用いた測定装置に変更した。大量のイオンビームが直接 MCP に入ると MCP がダメージを受ける可能性がある為、測定は次の二つの方法で行った。一つは、イオンビームをカーボンフォイルに当て、そこから放出される二次電子を MCP で測定する方法である。カーボンフォイルには $-500\text{ V}$ のバイアス電圧をかけ二次電子を放出しやすいようにした。パルスビームのみの測定ならこの方法で問題はない。プラズマ相互作用実験においてはプラズマ発光に伴う光電効果によるノイズのために信号が埋もれてしまうので、もう一つの方法でも測定を行った。即ち、検出器にプラズマ発光が届かないように検出器とプラズマ間を金箔でしきり、金箔で散乱されたイオンを直接検出した。これらの装置を用いて約 $5.6\text{ ns}$ の時間間隔でプラズマ標的を通過したイオンビームのエネルギー損失の変化を測定することが可能になる。

## 3 . 結果

右図のようにチョッパーによりイオンビームが上下に偏向された幅を石英蛍光板を用いてチョッパーから約 $2.5\text{ m}$ 離れた場所で測定した。偏向電極電圧が $1.8\text{ kV}$ のとき $5\text{ mm}$ であり、 $2.5\text{ kV}$ のとき $8\text{ mm}$ であった。これはほぼ計算値と一致する。



次に 2 つの方法で測定したパルス波形を図 5a、5b に示す。いずれも信号は負に出る。

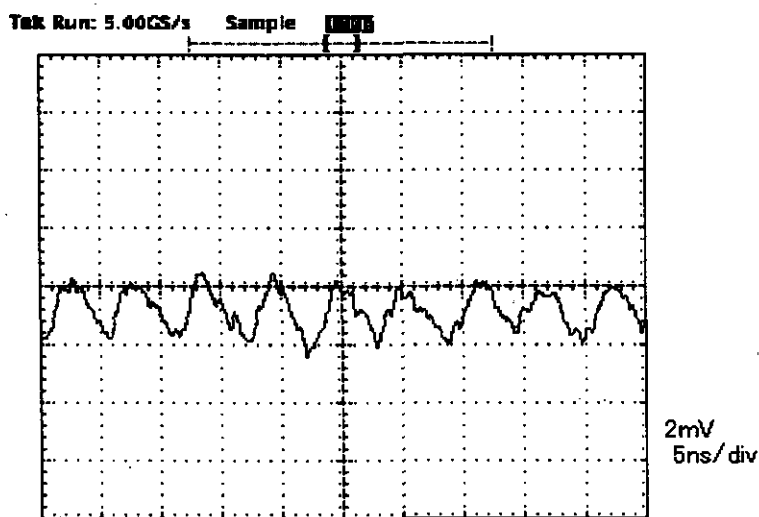


図 5a. パルスビームをカーボンフォイルに当て、放出される二次電子を測定した場合

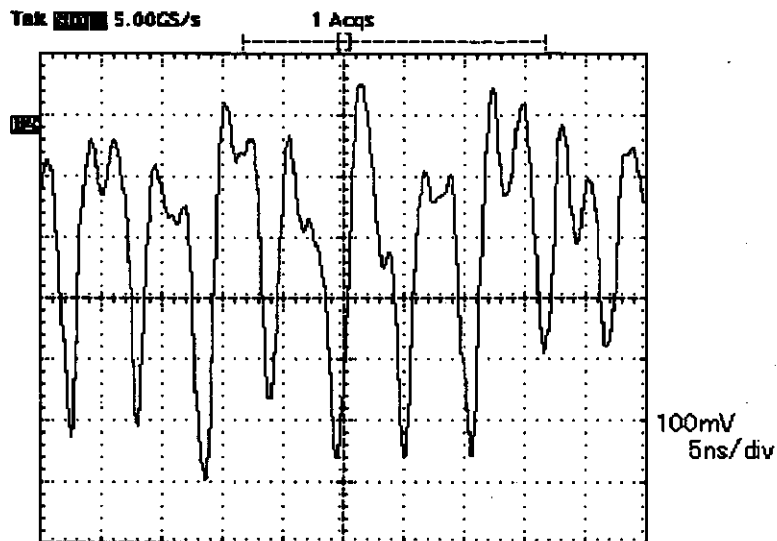


図 5b. 金箔により散乱されたイオンを測定した場合

以上の測定結果よりパルスは 5.6 ns 周期であり、どちらもきれいにパルス化されていることがわかった。しかし、イオンを測定したほうが 200 倍以上も高い出力が得られ、パルス波形からのピーク位置の読み取り誤差が  $\pm 0.2$  ns 程度に抑えられるため、二次電子を検出する方法より格段に優れていることがわかった。

#### 4. おわりに

計算によればプラズマ電子線密度が予定している  $5 \times 10^{17}$   $\text{cm}^{-2}$  のとき 150 keV 程度のエネルギー損失が予想されており、イオンビームのエネルギーが約 5% 失われる。これはプラズマから 1 m 離れた位置で約 4 ns の飛行時間差が生じることに相当するので十分測定可能である。今後、この装置をもちいてプラズマ・イオンビーム相互作用実験を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] T.K.FOWLER and W.M.GOOD, *Nuclear Instruments and Method* 7 (1960) 245.
- [2] R.DINGER, K.ROHR and H.WEBER, *Laser and Particle Beams* 4 (1986) 239.
- [3] 小西良弘：マイクロ波工学の基礎知識 産報出版.

# タンデム・ブースターにおける常用範囲外低速入射重イオンの加速の可能性

319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

日本原子力研究所 東海研究所

竹内末広

## 1. はじめに

多くのタンデム加速器の後段ブースターでは、種々の重イオンを効率良く加速するため、1/4波長型加速空洞等の加速ギャップが少なく加速範囲の広い加速空洞を多数使用し、それぞれビームに対する同期位相をとって加速する。原研タンデム・ブースターでは最適入射速度 $\beta_{opt}$ が0.1の1/4波長型超電導加速空洞（図1）を40個用いており、その入射速度の下限は約0.05である。一つの空洞によるエネルギー利得は、通常

$$\Delta E = q E_{acc} L TTF(\beta) \cos(\phi_s) \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $q$ はイオンの電荷、 $E_{acc}$ は加速空洞中の平均加速電界、 $L$ は加速空洞の加速長、 $TTF(\beta)$ は通過時間因子でビームの速度 $\beta$ の関数であり、 $\phi_s$ は同期位相である。図2に原研タンデム・ブースターの1/4波長型超電導加速空洞に対するTTFを示す。

TTFが1に近い入射速度で加速するのが理想的であり、原研では通常入射速度が低くても0.06以上の範囲で加速を行っている。この理由の一つは、入射速度がそれ以下になると加速効率が急激に小さくなることである。もう一つは非線形の効果が大きくなることである。つまり、(1)式が正確には成り立たなくなり[1]、正常な加速ではなくなる。しかし、利用者の要求度の高い金や鉛のように重いイオンとなると、タンデムで十分な加速をしない限り、入射速度が常用範囲を外れたの低速入射となる。このような重いイオンを加速するには、ブースターの前段部に最適入射速度 $\beta_{opt}$ が0.06-0.07の空洞が数個から10個程度必要となる。しかし、こうした増強計画とは別に、常用範囲外の低速入射条件で加速が可能かどうか検討を行っておくことも意義があると思われる。

そこで、さらに入射速度の低いところのTTFを見ると、TTFが0を通り負となる範囲がある。この負の範囲は(1)式から位相を $180^\circ$ 反転させることにより正のエネルギー増分が得られるはずである。では、TTFが負のところから0を越えて正のところへと加速は可能であろうか。この間に答えるため、計算を行った。以下にその結果を述べる。

## 2. 計算方法

TTFは、加速粒子が受ける電界をビーム軸にそって積分したものの加速電圧に対する比であり、(1)式ではさらに最適速度で1に規格化したものを使用している。空洞中の加速電界の振幅を $E(z)$ として

$$g(\beta) = \int E(z) \sin(\omega t) dz / \int |E(z)| dz \quad (2)$$
$$TTF(\beta) = g(\beta)/g(\beta_{opt})$$

である。通常の計算では簡単のため、空洞内での速度を一定、つまり、 $t = z/c\beta$ なる近似を行っている。しかし、 $TTF=0$ 付近の入射粒子は空洞通過中加速だけでなく減速も受けるため、それらの差として得られる小さなエネルギー利得あるいは速度の増分を正確に求めるには、空洞中の速度の変化を考慮して計算する必要がある。すなわち、微小な時間間隔で漸進させ軌道追跡する計算を行う必要がある。実際の計算には一般的に用いられているRunge-Kutta法を用いた。1粒子をビーム軸上を通過させた場合の簡単な1次元計算であるので計算の詳細は省略する。

計算の対象とした図1の加速空洞は、周波数が129.8MHzで、加速長が0.15m、ドリフトチューブ長が

0.07m、加速ギャップが0.04m、口径が0.026mである。

### 3. 計算結果

図3に $E_{acc}=5\text{MV/m}$ での空洞内の電界振幅 $E(z)$ を示すとともに、 $\text{Cl}^{10+}$  50MeVのイオンを同期位相 $-30^\circ$ で通過させた場合のイオンの受ける電界と速度変化を示す。この入射エネルギーはTTF=0より十分高く、入り口で減速されても2番目の加速ギャップで加速されていることがわかる。1空洞を対象として、いろいろな同期位相に対し入射速度をTTF=0となる入射速度 $\beta_z=0.0459$ 付近で変えて計算すると加速と減速が入れ替わる境界線すなわちエネルギー利得 $\Delta E=0$ となる線が得られ、それを図4に太い実線で示す。このときの加速電界 $E_{acc}$ は5MV/mである。位相によって境界線が移動することがわかる。位相が $\pm 90^\circ$ では不連続となっている。図4には、また、ある一定の入射速度に対し位相を変えた場合の速度増分を示している。TTF=0の入射速度 $\beta_z=0.0459$ に対しては $\sin(2\phi_s)$ 的な分布をしている。 $0^\circ$ から $90^\circ$ の加速部分は入射速度が大きくなるにしたがって、速度増分が大きくなり、かつ位相が負の方向に加速範囲が広くなり、そのピークは $45^\circ$ から $0^\circ$ に向かって移動する。また、 $-120^\circ$ から $-180^\circ$ の範囲に加速部分があり、入射速度を下げると、速度増分が大きくなり、 $180^\circ$ から $90^\circ$ に向けて加速範囲が広がっている。この結果から多数の加速空洞を用いれば矢印のような軌跡を辿って加速が可能であることがわかる。ただし、TTF=0では加速の位相アクセプタンスが通常の1/2となる。また、ビームをブースターの前で同一空洞を用いてバンチするシステムの場合、TTF=0付近でのイオン入射は十分な速度変調がかからないから無効で、入射速度がTTF=0より十分低い場合のみ有効である。

つぎに、加速電界を変えたときの $\Delta E=0$ となる入射速度およびTTF=0 ( $\beta_z=0.0459$ )でのエネルギー利得の変化を、ある位相に対して計算した結果を、それぞれ図5と図6に示す。加速電界が高いほど境界は大きく移動し、エネルギー利得は加速電界の2乗で増大する。加速効率(=エネルギー利得/加速電圧)としては加速電界に比例する。加速電界の代わりに電荷数を変えても同様な効果がある。したがって、実効ある加速効果を生むためには5MV/m-10MV/mくらいの高い加速電界を発生できる加速空洞を利用し、加速イオンは多少ビーム強度が落ちて最も高い電荷状態で入射する必要がある。この程度の加速電界は銅の加速空洞では無理で、ニオブの超電導空洞ならば楽に発生可能である[2]。

加速の1例として、 $\text{Cl}^{10+}$  (30MeV)と $\text{Bi}^{36+}$  (200MeV)を40個の上記加速空洞を用いて5MV/mの加速電界で加速する計算をした結果をそれぞれ図7、図8に示す。加速可能とはいっても加速は極めて緩慢で、加速効果が現れるのは約30個の空洞を過ぎてからである。

最後に、イオン種を変えてTTF=0 ( $\beta_z=0.0459$ )でのエネルギー利得と速度増分を計算した結果を図9に示す。ただし、イオンの電荷数は $\beta_z=0.0459$ で荷電変換炭素薄膜を通過させて得られる電荷数とした。

### 4. 結論

1/4波長型加速空洞にTTF=0となる $\beta=0.5\beta_{opt}$ 付近の低速重イオンを入射した場合について、空洞内での速度の変化を考慮に入れ漸進法で計算を行った。その結果、加速電界が高いと $\Delta E=0$ となる入射速度が位相によって大きく変化し、TTF=0 ( $\beta_z=0.0459$ )においてエネルギー利得は加速電界の2乗に比例し、加速効率は加速電界に比例することがわかった。そして、TTF<0の入射速度範囲から加速を始めてTTF=0 ( $\beta_z=0.0459$ )を越えTTF>0の通常加速範囲に向かって加速が可能であることが示された。ただし、十分な加速効果を得るためには加速電界を5MV/m程度あるいはそれ以上にすることが必要である。このように高い電界は超電導加速空洞では既に実現しており問題ないが、TTF=0付近を通過するには30個くらいの空洞が必要である。また、TTF=0付近は位相アクセプタンスが通常の半分であり、入射粒子が加速位相に乗りにくいこと、TTF=0付近でバンチして加速をスタートすることは難しいことがわかった。

### 参考文献

- [1] J. R. Delayen, Nucl. Instr. and Methods A258 (1987)15
- [2] T. Ishii, M. Shibata and S. Takeuchi, Nucl. Instr. and Methods A328(1993)231.

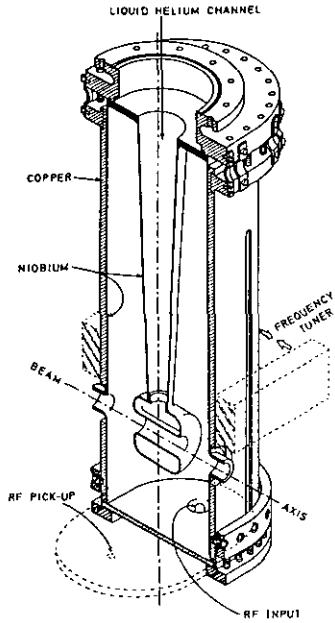


図1. 原研タンデム・ブースターの  
1/4波長型超電導加速空洞（半切断図）

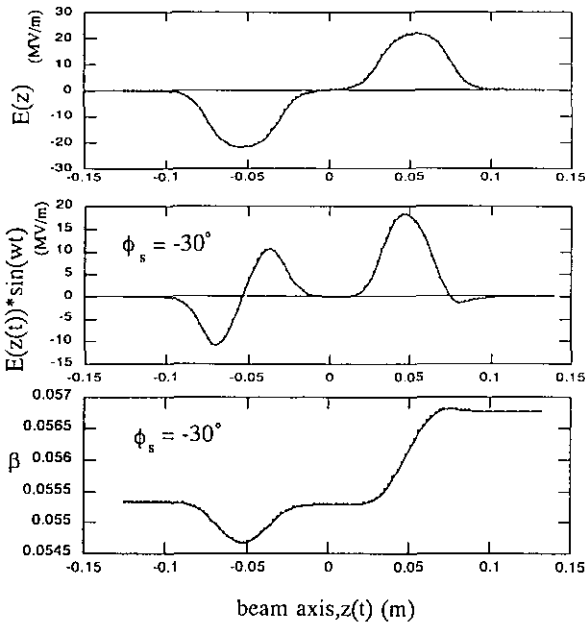


図3. 空洞内ビーム軸上の電界の振幅（上）、  
 $Cl^{10+}$  50MeVが同期位相 $-30^\circ$ で通過したときの、  
粒子の受ける電界（中）と速度（下）

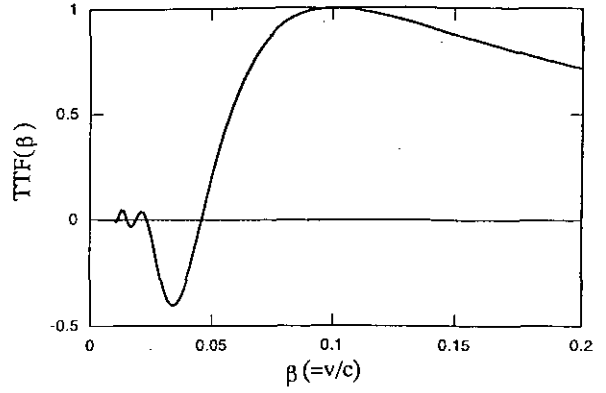


図2. 1/4波長型空洞の時間通過因子(TTF)

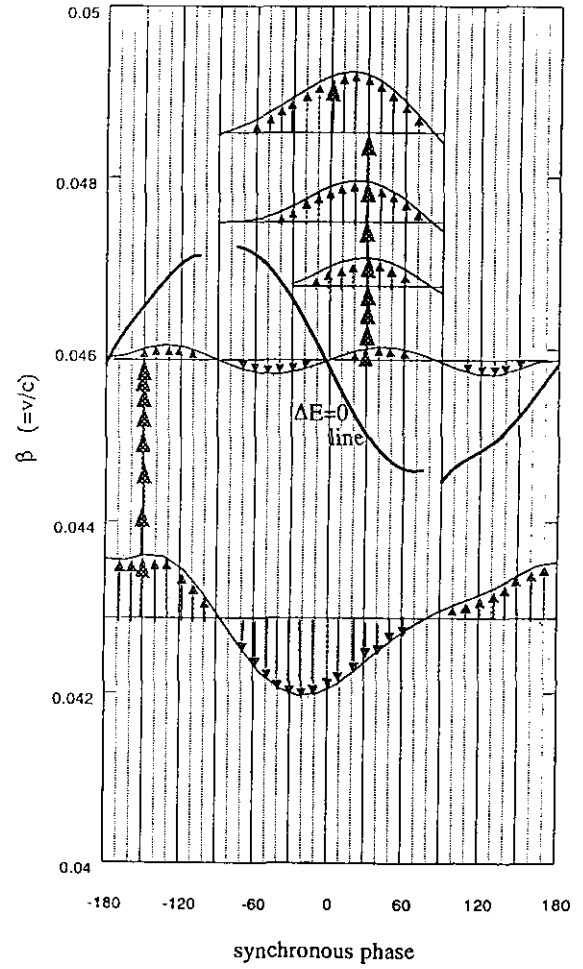


図4. TTF=0付近の速度をもつ $Cl^{10+}$ を空洞（5MV/m）  
に入射したときの速度増分図



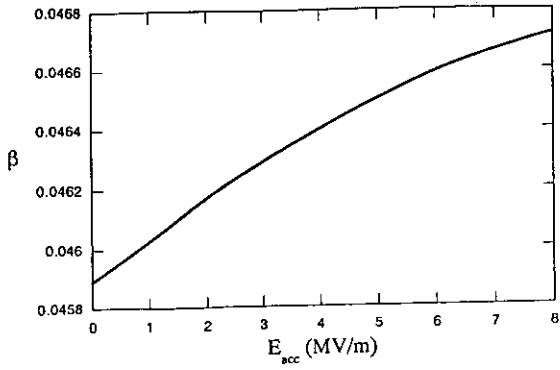


図5.  $\Delta E=0$ となる入射速度の加速電界依存性  
同期位相 $=-150^\circ$

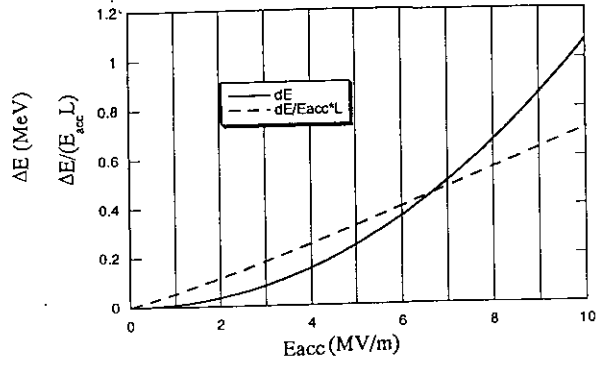


図6. TTF=0 ( $\beta_2=0.0459$ )でのエネルギー利得の  
加速電界依存性 同期位相 $=30^\circ$

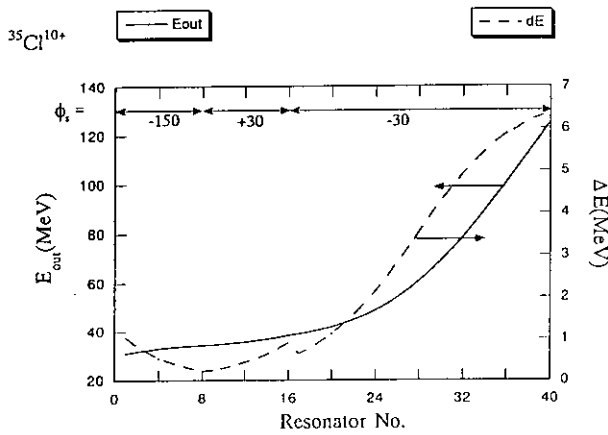


図7.  $\text{Cl}^{10+}$ を40個の空洞で加速した計算例

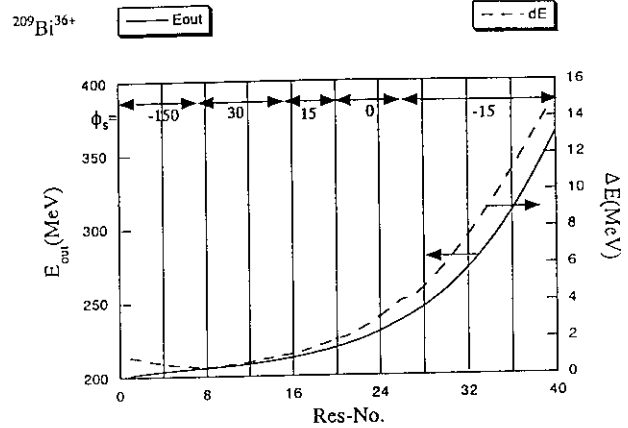


図8.  $\text{Bi}^{36+}$ を40個の空洞で加速した計算例

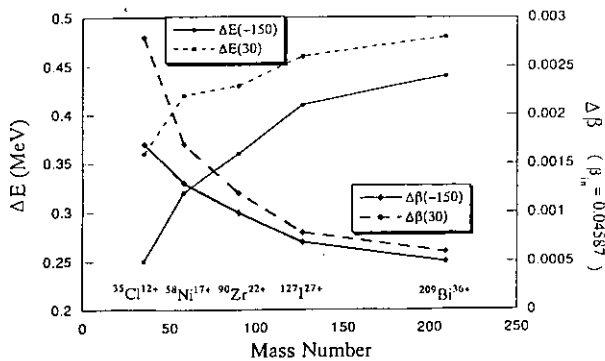


図9. TTF=0 ( $\beta_2=0.0459$ )でのエネルギー利得/  
速度増分のイオン種依存傾向

# マイクロクラスターイオンビームの開発

原研高崎：斎藤勇一、水橋清、酒井卓郎、神谷富裕、田島訓

## 1. はじめに

数個から数千個の原子で構成されるクラスターは、ミクロな原子やマクロな結晶とは異なった独特の性質を示し、それ自身の物性及びその照射（注入器を利用した数百 keV までのエネルギー）による材料開発等の研究が行われている。クラスターイオンはタンデム加速器によって MeV エネルギーに加速する場合、荷電変換ガスとの衝突で原子に解離してしまうと考えられていたが、2 個から 8 個程度の原子で構成されるマイクロクラスターの場合、荷電変換ガスの圧力の最適化により解離する確率を低下させることができ、nA 以上のイオンビームとして加速可能なことがわかった[1, 2]。

MeV エネルギー分子・クラスターイオンは、材料改質、表面解析、原子物理等への広い応用が期待され、原研高崎ではイオン源における多種のクラスターイオンの発生、タンデム加速器を用いた MeV エネルギーへの加速及び加速されクラスターの構造を調べるための実験を行っている。現在まで、炭素、ホウ素、シリコン等の MeV エネルギークラスターイオンを得ている。これらに加え、アルミ、銅のクラスターイオン及び酸化アルミ分子イオン (AlO) をイオン源で発生させ、MeV エネルギーで得ることができた。AlO イオンは 2 種類の原子で構成されるが、このようなイオンを用いるとターゲット上に原子レベルの近距離で異なる物質を同時に注入することが可能となり、新しい照射法として期待される。また、クラスターの構造についてはターゲット物質との相互作用を考察する上で、重要な情報となるが実験的測定は十分にされておらず、理論との比較が望まれている。そこで、クラスター構造解析方法として、薄膜中でのクラスターのクーロン爆発を利用する CEI (Coulomb Explosion Image) 法[3]を試みたので合わせて報告する。

## 2. クラスターイオン生成・加速

クラスターイオンはセシウムスパッター型負イオン源 (SNICS II : nec) を用いて生成され 70 keV のエネルギーでタンデムに輸送される。イオン源で生成されるクラスターの質量分布は電子親和力、スパッター率及び結合エネルギーに依存するが、金属は 2 分子状態より結晶状態の結合エネルギーが大きいためクラスターに成長しやすい。図 1 に示すように、アルミクラスターは単原子イオンに比べ 2 原子イオンの方がビーム強度が強く、また、Al<sub>7</sub>まで 100 nA 程度の電流が得られた。銅については単原子イオンが最も多く以下クラスターサイズの順になった (図 2)。これは銅の場合、質量数がアルミに比べ 2 倍以上大きいのでスパッター率が低下したためと推測される。AlO は酸化アルミ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) をスパッターカソードに用いて生成した。

これらのクラスターイオンはタンデム加速器 (9SDH-2:nec) 中央部の高電圧ターミナルに向かって加速され、ターミナル内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。クラスターは結合が弱いため、この衝突によりほとんどが単原子イオンに解離するが、窒素ガス圧を調整することにより、正クラスターイオンが観測される。加速電圧 3 MV のときのアルミクラスター (クラスター数: 2~4) ビーム電流値及び AIO ビーム電流値と窒素ガス圧との関係を図 3、4 に示す。ガス圧はタンク入り口直前の真空計でモニターしており、荷電変換部では約 4 桁高い。アルミは 1 価イオンのみ観測され (加速エネルギー 6 MeV) ガス圧が  $10^8$  Torr 台前半に最大電流値があり、これまでに行った C、Si、B と同じ特徴が得られた。銅についても同様である。AIO では 1 価イオンに加え、2 価イオンが観測され、9 MeV までの加速に成功した。AIO は、他のクラスター・分子イオンと比較して結合が強固であると考えられる。現在、加速可能なクラスターイオンとビーム電流値を表 1 に示す。

### 3・クラスター構造解析

クラスター構造を解析するため、CEI 法の予備的実験を試みた。CEI 法はマイクロなクラスター構造をマクロに拡大して観測可能とする。高エネルギークラスターが薄膜を通過すると、クラスターが解離し単原子イオンとなる。この瞬間では、それぞれのイオンは結合していたときとほぼ同じ距離に近接しているため、互いのクーロン場により大きな斥力を受ける。これにより広がったイオンをターゲットで受け止め、その痕跡を観測する。イオンに働くクーロン力は正確に定義できるので、この痕跡の位置関係から、クラスターの最初の状態を解析することができる。図 5 に CEI 法のイメージを示す。また、今回の実験条件を以下に示す。

#### 実験条件

イオン種 :  $C_4$

エネルギー : 6 MeV

薄膜 : カーボンフォイル ( $5 \mu g/cm^2$ )

ターゲット : CR39 (照射後 NaOH によりエッチング)

照射結果の例 (図 6) にクラスターイオンが照射された痕跡が見られる。今回、1 つ 1 つのクラスターを観測するため、クラスターイオンをシングルイオンヒットシステム[4]によりターゲットの任意の位置に 1 個ずつ照射することをはかったが、図 6 には多数のイオンの痕跡が見られる。これは、シングルイオンヒットシステムはターゲットからの 2 次電子でイオンの入射を検出しているが、2 次電子検出器を収集効率の良い位置に設置できなかったため、多重ヒットがおこったと考えている。現在、CCD 素子をターゲットに用いてオンライン計測を行うことを計画中である。

#### 4・まとめ

今回の3種類のイオンを加えることで、8種類のマイクロクラスター及び分子（異なる原子で構成される）イオンをnA以上のビーム電流で得ることができた。これらのイオンは実験に使用されはじめ、成果を出しつつある。また、クラスター構造解析手段として CEI 法を試み、その痕跡を直接観測することができた。

#### 参考文献

- [1] 斎藤勇一、高田功、水橋清、他、第8回タンデム加速器及びその周辺技術の研究報告会集、p. 32、1995、名古屋
- [2] 斎藤勇一、水橋清、田島訓、他、第9回タンデム加速器及びその周辺技術の研究報告会集、p. 100、1996、東海
- [3] Z. Vager, R. Naaman, E. P. Kanter, SCIENCE, Vol. 244, p. 426, 1989
- [4] T. Sakai, T. Hamano, T. Suda, T. Hirao, T. Kamiya, 5th Int. Conf. on Nucl. Microprobe Technology and Application, 1996, U.S.A., MIN B to be published.

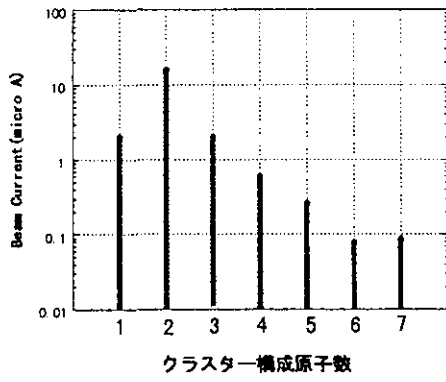


図1 イオン源から引き出された Al クラスター質量分布

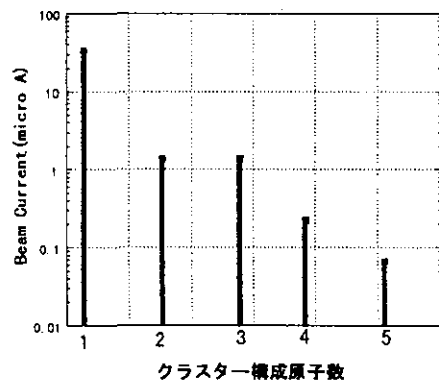


図2 イオン源から引き出された Cu クラスター質量分布

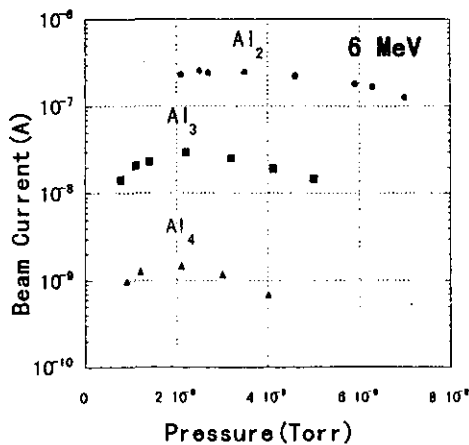


図3 Al クラスタービームと荷電変換ガス圧の関係

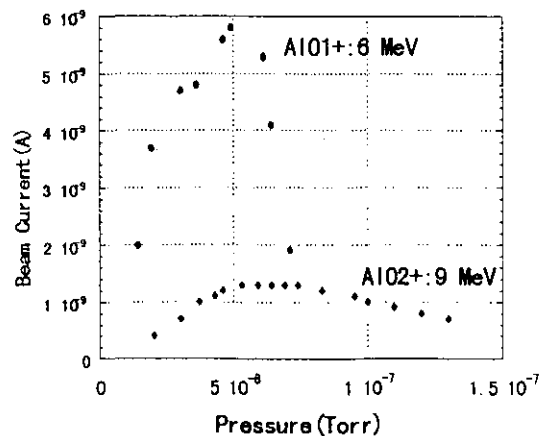


図4 AlO ビームと荷電変換ガス圧の関係

表1 現在までに得られた、分子・クラスターイオンの種類と電流値（単位は nA）、  
エネルギー6 MeV、 $\text{AlO}^{2+}$ は9 MeV

| イオン種 \ クラスター数             | 2      | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
|---------------------------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 炭素 ( $\text{C}_n$ )       | 900 nA | 34  | 42  | 3.3 | 9.7 | 0.8 | 1.5 |
| 珪素 ( $\text{Si}_n$ )      | 190    | 8.5 | 1   |     |     |     |     |
| ホウ素 ( $\text{B}_n$ )      | 64     | 4.4 | 2.7 |     |     |     |     |
| アルミ ( $\text{Al}_n$ )     | 250    | 30  | 1.5 |     |     |     |     |
| 銅 ( $\text{Cu}_n$ )       | 7.2    | 0.5 |     |     |     |     |     |
| 酸素 ( $\text{O}_2$ )       | 3.7    |     |     |     |     |     |     |
| フッ化リチウム ( $\text{LiF}$ )  | 1.0    |     |     |     |     |     |     |
| 酸化アルミ ( $\text{AlO}$ ) 1+ | 5.8    |     |     |     |     |     |     |
| 2+                        | 1.3    |     |     |     |     |     |     |

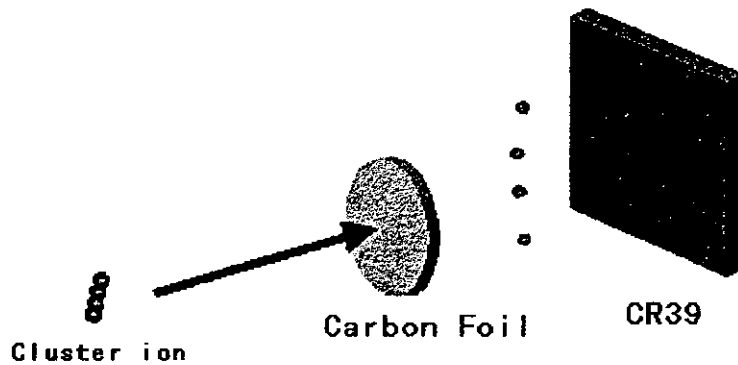


図5 クーロン爆発を利用したクラスター構造解析

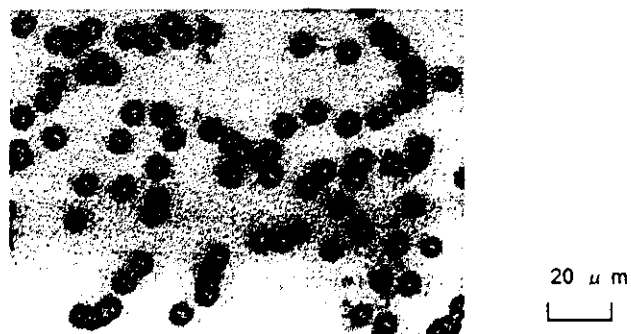


図6 6 MeV  $\text{C}_4$ を照射し NaOH でエッチングされた CR39

# 超マイクロイオンビーム形成技術の開発

原研高崎 石井保行、磯矢 彰、田中隆一

## 1) はじめに

イオンマイクロビーム形成方法として、静電的な力による集束と電場の加速を同時に行う“加速レンズ”方式を提案してきた<sup>1,2)</sup>。このレンズの集束力は、ビームを加速するときに使用される平行平板電極の入り口の孔部に形成される単孔レンズであり、加速効果はその電極間に形成される一様電場による。このレンズは集束点でビームを発散させる球面収差を小さく抑えられることを見出した<sup>3)</sup>。

加速レンズでは入射と出射のエネルギー比によってビームの縮小率を稼ぐため、イオン源で低エネルギーのビームを発生する必要がある、また、ビーム集束で問題となる色収差を抑えるため、エネルギー幅の狭いビームを発生することが必要である。これらの要求をみたすため、デュオプラズマトロタイプの試作機を用いて専用イオン源の開発を進めてきた<sup>4)</sup>。

加速レンズの2段使用及び専用イオン源を組み合わせることで、ビーム径 $0.1\mu\text{m}$ 以下でエネルギー $100\text{keV}$ 程度を目指す超マイクロイオンビーム形成装置を考案した<sup>5)</sup>。これまでにイオン源及び加速レンズ系の設計及び製作を行い、これらの組立をほぼ終了した。

本装置系で形成されるビーム径は微小であるため、ナイフエッジ法<sup>6)</sup>を使用したビーム測定系を開発し、本体に装着した。この方法ではナイフエッジにより集束点でビームに対して垂直にナイフをスライドさせ、ビームを遮ることにより、電流量の増減の様子を調べることでビーム径を評価する。

本稿では専用イオン源の概略、及びその性能を調べるために行った発生電流量の実験の結果を示す。また、ビーム測定系の概略と測定方法について述べる。

## 2) イオン源の概略とその性能実験

試作イオン源の研究を基に開発したデュオプラズマトロタイプのイオン源(図-1)の特徴は、以下の3つである。

(1)アノード電極に非磁性の銅(Cu)の円板を使用することにより、高真空中( $\sim 10^{-4}\text{pa}$ )にプラズマを導き、イオンビームの発生を平面状のプラズマのシース面と引き出し電極との間で行う。この効果として低エネルギーで、エネルギー幅が狭く、発散角の小さなビームの発生が期待できる。

(2)イオン源内の真空度は $4\text{pa}$ 程度であり、放電電圧は $60\text{V}$ 程度であるため、プラズマの放電電圧は低く、かつ電子温度及びイオンの温度が低くなると予想できる。

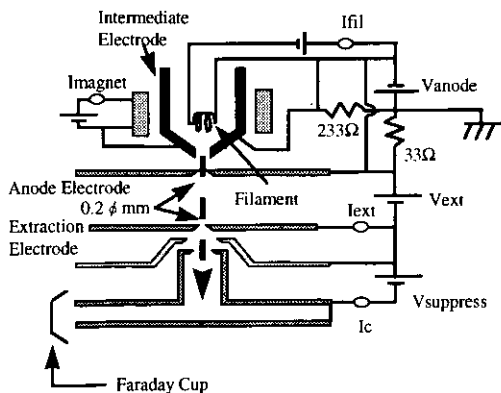
(3)ビームエミッタンスを小さくするためアノード電極と引き出し電極の孔径を $0.2\text{mm}\phi$

とした。

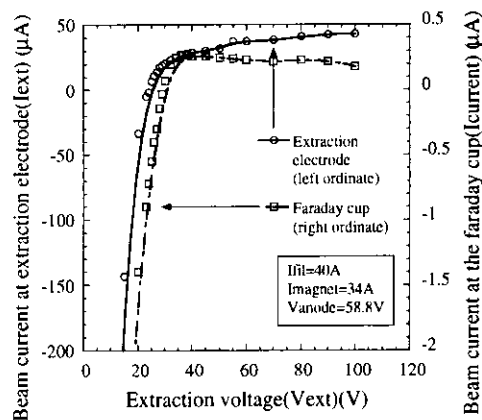
このように本イオン源は一般的なデュオプラズマトロンでのビームの発生方法と異なるので、イオン源の諸性能を実測した。

本イオン源の性能評価として、低エネルギービームの発生、ビームのエネルギー幅、発生電流量及びビーム輝度( $B_n$ )がある。低エネルギービームの発生及びビームのエネルギー幅については試作イオン源で行った評価が Ref.7 に示されている。発生電流量については、引き出し電圧を変えたときの総電流量( $I_{total}$ )及び引き出し電流量( $I_{ext}$ )の実験結果を図2に示す。図から引き出し電圧が30V程度までは  $I_{total}$ 、 $I_{ext}$  ともにマイナスの電流値が測定された。これは引き出し電極及びファラデーカップまでプラズマ中の電子が到達していることを表している。引き出し電圧40Vを越える付近から  $I_{total}$ 、及び  $I_{ext}$  はそれぞれ40 $\mu$ A及び0.1 $\mu$ A程度の一定値に達し、電子が電極及びファラデーカップまで到達していないことを表している。この結果から電子のエネルギーは40eV程度以下であると考えられる。ビーム径が引き出し孔径0.2mm $\phi$ と同じであること、発散角は引き出し電極の孔の配置から  $1 \times 10^{-3}$ radとみなすと、規格化したビーム輝度( $B_n$ )の値は  $B_n = 2 \times 10^6 \text{Am}^{-2}\text{rad}^{-2}\text{eV}^{-1}$ となる。

ファラデーカップに入る電流量と輝度から最終的なビーム集束点での電流量を推定した。これを行うため超マイクロ装置の電極配置として図1の Extraction Electrode より下の2枚の極系は図3での第一加速レンズに相当する。このレンズを通過し第二レンズに達する電流量はファラデーカップに入った0.1 $\mu$ A程度の電流量である。この値と  $10^6 \text{Am}^{-2}\text{rad}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 輝度から第二加速レンズを通過する電流量は100pA程度と推定できた。この量はビーム径の測定実験を行うときに使用する微小電流計の感度から考慮してこの実験を行うのに十分であると考えられる。



図—1 デュオプラズマトロンタイプのイオン源概略図



図—2 イオン源からの引き出し電圧に対する発生電流量

### 3) ビーム径測定径

ナイフエッジを用いたビーム径の測定は、鋭いエッジと高精密の移動制御を必要とする。この鋭いエッジの研磨の荒さは  $0.1\mu\text{m}$  以下を必要とするため、市販のカミソリを専用の研ぎ機と  $0.1\mu\text{m}$  の荒さの紙ヤスリ（ラッピングフィルム）で研磨して製作した。研磨に際してエッジの先端角は刃こぼれをさけるため  $60^\circ$  とした。このエッジを走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した結果を研磨前のものと共に図4に示す。図からエッジの研磨による荒さは  $0.05\mu\text{m}$  程度であることが分かった。また、エッジの移動制御については、 $0.1\mu\text{m}$  以内の位置分解能が必要であるので  $1\text{mm}\sim 0.1\mu\text{m}$  までをマイクロメータヘッドで、これ以下の精密制御をピエゾアクチュエータで行う。アクチュエータに関しては移動量に図5に示すようなヒステリシスがあるため校正を行った。電圧  $100\sim 120\text{V}$  の間ではアクチュエータの伸びはほぼ直進性を示すことから、ビーム径の測定にはこの範囲の電圧での使用が有効であることが分かった。

ビーム径はナイフエッジをスライドさせてビームを少しずつ遮りながら、エッジ後方のファラデーカップに入射する電流量の変化を測定することから見積もる。

超マイクロイオンマイクロビーム装置の組立及びビーム径測定装置の装着はほぼ完了し、現在第一加速レンズでのビーム発生実験を進めている。今後第二加速レンズによりビームのエネルギーの増加及びマイクロビーム化を行いビーム径の測定を行う。

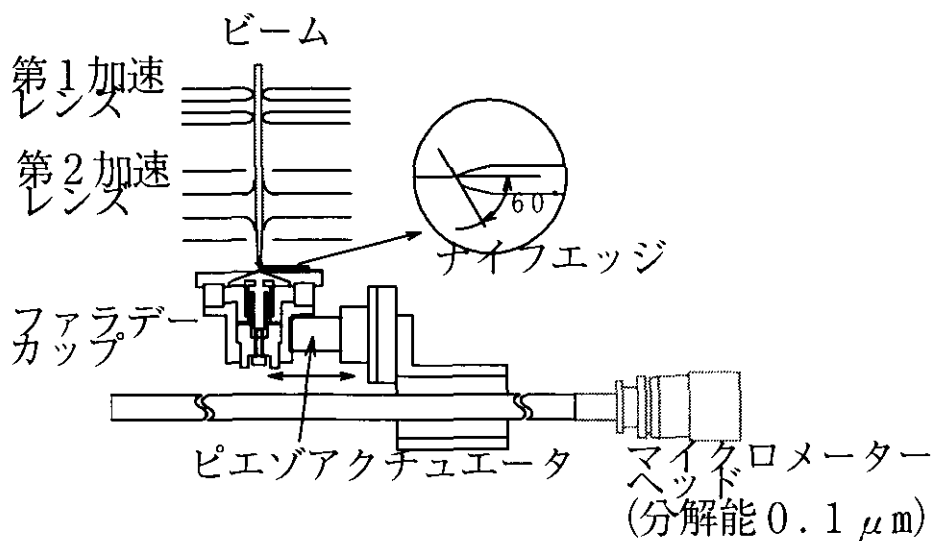
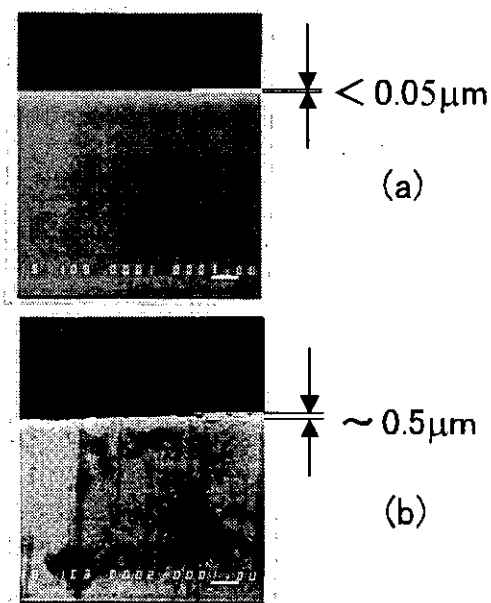
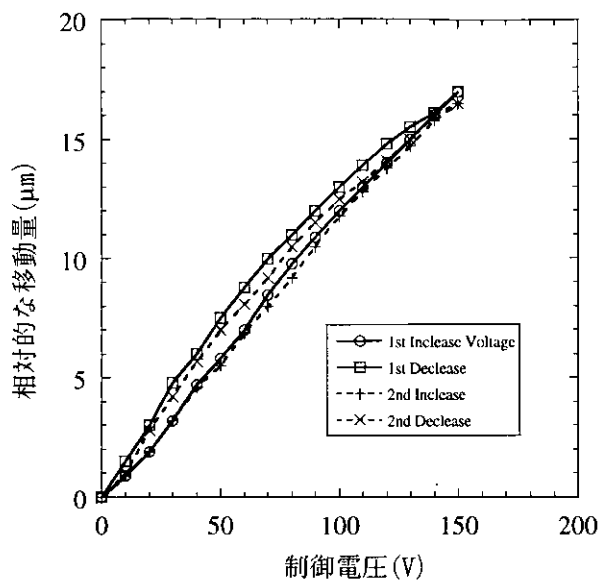


図-3 ビーム径測定装置の概略図





図一4 ナイフエッジの先端の様子  
(SEM像) (a) 研磨後、(b) 研磨前



図一5 ピエゾアクチュエータの制御電圧に対する伸び

参照

- 1) A. Isoya, A Universal Method of Producing Ultra-Fine Microbeam Proc. Conf. On Application of Nuclear Techniques. P.334~339, June 1991, Creta, Greece.
- 2) A. Isoya, A Universal Method of Producing Ultra-Fine Microbeam Proc. Conf. On Evolution in Beam Application, Nov., 1991, Takasaki, Japan.
- 3) 磯矢 彰, 第7回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集
- 4) 磯矢 彰, 第6回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集
- 5) 磯矢 彰, Micro-Ion Beam 発生用イオンレンズ系の研究, JAERI-memo 07-247, Nov., 1995.
- 6) Kenneth J. Harker, Journ. Appli. Phys. Vol.28 11(1957)1354
- 7) Y. Ishii, A. Isoya and R. Tanaka, Nucl. Instr. And Meth. Section B(1996)75-77

# 原研タンデム加速器のターミナル ECR イオン源の開発

松田 誠 竹内 末広 小林 千明\*

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. はじめに

タンデム加速器から得られるイオンビーム強度の増強と加速イオン種の拡大を目的にターミナルイオン源として高多価・高強度のビームの得られる電子サイクロトロン共鳴(ECR)イオン源を設置する計画を進めている。タンデム加速器からのビームの強度の上限は重いイオンの場合、ストリッパフォイルの寿命により決定され、フォイルの交換無しには長時間強度の強いビームを得ることは不可能である。そこで ECR イオン源をタンデム加速器のターミナル内に設置しシングルエンドの加速器として利用することで強度の強いビームを長時間安定して得ようとするものである。またターミナルでの荷電状態は、負イオン入射の場合ターミナル電圧に依存するが、ECR イオン源の場合それはイオン源固有の性能に依存する。さらにタンデム加速器では不可能であった希ガスの加速が可能となる。

## 2. NANOGAN

イオン源本体はフランスの GANIL において開発された“NANOGAN” [1,2]を用いる。これはリングサイクロトロンを用いた核反応により生じた放射性同位元素を ECR イオン源で多価イオンにし小型のサイクロトロンで再加速しようという“SPIRAL 計画” [3]のために開発されたもので、放射化しても交換が容易なように永久磁石を使用した非常に小型で一定の性能の得られるイオン源である。永久磁石を用いているのでコイル用電源およびその冷却装置等を必要とせず構造が簡単であり運転・保守の面からもターミナル内に設置するのに適している。イオン源本体は図 1 に示されるように 5 個のドーナツ型の FeNdB の永久磁石を組み合わせて外形 130mm、長さ 220mm に構成されている。磁場分布はマイクロ波の入力側で約 0.75T、引き出し側で約 0.5T であり 10GHz のマイクロ波電力で直径 26mm の銅のパイプの中に ECR プラズマが形成される。動径方向のプラズマ閉じ込めには 8 極収束磁場を用いている。

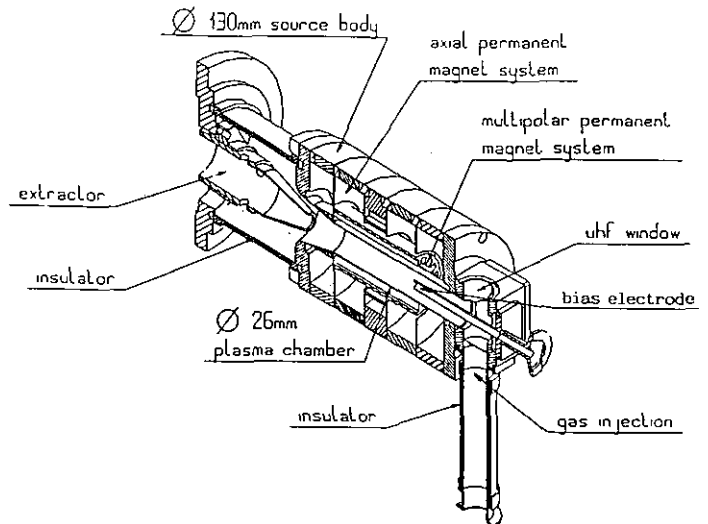


図 1 NANOGAN : mechanical structure

## 3. 設置概要

原研タンデム加速器はターミナル部に電荷分析用の 180° 電磁石を持つ折り返し型の加速器であり、ターミナル内には荷電変換装置、ビーム搬送系、イオンポンプ等の機器が乗せられており光通信によって CAMAC を経由して制御される。これらの電力をまかなうために発電機が 2 基 (15kVA、10kVA) 備えられアクリルシャフトにより駆動される。発生電圧は通常の運転で 10~16MV であり、加速イオン種、エネルギーに合わせてガスまたはフォイルストリッパ (1st、2nd) を使用する。

タンデム加速器のターミナル内に新たに ECR イオン源を設置するには、設置スペース、電源、イオン源および RF アンプの冷却、RF アンプ、真空系、制御系、ビーム옵ティクス等の多くの解決しなければならない

\* Nihon Advanced Technology, Co.

問題がある。さらに設置環境は、最大 16MV もの高電圧になり、かつ  $4.5\text{kg/cm}^2\cdot\text{G}$  の  $\text{SF}_6$  ガス中であり放電および圧力対策が必要となる。スペース、電力、制御系についてはこれまでにターミナルイオン源として使用されていたデュオプラズマトロンイオン源と置き換え、それらを ECR 用に改造することで解決できる。10GHz の RF 増幅器は航空機用に生産されている TWT タイプのものを内部を大気圧に保った耐圧容器に入れて使用する。真空ポンプには補助排気装置の要らないイオンポンプを用いる。希ガスを加速する場合も長時間十分使用に耐えることがテスト済みである。

#### 4. イオン源の最適化・簡略化

これまでにイオン源のベンチテストを行い、ほぼ所定の性能が得られることが確認された。タンデム加速器内にイオン源を設置することを想定し運転パラメーターの最適化、簡略化を試みた。これはイオン源の性能の最大値を目指したのではなく、動作パラメーターの変化に対し引き出されるビーム量が大きく変化せず安定に動作することを目標とした。様々なテストの結果、運転パラメーターは 6 からガス、RF 電力、DC bias の 3 つに減らす事にした。

強度の強いビームを得るにはソースガスに加えて電子の供給源となるサポートガスが必要である。図 2 に Ar と  $\text{O}_2$  の混合比を変えたときの荷電状態の異なるビーム電流の変化を示す。多価イオン(8+,9+)の電流はガス比に依らずほぼ一定であることが分かる。よって、希ガスに対するイオンポンプの負荷を考え、混合比を  $\text{Ar} : \text{O}_2 = 1 : 10$  とした。Kr, Xe についても同様の結果となった。RF 電力とビーム電流の関係を図 3 に示す。出力電力に対し引き出されるビーム電流は緩やかに変化するので、ビーム量の調整に使用する。また RF チューナーは細かな調整を必要としないことから固定とした。特にイオン源の安定な動作にはガス流量(真空度)が重要であった。流量の制御には一定流量の得られるスタンダードリークを使用する。Ar+N<sub>2</sub> ガスの場合  $1.6\sim 2.2\times 10^{-4}\text{torr}\cdot\text{l}/\text{sec}$  の範囲にガス流量を押さえれば安定であり、他の 2 つのパラメーターを調整すればビーム電流に大きな変化はみられなかった。大電流を引き出すには DC bias が必要である。これは RF 導入部の中心導体に本体に対し 40~200V の負の電圧を印加するもので、ビーム電流は 1桁あまり増加する。図 4 に以上の条件で Ar, Kr, Xe の 3 種について  $\text{N}_2$  あるいは  $\text{O}_2$  と混合させた時に得られたビーム電流を示す。それぞれのビームのエミッタンスは約  $10\text{mm}\cdot\text{mrad}\cdot\text{MeV}^{1/2}$  であり、そのプロフィールは非常に複雑なものであった。

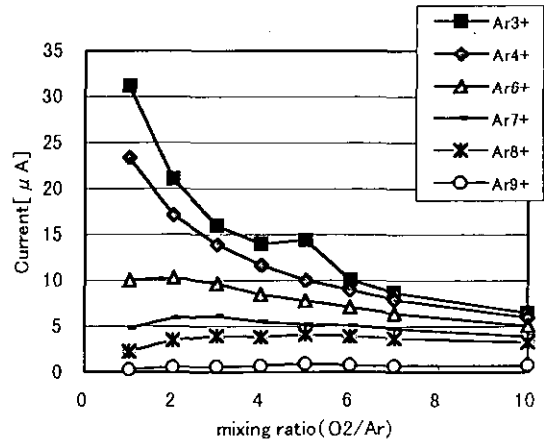


図 2 ガス混合比に対するイオン電流の変化

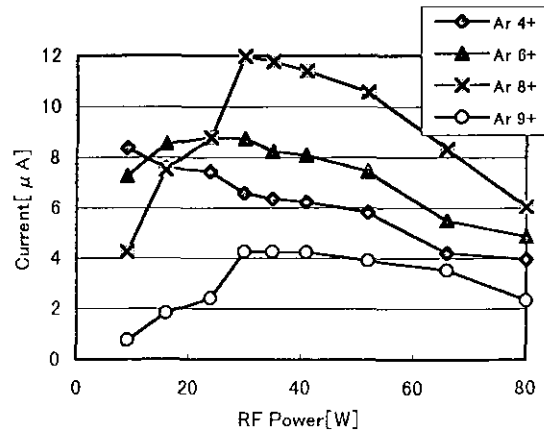


図 3 RF パワーとイオン電流の変化

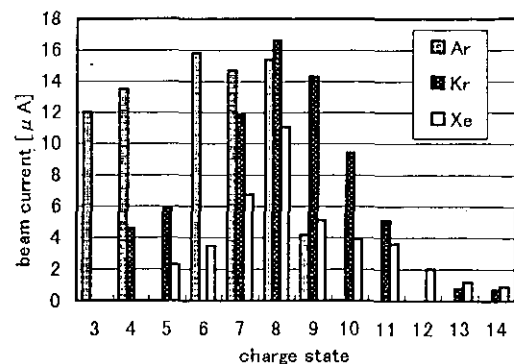


図 4 Ar, Kr, Xe イオンの荷電分布

また本体の耐圧、冷却テストとしてイオン源本体を圧力テスト容器内に入れ実際と同じように  $4.5\text{kg/cm}^2$ ・G の  $\text{SF}_6$  ガス中で運転状態を模擬して行なった。イオン源の冷却はダイヤモンドポンプをインバーターにより回転数を落として使用した。120W 入力時において出口温度は周囲ガス温度+5°Cであった。ターミナル内の  $\text{SF}_6$  ガス温度は27°C前後であるのでイオン源の排気温度上限の36°Cには余裕があり、また高圧ガス中でも安定に動作することが確認できた。

## 5. 配置

図4に計画しているイオン源の配置図を示す。イオン源から30kVで引き出されたイオンビームはアインツェルレンズでフォーカスされ、最大2mAにもなるビームから前段加速部の負担を減らすため前段部の45°電磁石によりおおまかに質量と電荷数を選び出す。80kVの前段加速管で加速され、さらに後方の45°電磁石により必要なビームをタンデムの高エネルギー側の主加速管に入射する。ビームのエミッタンスが悪く強度が強いので途中にいくつかのアパーチャーを設け質の良いビームのみを通過させる。

## 6. まとめ

図5にこれまでのテストの結果から期待されるターミナル ECR イオン源の性能を示す。図中の上の3つの実線はターミナルイオン源から得られる Ar、Kr、Xe の電流とタンデム出口のエネルギーを表わす。添え数字はそれぞれの電荷数を示す。3つの破線はさらに2nd ストリッパを使用したときの予想されるエネルギーを示す。下の3つの実線は負イオン源からそれぞれ  $1\ \mu\text{A}$  の Sn、Cu、Cl ビームを入射すると仮定し、ターミナル電圧16MVで加速したときの場合である。ECR イオン源からのビーム強度は負イオン源と比較して約1桁以上強くなることわかる。

今後、実際の取り付け状態でビームオプティクスの最適化および制御系のテストを進める予定である。また、次のステップとして金属多価イオンの生成についても考えていきたい。

## 参考文献

- [1] P. Sortais et al., Proc. 11th Int. Work. on ECR ion sources, Groningen, 1993, 97.
- [2] P. Sortais et al., Proc. 12th Int. Work. on ECR ion sources, RIKEN, 1995, 44.
- [3] A. Joubert et al., "SPIRAL : a radioactive ion beam facility project at GANIL". Part. Acc. Conf., Washington 93.
- [4] D. K. Olsen et al., Proc. 10th Int. Work. on ECR ion sources, Oak Ridge, 1990, 1.

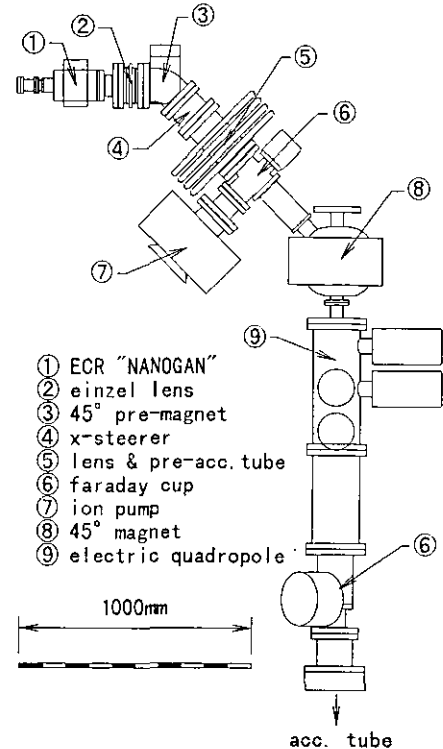


図4 ターミナル ECR イオン源の配置

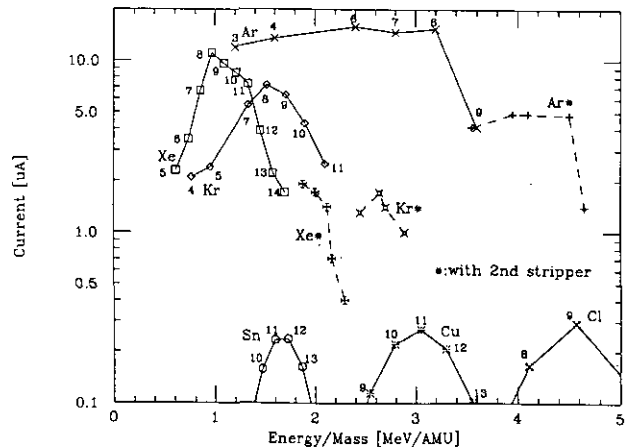


図5 ECR イオン源から得られるビームのエネルギーと強度

# 宇宙用シリコン太陽電池に対する 低エネルギー高線量プロトン照射試験

宇宙開発事業団：松田純夫、久松 正

(株)イー・イー・エス：中尾哲也

原研高崎：森田洋右、大島 武、梨山 勇

## 1. はじめに

低エネルギー高線量のプロトンを照射した宇宙用シリコン太陽電池セルの出力特性が従来知られていなかった特異な劣化挙動を示すことを見出し、そのメカニズムを解明するための種々の検討を実施した[1]、[2]。本報告では得られたデータのうち、3MeV のプロトンを照射したセルと 10MeV のプロトンを照射したセルの電気的特性を比較し、議論する。

## 2. 実験

照射試料は図 1 に示すように表面側から n<sup>+</sup>型拡散層(約 0.15 μm)/p 型 Si 基板(B<sup>+</sup>-<sup>+</sup>、約 10 Ωcm)/p<sup>+</sup>拡散層の構造を有する 50 μm 厚宇宙用シリコン BSFR 型太陽電池セルである。照射は原研高崎のタンデム加速器とサイクロトロンを用いて行った。照射後、安定化のためのアニール(60°C、24 時間)を施し、出力特性、暗伏状態における I-V 特性、C-V 特性の測定を行った。なおプロトンは 3MeV の場合も 10MeV の場合も飛程はセル厚より大きく、セルを貫通する。

## 3. 結果と考察

図 2 にセルの出力特性(AM0、28°C)を示す各パラメータの保存率の照射量依存性を示す。3MeV の場合も 10MeV の場合も、高線量域で特異な劣化挙動(ある特定の線量における I<sub>sc</sub>、FF、P<sub>max</sub> の急激な低下とその直前の I<sub>sc</sub> の若干の増加)が見られる。またこの特異な劣化挙動が 10MeV の場合は 3MeV の場合の概ね 3 倍程度の照射量で発生していることがわかる。

図 3 に暗 I-V 特性から得られたセルの飽和電流密度 I<sub>0</sub> の照射量依存性を、図 4 に同特性から得られたセルのシリーズ抵抗 R<sub>se</sub> の照射量依存性を示す。ともに照射量の増加に伴って増加する傾向が見られている。図 5 に C-V 特性から得られたセルの拡散電位 V<sub>d</sub> を、図 6 に同特性の 1/C<sup>2</sup>-V プロットから得られたシリコン基板のキャリア濃度 p の照射量依存性を示す。これらはともに照射量の増加に伴って減少する傾向が見られる。また 10MeV の場合の I<sub>0</sub>、R<sub>se</sub> の増加および p の減少傾向は、3MeV の場合の概ね 3 倍程度の照射量で認められる。

またプロトンが Si 原子をはじき出すことに費やされた単位エネルギー(nonionizing energy loss: NIEL)を計算したところ[3]、同じ照射量でも 3MeV の場合は 10MeV の場合より約 3 倍大きいことがわかった。

$$\begin{aligned} 3 \text{ MeV プロトン} & : 3.15 \times 10^4 \text{ (eV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{atm/g)} \\ 10 \text{ MeV プロトン} & : 1.06 \times 10^4 \text{ (eV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{atm/g)} \end{aligned}$$

図 2~図 6 に示した点線は、3MeV のデータから得られた曲線を 2.97 倍したものである。

これより特異な劣化挙動が発生する照射量は概ね上記のエネルギーで把握することができると考えられる。なお、V<sub>d</sub> についてはこの傾向が見出し難いことは、V<sub>d</sub> が接合近傍の pn の濃度差で決まるので、3MeV と 10MeV では表面近くに形成されている接合近傍で消費さ

れるエネルギーに違いがあることを示唆していると考えられる。

低エネルギープロトンの照射においては同じフルエンスの照射においても個々の試料の保存率のばらつきが大きい。特に 3MeV のエネルギーの  $I_{sc}$  において顕著である。これは 3MeV プロトンの飛程が約  $90\mu\text{m}$  であることから、プロトンが試料中でそのほとんどのエネルギーを失うために、試料を貫通する高エネルギーのプロトンの照射に比べ、飛跡に多量の欠陥ができるためであると思われる。

[参考文献]

[1] O.Kawasaki et al., JAERI-Review 95-019, Oct. 1995, p.11-13

[2] T.Hisamatsu et al., Technical Digest of Intl. PVSEC-9, Miyazaki, 1996,

[3] Dennis J. Flood, Proceedings of The 2<sup>nd</sup> International Workshop on Radiation Effects of Semiconductor Devices for Space Application, March 1996, p.155-164

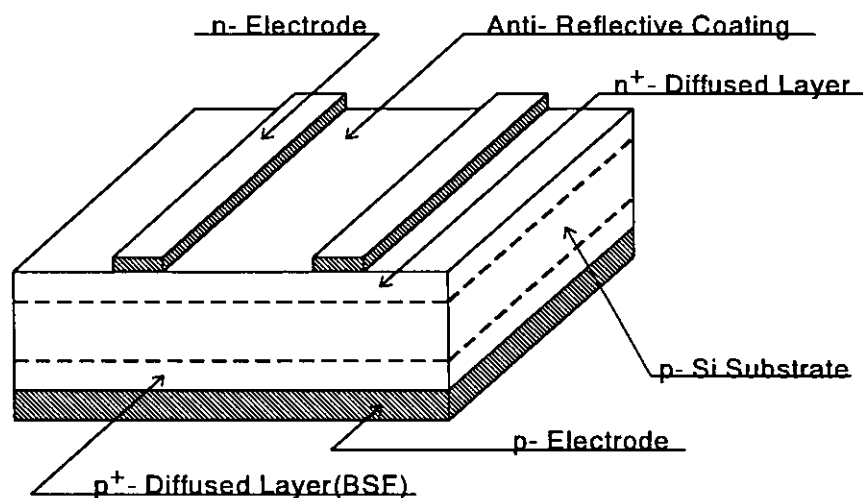
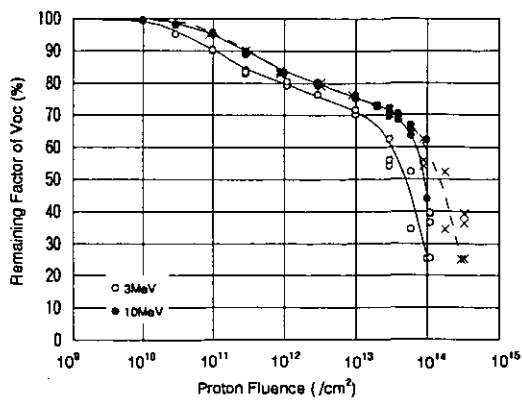
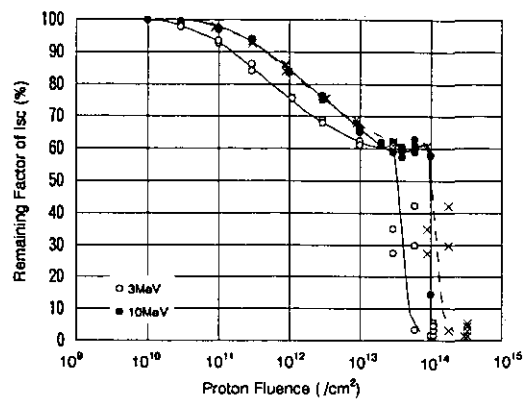


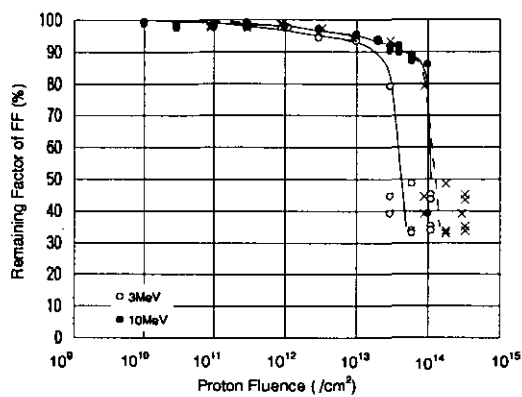
図1 Si-BSFR 太陽電池の構造



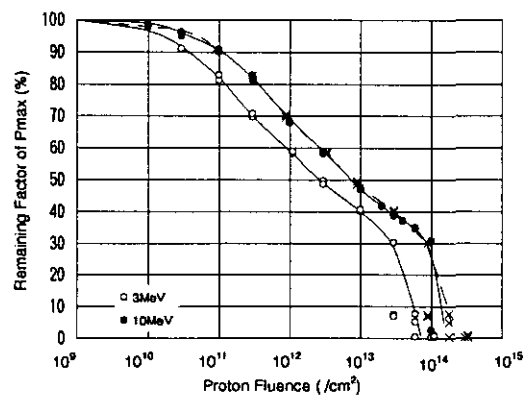
(a)



(b)



(c)



(d)

図2 陽子線照射による太陽電池セルの劣化特性(3MeVと10MeVの比較)

(a)Voc:開放電圧, (b)Isc:短絡電流, (c)FF:曲線因子, (d)Pmax:最大出力.

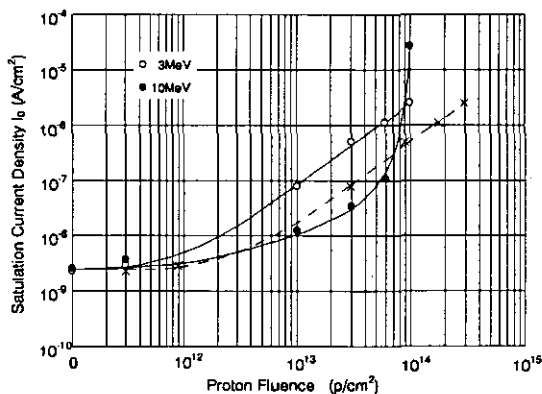


図3 飽和電流密度 $I_0$ と陽子線照射量との関係.

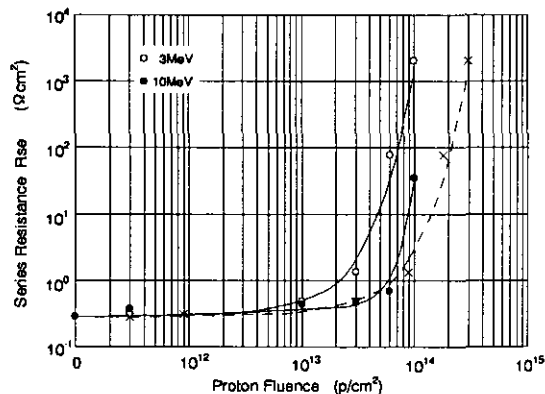


図4 シリーズ抵抗 $R_{se}$ と陽子線照射量との関係.

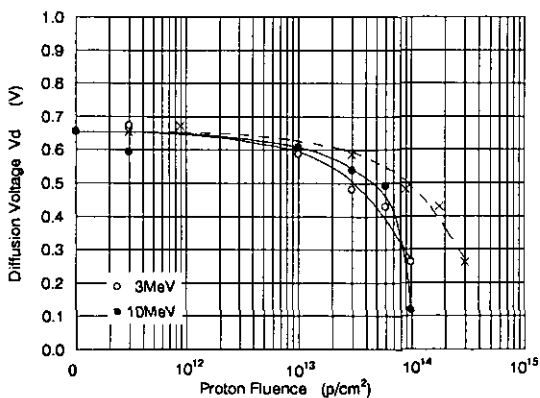


図5 拡散電位 $V_d$ と陽子線照射量との関係.

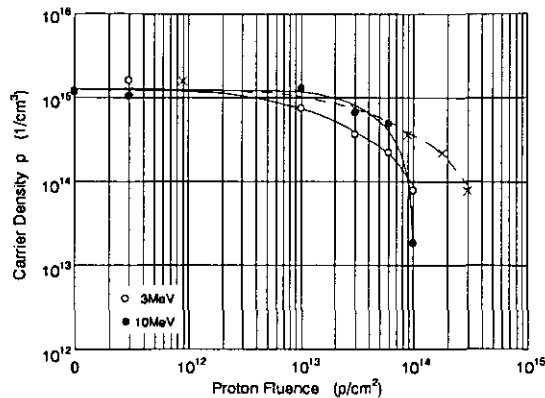


図6 基板キャリア濃度と陽子線照射量との関係.

# 結晶Siにおけるイオンビーム照射効果

筑波大物理 片渕竜也、河地有木、山田直樹、田岸義宏

## 1. はじめに

現在、水素(又は重水素)を結晶Siに高密度でイオン注入したときに起こる現象についてはあまり分かっていない。特に我々が研究の対象にしているような巨視的な現象については、ほとんど分かっていない。4年前から、我々は20-100keVの重水素イオンを単結晶Siに注入したときに見られる巨視的な現象を研究している。我々は次の2つについて研究している。

- リング状クレーター
- アニール後の小クレーターの密度

今回、このそれぞれの現象について報告する。

なお、実験は、筑波大学加速器センターで行った。結晶Siへのイオン注入はラムシフト型偏極イオン源に散乱槽(直径400mm, 深さ200mm)を接続して、無偏極のD<sup>+</sup>ビームを用いて行った。散乱槽内の真空は約 $2 \times 10^{-7}$  torrに保たれていた。

## 2. リング状クレーター

結晶Siに重水素イオンビームを長時間照射すると、結晶表面にリング状のクレーター(溝)が形成された(写真1)。これは、重水素の注入量がある臨界に達すると結晶中にできたD<sub>2</sub>ガスの圧力で結晶表面が剥ぎ取られ形成されたクレーターであることが分かった。透過型電子顕微鏡による観察から、クレーターの深さは重水素イオンの飛程に対応することも分かった( $E_d = 90$  keVで $1 \mu\text{m}$ )。クレーター部分は飛程に対応する深さだが、リングとリングの間は元の結晶表面そのままである。ちなみに最初のクレーターが形成される臨界注入量は $8 \times 10^{17}$  個/cm<sup>2</sup>であった。また、結晶方位には依存しなかった。

イオン注入によって、表面層が剥がれる現象はフレーキングとして知られている。したがって、剥がれること自体はそれほど珍しいことではない。しかし、剥がれてできたクレーターがリング状パターンを形成する、という報告は我々がはじめてである(参考文献1)。リング状になるメカニズムの解明は今後の課題である。

水素(H)イオンで同様の実験を行ったが、重水素ほど現象の再現性はよくなかった。リング状クレーターが形成されるときとされないときがあるのである。リング状クレーターが形成されないときには、結晶表面に多数の小クレーター(直径 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ )ができるだけである(写真2)。リング状になるときとならないときで何が違うのか、現在のところ分かっていない。

## 3. アニール後の小クレーターの密度

クレーターができる前の重水素を注入した試料をアニールした場合、上に述べたものとは違う種類の現象が見られる。

高密度( $10^{17} \sim 10^{18}$  個/cm<sup>2</sup>)に重水素を注入した試料をビーム照射後、約700℃にアニールするとガスが放出される。ガスが放出された後には結晶表面に直径 $10 \mu\text{m}$ 程度の小クレーターが形成される。我々は、この小クレーターの密度が注入量によって非常に興味深いふるまいをしめすことを発見した。その光学顕微鏡写真を写真3に示す(白い部分が小クレーターの多いところ)。写真の注入量はビーム径の円形ク



レーターができる臨界注入量( $8.2 \times 10^{17}$ 個/cm<sup>2</sup>)を100パーセントとして表示してある。また、重水素を試料にイオン注入する際には、ビームを交流電場で振ってやることで照射面内でビーム強度が均一になるようにした。ビームの直径は2.5mmである。写真を見ると、どの注入量でも照射領域の縁で小クレーターが多いのは、重水素が注入されたところは結晶が膨張するため、照射領域の縁では未照射の結晶部分との間に大きな応力がかかりガスが出やすくなっているものと思われる。

写真から分かるように小クレーターの密度の変化は単調ではない。注入量が少ないうちは小クレーターの数は注入量とともに増加していくが、注入量が20パーセントを超えると減少していく。そして、55パーセントから増加、65パーセントからまた減少、85パーセントでは小クレーターは全くなくなる。100パーセントではもちろんアニールしなくてもビーム照射中にビーム径の円形クレーターができる。

もし、イオン照射によってできた欠陥を核としてガス溜りが形成され、それが表面層を吹き飛ばして小クレーターができたとすると注入量とともに欠陥の数は増加するから、小クレーターの数も注入量とともに単純に増加するだけのはずである。しかし、実験結果はそうになっていない。劇的に小クレーターの数は振動する。なぜ、このような振動が起こるのかは今のところ分かっていない。

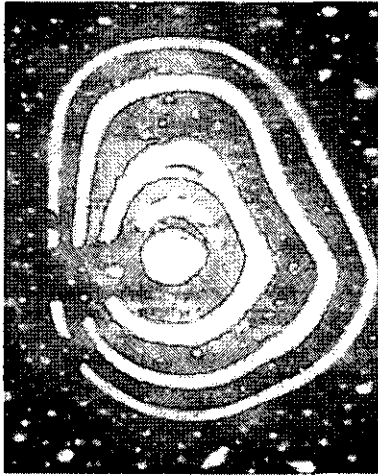
#### 4. 今後の課題

リング状クレーターに関しては、クレーターがリング状になるメカニズムを探らなくてはならない。上でも述べたが重水素ではなく水素でやった場合、現象の再現性が悪くなる。リング状になったりならなかったりする。この原因を探ればリング状クレーターのメカニズム解明の突破口になると我々は考えている。また、まだ定量的には押さえていないが、照射中の試料温度によっても形成されるリング状クレーターはかなり違うことが分かっている。この温度依存性もリング形成のメカニズムと密接に関係していると我々は考えている。

アニール後の小クレーター密度の注入量依存性から言えることは、注入量とともに飛程付近の性質が劇的に変化しているということである。したがって、その変化しているものの正体をつかむことがまず第一の課題である。そのために今後我々はチャネリング実験によって注入量とともにシリコンの結晶性がどう変化しているのか調べる予定である。

#### 参考文献

[1] Y.Tagishi and T.Katabuchi, Phys.Lett. **A195**(1994)99



150  $\mu\text{m}$

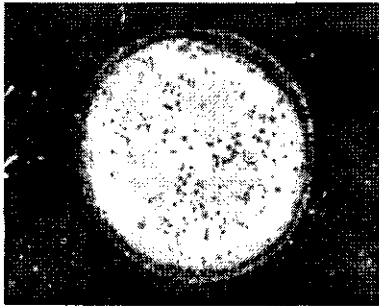
写真1.

リング状クレーターのSEM写真.

45° に傾けて撮影.

Si(111).  $E_0=90\text{keV}$ . 注入量  $8 \times 10^{18}$ 個/cm<sup>2</sup>.

1mm



(a)

50  $\mu\text{m}$



(b)

写真2.

(a) 水素を照射してリング状クレーターができなかった場合の照射表面の光学顕微鏡写真. Si(100).  $E_p=90\text{keV}$ . 注入量  $2 \times 10^{18}$ 個/cm<sup>2</sup>.

(b) SEMによる拡大写真.

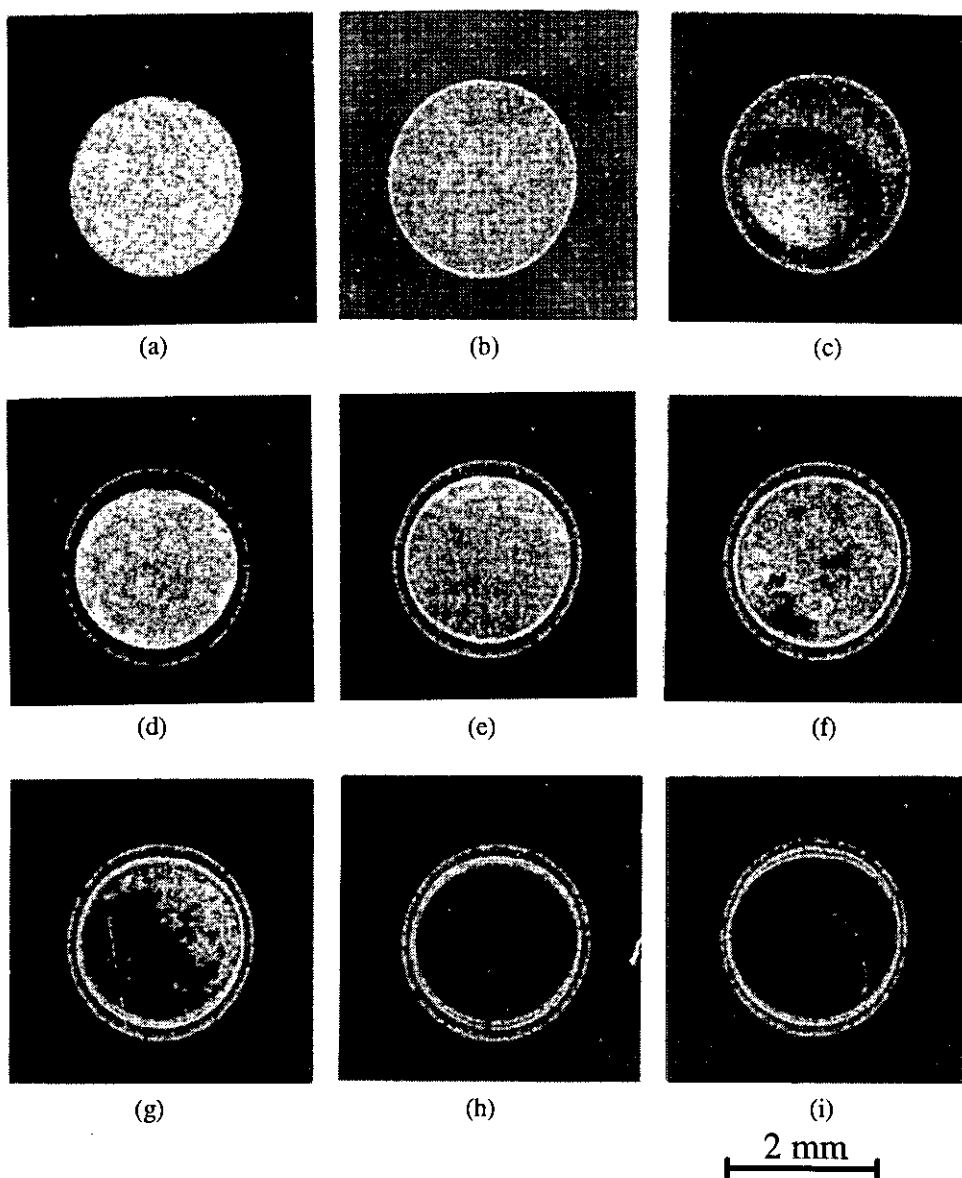


写真3.

アニール後の照射表面. 光学顕微鏡写真.

Si(100).  $E_d=90\text{keV}$ . アニール  $700^\circ\text{C}$  で約30分.

クレーターができる臨界注入量  $8.2 \times 10^{17}$  個/cm<sup>2</sup> を100%とした

ときの注入量 (a) 20% (b) 55% (c) 60% (d) 65% (e) 70%

(f) 75% (g) 80% (h) 85% (i) 100%

# 宇宙用パワーMOSFETの開発と高エネルギー加速器の利用

宇宙開発事業団 : 修行新一、松崎一浩、杉本憲治、米丸充規、鈴木隆博、松田純夫  
 原研材料開発部 : 平尾敏雄、梨山 勇  
 菱栄テクニカ(株) : 廣瀬孝幸、大平秀春、永井由紀

## 1. はじめに

パワーMOSFETは、バイポーラトランジスタに比較して、ゲートドライブが電圧駆動であることと高周波動作が可能であることから、電源等の小型・軽量化に適した半導体デバイスであり、機器の軽量化が重要な宇宙用部品に適している。将来は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。

パワーMOSFETの構造は、図1. に示すような単位セルを並列に多数並べた構造をしている。宇宙空間では、銀河宇宙線や太陽フレアからの放射線などの多くの粒子が飛び交っており、それが半導体デバイスに飛び込んだ場合、シングルイベントと呼ばれる誤動作や破壊に至る現象が起きる。パワーMOSFETの宇宙空間で起こるシングルイベント現象としては、パワーMOSFETの単位セルが破壊するSEB(Single Event Burn-out)と、ゲート電極直下のゲート酸化膜が破壊するSEGR(Single Event Gate Rupture)という、どちらもパワーMOSFETが機能しなくなる、破壊現象がある。

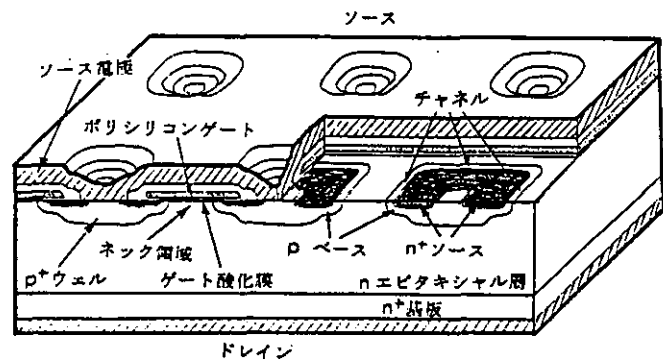


図1. 正方形セル型パワーMOSFETの構造

SEBは、パワーMOSFETがオフ時に高いドレイン・ソース間電圧が印加された状態の時に発生する。図2. に示すようにパワーMOSFETの単位セルには、内在する寄生バイポーラトランジスタ部分がある。パワーMOSFETの普通の動作状態では、この寄生バイポーラトランジスタはエミッタとベースに相当する部分がソース電極でショートした状態になっているので、常にオフ状態になっている。

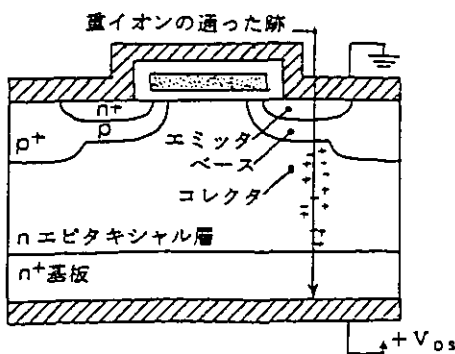


図2. 寄生バイポーラトランジスタと重イオン通過の断面模式図

この寄生バイポーラトランジスタ部分に高エネルギーイオンが飛び込み、半導体内部に電子・正孔対が発生すると、それらの電荷が寄生バイポーラトランジスタに印加されているドレイン・ソース間電圧で寄生バイポーラトランジスタをオン動作させ、電流が集中して流れ、そのセルを破壊してしまう現象がSEBである。

一方SEGRは、半導体表面のゲート酸化膜が破壊する現象である。ゲート酸化膜直下のド

レイン領域の半導体表面部（ネック領域と呼ぶ。図3．参照）から高エネルギーイオンが入射するときに発生した電子・正孔対が、半導体基板の空乏層内部の電界（ $V_{DS}$ による）でそれぞれ逆の方向に分離し始め、正の電荷は重イオンの入射位置に近いシリコンと酸化膜界面のシリコン中に蓄積される。この電荷の蓄積はピコsecのオーダーの時間だけ続くといわれ、イオンの入射位置で酸化膜中の局所的な電界の増加をもたらす。もし酸化膜中の電界が増加して、酸化膜の破壊耐圧を越えると酸化膜層の破壊が起こり、ゲート酸化膜の永久的な短絡状態になる。いずれもパワーMOSFETとして機能しなくなる破壊現象であり、機構解明と対策が急がれる。

・本報告では、宇宙用パワーMOSFETの開発のために実施した、高エネルギー加速器を使った評価実験とその結果について報告する。

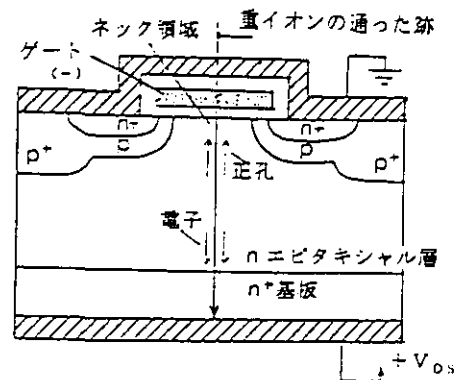


図3．ネック領域で発生するSEGRの断面模式図

## 2. 高エネルギー加速器を利用した実験の目的と実験方法

JEMまたは、地球の周りを周回する人工衛星の宇宙放射線環境は、LET (Linear Energy Transfer: 荷電粒子が単位長さ当たり失うエネルギー、単位:  $\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$ ) 27からLET34にかけてフルエンスが3桁程度差があり、シングルイベントの発生レートはLET27以上については3年間2回程度であるのに対して、LET34以上では0.003回程度と少ない。そのため、パワーMOSFETのシングルイベント耐性の検討にはLET27~34程度の影響が支配的と考え、その環境を模擬するため高エネルギー加速器を使って実験評価を行っている。なお、シングルイベント耐性評価は、パッケージのリッドや樹脂を除去してパワーMOSFETの半導体チップに直接イオン照射し、耐放射線性を半導体チップの実力として解析している。

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測定するために開発したシステム (EPICS) を用いて行った。現在まで実験に用いたタンデム関係加速器と照射粒子を表1に示す。

試料への照射は、ビームライン上に設けた散乱薄膜 (厚さ500 Åの金薄膜) で散乱したイオンを散乱角度を選んで入射した。なお、開発した測定系の追従性を良くするためとデバイスの照射損傷の影響を軽減するため、照射粒子のフルエンス率を100個/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$ 程度として行った。

表1 実験に使用した加速器と照射イオン

| 機関      | 加速器     | 照射イオン         | 照射室   |
|---------|---------|---------------|-------|
| 原研東海研究所 | タンデム加速器 | Br、C、Si、Ni、Au | N1照射室 |

## 3. シングルイベント耐性評価の試料

一般に、パワーMOSFETのシングルイベント耐性は、パワーMOSFETの $V_{DS}$ 耐圧特性が高い程、大きくなるのが今までの実験結果で分かっている。これは、 $V_{DS}$ 耐圧が高い程、半導体中の空乏層の拡がりが大きくなる設計になっており、同じバイアスで電

界強度が小さくなる傾向があるからである。しかし、 $V_{DS}$ 耐圧特性を高くするとオン抵抗が高くなるという問題があり、同じ $V_{DS}$ 耐圧特性でオン抵抗を低く押さえるためには、パワーMOSFETのチップ面積を大きくしなければならない。そうすると容量特性が大きくなって、スイッチング特性が悪くなってしまふ。現状では、宇宙用として独自構造のパワーMOSFETを開発しなければ、必要なシングルイベント耐性とパワーMOSFET特性を両立させたものを得ることは難しい。

今回の評価試料は、 $V_{DS}$ 定格250Vの宇宙用開発検討品を使った。耐放射線性目標として $V_{DS}$ 約250V程度のシングルイベント耐性をめざしているものである。パワーMOSFETとしての電気的特性と耐放射線性を検討するため、 $V_{DS}$ 実力特性を3水準、セル構造を民生品で一般的な正方形セルと、過去の検討でそれより耐放射線性が強い結果が出ているストライプセル構造(図4. 参照)の2水準、そして、各セルに寄生するバイポーラトランジスタの $h_{FE}$ を調整するためのソース不純物の濃度を数水準にふって試料を準備した。照射イオンはLET 27程度以上を得るため、Niを加速エネルギー250MeVで使用した。

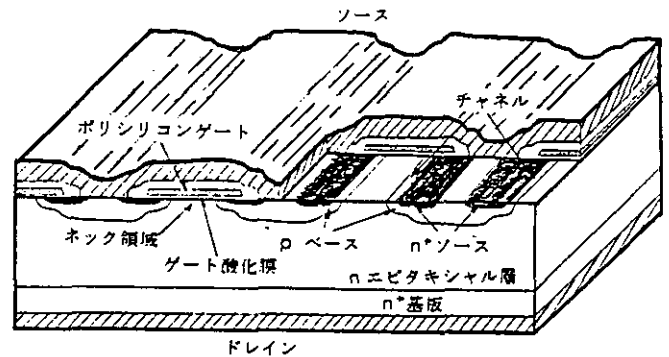


図4. ストライプセル型パワーMOSFETの構造

#### 4. 実験結果

パワーMOSFETのゲート電極へのバイアス印加を $V_{GS}=0V$ (ショート)の時の結果をSEB測定、ゲートの破壊をモニタするためゲートに $V_{GS}=-5V$ を印加した時の結果をSEGR測定で区別して、セル構造とSEB、SEGR試験別に、図5. ~図8. にまとめた。SEB発生電圧、SEGR発生電圧は、それぞれのゲートバイアス状態で、試料にイオンを照射しながらドレイン-ソース間に印加する電圧を増加して行き、SEB信号の検出あるいは、ゲート破壊の発生した時点のドレイン-ソース間電圧である。

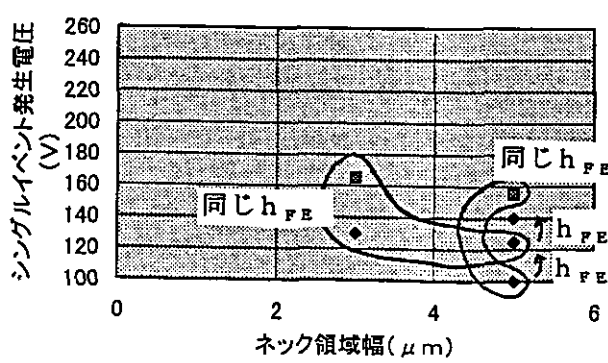


図5.  $V_{DS}$ 耐圧、ネック領域幅 対 シングルイベント発生電圧 正方形セル(SEB測定条件)

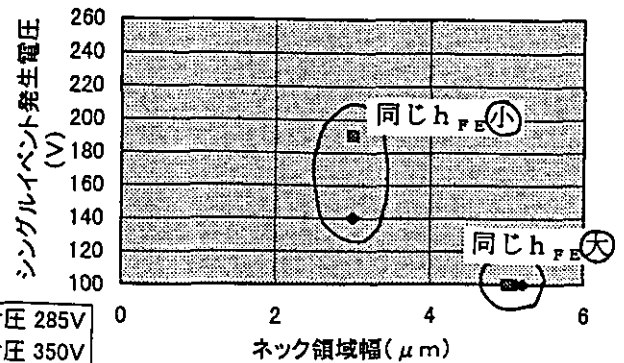


図6.  $V_{DS}$ 耐圧、ネック領域幅 対 シングルイベント発生電圧 正方形セル(SEGR測定条件)

図5.、図6. は正方形セルの結果である。図中に枠で囲ったデータはソース形成に、同じ不純物拡散濃度条件を使った $h_{FE}$ 特性のそろった試料を示す。正方形セルでは、ネック領域幅を2水準で検討した。ネック領域の幅を狭くすることで、隣接したセル間の空乏層の拡がりを均一化しSEGR耐量の改善を期待したものである。結果はSEB測定条件とSEGR測定条件でシングルイベント耐性に若干の差があるが、正方形セルの今回の

水準では効果は見えなかった。 $h_{FE}$ 特性を低下させるとシングルイベント耐性が向上し、同じ $h_{FE}$ 特性では、耐圧特性が高い程、シングルイベント耐性が高くなり、従来と同じ結果が得られた。

図7.、図8. はストライプセル構造の結果である。ネック領域幅は4水準を検討した。

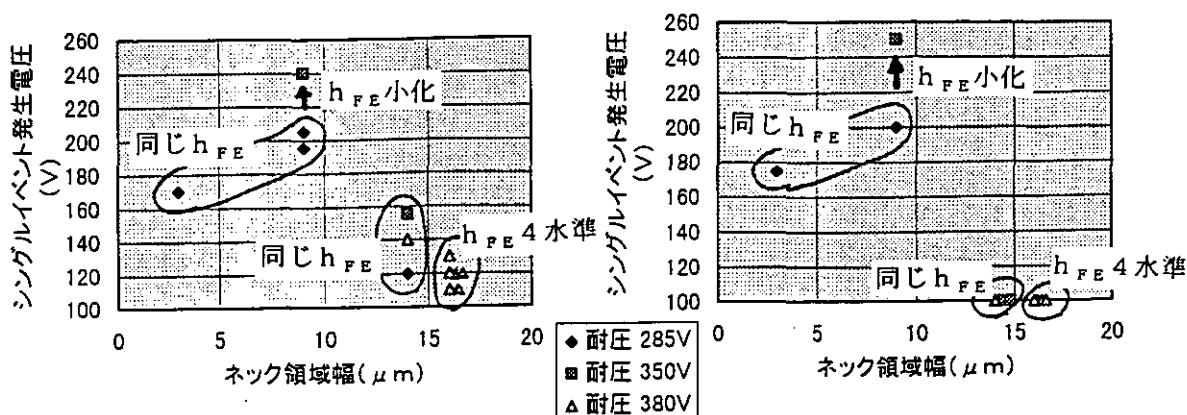


図7. V<sub>DS</sub>耐圧、ネック領域幅 対 シングルイベント発生電圧 ストライプセル(SEB測定条件) 図8. V<sub>DS</sub>耐圧、ネック領域幅 対 シングルイベント発生電圧 ストライプセル(SEGR測定条件)

ストライプセル構造では、ネック領域幅が14  $\mu m$ 以上では照射による破壊はSEB測定条件、SEGR測定条件ともすべてゲート酸化膜破壊となった。ネック領域幅9  $\mu m$ では幅を狭くした効果が見られ、ゲート部での破壊はなくなり、測定システムによるSEB信号の検出だけ見られるようになった。しかし、さらにネック領域幅を狭くすると、シングルイベント発生電圧が低下する傾向が見られ、ネック領域幅には最適値があることがわかる。この点の解析は継続して進めている。

なお、ソースを形成するための拡散不純物濃度は、寄生バイポーラトランジスタの $h_{FE}$ 特性を小さくするため、できるだけ濃度を小さくしなければならないが、トータルドーズ効果を評価した実験から、不純物濃度が小さすぎると、ソース層の抵抗が高くなっていく傾向があり、今回ストライプセル構造で得られたシングルイベント耐量が240V~250Vの試料は、ソース不純物濃度をトータルドーズの影響のない最下限で試作したものである。

今回の実験結果から、同じV<sub>DS</sub>耐圧設計、 $h_{FE}$ 設計では正方形セル構造よりストライプセル構造のほうがシングルイベント耐性が高くなることが、再確認できた。

## 5. まとめ

V<sub>DS</sub>定格250Vで、耐放射線性目標のV<sub>DS</sub>約250Vのシングルイベント耐性は、正方形セルでは難しく、ストライプ構造が適していることが再確認できた。今後は、製品化に向けて検討を継続する。

## REFERENCES

- 1) S. Kuboyama et al : "Mechanism for Single-Event Burnout of Power MOSFETs" IEEE Trans. Nucl. Sci. ,NS-39, No6, 1698(1992)
- 2) K.F.Galloway et al : "Present Status of Power MOSFETs Single-Event Phenomena : A Review" Proceedings of The 2<sup>nd</sup> International Workshop. NASDA,JAERI(1996)

# プラズマ中の MeV イオンビームの阻止能測定

東京工業大学原子炉工学研究所

小栗慶之, 作美 明, 岡崎 永, 渡辺 武, 柴田 恭, 小川雅生

## 1. 序論

イオンビームと高温プラズマの相互作用に関するデータのうち, 特に入射イオンの阻止能は重イオン慣性核融合[1,2]における燃料標的の設計等において重要な情報である.

Bethe の表式[3]によると, 物質中の高速イオンの電子阻止能は次の様に書ける:

$$-\frac{dE}{dx} \propto z_{\text{eff}}^2 \ln \Lambda \quad (1)$$

ここで  $z_{\text{eff}}$  は標的物質中の入射イオンの有効電荷,  $\ln \Lambda$  は Coulomb 対数である. まず有効電荷は入射イオンの電離及び再結合の平衡によって決まる. プラズマ中では入射イオンの電子捕獲が困難になるため有効電荷は常温物質中に比較して高くなる[4]. 一方 Coulomb 対数は一個の入射イオンが相互作用できる標的内電子の個数に関係する. 常温物質の場合, 入射イオン速度を  $v$ , 電子質量を  $m$ , 標的原子の平均励起エネルギーを  $I$  として,

$$\Lambda = 2mv^2/I \quad (2)$$

で表される. しかし高電離プラズマの場合に入射イオンから標的内電子に付与可能なエネルギーの下限がプラズマ振動の励起によって決まるため

$$\Lambda = 2mv^2 / \hbar\omega_p \quad (3)$$

となる. ここで  $\omega_p$  はプラズマ角振動数である. 通常は

$$\hbar\omega_p \ll I \quad (4)$$

であるためプラズマ中では常温物質中に比べ Coulomb 対数も増大する. これらの理由によりプラズマ中の阻止能は常温物質中に比べて大きくなることが予想されている.

このプラズマ中の高速イオンの阻止能測定に関する実験的研究は近年開始されたばかりで,  $\sim 1$  MeV/u のエネルギー領域を中心にデータが集積されつつある[5]. しかし特にイオンの有効電荷に関して常温物質との違いが顕著であることが予想される $\sim 100$  keV/u 程度の比較的低速の領域における実験例は世界的にも存在しない. そこで東京工業大学原子炉工学研究所の 1.7 MeV タンデムペレトロン加速器から得られる MeV 重イオンビームを高温・高密度プラズマ標的に通し, プラズマ中の高速イオンの阻止能を測定する実験を開始した.

## 2. 実験方法

図 1 に実験配置の概念図を示す. 標的となるプラズマは, 直径 0.7 mm のグラファイト棒の側面に最大エネルギー 4 J の Nd ガラスパルスレーザーを照射して発生させる. レーザーのパルス幅は 30 ns (FWHM), 焦点直径は約 100  $\mu\text{m}$  である. プラズマ中の自由電子密度分布測定のために He-Ne レーザーを用いた Mach-Zehnder 型干渉計を設置した.



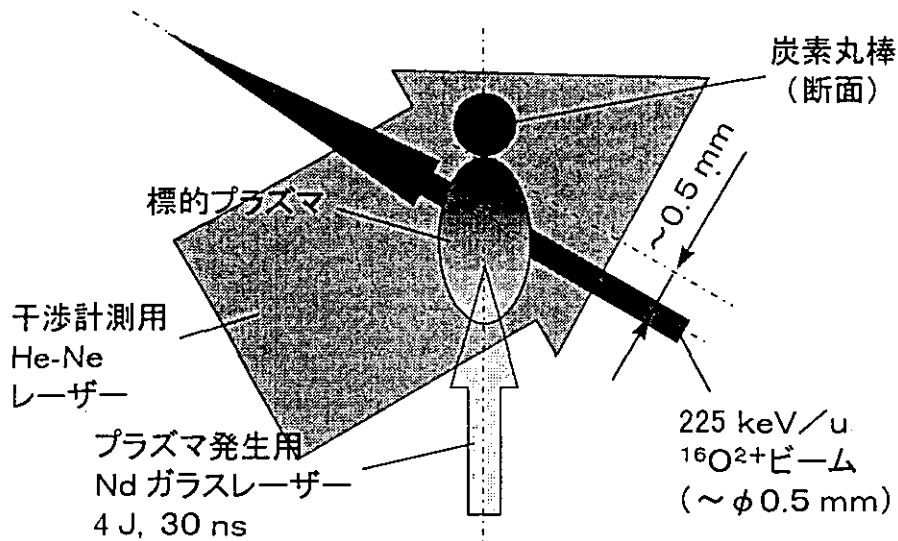


図1: イオンビーム, プラズマ標的, プラズマ診断系の配置概念図.

このプラズマ標的に 3.6 MeV (225 keV/u) の  $^{16}\text{O}^{2+}$  イオンを通し, 出射してくるイオンのエネルギー損失を時間分解測定した. ビーム電流は約  $1\ \mu\text{A}$ , ビーム直径は 0.5 mm, ビーム中心と炭素棒表面の距離は 0.5 mm 程度に調整した. 測定には磁場型のスペクトロメーターを用い, 入射側焦点にプラズマ標的, 出射側焦点には NE102A プラスチックシンチレーターを配置した. イオンのエネルギー変化に伴うシンチレーター上のビームスポット位置の動きをストリークカメラで流し撮りし, プラズマ寿命内の各時刻における入射イオンのエネルギー損失を求める. この測定には標的中の荷電変換により生じた  $^{16}\text{O}^{5+}$  イオンを用いた.

### 3. 実験結果と考察

図 2 はレーザー干渉測定により得られた干渉縞のストリーク像, 及びこれを解析して得られた電子面積密度  $n_e l$  ( $n_e$  は電子密度,  $l$  は標的の厚さ) の空間分布である. レーザー照射開始後 80 ns においてビーム通過位置で  $n_e l = 5 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-2}$  であった.

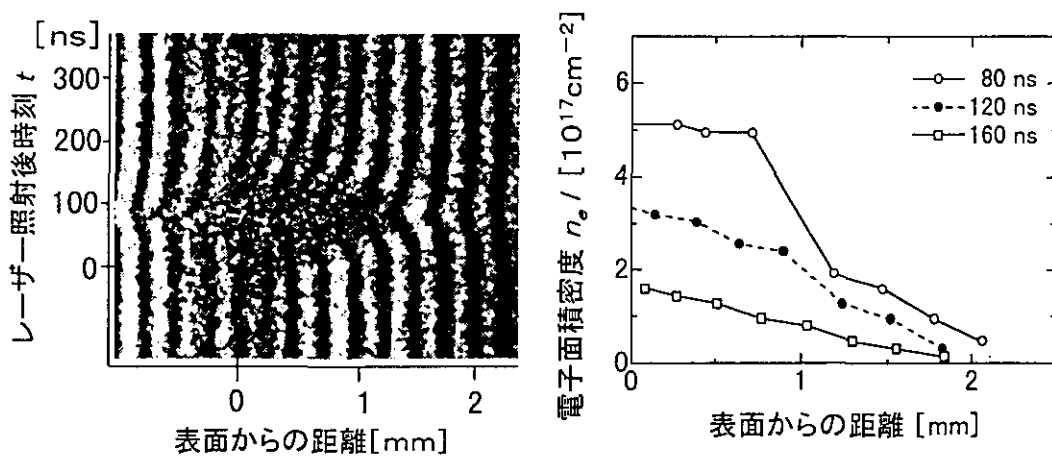


図 2: 炭素プラズマ標的に対する干渉縞のストリーク像と電子面積密度分布. レーザー出力は 2 J.

図3にシンチレータ上のビーム位置のストリーク像を示す。レーザー照射開始後約80 nsで変位は最大(約6 mm)となった。この変位をエネルギー損失  $\Delta E_{\text{exp}}$  に換算すると

$$\Delta E_{\text{exp}} = 150 \text{ keV} \quad (5)$$

が得られた。ここでプラズマを  $C^+$  イオンと電子の1:1の混合物と仮定すると、前述のプラズマ電子面積密度  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  に等価な常温炭素箔の厚さは  $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  となる。この中の  $^{16}\text{O}$  イオンのエネルギー損失  $\Delta E_{\text{cold}}$  を常温炭素の阻止能のデータ[6]を用いて求めると、

$$\Delta E_{\text{cold}} = 100 \text{ keV} \quad (6)$$

となる。したがってこのプラズマ中では等価常温物質中に比べてエネルギー損失が約50%増加していることが分かる。この実験結果を阻止能に換算し、常温物質に関するデータ[6]とともに入射エネルギーの関数として示すと図4のようになる。

この結果は次の様に定量的に解釈できる：上記の近似の下で、プラズマ中の入射イオンのエネルギー損失は

$$\Delta E_{\text{calc}} = \Delta E(C^+) + \Delta E(e^-) \quad (7)$$

で評価できる。ここで  $\Delta E(C^+)$ ,  $\Delta E(e^-)$  はそれぞれ  $C^+$  イオン、自由電子のみによるエネルギー損失である。まず  $C^+$  イオンには束縛電子が多数存在するため入射イオンの電子捕獲が依然として強い。したがって入射イオンの有効電荷は常温標的の場合とあまり変わらないと考えられるので、ここでは常温標的に対するデータ[7]

$$z_{\text{eff}} = 3.9 \quad (8)$$

を採用する。すると  $C^+$  イオンのみによるエネルギー損失は  $C^+$  の持つ束縛電子数  $(6-1=5)$  を考慮し、式(6)を利用して次式で大まかに評価できる：

$$\Delta E(C^+) \approx (5/6)\Delta E_{\text{cold}} = 80 \text{ keV}. \quad (9)$$

一方レーザー干渉計による測定結果から、プラズマ中のイオンが通過した部分について、厚さ  $l \approx 1 \text{ mm}$ 、平均電子密度  $n_e = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と評価できる。これらの仮定より式(1), (3)を

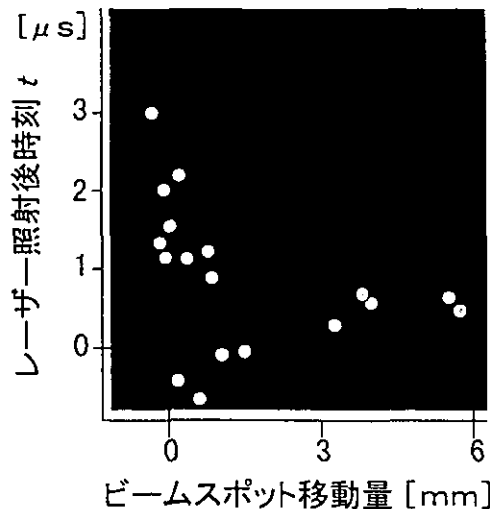


図3：シンチレータ上のビーム位置のストリーク像。

用いて自由電子のみによるエネルギー損失  $\Delta E(e^-)$  を計算すると、

$$\Delta E(e^-) = 80 \text{ keV}. \quad (10)$$

従って式(8)~(10)により本実験で用いた炭素プラズマ中のエネルギー損失を評価すると、

$$\Delta E_{\text{calc}} = \Delta E(C^+) + \Delta E(e^-) \approx 80 \text{ keV} + 80 \text{ keV} = 160 \text{ keV} \quad (11)$$

となる。これは測定結果  $\Delta E_{\text{exp}}$  に良く一致している。

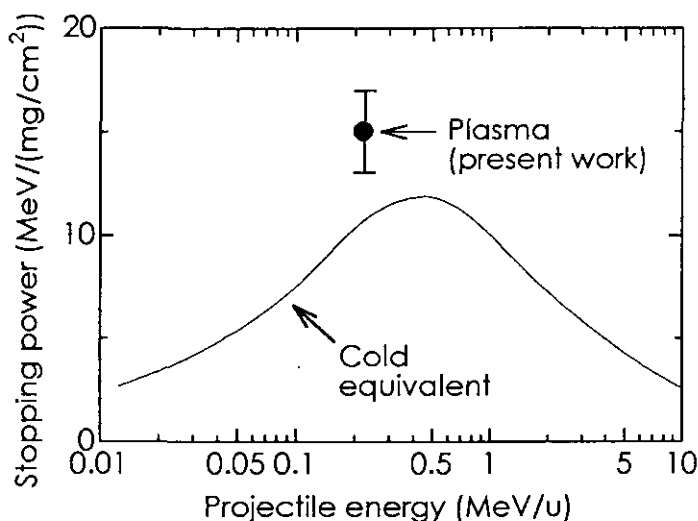


図4：炭素プラズマ中の阻止能測定結果と常温炭素標的に対するデータ[6]の比較。

#### 4. 結論

レーザー照射により発生した炭素プラズマ標的を用い、高温プラズマ中の  $^{16}\text{O}$  イオンの阻止能測定に成功した。この測定結果を等価な常温炭素標的の場合と比較したところ、プラズマ状態では阻止能が大幅に増大していることを確認した。この実験結果はレーザー干渉計によるプラズマ電子密度の測定値を用いた近似計算の結果と良く一致した。

現在、測定精度と時間分解能を向上させるためにマイクロチャンネルプレートを用いてシンチレーターの発光を増強する装置を準備中である。

#### 参考文献

- [1] R.O. Bangerter, Fusion Eng. and Design 32-33 (1996) 27.
- [2] G. Plass, *ibid.* 55.
- [3] T. Peter and J. Meyer-ter-Vehn, Phys. Rev. A43 (1991) 1998.
- [4] E. Nardi and Z. Zinamon, Phys. Rev. 49 (1982) 1251.
- [5] D.H.H. Hoffmann, Fusion Eng. and Design 32-33 (1996) 11.
- [6] L.C. Northcliffe and R.F. Schilling, Nucl. Data Tables A7 (1970) 233.
- [7] K. Shima, N. Kuno, M. Yamanouchi and H. Tawara, Atom. and Nucl. Data Tables 51 (1992) 173.

# SOI中に生成した収集電荷の測定について

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：松田純夫、根本規生

## 1. はじめに

宇宙環境で使用される半導体素子に、高いエネルギーを持ったイオンが入射する際にデジタル情報等を反転させるシングルイベント現象<sup>1)</sup>のあることはよく知られている。今後、商業化を目指した人工衛星が多数打ち上げられ、益々半導体素子の需要が高まることは必須となっている。そのような中、それらの半導体素子のシングルイベント現象に関する様々な研究<sup>2,3)</sup>が加速器を利用して進められている。現在、我々は、イオンの入射に伴い生成した電荷量とイオン種との関係を求めるために、半導体にイオンが入射した時に発生するピコ秒台のシングルイベント過渡電流波形の測定をT I A R A照射施設のタンデム加速器に接続されている重イオンマイクロプローブを用いて行っている<sup>4,5,6,7,8,9,10)</sup>。本報告では、耐放射線性素子として注目されているSOI構造を持ったシリコンpn接合ダイオードに炭素及び酸素イオンを入射し、その時に発生した電荷量とSOI層内での収集電荷量との関係について検討した結果を述べる。

## 2. 実験

照射は、原研高崎研のT I A R A照射施設にある3MVタンデム加速器に接続した重イオンマイクロビーム形成装置<sup>11)</sup>と半導体デバイス微小領域照射試験装置を用いて行った。実験は炭素と酸素イオンが、試料に入射した時に発生するシングルイベント過渡電流波形の測定を図1に示すように超伝導遅延回路と40GHzで構築した超高速サンプリングシステムを用いて行った。試料に入射するイオン数の制御は、タンデム加速器に新たに設置されたビームアッテネータとマイクロビームラインにある高速スイッチを用い、約100~300cps程度で、ビーム径は約1ミクロン以下で行った。

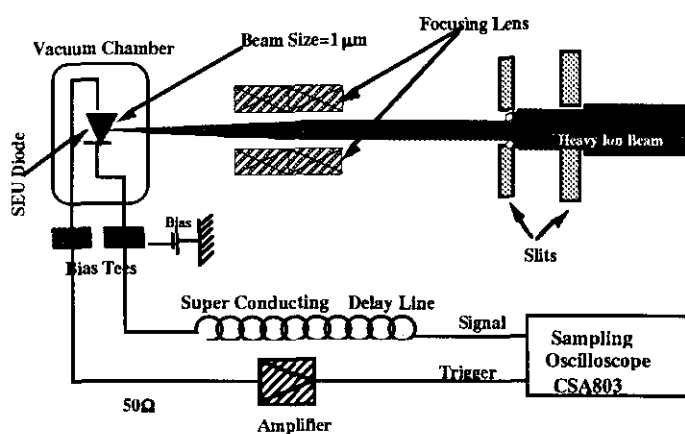


図1 シングルイベント過渡電流測定模式図

シングルイベント過渡電流波形の測定は、試験試料へ印加するバイアスを-3Vから-30Vの範囲で変化させ、それぞれの電圧に対して行った。発生した電荷量は、それぞれの電圧で得られた波形を積分して測定系のインピーダンス50オームで除すことで求めた。

表2に実験に使用した試料の諸特性を示す。

粒子計測は、照射試験装置に設けた半導体検出器にて行った。

図1に測定系の概念図を、表1に使用したイオン種の特徴を示す。

実験に用いた試料は、1から5オームの比抵抗を持ったn型のSOI構造のpn接合ダイオードである。図2に試料の断面図を示す。図2に示すようにSOI構造は、ベース基板の上に膜厚0.5ミクロンの酸化膜層を重ね、更にその上に5ミクロン厚（基板抵抗として2から4オーム）のSOI層から構成されている。

入射イオンによって発生したシングルイベント

表1 実験に用いたイオン種の特長

| イオン種 | エネルギー<br>MeV | 飛程<br>$\mu\text{m}$ | LET<br>$\text{MeV}(\text{mg}/\text{cm}^2)$ | 発生電荷量<br>$\text{fC}/\mu\text{m}$ |
|------|--------------|---------------------|--|----------------------------------|
| 炭素   | 15.0         | 13.98               | 4.130                                      | 42.651                           |
| 酸素   | 15.0         | 9.66                | 6.911                                      | 71.382                           |

表2 実験に用いた試験試料の特長

| 試料名                      | 上層基板   | 埋め込み<br>$\text{SiO}_2$ | ベース<br>基板  |
|--------------------------|--|------------------------|--|
| SOI<br>5.0 $\mu\text{m}$ | 5.0 $\pm$ 0.5 $\mu\text{m}$<br>2~4 $\Omega\text{cm}$<br>CZN(100) | 0.5 $\mu\text{m}$      | 625 $\mu\text{m}$<br>1~5 $\Omega\text{cm}$<br>CZN(100) |

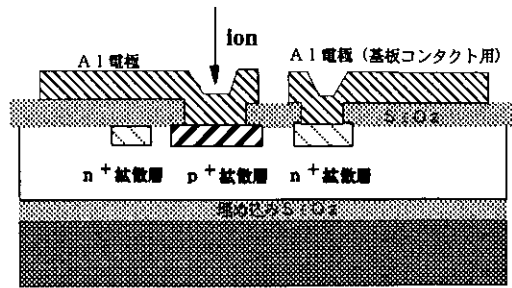


図2 SOIシリコンpn接合試料断面図

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 炭素及び酸素イオンに対するシングルイベント過渡電流波形について

図3及び図4に、炭素イオンと酸素イオンが試料に入射した時に発生したシングルイベント過渡電流波形の電圧依存性を示している。炭素及び酸素イオンともシングルイベント過渡電流波形は、印加電圧が高くなるに伴い波形のピークも高くなる電圧依存性を示している。

炭素イオンの場合、印加電圧が-20V以上で波形ピークの増加量が少なくなっており、立ち下がり時間も短くなる傾向を示している。酸素イオンの場合では、炭素イオンで得られたシングルイベント過渡電流波形より幅の広い過渡電流波形が得られている。また、炭素イオンと同様にシングルイベント過渡電流波形は、印加電圧が-15V以上で波形ピークの大きな増加が見られず、さらに立ち下がり時間も短くなる傾向を示している。

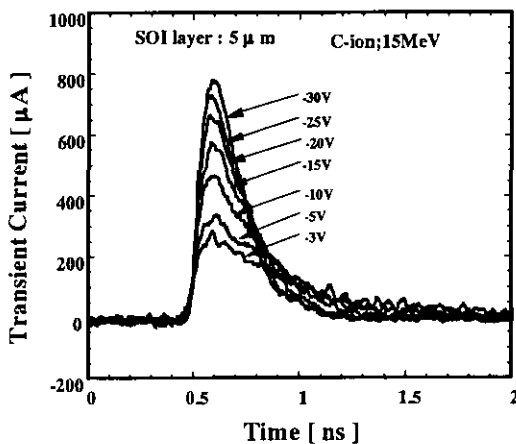


図3 炭素イオン入射で発生したシングルイベント過渡電流波形の電圧依存性

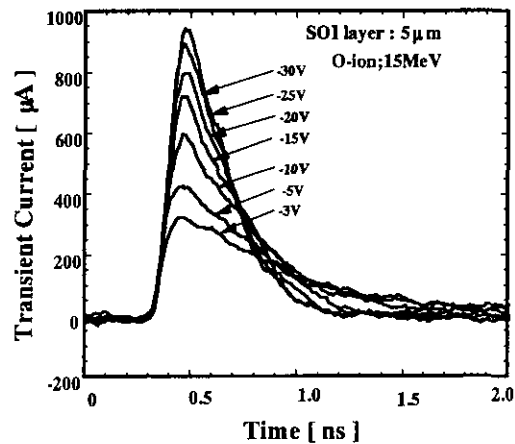


図4 酸素イオン入射で発生したシングルイベント過渡電流波形の電圧依存性

一方、図5及び図6は、図4と図5で示したそれぞれの印加電圧で発生したシングルイベント過渡電流波形のピークを1として規格化した結果を示している。

同図に見られるように、炭素及び酸素イオンとも印加電圧が高くなるに伴い立ち下がり時間が短時間側へシフトしていることが分かる。炭素イオンでは、印加電圧が高くなるにつれ半値幅で340 ps ~ 220 ps、電荷の収集に及ぼす収集時間として940 ps ~ 400 ps、さらに立ち下がり時間として900 ps ~ 280 ps等のように短くなっている。酸素イオンの場合も同様に、半値幅が620 ps ~ 308 ps、収集時間が1150 ps ~ 600 ps、さらに立ち下がり時間として1230 ps ~ 380 psと短くなっていることが分かる。

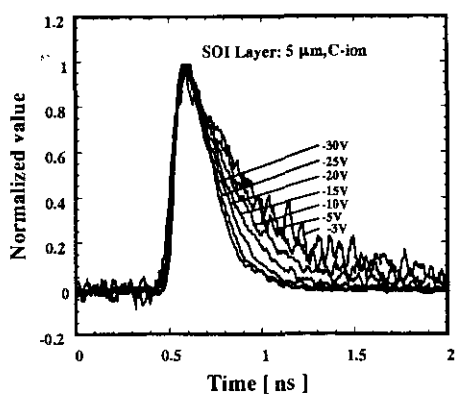


図5 ピークを1として規格化した時の炭素イオンにおける過渡電流波形の比較

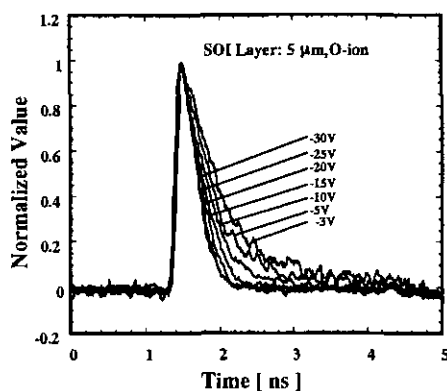


図6 ピークを1として規格化した時の酸素イオンにおける過渡電流波形の比較

### 3. 2 発生電荷量と電荷収集長について

図7に炭素イオンと酸素イオンにおける印加電圧と収集電荷量との関係を示す。なお、図中の直線は、SOI層の厚さ(5ミクロン)と表1の単位長さ当たりの発生電荷量との関係から求めたSOI層内で収集される電荷量である。それぞれの収集電荷量は、炭素イオンで213 fC、酸素イオンで357 fCである。また、図中の実線で示した曲線は、測定したシングルイベント過渡電流波形から求めた発生電荷量を、点線はそれぞれの印加電圧で発生した空乏層内での収集電荷量を示す。その結果、炭素及び酸素イオンとも、実験値の方がそれぞれの印加電圧で発生した空乏層内での電荷収集よりも約2~3倍程度も多く収集されている。さらに、発生した電荷量とSOI層内での収集電荷量とを比較した場合、炭素及び酸素イオンとも印加電圧として、-10V以上で発生する電荷量が一定となっている。イオンの飛程と空乏層長との関係に於いて、イオンの飛程が十分に空乏層長より長い場合には、空乏層下からのファネリング及び拡散成分の影響等により電荷の収集を生じる。このために発生した電荷量は、空乏層内での収集電荷量よりも、多く収集されている。

実験に使用した炭素と酸素イオンの飛程とSOI層との関係に於いて、イオンの飛程は表1に示すように十分にSOI層を通過していると考えられる。即ち、図7で見られる発生した電荷量が空乏層内で収集した電荷

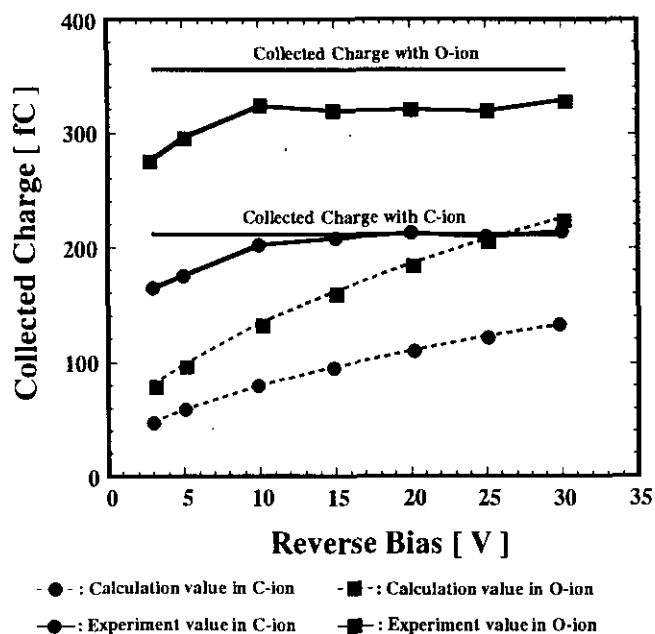


図7 炭素、酸素イオン入射で得られた収集電荷量とバイアスとの関係

量よりも多く得られていることは、電荷の収集過程で言われている上記に述べたファネリング成分と拡散成分の影響による電荷の収集によるものと考えられる。一方、発生した電荷量がSOI層内で収集される電荷量よりも多くなることがして、印加電圧として-10V以上で一定になることについては、この試料の特徴であるSOI層の下に設けた酸化膜により電荷の収集が抑制されていることと、さらにファネリング及び拡散による実際の電荷収集に寄与する電荷収集長が、それぞれの印加電圧で生成した空乏層長下の2から3ミクロン程度と押さえられていることと推定できる。

一方、収集電荷量から求めたファネリング係数と電荷収集長との関係は、次の式で示すことができる。ここで $l_N$ は電荷収集長、 $K_N$ はファネリング係数、 $W_{DN}$ は空乏層幅を示す

$$l_N = (K_N - 1) \times W_{DN}$$

図8に各印加電圧によって生成した空乏層幅とイオンが入射したときに発生した電荷量から求めた電荷収集

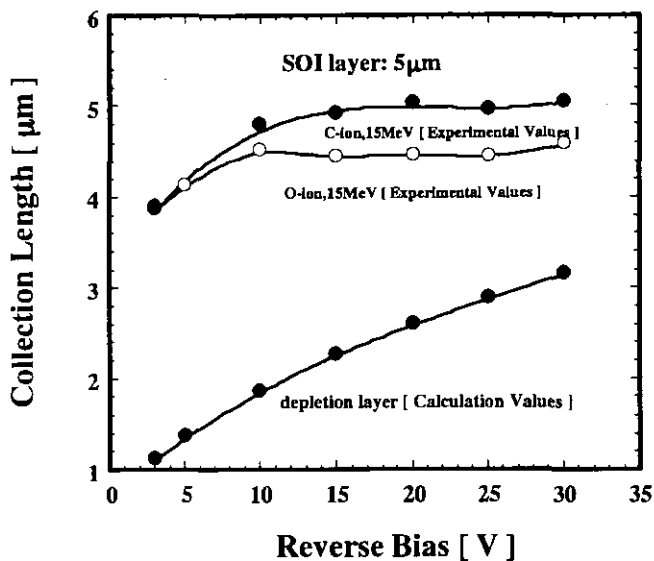


図8 炭素、酸素イオン入射で求めた電荷収集長とバイアスとの関係

イオンの飛程がSOI層幅以上であっても収集される電荷量はSOI層の幅に依存するという結果が得られた。即ち、イオンの入射に伴い発生する電荷の量は酸化膜を基板内に埋め込むことで制御できることがわかった。

このことは、宇宙環境で使用する半導体素子の耐シングルイベント対策さらに耐放射線性素子の開発に向けての重要な指標を得ることができたといえる。

#### 参考文献

- 1) D.Binder, E.C.Smith, A. B Holman, IEEE Trans, Nucl. Sci. NS-22, No.6(1975) 2675.
- 2) Proc. of the Int. Workshop on Radiation Effects of Semiconductor Device for Space Application (Takasaki, 1992).
- 3) Proc. of the 2nd Int. Workshop on Radiation Effects of Semiconductor Device for Space Application (Tokyo, 1996).
- 4) T. Hirao, I. Nashiyama, T. Kamiya, T. Nishijima, "Effect of micro-beam induced damage on single-event current measurement ", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 104 (1995) 508-514.
- 5) T.Hirao, I. Nashiyama, T. Kamiya, T. Suda, "Study of Transient Current Induced by Heavy-ion Microbeams Si and GaAs", The 7th International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research, p.54, March.1996, Takasaki.
- 6) I.Nashiyama, T.Hirao, T.Kamiya, H. Yutoh, T. Nishijima, H.Sekiguti, "Single-Event Current Transients Induced by High-Energy Ion Microbeams", 30th International Nuclear and Space Radiation Effect Conference, Jul(1993)
- 7) T.Hirao, Y.Morita, S.Nishijima, T.Kamiya, "Single-Event Current Transients Induced with Heavy Ion Micro-Beam", Proceeding of The International Work on Radiation Effects of Semiconductor Devices for Space Application., p.142-146 (1992).
- 8) T.Hirao, I. Nashiyama, T. Kamiya, T. Suda, "MEASUREMENT OF CHARGE COLLECTED FROM HEAVY-ION TRACS IN PN JUNCTION DIODES", Proceedings of The 2nd International Workshop on Radiation Effects of Semiconductor Devices for Space Application. p.99-p.103, March.1996, Tokyo.
- 9) 平尾敏雄、西島俊二、"シングルイオン誘起ピコ秒過渡電流の計測と放射線損傷" 放射線雑誌 (1997年1月)
- 10) 平尾敏雄、梨山 勇、"重イオンマイクロビームの応用 (宇宙用LSIのシングルイベント)"、放射線化学、No. 57、p. 37-40、1994年
- 11) T.Kamiya et al., Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B64, pp.326-366, 1992

長との関係を示す。その結果、炭素及び酸素イオンとも印加電圧が-10V以上で電荷の収集に寄与する収集長は、約4~5ミクロンと一定となっている。このことは、実験試料のSOI層の幅(5ミクロン)の中でほとんど電荷の収集が収まっていることを現している。さらに空乏層からの電荷の収集に寄与する長さとしては、印加電圧が-3Vで約2.7ミクロン、-30Vで1.8ミクロンという値を得ることができる。

#### 4. まとめ

耐放射線性素子として注目されているSOI構造を持った半導体pn接合試料を用いて、重イオンが入射した際に発生するシングルイベント過渡電流波形の測定から収集される電荷量を求めた。その結果SOI構造を持った試料では、

タンデム研究会参加者名簿

|    | 名 前            | 勤 務 先                     | 郵便番号   | 住 所                         |
|----|----------------|---------------------------|--------|-----------------------------|
| 1  | 宮下 秀敏          | (株)神戸製鋼所                  |        | 大阪市此花 梅香3-7-14              |
| 2  | 近藤 康平          | (株)神戸製鋼所 機械本部 高機能商品部      | 135    | 東京都江東区東陽2-3-2               |
| 3  | 結城 隆裕          | (株)神戸製鋼所 機械本部 高機能商品部      | 676    | 兵庫県高砂市荒井町新浜2-3-1            |
| 4  | 田丸 正二郎         | (株)神戸製鋼所 機械本部 高機能商品部      | 135    | 東京都江東区東陽2-3-2               |
| 5  | 福山 博文          | (株)神戸製鋼所 機械本部 高機能商品部      | 676    | 兵庫県高砂市荒井町新浜2-3-1            |
| 6  | 坂内 尚史          | (株)島津製作所                  |        | 神奈川県秦野市堀山下380-1             |
| 7  | Craig A Schult | (株)伯東 システム第一事業部営業二部       | 160    | 東京都新宿区新宿1-1-13              |
| 8  | 庵下 稔           | (株)伯東 システム第一事業部営業二部       | 160    | 東京都新宿区新宿1-1-13              |
| 9  | 金子 昌史          | (株)伯東 システム第一事業部営業二部       | 160    | 東京都新宿区新宿1-1-13              |
| 10 | 神保 健一          | (株)伯東 システム第一事業部営業二部       | 160    | 東京都新宿区新宿1-1-13              |
| 11 | 中川 靖広          | (株)伯東 システム第一事業部営業二部       | 160    | 東京都新宿区新宿1-1-13              |
| 12 | 牧田 肇           | (株)伯東 システム第一事業部営業二部       | 160    | 東京都新宿区新宿1-1-13              |
| 13 | 鈴木 佐江子         | (株)伯東 システム第一事業部営業二部       | 160    | 東京都新宿区新宿1-1-13              |
| 14 | 渡辺 寛           | (有)光信理化学製作所               | 170    | 東京都豊島区池袋本町1-39-2            |
| 15 | H.van Oosterho | HVEE                      |        |                             |
| 16 | 熊谷 正夫          | KTF                       |        | 神奈川県川崎市坂戸 KSP               |
| 17 | 修行 新一          | 宇宙開発事業団                   | 305    | 茨城県つくば市千現2-1-1              |
| 18 | 根本 規生          | 宇宙開発事業団 技術研究部 電子情報系技術研究部  | 305    | 茨城県つくば市千現2-1-1              |
| 19 | 松田 純夫          | 宇宙開発事業団 技術研究部 電子情報系技術研究部  | 305    | 茨城県つくば市千現2-1-1              |
| 20 | 杉本 憲治          | 宇宙開発事業団 技術研究部 電子情報系技術研究部  | 305    | 茨城県つくば市千現2-1-1              |
| 21 | 高久 雄一          | 丸文株式会社 科学機器部 分析機器課        | 103    | 東京都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 分析機器課        | 103    | 東京都中央区日本橋大伝馬町8-1            |
| 23 | 五十嵐 康人         | 気象研究所地球化学                 | 305    | 茨城県つくば市吾妻1-601-508          |
| 24 | 松本 博           | 京都大学 理学部物理学第二教室           | 606    | 京都府京都市左京区北白川追分町             |
| 25 | 中村 正信          | 京都大学 理学部物理学第二教室 原子核物理学研究室 | 606    | 京都府京都市左京区北白川追分町             |
| 26 | 中島 孝夫          | 九州大学 理学部物理原子核実験室          | 812-81 | 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1            |
| 27 | 相良 健至          | 九州大学 理学部 理学科              | 812-81 | 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1            |
| 28 | 竹中 稔           | 九州大学応用力学研究所               | 816    | 春日市春日公園6-1                  |
| 29 | 黒岩 貴芳          | 国立環境研究所 化学環境部             | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2              |
| 30 | 内田 昌男          | 国立環境研究所 化学環境部             | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2              |
| 31 | 南 浩史           | 国立環境研究所 化学環境部             | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2              |
| 32 | 久米 博           | 国立環境研究所 化学環境部 計測技術研究室     | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2              |
| 33 | 柴田 康行          | 国立環境研究所 化学環境部 動態化学研究室     | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2              |
| 34 | 瀬山 春彦          | 国立環境研究所 化学環境部 動態化学研究室     | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2              |
| 35 | 田中 敦           | 国立環境研究所 化学環境部 動態化学研究室     | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2              |
| 36 | 米田 穰           | 国立環境研究所 化学環境部 動態化学研究室     | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2              |
| 37 | 土井 妙子          | 国立環境研究所 水圏環境部 地下環境研       | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2              |
| 38 | 森泉 純           | 国立環境研究所 大気圏環境部 大気動態研究     | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2              |
| 39 | 森田 昌敏          | 国立環境研究所 地域環境研究グループ        | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2              |
| 40 | 松岡 健次          | 大阪大学理学研究科岸本グループ           | 560    | 大阪府豊中市待兼山町1-1               |
| 41 | 倉持 秀敏          | 筑波大学                      | 305    | 茨城県つくば市二宮2-3-7 サングリーン二宮 301 |
| 42 | 木村 博美          | 筑波大学                      | 305    | 茨城県つくば市天王台1-1-1             |
| 43 | 関 李紀           | 筑波大学 化学系                  | 305    | 茨城県つくば市天王台1-1-1             |
| 44 | 高橋 努           | 筑波大学 加速器センター              | 305    | 茨城県つくば市天王台1-1-1             |
| 45 | 石井 聡           | 筑波大学 加速器センター              | 305    | 茨城県つくば市天王台1-1-1             |



タンデム研究会参加者名簿

|    |               |                                   |        |                         |
|----|---------------|-----------------------------------|--------|-------------------------|
| 46 | 石原 豊之         | 筑波大学 加速器センター                      | 305    | 茨城県つくば市天王台1-1-1         |
| 47 | 大島 弘行         | 筑波大学 加速器センター                      | 305    | 茨城県つくば市天王台1-1-1         |
| 48 | 大和 良広         | 筑波大学 加速器センター                      | 305    | 茨城県つくば市天王台1-1-1         |
| 49 | 片淵 竜也         | 筑波大学 物理学研究科 筑波大学加速器センター           | 305    | 茨城県つくば市天王台1-1-1         |
| 50 | 河地 有木         | 筑波大学大学院                           | 305    | 茨城県つくば市天王台1-1-1         |
| 51 | 西島 俊二         | 電子技術総合研究所                         | 305    | 茨城県つくば市梅園1-1-4          |
| 52 | S.GARNSOMSART | 東京工業大学                            |        | Tokyo Institute of TECH |
| 53 | 新井 栄一         | 東京工業大学                            | 145    | 東京都大田区北千束1-64-10        |
| 54 | Son Bat(ソノバツ) | 東京工業大学 原子炉工学研究所                   | 152    | 東京都目黒区大岡山2-12-1         |
| 55 | 岡崎 永          | 東京工業大学 原子炉工学研究所                   | 152    | 東京都目黒区大岡山2-12-1         |
| 56 | 作美 明          | 東京工業大学 原子炉工学研究所                   | 152    | 東京都目黒区大岡山2-12-1         |
| 57 | 小栗 慶之         | 東京工業大学 原子炉工学研究所                   | 152    | 東京都目黒区大岡山2-12-1         |
| 58 | 小川 雅生         | 東京工業大学 原子炉工学研究所                   | 152    | 東京都目黒区大岡山2-12-1         |
| 59 | 渡辺 武          | 東京工業大学 原子炉工学研究所                   | 152    | 東京都目黒区大岡山2-12-1         |
| 60 | 牧野 一行         | 東京工業大学 原子炉工学研究所                   | 152    | 東京都目黒区大岡山2-12-1         |
| 61 | 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          |
| 62 | 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         |
| 62 | 小林 紘一         | 東京大学原子力総合研究センター                   | 113    | 東京都文京区弥生2-11-16         |
| 63 | 小島 一二         | 東京電子株式会社                          | 141    | 東京都品川区東五反田1-21-10       |
| 64 | 伊藤 茂          | 動力炉・核燃料開発事業団 東濃地科学センター技術開発課       | 509-51 | 岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸959-31    |
| 65 | 徐 勝           | 動力炉・核燃料開発事業団 東濃地科学センター技術開発課       | 509-51 | 岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸959-31    |
| 66 | 金子 博実         | 日新ハイボルテージ(株) 第三技術部                | 371    | 群馬県前橋市総社町総社2121         |
| 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 | 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4        |
| 68 | 北村 敏勝         | 日本海洋科学振興財団                        |        |                         |
| 69 | 堀江 活三         | 日本原子力研究所                          | 319-11 | 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4        |
| 70 | 峰原 英介         | 日本原子力研究所 東海研究所 原子炉工学部 自由電子レーザー研究室 | 319-11 | 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4        |
| 71 | 荒巻 能史         | 日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究             | 035    | 青森県むつ市港町4-24            |
| 72 | 水島 俊彦         | 日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究             | 035    | 青森県むつ市港町4-24            |
| 73 | 神谷 富裕         | 日本原子力研究所 高崎研究所                    | 370-12 | 群馬県高崎市綿貫町1233           |
| 74 | 石井 保行         | 日本原子力研究所 高崎研究所                    | 370-12 | 群馬県高崎市綿貫町1233           |
| 75 | 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           |
| 76 | 斉藤 勇一         | 日本原子力研究所 高崎研究所 ビーム技術開             | 370-12 | 群馬県高崎市綿貫町1233           |
| 77 | 平尾 敏雄         | 日本原子力研究所 高崎研究所 材料開発部技術開発課         | 370-12 | 群馬県高崎市綿貫町1233           |
| 78 | 宇野 定則         | 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           |
| 79 | 高田 功          | 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           |
| 80 | 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           |
| 81 | 田島 訓          | 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           |
| 82 | 花島 進          | 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        |
| 83 | 吉田 忠          | 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        |
| 84 | 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        |
| 85 | 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 | 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4        |
| 86 | 斉藤 嗣夫         | 伯東(株)                             | 160    | 東京都新宿区新宿1-1-13          |
| 87 | 村松 康行         | 放射線医学総合研究所                        |        |                         |
| 88 | 小田 寛貴         | 名古屋大学 年代測定資料研究センター                | 464-01 | 愛知県名古屋市千種区不老町           |

タンデム研究会参加者名簿

|    |       |                                      |        |                               |
|----|-------|--------------------------------------|--------|-------------------------------|
| 89 | 小野 直俊 | 名古屋大学大学院 工学研究科材料プロセス工学科専攻 材料反応プロセス講座 | 447    | 愛知県碧南市井口町2-61                 |
| 90 | 山野 哲也 | 名古屋大学大学院 人間情報学研究科物質・生命情報学専攻          | 466    | 愛知県名古屋市昭和区前山町3-32 パティオII328号室 |
| 91 | 磯谷 彰  |                                      | 413-02 | 静岡県伊東市八幡野1084-30              |
| 92 | 関口 弘喜 |                                      | 305    | 茨城県つくば市吾妻2丁目812-5             |

タンデム研究会世話人名簿

|    | 名 前   | 勤 務 先                      | 〒      | 勤 務 先 住 所         |
|----|-------|----------------------------|--------|-------------------|
| 1  | 中村 正信 | 京都大学 理学部 物理学第二教室 原子核物理学研究室 | 606    | 京都府京都市左京区北白川追分町   |
| 2  | 中島 孝夫 | 九州大学 理学部物理原子核実験室           | 812-81 | 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1  |
| 3  | 石原 豊之 | 筑波大学 加速器センター               | 305    | 茨城県つくば市天王台1-1-1   |
| 4  | 小栗 慶之 | 東京工業大学 原子炉工学研究所            | 152    | 東京都目黒区大岡山2-12-1   |
| 5  | 柴田 裕実 | 東京大学 原子力研究総合センター           | 319-11 | 茨城県那珂郡東海村白方白根2-22 |
| 6  | 小林 絃一 | 東京大学原子力総合研究センター            | 113    | 東京都文京区弥生2-11-16   |
| 7  | 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     |
| 8  | 吉田 忠  | 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  |
| 9  | 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 | 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4  |
| 10 | 古野 興平 | 筑波大学加速器センター                | 305    | 茨城県つくば市天王台1-1-1   |
| 11 | 中村 俊夫 | 名古屋大学年代測定資料研究センター          | 464-01 | 愛知県名古屋市千種区不老町     |
| 12 | 森信 俊平 | 九州大学理学部物理原子核実験室            | 812-81 | 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1  |
| 13 | 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   |
| 14 | 柴田 康行 | 国立環境研究所 動態化学研究室            | 305    | 茨城県つくば市小野川16-2    |

【平成10年3月4日編集委員会受理】  
〔国立環境研究所資料 F-113-'98/NIES〕

国立環境研究所タンDEM加速器分析施設レポート No.2

問い合わせ先：化学環境部 柴田 康行  
電 話 0298-50-2450 (ダイヤルイン)

---

平成10年3月31日 発行

発 行：環境庁 国立環境研究所  
〒305-0053 茨城県つくば市小野川16番2

---

印 刷 (会社名) 朝日印刷株式会社  
(住 所) 茨城県下館市中館186