

JAERI-Conf
2000-019



JP0150264



第13回「タンデム加速器及び
その周辺技術の研究会」
報告集

2001年2月

海洋調査研究室

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

第 13 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集

日本原子力研究所むつ事業所施設部
海洋調査研究室

(2000 年 11 月 16 日受理)

第 13 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」は、平成 12 年（2000 年）6 月 8～9 日の 2 日間に渡り、日本原子力研究所むつ事業所海洋調査研究室の主催により青森県むつ市において開催された。タンデム加速器または静電加速器を有する大学、研究所等の 27 機関から約 60 名が参加した。

本研究会の目的は、タンデム加速器または静電加速器施設を対象に、主として現場サイドからの研究発表や話題提供を通じて、参加者相互の情報交換と親睦を図り、関連研究の発展に資することである。研究会は参加者による講演と質疑応答を中心に構成され、加速器質量分析装置（AMS）施設の現状、タンデム加速器・静電加速器施設の現状と研究概要、AMS 応用研究、加速器に係る測定制御技術・応用研究等について、31 件の講演と活発な質疑応答が行われた。

本稿は、本研究会で発表された講演の報告集である。

Proceedings of the 13th Meeting for Tandem Accelerators and Related Techniques

Marine Research Laboratory

Department of Facilities
Mutsu Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Minato-machi, Mutsu-shi, Aomori-ken

(Received November 16, 2000)

The 13th Meeting for Tandem Accelerators and Related Techniques was held on June 8-9, 2000 at Mutsu, Aomori Prefecture, under the auspices of Marine Research Laboratory, Mutsu Establishment, the Japan Atomic Energy Research Institute. About 60 people participated in the meeting from 27 universities and organizations, many of which have a tandem accelerator or an electrostatic accelerator.

The objectives of the meeting are to exchange information on tandem accelerators or electrostatic accelerators by making a presentation on related research and topics, and also to enhance mutual friendship of participants, resulting in the contribution to associated R&D. The meeting mainly consisted of presentations by participants and corresponding Q&A; the present situation on facilities of accelerator mass spectrometers (AMS), operations of and research on tandem accelerators or electrostatic accelerators, applications of AMS, related techniques and applications using accelerators, and so on.

This report summarizes the contents of presentations made in the meeting.

Keywords: Tandem Accelerator, Electrostatic Accelerator, Accelerator Mass Spectrometer (AMS)
 Application of AMS

目 次

はじめに.....	1
-----------	---

1 施設報告 (AMS)

1-1 NIES-TERRA (国立環境研究所加速器分析施設) の現状	2
米田 穣、柴田康行、田中 敦、植弘崇嗣、森田昌敏 (国立環境研究所) 内田昌男 (海洋科学技術センター)、廣田正史 (環境研究センター)	
1-2 名古屋大学タンデトロン1号機による ¹⁴ C測定の現状と ¹⁰ Be測定計画	6
中村俊夫、小田寛貴、池田晃子、丹生越子 (名古屋大学 年代測定総合研究センター)	
1-3 名古屋大学タンデトロン2号機の現状	11
丹生越子、中村俊夫、小田寛貴、池田晃子、太田友子 (名古屋大学 年代測定総合研究センター) 南 雅代 (名古屋大学大学院 理学研究科)	
1-4 東濃地科学センターにおけるタンデム型加速器の現状	15
伊藤 茂、徐 勝、阿部雅人、渡辺雅人、有我真希、岩月輝希 (核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 地層科学施設グループ)	
1-5 京大 AMS システムの現状	18
中村正信、田澤雄二、松本 博、高橋清二 (京都大学 理学研究科物理学第2研究室 タンデム加速器グループ) 広瀬昌憲 (京都大学理学部)、荻野晃也 (京都大学工学部)	
1-6 AMS システムの開発	22
御手洗志郎、町田 淳、岩田康直、粒崎善弘、田中勝彦、前田豊和 中島孝夫 (九州大学 理学部)	
1-7 原研むつ・タンデトロン加速器の現状	26
北村敏勝、荒巻能史、水谷義彦、外川織彦 (日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室) 水島俊彦 (日本原子力研究所 大洗研究所) 甲昭二、須藤一彦 (財団法人日本海洋科学振興財団)	

2 施設報告 (現状)

2-1 原研タンデム加速器の現状	30
吉田 忠、神田 将、竹内末広、花島 進、大内 黙、堀江活三 月橋芳廣、阿部新市、石崎伸洋、田山 豪、松田 誠 (日本原子力研究所 東海研究所 物質科学研究部 加速器管理室)	
2-2 東京大学・原子力研究総合センター・重照射研究設備の現状	33
柴田裕実、岩井岳夫、尾亦孝夫 (東京大学 原子力研究総合センター 重照射管理部門)	

2-3 筑波大学加速器センターの現状	36
笹 公和、石井 聰、大島弘行、木村博美、高橋 努、田島義一 大和良広、片渕竜也、小松原哲郎、島 邦博、古野興平 (筑波大学 加速器センター)	
2-4 東大タンデム加速器 MALT の現状	40
松崎浩之、小林紘一、中野忠一郎、春原陽子、山下 博、牧田 肇 堀内一穂 (東京大学 原子力研究総合センター・タンデム加速器研究部門)	
2-5 TIARA 静電加速器の現状	46
高田 功、水橋 清、宇野定則、大越清紀、中嶋佳則、千葉敦也 斎藤勇一、石井保行、酒井卓郎、神谷富裕、田島 訓 (日本原子力研究所 高崎研究所 イオン加速器管理課)	
2-6 重イオンビームプローブ (HIBP) の開発と 3 MeV タンデム加速器	50
西澤章光、浜田泰司、川澄義明 (文部省 核融合科学研究所)	
2-7 福井県若狭湾エネルギー研究センターの現状	54
羽鳥 聰、伊藤慶文、石神龍哉、安田啓介、猪股 亨、丸山忠司 池澤一浩、畠下昌範、高城啓一、山本和高、福田茂一、久米 恭 鍵谷 豪、土手雅人、山田政信、山田裕章、大谷暢夫、富永 恭 福本貞義、近藤道也 (財団法人 若狭湾エネルギー研究センター)	
2-8 1.7 MeV タンデム加速器 + 1.0 MeV シングルエンド加速器からなる DuET の現状報告	63
神保光一、加藤雄大、香山 晃 (京都大学 エネルギー理工学研究所)	
2-9 九大加速器の現状	65
御手洗志郎、前田豊和、古賀義博、池田伸夫、森川恒安、相良建至 杉光 強、郷農靖之、森信俊平、中島孝夫 (九州大学 理学部)	
2-10 東工大タンデム加速器による核融合・環境測定研究	69
小栗慶之、長谷川純、福田一志、小川雅生 (東京工業大学 原子炉工学研究所)	

3 測定技術・応用研究 (I)

3-1 西部北太平洋における $\Delta^{14}\text{C}$ の分布と人為起源炭素の追跡	73
荒巻能史、外川織彦 (日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室) 渡邊修一、角皆静男 (北海道大学大学院 地球環境科学研究科) 久慈智幸 (財団法人日本海洋科学振興財団) 水島俊彦 (日本原子力研究所 大洗研究所)	
3-2 分取キャピラリーガスクロマトグラフ (PCGC) システムを用いた 堆積物中個別有機化合物の放射性炭素年代決定	76
内田昌男 (海洋科学技術センター 海洋観測研究部) 柴田康行 (国立環境研究所)、河村公隆 (北海道大学 低温科学研究所) 廣田正史 (環境研究センター) 米田 穂、向井人史、田中 敦、植弘崇嗣、森田昌敏 (国立環境研究所)	

3-3 マイクロ PIXE による 2 次元元素分析システムの開発	80
酒井卓郎、及川将一、神谷富裕（日本原子力研究所 高崎研究所）	
佐藤隆博、杉本明日香、石井慶造（東北大学工学部）	
3-4 名工研タンデム加速器を用いた PDMS	84
溝田武志、中尾節男、丹羽博昭、齋藤和雄	
（名古屋工業技術研究所 融合材料部 ビーム工学研究室）	

4 測定技術・応用研究（II）

4-1 最先端半導体素子の新たなシングルイベント現象	
—高集積メモリの充電型マルチピットアップセット—	86
楳原亜紀子、新藤浩之、根本規生、久保山智司、松田純夫	
（宇宙開発事業団 技術研究本部 電子情報系技術研究部）	
大島 武、平尾敏雄、伊藤久義（日本原子力研究所 高崎研究所）	
4-2 最近のシングルイベント研究について—新たな測定手法の開発—	90
平尾敏雄、Jamie S.Laird、伊藤久義	
（日本原子力研究所 高崎研究所 材料開発部 技術開発課）	
森 英喜、小野田忍（東海大学工学研究科）	

5 測定技術・応用研究（III）

5-1 MeV クラスターイオン開発と照射効果	93
斎藤勇一、水橋 清、田島 訓、荒川和夫	
（日本原子力研究所 高崎研究所 ビーム技術開発室）	
平田浩一、小林慶規（物質工学工業技術研究所）	
5-2 MALT のイオン源特性 その 1	97
中野忠一郎、小林紘一、松崎浩之、春原陽子	
（東京大学 原子力研究総合センター タンデム加速器研究部門）	
5-3 He 負イオン源の開発	101
大塚道夫、中村 真、鈴木洋三	
（日立製作所 電力・電機グループ 原子力事業部 新事業開発本部）	
雨宮健介、田中正信、竹内一浩、登木口克巳、佐藤 忠	
（日立製作所電力・電機グループ 電力・電機開発研究所）	

6 測定技術・応用研究（IV）

6-1 原研（東海）タンデム・ブースターのビーム増強化	105
竹内末広、松田 誠、吉田 忠	
（日本原子力研究所 東海研究所 物質科学研究部 加速器管理室）	
6-2 原研タンデム入射ライン用のビーム診断装置の基本設計と新しい静電光学 エレメントの提案	109
花島 進（日本原子力研究所 東海研究所 加速器管理室）	

6-3 イオンマイクロビームを用いた半導体デバイスの放射線損傷	111
西島俊二（電子技術総合研究所 量子放射部）	
6-4 1 MW 超伝導リニアックと高出力電子銃	115
峰原英介（日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター 自由電子レーザー研究グループ）	
6-5 超マイクロイオンビーム形成技術の開発Ⅱ	117
石井保行、磯矢 彰、荒川和夫 （日本原子力研究所 高崎研究所 ビーム技術開発室）	
田中隆一（ビームオペレーション株）	
おわりに	121
付録 1 第13回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」参加者名簿	122
付録 2 「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」世話人名簿	124
付録 3 「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」主催機関一覧	125
付録 4 第13回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」開催風景	126

はじめに

「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」は、東京工業大学にタンデム加速器が設置された昭和 63 年（1988 年）に、東京工業大学と日本原子力研究所が共催したセミナーが始まりである。タンデム加速器または静電加速器施設を対象に、主として現場サイドからの研究発表や話題提供を通じて、参加者相互の情報交換と親睦を図り、関連研究の発展に資することを目的に年々発展してきている。なお、本研究会はタンデム加速器または静電加速器施設を所有する大学や研究機関から選出された世話人の協議によって運営されている。

第 13 回研究会は、日本原子力研究所むつ事業所施設部海洋調査研究室の主催により平成 12 年（2000 年）6 月 8～9 日の 2 日間に渡り、青森県むつ市のプラザホテル“むつ”プラザホールを会場として、大学、研究所、企業等の 27 機関から約 60 名が参加して開催された。申込みのあつた講演を施設報告と測定技術・応用研究の 2 つの主題に分け、さらにそれらを 6 つのセッションに分割して、加速器質量分析装置（AMS）施設の現状、タンデム加速器・静電加速器施設の現状と研究概要、AMS 応用研究、加速器に係る測定制御技術・応用研究等について、31 件の講演と活発な質疑応答が行われた。また、主催機関が所有する加速器施設等の見学会も重要なテーマであり、今回は休憩時間を利用して、むつ事業所に設置された加速器質量分析装置（タンデットロン）を中心に試料前処理装置等の施設見学会を開催した。

AMS 施設の現状では、ガスクロマトグラフを用いた極微量試料の測定、 ^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 等の ^{14}C 以外の元素測定のための技術開発や研究、装置の運転状況、 ^{14}C 測定精度など施設の現状について報告された。タンデム加速器、静電加速器等を有する各大学、研究機関等から精密測定を目指した測定・制御設備の改良、新たなビーム利用の展開について報告されたが、一部の施設では設置から十数年を経過し、運営費の確保が難しく加速器施設の運転に大きな影響を与えつつあることなど新たな問題が明らかにされた。また、AMS 応用研究では、核実験開始以降の大気中二酸化炭素の中層水への積み込みや堆積物有機化合物の放射性炭素年代に関する最近の研究成果について報告された。

本報告書は、研究会における講演内容をまとめたものである。



JP0150265

JAERI-Conf 2000-019

1 施設報告 (AMS)

1-1 NIES-TERRA (国立環境研究所加速器分析施設) の現状

米田 穂、柴田康行、田中 敦、内田昌男⁽¹⁾、
廣田正史⁽²⁾、植弘崇嗣、森田昌敏

国立環境研、(1)海洋科学技術セ、(2)環境研究セ

1. はじめに

昨年度の第 12 回研究会より約 1 年間に国立環境研究所加速器質量分析施設 (NIES-TERRA) ではハードウェアに関する大幅な改良等は実施せず、加速器質量分析法 (AMS) による応用研究を中心に安定したルーティン測定を目標として運転作業を実施した。その結果、環境試料をはじめとして、共同研究による地形学、地質学、土壤学、海洋学、考古学、人類学など多岐にわたる分野の実試料の測定を行い、応用分野においていくつかの新知見を得た。AMS で中心的に測定している放射性炭素 (¹⁴C) の場合、昨年度は標準試料と未知試料をあわせ約 600 検体を測定した。本報告ではその研究の幾つかの概略を紹介する。また、¹⁴C 測定に關係して、分取ガスクロマトグラフ (PCGC) による前処理など先端的な応用研究で強い要請のある、極微量試料による測定を実現するため、新たな前処理システムを設計し、その性能テストを開始した。

¹⁴C 以外の核種については ¹⁰Be および ²⁶Al の AMS 測定について基礎的な条件検討を行ってきたが、本年度はその結果を踏まえ実試料の分析を実施した。今まで行ってきた前処理および測定条件の検討では妨害因子を除去し十分なカウント数を得るのに限界があり、より高精度の測定を実施するために検出部をはじめとするハード面での改良について検討を開始した。

2. 運転状況

¹⁴C 測定については近年にいたり一定レベルの精度で定常的な試料測定を行うことが可能となつたが、加速器本体は 1995 年の着工以来すでに 2 万 3 千時間を越える運転がなされてい

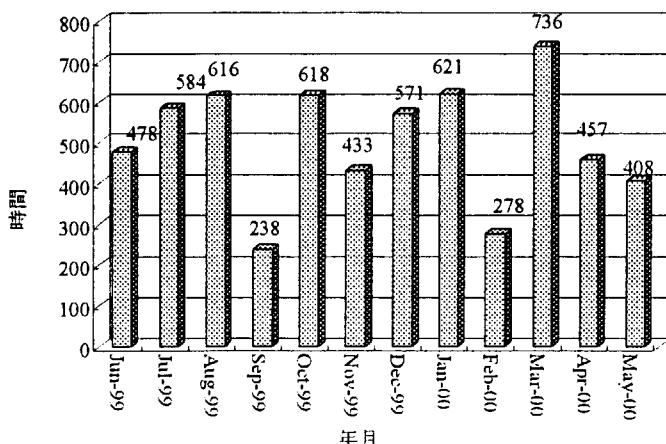


図 1. 月別チェーン駆動時間.

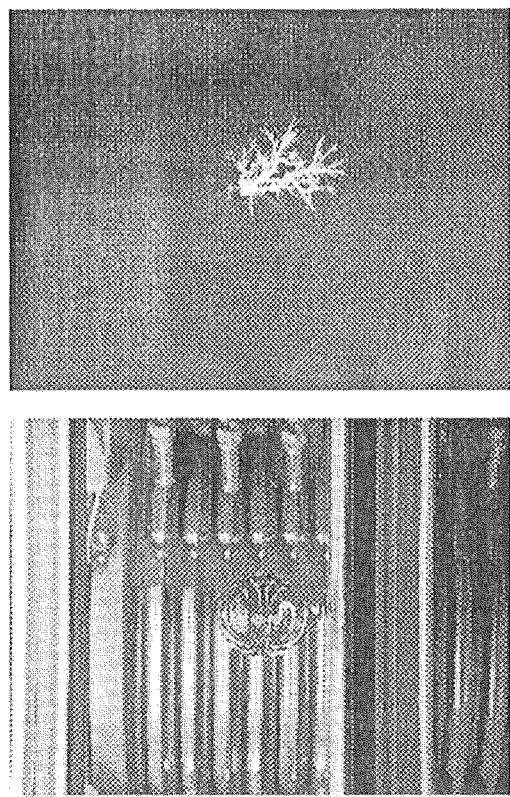


図2. ルーサイト上の樹状スパーク
痕（上）と研磨部分の側面観（下）

3. 試料測定

昨年度は¹⁴Cを中心として、²⁶Alおよび¹⁰Beでも実試料の測定を実施した²⁾。昨年度1年間で¹⁴Cについては約600試料の分析を行った。その内容を表1と図3に示す。通常、¹⁴Cの測定にはNISTが発行している標準物質SRM-4990C(HOxII)とIAEA-C6(ANU sucrose)を使用しており、さらに試料の想定される年代にあわせて他の標準物質を同時に測定することもある。昨年の分析では全体の47%が標準物質の測定に当たられたが、これには微量サンプルなど前処理過程の実験に伴うものも含まれている。

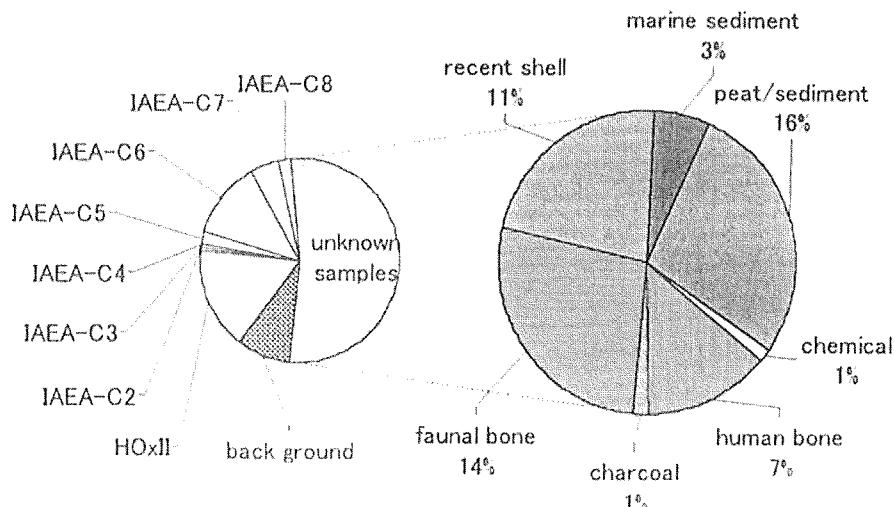


図3. 1999年度にNIES-TERRAで測定された¹⁴Cデータの内訳。

る¹⁾。昨年度も加速器を中心に何箇所か小規模なトラブルが発生した。とくにGVM駆動モーター、ローテーティング・シャフト軸受け、チェーン駆動モーターベアリングなど加速器内の故障が頻発した。それらのトラブルのため、昨年度は加速器タンクを計6回にわたって開放することとなつた。2月には、加速管を支持しているルーサイトにツリー状のスパーク痕が認められたため、周囲を研磨した（図2）。2000年7月現在、周辺にスパークがあった形跡は認められていない。

加速器タンク以外では、コンソールに設置されたアサイナブル・コントローラー、分析電磁石(BM03-1)の電源、磁場四重極レンズ(MQL4-2)の電源およびコントロールモジュール、固体イオン源アイオナイザーのヒーター部などが故障したがいずれも部品交換などで対処可能であった。

表1. 1999年度に NIES-TERRA で
測定された ^{14}C データの内訳。

unknown	318	53%
BKG	54	9%
HOxII	97	16%
IAEA-C2	3	0%
IAEA-C3	4	1%
IAEA-C4	0	0%
IAEA-C5	11	2%
IAEA-C6	75	12%
IAEA-C7	27	4%
IAEA-C8	13	2%

実試料としては、日本列島沿岸における「海洋リザーバ効果」の評価に関する研究で、近年の貝殻試料³⁾および遺跡から出土した動物骨を数多く測定した。これらは、ともに海水の溶存無機炭素 (DIC) の ^{14}C レベルを評価することを目的とした研究である。DIC における ^{14}C 濃度はもともと大気よりも低いため、海水の見かけの ^{14}C 年代は平均で 400 年ほど古くなることが知られている。また海域によっては深層から古い海水が湧昇している影響を受けるため、さらに古い年代を示す可能性がある。この地域毎の補正値 (ΔR 値) は、貝殻や有孔虫殻などの海産試料における正確な ^{14}C 年代を決定するために、あるいは ^{14}C をトレーサーとして海水の動きを調べるために基礎的な情報として非常に重要であるが、日本近海については系統的な研究がなされていなかった。今回、北海道の貝塚遺跡から出土したシカとオットセイの骨で放射性炭素年代測定を実施したところ、約 750 年という年代の差が確認され、 ΔR 値として約 380 年に相当する地域的な補正が必要であることが確認された⁴⁾。

また、筑波大学、海洋科学技術センター、日本大学、静岡県立大学などとの共同研究として、海洋堆積物、湖沼堆積物、海水溶存無機炭素などの放射性炭素年代測定を実施した。中国科学院との共同研究では、ピート堆積物から古環境変遷を復元するために堆積物の ^{14}C 年代を決定している。さらにより正確な年代を与えるために、ピート堆積物を化学的にいくつかの分画に分離し、それぞれの分画が与える ^{14}C 年代を検討することによって、堆積物における続成作用の影響を検討している⁵⁾

4.まとめと今後の展望

以上で紹介したように加速器の運転状況は比較的順調であり、連続的な高精度測定が可能となっている。年間 600 試料という分析数は前処理作業が律速段階となっているため、前処理の迅速化・自動化を進める方向で検討を行っている。具体的には、元素分析計を応用した試料燃焼・二酸化炭素精製についての予備実験を開始した。また、PCGC を応用した分子レベルの分離・精製技術については、海洋堆積物試料を用いた予備実験を開始し⁶⁾、実試料から得た脂肪酸等の放射性炭素年代を比較検討している^{7,8)}。今後、精度向上をはかることによって分子種毎の物質循環などを明らかにすることが可能であり、様々な分野での応用が期待される。しかし、その実現には特に微量試料における高精度分析が不可欠であり、新しい微量試料専用のグラファイト反応容器の作成など、低バックグランド、高回収率の前処理システムの構築を計画している。同時に、気体イオン源を利用した微量試料の測定についてもビール会社から購入した modern CO_2 を用いて $0.1\mu\text{g}$ オーダーでの検出に成功している¹¹⁾。今後、実試料への応用に向け、精度向上、効率的な測定方法を確立する計画である。

参考文献

- 1) Tanaka, A., M. Yoneda, M. Uchida, T. Uehiro, Y. Shibata, and M. Morita (in press) Recent advances in ^{14}C measurement at NIES-TERRA. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B.
- 2) Shibata, Y., A. Tanaka, M. Yoneda, H. Kume, T. Uehiro, T. Kawai, M. Morita, and K. Kobayashi (in press) ^{10}Be - ^{26}Al method for age determination of sediment-core samples from Lake Baikal. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B.
- 3) Yoneda, M., H. Kitagawa, J. van der Plicht, M. Uchida, A. Tanaka, T. Uehiro, Y. Shibata, M. Morita, and T. Ohno (in press) Pre-bomb marine reservoir ages in the western North Pacific: preliminary result on Kyoto University collection. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B.
- 4) Yoneda, M., M. Hirota, M. Uchida, K. Uzawa, A. Tanaka, Y. Shibata, and M. Morita (2000) Marine reservoir effect in the western North Pacific observed in archaeological fauna. Presentation at 17th International Radiocarbon Conference, Jerusalem.
- 5) Hirota, M., Y. Shibata, M. Uchida, M. Yoneda, H. Yetang, Q. Lin, Z. Yiqiang, H. Mukai, A. Tanaka, T. Uchida, and M. Morita. (2000) Comparison between the radiocarbon ages of various components from peat sediments. Presentation at 17th International Radiocarbon Conference, Jerusalem.
- 6) Uchida, M., Y. Shibata, K. Minoura, K. Kawamura, M. Yoneda, H. Mukai, A. Tanaka, T. Uehiro, and M. Morita (in press) Preparation for radiocarbon analysis of individual organic compounds from sediments using preparative capillary gas chromatography (PCGC) at NIES-TERRA. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B.
- 7) Uchida, M., Y. Shibata, K. Kawamura, Y. Kumamoto, M. Yoneda, M. Hirota, H. Mukai, A. Tanaka, and M. Morita (2000) Compound-specific radiocarbon ages of fatty acids from bathyal sediments in the western North Pacific. Presentation at 17th International Radiocarbon Conference, Jerusalem.
- 8) 内田昌男・柴田康行・河村公隆・米田穣・向井人史・田中敦・廣田正史・植弘崇嗣・森田昌敏 (2000) 分取キャピラリーガスクロマトグラフ (PCGC) システムを用いた堆積物中個別有機化合物の放射性炭素年代決定. 本巻.



JP0150266

JAERI-Conf 2000-019

1-2 名古屋大学タンデトロン1号機による¹⁴C測定の現状と¹⁰Be測定計画

中村俊夫・小田寛貴・池田晃子・丹生越子

名古屋大学年代測定総合研究センター
〒464-8602 名古屋市千種区不老町
Tel:052-789-3082, Fax:052-789-3092
中村 : e-mail: nakamura@nendai.nagoya-u.ac.jp
<http://www.nendai.nagoya-u.ac.jp>

1. はじめに

名古屋大学に米国 General Ionex 社製のタンデトロン加速器質量分析（名古屋大学加速器年代測定装置1号機）が1982年3月に導入されて18年が経過した。この間、¹⁴Cを化学トレーサーとした環境¹⁴C濃度分布に関する研究及びさまざまな環境試料の¹⁴C年代測定に基づく研究に利用してきた。1999年末までの測定数は8,567個である。タンデトロン分析計は、学内共同利用機器として研究・教育に利用され、また、国内や諸外国の研究者の共同研究の場としても盛んに利用されている。現在までの共同利用研究として、¹⁴C年代測定では、地質学、堆積学、古環境学、海洋学、地震学、活断層科学、雪氷学、水理学、考古学、人類学、文化財科学などの分野で、また環境¹⁴C濃度測定では、地球化学、環境科学、海洋科学、木材科学、保健物理学、食物科学などきわめて幅広い分野で利用されている。これらの研究成果は、名古屋大学加速器質量分析計業績報告書I～XI(1989, 1991～2000)で報告されている。

本研究会で丹生ほか(2000)から報告されているように、1996-1997年に導入された名古屋大学加速器年代測定装置2号機は、1999年11月頃から、まだマイナーな故障は続出するものの稼働している。これまでストックしてあった試料のうち、正確度がそれほど必要とされない試料について測定を進めている。これに応じて2号機を¹⁴C測定専用として、GIC社製タンデトロン加速器質量分析計1号機を¹⁰Be測定に切り替えて用いるための準備を進めている。

本研究会では、名大タンデトロン1号機の昨年の使用実績と¹⁰Be測定の準備状況を報告する。

2. 年代測定総合研究センターの発足

平成2年度に設置された名古屋大学年代測定資料研究センターが、本年（平成12年）3月末に10年の时限を迎える、平成12年度から、新たに年代測定総合研究センターとして生まれ変わった。当センターは、2台のタンデトロン加速器質量分析計（加速器年代測定装置）を所有するユニークな研究機関である。さらに、ウラン-トリウム-鉛の壊変系を利用したChemical

Isochron Method(CHIME)年代測定施設と一緒にになって、46億年にわたる地球史のあらゆるイベントを解析することになった。タンデトロン年代研究分野および新年代測定法開発分野の2分野を構成して、ユニークな研究を推進すると共に、幅広い学際的分野で共同利用と共同研究を推進する。

3. 名古屋大学タンデトロン加速器年代測定システム1号機の運転・利用の状況

名古屋大学に1981-1982年に設置されたタンデトロン加速器年代測定システム（加速器質量分析計）1号機を用いた、1999年における¹⁴C年代測定利用について述べる。1999年には、装置の改造はほとんど行っていない。1999年における、装置の修理・保守・点検状況を表1に示す。

表1 1999年度タンデトロン1号機の修理・保守・点検

99/04/09~12	◇イオン源分解掃除. ◇グリッドレンズのメッシュ交換 ◇Cs を 1g 充填
99/04/24	◇高電圧不安定. コントロール回路の点検.
99/05/11	◇測定データの取り込み回路が不良動作. フォトカプラーを交換
99/06/16	◇炭素ビームが弱くなったため、再度イオン源の 分解掃除. Cs を 1g 充填.
99/08/06	◇停電のためにクライオポンプ停止、再生.
99/08/12	◇イオン源再調整.
99/08/13	◇高エネルギー分析部の質量分析電磁石が不安定. ジリジリと変動する.
99/09/0~11	◇高電圧発生回路の故障. コントロール回路の点検.
99/09/24	◇冷却水循環装置の故障. 回路の点検.
99/09/20	◇高電圧側分析電磁石不安定.
99/11/21	◇停電のためにクライオポンプ停止、再生.
99/11/29	◇クライオポンプ保守（業者による消耗部品の交換、 ヘリウムガスの充填).
00/03/14~16	◇イオン源分解掃除, ◇イオナイザーを交換して Cs を 1g 充填, ◇Gridded Einzel lens のステンレスメッシュを交換

¹⁴C濃度測定、¹⁴C年代測定及び分析計の調整のためのテスト測定と¹⁴Cバックグラウンド測定を含めた測定試料総数の積算と、毎年の測定数の変動をそれぞれ図1及び2に示す。1999年は、センター職員の業務がタンデトロン加速器質量分析計2号機の調整や準備に費やされ、この

ため結果的に測定された試料数は減ってしまった。しかし、年末、年始は順調に稼働し、学内・外の学生の卒業論文、修士論文のまとめに大いに役立てられた。本年も順調に稼働している。

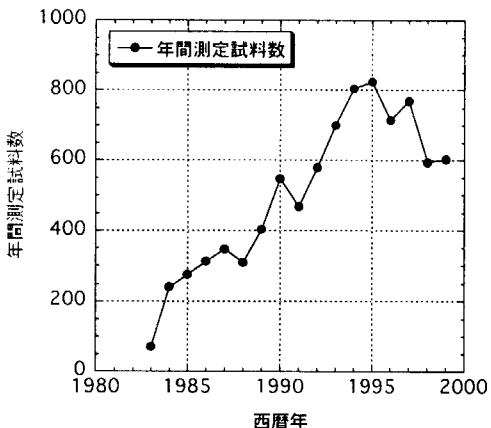


図1 タンデトロン加速器年代測定システム1号機による測定試料の
1999年12月31日現在までの積算総数

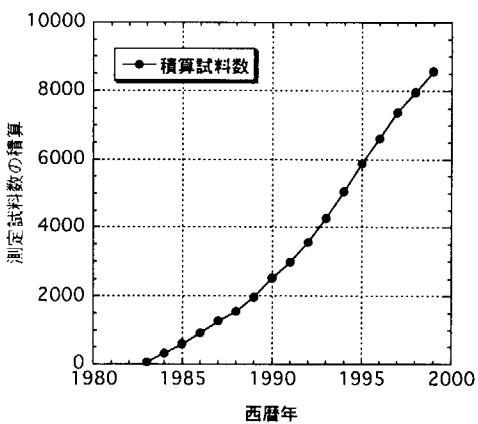


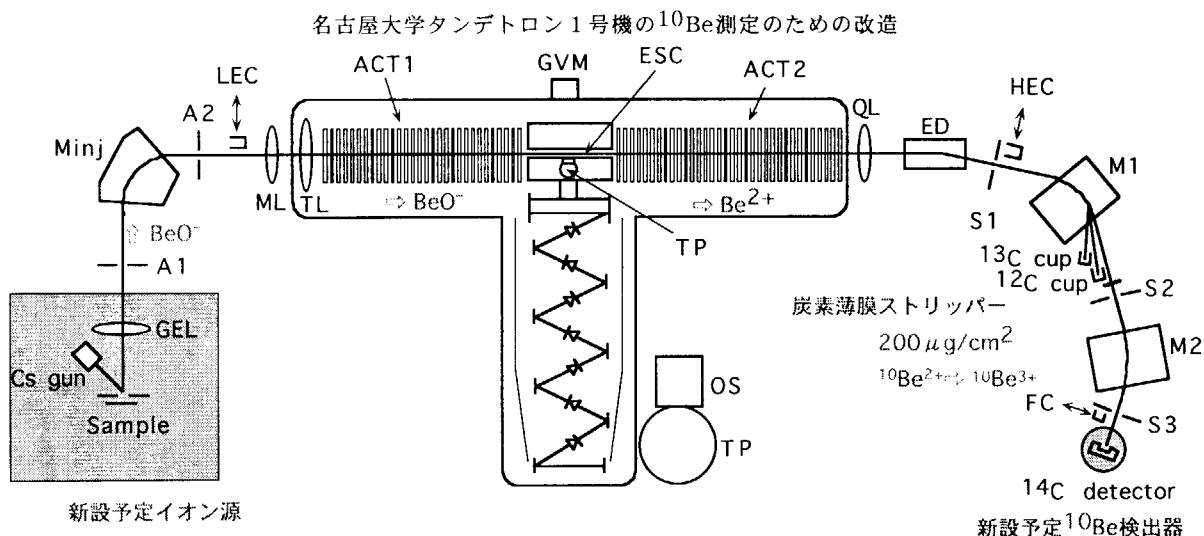
図2 タンデトロン加速器年代測定システム1号機の各年毎の測定試料数。1999年
12月31日現在の集計

5. ^{10}Be 測定計画

タンデトロン加速器質量分析計を用いた ^{10}Be 測定は、フランス国 Gif-sur-Yvette AMS 施設では定常的に実施されており、また、米国アリゾナ大学 AMS 施設でも可能になっている。名古屋大学では、最新型の HVEE タンデトロンを ^{14}C 測定専用として、旧型の GIC タンデトロンを ^{10}Be 測定に充てる為に計画を進めている。

名古屋大学の改造計画では、イオン源を最新の設備に替え、さらに ^{10}Be 検出用の電離箱式の

重イオン検出器を導入する。改造計画の図面を図3に示す。図3に示すように、酸化ベリリウムと銀分を混ぜて圧縮固化したターゲットから Cs スパッタイオン源で BeO⁻イオンを作り、入射電磁石で質量数 25 (⁹Be¹⁶O⁻) と質量数 26 (¹⁰Be¹⁶O⁻ + ⁹Be¹⁷O⁻ + ⁹Be¹⁶OH⁻) のイオンを交互に入射する。BeO をタンデム加速器の初段部で加速し、荷電変換カナル (ESC) にて Ar ガスとの衝突により、BeO 分子をバラバラにすると共に、電子をはぎ取って Be のプラスイオンを作る。これを加速器の後段部で加速し静電デフレクターを用いて 2+の陽イオンを選別する。ターミナル電圧を V (MV) とすると、¹⁰Be²⁺と ⁹Be²⁺の加速された後の運動エネルギーは、それぞれ $(10/26)V + 2V$ および $(9/25)V + 2V$ と得られる。このため、質量数 26 を入射して ¹⁰Be²⁺を選別する場合と、質量数 25 のイオンを入射して ⁹Be²⁺を選別する場合とでは、両者の運動エネルギーが異なるため、デフレクター（幾何学的にイオンの軌道を曲げて、運動エネルギー/電荷 = 一定のイオンを選別する機能を有する）の電圧を変える必要がある。このあと電磁石(M1)で質量分析を行って、ファラディカップにて ⁹Be²⁺を電流値で定量する。一方、¹⁰Be²⁺は M1 の後に設置した炭素薄膜ストリッパー (200 μg/cm² 程度) を用いて、+2 価から+3 価に変えて、電磁石(M2)で質量分析を再度行ったあと、新設する重イオン検出器（電離箱型検出器）を用いて ¹⁰Be³⁺であることを確認したあと、それを計数する。



A1, A2, S1, S2, S3 : beam slit

GEL, ML, TL, QL: electrostatic lens

LEC, HEC, ¹²C cup, ¹³C cup, FC : Faraday cup to measure ion beam current

Cs gun : HICONEX 844 cesium sputter negative ion source with 18 cathodes

Minj, M1, M2: mass-analyzing magnet

ACT1, ACT2 : acceleration tube

GVM : generating volt meter

ESC : Ar-gas charge-exchange canal

TP : turbo molecular pump to condense Ar gas

OS : generator of high frequency AC power (40Khz)

TF : step-up transformer to generate high voltage AC power

ED : 15 degree electrostatic deflector

図3 名古屋大学タンデロン1号機の¹⁰Be測定のための改造

こうして、 $^{10}\text{Be}^{3+}/^{9}\text{Be}^{3+}$ 比を、試料及び標準体について測定して、両者を比較することにより、試料の $^{10}\text{Be}^{3+}/^{9}\text{Be}^{3+}$ 比を求める。試料調製の為に、前もって試料に加えた ^{9}Be キャリヤーの量から、最終的に試料に含まれる ^{10}Be の濃度が算出される。

6. ^{10}Be を用いた研究

^{10}Be は半減期が150万年であり、その生成は、一次宇宙線である荷電粒子（陽子、重水素やヘリウムの原子核、など）と大気中の窒素、酸素との破碎核反応（岩石表面での酸素、珪素からの生成もある）である。

大気上層で生成 ^{10}Be は大気中エアロゾルやダスト、海水・河川水中、堆積物中、溶岩噴出物などに広く分布し、また、In-situ生成により、 ^{10}Be は、地表に露出した岩石表面、隕石表面などで生成される。

^{10}Be を用いた応用研究は、東京大学原子力研究タンデム加速器部門にて精力的に行われている。それらの研究成果をリストアップすると、

- 1) 岩石の露出年代や岩石表面の風化速度の推定
- 2) 火山帯のマグマの起源
- 3) 氷床堆積物や海洋・湖沼底堆積物中 ^{10}Be 濃度と ^{10}Be 生成の経年変動
- 4) 氷床堆積物や海洋・湖沼底堆積物中の ^{10}Be 堆積年代測定
- 5) 隕石の照射年代や落下年代
- 6) ^{10}Be 濃度による土器分類

など、多岐にわたる。名古屋大学タンデトロン1号機の ^{10}Be 測定の改造に成功した暁には、専用機であることを生かして、研究計画を企画したい。

謝辞 東京大学の小林紘一先生、日本大学の永井尚生先生には、東京大学タンデム加速器を用いた ^{10}Be 測定に関してご教授頂いた。また、2台のタンデトロン加速器質量分析計の保守・改造に関する連絡、名古屋大学理学部装置開発室の松下幸司技術官を始めとする皆様にお世話になった。ここに、記して感謝致します。

参考文献

- 1) G.M. Raisbeck, et al (1984) NIM, B5, 175-
- 2) G. M. Raisbeck, et al (1987) NIM, B29, 22-26
- 3) 小林紘一、他 (1999) 第12回タンデム加速器及びその周辺技術の研究報告会、30-38.



JP0150267

JAERI-Conf 2000-019

1-3 名古屋大学タンデトロン2号機の現状

丹生 越子⁽¹⁾、中村 俊夫⁽¹⁾、小田 寛貴⁽¹⁾、池田 晃子⁽¹⁾、太田 友子⁽¹⁾、南 雅代⁽²⁾

(1) : 名古屋大学 年代測定総合研究センター

(2) : 名古屋大学 大学院 理学研究科

1. はじめに

名古屋大学年代測定総合研究センター・タンデトロン2号機（オランダ HVEE 社製 Model 4130-AMS）は、1996年の導入以来、初期不良の改善と調整を重ね、1999年1月末の性能検査では、初期性能としては充分な精度を示した。しかし、その直後に発生した高電圧発生装置の故障のため、1999年2月～10月までのほとんどが、故障による待機・修理期間として費やされた。

2. 運転状況

1999年1月以降の運転状況を表1に示す。相次ぐ故障に伴う長期停止のため、1999年2月～10月までの9ヶ月間で、事実上20日しか測定できなかった。1999年11月からは定常測定に入り、順調に測定数を伸ばすことが出来るようになった。運転可能な期間中は、標準体のテスト測定および、比較的年代の若い試料についての測定が行われた。

3. 故障箇所と修理状況

3-1 高電圧発生装置の故障

高電圧発生装置の故障が1999年1月と7月に発生し、新しい部品を取り寄せて交換するまでに時間が掛かったため、長期間に渡り加速器の運転を完全に停止しなければならなかった。

1. 整流器ダイオードアレイの損傷

アクセプタンステスト直後のスパークをきっかけに、高電圧制御が不安定になり、しばしば前触れもなく落ちるようになった。そこで、高電圧ドライバーの回路調整で対応しようとしたが、しきれず、さらに不安定になり、Q-factorも悪化した。時間が経つにつれ、必要な電圧を保つことが、ごく短時間しか出来なくなったため、タンクを開けて点検した。その結果、整流器ダイオードアレイの内、ダイオード1422個中366個(24%)、抵抗158個中14個(9%)の不良が発見された。HVEE社に相談した結果、ダイオード製造時に一連の製品に欠陥があったとのことで、ダイオードおよび抵抗を全て新品に交換することになった。メーカーの春休み（イースターブラック）の影響で、新しい部品が手に入るまで、1ヶ月待たされた。

2. トランスフォーマコイルの損傷

スパークが頻発した後、高電圧が上がらなくなってしまった。HVEE社からの指示により、Q-factorを測定すると、正常時に比べて、著しく値が低く、トランスフォーマコイルが両方とも損傷して

表1. タンデトロン2号機運転状況(1999/1~2000/5)

	運転内容	故障(停止)期間	停電
1999年1月	↑ 調整(2週間) ↓ アクセプタンス・テスト	・冷却水循環装置停止(2週間)	
1999年2月	↑ ↓ 測定(1週間)	↑ 高電圧発生装置、制御不良 ¹² C chopper 不良 高電圧発生装置停止	
1999年3月	↓	↑ タンク開・ダイオードアレイ点検 タンク開放(8週間)	
1999年4月		↓	
1999年5月		↓ ダイオード・アレイ交換 ・タンク閉・SF6ガス充填	
1999年6月	↑ 調整(4週間) ↓	・クライオ・ポンプ故障 ・エア・コンプレッサ故障	
1999年7月	↑ 測定(4週間) ↓	・スパーク頻発	
1999年8月		↑ 高電圧発生装置(トランスコイル)故障 高電圧発生装置停止(6週間)	
1999年9月		↓ タンク開・コイル交換	
1999年10月	↑ ↓ 調整(6週間)	・マグネット電源故障、真空バルブ故障 ・Q-Shout 電源不良、タンク開(1週間)	
1999年11月	↑ 測定(3週間)	・ターゲット電流制御不良	
1999年12月	↓ 測定(2週間)	・ディテクタファラディカップ制御不良	停電
2000年1月	測定(3週間)		
2000年2月	↓ 測定(2週間)	・ターゲット電流制御不良 ↑ ターゲット操作不良	停電
2000年3月	↓ 測定(3週間)	↓ 新型カルーセル導入	停電
2000年4月	↓ 測定(3週間)	↑ スリット・スタビライザ不調	
2000年5月	↓ 測定(4週間)	↓	

いることが確認された。そこで、新しいコイルを入手した後、タンクを開けて確認すると、コイルは著しく焼け焦げていたため、コイル全体を交換した。これも、HVEE社の夏休みに故障が発生したため、対応までに3週間かかった。

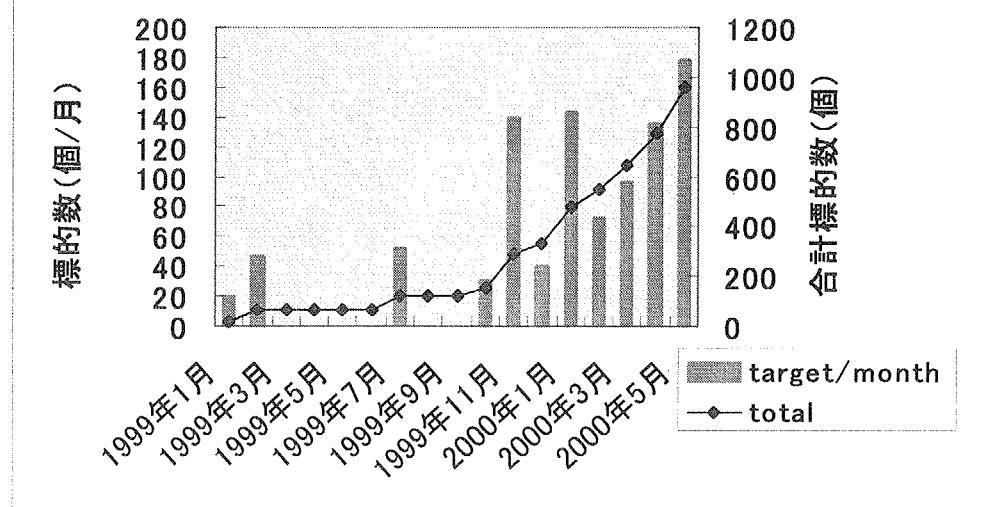
この際、タンク内部を確認すると、全ての部品が、コイルが燃えて出た煙・煤で全て汚染されていたため、タンク内を全面的に清掃した。それでも汚れが残っており、後に、Q-Snout スパークギャップで放電を起こす元になったので、再びタンクを空けて清掃する必要があった。

3-2 その他の故障

その他、期間中に運転停止の原因となった故障の概略を列挙する。

- マグネット電源: 上記の故障による長期運転停止後、マグネット電源への電源供給配線上のブレーカーをONにしたところ、コンダクタ付近から火花と煙が出、再度ブレーカーを入れても立ち上がらなくなってしまった。回路内の Phase Detector が故障していた。Phase Detector を交換し、焼け焦げたコンダクタおよび付近の配線を取り替えた。
- 真空バルブ: これも長期運転停止後、開閉ができなくなった。分解、点検したところ、内部のO-リングが破損していた。半年前にも同じ個所が破損していたので、バルブごと交換した。
- ターゲット電流: しばしば測定中に突然高い電流が流れ、制御不良となつた。ソース内部の汚れ、主に、ターゲットホルダがカルーセルの支持部分によって削られて出来たアルミの屑が、ショートの原因になっていた様子だったので、定期的にソース内部を清掃することで回避するよう努めた。また、ターゲットホルダの外径を小さめに作るようにした。
- ターゲットカルーセル: 各々のターゲットホルダを支える爪とばねが劣化し、ターゲット交換できない個所が発生したため、ボールベアリングで支える形式の新型に交換した。それに伴い、ターゲットホルダの形状も新型カルーセルに適応したものに変えた。
- スリット・スタビライザ: スリットスタビライザのフィードバックが、 $^{13}\text{C}^{3+}$ 電流が 300 nA 以上になる時に効かなくなり、3週間後には完全に制御不能になった。制御回路上の OP amp 2 個を交換し、フィードバック回路のコンデンサを調整した。

図1. タンデトロン2号機による測定標的数



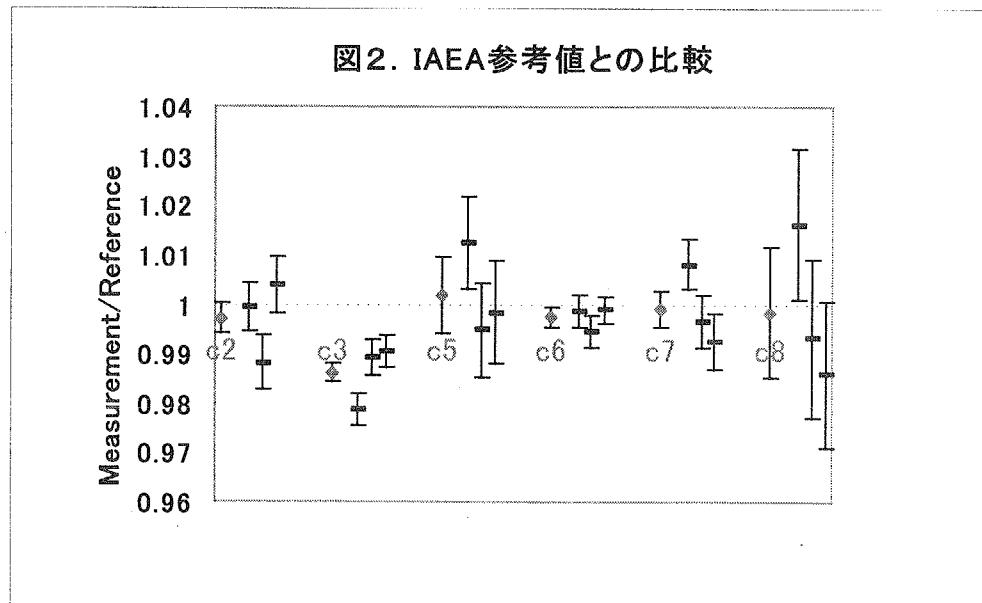
4. 測定状況

1999年1月～2000年5月までの、測定標的数を図1に示す。

定常測定では、一連の試料（約45個）を3回繰り返して測り、立ち上げから終了手続きまで、5日間掛けている。実績としては、1999/11～2000/5の7ヶ月間で、805個の標的を測定した。月当たりに直すと、約115個/月 测定したことになるので、年間では1000～1500個測定できる見積もりになる。

測定の例として、2000年5月に測定した、IAEA標準体の測定結果を図2に示す。

それぞれの試料に対して、丸で示した3回の測定の平均を見ると、誤差の範囲で、2000年時点の値に直した参考値とよく一致している(Measurement/Reference がほぼ1付近になっている)ことが分かる。



5. 今後の予定

今後の課題として、測定データの評価のため、IAEA標準体のような既知試料についての測定を定期的に行い、隨時測定精度を確認できるようにし、かつ、測定器の状況を的確に把握し、不調・故障等を即時把握できるようにしたい。

また、データベースの整備を進め、測定データの充実化を図り、試料採取から年代評価までの一連の情報を最終結果に反映させ、それぞれのデータに裏づけをもたせることで、数字の一人歩きを防ぐよう努めたい。

同時に、定常測定・共同利用に向けた管理体制の整備し、量産への対策も充実させたい。



JP0150268

JAERI-Conf 2000-019

1-4 東濃地科学センターにおけるタンデム型加速器の現状

東濃地科学センター

伊藤 茂、徐 勝、阿部 雅人、渡辺 雅人、有我 真希、岩月 輝希

1 はじめに

東濃地科学センターでは、平成 8 年度に岩石や地下水など天然試料の同位体分析を目的としてタンデム型加速器質量分析計（NEC 製 15SDH-2 ペレトロン）を導入した。図 1 に装置概略図を示す。本件では、平成 11 年 4 月からの運転状況と装置現状について報告する。

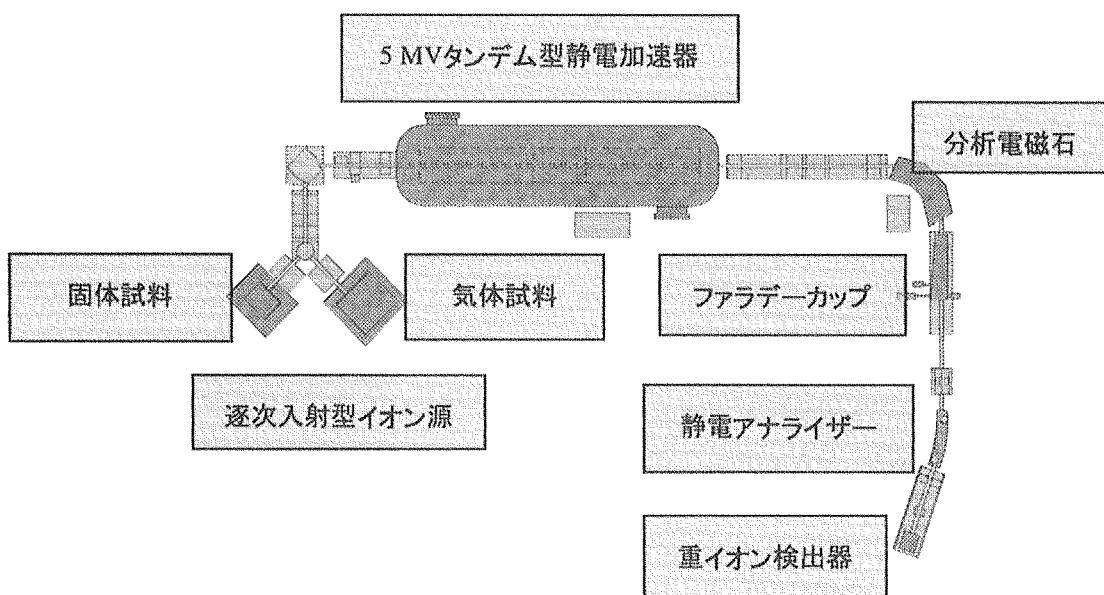


図 1 ペレトロン加速器質量分析計

2 運転状況

現在は固体試料用イオン源により運転しており、平成 11 年 4 月から平成 12 年 1 月までの総ビーム発生時間は 949 時間である（図 2）。試料の前処理効率は週に 40 試料程度であるため、試料測定は週に 1 度、約 26 時間行う。装置定常運転時は月に 100 時間前後運転している。図 3 に平成 11 年 6 月～12 年 4 月の間に測定した試料の内訳を示す。795 試料を測定し、約 1/4 が IAEA 標準試料及び NIST シュウ酸である。CaCO₃ は貝殻試料、BaCO₃, SrCO₃ は地下水試料、CO₂ は気体試料（測定はグラファイト化して固体試料用イオン源により行った）、その他は土壤中の有機物試料である。東濃地科学センターでは平成 11 年 9 月より外部からの受託分析を行っており、昨年度は 77 試料が外部からの受託試料であった。

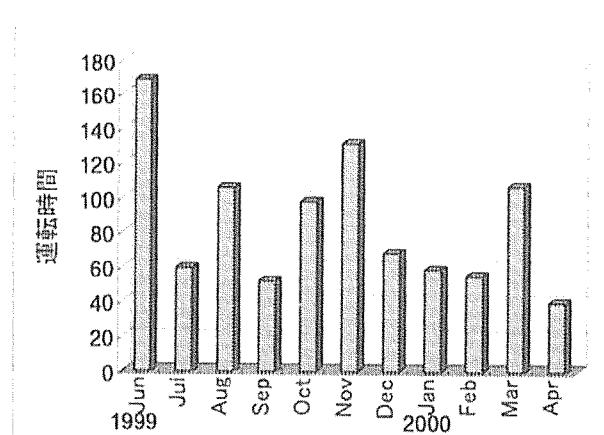


図2 月別ビーム発生時間

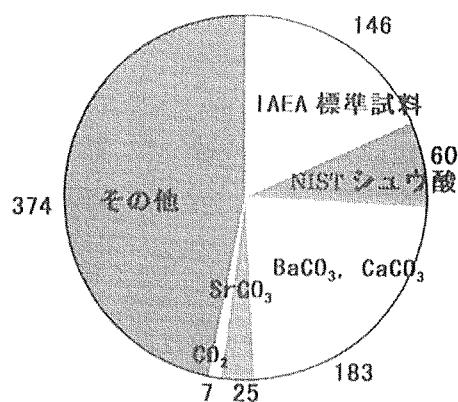


図3 測定試料の種類

3 保守状況

- 1) 平成11年4月にペレットチェーンが切れ、その交換を行った。その後、数回の運転後にターミナル電圧が突然不安定になった。タンク内を調査した結果、スパークによつて低エネルギー側ターミナル付近のアクリル製ルーサイトに破損が発生していた(図4)。この状態ではルーサイト破損部のざらざらした部分にスパークが発生してしまうため、表面を研磨して滑らかにし、同じ個所にスパークが発生しないようにした。この原因としては、チェーン交換時に破損したルーサイト付近のフープが緩み、その緩んだフープとターミナル間でスパークが発生したためと考えられる。今まで修理個所に再度スパークは起こっていない。
- 2) 平成11年7月に、ターミナル電圧が不安定になった。タンクを開けたところ、タンク低エネルギー側のルーサイトを支持している部分に大きな破損が見られた(図5)。また高エネルギー側チェーンの横のアルミバーが2つはずれていた。これは、チェーンが切れた際にアルミバーに当たり、ダメージが有ったものが運転時の振動等で折れたと考えられる。その後、アルミバーの落下によりフープ間がショートし、低エネルギー側のルーサイト支持部にスパークが起ったのではないかと推測される。アルミバーを交換し、ルーサイトは削って滑らかにした。ルーサイト支持部の隙間が均

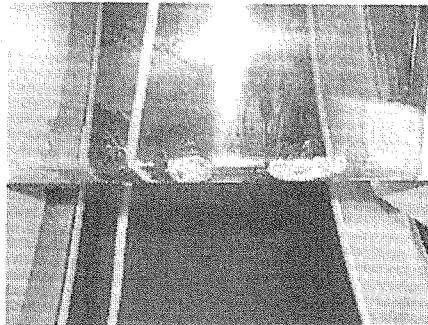


図4 スパークによるルーサイト破損部（ターミナル付近）

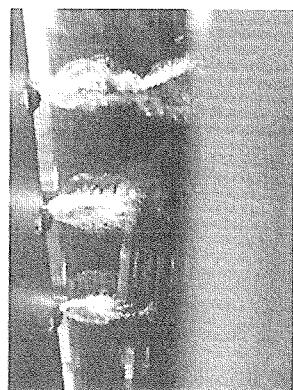


図5 スパークによるルーサイト破損部（低エネルギー側）

一でない事がスパーク発生の一因であるという NEC の判断から、ルーサイト支持部の隙間にアルミのスペーサーを取り付けた。現在まで修理個所に再度スパークは起こっていない。

- 3) 平成 11 年 9 月、ローテーティングシャフトから異音がしたため、タンクを開けたところ、シャフト受けのペアリングの部分でシャフトが削れてガタがある状態であった(図 6)。シャフトの向きを逆にしてペアリングが当たる部分をずらした。現在まで異音等の異常はない。

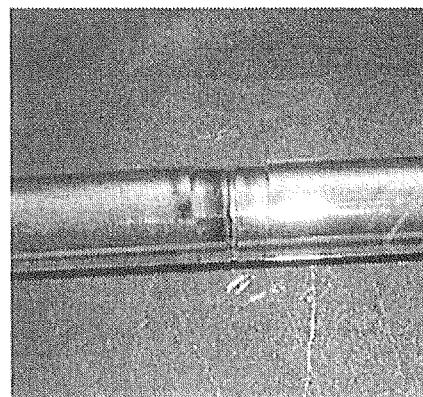


図 6 ローテーティングシャフト破損部

4 気体試料用イオン源

気体試料用イオン源により IAEA 標準試料及び NIST シュウ酸試料の測定を行った(表 1)。解析では NIST シュウ酸を標準試料、IAEA C1 をバックグラウンドとした。IAEA C1 の測定値が固体試料用イオン源では 0.10 pMC 程度なのに比べて、0.19 pMC と少し高い値を示している。IAEA C2, C3, C7 試料は IAEA の標準値よりも低い値が得られた。今回の測定は各試料について 1 つの試料しか測定していないため、標準値とのずれは装置に原因が有るのか試料の前処理段階に原因があったのか特定できない。今後、さらに測定点を増やして測定精度確認を行っていく。

	標準値	測定値
NIST シュウ酸	134.07	134.07 ± 0.74
IAEA C1	0 ± 0.02	0.19 ± 0.02
IAEA C2	41.14 ± 0.03	38.2 ± 0.55
IAEA C3	129.41 ± 0.06	125.25 ± 1.05
IAEA C6	150.61 ± 0.11	150.61 ± 0.89
IAEA C7	49.54 ± 0.13	48.8 ± 0.49
IAEA C8	15.09 ± 0.18	15.01 ± 0.26

表 1 気体試料測定結果

5 まとめ

今回チェーン切断、ルーサイト破損、ローテーティングシャフト破損のトラブルが発生したが、ともに修理を完了し、現在は定常運転を行っている。気体試料用イオン源については IAEA 標準試料と数%のずれが生じているが今回の測定は測定点が少ないとみ、さらに測定点を増やして測定精度確認を行っていく予定である。



JP0150269

JAERI-Conf 2000-019

1-5 京大 AMS システムの現状

中村正信、田澤雄二、松本 博、高橋清二*、広瀬昌憲、（京大理）、
荻野晃也（京大工）

最高ターミナル電圧が 8 MV の京都大学理学部のタンデム加速器において加速器質量分析法 (AMS) により、重い元素の長半減期放射性同位体の超高感度測定を開発している。まず標準技術として ^{14}C 測定を開発した [1, 2]。

1. AMS システム

京大タンデム AMS システムの構成を図 1 に示す。

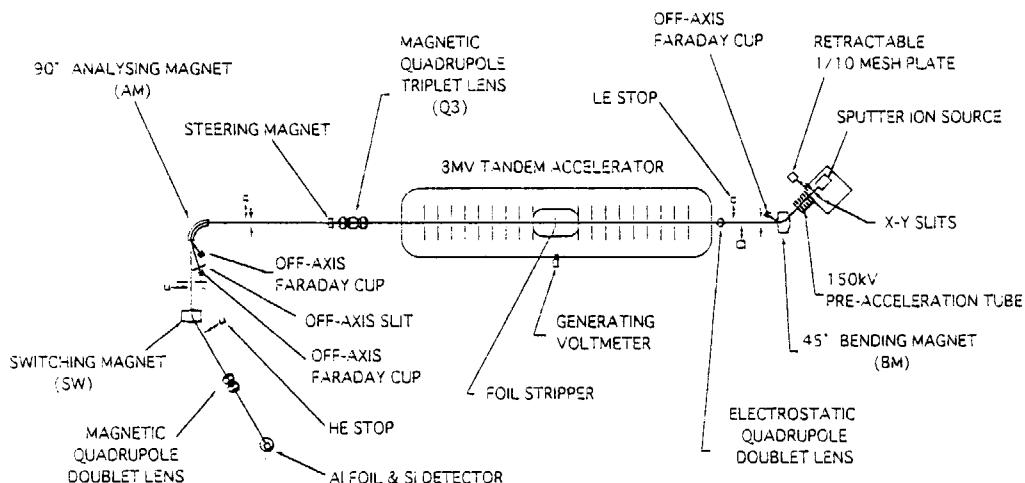


図 1. 京大タンデム AMS システムの構成。

その概要は；多重標的型スパッターイオン源は 5 9 サンプル装着可能で、このサンプル交換の機構を改造することにより安定な運転が可能となる；負イオン源にはスリットを取り付けて入射ビームのエミッタンスを小さくすることにより安定で高いビーム透過率を得る；加速器は $^{14}\text{C}^-$ と同時に入射される $^{13}\text{CH}_-$ ビームがターミナル部で分解してできた $^{13}\text{C}^{4+}$ を分析することによりその高電圧を制御する；検出器系は $^{14}\text{C}^{4+}$ の同重体である $^{14}\text{N}^{4+}$ や $(^{7}\text{Li}_2)^{4+}$ は $3 \mu\text{m}$ の Al フォイルでエネルギーロスさせることにより Si 半導体検出器で分離している。系統的な測定のために入射部電磁石の磁場を変えることにより同位体を逐次入射している。システムの時系列変化を図 2 に示す。

サンプル試料は炭酸ガス化し、精製した後、鉄を触媒として水素により還元してグラファイト化する [3]。

2. 同位体比の決定

$^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$ の比は次の式で計算される：

$$\frac{^{14}C^-}{^{12}C^-} = \frac{\#^{14}C^{4+} \cdot e}{I^{12}C^-} \frac{1}{[^{14}C^{4+} \text{透過率}]} \quad (1)$$

ここで $\#^{14}C^{4+}$ 、 $I^{12}C^-$ は、それぞれ、 $^{14}C^{4+}$ の計数の積分値、 $^{12}C^-$ 電流の積分値であり、 e は素電荷である。 $^{14}C^{4+}$ 透過率に関しては、先ず $^{12}C^{4+}$ と $^{13}C^{4+}$ の透過率を測定し、
[イオン透過率] = [はぎ取り効率] × [イオン光学的透過率]

と定義し、剥ぎ取り効率として文献 [4] の値を用いるとイオン光学的透過率が求まる。この 2 つのイオン光学的透過率から、 $^{14}C^{4+}$ の透過率を推定することが可能である。そこで同位体比の絶対測定ができる。

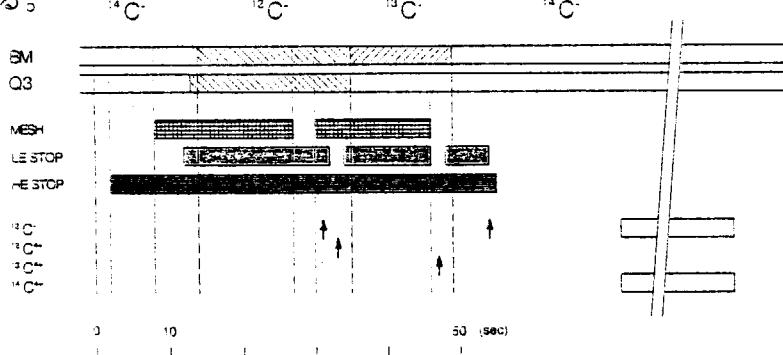


図 2. 逐次入射システム時系列変化。

総合テストとして IAEA C-6 他をグラファイト化したサンプルを用いて ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^{14}C を逐次入射し、 $^{14}C / ^{12}C$ の比を決定した。

イオンの透過率の仮定を確かめるために C-6 試料の測定値を吟味した。 $^{14}C^- / ^{12}C^-$ の比が $^{14}C / ^{12}C$ の比の公称値と等しいと仮定して、1 式を用いて $^{14}C^{4+}$ のイオン光学的透過率を計算し、 $^{12}C^{4+}$ と $^{13}C^{4+}$ のものと比較し、図 3 に示す。 $^{14}C^{4+}$ と $^{13}C^{4+}$ のイオン光学的透過率は確かに等しい。しかし $^{12}C^{4+}$ は系統的に大きくなっている。この理由として次の様に考えられる。 $^{12}C^{4+}$ の透過率測定時には、ビームローディングによる不安定化を避けるために、1/10 メッシュを用いて入射するビーム電流を減衰させている。このメッシュが損傷し、通過した ^{12}C のエミッタスが元より良くなり、従って ^{13}C や ^{14}C より良くなつたためである。

これらのデータの再現性を見ると 1 % 程度の揺らぎがあるが、これは電流測定の揺らぎが原因と考えられる。

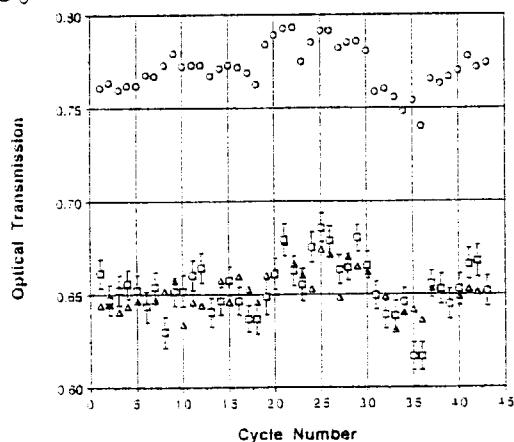


図 3. イオン別の光学的透過率の変化。

○: ^{12}C 、△: ^{13}C 、□: ^{14}C 、

4. バックグラウンド

京大タンデムAMSコースのビームラインに静電分析装置は入っていない。従って多種多量のバックグラウンドイオンが検出器で測定される。測定されたエネルギースペクトルの一部を図4に示す。京大タンデムはAMS専用機では無いので⁷Liイオンを用いる実験が度々ある。その後ではa) にあるように多量のバックグラウンドの(⁷Li₂)⁺⁺が見られる。これはイオン源の分解掃除によりb) の様に除くことが出来る。

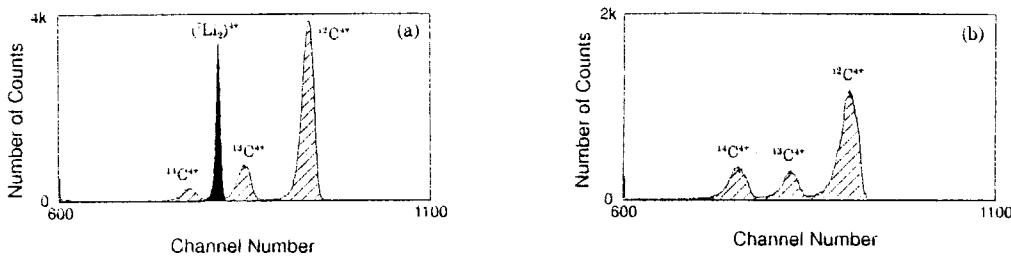


図4. S i 検出器のエネルギースペクトル。a) イオン源掃除前、b) イオン源掃除後。

またエネルギースペクトル全体を図5に示す。図5-aに示すように、3⁺のバックグラウンドが桁違いに多く、これらがS i 検出器を劣化させるので、同重体の分離が困難となる。そこで90度分析電磁石と振り分け電磁石の間に第2番目のストリッパーを取り付けた。その結果は図5-bに示すように、3⁺の強いピークは無くなる。しかし図6-aで示すように、Liのバックグラウンドを除くことが出来ないので、これが多い場合は損傷による分解能の劣化も依然残る。そこで図6-aで示すように5⁺を用いると、剥ぎ取り効率では不利だが圧倒的にきれいなスペクトルが得られる。

4. その他

この1年間のタンデム加速器の運転において、特に大きなトラブルは無かった。高電圧発生時間（チェーン運転時間）は約2500時間とあまり変わっていない。しかし昨年度途中から放射線発生装置の運転時間の定義としては、これまでのチェーン運転時間からビーム加速時間に変更したために、運転時間は減少している。

この間のトラブルとしては、AMSイオン源の冷却に使用している純水（イオン交換水）の問題があった。この水は高電圧部を通過するので水質の劣化がリークや放電を引き起こす。1998年度よりイオン交換樹脂を交換しても抵抗値があまり良くならない状態が起きていた。この原因は有機物であることが判明した。これが一旦発生すると水を交換しても回復せず、パイプ等の交換や薬品洗浄が必要である。処置後ようやく当初の状態に戻った。

5. まとめ

¹⁴Cに関しては逐次入射法により、系統的な測定が可能となった。再現性は1~2%程度良くないが、主な原因は電流測定の揺らぎによる。課題であったバックグラウンドに対しては、第2ストリッパーを取り付けることにより充分に低くすることが出来た。従ってビーム強度の制限が

無くなり、実際の炭素試料の測定の見通しが出来た。

次のステップとして、本来の目的である重い元素の同位体比の超高感度測定に向けて、重イオン検出器系を最適化する必要がある。

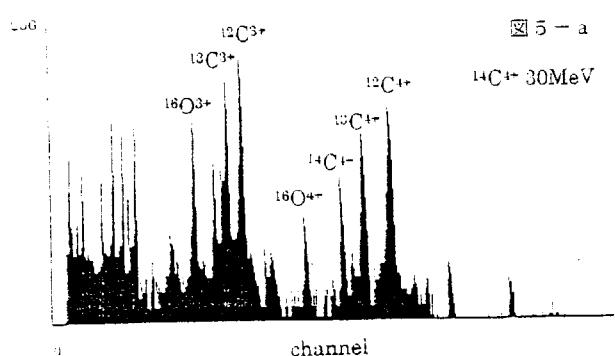


図 5-a

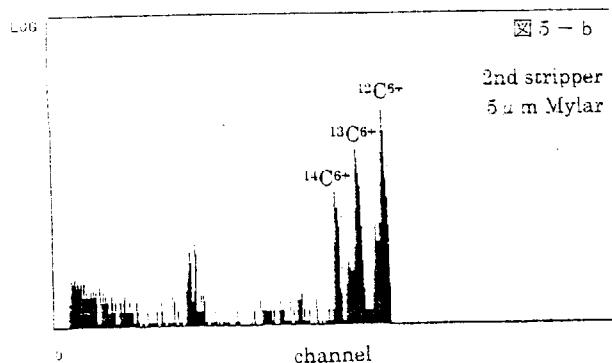
 $^{14}\text{C}^{4+}$ 30MeV

図 5-b

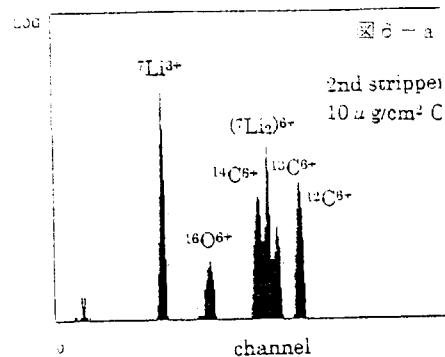
2nd stripper
5 μm Mylar

図 6-a

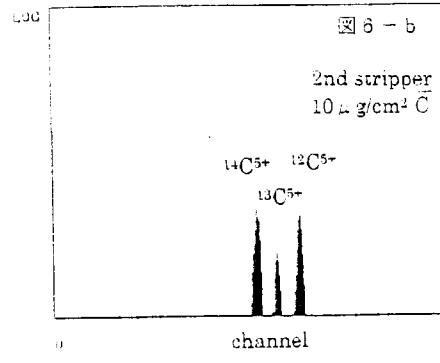
2nd stripper
10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ C

図 6-b

2nd stripper
10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ C

図 5. エネルギースペクトル。

第2ストリッパーの効果。

図 6. エネルギースペクトル。

 $^{14}\text{C}^{5+}$ 測定と $^{14}\text{C}^{4+}$

測定との違い。

参考文献

- [1] M. Nakamura, Y. Tazawa, H. Matsumoto, M. Hirose, K. Ogino, M. Kohno, J. Funaba, Nucl. Instr. and Meth. B 123 (1997) 43.
- [2] 田澤雄二、広瀬昌憲、松本博、中村正信、荻野晃也、
第12回「タンデム加速器及びその周辺技術研究会」報告書、(1999) 81.
- [3] H. Kitagawa, T. Masuzawa, T. Nakamura, E. Matsumoto, Radiocarbon 35 (1993) 295.
- [4] C. Stoller, M. Suter, R. Himmel, G. Bonani, M. Nessi, W. Wolfli,
IEEE Trans. Nucle. Sci. NS-30 (1983) 1074.

* タンデム加速器グループ



JP0150270

JAERI-Conf 2000-019

1-6 AMS システムの開発

九大理 御手洗志郎、町田淳、岩田康直、粒崎喜弘、
田中勝彦、前田豊和、中島孝夫

1. Inverse PIXE 法による ^{36}Cl -AMS

九大の AMS グループは Inverse PIXE 法によるビーム粒子の $K-X$ 線の測定により同重体 ^{36}Cl と ^{36}S の弁別を行い、旧ソ連核実験場の汚染土壌の測定を行った。そのためにタンデム加速器のターミナル電圧の GVM 制御を行った。九大タンデムの制御用フィードバックシステムではコロナは使用されておらず、ダウンチャージを用いて GVM 制御を行った。

この時得られた安定度は 7 MV のタンデム電圧にたいして $\pm 2.5 \text{ kV}$ 程度であった。しかしながら、時々大きくずれるので、我々は GVM で得られた電圧が 7 MV $\pm 2 \text{ kV}$ の時のみデータを取り込んだ。(後書: この研究会の後、GVM 制御の改良に取り組み 3 MV の発生電圧の時に $\pm 0.5 \text{ kV}$ の電圧安定度を得た。かつこの時フィードバックが外れる事はない。)

図1は実験に使用されたチャンバーにおける Si 検出器、Beam viewer および X 線検出器の配置を示し、X 線検出器の部分を拡大した。

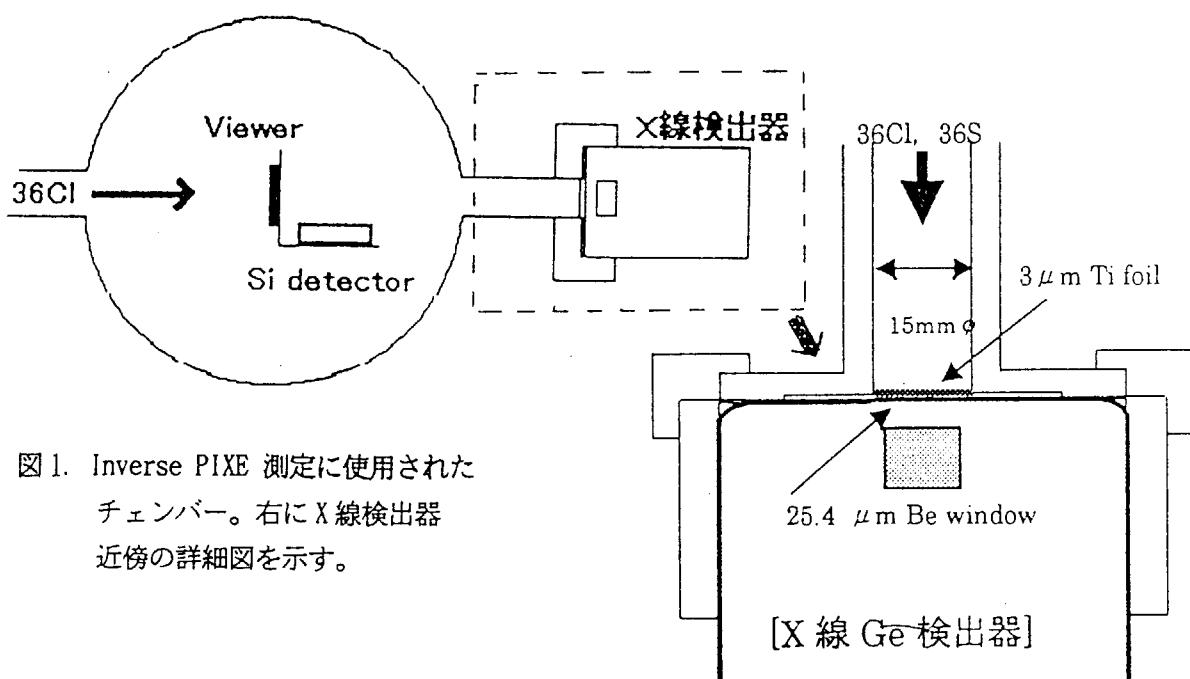


図1. Inverse PIXE 測定に使用された
チャンバー。右に X 線検出器
近傍の詳細図を示す。

56 MeV の入射粒子 ^{36}Cl からの $K-X$ 線を計測する X 線検出器は ORTEC 社製の Ge 検出器 (INGLET-X-11145) であるが、その検出器の大きさは $11 \text{ mm} \phi$ 、厚さ 10 mm である。この測定においては、検出効率を出来るだけ大きくする事が重要なので図に示される様にターゲット物質である $3 \mu\text{m}$ 厚みの Ti フォイルに密着して X 線検出器を設置した。56 MeV の 1 個の Cl イオンが $3 \mu\text{m}$ の Ti フォイルを通過すると 0.3 個の Cl-K-X 線が Ti フォイル表面から発生する事を我々は去年の実験で得ている。Ge 検出器の立体角は 4π の約 19.4% である。また、Ge 検出器の $24.4 \mu\text{m}$ の Be window

に対する 2.623 keV の Cl-K-X 線の透過率は 82.9%である。これらからこの実験での Inverse PIXE で生成される入射粒子の K-X 線を用いた検出効率は 1 個の入射 Cl 粒子当たり、約 4.8%に達する。今回に実験では塩素に対する 10^{-9} 台の存在比の ^{36}Cl を含む汚染土壤を調べた。試料は加えられた Cl により薄められ、実際に測定したのは 10^{-10} のオーダーである。同じ試料を放射化学分析による β 線計数法を用いて計測したが両者は良く一致した。

これらの測定により、Inverse PIXE 法による同重体 ^{36}Cl と ^{36}S を分離同定するのに充分であり、比較的高いビーム・エネルギーを使用すると K-X 線放出の断面積も大きくなる。従って、2keV 以上の K-X 線エネルギーを持つ核種の同定に有効であることが確認された。

2. 飛行時間法を主とする新 AMS システムの試み

九大では GVM 制御によるタンデム電圧の安定化と分析電磁石の高い分析能力を用いた従来の AMS 方式に加えて、飛行時間法を主とする AMS 方式の開発を試みている。ここでは、ビーム・バンチャーとビーム・チョッパーの開発について報告する。

2-1. ビーム・バンチャー

スパッター・イオン源から得られた重イオンビームのパルス化を目指して、タンデムタンクから約 7m の距離の所に図 2 に示すビーム・バンチャーを設置した。ダクトの上に高周波の共振器が 2 台設置された。その 1 台により、周波数 f_0 の正弦波の直線部によりビーム・バンチングを行った。また出来るだけ多くの粒子をバンチするために、別の $2f_0$ の共振周波数をもつ 2 台目のビーム・バンチャーを同時使用する事により、より長い直線近似部を実現するテストがなされた。

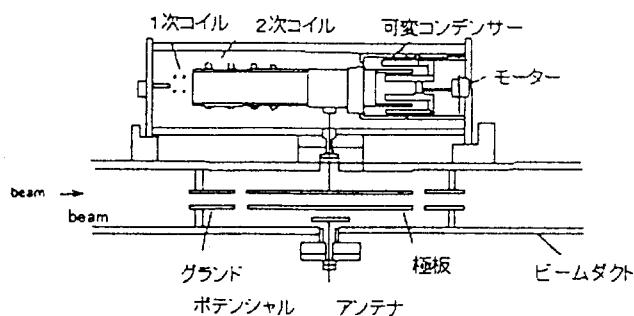
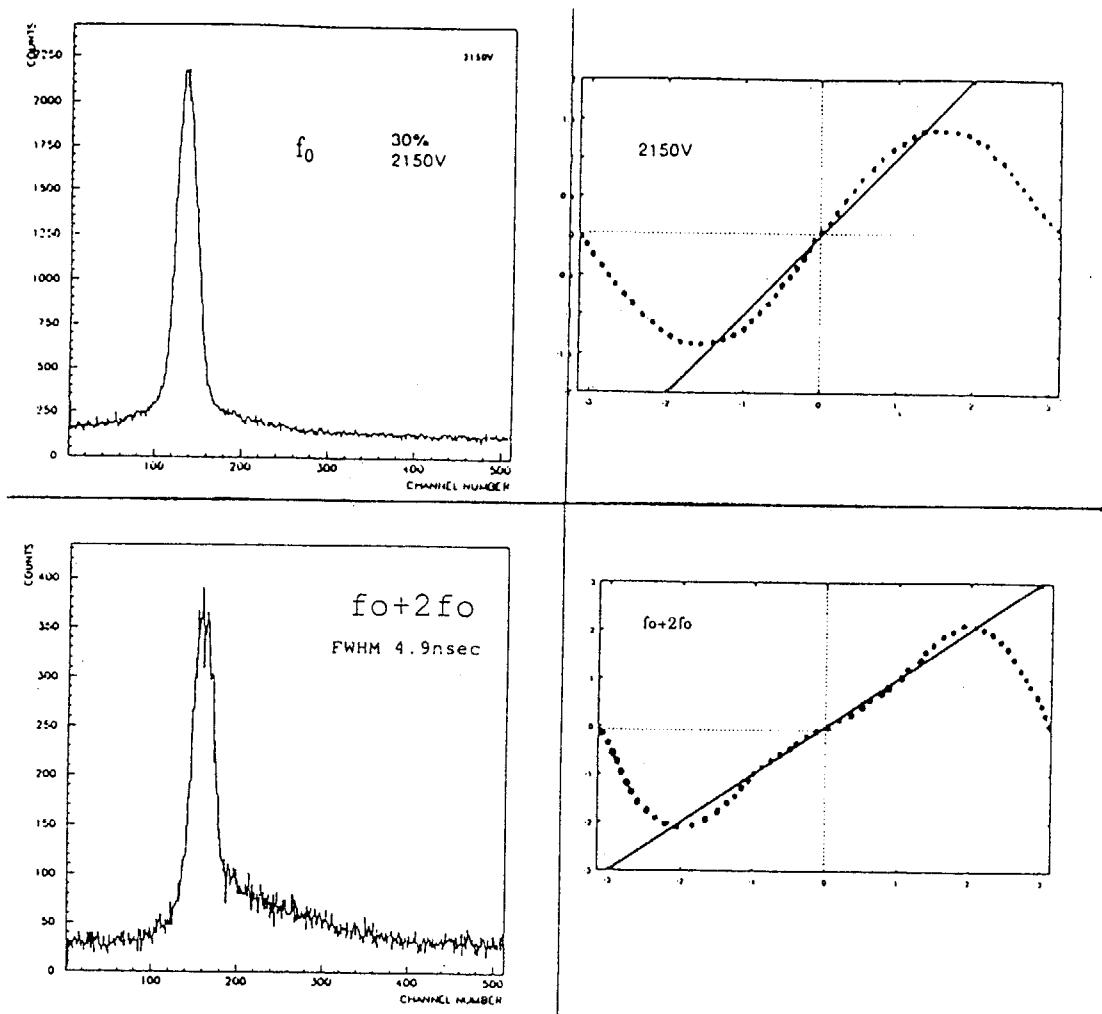


図 2. ビーム・バンチャーに使用された共振器およびビーム・ダクト

それらの測定結果を図 3 に示す。測定は 150keV の予備加速の 160 を用いて、 f_0 バンチャーのみの場合、2150 Volt で 30 %の効率、半値幅 5.7 nsec のスペクトルが得られた。この 160 は 49MeV まで加速された。また、同時にこの状態に $2f_0$ バンチャーを加えてその効果が調べられた。 f_0 のみのバンチングの際にはバックグランドを構成していた粒子成分が、 $2f_0$ を掛けることにより、より中央部に近づいてきているのがわかる。効率は 40 %、半値幅は 4.9nsec まで向上している。ピークの形が左右非対称なのは、 f_0 と $2f_0$ のフェイズが正確に合っていないためで、今後解決しなければならない。

図3. f_0 正弦波および $f_0 + 2f_0$ の2つの正弦波の合成波によるバンチャースペクトル

2-2. ビーム・チョッパー

AMS では目的核種は極端に微量であり、イオン源部の分析マグネットの選別能力不足による他の同位元素等の混ざりこみを出来るだけ減少させる事が肝要である。そのためこのチョッパーはタンデムのストリッパーで電荷分布により多くの異なる速度成分が生ずる前に、特定の質量数を選別するために、入射側の加速管の入り口部に設置された。従って、特定の質量に対応する時間成分のみがタンデムストリッパーを通過できる。

ここでの AMS システムとしてはイオン価数分布による粒子数の減少を避けるために直線コースのみが使用される。具体的には Cl の AMS について考える。ここでは 7 MV のターミナル電圧における 6, 7, 8 倍の 36Cl を同定するように考えてある。質量の選別は飛行時間法によるので、飛行時間を測定すべき粒子数はできるだけ少なくしなければ回路的に困難である。イオン源部の分析電磁石を通過した 35Cl 、 37Cl と 36Cl を早い段階で選別し、 36Cl 以外の粒子を減らす事が肝要である。

150 keV に予備加速された 35Cl 、 36Cl 、 37Cl はビーム・バンチャーにより、パリス化されるがその質量の違いにより、タンデム加速管入り口に到着する間にズレが生ずる。タンデム・タンク内部の加速管入射直前にビーム・チョッパーを設置した。長さ 20 cm、電極間間隔 40 mm のチョッパーに

はタンク内に設置された図4の共振器を用いて、 $f_0/2$ の正弦波が加えられた。その電圧はピックアップにより読み出されている。バンチ化された 36Cl のパルスはチョッパー正弦波がゼロ電位（節）の時、通過するよう調整されている。従って、バンチ化された 35Cl 、 37Cl 成分を含む、他の時間成分の粒子はカーボン・ストリッパー部の枠で除去されることになる。

このチョッパーの初期の動作テストを図5に示す。これらのスペクトルは直流のビームをチョッパーに入射して得られた。正弦波の節での成分のみが残り、その高さは直流ビームの場合と同じであるべきである。しかしながら、図に示されるように、 $f_0/2$ の正弦波の半波長ごとにその形状は異なり、低いバンチャード電圧 (500V) の時はパルスの位置は大きくズれており、そのパルスの大きさは半周期毎に異なる。電圧が高く (2200V) なるとパルス位置は周期的に成ってきているが、そのパルスの大きさは半周期毎の違いがより著しい。また入射直流ビームより著しくそのパルスの高さは小さい。我々はこの原因の究明をおこなった。原因としては高周波の電波がタンデム入り口近傍の静電デフレクタ一部からダクト内へ漏れ込んでいることが判明した。図6はその対策の後、得られたスペクトルである。スペクトルはビームのロスが無く、チョッパー電圧はなお不足している事を示している。

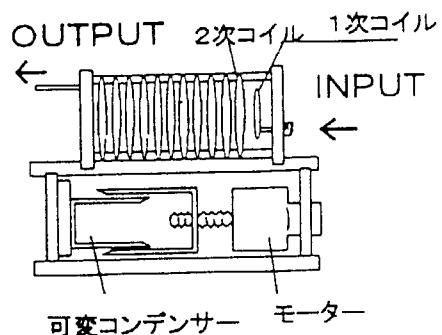


図4. ビームチョッパー用共振器

図5. チョッパー・パルスによるタイム・スペクトル

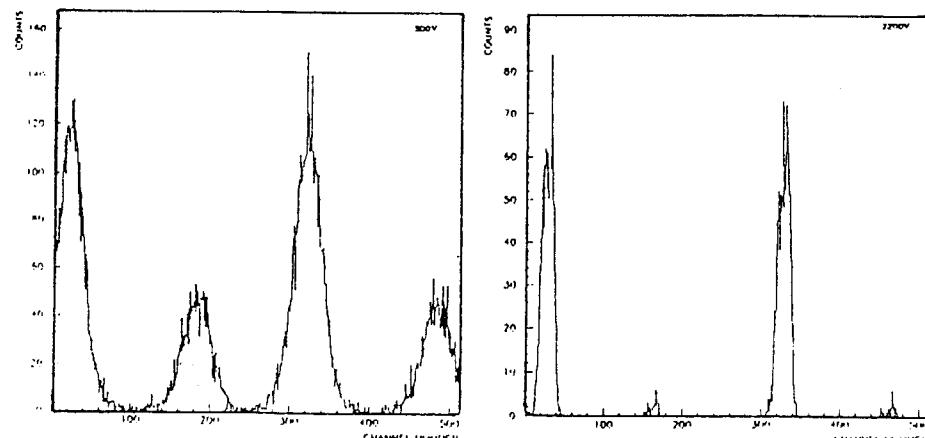
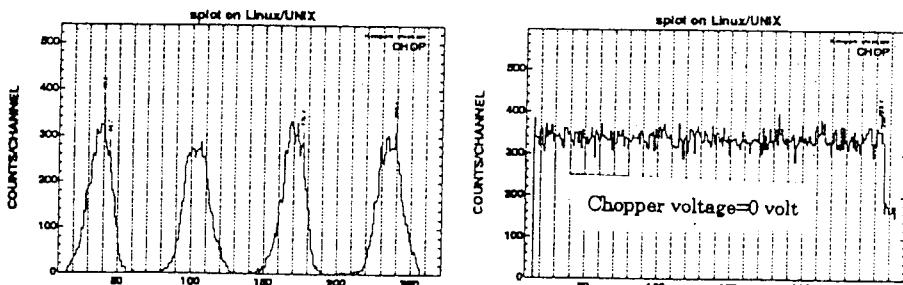


図6. チョッパー・パルスの漏れ込み防止を施す。他は図5と同じ。



1-7 原研むつ・タンデトロン加速器の現状

北村敏勝¹、荒巻能史¹、水谷義彦¹、外川織彦¹、水島俊彦²、甲昭二³、須藤一彦³

¹日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室

²日本原子力研究所 大洗研究所 管理部保安管理課

³財団法人 日本海洋科学振興財団 むつ海洋研究所

1. はじめに

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、原研むつ事業所にタンデトロン加速器質量分析装置(HVEE 社製 Model 4130-AMS)が1997年4月に導入されてから早3年が経過した。本装置は、最大加速電圧が3MVのタンデム型加速器質量分析装置で炭素及びヨウ素同位体比測定ラインから構成されている。装置の概略図を図1に示す。

炭素ラインは、1998年10月に標準試料(Oxalic II 138pMC)の¹⁴C/¹²C比の繰返し測定精度(相対標準偏差)が0.158%であることを確認した後、1999年12月から本格的な運転を開始した。一方、ヨウ素ラインは、1999年10月、重イオン検出器を使用して測定精度確認試験を行い、¹²⁹I/¹²⁷Iの相対標準偏差が1.0%以下であることを確認した。

本件では、昨年からの運転状況、装置の現状、ヨウ素ラインの精度確認試験結果等について報告する。

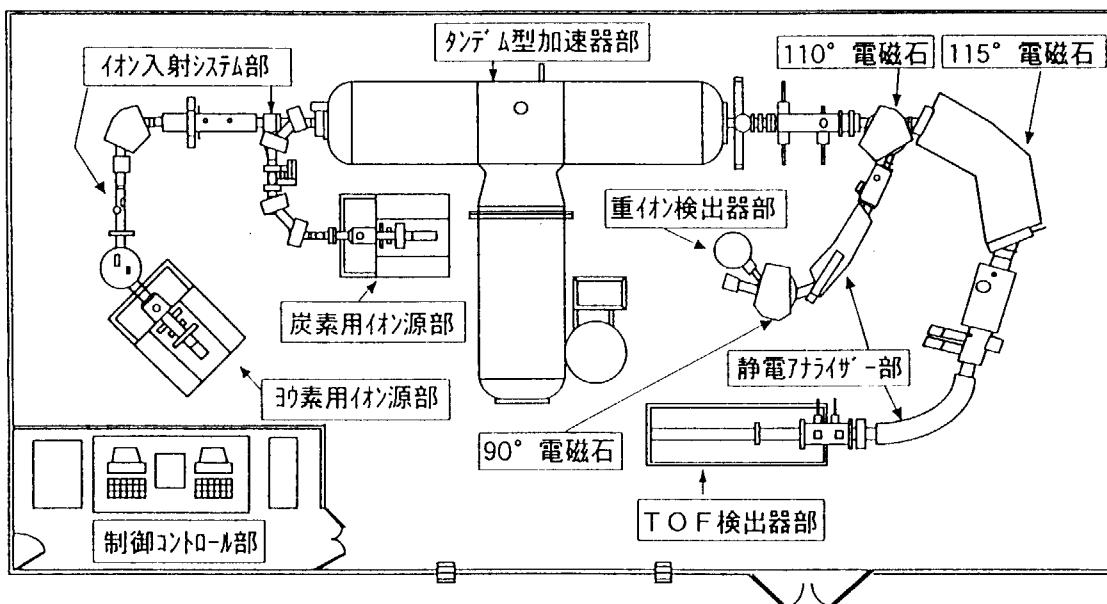


図1 タンデトロン加速器質量分析装置

2. タンデトロンの運転状況

設置から本年4月までの運転状況を図2に示す。総運転時間は約2,300時間、測定時間は約660時間である。1998年8月から1999年11月までヨウ素ラインのアライメント、測定精度確認試験等の調整作業を行っていたため、測定時間の殆どは昨年12月以降の炭素ラインの本格運転で占められている。

通常、イオン源のクリーニング、真空引き、コンディショニング、オブティマイズ等の調整作業の後、約2昼夜かけて50~56試料を測定し、運転状況を監視しながら適宜イオン源のクリーニングを実施している。測定は、図3に示すようにCsビームによるクレーター効果を低減させるため試料（ターゲットピース）をX-Y方向に9ポイント30秒づつ走査させ、これを1サイクルとして1試料当たり合計10サイクル（45分）を標準としている。データ処理は、試料表面の汚染の影響を避けるため2~10サイクルのデータを採用し、現在、その時の統計誤差はNISTシュウ酸で約0.3%である。

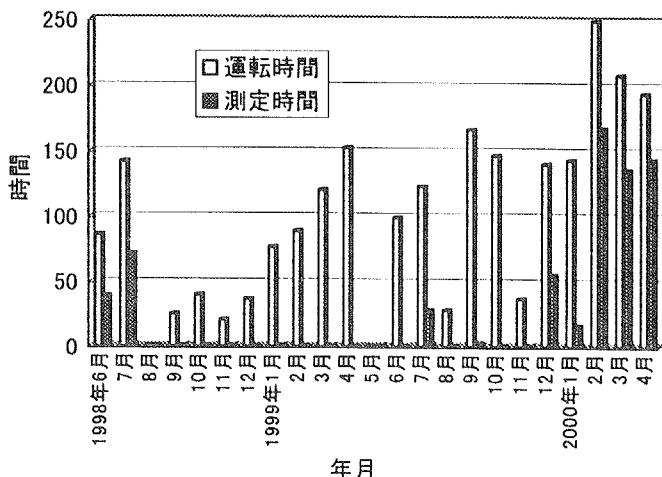


図2 月別運転・測定時間

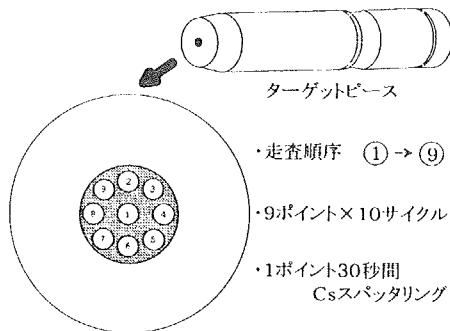


図3 Csスパッタリングの方法

図4に1999年12月から2000年4月の炭素同位体比測定数量の推移を、図5に測定試料の内訳を示す。全621試料のうち、北太平洋、オホーツク海等の海水試料が391個で63%、外部機関からの受託調査試料が151個で24%、NISTシュウ酸及びIAEA標準試料は75個で12%であった。

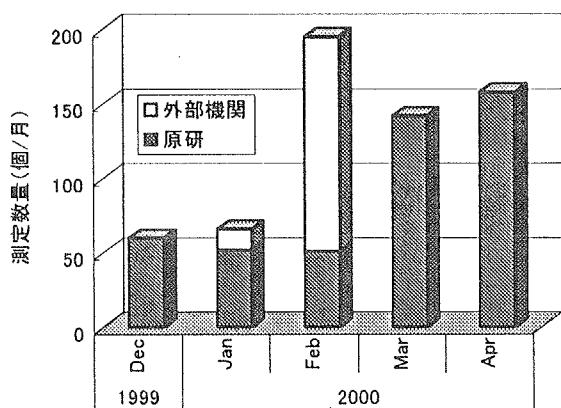


図4 月別測定数量

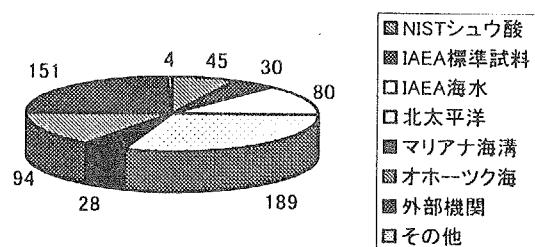


図5 測定試料の種類

3. バックグラウンド試料の測定結果

IAEA標準試料C-1 (0.0 ± 0.02 pMC) のサイクル毎の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の関係を図6に示す。測定開始直後は明らかに $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比が高く、5サイクル目までバックグラウンド値が高い。この現象は直前に測定された試料の種類を問わずほぼ同じ濃度で測定されることから、メモリー効果ではなく、むしろグラファイ

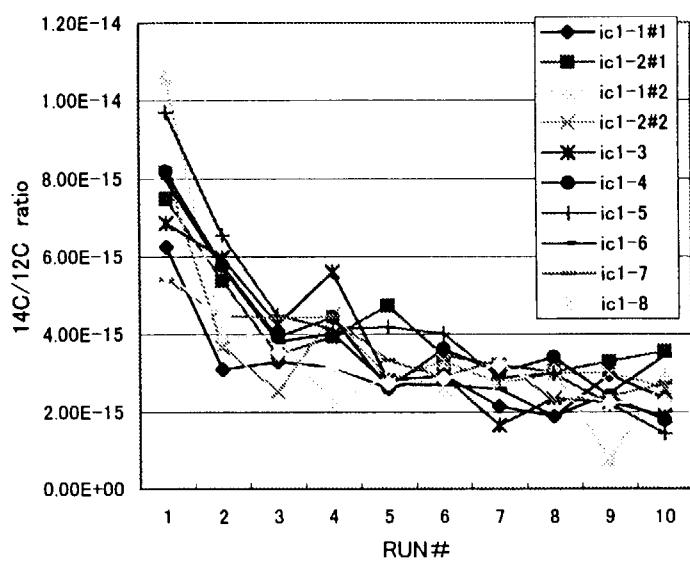


図6 IAEA C-1 測定結果

ト試料表面の汚染の影響と考えられる。従って、バックグラウンド値に近い古い年代試料の測定には、この汚染の影響を十分考慮する必要がある。なお、標準偏差から外れるものを除外して計算した結果、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比は 3.0×10^{-15} で、この値が試料前処理装置と AMS 本体のバックグラウンドの合計と考えられ、その値は 0.28pMC、 ^{14}C 年代にして約 47,000 年であった。

4. ヨウ素測定精度確認試験

本試験は、ヨウ素ラインのアライメントを確認する目的で、検出器に重イオン検出器を設置して 1999 年 10 月に行われた。加速電圧を 2.5MV、加速負イオンを荷電変換カナルで 5 倍の正イオンに変換するようにストリッパーガスの濃度を調整して行い、試験測定用試料は、カナダのトロント ISOTRACE 研究所加速器質量分析グループが作製したヨウ素標準試料 ($^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比が 1.1×10^{-10} でヨウ化銀とニオブ粉末を 1 : 2.5 の割合で混合) を用いた。

試験の結果、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比の相対標準偏差は 0.61%、0.86%、計数統計誤差は 0.44%、0.63%で、装置の高い安定性を確認するとともに、バックグラウンド値 (8.99×10^{-14}) を確認した。表 1 に 1 回目の試験結果を示す。

表1 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比測定結果（重イオン検出器使用）

$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ (E-10)	run1	run2	run3	run4	run5	run6	run7	run8	run9	average per sample	rel std dev per sample in %	stat error per sample ave cnts in %
sample45	1.0935	1.0732	1.0856	1.0880	1.1009	1.0814	1.0845	1.0841	1.1158	1.0897	1.14%	1.31%
sample47	1.1023	1.0876	1.0546	1.0793	1.0842	1.0900	1.1083	1.0948	1.0865	1.0875	1.41%	1.29%
sample51	1.0944	1.0572	1.0759	1.0745	1.0851	1.0979	1.1162	1.1067	1.1430	1.0894	2.51%	1.32%
sample52	1.0842	1.0838	1.0835	1.0760	1.0966	1.0805	1.0595	1.0615	1.0761	1.0780	1.08%	1.27%
sample53	1.0843	1.1171	1.1027	1.1009	1.0941	1.0741	1.1030	1.1004	1.0904	1.0963	1.13%	1.49%
average per run	1.0917	1.0838	1.0805	1.0837	1.0922	1.0848	1.0943	1.0803	1.1024			
std dev per run in %	0.70%	2.03%	1.62%	1.01%	0.67%	0.85%	2.07%	1.71%	2.45%			
stat error per run in %	1.21%	1.26%	1.25%	1.24%	1.31%	1.37%	1.41%	1.48%	1.52%			
total average	1.0882											
std dev from run ave in %	0.68%											
stat error from run ave in %	0.59%											
std dev from sample ave in %	0.61%											
stat error from sample ave in %	0.44%											

入射システムのパラメーターは、 ^{127}I の入射時間 T_{127} を 2msec、 ^{129}I の入射時間 T_{129} を 8msec、 ^{127}I 、 ^{129}I の入射前の待ち時間を 0.1msec、1 回の sweep に掛かる時間 10.2msec として、2000sweeps、20blocks の設定で、1 回の測定 (single analysis) に掛かる時間 T_{single} は 408sec で、5 試料を順に計数統計誤差が 1% に達するまで測定を繰り返した。

5. 保守状況等

(1) 加速タンクの開放

ヨウ素ライン調整中の昨年8月、ストリッパーガス循環ターボポンプ用発電機交換後に頻繁にスパークが発生したため、加速タンクを開放した。図7は開放時に発見された発砲スチロールの小片で、これがスパークの原因と思われる。直前に交換したモーター冷却用フィンに付着していた輸送用梱包材が混入したものと思われる。スパーク痕を研磨し、スタッカダイオードを40個交換し復旧した。

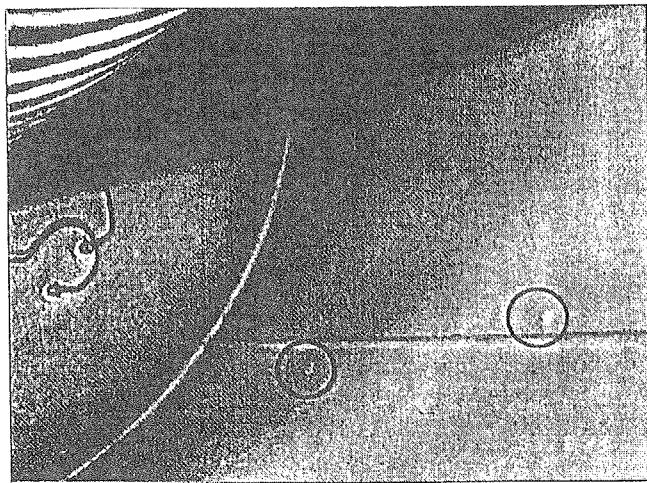


図7 タンク開放時に発見された発砲スチロールの小片

(2) 測定グラファイト試料の脱落

図8に測定途中に試料がターゲットベース先端から剥離した模様の実体顕微鏡写真を示す。原因是ターゲットプレス機の不具合によるもので、プレス用ホルダーの強度不足からグラファイト試料がターゲット表面から僅かに盛り上がってプレス（プレス圧：800lb）されたことによるものである（現在はプレス用ホルダーを改良し良好にプレスされている）。また、表面に大きな溝みや割れが見られた試料は、¹²C、¹³C電流値及び¹⁴Cカウントが常に同じスパートーポイントにおいて不安定で、一方、表面に光沢があり均一にプレスされた試料は、電流値及びカウントともに安定していた。このように、プレス圧力、試料の均一性はAMS測定の重要な要素で、安定した測定のためには均一にプレスされたターゲット試料が不可欠である。

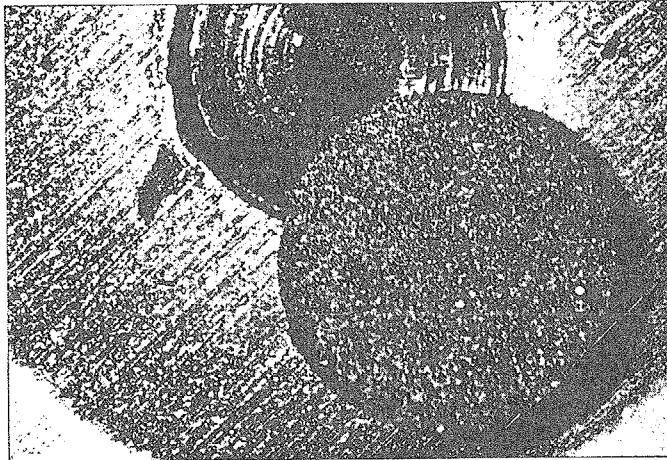


図8 剥離した測定試料（プレス圧：800lb）

6. おわりに

タンデトロンの運転状況、装置の現状等についてその概要を報告した。なお、ヨウ素ラインは、7月中旬に飛行時間(TOF: Time of Flight)型検出器による¹²⁹I/¹²⁷Iの繰返し測定精度確認を行い、3%以下であることを確認した。現在、装置は保守点検作業を行っている。

今後は、炭素ラインについて、測定試料の種類に応じた最適運転パターンやバックグラウンド低下の検討、測定精度の確認及び測定数量の増加を想定し効率的な運用体制の検討を進めたい。さらに、来年度からのヨウ素ラインの本格運転に備え測定条件の検討を行う予定である。



JP0150272

JAERI-Conf 2000-019

2 施設報告（現状）

2-1 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、大内 勲
堀江活三、月橋芳広、阿部新市、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

1. はじめに

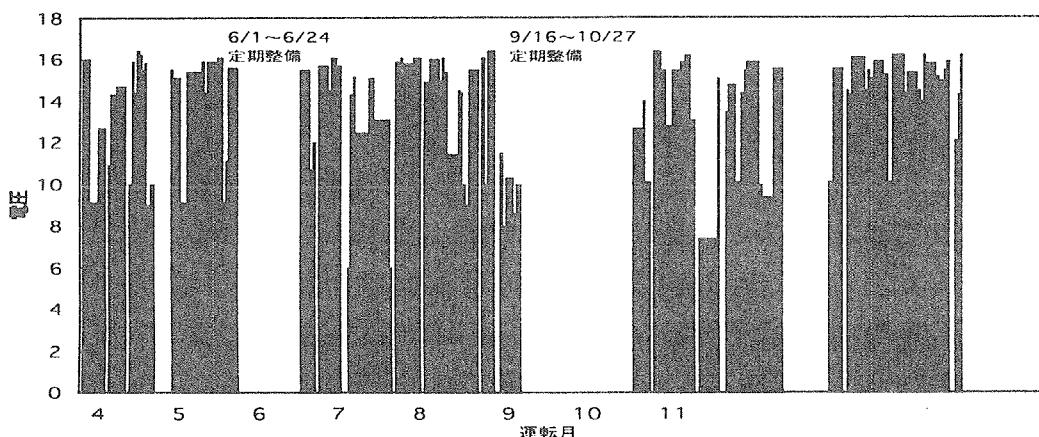
国内最大の静電型加速器とブースターによる再加速による最高エネルギーが1GeVにも及ぶ性能を有している原研タンデム加速器は、希ガス加速等の改良を加え、40数種に及ぶイオン加速を可能にしている。現在は原子核関連研究に多くのマシンタイムを費やす装置として第1級の性能といえる。今後の改良計画とともに、各種の拡張計画も登場し、さらに周期表全般の加速を可能にすべく計画を進めている。しかし、加速器の老朽化は確実に進みつつあり、早急に改善するべく計画を思案中である。また、人員の問題が大きく、今後の運営は如何に効率よく業務を遂行するかにかかっている。加速器関連技術は多くの技術の延長上にありこれらの知識の継承は今後の原研タンデム加速器の発展の基礎となる。

機械的な部分を多く含む原研のタンデム加速器は、年間数回のタンク解放による整備は不可欠であり、契約による運転整備要員の確保と十分な教育による整備の成果は、今後の運転時間確保に大きな要因となる。さらに、各種の開発を進め、省力化、高度化により人員の減少にも対応した加速器管理組織の構築を目指している。

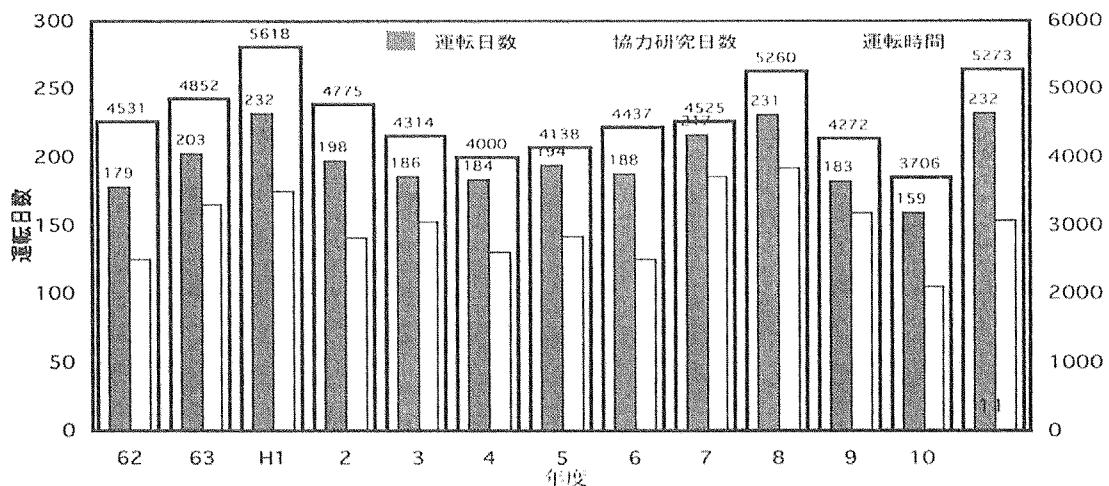
2. タンデム加速器、ブースターの運転状況

タンデム加速器の平成11年度のマシンタイムは、3回計画され実施された。第1回、第2回のマシンタイムは定期整備の都合上短期の実験計画とし、同時にその間のメインテナンスも短期のものとした。第3回目のマシンタイムは通常よりやや長く設定し、合計230日余りの運転を遂行できた。しかし、当初から希望していた希ガス関連研究は、高周波電源の思わぬ故障により中断せざるを得なかった。この電源は特殊な形状であり、国内では入手できないことから多くの希ガス及び低エネルギーイオン加速の実験計画を変更せざるを得なかった。

加速器の運転条件は平年と同様であり、第1図に示す。また、第2図に年度別利用状況を示す。



第1図 平成11年度加速器の運転状況

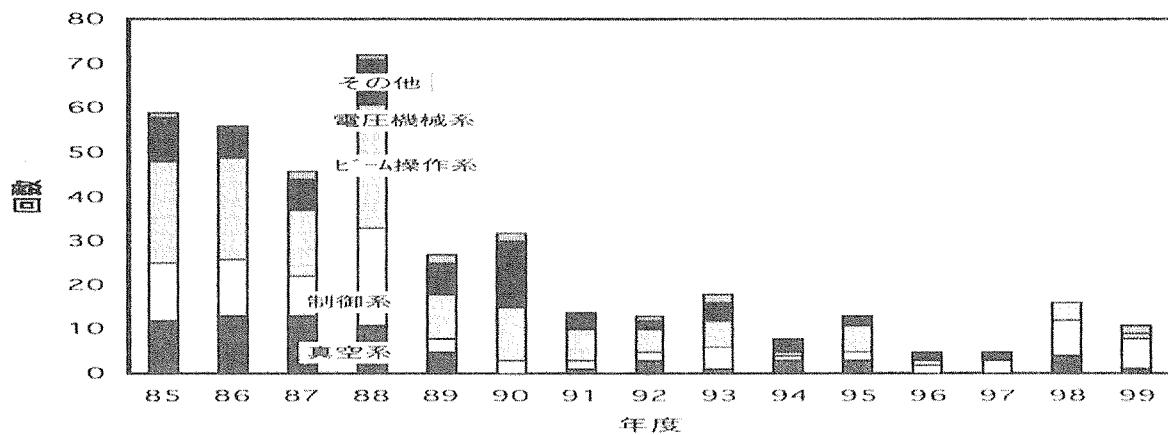


第2図 加速器の年度別利用状況

ヘリウム冷凍機の運転は、3月下旬から開始され翌年2月まで3回に分け運転を実施した。例年10月には定期整備と原研内の変電施設の点検のため停電があり、停止している。冷凍機の運転は、出来れば連続運転したいが、法的な整備、電源設備の検査業務のため必ず1度は停止する必要がある。さらに年末年始の休業時は電力節約（通常運転時640KwHを要する）の意味も含め停止するようにしている。

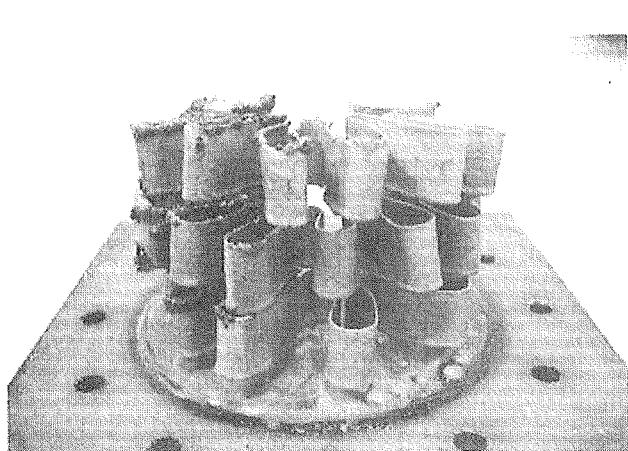
3. 加速器系の整備

今年度も3回の定期整備を行うこととなった。昨年度と同様の整備を行っていったが、加速器内部は大きな整備を要するところは無く順調に整備を終了している。しかし、制御系に於いてプログラム変更に伴うハードウェアとの相関から昨年同様の回数で整備を要した。第3図参照。



第3図 年度別加速器及び関連機器の修理回数

また、タンデム加速器の電磁石は40kwと大型で旧来の電源を使用しているが、磁場の不安定な故障があった。旧来の設計であり大型のシャント抵抗を利用したフィードバック回路を使用しているが、シャント内部の絶縁不良が有り、このためのふらつきであった。シャント抵抗は、第4図に示すように金属板を曲げたものを使用し、その表面に保護塗装を施したものであり、直接冷却水にふれる形態のものであった。このため、保護が痛み腐食が進み結果的に部分的に短絡状態が不安定に発生したためであった。洗浄後の磁場は以前より安定になったことは言うまでもない。



第4図 シャント抵抗器の絶縁劣化

の両端の支持軸受けに大きな損傷が見られないことから、電荷集積による高絶縁物の自己破壊？なのかも知れない。高絶縁物の破壊について研究や経験等のお有りになる方のご指導をお願いいたします。

4. タンデム加速器系の現状と今後の展開

E C R イオン源に使用している高周波電源の故障によりマシンタイム後半の研究利用は全く出来なかった。特殊な形状の増幅器であり、国産では生産していないか或いは入手

できないものであり、バックアップ電源の調査を進めている。コロナ針に代わり抵抗による電圧分割方式を設定すべく、抵抗器の購入を進めている。しかし、加速管の交換も考慮中であり次年度以降の整備になる。おそらく低電圧での安定性は大幅に改善されるであろう。しかし、加速管を交換した後高電圧による放電はこれまでのサージよりも大きくなり、制御回路系に及ぼす影響は大きくなり、回路のサージに対する防御方法はこれまでのシールド等の知識を考え直さなければならぬかもしれない。

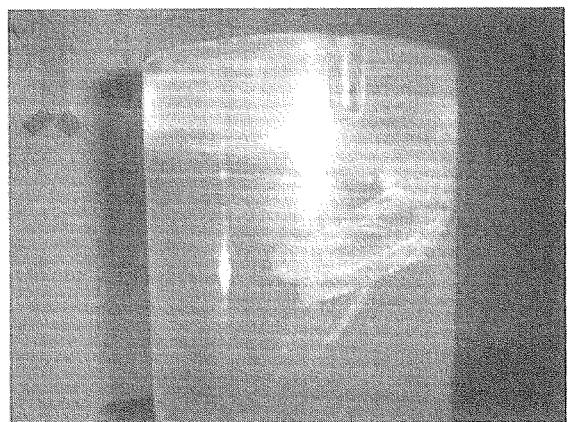
タンデム加速器もすでに20年近くの運転をしてきた。近年の研究ではさらにイオン種を加えた研究要望が強い事やくタンデム型加速器では得られない量のイオン電流を望む研究が増えている。そこで、原研ではKEKで開発されたRFQやIH型加速器を導入し、新展開を図ろうとの計画が進行しつつある。すでに加速器の一部は開発済みであり少ないコストでユニークな加速器装置が完成することとなり多いに期待を寄せている。

加速器の運営は現在の人数では難しいことがあり、平成5年から少しづつ契約による人員を増加させてきている。しかし、この人員による運転は多くの時間を要し、原研側への負担も大きいが、専任の運転員の確保が難しい現在、やむを得ない措置として進めている。さらに24時間の運転監視となると安全確保の面で多くの課題を残している。昨年も報告したが、自動設定化運転や安全系の充実は今後の加速器運営に充実させなければならない。

参考文献

- 1) 吉田他 第12回タンデム加速器とその周辺技術の研究会報告集（1999）

また、加速器内部の整備で昨年も話題にしたが、動力伝達用絶縁シャフトにこれまで一度もなかった故障が有った。第5図に示すようにアクリルシャフトに大きな割れが発見されたことである。幸い破断してはいなかったがこの大きな割れは深刻な状況を生み出す可能性があり、定期的な整備を行っていればこそ危険を免れた状況である。原因は分かっていないが、このシャフト



第5図 アクリルシャフトの割れ



JP0150273

JAERI-Conf 2000-019

2-2 東京大学・原子力研究総合センター・重照射研究設備の現状

柴田 裕実、岩井 岳夫、尾亦 孝夫

東京大学・原子力研究総合センター・重照射管理部門

【はじめに】

東京大学・原子力研究総合センター・重照射研究設備は学内に於ける核融合炉関連の材料研究をはじめとして、加速器を利用した研究を強化する目的により、昭和 56 年度より 3 年間の建設期間を経て茨城県東海村の工学部附属原子力研究施設内に設置された。昭和 60 年 6 月より学内共同利用を開始し、今年で 15 年目を迎える。設備は学内共同利用として設置されているが、共同利用開始当初より学外の研究者にも東京大学との共同研究という形で開かれている。現在、学外からは 13 大学・研究所等の利用がある。

【加速器設備の現状】

本設備は 2 台の静電型加速器と 7 本のビームラインからなる。加速器はそれぞれ 3.75MV のシングルエンド型のバン・デ・グラーフと 1 MV のタンデム型のタンデトロンで構成され、設備として次のような特長を持つ。① 2 台の加速器により 2 種類のイオンを同時に照射することができる（2 重照射、BL4/5）。②ビームの掃引により大電流のビームを均一に照射することができる（BL3, 4, 5）。③パルス化されたビーム（約 1 ns）による照射実験を行うことができる（BL1）。④中性子を発生することができる（BL2）。

さらに平成 8 年度には補正予算で「ナノ領域動的現象解析システム」として①重イオンマイクロビーム分析装置（BL6）、②フーリエ変換赤外顕微測定装置（BL6 付随）、③ピコ秒 2 次元蛍光測定装置（BL1 付随）、④フェムト秒波長可変パルスレーザー照射装置（イオンビーム・レーザー同時照射実験用）が導入された。平成 9 年度には BL0 に「超高速微粒子実験」用のビームラインが建設された。また、平成 10 年度からは BL2 の最下流に低速陽電子ビーム（0~30keV）と組み合わせたイオンビーム照射下陽電子消滅測定装置が設置された。図 1 に設備のレイアウトを示す。上記のような特徴ある設備を用いて、バン・デ・グラーフとタンデトロンの 2 台の加速器からのイオンビームの同時照射（2 台のイオン加速器をうまく組合せると核融合プラズマからの 14MeV 中性子による照射効果のシミュレーションが可能となる）による核融合炉第一壁材料の重照射研究をはじめとして、金属・セラミックス・有機材料の照射効果、過渡現象の高速時間分解分光測定、新しい放射線検出器の開発、マイクロビームによるミクロ照射効果、超高速微粒子による宇宙機搭載用宇宙塵計測機器の開発や陽電子消滅によるイオンビーム照射欠陥測定などの研究を行っている。

【共同利用の現状（学内共同利用）】

共同利用の形態には一般研究とプロジェクト研究があり、プロジェクト研究は平成 3 年度下半期より共同利用の活性化と発展を図るために、3 年程度で研究が完了し、かつ発展性のあるテーマを公募しマシンタイムを優遇するようにしたもので、現在まで 7 件のプロジェクトが終了あるいは進行している。平成 12 年度のプロジェクト研究共同利用テーマは以下の通りである。

- ① 低次元構造体の電子物性に対する高エネルギーイオン照射効果
- ② 超高速微粒子衝突実験と宇宙塵捕集・分析装置の開発

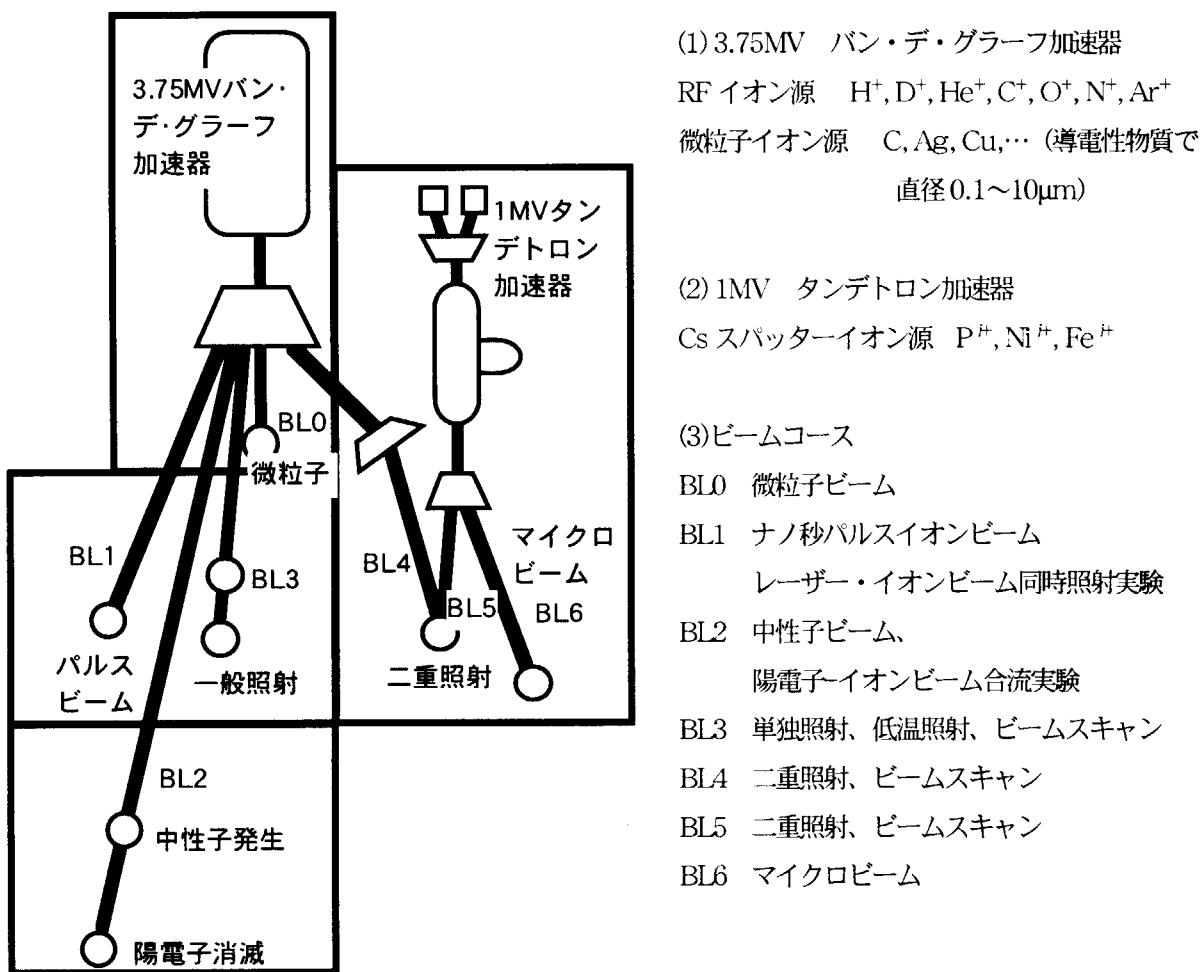


図1 加速器・ビームコースのレイアウトと主な仕様

次に HIT で今年度の上半期に採択された研究テーマ（全部で 16 件）を大まかな分野毎に並べてみると以下のようになる。

- | | |
|-----------------|-----------------------|
| 1. 核融合炉材料関連研究 | 4 件 |
| 2. 材料照射・改質研究 | 6 件 |
| 3. 放射線物理・化学 | 2 件 (プロジェクト研究 1 件を含む) |
| 4. 量子ビーム計測・応用 | 1 件 |
| 5. マイクロビーム生成・応用 | 1 件 |
| 6. 微粒子加速・計測実験 | 1 件 (プロジェクト研究) |
| 7. 陽電子利用研究 | 1 件 |

HIT は本来学内共同利用の設備として建設されたが学外からの利用希望が多く、現在、以下のような大学・研究所等からの利用がある。九州大学・京都大学・富山高等工業専門学校・東海大学・立教大学・東京水産大学・獨協医科大学・東北大学・室蘭工業大学・宇宙科学研究所・理化学研究所・KEK・日本原子力研究所

【加速器利用実験の新たな展開を目指しての開発研究】

- (1) 重イオンマイクロビームの生成と応用に関する研究

微小領域の分析や照射効果の研究のため、重イオンマイクロビームやシングルイオンを生成し、顕微フーリエ変換赤外分光法やイオン誘起X線分光法等と組み合わせた新分析システムの開発を行っている。マイクロビーム装置は国内外に多数あるものの国内では数カ所でしか稼働していないので、日常的にマイクロビームの実験が可能になるよう開発を行っている。重イオンマイクロビームは電子顕微鏡用メッシュからの2次電子計測により現在 1~10_m 位までのビームが利用可能になっており、現在、リアルタイムビームモニターの開発が進められている。

(2) 微粒子の加速と応用に関する研究

国産宇宙探査機への星間塵（サブミクロンの微粒子）分析器の搭載計画など宇宙空間微粒子に関する研究のため、超高速微粒子加速器（MV 級）を開発し、衝突シミュレーション実験や超高速微粒子と物質の相互作用等の研究を行っている。微粒子の超高速加速設備は世界でもドイツと英国の 2 カ所にしかなく、本設備は国内唯一のものとして 98 年 4 月に加速に成功し、現在、世界最高電圧（3MV）で加速を行っている。微粒子（直径 0.1~1_m）を約数 km/s から数 10km/s の速さにまで加速できている。

(3) イオンビーム照射下陽電子消滅実験による材料研究

陽電子ビームと高エネルギーイオンビームを組み合わせて、イオンビーム照射下での陽電子消滅測定を行い、固体材料中の照射欠陥生成のダイナミックな過程を明らかにするためシステムの開発及び研究を行っている。本設備は現在世界で唯一のものとして利用されている。

(4) フェムト秒レーザーとパルスイオンビームを組み合わせた材料研究

フェムト秒レーザーとイオンビームを組み合わせた材料の複合照射効果や励起状態生成・緩和過程の研究のためのシステムの開発を行っている。

【加速器設備及び運営における問題点】

以上のようにユニークな研究設備が設置され、ビーム利用の新たな展開を見せ始めたが、既に建設時より 15 年が経過したために平成 10 年度より加速器の維持費が全額カットされ苦しい運営を強いられている。維持費・運営費の出費が予算を上回ることとなったため、ユーザーより年間予算の一部を利用料として徴収する事とした。

また、予算のカットと共に設備の老朽化が切実な問題として浮上している。特に HIT では塩害による空調設備の老朽化が進み（修理、更新に約 1.3 億円かかる予定）、冬場は余り問題がないが、夏場の冷房及び一次冷却系が運転不能に陥っており、高温多湿の環境で装置を稼働させなければならない状態で、極めて装置にとって危険な状態にある。現在予算を申請中。



JP0150274

JAERI-Conf 2000-019

2-3 筑波大学加速器センターの現状

笹 公和、石井 聰、大島 弘行、木村 博美、高橋 努、田島 義一、大和 良広、

片渕 龍也、小松原 哲郎、島 邦博、古野 興平

筑波大学加速器センター

1. はじめに

筑波大学加速器センターは、1974年の筑波大学発足と同時に建設が始まり、導入された12UDタンデム加速器は1976年7月に所定の性能に達した。本年は筑波大学加速器センターの建設から25周年という節目の年となる。また1997年に電子技術総合研究所より1MVタンデトロン加速器が移設され、1999年度より正式に稼動を始めている。

筑波大学加速器センターは元々、学内共同利用施設であったが、現在、学外に広く利用を呼びかけている。1999年度は、12UDタンデム加速器での学外共同研究は他大学1件、国外の大学1件、筑波地区研究機関1件であった。1999年度から稼動を始めた1MVタンデトロン加速器での学外共同研究は、他大学が1件、民間企業の筑波地区研究所が1件であった。

マシンタイム申し込み、外部機関からの共同研究プロポーザルなどは、筑波大学加速器センターのホームページからオンライン申し込みで行うようになっており、利用者の便宜とペーパーレス化を図っている。また毎年発行していたアニュアルレポートを電子化して、1999年度からホームページ上で公開を行っている。

加速器センターホームページ <<http://www.tac.tsukuba.ac.jp/>>

Annual Report 1999 <<http://www.tac.tsukuba.ac.jp/uttac/annual/1999/index.html>>

表1 1999年度加速器稼動状況

年月	12UDペレトロン	1MVタンデトロン
1999年 4月	・定期整備	・エネルギー校正
5	・定期整備	調整
6		・実験供給開始
7	・加速器緊急修理（2週間）	調整
8		・
9		・デュオプラズマ型イオン源 故障
10	・コンプレッサー開放検査・老朽部品交換 ・貯槽開放検査 ・気化器開放検査	調整
11		・
12		・
2000年 1		・イオン源修理
2	・停電による停止（2/8）	調整
3	・定期整備 導電性ゴムピックオフブーリーに交換 フォイル交換 コロナ針交換 オイラー取り付け SF_6 ガス 500kg 補充	・
4	・停電による停止（5/14）	・停電により TMP破損 ・デュオプラズマ型イオン源 故障
5		

2. 12UD タンデム加速器

1999年度の加速器運転時間及びビーム利用時間はそれぞれ2905、2316時間となった。これは1998年度と比較して、約4%の増加であった。図1に月別運転時間、図2にターミナル電圧別のビーム利用時間を示す。

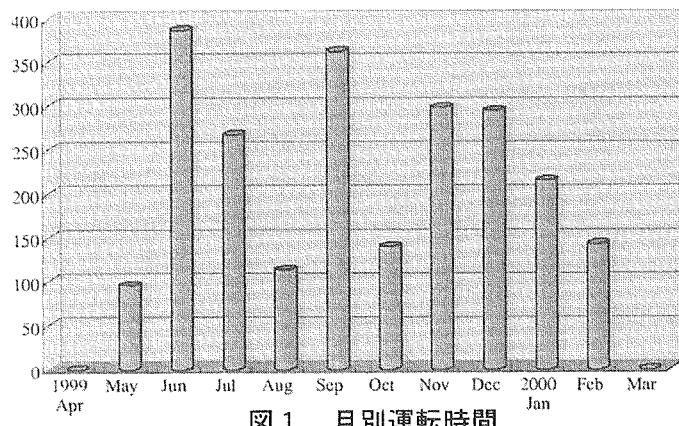


図1 月別運転時間

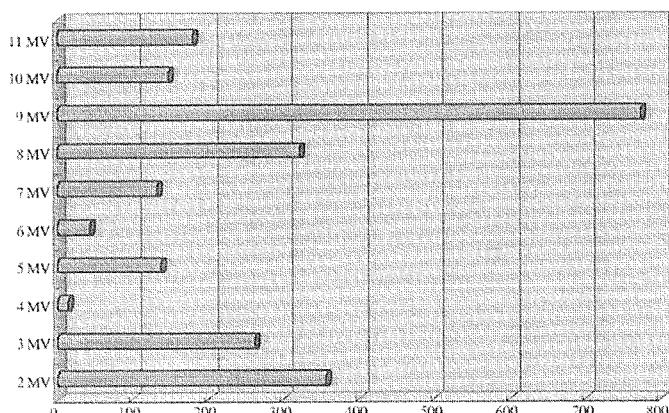


図2 ターミナル電圧別ビーム利用時間

1999年3月の春の定期整備において、加速器入射側の収束レンズをAINツェルレンズから静電四重極レンズに交換する作業があったために整備期間が長くなり^[1]、ビーム供給は5月24日からとなった。1999年7月には、第一加速管のコロナ針が全倒する事故があり、7月23日から8月10日にかけて、加速タンクを開放して修理をおこなった。事故はターミナル電圧11MVでのコンデンシング中の放電により発生した。しかし、整備時のコロナ針取り付け作業における、人為的要因もあったと考えられる。

1999年度は高圧ガス施設の開放検査年にあたり、老朽化したコンプレッサーの修理を行うことになった。 SF_6 用コンプレッサーは25年前に加速器と一緒にアメリカから輸入したもので、規格部品がないた

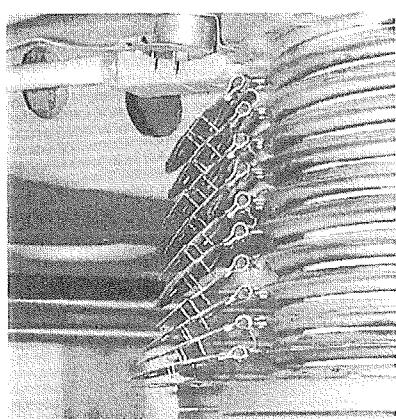


図3 コロナ針倒壊の様子

め、コンプレッサーを分解して老朽化した各部品を取り出した後、型取りして新しい部品を製作することになった。部品の製作と設置・点検のため、約2ヶ月の間SF₆用コンプレッサーの使用が出来なくなった。通常、加速タンク内には6気圧(0.5 MPa)のSF₆ガスを封入しているが、安全上の臨時処置として整備期間中、加速タンク内には1気圧(0 MPa)のSF₆ガスを封入した。この間の12UDタンデム加速器のターミナル電圧は3.7MVが最高となった。開放検査は10月に予定されていたので、8月10日の緊急修理後から10月14日まで加速タンク内のSF₆ガスは1気圧となつた。低いターミナル電圧(2~3.7MV)での実験は、主にPIXEによる「地球惑星物質中の微量元素の挙動」と共鳴核反応を用いた「地球科学試料の水素分析」が行われた。図2からもわかるように、1999年度は例年と比較して2、3 MV台のターミナル電圧の使用割合が多かった。2000年3月の春の定期整備では、コロナ針の全交換、フォイルの交換及びピックオフブーリーをNECの導電性ゴム製に交換した。AMS用に通常の径より大きいΦ13で1.9~3.2 μg/cm²のフォイルを11枚入れた。故障のため前回定期整備時に取り外したペレットチェーンの潤滑油補給系を修理して、1年振りに取り付けた。またSF₆ガスを500kg新たに購入して、補充を行つた。

12UDタンデム加速器には、水素及び重イオン用のスパッタ型イオン源(GIC)、ラムシフト型偏極イオン源(PIS)及び加速器質量分析専用イオン源(AMS)の3台のイオン源がある。1999年度のイオン源及びイオン種ごとの加速時間割合を図4に示す。スパッタ型イオン源の使用時間が最も多く、プロトン加速が全体の34%を占めた。AMS専用イオン源の使用割合は約6%であった。

1999年度の12UDタンデム加速器を利用した研究分野別の利用状況を図5に示す。原子核物理に関する実験が全体の6割を占めているが、物性関係やAMSでの加速器使用時間が増えている。AMSでは³⁶Clの測定を中心に行っており、1999年度からは茨城県東海村のJCO施設における臨界事故での中性子束分布の測定を、JCO施設内にあったCsClやKClを用いて行っている。2000年度からは新たに¹²⁹Iの測定システムの開発に取り掛かる。また、加速器センターの重点研究課題である地球科学分野での利用が約20%となり、大幅に増加した。教育用として、学部3年生を対象とした夏期特別実験「原子核の人工変換」という課題での利用があった。

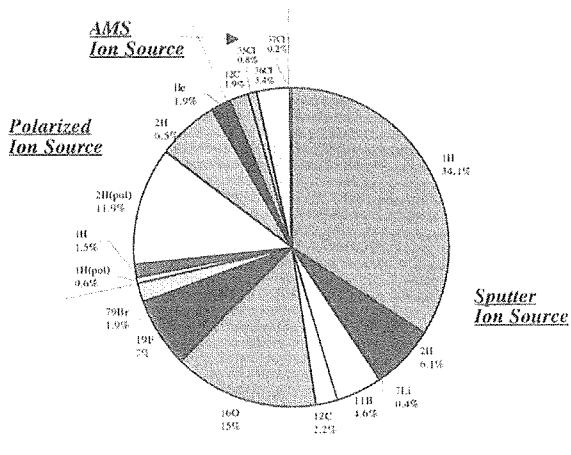


図4 イオン源及びイオン種別使用時間割合

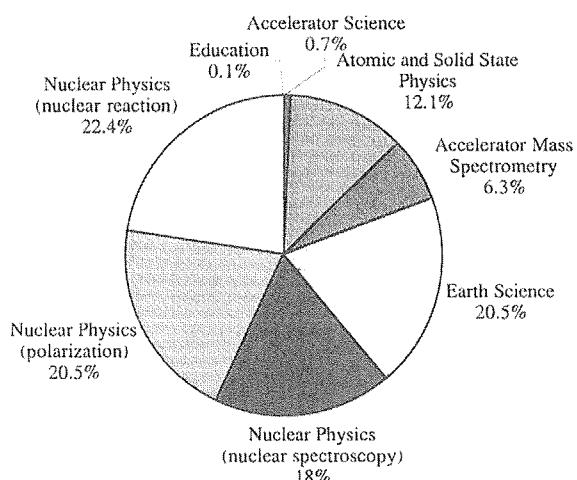


図5 研究分野別利用割合

3. 1MVタンデトロン加速器

電子技術総合研究所から移管されたタンデトロン加速器は、組み立て及び施設検査を終えて、1999年4月にはエネルギー較正が終了した。実験へのビームの供給は、1999年度からの開始となった。イオン源はスパッタ型と主にHe加速用のデュオプラズマトロン型の2台を備えている。ビームコースは5本あり、RBSやPIXE及び電子分光用のコースは既に設置され利用が始まっている。マイクロPIXE用のコースなどは現在建設中である。図6に現在のタンデトロン加速器の概略図を示す。

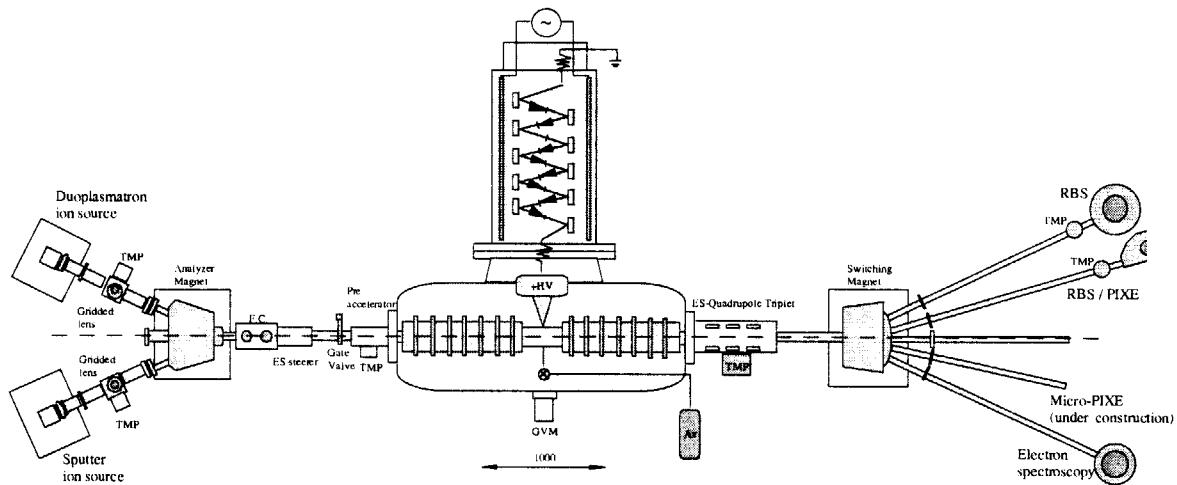


図6 1MV タンデトロン加速器

表1にも示したように、タンデトロン加速器は故障が相次ぎ、1999年度のビーム加速時間は225時間程度であった。特にデュオプラズマトロン型イオン源の冷却系に問題があり、Heビームが加速出来ない状態が続いている。スパッタ型イオン源からのプロトンビームはユーザーに提供出来るようになっており、PIXEやRBS、チャネリングを用いた結晶物理の研究などに使われている。デュオプラズマトロン型イオン源の整備が終われば、学内及び筑波地区などの学外研究者から要望の高いHeビームによるRBS実験が中心になっていくものと思われる。

4. まとめ

筑波大学加速器センターは建設から25年が経過し、設備、建物とも老朽化が進んでいる。センター自体の将来計画も考える時期に来ていると考えられる。しかし、ターミナル電圧が11MVと1MVの2台のタンデム加速器を有し、広いエネルギー範囲で多くのイオン種を利用出来る施設が大学にあることは有意義なことである。学外との共同研究の芽も順調に育っており、さらに筑波地区の研究機関との連携を進め、現有設備の維持を続けて研究内容の範囲を広げていくつもりである。

参考文献

- [1] 大和良和他：第12回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集(1999)100.



JP0150275

JAERI-Conf 2000-019

2-4 東大タンデム加速器MALTの現状

松崎浩之、小林紘一、中野忠一郎、春原陽子、山下 博、牧田 肇、堀内一穂
(東京大学原子力総合センター)

1. はじめに

東京大学原子力研究総合センタータンデム加速器研究施設 (MALT=Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator) は、平成 7 年 (1995 年) 以来、研究利用運転が続いているが、日々メンテナンス、モディファイが継続的に行われてきた。平成 9 年 (1997 年) には、ストリッパー・キャナルの大口径化、加速管の再アラインメントおよび加速管入射側の抵抗体の交換、また AMS コースのアラインメントが行われた。これらの努力の成果により、加速器は安定してきており、平成 10 年度には、4000 時間もの加速器運転時間を記録したが、その利用時間の 8 割近くが AMS 開発や AMS 測定に関連するものであったとともに、MALT の特徴を表しているといえる。そこで、AMS 測定の効率化を目指して、平成 11 年 (1999 年) には、AMS 自動測定システムを導入した。こうして、加速器が本来の性質を發揮しつつある一方で、建設以来 5 年以上が経ち、そろそろ疲弊する部分が出始めてきたのも事実である。その最も大きなものは、入射ビームの不安定性であった。これは、平成 11 年 (1999 年) 春頃から症状が観測されていたが、秋以降顕著となり、ユーザーには困難な実験を強いることになってしまった。結局これは、入射電磁石とイオン源の引き出しポテンシャルを与える電源の両方に問題があることが分かったが、両者が複合していたことによって、解決が遅れてしまった。

こうして、数々の困難を乗り越えることにより、イオン源、加速器、測定系すべてを含めて、マシンとしてはほぼ完成したシステムになった。今後、 ^{10}Be -、 ^{26}Al -AMS 測定、物性研究、PIXE 各分野で今まで以上の実りある成果が期待される。

一方で、高精度な測定が要求される ^{14}C -AMS については、現在まだ開発途上である、といわざるを得ない。まず、加速器のトランスマッショングの電流依存性が問題である。 ^{12}C の大電流を加速器に入射すると、加速管入り口付近の電場を乱すことによって、レンズ作用に変化が生じ、トランスマッショングを劣化させてしまう。加速管入射側の抵抗体の交換はこれを解決するために行われた。また、オプティクス上の観点から、イオン源部のジオメトリを変化させることにより、トランスマッショングの安定化が図られた。また、平成 11 年 (1999 年) 夏、 ^{14}C -AMS 専用の個体スパッターアイオン源を増設した。これらの努力により、平成 11 年 (1999 年) 秋には、繰り返し精度は $\pm 0.5\%$ 程度にまで向上した。しかし、その後平成 12 年 (2000 年) に入ってからは、次第に性能が悪化し、 $\pm 0.8\% \sim 0.9\%$ 程度になってしまった。ビーム入射側に問題があると推測されるが、原因は明らかになっていない。

平成 11 年度の MALT 共同利用の状況は、加速器運転時間は 3300 時間であった。内訳は、加速器のコンディショニングに 15%、物性実験 15%、AMS 65%、PIXE 5%、学生実験 0.5% ほどであった。

図 1. に現在の MALT ビームラインの概要を示す。

2. 整備状況

S2 イオン源-固体イオン源の増設 過去一年間に行われた整備の中で最大のトピックは、Cs スパッター型固体イオン源 (MC-SNICS) の増設であろう。従来単一の固体イオン源 (S1 イオン源) を用いて、 ^{14}C をはじめとする AMS、物性実験、PIXE 実験等全ての実験を行ってきた。当然イオン源内の汚れも早く、高精度なる ^{14}C -AMS 実験にとっては好ましくない状況であった。そのため、平成 11 年 (1999 年) 1 月、トランスマッショング改善を目的としたイオン源のジオメトリの変更を行って以後、 ^{14}C -AMS 実験の直前には、イオン源を分解清掃する、という作業を行ってきた。この場合、イオン源の分解清掃作業そのものにまる 1 日、更に、イオン源再起動時のアイオナイザー焼き出しおよび、Cs ビームスポット位置

のアライメント作業にさらなる1日以上かかるため、マシンタイムの運営という観点からは非効率であった。そこで、平成11年(1999年)8月、新たに固体イオン源を追加、MALT01ビームラインに対して、S1イオン源と対称の位置に設置した(S2イオン源)。

S2イオン源は¹⁴C-AMS専用とした。これにより、¹⁴C-AMS実験時のイオン源の汚れを最小に抑えることができる(イオン源全稼動時間中、¹⁴C-AMS実験で使う割合は、20~25%。したがって、¹⁴C-AMS専用イオン源とすることにより、汚れ方の速さは単純計算で1/4~1/5ということになる)。現在では、イオン源の分解清掃はS1、S2共に半年に1回の割合で行われている。

S2イオン源においては、電源供給部に安定化電源(AVR)を設置し、電力供給側の変動の影響を最小限に抑えた。また、Csリザーバタンクからアイオナライザに導くパイプの回りをグラスウールで巻く等、イオン電流の安定化を図った。

図2.に、MALTにおける¹⁴Cのマシンタイムごとの繰り返し精度の変遷を示す。MALTにおいては、スタンダードサンプルの1回の測定ではほぼ20,000~25,000カウントを得る。したがって、統計的におよそ0.6~0.7%のばらつきがあるため、繰り返し精度でこれを下回る数値については本来あまり意味はない。

S2イオン源増設直後のマシンタイム(平成11年(1999年))10月では、スタンダードサンプルの繰り返し精度は0.9%程度であったが、11月には、0.6%となった(NBSおよびANUスタンダードの13/14比)。10月と11月の違いは、ビームの通し方によるものであると考えられる。以後は11月のマシンパラメータをもとにビームチューニングを行った。この後、安定した精度の測定が続いたが、平成12年(2000年)に入ってからは、次第にいろいろな意味で性能が低下していった。たとえば、MALTでは、同じスタンダードをMC-SNICSカソードの異なる場所に複数個入れているが、同一カソード位置内での繰り返し精度は良いのに、異なる位置に入れたスタンダードのそれぞれの測定結果の中心値がばらつき、全体として精度が落ちているという状況、また、サンプルの測定においても、あるサンプルは、繰り返し精度が統計によって決まってしまう精度程度まで到達するにもかかわらず、別の位置に入れたサンプルについては、繰り返し測定のばらつきが統計によるばらつきを有意に越えてしまうという状況などが観測されている。

しかしながら、全体としては、繰り返し精度は、ほぼコンスタントに1.0%を切っており、S2イオン源の導入により、¹⁴C-AMSのパフォーマンスは大幅に向上した。

S1イオン源 入射ビームの不安定性は、平成11年(1999年)3月に初めて観測された。これは、MALT02ビームラインに設置されているBPM(Beam Profile Monitor)上で、ビームの位置が変動する現象としてあらわれた。当然、トランスマッキシヨンが変動し、AMS測定を不可能とする。MALT02ラインの上流イオン源までの間には、ESA(静電ディフレクター)、BM(入射電磁石)などがある。MALT02ラインのBPMにおいてx方向、y方向双方で動き、かつMALT01ライン上のBPM(ESAより下流で、BMより上流)では、x方向のみ動きが観察されたことから、イオン源から出てくるビームのエネルギーが変動していると推定された。実際、HVS(負イオンを加速するための高圧電源)を100V程度意図的に変化させてみると、BPMにおけるビームの変動をほぼ再現することができた。

この入射ビームの変動は、その後ほとんど目立たなくなつたが、平成11年7月、再び現れだした。8月にイオン源を構成する電源類のチェックを行った。まず、負イオンビームのエネルギーを決める電源類、CAT(カソードポテンシャル)、EXT(エクストラクション)、およびHVSの出力電圧をモニターしたが、極めて安定しており、ビームの変動との関連は見出せなかつた。次に、まず、MALT02ライン上のBPMでビームの変動を確認した上で、これらの電源を1つずつ別のセットと交換してみた。当時、S2イオン源の増設が進行中であり、ちょうどもう1セットの電源類が存在したのである。このときのビームの変動は小さなものであったが、全ての電源を交換してみても、このビームの変動は変わらなかつた。このことから、電源類は正常であるという結論を下した。

ビーム変動の原因不明のままマシンタイムを進めていったが、平成11年10月より、ビーム変動がより顕著になり、トランスマッキシヨンが大きく変動し、あらゆる実験が困難になつてきつた。変動幅も200V程度に達し、時折、500V程度の変動を見せた。また、カソードの位置を変える(サンプルを変える)折

に変動が顕著である、引出しひームが大きいほど顕著である等の性質が観察された。ヒームの変動は、HVS 等の値を変化させることによってほぼ相殺できるため、トランスマッショングがほぼ一定になるように HVS を調節しながら実験や測定を行うとした。また、このような測定方法を取る限り、常に実験者がコンソールについている必要があったため、自動測定を行うことは事実上不可能であった。

この間、絶縁トランスの交換、アイオナイザーハウジングの交換、カソードコンタクトピンの交換等を試みたが、状況は改善されなかった。

平成 12 年(2000 年)6 月、入射電磁石 BM の変動が見出された。BM のガウスマータが時折、10G 程度も変動した。また、この変動と BPM でのヒーム変動の関連が見出された。そこで、BM 電源をインスペクションした結果、電磁石に電流を供給する電流ケーブルの電源出力端子部分が発熱、カバーが焼け焦げているのが発見された。これは、端子とケーブルの接続が不完全であったことによるものであった。その状態から判断すると、BM の変動は長期にわたって存在していた可能性があった。ケーブルを交換、接続部を改善した結果、BM の変動は解消した。

しかし、その後も入射ヒームの不安定性は解消されなかった。BM の変動は、入射ヒームの変動に寄与していたと考えられるが、原因は他にもある。実際 BM の変動によるヒームの変動は、MALT02 ライン上の BPM では、y 方向にしか現れない。しかし、平成 11 年 8 月の電源チェックの際に見ていたヒームの変動が、BM の変動によるものであった可能性が残る。当時は、ヒームの変動自体が小さいものであったため、双方の原因(BM によるものと、その他の原因によるもの)を混同していた可能性がある。

そこで、平成 12 年 9 月、再び電源のチェックを行った結果、EXT 電源を交換したところ、ヒームの変動は解消した。取り出した EXT 電源の中を調べたところ、電源側のアウトプットターミナルとケーブルの間に保護抵抗が絶縁していた。高電圧をかけた際、放電等別のパスを作り、ポテンシャルが維持されていたものと考えられる。したがって、不安定であり、また、引出しひームがエクストラクションのアパチャにあたることにより影響を受けると考えられる。ヒームの変動が、カソード位置を変えたときに顕著であったり、引出しひーム量に依存したりする現象は、このことが原因であったと考えられる。また、電源の出力電圧のモニター信号は、電源のアウトプットターミナルより内部から取り出しているため、保護抵抗の部分の影響は受けない。

平成 12 年(2000 年)8 月、S1 イオン源のアイオナイザーハウジングを新型に交換した。平成 11 年秋頃より、イオン源立ち上げ中、カソードディスクを回転する際、カソードーグランド間にスパークが起り、この電気的ノイズにより、S1 イオン源部分を真空に引いているターボポンプの電源が落ちる、という現象が頻発した。これは、一つにはカソードコンタクトピン(カソード電位)と、アイオナイザーハウジング自体(イオン源のコモン電位)の隙間が小さいことと、カソードコンタクトピンの取り付け部の剛性が低いことにより、接触もしくはスパークが起きると考えられた。新型のアイオナイザーハウジングは、構造が全く異なり、その心配はない。また、新型アイオナイザーハウジングは、気体のコンダクタンスが良く、アウトガスや、中性セシウムの滞留が小さいため、負イオンの引き出しにとても有利と考えられる。

自動測定 米国 NEC 社の提供する自動測定システム一式をインストールしたのは、平成 11 年(1999 年)5 月であった。このシステムでは、CAMAC の ADC、カウンタ、リストプロセッサを加速器システム全体を制御している pc とシリアルで結び、システム制御プログラムと連動して制御するものである。そのために必要なアナログおよびロジックシグナルをつくるための回路は、MALT サイドで用意した。5、6、7 月は、イオン源が一時的に安定していたこともあり、 ^{14}C -、 ^{10}Be -、 ^{26}Al -AMS で、自動測定を行った。これは測定者の負担を著しく軽減するものであった。しかし、8 月、自動測定システムが動作しなくなった。入力シグナルは正しいことが確認されが、その後の観察により、ADC トリガは計測しているが、ADC 後の出力を計測していないことが分かった。平成 12 年 1 月になってこの ADC(PHILLIPS 7164 型)の抵抗型フューズが絶縁していることを発見。また、その原因が基板上有るバイパスキャパシターの不良らしいことが分かった。そこで、この ADC を NEC に修理依頼した。一方、予備のために PHILLIPS の日本代理店よりもう 1 台同型の ADC を購入した。これは、平成 12 年 5 月に納入され、再び自動測定を行っている。ただし、前節で述べた S1 イオン源の不安定性のため、自動測定を用いるの

は、S2 イオン源を用いる ^{14}C -AMS のみであった。その後、S1 イオン源の不安定性が解消し、9月より、S1 イオン源を用いる AMS 測定についても自動測定を再開している。

振分電磁石電源ボード 平成 10 年(1998 年)11 月より、振分電磁石(Switching Magnet、MALT04 ビームライン)のリモート制御が利かなくなってしまった。当初通信系が疑われたが、平成 11 年 5 月に詳細な調査を行い、電源(DANFYSIK 社製)内 I/O ボードの動作不良であることが判明した。これをただちに発注するが、実際に納入されたのは、平成 12 年(2000 年)2 月であった。

イオン源フレオン冷却システム 平成 11 年(1999 年)5 月より、暫定的に使用していたイオン源冷却システムを新しいシステムに交換した(平成 12 年(2000 年)8 月)。新しい冷却システムでは、ポンプを強力なものとし、冷却効率を改善したほか、流量センサーと温度センサーにより、フレオンの状態をモニターできる。また、S1、S2 イオン源の切り替えも簡単なバルブ操作で行えるようになった(8 月)。

タンク内作業 平成 12 年(2000 年)3 月、毎年行っている定期的メンテナンスのために、加速器タンクを開けた。通常どおり、ペレットチェーンの伸びの目視検査、プーリーチェック及び交換、加速管およびカラムの抵抗体の取り付けチェックし、ペレット清掃およびグリース塗布等を行った。また、今回は特に、GVM をチェックしたところ、モーターのペアリングが劣化していたため、新規モーターと交換した。また、プローブの針を交換した。この他、加速管のリークテストを行った。また、チェーン、R.S.(ローテーティング・シャフト)のモーターのペアリングにオイルを注入した。

3. AMS 開発

昨年から今年にかけて、 ^{59}Ni -AMS および ^7Be -AMS のシステムを開発した。

^{59}Ni に関しては、inverse-PIXE 法(projectile-Xray 法)を試みた。これは、測定したい核種(この場合 ^{59}Ni)を加速し、ターゲットに衝突させ、その際発生する特性 X 線を検出しようとするものである。MALT では、AMS コース終端付近(ガス・フィルド・マグネットよりも前)の多目的角チャンバーに、ターゲットと X 線検出器を配置することによってシステムを構築した。スタンダードサンプルは、京都大学原子炉実験所で熱中性子照射された Ni 金属片より作製した。 ^{59}Ni -AMS における最大の妨害同重体は、 ^{59}Co であるが、ターゲット材の吟味(Ge を選択)、およびサンプル前処理(陰イオン交換)の吟味を行った結果、 $\text{Co}/\text{Ni} = 6 \times 10^{-8}$ 以下に抑えた場合、バックグラウンドレベル $^{59}\text{Ni}/\text{Ni} = 3 \times 10^{-9}$ を達成できることを確認した。しかし、スタンダードサンプルの測定において、繰り返し測定のばらつきはは統計から予測されるばらつきを大きく越えるものであった。これは、システムのジオメトリ(ターゲットおよび検出器)が、検出効率を最優先して決めたものであったため、ビーム位置のわずかな変動(加速器の変動やビームエミッションの変動による)によって効率が大きく変わってしまう結果であると考えられた。今後は、ジオメトリを再検討すべき課題が残った。

^7Be については、MALT04 ビームラインのセカンドストリッパーを利用した。すなわち、分析電磁石で $^7\text{Be}^{3+}$ を導き、セカンドストリッパーで $4+$ とし、引き続く振分電磁石および ECA によって $^7\text{Li}^{3+}$ を完全に分離する。今回はセカンドストリッパーとしては、手持ちの厚み $85\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のカーボンフォイルを使用した。トランスマッショントラップは 68% であった。結果として、予想通り、 $^7\text{Li}^{3+}$ は完全に分離することができた。同位対比は、ジャンピングを用いて 04 ラインのマルチファラデーカップで、 $^9\text{Be}^{4+}$ を測定することによって求めたが、同位対比 $^7\text{Be}/^{10}\text{Be} = 10^{-12} \sim 10^{-14}$ のサンプルについて、カウンティングで求めた値と整合する結果が得られた。限られた時間の中での実験であったため、十分なカウント数が得られなかつたため測定の再現性については言及できないが、少なくとも 1×10^{-14} のバックグラウンドレベルを確認した。 ^7Be は、大気中の宇宙線生成核種の生成率の変動や、大気中の物質循環のプローブとして重要な核種であり、多彩な応用研究に利用されている。現在は、その定量にはカウンティングが主流であるが、今後 AMS を用いた測定件数も増大していくものと期待される。

最後に、MALT において、今までに開発された、あるいは、ルーチン測定に入っている AMS システムのパフォーマンスを表にまとめておく。

MALT

Main Beam Lines

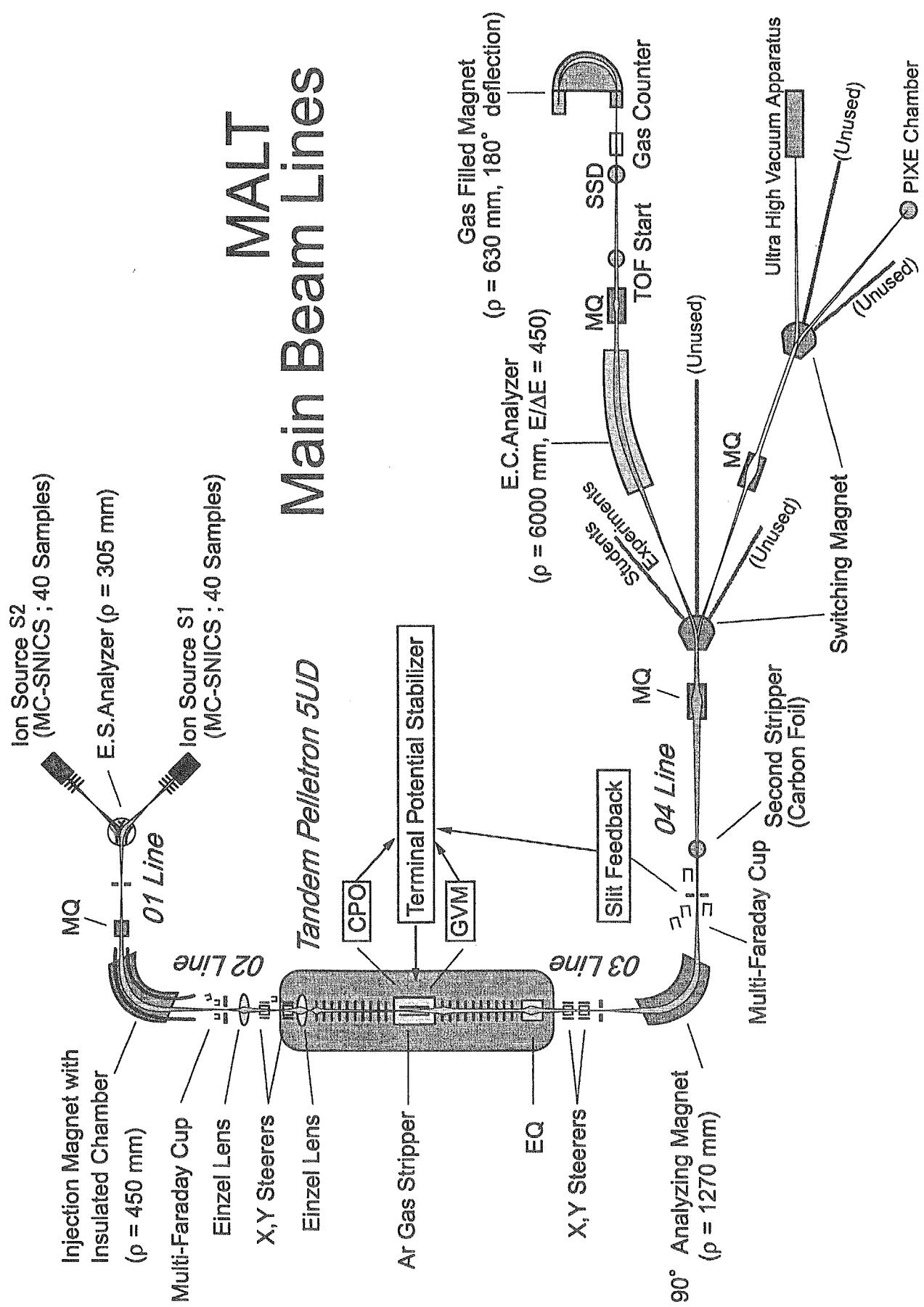


図1. MALTビームラインの概要

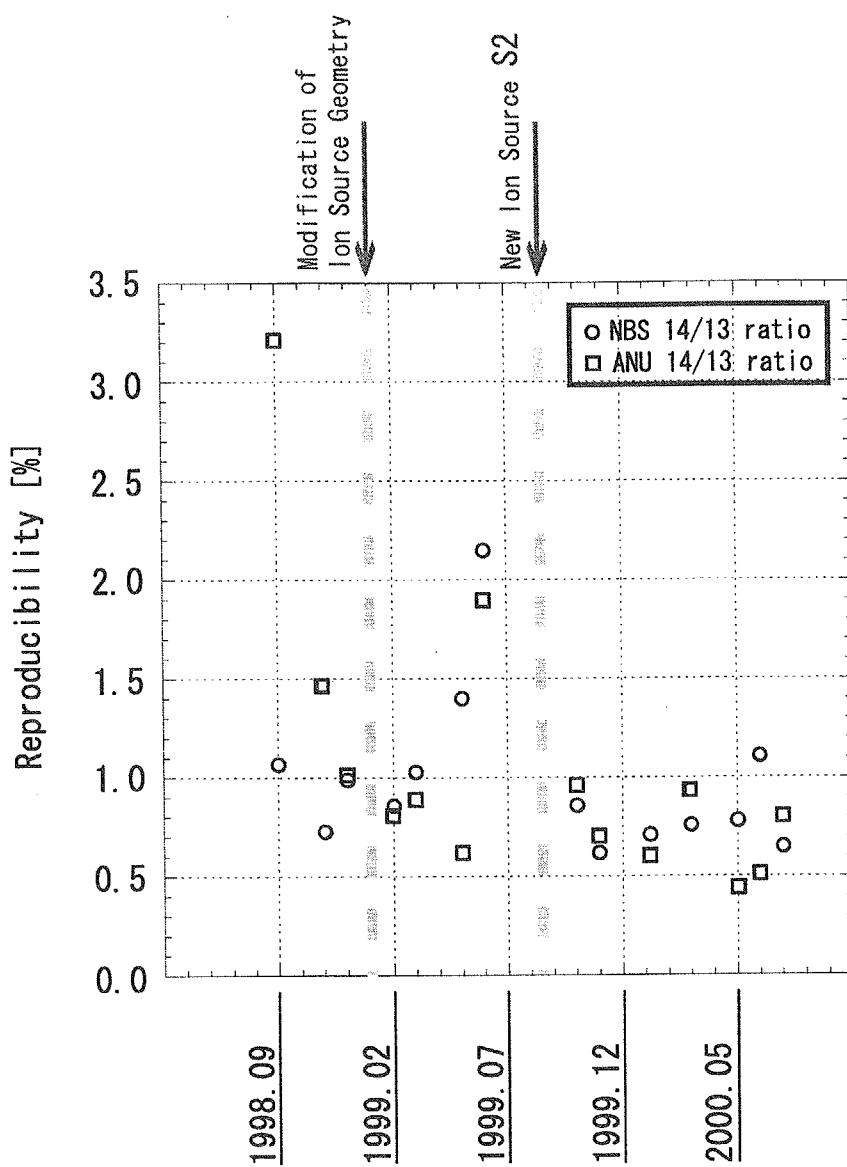
図2. MALTにおける¹⁴C-AMSの繰り返し精度の変遷

表 MALT-AMSパフォーマンス

MALT-AMS Performance

核種	半減期	化学形態	入射イオン	加速電圧 (MV)	電荷	入射法	粒子識別法 ECA +	最小検出感度 (X^*/X)	再現性 (精度) (±%)
⁷ Be	53.3d	BeO	BeO ⁻	4.8	3+ → 4+	SIM	H-SSD	1×10^{-14}	???
¹⁰ Be	1.6×10^6 y	BeO	BeO ⁻	4.8	3+	IBMM	GC	7×10^{-15}	2-3
¹⁴ C	5,730y	グラファイト	C ⁻	5	4+	SIM	H-SSD	3×10^{-16}	< 0.7
²⁶ Al	7.2×10^5 y	Al ₂ O ₃	Al ⁻	4.3	3+	SIM	GC	5×10^{-15}	2-3
³⁶ Cl	3.0×10^5 y	AgCl	Cl ⁻	5	7+	SIM	GFM	1×10^{-14}	4
⁵⁹ Ni	7.6×10^4 y	Ni	Ni ⁻	5	6+	SIM	IPIXE	3×10^{-9}	20
¹²⁹ I	1.6×10^7 y	Agl	I ⁻	3	5+	SIM	TOF	4×10^{-13}	9

* IBMM : Internal Beam Monitor Method
 * SIM : Sequential Injection Method

** ECA : Electrostatic Cylindrical Analyzer
 ** H-SSD : Havar foil + SSD
 ** GC : Gas Counter, ΔE-E
 ** TOF : Time Of Flight + SSD
 ** GFM : Gas Filled Magnet
 ** IPIXE : Inverse PIXE (projectile X-ray)

2-5 TIARA静電加速器の現状

原研高崎 高田 功、水橋 清、宇野定則、大越清紀、中嶋佳則、千葉敦也、
斎藤勇一、石井保行、酒井卓郎、神谷富裕、田島 訓

1. 運転・利用状況

平成11年度、TIARA静電加速器施設の3台の加速器は年間運転計画（タンデム：166日、シングルエンド：162日、注入装置：143日）に基づき、耐放射線性半導体の制作技術の開発、マイクロビームを用いたPIXE分析技術の開発、複合照射を用いた核融合材料の研究等の放射線高度利用研究に使用された。平成11年度に於ける各加速器の運転時間は、3MVタンデム加速器、3MVシングルエンド加速器及びイオン注入装置について、それぞれ2,098時間、2,593時間、1,867時間であった。なお、今年度、イオン注入装置の設置以来のトータル運転時間が、昨年度のタンデム加速器、シングルエンド加速器に続き、10,000時間に到達した。図1と図2に各加速器の年度、月別の運転時間を、また、図3と図4に研究分野別と利用形態別の利用実績を示す。

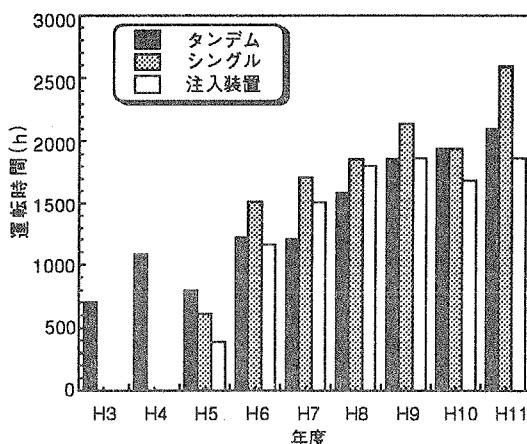


図1 各加速器の年度別運転時間

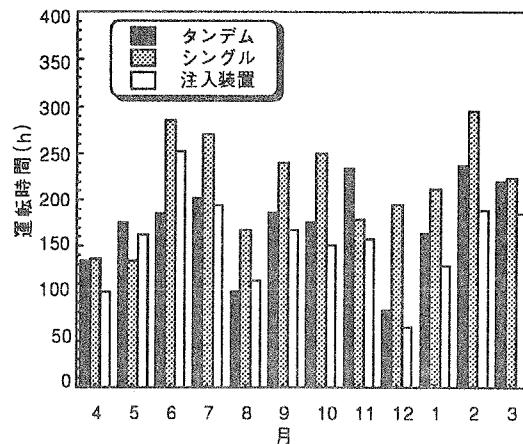


図2 各加速器の月別運転時間

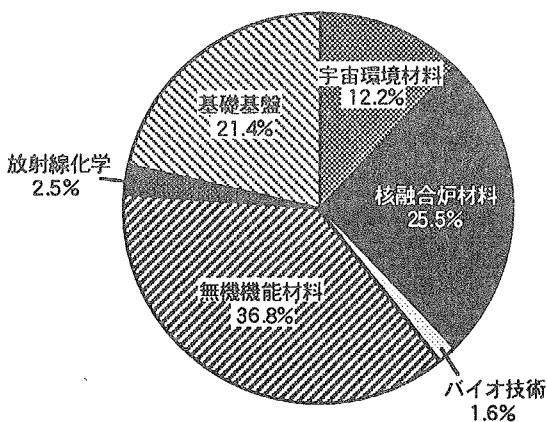


図3 研究分野別利用実績

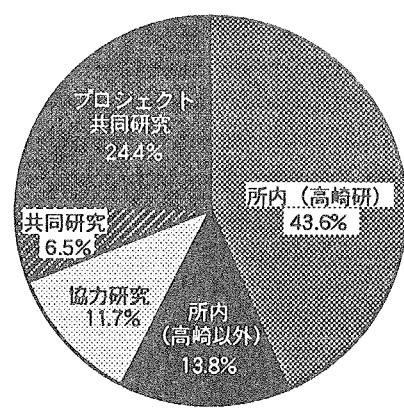


図4 利用形態別利用実績

2. 整備状況

2. 1 小型ECRイオン源の実用化

従来、静電加速器群ではイオン注入装置の最高加速エネルギーが400keVであるのに、タンデムの加速最低エネルギーは800keVと加速エネルギーの空白域を抱えていた。そこで、これをカバーするために従来のフリーマン型イオン源と違い多価イオンが発生可能な小型ECRイオン源の開発を進めてきたが、ようやく実用の目途がたち (Ar^{6+} で $1\text{e}\mu\text{A}$) 今年度後半に照射利用への提供を行った。しかし、ECRイオン源についてはフリーマン型イオン源との互換性は確保したものの、装・脱着の容易性と電流量に係わる機器の操作（流調弁、フォーカス電圧等）が制御室で出来ない等の問題点を抱えている。来年度はこれらの問題点をクリヤーするとともに、提供イオン種の増加（O、Xe、Kr等）を目指す。図5にECRイオン源の概略図を示す。

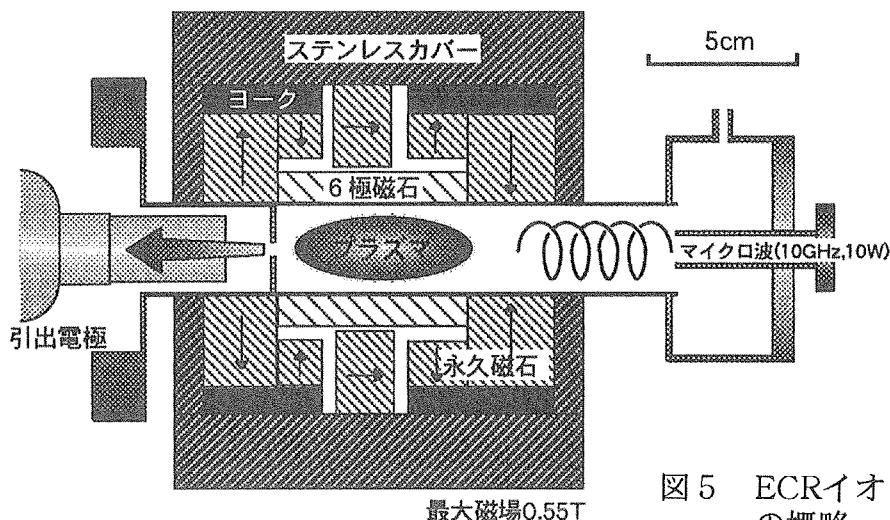


図5 ECRイオン源
の概略

2. 2 新型電圧測定抵抗の開発

シングルエンドの加速タンク内の昇圧部に設置してある電圧測定抵抗（ $240\text{M}\Omega$ 並列×220段=3m）は電圧の表示だけでなく制御にも使用されているが、今までしばしば、放電時のサージによる損傷（抵抗値の劣化と破損）を受けてきた。そこで、今年度新形式の電圧測定抵抗モジュールを試作して実装架し、耐放電テストを行った。

新型の従来型との相違点は、1) 2本並列の抵抗を1本にして保護カバー（2種類）を付けた、2) 取り付け方法をハンダ付けからネジに変更した、3) スパークギャップの間隙を小さくした、である。抵抗本体は温度係数等の問題から適当な代替品が無かったた

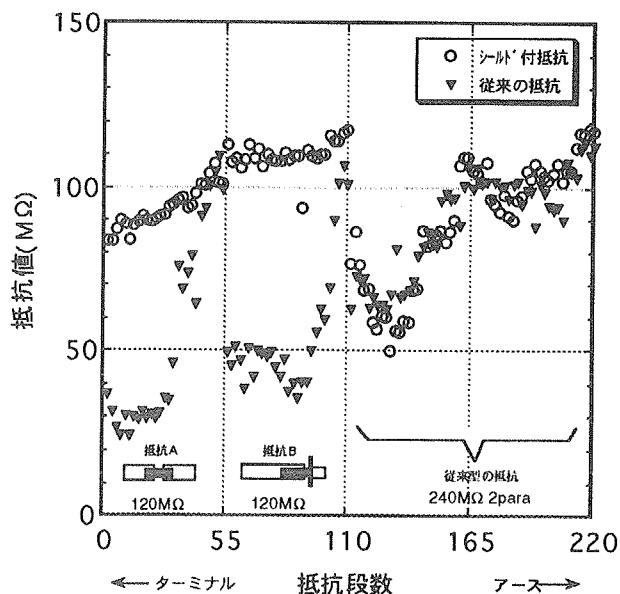


図6 電圧測定抵抗の劣化分布の比較

め従来使用していたものを用いた。なお、テストでは新型測定抵抗を4ユニットのうち高圧側から2ユニットとし、他の2ユニットは従来のものを使用した。図6は3MVで放電を発生させた時またま出現した（放電させても常に損傷が発生するとは限らない）抵抗値の変化の比較である。この結果から見ると新型のものは従来のものと比較して明らかに耐放電性（耐サージ）が向上していることが解る。今回は高圧側2ユニットのみ新型という中途半端なテストであったが耐放電性の向上の見通しがたったので今後も機会をみてテストを重ね、耐放電性に優れた「電圧測定抵抗モジュール」の開発を目指す。図7に新型電圧測定抵抗の中のB型抵抗の取り付け状態を示す。

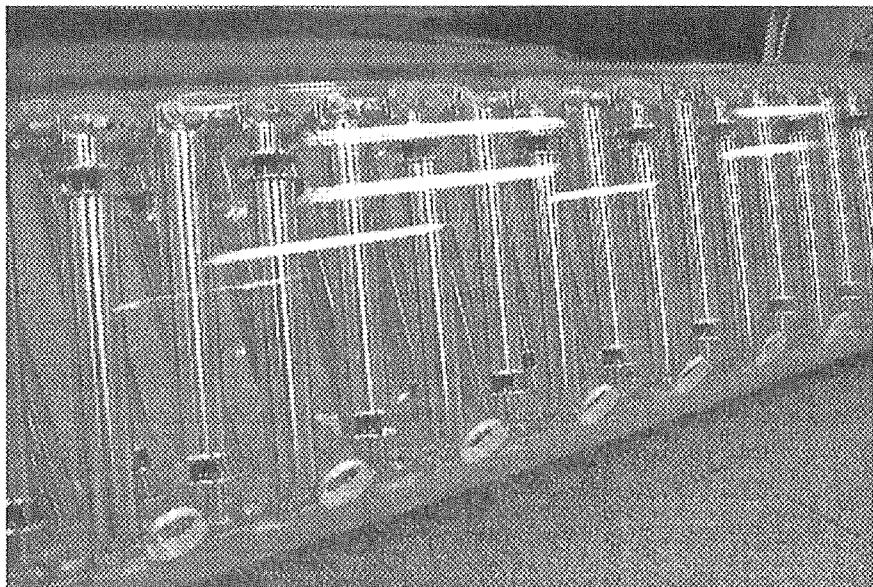


図7 新型電圧測定抵抗（B型抵抗）

2. 3 偏向電磁石の電源交換

ビームの安定性の向上のためにシングルエンドとイオン注入装置ビーム輸送系の偏向電磁石の電源（計5台）を現在使用している電源より高安定度（電流安定度： 3×10^{-5} 以下）のものに交換した。タンデムの電源も順次交換する予定である。

3. 故障等

3. 1 タンデムの電圧コントロール不能

タンデム加速器では、加速電圧の制御、保持をタンク下部に設置してあるコロナプローブで行っているが、1月にこれが不能となる状況が発生した。調査の結果、コロナプローブを挿入するとロス電流が発生し電圧の保持ができなくなることが判明した。このことから原因はコロナプローブにあると考え、これの構成品であるコロナニードル針、絶縁体（ナイロン）、ケーブル、3極管を交換した（図8参照）。しかし状況は改善されなかつたため、タンクを開放し加速管廻りも調査したがここでも不具合箇所は確認できなかつた。なお、今回と同様の事象は過去にも数回発生しているがその時は前述の構成部品を交換することで機能は正常に復帰した。

そこで、次に加速タンクに封入（ $6 \text{ kg f/cm}^2\text{G}$ ）してある絶縁ガス（ SF_6 =約45

Nm³) の絶縁耐力が何らかの原因により低下したのではないかと考え、SF₆の一部を交換（約28Nm³）したところ、電圧制御機能が回復した。SF₆が原因とすると1) コロナ放電による近傍のSF₆の分解、2) 不純物、水分等の混入等による絶縁耐力の低下等が考えられるが確実なところは解らない。現在、故障時に封入してあったSF₆の分析（空気、CO₂、SO₂、H₂O、HF等）と耐電圧試験の準備を進めている。結果については次回のタンデム研究会で報告したい。

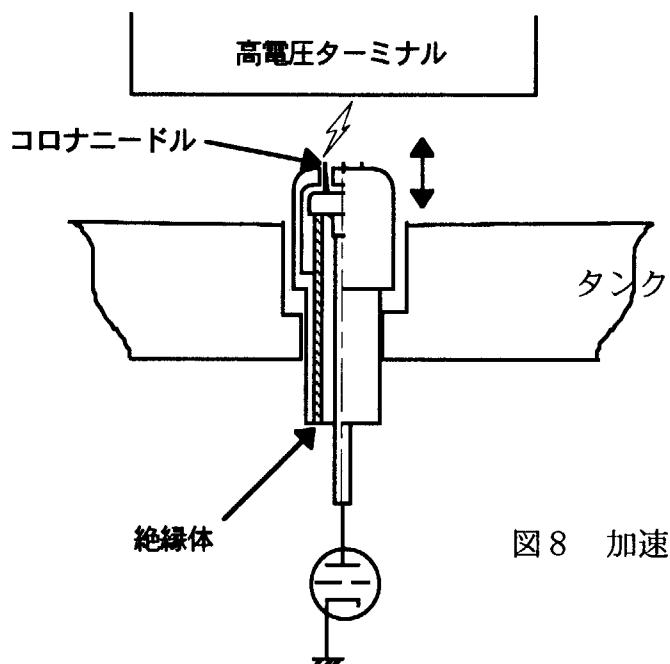


図8 加速電圧制御装置

3. 2 シングルエンドのサーモメカニカルリーク弁 (TML) の故障

TMLはタンク内の6 kg/cm²Gに加圧されたSF₆ガス雰囲気中に設置しており、金属管を通電加熱（最高約65A）し、その熱膨張を利用してRFイオン源に供給するガス（H、D、He）流量をコントロールする弁であるが、今年度はこれのトラブルに悩まされた。8月にH用、11月にH用とHe用が破損し都合15件の実験日程を変更した。

当該TMLの金属管は当初SUS製のものを使用していたが破損までの時間が短く、途中でNi合金製のものに変更した経緯がある。変更後は約3,000時間程度の健全性はあったが、ここに来て性能の低下が著しく上述のTMLは3個とも約400時間で破損した。TMLは設置場所がタンク内ということもあってこれのトラブルは計画運転に及ぼす影響が非常に大きい。現在代替品について検討している。

4. 今後の計画

保守が使用機器の製造中止等により困難になったタンデム加速器の制御系を12年度の11月に更新することになった。更新に際しては計算機の高性能化を計り、イオン源の増設等の高能率化に対応できるようにする。



JP0150277

JAERI-Conf 2000-019

2-6 重イオンビームプローブ (HIBP) の開発と 3 MeV タンデム加速器

西澤 章光、浜田 泰司、川澄 義明

核融合科学研究所

1. はじめに

核融合科学研究所における大型ヘリカル装置 (LHD) では大型の超伝導ヘリカルコイルを世界ではじめて採用してプラズマを閉じ込め、高温高密度のプラズマを定常的に保持することを目指して研究が行われている。その実験は第 3 期を成功裏に終え、第 4 期には追加熱装置の増力などプラズマ温度や閉じ込め時間の改善などの計画が進められている。重イオンビームプローブ(Heavy Ion Beam Probe 略して HIBP)は、そのプラズマ閉じ込め機構の解明に必要なプラズマ中の空間電位分布と揺動を直接的に測定できる重要な手段である。LHD 装置のヘリカル磁場は最大 3 T (テスラ) であり、プラズマ主半径は 4 m、プラズマ小半径は 0.5~0.6 m である。HIBP 測定においては磁場の強さとプラズマ半径などを考慮して、最大エネルギーが 6 MeV で、質量数が 200 位である 1 倍のイオン (Au または Ti) の入射が必要であり、コッククロフト・ワルトン型のタンデム加速器が最適である。プラズマに入射された 1 倍のイオンビームはプラズマと相互作用し、そのイオンビームの 1 部は電子を剥ぎ取られ 2 倍のイオンになる。その 2 倍のイオンは閉じ込め磁場により軌道を変えるが、プラズマから取り出された時はプラズマの内部電場によるエネルギー変化を反映しており、そのエネルギーを精密に測ることにより、内部の電位を知ることが出来る。この測定手段の開発のために、平成 10 年にコッククロフト・ワルトン型 3 MeV タンデム加速器を科技庁より認可を受け、当研究所の計測実験棟において加速器の調整運転と基礎的な実験を行ってきた。また、LHD プラズマの測定をするためのビームラインの建設も同時にを行い、前年度後半からは施設検査、並びに、LHD 本体棟への加速器設置の準備を行った。12 月に施設検査を受け合格し、現在同機としては廃止となり、新たに LHD 本体棟に設置された加速器の使用許可を申請中である。ここでは加速器の現状と、現在計画しているタンデム加速器を用いたプラズマ計測の紹介、及び実験的に得られた加速器に負イオンを入力して出力される正イオンのガス圧特性、また、放射される X 線特性などの装置の基礎的な特性について報告する。

2. 加速器の現状

2-1. 加速器

前述したように現在加速器は新たに LHD 実験棟に設置され、真空テストを始め絶縁ガス圧力テストや初期高電圧発生試験、及び、シーケンス試験など基本的な試験を終えている。計測実験棟における加速器の使用許可の認可を受け、施設検査までの期間が 2 年近くかかった理由は主に加速器の幾種類もの修理に時間を必要としたことと、イオン源の性能の開発に時間を要したためである。次に主な故障に付いて述べる。

1) 荷電交換ガス (Ar) 制御用回路や直流高圧安定化電源制御用回路の故障

HIBP で使用する加速器はプラズマ電場の微少な変化も測定できるように、電圧の安定

度は 10^{-5} 近くまで調整が必要である。そのため、安定化回路は電圧変化に対し非常に感度を上げて使用している。従って、エイジングなどの際に帰還回路などにノイズの影響を受けやすく安全スイッチが作動して高電圧が瞬時に遮断される。そのため加速器内部の高圧ターミナル部に搭載されている荷電交換ガス (Ar) 制御用回路や直流高圧安定化電源制御用回路が故障した。荷電交換ガス制御回路についても故障しやすく、2回目以降は発電機の周波数のみで調整を行った。

2) SF6 ガスの加速管への流入、

荷電交換ガスセルで差動排気を行うためガス循環用のターボ分子ポンプを狭い所に 2 台搭載している。そのためジョイント部に力がかかっていたためリーク量はわずかであるが圧力を掛けるとリークが発生し、荷電交換に影響したため循環系は取り外した。以後ビームテストは全て循環系を使用せずに実行した。

3) SF6 ガス循環用回転導入端子軸からの SF6 ガス流出、

加速器タンクの昇圧部を冷却するように SF6 ガスを熱交換器を通して循環させるためタンク内でブローを用いている。回転軸には磁気結合型回転体を使用しているが水冷部シールの腐食が生じ水が侵入し圧力シールを腐食させたようであるが、はっきりした原因はつかめていない。

4) リップル調整用導入端子の腐食による SF6 ガス流出

加速器昇圧部の外部からチョークコイルを使用してリップルの調整を行っているがその昇圧部への電流導入端子が熱により腐食してリークが発生した。原因はリード線の結線の緩みと考えられる。

2-2 イオン源

HIBPにおいて、イオン源は出来るだけエネルギー広がりの少ないプラズマスパッター型を採用しており、調整運転として銅の 1 倍の負イオンを用いている。現在使用しているイオン源の典型的なパラメーターは フィラメントに LaB6 を用い、プラズマ放電電圧 15~20V、電流 1~2A、ターゲット電圧 200V、電流 5~10mA でありターゲットは 14φ である。このとき引き出されるイオン電流は数 μ A である。今までの改良としては、イオン源引き出し部の電子を押さえるための永久磁石配置の改良や、引き出した後のレンズ系などの改良を行いイオンビームを有効に引き出せるようにしたことや、フィラメントを LaB6 に置換え、プラズマ放電電圧を下げられるようにし、長時間の放電が可能にしたこと、また、熱鞘の改良により安定に放電ができるようにしたことなどが上げられる。更に、イオン化電圧を下げるための Cs の温度調整を厳密に行うことにより長時間安定にイオン源を働かせることができるようにになった。しかし、長時間運転が可能になって新たに、放電部内部の絶縁や引き出し部の絶縁悪化が問題になり、その解決が必要になることが判明した。

3. 重イオンビームプローブ (HIBP) 測定装置

HIBP 測定装置の概念図を図 1 に示す。装置の構成はイオン源部、加速部、ビームライン(入射部)、エネルギー分析部である。負イオン源から引き出された 1 倍の金の負イオンはプリ

加速管を用いて 100keV 以下で加速され、磁石を用いた質量分離管で軽い酸素や電子を取り除き、加速管に導入される。ガスセル部では Ar ガスで荷電交換が行われ正イオンが取り出される。このとき多価イオンも生じるので、高エネルギー側をでたビームは静電荷電分離装置で測定に必要な 1 価のイオンのみを取り出す。取り出されたビームはプラズマまでの距離が長いので（プラズマ中心まで 20 m）、プラズマに最適に入射するためにビームの広がりや位置を調整するための伝送系を使用する。加速されたビームは水平方向に出力されるので、プラズマに入射するために曲率 4.8m のシリンドリカルデフレクター（CD）で 90 度垂直上方に向かって軌道が曲げられる。プラズマに最適な径と位置を調整するため Q レンズと XY ステアラを用いる。プラズマの空間分布を測定するために入射口にあるオクターポールでビームの角度を振って入射する。プラズマに入射された 1 価のビームの一部はプラズマと作用し、電子を剥ぎ取られ 2 価のイオンになり、プラズマ中の磁場で曲げられ、エネルギー分析器に入射される。分析器に入射するとき、軌道を修正するためにオクターポールを用いる。分析器は静電型を用い、動作電圧を下げるため入射角度が 6 度と 10 度を 2 台つなげたタンデム型分析器で 50 kV から 150 kV の電圧を印加して使用する予定である。検出器は数 10V 程度のエネルギー変化も測定できるように、互いに接近した 2 枚の金属板で受け、その電流値の差でプラズマ中の電位の変化を測定する。

4. 出力正イオンビームの特性

HIBP の測定に必要なビームは 1 価の正イオンでありその電流値は入射負イオン電流値に比例し、荷電交換率は加速管内の Ar ガスの圧力に依存する。加速ビームはエネルギーが高いので多価のイオンも生じ 1 価のイオンを最大にするためには加速管内のガス圧特性を調べる必要がある。図 2 は静電荷電分離装置の電極の電圧を変えて、価数別の電流値を約 6 m 離れた点においてファラデーカップで測定したものの代表的な例である。ガス圧が 2.7×10^{-4} Pa では 1 価のイオンは殆どなく多価ばかりになる。各価数がピークになるとろの荷電分離装置の電圧比は 1、2、3、4 価に対して 2 : 3/2 : 4/3 : 5/4 になっている。ファラデーカップのビーム入射径は 1

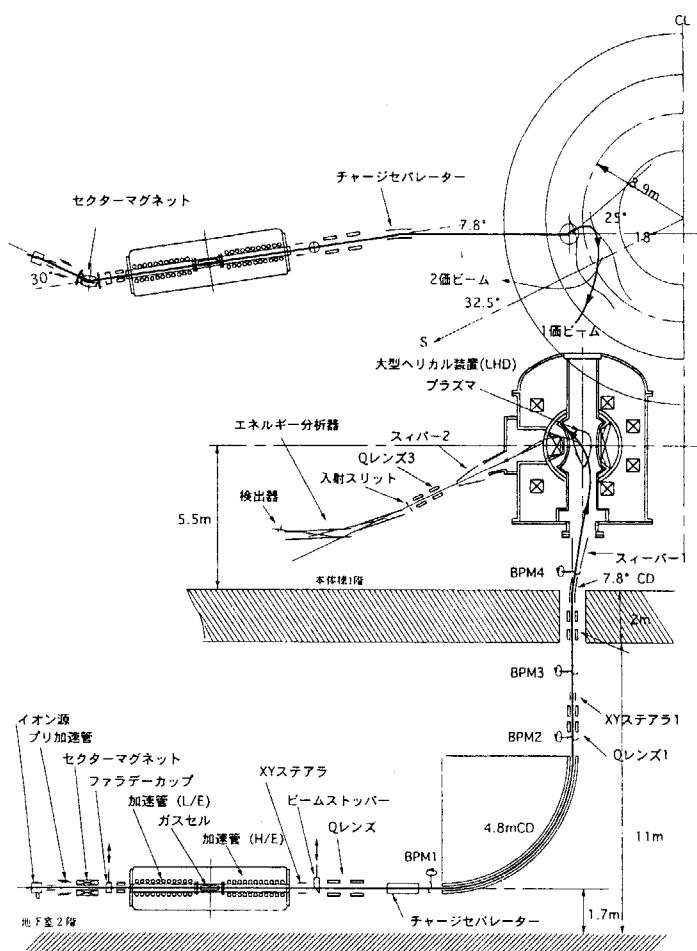
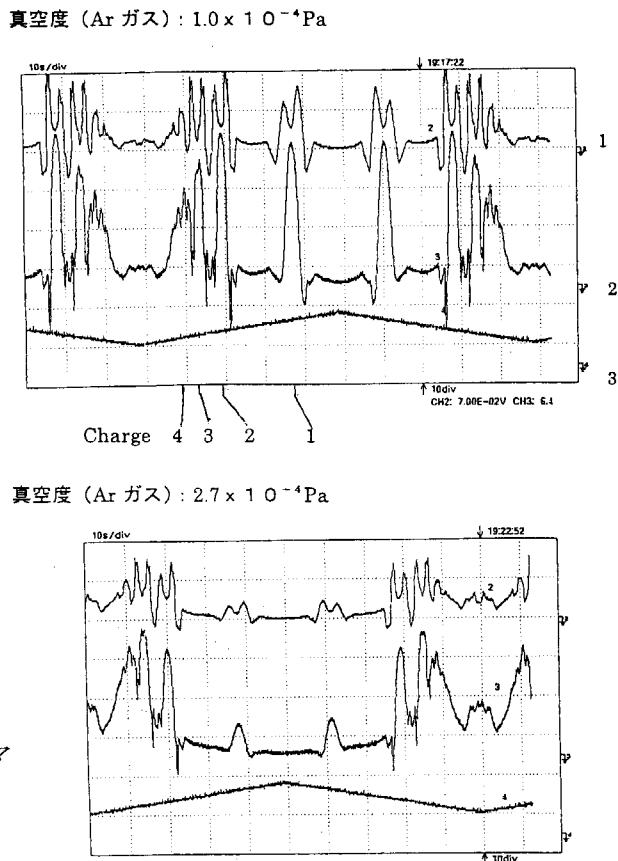


図 1. 重イオンビームプローブ (HIBP) 測定装置概念図

5 φ であるが、電流信号のピーク付近のなまりは距離を変えた測定結果から、エネルギーの広がりではなくビーム径の広がりを表わしていると考えられる。ガス圧を変えたときの測定結果を図3に示す。1価の電流値が最大になるガス圧は 1×10^{-4} Pa である。このことは、ガス圧が低い時は荷電交換率が低くガス圧と共にその値が増加するが、ガス圧が増えすぎると1価が2価になる断面積が増加することを示している。全電流値は加速器出口のビームストッパーで測った値である。ガス圧と共に電流値も増加しているがこれは多価のイオンが増加しているためである。

5. 今後の予定

加速器の運転は 使用許可の認可を受けてから可能であるので、本年度末ぐらいにはプラズマの測定ができると思われる。



accelerator voltage:3MV, injection current: 2.3μ
A,1:Faraday sealing signal(0.5V/div),2:target
signal(0.2V/div),3:7.8° charge separator
sweeping voltage(5V/div;45kV±20kV)

図2. 静電荷電分離装置による価数分離特性

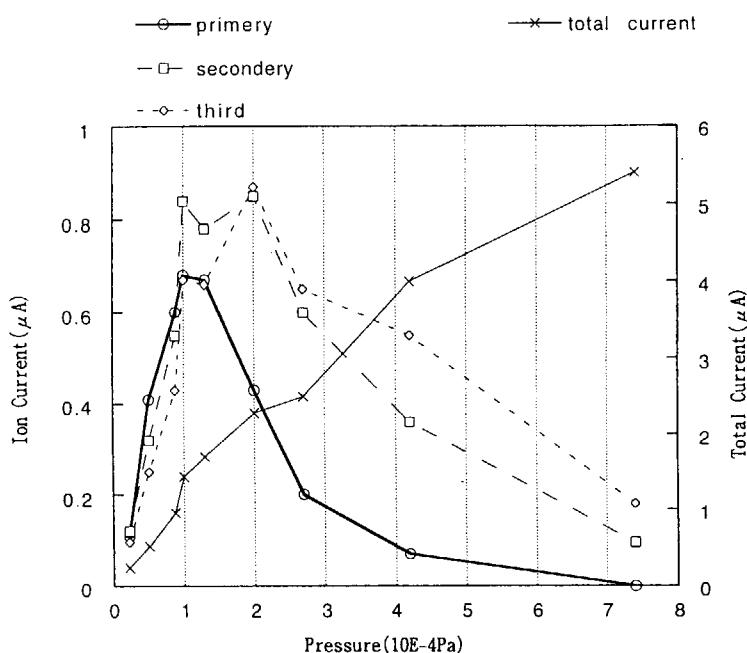


図3. 価数別電流ガス圧特性
加速電圧：3 MV、
入射負イオン電流： 2.6μ A



JP0150278

JAERI-Conf 2000-019

2-7 福井県若狭湾エネルギー研究センターの現状

羽鳥 聰、伊藤慶文、石神龍哉、安田啓介、猪股 亨、
丸山忠司、池澤一浩、畠下昌範、高城啓一、
山本和高、福田茂一、久米 恭、鍵谷 豪、
土手雅人、山田政信、山田裕章、
大谷暢夫、富永 恭、福本貞義、近藤道也

財団法人若狭湾エネルギー研究センター

1. はじめに

福井県若狭湾エネルギー研究センターでは、材料改質研究、分析技術の開発等の理工学、癌治療研究、農作物の品種改良研究等の、幅広い分野における研究に利用される粒子線加速器の設置作業を進めている。

加速器はターミナル電圧 5 MV のシェンケル型タンデム加速器（日新ハイボルテージ社製）と 200 MeV 陽子シンクロトロン（日立製作所製）からなる。また、独立に 200 keV マイクロ波イオン注入装置を持つ。

タンデム加速器はシンクロトロンの前段加速器として用いられ医療用ビームを供給するほかに、単独のビームラインを備え、微量分析、材料研究、生物照射等のイオンビーム応用研究にも利用される。

研究施設建築終了とともに 1998 年 7 月より加速器の設置作業を開始し、現在、ビーム加速調整試験を開始している。本稿では加速器施設の概要、今まで確認されている加速器の性能、その性能を得るにいたるまでに生じた問題点、改良について、および、ビームラインの敷設状況、それを用いての研究計画について、述べる。

2. 加速器システム

若狭湾エネルギー研究センターで行われようとしている研究は非常に多岐に亘るため、加速器にも多くの要請が生じてくる。加速器に求められる条件として、(1) 利用可能イオン種の多様性、(2) 幅広いエネルギー領域で利用可能、(3) ビーム加工が容易、(4) 大強度を確保しつつ正確に制御されたビーム強度およびエネルギー、があげられる。

これらの要請を実現するため、低エネルギーから高エネルギーまでカバーできる複合加速器システムを建設している。加速器は、スタンドアローンで用いられる 200 keV イオン注入装置、MeV ないしサブ GeV イオン加速器からなる。イオン化試料の頻繁な交換が想定され、また、大強度ビームによる負荷に耐えるため、MeV 級加速器にはターミナル電圧 5 MV のシェンケル型タンデム加速器を選んだ。また、医療用加速器としての目的をも担うため、人体での飛程を考慮し 200 MeV シンクロトロンを後段加速器として採用した。

表面衝撃型イオン源による固体ターゲットからの負イオン生成は多くの加速器施設で成果をおさめているが、我々は高強度パルス運転の必要性からプラズマ衝撃型イオン源を採用している。また、気

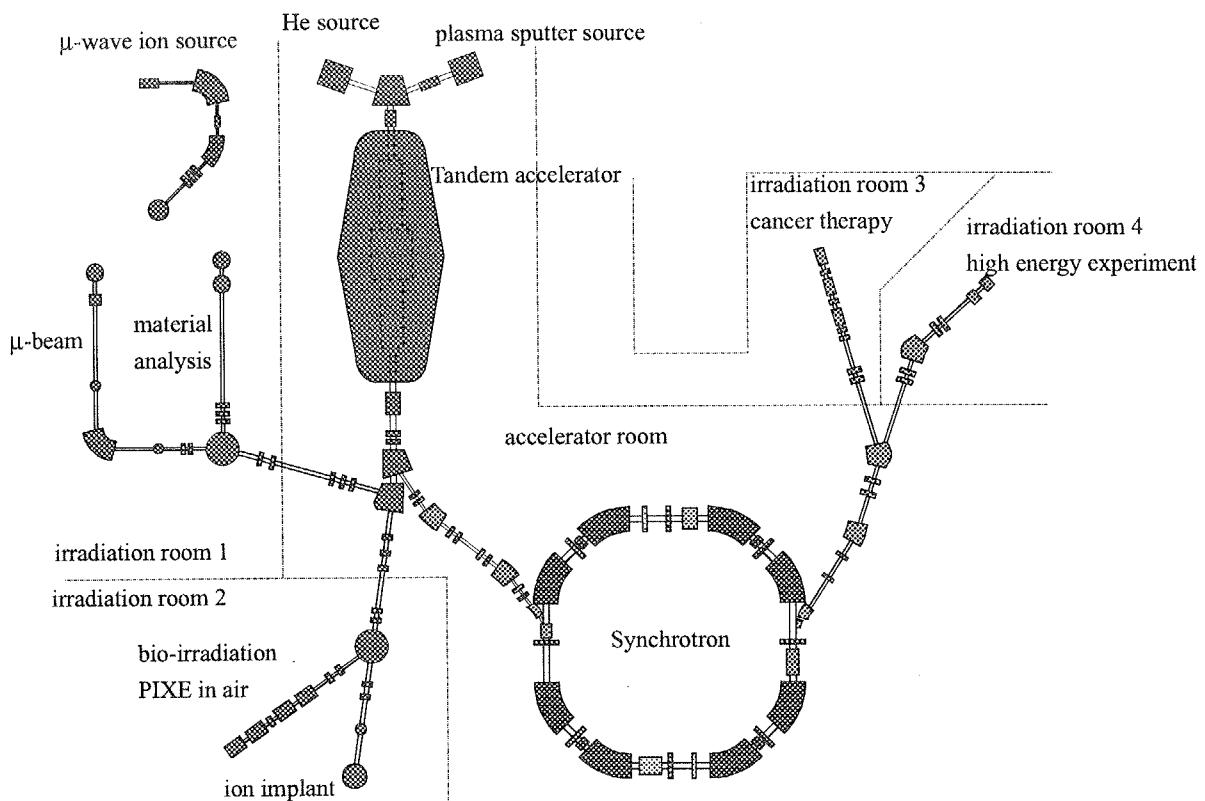


図1 若狭湾エネルギー研究センター複合加速器システム

体元素とくに負ヘリウムイオン生成用にバケット型正イオン源とリシウム蒸気による荷電変換を組み合わせたものを用いる。ビーム加工により強度を極度に損なわない低エミッタスピームを得るために、200 keV の前段加速をおこなう。

さらに、ロスのないビーム輸送系、ロスのない加速を行うための改良、開発実験を行っている。システムの詳細については1999年当研究会報告集にあるので参考されたい。図1に我々の加速器システムのレイアウトを示す。

3 イオン源

図2にイオン源およびタンデム入射系を示す。メインイオン源はプラズマ衝撃型イオン源を用い、水素のタングステンターゲットによるコンバージョン、固体ターゲットのイオン化を行う。200 KVの前段加速を受けた負イオンは四連四重極電磁石により発散角の補正を受け分析電磁石、入射系へと導かれる。プラズマ発生用のアーク電圧と静電キッカーのパルス運転によりシンクロトロンへパルス入射を行う。

気体元素とくにヘリウムの負イオン化を行うために荷電変換型のイオン源を備えている。正イオン発生はバケット型イオン源で行う。荷電変換セル内のリシウム蒸気との荷電変換により負イオンをうる。50 μ Aのヘリウムイオンを引出し可能である。イオン源開発に関しては、本プロシーディングス内に大塚らが詳しい報告を行っているので参考されたい。

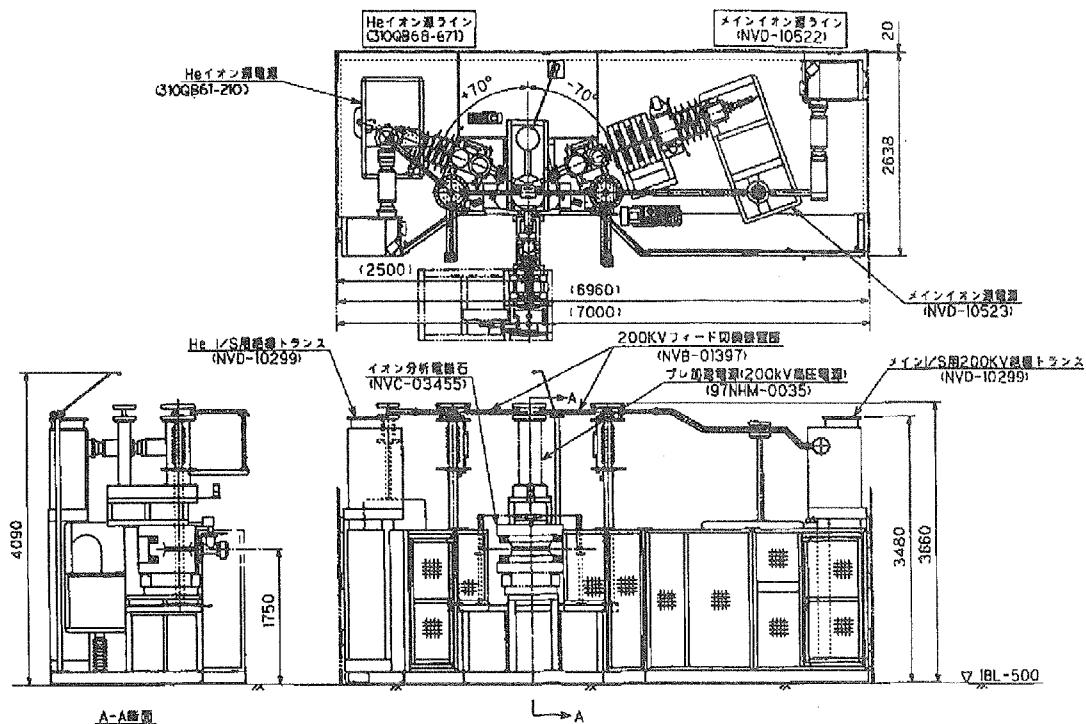


図2 イオン源および入射系

3. タンデム加速器

ターミナル電圧 5 MV タンデム加速器（日新ハイボルテージ社製）は MeV イオンビームを用いた分析やイオン注入に用いられるほか、200 MeV (陽子) シンクロトロンの前段加速器として用いられる。イオン注入やシンクロトロンへの入射器として用いられるため、搬送電流が大きくできる高周波整流型の昇圧装置（シェンケル式）が採用されている。

この種の加速器の最大の課題が高圧の維持である。医療にも用いられる我々の加速器は人を照射するという特殊性のため、短期的な医療中断のみならず、加速器破損による長期的なシャットダウンも最大限避けられなければならない。特にコンデンサを電荷の押上や平滑に用いるこのタイプの加速器は放電による機器へのダメージは直流型のバンデグラーフやペレトロンの比ではない。以下、我々の経験した放電事故、放電に対するオペレーション上の対策、その対策と輸送効率向上との矛盾点、またその克服について述べる。

3.1 抵抗セパレーター破損事故

加速管の電極への電圧分割はブリーダー抵抗を用いている。隣接する抵抗が静電力で引き付けあうことによる短絡を防ぐために機械的に両者を遠ざけるため、絶縁ポストを挿入していたが、それぞれのポストは絶縁板（アクリル）の上に設置されていた。その絶縁板が 2 MeV 近くをブリッジしていたため小規模な絶縁破壊が連鎖的で広範囲な絶縁破壊を引き起こし、分割抵抗を破断する事故を起こした。現在、電位的に独立なポストを挿入することによりかかる事故は発生していない。

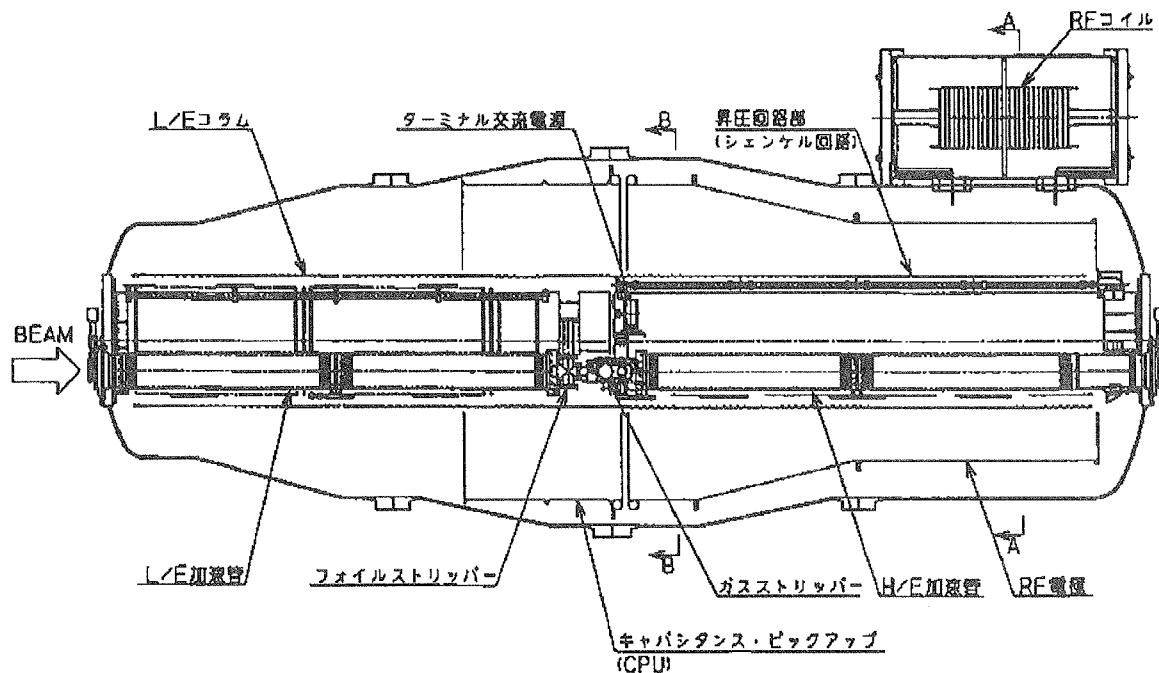


図3 タンデム加速器

3.2 ロテーティングシャフト破損

ターミナル内の荷電変換装置に我々はガスストリッパーを採用しているが、ガスのコンセントレーションのためにTMPによる循環を行っている。そのTMPへの電力供給を行うため設置側から絶縁シャフトを介してターミナルの発電機を運転している。放電による電子機器の破損を嫌うため、電気品はターミナル内にいっさいおかげガスの流量制御もピエゾバルブを用い発電機からの電圧を直接供給し、発電機の回転数により制御を行う方式をとっていた。

このため、発電機の回転数を変化させる過程で、いくつかの振動の共鳴点を通過せざるをえず、シャフト破損の下地を作っていたといえる。また、シャフト、ベアリングのアライメントの甘さ、ベアリングへの注油ミス等が重なり、ベアリングを破損させ、その際に飛散したボールが大きなタンク放電を引き起こすこととなった。

現在ではターミナルの静電シールドをより強固なものにし、ターミナル内に設置したピエゾバルブのコントローラを光リンクにより制御し、発電機の回転数は一定にした。ベアリングの交換の際にはアライメントを慎重に行い、かつ、振動を測定し共鳴が起こっていないことを確認した。

3.3 荷電変換効率の向上

我々の用いているイオン源は大きなターゲット表面よりビームを引出すために比較的大きなエミッターンスを持つ ($22\pi \text{ mm mr MeV}^{1/2}$)。そのためターミナル内ガスストリッパーカナルの内径は 15 mm と大きなものになっている。ストリッパーガスの循環に 80 l/s のポンプを 2 台、400 Hz で運転していたが、ガスのコンセントレーションが足りず、水素イオンの場合、荷電平衡状態にいたっていないと推定されていた。(図4)

タンデム加速器は3.5 MV以上ターミナルに印可する場合、耐圧を高めるために高エネルギー側加速管出口で 1×10^{-6} Torr 程度の圧力になるように、ストリッパーガス(Ar)を積極的に流す。図4はその場合の加速管、ストリッパー・カナル内の圧力分布を計算したものである。横軸は低エネルギー側加速管入口からの距離を示しており、5500 mmあたりがストリッパー・カナルである。図5はArとHの荷電変換断面積から計算された、5 MeV水素イオンの各荷電状態のArガスの厚さに対する変化をあらわしている。水素の荷電状態が平衡に達するには $20 \text{ mTorr} \times \text{m}$ 程度のコンセントレーションが必要であるのに対し、図4から求められるストリッパー・カナル内でのガスの厚さは $3 \text{ mTorr} \times \text{m}$ 程度である。この場合、正イオンは20 %程度のフラクションしかもちえない。

大強度ビームを得る上で、低輸送効率は問題で、イオン源や加速器への負担を考えると改善されなければならない。我々はガスのコンセントレーションを向上させるため TMP の数を2台から4台に増やし1段の差動排気を2段にした。

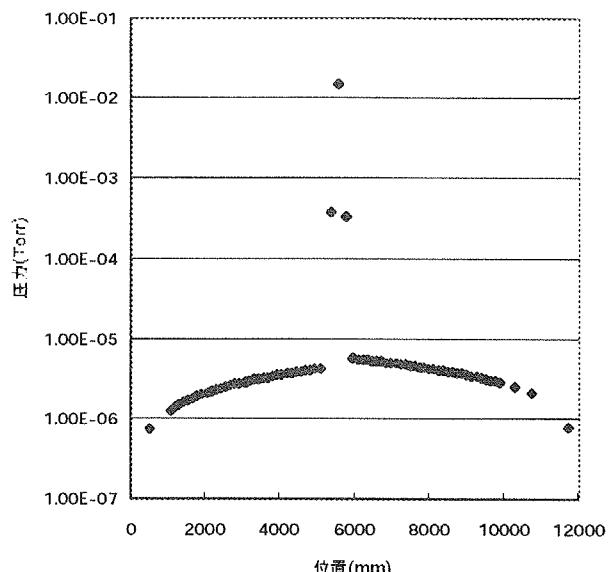


図4 加速管内圧力分布

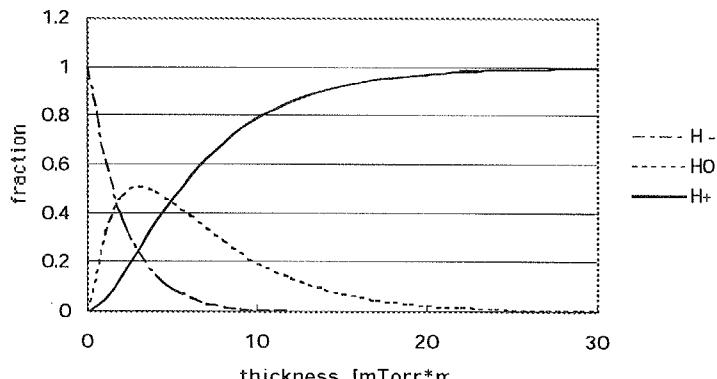


図5 水素イオン電荷分布

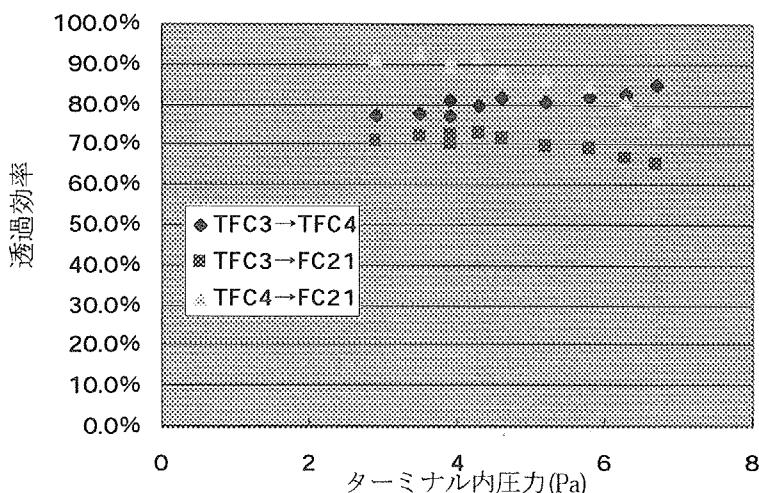


図6 タンデム加速器の透過率

タンデム入口 FC(TFC3)における水素イオン電流で規格化したタンデム直下流 FC(TFC4、ダイヤ印)、15度ビームライン途中の FC(FC21、三角印) における水素イオン(10 MeV)電流、およびTFC4における電流で規格化した FC21 での電流をターミナル内圧力の関数で示してある。

図6はタンデムの透過効率を示している。透過効率はタンデム入口FC(TFC3)における水素イオン電流で規格化したタンデム直下流FC(TFC4、ダイヤ印)、15度ビームライン途中のFC(FC21、三角印)における水素イオン(10 MeV)電流、およびTFC4における電流で規格化したFC21での電流をターミナル内圧力の関数で示してある。

ストリッパーガスの厚さによらず透過効率はほぼ一定、むしろ、圧力上昇とともに減少関数となっている。このことは、荷電状態は平衡に達しており、厚いストリッパーガスによる散乱の効果で幾何学的な透過効率が減少していることを示している。

3.4 高圧オペレーションとストリッパーガス

図6で透過効率を示したが、3 Pa以下のデータが存在しない。これは、加速管の耐圧を考慮し、これ以上ガス流量を減ずることができなかったためである。真空に近い状態($\sim 10^4$ Pa以下)では、ターミナル電圧3.9 MVまでしか印加した経験しかなく、このときはブレークダウンを引き起こした。現在、真空状態でのコンディショニングは3.5 MVまで進んでいるが、これ以上の印加はガスを導入して行っている。ガスを導入した時の耐圧の向上がどれだけ見込めるのかの情報がなく、運転計画をたてる上でも是非とも知っておくべき情報であるが、実験的に確かめた時のダメージによる被害を考えると行えずにいる。

ガス導入なしの昇圧が不可能であることは、重イオン加速時に問題を引き起こす。加速管保護のためのガス流量は水素イオンの荷電変換に十分なガスの厚さであり、それは、重イオンに対してはむしろ大きすぎ、散乱による幾何学的な透過効率を引き下げるからである。現在、増強した4台のTMPは水素イオン加速時にのみ全て用い、重イオン加速の場合にはそのうち、内側の2台を停止することで対処している。

4 シンクロトロン入射器としてのタンデム

200 MeV陽子シンクロトロンへの入射器としてタンデム加速器は荷電変換効率向上を目的とする改良を行ってきた。さらに、シンクロトロン入射系の輸送効率向上のための改造も行った。従来タンデ

表 1

	設計値	改造前	改造後
		1999/10/20	2000/3/18
チューン			
水平方向	1.75	1.68	1.68
垂直方向	0.85	0.79-0.81	0.77-0.81
周回周波数			
入射時(10MeV)	1309kHz	1320kHz	1320kHz
取り出し時 (200MeV)	5117kHz	5112kHz	5112kHz
タンデム入射電流	18mA	14mA	9.8mA
タンデム出射電流	6mA	4.3mA	4.7mA
入射ビーム電流	6mA	1.9mA	4.5mA
蓄積粒子数(200MeV)	1.3×10^{11}	5.5×10^{10}	1.0×10^{11}
出射ビーム電流(200MeV)	10nA	3.7nA	8.0nA

ム加速器下流には静電デフレクターとセプタム電磁石によりシンクロトロン入射系へとビームを導いていたが、このシステムの幾何学的な透過効率が非常に低く、また、電極をビームが衝撃することによる電圧降下のため大電流の引き出しが困難なものになっていた。これを振り分け電磁石に置き換えることにより、輸送効率の向上をはかった。

現在、これらの効率向上のための改造により、シンクロトロンからのビーム強度も向上し、かつ、安定なビーム供給が行えるようになっている。表1に改造前と改造後のビーム強度をまとめる。

5 タンデム加速器単独使用時のビームライン

タンデム加速器はシンクロトロン入射器としてではなく、単独でも使用され、分析やイオン注入、生物への照射実験に用いられる。タンデム加速器のターミナル電圧を最大 1.7 MV に設定して引出される低エネルギービームを用いての実験を行う照射室1にはマイクロビームPIXE, RBS, ERDAを行うコース、ターゲットゴニオメータを備えた結晶構造解析を行うコースが設置される。照射室2はタンデムの最大エネルギーを引出す実験室で、イオン注入や散乱実験を行うコース、マイクロビームを大気に取出し、生物照射やPIXEを行うコースが設置されている。

5.1 物性分析コース

ターゲットゴニオメーターと2組のマイクロスリットによる平行ビームを用いて、結晶構造や物性解析を行うコースが照射室1に設置されている。散乱槽の後段には小型静電デフレクターと位置検出器があり、薄膜による荷電状態の変化を調べることができる。図7にコース概要を示す。

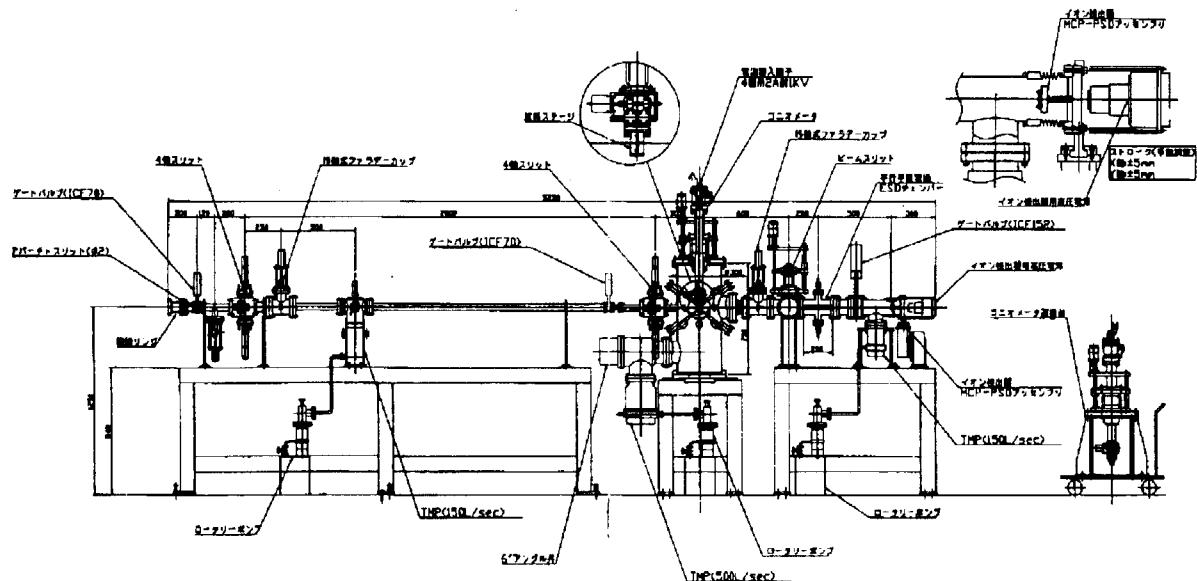
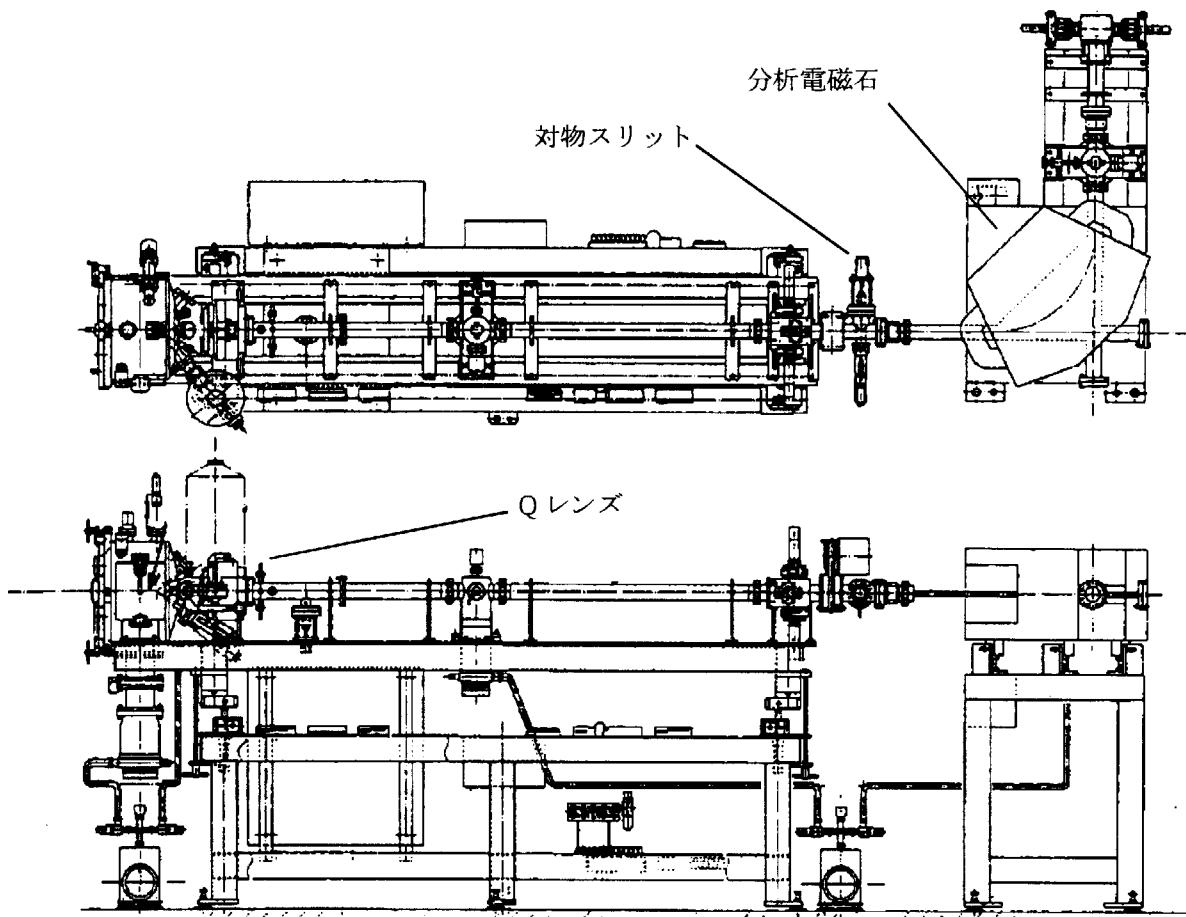


図7 物性分析コース

5.2 元素分析コース

2連四重極電磁石により、ビームを数 μm に絞り、PIXE や RBS、ERDA を用いて元素分析を行うコースである。倍率は縦、横それぞれ、 $(x|x) = 1/4.2$ 、 $(y|y) = 1/18.6$ である。図8にコースの概要を示す。

図8 元素分析コース (μ -PIXE コース)

5.3 生物照射コース（大気取出しコース）

照射室2に設置され、タンデムの最大エネルギーbeamを用いることができるコースである。beamは3つのアーチャーにより加工され、最終段アーチャーには $10 \mu\text{m}$ 平方のものが用いられ、beamを大気中に取出す。真空槽内にセットすることのできない試料、例えば、生きた細胞や貴重な考古学試料の照射分析に用いられる。図9にコース概要を示す。

5.4 イオン注入コース

照射室2に設置されるこのコースでは加熱ステージ、冷却ステージにセットされた試料に大強度のbeamを照射し、材質の改変や材料の利用環境シミュレーションを行う。また、物性分析コースのターゲットゴニオメータを設置可能で、各種散乱実験や分析を行うこともできる。図10にコース概要を示す。

6. まとめと今後

若狭湾エネルギー研究センターでは、その研究の一つの柱である放射線高度利用研究を遂行するために、加速器システムを建設してきた。タンデム加速器からのMeVイオンbeamによる材料、生物、元素分析研究やタンデム加速器を入射器とするシンクロトロンからのサブGeVイオンbeamによる癌

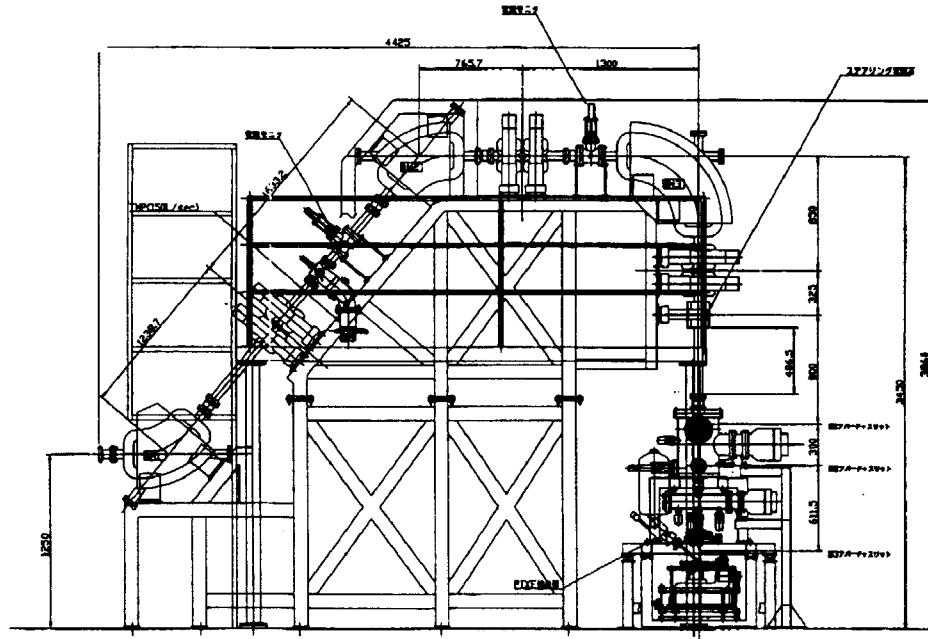


図9 生物照射コース

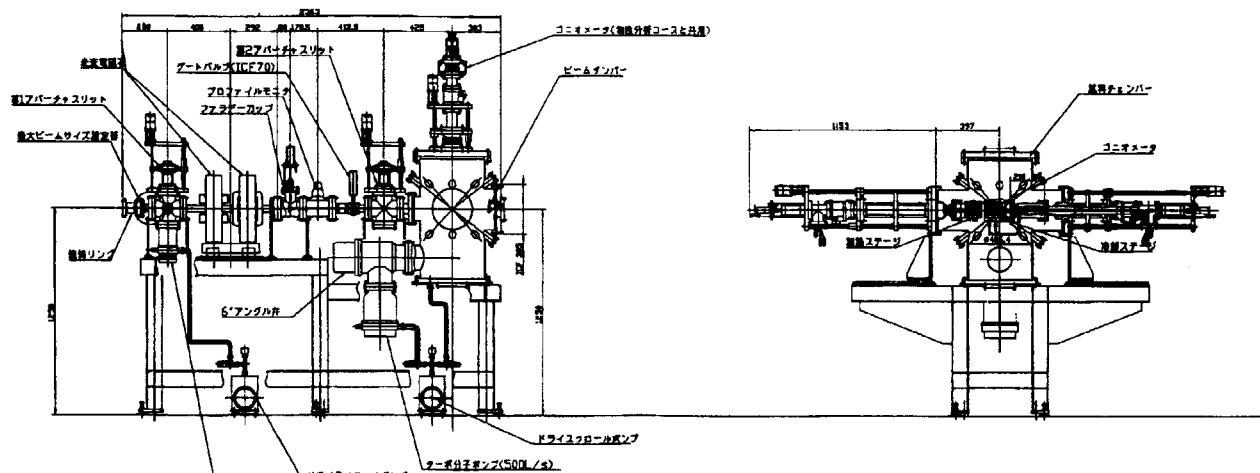


図10 イオン注入コース

治療研究、材料、生物研究と、放射線応用研究は多岐にわたる。

建設の第一段階を終え、各コースへのビーム引出し試験を通じて、実際の実験のためのテストを開始したところである。テスト後、医療照射用の装置のインストールを行い、来年度は医療に向けたテストをさらに深める計画もスタートさせる。タンデム専用ビームラインに関しては、微量分析法の開発を行ったり、多様な散乱実験を行えるコースを整備してゆく。

**2-8 1.7 MeV タンデム加速器 + 1.0 MeVシングルエンド加速器
からなる
DuET の現状報告、**

神保光一、加藤雄大、香山 晃

京都大学エネルギー理工学研究所

核融合炉開発において、高密度の 14MeV 中性子照射下での使用に耐え、かつ誘導放射化の小さい構造材料の開発は最も重要な研究課題である。DuET は(それら構造材料を構成する化学的に同質な主要原子の)イオン照射とヘリウム He 粒子の同時照射によって、核融合炉環境下で想定される(それら材料に対する)はじき出し損傷と核変換 He の影響の、いわゆる同時効果をシミュレートすることを主目的とする。さらにその高温・繰り返し応力・化学環境などとの複合負荷・動的効果に関わる現象や機構を、極めて過酷な条件下で詳細に調べることが可能であり、また高温環境下の照射によるセラミクス系先進材料等の開発にも使用される。

DuET のタンデム型加速器においては、DuoPlasma イオン源から He^- イオンを引き出せる点がその特徴の一つであり、一方 Sputter イオン源からは、以下のように多彩なイオン種を一価あたり最大電圧 1.7MV まで様々な条件下で加速することができた。

銅 (Cu)	Cu^- イオン、そして一価から六価の正イオン
シリコン (Si)	Si^- イオン & Si_2^- イオン、そして一価から五価の正イオン
金 (Au)	Au^- イオン、そして一価から五価の正イオン
ニッケル(Ni)	Ni^- イオン & Ni_2^- イオン、そして一価から八価の正イオン
鉄 (Fe)	FeO^- イオン、そして一価から八価の鉄 (単体) の正イオン

ここで銅、ニッケルの引出しには、ターゲット自体をそれらの材質でつくり、シリコン、金は、銅製のターゲットにそれらを詰め込み、各イオンを容易に 10 時間以上連続して引き出すことができた。鉄の場合は、銅製のターゲットに酸化鉄 Fe_2O_3 の粉末を詰め込んだ。この時 O^- イオンと共にターゲットの銅の負イオンが同時に計測された。 Fe^- イオンは計測されず、 FeO^- イオンと O^- イオンのみが測定された。Low energy magnet で得た O^- イオン及び、 FeO^- イオンの Mass spectrum を Figure に示す。一方一価から四価の酸素の正イオンが計測され、その総電流値は鉄の正イオンの総電流値よりかなり大きかった。

一方シングルトロンは、RF イオン源を装備して、一価のヘリウム正イオンを最大電圧 1.0MV まで加速できる。このシングルエンド型加速器は、従来のモデルより小型にする為に、高圧を生じるコッククロフト回路と加速管を同軸に配置した H V E E 製新型一号機である。しかしそのコンパクト性故に、サージによる影響、タンク温度の上昇等、いくつかの問題も生じている。

Faraday Cup Current of Negative Ions [Arbitrary Unit]

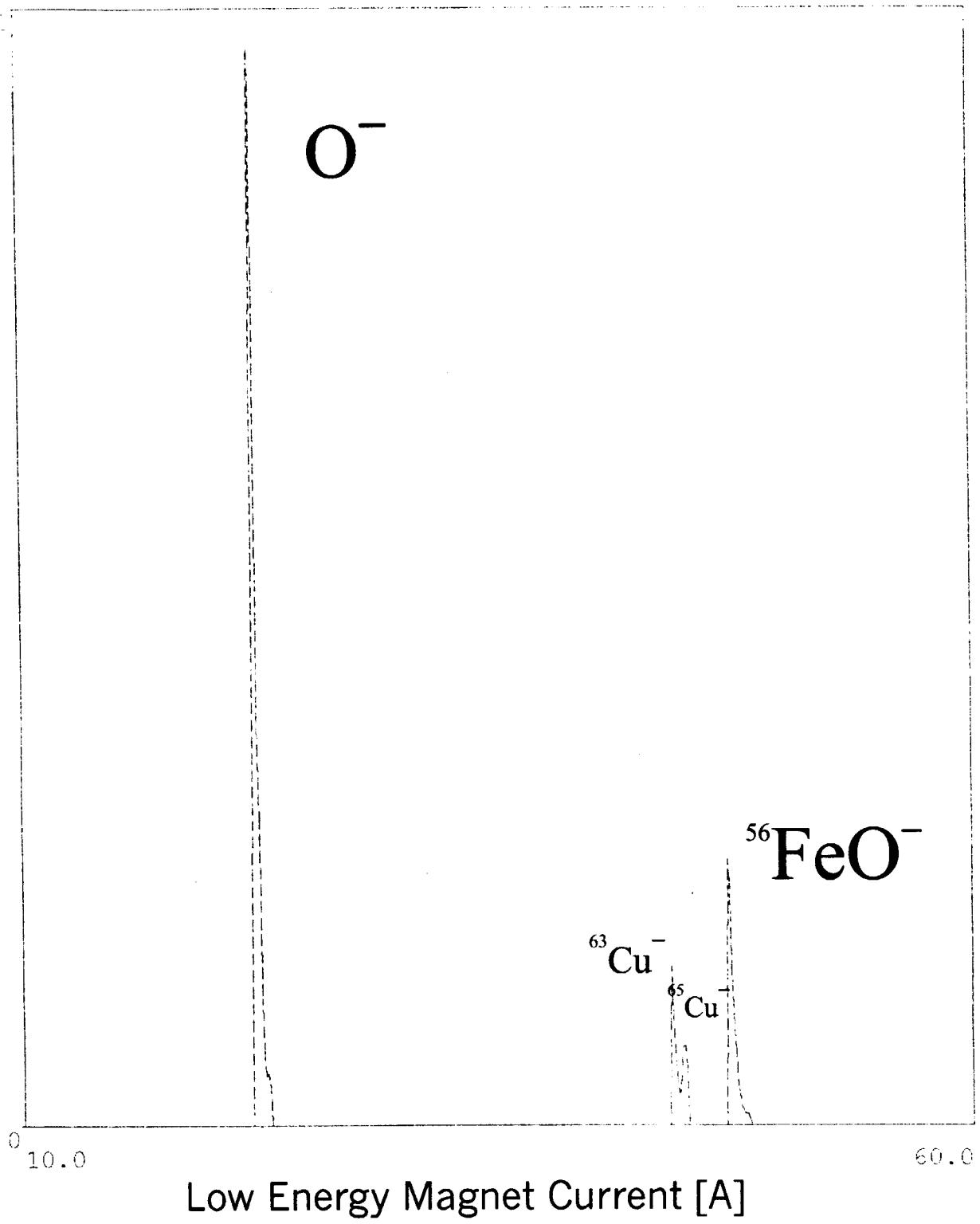


Figure: Mass Spectrum of Negative Ion Beam

Iron oxide powder Fe_2O_3 was put into a copper target



JP0150279

JAERI-Conf 2000-019

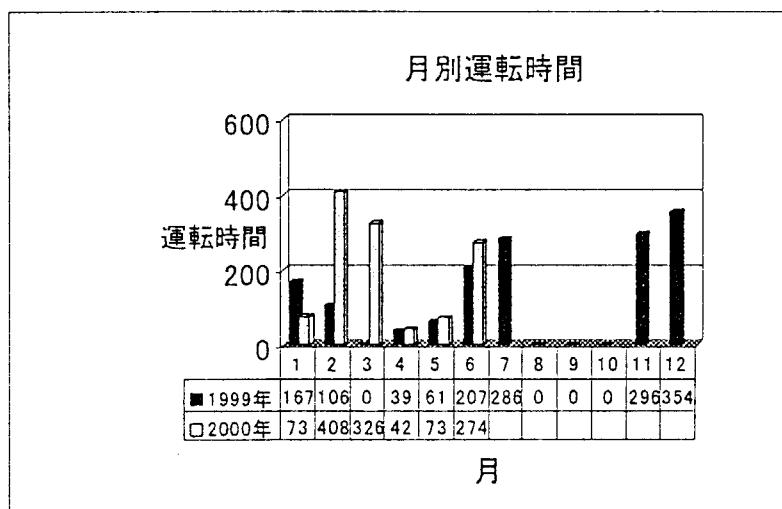
2-9 九大加速器の現状

九大理 御手洗志郎、前田豊和、古賀義博、池田伸夫、
森川恒安、相良建至、杉光強、郷農靖之、森信俊平、中島孝夫、

昨年の8-10月にかけて、タンデム加速器ターミナル部へのガス・ストリッパーの取り付けが行われた。このストリッパーはまたカーボン・ストリッパーと共存している。ガス循環用に磁気浮上型のモレキュラー・ポンプが使用された。ビームに対する加速・減速による強収束作用を用いた低エネルギーC・ビームのタンデムでの透過率がこのガス・ストリッパーの使用により著しく改善された。

天体核物理における ${}^4\text{He}$ (${}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}$)反応断面積の測定を大きな目的とする反跳核質量分析器に対する整備がビームを用いて進められ、バックブランド成分の解明・低減が進んでいる。大量のCビームを引き出すためのイオン源としてプラズマ・スペッタリング型の強力なイオン源が導入され、近々ビームをタンデム加速器へ入射の予定になっている。

下図に去年から本年6月までの月別タンデム運転状況を示すが、ガス・ストリッパーの取り付け、その後の真空トラブルのために長期間の休止が生じている。



ここ1年間におけるビーム粒子としては主としてp、d、 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 及び ${}^{16}\text{O}$ が加速された。軽イオンを中心に多くの原子核実験がおこなわれたが、同時に中性子測定、極低エネルギーでの ${}^4\text{He}$ (${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$)断面積の測定、AMSシステムの開発等の新たな試みに、多くのマシン・タイムが費やされた。

加速・減速による低エネルギーC・ビームの透過率向上のためにタンデム改造が行われた際に、コラムに取り付けられた抵抗体は除去され、加速管の抵抗体のみに変更された。それにより、ターミナル部とアース間の抵抗値は約2倍になった。荷電負荷の減少により荷電搬送チェーンの速度を秒速10m強から5-6 m/secへ減速する事が可能になり、チェーン負荷が大幅に減った。これにより、チェーン運転の安定化、タンデム電圧の安定、チェーンの長寿命化が得られている。

Inverse PIXE法を用いた ${}^{36}\text{Cl}$ のAMS測定、ターミナル電圧のGVM制御の開発が進められ、また飛行時間測定法を主とした新AMSシステムの開発が進められている。これらについては別に本研究会で報告された。

次ページ以下にガス・ストリッパーと反跳核質量分析器についての項目をまとめて報告する。

大口径ガスストリッパーの装着・試運転

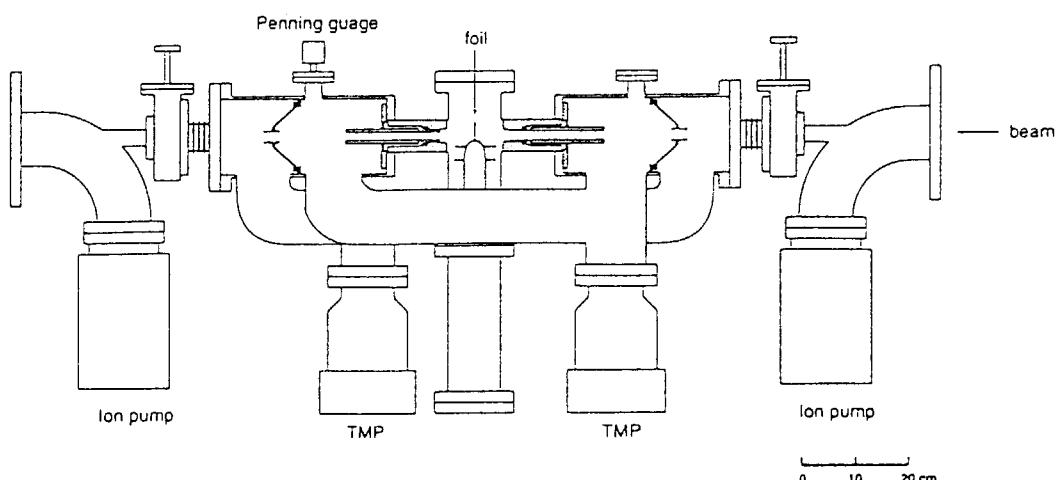
我々は天体核反応実験のために大強度の低エネルギー(3-10 MeV)炭素ビームを加速する計画を持っている。既に九大独自の加速減速強集束方式を開発し、ビームアクセプタンスを約10倍増加した事は前回報告した。またこの加速減速強集束方式は通常加速方式に比べて同じターミナル電圧を発生するのに17.5倍のチェーン電流を要する。このことはビーム負荷に耐えて電圧を安定化できる、との利点になる。残された問題点は、炭素薄膜ストリッパーの破損、ビームのエネルギー拡がり、角度拡がりであった。実際にターミナル1 MVで加速された炭素ビームは±1%程度のエネルギー拡がりを持ち、実験に使用できるそうなビーム量は1/10程度と見積もられた。

そこで大口径ガスストリッパーを独自開発してタンデムに装着した。ビームの通過を妨げないように口径12mm、有効長さ50cmと大口径短縮型にした。これまでの炭素薄膜ストリッパーの有効径が10mmであったから、ビームの通過率はこれまでと変わらない筈である。なおガスストリッパー中央部に従来の薄膜ストリッパーを配置し、ガス／薄膜共用型とした(下図参照)。

問題は如何に効率よくガスを閉じ込めるかである。大口径短縮型とはガス閉じ込めにとって悪い条件である。その上に中央部に薄膜ストリッパーを置いたのでパイプの有効長が減ってガス閉じ込め効率がさらに減ることになった。この悪条件に対抗するために、吹き込み方式と2台のターボ分子ポンプ(TMP)を用いる2段階差動排気方式を採用した(下図参照)。

吹き込み方式は粘性流のガスターgettでは成功した方式である。しかしガスストリッパーではガスは粘性流一分子流の遷移領域にあり、吹き込み方式は残念ながら実測の結果5-10%程度の効果しかないことが判明した。2段階差動排気方式で中央部の 2×10^{-2} Torrから出口の 1.5×10^{-5} Torrまで真空度を向上させ、更にイオンポンプで排気してタンデム加速管につなげた。今は窒素ガスを用いている。大部分のガスは循環使用し、イオンポンプに漏れ出た僅かの分を補給する。これで約 $1\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のガスストリッパーができた。ビームのエネルギー拡がりは十分に小さくなり加速ビームの80-90%が実使用可能となった。またガスを薄くしてビーム電荷数を減らせることも天体核反応実験にとって大きなメリットである。

目下の問題点は放電ショックによるTMP(完全磁気浮上型)電源の故障である。放電シールド強化、保護回路強化等を施しているが未だ最終解決には至っていない。TMPの技術的相談に親身に応じて頂いた三菱重工業(株)広島の方々に感謝します。



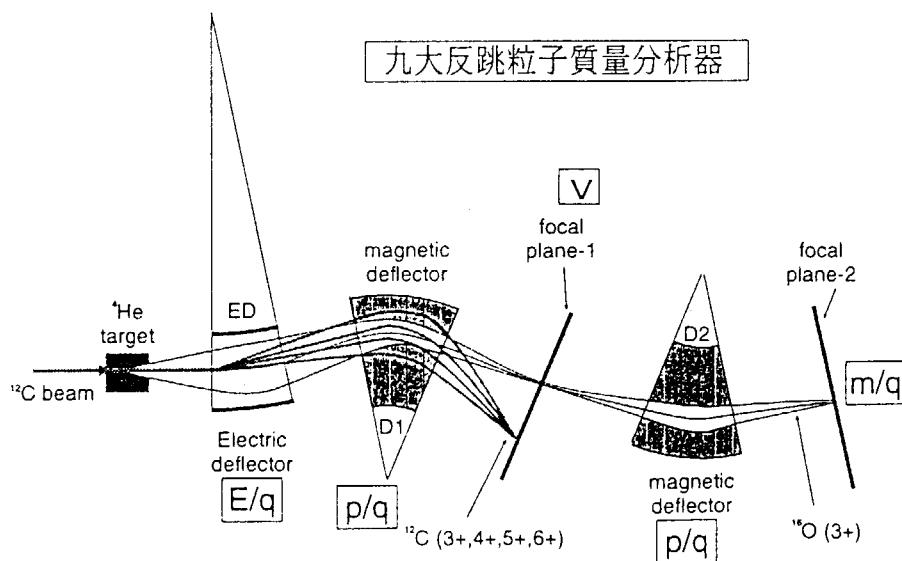
反跳核質量分離器の background 除去能力のテスト

— $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$ 反応率精密測定に向けて

本施設において、天体熱核反応率の精密測定を目指すプロジェクトを進めている。本プロジェクトは、逆運動学を利用し、 0° 近傍に集中して放出される反応生成核を一次ビームと分離収集することにより高効率での測定を実現させ、一般に極めて小さい天体熱核反応断面積を高精度で決定しようとするものである。天体核反応 $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$ の核反応率測定を第一の目標として開発研究を進めている。

逆運動学を用いた実験手法を確立するための最も重要な開発要素の1つとして、一次ビーム及びそれに起因する background に関し優れた除去能力を持つ粒子測定系の開発が挙げられる。我々は逆運動学反応に対し世界最高のビーム分離能力を目標とした反跳核質量分離器の設計・製作を行い、全系としての完成に至った。本質量分離器は、偏向電極、2台の偏向電磁石及び集束用多重極電磁石からなる(本頁下図、図中では多重極電磁石を省いた)。その大きな特徴は、2つの集束面を有することにある。反跳粒子はまず第一集束面において速度のみにより分離される。これにより一次ビーム及びそれに起因する background の大半が除去される。さらに最終集束面において質量(正確には質量電荷比)のみにより分離し、特定の質量の粒子を高い SN 比で検出する。

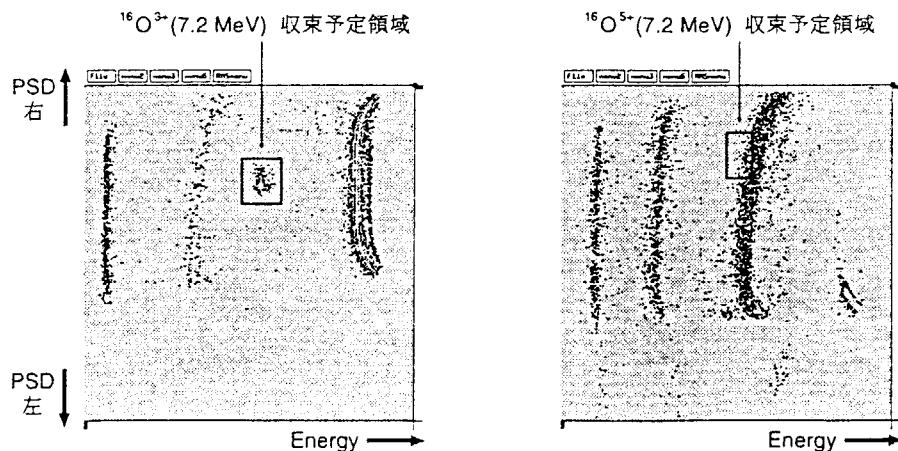
1999年より、 $^4\text{He}(^{12}\text{C}, ^{16}\text{O})\gamma$ 反応の精密測定に焦点を定め、一次ビームに起因する background 除去に関するテスト実験を開始した。9.6 MeV $^{12}\text{C}^{3+}$ ビームを用い、標的としては一次ビームの電荷を分散させ実際の測定時に類似した状況をつくるため、炭素薄膜を用いた。質量分離器の最終集束面に一次元位置感応型シリコン半導体検出器($45 \times 8 \text{ mm}^2$ in area, $300 \mu\text{m}$ thick)を設置し、質量分離器の運転条件として、7.2 MeV ^{16}O 3価及び5価ビームを収集する条件で検出される background particle のエネルギー、位置情報を得た。



得られた位置 vs. エネルギー 2 次元プロットの一例を本頁下に示す。 ^{16}O 3 倍（左図）、5 倍（右図）いずれの設定の場合も、帯状の background が見られる。これらは偏向電磁石より上流で発生した background 粒子のうち磁場を通り抜ける条件を満たしたもののみが最終集束面まで到達したものと理解できる。その起因としては、一次ビームの質量分離器内のダクト散乱による成分とビームハロー成分の 2 つが可能性として挙げられる。これらに対する対処として、まず、一次ビーム除去用バッフルを実際の実験条件に則して設置することにより、大幅な background の低減を実現した。さらに、標的枠による散乱を抑えることによる background 低減も確認した。ビームハローの対処が残された課題である。また、下図両プロットとともに、9.6 MeV C が観測されているが、これは電極・磁場間で荷電変換を起こした結果、電極と磁場の双方を通過する条件を満たした一次ビーム粒子と考えられる。これらはエネルギーの相違から ^{16}O 同定には問題無いが、計数率が大きいため大強度ビームを用いる際に支障となる。現在、分析器最下流に垂直方向への偏向電場を設けることにより、さらにエネルギー差による分離を行なうよう改良を進めている。

一連のテスト実験において、7.2 MeV $^{16}\text{O}^{3+}$ がしばしば観測された（左図参照）。blank target run でも同様に観測されることから、タンデム加速器により加速された ^{16}O ビームが観測にかかっていることが明らかとなった。7.2 MeV $^{16}\text{O}^{3+}$ はターミナル部分でのイオン生成に対応し、その後のビーム輸送系においては 9.6 MeV $^{12}\text{C}^{3+}$ ビームと正に $B\rho$ 値が合致するため、C ビームと同軌道上を通る。ただし、使用した炭素ストリッパーが新品では観測されず、ビームをある程度照射した後突如発生する傾向がある。その発生機構は明らかではないが、本測定では、前述のガスストリッパーを利用し $^{12}\text{C}^{2+}$ ビームを加速することによりターミナル部（もしくは高エネルギー側加速管）で発生する ^{16}O ビームは標的まで到達し得なくなると考えられる。実際ガスストリッパーを使用した加速においては ^{16}O ビームは観測されていない。

まもなく、 ^4He ガスターゲットを質量分離器に接続し、本格的な精密測定を開始する予定である。





JP0150280

JAERI-Conf 2000-019

2-10 東工大タンデム加速器による核融合・環境測定研究

小栗慶之, 長谷川純, 福田一志, 小川雅生

東京工業大学原子炉工学研究所

1. はじめに

東京工業大学原子炉工学研究所の原子科学研究室には 5SDH-HC2 型 1.7 MV 小型タンデム加速器が設置されている。1984 年に線型加速器への入射用・材料照射用として設置されたが、1995 年からはプラズマ・核融合、環境科学を主要テーマとして使用されている。イオン源は独自に開発した冷陰極 PIG[1]、及び SNICS II であり、それぞれ気体、固体原料から負イオンを発生している。1997 年には TOF 測定のために 100 MHz ビームパルス化装置が設置された。

現在、加速器は通常 1.0~1.4 MV 程度のターミナル電圧で運転されている。設置後 16 年を経過したが、最近は致命的な故障もなく順調に稼動している。昨年度に発生した比較的大きなトラブルは、高圧ターミナル内のプーリー軸のペアリング固定箇所がゆるみ、ペレットチェーンがインダクターに当って大量の金属粉がタンク内に飛散したことである。幸い、チェーンとインダクターの交換、及びタンク内部の清掃によって性能は回復した。

運転時間は核融合に関係したプラズマとイオンビームの相互作用実験、及び PIXE 法による環境試料測定に分けられ、その割合はほぼ 1 対 1 である。以下に最近の研究について報告する。

2. 重イオンビーム・プラズマ相互作用

1) プラズマ標的中の阻止能測定

重イオン慣性核融合研究の一環として、プラズマ標的とイオンビームの相互作用を調べる実験を行っている[2,3]。図 1 はプラズマ中の阻止能の入射エネルギー依存性に関する測定結果を示す。標的は最大エネルギー 4 J のガラスレーザーを照射して発生した電子密度 $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、温度 $\sim 10 \text{ eV}$ の水素化リチウム (LiH) プラズマで、 H^+ 、 Li^+ 、及び電子にはほぼ完全電離している。測定にはパルスビームを用い、TOF 法によりエネルギー損失を求める。等価な常温標的と比較して、阻止能が約 2~3 倍上昇していることが分る。しかもエネルギー依存性に注目すると、ブレッギングピークに対応する阻止能のピーク位置がプラズマ標的では全く異なることが明らかになった。このプラズマ中における阻止能増大の原因の一つは、等価常温物質中と比較して入射イオンの荷電状態が増大することである。そこで上記の阻止能測定と並行し

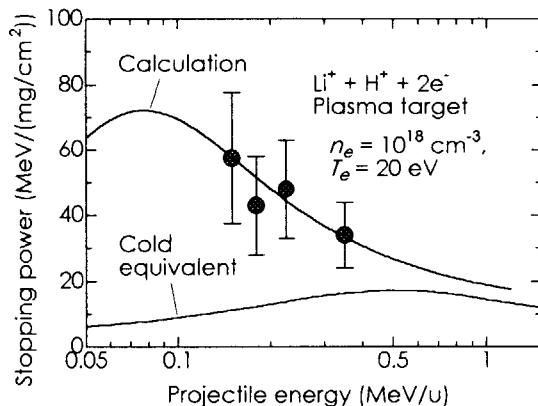


図 1 : ^{16}O イオンの阻止能の入射エネルギー依存性。

て、プラズマを通過した重イオンの荷電状態分布及び有効電荷の測定を行っており、既に ^{12}C 及び ^{16}O イオンについて常温標的中に比べて高い荷電状態を観測している。さらにこの現象を理論的に説明するために、入射イオンの内殻励起に伴う自動電離（Autoionization）を考慮した荷電状態分布の数値解析が進行中である。

2) 水素プラズマ発生用固体水素標的の開発

本加速器施設には上記のガラスレーザーの他に、最大エネルギー10 Jの炭酸ガスレーザーが設置されている。これを用いてバルクのリチウムや炭素標的を照射してプラズマ標的を発生してきたが、完全電離（束縛電子の全くない）プラズマ標的の発生を目的として、固体水素標的の開発を

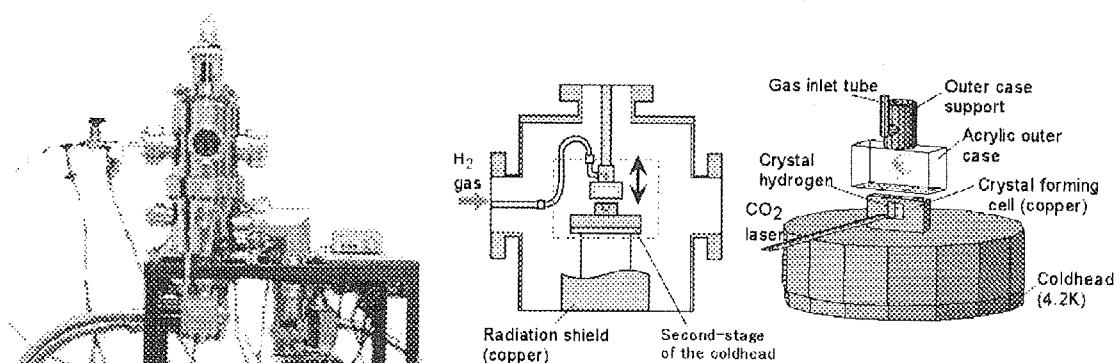


図2：固体水素標的製造装置の外観と氷塊生成機構。

開始した。図2にその装置系を示す。ヘリウム冷凍機により冷却された銅ブロック上の枠とアクリルケース内に水素氷塊を形成した後、ケースを外してレーザーを照射する。図3は可視分光法によるプラズマ電子密度・温度の予備的な測定結果である。電子密度 $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、温度 $1 \sim 10 \text{ eV}$ の水素プラズマが得られている。今後はより精密な診断測定を目指すとともにプラズマの電離度を決定するために中性水素原子の定量を行うことが課題である。

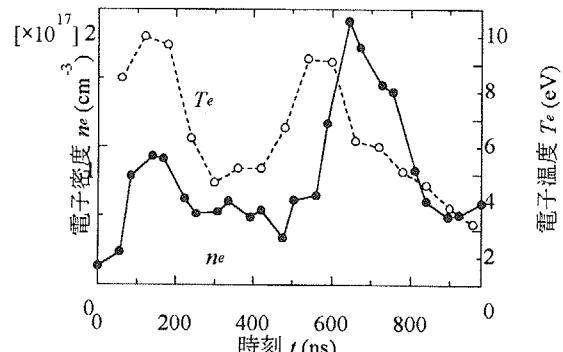


図3：電子密度・温度の時間変化。

3. PIXE分析法による環境測定

1) 幹線道路周辺の大気エアロゾル粒子による汚染分布の測定

自動車交通は都市部における最も強い大気汚染源の一つである。エアロゾル粒子による汚染についてこの影響を調べるために、幹線道路から異なる距離で同時刻に粒子を採取して元素分析し、エアロゾル濃度の空間分布を調べた。

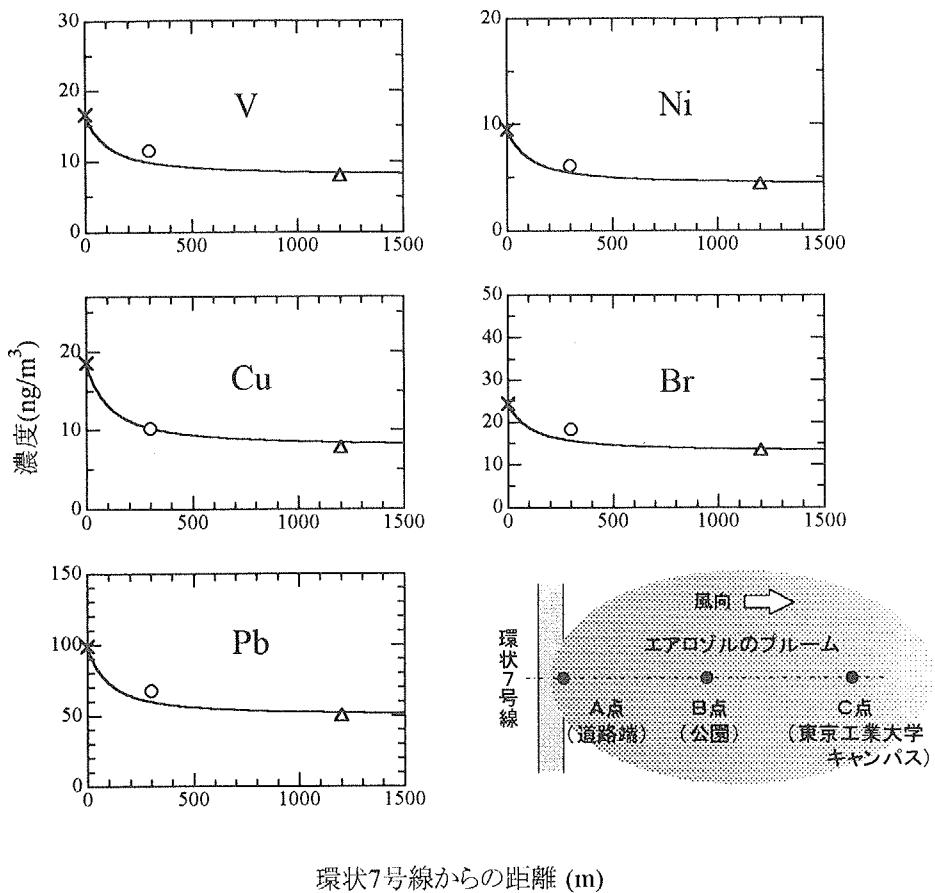


図4：微小粒子濃度の位置依存性。"×"はA点, "○"はB点, "△"はC点の濃度を表す。

エアロゾルの採取位置は都内環状7号線の道路端（A点），そこから1200m東に位置する東京工業大学大岡山キャンパス内（C点），及びこれらの中間に位置する公園（B点）である。採取は平成11年8月から11月の平日，11:00～12:00の1時間行い，採取延べ日数は63日である。孔径8μm及び0.4μmのニュクレポアフィルターを直列に接続し，分級採取を行った。

図4に微小粒子に関する順風時（風が環状7号線から測定点A→B→Cに向かって吹くとき）の元素別の測定結果を示す。全ての場合について、距離とともにエアロゾル濃度が減少することが分った。実線はブルームモデル[4]による移流拡散のシミュレーション計算結果であり、汚染源から最も遠いC地点での濃度をバックグラウンドとしている。計算では発生源の鉛直方向強度分布として、同様な道幅・交通量の場合の一酸化炭素に関する実測値[5]を高さ30mまで外挿して用いた。バックグラウンドの評価、ブルームモデルの精度等に問題はあるが、シミュレーション計算結果は実測結果を比較的良く再現している。この結果により、幹線道路周辺において自動車交通の影響が明らかに見られるのは道路から大体300mまでの範囲であることが分った。

2) 厚い標的を用いたPIXE分析法の開発

本加速器施設においては、PIXE法を用いた環境分析として現在までに大気エアロゾル粒子の測定、雨水・河川水の測定等を行ってきた。この場合、標的はいずれもフィルター等に付着させた薄い標的であり、データ解析は比較的容易であった。昨年度より土壤、沈殿物等の測定を行うため、厚

い標的の作成法及びその測定・データ解析法の開発を開始した。

標的一様性を確保するために、試料を一度粉碎し篩にかけた後、再び成形する。図5に試料形成用のプレス器、及び土壌から形成されたペレットを示す。

図6に予備的な測定結果を示す。土壌試料は自動乳鉢により20分間粉碎され、 $100\text{ }\mu\text{m}$ の篩を通して後、 2 ton/cm^2 の圧力でペレット化された。今のところ Al, Si, K, Ca, Ti, Fe 等の典型的な土壌の主要成分に混じって Pb 等の微量成分も検出されている。厚いターゲットを用いた場合、標的内で陽子ビームのエネルギーは減衰し、またX線の自己遮蔽も起こる。現在、これらを考慮して元素を定量するための解析用プログラムを開発中である。

4. おわりに

東工大タンデム加速器は建設後16年を迎え、今のところ致命的なトラブルはないものの、各種電源や空調設備等の老朽化によるトラブルが懸念されている。また維持費も年々削減されており、いつまで運転を続行できるかは極めて不確定な状態である。

いずれにしても本加速器は他の主要研究機関の装置に比較して、もはや加速電圧が極めて低いため、今後とも低エネルギーの特殊な実験を主に研究を展開する予定である。

参考文献

- [1] E.Arai, K.Hayashi, Y.Oguri, Qui-Qi and K.Satoh : "A Heavy-ion Acceleration System Using a Low Energy Van de Graaff" ; Nucl. Instr. and Meth. B5 (1984) 58.
- [2] A.Sakumi, T.Watanabe, K.Shibata, J.Hasegawa, M.Ogawa and Y.Oguri : "Stopping Power Measurement of 225 keV/u Oxygen Ions in Laser-Produced Lithium Hydride Plasma" ; J. Nucl. Sci. Technol. 36 (1999) 326.
- [3] Y.Oguri, K.Tsubuku, A.Sakumi, K.Shibata, R.Sato, K.Nishigori, J.Hasegawa and M.Ogawa : "Heavy Ion Stripping by a Highly-Ionized Laser Plasma" ; Nucl. Instr. and Meth. B161-163 (2000) 155.
- [4] F.Pasquill and F.B.Smith : "Atmospheric Diffusion", 3rd Edition ; John Wiley & Sons (1983).
- [5] 副島海夫：「自動車排ガスの道路周辺における拡散現象の観測と考察」；自動車技術 25 (1971) 242.

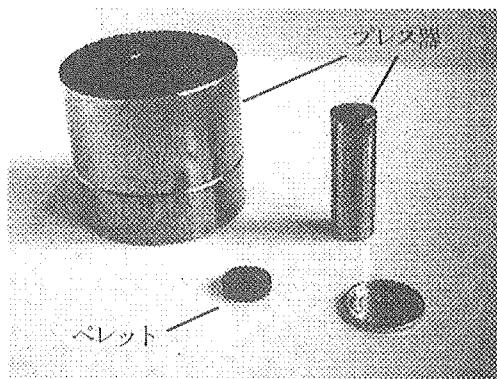


図5：試料形成用プレス器（奥）と
製作されたペレット（手前）。

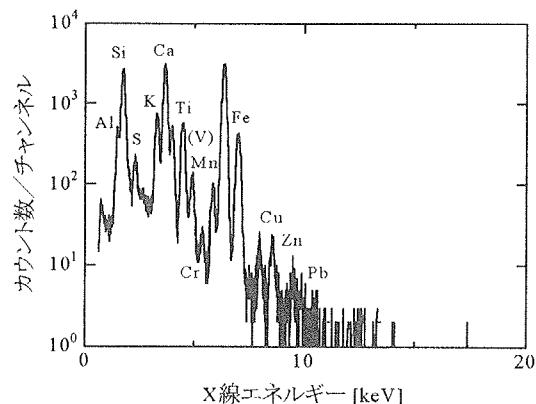


図6：土壌試料のPIXEスペクトル。



JP0150281

JAERI-Conf 2000-019

3 測定技術・応用研究（I）

3-1 西部北太平洋における $\Delta^{14}\text{C}$ の分布と人為起源炭素の追跡

○荒巻能史(原研むつ), 渡邊修一, 角皆静男(北大院地球環境)
久慈智幸(日本海洋科学振興財団), 水島俊彦, 外川織彦(原研むつ)

北西部北太平洋では、冬季の活発なガス交換によって人為起源の二酸化炭素が、そこで形成される北太平洋中層水に大量に溶け込み、北太平洋全域へ運ばれているとの報告がある(Tsunogai et al. 1993 他)。海水の溶存無機炭酸中の ^{14}C は、この中層水の動態を明らかにする上で重要な化学トレーサーとしての役割をもつ。さらに近年 Broecker et al. (1995)によって報告された海洋中の核実験以前の $\Delta^{14}\text{C}$ 値の再現法を用いれば、核実験後、約40年間に海洋に積み込まれた大気中二酸化炭素量を推定することが可能となる。そこで著者らは、西部北太平洋における $\Delta^{14}\text{C}$ の分布を明らかにし、北太平洋中層水に積み込まれた核実験起源の ^{14}C 量を推定し、その挙動を明らかにすることを研究目的とした。

方法

東大洋研白鳳丸 KH91-5 航海及び KH93-2 航海で 165°E に沿った 0° ~ 48°N の 6 観測点(図 1)において、概ね 20 層程度で海水試料 500ml をガラスビンに採取後、飽和水銀溶液を添加し、研究室に持ち帰った。試料は Aramaki et al. (2000)に従い、溶存無機炭酸を二酸化炭素ガスとして抽出し、水素ガスを用いてグラフアイトに還元した後、AMS (加速器質量分析装置、HVEE 4130-AMS)で試料中の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を計測した。 $\Delta^{14}\text{C}$ 値算出時の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、抽出した二酸化炭素ガスを一部分取り、Finnigan DELTA^{plus} を用いて $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を計測することから算出した。なお、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値の測定精度は 1σ で $\pm 4\%$ 以下であった。

結果及び考察

図 2 には、等密度面から見た $\Delta^{14}\text{C}$ 値の緯度変化を表現した。ここで単純化のため、密度 $26.4 \sigma_0$ は水深 300m 程度の表層水下部、 $27.2 \sigma_0$ は水深 1000m 以深の深層水上層部と仮定する。全ての密度面において、赤道域及び北緯 40 度付近が高い。また北緯 48 度では、表層付近の値に大きな減少が見られる。なお、北緯 10 度付近での値の減少は、赤道湧昇によって運ばれた深層水の混合(低 $\Delta^{14}\text{C}$ 水)の影響であることが他の化学成分の測定から明らかとなっている。

図 3 では、1973 年にアメリカ合衆国を中心となって観測がなされた GEOSECS での $\Delta^{14}\text{C}$ 値と比較した。表層及び中層($26.8 \sigma_0$)では本研究(1990 年代)が高い値を示したが、深層では

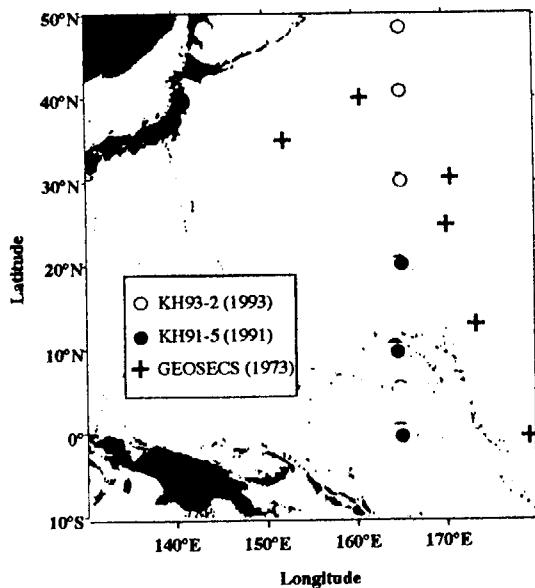


図1 観測点

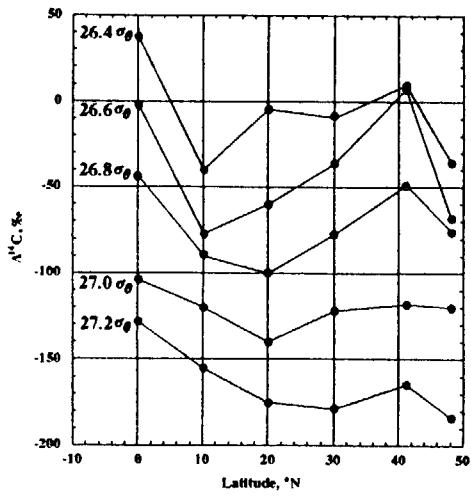
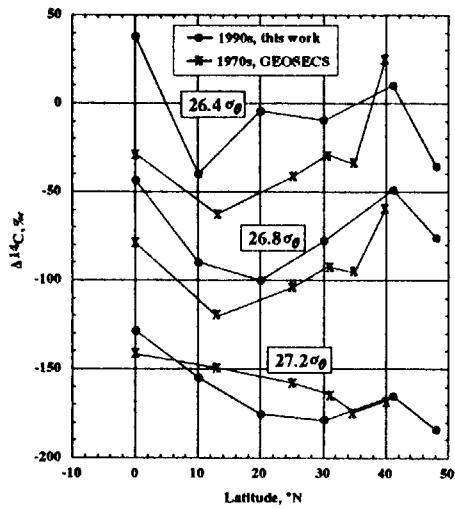
図2 等密度面における $\Delta^{14}\text{C}$ の緯度分布

図3 GESECSとの比較

同程度であった。これは、この20年間に1950年代後半から始まった核実験起源の ^{14}C ($^{14}\text{C}_{\text{bomb}}$)が表層及び中層で増加したこと、さらに1000mを越す深層には、その影響が到達していないことを示している。そこで著者らは、 $^{14}\text{C}_{\text{bomb}}$ を観測緯度ごとに定量的に見積もり、その動態を解析した。

Broecker et al. (1995)は、海水中に溶存するケイ酸塩(Si)と核実験以前の海水中 $\Delta^{14}\text{C}$ ($\Delta^{14}\text{C}_{\text{pre}}$)の間に次式の直線関係があることを発見した(図4参照)。

$$\Delta^{14}\text{C}_{\text{pre}} (\%) = -70 + \text{Si} (\mu\text{mol/kg})$$

著者らは、海水中のトリチウム(^3H)の濃度が検出限界となる深度(z)を $^{14}\text{C}_{\text{bomb}}$ の貫入深度と仮定して、同一航海で得られた、海水の密度 $26.2 \sigma_\theta$, $26.4 \sigma_\theta$, $26.6 \sigma_\theta$, $26.8 \sigma_\theta$ 及び貫入深度におけるケイ酸塩濃度を上式に代入して $\Delta^{14}\text{C}_{\text{pre}}$ を見積もった。ここで、表層(0 m)の $\Delta^{14}\text{C}_{\text{pre}}$ は、-50 ‰と仮定した(図4参照)。

見積もられた $\Delta^{14}\text{C}_{\text{pre}}$ と観測された $\Delta^{14}\text{C}$ との差が核実験起源の $\Delta^{14}\text{C}$ ($\Delta^{14}\text{C}_{\text{bomb}}$)となり、水深 $0 \sim z$ mでの $\Delta^{14}\text{C}_{\text{bomb}}$ の積分値が $^{14}\text{C}_{\text{bomb}}$ の存在量(I bomb)となる。

本研究(1990年代)及びGESECS(1970年代)で得られた $\Delta^{14}\text{C}$ から見積もられたI bombを表に示した。表中では、表層(密度 $\sigma_\theta < 26.6$)、中層($26.2 < \sigma_\theta > 27.2$)及び深層($\sigma_\theta > 27.2$)に分けて表現した。全量で比較すると、中緯度域(北緯20~30度)で20年間に約

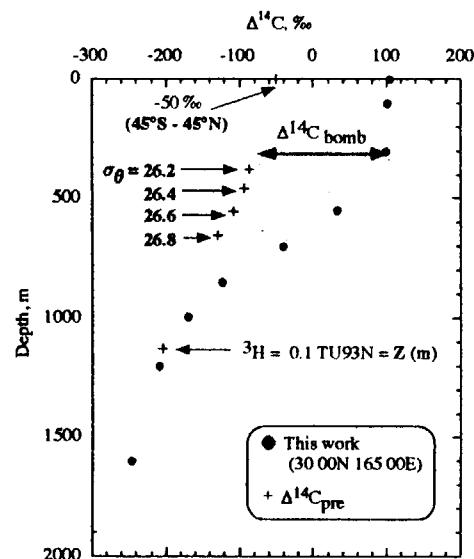
図4 Broecker et al. (1995)による $\Delta^{14}\text{C}_{\text{pre}}$ の再現法

表 ^{14}C bomb の存在量(本研究と GEOSECS の比較)

1990s							
Latitude($^{\circ}\text{N}$)	0	10	20	30	41	48	average
$\sigma_{\theta} < 26.6$	7.8 84.8	4.0 78.4	12.7 90.1	15.8 84.5	2.8 38.3	1.0 31.2	7.4 67.9
$26.6 < \sigma_{\theta} < 27.2$	1.4 15.2	1.1 21.6	1.4 9.9	2.9 15.5	3.7 50.7	1.9 59.4	2.1 28.7
$\sigma_{\theta} > 27.2$	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.8 11.0	0.3 9.4	0.2 3.4
total	9.2 100.0	5.1 100.0	14.1 100.0	18.7 100.0	7.3 100.0	3.2 100.0	9.7 100.0

1970s							
Latitude($^{\circ}\text{N}$)	0	13	25	30.5	35	40	average
$\sigma_{\theta} < 26.6$	5.2 94.5	8.6 98.9	10.6 95.5	10.5 86.8	14.3 92.9	3.6 48.0	8.8 87.1
$26.6 < \sigma_{\theta} < 27.2$	0.3 5.5	0.1 1.1	0.5 4.5	1.5 12.4	1.1 7.1	3.7 49.3	1.2 11.9
$\sigma_{\theta} > 27.2$	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.1 0.8	0.0 0.0	0.2 2.7	0.1 1.0
total	5.5 100.0	8.7 100.0	11.1 100.0	12.1 100.0	15.4 100.0	7.5 100.0	10.1 100.0

上段 : ^{14}C bomb 存在量($\times 10^9 \text{ atoms/cm}^2$)

下段 : 割合 (%)

20%増加していることが分かる。赤道や北緯40度以北では、逆に減少傾向にある。密度毎に見ると、この20年間で ^{14}C bomb が中層水へ移行していることが分かる。その傾向は、北緯40度以北の高緯度域で顕著である。これは、高緯度域において北太平洋中層水に溶け込んだ ^{14}C bomb が中層を南下していることを示唆している。Tsunogai et al. (1993)は、同一海域における全炭酸量の鉛直分布を用いて、北太平洋中層水が大気中の人为起源による過剰二酸化炭素の吸収源としての役割を持つ可能性を示唆した。本研究はその可能性を支持するとともに、高緯度域で北太平洋中層水に溶け込んだ ^{14}C bomb(二酸化炭素)がわずか20年程度で中緯度域に運ばれていますことを明らかにした。

参考文献

- Aramaki, T., T. Mizushima, Y. Mizutani, T. Yamamoto, O. Togawa, S. Kabuto, T. Kuji, A. Gottdang, M. Klein and D.J.W. Mous, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* (2000) In press.
 Broecker, W.S., S. Sutherland, W. Smethie and T.-H. Peng T-H., *Global Biogeochemical Cycles* 9:263-288 (1995)
 Tsunogai, S., T. Ono and S. Watanabe, *Journal of Oceanography* 49:305-315 (1993)



JP0150282

JAERI-Conf 2000-019

3-2 分取キャピラリーガスクロマトグラフ (PCGC) システムを用いた 堆積物中個別有機化合物の放射性炭素年代決定

内田昌男⁽¹⁾、柴田康行、河村公隆⁽²⁾、米田 穣、向井人史、田中 敦

廣田正史⁽³⁾、植弘崇嗣、森田昌敏

国立環境研、⁽¹⁾ 海洋科学技術セ、⁽²⁾ 北大低温研、⁽³⁾ 環境研究セ

1. はじめに

環境中に存在する放射性炭素 ^{14}C は、産業革命以前は大まかな 1 次近似として、宇宙線起源の二次中性子による大気中での生成反応と崩壊並びに環境循環による減少との平衡にあったと考えられる。環境中での炭素循環は、植物による光合成固定と呼吸による再放出といった短期のサイクルから、海水循環とともに数百年～2000 年程度のサイクル、さらには海底堆積物の潜り込みと火山ガス放出、或いは石灰岩や化石燃料への変化と再利用といった地質学的スケールでの循環に至る様々な時間スケールのものがあり、それぞれの時間スケールに応じて異なる年代を持つ炭素が様々な時間的、空間的分布を持って地表～大気中の炭素プールに戻り、再利用されていく。近代になって、この自然の ^{14}C サイクルに、石油石炭等の化石燃料に由来する ^{14}C を含まない炭素の環境放出、並びに原子力利用や大気圏核実験による ^{14}C の負荷という、希釈並びに増加方向の 2 つの人為的負荷が搅乱要因として働くようになってきた。環境研究の分野においては、こうした ^{14}C の環境循環に関する理解を深め、環境中の炭素循環、物質循環の研究や人為的な影響把握のためのトレーサーとして利用するとともに、年代測定の精密化とそれを通じた環境変化のより詳細な解明の推進を目的として、 ^{14}C 研究が進められている。

特に、発生源により負荷される炭素の化学的な種類、構造が異なること、化合物毎に環境循環の様子や人為的な影響の反映のされ方も異なることなどを考慮すると、環境中の様々な化学物質毎の ^{14}C 測定 (Compound-specific ^{14}C analysis) の実現が重要な目標として浮かび上がってくる。国立環境研究所では、そのための測定手法の確立を目指して、2 次元ガスクロマトグラフ (GC) と加速器質量分析法 (AMS) を結合した GC-AMS システムの開発を平成 9 年度から始めている。ここでは、第 1 段階として作成したオンライン試料処理、分析システムの概要とその応用例、並びに GC と AMS をオンラインで結合するための条件検討の現状について報告する。

2. 分取キャピラリーガスクロマトグラフ (PCGC)

化合物毎の ^{14}C 測定システムの開発においては、全体を 2 つのフェーズに分け、前半で従来のグラファイト化-AMS 測定技術の利用を前提とした試料大量精製・前処理技術の確立並びに GC と AMS のインターフェース部分の条件検討と開発を進め、後半で GC-AMS オンライン分析システムの確立を目指している。従来型の固体スペッタリングイオン源では試料のハンドリングと分析のために通常 1 mg 程度の試料量が必要である。一方、高分解能のキャピラリー GC で 1 度に分離可能な試料量は高々数マイクログラム程度であり、複雑な混合物である環境試料中の特定化合物の mg レベルの分離精製は極めて困難である。また、それだけの量を確保するためには必要

とする最初の試料量も増え、その採取や前処理作業も困難となる。そこで、最初に従来の固体イオン源による微量試料測定のための諸条件を検討し、100マイクログラムまでの試料処理技術を確立し、炭素／鉄比の変動に由来する同位体比の見かけの変化並びにその補正法について検討した¹⁾。同時に、特定化合物の大量分離、精製を目的とした分取キャピラリーガスクロマトグラフシステムを組み上げ、標準試料による精製条件等の検討を進めた²⁾。

2次元分取キャピラリーガスクロマトグラフは HP（現在はアジレント）社製 6890GC 2台とコントロール装置、並びに Gerstel 社製の大容量インジェクター＋オートサンプラー、2次元 GC 用インターフェース、PFC（分取装置）からなる。1次元目と2次元目のガスクロマトグラフの間に液体窒素で冷却されるトラップがあり、特定の時間帯に出てくる成分だけを捕集できる。捕集された成分は2次元目のガスクロマトグラフに導入されてさらに個々の化合物に分離される。出てきた成分はごく一部（1%程度）が検出器でモニターされ、残りは8方バルブを経てトラップである個別のガラス管に導かれ、そこで冷却捕集される仕組みになっている。冷却用の液体窒素さえ補充しておけば、1週間かけて最大6分子まで同じ画分の分離・捕集を数十～百回自動で繰り返す事ができ、100マイクログラムオーダーの特定化合物の分離・精製も可能となる。なお、試料中の比較的主な成分の分離・精製には1台の GC と捕集装置(PFC)だけでも十分であり、以下の例では2次元目の GC にインジェクターを設置して使用した。

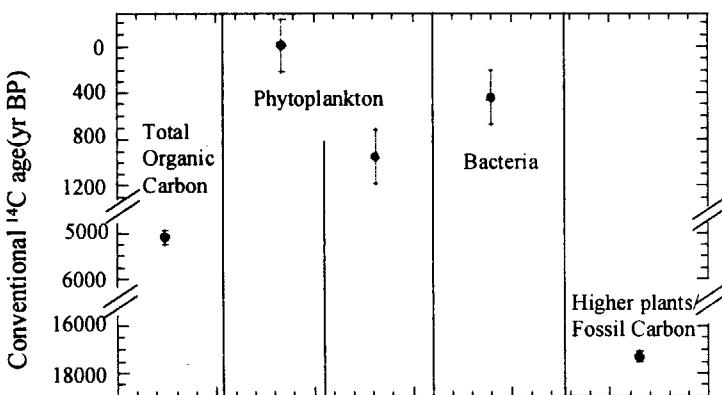
3. 海洋堆積物中に含まれるバイオマーカー分子の ^{14}C 測定

海洋堆積物中の有機物には、植物プランクトン、動物プランクトン等に由来する成分、水中、底泥中のバクテリアの代謝産物、陸上植物由来物質、さらに人為起源物質（特に化石燃料起源の物質）などがある。海洋堆積物は過去の地球環境の変化を探る上で貴重な試料であり、より多くの環境、生態情報を引き出すために、こうした有機物の起源や環境動態に関する詳しい基礎情報の集積が重要である。ここでは人為的影響の大きい東京湾海底堆積物の分析結果を報告する³⁾。

江戸川放水路河口に広がる三番瀬で採取された表層堆積物を凍結乾燥後、ジクロロメタン・メタノール混合溶液で超音波抽出ないし高速溶媒抽出（Dionex ASE200）処理した。これを0.5M KOH を含む含水（5%）メタノール溶液で還留しながらけん化し、中性、酸性画分に分画後、酸性画分をメチルエステル化し、シリカゲルカラムクロマトグラフィーを用いてさらに分画して脂

肪酸画分を得た。これを PCGC で特定の生物群に由来するバイオマーカー分子の分離、捕集を行った。抽出された脂肪酸分画のガスクロマトグラムより三番瀬の表層堆積物中には数多くの脂肪酸が含まれていた。このうち、主要なバイオマーカー 6 種類の分取を試み、うち量的に多く精製できた 4 種類について以下常法に従って酸化銅とともに封管して燃焼し、生成した二酸化炭素を精製、秤量後、グラファイトに還元して AMS 測定を行った。なお、これらの脂肪酸は GC 分離のためにメチルエステル化されているため、メチル化に用いた試薬(CH_3OH)を別途グラファイト化処理して ^{14}C 測定を行い、その分を補正してもとの脂肪酸の放射性炭素年代を求めている。

最終的な補正結果を図 1 にまとめた。左端は表層堆積物中の全有機炭素の放射性炭素年代で、表層にもかかわらず数千年前というかなり古い年代となった。例えば化石燃料由来の物質など、かなり古い炭素の影響を受けていることが明らかである。一方、植物プランクトンやバクテリアのバイオマーカー脂肪酸である $\text{C}_{16:1}$ 、iso-,anteiso- $\text{C}_{15:0}$ （C のすぐ右側の数値は総炭素数を、コロンの後ろは不飽和結合の数を表す）はほぼ現代に近い年代を与え、表層の堆積年代を表すと考

図1 東京湾表層堆積物中脂肪酸分子、バルク有機物の慣用 ^{14}C 年代

えて矛盾しない結果となった。即ち、バルクの有機炭素ではなく特定の化合物を選択して放射性炭素年代を測定することで、その層のより正確な堆積年代を求められる可能性が示された。

これに対し、陸上高等植物起源と思われた炭素数 22 の飽和直鎖脂肪酸（ベヘン酸）が1万7千年前という極めて古い年代を与えた。脂肪酸分子の存在量のパターンを示すクロマトグラムからもこの近辺では C_{22} が突出して高く、石油や一般の植物ワックス等には見られない変わったパターンになっている。ベヘン酸は様々な高等植物の種子やワックス中に含まれている。また試薬として純品が市販されているが、これは主にナタネ油等に多量に含まれる C_{22} の不飽和脂肪酸（エルカ酸）を水素化還元して作られる。このほか深海底堆積物にもベヘン酸ピークの検出例が報告されており⁴⁾、陸上植物だけでなく海洋生物の代謝産物に由来する可能性も検討する必要がある。このように、東京湾表層堆積物にあって古い年代を与える突出したベヘン酸のピークは化石燃料起源と素直に解釈できにくく、陸上の古い堆積層からの流入・堆積、或いは化学・生物作用による選択的長期環境残留、さらには浚渫など人為的行為による古い層の表面への移動の可能性など、今後様々な可能性を検討していく必要があろう。

4. ガスイオン源へのパルス状二酸化炭素の導入と ^{14}C 測定

国立環境研究所の加速器質量分析施設には、二酸化炭素ガスの直接導入で C^- イオンを引き出せるガスイオン源が設置されている⁵⁾。GC-AMS プログラムの後半では、このガスイオン源に GC 分離溶出物質を流し込んで分離されたそれぞれの化合物の放射性炭素年代の連続測定を可能にするオンライン分析システムの確立を目指している。GC 分離後安定同位体 MS で $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を連続的に分析する GC-C-IRMS は確立された技術であり、このシステムと同様、GC 分離後オンラインで二酸化炭素に燃焼させるシステムを通してガスイオン源での分析を行う構成を考えている。その前段階として、ヘリウムガスを一定量流しながら二酸化炭素ガスをパルス状に挟み込んでガスイオン源に導入し、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の測定を試みた。0.1 μg 炭素に相当する量の、現代炭素レベルの ^{14}C を含む二酸化炭素をヘリウムガスにサンドイッチにしてガスイオン源に導入した結果、正味 70 カウント分の ^{14}C が検出された。下段にはその際加速器後のファラディカップで測定された ^{12}C の電流の時間変化が記録されている。 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}=1.2\times 10^{-12}$ を仮定して計算するとイオン源に導入された試料中には 6,000 個の ^{14}C があったことになり、そのうち約 1.2%が検出器まで届いた計算となる。直後に測定したバックグラウンドレベルは 20 カウントであったが、これは時間

とともに減少する傾向を示した。さらに、バックグラウンドの $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比も導入した試料（現代炭素レベル）に近い値を示していることから、このバックグラウンドは先に導入した試料中の炭素の一部がセシウムイオンによってチタンのカソード中にたたき込まれたものを再びスパッタリングで叩き出して検出しているものと解釈できる。今後このメモリー効果をいかに軽減するかが技術開発上の大問題と思われる。

5.まとめと今後の展望

環境中の様々な化学物質毎の放射性炭素年代を目指して平成9年から進められてきた GC-AMS プログラムの現状を報告した。宇宙線起源（或いは人為起源）の放射性炭素をトレーサーとして用いる環境研究は今後益々盛んになっていくと思われ、化合物毎の放射性炭素年代測定の需要も益々増えることが予想される。また、こうした概念や手法は医学生物学の分野でこれまで行われてきたトレーサー実験と共通するもので、GC 分離と AMS を組み合わせた手法は医学生物学研究にもそのまま応用できるものと予想される。実用になるシステムの確立を目指し、オンラインで測定できる GC-AMS システムの完成を目指して今後の研究を進める予定である。

なお、本研究の一部は科学技術庁国立機関原子力試験研究費ならびに学術振興会特別研究員制度によって遂行された。

<文献>

- 1) 米田 穣、柴田康行、久米 博、田中 敦、植弘崇嗣、森田昌敏、熊本雄一郎：極微量サンプルの放射性炭素年代測定にむけて、加速器質量分析シンポジウム予稿集、日本大学文理学部自然科学研究所 138-143 (1997)
- 2) M. Uchida, Y. Shibata, M. Yoneda, A. Tanaka, H. Kume, T. Uehiro, and M. Morita : Preparation for radiocarbon measurement of individual organic compounds using preparative capillary gas chromatography (PCGC) at NIES-TERRA. Proceedings of International Workshop on Frontiers in Accelerator Mass Spectrometry, pp. 254-258 (1999). National Institute for Environmental Studies, Japan.
- 3) M. Uchida, Y. Shibata, K. Kawamura, M. Yoneda, A. Tanaka, T. Uehiro, M. Morita: Isolation of Individual Fatty Acids from Sediments for Radiocarbon Analysis using Preparative Capillary Gas Chromatography (PCGC) at NIES-TERRA Nucl. Instr. and Meth., B, in press.
- 4) S.G. Wakeham, C. Lee: Organic geochemistry of particulate matter in the ocean: The role of particles in oceanic sedimentary cycles, Org. Geochem., 14, 83-96, 1989.
- 5) Y. Shibata, H. Kume, A. Tanaka, M. Yoneda, Y. Kumamoto, T. Uehiro, M. Morita: A preliminary report on the characteristics of a CO_2 gas ion source MGF-SNICS at NIES-TERRA, Nucl. Instr. and Meth., B123, 554-557 (1997)

3-3 マイクロPIXEによる2次元元素分析システムの開発

酒井卓郎、及川将一、神谷富裕（日本原子力研究所 高崎研究所）
佐藤隆博、杉本明日香、石井慶造（東北大学工学部）

1. はじめに

原研高崎では、軽イオンマイクロビームを用いた、大気取り出しマイクロPIXE分析システムの開発^{1), 2)}を行い、所内外の研究グループに広く開放している。このシステムは、大気中において試料に対して、 $1 \mu\text{m}$ 程度に収束した高エネルギープロトンビームを照射し、試料から発生する特性X線を測定することにより、微細領域の2次元多元素分布を測定できるものであり、現在医学、歯学、生物学、地質学、環境科学など幅広い分野の研究者に利用されている。このシステムのデータ収集系は、独自開発した、パーソナルコンピューター(PC)をベースにしたマルチパラメータ測定システム^{3), 4)}であるが、昨年度にPCを更新するのに伴い、システムの大幅な改良を行った。以前にデータ収集用に使用していたPCをFTPサーバーとして、実験データを外部とインターネットを通じて共有できるようにした。これは、測定データを遠隔地にいる利用者とリアルタイムで共有し、専門家同士が、同じ知識を共有した上で、コミュニケーションを図ることを目的としたものである。

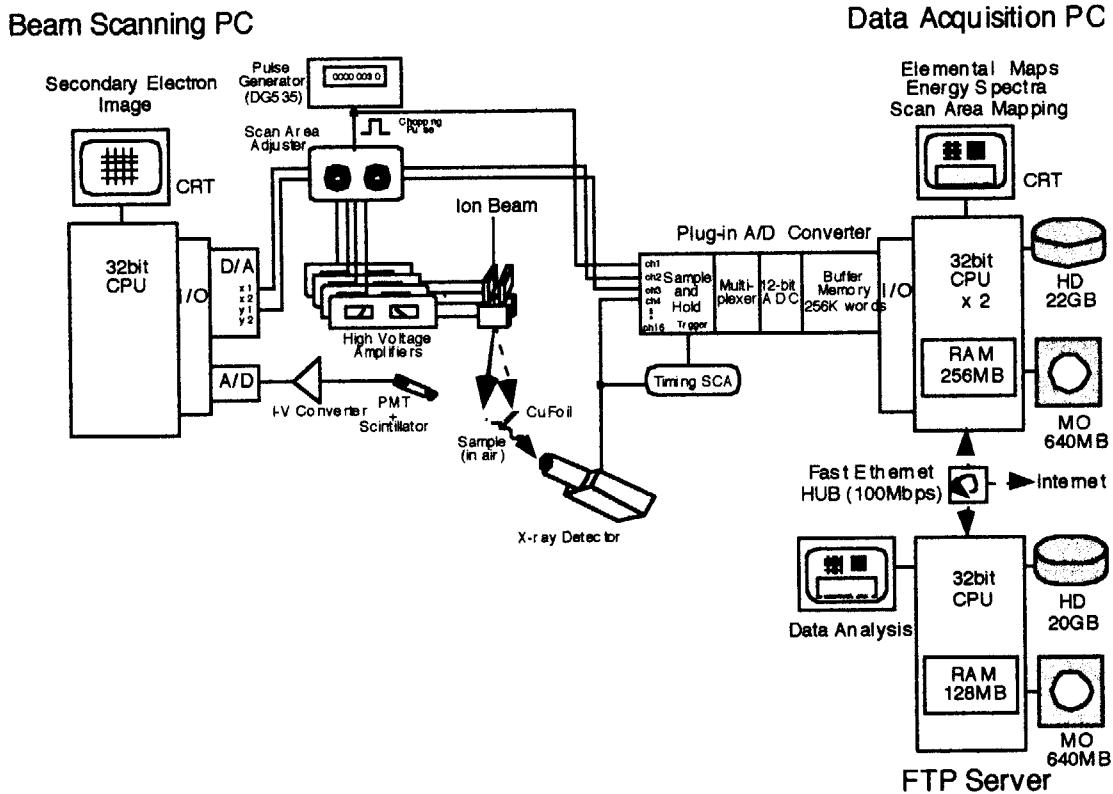


図1 マイクロビーム走査系とデータ収集系・FTPサーバー

2. PIXE (NRA) 分析システム

$1 \mu\text{m}$ の空間分解能を保ったまま大気中の試料にイオン照射を行うためには、試料とイオンビームを大気中に取り出すための窓との間を極力小さくする必要がある。このために、試料のバ

ッキング材と窓材を共通にすることにした。試料ホルダーは中心に 1 mm ϕ のビーム取り出しの孔が開いている円盤で、このホルダーに有機薄膜を張り付け、その上に試料を載せて、真空容器に直接取り付ける形状にした。窓材となる薄膜には、5 μ m 厚のマイラー膜を主に使用している。バックグランド X 線の発生を抑えるために、試料ホルダーはアクリル樹脂製である。試料からの特性 X 線を測定する Si(Li) X 線検出器 (ORTEC, SLP10180-S) は、ビーム進行方向から 140° の角度で真空側に設置されている。またナトリウムより軽い元素は PIXE 法では検出できないため、NRA (Nuclear Reaction Analysis) 法を用いて歯質中のフッ素を定量分析できるシステム⁵⁾ を大阪大学と共同で開発した。これは、¹⁹F ($p, \alpha \gamma$) ¹⁶O 反応により発生する γ 線を大型のシンチレーション検出器で検出することにより、フッ素分布の測定を行うもので、定量化は、標準試料との比較で行う。

X 線（もしくは γ 線）のエネルギー (E) は、ビームの位置情報 (X, Y) と関連づけて計測される。イベント毎に (E, X, Y) のリストデータとして PC のメモリーに転送され、演算処理、画像化される。計測したデータはバイナリ形式で保存され、専用のデータ解析ソフトで元素の 2 次元分布の表示、エネルギースペクトル上のピークフィットなどを行うことが可能である。この解析ソフトは、逐次バージョンアップを行っており、現在定量分析を行えるようにするために開発中である。このプログラムは、後述するように FTP サーバーから最新版をダウンロードすることが可能である。

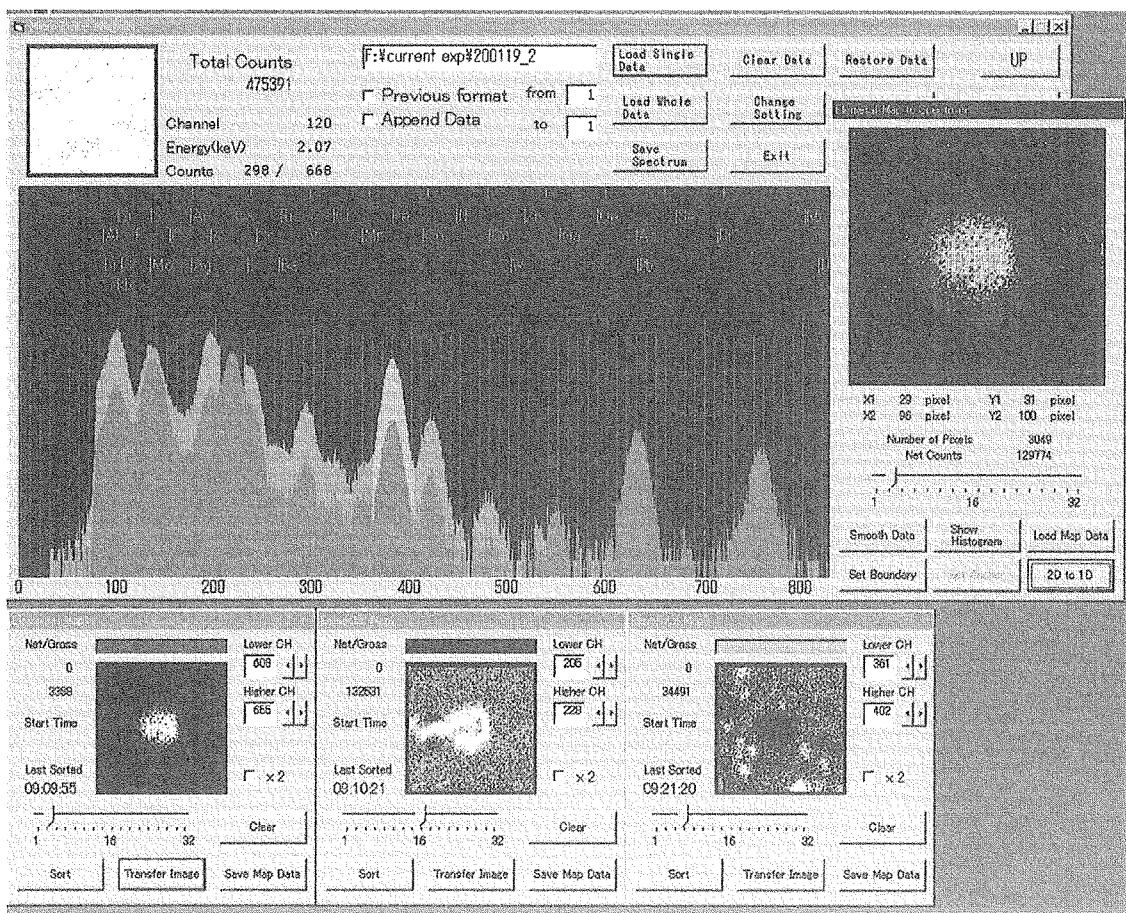


図 2 鉱物試料のマイクロ PIXE 分析例 (各元素の分布がそれぞれのウインドウで表示)

3. データ共有システム

データ収集用のPCは、所内LANに接続されており、測定したデータはすぐに別のPCで解析することができる。さらに遠隔地にいる実験者もインターネットを通じて、同じデータを共有する事が可能である。これは過去のデータだけでなく、現在進行中の実験に関しても同様であり、測定データは、あらかじめ設定した時間間隔でFTPサーバー上に転送される。これにより、遠隔地にいるユーザーでもインターネットにさえ接続できれば、ほぼリアルタイムで実験結果を知ることができる。

セキュリティに関しては現在未整備であるが、将来的には関係者以外のデータへのアクセスを拒絶するために、プロキシサーバー（ファイアウォール）の設置の他に、実験データにはデジタル暗号によるスクランブルを施し、解析のためには専用クライアントソフトによるデコードを必要とすることも検討している。

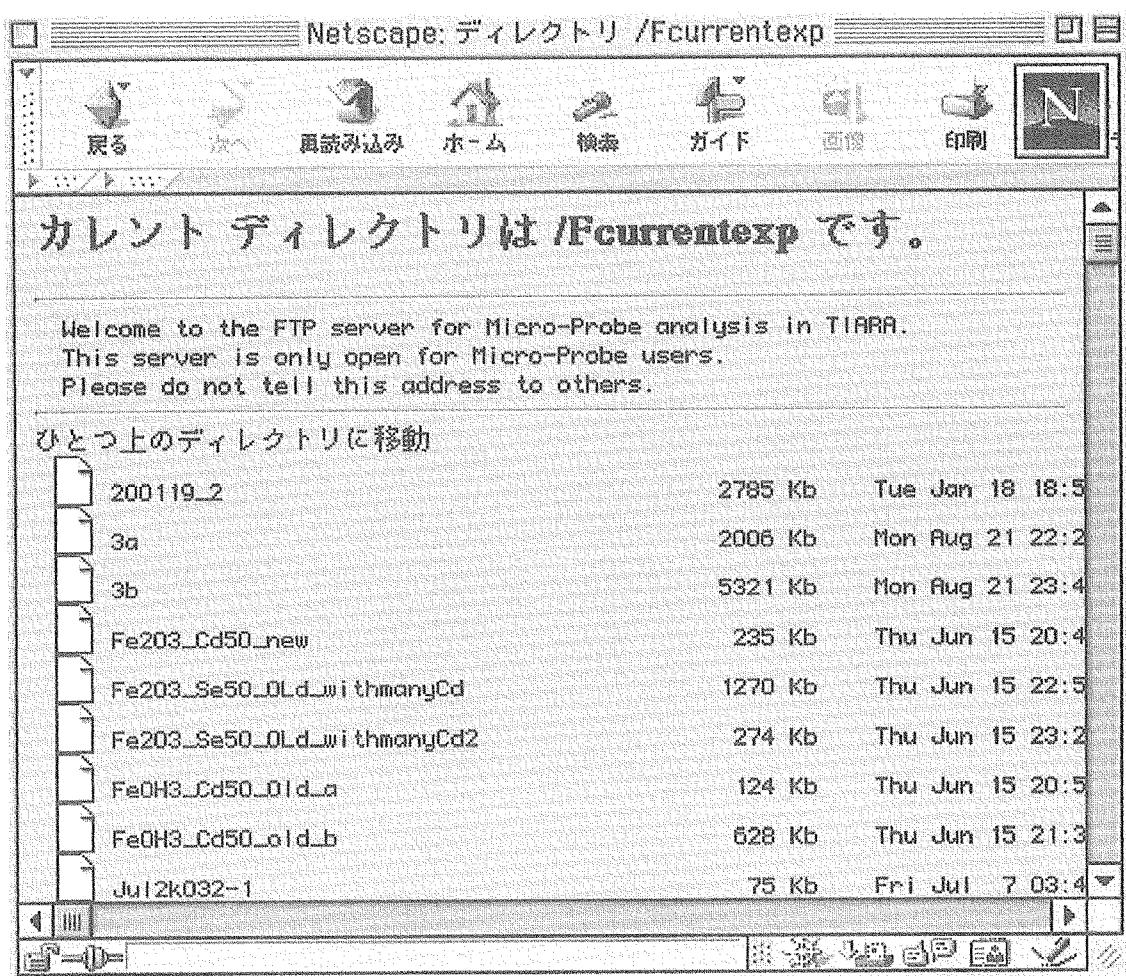


図3 インターネット上でデータ共有の例

4. まとめ

定量分析化、測定時間の短縮、測定可能元素の拡充、検出感度の向上など、まだ幾つかの開発要素が残っているが、昨年度よりマイクロPIXE(NRA)を用いた元素分析は、様々な分野の研究に本格的に利用され始めた。また、昨今のインターネットの普及により、遠隔地の実験者とリアルタイムで実験データを共有して議論することが可能になっている。先に述べたようにマイク

口 PIXE 実験においては、利用者は医学・歯学・環境科学など加速器の専門家ではない。このような利用者にとっては、試料調整に時間をとられるため、分析手段はできるだけ早く簡便であることが望ましい。そこで、このようなネットワークを利用した分析システムが整備されると、将来的には試料だけを送り、分析結果はネットワークを通じてリアルタイムで知ることができ、自分の専門分野に集中することができるようになる。

現在、素粒子実験以外の加速器施設で、このようなネットワークシステムが本格的に稼働しているところはないが、将来の研究所の一つのモデルとなる可能性がある。

参考文献

- 1) 酒井卓郎 他: 第11回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集 (1998年 東京)
- 2) T. Sakai et. al., Biological Trace Element Research Vols. 71-72 (1999), p77-82
- 3) 酒井卓郎 他: 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 (1997年つくば)
- 4) T. Sakai et. al., Nucl. Instr. and Meth.B136-138 (1998) 390
- 5) M. Nomachi et. al., presented at ICNMTA-2000 Bordeaux, to be published in Nucl. Instr. and Meth.B



JP0150284

JAERI-Conf 2000-019

3-4 名工研タンデム加速器を用いた P D M S

溝田武志、中尾節男、丹羽博昭、齋藤和雄

名古屋工業技術研究所 融合材料部 ビーム工学研究室

1. はじめに

タンデム加速器から得られる MeV 重イオンを試料に照射することで、試料中の構成元素、分子、高分子、クラスター等が放出される。これらを質量分析することで、試料の分析を行うことができる(Plasma Desorption Mass Spectrometry, PDMS)。一般に用いられる、keV エネルギー重イオンを用いる SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometry)が、Nuclear Stopping Power による二次イオン放出を行うのに対し、MeV エネルギーの場合、Electronic Stopping Power 起因で二次イオン放出を行う(Fig.1)。このため二次イオンとして、試料の分子、高分子、クラスター等が破壊されることなく放出されるものもでてくる。

表面にクラスターや高分子等を配置したような複合材料を評価する装置として、今回、設計・製作した PDMS 測定システムのテストを、 C_{60} フラーレンを用いて行った。

2. 研究内容

Fig.2 に、PDMS 測定システムのセットアップを示す。名工研 1.7MV タンデム加速器から得られる 11.2MeV の ^{28}Si イオンビームを、 $100\mu g/cm^2$ 厚の Au ターゲットフォイルに透過させ、 45° 方向に弾性散乱されたイオンを入射ビームとして用いた。その後、スリットを通してしたビームは Start CPD (Channelplate Detector) のフォイルを通過した散乱イオンは、更に、試料膜を透過し SSD (Solid State Detector) に入射される。試料膜は $1.8\mu m$ 厚のマイラー膜上に 800\AA の金を蒸着し、更にエレクトロスプレー法により C_{60} を塗布したものである。入射イオンが試料膜

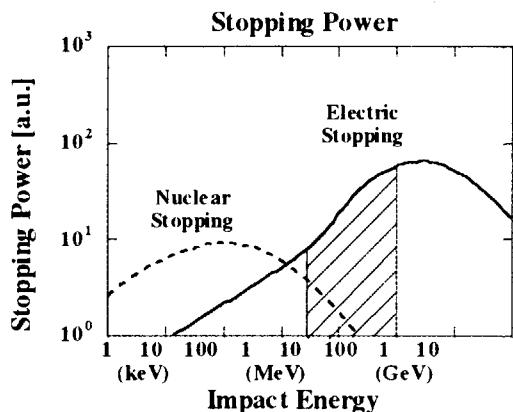


Fig.1 Nuclear stopping power と Electric stopping power

を透過する際、試料中の構成原子、分子、クラスター等が放出される。そのうちのイオンが、加速グリッドとの間の電場($7.5\text{kV}/5\text{mm}$)によって加速され、TOF 管中の一定距離を飛

Experimental Set-up

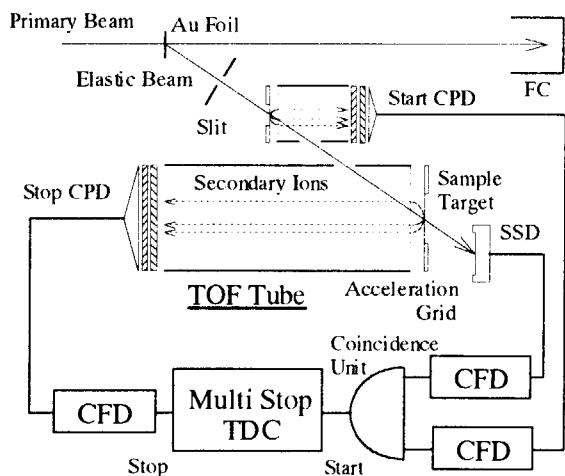


Fig.2 PDMS 測定システムのセットアップ

— 84 —

行した後、Stop CPD によってストップ信号を作る。スタート信号とストップ信号の時間差を測定することで、飛行時間(Time of Flight, TOF)スペクトルが得られる。 $E = (1/2) m v^2$ の関係から、生成された二次イオンの質量分布に換算できる(飛行時間測定質量分析法)。

PDMS の場合、1 個の重イオンが入射した際に複数個の二次イオンが試料から放出される。それらすべての飛行時間を計る必要性から、Multistop TDC (EG&G ORTEC Model 9308) を用いた。

3. 結果とまとめ

Fig.3(a), (b)に、初期エネルギー 11.2MeV、弾性散乱後 10.3MeV の ^{28}Si ビームを C_{60} 試料膜に照射した際の TOF スペクトルを、質量分布に変換したもの的一部を示す。(a)の軽い領域では水素、炭化水素等が 1amu 単位で確認できる。そして、(b)では C_{60} の質量 720amu に対して、炭素の同位元素 ^{13}C を含む 721amu のピークが分離されていることが分かる。これにより質量分解能としては、少なくとも $M/\Delta M \sim 1000$ 程度はあることが確認できた。

今後は、この測定システムを用いて、実際の高機能材料の評価とともに、そのための基礎データを蓄積することを予定している。その一例として、液相法によって作った金クラスターに対して、PDMS 法により得られた質量分布を Fig.4 に示す。 Au_n , $n = 60 \sim 1000$ のサイズが確認でき、TEM 測定とも良い一致が見られた。

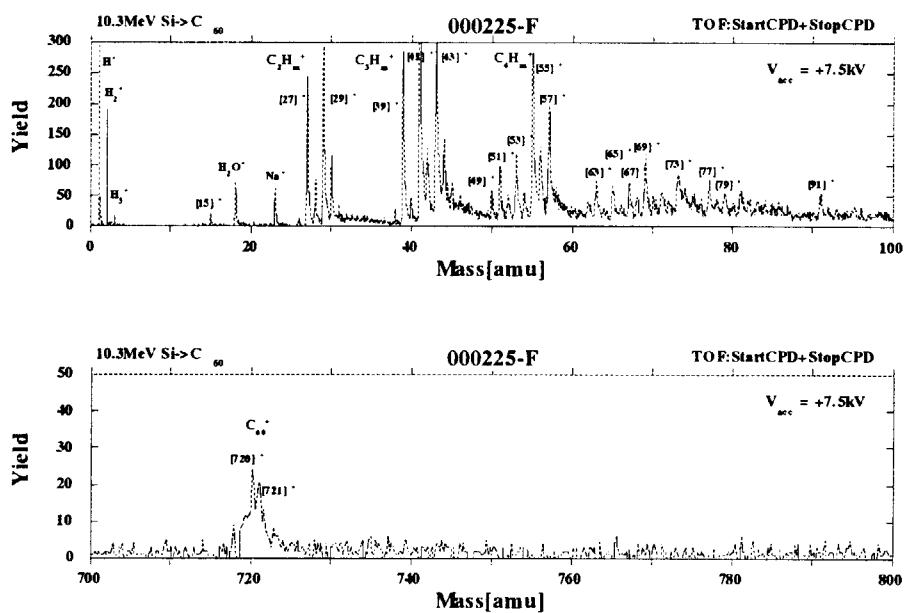


Fig.3 C_{60} 膜からの二次イオン質量分布。上：(a)水素や炭化水素、下：(b) C_{60} 。

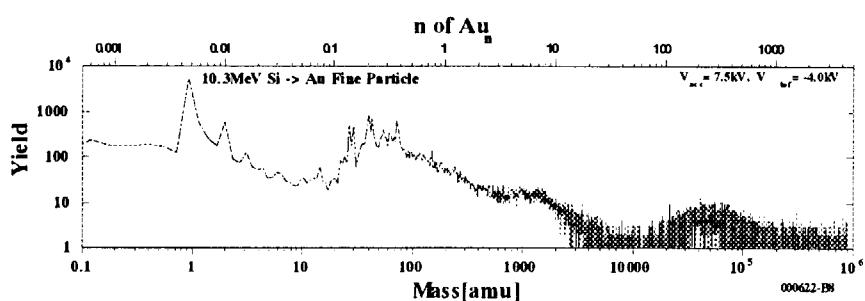


Fig.4 金クラスターの質量分布。12000 ~ 200000amu が金クラスター。



JP0150285

JAERI-Conf 2000-019

4 測定技術・応用研究（II）

4-1 最先端半導体素子の新たなシングルイベント現象 — 高集積メモリの充電型マルチブルビットアップセット —

槙原 亜紀子、新藤 浩之、根本 規生、久保山 智司、松田 純夫
大島 武*、平尾 敏雄*、伊藤 久義*

宇宙開発事業団
*日本原子力研究所 高崎研究所

1. はじめに

高集積メモリは、MD S-1等の人工衛星で観測したデータを蓄積しておく半導体メモリ装置 (SSDR : Solid State Data Recorder) 等に使用されているが、メモリ素子は重粒子イオンの入射によって記憶していたデータが反転してしまうシングルイベントアップセット (SEU : Single Event Upset) に対する耐性が非常に弱いため、通常はシステム中にエラー訂正用回路を組み込み、誤動作に対する対策を行っている。しかし、エラー訂正回路によって、発生し得る全てのエラーに対する対策を施すことは現実的ではない。効率的な訂正を行うためには、エラーの発生メカニズムを知った上でそのエラーを訂正するのに効果のある方法を選択することが必要である。これまで、単一のビット反転と多数のビットが同時に反転するマルチブルビットアップセット (MBU : Multiple Bit Upset) について研究が進められているが、近年のメモリの高集積化に伴い、新しいタイプの MBU 現象も報告されている。従って、これらのメカニズムを解明し MBU の特性を詳細に調査することが急務になっている。

これまで行われてきた研究では、16MbitDRAM の地上での重粒子照射試験データと宇宙環境での実測データとの比較がなされた^[1]。これらの実験データを別の角度からさらに詳細に解釈するために、今回地上用高集積メモリである 16Mbit 及び 64MbitDRAM を用いて重粒子照射試験を実施し、エラー発生箇所をチップ上に配置されているメモリセルの物理アドレスを用いてマッピング後、エラー内容とエラー分布の相関について解析した。その結果、今までの MBU 現象とは異なるメカニズムをもつと考えられるシングルイベント現象が確認され、以下に実験結果と新たな MBU 現象について報告する。

2. 実験

照射実験としては、地上用半導体メモリである NEC 製の 16MbitDRAM (μ PD4217800) 及び 64MbitDRAM (μ PD4264800) を使用し、重粒子イオン照射を実施した。これらのデバイスに用いられているプロセス技術については、表 1 にまとめた通りである^{[2][3]}。

デバイスに対しては、照射前にデータを書き込み、さらに照射後にデータを読み出して照射前後のデータを比較した。メモリセルのソフトエラーは、充電状態セルの放電状態への変化が原因になっていることが従来から知られているメカニズムであり、この場合イオンの入射位置にあるセルが反転する^[4]。一方、後に詳述するが、放電状態セルが充電状態に変化す

るソフトエラーも実際には発生している。今回の実験では、入射イオンによって発生するエラーモードを区分けできるように、書き込むデータはメモリセルが全て充電、全て放電または放電のチェックカードの様な繰り返し、となるようなものを計3種類設定した。

照射実験は、共同研究先である日本原子力研究所高崎研究所のイオン照射研究施設(TIARA)及び米国ブルックヘブン国立研究所にて実施した。使用したイオン種は、ヨウ素(I)、臭素(Br)、ニッケル(Ni)の計3種で、チップに対するイオンの入射角度を0度、ワードラインに対して60度、ビットラインに対して60度に変化させた。

表1 各評価用サンプルのプロセス技術

品種 項目	第2世代 16MbitDRAM	第3世代 64MbitDRAM
設計ルール	0. 45 μm	0. 28 μm
チャネル長	PMOS	0. 90 μm
	NMOS	0. 70 μm
メモリセル	サイズ	$2.48 \times 1.24 = 3.075 \mu m^3$
	構造	スタックセル
	容量	27fF
		25fF

2.1 メモリセルのMBU(充電→放電)

従来から解明されている単体メモリセルのソフトエラーは、充電状態セルが放電状態に反転することにより発生する。これは、キャパシタまたはキャパシタ電極が接続するトランジスタの拡散領域付近にイオンが入射することにより、発生した電子-正孔対の中の電子が拡散領域に捕獲され、充電していたキャパシタが電気的に中和されて放電状態に反転してしまうため、イオンの入射位置にあるメモリセルのみがエラーを起こすことになる。また、イオンが入射してからサブストレート中に発生する電子-正孔対は周辺に拡散され、高密度プラズマ領域を形成する。メモリの高密度化に従って、メモリセルの物理的な大きさや配置が縮小され、この高密度プラズマ領域に影響されるメモリセルが複数になる。従って、1つのイオンが入射することにより、複数のメモリセルが反転するMBUが発生することになる。

3. 結果

3.1 16MbitDRAM

図1に、典型的なMBUのエラーマッピングを示す。これらは、入射イオンにI、Br及びNiを使用し、入射角度をチップに対して0度、ワードラインに対して60度、ビットラインに対して60度に変化させ、充電状態セルに対して照射したもので、発生したエラーは全て充電状態セルが放電状態に反転したものである(放電型MBU)。このエラーマッピングの形状が、以前実験されたMBU^[1]のエラーマッピングと異なるのは、メモリセルの配置を論理的配置ではなく図2に示すような物理的配置を用いてレイアウトしたためである。

一方MBUは、放電状態セルにおいても発生した。図3に、16MbitDRAMにおける

放電状態セルが充電状態に反転したエラーマッピング（充電型MBU）を示す。さらにイオンの入射位置を確認するため、DRAMに対して all"0" のデータを書き込んだ状態で、0 度入射の照射実験を行った。この場合、実際のメモリセルには放電／充電がチップカーボード状態に現れる。結果は、6 ~ 10 ビットの放電型MBU と、数ビットの充電型MBU が完全に分離して発生し、しかも充電型MBU が発生したメモリセルに近接している充電状態セルは、ビットが反転していなかった。このことは、充電型MBU のエラーメカニズムが 2.1 項で説明した放電型MBU の場合とは異なり、メモリセルアレイ部へのイオンの直接入射が原因ではないことを示している。また、ビットラインに平行照射を行った結果である図 4(b) は、メモリセル 3 個おきにエラーが発生しているのに対し、(c) では 1 個おきに発生している。**16MbitDRAM** では、各ビットラインの両端にはコントロール回路としてセンスアンプ回路とプリチャージ回路があり、ビットライン 1 本毎にその位置が互い違いの構造になっている。従ってこれらのエラーは、片側または両側のセンスアンプ回路またはプリチャージ回路が入射イオンにより影響をうけ、リフレッシュサイクル中に誤ったデータを書き込んだ可能性が考えられる。

3.2 64MbitDRAM

図 5 に、**64MbitDRAM** における典型的な放電型 MBU のエラーマッピングを示す。

また充電型 MBU においては、**16MbitDRAM** と一番異なる点としては図 5 に示すような最大 8 本のワードライン上の複数ビットラインにつながるメモリセルについて充電型MBU が発生した。この場合はリフレッシュサイクル中にビットラインの電位が少なくとも数 $10 \mu s$ 程度は誤った電位に固定されている必要があり、これにはセンスアンプ回路中のフリップフロップの出力電圧がしばらくの間固定される必要がある。

4. 結論

以上の結果より、DRAM に発生する充電型及び放電型MBU にはそれぞれ独立したエラー発生メカニズムが存在することが判明した。今回の実験のように長いリフレッシュサイクル($5.2 \mu s$)では、リフレッシュ動作に要するトータル時間に対する充電型 MBU の発生可能な時間の割合が小さくなるため、エラー発生回数としては放電型 MBU と比べて充電型MBU は見かけ上少なくなるが、メモリの実動作に近づくにつれリフレッシュサイクルは短くなるため、充電型 MBU の発生回数は極めて多くなり、深刻な問題となる。従って、放電型 MBU の発生メカニズムの解明が重要になってくる。

参考文献

- [1] S.Buchner et al., "Investigation of Single-Ion Multiple-Bit Upsets in Memories on Board a Space Experiment", RADECS'99, (1999)
- [2] S.Koshimaru et al., "2nd Generation 16MbitDRAM," NEC Technical Journal, Vol.46, No.2, pp.90-93, (1993)
- [3] S. Tsukada et al., "Development of 64MbitDRAM (3rd Generation)," Nec Technical Journal,

Vol. 50, No. 3, pp. 23-27 (1997)

[4]J.L.W.Massengill et al., "Cosmic and Terrestrial Single-Event Radiation Effects in Dynamic Random Access Memories," IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. NS-43, No.2, pp. 576-593,(1996)

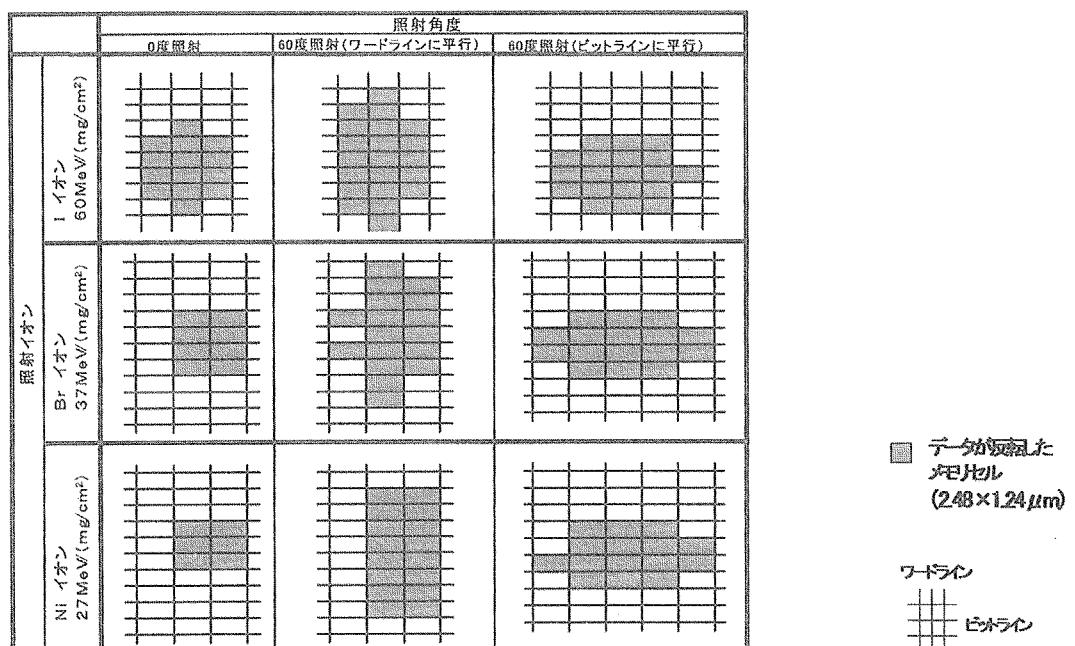
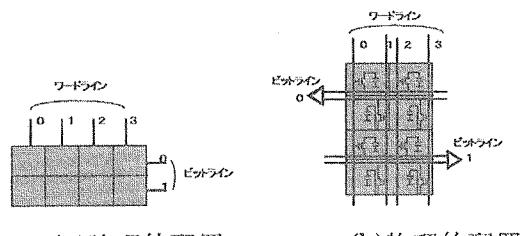
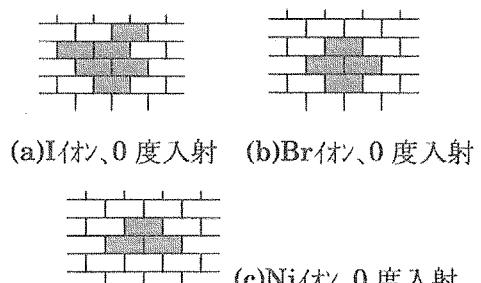
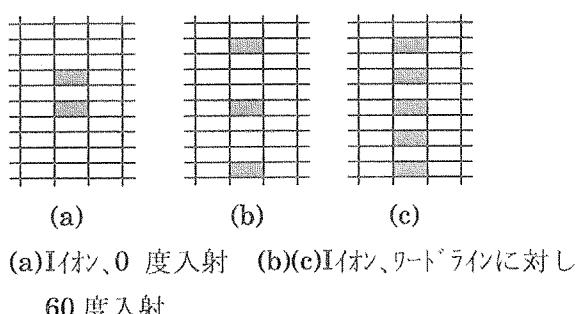
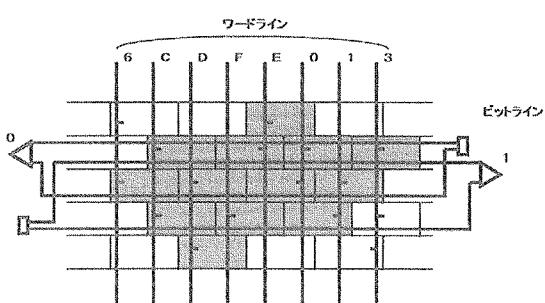


図1 典型的な全セル充電状態のMBUエラーマッピング(16MbitDRAM)

図2 メモセルの論理的及び物理的配置
(16MbitDRAM)図4 全セル充電状態のMBUマッピング
(64MbitDRAM)(a) Iイオン、0 度入射 (b)(c) Iイオン、ワードラインに対し
60 度入射図3 全セル放電状態のMBUエラーマッピング
(64MbitDRAM)図5 全セル放電状態のMBUエラーマッピング
(64MbitDRAM :
Iイオン、ピットラインに対し 60 度入射)



4-2 最近のシングルイベント研究について ——新たな測定手法の開発——

平尾敏雄、Jamie S.Laird、森 英喜*、小野田忍*、伊藤久義

日本原子力研究所高崎研究所材料開発部技術開発課

*東海大学工学研究科

1. はじめに

現在の高度情報化時代は、科学衛星や気象および通信衛星等の利用によって支えられている。それら衛星の中核となる制御および通信には、軽量、小型高性能、低消費という特徴から半導体素子の需要が高まっている。しかし、宇宙空間のような放射線環境下で使用する場合、半導体素子と放射線との相互作用により様々な影響を受けることはよく知られている。特に人工衛星に搭載されている半導体素子に、高エネルギーを持った荷電粒子が入射した際、素子内に発生した電荷が雑音電流となり、その大きさが回路の溶断やデジタル情報の反転などの故障や誤動作を引き起こすソフトエラーやラッチアップ等のシングルイベント現象が大きな問題となっている。

従って、宇宙環境で使用される半導体素子および集積回路の実用化を図るためにも、重イオン入射によって引き起こされるシングルイベント現象に対する対策が最も重要である。さらに、今日のように人工衛星の需要と長寿命化への要求が高まる中、半導体素子の放射線環境下での影響を詳細に調べることはますます重要な課題となっている。

我々はシングルイベントの発生機構の詳細な解明を目的とし半導体素子の基本構造であるpn接合ダイオードに重イオンが入射したときに発生するピコ秒台のシングルイベント過渡電流を計測し、その時の発生電荷量とイオン種との関係からシングルイベントの機構解明を目指した研究を進めている。今回の報告では、この研究を行うために導入した新たなシングルイベント過渡電流波形の計測方法と、それらを用いた実験結果さらに今後のシングルイベント研究の新たな展開について行う。

2. 新たな測定系の構築および実験条件

これまでシングルイベント現象の解明を目指し、シリコンおよびガリウム砒素で構成した試料に重イオンを照射して発生する電荷量を求めてきた。その結果、高LETを持ったイオンが入射した時に発生する電荷量が、入射イオンのLETの増加に伴い増加し、印加電圧に依存することなどの結果が得られている。さらにシングルイベントの耐性を強化するには、SOI構造を備えたデバイスが有効であるとの結果も得られている。しかし、これらの実験の中で、重イオンが入射したときに発生したシングルイベント過渡電流波形の放射線損傷による低下も見られており、詳細な発生機構を解明する上で大きな障害となっている。そこで重イオンの入射に伴う放射線損傷を軽減する測定システムの開発が急務となっていた。

我々は、高周波帯域で構築したシングルイベント過渡電流測定システムと重イオンマイクロビームラインに設置されているファーストビームスイッチを組み合わせた、新たな測定システム(TIBIC)を開発した。TIBICシステムは、図1に示すように、シングルイベント過渡電流測定システム、パルス発生器、高速ビームシャッターから構成されており、それらは全て測定用計算機にて制御およびデータ取り込みが行われている。なお、このシステムはLabViewにて作成した。このシステムを用いることで、入射イオンの位置を変更したスキャン照射を行うことができ、従来から問題となっていた入射粒子における放射線損

傷の影響を軽減した方法である。さらに、シングルイベント過渡電流波形とイオンの入射位置におけるイメージングも同時に観測できる。

このシステムと従来の測定システムとの比較を行うために、15MeV のエネルギーを持つ炭素イオンをシリコンおよびガリウム砒素試料に照射を行い、その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の測定を行った。

3. 結果及び考察

図 2 は、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 径の感応面積を有したシリコン pn 接合ダイオードの $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ の範囲に、炭素イオンを $1\text{ }\mu\text{m}$ ステップにて照射したときに発生したシングルイベント過渡電流波形の測定結果を示している。図 2 中の a)は照射試料の平面写真を、b)はスキャン範囲で発生したシングルイベント過渡電流波形から求めた、ピーク位置、下降、上昇時間等の感應面積との関係、c)入射位置が中央で得られたシングルイベント過渡電流波形の電圧依存性、d)イオンの入射位置の違いによるシングルイベント過渡電流波形の違いを示している。同図に見られる様に新たに開発した TIBIC 測定システムを用いることで、従来から求めていた接合部の一点での電荷発生挙動を示すシングルイベント過渡電流波形の他に、それぞれの照射位置での電荷発生に寄与するシングルイベント現象を連続的に観察できることが分かった。さらに、接合部全体に渡ったシングルイベント発生挙動を連続的に得ることができることから、より詳細なシングルイベント発生機構の解明に有効な手法と言える。また入射粒子の数を高速パルスにて制御することから、それぞれの照射位置に対する入射粒子によるイオン損傷も低減することができた。一方、図中の各イメージングの結果から、イオンが入射した時に発生するシングルイベント現象の電荷収集に寄与する感應面積が、この試料の接合面積と良く一致し（シリコン試料は感應面積 $50\text{ }\mu\text{m}$ ）、さらに照射位置の違いによる影響として、図 2b で示すように感應部位の中央付近の影響が最も強いことが分かる。さらにイオンの入射部位の違いにより、イオンが入射したときに発生するシングルイベント過渡電流波形のドリフトと拡散成分による挙動も計測されている。

4. まとめ

この新たに開発したシングルイベント測定システムは、入射粒子 1 ケによるシングルイベント現象を直接的に観察できるため、イオン損傷による影響を軽減でき、さらに発生する電荷挙動をイメージングと過渡電流波形との両方から求めることができる。従ってこのシステムを用いることで、今後のシングルイベント解明に対して詳細な解明を行うことができると言える。

参考資料

- T. Wallmark et al., Proceeding of IRE, (1962) 286.
- D. Binder et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-22, No.6 (1975) 2675.
- Ronald S. Wagner et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-33, No.6 (1986) 1651.
- R. S. Wagner et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-34, No-6, p.1240 (1987).
- R. S. Wagner et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-35, No.6 (1988) 1578.
- I. Nishiyama et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-40, No.6 (1993) 1935.
- F.W. Sexton et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-40, No-6, p.1787 (1993).
- T. Hirao et al., Nucl. Instr. and Meth. B 104 (1995) 508.
- F. W. Sexton et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-42, No.6, (1995).
- T. Hirao et al., Nucl. Instr. and Meth. B 130 (1997) 486.
- T. Sakai et al., Nucl. Instr. and Meth. B 130 (1997) 498.
- T. Hirao et al., Nucl. Instr. and Meth. B 158 (1999) 260.

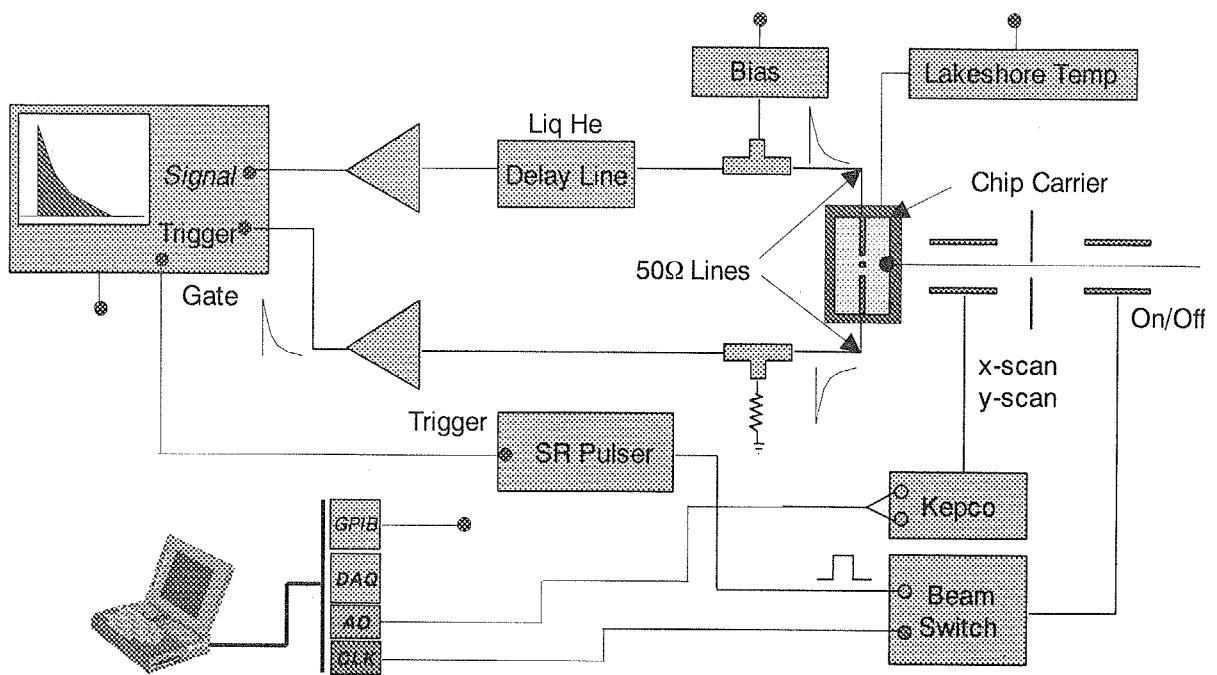


Figure 1: The overall schematic of the Transient-IBIC data collection system

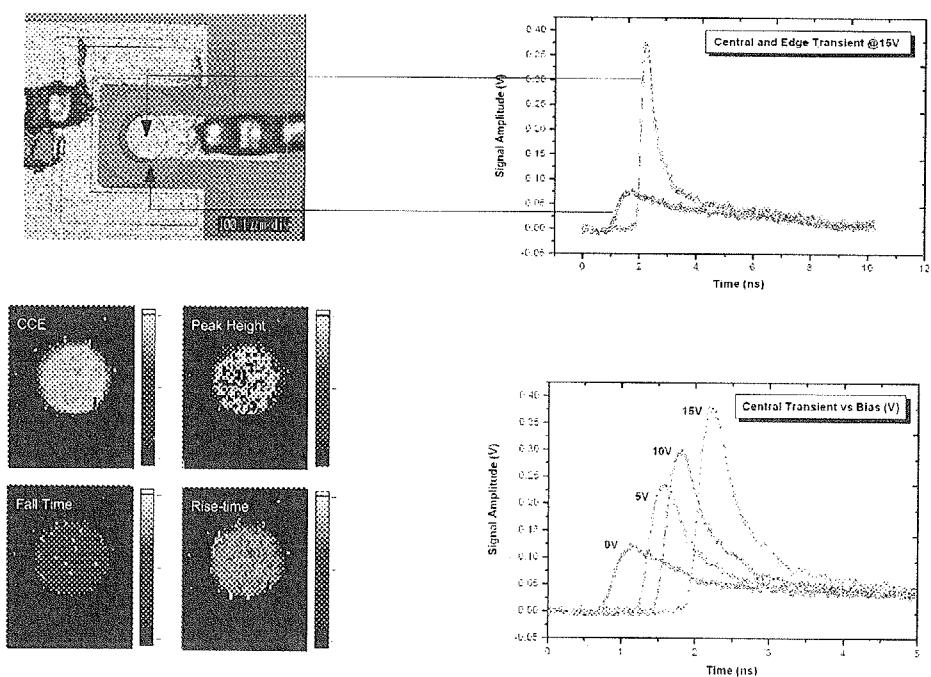


Figure 2: Transient-IBIC results collected on a pn junction. Top left shows a photograph of the device. Images produced from the transient current data are shown in the lower left. The top right plot shows typical transients extracted from the centre and edge region of the diode. The bottom plot shows the centre transient behaviour with bias.



5 測定技術・応用研究（III）

5-1 MeV クラスターイオン開発と照射効果

原研高崎 斎藤勇一、水橋 清、田島訓、荒川和夫
物質研 平田浩一、小林慶規

1. はじめに

MeV クラスターイオンの照射は単原子イオンのそれと比較して、大きな運動量を局所的に付与することができるので、非線形な効果が現れ、材料開発などへの応用が期待される。そこで、我々はスパッタ型負イオン源を用いた様々なクラスターイオンの生成及びタンデム加速器を利用したそれらの MeV エネルギーへの加速を試みており、これまで、いくつかのクラスターイオン及び異なる原子から構成される 2 分子イオンの生成・加速に成功している。また、これらクラスターイオンの照射効果の基礎的な知見を得るため、照射により標的表層に形成される欠陥分布の測定を行っている。負クラスターイオンは SNICS II で生成され、TIARA 3 MV タンデム加速器 (9SDH-2) で加速される。今回は以下のことをについて報告する。

クラスターイオン生成・加速では、異なる元素から構成される分子イオンとして新たに酸化鉄イオンを生成し、それを MeV エネルギーへ加速した。欠陥形成では、炭素クラスターイオン ($C_2 \sim C_4$) 照射と炭素単原子イオン照射の欠陥形成量を比較した。また、大きなクラスター（例えば Au_{11} 以上、 C_8 以上）に対しては、現在ビームラインに設置されている汎用のビームモニターでは電流が測定できなくなる現象が現れたので、いくつかの標的について、同一のビームで測定される電流量を比較した。

2. 酸化鉄イオン生成・加速

ターゲットに異なる原子を同時に、または同じ場所に注入することができる、異分子イオン同時注入技術開発の一環として、酸化鉄イオンの生成及び加速を試みた。イオン源のスパッタカソード試料として Fe_2O_3 粉末を用い、スパッタ電圧・6 kV、引出電圧・10 kV、加速電圧・55 kV のエネルギー 71 keV でビームを引き出し、30° 偏向電磁石でその質量を分析した。その結果、図 1 に示すように、鉄と酸素の化合物として、 $FeO(780nA)$ 、 $FeO_2(160nA)$ 、 $FeO_3(10nA)$ 及び $Fe_2O(6nA)$ の負イオンがそれぞれ観測された。これまでの経験でタンデム加速器透過効率は 1 % 前後となるので、nA 以上の電流が期待できる FeO と FeO_2 の加速を加速電圧 2.5 MV で試みた。その結果、 FeO^{+} が 19 enA、 FeO^{2+} が 1.3 enA、 FeO_2^{+} が 10 epA それぞれ観測された。 FeO_2^{+} に関しては透過率がこれまでのものと比較して、百分の 1 程度低く、結合が不安定であると考えられる。 FeO については、 AlO (酸化アルミ) の場合 [1] と同様に 2+イオンが観測された。荷電変換ガス圧 (加速器タンク直近の接地側で測定) と加速器加速されたイオンのビーム電流の関係を

調べたところ図2に示すように、 3×10^{-8} Torr 付近で両方とも最大ビーム電流値をとった。また、2価イオンの方が、ガス圧を増加させたときのビーム電流の減少が小さいという、AlOイオンとほぼ同じ振る舞いをすることがわかった。

3. MeV エネルギークラスターイオン照射による欠陥形成

クラスターイオンの材料への照射は、表面改質、薄膜形成及び物質内クラスター形成など、新材料開発への応用が期待される。しかし、照射により材料は必然的に損傷を受ける。この損傷は単原子イオンとクラスターイオンとでは異なると考えられるがその実験的研究は少ない。そこで、我々は構成原子数の異なるクラスターイオンをターゲットに照射し、その損傷を、表面の欠陥及び損傷に敏感なエネルギー可変陽電子ビームを用いて測定した。実験条件は、照射ビーム：1原子当たり 0.5 MeV の C₁₁₁、注入量： 1×10^{13} 個/cm²、ターゲット：シリコンとポリカーボネート(PC) である。また、エネルギー可変陽電子ビームで測定される損傷量は、陽電子がターゲット内のどの運動量の電子と対消滅したかをドップラー効果の度合いで示す、S パラメータで定義される。これは電子・陽電子対消滅時に放出されるガンマ線のエネルギー 511 keVを中心とした前後 1 keV のガンマ線量を全体のガンマ線計測量で除したもので、金属及び半導体では S パラメータが大きいと欠陥→大、高分子材料の場合は逆に S パラメータが大きいと損傷→小となる[2]。

その結果、図3に示すように、ターゲット表層において、1入射原子が形成する欠陥数がクラスター構成原子数及び照射材料に依存する関係が見いだされた。PCについては、クラスター構成原子数が多くなるほど損傷が多く形成されたのに対し、シリコンについてはクラスター構成原子が多くなると欠陥が少なくなった。このメカニズムについては現在検討中であるが、シリコン

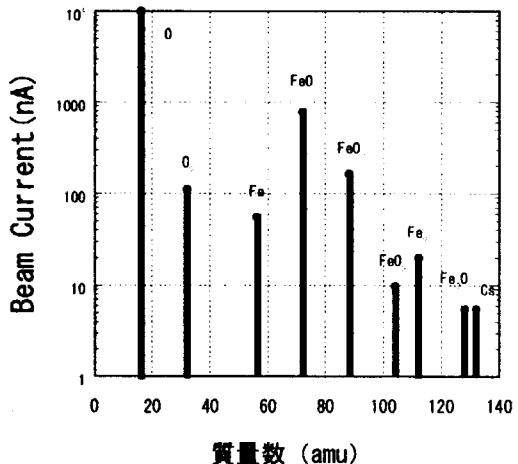


図1 Fe₂O₃ を試料としたときのイオン源から引き出された負イオン質量分布

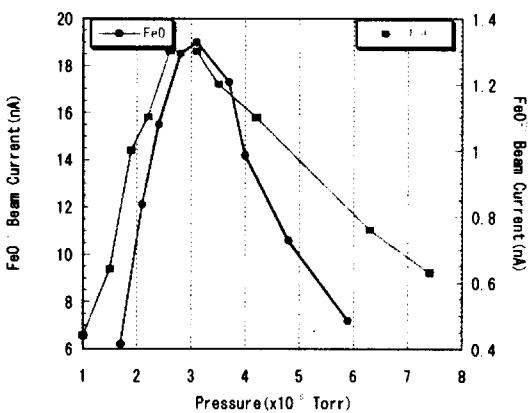


図2 FeO⁺ 及び FeO²⁺ ビーム電流値の荷電変換ガス圧力依存性

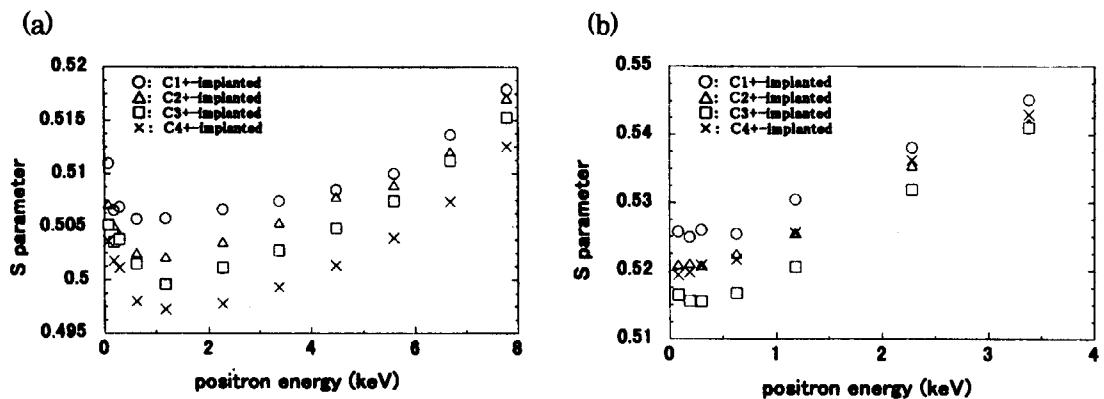


図3 エネルギー可変陽電子ビームによるクラスター照射材料（エネルギー：0.5 MeV/atom、イオン種：C_{1~4}、注入量：1 × 10¹³ 個/cm²）の深さ方向欠陥分布 (a)ポリカーボネート (b)シリコン

では、原子核衝突による弾き出しが支配的で結晶内の欠陥（空孔）を観察していることになるので、クラスター効果（非線形効果）としてターゲットのアニーリングが行われたと推測することができる。これに対しPCでは共有結合の切断である、高分子中の損傷を観測しており、クラスター効果としてそれが強調されるということは、クラスターの物質中での電子阻止能が増大したと考えられる。

4. クラスタービーム電流の測定

クラスター加速実験及び応用実験の過程で、試料電流の測定値が試料の種類によって異なる現象を観測した。同じ条件での照射において、單原子イオンビームの場合は上記現象は観測されないので、クラスタービームに起因するものと考えられる。試料電流は注入量を制御する上で重要な情報となる。そこで、このメカニズム解明の一環として、いくつかの試料に対して図4に示すようにサプレッサーに負の電圧を印可し、試料からの2次電子を追い返した状態で、試料電流とその時間変化を測定した。

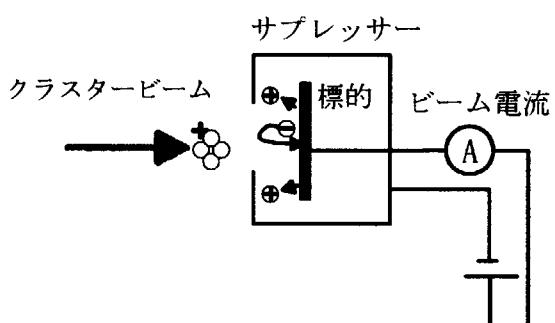


図4 試料電流測定方法

入射ビームとして 1.6 MeV の C₈、標的として、シリコン (Si)、アルミナ (Al₂O₃)、銅 (Cu)、アルミ (Al) 及びポリカーボネート (P.C.) を用いた。その結果、図 5 に示すように、同一クラスター ビームを標的に照射しても、電流計の示す数値に違いがあり、また、その値は時間と共に増加していく、ある値で飽和した。その飽和時間及び飽和値は標的により異なることがわかった。この中で最も時間変動が小さかったものはシリコンで、最初 0.8 nA の測定値が約 3 分後に 1.0 nA まで増加し飽和した。また、最も大きかったものは銅で、最初 4.9 nA の測定値が約 20 分後に 0.1 nA まで増加し飽和した。到達電流値はシリコンが最も大きく

(1.0 nA)、アルミナとアルミが最も小さかった (-0.3 nA)。

現在のデータから推測されることを以下に記す。

- 1) ビーム電流値が異なる → 標的表面から 2 次正イオンが放出されその量は標的の種類に依存する。標的表面に吸着している水分や酸化膜が正イオンとしてスパッターされている。
- 2) 時間変動がある → 標的表面の付着物の作用。吸着物がイオンビームで飛ばされると安定する。
- 3) Si と Al で電流値が異なる → スパッターされる 2 次イオンの割合は少ない。シリコンとアルミはほぼ同じ質量なので、スパッター率が同程度となり、この正イオンが支配的であるなら、ビーム電流も同程度となるはずである。

今後、標的からの 2 次イオンの種類の同定を行いたい。

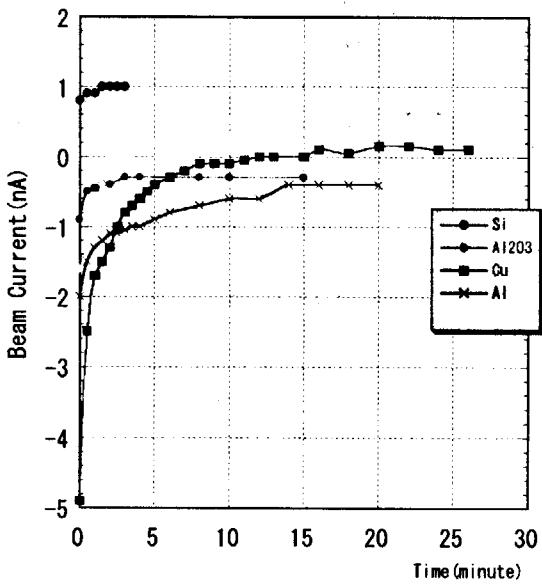


図 5 エネルギー 1.6 MeV の C₈ ビームを標的に照射したときのビーム電流の測定値及びその時間変化

参考文献

- [1] 斎藤勇一、水橋清、田島訓：第 12 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、p117 (1999).
- [2] K.Hirata, Y. Saitoh, Y. Kobayashi, S.Okada and M. Kawasuso, JAERI-Review 99-025, p193 (1999).



5-2 MALT のイオン源特性 その 1

中野忠一郎、小林紘一、松崎浩之、春原陽子
東京大学原子力研究総合センター

1. はじめに

東京大学原子力研究総合センタータンデム加速器研究施設 (MALT) は、1991 年に建設が開始され、1995 年より研究利用がはじまり今日に至っている。この間数多くの改良・改造が実施され、AMS をはじめとする微量分析装置として安定した性能を発揮できるようになつた¹⁾。しかし、これら実験に、より高精度が求められている現在、比較的長いスケールでのトランスマッショングの変動やイオン源に起因すると考えられる不安定要因が大きな問題となつてきている²⁾。

イオン源の不安定要因は、イオンビーム電流の変動として現れる。そこで、MALT で使用しているセシウムスパッタ型イオン源(米国 NEC 社製、MC-SNICS)のビーム電流とセシウムリザーバ温度、アイオナイザ、カソードポテンシャルの関係など基本的特性についてグラファイト試料を用いて測定を行つたので報告する。

2. イオン源の概要

MALT のイオン源であるセシウムスパッタ型イオン源の負イオン生成過程の概略を図 1 に示す。なお、米国 NEC 社製のイオン源は一度に 40 個の試料を装顛できることから、Multi Cathode -SNICS と呼ばれている。

負イオン生成は、 Cs^+ イオンを生成する過程とその Cs^+ イオンをもちいて試料から負イオンを生成する過程の二つの過程からなる。前者は、セシウムリザーバ温度を上げると Cs は蒸気となり、導管を通りアイオナイザに到達する。仕事関数が大きく高温となっているアイオナイザの Ta 表面に電離電圧の低い Cs 原子が吸着し、その一部が電離してイオン化される。後者は、カソードには負の高電圧が印加されており、イオン化した Cs^+ イオンは加速されてカソードに詰め込まれた試料面に到達する。なお、 Cs^+ イオンビームは Cs フォーカスレンズにより試料面にフォーカスされる。アルカリ金属である Cs で試料表面が覆われると仕事関数が低下し、最大値数 10eV の放出エネルギー分布をもつ負イオンが生成される³⁾。

アイオナイザへの Cs 蒸気量はセシウムリザーバ温度を変えることで調整できる。同様に、アイオナイザの Ta 表面温度はアイオナイザ電流を変化させることで、また Cs^+ イオンの入射エネルギーはカソードポテンシャルを変えることで調整可能である。

試料はグラファイトを使用した。この試料から生成される主な負イオンを表 1 に示す。Cu⁻イオンが生成されるのは、銅製のカソードを用いたことによる。なお、使用したアイオナイザの最大定

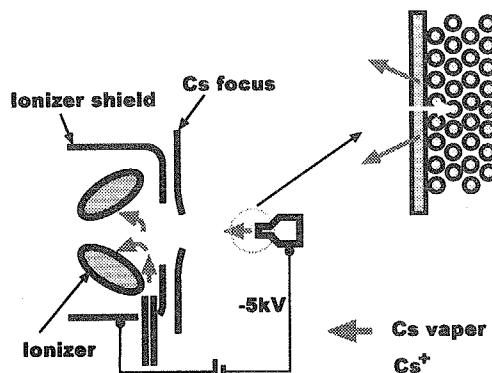


図 1 セシウムスパッタ型イオン源の負イオン生成過程

表 1 生成される主な負イオン

H^-	CN^-
C^- , C_2^- , C_3^-	CH^- , CH_2^-
${}^6\text{Li}^-$, ${}^7\text{Li}^-$	Cu^-
O^- , O_2^-	

格は 290W である。

3. イオン源特性

イオン源からのイオン電流値は負イオンが約 75kV で前段加速された直後のイオン源コース用ファラディカップで、また ^{12}C イオン電流値は入射電磁石（低エネルギー側分析電磁石）の下流に設置されたファラディカップでそれぞれ測定した。カソードポテンシャルは NEC 社の推奨値である

-5kV を用いた。

図 2、図 3 はカソードポテンシャルを一定とし、それぞれアイオナイザ電流をパラメータとしたセシウムリザーバ温度と ^{12}C イオン電流との関係、およびセシウムリザーバ温度と ^{12}C イオン電流／総イオン電流との関係の測定結果を示す。

図 2 より、アイオナイザの電流値が高いほど、低いセシウムリザーバ温度で同値の ^{12}C イオン電流を得ることができる。すなわち、アイオナイザ電流を高くした方が、イオン化効率が良いことを示している。また ^{12}C イオン電流は、セシウムリザーバ温度に対してリニアに変化するのではなく、ある温度から指数関数的に増加している。このことは、この近傍における温度制御の重要さを示唆している。また図 3 からも、アイオナイザの電流値が高いほど総イオン電流に対する ^{12}C イオン電流の発生割合が高いこと、すなわちイオン化効率が高いことが理解される。

使用したアイオナイザの最大定格は 290W であり、今回の測定では最大定格の約 87%（最大電流 24.7A、電圧 10.2V）まで使用した。アイオナイザの電流値を高めると更にセシウムリザーバの温度を下げることが可能となり、イオン化効率は向上するが、アイオナイザの寿命は短くなる。また、過高温での動作は加熱損失が大きいわりにイオン化の効率が下がり得策でない。

MALT では、数年前までアイオナイザの電流値を 25A 程度の高めに設定して使用していたが、寿命が 1 ヶ月程度しか持たなかったことがあり、現在は 22A～22.5A に設定している。

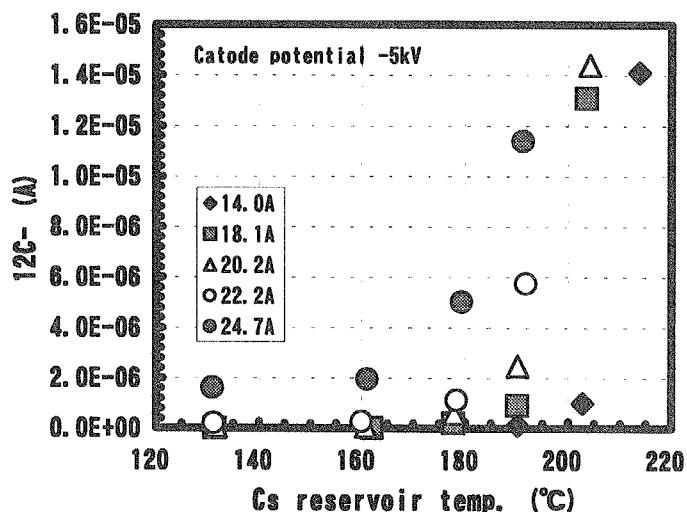


図 2 $^{12}\text{C}(\text{A})$ vs Cs reservoir temp.(°C)

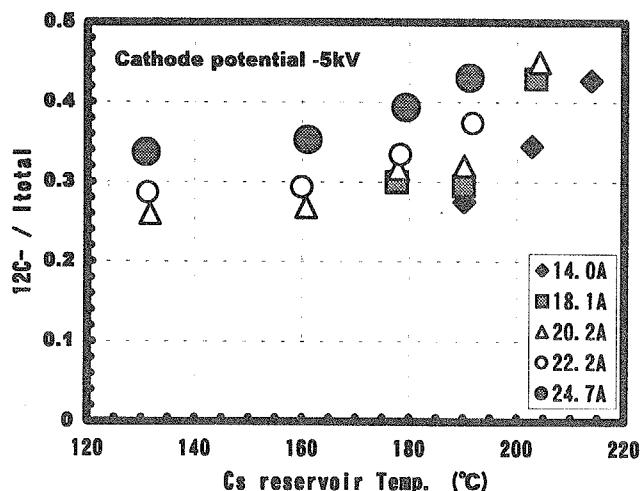


図 3 $^{12}\text{C}/\text{Itotal}$ vs Cs reservoir temp.(°C)

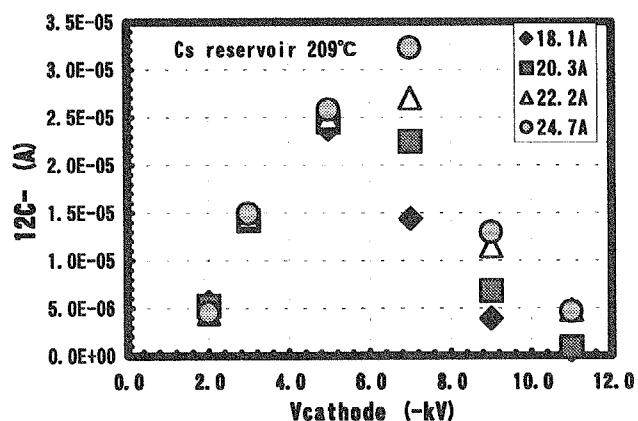
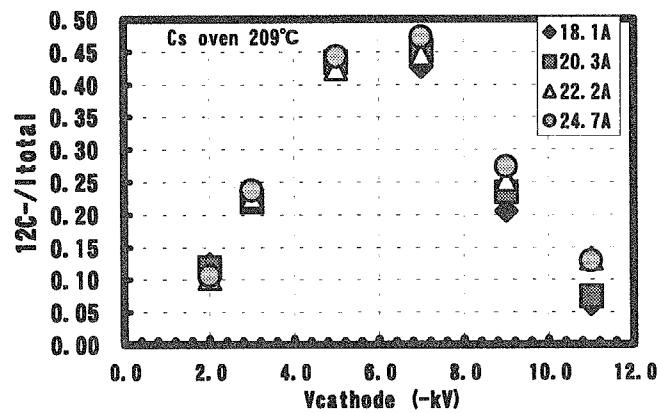
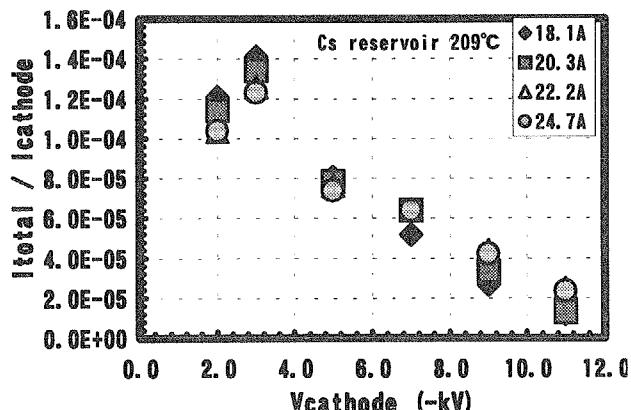
図4、図5はセシウムリザーバ温度を一定とし、それぞれアイオナイザ電流をパラメータとしたカソード電圧と¹²Cイオン電流との関係、およびカソード電圧と¹²Cイオン電流/総イオン電流との関係の測定結果を示す。

カソード電圧を-2kV～-11kV変化させると入射エネルギーは72kV～81kV変化し、またビームオプティクスも変化する。そこで¹²Cイオン電流の測定は、カソード電圧の変化に対応してESA (Electrostatic Spherical Analyzer) および入射電磁石を調整した。

図4、5より、¹²Cイオン電流および総イオン電流に対する¹²Cイオン電流割合は、カソード電圧が約-7kVの時に最大となっている(図4ではカソード電圧が約-7kVの時およびそれ以上の場合、アイオナイザ電流値により¹²Cイオン電流値のバラツキが見られるが、図5に示すように総イオン電流に対する¹²Cイオン電流割合はほぼ一致している)。カソード電圧が-7kV以下では主にCH₃、CH₂などの分子イオン発生の寄与が大きく、またカソード電圧が-7kV以上ではC₂、C₃などのクラスターイオン発生の寄与が大きくなると考えられる。測定結果から、NEC社の推奨のカソード電圧は-5kVであるが、-7kVに設定した方が、イオン化効率が高く望ましいと考えられる。

図6はセシウムリザーバ温度を一定とし、それぞれアイオナイザ電流をパラメータとしたカソード電圧と総イオン電流/カソード電流との関係を示す。

この特性のピークは、図4、5の結果から-7kV近傍になるものと予想していたが、約-3kVにピークがきている。この原因はまだ解明していないが、カソード電極の構造に起因しているのではないかと考えている。図7にカソード電極の構造を示す。カソード電位は、カソード電源よりフィードスル

図4 ¹²C(A) vs V_{cathode}(-kV)図5 ¹²C/I_{total} vs V_{cathode}(-kV)図6 I_{total}/I_{cathode} vs V_{cathode}(-kV)

ー (Coaxial, 15kV)、コネクタ、ホルダ、スプリング、ボタンを介し、真空中のカソードディスクにボタンが接触することで与えられている。アイオナイザハウジングに溶接されたカソード電極用のポートは、内径約 12mm のパイプ状でかつ直角に曲がっており、そのスペースはボタンなどの部品が収まると非常に狭くなる。真空のコンダクタンスが高くないことと併せてカソード電極の剛性が低いこともあり、この近傍で何らかのリークが起きているのではないかと考えている。

NEC 社製の新しいアイオナイザハウジングは、筒部が太く、真空のコンダクタンスも旧型に比べ高い構造となっており、またカソード電極のポートもフランジではなく本体（筒）に直接溶接された構造になった。この新しいアイオナイザハウジングで再度測定を実施し、原因を解明する予定である。

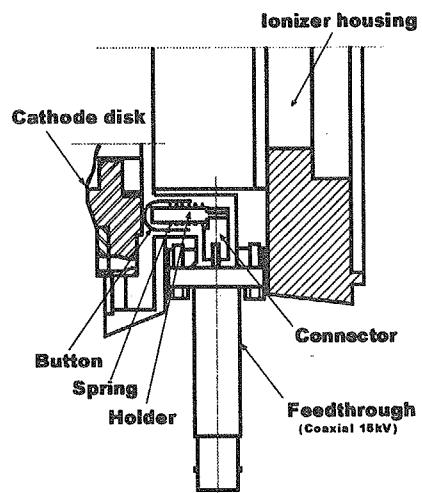


図 7 カソード電極の構造

4. おわりに

MALT で使用しているセシウムスパッタ型イオン源(米国 NEC 社製、MC-SNICS)のビーム電流とセシウムリザーバ温度、アイオナイザ、カソードポテンシャルの関係など基本的特性についてグラファイト試料を用いて測定を行った。この結果、¹²C イオン電流はセシウムリザーバ温度に対してリニアに変化するのではなく、ある温度から指数関数的に増加すること、カソード電圧は NEC 社推奨値の -5kV よりも -7kV を用いた方がイオン化効率を高くすることができるなどの特性を知ることができた。なお、図 6 で示したカソード電圧と総イオン電流／カソード電流特性については、新しいアイオナイザハウジングを用いて、再度測定を実施し原因を解明する予定である。

【参考文献】

- 1) 小林紘一、松崎浩之、中野忠一郎、春原陽子、牧田肇、羽鳥聰、山下博：東大タンデム加速器 MALT の現状、第 12 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、pp30-38 (京都大学、1999)
- 2) 松崎浩之、小林紘一、中野忠一郎、牧田肇、春原陽子、堀内一穂、羽鳥聰、吉田邦夫、谷川勝至、永井尚生、小林貴之、多田亘、今村峯雄：MALT-AMS(10Be,26AL の現状)、第 12 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、pp85-88 (京都大学、1999)
- 3) 石川順三：イオン源工学（アイオニクス叢書、1986）p.160.



JP0150289

JAERI-Conf 2000-019

5-3 He 負イオン源の開発

大塚道夫、中村 真、鈴木洋三、

(株)日立製作所 電力・電機グループ 原子力事業部 新事業開発本部

雨宮健介、田中政信、竹内一浩、登木口克巳、佐藤 忠

(株)日立製作所 電力・電機グループ 電力・電機開発研究所

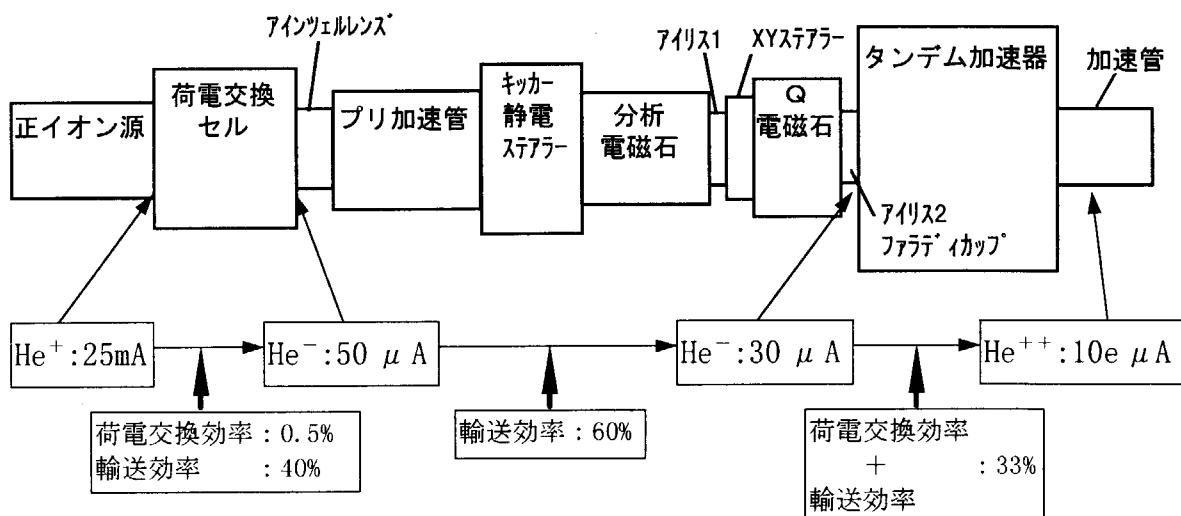
1. はじめに

福井県若狭湾エネルギー研究センターに設置される多目的イオン加速器システムでは、タンデム加速器(ターミナル電圧:最大 5MV)出口での He^{++} 電流値として DC10 e μA 以上が要求されている。既存の He 負イオン源では DC1 e μA 程度しか得られないため、要求電流値が得られる仕様の He 負イオン源を開発した。

2. 設計方針と仕様

He 負イオン源では通常正イオンをアルカリ金属蒸気中を通過させる方法により負イオンを発生させる。交換効率は R_b が最も大きく、正イオンのエネルギーが 10keV 弱で最大 2%程度である。Na は比較的高いエネルギー(十数 keV)で 2%弱の交換効率を持ち、Li は同程度のエネルギーで 0.5%程度の交換効率である。正イオンのエネルギーが低いと空間電荷による発散が大きくなるため、加速電圧は高い方が望ましい。一方アルカリ金属蒸気の加速管への漏洩を考慮すると取り扱いが容易な元素が望ましい。これらを総合的に評価し、取扱いが比較的容易な Li を選定した。また加速器を使用する観点からは長時間の連続運転が望まれ、荷電交換セルへの Li の補充間隔も長い方が良い。このため荷電交換セルはバッチ型ではなく連続還流型とした。

正イオン源としては大電流を引出せ、低エミッタスのビームが得られるバケット型イオン源を採用した。正イオンビームの輸送効率、負イオンへの荷電交換効率、タンデムまでの輸送効率、タンデムの透過率とターミナル部での荷電交換効率を評価し、正イオンビーム電流として 25mA を得ることを目標とした。第 1 図に He ビームラインの機器構成と各位置での電流目標値を示す。



第 1 図 He ビームライン機器構成と各位置での電流目標値

荷電交換セル出口では、負イオン電流値の2桁近く大きい電流値の正イオンが残留する。セル下流側には、負イオンを所定のエネルギーまで加速し、タンデム入口まで効率良く負イオンを輸送するためにアインツェルレンズとプリ加速管が設置されている。残留正イオンがプリ加速管に入射されると、負イオンの加速電界で追返されプリ加速管電極に衝突して二次電子を放出する結果、プリ加速電源の負荷が大きくなるなどの問題が生じる。このためアインツェルレンズへの印加電圧を通常の負電圧から正電圧にすることにより、アインツェルレンズで正イオンを追返すと同時に負イオンを収束出来るように電極を設計した。第1表にHe負イオン源の仕様を示す。

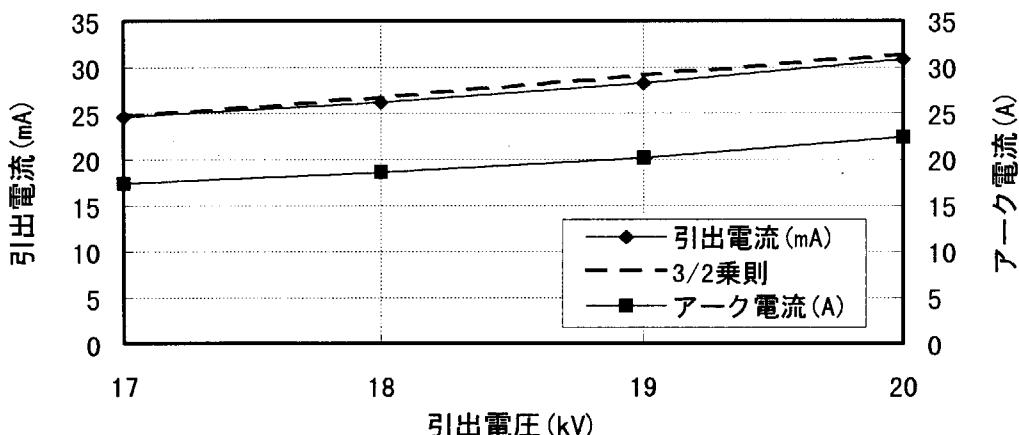
第1表 He負イオン源仕様

正 イ オ ン 源 部	項 目	仕 様	荷 電 交 換 セ ル 部	項 目	仕 様
	形式	パケット型		荷電交換物質	Li
	磁場極数	16極(Sm-Co磁石)		るっぽ温度	最高 640°C
	フィラメント	φ 1.2 Wヘアピン		Li補充間隔	50時間以上
	正イオン電流	DC25mA		運転方式	連続還流型
	引出電圧	20kV		負イオン電流	セル出口で DC50 μA

3. 試験結果

3.1 正イオン引出試験

第2図に正イオン源の引出電圧/電流特性を示す。Heガス流量は $1.5 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ である。



第2図 正イオン源の引出電圧/電流特性

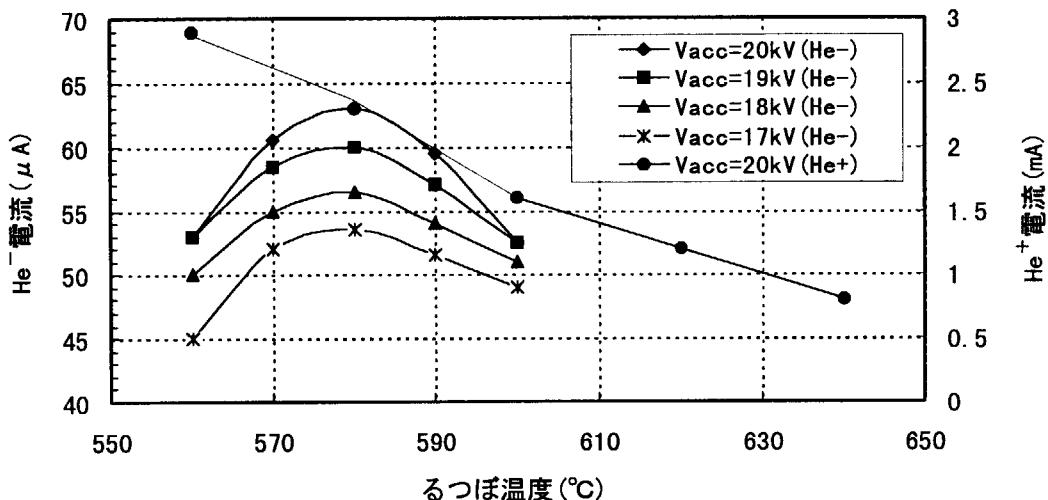
引出電流は引出電圧の $3/2$ 乗にはほぼ比例している。第2表に正イオン源の典型的な運転パラメータを示す。
 二次電子抑制用永久磁石を付けた
 フララディカップで測定した正イオン源
 出口でのビーム電流は 25mA であった。

第2表 正イオン源の典型的運転パラメータ

項 目	運 転 値
フィラメント電圧/電流	12.5V/76.2A (0.95kW)
アーカ電圧/電流	70V/22.6A (1.58kW)
引出電圧/電源電流	20kV/31mA
減速電圧/電源電流	1.8kV/2.2mA
Heガス流量	$1.5 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

3.2 負イオン生成試験

引出した正イオンビームを荷電交換セルに入射し、Li カナルるつぼ温度と引出電圧をパラメータにして負イオン生成試験を実施した。セル出口に分析電磁石を接続して He 負イオンを分離し、電磁石出口のファラディカップで電流を測定した。測定結果を第3図に示す。

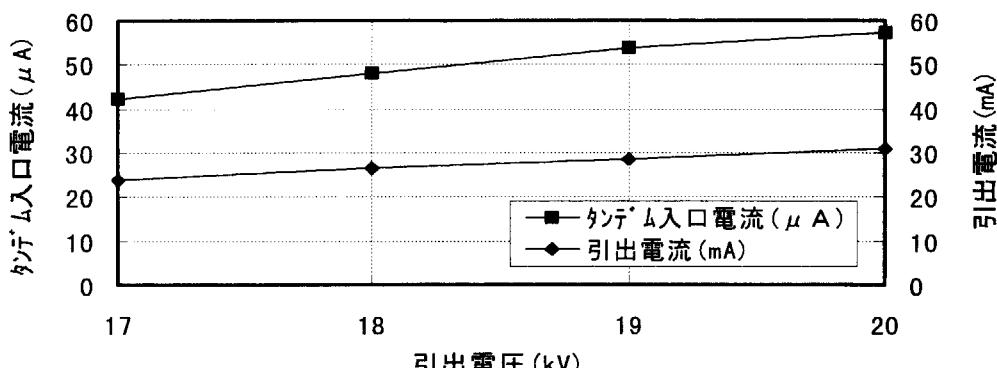


第3図 荷電交換カナルるつぼ温度と He^- 電流
(V_{acc} : 引出電圧)

何れの引出電圧でもるつぼ温度が 580°C の場合に負イオン電流は最大になり、引出電圧 20kV で 63 μA であった。生成した負イオンは Li の蒸気密度が高いと中性粒子に再変換される割合が増加するため、このような傾向になると考えられる。一方荷電交換されずに残留する正イオンは温度とともに減少し、580°C では 2.3mA の正イオンが残留する。分析電磁石の透過率は正イオンに対しては 80%程度であった。負イオンについては測定出来ないので、正イオンの場合と同じと仮定すると、セル出口での負イオン電流は 78 μA となる。Li を蒸発させない場合にセル出口で測定した正イオン電流は、引出電圧 20kV で 10mA 程度なので、負イオンへの交換効率は $78 \mu\text{A} / 10\text{mA} = 0.8\%$ 弱となる。但し Li を蒸発させた場合には空間電荷による正イオンビームの発散が緩和され、正イオンビームのセル透過率が大きくなる可能性があり、これを考慮すると交換効率は小さくなる。

3.3 プリ加速とタンデム入口までのビーム輸送試験

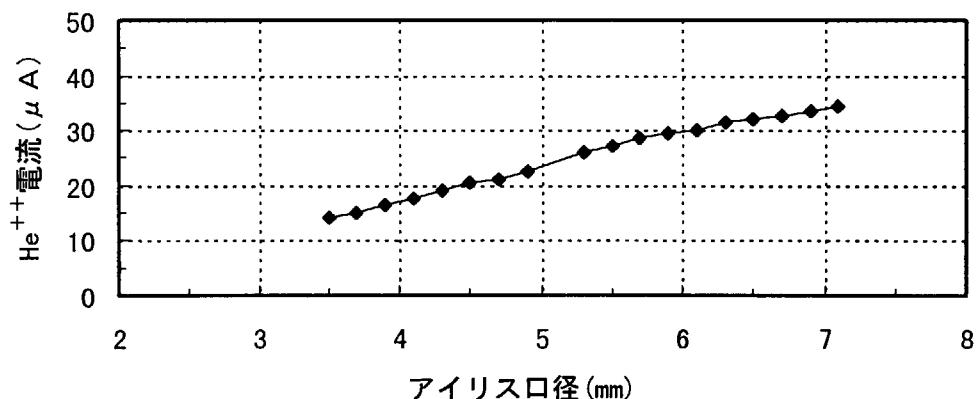
第1図に示したようにセルを出た負イオンビーム、中性粒子ビーム、正イオンビームはプリ加速管に入射される。正イオンはアインツェルレンズで追返され、負イオンはアインツェルレンズとプリ加速電極で収束・加速され、分析電磁石で偏向された後タンデム入口まで輸送される。プリ加速電圧は引出電圧に依存し、設計値は引出電圧 20kV の場合、160kV である。第4図にタンデム入口のファラディカップで測定した負イオン電流を示す。引出電圧 20kV、アインツェル電圧 24kV、プリ加速電圧 160kV の条件で、最大 57 μA の He^- 電流が得られた。セル出口からタンデム入口までの輸送効率は、 $57 \mu\text{A} / 78 \mu\text{A} = 73\%$ となる。



第4図 引出電圧とタンデム入口負イオン電流

3.4 タンデム加速試験

タンデムターミナル電圧 : 4.94MV での加速試験結果を第5図に示す。タンデム出射側に設置された偏向電磁石で電荷分離して、下流側に設置されたファラディカップで He^{++} 電流を測定した。タンデム入口のアイリス口径を大きくすると He^{++} 電流は $34\text{e } \mu\text{ A}$ まで増加した。この後レンズ電圧等の調整の結果、最大 $54\text{e } \mu\text{ A}$ の He^{++} 電流を得た。

第5図 タンデム出射側での He^{++} 電流
(引出電圧/電流 : 17kV/22mA、プリ加速電圧 : 136kV)

4. まとめ

タンデム加速器用 He 負イオン源を開発し、以下の結果を得た。

- (1) 正イオンから負イオンへの荷電交換物質として Li を使用し、荷電交換セル出口で 20keV、 $80\text{ }\mu\text{ A}$ 弱の He 負イオンビームを得た。
- (2) ターミナル電圧 : 4.94MV でのタンデム加速試験の結果、タンデム出射側で最大 $54\text{e } \mu\text{ A}$ の He^{++} 電流を得た。
- (3) 正イオン源のタングステンフィラメント寿命は約 100 時間であり、予備を含めて 2 本設置しているので、交換せずに合計 200 時間使用可能である。
- (4) 荷電交換セルの Li を補充せずに累計 200 時間使用しており、負イオン生成特性に特に変化は見られない。



JP0150290

JAERI-Conf 2000-019

6 測定技術・応用研究 (IV)

6-1 原研（東海）タンデム・ブースターのビーム増強化

日本原子力研究所 東海研究所
竹内未広、松田誠、吉田忠

1. はじめに

原研東海のタンデム加速器およびその超伝導ブースターを利用においては、未知重核の探索あるいは合成等の実験のため強いビームが要求されており、加速器開発においてはビーム増強化に取り組んでいる。

タンデム加速器のシステムでビーム強度を制限しているのはストリッパーフォイルの使用であり、重い重イオンビームの強度を増強するのは困難である。解決策の1番目として、これまでタンデム加速器の高電圧端子内に設置した小型のECRイオン源から希ガス等の多価イオンを直接加速することでビーム強度の改善を進めてきた。解決策の2番目は、高質量の重イオンのブースター加速に対してビーム強度の改善をはかるには、第2のストリッパーフォイルを使わずにタンデム加速器からの入射エネルギーを上げることである。3番目としてはタンデム加速器爱好者にとっては最後の手段となるが、ECRイオン源とRFQリニアックの発展は目覚ましく、リニアック等の加速器は既にビーム強度と加速エネルギーに関してタンデム加速器を凌駕しており、リニアックを入射器として配置する案がありうる。これらの解決策について現状と計画を以下に述べる。

2. 高電圧端子内ECRイオン源の現状

タンデムの従来のシステムではストリッパーフォイルがネックとなってビームを増強が困難であることから、高電圧端子にECRイオン源を設置し直接多価イオンを加速しブースターに入射する開発を進めている [1]。現在装着されているのは小型のNANOGANという10GHzのECRイオン源であり、加速データをTable 1に示す。昨年クリプトンやゼノンなどの重い希ガスの利用希望が集まり利用運転を進めたが、これまでのイオンポンプ排気系では長時間の運転継続は無理であった。そこで今年の3月磁気浮上のターボ分子ポンプを高電圧端子内ECRイオン源に追加した。

Table 1 ターミナル内ECRイオン源 加速実績データ

イオン種	価数	ビーム電流 [eμA]	加速エネルギー [MeV]
H	1	3.0*	16
N	2	1.0*	28
O	3	1.5*	45
	5	0.15	70
Ne	4	2.0*	56
	5	1.4	70
	6	2.9	84
	7	0.23	98
	8	0.037	112
Ar	6	2.1	84
	8	3.7	112
	9	1.3	135
Xe	14	2.3	210
	15	1.1	225
	16	0.77	240
	18	0.17	270

*は放射線管理上の上限

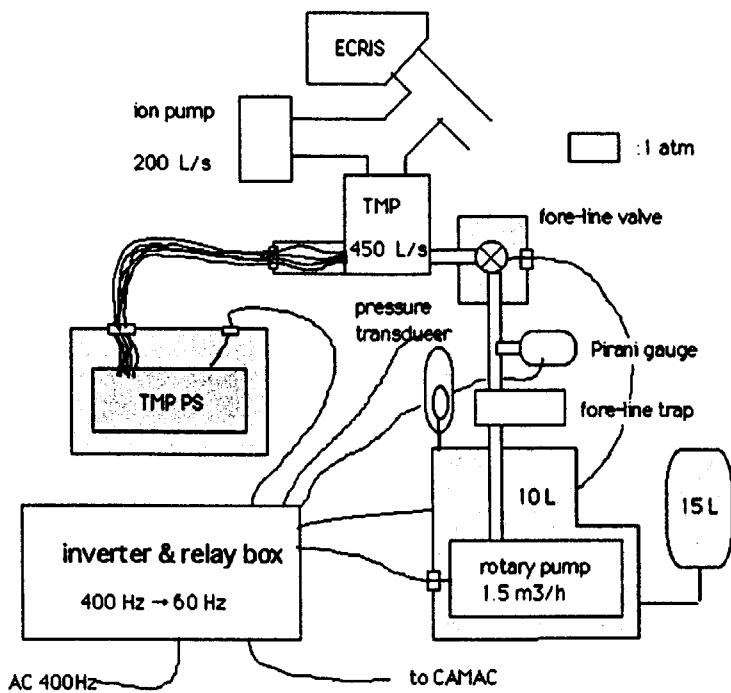


Fig.1 タンデム加速器高電圧端子内ECRイオン源に設置したターボ分子ポンプ排気系の圧力保護を示す概略図

Fig.1に概略図を示す。このようなメカニカルなポンプを高圧ガス（約0.55MPa）中で使用するには、イオンポンプのように密閉・吸着式ではないので、停電時のガスの逆流等に対処したシステムでなければならない。排気したガスは、ガストリッパーのポンプとは違い、ロータリーポンプを通した後ガス蓄積容器（総容積約25リットル、イオン源から流すガス量は2-3リットル）に貯める方式を探った。ターボ分子ポンプとしては450L/sの完全磁気浮上のアウトガスの少ないポンプを採用し、ヘッドのゲートバルブは無しとし、停止時の真空保持にはソレノイド駆動のフォアラインバルブを使った。市販品の機器はすべて大気圧中で使用できるようにできているため、使用機器は全体ないしは部分的に耐圧容器に入れて保護した。それらは、ターボ分子ポンプの制御ケーブルの電流導入端子部分、ターボ分子ポンプの電源、フォアラインバルブ、ロータリーポンプ、圧力トранジスタ（ロータリーポンプの入った耐圧容器の圧力=ガス蓄積容器の圧力を測る）である。200V60Hzの交流電源は高電圧端子で発電される400Hz200V3相をインバーターで変換して供給している。磁気浮上のターボ分子ポンプは数多くの検出回路で制御されていてノイズに弱いため、放電に対するシールドは出来るだけ厳重に施した。

設置後、タンデム運転下で作動継続に無事成功した。しかし、残念なことにRF電力増幅器に故障が見つかったため、修理回復を待ってクリプトン、ゼノン等の加速を行うこととなった。今後安定に運転を続けるためには、放電等で故障しないよう信頼性の高いシステムにすること、故障に際しては直ちにタンクを開けて修理をすることが重要である、と考えている。また、今のNANOGANを用いたシステムは性能としてはまだ不十分なので、できるだけ近い将来NANOGANの利用実績が上がったところで高性能のSuperNANOGANに置き換える予定である。SuperNANOGANからの加速が実現すれば、Fig. 2に見るようく高質量重イオンで電荷倍増、つまり加速エネルギー倍増が期待される。そして、Fig.3で見るように（次節参照）、希ガス等の限定された重イオンではあるがブースターへの入射条件が大幅に改善されるはずである。

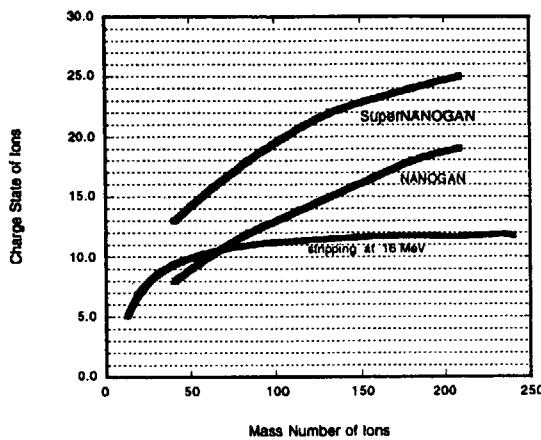


Fig. 2. タンデム高圧端子での荷電変換によるイオンビームの電荷と2つのECRイオン源 NANOGEN(10GHz)とSuperNANOGEN(14.5GHz)により引き出されるイオンの電荷

3. タンデムの加速電圧を上げる計画

負イオン源から加速される金などの高質量の重イオンをブースターで加速するには入射エネルギーをもう少し上げる必要がある。タンデムからのエネルギーを上げるために、高エネルギー加速管途中の2ndストリッパーフォイルを使用することはビーム強度を1/5 - 1/10に減らすことになるので、1つは、上述のSuperNANOGENからの高多価イオンに期待をしているが、2つ目としてタンデム加速器本体の加速電圧を上げる準備を進めている。タンデムのこれまでの運転はタンデム本体内の電子機器を放電で壊さないように安全な電圧範囲で行ってきた。その結果、現在では16MV付近で運転を行っている状況である。ブースターの設計当時は18MVを期待していたので、現状では入射条件が悪い。今の加速管は従来のヒーターブレート付きのNEC標準型加速管であり、新しいコンプレスドジオメトリー型の加速管に更新すれば加速ギャップ数が1MVモジュールあたり33から42に増え18-20MVの加速電圧が期待できる。Fig.3にイオン速度を加速イオン質量の関数として示し、右にブースターの加速空洞のTransit Time Factorを示す。入射速度としてTransit Time Factorがある程度の値をもつ0.055c - 0.06c以上が必要である。加速電圧が16MVから20MVに改善されれば金や鉛のように重いイオンも2ndストリッパーフォイルを使用せずに加速できることがわかる。

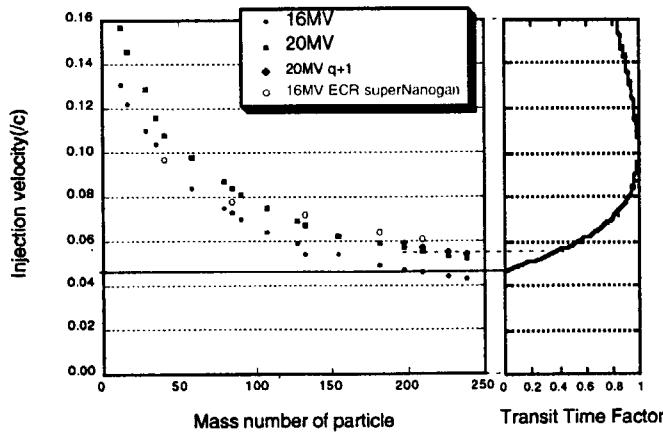


Fig. 3 ブースターへの入射速度とブースター加速空洞のTransit Time Factor

この加速管更新の策は、すでに準備が進んでいて2001年に実行する予定である。同時に電圧分割方式もコロナニードルから抵抗に取り替える。この計画は、もちろんブースターの改善のためばかりではなく、タンデムの性能回復・向上のためであることは言うまでもない。更新作業にあたっては、加速管の十分な清浄化と脱ガスを行って清浄な雰囲気中で組み立てを進める予定である。運転再開にあたっては慎重に時間をかけてコンディショニングをしながら、かつ実験との両立をはかりながら、進める予定である。

4. 常伝導入射リニアックの導入計画

ECRイオン源やRFQリニアックの発達によって重イオンの加速はタンデムよりもリニアックやサイクロトロンの方がエネルギー・電流性能で勝っている。タンデムの10倍以上のビーム強度が期待されるが、原研のタンデム加速器は世界有数の大型タンデム加速器であり、タンデム加速器をリニアックに置き換えることは許されない、と誰もが思っていた。ところが、KEK田無で開発された短寿命核加速リニアックを原研タンデムに移設する計画が現在検討されているので、その計画案の概略を紹介する。

加速器の配置図をFig.4に示す。加速器はSC（スプリットコアキシャル）RFQリニアック、インターディジタル-H型リニアック IH-1 及びIH-2からなる [2]。安定核ビームはECRイオン源で生成し加速しブースターに入射する。試算では現施設で放射線管理上許されるビーム電流の許容値 $0.5\text{p}\mu\text{A}$ が簡単に得られる。短寿命核ビームはタンデムからの陽子ビーム（ $2\text{-}3\mu\text{A}$ ）をISOLのターゲットチャンバーに導き UC_2 などのターゲットに照射し核分裂片を生成しイオン化しISOLで分析後加速器に入射するが、重い短寿命核イオンを加速するには入射前でECR charge breeder（荷電増倍器）を用い質量対電荷比（Q/A）を加速器の許容範囲 $1/7$ 以上にする。ビーム強度は比較的条件の良い核種で試算すると $1\times 10^6/\text{s}$ が期待できる。

この計画を進めるには、タンデム加速器棟の中性子ターゲット室の拡張と電源室の増築と地下1階ドライエリアの拡張工事がまず必要で、加速器もIH-2リニアックなどの部分の追加が必要である。計画が来年にも実行に移されることになれば、KEK-原研の大強度陽子加速器統合計画に先んじてKEK-原研間のミニ加速器結合計画が始まることになる。

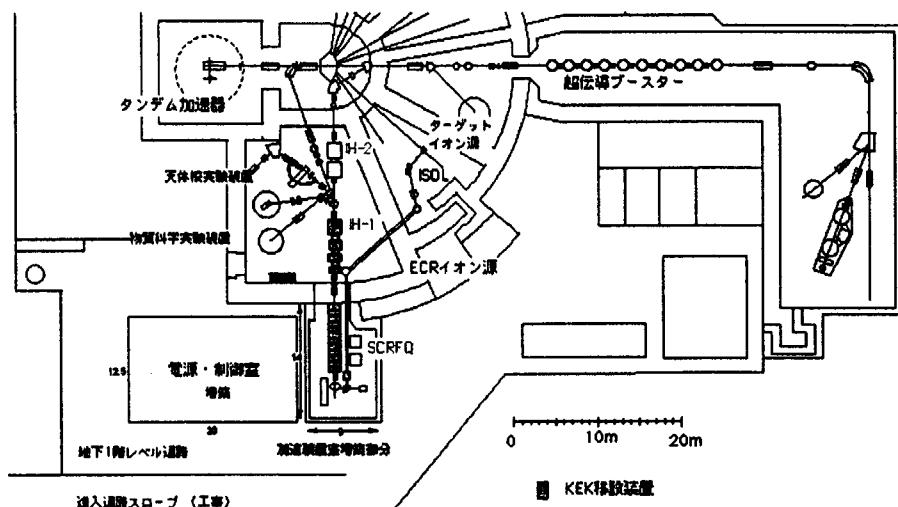


Fig. 4. KEK短寿命核加速リニアック配置案

参考文献

- [1] 松田誠、竹内未広、小林千明、第12回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、京都（1999） pp113-116
- [2] 新井重昭 JAERI-Conf 95-017,
S. Arai et al., Proc. of the 1994 Int. Linac Conf. p689 など



JP0150291

JAERI-Conf 2000-019

6-2 原研タンデム入射ライン用のビーム診断装置の基本設計と新しい静電光学エレメントの提案

花島 進
日本原子力研究所 加速器管理室

1. 装置の目的

加速器への入射ビームの状態がわかると日々の運転や光学系の理解に役に立つ。われわれは、原研タンデム加速器入射ライン用のビーム診断装置の基本設計を行った。この装置は位相空間の4つの次元の中でビームの密度分布を測定する。この測定により、加速器がトランスポートできるビームの位相空間での領域（アクセプタンス）を明らかにすることが出来る。また日常の運転において入射ビームを加速器がトランスポートできる位相空間での領域ないに調整するための測定に使用することが出来る。従来のエミッタス測定などに使われるビーム診断装置は、ビームラインの光軸に垂直な2つの軸（X,Y軸と呼ぶ）のうち一つの軸の傾きと位置について分布を測定し、

他方の軸については分布を見ない。つまり2次元の測定をするだけであるが、本装置は4次元空間での分布をそのまま測定できる。

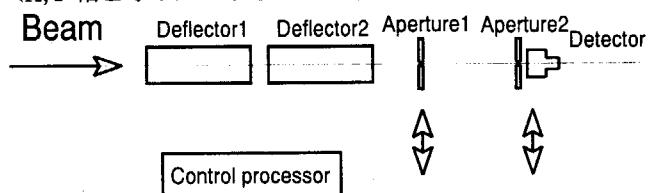


Fig.1 Construction of Beam Diagnostic Device:
The apertures and the particle detector are retracted from the beam course when a measurement is not made.

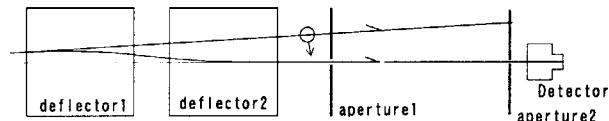


Fig.2 測定の原理:
ふたつのdeflectorで位置のシフトと傾きの偏向を行い、
変更前の位相空間上で、コリメータを通る部分を選択する。
位相空間の基準点を任意の位置にとることができます。
コリメータを通す位置を走査して位相空間上の密度分布を測定する。

3. シュラウド型の静電偏向器

各々の偏向器には一つの静電偏向器で2つの方向X,Yにビームを偏向できるシュラウド型の静電偏向器を使用する。一つのシュラウド型偏向器は偏向方向が互いに直行する2つの平行平板型の静電偏向器を一つにまとめた物である。Fig.3に示すように、ワイヤー電極と分圧抵抗を箱状に構成し、そのエッジ部に適当な電圧をかけることによって、矩形の空間の中に平行平板静電偏向器が作る電場2つを重ねあわせた電場を作ることができる。この偏向方式はX-Yの二つの偏向方向に対し独立の偏向器を要しないため、光軸方向に長い偏向器を加速器システムのかぎられた空間に設置できるようになる。そのことによって偏向に必要な電圧を低くでき、高速な電圧の走査が容易になる。

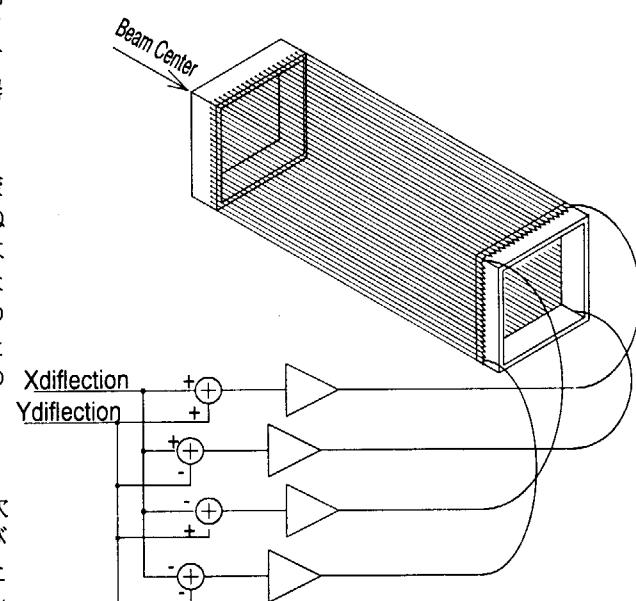


Fig.3 Shroud Type Deflector

4. 粒子検出

粒子検出器は2次電子放出用のターゲットと2次電子を測定するマイクロチャンネルプレートおよび適当な電子回路である。最大計数率を大きくするため、マイクロチャンネルプレートは低抵抗でチャンネル径の小さなものを使い、また2次電子がプレート上に適当に分散するように光学系を設定する必要がある。適切な設計により最大計数率 10^6 CPSを期

待している。

5. 走査のアルゴリズム

この装置では走査の1点（以後セルと呼ぶ）ごとに測定すべき位相空間上のセルをきめ、そのセルの粒子をコリメータに通すように偏向器の電圧を計算し、偏向器に設定し、粒子を計数する。非常に大きな空間を走査するため、走査に要する時間をいかに短縮するかが重要な要素となる。制御プロセッサの演算能力と走査のアルゴリズムは計測時間の制限要因の一つである。測定時間の第2の制限要因は粒子検出器の計数率である。第3の制限要因は静電偏向器の偏向電圧のセトリングタイムである。これについてはシュラウド型偏向器によって必要な偏向電圧を小さくできるため簡単な高電圧増幅器で十分な性能を得られると考えている。

6. 制御プロセッサとアルゴリズムの評価

制御プロセッサの演算能力と走査のアルゴリズムの実現性を検証するために高速なデジタルシグナルプロセッサ（DSP）で動作する評価プログラムを作り、評価を行った。評価した走査のアルゴリズムは2種類で、Type1は通常のエミッタス測定器で行うようなX-X'空間で測定するときはY-Y'空間分布は積分するという方式である。

Type2はX-X'-Y-Y'の空間で測定するが走査時間を短縮するため、まず荒く（ $10 \times 10 \times 10 \times 10$ ）走査し、次にその走査で粒子を有為に検出したセルの周辺を細かく走査する。評価に使用したデータは正規分布型の疑似データを生成して使用した。DSPはテキサス・インスツルメンツ社のTMS320C6701を使用した評価モジュールを使用した。実行時間は設定する分解能などで大幅に変化するが、満足できる結果が得られた。ちなみにType2の測定で測定範囲位置±10mm、傾き±10mrad、細かい測定のステップ位置1mm、傾き1mradのときダミーデータ生成タスクとの通信時間も含めて約1分で走査した。

7. 新しい静電光学エレメントの提案

この装置で採用したシュラウド型偏向器の基本原理の見方を変えると、空間の周囲の電位分布を設定して目的の電界を内部に作る光学素子と見ることができる。その考え方で偏向器だけでなく静電4重極レンズなども容易に構成できる。Fig.4に静電4重極レンズの例を示す。偏向器の場合、各辺上の電位分布は均等になるように抵抗分割されるが、4重極の場合はコーナーをアース電位、辺の中央に給電して、抵抗ネットワークは辺に添って二次関数の電位分布を与えるように選択する。この方式は複雑な電極形状の整形が不要である。その代わりに分圧比の設定が必要である。電源に電流負荷が生じるという欠点があるが、装置の大きさの割に有効径の大きなレンズができるなどの利点がある。

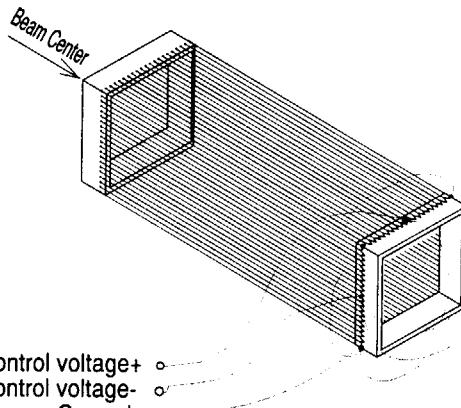


Fig.4 Shroud Type Quadrupole Electrostatic Lense

Different from deflector in Fig.2, control voltages are fed at the centers of the dividers and the values of the dividing registers are set to make the voltage distributions parabolic along the dividers.

8. まとめ

タンデム加速器の入射ライン用のビーム診断装置の基本設計について報告した。設計された装置はビームのX-X'-Y-Y'の4つの次元の位相空間上の分布を測定できる。また、位相空間の走査のアルゴリズムと制御用のプロセッサ（DSP）の性能を評価し、実用に耐えるものであることを確認した。また、この仕事の副産物として、シュラウド型の静電光学素子の提案を行い、静電4重極レンズへの適用を例示した。一方、粒子検出については、2次電子をマイクロチャンネルプレートに誘導する光学系の設計が残されている。



JP0150292

JAERI-Conf 2000-019

6-3 イオンマイクロビームを用いた半導体デバイスの放射線損傷

西島俊二

電子技術総合研究所 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-4

§ 1 はじめに

高速イオンマイクロビームを用いた IBIC 分析法は、益々微細化する電子材料の固体と入射イオンとの相作用を観察するのに非常に有効な手段となる。この方法は集積回路の反転現象(SEU)や半導体デバイスの開発や基礎研究に応用されている。SEU の基礎過程を研究するために我々はテスト用マイクロダイオードに高エネルギーイオンが入射し誘起される過渡電流の量を測定した⁽¹⁻⁴⁾。これらの実験は加速器からのビーム量を数 100 個/秒に制御した。また IBIC 像を測定し、数 $10 \mu\text{m}$ のマイクロダイオードの任意位置にビームを照準することを可能とした。この論文では Si ジャンクション・ダイオード及び埋め込み酸化膜構造 Si ジャンクション・ダイオード SOI (silicon-on-insulator device)、SiC ショットキー・ダイオードの、三種類のデバイスにビームを $10 \mu\text{m}^2$ の範囲に照射させ、照射量と発生波高値の減衰の割合を調べた。

§ 2 加速器および実験装置

実験に用いたビームは 2MeV He+ のイオンビームを用いた。四連四重極電磁石レンズによって収束し、約 $2 \mu\text{m}$ のマイクロイオンビームを作り出した。ビーム径の測定にはターゲットに 1000 メッシュ・グリッドを用い、ターゲットから発生する Particle Induced X-ray Emission(PIXE) を Si(Li)detector で測定し、これを誤差関数に当てはめビームの広がりからビーム径を求めた。損傷実験でのビーム強度は電流パルスのパイルアップを避けるためにイオン源にあるウィーンフィルターを用い、ビーム量を制御し 1000 粒子/秒 (0.15fC) 以下に制御し照射した。実験に用いた 3 種類のダイオード基板 (約 $400 \mu\text{m}$ の四角形) は 50Ω のチップキャリアーに取り付け配線した。測定に使用したコネクター及びケーブルのインピーダンスも同様に 50Ω で統一した。照射によって発生したシグナルは電荷感応型前置增幅器(ORTEC142A)を通し、比例増幅器(ORTEC562)によって増幅した。次にアナログデジタル変換器(ADC-ORTEC800)によってデジタル化し、波高分析器で測定した。デバイスの照射位置の決定には Ion beam induced charge collection(IBIC) を用い、ビーム走査シグナルと同期させて 2 次元の像を得、この IBIC 像から照射位置を決定した。ビーム位置の決定にはテストダイオードの照射損傷生成率を考慮し測定照射量を 1~2 粒子 / μm^2 程度とする限り最小限とした。損傷位置決定後、デバイスの $10 \mu\text{m}^2$ の範囲にマイクロイオンビームを照射した。テストデバイスの照射量は比例増幅器からのシグナルパルスを計数し測定した。デバイスの損傷割合は測定された初期値の波高値を基準に各照射量による発生電荷の減衰の割合を調べた。

§ 3. 実験結果

3-1.) Si ジャンクション・ダイオード

実験に用いた Si ジャンクション・ダイオードはシリコン基板上にエピ層 $20 \mu\text{m}$ (濃度 $1 \times 10^{14} / \text{cm}^3$) を成長させ、電極は Al 蒸着により、 $50 \mu\text{m}$ のジャンクションを作製した。電極は $25 \mu\text{m}$ の Al 導線によってチップキャリアーに接続した。裏面に接続する導線は Si 基板の裏面に蒸着した Al により電極を成し、もう一方のチップキャリアーに接続した。Si ジャンクション・ダイオードの $10 \mu\text{m}^2$ にビーム

ムを照射した。 Si ジャンクション・ダイオードへの照射量は $1.0 \times 10^9 / \text{cm}^2$ から $1.1 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ のイオン量を照射し、測定された初期の波形を基準に、照射量と波高の減推の割合を調べた。 Si ショットキー・ダイオードの放射線損傷の割合を第 1 図に示す。 横軸には照射量を、縦軸には損傷率を示す。 $2.1 \times 10^{11} / \text{cm}^2$ までは発生した電荷は殆ど低下していない。 7.8×10^{11} 個/ cm^2 で発生電荷量は 2% 減少し始めた。 $3.8 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ では 5% の減少が見られた。 $1.1 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ では、最初の電荷量より 16% 減衰していることを示した。

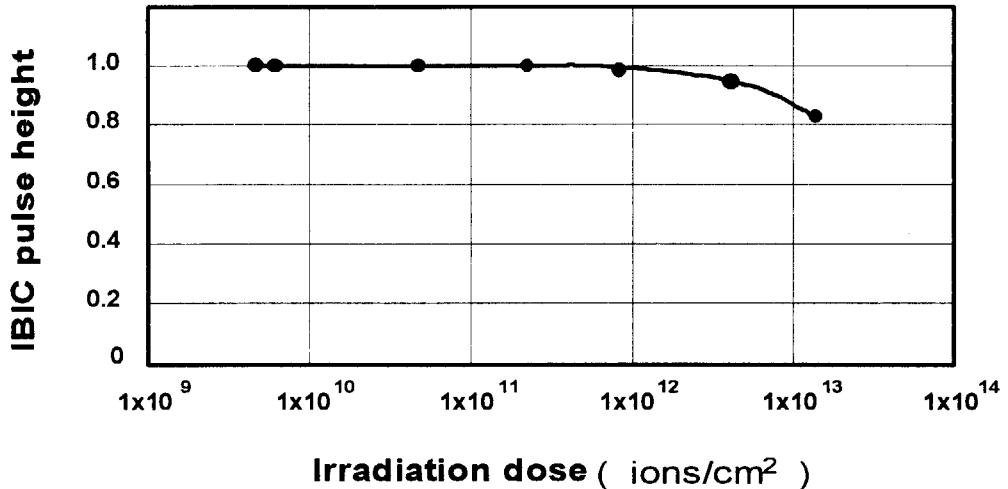


図 1 : $50 \mu \text{m} \phi$ Si ショットキー・ダイオードに 2MeV ヘリウムイオンビームを照射したときの発生電荷の減衰率を示す。

3-2.) SOI 構造 Si ジャンクション・ダイオード

実験に用いた SOI 構造 Si ジャンクション・ダイオードは Si 基板($5.1 \times 10^{17} / \text{cm}^{-3}$)上に埋め込み酸化膜 $0.12 \mu \text{m}$ を張り付け、その上にエピ層 $2 \mu \text{m}$ を成長させた基板を用いた。 この基板上に酸化膜 $1 \mu \text{m}$ を形成させ、直径 $30 \mu \text{m}$ のショットキー・ダイオードを製作した。 電極には約 $0.5 \mu \text{m}$ の Al を蒸着した。 コレクターは $30 \times 180 \mu \text{m}$ の大きさで $30 \mu \text{m} \phi$ の電極の三方を囲む形で製作した。 $30 \mu \text{m} \phi$ のデバイスの一定位置に 2MeV He^+ ion のマイクロビームを照射し、 Si ショットキー・ダイオードと同じように測定した。 測定された初期値の波形を基準に、照射量と波高値の減推の割合を調べた。 SOI 構造 Si ジャンクション・ダイオードへの照射量は $3.7 \times 10^{10} / \text{cm}^2$ から $1.9 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ を測定した。 第 2 図に初期値の波高を基準とし SOI 構造 Si ジャンクション・ダイオードの減衰の割合を示す。 基準値は $3.7 \times 10^{10} / \text{cm}^2$ 照射したとき発生した波高を 1 とした。 波高値は照射量を増しても殆ど減少せず、 $2.0 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ の照射量でも殆ど損傷の変化は現れなかった。 $1.9 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ 照射で 2% の減少に留まり、放射線損傷に非常に強い結果を示した。

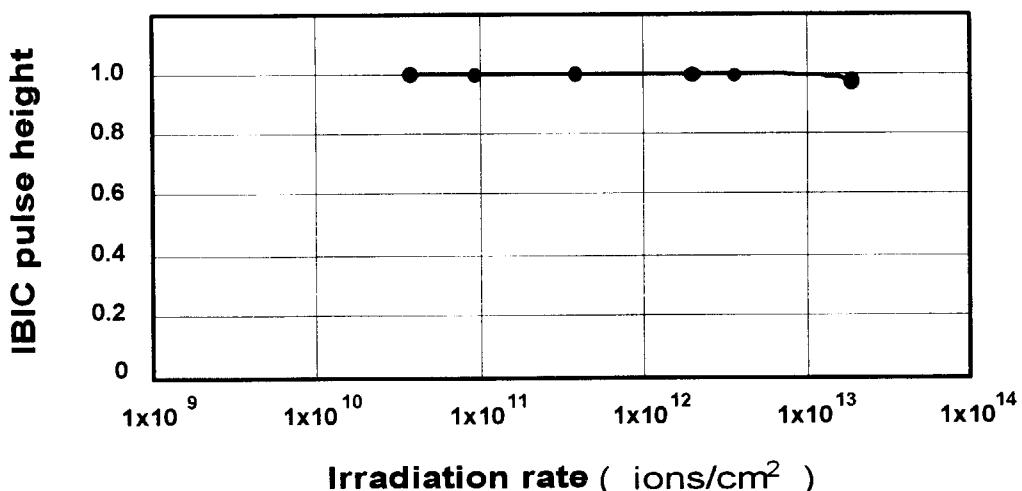


図2: $30 \mu \text{m} \phi$ SOI構造Siジャンクション・ダイオードに2MeVヘリウムイオンビームを照射したときの発生電荷の減衰率を示す。

3-3.) SiCショットキー・ダイオード

実験に用いたSiCショットキー・ダイオードの試料は6H-SiC p-Type(基板濃度 $5.1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$)、エピ層 5μ (濃度 $5.5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$)の基板を用いた。この基板上に酸化膜 $1 \mu \text{m}$ を形成させ、直径 $30 \mu \text{m}$ のショットキー・ダイオードを製作した。ショットキー・ダイオードに2MeV He⁺ ion のマイクロビームを照射し、前記2つのダイオードと同じように照射量と波高値の減衰の割合を調べた。第3図に 1.6×10^9 個/ cm^2 照射した波高を基準としSiCショットキー・ダイオードの波高値の減衰の割合を示す。発生電荷量は照射量と共に減少し、 1.1×10^{10} 個/ cm^2 照射では9%の減少を 2.9×10^{12} 個/ cm^2 照射では21%減衰を示した。

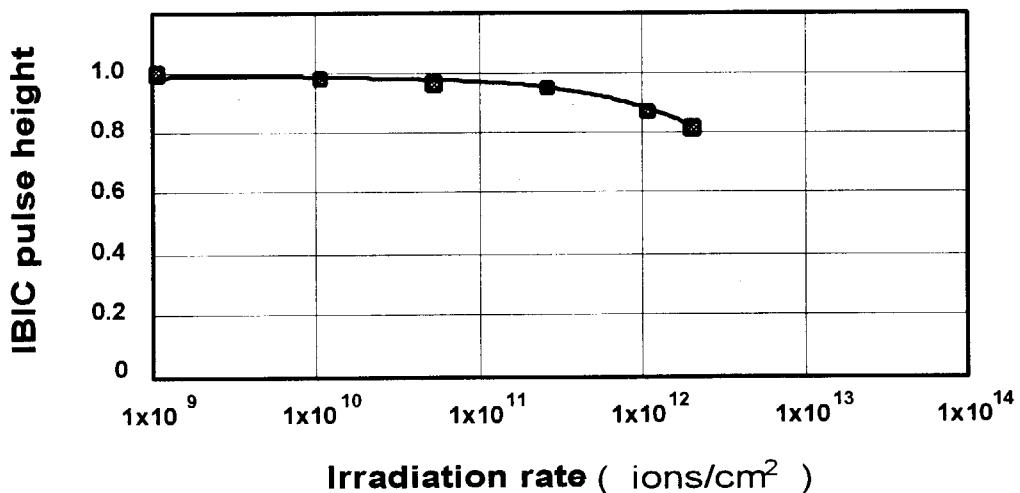


図3: $30 \mu \text{m} \phi$ SiCショットキー・ダイオードに2MeVヘリウムイオンビームを照射したときの発生電荷の減衰率を示す。

§ 4. 結論

Si ショットキー・ダイオードの実験結果では照射量 $1 \times 10^9 /cm^2$ から $2.1 \times 10^{11} /cm^2$ で照射の影響は殆ど発生していなかった。照射量 $1.1 \times 10^{13} /cm^2$ で最初の電荷量より 16% 減少していることを示した。2MeV He+イオンビームは Al 電極の $0.5 \mu m$ を通過してシリコン中へ約 6.5μ の飛程と計算されるので、照射によってデバイス内部に損傷欠陥を起こしていくと考えられる。使用した Si ジャンクション・ダイオードはデバイスを形成しているエピ層が $20 \mu m$ であり、入射したビームはファネルレング現象による大きな電荷量を観測した。SOI の Si ジャンクション・ダイオードでは、照射量 $3.7 \times 10^{10} /cm^2$ から $3.7 \times 10^{12} /cm^2$ では、発生電荷量に変化が見られなかった。この試料ではデバイスの厚さが薄く、照射された 2MeV He+イオンビームは $2 \mu m$ のエピ層と $0.12 \mu m$ の埋め込み酸化膜を通過し、 $2 \mu m$ の薄いデバイス中では照射による影響を殆ど受けていない実験結果を示した。この結果は軽イオンで Frenkel 欠陥の殆どがイオン飛程の終端に集中すると考えられているので、2MeV He+イオンビームは埋め込み酸化膜の下層の基板で欠陥が起こっていると考えられる。しかし僅かに、 $1.9 \times 10^{13} /cm^2$ の照射量では 2% の減衰を示し $2 \mu m$ のエピ層に損傷を与えていた。SOI の Si ジャンクション・ダイオードはデバイスが薄いのでシングルイベントによる大きな電荷の発生が無く、宇宙空間や強放射線場などで非常に有効な構造の半導体で有ることを示した。SiC ショットキー・ダイオードでは Si や SOI の試料に比べると結果のバラツキが大きく、照射の影響を受けやすい結果を示した。発生電荷量は照射量と共に減少し、 1.1×10^{10} 個/ cm^2 照射では 9% の減少を 2.9×10^{12} 個/ cm^2 照射では 21% 減衰を示した。この大きな減衰の原因は明らかに出来なかつたが、入射したイオンビームによってデバイス性能の低下を示した事は明らかである。一般的に SiC は格子定数が小さいので原子核の変位損傷をおこす放射線エネルギーの閾値が高く欠陥導入率が低いと言われており、実験結果は相反する特性を示した。SiC ショットキー・ダイオード等では、まだ電極形成での SIO₂/SiC 界面の表面構造、電子状態の違い等製造工程に未知の問題が多く、これらが起因している事が考えられ今後これらの原因の究明に取り組んで行くつもりである。

§ 5. 謝辞

最後にテストデバイスの製作にご協力戴きました株式会社レイテックの尾鍋氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T. Nishijima, H. Sekiguchi, S. Matsuda, M. Takeuchi, N. Shiono, H. Anayama and A. Morio, Nucl. Instr. and Meth. B104 (1995) 528.
- [2] T. Nishijima, H. Sekiguchi, T. Hirao, I. Nashiyama, N. Nemoto, S. Matsuda, N. Shiono, Nucl. Instr. and Meth. B130 (1997) 528.
- [3] T. Nishijima, H. Sekiguchi, S. Matsuda, N. Shiono, Nucl. Instr. and Meth. B130 (1997) 557.
- [4] 西島俊二、関口弘喜、平尾敏雄: 電子技術総合研究所彙報 第62巻 第10,14号 (1999) 49-54.



6-4 1MW 超伝導リニアックと高出力電子銃

A High-Current Electron Gun for a 1MW Compact Superconducting rf Linac

峰原英介 E.J.Minehara

日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究中心自由電子レーザー研究グループ

Free Electron Laser Laboratory at Tokai, Advanced Photon Research Center,

Kansai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute

郵便番号 319-1195、茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4 番地

2-4 Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11 JAPAN

1.はじめに

原研東海研において自由電子レーザーの駆動源として開発してきた高出力超伝導リニアックは、現在 100 kW 級のビーム出力を準連続波で定常的に出せる。これをエネルギー回収せずに 1 衝あげることを目標に 1MW 小型超伝導リニアックと高出力電子銃の検討を行った。これは、現在使用中の 500MHzNb 製 5 連空洞のモジュール 1 個(図 1, 2 参照)を使用する予定である。超伝導リニアックは 0.1MW-1MW 出力 5-10MeV

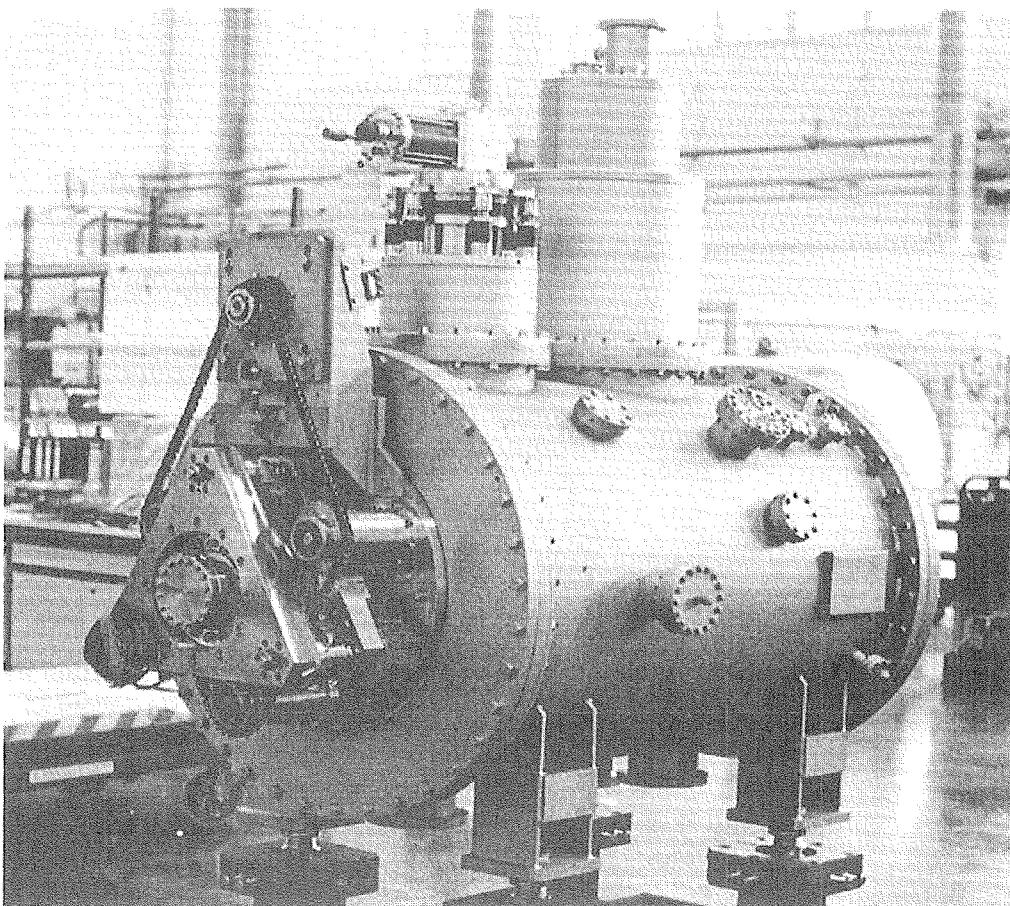
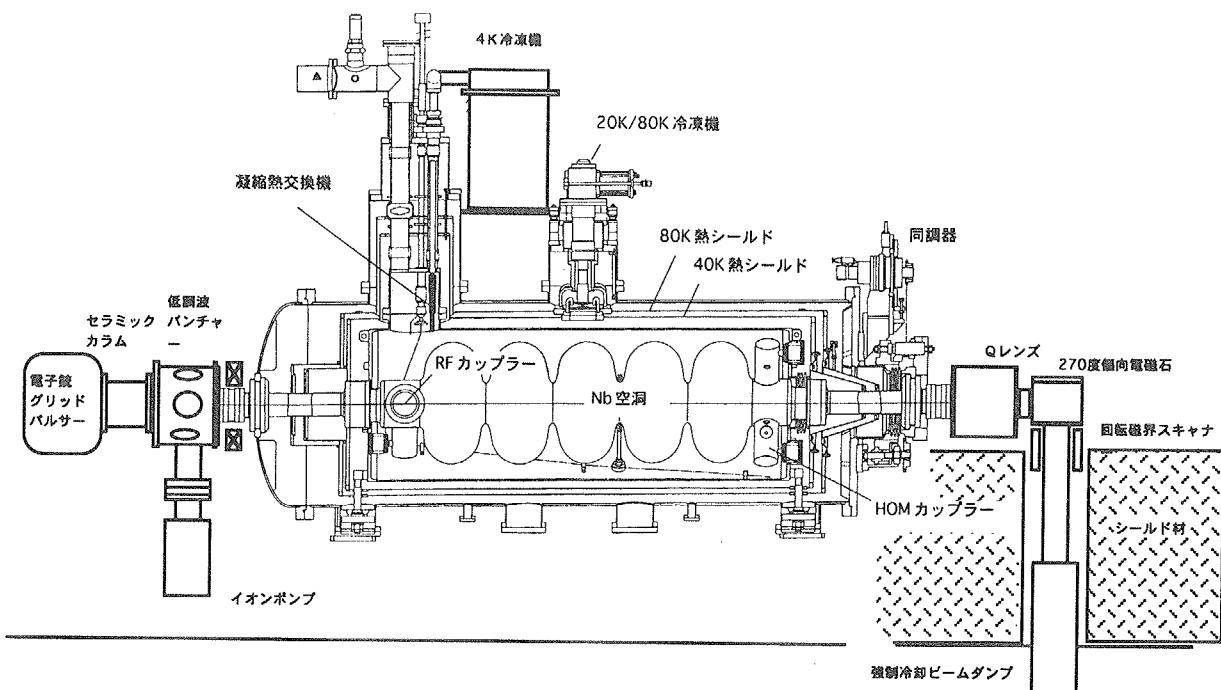


図 1、無蒸発型超伝導リニアッククライオスタット外観図。

電子エネルギーの小型超伝導リニアックであり、0.2A から 0.01A の 80keV 高出力電子銃を使用する予定である。現在、準連続波運転である原研自由電子レーザーを

連続波で運転する事は断念し、機器の健全性や発生放射線量の低減を確保するために、またその実現を出来るだけ短時間及び少ない予算で行うために、現在とは異なる図2の配置で電子ビームの連続試験運転のみを行うことで代用することとした。最大電子エネルギーを現状の半分から1/4である10MeVから5MeVとした。この試験の目標達成により、機器の破損や多くの予算と人員の浪費を避けてFEL連続波の試験運転の代用とする。また、電子銃部分でのエネルギー回収方法の最適化を試みる予定である。

図2、1MW超伝導リニアックと高出力電子銃の構成図。



2. 高出力試験の実現

原研では外部冷凍機を用いない自立型冷凍機を組み込んだ無蒸発型高出力自由電子レーザー用超伝導リニアックを12年間開発してきた。2度の世界最高出力と1度の最高変換効率の記録を達成した。産業用高出力FELを開発するため次のステップを考えている。準連続波(qCW)で安価に短い期間で1MW級の高出力qCWFELを実現する。1000kWビームダンプ、高出力電子銃、入射系、現在使用中の0.5GHz超伝導リニアックモジュール1個を用いてCW試験運転を行う。この電子ビーム加速試験運転の実行により、CW高出力FELの試験運転を代用させる。レーザー関連はCW運転をしていないが、鏡や出力窓は既存の軍用や民生用数十kW級レーザー技術が面密度を同等以下に取れば利用できる。このように、新規予算がない現状で、最初の目標をFEL技術から加速器技術に置き換え、数値を再設定し、実質的な達成を図る予定である。



6-5 超マイクロイオンビーム形成技術の開発Ⅱ

原研・高崎 放射線高度利用センター¹

ビームオペレーション㈱²

石井保行¹、磯矢 彰^{1*}、荒川和夫¹、田中隆一²

1) はじめに

ガスイオンビームを用いて 100keV 程度で $0.1\mu m$ 以下のマイクロビーム径を形成する装置は、エネルギー幅の小さなイオン源や、大きな縮小率が得られるレンズ系の開発や設計が困難であったため、これまでほとんど開発されていない。本研究ではこの径のイオンマイクロビームを形成するために、マイクロビーム形成方法として一般的に用いられている磁気レンズによりビームの集束を行うのではなく、加速電極の入り口部に形成される単孔レンズの集束作用と電極間の一様電場によるビーム加速作用を合わせ持つ加速レンズによりビームの集束及び加速を行う方法を採用した¹⁾。この加速レンズを二段階に組み合わせた集束レンズ系と、この装置専用に開発した 100eV 程度で、エネルギー幅 1eV 程度のビームが発生可能なデュオプラズマトロン型イオン源とを組み合わせることで、超マイクロイオンビーム形成装置を開発してきた²⁾。本装置の加速レンズは静電場を使用しているため、電極間の電圧を上げることで原理的に MeV 級のビームの形成も可能である。現在本装置を用いたビーム形成実験を進めている。

本装置はこれまでに上記イオン源、加速レンズ系の設計及び開発を行ってきた²⁾。ビーム径の測定はナイフエッジを移動させて、この後段に配したファラディーカップで減少するビーム電流量を測定することでその径を見積もあるビーム径測定装置を開発した。この装置は先端の凹凸が $0.2\mu m$ 程度のナイフエッジを分解能 $0.1\mu m$ のマイクロメータヘッドにより移動させる装置で、このマイクロメータのバッククラッシュ等により、この装置の分解能は $0.5\mu m$ 程度であった。しかし、実験当初ビーム径はマイクロメータ級であったため、十分な分解能であった³⁾。

これまでの研究・開発から加速レンズ系の最適化を行うことにより、ビーム径をサブミクロン径に絞ることが可能となったので、ビーム測定装置の分解能を $0.1\mu m$ 以下にする必要となった。本研究ではビーム径測定装置の分解能を $0.05\mu m$ 以下にするため行った改良点と、この装置を用いて 30keV 程度でビーム径測定実験を行った結果を示す。この改良では $0.05\mu m$ の分解能を得るための工夫とともに、エッジで散乱したビームの取り扱いについて示す。実験ではビーム径としては $0.5\mu m$ 以下を得ることができたが、ビームスポットの遅い移動を観測した。得られたビーム径は軌道計算の値より約 2.5 倍大きく、しかも、ビーム径と同程度でビームスポットが移動していた。これらの問題の解決方法を探すため、レンズ系に入射するビームの発散角に注目して、この発散角を制御する電極径をイオン源引き出し電極と、集束レンズ系の間に導入した。これによりビームスポットの移動はわずかな縮小にと止まったが、ビーム径を $0.3\mu m$ 程度にすることが出来、更なるビーム径縮小に向けた改良の方向性を示すことが出来た。また、実験から水素イオンビームをナイフエッジに当て続けるとエッジが削れてしまう現象を観測した。これからビームを長時間エッジに当てないことともに、材質の検討が必要となった。

* 九州大学名誉教授、前日本原子力研究所客員教授

2) ビーム測定系の改良

サブミクロン径のビームサイズを測定するため、 $0.05\text{ }\mu\text{m}$ 以下の分解能が得られるように改良を行ったビーム径測定装置を図-1に示す。図中に示すように大気中のエッジ移動装置や位置検出装置と、真空中のナイフエッジやファラディーカップを精度よく移動制御させるため、これらは剛体棒を通して接続した。本装置では $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 級のエッジ移動制御を行うため、マイクロメータヘッドと剛体棒との間に圧電素子を設置した。また、このエッジの位置を同分解能で測定するため、分解能 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ のレーザー変形を圧電素子の反対側に設置した。

測定装置のナイフエッジは表面の非常に細かいラッピングフィルム (#20000番まで) を使用して先端の凹凸が $0.02\text{ }\mu\text{m}$ 程度で、その角度が 60° 程度で製作を行った⁴⁾。

ファラディーカップ系の改良では図-2に示すように、ナイフエッジで散乱したビームが二次電子抑制サプレッサー電極に当たり、ここから発生した二次電子が直接ファラディーカップの壁面に入射するのを極力抑えるため、サプレッサー電極の位置を幾何学的及び、静電ポテンシャル的な検討から決めた。

測定装置のデータ数はこれまでよりナイフエッジを細かく移動し、かつ測定データの精度を上げるために、繰り返し測定を行ったので、飛躍的に増大した。このナイフエッジの移動制御装置と4種類の電流測定を行う微少電流計をGP-IBケーブルで接続し、この移動制御と短時間でデータ収集を行うため、コンピュータを使用したシステムを構築した⁴⁾。特に、ナイフエッジ及びファラディーカップから発生する二次電子のサプレッサー電極に接続している微少電流計はそれぞれ異なる電圧を印加したため、普通のGP-IBケーブルが接続できないので、光GP-IBケーブルを使用した。電流計のデータはバラツキを小さくするため、平均時間を500ms程度にしているので測定時間を極端に短縮することは出来なかつたが、このシステムにより1つのビームサイズを測定するのに2分程度に短縮でき、これまでより約一桁早い測定を行えるようになった。

3) ビーム径測定結果とビーム径縮小への検討

超マイクロ装置の性質を調べるため、ビームエネルギーを30keV程度として焦点距離が深く取れる条件でビーム測定実験を行った。5回測定したナイフエッジの位置とビーム電流の関係及び、この測定から代表として最小値のビーム径の見積もりとを合わせて図-3に示す。このビーム径は $0.43\text{ }\mu\text{m}$ であった。この径はプレリミナリーデータとしては満足な値であるが、ビームエネルギー約30keV

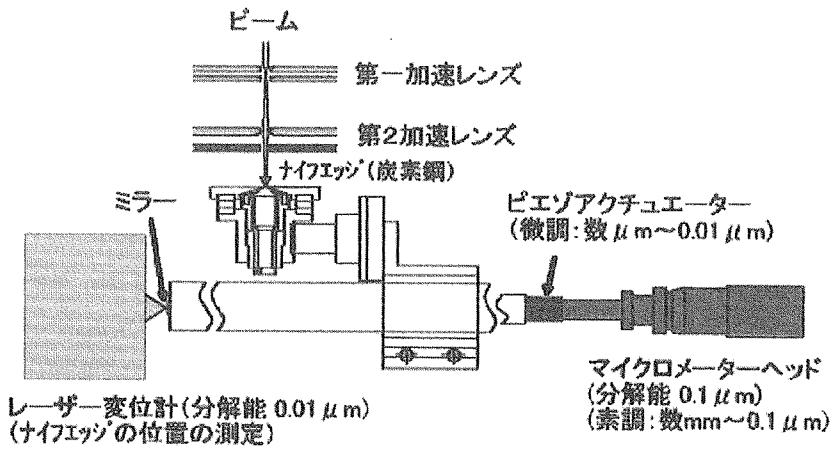


図 1 改良後のビーム径測定系

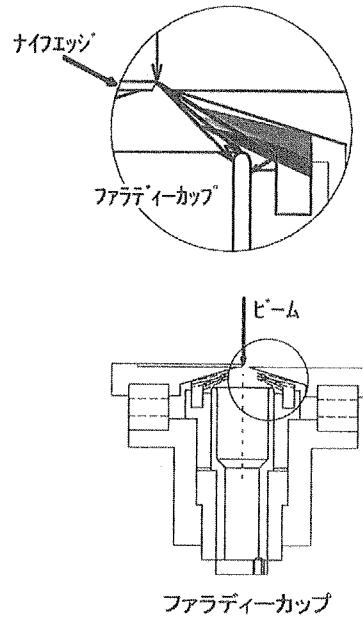


図 2 ナイフエッジによるビームの散乱

でのビーム径よりこの径は計算値より約2.5倍大きな値であった。また、測定結果から分かることおり、ビーム径は図中右から左に約 $0.4\mu\text{m}$ 移動している。

ビーム径が計算値より大きいことと、ビーム径が移動する原因に関して、以下に示す二通りの検討を行った。何れもビームの発散角が設計値からずれていることと、この角が時間的に変動してことに原因があると考えている。①ビームが第1及び第2加速レンズ間の自由空間を5keV程度で遅く飛ぶため、この間に発生した二次電子による誤差電場の影響を受けるのが要因である。②ビームがビーム集束系に入射するさい、真空中に引き出したプラズマビームに対して引き出し電極に電圧を印加することでシース面を形成し、この面と引き出し電極間でビームを加速することで発散角の低減を行っている。この加速による発散角が設計値通りでなく、しかも不安定であることが要因である。

①に対して第1及び第2加速レンズ間の自由空間を電気的に分離し、この間に200~300V程度の電位差を作り強制的に二次電子の排除を行った。しかし、この改良を行った後の実験では測定データに優位なさは観られなかった。

②の検討を行うため、図-4に示す平行電場を発生させる電極系をイオン源の引き出し電極と第1加速レンズ間に導入した。この電極間は抵抗値 $10\text{M}\Omega$ の抵抗で接続されている。この電極系によりビームの発散角の制御を行うことが出来る。この改良後に行った5回の実験結果と、ビーム径の最小値を図-5に示す。このときのビーム径は $0.28\mu\text{m}$ であった。ビーム径は35%程度に減少することが出来た。しかし、この径はまだ計算値より約1.6倍大きい。また、ビームスポットの移動はわずかに減少し約 $0.3\mu\text{m}$ であった。この結果からビーム径の増大と、そのスポットの移動の主な原因是ビーム集束系に入射するビームの発散角にあることが分かった。

4) ビームのナイフェッジに対する照射効果

数十時間30keV程度の水素イオンを照射後の、ビーム径測定実験において図-6の様なデータが得られた。このデータからはビームが分かれているように見えた。実験後ナイフェッジの様子を顕微鏡及びレーザー顕微

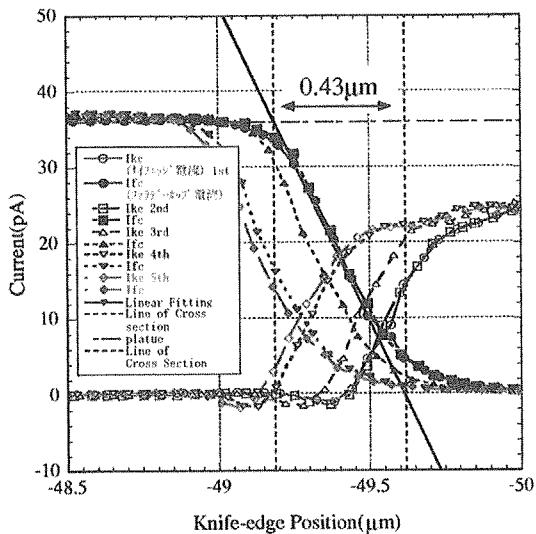


図-3 ナイフェッジ位置に対するビームエネルギーの変化
(ビームエネルギー:31.77keV)

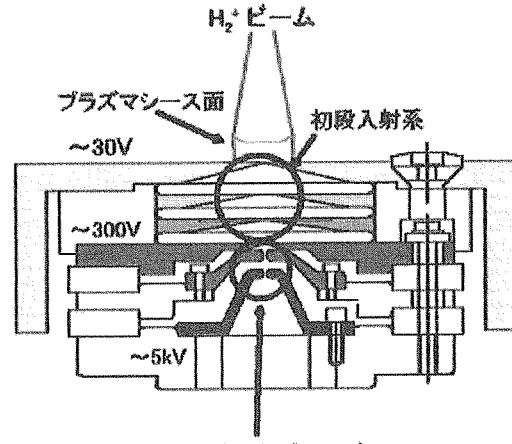


図-4 発散角調整電極

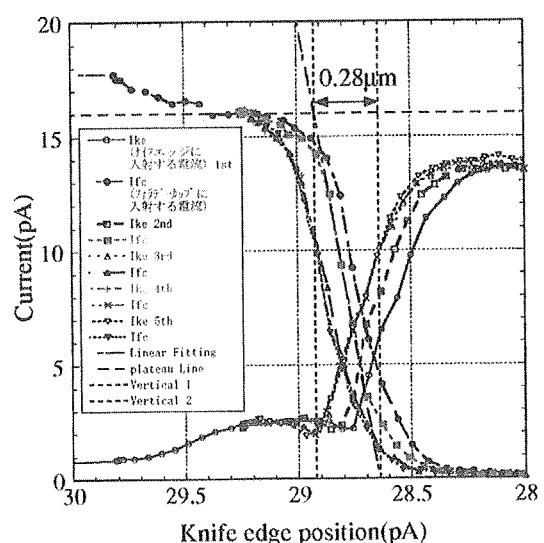


図-5 発散角改良後のナイフェッジの位置に対するビーム電流の変化 (ビームエネルギー:33.44keV)

鏡で観察した結果を図-7に示す。ビームが当たったところのエッジがなくなり、かつ平らでなくなっているのが分かる。鉄は熱伝導率が良いため、熱の溶解によりこの現象が起きたとは考えにくいので、原因としては30keV程度の水素ビームによるスバッター、または水素イオン注入による水素バブル形成により表面破壊の何れかであると考えている。

この結果から図-6のデータを考察すると、ナイフエッジの先端がなくなり、丸みを帯びてしまったため、ビーム入射によりこの表面から高いエネルギーの二次電子がほぼ前方に発生し、この一部がファラディーカップに入射するため図-6に示すような段が出来たと考えられる。従って、本材質のナイフエッジは長時間のビーム照射には適さないことが分かった。

現在水素イオン長時間照射に対して耐久性のある材料の検討を行っている。

4)まとめ

ビーム径測定装置の改良により $0.05 \mu\text{m}$ の分解能が得られたことにより、これまでの装置に比べて約一桁測定精度を改善することができた。この装置を使用したプレリミナリーなビーム径測定実験によりビームスポットの移動を観測したが、30keV程度で $0.43 \mu\text{m}$ のビーム径を形成することができた。更に、ビーム径の縮小とビームスポットの移動を抑えるための検討を行い、二つの実験を行った。この結果レンズ系に入射するビーム条件を改良することで、ビームスポットの移動の抑制はわずかであったが、最小ビーム径 $0.28 \mu\text{m}$ を得ることができた。この結果からレンズ系に入射するビームの発散角の改善よりビーム径の縮小及びビームスポットの移動抑制を行える見込みが得られた。

参考

- 1) A. Isoya, Proc. Int. Conf. on Application of Nuclear Techniques. (Crete, Greece, June 1991)p334
- 2) 磯矢 彰, ULVAC TECHNICAL JOURNAL May 1996 p.42
- 3) Y. Ishii, A. Isoya and R. Tanaka, TIARA Annual Report 1997, JAERI-Review 98-016, p.257
- 4) Y. Ishii, A. Isoya and R. Tanaka, TIARA Annual Report 1998, JAERI-Review 99-025, p.266

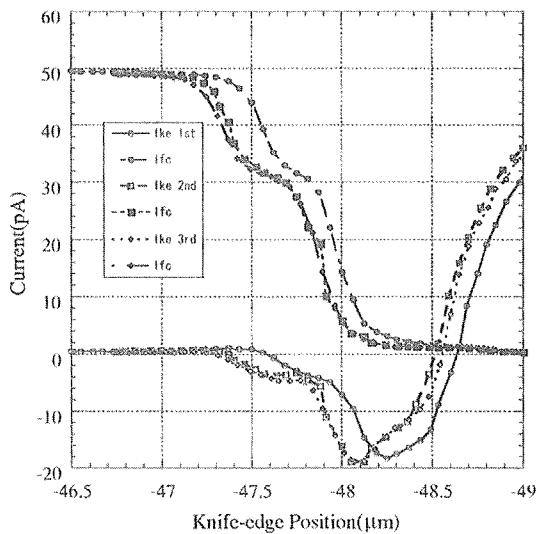


図-6 ナイフエッジ表面の様子が反映されている実験結果

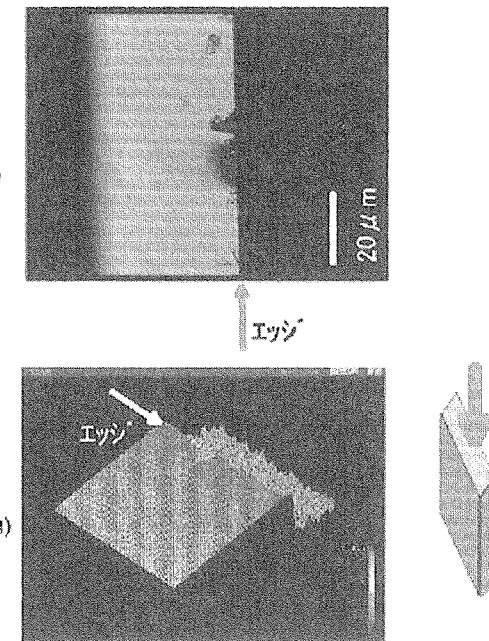


図-7 ナイフエッジの垂直方向からの様子
(A)顕微鏡写真、(B)レーザー顕微鏡写真

おわりに

第 13 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」は、日本原子力研究所むつ事業所施設部海洋調査研究室の主催でむつ市のプラザホテル“むつ”において開催された。本州最北端の地という遠隔地にもかかわらず、60 余名の参加者により 31 件の講演と活発な質疑応答が行われ、盛況のうちに研究会を終了することができた。これも、参加者及び世話人のご協力の賜物であると主催機関事務局一同感謝している。本研究会の目的は、タンデム加速器または静電加速器施設を対象に、主として現場サイドからの研究発表や話題提供を通じて、参加者相互の情報交換と親睦を図り、関連研究の発展に資するということであるが、この目的は本研究会でも十分に達せられたものと思う。

今回の研究会では、例年の研究会とは 2 つの点が異なっていた。1 つは研究会の開催時期である。例年では 7 月の第 1 週あるいはその前後の週に開催されていたが、主催機関による海洋調査の実施の都合により、例年より 1 ヶ月早い 6 月第 1 週の開催となった。もう 1 つの相違は研究会の開催場所である。例年では主催機関が所有している会議室等を使用していたが、当事業所では適当な会議室がなかったため、ホテル会場を借用した。これらは本研究会としては初めての試みであったが、参加者及び世話人のご理解のもとに、研究会を無事終了することができた。

次回の研究会は、核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターの主催により、平成 13 年 7 月初旬から中旬に岐阜県土岐市で開催される予定である。今回の研究会と同様に、多数の参加者のもとに興味深い講演と活発な質疑応答が行われることを期待する。

最後に、参加者及び世話人を初め、本研究会の開催に当たってご協力いただいた方々に改めて感謝する。

付録1 第13回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」参加者名簿

氏名	所属	郵便番号	所在地	TEL	E-mail
柴田 康行	国立環境研究所 化学環境部	305-0053	つくば市小野川16-2	0298-50-2450	yshibata@nies.go.jp
米田 穣	国立環境研究所 化学環境部	305-0053	つくば市小野川16-2	0298-50-2552	myoneda@nies.go.jp
高田 功	日本原子力研究所 高崎研究所 イオン加速器管理課	370-1292	高崎市綿貫町1233	027-346-9642	takada@taka.jaeri.go.jp
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	370-1292	高崎市綿貫町1233	027-346-9630	tajima@taka.jaeri.go.jp
斎藤 勇一	日本原子力研究所 高崎研究所 放射線高度利用センター	370-1292	高崎市綿貫町1233	027-346-9654	saito@taka.jaeri.go.jp
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	370-1292	高崎市綿貫町1233	027-346-9324	hirao@taka.jaeri.go.jp
酒井 卓郎	日本原子力研究所 高崎研究所 放射線高度利用センター	370-1292	高崎市綿貫町1233	027-346-9653	tsakai@taka.jaeri.go.jp
石井 保行	日本原子力研究所 高崎研究所 ピーム技術開発室	370-1292	高崎市綿貫町1233	027-346-9654	ishii@taka.jaeri.go.jp
千葉 敦也	日本原子力研究所 高崎研究所 イオン加速器管理課	370-1292	高崎市綿貫町1233	027-346-9654	
峰原 英介	日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター	319-1195	茨城県那珂郡東海村白方白根2-4	029-282-5464	eisuke@jfel.tokai.jaeri.go.jp
吉田 忠	日本原子力研究所 東海研究所 加速器管理室	319-1195	茨城県那珂郡東海村白方白根2-4	029-282-5439	yoshida@tandem.tokai.jaeri.go.jp
竹内 実広	日本原子力研究所 東海研究所 加速器管理室	319-1195	茨城県那珂郡東海村白方白根2-4	029-282-5860	takeuchi@tandem.tokai.jaeri.go.jp
松田 誠	日本原子力研究所 東海研究所 加速器管理室	319-1195	茨城県那珂郡東海村白方白根2-4	029-282-5860	matsuda@tandem.tokai.jaeri.go.jp
花島 進	日本原子力研究所 東海研究所 加速器管理室	319-1195	茨城県那珂郡東海村白方白根2-4	029-282-6316	hanashima@tandem.tokai.jaeri.go.jp
岩月 輝希	核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター	509-5102	土岐市泉町定林寺959-31	0572-53-0211	iwatsuki@tono.jnc.go.jp
伊藤 茂	核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター	509-5102	土岐市泉町定林寺959-31	0572-53-0211	shigeru@tono.jnc.go.jp
丹生 越子	名古屋大学 年代測定総合研究センター	464-8602	名古屋市千種区不老町	052-789-3082	m46946a@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp
中村 俊夫	名古屋大学 年代測定総合研究センター	464-8602	名古屋市千種区不老町	052-789-2578	g44466a@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp
笛 公和	筑波大学 加速器センター	305-8577	つくば市天王台1-1-1	0298-53-2494	ksasa@tac.tsukuba.ac.jp
島 邦博	筑波大学 加速器センター	305-8577	つくば市天王台1-1-1	0298-51-2720	shima@tac.tsukuba.ac.jp
溝田 武志	名古屋工業技術研究所 融合材料部ビーム工学研究室	462-8510	名古屋市北区平手町1-1	052-911-3406	tmizota@nirin.go.jp
楳原 亜紀子	宇宙開発事業団 技術研究本部 電子情報系技術研究部	305-8505	つくば市千現2-1-1	0298-52-2291	makihara.akiko@nasda.go.jp
久保山智司	宇宙開発事業団 技術研究本部 電子情報系技術研究部	305-8505	つくば市千現2-1-1	0298-52-2291	kuboyama.satoshi@nasda.go.jp
西島 俊二	電子技術総合研究所 量子放射部	305-8568	つくば市梅園1-1-4	0298-61-5692	nishijim@etl.go.jp
小栗 慶之	東京工業大学 原子炉工学研究所	152-8550	目黒区大岡山2-12-1	03-5734-3070	yoguri@nr.titech.ac.jp
御手洗 志郎	九州大学 理学部	812-8581	福岡市東区箱崎4-10-1	092-642-2707	shiro@kutl.kyushu-u.ac.jp
菊池 誠	(有)光信理化学製作所	170-0011	豊島区池袋本町1-39-2	03-3986-0566	
渡辺 昭二	(有)光信理化学製作所	170-0011	豊島区池袋本町1-39-2	03-3986-0566	
村越 義修	丸文株式会社 科学機器部 真空機器第一課	103-8577	中央区日本橋大伝馬町8-1	03-3639-9652	murakosi@marubun.co.jp
飯田 正樹	丸文株式会社 科学機器部 真空機器第一課	103-8577	中央区日本橋大伝馬町8-1	03-3639-9652	masaiida@marubun.co.jp
金子 昌史	伯東株式会社 エレクトロニクス第二事業部 機器営業三部	160-8910	東京都新宿区新宿1-1-13	03-3225-8051	kaneko-m@hakuto.co.jp
尾崎 百信	株式会社ニコンシステム 第3システム本部	220-6116	横浜市西区みなとみらい2-3-3 クイーンズタワーB 16F	045-682-0127	ozaki@nikon-sys.co.jp
高久 雄一	(財)環境科学技術研究所 環境動態研究部	039-3212	青森県上北郡六ヶ所村 大字尾駒字家ノ前1-7	0175-71-1243	ytakaku@ies.or.jp

付録1 第13回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」参加者名簿(続き)

氏名	所属	郵便番号	所在地	TEL	E-mail
大塚 良仁	(財)環境科学技術研究所 環境動態研究部	039-3212	青森県上北郡六ヶ所村 大字尾駒字ノ前1-7	0175-71-1452	ohtsuka@ies.or.jp
西澤 章光	文部省 核融合科学研究所 計測系	509-5292	岐阜県土岐市下石町 322-6	0572-58-2502	nisizawa@LHD.nifs.ac.jp
松岡 健次	大阪大学 理学研究科 原子核実験室	560-0043	豊中市待兼山町1-1	06-6850-5508	matsuoka@hep.sci.osaka-u.ac.jp
羽鳥 聰	(財)若狭湾エネルギー研究センター	914-0192	福井県敦賀市長谷64-52-1	0770-24-5625	hatori@werc.or.jp
伊藤 慶文	(財)若狭湾エネルギー研究センター 研究部	914-0192	福井県敦賀市長谷64-52-1	0770-24-5626	yito@werc.or.jp
猪股 亨	(財)若狭湾エネルギー研究センター 研究部	914-0192	福井県敦賀市長谷64-52-1	0770-24-5625	inomata@werc.or.jp
神保 光一	京都大学 エネルギー理工学研究所	611-0024	京都府宇治市五ヶ庄	0774-38-3462	jimbo@iae.kyoto-u.ac.jp
中村 正信	京都大学 大学院理学研究科 物理学第二教室	606-8502	京都市左京区北白川追分町	075-753-3853	nakamura@ne.scphys.kyoto-u.ac.jp
小林 純一	東京大学 原子力研究総合センター タンデム加速器研究部門	113-0032	文京区弥生2-11-16	03-5841-2945	kobayashi@malt.rcnsta.u-tokyo.ac.jp
松崎 浩之	東京大学 原子力研究総合センター タンデム加速器研究部門	113-0032	文京区弥生2-11-16	03-5841-2949	hmatsu@malt.rcnsta.u-tokyo.ac.jp
中野 忠一郎	東京大学 原子力研究総合センター タンデム加速器研究部門	113-0032	文京区弥生2-11-16	03-5841-2962	nakano@malt.rcnsta.u-tokyo.ac.jp
柴田 裕実	東京大学 原子力研究総合センター 重照射管理部門	319-1106	茨城県那珂郡東海村白方白根2-22	029-287-8476	shibata@tokai.t.u-tokyo.ac.jp
大塚 道夫	日立製作所原子力事業部 新事業開発本部	317-8511	日立市幸町3-1-1	0294-23-5163	michio-ootsuka@pis.hitachi.co.jp
影山 三左夫	電総研OB	189-0024	東村山市藤見町-14-10-503	042-392-7111	
美澄 篤信	海洋科学技術センター むつ事務所 船舶・施設課	035-0022	青森県むつ市大字関根字北関根690	0175-25-3811	
富安 和徳	海洋科学技術センター むつ事務所 船舶・施設課	035-0022	青森県むつ市大字関根字北関根690	0175-25-3811	
小栗 一将	(財)日本海洋科学振興財団 むつ海洋研究所	035-0064	青森県むつ市港町4-24	0175-22-9111	oguri@jmsfmml.or.jp
賀佐 信一	(財)日本海洋科学振興財団 むつ海洋研究所	035-0064	青森県むつ市港町4-24	0175-22-9111	gasa@jmsfmml.or.jp
久慈 智幸	(財)日本海洋科学振興財団 むつ海洋研究所	035-0064	青森県むつ市港町4-24	0175-22-9111	kuji@jmsfmml.or.jp
谷 弘	日本原子力研究所	035-0022	青森県むつ市大字関根字北関根400	0175-45-1101	
山田 昌夫	日本原子力研究所 むつ事業所 管理部	035-0022	青森県むつ市大字関根字北関根400	0175-45-1104	
酒井 陽之	日本原子力研究所 むつ事業所 施設部	035-0022	青森県むつ市大字関根字北関根400	0175-45-1201	
野村 俊彦	日本原子力研究所 むつ事業所 施設部	035-0022	青森県むつ市大字関根字北関根400	0175-45-1218	
守 勝治	日本原子力研究所 むつ事業所 技術管理課	035-0022	青森県むつ市大字関根字北関根400	0175-45-1344	
甲 昭二	日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室	035-0064	青森県むつ市港町4-24	0175-28-4618	
大橋 麻美	日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室	035-0064	青森県むつ市港町4-24	0175-28-4617	
福田 みゆき	日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室	035-0064	青森県むつ市港町4-24	0175-28-4617	
乙坂 重嘉	日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室	035-0064	青森県むつ市港町4-24	0175-28-2613	otosaka@popsvr.tokai.jaeri.go.jp
鈴木 崇史	日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室	035-0064	青森県むつ市港町4-24	0175-28-2654	iodine@popsvr.tokai.jaeri.go.jp
荒巻 能史	日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室	035-0064	青森県むつ市港町4-24	0175-28-2614	aramaki@popsvr.tokai.jaeri.go.jp
北村 敏勝	日本原子力研究所 むつ事業所 施設部	035-0064	青森県むつ市港町4-24	0175-28-2612	kitamura@popsvr.tokai.jaeri.go.jp
外川 織彦	日本原子力研究所 むつ事業所 海洋調査研究室	035-0064	青森県むつ市港町4-24	0175-28-2610	togawa@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

付録2 「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」世話人名簿

氏名	所属	郵便番号	所在地	E-mail
今西 信嗣	京都大学 大学院 工学研究科 原子核工学教室	606-8501	京都市左京区吉田本町	imanishi@nucleng.kyoto-u.ac.jp
岩月 輝希	核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター	509-5102	土岐市泉町定林寺959-31	iwatsuki@tono.jnc.go.jp
小栗 慶之	東京工業大学 原子炉工学研究所	152-8550	東京都目黒区大岡山2-12-1	yoguri@nr.titech.ac.jp
小林 紘一	東京大学 原子力研究総合センター タンデム加速器研究部門	113-0032	東京都文京区弥生2-11-16	kobayashi@malt.rcnsl.u-tokyo.ac.jp
柴田 裕実	東京大学 原子力研究総合センター 重照射管理部門	319-1106	茨城県那珂郡東海村白方白根2-22	shibata@tokai.t.u-tokyo.ac.jp
柴田 康行	国立環境研究所 化学環境部	305-0053	つくば市小野川16-2	yshibata@nies.go.jp
島 邦博	筑波大学 加速器センター	305-8577	つくば市天王台1-1-1	shima@tac.tsukuba.ac.jp
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	370-1292	高崎市錦貫町1233	tajima@taka.jaeri.go.jp
外川 織彦	日本原子力研究所 むつ事業所	035-0064	むつ市港町4-24	togawa@popsvr.totkai.jaeri.go.jp
中村 俊夫	名古屋大学 年代測定総合研究センター	464-8602	名古屋市千種区不老町	g44466a@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp
中村 正信	京都大学 大学院理学研究科 物理学第二教室	606-8502	京都市左京区北白川追分町	nakamura@ne.scphys.kyoto-u.ac.jp
古野 興平	筑波大学 加速器センター	305-8577	つくば市天王台1-1-1	furuno@tac.tsukuba.ac.jp
峰原 英介	日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター	319-1195	茨城県那珂郡東海村白方白根2-4	eisuke@jfel.tokai.jaeri.go.jp
森信 俊平	九州大学 大学院理学研究科 物理学教室	812-8581	福岡市東区箱崎6-10-1	morinobu@nucl.phys.kyushu-u.ac.jp
吉田 忠	日本原子力研究所 東海研究所 加速器管理室	319-1195	茨城県那珂郡東海村白方白根2-4	yoshida@tandem.tokai.jaeri.go.jp

注:本研究会は、タンデム加速器または静電加速器施設を所有する大学や研究機関から選出された世話人の協議によって運営されている。上表は、第13回研究会開催時点における世話人の名簿である。

付録3 「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」主催機関一覧

回 数	期 間	主 催 機 門
第1回	昭和63年7月6～7日	日本原子力研究所、東京工業大学 原子炉工学研究所
第2回	平成元年7月13～14日	東京工業大学 原子炉工学研究所
第3回	平成2年7月19～20日	京都大学 理学部
第4回	平成3年7月11～12日	日本原子力研究所 高崎研究所
第5回	平成4年7月9～10日	筑波大学 加速器センター
第6回	平成5年7月12～13日	九州大学 理学部
第7回	平成6年6月28～29日	東京大学 原子力研究総合センター
第8回	平成7年7月6～7日	名古屋大学 年代測定資料研究センター
第9回	平成8年7月4～5日	日本原子力研究所 東海研究所
第10回	平成9年7月7～8日	国立環境研究所
第11回	平成10年7月2～3日	東京工業大学 原子炉工学研究所
第12回	平成11年7月7～8日	京都大学 理学部
第13回	平成12年6月8～9日	日本原子力研究所 むつ事業所
第14回	平成13年7月	核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター(予定)

付録4 第13回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」開催風景



講演の様子 その1



講演の様子 その2



加速器質量分析装置の見学会



参加者一同

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
压力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m^2
功率、放射束	ジュール	J	$N \cdot m$
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	キーロン	C	$A \cdot s$
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	ファラード	F	C/V
コンダクタンス	オーム	Ω	V/A
磁束	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m^2
セルシウス温度	ヘンリイ	H	Wb/A
光束度	セルシウス度	°C	
照度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
放射能	ルクス	lx	lm/m^2
吸収線量	ベクレル	Bq	s^{-1}
線量等量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- ECE開闢理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N($=10^3$ dyn)	kgf	lbf	MPa($=10$ bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	0.101972	0.224809	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	9.80665	1	2.20462	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	4.44822	0.453592	1	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
粘度	$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P}$ (ボアズ)(g/(cm·s))			1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
動粘度	$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St}$ (ストークス)(cm ² /s)			6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J($=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量法)		
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{-8}	$= 4.184J$ (熱化学)		
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{-9}	$= 4.1855J$ (15°C)		
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{-25}	$= 4.1868J$ (国際蒸気表)		
	4.48605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{-19}	仕事率 1 PS(仮馬力)		
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$		
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{-18}	$= 735.499W$		
	1.60218×10^{19}	1.63377×10^{20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{19}	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量等量	Sv	rem
	1	2.70270×10^{-11}		1	100		1	3876		100	1
	3.7×10^{10}	1	0.01	1			2.58×10^{-1}	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

