JAEA-Conf
2008-005

JAEA-Conf

第20回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集

Proceedings of the 20th Meeting for Tandem Accelerators and their Associated Technologies

（編）松田 誠

(Ed.) Makoto MATSUDA

東海研究開発センター
原子力科学研究所
研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

March 2008

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp/index.shtml）より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っております。

〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4　日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

JAEA-Conf 2008-005

第 20 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集

日本原子力研究開発機構東海研究開発センター
原子力科学研究所　研究炉加速器管理部
（編）　松田　誠

（2008 年 1 月 24 日受理）

第 20 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」は平成 19 年 7 月 12 日～13 日の２日間に亘り、日本原子力研究開発機構東海研究開発センター・原子力科学研究所の主催により先端基礎交流棟にて開催された。研究会にはタンデム型加速器や静電型加速器を所有する 33 の大学、研究機関及び産業界から約 110 名の関係者が参加した。

本研究会の主な目的は、上述した加速器施設を運営あるいは利用する技術者や研究者相互の情報交換により、加速器技術の研究・開発の進展に寄与することである。

研究会は講演とポスターセッションによって構成され、タンデム型加速器や静電型加速器施設の現状、技術開発、応用研究について 47 件の発表とこれらに関する質疑応答が行われた。

本報告集は本研究会で発表された講演とポスターセッションをまとめたものである。

原子力科学研究所：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

JAEA-Conf 2008-005

Proceedings of the 20th Meeting for Tandem Accelerators and their Associated Technologies

(Ed.) Makoto MATSUDA

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 24, 2008)

The 20th Meeting of Tandem Accelerators and their Associated Technologies was held from July 12 through 13, 2007 at Tokai-mura, Ibaraki-ken, under the auspices of the Nuclear Science Research Institute of Japan Atomic Energy Agency (JAEA). About one hundred and ten people participated in the meeting from thirty-three organizations; universities, research institutes and industries, which have a tandem accelerator or an electrostatic accelerator.

The objective of the meeting is to contribute to research and development of accelerator technology by exchanging information on their accelerators each other.

The meeting consisted of oral and poster sessions. Forty-seven presentations about present status and technical development on tandem accelerators or electrostatic accelerators and applications using these accelerators were discussed during the two days.

This report summarizes the forty-seven presentations including posters in the meeting.

Keywords: Tandem Accelerator, Electrostatic Accelerator, Present Status, Research and Development, Application

目　　次

開会挨拶 1

１．口頭発表：施設現状報告 1

1-1　筑波大学タンデム加速器の現状 2

笹　公和、石井　聡、大島弘行、木村博美、高橋　努、田島義一、大和良広、小松原哲郎、工藤　博、長島泰夫（筑波大学研究基盤総合センター　応用加速器部門）

1-2　国立環境研究所タンデム加速器分析施設 NIES-TERRA の現状 6

小林利行、小林千明（㈱伯東）　内田昌男、瀬山春彦、田中敦、荒巻能史、植広崇嗣、柴田康行、鈴木　亮（国立環境研究所　化学環境研究領域）　米田　穣、鵜野　光（東京大学大学院　新領域創世科学研究科）

1-3　東京大学 MALT 加速器施設の現状 10

中野忠一郎、松崎浩之、春原陽子、森田　明、伊藤誠二、宮入陽介、松四雄騎　（東京大学大学院　工学系研究科原子力国際専攻）　阿瀬貴博（東京大学大学院　理学系研究科地球惑星科学専攻）

1-4　若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状 14

羽鳥　聡、栗田哲郎、林　豊、山田裕章、森　順一、濱地寿和、木村　忍、霜田　勉、廣戸　慎、島田麻亜久、橋本鉄也、小田桐哲也、大谷暢夫、山本久雄、福本貞義（若狭湾エネルギー研究センター）

1-5　名古屋大学 AMS^{14}C 測定の現状と応用（2007） 18

中村俊夫、南　雅代、小田寛貴、池田晃子、工藤雄一郎、大森貴之、西本　寛、林　和樹、太田友子、西田真砂美（名古屋大学年代測定総合研究センター　加速器年代研究分野）

２．口頭発表：施設現状報告 2

2-1　パレオ・ラボ Compact-AMS の現状 22

伊藤　茂、丹生越子、小林紘一（㈱パレオ・ラボ　AMS 年代測定施設）
山形秀樹、廣田正史、瀬谷　薫、Z. Lomtatidze、I. Jorjoliani（㈱パレオ・ラボ　東海支店）

2-2　神戸大タンデム加速器の現状 26

谷池　晃、古山雄一、北村　晃（神戸大学大学院　海事科学研究科マリンエンジニアリング講座）

2-3　九州大学タンデム加速器の現状 30

森川恒安、相良建至、野呂哲夫、若狭智嗣、寺西　高、前田幸重、前田豊和、古賀義博（九州大学大学院　理学研究院）　池田伸夫（九州大学大学院　工学研究院）

2-4　JAEA-AMS-TONO の現状 34

鈴木元孝、齋藤龍郎、笹尾英嗣（日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門）

西澤章光、大脇好夫、西尾智博（㈱ペスコ）

2-5　原子力機構むつ・タンデトロン加速器の現状　2006-2007 38

天野　光、甲　昭二、木下尚喜（日本原子力研究開発機構　青森研究開発センター AMS 管理課）　渡部幸也（日本海洋科学振興財団　むつ海洋研究所）

３．口頭発表：施設現状報告 3

3-1　原子力機構-東海タンデム加速器の現状 42

松田　誠、左高正雄、竹内末広、月橋芳廣、花島　進、阿部信市、長　明彦、石崎暢洋、田山豪一、仲野谷孝充、株本裕史、中村暢彦、沓掛健一、乙川義憲、大内　勲（日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所　加速器管理課）

3-2　京都大学工学研究科重イオン加速器によるビーム分析 46

内藤正裕、土田秀次、高木郁二、今井　誠、法澤恵造、柴田裕実、伊藤秋男（京都大学大学院　工学研究科）

４．口頭発表：技術開発

4-1　ダイナミトロン加速器のアップグレード 49

藤澤政則、永谷隆男、松山成男、小松清勝、坂本隆司、橋本悠太郎、石井慶造（東北大学大学院　工学研究科量子エネルギー工学専攻）

4-2　Recent Developments and New Applications of NEC Ion Beam Systems 53

G.A. Norton (National Electrostatics Corp.)

4-3　タンデム高周波トランスの故障についてⅠ　～トランスの放電損傷～ 58

霜田　勉、羽鳥　聡、栗田哲郎、林　豊、山田裕章、森　順一、木村　忍、濱地寿和、廣戸　慎、橋本鉄也、島田麻亜久（若狭湾エネルギー研究センター）

4-4　タンデム高周波トランスの故障についてⅡ　～トランスの特性測定～ 62

霜田　勉、羽鳥　聡、栗田哲郎、林　豊、山田裕章、森　順一、木村　忍、濱地寿和、廣戸　慎、橋本鉄也、島田麻亜久（若狭湾エネルギー研究センター）

５．口頭発表：応用 1

5-1　ガラスキャピラリを使った 6MeV ^{15}N イオンの収束の試み 66

根引拓也、成沢　忠（高知工科大学）　関場大一郎、マーカス・ヴィルデ、小倉正平、山下　博、松本益明、福谷克之、岡野達雄（東京大学生産技術研究所）　米村博樹、笠木次郎太（東北大学大学院　理学研究科）　岩村康弘、伊藤岳彦、栗林志頭真（三菱重工業）　松崎浩之（東京大学大学院　工学系研究科）

5-2　放医研 SPICE におけるビーム偏向・収束系の改造 70
濱野　毅、石川剛弘、磯　浩之、小西輝昭、酢屋徳啓、安田仲宏、今関　等
（放射線医学総合研究所　研究基盤技術部）
5-3　京都大学における重イオンマイクロビーム細胞照射系の開発 74
中村正信、牧野誠司（和歌山県立医科大学医学部）　今井憲一、松本　博、廣瀬昌憲
（京都大学大学院　理学研究科）　戸崎充男、大澤大輔（京都大学放射性同位元素
総合センター）　丹羽太貫（京都大学放射線生物研究センター、放医研重粒子医科学
センター）小松賢志、中村恭介（京都大学放射線生物研究センター）
内海博司（体質研究会）
5-4　マイクロビームを用いた高分解能 X 線イメージング装置の開発 78
長谷川　純、柴　茂樹、福田一志、小栗慶之（東京工業大学原子炉工学研究所）

6．口頭発表：応用 2
6-1　高速クラスタービームの炭素衝撃による放出二次イオンの測定 82
柴田裕実、土田秀次、伊藤秋男（京都大学大学院　工学研究科）　斉藤勇一、千葉敦也、
阿達正浩、神谷富裕、横田　渉（日本原子力研究開発機構　高崎量子応用研究所）
鳴海一雅（日本原子力研究開発機構　先端基礎研究センター）
6-2　3MV タンデム加速器を用いた核融合プラズマ計測..... 84
井戸　毅、清水昭博、西浦正樹、加藤眞治、中野治久、横田光弘、西澤章光、濱田泰司、
LHD 実験グループ（自然科学研究機構　核融合科学研究所）
6-3　1MeV 小型大電流エネルギー回収型静電加速器とその応用..... 87
峰原英介（日本原子力研究開発機構　量子ビーム応用研究部門）
6-4　TIBIC を用いた酸化膜中に誘起した過渡電流の解明に関する研究..... 89
平尾敏雄、小野田　忍、大島　武（日本原子力研究開発機構　量子ビーム応用研究部門）
高橋芳浩、府金　賢（日本大学大学院　理工学研究科電子工学専攻）
6-5　酸化膜を介したイオン照射誘起電荷の収集機構解明に向けた研究 93
府金　賢、高橋芳浩、中嶋康人、大西一功（日本大学大学院　理工学研究科電子工学専攻）
平尾敏雄、小野田　忍（日本原子力研究開発機構　量子ビーム応用研究部門）

7．ポスター発表
P-1　京都大学理学部タンデム加速器の現状 97
松本　博、廣瀬昌憲、中濱治和、今井憲一、村上哲也（京都大学大学院　理学研究科）
中村正信（和歌山県立医科大学）

P-2　東京大学重照射研究設備の現状 101
尾亦孝男、岩井岳夫、阿部弘亨（東京大学大学院　工学系研究科原子力専攻）
P-3　原子力機構-放射線標準施設棟ファン・デ・グラーフ型加速器の現状 103
小沼　勇、古渡意彦、谷村嘉彦、川崎克也、清水　滋、吉澤道夫（日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所　放射線計測技術課）
名倉信明、川井　勲、佐藤福克（日本アドバンストテクノロジー㈱）
P-4　TIARA 静電加速器の現状－タンデム加速器の現状－..... 107
千葉敦也、石井保行、水橋　清（日本原子力研究開発機構　高崎量子応用研究所）
北野敏彦、金井信二、青木勇希（ビームオペレーション㈱）
P-5　中性子発生用加速器システム(NASBEE)におけるターゲットの開発 110
酢屋徳啓、濱野　毅、須田　充、萩原拓也、小西輝昭、宮原信幸（放医研　放射線発生装置
利用技術開発課）　　高田真志（放医研　放射線計測技術開発室）
今関　等（放医研　研究基盤技術部）

P-6　TIARA イオン注入装置におけるイオン生成技術の開発..... 114
山田圭介、斎藤勇一、水橋　清（日本原子力研究開発機構　高崎量子応用研究所）
大越清紀（日本原子力研究開発機構　J-PARC センター）
織茂貴雄、大前昭臣、山田尚人（ビームオペレーション㈱）
P-7　シングルエンド加速器の絶縁用樹脂部品の部分放電損傷 118
宇野定則、水橋　清（日本原子力研究開発機構　高崎量子応用研究所）
高山輝充、江夏昌志（ビームオペレーション㈱）
P-8　ターミナルイオン源による金属イオンビームの生成 121
仲野谷孝充、松田　誠（日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所　加速器管理課）
P-9　偏向電磁石のコンダクタンス測定 124
花島　進（日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所　加速器管理課）
P-10　高圧六フッ化硫黄(SF_6)ガス中で使用するリレーのためのスクリーニング試験... 126
沓掛健一、松田　誠、花島　進（日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所
加速器管理課）　　小原建治郎（日本アドバンストテクノロジー㈱　東海事業所）

P-11　原子力機構-東海タンデム加速器インターロックシステムにおける
通信障害およびプログラムバグフイックス 130
中村暢彦、花島　進（日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所　加速器管理課）
P-12　ISOL 用イオン源の開発 133
長　明彦、乙川義憲、松田　誠（日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所

加速器管理課）　佐藤哲也、市川進一（日本原子力研究開発機構　先端基礎研究センター）

P-13　Low β超伝導加速空洞の開発 137

株本裕史、竹内末広、石崎暢洋、松田　誠、乙川義憲（日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所　加速器管理課）

P-14　PIXE 分析法による額縁装飾用金箔に含まれる微量元素(Cu, Ag)の検出..... 141

長谷川純子（京都造形芸術大学大学院　芸術研究科）　河野益近（京都大学大学院
工学研究科）　伊達仁美（京都造形芸術大学　歴史遺産学科）　川本耕三、井上美知子
（元興寺文化財研究所）　西山文隆（広島大学大学院工学研究科）　伊藤誠二、森田　明、
松崎浩之（東京大学大学院　工学研究科）

P-15　東工大タンデム加速器を用いた PIXE 法による水中微量クロムの価数分別測定 .. 145

福田一志（東京工業大学技術部　基盤技術支援センター）　Sureerat Thomyasirigul、
長谷川　純、小栗慶之（東京工業大学原子炉工学研究所）

P-16　日本海における放射性炭素の分布と深層循環 149

荒巻能史（国立環境研究所　化学環境研究領域）　外川織彦、乙坂重嘉、鈴木崇史、
田中孝幸（日本原子力研究開発機構　原子力基礎工学研究部門）　天野　光（日本原子力
研究開発機構　青森研究開発センター）　千手智晴（九州大学応用力学研究所）
皆川昌幸（水産総合研究センター　中央水産研究所）

P-17　Li イオン導電体 β-LiGa と β-LiIn 中における ^{8}Li 短寿命核トレーサーの拡散 .. 153

須貝宏行、左高正雄、岡安　悟、市川進一、西尾勝久、光岡真一、仲野谷孝充、長　明彦、
佐藤哲也、橋本尚志（日本原子力研究開発機構　東海研究開発センター）
鄭　淳讃、片山一郎、川上宏金、渡辺　裕、石山博恒、今井伸明、平山賀一、宮武宇也
（高エネルギー加速器研究機構）　橋本恭能、矢萩正人（青森大学）

P-18　測定条件が pMC 及び δ ^{13}C 測定値に与える影響の検討 157

齋藤龍郎、鈴木元孝（日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門）
西澤章光（㈱ペスコ）

P-21　分子レベル ^{14}C 測定による都市微小大気エアロゾル中燃焼由来
汚染化学物質(PAHs)の起源推定 161

内田昌男、柴田康行（国立環境研究所）
熊田英峰、佐久間英輔、藤原祺多夫（東京薬科大学）

P-22　最終退氷期十勝沖海底コアに記録された海底下メタンハイドレート湧出現象 ... 165

内田昌男、柴田康行（国立環境研究所）　大串健一（神戸大学）
稲垣史生（海洋研究開発機構）　石村豊穂、角皆　潤（北海道大学）

附録-1　第 20 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」プログラム 169
附録-2　研究会出席機関..... 174
附録-3　タンデム研究会世話人名簿及び事務局住所..... 176

Contents

Opening Address 1

1. Oral session : Status Report of Accelerator Facility 1

1-1 Status report of the tandem accelerator facility at the University of Tsukuba 2

K. Sasa, S. Ishii, H. Oshima, H. Kimura, T. Takahashi, Y. Tajima, Y. Yamato, T. Komatsubara, H. Kudo and Y. Nagashima (Research Facility Center for Science and Technology, University of Tsukuba)

1-2 Status report of the NIES-TERRA (an analysis facility used tandem accelerator at the National Institute for Emvironmental Studies (NIES)) 6

T. Kobayashi and C. Kobayashi (Hakuto Corp.) M. Uchida, H. Seyama, A. Tanaka, Y. Aramaki, T. Uehiro, Y. Shibata and T. Suzuki (NIES) Y. Yoneda and H. Uno (Graduate School of Frontier Science, University of Tokyo)

1-3 Current status of MALT, the University of Tokyo 10

C. Nakano, H. Matsuzaki, Y. Sunohara, A. Morita, S. Ito, Y. Miyairi and Y. Matsusi (School of Engineering, University of Tokyo) T. Aze (School of Science, University of Tokyo)

1-4 Status of accelerator laboratory at the Wakasa-wan Energy Research Center 14

S. Hatori, T. Kurita, Y. Hayashi, H. Yamada, J. Mori, H. Hamaji, S. Kimura, T. Shimoda, M. Hiroto, M. Shimada, T. Hashimoto, T. Odagiri, N. Ohtani, H. Yamamoto and S. Fukumoto (Wakasa-wan Energy Research Center)

1-5 Present status and applications of ^{14}C AMS system at Nagoya University in 2007 18

T. Nakamura, M. Minami, H. Oda, A. Ikeda, Y. Kudo, T. Omori, H. Nishimoto K. Hayashi, T. Ohta and M. Nishida (Nagoya University Center for Chronological Research)

2. Oral session : Status Report of Accelerator Facility 2

2-1 Current status of the compact ^{14}C AMS system at Paleo Labo Co., Ltd. 22

S. Ito, E. Niu, K. Kobayashi, H. Yamagata, M. Hirota, K. Seya, Z. Lomtatidze and I. Jorjoliani (Paleo Labo Co., Ltd.)

2-2 Present conditions of tandem acceleraror in Kobe University 26

A. Taniike, Y. Furuyama and A. Kitamura (Graduate Scholl of Maritime Sciences, Kobe University)

2-3 Status report of Kyushu University tandem accelerator 30

T. Morikawa, S. Sagara, T. Noro, T. Wakasa, T. Teranishi, Y. Maeda, T. Maeda and Y. Koga (Faculty of Science, Kyushu University) N. Ikeda (Faculty of Engineering, Kyushu University)

2-4 Present status of the JAEA-AMS-TONO 34

M. Suzuki, T. Saito and E. Sasao (Geological Isolation Research and Development Directorate,

Japan Atomic Energy Agency (JAEA)) A. Nishizawa, Y. Ohwaki and T. Nishio (Pesco Corp., Ltd.)

2-5 Status of JAEA AMS-MUTSU at 2006-2007 38

H. Amano, S. Kabuto and N. Kinoshita (Mutsu Establishment, JAEA) Y. Watanabe (Japan Marine Science Foundation)

3. Oral session : Status Report of Accelerator Facility 3

3-1 Current status report of the JAEA-Tokai Tandem Accelerator 42

M. Matsuda, M. Sataka, S. Takeuchi, Y. Tsukihashi, S. Hanashima, S. Abe, A. Osa, N. Ishizaki, G. Tayama, T. Nakanoya, H. Kabumoto, M. Nakamura, K. Kutsukake, Y. Otokawa and I. Ohuchi (Tandem Accelerator Section, JAEA)

3-2 Materials analysis by heavy ion accelerators in Graduate School of Engineering, Kyoto University 46

M. Naito, S. Tsuchida, Y. Takagi, M. Imai, K. Nrozawa, H. Shibata and A. Ito (Graduate School of Engineering, Kyoto University)

4. Oral session : Technical Development

4-1 Upgrade of the Dynamitron Accelerator 49

M. Fjisawa, T. Nagaya, S. Matsuyama, K. Komatsu, R. Sakamoto, Y. Hashimoto and K. Ishii (School of Engineering, Tohoku University)

4-2 Recent developments and new applications of NEC Ion Beam Systems 53

G.A. Norton (National Electrostatics Corp.)

4-3 The trouble at the RF transformer of the tandem accelerator - The discharge damage of the transformer - 58

T. Shimoda, S. Hatori, T. Kurita, Y. Hayashi, H. Yamada, J. Mori, S. Kimura, H. Hamachi, M. Hiroto, T. Hashimoto and M. Shimada (Wakasa-wan Energy Research Center)

4-4 The trouble at the RF transformer of the tandem accelerator - The measurement of the resonance characteristic of the transformer - 62

T. Shimoda, S. Hatori, T. Kurita, Y. Hayashi, H. Yamada, J. Mori, S. Kimura, H. Hamachi, M. Hiroto, T. Hashimoto and M. Shimada (Wakasa-wan Energy Research Center)

5. Oral session : Application 1

5-1 Focusing of 6.4MeV ^{15}N ions by means of tapered glass capillary 66

T. Nebiki and T. Narusawa (Kochi University of Technology) D. Sekiba, M. Vildy, S. Ogura, H. Yamashita, M. Matsumoto, K. Fukuya and T. Okano (Institute of Industrial Science, University

of Tokyo) H. Yonemura and J. Kasagi (Garduate School of Science, Tohoku University)
Y. Iwamura, T. Ito and S. Kuribayashi (Mitsubishi Heavy Industries Ltd.)
H. Matsuzaki (School of Engineering, University of Tokyo)

5-2 Progress report of the SPICE at NIRS 70
T. Hamano, T. Ishikawa, H. Iso, T. Konishi, N. Suya, N. Yasuda and H. Imaseki (Department of Technical Support and Development, National Institute of Radiological Science (NIRS))

5-3 Development of cell irradiation system by heavy ion micro-beams at Kyoto University 74
M. Nakamura and S. Makino (Wakayama Medical University) K. Imai, H. Matsumoto and M. Hirose (Graduate School of Science,Kyoto University) M. Tosaki and D. Osawa (Radioisotope Research Center of Kyoto University) T. Niwa, K. Komatsu and K. Nakamura (Radiation Biology Center of Kyoto University) H. Utsumi (Health Research Foundation)

5-4 Development of high-resolution X-ray imaging system using micro-beams 78
J. Hasegawa, S. Shiba, H. Fukuda and Y. Oguri (Research Laboratory for Nuclear Reactors, the Tokyo Institute of Technology)

6. Oral session : Application 2

6-1 Measurement of secondary ion from HOPG target bombarded by swift carbon cluster ion beams 82
H. Shibata, H. Tsuchida and A. Itoh (Graduate School of Engineering, Kyoto University) Y. Saitoh, A. Chiba, M. Adachi, T. Kamiya and W. Yokota (Takasaki Advanced Radiation Research Institute, JAEA) M. Narumi (Advanced Science Research Center, JAEA)

6-2 Diagnostics system for fusion plasmas by using 3MV tandem accelerator 84
T. Ido, A. Shimizu, M. Nishiura, S. Kato, H. Nakano, M. Yokota, A. Nishizawa, Y. Hamada and LHD experimental group (National Institute for Fusion Science, National Institutes of Natural Sciences (NINS))

6-3 A 1MeV compact high current energy recovery electrostatic accelerator and its application 87
E.J. Minehara (Quantum Beam Science Directorate, JAEA)

6-4 Investigation of the generation mechanism of transient current generated in oxide using TIBIC 89
T. Hirao, S. Onoda and T. Ohsima (Quantum Beam Science Directorate, JAEA)
Y. Takahashi (Graduate School of Science and Technology, Nihon University)

6-5 Charge collection mechanism of heavy-ion induced charge through an oxide layer 93
M. Fugane, Y. Takahashi, Y. Nakajima and I. Ohnishi (Graduate School of Science and Technology,

the Nihon University) T. Hirao, S. Onoda and T. Ohsima (Quantum Beam Science Directorate, JAEA)

7. Poster session

P-1 Current status of tandem accelerator at Department of Science Kyoto University 97

H. Matsumoto, M. Hirose, H. Nakahama, K. Imai and T. Murakami (Graduate School of Science, Kyoto University) M. Nakamura (Wakayama Medical University)

P-2 Current status of high fluence irradiation facility, the University of Tokyo (HIT).....101

T. Omata, T. Iwai and H. Abe (School of Engineering, University of Tokyo)

P-3 Present situation of the Van de Graff accelerator at facility of radiation standard of JAEA 103

I. Onuma, M. Furuwatari, Y. Tanimura, K. Kawasaki, S. Shimizu and M. Furusawa (Department of Radiation Protection, JAEA) N. Nakura, I. Kawai and F. Sato (Nippon Advanced Technology Corp.)

P-4 Status of electrostatic accelerator at TIARA - Status of tandem accelerator - 107

A. Chiba, Y. Ishii and K. Mizuhashi (Takasaki Advanced Radiation Research Institute, JAEA)

T. Kitano, S. Kanai and Y. Aoki (Beam-Operation Corp., Ltd.)

P-5 Development of neutron production target for NASBEE 110

N. Suya, T. Hamano, M. Suda, M. Takada, T. Hagiwara, T. Konishi, N. Miyahara and H. Imaseki (National Institute of Radiological Science (NIRS))

P-6 Development of the ion generation method at TIARA ion implanter 114

K. Yamada, Y. Satoh and K. Mizuhashi (Takasaki Advanced Radiation Research Institute, JAEA)

K. Ohkoshi (J-PARC Center, JAEA) T. Orimo, A. Ohmae and N. Yamada (Beam-Operation Corp., Ltd.)

P-7 Partial discharge damage of insulating plastic parts for the Single-ended Accelerator.....118

S. Uno and K. Mizuhashi (Takasaki Advanced Radiation Research Institute, JAEA)

T. Takayama and M. Kohka (Beam-Operation Corp.,Ltd.)

P-8 Production of metal ion beams from Terminal Ion Source 121

T. Nakanoya and M. Matsuda (Tandem Accelerator Section, JAEA)

P-9 Measurement of conductance of bending magnetcoil.....124

S. Hanashima (Tandem Accelerator Section, JAEA)

P-10 Screening test of relays used under pressurized sulfur hexafluoride (SF_6) 126

K. Kutsukake, M. Matsuda and S. Hanashima (Tandem Accelerator Section, JAEA)

K. Obara (Nippon Advanced Technology Corp., Ltd.)

P-11 Communication faults and bug fixes in the interlock system for the JAEA-Tokai Tandem Accelerator Facility 130

N. Nakamura and S. Hanashima (Tandem Accelerator Section, JAEA)

P-12 Development of ion sources for JAEA-ISOL 133

A. Osa, Y. Otokawa and M. Matsuda (Tandem Accelerator Section, JAEA)

T. Sato and S. Ichikawa (Advanced Science Research Center, JAEA)

P-13 Development of low β superconducting twin quater wave resonator 137

H. Kabumoto, S. Takeuchi, N. Ishizaki, M. Matsuda and Y. Otokawa

(Tandem Accelerator Section, JAEA)

P-14 PIXE analysis of trace elements (Cu, Ag) in gold leafs on frames 141

S. Hasegawa (Graduate School, Kyoto University of Art and Design) M. Kohno (Graduate School of Engineering, Kyoto University) H. Date (Kyoto University of Art and Design) K. Kawamoto and M. Inoue (Genkohji Cultural Institute) F. Nishiyama (Graduate School of Engineering, Hiroshima University) S. Ito, M. Morita and M. Matsuzaki (School of Engineering, University of Tokyo)

P-15 Valence-selective determination of trace-level chromium in water by PIXE.....145

H. Fukuda, Sureerat Thomyasirigul, J. Hasegawa, Y. Oguri (Tokyo Institute of Technology)

P-16 Study on the deep circulatiion in the Japan Sea by chiefly using the analysis of radiocarbon in seawater 149

T. Aramaki (NIES) O. Togawa, S. Otosaka, T. Suzuki, T. Tanak and H. Amano (JAEA)

T. Senjyu (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University)

M. Minakawa (Fisheries Research Agency)

P-17 Diffusion of ^{8}Li short-lived radiotracer in Li ionic conductors β-LiGa and β-LiIn 153

H. Sugai, M. Sataka, S. Okayasu, S. Ichikawa, K. Nishio, S. Mitsuoka, T. Nakanoya, A. Osa, T. Sato and T. Hashimoto (JAEA) S.C. Jeong, I. Katayama, H. Kawakami, Y. Watanabe, H. Ishiyama, N. Imai, Y. Hirayama and H. Miyateke (High Energy Accelerator Research Organization)

T. Hashimoto and M. Yahagi (Aomori University)

P-18 Examination of the effects of the measurement conditions on pMC and delta ^{13}C.....157

T. Saito and M. Suzuki (Tono Geoscience Center, JAEA) A. Nishizawa (Pesco Corp., Ltd.)

P-21 Origin of polyaromatic hydrocarbon (PAH) in aerosol from residential are of Tokyo using compound-specific radiocarbon analysis 161

M. Uchida and Y. Shibata (NIES) E. Kumada, E. Sakuma and K. Fujiwara (Tokyo University of Pharmacy and Life Science)

P-22 Methane hydrate dissociation signal under sea floor off Tokachi, western North Pacific during the last deglaciation.....165

M. Uchida and Y. Shibata (NIES) K. Ohgushi (Kobe University) F. Inagaki (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology) T. Ishimura and T. Tsunogai (Hokkaido University)

Appendix-1 Meeting program 169
Appendix-2 Attended organizations 174
Appendix-3 Attendants for the meeting, and secretariat address 176

開会挨拶

日本原子力研究開発機構
東海研究開発センター原子力科学研究所
研究炉加速器管理部
加速器管理課長　左髙正雄

この度は第２０回という節目の研究会を東海で開催させて頂きありがとうございます。

今から２０年前、東京工業大学原子炉工学研究所の新井教授と日本原子力研究所東海研究所加速器管理室の峰原研究員により、この原子力科学研究所（当時は東海研究所）で開催されたことがこの研究会の始まりだと聞いております。開始当時から小型イオン加速器の利用・応用に関する変遷もあり、発表の動向に変化はあるにしても、通常の学会発表の常である成功談、独創的な研究発表もさることながら、本研究会ではむしろ失敗談も良しとするなどの、開催当時からの良い伝統は残っています。この研究会はユニークであり、また、良い伝統もあり今後もこの研究会はますます発展していくだろうと思われます。

さて、本タンデム加速器施設はタンデム加速器で共用実験開始２５周年を迎えております。その間、超伝導線形加速器（ブースター加速器）の開発によるイオンエネルギーの増強、高圧ターミナル上の ECR イオン源により希ガス等の加速及びイオン電流の増強を図ってきました。また、高エネルギー研究機構との共同により短寿命核加速装置を移設し ^{8}Li などの短寿命核の加速を始めることが出来ました。これもひとえに、この研究会で、皆様との討論、ご助言のおかげであると思っております。

最後に、この研究会において実りある討論が行われ、それらが今後イオン加速器分野の発展の一助となること祈念致しまして、開会の挨拶とさせて頂きます。

1. 口頭発表 : 施設現状報告 1

1-1 筑波大学タンデム加速器の現状

笹 公和、石井 聡、大島 弘行、木村 博美、高橋 努、田島 義一、大和 良広、
小松原 哲郎、工藤 博、長島 泰夫
筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門

1. はじめに

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門(UTTAC)では、12UDペレトロンタンデム加速器と 1MVタンデトロン加速器の 2 台の静電加速器の維持管理を担当し、学内外との共同利用研究を推進している。1MVタンデトロン加速器では、主に高速クラスター研究及びPIXEとRBS分析研究がおこなわれている。12UDペレトロンタンデム加速器は、1975 年の導入から 32 年が経過したが順調に稼動している。利用形態は原子核研究からAMSや水素分析などのイオンビーム分析研究、重イオン照射等の応用研究が中心となってきている。2007 年度より当施設は、文部科学省委託事業「先端研究施設共用イノベーション創出事業」【産業戦略利用】に採択された。なお当施設の利用方法や研究成果及びイノベーション創出事業等の詳細については、ホームページを参照下さい[1]。本報告では、主に 2006 年度の 12UDペレトロンタンデム加速器についての運転、保守整備状況と利用研究の現状及び施設運用に関する現況について報告をおこなう。

2. 12UD ペレトロンタンデム加速器の運転状況(2006 年度)

2006 年度の実験利用日数は 129 日間、実験課題数 55 件、実験参加者数 452 名であった。加速器の総運転時間は 1875 時間であり、前年度比で 80 %となっている。またビーム加速時間は 1396 時間であった。図 1 に月別運転時間割合、図 2 にターミナル電圧別運転時間のグラフを示す。2006 年度は施設内のアスベスト対策工事が 2007 年 2～3 月の 2 ヶ月間にわたり実施された。この間、加速器運転が出来ない為、通常より定期整備期間を早めて、2007 年 2 月より加速器内部の定期整備を実施した。その為、例年より 1 ヶ月程、加速器稼動期間が短くなっている。加速器の利用としては、10MV が約 70%と最も多い利用割合となっている。12UD ペレトロンタンデム加速器は現在、スパッタリング負イオン源(GIC Model860A)と独自に開発したラムシフト型偏極イオン源(PIS)及び加速器質量分析用イオン源(AMS)の 3 台のイオン源が稼動している。図 3 にはイオン源別加速イオン種の割合を示す。加速イオン種としては AMS での Cl-36 が最も時間数が多かった。

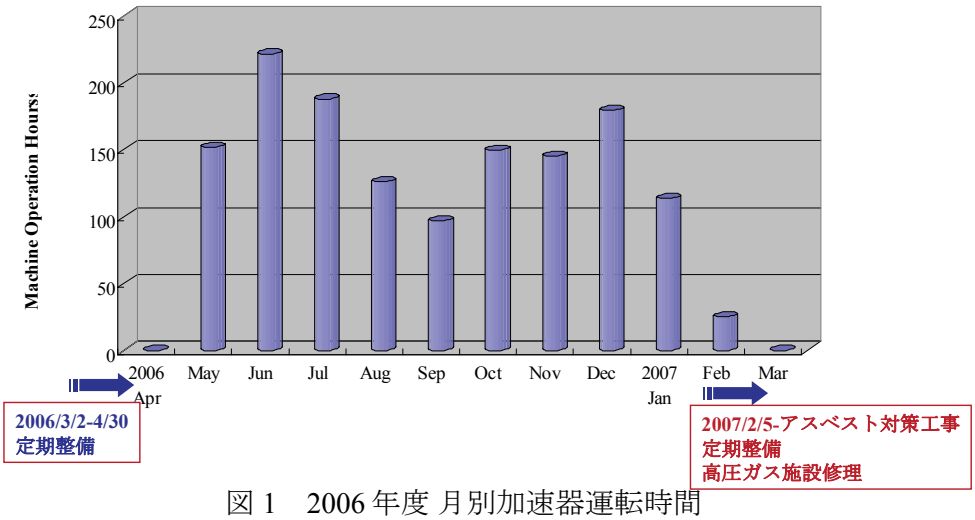


図 1　2006 年度 月別加速器運転時間

[1]筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門ホームページ　http://www.tac.tsukuba.ac.jp/

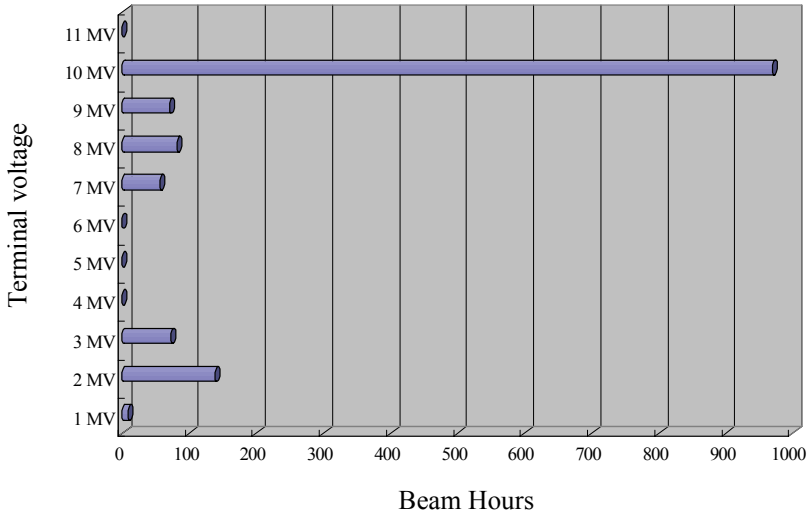


図 2　2006 年度ターミナル電圧別加速器運転時間

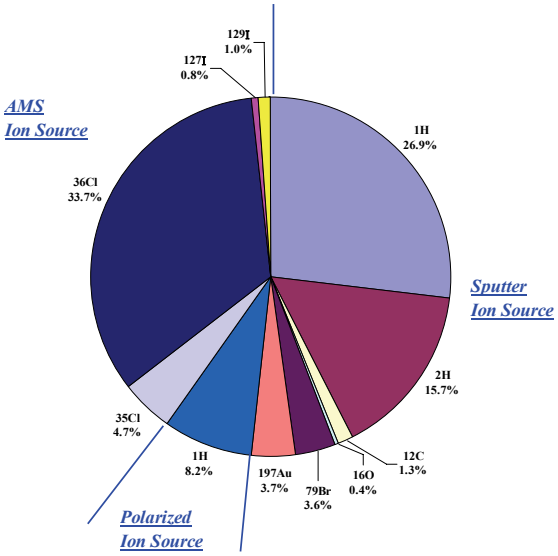


図 3　加速イオン種割合

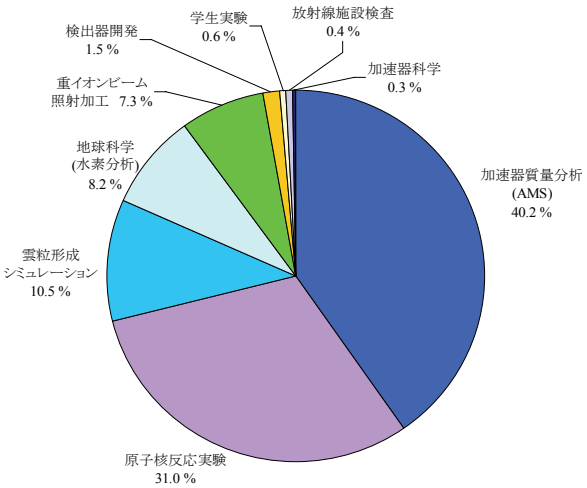


図 4　研究分野別利用状況

3. 12UD ペレトロンタンデム加速器 の利用状況

図 4 に研究分野別利用割合を示す。加速器質量分析(AMS)の利用が最も多く、全体の約 40 % 程度の利用割合となっている。主にCl-36 を用いた地下水年代測定[1]、環境トレーサー利用研究[2]、加速器施設遮蔽物中の中性子積算線量測定等[3]を実施している。2006 年度は原子力施設からの放射性廃棄物に関するクリアランスレベル調査で、12UDペレトロンタンデム加速器の遮蔽コンクリートから試料を採集し、Cl-36 のAMS測定を実施した(KEK・筑波大学 共同研究)。試料採取場所は、最も漏れ中性子の線量が高くなると推定される加速器出射側の分析電磁石直下の床面からであり、AMS施設内からAMS測定用試料を採取した珍しい例である。測定結果として、$^{36}Cl/^{35}Cl = (2.66 \pm 0.12) \times 10^{-12}$ となり、試料採取場所の積算熱中性子線量は、$(6.09 \pm 0.27) \times 10^{10}$ n/cm^2 となった。 また国内共同研究プロジェクトである南極ドームふじ氷床コアのAMS測定では、深度 3028 mまでの氷床試料を用いて氷床試料中のCl-36 濃度測定をおこなった(筑波大・国立極地研究所・国立環境研究所・弘前大 共同研究)。Cl-36 は半減期 30.1 万年の長寿命放射性核種であり、最深部年代が 72 万年とされた氷床コアの年代制約情報の提供が期待されている。AMS測定結果より、氷床試料中の酸素同位体比を氷床涵養量の指標にしてCl-36 フラックスを求めた結果、全体のCl-36 フラックスは浅層から深層部にかけてモデル年代に従って減少し、Cl-36 半減期と調和的な減衰曲線を描くことが確認できた[4]。そ

の他、陽子弾性散乱同時計数法(ERCS)を用いた地球科学試料の水素分析では、データ解析手法の開発が進展している[5]。地球に降り注ぐ宇宙線の量と、大気中の雲の量に強い相関があることが報告され[6]、その要因として宇宙線が大気に入射した際、大気原子をイオン化し、その結果生成されたイオンが液滴形成を促していると考えられているが、その詳細はわかっていない。2006 年度より始まった雲粒形成シミュレーション実験では、イオンによる液滴生成機構を研究するため、20MeV 陽子ビームと、コロナ放電とを用いて試料ガスのイオン化を行い、発生した微粒子の粒径分布を測定している[7]。またAu、Br等の重イオンビームを利用したナノ精度加工の研究(産業技術総合研究所)が進展している[8]。その他、学部 3 年生を対象とした夏季特別実験や、高校生を対象とした加速器を用いた体験学習の実施及び施設見学(2006 年度見学者総計 566 名)など、加速器科学教育も当施設では重視している。表 1 に 2006 年度に実施された研究課題一覧を示す。

表 1　2006 年度 12UD ペレトロンタンデム加速器利用研究課題一覧

研究課題名	実施主担当機関	イオン種類	ターミナル電圧[MV]	実験日数
原子核実験分野				
α核の共鳴探査	筑波大	H (偏極)	7 - 9.5	8
陽子弾性散乱による硅素核の共鳴状態探査	筑波大	H	8	3
重陽子のクーロンストリッピングの研究	筑波大	D	1.5 - 3	11
加速器質量分析(AMS)				
隕石試料中の^{36}ClのAMS測定	首都大学東京	^{36}Cl	10 - 10.3	2
^{36}Clを用いた地球科学的研究	筑波大	^{36}Cl	10 - 10.3	21
加速器構造物中の^{36}Cl濃度測定	KEK	^{36}Cl	10 - 10.3	2
南極氷床コア試料のAMS測定	筑波大	^{36}Cl	10 - 10.3	26
^{129}I-AMSのテスト測定	筑波大	^{129}I	9.7	6
ビーム応用				
陽子ERCSによる水素分析	筑波大	H	10	10
重イオンビームを用いたナノ精度加工	産総研	Br, Au	10	19
雲粒形成シミュレーション	筑波大	H	10	11
検出器開発				
HPD(Hyblid Photo Detector)の応答時間測定	筑波大	C	10	2
シリコンストリップ検出器の放射線耐性実験	立教大	H	10	1
その他				
学部生対象夏季特別実験 (インビームγ線分光)	筑波大	O	10	1
^{89}Y(p, n)反応によるγ線検出 (高校生体験学習)	筑波大	H	9 - 10	2
放射線施設検査	筑波大	H	10	2
加速器ビームテスト	筑波大	H, O	10	2

4. 施設の現況

加速器施設は建設後 32 年を経過して、各所で老朽化による雨漏り、配管の破損などがおこっている。加速器自体は継続した保守整備活動及び研究開発により建設当初の性能を維持しながら、多くの改良が加えられているが、施設自体及び周辺装置の老朽化による影響が大きくなっている。特に、SF_6の高圧ガス製造装置の老朽化が大きな問題となっている。2006 年度は、11 月に加速タンクにSF_6ガスを充填・回収する為の高圧ガス圧縮機内部の冷却水配管に穴が開き、ガス配管や貯蔵タンク、加速タンク内に冷却水が流入する事故がおこった。2007 年 1 月に破損箇所を蓋う応急処置を実施したが、4 月の定期整備後に再度、高圧ガス圧縮機内部の冷却水配管が老朽化の為に破損し、ガス配管中に冷却水が流入したことが判明した。

高圧ガス圧縮機の開放検査の結果、3 段までのガス圧縮機構冷却水系の全てで水漏れが発生しており、冷却水系内部を全て作り直す必要が生じた。現在、加速タンク内の露点は、SF_6露点回復装置(大陽日酸東関東DPR-60)を用いて回復しているが、加速タンク内SF_6ガスの回収・充填ができない状態となっている。全面的な復旧は、2007 年 11 月の高圧ガス施設定期保安検査後を予定している。

また 2006 年度は、加速器施設内のアスベスト除去作業がおこなわれた。加速器棟の 3 階高圧ガス室と 9 階イオン源室及び 10 階のエレベータホールの天井部分にアスベストが建設材として使用されていた。2007 年 2 月から約 2 ヶ月間にわたり除去作業の為にこれらの部屋への立ち入りが制限された。特に 3 台のイオン源は防塵処置の為、それぞれのイオン源がベニヤ板等で覆われて完全に外部から遮断された状態に置かれた。長期間にわたり、イオン源の稼動及び整備ができない状況となった。またアスベスト除去作業後の室内の埃の除去や装置の復旧作業に手間取り、2007 年度のビーム供給開始は当初予定より一ヶ月遅れて、5 月連休明けにずれ込んだ。

5. まとめと今後

2007 年度より、本施設は文部科学省委託事業「先端研究施設共用イノベーション創出事業」【産業戦略利用】に採択された。これは、文部科学省が産業利用のポテンシャルが高い国内有数の先端研究施設を採択し、産業界への共用を通じて産業界利用や産学官の共同研究利用による具体的な技術課題の解決のための研究環境を提供するものである。採択された施設は、施設共用の運転実施に係る経費や民間企業が利用しやすい支援体制を構築するための経費を支援される。本施設の支援事業名は「高度制御加速イオンビーム産業利用によるイノベーション創出事業」であり、2 台の静電加速器を利用して、年間計 600 時間のビーム実験時間の提供を予定している。イノベーション創出事業の支援体制として、指導研究員 2 名、支援研究員 2 名、技術補佐員 1 名及び事務補佐員 1 名が専属で業務に当たっている。当施設では、このイノベーション創出事業を足懸かりに産業界への利用促進を図るとともに、加速器の新規利用者の拡大を目指している。

筑波大学タンデム加速器では上記のイノベーション創出事業の展開を図り、併せて加速器の改良を進めていく予定である。今後、現行のコロナ針に替えて分割抵抗体の導入を予定している。また、組み込みコンピュータによる ビーム輸送制御の開発を進めている。加速器の研究利用環境の整備については、イオンビーム分析研究の水素分析法、AMS、 PIXE 及び重イオン RBS 測定等を重点的に進める予定である。

References

[1] Y. Tosaki et al., Nucl. Instr. and Meth. B 259 (2007) 479.
[2] R. Seki et al., Nucl. Instr. and Meth. B 259 (2007) 486.
[3] K. Bessho et al., Nucl. Instr. and Meth. B 259 (2007) 702.
[4] K. Sasa et al., Japan Geoscience Union Meeting (2007) W160-007.
[5] T. Komatsubara et al., Nucl. Instr. and Meth. B 251 (2006) 237.
[6] K. S. Carslaw, R.G. Harrison and J. Kirby, Science 298 (2002) 1732.
[7] S. Tomita et al., 20th International Symposium on Ion-Atom Collisions (XX ISIAC2007), Abstracts 35 (PS26).
[8] K. Awazu et al., Journal of Applied Physics 100, 044308 Aug (2006).

1-2 国立環境研究所タンデム加速器分析施設 NIES-TERRA の現状

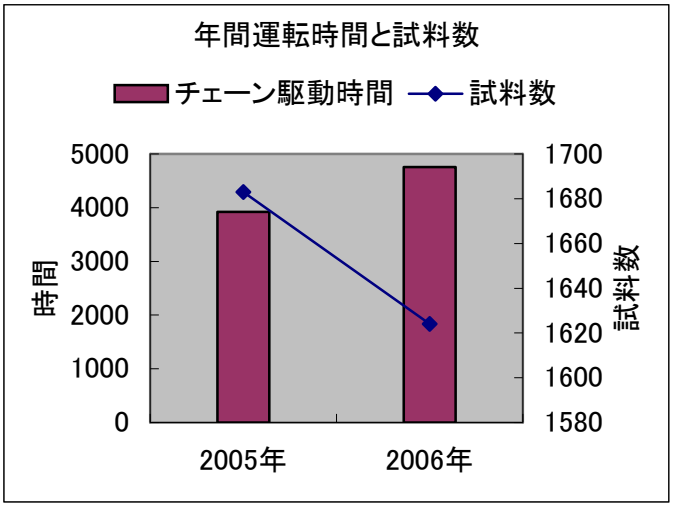
小林利行、小林千明　（株式会社 伯東）
内田昌男、瀬山春彦、田中敦、荒巻能史、植広崇嗣、柴田康行、鈴木亮
（独立行政法人 国立環境研究所 化学環境研究領域）
米田穣、鵜野光　（東京大学 大学院 新領域創世科学研究科）

1. はじめに

独立行政法人国立環境研究所タンデム加速器分析施設（NIES－TERRA）は、1995 年度に設置されて以来 12 年間、放射性炭素を用いた加速器質量分析（AMS）を中心に主として環境研究への応用を中心課題として研究を行ってきた。近年は初期段階でのトラブルも出尽くした感があり、長期に渡って測定が不可能となるような大規模な故障も無く順調に稼動していると言って良いだろう。本稿では昨年度の運転状況の他、保守整備、改修状況について報告する。

2. 運転状況

図1　年間運転時間と測定試料数



稼動以来の積算運転時間（チェーン駆動時間）は 2007 年 5 月の時点で約 53000 時間を記録している。2006 年度の運転時間は 4757 時間、測定試料数は標準試料を含め 1624 点であった。参考までに 2005 年度のデータを見ると運転時間が 3918 時間、測定試料数は 1683 点であった。測定試料数がやや減少しているにもかかわらず実際の運転時間数が 839 時間ほど増加している。これは電圧コンディショニングなどに時間を取られたわけでは無く、より高精度なデータを要求するユーザーが増加したためである。14C の環境研究への応用と一言で言ってもその研究テーマは多岐に渡るが、絶対的な年代測定というより、14C をトレーサー（指標）

として用いた測定が主となる。必然的にサンプル間の変動などを細かく検討する必要が生じ、統計誤差を減らすべく測定誤差の範囲内で14C カウント数を出来るだけ稼ごうとするため、どうしても測定時間が長くなりがちである。このため今年度中に、現在使用中のイオン源を新型のビーム増強型に改造する計画である。

3. 保守整備状況

表1 2006 年度保守整備記録

2006.3.3	所内大規模停電事故発生
2006.7.23	イオン源 Ionizer 交換
2006.8.10	MBS 電源（Trek P0647）冷却ファン交換
2006.12.27 ～12.28	加速器タンク開放 コロナニードル交換、GVM モータベアリング交換、内部清掃
2007.2.2 ～2.6	加速器タンク開放 加速管支持板を新型のアルミ製のものに交換

2006 年 3 月に研究所内で配電業者の作業ミスによる大規模な停電事故があった。この際、HE 側マグネット手前ターボポンプゲートバルブ（TPV03-1）が動作不良を起こし加速管に大気が混入した。幸い加速器は停止中であったため、IGC フィラメント（IGC03-1）一箇所を焼損するだけで済んだのは幸いであった。7月には Ionizar がショートしたので交換した。12 月にはコロナ電流の不安定さが目立ち始め TRV 制御時のターミナル電圧が一定に保てなくなったのでタンク内部の整備を行った。目視の結果、加速器内部の汚れ，特にコロナニードル周辺の汚れが目についたので特に念入りに清掃した。ニードルも交換したが、2005 年 6 月に交換済みである事から、目視ではっきり判別出来るほど先端が丸まっていた訳ではなかった。その際、ニードルホルダーとフィードスルーの接点が緑青を生じているのを発見した。接点付近は SF6 ガスの化合物らしき白い粉状の固まりが堆積しており、おそらくフィードスルーがきちんと嵌っていなかったためにこの箇所で放電が起きていたのだろうと推測される。この他、GVM モータが異音を生じていたため、ベアリングを交換した。

4. 加速管支持板の改良

当施設は最大電圧5MV の横型ペレトロンであるが、現在のところ、測定時のターミナル電圧は4．5MV で行っている。今まで積極的に電圧コンディショニングを行ってきたが、4．7MV 付近になると加速管の放電が始まり、それ以上の昇圧が難しい状況にあった。もっとも 14C の AMS を主眼としている現状では+4 荷のビームを得るに充分な電圧であり、不足があったわけ

では無いが、近い将来視野に入れている 36Cl の測定においては，最大の妨害同重体 36S の除去が不可欠であり，そのためには出来る限りターミナル電圧を稼がなければならない。また、通常測定時における不意の放電による測定停止を防ぐのに非常に効果が有りそうだという期待もあり、新設計の加速管支持板に交換した。

4－1） 製品仕様

旧支持板はルーサイトの一枚板であるが，新支持板はアルミ製のチューブサポートと片側5箇所のスパークギャップをニッケル製のコネクタで連結したものである

図2　製品図

旧

新

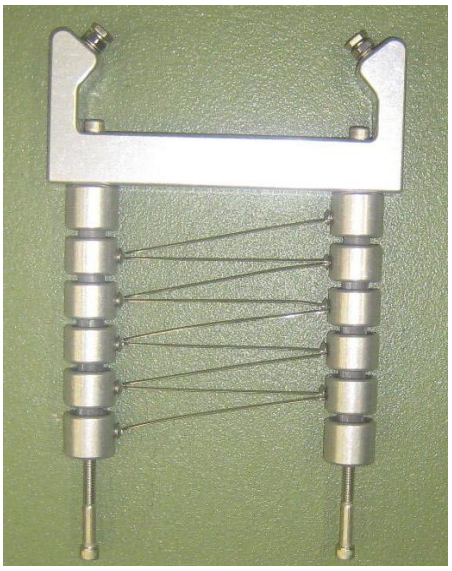
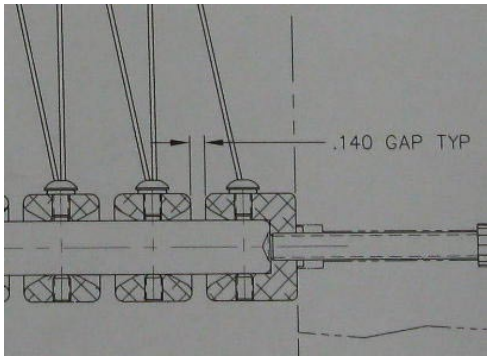


図3　スパークギャップ間隙



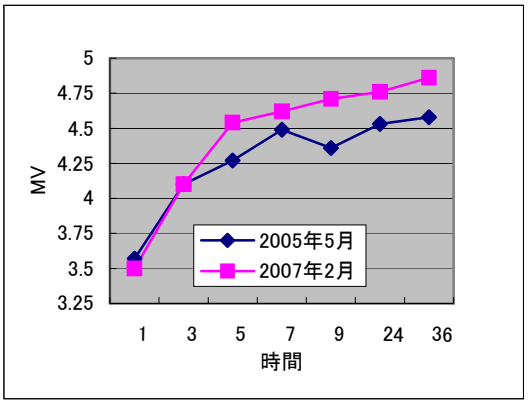
4－2） 仕組みと効果

この支持板の狙いであるが、放電時に起きたサージがカラムまたは加速管に伝達される前にスパークギャップで極小さい放電を起こし吸収してしまおうという事のようだ。従来のルーサ

イト製の支持板は加速管内での放電が起きた時，加速管～カラム間の抵抗が殆んど無いため，サージをカラムに直接伝えてしまい，カラムから絶縁ガス中を浮遊するゴミなどを介してタンク壁面との間で放電を誘発し，またはタンク内部での放電サージの影響が加速管に伝わり加速管内での放電を誘発するなど，一つのきっかけが雪崩式に放電を誘発させる現象があったと推測される。

4－3）作業後の所見

図4　タンク開放後電圧コンディショニング



図は前回2005年5月に行ったタンク開放後コンディショニング運転時と，今回作業を行った2007年2月のタンク開放後コンディショニング運転時における到達電圧と時間の関係であるが，前回より明らかな改善が見られた。通常，タンク開放後は4.5MV付近まで昇圧させるとで放電が頻発したり，軽いディコンディショニングが起こったりしてなかなか進まないのであるが，今回は 4.75MV付近まで一度の放電も無く順調に進んだ。4.85MV付近では加速管の放電が頻発したが，インターロックが掛かる程の真空の悪化を伴う大規模な放電は皆無であり，通常測定電圧の 4.5MVでの安定性も大きく向上した。改良後現在まで放電による真空悪化で測定が中断された事が一度も無い事だけでも大いに効果が有ったと言える。

5. 今後の予定

先に述べたように測定時間の短縮が急務であることから、新設計のIonizerを備えたビーム増強型イオン源への改造を早期に実現したい。また、今後の課題として、ホウ素との分別が困難で未だ実験段階を出ていない10Be の定常測定の実現、36Cl についての予備実験を進めていきたい。

参考文献

（1） 米田穣、柴田康行、田中敦、内田昌男　他：NIES-TERRA の現状と AMS 研究.
第14回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告書. pp.27-30（2001）

1-3 東京大学ＭＡＬＴ加速器施設の現状

中野忠一郎 1)、松崎浩之 1)、春原陽子 1)、森田明 1)、
伊藤誠二 1)、宮入陽介 1)、松四雄騎 1)、阿瀬貴博 2)
1)東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻
2)東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

1. はじめに

東京大学 MALT(Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator, The University of Tokyo)では、タンデム加速器を利用し発生する良質なイオンビームを用いたさまざまな微量元素分析システムが開発されている。加速器質量分析(AMS: Accelerator Mass Spectrometry)では ^{14}C をはじめ ^{10}Be, ^{26}Al, ^{36}Cl, ^{129}I 等の核種を高感度・高精度で測定可能である。またこのほかに核反応分析(NRA: Nuclear Reaction Analysis) や粒子線励起 X 線分析（PIXE: Particle Induced X-ray Emission)などの分析システムも開発されている。

2005 年 4 月の改組で MALT の所属する原子力研究総合センターは大学院工学系研究科原子力国際専攻となった。それに伴い、MALT（5UD Pelletron(NEC), Van de Graaf type, 5.0MV）と旧原子力研究総合センター共用設備管理部門の RAPID（Tandetron 411HC(HVEE), Cockcroft-Walton type, 1.7MV）は同じ所属となり、現在この 2 台の加速器を含めて「MALT」と呼んでいる。なお、RAPID は数年後に廃止が決まっている。

本報では MALT（5UD Pelletron）について述べる。

2. 運転状況

図 1 に MALT の加速器稼働時間の推移を示す。共同利用開始から 2001 年度まで年間の加速器稼働時間に凸凹が見られる。加速器稼働時間の減少は、加速器の性能改善のための作業、また故障とその対策に時間を割かれたことによる。例えば、1997 年度は加速管の再アライメントと大口径ストリッパーキャナルの取付等の作業があった。1999 年度は S2 イオン源を Alphatros から MC-SNICS へと交換した。また入射イオンビームの変動対策があった。2001 年度は加速管の真空漏れという事態が生じ、共同利用開始までにほぼ 3 ヶ月を要した。2002 年度からは大きな故障もなく、年度ごとに大幅な加速器稼働時間を更新してきた。

2006 年度(平成 18 年度)の MALT の稼働時間は 7075.5 時間で、ほぼ限界と思われていた 2004 年度、2005 年度の 6,248 時間、6,234 時間を 800 時間以上も越えたものとなった。また加速器総稼働時間は 55,711 時間となっている。なお、2007 年 7 月 10 日現在は 57,100 時間となっている。加速器稼働時間が増えた要因として、先ず共同利

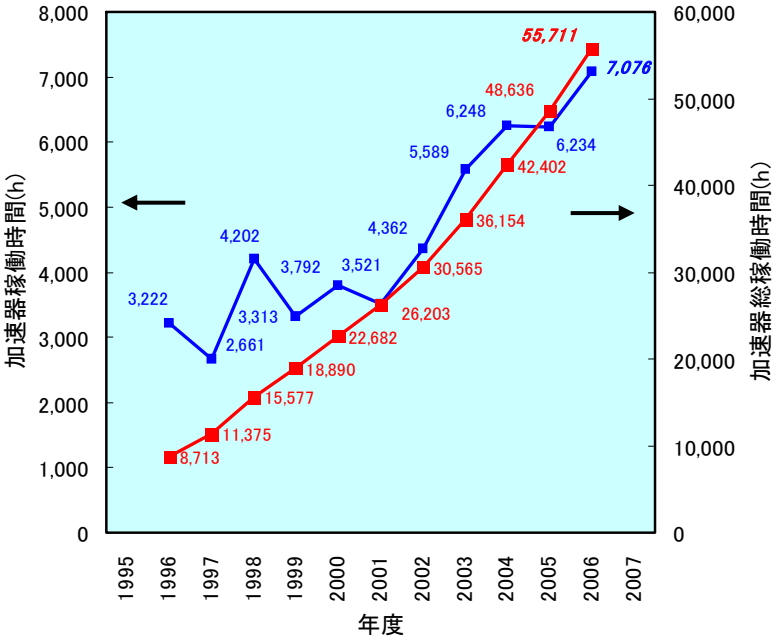


図 1 MALT の加速器稼働時間の推移

用の増加があげられる（表 1 参照）。次ぎに自動コンディショニングプログラムの開発等がある。このプログラムよりオペレータが常時制御盤前に張り付き監視する状態が緩和され、コンディショニングにおける負担が軽減されることとなった。しかし、マシンタイムがタイトでコンディショニングに十分な時間が取れない現状が続いていることに変わりはない。

2006 年度の MALT の利用状況を図 2 に示す。AMS が全体の 67%を占めている。そのなかで ^{14}C-AMS が 26%であり、加速稼働時間の 1/4 強を占めている。また例年に比べ、NRA が 18%と増えており、PIXE のマシンタイムが相対的に減少している。

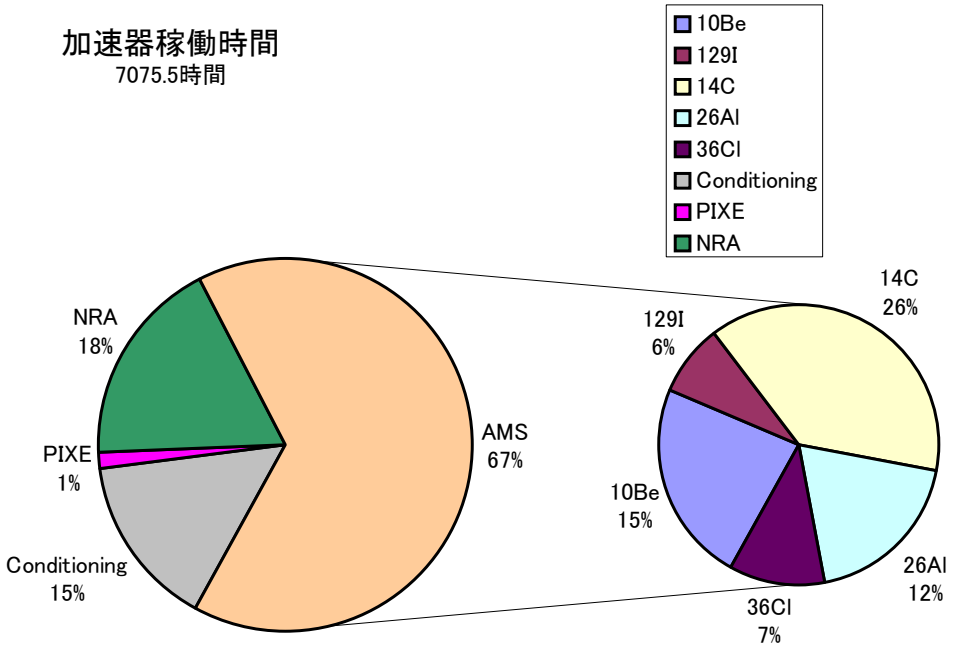


図 2　2006 年度の MALT の利用状況

表 1 に 2006 年度（2006 年 4 月～2007 年 3 月）における ^{14}C、^{10}Be 及び ^{26}Al の未知試料測定実績を示す。MALT ではビームの通りを再検討し、入射イオン電流を大きくし、大幅な測定効率の向上をはかっている。その結果、2006 年度の ^{14}C、^{10}Be 及び ^{26}Al 未知試料測定実績はそれぞれ 1,541 試料、1,113 試料及び 843 試料であり、総計 3,497 個となっている。

表 1　2007 年度(H18 年度)測定実績

	^{14}C-AMS	^{10}Be-AMS	^{26}Al-AMS
未知試料測定実績	1,541 個	1,113 個	843 個
電　流	15～20 μA	4～5 μA	200～300nA
	MFC02-1,^{12}C^{-}	MFC02-2,^{9}Be^{16}O^{-}	MFC02-4,^{27}Al^{-}
Background	^{14}C/^{12}C < 3X10^{-16}	^{10}Be/^{9}Be < 1X10^{-14}	^{26}Al/^{27}Al <1X10^{-15}

2007 年 6 月初め、2 本のペレットチェンの内の 1 本(Chain#1)のターミナル部 12 inch Sheave 用ベアリングが破損し、Hub シャフトを削るという事態が発生した。現在、残りの Chain#2 のみで電荷を搬送し、マシンタイムを消化している（詳細は保守・整備状況を参照）。なお、8 月に修理を実施する予定である。

3. 保守・整備状況

2006 年度は加速器にまつわる大きな故障は発生していない。しかし、加速器設置後 13 年

を経過し、加速器稼働時間も 55,000 時間を越えるにおよび小さなトラブルが頻出している。例えば、Extractor 電源の出力保護抵抗の焼損をはじめとして測定中での放電における Accel-NET のダウン、入射マグネット用電源のトランジスターバンク内パワートランジスタの焼損、イオン源用フレオン冷却ポンプの交換（軸受けの摩耗のよる異音）、軸浮上 TMP の電源交換、高エネルギーマルチファラディーカップの点検等がある。そんな中、2007 年 6 月に chain#1 のターミナル部 12 inch Sheave 用ベアリングが破損という大きな故障が発生した。ここでは、この故障と 2006 年 4 月に実施した Accel-NET の更新及び Probe(コロナ針)の交換について詳細する。

3.1 ターミナル部 Chain#1 チャージングシステムの故障

2007 年 4 月定期メンテナンス終了後の 5 月より共同利用を開始する。Conditioning、^{10}Be-AMS、NRA、^{14}C-AMS と順調にマシンタイムを消化した。6 月 1 日より ^{129}I-AMS に実験に入るが、Chain#1 の搬送電荷が安定しない状態となった。モニターしている Strip chart graph において Chain#2 の搬送電流の振れ幅が±1%に対して Chain#1 は±10%と大きい。また、Chain#1 の搬送電流値が次第に減少し始め、コンディショニングにおいてはターミナル電圧が高い時も、また低い時も放電が発生するようになった。

加速器タンクを開けた時の内部の様子を図 3 に示す。ターミナルシェル近傍のタンク内壁にはシェルの隙間と同位置に薄黒い汚れが帯状に付着している(a)。またターミナル内の、Chain#1 の Support plate (lucite)近傍には金属の細かい切り粉状のものが積もっている(c)。高エネルギー側の Column base plate の表裏とも拭き取るには困難なほど多量の汚れが付着しており、電気掃除機で吸い取る状態であった(b)(d)。

(a)タンク内壁
Terminal shell 近傍

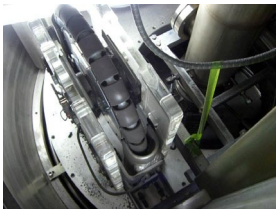
(b) Column base plate 上の汚れ

(c) Terminal 内
Chain#1 取付付近

(d) 清掃の様子
電気掃除機に毛ブラシを付けて汚れを吸い取る

図 3 加速器タンク内の様子

図 4 にターミナル部の Chain#1 charging system の状態を示す。Pellet chain の表面は一面黒い汚れが付着している。また、Pellet chain が Inductor に接触しているのが理解される(a)。(b)は Support plate より取り外した 12 inch Sheave に固定された Hub とベアリングを示す。Hub のシャフトがベアリングにより削られているのが観察される。(c)はベアリングを持ち上げた状態で、ベアリングハウジングにより Hub 本体が削られ溝ができているのが分かる。何らの原因でベアリングが Hub のシャフトを削り込み、その結果 12 inch Sheave に外方向（ベアリング側）への力が加わり移動し、Hub 本体をも削りこんだと考えられる。ターミナル内や Column base plate、Pellet chain 表面などの薄黒い汚れは、これらの切り粉や Pick-off idler pulley などの導電性ゴムの削られたものである。Chain#1 の搬送電荷の変動幅が大きいことや次第に減少してきた原因は図 4(a)が主な原因と



(a) Pellet chain と Inductor

(b) Hub のシャフトとベアリング

(c) Hub の状態

図 4 ターミナル部の Chain#1 charging system の状態

考えられ、またコンディショニング時の低いターミナル電圧での放電はこれら導電性の切り粉が原因と思われる。2007 年 4 月の点検整備以後、ベアリングによる Hub シャフトの削り込みといった事態が急速に進行したものと想定される。

現在、Chain#1 を取り外し、Chain#1 用ドライブモーターの固定などの応急処置を施し、Chain#2 のみで稼働し、マシンタイムを消化している。なお、Chain#2 のみでも安定したターミナル電圧を発生している。なお、これらの修理は 8 月に実施する予定である。

3.2 Accel-NET の更新

更新前のハードウェアは、制御室に MALT-1,-2,-3 の 3 台の PC（Pentium200MHz）、標的室に 2 台にターミナルサーバ、また 5 階イオン源室に MALT-5 の PC と 1 台のターミナルサーバで構成され、これらは 10 base 2 で接続されていた。更新後は、main system PC と 2 台の satellite PC 及び 2 台の network Hub となり、これらは 100 base T で接続されている。また 5 階と 1 階との信号伝達は光ケーブルを用いている。Diagrammatic display として satellite PC 1 台と 32 inch LCD display がセットされた。3 台あったターミナルサーバは satellite PC と USB to 16 port RS232C adapter 各 3 セットに変更された。HDD を持つのは main system PC のみで、他の satellite PC は CD boot となっている。なおソフトウェアもアップグレードされ、また OS は Scientific Linux となった。図 5 に更新後の制御盤周辺を示す。

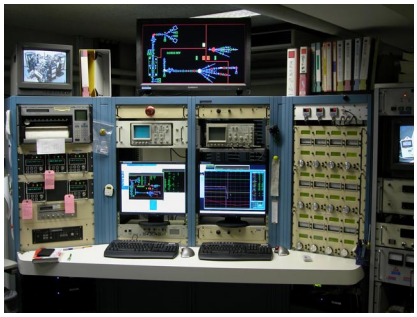


図 5 更新後の制御盤

3.3 Probe(コロナ針)の交換

MALT では年 1 回 4 月に実施する加速器の点検整備時に Terminal shell での放電痕を観察し、Probe（以下コロナ針という）の交換時期の目安としてきた。加速器設置時から現在まで 1997 年 8 月及び 2000 年 4 月、2004 年 4 月と 3 回の交換を実施した。図 6 に 2007 年 4 月における Terminal shell 上のコロナ針による放電痕を示す。コロナ針を 3 本使用しているが、コロナ針が消耗しており二つの放電痕しか見られない。またその放電痕も同形とはなっていない。図 7 に消耗したコロナ針を示す。右側 1 本は未使用のものである。

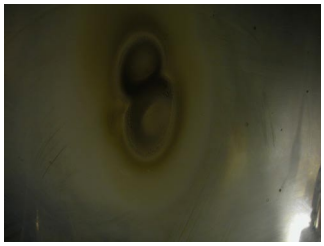


図 6 Teminal shell 上の放電痕

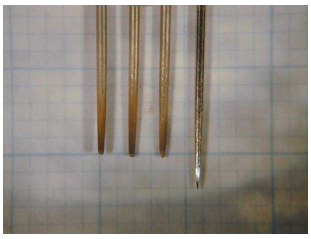


図 7 消耗したコロナ針

MALT ではコロナ針として和裁用の縫い針を使用している。針先が非常に硬く鋭い上に、消耗しにくいという特徴を併せ持っている。また安価でもある。

4. まとめ

2006 年度、MALT の稼働時間は 7075.5 時間で、また総稼働時間は 55,711 時間となり、順調に稼働している。しかし、2007 年 6 月に Chain#1 のターミナル部 charging system の故障に見舞われた。現在、Chain#2 のみで稼働中だが、これでも安定した性能を発揮している。なお、修理は 8 月中に実施する予定である。

1-4 若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状

羽鳥　聡、栗田哲郎、林　豊、山田裕章、森　順一、濱地寿和、木村　忍、霜田　勉、
廣戸　慎、島田麻亜久、橋本鉄也、小田桐哲也、大谷暢夫、山本久雄、福本貞義
財団法人若狭湾エネルギー研究センター

1.　はじめに

若狭湾エネルギー研究センター (WERC) では、粒子線の材料研究，生物学、医療や元素・同位体分析への応用目的で，加速器施設を運用している。図 1 は加速器施設の概要を示したものである。

1999 年からの建設、ビームコミッショニング以来、2005 年度 (2005 年 4 月～ 06 年 3 月）にはじめて計画外の停止もなく、4400 時間超の運転時間を記録したが，昨年度（2006 年度）は高周波発振器および高周波トランスの故障により，定期検査を 1 ヶ月前倒ししなければならず，その結果，いくつかのマシンタイムの中止を余儀なくされ，伸び続けていた運転時間も前年度を下回る 4340 時間であった。

高周波トランスの点検は、作業性の悪さから，対地電圧の一番高くなる数枚のパンケーキコイルしか実施してこなかったが，今回の故障をきっかけとして、今後の定期点検の計画も見直す必要性が生まれてきた。

加速器施設の最近の利用状況、トレンドもある特徴を示すようになり，それにともなう運転方法も確立しつつある。しかし、最近、福井県から打ち出されたエネルギー研究拠点化構想により、当センターにおける医療照射も近く終了する予定であり，今後のテーマ開拓、それにともなう、施設の再整備が必要となってくる。

本稿では，現在の加速器の利用状況、センターを取り巻く環境の変化について報告する。高周波トランスについては、稿を割いて詳しく報告する [1]。

2.　2006 年度施設運転状況

2006 年度の運転は前年度定期検査を 06 年 3 月 10 日に終えた後に開始した。3 月から治療開始の 6 月まではスパッターイオン源からは炭素ビームを引き出し，荷電変換型イオン源からの水素、ヘリウムビームを用いた実験を行う。

6 月から 07 年 1 月までは治療を含む利用を行うため，スパッターイオン源からは水素パルスビームを引き出す。治療は 11 月末まで行われ，その後，RF トランスや発振器の故障が発見され，以後予定されていた実験を中止し，トランスや発信器の修理を行うとともに、２～３月に予定されていた定期検査を前倒しして行った。高周波トランス関係の修理および

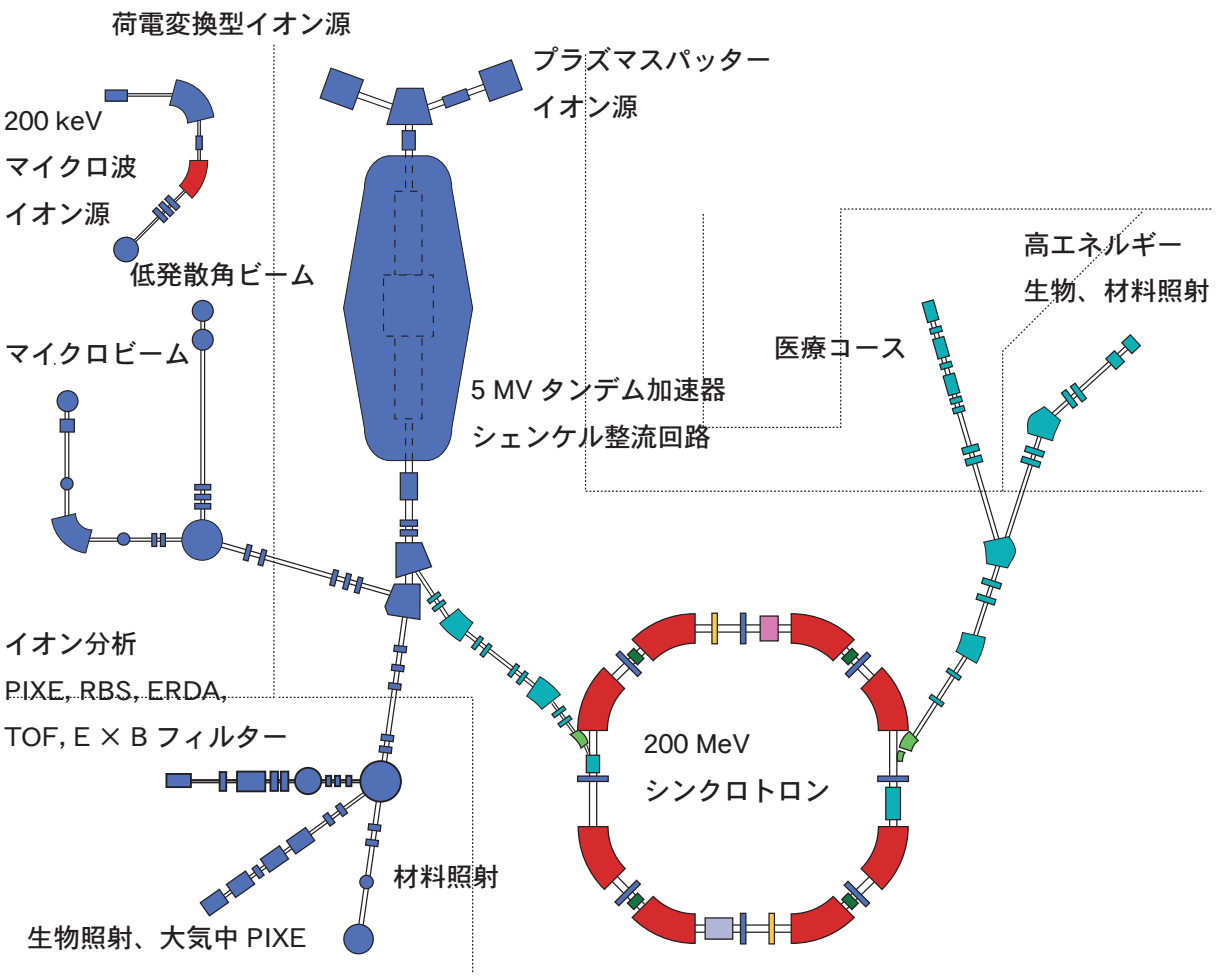


図１　若狭湾エネルギー研究センター加速器施設

定期検査を終えた後，２月末より、炭素ビーム利用実験を開始した。

図２に 2006 年度のタンデム運転時間の内訳を示す。加速ビーム種とエネルギー別、実験テーマ別により示してある。総運転時間は 4340 時間であった。

タンデム加速器をその最高加速電圧 5 MV で運転する場合は、シンクロトロンへの入射器としての利用が殆どであり、運転時間の 57 %をしめる。さらに、その６割は医療関係であり，シンクロトロン開発実験、品種改良、生物照射が続く。

全体の半数弱のタンデムビームラインを用いた実験では、ターミナル電圧 2.5 MV 以下での利用が大多数をしめる。RBS、チャネリング、PIXE などのイオンビーム分析や炉材損傷のシミュレーションなどが行われている。とくに、ターミナル電圧の GVM フィードバックの行いにくい２ MV 以下での運転が増加してきている。高周波発振器の発振管 B 電源の安定化（AVR 利用）により、GVM フィードバックの解除運転が比較的安定して行えるようになっており，このような低電圧運転時は GVM フィードバックは行っていない。

3.　高周波発振器と高周波トランスの故障

タンデム加速器の加速電圧は高周波電圧をカスケード整流器で整流、平滑化してえている。

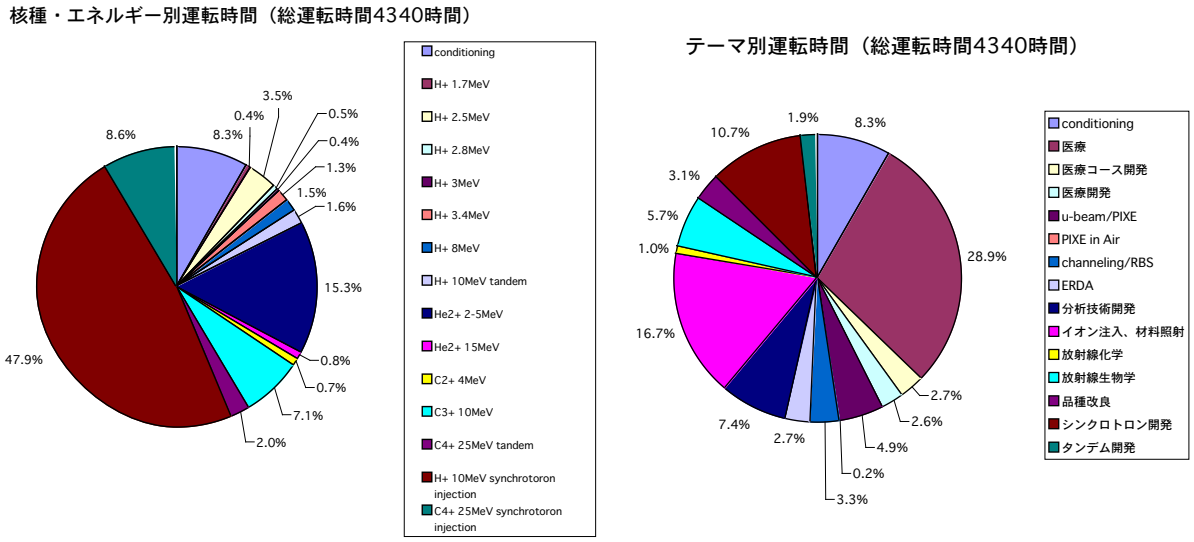


図　２００６年度タンデム高圧運転時間

運転時間は 4340 時間であった。左は加速核種、エネルギー別にまとめたもの、右は利用テーマごとにまとめたものである。実験や医療に用いた時間は実際の利用時間の前の立ち上げ，待機時間も含んでいる。コンディショニング時間はスケジュールされた実験利用以外の時間で，マシンの調整や電圧コンディショニングを行った時間である。

高周波電圧は、おもに、タンデム圧力タンクと高周波電極で形成される静電容量および高周波トランスの 2 次コイルから形成される（並列）共振回路の共振周波数でトランスの一次側を他励振することでえられる。一次側の発振は、三極管のグリッドを MOS-FET でスイッチングにより、行う。

今回の事故の前兆として、ターミナル電圧が安定しているにもかかわらず三極管のプレート電流が漸増することが観測された。共振回路内でダンピングを起こし、かつ、その度合いがだんだんと大きくなる、たとえば、高周波電極の対地放電などが予想されてはいたが、実験期間中であったことや、近く、定期検査が予定されていたこともあり、そのまま運転を行った。ついには、グリッドドライバーの MOS-FET を破損するにいたり、発振器の修理とそれにいたる原因調査と修理を行うこととなった。

詳しくは霜田 *et al* の報告 [1] を参照されたいが、発信器故障にいたる原因は、高周波電極へのフィードラインと RF トランスを収納するタンクとの間の放電であった。対地放電を起こす理由の考察や、また、トランスを構成するパンケーキに見られる放電痕の原因の考察が、トランスの完全解体による点検、修理の過程で行われ、[1] にまとめてある。

今後の定期検査では、高周波トランスの解体による点検を追加し、昇圧試験では、プレート電流が安定であることも合否判定基準に加えていくこととした。

4.　若狭湾エネルギー研究センターをとりまく状況の変化

2005 年、福井県が「エネルギー研究拠点化推進計画」を打ち出す。その中で、2009 年

度より、「陽子線がん治療を中心としたがんの研究治療施設の整備」を行うことがうたわれている。現在、若狭湾エネルギー研究センター加速器施設において主要なテーマとなっている陽子線がん治療研究は、この計画により、終了することになる。

また、「拠点化計画」の中で、若狭湾エネルギー研究センターの役割として、2005 年度より、「県内企業の製品化を目指した研究開発」、「県内外の企業や大学への施設設備の開放」などを担い、行うこととされている。

「実」を生み出すことに直結する研究が重要視されるのは昨今の風潮ではあるが、現在、タンデム加速器を用いた実験では、イオンビーム分析や、放射線損傷の研究が軌道に乗ってきており、今後もこのテーマは維持しかつ、あらたな分析手法やシミュレーション手法の開発を行っていくことは重要なテーマであると考える。

「製品化」に関しては、現在、生物、農業分野での応用がもっともその目的に近く、実際、種苗改良において製品化されたものもある。タンデムビームやシンクロトロンビームを用いる生物、農業研究はひとつのテーマになりうる。

一方で、文部科学省が 2007 年度より進める粒子線がん治療の専門人材育成プログラムの実施機関に選定されており、施設を使った現場実務研修を通じ、医師や放射線技師、医学物理士の養成に５年間取り組むこととなっている。

しばらくは、軸足も定まらない状況が続きそうではあるが、新たなテーマ開拓、それにともなう、施設の見直しは必要となる。

5.　まとめ

タンデム加速器からのビームを用いたイオンビーム分析、損傷シミュレーション、また医療や生物照射などのためにシンクロトロンへビームを入射するなど、タンデム加速器の運転は順調に行われていたが、高周波発振系の故障により、一部利用のキャンセル、定期検査の前倒しなど、計画変更を余儀なくされた。この故障の経験から、定期検査項目の見直しも検討された。

タンデム加速器の利用方法は現在、ほぼ確定し、運転方法も確立しつつある。しかし、県や国の計画により、将来の研究テーマは流動的である。あらたなテーマを開拓し、必要な施設整備、運転方法や実験手法の開発を検討、実施にうつすことが急がれる。

参考文献

[1]　霜田 et al, somewhere in these proceedings.

1-5 名古屋大学 AMS ^{14}C 測定の現状と応用(2007)

中村俊夫*、南　雅代、小田寛貴、池田晃子、工藤雄一郎、大森貴之、西本　寛、
林　和樹、太田友子、西田真砂美
名古屋大学年代測定総合研究センター　加速器年代研究分野
(*e-mail:nakamura@nendai .nagoya-u.ac.jp, Tel:052-789-3082,Fax:052-789-3092)

１．はじめに

名古屋大学年代測定総合研究センターに、1997 年 3 月に設置された High Voltage Engineering Europe 社製 Tandetron (Model4130-AMS)は、放射性炭素測定専用のシステムである。Cs スパッタ負イオン源（Model 864B）、リコンビネーター式炭素負イオン入射器、3MV ベースのタンデム加速器、110 度および 90 度曲げ角度の質量分析電磁石２台、33 度曲げ角度の静電デフレクタ、およびイソブタンガスを用いる電離箱検出器からなる．本年代測定システムでは、特に、リコンビネーターシステムを用いており，炭素 ^{14}C, ^{13}C, ^{12}C の同時測定が可能であり、^{14}C/^{12}C, ^{13}C/^{12}C 同位体比を高精度に測定できることが特徴である。1999 年 1 月に ^{14}C/^{12}C, ^{13}C/^{12}C 比測定の検収を終了し、2000 年度から学内共同を開始した（Nakamura et al. 2000; 2004）。ここでは、2006 年 6 月の始めから 2007 年 5 月末までの１年間の故障例など、運転の状況をまとめる。また、^{14}C 測定の実験室間比較や応用研究について報告する。

２．2006/06-2007/05 の間の運転状況の概要

2006 年の前半は、^{14}C 測定システムの利用はほぼ順調に進行した。しかし、後半の 6 月 10 日に加速器の高電圧制御に不具合が生じ，さらに漏洩放射線量が増加したため加速器タンクをオープンし、部品の取替修理を行った。この際に，ターミナルポンプ駆動系の保守も実施した．しかしながら、加速器の高電圧は安定せず，高電圧のスパークが頻発した．この間，冷却水循環系のパイプに銅の酸化物が沈着し，流水量が減少して冷却能力が低下する事態が発生した．このため，目詰まりした冷却水パイプの一部を交換した．9 月には，高電圧の放電により，高電圧発生用のダイオードの働きが悪くなったため，10 月に加速器タンクを再度開き，高電圧発生部の保守点検を行った．不具合のあるダイオードが 150 個に達した．抵抗器も５個交換した。2006 年 6 月始めから 2007 年 5 月末までの 52 週のうち 17 週間を運転することができた。測定したターゲット数は 721 個である（図１，２）．

表１ 年間の測定数と測定時間

項目 / 年	測定ターゲット（個）			測定時間（時間）	
	年間	月平均	積算数	年間	月平均
1999	330	28	330	352	29
2000	1430	119	1,760	2234	186
2001	2077	173	3,837	3161	263
2002	1003	84	4,840	1545	129
2003	1979	165	6,819	3219	268
2004	1679	140	8,498	2837	239
2005	1771	148	10,269	3456	288
2006	1115	159	11,384	1586	264
2007(5 月末まで)	449	90	11,833	840	168

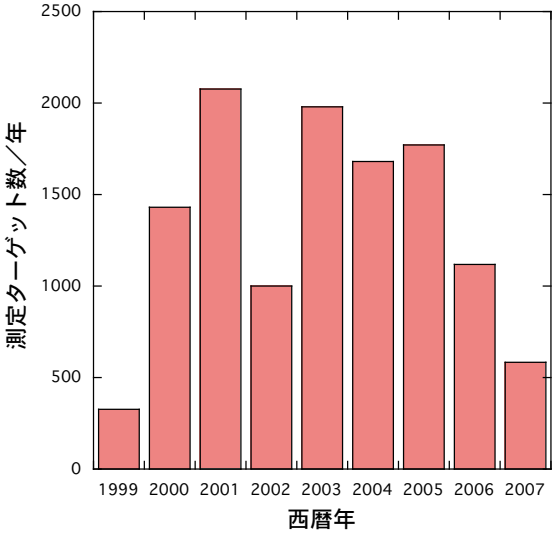


図１　各年の測定ターゲット数
2007 年は 5 月末までの集計

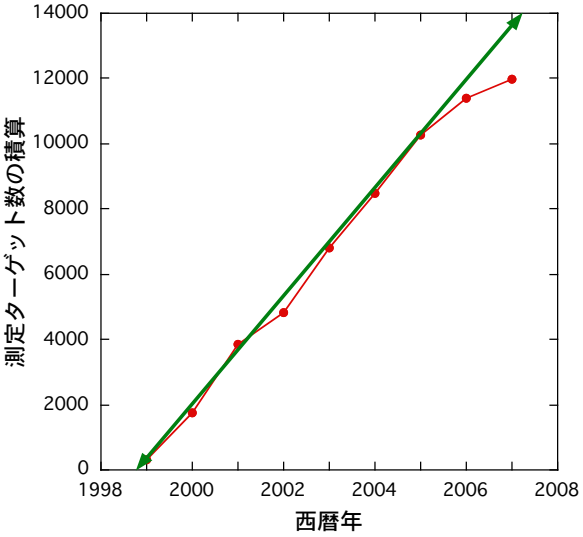


図２　ターゲット測定数の積算

３．作業や故障の例

2006 年 06 月始めから 2007 年 05 月末までのタンデトロン２号機の運転の概要を表２にまとめて示す。この間の主たる不具合は、

１）加速器高電圧の放電によるシステムの不安定,

２）冷却水の冷却能力不足による高エネルギー分析電磁石電源の自動停止によるトラブル、

であった。１）については、2006 年 10 月 4 日ー同月 12 日の間に加速器タンクを開けて、高電圧発生電源回路の高周波トランス、ダイオード、抵抗などを点検した。しかし、その後も高電圧のスパークが継続し､2006 年 10 月 31 日から 2007 年 7 月 7 日までの 8 ヶ月間に 30 回の高電圧スパークが発生した。30 回目のスパークで、加速器高電圧が不安定になったため、再度、加速器タンクを開けて点検することが不可欠となった。この間の高電圧スパークにより、高電圧コントロール用の制御ボードが２回、また高電圧出力トランスフォーマーの断線破損など、電気回路の破損による不具合が発生した。

２）については，冷却水パイプの交換，冷却水の取替およびリザーバータンクの洗浄を 2006 年９月、2007 年 3 月、2007 年 7 月の３回行い、その都度どうにか ^{14}C 測定が出来る状態に回復している。抜本的な対策を講ずる必要がある。これについては、広島大学の西山文隆氏からパイプ洗浄剤に関する情報を得ており、今後活用する予定である。

写真１　交換したダイオード 154 個

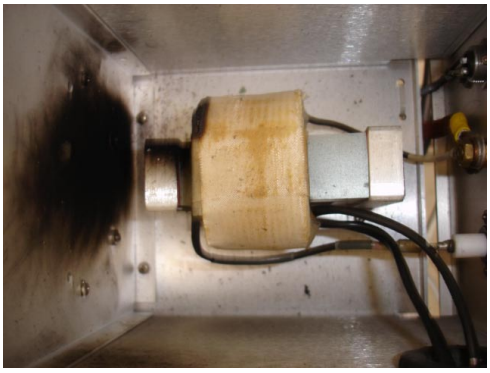


写真２　高電圧のスパークにより焼けて
断線した高電圧出力トランス

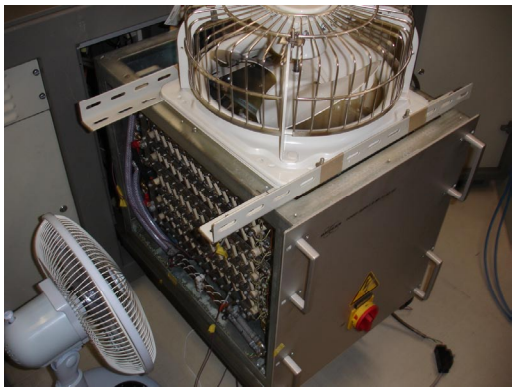


写真３　分析電磁石電源ユニット
水冷式だが、強制空冷も併用

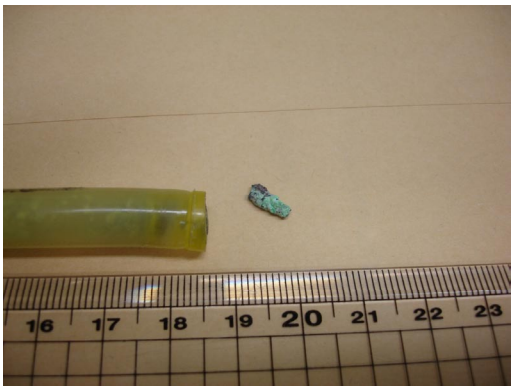


写真４　分析電磁石電源ユニットの冷却水
パイプの詰まり

表２　年代測定装置関連の不具合の状況（2006ー2007/05）

2006 年	
2/14	・加速器高電圧スパーク（電圧制御 PCB ボード破損）（１回目）
6/20	・HV conditioning の途中で放射線レベルが増加 加速器タンクオープン，内部の点検
6/26	・ターミナルポンプ駆動系を改良型に交換
7/23	・Q-snout のバイアス電圧の取り換え
9/09	・マグネット電源の冷却水パイプの詰まりにより、パイプの洗浄・交換
9/17	・Q-factor の低下 タンデトロンタンクのオープン修理 ダイオード　154 個（写真１）、 抵抗器　5 個、 などの部品交換
11/26	・高電圧コントロール用の PCB ボードの破損による取替（２回目）
12/27	・高電圧出力側のトランスフォーマーの断線，交換品の発注（写真２）
2007 年	
2/16	・高電圧出力側のトランスフォーマーの取付
3/23	・マグネット電源の冷却水パイプの詰まり（２回目）（写真３，４）
4/5	・高電圧コントロール用の PCB ボードの破損による取替（３回目）
4/7	・イオン源のターゲット交換制御回路の破損
7/7	・高電圧出力不良によりタンクのオープン修理を決意
7/4	・マグネット電源の冷却水パイプの詰まり（３回目）

４．　^{14}C 測定の応用研究

5 千年前よりも若い試料では、ほぼ定常的に±20ー±30 年の誤差（１標準偏差）で年代測定が可能である(Nakamura et al, 2004)ため、文化財科学や考古学関連のさまざまな資料の年代測定に利用が期待されている。個々の応用例については、紙面の都合上ここでは論じない。本報告書や、既刊の名古屋大学加速器質量分析計業績報告書（1988ー2007）に掲載されている報文を参考にして頂きたい。報告書の目次は当センターのホームページ（www.nendai.nagoya-u.ac.jp）で公開されている。昨年のトピックスとして、高度 5000m のチベット高原で採取した植物・湖水中の無機炭酸の ^{14}C 濃度を以下に報告する。

５．　環境 ^{14}C 濃度測定

2006 年 8 月に、中華人民共和国チベット高原のプマユムツォ湖にて行われたボーリングによる湖底堆積物の採取を主とする環境調査に参加する機会を得た。これは東海大学を主とする日本グループとチベット高原研究所を主とする中国グループとの共同研究である。2001 年から現地調査が行われ、研究成果が報告されつつある。

2006 年 8 月の調査において、プマユムツォ湖の湖水および周辺陸上植物の採取を行い、それらの試料の ^{14}C 濃度測定を行った。測定の結果を表３に示す。プマユムツォ湖の湖水および周辺陸上植物の ^{14}C 濃度はよく一致している。その濃度を、琵琶湖湖水および周辺植物の濃度と比較すると、プマユムツォ湖関連試料の方が ^{14}C 濃度が高い傾向にある。この違いは、高度が高く ^{14}C 生産量が高いためと解釈するより、琵琶湖周辺の方が、化石燃料消費現場に近く、化石燃料の消費により放出される ^{14}C を含まない二酸化炭素放出による ^{14}C 濃度の希釈効果と解釈できる。さらにデータを増やして、きちんとした報文を作成したい。

表３　チベット高原プマユムツォ湖と琵琶湖周辺試料の ^{14}C 濃度の比較

	プマユムツォ湖（2006 年採取）	琵琶湖
周辺陸上植物	草木植物 ^{14}C:1.086±0.014 ^{13}C:-24.8±1.14‰	大津市琵琶湖湖岸の松葉 ^{14}C:1.064±0.021　(1996 年採取) ^{14}C:1.057±0.010　(1997 年採取)
湖水の無機炭酸 (Dissolved inorganic carbon: DIC)	DIC:3.2-3.3mmol/kg ^{14}C:1.082±0.001 ^{13}C:+1.2～+2.1‰	DIC:0.5-0.6mmol/kg　(1995/96 年採取) ^{14}C:1.030～1.045　(1995/96 年採取) ^{13}C:-5.5～-4.0‰　(1995/96 年採取)

６．まとめ

以上に述べたように、2006 年 7 月からの１年間は、AMS ^{14}C 測定システムは極めて異常な状況にあった。しかし、ともかくも ^{14}C 測定を優先したのは、測定試料の蓄積がその理由に他ならない。しかし、高電圧スパークの原因の追求をおろそかにしたことには問題がある。言い訳でしかないが、測定試料の増加、装置保守に関わるマンパワー不足などにより、保守・点検・改良に十分な時間がとれない事情による。しかし、“急がば回れ“ということわざが諭すように、抜本的な対策をきちんととって、問題を解決して先に進んだ方が、応急処置を施して進むより、目的達成（短時間に、沢山の試料を、精度・確度よく測定する）の近道であると確信している昨今である。

謝辞

タンデトロン加速器質量分析計の改造、保守、運転のための消耗品類の開発などで、名古屋大学全学技術支援センターの教育・研究技術支援室の皆様には大変お世話になっています。また、日本原子力研究開発機構むつ事業所の北村敏勝、天野　光、甲　昭二の３氏には、同事業所で準備されている保守用の部品をお貸し頂くなど便宜を図って頂いています。また、退職された吉岡茂雄氏にも、ご厚意に甘えて緊急時にはご助力いただいております。ここに、記して深く感謝致します。

参考文献

名古屋大学加速器質量分析計業績報告書(1988～2007) (I～XVIII)、名古屋大学年代測定総合センター.

T. Nakamura, E. Niu, H. Oda, A. Ikeda, M. Minami, H. Takahashi, M. Adachi, L. Pals, A. Gottdang, and N. Suya (2000) The HVEE Tandetron AMS system at Nagoya University. *Nucl. Instrum and Methods in Physics Research*, B172, 52-57.

Nakamura, Toshio, Etsuko Niu, Hirotaka Oda, Akiko Ikeda, Masayo Minami, Tomoko Ohta and Takefumi Oda (2004) High precision ^{14}C measurement with the HVEE Tandetron AMS system at Nagoya University. *Nucl. Instru. and Meth. in Phys. Res.* B223-224, 124-129.

2. 口頭発表：施設現状報告 2

2-1 パレオ・ラボ Compact-AMS の現状

伊藤茂[1]、丹生越子[1]、山形秀樹[2]、廣田正史[2]、瀬谷薫[2]、
Z. Lomtatidze[2]、I. Jorjoliani[2]、小林紘一[1]
1 （株）パレオ・ラボ　AMS 年代測定施設
2 （株）パレオ・ラボ　東海支店

1. はじめに

2004 年 11 月、(株) パレオ・ラボは米国 NEC 社製の Compact-AMS を導入した。Compact-AMS は、^{14}C 濃度測定専用 AMS システムであり、加速電圧 500kV の小型加速器を使うシステムである。分子イオン（^{13}CH、$^{12}CH_2$）の混入によるバックグラウンドの増加を防ぐため、荷電変換ガスストリッパーの Ar ガス圧を高くすることにより、荷電変換後の電荷 q = 1+の測定でも約 6 万年（和光純薬、化学合成グラファイトを測定）と十分なマシンバックグラウンドが得られている。装置を小型化するため調整箇所は少なく、アインツェルレンズ 1 台、ステアラー3 台、ESA1 台、電磁石２台だけである（図 1)。このようにシンプルな構成であるが、微妙な調整を行うことにより、数千年前の試料では ^{14}C 年代で±0.25～0.3%(±20～25 年)、$^{13}C/^{12}C$ 比では±0.05%以下という非常に高精度の測定が可能である。

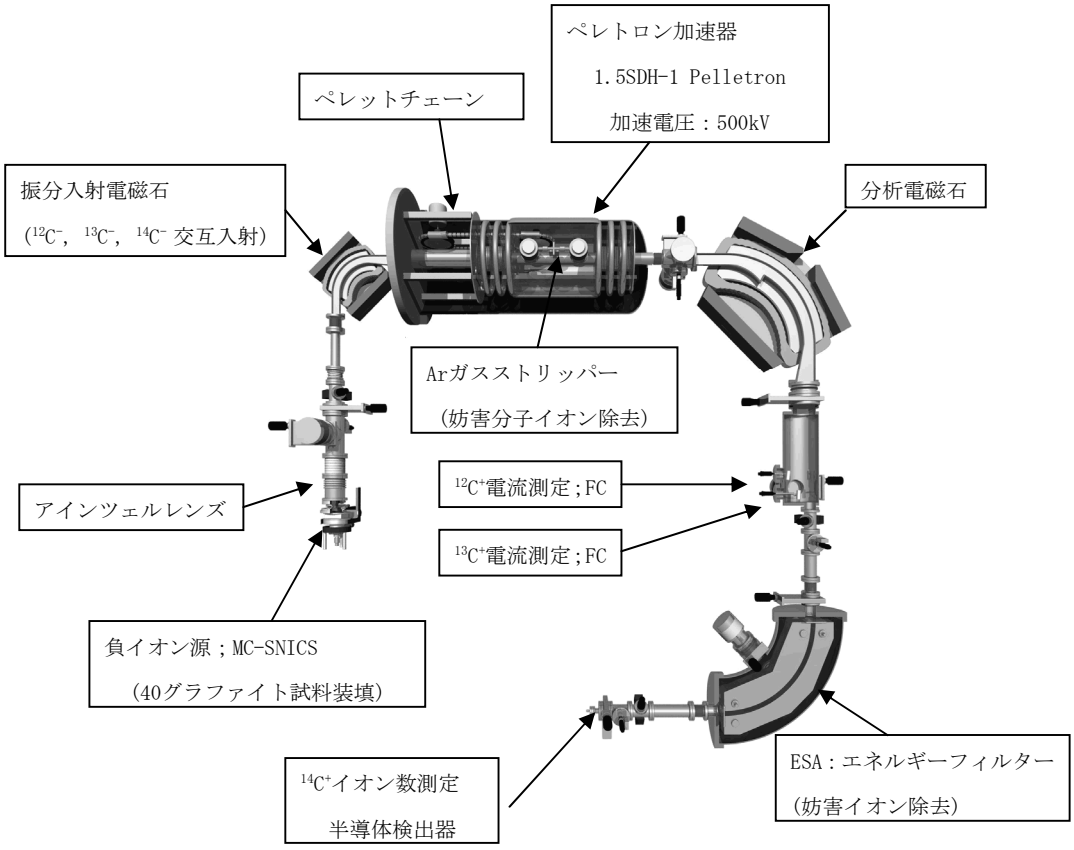


図 1　^{14}C 濃度測定専用 AMS システム（CAMS：Compact-AMS）

2. 運転・測定状況

導入以来 2 年 8 ヶ月間測定を続け、2007 年 8 月末現在、測定総数は 6421 個に達した。これを月平均に直すと 201 個となっている。図 2 に測定試料数と測定総数の推移を示す。

2006 年は、コンタクトバンドの磨耗による加速器不安定、チラーの水漏れ、ターボポンプ発煙、^{14}C エネルギースペクトル変動などのトラブルも発生している。また、MC-SNICS イオン源のバージョンアップを行った 2007/6 月は測定数は少ないが、順調に測定をこなしていると考えられる。

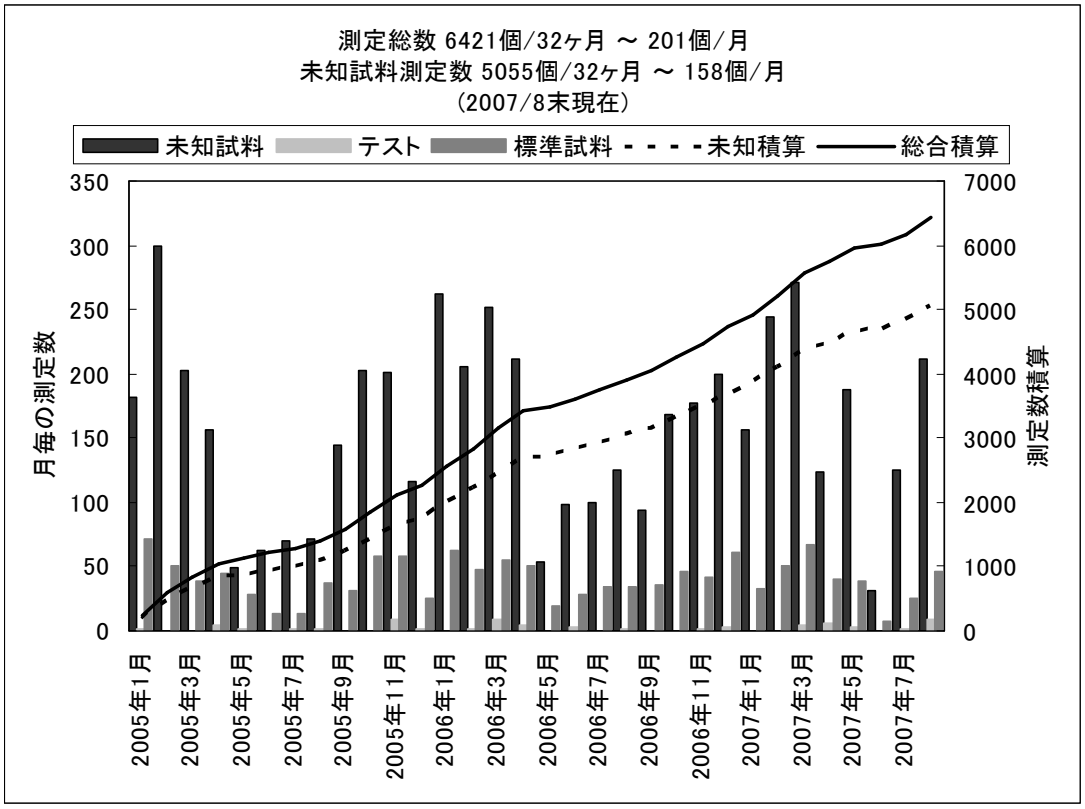


図 2　過去 2 年 8 ヶ月間の測定試料数

3. メンテナンス状況

昨年のタンデム研究会から 1 年の間に、いくつかのトラブルやメンテナンスを行っているが、特に問題となっている事項について以下に述べる。

3.1　^{14}C スペクトルの変動

2007 年 5 月ごろ、日中の暑い時間になると ^{12}C、^{13}C の電流値は変わらないが ^{14}C カウントのみ減少し、その結果 ^{14}C/^{12}C 比が低くなるという現象が起きた。^{14}C エネルギースペクトル（図 3）をみるとややエネルギーの低い側に移動し、シングルチャンネルアナライザの設定エネルギー幅よりも低い部分が切れていた。エネルギー幅を広げ、すべてカウントするよう設定すると ^{14}C/^{12}C 比は正常値に戻った。エネルギースペクトルが動く原因として①加速電圧の変動により ^{14}C のエネルギーが変わった、②検出器直前の ESA の電圧が変動した、③検出器の劣化、④測定系の変動、などが考えられる。①、②については、加速電圧・ESA 電圧を変えてみたところエネルギースペクトルが動く前にカウント数が減ってしまうため今回の原因とは違うと考えられる。③についても新品の検出器に交換しても同様の現象が起こったため検出器の問題ではないと考えられる。よって今回の現象は室温の変動が測定系に何らかの影響を及ぼし、その結果エネルギースペクトルが動いたと考えられる。この温度変動を抑えるため、測

定系の検出器、アンプ、CAMAC などをファンにより冷却してみたが改善されなかった。そのため今回は建屋屋根に熱制御遮熱塗料（コープ・プロツバル）を塗布することにより建物自体の温度上昇を防ぐことで対応することにした。その効果については現在検証中である。

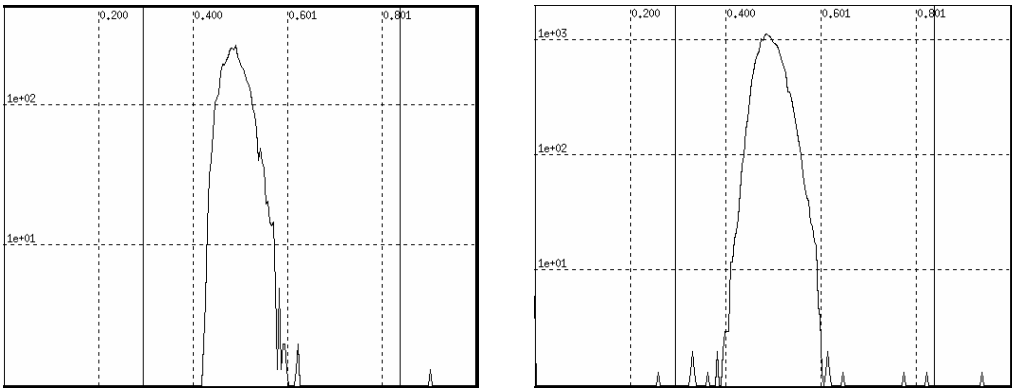


図 3　^{14}C エネルギースペクトル、シングルチャンネルアナライザーにより低エネルギー側が切られたもの(左)と幅を広げて切れないように設定したもの(右)

3.2　MC-SNICS イオン源のバージョンアップ

2007 年 6 月の 1 ヶ月間に MC-SNICS イオン源のバージョンアップを行った。主な変更点は、ラインヒーターの廃止、アイオナイザーを球形アイオナイザーに変更、Cs フォーカスをイマージョンレンズ変更、アイオナイザーの前にセシウムフローディフューザの取り付け等である(図 4)。作業は既存の MC-SNICS イオン源を米国 NEC 社に送って改造するという形で行ったため、ほぼ 1 ヶ月間装置は止まっていた。今回のバージョンアップにより、イオン化効率の向上による測定時間の短縮、クリーニング回数の削減などのメリットが考えられる。バージョンアップ後運転テストを行っているが、カソード位置の不良等で手間取り（図 5)、各調整部の最適値を探っている状態である。

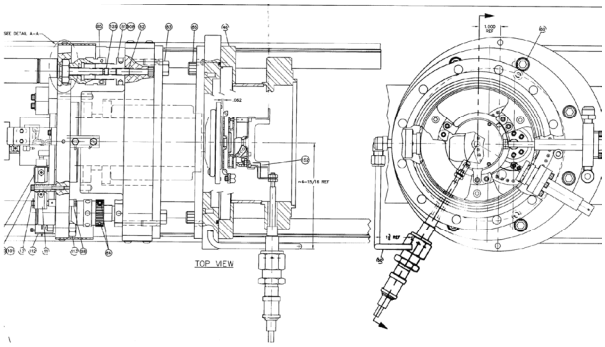


図 4　バージョンアップ後の MC-SNICS。

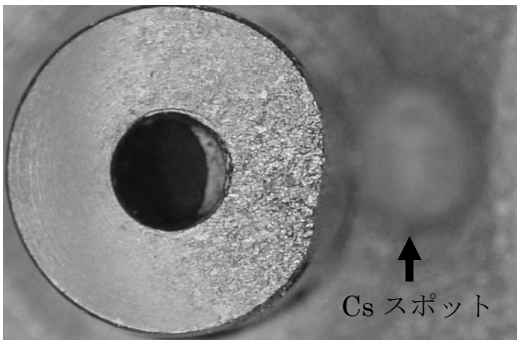


図 5　照射後のカソード。Cs がグラファイトから大きく外れた所にあたっている。

3.3　試料管理データベースの構築

パレオ･ラボでは、試料前処理を岐阜県で、測定を群馬県で行うという体制であるため、情報の共有が問題となっている。これを克服するべく、web ページを利用した測定試料情報の管理を行うためのデータベースを構築した（図 6)。これにより、各試料のデータと作業の進み具合、測定予定や測定結果などがすぐに把握することができるようになった。

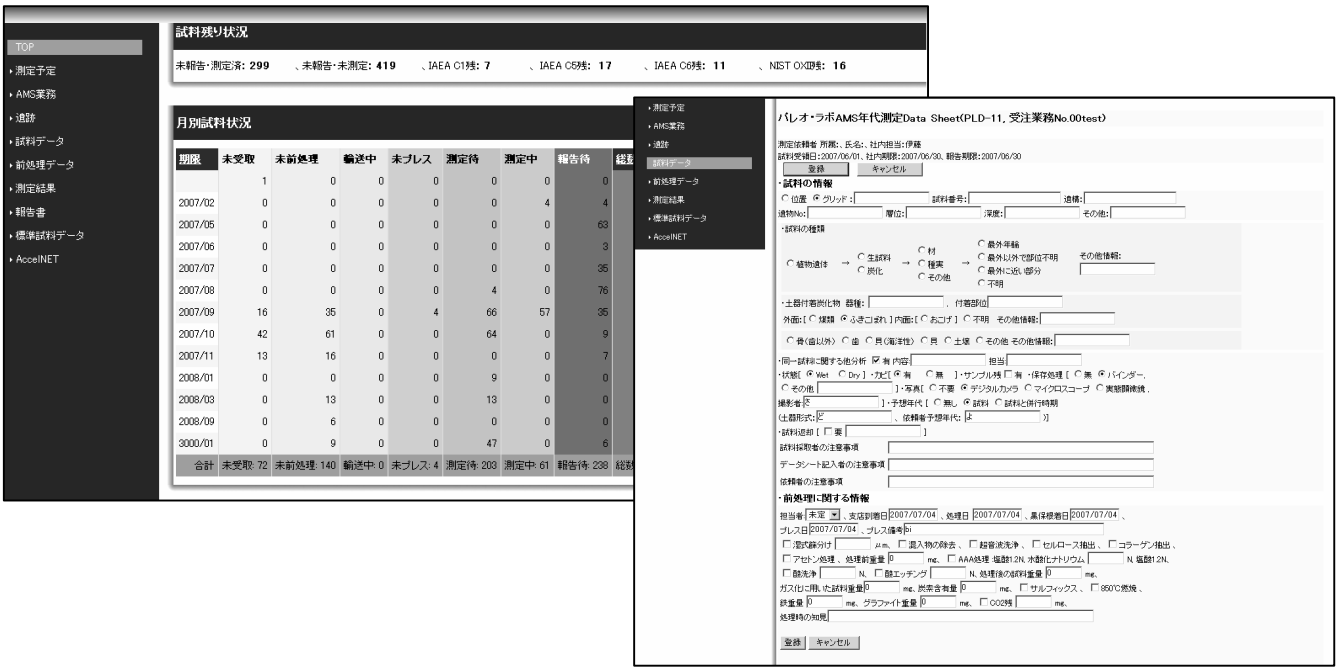


図 6　試料管理データベース。試料状況(左)と各試料のデータシート入力画面(右)

4. 今後

建屋屋根面に塗装した熱制御遮熱塗料の効果について、今後温度変化などを測定していく。また、バージョンアップした MC-SNICS イオン源の各調整部の最適値を探し、測定時間の短縮と測定精度の向上を目指す。

2-2 神戸大タンデム加速器の現状

谷池　晃，古山　雄一，北村　晃
神戸大学大学院 海事科学研究科　マリンエンジニアリング講座

(1)はじめに

神戸大タンデム加速器は nec 社製 5SDH-2(1.7MV)で，設置されてから 12 年目である．本装置は，5 本のビームラインで構成され，RBS，ERDA，NRA あるいは PIXE 等の分析またはイオンビーム照射を行うことができる．図 1 に装置の概要を示した．図 2 に運転状況の目安として，ペレットチェーンの積算駆動時間を示した．現在（2007 年度）は学外利用も含め 8 テーマの研究および海事科学部 3 年生の学生実験に用いられている．2007 年 7 月現在における各ビームラインとエンドチェンバーで行われている研究テーマとを表 1 に示した．

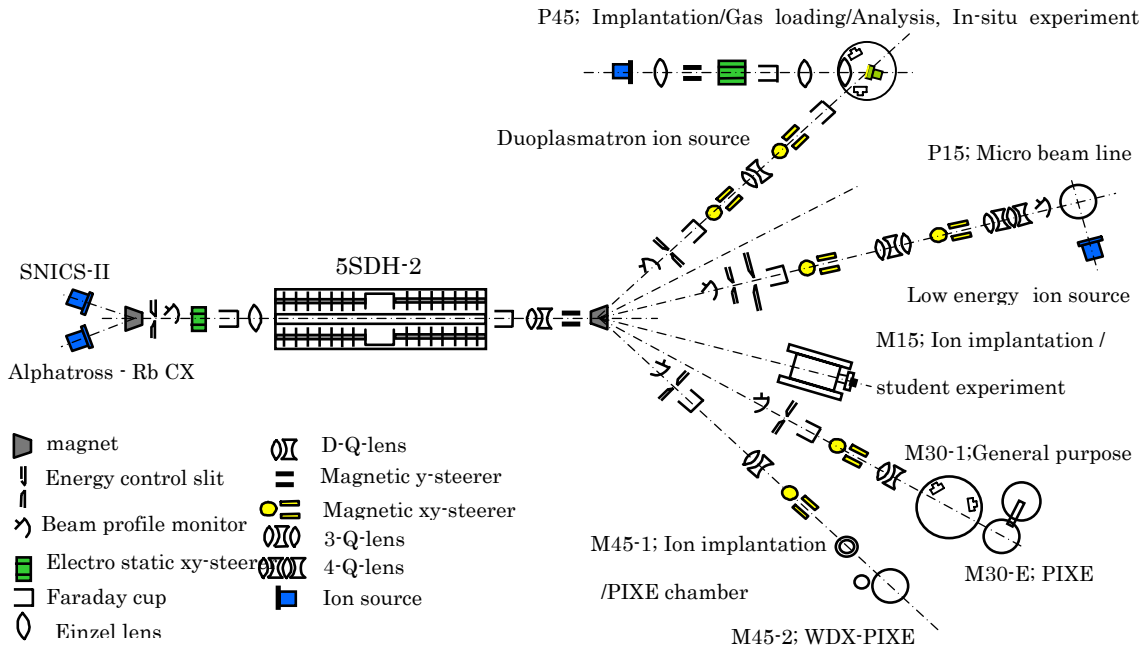


Fig. 1.　KUMS 1.7 MV tandem accelerator system.

表1 各ビームラインチェンバー利用状況(2007年7月)／研究テーマ

P45	凝集系核反応 核変換	～　その場　～ ガス吸蔵/重水素注入 /加速器分析	Pd/CaO/Pd/CaO/Pd D_2吸蔵，D_2注入，D_2透過
P15 chamber	プラズマ壁相互作用	micro beam ϕ20μm 低エネルギーイオン 注入	Li 薄膜

M15	学生実験 イオンビームグラフト重合	p-RBS イオン照射（p）	Au/PE ポリエチレン
M30 総合分析ステーション	ブランケット材 プラズマ壁相互作用 トリ　ブチル　スズ イオンビームグラフト重合 分析	RBS，ERDA RBS，ERDA PIXE He-RBS すべて	Be Li TBT　船底の塗装，カキよけ アミドキシム型キレート材 各種試料分析の研究
M30-end	トリ　ブチル　スズ 固体内核反応 イオンビームグラフト重合 デモンストレーション	PIXE （D_2透過中）PIXE （大気）PIXE 大気 PIXE	TBT Pd/CaO/Pd/CaO/Pd アミドキシム型キレート材 塩，コイン
M45	その場　FTIR エネルギー校正	イオン照射/ラマン分光・真空赤外線分光 PIGE	CR-39 放射線検出素子 AlF_3，F(p,αγ)O
M45-extention	海洋試料 デモンストレーション	波長分散型 PIXE	 塩

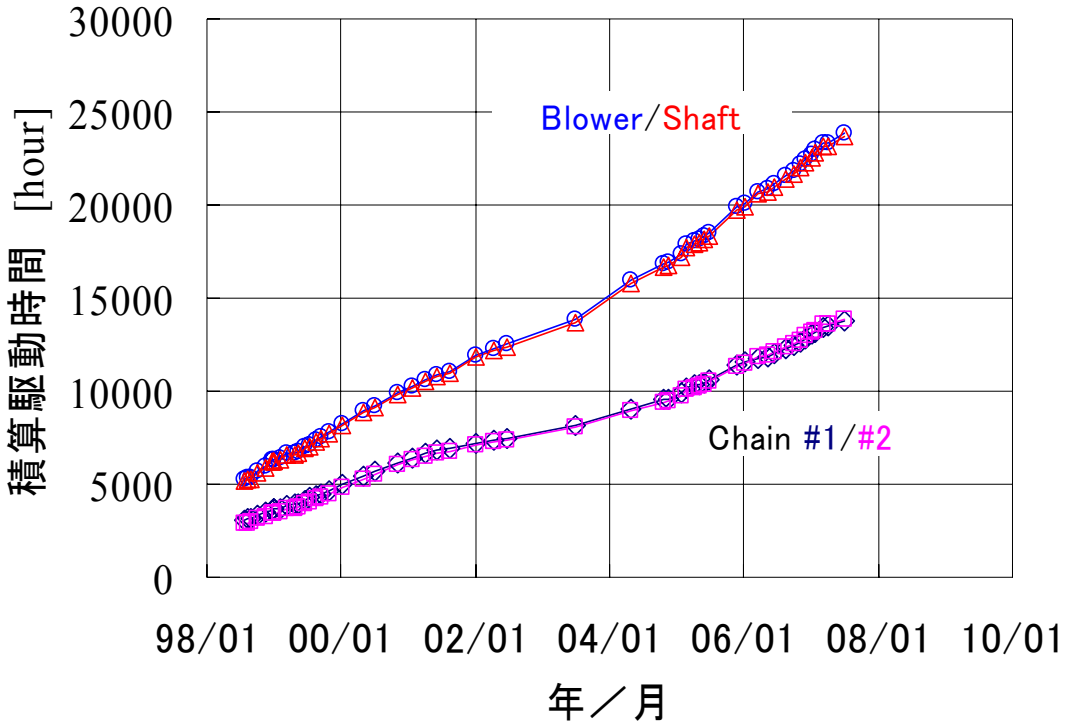


図 2 ペレットチェーンの積算駆動時間．加速器の運転時間（ビームの生成時間）に対応している．Blower(SF_6循環機)と Rotary Shaft(高圧部発電機)も同時に示した．

(2)2007 年 7 月までの主な故障・メンテナンス状況

(2-1)ペレットチェーンが破断した．運転時間は 13000 時間であった．図 3 に破断部分の様子を示した．破断部分付近のペレットは潰れており，破断部以外のペレットにも変形が認められたが，チェーン以外の部分へのダメージは無かった．ペレット接続部の樹脂の殆ど全てに変形が見られたので，1 本全体を交換し復旧した．4 月のメンテナンスで壊れかけていた所が 3 箇所あったが,まだいけそうなので,そのままにしておいた.上記以外の部分で切れていたので,全体にわたって不適切な負荷が加わっていたために破断したのかもしれない．　もう一本のペレットチェーン#2 も，全体にわたって伸びていることが確認されているので，時期的に破断の可能性がある．対策として予備のペレットチェーンを購入した．

図 3　ペレットチェーン破断部分

(2-2)圧縮空気のラインに水が混入していた．コンプレッサータンク部分にも水がかなり溜まっていて，何回か排出した．ドライヤーの自動排水機能の故障だと思われる．その後修理復旧したが，たまに停止したりして，いまだに不調である．

(2-3)P45B/L下のI/O Plexcerが故障した．一時的に伯東から借用し使用しようとしたが，ボードの形状が異なったので，そのまま使用できなかった．そこで，借用物をP15下へ設置し，元々P15下で使っていた物をP45下へドミノ移植した．最初うまく動作していたが，そのうちおかしくなった．元々使用頻度が少ない部分だったので,必要最小限使えるように配線を変えて運転を行った．その後しばらくして，修理から帰ってきたI/O Plexerを取り付けて元に戻した．

(2-4)Alphatrossのプラズマがつかなくなったので，RF発信機部を分解した．そのまま元通り組み立てたらなぜか直った．これを機に予備のセラミック管（RF発振回路用テトロード）を購入した．

(2-5) Alphatross イオン源の加速管部分のセラミック管を紙やすりで研磨（大気側のみ）した

ら，2000 MΩ以上まで絶縁抵抗が回復した．ロータリーポンプの排気と静電気により,表面部分に埃が堆積しやすい環境にある．高圧部分は特に定期的なメンテナンス（単に拭き掃除でも有効かもしれない）が必要であろう．

(2-6)麻疹による休校措置により，6 月 1 日から 6 月 12 日まで学生は自宅待機することになった．学生は一時的入校が可能で，教職員は通常勤務である．指示は直前の 5 月 31 にあって，急なことだったのでその週およびその次の週のマシンタイム実施のための十分な対策が取れなかった．人手も無かったので，加速器利用効率が著しく低下した.また,休講の補講日が後の土曜日に設定されたので,そのことも加速器利用効率低下させる原因となった.

(3)最近の新たな試み

(3-1) 公開デモンストレーション実験や委託試料分析に多用する PIXE 分析において，SiPIN 検出器と CdTe 検出器を用いた同時計測ができるようにする予定である．それらは感度の高い領域が異なるので，様々な元素を含む試料や未知試料の測定が効率よく行える．計測器は入手済みなので，設置と調整をすればよい.

(4)昨年からの変更点，今後の展望・予定

学内改組に伴い，所属が変更になった．予算に関して，本年度の維持費はいただいている．しかし，来年度以降はどうなるか分からないので，予算申請，外部利用のための宣伝，啓蒙目的の奉仕活動などの努力を怠ってはならないと考えている.

2-3 九州大学タンデム加速器の現状

森川恒安、相良建至、野呂哲夫、若狭智嗣、寺西高、
前田幸重、前田豊和、古賀義博、池田伸夫 *
九州大学大学院理学研究院
九州大学大学院工学研究院 *

はじめに

九州大学タンデム加速器実験グループは、現在、物理学部門のスタッフ 8 名 (教員 6、技術職員 2) および大学院生 19 名 (修士 16、博士 3) で構成されている。我々の加速器は 2005 年 3 月に発生した福岡西方沖地震によってコラムの破損やセンターターミナルの沈下などの大きな被害を被った。2005 年度に緊急の仮復旧を行ったが、更に 2006 年 8 月-11 月の期間大がかりな改修工事を実施し、復旧を果たした。

2006 年度の運転状況

加速器の復旧を果たしたことで、図 1 に示すように 2006 年度の加速器運転時間は 1800 時間を超え、震災前の水準に戻りつつあると言える。今年度は現在までに約 400 時間の運転となっている。2006 年度の加速器運転の内訳では天体核物理の実験、少数核子系物理の実験および AMS 開発のためのビームタイムが大半を占めている。他に軽イオングループによる EPR パラドックスの検証実験やカウンターテストなどに使われており、物理学科の学生実験も行われている。ターミナル電圧は低いもので天体核の 2.4 MV、高いもので少数核子系実験での 7.3 MV となっている。運転には通常、分析電磁石後のスリット制御が用いられるが、AMS 開発やカウンターテストの一部などでは GVM 制御を用いている。

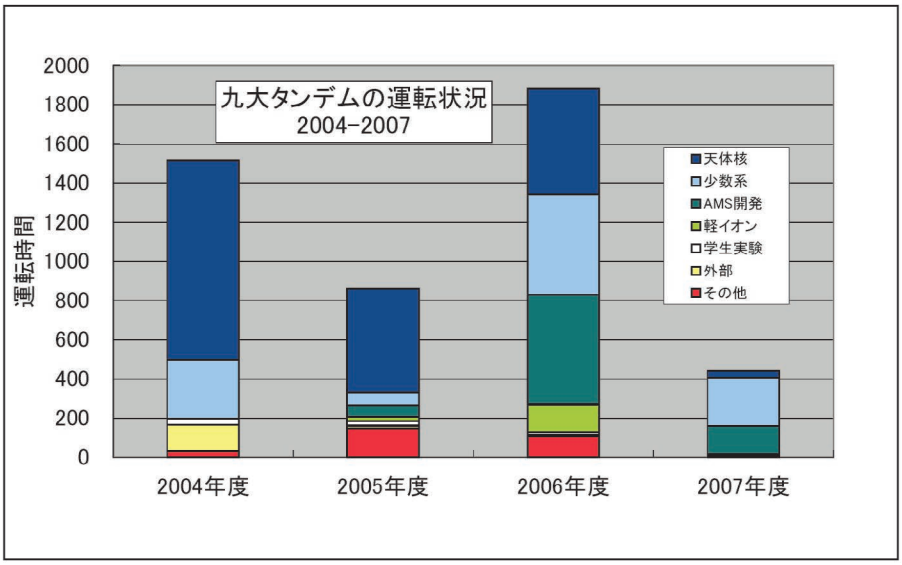


図 1. 2004 年度-現在までの九大タンデムの運転状況。

改修作業

前年度の応急処置の後、2006 年 8 月 ~11 月にかけて、一部加速管の交換と、加速管・センターターミナルの再アラインメントを実施した。また、平行して、ビーム輸送系の Q レンズ等のアラインメントやステアリング電磁石のダクト (真空箱) の取り替えも実施した。12 月初旬には物理学科 3 年生のタンデムを使った学生実験が高い優先度で予定されており、これに間に合わせるべく、お盆休み明け直後から作業を開始した。全体の日程と作業風景を図 2 に示す。

フープ、ガードリング、抵抗体等の各種アクセサリの取り外しを含め、大がかりな作業であったが、研究室の教職員、院生全員でローテーションを組み、手分けして作業にあたった。アライ

ンメントの基準軸として加速器本体の上流側と下流側のビーム軸上に、2 台の望遠鏡をそれぞれセンターターミナルを睨むように設置し、加速管及びセンターターミナルの位置決めをその光軸に対して目視により行った。平行して、加速管の洗浄や加速管への電極取付、金線ガスケットの作成等も進めた。

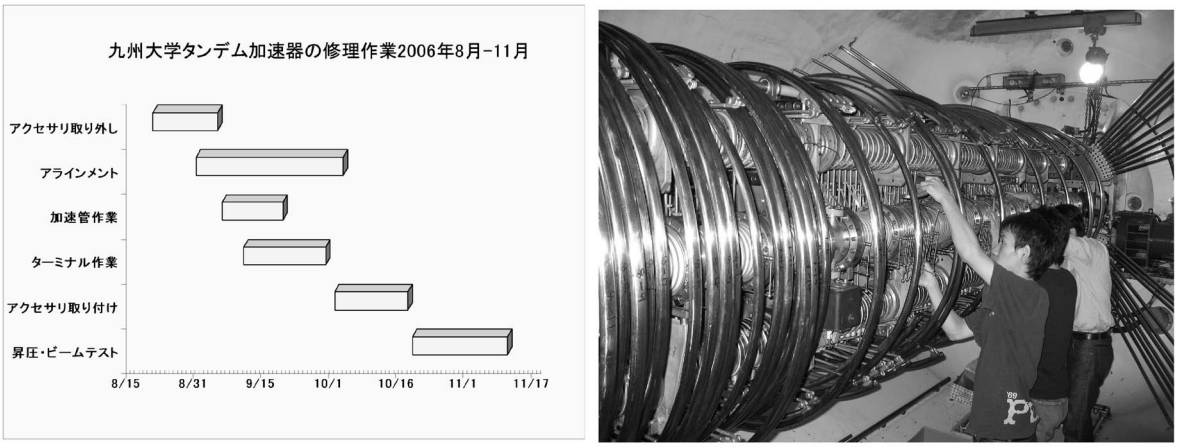


図 2. 2006 年度九大タンデムの改修作業日程 (左) とタンク内作業の様子 (右)。

加速管組み上げ・真空引きの後、ガードリングおよび抵抗体取付用アクセサリまで組み込んだ状態にして、水素アーク放電による加速管のベーキング処理を行った。加速器本体出口側のゲートバルブ直下流に石英ガラスのビュアを設置し、陽子および炭素イオンを用いて、ビーム加速の確認を行った。その上で、加速器側ダクトと下流側ビームラインの繋ぎ込みを行い、各実験コースへビームをトランスポートした。各実験室のビュアおよび Faraday Cup によってビームが正しく輸送されていることを確認した段階で、全体の復旧作業の完了とした。

加速器本体のビーム透過効率

ターミナル電圧 6 MV に於いて加速器本体のビーム透過効率の測定を行った。個々の加速管ならびにセンターターミナルは、SF_6 ガス充填時のターミナルの沈下を考慮した上で、望遠鏡による目視によって 0.2 ～ 0.3 mm 以内にアラインされており、また、ガス充填後の目視によっても確認されている。測定の結果、陽子ビームについては、ほぼ 100 %の透過効率が確認された。しかしながら、$^{12}C^{4+}$ ビームについては、4 価の Charge Fraction を 60 %と仮定して、85 %程度の透過効率に留まっている。理論上の透過効率を見積もるために、加速管電極の形状や抵抗体の実測値などリアリスティックな数値を用いて (軸対称性を仮定した上で) SIMION7 プログラムによるレイトレース計算を行った。その結果、図 3 に示すように計算上は 100 %の透過効率が得られるハズであり、実測値との大きな食い違いが生じていることが判った。

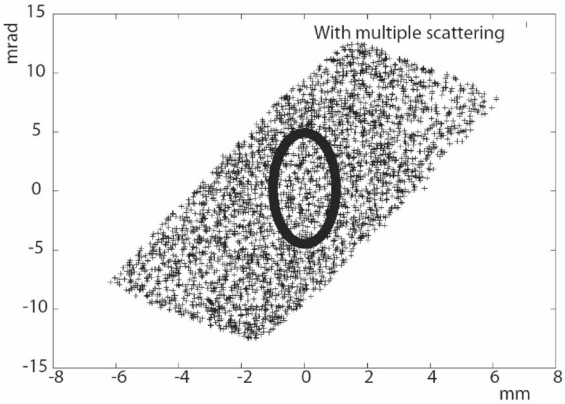


図 3. SIMION7 を用いたレイトレース計算で得られたタンデム加速器の
アクセプタンスと入射イオン ($^{12}C^{-}$) のエミッタンス楕円。

この食い違いの原因については、加速管の電場が理想的な軸対称からずれているためではないかと考えている。ターミナルストリッパーのフレームに MgO 蛍光板を設置してビームスポットを観測したところ、フレーム中央にスポットを作ると透過効率は下がり、やや右下に寄った位置にビームを持っていくと、透過効率は高くなる傾向が見られた。また、タンデム出口すぐに設置した石英ガラス板で観測したビームスポットは、アラインメントの軸からやや上方にずれていた。これらの観測結果は、目視によるアラインメントにも拘わらず、加速電場の軸対称性が成り立っていないことを示していると考えられる。但し、レイトレース計算に用いた入射イオンの emittance は計算値であり、実際の emittance はもっと大きい可能性も否定できない。

Current Integrator の問題

我々の実験室では、ビームライン各所の電流の計測に 2 台の ORTEC 439 を用いている。これらは長らく校正に出していなかったが、今回チェックのために、電池による微小電流源および実際のビームを用いて 2 台相互間の比較を行った。電流源または Faraday Cup からの信号線をリレー (マルチプレクサ) により 2 台の ORTEC 439 に交互に入力し、I/F 変換後の TTL パルス出力を 2 台のスケーラで測定した。その結果、この 2 台の間には 3 %程度の系統的なズレのあることが判明した。また、2 台は共に、'multiplier' のポジションによって電流値の読み (TTL パルスの周波数) に 0.1 ～ 0.4 %程度の系統的なズレが生じることも判った。この 'multiplier' ポジションによるズレは 2 台の間で同じ傾向を示し、両者の比をとればある程度相殺されることも判った。ともあれ AMS のような高精度の測定が要求される場合は、Faraday Cup 毎に Current Integrator も固定して使用する必要があることが判った。

AMS 開発の現状

九大タンデム AMS に用いているイオン源は自作の 25 サンプル装填可能なもので、中間電極を用いることで 0.5 mmϕ 程度の Cs スポットを実現している。イオン源分析電磁石の区間に周期的に電圧を印可して、$^{12}C^-/^{13}C^-$ あるいは $^{14}C^-/^{13}C^-$ の逐次入射を行い、前者では加速器本体の分析電磁石 (M90) 直後の直進とオフセットの 2 台の Faraday Cup により電流比を測定する。また後者では $^{13}C^{4+}$ 電流を M90 のオフセット Faraday Cup で測ると共に $^{14}C^{4+}$ イオンを、下流の実験室に設置した Si SSD で計数する。全体のレイアウトを図 4 に示す。$^{12}C^-$ 入射時には '1/84 メッシュ' によりビームを減衰させている。GVM 制御によるターミナル電圧の安定化 (±1 kV@6 MV) および、ビーム輸送系各所の電場・磁場の安定化・高精度化を進めている。現状では、サンプル交換を行わなければ、0.3 ～ 0.5 % 程度以内の長時間安定性が得られているが、サンプル交換を行った場合のバラツキがまだ 2 ～ 3 %程度残っている。このバラツキを抑えるべく、現在、イオン源周りでのビーム輸送パラメータの更なる安定化を試みている。

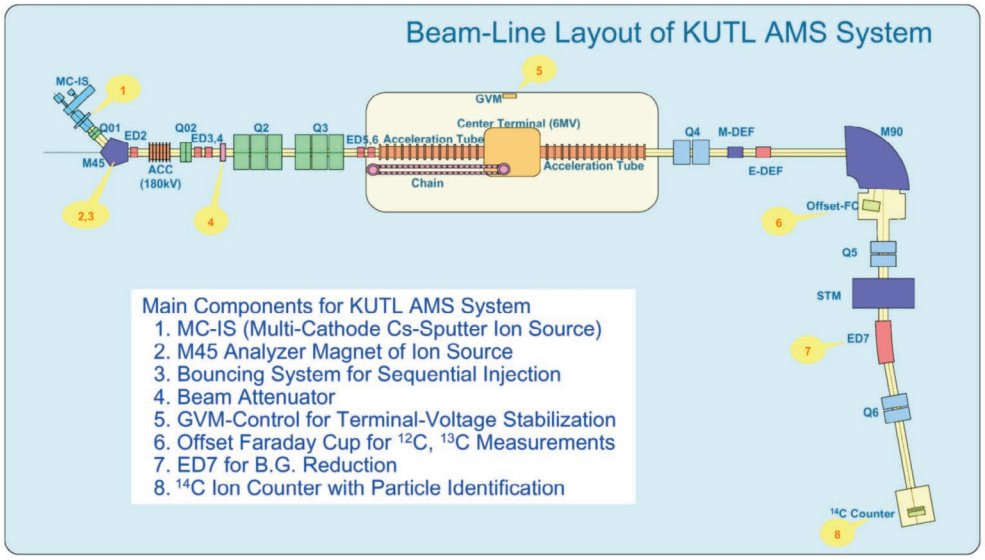


図 4 . 九大タンデムに於ける AMS のためのビームラインレイアウト。

天体核反応実験の現状

重心系エネルギー 0.7 MeV における天体核反応 ^{4}H(^{12}C,γ) の断面積の直接測定を目指して開発を進めている。これまでに加速減速方式による低エネルギー大強度ビームの実現、吹き込み型ガスストリッパーの開発、吹き込み型ガス標的の開発を行ってきており、現在は S/N 向上のために ^{12}C ビームの高効率パルス化のための開発を進めている。これまでに SNICS イオン源からタンデム加速器までの入射ビームライン上に 2 ステージのバンチャー、タンデム加速後に 2 ステージのチョッパー、質量分離器の中間焦点面にロングタイムチョッパーを設置してきた。これらに加え、イオン源本体に鋸歯状波の電圧を印可する前段バンチャーを組み込み、パルス化効率の向上を目指している。前段バンチャーを動作させたビームパルス化テストの結果、パルス化効率が 41 %から 81 %へと大幅に向上したことが確認された。これらの開発を踏まえ、まず重心系 2.4 MeV に於ける断面積測定からスタートする予定である。

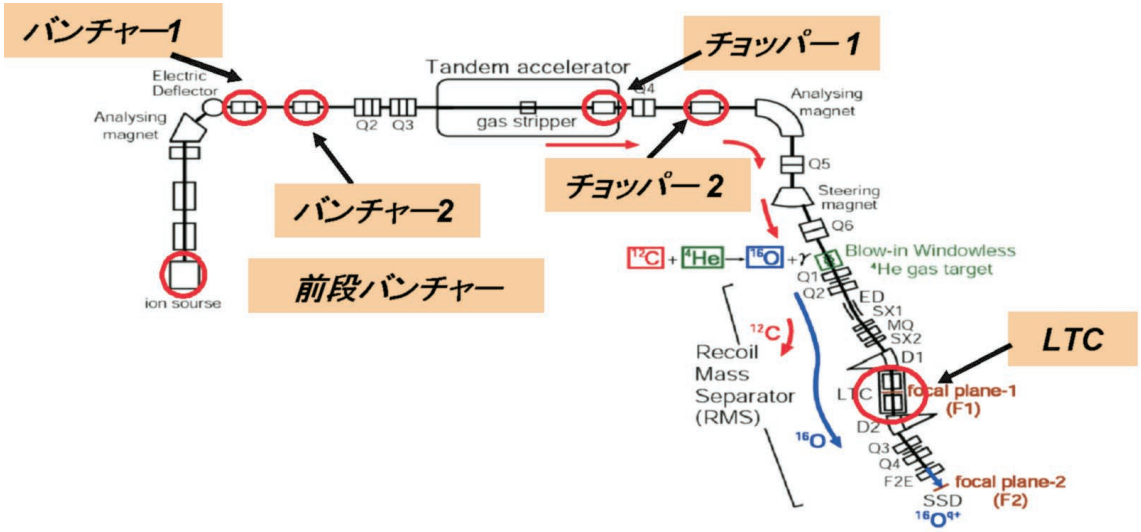


図 5. 天体核反応実験のためのビームラインレイアウトと
高効率パルス化のためのバンチャー及びチョッパー。

おわりに

2006 年度の大改修によって我々のタンデム加速器は一応の復旧を果たした。しかし予算のカットや各種周辺装置を含めた設備の老朽化に加え、建設当時からの生え抜きのスタッフの方々が定年退職されていく中、この先の道のりはそれほど平坦ではない。平成 26 年に予定されている新キャンパスへの移転・新加速器稼働までの間、研究グループメンバが一丸となって、このタンデム加速器を維持し、良い成果を上げていくことが大切であると考えている。

2-4 JAEA-AMS-TONOの現状

鈴木元孝、西澤章光[*1]、大脇好夫[*1]、西尾智博[*1]、齋藤龍郎、笹尾英嗣
独立行政法人日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門
*1　株式会社ペスコ

1. はじめに

日本原子力研究開発機構 東濃地科学センターでは、1997年3月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JAEA-AMS-TONO（NEC製15SDH-2ペレトロン 最大電圧：5.0MV、最大電流：1μA）を導入した。1998年9月に測定精度0.5%を達成し、それ以後^{14}Cのルーチン測定を行ってきた。装置導入から6年を経過した頃から装置の経年劣化によるトラブルが出始めたが、その都度対処して測定を行ってきた。 2006年7月～2007年6月までに発生した装置の故障と保守の状況及び測定試料と運転時間状況等について報告する。

2. 故障・保守の状況

2．1　ゲート設定及びCAMACインターフェースの再配線

重イオン検出器のアップグレードに伴い、それを制御するためのCAMACインターフェースの交換を2006年2月に行ったが、度重なる装置の不調により2007年7月以降からビーム調整を再開した。新検出器に対応するように制御用ソフトウェアのゲート設定やCAMACインターフェースの配線を変更してビーム調整をした。 しかし、^{12}C/^{13}Cの遅延逐次入射が出来なくなる不具合が生じたためゲート設定や配線の見直しを行った。その後、ビーム調整は出来るようにはなったが、^{14}Cを取り込むためのヒストマネージャーが、新検出器に対応していなかったため、制御用ソフトウェアのバージョンアップを行った。新システムになることでゲートの再設定及びCAMACインターフェースの再配線を行い、ヒストマネージャーにおいて^{14}Cを検出することが出来るようになった。

2．2　重イオン検出器のノイズ対策及びアンプゲインの調整

^{14}Cを取り込むためのヒストマネージャーにノイズや不純物が多く見られ^{14}Cの区別が出来なかった。原因として検出器とプリアンプに十分なアースによる対策がされていなかったためと思われる。また、アンプゲインの設定が旧検出器の設定になっていたために、^{14}Cが正しく表示されなかった。対策として検出器とプリアンプにアルミ箔でシールドを施しアース線を付けた（図1）。また、^{14}Cの表示ではコイシデンスを調整し、メインアンプのゲインEtot、ΔE1、ΔE2の最適化を行った。

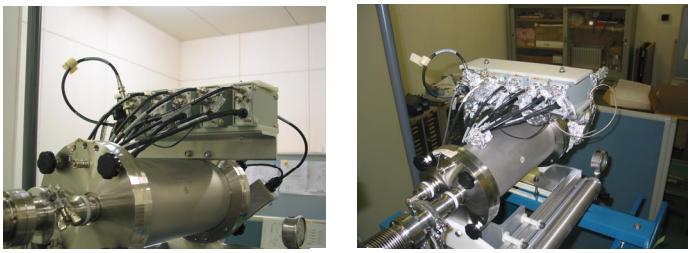


図 1

2．3　イオン源のクリーニング

測定を開始するにはイオン源に試料を装填し、試料からマイナスイオンを発生させるためにセシウムオーブンを立ち上げるが、度重なる使用によりイオン源内部に汚れが発生し、カソード電流が不安定になり、内部で頻繁に放電が起こっていたため、イオン源内部のクリーニングを行った。クリーニングした結果、カソード電流が安定し、放電が減少した。また、セシウムオーブンではセシウム蒸気輸送部をガラステープで保温をしたことで、±5℃の温度変化を±2℃に抑えることが出来た。

2．4　ローテーティング・シャフト(RS)のモーター損傷

2007年4月28日測定中に落雷があり装置が停止した。その後、排気系による装置の復旧を行い、コンディショニングを開始したが、一定時間になるとRSのブレーカーが落ちるためRS用ブレーカーで負荷電流値をチェックした。その結果、電流値が異常に多くモーターに負荷がかかったため停止したことが判明した。よってタンクを開放し予備のモーターと交換した。また破損したRSモーターを解体して見たところ、モーター後部に付いているベアリング部分にベアリングカバーが食い込んでいた(図2)。

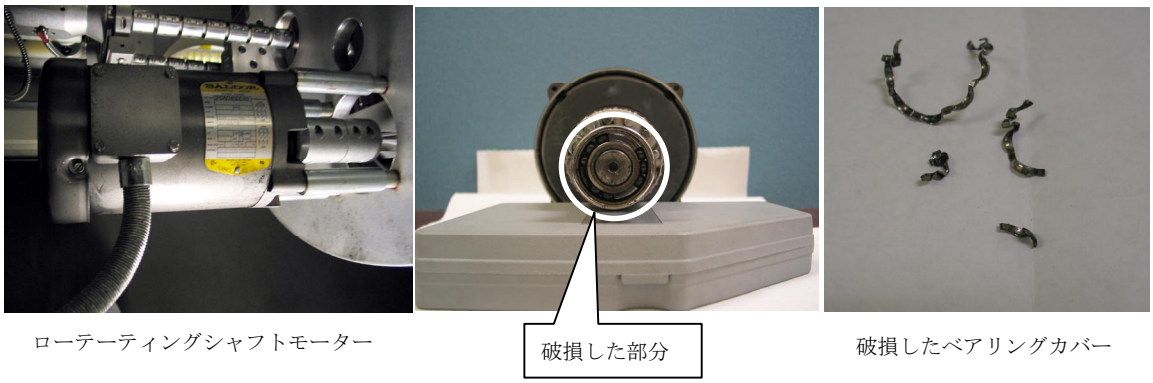


図 2:破損した RS モーター

2．5　ブリーダー抵抗器の検査および掃除

2007年1月に加速器タンク内の清掃を行った際に、加速管に付いているブリーダー抵抗器の汚れが気になっていたためRSモーターの交換に伴い、ブリーダー抵抗器の検査と掃除を行った。ブリーダー抵抗器はLE側とHE側の2つに分かれているため(図3-1)、最初にLE側の上下201本を検査した。ブリーダー抵抗器の内訳は表1に示す。次にHE側の上下200本を検査した結果、LE側に1本だけ抵抗器(図3-2)の抵抗値が半分になっていた。抵抗自体は正常値であったのが、加速管内の絶縁劣化であると考えられ、その部分を安定化するために針金で短絡した。また、HE側にある抵抗器200本の汚れがひどいため全て外し掃除を行った。

2．6　スパーク・ギャップネジの欠落

HE側の抵抗器の検査をしている際に、加速管に付いているスパーク・ギャップのネジが無くなっていた(図3-3)。原因は不明であるが、度重なるスパークを引き起こし、ターミナル電圧を不安定にしていた要因の1つと考えられ、外れていた部分をネジで固定した。

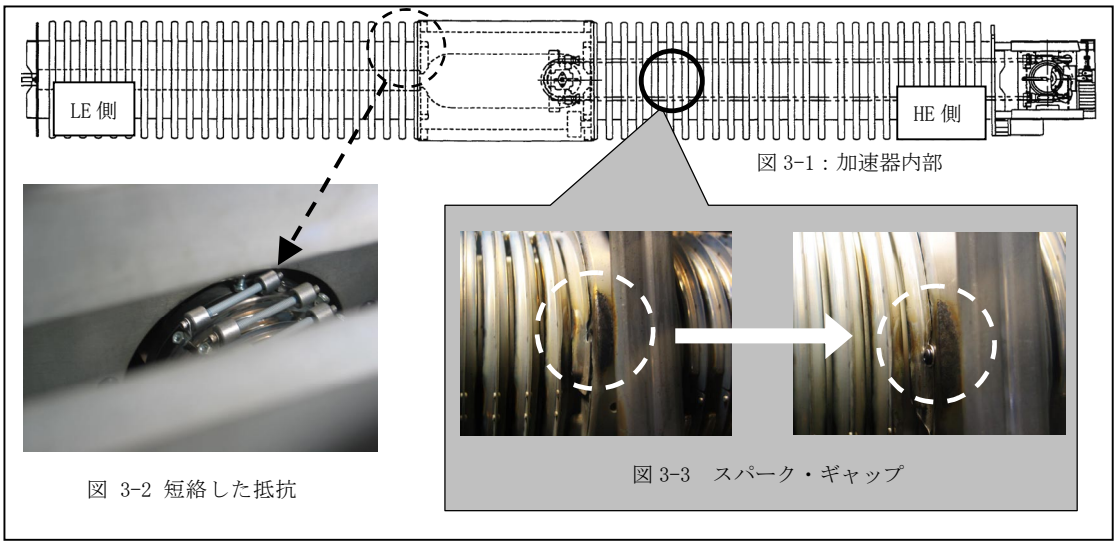


図 3-1：加速器内部

図 3-2 短絡した抵抗

図 3-3　スパーク・ギャップ

	LE 側	HE 側
555Ω	194	200
200Ω	7	0
計	201	200

表 1

3. 測定試料と運転時間の状況

2006年7月から2007年6月までの測定試料の内訳を図4に運転時間を表2に示す。 2006年7月から12月までは装置のトラブルが多いため試験測定を行い、2007年2月～4月の間に実試料の測定を行った。同年5月～6月までは装置の故障のため復旧作業を行っていた。

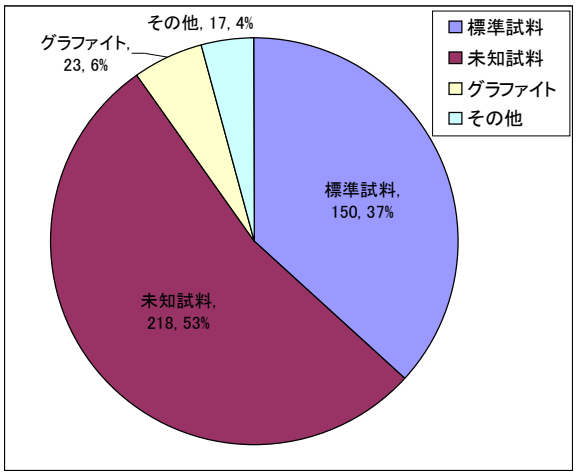


図 4　試料内訳

月	測定試料数	ビーム発生時間
2006 年 7 月	0	10
2006 年 8 月	0	16
2006 年 9 月	30	55
2006 年 10 月	22	65
2006 年 11 月	14	66
2006 年 12 月	64	135
2007 年 1 月	0	8
2007 年 2 月	112	183
2007 年 3 月	102	162
2007 年 4 月	64	92
2007 年 5 月	0	0
2007 年 6 月	0	0
計	408	791.57

表 2

4. 今後の計画

・ペレット・チェーンの交換

2003年4月にペレット・チェーンの交換を行ったが、現在、チェーンのたわみが目立つため交換を行う。

・RSモーターの交換

以前、使用していたモーターを応急処置として使用しているため新品のモーターと交換する。

・ビームラインのアライメント

地盤沈下によるビーム軸のズレが生じているためアライメントを行う。

2-5 原子力機構むつ・タンデトロン加速器の現状　2006-2007

天野　光[1]、甲　昭二[1]、木下尚喜[1]、渡部幸也[2]
１：日本原子力研究開発機構　青森研究開発センター　AMS 管理課
２：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

日本原子力研究開発機構 青森研究開発センター むつ事務所 タンデトロン加速器質量分析装置（JAEA-AMS-MUTSU: High Voltage Engineering Europa 製 Model 4130-AMS）は、最大加速電圧 3MV のタンデム型加速器と炭素及びヨウ素同位体比測定用の 2 本のビームラインから構成される。種々の整備を経て、これまで海洋環境における放射性核種の移行挙動に係る研究等に主に利用され、平成 18 年度末までに約 7,600 試料（原子力機構：79%、原子力機構以外 21%）を測定した[1-7]。本発表では、18 年度の運転及び維持管理状況等について報告するとともに、18 年度から開始した施設共用についても報告する。

２．運転及び測定状況

平成 18 年度の総測定時間（実際に AMS で試料を測定した時間）は 1955 時間、52%が ^{14}C 測定（1011 時間）、48%が ^{129}I 測定（944 時間）に利用された。^{14}C 測定では、海水、懸濁物、標準試料など 1094 個（原子力機構：946 個、原子力機構以外：148 個）を、^{129}I 測定では、標準試料、海水試料、及び土壌等の環境試料 502 個（原子力機構：250 個、原子力機構以外：252 個）を測定した。図 1 に平成 18 年度の運転状況、図 2 に測定数を示す。

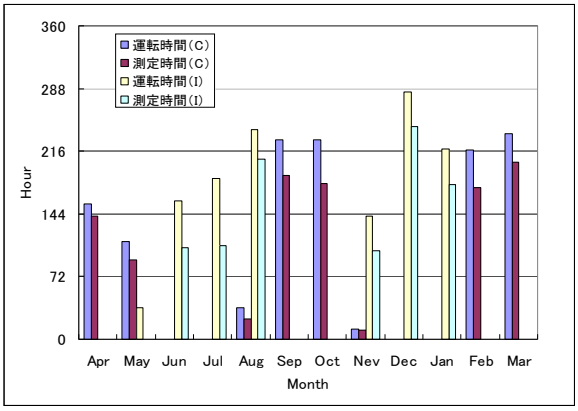


図 1　平成 18 年度の運転状況

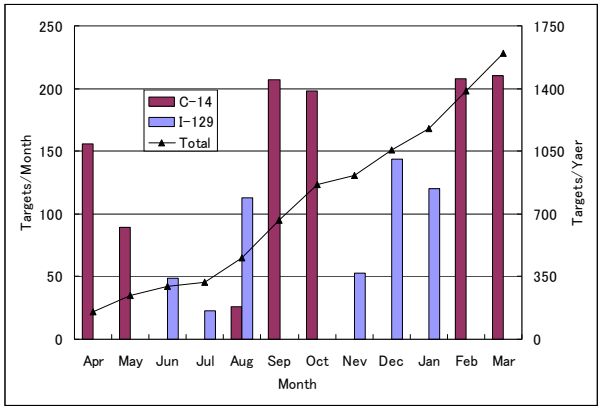


図 2　平成 18 年度の測定数

図 3 に炭素（^{14}C）、図 4 にヨウ素（^{129}I）の測定内訳を示す。炭素ではほぼ 8 割が内部利用、ヨウ素では約 5 割が内部利用である。

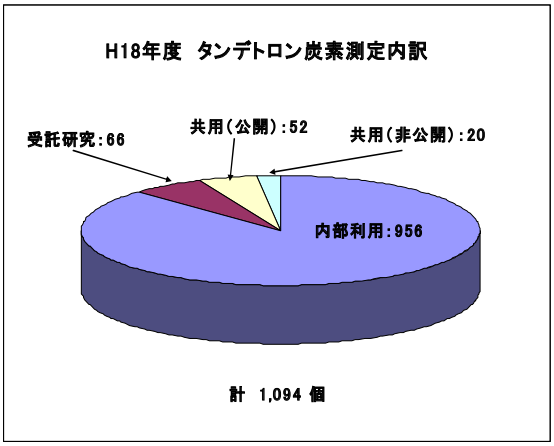


図 3　炭素（^{14}C）の測定内訳

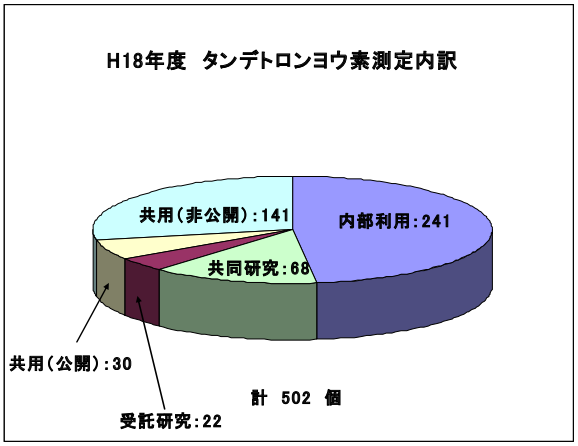


図 4　ヨウ素（^{129}I）の測定内訳

図 5 に炭素（^{14}C）及びヨウ素（^{129}I）の年度毎の測定試料数を示す。平成 18 年度は、むつタンデトロン AMS は、炭素（^{14}C）及びヨウ素（^{129}I）合わせて過去最高の測定試料数（1,596 個）を達成できた。

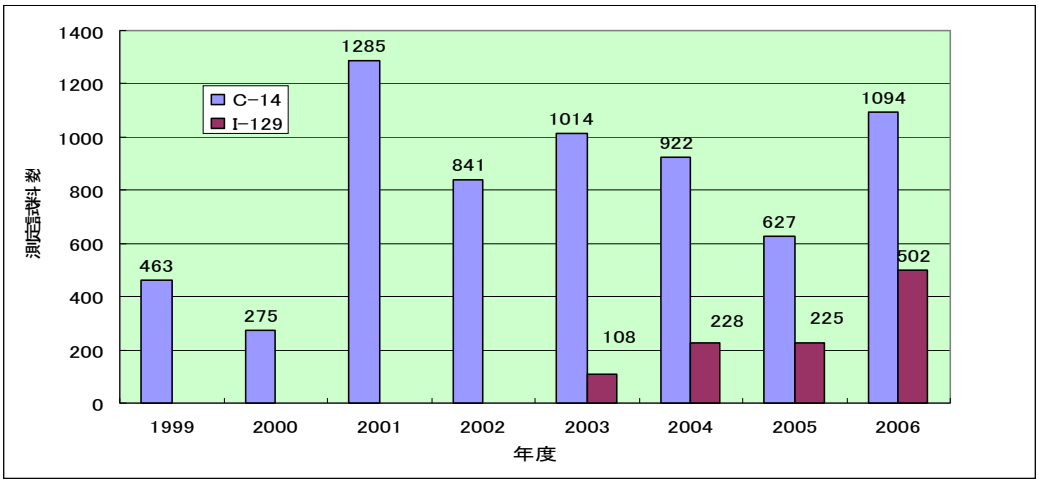


図５　むつタンデトロン AMS における年度毎の測定試料数

３．維持管理状況

18 年度は、むつ事務所のタンデトロン AMS は、経年劣化等による故障はいくつか発生したものの、過去最高の測定試料数を達成できた。その理由としては、(1)運転員が経験を積んできたこと、(2)加速管を開放するようなトラブルはなかったこと、ちなみにむつ AMS ではこれまで 6 年間加速管を開放していない。(3)これまでの経験から故障が起きそうな部品をあらかじめ購入し、故障に対処していること、(4)むつ AMS では加速管は共通であるが、炭素ライン、ヨウ素ラインが独立しており、部品の共通した利用が可能であり、またそれぞれのライン運転時に別のラインをチェックできること、(5)施設共用の開始により、外部利用者から測定試料が持ち込まれたこと、等が挙げられる。平成 18 年度はクライオポンプのコンプレッサーやイオン源の X-Y モーターの故障等の事象は発生したが、特に大きなトラブルはなく上記の理由で順調に装置を稼動、測定数の増大を達成できた。以下に装置の不具合について時系列で列挙する。

＊5/31 クライオポンプコンプレッサ No.2 の He ガス圧力低下
事象：点検整備のためクライオポンプ CT4 を取外ししたところ、フレキシブルホースのクイックカップラーから He が漏れていた。
原因：経年劣化と思われる。（クイック式なので通常は取外したとき機密は保持される）
対応：ポンプ側のカップラーなのでコンプレッサからフレキシブルホースを取外すことでコンプレッサの圧力が下がるのは収まった。クライオポンプにフレキシブルホースを接続しているときは漏れがないのでそのまま使用している。

＊6/22 ヨウ素イオン源ターゲット交換エラー
事象：ターゲット交換時に XY モーターが動かなくなり、エラーが発生
原因：経年劣化と思われる。
対応：測定を行うために炭素イオン源から一時的に XY モーターを取外して使用した。現在は新しいモーターを購入し交換して使用している。

＊9/6 リコンビネーターマグネットステアラーM3 用の±2A 直流電流電源出力異常
事象：出力電流が所定値まで上がらない。
原因：経年劣化と思われる。
対応：電源内部の基板を交換して復旧した。

＊11/2 冷却水循環装置チラーNo.1 のポンプインペラ破損
事象：運転時の冷却水流量が所定まで上がらないので点検したところ、冷却水が汚れ、フィ

ルタが目詰まりを起こしていた。
原因：チラーNo.1 の点検整備をメーカーが実施したとき、循環ポンプを分解点検し、消耗部品の交換を行い、再組み立てしたときにインペラの取付けが悪く運転再開したときにインペラがこすれフィルタが破片で目詰まりした。
対応：点検整備を行ったメーカーへ連絡し、インペラを交換して復旧した。

＊11/27 クライオポンプコンプレッサ No.1 異常停止
事象：クライオポンプコンプレッサ No.1 がダウンして動かなくなった。
原因：経年劣化と思われる。
対応：予備のコンプレッサと交換して復旧した。メーカー（ライボルト）に連絡したところ、型が古いため修理できないとのことである。

＊12/4 ヨウ素イオン源 Cs 温度コントローラー故障
事象：ヒーティングしない。
原因：不明
対応：予備と交換し復旧した。

＊2/6 C12 用ファラディカップの作動不良
事象：C12 用ファラディカップを出し入れできない。
原因：経年劣化による電磁弁の故障のため、圧縮空気が流れなくなった。
対応：電磁弁を交換して復旧した。

４． ^{14}C や ^{129}I 測定の現状、施設共用、前処理技術開発

^{14}C 測定では、日本海等で採取した海水や受託調査での六ヶ所沖で採取した海水、海水中粒子状物質等の有機態 ^{14}C、空気や樹木年輪中 ^{14}C を測定した[8-10]。^{129}I 測定では、環境試料（海水・土壌・牛乳・海藻等）、放射性廃棄物中の ^{129}I 測定を行った[11-13]。18 年度から開始した施設共用では、むつタンデトロン AMS 利用に関して 18 年度採択された成果公開課題は 6 件、成果非公開課題は 2 件であった。前処理技術開発では、研究者と協力して、大気中二酸化炭素からの ^{14}C 抽出・精製、海水溶存有機物、懸濁物中 ^{14}C 測定、海洋試料を含めた環境試料中 ^{129}I 測定の高度化等を行っている[8,10-13]。

５．おわりに

今後は、原子力研究開発機構の内部利用に沿って引き続き ^{14}C 及び ^{129}I 測定を継続するとともに、18 年度から開始した施設共用制度での外部利用者のニーズ等にも応えるため、前処理技術開発や測定のさらなる高度化を図っていく予定である。

参考文献

[1] Aramaki, T., et al., The AMS facility at the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B 172, 18, pp.18-23 (2000).
[2] Suzuki, T., et al., Performance of the new ^{129}I beamline at JAERI-AMS. Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B 223-224, pp.87-91 (2004).
[3] 北村敏勝、他、「原研むつ・タンデトロン加速器の現状」、第 18 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集 pp.31-35 (2005)
[4] 鈴木崇史、他、「加速器質量分析装置ヨウ素ラインの性能」、JAEA-Tech 2006-18 (2006).
[5] Suzuki, T. et al., High Sensitivity Measurement of ^{129}I by an Accelerator Mass Spectrometry. J. of Nucl. Sci. and Tech., Vol.43, No.11, pp.1431-1435 (2006).
[6] Amano, H. et al., Status and Future Plan of JAEA Mutsu Tandetron AMS Facilities, Proc. of the 1st East Asian Symposium on AMS, pp.77-81 (2006).
[7] 天野　光、他「原子力機構むつ・タンデトロン加速器の現状」、第 19 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集 pp.1-4 (2006)
[8] 田中孝幸、他、「溶存態有機物中放射性炭素測定の海水への応用」、第 9 回 AMS シンポジウム報告集 pp.70-73 (2007)

[9] Aramaki, T., et al., Circulation in the northern Japan Sea studied chiefly with radiocarbon. Radiocarbon, in press (2007).
[10] Otosaka, S. et al., Deep sea circulation of particulate organic carbon in the Japan Sea, in preparation (2007).
[11] 賀佐信一、他「溶媒抽出法を用いた加速器質量分析法による海水中 I-129 の定量」、Radioisotopes 56, No.4 pp.155-162 (2007)
[12] Suzuki, T., et al., Determination of ^{129}I in environmental samples by AMS and NAA using an anion exchange resin disk. Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B 259, pp.370-373 (2007).
[13] 桑原潤、他、「AMS による I-129 測定のための海藻試料の簡便な前処理法の開発」、第 8 回環境放射能研究会報告集、KEK レポート、印刷中 (2007)

3. 口頭発表：施設現状報告 3

3-1 原子力機構-東海タンデム加速器の現状

松田誠、左高正雄、竹内末広、月橋芳廣、花島進、阿部信市、長明彦、石崎暢洋、
田山豪一、仲野谷孝充、株本裕史、中村暢彦、沓掛健一、乙川義憲、大内勲
日本原子力研究開発機構　東海研究開発センター
原子力科学研究所　研究炉加速器管理部　加速器管理課

1. はじめに

原子力機構-東海タンデム加速器施設では 20MV ペレトロンタンデム加速器と、その後段線形加速器である 1/4 波長型超伝導ブースターおよび KEK と共同で設置した短寿命核分離加速実験装置（通称 TRIAC）の 3 種類の加速器が設置されている。当施設では共同研究や施設共用の形態で外部機関の方の利用が可能となっている。本報告では 2006 年度のタンデム加速器の運転、利用状況および保守整備の状況について報告する。

2. 加速器運転・利用状況

2006 年度のタンデム加速器の運転は 2 つのマシンタイム期間で行なわれ、利用運転日数は 201 日（約 4800 時間）で年間の 55.1%を占めた。定期整備・保守日が 94 日（25.8%）、休止日(整備期間の休日を含む)が 62 日(17%)で、運転期間に発生した故障の修理に 6 日(1.6%)、コンディショニングに 2 日（0.5%）をあてた。タンデム加速器の運転状況を図 1 に示す。最高加速電圧は 18MV であり、4 日間の実験利用が行われた。後半のマシンタイム期間では 12 月に加速管の真空破壊事故による加速管のデコンディショニングを発生したため 16MV 以上の電圧で運転されていない。発生電圧はユーザーの要求に応えるため 6.9MV から 18MV の範囲で利用され、12MeV の Ne ビームから 340MeV の Au ビームまで多様なイオン種とエネルギーで利用された。

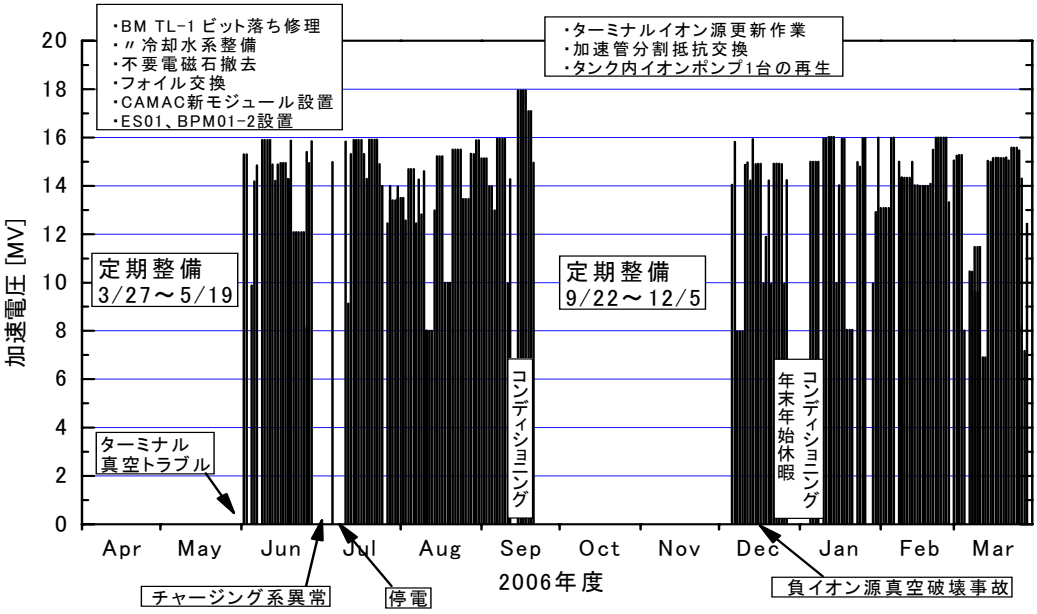


図 1：タンデム加速器の運転状況

図 2 に運転日数及び利用分野別の利用日数を示す。核物理が 83 日(41%)、核化学が 29 日(18%)、固体・原子分子や材料・照射実験が合わせて 69 日(33%)であり近年はほぼこの比率となっている。加速器開発は 20 日(10%)で、ビームの加速試験や短寿命核加速実験装置(TRIAC)のビーム開発実験にあてられた。

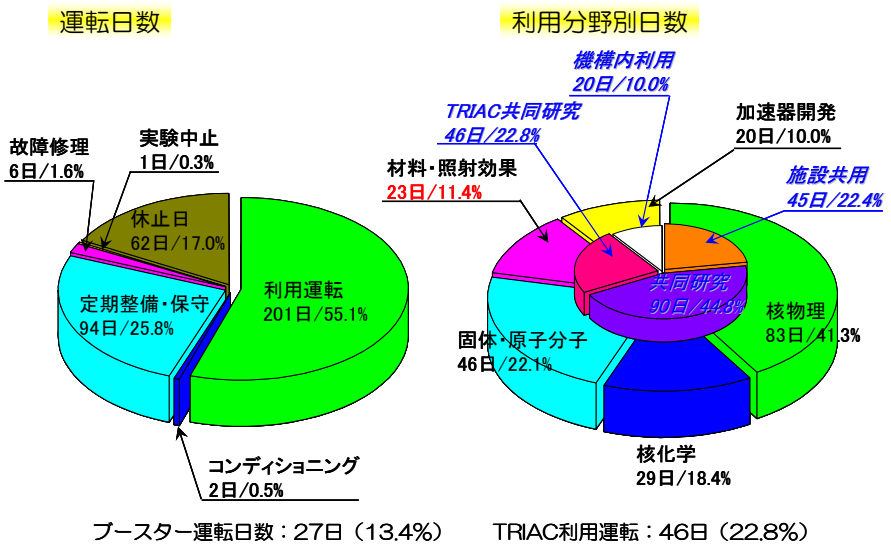


図 2：運転日数および利用分

図 3 にイオン種別の利用日数を示す。イオン種は 19 元素（26 核種）であり、O が 16%で核化学実験に、H、Li は各 14%程で主に短寿命核分離加速実験装置（TRIAC）の一次ビームとして利用された。Xe は 12%で主に材料・照射損傷の研究に利用されている。Ni や Kr などの中重核種はブースターを用いた原子核実験に利用されている。N、Ne はターミナルイオン源から+1 価のイオンを加速することで 10 数 MeV の非常に低エネルギーのビームが利用された。また TRIAC の本格運転が始まり、核化学実験等とあわせ照射室の利用が 83 日で全体の 41%を占めており、実験室の効率的利用を図る必要が出てきている。

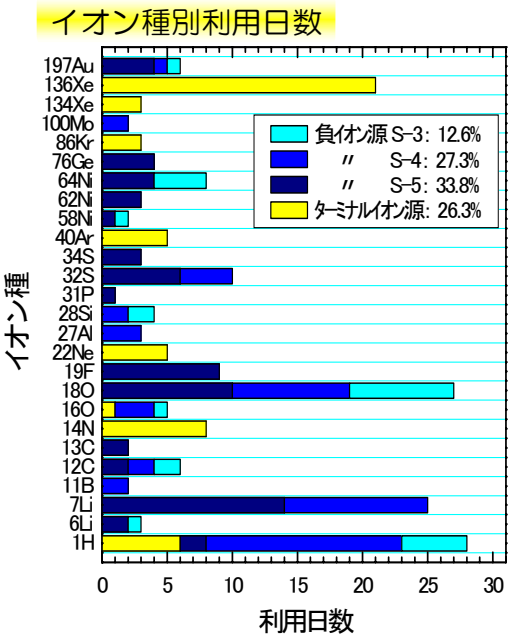


図 3：イオン種別利用日数

3. 保守・整備状況

加速器の定期整備は前期（3.27～5.19）と後期（9.22～12.5）の 2 度行った。定常整備以外では、前期は相次ぐ水漏れトラブルを発生していたターミナル 180 度偏向電磁石電源のゴムホースの更新をおこなった。電磁石本体の水漏れ対策としては今年度にコイルの更新を行う予定である。また運転時の水漏れ診断のため冷却水量をモニタできるように、微差圧系を利用した液面モニタを設置した。そのほか 180 度偏向電磁石の 20bitDAC の LSB より 7bit 目が動作しなかったためそのビット落ちの修理、使用しなくなった旧ターミナルイオン源用 45 度偏向電磁石の撤去を行った。

後期はターミナルイオン源の更新作業と、ビーム強度増強のために加速管の低インピーダンス化に向けて高エネルギー側加速管の電圧分割抵抗を 1.2GΩから 0.4GΩへの交換を行った。イオン源更新では現在の 10GHz の ECR イオン源を 14.5GHz のものへ更新する予定で、イオン源設置まで作業が完了していたが、RF 増幅器の予期せぬ故障により、再度 10GHz の物に

戻さざるをえず、計画は次年度へ延期となった。他にターミナルのイオンポンプ（1 台）の素子交換を行った。

その他ターミナル電圧の不安定現象が生じた際のタンク開放修理時（後述）にターミナルイオン源の入射 90° 偏向電磁石の消磁回路を自主製作し設置した。消磁電源は-0.25A～0.25A で-8mT～8mT の範囲で磁場を可変できる。それまでは残留磁場が 1～2mT ほど残っているためにステアリング効果があったが、設置後は素直なビームハンドリングとなった。

3.1. タンク開放修理に至ったトラブルとその対応

昨年度は、タンク開放修理を必要とするトラブルが 2 件発生した。

1 件目は定期整備を終えこれからマシンタイムを開始する 5/22 にターミナル発電用の回転シャフト起動と同時にタンク内の真空度が非常に悪くなり（～10^{+3}Pa）、加速管内に SF6 ガスがリークする事故が発生した。タンクを開放しリーク箇所を探したところ、ターミナルイオン源の粗引き用ポートの溶接部にひびが発生し、そこからの漏れであることが分かった。原子力機構のタンデム加速器のターミナルには内蔵機器に電力を供給するために 10kVA と 15kVA の 2 台の発電機（400Hz/3 相）が設置されている。それぞれの発電機は地上電位に設置されたモーターの動力を絶縁のためのアクリルシャフトを介して駆動されるが発電機直前にシャフトの回転数を増速するギアボックスが設置されている。今回のひび割れは 15kVA 発電機の設置不良によりギアボックスとの軸ずれにより発生したものである。それらを切り離したところ、軸ずれは約 2mm もあった。このためカップリングに無理な力が働き異常振動が溶接の弱かった部分を破壊したものである。15kVA 発電機の設置不良（設置当初は異常振動は見られなかったので設置が完全でなく徐々に発電機がずれて行った）が直接の原因であるが、原子力機構タンデムのような機械物（チェーンやアクリルシャフト）の加速器では機械等の故障による振動を考慮して真空チャンバーなどを製作する必要がある。今回の粗引きポートは溶接部が重複しており薄肉の溶接であった。また異常振動はストリッパーフォイル観測用の TV カメラでフォイルの異常な振動が観測されていたのであるが、事故を予見できなかったことも反省点である。

2 件目は 6/28 日にターミナル電圧 16MV での運転中に突然フルスパークが発生し、その後ターミナル電圧が不安定となる現象が発生した。このときチェーンへ電荷を乗せるインダクターの電圧とチャージング電流との関係が通常の約 60%になっていることが判明した。その他には異常は見られずタンク開放を行い、チャージング系の総点検およびクリーニングを行った。その結果、⊕側インダクターの 50ｋΩ抵抗の断線と、⊕側インダクター用高電圧電源の出力ケーブルのコネクタが抜けかかっていることが判明した。その他に異常が見られないためタンクを閉じ電圧発生試験を行ったところチャージング系は正常に動作しターミナル電圧も安定した。抵抗の断線は通常整備する箇所ではないので、いつから断線していたかは不明である。後日⊕側の高電圧電源からのケーブルを引き抜きチャージング試験を行ったが現象は再現しなかった。⊕側は電荷をチェーンに乗せる側ではないので、未だに 6/28 の不安定性の発生した確たる原因が得られずにいる。

その他のトラブルや故障では 12/14 に負イオン源のサンプル交換後のバルブ操作の間違いでイオン源部から入射ビームライン及びタンク内の加速管まで真空破壊を起こしてしまった。安全装置として高速遮断バルブが備わっているが、このときは動作せず電圧のかかっている入り口部の加速管（1～2MV ユニット）をデコンディショニングしてしまった。簡単なことではあるが「大事なところのバルブは 2 重に閉める。真空ゲージは絶対ではない。」というよく言われる教訓を経験することとなった。

3.2. 静電四重極レンズの電極コネクタの接触不良とその診断

負イオン源から 200kV の前段加速を受けタンデム加速器の加速管へ入射するまでのビームラインにおいてビームプロファイルモニタ（BPM）のビーム形状がゆっくりと変動する現象が発生した。この現象は 1μA ほどの比較的ビーム量の多いときに見られた。ビームダクト内部

で電気的に絶縁された物がチャージアップした場合に起こる現象に見られたのでその場所を特定したところ静電四重極レンズが怪しいということになった。ここでレンズ電極とコネクタの接触不良を確認することは電極が絶縁されているためにテスターなどではできない。そこで我々は図 5 に示すように 4 つある電極へのケーブルのうちの 1 つから高周波信号（$20V_{p-p}$/100kHz）を入力し、他の 3 本のケーブルからの出力信号を観測することで判断することとした。その結果一つの電極で信号が観測されないことからそのコネクタの接触不良を発見することができた。コネクタの中心電極の位置を測定するとフィードスルーと触れるか触れないかの微妙な長さで製作されていることが分かった。タンデムの建設時から使われていた物であるがこれまでは運良く接触していた物と思われる。原因はケーブルの製作ミスであり作り直した。他にも絶縁された電極（ファラデーカップなど）の真空内部の接続状況を診断する手法としては静電容量の測定やパルス信号の反射や遅延時間など（Inpulse 応答）を測定する方法が考えられる。

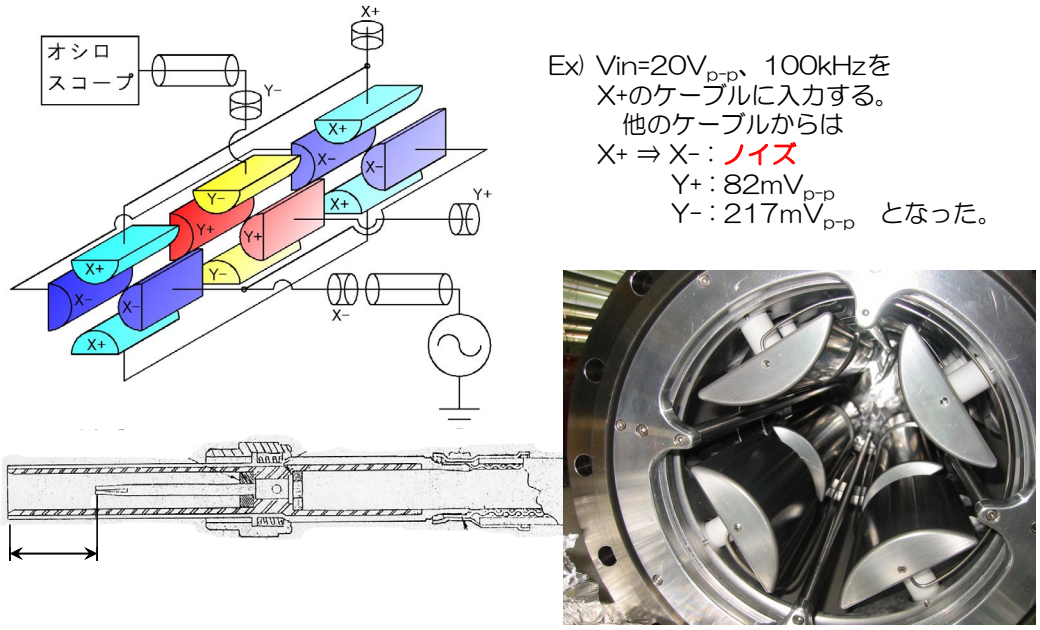


図 5：静電四重極レンズ内部と接触不良の診断法

4. まとめと今後

昨年度の加速器の運転利用時間は平年並みであった。真空トラブルによりターミナル電圧は 18MV までしか発生できていないが、今年度だめになった加速管を交換している。

発生したトラブルはこのような報告書に載らない知識や経験、作業時の心がけ等の技術継承が重要であることを示唆している。建設時からのスタッフが定年により少なくなってきており、今後課題となっていくと思われる。建設から 30 年あまり経過しているので未整備部や低頻度整備部の点検整備を計画的に行う必要があると考える。今後は高経年化部品の更新・整備によって安定運転の確保を目指し、今年度はターミナルの 180° 電磁石コイルの更新を伴う長期の大規模整備を行う予定である。同時にターミナルイオン源の更新や加速管分割抵抗の低インピーダンス化により、イオンビームの更なる大強度・高エネルギー化を進めるつもりである。

参考文献

[1] H.Miyatake et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B204(2003)746.
[2] 沓掛健一他；第 19 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集 p92-94.

3-2 京都大学工学研究科重イオン加速器によるビーム分析

内藤正裕　土田秀次　高木郁二　今井誠
法澤恵造　柴田裕実　伊藤秋男
京都大学大学院工学研究科

１．はじめに

我が国では、1960 年代の初頭に、粒子線加速器による陽子、重陽子、α粒子を利用した核物理・核化学実験が盛んに行われていた。一方、国外では、米国などが本格的な重イオン加速器研究を行っていた。この黎明期に、創設間もない京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻では、重イオンが物性に与える特異な現象を基礎的観点から研究対象とし、放射線物理学・化学、放射線損傷、原子衝突物理学、放射線計測など核物性分野に着目し、重イオン特別設備の概算要求を行い、重イオン加速器実験装置の設置が認められた。当専攻では先に述べた「重イオン核物性実験装置（昭和 42 年度設置）」に加えて、「金属イオン物性試験装置（昭和 53 年度）」および大学院最先端設備として設置された「京都大学工学部イオン分析実験装置（当時、昭和 63 年度設置）」を所有しており、共同利用設備等として最先端研究・教育に活用されている。平成 11 年には、工学研究科附属量子理工学研究実験センターが設立し、先の装置が移管され、これまで以上に共同利用の推進が強化された。

２．加速器

加速器は４基所有しており共同利用として稼働しているのは３基で、このうち年間を通じて活発に利用されているのが「重イオン核物性実験装置（シングルエンド４ＭＶバンデグラフ型イオン加速器）」と「イオンビーム分析実験装置（1.7ＭＶコックロフトワルトン型タンデム加速器）」である。ここでは主にこれら２基の加速器に関して説明を行う。

各加速器の平成 18 年度の運転時間はおよそ、バンデグラフ型加速器 3930 時間、タンデトロン 2560 時間となっている。

以下に、各加速器の仕様やバンデグラフ・タンデム加速器の平成 18 年の運転時間、バンデグラフ型加速器の設置以来の総運転時間を示す。

表１　各加速器の仕様

装置名	重イオン核物性実験装置		金属イオン物性試験装置	イオン分析実験装置
種類	バンデグラフ型 イオン加速器	バンデグラフ型 電子加速器	コッククロフトワルトン型 イオン加速器	コッククロフトワルトン型 タンデム加速器
メーカー	三菱電機	三菱電機		セイコー電子工業
最高電圧	4MV（現状最大電圧2．5MV）	2MV	250kV	1，7MV（ターミナル電圧）
イオン源	PIG型		Csスパッタ型負イオン源	Csスパッタ型負イオン源、 デュオプラズマトロン型
イオン種	H、He、C，N、O、Ne、Ar 等		H、He、B、C、O、Mg、Si、Ca、Ni、Cu、Ge　等	ほぼ全元素
ビーム電流	～50μA	～90μA	1～50μA	1～50μA
研究用途	衝突基礎課程、元素分析、照射、イオン注入（ビームライン5コース）	電子線・X線照射損傷、X線源	イオン注入、負イオン物理	衝突基礎課程、固体構造解析、元素分析、照射、イオン注入（ビームライン5コース）

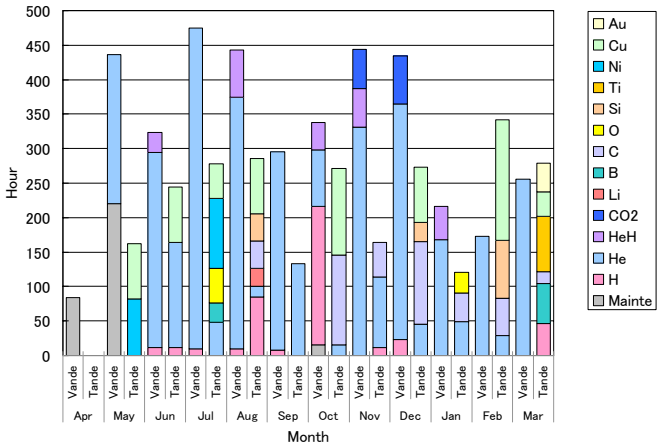


図１　平成 18 年度 バンデ＆タンデム運転時間

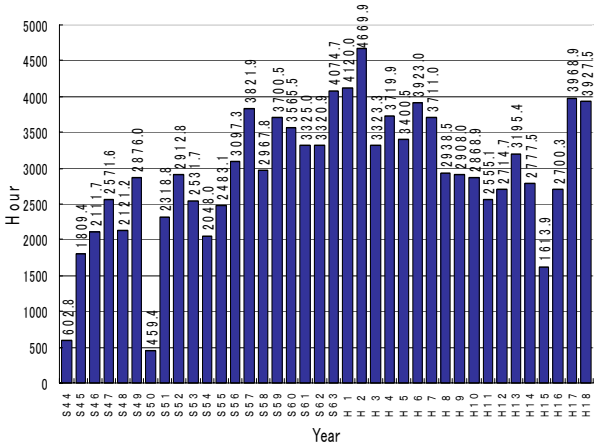


図２　バンデグラフ総運転時間

３．利用状況

これまでの利用状況等を説明する。原子衝突物理学関連では、重イオン衝突法による低エネルギー多荷イオンの生成とその応用、重イオン衝突による高分子／C_{60} 分子の電離・分解過程の相関メカニズム、斜入射イオンによる単結晶表面からの二次電子生成などのイオン・物質相互作用、照射損傷関連では、核反応法による核融合炉材料中の水素原子濃度分布、半導体中の格子欠陥観察、放射線治療用シリカガラスの表面改質、ビーム分析関連では、RBS 法によるクラスター照射による表面平滑化の評価や PIXE 分析法による大気環境分析などがある。ユーザーは、工学研究科に所属する研究室を主に、他部局（エネルギー科学、理学、医学、農学、情報学）や附置研究所（エネルギー理工学、国際融合創造センター、原子炉実験所）、他機関（奈良国立博物館、京都府立大、大阪大、ＫＥＫ）などである。年間の利用者数は、教職員と学生を合わせ約 230 名（内学部学生数 50 名）となっている。

４．試み

昨年度は、イオンビーム分析技術の充実を図るため、大気圧下での PIXE 分析装置やチャネリング RBS 分析装置から成る図３(写真)に示すような、ビーム分析専用装置を製作した。

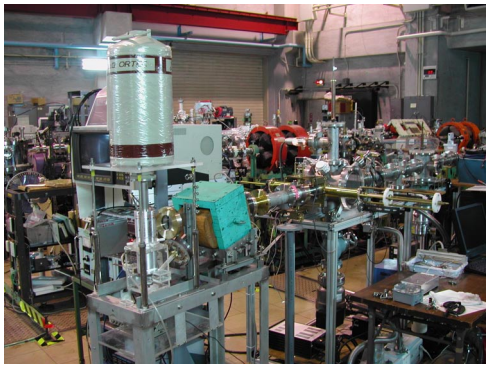
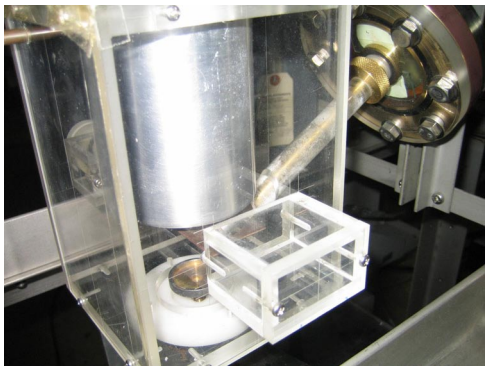


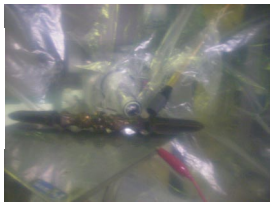
図３　PIXE・RBS 装置写真

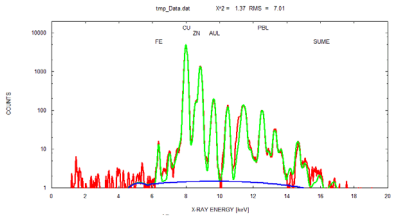


今年度からはこれらのビーム分析装置を用いて、学外を含めた「イオンビーム分析支援サービス」を行っている。ここではこの装置を利用して奈良国立博物館と共同研究で行った考古資料の分析結果を示す。

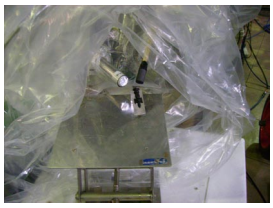
図４ 計測風景と計測結果

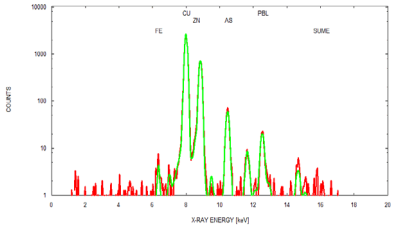
分析試料：独鈷杵（どくほうきね）





分析試料：千手観音



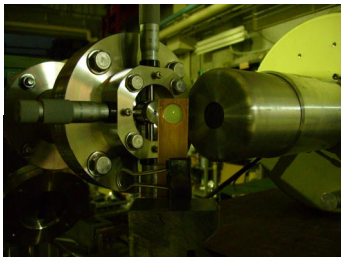


他にも、オープンキャンパスでの公開実験や学生実験などでも利用され活躍している。

また、最近では、高知工科大や理研の協力のもとガラスキャピラリーを使用したマイクロイオンビームによる微小領域の分析（大気圧下での分析）の試みも行っている。

各種キャピラリーのビーム電流量の測定と 30μm のワイヤーでビームがさえぎる事ができるかの実験を行ってみた。結果は表２に示してある。

図５ ビーム電流の測定（写真）



ワイヤーによるビーム径の測定（写真）

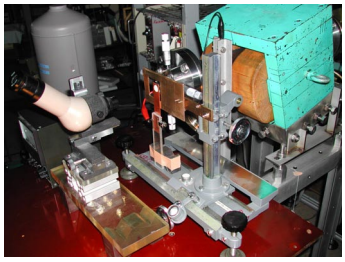


表２　ビーム電流測定結果

イオン	先端内径	通過後電流量	直前FC電流量	装置真空度	ワイヤー
H	10μm	70pA	12nA	6.4×10^{-5} Torr	
He	1μm	20pA	400nA	5.2×10^{-5} Torr	消える
	5μm	80pA	400nA	5.2×10^{-5} Torr	消える
	10μm	100pA	400nA	5.6×10^{-5} Torr	消えない
	30μm	測定不可	400nA	1.2×10^{-3} Torr	測定不可

５．おわりに

バンデグラフが運転開始より 39 年、タンデトロンが 19 年とどちらも長きにわたりその時々に故障等も解決しながら毎年長時間の運転時間を確保しているのは、維持グループの運営と熟練した技術者の方々のご協力の賜物であるといえる。しかし、近年この熟練された技術者の退職なども含めメンバーの入れ替えが目立ち、また装置の長期使用による老朽化や法人化により運営費も縮小していくなか、今後これまでのような運転時間を確保できるかは大いに疑問が残る部分ではある。しかし、これらに対応しながら従来のような利用者の要求に応えられるように運営していかなければならない。

4. 口頭発表 : 技術開発

4-1 ダイナミトロン加速器のアップグレード

藤澤政則、永谷隆男、松山成男、小松清勝、坂本隆司、橋本悠太郎、石井慶造
東北大学大学院工学研究科　量子エネルギー工学専攻

はじめに

東北大学のダイナミトロン加速器（RPEA-4.5 型）は、米国 RDI 社製シュンケル型シングルエンド加速器で 1974 年に設置された。加速電圧範囲は 0.7MV から 4.5MV で、ターミナルデッキ内にはデュオプラズマトロン型イオン源、レンズシステム、ウイーンフィルターが搭載されており、H、D、He イオンを数 mA まで加速することが可能である。さらに高電圧ターミナルには、nsec パルス化装置が搭載されており、ポストチョッパーと併用することにより、半値幅で１～2nsec、ピーク電流が数 10mA のパルスビームを得ることが可能である。加速管は太さの異なる二本をつなぎ合わせた構造で全長 3.9m、139 段で構成されている。

これまで加速器の改良やビームラインの増設を行ってきた。その中で大きな改良は 1981 年に昇圧部分で用いられる真空管整流器をオリジン社製の半導体整流器へと交換した。交換によって加速器の稼働率向上だけでなく、安定性の向上や使用電圧範囲の拡大へもつながった。1999 年にはポストチョッパーを開発し、パルスビームの 1/10 幅を大幅に縮小し、TOF 実験の精度が大幅に向上した。

建設時の実験内容は中性子関連が主なもので、ビームラインは中性子用のライン 1 本とイオンビーム実験用のライン 1 本の計 2 本であった。その後、実験の多様化に伴い 1996 年には汎用 PIXE ライン、2001 年にはマイクロビームラインが増設された。

現在は、PIXE 分析ライン、原子物理基礎実験ライン、マイクロビームライン、汎用中性子ライン（中性子標準場）、イオンビーム照射ライン、イオンビーム分析ラインの 6 ラインで構成されている。年間運転時間は 2,000 時間程度であり、中性子実験の時間数は年々減少しイオンビーム実験の割合が増加している。

マイクロビーム実験が開始された頃から、さらなる電圧やビーム電流の安定度向上が要求されてきた。本稿ではイオン源の制御を信頼性の高い光ファイバー制御へ移行するためのアイデアと試作経過について報告する。

現状の問題点と改善手法

高圧ターミナルデッキのイオン源やレンズ等の電源は、定電圧安定化回路を持たない構成で、ターミナルデッキに置かれたスライダックをグランド側から絶縁棒を介してモーターで回転させることにより制御する方式であった。そのために、１）保守に使用する高耐電圧部品の入手が困難になりつつあった。2)スライダックの滑りやねじれによって再現性が非常に悪く、制御には経験と熟練が必要であった。3)電源の安定性が不十分である。等の問題点を抱えていた。

この古典的な制御方法を光ファイバーに置き換え、高安定度の電源を用いることにより、イオン源を制御する電源群の監視が容易になると同時に再現性や安定性に優れた制御が可能となる。しかしながらダイナミトロン加速器での光ファイバー制御をこれまで何度か試みたものの、時折発生する放電によって光ファイバーが破損、焼失が起こり実用に至っていなかった。

さらに放電による光ファイバーの破損、焼失による影響は二次的な被害を大きくしていた。それは圧力容器内に飛び散った破片が整流用ダイオードやコンデンサなどの隙間に入り込むことで、高電圧発生の安定度が下がり放電を誘発させてしまうのである。放電被害からの復旧は多くの時間を要するため、共同利用されている本加速器での光ファイバーの敷設は、慎重を期すると同時に容易に踏み切ることが出来ない特有の背景があ

った。

しかしながら、前述した問題を解決するためには光ファイバーの敷設を避けて通れないと判断した。また使用する電源についても外部制御可能で安定度の優れたスイッチング電源に変更し、その制御を FA（Factory Automation）システムの中枢コンポーネントとして使用されている PLC（Programmable Logic Controller）を利用することが有効と判断した。

全体の構成を考えたとき、ターミナルに搭載されている発電機は三相 100V、5KW で周波数が 700Hz の物である。この為に PLC を動作させるための直流電源やイオン源に加える高圧電源群は汎用品を安易に選択できない難しさを含んでいた。

基本構成

システムの構成は光ファイバーの本数が最小ですむ図 1 の回路構成をとることにした。

PLC の選定は小型軽量であると同時に、今後予想される装置の拡張性を重視し、イーサーネット網を使った制御を早くから取り組んでいた横河電機の FAM3 シリーズを選択した。

制御室の PC（Personal Computer)には、PLC 専用プログラム（WideField2)と主に GUI（Graphical User Interface）を担当する LabVIEW を同時に起動させ、イーサーネット網を使い PLC の CPU ユニットへ制御信号を送る。放電による誤動作や破損を避けるため、CPU ユニットを加速器本体の外に設置した。

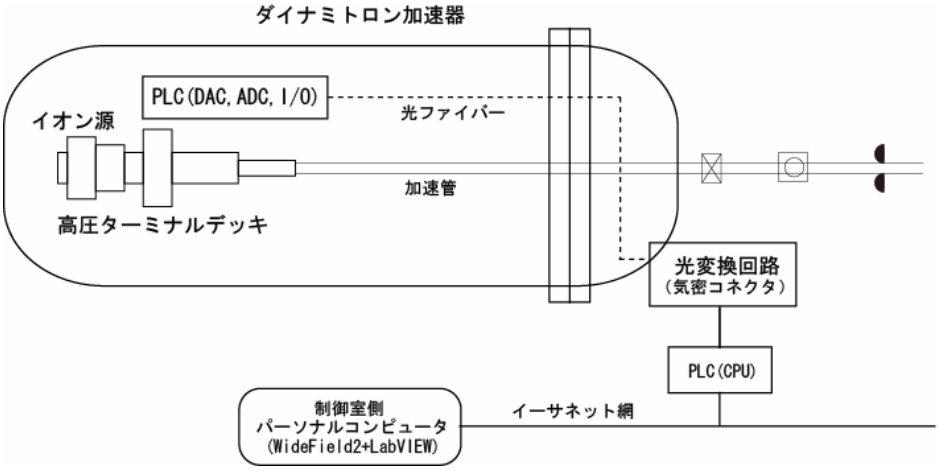


図 1　回路構成

ターミナルデッキには､端末として電源コントロールに使用する DAC(Digital Analog Converter)ユニットとそれを監視するための ADC(Analog Digital Converter)ユニット、さらにステータス信号処理用の I/O（Input/Output)ユニットを置き、光ファイバーで結ぶことにした。

ターミナルデッキは絶縁ガスが 5 気圧に充填された圧力容器内にあるため、光ファイバーの取り出し付近で放電が起き破損すると絶縁ガスが漏れ出す危険性があった。この為、光信号を一旦電気信号に変換し気密型コネクタを通し信号を導き、さらに光変換を行いターミナルデッキまで導くことで放電破壊によるガス漏れの危険性を回避した。本方式の最大の特徴は、ターミナルとグランド間の通信が一対の光ファイバーで済むところにある。これにより、放射線損傷による劣化の際も一対の光ファイバーを交換するだけで済むためメンテナンスが容易になることを期待した。

予備試験

光ファイバーの敷設はこれまでの経験と放電の観察により、グランド側からターミナ

ルデッキまでの間の電位勾配が不規則な部分で誘発されると考えた。そこで、強制的に電位固定をするための治具を製作し、治具にアクリルパイプを取り付けターミナルデッキからグランドまで光ファイバーをこのパイプに沿って敷設した。

ターミナルデッキ内に設置した DAC は、その出力電圧を直接 ADC に入力し、制御室に設置した PC からイーサーネット網を経由した光ファイバーの信号で DAC を変化させ、その値は逆の手順に従って PC の画面に表示させた。無論、PLC の端末や光変換回路はシールドを施した。

加速器を昇圧させたところ、加速電圧が 3MV 付近に達した時に放電が発生した。発生と同時に PC と PLC 間の通信が途絶え ADC の値を表示しなくなった。二回目の放電では加速電圧も上がらなくなったため、タンクを開放し原因を調査したところ放電によって光ファイバーが破壊されていることが確認できた。また、光ファイバーのコアに使用されている石英ガラスを保護する被覆が放電によって激しく損傷したことで炭化し、高抵抗となり加速電圧が上がらないこともわかった。さらに観察を進めると放電は加速管に近い部分ほど被害が大きいこと、光ファイバーの電位固定が有効であることも判明した。

以上のことから敷設は

１）光ファイバーの被覆をはぎ取る。

２）加速管から遠ざける。

３）電位勾配をさらに滑らかにする。

この三点を考慮した上で再設置を試みることにした。

光ファイバー材質、敷設の見直し

PLC で使用されている光ファイバーはメーカーから指定された製品で、その材質は光が通過するコアは極細の石英ガラスで出来ており、周りを絶縁被覆で保護する構造になっていた。被覆が放電によって破壊されると高抵抗となり加速電圧が上がらなくなるため、絶縁被覆を取り除くことを考えたが構造上、石英ガラスと絶縁被覆の分離は出来なかった。

そこで、光伝送効率が落ちるが装飾用に使用されている被覆の無いプラスチックファイバーを利用することを考え予備試験に踏み切った。その結果、特別な端面処理を施さなくても短い通信距離では十分に実用可能であることが分かり採用した。石英ガラス製からプラスチック製のファイバーに置き換えたことで、光コネクタは特殊工具を使用することなく現場での加工を容易にする相乗効果が生まれた。

敷設に関しては加速管から遠く、電位勾配が滑らかな場所を再考したところ、高圧ターミナルデッキの電圧を直接読み取るための HV ディバイダが有効であると考えた。この部分は 1,692 本（22MΩ/本）の抵抗が直列接続された倍率器としての働きを持っている。倍率器は 6 本の抵抗器が組になり、屈曲した直列構造で構成され、組ごとに抵抗器を保護するためのスパークギャップとガードリングが施されている。これに沿って敷設することで滑らかな電位勾配を期待した。また、光ファイバーをガードリングの内側に通すことにより、放電が直接光ファイバーに届かない効果も期待した。

まとめ

総合的な動作試験を材料実験やマイクロビーム実験と並行し実施した。実験中は常に光ファイバーの状態を監視しながら連続運転を続け、一年が経過した現在、加速器は数十回の放電が発生したが、敷設した光ファイバーを始め PLC や光変換回路に被害を受けることはなく安定に動作している。

ダイナミトロン加速器の光ファイバー制御は設置以来の懸案事項であったが、今回の試みによって、運転状況を直接監視することが可能になった。このことはコンピュータによる運転支援や自動化に結びつくことになる。PLC のプログラムは LabVIEW を併用

し、イーサーネット網を用い制御信号を送ることで、これまで使用していた数百本の信号ケーブルは一本の LAN ケーブルと一対の光ファイバーケーブルに置き換わり、保守点検の面からも有益である。今後は実際に電源群のコントロールを行い、イオン源の高精度制御と運転の簡素化を図って行く予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、東京工業大学の井頭先生、登坂氏、日本原子力研究開発機構の古渡氏、産業技術総合研究所の松本哲郎研究員には大変お世話になりました。
特に松本研究員には業務繁多にも関わらず、装置全体の構成や実配置を丁寧にご教授頂きました。ここに心から感謝申し上げます。

4−2 Recent Developments and New Applications of NEC Ion Beam Systems

G.A. Norton
National Electrostatics Corp.
Middleton, Wisconsin U.S.A.

Last year a multi year development to improve the beam quality of the multi cathode SNICS source was completed by a group lead by Dr. John Southon at the University of California-Irvine. This is one of several new developments related to Accelerator Mass Spectrometry systems. This talk will discuss new technical developments of the NEC AMS systems and other ion beam systems. Also, new applications in the area of pharmaceutical development will be presented.

The market for new Pelletron accelerator systems continues to be very strong. There are now NEC ion beam systems in 29 countries for a wide variety of applications. In addition, 27 of the older tandem accelerator models, EN, FN, MP, and ESTU, are now using the Pelletron charging system.

To meet these demands, there have been significant developments in NEC ion beam systems for Accelerator Mass Spectrometry (AMS), new developments in the NEC Multi Cathode Source of Negative Ions by Cesium Sputtering (MC-SNICS), and new developments related to material analysis.

AMS Systems - At the present time, the largest demand for accelerator systems is in the area of Accelerator Mass Spectrometry (AMS). This is illustrated by the fact that NEC has now shipped more than 500,000 cathode holders for AMS samples. These cathode holders are in use for sixty MC-SNICS sources throughout the world. There are about 14 general purpose Pelletron systems being used for AMS for a significant amount of the beam time available. In addition, NEC has built 27 dedicated AMS systems. All of this is in addition to AMS systems by other manufacturers. Clearly, AMS is a very strong field.

A significant number of these systems, about 18, are dedicated to carbon AMS only for the measurement of $^{14}C/^{12}C$. These systems are based both on the standard tandem configuration and the new Single Stage configuration (1,2). Figure 1 shows a typical compact carbon AMS system based on a 500 kV tandem Pelletron. There are now 10 of these systems in operation throughout the world. Figure 2 shows a typical, dual ion source Single Stage AMS system during construction. This system is very similar to the tandem configuration except that there is no acceleration after the negative ion stripper. The stripper, high energy analysis, and detector system are all located on a 250 kV open air deck. There are now six of these systems in operation and an additional two in manufacture for shipment in late 2007 and early 2008.

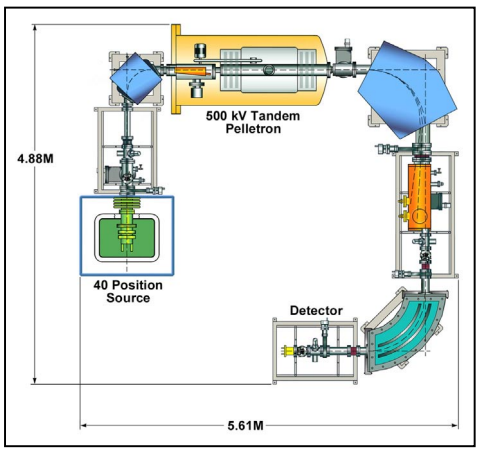


***Fig. 1**. Compact, carbon AMS system based on the 500 kV tandem Pelletron equipped with the 40 sample MC-SNICS followed by 90° magnet with a biased chamber for sequential injection. The high energy analysis magnet has a wide exit pole to allow the measurement of ^{12}C and ^{13}C. The ^{14}C beam is further analyzed by the 90° electrostatic spherical analyzer before the solid state detector.*

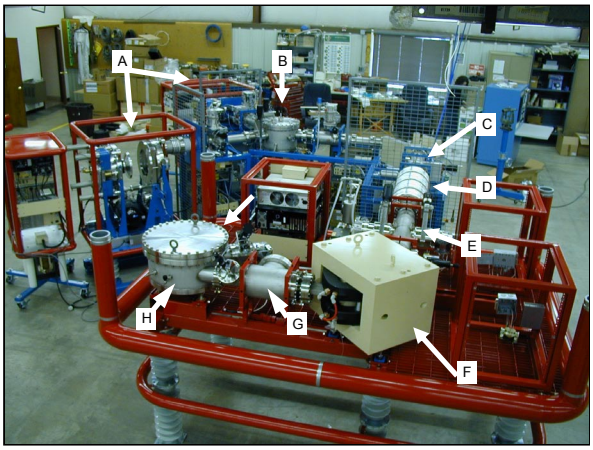


***Fig. 2**. Single Stage carbon AMS system with dual 134 sample MC-SNICS **(A)** followed the ±45° electrostatic spherical analyzer **(B)** before the 90° magnet **(C)** with a biased chamber for sequential injection into the acceleration tube **(D)** to the stripper **(E)** on the 250 kV deck. The high energy 90° analysis magnet **(F)** is immediately after the stripper and is followed by the off-set Faraday cups **(G)** for ^{12}C and ^{13}C beam current measurement. The ^{14}C beam is analyzed by the 90° electrostatic spherical detector **(H)** before the solid state detector **(I)**.*

The performance of these systems is as good or better than the older higher voltage AMS systems. The precision has been measured to much better than 3 per mil. Backgrounds are routinely better than 55,000 years. In addition, the group at University of California - Irvine (3) has demonstrated a background of better than 75,000 years by using specially prepared Ceylon graphite in their compact tandem AMS system. The same experiment has not been done for the Single Stage AMS system.

AMS Pharmaceutical Application - There are a large number of applications for AMS. One of the fastest growing is in the area of pharmaceutical research. About seven of the carbon AMS systems that NEC has shipped are being used entirely for biological applications.

Specifically, AMS is being used in the field of pharmacokinetics which is the study of the life cycle of a drug or nutrient in the body. In this application, ^{14}C is added to the drug or nutrient to be studied, which is given orally or injected into a human volunteer. Then, the amount of ^{14}C present in the blood plasma, urine and feces is precisely measured. AMS is far more sensitive and precise than any other isotopic analysis technique. This provides some of the most basic information required for drug development. No other technique can provide information concerning the time a drug or nutrient resides in the body to the same sensitivity as AMS. In addition, AMS can identify metabolites formed by the body from the nutrient or drug that are not observable by any other technique.

This application requires rapid throughput of AMS samples. During on-site acceptance tests, NEC analyzed 2000 modern carbon samples to within 2% precision within 5 days on a tandem Pelletron AMS system equipped with a 134 sample MC-SNICS.

AMS MC-SNICS Development - A group comprised of personnel from the University of California at Irvine, Woods Hole Oceanographic Institute, and The University of Arizona, headed by Dr. John Southon has investigated and performed improvements to the NEC MC-SNICS source (3,4). NEC has been working with this group to improve the standard design and to provide an upgrade program for existing MC-SNICS in the field.

The single most important change to the source is replacement of the conical ionizer with a spherical ionizer and the removal of the cesium focus lens which is replaced by an immersion lens. In addition, the heated cesium feedline has been replaced by a vacuum insulated feedline. Power supplies for Cs focus and the Cs line heater have been eliminated. There are many other smaller changes such as a redesign to the extractor lens assembly to increase vacuum conductance and a new support system using rails to make routine ion source service much easier (figure 3).

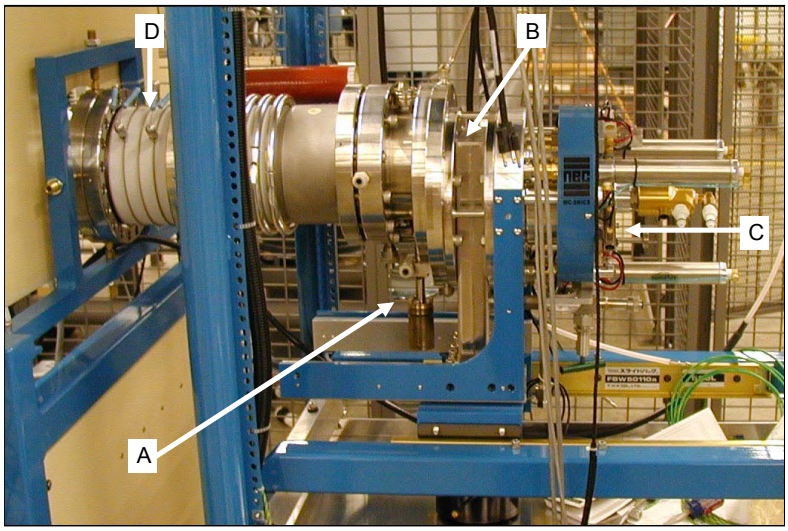


***Fig. 3**. Forty (40) sample multi-cathode source of negative ions by Cs sputtering (40 MC-SNICS). **A.** Cs oven with vacuum insulated feed line. **B.** Isolation valve for fast cathode wheel change. **C.** Pneumatic cathode indexing system **D**. Extractor - gap lens assembly.*

The result has been a significant increase in negative ion beam current with much better emittance. Dr. Southon reports injecting 150 μA of C-. For modern carbon, he reports the measurement of 40 samples within 2 to 3 per mil within 24 hours (3). Dr. Baoxi Han has reported a calculated emittance of 40 pi mm mr at 55 keV (5).

This new source configuration is now the standard for all new MC-SNICS. The first system equipped with this configuration is the Single Stage AMS system presently in use at the Australian National University. During on-site tests, precisions of better than 2 per mil were measured using an injected beam current of about 40 μA. The time to reach this precision using the standard, OXI, was about 70 minutes. The time to reach 5 per mil precision is about 12 minutes. The background was measured at 57,800 years using Alfa Aesar graphite.

RBS Development - There is still strong interest in basic materials analysis systems. There are now almost 40 Pelletron systems equipped with RBS analysis end stations. The most recent system to be accepted on-site is at the State University of New York at Geneseo in the U.S. This model RC43 analysis end station is equipped with a quadrupole quadruplet (6) to provide ion beams from 2 mm to 20 microns in diameter (figure 4).

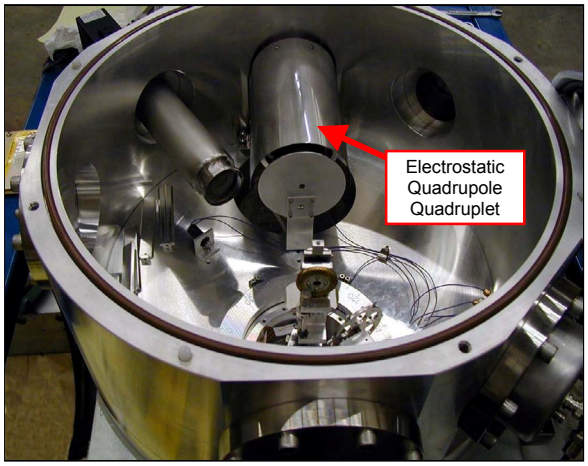


Fig. 4. Model RC43 analysis end station equipped with the electrostatic quadrupole quadruplet lens in the collimator position. Primary application is micro RBS with 20 micron diameter He^+ beams.

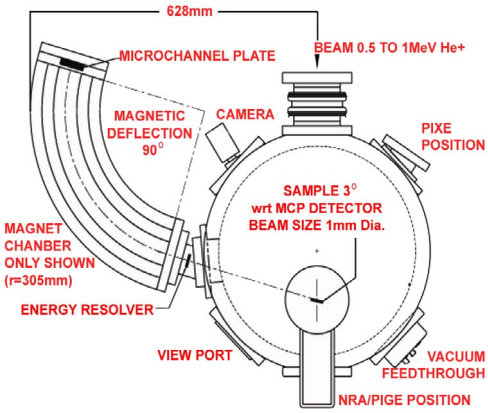


Fig. 5. High resolution microchannel plate detector on the RC43 analysis end station.

NEC is also developing a high resolution RBS system. This system is presently in manufacture. It will be equipped with a 90° magnet on one port of the model RC43 analysis end station. It is equipped with a micro channel plate. This high resolution detector system is designed to be used with relatively low energy ion beams, 0.5 to 1 MeV He^+ beams. The first measurements are expected to be performed before the end of 2007 (figure 5).

ECR Source in 3 MV Single Ended Pelletron - The group at the JAEA 20UR tandem has shown that an ECR source can be successfully installed in the terminal of an electrostatic accelerator. NEC has built a 3 MV Single ended Pelletron with an ECR source in the terminal. This system is presently onsite at Commissariat A L'Energie Atomique (CEA) in Saclay, France. This system is designed to produce high charge states for argon, neon, krypton, xeon, and metallic ions such as iron and nickel. This is a four chain system with three turbo molecular pumps on a Nanogan source (7) in the high voltage terminal. On site at CEA, preliminary beam testing obtained 70μA of He^{++}, 2.0μA of O^{+6}, 0.10μA of Ar^{+11}, 0.25μA of Fe^{+11}, 0.27μA of Ni^{+9}, and 2.75μA of Xe^{+10}.

Other Projects - At the present time, a 5 MV tandem Pelletron is presently in manufacture. This is a highly versatile system that initially will be equipped for materials analysis. It is to be installed at the National Centre for Physics at Quad-i-Azam University in Islamabad, Pakistan.

An open air 400 kV ion implantation system was recently shipped to the Michigan Ion Beam Laboratory at the University of Michigan in the U.S. It is equipped with the Danfysik 921A source. Although capable of very high currents, this system has a specification limited to about 100 μA. For Ar^+, 440 μA were produced at 400 keV.

Another open air deck was recently shipped to the Oak Ridge National Laboratory for use in their High Power Target Laboratory (8). This deck is rated at 250 kV and is about 6 m by 4 m. It is equipped with two 50 kVA generators. This is the instrumenation deck and is the third of three decks. The first two, shipped earlier, are for the ion source and the beamline. This is part

of the ORNL radioactive ion beam ion source research project.

Conclusion - Inquiries for Pelletron systems for a wide variety of applications continue to be strong. It is clear that AMS will continue to be the dominant application for accelerator use for some time. However, it is also clear that new applications will continue to develop that will require MeV ion beams.

References

(1) J.B. Schroeder, T.M. Hauser, G.M. Klody, G.A. Norton, Radiocarbon 46(2) (2004) 1.

(2) G.M. Klody, J.B. Schroeder, G.A. Norton, R.L. Loger, R.L. Kitchen, M.L. Sundquist, Nucl. Instr. And Meth. B 240 (2005) 463.

(3) John Southon, Guaciara M Santos, to be published in the Proc. of the 19th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, August 20-25, 2006.

(4) John Southon, Guaciara M Santos, Nucl. Instr. and Meth. B 259 (2007) 88.

(5) Baoxi Han, John R Southon, Mark L Roberts, Karl F. von Reden, to be published in the Proc. of the 19th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, Aug 20-25, 2006.

(6) G.M. Klody, J.B. Schroeder, J.A. Ferry, T.J. Pollock, Nucl. Instr. and Meth. B56/57 (1991) 704.

(7) Manufactured by Pantechnik S.A., 13 rue de la Resistance, 14400 Bayeux, France.

(8) M.J. Meigs, R.L. Auble, J.R. Beene, D.T. Dowling, J.W. Johnson, R.G. Juras, A.J. Mendez, G.D. Mills, S.W. Mosko, P.E. Mueller, D. Shapira, J.W. Sinclair, D.W. Stracener, B.A. Tatum, “Status and Upgrades of the Holifield Radioactive Ion Beam Facility”, presented at the 37th Symposium of Northeastern Accelerator Personnel, Institute de Recherches Subatomique, Strasbourg (F), 13-16 October 2003.

4-3 タンデム高周波トランスの故障についてⅠ
～トランスの放電損傷～

霜田勉、羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、森順一、木村忍、
濱地寿和、廣戸慎、橋本鉄也、島田麻亜久
若狭湾エネルギー研究センター

１．はじめに

2006 年の 11 月 23 日に、発振管のプレート電流 I_p の過電流によるタンデム加速器トリップが発生した。加速電圧が 4.5MV 以上の領域において、加速電圧が設定電圧に到達して一定になっているにもかかわらず、発振管のプレート電流が漸増し、5MV 以上ではその上昇度がはなはだしいということに気付いた。

2005 年度のタンデム定検終了直後からその傾向が見出され、上昇度が徐々に大きくなってきているということが分かった（図１）。

暫定的に低めの設定電圧で運転していたが、プレート電流に異常の見られはじめる電圧が徐々に下がっていった。その過程で、プレート電流の急上昇とともに発振器が停止した。

前述した要因で、タンデム加速器の運転が不可能となり、2007 年 2 月から予定されていたタンデム定検を前倒しして、タンデムを開放することとなった。

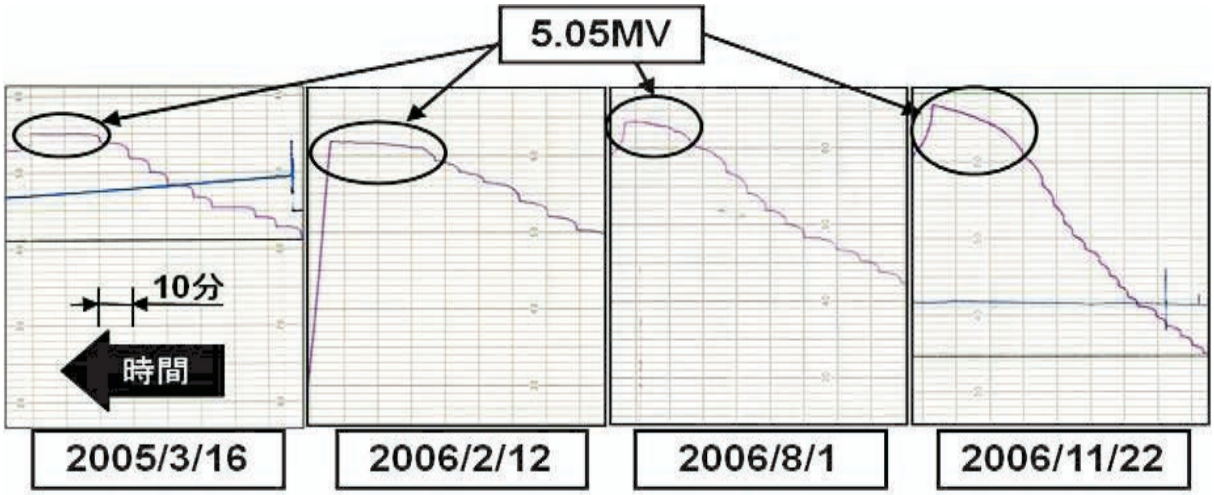


図１　加速電圧 5.05MV 時における、プレート電流の比較

２．原因の推定

２－１）シェンケル整流回路

タンデム加速器の加速電圧（ターミナル電圧）は、多段倍電圧整流回路の一種であるシェンケル整流回路を用いて発生される。（図２）

この回路を用いてターミナル（N 点）では $2NU_0$ の高電圧が得られる。したがって、ターミナル電圧が安定している時には、高周波電圧も一定であるはずである。

２－２）一次側入力高周波の発生

トランスの一次コイルには 3 極管が直列に接続され、3 極管のグリッドを二次側の共振周波数でスイッチングすることで、他励振させている。

ターミナル電圧はトランスの二次電圧に比例する。また、二次電圧は、一次電流 I_p に比例する。ターミナル電圧の制御は一次電流を調節することにより行われる。したがって、ターミナル電圧が一定であれば、一次電流 I_p も一定のはずである。（図３）

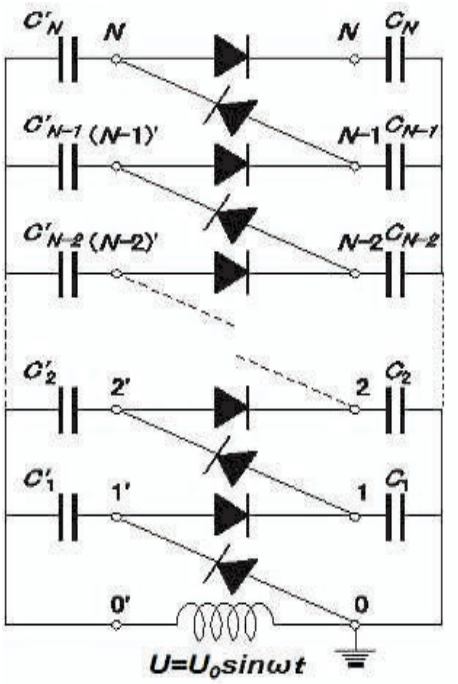


図２　シェンケル整流回路

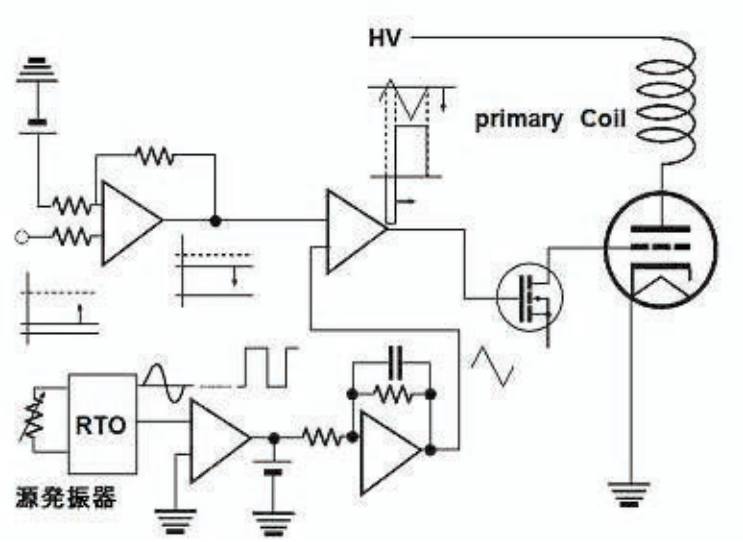


図３　一次側高周波の発生

２－３）ターミナル電圧が一定にも関わらず、一次電流 Ip が増加する原因の推定

２－２、２－３で、正常な状態であれば、ターミナル電圧が一定になった後は、プレート電流 I_p も一定になることを述べたが、図１で示したような、プレート電流 I_p が漸増しているという事実があり、その原因を推定した。

図４の C_0 は、高周波電極とタンデムタンク間の静電容量である。この C_0 と高周波トランスのコイルとで、共振回路を作っている。R_0 は高周波電極とタンデムタンク間の抵抗なので、本来は無限大である。本来は無限大であるはずの R_0 が放電により有限の値を持つ、それにより、二次電圧 V_s が小さくなり、ターミナル電圧が低下するので、GVM による測定値もおのずと下がる。フィードバック回路に、GVM からの低い測定値が入力されるため、ターミナル電圧を設定値に保つように一次電流 I_p が増加する制御が働き、二次電流 I_s も増加するので、放電によるリーク電流がさらに大きくなり、R_0 もさらに小さくなる。

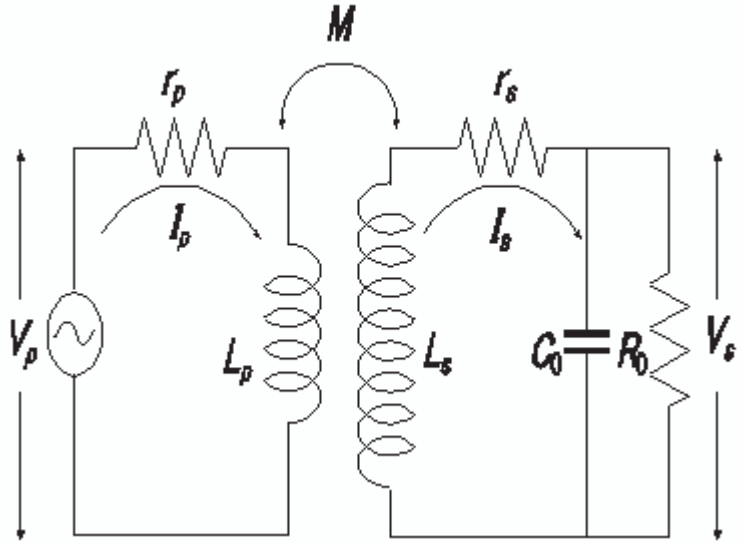


図４　高周波トランスの共振回路

３　高周波トランス部の放電

まずタンデムを開放し、定検前の準備をする際に、同時に RF 電極に放電箇所がないか目視点検したが、放電の痕跡は見当たらなかった。その後、RF タンクを開放してみると、RF コイルの２次側から RF 電極への高周波フィードに放電の痕跡を発見した。（図５）

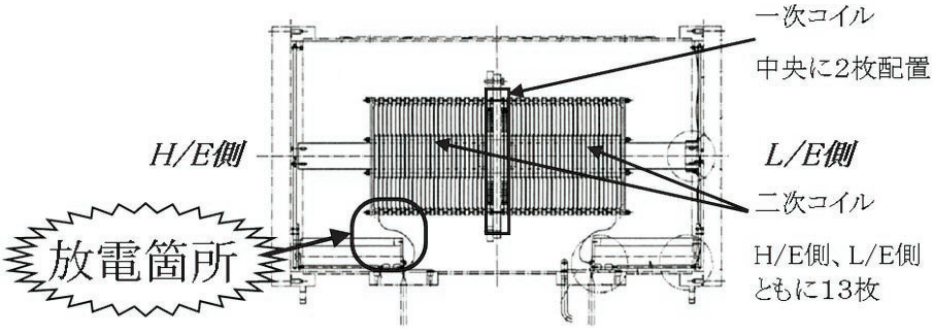


図５　　高周波トランスの構造

RF コイルの二次側から RF 電極へのフィード部分と冷却水配管（タンデムのタンクと同じ GND 電位）との間で放電している。被覆が完全に溶けて飛び散っている。また、絶縁ロッドも溶け落ち、樹脂が一部無くなっていることを発見した（図６）。推測した高周波電極と大地間のリークがまさにこの放電と思われる。

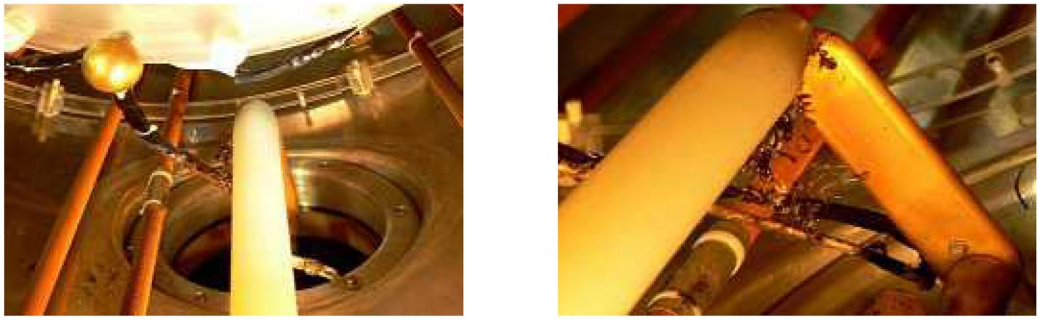
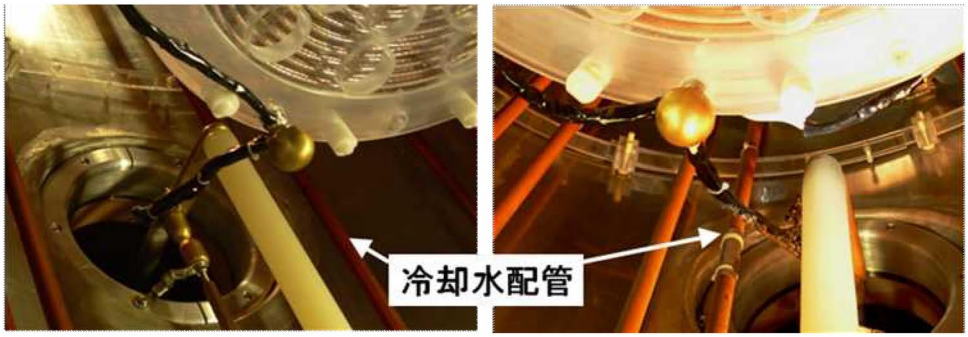


図６　損傷の様子

４　放電に対する考察とその改善

４－１）パンケーキ～高周波電極の配線ルートの比較

放電していなかった L/E 側と放電があった H/E 側の配線ルートを比較すると、H/E 側はあきらかに冷却水配管と近接している。（図７）



L/E 側　　H/E 側

図７　パンケーキ～高周波電極の配線ルートの比較

４－２）放電原因の推定とそれに対する対策

放電の原因として以下のことを推定した。

- パンケーキのリッツ線をいくつかのストランドに纏め直し、ポリエステルテープで被覆、更に熱収縮チューブで被覆している。→多重に被覆しているため、被覆内部に空気溜りが出来て、充分絶縁ガスと置換しないのではないか。
- ケーブル同士のつなぎは圧着端子とボルト・ナットで行っている。 また、被覆の補強、ケーブルの固定に結束バンドを使用している。→この部分のシャープエッジで強電界部分を作っているのではないか。

上記より、気中放電を起し、ケーブル経路が GND 電位により近い H/E 側で気中放電が GND 間とのアーク放電に発達したと考え、下記の改善を行った。

- ケーブル経路を変更した。
- 結束バンドを極力使用しないようにした。
- 作業終了後、真空引きを行ったあと２日間放置し、隙間の排気が充分行われるようにし、そのあと絶縁ガスの充填を行った。

４－３）改善後の様子

図８が改善後のものである。配線を絶縁ロッドの上に引き廻すルートに変更して、冷却水配管との距離を広げた。

また、ケーブルをまとめる結束バンドのエッジ部分も強電界箇所になりうるため、結束バンドの使用も控えた。

図８　改善後の様子

５　まとめ

昨年末に、プレート電流の異常に気付き、終には高周波発振器が故障した。その後の点検の結果故障の原因は、事前の推定通り、高周波トランス－大地間の放電であった。

今後の高電圧オペレーションにおいて、発振管プレート電流のモニターが重要であり、プレート電流が一定しない現象を発見した時は、高周波電極－大地間の放電を疑う必要があることがわかった。また、高周波ケーブルの端末処理の繊細さが絶縁ガス中での気中放電の引き起こしにくさに影響しそうである。

4-4 タンデム高周波トランスの故障についてII
～トランスの特性測定～

霜田勉、羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、森順一、木村忍、
濱地寿和、廣戸慎、橋本鉄也、島田麻亜久
若狭湾エネルギー研究センター

１　トランスの解体

重度の事故であったため、他への影響も考慮して、毎年の定検では、　二次コイルの高電圧側(RFタンクの両端）の1～2枚しか点検しないところ、今年度は全てのパンケーキを取り外して1枚1枚の点検を行った。
（一次コイル×2枚＋二次コイル×26枚＝28枚）

１－１）パンケーキの点検

二次コイルのパンケーキ26枚のうち、最も多数の放電痕が発見されたものの写真である。写真の黒丸箇所が全て放電痕である（図１）。巻線に沿って広い範囲で並んでいる放電痕もあった。これは、リッツ線をポリエステル外皮で束ねていく工程で不良があり、その部分に空気溜りが出来て、充分に絶縁ガスと置換しないうちに昇圧したために起こった放電と考えられる（図２）。
今回初めて解体したRFコイルの中間部分でハンダ付け作業時に付着したと思われるハンダが見つかった。導入時より、ずっとハンダが付着したまま使用していた（図３）。

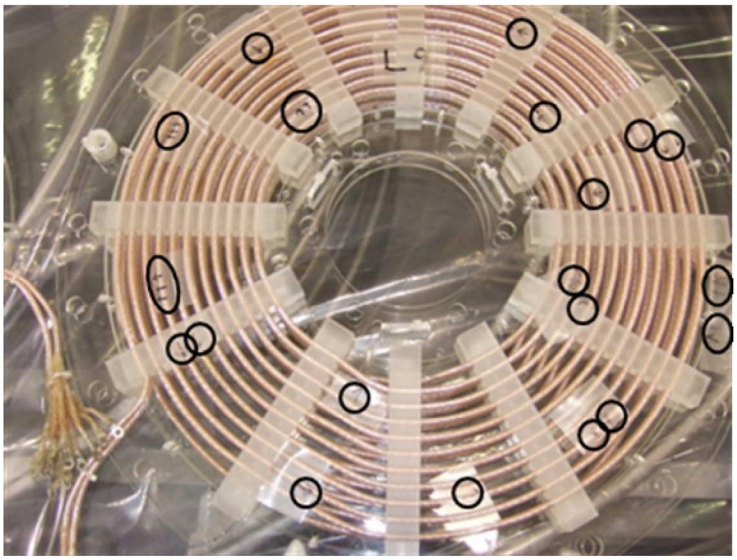


図１　パンケーキの放電痕

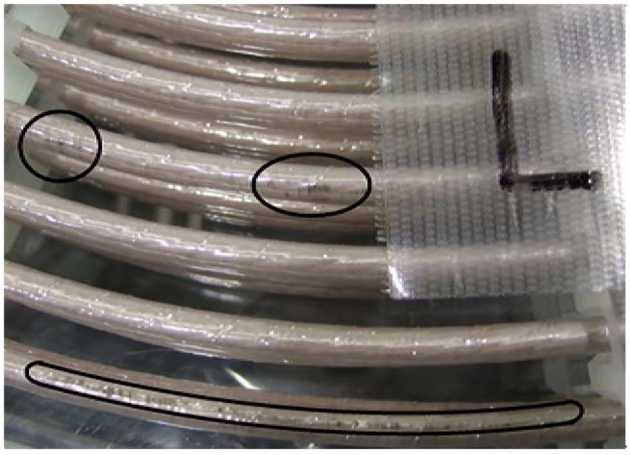


図２　連続した放電痕

図３　パンケーキに付着したハンダ

１－２）パンケーキの交換

取り外したパンケーキを目視点検した結果、全 28 枚中 19 枚のパンケーキに放電痕があることが確認されたが、想定外の事故であったため、予備品が不足し、表１の対応で済ませた。

表１　放電痕の発見されたパンケーキの対応

対応内容	数量
①　放電痕の多い順に新品と交換。	5 枚
②　絶縁板の損傷などで、取り外し保管していたパンケーキのリッツ線を利用して、 巻きなおして交換。	2 枚
③　過去の点検にて取り外し保管していたもののうち放電痕が少ないものを選別して使用。	1 枚
④　放電痕の少ないものは、そのまま使用。	11 枚

２　パンケーキの測定

２－１）パンケーキ単体のインダクタンス測定

今回の補修において、巻き直し作業を行ったため、パンケーキ 1 枚 1 枚の自己インダクタンスの測定を行った。表２に示すように、大きな差があるものは無かったので問題無しとした。

表２　パンケーキの自己インダクタンス測定結果

一次コイル		二次コイル	
H/E 側	21.7μH	最大	205.8μH
L/E 側	21.1μH	最小	195.4μH
平均	21.4μH	平均	198.9μH

２－２）トランス組み上げ後のインダクタンス測定

一次コイル、二次コイルをそれぞれ組み上げ自己インダクタンスを測定した結果を表３に示す。２－１、２－２の結果から、パンケーキ間の相互インダクタンスの推定も行った。

表３　トランス組み上げ後のインダクタンス測定

一次コイルを 2 枚接続した状態	48.6μH
二次コイルを 13 枚接続した状態	L/E 側　10.55mH H/E 側　10.58mH
二次コイル全体＋RF 電極電圧平衡化用補正コイル	20.3mH

３　トランス２次側の共振特性測定

RF 電極と加速器タンクの間の静電容量と２次コイルにより直列共振回路が形成されるように、図４の接続をした。

ファンクションジェネレーターで V1 を一定にして、周波数を変化させて交流電源を供給し、V2 が最小になる周波数を調べた。

測定に用いた R_m（測定用外付け抵抗）及び、V1（供給電圧）はそれぞれ R_m =49.23Ω、V_1=10.4V とした。

測定の結果、共振周波数は、41.55kHz であり、その時の V_2 は、2.12V であった。

また、共振周波数においては、電流と電圧は同位相であるとして、測定した V_1, V_2 から共振周波数において、R_m に流れる電流を求めて二次コイルの抵抗を計算した結果、12.60Ω と求められた。

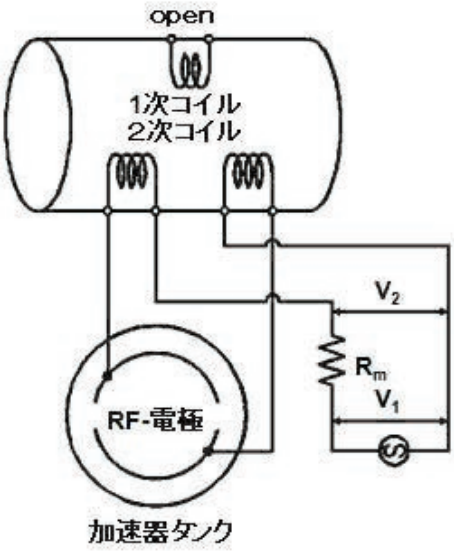


図４　２次側の共振特性測定

４　トランス１次側から見た負荷の共振特性測定

図５のように二次コイルを正規配線とし、一次コイルにファンクションジェネレーターを用いて、周波数を変化させながら、電源を供給し、周波数に対する負荷のアドミッタンスの変化を測定した。

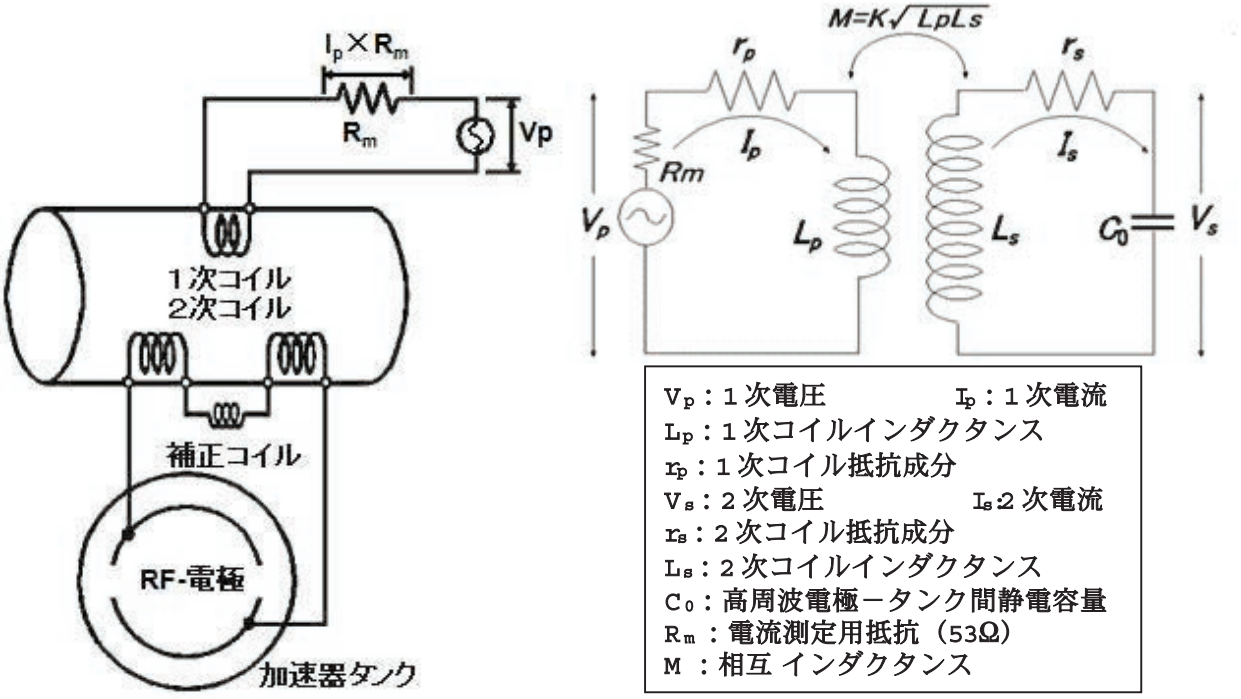


図５　トランス１次側から見た負荷の共振特性測定及びその等価回路

測定結果を図６に示す。図中の黒丸が、運転時の周波数付近のアドミッタンスと V_p に対する位相の測定結果である。また実線は、計算結果である。計算には、1 次コイルのインダクタンス 48.6μH、2 次コイルのインダクタンス 20.3nH、2 次コイルの抵抗 12.6Ω を実験事実として用いた。

測定値を再現するように RF 電極の対地容量と 1 次、2 次コイル間のカップリング係数をそれぞれ C_0=729pf、K=0.34 と求めた。カップリング係数はメーカーデザイン値 0.35 とよい一致をみている。

また、図６より共振周波数は 41.35kHz となり、1 次電圧に対する 1 次、2 次電流は、それぞれ、1 次電流 $I_p/V_p=(1.51887-0.05086i)\times10^{-3}$、2 次電流 $I_s/V_p=-(0.01886+1.05192i)\times10^{-2}$ となる。

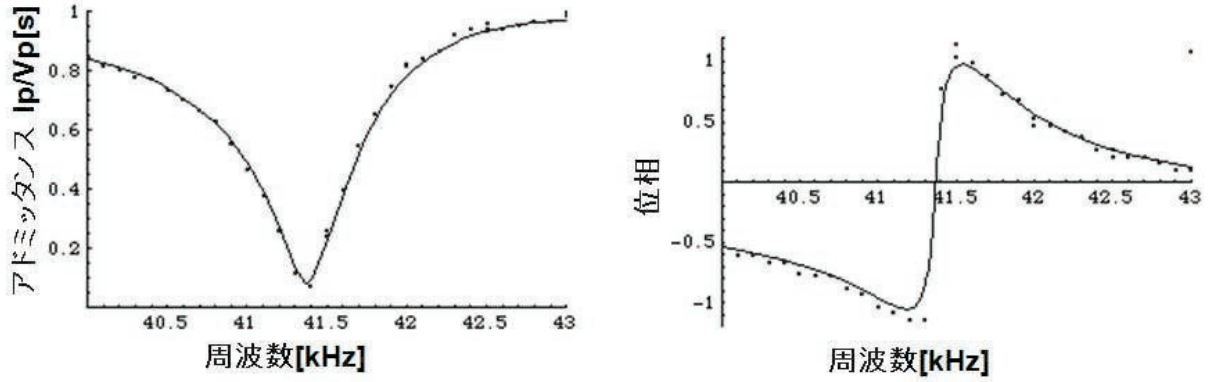


図６　トランス１次側から見た負荷の共振特性測定の測定結果

5　２次コイルの電圧分布

パンケーキ間の相互インダクタンス、1次 2 次カップリング、アドミッタンスから、2 次コイルパンケーキ 1 枚ごとの電圧分布の推定を行った。

グラフの 2 次コイルパンケーキナンバーは H/E 側を#1～13、1 次コイルと中間のアクリル板を#14, 15, 16 、L/E 側を#17～29 とした。

今までは、トランスの高電圧側である端のコイルで放電が起こりやすいと考えていたが、この結果より、中間付近の方がむしろ放電しやすいことが分かった。

今回の点検で多数の放電痕が発見されたパンケーキの位置もこの結果と一致する。

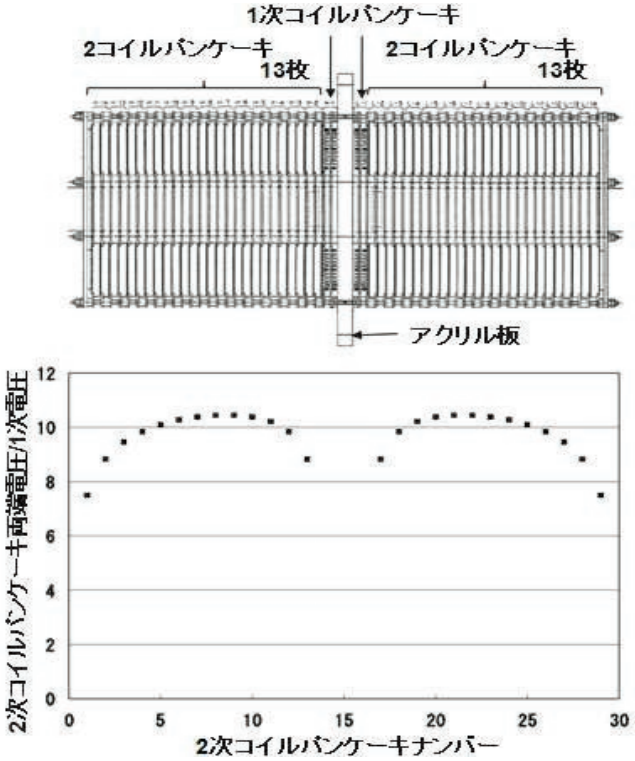


図７　２次コイルの電圧分布

6　まとめ

次回の定検からは、高周波トランスと RF 電極－タンク間の放電調査をあらためて慎重に行うことが重要である。さらに、トランスを構成するパンケーキの電圧分布の計算結果から、今後の点検においては、今回と同様にトランスを解体して全てのパンケーキの放電痕をチェックする必要があることがわかった。

また、今回トランスの特性測定を行った結果より、パンケーキ単体、トランス全体のインピーダンス測定及び、共振特性の測定結果や定検直後の昇圧試験においてのプレート電流のモニターも最終合否基準に採用すべきである。

最後に、本年度の定検終了後に昇圧確認を行った結果を図８に示す。プレート電流が漸増する現象は、見られなくなった。この結果より、今回の点検での修理・改善によって異常箇所が修繕され正常に戻ったことが確認できた。

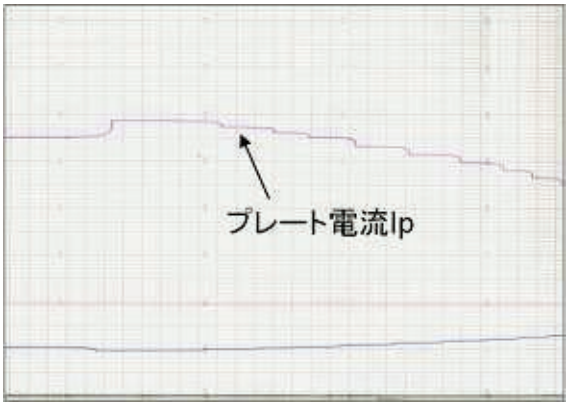


図８　本年度定検終了後の昇圧結果

5. 口頭発表 : 応用 1

5-1 ガラスキャピラリを使った 6MeV ^{15}N イオンの収束の試み

根引拓也、成沢忠
高知工科大学

関場大一郎、マーカス・ヴィルデ、小倉正平、山下博、松本益明、福谷克之、岡野達雄
東京大学生産技術研究所

米村博樹、笠木次郎太
東北大学原子核理学研究施設

岩村康弘、伊藤岳彦、栗林志頭真
三菱重工業

松崎浩之
東京大学大学院工学系研究科

１．はじめに

新規のイオンビーム収束用レンズとしてわずかなテーパーを持って出口内径がミクロンからサブミクロンオーダーになるガラスキャピラリが注目され、さまざまなイオン種やエネルギーを使ってイオンビーム収束や応用研究が行われている[1-3]。ガラスキャピラリにイオンビームを入射させると、ガラス内壁とイオンビームとの相互作用によってイオンビームは収束され、出口から出射される。このとき透過したイオンビームは単純な出口/入口面積比で計算された個数よりも大きくなり、イオンビームが収束されることが確かめられている。しかしこの収束効果はイオン種や入射エネルギー、またキャピラリの形状に大きく依存している。その大きな要因はガラス内壁の帯電、およびガラス内壁表面原子の原子核との散乱によるものであると考えられているが、未だ解明されていない。収束効果がどのような機構によって生じるかを知ることは、イオンビーム収束に最適なキャピラリの形状を決めるためにも必要である。

そこでガラスキャピラリを使って 6.4 MeV $^{15}N^{2+}$という高エネルギー重イオンを収束したとき、キャピラリのテーパー角に収束効果がどのように依存するか調べるために、テーパー角の異なるキャピラリを用いて収束実験を行った。

２．実験内容

実験は東京大学の MALT のタンデム加速器を用いて行われた。イオンビームはキャピラリ入口の前方に置かれたファラデーカップで計測され、それを入射ビーム電流値とした。また入射イオンビームは Q レンズによってキャピラリ入口で 2 mm φに絞り入射させている。キャピラリの軸調整機構には並進 2 軸、傾き 2 軸の 4 軸駆動のステージを用いている。キャピラリを透過したイオンビームは試料上で計測される。試料上での電流値を正確に見積もるために、試料をファラデ

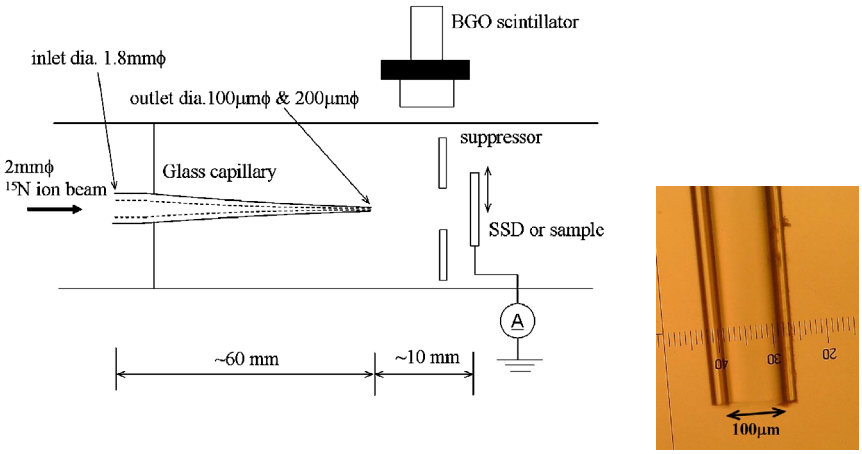


図 1　実験装置の概要とキャピラリ先端（～100μmϕ）の顕微鏡写真

ーカップの中に収納し、電流値の測定を行った。

ガラスキャピラリを透過したイオンビームのエネルギー損失の有無を調べるために、キャピラリ透過後のイオンビームを直接 Silicon Surface Barrier Detector （SSD）を用いてエネルギー測定を行った。このときのキャピラリは出口内径が 100 μmϕのものを使用した。

次にキャピラリ形状による透過率の違いを調べるために、テーパー角の異なるキャピラリを使って NRA 測定を行い、得られたデータを電流値で規格化したピークの高さから収束効果のテーパー角依存性を調べた。この実験で用いた核反応は $^{15}N + ^{1}H \rightarrow ^{12}C + \alpha + \gamma$ の共鳴核反応で、6.385MeV ^{15}N イオンを入射させることにより、水素と核反応を起こし 4.43MeV の γ 線が放出される。このときの共鳴幅は 1.8keV と非常に狭いため、入射エネルギーを走査することで水素の深さ方向分布の測定が可能となる [4,5]。図 1 に装置の概要とキャピラリ先端部分の顕微鏡写真を示す。

ガラスキャピラリの作製には内径 1.8 mm、外径 3.0 mm の中空ボロシリケイトガラス管を用いた。テーパー角の異なるキャピラリで実験を行うために、プラーの張力を変えてキャピラリの作製も行った。その実験で使用したキャピラリは、出口内径は～200 μmϕとし、出口 1 mm 前から出口までのテーパー角はそれぞれ a) 7 mrad、b) 76 mrad、c) 160mrad である。

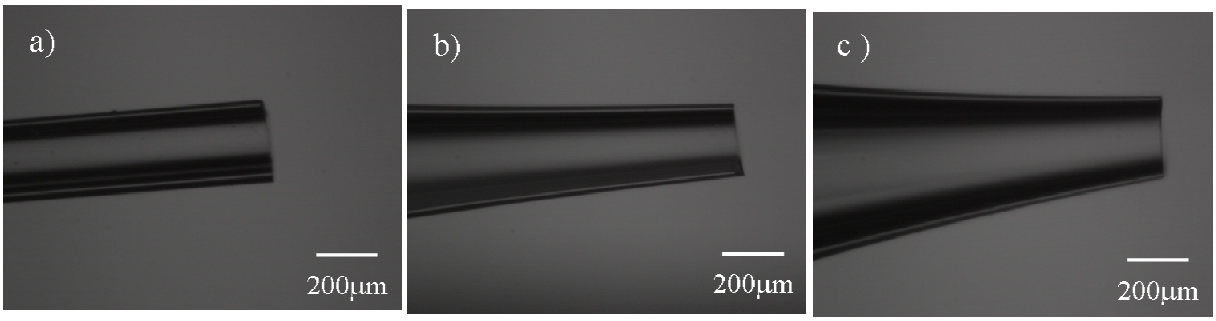


図 2　テーパー角の異なるキャピラリの全体写真と出口付近の顕微鏡写真

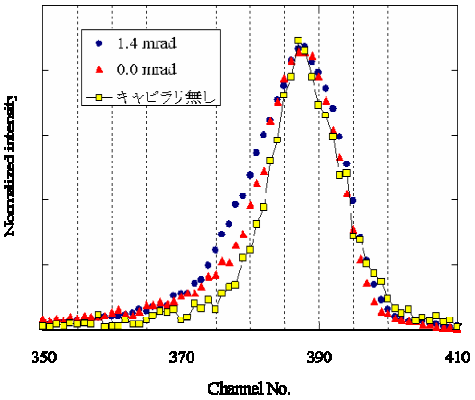


図 3　透過イオンビームのエネルギー測定結果

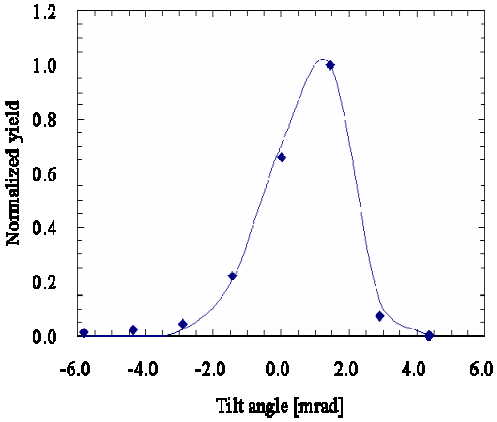


図 4　透過イオンの角度依存性

NRA 測定用の試料には Pd/Y/Si 膜を用いた。この試料は室温で 1 気圧の水素雰囲気中で暴露することにより、Pd 膜を透過した水素原子が Y 中に吸蔵されることが知られている[6]。したがって、人工的に水素の濃度を調整することが出来る。

3．結果と考察

SSD でキャピラリ内を透過してきた 6.3 MeV ^{15}N イオンを測定した結果、キャピラリがビーム軸にアラインメントされているときは、エネルギー損失はほとんど確認されなかった。また、キャピラリの角度を振って測定したところ、1.4 mrad で最も多くの透過イオン数が得られたがわずかにエネルギーを損失した粒子も含まれていた（図 3）。またキャピラリを傾けたときにイオンビームが透過できる角度の半値幅は±1.5 mrad であった（図 4）。透過イオンのエネルギー損失はガラス内壁の原子核による散乱のためと考えられる。角度幅が非常に狭いことはガラス内壁の帯電によるイオンビームのガイド効果が小さいためと考えられる。帯電によるガイド効果が大きいならばキャピラリの幾何学的な限界である 5mrad 以上になるはずである[3]。

この実験では、入射電流が～60nA に対して、試料上では～8nA となった。入射電流値 I_i と透過電流値 I_o の比は $I_o / I_i = 0.13$ である。一方、出口の面積を S_o、入口の面積を S_i とすると、その面積比は $S_o / S_i = 0.012$ となるので、Focusing factor は約 10 倍となった。

キャピラリの角度による違いを調べる実験で、キャピラリで収束したイオンビームを用いて NRA 測定を行ったときの結果を図 5 に示す。スペクトルには 2 つピークが現れている。低エネルギー側のピークは 6.38MeV から立ち上がりが始まっていることから、Pd 膜表面についた水素からのピークである。このピークは 6.41MeV まで減少しているが、これは Pd 膜中にはほとんど水素が残らないためである。その後 6.43MeV から次のピークが始まっている。これは Y 膜内に吸蔵された水素ピークである。また、それぞれのキャピラリで得られたスペクトルを、試料電流値で規格化して比較したところ、テーパー角が 7 mrad から 76 mrad、160 mrad に大きくなることで、規格化したピーク強度が表面水素、Y 膜中ともにそれぞれ 70%、60%に小さくなっている。これはガラス内壁のテーパー角が大きくなりすぎたことで、入射イオンがチャンネリング臨界角以上の角度で入射することになるため前方散乱されず、ガラス内壁に埋もれてしまったためと考えられる。そのためキャピラリ内を透過できなくなるイオンの個数、または衝突によってエネル

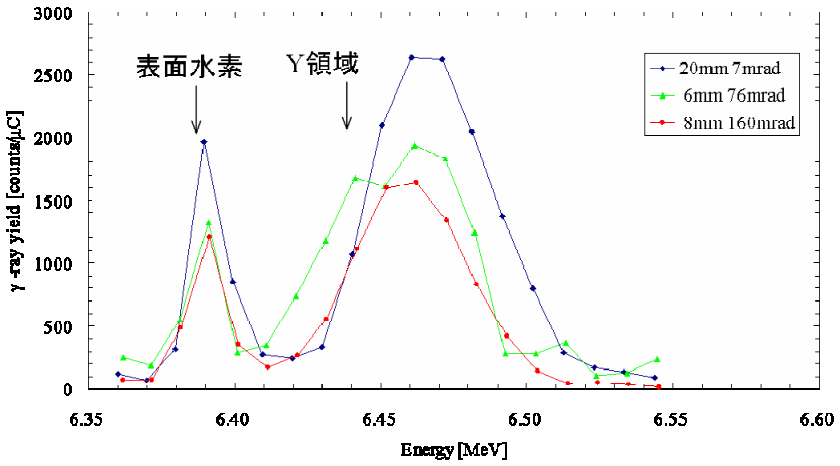


図 5　テーパー角を変えた時の Pd/Y 膜の NRA 測定の結果

ギーを大きく減少したイオンの個数が増えてしまった。

4．まとめ

6.4MeV ^{15}N のような高エネルギー重イオンでも、他のキャピラリ収束ビームと同じく、キャピラリ透過後に大きなエネルギー損失が無いことが確認された。しかしキャピラリを傾けたときに透過するイオンビームの強度は、傾き角の半値幅が±1.5 mrad と非常に狭く、キャピラリ内壁の帯電によるビームガイド効果はほとんどないと言える。また、キャピラリのテーパー角を変えて NRA 測定した結果では、テーパー角が 7 mrad から 160 mrad に大きくなることで、ピーク強度が 60%に小さくなった。以上の結果から、高エネルギー重イオンビームがキャピラリによって収束される主な原因は、イオンビームとガラス内壁原子とのクーロン散乱によるものが支配的である。

参考文献

1）T. Nebiki, T. Yamamoto, T. Narusawa, M. B. H. Breese, E. J. Teo and F. Watt, J. Vac. Sci. Technol. A21 (2003) 1671-1674

2）T. Nebiki, M. Hasnat Kabir, T. Narusawa, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B249 (2006) 226-229

3）T. Ikeda, Y. Kanai, T. Kojima, Y. Iwai, T. Kambara, Y. Yamazaki, M. Hoshino, T. Nebiki and T. Narusawa, Appl. Phys. Lett. 89 163502 (2006)

4) K. Fukutani, Curr. Opin. Solid. State Mater. Sci. 6 (2002), p. 153

5) K. Fukutani, M. Wilde and M. Matsumoto, Phys. Rev. B64, 245411, 2001

6) J.N. Huiberts, R. Griessen, J.H. Rector, R.J. Wijngaarden, J.P. Dekker, D.G. De Groot and N.J Koeman, Nature, 380 (1996), pp. 231-234

5-2 放医研 SPICE におけるビーム偏向・収束系の改造

濱野毅、石川剛弘、磯浩之、小西輝昭、酢屋徳啓、安田仲宏、○今関等
(独)放射線医学総合研究所　研究基盤技術部

1.はじめに

加速器からの粒子線を絞り局所的な照射を可能にするマイクロビーム照射技術は、放射線による生体影響研究の強力なツールとして国内外の研究機関が開発を進めている。その理由は、発ガンに最も関連するとされている細胞核等へ選択的な照射が可能であること、当たった或いは当たらなかった細胞の変化を個別に観察することができること及び照射粒子数を制御することで、照射線量評価を容易にし、その結果として、細胞のどの位置にどれ程の線量が与えられたかが明確に評価可能であること等である。放射線医学総合研究所では、放射線生物学研究において注目されているバイスタンダー効果等、低線量放射線の生物影響を研究する手段としてマイクロビーム細胞装置（以下、SPICE：Single Particle Irradiation System to Cell）の開発を計画し、2003 年 4 月から本格的な調整・開発を開始している。本報告では、これらの技術開発の内容をまとめ、SPICE ビームラインの現状について報告する。

2.SPICE の特徴と開発目標

SPICE の特徴は、従来のマイクロビーム細胞照射装置に多く見られるコリメータ（アパチャー）方式ではなく、二組のＸ－Ｙスリットシステムと三連四重極マグネットを利用して、エネルギー分解能の高いとされるビームフォーカス方式を採用している点である。SPICE の開発目標を以下に示す。

(1)垂直上向き・大気中照射とする。
- ･細胞をシャーレ上に培養し、この状態のまま照射を行うことが可能となる。
- ･細胞観察を自然な体勢で行うこと可能となる。

(2)ビーム収束方式として三連四重極マグネットを使用する。
- ･コリメータ散乱による低エネルギー成分の殆どないビームを生成可能となる。

(3)高速型ボイスコイルモータ駆動ステージ＆高速ビームシャッターを開発する。
- ･静電デフレクタ、高速パルス電源、シングルイオン検出器（シンチレータ＆PMT）の組み合わせで、細胞核当たり1粒子から照射可能とするため。
- ･一時間あたりの最大細胞照射数は、100,000 個を目標とする。

(4)細胞観察系（オンライン・オフライン装置及びビーム制御ソフトウェアの開発
- ･細胞照射前後に、照射装置と同じ条件で、観察できること及び照射シミュレーションのため。

3. 2003 年から 2006 年にかけての改善内容

2003 年 3 月に設置工事は終了し、その直後から調整運転を始めたものの、ビームを微細に調整するためには幾つか性能が不足していることが判明し、対策を施さなければならなかった。例えば、90 度偏向磁石と3連四重極マグネットの励磁電流の調整を 0.1％の精度でできるようにしたこと、ターボ分子ポンプを磁気シールドしたこと、全ての電子機器類のアースラインの取り回しをやり直したことなどである。加えて高速ビームシャッター制御系の交換と再調整等を繰り返した結果、同年 6 月には、細胞照射位置で短時間ではあるが、ビームサイズ約 17μm を達成した。しかしながら、この改善の課程で、設計時には想定できなかった多くのメーカー側の設計及び製作上の欠陥が明らかになった。例えば、ビームラインと一体化しているはずの内フレームの剛性不足、内フレームを支えるやじろべえ式の 4 つのエアーサスペンションのフレームの姿勢を固定する支点としての能力不足、オブジェクト及びエミッタンススリットの中心を光学的ビームライン上から狂わないようにするための固定力の不足、90 度偏向マグネットの励磁用電源の時間及び温度変化に対する安定度の不足、ビーム取り出し用チェンバーの誤った固定方法等である。これらを解決するためには、ビームラインを支えるフレームの剛性を大幅に強化すること、ビーム取り出し用チャンバーを新たに設計し直すこと及びオブジェクト/エミッタンススリットの固定治具を強化すること、等など SPICE 基本的思想を根本から見直し、改

造することが必要となった。なかでも SPICE の特徴であるビームラインをやじろべえのように 4 つの支点で支えているエアーサスペンションを取り去り、ゴムブッシュによる支点の固定に換えたこと、フレームに補強を加えたことなどは、SPICE の基本的な構造を変えることを意味し、かなりの決断を必要とした方針の転換であった。

これらの改良・改善に取り組んだ結果、2006 年 6 月には、(1)50 msec の照射時間で 60-70 個のプロトン照射の条件下で、70%以上が 10μm の範囲内に収まるスポットビームの作成に成功した。(2)また、固体飛跡検出器の CR-39 を使い、シンチレーションカウンタでのイオンのヒット検出効率が 90%以上あることを確認した。(3)更に、表面障壁型半導体検出器によるエネルギー分解能の測定の結果、加速エネルギー3.4MeV のプロトンについて半値幅は 140keV であることを確認した。これの結果から、三連四重極マグネットによるマイクロビームの収束性能を十分に発揮していると判断した。図1及び図2にその結果を示す。

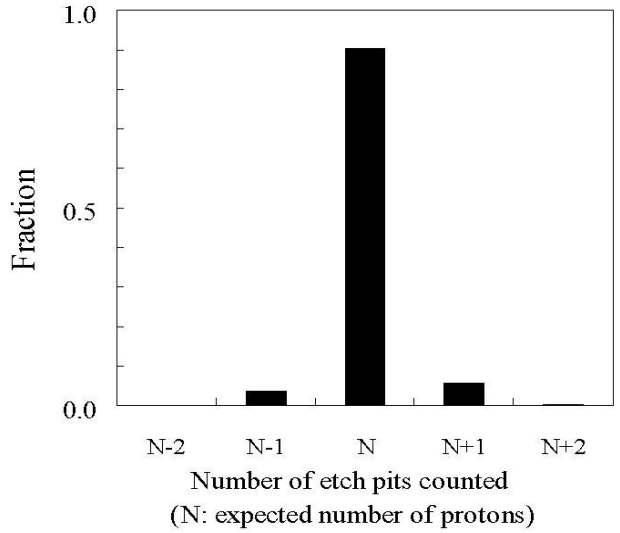


図1　粒子数カウンティングの設定値の正確さを測定

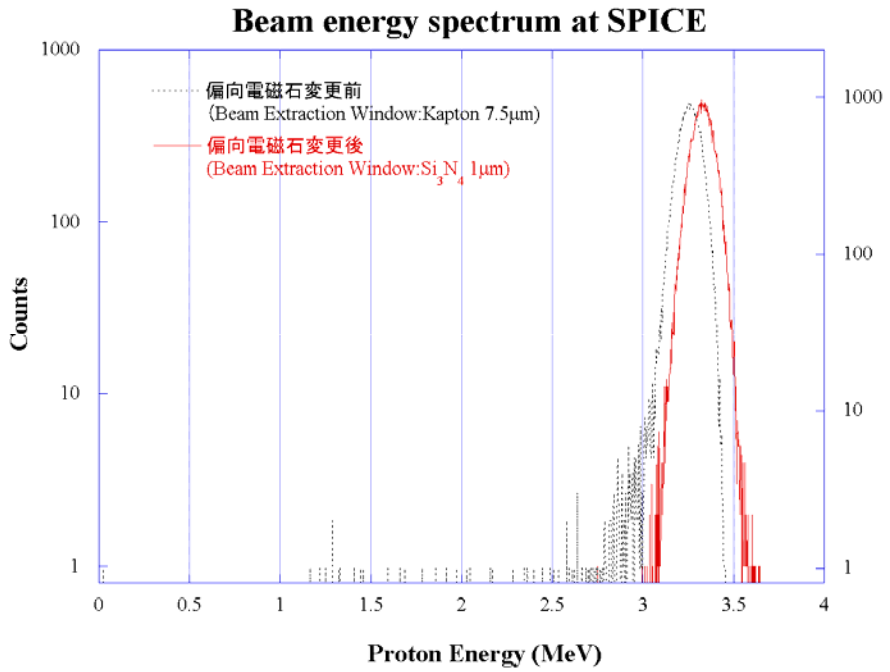


図 2　エネルギースペクトル測定結果
低エネルギー側のビーム成分が殆ど見られない

これらの作業と平行して、細胞照射装置周りの改良・改善にも取り組んだ。その内容については、

昨年度の第 19 回タンデム加速器とその周辺技術の研究会「放医研マイクロビーム細胞照射装置(SPICE)の現状−細胞照射顕微鏡を中心に−」で報告したので省略する。

4. 2007 年の改善内容

これらの改善にも拘わらず、ビームサイズが10μm を切ることが出来ない、ビームフラックスを長時間、安定して取り出すことができない等の状態が続いていた。その原因を調べるため、改めて幾つかの測定を行った結果、SPICE ラインにビームを偏向する 90° 偏向マグネットの磁場の安定性に主な原因があることが判った。90° 偏向マグネットの設計データから磁場計算を改めて行い、更に三次元測定器による磁場測定を行ったところ、当初のマグネットメーカーの設計自体に大きな問題があることが判ったが、この問題は、改造程度では解決できないことも明らかだった。そのために、新たに NMR 測定による磁場のフィードバック制御方式を取り入れたマグネット及び電源を設計し、(有)タカノ技研社に製作を依頼した。現在、納入・据付調整を終えて、SPICE に組み込み総合性能試験を行っている。同時に光学的及び磁気的なアライメントの精度向上も挑戦し、良い結果を得ている。これらの改善の結果として、本年の 2007 年 7 月には、ビームサイズ約 5μm 以下を達成することができた。図 3 及び図 4 にその結果を示す。

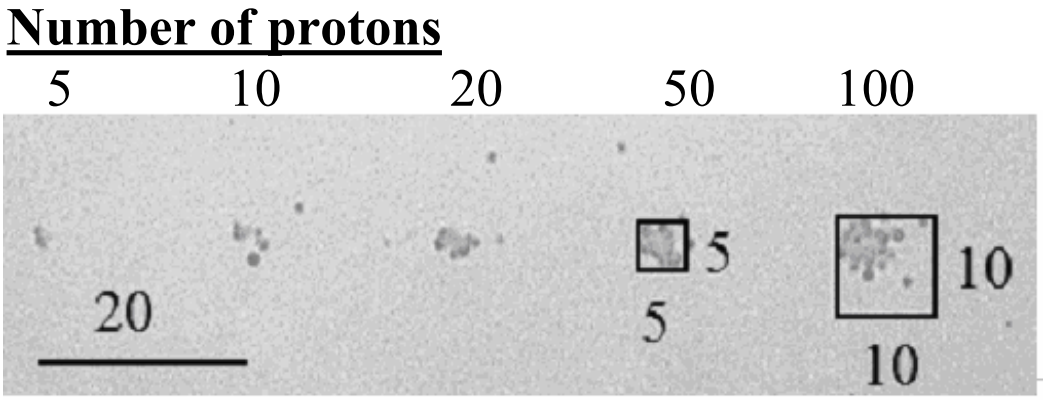


図3 CR−39 によるビームプロファイル
左側より 5,10,20,50,100 個の陽子を照射している。

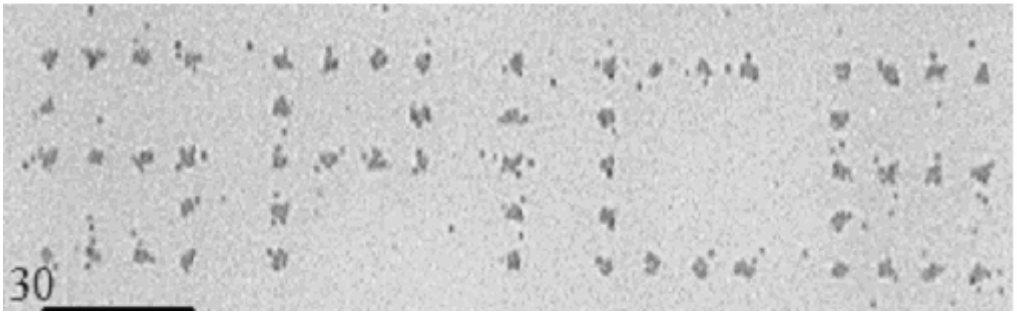


図4 CR39 によるビームプロファイル その 2
SPICE の文字を、一つの点に 20 個のプロトンを照射して描いた。

5. 今後の課題

今後の課題を以下に示す。優先すべきは、(1)の細胞照射系の改良である。ビームサイズは、装置の物理的仕様限界まで来ていると思われるが、実際の細胞の照射位置でのビームサイズを決める大きな要素としてビームの拡散角度が挙げられる。拡散角度はビーム取り出し窓の材料と厚みに依存していると考えられるのでビーム取り出し窓と細胞までの距離をできるだけ小さくし、且つ、ビーム取り出し窓の材料も薄くしなければならないと予想するからである。

(1)細胞照射系の改良
　ビームサイズは、取り出し窓の材料と細胞までの距離に大きく依存。
(2)細胞照射条件に近い条件下でのビームプロファイル確認法の開発
　数 100 個/秒程度では、シンチ+II+CCD の方式では、観測は困難。
(3)パワーユーザーの開拓
　SPICE は、所内外のユーザーに開放された共用施設として位置づけられている。
(4)マイクロビーム細胞照射に関する国際ワークショップ in NIRS（12-14 ,NOV,2008 ）

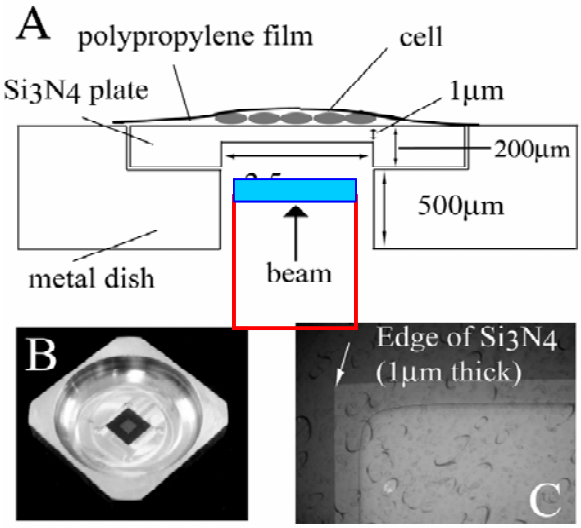


図5　細胞照射装置

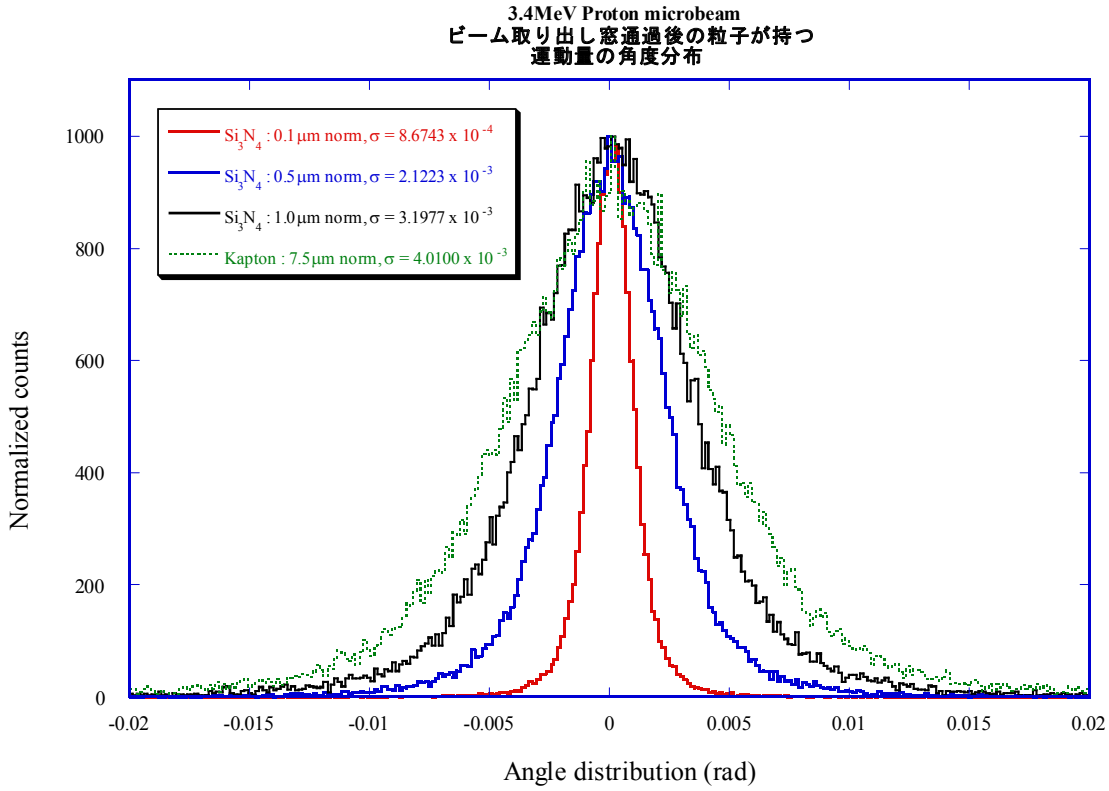


図　6　ビーム取り出し窓通過後の粒子が持つ運動量の角度分布

5-3 京都大学における重イオンマイクロビーム細胞照射系の開発

中村正信、今井憲一*、松本博*、廣瀬昌憲*、
戸崎充男%、大澤大輔%、牧野誠司、
丹羽太貫#1、小松賢志#、内海博司+、中村恭介#
和歌山県立医科大学医学部、*京都大学理学研究科、
%京都大学放射性同位元素総合センター、
#京都大学放射線生物研究センター、+体質研究会
1放射線医学総合研究所重粒子医科学センター

１　はじめに

放射線の影響を調べるために、１つ１つのイオンを個々の細胞を狙って制御照射し、その影響を追跡調査する方法が有効である。米国コロンビア大及び英国グレイ研究所の小型静電加速器を用いた陽子、α粒子の照射が先行している。わが国でも原研高崎研、高エネルギー加速機構フォトンファクトリーや放射線医学研究所において多様なマイクロビーム照射開発が進んでいる。一方重粒子線は抵抗性の強いがんや深部のがんに治療効果が見られ、治療法が推進されている。その基礎的な研究も重要である。しかし細胞照射においては細胞の核等を照射するためには数十μｍの飛程が必要となり、小形静電加速器では重イオンの利用は困難である。我々は２００２年から京都大学理学部の最高ターミナル電圧８ＭＶタンデム型静電加速器を用いた重イオンマイクロビームの細胞照射について開発を行っている。

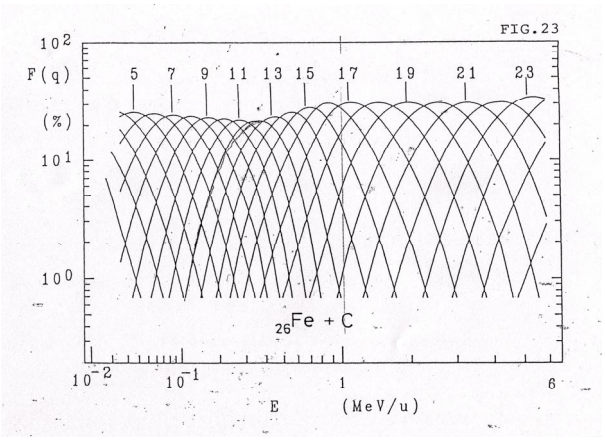


図１　炭素フォイルを通過したときの
鉄イオンの平衡荷電分布　（Shima より）

２　各種重イオンの線エネルギー付与（ＬＥＴ）

京都大学理学部のタンデム加速器において安定に加速できる各種重イオンをまとめる。安定加速電圧を７MV とし、ターミナル部ストリッパーを炭素として、イオンの平衡荷電分布が１％以上を目安とした。鉄イオンの平衡荷電分布の例を図１に示す。この場合１２価となり、正イオンのエネルギーは９１MeV となる。そのＬＥＴは４４ｋｅＶ／μｍであり、イオンの水中の飛程は２６μｍである。各種イオンをまとめると１４ＭｅＶ 陽子の０．０３５ｋｅＶ／μ

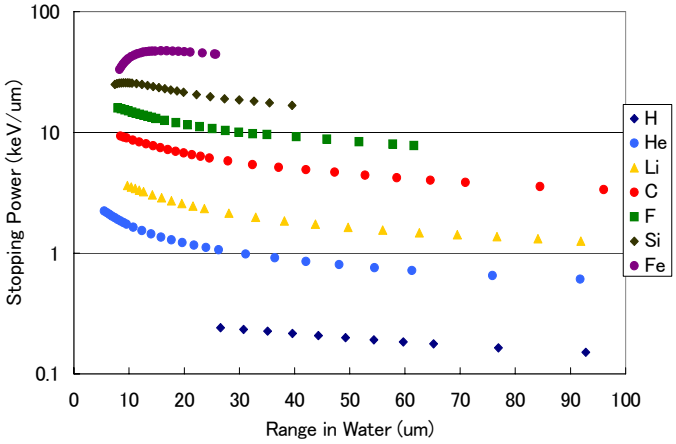


図２　水素から鉄までの
主なイオンのＬＥＴの領域

mから９８ＭｅＶ ^{209}Ｂｉ$^{13+}$の９５ｋｅＶ／μｍまで、約３．５桁の範囲をカバーしている。水中の飛程にすると１４ＭｅＶ陽子の２２００μｍから９８ＭｅＶ^{209}Ｂｉ$^{13+}$の１９μｍに対応している。重粒子線がん治療に用いられている炭素だと４９ＭｅＶとしてＬＥＴは３．４ｋｅＶ／μｍで水中飛程は９６μｍである。これらのＬＥＴの違いは生物学的効果においても大きな違いを引き起こすと考えられる。そこでこれら各種重イオンを１つ１つ個々の細胞を狙って照射し、その影響を調べることは非常に重要である。これまで特にコリメータを用いたマイクロビーム生成の開発を行ってきた。先ずはこの開発された技術で可能と考えられる鉄イオンまでを用いてＬＥＴの効果を調べる。図２に比較対照を計画しているヘリウム、リチウム、炭素、フッ素、シリコン、鉄等におけるＬＥＴ領域を示す。約２桁の範囲をカバーしている。

３　ビームテスト

これまでのビームテストの結果をまとめる。コリメータとしては５μｍφのアパーチャを用いている。エッジ散乱のビームを減らすためにアパーチャ（Ｍｏ板厚さ２０μｍ）２枚（穴径５μｍφ及び６μｍφ　図３参照）を間隙をおいて配置している。２枚の間隙を３００μｍとした場合に大気中に引き出した４２ＭｅＶ炭素ビームのＳｉ検出器によるエネルギースペクトルを図４に示す。極低エネルギー部分を除くと９２％がピークに集中している。

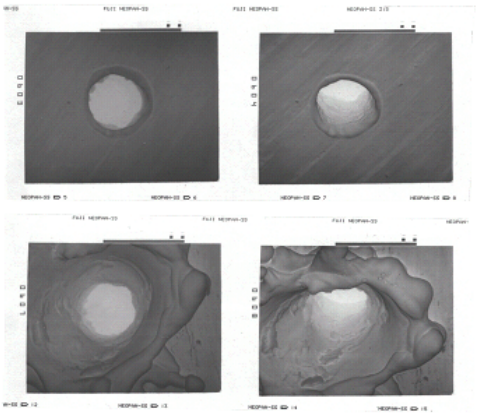


図３　Ｍｏ板厚さ２０μｍのアパーチャ。それぞれ穴径５μｍφ及び６μｍφ。Lenox LASER 製

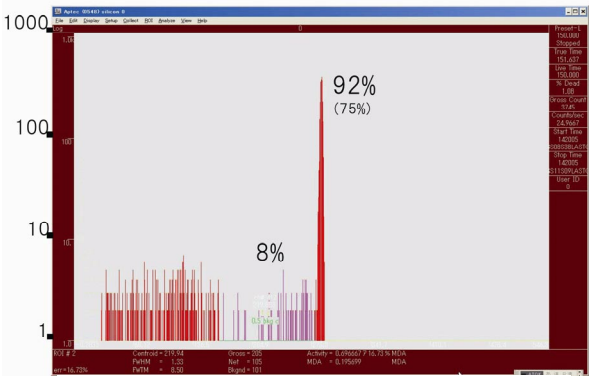


図４　大気中に引き出した４２ＭｅＶ炭素ビームのＳｉ検出器によるエネルギースペクトル。低エネルギーの成分を無視すると約９２％がピークに集中している。

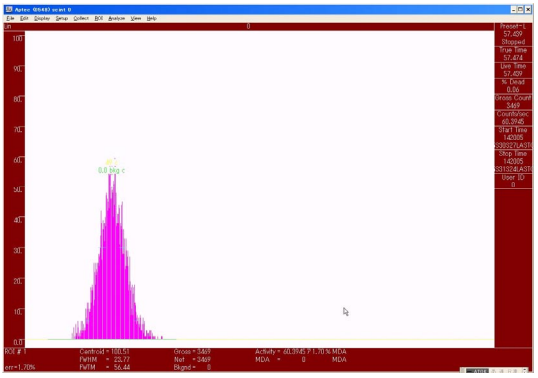


図５　４２ＭｅＶ炭素が透過したときの１０μｍ極薄プラスチックシンチレータにおけるエネルギースペクトル。

シングルヒット制御は厚さ１０μｍ極薄プラスチックシンチレータをイオン検出器とする。４２ＭｅＶ炭素が透過したときのスペクトルを図５に示す（１ｍｍ厚さのライトガイドをもちいた)。この検出器からの信号を用いて静電偏向板とスリットを組み合わせてシングルヒット制御を行っている。シングルヒット制御の結果を図６に示す。図中央左部の多数ヒットした部分は制御無しで照射した部分である。その後ＣＲ－３９を１５０μｍ移動して設定した数（＝１：シングルヒット）のイオンを照射した。これを４回行った。確かに図では１５０μｍ間隔でヒットが見える。なお今回ダブルアパーチャの間隙（３００μｍ）の１０倍の距離にＣＲ－３９が置かれているので、角度の広がりからヒットパターンは本来の５μｍφから大きく広がっている。図では参考のためにアパーチャの直径の１０倍に相当する５０μｍφの円を示した。数を１に設定した場合に限ると円の中のヒット数は２，１，１，１となっている。図で見えるように最初の円にはステップ１の大角度のヒットが偶然に入っていると考えても矛盾はない。従ってシングルヒット制御に問題は無いと考えられる。

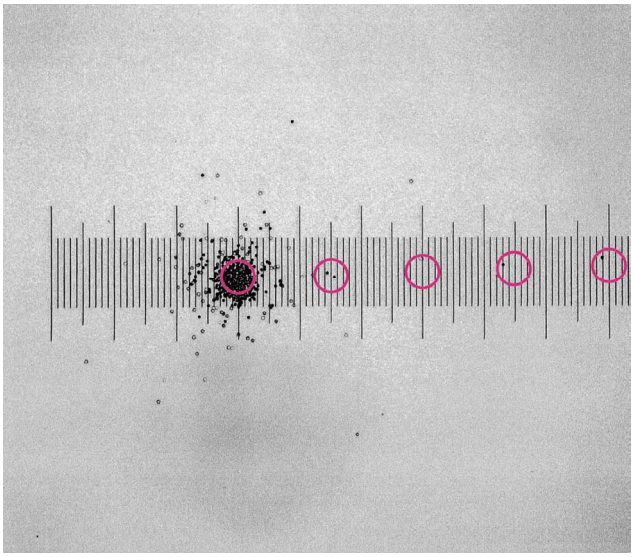


図６　ＣＲ－３９位置検出器による照射イオンのヒットパターン。図中のスケールは１０μｍ／目盛である。直径５０μｍの円は目安のために１５０μｍ間隔で示されている。詳細は本文を参照のこと。

４　細胞照射系の開発

垂直ビームラインの基本的な課題がほぼ達成されてきたので、平行して細胞照射系の検討を進めてきた。基本的な条件は、

・ ビームは下から上向きに出てくる（顕微鏡は正立で上から見る)、
・ 生きた細胞を扱う（染色しないで位相差で見る)、
・ 細胞核等を狙う（４００倍程度の倍率で見る)、

である。

現在電動ステージがないので先ずは手動ステージをもちいて蛍光染色試料の細胞照射テストを開始する予定である。整備しているビームライン用落射蛍光顕微鏡を図７に示す。

ＨＥｐ－２細胞の細胞核をヘキスト３３２５８で染色して撮影した例を図８に示す。

なお加速器関係の開発が先行しているが、細胞照射に向けて試料系の開発が必要である。そして生命科学

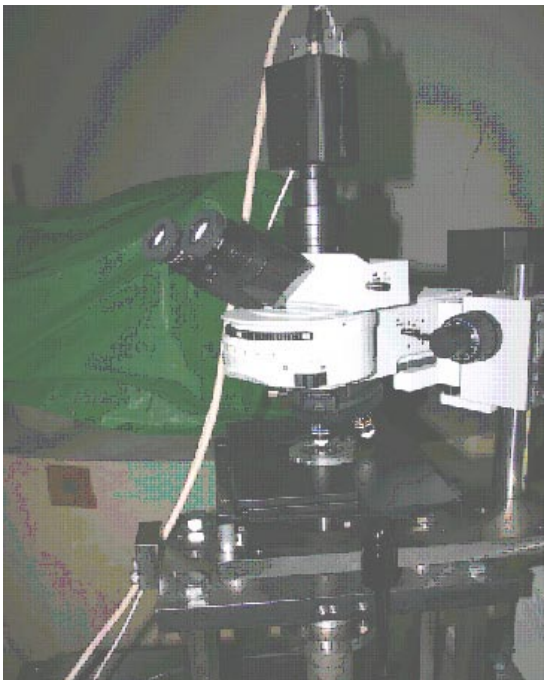


図７　ビームライン用落射蛍光顕微鏡

実験として何をするのかが最重要課題である。

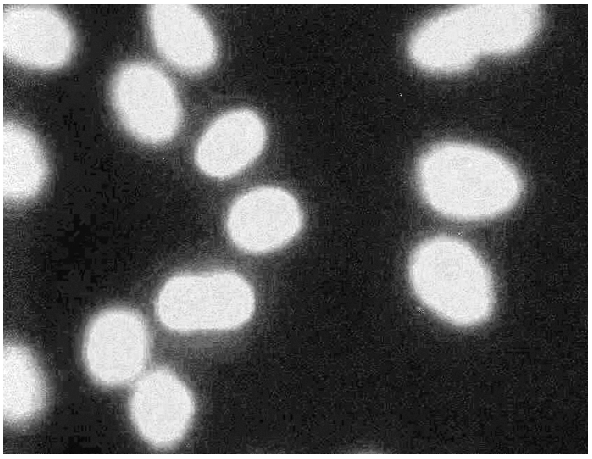


図８　ＨＥｐ－２細胞の細胞核を
ヘキスト３３２５８で染色して、
落射蛍光で撮影した例

参考文献

［１］ 中村正信他、「第１５回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集、若狭湾エネルギーセンター（２００２）、１３５－１３８．
［２］ 中村正信他、「第１６回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集、神戸大学海事学部（２００３）、５４－５７．
［３］ 中村正信他、「第１７回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集、放射線医学総合研究所（２００４）、７８－８１．
［４］ 中村正信他、「第１８回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集、九州大学大学院理学研究院（２００５）、５０－５３．
［５］ 中村正信他、「日本放射線影響学会第４８回大会」講演要旨集、広島大学原爆放射線医科学研究所（２００５）、１０１－１０２．
［６］ 中村正信他、「第１９回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集、九州大学大学院理学研究院（２００５）、５０－５３．

5-4 マイクロビームを用いた高分解能Ｘ線イメージング装置の開発

東京工業大学 原子炉工学研究所
長谷川 純，柴 茂樹，福田 一志，小栗 慶之

はじめに

Ｘ線造影において造影元素のＫ吸収端エネルギーよりわずかに高いエネルギーをもつ単色Ｘ線を光源として用いると，造影剤に効率的にＸ線を吸収させることができ，従来よりも高コントラストな造影が可能になる．また，単色Ｘ線源は造影に寄与しない余分な波長成分を含まないことから，造影時の被ばくも最小限に抑えることができる．これらの利点から，大型放射光施設などから得られる単色Ｘ線を用いた毛細血管などの高コントラスト造影試験が行われている[1-3]．一方，我々は陽子線励起Ｘ線の高い単色性に注目し，静電イオン加速器による準単色Ｘ線の発生とそれを用いた高コントラスト造影の原理実証実験をこれまで行ってきた[4]．最近では，7 MeV の陽子線を La 標的に照射し，ヨウ素のＫ吸収端よりエネルギーがわずかに高い準単色のＸ線を発生し，エネルギーサブトラクション法を併用することで，ファントム内の模擬血管に充填されたヨウ素造影剤の高コントラスト造影に成功した[5]．

毛細血管などの数十ミクロンかそれ以下のサイズの被写体の造影においては，光源のサイズが問題となる．陽子線励起Ｘ線を用いた造影の場合，光源サイズは陽子ビームのスポットサイズで決まるため，高分解能を得るにはマイクロビームを用いる必要がある．我々は既存のマイクロビーム照射施設を利用して，高分解能・高コントラストＸ線造影の原理実証実験を行い，マイクロビームの使用が有効であることを示した[4]．

近年， PET 薄膜上にあけられた内径 100 nm のキャピラリーにより低エネルギー（~keV）の多価イオンが高効率で輸送されることが報告されている[6]．ビーム軸に対してキャピラリー軸が傾いた状態でも高い出口電流が得られることから，その輸送には帯電したキャピラリー内壁が作る静電場によるガイド効果が強く影響していると考えられている．一方， MeV クラスのエネルギー領域においても，先端径をミクロンからサブミクロンに絞ったガラスキャピラリーによりイオンが集束される効果があることが根引らにより報告された[7]．我々は，安価でコンパクトなマイクロビーム生成方法として，ガラスキャピラリーによるイオン集束法を採用し，これをミクロンサイズの被写体の高コントラスト造影に応用することを目指して現在研究を行っている．

Ｘ線イメージングでは，露光時間を短くするためにＸ線強度はなるべく大きい方が良い．Ｘ線の発生量はマイクロビームの電流量に比例することから，キャピラリーへの入射電流量とキャピラリー内でのイオンの輸送効率をいか大きくできるかが重要となる．特に，輸送効率はキャピラリーの出口径，長さ，形状に依存すると考えられるが，これらについてはまだ系統的なデータがほとんど得られていない．また， MeV クラスの高エネルギーイオンのキャピラリー中での輸送メカニズムについても，壁面での小角散乱が支配的であると考えられているが，詳しいことはまだ明らかになっていない．

本報告では，まず，東工大タンデム加速器施設に新たに設置されたマイクロビーム発生装置について紹介し，ビーム輸送効率などの基礎データ取得のために行った測定について述べる．マイクロ陽子ビームを用いた準単色Ｘ線の発生と，それを用いた拡大撮影試験についても報告する．最後に，イメージングプレートを用いてマイクロビーム断面の強度プロファイルを拡大観測した最近の結果について報告する．

マイクロビーム発生装置

図 1 に東工大タンデム加速器施設に新設したマイクロビーム発生装置の概略図を示す．内径 0.8 mm，外径 2 mm のホウ珪酸ガラスの細管をプーラーにより引き伸ばし，先端径を 10-60 μm に絞った長さ 50 μm 程度のテーパー状ガラスキャピラリーを製作した．これをステンレス製のホルダーに装着し，ビームラインに設置した．キャピラリー

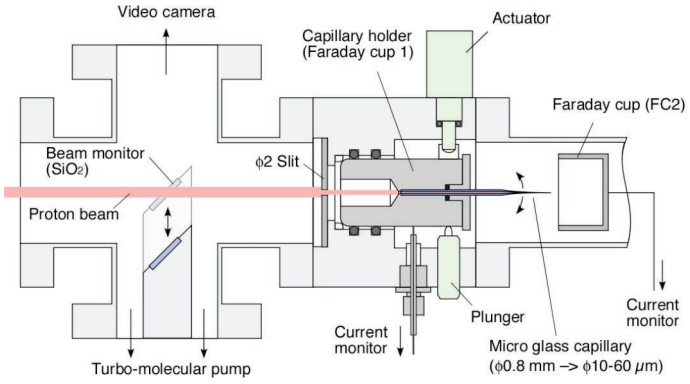


図 1 ：マイクロビーム発生装置概略図.

ホルダーの上流側を O リングで支える構造とし，そこを支点にホルダーの下流側を小型のアクチュエーターで上下，左右に動かすことにより，ビーム軸に対するキャピラリー軸の傾きを遠隔制御した．アクチュエーターの位置決め精度は 0.01 μm であり，これは角度にすると約 0.3 mrad に相当する．

キャピラリーホルダーは周囲の真空容器と電気的に絶縁されており，ホルダー自体をファラデーカップとして用いることで，キャピラリーへ入射するビーム電流量を測定することができる．ホルダー直前には φ2 mm のアパーチャーが置かれている．実験では，ホルダーで検出されるビーム電流が最大になるように上流のビーム光学系を調整した後に，さらにアクチュエーターによりキャピラリーの傾き角度を変えながら，マイクロビーム電流が最大になるように微調整を行った．

ビーム輸送効率の測定

ビーム輸送効率のキャピラリー角度依存性を調べるために，キャピラリー出口の約 3cm 下流にファラデーカップを配置し，キャピラリー出口からのビーム電流を測定した．キャピラリーへの入射電流量 I_{in} の見積もりには，以下の式を用いた．

$$I_{in} = (S_2/S_1)(I_{FC1} + I_{FC2})$$

ここで，S_1 はキャピラリーホルダー直前のアパーチャー(φ2 mm)の断面積，S_2 はキャピラリー入口(φ0.8 mm)の断面積，I_{FC1} はホルダーでのビーム電流量，I_{FC2} はキャピラリー下流のファラデーカップでのビーム電流量である．キャピラリーから出るビーム電流量 I_{out} を I_{FC2} に等しいとすると，ビーム輸送率 $\varepsilon = I_{out}/I_{in}$ は次式で計算できる．

$$\varepsilon = \frac{I_{FC2}}{(S_2/S_1)(I_{FC1} + I_{FC2})}$$

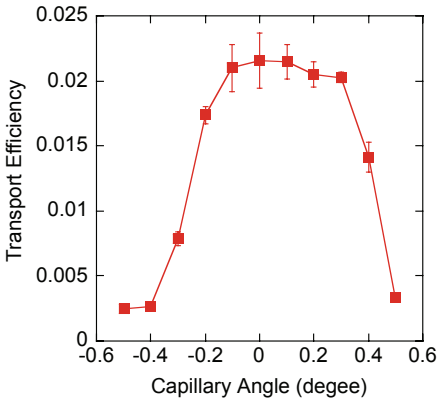


図２：ビーム輸送効率のキャピラリー傾き角依存性．キャピラリー出口径 63 μm

2 MeV の陽子ビームを先端径 63 μm のキャピラリーへ入射した際のビーム輸送率の測定結果を図２に示す．このとき I_{FC1} が約 100 nA 程度になるようにビームを調整した．ビーム電流量のふらつきに起因する誤差をなるべく小さくするために，ビーム電流を 10 秒間測定しその平均値を用いた．ビーム輸送効率はピークで約 2%であり，キャピラリーの入口径と出口径の比(~0.6%)に比べておよそ 3~4 倍の輸送効率が得られた．このことは，テーパー状キャピラリーによる MeV 陽子の輸送において何らかの集束効果が働いていることを示している．キャピラリー軸を，最も出口電流が得られた場合に対し約 0.3 度以上傾けると，出口電流は急速に減少することが分かった．このことから集束効果によるマイクロビーム電流値の増大は見られたものの，keV 領域の低エネルギーイオンの輸送の場合に比べ，その効果はかなり小さいことが分かった．

マイクロ陽子ビームのエネルギースペクトルの測定

キャピラリーを通過した陽子をポリ塩化ビニルデン薄膜（厚さ 10 μm）を通して大気中に取り出し，薄膜から約 12 mm 下流でシリコン半導体検出器により，そのエネルギースペクトルを測定した．このときのキャピラリーの出口径は 17 μm であった．シリコン半導体検出器の前面には，遮光膜として厚さ 4.4 μm の炭素膜を貼った．検出器は前方 0°と 45°に配置し，陽子のエネルギーが 2, 2.5, 3 MeV の場

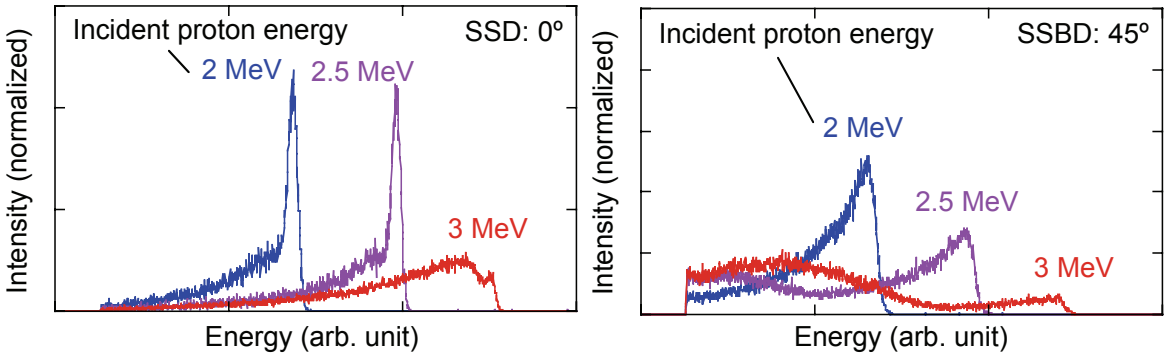


図３：キャピラリー通過後の陽子のエネルギースペクトル．左：前方 0°，右：前方 45°．

合についてそれぞれ測定を行った．その結果を図３に示す．

前方 0°に配置した検出器では，2 MeV および 2.5 MeV の場合に鋭いピークが観測された．これらのピークの位置および幅は，ポリ塩化ビニルデン薄膜，大気，炭素膜を通過したことによるエネルギー損失とストラグリングを考慮した TRIM の計算とよく一致した．したがって，陽子の大半は，ほとんどエネルギー損失することなくキャピラリーを通過してきたと考えられる．一方，ピークの左側に低エネルギーのテールがあるが，これは陽子がキャピラリー内壁での多数回の散乱によってエネルギーを失ったり，キャピラリー先端付近のガラス壁（~10 μm）を貫通したことによるものと考えられる．エネルギーを 3 MeV に上げると，鋭いピークがずっと小さくなり，低エネルギー成分が支配的になった．これは，キャピラリーのガラス壁を突き抜けた成分がほとんどになったためだと考えられる（3 MeV 陽子のホウ珪酸ガラス中での飛程は約 70 μm）．前方 45°に配置した検出器では，ピークの幅が広がり，低エネルギー成分の割合がかなり増えた結果となった．これは，キャピラリー内部で比較的大きな角度の散乱を受け大きくエネルギー損失した陽子や，ガラスの側壁を貫通した陽子が主に検出されたためであることを示唆している．

感熱紙によるビーム照射スポット径の測定

Ｘ線透過撮影を行う前に，キャピラリーから出た 2 MeV 陽子ビームのスポット径の測定を行った．Ｘ線発生用の薄膜標的の代わりに感熱紙を置き，約 60 分間マイクロ陽子ビームを照射した．感熱紙上の痕跡を光学顕微鏡で拡大観察した．出口径 66 μm のキャピラリーを使った場合のスポット像を図４に示す．中心の濃い部分と周辺の比較的色の薄い部分から構成されているのは興味深い．これはマイクロビームが大きく分けて二つの成分から構成されていることを示唆している．同様に 17 μm，30 μm のキャピラリーを用いて測定した結果，キャピラリー出口径とほぼ同じ径のスポットが得られることが分かった．このことから，キャピラリー出口径を変えることで任意にマイクロビーム径を制御できることが分かった．

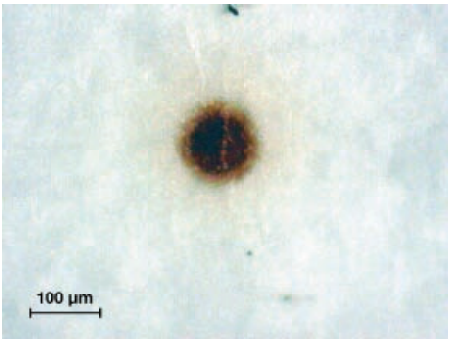


図４：感熱紙上のマイクロビームスポット痕．キャピラリー出口径 66 μm．

マイクロ陽子ビーム励起Ｘ線を用いた拡大撮影試験

ガラスキャピラリー（φ25 μm）により得られたマイクロ陽子ビームを用いて実際にイメージングの試験を行った．図５にあるようにキャピラリー直後に Cu の薄膜を配置した．薄膜厚さは 2 MeV 陽子の飛程の 2 倍程度になるようにした．Cu 薄膜の裏面から出るＸ線を用いてイメージングプレート上に撮像した．また，CdTe 検出器により発生したＸ線のエネルギースペクトルを同時にモニターした．被写体には，豆電球のフィラメントを用い，拡大率を 10 倍とした．撮影結果を図６に示す．フィラメントのニクロム線の径が約 20 μm であり，その像がはっきりと確認できることから，20 μm 程度の空間分解能は得られていることが分かった（図６の円内）．このことは，キャピラリー出口径と同程度の光源サイズが得られていることを示している．現時点では図６のイメージングに約 1 時間程度かかって

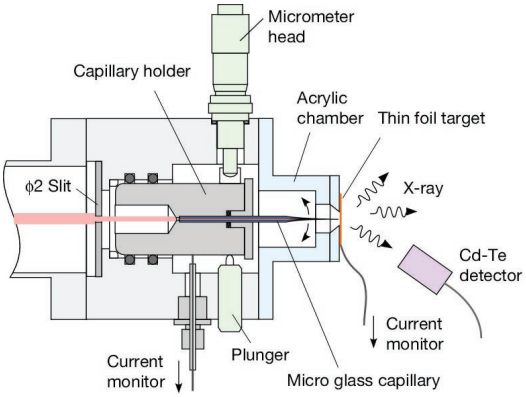


図５：Ｘ線イメージング実験配置．

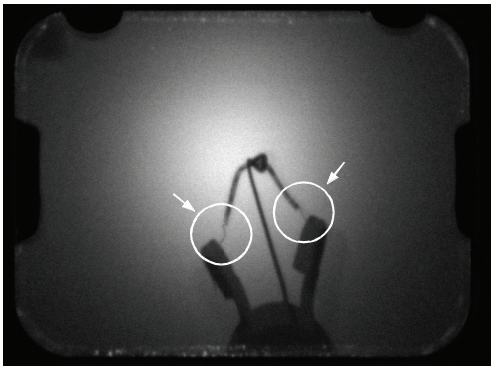


図６：豆電球フィラメント拡大撮影像．キャピラリー出口径 25 μm，拡大率 10 倍，撮影時間 1 h．

いる．露光時間短縮のためには，マイクロビームの電流量をさらに増やす必要がある．

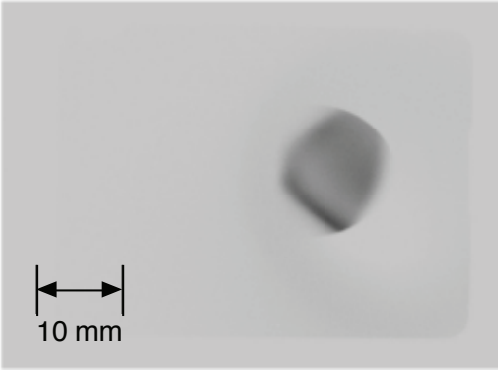


図７： IP 上に記録されたビームスポットの強度分布．キャピラリー出口径 25 μm.

マイクロビーム強度プロファイルの観測

キャピラリー出口の約 3 m 下流に IP を配置し，マイクロビームの断面の強度プロファイルを観測した．IP 上に記録されたビーム強度プロファイルを図 7 に示す．キャピラリーから出たマイクロビームの指向性は高く，約 3 m 下流でもそのビームスポットサイズは約 10 mm であった．これは角度にすると，約 3.3 mrad に相当する．キャピラリー入口でキャピラリー中心軸に対し 3.3 mrad の角度を持って入射した陽子はキャピラリー中（長さ約 50 mm）を進むうちに，中心軸から約 160 μm にずれる計算になり，これは出口径の 25 μm よりずっと大きい．このことは，内壁で少なくとも 1 回以上散乱を受けて輸送されてきた陽子がかなりの割合でいることを示している．一方，ビームスポット像をよく見るとそのエッジが円形にシャープに切り取られている様子が分かる．また，スポット内のビーム強度分布は上流の入射光学系に強く依存することも分かった．これらのことは，キャピラリー内部で受けた散乱の回数が比較的少ない陽子がマイクロビームの主成分になっていることを示唆している．ビームスポット上の各位置で SSD により測定した陽子のエネルギースペクトルは入射時のエネルギーを持つ陽子が支配的であり，このことも上記を裏付けている．IP は MeV 陽子に対して非常に感度が高く，ビームの詳細な強度プロファイルを観測するのに適している．入射光学系がきちんと定義された状況下で，キャピラリー出口径や形状などに対する強度プロファイルの依存性を調べることで，キャピラリー内での MeV 陽子の輸送について新たな知見が得られるのではないかと期待している．

まとめと今後の課題

東工大タンデム加速器施設にテーパーガラスキャピラリーを用いたマイクロ陽子ビーム発生装置を新たに設置し，キャピラリー中の MeV 陽子の輸送効率のキャピラリー傾き角度依存性や，マイクロ陽子ビームのエネルギースペクトル，スポット径といった基礎データを取得した．また，マイクロ陽子ビームを Cu 薄膜標的に入射し，発生した準単色のＸ線を用いてＸ線イメージング試験を行った．その結果，キャピラリー出口径に相当する空間分解能での拡大造影が可能であるが，露光時間の短縮のためにはマイクロビームのさらなる大電流化が必要なことが分かった．今後は，ビーム入射光学系の最適化による入射電流量の増大を図りつつ，キャピラリー出口径や形状を変えながら系統的にデータを蓄積することにより，キャピラリー中での陽子の輸送効率に関わる要因を明らかにし，輸送効率の一層の向上を目指していく予定である．

参考文献

[1] R. Lewis, Phys. Med. Biol., 42, 1213 (1997).
[2] K. Umetani, *et al*., J. Synchrotron Rad., 5 (1998) 1130.
[3] H. Mori, *et al.*, Radiology, 201, 173 (1996).
[4] S. Iwatani, J. Kaneko, J. Hasegawa, H. Fukuda, R. He, Y. Saitoh, T. Sakai, M. Ogawa, Y. Oguri, Sci. Technol. Adv. Mat. **5** 597 (2004).
[5] Y. Oguri, J. Hasegawa, M. Ogawa, K. Kaneko, K. Sasa, Int. J. PIXE (to be published).
[6] N. Stolterfoht, J.-H. Bremer, V. Hoffmann, R. Hellhammer, D. Fink, A. Petrov, and B. Sulik, Phys. Rev. Lett., **88**, 133201 (2002).
[7] T. Nebiki, T. Yamamoto, T. Narusawa, M. B. H. Breese, E. J. Teo, and F. Watt, J. Vac. Sci. Technol. A **21**, 1671 (2003).

6. 口頭発表：応用 2

6-1 高速クラスタービームの炭素衝撃による放出二次イオンの測定

柴田裕実、土田秀次、伊藤秋男（京大院工）、斉藤勇一、千葉敦也、阿達正浩、神谷富裕、横田 渉（原子力機構高崎研）、鳴海一雅（原子力機構先端研）

【はじめに】

高速（高エネルギー）クラスターイオンと物質との相互作用では単原子イオンの数の集合体として線形的に振る舞うのではなく、個数以上、あるいは個数以下の非線形的な効果を与える。二次荷電粒子放出の収量や二次イオン放出スペクトルの測定を通して、高速クラスターイオン照射の特徴を調べることが本研究の目的である。

今回は直線飛行時間型(TOF)質量分析器を用いて炭素、アルミニウム及び金クラスターイオンと HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite: 高配向性熱分解炭素) 標的との衝突で放出される正負の二次イオン測定を行ったので報告する。

【実験】

本実験に用いたクラスターイオンは日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所 TIARA の 3MV タンデム静電加速器からのエネルギー0.5 MeV/atom（～42keV/u）の C_1^+～C_8^+イオン、0.675MeV/atom (～25keV/u)の Al_1^+～Al_4^+イオン及び 1.67MeV/atom（～8.5keV/u）の Au^+～Au_3^+イオンである。同種のクラスターイオンで核子当たりのエネルギーを広範囲に変えることができることが望ましいのであるが、加速器の制約上不可能なので、加速可能な粒子を変えることで核子当たりのエネルギーを変更し比較した。クラスターイオンのビーム強度は直流ビームで数 pA から数 10pA であった。また、ビームライン及び真空チャンバーはクラスターイオンが輸送中に分解しないよう超高真空（～10^{-7} Pa）に保たれている。TOF スペクトルの計測はイオンビームをパルス化し、TAC（時間波高変換）を用いる方法により行われた。図 1 に TOF 質量分析システムの概要を示す。TOF 装置は直線型で引出し電極、ドリフトチューブ（約 50 cm）、加速電極、MCP（マルチチャンネルプレート）検出器から成る。板状標的からの二次イオンはビームに対して 45° の方向に引き出された。インジェクター側に設置されたチョッパー装置によって幅 100～200 ns、間隔 8 kHz のパルスビームが作られた。TAC のスタート信号としてパルスビーム形成用パルス発生器の TTL 信号を用

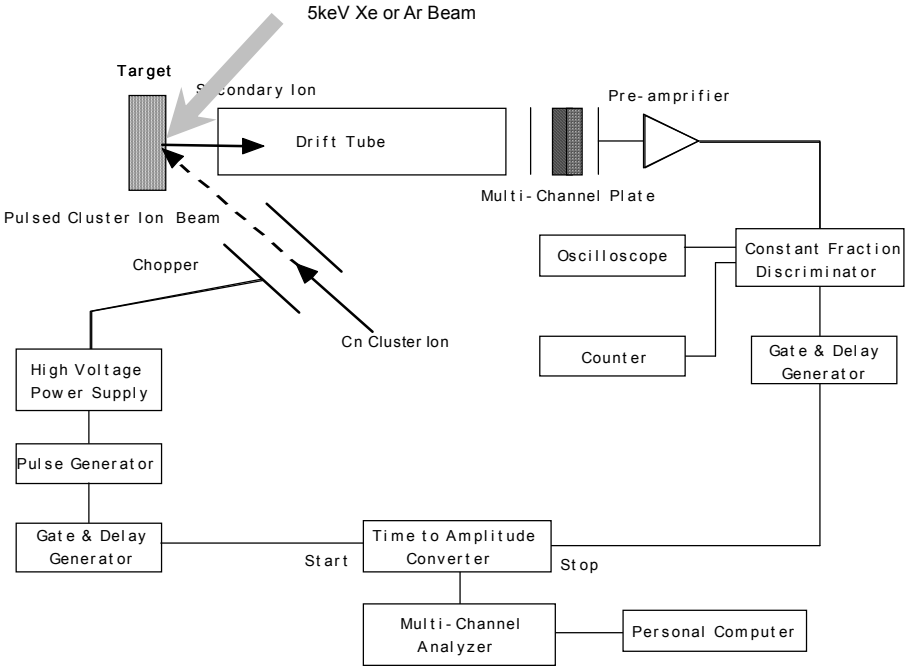


図1 飛行時間型（TOF）質量分析計を用いた二次イオン計測システムの概要

い、ストップ信号として MCP 検出器で発生したイオンの信号を用いた。二次イオンの信号は MCA（マルチチャンネル分析器）にて蓄積された。

標的試料には HOPG を用いた。HOPG 試料は層状に剥がすことができ新しい表面を測定に使えるので他の試料に比べて不純物の吸着が少ないと考えられる。それでも相当不純物が観測されるので、ECR イオン源からの Ar ビーム照射により表面のクリーニングを行った。

【実験結果および考察】

核子当たりのエネルギーは Bohr 速度（〜25KeV/u）とその前後を選び、放出正負二次イオンの全収量（水素を除く）の入射クラスターサイズに対する依存性を比較した。Al や Au クラスターイオン照射に対して放出二次イオン質量スペクトルはそれほど変わらず、あまり大きなサイズの放出クラスターイオンは観測されていない。一方、C クラスターの場合では、大きなサイズのクラスターが正、負二次イオン共に観測されており、炭素-炭素衝突における特異性が考えられる。 図 2 は C（左図）、Al（中央）及び Au クラスターイオン（右図）を HOPG に照射した際に放出された二次イオンで水素を除いた正負イオンの全収量の C_1^+、Al_1^+ 及び Au_1^+イオン照射における正イオン全収量に対する比をプロットしたものである（C_1^+、Al_1^+ 及び Au_1^+照射における正イオン放出の全収量をそれぞれ 1 とした）。図中の Linear relation は収量がクラスターの個数に比例している場合である。

図からわかるように三者の入射粒子について比較してみると、Au の場合、正負イオンの収量はクラスターサイズに余り依存せずほぼ一定で、負の非線形性を示している。一方、C 及び Al の場合はクラスターサイズに対し、ほぼ指数的に増加し、正の非線形性を示している。すべての入射クラスターについて、負イオンの収量は正イオンの数倍から数 10 倍になっていて、この傾向はエネルギーに関わらず同様である。この理由は未だ明らかではない。

二次イオン放出現象においては、イオンの速度が Bohr 速度以下の低速領域では、核的衝突が支配的でクラスターイオンでは負の非線形性が、また Bohr 速度以上の高速領域では電子的衝突が支配的で正の非線形性が表れることが理論的に知られており、今回の実験では定性的には理論と同じ結果を得ている。

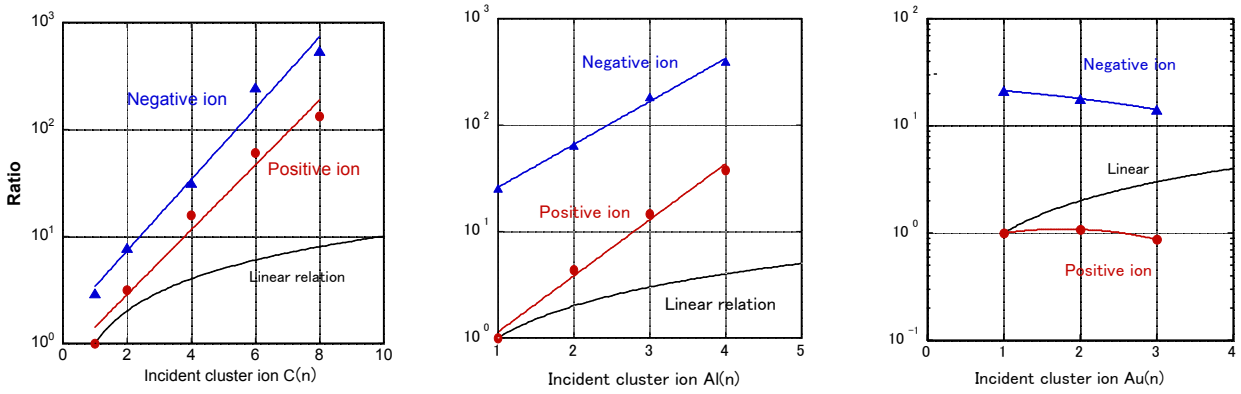


図 2　水素を除く放出二次イオンの全収量（C_1^+、Al_1^+および Au_1^+照射において正イオン放出の全収量をそれぞれ 1 とした）

【参考文献】

1) Y. Le Beyec, Int. J. Mass Spectrom. Ion Proc. **174** (1998) 101.
2) S. Della-Negra, et al., Nucl. Instrum. Meth. B**74** (1993) 453.
3) M. Dobeli et al., Phys. Rev. B **94** (1994) 388.
4) K.Boussofiane-Baudin et al., Int. J. Mass Spectrom. Ion Proc. **130** (1994) 73.
5) K.Hirata et al., Appl. Phys. Lett. **83** (2003) 4872.

6-2 3MV タンデム加速器を用いた核融合プラズマ計測

井戸　毅、清水昭博、西浦正樹、加藤眞治、中野治久、横田光弘、西澤章光、
濱田泰司、LHD 実験グループ
自然科学研究機構　核融合科学研究所

1　はじめに

核融合科学研究所では将来の核融合発電を目指し、磁場によるプラズマ閉じ込め装置である大型ヘリカル装置（Large Helical Device ： LHD）を建設し、その閉じ込め特性の研究を進めている。近年の研究の進展により、プラズマ内部に自発的に形成される電場及び電場の勾配がプラズマ閉じ込め性能に大きな影響を与えることが明らかになりつつある。われわれのグループでは、１億度に及ぶ核融合実験プラズマの内部に形成される電場を計測するために３MV タンデム加速器を用いた重イオンビームプローブ（Heavy Ion Beam Probe ： HIBP）と呼ばれる計測装置を開発している[1]。本稿において計測装置の概要とそれらによって得られた実験データの紹介を行う。さらに現時点でのハードウェア上の問題点を示す。

2　LHD 用 HIBP 装置

LHD 用 HIBP の概略図を図 1に示す。この装置では、最大 6MeV まで加速した金の 1 価の正イオン(Au^{+})をプラズマ中に入射し、プラズマ内部でイオン化して生成された 2 価イオン(Au^{2+})を取り出し、その入射ビームと検出ビームの運動エネルギーの差からイオン化点でのプラズマ電位を測定する。また、検出電流値の変動はターゲットとなるプラズマ密度の揺らぎ反映するため、プラズマ密度揺動同時に測定することができる。HIBP の長所の一つは、高時間分解能で観測することができるということである。信号は１マイクロ秒のサンプリングで計測することが可能であり、プラズマの閉じ込め性能を左右している乱流を原理的に計測することができる。

イオン源にはプラズマスパッター型（BLAKE 型）イオン源を用いている[2]。現時点で約 15 マイクロ A の Au^{-} をタンデム加速器に入射し、1 マイクロ A 程度の Au^{+}を取り出し計測に使用している。

プラズマ閉じ込め装置 LHD は強力な磁場を用いているため、その漏れ磁場も大きい。加速器内部におけるビーム軌道に対する漏れ磁場の影響を低減するために、加速器は LHD から離れた位置に設置されている。また逆にビームライン中に磁場を発生させるとプラズマ閉じ込め磁場に対して誤差磁場になる可能性があるため、加速器下流側のビーム輸送系機器はすべて静電的な機器で構成されている。

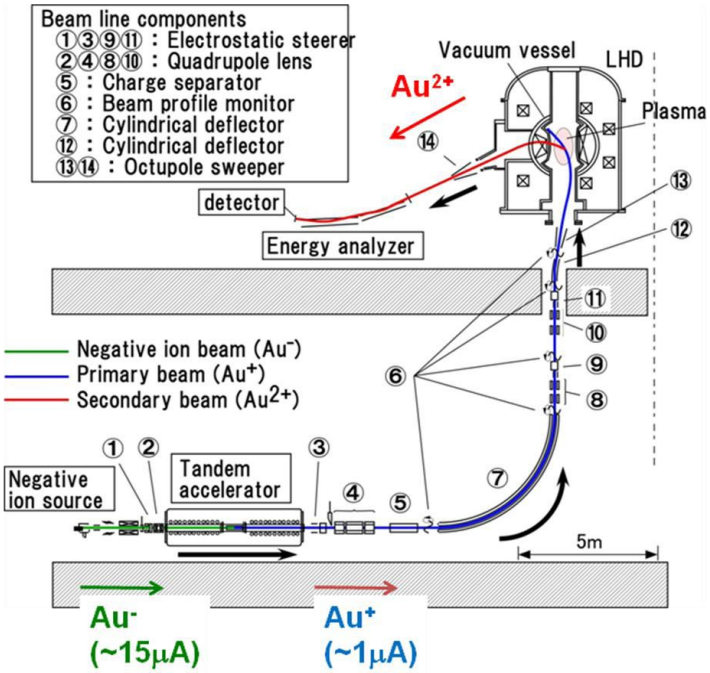


図 1　*LHD 用 HIBP 概略図。図右上に LHD の垂直断面図を示す。LHD プラズマは主半径約 3.9m,　小半径約 0.6m のドーナツ型をしている。イオン源及び加速器は地下室に設置されており、LHD 下部ポートより Au^{+}ビームを入射し、水平ポートから Au^{2+}ビームを取り出しエネルギー分析を行う。*

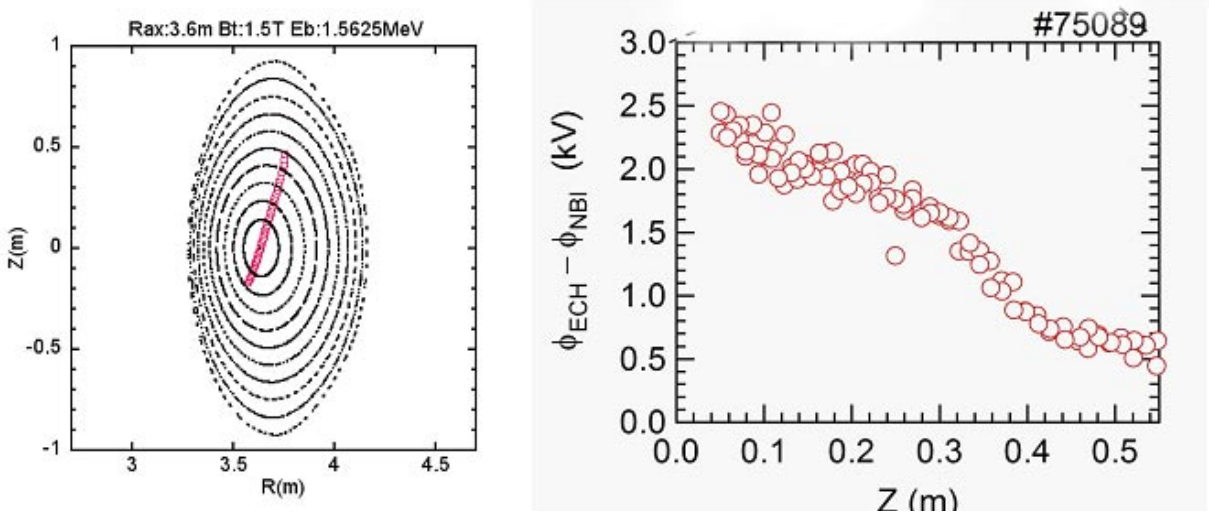


図 2　*左：プラズマ断面と HIBP により観測できる領域（白抜き丸）。右：HIBP により観測された電位分布の変化量。横軸は観測位置を左図に示す Z で表し、縦軸は通常の閉じ込め状態から閉じ込め改善状態になった時の電位の変化量を示す。*

ビームのエネルギーは我々のグループで新たに製作した 2 対の平行平板電極よりなるタンデム型静電エネルギー分析器[3]を用いている。通常使用されている 30 度入射型エネルギー分析器では MeV 級のイオンに対して数 100kV の正極電圧が必要であるが、タンデム型エネルギー分析器を用いることにより 100kV 程度の電圧で分析が可能となっている。このことが分析器の安全で安定した動作、エージング時間の低減に寄与している。

ビームエネルギー、磁場強度、入射角度が決まれば検出可能なビームの軌道が一意に決まるため、観測位置は一点に決まる。実験中には図 1⑬、⑭にある八重極偏向器を用いて入射角度を変えることにより、観測位置を選択する。これにより電位分布の観測が可能である。

3　観測結果

2006 年度の実験によってプラズマ閉じ込め性能の変化と電位の勾配（電場）が関係していることを示す実験結果が得られた（図 2）。図 2左にビームの入射角度を掃引したときに観測できる領域を示している。右図に、通常のプラズマ閉じ込め状態から閉じ込め改善状態に至った時の電位分布の変化量を示す。Z = 0.3 ～0.35m あたりに電位分布の屈曲が見られ、この領域で電場が変化していることが分かる。この電場の勾配がプラズマの閉じ込め改善と密接に関連している可能性が高く、因果関係を含め今後議論が進むことが期待できる。

また、同様の実験において観測位置を

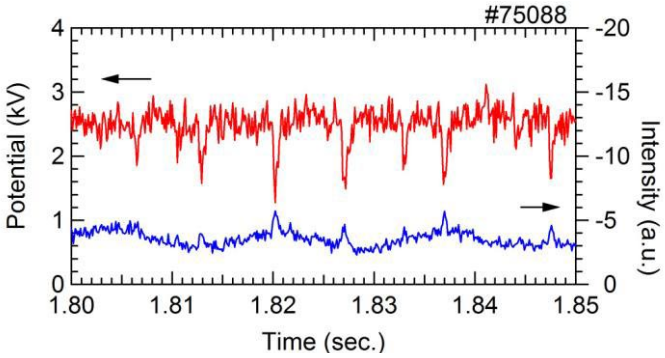


図 3 プラズマ中の電位の振動現象。上：電位信号。下：検出ビーム強度（プラズマ密度の揺らぎを反映する）。加速電圧は 0.75MV。

固定してプラズマの電位の時間変化を観測した例を図 3に示す。このように、プラズマ中で間欠的に発生する時定数 100 マイクロ秒程度の揺らぎが観測された。プラズマの動的挙動の物理モデルとの比較を進めている。

4　装置の改善と問題点

プラズマ閉じ込めの物理を理解するには更なる S/N 比の向上が必要であり、イオン源の高出力化、タンデム加速器内ガスセルの改善、検出器の改良を進めている。ガスセルに関してはこれまで問題になっていた SF_6 の微少リーク箇所が特定できたため、ビームライン内(加速器出口)の真空度を 1.3×10^{-5} Pa から 2.6×10^{-6}Pa まで改善できた。これによる１価イオンの出力電流、エネルギー広がりの改善による輸送効率の改善の効果等を調べる予定である。

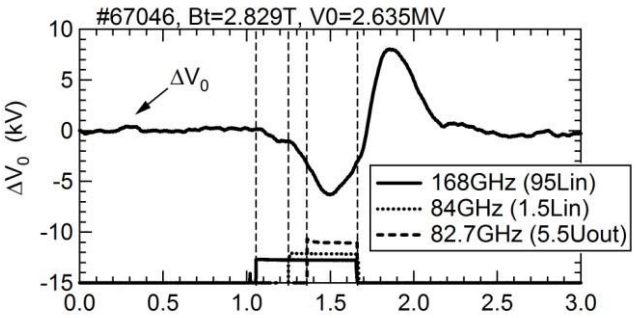


図 4 外部機器(ジャイロトロン)動作時の加速電圧の変動 (ΔV_0)。加速電圧は 2.635MV。

また、対策が必要な問題点として、外部機器動作時に加速電圧が変動してしまうという問題がある。プラズマの加熱のためにジャイロトロンを用いてマイクロ波（82.7GHz, 84GHz, 168GHz）を入射しているが、ジャイロトロン発振時にタンデム加速器の加速電圧が 0.3%程度（加速電圧 2.6MV に対して 8kV 程度）変動する（図 4）。これによるビームエネルギーの変動のため、ビームがビームラインを通過できず、計測が行えない事態が発生している。加速電圧変動の原因は、ジャイロトロン運転時に発生する商用 200V 系統の電圧降下に伴い、加速器用発振器のプレート電圧が変動していることによると考えられる。現在、原因の特定・検証作業と対策方法の検討を進めている。

5　まとめ

3MV タンデム加速器を用いて磁場閉じ込め核融合実験装置のためのプラズマ電位計測装置の開発を行い、電位計測を行った。これによりプラズマ閉じ込めと密接に関連していると考えられる電位分布の変化が観測された。また同時に、数 100 マイクロ秒の時定数を持つ電位の揺らぎ現象も測定することができた。

現時点ではハードウェア上の問題のため適用可能条件が制限されている。特に外部機器による商用電源電圧降下に伴う加速電圧の変動は深刻で、今後これを解決することが重要な課題である。

参考文献

[1] T. Ido, et al., Rev. Sci. Instrum.,10F523, **77** (2006)

[2] M. Nishiura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **77**, 03A537 (2006)

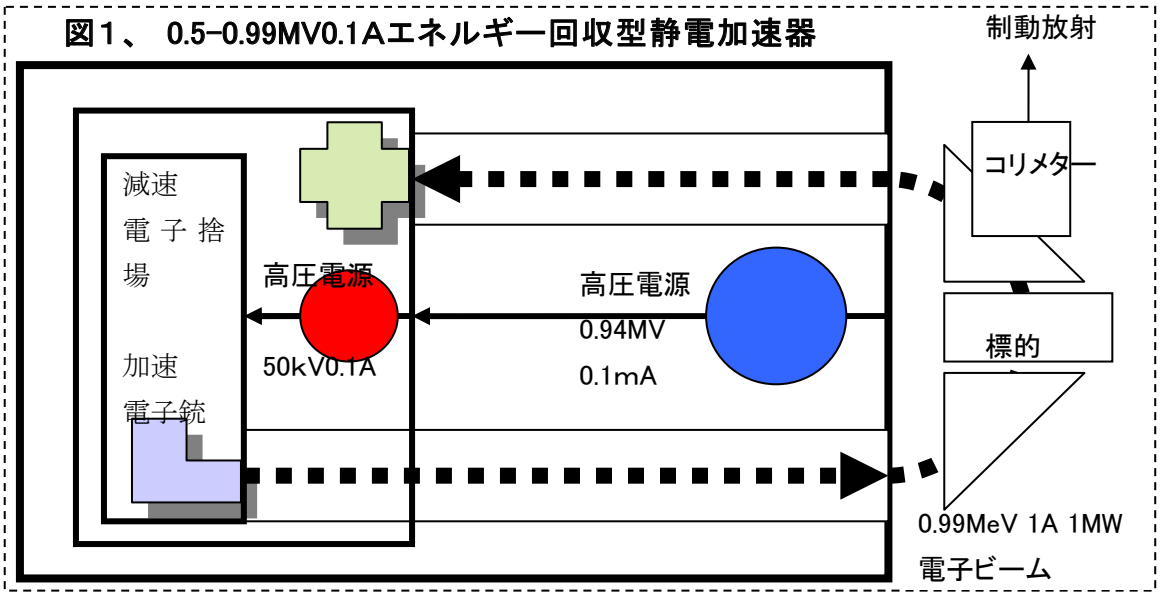
[3] Y. Hamada, et al., Rev. Sci. Instrum., 2020, **68** (1997)

6-3　1MeV 小型大電流エネルギー回収型静電加速器とその応用

1MeV Compact, High Current and Energy Recovery Electrostatic Accelerator and its Applications

峰原英介 Eisuke J. Minehara
日本原子力研究開発機構　量子ビーム応用部門　先進光源開発研究ユニット

小型軽量の加速器でエネルギーが 2-3MeV 程度までのものは直流が使いやすく安価である。産業用では1MeV以上は加速器で文部科学省の許認可が必要、これ以下ではX線発生装置で労基署への届け出のみで運転・使用が可能である。



ここでは 0.99MVの小型大電流エネルギー回収型静電加速器(図 1 参照)を具体的に目的を決めて概念的に設計評価する。

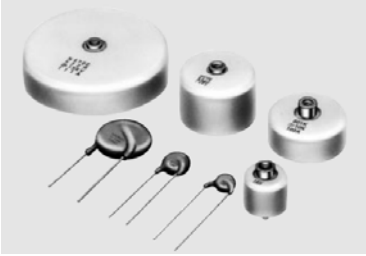


図2. 低価格高耐圧小型コンデンサの採用

図3. 低価格ダイオードと高耐圧モールドの改良

X線発生用 1mAから 100mA程度のもので軽量と低価格にする工夫が必要不可欠である。したがって1）高圧電源の部品(図2、3参照)を見直し、汎用品から製作し、試作機の電圧は 0.5-0.99MV本質的な低価格設計とする。2）バルブ付ポンプを持たない、封じきり構造でNEGやｓ－NEGで安価に大排気容量を確保する。3）酢酸ビニル接着等による低放出ガス有機物加速管(図 4 参照)を低価格で製作する。減速加速管と加速管を共用する。大電流では分離する。4）単純構造のトリウムタングステンカソードを用いる。5）SF6あるいは安価な代替フロン5－6Kg／cm2で絶縁する。タンク直径とカラム直径比は最適電界となるｅより小さくする。タンクは直径 40cm程度長さ 100cm程度鏡板のみであるいは溶接で大型フランジは使用しない。材料費人件費で数百万円以下、高級乗用車価格以下での販売が可能か検討したい。

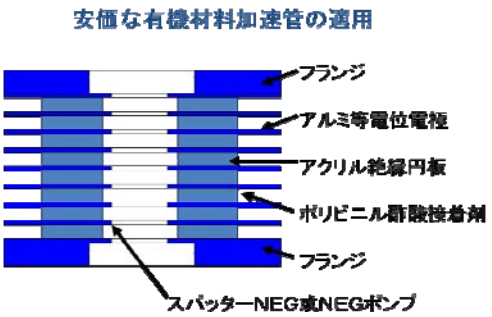


図4. 安価酢酸ビニル接着等による低放出ガス有機物加速管。

もう一つはERL用の入射器の電子銃部分で 100mA以上、NEAカソードは極高真空が必要である。かなり重量も容積も大きくなる。エネルギー回収をする必要がある。加速管部分をセラミックで製作できないと有機物加速管で自由に安価に製作できるが真空に問題が出てくる。1)高圧電源の部品は汎用品から製作し、電圧は 0.5-0.99MV電流は0. 1A－1A、低価格設計とする。2)荒引を除き、バルブ付ポンプを持たないNEGやs－NEGで主に排気する。3)酢酸ビニル接着等による低放出ガス有機物加速管を大口径低価格で製作する。減速加速管と加速管を分離する。4)超格子構造のNEAアルミガリウム砒素カソードを用いる。5)SF6あるいは安価な代替フロン5－6Kg／cm2で絶縁する。タンク直径とカラム直径比は最適電界となる e とする。タンクは直径 100cm程度長さ 200cm程度鏡板のみであるいは溶接で 1 枚フランジを持つ。材質は、鉄、アルミなどが可能である。エネルギー回収は、エネルギー分散無し等時性 180 度反転電磁石で曲げて、ワイヤーや薄膜で失ったエネルギー分を除いて静電的に回収する。

対テロ対策用特殊装備として1MeV から数 MeV 程度までの核共鳴蛍光(NRF) γ線の発生用電子線加速器2MeV から10MeV が別目的で開発が期待される。この概要を以下に図5にて説明する。概要は図5での説明の通り単色化制動放射による核共鳴蛍光或いは核共鳴吸収法で核燃料物質、核兵器材料、爆薬、毒性ガスなど危険物質を検知する手法の開発でこの初段の加速器の入射器や電子銃にこの装置を適用することを想定している。

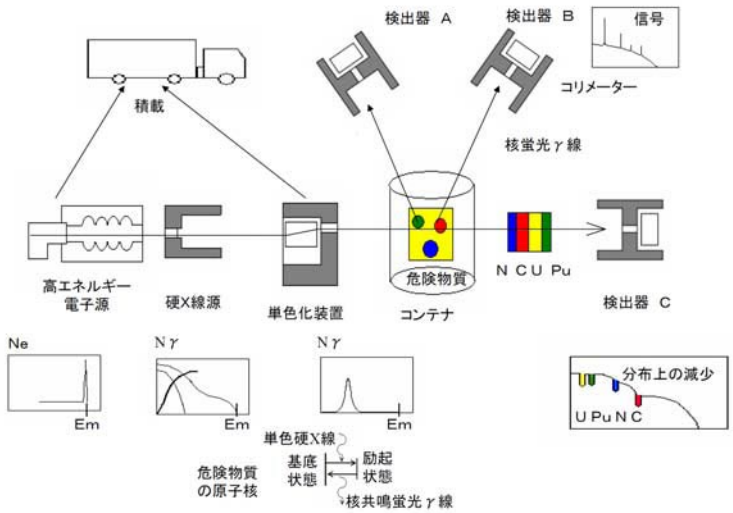


図5. 単色化制動放射による核共鳴蛍光或いは核共鳴吸収法の説明。文献1)。

文献

1) W.Bertozzi et. Al., Nucl. Instr. and Meth. B, Vol. 241, 1-4, December 2005, pp.820-825.

6-4 TIBIC を用いた酸化膜中に誘起した過渡電流の解明に関する研究

平尾敏雄[1)]、高橋芳浩[2)]、府金　賢[1,2)]、小野田忍[1)]、大島　武[1)]

1）日本原子力研究開発機構　量子ビーム応用研究部門
半導体・高分子材料耐放射線性評価研究グループ
2）日本大学大学院　理工学研究科電子工学専攻

1. はじめに

近年、半導体デバイスの微細化が進み、その駆動電荷が小さくなっていることから、ノイズマージンがますます低下している。宇宙放射線に含まれる重荷電粒子（イオン）がこのような半導体デバイスを含む集積回路の感受部を通過した場合、シングルイベント現象である回路に一時的な誤動作（ソフトエラー）や永久的な損傷（ハードエラー）を生じる。一方、地上で使用されている半導体デバイスでも宇宙と同様に中性子によるシングルイベント現象が顕在化している。この様に、シングルイベント現象は、宇宙からごく身近な、地上で我々が使用している半導体デバイスにまで範囲が広がっているのが現状であり、その発生機構の把握と早期対策が急務となっている。

日本原子力研究開発機構(JAEA)では、TIARA 照射施設を用いてシングルイベント現象の発生機構解明とモデル構築を目指した研究を進めている。シングルイベント耐性として有望視されている SOI (Silicon On Insulator)半導体素子の埋め込み酸化膜の評価を、MOS 構造を有したデバイスを用いて行った。これまで SOI 構造のデバイスでは、基板内で発生した電荷が、埋め込み酸化膜にて抑制されることからシングルイベント耐性が評価されている[1-2]。しかし、近年、イオンが基板内に入射し、発生した電荷の一部が埋め込み酸化膜を介して収集が観測され、SOI デバイスに対するシングルイベント耐性が疑問視されている[3-5]。本研究では、酸化膜を介した誘起電流のメカニズムを解明するために MOS 構造を持ったデバイスで評価を行った結果について報告する。

2．実験方法

照射試験試料は、電極面積 100, 200, 300 μm 径、酸化膜厚 50, 100, 200 nm を有したシリコン MOS(Metal Oxide Semiconductor)キャパシタを用いた。図 1 に作成した試験試料構造を示す。試料へのイオン照射は、TIARA 施設の 3MV タンデム加速器に接続されている重イオンマイクロビームの炭素及び酸素 15MeV～18MeV を使用した。イオンが入射した時に発生する誘起過渡電流の測定は、目的とした箇所にイオンを 1 ヶづつ打ち込むことが可能なシングルイオンヒットシステムを組み合わせた TIBIC (Transient Ion Beam Induced Current) 測定装置を用いて実施した。表 1

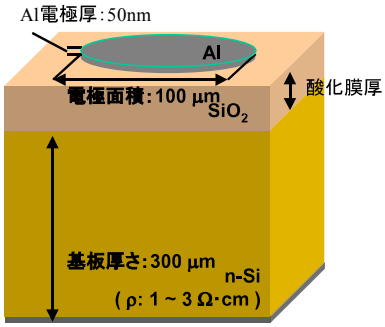


図 1. 酸化膜厚 50, 100, 200 nm の MOS キャパシタの構造概念

表 1．イオンの特性（in Silicon）

イオン種	エネルギー [MeV]	LET [MeV/(mg/cm²)]	飛程 [μm]	発生電荷量 [fC/μm]
炭素	15	4.15	14.47	43
酸素	15	6.9	9.7	71

に実験に使用したイオンの特性の概要を示す。

３．結果及び考察

図 2 に電極面積 100μm の MOS キャパシタに 15MeV の炭素イオンを照射した時に誘起した過渡電流波形の電圧依存性を示す。

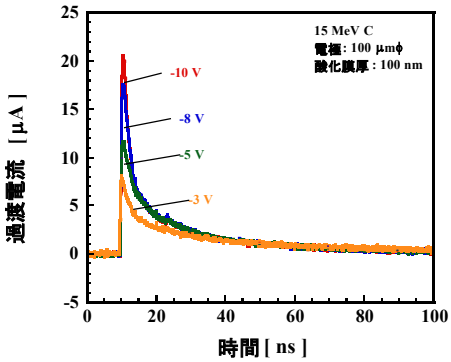


図 2．15MeV の炭素イオンによって誘起した過渡電流波形の電圧依存性

過渡電流波形は印加する電圧に依存しており、負の電圧の絶対値が大きくなるに伴い電流ピークも大きくなり、そのピークの増加は直線的で、電極面積が小さいほどピークが大きいことも得られている。n 型基板の MOS キャパシタに対して負の電圧は酸化膜下に空乏層を形成する電圧であり、その空乏層で発生した電荷が空乏層電界によって収集されると考えられる。

図 3 に電極面積の違いによる印加電圧と収集電荷との関係を示す。この結果、それぞれの収集

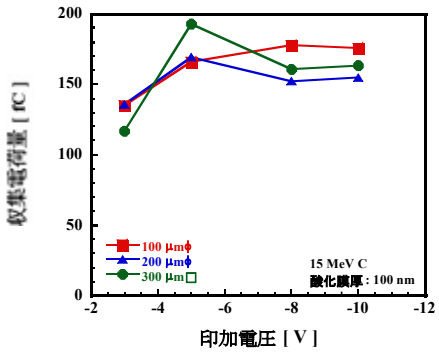


図 3．酸化膜 100・m の MOS キャパシタに炭素 15MeV が入射した時に収集された電荷量と印加電圧との関係

電荷では、空乏層が一定である印加電圧-5V 以降の電圧で、収集電荷が変化していないことが分る。それに対して、空乏層が減少し始める電圧-3V 付近での収集電荷の著しい変化が得られている。また、電極面積と収集電荷量との関係を印加電圧が -10V 時で比較した場合、収集電荷量は直径 100μm の試料(円形)が一番大きく、次いで一辺 300μm の試料(四角)、直径 200μm の試料(円形)の順であり、収集電荷量の変化は電極面積に依存しない結果が得られている。なお、電極面積と過渡電流波形との結果では、電極面積の小さいほど発生した過渡電流のピーク電流が大きくなっている。しかし図 3 に示すように収集電荷量に電極面積の依存性が見られない理由としては、電極面積が大きいほどピーク電流は小さくなるが、過渡電流波形の立下り時間が長くなることに起因している。即ち、電極面積が大きい程、容量が大きくなり時定数が大きいために、過渡電流の応答が遅くなるためと考えられる。

酸化膜厚が及ぼす過渡電流の影響を評価するために、酸化膜厚の異なる MOS キャパシタに酸素 18MeV のマイクロビームを照射した時に生じた過渡電流の膜厚依存性を図 4 に示す。結果に示

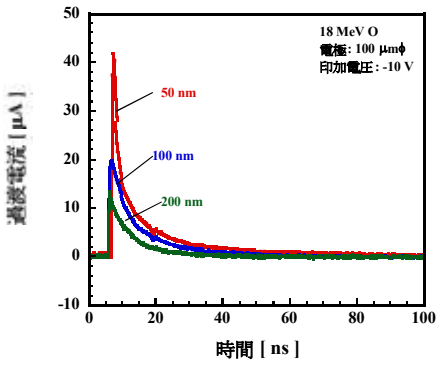


図４．18MeV の酸素イオンによって誘起した過渡電流波形の酸化膜厚依存性

すように、MOS キャパシタにおいて誘起される過渡電流波形は、酸化膜厚が薄いほど、過渡電流波形のピーク値が大きくなる酸化膜依存性を示している。また、酸化膜厚が 100nm と 200nm の試料では、印加電圧の増加とともにピーク値が直線的に増加しているのに対して、50nm の試料では対数的に増加する傾向が現れている。しかし、

図中の50nmの試料と200nmの試料で収集電荷量（得られた過渡電流波形の積分値）を比較した場合、最大で6倍近い収集電荷量の違いが現れている。このようにMOSキャパシタに重イオンが入射した時に生じる過渡電流は、酸化膜厚が薄いほど酸化膜電界が強くなることから酸化膜厚の違いによる影響が大きく、そして、イオンが入射した時の収集電荷量には、空乏層幅と酸化膜電界の寄与がおおきいことが分る。

また、イオン損傷の影響を考慮して照射前後のC-V及びI-Vの電気特性を実施し、イオン照射における酸化膜の影響を検討した。

以上の実験結果から、我々は観測された重イオンによって誘起した過渡電流の発生メカニズムについて次の2項目に着目し考察した。その結果、1) 照射によりSi基板中で発生した電荷が酸化膜を介した伝導電流、2) Si 中で発生電荷により生じる酸化膜電界の変化によって起因した変位電流の可能性が考えられる。もし、伝導電流と仮定した場合、電流はイオントラック周辺の極限られた領域の酸化膜を通過すると考えられる。即ちこの高密度電流による酸化膜の絶縁劣化が考えられるが、照射による電気特性（C-V及びI-V）の変化が見られないことから伝導電流が支配的とは考えられない。これらの理由から、イオン入射によって誘起した過渡電流を変位電流によると仮定し、測定結果との比較を行った。

本シミュレーションでは、酸化膜が完全絶縁膜であると仮定し、実施したためゲート電流成分は全て変位電流である。変位電流密度の定義式を以下に示す。

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} \qquad \text{式 1}$$

式中の D は酸化膜中の電束密度を示しており、これを変形すると次の式が成り立つ。

$$J_D = -\varepsilon_{ox}\frac{\partial E_{ox}}{\partial t} = \frac{\varepsilon_{ox}}{d_{ox}}\frac{\partial V_S}{\partial t} \qquad \text{式 2}$$

ここでε_{ox}は比誘電率、d_{ox}はゲート酸化膜厚、E_{ox}を酸化膜電界（ゲートから基板方向が正方向）、V_sは界面電位（半導体表面電位）である。この変位電流密度のゲート領域における積分値が変位電流となる。つまり、変位電流は界面電位の時間微分値に比例すると言える。

図 5 に測定結果との比較を行う際に用いた変位電流計測時の構造モデルの概略を示す。過渡電流の計算は、TCADデバイスシュミレータを用いた過渡解析にて行った。

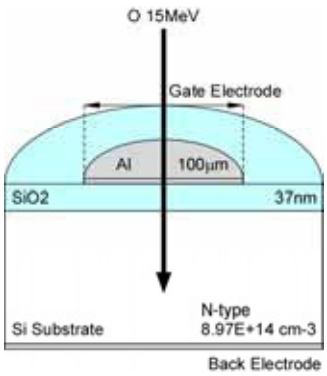


図 5. 変位電流計算時の構造モデル概略図

計算モデルのパラメータに合わせて重イオン照射誘起電流を計算し、比較を行った結果を図6に示す。

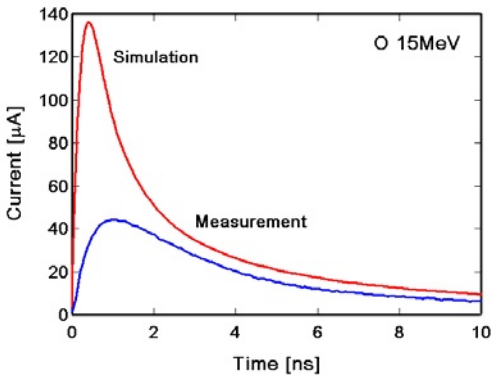


図 6. 実験結果と計算結果との比較

シミュレーション結果では実験結果に比べ、過渡電流波形が3倍ほど大きな値となっている。これは本シミュレーション条件において、測定系の寄生成分を考慮していないためだと考えられる。しかし，ピーク電流値、ピーク時刻共に同じオーダーで一致しており、ゲート印加電圧依存性、酸化膜厚依存性等も良く一致することがわかった。

一方、図 5 に示す解析用計算モデルを用いて重イオン照射誘起電流及び界面電位の計算を行った。その結果を図 7 に示す。

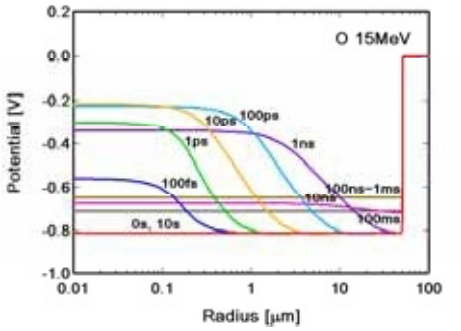


図７．界面電位の時間変化

半径方向に対する界面電位の時間的変化を見ると、イオンの照射に伴い、ゲート電極中心部の界面電位が正方向へ急激に変化していることがわかる(～10ps)。これはイオントラック領域に発生した高密度のキャリアによるものである。つまり式（2）に示したように、正方向の変位電流が発生する．しかし，ゲート領域中心部のみに発生するため、大きな電流値には至らない。その後、発生したキャリアは放射方向に拡散することで、ゲート領域中心部の界面電位は負方向へ変化する(10ps～)。つまり中心部では負方向の変位電流が発生していると言えるが、ゲート領域全体の界面電位が正方向に変化するため、正方向の大きな変位電流が流れる(～1μs)。このときの電流値のピーク時刻である 0.5ns (図 6 参照)までは、界面電位の変化速度が上昇するため電流値は増加し、ピーク時刻以降ではその変化速度が遅くなるため電流値は減少する。　また照射後 0.1μs 以降では、ゲート領域全体における界面電位はゆっくりと負方向に変化し，照射後約 10s で定常状態に戻ることを確認した。これは界面に溜まったキャリアが非常に長い時間をかけて再結合により消滅していくためだと考えられる。

以上より、MOS 構造における変位電流の発生要因はキャリアのドリフト、拡散、再結合による界面電位の時間的変化であることがわかった。

４．まとめ

本シミュレーション結果により実験結果を定性的に説明できることから、ゲート電流成分を全て変位電流とする計算モデルを用いた解析は妥当なものであると考えられる。また照射前後の CV 特性も変化しないことから、MOS 構造における重イオン照射電流を伝導電流として考えることは難しく、変位電流が支配的であることがわかる。

５．今後の展望

MOS キャパシタのイオン照射効果についてシミュレーション結果から、負方向の電流と正方向の電流成分が観測されている。変位電流の発生機構を実験的に把握するために、試験素子として MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)を用いた実験にてこの負正の電流分布の計測を実施し変位電流解明に努める。

謝辞

本研究の一部は文部科学省学術フロンテイア推進事業「マイクロ機械／知能エレクトロニクス集積化技術の総合研究」の支援を受けて実施した。

文献

［1］O. Musseau, IEEE Trans,Nucl. Sci., Vol. NS-43, no.2, p-603, 1996.

［2］T. Hirao, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 158 (1999) 260.

［3］P. E. Dodd, IEEE Trans,Nucl. Sci., Vol. NS-48, no.6, p-1893, 2001.

［4］T. Hirao, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 206 (2003) 457.

［5］J. R. Schwank, IEEE Trans,Nucl. Sci., Vol. NS-49, no.6, p-2937, 2002.

6-5 酸化膜を介したイオン照射誘起電荷の収集機構解明に向けた研究

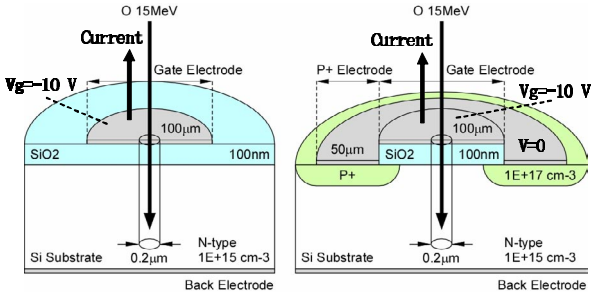
府金　賢[1)、2)]、 高橋芳浩[2)]、 平尾敏雄[1)]、 小野田忍[1)]、 中嶋康人[2)]、 大西一功[2)]

1）日本原子力研究開発機構　量子ビーム応用研究部門
半導体・高分子材料耐放射線性評価研究グループ
2）日本大学理工学部　電子情報工学科

1　研究背景

半導体デバイスに重荷電粒子(イオン)が入射するに伴い、半導体デバイスに誤動作や故障を引き起こすシングルイベント現象が発生する。この現象は、入射イオンによって基板中で誘起された電子正孔対の一部が空乏層内の電界によって加速され、電極に収集されることにより生じた電流に起因すると考えられている。

シングルイベント現象に耐性を持つ半導体デバイスとして、SOI(Silicon on Insulator)構造が注目された。SOI 構造はトップシリコン層、埋込み酸化膜、基板の 3 層により構成され、イオンの入射に伴い基板中で誘起された電荷のトップシリコン層での収集を、埋込み酸化膜により抑制することから、耐シングルイベント性が期待された。しかし、SOI p^+n ダイオードに対する高エネルギーの重イオン照射試験において、基板内で誘起された電荷がトップシリコン層で収集されることを示唆する観測結果が報告されたため、酸化膜を介した電荷収集機構の解明が急務となっている。



(a)MOS　　(b)MOS with P+ Layer
図1　計算モデル

本研究では酸化膜を介した電荷収集機構の解明のために、MOS 構造に対する重イオン照射試験を実施し、観測したイオン照射誘起電流を評価すると共に、デバイスシミュレータ(ISE TCAD)による解析を行ってきた。その結果、酸化膜を介した重イオン照射誘起電流を変位電流により仮定したシミュレーション結果によって、MOS 構造における重イオン照射誘起電流の観測結果を説明できることから、酸化膜を介した重イオン照射誘起電流は変位電流が支配的であると予想した。しかし、実験的な確証を得るには不十分であった。

そこで本研究では、酸化膜を介した重イオン照射誘起電流が変位電流であることを実験的に確認するために、デバイスシミュレータを用いた更なる解析を実施し、イオン照射誘起電流の発生機構の解明を目指した。

2　デバイスシミュレーション(ISE-TCAD)

図 1(a)に MOS 構造の計算モデルを示す。計算モデルは軸対称円筒形とし、酸化膜を比誘電率 3.9 の完全絶縁膜とすることで、電流成分を全て変位電流とした。また外部回路は考慮せず、理想直流電圧源のみがゲート電極に接続されているものとした。そしてゲート電極の中心に、加速エネルギー15MeV の O(酸素)イオンが垂直入射するものとした。なお、イオントラックの深さ方向の LET(Linear

Energy Transfer)分布はTRIM(the Transport of Ions in Matter)コードの計算結果を用い、半径方向の分布はσ(分布係数)=0.1[μm]のガウス分布であると仮定した。さらに、電子正孔対発生率の発生ピーク時間を1.5[ps]、拡がり時間を1.0[ps]と設定した。表1にシリコン中でのOイオンの諸特性を示す。

以上の計算条件の下で得られた、MOS構造における重イオン照射ゲート誘起電流には次(①,②)の性質がある。①イオン照射誘起電流は正方向及び負方向成分から成り、②電荷収集量(電流の時間積分値)がイオン照射後約10[sec]で0に収束する。これらの性質は、変位電流の特徴を示すものである。MOS構造における計算結果では、イオン照射後約100[ns]以降に負方向の電流成分が発生するが、その電流値が非常に小さいため、実際の重イオン照射試験では、ノイズの影響により負方向成分の電流の観測が困難であった。

そこで実験的に①,②の変位電流の性質を確認するために、図1(b)に示すMOS with P^+ layer(拡散層を有するMOS構造)を計算モデルとして重イオン照射ゲート誘起電流の解析を実施した。

表1　シリコン中でのOイオンの諸特性

Ion	Accelerated Energy [MeV]	Project Range [μm]	LET [MeV/(mg/cm²)]
O	15	10.3	6.53

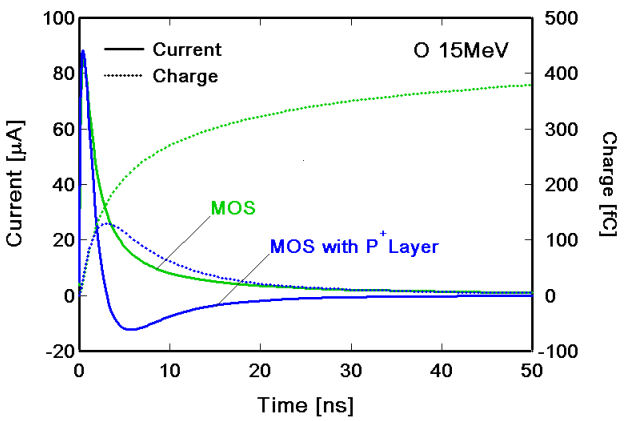


図2　MOS構造及び拡散層を有するMOS構造に対する重イオン照射誘起ゲート電流計算結果

図2にMOS構造、及び拡散層を有するMOS構造に対して、加速エネルギー15MeVのOイオンを照射した場合の、重イオン照射誘起ゲート電流の計算結果を示す。ゲート電極印加電圧は-10[V]とし,拡散層を有するMOS構造の P^+ layer(拡散層)電位は0[V]とした。なお、電流の極性はゲート電極から電源に向かって流れる電流を正電流と定義した。

計算結果より、拡散層を有するMOS構造の場合、イオン照射後約6[ns]にピークを持つ負方向の電流が発生し、さらにイオン照射後約45[ns]で収集電荷量が0に収束することが分かる。ここで、MOS構造での変位電流発生機構について考察する。

MOS構造における変位電流は、入射イオンにより誘起された電荷がゲート酸化膜-半導体界面に蓄積し、半導体界面電位を変化させることにより発生すると予想される。

$$J_D = -\varepsilon_{ox}\frac{\partial E_{ox}}{\partial t} = \frac{\varepsilon_{ox}}{d_{ox}}\frac{\partial V_{suf}}{\partial t} \quad (1)$$

ε_{ox} ： ゲート酸化膜の誘電率
E_{ox} ： ゲート酸化膜電界
d_{ox} ： ゲート酸化膜厚
V_{suf} ： 半導体界面電位

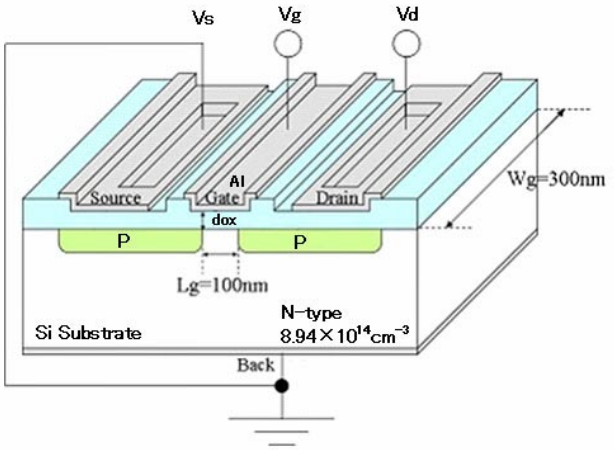
式(1)に変位電流密度 J_D の定義式を示す。なお、酸化膜電界 E_{ox} はゲート電極から基板に向かう方向を正電界と定義している。上式より、変位電流密度 J_D は半導体界面電位 V_{suf} の時間変化値に比例することが分かる。

MOS構造の場合、重イオン照射に伴い半導体界面に蓄積した電荷が、長い時間をかけて再結合により消滅していくことで、界面電位が負方向に変化し定常状態に戻る。しかし半導体界面電位の時間変化が非常に小さいために、発生する負方向電流の値も非常に小さくなる。一方、拡散層を有するMOS構造の場

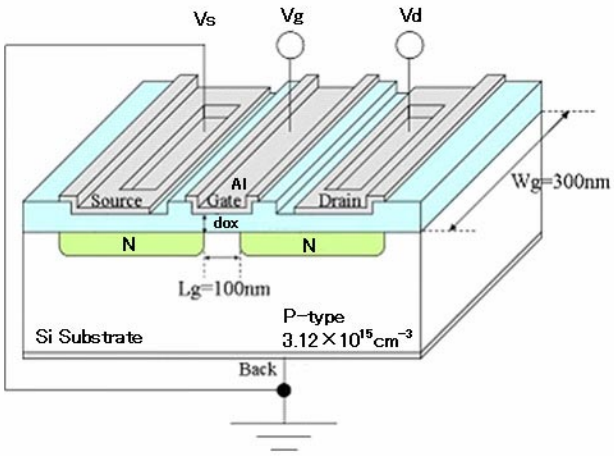
合では、界面に蓄積した電荷が拡散層電極に引き抜かれ、素早く定常状態に戻る。そのため、半導体界面電位の時間変化が大きく、MOS構造に比べて大きな負方向電流が発生すると予想される。以上の計算結果より、MOS構造に拡散層を付加することで、実験的に負方向電流の観測、及び収集電荷量が0に収束する挙動の確認が可能となると予想し、拡散層を有する MOS 構造に対する重イオン照射試験を実施した。

3　重イオン照射試験

図3に被照射試料の構造図を示す。被照射試料には、拡散層を有する MOS 構造として、バルクシリコンにより作製した Al ゲート p-channel, n-channel MOSFET(d_{ox}=40[nm], Lg=100[μm], Wg=300[μm])を用いた。この試料を、特性インピーダンスが 50[Ω]のマイクロストリップラインが形成されたチップキャリア上にマウントした。さらに，基板をマウントしたマイクロストリップラインと、ソース電極とをボンディングワイヤにより結線することで、ソース電極を基板と同電位としている(Vs=0[V])。そしてドレイン電極(Vd)及びゲート電極(Vg)に電圧を印加した状態で、重イオン照射試験を実施した。



(a) p-channel MOSFET



(b) n-channel MOSFET

※ MOSFET:Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

図3　重イオン照射試験の被照射試料

重イオン照射試験は、日本原子力研究開発機構 TIARA 照射施設の、3MV シングルエンド静電加速器に接続された重イオンマイクロビーム形成装置を用い、エネルギー15[MeV]のOイオンを照射した。また、イオン照射誘起電流の測定は、TIBIC(Transient Ion Beam Induced Current)システムにより実施し、帯域幅 3[GHz]のオシロスコープ(Tektronix 製)を用いて、各端子における照射誘起電流を観測した。

4　実験結果

図4に p-channel MOSFET に対して、エネルギー15[MeV]のOイオンを照射した場合の、重イオン照射誘起ゲート電流、及び収集電荷量のゲート電極印加電圧依存性を示す。このとき、ドレイン電極及びソース電極は接地状態としている。また、電流の極性はゲート電極から電源に向かって流れる電流を正電流と定義している。

結果より、正方向の電流成分に加えて、負方向の電流成分が観測され、さらに収集電荷量がイオン照射後数十 ns で0に収束する挙動が確認できる。そのため、MOSFET に対する重イオン照射試験において、シミュレーシ

ョン結果と定性的に一致する観測結果が得られていると言える。MOSFET の場合、ソース・ドレイン拡散層を接地状態とすることで、イオン照射に伴いチャネル領域(ゲート酸化膜-半導体界面)に蓄積した電荷が、拡散層と基板層間の内臓電位により、ドレイン・ソース電極に短時間で引き寄せられたため、半導体界面電位が急速に変化し、ゲート電極に大きな負方向電流が流れたと予想される。

また、ゲート電極印加電圧を半導体基板に空乏層を形成する方向に増加させるに伴い、正・負方向の電流ピークが増加し、より短時間の電流波形となることが分かる。これは、印加電圧の増加に伴い、ゲート酸化膜電界が高くなることに起因して、ゲート電極に発生する変位電流が増加したと考えられる。

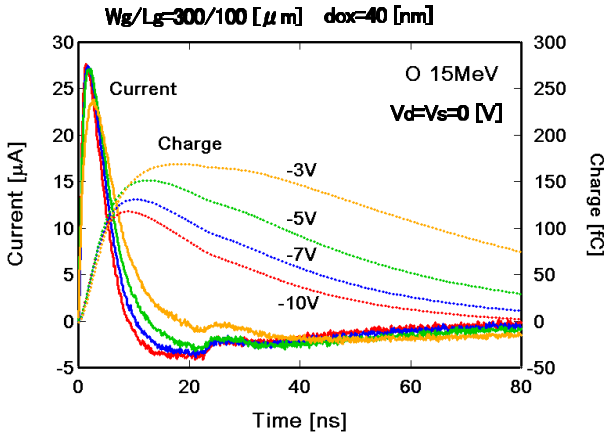


図 4　p-channel MOSFET における重イオン照射誘起ゲート電流のゲート電極印加電圧依存性

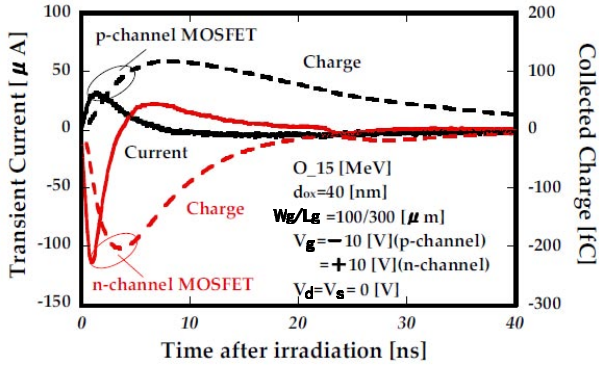


図 5　p-channel, n-channel MOSFET における重イオン照射誘起ゲート電流の比較

図 5 に、p-channel 及び n-channel MOSFET に対してエネルギー15[MeV]のOイオンを照射した場合の、重イオン照射誘起ゲート電流及び収集電荷量の比較を示す。イオン照射時、p-channel, n-chnnael MOSFET のゲート電極にはそれぞれ-10, +10[V]を印加し、ドレイン電極及びソース電極は接地状態とした(Vd=Vs=0[V])。なお、電流の極性はゲート電極から電源に向かって流れる電流を正電流と定義している。

結果より n-channel MOSFET では、p-channel MOSFET に比べて重イオン照射誘起電流のピークが大きく、より短時間で収集電荷量が 0 に収束することが分かる。n-channel, p-channel MOSFET における重イオン照射誘起電流の差異について考察すると、p-channel MOSFET では重イオン照射に伴いゲート直下の半導体界面に蓄積する電荷が正孔であるのに対し、n-channel MOSFET では電子であり、正孔に比べキャリアの移動度が高いため、誘起過渡電流のピークが大きく、短時間の電流波形となると考えられる。

5　まとめ

MOSFET に対する重イオン照射試験を実施した結果、重イオン照射誘起ゲート電流に正・負方向の電流ピークが見られ、収集電荷量がイオン照射後数十 ns で 0 に収束する挙動が確認された。よって、以上の実験結果とデバイスシミュレータによる計算結果から、酸化膜を介した重イオン照射誘起電流は変位電流が支配的であると説明できる。

6　今後の展望

今後は、SOI デバイスに対する重イオン照射試験を実施し、重イオン照射誘起電流の観測を通じて、埋め込み酸化膜を介したイオン照射誘起電流の発生機構の解明を目指す。

7. ポスター発表

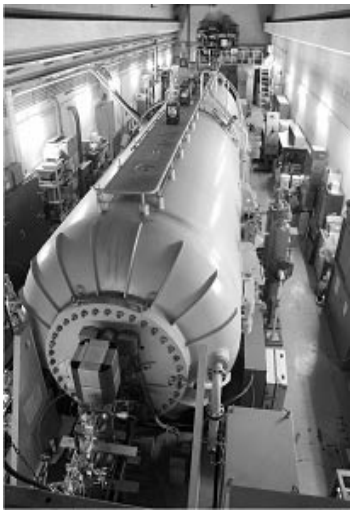
P-1 京都大学理学部タンデム加速器の現状

松本　博、廣瀬昌憲、中濱治和、今井憲一、村上哲也、中村正信＊

京都大学 大学院理学研究科 物理学第二教室
＊和歌山県立医科大学

１．はじめに

京都大学理学研究科のタンデム加速器は、１９８７年より３年計画で、５ＭＶタンデムバンデグラフ加速器より、ペレトロン加速器（横置き型の米国ｎｅｃ製８ＵＤＨ型）に更新され、１９９０年度より利用が開始され、１８年が経過した。近年は、ユーザーの定年退職あるいは他大学、研究所への転出により、利用者が大巾に減り、それに伴って、運転時間も減少してきたが、今年度は、新しいユーザーの確保、及び、学生実験のマシンタイムの増加により、１７年度の１．６倍の運転時間となった。イオン源は、当初はｎｅｃ製のＳＮＩＣＳⅡを使用していたが、ＡＭＳ実験の開始により、１９９７年からＨＶＥＥ製８４６－Ａ型Ｃｓスパッターイオン源（５９サンプル）を標準イオン源として使用している。またＲＦ荷電変換型イオン源（アルファトロス）も常時設置している。



加速器本体

２．利用状況

平成１８年度の利用募集は年２回案内を出しているが、マシンタイムに余裕があるため、随時、利用申し込みを受け付けている。ただ、人的（夜間運転員の確保）、予算的に充分なサポートが出来ない状況にあるため、ユーザーは、経験ある人に限られてきている。なを、年間を通じての延べ利用者数は１６６名（８グループ）であった。

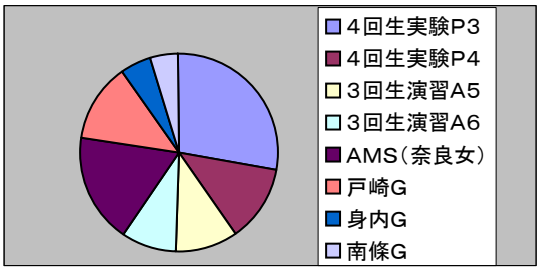
次に利用グループとその研究課題等を示す。

利用グループ名	研　究　題　目　等
戸崎グループ	イメージングプレートの放射線計測への応用
身内グループ	マイクロ TPC 性能評価実験
奈良女子大グループ	植物遺体の AMS 年代測定
南條グループ	光圧縮原理の検証
４回生実験	Ｐ　―　３
〃	Ｐ　―　４
３回生演習	Ａ　―　５
〃	Ａ　―　６

図―１に各ユーザーの加速時間の割合を示す。

全体の約１／４を４回生実験 P3 が占めているのは、１週間連続の実験を行った、ためである、又、AMS 実験も１／４近く占めており、３日程の実験を数回行った。

他のグループは、１～２日の実験を行っている



図－１　各ユーザーの加速時間の割合

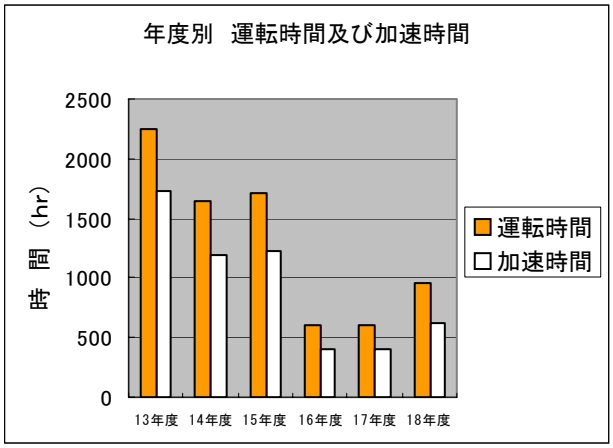
３．運転状況

昨年度の保守点検を含めた、運転時間（チェーン運転時間）は９５３．４時間であり、ビーム加速時間は６１９．１時間であった。

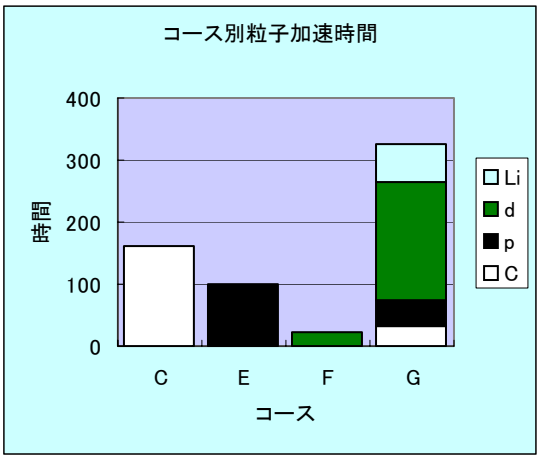
図－２に近年６年間の運転時間、加速時間の経過を示す。平成１６年に加速時間、運転時間が激減したが、徐々に増えてきている。

図－３にコース別加速時間と加速粒子の内訳を示す。
現在ビームコースは５コースを使用しており、Ｇコースは学生実験を主とし、汎用でも使用をしている。Ｆ及びＥコースは固有のユーザー専用で使用し、ＣコースはＡＭＳの専用のコースとしている。またＢコースはマイクロビーム用で整備中である。

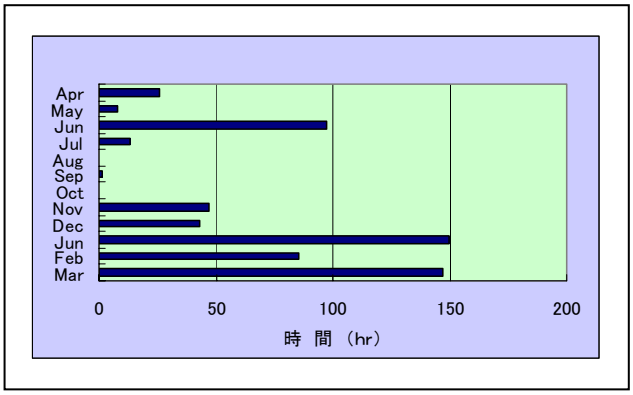
図－４に今年度の月別の加速時間を示す、学生実験は、６，月１、２，３月に実施されるため、運転時間が多くなっている。



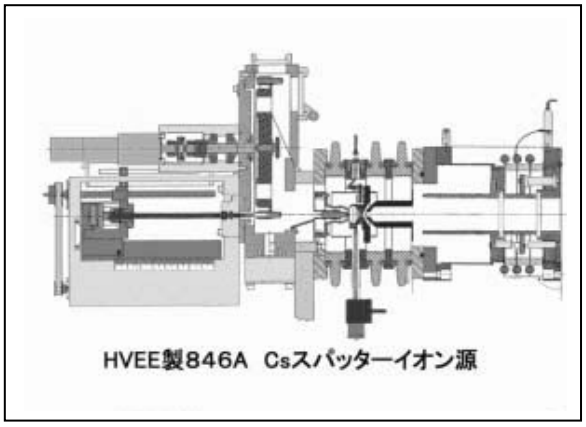
図－２



図－３コース別加速時間と加速粒子の内訳



図－４　月別の加速時間



４　加速器の故障・保守整備の状況

年間を通じて、タンクを開く様な大きな故障はなかった、また、運転時間より判断して、タンクを解放しての修理点検は行わなかった。

主な故障としては

１．６月に８４６－Ａイオン源のカソードロード用ロットの爪の開閉制御用３方弁の故障交換を行った。（写真１、２参照）

２．１０月に８４６－Ａイオン源からビーム　が出なくなったため、イオン源の分解掃除を行った。（写真３，４、５、６）

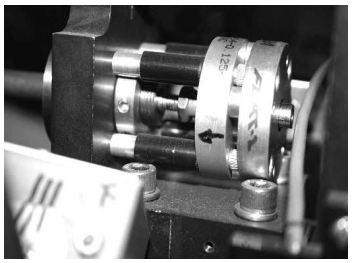
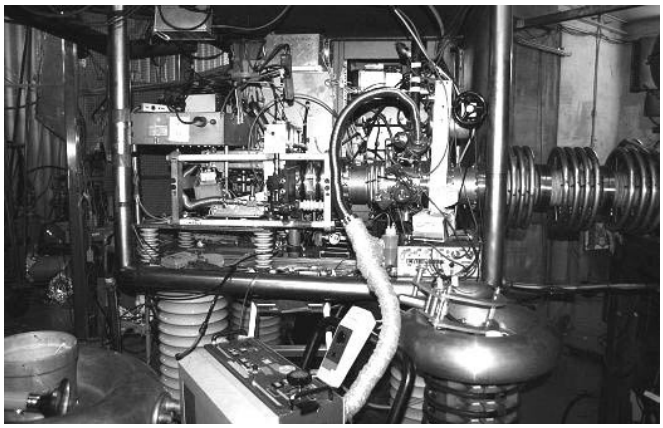


写真１　シリンダー



作業中のイオン源デッキ

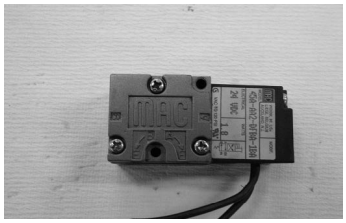


写真２　故障した３方弁

写真３　カソード部

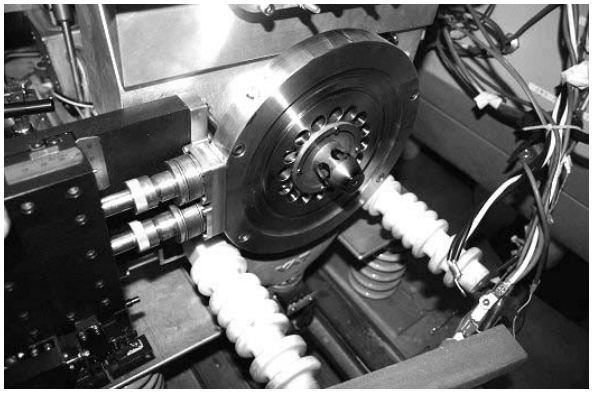


写真　４

写真５　セシウム部

３．今年２月にファラディカップ（ＦＣ０４）のフィルドスルーのベローズのリークが発生し修理、交換を行った。（写真　７、８参照）

その他、イオン源室のエアコンの故障、ＴＶモニターの焼障、分析電磁石のホール素子電圧測定用のデジボルの故障等があった。

写真６　掃除したセシウム部

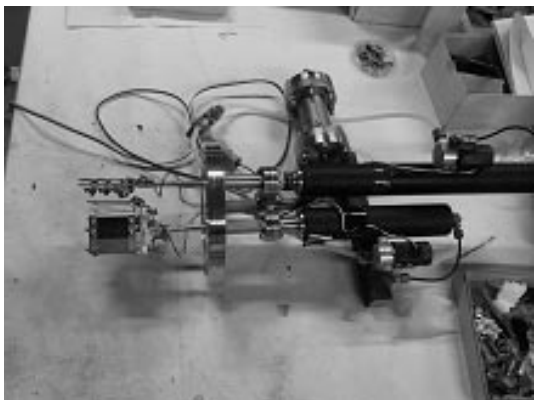


写真７　ＦＣ駆動部

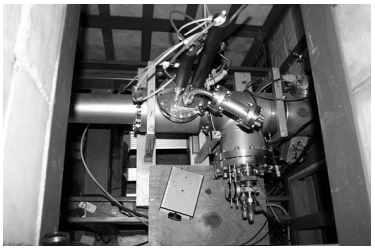


写真８　ＦＣ取り付け

５．マイクロビームコースの整備

京大理タンデムでは、２００３年頃から、学内のRIセンター、放生研等の方々とともに、重イオンによる、マイクロビームを用いた、細胞照射システムの開発をおこなってきた。２００６年度は、落射装置を装備した顕微鏡（写真１３，１４）設置のための架台（写真９，１０）を設置した。顕微鏡の水平をだすため、架台の下にジャッキを使用し（写真１５，１６）アンカーボルトで固定した。またダクト、チェンバーを固定する金具（写真１７）もとりつけた。

ビーム調整用のルミネ板及びファラディカップ（写真１１，１２）も取り付け制御室から出し入れの遠隔操作が出来るようにしている。

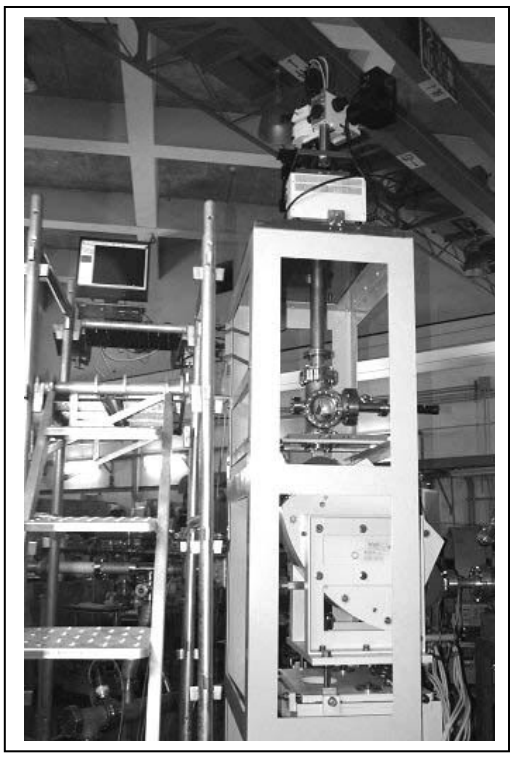


写真９　垂直のビームコース

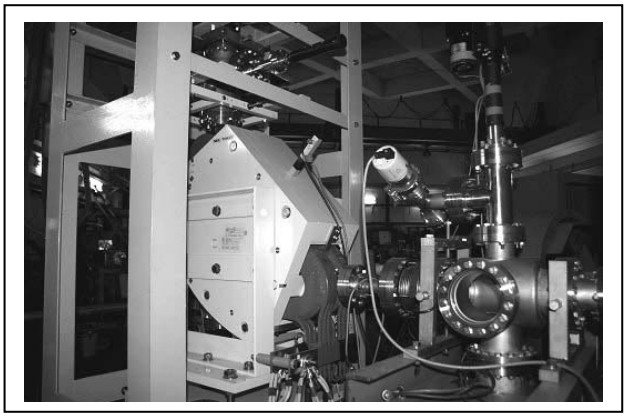


写真１０　９０度電磁石

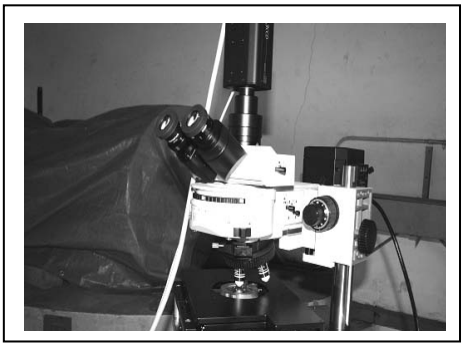


写真１３　落射装置を装備した顕微鏡

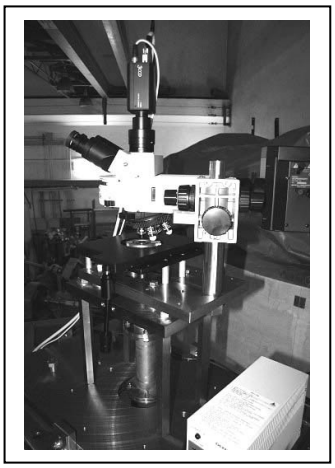


写真１４

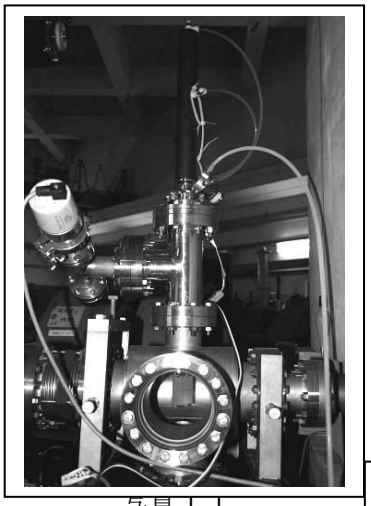


写真１１

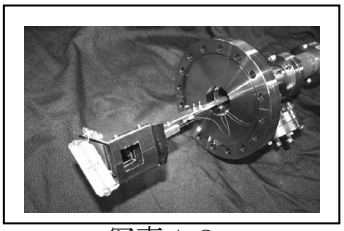


写真１２

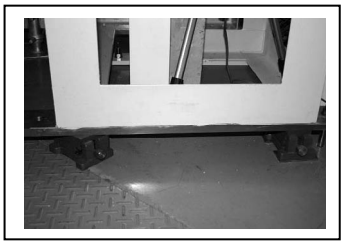


写真　１５

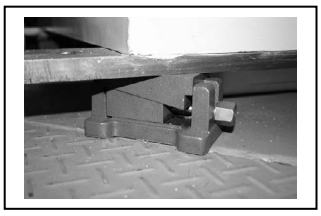


写真　１６

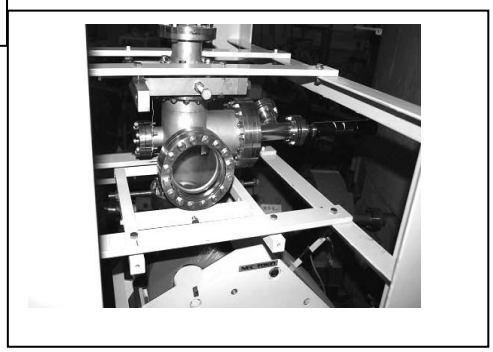


写真　１７

P-2 東京大学重照射研究設備の現状

尾亦孝男、岩井岳夫、阿部弘亨
東京大学大学院工学系研究科原子力専攻

１．概況

重照射研究設備（略称 HIT、High Fluence Irradiation Facility, the University of Tokyo）は東京大学における核融合炉材料研究等、加速器を高度に利用する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東海村の原子力工学研究施設内に設置され、東京大学原子力研究総合センターによって運営されてきた。平成１７年４月の改組により、現在は大学院工学系研究科原子力専攻（専門職大学院）の管理するところとなり、これを機に既存の高速中性子源炉「弥生」や電子線ライナックと同様、全国共同利用設備として学外の利用者にも開放されて２年が経過し、利用テーマも増えつつある。また、大学や研究機関だけでなく、民間企業の利用も受け入れている。

本設備は3.75 MV シングルエンド型バンデグラーフと1MV タンデトロンの２台の静電型イオン加速器を主設備としたマルチイオンビーム照射施設である。大きな特徴は MeV 領域の二重イオンビーム照射実験ができる点であり、その他、微粒子加速機能や各種測定装置を強化しながら今日まで工学系を中心とした研究者に利用されている。運転開始より 20 年を超えるが、大きなトラブルもなく順調に稼働している。

２．各加速器の現状

①バン・デ・グラーフ加速器（High Voltage Engineering KN-3750）

ターミナル電圧は現状で最大３MV である。大きな特徴は微粒子イオン源とのハイブリッド運用を行っていることで、これはおそらく世界でも他に例がないであろう。イオンビームモードは年間 28 週のマシンタイムのうちの 20 週、微粒子加速モードは 8 週を割り当てている。

イオンビームモード時には、RF イオン源で H^+, He^+, C^+, O^+, (D^+ または N^+)やこれらの分子イオンが利用可能である。また、微粒子加速モードでは１ミクロン程度の導電性微粒子を 10 km/s 以上の超高速に加速することができ、微粒子加速用加速器としては世界最高電圧を誇る。平成 18 年度の運転時間は両モード合計で 635 時間であった。

②タンデトロン加速器（General Ionex Corporation）

加速器は大きな問題もなく順調に稼動中である。Ni^{3+}イオンを中心に Cu^{2+}、Fe^{2+}、H^+などが利用されている。典型的なイオン電流は Ni^{2+}で１μA 程度である。平成 18 年度の運転時間は 518 時間であった。

表１　各加速器の主要諸元

	バンデグラーフ	タンデトロン
メーカー・型名	High Voltage Engineering KN-3750	General Ionex Corporation 1MV Tandetron
最高電圧	3.75 MV（現状では 3.0MV）	1 MV
イオン源	ＲＦイオン源、 微粒子イオン源	Cs スパッターイオン源(860A)
イオン種	H^+, He^+, C^+, O^+, (D^+, N^+) 微粒子（Ag, C, LATEX）	H, Al, Si, Fe, Cu, Ni etc.

３．利用研究の現状

利用分野として主たるものは原子力用材料の研究である。設立当初から継続されている核融合炉構造材、ブランケット増殖材の研究に加え、軽水炉の被覆管材料・圧力容器鋼材、J-PARC に代表される核破砕中性子源のターゲット材料等の照射効果の基礎研究が実施されている。また、大型プロジェクトで本加速器を使う例も増えており、超臨界圧水冷却炉の被覆管材料開発（文部科学省:原子力システム研究開発事業）、高速炉材料劣化予測法開発（同）、軽水炉圧力容器鋼材脆化予測法開発（経済産業省：高経年化対策強化基盤整備事業）等のプロジェクトに活用されている。また、19 年度からは民間による利用も開始された。他には、高速中性子シンチレータ、光触媒材料、宇宙用ソーラーセイル材料等の照射効果研究や、d-d 反応を利用した中性子/プロトン検出器の開発も行われている。

HIT のバン・デ・グラーフ加速器は、現状で国内唯一の MV 級静電型微粒子加速施設である。加速された微粒子で宇宙塵を模擬することによって、探査衛星搭載用の宇宙塵検出器開発に用いられている。ここで開発中の圧電素子型軽量ダスト検出器は、BepiColombo 国際日欧水星探査計画で打ち上げられる探査機に搭載候補として選定されており、完成に向けての改良が続けられている。また、開発中の大口径・軽量の衝突電離型宇宙塵検出器（IID）が、国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォーム第 2 期利用の 11 の候補ミッションの１つに選定され、今後開発作業が加速されていく見込みである。

表２に上記プロジェクトの一覧をまとめるが、他にも全体として研究テーマが増加しており、19 年度上半期は 20 件のテーマが採択された。大学、研究機関(JAEA, JAXA 等)、民間企業等幅広い利用者を取り込んで、様々な研究が進められつつある。

表２　HIT 利用研究プロジェクト一覧

研究資金・計画	代表者	所属	テーマ名	期間
文部科学省：原子力システム研究開発事業	岡　芳明	東京大学	軽水冷却スーパー高速炉に関する研究開発	H17~21
文部科学省：原子力システム研究開発事業	青砥紀身	日本原子力研究開発機構	長寿命プラント照射損傷管理技術に関する研究開発	H18~20
経済産業省：高経年化対策基盤整備事業	鬼沢邦雄	日本原子力研究開発機構	原子炉圧力容器鋼の中性子照射脆化に関する研究	H19
経済産業省：原子力人材育成プログラム（原子力の基盤技術分野強化プログラム）	阿部弘亨	東京大学	機構論に立脚したより安全なハフニウム板型制御棒の開発	H19~21
国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォーム第二期利用	佐々木晶	自然科学研究機構	大面積宇宙ダスト･デブリ計測	H22 以降打ち上げ
BepiColombo 国際日欧水星探査計画	野上謙一	獨協医大	水星・惑星間・恒星間ダストの観測	H25 打ち上げ予定

P-3

原子力機構－放射線標準施設棟ファン・デ・グラーフ型加速器の現状

小沼勇[1)]、古渡意彦[1)]、谷村嘉彦[1)]、川崎克也[1)]、清水滋[1)]、吉澤道夫[1)]、
名倉信明[2)]、川井勲[2)]、佐藤福克[2)]

1）日本原子力研究開発機構　東海研究開発センター
原子力科学研究所　放射線管理部放射線計測技術課
2）日本アドバンストテクノロジー株式会社

1. 概要

日本原子力研究開発機構原子力科学研究所の放射線標準施設棟は、放射線測定器等の性能試験及び校正に国内外で広く利用されている。2000 年度には、大型加速器の開発等に対応した広範囲なエネルギーの中性子や高エネルギーγ線に対する線量評価法や放射線防護のための計測技術を確立すべきとの要望を受け、米国 NEC 社製 4MV ファン・デ・グラーフ型加速器（以下、「FRS 加速器」という）を設置した。図 1 に加速器の配置図と単色中性子照射室内の様子を示す。また、表 1 にターゲットの種類とエネルギー点を示す。

FRS 加速器の利用に当たっては、産学界に広く貢献する目的で原子力機構が推進している施設共用を開始することを目指していた。このためには、安定した運転を確保する必要がある。そこで 2005 年度から 2006 年度にかけて、加速器マニュアルの作成、委託による運転員の確保などの運転体制の確立に取り組んだ。また、トリチウムターゲット管の管理方法の確立や電圧昇圧装置制御用プログラムの開発などの技術開発も行った。これらにより、2006 年 11 月には施設共用を開始することができ、また、2006 年度には過去最高の運転時間（1000 時間超）を達成した。

本報では、2005 年度及び 2006 年度の運転状況をまとめるとともに、上記の技術開発について報告する。

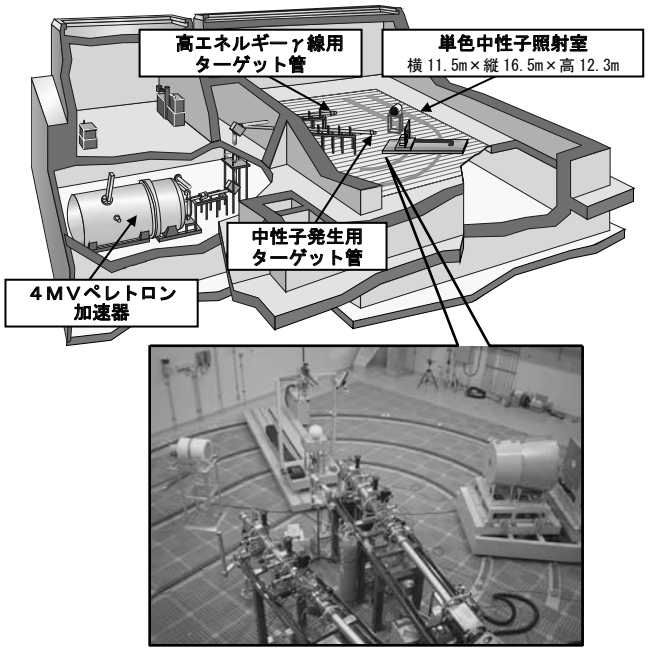


図１　加速器の配置図と単色中性子照射室

表１　ターゲットの種類とエネルギー点

ターゲットの種類	核反応	校正場のエネルギー点
トリチウム	$^{3}H(d,n)^{4}He$	n：14.8MeV 19MeV
	$^{3}H(p,n)^{3}He$	n：1.2MeV 2.5MeV
重水素	$^{2}H(d,n)^{3}He$	n：5.0MeV
リチウム	$^{7}Li(p,n)^{7}Be$	n：144keV 250keV 565keV
スカンジウム	$^{45}Sc(p,n)^{45}Ti$	n：8keV 24keV
フッ素	$^{19}F(p,\alpha\gamma)^{16}O$	γ：6～7MeV

注）下線はトレーサビリティ確保済みエネルギー点

2. 運転・整備状況

2005 年度及び 2006 年度における加速器の使用状況を図 2 に示す。当該年度における総運転時間は、2005 年度が 627 時間、2006 年度が 1023 時間であった。内訳は両年度とも単色中性子校正場整備の割合が特に大きい。2006 年度は運転員委託の開始によりコンディショニング運転を十分に行うことができ、その割合も大きく増加している。FRS 加速器は、通常勤務時間帯（9:00～17:30）のみの運転ではあるが、2006 年度に初めて総運転時間 1000 時間以上を達成できた。その理由としては、運転員委託による日常管理等の強化、加速器マニュアル [1)]の作成により、修理に時間を要する故障が減ったことが大きい。なお、加速器マニュアルの作成に当たっては、加速器の運転操作及びメンテナンス作業等について詳しく記載し、加速器運転を初めて行う者でも理解しやすい内容としている。

当該年度に発生した主な故障は、2005 年度は NMR 磁場測定器の故障、ビーム引き出し用エクストラクタ電源の故障、ライトリンクの故障であった。また、2006 年度は制御回路の不良により、分析磁石用電源装置が断続的に約 50 回(17 日間)停止する故障が発生し、原因追求に時間を要したが基板交換により正常に復帰した。表 2 に主な故障状況とその対応について示す。当該期間中において長期間連続して運転停止となる故障はなく、それぞれ部品交換及びメーカー修理での対応を行った。

表 2　2005、2006 年度の主な故障とその対応

故障内容	修理・対応
NMR 磁場測定器の故障	メーカー修理
ビーム引き出し用 エクストラクタ電源の故障	メーカー修理
ライトリンクの故障	部品交換
分析磁石用電源装置の停止	基板交換

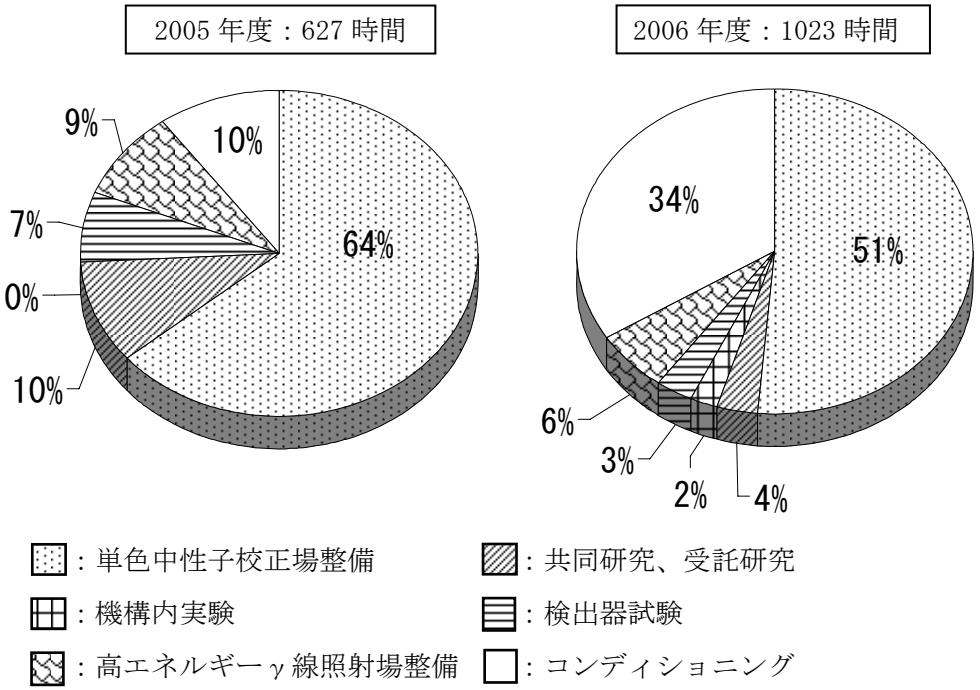


図 2　加速器の使用状況

3. トリチウムターゲット管の管理

FRS 加速器では、14.8MeV の単色中性子を発生させるためにトリチウムターゲットを用いている。使用中のトリチウムターゲットは、銅板上の薄いチタン膜（直径 13mmφ、厚さ 454μg/cm^2）に 18GBq のトリチウムを吸着させているため、温度上昇等に伴うガス放出や遊離するトリチウムの漏洩防止が重要である。我々は、安全かつ迅速にターゲット交換を行うため、トリチウムターゲット単体ではなく写真１に示すトリチウムターゲット管全体を１ユニットとしてビームラインから取り外し、保管・管理する方法を採用している。このトリチウムターゲット管の管理方法の確立は、トリチウムターゲットを安全に取り扱うためには必要不可欠である。すでに日常のトリチウムの漏洩防止として、次の対策を講じている。

① 保管時には、手動バルブ及びイオンポンプ等ライン全体を一体型で管理する。

② 使用及び保管時の真空度は、10^{-8}Torr～10^{-9}Torr を常に担保する。

③ 保管は、万が一のトリチウム漏洩が生じても影響を回避できるよう局所排気が行えるフード内で行う。

④ 保管時の真空度維持には、外部への排気が不必要なイオンポンプを使用する。

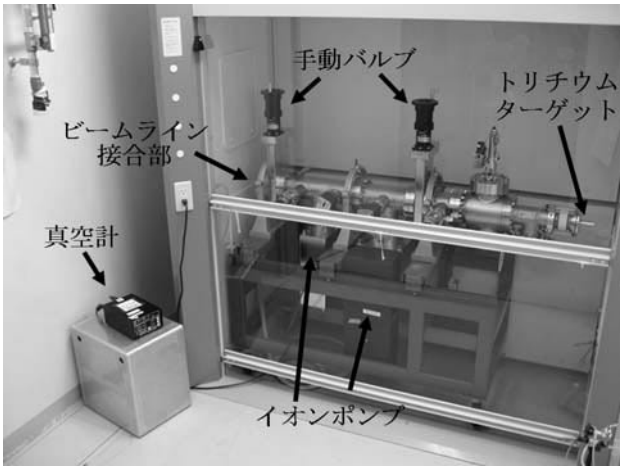


写真１　トリチウムターゲット管の構成及びフード内での保管状況

トリチウムの漏洩防止で最も重要なことは、トリチウムターゲット管の真空度を常時担保しておくことである。しかし、停電時にはイオンポンプも停止してしまうため、真空度の保持対策を確立しておく必要があった。そこで、ターゲット管の真空度低下実験を行い、真空度がイオンポンプ動作下限レベル（10^{-6}Torr オーダー）に達する時間を求めた。その結果、イオンポンプ動作下限レベルに達する予想時間は約 2.5 日となった。

図３にトリチウムターゲット管保管時の真空度の測定状況を示す。当該期間中、25 時間、49 時間の２回の計画停電作業が行われた。各停電時における真空度の低下は、イオンポンプの動作下限レベルを下回ることはなく、2.5 日という事前の実験結果を裏付けるものであった。従って、2.5 日以内の停電であれば特段の対策は不要であることがわかった。

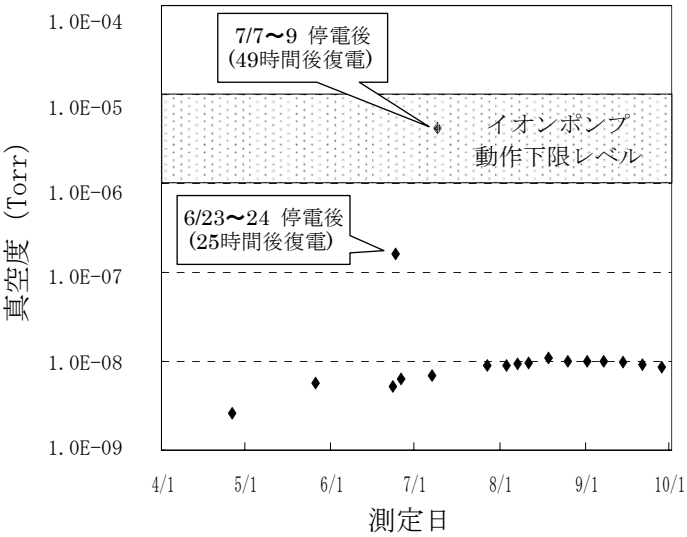


図３　トリチウムターゲット管真空度測定状況

4. スカンジウムターゲット用電圧昇圧装置制御用プログラムの開発

2006 年度には、スカンジウムターゲット用電圧昇圧装置制御用プログラムを開発した。8keV の単色中性子校正場に利用している ^{45}Sc(p,n)^{45}Ti 反応は、図 4 に示すように 8～36keV 中性子発生付近で非常に複雑な共鳴構造を有しており、目的とするエネルギーの中性子を発生させるためには、1kV 以下の精度で入射陽子エネルギーを調整することが必要である。ところが、加速器本体側では高精度なエネルギーの微調節は困難である。そこで、スカンジウムターゲット用電圧昇圧装置を設置することにより、ビームラインターゲット部に高電圧を印可し、目的とする精度でのビームエネルギーの微調節を可能とした。今回この装置の制御用プログラムを開発した。これにより、制御室にあるコンピュータからターゲット電圧を遠隔操作により制御し、電圧変化時の中性子発生量（中性子モニタの計数）を同時に取得することで、中性子発生量の変化を自動的に測定できるようにした。図 5 に約 2.94MeV に加速した陽子をターゲットまで輸送し、ターゲット電圧を+10kV から+32kV まで掃引したときの単位ビーム電流あたりの中性子発生量の変化を示す。この結果より、31kV の電圧をターゲットに印加することで、目的とする 8keV 単色中性子を発生できることがわかる。本プログラムの開発により、目的とするエネルギーの単色中性子を再現性良く発生させる手法を確立した。

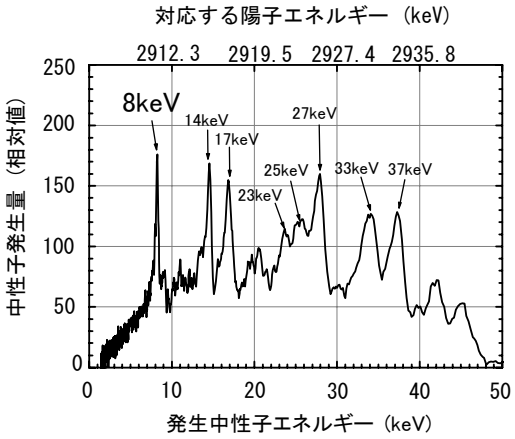


図４ ^{45}Sc(p,n)^{45}Ti 反応の共鳴構造

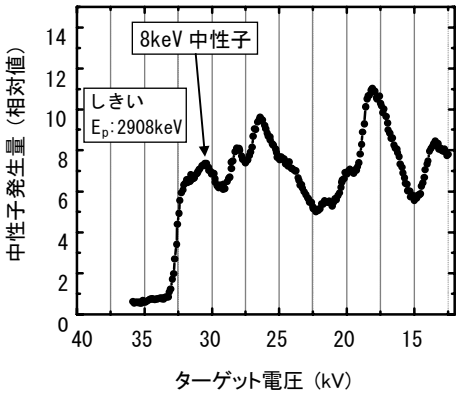


図５ ﾀｰｹﾞｯﾄ電圧挿引時の中性子発生量の変化

5. まとめ

2005 年度及び 2006 年度における FRS 加速器では、分析磁石用電源装置の断続的停止などの一部の不具合はあったが、長期間に渡る連続停止の障害はなく、ほぼ順調に運転及び整備を行うことができた。今後は、残り 4 点の単色中性子校正場及び高エネルギーγ線校正場の整備を引き続き行うとともに、安定した単色中性子校正場の供給を進める予定である。

参考文献

1）藤井克年，他：放射線標準施設棟 加速器マニュアル,JAEA-Testing2006-005（2006）

P-4 TIARA 静電加速器の現状

—タンデム加速器の現状－

[1]千葉敦也、[1]石井保行、[1]水橋清、[2]北野敏彦、[2]金井信二、[2]青木勇希
[1]日本原子力研究開発機構　高崎量子応用研究所
[2]ビームオペレーション（株）

１.はじめに

TIARA タンデム加速器（nec 製 9SDH-2）は平成 3 年に完成し、すでに 15 年が経過した。加速器導入当初より加速器高圧タンク内に異常なまでの煤が発生（黒化）し、およそ 3 ヶ月間の運転でタンク内が真黒になる状態が続いていた。また黒化が進むにつれ加速電圧安定度が最悪時には CPO(Capacitive Pick Off)の測定限界である 5×10^{-4} 以上にまで悪化していた。一方で、照射技術の発展に伴い、加速器性能の向上が求められている。マイクロビームの更なる微細化を実現するためにはビームエネルギーの高い単色性が不可欠である。静電型加速器の場合、ビームのエネルギー幅は通常、加速電圧安定度に比例するが、タンデム加速器では、荷電変換ガスとの衝突によるエネルギー損失量に分布を持つため、加速電圧安定度とビームエネルギー幅の関係は単純に比例しない。ビームの単色性を更に向上させるためには電圧安定化に加え、荷電変換によるエネルギー幅の広がりにも何らかの対策が必要である。ここでは、加速電圧の安定化に向け取り組んできた黒化対策および荷電変換ガス圧とビームエネルギー幅の関係について現状報告する。

２.加速器高圧タンク内の黒化対策

当初、粉塵の発生は加速器を構成する様々な回転機構における軸受け部分（モータ軸やシーブ等のベアリング）の摩耗によるもの、もしくはペレットチェーンの軸だし不良によりチェーン振動がシーブ表面とチェーンとの間に大きな摩擦を生み、シーブ表面が削られ粉塵が発生するものと考えられた。そこでチェーンモータや各部ベアリングの交換およびチェーンの軸出し調整等を何度も繰り返したが、全く改善は見られなかった。しかし、当初ターミナル電圧のリップルを改善する目的で行った、チェーンのインバータ駆動化が、黒化の抑制に大きな効果をもたらした。インバータ駆動により、各チェーン固有の安定なチェーンスピードが選択でき、更に、インバータの低速スタート機能によってスタート時の急激な回転によるチェーンとシーブ間の大きな摩擦を無くす事ができた。その結果、図１に示すようにタンク内壁に付着する煤を１／１０程度まで減らすことができ、実質問題ない程度に改善された。

図 1-1. 従来の駆動方式

図 1-2. インバータ駆動方式

次に、チェーンモータ固定版の改良を試みた。固定版（図２参照）は、ペレットチェーンに一定の張力を持たせ、且つチェーンの回転による振動を吸収するためのスライド機構が備わっている。従来の固定版は厚い鋼鉄製で非常に重く、スライド部への負担が大きかったため振動を十分に吸収できていないと考えられた。そこで、固定版の軽量化とスライド部の改良を行った結果、チェーンがこれまで以上に安定に回転するようになり、チェーンが高速に回転することで発生する塵埃はほぼ完全に無くなった。また図３に示すように高電圧ターミナルのリップル電圧変動も改善された。以上の経緯から、加速器導入当初より発生していた粉塵は、新品故に問題視してこなかった固定版のスライド機構が導入当初から問題があったものと考えられ、15 年目にしてようやく粉塵問題が解決した。

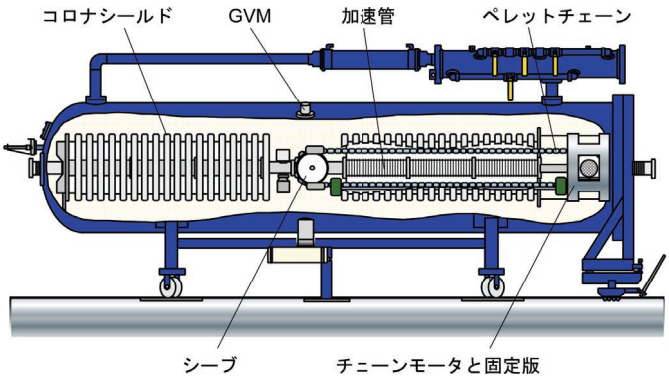


図 2. タンデム加速器の概略図

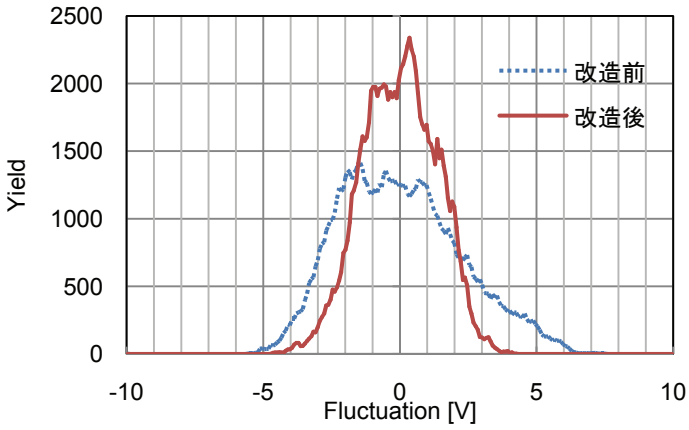


図 3. モータの回転周波数 35Hz で 1MV 昇圧時のターミナルのリップル電圧変動。チェーンモータ固定版の改良前後でターミナル電圧のリップル電圧幅が 20%程度改善された。

３.荷電変換ガス圧とエネルギー安定度

ペレットチェーンのインバータ駆動化によって、チェーンが最も安定する回転速度に調整し昇圧することでターミナルの振動が抑えられ、３MV 運転時に於いて CPO 信号から計算される電圧安定度（ΔV/V）は 1.5×10^{-4} 程度（改造前 3.0×10^{-4}）にまで改善された。タンデム加速器の場合、ビームエネルギー（E）は荷電変換ガス（N_2）との衝突によるエネルギー損失量に分布を持つため、エネルギー安定度（ΔE/E）は電圧安定度よりも大きい値を示す。エネルギー安定度の評価は共鳴核反応を利用して行うが、荷電変換によるエネルギー幅はプロトンでも数 10eV から数 100eV 程度と予想されため、通常エネルギー校正などに利用される $^{15}N(p,\alpha\gamma)^{12}C$ では反応幅が 1.3keV と広く、荷電変換によるエネルギー幅

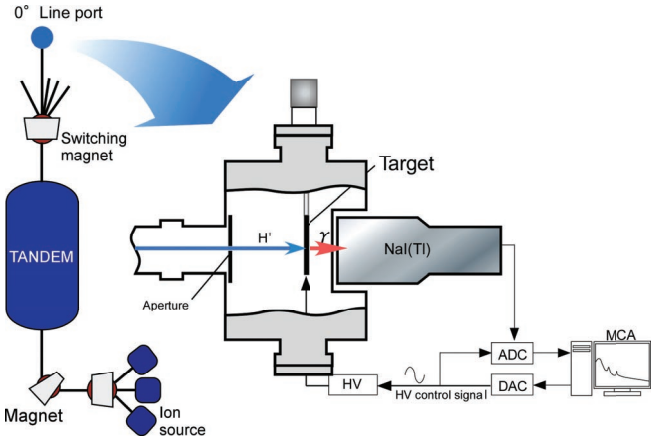


図 4. セットアップ

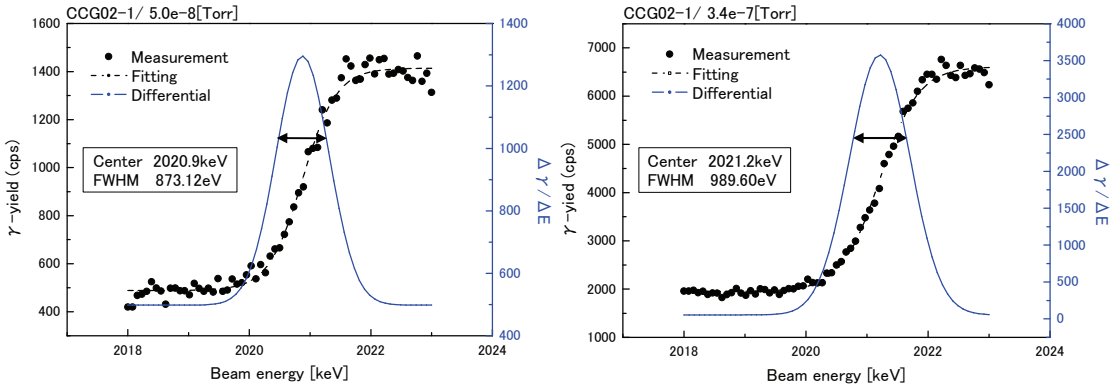


図 5. ビームエネルギー幅の測定結果

を評価することは難しい。そこで、反応幅の狭い共鳴核反応 $^{24}Mg(p,\gamma)^{25}Al$（反応エネルギー；2010keV、反応幅；150eV）[1]を利用して荷電変換ガス圧とエネルギー安定度の関係を測定した。測定体系を図 4 に示めす。試料（Mg）に 0～5kV の電圧を印加し、ビームエネルギーを絶えず振りながら各エネルギー（1024ch）におけるγ線の収量を測定した。

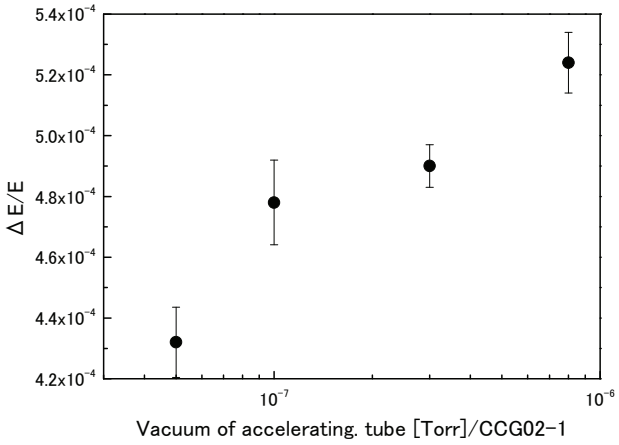


図 6. 荷電変換ガス圧とエネルギー安定度の関係

図 5 左は荷電変換ガス圧に比例した加速管下流の真空度が 5.0×10^{-8} [Torr]時、右は 3.4×10^{-7} [Torr]時（荷電変換部の真空度はこれより 2 桁程度高いと予想される）の測定結果である。黒丸はビームエネルギーに対するγ線の収量（実測値）であり、エネルギー幅は dγ/dE（実線）の半値幅とする。荷電変換ガス圧が高い方は低い方に比べ、ビームエネルギー幅（半値幅）が 100eV 程度拡がっている。また図 6 に示すように本測定系により荷電変換ガス圧が減るに連れビームエネルギー安定度が良くなっていく過程が測定できた。 しかし、今回の測定では荷電変換ガスによるエネルギー分布を差し引いてもエネルギー安定度は電圧安定度に及ばない結果となった。 この原因としては Mg 試料の表面状態や厚さが測定精度に大きく左右するものと考えられるため、今後はこの点を考慮し、測定精度の向上を図る予定である。

Reference

[1] Y. Ishii, A. chiba, S. Uno, Y. Saitoh, K. Mizuhashi, S. Tajima, T. Kamiya, Nucl. Instr. and Meth. B 260 (2007) 15-19

P-5

中性子発生用加速器システム（NASBEE）におけるターゲットの開発

○酢屋徳啓[2]、濱野毅[2]、須田充[2]、高田真志[3]、萩原拓也[2]、小西輝昭[2]、宮原信幸[2]、今関等[1]
（独）放射線医学総合研究所　研究基盤技術部[1]
放射線発生装置利用技術開発課[2]、放射線計測技術開発室[3]

１．はじめに

平成 15 年度に(独)放射線医学総合研究所にある低線量影響実験棟に、中性子発生用加速器システム（NASBEE）を導入した。このシステムは高電流出力型の HVEE 社製タンデム加速器を基本としたシステムである。

図１に中性子発生用加速器システムの全体図を示す。本システムでは、最大 4 MeV まで加速した重水素イオンと、金属 Be との（d, n）反応で放出される平均エネルギー2 MeV 程度の中性子線を提供している。本システムには２つの照射室があり、SPF（特定病原菌未感染）照射室（図１左）では、SPF 環境で飼育された妊娠マウス、ラットなどの低線量生体影響研究に用いられており、もう一つの生物照射室（図１右）では、ヒト培養細胞を用いた中性子線特異的な DNA 損傷誘発機構の解明やその修復機構ついての研究に用いられている。今回は中性子照射の線量測定による LET スペクトルの確認と、よりコンパクトな中性子発生用ターゲットの開発について報告する。

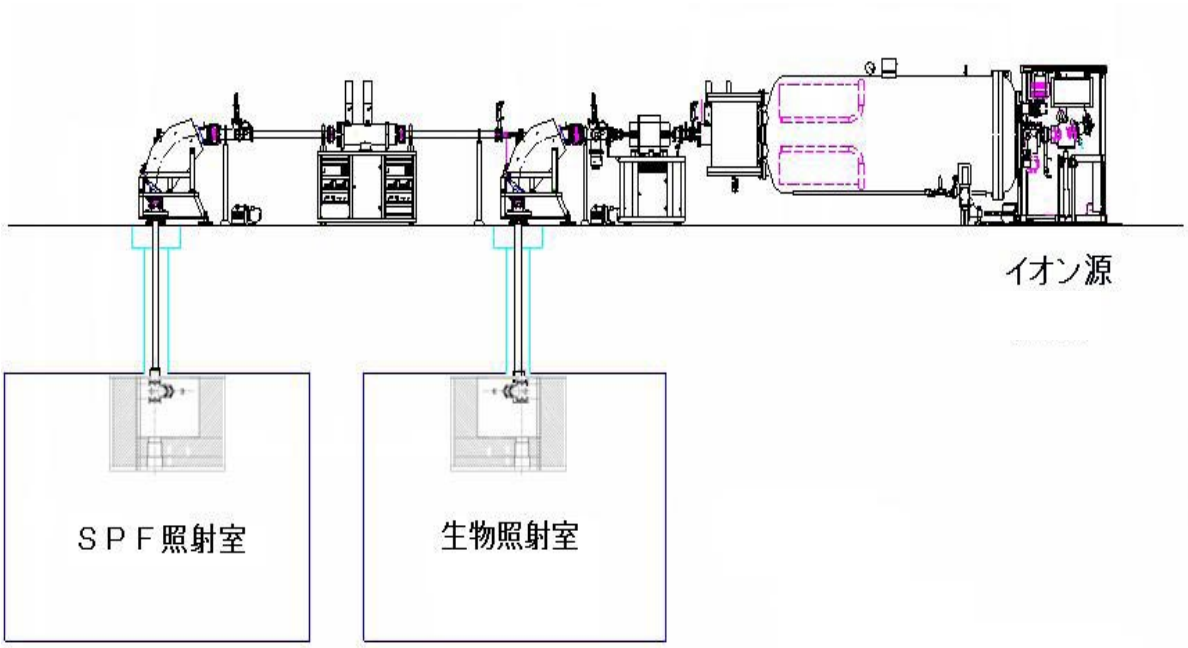


図１中性子用 2MV タンデム加速器システム

右上がマルチカスプイオン源。加速器はインライン構造の２MV 加速器

出射されたビームは 90°マグネットで各照射室へビームを提供する

２．試作ターゲットの制作の背景

現システムで単色性の高い中性子線を出力するには、Li や Be との（p, n）反応を利用することが最も有効であるが、この反応断面積は Be（d, n）反応の 1/10 以下であり、従来行われてきた照射実験（通常運用では 4 MeV 500 μA の 重水素イオンビームをターゲットに照射）と同程度の線量（Be ターゲット－照射台距離 71 cm 中心線量 0.11 Gy/min）を照射するためには、これまで以上の長時間照射が必要で、ターゲットの劣化が早くなる。また、単色性を確保するためには、冷却水の層をできるだけ薄くする必要がある。さらに将来的には、ターゲット交換を頻繁に行うことが予想される。このような理由から、放射化レベルの高い使用済みターゲットの管理区域内での長期間保管を考慮し、省スペース化をはかれるようにターゲット部と冷却ジャケットが分離できるようにしたターゲットを開発した。

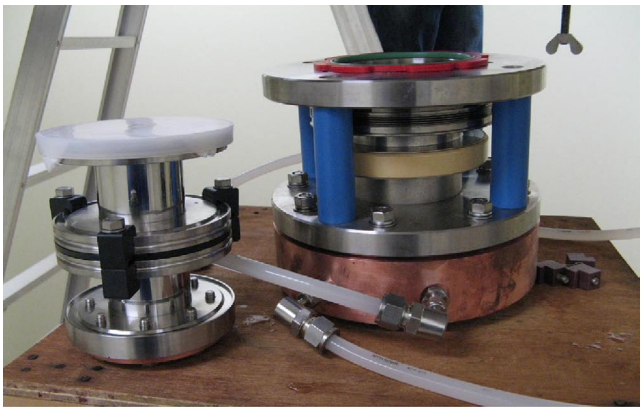


図２　試作ターゲット（左）従来型ターゲット（右）
大きさの違いの比較

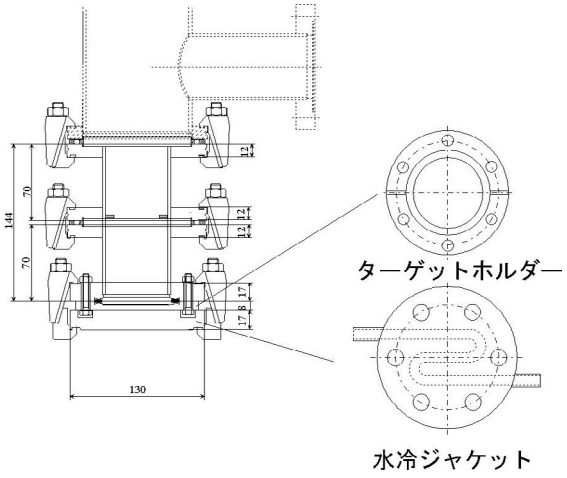


図３　試作ターゲット

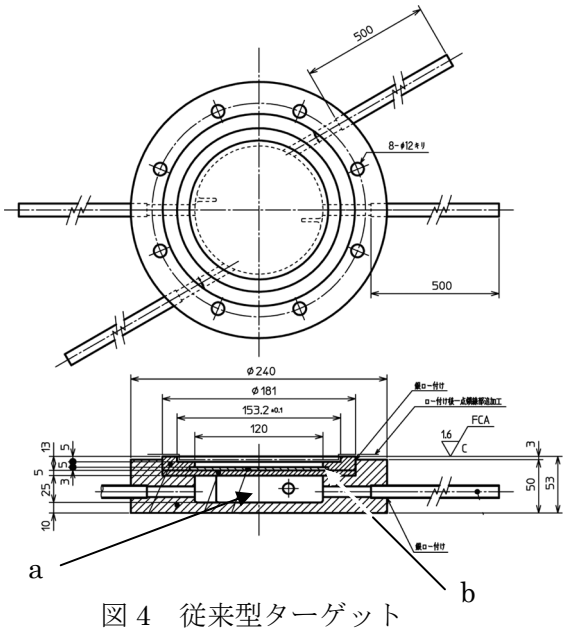


図４　従来型ターゲット
冷却水層（図 a）と Be 板（図 b）が
分離出来ない

開発初期のターゲットは Be を貼り付けた銅板と銅製冷却ジャケットをロウ付けしたもので絶縁部を含むとかなりの重量がある大型のものとなった。このためメンテナンス時の作業性が悪かった。そこで新型のターゲットは従来のものに比べ直径が約半分に小型化した。絶縁部分はフッ素コーティングした絶縁クランプと絶縁センターリングを採用して、従来型に比べかなり軽量化も行った。Be を貼り付けた銅製プレートと冷却ジャケットは分離し、廃棄の省スペース化も実現した。

３．試作ターゲットのメリットと問題点

重水素ビーム 100μA で約 9 時間スポット照射をして、ターゲットの耐久性を検討した。その結果ターゲット表面でビームの熱量により局所的に凹凸が発生することが分かった。この時の線量測定では線量率の変化は 6%程度であった（図 5, 6）。今までの線量測定データから、ターゲット表面に劣化が無いときは約 1%であるので表面の劣化が線量率のばらつきに影響していると思われる。この実験から、ターゲット表面の Be を剥離させないためには、単位面積あたりの発熱量を下げるには、ワブラー照射は必要であると思われる。しかし試作ターゲットは Be 直径が小さいため Be だけにビームが照射されていることを確認する方法がない。このためビームポジションや照射野を確認する検出器などのモニターシステムの開発が必要である。現状の解決策としては、照射野測定をしながら加速器パラメーターの最適化を行う必要がある。

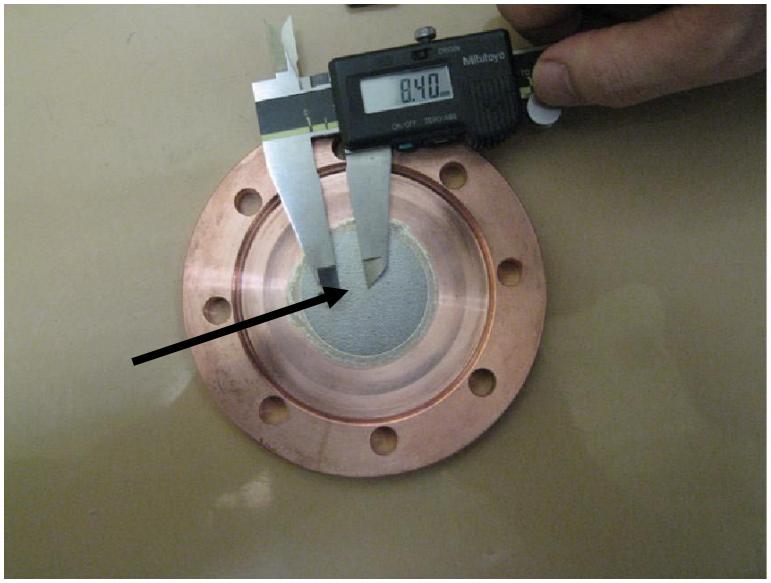


図 5　スポット照射（100μA 約 9 時間）で
局所的に Be ターゲット表面に凹凸が発生（矢印）

次にターゲットの冷却層がある時とない時で中性子線量の違いを測定した。単色中性子を出すためには冷却層の水が邪魔をしていることが考えられるために今回冷却ジャケットを外した。また、冷却ジャケットを外した時と取り付けた時との線量の違いを比較した。その結果、冷却層 25mm と冷却層なしでは、線量が約 1.5 倍増加することが分かった。より高い線量率を得るためには冷却層の厚みを薄くする必要があることが示唆された。しかし耐久性を上げるためには冷却層の厚みが必要であり、今後両者のメリットとデメリットの関係を考慮して検討していく。

４．まとめ

中性子照射後の放射化した使用済みターゲットを管理区域内で保管しなければならないため、ターゲットの大きさが問題になっていた。今回の新ターゲットの試作でターゲットを小型化することにより廃棄する Be や放射化物等の減量が期待できる。また、ビームの熱により Be 表面の剥離が問題であるが、Be の厚さを変えたり、ワブラーを利用してどれだけ広げればうまく表面の熱を分散できるか今後の課題である。そのためにはビームプロファイルや照射野モニターの開発も今後必要である。冷却層の LET への影響については、大強度ビームの熱に耐えられる程度でターゲットの冷却層をどれだけ薄くできるかまだ実験が必要である。今後の実験として、Be 以外に Li ターゲットでエネルギー測定を行う予定である。

P-6 TIARA イオン注入装置におけるイオン生成技術の開発

山田圭介[1]、斎藤勇一[1]、水橋清[1]、大越清紀[2]、織茂貴雄[3]、大前昭臣[3]、山田尚人[3]
[1]日本原子力研究開発機構　高崎量子応用研究所
[2]日本原子力研究開発機構　J-PARC センター
[3]ビームオペレーション株式会社

1. はじめに

TIARA400kV イオン注入装置では、フリーマン型イオン源を用いて様々なイオンを生成し、数多くの実験にビームを提供している。1993 年に運転を開始し、暫くは 6 種類のイオン（H、P、Ar、Mn、As、Ag）に限定し利用していたが、利用者の要求に応じたイオン発生技術の開発を行ってきたことで、現在では 43 種類ものイオン生成が可能となった。本報告では、最近開発した Si、Ge イオン生成について、その開発経緯と結果について報告する。

2. 400kV イオン注入装置

原子力機構高崎量子応用研究所 TIARA のイオン注入装置は、日新電機(株)製の大気開放型の最大加速エネルギーが 400kV、加速イオン電流量が数 10μ A程度のイオン注入装置「NH-40SR」型である。本装置の最大定格加速電圧は 370kV、イオン源引出電圧が 30kV で積算される加速電圧が 400kV である。イオン注入装置としては加速電圧の高い装置であり、イオン源で生成した 1 価の正イオンを 20keV から 400keV まで連続可変で加速することが可能である。イオン源はフリーマン型イオン源を搭載している。装置はイオン源、質量分析電磁石、加速管、コッククロフト昇圧回路、絶縁トランス、及び排気装置から構成されている。

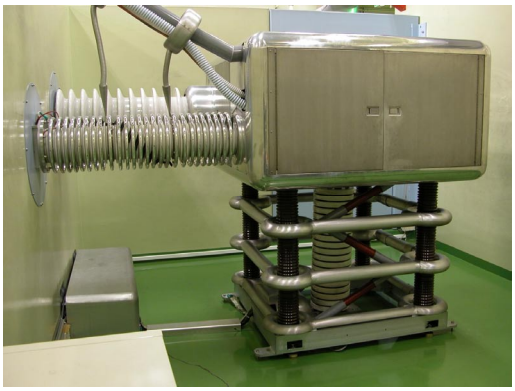


図 1. イオン注入装置外観

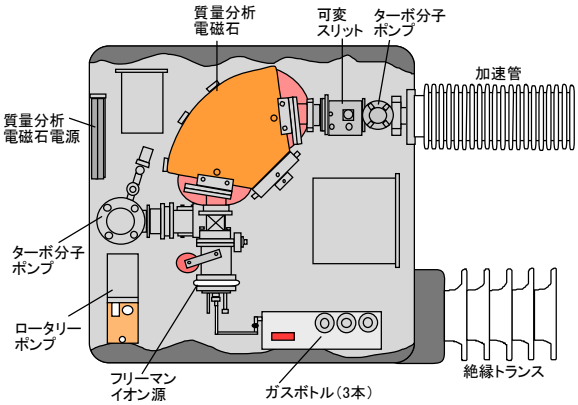


図 2. イオン注入装置構成図

3. フリーマン型イオン源によるイオンの生成

3.1 フリーマン型イオン源

フリーマン型イオン源は目的とする元素の試料（以下、試料）の蒸気とフィラメントが放出する熱電子との衝突によって試料ガスをプラズマ化し、イオンを生成するイオン源である。イオン源の構造は引出孔を縦長のスリット状にし、その手前 2～3mm のところに引出スリットと平行にフィラメントを配置し、それに平行に外部から弱い磁場（～150Gauss）をかけることを特徴とする。TIARA ではフリーマン型イオン源で一般的に用いられているガス方式やオーブン方式によるイオン生成に加え、独自にディスク方式、SF_6 プラズマ方式、及びフィ

ラメント方式を開発してきた [1]。試料の性状により、これらの方法を使い分けることで、以前には発生できなかったイオンや毒劇物を用いないと生成が困難であったイオンを含め、多種類のイオン生成に成功している。以下、Si 及び Ge イオンの生成に用いたディスク方式及び SF_6 プラズマ方式について詳しく紹介する。

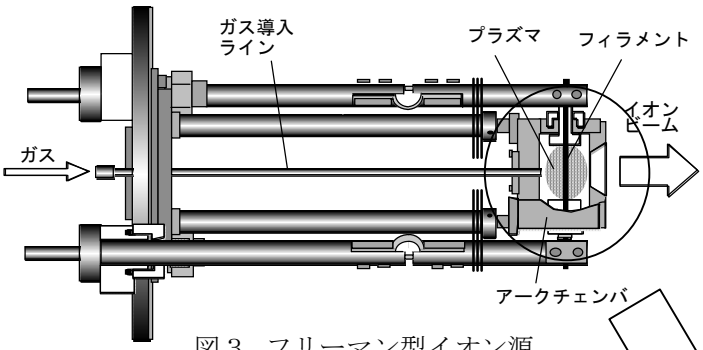


図３．フリーマン型イオン源

3.2　ディスク方式

オーブン方式の最高温度は約 750℃であり、この温度でも十分な試料蒸気が得られない場合にはフィラメント及びプラズマの熱を利用するディスク方式を用いている。10mmφ×2.1mmφ×3mmt のディスク状試料にフィラメントを通してアークチェンバ下部に設置し、Ar ガスを供給してアーク放電を起こさせる。ドーナツ状試料をアークチェンバ中心近くに設置した方がビーム電流の増加が望めるが、アーク電流が不安定になる傾向があるため、アーク放電が安定に保てる範囲でビーム電流が最大になるよう位置調整を行った。その結果、ディスク状試料の表面がアークチェンバ内壁から 8mm 程度が最適であった。本方式で V、Ti、Er 及び Tb イオン等は安定に生成している。

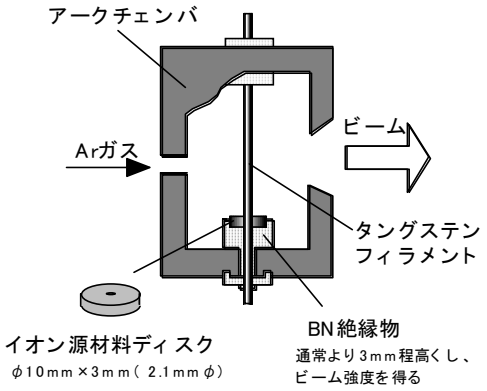


図 4．ディスク方式

3.3　SF_6 プラズマ方式 [2]

TIARA では設備上毒劇物ガスである BF_3 や SiH_4 等の使用ができず、ディスク方式でも十分なビーム電流を得ることができない高融点で低蒸気圧の B 等に対して SF_6 プラズマ方式を開発し、イオン生成を行っている。高融点物質には蒸気圧の高いフッ化物を有するものが多く、例えば B の蒸気圧は室温ではほとんどゼロであるが、BF_3 では 10^5Pa 以上になる。SF_6 プラズマ方式は SF_6 ガスで起こしたプラズマにより、固体のイオン材料から固体のフッ化物をイオン源内で直接生成する（図 5）。イオン材料の設置方法は、ディスク方式と全く同じである。供給するガスを Ar から SF_6 に変更したことに特徴を有している。

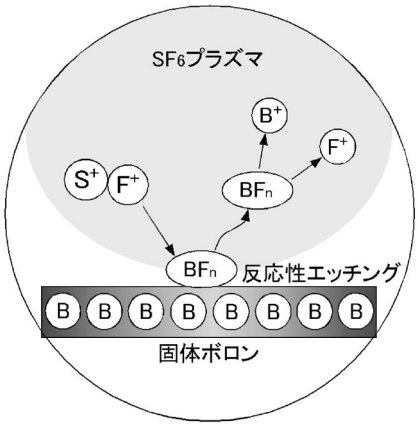


図 5．SF_6 プラズマ方式

4. Si、Ge イオンの生成

近年要望が多い Si、Ge について開発を行った。いずれも単体では高融点かつ低蒸気圧であり、毒劇物ガス以外に十分な蒸気圧が得られる化合物が存在しないため、ディスク方式および SF_6 プラズマ方式でイオン生成を試みた。しかし、下記に示すような種々の問題が発生しため、試料の設置方法に改良を加えた。

4.1 Si イオンの生成

Si イオンは光機能素子などの材料開発に有用であり [3)]、実験者からの要望が高く、平成 17 年度のイオン生成技術の開発により SF_6 プラズマ方式により安定したビーム生成が可能となり、平成 18 年度より実験提供を行っている。他のイオン生成においては、フィラメントとアークチェンバ間の絶縁物には窒化ボロン(BN)を用いているが、N_2 の質量数が Si と同じであり分離できないため、Si イオンの生成では絶縁物に Al_2O_3 を使用するか Mo 試料台をアークチェンバの外側から BN で支持する方法で行っている。実験提供開始当初はこの方法で安定なイオン生成が行えていたが、最近は図 6 のように運転中に Si ディスクと接触する部分のフィラメントの消耗が激しく、短時間で断線してしまう現象が起きていた。そこで、フィラメントの消耗を抑えるため、図 7 のように Si 試料のドーナツ型形状の穴を 1.9mm 大きくし、さらにフィラメントと Si 試料の間に Al_2O_3 スリーブを挿入することで両者が接触しないようにした。改良を加えた結果、フィラメントの消耗が抑えられ、図 8 のように安定した Si イオンの生成が可能となった。

図 6. Si イオン生成時のフィラメントの消耗

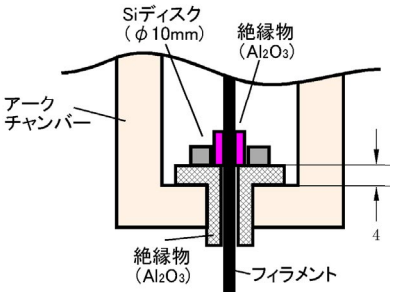


図 7. 改良後の Si ディスク設置方法

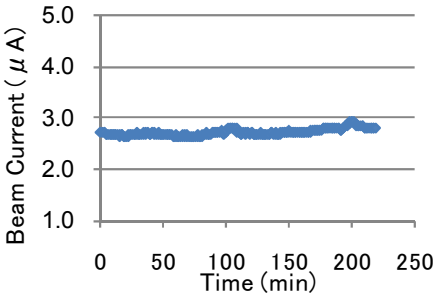


図 8. Si イオンの生成結果

4.2 Ge イオンの生成

Ge イオンはディスク方式で生成を行ったが、Ge ディスク自体が溶融しフィラメントとアークチェンバ間が短絡するか試料が無くなってしまう現象が起きてしまいイオン生成が困難であった。Ge は融点が 937℃であるが、ディスク方式での試料位置温度は経験上約 1000～1500℃であり、温度が高すぎたものと考えられる。

そこで、Ge ディスク設置位置をプラズマ中心位置から遠ざけるために試料ディスクを BN に括りつけ、アークチェンバ上に直接設置した。その結果、溶融は避けられたがビーム強度が数十 nA 程度と少なかったため、SF_6 プラズマ方式に切り替えた。SF_6 プラズマ方式では Ge イオンを μ A オーダーで生成することができたが、ビーム電流が不安定であった。しかし、Ge 試料は SF_6 プラズマ特有の黒くなる現象はあったが元の形状を保持していた。

最終的には SF_6 プラズマ方式をさらに改良する方向で開発を進め、Ge ディスク位置を BN 上に戻し、フィラメントによる Ge ディスクの過剰な加熱を抑えるとともに短絡を防ぐ目的で Si イオンの生成時と同様にフィラメントと Ge 試料間に Al_2O_3 スリーブを挿み込み、両者が直接接触しない改良を行った。さらに、溶解した Ge が BN 内に留まるように BN に溝を付

けた（図 9）。その結果、図 10 に示すようにビーム強度約 6μ Aで安定なイオン生成に成功した。

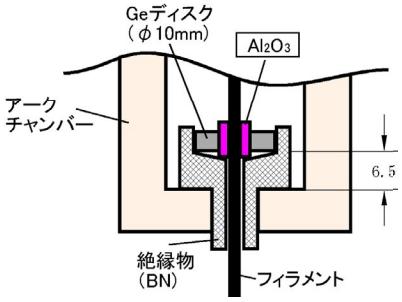


図 9．改良後の Ge ディスク設置方法

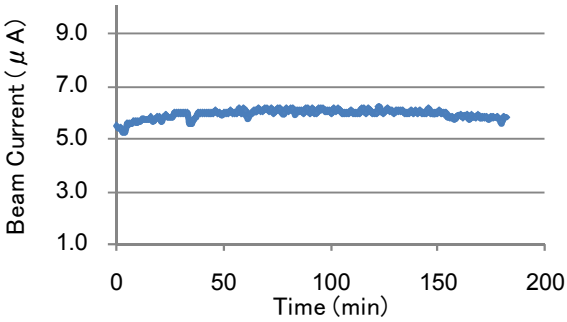


図 10．Ge イオン生成結果

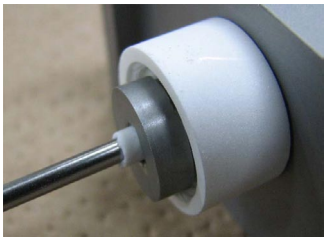


図 11．改良後の Ge イオン生成

（イオン生成前）　　（イオン生成後）

5．まとめ

近年要望が多かったがフリーマン型イオン源では生成が難しかった Si イオン及び Ge イオンの開発過程について報告した。両者とも開発してきたイオン生成方式に、更に、試料の設置方法の改良を加えることで安定したイオン生成に成功した。Si イオンは再現性も良く実用レベルに達成しっているが、Ge イオンは今後再現性を確かめ実験に提供していく予定である。

参考文献

1)　大越清紀 他，私信
2)　K.Ohkoshi,Y.Saitoh, T.Orimo, S.Tajima, JAERI-Review 98-016 (1998) 250.
3)　花泉修, 他,「第 2 回高崎量子応用研究シンポジウム」要旨集 (2007) 78.

P-7 シングルエンド加速器の絶縁用樹脂部品の部分放電損傷

宇野　定則、高山　輝充*、江夏　昌志* 、水橋　清
日本原子力研究開発機構　高崎量子応用研究所　放射線高度利用施設部
*ビームオペレーション（株）

1. はじめに

高崎量子応用研究所イオン照射研究施設（TIARA）の 3MV シングルエンド加速器は、本体タンクの内部において電気的絶縁を保ちながら部品を取り付けるための構造材や支持具として、アクリルを始めとする数種類の合成樹脂材料を加工した部品が使用されている。これらの中で、加速電圧昇圧回路を構成する RF 電極の固定用樹脂部品の材質には、ポリプロピレン（PP）が使用されていたが、溶融する損傷が頻発したため調査を行った。その結果、PP 樹脂部品内部に混入した気泡の密集箇所で部分放電が起こり、発熱および溶融した痕跡を発見したため、異物の混入や異常を発見しやすい透明な材質のポリカーボネート（PC）樹脂に交換することで、RF 電極固定用樹脂部品の損傷を防止した。

2. RF 電極と PP 製樹脂部品

RF 電極は全長約 4m、アルミニウム製で片側の重量が約 100kg あるが、分割が可能な 4 つのパートからなり、図 1 に示すようにタンク内壁の上下に配置されている。本加速器では加速電圧を 3MV に昇圧する場合、この RF 電極に±200kV,40kHz の高周波電圧が印加され、加速電圧昇圧回路（シェンケル型）のシールド電極との間に形成される浮遊容量に電荷の充電と供給を行う。[1]　このため PF 電極は、PP 製樹脂部品により電気的絶縁を保ちながらタンク内壁に取り付けられている。この PP 製樹脂部品の形状は円筒形で、表面は沿面距離を増やし絶縁耐力が向上するように波状となっており、固定用の金属部分まで含めた高さが 180mm である。PP 樹脂の一般特性は、絶縁耐力：20ー25kV/mm、耐熱温度：110℃、比重：0.9、機械的強度もアクリル樹脂と比較して高く、また加工性も良いため RF 電極の固定用絶縁部品として適している。PP 製樹脂部品は図 2 に示すような配置でタンク内壁に 40 個取り付けられ、この上に RF 電極を固定する構造となっている。

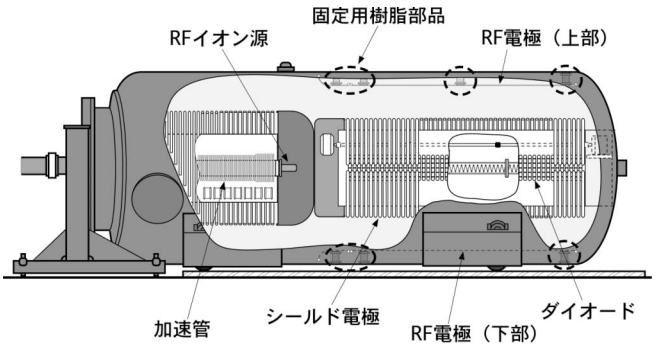


図１　シングルエンド加速器の概要

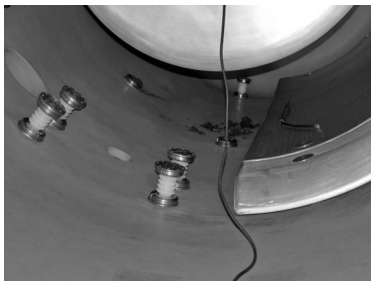


図２　RF電極の一部を外し、固定用PP樹脂部品（左側4個）の取り付け状態を示す。右側の湾曲したものがRF電極。

3. PP 製樹脂部品の損傷

PP 製樹脂部品の損傷は、初期の段階では変形と一部が溶融する程度であったが、進行したものになると図 3 に示すように原形を留めない程に溶けてしまうものもあった。この原因として当初は、PP 樹脂部品表層での連続的な沿面放電による発熱で溶融が発生したと思われたが、その後に損傷した幾つかの部品（図 4）では、明らかに樹脂内部で溶融が起こり、この溶融物の圧力により外部に吐出した形跡があった。そのため、図 5 に示すように PP 樹脂部品を切断し内部を調査したところ、樹脂中心部が茶褐色に変色して溶融が起きた痕跡があった。この痕跡は、検証のために取り外した外見上は全く正常に見える 2 個の PP 樹脂部品についても同様に起きていることが確認できた。更に損傷部位を調査したところ、直径 1 ㎜ 以下の気泡が樹脂部品の円柱中心軸付近に沿って多数あり、この気泡部分で発熱が起きたことによる変色部位の点在と、それが結集してできたと思われる溶融跡が観察できた。現在までに RF 電極固定用 PP 樹脂部品 40 個の内の 7 個に損傷が発生したが、この場合には、交換部品として同じ PP 材質で製作した新品に置き換える処置をしてきた。

シングルエンド加速器は平成 5 年度に利用運転が開始されたが、このような部品の溶融損傷は平成 11 年以降に起きるようになった。この原因として、この時期よりマシンタイムで 2.6MV 以上の加速電圧による運転が多くなったことに伴い、RF 電極と樹脂部品の印可電圧も従来より高くなる時間が増加したことが影響したと考えられる。

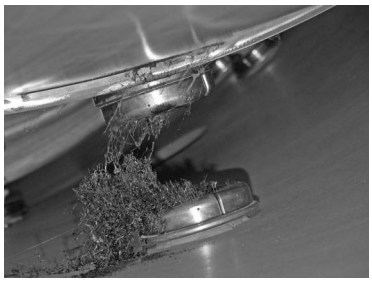


図3　原形を留めない程溶融した例

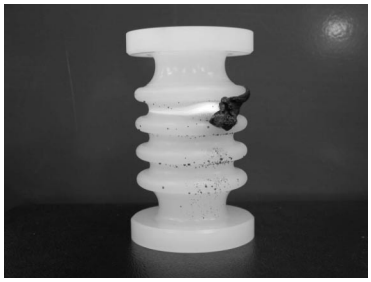


図4　樹脂内部より溶融物が吐出した例

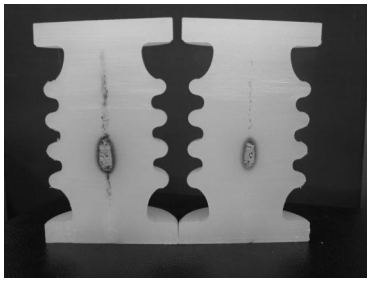


図5　樹脂部品の切断面

4. 損傷原因の検討

樹脂部品の内部で発熱が起きる原因として考えられる、誘電加熱と部分放電について検討を行った。

4.1 誘電加熱

電気的に絶縁された誘電率 ε の誘電体を高周波電圧 V に置くと、誘電体を構成する分子（双極子）がその電場により振動や回転し、その摩擦のために誘電体自身が発熱する。[2] この時、内部で熱に変わる電力 P は次式で表せる。

$$P = 5.56 \times 10^{-11} \frac{f \cdot \varepsilon \cdot S \cdot V^2}{d} \tan\delta$$

ここで f は周波数、S は誘電体の面積、tan δ は誘電正接、d は電極間距離となり、これより PP 樹脂部品に吸収される電力は 2W 以下となる。さらに PP 樹脂の比熱と重量から温度上昇を見積もると 1 時間あたり 10℃弱となるが、実際には絶縁ガス（SF_6）により冷却されること

から、この温度上昇より低くなる。また、気泡部分については誘電率が 1 であるので誘電損失は無く発熱は起こらない。これらにより、誘電加熱は PP 樹脂部品の損傷の原因にはならないと考える。

4.2 部分放電

絶縁物中に微小なボイドや空隙などの欠陥があると、その部分に電界が集中し微弱な放電が起こる。これを部分放電といい、絶縁物が直接的に侵食されるだけでなく、放電が原因で生じる活性酸素・オゾン・酸化窒素・酸等によって物理的、化学的に変化し劣化することが知られている。[3]

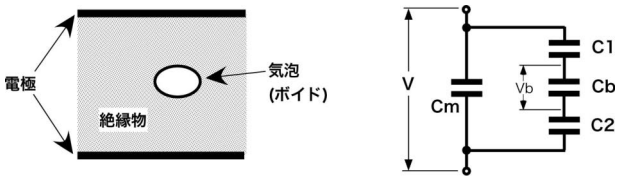


図6　部分放電の等価回路

この部分放電について、気泡が１つある絶縁物を幾つかの容量を持つコンデンサとして表した図 6 の等価回路で考えてみる。Cb は気泡、C1 と C2 はその前後、Cm をそれ以外の静電容量とすれば、絶縁物全体の静電容量Ｃは Cm+C1･Cb･C2/(C1･Cb+C1･C2+Cb･C2)となる。電極間電圧をＶとして、気泡 Cb が分担する電圧 Vb は次式となる。

$$Vb = V\frac{C1 \cdot C2}{C1 \cdot Cb + C1 \cdot C2 + Cb \cdot C2}$$

C1 と C2 は PP 樹脂で誘電率は 2 以上であるが、Cb は気体（空気）なので 1 となり、同一形状の静電容量は PP 樹脂の方が大きくなるため、Cb が分担する電圧 Vb も大きくなる。また、PP 樹脂の耐電圧は 20kV/mm 以上あるのに対し、気体（気泡）は 3kV/mm 以下となるので、容易に放電が発生する。損傷の起きた PP 樹脂部品は、円柱中心軸付近に沿って気泡が密集していたため、１つの気泡で放電が起こるとその気泡の分担電圧が低下し、上または下の気泡に掛かる電圧が上昇する。このように部分放電が伝播したことで溶融損傷に至ったと考える。

5. まとめ

損傷部品の交換用に製作し、設置後 5 年間経過した PP 部品を切断し内部を調査したところ、変色や溶融した痕跡は無く、気泡も観察できなかったため、気泡部位の部分放電が損傷の原因であることが裏付けられた。また気泡は設置後に発生したのではなく、PP 部材の製作時に混入したものと推測される。

PP 樹脂は白色で不透明な材質であるため、異物の混入や内部で異変が起きた場合に直に識別できない。そのため、全ての RF 電極支持部品を図 7 に示す透明な材質のポリカーボネート(PC)製に交換した。その後、留意して点検を重ねてきたが、損傷は起きていないので、善処できたと考える。

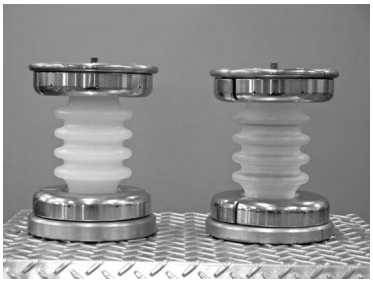


図 7　従来の PP 製(左)は不透明だが、PC 製（右）は透明

{参考文献}

[1]田島、高田、水橋、宇野、他：JAERI-Tech 96-029 (1996)p.54
[2]越島哲夫、他：(株) NST「マイクロ波加熱技術集成」p.6
[3]電気学会：(株) オーム社「放電ハンドブック」下巻 p.219

P-8 ターミナルイオン源による金属イオンビームの生成

仲野谷孝充　松田誠
日本原子力研究開発機構　東海研究開発センター
原子力科学研究所　研究炉加速器管理部　加速器管理課

1.はじめに

当機構のタンデム加速器には高電圧ターミナルの内部に 10 GHz の ECR イオン源（pantechnik 製 NANOGAN）が設置されている。このイオン源により希ガス元素や酸素、窒素等の気体元素の多価イオンビームを得ている。近く、このイオン源をビーム強度、加速エネルギーを増強するためにより強力な 14.5 GHz の “SUPERNANOGAN” に置き換える予定である[1]。このイオン源の交換作業と平行して SUPERNANOGAN からオーブン法による金属イオンビームの生成を目指している。気体元素以外に様々な金属イオンビームを ECR イオン源から生成することができれば、タンデム加速器の有用性をさらに広げる事ができる。例えば、図 1 に示すように質量数 20 以上のイオンの場合、負イオン源からの加速に比べ、正イオン化後の価数が上回るため、エネルギーを大幅に増強する事ができる。特に Au のように非常に重いイオンでは負イオン加速に比べ約 2 倍の価数を得る事ができる。また、負イオン入射の場合、荷電変換の際に、カーボンフォイルの消耗によるビーム量の減少が避けられない。特に大電流の重イオン加速では 1 日で数十枚のフォイルを消耗してしまう事もあるが、オーブン法による金属イオンビームの生成が可能となれば、フォイルの寿命からは完全に開放される。この他、負イオン源では生成困難なアルカリ、アルカリ土類元素のイオンビームも ECR イオン源とオーブン法を組み合わせれば容易に生成することができる。

ターミナルにおけるオーブン法の難点は 1 種類のみの試料しか装填できないため、マシンタイム中にイオン種の切り替えや試料の交換ができないことである。また当然ながらトラブル時に即座に対応できない。このため、オーブンには長い試料寿命と高い安定性が求められる。また、加速器タンク内の限られたスペースに設置するため、高い耐圧性能と小型化が必要である。試料容積を確保したまま可能な限り小型化したオーブンは既に開発しており、このオーブンによる金属ビームの生成は大気中にて NANOGAN で既に実績がある[2]。そのため、長時間での安定性と寿命の検証と高圧タンク内での使用に耐えるタンク内用オーブン筐体の設計を新たに行った。

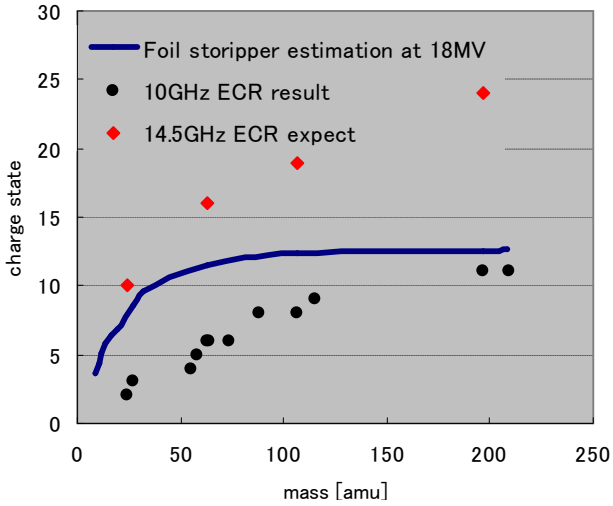


図 1　各イオン源の電荷状態の比較

2.オーブン長時間試験

これまでに NANOGAN で得られた結果ではビーム電流が数分のオーダーで細かく振動するため、安定した電流を得ることが難しか

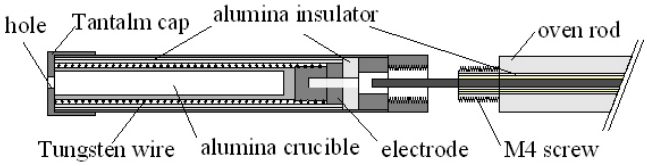


図 2　オーブンヘッド概略図

った。ビーム電流の振動を抑えるために図 2 中のタンタルキャップの孔径を 1.0 mm φ から 0.5 mm φ に替えて実験を行った。Zn 試料で実験した結果を図 3 に示す。孔径を 0.5 mm φ にすることで、ビーム振動の振幅が減少し安定性が向上した。これは金属蒸気の供給量の変動が減ったためだと考えられる。実験終了後のオーブンを観察すると、試料は孔を塞ぐようにキャップ周辺に凝集している。このため、蒸発面の大きさはキャップ孔の面積と同程度であると考えられる。よって、キャップ孔径を小さくする事で蒸発面積も小さくなり、結果として金属蒸気の供給量が温度変化等の外乱の影響を受けにくくなったためと考えられる。

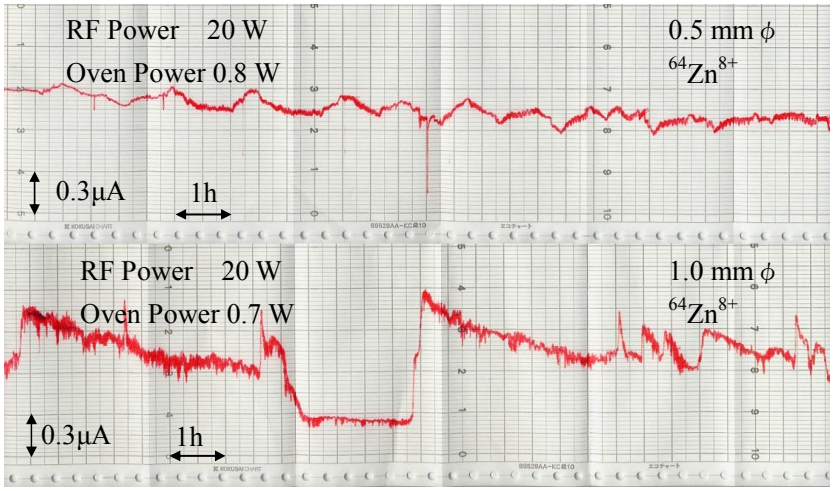


図 3　キャップ孔径の違いによるビーム電流の変化

次に Au 試料を用いて長時間試験を行った。図 4 にその結果を示す。運転パラメータは初期に設定した値のままで 90 時間の運転を行った。電流は初期の数時間で大きく減少し、いったんは上昇した後、ゆるやかに減少していった。20 時間が経過したあたりでビーム電流は大きく変動している。この原因については現在調査中である。この実験を通して Au 試料の消費率は約 0.5 mg/h であった。試料は Au の場合、最大で 1.5 g 装填する事が可能である。この実験の結果より、実際の使用に用いるにはさらなる安定性の改善が必要なものの、数日間にわたる実験に耐える寿命があることを示せた。

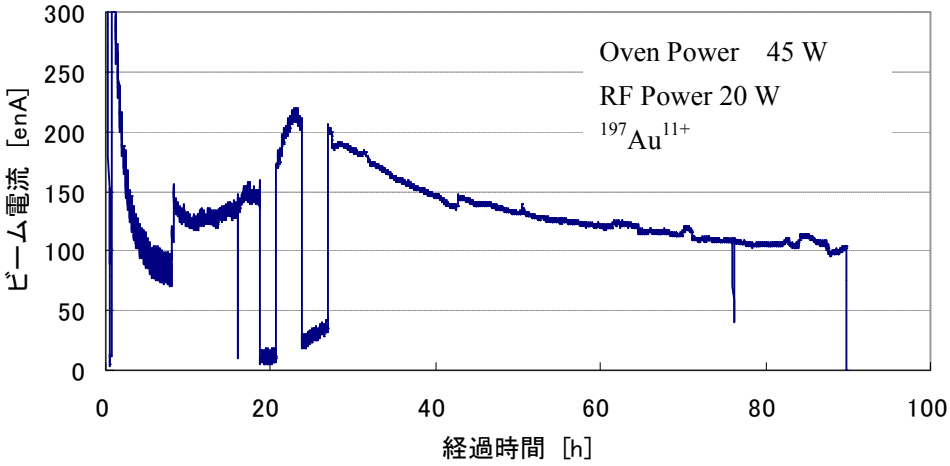


図 4　Au ビームの長時間試験

3.タンク内用オーブンの設計

加速器タンクの内部は 0.45 MPa(G)の SF_6 ガスが充填されている。一方、ECR イオン源の内部は 10^{-5} Pa 以下の高真空である。そのため、オーブン筐体はその差圧に耐え、真空を保持できなければならない。また高電圧ターミナル内部は様々な機器が複雑に入り組んでおり、オーブンの設置スペースが非常に制限される。したがって、オーブン筐体は大気中で使用していたモデルをそのまま組み込む事は不可能なため、タンク内専用のオーブン筐体を新たに設計した。図 5 にタンク内での使用を考慮して設計したオーブン筐体を示す。オーブンヘッドの構造は従来のものと同じであるが、オーブンロッド、シールドチューブ、および絶縁管はそれぞれメタルシールで接続されており、3 重管構造となっている。シールドチューブは銅製の薄い円筒であり、オーブンヘッドを ECR プラズマから守るためのプラズマシールドとしての役割がある。またオーブン使用時、オーブンヘッドの輻射熱から永久磁石を守るための熱シールドとしての役割もある。その際、輻射熱を効果的に外部に逃がすため、チューブの一部は SF_6 中に露出させており、更に冷却効率を上げるために銅製の放熱板が取付けてある。

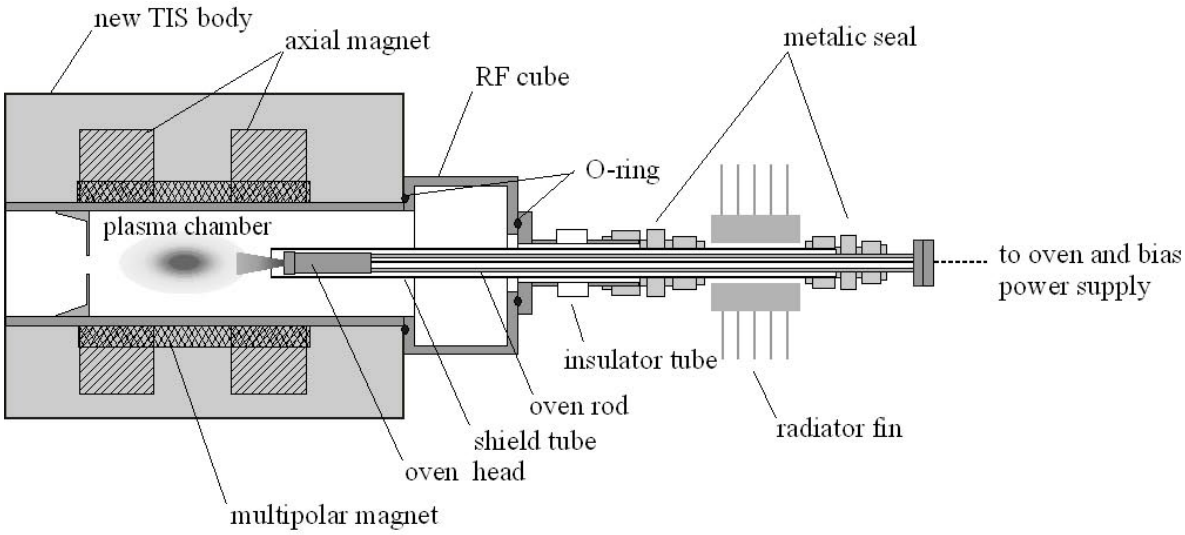


図 5　タンク内用オーブンの概略図

4.まとめ

大気中での試験で 90 時間以上ビームを供給する事ができた。これにより、実際のマシンタイムでの使用に耐えられる寿命があることが示せた。今後はビームの急激な変動の原因を特定し、他のイオン種でも同様の実験を行い、実用可能なイオン種の特定を行う。また、設計したタンク内仕様のオーブン筐体の耐圧性能を確認し、早期に SUPERNANOGAN 本体への設置とビーム生成を目指す。

参考文献

[1] M.Matsuda, Y.Fujii, S.Takeuchi, JAERI-Review 2002-029 (2002) p.11.
[2] T.Nakanoya, and M.Matsuda, JAEA-Review 2005-004 (2005) p.12.

P-9 偏向電磁石のコンダクタンス測定

花島進
日本原子力研究開発機構　東海研究開発センター
原子力科学研究所　研究炉加速器管理部　加速器管理課

０、導入

エレクトロニクスの進歩によって､加速器の偏向電磁石の電源にスイッチング電源(SMPS)が広く使われるようになってきた。SMPS は電力効率が良いこと、また小型にできることという利点がある。一方、安定度の高い電源、ノイズの少ない電源を作るのが比較的に難しい。原子力機構タンデムでは、ターミナル 180°偏向電磁石電源の更新を進めており、新しい電源として、スイッチング電源の設計を進めている。タンデム加速器の高電圧ターミナル上では、電力、設置スペースともに貴重であり、その面でスイッチング電源は大きなメリットがある。この電源設計作業のために、現在の使用している偏向電磁石の巻線について、0.02Hz から 100KHz までのコンダクタンス（アドミッタンス）測定を行った。

１、偏向電磁石コンダクタンス測定の意義

コンダクタンスは、ひとつには電源の設計において、安定な負帰還制御ループを設計するために重要である。第 2 には AC 領域において電源の残留リップルやノイズがどのくらい許されるかという指標を決めるために重要である。コンダクタンスはかけた電圧に対して、どのように電流が流れるかという伝達関数に対応する。

偏向電磁石の電源は出力電流を高い精度・安定度で制御すること目的だが、負荷となる電磁石の振る舞いを理解すると電源設計に役に立つ。電源は負帰還制御を行う。負帰還制御ループの増幅率が十分大きければ、コイル電圧からコイル電流への伝達関数の詳細はシステムの性能にあまり影響しない。最終出力の制御にバイポーラトランジスタを使った旧来のシリーズパス安定化電源の場合には、最終出力段そのものが定電流出力的な性格をもつため、その前段で大きな増幅がなくとも電流源としての安定度を高くすることは容易だった。しかし、パルス幅変調（PWM）を使用するスイッチング電源の出力段はそのような性格が薄いため、設計ではその対処が必要になる。この問題は、直流特性だけを見れば負帰還ループの増幅率を大きくして済むように見える。しかし単に増幅率を高くすると交流領域で発振やそれに近い不安定現象を起こすなどの問題を生じてしまう。したがって、負帰還制御のループフィルターの設計が重要になる。負荷となる電磁石コイルの特性に強く依存する回路設計は避けるべきであるが、負荷の特性の概略を知っていれば、電源側に過剰な帯域特性や過剰なループゲインを与えるなどの無駄を省くこともできる。

これまでの電磁石コイルの特性表記では、特定の周波数 1 点における等価な直流抵抗とインダクタンスの直列回路としての記述で済ますことが多かったが、それだけでは異なる周波数での振る舞いを適切に予測することはできない。われわれは、電磁石の電圧対電流の関係を伝達関数として捉え、より広い範囲での測定をおこなった。

２、コンダクタンスの測定法

コンダクタンスの測定は、既知の正弦波信号を電流制限抵抗と接続ケーブルを経由して偏向電磁石に加え、電圧と電流をディジタルストレージオシロスコープ（DSO）で測定し、電圧と電流の振幅および位相のずれからインピーダンスを測定する。信号源はファンクションジェネレータであるが、電流容量が不足なので、AC 増幅器を経由してコイルに出力する。電流は DSO の電流プローブを使用した。電磁石の設置場所と測定器の置き場所の制約から電圧と電流は信号源側で測定したため、別に電磁石側を短絡して接続線路のインピーダンス測定を行い、直列に接続されているとみなした補正を加え、電磁石自体のコンダクタンス（アドミッタンス）を計算で求めた。測定データの生データはパーソナルコンピュータに入力し、表

計算ソフトで補正演算その他の演算処理を行った。

３、測定結果と考察

図１に 0.02Hz から 1KHz までの結果を示す。0.02Hz の測定値は直流測定とほとんど変わらない。測定前には純粋なインダクタンスと直流抵抗の直列回路に近い特性を示すものと推測したが、そうはならなかった。主な理由は電磁石のヨークが純鉄の塊であって渦電流によるロスが大きいためと推定される。この電磁石の電源の１次電源は３相 400Hz である。したがって、400Hz とその高調波での特性がひとつの注目点である。400Hz では絶対値が約 0.03 Ω^{-1} で、高調波ではさらに小さくなる傾向にある。

この測定結果は、電源の設計に利用される。たとえば、必要な磁場の安定度から電流のリップルは 2mA まで許容できるが、その際電源の 400Hz での電圧リップルは 67mV 程度あっても良いことがわかる。このような測定なしで直流のコンダクタンスだけから推定すれば、リップルは実際に許される値の約 100 分の１にしなければならないと考えてしまうところであった。

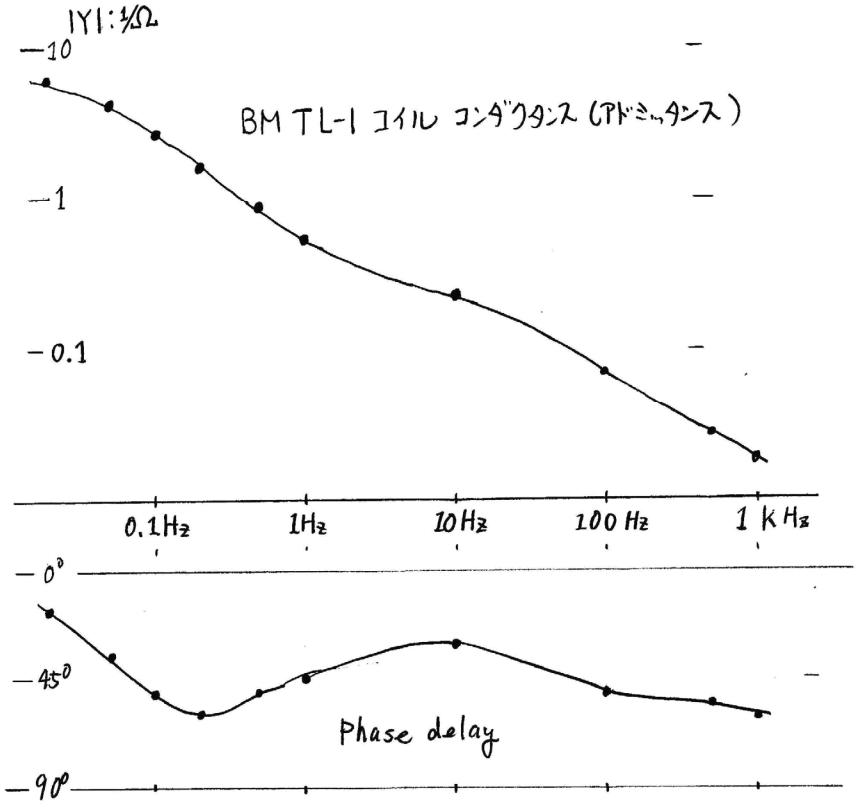


図１：原子力機構タンデム加速器 180°偏向電磁石のコンダクタンス

４、結論

これまでの電磁石のインピーダンス表記では、周波数について１点のデータだけで等価回路を示すことが多かった。それだけでは十分でなく、本報告のように、周波数ごとの特性を知れば、電源の設計・製作において不確定要素を少なくできる。

本来は、電流リップルから磁場の変動への伝達関数も関心があるが、今回は測定していない。それを行うためにはセンスコイルなどの設置が必要である。また、今回の測定では使用しなかったが、ランダムノイズ源と２チャンネル FFT アナライザを使用すれば同様の測定をより短時間に実施できる。次の機会にはその手法で測定するつもりである。

P-10　高圧六フッ化硫黄(SF_6)ガス中で使用するリレーのためのスクリーニング試験

沓掛健一、松田　誠、花島　進、小原建治郎[1]
日本原子力研究機構　東海研究開発センター
原子力科学研究所　研究炉加速器管理部　加速器管理課
[1]日本アドバンストテクノロジー㈱　東海事業所

1. 目的

原科研・東海タンデム加速器の高電圧端子内には種々の計測・制御装置が設置されており、これらの装置は0.5MPa の六フッ化硫黄ガス(SF_6)中で運転される [1)]。本スクリーニング試験は、これら装置に電源を投入・遮断するためのリレーとして、ハーメチックシールリレーではない大気仕様のリレーの中から高圧 SF_6 中でも使用可能なリレーを選ぶことを目的に実施された。

2. 試験方法

市販されている4種類のリレー(機械式リレー(EMR)、マグネットコンタクター(MAG)、半導体リレー(SSR),ハイブリッドリレー(HYB))を試験した。0.5MPa の SF_6 雰囲気のチャンバーに設置したリレーに 3 相 200V、3A の抵抗負荷を接続し、一定の接点開閉頻度にて負荷を繰返し投入・遮断した。測定項目はリレーの温度、電圧・電流、試験前後の外観変化および EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)によるリレー接点の表面観察と元素分析である。図 1 に試験した HYB を示す。極数が1であるため相毎に 1 台ずつ取り付けてある。

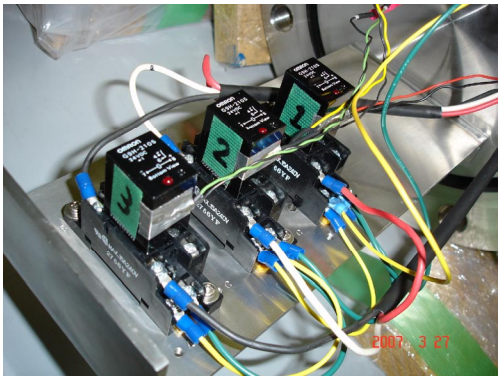


図 1　試験されたハイブリッドリレー(HYB)

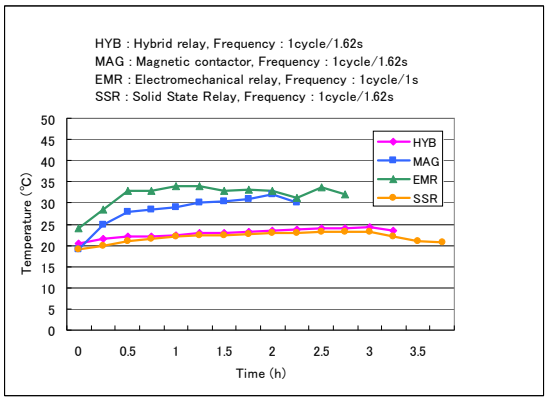


図 2　繰返し開閉時のリレー本体の温度変化

3. 試験結果

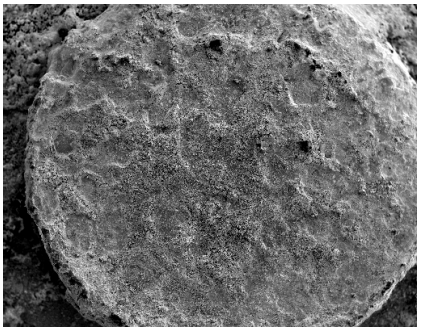
図 2 にそれぞれのリレーの試験結果から 0.5MPa の SF_6 ガス雰囲気で試験したときの代表的な温度変化を示す。開閉頻度は EMR が 1 サイクル/秒、その他のリレーは 1 サイクル/1.62 秒である。また、SSR については本体温度で示している(ヒートシンク部は約 40℃である)。図 2 から、SSR と HYB は共に温度変化が安定していて接点の開閉障害もなく同雰囲気での使用は可能と判断される。特に、HYB は開閉時の温度上昇が小さく動作が安定している。他方、有接点リレーである EMR と MAG では試験開始数分後にすべての接点の開閉が不規則になり、電流の指示値も 3A を下回るようになった。このときの操作コイルへの入力電圧・電流は正常であった。

以下に、SF_6 ガス雰囲気中で開閉障害が見られた EMR と MAG の試験後の観察結果について述べる。

3.1 小型汎用リレー(EMR)

試験後のリレーには黒色のダストが飛散、付着していた。また、接点近傍のカバーには黒化が観察された。外観所見としては、繰返し開閉された接点近傍にアーク放電の影響による何らかの変化が生じていることがうかがえる。図 3(a)は EMR の駆動側 b 接点の拡大図である。接点周囲には試験によって接点表面から飛散したとみられる堆積物が付着している。図 3(b)は b 接点表面を約 20 倍に拡大した SEM 写真である。表面全体がほぼ一様に荒れている様子がわかる。また、EDS の特性X線スペクトル測定によって検出された b 接点全表面の銀(Ag)と硫黄(S)の面分析結果から、接点の構成元素である銀と SF_6 ガスの分解により生成したと考えられる硫黄が表面に一様に分布していることがわかった。図 4 は接点のほぼ中央を横切る形でプローブを走査したときの元素分析結果である。Ag、Cu、Al、Mg などが検出されている他、F もわずかながら検出されている。分析手法上、化合物としての硫化銀(Ag_2S)は分析できないが、硫黄が検出されていることと変色した接点の色から硫化銀が生成されていると考えられる。

(a)



(b)

図 3 試験後 EMR の表面観察結果 (a)全体外観(b)SEM による表面拡大

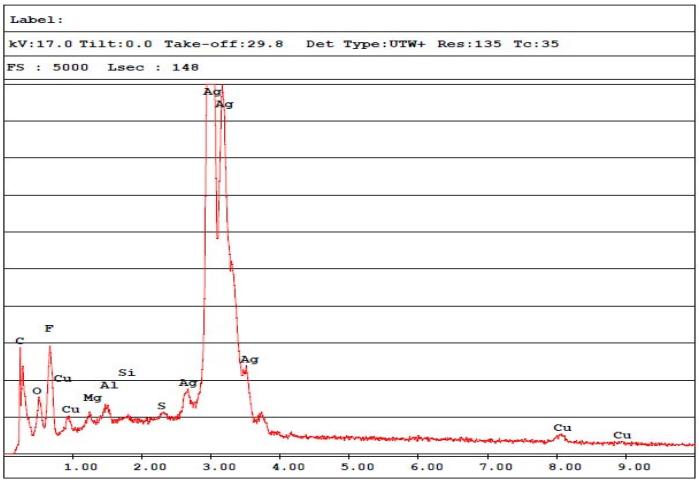


図 4 EDS による EMR 表面元素分析結果

3.2 高感度コンタクター(MAG)

通電された接点は、通電前の銀白色から黒灰色に変色し、表面はかなり荒れて中心に窪みが形成されている。この窪みと接触していた駆動側の接点には突起ができていて、固定側接点から移着したとものと推測される。本

事象は EMR には見られなかった。EDS による接点の面分析結果から、接点の構成元素である銀および SF_6 ガスの分解により生成したと考えられる硫黄が接点上に一様に分布していた。線分析結果では、検出元素は EMR と同じであり、EMR と同様に硫黄が検出されていることと接点の変色から、EMR と同様に接点表面には硫化銀が生成されていると考えられる。

4. 考 察

4.1 小型汎用リレー(EMR)

リレーの基本的な開閉挙動はリレーの本体温度をモニターすることで把握できることがわかった。大気雰囲気では正常な開閉動作を示す EMR も SF_6 ガス雰囲気では動作開始数分後には開閉障害を起こした。原因として、接点開閉時のアーク放電による SF_6 ガスからの S_2F_2 や SF_4 などの分解生成物と雰囲気中に残留する空気や水分、アーク近傍の構造材料が反応し、低フッ化硫黄や金属フッ化物、硫化物などの二次反応生成物 [2)、3)]を生成、これらの生成物が接点やその近傍に付着し、結果として、接点の開閉障害を誘発したと考えられる。また、ケース内部には黒色の粉体が飛散、付着していた。開閉時にアーク放電を発生するリレーでは、有機ガスからの炭素、炭化銀等の粉体の生成が知られているが、これに先の反応生成物が混入しているものと思われる。前述した SF_6 ガスの分解は電気的アークによるエネルギーを SF_6 ガスが吸収することによって起こり、分解したフラグメントのほとんどは再結合し元に戻ると考えられる。従って、放電の継続時間、すなわち開閉頻度を低く設定することはフラグメントの再結合を促し、SF_6 ガス中での開閉障害を回避するためには有効である。したがって、開閉頻度が少ない場合には、0.5MPa の SF_6 ガス中でも使用できると考えられる。

4.2 高感度コンタクター(MAG)

開閉頻度 1 サイクル/1.62 秒の場合、大気雰囲気での開閉障害は起こらないが、SF_6 ガス雰囲気では動作開始数分から数十分後には開閉障害が起こった。一方、開閉頻度を 1 サイクル/64 秒に設定した場合には開閉障害は生じなかった。これは 4.1 で述べたように、開閉頻度を低くしたことで SF_6 ガスの分解によって生じたフラグメントの再結合が促進されたと考えられる。開閉障害の状態は EMR では接点の粘着があったが、MAG では駆動側と固定側接点が接触しているにも関わらず負荷電流が減少し、試験後の接点抵抗値は 150kΩ～無限大を示した。電気絶縁性の Ag_2S の生成・付着、突起と窪みが接点抵抗を高め負荷電流を減少させたと推測される。これらは MAG に特有な事象であり、その原因としては、接点外径が EMR の 4mm に対し MAG では 3mm と小さいことと、接点材料が EMR と必ずしも同一でないことが原因と考えられる。

4.3 ソリッドステート・コンタクター(SSR)

SF_6 ガス雰囲気でのリレー本体温度はヒートシンクの効果により 20℃程度と低く、開閉障害もなく安定した動作を示した。一方で、半導体を使用しているため、製品間の特性のバラツキがあることを念頭に、実使用に際しては負荷条件や使用環境を考慮した確認試験が必要である [4)]。

4.4 ハイブリッド・パワーリレー(HYB)

HYB の平衡時の温度は、大気、SF_6 ガスいずれの雰囲気においても先に試験した EMR や MAG に比べ 5℃～10℃低く SSR の本体温度よりは 2、3℃高い。しかし、SSR の場合は本体とは別にヒートシンクからの発熱が

30℃～40℃ある。SF_6ガス中ではSF_6ガスの冷却効果により大気雰囲気時の試験に比べ総じて数℃低く、安定した動作を示した。試験終了後、本体カバーを取り外した外観観察では腐食やダストの飛散は見られなかった。

5. まとめ

1)小型汎用リレー(EMR)

SF_6 ガス雰囲気中では動作開始数分後に接点の開閉障害を起こすが、大気雰囲気に戻すと開閉動作、電気的導通共に正常に戻る。接点開閉時に発生したアーク放電によるSF_6ガスからの分解生成物と雰囲気中に残留する空気、水分、アーク近傍の構造材料との反応によって生成した低フッ化硫黄や金属フッ化物、硫化物などの接点表面への付着や荒れが原因と考えられる。

2)高感度コンタクター(MAG)

SF_6 ガス雰囲気中では電流の指示値が次第に小さくなりやがてゼロとなるが、駆動側接点は操作コイルへの入力電圧/電流に追従し規則的に上下に動作している。試験後の接点には転移現象が生じていて、電気絶縁性を持つ Ag_2S の付着が認められることから、結果として、接点表面の抵抗が高くなり負荷電流の減少を引き起こしたと推測される。

3)ソリッドステート・コンタクター(SSR)

本体温度上昇に比べヒートシンクの温度は 10℃～15℃程度高く、半導体素子の“出力オン電圧降下”による発熱と考えられる。SF_6ガス雰囲気中での開閉障害はなく、EMR や MAG に比べ安定した動作を示す。

4)ハイブリッド・パワーリレー(HYB)

平衡時の温度は、大気、SF_6ガスいずれの雰囲気においても EMR や MAG に比べ 5℃～10℃低く SSR の本体温度よりは 2、3℃高い。6 体の HYB を試験したが、結果に再現性があり製品間の特性上のバラツキが小さいことが確認できた。

以上、今回の試験結果から、標準仕様の SSR と HYB が 0.5MPa の SF_6ガス雰囲気でも使用できることが確認できた。なお、今回試験した商用周波数 50Hz とは別に 400Hz での特性試験については今後の課題である。なお、詳細については参考文献[6)]を参照されたい。

参考文献

1)E. Minehara :“THE JAERI TANDEM ACCELERATOR FACILITY”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A244, pp.13-19 (1986).

2)旭ガラス㈱:“六フッ化硫黄”、U-0210-06 2004.06.17.

3)Honeywell Industrial Fluorines :“SF_6 Technical Reference”, (2000).

4)オムロン㈱:“リレーテクニカルガイド”、カタログ番号 SAOO-0058、2005-6.

5)オムロン㈱:“ソリッドステート・リレーテクニカルガイド”、カタログ番号 SAOO-206A、2005-6.

6)沓掛健一他, “高圧六フッ化硫黄ガス(SF_6)中で使用するリレーのためのスクリーニング試験”, JAEA-Technology 2007-068

P-11

原子力機構-東海タンデム加速器インターロックシステムにおける通信障害およびプログラムバグフィックス

中村暢彦、花島進
日本原子力研究開発機構　東海研究開発センター
原子力科学研究所　研究炉加速器管理部　加速器管理課

１．はじめに

タンデム加速器のインターロックシステムは複数のモジュールがシリアル（RS485@250kbps）バス接続され、中央コントローラとその他のモジュール（スイッチモジュール×４、放送モジュール×１、LED モジュール×３、入退室監視装置×７）が相互に通信することにより実現している[1,2]。図１にシステム構成を示す。各モジュールはマイクロコントローラ（PIC, Microchip Technology Inc.）を用いて制御しており、PIC はアセンブリ言語でプログラミングしている。以下では本システム開発時に発生した通信障害への対応およびプログラムのバグフィックスについて紹介する。

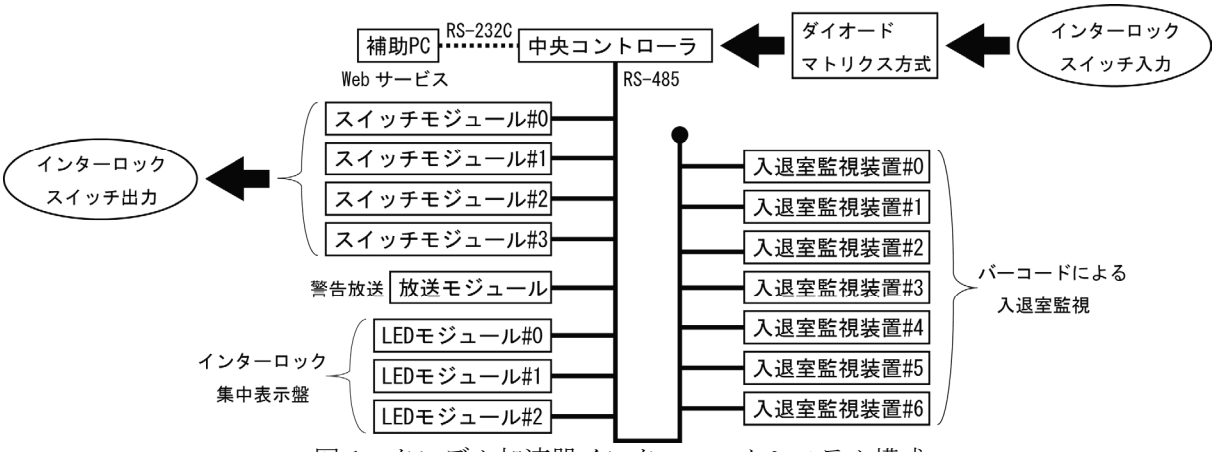


図１　タンデム加速器インターロックシステム構成

２．通信障害

通信障害はハードウェアとソフトウェアの問題が複合して発生したものであり、これによりシステムが停止することがあった。システム停止に気づいた時点では原因が分からなかったため、プログラムのデバッグ作業を進めつつモジュール間の送受信信号をロジックアナライザ及びオシロスコープを用いて測定した。

（ハードウェアの問題）

ロジックアナライザを用いて通信障害が起きた際の信号を測定すると、通常シーケンシャルに流れるべき送信信号と受信信号間に混線が見られた。そこで通信障害が起きていない時にオシロスコープを用いて中央コントローラの信号を測定すると、入退室監視装置群からの受信信号のベースに約２V 程度の降下が見られた。図２A にその様子を示す。

通信は差動信号方式を取っているので２V 程度の電圧降下ならば正常に受信できると思われる。しかし、この降下は意図していないものであり、混線の原因となる可能性があるために更なる調査を行った。調査の結果、この電圧降下は通信ケーブルにおける信号グラウンドのインピーダンスが高いために発生していることが判明した。

そこで、グラウンドインピーダンスを下げるために各モジュールの筐体を開放してグラウ

ンド線を追加することにしたが、その際に、入退室監視装置＃４筐体内部において短絡を発見した。この短絡がインピーダンスの上昇を引き起こしていたと考えられる。DC クランプオン電流プローブを用いて測定すると筐体の＋５V 電源から信号路へ向かって０．１A 程の短絡電流が確認された。内部のケーブルの一部に幾らか損傷が見られたのでケーブルの挟み込みが原因だと思われるが、調査中に短絡が無くなり信号が正常復帰してしまったので確定するには至っていない。損傷の見られたケーブルを保護した後に測定した信号の様子を図２B に示す。

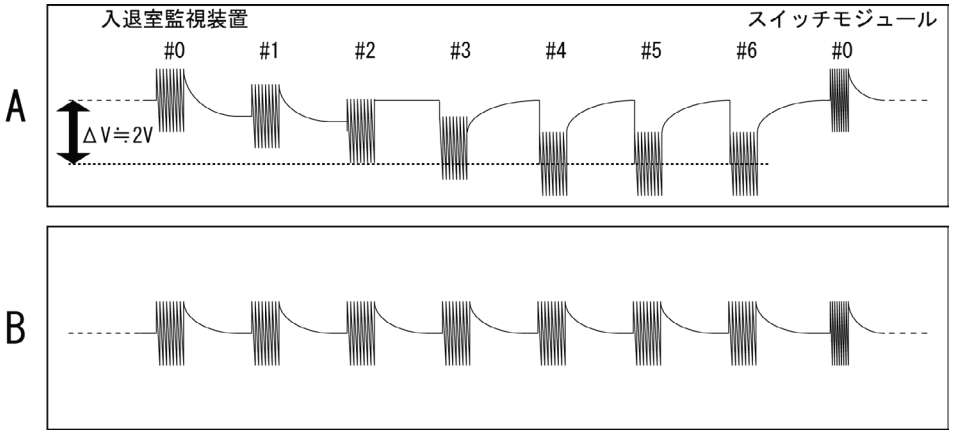


図２　中央コントローラ受信信号のスケッチ（オシロスコープ）
A:電圧降下している信号　B:正常な信号

（ソフトウェアの問題）

一時的な通信障害が発生してもシステム全体が停止することは避けなければならない。プログラムにはバグがあり、通信が混線した場合の対策がなされていなかった。そこで中央コントローラが無効なデータを受信した際には 1.0 ミリ秒の遅延時間を置いて次のモジュールとの通信を開始するように変更した。また、通信障害が発生した場合には入退室監視装置に警告メッセージを表示して注意を喚起するように変更した。これらの対策を施した後にシステムが正常に動作することを確認している。

３. バグフィックス

アセンブリ言語による PIC（8bitCPU）プログラミングは他の言語と比べるといくらか特徴的である。バグの要因となりやすい点として、データメモリの参照範囲がバンク（ページ）切り替えを必要とする 256byte 単位であることが挙げられる。ただし、アクセスバンクという汎用データメモリの概念が用意されており、バンク 0 の下位 128byte 及びバンク 15 の上位 128byte（I/O 領域）のアドレスを直接参照できるようになっている。アクセスバンクの導入によって 128byte 以下の変数及び IO 領域にアクセスする場合にはバンク切り替えをする必要がなくなったが、一方では命令時に随時、2 種類（アクセスバンクによる指定またはページ切り替えによる指定）の参照方法を選択する必要がある。図３にこれらの概念を示す。また、ジャンプ命令には直接ジャンプできるアドレス範囲が制限されている場合もある。コーディング時にはページの切り替えミス、アクセス方法の指定ミス、アドレス範囲外のジャンプ命令などによるバグが発生した。

もう 1 つのバグの要因として我々のメモリアクセス方式はプロセス毎にメモリ空間が独立していないことが挙げられる。図４にこれらの違いを示す。変数を扱う際にはプログラマ自身が全メモリ空間を意識しなければならず、例えば割込み処理における資源の保存・復旧時などにバグが発生しやすい。これらのバグはアセンブルの際にはほとんど警告されないので注意が必要である。

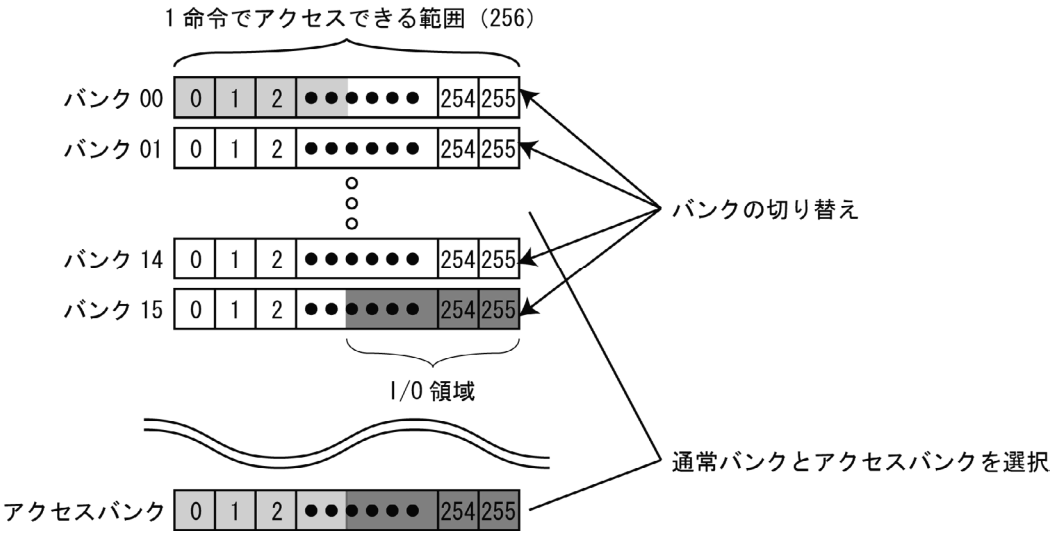


図 3　16 分割のバンクとアクセスバンクの概念

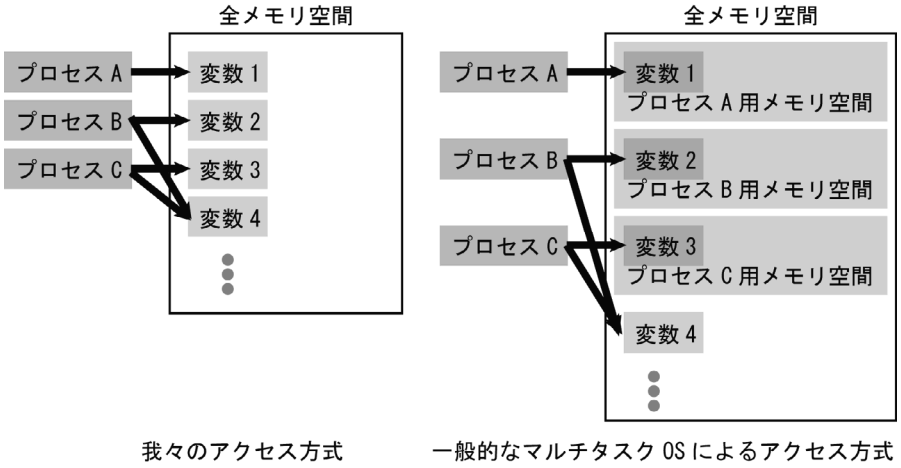


図 4　メモリアクセス方式の違い

４．まとめ

我々はケーブル類を簡素化するためにインターロックシステムのモジュール間通信にシリアルバス方式を採用している。しかし、バストポロジには信号が混線する可能性があることや不良モジュールによる通信障害の耐性が低いことに留意する必要がある。

また、システム開発当初、PIC プログラミングはアセンブリ言語が主流であり開発用ツールのコストや信頼性など有利な点が多かった。現在では C 言語に最適化された DSP 機能を持つ 16bitCPU（dsPIC, Microchip Technology Inc.）が登場しており、サードパーティによる C コンパイラも充実している。今後は C 言語による開発に移行する予定である。これにより先述のバグ要因を減らすことができると考えている。

[1] 中村暢彦他, 「第 18 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集」(2005) pp.84-87.
[2] S. HANASHIMA et al., JAEA-Tokai Tandem Annu. Rep. 2005, JAEA-Review2005-029 (2006) pp.16-17.

P-12　ISOL 用イオン源の開発

長 明彦、乙川 義憲、松田 誠、佐藤 哲也、市川 進一
日本原子力研究開発機構

1. はじめに

原子力機構タンデム加速器施設に付設されているオンライン同位体分離器(Isotope Separator On-Line; ISOL、以下 JAEA-ISOL とする)は、JAEA-KEK 共同研究で運営されている短寿命核加速実験施設(TRIAC)へ短寿命核を供給する入射器として使われている。TRIAC 実験で要望が出ている Li, Kr, In, Cs, Ba などの短寿命核の ISOL 用イオン源からの放出時間と収率を測定した。

2. 実験

2.1 イオン源

JAEA-ISOL では、元素の化学的性質に合わせて表面電離型イオン源(Surface Ionization type Ion Source; SIS)と低圧アーク放電型イオン源(Forced Electron Beam Induced Arc-Discharge type Ion Source; FEBIAD-IS)を開発している。ウラン標的内臓型の SIS 並びに FEBIAD-IS の概略を Fig. 1 に示す。

SIS は、イオン化を目的とする元素のイオン化ポテンシャルとイオン源内壁材の仕事関数の差でイオン化するイオン源であり、アルカリ元素、アルカリ土類元素、ランタノイドなどのイオン化ポテンシャルが 6eV 程度までの元素のイオン化に適用される。イオン源の運転温度は 2300ºC 程度である。

FEBIAD-IS は低圧アーク放電中にイオン化を目的とする元素を導入することでイオン化するイオン源であり、イオン化ポテンシャルには依存しないが、イオン化チェンバー内に導入するためにイオン源運転温度で十分な蒸気圧が得られる希ガス、揮発性元素のイオン化に適用される。

陽子誘起ウラン核分裂による放射性核種生成のために、グラファイトファイバー(ϕ=11 μm)を母材とする炭化ウラン標的を調整した。ウランターゲット量は 630mg/cm^2 ^{nat}U である。

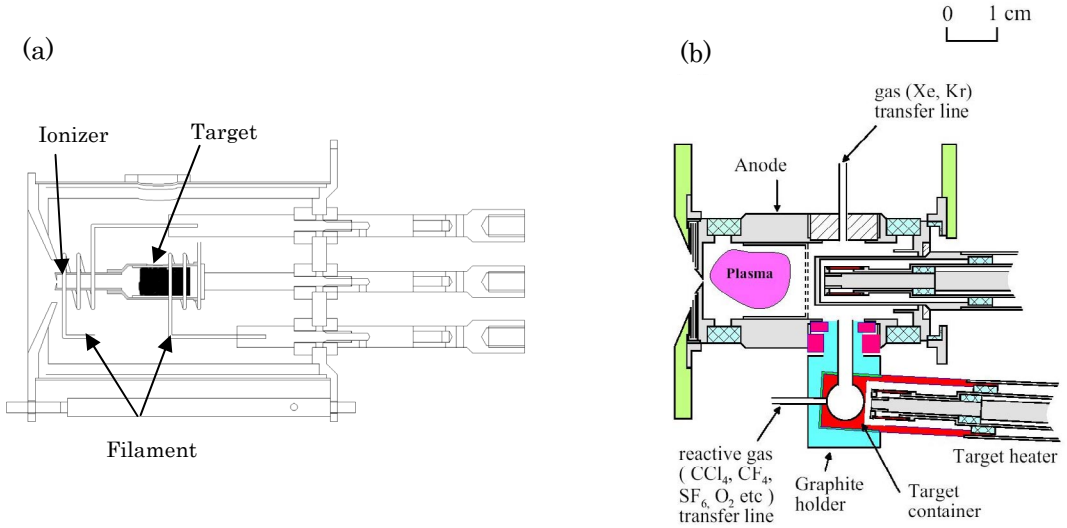


Fig.1 Schematic view of ion sources: (a) Surface ionization type ion source (b) Forced Electron Beam Induced Arc-Discharge type ion source.

2.2 測定

陽子誘起ウラン核分裂生成物を分離するために、グラファイトファイバーを母材とする炭化ウラン標的(630mg/cm^2)を SIS, FEBIAD-IS に装着し、タンデム加速器からの 32MeV 陽子ビーム(標的照射エネルギー25MeV) 60nA で照射した。核分裂生成物は、イオン源によってイオン化され、加速・質量分離した後、テープ搬送装置の Al 蒸着マイラーテープに捕集し、HPGe 検出器を配置した測定位置へ移送する。収率測定では、目的とする核種の半減期を考慮してテープ上への捕集時間、測定時間などの測定サイクルを決め、γ 線測定から各核種の収量を求めた。イオン源からの放出時間を測定では、タンデム加速器からの陽子ビームを On/Off し、ビーム Off 時を t=0 としてイオン源から放出される短寿命核ビーム量の時間依存性をγ線測定によって決定した。

3. 結果

3.1 イオン源からの放出時間

イオン源からの放出速度の測定例として、^{136m}Csの結果をビームOn/Offと線源の移送・測定の時間系列と共にFig.2 に示す。黒丸は3秒毎のγ線カウント(N)、白丸はt=0以降のデータに対して半減期($T_{1/2}$= 17s)の壊変補正を行ったカウント(N')を示す。壊変補正を行ったカウントを $N'(t) = \sum_{i=1,2} A_i \exp(-\lambda_i t)$ の式でフィッティングした。2つの成分が存在し、放出時間($\tau_i = 1/\lambda_i$)でτ_1=1.7sの速い放出成分(配分率30%)と共にτ_2=22.7sの遅い放出成分(配分率70%)があることが分かる。

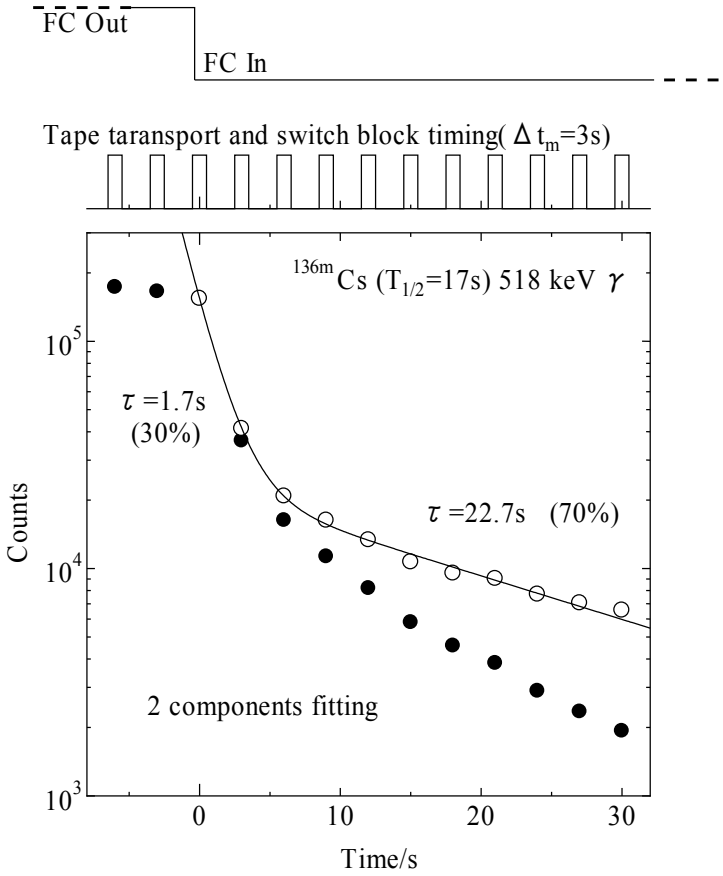


Fig.2. Release of ^{136m}Cs from the target/ion source.

放出時間τは、標的からの拡散時間τ_d、衝突一回当たりの吸着時間τ_a、イオン源内での衝突回数nを用いて、次のように表される。

$$\tau = \tau_d + \tau_a \times n$$

$$\tau_a = 2.4 \times 10^{-15} \exp\left(\frac{11605 \Delta H_a}{T}\right)$$

Csの場合、τ_a~3×10^{-8}s(吸着エンタルピーΔH$_a$=3.5eV)、n~1500とするとτ_a×n~5x10^{-5}s となり、放出時間全体に対して無視できる。SIS及びFEBIAD-ISで測定した放出時間の結果を他の報告結果と共にTable 1に示す。測定時のイオン源温度は、2250℃(SIS)、1550℃(FEBIAD-IS)である。今回測定した元素では、概ね吸着時間は無視することができ、放出時間は拡散時間に起因していると考えられる。

Table 1 Results of release time and fractional rate.

Isotope	half-life/s	Ion source	Release time/s	Fractional rate	Reported results
^{94}Rb	2.072	SIS	τ_1: 1.1 τ_2: 10.7	84% 16%	3.2 s†, 8.2 s‡, 0.8 s$
^{136m}Cs	17	SIS	τ_1: 1.7 τ_2: 22.7	30% 70%	2.5 s†, 21.6 s‡
^{145}Ba	4.3	SIS	τ_1: 9	100%	10.3 s†, 107 s‡
^{160}Eu	38	SIS	τ_1: 12	100%	
^{91}Kr	5.98	FEBIAD	τ_1: 3.1 τ_2: 46.9	21% 79%	2.2 s†, 3.5 s‡
^{123g}In	39.68	FEBIAD SIS	τ_1: 7 τ_1: 1.7	100% 100%	2.5 s†, 8.7 s# 6.2 s, 2.3 s, 1.6 s‡
^{139}Xe	8.57	FEBIAD	τ_1: 12 τ_2: very long		32 s†, 11.7 s‡

SIS operated at 2250ºC. FEBIAD-B2 operated at 1550ºC
†: OSIRIS@2400ºC ‡:ISOLDE@1900-2000ºC $: SOLAR@1600ºC #:IRIS@2100ºC
Observed release times are mainly attributed to diffusion process τ_d.

SISによってイオン化されるアルカリ元素は速い放出時間を持っていることが分かる。それに対し、アルカリ土類元素であるBaやランタノイドのEuは1桁近く放出時間が遅い。FEBIAD-ISでイオン化した希ガスではτ(Kr)< τ(Xe)であり、その差は標的からの拡散時間に依存すると考えられる。SIS, FEBIAD-ISの両方で放出時間を測定したInでは、イオン源温度の高いSISでの放出時間が短い。今回の実験では、SIS、FEBIAD共に同じ標的母材を使用している。ふたつのイオン源での放出時間の違いは拡散時間の温度依存性に依存していると考えられる。

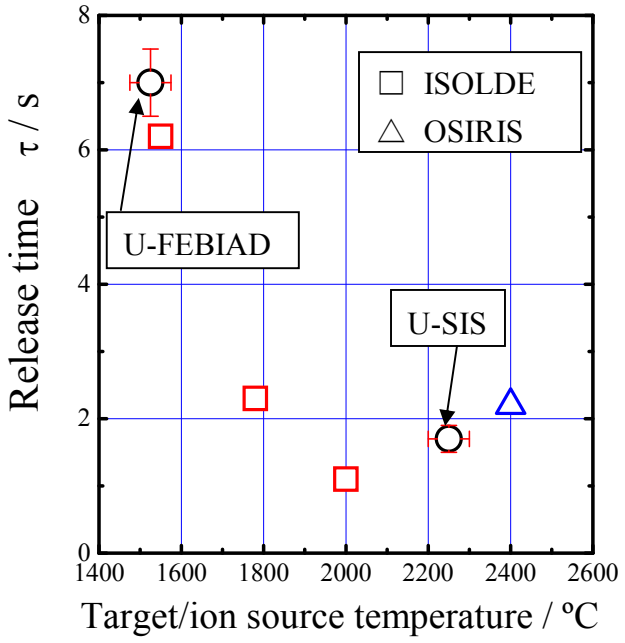


Fig.3 Temperature dependence of release time for In.

他の研究機関で測定されたIn元素のイオン源からの放出時間との比較をFig.3に示す。ISOLDEにおける一連のデータは同一標的母材で得られたものであるが、それより高温でイオン源を運転していても、必ずしも放出時間が速くなるわけではないことが分かる。

3.2 収率の半減期依存性

Fig.4 にSISでイオン化したBa放射性同位体の収率の時間依存性を示す。破線は、放出時間τ_1=9 s もしくはτ_1=4 s とした場合の、β壊変半減期による収率の壊変損失を表す。放出時間測定で得られたBaの放出時間τ_1=9 s で計算した壊変損失は、短半減期のBa放射性同位元素の収率低下をよく再現している。

我々は、JAEA-ISOLを用いてEu未知核種の探索を行っているが、今回測定したEuの放出時間τ_1=12 s は未知核種の半減期が1秒程度であった場合、収率が3桁以上低下することを示している。

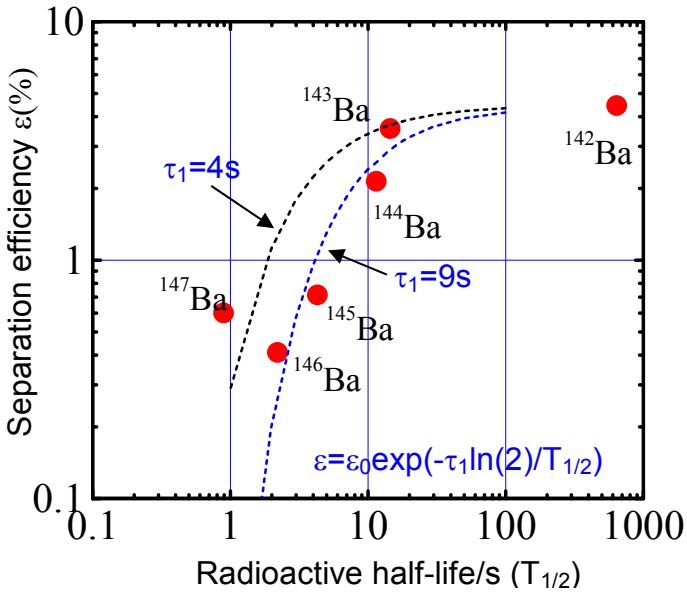


Fig.4. Half-life dependence of Separation efficiency

4.まとめ・今後の開発

短半減期の放射性同位元素をイオン化・分離する場合、イオン源からの放出時間は収率に大きく影響する。今回報告した陽子誘起ウラン核分裂生成物とは別に、核子移行反応で生成する^{8}Li($T_{1/2}$=838ms)のイオン化・分離に関しても、放出時間の標的母材依存性が確かめられている。RNB加速器実験においては^{8}Liビーム量の大幅な増量が要望されており、収率の向上のためには現在使用している^{13}C濃縮同位体焼結標的の改良が必要であることを示唆している。

イオン源からの放出時間を促進する方法としては、①標的・イオン源の高温化による離脱速度の促進、②炭化ウラン標的の母材の選択が考えられる。現在、Kr, Inなどの分離を行うためのFEBIADイオン源の高温化を進めている。標的母材については、グラファイト粉体を整形した高密度の薄い円板を積層することで収率があがることが報告されている。他方、高密度標的では寿命が短くなるに連れての収率低下も報告されている。研究対象の化学的特性・半減期などの物理的特性に合わせた標的開発が必要であり、標的生成法を含めて検討・開発を進めて行く。

P-13　Low β 超伝導加速空洞の開発

株本裕史、 竹内末広、 石崎暢洋、 松田誠、 乙川義憲
日本原子力研究開発機構　東海研究開発センター　原子力科学研究所
研究炉加速器管理部　加速器管理課

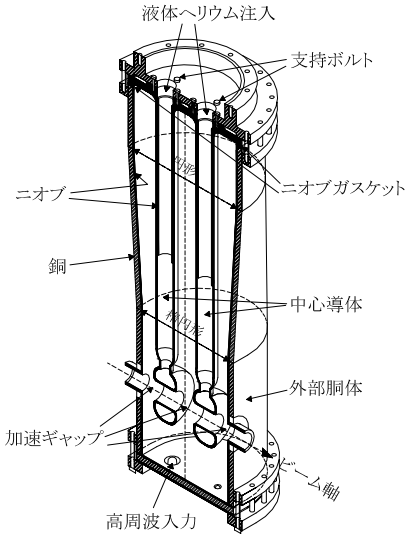
1. はじめに

原子力機構 東海タンデムでは TRIAC からの安定核、短寿命核ビーム及びタンデムからの低速度重イオンビームを超伝導ブースターで再加速し、クーロン障壁を越える約 5～8MeV/u のビームを得る計画を進めている。イオンを既存の超伝導ブースターで効率よく加速するためには入射ビームを 2.0MeV/u 付近まで加速する前段加速器が必要であり、その候補として Low β 超伝導加速空洞(Twin-QWR)の開発を進めている。プロトタイプ空洞を製作し、性能試験を行った結果を報告する。

2. 超伝導ブースターと Low β 超伝導加速空洞

20MV タンデム加速器の後段にはイオンのエネルギーを増強するために超伝導ブースターが設置されている。超伝導ブースターは 40 個の加速空洞で構成されるリニアックで合計の加速電圧は 30MV に相当する。加速空洞は 2 ギャップの同軸 1/4 波長型空洞共振器(Quarter Wave Resonator)で共振周波数は 129.8MHz、最適ビーム速度は光速の 10%に設計されている。この超伝導ブースターの前段から 4～8 個の空洞を開発中の Low β 超伝導加速空洞に置き換える計画を立案している。

図 1 に Low β 超伝導加速空洞の断面図を示す。空洞は 3 ギャップの 2 芯 1/4 波長型空洞共振器(Twin-QWR)で、共振周波数は 129.8MHz、最適ビーム速度は光速の 6%である。中心導体は超伝導体のニオブでできており、4.2K の液体ヘリウムにより直接冷却される。外部胴体はニオブと銅を爆発圧着して製作したクラッド板でできており、銅の高い熱伝導率を利用して間接的に液体ヘリウム温度まで冷却される。また中心導体と外部胴体はニオブ製ガスケットで接続される構造となっている。



（外形寸法：0.67m×0.24m×0.26m）

図 1　Low β 超伝導加速空洞の断面図

		Low β 空洞	超伝導ブースター
形式		Twin-QWR	QWR
最適ビーム速度	β_{opt}	0.06×光速	0.10×光速
共振周波数［MHz］	f_0	129.8	129.8
高周波蓄積エネルギー	U_0/E_{acc}^2	0.039	0.046
最大表面電界［MV/m/(MV/m)］	E_p/E_{acc}	4.2	4.6
最大表面磁界［mT/(MV/m)］	H_p/E_{acc}	12.3	7.5
加速ギャップ［mm］	L_g	17.5，35.0，17.5	40.0，40.0
加速長［mm］	L	150	150
加速電界（RF 入力 4W）［MV/m］	E_{acc}	5.8	4～5

表 1　空洞のパラメータ

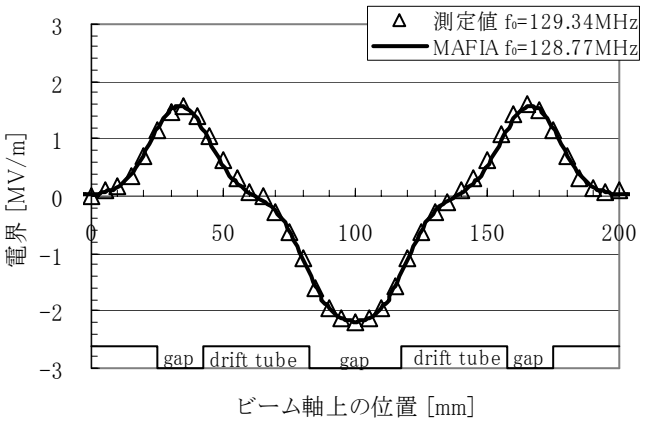


図 2 ビーム軸上の電界分布(E_{acc}=1.0MV/m)

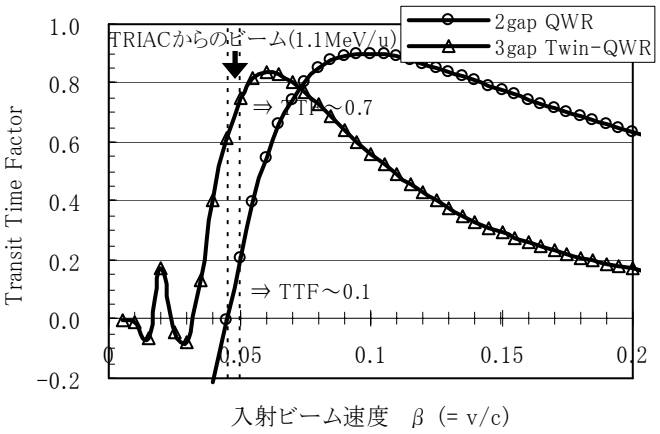


図 3 トランジットタイムファクター

3. Low β 超伝導加速空洞の開発

3.1 電磁界分布の測定・解析

空洞の形状を検討するためにアルミニウムで 1/1 スケールのモデル空洞を製作し、ビーズプル法を用いて電磁界分布を測定した。また、MAFIA を用いて電磁界分布の解析を行い、モデル空洞の測定値と比較して空洞のパラメータを決定した。表 1 に Twin-QWR と QWR の主要なパラメータを示す。また、図 2 はビーム軸上の電界分布(E_{acc}=1.0MV/m)である。MAFIA で計算により求めた共振周波数は測定値よりも 0.5%ほど低い値となったが、電磁界分布は良く一致していた。

図 3 は入射イオンの速度に対する空洞の加速効率を示す通過時間因子(トランジットタイムファクター)である。Twin-QWR は入射イオンの速度が光速の 3.3%(β=0.033)以上であれば加速が可能で、最適ビーム速度は光速の 6%(β_{opt}=0.060)となっている。TRIAC で 1.1MeV/u(β=0.048)まで加速されたビームに対する Twin-QWR のトランジットタイムファクターは 0.7 となっており、QWR の 0.1 と比べて効率よく加速できることが分かる。

3.2 プロトタイプ空洞の製作

電磁界分布の測定・解析で得られたパラメータに基づいてプロトタイプ Twin-QWR を製作した(図 4)。Twin-QWR は主に中心導体、外部胴体、ニオブガスケットの部品で構成され、それぞれ機械加工をした後に表面処理として電解研磨を行った。中心導体と外部胴体は 80～100 μm、ニオブガスケットは 40～60 μm の電解研磨を施した。

電解研磨によってニオブが水素吸蔵を起こすため、真空熱処理で水素ガスを追い出す必要がある。中心導体とニオブガスケットについては 600℃、1時間半の真空熱処理を行った。外部胴体についてはニオブ・銅のクラッド板でできているため加工後に 600℃の真空熱処理を行うことはできない。

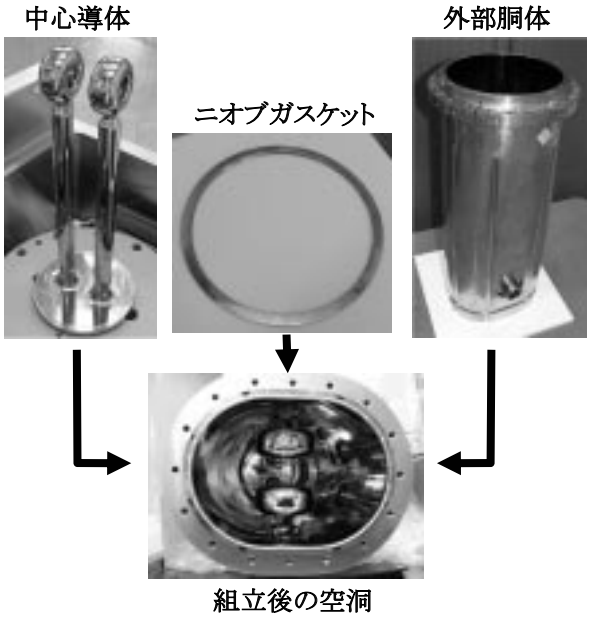


図 4 製作したプロトタイプ Twin-QWR

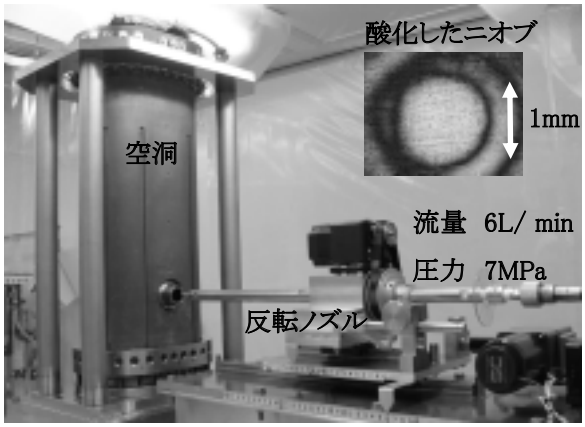


図 5 高圧純水洗浄装置と酸化したニオブ

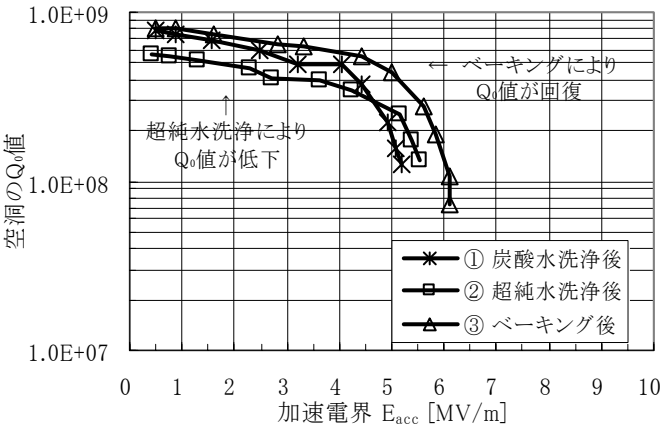


図 6 高圧純水洗浄とベーキングの影響(QWR)

3.3 高圧純水洗浄とベーキング

超伝導空洞ではニオブ表面の清浄度が非常に重要であり、ゴミなどが混入すると電子の電界放出(フィールドエミッション)によって加速電界が制限される。そこで比抵抗 18MΩ・cm の超純水を 7MPa まで加圧してニオブ表面に吹き付ける高圧純水洗浄を行い、その後に 120℃、2 日間程度のベーキングを施すのが一般的になっている。図 5 に製作した高圧純水洗浄装置を示す。

ニオブのサンプル片を用いて洗浄試験を行ったところニオブが茶色～青色に酸化する現象がみられた(図 5)。これは絶縁性の高い超純水を高圧で吹き付けるために静電気が発生してニオブが陽極酸化を起こすためである。この酸化は水に炭酸ガスを溶解させて比抵抗を 0.04MΩ・cm まで下げることで抑えられることが分かった。高圧純水洗浄によるニオブ酸化が性能に影響するのか調べるために予備の QWR を用いて試験を行った。①炭酸水洗浄 ⇒ ②超純水洗浄 ⇒ ③ベーキング の順に試験を行ったところ、炭酸水洗浄では Q_0 値が 8×10^8 であったが、超純水洗浄によって Q_0 値が 6×10^8 まで低下し、ベーキングを施すことによって Q_0 値の回復がみられた(図 6)。超純水洗浄によるニオブの酸化で表面抵抗が増加し、ベーキングによって酸化皮膜が緩和されたためと考えられる。組立後の Twin-QWR に対しては高圧炭酸水洗浄と 120℃、2 日間のベーキングを施した。

4. オフライン性能試験

液体ヘリウム温度 4.2K において Twin-QWR のオフライン性能試験を行った。結果を図 7 に示す。最初の試験では Q_0 値=2×10^8、加速電界 E_{acc}=2.8MV/m(RF 入力 4W)であった。ニオブガスケットの周辺で温度上昇が観測され、低い加速電界から Q_0 値の低下がみられたことから、中心導体と外部胴体の接触が不十分であることが考えられた。空洞を分解したところニオブガスケットが約 0.4mm ズレており接触していない部分があった。ニオブガスケット交換後は Q_0 値=9×10^8、加速電界 E_{acc}=5.8MV/m(RF 入力 4W)まで性能が改善され、設計目標の 5.0MV/m を超える性能を確認した。

また、6.0MV/m 付近から X 線の発生なしで Q_0 値の急激な低下がみられ、到達できた最大の加速電界は 6.5MV/m であった。Twin-QWR の最大表面磁界は 12.3mT/(MV/m)と QWR の 7.5mT/(MV/m)よりもかなり高くなっている。また、機械的強度を確保するために中心導体の付け根付近が肉厚となっており熱伝導の面で不利なことから、高周波臨界磁場により Q_0 値低下が起こった可能性が考えられる。

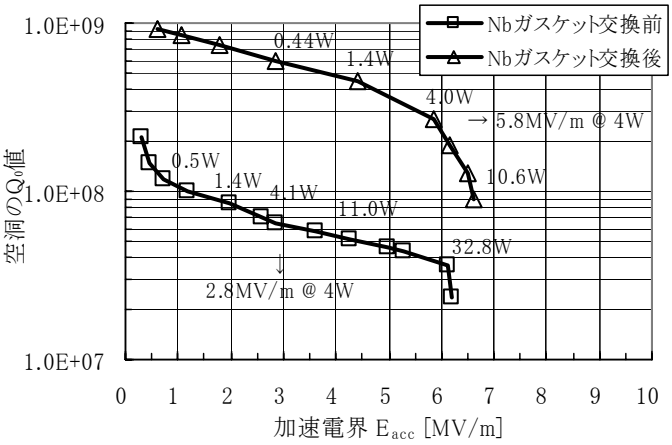


図７ オフライン性能試験結果

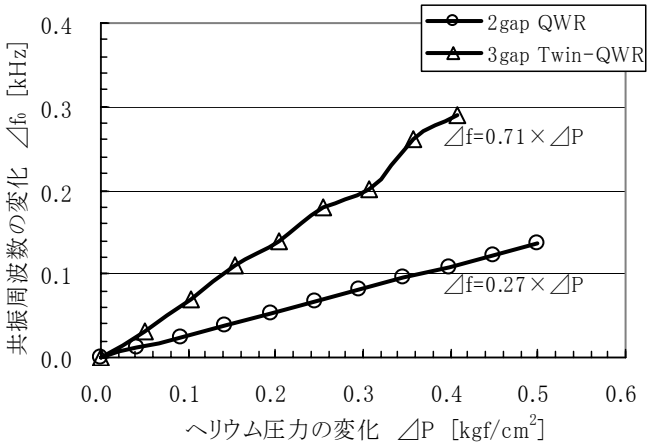


図８ ヘリウム圧力に対する共振周波数変化

5. 周波数安定性の試験

Twin-QWR は既存の QWR よりも細い中心導体が 2 本入る構造となっているため、機械的強度が低く周波数安定性が悪いと考えられる。この周波数不安定性は主に液体ヘリウム導入部（ヘリウムデュワー）の圧力変動によって中心導体天板が変形することで引き起こされる。Twin-QWR は機械的強度を確保するために中心導体の付け根付近を肉厚とし、天板を押しネジと引きネジで固定して変形を防止する構造となっている。

Twin-QWR のヘリウム圧力に対する共振周波数の変化を測定した。結果を図 8 に示す。Twin-QWR の周波数変動は 0.71kHz/(kgf/cm^2)であり、これは QWR の 0.27kHz/(kgf/cm^2)と比べて約 2.6 倍大きい値であった。QWR をオンラインで使用する際は RF カプラーの結合度を強め、バンド幅を広げることで安定運転が可能となっているが、Twin-QWR が現在のヘリウム冷凍機の圧力変動を許容して安定運転が可能かどうか検討する必要がある。

6. まとめ

Twin-QWR のプロトタイプ空洞を製作し、オフライン性能試験において Q_0 値=9×10^8、加速電界 E_{acc}=5.8MV/m（RF 入力 4W 時）の性能を達成した。また、周波数安定性の試験も行った。測定で得られた Twin-QWR のヘリウム圧力に対する共振周波数変化は 0.71kHz/(kgf/cm^2)であり、オンラインの QWR と比べて 2.6 倍大きい値であった。今後は現在のヘリウム冷凍機において安定な運転が可能かどうか検討していく。

参考文献

[1] S. Takeuchi, et al., “Acceleration of heavy ions by the JAERI tandem superconducting booster” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 382 (1996) 153-160

[2] H. Miyatake, et al., “The KEK-JAERI joint RNB project”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 204 (2003) 746-751

P-14

PIXE 分析法による額縁装飾用金箔に含まれる微量元素(Cu, Ag)の検出

長谷川純子 [1)]、○河野益近 [2)]、伊達仁美 [3)]、川本耕三 [4)]、井上美知子 [4)]
西山文隆 [5)]、伊藤誠二 [6)]、森田明 [6)]、松崎浩之 [6)]
[1)] 京都造形芸術大学大学院芸術研究科、[2)] 京都大学大学院工学研究科、[3)] 京都造形芸術大学歴史遺産学科、[4)]元興寺文化財研究所、[5)]広島大学大学院工学研究科、[6)]東京大学大学院工学研究科

はじめに

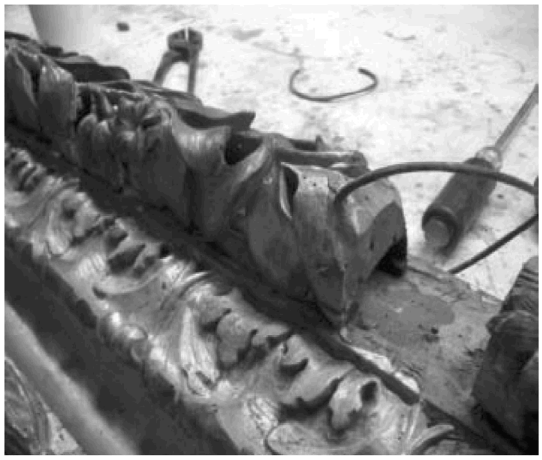
額縁とは、日常空間と非日常空間の区別であり、それらの結合と分離の役割を担うものである。フィレンツェでは 14 世紀から 15 世紀にかけて祭壇装飾が発展し、それに伴い多くの金箔装飾の額縁が制作された。そして現在においてもその伝統に基づいた額縁修復が行なわれている。修復の際に生ずる額縁片は、現時点でその重要性がまだ認識されていないこともあり、分析用試料として比較的容易に委託してもらうことができる。

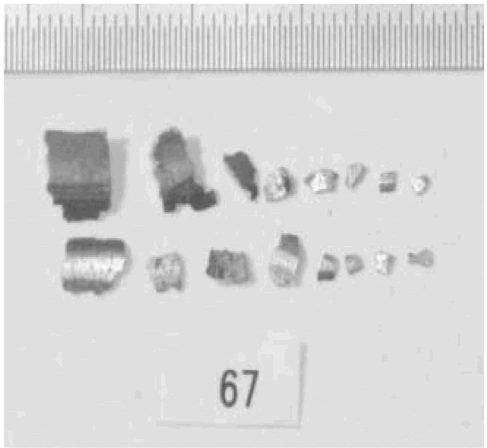
入手した全ての額縁試料については、すでに蛍光X線分析を行っている。加速器を使った分析では、試料に含まれる微量元素を加速器を使った分析（PIXE 分析)法で分析するために必要な基礎データを収集すること、その結果に基づいて一部の試料についてより正確に分析を行うことを本実験の目的とした。

額縁に装飾された金箔に含まれる微量元素を定量分析することで、美術史的検討を行うことのみならず、修復に必要な情報の入手し、また額縁の重要性を周知することが最大の目的である。

試料

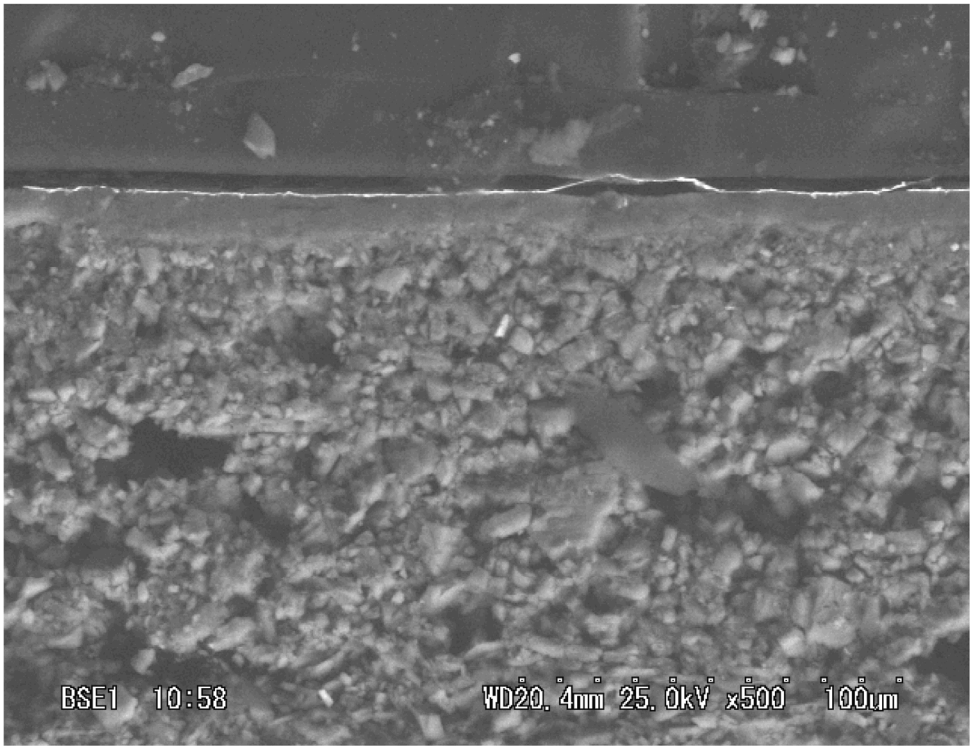
対象となる額縁は、木彫に下地（漆喰あるいは石膏）で形を整え、ボーロと呼ばれる砥粉





修復中の額縁（左）と金箔を施された額縁片（右）

様の材料で表面を滑らかに仕上げた上に金箔が施されている。我々が入手できる試料は、下地・ボーロの上に金箔が張り付いたものである。



額縁片断面の顕微鏡写真

（写真上部に金箔を見ることができる）

プロトンの飛程は非常に短いので、測定対象となる金箔層が厚ければ、PIXE 分析は下地の影響を受けることがない。しかし電子顕微鏡による金箔の厚み測定結果（1μm 程度）と金箔中でのプロトンの飛程のシミュレーション計算結果から、プロトンは下地にまで到達することが判明した。

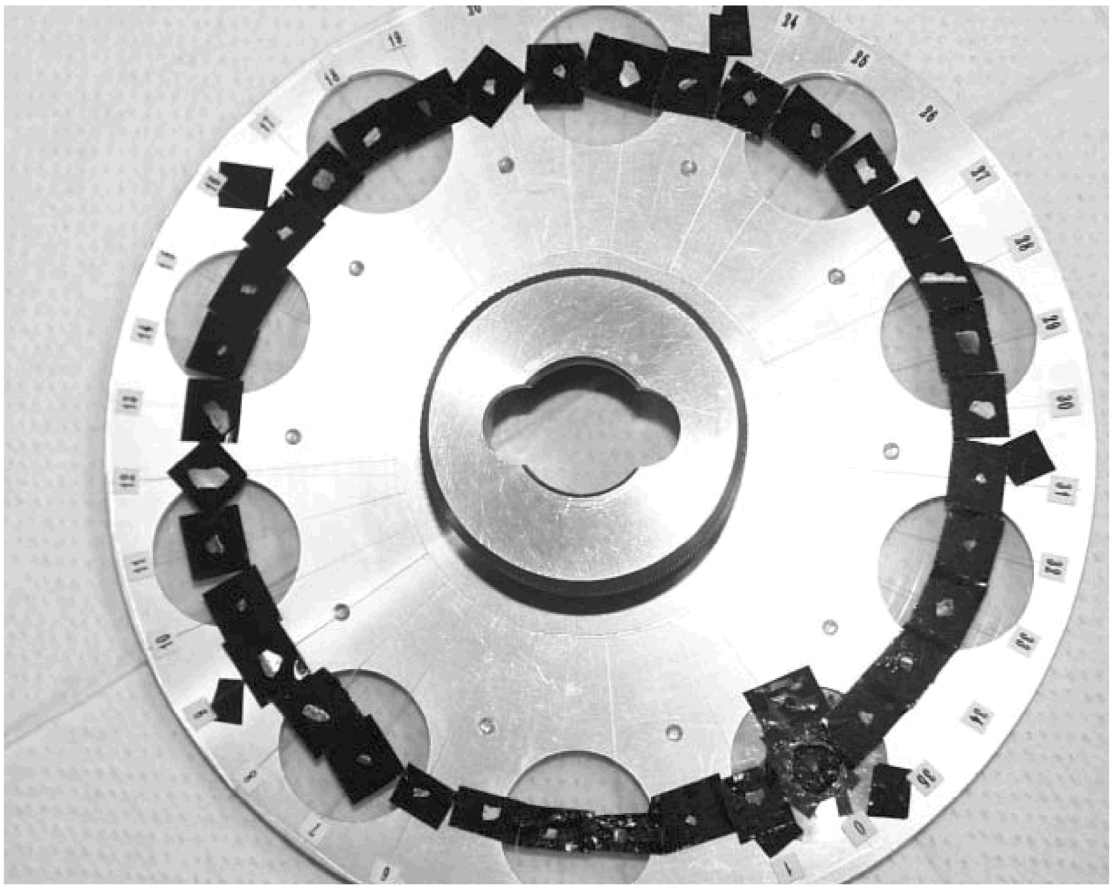
プロトンのエネルギー	飛程
3 MeV	27.0 ± 1.79 μ m
2 MeV	14.8 ± 1.23 μ m
1.25 MeV	7.61 ± 0.66 μ m

TRIM-95 によるシミュレーション結果（西山氏による）

入手した額縁試料から金箔のみを分離することは非常に困難であるため、下地・ボーロが付いた状態のものを PIXE 分析用の試料として用いざるを得なかった。また金箔から分離できないボーロに含まれる Cu, Ag を評価するために、現在入手可能な数種類のボーロを試料として用意している。

測定

東大にあるタンデム型加速器(通称 RAPID)で発生させた 3MeV のプロトンを使って、額縁試料の PIXE 分析を行なった。金箔に含まれる微量の Cu, Ag を検出するために、吸収板として 25μm 厚の Zn を用い、Au の L-X 線を選択的に吸収させ、相対的に Cu, Ag の K-X 線の検出器への入射量が多くなるようにした。また、ボーロに含まれる Cu, Ag の定量を試みた。下地試料については、現時点では、蛍光X線分析装置を使い、金箔面と下地面の両方向から測定を行なっている。

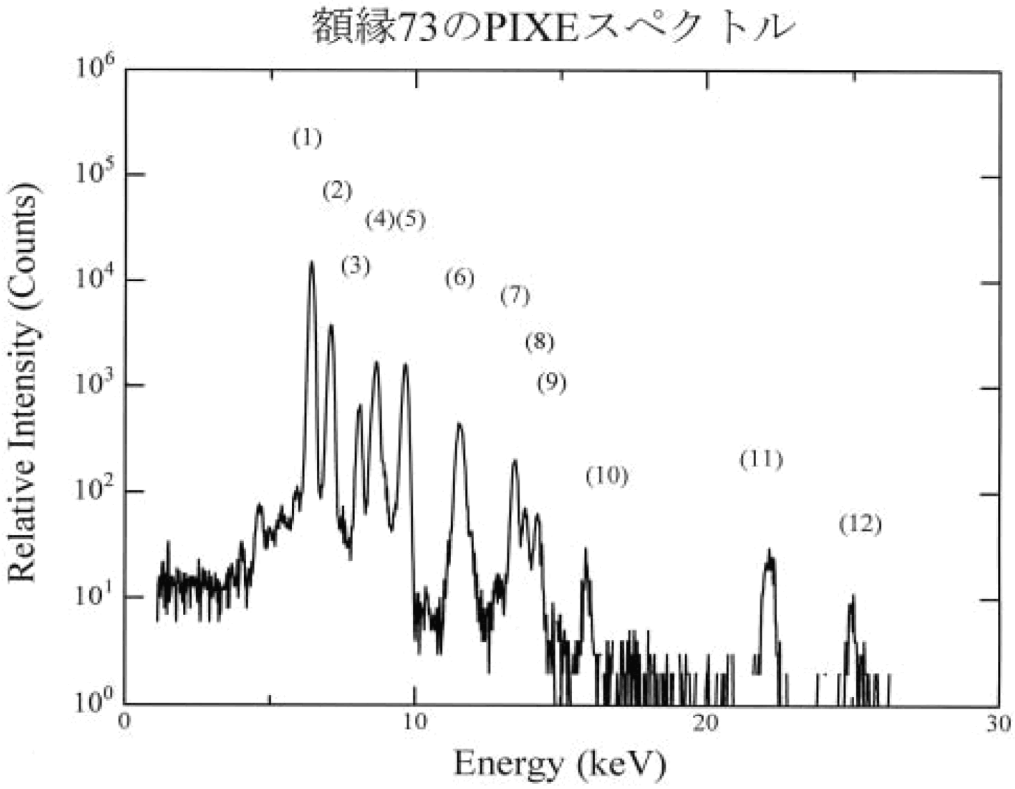


サンプルホルダーに取り付けられた額縁片

結果

1) 額縁装飾用金箔に含まれる Ag/Au 比から、額縁が作成された年代の特徴を見出すことはできなかった。

2）金箔の厚さは1μm程度であるため、今回のPIXE分析においては下地・ボーロに含まれる元素の影響を考慮する必要がある。
3）ボーロからAgは検出されなかった（金箔に含まれるAgに比べて無視できる程度に少ない）。
4）下地試料に含まれるCu, Agについては、金箔に含まれるCu, Agに比べて無視できる程度に少ないことを確認した。



(1) Fe Kα1,2 (2) Fe Kβ1,3 (3) Cu Kα1,2
(4) Zn Kα1,2 (5) Au La1,2 + Zn Kβ1,3
(6) Au Lβ1,2,3 (7) Au Lγ1 (8) Au Lγ2,3
(9) Au Lγ4 + Sr Kα1,2 (10) Sr Kβ1,3 (11) Ag Kα1,2
(12) Ag Kβ1

<u>今後について</u>

Cu/Au比を確定するためには、ボーロに含まれるCuが金箔に含まれるCuに比べて無視できる程度に少ないことを確認する必要がある。この点については現在解析中であるので、次回の研究会で報告できるものと思っている。

P-15　東工大タンデム加速器を用いた PIXE 法による水中微量クロムの価数分別測定

福田一志 [1]、Sureerat Thomyasirigul[2]、長谷川純 [2]、小栗慶之 [2]
[1] 東京工業大学　技術部基盤技術支援センター
[2] 東京工業大学　原子炉工学研究所

1.はじめに

東工大 1.6MV ペレトロンタンデム加速器(NEC 社製、5SDH2 型)で加速されたプロトンビームを用いて PIXE(Particle Induced X-ray Emission)法による環境科学関連の実験を行っている。

本研究では、水質環境基準で、その濃度が指定されているクロムの微量分析に注目した。水中では、主としてクロム(Ⅲ)とクロム(Ⅵ)の状態で安定に存在するが、毒性はクロム(Ⅵ)の方がクロム(Ⅲ)に比べ 100～1000 倍高い。一方、クロム(Ⅲ)は毒性が低く少量では人体に必須な元素となっている。このことからクロムの形態別分析を行う必要がある。簡便かつ高感度でこの分別測定を行うために、イオン交換濾紙[1]で吸引濾過分別し乾燥後、ターゲットとして PIXE 測定を行う方法について検討した。

2.目的

・水試料中 Cr(Ⅲ)と Cr(Ⅵ)の PIXE による分別測定のために、Whatman DE81 セルロース陰イオン交換濾紙及び P81 陽イオン交換濾紙を用いた濃縮技術を研究する。
・濾過時間等，最適な試料調整方法を調べる。
・検出下限を評価し，環境モニタリングの方法としての実用性を調べる。

3.実験方法

水中での存在形態は、クロム(Ⅲ)では $Cr(OH)_2^+$などの陽イオンで存在し、クロム(Ⅵ)では CrO_4^{2-}などの陰イオンが考えられている。そこで、これらの分別濃縮には、それぞれ陽イオン交換濾紙(Whatman-P81 Cation Exchanger)、陰イオン交換濾紙(Whatman-DE81 Anion Exchanger)を用いた。

図 1:上段 Prefilter:孔径 0.45μm
下段 DE81:直径 22mm、厚さ 0.200mm
イオン交換容量=1.7μeq/cm^2

標準試料として、クロム（VI）には和光純薬製クロム標準液を用いた。濃縮、濾過は以下の条件で行った。

・水試料投入量=100ml
・Cr（VI）の化学形態=$K_2Cr_2O_7$
・[$K_2Cr_2O_7$]=0.05、0.2mg/l
・（それぞれ[Cr]=18、71ppb）
・pH=6
・濾過時間=1-100ml/min

図 2：二段式フィルターと吸引ポンプ

時間の都合により、Cr（III）溶液の測定は行わなかった。フィルター乾燥後、東京工業大学原子炉工学研究所の 1.7MV タンデムペレトロン静電加速器からの 2MeV プロトンビームを用いて PIXE 分析を行った。ビーム電流は約 1nA、測定時間 10min とし、検出器には、Si(Li)半導体検出器を用い、低エネルギーX 線吸収用フィルターマイラー膜 20μm を使用して測定を行った。

4.実験結果

濾過前の DE81 フィルター（陰イオン交換ろ紙）使用時の PIXE スペクトルを図 3(a)に示す。S, Cl, Ca は陰イオン交換樹脂の成分である事が分かった。次に Cr（VI）溶液[$K_2Cr_2O_7$]=0.2mg/l 濾過後のフィルターに対するスペクトルを図 3(b)に示す。明瞭な Cr の Kα, Kβ 線を観測できた。

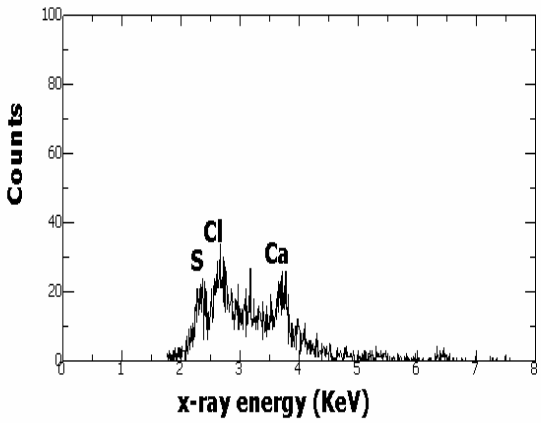


図 3(a)：濾過前

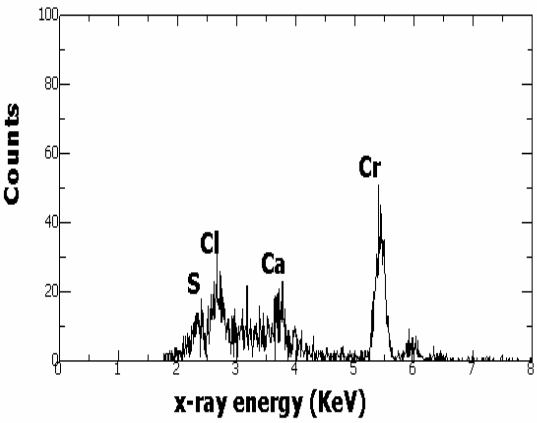


図 3(b)：Cr（VI）溶液濾過後

次に、P81 フィルター（陽イオン交換濾紙）に対する同様な結果を図 4 に示す。

濾過前のフィルターに対するスペクトルを図 4(a)に示す。P, Ca は陽イオン交換樹脂の成分である事が分る。次に Cr（VI）溶液[$K_2Cr_2O_7$]=0.2mg/l 濾過後のフィルターに対するスペクトルを図 4(b)に示す。Cr（VI）は全く収集されないことが分る。これにより、Cr（Ⅲ）と Cr（VI）の分別測定が原理的に可能である事が分かった。

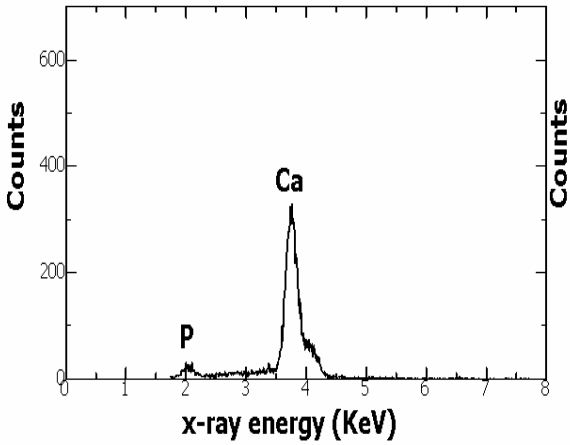


図 4(a)：濾過前

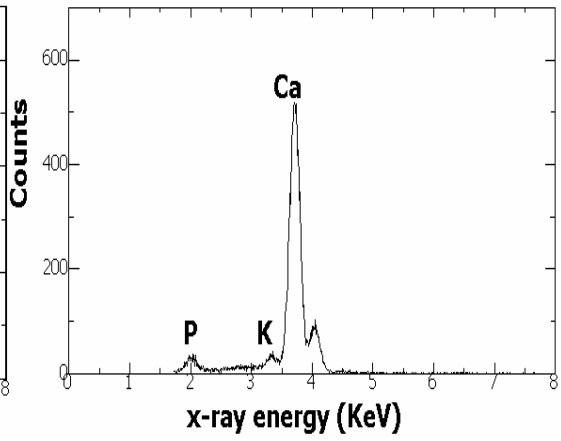


図 4(b)：濾過後

DE81 フィルターによる Cr（VI）収集効率に対する濾過速度の影響を図 5 に示す。縦軸はラザフォード後方散乱（RBS）のカウントで規格化した Kα線ピークのカウントである。濾過速度=20-100ml/min の領域では、収集効率に殆ど変化は見られないが、濾過速度<20ml/min のときでは、収集効率が不安定になった。（図 5）原因の一つとして、Cr（VI）の吸着の非均一性があると考えられる。

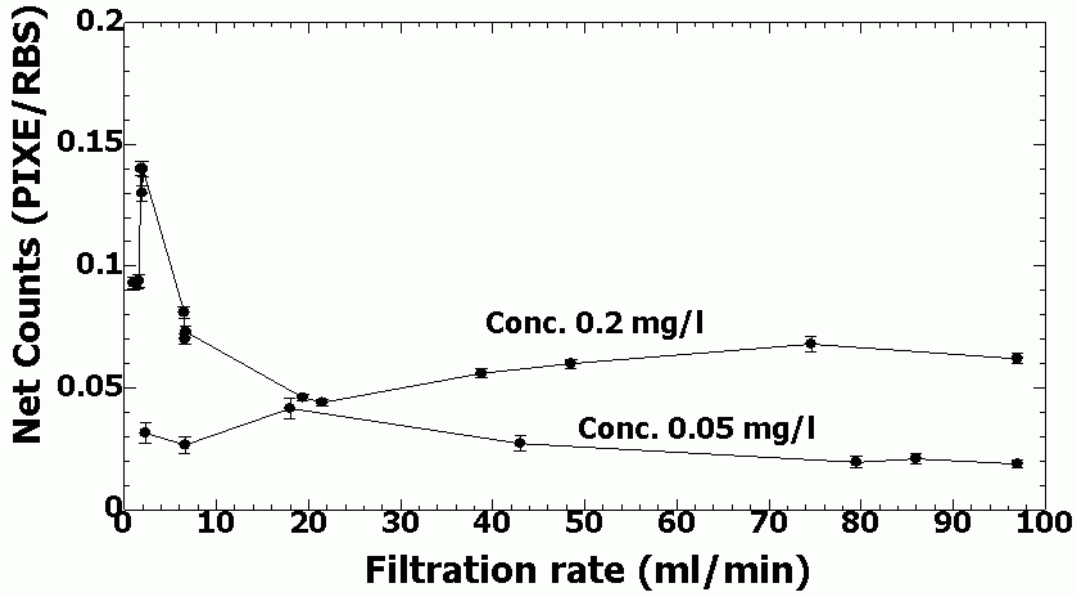


図 5：濾過速度と Cr（VI）の収集効率の関係

検出下限（Limit of Detection；LOD）は次のように評価した。
まずバックグラウンドを蒸留水を濾過した濾紙を測定して求めた。次に検出下限 LOD ≡ 3σ（σ=バックグラウンドのふらつきの標準偏差）で評価を行った。結果として、Cr（VI）に対する検出下限 =[$K_2Cr_2O_7$]□0.002mg/l であり、[Cr（VI）] □1ppb であった。一方、環境基準は 50ppb である。

5.結論

Whatman DE81–DEAE セルロース陰イオン交換濾紙は極めて効率的に 6 価クロム Cr（VI）を吸着し、乾燥させるだけで、そのまま PIXE 分析に使用できることが分かった。DE81 と P81 を使用すれば、Cr（VI）と Cr（III）の分別収集と高感度測定が簡単、迅速、安価に可能で特別な薬品も不要である。Cr（VI）の検出下限は 1ppb 程度で、環境基準の 50ppb よりも十分低いため、飲料水の分析や河川水等の環境モニタリング使用できることが分かった。

参考文献

[1]新関　隆「元素分析を利用した環境教育－研究」第 23 回 PIXE シンポジウム 12-1

P-16 日本海における放射性炭素の分布と深層循環

荒巻能史[1]、外川織彦[2]、乙坂重嘉[2]、鈴木崇史[2]、
天野光[3]、田中孝幸[2]、千手智晴[4]、皆川昌幸[5]
[1]国立環境研究所　化学環境研究領域
[2]日本原子力研究開発機構　原子力基礎工学研究部門
[3]日本原子力研究開発機構　青森研究開発センター　むつ事務所
[4]九州大学　応用力学研究所
[5]水産総合研究センター　中央水産研究所

日本海は 4 つの浅い海峡(<200m)に囲まれた太平洋の縁辺海である（図 1）ため、水深 200-300m から海底直上には、「日本海固有水」と呼ばれる水温 0.0 - 0.1 °C、塩分 34.07 psu 前後のほぼ均質な水塊が存在する。その名の示すとおり、この水塊は周辺海域には見られない日本海固有の水塊で、日本海全体の 80 % 以上を占めている。最近の詳細な観測から日本海固有水は単一の水塊ではなく、1000 m 深付近までの上部固有水、2000 m 深付近までの深層水、さらには 2000 m 以深の底層水に分類できることが分かってきた（図 2）。この日本海固有水(底層水)は、北西部表層における冬季の結氷、その融解によって密度を増した表層水が海底付近まで沈み込むことで形成しているものと推測されており、北部北大西洋で見られる深層水形成と同一の機構を持つ。一方、表層では北緯 40 度付近に南から流入する暖流と北部日本海を循環する寒流が接する亜寒帯前線が存在する。これは西部北太平洋でいうと黒潮と親潮の関係にあたる。このようなことから、日本海は「ミニチュア大洋」とも呼ばれ、海洋研究に格好の“実験場”を提供している。

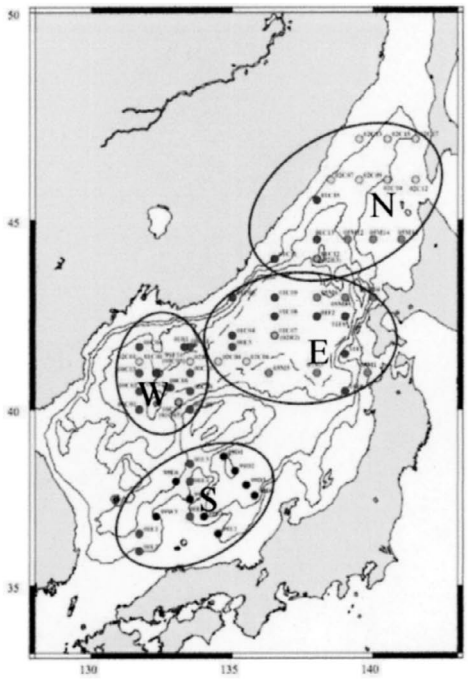


図 1　放射性炭素測定を含む観測点
N: 北部日本海　E: 日本海盆西部域
W: 日本海盆東部域　S: 南部日本海

近年、過去数十年間、底層水中の溶存酸素量が徐々に減少していることが報告され、過去の大陸沿岸冬季平均気温の上昇との関係から、この原因が温暖化によって底層水形成が停滞し、表層の豊富な酸素が深層に運ばれにくくなったためではないかと危惧されている(Gamo,1999)。これを裏付けるように、舞鶴海洋気象台よる 1960 年代からの大和海盆南部定点における底層水中の水温はわずかに上昇傾向にある(Minami *et al.*, 1999)。

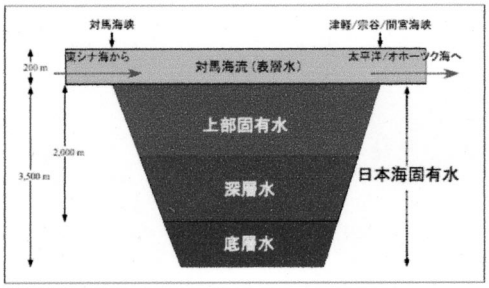


図 2　日本海の構造（模式図）

日本海における海水循環のタイムスケールはおおよそ外洋の 1/20 と推測されている。この時間スケールの差がそのまま適用される訳ではないが、日本海で現在確認されている「変化」は近い将来の海洋環境における変化を暗示していることは確実である。近年、温暖化に伴う様々な環境変動、あるいは環境影響が報告され始めたが、海洋環境への影響を評価し、対策を講じるには、まずは私たちにとって身近な日本海の変化を正確に把握してそのメカニズムを解明することが近道と言える。しかしながら、政治的背景から総合的な観測研究は皆無に等しく、深層水の形成機構や循環像など、十分な理解には至っていない。日本原子力研究所（原研、現在：日本原子力研究開発機構、以下、原子力機構）では、ロシアによる放射性廃棄物の海洋投棄を機に、1990 年代後半より日本海全域における人工放射性核種の分布調査、並びに日本海深層の物質循環について観測研究を実施してきた。そこで本研究では、これらの観測によって得られた、海水流動のトレーサーとして有効な放射性炭素(^{14}C)の広範な分布をもとに、深層水の特性やその循環について議論した。

＜観測および方法＞

観測は、ロシア側排他的経済水域については 1999-2002 年の ISTC（国際科学技術センター）パートナープロジェクト下での原研とロシア・極東水理気象研究所との共同観測、日本側排他的経済水域については 1999-2001 年の原研による科技庁/文科省の受託調査、並びに 2005 年の原研/原子力機構と中央水研との共同研究によって、合計 66 観測点で実施された。

試料は、表面から海底上約 50m までの最大 23 層、合計 1,296 試料が得られ（図 1）、放射性炭素濃度（$\Delta^{14}C$）測定のほか、同一試料中の塩分、溶存酸素、栄養塩類の測定も行った。なお、$\Delta^{14}C$ 値は原子力機構むつ事務所の加速器質量分析装置による $^{14}C/^{12}C$ 比測定を用いて算出され、その測定精度（計数誤差）は ± 5 ‰ 以下である。

＜結果と考察＞

北部日本海、日本海盆西部、日本海盆東部、及び南部日本海で海域分けした $\Delta^{14}C$ の鉛直分布を図 3 に示した。各海域とも表層の + 70 ‰ から深度とともに指数関数的に濃度を減少させる傾向にあるが、日本海盆あるいは大和海盆の水深 2000 m 以深では、- 50 ‰ から -70 ‰ の範囲でほぼ一定の値となる。この水塊は水温の一様性で定義される底層水（Gamo *and* Horibe, 1983）で、海域によって、あるいは測定数にばらつきは大きいものの、各海域におけるその平均値は、日本海盆西部、南部日本海、日本海盆東部の順に小さくなる（見かけ上の海水年齢が古くなる）。また、日本海盆西部と南部日本海の底層水の $\Delta^{14}C$ が同程度であるのに対して、日本海盆東部が約 10 ‰ 低い結果（見かけの海水年齢にして約 80 年に相当）となった。これは、もし底層水の起源が一つであると仮定するならば、その起源は北西部表層にあり、形成した底層水は沿岸域で海底まで沈み込み、日本海盆西部と南部日本海で迅速に混合するものの、東部日本海（日本海盆東部）に伝播するには比較的長い時間を要することを意味する。つまり、底層水は水深 1000m 以浅と浅い大和堆を囲むように反時計回りの循環をしているものとも推測できる。

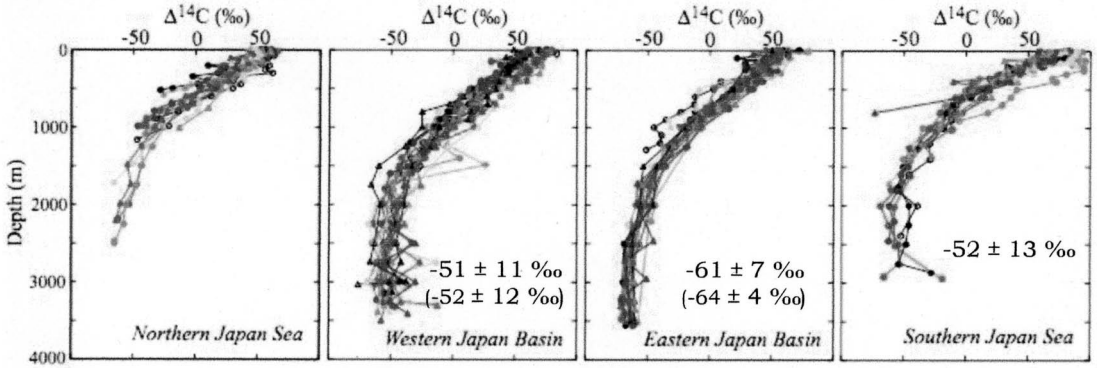


図 3　海域ごとの $\Delta^{14}C$ 鉛直分布（海域分けは図 1 参照）
図中の数字は 2000m 以深の平均値，括弧内は 2500m 以深

表 1 には底層水中 $\Delta^{14}C$ の時間的変遷を示した。値は時間とともに増加しており、核実験によってもたらされた高い $\Delta^{14}C$ を含む表層水が徐々に底層水と混合していることが分かる。一方、日本海盆の 1995 年と 2002 年で濃度の逆転（表 1 網がけ）が起こっている。これは 1995 年が日本海盆西部域で採水されたのに対して 2002 年が日本海盆東部域で採水されたことに起因しており、今回の結果と矛盾しない。また、日本海盆西部や南部日本海の底層水の $\Delta^{14}C$ にばらつきが顕著であるのに対して、日本海盆東部は水深 2500 m 以深において、1 測点を除き、誤差範囲内で一定の値を示す（図 3 参照）。これは日本海盆西部や南部日本海の底層水が、比較的 $\Delta^{14}C$ の高い、新たに形成した底層水（例えば、Senjyu *et al.*, 2001 に詳しい）の影響を受けているに対して、日本海盆東部の底層水には未だその影響

Year	Region	$\Delta^{14}C$ (‰)	Reference
Northern Basin			
1977	Japan Basin	-80 ± 8 [a]	*Gamo and Horibe* [1983]
1995	Japan Basin	-49 ± 4 [b]	*Kumamoto et al.* [1998]
2002	Japan Basin	-65 ± 5 [b]	this work
Southern Basins			
1977	Yamato Basin	-68 ± 8 [a]	*Gamo and Horibe* [1983]
1979	Northern Ulleung Basin	-74 ± 6 [a]	*Gamo and Horibe* [1983]
1987	Northern Yamato Basin	-66 ± 18 [a]	*Watanabe et al.* [1989]
1995	Yamato Basin	-60 ± 7 [b]	*Kumamoto et al.* [1998]

表 1　底層水中 $\Delta^{14}C$ の時間的変動（1977-2002）
（Aramaki *et al.*, 2007 より抜粋）

が及んでいないためではないかと推測される。しかしながら、日本海盆西部や南部日本海で底層水が迅速に混合するにもかかわらず、距離にして数百キロしか離れていない日本海盆東部へ伝播するのに数年から数十年を要するとは考えにくい。日本海盆の東西で底層水の起源が異なる、あるいは循環系そのものが異なるということはないだろうか？

図 4 には、同様に海域分けした化学成分の鉛直分布を示している。丸印（●と○）で示したプロットは、$\Delta^{14}C$ だけでなく他の化学成分についても同じようなプロファイルを与えている。さらに、底層水中の低い $\Delta^{14}C$ に対応するように、日本海盆西部および南部日本海に対して溶存酸素は低く、溶存ケイ酸塩は高くなっている。酸素は大気/表層に起源があるので溶存酸素が低いということは表層水との交換が活発ではないを意味し、溶存ケイ酸塩は海洋中の生物活動によって濃度を増すので濃度が高いということは表層から（海水が）沈み込んでからの経過時間が長いことを意味する。つまり、西部日本海（日本海盆西部および南部日本海）と日本海盆東部の間の底層水中 $\Delta^{14}C$ の平均値の差は、水塊そのものが異なることに由来するのかもしれない。ここで興味深いのは、日本海盆東部だけではなく北部日本海も同じ傾向を示す点である。北部日本海の最北部に位置する間宮海峡（タタールスキー海峡）周辺は、冬季の結氷と春先のその融解によって高密度水を形成する海域と推測されており（Martin *et al.*, 1992）、底層水形成の場としてウラジオストック沖とともに候補に挙げられている。しかしながら、Aramaki *et al.*, (2007) は、2002 年夏に間宮海峡周辺で実施した海洋調査で得られた化学成分の詳細な解析から、「当該海域では、少なくとも 2001-2002 年に、底層水の起源となるような高密度水が形成した形跡はない」と報告している。したがって、現在のところ日本海盆東部の底層水の起源が北部日本海にあるとする証拠は報告されていないが、図 4 で示したように、日本海盆東部と北部日本海の水塊が表層から海底直上まで大変よく一致していることから、北東部日本海が同一の起源からなる可能性は高く、ウラジオストック沖を起源とする西南部日本海で見つかる底層水とは起源が異なる可能性がある。

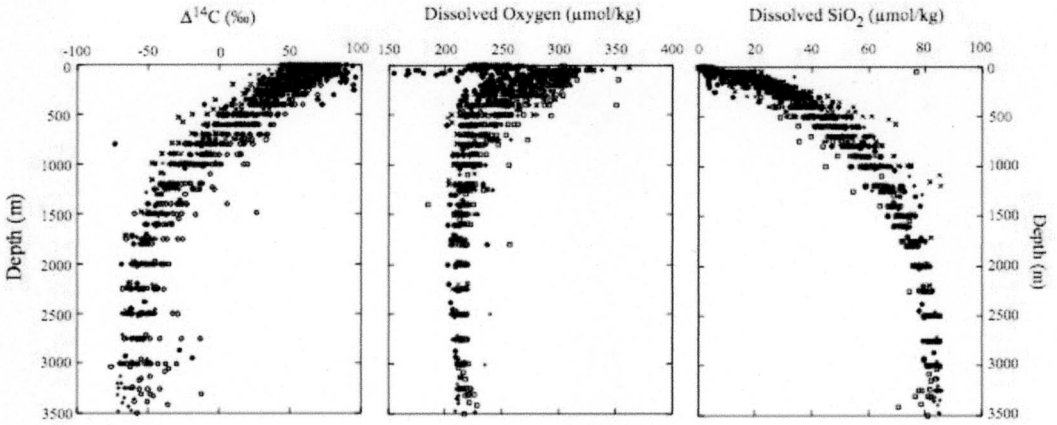


図 4　化学成分の鉛直分布（左から、$\Delta^{14}C$、溶存酸素、溶存ケイ酸塩）
●：北部日本海、○：日本海盆東部、＋：日本海盆西部、×：南部日本海

図 5 は、日本海盆の東西におけるほぼ同一地点での $\Delta^{14}C$ 鉛直分布の経年変化を示している。日本海盆西部では、新たな底層水形成が確認された 2001 年の 1 年後にあたる 2002 年に、明らかに 2000 年よりも水柱中の ^{14}C 存在量が増加したことが分かる。一方、日本海盆東部では、新たな底層水形成から 4 年が経過した 2005 年の分布と 2001 年の分布との間に差違は認められない。この結果は、仮に底層水が大和堆を迂回する反時計回りの循環を行っている場合、南部日本海から日本海盆東部へ伝播するのに少なくとも 4 年以上の時間を要することを表している。

日本海全域にわたる放射性炭素と化学成分の詳細な分布から、南西部日本海（日本海盆西部と南部日本海）と北東部日本海（日本海盆東部と北部日本海）の底層水の性質が異なることが分かった。前述のように、日本海底層水にはすでに核実験由来の放射性炭素（Bomb-^{14}C）が混入しており、外洋の深層水のように“海水の見かけの年齢”を算出することはできない。したがって、今回明らかになった底層水の相違が、（1）南部日本海から日本海盆東部まで伝播するのに数年から数十年を要するためなのか、（2）両海域の底層水の起源が異なり各々異なった循環機構を有するためなのか、判断することは難しい。しかしながら、日本海盆東部と北部日本海の水塊が表層から海底直上まで大変よく一致している事実は、（2）の可能性をうかがわせる。

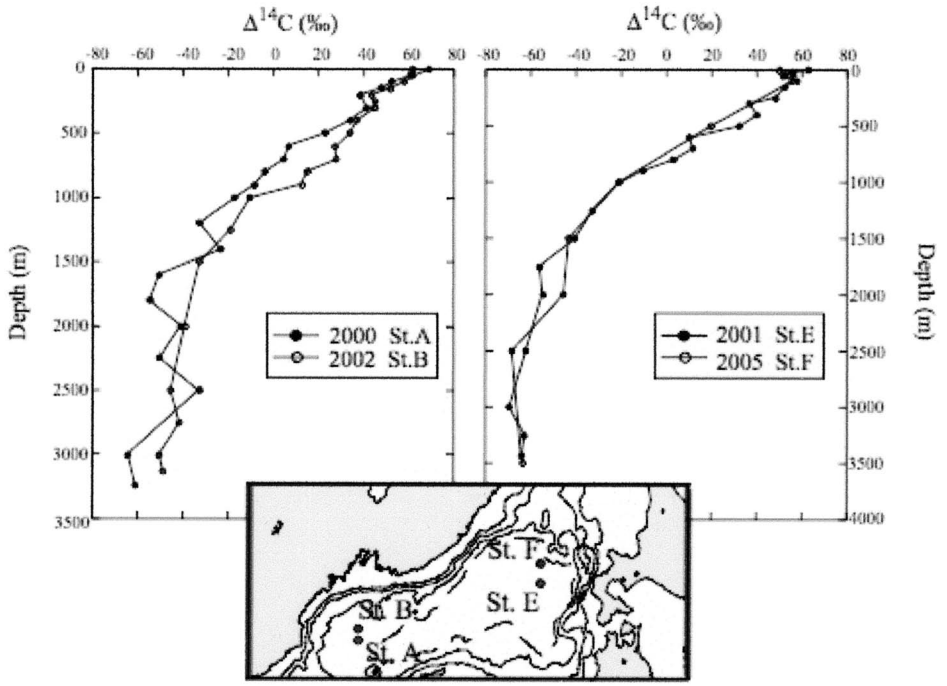


図 5　Δ¹⁴C 鉛直分布の経年変化
右図：日本海盆西部域、左図：日本海盆東部域

＜まとめ＞

日本海の海洋化学的研究では、図 2 に示したような 3 層あるいは 4 層の単純なボックスをイメージして放射性炭素やトリチウムを用いて深層水/底層水の平均滞留時間の見積もりなどが行われてきた（例えば、 Watanabe *et al.*, 1991; Kumamoto *et al.*, 1998）。さらに、日本海は政治的背景から今回のような総合的な観測を実施すること自体が難しく、結果として局所的な観測値を日本海全域の代表値として使用してきた。例えば、トリチウムによる深層水の平均滞留時間の見積もりは大和海盆と日本海盆東部のデータを使用し、約 300 年と計算されている（Watanabe *et al.*, 1991）。もし、南西部日本海と北東部日本海で異なった深層循環機構を持っているとするならば、これらの成果の一部は改訂を余儀なくされるであろう。これまで日本海を「ミニチュア大洋」として扱ってきたが、深層の循環は想像以上に複雑であり、さらなる観測研究が重要である。今回取り扱った放射性炭素測定では、すでに核実験に由来する放射性炭素が海底直上で検出されるため、各底層水の起源推定に使用できないことを説明したが、例えばヘリウムートリチウム同位体比測定、あるいは SF_6（六フッ化硫黄）などの工業活動由来成分測定は過去数十年スケールの海水流動を追跡するトレーサーとして有効だと考えられており、これらの詳細な測定やその解析を期待する。一方、前述した、過去数十年にわたる底層水中溶存酸素量の減少は日本海盆東部（Gamo, 1999）、深層水温の上昇は大和海盆（Minami *et al.*, 1999）から得られた観測事実であり、日本海が温暖化に対して脆弱な海域であることには違いない。

References

Aramaki T, Senjyu S, Togawa O, Otosaka S, Suzuki T, Kitamura T, Amano H and Volkov YN. 2007. Circulation in the northern Japan Sea studied chiefly with radiocarbon. Radiocarbon. in press.

Kumamoto Y, Yoneda M, Shibata Y, Kume H, Tanaka A, Uehiro T, Morita M and Shitashima K. 1998. Direct observation of the rapid turnover of the Japan Sea bottom water by means of AMS radiocarbon measurement. Geophysical Research Letters. 25: pp.651-654.

Gamo T. 1999. Global warming may have slowed down the deep conveyor belt of a marginal sea of the northwestern Pacific: Japan Sea. Geophysical Research Letters. 26: 3141-3144.

Gamo T and Horibe Y. 1983. Abyssal circulation in the Japan Sea. Journal of the Oceanographical Society of Japan. 39: pp.220-230.

Martin S, Munoz E and Drucker R. 1992. The effect of severe storms on the ice cover of the northern Tatarskiy Strait. Journal of Geophysical Research. 97: pp.17753-17764.

Minami H. Kato Y. and Ogawa K. 1999. Long-term variations of potential temperature and dissolved oxygen of the Japan Sea Proper Water. Journal of Oceanography. 55: pp.197-205

Senjyu T, Aramaki T, Otosaka S, Togawa O, Danchenkov M, Karasev E and Volkov Yu. 2002. Renewal of the bottom water after the winter 2000-2001 may spin-up the thermohaline circulation in the Japan Sea. Geophysical Research Letters. 29: 10.1029/2001GL014093.

Watanabe YW, Watanabe S and Tsunogai S. 1991. Tritium in the Japan Sea and the renewal time of the deep water. Marine Chemistry. 34: pp.97-108.

P−17 Diffusion of ^{8}Li short-lived radiotracer in Li ionic conductors β-LiGa and β-LiIn

Hiroyuki Sugai,[1] Masao Sataka,[1] Satoru Okayasu,[1] Shin-ichi Ichikawa,[1] Katsuhisa Nishio,[1] Shinichi Mitsuoka,[1] Takamitsu Nakanoya,[1] Akihiko Osa,[1] Tetsuya Sato,[1] Takashi Hashimoto,[1] Sun-Chan Jeong,[2] Ichiro Katayama,[2] Hirokane Kawakami,[2] Yutaka Watanabe,[2] Hironobu Ishiyama,[2] Nobuaki Imai,[2] Yoshikazu Hirayama,[2] Hiroari Miyatake,[1,2] Takanori Hashimoto,[3] Masahito Yahagi[3]

[1]Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan

[2]Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

[3]Faculty of Engineering, Aomori University, Kouhata 2-3-1, Aomori 090-0943, Japan

Keywords: ^{8}Li; short-lived radiotracer; self-diffusion coefficient; Li ionic conductors; NaTl-type intermetallic compounds; LiGa; LiIn

Abstract Non-destructive and on-line Li diffusion experiments in Li ionic conductors are conducted using the short-lived α-emitting radiotracer of ^{8}Li. The radiotracers produced as an energetic and pulsed ion beam from TRIAC (Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex) are implanted into a structural defect mediated Li ionic conductor of NaTl-type intermetallic compounds (β-LiGa and β-LiIn). The experimental time spectra of the yields of α-particles are compared with simulated results and Li diffusion coefficients in the intermetallic compounds are extracted with an accuracy of ±10%. The diffusion coefficients obtained for β-LiGa with Li content of 43-54 at.% at room temperature are discussed in terms of the interaction between Li-ion and the structural defects in the specimen, compared with the case of β-LiAl and β-LiIn. The nonlinear Li-content dependency of Li diffusion coefficients for β-LiGa suggests that the Li diffusion with Li-deficient region is obstructed by the defect complex composed of vacancies at the Li sites.

Introduction

Although the conventional radiotracer method for diffusion studies in conjunction with a serial sectioning technique [1] and the conventional non-destructive radiotracer method [2] has yielded the most accurate diffusion coefficients, radioactive isotopes for some elements have not yet been used because of no-availability of radiotracers with adequate lifetimes for the application. Among them, ^{8}Li, the radioactive isotope of Li with a half-life of 0.84s is of special interest for practical issues; how well Li ions could move during the charge- and discharge-processes in the secondary Li ion batteries. Fast Li diffusion is desirable in battery

materials, i.e. Li ionic conductors for materials of electrodes and solid electrolyte, which are under development for improving the present capability of the secondary Li ion batteries. When a proper radiotracer is not available, on the other hand, various electro-chemical methods are usually adopted for measuring the macroscopic movement of the constituents of the sample of interest [3]. Depending on the method used for the measurement, however, the diffusion coefficients are scattered over several orders of magnitude. Therefore, the diffusion coefficients measured in different ways, e.g. by using the radiotracer of Li, is highly required to settle down such disagreements, and further such an experimental knowledge on the Li diffusion as developed ingredients for the battery is of importance in the recent general efforts to design the battery by simulations based on the first principle.

The intermetallic compound β-LiAl, β-LiGa and β-LiIn belong to the same crystal structure (Zintl phase) [4] and are the attractive materials for secondary batteries owing to the high diffusivities of Li [5]. The materials contain the characteristic defect structure which is dominant for the Li diffusion and depends on the Li content. In this study, the Li diffusions in β-LiGa and β-LiIn are examined and the Li content dependency of diffusion coefficients are discussed in terms of the structural defects, i.e. vacancies at the Li sites and antisite Li atoms.

Experimental

The polycrystals of intermetallic compounds were grown by the Tammam-stöber method starting from a mixture of lithium and another metal (Al, Ga, In) in the same way reported previously [6, 7]. The surface of the sample was polished to the roughness less than 1 μm before the experiments.

Li-8 decays through β-emission to ^{8}Be with a half lifetime of 0.84s, which immediately breaks up into two α-particles with energies broadly distributed around 1.6MeV with a full width at half maximum (FWHM) of 0.6MeV. The ^{8}Li-beam of about 4MeV with an intensity of about 3000 particles/s was implanted into the implantation-depth of about 7μm from the front surface of the sample at room temperature. The α-particles coming out of the sample were measured as a function of time by an annular solid-state detector (SSD) installed close to the front surface of the sample. Based on this relative time-dependency of alpha particle yields (time dependent ratio), a diffusion coefficient was estimated by comparing with the simulation where one-dimensional Fickian diffusion was assumed. More details of the experimental procedure can be found elsewhere [8, 9].

Results and discussion

NaTl-type (Zintl phase) [4] crystal structure is composed of two interpenetrating diamond sublattices such that each atom has eight nearest neighbors: four like and four unlike atoms, as shown in Fig. 1. The characteristic defect structure [7, 10] consists of two types of defects at room temperature, i.e. vacancies in the Li sublattice (V_{Li}) and Li antistructure atoms in the Ga sublattice (Li_{Ga}). The concentrations of the point defects, [V_{Li}] and [Li_{Ga}], strongly depends

on Li compositions; with increasing the Li content from 43 to 54 at.%, [V_{Li}] decreases from 11.4 to 2.8 at.%, while [Li_{Ga}] increases from 0 to 5.1 at.%. Although V_{Li} is the dominant defect for Li-deficient compositions, Li_{Ga} is the dominant defect for the Li-excess ones.

As shown in Fig. 2, the Li diffusion coefficients of β-LiGa around the Li content of 48 at.% have maximum at room temperature. The feature is quite different from those observed for β-LiAl and β-LiIn (the Li-content of β-phase: 48-54 at.%) [10] which are iso-structural with the β-LiGa. In the case of β-LiAl and β-LiIn, the Li diffusion coefficients, the corresponding diffusion constants and activation energies decrease monotonically with increasing lithium content. Since the vacancy concentration in the Li sublattice decreases with increasing lithium content, this monotonic behavior could be associated with the vacancy concentration, i.e. the Li diffusion path is V_{Li}.

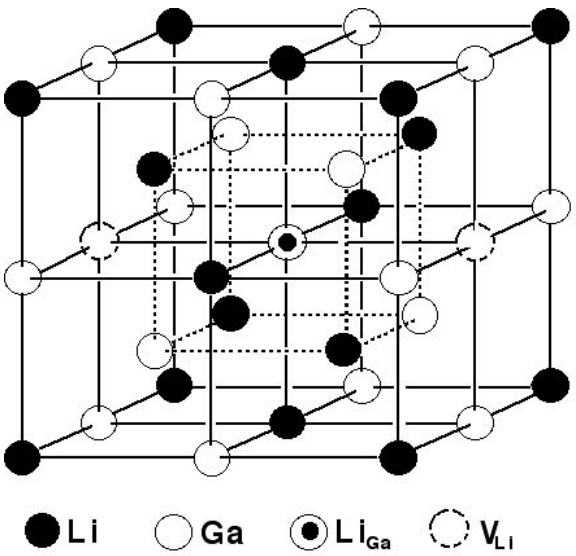


Fig. 1. Crystal Structure of NaTl type (Ref. 4) containing defects in β-LiGa (Ref. 7). A possible example of the defects complex is composed of two vacancies at the Li sites and an antisite Li atom at the Ga sites in the nearest neighbor.

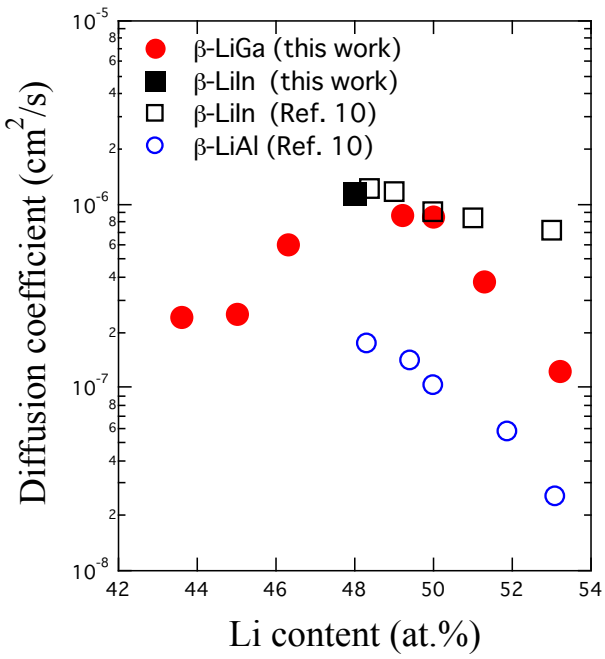


Fig. 2. Li-content dependence of the Li diffusion coefficients at room temperature for β-LiGa (this work), β-LiIn (a closed square, this work; open squares, Ref. 10) and β-LiAl (Ref. 10).

What observed in the present measurement for β-LiGa goes the other way contrary to the consideration of former paragraph for β-LiAl and β-LiIn, i.e. the Li diffusion coefficients of β-LiGa monotonically do not depend on the Li content; the Li diffusion around 48 at.% is faster than at the most Li-excess and Li-deficient compositions. This suggests that the motion of Li ion for the Li-deficient composition could be quenched by the formation of the defects complex such as V_{Li}-Li_{Ga}-V_{Li} and/or V_{Li}-V_{Li}. The reason why is that the concentration of V_{Li} defects is much (almost three times) larger in the Li-deficient side as compared to the case of

β-LiAl and β-LiIn; a pair of vacancy is stable energetically than a single vacancy [11], furthermore, V_{Li} and Li_{Ga} are easy to make the V_{Li}-Li_{Ga}-V_{Li} and/or V_{Li}-Li_{Ga} complex [7] owing to the atomic size effect to relax the lattice strain as mentioned in the case of β-LiAl [10, 12] because the Li ion radius is a little larger than the Ga ion's. It should be noted that the number of vacant Li sites in a unit cell volume (8 for Li and 8 for Ga) is about two for the most Li-deficient β-LiGa [7], whereas there exist about one vacant Li site in every two unit cells for the most Li-deficient β-LiAl and β-LiIn [10] by assuming the random distribution of the vacancies over the entire volume.

In summary, we measured the Li diffusion coefficients in the intermetallic compound β-LiGa as a function of the Li content of 43-54 at.%. The Li content dependency of diffusion coefficients showed a convex shape and a maximum around 48 at.% Li. The feature of the Li diffusion coefficients suggests that the Li diffusion with Li-deficient region is obstructed by the defect complex composed of vacancies at the Li sites.

References

[1] F. Wenwer, A. Gude, G. Rummel, M. Eggersmann, T. Zumkley, N.A. Stolwijk and H. Mehrer: Meas. Sci. Technol., Vol. 7 (1996), p. 632.

[2] For example, H. Sugai: Solid State Ionics, Vol. 177 (2007), p. 3507.

[3] H. Sato, D. Takahashi, T. Nishina and I. Uchida: J. Power Sources, Vol. 68 (1997), p. 540.

[4] E. Zintl and G. Brauer: Z. Phys. Chem. Abt., Vol. B 20 (1933), p. 245.

[5] C.J. Wen and R.A. Huggins: J. Electrochem. Soc., Vol. 128 (1981), p. 1636; J. Saint, M. Morcrette, D. Laucher and J.M. Tarascon: Solid State Ionics, Vol. 176 (2005), p. 189.

[6] M. Yahagi: J. Cryst. Growth, Vol. 49 (1980), p. 396.

[7] K. Kuriyama, H. Hamanaka, S. Kaido and M. Yahagi: Phys. Rev., Vol. B 54 (1996), p. 6015; K. Nakamura, K. Motoki, Y. Michihiro, T. Kanashiro, M. Yahagi, H. Hamanaka and K. Kuriyama: Faraday Discussions, Vol. 134 (2006), p. 343.

[8] S.C. Jeong, TRIAC collaboration: Nucl. Instr. and Meth., Vol. B 230 (2005) p. 596.

[9] S.C. Jeong, TRIAC collaboration: Journal of Phase Equilibria and Diffusion, Vol. 26 (2005), p. 472.

[10] J.C. Tarczon, W.P. Halperin, S.C. Chen and J.O. Brittain: Mater. Sci. and Eng., Vol. A 101 (1988), p. 99.

[11] For example, J.I. Pankove: Optical Process in Semiconductors (Dover, New York, 1971), Chap.1.

[12] H. Sugai, M. Tanase, M. Yahagi, T. Ashida, H. Hamanaka, K. Kuriyama and K. Iwamura: Phys. Rev., Vol. B 52 (1995), p. 4050.

P-18　測定条件が pMC 及び δ ^{13}C 測定値に与える影響の検討

齋藤龍郎、西澤章光[*1]、鈴木元孝
独立行政法人日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門
*1　株式会社ペスコ

1. 概要

加速器質量分析装置 JAEA-AMS-TONO の測定時における調整用パラメータ応答特性を明らかにすることを目的として、測定条件の調整に使用する様々なパラメータを変えたとき、pMC 及び δ ^{13}C の測定値にどの程度影響を与えるかを検討する試験を行ったので、その結果を報告する。

2. JAEA－AMS－TONO について

JAEA-AMS－TONO は National Electrostatics Corporation 製の加速器質量分析装置であり、最大加速電圧は 5.0MV、最大電流 1μA のスペックを持つタンデム型イオン加速器である。現状では主に炭素イオンを4価で加速して測定している。入射電磁石により、炭素同位体を加速器本体に導入する前に選別する、逐次加速方式を採用している。

今回の報告にあたり、測定条件を調整するパラメータとして、以下の3つを選択した。

（1）　GVM 電圧
（2）　加速器出口の XY ステアラ
（3）　ホイール位置調整部

JAEA-AMS-TONO 模式図と本研究で検討したパラメータ を、図 1 に示す。

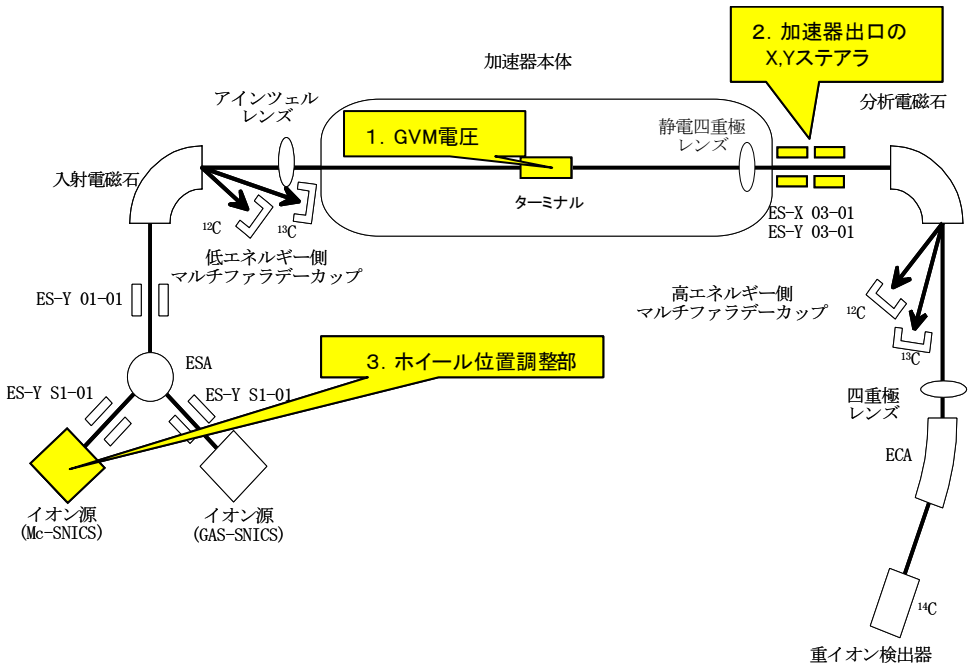


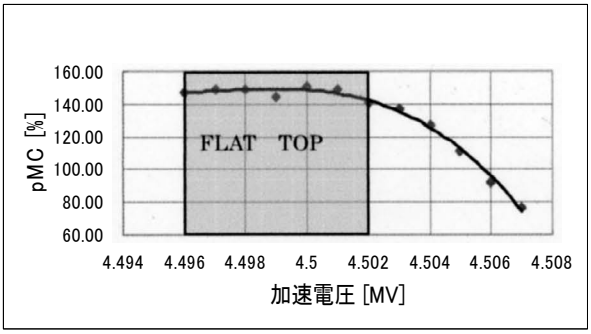
図 1：　JAEA-AMS-TONO 模式図と本研究で検討したパラメータ

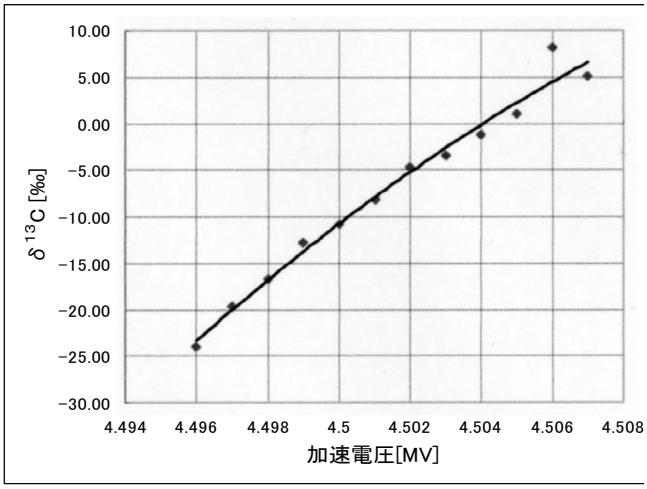
3. 測定結果

上述の3つのパラメータを変化させて、pMC 及び $\delta^{13}C$ の測定を行った。

(1) GVM 電圧

測定時間を GVM 電圧がほぼ一定とみなせる短時間として 600cycle とし、測定する GVM 電圧の範囲には 4.495～4.510MV 間をとり、1kV ずつ増加させて測定した。測定対象には、IAEA－C6 を用い、4.5MV における測定値を基準とした pMC 及び $\delta^{13}C$ の測定結果を図 2 及び図 3 に示す。





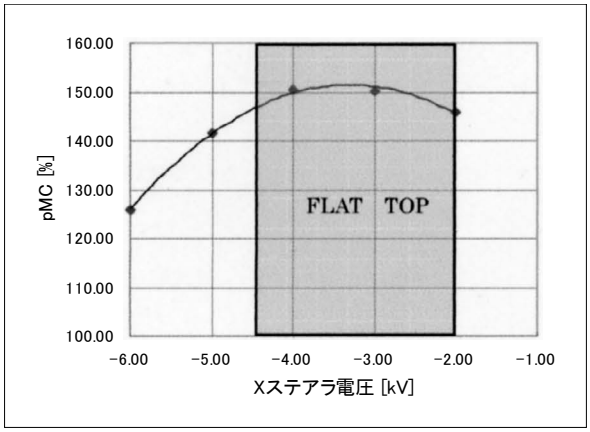
↑図 2： pMC の加速電圧依存性

→図 3： $\delta^{13}C$ の加速電圧依存性

pMC は 4.502MV までは FLAT TOP を保ち、それ以上の電圧では減少したが、$\delta^{13}C$ は常に増加した。

(2) 加速器出口の X、Y ステアラ

測定時間を GVM 電圧と同じく 600 cycle とし、測定する X、Y 各ステアラの電圧範囲としては、-2～-6kV として、1kV 刻みでプロットした。測定対象には、IAEA-C6 を用いた。pMC 及び $\delta^{13}C$ の測定結果を X ステアラについて-4kV における測定値を基準として図4及び図5に、Y ステアラについて-5kV における測定値を基準として図6及び図7に示す。



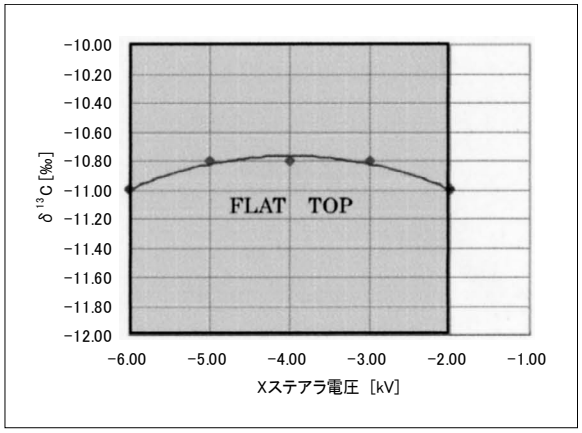


図 4： pMC の X ステアラ依存性　　図 5： $\delta^{13}C$ の X ステアラ依存性

pMC は X、Y ステアラがともに-4kV で最大値となった。$\delta^{13}C$ については、X ステアラでは FLAT TOP が認められたが、Y ステアラでは印加電圧の減少に伴って増加し、FLAT TOP は認められなかった。

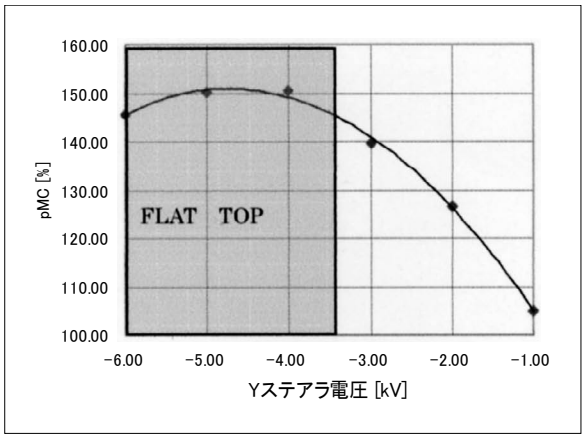


図 6： pMC の Y ステアラ依存性

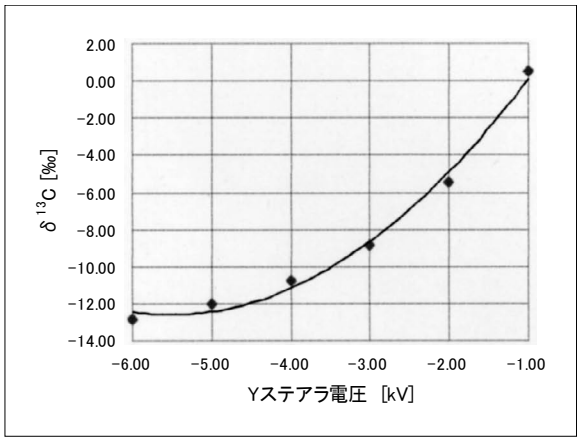


図 7： δ13C の Y ステアラ依存性

(3) ホイールの位置調整

ホイール位置調整ネジ3本(下、右、左)を変化させたときの、pMC 及び δ13C に対する依存性を確認するため、標準試料(NIST-OXII)による測定を行い、標準値(pMC:134.07%、及び δ13C:-17.8‰)と比較した。測定結果を図8及び図 9 に示す。

測定条件（図8、図9共通）
- 試料： NIST-OXII
- GVM電圧： 4.2MV
- Cycle数： 6000
- 測定回数： 2

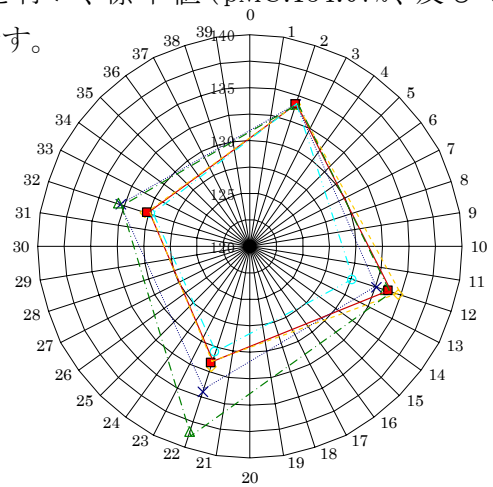


図 8：pMC のホイール位置調整依存性

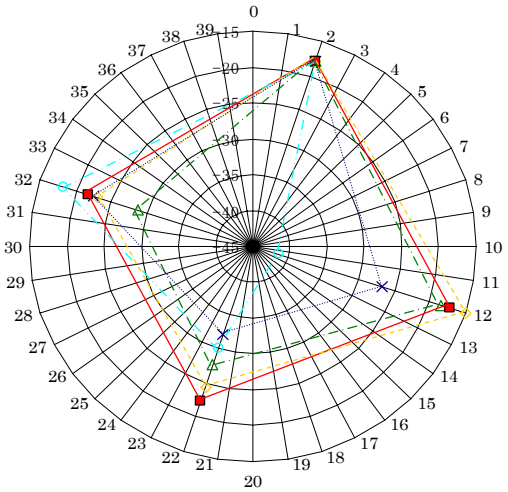


図 9： δ13C のホイール位置調整依存性

半径軸：pMC[%]、 δ13C[‰]
接線軸：試料装填位置

記号	調整方向 下,	右,	左
×	−3.0,	0.0,	1.5
○	−3.0,	10.0,	−8.5
△	−3.0,	−3.0,	−1.5
◇	0.0,	−1.5,	0.0
■	0.0,	0.0,	0.0

測定結果により、ホイール位置調整ねじ3つの調整は、pMC 及び δ13C のホイール装填位置における測定値バランスに反映され、ホイール装填位置が異なる同一試料の pMC 及び δ13C が不均一になることが確認された。

3. 結論および考察

今回の測定結果から、JAEA-AMS-TONO の測定時における特性について知見を得ることができた。δ ^{13}C 測定値と pMC 測定値の装置調整用パラメータを変えたときの応答曲線が一致しないこと、とくに GVM 電圧および Y ステアラ調整について δ ^{13}C 測定値の FLAT TOP が無いことについては今後の検討が必要であるが、^{14}C と ^{13}C でビームの軌道が異なっている可能性がある。想定される原因のひとつにビームラインの Y 方向軸がずれて、年代測定に必要な ^{14}C 測定を最適化した軌道においては、^{13}C 測定条件として同時には最適化されておらず、^{12}C、 ^{13}C の一部が測定器に到達していないことが考えられる。下に挙げた図 10 は、IAEA-C1、 C2、 C5 および NIST-OXII の δ ^{13}C（異なる標準試料の比較対照のため、測定値と推奨値の差）を、ホイール位置調整ネジ 0, 0, 0 の条件で、同じビームの加速前と加速後を 600cycle で測定した結果である。加速前と加速後でビームが絞り込まれ、測定値と推奨値の差が縮まる反面、測定値の特性が変わっていることが分かる。計数効率を良くするため、装置のビームラインアラインメントを実施する計画を立てている。

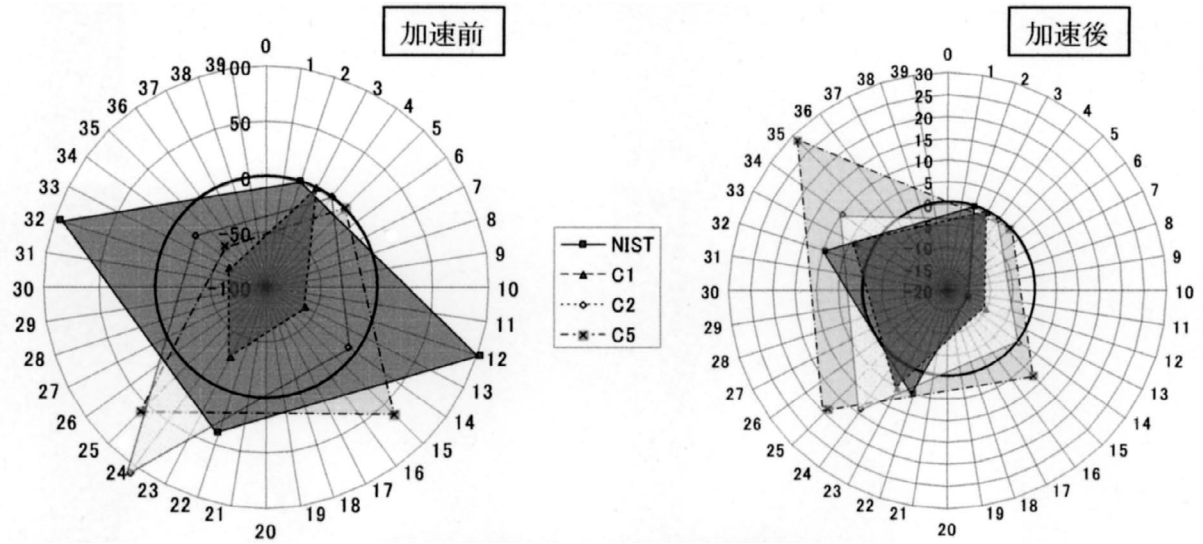


図 10：加速前後の δ ^{13}C 測定結果比較

また、カソードの位置調整が正しいかどうか、測定後のカソードを顕微鏡で確認するために、ホイール調整ネジ 0, 0, 0 での測定（6000cycle、 7run）での顕微鏡撮影を行った。位置調整が偏っているとカソードの試料充填部周りに削れや変色が見られるはずであるが、写真では削れ等は見られず、位置調整に大きな偏りはないと考えられる（図 11）。

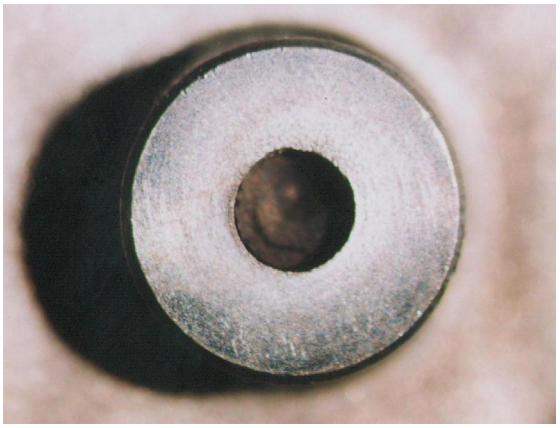


図 11： 測定後のカソードの顕微鏡写真（NIST-OXII）

P-21

分子レベル^{14}C測定による都市微小大気エアロゾル中燃焼由来汚染化学物質(PAHs)の起源推定

内田昌男（環境研）、熊田英峰（東京薬科大）、佐久間英輔（東京薬科大）、
藤原祺多夫（東京薬科大）、柴田康行（環境研）

多環芳香族炭化水素(PAH、図1)は燃焼によって発生する主要な大気汚染物質のひとつで、発ガン性や変異原性を示す化合物が含まれる。人体への影響が懸念されるベンゾ[a]ピレンなどの高分子 PAH は、大気中に浮遊する粒子(エアロゾル)に高濃度で存在し、エアロゾルが持つ変異原性の主要因とされている。人間が呼吸すると細かい粒子ほど肺の奥まで侵入して呼吸器疾患の原因となりやすいので、微細エアロゾルに含まれる PAH の発生源を定量的に識別することが求められている。本研究では、炭素の発生源を識別する指標として放射性炭素同位体に着目した。^{14}C は約 5730 年の半減期を持つため、化石燃料には含まれないが、現在の植物が光合成によって生成した有機物は現在の大気中 CO_2と同じ炭素14含有量を示す(現代炭素)。この性質を利用すれば、化石燃料と現在の植物(バイオマス)からの寄与を定量的に識別できる*。環境中の PAH の ^{14}C を測定して発生源を識別する試みはこれまでにもなされているが、^{14}C 測定に必要な炭素量の制約から、現在の大気中の、それも微細エアロゾルに含まれる PAH のみについて、解析を行った前例はない。今回、炭素の重さに換算して 10ー20μg という極微量スケールでの高精度な ^{14}C 測定技術[1]を用いることで、微細エアロゾルに含まれる微量 PAH について、定量的に発生源を識別することが可能となった。近年の気候変動や人間活動域の拡大は、バイオマス燃焼(森林／草原火災)の頻度や規模を地球規模で増大させている。また、現在国内で廃棄される，農業廃棄物や下水汚泥などのバイオマス系物質は、重量ベースで化石燃料の輸入量の1割に相当する。これらのバイオマス炭素資源は、余分な CO_2 の発生を引き起こさないエネルギー源として地球温暖化対策の観点から注目されており、今後使用量の増加が見込まれる。これらはいずれも、PAH による大気汚染の起源としての、バイオマス燃焼の重要性を増大させていく要因となる。このような状況下で主要な燃焼由来汚染物質である PAH の発生源を化石燃料由来とバイオマス炭素由来とに識別する事は、極めて重要な課題である。2002 年 12 月ー2004 年 6 月にかけて東京都八王子市にある多摩丘陵において、およそ6万ー15万 m^3 の大気を吸引して粒径 10μm 以下(PM_{10})と粒径 1.1μm 以下($PM_{1.1}$)の微細エアロゾルを採取し、PCGC(分取キャピラリーガスクロマトグラフ)システムを用いて、各種の PAHs を分取、精製し(図2)、最終的に PAH の構成炭素の現代炭素含有率を解析した。その結果、PM_{10} だけでなく、肺胞内へ到達可能な PM1.1 に含まれる PAH でも 21ー46%の現代炭素を含むことが分かった(図3)。これは、現在生育中の植物バイオマスからの寄与に換算すると、2ー4割に相当する(図4)。この割合は、エネルギー受給割合など統計値から推定されるバイオマス／化石燃料の燃焼比率(ー2%)に比べて著しく高い。また、この解析からバイオマス燃焼由来 PAH が冬期の PAH 濃度の上昇に対して3割程度寄与していることも明らかとなった。

＊大気エアロゾル中PAHsの発生源を識別する方法(ソースアポーショニング)
化石燃料を含む有機物の燃焼由来PAHsは、全く^{14}Cが含まれないのに対し（$\Delta^{14}C_{free}$=-1000‰）、現在生育する植物を含めたバイオマス燃焼由来PAHsは、光合成により炭素固定した際の大気中^{14}C 濃度（Δ^{14}C=->0‰、これを現代炭素（modern carbon）と呼ぶ）を反映することから、

この性質を利用して２つのソースから生成されるPAHsの発生源推定（以下、ソースアポーショニング、SRと呼ぶ）が可能である。以下にPAHを例にソースアポーショニングの計算方法を示す。

$$\Delta^{14}C_{PAH}=(\Delta^{14}C_{BIOMASS})(F_{BIOMASS})+(\Delta^{14}C_{FOSSIL})(1-F_{BIOMASS}) \quad (1)$$

$\Delta^{14}C_{PAH}$:サンプルのPAHの14C濃度、$\Delta^{14}C_{BIOMASS}$：現在の大気中14C濃度を反映するバイオマスの^{14}C濃度（225‰、1990年代の植物の$\Delta^{14}C$の平均値），$\Delta^{14}C_{FOSSIL}$:-1000‰、$F_{BIOMASS}$、$1-F_{BIOMASS}$：バイオマス、化石燃料由来PAHの相対的な割合を表す。

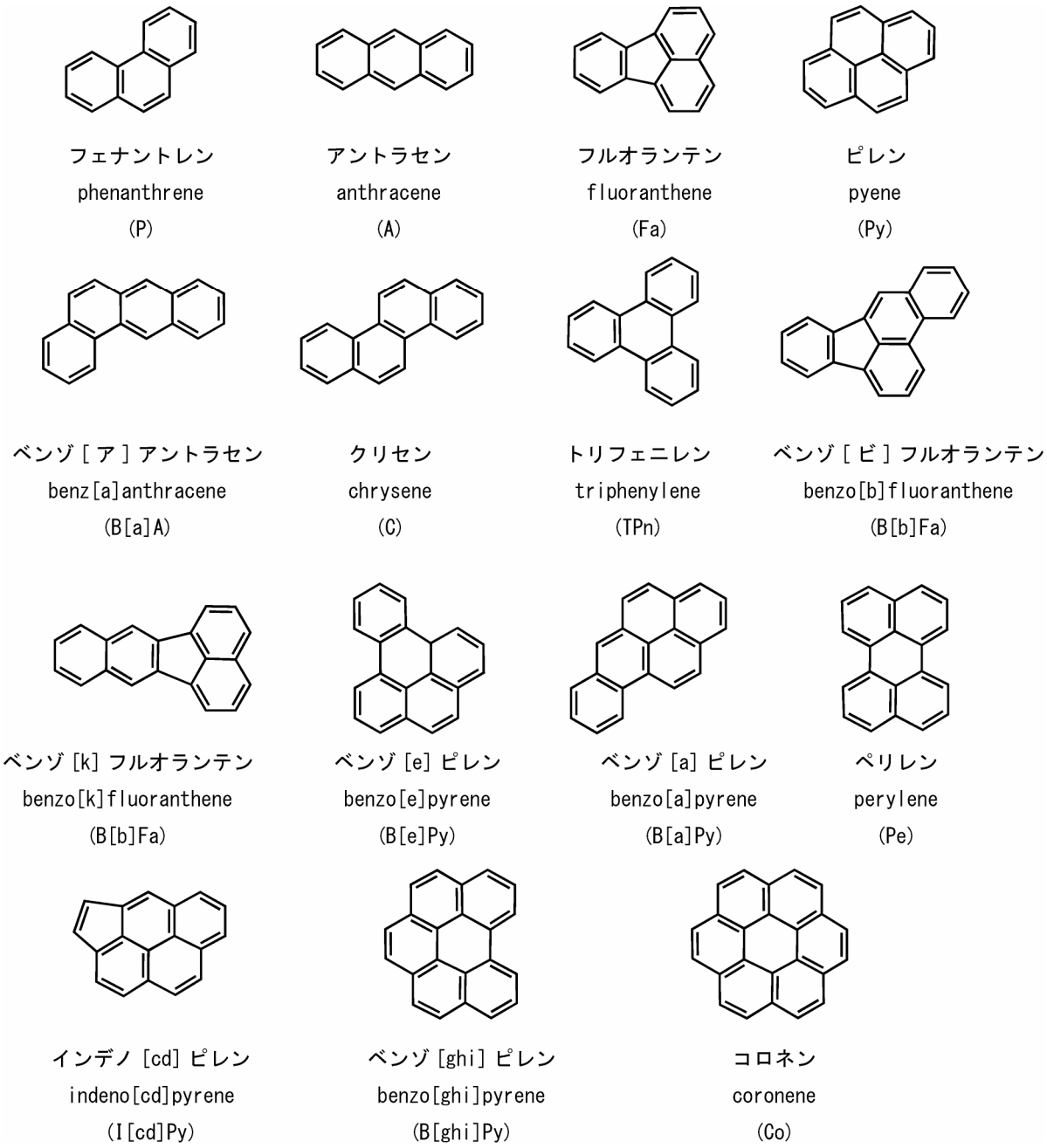


図1　各種 PAH の構造式

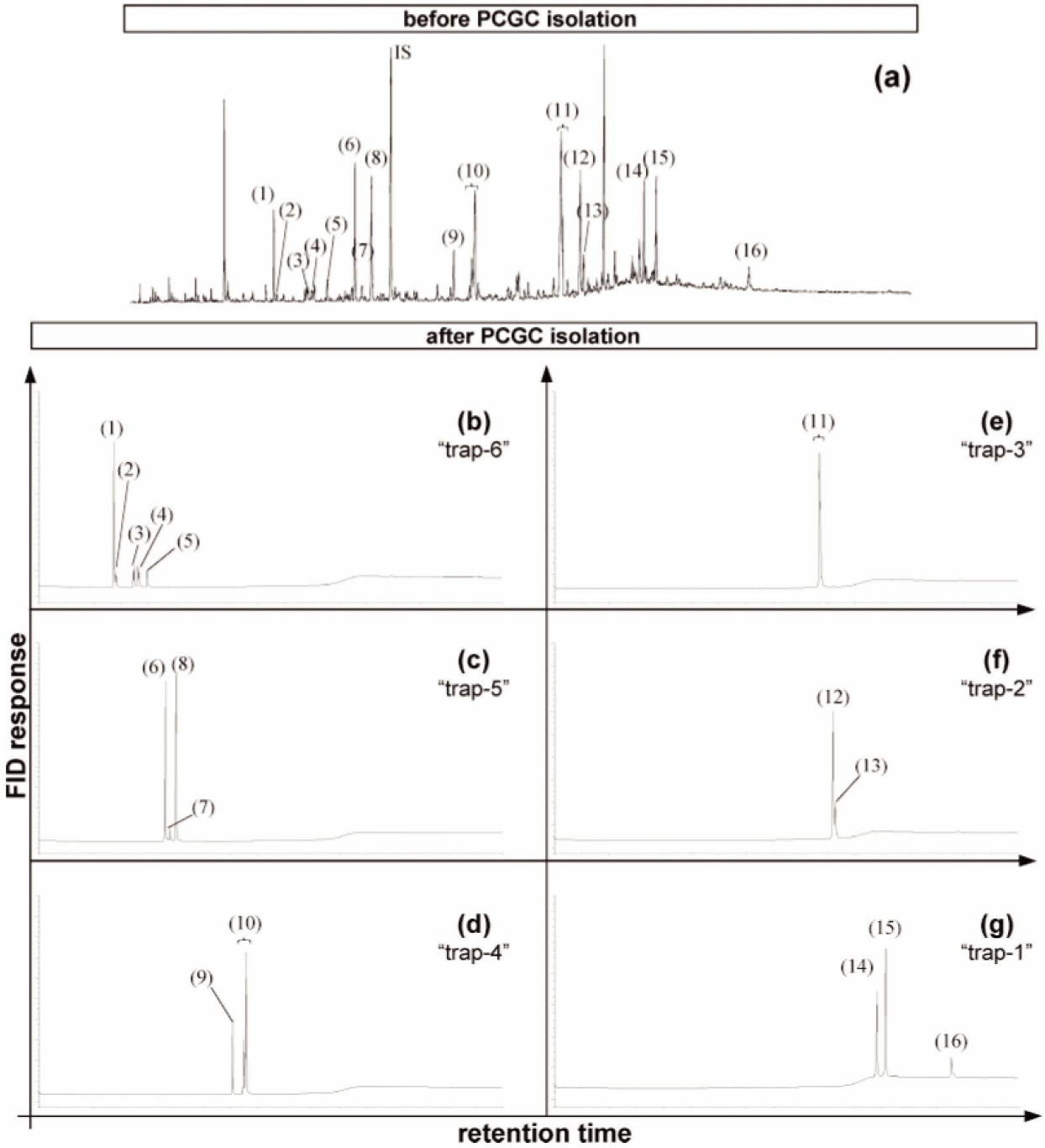


図2 PCGC システムによる PAH 化合物の分取前(a)と分取後(b−g)のクロマトグラフ例、
各ピークの PAH 名；(1) phenanthrene, (2) andthracene, (3) 3-/2-methylphenanthrene, (4) 9-/1-methylphenanthrene, (5) 2-phenylnaphthalene, (6) fluoranthene, (7) acephenanthrylene, (8) pyrene , (9) benzo[ghi]fluoranthen, (10) cyclopenta[cd]pyrene/benz[a]anthracene/chrysene/triphenylene, (11) benzo[b+j+k]fluoranthene, (12) benzo[e]pyrene, (13) benzo[a]pyrene, (14) indeno[1,2,3-cd]pyrene, (15) benzo[ghi]perylene , (16) oronene

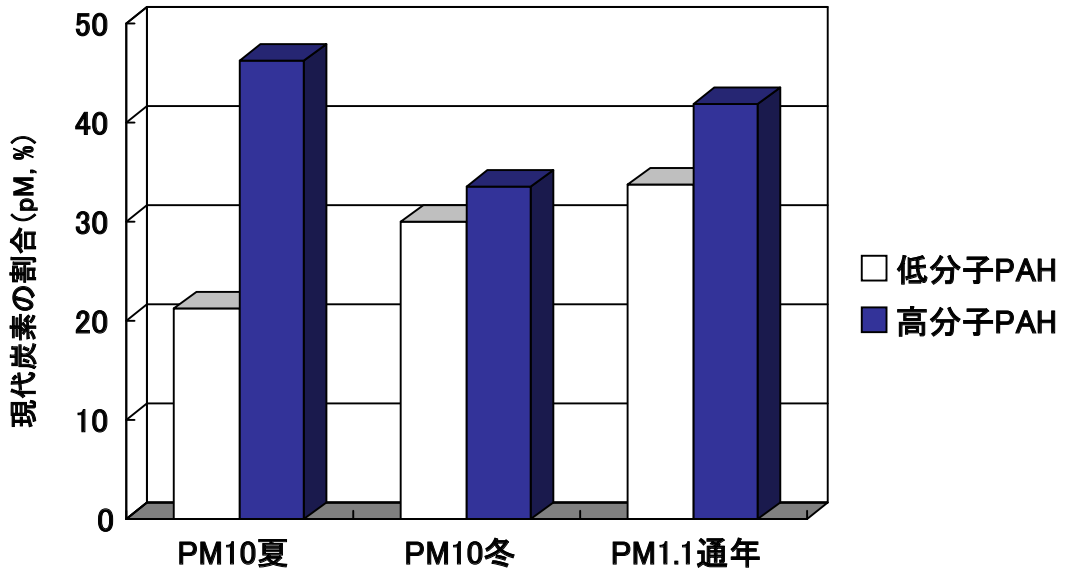


図 3 $PM_{1.1}$、PM_{10} エアロゾル中 PAH の ^{14}C の測定結果、低分子 PAHs、高分子 PAHs は、それぞれ図 2 中(1)ー(10)、(12)ー(17)の分子を指す

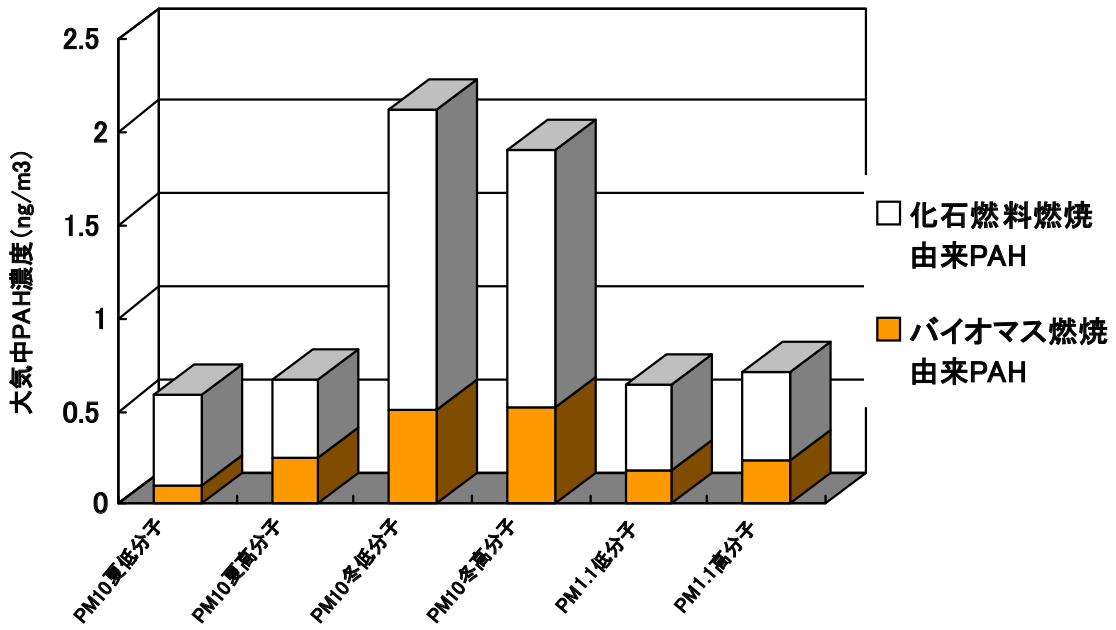


図 4 エアロゾルに含まれるバイオマス燃焼由来と化石燃料燃焼由来 PAH の濃度

[参考文献]

１．Uchida M., et al.,(2004) Technical progress of microscale radiocarbon analysis, Nuclear Instruments and Material Methods in Physical Research-B 223-224, pp.313-317.

２．内田昌男（分担執筆） 第五版実験化学講座 20-2 環境化学 3.4.5 項 「GC-AMS によるバイオマーカー分析」pp.433-442, 丸善

3. Kumata, H., M. Uchida, Y. Shibata et al., Compound specific radiocarbon analysis (CSRA) of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in fine organic aerosols from residential area of suburb Tokyo.(2006) Environmental Science and Technology. 40, 11, pp.3474-3480.

P-22　最終退氷期十勝沖海底コアに記録された海底下メタンハイドレート湧出現象

内田昌男（環境研）、大串健一（神戸大）、稲垣史生（海洋研究開発機構）、
石村豊穂（北大）、角皆潤（北大）、柴田康行（環境研）

グリーンランドアイスコアの酸素安定同位体比の記録から、過去９万年間に22回、数百年規模での急激な温暖化が起きたことが報告されている。これらの数百年~数千年周期で繰り 返す突然かつ急激な変動はDansgaard-Oeschger cycle（以下,「D -Oサイクル」 という）と呼ばれている。D-Oサイクルは,わずか数十年以内に起こる急激な温 暖化,徐々に寒冷化しつつ数百年~数千年間継続する温暖期,数百年以内に起こる急激な寒冷化,数百年~数千年間継続する寒冷期の繰り返しであり、全球的現象である可能性が指摘されている。これらの急激な気候変動の要因は、①地球に入る日射量に影響する太陽活動、②温室効果に大きく影響する二酸化炭素量,水蒸気量,メタンガス等の大気組、③大気,海洋,陸面,雪氷等のサブシステム同士の相互作用、等が考えられるが、特に①の影響が最も大きいと言われている。特にD/Oサイクルとの関連すると考えられる太陽活動周期としては、約2,300年の顕著な周期があるといわれており（Damon and Sonett, 1991）,これは、グリーンランド氷床の酸素同位体比の解析から求められる卓越周期2,550年（Dansgaard et al., 1984）と調和的であり,D-Oサイクルの原因の一候補として考えられている。D-Oサイクルにおける急激な温暖化は、海洋- 大気に様々な影響を与えていると考えられる。本研究で扱う過去の温暖期（氷床融解期における）における海底下メタンハイドレート層の不安定化は、まさに急激な温暖化のトリガーもしくは、温暖化の正のフィードバックとなった要因の一つであったかもしれない。現在、極域も含めた大陸縁辺部の海底下には、大量のメタンハイドレート層が存在する。その量は、化石燃料に換算して既知の天然ガス、石油、石炭の総埋蔵量の２倍以上（炭素換算）に相当することが分かっている。これらのメタンリザーバーが何らかの原因によって不安定化し、メタンハイドレート層由来のメタンが大量に大気へと放出され、温暖化を加速させたのではないかとの仮説（クラスレートガン仮説、Kennett, 2000）が提唱されている。最近、日本周辺を含めた北西太平洋の縁辺域の海底探査によっても、莫大な量のメタンハイドレートの存在が明らかにされている。日本周辺でも、これまでクラスレートガン仮説を示唆する結果が、下北半島沖、水深1366mにおいて、最終氷河期の温暖期に相当する25400年前（Interstadial 3）に見つかってる。これらの証拠は、有孔虫化石並びにメタン酸化細菌細胞膜脂質由来バイオマーカー（ジプロプテン）の炭素安定同位体比の解析から明らかにされた（Uchida et al., 2004, G-cubed, Ohkushi et al., 2005, G-cubed）。現在メタンハイドレートの宝庫ともいえる北西太平洋大陸棚域が、過去にメタン放出という形で汎世界レベルの急激な温暖化と密接に連動していた可能性があり、今後メタンハイドレートの崩壊と過去の急激な気候変動との関係を解明することは極めて重要な課題である。

本研究では、海洋研究開発機構所有船舶「みらい」MR01-K03 航海により十勝沖水深 1066m で採取されたコアについて有孔虫化石の炭素安定同位体比、^{14}C 分析を行った（図１）。研究の結果、氷床退氷期（21.5-17kyrs）に相当する層準から炭素同位体比異常を示す多数の有孔虫化石が見つかった（図 2）。これらの炭素安定同位体比異常とメタンハイドレート由来メタンとの関連性を調べるため、同位体異常有孔虫化石について ^{14}C 分析を行った。その結果、同位体比異常有孔虫化石の ^{14}C 年代は、ノーマルな有孔虫化石に比べて 600 年から 2000 年古いことが分かった（図 3）。これは、同位体比異常有孔虫化石が、メタンハイドレート由来炭素（^{14}C-free）の影響を受けていることを示唆するものである。さらにΔ^{14}C とδ^{13}C の測定結果を用いて同位体マスバランスモデル（式(1)ー(3)）による計算を行った。

$$F_{\mathrm{seawater}} + F_{\mathrm{methane}} = 1 \tag{1}$$

$$F_{\mathrm{seawater}}\Delta^{14}\mathrm{C}_{\mathrm{seawater}} + F_{\mathrm{methane}}\Delta^{14}\mathrm{C}_{\mathrm{methane}} = \Delta^{14}\mathrm{C}_{\ \mathrm{anomaly\ foram.}} \tag{2}$$

$$F_{\mathrm{seawater}}\delta^{13}\mathrm{C}_{\mathrm{seawater}} + F_{\mathrm{methane}}\delta^{13}\mathrm{C}_{\mathrm{methane}} = \delta^{13}\mathrm{C}_{\mathrm{anomaly\ foram.}} \tag{3}$$

上式において、F_{seawater} と F_{methane} は、同位体異常有孔虫を構成する炭素のうち、それぞれ海水中全炭酸、メタン由来の割合を表す。

同位体比異常有孔虫化石は、最大で 22%の ^{14}C-free の炭素からなることが分かった。またそれらの炭素同位体比は、ノーマル有孔虫の炭素同位体比が、0‰前後であるのに対し、-40～-100‰もの値をもつことが明らかとなった。これらの値を持つ炭素源は、現在自然界では、メタン（微生物起源・熱分解起源）のみと考えられる。本結果は、世界で初めて同位体比異常有孔虫化石の炭素源をΔ^{14}C を用いて定量的に検討したケースである。本研究海域では、現在広範囲にわたってメタンハイドレート層が存在していることが見つかっている。したがって，北西太平洋域が最終氷河期にメタンハイドレート層由来のメタン放出が頻発していた地域であったかもしれない。メタンハイドレート層の不安定化の原因となるメカニズムについては現時点では未解明であるが、海水準の低下による圧力低下はメタンハイドレート層の不安定化する要因の一つとして考えられている。本海域でメタン放出のあった時代は、現在と比べて海水準の低下（100m 以上）が顕著であった時代に相当している。したがって，海水準の低下による圧力低下が存在し、さらに二次的な不安定化要因がさらに作用したことによりメタンハイドレート層が不安定化した可能性がある。その一つとして、本海域は、大規模なプレート境界型地震が頻繁に発生する海域にあるため、地震による海底地滑りや断層の形成・移動などによって、メタンハイドレート層の不安定化を招いたとも考えられる。さらに本研究において発見された時期は、最終氷河期から現在の気候システムへと地球の気候がダイナミックに推移する時期に相当することから、海洋環境変動と密接に関連したグローバルな気候変動とも多いに関連があることが考えられるだろう。

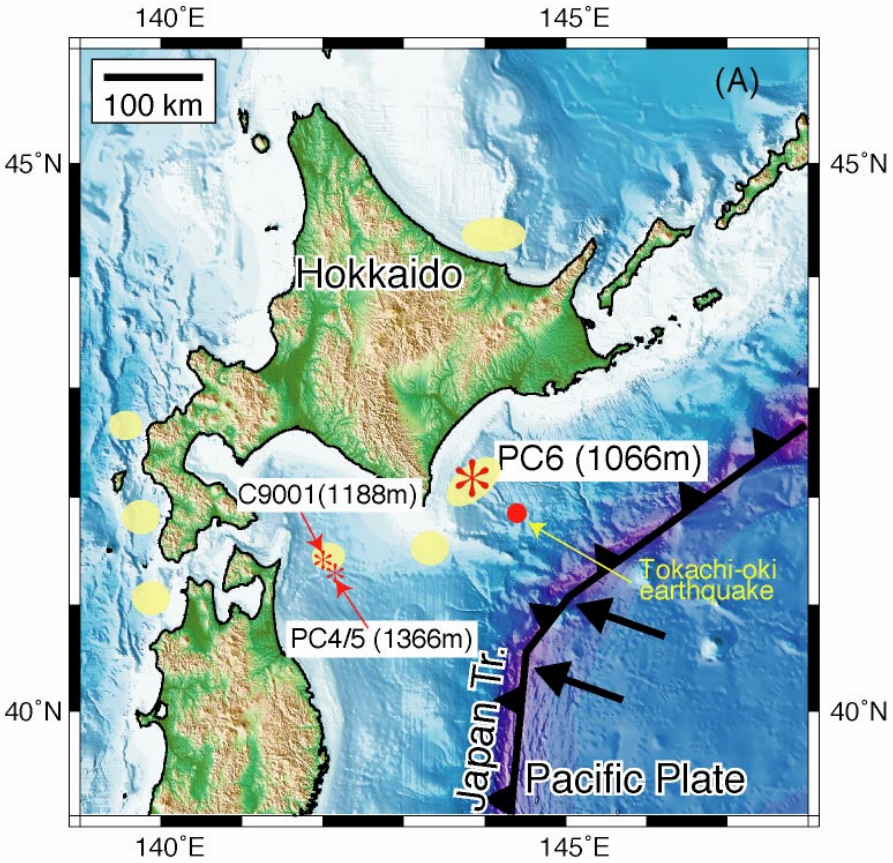


図１　コア採取地点と物理探査によりメタンハイドレート層が存在が認められる海域（黄色のハッチ部分）

参考文献

(1) Uchida,M., K.Ohkushi, K. Kimoto, F. Inagaki, T. Ishimura, U. Tsunogai, T. TuZino, Y. Shibata, Radiocarbon-based carbon source quantification of anomalous isotopic foraminifera in glacial sediments in the western North Pacific. *Geochemistry,Geophysics,Geosystems (G-cubed)*. in press.

(2) Ohkushi, K., N. Ahagon, M. Uchida, and Y. Shibata, Foraminiferal isotope anomaly from northwestern Pacific marginal sediments. (2005) *Geochemistry, Geophysics, Geosystems (G-cubed)*. Vol. 6, No. 4, Q04005 doi:10.1029/2004GC000787.

(3) Uchida, M., Y. Shibata, K. Ohkushi, N. Ahagon,M. Hoshiba, Methane hydrate instability signals in Northwest Pacific during Last Glacial rapid warming change. (2004) *Geochemistry,Geophysics,Geosystems (G-cubed)*, Vol.5. No.8. Q08005 doi:10.1029/2004GC000699.

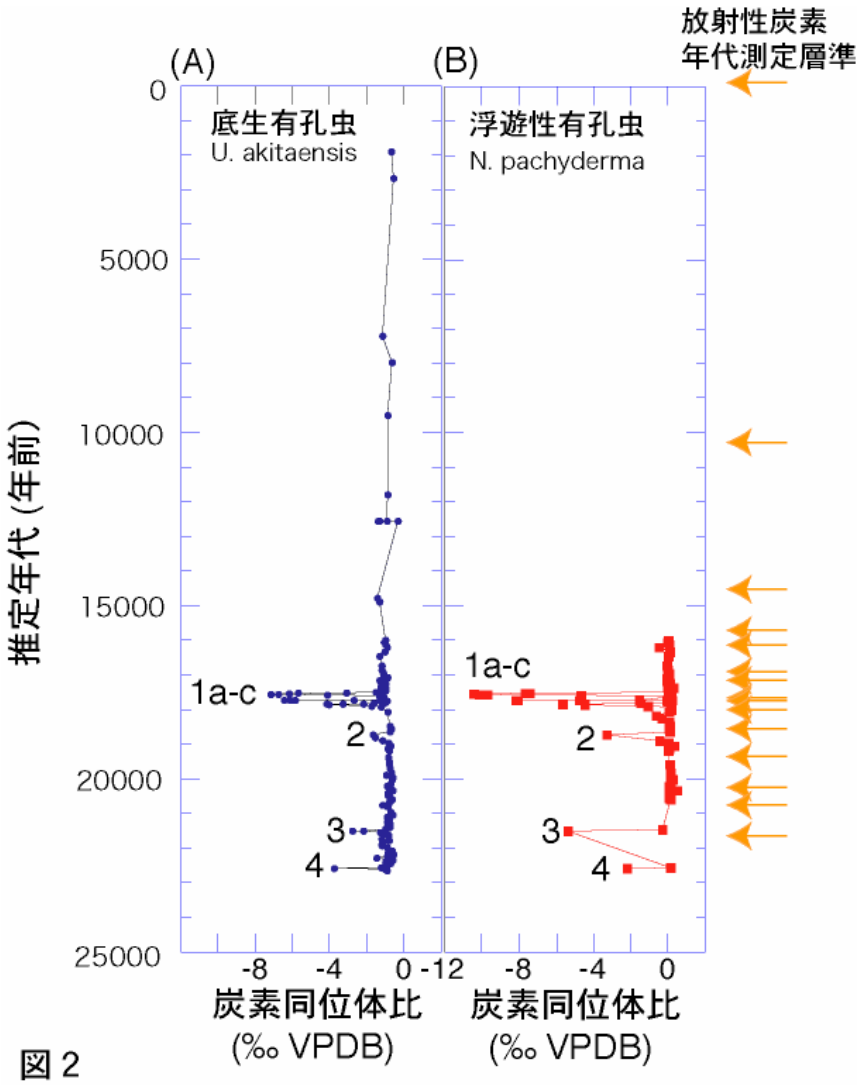


図２
十勝沖海底柱状コアの解析から明らかにされた過去２万３千年前までの(A、B)底生・浮遊性有孔虫の炭素同位体比変化（図中番号1a-c,2,3,4がメタン放出があったとされる層準）

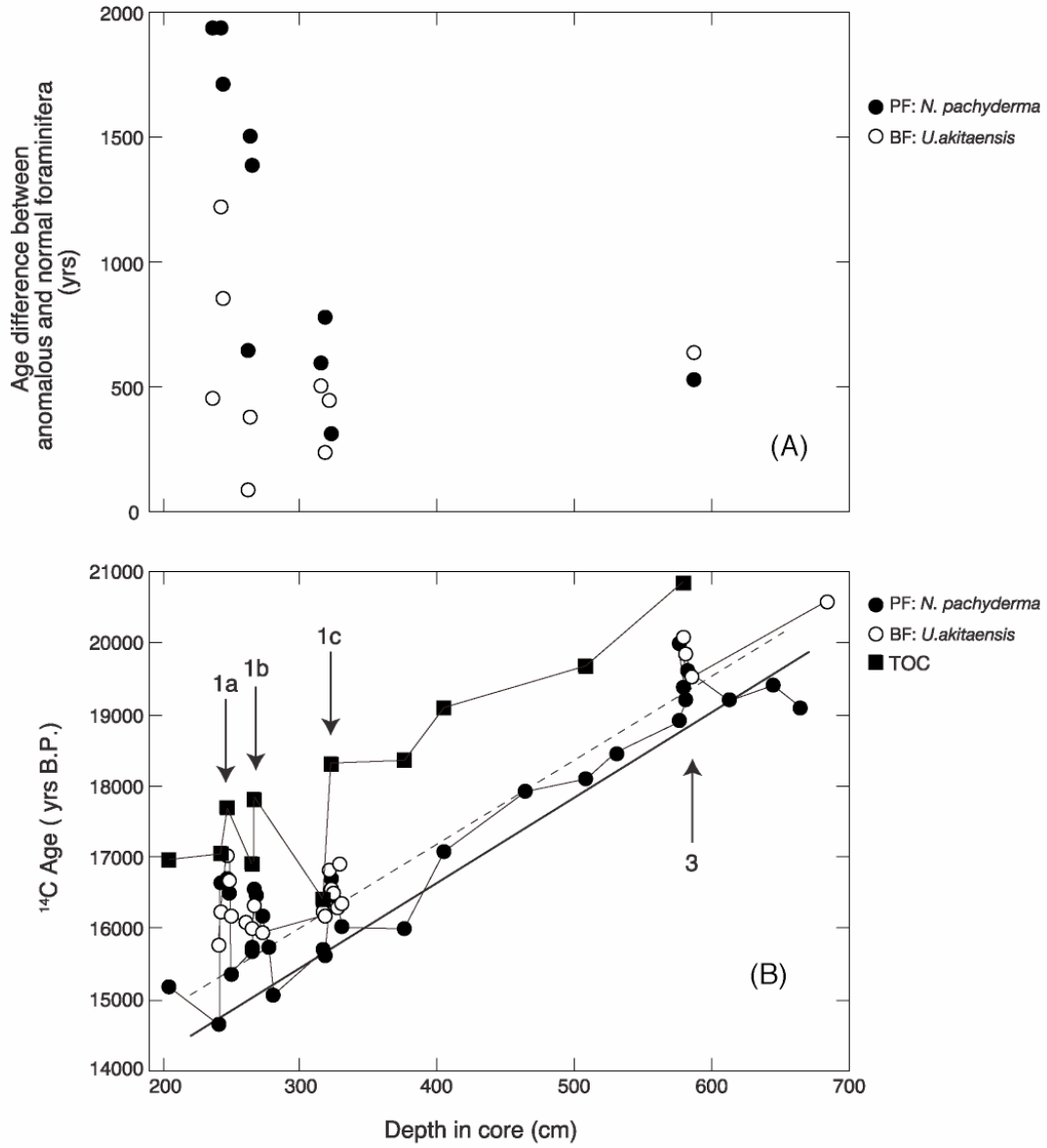


図3
浮遊性・底生有孔虫(PF/BF)、バルク有機物の^{14}C年代(A)とノーマル有孔虫から算出したアノマリー有孔虫が見つかった層準の堆積年代とアノマリー有孔虫との年代差(B),図中の1a,1b, 1c,3は、アノマリー層準を示す。

附録－1　第 20 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会　プログラム

［第 1 日目：2007 年 7 月 12 日（木）］

10：00　　**開会挨拶**

10：10～11：50　　**施設現状報告１**　　5 件　　座長：谷池 晃

1-1　筑波大学タンデム加速器の現状
笹 公和　　筑波大学 研究基盤総合センター

1-2　国立環境研究所タンデム加速器分析施設 NIES-TERRA の現状
小林 利行　　株式会社伯東（国立環境研究所）

1-3　東京大学 MALT 加速器施設の現状
中野 忠一郎　　東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻

1-4　若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状
羽鳥 聡　　若狭湾エネルギー研究センター

1-5　名古屋大学 AMS^{14}C 測定の現状と応用（2007）
中村 俊夫　　名古屋大学 年代測定総合研究センター

11：50～13：10　　**昼食および世話人会**

13：10～14：50　　**施設現状報告２**　　5 件　　座長：羽鳥 聡

2-1　パレオ・ラボ Compact-AMS の現状
伊藤　茂　　（株）パレオ・ラボ

2-2　神戸大タンデム加速器の現状
谷池 晃　　神戸大学大学院

2-3　九州大学タンデム加速器の現状報告
森川 恒安　　九州大学大学院理学研究院

2-4　JAEA-AMS-TONO の現状
鈴木 元孝　　日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター

2-5　原子力機構むつ・タンデトロン加速器の現状 2006-2007
天野 光　　日本原子力研究開発機構　青森研究開発センター

14：50～15：10　　休憩

15：10～16：10　　**施設現状報告３**　　3 件　　座長：笹 公和
3-1　原子力機構-東海タンデム加速器の現状
松田 誠　　日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所

3-2　京都大学工学研究科重イオン加速器によるビーム分析
内藤 正裕　　京都大学大学院

16：10～16：20　　休憩
16：20～17：30　　**ポスターセッション**　22 件
18：00～20：00　　**懇親会**（阿漕ヶ浦クラブ）

［第 2 日目：2007 年 7 月 13 日（金）］

9：10～10：20　　**技術開発**　　4 件　　座長：小林 紘一
4-1　ダイナミトロン加速器のアップグレード
藤澤 政則　　東北大学大学院

4-2　Recent Developments and New Applications of NEC Ion Beam Systems
Gregory A. Norton　　National Electrostatics Corporation

4-3　タンデム高周波トランスの故障について Ⅰ　～　トランスの放電損傷
霜田 勉　　若狭湾エネルギー研究センター

4-4　タンデム高周波トランスの故障について II　～　トランスの特性測定
霜田 勉　　若狭湾エネルギー研究センター

10：20～10：40　　休憩
10：40～12：00　　**応用１**　　4 件　　座長：柴田 裕実
5-1　ガラスキャピラリを使った 6MeV ^{15}N イオンの収束の試み
根引 拓也　　高知工科大学

5-2　放医研 SPICE におけるビーム偏向・収束系の改造
今関 等　　放射線医学総合研究所

5-3　京都大学における重イオンマイクロビーム細胞照射系の開発
中村 正信　　和歌山県立医科大学 医学部

5-4　マイクロビームを用いた高分解能 X 線イメージング装置の開発
長谷川 純　　東京工業大学

12：00～13：00　　昼食

13：00～14：40　　**応用２**　　5 件　　座長：中村 正信

6-1　高速クラスタービームの炭素衝撃による放出二次イオンの測定
柴田 裕実　　京都大学 大学院工学研究科

6-2　3MV タンデム加速器を用いた核融合プラズマ計測
井戸 毅　　自然科学研究機構 核融合科学研究所

6-3　1MeV 小型大電流エネルギー回収型静電加速器とその応用
峰原 英介　　日本原子力研究開発機構　量子ビーム応用研究部門

6-4　TIBIC を用いた酸化膜中に誘起した過渡電流の解明に関する研究
平尾 敏雄　　日本原子力研究開発機構　量子ビーム応用研究部門

6-5　酸化膜を介したイオン照射誘起電荷の収集機構解明に向けた研究
府金 賢　　日本原子力研究開発機構　量子ビーム応用研究部門

14：40　　**閉会挨拶**

14：50～16：30　　**施設見学**

タンデム加速器棟：20MV タンデム加速器、超伝導ブースター、
短寿命核分離加速実験装置（TRIAC）
放射線標準施設棟：4MV ファン・デ・グラーフ型加速器

［ポスター発表リスト］

第 1 日目：2007 年 7 月 12 日（木）16：20～17：30

P-1　京都大学理学部タンデム加速器の現状

松本 博　　京都大学大学院　理学研究科

P-2　東京大学重照射研究設備の現状

尾亦 孝男　　東京大学大学院　工学系研究科

P-3　原子力機構-放射線標準施設棟ファン・デ・グラーフ型加速器の現状

小沼 勇　　日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所

P-4　TIARA 静電加速器の現状

千葉 敦也　　日本原子力研究開発機構　高崎量子応用研究所

P-5　中性子発生用加速器システム（NASBEE）におけるターゲットの開発

酢屋 徳啓　　放射線医学総合研究所

P-6　TIARA イオン注入装置におけるイオン生成技術の開発

山田 圭介　　日本原子力研究開発機構　高崎量子応用研究所

P-7　シングルエンド加速器の絶縁用樹脂部品の部分放電損傷

宇野 定則　　日本原子力研究開発機構　高崎量子応用研究所

P-8　ターミナルイオン源による金属イオンビームの生成

仲野谷 孝充　　日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所

P-9　偏向電磁石のコンダクタンス測定

花島 進　　日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所

P-10 高圧六フッ化硫黄(SF_6)ガス中で使用するリレーのためのスクリーニング試験

沓掛 健一　　日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所

P-11 原子力機構-東海タンデム加速器インターロックシステムにおける通信障害およびプログラムバグフィックス

中村 暢彦　　日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所

P-12 ISOL 用イオン源の開発

長 明彦　　日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所

P-13 Low β超伝導加速空洞の開発

株本 裕史　　日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所

P-14 PIXE 分析法による額縁装飾用金箔に含まれる微量元素（Cu, Ag）の検出

河野 益近　　京都大学大学院工学研究科

P-15 東工大タンデム加速器を用いた PIXE 法による水中微量クロムの価数分別測定

福田 一志　　東京工業大学

P-16 日本海における放射性炭素の分布と深層循環

荒巻 能史　　国立環境研究所

P-17 Li イオン導電体β-LiGa とβ-LiIn 中における ^{8}Li 短寿命核トレーサーの拡散

須貝 宏行　　日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所

P-18 測定条件が pMC 及びδ^{13}C 測定値に与える影響の検討

齋藤 龍郎　　日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門

P-19 最終氷河期融氷期-完新世における北西太平洋における海洋表層リザーバー年代の変動-有孔虫化石の放射性炭素年代測定による検証

内田 昌男　　国立環境研究所

P-20 有孔虫化石の放射性炭素年代測定による最終退氷期における北西太平洋におけるミレニアムスケール海洋循環変動の高精度復元

内田 昌男　　国立環境研究所

P-21 分子レベル ^{14}C 測定による都市微小大気エアロゾル中燃焼由来汚染化学物質(PAHs)の起源推定

内田 昌男　　国立環境研究所

P-22 最終退氷期十勝沖海底コアに記録された海底下メタンハイドレート湧出現象

内田 昌男　　国立環境研究所

附録－2　研究会出席機関（五十音順）

1.　大学関係

1）九州大学大学院　理学研究院
2）京都大学 大学院理学研究科／大学院工学研究科
3）高知工科大学
4）神戸大学大学院
5）筑波大学 研究基盤総合センター
6）東京大学 大学院工学系研究科
7）東京工業大学 原子炉工学研究所
8）東北大学大学院
9）名古屋大学 年代測定総合研究センター
10）広島大学 大学院工学研究科
11）和歌山県立医科大学 医学部

2.　研究所関係

1）国立環境研究所
2）高エネルギー加速器研究機構
3）自然科学研究機構 核融合科学研究所
4）放射線医学総合研究所
5）理化学研究所
6）若狭湾エネルギー研究センター
7）日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所、先端基礎研究センター、量子ビーム応用研究部門、
青森研究開発センター、地層処分研究開発部門

3.　会社関係

1）National Electrostatics Corp.
2）㈱ アトックス
3）㈱ エリコン
4）㈱ パレオ ラボ
5）ビームオペレーション㈱
6）㈱ ペスコ
7）㈱ 加速器分析研究所
8）極東貿易㈱
9）原子力エンジニアリング㈱

10) ㈱ 神戸製鋼所
11) 住重試験検査㈱
12) 伯 東㈱
13) ㈱ 日立製作所
14) 日本アドバンストテクノロジー㈱
15) 三菱電機特機システム㈱

附録－3　タンデム研究会世話人名簿（順不同、2007-7/12 現在）

氏　名	メールアドレス	所属機関
1. 松田　誠	matsuda.makoto@jaea.go.jp	（独）原子力研究開発機構 東海研究開発センター原子力科学研究所 研究炉加速器管理部　加速器管理課
2. 柴田　裕実	shibadanuki@ybb.ne.jp	京都大学大学院 工学研究科 原子核工学専攻量子ビーム科学講座
3. 小林　紘一	kobak@paleolabo.jp	㈱ パレオ・ラボ AMS 年代測定施設
4. 谷池　晃	taniike@maritime.kobe-u.ac.jp	神戸大学 海事科学部　動力環境科学講座
5. 今関　等	h_ima@nirs.go.jp	（独）放射線医学総合研究所 研究基盤部　技術支援開発室
6. 柴田　康行	yshibata@nies.go.jp	（独）国立環境研究所 化学環境研究領域
7. 小栗　慶之	yoguri@nr.titech.ac.jp	東京工業大学 原子炉工学研究所
8. 松崎　浩之	hmatsu@malt.rcnst.u-tokyo.ac.jp	東京大学大学院 工学系研究科　原子力国際専攻
9. 笹　公和	ksasa@tac.tsukuba.ac.jp	筑波大学 研究基盤総合センター　応用加速器部門
10. 中村　正信	nakamura@wakayama-med.ac.jp	和歌山県立医科大学 医学部教養・医学教育大講座物理学
11. 羽鳥　聡	hatori@werc.or.jp	（財）若狭湾エネルギー 研究センター
12. 中村　俊夫	nakamura@nendai.nagoya-u.ac.jp	名古屋大学 年代測定総合研究センター
13. 天野　光	amano.hikaru@jaea.go.jp	（独）原子力研究開発機構 むつ事業所　AMS 管理課
14. 水橋　清	mizuhashi.kiyoshi@jaea.go.jp	（独）原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部 イオン加速器管理課

附録－3　タンデム研究会世話人名簿（続き）

氏　名	E メールアドレス	所属機関
15.　峰原　英介	minehara.eisuke@jaea.go.jp	（独）原子力研究開発機構 関西光科学研究所 先進光源開発研究ユニット
16.　中司　昇	nakatuka.noboru@jaea.go.jp	（独）原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 自然事象研究グループ
17.　森川　恒安	morikawa@kutl.kyushu-u.ac.jp	九州大学大学院 理学研究院物理学部門・粒子物理学講座

「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」に関する情報

・事務局担当機関　：筑波大学研究基盤総合センター／応用加速器部門
・住　所　：〒305-8577　茨城県つくば市天王台 1-1-1
・電話番号　：029-853-2494
・ファックス番号　：029-853-2565
・代表者　：笹　公和
・代表者メール　：ksasa@tac.tsukuba.ac.jp

・事務局公開ホームページ：　http://web2.tac.tsukuba.ac.jp/tandem

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m-1
密度（質量密度）	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
質量体積（比体積）	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	（数の） 1	1

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	µ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表３．固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(a)	rad		$m \cdot m^{-1}=1$ (b)
立体角	ステラジアン(a)	sr(c)		$m^2 \cdot m^{-2}=1$ (b)
周波数	ヘルツ	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	V・s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度(d)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr(c)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd=cd$
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd=m^{-2} \cdot cd$
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s^{-1}
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表４に示されている。
(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“１”は明示されない。
(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表６．国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° =(π/180) rad
分	’	1’ =(1/60)° =(π/10800) rad
秒	”	1” =(1/60)’ =(π/648000) rad
リットル	l、L	1l=1 $dm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1t=10^3 kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表７．国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10^{-19}J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10^{-27}kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10^{11}m

表８．国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 $dam^2=10^2m^2$
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10^5Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10^{-10}m
バーン	b	1 b=100$fm^2=10^{-28}m^2$

表４．単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa・s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s^2	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=kg \cdot s^{-3}$

表９．固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm^2=0.1Pa・s
ストークス	St	1 St =1$cm^2/s=10^{-4}m^2/s$
ガウス	G	1 G ≙10^{-4}T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙10^{-8}Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/$cm^2=10^4cd/m^2$
ホト	ph	1 ph=10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm/$s^2=10^{-2}m/s^2$

表10．国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
X線単位		1X unit=1.002×10^{-4}nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10^{-9}T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=$10^{-26}W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ		1 fermi=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
ミクロン	µ	1 µ =1um=10^{-6}m

（第７版，1998年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています