



JAEA-Conf

2022-002

DOI:10.11484/jaea-conf-2022-002

第34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 34th Meeting for Tandem Accelerators
and their Associated Technologies

(編) 株本 裕史 中川 創平 松田 誠

(Eds.) Hiroshi KABUMOTO, Sohei NAKAGAWA and Makoto MATSUDA

原子力科学研究部門

原子力科学研究所

Nuclear Science Research Institute
Sector of Nuclear Science Research

March 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Conf

本レポートは国立研究開発法人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。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

第 34 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 原子力科学研究部門 原子力科学研究所

(編) 株本 裕史、中川 創平、松田 誠

(2022 年 12 月 2 日受理)

第 34 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」は、令和 4 (2022) 年 7 月 21 日 (木) ~22 日 (金) の 2 日間に亘り日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所により開催された。新型コロナウイルスの感染拡大防止の対応からオンライン形式とした。

本研究会は、タンデム加速器を中心とした静電加速器施設を運営あるいは利用する研究者・技術者の現場レベルからの話題提供を通じて、参加者相互の情報交換を図り、関連研究の発展や施設管理に資することを目的として行われている。本研究会へは 26 の大学、研究機関および産業界から約 100 名の関係者が参加した。発表件数は 25 件で、各施設の現状報告や加速器の技術開発、応用研究等について報告が行われた。また、今回はオンライン開催のためにポスター発表は行わず、口頭発表のみとした。

本報告集は、これらの発表内容をまとめたものである。

Proceedings of the 34th Meeting for Tandem Accelerators
and their Associated Technologies

(Eds.) Hiroshi KABUMOTO, Sohei NAKAGAWA and Makoto MATSUDA

Nuclear Science Research Institute, Sector of Nuclear Science Research,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 2, 2022)

‘The 34th Meeting for Tandem Accelerators and their Associated Technologies’ was held on July 21-22, 2022 organized by Nuclear Science Research Institute of the Japan Atomic Energy Agency. This meeting was held only on-line for preventing the spread of COVID-19 infection.

The purpose of this meeting is contribution of development for related technology and of management of facilities through exchange of information among the researchers and engineers using and operating electrostatics accelerator facilities like tandem accelerators. There were 25 presentations which contains current status report of facility, technical development of accelerator, research of application. The total number of participants was a hundred, from 26 universities, research organizations and industries. This meeting consisted of only oral session, a poster session was not carried out because of on-line meeting.

This proceeding compiles the contents of report papers in the meeting.

Keywords: Tandem Accelerator, Electrostatic Accelerator, Report of Facility Status,
Ion Beam, Technology Development

目次

はじめに	1
1. 施設報告 I	
1.1 原子力機構・東海タンデム加速器の現状	5
石崎 暢洋、松田 誠、中村 暢彦、株本 裕史、沓掛 健一、乙川 義憲、遊津 拓洋、 松井 泰、阿部 信市 (日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 研究炉加速器技術部 加速器管理課)	
1.2 理化学研究所におけるタンデム加速器の現状 (2020-2021 年度)	11
池田 時浩 ¹ 、稲吉 琴子 ^{2,1} 、佐藤 広海 ¹ (¹ 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター、 ² 東邦大学 理学研究科)	
1.3 若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状 (2019-2021)	16
羽鳥 聡、栗田 哲郎、山田 裕章、山口 良文、淀瀬 雅夫、廣戸 慎、清水 雅也、 澁上 隆太、小田部 圭佑、古川 靖士、羽田 祐基、菊地 亮平 (若狭湾エネルギー研究センター)	
1.4 奈良女子大学におけるタンデム加速器の現状 (2021 年度)	22
狩俣 順也 ¹ 、石井 邦和 ² (¹ 奈良女子大学 研究協力課、 ² 奈良女子大学 研究院自然科学系)	
2. 施設報告 II	
2.1 JAEA-FRS バンデグラフ加速器の現状	29
西野 翔、海野 和重、吉富 寛、深見 智代、辻 智也、谷村 嘉彦 (日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課)	
2.2 JAEA-FRS の静電加速器を用いた中性子測定器の信頼性確保に係る取組	33
深見 智代、吉富 寛、西野 翔、辻 智也、海野 和重、谷村 嘉彦 (日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課)	
2.3 東北大学ダイナミトロン加速器の現状	37
三輪 美沙子、遠山 翔、松山 成男、永谷 隆男 (東北大学大学院 工学研究科 量子エネルギー工学専攻)	

3. 特別講演と施設報告Ⅲ

- 3.1 可搬型 γ 線イメージング装置 GeGI5 による筑波大タンデムの加速器放射化イメージング – 加速器の放射化イメージングへの挑戦 – ……………45
 吉田 剛¹、松村 宏¹、松村 万寿美²、豊田 晃弘¹、中村 一¹、榎本 和義¹、
 三浦 太一¹、笹 公和²、森口 哲朗²
 (1 高エネルギー加速器研究機構、²筑波大学 タンデム)
- 3.2 パレオ・ラボ Compact-AMS の現状 (2022 年) ……………49
 伊藤 茂¹、加藤 和浩¹、佐藤 正教¹、廣田 正史¹、山形 秀樹²、Z. Lomtadze²、
 中村 賢太郎²
 (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)

4. 施設報告Ⅳ

- 4.1 JAEA-AMS-TONO の現状 (2021 年度) ……………55
 松原 章浩¹、藤田 奈津子²、三宅 正恭²、石井 正博²、渡邊 隆広²、
 國分 (齋藤) 陽子²、西尾 智博¹、小川 由美²、神野 智史²、木村 健二²、
 島田 顕臣²、石丸 恒存²
 (1 株式会社 ペスコ、² 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター)
- 4.2 神戸大タンデム加速器の現状 2022 ……………63
 谷池 晃^{1,2}、古山 雄一¹、尾崎 英梨子¹、片山 侑己¹、三村 治夫^{1,2}
 (1 神戸大学大学院 海事科学研究科、² 神戸大学大学院 研究基盤センター加速器部門)
- 4.3 国立環境研究所 NIES-TERRA の現状 2021 ……………67
 小林 利行、内田 昌男、荒巻 能史、万徳 佳菜子
 (国立環境研究所 地球システム領域)

5. 施設報告Ⅴ

- 5.1 都市大タンデムの現状 (2020–2021) ……………73
 羽倉 尚人^{1,2,3}、佐藤 勇^{1,2,3}、松浦 治明^{1,2,3}、内山 孝文¹、河原林 順^{1,2,3}、
 林崎 規託^{1,4}
 (1 東京都市大学 原子力研究所、² 東京都市大学 原子力安全工学科、³ 東京都市大学
 共同原子力専攻、⁴ 東京工業大学 科学技術創成研究院 ゼロカーボンエネルギー
 研究所)
- 5.2 QST 量医研静電加速器施設 (PASTA & SPICE) の現状 2022 ……………77
 及川 将一¹、石川 剛弘¹、磯 浩之²、樋口 有一²、松田 拓也²
 (1 量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門 量子医科学研究所、² 株式会社 巧)

5.3	QST 量医研中性子発生用加速器システム (NASBEE) の故障と現状 2022	81
	石川 剛弘 ¹ 、須田 充 ¹ 、磯 浩之 ² 、萩原 拓也 ² 、樋口 有一 ² 、松田 拓也 ² 、 酢屋 徳啓 ³ 、及川 将一 ¹	
	(¹ 量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門 量子医科学研究所、 ² 株式会社 巧、 ³ SVE)	
6.	施設報告VIと実験	
6.1	京都大学工学研究科加速器施設の現状 (2021年度)	89
	佐々木 善孝 ¹ 、間嶋 拓也 ¹ 、土田 秀次 ^{1,2} 、内藤 正裕 ¹ 、今井 誠 ¹ 、斉藤 学 ^{1,2} 、 高木 郁二 ^{1,2}	
	(¹ 京都大学 工学研究科 原子核工学専攻、 ² 京都大学 工学研究科 附属量子理工学 教育研究センター)	
6.2	1 MeV 陽子ビームを用いた広ダイナミックレンジ光子検出器の性能評価実験	93
	水野 るり恵 ¹ 、新倉 潤 ^{1,2} 、松崎 禎市郎 ² 、池田 時浩 ² 、郷 慎太郎 ² 、齋藤 岳志 ¹ 、 櫻井 博儀 ^{1,2} 、道正 新一郎 ¹	
	(¹ 東京大学 理学系研究科、 ² 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター)	
6.3	小型四重極永久磁石を用いたガラスキャピラリー内のイオンビームの通過特性の 研究	97
	稲吉 琴子 ^{1,2} 、池田 時浩 ^{2,1} 、金 衛国 ¹	
	(¹ 東邦大学、 ² 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター)	
7.	原子力機構 東海タンデム加速器での実験紹介	
7.1	東海タンデム 40年のあゆみ	103
	松田 誠	
	(日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 研究炉加速器技術部 加速器管理課)	
7.2	原子力機構タンデム加速器を利用した照射損傷・原子物理研究の紹介	111
	石川 法人	
	(日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター)	
7.3	タンデム加速器施設における核物理・核化学研究	116
	西尾 勝久	
	(日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター)	

8. 施設報告Ⅶ

8.1	筑波大学タンデム加速器施設の現状	123
	笹 公和 ^{1,2} 、石井 聡 ¹ 、高橋 努 ¹ 、大和 良広 ¹ 、田島 義一 ¹ 、吉田 哲郎 ¹ 、 松村 万寿美 ¹ 、森口 哲朗 ^{1,2} 、上殿 明良 ^{1,2} (¹ 筑波大学 研究基盤総合センター 応用加速器部門、 ² 筑波大学 数理物質系)	
8.2	東京大学タンデム加速器研究施設 MALT の現状	128
	徳山 裕憲、松崎 浩之、土屋 陽子、山形 武靖 (東京大学 MALT)	
8.3	東京大学総合研究博物館 Compact-AMS の現状 (2021-2)	132
	尾寄 大真、大森 貴之、山崎 孔平、金澤 礼雄、上原 加津維、内田 啓子、関根 紀子、 米田 穰 (東京大学 総合研究博物館 放射性炭素年代測定室)	
8.4	山形大学高感度加速器質量分析センターの現状 2021-2022	136
	武山 美麗、森谷 透、小野 利弘、佐藤 里美、設楽 理恵、櫻井 敬久、門叶 冬樹 (山形大学 高感度加速器質量分析センター)	
付録	研究会プログラム	140

Contents

Preface	1
1. Status report of accelerator facility I	
1.1 Present status of JAEA-Tokai tandem accelerator facility	5
N. Ishizaki, M. Matsuda, M. Nakamura, H. Kabumoto, K. Kutsukake, Y. Otokawa, T. Asozu, Y. Matsui, S. Abe (Tandem Accelerator Section, Department of Research Reactor and Tandem Accelerator, Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency)	
1.2 Current status of the tandem accelerator facility at RIKEN (FY 2020 - 2021)	11
Tokihiko Ikeda ¹ , Kotoko Inayoshi ^{2,1} , Hiromi Sato ¹ (¹ RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science, ² Graduate School of Science, Toho University)	
1.3 Current status of the accelerator facility at The Wakasa Wan Energy Research Center	16
Satoshi Hatori, Tetsuro Kurita, Hiroaki Yamada, Yoshifumi Yamaguchi, Masao Yodose, Makoto Hiroto, Masaya Shimizu, Ryuta Fuchikami, Keisuke Otabe, Seiji Furukawa, Yuki Haneda, Ryohei Kikuchi (The Wakasa Wan Energy Research Center)	
1.4 Progress report of tandem accelerator in NWU (2021)	22
J. Karimata ¹ , K. Ishii ² (¹ Research Cooperation Division, Nara Women's University, ² Division of Natural Sciences, Nara Women's University)	
2. Status report of accelerator facility II	
2.1 Current status of the Van de Graaff Accelerator in JAEA-FRS	29
S. Nishino, K. Umino, H. Yoshitomi, T. Fukami, T. Tsuji, Y. Tanimura (Calibration Standards and Measurement Section, Department of Radiation Protection, Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency)	
2.2 Establishment of Quality Assurance System for Calibration of Neutron Measuring Instruments Using an Electrostatic Accelerator at JAEA-FRS	33
T. Fukami, H. Yoshitomi, S. Nishino, T. Tsuji, K. Umino, Y. Tanimura (Calibration Standards and Measurement Section, Department of Radiation	

Protection, Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency)

2.3	Status of Tohoku University Dynamitron Accelerator	37
	Misako Miwa, Sho Toyama, Shigeo Matsuyama, Takao Nagaya (Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University)	
3.	Special session and status report of accelerator facility III	
3.1	Imaging for the Activated beamline in the UTTAC employing the Portable γ -ray Imaging Device GeGI5 -Pilot study for Accelerator Activation Imaging-	45
	G. Yoshida ¹ , H. Matsumura ¹ , M. Matsumura ² , A. Toyoda ¹ , H. Nakamura ¹ , K. Masumoto ¹ , T. Miura ¹ , K. Sasa ² , T. Moriguchi ² (¹ KEK, ² UTTAC)	
3.2	Current status of the compact-AMS system at Paleo Labo Co., Ltd. (2022)	49
	Shigeru ITOH ¹ , Kazuhiro KATO ¹ , Masanori SATO ¹ , Masasi HIROTA ¹ , Hideki YAMAGATA ² , Zaur LOMTATIDZE ² , Kentaro NAKAMURA ² (¹ AMS Dating Facility, Paleo Labo Co., Ltd., ² Tokai Branch, Paleo Labo Co., Ltd.)	
4.	Status report of accelerator facility IV	
4.1	Present status of the JAEA-AMS-TONO (2021)	55
	A. Matsubara ¹ , N. Fujita ² , M. Miyake ² , T. Watanabe ² , Y. Saito-Kokubu ² , T. Nishio ¹ , Y. Ogawa ² , S. Jinno ² , K. Kimura ² , A. Shimada ² , T. Ishimaru ² (¹ PESCO Co., Ltd., ² Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency)	
4.2	Present Conditions of Tandem Accelerator of Kobe University in 2022	63
	Akira Taniike ^{1,2} , Yuichi Furuyama ¹ , Eriko Ozaki ¹ , Yuki Katayama ¹ , Haruo Mimura ^{1,2} (¹ Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, ² Accelerator Division of Center for Supports to Research and Education Activities, Kobe University)	
4.3	Present status of NIES-TERRA 2021	67
	Toshiyuki Kobayashi, Masao Uchida, Takafumi Aramaki, Kanako Mantoku (Earth System Division, National Institute for Environmental Studies)	
5.	Status report of accelerator facility V	
5.1	Present Status of the TCU-Tandem (2020 - 2021)	73
	N. Hagura ^{1,2,3} , I. Sato ^{1,2,3} , H. Matsuura ^{1,2,3} , T. Uchiyama ¹ , J. Kawarabayashi ^{1,2,3} , N. Hayashizaki ^{1,4}	

(¹Atomic Energy Research Laboratory, Tokyo City University, ²Department of Nuclear Safety Engineering, Tokyo City University, ³Cooperative Major in Nuclear Energy, Tokyo City University, ⁴Laboratory for Zero-Carbon Energy, Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology)

5.2	Progress report of QST-Chiba electrostatic accelerator facility (PASTA & SPICE)	77
	Masakazu OIKAWA ¹ , Takahiro ISHIKAWA ¹ , Hiroyuki ISO ² , Yuhichi HIGUCHI ² , Takuya MATSUDA ²	
	(¹ Institute for Quantum Medical Science, Quantum Life and Medical Science Directorate, National Institutes for Quantum Science and Technology, ² TAKUMI Co., Ltd.)	
5.3	Failure report of the 2 MV neutron exposure accelerator system at QST-QMS	81
	Takahiro Ishikawa ¹ , Mitsuru Suda ¹ , Hiroyuki Iso ² , Takuya Hagihara ² , Yuuichi Higuchi ² , Takuya Matsuda ² , Noriyoshi Suya ³ , Masakazu Oikawa ¹	
	(¹ Institute for Quantum Medical Science, Quantum Life and Medical Science Directorate, National Institutes for Quantum Science and Technology, ² TAKUMI Co., Ltd., ³ SVE)	
6.	Status report of accelerator facility VI and technical development, research of application	
6.1	Current status of the accelerator facility of the Graduate School of Engineering, Kyoto University (2021)	89
	Y. Sasaki ¹ , T. Majima ¹ , H. Tsuchida ^{1,2} , M. Naito ¹ , M. Imai ¹ , M. Saito ¹ , I. Takagi ^{1,2}	
	(¹ Department of Nuclear Engineering, Kyoto University, ² Quantum Science and Engineering Center, Kyoto University)	
6.2	Performance study of wide dynamic range photon detectors using 1 MeV proton beam	93
	R. Mizuno ¹ , M. Niikura ^{1,2} , T. Matsuzaki ² , T. Ikeda ² , S. Go ² , T. Y. Saito ¹ , H. Sakurai ^{1,2} , S. Michimasa ¹	
	(¹ Faculty of Science, the University of Tokyo, ² RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science)	
6.3	Transmission characteristics of ion beams through tapered glass capillary optics with miniature quadrupole magnets	97

Kotoko Inayoshi^{1,2}, Tokihiro Ikeda^{2,1} and Wei-Guo Jin¹

(¹Toho University, ²RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science)

7. Introduction of experiment at the JAEA-Tokai tandem accelerator	
7.1 40 years of Tokai-Tandem history	103
Makoto Matsuda	
(Tandem Accelerator Section, Department of Research Reactor and Tandem Accelerator, Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency)	
7.2 Introduction of Radiation Damage Research and Atomic Physics Research at the JAEA Tandem Accelerator	111
N. Ishikawa	
(Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency)	
7.3 Research activity in nuclear physics and nuclear chemistry at the JAEA tandem accelerator facility	116
K. Nishio	
(Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency)	
8. Status report of accelerator facility VII	
8.1 Status Report of the Tandem Accelerator Complex at the University of Tsukuba	123
K. Sasa ^{1,2} , S. Ishii ¹ , T. Takahashi ¹ , Y. Yamato ¹ , Y. Tajima ¹ , T. Yoshida ¹ , M. Matsumura ¹ , T. Moriguchi ^{1,2} , A. Uedono ^{1,2}	
(¹ UTTAC, University of Tsukuba, ² Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba)	
8.2 The Current Status of MALT, The University of Tokyo	128
H. Tokuyama, H. Matsuzaki, Y.S. Tsuchiya, T. Yamagata	
(Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator, The University of Tokyo)	
8.3 Current status of Compact-AMS at UMUT (2021-2)	132
Hiromasa OZAKI, Takayuki OMORI, Kohei YAMAZAKI, Ayao KANESAWA, Katsui UEHARA, Akiko UCHIDA, Noriko SEKINE, Minoru YONEDA	
(Laboratory of Radiocarbon Dating, The University Museum, The University of Tokyo)	

8.4	Present status of YU-AMS 2021-2022	136
	M. Takeyama, T. Moriya, T. Ono, R. Sato, R. Shitara, H. Sakurai, F. Tokanai (Center for Accelerator Mass Spectrometry, Yamagata University)	
Appendix	Meeting program	140

This is a blank page.

はじめに

日本原子力研究開発機構（原子力機構）原子力科学研究所が主催した「第34回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」（通称 タンデム研究会）は、2022年7月21日（木）、22日（金）の期間で開催された。新型コロナウイルス感染症の感染拡大防止の観点から開催方法はオンライン形式とした。

本研究会の参加者は約100名で、参加機関は26機関であった（内訳は、研究機関：6、大学：10、民間：10）。発表件数は25件で、オンライン開催のためにポスター発表は行わず、すべて口頭発表とした（内訳は、施設現状報告：18、加速器の応用・利用：3、特別講演：1、原子力機構東海タンデムでの実験紹介：3）。

発表では、各施設の取り組みや課題などについて情報交換や議論が行われた。具体的な例としては、加速電圧の安定化対策、アルファトロスイオン源からのヘリウムイオンビーム量増加の取り組み、チャージングチェーンの潤滑方法、加速器タンク内のダスト対策、新型コロナウイルス感染症への対応などであった。

特別講演では、高エネルギー加速器研究機構（KEK）の吉田 剛 氏より「可搬型 γ 線イメージング装置 GeGI5 による筑波大タンデムの加速器放射化イメージング –加速器の放射化イメージングへの挑戦–」と題して、加速器の放射化を画像化する取り組みについてご講演いただいた。また、原子力機構タンデムでの実験紹介として3件の発表が行われ、その内容は「東海タンデム 40年のあゆみ」、「照射損傷・原子物理研究」、「核物理・核化学研究」であった。

本研究会の最後には、施設見学の代わりとして、「原子力機構 東海タンデム加速器の施設紹介」の動画を参加者に視聴してもらい、説明・意見交換等を行った。オンラインでの開催ではあったが、Zoom ミーティングのブレイクアウトルームという機能を用いたオンライン講演と同時進行で議論ができる場などを活用し、参加者相互で活発な議論や情報交換が行われ盛会のうちに幕を閉じた。

This is a blank page.

1. 施設報告 I

This is a blank page.

1.1 原子力機構-東海タンデム加速器の現状 Present status of JAEA-Tokai tandem accelerator facility

石崎 暢洋*, 松田 誠, 中村 暢彦, 株本 裕史, 杵掛 健一,
乙川 義憲, 遊津 拓洋, 松井 泰, 阿部 信市
N. Ishizaki*, M. Matsuda, M. Nakamura, H. Kabumoto, K. Kutsukake,
Y. Otokawa, T. Asozu, Y. Matsui and S. Abe

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 研究炉加速器技術部 加速器管理課
(Tandem Accelerator Section, Department of Research Reactor and Tandem Accelerator,
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency)

* Correspondence to: N. Ishizaki; E-mail: ishizaki.nobuhiro@jaea.go.jp

Abstract

原子力機構-東海タンデム加速器は、米国 N.E.C 製の 20UR 型ペレトロンタンデム加速器で、最高加速電圧は約 18MV となっている。イオン源は地上電位にある 3 台のセシウムスパッター型負イオン源 (SNICS-II) と高電圧端子内の ECR 正イオン源 (Super-Nanogan) を使用しており、陽子 (H) からビスマス (Bi) までの約 50 元素の多様なイオンを 5~500 MeV のエネルギーまで加速することが可能である。また、当施設は RI や核燃料を標的として利用できる照射室を有しており、この特長を生かして核物理、核化学、材料照射、原子物理などの分野の研究に利用されている。本稿では 2021 年度の運転・整備状況等について報告する。

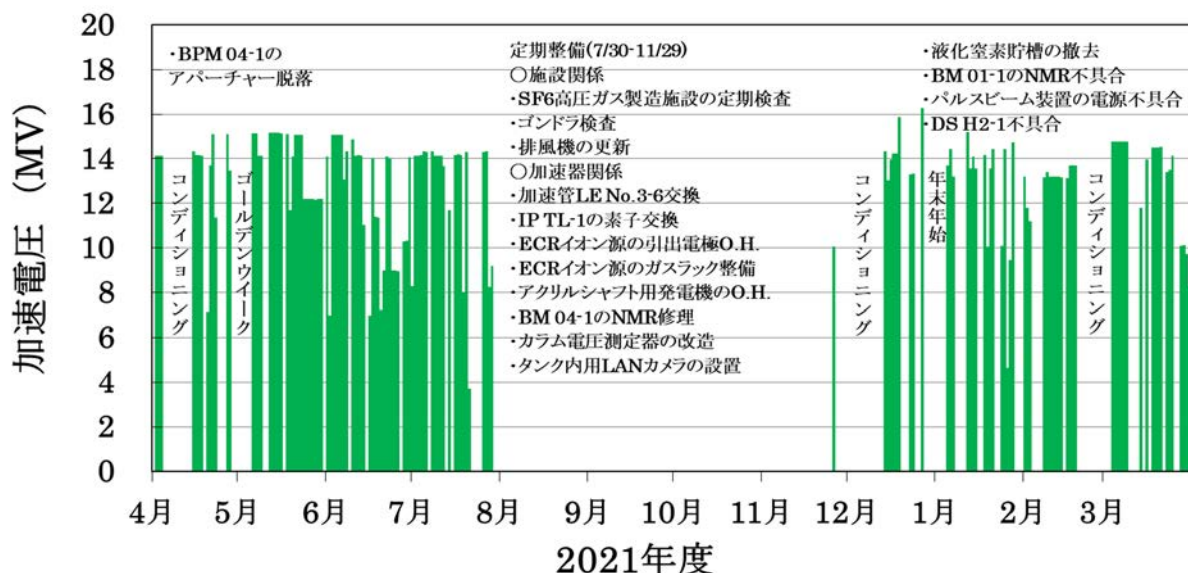


図1 2021年度の主な運転・整備状況

Keywords: タンデム加速器; ECRイオン源; 加速管; NMR; 液化窒素貯槽

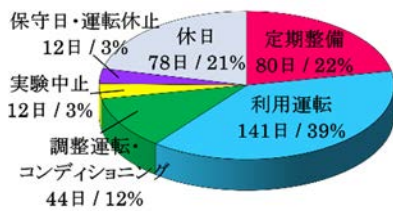


図2 運転・整備日数

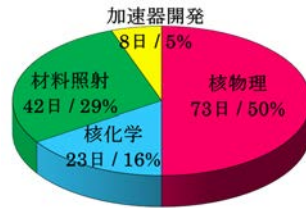


図3 分野別の利用日数

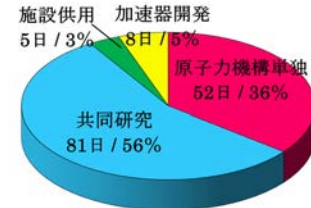


図4 形態別の利用日数

1. 2021年度の運転・整備の概要

図1は2021年度の日毎の加速電圧の発生状況および施設の稼働状況である。春から夏にかけて加速器の運転を行い、定期整備は2021年8月から11月にかけて1回実施した。以前は定期整備を年に2回から3回行っていた。加速器の高電圧カラム内の発電用回転シャフトの軸受ユニットの改良により、その寿命が大幅に改善したことで長期の連続運転が実現できている。2021年度は故障修理のための加速器タンクの開放はなかった。

定期整備では、毎年、実施する項目として、六フッ化硫黄（SF₆）高圧ガス製造施設の定期検査、タンク内整備用ゴンドラの定期検査を行った。設備関係では、第2照射室系排気設備の更新工事を行った。加速器の整備関係については後述する。

2021年12月16日から加速器の利用運転を開始した。加速管交換に伴う集中的な電圧コンディショニングを2021年12月に10日間程度実施した。2022年3月頃にも低下した電圧を回復するためコンディショニングを複数日行った。

また、液化窒素貯槽（貯槽能力4410L）の定期検査を2021年10月に行ったところ、脚部に腐食がみられた。不同沈下測定で傾斜していることが判明したため、貯槽の撤去と廃止を行った。

2021年度も新型コロナウイルス感染症への対応が引き続き必要となった。感染者数が拡大傾向にあった2021年8～9月、2022年2月頃には、一部のスタッフをテレワークによる在宅勤務の態勢とし、万が一に感染者が発生しても、施設管理を行うスタッフがゼロとまらないような態勢として事業継続に努めた。

2. 2021年度の利用状況

図2に運転・整備日数を示す。利用運転日数は例年並みの141日であった。2020年度は高圧ガス施設の六フッ化硫黄（SF₆）液化ガス貯槽の開放検査を実施する必要があったために利用運転日数が減少していたが、2021年度は開放検査がなかったため、例年並みに戻っている。また、定期整備の日数は80日となり、こちらも例年並みであった。しかし、加速管交換を実施したことで、電圧コンディショニングを行う必要があったため、コンディショニングが44日と多くなった。実験中止は12日であった。その主な理由は新型コロナウイルス感染症による県境をまたいでの利用者の移動制限、加速器の放電によるデコンディショニング（加速電圧の不調）、加速器機器・実験装置の不具合などによるものである。

図3に利用分野別の割合を示す。核物理が73日（50%）、核化学が23日（16%）、材料照射・原子物理が42日（29%）、加速器開発が8日（5%）であった。当施設では、2017年度から希少

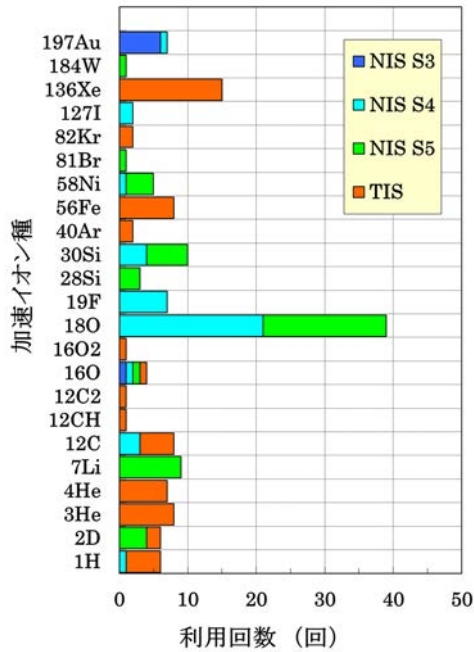


図5 イオン種別の利用回数

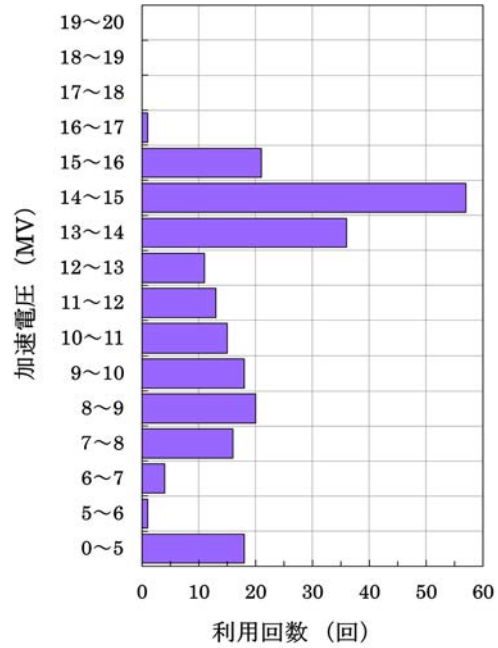


図6 加速電圧別の利用回数

な超ウラン元素であるアインスタイニウム（元素記号 Es、半減期 276 日、99 番元素）を数マイクログラムの微量で入手して標的を作成し、実験を行っている。そのため、近年では核物理・核化学の利用割合が増加傾向になっている。図 4 に利用形態別の割合を示す。共同研究が 56%、原子力機構単独が 16%、加速器開発が 6%、施設供用が 3%であった。

図 5 にイオン種別の利用日数を示す。イオン種は、陽子 (^1H) から金 (^{197}Au) まで 16 元素 23 種が利用された。イオン源の利用割合は、負イオン源 (NIS) が約 62%、ターミナル ECR 正イオン源 (TIS) が約 38%となった。アインスタイニウム実験に酸素 (^{18}O) が非常に多く利用されたため、負イオン源の利用割合が例年より多くなった。図 6 に加速電圧別の利用日数を示す。加速電圧 1.4 MV から 16.3 MV までの利用となった。放電の頻発による加速電圧の低下のため 16 MV 以上での実験利用は 1 回のみであった。

3. 加速器の整備・故障修理

3.1 高電圧端子（ターミナル）部のイオンポンプの素子交換

定期整備において、高電圧端子内イオンポンプ (IP TL-1) の素子交換を行った。加速器運転中に度々瞬間的な真空悪化などが発生し、動作状況が不安定であったためである。

交換作業の主な内容としては、高電圧端子内からの取り外し、内部クリーニング、取り付け金具の作成、素子取付け、真空ベーキング（約 200°C、計 17 時間）、高電圧端子内への取り付け復旧などである。作業時にはイオンポンプの内部観察を行い、チタン板の亀裂、スパッタ層が少量確認できたが、動作が不安定になるほど酷い状態ではないように思われた（図 7）。

その後、加速器運転において本イオンポンプを使用しているが、瞬間的な真空悪化などの不安定な動作状況が未だに残っている。原因は交換作業時のゴミ混入、真空ベーキング不足、高電圧端子内の ECR 正イオン源による希ガスの負荷などが考えられ、今後の検討課題となっている。

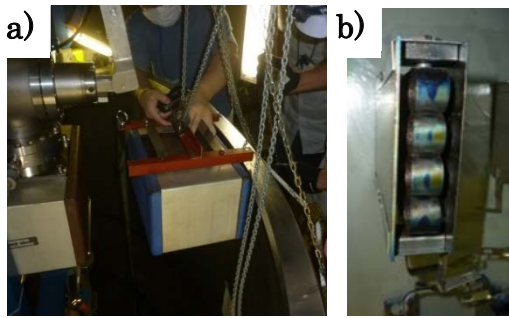


図7 a)イオンポンプ取り外し作業の様子
b)取り外したチタン素子

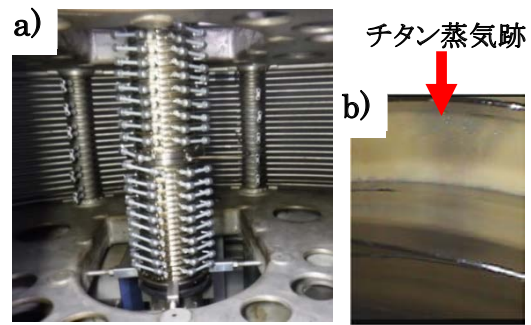


図8 a)加速管のSF₆側の外観 b)加速管真空側のセラミック表面の様子

3.2 低エネルギー（LE）側加速管の交換

2021年度の定期整備において低エネルギー側加速管 No.3～6 下の 7 本（3.5 MV ユニット分）を交換した。当施設では、1 MV を発生するユニットが 20 段分積み重なっており、No.3 ユニットとは下から 3 段目を表す。

1 年前の 2020 年度の定期整備において、低エネルギー側加速管 No.1～8 の 16 本（8 MV ユニット分）の交換を行っており、ほぼ同じ場所の加速管を 2 年連続で交換することになった。2020 年度の交換直後から加速器の電圧発生時にはイオンポンプの真空度や X 線モニタのトレンド値が連続的にベース上昇する現象が見られた。これらの原因は不明であるが、前処理の水洗い・ベーキングなどでゴミが混入した可能性が考えられた。2 か月後には約 17.3 MV まで電圧上昇したが、その後の運転中の放電などで No.4 は絶縁劣化したため、その 1 MV ユニット分をショートし、最大運転電圧は約 14.3 MV の状態となり、再度の交換を行うことになった。

2021 年の定期整備で用いた交換用の加速管は、新品と再生品で、超音波洗浄及び高圧純水洗浄後にベーキングし、窒素充填して保管していたものを用いた。交換作業は、分割抵抗の取外しや HEPA フィルタの設置、作業場所の清掃等の準備に 4 日、加速管交換及びリークチェックに 5 日を要した。加速管交換後にはベーキング（最高 110℃）を 7 日間実施した。取り外した加速管内部の観察も併せて行った。セラミック表面のチタン蒸着跡、電極の接合部に金属のはみ出しなどがみられたが（図 8）、1 年で同じ場所の加速管の再交換を行うことになった原因は不明であった。

加速管の再交換後には電圧コンディショニングを実施し、3 か月後には約 17.6 MV まで電圧上昇した。しかし、運転中に放電が発生するため、現在の最大運転電圧は約 15 MV の状態となっている。交換前よりは多少改善したが、16～18 MV での運転ができていない状況である。

現在の加速管（コンプレッド・ジオメトリ型）に更新してから約 20 年経過しており、セラミックの表面が蒸着跡などで全体的に汚れてきた可能性がある。今後は計画的な加速管の再生処理（サンドブラストによる蒸着跡の除去）、新品への更新等が必要ではないかと対応を検討している。

3.3 ペレットチェーンのすき間距離の測定

定期整備において、ペレットチェーンのすき間距離の測定を行った。当施設では、米国 NEC 製ペレットチェーン約 830 コマ（長さ約 30 m）を 2 本使用して電荷を運ぶことで加速電圧を発生させている。このペレットチェーンは高額であるため、長期間にわたって使用することができれば、

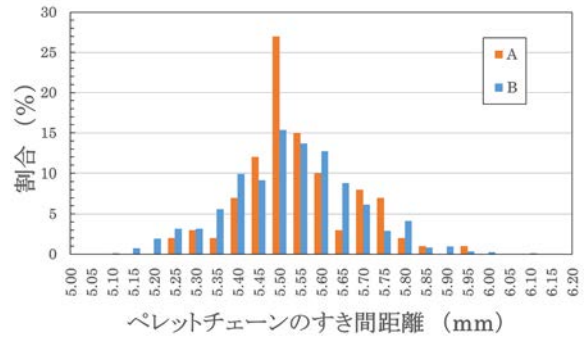
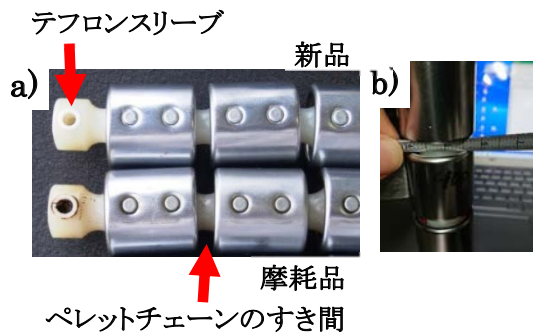


図9 a)ペレットチェーンの新品とベルト粉塵による摩耗品 b)すき間距離の測定の様子 図10 ペレットチェーンのすき間距離の分布 A：12,000時間使用、B：36,000時間使用

購入費用と整備時間の削減が可能になると考えられる。

ペレットチェーンが破断する場合は、テフロンスリーブの穴の部分が伸びて破断すると推測される(図9)。そのため、全ペレットチェーン間のすき間距離のばらつきを測定すれば、異常な伸び箇所の有無が分かると考えた。測定方法は、ペレットチェーン間に管用テーパゲージを差し込んで一コマずつ距離を測定した。作業時間は100コマで約20分が必要であった。

図10に測定結果を示す。ペレットチェーンA(12,000時間使用)とB(36,000時間使用)とを比べると、Bの方が若干、幅広く分布しているが、それほど大きな差異は見られなかった(メーカー推奨寿命は使用環境によるが約33,000時間)。Bのすき間5.9 mm以上は追加点検を行い、特別な異常がないことを確認し、使用継続をすることとした。今後は測定を継続して経過観察を行う予定である。また、簡易に測定できる方法・装置等の検討を進めたいと考えている。

3.4 入射電磁石の磁場測定装置の不具合

運転期間中において、加速器への入射ビームに周期的な変動が発生した。調査の結果、入射側の質量分析電磁石(BM 01-1)の磁場が周期的(数分に1回程度)に変動していた。

この電磁石の磁場の測定には、「NMR(核磁気共鳴型磁場測定器)」と「ホール素子」の2種類のプローブを組み合わせて電磁石内に設置している。磁場フィードバック制御には「ホール素子」の信号を使用していたが、「NMR」の測定回路が故障してノイズを発生し、ホール素子の測定系にも影響を与えていたため、磁場が不安定となっていた。故障への対応として、NMR制御回路のメーカー修理を行い、変動はなくなった(5V電源の劣化コンデンサ交換、ノイズ発生メイン基板交換)。また、NMRは電磁石のスイッチング電源等に起因する環境ノイズによって動作不安定になりやすいと思われるため、シールドを施してノイズ低減を図った(プローブ先端に35 μ m厚銅箔テープ、ケーブル部分に20 μ m厚アルミ箔を巻いた)。現在までのところ、安定して使用ができています。

3.5 カラム電圧測定器の開発

当施設は1 MVのユニットが20段直列に積み重なって20 MVの高電圧を発生する静電加速器である。現在は合計の電圧をGVM(Generating Volt Meter)という回転電圧計を用いて測定しているが、1 MVカラムユニットの個別の電圧を測定する手法の開発を進めている。これが可能となれば

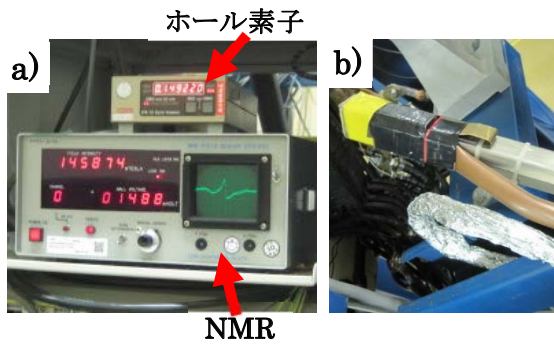


図 11 a)NMR とホール素子の測定器 b)ブ
ローブ 2 個を組み合わせて設置する様子

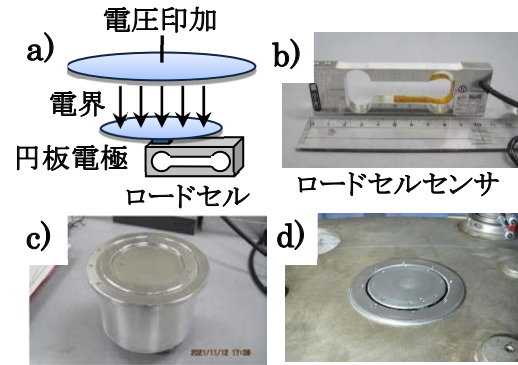


図 12 a)電界測定の原理 b)ロードセルセン
サ c)組み立てたプロトタイプ d)設置の様子

ば、ビーム負荷時の電圧分布、絶縁性能が劣化時の電圧分布などが分かると考えている。図11に
カラム電圧測定器の概要を示す。加速器の各カラムユニットに、円板電極を取り付けたロードセ
ルを設置し、電極にかかる静電気力によるロードセルのひずみを測定することで各ユニットの電
圧測定が可能となる。図12に測定原理と外観を示す。

これまでにプロトタイプ1台を設置し、電圧変化が測定できることを確認した。しかし、加速器
の放電によるサージで測定器が故障することが問題であった。対策として、測定部・電気回路部
のサージ保護の強化を行い、ここ1年程度の使用では放電による故障は発生していない。ただし、
密閉構造としたために真空引きによる減圧、SF₆ガスによる加圧等で出力値にオフセットが生じ
ることが分かった。今後の予定としては、ガス抜き穴開け加工を行い、上記課題の克服を目指す。

また、カラム電圧測定器の設置想定場所は、加速器の高電圧上にあり、現在は電力供給機構や
通信機器がない。そのため電力供給機構の開発が必要であり、バッテリーの使用、または新たな
発電機構の検討を進めていく。通信機器については、プラスチック光ファイバ(POF)によるLAN
を使用したシステムの構築を目指して開発を進めている。現在、加速器の定期整備を年1回に削減
しているが、これらのシステムをその他の測定機器類にも応用し、タンク内機器の異常などを早
期に検知できるようにしていくことを目指している。

4. まとめ

2021年度の利用運転日数は141日で、例年並みであった。定期整備の回数を1回と減らしたこと
で運転日数が増加することが期待された。しかし、近年では16 MV以上の加速電圧での運転が難
しくなっているため、加速管の交換作業や電圧コンディショニングに時間を割く必要がある
状態であり、増加するまでには至っていない。

加速管の交換を2年連続で実施することとなり、長年の使用による放電で絶縁性能が劣化して
きていると考えられる。今後は計画的な加速管の再生処理、新品への更新などが必要と思われる。
一方で、現在の加速器の後継となる施設の計画立案・検討を開始した。まだ具体的に製作・建設
を進める段階には至っていないが、重イオン等を用いたユニークな研究を推進する施設とするべ
く、開発・検討を進めていく。

1.2 理化学研究所におけるタンデム加速器の現状（2020－2021年度） Current status of the tandem accelerator facility at RIKEN (FY 2020 - 2021)

池田 時浩^{1,*}・稲吉 琴子^{2,1}・佐藤 広海¹

Tokihiro Ikeda^{1,*}, Kotoko Inayoshi^{2,1} and Hiromi Sato¹

¹理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

(RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science)

²東邦大学 理学研究科

(Graduate School of Science, Toho University)

* Correspondence to: Tokihiro Ikeda; E-mail: tokihiro@riken.jp

Abstract

理化学研究所仁科加速器科学研究センター管理の Pelletron 加速器にて検出器開発、試料分析および物理実験が行われており 2021 年度のメンテナンスは 35 日にまで回復した。中でも放射線源では得られない高エネルギー γ 線を発生させる実験が数を伸ばした。また、独自開発のガラスキャピラリーによるイオンマイクロビームで細胞照射を行う専用ビームラインが完成した。メンテナンスでは加速タンク内の主要部品の点検交換が行われ懸案事項であったターミナル電圧が不安定であったこと、および、高電圧がかけられなかったことが解消された。

Keywords: ペレトロン加速器; 検出器開発; マイクロビーム; 細胞照射; 高エネルギー γ 線

1. 装置と運転の概要

理化学研究所和光キャンパスでは、米 NEC 社製 5SDH-2 型 Pelletron 加速器（最大電圧 1.7 MV）が設置されており、仁科加速器科学研究センター 実験装置運転・維持管理室（主に RI ビームファクトリー：RIBF に関する業務と研究に従事）計測技術チームによって管理・運営されている。主な業務は RIBF で使用される検出器の開発支援であるが、同時に和光キャンパスの共同利用機器のひとつでもあるため、理研に身分を持つ研究者（外部機関が本務の研究者も含む）の研究開発にも利用されている。Table 1 に示す通り、2020 年度および 2021 年度に照射を行った日数（マシンタイム：MT）は、それぞれ、10 日および 35 日であった。H および B イオンは Fig. 1 に示す SNICS、そして He イオンは Alphasross から引き出された。照射電流値は、強度の届出値である 6.3×10^{12} 粒子/秒 (1 μ A) より低い値に抑えられている。2020 年度は新型コロナウイルス感染対策による在宅勤務および共同研究者の出張抑制、また装置納品の遅れ等の理由により MT が少なかった。2021 年度は検出器開発支援が増えた。しかしながら MT は連続した 5 日程度であってもセットアップの設営及び撤収で更に 1 週間程度が必要で、今後も、年間 MT 日数は同程度と見込まれる。

Table 1:2020 年度および 2021 年度の実績

Ion	エネルギー[MeV]	照射電流値 [pnA]	運転日数
2020 年度			
$^1\text{H}^+$	2.0 – 3.0	4 – 120	6
$^4\text{He}^{2+}$	2.28	0.25 – 5 [pnA]	4
2021 年度			
$^1\text{H}^+$	0.8 – 2.8	0.3 – 930	28
$^4\text{He}^{2+}$	2.28	3.5 – 12.5 [pnA]	6
$\text{B}^{+, 2+, 3+}$	1.0 – 2.0	7 [pnA]	1

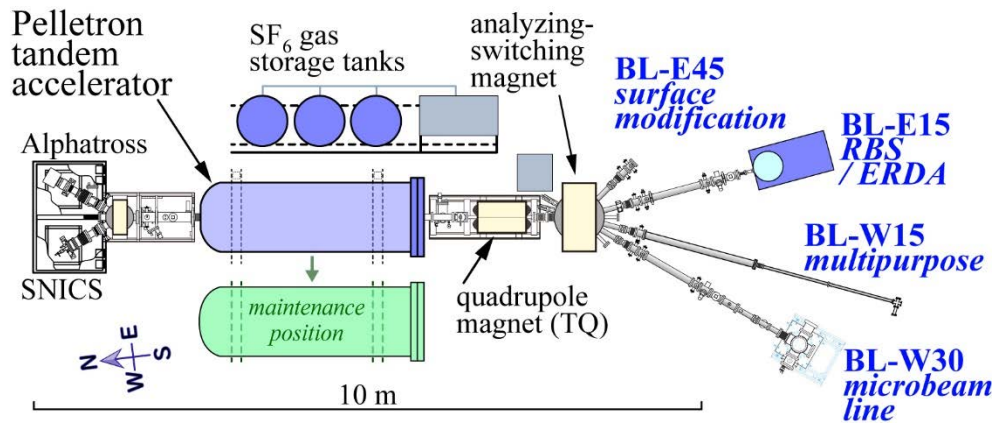


Fig. 1: 理化学研究所タンデム加速器のビームライン配置図

2. ユーザー実験

マシンスタディ以外の全ての MT はユーザーから申請された計画の審査・承認を経て決定される。2021 年度申請課題は、後方散乱構造解析サンプル照射、イオンマイクロビーム生物照射（照射ポート開発）、ガラスキャピラリー光学系のビーム輸送特性の研究^{1), 2), 3)}、検出器性能評価のための高エネルギーガンマ線の発生と測定実験⁴⁾等であった。後方散乱構造解析サンプル照射は、工学系、物性実験系のユーザーから依頼されたサンプルに対して RBS 測定を行うもの^{5), 6)}で、共同利用機器としての業務に含まれている。

3. 修理による加速電圧安定性の改善

日々のメンテナンス以外に、2022 年 2 月から 3 月にかけてオーバーホールおよび加速タンク内の主要部品の交換を行った。これは 2021 年 12 月頃から加速タンク内で異音が発生したことから、内部の点検の必要が生じたからで、例年は 5 月に行っているオーバーホールも時期を早めて同時に実施した。点検・交換は、(1)ペレットチェーンの回転機構、(2)高電圧ターミナルで

の発電のためのロータリーシャフト (RS) 関連、および(3)加速タンクの内側・外側をつなぐケーブル接続、に対して行われた。Fig. 2(a)(b)に示す通り、ビームから見て右側で上流側のシーブ軸 (Fig. 2(c)) およびベアリング (Fig. 2(d)) が破損していた。一方で、RS (Fig. 2(a)(e)) の下流側の端に近い部分では金属粉の落下が見られ、シャフトの金属の削れた跡およびディスクの一部欠損 (Fig. 2(f)) が確認され交換した。Fig. 2(g)に示すケーブルのコネクターボックス内の接続不良などを確認して再接続した。

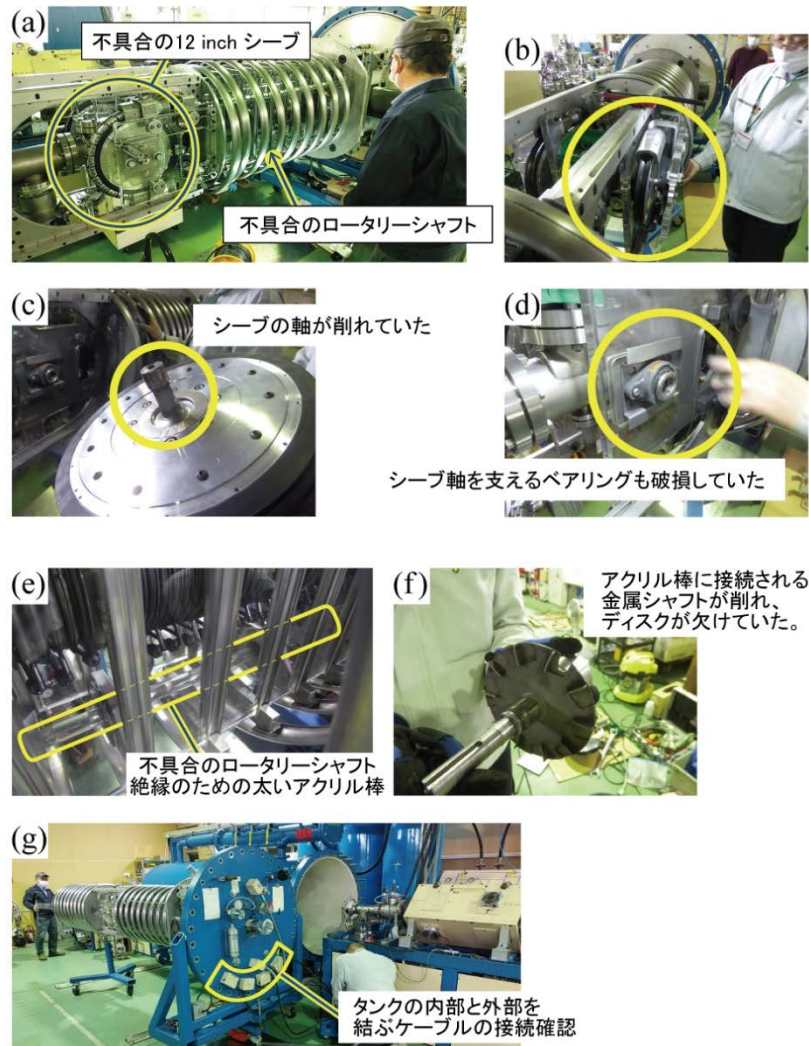


Fig. 2: (a)~(d)シーブ軸の破損部, (e)~(f) RS の破損部, (g)ケーブル接続の点検・修理

修理後には長く懸案事項であった加速電圧の揺らぎ、および 1.2 MV 程度までしか昇圧できなかったという問題が解消された。Fig.3 の各グラフは各 MT 中の最も安定と考えられる 60 分間 (7200 sampling) に得られた電圧の揺らぎ分布である。Fig. 3(a)~(c)は修理前、Fig. 3(d)~(f)は修理後のデータで、各グラフの右上の電圧値は実データからの平均値である。下の段の図の inset は、同じヒストグラムのピンサイズを 5 倍細かくしたものである。Fig. 3(b),(e)が 1.2 MV 設定の MT にて得られたデータで、安定性 (揺らぎ分布の標準偏差) は 0.552%から 0.066%へ 1 桁程度の改善が見られ、初期仕様 (0.1%) を満たすことが確認された。また、Fig. 3(c)に

示す通り、1.2 MV より高い電圧では MT を進めるには困難な安定性であったが、Fig. 3(f)のとおりに、約 1.6 MV の MT でも仕様どおりの安定性が得られた。現在 1.65 MV までの安定運転が確認されている。

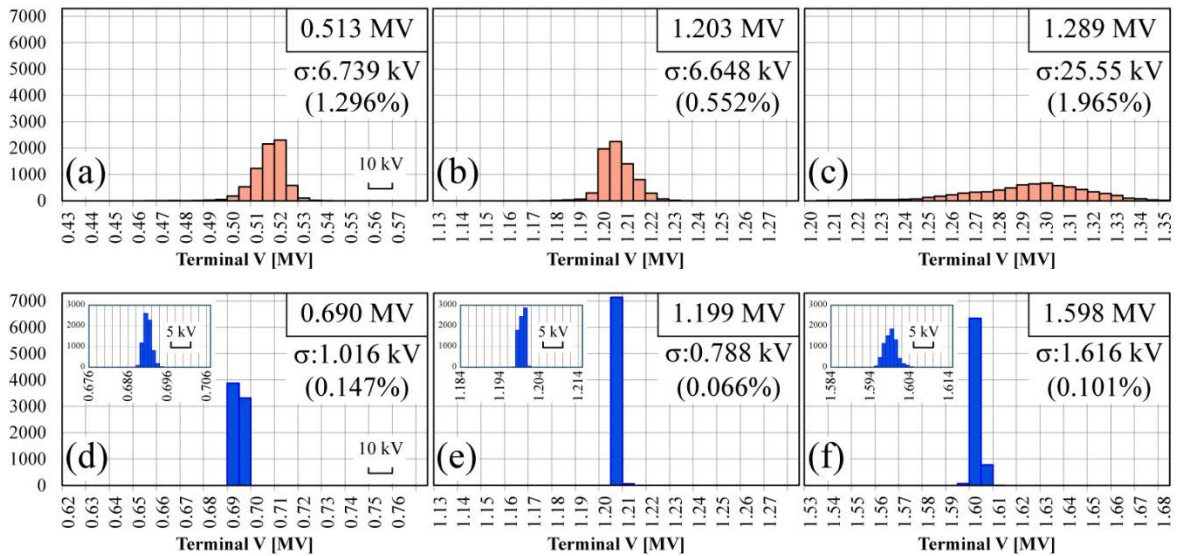


Fig. 3: 加速電圧の安定性. (a)~(c)は修理前、(d)~(f)は修理後の状態

4. 今後の展望

修理により加速電圧が安定したことからユーザーの計画通りのイベント収量が可能となる。この1、2年でユーザー開拓も進めており、ユーザー当たりのビームライン占有日数が短くなれば、MTの増加は期待できる。しかしながら、その一方で、MT運転要員の不足も深刻であるため、対策として、現在の(DOS-V パソコンによる)複雑な手動ビームチューニングを、最新の自動化システムに更新することが大いに望まれる。

参考文献

- 1) Ikeda, T., Applications of Microbeams Produced by Tapered Glass Capillary Optics, Quantum Beam Sci., vol.4(2), no.22, 2020.
- 2) 池田時浩, MeVイオンビームのガラスキャピラリーによるマイクロビーム化とその応用, 応用物理学会誌『応用物理』, vol.91, no.9, 2022, pp.542-547.
- 3) Ikeda, T., Ikekame, M., Hikima, Y., Mori, M., Kawamura, S., Minowa, T. and Jin, W.-G., Profile measurements of MeV ion microbeams in atmosphere extracted from single tapered glass capillaries with an end window, Nucl. Instrum. Methods B, vol. 470, 2020, pp. 42-47.
- 4) Mizuno, R., Ikeda, T., Go, S., Saito, T.Y., Sakurai, H., Niikura, M., Matsuzaki, T. and Michimasa, S., Performance study of wide dynamic range photon detection system using

Ge detectors for muonic X-ray spectroscopy, RIKEN Accelerator Progress Report 2021 Vol. 55, 2022, S20.

- 5) Lee, S.R., Kim, A., Choi, S., Ikeda, T., Kobayashi, T., Isoshima, T., Cho, S. and Kim, Y., Amorphous to polycrystalline phase transition in La_2O_3 films grown on a silicon substrate forming Si-doped La_2O_3 films, *Phys. Status Solidi A* 219, 23, 2022, 2200318 (DOI: 10.1002/pssa.202200318)
- 6) Liu, J., Enomoto, K., Takeda, K., Inoue, D. and Pu, Y.-J., Simple cubic self-assembly of PbS quantum dots by finely controlled ligand removal through gel permeation chromatography, *Chem. Sci.*, vol.12, 2021, pp.10354-10361.

1.3 若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状（2019–2021） Current status of the accelerator facility at The Wakasa Wan Energy Research Center

羽鳥 聡*・栗田 哲郎・山田 裕章・山口 良文・淀瀬 雅夫・廣戸 慎
清水 雅也・瀧上 隆太・小田部 圭佑・古川 靖士・羽田 祐基・菊地 亮平
Satoshi Hatori*, Tetsuro Kurita, Hiroaki Yamada, Yoshifumi Yamaguchi,
Masao Yodose, Makoto Hiroto, Masaya Shimizu, Ryuta Fuchikami, Keisuke Otabe,
Seiji Furukawa, Yuki Haneda and Ryohei Kikuchi

若狭湾エネルギー研究センター（The Wakasa Wan Energy Research Center）

* Correspondence to: Satoshi Hatori; E-mail: hatori@werc.or.jp

Abstract

若狭湾エネルギー研究センター5MVタンデム加速器における昇圧回路素子や分割抵抗器の抵抗値均一化の試みは、加速器の多くの場所での放電抑制に効果を示しているが、一部の抵抗素子の取り付け不具合から生じた抵抗値不均一さが放電を引き起こしている。

昇圧用の高周波多段整流回路（シェンケル回路）の負荷電流や高周波発振器発振管プレート電流（高周波トランス1次コイル電流）が不安定になる現象が発生した。高周波フィードラインの中継端子や保護ギャップ電極を支える絶縁支柱の放電による共振特性の悪化が原因であった。加速管内壁のコンディショニング不足による放電も起こっている。

2020年度から2021年度にかけてはCOVID-19蔓延の影響を受けた。マシンタイムキャンセルにより運転時間が減少した。また、物品調達にも遅延が生じ、機器更新が延期された。

Keywords: 高周波整流型; Schenkel 整流回路; RF 共振特性悪化; 分割抵抗切断

1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センター5MVタンデム加速器において、2016年度より取り組んでいる昇圧回路素子や分割抵抗器の抵抗値均一化の試みは、加速器の多くの場所での放電抑制に効果を示している。また素子や絶縁構造物上の温度分布は抵抗値の不均一性を生み、均一な電位分布を阻害し電界強度の増す箇所での放電を引き起こすが、絶縁ガスの冷却循環により解決をみている。温度を一定に保つことは、加速電圧ドリフトを抑える効果ももつ。

昇圧用の高周波多段整流回路（シェンケル回路）の負荷電流や高周波発振器発振管プレート電流（高周波トランス1次コイル電流）が不安定になる現象が発生し放電につながることもある。シェンケル回路の組まれている絶縁構造物の絶縁不良により整流回路の短絡や共振トランスの絶縁不良による共振特性の悪化が原因である。加速管内壁のコンディショニング

が不十分な段階での昇圧がタンク放電につながることもある。いくつかの放電事例を原因ごとに報告する。

2020年度から2021年度にかけては世界的なCOVID-19蔓延による影響を当センター加速器施設も受けている。蔓延防止措置による外部ユーザー特に県外のユーザーのマシントイムキャンセルが発生している。物品、とくに半導体や電子部品などの調達遅延により加速管分割抵抗や放電ギャップ電極の更新、および高電圧発生用高周波発振器の更新が延期されることになった。3年間の運転状況についても報告する。

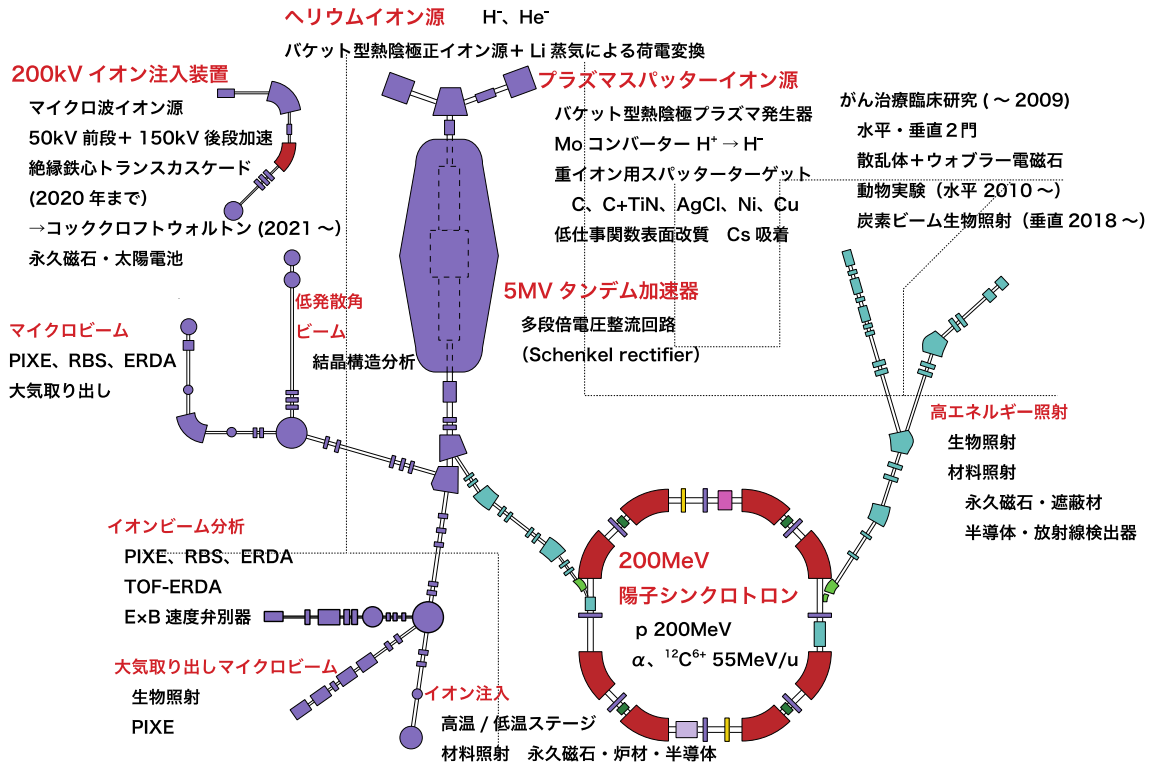


図1 若狭湾エネルギー研究センター加速器施設

2. 加速器の運転状況

図1に若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の加速器、ビームラインの全体概略を示す。イオン源や加速器、ビームラインに対し簡単にイオン化方法、イオン種、加速高電圧とその発生法、加速エネルギー、ビームの利用法などを添えた。近年増えてきたビーム利用法に半導体製品の対放射線評価がある。

2019年度マシントイムは加速電圧の最高値を5MVに設定し開始したが、昇圧用の高周波多段整流回路（シェンケル回路）の負荷電流 I_0 や高周波発振器発振管プレート電流（高周波トランス1次コイル電流 I_p ）が不安定になる現象が発生した。一過性のものであり、通常10ヶ月のマシントイム運転を行い、高電圧発生時間も3879時間に達したが、2019年度定検で高周波フィードラインの中継端子や保護ギャップ電極を支える絶縁支柱の放電が確認された。

2019年度点検後の加速電圧昇圧試験で4.8MV設定時に加速管内放電がタンク放電・地絡を引き起こした。後の弾性散乱を用いた電圧校正によれば放電時の電圧は4.98MVに達していた。加速管内壁のコンディショニングが不十分な段階での昇圧が原因と考えられる。2020年度は加

速電圧上限を 4MV に設定した運転が行われた。圧搾空気駆動装置のエアシリンダー交換作業中にエア漏れを起こし、圧空圧力が低下する事象が発生している。加速管の真空系が停止し、大気およびロータリーポンプ油が加速管へ混入した。加速管耐圧（真空、ストリッパガスなし）が 3.8MV から 2.0MV まで低下している。4 日間のコンディショニングにより耐圧を回復している。2019 年度は COVID-19 蔓延防止措置のため外部ユーザーの実験キャンセルが 11 件発生している。このため 2019 年度の高電圧発生時間は 3703 時間にとどまった。

2020 年度定検後の昇圧試験において加速高電圧 4.8MV で低エネルギー側（L/E）絶縁コラム分割抵抗電流（コラム電流 I_{CL}）が急減、I_p、I₀が急増しトリップした。イオン源切り替え時に I_{CL}の分流経路を探すことにし 2021 年度も最高電圧を 4MV に制限しマシンタイム運転を行った。イオン源切り替え時の調査では L/E コラム表面に分流経路は見いだせなかった。その後、I_{CL}の急落、I_p、I₀の急上昇を伴うトリップ電圧は 3.4MV まで下がり加速器タンクを開放し放電の調査をおこなった。コラム沿面の放電痕はなく、超音波探傷によるコラム内部の剥離性損傷調査も行なったが内部にも損傷はなかった。一組のコラム分割抵抗の連結部での分離を発見した。I_{CL}の低下は分流経路の存在ではなく抵抗の増大が原因であった。調査、修繕、再昇圧試験のためにキャンセルされた実験は 22 件にのぼった。

2021 年度は加速管デバイダー抵抗と放電ギャップ電極の更新、加速高電圧発生用高周波発振器の更新が計画され、マシンタイムは通常より 1 ヶ月短い 9 ヶ月の予定であったが COVID-19 蔓延による物品調達の遅延の影響を受け更新作業は 2022 年度に延期されることとなった。このためマシンタイム期間を 2022 年 1 月末まで延長した。2021 年度の高電圧発生時間は 2842 時間まで減少した。

図 2 に加速高電圧発生時間の推移を示す。上図は加速イオン種による分類、下図は実験テーマによる分類を示す。

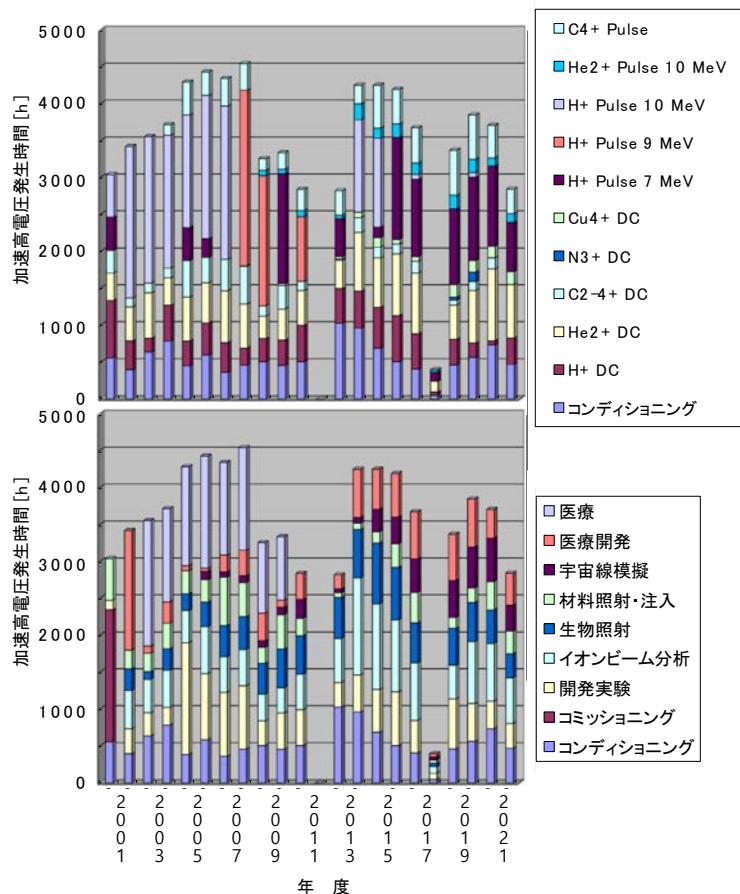


図 2 加速高電圧発生時間

上) イオン種による分類 下) テーマによる分類

3. 加速高電圧不安定

3.1 共振トランスの共振特性悪化によるもの

2019年6月24日に I_p 、 I_0 のハンチングが観察されている。2019年度の定検でRFトランス2次コイル終端およびRF電極プスバーを支持するポリプロピレン製支柱の焼損が発見された(図3)。支柱の放電によりRF電極とタンク内壁(大地電位)間に不安定なダンピング抵抗が発生し、 Q 値が不安定な状態になった。その後、絶縁物の溶融が固定化され、安定な状態が形成されたと考えられる(図4)。

以前は高周波電極の絶縁支柱にポリプロピレンが使われていた。ポリプロピレンなどプラスチック製の絶縁物内部に残る「鬆」が電界の特異点となり放電の開始点になる。ポリプロピレンは白色なので内部に生じた異変に気づきにくい。放電焼損事故後、無色透明でかつ高周波損失の小さいポリカーボネートに交換したという報告を受け、我々もポリプロピレン製の絶縁支柱をすべてポリカーボネートに交換したはずだったが、交換し損ねたものがまだ存在した。焼損した支柱ともう一相用の支柱もポリカーボネート製のものに交換した。

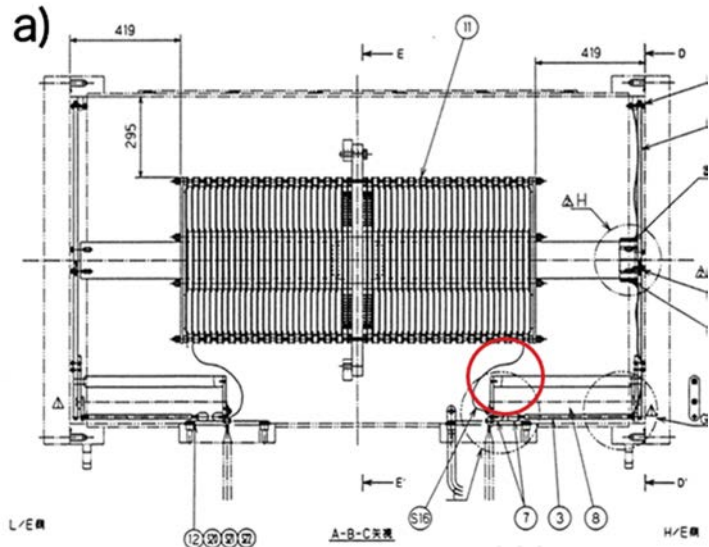


図3 RFトランスと焼損した支柱

a) RFトランス組立図。赤丸が焼損した箇所

b) 焼損したポリプロピレン製支柱

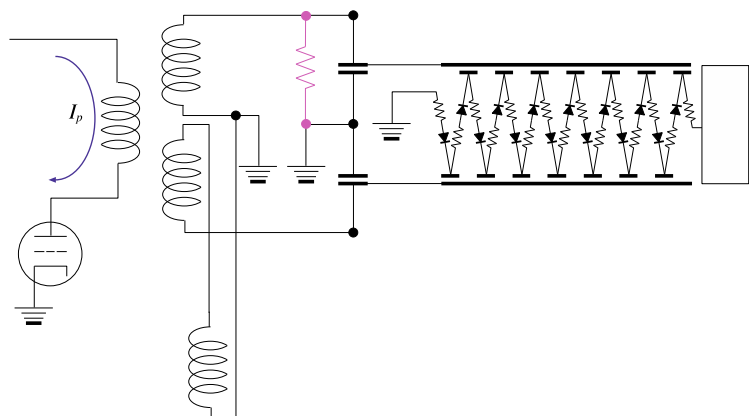


図4 発振器、RFトランスおよびシェンケル回路

赤で記した抵抗が放電によるダンピング抵抗

3.2 不均一な電位分布によるもの

2021年に I_{CL} が低下し I_p 、 I_0 が上昇し最終的にタンク放電にまで至る事象が起きている。図5は加速高電圧印加時のストリップチャートによる記録である。 I_{CL} が低下を始め、 I_p や I_0 が上昇を始めたところで、一旦、加速高電圧を下げています。その後、また同じ電圧まで昇圧しているが、 I_{CL} は不安定になり電流値が下がっている。当初はL/E側絶縁コラムの表面、もしくは内部に放電経路があり、その経路が電流計測系を迂回するためだと考えた。タンクを開放しコラムの沿面調査を行なったが放電痕は見いだせなかった。耐圧が3MVまで下がったところで再度タンクを開放し、コラム内部の放電経路を調査すべく超音波探傷試験を行ったが内部に損傷は見出せなかった。超音波探傷を行うために絶縁コラムを電位分割、電位固定を行うための分割抵抗器をすべて取り外した。図6は高圧ターミナルからL/Eコラムを見たものである。コラム表面に電位固定用の電極を配置しその間に分割抵抗器が配される。2本の抵抗器を連結して一組の分割抵抗器をなす。抵抗器を取り外したときに連結部で分離しているものを一組発見した。

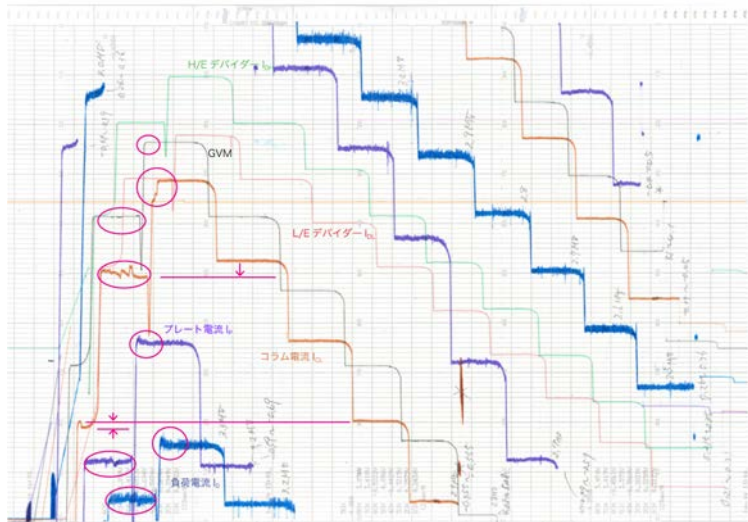


図5 昇圧時の I_{CL} 、 I_p 、 I_0 の変化



図6 L/E コラム



図7 分割抵抗連結部

連結部の止めネジが一方の抵抗器に入り込んでいた（図 7）。ICL の低下は分流経路の存在によるものではなく接触抵抗の増加によるものであった。止めネジを長くし、止めネジの中央に印を連結が完了する直前までその印が見え続けるように締め付けるようにした。

3.3 加速管内壁コンディショニング不足によるもの

2020年3月定検直後の昇圧時の加速高電圧トリップは加速管内壁のコンディショニングが十分でない状況で昇圧したためと考えられる。大気やさらに有機物などを導入した後は加速管内壁の耐圧が下がる。2020年8月の真空系トラブルによる大気・ロータリーポンプ油混入時は耐圧が2.0MVまで低下した。昇圧を行うと加速管内壁で小放電（キック）が継続するがキックの減少を見極め少しずつ昇圧を行うコンディショニングを続けると耐圧が回復する。一種の放電洗浄である。

4. まとめ

2019年度の運転は定検で発覚したことだが高周波トランス内に共振特性を悪化させるトラブルを抱えての運転であったがマシン運用にはほとんど影響がなかった。2020年度は真空トラブルにより一時的に加速管耐圧が落ちたが実験に必要な耐圧には復活し実験遂行に支障はなかった。2021年度は年度初頭にコラム分割抵抗分裂による電圧不安定のため1ヶ月程度実験を中断しなくてはならなかった。

COVID-19蔓延により、実験が取りやめになったり装置の改良計画に遅延が生じるなどの影響を受けた。

加速高電圧のトラブルに関しては実験時以外の加速管コンディショニングのための昇圧や、絶縁物や素子上の電位分布の均一化の取り組みにより解決できるものである。この取り組みは今後も続けてゆく。

参考文献

- 1) 宇野定則、他、P-7 シングルエンド加速器の絶縁用樹脂部分の部品放電損傷、第20回「タングラム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集、東海村、JAEA-Conf 2008-005、2008、pp. 118-120.

1.4 奈良女子大学におけるタンデム加速器の現状（2021年度） Progress report of tandem accelerator in NWU (2021)

狩俣 順也^{1,*}・石井 邦和²

J. Karimata^{1,*} and K. Ishii²

¹ 奈良女子大学 研究協力課 (Research Cooperation Division, Nara Women's University)

² 奈良女子大学 研究院自然科学系 (Division of Natural Sciences, Nara Women's University)

* Correspondence to: Jun-ya Karimata; E-mail: karimata@cc.nara-wu.ac.jp

Abstract

1991年度から1993年度に3年計画で奈良女子大学理学部物理科学科にタンデム加速器が導入された。タンデム加速器は、アルファトロスイオン源及びSNICS II イオン源、最高ターミナル電圧が1.7 MVの米国NEC社製5SDH-2型加速管、90度分析電磁石及び2本のビームラインから構成されている。これまでに2009年度にアルファトロスイオン源の更新及び加速器制御システムの変更が行われ、さらに2013年度にはビームラインの延長および増設が行われてきている。本装置の主な使用目的は原子衝突研究やイオンビームを利用した物質分析等であり、また学生実験等の学生教育にも用いられている。本稿では、2021年度における利用状況及びトラブルとそのメンテナンス作業について述べる。

Keywords: ペレトロン加速器; メンテナンス

1. はじめに

本学のタンデム加速器は、1991年度から1993年度にかけて3年計画で導入され、1994年度から使用を開始した。学内利用として固体内原子衝突研究、イオンビームを利用した物質分析及び学生実験に用いられている。また、学外者にも研究目的で利用されている。

図1に奈良女子大学加速装置の構成図を示す。イオン源としてアルファトロスイオン源(RFイオン源)及びSNICS II イオン源(セシウムスパッタ型イオン源)の二つを備えている。加速器はNEC社製タンデム型ペレトロン(5SDH-2型)で最高ターミナル電圧が1.7 MVである。また、本学加速器の特徴として90度分析電磁石を設置しており、高いエネルギー分解能を持つイオンビームを出射することが可能となっている。ビームラインは0度ビームライン及び15度ビームラインの2本が設置されており、0度ビームラインには物質分析用散乱槽が、15度ビームラインにはPIXE分析用散乱槽が設置されている。また、2009年度には、アルファトロスイオン源の主要部分及びAccelNETによるコン

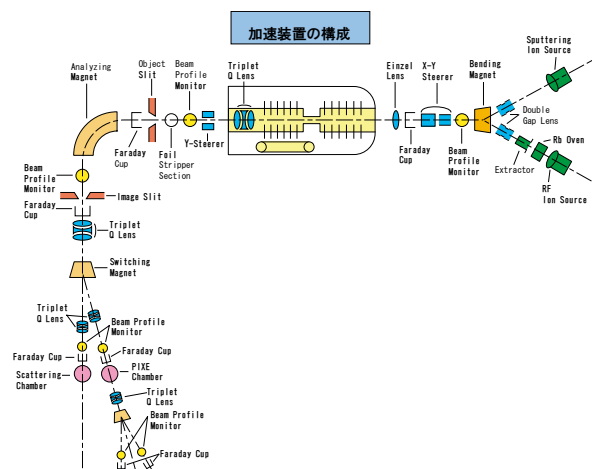


図 1 奈良女子大学加速装置の構成

トロールシステムへの変更, 2013年度には管理区域を拡張し, 15度ビームラインの延長と電磁石を設置しビームラインの増設を行った。

本稿では, 2021年度における本学加速器の利用状況, メンテナンス作業及びトラブル対応について述べる。具体的な事例として, イオン源周辺のメンテナンス及びトラブル, 90度分析電磁石周辺のトラブル, タンク周辺のトラブル及び定期メンテナンスタンク周辺のトラブル及び定期メンテナンスについて述べる。

2. 利用状況

過去5年間で, 2017年度及び2018年度はトラブルが多く発生したため, 使用時間が大きく減少した。2017年度は年間の総使用時間が1,000時間を下回り, 2018年度に至っては制御系の故障により修理時間が長期間となったために600時間となった。2019年度からは修理に長期間を要するトラブルが発生することがなく, また1回あたりの使用時間が長いことから年間の総使用時間は1,500時間を超える年が続いている。図2に2021年度における週ごとの使用時間を示す。2021年度においても2019年度及び2020年度と同様に使用していない週が続くこともあるが1回あたりの使用時間が長い週が多くあったために1,600時間の使用時間となった。トラブルの発生として, 2021年4月, 8月そして2022年1月の合計3回もタンクを開放することとなった。特に8月のタンク開放の際は復帰までに長時間を要することとなった。また, イオン源周辺に多くのトラブルが発生することとなったが幸いなことに長期間停止することはなかった。その他小さなトラブルが多々発生したがいずれも早期に加速器を使用できる状態に復帰することができた。

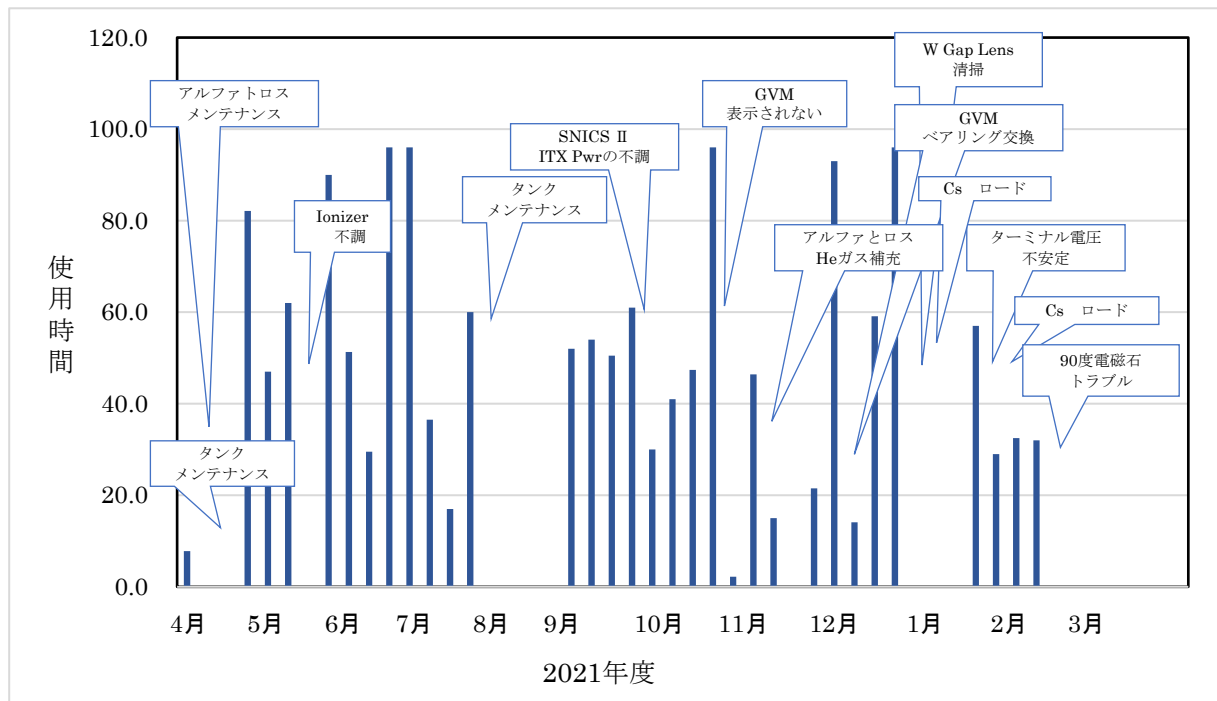


図2 2021年度における週ごとの使用時間とトラブルの発生状況

3. メンテナンス及びトラブル紹介

この章では、イオン源周辺のメンテナンス及びトラブル、90 度分析電磁石周辺のトラブル及びタンク周辺のトラブル及び定期メンテナンスについて報告する。

3.1 イオン源周辺のメンテナンス及びトラブル

先に述べたように奈良女子大学には 2 つのイオン源がある。最初にアルファトロスイオン源のメンテナンスの事例を紹介する。2020 年 5 月にアルファトロスの分解・洗浄を行った後、使用する予定がなかったため Rb のロードを行っていなかった。2021 年度は使用が予定されていたため 4 月に Rb ロードを行った。その他には 2021 年 10 月に He ガスの充てんを行った。使用している He ガスはおおむね 7 年から 8 年ぐらいの周期で補充しているが、前回 2014 年 7 月からおよそ 7 年後のことであった。

次に SNICS II のトラブルについて紹介する。5 月に Ionizer の不調が発生した(図 3)。通常、Ionizer 電流を 21 A 流すと Ionizer 用電源は 10 V ぐらいの電圧となるのが正常である。しかしこの時は 1 V 程度に低下していた。SNICS II を分解し内部を確認すると Ionizer の電流を流すワイヤが本体と接触し、ショートをおこしていた。ワイヤを本体と接触しないように Ionizer を調整して使用を再開した。次に SNICS II の荷電変換として使用されている Cs について紹介する。Cs は消耗品なので一定期間後には新たに Cs をロードする必要がある。本学では数年に一度のペースで行っているが、最近では 2018 年 11 月と 2019 年 11 月にロードを行っており、回数が多くなっていた。2021 年度も 11 月と 2022 年 1 月の 2 回ロードを行うこととなった。原因としてはイオン源下部にある手動バルブの Oリングの劣化だと考えている。2020 年度以降にタンクを開放することが多くなり、その際にイオン源を完全に密封することができず、開放のたびに Cs が酸化していたと思われる。

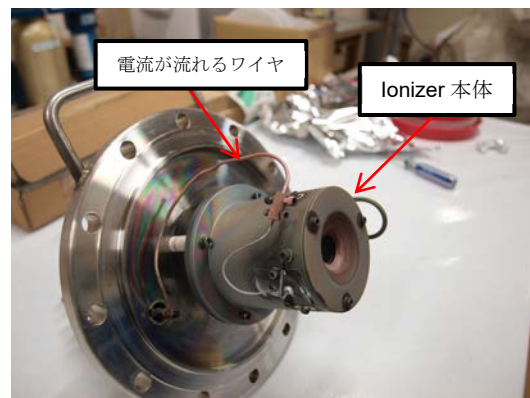


図 3 Ionizer 本体の写真

3.2 90 度分析電磁石周辺のトラブル

当初 90 度分析電磁石の電源は DANFYSIK 社製の POWER SUPPLY 823 を使用していたが、2012 年 10 月に Heinzinger 社製の Power converter 50-200 に更新を行った。更新から約 10 年後の 2022 年 1 月に電源が頻繁に停止するようになった。本体を触ってみると温かく感じられた。以前使用していた DANFYSIK 社製の電源は水冷であったが、Heinzinger 社製の電源は空冷であるため、廃熱に問題があると考えた。そのため排風口の清掃を行い、本体自体を送風機で冷却したところ、停止することがなくなった。

電磁石本体には大電流が流れることから水冷で冷却を行っている。水冷用のホースは定期的に交換を行ってきたが、コネクタを交換することはなかった。これは使用されているコネクタはネジ部分もプラスチックで製作されているため、交換時にネジを破損するリスクを避けてきたからである。そのためコネクタの内部の Oリングが劣化し水漏れが発生したと思われる。そのためコネクタを交換せざるを得なくなり、慎重に古いコネクタを取り外したため幸いネジを破損させることはなく、ほとんどのコネクタを新しくすることで水漏

れを止めることができた。

3.3 タンク周辺のトラブル及び定期メンテナンス

奈良女子大学では、毎年 4 月頃に行う定期メンテナンスとトラブルが発生した際にタンクを開放している。2021 年度は定期メンテナンスと 2 回のトラブル発生により合計 3 回タンクを開放することとなった。

まず 2021 年 4 月には定期メンテナンスとしてタンク内壁の清掃・チェーンの清掃などを行った。前回にタンクを開放し成功を行ったのは 2020 年 6 月と約 1 年ぶりとなるために多量の粉末がチェーンやリングフープに付着していた。今回タンクを開放したついでにうまく動作していなかった L.E. FC の調整を行った。内部を確認したところ、ビームを測定するカップ部分を止めるネジが緩んでいたために正常に回転せずビーム量が測定できない状態であった。

2 回目にタンクを開放したのは 2021 年 8 月である。ターミナル電圧が上昇しないために内部を点検するためであった。前回から 4 か月しか使用していないにも関わらずチェーンに粉末が付着していた。そのためにターミナル電圧が上昇できなくなっていたと思われる。また、プローブを点検すると針の先端が丸くなっていたために交換することとした。

2022 年 1 月にはターミナル電圧が安定しないためにタンクを開放し点検を行うこととなった。今回もチェーンや各部に粉末が付着していた。このようにチェーン等に粉末が付着することにより、ターミナル電圧が上昇できなく場合やターミナル電圧が不安定になるトラブルが発生する。

2021 年度は 3 回タンクを開放したが、いずれもタンクの下部には黒い粉末が落ちていたが場所や量が異なっていた。その様子を図 4 に示す。



図 4 2021 年 4 月の状況(左), 2021 年 8 月の状況(中央), 2022 年 1 月の状況(右)

4. まとめ

本稿では、2021 年度の本学におけるタンデム加速器の利用状況、メンテナンス及び発生したトラブルについて紹介した。2019 年度からは修理に長期間を要するトラブルが発生することがなく、また 1 回あたりの使用時間が長いいため、使用時間が多い年が続いている。

メンテナンス及びトラブル紹介として、イオン源周辺のメンテナンス及びトラブル、90 度分析電磁石周辺のトラブル、タンク周辺で発生したトラブル及び定期メンテナンスについて紹介した。タンク周辺で発生したトラブル及び定期メンテナンスは 3 回もタンクを開放することとなったトラブルについて紹介した。また開放した際にタンク内に落ちている黒い粉が毎回異なる状態で見られた。

This is a blank page.

2. 施設報告Ⅱ

This is a blank page.

2.1 JAEA-FRS バンデグラフ加速器の現状

Current status of the Van de Graaff Accelerator in JAEA-FRS

西野 翔*、海野 和重、吉富 寛、深見 智代、辻 智也、谷村 嘉彦
S. Nishino*, K. Umino, H. Yoshitomi, T. Fukami, T. Tsuji and Y. Tanimura

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課
(Calibration Standards and Measurement Section, Department of Radiation Protection,
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency)

* Correspondence to: S. Nishino; E-mail: nishino.sho@jaea.go.jp

Abstract

日本原子力研究開発機構 放射線標準施設棟 (FRS) では、4MV バンデグラフ加速器 (米国 NEC 製ペレトロン 4UH-HC) を用いた単色中性子校正場・高エネルギー γ 線校正場を整備しており、放射線測定器の校正や特性試験に利用されている。本稿では、FRS 加速器の概要や利用状況を報告するとともに、近年発生した故障・トラブルへの対応等を紹介する。

Keywords: FRS; Van de Graaff Accelerator; Pelletron; Neutron Calibration Field

1. FRS 加速器の概要と利用状況

日本原子力研究開発機構 (JAEA) 放射線標準施設棟 (FRS) では、放射線測定器の校正や特性試験を目的として、4MV バンデグラフ加速器 (米国 NEC 製ペレトロン 4UH-HC) ¹⁾を用いた単色中性子校正場・高エネルギー γ 線校正場を整備している (図 1)。これまでに、 $^{45}\text{Sc}(p,n)^{45}\text{Ti}$ 、 $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ 、 $^3\text{H}(p,n)^3\text{He}$ 、 $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ 、 $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ 反応を用いた単色中性子校正場 (8 keV~19 MeV) と、 $^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 反応を用いた高エネルギー γ 線校正場 (6~7 MeV) が整備済みであり、国家標準とのトレーサビリティを確保した二次標準場 (一部を除く) として、JAEA 内外のユーザーに広く利用されている。2022 年 6 月には、放射線分野で国内初となる JIS 登録試験所としての運用を開始した ²⁾。これまでは自主的な取り組みの中で、単色中性子校正場の計量トレーサビリティや試験に係る品質を確保してきたが、試験所や校正機関に関する要求事項を定めた国際規格 (ISO/IEC 17025:2017³⁾) に沿った品質保証体制を整備し、外部機関による審査を経て試験所登録を受けた。これにより、JIS 規格に定められた中性子検出器のエネルギー特性試験を、高い信頼性のもとで実施することが可能となった。

2012 年以降の、FRS 加速器の年間運転時間と施設外ユーザーによる利用日数を図 2 に示した。利用日数は、JAEA 施設共用制度 ⁴⁾のもと行われる外部利用と、JAEA 内部の研究開発に係る内部利用を区別して表示した。加速器運転時間には、上記の施設利用に加え、新規校正場開発及び品質維持活動に伴う自己利用や、コンディショニング運転等のメンテナンスに伴う運転時間も含めた。ISO や JIS 規格に挙げられたエネルギー点の校正場開発が一段落していることから、運転時間は近年やや減少傾向にあるが、利用日数は年間 10 日間程度を維持している。なお、2020 年度は、新型コロナ

感染拡大防止に係る施設利用の受け入れ停止期間が発生したため、利用日数が一時的に減少した。

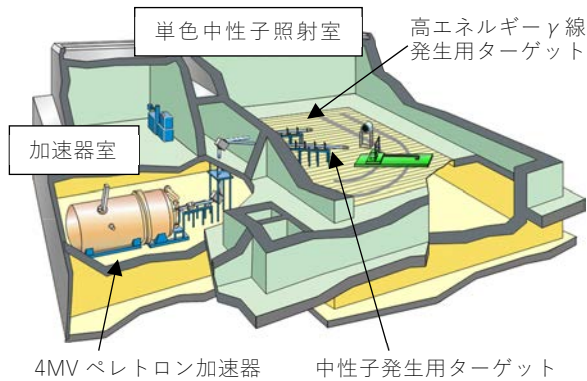


図1 加速器とビームラインの配置

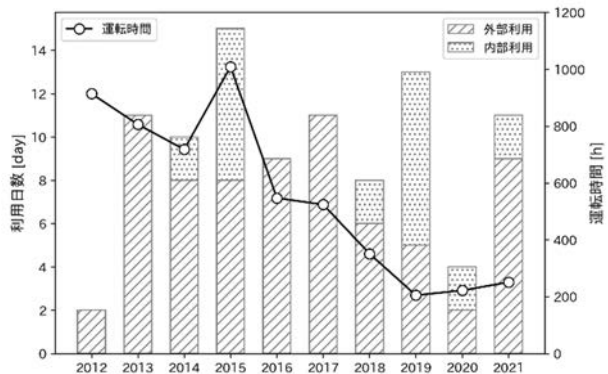


図2 年間の運転時間と利用日数

2. 高経年化機器の更新

FRS 加速器は、設置から 20 年以上が経過しており、一部の高経年化機器の更新を行いながら運用を継続している。以下に、近年更新を行った機器の例を示す。

- ・ビームライン真空排気用ターボポンプ(2014 年)： 加速器室のビームライン真空排気用に、ターボポンプが 2 台設置されており、常時稼働している。毎年実施している施設停電に備えて停止させた際に、ポンプから異音が発生し再起動不能となったため、同等品 (Pfeiffer 製 Hipace700 TC400) への更新を行った。

- ・加速器制御システム(2015 年)： 加速器及びビームライン機器の遠隔制御、状態監視を行うための加速器制御システムが老朽化し、システムの動作や通信に不具合が見られるようになったため更新した。ワークステーション、ソフトウェア (AccelNET) 及び通信機器等の更新を行い、システムが安定に動作するようになったことに加え、ユーザーインターフェースが向上した。

- ・冷却水循環装置(2016～2019 年)： イオン源、分析磁石、その他ビームライン機器等の冷却用に、冷却水循環装置 (千代田冷熱製 CB15W2) を使用している。年 1 回のメーカー保守点検を実施しているものの、経年に伴う故障・不具合が度々発生するようになり、凝縮器、圧縮機、循環ポンプ、コントローラなどの内部機器の更新を段階的に行ってきた。使用している冷媒ガス R-22 の全廃に伴い、内部機器の多くが生産終了となっている。現在は安定動作しているものの、今後は修理が困難になることから、装置の早期更新を検討する。

- ・分析磁石電源(2018 年)： FRS 加速器では、上階照射室までのビーム輸送及びエネルギー分析用に、2 台の分析磁石を使用している。過去に分析磁石電源内トランジスタバンクの冷却配管に生じたピンホールからの漏水が発生したことがあった。その後、漏水センサーを設置し、トラブルの早期発見に努めてきたが、漏水によるトラブルリスクの低減のため、冷却水を使用しない空冷式の電源 (Heinzinger PCU50-200) へ更新した。

3. 故障・不具合対応

近年発生した加速器機器の故障や不具合への対応を以下に示す。

- ・熱交換器の故障(2019 年)： 高圧発生時に、加速器タンク内で放電が頻発する事象が発生した。加



図 3 フロリナート配管についての放電痕（左）熱交換器内部の様子（右）

速器タンクを開放し内部を確認したところ、イオン源冷却用フロリナート配管に、放電痕と思われる汚れが筋状に付着していた(図 3 左)。また、フロリナート配管内をよく観察したところ、フロリナート液中に、水と思われる液体が混入していることが確認された。水の混入経路となり得るイオン源冷却用フロリナートと二次冷却水の熱交換器を取り外し点検したところ、内部金属が腐食劣化している様子が見られた(図 3 右)。熱交換器を予備品と交換し、フロリナート液中に混入した水を取り除いた後、加速電圧の昇圧試験を行ったところ、異常放電が解消されていることが確認できた。劣化した熱交換器から混入した水がフロリナート液中を移動する際に、放電のターゲットになっていたことが異常放電の原因であったと推定される。

・ビームライン内アパーチャーの軸ずれ(2021年)：中性子発生用ビームラインにてビーム輸送を行った際、ビーム電流当たりの中性子発生率が、前回使用時よりも著しく低下していることを確認した。ターゲット直近のファラデーカップやビームプロファイルモニタまでは、正常にビーム輸送されていることが確認されたため、ターゲットラインの接合部を開放し、内部の点検を行った。点検の結果、ビームライン内部機器を保護するために設置されているアパーチャー部品が軸ずれを起こしており(図 4)、ビーム輸送の妨げとなっていたことが分かった。アパーチャー部品は、イモネジを用いてビームライン内壁に固定される構造をしており、ターゲット管交換時や冷却系ポンプ等の振動によりネジが緩み、軸ずれを起こしたと思われる。部品の再固定後、正常にビーム輸送ができることを確認した。

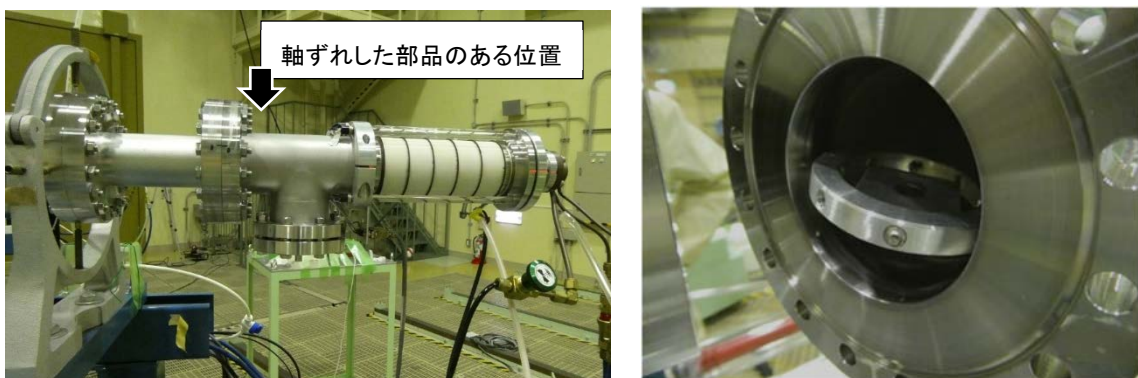


図 4 ビームライン内部で軸ずれを起こしたアパーチャー部品

・ロータリーシャフトカップリングの破断(2021年): 加速器ビーム調整中に、ロータリーシャフトが異常停止し、イオン源への電源供給ができなくなる事象が発生した。加速器タンクを開放し内部を確認したところ、アクリル製シャフトの連結に用いられるカップリングが破断していることが確認された(図5)。経年的なシャフトの軸ずれによる負担が連結部のゴム製カップリングに集中し、ボルト穴に沿った円周上に破断が生じたものと思われる。カップリングを予備品と交換し、シャフトを再組み上げた後、ロータリーシャフトの正常動作を確認した。



図5 破断したロータリーシャフトのカップリング

4. まとめと今後

FRS 加速器は、設置後 20 年以上が経過し、高経年化に伴う機器の故障・不具合が発生しているが、長期の加速器停止には至らず、運用を継続している。2022 年 6 月には、JIS 登録試験所としての運用も開始し、ユーザーの増加が見込まれるため、引き続き、高経年化機器の計画的更新、故障・トラブルへの早期対応を行い、加速器の安定運用・校正場の品質の維持向上に努めたい。また、加速器管理における運用コストの低減のため、IoT・デジタル技術の活用も今後検討を進めていきたい。

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-Testing 2006-005 (2006), 146p.
- 2) 日本原子力研究開発機構, プレス発表「日本初! 放射線測定器の JIS 登録試験所が誕生
—放射線測定信頼性確保が大きく前進—」2022/6/23,
<https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22062301/> (参照:2022/6/23).
- 3) ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
- 4) 日本原子力研究開発機構, 施設供用制度, 2022/10/5,
<https://tenkai.jaea.go.jp/facility/index.html> (参照:2022/10/5).

2.2 JAEA-FRS の静電加速器を用いた中性子測定器の信頼性確保に係る取組 Establishment of Quality Assurance System for Calibration of Neutron Measuring Instruments Using an Electrostatic Accelerator at JAEA-FRS

深見 智代*・吉富 寛・西野 翔・辻 智也・海野 和重・谷村 嘉彦

T. Fukami, H. Yoshitomi, S. Nishino, T. Tsuji, K. Umino and Y. Tanimura

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課
(Calibration Standards and Measurement Section, Department of Radiation Protection,
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency)

* Correspondence to: T. Fukami; E-mail: fukami.tomoyo@jaea.go.jp

Abstract

FRS の単色中性子校正場では、バンデグラフ加速器 (4MV ペレトロン加速器) を用いてエネルギーが揃った (単色の) 中性子を発生させることができ、中性子検出器の開発や性能評価等の目的で JAEA 内外の利用者に数多く利用されてきた。今般、FRS 加速器を用いた中性子測定器の試験の信頼性確保に係る体制を整備し、JIS 試験所として登録されたことで客観的に信頼性を証明できるようになったので、その取組みについて紹介する。

Keywords: 信頼性確保; FRS; バンデグラフ加速器; 試験所

1. はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 (以下「JAEA」という。) の原子力科学研究所内にある放射線標準施設棟 (以下「FRS」という。) は、国家標準とトレーサビリティを確保した X・ γ 線、単色中性子、RI 中性子及び β 線の校正場を有するアジア最大、世界トップクラスの校正施設である (図 1)。

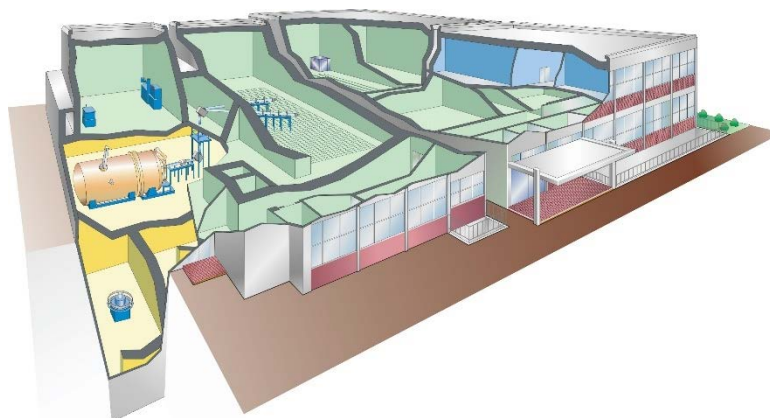


図 1 放射線標準施設棟 鳥瞰図

このうち、単色中性子校正場では、バンデグラフ加速器（4MVペルトロン加速器）で加速した陽子や重陽子をビームライン下流側先端部に取り付けた各種ターゲットに照射してエネルギーが揃った（単色の）中性子を発生させることができ（表 1）、中性子測定器の開発や性能評価等の目的で JAEA 内外の利用者に数多く利用されてきた。

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
スカンジウム	$^{45}\text{Sc}(p,n)^{45}\text{Ti}$	8keV, 27keV
リチウム	$^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$	144keV, 250keV, 565keV
トリチウム	$^3\text{H}(p,n)^3\text{He}$	1.2MeV, 2.5MeV
重水素	$^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$	5.0MeV
トリチウム	$^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$	14.8MeV, 19MeV

2. 放射線測定信頼性確保にかかる課題

線量計の信頼性確保に対しては 2016 年に実施された原子力規制庁への IAEA 総合規制評価サービス (IRRS) で、放射線モニタリングの品質保証に係る規制要求が十分でないことが勧告された。これを受け、令和 5 年 10 月から規制要求となる放射線測定の信頼性確保に対応することが課題となり、国内の関係学会などでは放射線管理に使用される測定器の点検・校正方法などの具体的な対応について検討が進められている。加速器施設の作業場については、中性子スペクトルが多様であるため、放射線測定の信頼性を確保するためには、使用する中性子測定器の応答について、広いエネルギー範囲において、特性を正確に評価しておくことが重要である。

中性子線量計は、一般的には RI 線源を用いた校正が行われ、国家標準とトレーサビリティが確保されている ^{252}Cf や $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ といった中性子線源で校正対象の中性子線量計に放射線を照射し、線量計の指示値と基準線量率を比較することで、信頼性が確保されている。しかし、中性子線量計のレスポンスは中性子のエネルギーによって大きく変化するため、中性子エネルギーの分布が広いこれらの線源での試験では明確なエネルギー特性を評価しづらい問題がある。

FRS の単色中性子校正場は、単一エネルギーでの試験が可能というエネルギー特性を評価するのに適した特徴を持っており、現在では表 1 に示す場が整備されている。しかし、エネルギー特性試験を実施するにあたっては、試験所及び校正機関の能力に関する一般的要求事項を定めた国際的な規格である ISO/IEC17025（参考文献 1）やエネルギー特性試験についての JIS を満足する品質保証体制が整っていなかった。

3. FRS での取組み

適切な品質保証体制を構築するために、関係規格に基づき、必要な要領の作成、各種試験等を実施し、測定に際して設備・機器が満たすべき条件や試験対象物の受入れから試験証明書発行までの手順を明確にした。特に試験結果の妥当性を担保するために、基準線量率、測定設備や試験結果等を定期的または試験プロセスの決まったタイミングで確認する、「内部品質管理」の方法及び、試験の精度管理のために、複数の試験事業者や校正事業者間で技能試験または試験所間比較を行う、「外部品質管理」の方法を定め、常に同じ品質で試験を実施できる体制を整えた。試験所間比較については、第1回として2020年度に産業技術総合研究所との間で試験を実施し(図2)、エネルギー特性がよく一致していることを確認した。技能試験または試験所間比較は今後も定期的実施し、FRSにおいて試験を有効に実施する能力があることを継続的に確認していく。さらに、測定に携わる人員の力量向上のため、JAEA内外においてISO/IEC17025をはじめ試験業務を実施するために必要な教育を受講させた。これにより、品質保証体制を構築し、加速器施設などの放射線管理に用いる中性子測定器の信頼性確保に必要なインフラを構築することができた。

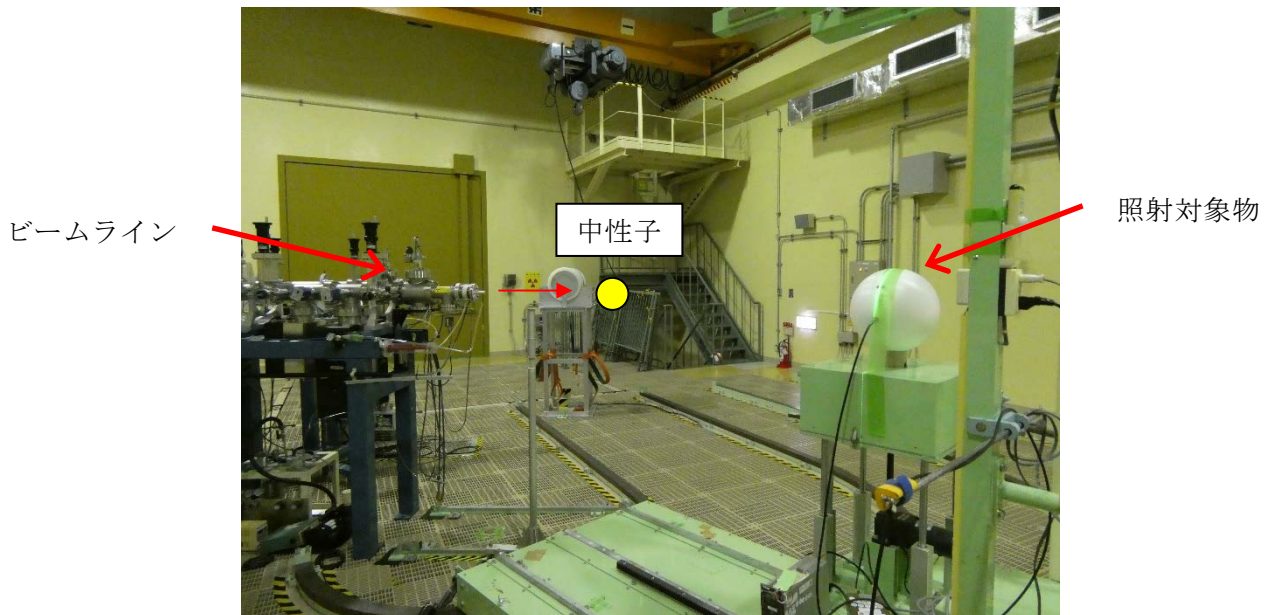


図2 単色中性子校正場における試験の様子

ISO/IEC17025の要求事項に適合しているかどうか審査し試験事業者を登録する産業標準化法試験事業者登録制度(JNLA)(参考文献2)が、産業標準化法に基づいて運用されている。FRSは第三者機関による審査を経て、2022年6月23日、日本初の放射線測定器のJNLAに基づく試験事業者として登録された(参考文献3)。これにより、放射線測定器の次の4つの項目のエネルギー特性試験について、品質が担保されていることの証となる試験証明書を発行することが可能になった。

- (1) JIS Z 4345 (X・ γ 線及び β 線用受動形個人線量計測装置並びに環境線量計測装置)
- (2) JIS Z 4416 (中性子用固体飛跡個人線量計)
- (3) JIS Z 4333 (X線、 γ 線及び β 線用線量当量(率)サーベイメータ)
- (4) JIS Z 4341 (中性子用線量当量(率)サーベイメータ)

4. まとめと将来展望

FRS では多様な照射設備を整備しており、今回第三者機関による審査を経て、放射線測定器のエネルギー特性試験に公的な保証を付けることが可能となった。これにより放射線測定信頼性を高めることに一層貢献できるようになった。

JIS 規格にはエネルギー特性試験以外にも、方向特性試験などの試験項目があるため、今後はそれらの試験に対応できる体制を構築し、JIS 試験所の登録範囲を拡充したい。また、試験結果が国際的に通用する「国際 MRA」対応の JNLA 認定を取得することで、国内のみならず海外からの試験依頼にも対応できるようになることを目指す。

参考文献

- 1) ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- 2) 独立行政法人 製品評価技術基盤機構, JNLA の概要, 2022/9/15,
<https://www.nite.go.jp/iajapan/jnla/outline/index.html> (参照: 2022/9/15) .
- 3) 日本原子力研究開発機構, プレス発表「日本初！放射線測定器の JIS 登録試験所が誕生－放射線測定信頼性確保が大きく前進－」, 2022/6/23,
<https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22062301/> (参照: 2022/6/23) .

2.3 東北大学ダイナミトロン加速器の現状 Status of Tohoku University Dynamitron Accelerator

三輪 美沙子*・遠山 翔・松山 成男・永谷 隆男

Misako Miwa*, Sho Toyama, Shigeo Matsuyama and Takao Nagaya

東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻

(Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University)

* *Correspondence to: Misako Miwa; E-mail: misako.miwa.c7@tohoku.ac.jp*

Abstract

東北大学ダイナミトロン加速器は、これまで電圧制御システムの更新による電圧安定度 10^{-5} を達成、またマイクロビーム自動収束システムを実用化した結果、マイクロビームライン実験を中心に年間稼働率が上昇傾向にある。また、東北大学の共通機器利用システムへの登録後、さまざまな研究領域から、イオンビーム分析実験や中性子照射実験が増加している。

2021 年は、2 月の地震による加速管の真空漏れのため加速管を交換し、その後順調に加速器の運転を行っていたが、ダイナミトロン加速器本体に関して 2 つの問題が発生した。一つ目は、高圧の発振現象である。高圧印可後、発振管の温度が突然上昇する現象が起こるようになった。以前ダイナミトロン加速器の発振回路パラメーター調整時の発振現象挙動と似ているため、なんらかの原因で発振が起こっていると考え調査を行った。ダイナミトロン加速器は真空管 5771 とトロイダルコイル、タンク内の電極で構成される容量によって 120kHz の発振回路を形成している。また発振回路部分と直流電圧部分の間に容量とインダクタンスで構成されるフィルター回路がある。この回路の役割は、直流回路部分に交流成分が戻らないようにすることである。この電解コンデンサのうちの 1 本が折れていることが分かった。折れたコンデンサの接着を改善させる処置を行った後、急激な真空管の温度上昇が起こらなくなり、発振現象は現在治まっている。この調査の過程で、ダイナミトロン加速器のフィードバック回路の補償コンデンサの値や、フィードバックゲインを決める抵抗の値を変更しながら、発振現象がどう変化するかのテストを行ったので、その結果も紹介する。二つ目の問題は、スパーク現象が頻発するようになったことである。この原因としてダイナミトロン加速器タンク内のベアリングのオイルの飛び散りによる絶縁破壊が起こっていると考えた。スパークが発生するタイミングに着目すると、毎回発電機のモーターをオンにして 10 時間程度経過した頃に起こること、コロナリングの一部にオイルが垂れていたこと、ベアリングの近傍にオイルの付着が見られたことから、ベアリングの温度上昇でオイルの粘性が下がり、タンク内で飛び散っていると考えた。これを防ぐために、ベアリングにカバーを新たに設置し、その結果スパークは起こらなくなった。また、スパーク発生時に CFA 電源が高い確率で故障することに悩まされたが、この対策として電源内のリファレンス電圧を生成しているオペアンプを汎用三端子レギュレーターに置き換えることで、CFA の故障を防ぐ対策を講じることが出来た。

Keywords: ダイナミトロン; 発振回路; 放電

東北大学ダイナミロン加速器は、これまで電圧制御システムの更新による電圧安定度 10^{-5} を達成し、マイクロビーム自動収束システムを実用化した結果、マイクロビームライン実験を中心に利用率が上昇傾向である。また、東北大学の共通機器利用システムへの登録後、さまざまな研究領域から、イオンビーム分析実験や中性子照射実験が増加している。加速器の状況としては、2021年2月の地震による加速管の真空漏れのため加速管の交換およびマイクロビームラインの復旧、2022年3月の地震による再度のマイクロビームラインの復旧を行い、その後順調に加速器の運転を行っていた。しかし、2022年度は、ダイナミロン加速器本体に関して2つの問題が発生した。一つ目は、高電圧の発振現象である。2021年2月13日の地震復旧後、ダイナミロン加速器の高電圧生成回路の発振管(5771)の温度が突然 3°C 程度上昇する現象が頻繁に発生するようになった。この症状は、以前ダイナミロン発振回路のパラメーター調整を行っていた際に発生した、発振現象の挙動と酷似していた。よって何等かの原因で発振が起こっている可能性が考えられるため、発振回路に異常が生じていないかを調査した。調査方法は、電圧発生回路のうち二カ所の高周波成分をモニターした。一カ所目は、ターミナルリップルモニター用の CPO 電極の信号を使用した。二カ所目は、真空管回路のキャビネット内で、真空管近傍に設置したアンテナ線からの信号をオシロスコープで観測した。図 1 にダイナミロン加速器の高電圧発生システムの概要図を示す。ダイナミロン加速器は真空管とトロイダルコイル、タンク内の電極で構成される容量によって 120kHz の自励発振回路を形成している。生成した高周波電力は RF 電極から整流部に入力され、多段整流回路によってターミナル部分に最大 4MV の電圧を生成する。電圧値は HVD および GVM でモニターしフィードバック回路に入力することで、設定値との差をゼロにするように直流高電圧発生部がコントロールされる。直流高電圧発生部では、発振管 5771 のプレート電圧を生成している。直流高電圧発生部の出力電圧 ($0\text{--}8\text{kV}$) によって、高周波電力の出力を制御している。発振回路部分と直流高電圧部の間には、CLC フィルター回路がある。この回路の機能は、直流高電圧発生部に交流成分が戻らないようにカットすることである。 3MV を印可した状態で、2カ所の信号をオシロスコープで観測し、オンライン周波数解析を行った。周波数解析には、オシロスコープの周波数解析機能を使用し、サンプリングレートは 250kS/s とした。この測定の結果、 13.5kHz 、 32kHz 、 60kHz 、 85kHz 、 120kHz の周波数成分がアンテナ線の信号として観測された。真空管温度が上昇するタイミングと同期して、 13kHz にピークをもつリップル成分の強度が上がり、周波数が 0.2kHz 程度シフトすることが確認された。それ以外の周波数に関しては、真空管温度との相関は見られなかった。このことから、 13kHz の成分が、真空管の温度上昇を招いていると考えた。ここで、CLC フィルター回路の周波数特性に着目すると、 13kHz に周波数特性のピークを持つローパスフィルターである。何等かの原因で、この周波数特性に変化が起こり、寄生発振が起こっていた可能性がある。CLC フィルター回路のコンデンサの値を確認したところ、コンデンサの取り付け部分のセラミックが断裂していた。使用しているコンデンサは、指月電機製作所製オイルコンデンサ FP50X103 KANB8A、容量 $0.02\mu\text{F}(10\text{kVDC}, 5\text{A})$ である。断裂部分を修復したところ、真空管の温度上昇が発現しなくなった。このことから、コンデンサの接続状態が不安定であったため、長期間運転による温度上昇によって、コンデンサの電氣的接続状態がわずかに変化することが原因していたと考えている。接続状態の変化によってコンデンサの容量値が微小に変わることによって、直流高電圧回路部に戻ってくる高周波電力の成分が増加し、それが真空管の発熱につながったと考えている。また、地震復旧後の運転時に発現したことを考えると、地震によりコンデンサの根本が断裂した可能性が高い。修復後、現在は正常に運転してい

る。

二つ目の問題は、スパーク現象が頻発するようになったことである。スパークが発生するタイミングに着目すると、タンク内の発電機駆動用のモーターが回転している場合に発生する。モーターを駆動させていない場合は、スパークが起こらない。さらに、モーターを駆動させた状態でも、回転開始後 10 時間以上経過したタイミングで発生する。これらの現象から、モーターと発電機を繋いでいる絶縁ロッドのベアリングのオイルが温度上昇に伴って液状化して飛散し、スパークの引き金を引いていると考えた。メンテナンス時にタンク内を観察すると、下側のコロナリングおよびベアリングに油滴が飛散していたことから、油滴が原因である可能性が高いと考えた。2021 年 2 月の地震復旧で加速管の交換を行った際、10 個のベアリング全てを新品に交換した。新品のベアリングは内部の油量が多く、油の飛散が増加していた可能性がある。さらに過去のデータを振り返ると、2007 年に東北大学ダイナミロン加速器は今回と同様の加速管の交換およびベアリングの交換を行っており、その際も 1 年程度にわたってスパークが頻発していた。その後、自然にスパークが収束していったが、この時もベアリングの油が原因だったと考えている。ここで、このような油滴がスパークを引き起こすメカニズムを考えてみる。ベアリング自体は、ターミナルからグラウンドに向かう線形の電位勾配の途中の電位に固定されている。合計 10 個のベアリングを取り付けているので、おおよそ 3MV を 10 等分した電位にそれぞれ固定されている。このような電位勾配の中でシャフトの回転によって温まった油滴が分極し、ターミナルからの静電場によって下流側から上流側へ加速されながら飛び散ったと考えると、高圧部に近づけば近づくほど、油滴の大きさが小さいことが説明できる。これらの考察から、スパークの原因は、ダイナミロン加速器タンク内のベアリングのオイルの飛散による絶縁破壊であると結論付けた。使用しているベアリングの型番は Seal Master SRP-16 で、オイル封入タイプであるが、完全に油が飛散の飛散を防ぐことはできない。そこで、ベアリング全体を覆うアルミ製のカバーを取り付けた。その結果、スパークは発生しなくなった。今回のように油の飛散を防ぐ構造を作ることは、モーターやベアリングを含む構造では避けることができないオイルによるスパークの対策として広く有用であると考ええる。

スパークに付随して、ターミナルデッキ上の電源が高い確率で故障することに悩まされ、その対策を行った。ダイナミロン加速器はシングルエンドであるため、イオン源やレンズ系がターミナルデッキに全て搭載されている。よって、これらの電源類に問題が発生すると、毎回タンクを開き大がかりなメンテナンスを行わなければならない。そこで、電源故障への対策を行った。スパーク時に故障する電源は毎回 ExB 負極側の電源 (GLASSMAN -5kV 3000uA) であった。さらに、電源の故障モードが、電源内の特定 IC (RefIC01) の故障であった。毎回 ExB 負極側の電源が故障する要因は、2 つ考えられる。一つは、スパーク時に発生する高電圧サージがカットできていないことがある。図 2 にダイナミロン加速器のターミナルデッキの構成図を示す。デッキには、デュオプラズマイオン源のフィラメント電源、アーク電源、マグネット電源、エクストラクター電源、フォーカスレンズ電源、ExB 負極側電源、ExB 陽極側電源およびギャップレンズ電源が搭載されている。電源本体は全てシールドボックスによって遮蔽されているので、高電圧サージの入力パスは、電極への高圧ケーブルであると考えている。ExB 電源以外の高圧ケーブル配線は、芯線がコイル状に巻かれており、配線自体がインダクタ成分をもつ。このため、スパーク時に発生する高電圧高速サージをカットすることができる。また、他の電源出力部にはフィルターやスパークギャップを設けているが、ExB の高圧ケーブルは、ケーブル自体を金属編線で遮蔽しているが、高速サージをカットするようなフィルターはスペース上の問題で設置していなかった。さら

に、陽極側と負極側を比較すると、負極側のケーブル長が短く、ケーブル自体のインダクタンス成分が少ない。よって、ExB 負極側電源が最もスパークによる高速サージ電圧に弱ったと考えている。ターミナルデッキのスペースの問題でフィルターやスパークギャップの設置が難しかったため、電源内部に変更を加えることを行った。ExB 負極側の電源 (GLASSMAN -5kV 3000UA) の内部基板にある RefIC01 は高精度 10V リファレンス電圧を生成する IC である。負荷変動に対して、内部回路で必要となる 10V 出力を補償する。本電源内での 10V の使用場所は、電源の外部電圧リファレンス出力およびリモート電圧制御 (0-10V) の入力部の保護回路として使用されている。本 IC は高精度 10V を生成することが可能であるが、ExB 負極電源として使用するにあたり、精度は必要ない。よって、RefIC01 を汎用三端子レギュレータに置き換えた。この結果、スパーク時に、ExB 負極側電源の故障が発生することは無くなった。3 端子レギュレータに置き換えることで、耐圧が上がり、スパーク時に高電圧サージが発生しても、耐えうる状態となったと考えている。

ここまで述べたように、東北大学ダイナミロン加速器の現状としては、2 度の大地震による加速管やビームラインの故障とその復旧作業を通して、加速器技術のノウハウを蓄積してきている。この蓄積によって現在のダイナミロン加速器は、増加傾向にあるイオンビーム実験に安定したイオンビームを供給することが可能である。

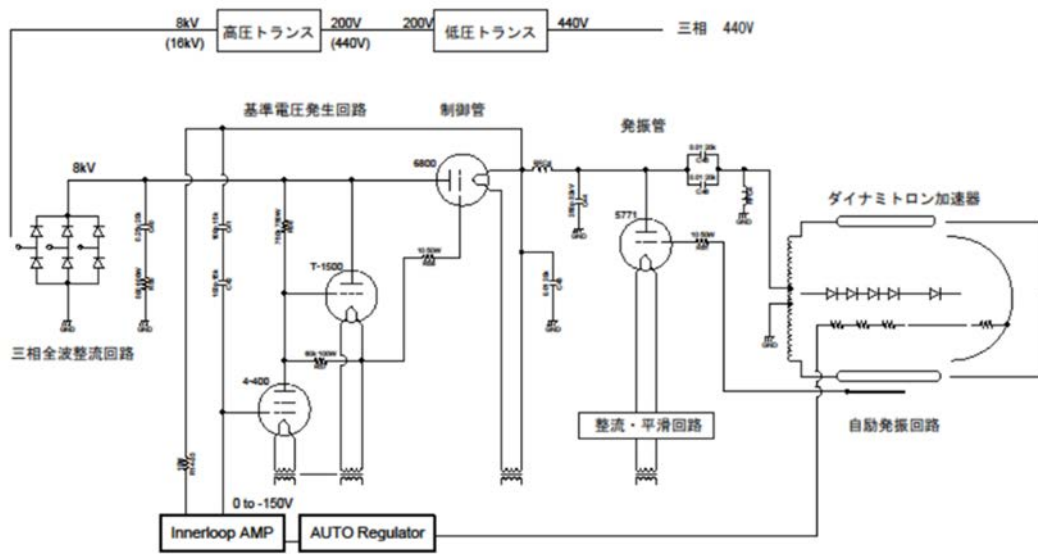


図 1 ダイナミトロン加速器の高電圧発生システム

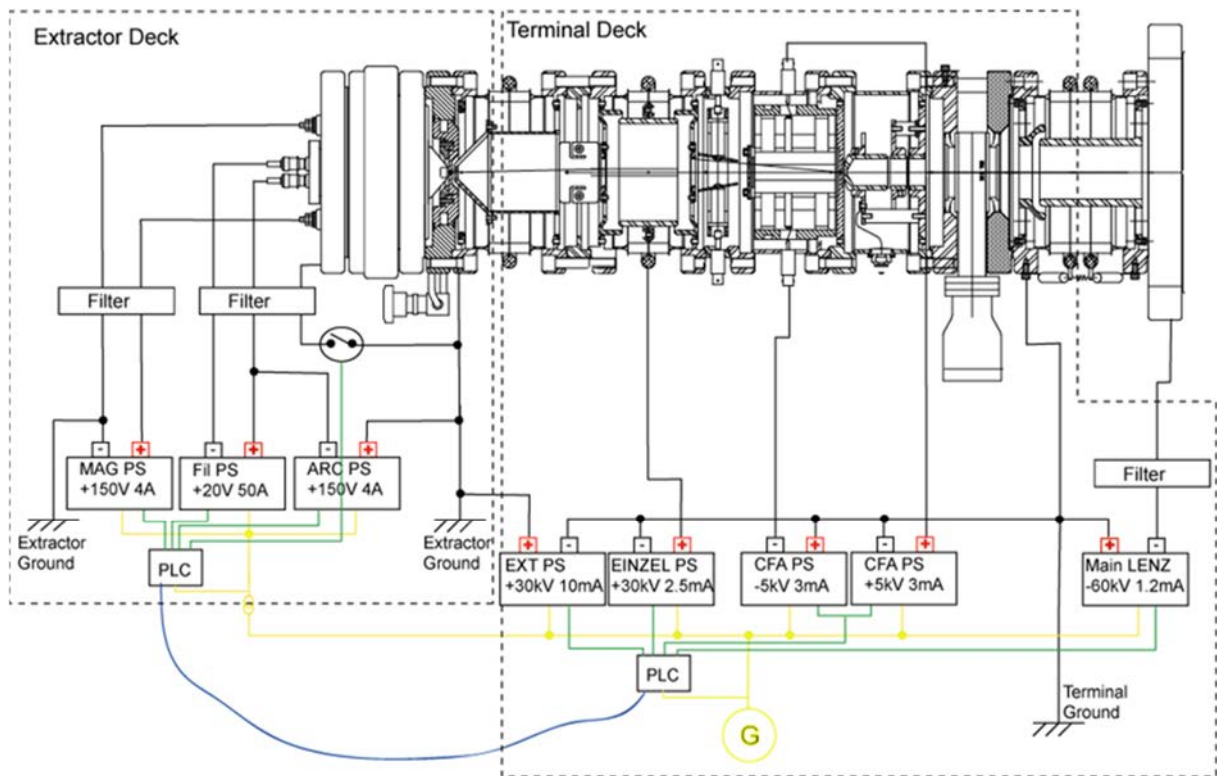


図 2 ダイナミトロン加速器のターミナルデッキの構成図

This is a blank page.

3. 特別講演と施設報告Ⅲ

This is a blank page.

3.1 可搬型 γ 線イメージング装置 GeGI5 による筑波大タンデムの加速器放射化イメージング – 加速器の放射化イメージングへの挑戦 –

Imaging for the Activated beamline in the UTTAC employing the Portable γ -ray Imaging Device GeGI5 -Pilot study for Accelerator Activation Imaging-

吉田 剛^{1,*}・松村 宏¹・松村 万寿美²・豊田 晃弘¹・中村 一¹・

榎本 和義¹・三浦 太一¹・笹 公和²・森口 哲朗²

G. Yoshida^{1,*}, H. Matsumura¹, M. Matsumura², A. Toyoda¹, H. Nakamura¹,

K. Masumoto¹, T. Miura¹, K. Sasa² and T. Moriguchi²

¹ 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

² 筑波大学タンデム (UTTAC)

* *Correspondence to: Yoshida G; E-mail: yoshigo@post.kek.jp*

Abstract

Accelerator activation is a serious problem in terms of radiation exposure of workers and waste management of radioactive materials. The portable γ -ray imaging devices can be supposed to be a breakthrough to visualize the γ -rays from the radiation source, and we have been tackling the application of this novel technology to the evaluation of accelerator activation. In this paper, We conducted an evaluation experiment for activated beamline in the 6MV tandem accelerator facility at the University of Tsukuba, employing a portable γ -ray imaging device GeGI5. Radioactivity of ^{56}Co locally produced in a flexible joint on the beamline was successfully visualized. Furthermore, the combinations of the measurement requirements (surface dose rate, source-detector distance, and measurement time) for visualization could be clarified.

Keywords: 加速器放射化; イメージング; GeGI5

1. はじめに

加速器の放射化を画像化し、放射化部位の特定や核種の種類、放射能まで短時間で知ることができれば放射線管理に大いに役立つ。現時点では、人手によるサーベイメータでのスキヤニングに頼る他、有効な評価法はなく、非効率かつ被ばくリスクが大きい。福島第一原子力発電所事故による放射能汚染を画像化するために急速に発展した可搬型 γ 線イメージング装置は、線源からの γ 線を可視化する革命的なツールであり、我々は当該技術を用いた加速器の放射化イメージングへの適用について検討を続けてきた。加速器の放射化物中の放射性核種は、原発

起源の放射性核種とは異なり、その様相も多様である。今回我々は、市販の装置である GeGI5 を用いて、実際の加速器施設での放射化の実地評価を行った。放射化ビームラインの可視化結果や、可視化に要する条件について整理したので議論を行う。

2. 可搬型γ線イメージング装置

可搬型γ線イメージング装置とは、明確な定義はないが、可視光カメラとγ線検出器を同じ装置に搭載し、可視光画像に対応する相対的なγ線強弱の分布を色相として表示する技術を備えた可搬型の装置を指す。現在実用化されている機種は、可視化方式として「ピンホール」、「(符号化)マスク」、「コンプトン」のいずれかを採用している。詳細は省略するが、前の2つは、検出部の結晶に飛来するγ線のうち、物理的なフィルターを通して光子を選別し結像させる。対して、コンプトン方式は物理的なフィルターに依存せず、結晶内でのγ線の散乱角度を基に光子の選別を行う。コンプトン方式は前者2つに比べS/Nが良いが、空間分解能で劣る傾向にある。我々が過去に実施した様々な市販機種による実地試験からは、⁶⁰Co に代表される 1MeV を超えるエネルギーの光子に対する検出効率が、加速器放射化評価に最も重要なファクターであることが明らかとなり[1]、PHDS 製 GeGI5 が最有力と判断した[2]。

当該機種は、直径 90mm 厚み 11mm の比較的大きな Ge 単結晶の検出部を持つコンプトン方式の装置である(Fig.1)。装置前方に搭載した Ge 結晶に入射したγ線が「1回散乱—1回光電吸収」を起こす事象(Events)を用いて線源位置を予想する。Fig.2 に示すように、散乱と光電吸収におけるそれぞれの座標(x, y, z)およびデポジットしたエネルギー(E)より、散乱角(θ)を決定する。線源の位置はθを頂点とする円錐で定義され、線源と結晶間の距離(r)を半径とする球面に弧(コーン)として投影される。統計の向上に伴うコーンの集積は、魚眼レンズで撮影した可視光画像上に色相変化で描画される。



Fig.1 Appearance of the GeGI5.

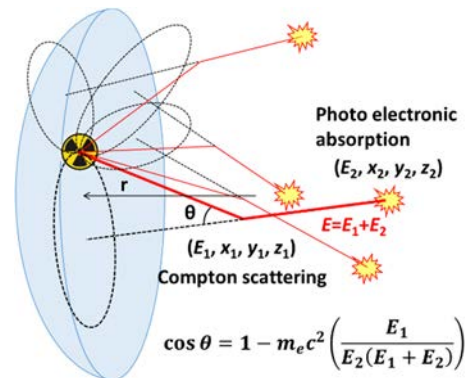


Fig.2 Schematic drawing for the imaging principle of the GeGI5.

3. 実験

2021/6/3 に筑波大学 6MV 陽子タンデム加速器施設(UTTAC)内にて GeGI5 による放射化の可視化評価を行った。当該施設は、以前の放射化調査より、コンクリートの放射化は無く、ビームラインについては、ホットスポット的に放射化が局在化していることがわかっており、主要核種は ⁵⁶Co が主体であった[3]。Fig.3 に示す、旧垂直入射ライン真下に位置する四重極電磁石(Q07-1)上流の放射化したベローズを撮影対象とした。撮影直前に NaI サーベイメータ(TCS-172, Hitachi, Ltd.)を用いてベローズの表面線量率を測定したところ、およそ 3.5 μSv/h で

あることがわかった。対象との距離を 40cm、60cm、80cm の 3 条件とし、線源部位の可視化が完了するまで、撮影の途中経過を 5 分～10 分毎に記録した。また、放射能定量のため、2.0 インチ CeBr₃ 検出器(CEBRS2.0X2.0, Mirion Technologies)での γ 線スペクトロメトリーも実施した。

4. 結果と考察

Fig.4 に GeGI5 を対象から 40cm 離れた位置に配置したときの 1238 keV γ 線由来の可視化結果の経時変化を示す。時間経過と共にコーンが画像中央の放射化したペローズに集積していく様子が観察された。この条件では、約 10 分でコーン集積より線源

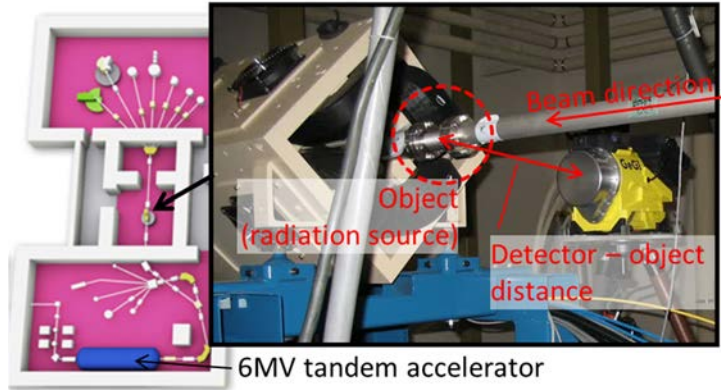


Fig.3 Evaluation points for the benchmark test of the GeGI5 in the UTTAC.

位置の推定ができた。Fig.5 に距離 40cm、60cm、80cm の 3 条件で、846 keV、1238 keV の γ 線についての可視化結果をまとめる。すべての条件で中央の線源位置へのコーン集積が確認された。

Fig.6 にコーンの基になる事象 Events の増加率を示す。Events は測定時間に比例し、距離と $1/r^2$ の関係性があることが確認された。このことより、測定対象はほぼ理想的な点線源と見なせることがわかった。各条件において、目視で線源位置へのコーン集積が認められた条件に赤丸を付記した。1238keV では、距離に関係なく 50~75 Events で集積することが確認されたが、847keV では、距離が遠くなるにつれ、より小さな Events で集積することが示された。線源中心と Ge 結晶が構成する円錐の半頂角は 40cm: 6.4° , 60cm: 4.3° , 80cm: 3.2° と装置の角度分解能 5° に対して大差なく、入射角の影響は考えにくい。当該エネルギーで散乱角も劇的に変わらないので 846 keV だけ挙動が異なる理由は不明である。

ほぼ一定の Events 値で線源へのコーン集積が見られた 1238keV の実験結果より、可視化完了の条件を線源強度(E: $\mu\text{Sv/h}$)、

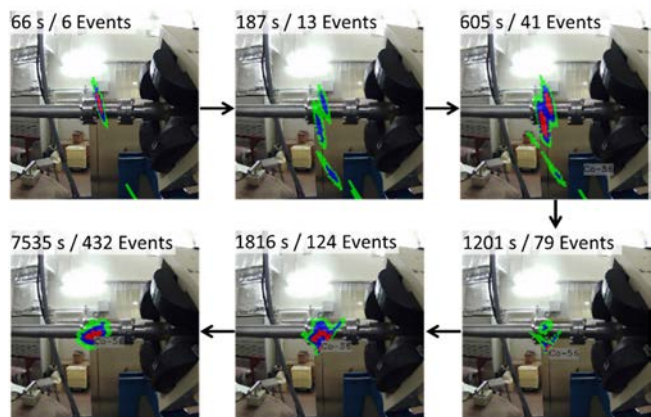


Fig.4 Time lapse of the visualization image for 1238 keV photons displayed on the GeGI5.

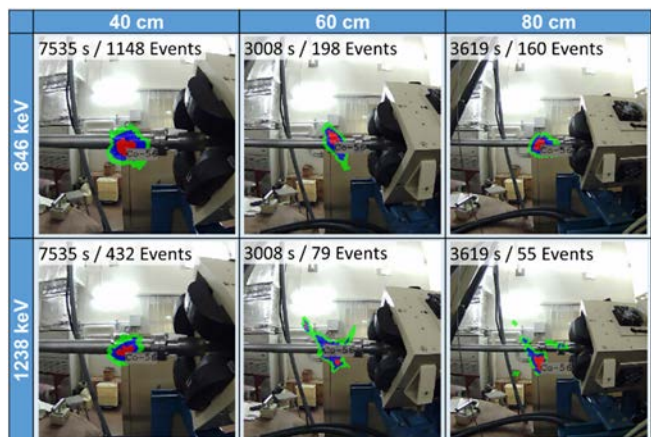


Fig.5 Summary of the visualization images for the beamline activated with ⁵⁶Co.

測定時間、装置－線源間距離(r : m)で規格化した。コーン集積完了条件を 55 Events と仮定し、Fig.6 における、40cm、60cm、80cm での Events 増加率の傾き(A)より、測定所要時間(t_{end} : s)を式(1)のように求めた。この関係より、表面線量率 $1\mu\text{Sv/h}$ の線源を 1m の距離から撮影した時の所要時間は、およそ、5~6 時間であると見積もられた。同じ距離で可視化を 1 時間で終了するには $5.6\mu\text{Sv/h}$ の線源が必要である。限定的な条件であるが、今回の実地評価より、実際の加速器現場にて、GeGI5 を用いて放射化イメージングを行う上で必要な条件を整理することができた。今回は割愛したが、GeGI5 の放射能自動定量機能についても評価し、CeBr₃ の結果をよく再現した。

$$t_{end} = \frac{55}{A} \cdot \frac{1}{E} \cdot r^2 \cong \frac{20000 \cdot r^2}{E} \quad (1)$$

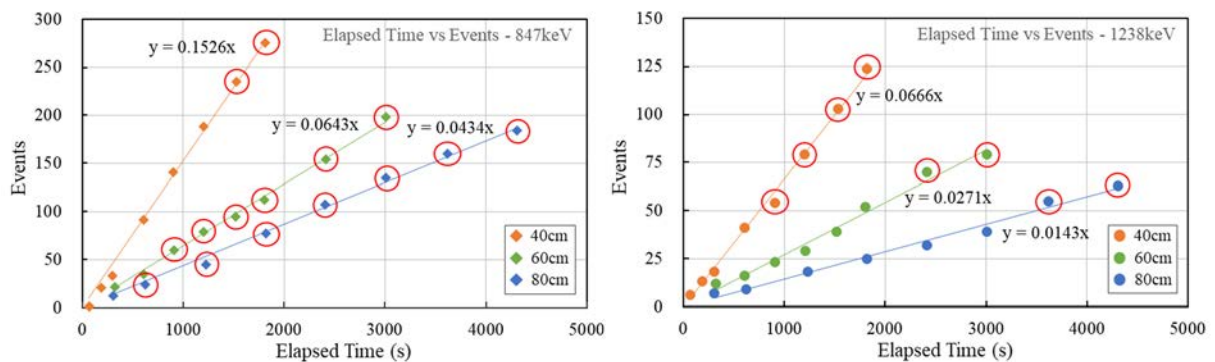


Fig.6 Time lapse of the Events which correspond to the number of a single scattering – a single absorption photons in the Ge crystal, in the measurement. Left: for 847 keV photons, Right: for 1238 keV photons. Red circle indicates completion of the visualization.

5. まとめ

可搬型 γ 線イメージング装置:GeGI5 を用いて、筑波大学 6MV タンデム加速器施設のビームライン放射化の可視化評価を行った。ベローズが局所的に ^{56}Co で放射化している様子を画像化することに成功した。放射化部位の表面線量率、線源－検出器間距離、測定時間より定式化を行い、可視化の必要条件について明らかにした。

参考文献

- 1) Yoshida, G., Toyoda, A. et al., Evaluation of Different Gamma-ray Imaging Techniques for Visualization of Induced Activity in Accelerator Magnets, Environmental Radiochemical Analysis, vol.6, 2019, pp.191-203.
- 2) 吉田剛, 他, 加速器放射化評価への応用を前提とした可搬型 γ 線イメージング装置の比較検討, 第 23 回「環境放射能」研究会プロシーディングス.
- 3) Yoshida, G., Matsumura, H. et al., Survey Methodology for the Activation of Beamline Components in an Electrostatic Proton Accelerator, Radiation Safety Management, vol.20, 2021, pp.1-8.

3.2 パレオ・ラボ Compact-AMS の現状 (2022 年)

Current status of the compact-AMS system at Paleo Labo Co., Ltd. (2022)

伊藤 茂^{1*}、加藤 和浩¹、佐藤 正教¹、廣田 正史¹、
山形 秀樹²、Z. Lomtavidze²、中村 賢太郎²

Shigeru ITOH^{1*}, Kazuhiro KATO¹, Masanori SATO¹, Masasi HIROTA¹,
Hideki YAMAGATA², Zaur LOMTATIDZE² and Kentaro NAKAMURA²

¹ (株) パレオ・ラボ AMS年代測定施設(AMS Dating Facility, Paleo Labo Co., Ltd.)

² (株) パレオ・ラボ 東海支店(Tokai Branch, Paleo Labo Co., Ltd.)

* Correspondence to: Shigeru ITOH; E-mail: itoh@paleolabo.jp

Abstract

パレオ・ラボ Compact-AMS は MC-SNICS (40 試料) とペレトロン加速器 (1.5SDH-1 : 加速電圧 500 kV) を組み合わせた炭素 14 測定専用 AMS である。2005 年から運用開始以来、順調に測定をこなし 2022 年 8 月末までに未知試料 43214 点を測定している。2021 年 10 月には IONPLUS 社製グラファイト精製装置 AGE3 と元素分析計、炭酸塩試料用処理装置 CHS2 を導入した。

2021~2022 年もいくつかトラブルが発生した。本件ではこれらのトラブルや装置状況、バイオベース度測定での ISO/IEC 17025:2017 認定についての報告を行う。

Keywords: ¹⁴C-AMS; Compact-AMS; Ionplus; ISO/IEC 17025:2017

1. 測定状況

パレオ・ラボの Compact-AMS は 40 sample MC-SNICS イオン源、入射電磁石、NEC 社製加速器 : 1.5SDH-I Pelletron、分析電磁石、ESA、半導体検出器を組み合わせた炭素 14 専用 AMS である (図 1)。AMS 年代測定施設にはこの Compact-AMS と Elementar 社製 Vario MICRO cube 元素分析計 +



図 1 パレオ・ラボ Compact-AMS システム

光信理化学製作所製自動精製ラインを組み合わせた試料前処理システム (以下、光信ライン)、炭酸塩試料や土壌試料の処理用の手動精製ライン (以下、手動ライン)、そして新たに IONPLUS 社製 AGE3 + Elementar 社製 Vario ISOTOPE select + CHS2 (以下、AGE3) が導入されている。2021 年は 2613 点、2022 年は 8 月末時点で未知試料 1890 点を測定している。2004 年の導入から 2022 年 8 月までに積算未知試料測定数は 43214 点となっている (図 2)。

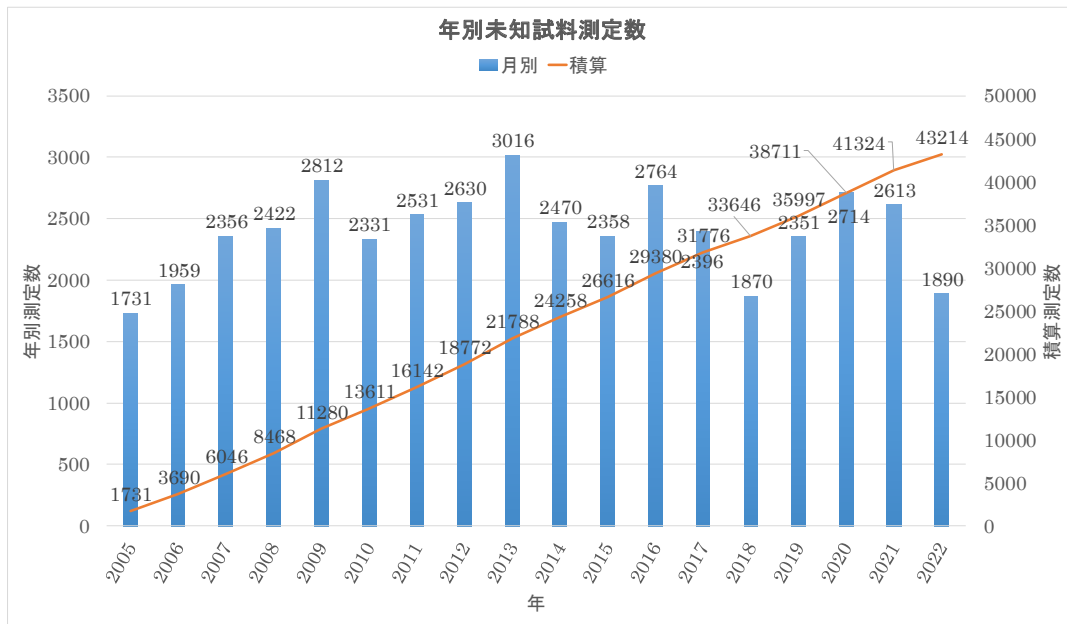


図 2 年別未知試料測定数

図 3、4、5、6 に 2021/6/1 から 2022/8/31 の間に測定した標準試料の結果を示す。各ラインでバックグラウンド試料の IAEA C1 及び富士フィルム和光純薬製安息香酸を精製し測定した平均値は AGE3 : 0.19 ± 0.04 pMC、光信ライン : 0.17 ± 0.03 pMC、手動ライン : 0.14 ± 0.05 pMC であった。すべてのラインでの平均値は 0.17 ± 0.05 pMC であり十分低い値である。IAEA C2 は AGE3 + CHS2 での炭酸塩処理時に測定し、標準値 41.14 ± 0.03 pMC に対して 41.32 ± 0.30 pMC であった。IAEA C7 は標準値 49.53 ± 0.12 pMC に対してすべてのラインの平均値で 49.55 ± 0.22 pMC でありよく一致している。

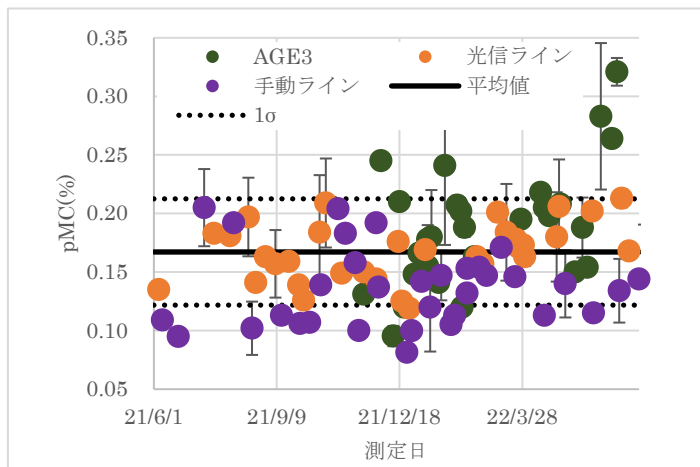


図 3 バックグラウンド試料測定結果

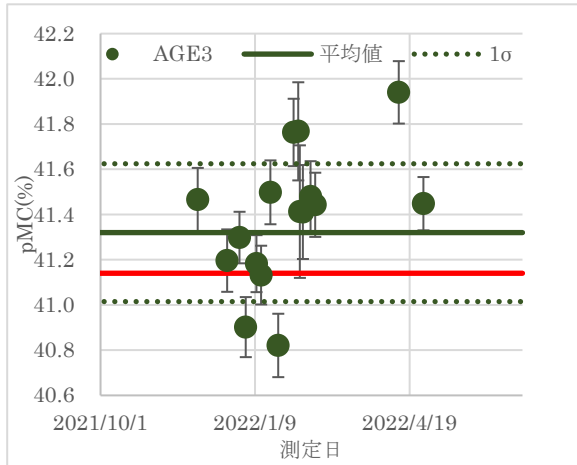


図 4 IAEA C2 測定結果

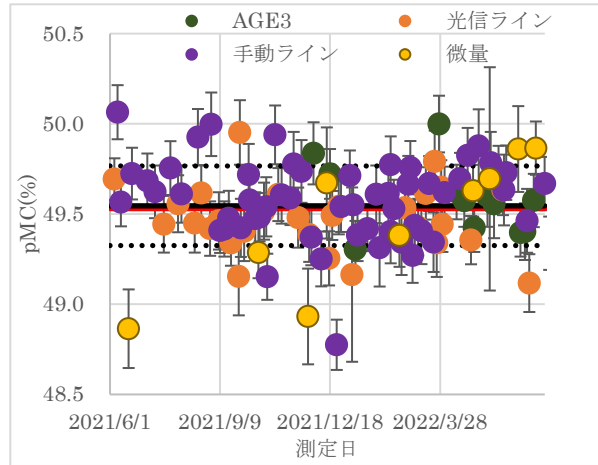


図 5 IAEA C7 測定結果

2. IONPLUS 社製 AGE3 導入

2021 年 10 月に導入した IONPLUS 社製 AGE3 システムは材や炭化物など燃焼法によるガス化を行う試料用に元素分析計、貝や有孔虫などリン酸法によるガス化を行う試料用に CHS2 とグラファイト精製装置の AGE3 を組み合わせたものである(図 6)。コロナ禍でスイスから技術者が来日できない状況であったため、設置作業はオンラインで指示を受けながら自前で行った。初期トラブルは多少あったが現在は順調に稼働している。

AGE3 は一度に 7 個の試料をグラファイト化することができ、元素分析計、CHS2 共に定常的に 1 日に 2 回処理することが可能である。すべての作業がほぼ自動化されており、試料をセットしてスタートすれば常時監視の必要はないため非常に効率的にグラファイト作成を行うことができる。

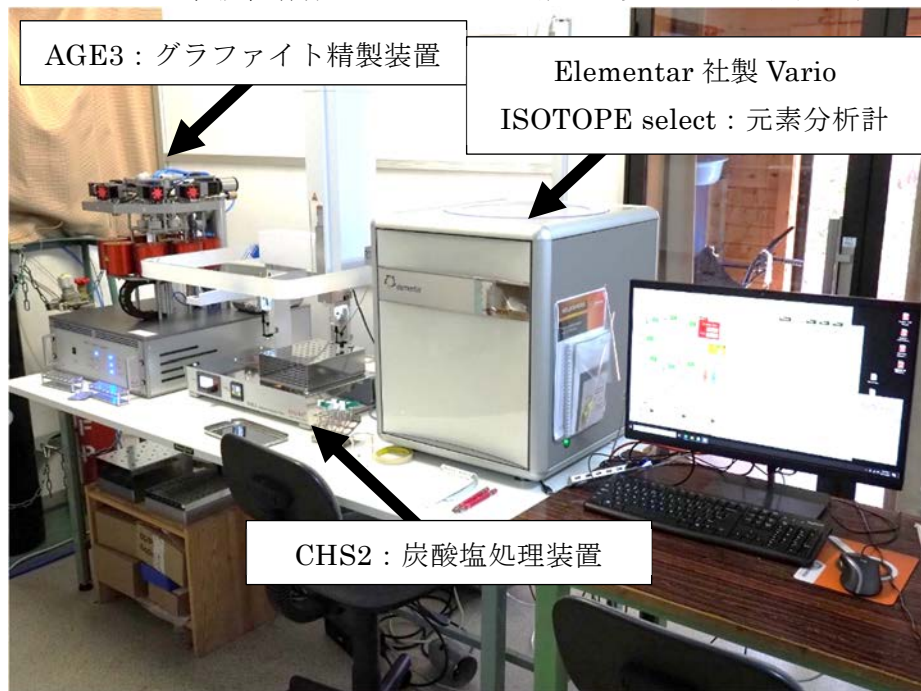


図 6 IONPLUS 社製 AGE3 システム

3. トラブル事例

例年通り小さなトラブルは発生したが数週間装置が止まるような大きなものはなかった。いくつかの例を以下に挙げる。

・2022年2月 イオン源アライメントピン故障

イオン源のカソード交換を行う Indexer Wheel のアライメントピン(図7)が動作しなくなり測定が途中で止まった。アライメントピンを新品交換で復旧した。

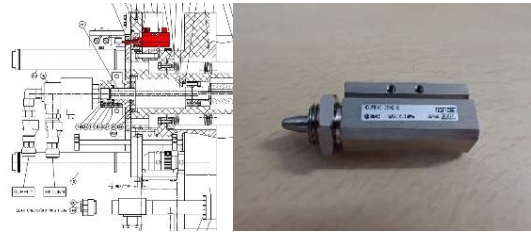


図7 イオン源 Indexer Wheel のアライメントピン

・2022年4月 GVM モーターブラシ接触不良

加速器の GVM 信号が出力されなくなった。GVM モーターを取り外し内部をチェックしたところブラシに黒い汚れが付着していた(図8)。掃除したところ信号が出力されるようになった。念のため次回メンテナンス時にブラシを交換する予定である。



図8 GVM モーターのブラシ

4. イメージョンレンズ電源追加

パレオ・ラボ AMS のイオン源内部のイメージョンレンズは、カソード電源の端子とワイヤーで接続されていたためカソード電圧と等電圧であった。2022年3月にイメージョンレンズ用のフィードスルーを追加し、イメージョンレンズ電圧を独立して設定できるように改良した。イメージョンレンズ電圧を調整することで従来に比べてイオン化の効率が良くなり、従来よりも2-3割増しのビーム電流が得られるようになった。

5. ISO/IEC 17025:2017 認定

ISO/IEC 17025:2017 とは、試験所・校正機関が正確な測定・校正を行う能力があることを権威ある第三者認定機関が認定する規格であり、認定を受けた機関はその分析・校正能力の信頼性が国際的に認められたことになる。パレオ・ラボの AMS 年代測定施設における分析業務のうち、「ASTM D6866 に準拠した加速器質量分析法(AMS)による放射性炭素の測定」を認定対象として申請を行い、2022年9月に無事に認定を受けた。ASTM D6866 ではバイオベース度の分析方法が規格化されており、この方法に従って測定試料の¹⁴C濃度を測定することで¹⁴Cを含まない化石燃料由来の炭素と現生の生物等由来の現代炭素(¹⁴C濃度が100 pMC程度)の割合を計算することができる。バイオベース度利用の例としては、化石燃料由来のプラスチックとバイオマス由来のプラスチックの混合材料で作られた素材を測定することでバイオマス由来炭素の割合を得る事ができる。今後の脱炭素社会に向けた様々な分野での活用が期待できる。ISO/IEC 17025:2017 認定を受けたパレオ・ラボで測定したバイオベース度は国際的に保証された値として扱われ、国内から輸出の際に輸出先で再度バイオベース度を測定する必要がない。今後はさらに認定範囲を広げて、年代測定試料についても認定を受ける予定である。

4. 施設報告Ⅳ

This is a blank page.

4.1 JAEA-AMS-TONO の現状 (2021 年度) Present status of the JAEA-AMS-TONO (2021)

松原 章浩^{1*}, 藤田 奈津子², 三宅 正恭², 石井 正博², 渡邊 隆広², 國分(齋藤) 陽子²,
西尾 智博¹, 小川 由美², 神野 智史², 木村 健二², 島田 顕臣², 石丸 恒存²

A. Matsubara^{1*}, N. Fujita², M. Miyake², T. Watanabe², Y. Saito-Kokubu²,
T. Nishio¹, Y. Ogawa², S. Jinno², K. Kimura², A. Shimada² and T. Ishimaru²

¹株式会社ペスコ (PESCO Co., Ltd.) ²日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター
(Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency)

* Correspondence to: Matsubara A; E-mail: matsubara.akihiro@jaea.go.jp

Abstract

日本原子力研究開発機構東濃地科学センターにある3台のAMSの内、5 MV装置(JAEA-AMS-TONO-5 MV)において2021年7月の数日間に5個のバリスタがビームラインの広い範囲にわたって破損した。この原因究明、修理・改修、安全対策のため2022年6月まで同装置の運用は停止した。バリスタ破損の原因は経年劣化であり、僅かな電圧変動により経年劣化したバリスタが地絡・破損したため過電圧が発生し、他の劣化したバリスタが破損したと推定した。

Keywords: JAEA-AMS-TONO; バリスタ; 原因究明; 経年劣化; 復旧作業

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土岐地球年代学研究所では、地質環境の長期安定性研究に関わる年代測定及びその技術開発において加速器質量分析装置 (Accelerator Mass Spectrometer: AMS) を使用している。現在当施設の AMS については、次の3台を有している¹⁾。JAEA-AMS-TONO-5 MV (NEC 製, 最大加速電圧 5 MV), JAEA-AMS-TONO-300 kV (HVE 製, 最大加速電圧 300 kV), 超小型 AMS 開発用試験装置である。本報告では、5 MV 装置において2021年度に発生した複数のバリスタ破損の状況とその原因究明について述べる。

Fig.1 は 5 MV 装置における導入時から年度毎の測定試料数の推移である。近年、測定試料数は比較的高い水準を維持してきたが、2021年度は大きく減少した。これは、同年7月にビームライン上の複数の機器でバリスタ*が破損したことにより、同年7月から2022年

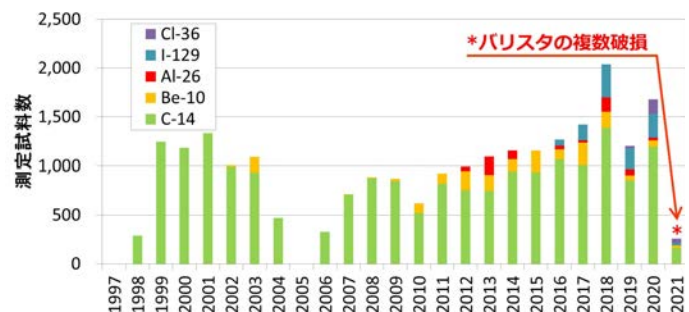


Fig. 1. JAEA-AMS-TONO-5MVにおける測定試料数の推移。2021年度は257個(内訳は、C-14:163個, Be-10:28個, I-129:27個, Cl-36:39個)となった。

*バリスタとは voltage-variable resistor の略であり、電気抵抗が電圧に対して非線形的に低下する素子をいう。この役割は、電圧スパイク等の過電圧から電子回路を保護することにある²⁾。

6 月まで装置の運用を停止したためである。その間、原因究明、修理・改修、安全対策という復旧に向けた一連の作業を行った。次章ではバリスタ破損の状況を説明する。第 3 章では原因究明の内容について述べる。第 4 章では復旧への歩みと今後の予定に触れる。第 5 章はまとめである。

2. バリスタの破損時の状況

Fig.2 にバリスタが破損したときの経緯を示す。7 月 9 日にアルミニウム・26 の測定を開始した。測定予定時間は 65 時間であり、9 日から週末にかけて無人の自動測定を行う予定であった。しかし、7 月 10 日の 18 時から 21 時にかけて、ターミナル電圧が設定値である 4.3 MV から 2.1 MV に低下していたこと、その他、ビームラインの真空度の悪化やいくつかの機器に不具合が発生していることが判明し、測定を手動停止した。

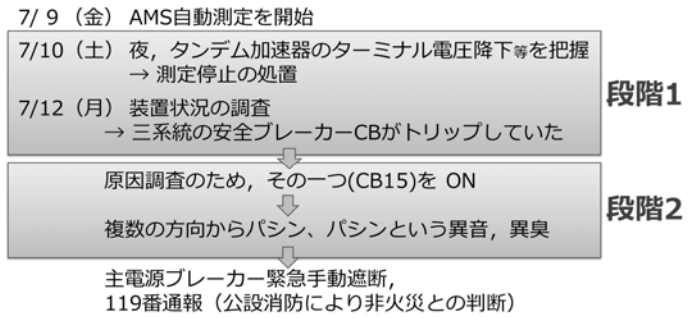


Fig. 2. バリスタが破損したときの大まかな経緯。

7 月 12 日午前、装置状況を調査した結果、ビームライン機器の 3 系統の安全ブレーカー (Circuit Breaker; CB15, CB41, CB52) がトリップしていることが分かった。原因調査のため、CB15 を ON にしたところ、複数の方向からパシン、パシンという異音が鳴り異臭が漂った。即座に主電源ブレーカーを手動で遮断し 119 番通報を行った (その後、公設消防により非火災と判断された)。その後、その異音、異臭の原因を調査した。その結果、Fig. 3 に示すようにビームラインの広い範囲にわたり、複数の機器でバリスタが破損していることが判明した。破損したバリスタは 5 個に及んだ。

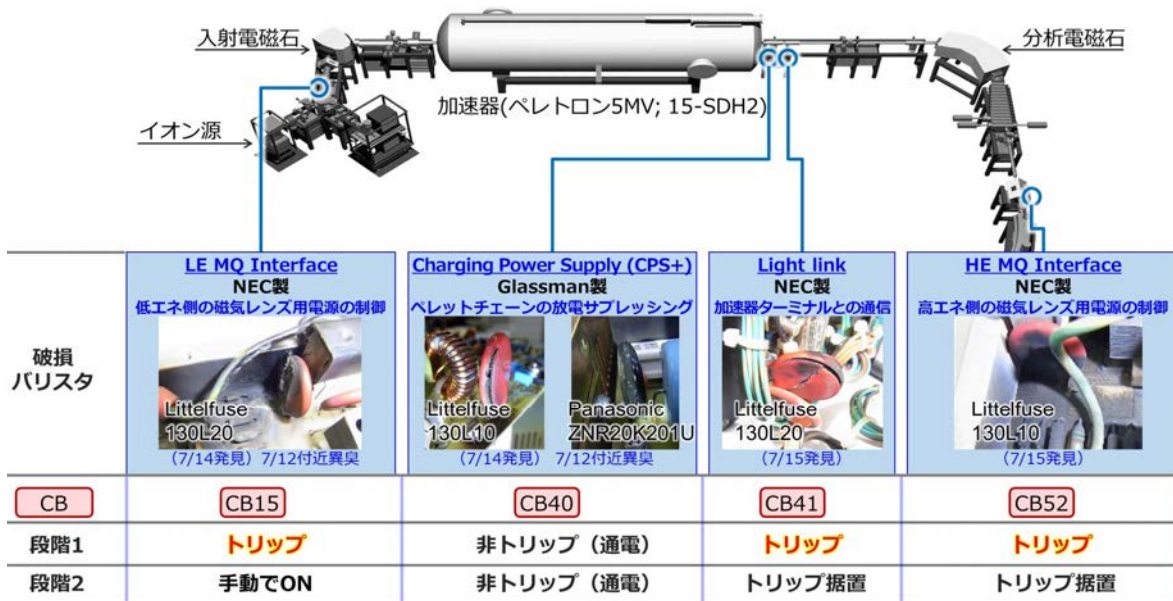


Fig. 3. バリスタの破損状況。下部の表に破損したバリスタとトリップした安全ブレーカーCBの対応も示す。破損バリスタの定格電圧 (実効値) はいずれも 130 V である。



Fig. 4. バリスタ破損の時系列とシナリオ。①と②の要因については本文及び Table 1 に示す。LE MQ と HE MQ は、それぞれ Low Energy Magnetic Quadrupole (LE MQ) Interface と High Energy Magnetic Quadrupole (HE MQ) Interface を表す。また Light l.は Light link を表す。L1, L2, L3 は 3 相交流の相順を示す。

3. 原因究明

3-1 バリスタ破損のシナリオ

一連の事象は、Fig. 2 に示すように、“ブレーカーがトリップしていた”という段階 1 と、“CB15 を ON にした”という段階 2 のように、大きく二つに分けることができる。トリップした 3 系統と破損したバリスタの関係については、Fig. 3 に示すようにそれらの系統ではいずれもバリスタ破損が生じていたことが分かる。一方、段階 2 では、CB15 を手動で ON にしたのであるが、このとき、CB41 と CB52 はトリップの状態に据え置いていた。これより、CB41 と CB52 の系統のバリスタの破損は段階 1 で生じたと考えられる。これを踏まえバリスタ破損の時系列を Fig. 4 にまとめた。装置ログや監視映像を調査した結果、CB41 に繋がる Light link は 7 月 10 日の午前 9:00 に発光を伴って故障したことが判明した。また、関連する事実より、LE MQ Interface (CB15) と HE MQ Interface (CB52) の故障は、Light link (CB41) の故障に伴うものであり、CB15, CB52, CB41 のトリップはほぼ同時に生じたと推測した。以上より、今回の一連の事象は、複数のバリスタがほぼ同時に破損したことを特徴とするものであると言える。

バリスタは一般的にその耐圧を超える電圧(いわゆる過電圧)が持続的に加わるか、あるいは過電圧が瞬間的に加わるイベントが積み重なると劣化して破損しやすくなることが知られている²⁾。これより、原因究明では各段階での過電圧の有無が重要となる。そこで、文献 3) にまとめられた過電圧の様々な発生要因を参照し、本事象のバリスタ破損を起こしうる過電圧の有無について検討した。

Table 1 は、文献 3) から抜粋した過電圧の発生要因である。結論から言えば、本事象のバリスタ破損を起こしうる過電圧の発生要因は、バリスタ地絡によって引き起こされる

Table 1. 過電圧の発生要因 (文献 [3] の表-1 より抜粋)

電圧波形	発生要因	概要
商用周波	高圧系統 1線地絡など	(省略)
	高低変電回路の 高低混触など	(省略)
	接地系の多線回路の 中性線断線など	(省略)
	① 接地系多相回路の 充電線 1線地絡	他の充電線の 対地電圧上昇
サージ*	② 回路開閉時の電流変化	誘導性の過電圧
	雷	(省略)

*サージは本文で述べる電圧スパイクに類似する。一般にミリ秒程度の持続時間を持つものをサージ、マイクロ秒程度のものを電圧スパイクという。

①の 1 線地絡による対地電圧の上昇と ②の回路開閉時(ここではバリスタ地絡時)の電流変化による誘導性の過電圧が該当する。他の要因は次の理由により該当しないと判断した。

- ・ 高圧系統に問題がある場合、故障は事業所規模で現れると期待されるが、実際は 5 MV 装置に限られた。
- ・ 中性線の断線は見られなかった。
- ・ 誘導性の過電圧を直接発生しうる数百アンペア級の単一の大型機器は当事業所内に無い。
- ・ 雷による電力のトラブルは、電力会社に確認したところ無かった。

結局、複数のバリスタが破損した各段階での開始時には過電圧は生じていなかったと考えられる。これより、バリスタはその時点で破損寸前まで劣化していたと推測することができる。

以上を踏まえて、バリスタ破損のシナリオを次のようにまとめた(Fig. 4 下部)。7 月 10 日 9:00 において何らかの原因で生じた僅かな電圧変動により破損寸前まで経年劣化したバリスタが地絡・破損した。これが引金となり、前述の①と②の要因で過電圧が発生し、他の劣化したバリスタが連鎖的に地絡・破損したと考えられる。次に 7 月 12 日では、CB15 を手動で ON にすることでダメージを負ったバリスタが地絡・破損した。次いで、前と同様にバリスタが連鎖的に破損したと考えられる。したがって、原因究明については、バリスタの経年劣化と過電圧の発生要因①と②に焦点をあてることにした。

3-2 バリスタの経年劣化の検証

バリスタの経年劣化は、バリスタ電圧 V_{1mA} の低下を伴う。バリスタ電圧 V_{1mA} とは、バリスタに定常(DC)で 1 mA 流すために必要なバリスタへの印加電圧である。例えば、破損した Littelfuse 社製のバリスタの V_{1mA} は仕様範囲で 184 V - 228 V であり、代表的には 205 V 程度である。この値は、その定格電圧(交流電圧の実効値 130 V)の $\sqrt{2}$ 倍、すなわち振幅の 184 V を少し超える程度になっている。

バリスタの経年劣化を検証するため、破損したものと同じ型式、同使用年数のバリスタ電圧を測定した。その際、Fig. 5 のような直列回路を用いた。バリスタ電圧 V_{1mA} については、電源電圧から 1 mA 流れたときの抵抗の電圧降下を差し引くこと($V_{1mA} = V_0 - IR$)より求めた。測定対象のバリスタについては、復旧作業の一環として実施したバリスタの予防保全において破損バリスタと同じ型式のものを新しいものに交換したが、この際に取外したものを対象とした。

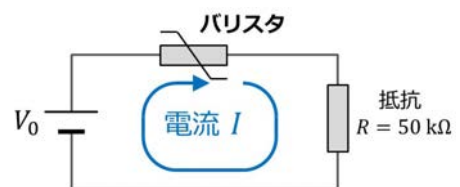


Fig. 5. バリスタ電圧 V_{1mA} の測定に用いた回路の模式図。

Fig.6(a) に本測定で得られたバリスタ電圧 V_{1mA} の頻度分布を示す。一方 Fig. 6(b) は、製造した Littelfuse 社が開示した未使用後継品(2021 年製)に対する頻度分布である。測定結果は仕様範囲内の 184 V から 228 V に含まれるが、Fig. 6(b) と比較すると未使用のものよりも平均値で 4 V 程度低い。これは、使用してきたバリスタが経年劣化していることを示すだけでなく、破損したバリスタも経年劣化していた可能性を示唆する。もっとも、破損してしまったバリスタのバリスタ電圧については推定困難であるが、熱暴走に類似した現象—バリスタ電圧が少し低下すると電流が大きくなり劣化がさらに進む現象—により、バリスタ電圧が加速的に低い方にシフトし、平均値近くの集団から離れてしまったとい

う解釈ができる。同図 (a) の頻度分布に見られる 190 V 台のバリスタは集団から離れていく状況を現している可能性がある。

3-3 過電圧の要因についての定量的検討

2-1 節では、過電圧の原因として①1 線地絡と②バリスタ地絡時の電流変化であると推測した。本節ではそれらの定量的評価について述べる。

① 1 線地絡による対地電圧の上昇

Fig.7 に示すように 5 MV 装置の電力系統は 3 相 4 線式であり、各相の交流電圧の実効値(相電圧)は 115 V である。同図のように a 相のバリスタの地絡により a 相に大電流が発生したとする。このとき、分電盤からトランスの中性点 N までのインピーダンス Z_n により[†]、分電盤の接地電位から見て中性点 N の対地電圧が上昇する。これに伴い健全相 b と c の対地電圧 V_b と V_c が上昇しうる。実際には、健全相の対地電圧は中性点 N の対地電圧と位相のずれた相電圧の重ね合わせとなる。この評価については、対称座標法と呼ばれる計算方法を用いて行った。対称座標法とは、地絡等で生じる不平衡状態(振幅と位相が正常な状態からずれる状態)における各相の電圧を、正相、逆相、零相と呼ばれる各平衡状態の和で表すことにより計算を容易にする方法である⁴⁾。詳細な計算式の導出は省略するが、計算の結果、本条件における地絡電流 I_a ならびに各相の電圧 V_a , V_b , V_c の大きさは、

$$I_a = \left| \frac{3\dot{E}_a}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + 3(\dot{Z}_n + \dot{Z}_v)} \right| = 520 \text{ A} \quad (1)$$

$$V_a = \left| \frac{3\dot{Z}_v}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + 3(\dot{Z}_n + \dot{Z}_v)} \dot{E}_a \right| = 113 \text{ V} \quad (2)$$

$$V_b = \left| \frac{(a^2 - 1)\dot{Z}_0 + (a^2 - a)\dot{Z}_2 + 3(a^2 - 1)\dot{Z}_n + 3a^2\dot{Z}_v}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + 3(\dot{Z}_n + \dot{Z}_v)} \dot{E}_a \right| = 143 \text{ V} \quad (3)$$

[†] 記号の上につく点は複素ベクトルであることを意味する。

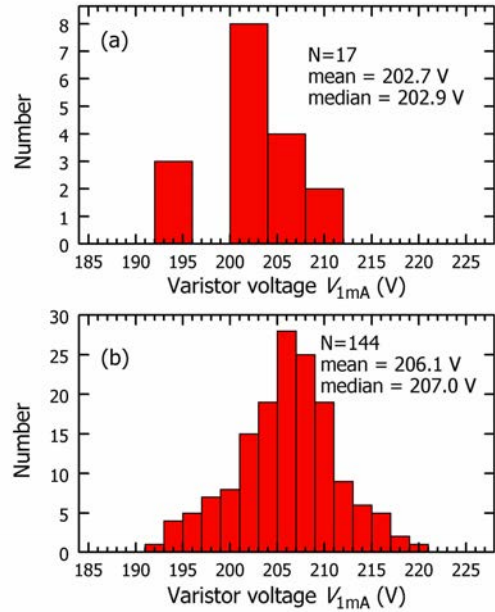


Fig. 6. バリスタ電圧 V_{1mA} の頻度分布。バリスタは Littelfuse 社製、型式 V130LA10 および V130LA20。
(a) 破損したバリスタと同型式で同使用年数の分布。
(b) 製造業者が開示した未使用後継品の分布。

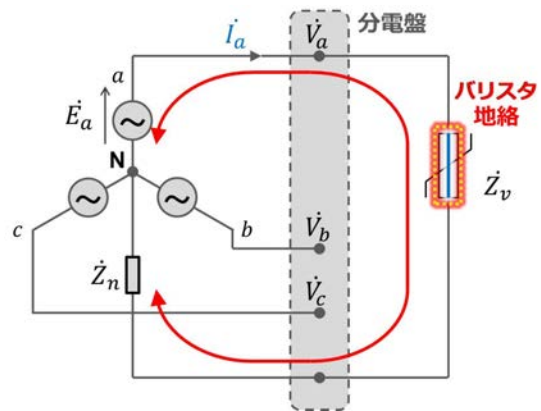


Fig. 7. 3 相 4 線式におけるバリスタ破損に伴う 1 線地絡の模式的な回路図。

$$V_c = \left| \frac{(a-1)\dot{Z}_0 + (a-a^2)\dot{Z}_2 + 3(a-1)\dot{Z}_n + 3a\dot{Z}_v}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + 3(\dot{Z}_n + \dot{Z}_v)} \dot{E}_a \right| = 103 \text{ V} \quad (4)$$

となった。ここで、 \dot{E}_a は a 相の相電圧である。また、 a はベクトルオペレーターと呼ばれ、平衡状態における各位相の差 120° を表す複素ベクトル $(-1 + j\sqrt{3})/2$ (虚数を j としている) であり、 $\dot{Z}_0, \dot{Z}_1, \dot{Z}_2$ は対称座標系での零相, 正相, 逆相に対応したインピーダンスである。これらは、相線の自己インピーダンス \dot{Z}_L , 相互インピーダンス \dot{Z}_M , 電気抵抗 R_ℓ を用いると、対称座標法より

$$\dot{Z}_0 = R_\ell + \dot{Z}_L + 2\dot{Z}_M = 0.0026 + j 0.073 \Omega \quad (5)$$

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = R_\ell + \dot{Z}_L - \dot{Z}_M = 0.0026 + j 0.007 \Omega \quad (6)$$

で与えられる。計算に用いた各インピーダンスを Table 2 に示す。Equations (2) ~ (4) の計算結果は、健全相の内、地絡した相の次の相の電圧が、バリスタの定格電圧 130 V よりも 13 V 上回ることを示している。ただし、これが直ちにバリスタ破損に結びつくわけではない。その破損は一般にバリスタで消費されるエネルギーが定格エネルギーを超えたときに起こりやすくなるため、対地電圧に加え継続時間も重要となる。例えば、地絡の継続時間を監視映像に見られた Light link の発光の継続時間である 0.1 s のオーダーとする。一方、対地電圧 143 V に対応する交流電圧の振幅(ピーク電圧) 202 V は概ね健全なバリスタのバリスタ電圧に等しいため電流を大雑把に 1 mA とする。これより、消費エネルギーは 0.01 J のオーダーと見積もられる。これに対して破損したバリスタの定格エネルギーは数十 J である。したがって、バリスタが健全である限りその状況でバリスタが破損する可能性は低い。一方、バリスタが劣化しバリスタ電圧が仕様範囲よりやや低い 180 V まで低下したと仮定した場合、その 202 V に対して電流は 100 mA 程度になり、消費エネルギーは 1 J のオーダーに達し破損の可能性が高まる。これは、破損したバリスタのバリスタ電圧が 180 V 付近まで低下していた可能性を示唆する。

上の計算は、対地電圧の上昇が地絡した相の次の相で生じることを示す。実際、Fig. 4 に示すように、段階 2 において地絡した CPS+(CB40 系統)の相(L1)は、手動で ON にした CB15 の相(L3)の次の相になっており、計算が示す相順に一致する。このような考察を段階 1 の相順に当てはめると、

Table 2. 線路の各インピーダンス

インピーダンス	計算式, 値
自己インピーダンス \dot{Z}_L	$j 2\pi f \left\{ \frac{\mu\ell}{8\pi} + \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ell \log_e \frac{\ell + \sqrt{r^2 + \ell^2}}{r} - \sqrt{r^2 + \ell^2} + r \right) \right\} = j 0.029 \Omega \quad (7)$
相互インピーダンス \dot{Z}_M	$j 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \ell \left(\log_e \frac{2\ell}{d} - 1 \right) = j 0.022 \Omega \quad (8)$
中性線のインピーダンス \dot{Z}_n	0.0076 + j 0.030 ^{*1}
分電盤からの地絡バリスタを含む線路インピーダンス \dot{Z}_v	$R_v + \dot{Z}_{L,v} = 0.020 + j 0.019 \Omega \quad ^{*2}$

Eq. (7) と Eq. (8) は直線的な線路に近似したものである⁴⁾。 ℓ は分電盤からトランスまでの相線長 45 m,

r は相線の平均半径 10 mm, d は相線の平均軸間隔 50 mm としている。

μ_0 は真空の透磁率 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$, μ は銅線の透磁率である。計算では $\mu \approx \mu_0$ としている。

*1 中性線の長さは ℓ に等しいが、導線の平均半径は 5.7 mm としている。

*2 線路長は 24.4 m, 導線の平均半径は 0.81 mm としている。

最初に地絡したバリスタは相(L2)の Light link (CB41 系統)のバリスタであり、次いで相(L3)の LE MQ interface (CB15 系統)と HE MQ interface (CB52 系統)のバリスタが地絡したと類推できる。

②バリスタ地絡時の誘導性の過電圧

Fig.8 に a 相と b 相の二つを取り出した回路図を示す。バリスタ A が地絡すると中性線に大電流が流れ誘導成分に磁気エネルギーが生成される。次に、そのバリスタが破断すると電流が途絶えるが、このとき誘導起電力により電圧スパイクが発生しバリスタ B に加わる。その磁気エネルギーの目安 U は、

$$U = \frac{1}{2} L_n I_a^2 \quad (9)$$

として与えられる。ただし、 L_n は中性線の自己インダクタンスである。前述の対地電圧の計算に用いた諸量を Eq. (9) に代入して U の値を求めた結果、11 J となった。このエネルギーは、Fig. 8 を見るとバリスタ B だけに消費されるように思われるが、

実際には、中性線を共にする数十もの各回路に分散する。分散により小さくなったエネルギーは、バリスタの定格エネルギーの 10 分の 1 未満になる。したがってそのエネルギーでは、健全なバリスタを破損させる可能性は低い。これも、バリスタ破損の原因が経年劣化であるということをサポートする。

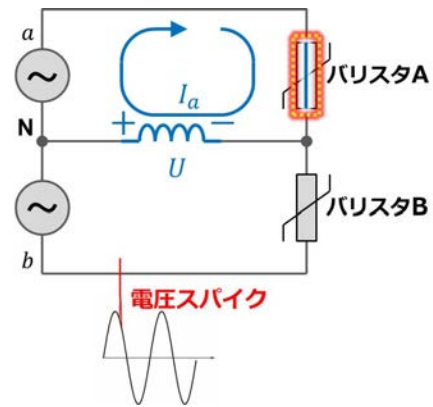


Fig. 8. バリスタ地絡時の電流変化にともなう誘導性の過電圧の発生機構。a 相と b 相だけを取り出した簡略的な回路図。

4. 復旧への歩みと今後の予定

バリスタが破損した以降、原因究明、修理・改修、安全対策を進めてきた。ここでは、その取組と今後の予定について簡単に触れる (Table 3 を参照)。安全対策の強化では、115 V を用いる全機器を対象としてビームラインに沿って 66 箇所のコンセントにサージプロテクター (TRIPP・LITE 社製 ULTRABLOK) を設置した。さらには、今般のバリスタ破損が無人の自動測定中に生じたことを踏まえ、監視通報システムの増強として、異常を早期に把握する機能を加速器制御システム (AccelNet) に追

Table 3. 復旧への歩みと今後の予定

年度	令和3 (2021) 年度									令和4 (2022) 年度								
	月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	
・出来事 ・予定		⊙ バリスタ破損				⊙ RI定期検査							⊙ RI定期検査 (線量測定)				⊙ ルーティン測定開始	
原因究明		→ 状況・原因調査, 原因検討																
		→ バリスタ電圧測定																
修理・改修, 動作試験		→ 破損機器(5台)の修理					→ 同型式バリスタ機器の調査・バリスタ交換(44台)				→ 全機器を個々に通電試験 (171台)				→ 試運転		→ 測定準備・試験測定	
安全対策 の強化		→ サージプロテクター66箇所, 監視通報システムの増強																

加した。従来の機能は、放射線の線量率超過、地震・火災が発生した場合、ファラデーカップによりビームを遮断するインターロックが働くとともにスタッフにメールが配信されるものになっていた。監視通報システムの増強では、何らかの異常によりビームラインの主要機器が1台でも停止した場合、スタッフに異常を知らせるメールが自動配信されることに加え、警備室で警報音が鳴るとともに警備室のモニターに警報メッセージが映し出されるようにした(警備員はスタッフに電話連絡する)。この措置により異常に対して迅速に対処できることが期待できる。

Table 3 に示すように、2021 年 12 月には 5 年に 1 回の定期検査が行われた。2022 年 7 月に入ってから残っていた検査項目である線量測定が行われ、定期検査は合格となった。その後、測定の準備を進めており試験測定を予定している。ルーティン測定開始の時期は 10 月頃を目標としている。

5. まとめ

2021 年 7 月に 5 MV 装置において複数のバリスタの同時破損が発生し 2022 年 6 月まで装置の運用を停止した。その間、原因究明、修理・改修、安全対策という復旧に向けた一連の作業を行った。本報告では、主に原因究明について述べた。バリスタ破損の原因は、僅かな電圧変動により経年劣化したバリスタが地絡・破損し、これが元になり、他の劣化したバリスタが破損したと推定した。破損したバリスタと同型かつ同使用年数のバリスタ電圧を測定した。その結果、バリスタ電圧は有意に低下していることが判明した。これは、バリスタの経年劣化を示唆するものである。また、連鎖的なバリスタの破損の原因となる過電圧の発生機構は、① 線地絡による対地電圧の上昇と ② のバリスタ地絡時の電流変化による誘導性の過電圧であると推定した。

復旧への歩みと今後の予定について触れた。2022 年 7 月より装置運用を再開し、測定準備に入った。本年 10 月頃よりルーティン測定を再開する予定である。

謝辞

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 加速器管理課の皆様からは原因究明について貴重な助言をいただきました。また、伯東・NEC の皆様からは原因究明にかかわる情報提供の他、修理・改修においてご協力をいただきました。

参考文献

- 1) Saito-Kokubu Y., Fujita N., Miyake M., Watanabe T., Ishizaka C., Okabe N., Ishimaru T., Matsubara A., Nishizawa A., Nishio T., Kato M., Torazawa H., and Isozaki N., Nucl. Instrum. and Methods, B 456 (2019) 271.
- 2) 渡部 修, バリスタの安全な使い方, JEITA 資料, 2014, <https://www.jeita.or.jp/japanese/exhibit/2014/1117/pdf/varistor.pdf> (accessed 2022-09-02).
- 3) 安井 晋示, 電気設備学会誌 vol.38 (2018) 81.
- 4) 間邊 幸三郎, 公益社団法人 日本電気技術者協会, 電気技術解説講座, 2007, <https://jeea.or.jp/course/contents/04110/> (accessed 2022-09-02), <https://jeea.or.jp/course/contents/01157/> (accessed 2022-09-02).

4.2 神戸大タンデム加速器の現状 2022

Present Conditions of Tandem Accelerator of Kobe University in 2022

谷池 晃^{1,2}, 古山 雄一¹, 尾崎 英梨子¹, 片山 侑己¹, 三村 治夫^{1,2}

Akira Taniike^{1,2}, Yuichi Furuyama¹, Eriko Ozaki¹, Yuki Katayama¹ and Haruo Mimura^{1,2}

¹神戸大学大学院 海事科学研究科(Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University)

²神戸大学大学院 研究基盤センター加速器部門(Accelerator Division of Center for Supports to Research and Education Activities, Kobe University)

* Correspondence to: Akira Taniike; E-mail: taniike@maritime.kobe-u.ac.jp

Abstract

神戸大タンデム加速器は米国 NEC 社製 5SDH-2(1.7 MV)で、1996 年 3 月に設置された。現在 6 本のビームラインで構成され、分析、イオンビーム照射、二次粒子・光子の生成および原子・分子衝突実験を行っている。現在は学外利用も含め、9 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。発表では、研究テーマ、運転・利用状況、故障・修理、及びメンテナンスについて報告した。

Keywords: Tandem Accelerator; 5SDH-2; Maintenance

1. はじめに

神戸大タンデム加速器は米国 NEC 社製ペレトロン 5SDH-2(1.7 MV)である。阪神淡路大震災で壊れた前身の 5SDH-1 から更新され、1996 年 3 月（当時は神戸商船大学）に設置された。ビームライン、ターゲットチェンバーを増設・改良し、現在 6 本のビームラインで構成され、RBS, ERDA, NRA, PIXE 等の分析、イオンビーム照射、二次粒子（中性子）・光子（ガンマ線）の生成および原子・分子衝突実験を行ってきた。現在（2022 年度前半）は学外利用も含め、9 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。また、2015 年度から神戸大学研究設備サポート体制構築の一環から、神戸大学研究基盤センターの加速器部門として加速器の外部利用を行っている。

本加速器設置から 26 年が経過していることはもとより、前身の加速器の時から 40 年間使用している部品もあり、各部分の劣化・故障が多くなっている。

以下に、研究テーマ、運転・利用状況、故障・修理、及びメンテナンスについて報告する。

2. 神戸大タンデム加速器利用研究テーマとビームライン利用状況

図1に神戸大タンデム加速器及びビームラインの概略図を示す。ビームライン (B/L) 名称はイオンの偏向角度で表している。本加速器を利用した研究テーマと使用B/L, 使用方法, 試料/ターゲット元素などを表1に示した。神戸大学大学院の海事科学研究科, 理学研究科, 工学研究科と, 他大学・研究機関の研究グループが利用しており, 外部利用は1年間に14週間程度である。

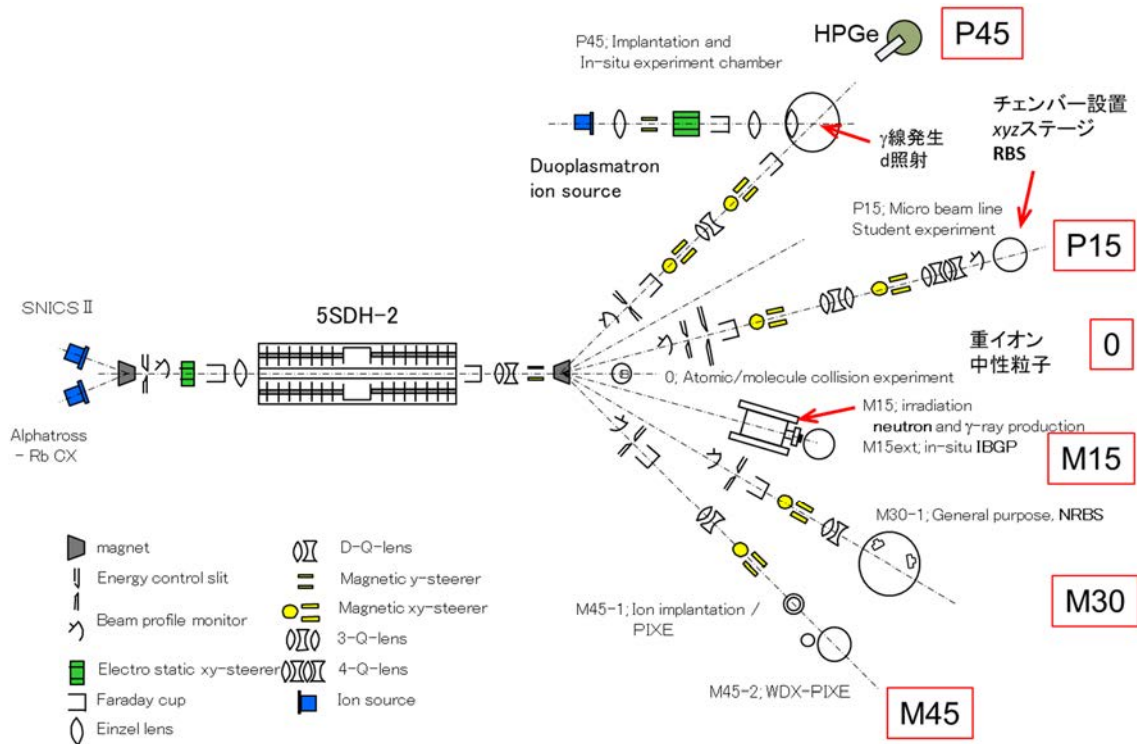


図1 神戸大タンデム加速器とビームライン

表 1 ビームラインと研究テーマ

B/L	研究テーマ	使用方法	試料など
P45	ガンマ線カメラ, Si波形	ガンマ線生成, 検出器開発	Be, PTFE
P15	イオンビームグラフト重合 岩石 学生実験	マイクロビームイオン照射 (p) PIGE RBS	ポリエチレン, PC 岩
0	金 トムソンパラボラ	重イオン測定	FC / MCP
M15	イオンビームグラフト重合, μ-PIXE, COMET, ATLAS	イオン照射 (p), 中性子発生Be (d,nγ)	Au, ポリエチレン, Be
M30	ブランケット材, DEC	NRBS, NRA,RBS, ERDA IB照射	Li化合物, 検出器開発
M30e	デモ	PIXE(大気も可,取り外し中)	塩, コイン, しおり
M45	その場 FTIR	イオン照射・分光(休止中)	放射線検出素子
M45e	デモ	波長分散型PIXE(休止中)	塩

*赤色は当方の研究室, 緑色が海事科学研究科の他の研究室,
水色が神戸大学の理学/工学研究科, 紫色は外部利用を示している。

3. 加速器運転状況

図2に積算した加速器運転時間を示す。ペレットチェーンが動いている時間がイオンを加速している時間で、加速器運転時間とすると、2020年度からの運転時間は例年よりも少ない事がわかる。2020年度は、コロナ禍による使用禁止期間とエアコン・照明の工事のために加速器を運転できない期間があったからである。さらに、2021年度は建物の外壁の点検・補修工事を行った。放射線管理区域が関係する部分の工事を行うときは、加速器を利用しなかったために、運転時間が少なくなっている。

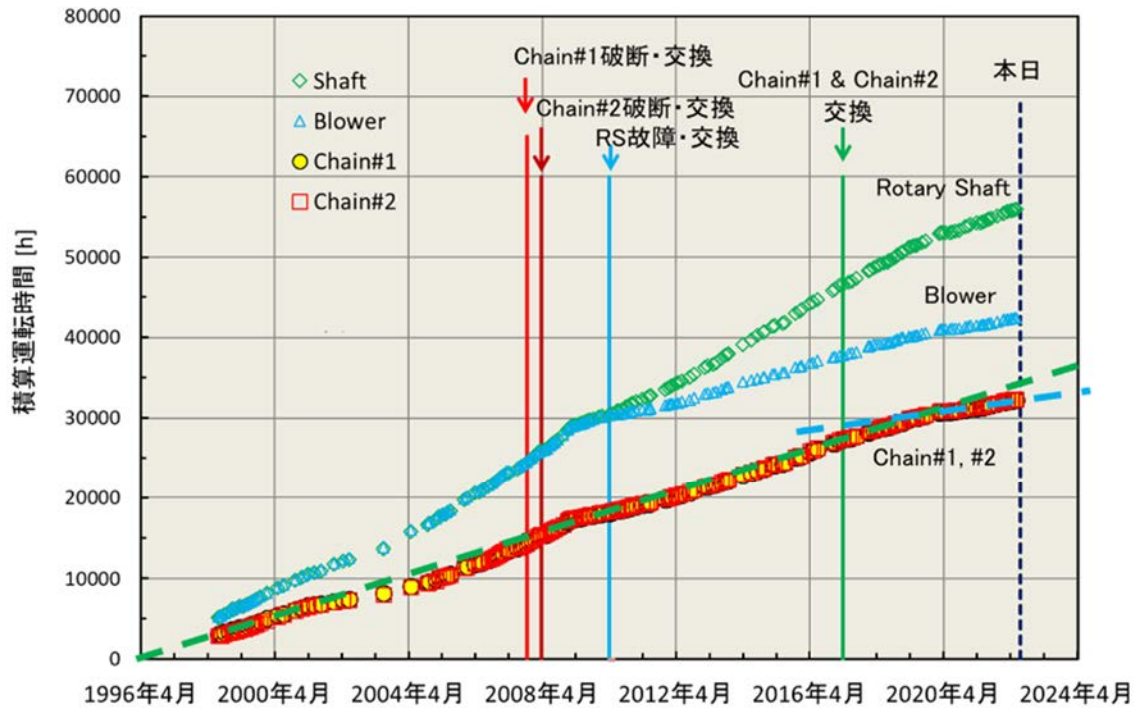


図2 神戸大タンデム加速器とビームライン

ペレットチェーンの伸びは、年2回の加速器メンテナンスの時に、モーターユニットハウジングとフランジ間の間隔を測定して観測している。その様子を図3に示す。

現在の加速器設置時から現在まで、ペレットチェーンの交換は二回行っており、図3から、次の交換はしばらく先で良いと思われる。

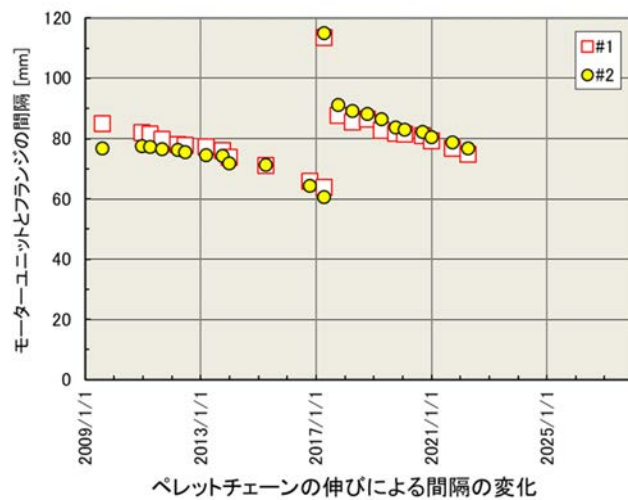


図3 ペレットチェーンの伸びの様子

4. 故障・修理及びメンテナンス状況

現時点では大きな故障等は発生していないが、機器の小さな故障・不具合とメンテナンス等について述べる。

4-1 イオン源

SNICS-2 は 2021 年の 10 月にメンテナンスを行った。それ以前から、制御コンソール上の Ionizer 電流の読み値が指示値よりも 1 割ぐらい小さい。読み値の方が正しいとして運転を行っているが、急に同じ電流になることもあるので、注意が必要である。

Alphatross は数年運転ができていない。真空ポンプ系の故障から始まり、現在は Chamber の温度が上がらずに、正常な Rb のリサイクリングが行われていないため、He⁺イオンビーム電流が出ていない。Chamber 温度が 50 度以上になる場合には数 nA の出力が見られたが、温度が上がらない時がほとんどであり、実験には使用できていない。

4-2 圧縮空気バルブシステムの不具合

いくつかのニューマチックバルブ（ゲートバルブ、FC）から圧縮空気が漏れている。すぐには修理できないので、使用していない部分は圧縮空気ラインを閉めて対応している。コンプレッサー排水はバケツに貯めていて、手動で排水している。夏季はコンプレッサー排水が結構多いため、作業を頻繁に行わないといけない。

4-3 SF₆について

冬季(12月からは)加速器タンクのコネクタ根元からの漏れが多い。接着剤で補修しているためである。時間があれば漏れ箇所を補修して運転している。春ごろから漏れはほとんどなくなる。

4-4 冷水器リモコンスイッチについて

SF₆、マグネットを冷却するための冷却水を作る冷却器のスライドスイッチ（図 4）の接触が悪く、たまに止まっていることがある。加速器運転中は SF₆ が冷却できなくなるため、温度異常で停止することが何回かあった。

4-5 RI・加速器棟の外壁点検・補修

加速器が設置されている建物の外壁点検・補修が行われた。実験棟周りに足場を組んで作業は行われた。一部の場所は管理区域になっているので、そこで作業を行う場合には、加速器、放射線取扱作業が行わないことにした。点検・補修作業は比較的使用が少ない 2 月に主な作業を行ってもらうことにして、全部で 5 週間を運転しない期間として対応した。補修後の建物の様子を図 5 に示す。



図 4 冷却水スイッチ



図 5 実験棟外壁

5. その他

2015 年度より、神戸大学研究設備サポート体制構築の一環から、神戸大学研究基盤センターの加速器部門として加速器を運営している。新しいテーマが増えてきているので、加速器利用時間の増加も見込まれる。

4.3 国立環境研究所 NIES-TERRA の現状 2021

Present status of NIES-TERRA 2021

小林 利行*・内田 昌男・荒巻 能史・万徳 佳菜子

Toshiyuki Kobayashi*, Masao Uchida, Takafumi Aramaki and Kanako Mantoku

国立環境研究所 地球システム領域

(Earth System Division, National Institute for Environmental Studies)

* Correspondence to: Toshiyuki Kobayashi; E-mail:kobayashi.toshiyuki@nies.go.jp

Abstract

国立環境研究所タンデム加速器研究施設 NIES-TERRA(NEC製 15SDH-2 最大電圧 5.0MV) は主として ^{14}C 、 ^{129}I をトレーサーとした環境研究の為に AMS (加速器質量分析法) 測定専用の装置であり、40 カソード装填の Cs スパッタ型負イオン源 (MC-SNICS)、逐次入射方式、最大電圧 5.0MV のタンデム型加速器、90 度分析電磁石、同位体比測定用マルチファラデイカップ、20 度曲げ角度の静電デフレクタ、および電離箱イオン検出器などから構成されている。当装置では、2015 年度に大規模なリノベーション改修を実施し、不必要な機器類 (CO_2 ガスイオン源、リコンビネーター、振り分け電磁石、TOF など) を撤去して省力化を図ると共に、加速管の再生や全体のビームライン再アライメントを行っている。また、2021 年 4 月に組織改編があり、当施設は従来の環境計測研究センターから地球システム領域に移管された。

Keywords: ; 施設報告; ペレトロン加速器

1. 装置の運転状況

図 1 に 2011 年度から 2021 年度までの CH 稼働時間と測定試料数を示す。例年おおよそ 1000 から 2000 時間程度の稼働時間であったが、昨年 2021 年度は大規模な故障が無かったこともあり、ほぼ前年度並みの 2484 時間を記録した。測定核種については、 ^{14}C がほぼ 100% を占める。また、測定試料数については前年度の 475 点から 1371 点と大幅に増加した。

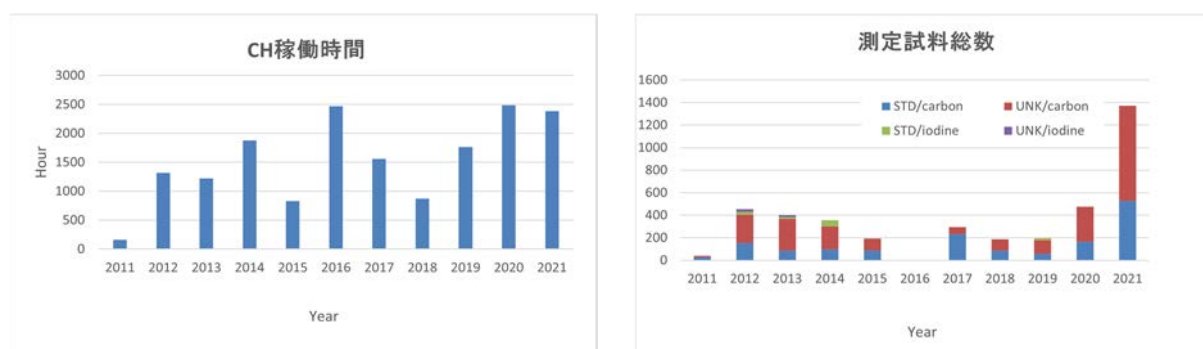


図 1 2011 年度から 2021 年度までの CH 稼働時間と測定試料数一覧

2. トラブル及び保守整備状況

表 1 に 2021 年度のトラブル並びに、保守整備状況をまとめた。以下いくつかの項目について報告する。

表 1 2021 年度の保守・整備状況一覧

2021	-5	イオン源分解清掃メンテナンス
	-8	TMP コントローラー (TCM520) 故障 (TP S1-1)
	-9	加速器タンク内保守整備
	-11	イオン源分解清掃メンテナンス
	-12	TPS (Terminal Potential Stabilizer) 調整
2022	-1	施設点検停電後に加速器タンク SF6 ガスの微小リーク発生
	-3	MQ L4-1 interface 回路焼損
	-3	イオン源分解清掃メンテナンス、Cs 補充
	-3	イオン源冷媒熱交換器の分解保守

2.1 TMP コントローラー (TCM520) 故障

ルーティン測定中に、イオン源部に設置されている真空ポンプ (PFEIFFER TPU520) が突如停止した。コントローラー (TCM520) の status は【E5】と表示されていたので、エラーコードを調べたところ、TCM の温度警告であることが分かった。そこで TCM を調査したところ冷却ファンが経年劣化して固着しているのを発見した。しかし、TCM520 はメーカーサポートがとくに打ち切られているので、汎用のファン (SANYO SAN-ACE60、図 2) を取り付け、修復した。



図 2 汎用のファン

2.2 MQ L4-1 interfaceの故障

2022年3月、ルーティン測定中に突如interlockが作動し、測定が中断された。調査してみると、AC/PC制御盤の幾つかの回路でブレーカーが遮断されていた。また、L4分析ライン付近では、焦げ臭い匂いが認められた。以上から、L4周辺の機器類に何らかのダメージが及んでいると判断した。調査の結果、MQ L4-1 interfaceのpowerが入らないので内部を調べたところ、回路の一部が焼損しているのを発見した。焼損した箇所を調べてみると、原型を留めないほど傷んだ素子が確認できた。これは回路図を参考にAC115V入力ライン上にあるバリスタであると特定した



図 3 焼損したバリスタ

(図3)。幸いにも、プリント基盤のパターンにダメージは及んでなく、アルコールで周囲を清拭したのちに、ストックしていたバリスタに交換して修復を試みた。その結果、通電試験でも異常はなく、無事に復旧させることが出来た。使用したバリスタは、オリジナルのものよりやや定格

が大きいが、使用には問題無いと判断した（定格135V→175V）。原因についてははっきりしたことは不明だが、ヒューズが切れていないうえに、AC115V入力ライン途中にはサージ避けのラインフィルターを追加していたので、外部からの影響というより、素子の経年劣化の可能性が高いと考えている。

2.3 イオン源冷媒熱交換器のトラブル

2022年3月15日、測定準備をしているときにイオン源冷媒の循環が突如停止した。点検してみると、冷媒（フロリナート）を冷却する熱交換器に用いられる冷却水（純水）の水量監視フローSWが働き、インターロックが作動したことがわかった。当装置のイオン源（MC-SNICS）には、冷媒を一定の温度に保つための熱交換器が備えられている



図4 熱交換器

（図4）。この熱交換器は冷却水を内部に備えられた複数の管に通し、その周りを冷媒が通過することで、温度を一定に保持する構造になっている。冷却水は建屋側からの供給なので、流量を調べてみたが異常は見られなかった。そこで、熱交換器を分解してみたところ、内部に錆が詰まり、冷却水通路を半分ほど



図5 熱交換器内部に発生した錆

に塞いでいたことが分かった（図5）。対処として

は、錆を落とし、出来る限り水流を確保したのちに組み上げたが、ガスケットが無かったので自作した。なお、この熱交換器は、ユーザーが日常点検できるような設計では無いことから、20年以上の使用期間を考えると更新するべきかと考えたが、現行型のMC-SNICSでは、冷媒の冷却はラジエーター+冷却ファンの空冷式に変更されているので、もし将来更新するならこの方式にするつもりである。

2.4 建屋停電後のSF₆リーク

2022年1月29日に、建屋の施設点検のための停電が予定されていたので、加速器の全システムを一旦シャットダウンした。停電後に各所を点検したところ、加速器タンクのフィードスルーやビューポート、および、ガス移送装置の圧力計取付ネジ部などからわずかにSF₆ガスがリークしているのを発見した。当施設では週に一度、Refrigerant Leak

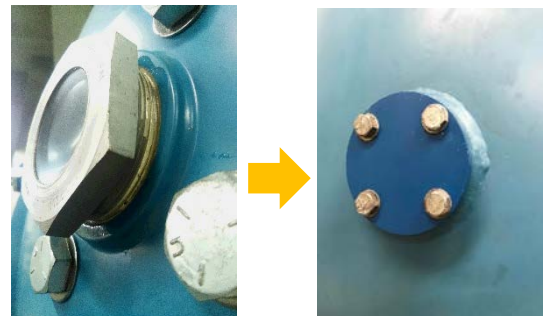


図6 ビューポートをブランクフランジに変更

DetectorでSF₆リークの点検を実施しているの
で、早期に発見できたのは幸いであった。処置

としては、フィードスルーのテフロンシール部の増し締め、ビューポートをブランクフランジに変更（図6）、圧力計取付ネジのシールテープの巻き直しなどでリークは抑えることができた。原

因については、停電により空調が停止し、室温が低下した影響ではないかと考えている。加速器室は室温のログを取っているわけでは無いので、実際にどの程度の温度変化があったのかは不明であるが、1月29日は、つくば市で最低気温-4.8℃を記録するこの冬一番の寒さであった。

2.5 加速器ペレットチェーンの潤滑について

NECペレトロン加速器では、ターミナルへの荷電移送に金属とナイロンを組み合わせたペレットチェーンを使用している。このペレットチェーンへの潤滑を行うか、また潤滑するとしたら何を塗布かの判断は各ラボで異なる様である。当施設では、15SDH-2(5MV)にはDupon社のKlytoxを使用している。これは、フッ素を主成分とし、性状は不活性で化学的に安定しているグリスであり、NECからも使用については問題無いとの回答も得ている。しかし、固体グリスであるので（ちょうどにして2くらいの粘度）、

塗布する際に薄く延ばすのが難しい、ベタベタするのでゴミが付きやすいなど取扱いが難しい一面もあった。そこで、代りに使える製品を模索していたところ、(株)和光ケミカルのフッ素オイルFSO105という製品が使いそうなので試してみた。この製品はKlytoxをエアゾール化させたスプレーで、性状もKlytox同様である。これを、昨年度(2021年8月)のタンクメンテナンスの際にチェーンに塗布してみた。スプレーなので

大量に塗布すると飛び散る可能性があるため、塗布後にチェーンをベンコットで軽く拭き取った。塗布後のコンディションについては、タンクスパークの頻度が以前より少なくなったほか(図7)、Lost-Currentも定常運転の電圧(4.5MV)に於いては、塗布後2000時間を経てもほぼゼロを維持できているなど、概ね良好な経過を辿っている。

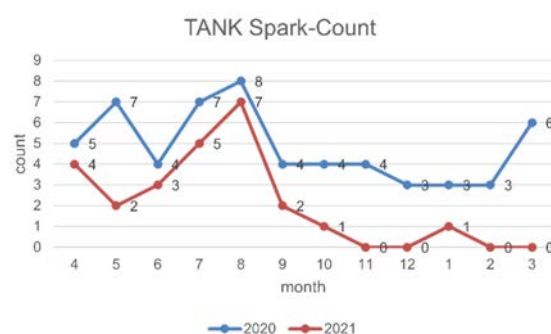


図7 タンクスパークの回数

3. おわりに

2021年度は、マシンを長期間停止させるような重大なトラブルはなかったため、測定試料数は1371点と前年度の倍以上を記録した。トラブルに関しては、TMPコントローラの故障、MQ-interfaceの回路素子焼損、イオン源冷媒熱交換器の詰まり、建屋保守停電後の加速器タンクSF6リークなどを報告した。また、ペレットチェーンの潤滑について、試験的に市販のフッ素スプレーを使ってみたところ、タンクスパーク及び、Lost-Currentの減少が認められるなどの効果を得ることができた。近年は比較的マシンの状態も安定しており、長期間の停止を余儀なくされる事態に陥ることが無いのは幸いである。しかしながら、今後の課題としては、施設運用の予算が削られていくことが予想されている。そのなかで、保守面でできることは創意工夫していきたい。

5. 施設報告 V

This is a blank page.

5.1 都市大タンデムの現状 (2020 - 2021) Present Status of the TCU-Tandem (2020 - 2021)

羽倉 尚人^{1,2,3*}・佐藤 勇^{1,2,3}・松浦 治明^{1,2,3}・内山 孝文¹・河原林 順^{1,2,3}・
林崎 規託^{1,4}

N. Hagura^{1,2,3*}, I. Sato^{1,2,3}, H. Matsuura^{1,2,3}, T. Uchiyama¹, J. Kawarabayashi^{1,2,3}
and N. Hayashizaki^{1,4}

¹ 東京都市大学/原子力研究所

(Atomic Energy Research Laboratory / Tokyo City University)

² 東京都市大学/原子力安全工学科

(Department of Nuclear Safety Engineering / Tokyo City University)

³ 東京都市大学/共同原子力専攻

(Cooperative Major in Nuclear Energy/ Tokyo City University)

⁴ 東京工業大学/科学技術創成研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所

(Laboratory for Zero-Carbon Energy, Institute of Innovative Research / Tokyo Institute of
Technology)

* *Correspondence to: N.Hagura; E-mail: nhagura@tcu.ac.jp*

Abstract

東京都市大学・原子力研究所では、2013年8月に静電型加速器の導入を決定し、2018年5月から1.7MVペレットロン・タンデム加速器(MAS1700、通称「都市大タンデム」)を運転している¹⁻²⁾。本学原子力安全工学科の学部3年生を対象とした実習科目にて荷電粒子線励起X線分光法(PIXE法)に関するテーマを2019年から実施している³⁾。また、東海大学の大学院生や本学共同原子力専攻における早稲田大学開講科目の「加速器実習」において都市大タンデムを利用している。

高エネルギー分解の分析を目的とした波長分散型(WDS)PIXEや可視光域の光を捉え測定対象物の存在形態を把握する荷電粒子誘起発光分光(Ion Beam Induced Luminescence (IBIL))法の測定も開始している⁴⁾。また、学内の他学科との連携により月・惑星探査開発を見据えた陽子線照射絶縁材料の帯電物性に関する研究のためのビームラインの整備も進めている⁵⁾。本報告では、上記に加えて2020年度から現在に至るまでの保守管理状況についても報告する。

Keywords: 1.7MVペレットロン・タンデム加速器; 都市大タンデム; PIXE; 波長分散型PIXE; IBIL

1. はじめに

1960年に開設され1963年から1989年まで研究用原子炉「武蔵工大炉」を運転してきた東京都市大学・原子力研究所は、原子炉施設としては廃止措置段階にあるが、RI施設としては引き続き教育・研究に活用しており、本学の原子力安全工学科(定員45名)、早稲田大学と共同

で運営している共同原子力専攻の学生・院生を中心に近隣の大学の学生さんにも利用していただく施設として活動を継続している。2013年8月には、新たな教育・研究用の装置として静電型加速器の導入を決定し、群馬県の株式会社パレオ・ラボ殿より移設した1.7MVペレットロン・タンデム加速器(MAS1700、米国NEC社製)の整備を開始した。イオン源をはじめとして、加速管や分析チャンバについても構築・整備していく必要があった。当研究所としては初めての放射線発生装置導入ということで、2014年から3年計画で構築し、ビーム実験が行える体制を整えていくこととした。既製品を復活させるという作業は研究として位置付けるには難しい部分もあったが、学生とともに構築作業を行うことでそのプロセスそのものも人材育成であると考え、取り組んできた。2017年度末までにはビーム実験ができる見通しが立ち、変更許可申請の手続きに入った。規制当局とのやり取りにも時間を要したが2017年12月に変更申請し、約2か月後に許可が下り、2018年5月には施設検査に合格し、正式に加速器施設としてスタートした。その後、最初の利用目的として想定していたPIXE(Particle Induced X-ray Emission(荷電粒子励起X線分光))による元素分析実験を開始するため、AMPTEK社製のSDD(Silicon Drift Detector) X-123Fastを導入し同年8月から実験を開始した。そして、2019年4月から原子力安全工学科の学部3年生を対象とした実験実習という科目の中の一テーマとしてPIXE実験を組み込むことができた。2020年度はCOVID-19の影響により長期停止を余儀なくされる状況があり、再立ち上げの際に不具合を生じることもあったが、その都度タンクをあけてメンテナンスを行うなど対応し、運転を継続することができている。また、学内の機械系学科の研究室に利用していただけるようになり稼働時間は増加傾向にある⁵⁾。



Photo.1 アライメント作業の様子



Photo.2 学生実験の様子

2. メンテナンスの状況

この1年間に行った主なメンテナンス作業としては、ビームラインアライメントの再調整とストリッパーガスラインの変更がある。ビームラインのアライメントに関しては、加速器構築当初に当然行っていたが、ビームは通せていたものの十分な状態とは言えないまま運転をスタートしていた。PIXE分析ではターゲット部で1nA程度のビーム電流が得られれば良いということもあり、この状態で運転を行っていたが、ユーザーが増えるに従い、さらに高いビーム強度が得られないかという依頼もあり、アライメントを再調整することとした。すべてばらし、一からやり直すという決断をし、約1か月をかけて修正を行った(Photo.1)。その結果、ビーム強度を約1桁向上さ

せることができた。ストリッパーガスラインに関しては、リークがみられたことから、供給ラインを見直すこととした。また、N₂ガス導入バルブの駆動機構に不具合が生じたが、分解洗浄を行うことで、正常に動作するように改善できた。

3. 学生実験などの教育目的での利用状況

本学の原子力安全工学科では、3年次の前期に「原子力実験実習」という必修科目が配置されている。3年次後期の研究室配属を前に学科の全教員が一テーマずつ担当し、これらの実験実習を通じて各専門領域の理解を深めることを目的としている。そのテーマの一つとして2019年度より都市大タンデムを用いたPIXE実験を開始した。一学年45名程度在籍しているが、一班あたり10名程度に分け、実習を行っている。元素分析法に関する実験実習としては蛍光X線分析装置を用いたものなどが別途用意されており、内容的に重複するところもあるが、本テーマでは、加速器の基本的な原理の理解をはじめ、イオン源からビームを引出しターゲット部まで輸送することも含めて学ぶことを目的としている。研究室の4年生にTAを務めてもらい、後輩に指導することを通じて4年生自身も理解を深めるという取り組みを行っている(Photo.2)³⁾。本実験を通じて、加速器を運転することや、ビームを利用した実験における難しさや工夫についても少しは実感してもらえているようで、興味を喚起することにつながっている。

また、2020年度からは東海大学大学院・応用理化学専攻の「放射線計測特論」にて、「タンデム加速器を用いたPIXE法による元素分析の講義と実習」と題して一コマ実施させていただけることになった。2020年度はオンラインでの実施となったが、2021年度は対面で一緒に実験を行うことができた。今後も継続して実施を予定している。また2021年度からは本学大学院・共同原子力専攻における早稲田大学開講科目の「加速器実習」の一コマに都市大タンデムによる実習を組み込むこととなった。大学においては研究とともに教育への貢献が求められており、都市大タンデムの用途の重要な部分であると考えている。今後も幅広く活用していただけるよう、整備を進めていきたい。

4. ビーム応用研究の取り組み

2020年度から開始した波長分散型(Wavelength-dispersive spectroscopic(WDS))のPIXE分析システムの開発に関する研究⁶⁾では、当研究室で以前より蓄積されてきた中性子ラジオグラフィにおける画像処理技法⁷⁾を適用することでコンパクトな体系でありながらエネルギー分解能を劣化させないという特徴を有する分析装置の開発を目指している。イオンビームを用いた簡便で高感度に測定できる分析手法は、数多くのサンプルを対象とする場合に非常に有効である。エネルギー分解能を化学結合状態の差異を検出可能なレベルに引き上げることができればさらに用途が広がると考えられる。WDS-PIXE法に関しては従来から研究されているが、エネルギー分解能を向上させるために物理的にX線源と検出器との間の距離を離す必要があり、検出効率がよいとは言えない状況にあった⁸⁾。そこで高い集光効率を維持するために距離を縮め、劣化してしまうエネルギー分解能を画像処理技法の適用により従来法と比べて遜色ない程度に保つシステムの構築を目指している。

ビーム利用を開始してから、様々な機関の方々と連携していく中で、こうした研究も開始できるようになった。今後も安定的に運転を継続しつつ、特徴ある研究テーマの推進にも努めていきたい。

5. まとめ・今後の計画

2018年に運用を開始した都市大タンデムは、学生実験向けとしてPIXE分析実験をスタートしてから、徐々に利用の拡大を図り、教育面では、他大学の学生さんを対象にした実験実習としての活用を始めるに至り、研究面においても様々な共同研究を通じて、特徴ある研究テーマを開始しつつある。2023年4月には運転開始から5年を迎えることになり、定期検査・定期確認の受審が必要になる。当研究所としては、特定許可使用施設として初めてこれらの検査等を受審することになるため、十分な準備を整えて臨みたいと考えている。また、都市大タンデムはまだまだ進化の途上にあるとの意識を持ち、利用しやすい施設・設備になる様に一層の努力をしていきたいと思っている。引き続き、関係機関の皆様からのご指導、ご支援を受けながら優れた施設として認めただけよう改善を図っていきたい。

参考文献

- 1) 羽倉尚人ほか, 東京都市大学原子力研究所における 1.7MV ペレトロン・タンデム加速器システムの構築作業及びそれを通じた人材育成, *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, 17(3-4), pp. 111-117 (2018), DOI:10.3327/taesj.J17.021.
- 2) 大学加速器連携協議会, 大学加速器施設一覧 (第二版) (2020年3月), https://www2.kek.jp/accl/KEK_University/files/catalog2.pdf (accessed 2022-09-24).
- 3) 羽倉尚人, 都市大タンデムの現状と実験実習プログラムの構築, 第67回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学, 14p-PA2-85, 2020/3.
- 4) 羽倉尚人, 都市大タンデムの現状と実験実習プログラムの構築, 第69回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学&オンライン, 25p-F308-3, 2022/3.
- 5) 小森あかね ほか, 陽子線誘起二次電子計測システムの構築, 宇宙科学技術連合講演会, 4E02, 2021/11.
- 6) Koki Ushijima, et al., "Development of an ultra-high-resolution WDS-PIXE system by using image processing," 2021 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2021).
- 7) Junpei Koide, et al., "Super resolution for resonance absorption imaging by reconstruction with sub-pixel shifting," Proc. of 2017 IEEE NSS/MIC, Hyatt Regency, Atlanta, Georgia, USA, 21-28 Oct. 2017.
- 8) J. Hasegawa, et. al., "Development of a high-efficiency high resolution particle-induced x-ray emission system for chemical state analysis of environmental samples," *Rev. Sci. Instrum.*, 78, 073105, 2007, DOI:10.1063/1.2756623.

5.2 QST 量医研静電加速器施設 (PASTA&SPICE) の現状 2022 Progress report of QST-Chiba electrostatic accelerator facility (PASTA & SPICE)

及川 将一^{1*}, 石川 剛弘¹, 磯 浩之², 樋口 有一², 松田 拓也²

Masakazu OIKAWA^{1*}, Takahiro ISHIKAWA¹,
Hiroyuki ISO², Yuhichi HIGUCHI² and Takuya MATSUDA²

1 量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門 量子医科学研究所
(Institute for Quantum Medical Science, Quantum Life and Medical Science Directorate,
National Institutes for Quantum Science and Technology)

2 株式会社 巧 (TAKUMI Co., Ltd.)

* Correspondence to: Masakazu OIKAWA; E-mail: oikawa.masakazu@qst.go.jp

Abstract

量子科学技術研究開発機構量子生命・医学部門量子医科学研究所 (QST 量医研) の静電加速器施設 (PASTA&SPICE) には、High Voltage Engineering Europe B. V. (HVEE) 製の Model4117MC+ タンデトロン加速器 (最大ターミナル電圧 1.7 MV) が設置されており、3 MeV 程度の $^1\text{H}^+$ を利用したマイクロ PIXE 分析やマイクロビーム細胞照射などの実験に広く利用されている。昨今、当施設のマイクロビーム細胞照射装置 SPICE (Single Particle Irradiation system for Cells) では、現状のプロトンより高 LET 粒子を用いた細胞間の照射応答に対する線質効果の検討が研究テーマとして掲げられており、SPICE への $^4\text{He}^{2+}$ イオンの導入が期待されている。そこで当施設では、その期待に応じる形で 5.1 MeV の $^4\text{He}^{2+}$ イオン (α 粒子) のマイクロビーム・シングルイオンヒット照射を実現する「SPICE- α 」の技術開発を実施している。前回の当研究会では、直径 10 μm 以下のマイクロビーム形成に成功したものの、イオン源荷電変換用リチウムオープンに熱損失の問題があり、ビーム電流の増強が今後の課題がある旨を報告した。本稿では、QST 量医研静電加速器施設 (PASTA&SPICE) の 2021 年度の利用状況を紹介すると共に、SPICE への $^4\text{He}^{2+}$ イオンのビーム輸送実験の現状について報告する。

Keywords: QST-Chiba; Tandetron accelerator; Ion beam analysis; Microbeam; PIXE; PIGE

1. はじめに

QST 量医研静電加速器施設では、1999 年にヴァンデグラーフ加速器から最大ターミナル電圧 1.7 MV の HVEE 製タンデトロン (Model 4117MC+) に更新し、2000 年度からビーム提供を開始した。加速器更新当初は、PIXE 分析に主眼を置いていたが (PIXE Analysis System and Tandem Accelerator: PASTA)、低線量/低線量率放射線影響研究のニーズの高まりにより、2003 年よりマイクロビーム細胞照射装置 (Single Particle Irradiation System to Cells: SPICE) の開発が進め

られ、2008 年頃よりユーザー開放されるようになった。ここ数年来は、ユーザーがマイクロ PIXE/PIGE 分析とマイクロビーム細胞照射の実験利用に二極化しており、マイクロビームに特化した利用状況となっている^[1-4]。なお、当施設は QST の共用施設に指定されており、産学官の研究開発に携わる研究者・技術者に幅広く利用してもらえるよう「施設共用」の取り組みが進められている。

2. 2021 年度の利用状況

対象期間 2021 年 4 月～2022 年 3 月において集計された、PIXE と SPICE のマシンタイム利用の内訳を図 1 に示す。全稼働日 209 日、全稼働時間 1,649.2 h の内、PIXE 分析の利用時間合計が 1178.2 h、SPICE の利用時間が 471 h であり 71 : 29 の比率であった。SPICE 利用時間は、前年比で 161.5 h (22 日) の減少となっているが、これは新型コロナウイルスの感染拡大により外国人研究者の訪日が困難であったことから、課題数が減少したことが大きく影響している。PIXE 分析に関する課題数は、前年度の 8 課題から 13 課題に増加し、その内 7 件が外部研究機関の研究課題（共同利用研究）であり、PIXE 分析マシンタイム全体の 31%を占めている。一方 SPICE では、前年度の 5 課題から 4 課題に減少し、全ての研究課題が内部利用によるものであった。

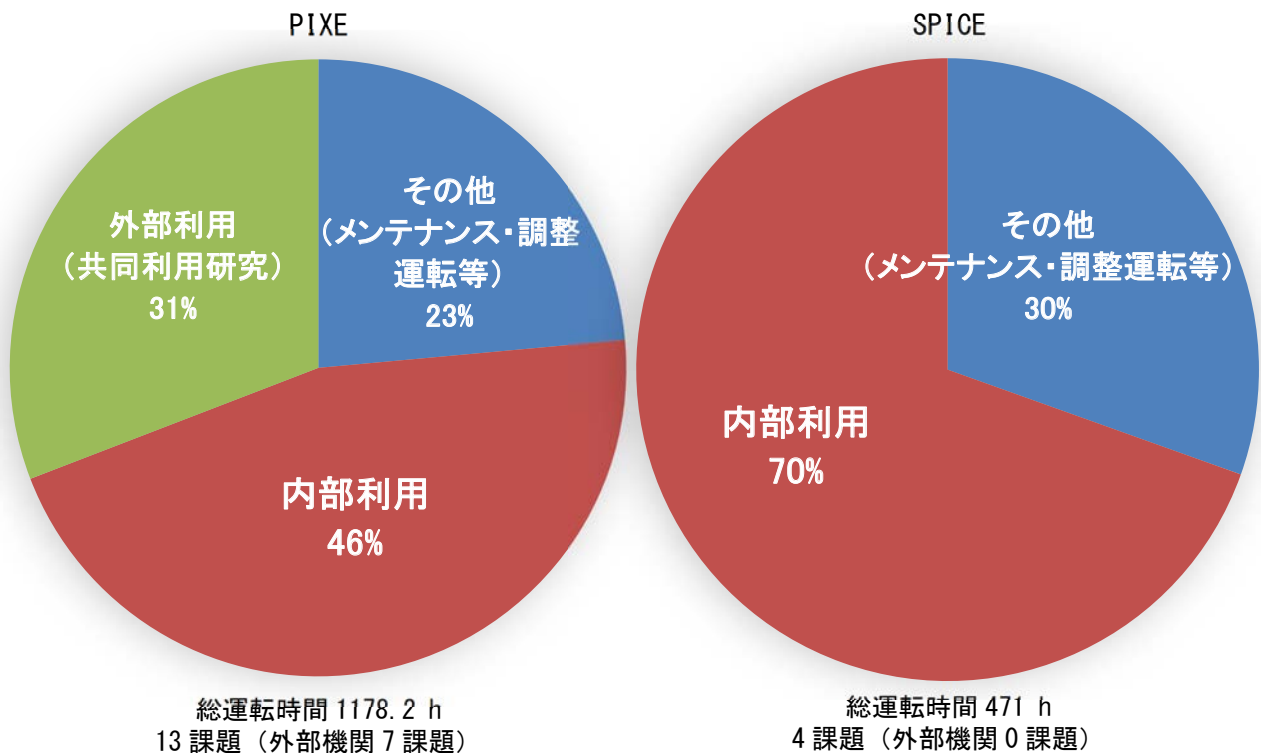


図 1. 2021 年度 PASTA&SPICE の利用内訳
 集計期間：2021 年 4 月 1 日～2022 年 3 月 31 日

3. SPICE への $^4\text{He}^{2+}$ イオンのビーム輸送実験の現状

2019 年度に、デュオプラズマトロン型イオン源 (Model 358, HVEE 製) 及び荷電変換用リチウムオーブンのクリーニング・整備を重点的に行った上で、イオン源パラメーターの最適化を実施した。その後、加

速器や各種ビーム輸送要素の最適化実験を進め、SPICE 導入直前の位置で 16 nA 程度のビーム電流を確保するに至り、SPICE へのファーストビーム輸送を行った。2020 年度は、イオン源の荷電変換効率を精査し、現状で確保できる最大ビーム電流 (SPICE 導入直前で ~60 nA) にてマイクロビーム形成実験を行った。その結果、大気取り出し後の細胞照射位置に設置したシンチレーター (CaF₂(Eu)) 上で直径 10 μm 以下のマイクロビーム形成に成功した。しかし、荷電変換用リチウムオープンに熱損失の問題があり、ビーム電流の増強が課題として残っていた³⁾。前回の当研究会において、荷電変換用リチウムオープンに充填する金属リチウムを細粒化して充填度を高めることにより熱伝導性が向上する (= 熱損失が低減) との助言を受けたことから、その手法を採用した上でイオン源部の ⁴He-ビーム電流を確認する実験を行った。荷電変換リチウムオープンの温度が 650 °C の条件において、イオン源直後のファラデーカップにおける ⁴He-ビーム電流を比較すると、リチウムを細粒化する以前には 75 nA 程度だったのに対し、リチウム細粒化後は 95 nA と若干の増加が観察された。しかしながら、⁴He-ビーム電流は 19 年前の過去パラメーターと比較して 1 桁程度少ない状況に変化は無く、今後も荷電変換リチウムオープンの熱損失の改善に取り組む必要がある。現在は、改善点が多々ある中でもマイクロビーム形成実験を進めており、イオン源の調整やビーム輸送の習熟度が向上したこともあり、再現性良く 5.1 MeV の ⁴He²⁺イオンのマイクロビーム形成に成功し、蛍光飛跡検出器等を用いたビームプロファイル計測等の実験が進行中である。(図 2 に、SPICE ビーム大気取り出し後のターゲット位置に設置したシンチレーター (CaF₂(Eu)) 上で観察された、5.1 MeV ⁴He²⁺ビームの発光の顕微鏡(最新) 画像を示している。)

次年度以降も、更なる ⁴He²⁺ビーム電流の向上を目指し、イオン源部における ⁴He-ビームの生成効率について調査を進め、荷電変換用リチウムオープンの調整及び最適化を実施する予定である。

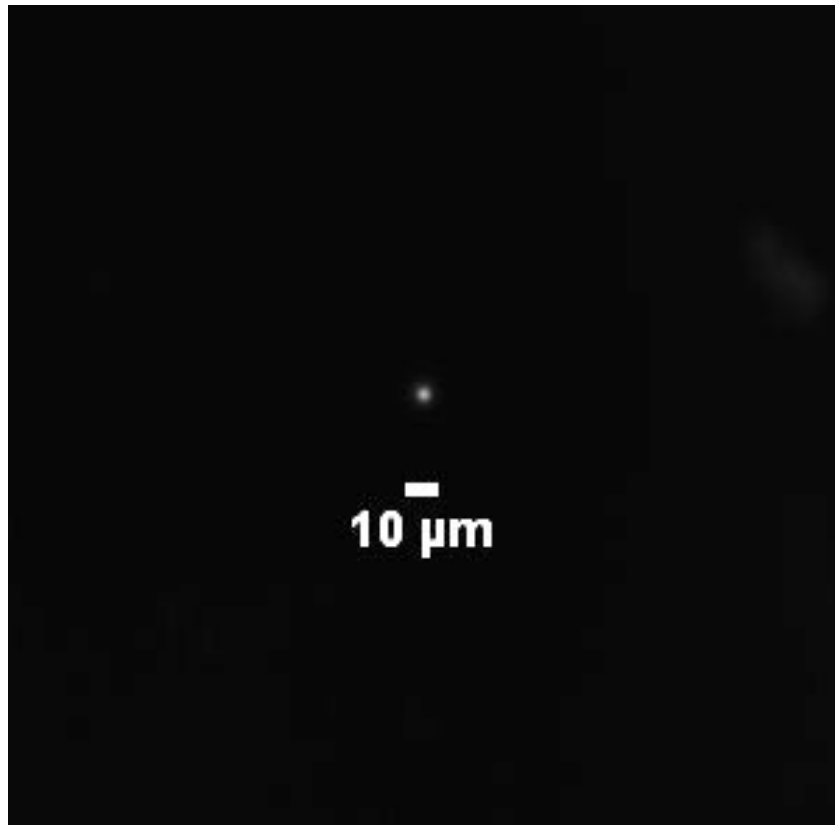


図 2. ターゲット位置に設置(大気中)したシンチレーター (CaF₂(Eu)) 上での 5.1 MeV ⁴He²⁺ビームの発光(最新画像)

参考文献

- [1] M.Oikawa, N. Suya, T. Konishi, T. Ishikawa, T. Hamano, S. Homma-Takeda, Micro-PIXE analysis system at NIRS-electrostatic accelerator facility for various applications, *Int. J. PIXE* 25 (2015) 215-223.
- [2] T. Konishi, M. Oikawa, N. Suya, T. Ishikawa, T. Maeda, A. Kobayashi, N. Shiomi, K. Kodama, T. Hamano, S. Homma-Takeda, M. Isono, K. Hieda, Y. Uchihori, Y. Shirakawa, SPICE-NIRS Microbeam: a focused vertical system for proton irradiation of a single cell for radiobiological research, *J. Radiat. Res.* 54 (2013) 736-747.
- [3] 及川将一, 石川剛弘, 磯浩之, 樋口有一, 松田拓也, QST 量医研静電加速器施設 (PASTA&SPICE) の現状 2021, 第 33 回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会報告集 (2021) pp.77-80.
- [4] 及川将一, 酢屋徳啓, 石川剛弘, 小西輝昭, 磯浩之, 樋口有一, 松田拓也, 濱野毅, 3-2 放医研静電加速器施設 (PASTA&SPICE) の現状 2018, 第 31 回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会報告集 (2018) pp.50-53.

5.3 QST 量医研中性子発生用加速器システム (NASBEE) の故障と現状 2022 Failure report of the 2 MV neutron exposure accelerator system at QST-QMS

石川 剛弘^{1,*}・須田 充¹・磯 浩之²・萩原 拓也²・樋口 有一²・

松田 拓也²・酢屋 徳啓³・及川 将一¹

Takahiro Ishikawa^{1,*}, Mitsuru Suda¹, Hiroyuki Iso², Takuya Hagihara²,
Yuuichi Higuchi², Takuya Matsuda², Noriyoshi Suya³ and Masakazu Oikawa¹

¹ 量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門 量子医科学研究所

(Institute for Quantum Medical Science, Quantum Life and Medical Science Directorate,
National Institutes for Quantum Science and Technology)

² 株式会社 巧 (TAKUMI Co., Ltd.)

³ SVE (SVE)

* Correspondence to: Takahiro ISHIKAWA; E-mail: Ishikawa.takahiro@qst.go.jp

Abstract

量子科学技術研究開発機構量子生命・医学部門量子医科学研究所には最大ターミナル電圧 2.0 MV の High Voltage Engineering Europe B. V. (HVEE) 社製 Model 4120HC+のインライン型タンデトロン加速器が設置されている。本施設は、加速した水素または重水素ビームをベリリウムやリチウムターゲットに照射し、それにより発生した中性子を照射する施設として、所内外の様々な研究・技術開発に利用されていた。近年では、共用施設に指定されたため徐々に運転時間が増加していた。今後も安定したマンタイム供給のため 2019 年 11 月にタンクオープンを伴う大掛かりなメンテナンスを実施したところ、作業期間中に低エネルギー側加速管が破断するという事象が発生した。本稿ではメンテナンス内容と破損状況の詳細について報告する。

Keywords: タンデム加速器; 中性子発生用加速器; NASBEE; 加速管

【1. はじめに】

量子科学技術研究開発機構量子生命・医学部門量子医科学研究所（以下、QST 量医研）の中性子発生用加速器システム NASBEE (Neutron exposure Accelerator System for Biological Effects Experiments) は、1999 年 9 月の JCO 臨界事故を背景に、中性子線の生物影響データの収集を目的として、2001 年に旧放射線医学総合研究所低線量影響研究プロジェクトの主要な中性子源として導入された。加速器本体は、最大ターミナル電圧 2.0 MV の High Voltage Engineering Europe B. V. (HVEE) 社製 Model 4120HC+のインライン型タンデトロン加速器であり、本加

速器により発生した水素または重水素ビームを、ベリリウムやリチウムターゲットに照射し、その核反応により発生した高速中性子線を照射する仕組みとなっている。2006年3月より生物試料への照射を開始し、平成22年度からは「共用施設」として外部ユーザーにも門戸を開き、生物試料に限らず様々な研究・技術開発にも使用されマシンタイムが徐々に増えてきた。

【2. 中性子発生用加速器システム (NASBEE) の概要】

NASBEE は当機構千葉地区の低線量影響実験棟に設置されている。NASBEE の構成図を Fig.1 に示す。 加速器本体は、最大ターミナル電圧 2 MV のシェンケル型倍電圧整流回路を、加速管と同軸上に配置したインライン型タンデム加速器である。イオン源はマルチカusp型負イオン源を1基設置しており、水素と重水素を加速器に導入することが可能である。ビームラインは2本装備されており、加速器本体が設置されている建屋1階部分から建屋地階部分の2つの照射室に鉛直下向きに各々導入されている。照射室の一方は 特定病原体がないことが保証されている動物環境 (SPF) においてマウス等の生物に照射することができる。もう一方の照射室はコンベンショナルなエリアとして様々な実験に使用されている。垂直ビームライン部には、大電流ビーム (~800 $\mu\text{A}@1\text{H}^+$) によりターゲットが損傷することを防ぐためワブラーシステムが設置されており、ビームを直径180 mm 程度で回転させながら中性子発生用ターゲットに照射する。

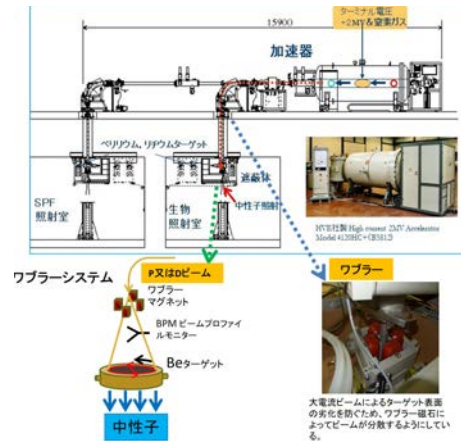


Fig.1 NASBEE 構成図

【3. 運転実績】

平成27年度～令和元年度の年度毎運転時間及びマシンタイム提供率の推移を Fig.2 に、平成30年度の利用分野割合を Fig.3 に示す[1]。平成22年度に共用施設に登録されて以降、中性子捕捉療法 (BNCT) の基礎研究や、中性子線量モニターの要素技術開発等の有償利用が年々増加し、熱外中性子から2 MeV 周辺までのエネルギー領域の中性子場として利用されていた。しかしながら、令和元年度については大規模なメンテナンス及びメンテナンス中の加速管破断の発生によりマシンタイムを停止したため運転時間が減少した。

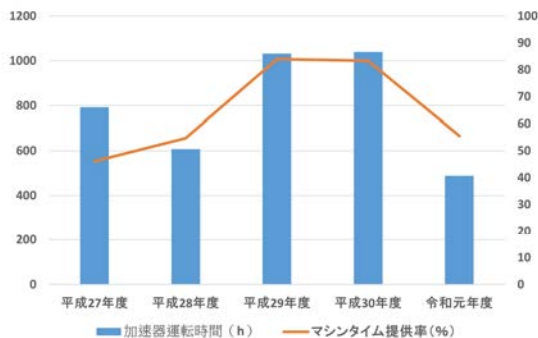


Fig.2 年度毎による運転時間及びマシンタイム提供率の推移

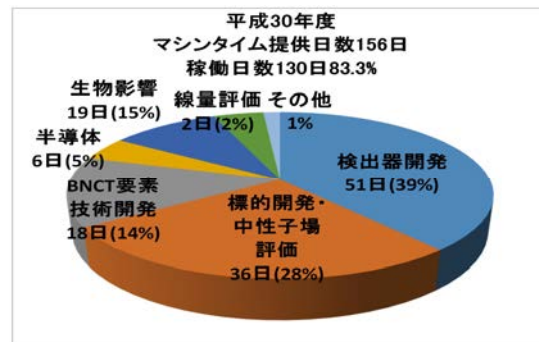


Fig.3 平成30年度のマシンタイム提供分野割合

【4. 2019 年大規模メンテナンス】

加速器本体において、タンクに内蔵されているストリッパーガス (N₂、1.0L ボンベ) が、前回交換から 7 年が経過した上に、マシンタイム増加に伴う残量の減少が懸念されたため、2019 年 11 月にタンクオープンを伴う大規模なメンテナンスを実施した。メンテナンスの内容は次の通りである。①加速器タンク開放、②ストリッパーガス用窒素ガスボンベのガス圧確認及び交換、③荷電変換システムのジェネレーター駆動部の部品交換 (ベアリング等)、④分割抵抗とダイオード測定及び交換の全 4 項目を実施した。

4-1. 加速器タンク開放

加速器タンクの開放は、イオン源と加速管を一体で引き出して開放する構造である。そのため High Energy 側のタンクフランジを外す必要があり、取り外し用にスライド可能なチェーンブロックを設置した (Fig.4)。また、このチェーンブロックは加速器直後にある静電 Q レンズの取り外しにも使用可能である。加速管のパージについては最初に窒素で行い、最後には大気を導入し陽圧にならないよう注意して行った。

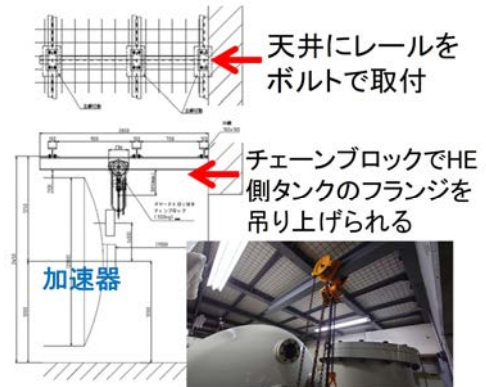


Fig.4 フランジ取り外し用チェーンブロック

4-2. ストリッパーガス用窒素ガスボンベのガス圧確認及び交換

今回のタンク開放は、タンク内のターミナル部に設置されているストリッパーガス用の窒素ボンベの残圧を確認し、次回のタンク開放時期を予測するのが最大の目的となる。前回開放した 2012 年には使用後約 8 年で空となり、緊急でタンク開放作業及びボンベ交換を行った。その時のボンベの仕様と容量は 1.0L と同じであったが、圧力を 9.81MPa から 14.7MPa と上げたものを搭載していた。そして今回の残圧を確認したところ、11MPa とかなりの余裕があり、計算上ではあるが更に 15 年以上の使用に耐えうることが判明した。ボンベ圧力を上げた以外にも、2012 年以降にストリッパーガスの使用量を低減するよう運用を改めていたことも功を奏したと考えられる。更に、今回のメンテナンスに向けて圧力は同様としながらも、交換回数を減らす目的で容量 2.2L のボンベを用意した。

4-3. 荷電変換システムのジェネレーター駆動部部品交換 (ベアリング等)

通常運転時に荷電変換システムのジェネレーターの回転音が大きくなってきたため、破損する前にドライブシャフトとマグネットカップリングのベアリング交換を実施した。ジェネレーター駆動部の模式図を Fig.5 に示す。マグネットカップリングはタンク外にあるモーターの動力をタンク内に伝達するために使用している。

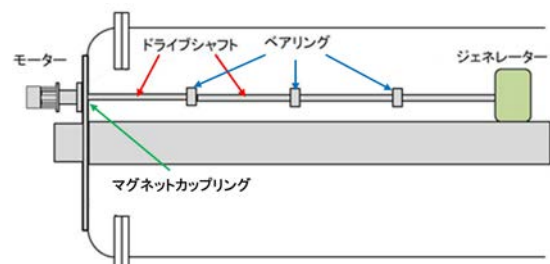


Fig.5 ジェネレーター駆動部の模式図

ドライブシャフトに3つ、マグネットカップリングには2つのベアリングが設置されており、最初にドライブシャフトのベアリングの状況確認を行った。状況確認時のベアリングの写真を Fig.6 に示す。ベアリングからグリースが漏れており、周囲にはグリースのカスやオイルの様な物が飛び散っていた。これら3個のベアリングにはベアリングハウジングには温度チェックのシールが貼ってあり、65～70 度程度まで上昇していた。温度上昇とグリース漏れの関係性は不明であるが、潤滑不良による破損を避けるために全て新品に交換した。



Fig.6 ドライブシャフトのベアリング

次にマグネットカップリングのオーバーホールを実施し、シャフト類の清掃を行い、ベアリングを新品に交換した。

ベアリング交換後に、簡易的な試運転を実施したところ、回転ノイズが著しく減少し、ベアリング交換の効果が確認できた。その後、荷電変換システムの本格的な試運転に移行しようとしたところで、加速管が破断しているのが発見された。当該破断事象については 5. で述べる。

4-4. 分割抵抗及びダイオードの測定

分割抵抗及びダイオードの測定の直前に加速管が破断してしまっていたが、新加速管の購入を見越してその他のメンテナンスを継続した。加速器本体から抜き取った加速管から分割抵抗を外し、抵抗値の測定を実施した。特に抵抗値が劣化している物はなかったが、再稼働の際には値の悪い物から順に新品に交換する予定である。ダイオードについても健全性を確認するために絶縁抵抗測定を実施した。こちらの値も悪いものは無く再稼働時には抵抗と同様に数値の悪いものから交換予定である。

【5. 加速管の破断】

ジェネレーター駆動部の簡易試運転後の 2019 年 11 月 11 日 (月) 朝に加速管 LE ターミナル側の破断を発見した。Fig.7 に加速器全体の断面図を示す。最初の破断箇所は①の部分である。破断面を Fig.8 に示す。ターミナル部分が落ちていることがわかる。

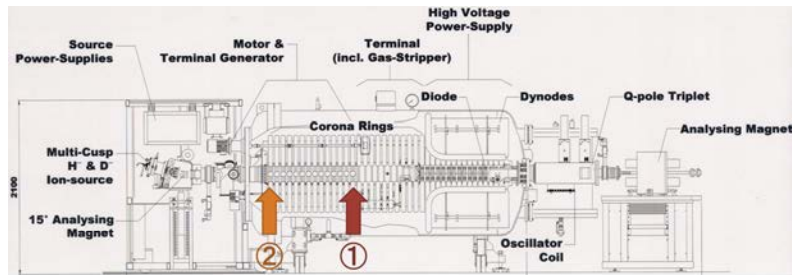


Fig.7 加速管破断箇所

分割抵抗の取り付け端子も引きちぎられ、絶縁ガラス部には著しい着色等は無いものの部分的に欠けて破片が落ちていた。ターミナル側破断 2 日後には、イオン源側の Fig.7②の部分にも破断が発生した。Fig.9 に破断前(左)と破断後(右)を示す。こちらについても絶縁ガラスに着色等は見られず、絶縁ガラスとチタン電極の接着部が綺麗に剥離した状態であった。この加速管破断事象を受け、更に被害が拡大しないよう重量物運搬の専門業者に依頼して加速管の抜き取り作業を実施した。取り外した加速管もその後数カ所で破断が発生したため、全体的に脆弱になっていたものと考えられる。

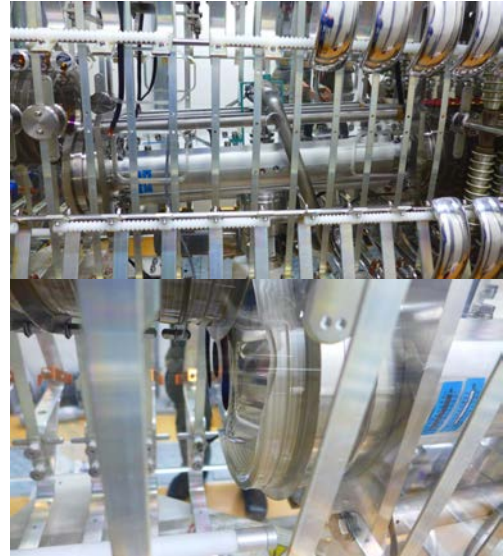


Fig.8 ターミナル側破断面



Fig.9 イオン源側破断前 (左)、イオン源側破断後 (右)

破断の原因としては絶縁ガラスとチタン電極の接着部の経年劣化や中性子線による放射線劣化による影響と推察される。

【6. まとめ】

量医研 NASBEE は平成 22 年度から共用施設に指定されて以降、順調に運転時間を伸ばしてきた。安定的なマシンタイム提供を行うためにタンク開放を伴う大規模なメンテナンスを実施し、ストリッパーガスポンプ交換、荷電変換システムの駆動系部品交換、分割抵抗及びダイオードの健全性確認を実施した。しかし、メンテナンス作業中に加速管 LE 側が 2 カ所破断する事象が発生した。原因は経年劣化や中性子線による放射線劣化によるものと推察される。現段階では、新しい加速管の購入に関する予算措置は無く、再稼働の目途が全く立てられない状況に陥っている。

[1] 酢屋徳啓, 須田充, 萩原拓也, 及川将一, 濱野毅, 放医研 中性子照射用加速器(NASBEE)の現状, 第 29 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集, 29, pp.117-120, 2018-07.

This is a blank page.

6. 施設報告VIと実験

This is a blank page.

6.1 京都大学工学研究科加速器施設の現状 (2021 年度) Current status of the accelerator facility of the Graduate School of Engineering, Kyoto University (2021)

佐々木 善孝^{1,*}, 間嶋 拓也¹, 土田 秀次^{1,2}, 内藤 正裕¹, 今井 誠¹, 斉藤 学^{1,2}, 高木 郁二^{1,2}
Y. Sasaki^{1,*}, T. Majima¹, H. Tsuchida^{1,2}, M. Naito¹, M. Imai¹, M. Saito¹ and I. Takagi^{1,2}

¹ 京都大学工学研究科原子核工学専攻
(Department of Nuclear Engineering, Kyoto University)

² 京都大学工学研究科附属量子理工学教育研究センター
(Quantum Science and Engineering Center, Kyoto University)

* Correspondence to: Y. Sasaki; E-mail: sasaki.yoshitaka.8r@kyoto-u.ac.jp

Abstract

本稿では、京都大学宇治キャンパスにある加速器施設（工学部放射実験室）における 2021 年度の利用状況、定期メンテナンス、主なトラブルの対応、今後の課題について述べる。主な定期メンテナンスおよびトラブル対応として、タンデム型コッククロフト・ワルトン加速器の冷却水用チラーのコンプレッサの経年劣化による故障が発生し交換を行った。また、ターボ分子ポンプメインバルブの経年劣化による故障が相次ぎ、後継機種への交換を行なった。ペレトロン加速器では、従来から課題となっていた SF₆ 漏れについて引き続き対応を行った。また、RF イオン源のビーム電流に揺らぎが見られるトラブルがあり運転条件を変更し対応を行った。分析チャンバーの試料ホルダー駆動システムの故障があり対応を行った。今後の課題として PCB オイル含有物の処理、発振管の価格高騰、電磁石マグネットのトラブルがある。それら詳細について述べる。

Keywords: 利用状況；維持管理；トラブルシューティング

1. はじめに

京都大学工学研究科附属量子理工学教育研究センター・原子核工学専攻の加速器施設（宇治キャンパス内放射実験室）には、タンデム型コッククロフト・ワルトン加速器（1.7 MV、セイコー電子工業製、1989 年設置）、タンデム型ペレトロン加速器（2 MV、米国 NEC 社製、2010 年設置）、バンデグラーフ加速器（4 MV（現在最高電圧 2.5 MV で使用）、三菱電機製、1968 年設置）、X 線照射用電子加速器（2 MV、三菱電機製、1968 年設置）計 4 台の加速器がある。これらの加速器が学内外の共同利用に使用されており、昨年度は、学内 12（うち教育関係 2）、学外 4 の計 16 グループの利用があった。

2. 利用状況

2021年度における各加速器の稼働時間は、タンデトロン加速器は1418時間、ペルトロン加速器2784時間、バンデグラフ・イオン加速器は1266時間であり、新型コロナウイルス感染症対策で利用が出来ない期間があった2020年度に比べると増加したが、従来に比べ稼働時間が減少した。これは、2021年度も新型コロナウイルス感染症対策のため利用時間などを制限していた期間があったことが主な要因である。なお、2021年度の電子用加速器の利用はなかった。図1に3台の加速器の稼働時間を示す。

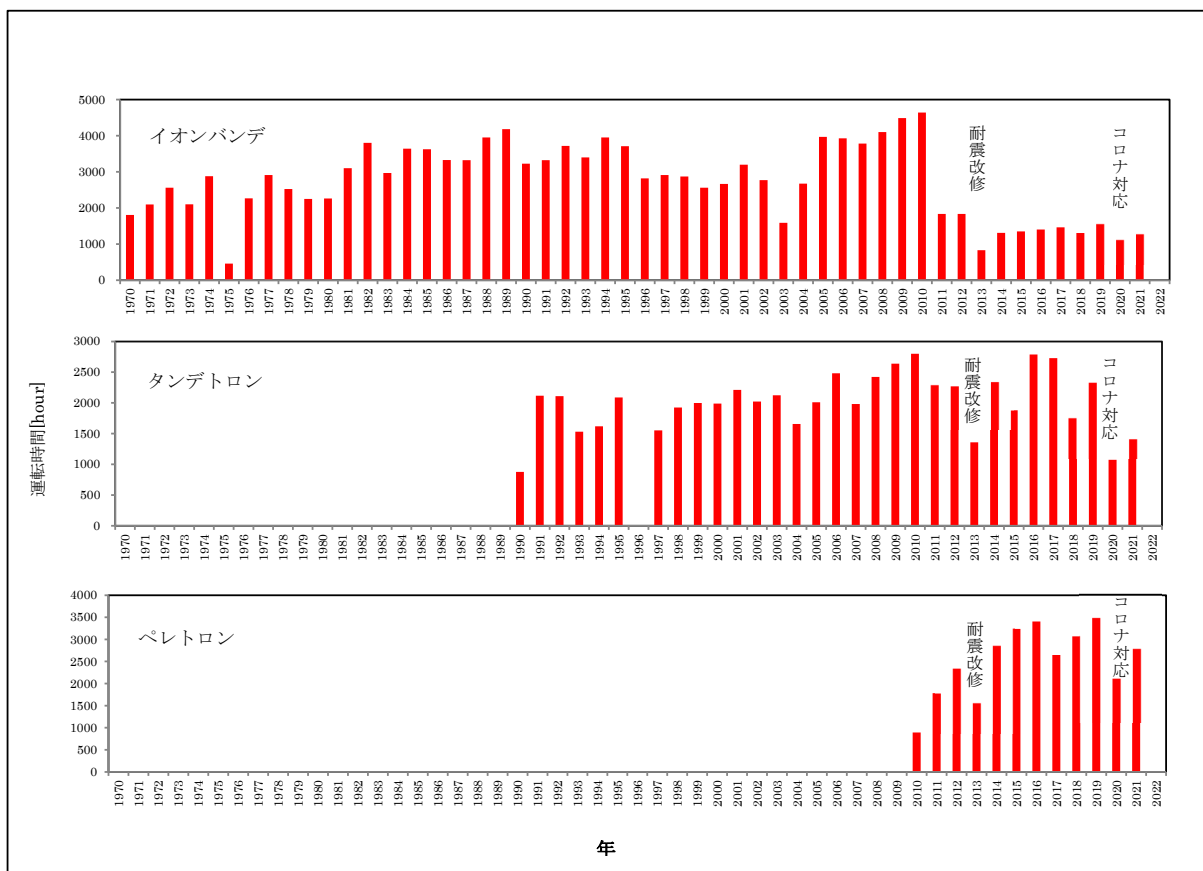


図1 加速器稼働時間

3. 加速器のトラブル及びメンテナンス

3.1 タンデム型コッククロフト・ワルトン加速器の冷却水用チラーのコンプレッサ交換

タンデム型コッククロフト・ワルトン加速器の冷却水用チラーが動作しない不具合が発生した。原因は経年劣化によるコンプレッサの故障であり、代替品と交換した。図2に冷却水用チラーを示す。



図2 チラー全体

3.2 タンデム型ペレトロン加速器のSF₆漏れ箇所対応

タンデム型ペレトロン加速器のフィードスルーからSF₆の漏れが確認されたため、定期メンテナンス時にフィードスルー箇所のタップを切りなおして対応を行った。この対応により1年間SF₆の漏れは発生していない。図3にフィードスルーの様子を示す。



図3 フィードスルー箇所

3.3 タンデム型ペレトロン加速器の運転条件の変更

以前からRFイオン源からのHeの試料でのビーム量が2~5nA程度と非常に少なく、かつビーム量に揺らぎが発生し測定時間が長くなっていた。イオン源のクリーニング頻度を少なくするため、イオン源を汚さないようにRbのオープン温度を180度までを上限としていたが200度まで上限に運転条件を変更した。これにより試料で10nA程度のビーム量が安定し得られ測定時間が大幅に改善された。運転条件の変更後から現時点でイオン源のクリーニングをしていないため、イオン源のクリーニング頻度の増加については不明である。

3.4 タンデム型ペレトロン加速器の分析チャンバーの試料ホルダー駆動システムの故障対応

タンデム型ペレトロン加速器の分析チャンバーの試料ホルダー駆動システムが動かないトラブルが発生した。原因はモータ軸の止めねじ滑落で締め直しの対応を行った。図4にモータ箇所を示す。

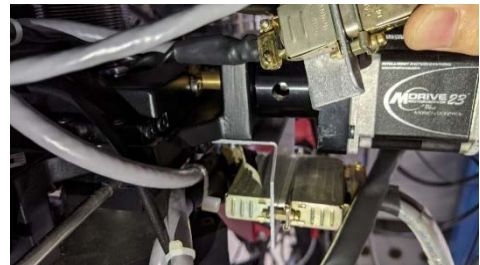


図4 試料駆動 モータ

4. 今後の課題

4.1 PCB オイルの廃棄対応

タンデム型コッククロフト・ワルトン加速器、バンデグラーフ加速器、X線照射用電子加速器は設置時期からPCBオイル含有の電子部品（コンデンサ、電源等）を使用している可能性がある。そのため可能性のある電子部品に関しては順次代替品と交換し、検査を行っている。

4.2 発振管の価格高騰

タンデム型コッククロフト・ワルトン加速器の発振管の価格が高騰しており、維持費を圧迫している。そのため再生品等の利用を試みたが使用可能期間が短く解決に至っていない。

4.3 電磁石マグネットトラブル対応

タンデム型ペレトロン加速器で使用しているビームライン振り分けマグネットの電源が勝手に

ダウンするトラブルが頻発している。電源冷却不足の助言を頂き、ファンを用いて冷却して様子を観察している。

5. まとめ

本加速器の昨年度の稼働状況について報告した。2021年度は新型コロナ対応のため稼働状況は2020年度に比べると改善したが従来に比べると短くなった。

タンデム型コッククロフト・ワルトン加速器は、冷却水用チラーのコンプレッサの交換を行った。タンデム型ペレトロン加速器は、SF₆の漏れ対応としてフィードスルー箇所のカップを切りなおし対応を行い、SF₆漏れが無くなった。

今後の課題として PCB オイルの廃棄対応と発振管の価格高騰がある。

6.2 1 MeV 陽子ビームを用いた広ダイナミックレンジ光子検出器の性能評価実験 Performance study of wide dynamic range photon detectors using 1 MeV proton beam

水野 るり恵^{1,*}・新倉 潤^{1,2}・松崎 禎市郎²・池田 時浩²・郷 慎太郎²・
齋藤 岳志¹・櫻井 博儀^{1,2}・道正 新一郎¹
R. Mizuno^{1,*}, M. Niikura^{1,2}, T. Matsuzaki², T. Ikeda², S. Go²,
T. Y. Saito¹, H. Sakurai^{1,2} and S. Michimasa¹

¹ 東京大学理学系研究科 (Faculty of Science, the University of Tokyo)

² 理化学研究所仁科加速器科学研究センター (RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science)

* Correspondence to: R. Mizuno; E-mail: mizuno@nex.phys.s.u-tokyo.jp

Abstract

ミュオン原子 X 線分光は非破壊元素分析や、原子核の荷電半径測定など様々な分野において利用されている。幅広い元素に対するミュオン原子 X 線の測定を可能にするためには、数十 keV から約 6 MeV までの広いダイナミックレンジを持つ検出器が必要となる。我々はこのミュオン原子 X 線分光に特化した検出器として、コンプトンサプレッサー付き Ge 検出器の開発を行っている。本研究では特に幅広いエネルギー領域における性能評価を行った。通常の標準ガンマ線源を用いて評価が可能な約 1.5 MeV より高いエネルギー領域での応答を調べるために、共鳴エネルギー 992 keV の $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ 反応から放出される約 1.5 MeV から 10 MeV までの広範囲のガンマ線の測定実験を理化学研究所ペレトロン施設において行った。検出器として 2 台の Ge 検出器、GMX80 (Ortec 社) と GX5019 (Canberra 社) を使用し、GX5019 については BGO シンチレーション検出器を用いたコンプトンサプレッサーとの同時測定を行った。この共鳴反応を用いた測定により、光子のエネルギーが約 10 MeV までの光子検出器の応答を取得した。この結果、Ge 結晶の非直線性と検出効率において約 3 MeV の前後のエネルギー領域で異なる傾向を示すことが確認されたほか、エネルギー分解能とコンプトンサプレッサーの性能についての実測値を得ることができた。

Keywords: Muonic X-ray Spectroscopy; Ge Detector; High-energy Gamma-rays

1. ミュオン原子 X 線分光のための光子検出器

ミュオン原子は負ミュオン (以下単にミュオン) が物質中に入射した際に原子核のクーロン場に捉えられて形成される、ミュオンと原子核の束縛系である。ミュオン原子が形成されると、ミュオンの軌道遷移に伴いミュオン原子 X 線と呼ばれる遷移 X 線が放出される。ミュオン原子 X 線分光はその特性から様々な分野において利用されている。例えばミュオン原子 X 線

が元素の特性X線であることを利用した非破壊元素分析^{1),2)}や、ミュオン軌道が原子核荷電半径を反映したエネルギーを示すことを利用した荷電半径測定³⁾などに用いられている。ミュオン原子X線のうちK α 線のエネルギーは軽元素において数十 keVを示す一方、ウランなどの重い元素では6 MeV以上の高いエネルギーを示す。そのため幅広い元素に対するミュオン原子X線の測定を可能にするためには、広いダイナミックレンジを持つ光子検出器が必要となる。そこで我々はミュオン原子X線分光に特化した検出器の開発を行なった。数 keVから数 MeVまでの広いダイナミックレンジで高いエネルギー分解能を示す検出器として、光子検出器はGe検出器を採用した。また、特に軽元素における微量元素分析等では光子検出器の代表的なバックグラウンド成分であるコンプトン散乱成分を削減することが求められる。そのため、Ge検出器の周りにコンプトンサプレッサーとして5つのBGOシンチレータを配置した。また、高いミュオン強度をもつ施設での測定や、ミュオン原子X線と同時に多数のガンマ線が放出される高係数率下での測定を可能にするため、デジタイザを用いたデータ収集システムを採用した。Fig. 1に本光子検出器システムの断面図を示す。

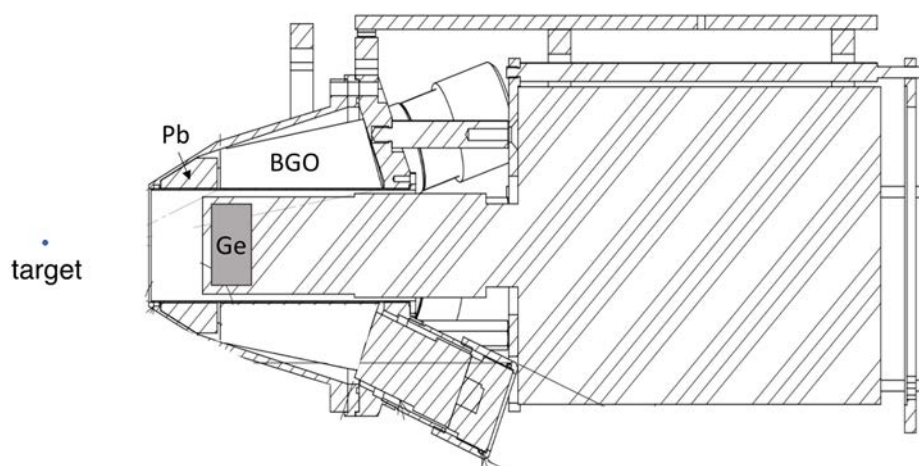


Fig. 1 コンプトンサプレッサー付き Ge 検出器の断面図

2. 高エネルギー領域での検出器の性能評価実験

幅広い元素に対するミュオン原子X線分光における検出器の性能を評価するには、数十 keV から約6 MeVまでの広いダイナミックレンジでの性能評価を行う必要がある。しかし、通常の標準ガンマ線源を用いた測定では約1.5 MeV以下の領域における応答しか測定することができない。そこでより高エネルギー領域での応答を調べるために、我々は陽子とAlの共鳴反応を利用した。共鳴エネルギー992 keVにおける ^{27}Al と陽子の共鳴反応である $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ 反応では、約1.5 MeV から10.8 MeVまでの広範囲のガンマ線が放出されることが知られており、そのエネルギーと相対強度はAntilla et al.(1977)⁴⁾において詳細に測定されている。これらのガンマ線を利用することで、Ge検出器の応答を調査した。実験は理化学研究所ペレトロン施設において行い、約1 MeVの陽子ビームを0.8 μm 厚のAl標的に入射することで、992 keVの共鳴反応からのガンマ線を測定した。検出器としては高エネルギー領域で比較的大きな相対検出効率を持つ2台のGe検出器、GMX80 (Ortec社、相対検出効率80%) とGX5019 (Canberra社、相対検出効率50%) を使用し、GX5019

についてはコンプトンサプレッサーとの同時測定を行った。Fig. 2に実験セットアップの写真を示す。

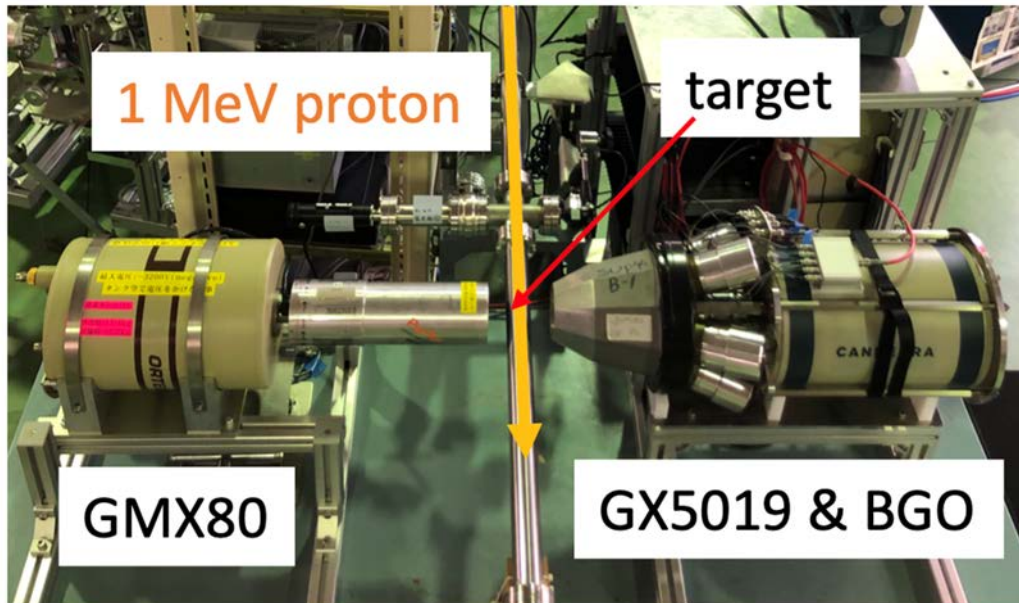


Fig. 2 $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ 共鳴反応測定実験のセットアップ

3. 広ダイナミックレンジにおける Ge 検出器の性能評価

Fig. 3 に陽子と Al の共鳴反応測定実験で取得されたエネルギースペクトルを示す。これより 10.8 MeV までの広いエネルギー領域におけるガンマ線の測定を行うことができたことがわかる。この共鳴反応を用いた測定と標準ガンマ線源を用いた測定を行うことで、約 50 keV の低エネルギー領域と約 10 MeV までの高エネルギー領域における性能評価を行った。特にエネルギー較正の直線性・Ge 検出器のエネルギー分解能・検出効率についての評価を行った他、広ダイナミックレンジにおけるコンプトンサプレッサーの性能についても調査した。

まず、エネルギー較正の直線性について、デジタイザと Ge 検出器のプリアンプの非直線性を評価するためにパルサーを用いた評価をそれぞれ行った。これより、デジタイザ・プリアンプ共にそれぞれ 3 次の較正曲線による補正が必要であることがわかった。さらに、デジタイザとプリアンプの非直線性を補正した上で、Ge 結晶のエネルギー応答を本実験で得られたエネルギー較正を用いて評価した。その結果、結晶の非直線性として約 3 MeV の前後で異なる較正直線を必要とするような傾向が見られた。これらの非直線性の補正を行うことにより、GMX80, GX5019 でそれぞれ 0.4 keV, 0.3 keV のエネルギー決定精度が得られた。次にエネルギー分解能として、約 6 MeV において GMX80, GX5019 でそれぞれ半値全幅 8.2 keV, 4.1 keV のエネルギー分解能を示す結果が得られた。また、GX5019 についてはプリアンプのゲインを小さくすることで 20 MeV までのダイナミックレンジを示す設定での測定を行った結果、6 MeV でのエネルギー分解能は 5.6 keV まで悪化する様子も確認された。Ge 検出器の検出効率についても 10.8 MeV までの測定値を取得した結果、約 3 MeV よりも大きなエネルギー領域ではそれより小さなエネルギー領域における検出効率から外挿して得られる結果よりも小さな検出効率を示すことがわかった。これより、3 MeV 以上の光子測定を Ge 検出器で行う際には、標準線源から測定可能な約 1.5 MeV 以下の領域から

外挿した検出効率曲線を用いることができず、高エネルギーガンマ線測定実験等を用いた検出効率の測定を行う必要があることが知見として得られた。最後に GX5019 に対するコンプトンサプレッサーの性能として約 10 MeV までの全エネルギー領域においてコンプトン成分を大幅に削減することができることが確認された。

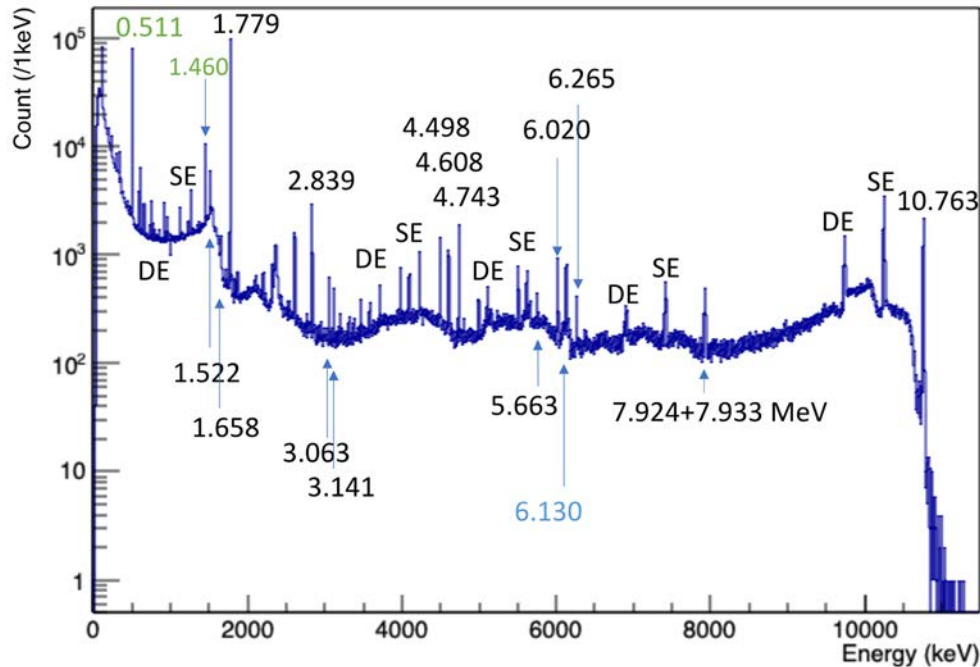


Fig. 3 GMX80 で得られたエネルギースペクトル。図中の SE, DE はそれぞれシングルエスケープ、ダブルエスケープピークを示す。

4. まとめ

ミュオン原子 X 線分光に特化した光子検出器として、BGO コンプトンサプレッサー付き Ge 検出器の開発を行っている。理化学研究所ペレトロン施設において共鳴エネルギー 992 keV の $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ 反応由来のガンマ線測定実験を行い、約 10 MeV までの広いエネルギー領域における Ge 検出器の性能を評価した。

参考文献

- 1) Daniel, H., Application of X rays from negative muons, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, vol.3, 1984, pp.65-70.
- 2) Terada, K. et al., A new X-ray fluorescence spectroscopy for extraterrestrial materials using a muon beam, Sci. Rep., vol.4, 2014, 5072.
- 3) Measday, D.F., The nuclear physics of muon capture, Phys. Rep., vol.354, 4, 2001, pp.243-409.
- 4) Antilla, A. et al., Use of the $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$, $E_p=992$ keV resonance as a gamma-ray intensity standard, Nucl. Instrum. Meth., vol.147, Issue 3, 1977, pp.501-505.

6.3 小型四重極永久磁石を用いたガラスキャピラリー内の イオンビームの通過特性の研究

Transmission characteristics of ion beams through tapered glass capillary optics with miniature quadrupole magnets

稲吉 琴子^{1,2,*}・池田 時浩^{2,1}・金 衛国¹

Kotoko Inayoshi^{1,2,*}, Tokihiro Ikeda^{2,1} and Wei-Guo Jin¹

¹東邦大学

(Toho University)

²理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

(RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science)

* Correspondence to: Kotoko Inayoshi; E-mail: kotoko.inayoshi@a.riken.jp

Abstract

出口にプラスチック製のフタの付いたテーパ型ガラスキャピラリー光学系を用いたイオンマイクロビーム細胞照射システムを開発中である。我々は更なるビーム拡がりの抑制を目指して、キャピラリー内で起こる内壁衝突に着目した。その内壁衝突を抑制するためにキャピラリーを囲む小型四重極永久磁石を作製した。実験は 2.4 MeV の H⁺ビーム、および出口内径 / フタ厚が、それぞれ、50 μm / 30 μm のキャピラリーを使用した。この四重極永久磁石によるビーム拡がりの抑制に伴う集束効果について、最大 3 倍のビーム密度向上が得られた。

Keywords: ペレトロン加速器; マイクロビーム; ガラスキャピラリー; 四重極永久磁石

1. マイクロビームの必要性とキャピラリー光学系の利点

培養細胞照射システムに利用されるテーパ型ガラスキャピラリー光学系 (Fig.1) は、イオンマイクロビーム生成装置の一つとして分析や照射実験に使われるようになってきた¹⁾⁶⁾。一般にマイクロビームは個々の細胞に照射することができるため、照射後の DNA 損傷と修復の過程を細胞



Fig. 1: (a)ガラスキャピラリー光学系、(b)キャピラリー先端 (出口径 50 μm)

ごとに時系列で観察することが出来る。我々のグループでは線エネルギー付与（Linear Energy Transfer: LET）が比較的大きい、すなわち、ブラッグピーク付近のエネルギーである数 MeV のイオンを入射しているが、水中飛程が最大でも数百 μm しかないため、培養液中で細胞膜近傍までイオンを輸送する目的で真空封じができるフタ付キャピラリーを採用している。

2. キャピラリー内壁での散乱の抑制

数 MeV のイオンマイクロビームを細胞に入射する際には、微小な標的に対してマイクロビームのサイズを小さくする、すなわちキャピラリーの出口径を小さくすることで対応する。ここで、イオンはキャピラリー内を通過中に内壁で散乱され、通過中にビームが広がる。そのキャピラリー内ビーム拡がり、フタ通過の際の多重散乱と合わさり、出射後のマイクロビーム拡がり、は更に大きくなり、スポットサイズが大きくなってしまふ。そこで、本研究ではキャピラリー内壁でのイオン衝突を抑制するために、Fig.2(a)に示すキャピラリーを囲むような小型四重極永久磁石 (QM) を作製した。電磁石では磁極が大きくなってしまふため、永久磁石であるネオジム磁石 (4400 Gauss) を採用した。磁場の調節は、Fig. 2(b)の調節ねじによってネオジム磁石の位置をシフトさせることで実現した。

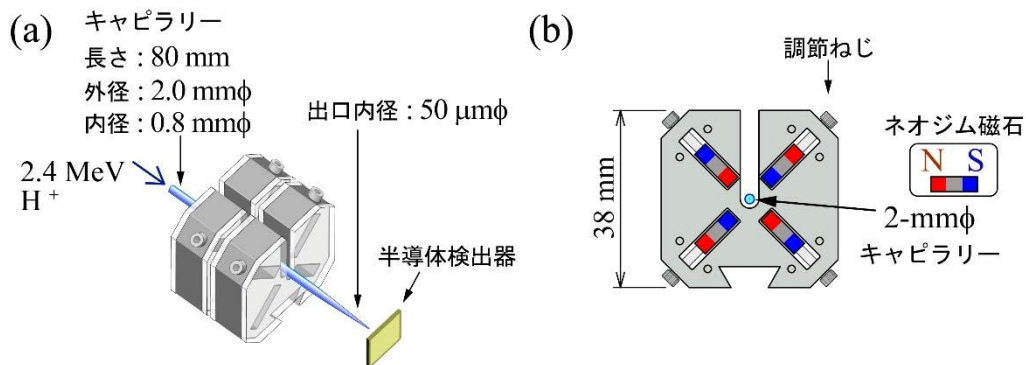


Fig. 2: (a)QM のキャピラリーへのインストール、(b)下流側から見た QM

3. 実験方法と結果

実験は理化学研究所にある米国 NEC 社製 5SDH-2 型 Pelletron 加速器で 2.4 MeV の H^+ を使用し、キャピラリーは出口内径 50 μm (Fig. 1(b)) で、フタの厚さは 30 μm のものを用いた。キャピラリー内を通過するイオンの内壁衝突が減少すれば、出射イオン数が増えると予想される。したがって、ガラスキャピラリーを入射ビーム軸に対してアライメントした後に、キャピラリーから出射されるイオンマイクロビームの強度を半導体検出器にて 1 秒当たりのイオンのカウント数 (counts per second: cps) として測定した。また、入射ビームプロファイルは、QM の水平集束の効果を確認するために予め横長にセットした。

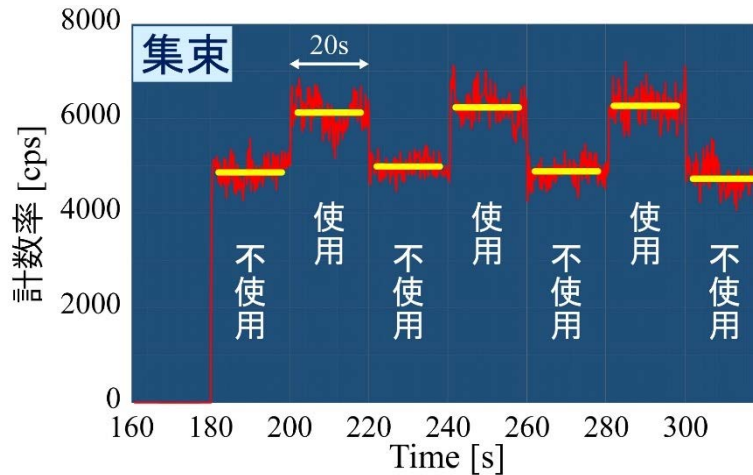


Fig. 3: QM による集束効果の結果

QM の使用時と不使用時のイオンのカウント数を Fig.3 に示した。横軸は照射開始からの経過時間で、縦軸は出射イオンビームの強度である。これより、QM 不使用に比べて 125%に増加した。この増加分はキャピラリー内壁での衝突を回避したイオンに対応する。

ここまでの測定では、QM が 1 個よりもビーム軸方向に 2 個連結した方が効果は高かった。更に効果の向上を目指し、ローレンツ力を受ける時間を長くするために、ビーム軸方向に長い磁石 (4→7.5 mm) を導入し QM (第 3 世代) を作製した。

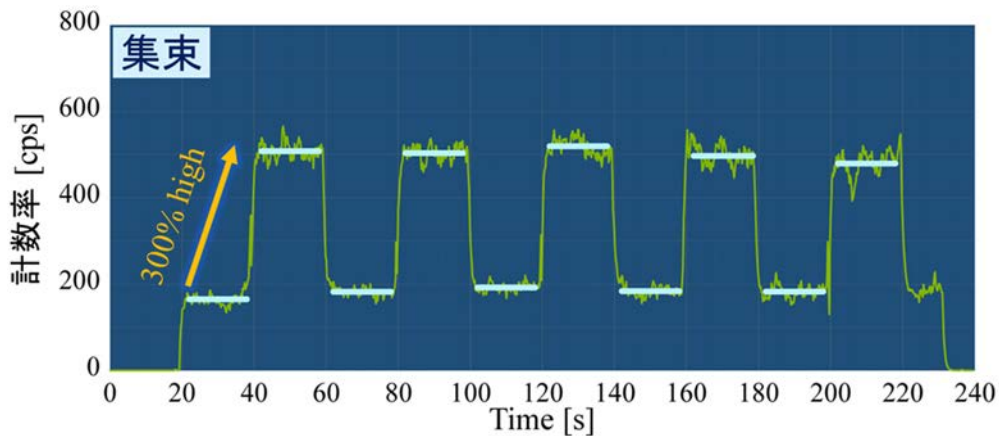


Fig. 4: QM (第 3 世代) による集束効果の結果

第 3 世代での結果を Fig.4 に示した。これより集束率が 300%に増加したことがわかる。このグラフの QM 不使用時の計数率のゆらぎは統計ゆらぎの範囲に収まっている。よって、ビームは安定であり、内壁散乱の割合も一定だったと考えられる。このことは、次のステップでの調節ねじを使った焦点距離の決定が長時間を要することに対しても都合が良く、加速器の安定性が同様に確保できれば高精度で焦点距離の決定ができると考えている。

4. 今後の予定

今回できなかった QM の水平集束と鉛直集束の組み合わせで集束実験を行う。散乱イオンが減少すれば、エネルギー損失したイオンは減るであろう。したがって、出射イオンのエネルギースペクトルを QM の使用/不使用で比較する。更には、本来の目的である出射後のビーム拡がり、固体飛跡検出器 CR-39 を使ってスポットサイズとして測定する 7)。

参考文献

- 1) Nebiki, T. et al., Focusing of MeV ion beams by means of tapered glass capillary optics, J. Vac. Sci. Technol. A, vol.21, 2003, pp.1671-1674.
- 2) Ikeda, T. et al., Production of a microbeam of slow highly charged ions with a tapered glass capillary, Appl. Phys. Lett., vol.89, 2006, 163502.
- 3) Hasegawa, J. et al., Transport mechanism of MeV protons in tapered glass capillaries, J. Appl. Phys., vol.110, 2011, 044913.
- 4) Ikeda, T., Applications of Microbeams Produced by Tapered Glass Capillary Optics, Quantum Beam Sci., vol.4(2), no.22, 2020.
- 5) Jin, W.-G. et al., Transmission of Laser Beam Through Tapered Glass Capillaries for Light Microbeams, J. Phys. Soc. Jpn., vol.84, 2015, 114301.
- 6) Koushima, M. et al., Development of laser target sight-on system based on multiple transmission through a tapered glass capillary for ion microbeam irradiation, J. Phys. Conf. Ser., vol.875, 2017, 112004.
- 7) Ikeda, T. et al., Profile measurements of MeV ion microbeams in atmosphere extracted from single tapered glass capillaries with an end window, Nucl. Instrum. Methods B, vol.470, 2020, pp.42-47.

7. 原子力機構 東海タンデム加速器での実験紹介

This is a blank page.

7.1 東海タンデム 40 年のあゆみ 40 years of Tokai-Tandem history

松田 誠*

Makoto Matsuda*

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 研究炉加速器技術部 加速器管理課
(Tandem Accelerator Section, Department of Research Reactor and Tandem Accelerator,
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency)

* Correspondence to: Makoto Matsuda; E-mail: matsuda.makoto@jaea.go.jp

Abstract

原子力機構 原子力科学研究所のタンデム加速器施設（以下、東海タンデムという）は、1982 年 9 月から供用運転を開始し今年 40 年を迎える施設である。この間、超伝導ブースターによる加速エネルギーの増強、負イオン源やターミナルイオン源の増設による加速イオン種の拡大およびビーム強度の増強、実験室の整備による新たな利用の展開など、研究テーマの進展に応じて施設を充実させてきた。本稿では当施設の 40 年のあゆみを筆者が入所して以降の後半部分を中心に報告する。

Keywords: タンデム加速器; 超伝導ブースター; 加速管; ECR イオン源

1. タンデム加速器の建設

原子力機構（旧原研時代を含む）では原子力基礎研究のため 1957 年に 2MV バンドグラフによる中性子核物理の研究から始まった。高速中性子のエネルギーを増大させるため 1962 年には 5MV バンドグラフが 2MV バンドグラフ建家を改装し設置され、中性子核データ研究に大きく貢献した。2MV バンドグラフは別の建家に移設され 2003 年まで運転を継続し、原子物理や照射効果研究に利用されてきた。1970 年代から高エネルギー重イオンが原子力基礎研究に有効であることから高性能重イオン加速器の設置の検討が行われ、エネルギーの可変性、ビームの質の良さ、加速イオン種の豊富さの点で優れたタンデム加速器に決定した¹⁾。当時は高多価重イオンを生成できる電子サイクロトロン共鳴型（ECR）イオン源は存在せず、高エネルギーの重イオンを得るには大型タンデム加速器が最適であったと考える。加速器は米国 NEC 製の 20MV タンデム加速器（Pelletron 20UR）が採用され、1976 年 11 月から 1982 年 8 月にかけて

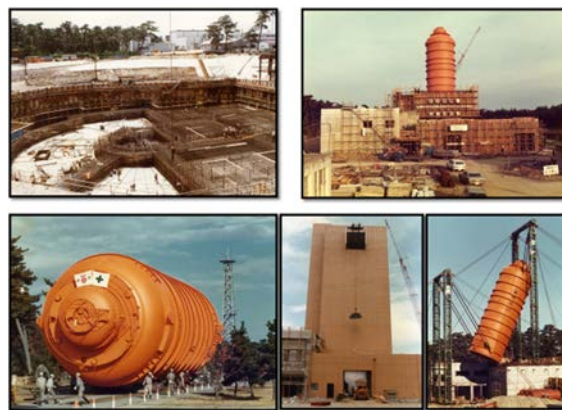


図 1 タンデム加速器建家の建設時の写真

て建設された。ただし電圧は 20MV に届かず契約変更をして 18MV タンデム加速器として完成している。当時、世界中で建設されていた大型タンデム加速器はどれも設計性能の電圧を達成できない状況であり、東海タンデムも同様であった。タンデム加速器建家の建設時の写真を図 1 に、加速器の組立て時の写真を図 2 に示す。

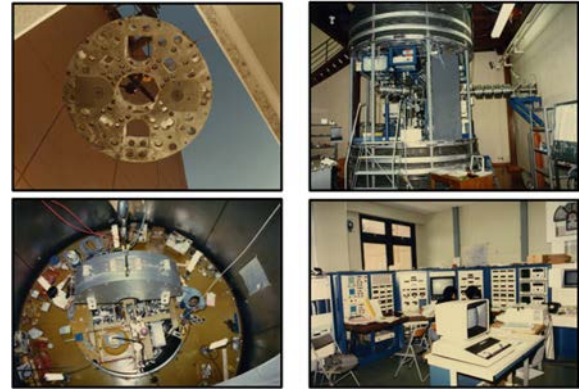


図 2 タンデム加速器の組立て時の写真

左上：カラムキャスティングの搬入 / 右上：負イオン源デッキ / 左下：高電圧端子の組立 / 右下：制御コンソール

2. 運転日数とターミナル電圧の推移

図 3 にこれまでの年度ごとの運転日数を示す。当初から年間 150~200 日程度の高い稼働率で利用されており、最大で 230 日におよぶこともあった。1989 年には負イオン源デッキが増設され 2 基となり、それぞれに 2 台と 1 台の負イオン源 (SNICS II) が搭載された。これにより一方のデッキからイオンビーム加速を行っている際も別のデッキでイオン源の整備ができるため、加速イオン種の切り替えが連日で可能となり高い稼働率を実現した。1997 年と 2007 年で利用日数の落ち込みがあるが、これは後述する ECR イオン源の高電圧端子内への設置によるもので 1997 年に 10GHz の ECR イオン源を、2007 年にはより高性能な 14.5GHz の ECR イオン源を搭載したためで、搭載初期のトラブル等により利用日数が減っている。2011 年、2012 年は東日本大震災とその復旧作業によるものである。2017 年の落ち込みは加速管へ大気を突入させた真空事故によるもので全加速管を取りはずし、再洗浄を行ったためである。震災以降は 100~150 日で運転を継続している。これまでの 40 年で約 6,900 日 (約 17 万時間) の利用運転を実施してきた。

図 4 にタンデム加速器で重要なターミナル電圧の推移を示す。建設当初のデータは集計できていないが当初 17MV 程度であった電圧が、1994 年の超伝導ブースターの完成もあり徐々に低下してきた。東海タンデムからのビームを後段ブースターで再加速できたことも理由にあげられる。しかし、高質量の重イオンの利用要望が増え、ブースターで効率よく加速するため東海タンデムの電圧を向上させる必要が出てきた。なぜならブースターは東海タンデムの加速電圧を 18MV と想定して設計されており、入射ビーム速度が光速の 7% 程度以上でないと効率的な加速ができないためである。当時、加速電圧を上げるべくコンディショニングを実施したが、16MV 以上の電圧を発生させることはできなかったと

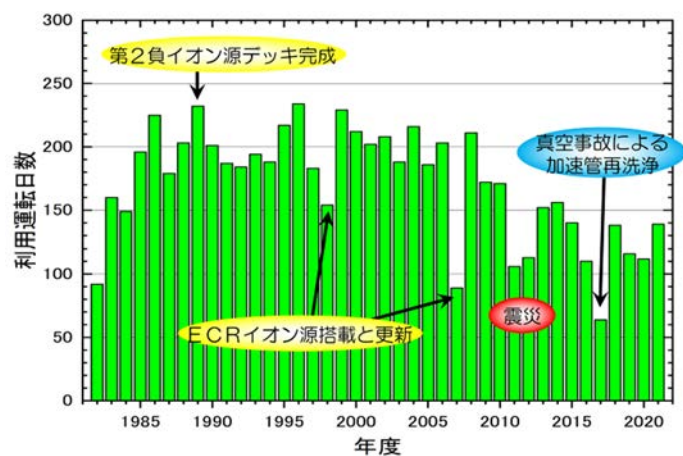


図 3 運転日数の推移

記憶している。

これを打開するため 2004 年に全加速管の更新を実施した（詳細後述）。更新後、徐々に電圧が回復し 18MV 超の運転を実施することができようになった。2010 年に東海タンデムの高電圧端子内 ECR イオン源から Xe²⁶⁺イオンを 18.5MV の加速電圧で加速し、東海タンデムで

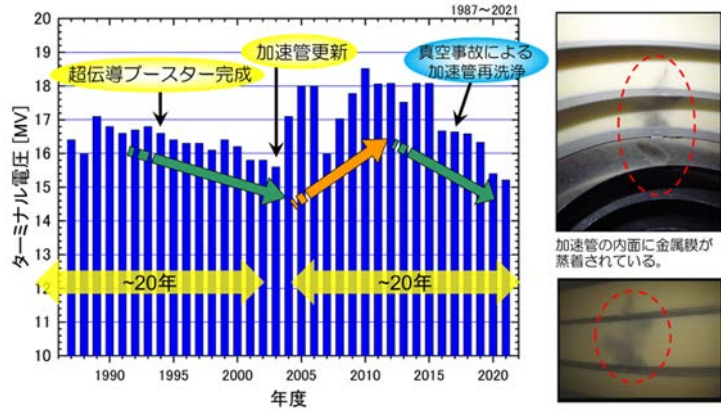


図 4 ターミナル電圧の推移と加速管の内面写真（右）

481MeV のビームを得た。さらにポ
ストフォイルで Xe³⁵⁺に荷電変換後、ブースターで再加速し 1314MeV のビームエネルギーまで到達した。どちらも当施設で記録した最高のエネルギーとなっている。

加速管の更新以降 2 度ほど真空悪化によるターミナル電圧の低下などがあり、最近では再び電圧が低下し 16MV 超での加速が困難になってきている。その理由として図 4 右側の写真に示すように、加速管内面のセラミクス部に放電をきっかけとして発生した金属膜の付着がある。この金属膜は放電発生の際に増えていくので、いわゆる加速管の寿命といったものと捉えており、東海タンデムでは 20 年が目安なのかもしれない。発生した金属膜は放電で蒸着されたもので物理的に削り取るしか除去する方法はなく、全加速管の再生作業あるいは更新しか電圧を回復する方法がないと考えている。

3. これまでの主な技術開発について

1982 年の東海タンデムの完成以降も、常に最新の研究開発環境を提供すべく加速器や施設の開発・改良を行ってきた。その主なものを表 1 に示す。この中で超伝導ブースターの開発、加速管の更新、高性能 ECR イオン源のターミナルへの搭載による高電圧端子内重イオン入射器の開発、第 2 照射室および垂直実験室の整備について触れることにする。

表 1 これまでの主な技術開発事項

1976-82	長寿命ストリッパフォイルの開発
1982-	インジェクター改良/加速イオン種開発
1984-92	並行処理制御システム開発
1984-94	超伝導ブースターの開発
1997-07	高電圧端子内重イオン入射器の開発
2001-05	短寿命核加速実験装置 (TRIAC)
2003	加速管の更新
2007	高性能 ECR イオン源のターミナル搭載 タンク内ビームラインの再整備
2013-2015	実験室整備 第 2 照射室・垂直実験室

3.1 超伝導ブースターの開発（高エネルギー重イオンビーム提供）

タンデム加速器では重イオンの加速エネルギーはターミナル電圧で決まってしまうため、東海タンデムでは質量数 70 の核種同士で核反応を起こすことができる程度のエネルギーが最大であった。加速エネルギーを増強することでより多くの原子核同士で核反応する領域が広がり、未知の中性子過剰核やウランより重い原子核の生成が可能になるなどの利点があることから、重イオンのエネルギーを東海タンデムの 2~4 倍に増強する目的で 1984 年から超伝導ブースターの開発が

スタートした。1984年に基本周波数を130MHzとする1/4波長型超伝導空洞の開発に着手した²⁾。基本構想は最適ビーム速度を光速の10%とした同一の1/4波長型超伝導空洞40台を一直線上に並べたものである。

ブースターの製作は1986年から始まり1994年に完成した。4WのRF入力に対し5MV/m以上の加速電界(750kVの加速電圧に相当)が得られた³⁾。図5に超伝導ブースターの概要を示す。

ブースターの完成に合わせて原子核実験用に反跳生成核分離装置や多重ガンマ線検出装置などの大型実験装置も整備された⁴⁾。

3.2 加速管の更新(加速電圧の回復)

先述したように2000年頃にはターミナル電圧が徐々に下がり16MV程度以下になっていた。電圧の回復・改善のために2002年に加速管の電圧分割方式をコロナニードルから抵抗に変更した。また2003年には加速管を1本あたり0.33MVで加速ギャップが11段の加速管から、1本あたり0.5MVで加速ギャップが21段のコンプレストジオメトリ型の加速管に更新した。これは1MVユニット当たり加速ギャップが33段から42段へ増えることで、電圧性能の向上を期待したものである(図6参照)。加速管の更新にあたっては、加速管内の放電の原因となる微粒子を除去するため、加速管内面に超音波洗浄と放電を抑制する効果がある高圧純水洗浄を施し、200°Cで約2週間の真空ベーキング後、窒素で封入して組立てまで保管した。加速管の組立ては作業場所にエアフィルターを設置し清浄な雰囲気で行った⁵⁾。交換直後の運転で、すぐに16MVのターミナル電圧を得ることができ、利用運転が再開された。その後、コンディショニング等により徐々に加速電圧が向上し、交換から15か月後の2004年に18.7MVに到達した⁶⁾。

3.3 高性能 ECR イオン源のターミナル搭載(高電圧端子内重イオン入射器の開発)

タンデム加速器は高電圧端子内で炭素薄膜により1価の負イオンから正の多価イオンへ荷電変換することで高エネルギーのビームを得ることができる。しかし、この炭素薄膜の寿命のために高強度のビーム加速は難しい。また図7の黒の点線で示すように、荷電変換後の電荷数はターミナル

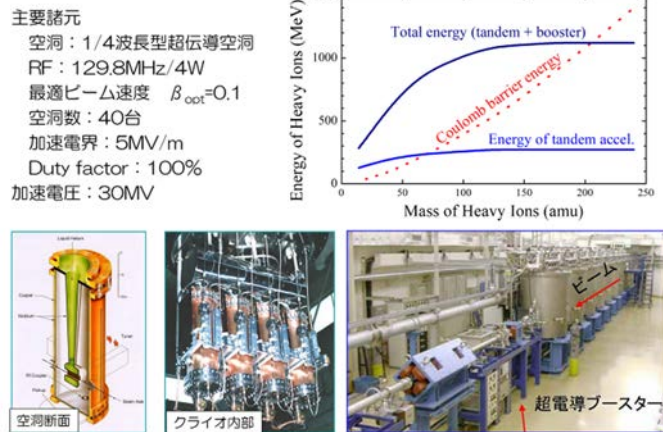


図5 超伝導ブースターの概要

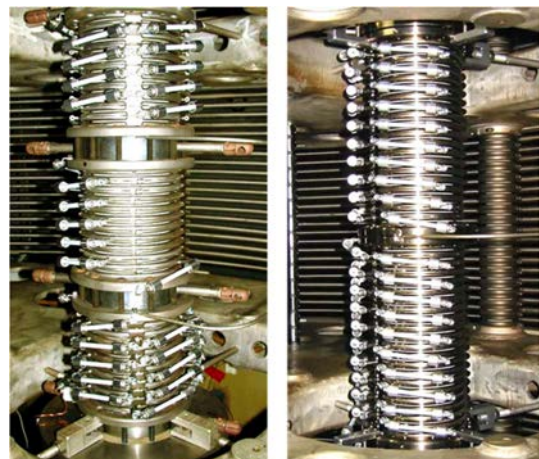


図6 加速管の写真(左:旧型 33gap/1MV、右:コンプレスト型 42gap/1MV)

電圧に依存し、重いイオンにおいても 14+程度が限界となるためビームエネルギーも制限されたものとなる。一方、図 7 の青の破線は 14.5GHz の永久磁石型 ECR イオン源から $1\mu\text{A}$ 以上の強度で得られるイオンの電荷を示したもので重いイオンでは 25+ 程度までの高い電荷を得られることがわかる。1990 年代に入り ECR イオン源の急速な発展に伴ってサイクロトロンやリニアックが重イオン加速器として発展し、タンデム加速器の立場が弱くなってきていた。そこで我々は高性能な永久磁石型 ECR イオン源を東海タンデムの高電圧端子に搭載し、生成された多価イオンを直接加速することで、高エネルギー・高強度のビームを得ることを計画した。ECR イオン源では希ガスイオン等の生成も可能なので利用できるイオン種の拡大にもつながる。

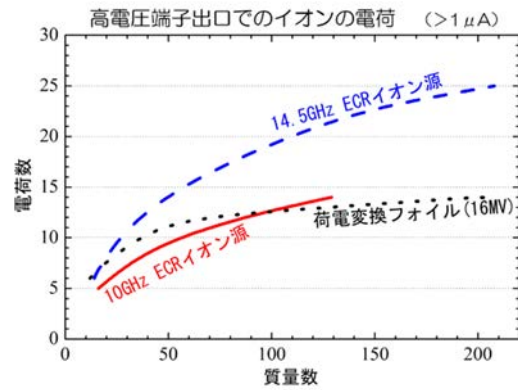


図 7 高電圧端子での電荷数

1997年に10GHzの小型イオン源を高電圧端子への搭載し、希ガスイオンの利用を可能とした。同時に課題の抽出とその解決に必要な機器の開発を進め、2007年により高性能な14.5GHzのイオン源を搭載した。図8に高電圧端子内でのECRイオン源による重イオン入射器の概要を示す。イオン源を低エネルギー側に設置し、180°偏向電磁石で引き出されたイオンの分析をする配置とした。希ガス排気のため高電圧端子内で動作するターボ分子ポンプによる真空排気系も新たに開発するなどした⁷⁾。図9に14.5GHzのECRイオン源から加速されたイオン電荷とビーム強度を示す。グレーのプロットは負イオン源から引き出したAuイオンをタンデム加速器の炭素薄膜で荷電変換した際の電荷分布を示しており、グレーの網掛け部がタンデム方式での電荷数とビーム強度の上限となる。一方、ECRイオン源からのKrやXeイオンでは電荷数、ビーム強度ともにタンデム方式での上限を上回っており、エネルギーで1.5~2倍、ビーム強度は10~100倍に増強することができた。新たな入射器では炭素薄膜を使用しないため、薄膜劣化によるビーム量の減少や薄膜によるビームの拡散もない極めて高品質で安定なビーム得ることができた。最近はこのイオン源から通常の加速器では得られない10MeV程度の電荷数1+のイオンや分子イオンなどの加速も実施され、原子物理実験などの利用も行われている。

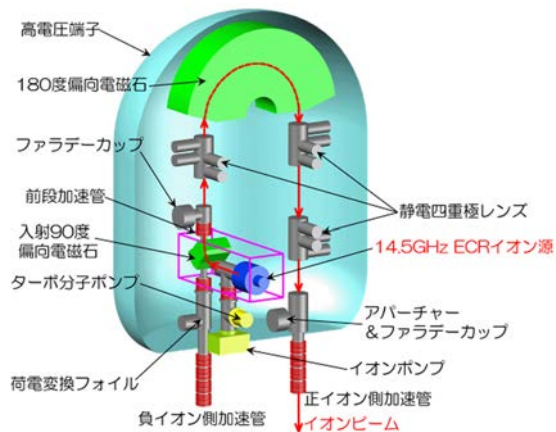


図 8 高電圧端子内重イオン入射器の概略図

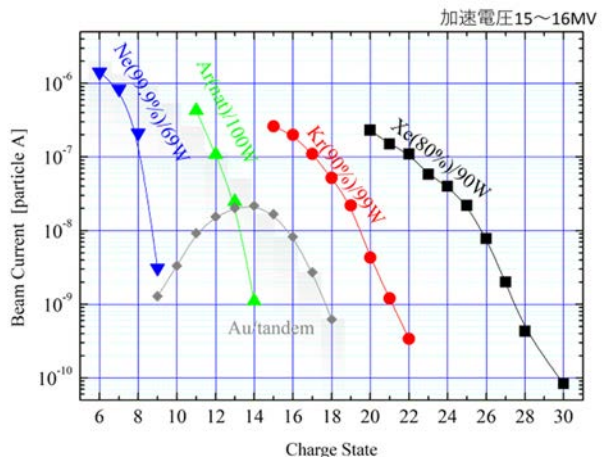


図 9 加速されたイオン電荷とビーム強度

3.4 第2照射室および垂直実験室の整備

東日本大震災以降厳しい予算状況が続いているが、そのような中でも研究を進展させるべく、2つの実験室の整備を行った。

東海タンデムの特徴である、非密封 RI や核燃料を標的とする実験要求に対応するため、これらの標的を扱える照射室（第2照射室）を新たに整備し、2014年から利用を開始した⁸⁾。建家の遮蔽の壁厚が薄いため、ビーム強度は重イオンで10p nAと限られるが、現在、希少試料である半減期276日の²⁵⁴Esを標的としたユニークな実験を世界に先駆けて実施している。核化学実験や非密封RI標的の調整ができるようにフードなどを整備する予定である。

タンデム加速器の高電圧端子内イオン源から分子・クラスターイオンを加速することで最大18MeVの高エネルギークラスタービームを得ることができる。しかし、クラスターイオンの電荷は1+であるので、質量電荷比が大きくエネルギー分析電磁石では偏向できず既存のターゲット室にクラスタービームを導くことができない。したがって、タンデム加速器の直下に新たに実験室（垂直実験室）を整備し、鉛直上方からイオンビームを照射できるビームラインおよび照射チャンバーを設置した⁹⁾。この実験室では炭素より重いイオンまたは分子・クラスターイオンを1.5MeV/u以下のエネルギーで利用でき、核反応を起こさないので最大20p μAのビーム強度での照射が可能である。ビームが鉛直方向から入射するので、液体状の試料の照射等も可能であり、加速器駆動核変換システム（ADS）の窓材研究等に使用されている。

4. 将来構想

現段階では計画立案中であるが、現在のタンデム加速器の後継機となる次期重イオン加速器施設構想の検討をしている。高強度・高エネルギーのビームを得るため、超伝導空洞を主加速器とした重イオン線形加速器施設とし、エネルギーで5倍、ビーム強度で10~100倍の多種多様なイオンビームを供給し、核物理、核化学、材料照射等の研究をさらに発展させることが目的である。図10に加速器施設の概要を示す。高強度高多価イオン生成のための①超伝導 ECR イオン源、②RFQ（高周波四重極線形加速器）、および③low β 超伝導線形加速器を新規に製作し、エネルギー

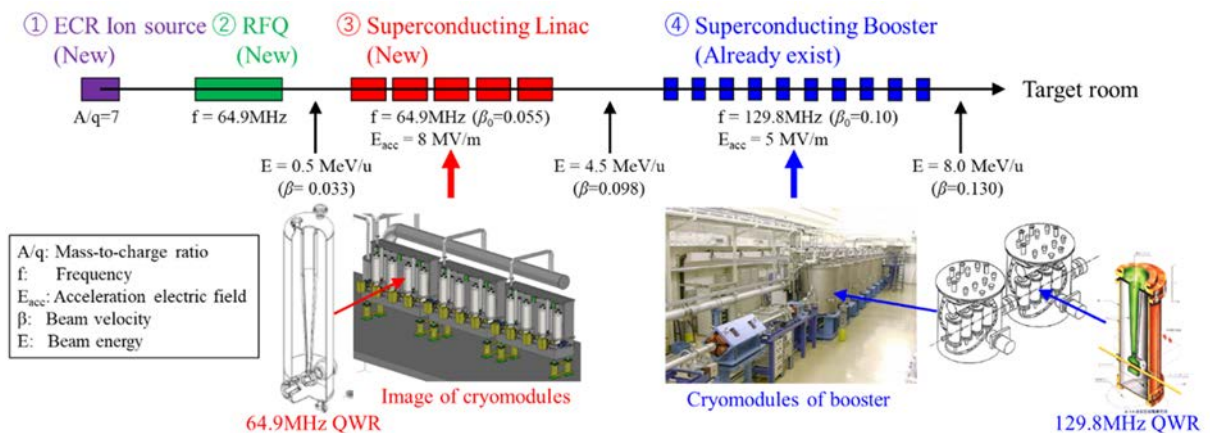


図10 次期重イオン加速器施設（タンデム後継機）の概要

4.5 MeV/u の重イオンビームを生成する。以上の部分を既存のタンデム加速器に置き換え、この後段加速器として既存の超伝導ブースター（現在休止中）を再活用することで、エネルギーで 8-10 MeV/u、ビーム強度で 10 pμA 程度の高エネルギー・高強度ビームを得る。大強度ビームによる照射や RI・核燃料標的を利用するほか、U ビームの加速も想定しているため、加速器室および実験室はそれに対応した放射線管理区域とする。また、材料照射や宇宙機器の照射試験等の産業利用に向けたターゲット室も設置することを検討している。

5. まとめ

東海タンデムは利用運転開始から今年で 40 年を迎える。この間、施設の改造や増設、改良を実施し原子力基礎研究を支える世界的にもユニークな施設として運転を継続してきた。当施設として実に幸運であったのは、東日本大震災で加速器本体に致命的な損傷が発生せず、運転を再開できたことである¹⁰⁾。震災後に後段加速器である超伝導ブースターが運転を休止したことが残念であるが、その後も実験室の整備などにより新たな利用ニーズに応えてきた。

図 11 は、筆者の主観であるが、当施設の加速器性能の変遷を図示したものである。イオン種やビーム強度は着実に向上しており、タンデム加速器単体としてこれ以上向上させることはなかなか難しいと思われる。エネルギーについてはブースター休止による後退はあるもののタンデム加速器単体での性能向上も図られてきた。今後、新施設建設の構想も検討を進めていくが、既存の施設についても加速管の再生または更新、そしてブースターの再稼働が図れば、現状でも世界的な重イオン加速器として活躍できると考えている。

最後に、タンデム研究会での活発な意見交換や関係者の助言、サポートにより今日まで大きなトラブルなく運転を継続してこられました。皆様ありがとうございました。今後もよろしくお願いいたします。

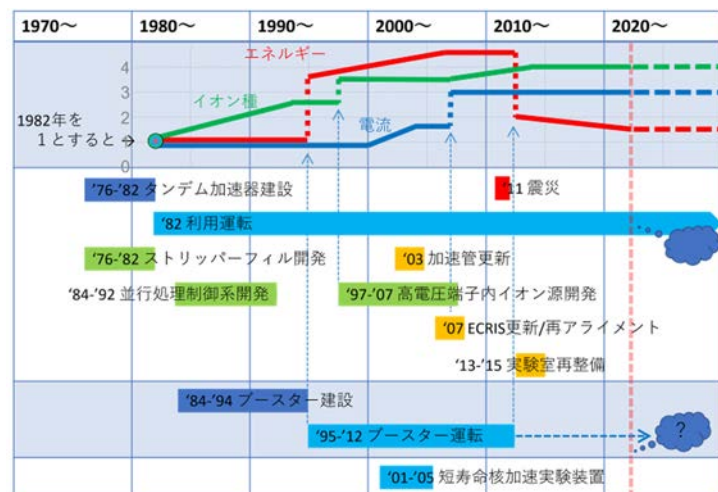


図 11 東海タンデムの加速器性能の変遷と主な開発事項

参考文献

- 1) 日本原子力研究所, 日本原子力研究所史, 平成 17 年 3 月.
- 2) S. Takeuchi et al., Development of the JAERI tandem Superconducting booster, Nucl. Instr. and Meth, A287(1990), pp.257-262.
- 3) S. Takeuchi et al., Acceleration of heavy ions by the JAERI tandem superconducting booster, Nucl. Instr. and Meth, A382(1996), pp.153-160.
- 4) 加速器管理室, タンデムブースターの開発と経緯, JAERI-Tech 95-034, 1995.

- 5) 竹内他, 新加速管の高圧純水洗浄による高電圧性能改善と加速管更新の状況, 第 16 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会(2003 年 6 月)報告集, pp.71-74.
- 6) 松田他, 原研タンデム加速器の現状, 第 18 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会(2005 年 7 月)報告集, pp.11-14.
- 7) 松田他, 原子力機構-東海タンデム加速器の現状, 第 21 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集, JAEA-Conf 2008-012, pp.39-43.
- 8) 仲野谷他, 原子力機構-東海タンデム加速器の現状, 第 24 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会(2011 年 7 月)報告集, pp.89-92.
- 9) 沓掛他, 原子力機構 東海タンデム加速器の現状, 第 29 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会(2016 年 6 月)報告集, pp.43-46.
- 10) 松田他, 原子力機構-東海タンデム加速器の被災状況, 第 24 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会(2011 年 7 月)報告集, pp.51-54.

7.2 原子力機構タンデム加速器を利用した照射損傷・原子物理研究の紹介 Introduction of Radiation Damage Research and Atomic Physics Research at the JAEA Tandem Accelerator

石川 法人*

N. Ishikawa*

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency)

* *Correspondence to: Norito Ishikawa; E-mail: ishikawa.norito@jaea.go.jp*

Abstract

原子力機構タンデム加速器を利用した近年の照射損傷・原子物理研究について、いくつかの研究例をピックアップしてトピックス紹介を行う。今回紹介する研究例は、原子力機構内部のユーザーだけでなく、外部の多くのビームユーザーの成果を含む。進行中の多くの研究は、タンデム加速器の特徴を生かした課題設定になっている。本報告では、研究例を紹介しつつ、原子力機構タンデム加速器のイオンビームの特徴と研究課題との関係性を概観する。ここで挙げる参考文献は、すべて原子力機構タンデム加速器を利用した照射損傷・原子物理などの近年の成果である。

Keywords: 照射損傷; 耐照射性材料; 阻止能; 多価イオン; イオントラック損傷

以下に、原子力機構タンデム加速器が提供するイオンビームの特徴を挙げ、そして、その特徴を生かした研究例を述べる。

特徴 1: (100 MeV 以上の)高エネルギー重イオン&広範囲のイオン種を提供可能

研究例: イオントラック損傷とそれに関連するナノ構造形成に関する研究

keV~MeV エネルギー範囲のイオン照射では、弾性的はじき出しに伴って点状欠陥の形態の照射損傷が形成されるのに対して、100 MeV 以上のエネルギー範囲では、イオンの飛跡に沿って線状の形態の照射損傷が見られる。その特殊な照射損傷をイオントラックと呼んでいる。イオントラックが発見されて以来、数十年間、イオントラックのメカニズム解明の研究はイオン固体衝突分野の中心課題である。近年も原子力機構タンデム加速器を利用したイオントラック及び照射影響の研究進展が目覚ましい。具体的な研究対象は、照射損傷のメカニズム研究だけでなく、様々な関連研究として、表面イオントラック(表面ナノヒロックとも呼ばれる。)の研究^{1)~4)}、イオン照射誘起ナノ粒子変形などのイオントラック関連研究^{5)~10)}、表面スパッタリングや物質改質の研究^{11)~13)}、高温超電導体等の材料機能の向上に関する研究^{14)~19)}、高エネルギーイオン照射に伴う特殊な物性変化^{20)~29)}の研究など広く展開している。

多種のイオン種を提供可能なタンデム加速器を利用すれば、阻止能を系統的に変えることもできる。阻止能(原因)・照射影響(結果)の因果関係を調べることは、照射損傷メカニズムを解明するために必要な

ことである。したがって、原子力機構タンデム加速器は、照射損傷研究を行う上で、非常に適した加速器だと言える。

特徴 2: 長距離飛程&高電流イオンビームを提供可能

高エネルギーイオンビームを利用することで、比較的長距離の飛程を持つようになる。典型的な飛程は、 $10\mu\text{m}$ 程度である。つまり、表面だけでなく、材料内部に照射損傷を導入することが可能になる。この特徴を利用して、放射線環境下でバルクの原子力材料が機能劣化するかどうかの耐照射性試験が可能になる。さらに、原子力機構タンデム加速器には、ターミナルイオン源として、ECR イオン源を搭載しており、比較的高電流のイオンビームを提供できる。その特徴も、耐照射性試験を行うにあたって、大きなアドバンテージとなる。以下に、進行中の 3 つの耐照射性評価研究の例を紹介する。

研究例 1) スピントロニクス素子の耐照射性試験

熱を電気に変換する熱電素子は、工場等の廃熱を再利用する環境発電に必要なデバイスとして重要である。また、放射性同位体から発生する放射線が熱に変換され、その熱を電力に変換する同位体電池の用途においても、その材料の応用が期待されている。特に、スピントロニクスに基づくスピン熱電素子は、放射線耐性が高いことが期待され、特に高放射線環境下での応用が期待される。一方で、スピン熱電素子性能が放射線環境下でどの程度維持されるかは実験的に証明する必要がある。そこで、スピン熱電素子の一つであるスピンゼーバック効果 (SSE) 素子を用い、タンデム加速器を利用した放射線耐性試験が行われた。その結果、熱電性能を表す SSE 電圧をモニターすると、高エネルギー重イオンのある程度の照射量までは性能を維持すること、さらに照射量の増加に伴い次第に性能劣化が見られた。実験で得られた耐用限界照射量をスピン熱電素子の動作期間に換算したところ、同位体電池の動作環境では数百年間にわたり発電性能が劣化せず、十分な耐用年数が確保できることが分かった^{30),31)}。

研究例 2) 事故耐性改良被覆管の耐照射性試験

福島第一原子力発電所の事故を契機に、事故進展を抑制しうる技術としての事故耐性燃料の開発が世界的に進められている。三菱重工業(株)と三菱原子燃料(株)では、現行の Zr 基合金よりも事故耐性が向上するクロム (Cr) コーティング燃料被覆管が開発されている。一方で、Cr コーティングした燃料被覆管においても、耐照射性が担保されるかどうかは、実験的に証明していく必要がある。そのため、タンデム加速器を利用して Cr コーティングした燃料被覆管をイオン照射する実験が進行中である。高エネルギーイオンビームのイオンエネルギーを制御することによって、損傷の深さ依存性に現れるダメージピークの深さ位置を調節することができる。この特徴を利用して、ダメージピークの深さ位置を、Cr 層と被覆管母材との界面の位置にアジャストできる。そうすることによって、Cr コーティングした燃料被覆管で懸念される界面の剥離の有無などを効率的に検証することができる。また、ECR イオン源から生成される高電流ビームは、高い損傷レベルまでの耐照射性試験のために不可欠である。

研究例 3) 金属腐食環境中の原子力材料の耐照射性試験

加速器駆動核変換システム (ADS) は、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減を目的としたシステムである。ADS において、数百 MeV から数 GeV に加速した陽子ビームを標的である核破碎ター

ゲットに入射すると、核破砕反応が起きて、大量の高速中性子が放出される。核破砕ターゲットの周りに MA (マイナーアクチノイド) を主成分とする燃料を設置しておく、MA は高速中性子を吸収して核分裂反応を起こし、主に短寿命または非放射性的の核分裂生成物になることが期待できる。しかしながら、ビーム窓材は、冷却材兼ビーム標的である液体 Pb-Bi と接しており、過酷な金属腐食環境に晒されることになる。また、その腐食挙動は高速中性子の照射によって大きく影響を受けることが懸念される。タンデム加速器に新たに設置された垂直ビームライン (加速されたビームの方向を変えずに、地下にそのままビームを導入するビームライン) では、液体中の材料照射が可能である。そのメリットを生かして、液体 Pb-Bi と接した材料をイオン照射することができる。腐食環境と照射環境による複合影響を現在調べているところである。

特徴 3: 高エネルギー & 多価イオンビームを提供できる

研究例: 高エネルギーイオンの炭素薄膜通過後の非平衡電荷分布に関する研究

単一の電荷をもつ高エネルギーイオンが炭素薄膜を通過すると、イオンの電荷状態が変化し、電荷が分布を持つようになる。極薄の炭素薄膜を通過する場合には、この電荷分布は平衡電荷分布に達しないので、いわゆる非平衡電荷分布を示すことになる。一方で膜厚が十分に厚い場合には、当然、平衡に達する。したがって、炭素薄膜の膜厚を極薄から厚くしていくにしたがって、非平衡電荷分布から平衡電荷分布に移行していく様子を詳細に調べることができる。また、入射時の多価イオンの入射電荷を系統的に変化させる実験を行えば、膜厚を厚くするに伴って平衡電荷に近づいていくふるまいが (入射電荷に依存して) どのように変化していくかも系統的に調べることも出来る。軽イオンターゲット室に設置された重イオン分光ロメータ (ENMA) を利用すると高エネルギーイオンが炭素薄膜を通過した後のイオンの電荷を正確に測定することができるので、現在の原子力機構タンデム加速器は上記の目的に非常に適した施設である。

研究例として、2 MeV/u S の入射イオン条件は固定しつつ、S の電荷および炭素膜厚を系統的に変えていく研究が行われた。膜厚を、 $0.9 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ から $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以上まで系統的に変化させていく。その結果、S の電荷が 14+ 以下の場合、 $6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 付近の膜厚以上では電荷分布が平衡に達しているように見える。一方で、入射イオンが S^{16+} 、 S^{15+} 入射の場合は、14+ 以下入射と電荷平衡化過程が異なり、平衡化距離が異常に長いことを明らかにした。以上のように、タンデム加速器を利用して、丹念に電荷状態を調べていくと、物質通過中の電荷の平衡化プロセスを包括的に理解できる³²⁾⁻³⁵⁾。

参考文献

- 1) Ishikawa, N. et al., Surface nanostructures on Nb-doped SrTiO₃ irradiated with swift heavy ions at grazing incidence, Nanotechnology 33, 2022, 235303, 10p.
- 2) 石川法人, 田口富嗣, 大久保成彰, 高速重イオン照射したセラミックスにおける照射損傷メカニズム, しょうとつ (原子衝突学会誌), vol.18, 2021, pp.43-54.
- 3) Ishikawa, N. et al., TEM analysis of ion tracks and hillocks produced by swift heavy ions of different velocities in Y₃Fe₅O₁₂, J. Appl. Phys.127, 2020, 055902, 7p.
- 4) Ishikawa, N. et al., Comprehensive Understanding of Hillocks and Ion Tracks in Ceramics

- Irradiated with Swift Heavy Ions, *Quantum Beam Sci.* 4, 2020, 43, 14p.
- 5) Amekura, H. et al., Incident Angle Dependent Formation of Ion Tracks in Quartz Crystal with C_{60}^+ Ions: Big Ions in Small Channels, *Quantum Beam Science* 6, 2022, 4, 8p.
 - 6) H. Amekura, M. Toulemonde, K. Narumi, R. Li, A. Chiba, Y. Hirano, K. Yamada, S. Yamamoto, N. Ishikawa, N. Okubo, and Y. Saitoh, Ion tracks in silicon formed by much lower energy deposition than the track formation threshold, *Scientific Reports* 11, 2021, 185, 11p.
 - 7) H. Amekura, R. Li, N. Okubo, N. Ishikawa, F. Chen, Irradiation Effects of Swift Heavy Ions Detected by Refractive Index Depth Profiling, *Quantum Beam Science* 4, 2020, 39, 11p.
 - 8) H. Amekura, P. Kluth, P. Mota-Santiago, I. Sahlberg, V. Jantunen, A.A. Leino, H. Vazquez, K. Nordlund, F. Djurabekova, On the mechanism of the shape elongation of embedded nanoparticles, *Nucl. Instr. Meth. B* 475, 2020, pp.44-48.
 - 9) H. Amekura, R. Li, N. Okubo, N. Ishikawa, and F. Chen, Swift heavy ion irradiation to non-amorphizable CaF_2 and amorphizable $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) crystals, *Nucl. Instr. Meth. B* 474, 2020, pp.78-82.
 - 10) F. Chen, H. Amekura, Y. Jia, Ion Irradiation of Dielectrics for Photonic Applications, Springer series in Optical Sciences Vol. 231 (Springer, Singapore, 2020), 290p.
 - 11) Matsunami, N. et al., Modification of SiO_2 , ZnO , Fe_2O_3 and TiN Films by Electronic Excitation under High Energy Ion Impact, *Quantum Beam Sci.* 5, 2021, 30, 21p.
 - 12) Matsunami, N. et al., Charge State Effect of High Energy Ions on Material Modification in the Electronic Stopping Region, *Atoms* 9, 2021, 36, 23p.
 - 13) Matsunami, N. et al., Electronic sputtering of SiC and KBr by high energy ions, *Nucl. Instr. Meth. B*, 478, 2020, pp.80-84.
 - 14) Matsunami, N. et al., Effective depth of electronic sputtering of WO_3 films by high-energy ions, *Nucl. Instr. Meth. B*, 460, 2019, pp.185-188.
 - 15) Sueyoshi, T. et al., Morphology of Columnar Defects Dependent on Irradiation Direction in High-Tc Superconductors, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 32, no. 6, 2022. 8000704, 4p.
 - 16) Sueyoshi, T., Modification of Critical Current Density Anisotropy in High-Tc Superconductors by Using Heavy-Ion Irradiations, *Quantum Beam Sci.* 5, 16 2021, 24p.
 - 17) Sueyoshi, T. et al., Summation of Flux Pinning by Columnar Defects Tilted at Different Angles in YBCO Thin Films, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31, 2021, 8000305, 5p.
 - 18) Sueyoshi, T. et al., Combined effect of flux pinning by three-directional columnar defects in a field-angular region of high-Tc superconductors, *Physica C*, 582, 2021, 1353824, 5p.
 - 19) Sueyoshi, T. et al., Strong flux pinning by columnar defects with directionally dependent morphologies in GdBCO-coated conductors irradiated with 80 MeV Xe ions, *Jap. J. Appl. Phys.* 59, 2020, 023001, 7p.
 - 20) Khoualed, M. et al., Blueshift in optical bandgap of sprayed nanocrystalline Cu_2ZnSnS_4 thin films induced by 200 MeV Xe swift heavy ions irradiation, *J Mater Sci: Mater Electron*

- 32, 2021, pp.25516-25527.
- 21) Pogrebnjak, A.D. et al., Positron annihilation studies of defect structure of (TiZrHfNbV)N nitride coatings under Xe¹⁴⁺ 200 MeV ion irradiation, *Materials Letters* 303, 2021, 130548, 4p.
 - 22) Yasuda, K. et al., Radiation-Induced Effects on Materials Properties of Ceramics: Mechanical and Dimensional Properties, *Comprehensive Nuclear Materials*, vol. 1, 2020, pp.153-185.
 - 23) Yamada, T. et al., Control of optical absorption of silica glass by Ag ion implantation and subsequent heavy ion irradiation, *Nanotechnology*, 31, 2020, 455706, 12p.
 - 24) Iwase A. and Hori F., Modification of lattice structures and mechanical properties of metallic materials by energetic ion irradiation and subsequent thermal treatments, *Quantum Beams Science* 4, 2020, 17, 13p.
 - 25) Li, R. et al., Matrix-material dependence on the elongation of embedded gold nanoparticles induced by 4 MeV C₆₀ and 200 MeV Xe ion irradiation, *Nanotechnology* 31, 2020, 265606, 9p.
 - 26) Yoshioka, S., et al., Local structure investigations of accumulated damage in irradiated MgAl₂O₄, *J. Am. Ceram. Soc.*, 103, 2020, pp.4654-4663.
 - 27) Yamamoto, Y. et al., Analysis of Ion-Irradiation Induced Lattice Expansion and Ferromagnetic State in CeO₂ by Using Poisson Distribution Function, *Quantum Beam Sci.*, 4, 2020, 26, 13p.
 - 28) Kokabu, H. et al., Measurement of local temperature around the impact points of fast ions under grazing incidence, *Nucl. Instr. Meth. B*, 460, 2019, pp.34-37.
 - 29) Pang, C. et al., Copper Nanoparticles Embedded in Lithium Tantalate Crystals for Multi-GHz Lasers, *ACS Applied Nano Materials* 2, 2019, pp.5871-5877.
 - 30) Okayasu, S. et al., Tolerance of Spin-Seebeck Thermoelectricity against Irradiation by Swift Heavy Ions, *J. Appl. Phys.*, vol.128, issue 8, 2020, 083902, 7p.
 - 31) 日本原子力研究開発機構, プレス発表 「放射線に負けない熱電発電の実現に向けてー スピン熱電素子が重イオン線に高耐性を持つことを実証ー」, 2020/8/28,
<https://www.jaea.go.jp/02/press2020/p20082802/> (accessed 2022-8-3).
 - 32) Imai, M. et al, Equilibrium and non-equilibrium charge-state distributions of 2.0 MeV/u carbon ions passing through carbon foils, *Nucl. Instr. and Meth. B*, 354, 2015, pp.172-176.
 - 33) M. Imai et al., Quasi-equilibrium in charge-state evolution for 1.0 and 2.0 MeV/u carbon ions after carbon foil penetration, *Journal of Physics: Conference Series*, 1412, 2020, 162013.
 - 34) Imai, M. et al., Stripping features of 2-MeV/u sulfur-ion beams penetrating carbon foils, *Nucl. Instr. Meth. B*, 520, 2022, pp.13-21.
 - 35) Tolstikhina, I., Imai, M., Winckler, N., Shevelko, V., *Basic Atomic Interactions of Accelerated Heavy Ions in Matter*, Springer, 2018, 236p.

7.3 タンデム加速器施設における核物理・核化学研究

Research activity in nuclear physics and nuclear chemistry at the JAEA tandem accelerator facility

西尾 勝久*

K. Nishio*

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター
(Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency)

* *Correspondence to: Author ; E-mail: Nishio.katsuhisa@jaea.go.jp*

Abstract

JAEA タンデム加速器は、高分解能で高いエミッタンスに優れた様々な重イオンビームを供給できる。静電型の加速器としては、現在、世界的にも最大のターミナル電圧を与える。また、施設では、様々なアクチノイドの核燃料や RI 試料を照射でき、世界的にも特徴ある施設である。この特徴を活かし、先端基礎研究センターでは重元素および超重元素領域の研究を進めている。本文では最近の成果について紹介する。

Keywords: 超重元素; 核分裂; 超重元素の化学; 多核子移行反応

1. はじめに

原子炉の中では原子番号 100 番のフェルミウムまで生成されるが、これより重い元素や元素同位体は、重イオンビームを用いた原子核反応によって生成される。重い元素同位体を生成しこれらの核物理および核化学研究を進めるには、アクチノイド核種を標的として用いることが有利である。タンデム加速器施設では、これら薄膜標的を作成する設備、およびこれらを照射できるビームラインを備えており、先端基礎研究センターでは、この特徴を活かし、重元素・超重元素領域に特徴ある研究を進めている。研究内容としては、超重元素合成のための核反応の研究 [1-3]、重元素の核構造の研究[4-7]、超重元素の化学的性質[8-10]についての研究成果を挙げた。ここでは、前中期計画中に行った中心的な成果である多核子移行反応を用いた核分裂の研究[11,12] を例にとりて成果の一部を紹介する。

2. 多核子移行反応を用いた新規核分裂測定技術の開発

核分裂は、重い原子核に特有の崩壊様式である。核分裂は、原子力発電や研究用研究炉を駆動するための基本現象であり産業や多くの基礎科学の基盤となっている。また、どこまで重い元素が存在するかも、原子核の核分裂に対する安定性で決まる。近年、中性子星どうしの合体現象における爆発的な環境下での元素合成において、重い元素が生成された際には核分裂が生じること

になる。星の中での核分裂リサイクルは、自然界での元素組成に影響を与え、近年、盛んに議論が行われている。このように、核分裂の理解は、応用から基礎科学に波及する重要な現象である一方、理論を構築する上でも大きなチャレンジとして残っており、近年、核物理分野における重要課題の1つになっている。

核分裂は、基底状態にある原子核が時間とともに変形を発展させ、最終的に切断して Scission と呼ばれる状態に至る過程を理解することである。核分裂の観測量のうち、最も重要なデータとして核分裂片の質量数に対する収率がある（あるいは核分裂片の陽子数に対する収率）。図1は、これまでに質量数または電荷に対する分布が測定された核種を示したもので、実験方法に応じて印を変えてプロットしている。先端基礎研究センターは、多核子移行反応を利用した核分裂測定技術を開発し、図の+印で示す核種のデータを取得した。初めて測定された核種は32種に及ぶ。また、 β 崩壊に対して安定となる β 安定線（破線）よりも右側に位置する中性子数の多い核種のデータも得た。 β 安定線より右側の核種は、天体でのr-プロセス元素合成で作られると考えられ、近年注目されている。さらに、この手法を拡張することで、はるかに多くの核種のデータを取得でき、核分裂の理解に貢献することが期待される。以下、実験手法と、得られた重要な結論の一つであるマルチチャンス核分裂について説明する。

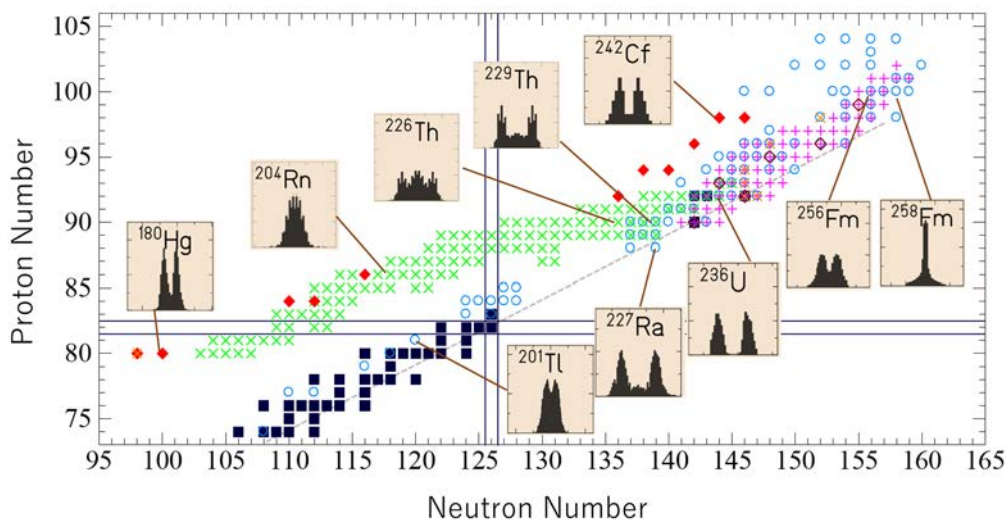


図1 複合核の励起エネルギーが核分裂障壁の高さから10MeV以下の、低励起エネルギーで取得されたデータを示した。JAEA タンデムで開発した手法を×で示す。JAEA 実験で用いた標的を◇で示す。核種として [13]に示したデータに加え、多核子移行反応による近年のJAEA データを追加している。従来の自発核分裂、中性子および軽イオン入射核分裂を○で示す。GSI の相対論的運動エネルギービームを用いた逆運動学法によるデータを×で示す。 β 崩壊遅発核分裂を◆で示す。また、安定同位体を■で示し、 β 崩壊に対して安定なラインを破線で示す。図には、代表的な原子核の核分裂片質量数分布の形を示した。

図2に実験の原理を、反応の例とともに示す。加速した ^{18}O ビームを ^{238}U に照射すると、双方で中性子や陽子を交換する反応が開く。この例では、複合核 ^{240}U が生成されているが、交換する

パターンに応じて多くの種類の複合核ができる。ここで、入射核から標的核に多くの中性子が移ることがあり、この場合、中性子数の多い複合核ができる。イベントごとに生成される複合核を同定し、核分裂を観測することで、様々な核種の核分裂データを取得できる。ここでカギになるのがシリコン ΔE - E 検出器であり、これは散乱された粒子（図 2 (a)では ^{16}O ）を識別することで、複合核が同定できる。例として、 $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ 反応で得た結果を図 2 (b)に示す[14]。この実験では、1つの反応で 23 種に及ぶ複合核を識別して核分裂データを取得した。多核子移行反応のもう一つの特徴は、複合核の励起エネルギーが広く分布することであり、散乱粒子の運動エネルギーの測定から励起エネルギーをイベントごとに決めることができる。これにより、例えば励起エネルギーに対する核分裂片質量数分布のデータを取得することができる。また、図 2(a)に示すように、核分裂が起こり始める励起エネルギーのしきい値から、核分裂障壁の高さを決定することができる[15]。核分裂障壁の高さは、核分裂モデルを検証する上で重要な観測量となっている。

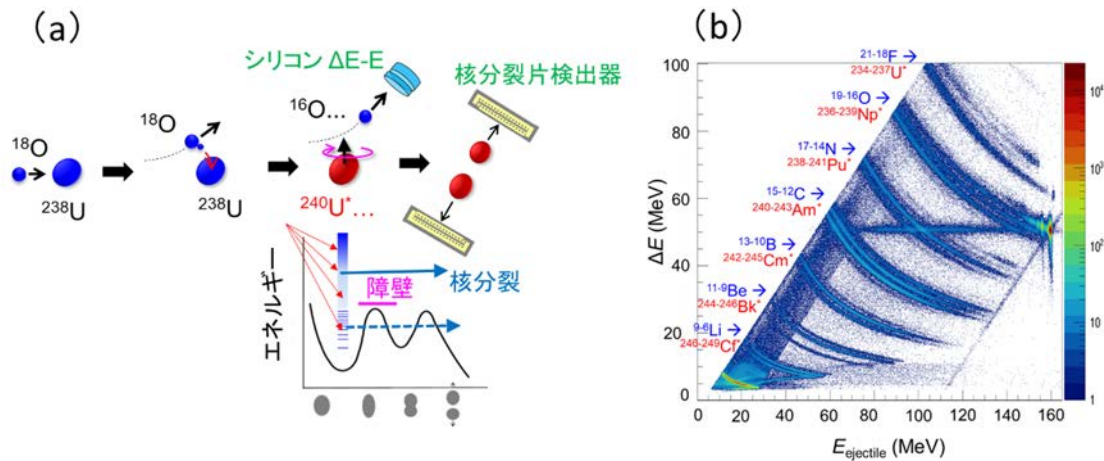


図 2 (a) 多核子移行反応による核分裂測定の実験原理。(b)シリコン ΔE - E 検出器で散乱荷電粒子を識別し、複合核を同定した結果 [14]。

多核子移行反応を用いた核分裂測定で明らかになった現象として、核分裂片質量数分布におけるマルチチャンス核分裂の効果である[12,16]。図 3(a)に示すように、高励起状態にある原子核は、核分裂することもあるが、中性子を放出して励起エネルギーを下げ、1つ中性子数の軽い同位体を生成することがある。これは 2nd チャンス核分裂と言われる。同様に、いくつかの中性子を放出してから核分裂する割合があり、実験データには、マルチチャンス核分裂が混在する。図 3(a)に示すように、中性子を放出するに従って複合核の励起エネルギーが下がっていく。この結果、原子核の殻効果が回復し、質量非対称な核分裂が顕著になっていく。図 3 (b) に示す励起エネルギー 45MeV の ^{240}U の場合、中性子を 4 つ放出してから核分裂するものが多く、実験で観測された質量非対称な核分裂は、高次のチャンス核分裂によってもたらされるものであると結論した。アクチノイドの高励起状態の核分裂を理解するには、マルチチャンス核分裂による効果を取り入れる必要があり、理論を構築する上で重要であることを示した。

3. 今後の展望

多核子移行反応は、中性子数の多い重元素・超重元素同位体を合成できる方法として注目されている。先端基礎センターでは、反跳生成核分離装置や ISOL を用いて多核子移行反応で生成された原子核を分離し、崩壊測定や高精度質量測定を行う実験研究をスタートさせた。中性子過剰核領域では、新たなタイプの核分裂の発見や、寿命の長い同位体の発見が期待される。寿命の長い超重元素同位体を作れば、様々なアプローチによるシングルアトム化学の研究が可能になる。これにより、超重元素の周期表における位置づけなど、化学研究への大きな波及が期待できる。自然界での元素合成においては、天体で合成される同位体を地球上で実現させることで、天体での元素合成の理解が深まると期待できる。このような研究を有利に進めるため、大強度ビームを与える重イオン加速器の構築が重要であり、将来計画として議論を進めている。

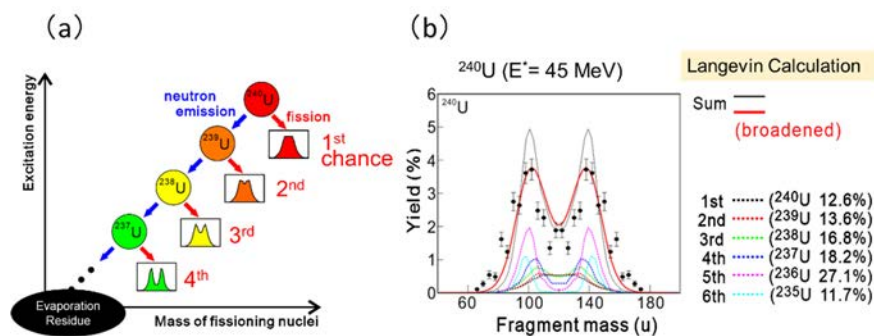


図 3 (a)マルチチャンス核分裂の原理。(b) ^{240}U の高励起状態からの核分裂におけるマルチチャンス核分裂の寄与[11]。

参考文献

- [1] K. Nishio et al., Effects of nuclear orientation on the mass distribution of fission fragments in the reaction of $^{36}\text{S}+^{238}\text{U}$, Phys. Rev. C **77**, 064607 (2008).
- [2] K. Nishio et al., Nuclear orientation in the reaction $^{34}\text{S}+^{238}\text{U}$ and synthesis of the new isotope ^{268}Hs , Phys. Rev. C **82**, 024611 (2010).
- [3] K. Nishio et al., Fusion probabilities in the reactions $^{40,48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ at energies around the Coulomb barrier, Phys. Rev. C **86**, 034608 (2012).
- [4] M. Asai et al., Experimental Identification of Spin-Parities and Single-Particle Configurations in ^{257}No and Its α -Decay Daughter ^{253}Fm , Phys. Rev. Lett. **95**, 102502 (2005).
- [5] H. Makii et al., E1 and E2 cross sections of the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma_0)^{16}\text{O}$ reaction using pulsed α beams, Phys. Rev. C **80**, 065802 (2009).
- [6] R. Takahashi et al., In-beam γ -ray spectroscopy of $^{248,250,252}\text{Cf}$ by neutron-transfer reactions using a Cf target, Phys. Rev. C **81**, 057303 (2010).
- [7] R. Orlandi et al., New K isomers in ^{248}Cf , Phys. Rev. C **106**, 064301 (2022).
- [8] T.K. Sato et al., Measurement of the first ionization potential of lawrencium, element 103, Nature **520**, 209 (2015).
- [9] T.K. Sato et al., First Ionization Potentials of Fm, Md, No, and Lr: Verification of Filling-

Up of 5f Electrons and Confirmation of the Actinide Series, *J. Am. Chem. Soc.* **140**, 14609 (2018).

[10] N. M. Chiera et al., Chemical Characterization of a Volatile Dubnium Compound, *DbOCl₃*, *Angewandte Chemie Int.Ed.* **133**, 18015 (2021).

[11] R. Léguillon et al., Fission fragments mass distributions of nuclei populated by the multinucleon transfer channels of the $^{18}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ reaction, *Phys. Lett.B* **761**, 125 (2016).

[12] K. Hirose et al., Role of Multichance Fission in the Description of Fission-Fragment Mass Distributions at High Energies, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 222501 (2017).

[13] A.N. Andreyev, K. Nishio, k.-H. Schmidt, Nuclear fission: a review of experimental advances and phenomenology, *Rep. Prog. Phys.* **81**, 016301 (2018).

[14] M.J. Vermeulen et al., Measurement of fission-fragment mass distributions in the multinucleon transfer channels of the $^{18}\text{O}+^{237}\text{Np}$ reaction, *Phys. Rev. C* **102**, 054610 (2020).

[15] K.R. Kean et al., Validation of the multinucleon transfer method for the determination of the fission barrier height, *Phys, Rev. C* **100**, 014611 (2019).

[16] S. Tanaka et al., Effects of multichance fission on isotope dependence of fission fragment mass distributions at high energies, *Phys. Rev. C* **100**, 064605 (2019).

8. 施設報告Ⅶ

This is a blank page.

8.1 筑波大学タンデム加速器施設の現状

Status Report of the Tandem Accelerator Complex at the University of Tsukuba

笹 公和^{1,2*}・石井 聡¹・高橋 努¹・大和 良広¹・田島 義一¹・吉田 哲郎¹・松村 万寿美¹・
森口 哲朗^{1,2}・上殿 明良^{1,2}

K. Sasa^{1,2*}, S. Ishii¹, T. Takahashi¹, Y. Yamato¹, Y. Tajima¹, T. Yoshida¹, M. Matsumura¹,
T. Moriguchi^{1,2} and A. Uedono^{1,2}

¹ 筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門 (UTTAC, University of Tsukuba)

² 筑波大学数理物質系 (Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba)

* Correspondence to: Kimikazu SASA; E-mail: ksasa@tac.tsukuba.ac.jp

Abstract

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門では、6MV タンデム加速器と 1MV タンデトロン加速器からなる複合タンデム加速器施設の維持管理と運用および学内外との共同利用研究を推進している。新型コロナウイルス感染予防対策などの影響で、2020 年度の 6MV タンデム加速器の運転時間は前年度より約 22%の減少となったが、2021 年度は前年度より 34%増加した。6MV タンデム加速器の主な利用分野は、加速器質量分析 (AMS)、マイクロビームを用いたイオンビーム分析、検出器開発、偏極ビームを用いた原子核実験、放射線耐性試験および照射実験となっている。6MV タンデム加速器については、使用可能なビーム核種の拡大を図っており、2021 年度からは偏極重陽子ビームの利用を開始した。AMS では、放射性ハロゲン ³⁶Cl と ¹²⁹I の測定が中心となっているが、新たに ¹³⁵Cs-AMS の試験開発を開始した。また、軽元素分析用の SC-PIXE (STJ 検出器) が稼働を開始した。本報告では、2021 年度のタンデム加速器施設の整備および運用状況について報告する。

Keywords: 施設報告; 6MV タンデム加速器; 1MV タンデトロン加速器; イオンビーム利用研究

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¹⁾では、6MV タンデム加速器と 1MV タンデトロン加速器からなる複合タンデム加速器施設の維持管理と運用をおこなっている。学内共同利用施設であるが、施設共用による学外利用者も受け入れている。2021 年度は、学内課題 21 件、学外の施設共用課題 10 件 (成果占有 1 件) が採択されており、6MV タンデム加速器では 132 日間、1MV タンデトロン加速器は 68 日間の実験を実施した。2021 年度の加速器施設の整備および運用状況を報告する。

2. 施設現況

2.1 施設の概要

筑波大学タンデム加速器施設の概略を Fig.1 に示す。6MV タンデム加速器は、5 台の負イオン源と 12 本のビームラインを有している²⁾。ラムシフト偏極イオン源 (PIS) については、偏極陽子と偏極重陽子の供給が可能である。また、1MV タンデトロン加速器には、2 台の負イオン源と 4 本のビームラインが備わっている。その他、²²Na 線源を用いた陽電子消滅実験装置やメスバウア分析装置などについても、その維持管理と運用を担当している。

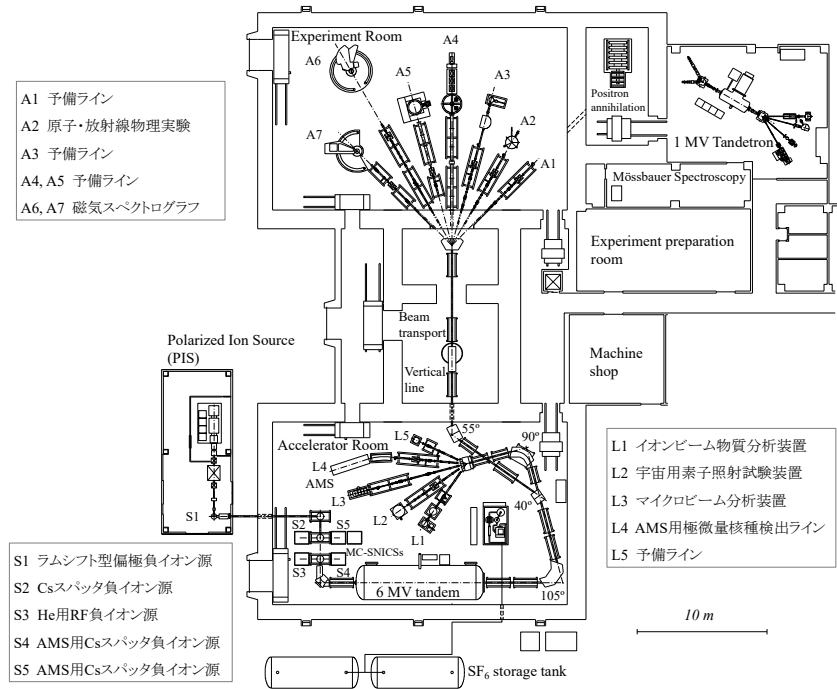


Fig.1 筑波大学タンデム加速器施設の概略図

2.2 1MV タンデトロン加速器の運用状況

2021 年度の 1MV タンデトロン加速器の稼働時間は 644 時間であり、ビーム加速時間は 286 時間であった。また、39 件の実験が実施され、利用者は延べ 212 名であった。2021 年度の加速イオン種の割合を Fig.2 に示す。研究分野別の利用割合については Fig.3 に示す。「NRA を用いた全固体 Li イオン電池の界面分析」、 Li_2 や H_2 クラスターを用いた「コンボイ電子収量におけるクラスター効果」、生物医学利用分野の「 $^{15}\text{N}(1\text{H}, \alpha \gamma)^{12}\text{C}$ 共鳴核反応を利用した新規放射線育種法および複合陽子線力学療法の開発」の実験課題を中心に利用された。

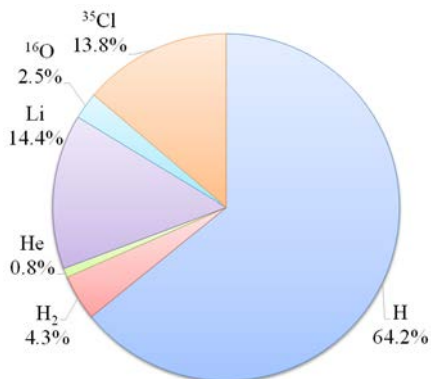


Fig.2 1MV タンデトロン加速器の加速イオン種の割合

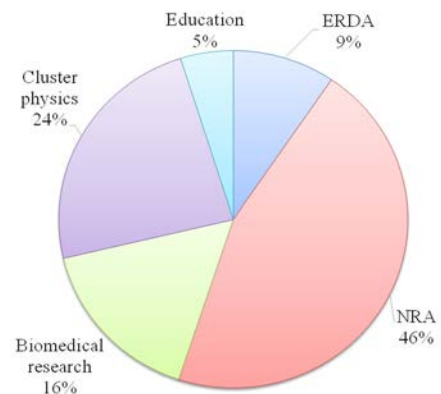


Fig.3 1MV タンデトロン加速器の研究分野別の利用割合

2.3 6MV タンデム加速器の運用状況

2021年度の6MV タンデム加速器の稼働時間は1,441時間であり、ビーム加速時間は1,148時間であった。2020年度と比較すると、加速器運転時間は34%増加した。また、74件の実験が実施され、利用者は延べ477名であった。2021年度の加速イオン種の割合をFig.4に示す。研究分野別の利用割合についてはFig.5に示す。加速器質量分析(AMS)の利用割合が46%となっており、その他にマイクロビームを用いたイオンビーム分析(IBA)が21%、検出器開発が15%、偏極陽子・重陽子を用いた原子核実験が13%、放射線耐性試験および照射実験が3%となっている。

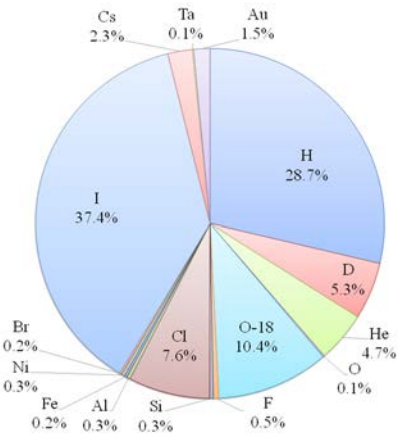


Fig.4 6MV タンデム加速器の加速イオン種の割合

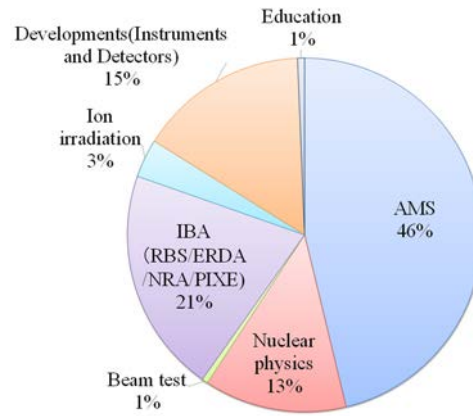


Fig.5 6MV タンデム加速器の研究分野別の利用割合

AMSでは、 ^{36}Cl (42 試料) と ^{129}I (427 試料) の合計 469 試料の測定が実施された。PIS からの偏極重陽子ビームの加速試験では、PIS 下流での偏極度は約65%となり、ビーム強度は約30 nAだった。また、 ^{135}Cs ($T_{1/2}=230$ 万年)のAMS開発を目指してRbスパッタ負イオン源によるCsビームの生成試験を行なった。

ターミナル電圧別の利用割合をFig.6に示す。 ^{129}I と ^{135}Cs のAMSでの5 MVとイオン照射と原子核実験及び ^{36}Cl -AMSにおける6 MVが主に使用されている。3 MVは、 He^{2+} ビームを用いた透過ERDAによる水素分析に用いられており、2 MVはマイクロPIXEの実験に用いられた。

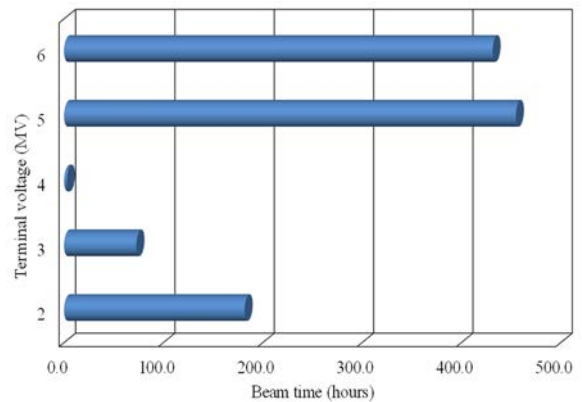


Fig.6 6MV タンデム加速器のターミナル電圧別の利用割合

3. ビーム実験装置の研究開発状況

3.1 超伝導トンネル接合 (STJ) 検出器

産総研との共同研究により、軽元素分析用のSC-PIXEの研究開発を進めている。Fig.7に示したSTJ検出器³⁾



Fig.7 STJ 検出器の外観

は、He-3 クライオスタット、512 pixels の STJ アレイ、16 ch の電荷検出増幅器と MCA で構成されており、冷却ステージ温度は約 320 mK となっている。4 MeV 陽子ビームを用いた試験測定では、Al-K 線のエネルギー分解能として約 50 eV を得ている。

3.2 Rb スパッタ負イオン源

135Cs の AMS 開発を進めており、S5 イオン源 (MCG-SNICS) でスパッタに用いている Cs を Rb に交換して負イオンビーム生成を確認した。試料 (Cs₂SO₄+PbF₂)からは、Cs の負分子イオン ¹³³Cs¹⁹F₂⁻ の生成に成功している。また、Rb スパッタによる一般的な負イオンの生成についても確認した (Table 1)。

4. 加速器整備状況

2021 年度は、RF 荷電変換イオン源 (アルファトロス) の整備とタンデトロン実験室の中性子エリアモニタの更新などを実施した。例年、3 月と 8 月に加速器の定期整備を実施しており、3 月には加速器タンクを開放して内部の点検整備をおこなった。加速器タンク内部では、シーブの導電性プラスチックとペレットチェーンとの擦れにより、多量の削片が発生しており (Fig. 8)、Krytox™等の潤滑剤を塗布するか検討中である。2021 年 8 月の定期整備では、ファイファー製 TMP 4 台のオーバーホールを実施したが、RP-TMP 間ベローズの NW25 クランプの O リングにひび割れが多数見つかった。23 台の TMP について、計 115 本の O リングの交換を実施した。その他、ガストリップパー用回転ロッドの駆動部に不具合が発生してガス漏れが発生したため、修理をおこなった。2022 年 5 月には、Rotating Shaft (RS)が停止しているのが見つかり、2022 年 5 月 16 日 - 6 月 3 日の期間に加速器タンクを開放して緊急の修理を実施した。ターミナルに搭載している発電機のベアリングに異常が見つかり、交換作業を実施した (Fig. 9)。

5. まとめ

6MV タンデム加速器については、利用可能なビーム種の拡大を図っており、2021 年度からは偏極重陽子の利用を開始している。AMS では、¹³⁵Cs-AMS の試験開発を開始した。また、軽元素分析用の SC-PIXE (STJ 検出器) が稼働を開始した。6MV タンデム加速器は、稼働を開始してから 5 年が経過しており、付属機器について不具合が発生し始めている。ペレットチェーンによるプリーアの削片が多く発生しており、対応を検討中である。その他、RF イオン源が所定の性能を発揮しておらず、運用方法について他施設の状況確認をおこなっている。

Table 1 Rb スパッタによる負イオン生成

Negative Ion	Maximum Beam Current (μA)	Material
H ⁻	~ 10	TiH ₂
¹⁸ O ⁻	~ 1	Al ₂ O ₃ +Ag (¹⁸ Oエンリッチ94%)
²⁷ Al ₂ ⁻	~ 2	Al (99.99%)
²⁸ Si ⁻	~ 3	Si (99.999%)+Ag
⁵⁶ Fe ⁻	~ 0.5	Fe (99.99%)
⁷⁹ Br ⁻	~ 10	AgBr
¹⁸¹ Ta ⁻	~ 0.02	Ta (99.95%)
¹³³ Cs ¹⁹ F ₂ ⁻	~ 0.2	Cs ₂ SO ₄ +PbF ₂



Fig.8 加速器タンク内の削片



Fig.9 故障した発電機のベアリング

参考文献

- 1) 筑波大学 応用加速器部門, <https://www.tac.tsukuba.ac.jp> (accessed 2022-10-01).
- 2) 笹 公和, イオンビーム多目的利用研究のための筑波大学 6 MV タンデム型静電加速器, 日本加速器学会誌「加速器」, 14 巻 1 号, 2017, pp.5-14.
- 3) S.Shiki et al., X-ray Detection Performance of 100-pixel Superconducting Tunnel Junction Array Detector in the Soft X-ray Region, *J.Low Temp. Phys.*167, 2012, pp.748-753.

8.2 東京大学タンデム加速器研究施設 MALT の現状 The Current Status of MALT, The University of Tokyo

徳山 裕憲*・松崎 浩之・土屋 陽子・山形 武靖

H. Tokuyama*, H. Matsuzaki, Y. S. Tsuchiya and T. Yamagata

東京大学MALT (Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator, The University of Tokyo)

* Correspondence to: Hironori Tokuyama; E-mail: htoku@um.u-tokyo.ac.jp

Abstract

東京大学タンデム加速器研究施設 (MALT) では、最大加速電圧 5MV のペレトロン 5UD タンデム加速器を運用している。

2021 年度は CAMAC 関連の故障が相次いで発生した。MALT では制御やデータ取得システムに CAMAC を利用している。8 月には加速器タンク周辺から分析電磁石、振分電磁石までの制御を担う CAMAC の電源クレーンが故障し、10 月には AMS のデータ取得に使っている CAMAC モジュールの ADC が故障した。どちらも原因の特定に時間がかかり、特に ADC のトラブルの際は修理にも大きな時間を要した。

そのほかにも、イオン源ターゲットカソードの交換ができなくなる、コロナプローブのグリッド電圧がかかなくなる、高圧ケーブルの絶縁破壊、冷却水ポンプの水漏れ、タンク内カラムポストの破損など、大小さまざまなトラブルが発生した。本研究会では、これらのトラブルの詳細について報告する予定である。

多くのトラブルは発生したものの加速器の停止にまで至るものは数回のみであった。さらにメンテナンスの日程も立て込んでいたため、結果的に 2021 年度の加速器運転時間は 7,295 時間まで伸びた。これは MALT 運用開始以来の最長記録である。

Keywords: ペレトロン; トラブルシューティング

1. MALT の概要

東京大学タンデム加速器研究施設 MALT (Micro Analysis Laboratory, Tandem Accelerator, The University of Tokyo) では、最大加速電圧 5MV の米国 NEC 社製ペレトロン 5UD 加速器を運用しており、現在は多核種 (^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{129}I など) を対象とした加速器質量分析 (AMS) や、NRA、ERDA、PIXE といった精密分析を行っている。

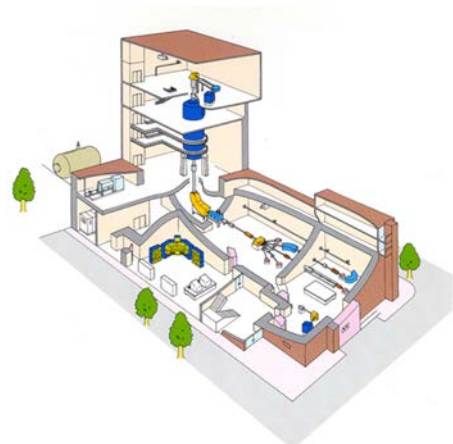


図 1. MALT 建屋俯瞰図

MALT は入射電磁石から加速器タンク、分析電磁石までが垂直に設置されている縦型のタンデム加速器である（図 1）。東京大学の本郷地区浅野キャンパスにおいて 1991 年より建設が開始され、1993 年に完成した。建設完了後、ビームの調整期間を経て 1996 年より東京大学内での共同利用を開始し、現在では学内外を問わず幅広いユーザーに利用されている。

2. MALT の利用状況

年度別の加速器運転時間とその内訳を図 2 に示す。2021 年度の年度別加速器運転時間は 7,295 時間となり、MALT 運用開始以来最長時間となった。AMS の中では ^{10}Be -AMS、 ^{129}I -AMS の利用が多く、その他の核種 (^{14}C 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl) も 2020 年度と比べると微増している。近年は NRA の利用も増加傾向にあり、2021 年度の NRA のマシンタイムは 1,518 時間と過去最長になった。また、以前は学生実験のために頻繁に行っていた PIXE の実験を 2015 年以来 6 年ぶりに実施した。

運用開始からの総運転時間は 14 万時間を超えた。



図 2. MALT 年度別運転時間とその内訳

3. MALT の保守整備状況

MALT では毎年春と秋に加速器タンクを開放し、内部の点検と清掃を実施している。また、イオン源のメンテナンスのため月に 1-2 回のペースで分解清掃をしており、2021 年度は合計で 16 回実施した。

前回の研究会以降の主なメンテナンスとトラブルを表 1 に示す。コロナプローブシステムの IC (オペアンプ) の故障が 2021 年 7 月、11 月に発生し、ペレットチェーンチャージング電源 (CPS) の高圧ケーブルの絶縁破壊による不具合が 2021 年 8 月に発生している。MALT ではこれらの不具合はあまり発生することが無かったので故障箇所の特定には数日がかかったが、予備の部品を持っていたためすぐに修理することができた。また CPS 電源、アインツェルレンズの電源、EQ 電源と、グラスマン電源の故障が数回発生しているが、こちらも予備を持っていたためマシンタイムに支障はなかった。

表 1. 主なメンテナンスとトラブル

年	月	内容
2021	7	コロナプローブシステムIC故障
	8	通信制御系CAMAC不具合
		CPS高圧ケーブル絶縁破壊
	9	キャンパス停電
	10	AMSデータ収集系CAMAC不具合
		PIXEビームコースロータリーポンプ故障
	11	CPSマイナス電源故障
		コロナプローブシステムIC故障
		イオン源エクストラクター放電
		入射前アインツェルレンズ周辺機器故障
	12	AMS自動測定再開
	2022	2
AcceINETが突然落ちる		
3		イオン源Csオープンヒーターの断線
		イオン源カソードカレント導通
		イオン源Cs交換
4		加速器タンク内カラムポスト破損が発覚
		分析電磁石冷却システムの整備
		コロナプローブの針を交換
5		タンク内EQ電源故障
		イオン源インデクサーに不具合
6	イオン源カソードカレント上がらない	
	分析電磁石電源アース不良	
		イオン源エクストラクター放電

3.1. CAMAC 関連のトラブル

MALT では装置の制御や AMS のデータ収集に CAMAC を用いている。2021 年度は CAMAC に関するトラブルが 2 回発生した。

まずは 8 月に加速器から下流の全ての装置との通信ができなくなるという不具合が発生した。この不具合の症状が安定せず、制御システムである AccelNET の再起動によって一時的に、または部分的に通信が可能になることがあったため、故障箇所の特定にかなりの時間がかかった。結果的に MALT ビームラインを制御している 4 台の CAMAC クレートの内、電源クレート 1 台と別の箇所のクレートコントローラーを交換することで通信が回復した。修理完了までおよそ二週間にわたる加速器の停止を余儀なくされた。

続いて 10 月には、AMS データ収集系において、ガスカウンターで得られた信号に大量のノイズが生じるトラブルが発生した (図 3a)。データ処理に用いる各モジュールをチェックした結果、CAMAC の ADC モジュールの故障が判明した。そこで、手元にあった故障した ADC3 台を NEC へ送り、正常な部品を見繕って、使用できる ADC を 1 台仕立ててもらった。出来上がった ADC でテストをすると、スペクトルにビット抜けのような隙間が生じていたが (図 3b)、以前のデータと比較して問題なく測定できているということがわかったので、12 月末に自動測定を再開した。最終的に、故障発生から修理完了まで 2 ヶ月以上の時間を要した。その間は、NRA や PIXE など AMS 以外の測定を行っている。

3.2. カラムポストの破損

2022 年春の加速器タンク内メンテナンス時に、タンク下部に白い細かな破片が散らばっていることに気づいた。発生源を探していると、絶縁カラムを支える支柱 (カラムポスト) に取り付けしていたカラム電流を読むための抵抗・配線が外れていることを発見、さらに調べるとカラムポスト最下部のガイシ (セラミクス) が破損していることが

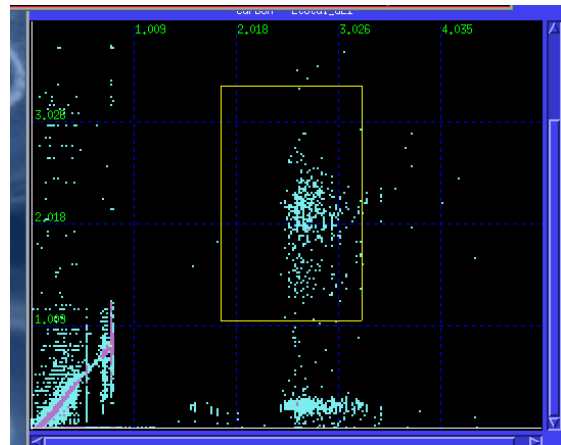


図 3a. ADC 故障時の AMS スペクトル。
左下を中心に多くのノイズが見られる。

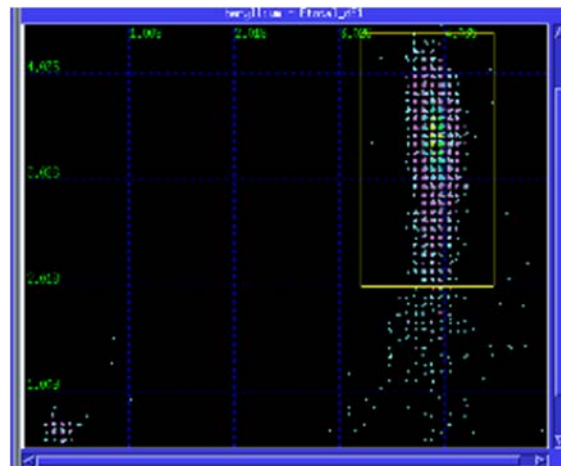


図 3b. ADC 修理後の AMS スペクトル。
ビット抜けのような隙間がある。

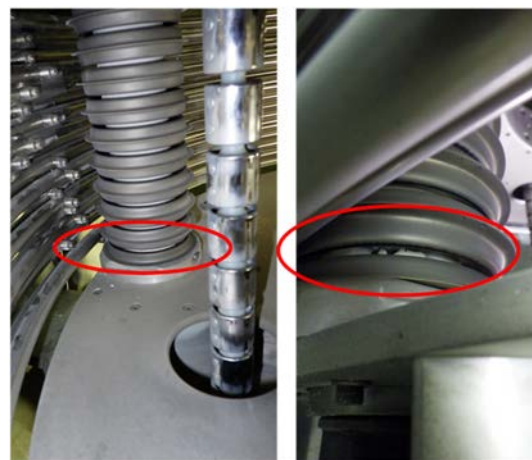


図 4a. カラムポストの破損箇所

判明した（図 4a）。2022 年 3 月 16 日に文京区で震度 3 の地震があり、その際にカラム電流が読めなくなったことから、ガイシの破損もこの地震が原因である可能性が高い。

MALT で予備のカラムポストを 1 本保有しているが、マシンタイムの都合によりすぐに交換修理ができなかったため、ホースクランプで破損箇所を覆うように締め付けることで応急処置とした（図 4b）。2022 年秋のメンテナンス時に交換作業を行う予定である。



図 4b. ホースクランプによる補強

3.3. 分析電磁石冷却システムの整備

2021 年度 MALT で積極的に取り組んだことの一つに、time-of-flight 方式を用いた ^{236}U -AMS の開発がある。今回、 ^{236}U -AMS を実施するにあたり加速電圧 2.4MV、+5 価のビームを用いたが、長時間測定をするとビーム加速後の分析電磁石がオーバーヒートエラーを起こしてしまうことがあった。そこで、冷却効率を上げる



図 5. 腐食していた分析電磁石側継ぎ手

るために分析電磁石冷却システムを整備することとなった。まず、建屋循環冷却水と分析電磁石冷却水の熱交換器を新品に交換し、熱交換器前にフィルターを新設した。また、冷却水配管の電磁石側の継ぎ手に腐食があったため交換した（図 5）。これまで真鍮製の継ぎ手を使用していたが、ステンレス製の継ぎ手に変更した。これらの整備の結果、 ^{236}U -AMS の際の電磁石のオーバーヒートは起こらなくなった。

3.4. イオン源のトラブル

MALT では、セシウムスパッタ負イオン源（MC-SNICS）1 台をビームラインに接続し使用している。イオン源において、以前より通信に関するトラブルは発生することがあったが、近年は動作に関するトラブル（カソードディスクの回転、ビームが出なくなる等）の頻度が高くなっている。いくつかのトラブルでははっきりとした原因を特定できていないものの、2022 年春のメンテナンス時にシリンダーやスイッチの更新や位置の調整、カソードとイマージョンレンズ間の距離の調整などをした結果、トラブルの発生はかなり少なくなっている。

4. 今後の予定

今後は、現在の性能の維持向上はもちろん、新たな技術開発にも取り組んでいきたい。具体的には、 ^{236}U -AMS の更なる開発のほか、しばらく停滞しているレーザー光脱離法の実験を本格的に再開する予定である。

また、CAMAC 関連機器や各種電源など、今後の故障が心配される機器の予備の確保を続けていき、NEC 現行の通信システム（ACT）への更新や建屋循環ポンプの更新なども引き続き検討していきたい。

8.3 東京大学総合研究博物館 Compact-AMS の現状 (2021-2) Current status of Compact-AMS at UMUT (2021-2)

尾寄 大真*、大森 貴之、山崎 孔平、金澤 礼雄、
上原 加津維、内田 啓子、関根 紀子、米田 穰

Hiromasa OZAKI*, Takayuki OMORI, Kohei YAMAZAKI, Ayao KANESAWA,
Katsui UEHARA, Akiko UCHIDA, Noriko SEKINE and Minoru YONEDA

東京大学総合研究博物館 放射性炭素年代測定室

(Laboratory of Radiocarbon Dating, The University Museum, The University of Tokyo)

* Correspondence to: Hiromasa OZAKI; E-mail: ozaki@um.u-tokyo.ac.jp

Abstract

東京大学総合研究博物館放射性炭素年代測定室では 2015 年 3 月に NEC 社製 Compact-AMS (CAMS500、1.5SDH-1) を導入し、放射性炭素年代測定における試料の前処理から測定までのすべての作業を実施できる体制を整え、2015 年 12 月から開始した実際の未知試料の測定は 2022 年 6 月までにおおよそ 9000 点に上っている。AMS による ^{14}C 測定のみではなく、AMS 測定試料の作成、試料の化学洗浄処理などの前処理を含めた一連の実験作業を行っていることもあり、考古学や人類学などの分野での利用が多かったが、近年では地球科学などの分野の利用も増えてきている。

本報告では 2022 年 6 月までの Compact-AMS 本体、付随設備に関するトラブルおよびその対応、メンテナンス作業などについて報告する。

Keywords: Compact-AMS; ^{14}C 測定; 電磁石用電源; 冷却水配管

1. 装置運用状況

Table1 に 2022 年 6 月までの未知試料の測定実績を記した。2015 年 12 月の実試料測定開始以降、2017 年 12 月の半自動化炭素精製装置の導入、使用開始により、測定点数が増加し、多くの依頼に応えることが可能となっている。2020 年度のコロナ禍において若干減少したものの、年間 1500 点ほどの実績を維持している。また、0.1mg 炭素の微量試料についても年間数百点と堅調である。今後、炭素精製装置の完全自動化、装置増設を含めた測定数の増加を目指している。

Table1. 年度別測定実績

年度	測定試料数			累計
	総数	通常	微量	
2015年度(12月～)	294	294		294
2016年度	954	954		1248
2017年度*	1432	1287	145	2680
2018年度	1607	1334	273	4287
2019年度	1442	1237	205	5729
2020年度	1345	1061	284	7074
2021年度	1533	1205	328	8607
2022年度(~6月)	336	203	133	8943

*12月半自動化精製ライン導入

2. メンテナンス、トラブル対応

2-1. ペレットチェーン隙間

本施設の CAMS500 の加速器ペレットチェーンは 51 個のペレットがあり、2017 年 4 月の定期メンテナンス以降個々のペレット間の隙間の測定を行い、ペレットチェーンをつなぐプラスチックの伸びを観察している。その平均値の変動を Table2 に示した。隙間自体の平均値は年々わずかながら大きくなる傾向にあるが、標準偏差に大きな変化はなく、広がりには大きな偏りはないことがわかる。

Table2. ペレットチェーン隙間

測定日	隙間(mm)	
	平均値	標準偏差
2017/04/18	5.067	0.103
2018/09/13	5.109	0.131
2019/04/22	5.049	0.130
2020/04/22	5.162	0.129
2021/04/22	5.225	0.169
2022/04/19	5.284	0.147

2-2. 冷却水配管

1) マニフォールド部ストレーナ取り付け

冷却水配管における緑青や鉄錆などによる詰まりは装置の安定運用の点では小さくない問題である。これまで本研究会でも報告してきたようにタンク内への配管部のクイックコネクツをストレート配管にするなどの対処を行ってきたが、根本的に緑青や鉄錆などを取り除くためにチラー本体に取り付けられているストレーナだけではなく、2022 年 4 月の定期メンテナンス時に装置低エネルギー側の冷却水供給側配管分岐(マニフォールド)部にストレーナを取り付けていただいた (Figure 1)。その後、一月に一回程度ストレーナ部の確認を行っているが、主に鉄錆と思われる赤茶けた物質が確認されているが、緑青はほとんど認められていない (Figure 2)。

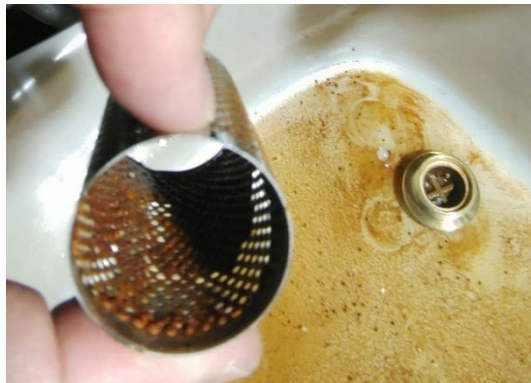


Figure 2 取り付け 1 か月後のストレーナ内部

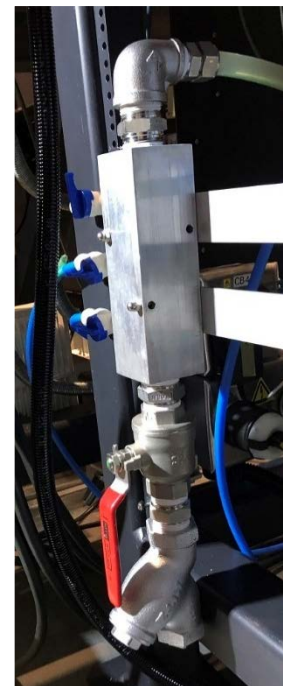


Figure 1 マニフォールド部に取り付けたストレーナ

2) マニフォールド洗浄

マニフォールド部へのストレーナ取り付けの際、取り外したマニフォールド内部が Figure 3 に見られるように緑青が付着してほとんどふさがっていた。この緑青を削

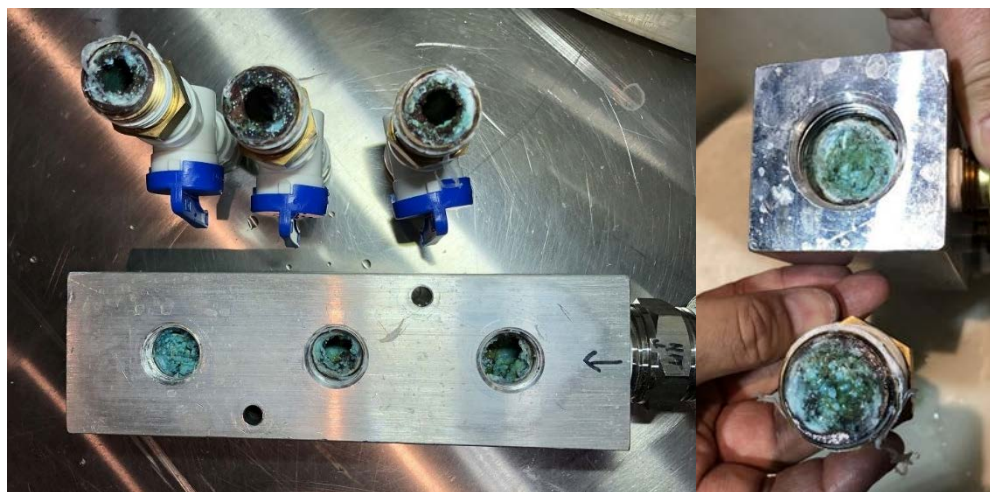


Figure 3 ストレーナ取り付け作業時のマニフォールド内部

り、取り除いていた
 だいたいのもの
 (Figure 4 左図)、
 Al 製マニフォル
 ドのねじ山が浸食
 され始めていたため
 (Figure 4 右図)、
 今後、排水側も合わ
 せて、マニフォル
 ドを交換する予定
 である。本研究会



Figure 4 マニフォルド内部緑青除去後のねじ山部

も報告したが、タンク内冷却水配管レギュレータ部でタンク内の SF_6 ガスが冷却水内に漏洩して
 いて際にチラー水槽に大量の緑青が滞留してしまっていたことがあり、その時、マニフォルド内
 部に緑青が付着してしまったものと考えており、マニフォルドの交換することで今後急速に同
 様の状態になることはないものと推測される。ただし、継続的な確認は必要であろう。

2-3. 分析電磁石電源故障

昨年度の本会で報告したが、2020年11月に高エネルギー側電磁石用電源（Heinzinger 社製
 PCU50-100）の内部基盤が焼損してしまい（Figure 5）、修理を依頼している間、同型機を伯東株
 式会社から借用していたが、2021年4月に修理完了した元の機体に換装した。その後、2022年
 2月に内部で爆発音がし、2020年11月の時とは異なる部分の内部基盤が焼け（Figure 6）、再び
 使用不能となった。2022年7月時点では東北大学から同型機を借用し、装置の運用を行っている
 （研究会後の7月下旬に修理機体への換装を行った）。

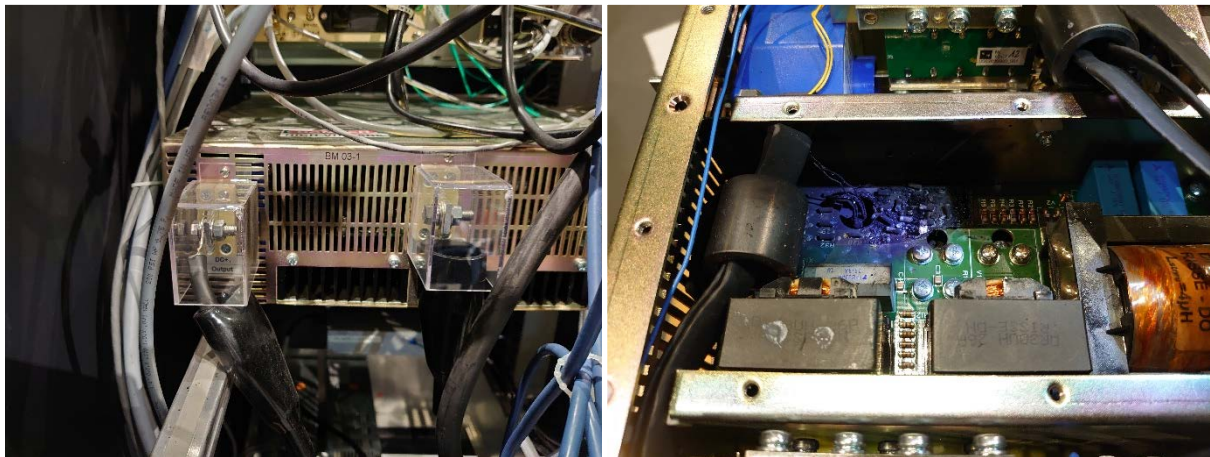


Figure 5 2020年11月電磁石電源焼損時の電源後部の焦げ付きと内部焼損部

PCU50-100 は、Figure 5、6 からもわかるように、内部に二つの電源ユニットがあり、それぞ
 れの排気排熱用のファンおよび電源後部に排気口がある。二度の借用機は排気口から交互に排気
 の吹き出しが確認できたが、焼損した機体はほぼ片側だけからしか吹き出しが確認できず（吹き
 出しが確認できない方は風量が弱いのかもしれない）、排熱に問題があるのではないかと推測され
 る（修理機体への換装後は電源前面から小型のサーキュレータで送風を行っている）。

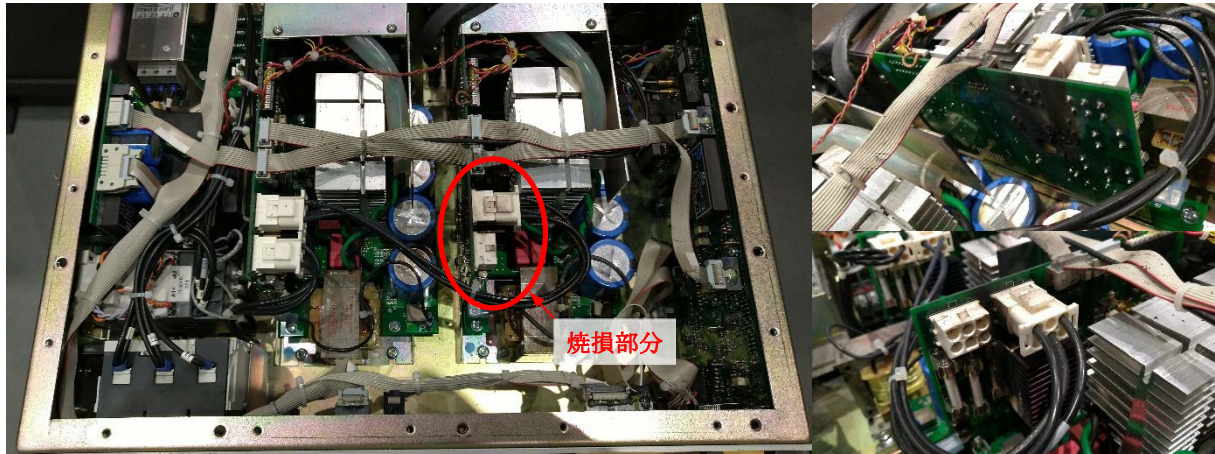


Figure 6 2022年2月電源焼損時の電源内部および焼損部分

2-4. 加速器コントローラシャットダウン

数年前から加速器コントローラ、低エネルギー側のいくつかの電源のシャットダウンおよび低エネルギー側コントロール PC (SlavePC1) がコンフリクトしてしまうことが起きるようになった。ほとんどは測定中に起こり、長期間測定を行わない場合は同様の現象はほぼ発生しない。当初は SlavePC1 がハングアップしてしまうことにより付随する電源などがシャットダウンしてしまうものと推測し、現象が頻発するようになるたびに PC のメモリ交換などを行い、少なくとも交換直後は頻度が減少していた。他にも加速器コントローラなどの電気配線にフェライトコアを取り付けるなどの対処も行っているが、完全な解消には至っていない。必ずしも一つの要因によるものではないことも考えられ、継続的に原因究明に取り組んでいく予定である。

2-5. 電子ローディング現象

測定などに大きな支障はないが、運用開始当初から測定中日に数回以上の電子ローディングが起きていた。これは決して加速器にとってよい状態とは言えず、原因を明らかにして、何らかの対処をする必要があるのではないかと考えていた。しかし、必ずしも明確な時期は定かではないが、ストリッパーガスラインへの SF₆ ガスの漏洩対処後、最近では電子ローディング現象はほとんど起こらなくなってきている。ストリッパーガスラインへの SF₆ ガスの漏洩は加速器下流のイオンゲージフィラメントの断線を引き起こしていたことを考えると、ビームライン内に SF₆ ガス分解生成物が残存していて、ガス漏洩の解消後、徐々に残存物が除去され、電子ローディング現象の減少につながっているのではないかと推測される。

3. 終わりに

CAMS500 の導入以来、主に SF₆ ガスの冷却水配管およびストリッパーガスラインへの漏洩に起因するものと考えられる不具合が認められ、それらの事象への対処療法的な対応が行ってきた。装置導入 7 年ほどが経過し、経年劣化が顕在化することが推測される中、装置に付随するユーティリティにもその傾向が認められる。今後、それらに対する対応、事前メンテナンスが必要になってくるものと考えられ、装置室のエアコンなどその準備を進めている。

多くのトラブル対応には、伯東株式会社の皆様をはじめ、アメリカ NEC 社の皆様には大変お世話になりました。さらに、これまでの不具合の対処にあたっては、加速器を保有される機関の方々にも多くの助言や協力をいただきました。ここに記して、感謝申し上げます。

8.4 山形大学高感度加速器質量分析センターの現状 2021-2022 Present status of YU-AMS 2021-2022

武山 美麗*・森谷 透・小野 利弘・佐藤 里美・設楽 理恵・櫻井 敬久・門叶 冬樹
M. Takeyama*, T. Moriya, T. Ono, R. Sato, R. Shitara, H. Sakurai and F. Tokanai

山形大学 高感度加速器質量分析センター
(Center for Accelerator Mass Spectrometry, Yamagata University)

* Correspondence to: Mirei Takeyama; E-mail: takeyama@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

Abstract

山形大学は 2010 年 3 月、試料中に含まれる炭素 14 (^{14}C) 濃度の高感度質量分析を目的に、コンパクト AMS システムおよびグラフィイト作製システムを山形県上山市にある山形大学総合研究所に導入し、2011 年 2 月に山形大学高感度加速器質量分析センター (YU-AMS) を設置した。さらに、2013 年度には自動グラフィイト作製システムとイオン源を新たに導入し、それぞれ 2 台体制で運用を開始した。本稿では、YU-AMS の 2021 年から 2022 年の運用状況について報告する。

Keywords: YU-AMS; Ion source; Graphitization line

1. はじめに

山形大学は 2010 年 3 月、試料中に含まれる炭素 14 (^{14}C) 濃度の高感度質量分析を目的に、コンパクト AMS システムおよびグラフィイト作製システムを山形県上山市にある山形大学総合研究所に導入した[1-4]。2011 年 2 月に山形大学高感度加速器質量分析センター (YU-AMS) を設置し、2013 年 3 月に自動グラフィイト作製システムとイオン源が新たに導入し、それぞれ 2 台体制で運用を開始した。2015 年度には自動ガラス真空ラインを手動操作に切り替えることにより、貝殻や卵殻試料測定のためのリン酸処理に対応できるシステムを構築し、2018 年には骨試料からのコラーゲン抽出方法を確立した。これらの YU-AMS システムを用いて、考古・文化財試料から医学・薬学・法医学まで幅広い分野の試料に対して、高精度な ^{14}C 濃度測定を進めている[5]。

本稿では、2021 年から 2022 年における YU-AMS のトラブルおよびメンテナンス状況について報告する。

2. 地震による被害状況

2021 年 2 月 13 日に発生した福島県沖の地震により、YU-AMS のある山形県上山市では震度 5 弱を観測した。YU-AMS システムには図 1 右のように 2 台のセシウムスパッタ型負イオン源があり、地震発生時は MCSNICS-II で測定を行っていたが、地震の衝撃で図 1 左上のイオン源側の ESA が MCSNICS-I の方に切り替わったためビームが通らなくなり、測定が停止した。ESA を

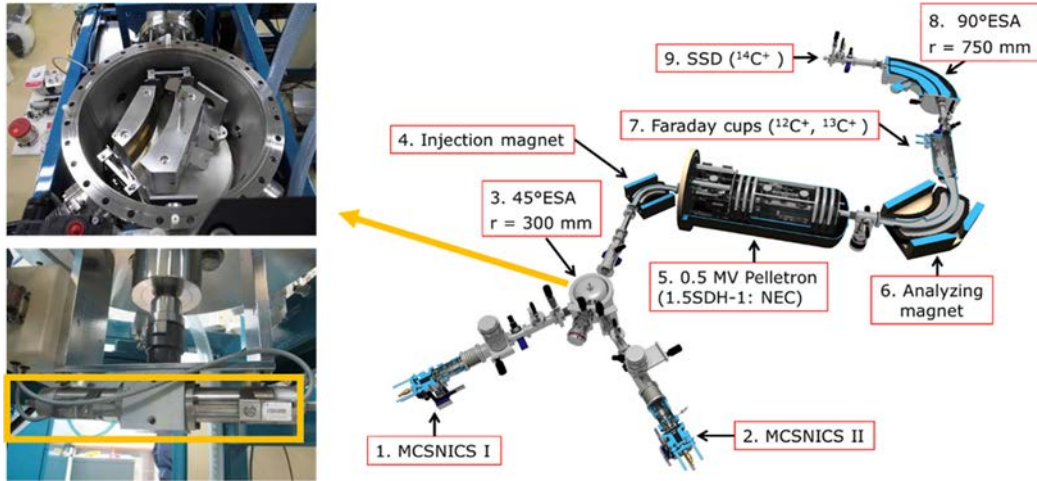


図 1. YU-AMS システムの概要 (右)、ESA の内部 (左上)、rotary actuator (左下)

MCSNICS-II に戻すことで測定を再開することができたが、その際に図 1 左下に示したイオン源側の ESA の rotary actuator からエアリークがあることに気が付き、2022 年度に交換を行った。

3. 制御用 PC の修理・交換状況

YU-AMS システムの制御は、同じマザーボード (ICES-003) を持つ、独立した 4 台の PC (yamagata1-1 から 1-4) を用いている。すべての PC において、マザーボード上のビデオカード周辺に使われている一部の電解コンデンサが経年劣化により膨張し、PC が施設停電後に立ち上がらないといったトラブルが 2016 年から連続的に発生した。そして、これまで 4 台すべてのマザーボード上で不具合のあった、あるいはその可能性のあるコンデンサをすべて交換してきた。しかし、2021 年度の施設停電の際に yamagata1-2 および 1-4 が再び再起動できなくなった。これらの PC のマザーボードを確認したところ、これまでに交換していなかった箇所のコンデンサが膨らんでいたため、交換作業を行った。図 2 に yamagata1-2 の交換前と交換後のコンデンサの写真を示す。交換作業後、PC は問題なく動作している。

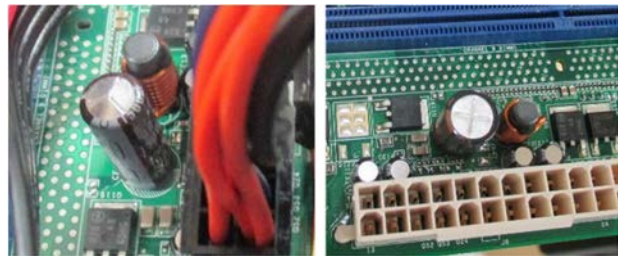


図 2. yamagata1-2 の交換前のコンデンサ (左)、交換後のコンデンサ (右)

4. 加速器の長期安定性

図 3 に 2018 年 1 月から 2022 年 3 月までの GVM (Generating Voltage Meter) 値、CPS (Charging Power Supply) 電圧および印加電流の値を示す。2020 年 10 月頃に印加電流が上がったのは GVM が故障したためで、ベアリング交換後は問題なく動作している。

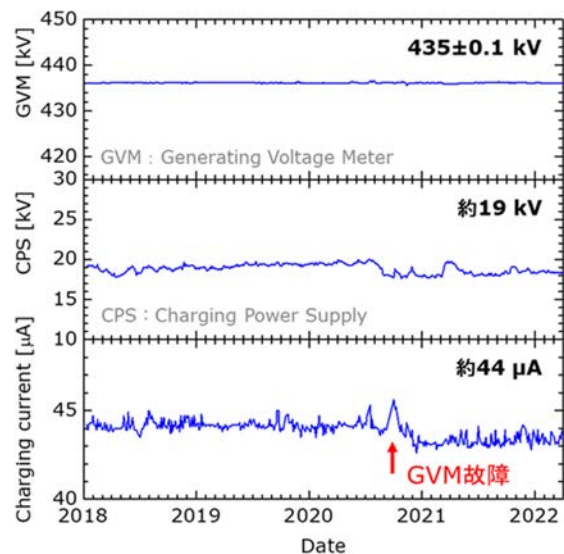


図 3. GVM 値、CPS 電圧および印加電圧の推移

GVM 値は 2018 年 1 月から 435 kV に保持しており、その時の CPS 電圧は約 19 kV、印加電流は約 44 μ A で推移している。直近の 5 年間でタンクオープンを実行してはいるが、加速器は安定に動作している。

5. トラブル及びメンテナンス状況

今年度は、定期メンテナンスとしてアイオナイザーのクリーニング作業と Cs アンブル交換を行った。その他のトラブルやメンテナンスについて、以下に詳細を示す。

① Ionizer 電源のトラブル

Ionizer 電源 (KIKUSUI, PAS10-35) が突然オフになってしまうトラブルが発生した。トラブルはアイオナイザーの交換前に起きたため、アイオナイザーを長期間使用しスパークが起こった時に、保護回路よりも大きな電流が流れることによって発生しているのではないかと考えられる。この電源はすでに製造中止になっており、今後手に入らなくなる可能性があるため、念のためスペアを購入した。

② アサイナブルコントローラーのアナログメーターの故障

図 4 に示すアサイナブルコントローラーのアナログメーターの M1 から M4 が動作しなくなった。DC-DC コンバーターが故障している可能性があるため、今年度に交換を予定している。

③ ペレットロンのチラー流量計の交換

図 5 に示した流量計のナイロンのねじが劣化して破損していたために、流量の調整が出来なくなり、代替品に交換を行った。現在、再び流量が低下し、温度が 22°C から 26°C まで上がっているため、2022 年度の施設停電の際にメンテナンスを予定している。

④ その他の故障・修理

- ・入射マグネット BM-01 と分析マグネット BM-03 のテスラメーター (Group3 Technology, DTM-151-PS) の表示に異常が出たため、交換を行った。
- ・EA (Elemental Analyzer) のマスフローコントローラーが故障したため、交換を行った。
- ・真空ガラスラインのダイヤフラムポンプとフルレンジゲージが故障したため、代替品に交換した。



図 4. アサインブルコントローラーの
アナログメーター
赤で囲んだ部分が M1 から M4



図 5. ペレトロン of チラー流量計

参考文献

- 1) “Compact AMS system at Yamagata University”, F. Tokanai et al., AIC Conf. Proc., 1336, pp.70-74, 2011.
- 2) “Present Status of the YU-AMS System, Yamagata University”, F. Tokanai et al., Radiocarbon, 55, pp.459-464, 2013.
- 3) “Automatic Sample Combustion and CO₂ Collection System for AMS-¹⁴C”, K. Kato et al., Radioisotopes, 61, pp.469-473, 2012.
- 4) “Automated sample combustion and CO₂ collection system with IRMS for ¹⁴C AMS in Yamagata University, Japan”, K. Kato et al., Radiocarbon, 56, pp.327-331, 2014.
- 5) “Status of the AMS system at Yamagata University”, T. Moriya et al., Nuclear Inst. And Methods in Physics Research B 439, pp.94-99, 2019.

付録

第 34 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

○開催日程

【1 日目】 2022 年 7 月 21 日（木）

- 10：00～10：20 開会挨拶と事務連絡
- 10：20～11：40 セッション 1 施設報告 I
- 11：40～13：10 お昼休み、世話人会
- 13：10～14：10 セッション 2 施設報告 II
- 14：10～14：30 休憩
- 14：30～15：30 セッション 3 特別講演と施設報告 III
- 15：30～15：50 休憩
- 15：50～16：50 セッション 4 施設報告 IV
- 16：50～17：00 事務連絡（1 日目終了）

【2 日目】 2022 年 7 月 22 日（金）

- 09：30～09：40 事務連絡
- 09：40～10：40 セッション 5 施設報告 V
- 10：40～11：00 休憩
- 11：00～12：00 セッション 6 施設報告 VI と実験
- 12：00～13：10 お昼休み
- 13：10～14：10 セッション 7 原子力機構 東海タンデム加速器での実験紹介
- 14：10～14：30 休憩
- 14：30～15：50 セッション 8 施設報告 VII
- 15：50～16：10 開会挨拶、事務連絡
- 16：10～16：30 休憩
- 16：30～（30 分程度） 動画による施設紹介（原子力機構 東海タンデム加速器）
- 17：00 頃 全日程終了

○講演時間

- 講演 15 分（接続・設定時間含む）、質疑 5 分の合計 20 分
- 特別講演 30 分（接続・設定時間含む）、質疑 10 分の合計 40 分
- 口頭発表 24 件、特別講演 1 件

【1日目】 2022年7月21日(木)

- 10:00 ～ 10:20 開会挨拶と事務連絡
日本原子力機構研究開発機構 原子力科学研究所 所長
遠藤 章
- セッション1 施設報告I (4件)
座長: 松崎 浩之 (東京大学 MALT)
-
- 10:20 ～ 10:40 1.1 原子力機構-東海タンデム加速器の現状
○石崎 暢洋、松田 誠、中村 暢彦、株本 裕史、沓掛 健一、
乙川 義憲、遊津 拓洋、松井 泰、阿部 信市
日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所
研究炉加速器技術部 加速器管理課
- 10:40 ～ 11:00 1.2 理化学研究所におけるタンデム加速器の現状
(2020-2021年度)
○池田 時浩 1)、稲吉 琴子 2)、1)、佐藤 広海 1)
1) 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター
2) 東邦大学 理学研究科
- 11:00 ～ 11:20 1.3 若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状
(2019-2021)
○羽鳥 聡、栗田 哲郎、山田 裕章、山口 良文、淀瀬 雅夫、
廣戸 慎、清水 雅也、瀧上 隆太、小田部 圭佑、古川 靖士、
羽田 祐基、菊池 亮平
若狭湾エネルギー研究センター
- 11:20 ～ 11:40 1.4 奈良女子大学におけるタンデム加速器の現状(2021年度)
○狩俣 順也 1)、石井 邦和 2)
1) 奈良女子大学 研究協力課
2) 奈良女子大学 研究院自然科学系
- 11:40 ～ 13:10 お昼休み、世話人会(90分)

セッション 2 施設報告Ⅱ (3 件)

座長: 及川 将一 (QST 放医研)

-
- | | | | | |
|-------|---|-------|-----|---|
| 13:10 | ～ | 13:30 | 2.1 | <p>JAEA-FRS バンドグラフ加速器の現状</p> <p>○西野 翔、海野 和重、吉富 寛、深見 智代、辻 智也、
谷村 嘉彦</p> <p>日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部
放射線計測技術課</p> |
| 13:30 | ～ | 13:50 | 2.2 | <p>JAEA-FRS の静電加速器を用いた中性子測定器の信頼性
確保に係る取組</p> <p>○深見 智代、吉富 寛、西野 翔、辻 智也、海野 和重、
谷村 嘉彦</p> <p>日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 放射線管理部
放射線計測技術課</p> |
| 13:50 | ～ | 14:10 | 2.3 | <p>東北大学ダイナミロン加速器の現状</p> <p>○三輪 美沙子、遠山 翔、松山 成男、永谷 隆男</p> <p>東北大学大学院 工学研究科 量子エネルギー工学専攻</p> |
| 14:10 | ～ | 14:30 | | 休憩(20分) |

セッション 3 特別講演と施設報告Ⅲ (2 件)

座長: 笹 公和 (筑波大学)

-
- | | | | | |
|-------|---|-------|-----|--|
| 14:30 | ～ | 15:10 | 3.1 | <p>可搬型 γ 線イメージング装置 GeGI5 による筑波大タンデムの
加速器放射化イメージング –加速器の放射化イメージングへ
の挑戦–</p> <p>【 特別講演 】</p> <p>○吉田 剛 1)、松村 宏 1)、松村 万寿美 2)、豊田 晃弘 1)、
中村 一 1)、榎本 和義 1)、三浦 太一 1)、笹 公和 2)、
森口 哲朗 2)</p> <p>1) 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
2) 筑波大学タンデム (UTTAC)</p> |
| 15:10 | ～ | 15:30 | 3.2 | <p>パレオ・ラボ Compact-AMS の現状(2022 年)</p> <p>伊藤 茂 1)、加藤 和浩 1)、佐藤 正教 1)、廣田 正史 1)、
山形 秀樹 2)、Z. Lomtadze 2)、中村 賢太郎 2)</p> <p>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</p> |

15:30 ~ 15:50 休憩(20分)

セッション 4 施設報告Ⅳ(3件)

座長: 羽倉 尚人 (東京都市大学)

-
- 15:50 ~ 16:10 4.1 JAEA-AMS-TONO の現状(2021年度)
 ○松原 章浩 1)、藤田 奈津子 2)、三宅 正恭 2)、
 石井 正博 2)、渡邊 隆広 2)、國分(齋藤) 陽子 2)、
 西尾 智博 1)、小川 由美 2)、神野 智史 2)、
 木村 健二 2)、島田 顕臣 2)、石丸 恒存 2)
 1) 株式会社 ペスコ
 2) 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター
- 16:10 ~ 16:30 4.2 神戸大タンデム加速器の現状 2022
 ○谷池 晃 1)、2)、古山 雄一 1)、尾崎 英梨子 1)、
 片山 侑己 1)、三村 治夫 1)、2)
 1) 神戸大学大学院 海事科学研究科
 2) 神戸大学大学院 研究基盤センター加速器部門
- 16:30 ~ 16:50 4.3 国立環境研究所 NIES-TERRA の現状 2021
 ○小林 利行、内田 昌男、荒巻 能史、万徳 佳菜子
 国立環境研究所 地球システム領域
- 16:50 ~ 17:00 事務連絡(1日目終了)

【2日目】 2022年7月22日(金)

9:30 ~ 9:40 事務連絡

セッション 5 施設報告Ⅴ(3件)

座長: 土田 秀次 (京都大学)

-
- 9:40 ~ 10:00 5.1 都市大タンデムの現状(2020 - 2021)
 ○羽倉 尚人 1)、2)、3)、佐藤 勇 1)、2)、3)、松浦 治明 1)、2)、3)、
 内山 孝文 1)、河原林 順 1)、2)、3)、林崎 規託 1)、4)
 1) 東京都市大学 原子力研究所
 2) 東京都市大学 原子力安全工学科

- 3) 東京都市大学 共同原子力専攻
- 4) 東京工業大学 科学技術創成研究院
ゼロカーボンエネルギー研究所

10:00 ~ 10:20 5.2 QST 量医研静電加速器施設(PASTA&SPICE)の現状 2022
○及川 将一 1)、石川 剛弘 1)、磯 浩之 2)、樋口 有一 2)、
松田 拓也 2)

- 1) 量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門
量子医科学研究所
- 2) 株式会社 巧

10:20 ~ 10:40 5.3 QST 量医研中性子発生用加速器システム(NASBEE)の故障
と現状 2022

- 石川 剛弘 1)、須田 充 1)、磯 浩之 2)、萩原 拓也 2)、
樋口 有一 2)、松田 拓也 2)、酢屋 徳啓 3)、及川 将一 1)
- 1) 量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門
量子医科学研究所
- 2) 株式会社 巧
- 3) SVE

10:40 ~ 11:00 休憩(20分)

セッション 6 施設報告VIと実験(3件)

座長: 谷池 晃 (神戸大学)

11:00 ~ 11:20 6.1 京都大学工学研究科加速器施設の現状(2021年度)

- 佐々木 善孝 1)、間嶋 拓也 1)、土田 秀次 1)、2)、
内藤 正裕 1)、今井 誠 1)、斉藤 学 1)、2)、高木 郁二 1)、2)
- 1) 京都大学 工学研究科 原子核工学専攻
- 2) 京都大学 工学研究科 附属量子理工学教育研究センター

11:20 ~ 11:40 6.2 1 MeV 陽子ビームを用いた広ダイナミックレンジ光子検出器の
性能評価実験

- 水野 り恵 1)、新倉 潤 1)、2)、松崎 禎市郎 2)、
池田 時浩 2)、郷 慎太郎 2)、齋藤 岳志 1)、櫻井 博儀 1)、2)、
道正 新一郎 1)
- 1) 東京大学 理学系研究科
- 2) 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

11:40 ~ 12:00 6.3 小型四重極永久磁石を用いたガラスキャピラリー内のイオンビームの通過特性の研究
 ○稲吉 琴子 1), 2)、池田 時浩 2),1)、金 衛国 1)
 1) 東邦大学
 2) 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

12:00 ~ 13:10 お昼休み(70分)

セッション 7 原子力機構 東海タンデム加速器での実験紹介(3件)

座長: 松山 成男 (東北大学)

13:10 ~ 13:30 7.1 東海タンデム 40年のあゆみ
 ○松田 誠
 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所
 研究炉加速器技術部 加速器管理課

13:30 ~ 13:50 7.2 原子力機構タンデム加速器を利用した照射損傷・原子物理研究の紹介
 ○石川 法人
 日本原子力機構研究開発機構 原子力基礎工学研究センター

13:50 ~ 14:10 7.3 原子力機構タンデム加速器を利用した核物理・核化学研究の紹介
 ○西尾 勝久
 日本原子力機構研究開発機構 先端基礎研究センター

14:10 ~ 14:30 休憩(20分)

セッション 8 施設報告Ⅶ(4件)

座長: 松田 誠 (原子力機構)

14:30 ~ 14:50 8.1 筑波大学タンデム加速器施設の現状
 ○笹 公和 1), 2)、石井 聡 1)、高橋 努 1)、大和 良広 1)、
 田島 義一 1)、吉田 哲郎 1)、松村 万寿美 1)、
 森口 哲朗 1), 2)、上殿 明良 1),2)
 1) 筑波大学 研究基盤総合センター 応用加速器部門
 2) 筑波大学 数理物質系

- | | | | | |
|-------|---|---------|-----|--|
| 14:50 | ～ | 15:10 | 8.2 | 東京大学タンデム加速器研究施設 MALT の現状
○徳山 裕憲、松崎 浩之、土屋 陽子、山形 武靖
東京大学 MALT |
| 15:10 | ～ | 15:30 | 8.3 | 東京大学総合研究博物館 Compact-AMS の現状(2021-2)
○尾寄 大真、大森 貴之、山崎 孔平、金澤 礼雄、
上原 加津維、内田 啓子、関根 紀子、米田 穰
東京大学 総合研究博物館 放射性炭素年代測定室 |
| 15:30 | ～ | 15:50 | 8.4 | 山形大学高感度加速器質量分析センターの現状 2021-2022
○武山 美麗、森谷 透、小野 利弘、佐藤 里美、設楽 理恵、
櫻井 敬久、門叶 冬樹
山形大学 高感度加速器質量分析センター |
| 15:50 | ～ | 16:10 | | 閉会挨拶
日本原子力機構研究開発機構 研究炉加速器技術部 部長
和田 茂 |
| 16:10 | ～ | 16:30 | | 休憩(20分) |
| 16:30 | ～ | (約 30分) | | 動画による施設紹介 (原子力機構 東海タンデム加速器) |
| 17:00 | 頃 | | | 全日程終了 |

以上

