

原子力機構－東海タンデム加速器の現状

PRESENT STATUS OF JAEA-TOKAI TANDEM ACCELERATOR

株本裕史[#], 中村暢彦, 杵掛健一, 乙川義憲, 遊津拓洋, 松井泰,
 中川創平, 池亀拓麻, 加藤佑太, 石崎暢洋, 松田誠

Hiroshi Kabumoto[#], Masahiko Nakamura, Ken-ichi Kutsukake, Yoshinori Otokawa, Takuhiro Asozu, Yutaka Matsui,
 Sohei Nakagawa, Takuma Ikekame, Yuta Kato, Nobuhiro Ishizaki, Makoto Matsuda
 Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The JAEA-Tokai tandem accelerator was operated over a total of 110 days, and delivered 22 different ions, and maximum acceleration voltage was 16.8 MV in FY2023. The main experiments performed in our facility are in the research fields of nuclear physics, nuclear chemistry, atomic physics, solid state physics and radiation effects in material.

In FY2023, we mainly carried out the maintenance of rotating shafts and related equipment for power generation in the accelerator tank, and carried out the replacement of low-pressure valves in the SF₆ gas facility. The developments of the accelerator are as follows. We developed a LAN system in the tandem accelerator tank using plastic optical fiber for easy monitoring of the devices. And more, we have started to development for irradiation of space equipment using heavy ions. This paper describes the operational status of the accelerator and the major technical developments of our facility.

1. はじめに

原子力機構-東海タンデム加速器施設には 20UR 型ペレットタンデム加速器と、その後段ブースターである 1/4 波長型超伝導空洞 40 台で構成される重イオン超伝導リニアック(超伝導ブースター)が設置されている[1]。

タンデム加速器は地上電位にある 3 台の負イオン源と高電圧端子(ターミナル)内の ECR 正イオン源[2]により、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、タンデム加速器からの重イオンビームを再加速する超伝導ブースターはヘリウム冷凍機を廃止し、運転を休止している。

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、この特徴を活かして核物理、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 2023 年度の運転・整備状況等について報告する。

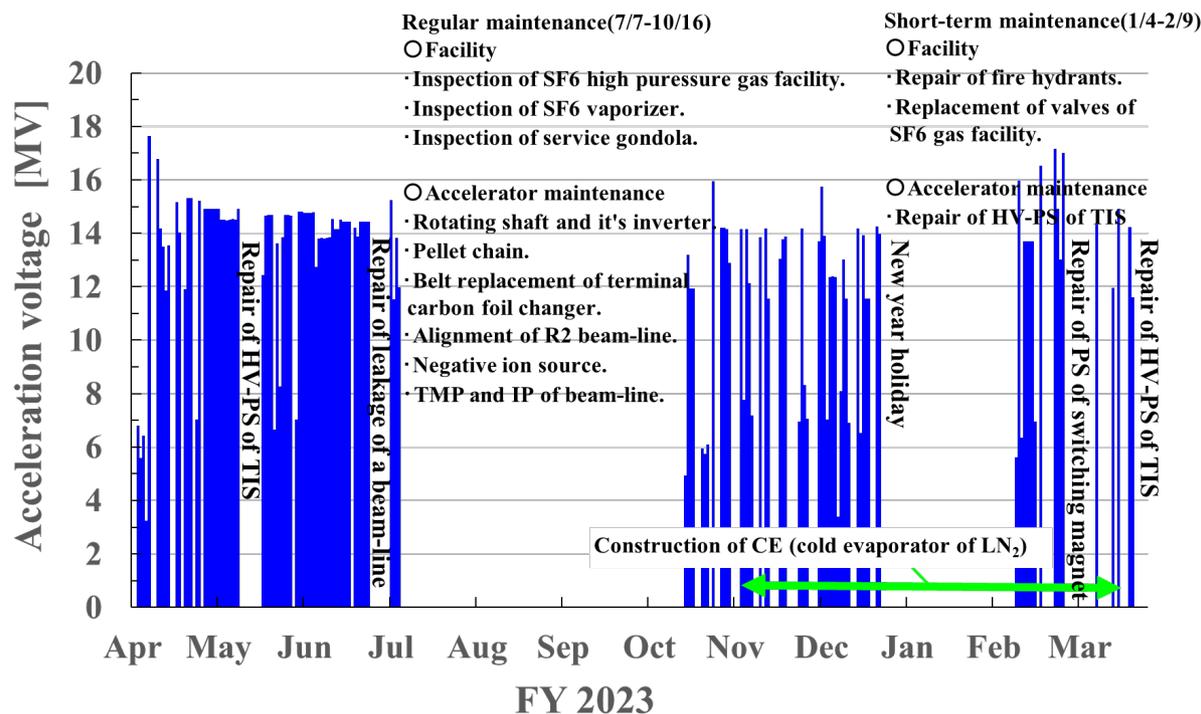


Figure 1: Daily accelerating voltage and operation status in the FY 2023.

[#] kabumoto.hiroshi@jaea.go.jp

2. 加速器の運転・整備状況

2.1 2023 年度の運転・整備の概要

Figure 1 は加速電圧の発生状況および施設の稼働状況である。2023 年度は加速器の運転を 4 月から 7 月、10 月から 12 月、2 月から 3 月の 3 回行った。定期整備は 2023 年 7 月から 10 月にかけて 1 回実施し、冬に短期間の整備を 1 回行った。2023 年度は故障修理のための加速器タンクの開放を 3 回行った。

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、SF₆ 用ペーパーライザー (気化器) 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。

加速器の整備関係では負イオン源やチャージング用ペレットチェーンなどの通常整備に加えて、以下に示すような整備を主に行った。その他の故障修理などの対応については後述する。

- ローテーションシャフト No.1 の電動機整備
- ローテーションシャフトのマウント整備 (No.8, 17)
- チャージングペレットチェーンの間隔・ねじれ測定
- 発電電圧計 (GVM)、コロナプローブの整備
- 電磁石 (MQ, MS) 切り替えスイッチのギア外れ修理
- ビームライン R2 のアライメント
- 加速器タンク下の真空ポンプ (HE 側の TMP、IP) 更新
- CAMAC クレート電源の一部更新

設備関係では、2024 年 1 月に短期の整備期間を設けて建屋の消火栓ポンプの更新工事を行った。近年は建屋の水関係の経年劣化対策として、修繕工事を順次進めている。また、同じ時期に SF₆ 高圧ガス製造施設の低圧部のバルブの一部更新を併せて実施した。

また、液化窒素貯槽 (CE: Cold Evaporator) の新設を行った。Ge 半導体検出器の冷却や建屋設備の窒素ガスの供給のために以前は CE が設置されていたが、2021 年 10 月の定期検査において脚部に腐食がみられ、不同沈下測定で傾斜していることが判明した。そのため、同年度に撤去と廃止を行っていた。2023 年度には予算を確保し、同程度の仕様 (貯槽能力 4485 l) で CE の建設を行った (Fig. 2)。建設工事は 2023 年 11 月から開始し、2024 年 3 月に完成検査を受検して合格し、5 月から使用を開始した。



Figure 2: a) Photo of construction work of cold evaporator (CE) of liquid nitrogen. b) Completed CE.

2.2 2023 年度の利用状況

Figure 3 に運転・整備日数を示す。利用運転日数は例年よりもやや減少して 110 日であった。2023 年度は消火栓ポンプや SF₆ 施設の低圧部バルブの更新工事などがあり、また、加速器の故障も複数回あったためである。定期整備の日数は 67 日であり、こちらは例年並みであった。実験中止は 22 日であり、主に加速器機器・実験装置の故障・不具合などによるものである。

Figure 4 に利用分野別の割合を示す。核化学が 28 日 (25.5%)、核物理が 31 日 (28.2%)、材料照射・原子物理が 39 日 (35.5%)、加速器開発が 6 日 (5.5%) であった。人材育成活動として、原子力人材イニシアティブ実習のための運転を 6 日 (5.5%) 行った。

Figure 5 にイオン種別の利用日数を示す。当施設では地上電位にある 3 台のセシウムスパッター型負イオン源 (SNICS-2) と、高電圧端子内にある 1 台の ECR 正イオン源 (Super-Nanogan) を使用している。イオン種としては、陽子 (¹H) から金 (¹⁹⁷Au) まで 17 元素 22 核種が利用された。このうちマグネシウム (Mg) とガリウム (Ga) は実験利用者の要望に応じるため、負イオン源からのイオン種開発の試験を行ったものである。イオン源の利用割合は、負イオン源 (NIS) が約 55%、ターミナル ECR 正イオン源 (TIS) が約 45% となった。

Figure 6 に加速電圧別の利用日数を示す。加速電圧 3.4 MV から 16.8 MV までの利用となり、11~15 MV での利用が中心であった。加速管の絶縁劣化などによる加速電圧の低下のため 16 MV 以上での実験利用が 1 回のみとなった。今後は電圧上昇のために計画的な加速管の再生処理、新品への更新などが必要である。

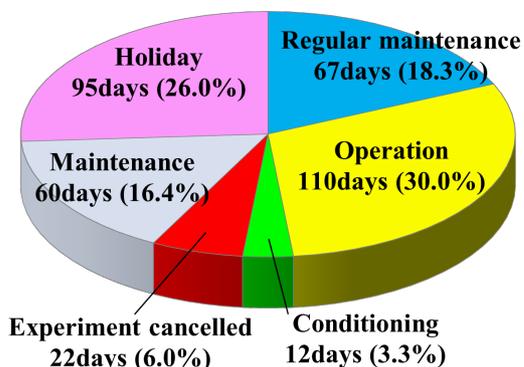


Figure 3: Operation status of accelerator in FY2023. Accelerator operation was 110 days.

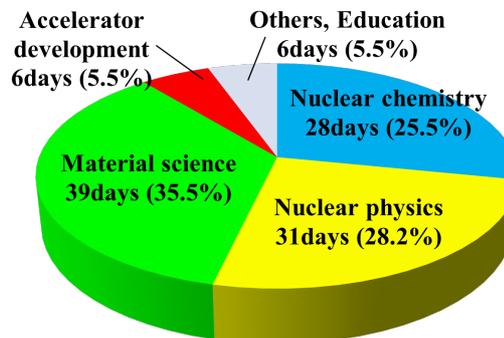


Figure 4: Usage of beam-times in different research fields in FY2023.

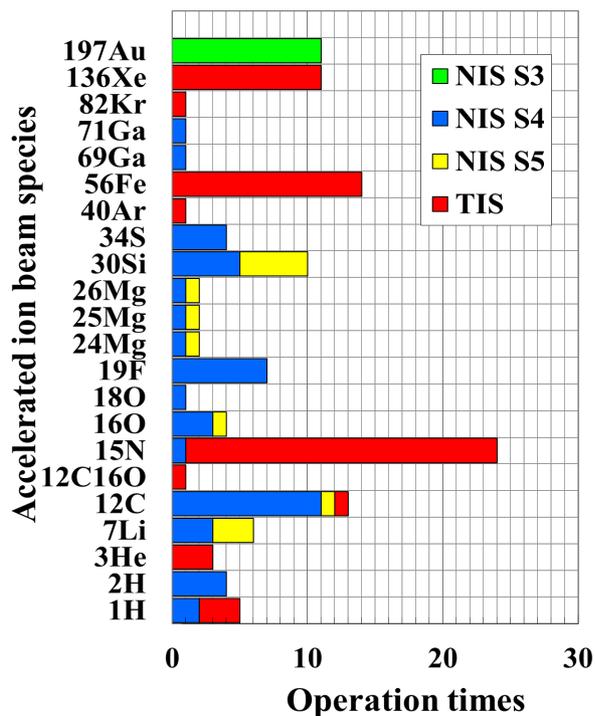


Figure 5: Distribution of accelerated ion beams species for experiment in FY2023.

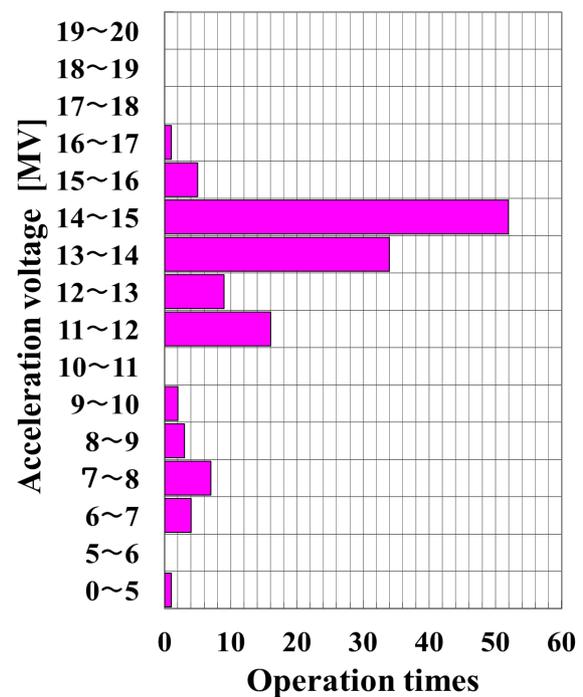


Figure 6: Distribution of acceleration voltages for experiment in FY2023.

3. 加速器の整備関係

2023 年度の定期整備は 7 月から 10 月にかけて 1 回実施し、冬に短期間の整備を 1 回行った。2023 年度は故障修理のための加速器タンクの開放を 3 回行った。主な整備事項について以下に記す。

3.1 TIS の引出用高圧電源の修理

2023 年度はターミナル正イオン源 (TIS) の引出用高圧電源 (30 kV/10 mA、Fig. 7) について 3 回のタンク開放修理を行うこととなった。以下にその内容を記す。

・故障① (2023 年 5 月)

高圧電源に制御信号を送っている CAMAC モジュールが故障し、電源 ON で最大電圧の 30 KV が印可される状態で制御不能となった。タンク開放修理を行い、CAMAC モジュール交換で正常動作となった。

・故障② (2024 年 1 月)

高圧電源が低い電圧 (~5 KV) では動作不安定で、運転時の定格電圧 (20 KV) では安定して動作する状態となった。同じ時期に SF₆ ガス施設の低圧バルブ更新作業のために SF₆ ガスを回収する予定があったので、それに併せてタンク開放修理を行った。高圧電源を交換することで対応した。

・故障③ (2024 年 3 月)

運転時に質量分析電磁石の磁場が計算値と合わない症状が発生し、印可されている実電圧が表示値よりも低くなる症状が発生した。調査したところ、2024 年 1 月に交換した高圧電源で前面パネル及び外部出力値は定格の値を示すが、実電圧は約 87 % と低くなっていることが分かった。電圧が 30 kV と高いため、実電圧を測定するためには高抵抗の専用機材を使用する必要があるが、

3.2 電源類の修理

2023 年度は電源類の故障が相次ぎ、その都度、修理等の対応を行った。以下にそれらの概要を記す。

・振分電磁石電源 (BM 04-2、100 V/400 A) の故障

(2023 年 6 月) 当施設にはイオンビームを各実験室に振り分けるための大型の電磁石が設置されている。その電磁石用電源が空冷ファンの故障により停止した。応急的に同型の電源からファンを転用して復旧し、その後、ファンを手配・交換して対応した。

(2024 年 2 月) 電源内部の IPM モジュール (Intelligent Power Module、電流の駆動・保護回路) が故障して停止した。メーカー技術者による修理を要し、手持ちの予備 IPM モジュールを使用して復旧した。約 1 か月間の実験中止を余儀なくされた。現在、同型の IPM モジュールが後継機種に変わっており、そのまま交換できる仕様ではなくなっているため、今後の予備 IPM モジュールの確保が課題となっている。

・負イオン源の初段加速用高圧電源 (HVS I2-1、300 kV/2 mA) の故障

(2023 年 5 月) 当施設の負イオン源は高電圧デッキ上に設置されており、生成されたイオンビームは 240 kV の初段加速をされた後にタンデム加速器に入射される。その高電圧デッキ用の電源内部の DC/DC コンバータが故障し、高電圧が印可できない状態となった。メーカー技術者による修理を要し、コンバータ交換で復旧した。負イ

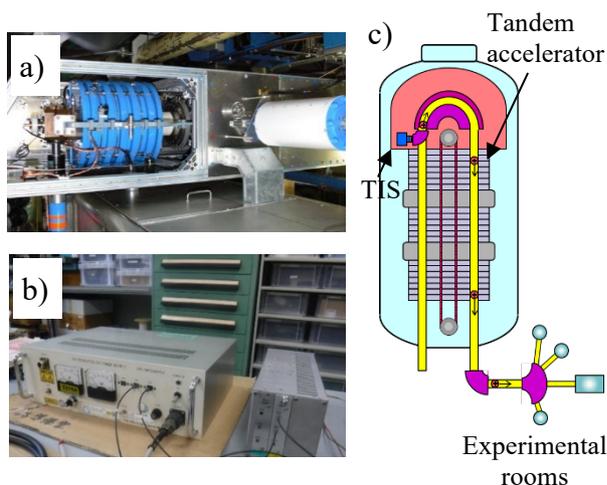


Figure 7: a) Photo of TIS (Terminal ECR Ion Source).
b) Operation test of the high-voltage power supply.
c) Diagram of TIS installation in high-voltage terminal.

オン源の高電圧デッキは 2 系統設置してあるため、修理が完了するまでは 1 系統のみを使用して運転継続した。

(2023 年 11 月) 配線不良による放電が発生した。定格は 240kV で使用しており、そのサージによって高電圧デッキ上の機器が複数故障した。配線及び機器の修理を行い、復旧した。

・負イオン源の分析用電磁石電源 (BM II-1、18 V/190 A) の故障 (2024 年 3 月)

負イオン源から引き出されたイオンビームを質量分析する電磁石の電源が ON できない症状が発生した。接触不良と推測し、内部のリレー交換などで復旧した。

・タンク内発電用回転シャフトのインバーター (RS-2、400 V/100 A) の故障 (2023 年 10 月)

当施設では、静電加速器の高電圧が印可されている加速ユニット部はアクリルシャフトを回転させて動力を送り、高電圧端子部 (18.5 MV 電位) に設置された発電機で電力を作って機器を動作させている。その回転シャフト用モーターを動作させるためのインバーターが経年劣化による故障により停止した。予備インバーターを確保していたので、交換して復旧した。

3.3 荷電変換用フォイルチェンジャーのベルト破損

当施設では高電圧端子部にイオンビームの電荷をマイナスからプラスに変換するための電子ストリッパ用カーボンフォイルが設置されている。カーボンフォイルは約 240 枚設置されており、イオンビームによって消耗した場合はフォイルチェンジャーで 1 枚ずつ送って変更できる仕様となっている (Fig. 8)。

定期整備時の点検により、そのフォイルチェンジャーの駆動用ベルトが経年劣化により破損していることが分かった。代替品のベルトについては、輸入品で早期の入手は不可能な状態であった。タンデム加速器では荷電変換用のカーボンフォイルが必要なため、加速器タンクを閉めての運転開始が難しい状況であった。

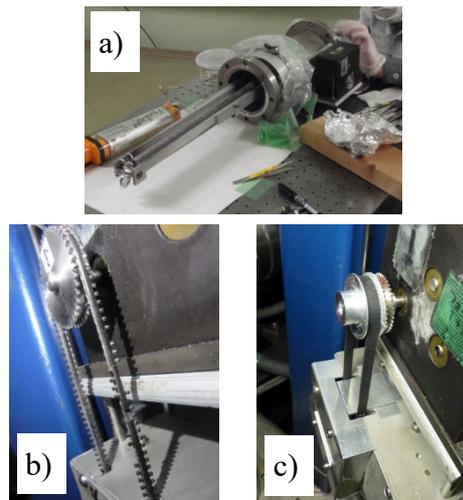


Figure 8: a) Photo of carbon foil changer for electron stripper in high-voltage terminal. b) Broken belt (NO-SLIP POSITIONING BELT). c) Glued new pulleys and new belt.

そこでモーター、ギアボックスそれぞれの元のプーリーの外側に別の汎用プーリーを接着剤で貼り付けて、手持ちの汎用ベルトを使用して駆動できるように対応した。現在までのところ、安定して使用ができています。

4. 加速器の開発関係

4.1 加速器タンク内 LAN システムの開発

当施設は 1 MV のユニットが 20 段直列に積み重なって 18.5 MV の高電圧を発生する静電加速器である。この高電圧端子上の機器について、プラスチック光ファイバ (POF) による LAN を使用した通信システムの構築を目指して開発を進めている[3][4][5]。このシステムを多くの測定・監視機器類に応用し、タンク内機器の異常や故障の予兆などを早期に検知できるようにする。現在は加速器の定期整備を年 1 回程度に削減しているが、このようなシステムを使用して、長期間の安定的な加速器の運転を目指している。

これまで使用してきた既存の制御システムは、CAMAC モジュールと赤外線通信を使用しており、測定・監視機器類を追加する場合には、その制御システムに対応した機器類を準備する必要があった。一方で、加速器タンク内 LAN システムでは、ネットワーク Hub に接続するだけで市販・汎用の測定・監視機器類などを使用できるようにするものである。

タンデム加速器は大型の静電加速器であり、そのタンク内は以下に示すような特殊な環境である。それら全てに対応できるものとする必要があるため、試験・開発を行って機器類を設置した (Fig. 9)。

・加圧・減圧対策

加速器運転時にはタンク内は六フッ化硫黄 (SF_6) ガスで満たされており、機器類は約 0.5 MPa で加圧される。また、整備時にはタンク内を空気に置換して作業員が入れるようにするため、 SF_6 ガスの真空引きが行われる。こういった加圧・減圧で機器の部品が破損する可能性がある。

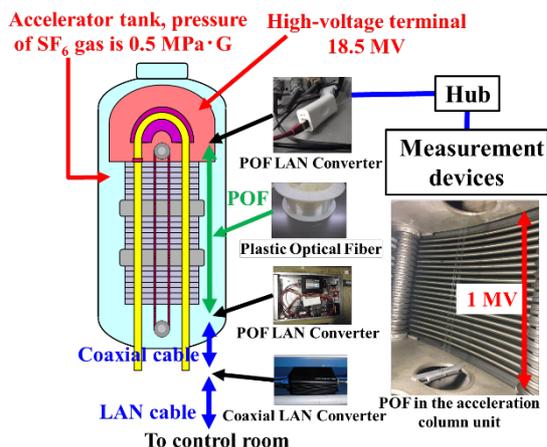


Figure 9: Schematic diagram of the LAN system in the tandem accelerator tank.

対策として、機器類をオフラインで使用できる加圧・減圧容器に入れて試験を行い、耐性を評価してから使用した。

・サージ対策

機器類は 18.5 MV の高電圧端子上などに設置されており、加速器の放電によるサージ(瞬間的に高い電圧が印加される現象)で回路素子等の破損・故障などが発生する可能性がある。

対策として、機器類をサージ保護のためのシールド用金属ケースに入れ、ケーブルも全て金属ダクトを通して配線した。また、電力の入力段にフィルター等の保護素子を追加するなどした。オフラインでのサージ耐性試験は難しいため、過去の経験を基にして金属ケースや保護素子を製作し、タンク内に搭載して耐性試験を行った。

・加速電圧の絶縁対策

機器類は 18.5 MV の高電圧端子上などに設置されている。そのため、機器類の通信は静電加速器の電気的な絶縁を確保した上で行う必要がある。

対策として、加速器の加速電圧の印加場所はプラスチック光ファイバを使用して絶縁を確保した。

これらの対策の結果、現在は監視カメラ(チャージングペレットチェーン用)、温度計・振動計(タンク内発電用回転シャフトのギアボックス用)などが使用可能となった。今後は USB 機器なども使用できるように対象機器の拡大を進めている。

4.2 宇宙機器照射用ビームライン

宇宙機器に使用する半導体等の放射線耐性の試験の需要の高まりに対応するため、「宇宙機器照射用ビームライン」の検討を開始した。

半導体では Single Event Upset (SEU) という放射線により素子の状態が反転する(0→1, 1→0)現象が、主に重イオンの高 LET 環境下で発生する[6]。重イオンに晒される宇宙機器の故障の原因となるため、宇宙環境を模擬して事前に試験を行う必要がある。宇宙産業分野の拡大により、新しい高性能な部品や逆に安価で一般的な民生部品を使用する需要が高まっていることから、当施設でも重イオン用大型静電加速器の特徴を活かして照

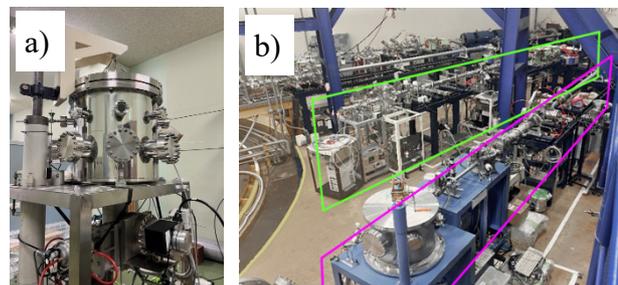


Figure 10: a) The vacuum chamber for irradiation of space equipment. b) Two beamlines to be installed.

射試験設備の設置が可能であるか検討を開始した。

照射試験設備に必要な機器やイオンビーム条件の検討を行い、現在は照射用真空チャンバー、試料用ステージの構築などを進めている (Fig. 10)。本格的な設備の構築はまだ先であるが、2024 年度に試験的な利用開始を行うことを目指して進めている。

5. まとめ

2023 年度の運転日数は 110 日であり、例年よりも減少傾向となった。機器・設備の経年劣化による故障修理や修繕工事などの対応を行う必要があり、運転日数減少の要因となっている。今後は加速器タンク内 LAN システムの開発を進め、故障の予兆の早期発見などで運転日数が増加することを目指している。また、加速電圧は現在、約 15 MV が上限となっており、16 MV を超える運転は難しくなっている。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な状況である。現在、宇宙機器照射用ビームラインの検討を進めており、2024 年度中の試験的な利用を目指している。今後も大型静電加速器の特徴を活かした加速器・イオンビーム開発等を進めていく。

参考文献

- [1] S. Takeuchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A382 (1996)153-160.
- [2] M. Matsuda *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A654 (2011)45-51.
- [3] M. Matsuda *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan, (2021) 394.
- [4] H. Kabumoto *et al.*, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University), (2022) 1109.
- [5] K. Kutsukake *et al.*, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 29 - September 1, 2023, Funabashi, (2023) 1080.
- [6] J.M. Lauenstein, JEDEC STANDARD Test Procedures for the Measurement of Single-Event Effects in Semiconductor Devices from Heavy Ion Irradiation, JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION, 2017.