

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[#], 松田誠, 中村暢彦, 石崎暢洋, 沓掛健一,
乙川義憲, 遊津拓洋, 松井泰, 中川創平, 阿部信市

Hiroshi Kabumoto[#], Makoto Matsuda, Masahiko Nakamura, Nobuhiro Ishizaki, Ken-ichi Kutsukake,
Yoshinori Otokawa, Takuhiro Asozu, Yutaka Matsui, Sohei Nakagawa, Shin-ichi Abe

^{A)} Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The JAEA-Tokai tandem accelerator was operated over a total of 141 days, and delivered 23 different ions, and maximum acceleration voltage was 16.3 MV in FY2021. 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. At the regular maintenance period, we replaced 7 acceleration tubes (equivalent to 3.5 MV units), these tubes were damaged by electric discharge in operation. In the past few years, acceleration voltage of our tandem facility decreases up to about 15 MV, we guess the electric insulation performance of these parts become deteriorated by long time aging. 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 2021 年度の運転・整備状況等について報告する。

2. 加速器の運転・整備状況

2.1 2021 年度の運転・整備の概要

Figure 1 は 2021 年度の東海タンデム加速器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。

2021 年度は春から夏にかけては加速器の運転を行った。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

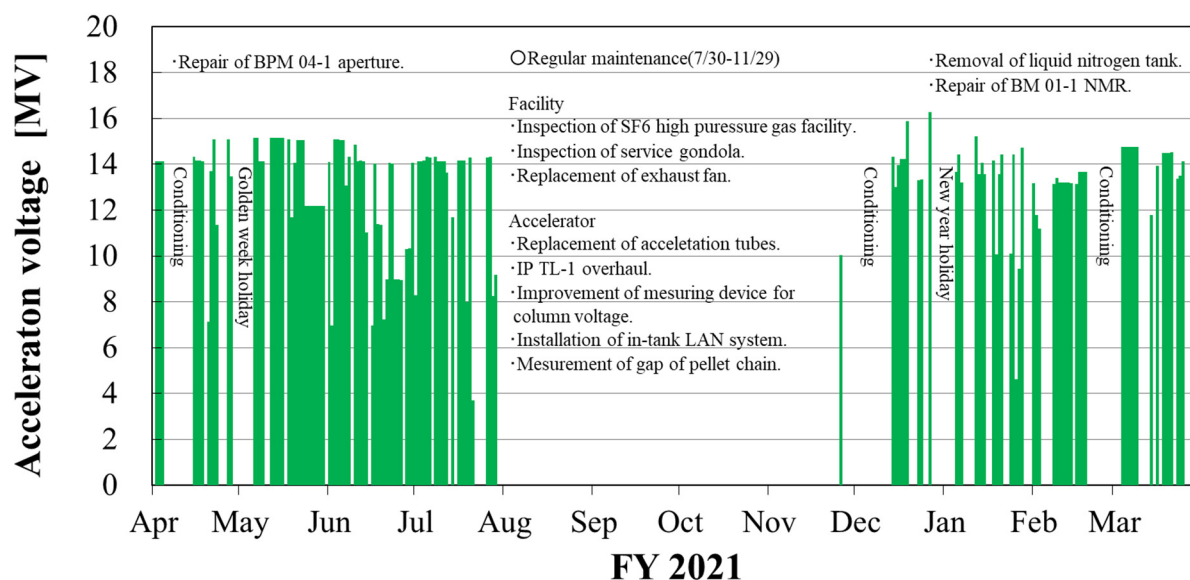


Figure 1: Daily accelerating voltage and operation status in the FY 2021.

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

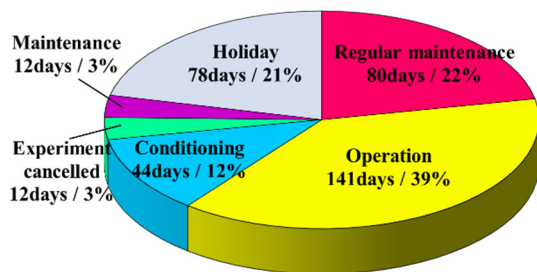


Figure 2: Operation status of accelerator in FY2021. Accelerator operation was 141 days.

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[3]。2021年度は緊急の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。加速器の整備関係では耐電圧性能が低下した低エネルギー側加速管7本(3.5 MV分に相当)の交換、動作不安定となっていたタンク内イオンポンプの素子交換などを行った。

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(10月)において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体制とし、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体制として事業継続に努めた。

2.2 2021年度の利用状況

Figure 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、例年並みに戻ったものである。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。

Figure 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

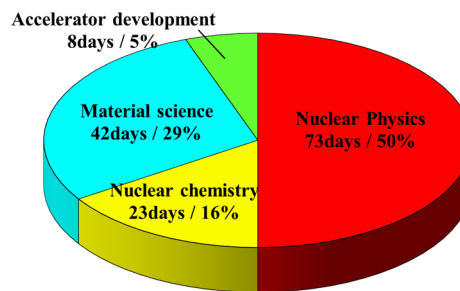


Figure 3: Usage of beam-times in different research fields in FY2021.

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小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。

Figure 4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。Es実験に酸素(18O)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。

Figure 5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以上での実験利用が1回のみ状況となっている。

3. 加速器の整備関係

2021年度の定期整備は8月~11月の1回のみの実施であった。主な整備事項について以下に記す。

3.1 低エネルギー側加速管の交換

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[4]。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

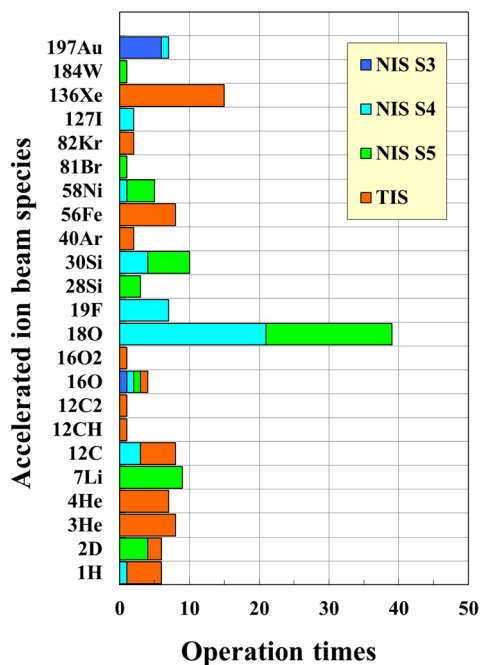


Figure 4: Distribution of accelerated ion beams species for experiment in FY2021.

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°C)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 (Fig. 6)、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ている可能性がある。

今後は計画的な加速管の再生処理(サンドブラストに

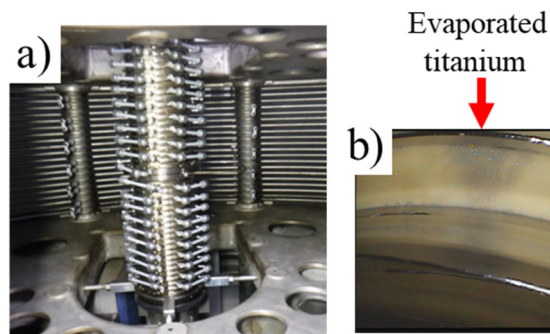


Figure 6: a) Acceleration tubes of 1MV unit. b) Acceleration gap of vacuum side, evaporated titanium marks were seen on ceramic.

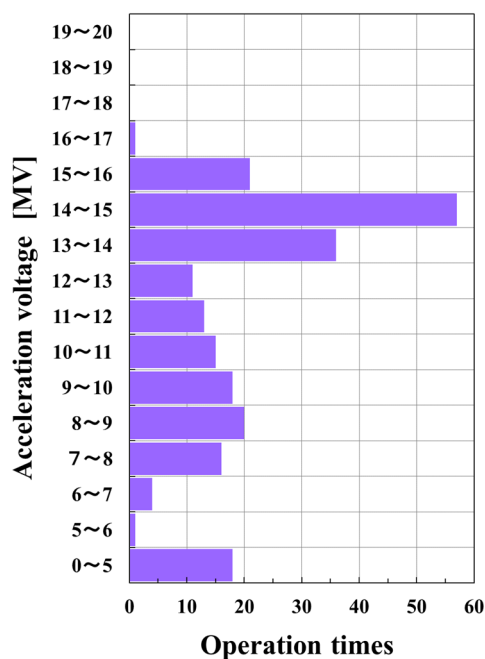


Figure 5: Distribution of acceleration voltages for experiment in FY2021.

よる蒸着跡の除去)、新品への更新などが必要ではないかと対応を検討している。

3.2 高電圧端子内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。加速器運転中にたびたび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、素子取り付け、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。

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。

3.3 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

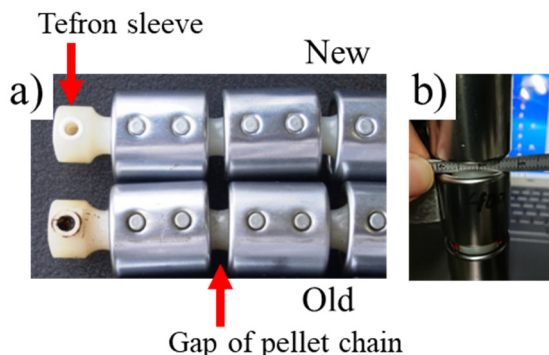


Figure 7: a) New and old pellet chains, Teflon sleeve has become transformed to oval. b) Measurement of the gaps.

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(5 V 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 μm 厚銅箔テープ、ケーブル部分に 20 μm 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。

3.4 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 N.E.C. 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、購入費用と整備時間の削減が可能になると考えられる(メーカー推奨寿命は使用環境によるが約 33,000 時間)。

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(Fig. 7)。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。

Figure 8 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。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。

4. 加速器の開発関係

4.1 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

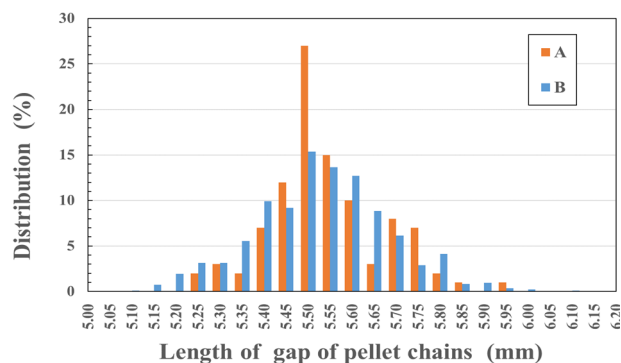


Figure 8: Distribution of length of gap of pellet chains. Time of use are A:12,000 h, B:36,000 h.

の個別の電圧を測定する手法の開発を進めている[4][5]。これが可能となれば、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。

Figure 9 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。

これまでプロトタイプ 1 台を設置し、電圧変化がきれいに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個体差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

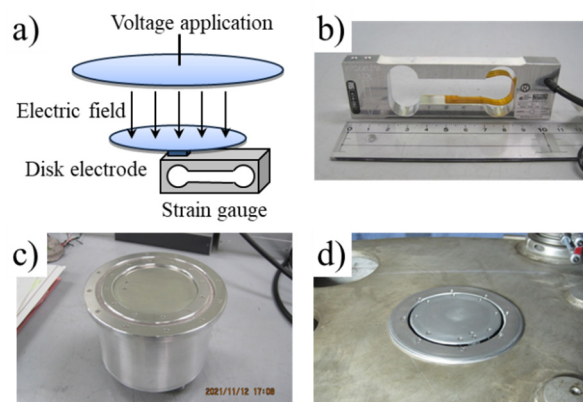


Figure 9: a) Principle of measurement. b) Load cell sensor. c) Developed voltmeter. d) Installed on the column unit.

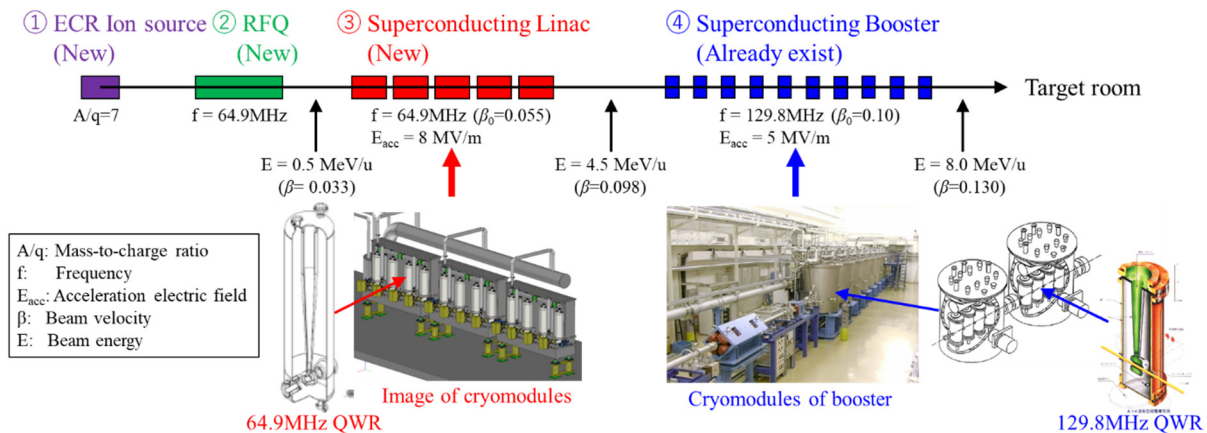


Figure 10: Layout image of successor facility of the tokai-tandem accelerator.

ていくことを目指している。

4.2 低エネルギーイオンビームの加速試験

利用者からの要望に対応するため、低エネルギーのイオンビームの加速試験を行った。当施設では、加速電圧の安定化はコロナプローブの電流をフィードバック制御することで行っている。2015 年度から使用開始した新型コロナプローブ[6](最大挿入量が 954 mm)の最大挿入時に制御可能であった最低の加速電圧が 1.5 MV であった。それよりも低い電圧ではコロナ放電が起きず、制御ができなかった。さらに低エネルギーで加速を行う場合には、それ以前に使用していた旧型コロナプローブ(最大挿入量が約 2000 mm)に切り替える必要がある。

加速試験では高電圧端子内にある ECR 正イオン源から電荷+1 の炭素(12C+1)、ヘリウム(4He+1)は、エネルギー 1.5~5 MeV の範囲でビームを輸送できた。陽子(1H+1)については、エネルギー 5 MeV ではビーム輸送できたが、それより低いエネルギーではビーム輸送できなかった。これは光学系機器のパラメータ設定が十分にできていなかったためと思われる、今後の検討課題である。

4.3 加速器後継機の計画立案

当施設では、現在のタンデム加速器の後継機の計画立案を行っている。重イオンビームを用いた加速器施設で、現在と比べてエネルギーで 4 倍、電流量で 20~50 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進展させることが目的である。

Figure 10 に構成を示す。イオン源、RFQ(高周波四重極線形加速器)、および超伝導線形加速器を新規に製作し、エネルギー 4.5 MeV/u の重イオンビームを生成する(軽イオンはさらに高エネルギーとなる)。これを既存の超伝導ブースター(休止中)に導入することで、エネルギー 8 MeV/u、最大電流 5 pμA 程度で多くの重イオンを加速する。重イオン大強度ビームの利用や RI・核燃料照射を行うため、ターゲット室・実験室はそれに対応した放射線管理区域化とする。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。本施設の構築により、基礎科学や産業など、イオンビームを活用するすべての分野の利用にも資するものである。

現在までのところ、「加速器・実験室のレイアウト検討」、「超伝導線形加速器の概念設計[7]」、「廃止・休止中の

ヘリウム冷凍機・超伝導ブースターの再稼働の検討[8]」などを進めている。

5. まとめ

2021 年度の運転日数は 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、高経年化によって絶縁性能が劣化してきていることが考えられる。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ではないかと思われる。

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・検討を進めていきたい。

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 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 5-7, Tsuruga, (2015) 357.
- [4] M. Matsuda *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-12, QST-Takasaki-Online, (2021) 394.
- [5] M. Matsuda *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September 2-4, Matsuyama-Online, (2020) 948.
- [6] M. Matsuda *et al.*, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10, Chiba, (2016) 1413.
- [7] Y. Kondo *et al.*, "Development of QWRs for the future upgrade of JAEA Tandem superconducting booster", Proceedings of SRF2021, East Lansing, MI, USA (2021).
- [8] K. Nii *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-12, QST-Takasaki-Online, (2021) 334.