

原子力機構-東海タンデム加速器の現状

PRESENT STATUS OF JAEA-TOKAI TANDEM ACCELERATOR

松田誠[#], 長明彦, 石崎暢洋, 田山豪一, 株本裕史,
中村暢彦, 杵掛健一, 乙川義憲, 遊津拓洋, 松井泰, 阿部信市
Makoto Matsuda[#], Akihiko Osa, Nobuhiro Ishizaki, Hidekazu Tayama, Hiroshi Kabumoto, Masahiko Nakamura,
Ken-ichi Kutsukake, Yoshinori Otokawa, Takuhiro Asozu, Yutaka Matsui, Shin-ichi Abe
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The JAEA-Tokai tandem accelerator was operated over a total of 138 days, and delivered 16 different ions to the experiments in the research fields of nuclear physics, nuclear chemistry, atomic physics, solid state physics and radiation effects in material in FY2018. Maximum acceleration voltage was 16.6 MV. A new beam attenuator was installed at the entrance beam line of the tandem accelerator to facilitate control of the beam current and minimize stripper foil consumption. The main maintenance items included replacing the pellet chain used for about 68,000 hours and the drive motor for the high voltage terminal generator used for about 9 years. A fault has occurred in the building's oxygen deficiency monitor. This paper describes the operational status of the accelerators 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 イオン源[2]により H から Bi までの約 50 元素の多様なイオンを 10~500 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の廃止により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特徴を有する。昨年度は運転計画を調整し、99 番元素であるアインスタイニウムを標的とした核物理実験を効率よく遂行できるようにした。

本報告では、2018 年度の原子力機構-東海タンデム加速器施設の運転状況について報告する。

2. 加速器の運転状況

2016 年 12 月に発生した真空トラブルにより加速管内に大気が混入し、加速電圧は 11.7 MV まで低下した。この復旧のため 2017 年 2 月から総数 80 本の全ての加速管を取り外して洗浄し、再組立てを行った。その結果加速電圧を 17.4 MV まで回復させることができた。このような状況のもとで 2018 年度の運転が行われた。

2018 年度のタンデム加速器の運転状況を Fig. 1 に示す。加速器の利用運転は 138 日であった。定期整備日数は 95 日であり、運転期間にタンク開放を伴う大きなトラブルは発生しなかった。加速電圧の回復を図るため 20 日のコンディショニングを実施したが、加速電圧を向上させることはできなかった。利用者や施設の都合により実験中止が 8 日となった。休日の日数は主として定期整備

[#] matsuda.makoto@jaea.go.jp

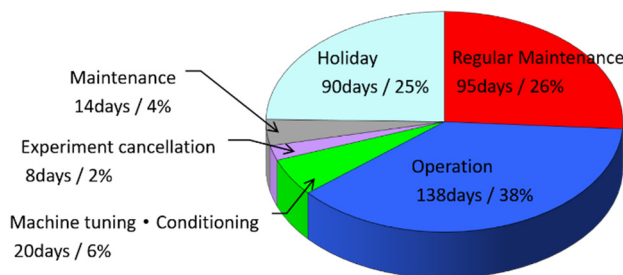


Figure 1: The operation status of the accelerator in the FY 2018.

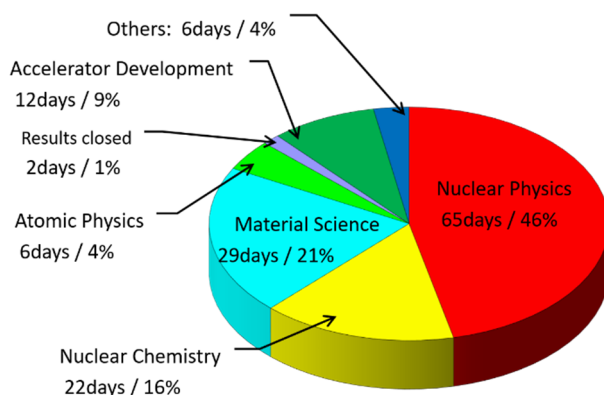


Figure 2: Usage of beam-times in different research fields.

期間の休日でも占められるが、運転期間における土日の運転休止が 8 週ほどと例年より多く、休日の日数が割合的に増えている。

Figure 2 は加速器の利用分野別の日数を示したものである。利用分野は核物理関係が 46%、核化学関係が 16%であり、大型タンデム加速器ゆえに可能な核反応を

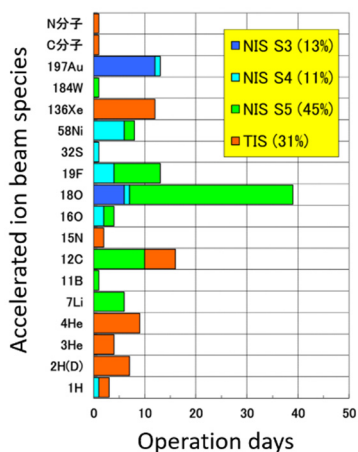


Figure 3: Distribution of accelerated ion beam species for experiment.

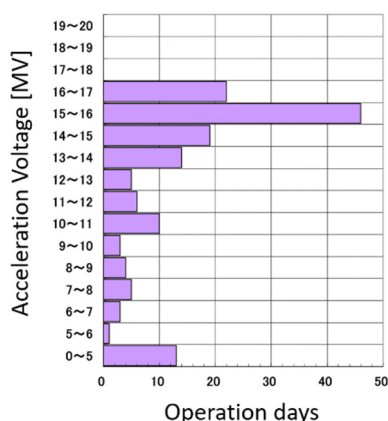


Figure 4: Distribution of acceleration voltages for experiments.

伴うイオンビーム実験に使用された。アインスタイニウムを用いた核物理実験に注力したこともあり核物理実験の日数が割合的に多くなった。原子物理・材料科学の実験が25%であり、Xeイオンなどを用いて原子炉材料の照射解析や材料改質などの実験に利用された。加速器開発は9%で主として加速管の再アライメントの効果確認などが行われた。

施設の利用形態としては、大学や他の研究機関との共同研究による利用が69日で49%であり、原力機構単独の研究は49日で35%、施設供用利用は6日で4%であった。原子力機構職員を対象に加速器の運転教育をのべ4日実施し、利用者の運転技能の向上に努めた。

2018年度に利用された加速イオン種をFig. 3に示す。HからAuまで13元素、16核種のイオンが利用された。イオン源の利用ではS5イオン源の利用が45%と例年と比較し多くなった。その理由として、S5イオン源は加速器運転中であっても単独での生成イオンの分析が可能であるため利便性が良いことがあげられる。高電圧端子内のECRイオン源の利用は31%であった。

Figure 4は2018年度のタンデム加速器の電圧発生状

況であり、最高加速電圧は16.6 MVであった。2016年の真空トラブルで加速電圧は11.7 MVまで低下していたが、加速管の再洗浄作業により16 MV以上の利用運転を再開することができた。しかしながら、放電が多く発生し、デコンディショニングにより加速電圧の低下が多く発生した。その都度コンディショニングにより電圧の回復を行いながらの運転を続けている。昨年度の発表[3]で述べたように加速管内面に付着したチタンの蒸着痕が放電発生の原因である可能性がある。加速器の利用運転を継続しながらであるが、加速管内面をサンドブラスト処理等によりクリーニングしたものに順次置き換えることを検討している。

3. 加速器の開発・整備状況

2018年度の定期整備は4/23~5/25、8/1~10/2、2/13~3/29の計3回実施された。前年の12月から7月末までの間にアインスタイニウムを用いた実験を効率よく実施するため、5月の長期連休を挟む形で4月の短期間の定期整備を設けた。この4月の整備が終了し、加速器タンクを閉じSF6ガスを充填後、加速器の運転を再開すると加速器タンク内のイオンポンプが2台動作しないトラブルが発生した。直ちにタンクを開放し修理を実施した。原因はイオンポンプ電源の故障と、制御ケーブルのコネクタの接触不良であった。8月の整備では毎年恒例の高圧ガス製造施設の自主点検のほか、高電圧発生用のペレットチェーンの交換、高電圧端子内イオン源の試料ガスの調製を行った。2月の整備では高電圧端子内の発電機を駆動する電動機の交換や、放電により破断したストリッパフォイル用カメラの光ファイバの復旧などを実施した。主な開発・整備事項について以下に記す。

3.1 ビームアッテネータの設置

これまでビーム量の最終的な調整はエネルギー分析電磁石のビーム収束位置に設けられた可動式のスリットの開口幅を変化させることで行っていた。しかしスリットはビーム径の細くなる位置に設置されているため、ビーム量の調整には適していない。またビームの断面形状を制限することになるので照射位置でのビームサイズの変化をもたらしていた。また、近年の研究計画の進捗により、高エネルギーの比較的軽いイオンを数nAまで抑えてビーム輸送を行う必要があり、ビーム量調整の容易な

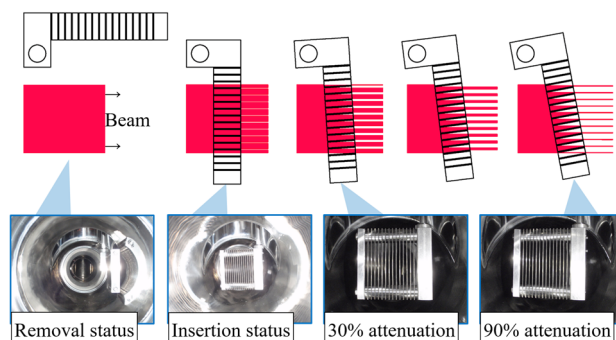


Figure 5: Operation outline of beam attenuator.

ビームアッテネータの設置が望まれてきた。

今回製作したビームアッテネータは幅 10 mm、長さ 50 mm、厚さ 0.5 mm のタンタル板を 2 mm の間隔を開けて 15 枚ほど積層したブラインド状の多段スリット構造とした。動作原理および実際の写真を Fig. 5 に示す。スリット全体をビーム軌道上に挿入し、ビームとタンタル板とが平行となった状態で減衰率が最も小さくなる。この状態から多段スリット全体を最大で 10 度程度までわずかに傾けることでビームを遮る量を変化させ連続的にビーム量を制御する。

このビームアッテネータを加速器の負イオンビーム入射ラインの 90 度偏向電磁石の直前に設置した。加速器へ入射する負イオンビーム電流を制御することで、無駄なビームを加速することがなく、かつ高電圧端子の荷電変換用ストリッパフォイルの無駄な消費を抑えることが可能となる。ただし、数 nA 以下のビーム電流は、スリットコントロールによるタンデム加速器の加速電圧の安定化ができなくなる。当初の目的を満足することができないので、タンデム加速器のエネルギー分析スリットの下流ビームラインに同様のアッテネータを設置する予定である。今回はブラインド状多段スリットの機能確認が目的でもある。

Figure 6 に設置したビームアッテネータの写真と多段スリットの角度調整の模式図を示す。ビーム径が十分広がっている二重収束型 90 度偏向電磁石の入射部直前に設置した。この位置でのビーム径は約 20 mm であり、タンタル板 10 枚ほどで減衰されることになる。ビームのエミッタンス分布に関しては、この後にストリッパフォイルでエミッタンスが大きく増大するため大きな影響はないと考えている。エミッタンス分布の測定は行っていない。多段スリットは単に回転導入端子に接続されたものである。この位置でのビームによる発熱は数 W であるので冷却

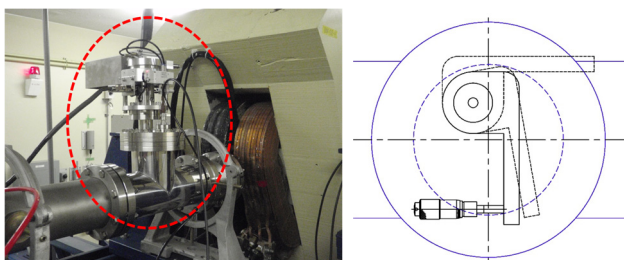


Figure 6: Installation photograph of beam attenuator (red circle) and outline of angle adjustment mechanism.

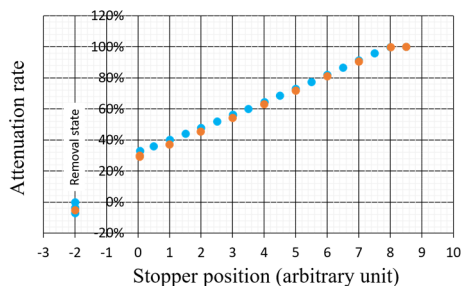


Figure 7: Measured beam attenuation rate.

機能は持たせていない。回転導入端子の駆動には圧空の回転アクチュエータを採用した。多段スリットの回転角度の調整は、挿入時の回転アクチュエータの停止位置を DC モーターで駆動するストッパーで制御することで行う。圧空なので挿入時(回転時)でもストッパー位置の調整が可能で、挿入、抜去を繰り返しても同じ角度で固定され再現性も良く、安価に製作できる。

実際にビームを減衰させたときのビーム電流の変化を Fig. 7 に示す。減衰率を 30~100% の範囲で連続的に可変することができている。多段スリットの製作の精度から減衰率が 95% 以上では可変量が連続的でなくなる可能性がある。また、多段スリットのタンタル板と開口の面積比では最小減衰率は 20% となるが、実際のビームは平行ビームでなく、ある傾きを持っているので面積比通りにはならない。ただ、最小減衰率が 30% と大きいのでビームが多段スリット板以外にぶつかっている可能性がある。

多段スリットがアッテネータとして十分実用的であることが確認されたので、今後、加速器の出射側ビームラインに冷却機能を設けたビームアッテネータを設置する予定である。ビームによる発熱は最大で 50 W 程度と見積もられる。

3.2 ペレットチェーンの交換

東海タンデム加速器では長さが約 30 m で、約 840 コマのペレットチェーンを 2 本使用している。うち 1 本が約 68,000 時間の使用時間に達したので、8 月の定期整備時に交換を行った。メーカー推奨の交換時間は 33,000 時間であるが、チェーンの伸び量を定期整備ごとに測定することで健全性を確認している。交換後に約 12 時間の動作試験を行い初期伸び分の 11 コマ分(約 40 cm)を短くした。初期伸びは初期の 5,000 時間ほどで 1~1.3% 程度であり、その後はほとんど伸びないことが経験的に分かっているため、これを目安に交換時期を決めている。

8 月のチェーン交換後、約 3,100 時間経過した 2 月の定期整備時に、チェーンのアイドルプーリーが削れたと考えられる粉の発生が見られた(Fig. 8)。チェーン接続用ネジとアイドルプーリーがぶつかる構造となっているため削られたと考えている。接続用ネジの頭が他の接続用リベットよりも高いのでリベットと同じ高さになるように接続ネジ約 20 個を 0.2 mm ほど削る対応を行った。しかし、交換前のチェーンでは粉の発生はなかったので詳細原

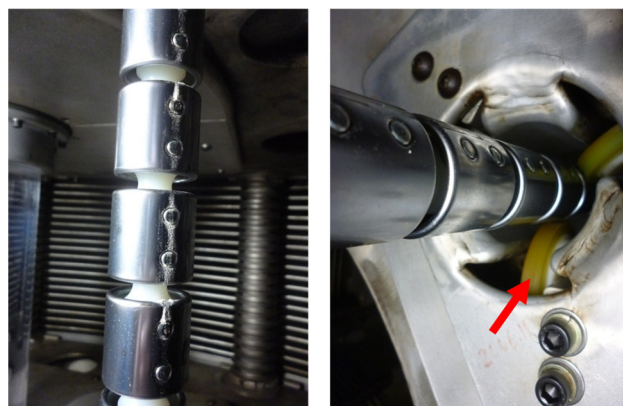


Figure 8: Powdered chains (left) and idler pulleys (right).

因は不明であり、経過観察中である。

3.3 酸素濃度警報盤の故障

タンデム加速器の絶縁ガスとして SF₆ ガスを約 50 トン保有している。大気圧換算で 7,000 m³ の体積であり、加速管が破損するなどの事故が発生した場合は加速器建家が酸欠となる可能性がある。そのため酸素濃度検出器が建家の加速器タンク室および地下エリアを中心に各部屋に設置されている。2018 年の 12 月に加速器制御室に設置されている酸素濃度警報盤の半数が動作しなくなった。この警報盤内のユニットが酸素濃度に換算し、18% 以下で各検出器位置および制御室で警報を発するようになっていた。この各ユニットへ DC24V を供給する電源が経年により、DC24V を出力しなくなったことが原因であった。対応として別電源から DC24V を供給することにして仮復旧を行った。この故障の 4 か月後にも残り半数分のユニットが動作しなくなり同様の対策を行うことになった。設置から約 26 年経過し、経年による故障だと考える。この警報盤の問題は DC 電源が故障した際に警報を発しないので、故障に気づきにくいことである。現に最初の故障の際は一晩気づかなかったようである。警報盤は新しく更新する予定であり、電源故障時に警報を発するように対策する予定である。

3.4 ターミナル発電機駆動電動機の交換

絶縁された高電圧端子内には電力を供給するために発電機が内蔵されている。この発電機を駆動するため加速器タンク内の地上電位側に 30HP の電動機が設置されている。8 月の定期整備でこの電動機の軸受部に異音が確認された。この状態で運転を行うことはできないため予備の電動機へ交換を行った。電動機の重量は約 300 kg であり、加速器タンクから外部への搬出および搬入作業は大がかりな作業となった。

3.5 ビームプロファイルモニターの回転ワイヤーの溶断

タンデム加速器のエネルギー分析電磁石直後のビームプロファイルモニター (BPM) の回転ワイヤーがビームにより溶断するトラブルが 2 度発生した。最近のビーム強度の増加に伴いビームパワーが増した影響と考えられる。BPM 直前に位置するビームアパーチャーのビーム痕から加速器のビーム調整中に溶断を起こしていると考えられ、ビーム調整時の手順や調整法を再検討している。

4. まとめ

2018 年度の運転日数は 138 日で、一昨年水準に回復した。加速電圧は 2016 年度の真空トラブル後、やや低迷し 17 MV に達しない状態となっている。貴重な RI 試料の 99 番元素アインスタイニウム (Es) を用いた実験などにより、非密封 RI を利用可能な照射室・第 2 照射室の利用が全体の 6 割となった。今年度も Es を用いた実験が計画されており照射室の有効な利用計画の策定が必要となる。

資源の限られた中で施設を有効に活用するため、加速器の定期整備を年 1 回とすることを模索している。人的にもマシンのにも負担を増やさずに運転日数を増加させるアイデアであると考えており、それに必要な方策を検

討し始めたところである。先述のような RI・核燃料を標的としたユニークな研究を推進するためにも、電圧性能の向上や静電加速器の特徴を生かした加速器・ビーム開発を進める。

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 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, Nagaoka, (2018) 1271.