

RCNP AVF サイクロトロンのコミッショニングの進展

PROGRESS OF THE COMMISSIONING OF THE RCNP AVF CYCLOTRON

神田浩樹^{#A)}, 福田光宏^{A)}, 依田哲彦^{A)}, 安田裕介^{A)}, 中尾政夫^{B)}, 畑中吉治^{A)}, 齋藤高嶺^{A)}, 田村仁志^{A)}, 森信俊平^{A)}, 永山啓一^{A)}, 吉田英智^{A)}, 阿野真治^{A)}, 友野大^{A)}, 鎌野寛之^{A)}, 青井考^{A)}, 嶋達志^{A)}, 井手口栄治^{A)}, 大田晋輔^{A)}, 小林信之^{A)}, 古野達也^{C)}, 今城想平^{A)}, 村田求基^{A)}, 山本康崇^{A)}, 鈴木智和^{A)}, 今教禎^{A)}, 森田泰之^{A)}, 武田佳次朗^{A)}, 原隆文^{A)}, 莊浚謙^{A)}, Zhao Hang^{A)}, 橘高正樹^{A)}, 松井昇大朗^{A)}, 井村友紀^{A)}, 渡辺薫^{A)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

^{B)} Gunma University Heavy Ion Medical Center, Gunma University

^{C)} Department of Physics, Osaka University

Abstract

The Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, has been renovating the facility and upgrading the AVF cyclotron and ion sources to increase beam intensity since FY2019. Commissioning of the equipment without using the beam was started in FY2021 after the completion of the renovation works. Commissioning with the beam was started in FY2022 after the approval of the radiation permit. After the commissioning, both proton and helium beams can demonstrate the same or even higher beam current than before the upgrade, confirming the direction of the upgrade. In FY2023, we have resumed the beam operation based on the long-term beam time plan. We make further commissioning and improvements so that we can provide the ion species and energies which we provided before the upgrade and provide new types of beams that are requested by the users of the communities of sciences.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センターのAVFサイクロトロンは1973年に稼働を開始して以来50年近くにわたり、原子核物理学の研究、中性子・ミュオン等の二次粒子を用いた情報科学や物性研究、RI製造などにビームを供給してきた。2004年から2005年にかけてAVFサイクロトロンやビームライン等の部分的な更新、増設を行い、2013年から2014年にかけてはAVFサイクロトロンとリングサイクロトロンの部分的な更新を実施したものの、機器の老朽化による水漏れ等のトラブルや機器の故障等が増加している状況であった。さらに、大強度の二次粒子ビームや短寿命核の大量製造のための大強度の一次ビームが必要とされるようになり、AVFサイクロトロンの大強度化が強く望まれていた。

そこで、2019年2月より加速器のシャットダウンを行い、加速器施設の改修工事、AVFサイクロトロン解体と新規製造した機器を導入したアップグレード作業を実施した。2020年度末までにこれらの作業を終えたのちに、2021年度には工事のために取り外していた機器の再取り付けと調整を実施した。2022年3月末より変更申請の認可を受けてAVFサイクロトロンに陽子ビームを入射し、ビームコミッショニングを開始した。2022年度は、コミッショニングと試験的なビーム利用を重点的に実施し、AVFサイクロトロンによる65 MeV陽子ビーム、この陽子ビームをリングサイクロトロンに入射してさらに加速を行った392 MeV陽子ビーム、アルファ線核医学治療の研究に必要とされる²¹¹At製造のための28.5 MeV ⁴He²⁺ビームを供給した[1]。加速器運転開始によって顕在化してきた初期トラブルの多くが解決してきたことより、2023

年度には長期的ビームタイム計画に基づいた加速器の運用が可能となってきた。2023年4月からは1か月に1回の割合でほぼ定期的に²¹¹At製造のビームタイムを実施してきたほか、グランドライデンを使用する核物理学の共同利用実験などにビームの供給を行ってきた。

2. アップグレードの概要

RCNP K140 AVFサイクロトロンは原子核物理学実験を主な目的として設計され、運用されてきたが、今回のアップグレードではビーム電流の増大を図るために、イオン源の引き出し電圧の高圧化、それに伴うインフレクタ、入射部の電極の構造の設計変更、ディー電極を87°として2台のディー電極を対向して設置することによる1周あたりのエネルギー利得の増大を図った[1]。イオン源の引き出し電圧(V)の高電圧化により、

- 引き出し電流の向上 $\propto V^{3/2}$
- エミッタンスの低下 $\propto V^{-1/2}$
- AVFサイクロトロンアクセプタンスとビームエミッタンスのマッチングの向上

が期待される。また1周あたりのエネルギー利得の向上により、

- 入射から引き出しまでのターン数の減少(によるビームの広がり低減)
 - Turn separationの増大による引き出し効率の向上
- が期待され、トータルとしてアップグレード前のビーム電流を大幅に超えることを見込んでいる。

3. ビームコミッショニング

2022年3月に加速器稼働のための変更申請が認可され、施設検査に向けたビームコミッショニングが可能となった。施設検査において漏洩線量の測定が必要とさ

[#] kandah@rcnp.osaka-u.ac.jp

れたのは N 実験室のビームパルサー起因の中性子、 γ 線で、改修工事によって大規模に遮蔽構造の強化を行っていた箇所であった。65 MeV 陽子ビーム 90 nA を N 実験室のビームパルサーで 1/9 に間引くという条件で測定を行うために、陽子ビームの加速と N 実験室までのビーム輸送、ビームパルサーのコミッションングが必要とされた。2022 年 3 月末までにイオン源から AVF サイクロトロン入射部までのビーム輸送に成功し、4 月 20 日には陽子ビームの引き出しを確認した。その後、入射効率、引き出し効率の改善とビーム電流の増強を進め、5 月 10 日に施設検査に合格し、放射線発生装置としての運用が可能となった。その後、65 MeV 陽子ビームのコミッションングを進めつつ、共同利用・共同研究に対するビーム供給を実施した[2, 3]。さらに $^4\text{He}^{2+}$ ビームのコミッションングも実施し、7 月には 28.5 MeV のビームを用いたアスタチン製造を実施し研究用に提供した。その後、10 月より 65 MeV 陽子をリングサイクロトロンに入射して、3 年半ぶりの稼働となるリングサイクロトロンの健全性を確認し、392 MeV 陽子ビームのコミッションングを実施した。11 月から 12 月には白色中性子コースに 392 MeV 陽子ビームを輸送し、半導体のソフトウェア試験を実施するなど、本格的な運用再開に向けた問題点の洗い出しと解決を実施した。

これらのコミッションングや初期トラブルに対する改善、修理などを進めた結果、2023 年度より長期的なビームタイム割り当てに基づいた比較的安定な運用が可能となってきた。ユーザーの求めるビームとして、AVF サイクロトロンによって加速した陽子 40 MeV、それをリングサイクロトロンに入射して加速することで得られる 230 MeV の陽子ビーム、AVF サイクロトロンによって加速した $^4\text{He}^{2+}$ 67 MeV をリングサイクロトロンに入射して加速することで得られる 400 MeV の $^4\text{He}^{2+}$ ビームは AVF サイクロトロンにて 100 MeV まで加速した $^4\text{He}^{2+}$ ビームなどが新しく実施したビームコミッションングの結果として得られ、原子核物理学の実験や白色中性子源の熱負荷試験等に使用された。

一連のビームタイムには高精度ビームを利用することを前提とした精密核物理学実験が含まれており、RCNP の核物理実験グループと協力して Grand Raiden [4] を用いたビームエネルギー測定とその結果をもとにしたビーム調整を実施して achromatic 輸送におけるビームのエネルギー分解能の向上のための調整を実施し、ユーザーへのビーム供給を行った。この調整においては、Grand Raiden を用いたエネルギー測定をワンクリックすることで、核物理実験グループが不在であっても簡便に測定を実施できるようにした。このことによって分解能測定とビーム調整に要するマンパワーと労力を低減することが可能となり、加速器内部の機器やビームライン機器の多数の調整パラメーターの設定条件に対するビーム分解能のデータセットを収集し、機械学習による最適化の基礎データとすることが可能となった。高分解能ビームを志向した加速器の調整においてはスリットによってビームを遮ることによって、エネルギー幅を狭く限定するが、その結果ビーム強度は低くなるのが一般的である。そこで、先述の基礎的なデータをもとに機械学習を用いた結果、エネルギー分解能を高めつつビーム強度も確

保するデータセットを見出すことが可能となった。AVF サイクロトロンで加速した陽子 65 MeV のビーム調整における機械学習前後のビームのエネルギー分解能とビーム電流の値を Table 1 に示す。なお、AVF サイクロトロンアップグレード前の 65 MeV 陽子ビームのエネルギー分解能の参考値としては、2015 年に測定された 23 keV (FWHM) という分解能の測定値があり、今回の測定値はそれに匹敵する値となっている。また、AVF サイクロトロンで加速した 67 MeV $^4\text{He}^{2+}$ をリングサイクロトロンで 400 MeV まで加速したビームに対してもエネルギー分解能の測定と調整を行い、140 – 210 keV (FWHM) という値を得た。AVF サイクロトロンアップグレード前の参考値としては 2018 年に測定された 175–270 keV (FWHM) という値があり、こちらも今回の測定では上回る結果を得ることができた。これらのことから、AVF サイクロトロンの調整の状態はアップグレード前と同程度から上回る分解能が得られる程度に進んできているといえる。

Table 1: Beam Resolution Tuning with/without a Machine Learning

	非機械学習	機械学習
分解能 (keV(FWHM))	13	19
電流 (nA)	1	24

また、ビーム強度を高めるための調整については、特に大電流ビームが必要とされ、放射線使用の許認可上平均 27 粒子 μA までのビームを使用できる 28.5 MeV の $^4\text{He}^{2+}$ ビームについて重点的に実施した。アスタチンの製造は、1 mm 厚のアルミ板上にビスマス 0.08 g、厚さの目標値としては 15–20 μm として蒸着して製作した標的 (Fig. 1) に $^4\text{He}^{2+}$ ビームを照射することで行われる。アルファ線核医学治療で使用される ^{211}At は半減期が 7.2 時間であることから、数時間を超える長時間の照射は大量製造に有効ではなく、大強度のビームが要求される。大阪大学医学部にて人を対象とした医師主導治験を実施するにあたり[5]、例として 1 GBq の ^{211}At の製造は、10 μA のビームの 3 時間の照射で達成される。イオン源からビームの入射、また AVF サイクロトロン内部の調整、AVF サイクロトロンからのビーム引き出し、実験室への輸送を注意深く調整することによって、最大で 8 μA を超えるビームを標的まで輸送することができた。ビスマスは融点が 271 $^{\circ}\text{C}$ と低いために、標的として使用する場合には十分な冷却と熱の分散が必須である。標的はビームを照射する面はヘリウムガスで、その裏面は水冷することで除熱を行った。また、水平から 15 $^{\circ}$ に傾斜させた標的に対して水平にビームを照射することで、短軸と長軸の比が 1:3.86 になるような楕円状の領域にビームを照射するだけでなく、wobbling 電磁石を用いて、楕円を描くようにビームを 2 Hz の周回周波数でスキニングを行って熱の分散を図った。このことによって標的の損傷を避けることができた (Fig. 2)。



Figure 1: Picture of the bismuth target before irradiation.

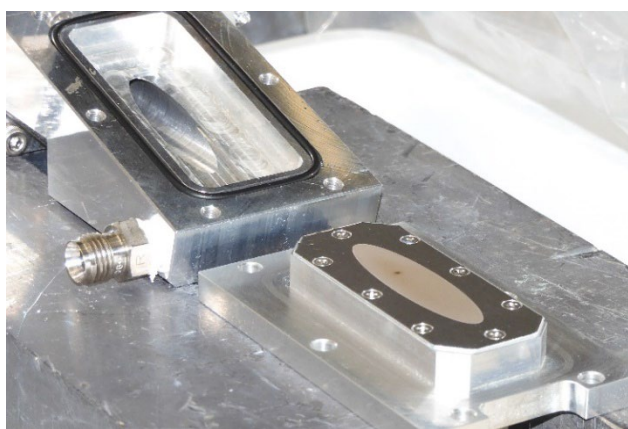


Figure 2: Picture of the bismuth target after irradiation.

4. まとめ

大阪大学核物理研究センターの AVF サイクロトロンは 1973 年に稼働を開始して以来 50 年近くにわたり、原子核物理学の研究、中性子・ミュオン等の二次粒子を用いた情報科学や物性研究、RI 製造などにビームを供給してきた。2019 年より加速器のシャットダウンを行って実施してきた施設改修と加速器のアップグレード作業は 2020 年度に完了し、2021 年度には取り外していた機材の取り付けと調整を行った後に 2022 年度より一貫してビームコミッションングとユーザーへのビーム供給を実施してきた。

2022 年度には陽子 65 MeV、陽子 392 MeV、 ${}^4\text{He}^{2+}$ 28.5 MeV の加速を実施し、2023 年度にはさらに陽子 230 MeV、 ${}^4\text{He}^{2+}$ 100 MeV、 ${}^4\text{He}^{2+}$ 400 MeV の加速を行った。また加速可能なイオンの種類、エネルギーを増すだけでなく、ビームの強度や分解能についても調整を実施した。ビーム電流としては 28.5 MeV の ${}^4\text{He}^{2+}$ ビームについては 8 μA という、AVF サイクロトロンのアップグレード前の実績を大きく上回るビーム電流を達成した。またビームの分解能としては、achromatic 輸送において、アップグレード前に比して同程度からいくらか上回る程度の分解能にビームの調整を行うことが可能となった。今後も引き続きイオン源の復旧とビームのコミッションングを進め、ユーザーの必要とするイオン種、エネルギーのビームを利用できるように努めてゆく。また、achromatic 輸送だけではなく、dispersion matching による超高分解

能のビーム調整[6] も実施し、ユーザーの研究の進展に寄与してゆく。

参考文献

- [1] M. Fukuda *et al.*, “RCNP AVF サイクロトロンにおけるビームコミッションング”, Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, FROA04.
- [2] ビードットメディカル社プレスリリース,
<https://kyodonewsprwire.jp/release/202205161197>
- [3] ビードットメディカル社プレスリリース,
<https://kyodonewsprwire.jp/release/202206152589>
- [4] 藤原守, “高分解能スペクトログラフ「Grand Raiden」,” IONICS 第 20 巻第 6 号, 1994, pp. 113 - 133.
- [5] 大阪大学プレスリリース,
<https://www.med.osaka-u.ac.jp/archives/28162>
- [6] T. Wakasa *et al.*, “High resolution beam line for the Grand Raiden spectrometer”, Nucl. Instrum. Meth. A, 482, 2002, pp. 79 - 93.