

## RCNP サイクロトロン施設の現状 STATUS OF THE RCNP CYCLOTRON FACILITY

神田浩樹<sup>\*, A)</sup>、福田光宏<sup>A)</sup>、畑中吉治<sup>A)</sup>、関亮一<sup>A)</sup>、森信俊平<sup>A)</sup>、齋藤高嶺<sup>A)</sup>、依田哲彦<sup>A)</sup>、友野大<sup>A)</sup>、  
田村仁志<sup>A)</sup>、永山啓一<sup>A)</sup>、安田裕介<sup>A)</sup>、Koay Hui Wen<sup>A)</sup>、森田泰之<sup>A)</sup>、武田佳次朗<sup>A)</sup>、原隆文<sup>A)</sup>、  
荘俊謙<sup>A)</sup>、Zhao Hang<sup>A)</sup>、橘高正樹<sup>A)</sup>、松井昇大朗<sup>A)</sup>

Hiroki Kanda<sup>\*, A)</sup>、Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>、Kichiji Hatanaka<sup>A)</sup>、Ryoichi Seki<sup>A)</sup>、Shunpei Morinobu<sup>A)</sup>、Takane Saito<sup>A)</sup>、  
Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>、Dai Tomono<sup>A)</sup>、Hitoshi Tamura<sup>A)</sup>、Keiichi Nagayama<sup>A)</sup>、Yusuke Yasuda<sup>A)</sup>、Shuhei Hara<sup>A)</sup>、  
Hui Wen Koay<sup>A)</sup>、Yasuyuki Morita<sup>A)</sup>、Keijiro Takeda<sup>A)</sup>、Takafumi Hara<sup>A)</sup>、Tsun Him Chong<sup>A)</sup>、Hang Zhao<sup>A)</sup>、  
Masaki Kittaka<sup>A)</sup>、Shotaro Matsui<sup>A)</sup>、

<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

### Abstract

The cyclotron facility at the Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, consisting of the AVF cyclotron built in 1973 and the ring cyclotron built in 1991, has provided the various ion beam for nuclear and elementary particle physics, nuclear chemistry, and nuclear medicine. We shut down the accelerator in February 2019 and carried out renovation works of the building and the facility and the upgrading works of the AVF cyclotron, since then. The main object of the upgrade of the AVF cyclotron is more than 10 times higher intensity of the primary beam. We have implemented maintenance and upgrades aimed at improving the performance of the main unit, attached equipment, and aged facilities. The upgrade works of the AVF cyclotron was completed by the end of FY2020. From FY2021 to FY2022, we commissioned various equipment of the AVF cyclotron and prepared the ion source and the beam course after extraction in preparation for the restart of the AVF cyclotron. In addition, preparations were made for the restart of the ring cyclotron and the beam course used in the experiment. After the modification of the facility was approved by the Nuclear Regulation Authority in May 2022, we continued the beam commissioning and started the user beam times with limited intensity and quality. Further improvement of the beam intensity and quality is expected by the improvement of AVF cyclotrons for higher injection and extraction efficiencies for the goal of the designed intensity upgrade.

### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センターでは 2019 年度から 2021 年度にかけて実施してきた、施設改修と AVF サイクロトロンアップグレード作業を終え、2022 年 5 月より AVF サイクロトロンビームコミッショニングを実施してきた。これらの改修やアップグレードの大きな目的は、近年需要を増してきている二次粒子ビームの大強度化や RI の大量製造に対応した AVF サイクロトロンの大電流化である。2022 年 3 月に放射線発生装置の承認使用に係る変更承認申請に対する認可が下りてからは、AVF サイクロトロンにイオン源よりビームを入射し、ビーム加速、取り出し、ビームコースへの輸送試験を実施してきた [1]。施設検査合格後の 5 月中旬からは引き続き加速器のコミッショニングを実施するとともに、10 月までの間に利用者の機材のコミッショニングのため、また教育用の実験のために陽子ビームおよびヘリウムビームを供給してきた。ビーム加速の効率はアップグレード以前と比べていまだ低いことから、現在はビーム強度を押さえた運転にとどめているが、今後の各種対策によって改善されることを期待している。また、2022 年 3 月に、経産省令和 3 年度産学連携推進事業費補助金（地域の中核大学の産学融合拠点の整備）に大阪大学が申請した「アルファ線核医学治療社会実装拠点」が採択された。これは、RCNP に  $^{211}\text{At}$  製造および化学精製に特化した施設を建築し、近隣の大学および民間企業との協力のもとに

$^{211}\text{At}$  を使用した放射性薬剤の開発および製造を推進するものである。現在、建屋の基礎的な設計を進めるとともに、建設予定地の土地の整備、埋蔵文化財調査など建築に向けた作業が進行している。

### 2. AVF サイクロトロンアップグレード

AVF サイクロトロン建設は 1973 年、リングサイクロトロン建設は 1991 年で、いずれも長期間の稼働による、コイルの水漏れや機器の老朽化によるトラブルを抱えていた。さらに、近年の RI 製造の需要の増加や、白色中性子、ミュオンビームや RI ビームといった二次ビーム利用の効率化のためのビーム強度の増大が期待されていた。そこで、イオン源から引き出されるビーム電流の増大、さらに AVF サイクロトロンへのイオンの入射効率および AVF サイクロトロンからの引き出し効率の向上を図り、利用できるビーム電流の増強を目指してアップグレードを実施した。さらに、このアップグレードによって、RCNP で実施される原子核物理学研究の特徴ともいえる精密核物理学分野の実験のために必要な高精度ビームにおいても強度を向上することが可能となる。RCNP では原子核・素粒子物理学実験で使用されるデータ収集システムの高度化を目指したデータ収集基盤室が発足しており、高精度で高い強度のビーム、高精度のスペクトロメーターや検出器、それに対応した高度なデータ収集システムを両輪として、原子核物理学研究をさらに強力に進めることを目標としている。

AVF サイクロトロンビーム強度の増大のため、アップグレード作業では主に以下の項目に関して改善を図

\* kandah@rcnp.osaka-u.ac.jp

り、多くの機器の更新や調整を行ってきた。

- 既存イオン源の加速電圧の 50 kV への高電圧化
- ビーム輸送光学の最適化と垂直入射部への新しい診断機器の導入
- AVF サイクロトロン中心領域の改良
- 2 ディー化
- RF 電源の更新と RF 系全体の改良
- 制御系の更新と EPICS の導入
- 真空系の更新

イオン源の高電圧化はビーム輸送光学の最適化と AVF サイクロトロン中心領域の改良と関連しており、イオン源から引き出されるビーム強度の増強、エミッタンスの減少によって、AVF サイクロトロンのアクセプタンスにマッチするビーム強度を向上する効果をもたらす。陽子およびヘリウム等の軽イオン用のイオン源 NEOMAFIOS は、高圧部を支える絶縁体の材質の変更と構造の見直しによって、設計値である 15 kV の引き出し電圧から 50 kV への高電圧化を成し遂げた。偏極陽子イオン源や超電導 ECR イオン源など、その他のイオン源についても、高電圧化に向けて電極や電線の構造の変更などによる耐圧性の向上を順次進めている。

加速系についてはこれまでの  $180^\circ$  のスパン角を持つディー電極 1 台で担ってきたが、これを廃止し、 $90^\circ$  のスパン角を持つディー電極 2 台に変更した [2]。これらに、イオンの周回周波数の 2 倍の周波数を持つ RF を印加することによって、1 周当たりのエネルギーゲインを 2 倍に増大する。また、RF 周波数を 2 倍とすることで  $\lambda/4$  共軸共振器の軸方向の長さは  $1/2$  となり、サイクロトロン本体室内に 2 台の共軸共振器とそのための RF 増幅器を配置することが可能となった (Fig. 1, 2)。

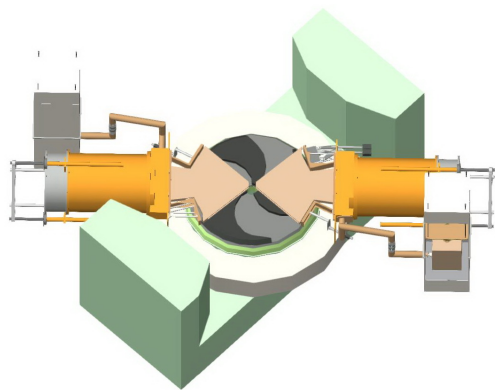


Figure 1: Schematics of the upgraded AVF cyclotron and its RF systems.

また、RF 系は周波数帯域が変わることから、LLRF、前段増幅器、主増幅器を新規に設計して製作した。これらを含めた制御系には EPICS を導入し [3]、最新の PC や OS では稼働させることの困難な旧来のシステムからの更新を進めている。ビームの加速に先立って、2021 年 11 月からは RF 系とメインコイルを 24 時間連続運転してコミッショニングを実施した。このことで、初期不良をあぶりだし、安定な運転を可能とする調整パラメーターを取得し、さらに、RF 系のエイジングによる安定化を目指した。この作業は住重加速器サービスのオペレー



Figure 2: Picture of the upgraded AVF cyclotron.

ター、RCNP の加速器部門のスタッフのみならず、核物理実験研究部門のスタッフも参加することでマンパワーを確保し、コミッショニングを急いだ。

### 3. AVF サイクロトロンの再稼働と利用

2021 年 7 月に、施設の改修とそれに伴う加速器の使用方法の変更のために、原子力規制委員会に承認使用に係る変更承認申請書を提出し審査を受けてきた。2022 年 3 月に認可が下りたことから、AVF サイクロトロンを放射線発生装置として稼働することが法的に可能となった。放射線発生装置使用の条件として、建物の遮蔽壁を強化したことによる放射線漏洩状況の変化について施設検査に合格する必要がある。2022 年 3 月から 2022 年 5 月の施設検査までは、検査に必要な陽子ビーム 65 MeV を十分な強度で加速するための試験を実施した。陽子ビームの AVF サイクロトロンへの入射を 3 月 22 日に開始してからひと月あまりの 4 月 21 日に、デフレクターとグラディエントコレクターを経由したビームの取り出しに成功した。2022 年 10 月までに加速し利用者へ供給した実績のあるビームの種類は 2 種類で、陽子 65 MeV と  ${}^4\text{He}^{2+}$  28.5 MeV である。これらのビームのパラメーターおよび利用したビームコースと利用時間を Table 1 にまとめる。5 月から 10 月の間に、陽子ビームと  ${}^4\text{He}^{2+}$  をそれぞれ 25 日間と 5 日間、ユーザーに対して供給を行ってきた。ES コースでは陽子線治療に用いるビームスキヤニング機器のコミッショニングと性能の実証を、陽子ビームを用いて行った。WS コースでは Grand Raiden スペクトロメーターのコミッショニングと、ビームのエネルギー測定を陽子ビームおよび  ${}^4\text{He}^{2+}$  ビームを用いて実施した。さらに、WS コースでは教育用ビームタイムとして陽子ビームを用いた実験を実施した。F コースでは  ${}^{211}\text{At}$  製造のための大強度ビーム向けのビーム照射装置のコミッショニングを行い、さらに実際にビスマス標的を用いて  ${}^{211}\text{At}$  製造と化学精製を実施した。

これまでのビーム強度はいずれも当初の目標値には到達しておらず、さらなる改善が求められる。この原因としては加速箱内部での RF のシールドが不足していることが認識されている。本来、アース板とダミーディー電極で囲われた領域は GND 電位となるべきであるが、この領域に RF が侵入しており、配置されているプローブ類へノイズとして影響し、加速中の粒子の軌道や位相

Table 1: Table of the Provided Beams for Users

	$^1\text{H}^+$	$^4\text{He}^{2+}$
Ion source	NEOMAFIOS	NEOMAFIOS
Extraction voltage (kV)	50	14.5
RF frequency (MHz)	33.690704	35.197
Dee voltage (kV)	37.5	35
Harmonics	2	6
Energy (MeV)	65	28.4
Current ( $\mu\text{A}$ )	1.1	0.4
Beam Course	ES-course, WS-course	WS-course, F-Course
Purpose	Commissioning, Education	Commissioning, $^{211}\text{At}$ production
Period of use (days)	25	5

のモニターが不完全な状態になっている。さらに、このような RF の漏洩によって十分な高さまでディー電圧が上昇せず、引き出し効率が向上しない原因の一つと考えている。現在、加速箱内部へのシールド用の電極板等の設置の準備を行っており、これらの問題を解決を図っている。

#### 4. アルファ線核医学治療社会実装拠点

2022 年 3 月に、経産省令和 3 年度産学連携推進事業費補助金（地域の中核大学の産学融合拠点の整備）に大阪大学が申請した「アルファ線核医学治療社会実装拠点」が採択された。この拠点の内容は以下のとおりである：

1.  $^{211}\text{At}$  製造用の加速器を設置するためのインフラおよびホットラボを有する施設の建築
2. 加速器、照射施設、ホットラボ用機器を産学融合として企業と協力して設置
3. アルファ線核医学治療に向けた薬剤の安全性、有効性を大阪大学および連携大学で実施

連携大学は、国立大学法人金沢大学、国立大学法人香川大学、学校法人近畿大学、学校法人関西医科大学、学校法人藤田学園であり、産学連携の協力機関として大阪府、住友重機械工業、アルファフュージョン株式会社が参画している。アルファ線核医学治療は放射線医療の最先端として注目されており、RCNP が中核機関として運営している短寿命 RI 供給プラットフォームにおいても  $^{211}\text{At}$  の需要がとびぬけて高く、薬剤開発、診断用の機器開発などが国内の多くの機関で精力的に行われている。この拠点が完成し、多くの  $^{211}\text{At}$  を供給することにより、さらなる研究の発展と治療への貢献が可能になるものと期待されている。現在、建屋の基礎的な設計を進めるとともに、建設予定地の土地の整備、埋蔵文化財調査など建築に向けた作業が進行している (Fig. 3)。

#### 5. まとめ

RCNP では AVF サイクロトロンアップグレード作業を終え、ビームのコミッショニングを行いつつユーザーへのビーム供給を再開している。今後さらなるビーム強度の増大とユーザーの利便性を図り、さらに魅力のある施設として共同利用に供するよう努力を行っている。



Figure 3: Picture of the land for construction of the new building.

#### 参考文献

- [1] M. H. Fukuda *et al.*, in these proceedings, FROA04.
- [2] Y. Yasuda *et al.*, in these proceedings, THP045.
- [3] T. Yorita *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THP041.