

RCNP AVF サイクロトロンにおけるビームコミッショニング BEAM COMMISSIONING OF THE RCNP AVF CYCLOTRON

福田光宏^{#, A)}, 依田哲彦^{A)}, 神田浩樹^{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^{A)}, 今城想平^{A)}, 村田球基^{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)} Mitsuhiko Fukuda^{#, A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Yuusuke Yasuda^{A)}, Masao Nakao^{B)}, Kichiji Hatanaka^{A)}, Takane Saito^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)}, Shunpei Morinobu^{A)}, Keiichi Nagayama^{A)}, Hidetomo Yoshida^{A)}, Shinji Ano^{A)}, Dai Tomono^{A)}, Hiroyuki Kamano^{A)}, Toshi Aoi^{A)}, Tatsushi Shima^{A)}, Eiji Ideguchi^{A)}, Shinsuke Ota^{A)}, Nobuyuki Kobayashi^{A)}, Tatsuya Furuno^{A)}, Souhei Imajyo^{A)}, Motoki Murata^{A)}, Yasutaka Yamamoto^{A)}, Tomokazu Suzuki^{A)}, Yukiyoshi Kon^{A)}, Yasuyuki Morita^{A)}, Keijiro Takeda^{A)}, Takafumi Hara^{A)}, Tsun Him Chong^{A)}, Hang Zhao^{A)}, Masaki Kittaka^{A)}, Shotaro Matsui^{A)}

^{A)} RCNP, Osaka University

^{B)} GHMC, Gunma University

Abstract

The upgrade program of the RCNP K140 AVF cyclotron was started in 2019 to provide not only an intense light ion beam for production of short-lived RIs, neutrons and muons but also a high-quality intense beam for precision experiments in nuclear physics. Most of equipment except for the cyclotron magnet was fully renewed. A new coaxial-type resonator with a movable short plate was designed to cover a frequency range from 16 to 36 MHz. Acceleration harmonic mode of $h=1, 2, 3$ and 6 is available. The acceleration voltage of ion sources was increased from 15 kV to 50 kV to enhance the proton beam intensity and to reduce the beam emittance to improve beam transmission from the LEBT system to the central region of the cyclotron. Beam commissioning was started in May 2022. A 65 MeV proton beam was supplied for medical applications soon after facility inspection. A 28 MeV $^4\text{He}^{2+}$ ion beam was provided to produce a short-lived RI of At-211 used for the targeted alpha-particle therapy. The soundness of the K400 ring cyclotron was confirmed by accelerating a proton beam up to 392 MeV. In this paper the details of the AVF cyclotron upgrade program and the status of beam commissioning are reported.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (RCNP) の AVF サイクロトロンは 1973 年に稼働を開始して以来[1]、50 年近く経過し、構成機器の老朽化による故障やトラブルが年々増加して定常的なビーム供給が危ぶまれるような状況になっていた。一方で、近年、短寿命 RI 供給プラットフォームでの供給件数の増加やアルファ線核医学治療研究の進展に伴う RI の大量製造、中性子・ミュオン等の二次粒子ビームの利用拡大、原子核物理実験における超高品質軽イオンビームや不安定核生成用重イオンビームの高強度化などのニーズも高まり、AVF サイクロトロンビームの強度増強と高品質化は喫緊の課題であった。そこで、2019 年度から共同利用・共同研究実験を休止して AVF サイクロトロン老朽化対策と高性能化を兼ねたアップグレードと加速器施設の改修工事に着手した[2-3]。2019 年 2 月に加速器を停止した後、2019 年度に建屋・設備の部分的な補修・増強工事[4]、2020 年度に AVF サイクロトロン解体・組立工事[5]、2021 年度に AVF サイクロトロン機器調整を行った後に、2022 年度初頭からビームコミッショニングを開始した。Figure 1 に RCNP 加速器施設の鳥瞰図を示す。



Figure 1: RCNP Accelerator facility.

2. アップグレードの基本仕様

ビーム強度を増強するためには、イオン源から高強度のビームを取り出し、AVF サイクロトロン中心領域へ効率良く入射させること、AVF サイクロトロン内部での加速

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

のエネルギー利得を増やしてターン数を減らし、取り出し前のターンセパレーションを可能な限り大きくしてデフレクターでのビーム損失を最小限に抑えること、デフレクターから加速箱出口までの取り出しビームの集束力を十分に確保して引出し効率を高めることが重要である。本アップグレードにおける主な仕様を Fig. 2 に示す。

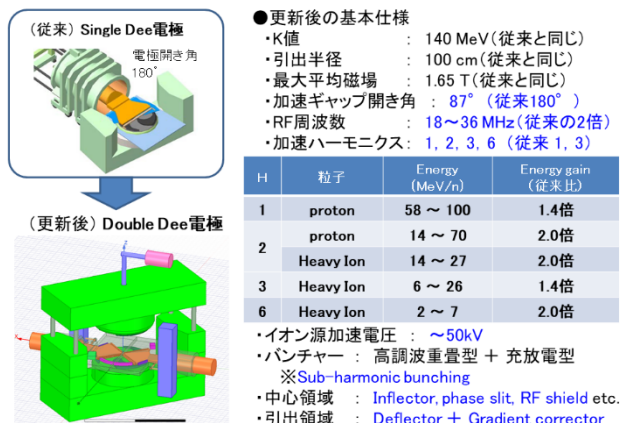


Figure 2: Specification of the upgraded AVF cyclotron.

イオン源の加速電圧は、AVF サイクロトロンを中心入射部に使用するインフレクター電極のビーム軌道設計に依存して決定される。従来の AVF サイクロトロンではイオン源の引出電圧を 10~15 kV に設定して運転していたが、Child-Langmuir law で示唆されるように、イオン源から取り出されるビーム電流密度は加速電圧の 3/2 乗に比例して高められることが期待されることからイオン源の加速電圧を最大 50 kV 程度まで高められるように全てのイオン源の耐電圧と絶縁性の向上を図った。また、加速エネルギーの増加に伴い、入射ビームのエミッタンスも小さくすることができ、AVF サイクロトロンを中心領域における位相空間内のアクセプタンスへのマッチングも改善することから、ビーム入射効率の向上も期待される[6-9]。

AVF サイクロトロン本体電磁石は、鉄心、ポール磁極、セクター磁極などはもとより、メインコイルも健全で問題なかったことから、本アップグレードにおいては本体電磁石を再利用することとした。これにより、本体電磁石の最大磁気剛性値は変わらないことから、AVF サイクロトロンは従来と同じ 140 MeV であり、加速粒子の最大エネルギーも従来と変わらない。但し、等時性磁場を形成するためのトリムコイルやビーム軌道中心の位置補正を行うバレーコイル(ハーモニックコイルとも呼ばれる)は真空領域であるアース板の背後に設置されており、これまで水冷を兼ねたホロウ・コンダクターからの漏水により真空度が悪化するトラブルが発生していたことから、トリムコイルとバレーコイルは全て更新することにした。

従来の共振器は、周波数範囲が 6~19 MHz でショート板駆動方式の同軸型共振器と開き角が 180 度のシングル・ディー電極から構成されていた。加速ハーモニクスは h=1 を基本としていたが、一周当たり 2 回しか加速されないため、ビーム取り出しまでの周回数が 500~600 ターンにも及び、デフレクター入口でのターンセパレー

ションを大きくするためにバレーコイルを上手く利用して precessional extraction により引出効率を高めるように工夫していた。そこで、本アップグレードでは、同軸型共振器を 2 台対向させて、ディー電極の開き角を 87 度にしたダブル・ディー電極により加速するように設計変更を行った。この場合、1 周あたりのエネルギー利得を最大にするためには、正弦波型加速電圧波形の最大振幅の位相で加速する必要があり、加速ハーモニクスは h=2 が最適となる。従って、加速周波数を従来の 2 倍に設定する必要があることから、共振器がカバーする RF 周波数帯域は 17~36 MHz になるように設計した。このダブル・ディー電極システムの採用により、1 周当たり 4 回加速することができ、エネルギー利得は従来の 2 倍になって取り出しまでのターン数を半分に減らし、引出前のターンセパレーションを大きくすることが可能になる。

加速周波数が従来の 2 倍になったことにより、ビームバンチの時間間隔も従来の 1/2 になってしまうことから、そのまま後段のリングサイクロロンへ入射させて従来と同じ加速周波数で加速してしまうとビームバンチの半分を失ってしまうことになる。そこで、AVF サイクロトロンに垂直入射ビームラインに設置した鋸歯状波型ビームバンチャーの周波数を従来と同じ周波数、すなわち AVF サイクロトロンに加速周波数の 1/2 に設定することによって natural な 2 バンチ分を 1 バンチに凝縮するサブハーモニック・バンチングが可能になり、リングサイクロロンへ入射するビームバンチの時間間隔は従来と同じに状態に保つことができる。但し、必要とされるバンチャー電圧は約 2 倍になることから、バンチャーのアンプ出力の増強も実施した。

AVF サイクロトロンからのビーム取り出しに当たっては、本体電磁石に対するビーム輸送ラインの位置が決まっていること、2 台の共振器のメンテナンスのために共振器を加速箱から引き抜いた際に必要とされる最小限のスペースを確保するためには共振器の位置がユニークに決まってしまうことなどから、静電デフレクターを始めとしたビーム引出機器の配置の自由度はほとんど無く、限定された条件下での設計を余儀なくされた。しかし、結果的に1台のデフレクターだけでビーム輸送ラインに整合させる引出ビーム軌道を描かせることが可能であることがわかった。これに加えて 2 台のグラディエントコレクターをディー電極下流と加速箱出口に配置することによって引出しビームの集束を制御できるようにした[8]。Figure 3 に AVF サイクロトロン機器配置図を示す。

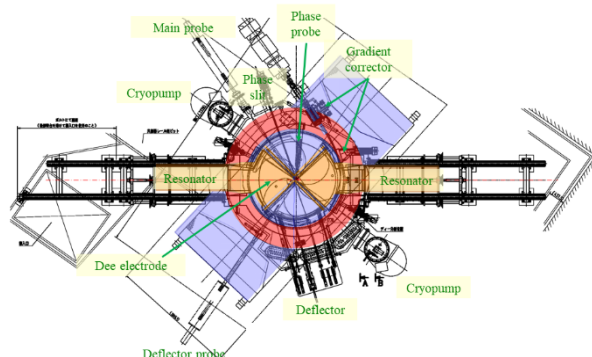


Figure 3: Layout of the upgraded AVF cyclotron.

3. AVF サイクロトロン の解体と組立

3.1 旧 AVF サイクロトロン の解体

2020 年 2 月に建屋・設備の改修工事が完了し、AVF サイクロトロン の解体作業が始められる状態になったが、COVID-19 の影響もあって実際に解体作業が始まったのは 2020 年 6 月であった。本体室天井のコンクリートブロックを撤去してクレーンを使える状態にした後に、順次、各機器の解体を進めていった[4-5]。Figure 4 に解体前の旧 AVF サイクロトロン の全景、Fig. 5 に本体電磁石とセクター磁極を示す。

共振器は、内筒、外筒、異径部、ディー電極などに分離した後に放射化物保管設備へ収納した。本体電磁石のポールチップと加速箱は直接溶接されて真空気密を保っていることから、一旦、溶接箇所を除去して分離した後に新しい加速箱を溶接し直して復旧した。セクター磁極とポールチップが加速箱に溶接された状態が Fig. 5 の右側の写真である。



Figure 4: Old AVF cyclotron before dismantling.

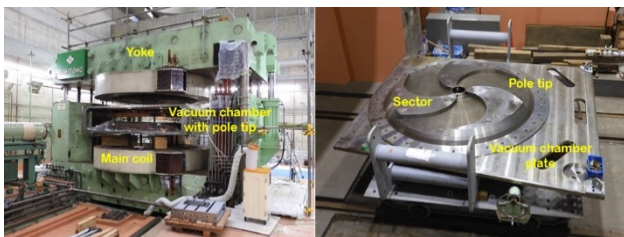


Figure 5: Old AVF cyclotron magnet.

3.2 新しい AVF サイクロトロン 機器の組立

新しい共振器の内筒と外筒のサイズを決めるのに当たり、高い周波数側でショート板をディー電極へ近づけていくとショート板と外筒が既存のメインコイルと干渉してしまうという問題に直面したが、内筒と外筒の直径をそれぞれ 700 mm と 1000 mm に最適化することによって必要とされる 17~36 MHz の共振周波数帯域をカバーできるようにした。このとき、ショート板のストロークは 1200 mm、RF 共振の同調を取るためのコンペンセータのストロークは 50 mm である。ディー電圧を励振するための RF パ

ワーは終段アンプ (EIMAC100,000E) から 50Ω の同軸管 (WX120) を用いて capacitive coupler に送られる。共振空洞内の表面電流密度とパワーロスは、それぞれ 40 A/cm 以下、 5 W/cm^2 以下になるように設計を行った。Figure 6 に新しい共振器とディー電極、終段アンプなどを示す。また、Fig. 7 にディー電極、デフレクター、グラディエントコレクターなどの加速箱内に配置した機器を示す。

AVF サイクロトロン のアップグレードに伴う新しい機器の組み立ては 2021 年 3 月に完了した[10]。その後、イオン源及び入射ビームラインの復旧、電磁石電源及び RF 電源等からの配線、冷却水配管、制御配線等の復旧・新設を行い、共振器の RF 静特性試験及びパワー試験などを順次行っていった。



Figure 6: New resonator, Dee electrode and final amplifier after upgrading.

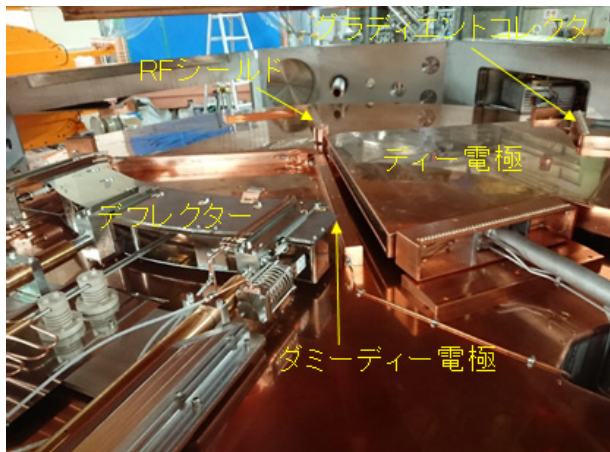


Figure 7: Equipment inside of the vacuum chamber.

4. ビームコミッショニング

2022 年 3 月に変更申請の許可が下り、イオン源から AVF サイクロトロンへの陽子ビームの入射調整を開始した。3 月末には AVF サイクロトロン の中心領域において入射ビームを確認し、2022 年 4 月には AVF サイクロトロンからの 65 MeV 陽子ビーム取り出しに成功した。翌 5 月

には施設検査に無事合格し、本格的なビームコミッショニングをスタートさせた。これまでに、65 MeV 陽子ビーム (33.691 MHz, $h=2$) と 28.4 MeV $^4\text{He}^{2+}$ ビーム (35.197 MHz, $h=6$) の加速を行い、ビームコミッショニングと並行して共同研究実験や実験装置のコミッショニングなどのために試験的なビーム供給を始めている。

RF パワー試験を開始後、周波数によっては RF 終段アンプの出力部にあるプレート・ピックアップ信号において基本波の 2 倍或いは 3 倍の高調波成分が基本波と同程度に観測されて、終段アンプ出力部に設置された真空可変コンデンサーで放電が生じたり、加速箱内での RF 漏洩成分がビーム診断機器に影響を及ぼしたりしてトラブルが頻発し、ディー電圧を安定に 50 kV まで上げることができていかなかった。前者については、真空可変コンデンサーに放電防止用コロナリングを取り付けると共に、周波数帯域に応じて同軸管の長さを変えることで高調波成分の影響を最小化する対策を講じたことにより、徐々に安定な RF 励振ができるようになった。また、後者についても加速箱内の RF シールドを強化することによって加速電圧を徐々に上げていく予定である。

ビームコミッショニングと並行してアルファ線核医学治療のための At-211 製造専用ビームラインのアップグレードも実施した。ビーム集束機能を強化するために doublet 四重極電磁石を増設すると共に、ビームスキヤニング電磁石も他のビームラインから移設してビスマス・ターゲットへの拡大照射も可能になった。At-211 の大量製造に向けてターゲットチェンバー自体も更新し、20 μA を超える $^4\text{He}^{2+}$ ビームの照射もできるようにした。2022 年 7 月末にはアップグレード後の初めての At-211 製造試験を実施し、問題なく At-211 が製造できることを確認した。

2022 年度は、陽子と $^4\text{He}^{2+}$ を主体としたビームコミッショニングを進めながら、試験的なビーム利用も並行して実施し、2023 年度からの共同利用・共同研究実験への本格的なビーム供給を目指している。

参考文献

- [1] M. Kondo *et al.*, “AVF CYCLOTRON”, RCNP Annual Report, 1976, pp. 1-75.
- [2] Y. Yasuda *et al.*, “RCNP AVF サイクロトロンアップグレード計画”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 104-106.
- [3] H. Kanda *et al.*, “RCNP サイクロトロン施設の現状”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1364-1366.
- [4] H. Kanda *et al.*, “RCNP AVF サイクロトロン施設アップグレードの現状”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 212-215.
- [5] H. Kanda *et al.*, “RCNP サイクロトロン施設の現状”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 944-945.
- [6] T. H. Chong *et al.*, “RCNP AVF サイクロトロン LEBT システムのアップグレード”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 453-455.
- [7] M. Nakao *et al.*, “RCNP AVF サイクロトロン中心領域の改良の検討”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of

Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 355-358.

- [8] M. Nakao *et al.*, “RCNP AVF サイクロトロン高強度化を目指した中心領域及び出射系の改良の検討”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 823-825.
- [9] M. Nakao *et al.*, “AVF サイクロトロン入射系の改良”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul.31-Aug.3, 2019, pp. 563-565.
- [10] T. Yorita *et al.*, “RCNP サイクロトロン施設の現状”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Aug. 9-12, 2021, pp. 981-982.