

RCNP AVF サイクロトロン施設アップグレードの現状 CURRENT STATUS OF THE UPGRADE OF AVF CYCLOTRON FACILITY AT RCNP

神田浩樹 *^{A)}、福田光宏 ^{A)}、畑中吉治 ^{A)}、森信俊平 ^{A)}、齋藤高嶺 ^{A)}、嶋達志 ^{A)}、依田哲彦 ^{A)}、鈴木智和 ^{A),B)}、
友野大 ^{A)}、中尾政夫 ^{A)}、阿野真治 ^{A)}、安田裕介 ^{A)}、永山啓一 ^{A)}、鎌倉恵太 ^{A)}、原周平 ^{A)}、
Koay Hui Wen^{A)}、森田泰之 ^{A)}、武田佳次朗 ^{A)}、原隆文 ^{A)}

Hiroki Kanda*^{A)}、Mitsuhiro Fukuda^{A)}、Kichiji Hatanaka^{A)}、Shunpei Morinobu^{A)}、Takane Saito^{A)}、
Tatsushi Shima^{A)}、Tetsuhiko Yorita^{A)}、Tomokazu Suzuki^{B)}、Dai Tomono^{A)}、Masao Nakao^{A)}、
Shinji Ano^{A)}、Yuusuke Yasuda^{A)}、Keiichi Nagayama^{A)}、Keita Kamakura^{A)}、Shuhei Hara^{A)}、
Hui Wen Koay^{A)}、Yasuyuki Morita^{A)}、Keijiro Takeda^{A)}、Takafumi Hara^{A)}

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

^{B)}Institute for Radiation Sciences, 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, provides the various ion beams for nuclear and elementary particle physics, nuclear chemistry, and nuclear medicine. We currently plan the upgrade of the AVF cyclotron and the facility in fiscal year 2018 and 2019. We aim at the upgrade of the beam intensity of the primary protons up to 10 μA , which is ten times higher than the present beam intensity. We plan the upgrade of the ion sources, the injection line, the Dee electrode, the RF system and the vacuum system. The designs of the new AVF cyclotron and the facility are intensively discussed and refined. Other upgrade plans according to the beam transport, efficient use of beam courses and experiment halls, and radiation control are currently discussed in collaboration between the accelerator group in RCNP and the user groups in working group. The update works are planned to be finished in the beginning of 2020. The utilization of the beam will be gradually started after the beam commissioning.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (RCNP) では、1973 年に完成した K140 AVF サイクロトロンと 1991 年に完成した K400 リングサイクロトロンが稼働しており、年間 5000 時間におよぶ運転時間にわたって多くの共同利用実験にビームを供給している。稼働中の 4 種類のイオン源から得られる様々なイオンを AVF サイクロトロンに入射して加速し、さらに高いエネルギーが必要な場合にリングサイクロトロンに入射して加速することで、幅広いエネルギー範囲の各種ビームを供給することが可能である。陽子やイオンなどの一次ビーム、重イオンビームを標的に照射することで得られる二次 RI ビーム、陽子をリチウム標的に照射することで得られる準単色中性子ビームを用いた原子核物理学の実験的研究のほか、陽子を炭素標的に照射して得られるミュオンビームを用いた物性物理学や元素分析法を応用した宇宙科学の研究、同じく陽子をタンゲステン標的に照射して得られる白色中性子ビームを用いた半導体ソフトエラーの研究などを実施している。さらに陽子やヘリウムイオンビームを用いて各種 RI の製造を行い、医学、生物学、核化学の研究への供給を行うなど、多くのユーザーにとって重要な研究拠点となっている。

近年の二次ビーム利用の伸びから、これまでより強度の高い二次ビームへの要求が高まっている。また、RI 供給能力の向上のため大強度の一次ビームが必要となっている。さらに、ビームの大強度化の結果、RCNP のビー

ムの特徴として挙げられる高分解能ビームを使用する場合においても、削りしろを多くとることができるためビームの質の向上が見込まれる。これらの声にこたえるため、私たち RCNP 加速器研究部門では一次ビームの大強度化の検討を行い、イオン源の高強度化と低エミッタンス化 (高輝度化)、AVF サイクロトロンの入射部のアクセプタンスの増大、AVF サイクロトロンの引き出し効率の向上による一次ビームの強度の向上を目指した大規模なアップグレードを行うこととした [1]。

イオン源の高輝度化として 2017 年度に「高輝量子ビーム供給システム」の整備を実施した。新しく高輝度イオン源 Duoplasmatron を導入し、また、既存のイオン源からの引き出し効率とエミッタンスの低減を目指して引き出し電圧の 20 kV から最大 60 kV への高電圧化の準備を行った。現在は、ビーム輸送系の最適化を実施している [2]。AVF サイクロトロンの改造としては、高電圧化した入射ビームに対応する入射部の改造、2 Dee 化による 1 周あたりの加速エネルギーの増大、加速箱の構造の変更ともなう引き出し部の改造を検討している [3]。また、老朽化した機器類の更新をこの機会に実施する予定である。さらに、これらの AVF サイクロトロン更新作業の効率化と今後のメンテナンスの効率化を図るために、AVF 本体室のクレーンの改造による高速化と揚程の拡大、ヨークリフターの更新を実施する。施設としての更新では、大強度化したビームに対応するための放射線遮蔽の強化、老朽化した遮蔽扉の改造と消防法に基づいた避難路の確保、RI 製造及び取り扱い能力の増大に対応した排水機能の強化工事を実施する。

AVF サイクロトロンおよび建物、施設の更新を今年度

* kanda@rcnp.osaka-u.ac.jp

末に控え、加速器、建物、RI 排水、電気設備等の設計が現在急ピッチで進められている。加速器の設計は RCNP の加速器研究部門が中心となって、RF 系、入射系、引き出し系についてコンピューターシミュレーション計算を元に進めている。施設の更新としては、大強度ビームに対応した遮蔽の増強や加速器のメンテナンス性の向上とともに、ユーザーの必要とするビームの供給および施設の実現することを目指し、ユーザーとの話し合いの下で作業を分担して立案、設計を進めている。RCNP 内部のユーザーのみならず京都大学、東北大学、宮崎大学など全国の大学の原子核物理学の研究室よりご協力を申し出ていただき、打ち合わせを重ねている。アップグレード工事は 2019 年 1 月から 2020 年 1 月までの 1 年間の実施を予定しており、この期間に加速器、施設のアップグレードに加えて老朽化した装置の集中的なメンテナンスを実施する。

改造後のビームコミッションングは 2020 年 2 月頃の開始を目指し、コミッションングが進み次第供給可能となったビームを徐々に実験に対して供給してゆく計画である。

2. 加速器の設計

加速器のアップグレードは、ビーム強度の現在の約 $1\mu\text{A}$ より $10\mu\text{A}$ へ増強することを目指し、老朽化したトリムコイル、バレーコイル、プローブ類、真空系の更新も含めて以下の項目に分けて設計を進めている。

- 入射部のインフレクター電極の構造を見直し、20 kV から 50 kV (可能ならば 60 kV まで) へ増大した入射電圧へ対応する。
- 180 度の開き角を持った 1 台の Dee 電極から 87 度の開き角の 2 台の Dee 電極へと改造し、1 周当たりの加速エネルギーをこれまでより最大で 2 倍とする。
- 上述の変更に伴い共振器を新たに製作する。
- 取り出し部のデフレクター電極、マグネティックチャンネル、グラディエントコレクターの構造と位置を最適化し、既設の取り出しビームラインへ高い効率でビームを取り出す。
- 取り出し部の変更に伴いプローブ類の位置と可動範囲を見直し、新規に製作する。
- これまで水漏れの発生していたトリムコイル・バレーコイルを更新する。
- 真空系の更新を行い、重イオンの加速時に問題となっていた低真空によるイオンの喪失を防止する。
- ヨークリフターを整備し、加速箱内部へのアクセスによるメンテナンス性の向上を図る。

RF 系の設計では既存の AVF サイクロトロンと同一の回転周波数が得られるようにし、またハーモクス 1 から 3 までを使い分けることで、これまで供給できていた粒子を同様に供給できるようにした。このことでリングサイクロトロンへの入射がこれまでと同様に保証される。この RF と粒子の挙動を元にした設計から、コンピューターによるシミュレーション計算を元にした磁場および電磁場とそれを実現するコイルや電極および共振器の構造の設計に発展させた。さらに機械的な構

造を加味した設計を行い、これらをシミュレーション計算にフィードバックし細部の設計を進めている。現在は最終版に近い設計をベースとして、Dee 電極から共振器に至る内部導体を流れる最大の電流密度を確認しつつ共振器の構造の調整を行っている。Figure 1 は共振器内のショート板を最短の位置に配置した状態での有限要素法計算ソフト ANSYS HFSS で計算した電流密度を表しており、この系における共振周波数が最高で 34.562 MHz となることと、電圧振幅を 60 kV とした場合にショート板表面における電流密度が 40 A/m となることが分かる。また、この計算によって求めた RF による加速電場と RF 周波数、同じく有限要素法によって求めた等時性磁場を粒子輸送コード OPAL [4] に入力し、インフレクタを仮定した入射位置から 60 kV で射出された粒子の挙動を追跡することで、陽子が設計上の AVF サイクロトロン中を加速を受けながら周回し、64.85 MeV まで加速されることが示されている (Fig. 2)。図のとおり入射位置、エネルギー共に最適化されていないために Well-Centered な軌道を描いてはいないが、最適化条件を探る努力が続けている。

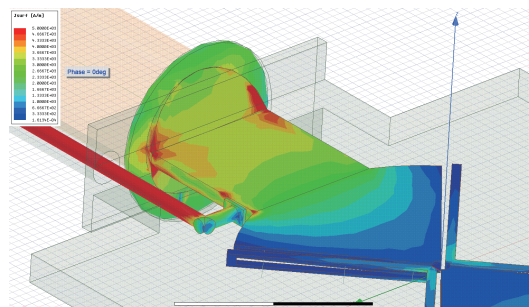


Figure 1: Result of the finite element calculation for the resonating frequency and the current density of the new RF system under design.

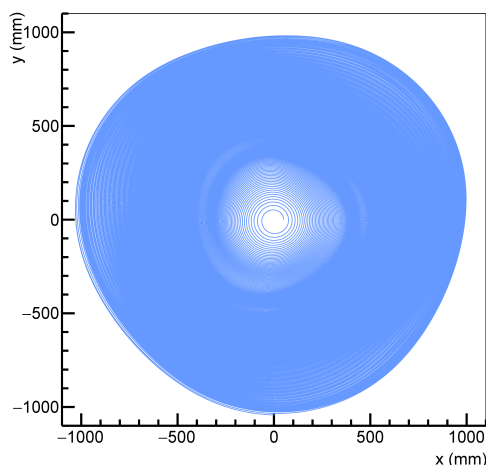


Figure 2: Result of the tracking of protons in the calculated magnetic field and RF with OPAL. The protons are accelerated up to 64.85 MeV.

3. 施設の更新

施設の機能強化を目的として、加速器更新に伴うビーム強度増強に対応した遮蔽の強化および二次冷却水の冷却能力の強化、RI排水路の安全対策としてRI排水機能強化を実施している。また、AVFサイクロトロン of 更新作業と今後のメンテナンスの効率化のためにAVF本体室のクレーンの移動族度の向上と揚程の増大を図るため、クレーンの更新作業を実施する。AVFサイクロトロンへのクレーンによるアクセスのためには上部に配置しているイオン源およびイオン源室の電源、および冷却水の配管の一時的な撤去が必要である。イオン源の復旧の際にはこれらの設備の更新も実施する。これらの更新作業のため、現在は大阪大学の施設部および設計業者と協力して作業を進めている。

4. ユーザーとの連携

現在、RCNPのユーザーと加速器研究部門のメンバーによる加速器アップグレード作業部会を立ち上げ、以下の3通りの項目にわたって加速器、施設の更新の方針や作業分担を協議して作業を進めている。RCNP内部のユーザーのみならず全国の多くの大学の原子核物理学の研究室よりご協力の申し出をいただき検討を重ねている。

ビーム輸送 加速器からの引き出しまでのビーム輸送計算は基本的に加速器グループが責任を持ち、それより下流の実験装置までのビーム輸送計算にはユーザーが自ら必要とするビーム輸送方法を確立するという方針で作業を進めている。ユーザーは主に、*dispersion matching* を利用した高精度ビームラインのさらなる高精度化を実施するための検討や、偏極陽子ビームの輸送時の減偏極の見積、高速読み出しの可能なエミッタンスモニターの開発について作業を分担している。オフィシャルなビーム輸送計算ツールとしてMad-X [5,6] を使用し、補助的にTransport [7] もしくはこれまで使用してきたORBIT [8] 等を用いて、作業部会への参加者全員で情報を共有して効率的な作業を図っている。

実験室活用 現在のRCNPの主要なビームコースと実験設備が一つの実験室に集中しているため、これらを分散して他の実験室に配置することで効率的なビームの使用が可能となる。この先10年を見据えてより効果的に研究を進める環境を整えられるよう、多くのユーザーの利害を調整しつつビームコースの移転、増設、高度化を図るための計画を立案している。

放射線管理 加速器のアップグレードの作業の効率化やアップグレード完了後のビーム利用に向けて、放射線装置の使用に係る変更申請が必要となる。この作業部会においては、ユーザーのビーム利用方法のリーサーを行い利用方法の拡大を可能とする放射線管理方法の検討も行い、変更申請に含めることを検討している。また、ユーザーには変更申請のための情報の提供や遮蔽計算への協力を呼びかけている。遮蔽計算にはこれまで使用してきたANISN [9] に代わりPHITS [10] を用いて、ビームの種類、ビーム

ダンプや遮蔽材の材質ごとに単位ビーム量当たりの透過する中性子、ガンマ線量を求めることとした。440 MeV陽子を炭素に照射した際に炭素の周囲を厚さ25 cmの鉄の球殻とコンクリートの球殻から成る遮蔽体を透過する中性子による実効線量率のコンクリートの厚さ依存性をANISNとPHITSで求めて比較した様子をFig. 3に示す。ANISNによる計算値は400 MeV陽子を照射したとして求めた値を、440 MeVと400 MeVの飛程の比1.17を用いてスケールしている。厚さが薄い領域では誤差範囲内で一致する値が得られているが、厚さを増した際のビルドアップの様子がPHITSでは再現されていることがわかる。また、遮蔽計算の結果は施設の更新の一環として進められている遮蔽強化に生かされている。

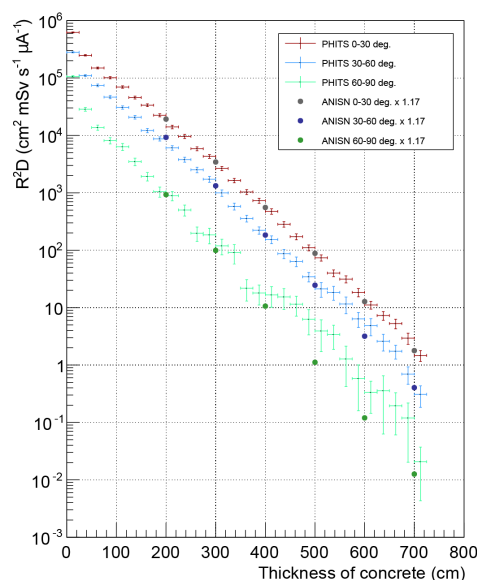


Figure 3: Comparison of the effective dose rate coefficient calculated with ANISN and PHITS. The beam is proton with kinetic energy of 440 MeV irradiated on the thick graphite target. The target is surrounded by a 25-cm-thick iron sphere and a concrete sphere.

5. まとめ

大阪大学核物理研究センター (RCNP) の加速器研究部門では、AVFサイクロトロンおよび建物、施設のアップグレードを今年度末に控え、加速器、建物、RI排水、電気設備等の設計を急ピッチで進めている。加速器の設計は我々が中心となってRF系、入射系、引き出し系についてコンピューターシミュレーション計算を元に進めている。施設のアップグレードとしては、大強度ビームに対応した遮蔽の増強や加速器のメンテナンス性の向上とともに、ユーザーの必要とするビームの供給および施設の環境を実現することを目指し、ユーザーとの話し合いの下で作業を分担して立案、設計を進めている。アッ

ブグレードのための加速器停止期間は 2019 年 1 月から 2020 年 1 月までの 1 年間を予定しており、2020 年 2 月からのビームコミッショニングを目指し、ビーム強度の増大を図り、ユーザーにとってさらに利用しやすい施設とするよう鋭意準備を進めている。

参考文献

- [1] Y. Yasuda *et al.*, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, WEOL06.
- [2] Y. Morita *et al.*, in these proceedings, WEP039.
- [3] M. Nakao *et al.*, in these proceedings, THP020.
- [4] A. Adelman *et al.*, Paul Scherrer Institut, PSI-PR-08-02, (2008-2018).
- [5] Hans Grote and F. Christoph Iselin, CERN/SL/90-13 (AP) (1990).
- [6] <http://mad.web.cern.ch/mad/>
- [7] http://aea.web.psi.ch/Urs_Rohrer/MyWeb/trans.htm
- [8] S. Morinobu, private communication.
- [9] W. W. Engle Jr., Union Carbide Corporation, Nuclear Division Report K-1693, Oak Ridge (1967).
- [10] T. Sato *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).