

## 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>、  
中尾政夫 <sup>A)</sup>、鎌倉恵太 <sup>A)</sup>、田村仁志 <sup>A)</sup>、永山啓一 <sup>A)</sup>、安田裕介 <sup>A)</sup>、原周平 <sup>A)</sup>、山野下莉那 <sup>A)</sup>、  
Koay Hui Wen<sup>A)</sup>、森田泰之 <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>, Masao Nakao<sup>A)</sup>, Keita Kamakura<sup>A)</sup>, Hitoshi Tamura<sup>A)</sup>, Keiichi Nagayama<sup>A)</sup>,  
Yusuke Yasuda<sup>A)</sup>, Shuhei Hara<sup>A)</sup>, Rina Yamanoshita<sup>A)</sup>, Hui Wen Koay<sup>A)</sup>, Yasuyuki Morita<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 currently plan the intensive maintenance and large scale upgrade in fiscal year 2018 and 2019 aiming at the update of old equipments for stable operation and the upgrade of the performance. We plan the upgrade of the ion sources, the injection line, the Dee electrode, the RF system and the vacuum system intending to the increase of the beam intensity and reduction of the emittance. The upgrade of the ion sources are underway as the first step to the large scale upgrade of the cyclotron. A novel pepper pot emittance monitor which contributes the upgrade and commissioning of the ion sources is under development. We study the elements of accelerators for nuclear therapy. A neutron source for the BNCT and a scanning method for the particle-beam radiation therapy, are intensively studied in collaboration with the Medical School, Osaka University.

### 1. 運転、保守

RCNP サイクロトロン施設は 2016 年には 2900 時間  
にわたる実験向けのビームタイムを確保し、順調に稼働  
している。実験のためのビーム調整およびビーム開発を  
含めると稼働時間は 4500 時間であり年間の 51%の期間  
を占めている。スケジュールされた保守時間と実験セッ  
トアップの期間は 2000 時間であるのに対し、故障等によ  
るスケジュール外の停止期間は 81 時間に過ぎない。2015  
年にはこのスケジュール外の停止期間が 240 時間に達して  
いたことに比較すると各段に改善した。2017 年 1 月 1 日  
より 7 月 4 日までの集計ではスケジュール外の停止が 87 時  
間と、すでに 2016 年の 1 年間の停止期間を超えている。こ  
の停止期間の約半分を占める 40 時間はリングサイクロ  
トロンの静電取り出しチャンネルの故障のために、現場に  
近づいて現状確認と修理を行うにも空間線量の低下を待  
つ必要があったことが原因である。このことを考慮すべ  
ば、2017 年は 2016 年と同程度の安定稼働が出来てい  
ると言える。Figure 1 に運転時間の集計を示す。目を引  
くのは  $\alpha$  ビームの使用時間の増大である。この時間の半  
分以上は核物理研究のための使用であるが、核医療研究  
のためのアスタチン ( $^{211}\text{At}$ ) 製造の伸びもあり、今  
後も  $\alpha$  ビームの利用は多い状態で推移するものと考  
えられる。また 2016 年度より短寿命 RI 供給プラ  
ットフォームが発足し、ほぼ定期的な実施される RI 製  
造のための運転時間も増大しつつある。2015 年は RI  
製造の時間が 207 時間、2016 年は 364 時間、2017 年  
7 月 4 日までに 158 時間であった。2017 年後半は定  
期的な  $^{211}\text{At}$  製造が計画されている。

2016 年度の主だったトラブルは AVF サイクロトロン

においてはディー電極の放電で、ディー電圧を 35 kV  
以上に上げるとクローバーが頻発するという問題があ  
った。さらにディーインサート西側に溶融箇所が発見  
されたことから、これまでの SUS 製のディーインサ  
ートより熱伝導率の高い銅製のディーインサートを  
用意して熱による溶融の抑制を図るとともに、ディー  
電極、アース板を研磨した。これらの改善の結果、  
ディー電圧 40 kV においても放電の頻度を減少さ  
せることが出来た。しかしながら、2017 年 5 月  
ごろより再び AVF クローバーが頻発するよ  
うになった。今後も電極の研磨等のメンテナ  
ンスを実施するとともに、次節に述べるよ  
うにディーおよび RF 系のアップグレード [1] で  
根本的な改善を検討している。また、放射線  
の影響による機器の故障も目立つようにな  
っており、これも集中メンテナンスにお  
いて遮蔽の増強を図るなど、対策を行う  
予定である。

### 2. アップグレードとオーバーホール

AVF サイクロトロンは 1973 年の建設より 44 年間、  
リングサイクロトロンは 1991 年の建設より 26 年間稼  
働しており加速器のみならず、実験装置や電気、空調、  
機械設備の老朽化による故障が目立つようになって  
きた。日々のメンテナンスや定期的なメンテナンス  
期間での対策には限度があり、ビームタイムのキャン  
セルやスケジュール変更に伴うコストが増大しつづ  
つある。また、近年の RI 製造の効率化のためのビ  
ーム強度の増大が期待されていることもあり、AVF  
サイクロトロンを集中的にオーバーホールし、ア  
ップグレードを行うことで安定で効率的なビーム  
供給を目指す。期間は 2018 年度後半からの約 1  
年間で予定している。AVF サイクロトロンのア  
ップグレードとしては「高輝度化」つま

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

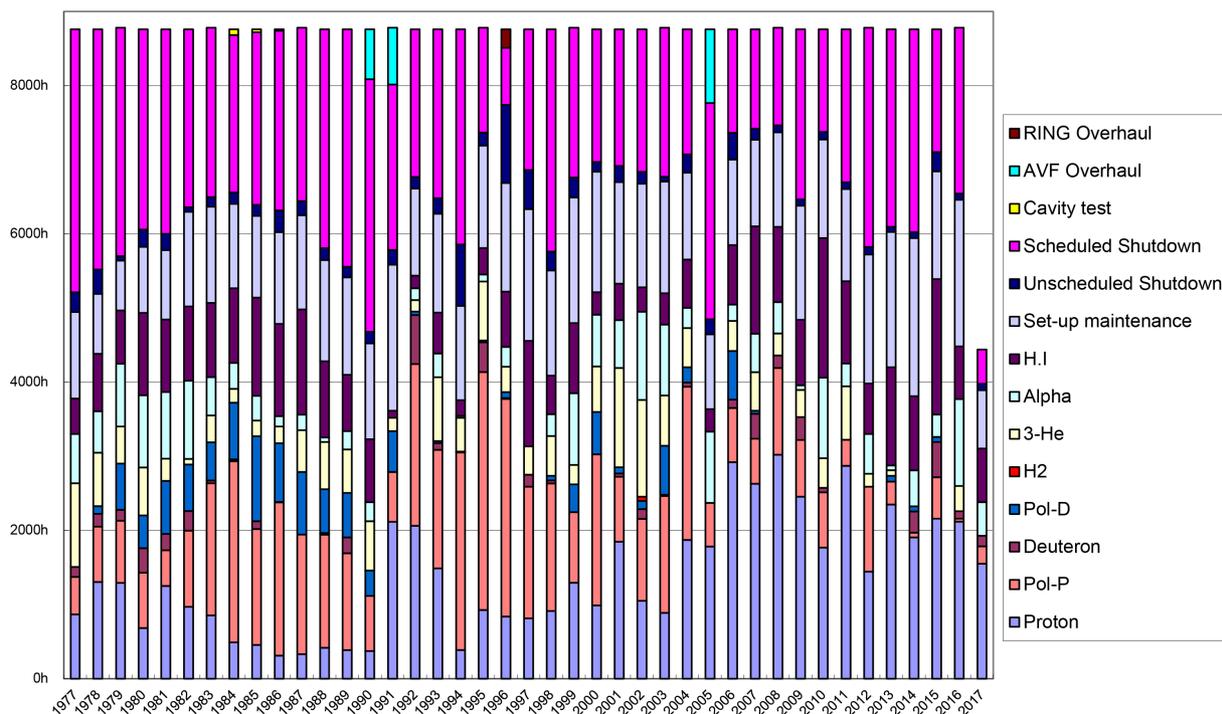


Figure 1: Operational statistics of the RCNP cyclotrons until the middle of 2017.

りビーム強度増強とエミッタンスの低減を目指し、以下の項目に関して改善を図る予定である [1]。

- 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
- 新バンチャーの導入と従来バンチャーとの連携運転によるビーム強度増強
- 高強度化に向けた内部領域の改良 [2]
- サイクロトロン電磁石の鉄芯の定温化と磁場再現性の向上
- RF 電源の更新と RF 系全体の改良
- 2 ディー化とそれに伴う共振器の更新

また施設の機能強化としては、施設の老朽化対策、メンテナンス性の向上およびビームの高強度化や医理核連携事業や産学連携事業にともなう RI 利用研究の促進を目指して、以下の項目に関して改善を行う予定である。

- AVF サイクロトロン本体室クレーンの更新、ヨークリフターの復活
- 放射線遮蔽の増強、2 次冷却設備の強化
- RI 排水設備の機能強化、RI 棟の改修
- リングサイクロトロン棟における液体窒素供給設備の設置、ガスコジェネレーションシステムの導入

2017 年度にはこのアップグレードに先駆けて、「高輝度量子ビーム供給システム」の整備としてイオン源および入射部の改良を行う。新規イオン源として、米国 NEC 社製 Duoplasmatron [3] を導入し、特に RI 製造に向けた  $\alpha$  ビームの強度増強を図る。このイオン源は引き出し電圧 30 kV において  $H^+$  10 mA、 $He^+$  2 mA の性能を持つが、これを 50 kV で使用することでさらなる

電流の増強を検討している。また、引き出し電圧 15 kV で  $H^+$  1 mA の性能をもつ既存の HIP-ECR イオン源 [4] を改良し、引き出し電圧 50 kV での使用によるビーム強度の増強を図る。またビーム輸送光学の再計算を行い電磁石を再配置することで、高強度のビームの低損失なサイクロトロンへの入射を可能とする。ビーム診断装置の開発として、既存の pepper pot 型エミッタンスモニター [5](Figure 2) の読み出しおよび解析方法の高速化を行い、より迅速なビーム診断による調整の効率化を図っている [6]。一連のアップグレードとオーバーホールによって、ビームの高強度化を実現し一次ビームを使用する実験や RI 製造のみならず、白色中性子やミュオンなどの二次ビームを使用する研究を強力に推進する。

現在は着実なアップグレードとオーバーホールに向けて、これらの各要素の設計を進め準備を行っている。

### 3. 医理核連携への取り組み

RCNP においては医理核連携事業の推進のため、医療用 RI の定期的な製造、ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) 用の新中性子源の開発 [7]、粒子線治療における精度向上を目指した新しいビーム照射方法の開発 [8] およびそのリアルタイムな線量モニター方法の開発 [9] を大阪大学大学院医学系研究科と共同で行っている。

#### 3.1 中性子源開発

RCNP の次世代 BNCT 研究開発部門と協力し、サイクロトロンによって供給される陽子ビームと核破砕反応を利用した中性子源の開発とそれに向けた専用ビームラインの整備、および低エネルギー静電加速器による重陽子ビームと  $D(d, n)$  反応を利用した中性子源の開

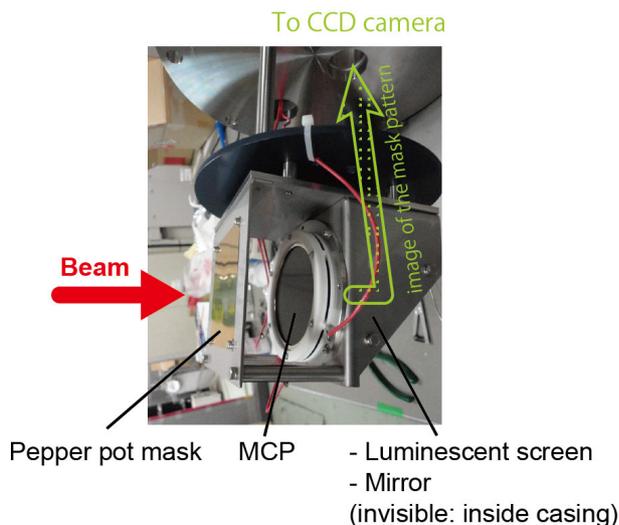


Figure 2: Photograph of the pepper pot emittance monitor. It consists of a pepper pot mask, a multichannel plate (MCP), a luminescent screen, a mirror and a CCD camera.

発を行っている。核破砕反応を利用した中性子源は、中心部に配置した重核標的に 50 MeV 陽子ビームを照射し核破砕反応によって得られる中性子を、標的に円筒状に取り巻く減速材を通して熱外中性子領域に分布を持つエネルギースペクトルへと整形する構造を持つ。これは S. Yonai らによる設計 [10] を踏襲しており、多門照射による多種類のエネルギースペクトルのビームの同時供給による効率的な治療を視野に入れた改良を行っている。現在 PHITS コード [11] を用いた基本設計をほぼ完了し、タンクステン標的とした核破砕反応によって生ずる中性子スペクトルと減速材によるスペクトルの測定を実施している。熱計算、機械強度計算等の工学的設計の後、プロトタイプ製作に取り掛かる計画である。性能テストを新しく整備中のビームコースで実施することが出来るよう準備を行っている。

### 3.2 粒子線治療のためのスキヤニング方法開発

粒子線治療における照射線量の均一性の向上と腫瘍部以外へのはみ出しの抑制を図る方法として有効と考えられているスパイラル型スキヤニング方式 [12] に、陽子ビームのスキヤニング速度、ビーム断面形状や強度を変調した照射方法を組み合わせ、より精度の高い照射方法の検討を行っている。コンピューターシミュレーションによる変調方法の検討と陽子ビームを用いた照射線量の一様性を測定する実験によって、実際の照射線量とコンピューターシミュレーションが良い一致を示すことが分かった。この実験では陽子ビームのスキヤニング速度の変調のみを実施したが、より均一な照射線量を実現できるビーム断面形状や強度の変調方法とその実装の検討を進めている。実験においては、照射線量によって黒化度の変化する Gafchromic film を使用して照射線量を測定し照射の精度の評価を行った。Gafchromic film は位置精度や線量に対する応答精度が高い半面、色素の定着に 1 日程度の時間を要することが知られている [13]。この問題を解決すべく、蛍光体

に陽子ビームを照射した映像を高速ビデオカメラで撮影して評価の迅速化を図るシステムの構築を行っている。また、このリアルタイムなビーム位置の映像を解析することにより、照射量の不均一性の原因を探ることも目指している。

## 4. まとめ

2016 年度、RCNP サイクロトロン施設は 2900 時間にわたる実験向けのビームタイムを確保し、順調に稼働している。故障によるダウンタイムは 2016 年では 2015 年に比して低く抑えられているが、今後の施設の老朽化に伴い故障頻度の増大が懸念される。RCNP ではこの問題を解決し、高強度ビームの安定供給を目指したアップグレード・オーバーホール計画を立案し、2018 年度後半からの実施に向けて準備を進めている。それに先駆けて 2017 年度は新規イオン源を導入し、入射系の改良を進めている。また、これと並行して医理核連携事業の推進のための要素開発も推進している。

## 参考文献

- [1] Y. Yasuda *et al.*, in these proceedings, WEOL06.
- [2] M. Nakao *et al.*, in these proceedings, TUP022.
- [3] <http://www.pelletron.com/plusion.htm>
- [4] Y. Yorita *et al.*, Proceedings of Cyclotrons2013, TUPPT016, 2013.
- [5] Y. Yorita *et al.*, Review of Scientific Instruments 87, 02B928, 2016.
- [6] Y. Morita *et al.*, in these proceedings, TUP079.
- [7] H. W. Koay *et al.*, in these proceedings, WEP124.
- [8] S. Hara *et al.*, in these proceedings, WEP135.
- [9] R. Yamanoshita *et al.*, in these proceedings, TUP080.
- [10] S. Yonai *et al.*, Medical Physics 30, 2021–2030, 2003.
- [11] T. Sato *et al.*, Journal of Nuclear Science and Technology 50:9, 913–923, 2013.
- [12] G. Meier *et al.*, Physics in Medicine & Biology 62, 3398–2416, 2017.
- [13] Tsang Cheung *et al.*, Physics in Medicine & Biology 50, N281–N285, 2005.