

# 理研 AVF サイクロトロン運転の状況報告

## STATUS REPORT OF THE OPERATION OF THE RIKEN AVF CYCLOTRON

仲村 武志<sup>#, A)</sup>, 石川 盛<sup>A)</sup>, 小林 清志<sup>A)</sup>, 小山 亮<sup>A)</sup>, 柴田 順翔<sup>A)</sup>, 月居 憲俊<sup>A)</sup>, 西田 稔<sup>A)</sup>, 西村 誠<sup>A)</sup>, 濱仲 誠<sup>A)</sup>, 福沢 聖児<sup>A)</sup>, 矢富 一慎<sup>A)</sup>, 須田 健嗣<sup>B)</sup>, 内山 暁仁<sup>B)</sup>, 大関 和貴<sup>B)</sup>, 奥野 広樹<sup>B)</sup>, 影山 正<sup>B)</sup>, 加瀬 昌之<sup>B)</sup>, 上垣外 修一<sup>B)</sup>, 熊谷 桂子<sup>B)</sup>, 込山 美咲<sup>B)</sup>, 坂本 成彦<sup>B)</sup>, 中川 孝秀<sup>B)</sup>, 長瀬 誠<sup>B)</sup>, 長友 傑<sup>B)</sup>, 福西 暢尚<sup>B)</sup>, 藤巻 正樹<sup>B)</sup>, 真家 武士<sup>B)</sup>, 山田 一成<sup>B)</sup>, 渡邊 環<sup>B)</sup>, 渡邊 裕<sup>B)</sup>, 山家 捷一<sup>C)</sup>, 大城 幸光<sup>C)</sup>, 小高 康熙<sup>C)</sup>

Takeshi Nakamura<sup>#, A)</sup>, Shigeru Ishikawa<sup>A)</sup>, Kiyoshi Kobayashi<sup>A)</sup>, Ryo Koyama<sup>A)</sup>, Junsho Shibata<sup>A)</sup>, Noritoshi Tsukiori<sup>A)</sup>, Minoru Nishida<sup>A)</sup>, Makoto Nishimura<sup>A)</sup>, Makoto Hamanaka<sup>A)</sup>, Seiji Fukuzawa<sup>A)</sup>, Kazuyoshi Yadomi<sup>A)</sup>, Kenji Suda<sup>B)</sup>, Akito Uchiyama<sup>B)</sup>, Kazutaka Ozeki<sup>B)</sup>, Hiroki Okuno<sup>B)</sup>, Tadashi Kageyama<sup>B)</sup>, Masayuki Kase<sup>B)</sup>, Osamu Kamigaito<sup>B)</sup>, Keiko Kumagai<sup>B)</sup>, Misaki Komiyama<sup>B)</sup>, Naruhiko Sakamoto<sup>B)</sup>, Takahide Nakagawa<sup>B)</sup>, Makoto Nagase<sup>B)</sup>, Takashi Nagatomo<sup>B)</sup>, Nobuhisa Fukunishi<sup>B)</sup>, Masaki Fujimaki<sup>B)</sup>, Takeshi Maie<sup>B)</sup>, Kazunari Yamada<sup>B)</sup>, Tamaki Watanabe<sup>B)</sup>, Yutaka Watanabe<sup>B)</sup>, Shoichi Yamaka<sup>C)</sup>, Yukimitsu Ohshiro<sup>C)</sup>, Yasuteru Kotaka<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> SHI Accelerator Service Ltd., <sup>B)</sup> Nishina Center, RIKEN, <sup>C)</sup> Center for Nuclear Study, the University of Tokyo

### Abstract

The operation of the RIKEN AVF cyclotron was started in 1989. Since then, it has been operated not only as an injector for the RIKEN ring cyclotron but also as an independent supplier of various ion beams. In this report, we describe both the operational status and the improvement work for increasing accelerating ability of the AVF cyclotron performed in this past year (August 2014-July 2015).

## 1. はじめに

理研 AVF サイクロトロン (AVF) は、K 値が 70 MeV であり、理研リングサイクロトロン (RRC) の入射器として 1989 年に導入されて以来、26 年間稼働し続けている。1991 年からは単独の加速器として低エネルギーの重イオンビームも供給している。以下、前者を「RRC 入射モード」後者を「AVF 単独モード」と呼ぶ。

RRC 入射モードでは、AVF で水素 ( $H_2^+$ ) から  $^{87}Rb$  までを  $E=3.78\sim 7$  MeV/u に加速し、RRC でさらに  $65\sim 135$  MeV/u まで加速し各実験コースへ供給している。2009 年から RI ビームファクトリー (RIBF<sup>[1][2])</sup> での軽イオン加速が開始されたことにより、AVF は RIBF への入射器としての役割も果たしている。AVF から取り出した偏極重陽子、 $^{14}N$ 、 $^{18}O$  等の粒子を、RRC、および超伝導リングサイクロトロン (SRC) で加速している。

AVF 単独モードでは、陽子 ( $A/Q=1$ ) から  $^{42}Ca$  ( $A/Q=3.5$ ) までの多様な核種のイオンをエネルギー  $E=3.41\sim 12.5$  MeV/u (陽子は 14MeV) まで加速し各実験コースへ供給している。

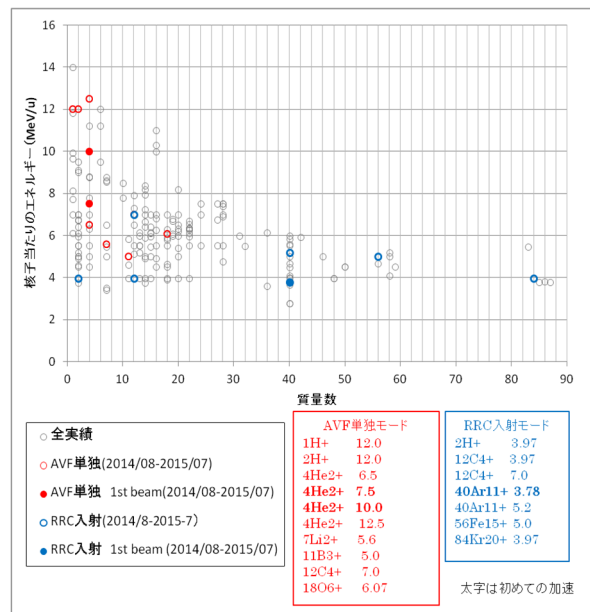
また、3 台の外部入射イオン源 (Hyper-ECR, SCECR, PIS) があるが、それぞれ金属イオン、ガス、偏極重陽子と、加速する粒子によって使い分けしている。マシンタイムのスケジュールを、開発や準備期間を考慮して組むことにより、ビーム切換えを短時

間で円滑に実施できるように運営されている。

ここでは 2014 年 8 月から 2015 年 7 月までの AVF 運転状況を報告する。

## 2. 加速実績

AVF で加速された核種の質量数と核子当たりのエネルギーとの関係を Figure 1 に示す。図中にはこれまでに加速実績がある全てのビームをプロットした。



<sup>#</sup> nta-ke@riken.jp

Figure 1: Energy-Mass map of AVF.

2014年8月から2015年7月までに加速したものは赤色と青色の○でプロットした。赤が AVF 単独モード、青が RRC 入射モードである。今回初めて加速した粒子は●でプロットし、粒子のリスト内に太字で表記した。

対象期間中に RRC 入射モードでは 7 種類のビームを加速した。それらは質量数が 2 から 84、核子当たりのエネルギーが 3.97 から 7 MeV/u の範囲に分布している。初めて加速したビームは 1 種類で  $^{40}\text{Ar}^{11+}$ 、3.78 MeV/u であった。

AVF 単独モードでは 10 種類のビームを加速し、それらは質量数が 1 から 18、核子当たりのエネルギーが 5.0 から 12.5 MeV/u の範囲に分布している。初めて加速したビームは 2 種類で  $^4\text{He}^{2+}$  の 7.5 MeV/u と 10.0 MeV/u であった。

### 3. 運転時間

AVF の運転時間を、調整時間、供給時間、および調整・供給中に発生した故障への対応時間に分け、供給時間に関しては実験コースごとに報告する。まず、それぞれの加速モードとビームコースについて説明する。

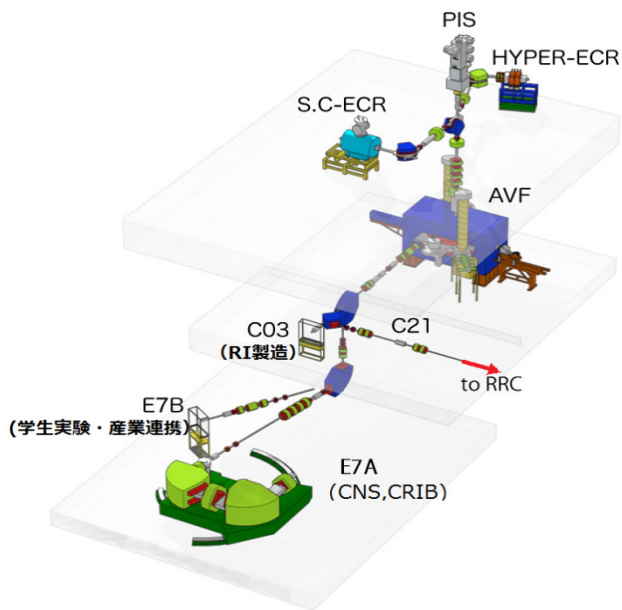


Figure 2: Overall view of AVF cyclotron with ion sources and BT lines.

RRC 入射モードの場合、AVF から取り出されたビームは C21 コースに曲げられ RRC へ送られる。RRC で加速し取り出されたビームは各実験室へ供給もしくは SRC で加速され RIBF の実験に用いられる。

AVF 単独モードの場合は取り出されたビームは Figure 2 で示す通り、次の 3 つのコースに送られる。1 つめはビーム取り出しから直進したところにある C03 コースで RI 製造の為に増設されたものである。供給するビームは以前では 14 MeV の陽子が主であったが、最近では 12 MeV/u の重陽子の供給が増

えてきている。

2 つめは AVF から取り出された後、垂直方向に曲げられ再度水平方向に曲げられる E7A コースである。このコースは東京大学原子核科学研究センター (CNS) が管理し、CRIB<sup>[3]</sup>を用いて原子核実験が行われている。

3 つめは E7A と同じ水平面にある E7B コースで、主に学生実験や産業連携に利用される。

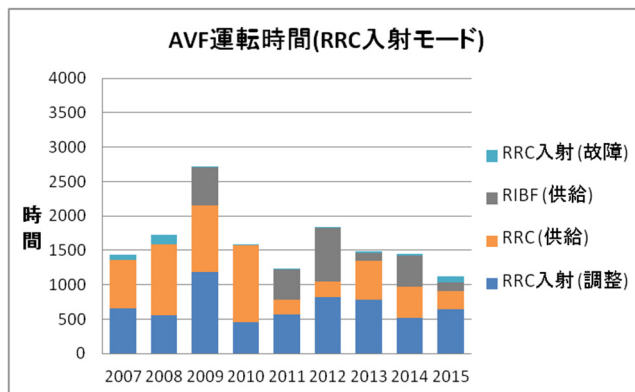


Figure 3: Beam service time of AVF-RRC/AVF-RRC-SRC.

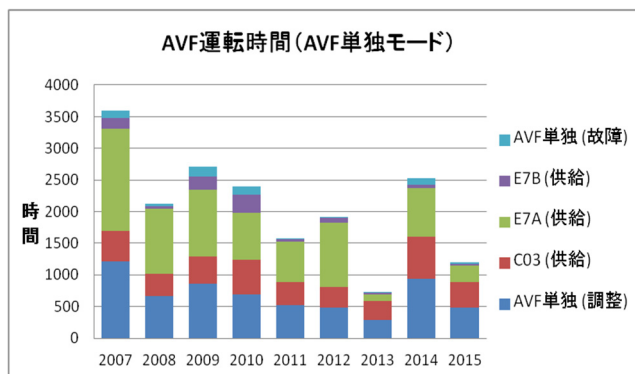


Figure 4: Beam service time of AVF stand-alone.

Figure 3 に RRC 入射モードの運転時間、Figure 4 に AVF 単独モードの運転時間を示す。図中の調整時間は、加速器の準備開始時刻からターゲット上のスポットの調整完了時刻までの時間を積算したものである。また「C03、E7A、E7B、RRC、RIBF」は各コースのユーザーにビームを供給した時間で、スポット調整完了時刻から実験終了時刻までの積算である。データ期間は 2006 年 8 月から 2015 年 7 月末までとし、1 年毎の統計を示した。すなわち、両図の横軸は、その前年の 8 月からその年の 7 月までの期間を表している<sup>[4]</sup>。

2015 年の RRC 入射モードでの AVF 調整時間 (青色) は 642 時間、故障対応時間 (水色) は 79 時間で、各実験コースおよび RIBF への供給時間は各々 270 時間 (橙色)、124 時間 (灰色) であった。合計の運転時間は 1036 時間で、前年の 1426 時間から 27% 減少した。これは AVF 以外の加速器 (RILAC<sup>[5][6]</sup>, RILAC2<sup>[7]</sup>) を入射器とした RRC 運転と RIBF への供給が増加した為である。

2015年におけるAVF単独モードでのAVF調整時間(青色)は478時間、故障対応時間(水色)は26時間で、C03、E7A、およびE7Bへの供給時間は各々408時間(赤色)、261時間(緑色)、22時間(紫色)であった。3つのコースの中ではC03が最も利用時間が多かった。合計の運転時間は1169時間で、前年の2423時間と比べ52%減少した。尚、故障により中止または延期となったユーザーサービスはなかった。

#### 4. 故障・不具合

故障・不具合は、調整あるいは供給中のいずれかに起こった事を対象とした。故障・不具合の割合はRRC入射モードで7.6%、AVF単独モードで2.1%、両者を合計した場合の割合は4.7%であった。

2014年9月17日のAVF加速調整中にビーム取り出し軌道を変える装置の1つであるマグネティックチャンネルのホロコンにピンホールが開き冷却水が漏れるトラブルがあった。該当箇所が大气側であったのでパテで固めて穴を塞ぐ処置を施し、17時間後に調整を再開した。Figure 5にマグネティックチャンネル本体と、ピンホールが開いたホロコンの処置前後の写真を示す。

また2015年7月24日のAVF立ち上げ作業中にマグネティックチャンネルに電流が流れなくなった。調査を行ったところ、ホロコンとブスバーを電気的に接続する金具のネジが溶け接続部がはずれていたため予備の接続金具と交換した。

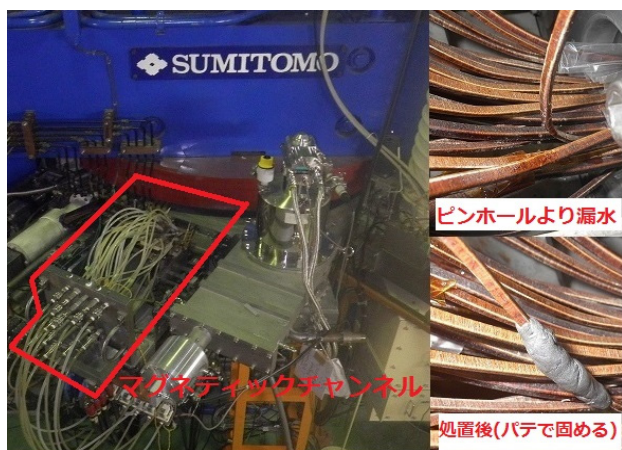


Figure 5: A leak of cooling water from the magnetic channel.

この様に、マグネティックチャンネルの老朽化が進んでおり、トラブルの頻度が上昇していることから、マグネティックチャンネルの予備機を作製した。新規作製したマグネティックチャンネルを既存のものとの交換する作業を2015年7月27日から開始している。

#### 5. 改良

イオン源からAVF単独運転時の実験コース(C03, E7A, E7B)までのビームトランスポートラインに設置してあるビームプロファイルモニター(PF)12台、ビームアッテネーター(ATT)11台の駆動制御を従

来のCIM/DIM制御からN-DIM<sup>[8]</sup>制御に更新した。DIMとはDevice Interface Moduleの略であり、約30年前に理研が独自に開発したCAMACモジュールであるCommunication Interface Module(CIM)と光ケーブルで接続することにより各デバイスを制御するコントローラーである。

また今回更新したN-DIMとはNetwork Device Interface Moduleの略であり、同じく理研が独自に開発した、イーサネットに対応したモジュールである。

N-DIMは、従来のDIMと異なり、直接ネットワークに接続することによって主にビーム診断機器などを制御できる。CIM/DIM使用時はモジュールと光ケーブルの老朽化が問題になり、故障時の対応にも時間がかかっていたが、N-DIMへ更新したことにより、より安定したビーム供給が実現された。Figure 6にさまざまなタイプのN-DIMを示す。1Uサイズの黄色、あるいは青色のユニットがプロファイルモニター駆動用、3Uの黄色のユニットはスリット駆動用である(色の違いは製作時期の違いによるもの)。

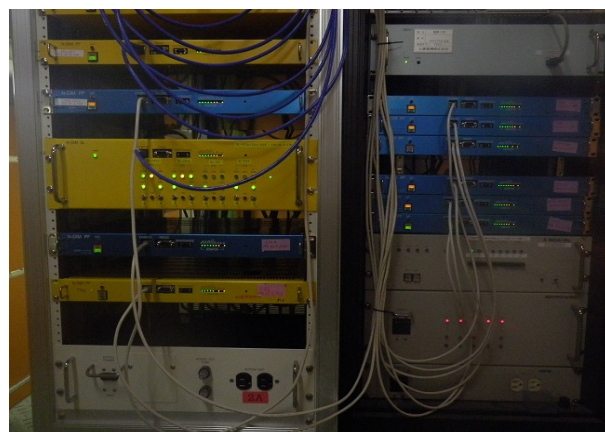


Figure 6: Network Device Interface Module (N-DIM).

#### 6. まとめ

2014年8月から2015年7月におけるAVFサイクロトロン運転状況はおおむね順調であり、総運転時間は2205時間であった。単独利用、RRCへの入射、更にはRIBFへと精力的にビームを供給した。

#### 参考文献

- [1] Y. Yano, The RIKEN RI beam factory project: A status report, Nucl. Instrum. and Methods B 261(2007) 1009-1013.
- [2] M. Nishida et al., Status report of the operation of the RIBF ring cyclotrons, in this proceedings.
- [3] Y. Yanagisawa et al., Nucl. Instrum. and Methods A 539 (2005) 74-83.
- [4] Y. Kotaka et al., Status report of the operation of the RIKEN AVF cyclotron, Proceedings of the 11th PASJ Meeting, FSP015 (2014).
- [5] M. Odera et al., Variable frequency heavy-ion linac, RILAC: I. Design, construction and operation of its accelerating structure, Nucl. Instrum. and Methods 227 (1984) 187-195.
- [6] E. Ikezawa et al., Present Status of RILAC, in this proceedings.

- [7] K. Yamada et al., Beam commissioning and operation of new linac injector for RIKEN RI beam factory, IPAC12, New Orleans, May 2012, TUOBA02, pp. 1071-1073.
- [8] M. Komiyama et al., Control system for RIKEN RI-BEAM FACTORY. Proceedings of the 4th PASJ Meeting, WP72 (2007).