

OPERATION REPORT ON RIKEN AVF CYCLOTRON

Hiroshi Imao ^{#,A)}, Akira Goto ^{D)}, Eiji Ikezawa ^{A)}, Shigeru Ishikawa ^{B)}, Yukimitsu Ohshiro ^{C)}, Jun-ichi Ohnishi ^{A)}, Hiroki Okuno ^{A)}, Tadashi Kageyama ^{A)}, Masayuki Kase ^{A)}, Osamu Kamigaito ^{A)}, Masanori Kidera ^{A)}, Hironori Kuboki ^{A)}, Keiko Kumagai ^{A)}, Yasuteru Kotaka ^{B)}, Kiyoshi Kobayashi ^{B)}, Misaki Komiyama ^{A)}, Ryo Koyama ^{B)}, Naruhiko Sakamoto ^{A)}, Junsho Shibata ^{B)}, Kenji Suda ^{A)}, Noritoshi Tsukiori ^{B)}, Takahide Nakagawa ^{A)}, Makoto Nagase ^{A)}, Takeshi Nakamura ^{B)}, Minoru Nishida ^{B)}, Makoto Nishimura ^{B)}, Hiroo Hasebe ^{A)}, Makoto Hamanaka ^{B)}, Seiji Fukuzawa ^{B)}, Yoshihide Higurashi ^{A)}, Nobuhisa Fukunishi ^{A)}, Masaki Fujimaki ^{A)}, Takeshi Maie ^{A)}, Kazuyoshi Yado ^{B)}, Shoichi Yamaka ^{C)}, Kazunari Yamada ^{A)}, Shigeru Yokouchi ^{A)}, Tamaki Watanabe ^{A)}, Yutaka Watanabe ^{A)}

^{A)} RIKEN Nishina Center, ^{B)} SHI Accelerator Service Ltd., ^{C)} CNS, the University of Tokyo

^{D)} National Institute of Radiological Sciences

2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198

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 2010-July 2011).

理研 AVF サイクロトロン の 運 転 状 況

1. はじめに

理研 AVF サイクロトロン (K 値:70) は、1988 年に理研リングサイクロトロン (RRC) の入射器として完成し、毎年 3000 時間を超える運転を行っている。この AVF 及び周辺実験設備の全体図を図 1 に示す。AVF は RRC の入射器としてだけではなく、単独で、低エネルギーで比較的質量が軽いイオンのビームの供給にも使用されてきた。それぞれ「AVF 単独モード」、「AVF-RRC モード」と呼ぶ。

AVF 単独モードでは陽子 (A/Q=1) から ⁸⁷Rb (A/Q=4.35)まで、多様な核種の低エネルギービーム (3.8~12 MeV/u ; 陽子は 14 MeV)を生成し、実験装置 CNS Radio Isotope Beam separator (CRIB) での核物理実験、核化学実験、そして RI 製造等へビーム供給している。2006 年末に RI ビームファクトリー (RIBF, [1]) が稼動してからは、その入射器として RILAC (可変周波数型の重イオンリニアック, [2]) が利用されることにより AVF 単独運転の需要が増加している。RIBF 用入射器としては、本年度よりウラン等の超重イオン用に RILAC2 (固定周波数型, [3]) と呼ばれる入射器も新たに導入されている。こちらは AVF サイクロトロンと同じ部屋に設置され、AVF との並列運転は行わない仕様になっている。

一方、AVF-RRC モードでは AVF で 3.8~7 MeV/u (陽子は 10 MeV) に加速し、RRC でさらに 65~135 MeV/u (陽子は 210 MeV) に加速する。2009 年に入ってから RIBF での軽イオン加速が開始され、

AVF は RIBF 加速器群の入射器として RIBF の初段加速器としての役割も果たしている。近年、AVF から偏極重陽子と N ビームを RRC へ供給し、最終段加速器である超伝導リングサイクロトロン (SRC) で 250MeV/u まで加速する事に成功している。

現在、AVF サイクロトロンの高度化計画が進行中であり、K 値を上げる作業、フラットトップ共振器の設置、ビーム入射と取り出しの効率を上げる改造を行っている。また、外部入射イオン源は 3 台 (Hyper ECRIS、SC-ECRIS、PIS) 整備しており、日常の運転とビーム開発を両立しながらビーム供給している。

本論文では 2010 年 8 月から 2011 年 7 月までの AVF 運転状況を報告する。

2. 運転状況

加速器の運転時間の内訳を図 2 に示す。図 2 の「調整」は加速器の初期化(磁石のサイクリング)の開始時刻からターゲット上のスポット調整の終了時刻までの時間とした。また「C03、E7A、E7B、RIBF、RRC」は、実験にビームを供給した時間 (スポット調整終了時刻から実験終了時刻) とした。故障によってビーム供給時間に支障がある場合は、調整時間を短縮または、予定時間を延長して供給時間を補償している。

「C03、E7A、E7B」は AVF 単独の場合の実験コースである (図 1 参照)。C03 コースは AVF 取出し後の直線部分のビームライン上にあり、RI 製

造専用コースで、供給されるビームは主に 14MeV 陽子である。ここで製造した RI は日本アイソトープ協会と共同で国内の研究機関に有償頒布されている。E7A コースは東大原子核科学研究センター (CNS) の専用コースで、東大の学生実験を含む原子核実験を行う。AVF 単独実験ではこのコースの利用時間が最も長い。E7B コースは非原子核実験と一部の RI 製造を行う。「RRC」は AVF-RRC のうち RRC から各実験コースにビームを供給した場合である。「RIBF」は RIBF の軽イオン加速実験で、AVF-RRC のうち、RRC で加速したビームをさらに SRC で加速した場合である。

今回の期間では AVF 単独が 1577 時間(前年: 2399 時間)、AVF-RRC が 1239 時間(前年: 1588 時間)であった。このうち故障による停止時間はそれぞれ 0.3 (5.3%)、1.2% (前年:0.8%) であった。運転時間が前年より減少した原因の一つとしては 3/11 の震災後、加速器の健全性確認作業に時間を要した事が挙げられる。その他、5 月に発生したアクセスの悪い AVF 真空箱下面からのリーク、AVF のディー電極の冷却配管の水漏れなど比較的大きなトラブルに見舞われた事も大きな原因である。真空リークについては、真空箱を吊り上げ、真空箱下側の大 0 リングを交換し、7 月に復旧を確認した。水漏れについては冷却配管にピンホールがあいており、ディー電極の新規作成を余儀なくされた。8 月に新しいディー電極の組み入れを予定している。

3. 加速実績

AVF で加速された核種とエネルギーの実績を図

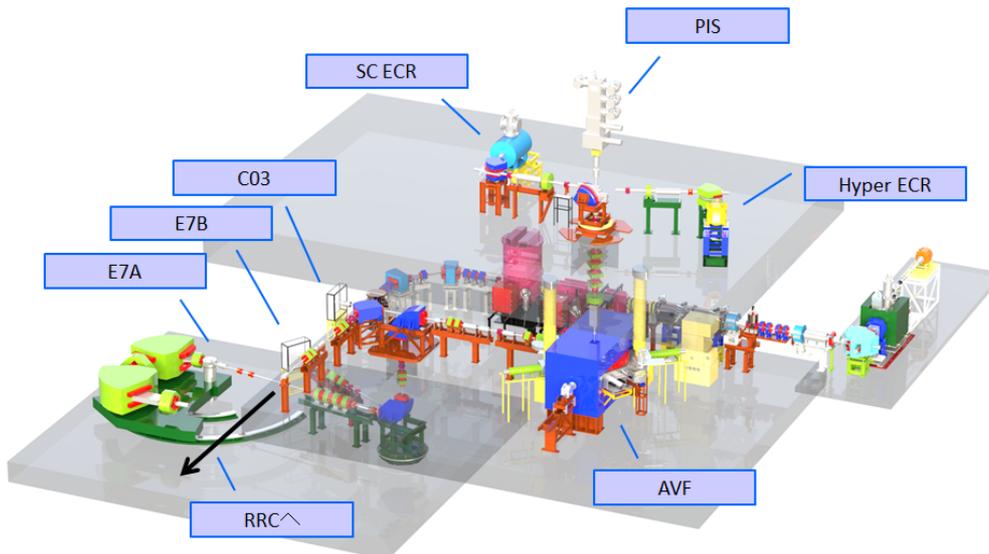


図 1 : AVF サイクロトロンと周辺実験設備

AVF サイクロトロン施設では HyperECRIS、18GHz SC-ECRIS、偏極イオン源(PIS)の三台の外部入射イオン源を有している。イオン源からのイオンビームは AVF サイクロトロンで加速後、C03 (RI 製造専用コース)、E7A (東大原子核科学研究センター専用コース)、E7B (非原子核実験と一部 RI 製造用のコース) といった実験コースへと供給される。

3に示す。2010 年 7 月以前に加速実績のあるものを○で示し、それ以降に初めて加速したものを●で示した。さらに対象期間の AVF 単独を赤、AVF-RRC を青とし、それ以外の実績を黒と色分けした。今回の対象期間においては AVF 単独で 11 種類のビームを加速し、AVF-RRC 運転の場合は、9 種類のビームを加速した。

AVF 単独運転では特に ${}^6\text{Li}^{3+}$ の加速調整(11.2 MeV/u)が困難であった。イオン源(Hyper ECRIS)後のビームにおいて $A/q=2$ の ${}^6\text{Li}^{3+}$ の分離は困難であるため調整は手探りとなる。まず分離可能な ${}^6\text{Li}^{2+}$ によって、Li イオンが出ている事を確認し、イオン源の初期調整を行った。その後、 ${}^6\text{Li}^{3+}$ を含む $A/q=2$ のビームを AVF で加速し、取り出し後の ${}^6\text{Li}^{3+}$ のビーム強度をモニターしながらイオン源の調整を行った。イオン源プラズマの色が黄緑色である時に ${}^6\text{Li}^{3+}$ が回ってくる事がわかったため (${}^6\text{Li}^{2+}$ リッチな場合は紅色である事が確認されている)、それをキープするようにイオン源を維持した。 ${}^6\text{Li}^{3+}$ ビームは最大 1.7 eμA までの強度で AVF から取り出され、実験に使用された。

また AVF-RRC モードでは ${}^{87}\text{Rb}^{20+}$ が初加速ビームであった。 ${}^6\text{Li}^{3+}$ と同様にイオン源後の A/q での分離は困難であるため、イオン源の初期調整には分離可能な ${}^{85}\text{Rb}^{20+}$ を用いた。その後 ${}^{87}\text{Rb}^{20+}$ を含む $A/q=4.35$ のビームを AVF で加速し、AVF 取り出し後、炭素膜による荷電変換を行い、分析用電磁石で ${}^{87}\text{Rb}^{31+}$ への変換を同定した。これは AVF から ${}^{87}\text{Rb}^{20+}$ が取り出されている事を示しており、AVF 取り出し位置での ${}^{87}\text{Rb}^{20+}$ ビーム強度は 80 enA であった。

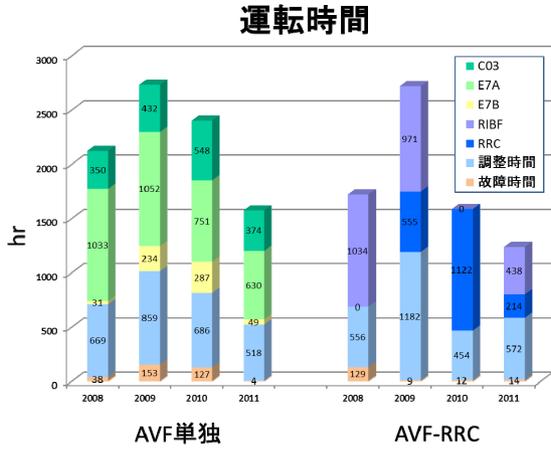


図2: 2008.8-2011.7の運転時間の内訳

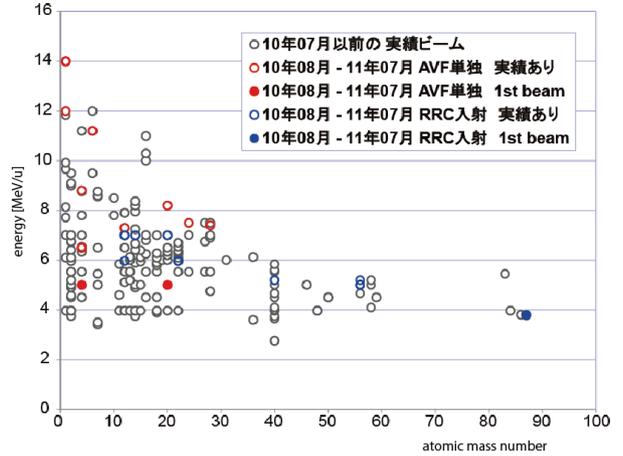


図3: AVF 加速実績

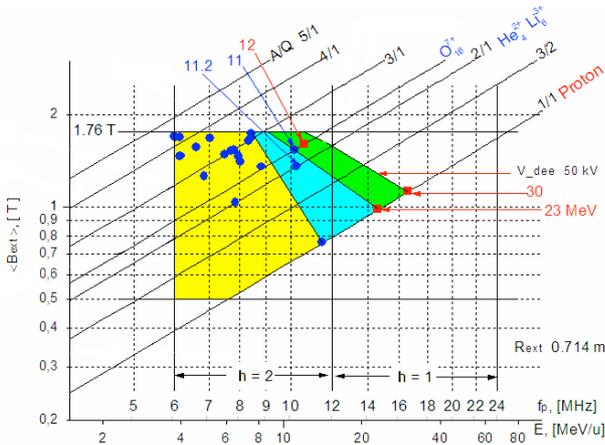


図4: AVFの加速性能

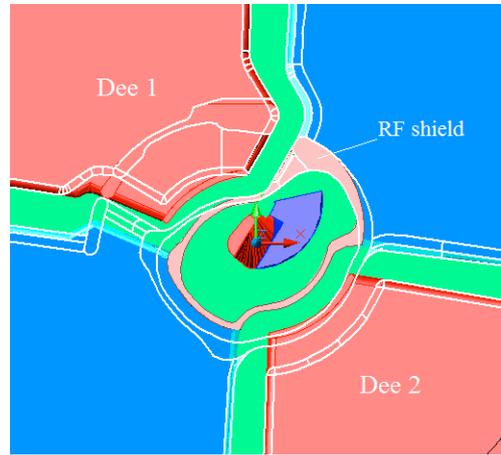


図5: h=1 加速のための中心領域

4. 改良

2009年より $^{16}\text{O}^{7+}$ と $^6\text{Li}^{3+}$ イオンビームの利用可能な最大エネルギーを12 MeV/uへと増加させる事を目標としたAVF中心領域改造への取り組みを行ってきた。2011年以降、更に中心領域の改造を推し進める計画である。主となる目的は陽子ビームの最大エネルギーを30 MeVまで上げることであり、これには現在のハーモニック数 $h=2$ の加速ではなく $h=1$ の加速を行う必要がある(図4)。これまで、3次元電磁場計算を駆使した3次元ビーム軌道シミュレーションによる中心領域形状の最適化を行ってきた[1,2,3]。新しく提案されている中心領域は図5のようなもので、RFシールドを更にコンパクトにし、ディー電極1を下流方向へ拡張、ディー電極2については中心方向へ拡張されたものとなっている。今後順次改造を進めていく予定である。

5. まとめ

2010年8月から2011年7月の期間におけるAVF

サイクロトロン総運転時間は2816時間であった。このうち故障による停止は20時間(0.7%)であった。AVF真空箱下面からのリーク、AVFのディー電極の冷却配管の水漏れなどのトラブルがあった。陽子の30MeV加速($h=1$)のため、3次元ビーム軌道計算に基づいた中心領域構造の改良に取り組んでいる。

参考文献

- [1] H.Imao, et al., “理研RIBFリングサイクロトロン(RRC, fRC, IRC, SRC)の運転報告”, in this Proceedings.
- [2] E.Ikezawa, et al., “理研重イオンリニアックの現状報告”, in this Proceedings.
- [3] Y.Watanabe, et al., “理研リニアック新入射器システムの建設状況”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [4] A.S. Vorozhtsov et al.; “Computer Modelling of Electromagnetic Fields for RIKEN AVF Cyclotron”. RIKEN Report, RIKENRIKEN-NC-AC-2, 2009.
- [5] E.E. Perepelkin et al.; “CBDA – Cyclotron Beam Dynamics Analysis code”. RuPAC 2008, p.40.
- [6] A.Goto, et al., “Renovation of the central region of RIKEN AVF cyclotron and results of beam acceleration test”. RIKEN Acce. Prog. Rep. 43, 2010, 127