

OPERATION REPORT ON RIKEN AVF CYCLOTRON

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

^{A)}RIKEN Nishina Center, ^{B)}SHI accelerator Service, ^{C)}CNS, Univ. of Tokyo

Abstract

We report the status of operation of the RIKEN AVF cyclotron (AVF) during July 2008 – June 2009. The total operating time of the AVF is 5509 hours. Unscheduled shutdown was 4.4 % of the total operational time. The AVF provides low energy beams to nuclear physics experiments and RI productions. The AVF has been used as an injector of RIKEN ring cyclotron (RRC) since 1989. The AVF is also utilized for providing heavy ions whose mass number is less than 40 or mass to charge ratio is 1-3 to RI Beam Factory. Superconducting ECR ion source (SCECRIS) started to operate in the october of 2008 to increase beam intensity. In April 2009, polarized deuteron and ¹⁴N beams was accelerated by AVF-RRC-SRC cascade for the first time.

理研AVFサイクロトロンの運転報告

1. はじめに

理研AVFサイクロトロン(AVF)は単独でのユーザーへのビーム供給のほか、理研リングサイクロトロン(RRC)の入射器として使用される。前者をAVF単独、後者をAVF-RRCとする。

AVF単独では陽子(A/Z=1)から⁸⁷Rb(A/Z=4.35)まで、多様な核種の低エネルギービーム(3.8 ~ 14MeV/u)を生成し、原子核実験、RI製造、検出器のスタディ等にビームを供給する。一方、AVF-RRCでは比較的軽い核種(A/Z=1 ~ 3)をAVFで3.8 ~ 10MeV/u、RRCでさらに65 ~ 210MeV/uに加速する。

2006年末にRIビームファクトリー(RIBF)が稼動してからは、その入射器としてRILAC(重イオンリニアック)が利用された事により、AVF単独が増えていった。2009年に入ってからRIBFで軽イオン加速が開始され、その入射器としてAVFが使用された。

また、新たなイオン源として2008年10月に超電導ECR(SC-ECR)が導入されビーム供給を開始した。本論文では2008年7月から2009年6月までのAVF運転の現状を報告する。

2. 加速実績

2008年7 ~ 9月は夏のメンテナンス期間を挟みAVF単独とAVF-RRC、10 ~ 12月はAVF単独のみ、2009年2月にRIBFの初段加速器として初めてAVFが利用され、3 ~ 5月には引き続きRIBFで¹⁴N及び偏極重陽子が加速(AVFでは4.9MeV/u)された。

Performance of AVF cyclotron

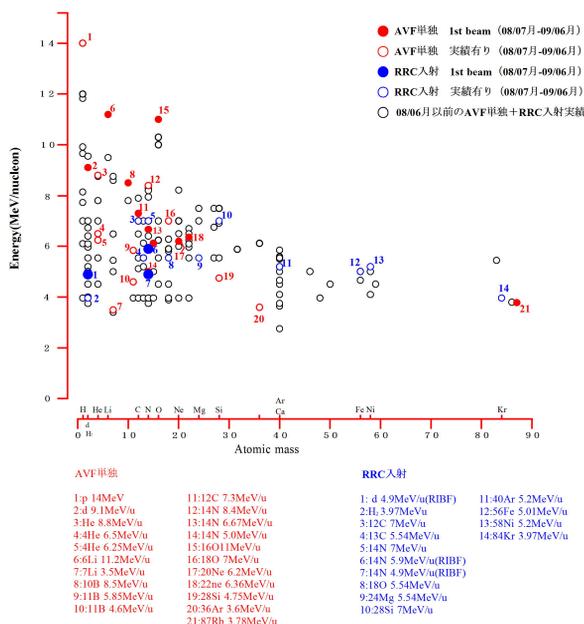


図1: AVFの加速実績

次にAVFで加速された核種とエネルギーを図1に示す。2008年6月以前に実績のあるものを黒で、今回の対象期間に初めて加速したものを赤で示した。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。AVFのK値

は70MeVであるが、加速可能なエネルギーは加速高周波 (RF) の周波数帯域 (12~24MHz) とハーモニク数が2であるため3.8~15MeV/uとなる。さらにA/Zが大体3以下の場合、RF電圧の周波数特性により必要な電圧が得られず、K値から得られるエネルギーより低くなる。また質量数の大きい核種に対しては、イオン源において適当な価数と量が得られれば加速可能である。図1の加速実績は設計上の性能の大部分を満たしている。

今回の対象期間においてはAVF単独で21種類のビームを加速し、そのうち11種類の初めてのビームの加速を成功させた。初めて加速した中で図3の赤丸の6 (${}^6\text{Li}$ 11.2MeV/u) と15 (${}^{16}\text{O}$ 11MeV/u) はそれまでの計算から必要とされるRF電圧が、実用上の電圧上限を超える例だが、可能な限り電圧を上げて加速を試み、成功した。この結果、設計性能の範囲を超えたビームの供給の可能性も出てきたと考えられる。一方、質量数の大きい領域は ${}^{87}\text{Rb}$ 3.78MeV/uの加速に成功した。

AVF-RRC運転の場合は、14種類のビームを加速した。RRCはK値が540MeVである。AVF-RRCの場合にRRCで得られるエネルギーとその時のAVFのエネルギーを述べる。A/Z=1では210MeVが現在達成されている最高エネルギーで、その時のAVFでのエネルギーは9.93MeVである。A/Z=2のRRCのエネルギーはK値から得られる135MeV/u、AVFは7MeV/uとなる。AVF-RRCの下限エネルギーは65MeV/uで、これはAVFの下限エネルギー3.8MeV/uから決まる。したがってAVF-RRCのAVFのエネルギーは陽子以外、大体3.8~7MeV/uとなる。今回の対象期間において初めて加速したのは図3の青丸1、6、7である。これらは2009年2月に初めてRIBFのためAVFが初段加速器として使用された例である。

に対し、実際に運転した時間をAVF単独 (左側の2つのグラフ)、AVF-RRC (右側の2つのグラフ) に分けて比較した。さらにビーム供給時間における実験コースによっても分けて比較した。

図2に示す「調整」は加速器の初期化(磁石のサイクリング)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、RRC、RIBF」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。「C03、E7A、E7B」はAVF単独の場合の実験コースである (図3)。

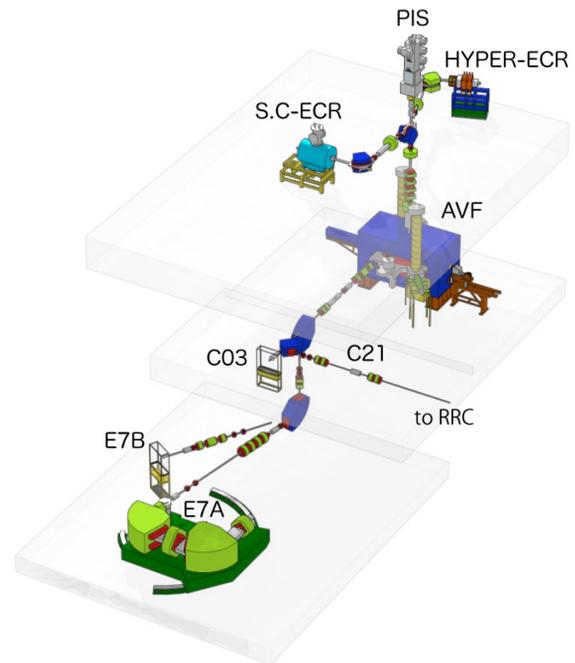


図3:AVF及び各実験コース

3. 運転状況

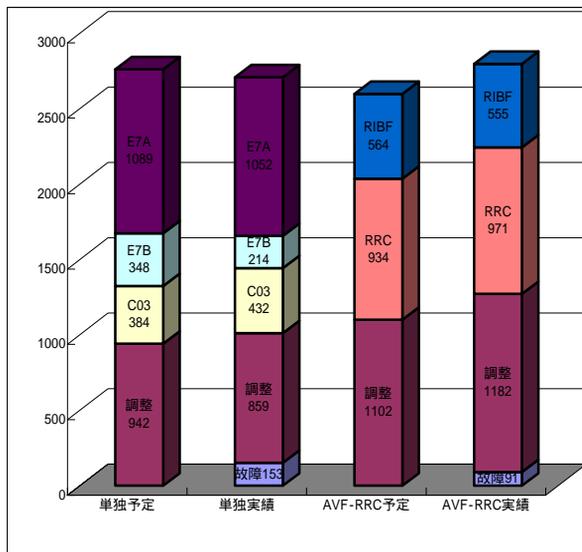


図2: 2008年7月から2009年6月までの運転時間

加速器の運転時間を図2に示す。予定された時間

C03コースはAVF取り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陽子14MeVである。ここで製造されたRIは理研より国内の研究機関に販売されている。

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単独実験の利用時間は最も長い。

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AVFを初段加速器としたRIBFの軽イオン加速実験である。またAVF単独、AVF-RRCの各々について予定と実績のグラフを示した。「予定」とは計画段階でスケジュールされた時間で、「実績」とは実際に要した時間であり、予定時間内に起きた故障時間も含んでいる。故障によってビーム供給時間に支障がある場合は、調整時間を短縮したり予定時間を延長して供給時間を補償している。また、加速器のマシナスタディーは予定、実績とも調整時間にカウントした。各運転時間を見ると、AVF単独が2710間、AVF-RRC (含AVF-RRC-SRC)が2799時間となっており前年(2007.7~2008.6)の2120時間と1718時間をそ

れぞれ大きく上回っている。これは、夏/冬のメンテナンス期間後の運転再開が前年より早かった事や、RIBFの軽イオン加速が連続して行われた事による。なおAVF単独利用の実績が予定より短いのは2つの実験中止(計144時間)による。

4. 故障及び対応

対象期間での故障・トラブルによる対応時間は244時間で運転時間全体の4.4%であった。AVFに関連する主なトラブルの一覧を表1に示す。

故障時間が最長なのは、RF増幅器のショート板のコンタクトフィンガーの焼損である。これは土曜日に起きた事故の為、本格的復旧作業が月曜になり、結果として復旧時間が長くなってしまった。

次に時間がかかっているのは、同じくRF増幅器の絶縁碍子のOリングの焼損である。

更に、対象期間にビーム停止には至らないが長期にわたり起きた不具合として、AVF取り出しビームの変動という事例があった。以下に症状と解決までの経緯を記す。

2009年に入ってから、運転中にAVFの取出し側のビームトランスポートでビーム軌道が水平方向に瞬間的にずれる現象(AVF取出し後2.2m下流で5mm程度)が頻発した。当初考えられた原因として、イオン源の状態の変化、電磁石・高圧電源の故障、電磁石自体のレアショート、RF電圧・位相の変化が考えられた。そこで以下に挙げる5項目

- 1.イオン源の引出し電極のリーク電流と真空度。
- 2.メインコイル、トリムコイル、マグネティックチャンネルの電流および端子電圧測定
- 3.インフレクター、デフレクター電源の出力電圧
- 4.RF(含入射バンチャー)の電圧・位相
- 5.AVF取出し前/後のビーム強度・位相

の測定を行った。

イオン源・RFとビーム強度・位相の相関の調査(1・4・5)でビームの変動の原因が取出し領域にあると判断したが、電源の測定(2・3)ではビームのずれに相当する電源の変動(マグネティックチャンネルならば10A/500A、デフレクターなら0.2kV/25kV)は無かった。これらの結果から、負荷側の調査を行い、デフレクターの高圧導入棒内部のリード線の断線を発見した。修理後はビームの跳びは無くなった。

5. 改良

対象期間での改善点を以下に2例報告する。AVFの本体では19年に渡る使用の結果、RFのDee電極の先端が鉛直方向に4mm下がっている事がわかり、夏のメンテナンス期間に電極を水平にする作業を行った。電極を加速器から取り出し専用の器具を用いて上方向に曲げる作業で5日×4人を要した。この結果、先端のずれは1mm程度となった。

2例目は、イオン源の更新である。2008年6月4日

発生日時	故障・トラブル	時間
2008/8/3 22:15	漏電でキュービクルのブレーカー落ちる、ポンプが落ちる	3.73
2008/10/15 0:54	インフレクター冷却配管より水もれ	0.68
2008/11/2 9:00	イオン源冷却水ポンプのカップリングの外れ	39
2009/1/9 9:05	立上げ時AVFの真空悪化	8.92
2009/1/21 23:30	立上げ時AVFの真空悪化、メインコイルで暖める	15.5
2009/2/28 12:00	RF#2 ショート板コンタクトフィンガー焼損	81.9
2009/3/6 5:00	RF#2アンプ内Oリングの一部が焼損、照射中に真空リーク	32.0
2009/6/2 9:00	デフレクタ、リーク電流により掃除×3	13.8

表1:主な故障項目

を最後に、それまでAVFのイオン源として利用されてきた10GHzECRが東北大学に移管され、以後オフラインにて開発を進めていた超電導ECR本体の搬入を開始した。移動後は六極チェンバー及びコイルを冷却する為にクライオポンプの復旧を行い、極低温に温度を下げる為の準備を行った。温度が4.5Kまで到達した後、真空及び真空ラインへの繋ぎ込み、ビームラインの軸出しなどの作業を行った。後半には高電圧系、ガス系、RF系の復旧作業を行った。X線に対する防御は旧10GHzのX線シールドをそのまま利用する事ができた。そして2008年10月1日、⁴He 6.5MeV/uのAVFでの加速にて実用的に稼働させる事ができた。

2009年7月現在で、陽子、重陽子、H₂⁺、⁴He、¹²C、¹³C、¹⁴N、⁴⁰Arのイオンの約30近い加速実績を達成している。今後は超電導ECRの遠隔操作化、エミッタンス向上による入射効率の改善などを予定している。

6. まとめ

2008年7月～2009年6月の期間におけるAVFサイクロトロン総運転時間は5509時間(前年:3838時間)で、故障による停止は4.4%(前年:4.3%)であった。

期間中はAVF本体の真空悪化、RF増幅器の焼損などの大きな故障があったが、概ね予定通りビームの供給ができた。またその過程で、これまでAVFのスペック外とされていたビームの加速、RIBF加速に向けての各種安定度の確認、新しいイオン源(CNS-超電導ECR)の稼働といった発展もあった。