

理研 AVF サイクロトロン運転の現状報告

STATUS REPORT ON THE OPERATION OF RIKEN AVF CYCLOTRON

福澤聖児^{B)}, 須田健嗣^{#A)}, 後藤彰^{A)}, 大西純一^{A)}, 濱仲誠^{B)}, 石川盛^{B)}, 小林清志^{B)}, 小山亮^{B)},
仲村武志^{B)}, 西田稔^{B)}, 西村誠^{B)}, 柴田順翔^{B)}, 月居憲俊^{B)}, 矢富一慎^{B)}, 藤巻正樹^{A)}, 福西暢尚^{A)},
長谷部裕雄^{A)}, 日暮祥英^{A)}, 今尾浩士^{A)}, 上垣外修一^{A)}, 加瀬昌之^{A)}, 木寺正憲^{A)}, 込山美咲^{A)}, 熊谷桂子^{A)},
真家武士^{A)}, 長友傑^{A)}, 中川孝秀^{A)}, 奥野広樹^{A)}, 大関和貴^{A)}, 坂本成彦^{A)}, 内山曉仁^{A)}, 渡部秀^{A)},
渡邊環^{A)}, 渡邊裕^{A)}, 山田一成^{A)}, 鎌倉恵太^{C)}, 小高康熙^{C)}

Seiji Fukuzawa^{B)}, Kenji Suda^{A)}, Akira Goto^{A)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)}, Makoto Hamanaka^{B)}, Shigeru Ishikawa^{B)},
Kiyoshi Kobayashi^{B)}, Ryo Koyama^{B)}, Takeshi Nakamura^{B)}, Minoru Nishida^{B)}, Makoto Nishimura^{B)}, Junsho Shibata^{B)},
Noritoshi Tsukiori^{B)}, Kazuyoshi Yadomi^{B)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Hiroo Hasebe^{A)},
Yoshihide Higurashi^{A)}, Hiroshi Imao^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Masayuki Kase^{A)}, Masanori Kidera^{A)},
Misaki Komiyama^{A)}, Keiko Kumagai^{A)}, Takeshi Maie^{A)}, Takashi Nagatomo^{A)}, Takahide Nakagawa^{A)}, Hiroki Okuno^{A)},
Kazutaka Ozeki^{A)}, Naruhiko Sakamoto^{A)}, Akito Uchiyama^{A)}, Shu Watanabe^{A)}, Tamaki Watanabe^{A)}, Yutaka Watanabe^{A)},
Kazunari Yamada^{A)}, Keita Kamakura^{C)}, Yasuteru Kotaka^{C)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

^{B)} SHI Accelerator Service Ltd.

^{C)} Center for Nuclear Study, University of Tokyo

Abstract

The RIKEN AVF cyclotron started its operation in 1989. Since then, it has been used not only as an injector of the RIKEN ring cyclotron but also as a supplier of various ion beams directly to users in its stand-alone operations. In this report, we describe both the operational status and improvement works performed in this year (August 2020-July 2021) aiming at increasing accelerating ability of the AVF cyclotron.

1. はじめに

理化学研究所(理研)仁科加速器科学研究センターの AVF サイクロトロン(以下、AVF)[1]は理研リングサイクロトロン(RRC)[2]の入射器である。その一方、単独でも低エネルギービームを専用の実験コース(Fig. 1)に供給する。RRC の入射器として他に RILAC[3]及び RILAC2[4]が存在し、これらが重いイオンを主に加速するのにに対し、AVF は例外があるものの質量数 40 以下の比較的軽いイオンの入射を主に担っている。AVF から RRC へと加速されたビームは各実験室へ供給される。RIBF[5, 6]では、さらに後段の超伝導リングサイクロトロン(SRC)[7]で加速し、BigRIPS に供給する。その他、AVF から RRC、中間段リングサイクロトロン(IRC)[8]へと加速されたビームは生物実験に利用されている。

AVF の基本スペックは、K 値 70 MeV、取り出し半径 0.714 m、RF 周波数 12~24 MHz、最大励磁時の平均磁束密度 1.7 T である。

利用可能なイオン源は偏極イオン源(PIS)、Hyper ECR、18GHz ECR[9]の 3 台である。PIS は偏極重陽子専用であるが、他の二台のイオン源はほぼ全ての軽イオンを供給することができる。特に近年は、固体試料を使用する Li 等の場合は Hyper ECR から、産業利用等で利用される Kr 等は 18 GHz ECR から供給されている。

本稿では 2020 年 8 月から 2021 年 7 月までの AVF の運転状況、不具合とその対応を報告する。さらに改良と

して、ハイパワービームによる機器の損傷を防止する為に行ったデフレクターへの温度モニターを設置とビームインターロックシステム(AVF-BIS)の導入について紹介する。

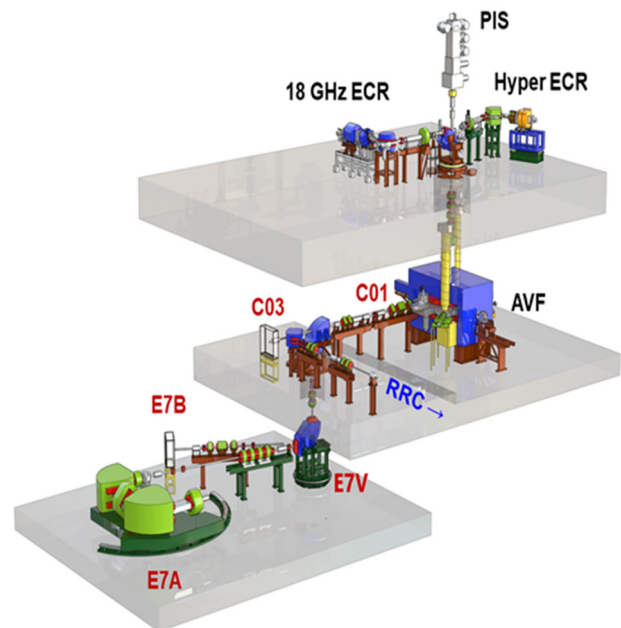


Figure 1: Overview of AVF cyclotron with 3 ion sources, 5 experimental courses, and beam transport line to RRC.

[#] ksuda@ribf.riken.jp

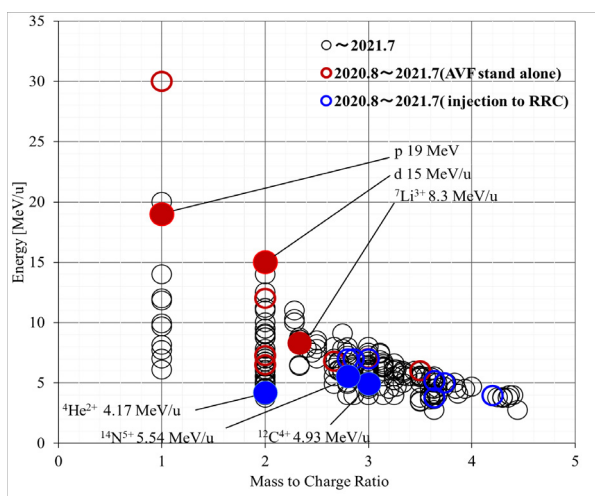


Figure 2: Energy-Mass to charge map of AVF.

Table 1: List of Accelerated Beams from August 2020 to July 2021

Particle	Energy [MeV/u]	Acceleration Mode	Experimental course	Beam current [pnA]
p	19	AVF stand alone	E7V/RI production	10000
p	30	AVF stand alone	C03/RI production	10000
d	4.93	AVF-RRC-SRC	BigRIPS/RIBF	7000
d	12	AVF stand alone	C03/RI production	19800
d	15	AVF stand alone	C01/Machine study	12000
⁴ He ²⁺	4.17	AVF-RRC-SRC	BigRIPS/RIBF	1665
⁴ He ²⁺	6.5	AVF stand alone	E7B/Student	5000
⁴ He ²⁺	7.25	AVF stand alone	C03,E7B/RI production	25000
⁴ He ²⁺	12.5	AVF stand alone	C03/RI production	3550
⁷ Li ²⁺	6	AVF stand alone	C03/RI production	8000
⁷ Li ³⁺	8.3	AVF stand alone	E7A/CRIB	5667
¹² C ⁴⁺	4.93	AVF-RRC-SRC	BigRIPS/RIBF	1125
¹² C ⁴⁺	7	AVF-RRC	E5B/Biology	875
¹⁴ N ⁵⁺	5.54	AVF-RRC	E3B/RI production	448
¹⁶ O ⁶⁺	6.8	AVF stand alone	E7A/CNS	4083
¹⁸ O ⁶⁺	7	AVF stand alone	E7V/CNS	4033
²⁰ Ne ⁷⁺	7	AVF-RRC	E5B/Biology	543
⁴⁰ Ar ¹¹⁺	3.8	AVF-RRC-IRC	E5B/Biology	282
⁴⁰ Ar ¹¹⁺	5.2	AVF-RRC	E5A/Industry	382
⁵⁶ Fe ¹⁵⁺	5.01	AVF-RRC	E5B/Biology	107
⁸⁴ Kr ²⁰⁺	3.97	AVF-RRC	E5A/Industry	225

2. 運転状況

2.1 加速実績

Figure 2 に AVF でこれまでに加速された核種の質量荷電比(M/q)と核子当たりのエネルギーの関係を示した。対象期間に加速したものは赤色(AVF 単独運転)と青色(RRC 入射運転)の○で、初めて加速したビーム(ファーストビーム)は、それぞれ赤色と青色の●でプロットした。対象期間より前の実績は黒色の○で表している。

ファーストビームは p 19 MeV, d 15 MeV/u, ⁴He²⁺ 4.17 MeV/u, ⁷Li³⁺ 8.3 MeV/u, ¹²C⁴⁺ 4.93 MeV/u, ¹⁴N⁵⁺ 5.54 MeV/u の 6 種であった。前者の 2 つはここ数年で方法が確立されたハーモニック 1 での加速によるものである。

p 19 MeV を使った実験は C01 から垂直に曲げ下ろすビームライン E7V(昨年までの C12 から改称)で行われた。2019 年に東京大学原子核科学研究センター(CNS)の実験チームにより本コースにターゲットチャンバーが設置され、2020 年 10 月には RI 製造が開始された。本コースでは照射する試料を容器に入れ水平にセットして真上からビームを照射できる為、ビームの熱で溶解するような試料でもこぼれ落ちる事なく連続照射が可能であるという特徴がある。

¹⁴N⁵⁺ 5.54 MeV/u はさらに RRC で 100 MeV/u まで、⁴He²⁺ 4.17 MeV/u 及び ¹²C⁴⁺ 4.93 MeV/u は RRC と SRC でそれぞれ 200 MeV/u, 250 MeV/u まで加速されユーザーへ供給された。

Table 1 に該当期間に加速したイオンの核種とエネルギー、加速モード、実験コース及び AVF の取り出し直後のファラデーカップ(FC-C01)で得られたビーム量の最大値を記した。今期は ⁷Li のビーム量が顕著に向上した。2021 年 3 月に行われた ⁷Li³⁺ 8.3 MeV/u の実験では過去のマシンスタディでの記録である 2370 pnA(2011 年、8.6 MeV/u)から 5667 pnA へと 2.4 倍に増えた。これに関してはイオン源の大強度化によるところが大きい。金属ビームの供給を担う Hyper ECR では、近年引出電極の改造が行われ[10]、ビームの引出効率が高められた。これにより広い M/q の範囲で AVF へ入射するビーム量が倍増した。さらに現在進められているサポートガスの研究の成果として、Li³⁺を効率的にサポートするガス種を見出した。これらの改良によりイオン源下流で Li³⁺ を 70000 pnA もの大強度で生成することに成功した。

2.2 運転統計

該当期間では合計 83 件の実験が行われた。用途として最も数が多かったのは RI 製造の 33 件である。Figure 3 に粒子別の実験件数の内訳を示した。He が最も多いのは昨年と同様で、24 件中 18 件が RI 製造であった。

過去 12 年間の運転時間の傾向を AVF 単独運転と RRC への入射運転に分け、Fig. 4 と Fig. 5 にそれぞれ示した。図中に実験コース別の供給時間、AVF の調整時間及び供給中の故障対応時間を示してある。調整時間は AVF のサイクリング開始から、単独運転ではスポット調整完了まで、RRC 入射運転では RRC へのビームトランスポートを開始する時刻までの時間とした。調整時間と

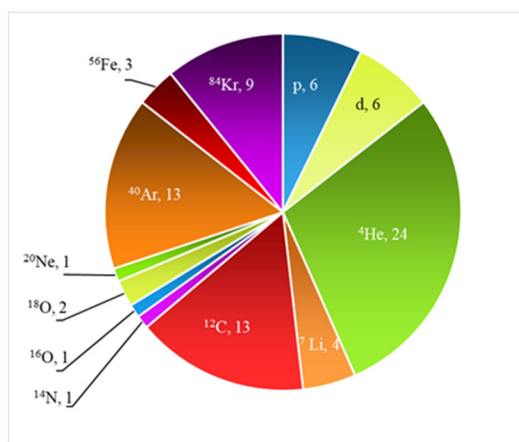


Figure 3: Number of experiments classified by supplied ions.

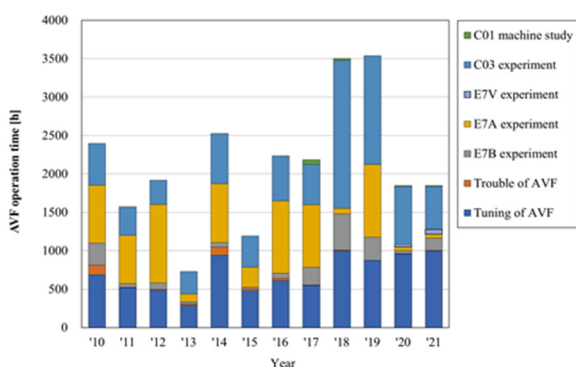


Figure 4: Beam service time of AVF stand-alone operation.

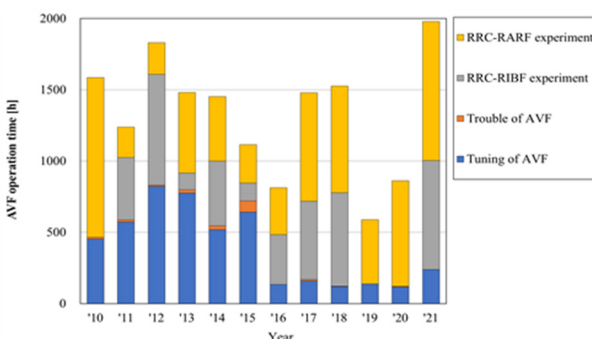


Figure 5: Beam service time of AVF operation as an injector of RRC.

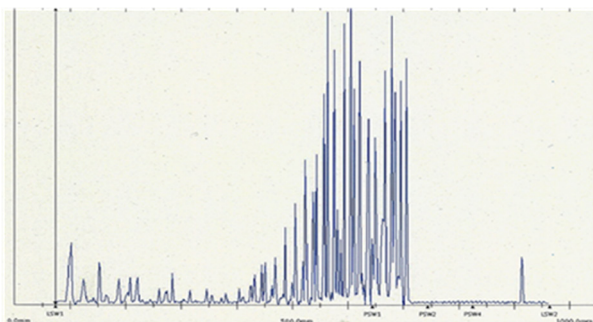


Figure 6: Turn pattern of deuteron beam.

供給時間を合計した AVF の総運転時間は、新型コロナウイルスの影響があった昨年の 2705 時間に対し 3818 時間と、一千時間以上も増加した。単独運転の運転時間は昨年の 1848 時間に対し 1839 時間とほぼ同一であった。その一方で RRC 入射運転が 1979 時間で最近 12 年間では最も長かった。これは、5 月から 6 月にかけて 3 年ぶりに RIBF(RRC-SRC)へビームを供給した為であり、¹²C、deuteron 及び ⁴He ビームを用いた実験が合計 28 日間行われた[6]。

2.3 シングルターン引き出しによる RIBF への高品質なビームの供給

RIBF 実験では、ユーザーより高品質なビームを供給するよう要請があった。また、加速器側としても下流のリングサイクロトロン(RRC、SRC)におけるビームのロスを軽減することが望ましい為、AVF 出側でのターンの混合を

減らすシングルターン引き出し[11]の調整を行った。ターンの混合とは、通常の軌道を通して取り出されたビーム(主成分)に、軌道のずれによりターン数が±1 だけ異なったビームが混ざることである。この混合成分はエネルギーが主成分のそれとは僅かに異なるので、混合を減らすとビームの質が向上する。Deuteron 実験では調整の過程で混合率が 10 %以上に悪化することもあったが、18GHz ECR から豊富に得られるビームをイオン源のスリットと AVF の位相スリットで大幅にカットすることで、最も少ない時で 2.3%±1.3%にすることができた。その際に得られた AVF のターンパターンを Fig. 6 に示す。

ターンの混合率はシングルターンモニターシステムを用いて測定した。AVF での加速がハーモニクス 2(=偶数)で行われた為、同一のタイミングで AVF に入射したとすれば主成分と混合成分の時間差は加速周期の 2 倍となる。しかし、連続ビームとなるので結果的に全てのバンチに混合が生じ、各成分を区別することができない。そこで、本システムは次の方法で混合率を測定した。(1)イオン源下流の AVF への入射ラインにおいて、バンチ化される前の直流ビームを加速周期の 10 倍程度の時間だけチョップした。これにより主成分がない状態を作り、(2)AVF から取り出されたビームをファラデーカップ(AVF 室内の FC-C21)で止めて、(3)発生するガンマ線をプラスチックシンチレーションカウンターにより計測してビームの時間構造を測定し(Fig. 7)、(4)ビームがチョップされる直前(あるいはチョップ後)の主成分が含まれるバンチから 2 バンチ後(前)のバンチを混合成分と見做し、それと主成分との収量比を求めた。

本システムでは、ファラデーカップを用いるためビームの供給中は測定できない。また、一度チョッパーを動作させてからガンマ線を測定するまでに 30~40 μs の時間を要するので、測定可能な周期は 30 kHz 程度が限度である。ただし、前述の調整時には 20 kHz で測定し、100 nA の deuteron ビームを 10 分間測定して誤差が 1 %であったので、実用的には問題なかった。

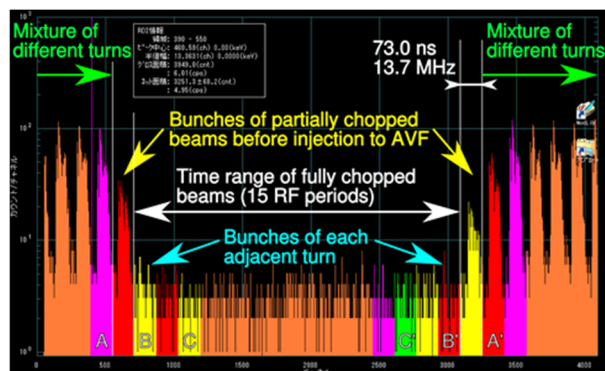


Figure 7: Time spectra of deuteron beams measured by the single turn monitor system. A: mixture of different turns, B: component of an adjacent turn, C: background.

2.4 マシントラブル

対象期間中は AVF の故障による実験の中断は少なく、ほとんどのトラブルは立ち上げ時に発生した。それらを以下に挙げる。

- (1) AVF 本体の真空悪化

今年1月、コールドスタートでの磁場設定後、サブチャンバーの真空悪化が起きた。その日の調査ではトリムコイル(サーキュラーコイル)C8の励磁状態に真空が反応している事が分かったが、2時間半の調査のうちに真空悪化が収まってしまい、再現しなくなった。後日、トリムコイルとハーモニックコイルのフィードスルー部分(Fig. 8)、上下各26か所のヘリウムリークテストが行われ、C8下側の1か所のみ $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ のリークが見つかった。C8では2013年に上側フィードスルーの部分からリークが発生してOリングを交換した実績がある。しかし今回は下側コイルからのリークであって、増し締めやOリングの交換を行うにはAVF本体の真空チャンバーを引き上げる必要があり、またリーク量が比較的小さい為、これを行うのは見送った。

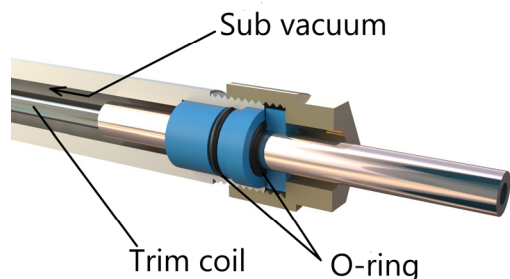


Figure 8: Feedthrough part of trim coil.

その後、2月にはDee電極No.2の静電容量を調整するコンペンセーターを駆動させた際にも、メインチャンバーの真空度が 10^{-5} Pa から 10^{-3} Pa まで悪化することが判明した。駆動軸のOリングからリークが生じていると考えられるが、不幸中の幸いにもRFを励振してコンペンセーターが共振をとる駆動範囲では比較的真空を保っていて、ビーム供給に影響を与えることはなかった。この件に関しては2018年2月に同様の症状でOリングを交換した実績があり、修理を検討中である。

(2) マグネティックチャンネルの不具合

昨年の加速器学会において、マグネティックチャンネルが運転中に外部インターロックで数回トリップしたトラブルについて報告した[12]。本体内部でのレイヤーショートを疑ったが、昨年9月の調査で、ホローコンダクタが密集した部分の中の二本を電氣的につなぐ小型のブスバーのボルトが緩んでいた事がわかった。この部分が接触不良となって発熱し、80℃を超えてサーマルスイッチが働いていた為、ボルトの増し締めを行った。

(3) ECR系冷却水ポンプの不調

今年6月、RRC-SRCへのビーム供給中に18GHz ECRの冷却水システムの熱交換器の市水側ポンプが不調となった。モーター電流が17Aに対し約3Aの幅で激しく振動しており、ポンプの周辺で異音を確認した。実験終了後にポンプの交換を行って復旧した。

(4) その他

p 30 MeVの調整中に42.8 kVの高電圧を印加していたデフレクターのリーク電流が1.5 mAまで上がり電圧を維持できなくなった為、急遽大気開放して電極の清掃を

行った。

AVF下流E7BコースのQ磁石(QT7B1a)が電流設定を0.01 A操作すると実際の電流が6 Aも変わってしまう誤動作があり、電源のDAC基板を交換した。

6対ある位相プローブの電極の読み出し信号が切り換わらなくなり、これらを切り替えるリレー盤内のDC 15V電源を交換した。

18 GHz ECRの出側のファラデーカップFC-I10をOUTに駆動させると周辺のビームトランスポートの真空度が 10^{-5} Pa から一桁悪化し下流のゲートバルブが閉まった。ファラデーカップのベローズにアルコールをかけると更に真空が悪化したことから、この部分のリークであることが判明し、待機品と交換した。

3. ハイパワービームに対する保護システム

3.1 ビームインターロックシステム(AVF-BIS)

近年、AVFのビーム量の増強と高エネルギー化がなされた結果、ハイパワービームのロスにより加速器自体が損傷する可能性が高まり、それを防ぐ対策が必要になった。そこで、RIBFのリングサイクロトロン群、RILAC及びRILAC2で既に導入されているビームインターロックシステム(BIS)が、昨年AVFにも導入された[13]。BISの主な機能は、予期せぬビームの変動を検知してイオン源直下流のビームチョッパーやファラデーカップで加速器に入射するビームを止める事である。

これらのトリガーとなるのが、バッフルに当たったビームの電流値をログアンプで変換して得られたアナログ信号や、電磁石電源のON/OFF・トリップ状態を示すデジタル信号である。AVF-BISは、インターロック用の入力情報として25個のデジタル信号と24個のアナログ信号を受け付け、5個のデジタル信号を出力して必要な機器を動作させることでビームを停止させる。信号線は各機器から、PLCユニットで構成される信号中継盤(STATIONと呼ぶ)につなぎ込んでいる。ユーザーインターフェースはCSS(Control System Studio)にて独自の物を作成した(Fig. 9)。

DI設定		入力異常	異常	DI名	機器名	電源	HOLD	遅延時間	FC													
DI-01	DI-02	DI-03	DI-04	DI-05	DI-06	DI-07	DI-08	DI-09	DI-10	DI-11	DI-12	DI-13	DI-14	DI-15	DI-16	DI-17	DI-18	DI-19	DI-20	DI-21	DI-22	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 9: The setting window for AVF-BIS.

このシステムは現在 RIBF で使用されている BIS の後継機として開発されたプロトタイプでもある。

3.2 デフレクターの温度モニター

ビームロスによるデフレクターセプタムの溶融を防ぐ為、熱電対により温度監視を行い、異常な温度上昇が検知されたときに AVF-BIS によりビームを停止させるようにした。Figure 10 に示すように、熱電対はビームロスが最も大きいデフレクターセプタムの入口部分に設置した。同図において手前がビームの周回側で、セプタムと電極の間からビームが取り出される。セプタムの材質は銅で、入口部分の厚さは 0.3 mm、高さは 12 mm で、ビームロスを分散させるため、ビーム方向に長さ 20 mm の切り欠きがつけられている。未使用のセプタムを機械加工し、切り欠き先端部の上下に熱電対を各 1 個取り付けした。

Figure 11 は、セプタムの先端部に 300 W のビームロス (ビーム径 ϕ 2 mm と仮定) が起きた場合の温度の時間応答を ANSYS により計算した結果を示している。左右の縦軸は、それぞれビームがロスした部分の温度 (T_{max}) 及び熱電対の取付位置における温度を示している。この計算結果から換算すると、ビームロスが 370 W 以上の場合、セプタム先端部は 1 秒以内に銅の融点 (1085 °C) を超えて溶融することが分かる。一方、熱電対の位置における

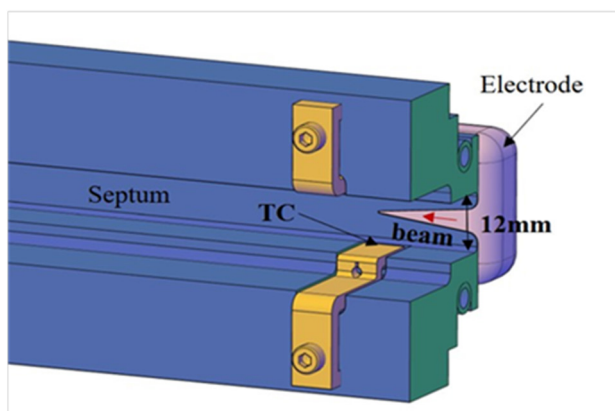


Figure 10: Tip of the deflector septum to which thermocouples were attached.

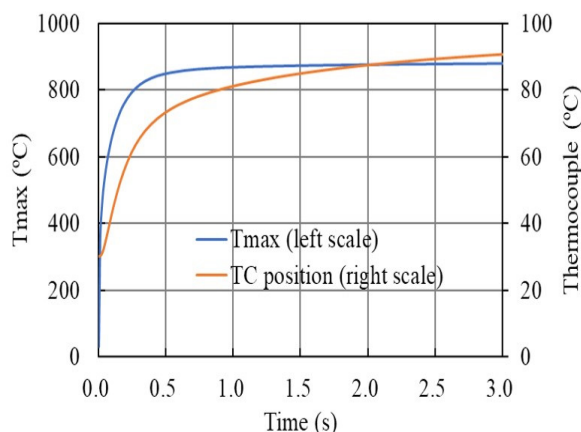


Figure 11: Time response of temperatures on the septum for a beam loss of 300 W calculated by ANSYS.

温度上昇は T_{max} の 1/10 程度で、時間的な遅れがあることが分かる。このため、熱電対の測定周期である 0.1 秒間における温度の上昇が設定値 (現在 1 °C) を超えた場合に AVF-BIS への出力を行い、セプタムが溶融する前にビームを停止することとした。このような短時間での保護に加えて、長時間の運転によっても徐々に温度が上昇する必要があるため、時間にかかわらず温度上昇が 40 °C を超えた場合にもインターロックを動作させるようにした。

4. まとめ

2020 年 8 月から 2021 年 7 月までの AVF の運転時間は 3818 時間で、AVF を理由とした実験中断は 9.6 時間であった。

ビームインターロックシステムやデフレクターの温度モニターといった、RIBF のリングサイクロトロン群等で使用されている手法が AVF にも採用され、ハイパワービームに対する保護機能が向上した。

参考文献

- [1] A. Goto *et al.*, “Injector AVF cyclotron at RIKEN”, Proceedings of Cyclotrons 1989, 1991, pp. 51-54.
- [2] H. Kamitsubo, “Progress in RIKEN Ring Cyclotron Project”, Proceedings of Cyclotrons 1986, 1987, pp. 17-23.
- [3] M. Odera *et al.*, “Variable frequency heavy-ion linac, RILAC: I. Design, construction and operation of its accelerating structure”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 227, 1984, pp. 187-195.
- [4] K. Yamada *et al.*, “Beam commissioning and operation of new linac injector for RIKEN RI beam factory”, Proceedings of IPAC 2012, 2012, pp. 1071-1073.
- [5] Y. Yano, “The RIKEN RI Beam Factory Project: A status report”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 261, 2007, pp. 1009-1013.
- [6] T. Nakamura *et al.*, “Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons”, Proceedings of the 18th PASJ Meeting, TUP052, 2021.
- [7] H. Okuno *et al.*, “The Superconducting Ring Cyclotron in RIKEN”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 17, 2007, pp. 1063-1068.
- [8] J. Ohnishi *et al.*, “Construction status of the RIKEN intermediate-stage ring cyclotron (IRC)”, Proceedings of Cyclotrons 2004, 2005, pp. 197-199.
- [9] T. Nakagawa *et al.*, “Intense beam production from RIKEN 18 GHz ECRIS and liquid He free SC-ECRISs”, Rev. Sci. Instrum. 73, 2002, 513.
- [10] Y. Ohshiro *et al.*, “Improvement of beam extraction system in Hyper ECR ion source”, CNS Annual Report 2019, 2020, pp. 53-54.
- [11] N. Sakamoto *et al.*, “Acceleration of Polarized Deuteron Beams with RIBF Cyclotrons”, Proceedings of Cyclotrons 2016, 2017, pp. 145-148.
- [12] M. Nishida *et al.*, “Status report on the operation of RIKEN AVF cyclotron”, Proceedings of the 17th PASJ Meeting, 2020, pp. 921-924.
- [13] M. Komiyama *et al.*, “Start of operation of AVF-BIS and its performance evaluation as a successor system to BIS”, RIKEN Accel. Prog. Rep. 54, 2021 (to be published).