

理研 RIBF のリングサイクロトロン運転の現状報告

STATUS REPORT OF THE OPERATION OF THE RIBF RING CYCLOTRONS

小山亮^{#B)}, 段塚知志^{A)}, 藤巻正樹^{A)}, 藤縄雅^{A)}, 福西暢尚^{A)}, 福澤聖児^{B)}, 濱仲誠^{B)}, 長谷部裕雄^{A)}, 日暮祥英^{A)}, 池沢英二^{A)}, 今尾浩士^{A)}, 石川盛^{B)}, 影山正^{A)}, 上垣外修一^{A)}, 加瀬昌之^{A)}, 木寺正憲^{A)}, 小林清志^{B)}, 小高康熙^{B)}, 久保木浩功^{A)}, 熊谷佳子^{A)}, 真家武士^{A)}, 長瀬誠^{A)}, 中川孝秀^{A)}, 中村仁音^{A)}, 仲村武志^{B)}, 西村誠^{B)}, 大西純一^{A)}, 奥野広樹^{A)}, 大関和貴^{A)}, 坂本成彦^{A)}, 柴田順翔^{B)}, 須田健嗣^{A)}, 月居憲俊^{B)}, 内山暁仁^{A)}, 渡邊環^{A)}, 渡邊裕^{A)}, 矢富一慎^{B)}, 山田一成^{A)}, 山澤秀行^{A)}
 Ryo Koyama^{#B)}, Tomoyuki Dantsuka^{A)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Tadashi Fujinawa^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Seiji Fukuzawa^{B)}, Makoto Hamanaka^{B)}, Hiroo Hasebe^{A)}, Yoshihide Higurashi^{A)}, Eiji Ikezawa^{A)}, Hiroshi Imao^{A)}, Shigeru Ishikawa^{B)}, Tadashi Kageyama^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Masayuki Kase^{A)}, Masanori Kidera^{A)}, Kiyoshi Kobayashi^{B)}, Misaki Komiyama^{A)}, Yasuteru Kotaka^{B)}, Hironori Kuboki^{A)}, Keiko Kumagai^{A)}, Takeshi Maie^{A)}, Makoto Nagase^{A)}, Takahide Nakagawa^{A)}, Makoto Nakamura^{A)}, Takeshi Nakamura^{B)}, Minoru Nishida^{B)}, Makoto Nishimura^{B)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)}, Hiroki Okuno^{A)}, Kazutaka Ozeki^{A)}, Naruhiko Sakamoto^{A)}, Junsho Shibata^{B)}, Kenji Suda^{A)}, Noritoshi Tsukiori^{B)}, Akito Uchiyama^{A)}, Tamaki Watanabe^{A)}, Yutaka Watanabe^{A)}, Kazuyoshi Yadomi^{B)}, Kazunari Yamada^{A)}, Hideyuki Yamazawa^{A)}

^{A)} RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

^{B)} SHI Accelerator Service Ltd.

Abstract

The yearly operation status of the RIBF ring cyclotrons (RRC, fRC, IRC and SRC) including statistics of machine time, troubles, and developments in the Aug. 2012—Jul. 2013 period is reported.

1. はじめに

理研仁科センターの RI ビームファクトリー (RIBF)^[1]は、水素からウランまでの重イオンビームを加速し、世界最大強度の RI ビームを発生させ、新たな原子核モデルの構築・元素の起源の解明といった根源的な研究に加え、新しい RI 技術による新産業の創出への貢献を目的とする加速器施設である。RIBF の加速器は Figure 1 に示す様に 3 台の入射器：線形加速器 (RILAC)^[2]、AVF サイクロトロン (AVF, K=70 MeV)^[3]、及び新線形加速器 (RILAC2)^[4]と 4 台のリングサイクロトロン：理研リングサイクロトロン (RRC, K=540 MeV)^[5]、固定周波数リングサイクロトロン (fRC, K=700 MeV)^{[6][7]}、中間段リングサイクロトロン (IRC, K=980 MeV)^[8]、及び超伝導リングサイクロトロン (SRC, K=2600 MeV)^[9]で構成される。

本稿ではこの 1 年間 (2012 年 8 月から 2013 年 7 月までの) これら 4 台のリングサイクロトロンの運転状況を報告する。具体的には 2 項で加速ビームの種類とエネルギー・ビームカレント・マシンタイム (MT) 遂行状況などの運転実績を、3 項でガスストリッパを始めとした開発更新項目を、4 項でビーム供給中に起きた様々なトラブルを述べ、5 項でまとめとする。

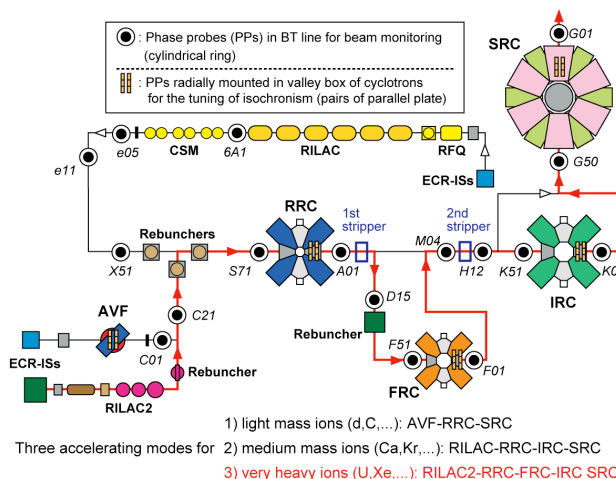





Figure 1: Schematic of the RIBF accelerators. The acceleration scheme for very heavy ions such as uranium and xenon is highlighted.

2. 運転実績

Table 1 にリングサイクロトロンのこの 1 年間の運転実績を示す。RIBF に於けるリングサイクロトロンを利用した実験は、1986 年より稼働を始めた RRC からのビームを利用した旧施設実験と、RRC

[#] rkoyama@riken.jp

Table 1: Yearly operation results of RIBF

最後段 サイクロトロン	前段加速器	イオン	エネルギー [MeV/u]	実験コース	実験種類	要求ビーム量 [pnA]	実績ビーム量 [pnA]	予定MT 時間 [h]	実MT 時間 [h]	中断 時間 [h]	可用性 [%]	備考	
RRC 	RILAC	⁵⁸ Ni	63	E6	原子核実験	> 200	87	144	157	10	102	13h延長	
	RILAC2	²³⁸ U	51	IRC	マシンスタディ	test	2	145	145	0.0	100	beam duty <25%	
		²³⁸ U	10.75	E5A	産業利用		2	29	24	24	0.0	100	
	AVF 	¹² C	135	E5B	生物		10	367	59	59	0.0	100	同条件加速：4回
		¹³ C	100	E6	原子核実験		400	408	36	38	0.2	104	1h延長
		¹⁴ N	135	E3B	RI製造		500	500	48	48	0.0	100	
		³² S	100	E6	原子核実験		50	43	96	16	0.0	17	R-EDC不調：MT中止
		³² S	100	E6	原子核実験		50	21	120	94	0.0	78	26h遅れて開始
		⁴⁰ Ar	95	E5B	生物実験		1	26	38	38	0.0	100	同条件加速：4回
		⁵⁶ Fe	90	E2B/E5B	原子核/生物実験		1	6	194	194	0.0	100	同条件加速：4回
⁸⁵ Rb	66	E6	原子核実験		1	0.5	36	43	6	104	6h補償延長		
⁸⁷ Rb	66	E6	原子核実験		1	0.1	48	69	0.7	142	21h前倒し実験開始		
RRC(旧施設)実験小計：								892	909	17	100	※ ³² S中止実験除く	
SRC 	RILAC-RRC	⁴⁰ Ar	400	BigRIPS	マシンスタディ	1000	16	138	138	0.0	100	beam duty <2%	
	RILAC-RRC-IRC	¹⁸ O	345	BigRIPS	原子核実験	100	313	120	132	34	82		
	RILAC2-RRC-IRC-IRC	¹²⁴ Xe	345	BigRIPS/EURICA/ZDS	原子核実験	> 20	38	492	553	105	91		
		²³⁸ U	345	BigRIPS/EURICA/ZDS	原子核実験	> 5	15	1536	1703	411	84	同条件加速：3回	
	AVF-RRC	¹⁸ O	250	SAMURAI	原子核実験	200	231	108	123	6	108		
SRC(新施設)実験小計：								2394	2649	556	87		
総計：								3286	3558	573	91	※ ³² S中止実験除く	

からのビームを 2006 年より稼働を始めた fRC, IRC 及び SRC の 3 台またはその一部を使用してさらにエネルギーを増幅して用いる新施設実験の 2 つに大別される^[10]。

旧施設実験においては 1 度だけ MT が中止となる事象があった。³²S-100 MeV/u の実験中に RRC の静電デフレクター(EDC)の電圧/リーク電流が 78 kV/0.1 mA → 約 50 kV/0.9 mA とリーク電流が増加して電圧が低下したことにより(Figure 2 参照)、取出しビーム量が激減してしまった。ビームを停止して電圧を上げ下げする事による通常行うコンディショニングを試みたが改善せず、電源やケーブルにも異常が見つからなかった為、MT 中止が決定した。

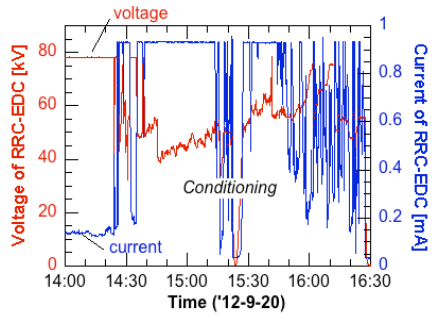


Figure 2: Voltage reduction of RRC-EDC.

結局当該 EDC は大気解放の上、セプタムと電極のクリーニングにより機能回復した。中止となった MT は後日補償実施し完了したので集計から除外すると、一部中断や実験開始の遅れがあった MT も概して延長等に対応し、全ての旧施設実験は予定された時間で MT をこなして全体としては可用性¹100%を達成した。

新施設の実験においてはまず、RILAC を入射器

¹ 可用性 ≡ (実験終了時刻-加速調整完了時刻-加速器事由中断時間)/予定 MT 時間=MT がどれだけ予定通りこなせたかの指標を表している。

とする ⁴⁰Ar ビームにおいて、SRC 取出しでこれまでの最高エネルギーである 400 MeV/u の加速に成功した。RIBF の目玉実験である ²³⁸U-345 MeV/u の実験においては 2 回行う荷電変換のうち第 1 荷電変換にガスストリッパー(3.2 節参照)を導入した。ガスストリッパーは昨年報告のあった fRC の K 値アップグレード^[7]により初めて使用可能となった。更に第 2 荷電変換に、炭素固定膜に比べて膜厚均一性と耐久性の勝る回転ベリリウム膜を導入した。これらによって炭素固定膜の寿命や照射強度上限問題もクリアされて平均ビーム強度は大幅に増加し、最高で 15 pnA のビームを供給した。また、¹²⁴Xe-345 MeV/u の実験では 2 回行う荷電変換のうち両方にガスストリッパーを初めて導入し最高で 38 pnA のビームを供給した。どちらの実験も 4 台のリングサイクロトロン(RRC, fRC, IRC, SRC)と入射器 RILAC2 を用いた RIBF で最も多くの装置が同時に稼働する加速モードであるので維持が容易ではなかったが、²³⁸U においては可用性 84 %、¹²⁴Xe においては可用性 91 %を達成した。

尚、入射器である RILAC と AVF はそれぞれ単独運転モードでも実験に利用しており、これらについては別途報告する^{[11][12]}。

3. 開発更新項目

3.1 RRC メインコイルの交換

昨年報告の通り^[13]、2011 年 5 月に RRC の東側セクター(E-sector)マグネットの上側メインコイルに層間短絡が発生した。修理不可能と判断され 2012 年の 8 月にコイルの交換作業が行われた。交換の結果、Figure 3 に示す通り磁場及び等時性の安定度は改善した。尚、磁場は NMR で、等時性は位相プローブ(Phase Probe: PP)とロックインアンプを中核とした非破壊ビームモニタシステム^[14]で測定した。

また、こちらも昨年報告の通り、西側セクター(W-sector)マグネットの下側メインコイルにおいて、RRC 建設当初に発生し当時修復した層間短絡が

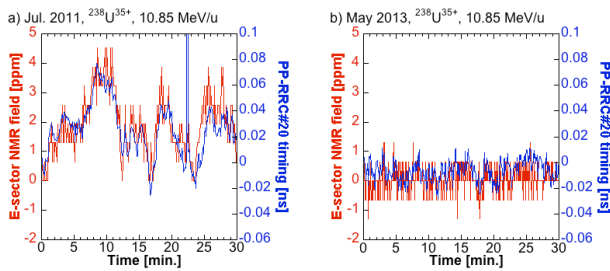


Figure 3: Stability of magnetic field and isochronism of RRC a) before and b) after main coil exchanging at E-sector.

2012年6月に再発したことが判明した。同年8月に応急処置を施し、絶縁を確保してこの1年間は使用して来た。安定度に大きな問題はなかったが今後の再発を考慮して交換することになった。故障しているのは下側のコイルであるが、老朽化や同時期に同工程で製作された事を考慮して上側コイルも同時交換することとした。2013年8月現在、交換作業が進行中である(Figure 4参照)。

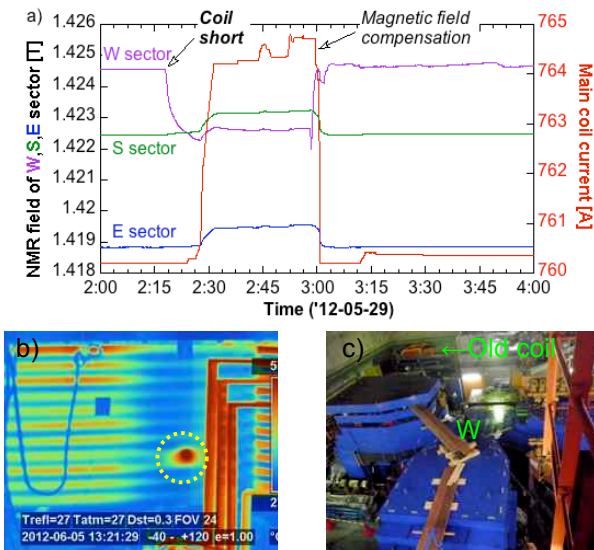


Figure 4: Outline of layer short for W-sector main coil. a) Variation of magnetic field at the moment of layer short. b) Thermograph around layer-short area of W-sector main coil. c) Photo of coil exchanging working.

3.2 ガスストリッパー実戦投入

Figure 1 に示した通り、ウランやキセノンといった超重イオンの加速においては RRC の後段と fRC の後段の 2 箇所 で荷電変換が行われ、これまでは炭素膜を荷電ストリッパーとして用いて来た。ウランの様な超重イオンは電子束縛エネルギーが大きいため、軽いイオンに比べて必然的に膜厚が厚くなり、ビームエネルギー損失は増加し、ビーム品質の劣化および膜自身のダメージは避けられず、ビーム大強度化における課題となっていた。

2012年10月の ^{238}U -345 MeV/u 加速において予めより開発が進められてきた He ガスストリッパー^[15]が RRC 後段の A02 サイトに第一ストリッパーとし

て初めて実戦投入された。2013年6月の ^{124}Xe -345 MeV/u 加速には fRC 後段 M04 サイトに第二ストリッパーとして空気ストリッパーが加わり第一・第二両ストリッパーがガスストリッパーに置き換わった。Figure 5 に両ストリッパーの写真を示す。

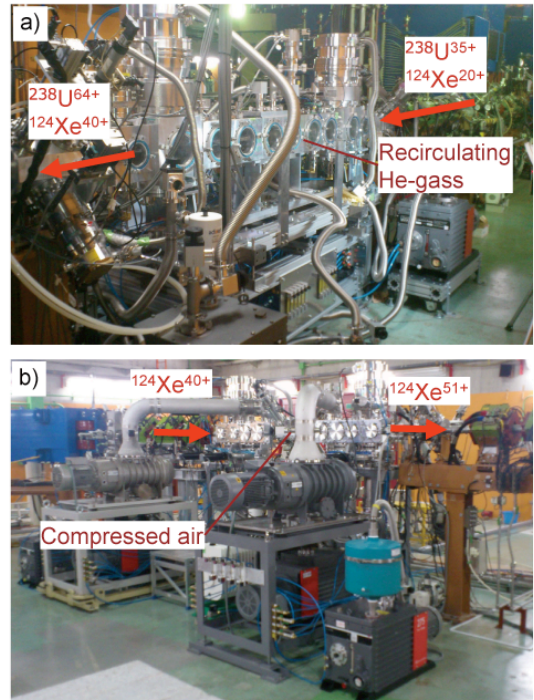


Figure 5: Photos of a) 1st stripper at A02 (He) and b) 2nd stripper at M04 (Air).

ガスストリッパーの特徴的な挙動とその補正について 2 例述べたい。1 つはガス圧のフィードバックが不安定になる場合がある点である。 ^{238}U -345 MeV/u 加速において Figure 6 の様にガスストリッパーの He 圧力が 150 Pa 下がり、これによって後段の fRC 入射タイミングが 0.2 ns 進み、結果としてユーザー供給ビーム強度が 10 % 程度低下する現象が非破壊ビームモニタ^[14]によって観測された。

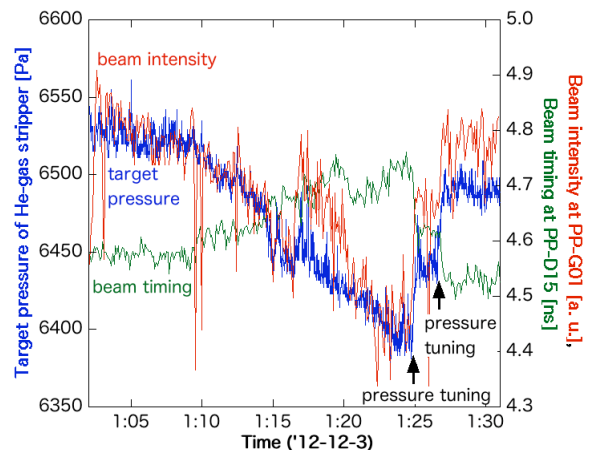


Figure 6: Recovering of beam intensity by the manual tuning of target pressure of He-gas stripper.

ビームタイミングは PP-D15、ビーム強度は PP-G01 で観測した結果を示している(位置は Figure 1 参照)。オンラインでこの様子を見ながら He ガス圧を手動で調整し、供給ビーム強度を復旧させる事が出来た。He ガスの圧力は標的室圧力で He ガス導入バルブの開度にフィードバックをかけて一定の圧力に制御されているが、放射線のダメージによってバルブが動作不良を起こしたと分析されている。

もう 1 点はビーム強度の増大に伴う熱負荷によるガス密度の減少により実効ガス厚が減少する現象である。Figure 7 は ^{124}Xe -345 MeV/u 加速においてオシロスコープで観測した PP-D15 のパンチ波形である。PP-D15 はガスストリッパ A02 の 30 m 下流にある位相プローブである。ビームを減らした加速調整の段階で 120 pA のビームをガスストリッパ A02 で荷電変換した場合と、600 pA のビームを荷電変換した場合とでは、PP-D15 の地点で後者の方が 0.4 ns ビームタイミングが進むことが解った。ビーム強度の大きい後者の方がガスストリッパへの熱負荷が大きく実効ガス圧が減少するという解釈と辻褃が合っている。この為、調整中及び実験開始後もビームタイミングを指標にガス圧・又はリバンチャー位相の調整を行い、最適なタイミングを維持した。

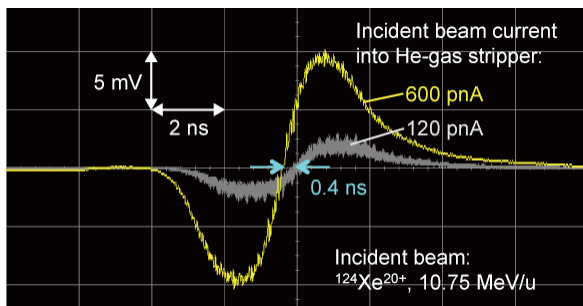


Figure 7: Beam timing shift detected by PP-D15 depends on the incident beam current into the He-gas stripper.

4. トラブル

この 1 年間もビーム供給中に様々なトラブルに見舞われたが、その中から“漏水トラブル”、“RRC-EDC 溶解”、及び“高周波系トラブル”に関して報告する。

4.1 漏水トラブル

この 1 年間のビーム供給中の漏水トラブルは軽微なものから重大なものまで合わせて 22 件と多かった。軽微なものとは冷却継手が割れたり、冷却ホースに穴が開くなどして漏水し床が水浸しになる程度で 30 分程度の交換・乾燥作業で復旧したものである。同じ様に冷却部品が原因であっても真空側への漏水や漏水が装置にかかる場合は重大なトラブルとなる。

2012 年 9 月頃より RRC の #2 共振器の真空度が通常 $5\text{e-}6$ Pa の所、徐々に悪化し $1\text{e-}5$ Pa となった。これ以上は真空悪化することなく、また加速への影響もなかった為、十分な調査時間が得られるまでのほぼ 1 年間この状態で運転を行った。冷却水の系統

別にバルブを開閉して調査した結果、Dee 電極の下側冷却系等において真空側に水が漏れていることが解った。2013 年 8 月現在、共振器を後退・分解して調査・修理を行っている。

2012 年 10 月 31 日、 ^{238}U -345 MeV/u の加速調整中に RRC メインコイル電源のサイリスタ冷却板からの冷却水のしみ出しが見つかった。即座の修繕は難しくしみ出し水量も少量であったので、大型ファンを設置して蒸発を促すと共にカメラを設置し、しみ出し水量の変化を監視しながら MT を完遂した。その後、サイリスタユニットの交換を行い修繕完了したが、電源全体としては老朽化が進んでいる為、電源更新が決定し現在準備中である。

2013 年 4 月 9 日、 ^{18}O -345 MeV/u ビーム供給中に、ビーム輸送系電磁石電源において上部から引き込む形で設置された冷却ホースが裂けて噴水し、電源に多量の水がかかってしまった。この時は 6 時間程かけて取り急ぎ別コースの電磁石電源に負荷給電線を延長・繋ぎ換える作業を行い、照射を再開した。

2013 年 6 月 29 日、 ^{124}Xe -345 MeV/u ビーム供給中に SRC の Magnetic deflection channel-1 (MDC1) の冷却ホースと継手の境に亀裂が発生し漏水が発生した。場所は Figure 8-a に示した通り磁気シールド内の第 3 共振器(RES3)と第 4 セクタマグネットの境に位置しており、点検口から進入して応急処置を施して 1 時間程で復旧した。また、当該箇所から更に奥でも漏水が確認されたが、量が少量であり手が届かないことからそのままにして同シリーズの MT は完遂した。2013 年 8 月現在、当該冷却システムへアクセス出来る様に RES3 を磁気シールド内から外へ引き出して(Figure 8-b 参照)修繕中である。SRC の共振器引き出し作業は SRC 建設以来初めてであったが大きな問題なく完了した。

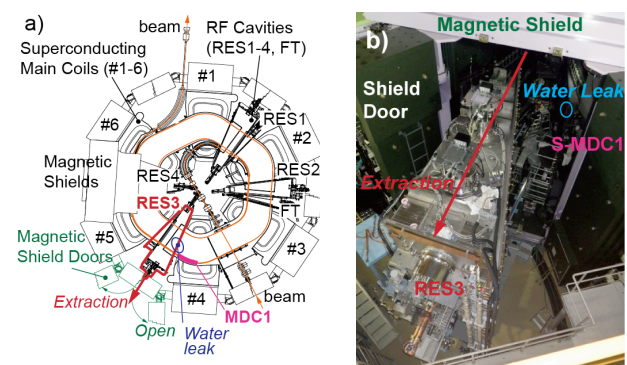


Figure 8: Extraction of SRC-RES3 for the repair of cooling water equipments for S-MDC1.

4.2 RRC-EDC セプタム溶解

2012 年 11 月 15~17 日にかけての ^{238}U -345 MeV/u ビーム供給中に、RRC の取出し効率が 90 %から徐々に悪化した。最終的に同年 11 月 17 日の夕方に突然に供給ビーム量が 1/3 に減少し RRC の取出し効率は 40 %以下まで低下していた。RRC の取出しエネルギーは 10.75 MeV/u でサイクロトロン内の周

回ビーム量はおよそ $1 \text{ p}\mu\text{A}$ であったので、ビームロス全ての RRC の静電デフレクター(EDC)に集中していたとすると、それに伴う熱負荷は 1.5 kW 以上となる。EDC の故障が疑われたので MT を中絶し大気解放して EDC を点検した所、Figure 9 の様に EDC セプタムの溶解が確認された。



Figure 9: Melted septum of RRC-EDC caused by the large beam loss of 1.5 kW .

当該 EDC は予備機に交換するとともに再発防止の為に熱電対を設置し、その温度でインターロックが作動する様に対策を施した。同時進行で行った高周波系トラブルへの対処等のその他の作業、及びビーム再調整を含め、一連の復旧には約 160 時間を要した。

4.3 高周波系トラブル

高周波系のトラブルを加速器別にまとめると以下の様になる：

- 1) RRC
 - #1,2 両励振器の中間段・終段両真空管交換。
 - #1 励振器の終段アンプ入力コンデンサ交換。
 - #1 終段 G1 電源交換。
- 2) fRC
 - 冷却水の温度上昇によりチューナーの調整範囲を超えた。
- 3) IRC
 - 特筆すべきトラブルなし。
- 4) SRC
 - RES1 の中間段フィラメント電源が放射線ダメージで故障、交換。
 - RES2 の終段 G1 電源内冷却ホース劣化で漏水 → ホース交換にて復旧。
 - RES3 の位相制御が出来なくなり、位相調整器交換にて復旧。
 - RES2 の電圧制御が不安定になり、振幅調整器交換にて復旧。

5. まとめ

RIBF の荷電ストリッパーが固定膜からガスへと更新され、これまでのウランビーム供給最大強度： 3.5 pnA が 15 pnA へと増大し、大強度化において一段上がった年であった。また、昨今の運転費削減や電気料金値上げの影響もあり、これまでも増して

いかに効率良く運転を行い、MT を予定通り完遂できるかが重要となってきている。我々は非破壊モニターなどを注視しながらなるべく照射を止めずにビーム維持に務め、またトラブル時も迅速な対応を行い、RIBF 全体としては 91 %の可用度を達成した。

大強度化が進むが故に起きた RRC-EDC 溶解トラブルは良い教訓となった。今後も続く大強度化に合わせ、まずは正しくビームトランスミッションを測定出来る様に、SQUID モニターやコアモニターの開発が進行中である。また、ビームロス状態の迅速正確な把握の為にイオンチェンバーを用いたロスモニターも開発が進行中である。

4 つのリングサイクロトロンのうち最も古いにも拘らず最も使用頻度の高い RRC へのケアは重要である。現在、W セクターメインコイル交換と #2 共振器の真空側漏水について作業進行中である。老朽化が進むメインコイル電源も更新準備中であり、老朽化対策に加え磁場の安定度改善も期待される。

参考文献

- [1] Y. Yano, The RIKEN RI beam factory project: A status report, Nucl. Instrum. & Methods B261 (2007) pp. 1009-1013.
- [2] M. Odera et al., Variable frequency heavy-ion linac, RILAC: I. Design, construction and operation of its accelerating structure, Nucl. Instrum. & Methods 227 (1984) pp. 187-195.
- [3] A. Goto et al., Injector AVF cyclotron at RIKEN, Cyclotrons'89, Berlin, Germany, 1989, pp. 51-54.
- [4] 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.
- [5] H. Kamitsubo, Progress in RIKEN Ring Cyclotron Project, Cyclotrons'86, Tokyo, Oct. 1986, pp. 17-23.
- [6] N. Inabe et al., Fixed-frequency ring cyclotron (fRC) in RIBF, Cyclotrons'04, Tokyo, Oct. 2004, 18P15, pp. 200-202, T. Mitsumoto et al., CONSTRUCTION OF THE FRC SECTOR MAGNET FOR RIKEN RI BEAM FACTORY, *ibid.*, 20P12, pp. 384-386.
- [7] K. Kumagai et al., UPGRADE OF RIKEN FIXED-FREQUENCY RING CYCLOTRON, Proceedings of PASJ9, WEPS055, (2012), pp. 517-521.
- [8] J. Ohnishi et al., Construction status of the RIKEN intermediate-stage ring cyclotron (IRC), Cyclotrons'04, Tokyo, Oct. 2004, 18P14, pp. 197-199.
- [9] H. Okuno et al., The Superconducting Ring Cyclotron in RIKEN, IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) pp. 1063-1068.
- [10] <http://www.nishina.riken.jp/RIBF/accelerator/overview.html>
- [11] E. Ikezawa et al., Present Status of RILAC, in these proceedings.
- [12] N. Tsukiori et al., Status report of the operation of the RIKEN AVF cyclotron, in these proceedings.
- [13] M. Hamanaka et al., THE OPERATION OF THE RIKEN RIBF RING CYCLOTRONS, Proceedings of PASJ9, WEPS004, (2012), pp. 350-352.
- [14] R. Koyama et al., Beam Phase and RF Fields Monitoring System using Lock-in Amplifier for RIKEN RIBF, EPAC'08, Genoa, June 2008, TUPC052, pp. 1173-1175.
- [15] H. Imao et al., He GAS CHARGE STRIPPER FOR HIGH-INTENSITY URANIUM BEAM, Proceedings of PASJ9, WELR02, (2012), pp. 68-71.