

Recent trouble cases and improvements of HIMAC injector

Takeshi Takeuchi^{1A),1}, Yuhsei Kageyama^{A)}, Izumi Kobayashi^{A)}, Tetuya Sakuma^{A)}, Noriyuki Sasaki^{A)}, Toshinobu Sasano^{A)}, Naohiro Shiraishi^{A)}, Wataru Takasugi^{A)}, Keita Fukushima^{A)}, Yoshiyuki Iwata^{B)}, Masayuki Muramatsu^{B)}

^{A)} Accelerator Engineering Corporation, 6-18-1 Konakadai, Inage-ku, Chiba-shi, 263-0043

^{B)} National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8555

Abstract

The latest fault example in HIMAC injector is reported. Many of troubles on HIMAC injector are depended on the electric discharge of RF equipment and ion source power supply. On the other hand, long time stoppage of beam deliveries is caused in the bad condition of ion source equipment.

We report some improvement examples; HEC ion source: Generation study of new ionic species, RF: Development of new AGC&APC control unit and install plan of 30kW semiconductor amplifier, Control & generalization system: Replacement from the special existing equipment to PLC as the flexible use.

HIMAC入射器の運転不具合事例と機器改善実績

1. HIMAC入射器の概要

HIMAC入射器とは、図1に示す3台のイオン源（ECR, HEC, PIG）と1組のRFQ-DTL線形加速器から構成されるビームラインを指す。図1のもうひとつのビームラインは、がん治療装置の普及に向けて平成16~17年に開発研究され平成21年に設置された高効率小型入射器ビームライン（KISイオン源[1], RFQ- IHL線形加速器[2]）である。前者の入射器については、イオン源として主に昼間治療のためCビームを供給する10GHz ECRイオン源と夜間実験およびECRサポートとして18GHz ECRイオン源（HEC）とPIGイオン源が備えられている。下流に位置する2台のシンクロトン（U-SYN, L-SYN）および線形加速器出射エネルギー実験コース（MEXP）へ異なる各種・チャージステートイオンを平行して運転供給可能とするタイムシェアリング運転を行っている[3]。後者の高効率小型入射器については、すでに治療に十分な量のCビーム加速は実現されている（2011年4月）。現在は加速器および制御装置の長時間安定性試験とその改善を行っている。

本論文では昨年度の治療および実験供給中に発生したHIMAC入射器不具合事例についてと、我々が加速器の維持業務として実施している機器改善について報告する。

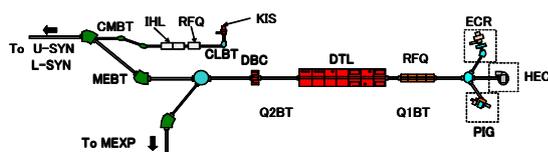


図1. HIMAC入射器と高効率小型入射器ビームライン

2. 運転不具合事例

2.1 機器分類別不具合件数

2011年度に発生した大小含めた不具合件数を装置群ごとに分類したグラフを図2に示す。

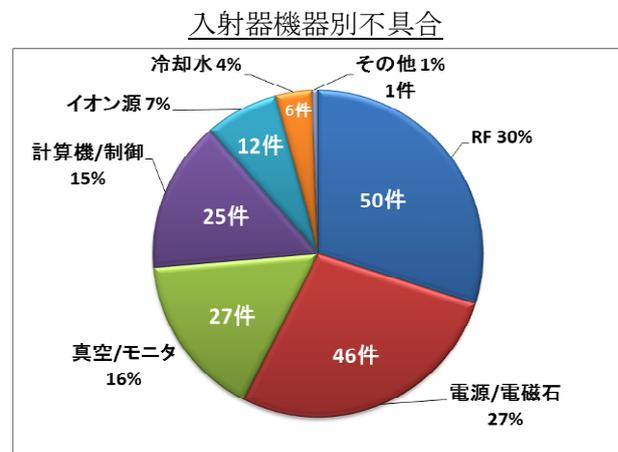


図2. HIMAC入射器機器別不具合

機器分類上最も不具合件数が多いRFではキャビティタンク内の放電が32件で大半を占めている。この不具合により真空管用電源がOFFされるので、再立ち上げと低レベルRF出力調整により約3分のビーム停止時間が発生する。次の電源/電磁石分類ではイオン源電源が26件で最も多く、真空管用RF電源の不具合が12件と続いている。どちらも放電に起因する過電流で、電源の再立ち上げにより1, 2分で復旧となる。真空についてはRFQタンク内水素分圧上昇が9件、TMP電源の不具合が8件で大半を占めてい

¹ E-mail: aec2g@nirs.go.jp

る。RFQタンク内水素分圧上昇は、PIGイオン源においてプロトンビーム供給の数日後に突然発生する現象で、 $2e-06 \rightarrow 7e-06$ Pa程度のRFQタンク内真空度悪化をもたらす。この現象ではビーム供給停止には至らないが高繰り返しでの重いイオンを加速する場合の高出力運転は安定性が悪くなる。発生メカニズムについては不明であるが、PIGプロトン供給による比較的多量の水素ガスがRFQまで流出し排気され、ターボ分子ポンプ（TMP）とスクロールポンプ（SP）で構成されるポンプ系においてSPのH₂排気量がN₂に比べ低いH₂が残留、数日後に何らかのトリガーにより背圧が徐々にタンク側へ漏れ出ていると考えている。TMP電源の故障については経年的な不具合原因がほとんどで、予備品との交換により対応している。

2.2 長時間ビーム供給停止の不具合と対応

発生件数についての不具合はRFQ、PIGが半数を占めているが供給停止時間は比較的短い。次に長時間の停止時間をもたらした不具合ワースト5を紹介する（表1）。

表1. HIMAC入射器長時間停止不具合事例

不具合事例	停止時間 (分)
①. PIG FIL 短絡	317
②. HEC MFC 制御不良	234
③. HEC Kr ガス欠	120
④. TMP431 コントローラ不良、交換	114
⑤. DTQ 電源不良、光学計算供給	102

最も供給停止時間が長かったのは、①. PIGのフィラメント短絡不具合に対してフィラメントの再セッティングと真空引きのやり直しを3回実施した不具合事例である。現在のところフィラメント=カソード間の距離やフィラメント取り付け方法などは個人の経験量・スキルによる部分が多い、これら一連の専門作業を一般化するようセットアップ治具の設計および技術の定量化による対策を進めている。

②. HECイオン源のマスフローコントローラ（MFC）が何らかのタイミング（放電ノイズ？）で流量制御不能、最小流量制御量のオフセットが $0.006 \rightarrow 0.018$ cc/minに増加となりXeビーム供給が出来なくなった不具合である。プラズマチェンバー内ガス成分をQマスにてモニターしガス配管手動ボールバルブを閉方向に微調整、さらに安定化までに要した時間を含めて234分のビーム供給停止となった。再発防止のため高压デッキ上に設置されているMFCのGND強化と大地側からの制御アナログ信号をデジタル信号へ変更する検討を進めている。

③. については供給開始時の濃縮⁸⁴Krガスの残量と供給使用時間の計算に間違いがあったため供給途中でガス欠となった不具合である。不具合発生時には一般Krガスに交換し対応した（ビーム量は1/5程度となる）。

④. DTLに取り付けられている5000リットル/min TMP431が運転中に突然FAULT、異常詳細メッセージ無しであった。停止完了に30分、電源コントローラを交換、起動完了（ノーマル回転）までに35分、その後の確認を含めて114分のビーム供給停止となった。原因はコントローラ電源内部制御マイコンの給電電圧不足で経年的な不具合である。後日に内部基板の修理、長時間動作テストにより問題ないことを確認している。

⑤. DTQはDTLのドリフトチューブ内部に設置された4極電磁石のことでこの電磁石電源内パワートランジスタが故障し、設定電流値が出力されない。ビーム供給中であったので、このDTQがOFF、前後に位置するDTQをパラメータとして光学計算し、計算された設定値にもとづいて微調整することでビーム量復旧、供給再開している。

3. 機器改善とグレードアップ

我々は前項で述べられた不具合に対する修理対応と防止対策だけでなく、新しい技術を応用した様々な機器改善・開発を日々行っている。以下では、現在までの改善実績・開発と今後の作業予定について紹介する。

3.1 HEC：新イオン種の生成とMIVOC装置の改良

特に物理実験分野でのHIMACビームユーザーの要望に応えるためにMIVOC法（Metal Ion from Volatile Compounds Method）を利用した様々なビームイオン種の生成を試みている[4]。現在まで生成可能となったイオン種を表2に示す。

表2. MIVOC法によるイオン種生成結果

イオン種	電流量	温度・環境
⁵⁶ Fe ⁹⁺	250 eμA	加熱、粉体
⁵⁸ Fe ⁹⁺	220 eμA	加熱、粉体
⁵⁹ Co ⁹⁺	210 eμA	冷却、粉体
²⁴ Mg ⁵⁺	150 eμA	冷却、粉体
²⁸ Si ⁵⁺	250 eμA	室温、液体、MFC
⁷⁴ Ge ¹²⁺	42 eμA	室温、液体、MFC

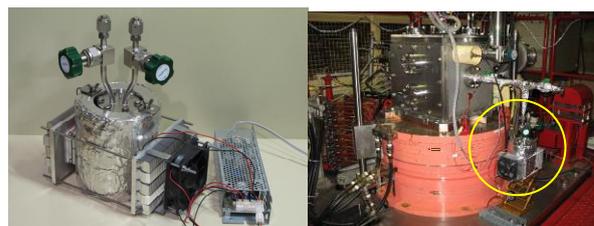


図3. 冷却制御MIVOC装置（左）
HECイオン源への装着（右）

Co, Mgについてはペルチェ素子を利用した冷却装置を開発することで生成可能となった。MIVOC冷却コントロール装置を図3に示す。さらに現在試行中の新イオン種は粉体試料の⁴⁸Ti, ⁴⁰Caの

3.2 RF：新型AGC&APC制御装置と30kW半導体アンプ

2009年にHIMAC入射器ライナックのRF強度・位相を安定に出力するAGC&APC制御装置の新型を開発・導入した。これは不具合時の調査をより迅速に、故障箇所を容易に判別できるように再設計されたものである[5]。導入後にシールド強化のための内部ケーブル変更、コントロール電圧に対する移相器動作の線形性向上およびRFスイッチの改良を経て、現在では量産化されHIMAC入射器の全RF装置(RFQ, DTL1~3, DBC)と高効率小型加速器のIHLに導入稼動している。

HIMAC入射器RFQ線形加速器のRF増幅システムの老朽化の対策として、大電力半導体アンプの導入を進めている。図4に現状のRFQ高周波増幅システムと検討中の変更後システムを示す。

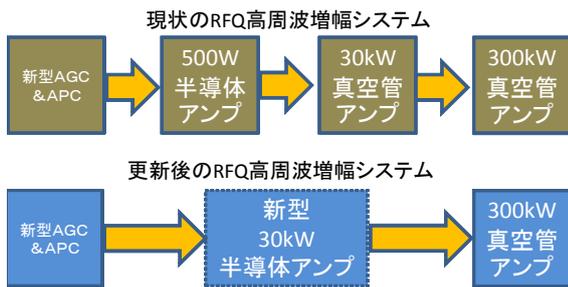


図4. HIMAC入射器RFQ高周波増幅システムの現状と更新後

新規に導入される30kW半導体アンプは狭帯域100 ± 1 MHz、デューティ最大0.5%、空冷で5kWアンプユニット8台から構成されている。このアンプユニットが故障した場合、予備品アンプユニットと交換することにより迅速に運転再開可能となる機能を有している。今年度末に導入・稼動を予定している。

3.3 制御&統括計算機

電源、モニター、真空を含む各装置にはオペレータが統括計算機を介し状態監視・リモート操作するために制御機器が備わっている。この制御機器は従来まではUDC仕様であったが開発・改善に適していないために2008年より順次PLC&タッチパネルシステムへとリプレースを進めている。ECR, HECイオン源のすべての装置については既に完了、今夏には真空系の全制御装置リプレースが完了する(図5)。

統括計算機についてはVME→PLCへの変更を来年度に予定している。これによりWindows等の汎用OSアップデートへの対応が容易に対応可能となる。

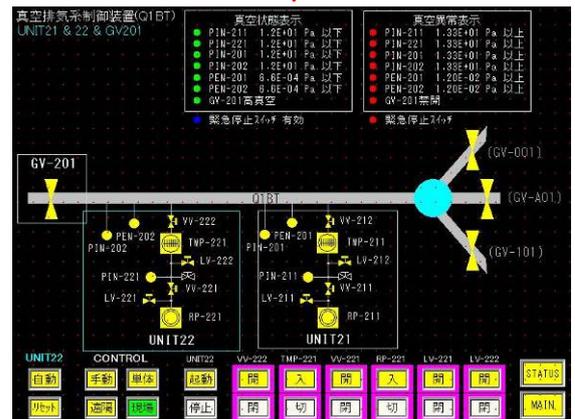


図5. 真空制御装置のPLC&タッチパネルシステムへのリプレース

4. まとめ

治療・実験利用施設としてのHIMAC入射器の不具合は、発生件数ではRF・イオン源の放電によるものが圧倒的に多いが、いずれも数分で復旧可能である(総件数については167件と例年と同様)。一方、長時間停止の面については予想される真空や冷却水の不具合ではなかった。真空・冷却水は件数も少ないが、蓄積された経験と監視・早期メンテナンス対応が有効に働いているためと考えられる。また機器内部消耗物品の交換を定期的に行っている効果のためか、部品故障による件数は比較的少ない。

参考文献

- [1] M. Muramatsu “Development of Compact electron Cyclotron resonance ion Source with Permanent Magnets for High-energy Carbon-ion Therapy” 17th International Conference on ion Implantation Technology (2008).
- [2] Y. Iwata “Performance of a compact injector for heavy-ion medical accelerators” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572 (2007) 1007-1021.
- [3] Y. Kageyama “Present Status of HIMAC injectors at NIRS” Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2010) 1135-1138.
- [4] W. Takasugi “MIVOC method with temperature control” Review of Scientific Instruments 81 (2010) 02A329.
- [5] T. Takeuchi “Development of the New RF Control System (AGC&APC) for HIMAC Injector LINAC” Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2009) 1097-1100.