

高速インターロック機能を備えた RI 製造ライン用真空制御装置の開発 DEVELOPMENT OF VACUUM CONTROL EQUIPMENT FOR RI PRODUCTION LINE WITH HIGH-SPEED INTERLOCK FUNCTION

渡邊環 ^{*,A)}, 羽場宏光 ^{A)}, 金山洋介 ^{A)}, 南部明弘 ^{A)}, 佐藤望 ^{A)},
清水弘通 ^{A)}, 重河優大 ^{A)}, 白田祥子 ^{A)}, 黒須弘典 ^{B)}

Tamaki Watanabe ^{*,A)}, Hiromitsu Haba ^{A)}, Yousuke Kanayama ^{A)}, Akihiro Nambu ^{A)}, Nozomi Sato ^{A)},
Hiromichi Shimizu ^{A)}, Yudai Shigekawa ^{A)}, Sachiko Usuda ^{A)}, Hironori Kurosu ^{B)}

^{A)} RIKEN

^{B)} TRIONIX Inc.

Abstract

Vacuum control is extremely crucial in beamlines used for radioisotope (RI) production using heavy-ion beams accelerated by cyclotrons and linacs. In particular, when the vacuum window of the RI production system is damaged by high-intensity beam irradiation, the resulting vacuum degradation requires an immediate response. To protect both the experimental apparatus and the accelerator, a beam interlock system is essential, automatically closing the beamline gate valve and stopping the beam and vacuum pumps. To address these challenges, we have developed a new vacuum control system. This system is based on a Field Programmable Gate Array (FPGA) platform and can transmit beam interlock signals more than 100 times faster than conventional systems.

1. はじめに

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター・核化学研究開発室では、サイクロトロンや線形加速器により加速された重イオンビームを用いて、さまざまな放射性同位体 (RI) を製造し、超重元素化学研究や放射性医薬品の開発等に活用している [1, 2]。近年、RI を含んだ薬剤をがん細胞に集積させ、RI から放出される α 線などの放射線を用いて細胞を死滅させる核医学治療法が注目されている。特に α 線放出 RI として、アスタチン-211 (^{211}At) の需要が急速に高まっており、現在仁科加速器科学研究センターの重イオン加速器施設 RI ビームファクトリー (RIBF) で大量に製造した ^{211}At は、大阪大学 医学部附属病院や国立がん研究センターなどに安定的に供給されている [3]。Figure 1 に、RI 製造に用いられている加速器と RI 製造用ビームラインを示す。 ^{211}At は、加速器によって加速された α ビームをビスマス (Bi) 標的に照射して製造される。

2. 真空制御装置

2.1 RI 製造用ビームラインに於ける真空装置

RI 製造用ビームラインに於ける真空装置の構成を Fig. 2(a) に、またその一例として E3B ビームライン (Fig. 1 参照) を Fig. 2(b) に示す。ここで用いられている真空機器の詳細は Table 1 に示した。Figure 2(a) のバイパスラインとは、大気から真空引きを開始する際、真空窓がダメージを受けないように、手動でバイパスバルブを徐々に開けるラインである。Figure 2(b) の水色の丸で囲まれた部分は、設置された ^{211}At 製造装置 [4] であり、この装置の前方には、Ta スリットとビームの照射による熱負荷を緩和するために開発された Ti 回転真空窓が設置される。ビームはこの図の左側から輸送され、真

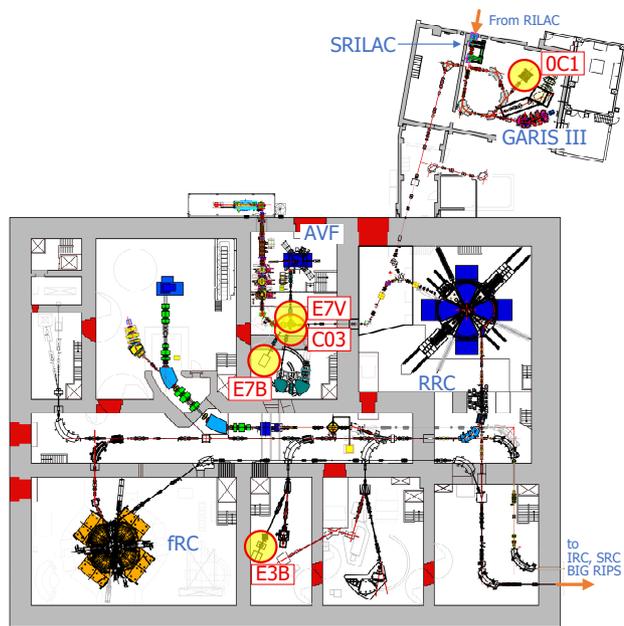


Figure 1: Accelerators (AVF cyclotron, RRC, and SRI-LAC) and beamlines (C03, E7V, E7B, E3B and 0C1) used for RI production at the RI Beam Factory (RIBF), the heavy-ion accelerator facility of the Nishina Center for Accelerator-Based Science.

空窓を通過後に ^{211}At 製造装置の Bi ターゲットに照射される。

2.2 従来の真空装置

RI 製造用ビームラインに於いては、真空制御は極めて重要である。特に、ビームの照射によって真空窓がダメージを受け、真空リークが発生した場合には、瞬時に実験装置と加速器を保護する必要がある。このためには、常時真空度を監視し、真空悪化を検知すると、即刻ビームラインのゲートバルブを閉じ、ビームと真空ポン

* wtamaki@riken.jp

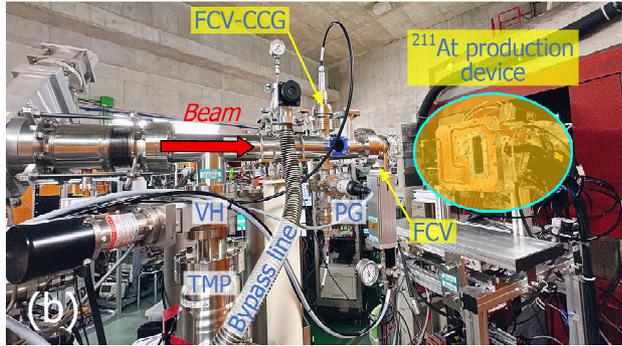
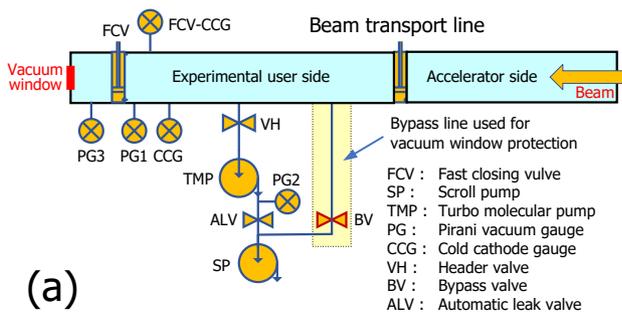


Figure 2: (a) Configuration of vacuum equipment in the RI production beamline. (b) E3B (See Fig. 1) RI production beamline. The area enclosed by the light blue circle is where the ^{211}At production device [4] is installed. A Ta slit and vacuum window is installed in front of this ^{211}At production device.

Table 1: Details of Vacuum Equipment

Vacuum device	Model	Manufacturer
Cold cathode gauge	IKR 050	Pfeiffer Vacuum [5]
Pirani gauge	TRP 010	"
Turbo molecular pump	HiPace 300	"
Scroll pump	ISP-90	ANEST IWATA [6]

ブを緊急停止するインターロックが必要不可欠である。一方、定常運転として、真空引きの開始時や大気開放の際には、決まったシーケンスに従い、真空度の変化に応じて各真空ポンプやバルブを動作させる制御も重要である。そのような状況下で、従来の真空制御では以下の問題点があった。(1) RI 製造用ビームラインの真空計やターボポンプの電源等は、個別に分散されて設置されていた。(2) 実験中に照射材料を交換する際は、現場で真空操作を行うため、実験室と照射室を往来する必要がある。(3) 真空度は実験者の PC がデータロガーから取得していたため、加速器を運転するオペレーターは、真空計の前に設置した CCD カメラから送られてくる映像を見ながら調節する必要があった。(4) 旧真空操作盤は照射室内にあったため、実験時にビームがターゲットに照射されると、高線量の放射線が発生し、旧真空操作盤がフリーズしたり誤動作した。(5) 真空悪化を検知する真空計の反応速度とゲートバルブの開閉スピードが充分ではなかった。

2.3 真空制御装置の開発

上記の問題を解決するために、真空制御装置導入の検討を始めた。まずは、加速器基盤研究部が約 20 数年前に設計した真空操作盤の再生産を検討したところ、基板用の部材が生産終了していたため、新たに再設計する必要があることが解った。また、筐体側の部品に於いては、DC 電源やコネクタ類の納期が約 18 か月以上、部品によっては未定、という回答を製造会社より受けた。

そこで、新たに真空制御装置に必要なスペックの検討から始め、設計と試験を開始した。まず始めに決めた仕様は、放射線からの障害を避けるために、真空制御装置は照射室外に設置し、一か所で集中して制御を行うことである。更に、ビームを緊急遮断する加速器側のビームインターロックシステム (BIS) には高速性が求められているため、FPGA (Field Programmable Gate Array) を搭載したシステムを採用することに決めた。また、FPGA によるシステムであれば、運用開始後に機能の追加や変更が、プログラミングで可能な点が大きな利点である。加速器側で使用されている BIS は FPGA を搭載したシステムに移行中であり、その応答時間は $200 \mu\text{s}$ 以内であるから、従来のシステムの 100 倍以上の高速性を実現している [7]。真空制御装置もこの応答速度を得るために、制御コントローラにはナショナルインスツルメンツ社 [8] の Compact RIO (cRIO) を採用し、LabVIEW によってプログラミングを行った。完成した真空制御装置を Fig. 3 に、FPGA を搭載したコントローラの概要を Table 2 に示す。このコントローラの制御は、FPGA 部とリアルタイム OS 部で構成されている。FPGA 部は、実 I/O 周りの処理、状態遷移等を実装しており、リアルタイ

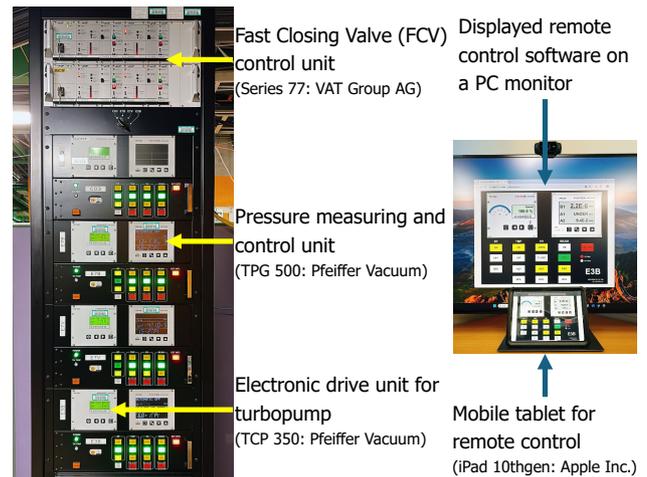


Figure 3: Vacuum control system with a fast closing valve for the RI production beam line. Tablets and PCs that can be remotely controlled and monitored.

Table 2: Overview of FPGA-Based Controllers

Model	Compact RIO 9054 (National Instruments)
FPGA	Xilinx Artix-7 A100T
OS	NI Linux Real-Time (64-bit)

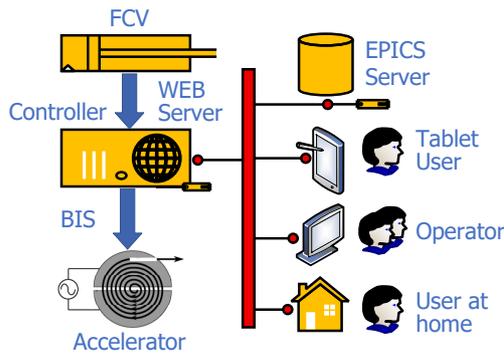


Figure 4: Network concept diagram of the vacuum control device.

OS 部は、HTTP コマンドによる EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) サーバーへの履歴データアップロード、Fig. 3 に示すように Web サーバー機能によるタブレットや PC による遠隔操作や監視を担っている。Figure 4 に、これらのネットワークの概念図を示した。cRIO は、瞬時停電でダウンした際も、数秒で自動復帰することができ、ハードウェアの堅牢性を有している。ネットワークを介した遠隔操作と真空度の監視によって、研究者やオペレータ同士で情報を共有することができるようになった。また、アーカイブされた真空度のデータは、現在開発中の ^{211}At 製造装置に於いて、後日の解析に有用な情報を提供している。

真空悪化に対する検知とバルブ閉止には、VAT 社 [9] の FCV (Fast Closing Valve) コントロールユニット (Series 77) を用いている。真空センサー (Cold cathode gauge) が検知した真空悪化の信号は、バルブが閉止する前に真空制御装置に送られ、ビームを緊急停止する BIS 信号を発報し、同時に RI 製造用ビームラインのヘッダーバルブを閉止する。現在、この真空制御装置は、Fig. 1 に示した計 5 箇所の RI 製造用ビームラインに設置されている。

3. FCV の応答時間測定とアーカイブデータ

FCV の応答時間の測定を行うために、FCV が動作する真空度の閾値を 1×10^{-6} mbar に設定し、ターボ分子ポンプを停止することによって FCV を動作させた。その測定結果を Fig. 5 に示す。センサーモジュールが真空度の悪化を検出すると「Inrush signal」信号を発生し、こ

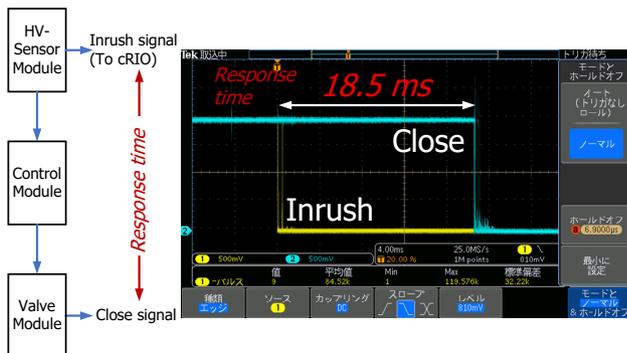


Figure 5: Measured result of the FCV response time.

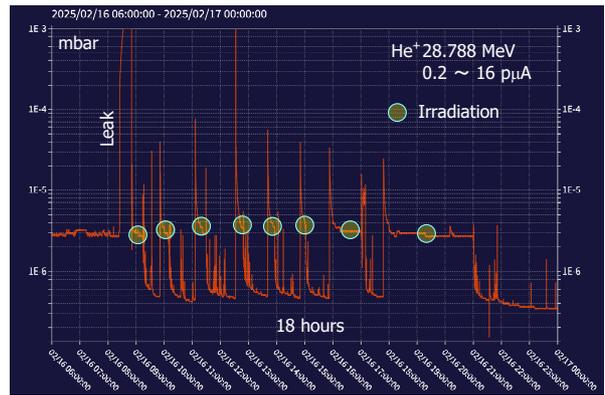


Figure 6: An example of archived vacuum degree by the vacuum control device during testing of the ^{211}At production device [4].

の信号によってバルブモジュールが FCV を閉じ、閉止が完了すると「Close」信号が発せられる。この測定により、現在の構成に於いては、FCV の応答時間は 18.5 ms であることが解った。

アーカイブされた真空度の一例として、2025 年 2 月 16 日に行った ^{211}At 製造装置 [4] の試験時の真空度を Fig. 6 に示す。ここでは、28.8 MeV に加速された He^+ ビームを $0.2 \sim 16 \mu\text{A}$ の強度で計 8 回の照射を行った。真空度は照射直後に 10^{-5} mbar 台まで悪化するが、徐々に 10^{-6} mbar 台まで復帰していることが解る。

4. まとめ

RI 製造用ビームラインに於いて、集中制御と分散処理が可能な真空制御装置の設計と開発を行い実用化した。真空制御装置は、照射室外に設置し、放射線によるシャットダウンや誤動作の問題を解決した。FPGA を搭載したコントローラと FCV ユニットの構成によって、BIS 発報によるビーム緊急停止は、従来装置の 100 倍以上の速さを実現し、FCV は 18.5 ms で閉止することを確認した。操作や監視は、タブレットや PC から遠隔で行うことが可能となり、真空度やステータスは EPICS サーバーに常時アーカイブされている。

謝辞

設計にあたっては、加速器基盤研究部の渡邊 裕氏と住友加速器運転サービスの西田 稔氏から貴重なご助言を頂き、この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] H. Haba, Drug Delivery System **35**, No.2, (2020) pp. 114-120. doi.org/10.2745/dd.35.114
- [2] 羽場宏光, FBNews No. 558, (2023) pp. 2-6.
- [3] 理化学研究所 研究最前線 “がんの治療に新元素合成で貢献”, https://www.riken.jp/pr/closeup/2023/20230804_1/index.html
- [4] H. Arata *et al.*, “Improvement of a production system of astatine-211 for targeted alpha-particle therapy”, Proceedings

- of the 22th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, this meeting.
- [5] Pfeiffer Vacuum GmbH,
<https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/en/>
- [6] Anest Iwata Corporation,
<https://www.anestiwata-corp.com/>
- [7] M. Komiyama *et al.*, “Development and Test Operation of the Prototype of the New Beam Interlock System for Machine Protection of the RIKEN RI Beam Factory”, Proc. of the 19th Biennial International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPS 2023), Cape Town, South Africa , 2023-10, pp. 645 – 649. doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2023-TUPDP050
- [8] National Instruments Corp,
<https://www.ni.com/en.html>
- [9] VAT Group AG,
<https://www.vatgroup.com/>