

## RCNP イオン源群の EPICS による運用と大強度化

### DEVELOPMENTS OF INTENSE ION SOURCES WITH EPICS CONTROL AT RCNP

依田哲彦<sup>#, A)</sup>, 森田泰之<sup>A) B)</sup>, 神田浩樹<sup>A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>

Tetsuhiko Yorita<sup>#, A)</sup>, Yasuyuki Morita<sup>A) B)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

<sup>B)</sup> RIKEN Nishina Center

#### Abstract

The Upgrade work on the accelerator facility of Research Center for Nuclear Physics (RCNP) has been carried from 2019 in order to revive the AVF cyclotron and improve the performance and functionality so that it can supply high-quality beams with higher intensity. During this upgrade, the control system consists with hard wired relays complex and SCADA with PLC and UDC is also updated and modified. At the same time, the EPICS system is introduced partially. Regarding the ion sources, almost all of equipment are controlled under the EPICS framework after the upgrade. Automatic beam tuning system can be constructed with the EPICS and some machine learning frameworks, and higher intensity beam might be achieved with these systems.

#### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (RCNP) では 2019 年から AVF サイクロトロン改造を中心としたサイクロトロン施設の更新が実施されている[1]。この AVF サイクロトロンの更新に伴い、制御系もリレー制御を廃止するなどの更新作業が進められている。この制御の更新では、将来的にすべての制御を EPICS に移行することを見据えて、RF アンプなど新しく導入された機器やスタンドアロンで動いていた機器を中心に EPICS 化を進めている[2,3]。イオン源については、もともと制御に組み込まれず手動で動いていた物が多かったこと、磁石電源類をほぼ全数入れ替えたため PLC による制御系も一から組み直したこと、

などの事情から、この期会に、遠隔操作可能な機器への入れ替えが実施され、EPICS による運用に完全に移行された。この結果、Archiver Appliance との組み合わせにより、過去の運転データへのアクセスが飛躍的に容易になり、ビームの強度や輝度といったビームクオリティの向上が大きく進むことが期待されている。また、ガウス過程回帰を利用した機械学習による運転の最適化の仕組みの構築も順次進められ、一部のイオン源については半自動調整が実現している。本論文において、Fig. 1 に示したイオン源群のうち、特に NEOMAFIOS、NANOGAN、超伝導(SC)-ECR についての開発状況について述べる。

#### 2. NEOMAFIOS

10 GHz 永久磁石型 ECR イオン源である NEOMAFIOS は水素、ヘリウムなど軽イオンの生成に利用されている。AVF 更新工事以前は RF アンプ、ガスバルブ及びビーム輸送系 (LEBT) のファラデーカップの操作など一部の UDC 機器[4]のみ Wonderware InTouch より制御されていた

##### 2.1 制御系の構築

イオン源の加速用高電圧電源及び LEBT 上の双極電磁石、四重極電磁石、グレーザーレンズ等の電源は AVF 更新に伴い新しいものに更新された。今回、遠隔操作を実現すべく Yokogawa PLC の ADC, DAC による 0-10 V 制御をできるようにした (Fig. 2)。EPICS への組み込みはラダーを F3RP71 の EPICS IOC から制御する形を取っている。ファラデーカップ等測定機器の圧空制御やインターロックリレーに対する制御は PLC の入力モジュールに対するラダーを F3RP71 の IOC から制御している。ガスバルブ操作のためのモーター制御も PLC モータードライバーに対し組んだラダーを F3RP71 の IOC から制御している。真空ポンプやゲートバルブなどの真空操作系は三菱 PLC のものを Yokogawa PLC に置

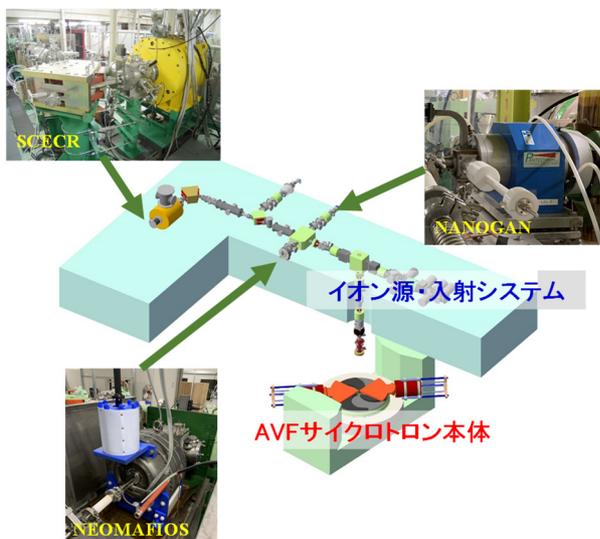


Figure 1: Schematic View of ion sources and AVF Cyclotron. Pictures of NEOMAFIOS, NANOGAN and SC-ECR are shown.

<sup>#</sup> yorita@rcnp.osaka-u.ac.jp



Figure 2: Yokogawa PLCs and relays for NEOMAFIOS and SC-ECR. Same system is also used for polarized ion source which is not shown this time.

き換えを行った。PLCラダーにより独立制御されているが、真空度のみ真空計のアナログ出力を PLC ADC で取得し、別のサーバー上に構築した仮想マシンより NetDEV により EPICS に取り込んでいる。RF アンプについては依然 UDC-MTC (SHI 製) 制御となっているので VME ボード PC から独自の DEVICE SUPPORT により EPICS に取り込んでいる (Fig. 3)。以上により、操作するほぼすべての機器を EPICS に組み込むことができた。

## 2.2 運用状況

NEOMAFIOS は AVF 更新に伴う入射半径の変更に合わせて、現在水素イオンは 50 kV, He は 20 kV の加速電圧により AVF に供給している。この水素 50 kV 運転時に時々発生する放電が、UDC, PLC 各機器をハングアップさせたり、ターボポンプを停止させるということが頻発した。対応として、放電時に発生するノイズ低減のため、加速電圧供給ラインにダンパー抵抗を付けるこ

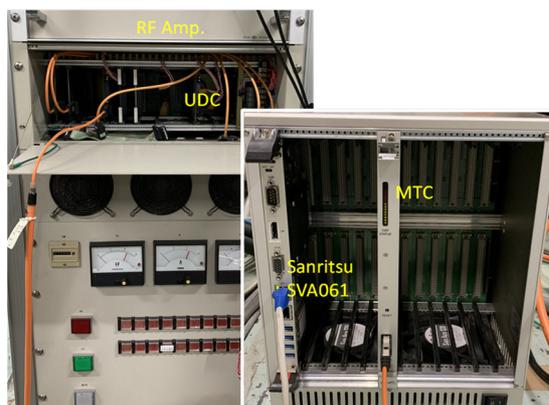


Figure 3: UDC-MTC controlled by EPICS with VME board computer Sanritsu SVA061.

とで大幅改善した。念のため PLC 電源にサージ除去装置の取り付けも行ったので今後は安定的に運用できるよう期待される。

## 2.3 自動制御

操作するすべての機器を EPICS に組み込んだので、遠隔操作が可能となったほか、機械学習によるビームの自動調整も可能となった。機械学習用に GPU を搭載した計算機サーバーを EPICS と同じネットワーク上に配置した。このサーバーを利用して、LEBT 上の十数チャンネルの磁石列を機械学習により操作しビームの大強度化を実現する試みも順次進めている[5]。

## 3. NANOGAN

10 GHz 永久磁石型 ECR イオン源である NANOGAN は NEOMAFIOS 同様、水素、ヘリウムなど軽イオンの生成に利用されている。NANOGAN は AVF 更新後に新しく導入されたイオン源で、テストベンチの様相が強いため、NEOMAFIOS に比べて制御が簡略化されている。

イオン源加速用高電圧電源、及びビーム輸送用の磁石電源や RF モニター用のパワーメータは 0-10 V 制御をしている。0-10 V の入出力は Yokogawa PLC の ADC, DAC を直接 F3RP71 の EPICS IOC から読み書きしている。ファラデーカップなどの測定機器の圧空制御は Raspberry Pi の GPIO 端子からリレーを制御することでやっている。ガスバルブ及び RF チューナーのモーター制御は Arduino によるモータードライバー制御システムに対して Raspberry Pi より USB シリアル通信経路で Stream Device による EPICS 制御を実現している (Fig. 4)。なお、エンコーダーは利用せずモーター制御パルスを一方向的に送るだけなので、時々ゼロ点復帰する運用が必要である。また Arduino が放電に弱く、放電の影響でガスバルブが全開となる事故が 1 度起きている。NEOMAFIOS 同様ダンパー抵抗を導入するなどの対策を講じる予定である。真空計 TPG500 は Raspberry Pi より USB 経由で Stream Device により値を読みだしている。パワーメータ Agilent 53147A は Raspberry Pi より USB-RS232C 変換を経由して Stream Device で値の読み出しをしている。RF は 10 GHz TWTA により生成しているが

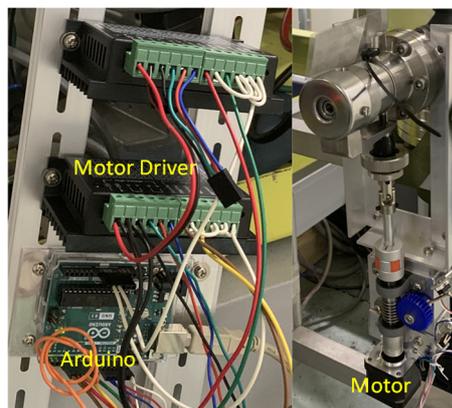


Figure 4: Motor driven by Arduino.

TWTA に入力する信号源 Anritsu MG3692C の制御は別のサーバー上に構築した仮想マシンより LAN 経由で Stream Device により ON/OFF、周波数設定および出力パワーの設定を行っている。ビームモニターとしてペーパーポット型エミッタンスモニター(PPEM)を有している。この PPEM は LabVIEW で制御されているが、得られたエミッタンスの値は CALab[6]により EPICS 系に流される。

以上のとおり操作するすべての機器を EPICS に組み込まれ、先述の機械学習用計算機サーバーとの組み合わせにより高輝度ビーム開発の自動化が可能となった。よって機械学習のテストベンチとして利用されて実績をあげている[7]。

#### 4. SC-ECR

AVF 更新により AVF の入射半径が変更されたのに伴い、SC-ECR も最大 50 kV でのビーム生成をする必要がある。この 50 kV 加速に向けた改造を現在進めている[8,9]。

制御系に関しては基本的に NEOMAFIOS のものと同様の PLC 中心のシステムを構築している。超伝導コイル制御電源については、更新前は盤内の三菱 PLC と Windows PC を光ファイバーによる Melsec Net のより接続しスタンドアロンで制御していた。これを EPICS に組み込む場合、盤内に LAN の口がないので、別の PLC CPU を準備し MELSEC Net で外に取り出したうえで仮想マシンより LAN 経由で NetDEV 制御する予定である(Fig. 5)。

#### 5. エミッタンスモニターの制御更新

イオン源の LEPT 上に NEC BPM82 とスリットにより構築された高速エミッタンスモニター[10]が設置されている。

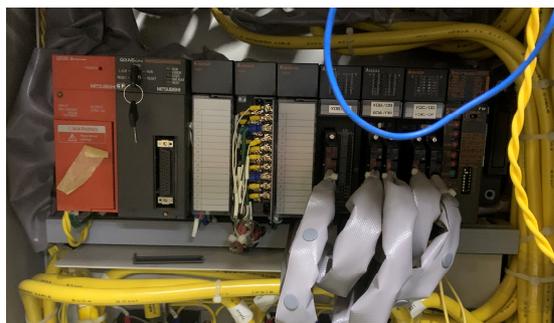


Figure 5: Mitsubishi PLC inside Coil Power Supply controlled by another PLC CPU using NetDEV.

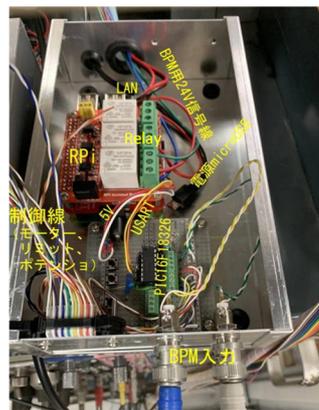


Figure 6: New compact emittance monitor control system.

このエミッタンスモニターの制御は EPICS が構築されている加速器のネットワークとは別のネットワーク上にある汎用計算機、NIM・CAMAC モジュール及び PLC で構築されたスタンドアロンシステムで制御されていた。ここで、汎用計算機は全体の制御及びエミッタンス算出を、NIM・CAMAC は Profile の取得を PLC はモーター制御及び BPM82 コントローラの制御を担っていた。このモニターを EPICS に取り込むべく、新たに、加速器ネットワーク上で EPICS IOC、各種制御、エミッタンス算出を担う Raspberry Pi、モーター制御と Profile 取得を担う PIC マイコンで構成されたシステムへの置き換えを進めている(Fig. 6)。この移行により、高輝度ビーム開発がさらに進展することが期待される。

#### 6. まとめ

2019~2020 年度に実施されている AVF サイクロロン工事に際し、制御機器の更新を行った。この際、イオン源関連機器をほぼすべて EPICS へ移行した。また、機械学習による自動制御システムも実現した。今後、高輝度ビームの開発が効率よく進められることが期待される。

#### 参考文献

- [1] M. Fukuda *et al.*, Proc. of this conference. FROA04.
- [2] T. Yorita *et al.*, Proc. of PASJ2020, FRPP23.
- [3] T. Yorita *et al.*, Proc. of PASJ2021, THP041.
- [4] T. Yamazaki *et al.*, Proc. of 12<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and their Applications, p252 (1989).
- [5] Y. Morita *et al.*, Proc. of PASJ2022 THP045.
- [6] <https://github.com/epics-extensions/CALab>
- [7] Y. Morita *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 2244 (2022) 012105.
- [8] M. Kittaka *et al.*, Proc. of PASJ2022 TUP043.
- [9] N. Yamasaki *et al.*, Proc. of PASJ2022 TUP005.
- [10] K. Kamakura *et al.*, 19th IEEE-NPSS Real Time Conference, 2014, pp. 1-1; doi: 10.1109/RTC.2014.7097455