

RCNP における電磁石電源制御更新及び RF 故障検知機構の開発

UPDATE OF THE CONTROL SYSTEM OF MAGNET POWER SUPPLY AND DEVELOPMENT OF ANOMALY DETECTION SYSTEM FOR RF STABLE OPERATION AT RCNP

依田哲彦^{#, A)}, 松田洋平^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 福田光宏^{A)}

Tetsuhiko Yorita^{#, A)}, Yohei Matsuda^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

Abstract

At the RCNP cyclotron facility, efforts are underway to enhance the stability of beam delivery. As part of this initiative, legacy SHI UDC microcontroller boards used for magnet power supply control are being progressively replaced with PLCs. While most the facility's control systems currently operate under the InTouch SCADA platform, the new PLC-based systems are integrated into EPICS, with the aim of increasing the overall share of EPICS-based control. To ensure a smooth transition, an OPC UA server has been introduced between SCADA and EPICS, allowing power supplies to remain operable via SCADA during migration. This architecture preserves existing operational workflows while enabling EPICS-based data access through Python, facilitating applications such as machine learning for predictive maintenance and improved operational stability. In parallel, for the RF system—already fully controlled by EPICS—a machine learning framework using neural networks is being developed to label acquired RF waveforms and detect precursors to phenomena such as clover operation. This is expected to contribute to improved reliability and extended service life of the RF system.

1. はじめに

RCNP サイクロトロン施設ではビーム供給の安定運用のため様々な方策に取り組んでいる。その取り組みの一つとして、電磁石電源の制御に使用されている、レガシーな機器である SHI 製のマイコンボード UDC[1]の PLC への置き換えを、順次進めている。RCNP の制御システムの大部分は InTouch という SCADA システムで運用されているが、置き換えられた PLC 制御は EPICS[2]の配下に置き、制御系全体としては EPICS 制御の比率を上げていく方針で、様々な作業を進めている。ただし、EPICS 以降の過渡期における混乱を避けるため、SCADA と EPICS の間に OPC UA[3]サーバーを介することで電源制御を旧来通り SCADA から制御できるようにする仕組みを今回新たに構築する。これにより、従来通りのオペレーションが引き続きできる一方で、EPICS から Python を通じて機器情報を得ることが可能となり、機械学習への適応などが容易にできるようになり、その結果、機器の安定運用につながる。これとは別に、すでに EPICS 単体で制御されている RF システムについては、取得された RF 波形をニューラルネットでラベル付け機械学習をすることにより、RF システムでのクローバー作動などの予兆を検知するシステムの構築を進めており、こちらも、RF の安定運用や長寿命化につながる情報が得られることが期待される。

2. 電磁石電源制御更新

RCNP では90年代に構築された SHI 製マイコンボード UDC で構築された制御システムが、依然として大多数使用され続けている。この UDC ベースの制御システムは

Wonderware 社の InTouch により上位から制御されている。一方、機械学習への適用や、分散処理のニーズなどから、現在 InTouch 制御から EPICS 制御への移行を順次推進している[3-5]。この UDC ボードについては、RCNP で開発した VME ボードコンピューターを利用したシステムにより EPICS 化への見通しはついている[6]。ただし、UDC ボードについては、特にフォトカプラの寿命などにより、徐々に再生不能な不良ボードが出始めている。よって、可能な限り UDC 機器を PLC 化することで、UDC 機器を減らしつつ、同時に UDC ボードの予備品を増やすという方針を固めた。この一環で、電磁石電源について順次 PLC に置き換えつつある。この PLC は EPICS NetDev[7]で制御される。また、制御の上位系については、置き換えの過渡期に旧来の SCADA である InTouch から制御できる仕組みを構築中である。



Figure 1: The boxes for PLC and UDC.

[#] yorita@rcnp.osaka-u.ac.jp

2.1 PLC ボックスの制作

1枚の UDC ボードが担ってきた、電磁石電源制御は、設定値の平行信号出力、インターロックなどの各種ビット信号の入出力、Actual 値取得のための ADC などであり、また、ローカル操作盤も同時に制御されている。これらの UDC や操作盤は19インチラックの筐体に収められ、背面の I/O ポートで電磁石電源と接続されている。今回、この、19インチラックの筐体サイズそのままに、新たに PLC による制御システムを構築した。Figure 1 に新しく製作した PLC ボックスと旧来の UDC ボックスが接続された電磁石電源の様子を示す。PLC は平行出力のための Y 接点モジュール、ビット信号用に X、Y モジュール、Actual 信号用にアナログモジュールを準備した。また、ローカル操作のためのタッチパネル制御のため、RS232Cモジュールも準備した。これらPLCのほか、16bit 平行信号を高速にシームレスに出力するため別途アップダウンカウンタを設計導入した。これら PLC モジュールは PLC CPU 上のラダーにより制御されるが、特定のレジスタは、LAN経由で外部から制御可能となっている。これを EPICS NetDev により制御用 IOC を構築することで、電磁石電源の PLC 化及び EPICS 化が実現する。

2.2 EPICS と InTouch の連携

電磁石電源の EPICS IOC は最終的には CSS[8]などの上位系から制御されるが、EPICS 移行期の混乱を避けるため旧来使われている InTouch を上位系とする仕組みを考えた。そもそも EPICS と InTouch との接続を直接実施する仕組みはどこでも開発されておらず存在しないが、OPC UA プロトコルを挟むことで接続が可能となると考えられる。OPC UA は SCADA システムで広く利用されているプロトコルである。OPC UA と EPICS IOC は PyEPICS[9]及び FreeOpcUa[10]という Python Library によって接続する。これらの概念図を Fig. 2 に示す。ただし InTouch は、OPC は OPC でも OPC DA にしか対応していないことが分かっている。そのため、更に OPC UA と OPC DA の懸け橋として Wrapper[11]を導入することで、電磁石電源の PLC を EPICS 経由で InTouch から従来通り制御することが可能となる。

3. RF 故障検知機構

サイクロトロンで加速されるビームの安定供給のため

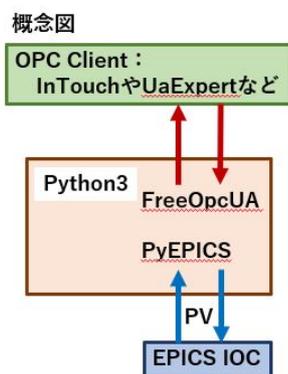


Figure 2: Connection layout between EPICS IOC and InTouch.

に、プレートクローバーなどの RF 回路保護機構による RF 停止のダウンタイムをできるだけ回避する必要がある。そのためまず、RF の異常を予め検知する仕組みを機械学習で行うことを検討した。

3.1 RF 波形の監視

AVF サイクロトロンは2台の RF アンプを有しており、それぞれに出力導波管の方向性結合機で進行波と反射波を監視している。監視は LAN に接続されたオシロスコープにより行われているが、このオシロスコープの波形は EPICS Stream Device[12]により Waveform として PV となり、Archiver Appliance[13]に逐次アーカイブされている。RF システムが異常状態に陥る直前に、この RF の波形が目で見えてわかるかどうかというレベルで、変化が表れているであろうということを前提として、異常時直前の波形を検知するシステムを検討した。

3.2 TensorFlow による異常検知

約40秒ごとに取得している RF 波形について、RF 異常直前の10分を Anomaly、それ以外を Normal とラベル付けして学習させた。今回使用した波形データは 4He2+ ビームを 28.5 MeV で加速するときのものに限定した。波形データセットは40000弱あり、Normal と Anomaly の比率は 100:1 程度である。今回は RF 停止が1日あたり平均1~2回と頻発していた AVF サイクロトロン南側に設置されている方の RF について、反射波と進行波両方について解析を行った。Figure 3 は典型的な波形の様子である。反射波の方は高調波成分が多いことが見て取れる。ラベル付けのうえ波形を学習したニューラルネットを用いて、RF 停止の5時間13分前の分のサンプル波形データから故障予測をした様子を Fig. 4 に示す。横軸の幅は5時間13分に相当する。結果によると、特に反射波の場合について RF 停止の2時間半前くらいまでは、Normal 状態と判断される0の値をとるが、それ以降の時間帯で、0ではない値が出るようになり、停止直前にさらに大きめの値が出る様子が見いだされた。よって、RF 停止のタイミングが近づくにつれて、波形信号に Anomaly 寄りの成分が含まれている可能性があることが示唆された。これ

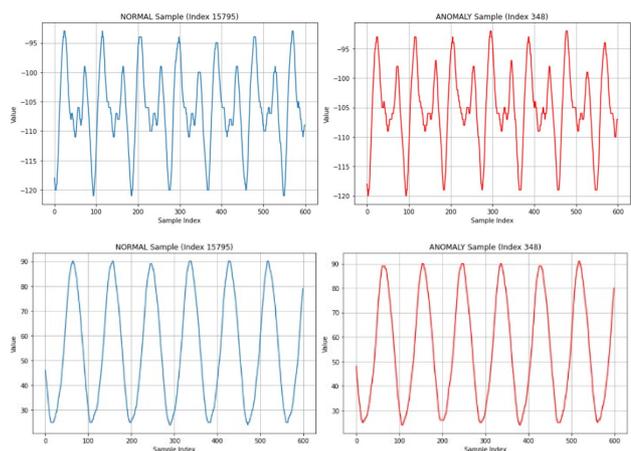


Figure 3: RF waveforms. Top two are for backward wave and bottoms are for forward wave. And left two are for NORMAL and right two are for ANOMALY.

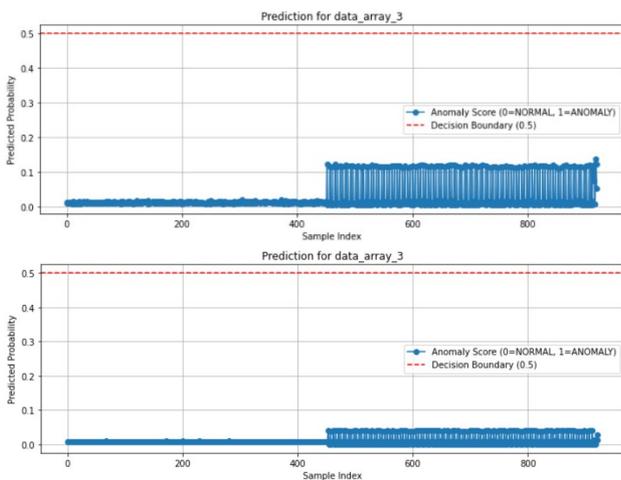


Figure 4: Prediction Probabilities. Top one is for backward wave and bottom is for forward wave.

により、少なくとも RF 停止の注意喚起をすることが可能となる。一方、実際停止させないために何をすべきかということは、より詳細な波形解析による RF の状態解析が必要と考えられる。

4. まとめ

RCNP サイクロトロン の安定運用のため、機械学習の導入を様々に進めている。電磁石電源等は旧来の SCADA による制御がなされていたため、機械学習でよく利用される Python との親和性があまりよくなかったが、今回制御を PLC 化することで EPICS 制御への移行と機械学習の導入が進む見込みとなった。また、異常検知機構の構築に取り組んでいる。今回、RF の異常発生を波形データから予測する機構をテストしてみたところ、事前に

検知しうる可能性が示された。今後、異常検知の精度向上に向けて、ニューラルネットなどの最適なパラメータを模索する。

参考文献

- [1] T. Yamazaki *et al.*, “Design of Distributed Control System for the RCNP Ring Cyclotron”, Proceedings of 12th International Conference on Cyclotrons and their Applications, p.252 (1989).
- [2] <https://epics.anl.gov/>
- [3] T. Yorita *et al.*, “Updating of control system and partial introduction of EPICS at RCNP”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September 2-4, Online, 2020, p.728.
- [4] T. Yorita *et al.*, “Control System Upgrade and Introducing EPICS on Legacy System at RCNP”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-12, Online, 2021, p.921.
- [5] T. Yorita *et al.*, “Developments of intense ion sources with EPICS control at RCNP”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, Online, 2022, p.532.
- [6] T. Yorita *et al.*, “Updating control system with EPICS and machine learning method at RCNP”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29-September 1, Funabashi, Japan, 2023, p.178.
- [7] <https://www-linac.kek.jp/cont/epics/netdevbis/netdev-man.html>
- [8] <https://controlsystemstudio.org/>
- [9] <https://pyepics.github.io/pyepics/>
- [10] <https://github.com/FreeOpcUa>
- [11] <https://www.unified-automation.com/>
- [12] <https://paulscherrerinstitute.github.io/StreamDevice/>
- [13] http://slacmshankar.github.io/epicsarchiver_docs/