

RCNP サイクロトロン安定運用のための時系列解析による異常検知機構の開発

DEVELOPMENT OF ANOMALY DETECTION SYSTEM WITH TIME SERIES ANALYSIS FOR CYCLOTRON STABLE OPERATION AT RCNP

依田 哲彦^{#,A)}、福田 光宏^{A)}、神田 浩樹^{A)}

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

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

Abstract

It is important to operate the accelerators under the very stable and high reliable conditions. The stable operation of the accelerators is also important to reduce the operation costs, especially the electricity cost which is soaring recently. To reduce the downtime of accelerator operation, the time series analysis to the monitoring systems has been done with the anomaly detection and the prediction for the future fluctuation. We developed the new monitoring system for the cooling water leakage and constructed the anomaly detection method with linear regression and now they work well. We also tried to use some python library for more fine detection or prediction and found that they are very promising methods.

1. はじめに

加速器を故障させることなく高い信頼性のもと安定に運転することは、非常に重要である。特に、近年の電気代などのエネルギーコストが上昇している状況下では、コスト削減の観点でもダウンタイムの少ない運転がより重要となってくる。ダウンタイムにつながるような重大故障を未然に防ぐ方策として、加速器の機器の状態を表す各種パラメータに異常の兆候が無いかを監視することが基本となる。監視対象は通常多岐にわたるので、制御システムで収集されるデータに対して、時系列解析を実施し重大事故の前駆現象の兆候を見出す自動システムの構築が必要となる。このとき、監視しているパラメータのノイズに埋もれがちな成分を効率的にピックアップできるよう、例えばベイズ推定の仕組みを取り入れた手法などにより、検出精度の向上を目指すことが肝要である。大阪大学核物理研究センター(RCNP)では、異常検知機構として、まず、漏水検知のための冷却水の総量監視システムを



Figure 1: Ultrasonic level gauge on the buffer tank of cooling water system.

構築し、その水量の変化を線形回帰などを利用した時系列解析により、いち早く漏水を検知する仕組みを開発した。また、異常予知機構として、RCNPのAVFサイクロトロンイオン加速用Dee電極にかかる電圧振幅の安定度向上のため、Dee電圧の変化をKalman FilterやMarkov Chain Monte Carloなどにより、予測し前もってフィードバックをかける機構の実現性について検討も行った。

2. 冷却水漏れ検知機構

RCNPのAVFサイクロトロンは運転開始から50年近く経っており、その冷却水系は老朽化もあって、時々漏水が発生する。加速器運転のダウンタイム回避のため迅速な漏水検知は重要である。今回、冷却水系を構成するバッファ水槽の液面を監視することで漏水検知をする仕組みを構築し、これまでは、加速器運転員が定期的に液面レベルを目視点検していたところを遠隔からもレベルがわかるようにした。この冷却水系は自動給水機構が備わっていないので、バッファ水槽の液面の低下により漏水がシステムのどこかで発生したことを知る事が可能となる。

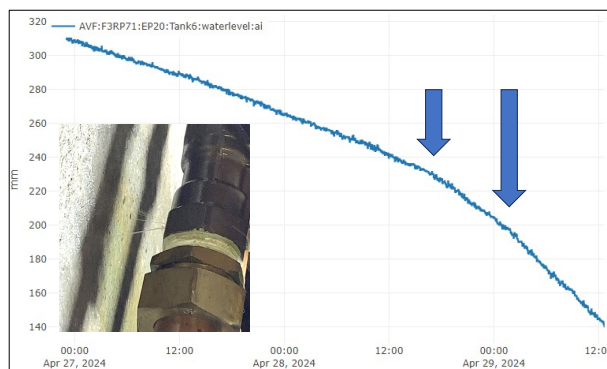


Figure 2: Example of water level trend. The picture shown in this figure shows the water leakage at this moment.

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

2.1 漏水監視機構の構築

バッファ水槽の液面監視のために、今回新たに本多電子株式会社の超音波レベル計 HD350 を導入した。水槽の上面に Fig. 1 のとおり設置した。HD350 は直流定電圧駆動となっており、液面レベルに応じて電流値が変化する仕様となっており、この電流を抵抗により電圧変換し PLC によりデジタル変換される。PLC で取得した値は、EPICS IOC[1]により EPICS Process Variable (PV)に変換され、そのデータは EPICS Archiver Appliance に保存される。実際にビーム輸送系の磁石冷却水系ボール弁に亀裂が生じ、漏水が発生した時の液面の変化の様子を Fig. 2 に示す。このときは、およそ $-0.6 \mu\text{m/s}$ の傾きで液面が減少しており、また、図中の矢印で示したように、漏水速度の変化が発生していることが見て取れた。

2.2 回帰直線による異常検出

液面計のデータから漏水の発生を自動で検知するシステム構築のため、まず単純な回帰直線により液面の減少の傾きを取得する仕組みを構築した。仕組みとしては Python Script で一定期間の EPICS PV 情報を Python library である PyEPICS により取得、及びバッファをし、そこに、Python library の Scikit-learn[2]を適用して、直線回帰を行い、傾きを得て、その傾き値を EPICS PV として出力する構造となっている。回帰を適用する期間は 30 分間のものと 5 時間のもの 2 通り準備した。Figure 3 に、ムズ漏れがないときの液面と 2 つの回帰直線の傾きの時間的推移を表示したグラフを示す。Figure 3 を見てのとおりに、水面の値は液面計のノイズの他に、波打つ表面の影響や、冷却水系全体の脈動の影響で $\pm 5 \text{ mm}$ 程度の変動が生じており、その影響で回帰直線も大きく揺らいている。30 分間の回帰直線の揺らぎは、Fig. 2 で示したようなゆっくりとした漏水の傾きよりも大きい、5 時間回帰の揺らぎは小さく抑えられている。よって、迅速な対応が求められる大きな漏水は 30 分回帰で、数日かけて相合すればよいような小さな漏水は 5 時間回帰で、検出することとし、検出の閾値をそれぞれ、 $-3 \mu\text{m/s}$ 、 $-0.3 \mu\text{m/s}$ とした。閾値を超えたかどうかの監視は、漏水関連の EPICS が構築されている加速器ネット上の EPICS Archiver Appliance に外部とのアクセス可能な RCNP の一般的なネットワークから定期的に傾きの値にアクセスし、閾値を超える異常値があった場合は Google サービスを利用してメールを送る仕組みを構築した。なお、Fig.3 赤丸で示す通りたまに偽通知が届くが、その頻度は高くない。

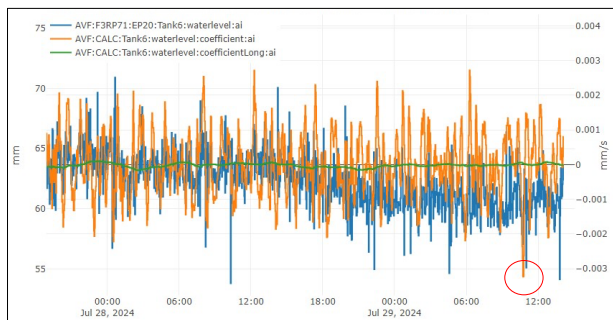


Figure 3: Water level in normal situation. Blue line shows the water level, orange line shows the coefficient for short-term and green line shows the long-term coefficient.

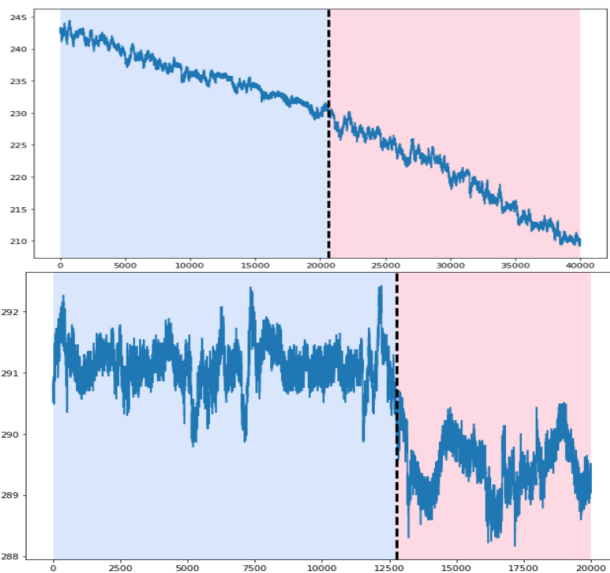


Figure 4: Found variable points using the ruptures.

い。

2.3 Ruptures[3]の利用

前述の回帰直線によるシステムよりも、簡易的に検出システム構築するためトレンドや位置の変化を効率良く検出することが可能な Python library である Ruptures のテストも実施した。トレンド変化に適用した例を Fig. 4 の上図に示す。この例では Fig. 2 中の矢印で示した漏水量が微妙点を 10 時間分のデータから確実に検出できていることがわかる。トレンド変化については、今後、確度の高い変化点検出のために必要なデータの時間幅をどのくらい短くできるかを探索し、運用に組み込んでいく。Ruptures は位置変化検出も可能であるが、元々の水面の揺らぎ程度の水位の低下も確実に検出している様子が Fig. 4 の下図のとおりに確認された。なお、この水位の低下は、人為的に水を抜いて起こさせている。

3. AVF Dee 電圧の安定化

RCNP のサイクロトロンで加速されるビームを、特に高いエネルギー分解能で安定供給するために、RCNP の AVF サイクロトロン内部の加速用 Dee 電極の電圧振幅の揺らぎを $1\text{E-}5$ のオーダーに抑えたいという要請がある。この Dee 電圧は、Dee 電極の外周端に取り付けられたピックアップ電極によりモニターされており、モニター信号を基にしたフィードバックが、Dee 電極に電力供給してい

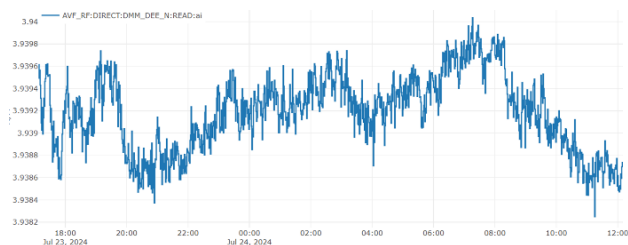


Figure 5: Example of the fluctuation of AVF Dee voltage amplitude.

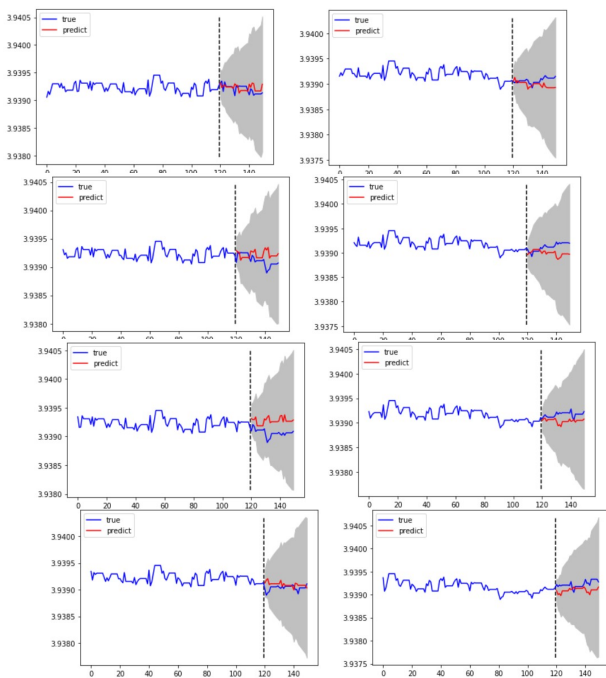


Figure 6: Dee voltage predictions by Kalman filter.

る共振器やアンプの最上流にあるローレベル発振器へ返されている。現状このフィードバックはPID制御で運用されている。このPID制御の一步その先のフィードバックの実現を目指して、ベイズ推定に基づく Markov Chain Monte Carlo や、Kalman Filter の利用による近未来予測に基づくフィードバックの利用を検討した。今回は Kalman Filter を Python library である Statsmodels[4]によって実装した。近未来予測テストとして、ここでは、何らかのトレンドと何らかの周期構造があることが前提となる初歩的な

model を使用した。Figure 5 のデータから任意の 120 秒分のデータを選び、その後の 30 秒間の予測を実施した。Figure 6 に結果を示しており、テストデータの抽出を 10 秒ずつずらした解析を 8 通り実施している。紫の線が実際のデータであり、赤の線が予測データ、灰色で示した領域は予測に対するエラーである。8 通りの解析は、予測ラインと実際のデータは、それなりに合っているようにも見受けられるが、元々がランダム性の高いデータであるためか、エラーが大きく、予測精度は高くないようである。よって、他の model の構築などの検討を今後実施していく。また、将来的には、RFSoc などを利用し、過去の補正値を基に近未来の補正値を予測するようなフィードバック回路の構築を目指す。

4. まとめ

RCNP サイクロトロン安定運用のため、様々な異常検知機構や安定化機構の構築に取り組んでいる。漏水検知機構については超音波液面計の導入により、簡便に冷却水系での微小な水漏れを検知する機構を構築できた。今後、確実に漏水検知ができる一步進んだデータ解析法を模索していく。また、サイクロトロン安定運転のための Dee 電圧安定化フィードバック回路の高度化のため、Kalman Filter の基礎的な動作テストを実施した。今後、フィードバック回路実装に向けたテストを進めていく。

参考文献

- [1] <https://epics.anl.gov/>
- [2] <https://scikit-learn.org/stable/>
- [3] <https://centre-borelli.github.io/ruptures-docs/>
- [4] <https://www.statsmodels.org/stable/index.html>