

アーカイバアプライアンスの RIBF 制御系への展開

DEPLOYMENT OF ARCHIVER APPLIANCE TO RIBF CONTROL SYSTEM

内山 暁仁^{#, A)}, 金子 健太^{B)}, 木寺 正憲^{A)}, 込山 美咲^{A)}

Akito Uchiyama^{#, A)}, Kenta Kaneko^{B)}, Masanori Kidera^{A)}, Misaki Komiyama^{A)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

^{B)} SHI Accelerator Service Ltd.

Abstract

The Archiver Appliance has been introduced for the RILAC control system, and very useful in understanding the behavior of the superconducting linear accelerator and in detecting anomalies. As a result of this success, the Archiver Appliance has been extended to the entire RIBF control system, now almost all EPICS records as about 220,000 data points are archived. In order to reduce the cost of searching for required data from a huge number of data, a description of the EPICS record in Japanese was prepared and a search function was implemented. In the case of analyzing data correlation using the current archive viewer, it is needed to select and visualize the data in a huge number of that may be relevant. On the other hand, the Pearson's correlation coefficient is one of the indexes showing the relevance of the data. For example, a tool for searching and analyzing the Pearson's correlation coefficient between the beam current and the vacuum value would be effective in reducing the cost of data search. We will report on the operation of the Archiver Appliance deployed throughout the RIBF control system and the tools that have been developed.

1. はじめに

大型実験施設において、コンポーネントの履歴データを蓄積するシステムのことをデータアーカイブシステムと呼んでいる。理研 RIBF における SRILAC プロジェクトでの制御系は、RIBF 制御系同様 EPICS を用いて開発され、上位プロトコルは Channel Access (CA) プロトコルで統一されている[1]。制御システムとしては、主に超伝導キャビティ、28GHz 超伝導 ECR イオン源といったマシンが増える事で制御点数が大幅に増加することが見込まれた。そこで EPICS ベースなデータアーカイブシステムで J-PARC, KEKB Linac, SuperKEKB, PF-AR において実績がある[2-5]アーカイバアプライアンス (Archiver Appliance[6]) を導入する事にした[7]。結果として冷却温度、真空度、電磁石電源、高周波といった約 9,300 のデータ点数を 1 秒間隔で 2020 年 1 月から現在までアーカイブし続けている。SRILAC ビームコミッショニングではビームチューニング中の子期しないビーム状態の変化の原因解析やビームに影響を与えたパラメータの相関検索、超伝導加速空洞の挙動の理解、性能向上を目的とした相関解析等で利用されており、加速器運転に必須なシステムの一つになっている。SRILAC プロジェクトが無事にコミッショニングを終え、Archiver Appliance の有用性が検証できた事から、RIBF 制御系全体にもシステム展開することを目指し、検討、実装を行った。

2. システム検討

2.1 アーカイブポリシー

SRILAC では予め必要と思われるデータを見積もり、アーカイブをしていたが、ビームコミッショニングが進むにつれて他にアーカイブすべきデータが出て、結局大き

く点数を増やす対応が必要になった。また制御やビーム診断に関してシステムのデバッグを進めるにあたり、EPICS で中間変数的な役割を持つレコードに関しても、アーカイブして参照が必要になるケースがあった。さらに将来的にシステム展開される事を目指している機械学習を用いたアプリケーションに関しても、教師データとして利用する可能性があるため、アーカイブする必要があるかどうかその時点では判断しない方が良いと考えた。以上のことから RIBF で運用されている全ての EPICS レコードをアーカイブする事にした。

2.2 他システムとの連携

加速器制御用ネットワークが引かれていない居室から、アーカイブデータの可視化や JSON 形式でデータ取得して Matlab や Mathematica といった他システムと連携したいという要望がある。一方で Archiver Appliance の可視化システムやデータ取得用 API は HTTP アクセスから利用する事、従来 RIBF 制御系では Web アプリケーションに関して、リバースプロキシを用いて所内ネットワークから加速器ネットワークシステムへのアクセスを可能にさせていた事から[8]、特別に追加でシステム開発をせずとも、これら要望を満たすことは可能である。

2.3 検索コスト削減

時系列で複数データを可視化、チャートで相関関係を見るという事はアーカイブシステムの利用方法として、一般的である。一方で、ある程度相関しそうなデータについて見当が付いている場合は良いが、そうでない場合は多くのデータと比較することになり、検索するためのコストが大きい。このコストを下げるために、時系列チャートによる視覚化に頼った相関分析だけでなく、まとめて数値で相関を確認できるシステムの開発をすることを考えた。

[#] a-uchi@riken.jp

3. 運用

3.1 設定

RIBF 制御系では、ビーム電流等一部を除いて EPICS レコードの SCAN フィールドは”Passive”もしくは最高で”1 second”に設定されている。したがって、全てのデータをアーカイブするためには Archiver Appliance のデフォルト設定を”Monitored? true”, ”sampling period 0.1”にすればよいことになる。また、膨大な数の EPICS レコードをアーカイブする時、CA コネクションのタイミングで `ca_search` に起因する問題が報告されている[9]。ここで RIBF 制御系では `ca_search` の問題をクリアするために EPICS の環境変数 `EPICS_CA_AUTO_ADDR_LIST` に NO を設定して、UDP ブロードキャストをさせない様にしている。

3.2 ゲートウェイ

現在、RIBF の Archiver Appliance は、約 120 の EPICS IOC (Input/Output Controller)に対して、仮想環境に実装された 4 台の PVgateway を経由してアクセスしている (Fig. 1 参照)。ここで Archiver Appliance の `EPICS_CA_ADDR_LIST` 環境変数に PVgateway のホスト名を設定し、新たな IOC を追加する時にも PVgateway に IOC のホスト名を追加すれば良いため、コストが大きいアーカイブプロセスの再起動を避ける事が可能である。

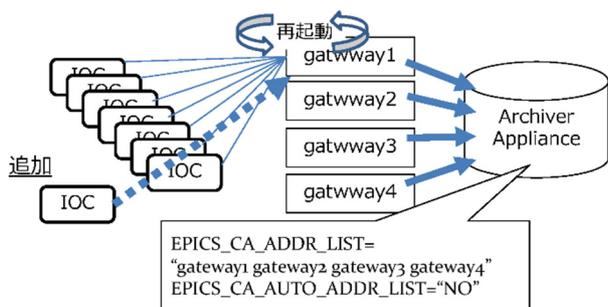


Figure 1: System chart between IOCs, PVgateway(s) and the archiver appliance for RIBF control system.

3.3 ビット単位アーカイブ

`mbbiDirect`, `mbboDirect` 等のレコードは各々のビットに対してステータスや命令が割り当てられている事が多いので `Integer` でアーカイブすると可視化したときに見通しが悪くなるケースがある。このため、`mbbiExample.B0` ~ `mbbiExample.BF` 等ビット単位にばらしてアーカイブすることにした。

3.4 自動アーカイビング

Hefei Light Source II ではアーカイブされる EPICS レコードの登録を自動で行う、自動アーカイビングを採用している[10]。RIBF 制御系においても、全 EPICS レコードをアーカイブする時の漏れを防ぐ目的で EPICS 管理システムと連携し、自動アーカイビングの機能を実装させた。EPICS 管理システムとは仁科センターで開発された、

EPICS スタートアップスクリプトをパースして、レコード、フィールド、デバイス名等をデータベースに格納して、検索や死活監視、管理に利用するシステムの事である[11]。この管理システムには RIBF 制御系で運用されている全 EPICS レコードの情報が格納されている。EPICS 管理システムでは新規に作成されたレコード名のリストを取得する Web API が備わっているため、それを用いてレコードリストを取得し、Archiver Appliance に登録している。

3.5 サーバ仕様

サーバ計算機の仕様を Table 1 に示す。Archiver Appliance のプロセスはメモリを多く消費し、パフォーマンスはメモリ容量に依存するため、256 GB メモリを積んでいる。また、RAID6 構成のオールフラッシュストレージ (使用容量 24 TB) を用意したが、現在の書き込みレートは約 20 GB/day なため、3 年程度しかもたない計算になる。そのため今後、80 TB (RAID6, 使用容量 64 TB) ディスクを増設する予定である。

Table 1: Specification for Archiver Appliance Server

CPU	Intel Xeon Silver 4110 CPU @ 2.10GHz (8 cores, 16 threads)
Memory	256 GB
Storage	SATA SSD 4TB × 8, (RAID6)
OS	CentOS 7.9 x86_64
DB	MariaDB 5.5.68
Version	archappl_v0.0.1_SNAPSHOT_13-November-2019T15-45-42
Servlet Container	Apache Tomcat 9.0.41

3.6 実績

SRILAC プロジェクト以前における従来のアーカイブシステム[12]では、アーカイブ点数は合計約 3,000 点であったが 2019 年 SRILAC 運用でアーカイブ点数は約 9,300 点に拡張されていた。今回、RIBF へ展開されたことにより、2021 年度より RIBF 制御系全てのレコード点数である約 220,000 点をアーカイブできている。

4. データ可視化

アーカイブデータの可視化には JavaScript でチャート出力するための jQuery のプラグインである jqPlot を用いて開発されていた。getData サブレットで取得したアーカイブデータの処理は、そのままダイレクトに使用させるだけでなく平均(mean), メディアンフィルタ(median)を選択して、データ処理できるようにしている。この時、実際のデータ可視化までの時間的コストはユーザアクティビティの低減に繋がるため、データ点数に応じた間引き処理をしている。Archiver Appliance に標準実装されている Viewer を参考に、例えば1年分のデータ表示をするケースでは 21,600 点の内 1 点を表示する `lastSample_21600(test:pv:123)`、同様に1か月表示の

ケースは lastSample_1800(test:pv:123), 1週間表示は lastSample_300(test:pv:123)にしている。また、従来の RIBF で運用されているアーカイブシステムのデータ可視化にも対応している[13]。

一方で、jqPlot ベースによるアーカイブデータの可視化システムには、チャートへの表示点数(合計 3 万点程度程度)、Y 軸目盛りの指数表記、同時シリーズ数(10 以上実現できない)についてデメリットがあった。これらを解決するために、Web で動的コンテンツを描画するのに広く使用されている JavaScript ライブラリ、d3.js[14]を採用した可視化システムの開発も行われている。Figure 2 に d3.js ベースで実現されたアーカイブデータ可視化システムのスクリーンショットを示す。



Figure 2: Screenshot of archive data visualization system implemented as a d3.js-based web application.

5. データ検索コスト削減

5.1 日本語ディスクリプション

アーカイブ点数が多いほど、欲しいデータを検索、選択するコストが増大するという問題点がある。従来のデータアーカイブシステムでは、そもそもアーカイブ点数が少ないという事だけでなく、グループや加速器の種類や電源、真空といったコンポーネントごとにラベリングして検索させ、ユーザが欲しいデータにたどり着きやすい構造になっていた。一方、Archiver Appliance においてグループやコンポーネントに相当するものは通常 EPICS レコード名の中で表わされている。例えば RIBF 制御系における”R28GECRIS:WATERCOOL:PC1_FLOW”の EPICS レコード名は ”28GHz ECR イオン源のプラズマチャンバー1 の冷却水流量”といった様に意味を持たせている。ところが、RIBF 制御系では EPICS レコード名に制御開発側で理解しやすい名前付けがされているケースも多く、必ずしもユーザ側で理解しやすい名前ではないケースもある。また他加速器施設ではレコード名の名づけを厳格なルールのもと運用しているケースもある[15]が、RIBF ではそのようなルールは特に決めていなかった。かといって EPICS の alias 機能も含めて、今更レコード名を変更することは逆に混乱を招くため、得策ではないと考えた。したがって、この問題を解決するために主な EPICS レコード約14,000 点に対して DESC フィールドと

は別に、日本語ディスクリプションのリストを作成、PostgreSQL ベースのデータベースに格納してデータ検索で扱えるようにした。

5.2 検索履歴収集

可視化されたアーカイブデータは過去に他のユーザが検索して、すでに使用されているケースも多い。例えば、あるトラブルが起こると、そのトラブル箇所周りの特定のアーカイブデータの検索が多くなるという事が挙げられる。したがって過去の可視化履歴(EPICS レコード名、日時、組み合わせ等)をバックエンドで保存、収集して、それを検索に利用すればデータ検索のコスト削減に繋がると考えた。このデータを用いて、表示回数順(使われた順)による検索、表示日時順による検索の機能が実装された。また、選択している EPICS レコード名から、過去一緒に可視化された組み合わせをリコメンデーションさせる機能も実装されている。アーカイブデータの検索画面のスクリーンショットを Fig. 3 に示す。

Combination Chart v1.84 (MyDAQ2, RIBFCAS, Archiver Appliance)

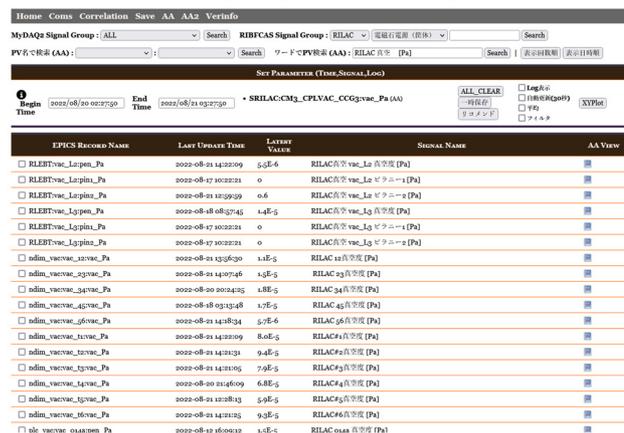


Figure 3: Search screen for the archived data. Search based on Japanese descriptions, display in order of number of times displayed, display in order of date and time, and recommendation functions are implemented.

6. 相関分析ツール

アーカイブシステムの一般的な使用方法として、データの相関を取り、ある値に影響を与えたパラメータを検索する事がよくある。相関を見るとき、関係しそうなパラメータを選択し視覚化する作業が必要になるが、これはある程度原因に見当がつかないケースでは、逐一視覚化が必要になるためコストが大きい。一方、相関関係を表す一つの指標としてピアソン相関係数がある。相関係数は-1から1の数値で、2変数間の関係の強さと方向性を表す値である。例えばビーム電流値や真空度に影響を与える他のパラメータを探す際、アーカイブデータを取得し、まとめて相関関係を数値として表示できれば、視覚化するコストが下げられると考えた。

ここで 2 変数間での相関係数を計算する時、RIBF 制御系のアーカイブデータは caMonitor で取得しているため、サンプリング間隔は各々のデータで異なる。そこで時系列を合わせるため、前後の値をそのまま使用してデータ補完をしている。上記、データ補完をした後に、相関係

数を計算するが、ハードウェアリソースを効率的に使用するため、それはマルチプロセスで処理されている。

相関関係をまとめて計算するためのユーザーインターフェースを Fig. 4 に示す。この例では仁科棟受電電力 (MYDAQ2:Nishina_6600V:c1) のレコードに対して RRC(RIKEN Ring Cyclotron) の RF に関するレコード (rf_mel:RRC:*) との相関関係を 1 対多でまとめて計算させている。相関係数について、 $0 < |r| < 0.2$ は相関無し、 $0.2 < |r| < 0.4$ は弱い相関、 $0.4 < |r| < 0.7$ は相関、 $0.7 < |r| < 1.0$ を強い相関として判定している。Fig. 5 に強い負の相関関係 (-0.96) があつた時のアーカイブデータを可視化した例を示す。

一般的に関係性を分析する際の手法として、線形回帰が挙げられる。同じ時系列にあるアーカイブデータ 2 変数を X と Y に取り、散布図として表すことにより値の予測や、相関から外れている値を分析することが可能である。これらを簡便に実現すればアーカイブデータの分析のコスト削減にさらに繋がると考え、線形回帰の可視化システムを実装した (Fig. 6 参照)。

Correlation v1.2 (Archiver Appliance)

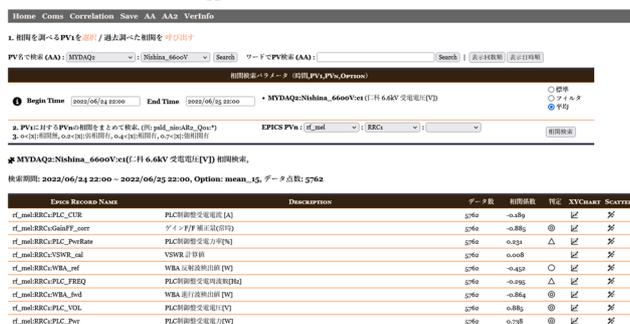


Figure 4: An example that calculates the correlation by archive data between the voltage of receiving electricity for the entire Nishina building and multiple data types related RF of the RRC. Also, the correlation coefficient "r" is represented by a numerical value, and the symbol depending on $0.2 < |r| < 0.4$, $0.4 < |r| < 0.7$, and $0.7 < |r| < 1.0$.

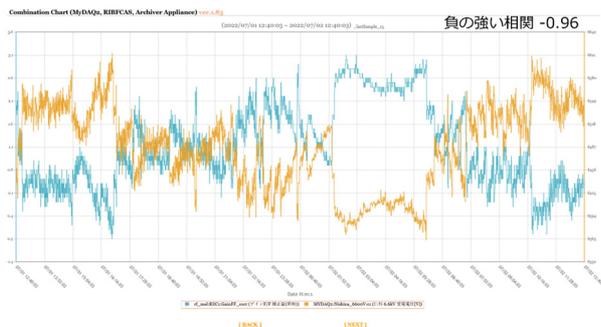


Figure 5: An example of visualization of archived data in case of a strong negative correlation "-0.96".

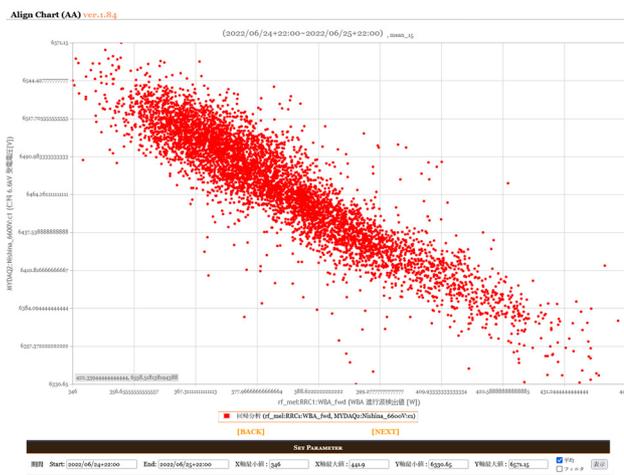


Figure 6: An example of linear regression visualization of archive data in case of the strong negative correlation "-0.96".

7. まとめと今後

SRILAC プロジェクトの成功によって、Archiver Appliance の有用性は確認され SRILAC 制御系だけでなく、RIBF 制御システム全体に展開されることになった。RIBF 制御系への展開では EPICS 管理システムと連携することによって、全 EPICS レコード約 22 万点をアーカイブできている。新規作成された EPICS レコードも自動でアーカイブされることになり、アーカイブの漏れを防いでいる。また、アーカイブ点数が増大したことによる、データ検索のコストを下げるために、日本語ディスクリプションを追加し、検索可能にさせた。さらにコストを下げる手段として、ユーザのアーカイブデータの使用履歴を収集し、表示日時順、表示回数順でアーカイブデータを選択可能にさせた。またアーカイブデータの組み合わせをリコメンデーションする機能も実装されている。頻度が高い使用目的である、データの相関関係を調べるコストを下げるために、まとめて相関係数を計算するツールも開発、実装された。

今後は現在 RIBF 制御系で運用されている MySQL や PostgreSQL といったリレーショナルデータベースの時系列データとアーカイブデータを同じ手法で可視化するため KEK で開発された Archiver Appliance 用 Grafana プラグイン[16]の運用も検討されている。またアーカイブデータの利用方法として、定常状態での加速器運転中のアーカイブデータをもとに教師データを作成、異常値検知も進めていく予定である。

参考文献

- [1] A. Uchiyama *et al.*, "Control system of the SRILAC project at RIBF", Proceedings of ICALEPCS2021, Shanghai, China, 2021, pp. 147-152.
- [2] S. Yamada *et al.*, "Deployment of archiver appliance at J-PARC main ring", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1144-1147.

- [3] H. Kaji *et al.*, “Application of EPICS Archiver Appliance at SuperKEKB”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 592-595.
- [4] I. Satake *et al.*, “Introduction of Archiver Appliance in KEK electron positron injector linac”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 861-864.
- [5] T. Nakamura *et al.*, “Deployment of Archiver Appliance at PF-AR accelerator”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 881-883.
- [6] M. Shankar *et al.*, “The EPICS Archiver Appliance”, Proceedings of the ICALEPCS2015, Melbourne, Australia, Oct. 17-23, 2015, pp. 761-764.
- [7] A. Uchiyama *et al.*, “Introduction of Archiver Appliance to RILAC control system”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 739-742.
- [8] A. Uchiyama *et al.*, “Network Security System and Method for RIBF Control System”, Proceedings of ICALEPCS11, Grenoble, France, 2011, pp. 1161-1164.
- [9] I. Satake *et al.*, “Operation status of Archiver Appliance in KEK electron positron injector linac”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 735-738.
- [10] Y. Song *et al.*, Nuclear Science and Techniques volume 29, Article number: 129 (2018);
<https://doi.org/10.1007/s41365-018-0461-6>
- [11] A. Uchiyama *et al.*, “EPICS PV Management and Method for RIBF Control System”, Proceedings of the ICALEPCS2015, Melbourne, Australia, Oct. 17-23, 2015, pp. 769-771.
- [12] M. Komiyama *et al.*, “Construction of New Data Archive System in RIKEN RI Beam Factory”, Proceedings of ICALEPCS11, Grenoble, France, 2011, pp. 90-93.
- [13] A. Uchiyama *et al.*, “Data Archive System for Superconducting RIKEN Linear Accelerator at RIBF”, Proceedings of IPAC2021, Campinas, SP, Brazil, 2021, pp. 2178-2181.
- [14] N.D. Arnold *et al.*, “Discovering process-variable-to-signal relationships in EPICS 3.x and 4.x”, Proceedings of 10th ICALEPCS, Geneva, 10-14 Oct. 2005, PO2.073-5 (2005).
- [15] <https://d3js.org/>
- [16] S. Sasaki *et al.*, “Development of Grafana plugin to visualize archive data on Archiver Appliance”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 504-508.