

RIBF 次期計画における制御システムの設計検討

DESIGN AND PLANNING OF THE CONTROL SYSTEM FOR THE NEXT RIBF PROJECT

内山 暁仁[#], 込山 美咲, 熊谷 桂子, 大城 哲彦, 木寺 正憲, 今尾 浩士
Akito Uchiyama [#], Misaki Komiya, Keiko Kumagai, Testsuhiko Ohshiro, Masanori Kidera, Hiroshi Imao
RIKEN Nishina Center

Abstract

The RIKEN Nishina Center aims to upgrade the RIBF facility with the Charge Stripper Ring (CSR) as part of the upgrading plan. The operation of the CSR is expected to increase the number of components such as magnet power supplies, beam diagnostics, and vacuum equipment more rapidly than the current RIBF facility, making beam tuning more complex and requiring more time for operation than the current facility. Since the increased time required will raise not only manpower costs but also electricity costs, it is essential to improve the efficiency of the operation to reduce overall operation costs. To achieve this, it is necessary to identify and solve problems in the current RIBF control system. Data on the accelerator, such as cooling water temperature and power consumption, have already been archived. However, the status of all cooling water pumps and data on the power reception status and power factor of cubicles, which have traditionally been managed only by the Facilities Division, should also be monitored in real-time by the accelerator side and used to improve operational efficiency. Devices used in remote control, commercial hardware, and open-source software that is widely used in the industry should be used as much as possible to reduce development person-hours.

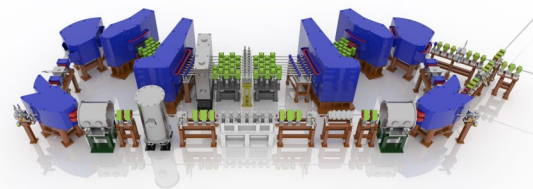
1. はじめに

理研 RIBF(RI Beam Factory)は、AVF、RRC、fRC、IRC、SRC といった複数のサイクロロンが多段構成された重イオン加速器施設である[1]。このような多段の重イオン加速において、加速途中での荷電変換は目的のエネルギーに効率的に到達するために不可欠な技術である。RIBF では荷電変換効率を向上させ、ビーム強度を高める事により、加速器施設として高性能化を実現してきた[2]。現在 RIBF でのウランビーム加速においては、上流の回転ディスクトリッパー[3]と下流の He ガストリッパー[4]と 2 回の荷電変換が行われており、トータルで約 5%の荷電変換効率で運用されている。一方、次世代重イオン加速器プロジェクトとして米国 FRIB では RIBF を上回るビーム強度を実現する予定である[5]。また、FRIB だけでなく、FAIR (ドイツ) [6]、RAON (韓国) [7]、HIAF (中国) [8]でも同様のプロジェクトが進行中である。

そこで、仁科センターでは RIBF における荷電変換効率をさらに高め、飛躍的にビーム強度を向上させるために、荷電変換リング (CSR : Charge Stripper Ring) が設計された[9] (Fig. 1 参照)。他国で RIBF の性能を超える加速器プロジェクトが進行している中、RIBF においても世界のトップであり続けるために、RIBF 次期計画として CSR 実装を軸とした加速器施設の高度化実現を目指している。

次期計画として、まずは 2 台の CSR(CSR1, CSR2) のインストールする事で現在の RIBF でのビームパワー 10 kW を 10 倍にし、さらに RF 改造やイオン源増強をする事で最終的にはビーム強度 2 pμA の達成を目指している。しかし次期計画のアップグレードが全て完了した暁には現 RIBF 施設に比べ、7 MW 弱の追加電力が必

要となる。そこで RIBF 次期計画では、制御システムによるオペレーション効率化の実現が求められている。現段階では、CSR1 に関して先行して実装が検討されているが、制御システムに関して CSR1 のみに特化した独自技術は多くないため、全体的な概要とポリシーを検討、それを基に具体的な設計を行った。



© 2024 RIKEN, M. Nishida

Figure 1: 3D design drawing of the CSR. Our final plan is to install two CSRs, CSR1 and CSR2.

2. 制御システムのポリシー

CSR 運用では、電磁石、ビーム診断システム、真空システムなどのコンポーネント数が、現在の RIBF 施設よりも大幅に増加する(例えば電磁石電源数は 300 台以上)。これにより、ビーム調整が現在の RIBF 施設よりも複雑で時間がかかることが予想される。ビーム調整に必要な時間が増えると、マンパワーや電気コストも増大するため、運用効率を向上させてコスト削減することが重要である。これを達成するためには、現在の RIBF 制御システムの問題点を洗い出し、制御システムで解決できる非効率な運用を避ける必要がある。

次に制御システムを構成するデバイスの設計には、市

[#] a-uchi@riken.jp

販のハードウェアとオープンソースソフトウェアを可能な限り活用して、開発工数を削減する。オープンソースの例を挙げると、次期計画は RIBF のアップグレードプロジェクトであるため、EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)を基に構築された RIBF 制御システムと統合され、オペレータインターフェースは当然高い互換性を持つべきである。

予期しないビーム軌道からハードウェアを保護する目的であるマシンプロテクションシステムも検討が必要である。現在 RIBF では、 ^{48}Ca から ^{238}U の重イオンを 10 kW のビームパワーで供給することができる。しかし、CSR1 実装が実現すればこれが 50 kW に増加し、その後の CSR2 アップグレードを考慮すると、マシンプロテクションシステムは 100 kW のビームパワーに対応する必要がある。

3. CSR 制御システム検討状況

3.1 フィールドネットワークの導入

Figure 2 は、加速器制御システムの標準モデルを示している。この標準モデルは、現在の大型実験施設の制御システムに共通する設計であり、CSR 制御システムにも採用される。標準モデルは、プレゼンテーション層、機器制御層、およびデバイスインターフェース層の 3 つのレイヤーで構成されている。プレゼンテーション層では、加速器運用のためのアプリケーションプログラムを開発・実行するためにワークステーションが含まれる。機器制御レイヤーに配置された EPICS Input/Output Controller (IOC) は、TCP/IP やバスを介してデバイスインターフェース層を通じ、物理的なハードウェアに接続されている。

TCP/IP は計測器やコントローラーを遠隔で制御するために広く使用されているプロトコルであり、EPICS は標準モデルのデバイスインターフェース層で TCP/IP を使用するデバイスをサポートしている[10, 11]。RIBF 制御システムにおいても、TCP/IP ベースのデバイスが多数使用されており、EPICS とインターフェースされている。これらは市販のデバイスだけでなく、仁科センター独自に設計・開発されたデバイスも含まれる。この場合 TCP/IP ベースのデバイスと EPICS IOC は通常、ソケット通信を使用してコマンドを送信する。一方、RIBF 制御システムでは、デバイスやネットワークスイッチの予期しない電源障害によるソケット通信の喪失後に、EPICS IOC とデバイス間の再接続が確立されないことがあるという問題がある。この場合、ping など通信を確認しても EPICS IOC とのソケット接続が切れているかどうかを判断するのは難しく、運用の障害と成り得る。このような問題を解決するために、CSR 制御デバイスには TCP/IP の代わりにデバイ

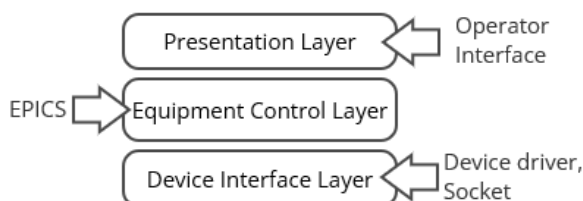


Figure 2: Outline of standard model for modern control system.

スインターフェース層で Ethernet ベースな EtherCAT[12] や EtherNet/IP[13]などのフィールドネットワークの導入を進めていく。

3.2 コントロールネットワーク

現在 RIBF 制御系の TCP/IP ネットワークは、Cisco 社のコアスイッチを中心とした 18 台のスイッチが接続されたスター型トポロジーネットワークで構成されており、接続には 1 Gbps の光ファイバーが用いられている。コアスイッチは放射線管理区域ではない計算機室に設置されており、スイッチ 18 台中のうち 16 台は放射線管理区域に設置されている。この制御系ネットワークを基に CSR 制御システム用には専用のスイッチを設置する。一方で、現在の帯域は 1 Gbps しかないため、これらスイッチとコアスイッチ間は最低でも 10 Gbps にする。

EtherNet/IP は汎用ネットワークで混在可能であるため、フィールドネットワークであるが制御系ネットワークでそのまま利用できる。制御室、計算機室と実験室、加速器室間のケーブルルートは長年のケーブル敷設により、新たな信号ケーブルの敷設は簡単ではない(Fig. 3 参照)。よ



Figure 3: Over many years of operation, a large number of cables have been laid to the radiation area from the control room and computer room, and the resources for cable routes are scarce.

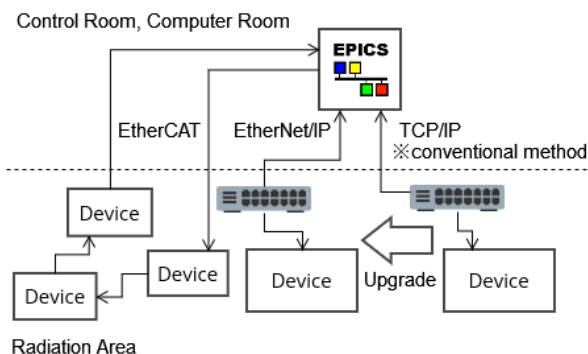


Figure 4: EtherNet/IP, EtherCAT network overview diagram, intended for upgrade from TCP/IP based devices. As for EtherNet/IP does not require a dedicated network, so it is connected to Cisco switches just like any TCP/IP-based device.

ってデバイス間の応答性能が 1 msec 程度で対応可能なシステムに関しては、人的コストとケーブルルートのリソースを削減するために EtherNet/IP プロトコルで運用する。より速い応答性能が必要なケースでは制御系ネットワークとは別な、計算機室と放射線管理区域間に既に敷設されている個別ケーブル上に EtherCAT 専用のネットワークを構築する。システム概要を Fig. 4 に示す。

3.3 マシンプロテクションシステム

RIBF では Programable Logic Controller である MELSEC-Q シリーズで構築された Beam Interlock System (BIS) が実装されており、デバイスからトリガーとなる信号を受け取ってから、ビームチョッパーでビーム停止させるまでの応答時間は約 10 msec のオーダーである[14]。よって次期計画での最終目標であるビーム強度 2 pμA に対応するためには、全体で応答時間 630 μsec 以下でマシンプロテクションシステムによってビーム停止できれば良い。現在 RIBF で開発中の National Instruments cRIO-9056 を用いた BIS は DI 入力時、応答時間は平均 130 μsec である[15]。したがって CSR 用に 500 μsec 程度の応答速度で動作するマシンプロテクションシステムを開発し、上記 cRIO ベースの BIS に入力すれば要件は満たせる。この性能はオーソドックスな FPGA をベースとしたマシンプロテクションシステムで対応できる[16]。CSR マシンプロテクションシステムに入力およびトリガーされる可能性のある異常信号は、バッフルスリットのビーム電流、電磁石の電源、真空、RF 冷却水温度測定、および BPM となる (Fig. 5 参照)。

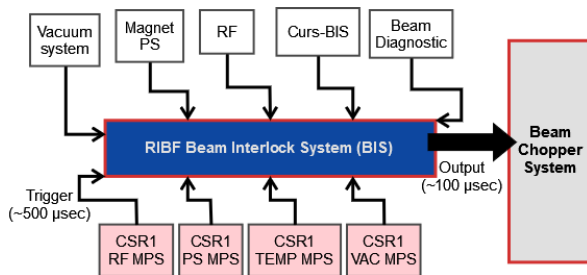


Figure 5: Outline of machine protection system for CSR. The red area is where the new systems will be constructed.

3.4 インフラストラクチャデータ統合

第2特高変電所からの 6,600 V 受電の変動と RRC の RF 系に相関関係があり、RRC のわずかな加速電圧変動が最終段 SRC から取り出されるビーム軌道に大きな影響を与える事がわかっている[17]。現在 RIBF 制御システムでは一部のキュービクルに VCT (Voltage and Current Transformer) を取り付け受電データを 1 分間隔でアーカイブしている。一方、本部施設部では和光キャンパス全体の電力状況に関してビル管理システムである三菱電機 MELBAS-EX[18]でデータを取得している。これら電力データを加速器制御システムと統合すれば次期計画の運用に対しても有用である。たとえば、次期計画では 7 MW 弱の電力増加が予想されているが、電力会社との契約電力を超える前に自動的に加速器を停止

させるシステムの構築をすることも可能である。また実験の条件毎に電力がどの程度変化するかデータを蓄積し正確に知る事や、リアルタイムに電力状況をモニタする事は効率的な加速器運用には必要である、と考えられる。しかし、加速器制御システムが直接 MELBAS-EX にアクセスすることは、和光キャンパス全体を管理する施設部としてセキュリティ上容認が難しい。上記を解決するために、MELBAS-EX とは別な仕組みとしてキュービクルの機械式指示計器を電子式計器に交換し、電力、電流、電圧といった基本的な値だけでなく、力率といった値も読み出して EPICS からデータを扱えるようにする。

電力だけでなく冷却水や空調もビームの安定度に影響を与えているパラメータである。冷却水や空調の温度に関しては様々な個所でデータとして取り込んでいるが、現在 RIBF 制御系では冷却水ポンプや空調自身の運転状況を遠隔でモニタはしていない。特に冷却水ポンプはビームチューニングに直接関係する機器ではないが、故障すると即ビーム供給が停止してしまう重要なコンポーネントであるので、可能な限り遠隔で扱えるようにすべきである。

4. 実装への取り組み

4.1 CSR1 Technical Advisory Committee

2023 年 6 月に行われた CSR1 に関する Technical Advisory Committee meeting[19]では、考案された RIBF 次期計画の制御システムに関して、まずは実現の可否を判断すべく小規模から実装すべき、という提言があった。それら提言に基づき、小規模システムを検討した結果、基本的な加速器コンポーネントに関して共通化している点が多く、多段サイクロトロンの実験コースに比べて規模の小さいリニアック単独実験のコース向けにアップデートや実装を主に行っていく事にした。その後、有用性を検証した結果をもって次期計画として RIBF 全体に広げていく流れを作るべく、取り組みを行う。

4.2 電磁石電源制御

次期計画の制御システムの検討以前から、RIBF 制御系へフィールドネットワークの導入として EtherNet/IP の性能テストを行っている[20]。これは 40 年以上経過して老朽化した電磁石電源にインストールされている CIM/DIM[21]と呼ばれる遠隔制御用デバイス置き換え時のプロトコルの候補として考えられている。

一方で近年、デフォルトで EtherCAT スレーブがインストールされた電磁石電源がメーカーから提供されている。EtherCAT マスタと接続させ、そのまま動作する事から、特別なデバイスを開発せずとも EPICS で扱えれば遠隔制御の導入コストを下げ有用性が高いと考えられる。また仁科センターでは EPICS IOC を EtherCAT マスタとして動作させ、FA-M3 ベースの EtherCAT スレーブと組み合わせでの実装テストを 2023 年にすでに行っている[22]。現在 EtherCAT スレーブが組み込まれた電源のテストベンチを作成中であり、このテストベンチを上記の EtherCAT マスタと組み合わせで運用できるか今後テストを行っていく予定である。

4.3 高圧受変電設備監視

リニアック実験系と一般系の高圧受変電設備について、データを EPICS で扱うため、キュービクルの機械式指示計器を電子式計器に交換する予定である。電子式計器は Modbus RTU 通信を持つ ME110G[23]を選定した。これを横河電機 FA-M3 の Modbus モジュールである F3LC31-2F[24]を用いて、読み出しを行う。ME110G からの Modbus RTU 通信を経た読み出しテストは問題なくできたので、今夏メンテナンスの停電時に交換作業をして運用テストを進める予定である。Modbus RTU のテスト状況を Fig. 6 に、計器を交換する予定の高圧受電設備を Fig. 7 に示す。



Figure 6: The situation in which F3LC31-2F is connected to ME110G and Modbus RTU communication is being tested.



Figure 7: Photo of the high voltage switchgear where the analog indicating meters will be replaced. Replace one of the multiple analog indicating meters installed in the high voltage switchgear with a digital multimeter. By replacing one analog indicating meter with the digital multimeter, multiple values, such as power, power factor, etc., can be monitored simultaneously.

4.4 冷却水ポンプ監視

冷却水ポンプが故障する際、異音や通常とは異なる振動を発生させる事があるため、その振動データは故障予知に有益である可能性がある。しかし冷却水ポンプが据え置かれている環境は実験室や加速器室に比べ過酷な環境で且つ、各種配線やデバイスを設置する事が

簡単ではないケースが多い。上記を解決するために、熱電発電モジュール KELGEN[25]の運用テストを行っている。大きな特徴として KELGEN は自己発電を電源としており、運転中の冷却水ポンプに子機を取り付け、ポンプと気温の温度差で発電する事である。他に電源が必要なく、データは親機へ無線で飛ばすことになるため、必要最小限の配線で済む。運用テストではコントロール室に設置された EPICS IOC に USB 親器をインストールして複数台の子機からポンプの温度や振動データを取得している。Figures 8、9 に KELGEN の運用テストをしている写真を示す。

RIBF では OS に Linux を採用した EPICS IOC が多いが、KELGEN の付属ソフトウェアは Windows のみ対応である。しかし親機は USB シリアル変換として認識し、Linux のデバイスファイル(/dev/ttyUSB0)で扱えるため Linux でも問題なく運用できている。EPICS への実装で

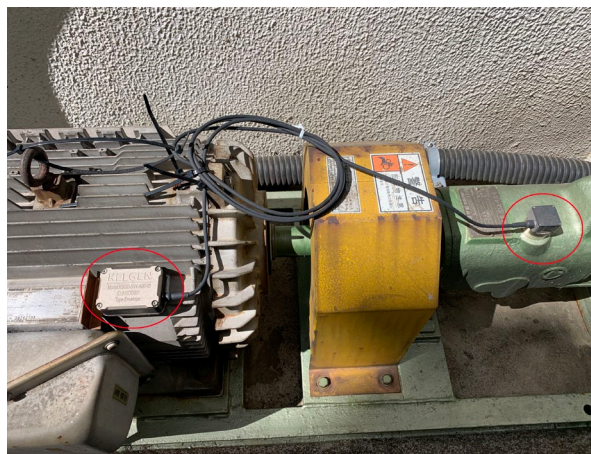


Figure 8: Photo of the thermoelectric generation module KELGEN installed in a cooling water pump. The red circle on the left highlights the thermoelectric power generation unit, which generates electricity from temperature differences. The red circle on the right highlights the sensor used to acquire values such as vibration acceleration.

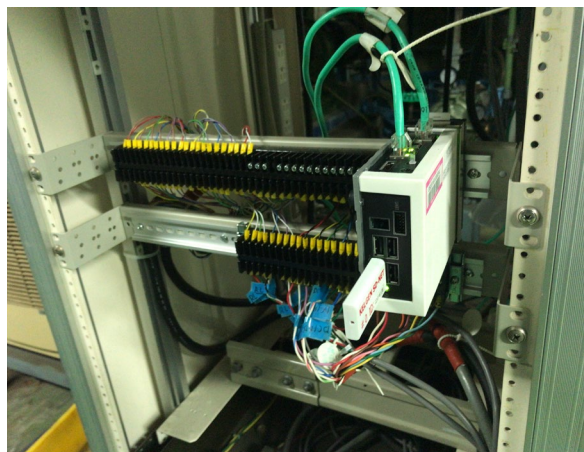


Figure 9: Photo of a small PC, which serves as the EPICS IOC, connected wirelessly to the KELGEN via a USB module.

は StreamDevice[26]でシリアル接続からのデータを待ち受け、データ列の受信イベントをトリガーに Waveform レコードに格納している。温度差で発電しているため、冷却水ポンプ自身の発熱温度が高いほどデータの受信回数が大きく、冷却水ポンプ停止時はほぼイベントは発生しない仕様になっている。

5. まとめ

CSR を軸とした RIBF 次期計画のため、制御システムのポリシーを策定し、要件を検討した。その後 CSR1 に関する Technical Advisory Committee meeting での提言に基づき、インフラストラクチャ等についてリニアックでテスト的に実装を進めている。今後、それらの有用性を確認したのち、RIBF 全体へのアップグレードという流れで開発を進めていく。加えて CSR1 実装に向け、必要なシステムや効率の低いオペレーションの洗い出しをさらに行っていく。

謝辞

本研究にあたり、Technical Advisory Committee meeting において有意義な議論を通じて、貴重な提言をいただきました。特に委員の JAEA 金正倫計氏、京都大学 若杉昌徳氏、KEK 外山毅氏、KEK 發知英明氏に対して心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Yano, "The RIKEN RI Beam Factory Project: A status report", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, vol. 261, pp. 1009-1013.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.04.174>
- [2] O. Kamigaito *et al.*, "Recent Progress in RIKEN RI Beam Factory", in Proc. Cyclotrons'19, Cape Town, South Africa, Sep. 2019, pp. 12-16.
doi:10.18429/JACoW-CYCLOTRONS2019-MOB01
- [3] H. Hasebe *et al.*, "History of Solid Disk Improvement for Rotating Charge Stripper", in Proc. HIAT'15, Yokohama, Japan, Sep. 2015, paper MOA1C01, pp. 17-19.
- [4] H. Imao, "Development of Gas Stripper at RIBF", in Proc. IPAC'18, Vancouver, Canada, Apr.-May 2018, pp. 41-46.
doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-MOZGBE1
- [5] J. Wei *et al.*, "Progress towards the Facility for Rare Isotope Beams", in Proc. NAPAC'13, Pasadena, CA, USA, Sep.-Oct. 2013, paper FRYBA1, pp. 1453-1457.
- [6] P. J. Spiller *et al.*, "Status of the FAIR Project", in Proc. IPAC'18, Vancouver, Canada, Apr.-May 2018, pp. 63-68.
doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-MOZGBF2
- [7] D. Jeon, "Progress of the RAON Heavy Ion Accelerator Project", in Proc. IPAC'15, Richmond, VA, USA, May 2015, pp. 3848-3850.
doi:10.18429/JACoW-IPAC2015-THPF073
- [8] J. C. Yang, L. T. Sun, and Y. J. Yuan, "Status of the HIAF Accelerator Facility in China", in Proc. Cyclotrons'22, Beijing, China, Dec. 2022, paper MOA101, pp. 1-5.
doi:10.18429/JACoW-CYCLOTRONS2022-MOA101
- [9] H. Imao, "The Present Status and Future Plan with Charge Stripper Ring at RIKEN RIBF", in Proc. IPAC'22, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 796-801.
doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-TUIYGD2
- [10] J. Odagiri *et al.*, "EPICS Device/Driver Support Modules for Network-based Intelligent Controllers", in Proc. ICALEPCS'03, Gyeongju, Korea, Oct. 2003, paper WP563, pp. 494-496.
- [11] M. R. Kraimer, M. Rivers, and E. Norum, "EPICS Asynchronous Driver Support", in Proc. ICALEPCS'05, Geneva, Switzerland, Oct. 2005, paper P3_074.
- [12] EtherCAT, <https://www.ethercat.org/default.htm>
- [13] EtherNet/IP, <https://www.odva.org/technology-standards/key-technologies/ethernet-ip/>
- [14] M. Komiyama *et al.*, "Beam interlock system at RIKEN RI beam factory", Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, Jul. 20-22, 2005, p. 615.
- [15] 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", in Proc. ICALEPCS'23, Cape Town, South Africa, Oct. 2023, pp. 645-649.
doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2023-TUPDP050
- [16] R. Schmidt, "Machine Protection and Interlock System for Large Research Instruments", in Proc. ICALEPCS'15, Melbourne, Australia, Oct. 2015, pp. 537-542.
doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2015-TUC3101
- [17] T. Nakamura *et al.*, "Status report of the operation of RIBF ring cyclotrons", Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan, pp. 575-579.
- [18] Hiroshi Fukuda, Takefumi Inuki, Masayoshi Morinaga, "ビル管理システム“MELBAS-EX”", 三菱電機技報, Vol. 89, No. 2, 2015, pp. 27-30.
- [19] RIBF Facility Upgrade Project
https://www.nishina.riken.jp/researcher/RIBFupgrade/RIBF_Upgrade_NCAC.pdf
- [20] A. Uchiyama, N. Fukunishi, M. Komiyama, and K. Kumagai, "Evaluation of PLC-Based EtherNet/IP Communication for Upgrade of Electromagnet Power Supply Control at RIBF", in Proc. Cyclotrons'22, Beijing, China, Dec. 2022, paper TUBO04, pp. 134-137.
doi:10.18429/JACoW-CYCLOTRONS2022-TUBO04
- [21] K. Shimizu, "New general purpose interfacing modules for an accelerator control system", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, vol. 236, issue 1, May 1985, pp. 109-116.
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90134-2](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90134-2)
- [22] A. Uchiyama *et al.*, "Introduction of the Ethernet-Based Field Networks to Inter-Device Communication for RIBF Control System", in Proc. ICALEPCS'23, Cape Town, South Africa, Oct. 2023, pp. 1384-1387.
doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2023-THPDP032
- [23] https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/document/nproduct/pmd/ym-n-a140/a140_2312.pdf
- [24] <https://www.yokogawa.co.jp/solutions/products-and-services/control/control-devices/programmable-logic-controller/plc-communications/plc-modbus/>
- [25] <https://www.kelk.co.jp/products/kelgen-sd.html>
- [26] <https://github.com/paulscherrerinstitute/StreamDevice>