

# J-PARC MR 制御システムの 15 年間の運用と今後の展望 15 YEARS OF THE J-PARC MAIN RING CONTROL SYSTEM OPERATION AND ITS FUTURE PROSPECTS

山田秀衛 <sup>\*,A)</sup>

Shuei Yamada <sup>\*,A)</sup>

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK) / J-PARC Center

## Abstract

The accelerator control system of the J-PARC MR started operation in 2008. Most of the components of the control computers, such as servers, disks, operation terminals, front-end computers and software, which were introduced during the construction phase, have went through one or two generational changes in the last 15 years. Alongside, the policies for the operation of control computers has changed. This paper reviews the renewal of those components and discusses the philosophy behind the configuration and operational policy. It is also discussed the approach to matters that did not exist at the beginning of the project, such as virtualization or cyber security.

## 1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力開発機構 (JAEA) が共同で計画・開発・運営する大強度陽子加速器施設で、2001 年に建設を開始し、2007 年に運用を開始した [1]。J-PARC 加速器の制御システムは、二つの異なるマシンサイクルのためのそれぞれの加速器制御システムから構成されている。25 Hz のサイクルで運転される LINAC (LI) と Rapid Cycle Synchrotron (RCS) の加速器制御システムは JAEA が、運転モードによって 1.36 s または 4.20 s サイクルの Main Ring (MR) は KEK が担当している。これら 2 つの制御システムは、タイミングシステム、ネットワーク、ストレージ、EPICS [2] という共通の基盤の上に構築されており、綿密に連携することで全体をひとつの加速器として制御している。

本論文では、2008 年に運用を開始した MR の加速器制御システムの 15 年間の運用の歴史と今後の展望について議論する。広義の加速器制御システムにはタイミングシステム [3, 4]・人的保護システム [5]・機器保護システム [6, 7] も含まれるが参考文献に挙げるに留め、EPICS を用いたネットワーク分散型制御システムのコンポーネント (ネットワーク・ストレージ・計算機・ソフトウェア環境) について注力する。

## 2. ネットワーク

### 2.1 ネットワークの構成

J-PARC 加速器制御 LAN の論理的な構成を Fig. 1 に示す。ネットワークの中核となるコアスイッチは中央制御棟 (CCR) に設置され、LI・RCS・MLF 実験施設・MR 第 3 電源棟 (D3) にそれぞれ設置されたエッジスイッチまで光ファイバで配線されている。D3 からはさらに、MR の二つの電源棟 (D1・D2) と二つの実験施設 (NU・HD) のエッジスイッチまで配線されている [8]。

コアスイッチとエッジスイッチは冗長構成で、障害発生時には主系から副系に切り替わる。またオンサイ

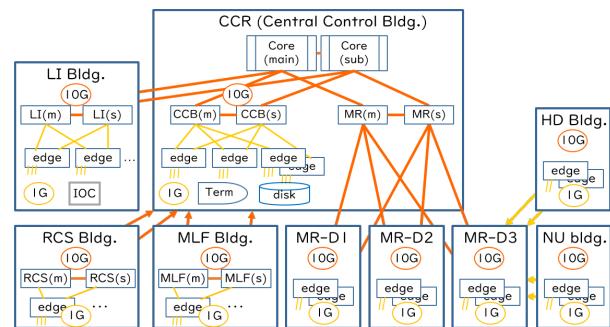


Figure 1: Logical Topology of the J-PARC Accelerator Network.

ト保守サービスにより、障害の原因究明・対策や故障した部品の交換が速やかに行われる。

ネットワークは VLAN で各施設 (LI・RCS・MR・MLF・HD・NU) と CCR の 7 つのセグメントに分割している。ある施設での通信障害等がほかの施設に及ぼす影響を最小限に止めるようにしてある。

加速器制御ネットワーク全体では約 250 台のエッジスイッチを使用している。LI と RCS はネットワーク末端までエッジスイッチで構成されている。MR では中間的なスイッチにエッジスイッチ 12 台を使用しているが、末端には SOHO 向けのスイッチングハブを使用し、導入と保守のコストを削減している。

### 2.2 ネットワークの歴史

J-PARC 加速器制御のネットワーク機器はこれまで Extreme 社の製品を導入しており、7-8 年毎に全てのコアスイッチとエッジスイッチを更新している。2005 年に LI で制御ネットワークの運用を開始し、2007 年には MR にまでネットワークが延伸された。バックボーンの帯域は 10 Gbps、建屋間は 1 Gbps であった。2011 年から 2015 年にかけて機種更新し、バックボーンは 40 Gbps、建屋間は 10 Gbps となった。

2019 年から 2 回目の機種更新が行われている。2024 年に更新が終了し、バックボーンは 100 Gbps、建屋間は 10 Gbps となる予定である。

\* shuei@post.kek.jp

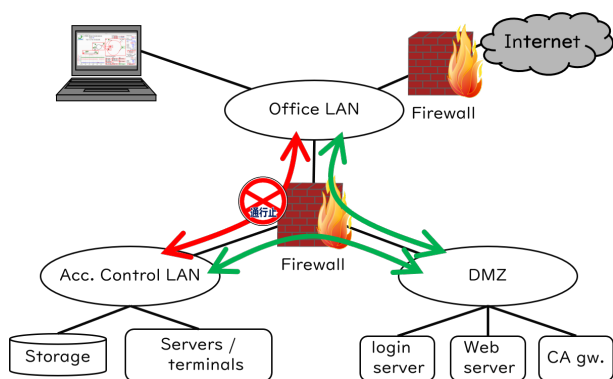


Figure 2: Relationship between accelerator control network, J-PARC office network, and the Internet.

### 2.3 セキュリティ

J-PARC の加速器制御ネットワーク、オフィスネットワーク、インターネットの関係を Fig. 2 に示す。制御ネットワークはオフィスネットワークからは独立したプライベートネットワークで、マルウェアやウイルスを持ち込ませない様々なセキュリティ対策を講じている。

制御ネットワークとオフィスネットワークは単にファイアウォールで分離するだけでなく、直接の通信を禁じている。これらの間には DMZ が設けられており、制御ネットワーク-DMZ 間の通信と DMZ-オフィスネットワーク間の通信だけが許可されている。

制御ネットワークからオフィスネットワークや外部のネットワークへの通信は、DMZ に設置された HTTP プロキシサーバまたは SSH サーバを経由する通信のみに制限している。HTTP に関しては、ホワイトリストに登録されたサイトへのアクセスのみを許可している。

一方オフィスネットワークから加速器制御ネットワークへの通信は、当初は DMZ に設置された HTTP サーバへの HTTP と SSH サーバへの SSH のみに制限していた。2018 年に EPICS の通信プロトコルである Channel Access (CA) をネットワーク間で転送するゲートウェイを DMZ に追加し、オフィスネットワークからの読み取り専用アクセスを可能にした [9]。SSH と CA は、オフィスネットワーク側の IP アドレスによるアクセス制限を行っている。

加速器制御ネットワーク内の計算機には、危険度に応じてアンチウイルスソフトを導入している。また、特定多数のユーザがつかう制御ネットワーク内の端末計算機は、USB ストレージを使用できないよう設定してある。サポートが切れた古いバージョンの OS も原則として使用禁止である。

## 3. ストレージ

### 3.1 ストレージへの要件

長期間の加速器の運転と高い可用性を実現するためには、ストレージシステムの信頼性と拡張性が重要である。MR では、ファイルサーバに特化した OS を採用したアプライアンス製品であること、コントローラ・

ネットワーク・ディスクがいずれも冗長化されており、障害発生時・メンテナンス時にも運転を継続できること、必要に応じてシェルフ・ディスクを追加し容量を拡張できることから NetApp 社製の製品またはその OEM 品を選択した。オンサイト保守契約を結んでおり、障害の原因究明・対策や故障した部品の交換が速やかに行われる。

### 3.2 ストレージシステムへの歴史

2008 年にディスク容量 9 TB の IBM 社製 N3600 を導入し、2012 年には容量を 28 TB へと拡張した。2013 年に 48 TB の NetApp 社製 FAS2240 へと最初の機種交換を行い、2014 年には 84 TB へと拡張された。2022 年に 2 度目の機種更新を行い、192 TB の Lenovo 社製 DM3000H になった。

いずれも運用を開始して 5 年程度経過するとディスクが故障して交換する必要が生じる程度で、特筆すべきトラブルは経験していない。2023 年現在、約 500 台のクライアントに対する NFS サーバとして稼働中である。

### 3.3 補助的ストレージとしての Linux サーバの導入

MR の加速器制御システムは、加速器運転用プログラム・運転データ・各ユーザのホームディレクトリなどのすべてをストレージシステムに置き、NFS で共有する設計であった。しかしながら、信頼性・I/O 性能・拡張性よりもディスク容量と低価格を重視した汎用 OS (Linux) を採用したラックマウント型のファイルサーバを 2012 年から導入し、特定の用途に供している。

加速器を運転するに伴ってデータは増える一方 (~10 TB/yr) であるが、古いデータはそれほど参照されることがない。運転から 1 年以上経過した shot-by-shot の波形データはストレージシステムからファイルサーバに移動している。2012 年にディスク容量 24 TB の IBM x3630M3 を 2 台導入し、2016 年には 84 TB の x3630M4、2022 年には 216 TB の Lenovo SR550 へと機種更新を経ている。

EPICS アーカイバで記録している時系列データも、当初はエンジンをサーバ計算機で実行し、ストレージシステムに記録していた。2016 年に機種更新で余剰となった x3630M3 で次期アーカイバの評価を開始した。2017 年に 112 TB の Lenovo x3650M5 を導入し、アーカイバの CPU 兼ストレージとして運用を開始した [10]。

## 4. サーバ計算機

### 4.1 サーバ計算機のハードウェア

当初 MR 加速器の制御システムでは、運転用プログラムをサーバ計算機で実行し、X 端末的に運用される端末計算機で表示するアーキテクチャを採用した [11]。その後 2014 年に端末計算機を更新した [12] のを機に、運転用プログラムも端末計算機で実行するようになった。本節と 4.2 節でサーバ計算機のハードウェアと運用形態の変遷について論じ、5 節で端末計算機について議論する。

サーバ計算機の運用方針は、(1) サーバの能力には余裕を持たせておき (2) 故障したらほかのサーバに負荷





(a) An enclosure populated with 14 blades.



(b) A single blade server.

Figure 3: Appearance of blade server system.

Table 1: Typical Specifications of Servers

Model	CPU	disk space
HS23e	Xeon E5-2470	48 GB
SR530	Xeon Gols 5215	96 GB

を振り分け、加速器の運転を継続する (3) サーバの負荷が増えたら中期的にサーバを増設する (4) 会社によるオンサイト保守を行う、というものである。

2005年に1台のIBM社製のBlade Center E筐体と5枚のHS20で運用を開始した (Fig. 3)。2007年には2台めの筐体を導入し、それ以降随時 blade を増設した。2010年には筐体2台にフル実装し計28枚の体制となった。2014年に当時の最新機種HS23eを投入したところ筐体の電源容量が不足することが判明した。blade を22枚に減らすことを余儀なくされたが、全体としての計算機能力は増加させた。

2018年から2019年にかけて筐体のメーカー保守が終了した。Blade型からラックマウント型サーバへの移行を検討するため、2019年に試験的に1Uのラックマウントサーバ (Lenovo社製SR530) を2台導入して評価

を開始したが、評価を終える前の2020年7月に1台の筐体が故障した。筐体の修理は断念した。

利用可能なBladeがこれまでの半分の11枚となったため、急遽8台のSR530を手配した。SR530が利用可能になるまで、利用可能な11台のbladeに加えて試験導入した2台のSR530、IOC用の4台のファンレスサーバ (6節)、1台の端末計算機 (5節) でサーバ計算機システムを仮復旧し、半年のあいだ加速器の運転を継続した。

2021年7月に全てのBlade計算機を廃止して10台のSR530に移行した。その後2022年3月に2台を追加して現在に至る。Table 1にサーバ計算機の典型的な仕様を示す。

Blade型サーバのメリットは機種更新が低コストな点で、安定に運転していた12年間の間に機種更新を重ねHS20からHS23eまでの4世代7機種を運用した。その一方で筐体が大きくスペースを要し、電源容量が利用可能なBladeの枚数を制限してしまうといったデメリットも明らかになった。筐体の寿命がbladeシステム全体の寿命を決めるという、想定されていたシナリオも回避できなかった。

#### 4.2 運用形態の変化と仮想化

Blade型サーバの運用を開始した当初は、個々のbladeに運転プログラム実行用・DHCPサーバ・DNSサーバといった個別の機能を割り当てていた [11]。2011年にScientific Linux (SL) 4上のXEN仮想マシンで動作するIOC (VIOC) を加速器の運転に投入した。2012年にSL6上のKVM仮想マシンに移行すると同時に、DHCP・DNSといった複数の小規模なサーバを仮想マシンに移行し、1台のbladeに集約した [13]。

2014年の端末計算機の機種更新 (5節) で運転プログラム実行用サーバの負荷が減り、仮想マシンホストへの転用が進んでいる。2023年現在、約100台の仮想マシンを5台のサーバで運用している。

仮想マシンを導入することで計算機資源の有効活用が可能となり、ライブマイグレーションによる耐障害性も向上した。また、IOCの負荷分散や試験用IOCの立ち上げ、古いバージョンのOS用の開発環境の維持も容易になった。

Docker・LXCのようなコンテナ技術も試験・評価しているが、加速器の運転に投入するには至っていない。

#### 4.3 特定用途向けサーバ計算機

2010年からは特定用途向けのサーバも導入している。加速器のシミュレーションは、加速器運転用に選定したサーバの仕様とはそぐわない。シミュレーションの特性に合わせたCPUコア数・メモリ容量・GPGPU等を選定した計算機を導入している。2.3節で述べたゲートウェイや3.3節に述べたアーカイバ用サーバも、この範疇に含めてよからう。

### 5. 端末計算機

2006-2007年に端末計算機として2または4ディスプレイ構成のHP社製のThin Client端末を約20台導入した。多数の端末の運用と管理を簡便にするため、ネットワークブートでSL4を起動し、X端末的に利



Figure 4: Intel NUC (left) and Thin-client (right).

用した [14]。サーバと IOC の OS が SL6 に更新されたのを機に、2014 年に Intel 社製の NUC へと機種更新した [12]。高速な CPU と大容量メモリ容量を搭載しており、これまでサーバで実行していた運転用プログラムを端末計算機で実行することができるようになった。Thin Client と NUC の外観を Fig. 4 に、典型的な仕様を Table 2 に示す。

NUC はメーカー保守のない低価格な小型 PC だが、意外と堅牢である。2014–2015 年に導入した 30 台中 20 台が 2023 年でも稼働中である。また新機種が毎年登場しより高速な CPU と大容量なメモリが利用可能になるが、ソフトウェアの互換性と管理上の観点からは大きな差異はない。随時新機種を試験して予備機とし、故障時の交換・端末の増設に備えている。2023 年現在、2 ディスプレイ構成で約 45 台を運用中である。

Table 2: Typical Specifications of Terminals

Model	CPU	memory	disk
HP t5720	Geode NX1500	512 MB	none
Intel NUC8i5BEH	Core i5-8259U	32 GB	SSD

## 6. フロントエンド計算機 (IOC)

2007 年に IOC として VME SBC を選択した [15]。2008 年に Linux 対応 PLC CPU(横河電機製 F3RP61) が、2010 年には VIOC が導入された。VME SBC は堅牢で良い選択であったが、制御対象機器の多くはネットワーク接続の PLC やオシロスコープといった機器であり、7.3 節で述べる例外を除くと VME 筐体を単なる電源として利用していた。MR の高度化に伴って IOC が増えてくると、少数の VME SBC であっても VME クレートが必要でスペースが不足すること、クレート内の VME SBC が電源を共有することが運用上の足枷となってきた。

2014 年に小型ファンレスサーバ (PiNON 製サーバ太郎 Type-P) を導入し [16]、2023 年に VME SBC からサーバ太郎への移行が完了する予定である。MR の運転用 IOC の種別と変遷を Table 3 にまとめる。典型的な IOC の外観を Fig. 5 に、仕様を Table 4 に示す。

## 7. OS と EPICS

### 7.1 ソフトウェアの考え方

計算機の運用上の観点からは、サーバ・端末・IOC は同じバージョンの OS・EPICS を使い、かつ可能な限り長く使い続けるのが望ましい。一方、セキュリティ上の観点からは、頻りにソフトウェアを更新したい。

MR 制御システムではこの相反する要望の妥協点として、いちど導入した OS はサポートが終了するまでメジャーバージョンを変えずに使い続けているが、可能な限りこまめにパッチをあてて更新している。実際には夏季計画停電・年末年始・年度末等の加速器の長期メンテナンスの際に OS にパッチをあて、必要なら再起動する。ただし、サーバを再起動するのは原則として夏季計画停電の際だけである。

EPICS base は原則として導入時点での最新の安定版を選択し、それを使い続けるが、深刻な問題がある場合には EPICS base のパッチレベルを上げることもある。EPICS のサポートモジュール、特に内製のものは必要に応じて更新している。いずれも予備の計算機・制御対象機器で試験・開発し、その後運転環境に投入している。

### 7.2 MR の加速器制御ソフトの変遷

2008 に MR の制御システムのソフトウェアとして SL4 と EPICS R3.14.7 を採用し、EDM・MEMDM・Strip-Tool といった EPICS で標準的な GUI プログラムを利用していた。2012 年に SL4 のサポートが終了したため、2012 年にサーバ計算機を、2013 年には IOC を SL6 と EPICS R3.14.12.3 に移行した [17]。制御端末である Thin Client は SL6 で動作させるのが困難であったため 2014 年に NUC へと機種更新した [12]。これによりサーバ・制御端末・IOC のソフトウェアが SL6 と EPICS R3.14.12.3 に統一され、制御端末上でよりモダンな GUI である Control System Studio の利用も可能となった [18]。

2019–2020 年には CentOS7 と EPICS R3.15.5 に移行し、2020 年に予定されていた SL6 のサポート終了に備えた。可能であれば CentOS8 に移行したいところであったが、2019 年に購入した NUC を早急に加速器の運転に投入する必要が生じ、CentOS8 のリリースを待たずに CentOS7 への移行を進めた。2020 年には EPICS R3.15.5 で CPU が暴走するケースが判明したため、R3.15.8 へと更新した。CentOS8 のサポートが 2022 年に前倒しされたため、結果的に CentOS7 の採用は正しい選択だったといえる。

CentOS7 のサポートは 2024 年に終了する予定である。2023 年から Alma Linux 9 と EPICS R7.0.7 への移行を開始しており、2024 年に移行を完了する予定である。

### 7.3 一部の例外

多くの機器はネットワーク接続で制御しているが、ここで計算機のバスに直結した機器を制御しているために OS を更新できない機器についてまとめておく。

MR のタイミング受信モジュールは内製の VME ボードである。その制御に用いる IOC は SL4 と EPICS R3.14.7 で動作する VME SBC (GE 社製 VME-7700RC)



Table 3: Evolution of Types and Numbers of IOCs

	2007	2008	2011	2013	2014	2015	2016	2021	2023
VME SBC	~80	~80	~90	~80	~80	~90	~90	55	37
microIOC	3	3	3	3	3	3	3	3	0
F3RP61		~10	~30	~40	~45	~45	~45	69	69
VIOC			a few	~30	~30	~30	~30	39	44
Saba-taro					a few	11	~30	50	80

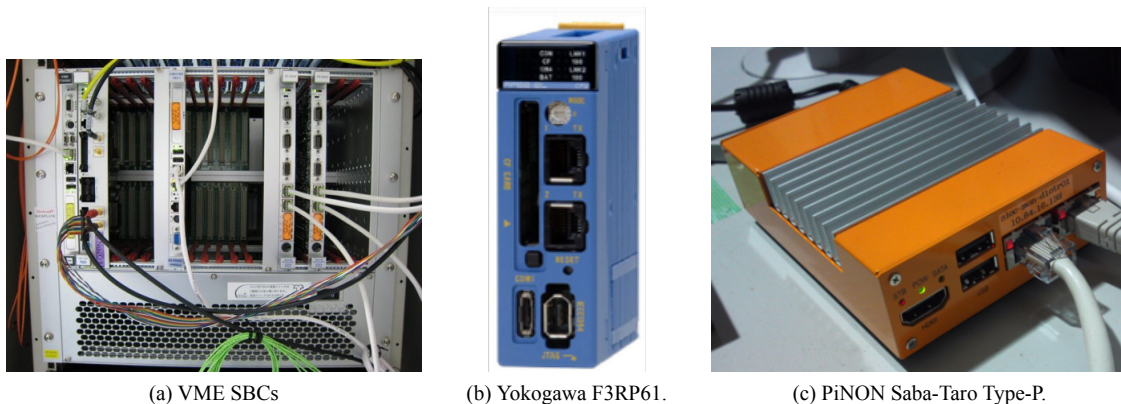


Figure 5: Three form-factors of front-end computers.

Table 4: Typical Specifications of IOCs

Model	CPU	memory	disk
Sanritz SVA041 (VME SBC)	Celeron-M 600 MHz	512 MB	diskless
Yokogawa F3RP61	ppc603e 600 MHz	128 MB	CF card
PiNON Saba-taro Type-P	Celeron J1900	8 GB	SSD

である。より新しい OS に移行するためには VME SBC の機種更新が必要であるが、VME バスにアクセスするためのハードウェアが変わるため、デバイスドライバやアプリケーションを大幅に書き換える必要がある。J-PARC 加速器のタイミングシステムを次世代ものへ更新するに伴って PLC モジュール型の受信機に移行することを選択した [3, 4]。25 台ある VME 型のタイミング受信 IOC のうち、23 台は PLC 型に移行する予定である。残りの 2 台も長期的には PLC 型への移行を検討している。

MR のビームロスモニタに用いる ADC も内製の VME ボードを利用している。制御用の IOC は SL6 と EPICS R3.14.12 を採用した VME SBC (GE 社製 V7865) である。全 12 台をサンリツオートメーション社製の SVA061 に機種更新し、ソフトウェアも CentOS7 と EPICS R3.15.8 に移行する予定である。

F3RP61 は横河電機社製の PLC モジュール用の Linux 対応 CPU モジュールで、CPU には Power PC が、OS には ELDK ベースの組み込み Linux が採用されている。CPU モジュールを EPICS IOC として動作させることが可能で、IOC からはバックプレーンに実装された PLC モジュールを読み書き可能である [19]。後継機種の

F3RP71 では CPU が ARM に、OS が Yocto ベースのものに変わっている。MR の制御システムでは約 70 台の F3RP61 を運用しており、2022 年から試験的に F3RP71 への移行を開始した。

## 8. まとめ

本論文では、2008 年に運用を開始した J-PARC MR の加速器制御システムを概説した。制御システムの各コンポーネントはこの 15 年間で 1-2 回の世代交代を経ており、その間に变化した運用形態とその背景を論じた。

予備機で新しいソフトウェアとハードウェアを試験し、運転用の環境やサーバ計算機に展開するアプローチは今のところうまく機能している。制御システムのコンポーネントの寿命は長いものでも 10 年、短いものは 2-3 年で、年々短くなる傾向にある。制御システムのソフトウェアの基盤として今後も Linux と EPICS を使い続けることが予想されるが、ソフトウェアとハードウェアは相互に依存しており、足並みを揃えて更新する必要がある。制御システムを全体として維持していくには、継続的な R&D が必要不可欠である。

## 参考文献

- [1] N. Kamikubota *et al.*, “J-PARC Control toward Future Reliable Operation”, Proc. ICALEPCS 2011, pp. 378-381, MOPMS026.
- [2] EPICS - Experimental Physics and Industrial Control System, <https://epics-controls.org/>
- [3] N. Kamikubota *et al.*, “Ten-year operation and experienced troubles of J-PARC MR timing”, Proc. PASJ2019, THOI07.
- [4] F. Tamura *et al.*, “Next generation timing system for J-PARC”, Proc. PASJ2019 pp. 149-152, THOI08.
- [5] N. Kikuzawa *et al.*, “Present Status of Personnel Protection System at J-PARC”, Proc. PASJ2019 pp. 877-880, FRPH006.
- [6] T. Kimura *et al.*, “Performance Evaluation of MR-MPS and Development Plan of New MR-MPS for J-PARC”, Proc. PASJ2017, pp. 1148-1150, WEP101.
- [7] H. Takahashi *et al.*, “Update of MPS Modules for J-PARC LINAC and RCS (2)”, Proc. PASJ2021, pp. 914-917, THP038.
- [8] N. Kamikubota *et al.*, “Network System Operation for J-PARC Accelerators”, Proc. ICALEPCS 2017, pp. 1470-1473. doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-THPHA047
- [9] S. Yamada, “Real-time and Detailed Provision of J-PARC Accelerator Operation Information from the Accelerator Control LAN to the Office LAN”, Proc. PCaPAC 2018, pp. 167-169. doi:10.18429/JACoW-PCaPAC2018-THP04
- [10] S. Yamada *et al.*, “Deployment of archiver appliance at J-PARC main ring”, Proc. PASJ2017, pp. 1144-1147, WEP100.
- [11] N. Kamikubota *et al.*, “Computer Environment for J-PARC MR Operation”, Proc. 7th PASJ (2010), pp. 690-692, WEPS116.
- [12] S. Yamada, “Renovation of PC-based Console System for J-PARC Main Ring”, Proc. PCaPAC 2014, pp. 81-83, WPO021.
- [13] N. Kamikubota *et al.*, “Experience of Virtual Machines in J-PARC MR Control”, Proc. ICALEPCS 2013, pp. 417-419, MOPPC131.
- [14] S. Yoshida *et al.*, “Console System Using Thin Client for the J-PARC Accelerators”, Proc. ICALEPCS 2007, pp. 383-384, WPPA33.
- [15] N. Kamikubota *et al.*, “Operation Experience and Migration of I/O Controllers for J-PARC Main Ring”, Proc. PCaPAC 2016, pp. 101-104, THPOPRPO09.
- [16] S. Yamada, “Deployment of a Tiny Fan-Less Server as IOC in J-PARC Main Ring”, Proc. PASJ2016, pp. 634-636, MOP092.
- [17] S. Yamada, “Upgrade of software toolkits for EPICS Input Output Controllers in J-PARC Main Ring”, Proc. 10th PASJ (2013), pp. 1106-1108, SUP080.
- [18] S. Yamada *et al.*, “Deployment of Control System Studio at J-PARC Main Ring”, Proc. PASJ2015, pp. 767-769, WEP103.
- [19] J. Odagiri *et al.*, “Development of Embedded EPICS on F3RP61-2L”, Proc. 5th PASJ (2008), pp. 240-242, FO05.