

J-PARC MR 加速器制御ネットワークの第三期更新

THE THIRD PHASE UPDATE OF CONTROL NETWORK IN J-PARC MR

佐藤 健一^{*,A)}, 山田 秀衛^{A)}, 上窪田 紀彦^{A)}, 高橋 博樹^{B)}
Kenichi Sato^{*,A)}, Shuei Yamada^{A)}, Norihiko Kamikubota^{A)}, Hiroki Takahashi^{B)}
^{A)} KEK / J-PARC
^{B)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The control network at J-PARC is a local network that provides the distributed control of various power supplies and measuring instruments which consist of the accelerator. The control network is constructed with core switches, aggregation switches, edge switches, and terminal switches to be installed inside or near the power supply unit. The control network was first designed at the end of 2005, and will be about 20 years old in 2024. Considering the general manufacturer maintenance period, the control network is updated with a full model update about every seven years. Within that cycle, the third update was planned from around 2018. However, due to the global semiconductor shortage, it became difficult to obtain the equipment to be updated. As a result, the initial schedule was revised significantly, but the third phase update of the control network in MR was completed in fiscal year 2023. In this report, we will summarize how the performance of the control network has changed in the updates up to the third phase, how it has changed from the original design and concept of the control network. And discuss the future outlook for equipment updates from the fourth phase onwards.

1. はじめに

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) は日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で計画及び運営を行っている大強度陽子加速器施設である [1]。リニアック、3GeV シンクロトロン (RCS:Rapid Cycling Synchrotron)、50GeV シンクロトロン (MR:Main Ring) の 3 段の加速器および物質・生命科学実験施設 (MLF:Materials and Life science experimental Facility)、ニュートリノ実験施設 (NU:Neutrino Experimental Facility)、ハドロン実験施設 (HD:Hadron Experimental Facility) の 3 つの研究施設で構成されている。

これらの加速器・実験施設を制御という観点から相互につなげているものが、加速器制御ネットワーク [2] である。J-PARC では、制御ネットワークは通常の Office ネットワークや安全にかかわる PPS(Personnel Protection System) ネットワークとは区別して設けられている。J-PARC における制御ネットワークは 2005 年の建設期から数えて 2018 年より第三期の更新期に入っている。概ね 7 年周期で更新が継続して行われているが、MR 担当は 2023 年度に完了した。

本報告では MR における制御ネットワークの第三期更新を完了したことを目処に、どのような意図でどのような変更をしたのかを示す。また、目前に迫っている第四期更新に備えて、どのような変更を行えばいいかなどの展望を示す。

2. 制御ネットワークの概要

一般的に加速器は 1 つの巨大な実験装置であると同時に、加速器を構成する各種電源や測定器等の集合体である。それらを分散制御するために、J-PARC では EPICS [3] と呼ばれるフレームワークを採用してい

る [4] が、利用するには何かしらの IP ネットワークに接続する必要がある。しかしながら通常業務で使用される Office ネットワークと同一だと、双方に悪影響を及ぼす可能性があるため、建設期に Office ネットワークの管理者である計算科学センターとの話し合いにより、制御専用のネットワークを設けることになった [5]。

制御ネットワークを成すのは LAN ケーブル・光ケーブル等で構成されるメディアの部分と、ネットワークスイッチ等で構成されるデバイスの部分に大別される。

2.1 制御ネットワークの光ファイバー網

Figure 1 に J-PARC における建屋の位置関係と、光ファイバ網の接続図を示す。制御ネットワークは中央制御棟 (CCB:Central Control Building) を中心に各施設をシングルモード光ファイバで結ばれており、巨大な光ファイバ網を構成している。

一方で、MR エリアには特定の一施設が存在しないため、第 3 電源棟 (D3) を中心としたスター構造になっている。そのため、第 1 電源棟 (D1)、第 2 電源棟 (D2)、ニュートリノ棟 (NU)、ハドロン等 (HD) および CCB への通信は必ず D3 を経由する。ただし、2018 年度までに新設された新設された第 4 電源棟 (D4)、第 5 電源棟 (D5) および第 6 電源棟 (D6) は Fig. 1 の通り、それぞれ近隣の電源棟とを結ぶ光ケーブルが用意された。

施設間光ケーブルに関しては、埋設されている部分もあるため交換は容易ではない。そのため、パッチパネルの内側である施設間ケーブルは寿命を考えず、パッチパネルの先である施設内のケーブルに関してはパッチケーブルの交換とともにスイッチ間の光量の調査を行っている。

2.2 制御ネットワークのネットワークスイッチ

制御ネットワークの機器としてはレイヤ 3 スイッチで構成されており、スイッチング機能だけでなくルーティング機能を備えている。これは複数の VLAN(Virtual Local Area Network) を管理するためである。

* kenichi.sato@j-parc.jp

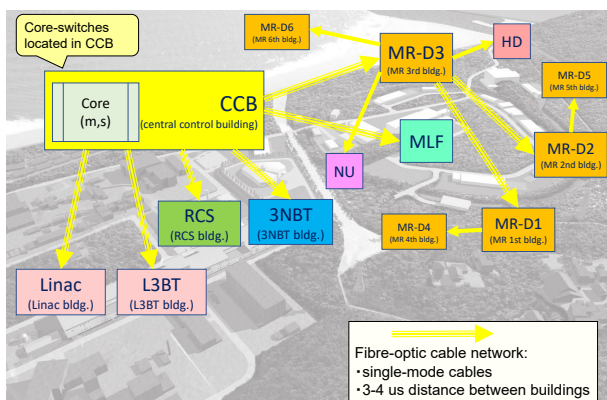


Figure 1: J-PARC buildings and networks.

これらの機器は回路部品の経年劣化や EOL、メーカーサポートの有無などからなる機器製品寿命が存在する。基本的にはメーカーサポート終了がメーカーの定めた EOL から約 7 年というのが一般的であることから、制御ネットワークも安全を見て機器の EOL から概ね 7 年でデバイス部分を全更新することを目標にしている。

Table 1: Number of Managed Switches Each Facility

Facility Building	IP assign	Number of switches
CCB	10.8	9
Linac	10.16	~80
RCS	10.32	~30
MLF	10.48, 10.56	~40
MR	10.64	16
NU	10.80	2
HD	10.88	2
L3BT,3NBT	10.16, 10.40	~30

Table 1 に J-PARC 制御ネットワークにおける建屋とスイッチの台数を示す。Table 1 にある通り、J-PARC では基本的には加速器の建屋単位にクラス A のプライベート IP アドレスを領域分けした VLAN(Virtual Local Area Network) を設定している。ブロードキャストストームが発生したときに、影響を受ける範囲を最小限に留める役割がある。MR においては基本的に mr-vlan(10.64) が使われているが、CCB においては多数の施設の中継地点でもあるため、ccr-vlan(10.8) を含めた全施設の VLAN を扱えるようになっていく。

J-PARC ではネットワークスイッチは Extreme Networks 社の製品を使用しており、以下のスイッチは全て Extreme Networks 社製である。Figure 2 は第三期更新で置き換えられたコアスイッチ (VSP 8608) であり、2020 年に第二期まで運用されたコアスイッチ (BlackDiamond 8806) から置き換えられた。

Figure 3 は実体としては 1 段目のエッジスイッチであるが集約スイッチ (X690-48x) と呼んでいる。基本的に各施設に 1 組だけ存在して、コアスイッチと後述のエッジスイッチの間の通信を担う上位スイッチである。

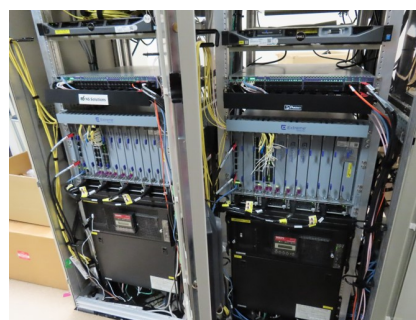


Figure 2: Core switches.

Figure 4 は実体としては 2 段目のエッジスイッチ (X460-G2-48t) であるが、ユーザーポートを備えた最前線スイッチの扱いである。しかしながら、MR ではアンマネージドスイッチを多数接続して、ポートの数を増やして使用しているので最前線ではない。MR ではポートごとに VLAN を割り当て、機器が必要とする VLAN を提供している。例えば J-PARC では MR-RF 機器制御に rcs-vlan(10.32) が必要であるため、MR のエッジスイッチには多数の mr-vlan(10.64) の他に rcs-vlan(10.32) が数ポート存在する。



Figure 3: Aggregation switches.



Figure 4: Edge switches.

Figure 2 から Fig. 4 の管理されたスイッチは基本的に冗長を組んで運用しているため、2 台が並んで設置されている。第 2 期更新までは ESRP(Extreme Standby Router Protocol) [6] と EAPS(Ethernet Automatic Protection Switching) [7] を組み合わせて運用していた。ESRP が L3 レベル (IP レベル) の冗長であり、EAPS は L2 レベル (データリンクレベル) の冗長である。従って、隣接機器に異常があった場合には EAPS で瞬時の切り替えを行い、迂回路を作り出す必要がある場合には ESRP で数秒程度の切り替えを行っている。第三期更新からは Fabric Connect [8] という SPB(Shortest Path Bridging) をベースにしたプロトコルを導入しつつあるが、対応機種でそろえる必要があるため、現時点对応しているコアスイッチ周辺の中核部分のみの利用に限っている。

3. 第二期から第三期への更新結果

J-PARC における制御ネットワークは 2005 年の建設期から数えて概ね 7 年周期で更新が行われている。そ

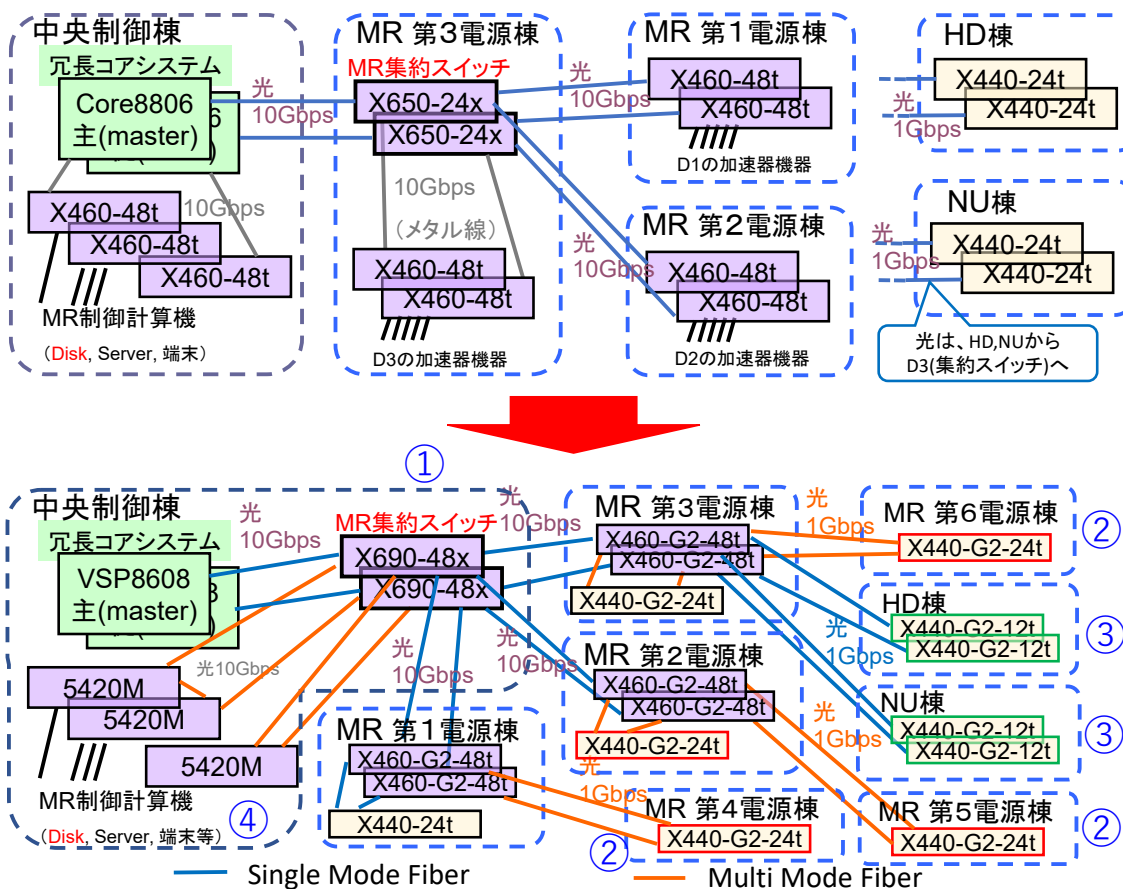


Figure 5: Control network updates in the third phase in MR part.

の流れで 2018 年から第三期の更新期に入り、MR 担当分 (MR,NU,HD) は 2023 年度に完了した。ただし、2020 年度から発生した世界的な半導体不足等で調達が遅れてしまったため、MR 全体の更新が 1 年半は遅れた。一方で JAEA 側 (LI,RCS 等) 担当分は 2024 年現在も更新中である。

Figure 5 において青の丸数字で示した箇所が、今回の更新で特筆すべき部分である。以下丸数字ごとに、更新の詳細を述べる。

1. MR 集約スイッチの移動 (2019 年度、2020 年度)

2019 年度に D3 にあった集約スイッチ (X650-24x) を CCB に移動させ、2020 年度に集約スイッチの機種更新 (X690-48t) を行った。光ケーブル網の中心は依然 D3 のままであるが、今後は制御ネットワークの中心を CCB にする。これは CCB にある Disk server 等の各種サーバーを mr-vlan に移動させ、MR の通信データが極力コアスイッチを経由しないようにするためである。

また、Fig. 3 を見てわかるように MR 集約スイッチの右側のポートが余っていたので、各種サーバ機器を接続するために活用することにした。ただし、通常のユーザーポートでは無く mini-GBIC の SFP モジュール (RJ-45) で拡張する形式であるため、通常のポートよりコストがかさむことになった。

2. MR D4~D6 の追加 (2021 年度および 2022 年度)

新しく建設された D4,D5,D6 へ制御ネットワークを拡張した。これら新設の電源棟には主電磁石のみが置かれる予定であるため、機器の数から mr-vlan(10.64) のみの 24 ポートがあれば十分であると判断した。

2021 年度には D3+D6 および後述の NU+HD のみを先行で延伸 + 機種更新を実施し、2022 年度には D1+D4、D2+D5 の延伸 + 機種更新を実施した。また、予算の都合上建屋ごとに台数が 1 台での運用をすることになった。機器に異常があった場合、D2 にある予備機 (同型の X440-G2-24t) を取り外し現場に持ち込んで LAN ケーブルの付け替えを行う。しかしながらそれぞれ上位のスイッチは 2 台あるため、経路の二重化だけは施している。

3. NU と HD の上位スイッチの変更 (2021 年度)

NU と HD スwitchの接続先を D3 にあった集約スイッチから D3 のエッジスイッチに変更した。それまでは、パッチケーブルを駆使して CCB に移動した集約スイッチに接続していた。

これらのスイッチは各実験施設の VLAN(nu-vlan(10.80) および hd-vlan(10.88)) だけでなく、mr-vlan(10.64) など複数の VLAN を施す必要があるため、単一の VLAN 設定しかできない予備機とは相入れなかった。そのため、NU と HD に関しては 2

台体制で冗長を組むようにして、せめてものコストカットでポートの数を 24 ポートから 12 ポートに減らした。

余談ではあるが、この時新規に敷設した D3 における光ケーブルが後にネズミの被害にあった [9]。

4. CCB のエッジスイッチの更新 (2023 年度)

集約スイッチ (X690-48x) を CCB に移動したので CCB のサーバを接続していたエッジスイッチ (X460-48t) を、機種更新 (5420M) に併せて ccr-vlan(10.8) から mr-vlan(10.64) の IP アドレスへ変更した。これによるメリットは、MR で取得したデータを CCB に Disk Server に転送する際に必ずしもコアスイッチを経由する必要がなくなったことである。これによりコアスイッチの負荷を減らすことができた。

このようにして、更新作業には複数年の調達とその都度の作業が必要なるため、最初の更新作業案を共有しておくことが重要であると感じた。

4. 最近のトラブル件数と今後の展望

J-PARC における最近のトラブル発生件数を Table 2 にまとめた。上から重大なものとして Reboot など停止を伴うトラブル、コアスイッチに発生したトラブルの件数、冗長で停止から守られたものとして GBIC の故障、電源ユニットの故障、その他 (fan モジュールの故障等を含む) のトラブル発生件数を各年度ごとに集計したものである。ただし、Stop の重大トラブルは夏の停電明けに集中しており、それを考慮に入れず機械的にカウントしているのには注意が必要である。

Table 2: Number of Trouble Occurrences Each Year

Types	15	16	17	18	19	20	21	22	23
(重大)									
Reboot, Stop	9	4	5	3	7	5	4	4	2
Core fault	0	1	1	0	1	0	0	0	0
(冗長)									
GBIC	0	3	0	1	1	0	1	1	0
PS Unit	2	6	4	5	4	7	3	6	2
else	0	1	4	4	3	3	6	2	6

Table 2 から、最近になるにつれ重大なトラブル件数は減少傾向にあることが分かる。これは経年とともに重大なトラブルが増加するが、予防的な機種更新によってトラブルの発生が防げているという見方ができる。"else" には fan module の故障が含まれており、やはり、電源と fan の故障が多いことが分かる。しかし、冗長になっているため、1 個故障しただけでは停止を伴うトラブルにはならない。

今後の展望であるが、制御ネットワークの第四期更新は約 7 年周期という事を杓子定規に考えると 2026 年ごろから始まる予定である。しかしながら、今使用しているネットワークスイッチはまだ EOL になってい

ないので、少しだけ第四期更新のことを考える余裕があると思われる。

仮に第四期更新が始まったとして、バックグラウンドでは既に 10Gbps を達成しているがユーザーの機器で 10Gbps に対応しているものはほとんど無い。この現状を踏まえ、例えばバックグラウンドを 40Gbps に対応させたとしてメリットはあるのであろうか?

次に考えなければならないのが保守サポート費の削減に関してである。基本的に保守サポート費は購入したスイッチの金額に比例することから、スイッチの台数を減らすか、機種をランクダウンさせる必要がある。やはりというべきか、建設期には大きな予算があった為比較的堅牢な構成になっているが、現状は予算削減をするために大きな見直しを図っていく時期に来ているといえる。

このように制御ネットワークの更新は次のフェーズを見据えて、どのように変化させていくかを今の段階から考える必要がある。

参考文献

- [1] J-PARC website, <http://j-parc.jp/>
- [2] N. Kamikubota *et al.*, "Network System Operation for J-PARC Accelerators", Proceedings of the 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems ICALEPCS2017, Barcelona, Spain, Oct. 8-13, 2017, THPHA047, pp. 1470-1473. <https://accelconf.web.cern.ch/icalcps2017/papers/thpha047.pdf>
- [3] EPICS website, <https://epics.anl.gov/index.php>
- [4] S. Yamada, "15 years of operation of the J-PARC Main Ring controls and its future plan", Proceedings of the 19th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems ICALEPCS2023, Cape Town, South Africa, Oct. 9-13, 2023, TUPDP049, pp. 639-644. <https://epaper.kek.jp/icalcps2023/papers/tupdp049.pdf>
- [5] N. Kamikubota *et al.*, "J-PARC Control toward Future Reliable Operation", Proceedings of the 13th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems ICALEPCS 2011, Grenoble, France, Oct. 10-14, 2011, MOPMS026, pp. 378-381.
- [6] ESRP Overview on Extreme Networks website, https://documentation.extremenetworks.com/exos_22.5/GUID-0C7D8E10-D1BB-4AC6-AF81-2DEB29F3F6E3.shtml
- [7] EAPS Overview on Extreme Networks website, https://documentation.extremenetworks.com/exos_22.5/GUID-61DDA2AB-977F-4FE5-86D8-6888540BEB1.shtml
- [8] Fabric Connect Concept and Design, https://documentation.extremenetworks.com/TCG-TSG/NN48500-649_Network_Virtualization_using_Extreme_Fabric_Connect.pdf
- [9] S. Yamada, "Damage to fibre optic communications in the J-PARC Main Ring caused by small wildlife", Proc. 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, WEP040, this meeting.