

加速器における MTCA 普及に向けて TOWARDS WIDESPREAD USE OF MTCA IN ACCELERATORS

田村文彦^{*A)}、吉井正人^{A)}、上窪田紀彦^{A)}、高橋博樹^{A)}
Fumihiko Tamura^{*A)}, Masahito Yoshii^{A)}, Norihiko Kamikubota^{A)}, Hiroki Takahashi^{A)}
^{A)}J-PARC Center, JAEA & KEK

Abstract

MTCA (MicroTCA) is expected to be the next generation platform for advanced control in accelerators. MTCA has many advantages over the widely used VMEs, such as high speed, large data transfer capacity, and high maintainability with hot-swappable modules. After the application to the LLRF control system at KEK, MTCA has been used in many accelerators around the world, while it takes a long time for MTCA to spread to the accelerators in Japan. Recently, the number of large-scale adoptions such as the LLRF control system, for the J-PARC RCS has been increasing. In this article, we introduce a case study of MTCA adoption and discuss why MTCA has not been widely used in Japan. Also, the efforts for the future promotion of MTCA in Japan are reported.

1. はじめに

MTCA [1] (MicroTCA、TCA は Telecom Computing Architecture の略) は高性能なデータ転送を軸とした、PICMG (PCI Industrial Computer Manufacturers Group) により制定されたオープン標準規格のひとつである。AMC (Advanced Messanine Card) をモジュールとして用い、さまざまな信号、データ処理や信号入出力を構成する。バックプレーンでの高速なデータ転送には PCI express (PCIe) が応用されている。Telecom という名が示すように、初めは通信関係への応用を目的としていたが、現在では宇宙や軍事、鉄道、そして高エネルギー物理学や加速器への応用が進んでいる。

規格にはいくつかのバージョンがあり、MTCA.0 はバックプレーンやカードのサイズ、シェルフ (シャーシ)、そして冷却や電源の管理を定めた MTCA の基本となる規格であり、MTCA.4 は物理実験や加速器への応用を目的として、RTM (Rear Transition Module) による I/O や、AMC と RTM を繋ぐ Zone 3 コネクタ、高精度なタイミング信号などを定義したものである。2016 年に制定された MTCA.4.1 では、高周波信号に特化した RF バックプレーンの追加や Zone 3 コネクタのピン割り当ての標準化などが行われた。

MTCA は 2000 年代に制定された比較的新しい規格であるが、規格制定に深く関わっている DESY を筆頭として、MTCA の加速器への応用は世界的に広がりつつある。一方で日本国内での MTCA 採用事例は海外に比べて少ないのが現状である。本稿では、J-PARC における MTCA 採用事例を紹介するとともに、日本国内での MTCA の普及に向けた取り組みについて報告する。

2. MTCA の概要

MTCA はインフラとしてシェルフ、電源モジュール (PM)、クーリングユニット、そして MCH (MicroTCA Carrier Hub) を備えている。シェルフには最大で 12 枚の AMC を挿入できる。AMC は MTCA における主要な



Figure 1: LLRF box. The BNC connectors in the front panel are auxiliary inputs to the RTM.

コンポーネントであり、AMC そのものあるいは RTM を介した I/O、FPGA による信号処理、CPU やストレージなどの機能を担う。バックプレーンを通じて他の AMC や MCH と情報のやりとりを行うことができる。前述のようにバックプレーンには PCIe Gen3 が採用されており、4 レーンで 3.9 GB/s の高速なデータ転送が可能である。PICMG ではさらに高速な Gen5 (15.8 GB/s) の採用に向けた努力が行われている。AMC あたり 80 W と比較的大きな電力消費を許容する設計になっている。

MCH は高速データ転送のスイッチとしての機能だけでなく、電源や冷却の管理も行う。MCH による管理により AMC やクーリングユニットはホットスワップ可能であり、システム全体の電源を落とさずに交換を行うことができる。MCH と PM についても冗長化が可能であり、システムの可用性が非常に高いことが MTCA の特長のひとつである。

3. J-PARC における採用事例

3.1 RCS LLRF 制御システム

J-PARC 3 GeV シンクロトロン (RCS) の Low Level RF (LLRF) 制御システムは VME モジュールで構成され、2007 年のビーム運転開始以来、大きな問題なく運転を継続してきた。しかし、使用している FPGA が陳

* fumihiko.tamura@j-parc.jp



Figure 2: (Top) old and (bottom) new LLRF control systems.

腐化し最新の FPGA 開発環境ではサポートされないものとなったため、長期にわたる維持は困難であると判断し、次世代 LLRF 制御システムの開発を 2016 年から開始した。

まず、主要な機能であるマルチハーモニックベクトル RF 電圧制御フィードバックを、各 1 枚の AMC および RTM を収納する小型システム (LLRF box と呼ばれる) に実装し、1 台の空胴を用いたビーム試験を行った [2]。LLRF box を Fig. 1 に示す。RF 信号をはじめとする入出力は背面の RTM から集合同軸コネクタで取り合っている。前面の BNC コネクタは追加の入力を行うためのもので、RTM と接続されている。LLRF box はプロトタイプや小規模システムの構成に適したものとなっている。

2017、2018 年度にかけ、旧 LLRF 制御システムを置き換えることを目的とし、12 台ある全ての空胴の電圧制御、ビームフィードバック等を実装した次世代 LLRF 制御システムを製作した [3]。新システムは、共通機能モジュール (AMC + RTM) 1 式、1 式で 2 台の空胴を制御する空胴ドライバモジュール 6 式 (AMC + RTM)、ベクトル合成機能を実装した高速シリアルモジュール、そして eMCH (embedded MCH) として J-PARC マスター

クロックの 12 MHz からシステムクロック 144 MHz を生成するクロック生成モジュールを、RF バックプレーンまで備えたフル規格のシェルフに収めたものとして構成されている。

Figure 2 に旧システム (上) と新システム (下) の外観を示す。RCS の LLRF 制御システムにおいては、12 台の空胴の IQ 振幅をベクトル合成モジュールに送る必要があるが、旧システムではバックプレーンの帯域が足りないために、前面パネルからシリアル通信で各空胴用モジュールからベクトル合成モジュールに送っている (上図左のシャーシ)。また、ビームローディング補償用のマルチハーモニック RF フィードフォワードの機能は、FPGA のロジック規模の制約から別のシャーシ (上図右) に実装されている。新システムでは、各空胴およびウォールカレントモニタの 8 ハーモニックの IQ 振幅や位相フィードバック量など多数の信号をバックプレーンを通じた高速シリアル通信により伝送することで、モジュール間のケーブルを排除することが可能となった。また、FPGA のロジック容量が大幅に増加したことで、フィードフォワードの機能まで含めた上で、1 つのシェルフに全ての機能を実装することができた。ケーブル量を減らすことによる保守性の向上、モジュール数の減少と AMC の共通化によって予備品管理が容易となったことは、MTCA.4 採用の大きなメリットと言える。

2018 年度末から機能のテスト、デバッグを行い、2019 年 10 月の運転から本格的な運用を開始し、これまで大きなトラブルなく運転を行うことができている。マルチハーモニックベクトル RF 電圧制御フィードバック [4] によりビームローディングをより良く補償できるようになり、取り出しビーム品質のビーム強度依存性をよく抑制できるようになった。

J-PARC リング RF グループには FPGA プログラミングに長けた人材はおらず、また RCS の LLRF 制御システムは、マルチハーモニック RF を取り扱い、また電圧、周波数など多数のパターンを持つなど、非常に複雑なものとなっている。プロトタイプおよび実機新システムの FPGA ロジックはハードウェアと一体のものとして三菱電機特機システムにより製作された。

3.2 その他の採用事例

J-PARC では他にも、MR においてはカップルドバンチ振動抑制のための縦方向ダンパーの制御システム、および RF 空胴の電圧制御、Linac においては LLRF 制御およびビームモニタのデジタイザとして MTCA.4 が使用されている。これらは全て LLRF box を活用したものとなっている。

また、RCS と同様のシェルフを用いたシステムとして、MR LLRF 制御システムの製作を開始したところである。

4. MTCA 普及に向けて

4.1 海外での普及状況

世界の加速器における MTCA の普及状況の調査が、2019 年に D. Tavares 氏により行われた。26 の施設から回答が寄せられており、IBIC'19 プロシーディングス [5] の Table 1 に各施設における MTCA 使用状況が簡潔に

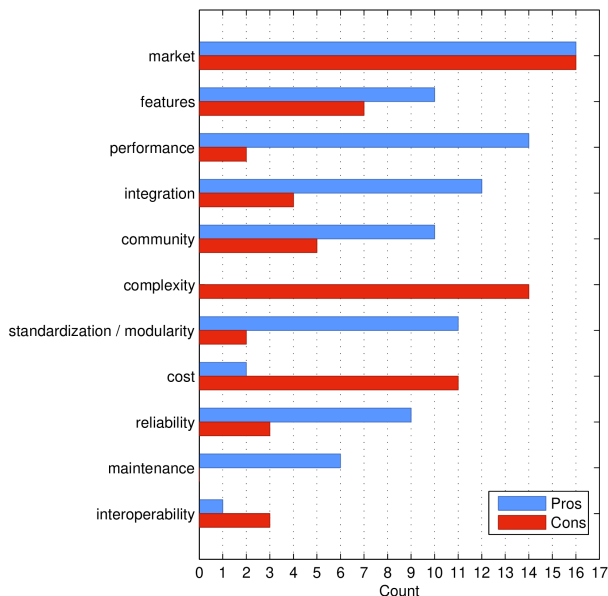


Figure 3: Clustering of opinions of MicroTCA.4 users in the accelerators community. (Courtesy of D. Tavares [5].)

まとめられているので参照されたい。集計によれば、20台以上のシェルフを使用しているのは12の施設であり、中でもDESY(ドイツ)では200台以上、ESS(スウェーデン)、SNS(米国)では100台以上のシェルフが使用されている。DESYはMicroTCA Technology Labを持ち、European XFELの建設にあたってはMTCA.4を全面的に採用しており、ほぼ全ての制御機器がMTCA.4となっている。またESSは新規に建設中の加速器であるため、高度な制御にはMTCA.4を用いることを組織的に決断している。SNSは運転を開始してから十数年が経過しており、制御機器の更新にあたってMTCAを積極的に採用している状況である。CERNではVMEが多く用いられてきたが、SPSでは、LHCアップグレードのための長期シャットダウン中にMTCA.4を用いたLLRFへの更新を行っており、数多くのシェルフが導入されている。アジアでは20台以上のシェルフを使用しているのはSPring-8/SACLA(日本)、IHEP(中国)、PAL-XFEL(韓国)となっている。

使用目的では、LLRFおよびタイミング/シンクロナイゼーション、そしてBPMの処理回路、フィードバックが主である。LLRFについては、European XFELおよびFLASHのために設計されたLLRF用モジュール群がESSやGSI(FAIR)などの多くの加速器で採用されている。これは、Linac LLRFでは信号処理手法が確立しているため、開発コストを下げるためにDESYで開発されたものを選択しているのだと考えられる。これらの事例では、標準化されたハードウェア上で自営でFPGAロジックを修正、開発して使用している場合が多い。もちろん、SNSやFRIB、KEK、SPring-8などのように、それぞれ独自の開発を行っている施設もある。一方でBPMやフィードバック、その他のビームモニタについては、各施設ごとに独自開発のシステムを構築することが一般

的なようである。

近年、MPS(Machine Protection System)を高度化し、複雑な条件判断をMPSに組み込むことが複数の加速器で検討されている。高度化したMPSの実装では高性能なMTCAが使用されることがあり、SNSでのパルス電磁石の異常波形をトリガとしたMPSシステム[6]はその好例である。

調査では、使用者の思うMTCAの長所、短所についての質問があり、その回答をまとめたものがFig.3である。性能、統合性、標準化、信頼性、そして保守性といった点を長所として感じている人が多数であり、短所としては複雑さ、高価なコストが挙げられていた。コストについては、MTCAは信号の集積度を高くできるため、チャンネルあたりで考えればそれほど高価ではない、という意見もあったことは興味深い。

MTCAの普及にあたっては、DESYで2012年から毎年12月に開催されている、MTCA Workshop for Industry and Research[7](以下MTCAWS)の役割を無視することはできない。40程度の口頭発表が行われるこのワークショップの最大の特徴は、タイトルにIndustry and Researchとあることに象徴されるように、加速器の研究者とMTCA機器を開発、販売する企業側の人々の参加、発表がほぼ半々であることである。企業側と研究者の交流により、研究者側のニーズが企業に伝わるだけではなく、企業側の開発のトレンドを掴むことができる。米国のMTCA開発の中心となっている企業VadatechのS.Karamooz氏の2018年の発表[8]では、MTCAの採用は通信、5G、放送などのみならず医療、サイバーセキュリティ、飛行シミュレータ、そして軍事など他分野にわたることが示された。主にヨーロッパからの参加者が多いが、2019年のMTCAWSでは17ヶ国からの参加者がおり、ヨーロッパ以外では特に中国から多数の参加、発表が多数であった。なお、2018、2019年の日本からの参加者は1名(田村のみ)であった。

MTCAWSのChairのひとりであるDESYのH.Schlarb氏のClose outにおける、“Community significantly has grown (from testers → to users & implementation)”との言に示されるように、MTCAは開発やテストの段階ではなく、普及の段階にある、ということが世界的な現状であると言える。

4.2 日本の現状

MTCAが世界で初めて加速器に用いられたのは、2008年のKEKによるLLRF開発である。しかし、日本国内でのMTCA普及は海外に比べあまり進んでいないのが現状である。これは何故だろうか。

今回の発表にあたり、J-PARCおよびKEKのLLRF、ビームモニタ、制御関係者にアンケート調査を行い、理由を探ってみた(Fig.4)。設問内容はURLを参照のこと(<https://forms.gle/ycQwZvNs4nWKMFNCA>)。この調査は対象者の人選が筆者らの周囲に留まるため統計処理をするには適していないことに留意されたい。

MTCAを使用しているか否かとの設問への回答では、Fig.5に示す通り、半数以上が使っていないとの回答であった。使っているとの回答はほぼLLRF関係者からのものであった。

MTCAを使っている場合の用途に関する設問への回

Figure 4: Survey form about MTCA.

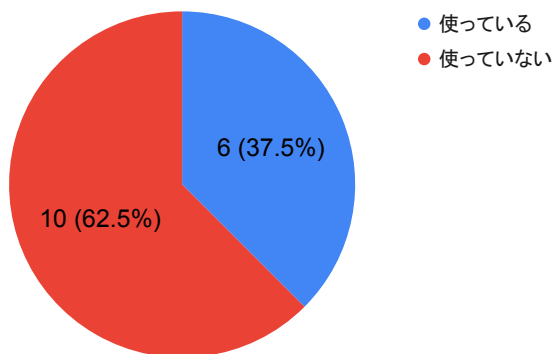


Figure 5: Answer on whether you use MTCA.

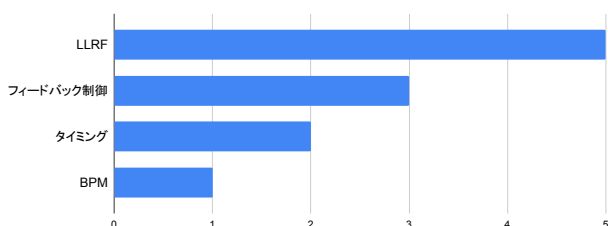


Figure 6: Applications of MTCA.

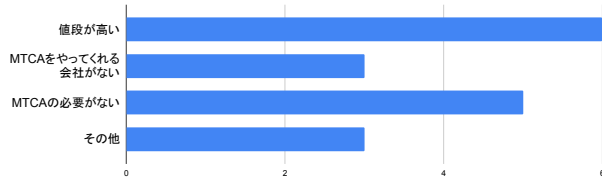


Figure 7: Reasons why MTCA is not used.

答では (Fig. 6)、海外での状況と同様に、LLRF が中心であり、その他、フィードバック制御やタイミング、BPM との回答があった。

また、MTCA を使用していない場合にその理由を尋ねる設問では、Fig. 7 に示すように、値段が高いこと、MTCA の必要がないことが上位を占めた。MTCA をやってくれる会社がない (少ない) ことも重要な点である。その他の回答としては、ノウハウを共有できるコミュニティが国内にないこと、開発にあたっての敷居が高いことなどの回答が寄せられた。

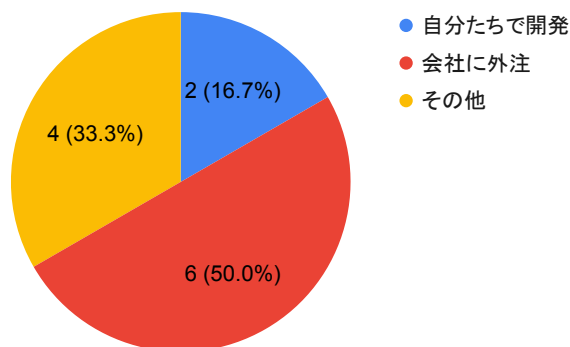


Figure 8: Answers to how to create FPGA Logic or DSP programs.

MTCA を使っている場合に、どのような形で使っているかとの設問では、COTS (Commercial Off-The-Shelf) 製品を買ってきて使うとの回答が 2 であったのに対し、開発して使うとの回答が 4 であった。また、FPGA ロジックや DSP プログラムをどこで開発するかとの設問への回答 (Fig. 8) では、自分たちで開発するとの回答は少数であった。その他に含まれる回答には、プロトタイプは自分たちで行い、実機への実装は外注との回答や、処理内容は自分で設計し、実装は外注との回答が含まれるため、多くの場合で FPGA ロジックや DSP プログラムを外注で開発しているということが言える。

自由回答で MTCA の長所を尋ねる設問への回答は、多機能な AMC の存在、高速なバックプレーン、モジュール管理が定義されていること、ホットスワップ、冗長性、そして将来性というような回答があった。MTCA.4 については、AMC/RTM 構成によるアナログ回路とデジタル回路の分離が可能という点が挙げられた。短所としては、コストが高いこと、日本で開発できる業者が少ないという回答が多数であり、その他 COTS 製品が少ない点が挙げられた。技術的には、モジュール管理のための MMC (Module Management Controller) を搭載する必要がありモジュール設計が難しいことや、技術の解説記事が少ないため情報が不足しがちとの指摘があった。細かい点では、MCH のメーカー毎に MMC と相性があり、構成ごとに動作するかのシステムチェックが必要である問題や、VME バスや PLC の共有メモリのように、全ての AMC でデータを共有できる仕組みがあれば良いのに、といった点が挙げられた。

国内で MTCA 普及のために必要なこととしては、日本でモジュール開発できる会社が増えることと低価格化が回答の多数を占め、その他、宣伝を行うこと、加速器以外でのマーケットの拡大および普及などの回答があった。

狭い範囲で行ったアンケート調査であるが、日本国内での MTCA 普及の障壁となっているものは次の要素であることが浮び上がってくる。

- コストが高いこと。
- 国内に MTCA 機器を製作できる企業が少なく。
- 国内に MTCA に関する情報を共有できるコミュニティがないこと。

コストが高いことが海外の MTCA コミュニティでも問題視されているのは前節で紹介した通りである。最近では低価格で MCH 機能を内蔵した小型シェルフが商品化されつつあり、メーカー側も低価格化の努力を続けていると考えられる。また、海外では汎用のモジュールを購入し、加速器内部で FPGA ロジック開発を行う手法が主流である。アンケート回答でもわかるように、日本ではロジック開発も外注であることが多いため、よりコストが高くなる傾向があると言えるのではないかと考えられる。FPGA 開発を行う人材を加速器側で準備できれば、より汎用モジュールを使用しやすくなり、必要なコストの減少にもつながるであろう。

一方で、J-PARC RCS の LLRF 制御システムの事例のように、高価であったとしてもそれに見合ったパフォーマンスを生み出すことができるならば、価格だけを理由にして MTCA 採用をためらうべきではないと考える。

国内に MTCA 機器を製作できる企業が少ないことは、やはり大きな問題である。MTCA はモジュールの管理に優れていると同時に実装が複雑であるために、参入にあたっての障壁が高いことが理由であると考えられる。しかしながら、例えば国内で高性能な VME モジュールを製造している優秀な企業であれば、適切な情報さえあれば、MTCA モジュールを開発できない理由はないだろう。国内に MTCA コミュニティを形成し情報やノウハウを共有することが、日本における MTCA 普及のために必要であろう。

4.3 MTCA workshop in Japan

国内での MTCA 普及を目的として、日本における 3 日間のワークショップの開催を準備中である。MTCA に関する情報交換のみならず、まだ MTCA を使用していない研究者、製作したことがないメーカーへの技術的、心理的な敷居を下げるねらいがある。

独自の企画として、初日は日本語でのチュートリアルセッションとする予定である。先に述べたように、MTCA はモジュールの管理が細かくできる反面、その実装が複雑であることは否めない。チュートリアルセッションでは、これまでに日本で MTCA 機器を開発してきた企業の技術者の方々に講師として、開発における経験を話していただくことになっている。後半 2 日は英語でのセッションとする予定である。国内の加速器における MTCA 採用も増えてきており、加速器施設間の情報交換が必要な時期に来ている。

ワークショップ全体を通し、日本における MTCA コミュニティを形成していきたいと考えている。

もともとは 2020 年の 9 月末に KEK つくばキャンパスでの開催を予定していたが、新型コロナウイルス感染症の拡大により 1 年程度の延期を余儀なくされることとなった。2021 年の状況はまだ見通せないが、もし国内の感染状況がまだ悪かったとしても、本加速器学会同様のバーチャル開催とし、必ず開催したい。

5. 最後に

MTCA は既に、開発の段階から普及の段階に入ってきている。高度な制御、データ収集のプラットフォームとして加速器における今後の標準となることは間違い

ない。オープンな規格であること、海外の加速器での大規模な採用が増えていること、そして MTCA コミュニティが活発に活動をしていることから、規格自体の寿命も長いことが見込まれる。

海外に比べて遅れを取っているものの、国内でも MTCA の採用事例は少しずつ増えてきている。国内での普及のためには、情報を共有できるコミュニティの形成と、国内において MTCA 機器製造メーカーを増やしていくことが必要である。コストを抑えるためには、FPGA ロジックを自営で製作できる体制を整えることも比較的低価格な COTS モジュールの活用から有用だろう。

MTCA はモジュール管理、保守性に優れている点が最大の特長である。高コストであることは否めないが、特に J-PARC 等の大型の加速器施設においては、システム、ひいては加速器運転の可用性を高めることが期待できることから、積極的に採用していくことが良いと考えられる。

参考文献

- [1] PICMG, “MicroTCA Overview”; <https://www.picmg.org/openstandards/microtca/>
- [2] F. Tamura, “A prototype system of multiharmonic vector voltage control for the J-PARC rapid cycling synchrotron”, in *2017 Low Level RF Workshop*, Barcelona, Spain, O-20, 2017.
- [3] F. Tamura, Y. Sugiyama, M. Yoshii and M. Ryoshi, “Development of Next-Generation LLRF Control System for J-PARC Rapid Cycling Synchrotron”, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 66, no. 7, pp. 1242-1248, 2019.
- [4] F. Tamura, Y. Sugiyama, M. Yoshii, M. Yamamoto, C. Ohmori, M. Nomura, T. Shimada, K. Hasegawa, K. Hara, and M. Furusawa, “Multiharmonic vector rf voltage control for wideband cavities driven by vacuum tube amplifiers in a rapid cycling synchrotron”, in *Phys. Rev. Accel. Beams*, 22, 092001, 2019.
- [5] D.O. Tavares, G.B.M. Bruno, S.R. Marques, L.M. Russo, and H.A. Silva, “MicroTCA.4 at Sirius and a Closer Look into the Community”, in *Proc. IBIC'19*, Malmo, Sweden, Sep. 2019, pp. 461-470.
- [6] E. Breeding, C. Roberts, J. Sinclair, and M. Martinez “MicroTCA Real-time Monitoring of Injection Kicker Magnets Performs Critical Interlock for High-Power Operation of the Spallation Neutron Source”, in *7th MicroTCA Workshop for Industry and Research*, Hamburg, Germany, 2018; <https://indico.desy.de/indico/event/20703/session/14/contribution/73>
- [7] “MicroTCA Workshop for Industry and Research”; <https://mtcaws.desy.de/>
- [8] S. Karamooz, “MicroTCA growth”, in *7th MicroTCA Workshop for Industry and Research*, Hamburg, Germany, 2018; <https://indico.desy.de/indico/event/20703/session/13/contribution/108>