

■ 研究紹介

電力変換器作ってみた

KEK 加速器研究施設

栗本 佳典

kurimoto@post.j-parc.jp

2018 年(平成 30 年)10 月 29 日

1 はじめに

本文章は、私が 2011 年ぐらいから続けてきた J-PARC Main Ring 加速器(MR) の電磁石用電力変換器の開発に関して、苦労話も交えてまとめたものである。時系列で書いているので、論文のような課題-対策-結果という論理的にすっきりした文章にはなっていない。さっと読み流していただければと思う。ちょっとした現場の愚痴のようなものも入っている。

2 J-PARC Main Ring アップグレード

2.1 繰り返し周期の短縮

現在、J-PARC MR は長基線ニュートリノ振動実験(以後 T2K 実験)に最大 500 kW の陽子ビームを供給している。現行では、2.48 秒に一回、3 GeV(入射時)から 30 GeV に加速された 8 個の陽子ビームの塊(バンチ)をニュートリノターゲットに取り出しており、バンチあたりの陽子数はおよそ 3×10^{13} と世界最大である。最近 5,6 年でバンチ内粒子数は大幅に増えた。私が J-PARC に赴任した 2010 年時は、MR のビーム強度は 50 kW 以下であったが、数年の間に、ビームローディング補償、コリメータ増強、二倍高調波空洞、ビーム不安定抑制装置、より安定な光学パラメーターの探索、補正磁石による共鳴現象の抑制、キッカー磁場の波形改善など、各グループの様々な仕事が立て続けに行われ、2018 年現在で 2010 年に比べて約 10 倍のビーム強度を得ている¹。一方で、バンチ内粒子数を増やすと陽子間に働く斥力の影響がより大きくなり、その結果エミッタンスが増大しビーム損失の原因となる。したがって、バンチ内粒子数を増やすには限界がある。J-PARC MR では、図 1 のように現行

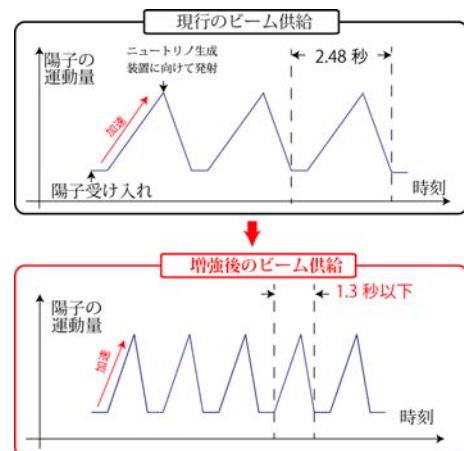


図 1: J-PARC MR における繰り返し周期の短縮

2.48 秒の繰り返し周期を 1.3 秒以下に短縮し、メガワット級の陽子ビームを得ることを計画している。このために必要なハードウェア更新が電磁石用の電力変換器である。

2.2 電磁石用電力変換器

「電力変換器」という言葉は、素粒子実験の方々にはあまり馴染みがないと思うが、早い話が「AC アダプタ」のことである。AC アダプタは、交流 50 Hz 100 V コンセント電圧源をパソコンやスマートフォンに必要な 10 V 程度の直流電圧源に変換している。加速器施設とはいえ、受電するのは交流 50 Hz の電圧源である。ただし電圧は高く、22 kV や 6.6 kV などである。いずれにしても、陽子を加速するのに必要な磁場が発生できる波形ではない。陽子が加速できる磁場とはどのようなものだろうか? シンクロトロン加速器では粒子の曲率 (ρ) を一定にするために運動量 (p) に合わせて磁場 (B) も変化させなければならない ($p = e\rho B$)。したがって、磁場すなわち電磁石電流の波形は、図 1 に示した運動量波形と相似になる。この電流を磁石に流すための電圧波形は、電磁石が電気回路的にはインダクタンス L と抵抗 R で表せる

¹ 私が赴任する前にも、電磁石の配線対称化による大幅な性能向上があった。建設期に活躍された方々も含めると、実に多数方々の貢献の上に達成したビーム強度と言えよう。



図 2: J-PARC MR の電磁石



図 3: 電磁石用電力変換器とそれに使われているトランジスタの例

ことから、

$$V = L \frac{dI}{dt} + RI \quad (1)$$

のように書ける。簡単のため、J-PARC MR の電力変換器一台でドライブする合計のインダクタンスと抵抗を 1 H , 1Ω , 30 GeV で必要な電磁石電流を 1000 A , 加速時間 dt を 1 秒 とし式 1 を使うと、電圧は 1000 V のオーダーになることが分かるだろう。実際には、ビームを曲げるための電磁石 (Bending Magnet) 96 台、収束されるための電磁石 (Quadrupole Magnet) 216 台、色収差補正のための電磁石 (Sextupole Magnet) 72 台 (図 2) を 20 グループに分けて、20 台の電力変換器でドライブしている。各電力変換器のスペックは最小のもので 400 V 程度、最大で 3000 V 程度の出力電圧であり先のオーダー計算は大体正しい。そうすると、この電力変換器が扱う必要な電力 (電圧 × 電流) はメガワット級になることが分かる。パソコンの AC アダプタは 100 ワット程度なので、ざっくり「AC アダプター万個以上」というところである。規模がイメージしやすいように、電力変換器とそれに使われているトランジスタの写真を図 3 に示した。なお、大型の電力変換器によく使われるトランジスタとして IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) があり、この写真も IGBT である。

2.3 何故更新が必要か？

では、なぜ繰り返しの短縮に電磁石の電力変換器の更新が必要なのか？大きく二つの理由がある。一つ目は式 1

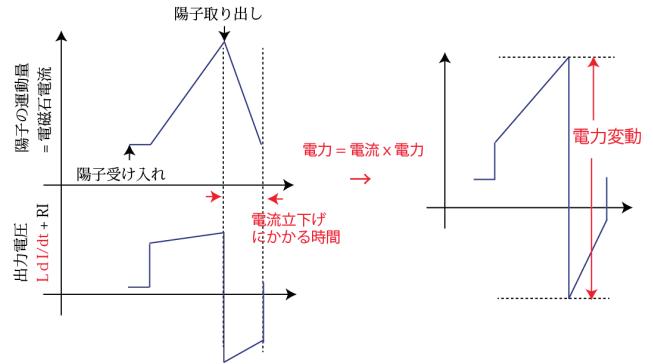


図 4: 電磁石電流と電圧

を眺めれば簡単にわかる。繰り返し時間を約半分 ($2.48 \text{ 秒} \rightarrow 1.3 \text{ 秒}$) にするので、磁石を 30 GeV 用まで励磁する時間も約半分になる。即ち、式 1 の dt が約半分になるので、必要な電圧 V は約二倍になる。

二つ目の理由はビームとは直接関係がない。図 4 左に電磁石電流パターンを示すが、 30 GeV でビームを取り出した後、 3 GeV 用に電磁石電流を戻すのに有限の時間がかかっていることが分かる。これは、式 1 を見れば明らかで、 $dt \rightarrow 0$ のとき $V \rightarrow \infty$ となり、変換器の定格電圧で電流立下げにかかる最短時間は決まる。また、電流を減らすときには負の電圧を印可しなければならない。したがって、電力 (エネルギーの流れ、電圧 × 電流) は電磁石から変換器の向きとなる。インダクタンス L は電流 I でエネルギー $\frac{1}{2}LI^2$ を蓄えるので、電流を下げる場合はエネルギー保存則よりエネルギーは電磁石から持ち去らなければならない。シーケンスとしては、ビーム加速時に大量のエネルギーをもらい、ビーム取り出し後に大量のエネルギーを返すというのを 2.48 秒 周期で繰り返していることになり、電力波形は図 4 右のようになる。現状では図 5 のように、電磁石から持ち去ったエネルギーは研究所の外側に返すという電力変換器の方式になっているので、研究所の受電電力波形は電磁石の電力波形 (図 4 右) と同じになる。全ての電磁石を合わせると、電力波形の peak-to-peak 値は現行で 60 MVA (メガブレイバー、ボルト・アンペアのこと) に達する。同じ電力変換器の方式でアップグレードし出力電圧を二倍にすれば、この電力変動も二倍になる。しかし、東京電力側が J-PARC の電力変動をこれ以上増やすことを受け入れられないため、ビーム取り出し後に一旦電磁石のエネルギーを貯蔵する装置を J-PARC 内に設置しなければならない。したがって、新しい電力変換器は図 6 のように巨大なコンデンサバンクが組み込まれた設計としている。

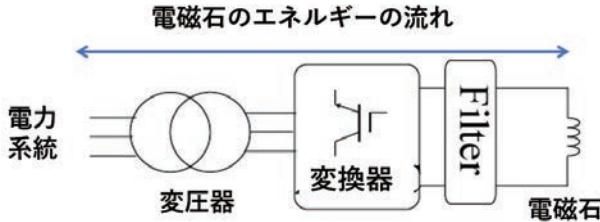


図 5: 現行の電磁石用電力変換器では、ビーム取り出しの後、3 GeV ビーム受け入れのため電磁石のエネルギーを研究所の外に返している。

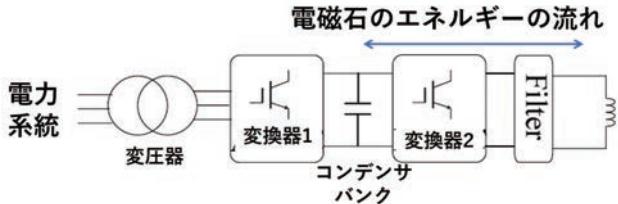


図 6: 新しく設計するものでは電磁石のエネルギーはビーム取り出し後、一度コンデンサバンクに貯めて次サイクルのビーム加速に再利用する。

3 2011年～2012年 開発立上げ

3.1 電力変換器を始めたきっかけ

私は米国 Fermilab のニュートリノビームを使った Sci-BooNE 実験で博士号を取得した(2010 年 3 月)。この実験を通じて、ビームが実験の結果のかなりの部分を決めているということを実感したため、Fermilab 滞在中から加速器の勉強を始め²、博士号取得後すぐに J-PARC メインリングで働くことにした。最初の 1 年はビームモニターグループに所属し、ビーム位置フィードバック装置を担当して FPGA のコードを書き、ビーム試験を経て無事常用の装置として導入することができた。この仕事は、メインリンググループだけでなくニュートリノ実験の方々にも非常に評価していただき、ある程度は満足していた。一方で、実務といえば FPGA 等の電子回路とビーム試験であり、素粒子実験とあまり変わり映えがしなかったので、「高周波加速」とか「電磁石」のような「いかにも加速器」という装置をやってみたいとも思っていた。

そんな中、「メインリングのアップグレードに必要な電磁石用の電力変換器の開発をやらないか?」と、同じ KEK の小関国夫さん(現産総研)に誘われたのでやることにした。

²当時インディア大の香取哲平さん(現 Queen Mary 大学)に加速器で著名な S.Y. Lee 教授を紹介していただいたおかげで、800 ドルのサマースクールに無料で行けたのはよかった。宿題が毎日でて開講場所の Maryland 大の単位認定もあるちゃんとしたものである。

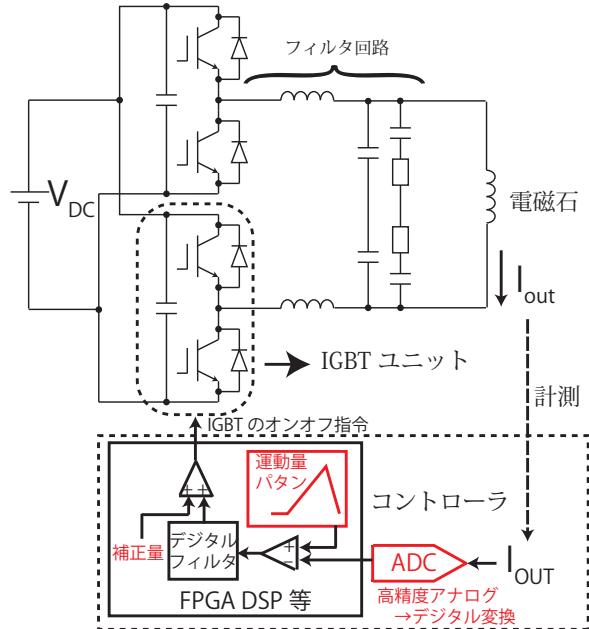


図 7: 電力変換器システムの概要

3.2 メーカーめぐり

さて、先ほど触れたメガワット級の電力変換器の大きさからして、工場を持たない KEK や J-PARC では、少なくとも製造することができない。また、このクラスの電力変換器の設計や製造を行っているのは、一般の方々にも知名度のある大手メーカーだけである。現行の電力変換器も東芝製である。そこで、これらのメーカーで設計や製造を担当してくれるところはないか何社も訪問した。結果は「うちは手伝えない」との回答がほとんどで、一社だけポジティブであった。メガワットどころか、それ以上のものも製造し安定に供給しているメーカーなのになぜだかお分かりだろうか?

3.3 加速器電磁石用の電力変換器システム概要

上記の事情を説明するために、電力変換器システム全体の概要を図 7 に示した³。図 7 の上部はトランジスタ(以後 IGBT とする)やダイオードを使った回路とパッシブな RLC 素子を使ったフィルタ回路がある。前者の回路は IGBT ユニットあるいは単にユニットなどと呼ばれる単位回路を組み合わせて構成される場合が多い。図の回路はブリッジと呼ばれる回路で、通常この回路中では IGBT 素子をオン(導通)かオフ(絶縁)のみのスイッチとして扱う。これはいわゆるスイッチング電源と

³図では入力が直流になっているが、実際に受電するのは交流である。そのため、図の回路と受電設備の間には交流から直流への電力変換器が入る。

呼ばれるもので、半導体 IGBT の状態を「電流=0」（オフ）か「電圧=0」（オン）のどちらかの状態に極力近づけることで、そこで発生する損失（電力=電流 × 電圧）を小さくでき、冷却機能を縮小できる。この利点から、今やほとんどの電力変換器がスイッチング電源といつても過言ではない。スイッチング電源で電流や電圧の大きさや向きを制御するためには、各 IGBT のオンオフを適切に組み合わせて動作させる必要がある。詳しい動作は私のテキスト⁴を参考にされたい。このプリッジ回路が理想の電磁石電流を出力するように IGBT のオンオフを制御するのが、図 7 下側のコントローラーである。コントローラーでは、取得した電磁石電流計測値と理想的な運動量パターンとの差分から、IGBT のオンオフ操作を決定するいわゆるフィードバック制御を行う。加速器の電磁石用電力変換器が産業用の電力変換器に比べて唯一異なるのは、出力の電流を非常に高精度で制御しなければならない点である。磁場のエラーは直接ビーム方向に影響するため、特にビーム損失が致命的になるような大強度陽子加速器ではなおさらである。そのため、高分解能（20 ビット以上）の ADC や出力補正機能など特殊な機能をコントローラーに持たせなければならない。したがって、新たに加速器用の電力変換器を設計するためには、制御部門などを巻き込んだ新規開発が必要である。それを継続的な受注を望めない世界に一台しかない J-PARC のためにやるのは採算が合わないというのが、協力できないメーカーの主な理由であろう。

3.4 開発の立ち上げ

ポジティブな大手メーカー 1 社とは付き合っていくとして、「KEK から技術提供できればメーカー側のコストを下げられるかもしれない」と思い、電力変換器の開発を始めることにした。これまで KEK では、主電磁石のような大型電力変換器の開発はメーカー主導で KEK 側は要求性能の決定、進捗状況の管理および設置後の運用が主な役割であった。したがって、ゼロから始める必要があった。まずは、電磁石用として特殊性がある制御システムの開発を始めたこととした。評価用の電源制御用 DSP ボードや 24 ビット AD ボードを購入し、どのような配線にすればノイズが混入しにくいか、目的の電流波形からずれる場合にどのように補正量を見つければよいかを詳細に実験した。また、制御の対象となるダミーの電力変換器として、昔の壊れた電力変換器から IGBT だけはずしてそれをバラックで組みなおした。つくばキャンパスで作ったセットアップの写真を図 8 に載せておく。そもそも電力変換器の知識の習得からしなければならないので、このころは沢山教科書を読むなど大量にイ

⁴http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-2018/0506_Kurimoto_Yoshinori.pdf



図 8: 開発当初の実験セットアップ。上は制御システムで左上が AD ボードで真ん中が DSP ボード（どちらも評価ボード）。下はジャンク品ボードから外した IGBT（点在している黒いもの）を配線して作った電力変換器。

ンプットがあった時期で、自分の専門性を一気に高めた。さらに、このころには震災の復旧で利用運転は止まっており、自分の時間の 100 % をこの開発につぎ込むことができた。アウトプットが全くなかった時期ではあったが、毎日、新しいことに触れているのでそれに関しては特にストレスを感じることはなかった。

4 2013～2014 年 結果が出ない …

4.1 実際の J-PARC 電磁石を使った試験

2 年間アウトプットなしでやってきたが、せっかちな性格のせいか身に付いた技術を使いたくなってきたため J-PARC がある東海キャンパスにもどることにした。そのときには、評価キットでの試験を元に自分で設計した 24 ビットの AD ボードや制御用の DSP ボードが手元にある状態になっていたので、それを使って、J-PARC MR の六極電磁石をドライブして性能を見る試験を行った。その結果の一部を図 9 に示す。これは、磁石電流のフィードバック制御の時におこる追従誤差の補正に関する結果である。指令値と同じになるように誤差を制御システムの入力とするのがフィードバック制御であるが、時間的に指令値を動かす必要がある場合、一般的には指

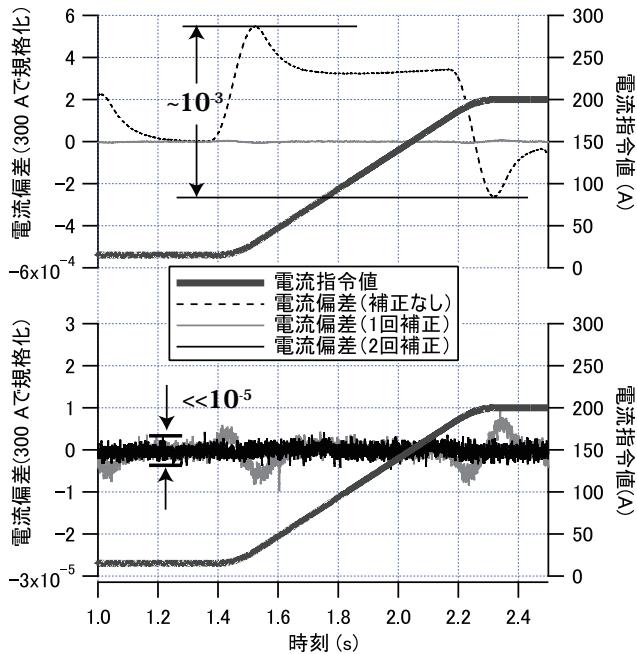


図 9: 追従誤差打ち消しの効果

令値と実際の値が異なる時間帯が存在し、これを追従誤差と呼ぶ。例えば、エアコンでいうと設定温度が指令値になる。ある時間に設定温度を変えるといずれ実温度は設定温度に落ち着くが、それまでの間は設定温度と実温度が異なっている。これが追従誤差である。シンクロトロンでも主電磁石磁場を運動量波形と相似に保たなければならぬので、電力変換器の電流指令値も定数ではなく運動量と相似なバタン波形となる。したがって、追従誤差は存在する。図 9 の太線は電流波形で、上グラフの点線は電流偏差（指令値-実測値）であり、定格 300 A に対して 10^{-3} 程度の追従誤差があることが分かる。さて、電磁石電流の追従誤差はエアコンと異なり抑える必要がある点では厳しいが楽な面もある。それは、「決まった指令値が繰り返される」という点である。このおかげで電流偏差の波形も毎サイクル同じである。そのために、あらかじめその電流偏差を打ち消すような補正量を制御出力（変換器へ入力）に重畠すればよい。さらに補正量を作る時に 1 サイクルではなく、複数のサイクルでそれぞれ補正量を作りそれを平均化すれば、ランダムノイズが打ち消され真の追従誤差による補正量により近いものを作ることができる。図 9 上グラフの灰色の線が補正一回目の追従誤差で既に上グラフのスケールでは確認が難しいほど小さくなっていることが分かる。そこで図 9 下グラフに追従誤差を拡大したものを載せている。ここで、わずかに有限の追従誤差が残っていることが確認されるが、それも二回目の補正後には、ノイズに埋もれて観測できないほど小さくなっている ($\ll 10^{-5}$)。これは文献 [1] に出版した。ただし、六極電磁石の変換器は 100 kW 程度で、偏向電磁石や四極電磁石用と比べると

小さい。これらの変換器を製造するのはやはり大手の重電メーカーが必要だというのが当時の考えであった。

4.2 レビュー委員会

また、このプロジェクトが J-PARC の将来を大きく左右するということで、外部委員で構成される開発進捗のレビューが行われた。このレビューをもう少し有効に使うべきだったと反省している。というのは、そのころ KEK でも部品の選定や回路方式などの電力変換器の設計にも携わろうとしていたため、今思えば判定を受けたい箇所がいくつもあった。にもかかわらず、レビューの開催、委員の選定やアジェンダをほぼ任せにしてしまい、必要な意見を聞きそびれてしまった。一方で、「リーダーが若いからシニアのリーダーシップが必要でないか」というコメントを頂戴したことは刺激になった⁵。

4.3 量産をどうするか？

我々の制御システム法も確立し、上記の大手メーカーの電力変換器との組み合わせ試験も完了し、原理実証試験は済んだ。しかし、制御アルゴリズムなどをこちらで提案し一部の電子回路を支給したが、あまりコストダウンにはならなかった。これまでの大手メーカーからの電力変換器の購入実績に比べて大幅にコストダウンすることができない場合は、今回の電力変換器のアップグレードは想定している予算の 2~3 倍になるという事が分かっていた。また、資金に限りがあったことや原理実証機であることから、上記の組み合わせ試験では実機の一部のみを構成する（当然ハードの追加により実機クラスにできる）案件で契約したため、どれかの電磁石用に一号機として導入することができなかつた。これらを踏まえて実機をどう作っていくか考える必要があった。

5 2015-2016 年 実機をやってやる！

5.1 反省点

結局大手メーカーとのやり取りは日の目を見なかつたが、反省点は明らかで以下の二点であった。

- たとえ試験機でも上手くいけば実機として使える規模のものを作るべき。
- アイディアではなくハードごと提供しないと安くならない。

⁵ 実際には頭にきてやめてやろうと別のところを受けたが最終面接で落ちてしまった

まず、新電磁石用電力変換器としての予算がついていない（2014年度末時点）以上、通常の運営費交付金や補助金の範囲内で、かつ短期間（1年程度）で実機クラスに挑むにはコスト削減は必須であった。したがって大手の重電メーカーと仕事をするのを諦める必要があった。また、それ以外のところで、デジタル制御の技術と電力変換器の技術を併せ持っているメーカーはないので、大手メーカーとのコラボレーションを諦めた時点で、どのみちデジタル制御システムをハード丸ごと支給しなければならなくなってしまった。

そこで、QFRという四極電磁石9台のグループをドライブするのに必要な電圧（およそ1700V）が、最大の変換器を要する偏向電磁石のグループをドライブするのに必要な電圧（10000V）の1/6程度になっていることに着目し、最大出力電圧1700VのIGBTユニットを単位とした変換器システムを考案した。さらに一号機はQFR用の変換器にすれば、その変換器はQFR用かつIGBTユニットの試験機の二つの役割を果たせる。幸いなことに、QFR負荷は小さいので例のコンデンサバンクは必要がないため、IGBTユニットと制御盤の設計、製造のみが必要である。そこで、以下を関係者に主張、提案し納得していただいた。

- 2016年度夏のシャットダウン中にQFR用の変換器を更新する。
- 2015年度は私が受注した業者の工場に滞在する。

二番目のKEK職員が工場に滞在すべきと考えた理由は、（1）1700V出力のIGBTユニットを作るためには、マージンをみて3000VクラスのIGBTを使う必要がありその経験がKEKにも受注業者にもなかったこと、（2）制御システムにはフィードバック用電流計測値やIGBTのオンオフ指令だけでなく、各種状態やアラームなど変換器と取り合いが多くあるため足並みをそろえた開発が必要であること、の二点である。特に、（1）の1年でゼロから実機クラスの変換器を作り運用に使うということに関しては、メーカーやKEK職員の方から様々な心配の言葉を頂いた。これに関しては、私自身が一番心配だったので、妥当な意見であると思う。ただ、「部分的なR&Dを行い、途中で終了」という経験はもう御免だという気持ちのほうが強かった。図10に開発体制の概要を載せた。

5.2 QFR用電力変換器の仕様

図11にQFR用電力変換器の概要を示した。左（上流）から、変圧器、交流から直流への変換器（AC/DC Converter）、直流からパタン電流を生成する変換器（Chopper）、フィルタ回路および負荷である。このうちAC/DC

新主電磁石用電力変換器開発製造における分担
↔現行電源はシステムごと大手メーカーが担当

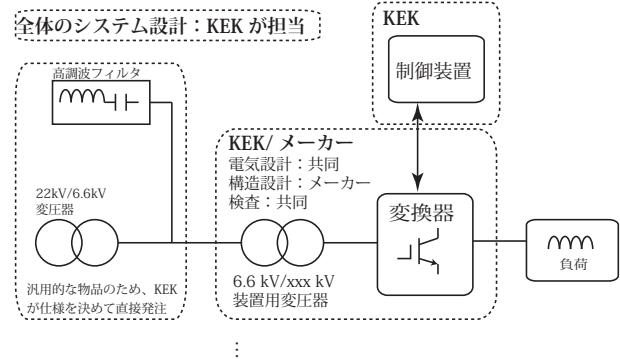


図10: 構築した開発体制

ConverterとChopperは同じ1700VのIGBTユニットから構成され、これらはKEKが支給するコントローラーで制御される。

5.3 FPGAデジタル制御装置

図12に開発したデジタル制御装置の詳細を示した。この仕事は主にKEK下川哲司さんによるものである。左上のpattern generator boardは上位で決定した運動量パターンを格納し中心に書いたMain control boardへ送られる。Main Control boardはその運動量パターンおよび左下の24bit A/D boardからの計測電流値を受信し、フィードバック制御を行う。フィードバック制御の出力は右のGate Pulse Generatorに送られIGBTのオンオフ指令に変換される。FPGAを採用した理由は、制御盤を変えずに大きさの異なる電磁石用変換器に対応するためである。電磁石群のRLなどの定数が大きく変われば、IGBTユニットの数を増やす必要があり、モニターや出力のチャンネル数が増える。FPGAであればそれに対して柔軟に対応できる。Gate Pulse Generatorの場合、FPGAにいくらチャンネル数があっても、出力は電気から光への変換素子の物理的大きさでチャンネル数が制限されるため、6UのVMEのクレートとカードを使った方式とした。IGBTユニットが増えれば、スロットに刺すカードを増やして対応するというわけである。詳細は文献[2]にある。

5.4 試験結果

私自身はあまり根性がない人間だと思っていたが、意外と頑張ったこと、さらには下川哲司さんをはじめとする他のグループ員の頑張りで、何とか私の公約どおり2016年夏にQFR用の変換器をインストールすることに成功した。とくに、KEK製のコントローラーとメーカー製のIGBTユニットの組み合わせ試験には神経を使った。電

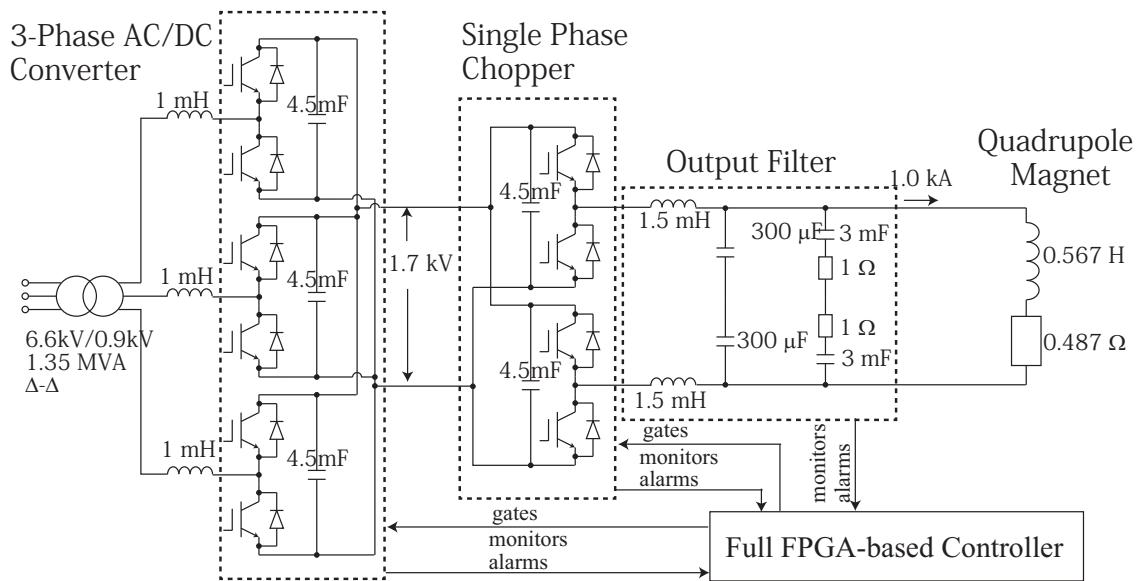


図 11: QFR 用変換器の概要

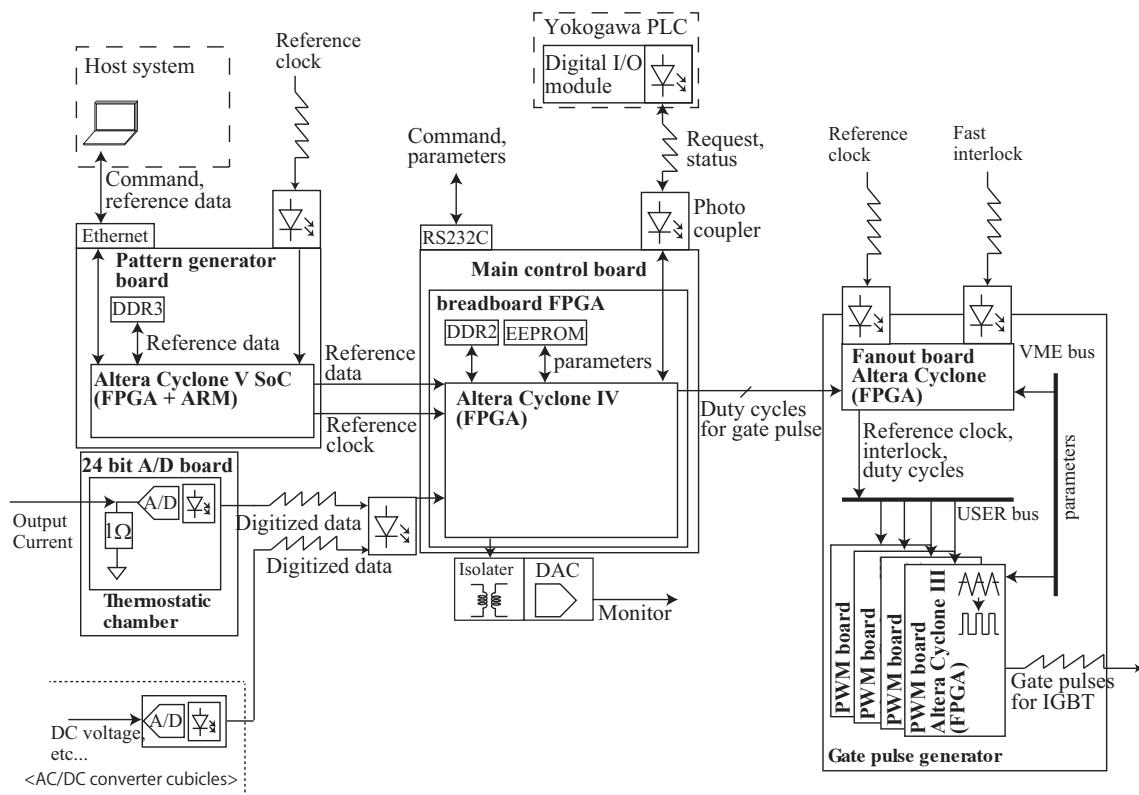


図 12: 開発したデジタル制御装置（下川哲司さんより）



図 13: インストール後の QFR 用変換器

力変換器は間違った制御を行えば、「爆発」というレベルの事故を起こすので、コントローラーのデバッグは KEK テスト電源（壊しても大したことはないパワーのもの）で試験を行い、そのソースコードをメーカーに滞在している KEK 職員に送り、メーカー工場で試す、という手順で行った。我々の電子回路やコードを信頼してくれたメーカーには非常に感謝している⁶。図 13 にインストールした電力変換器の写真を示す。高繰り返し化ができる電圧の高いものとして設計したため、例えば 1.3 秒周期で通電できるのはほぼ当たり前なので、ここでは別の試験結果を一つ紹介する。J-PARC MR にはニュートリノ用の速い取り出しだけでなく、ハドロンおよび原子核実験用に最大エネルギーに達したあと数秒かけてちょっとづつ取り出す「遅い取り出し」というビーム供給モードがある。図 14 上がその電流パターン（青）である。この波形のフラットトップにあたるビーム取り出し中の電流偏差は非常に小さく抑えなければならない。この領域の電流偏差の周波数依存性を図 14 下に示した。赤が変換器更新後で青が更新前である。100 Hz 以下の低周波の領域で一桁程度改善していることがわかる。2 kHz に大きなピークがあるが、1 kHz 以上の速い周波数成分は磁石内のダクトの渦電流でシールドされ、磁場換算では 1 桁程度減衰することがすでに分かっているため、問題はない。

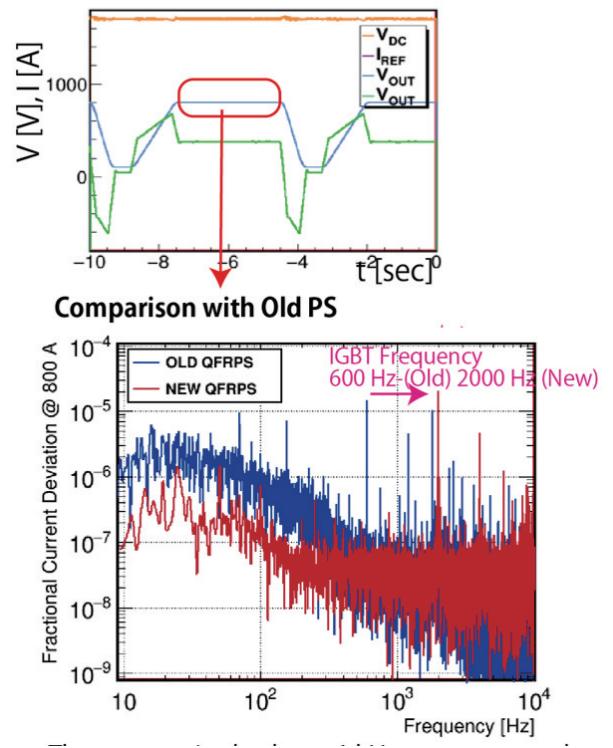


図 14: 遅い取り出しパターン（青:出力電流、緑:出力電圧、橙:直流電圧）とその電流偏差の新旧比較

6 2017 年～ 最大の偏向電磁石用電力変換器

6.1 コンデンサバンク

さて、偏向電磁石用変換器の 1 台分の回路構成は、図 11 の回路を六直列にしたものだと思えばよいし、紙面を多く浪費するだけなので回路図は特に示さない。その他、最大の違いが直流部に巨大なコンデンサバンクが挿入されることである。図 15 にコンデンサバンク 1 回路分を示した。1 回路当たり 5 mF のコンデンサが 96 個あり、4 個づつをユニットにして各ユニットにヒューズが取り付けられている。ヒューズを分散化して付けるのはコンデンサの短絡による事故放電をユニット内に限定するためである。また、バンク 2 回路分が図 16 のように 1 本のコンテナ内の左右にそれぞれ配置されている。偏向電磁石用変換器 1 台あたり 6 回路分必要なのでコンテナ 3 本ということになる。すでに変更電磁石用変換器 1 台分はインストールされているので、その写真を図 17 に示しておく。最終的には変更電磁石用変換器 6 台が必要なので、すくなとも 18 本のコンテナが J-PARC MR に設置されることになる。今は予算の採択状況に合わせて順次増やしていく。なお、この仕事は主に KEK 森田裕一さんが担当しており、詳しくは彼の論文 [3] を参照されたい。

⁶ 実は、メーカー技術者からは「仕事がしやすかった」と意見を頂いている。通常、コントローラーは変換器の知識がないソフト専門の人が担当するため、トラブルが起きたときに、どちら（仕様 or プログラム）が間違っているの水掛け論になったりするらしい。その点、我々は「変換器を動かす」というのが目標なので、ハードで足りてない機能をソフトに持たせる（またはその逆）等の有機的な議論ができる。

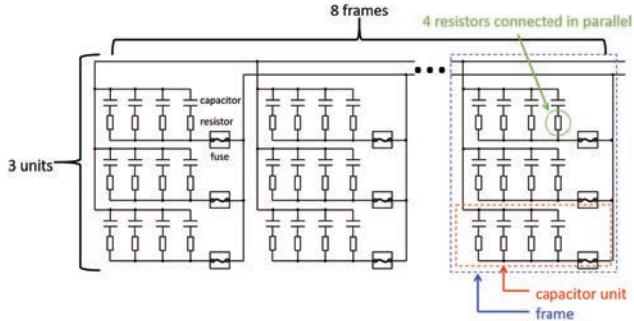


図 15: コンデンサバンクの回路図



図 16: コンデンサバンクコンテナの内部。図 15 の回路 2つが左右にそれぞれ配置されている

6.2 今後

2018 年度の 11 月から本変換器を実負荷に接続し通電試験を行う予定である。これが成功すればこの主電磁石用変換器更新プロジェクトの開発はすべて完了したことになる。あとは、予算に応じて順次電源をインストールしていく段階である。何とか 2021 年中に必要なすべての変換器の更新を完了させることを目指している。



図 17: 偏向電磁石用変換器 1 台分のコンデンサバンク用コンテナ。最終的にはこの 6 倍の 18 本が必要。

7 まとめと謝辞

J-PARC MR ではビーム取り出し周期を約半分 (2.48 秒 →~ 1.3 秒) にすることでメガワット級の実効ビーム強度にアップグレードする。そのためには電磁石用の電力変換器の更新が不可欠であり、我々電磁石電源グループはそれに心血を注いできた。最初は技術的に不足していたり、メーカーから協力を断れらたり上手くいかないことが多かったが、何とか開発を軌道に乗せることができた。今後は、インストールや工事などの時期に移行するが 2021 年中にすべての更新が完了するよう努力している最中である。

第 4.3 章で重電メーカーでは予算の 2,3 倍になる想定であったと述べたが、メーカーを変えて、KEK 職員が中心となり開発等の役割分担をすることで、発注が可能なレベルまで落とし込むことができた。現時点での交換すべき変換器の 1/3 程度しか発注できていないが、その分だけでも上記の想定額に比べて、10 億円以上安い額で発注できている。助教（当時）3 人（栗本、森田、下川）で 10 億円以上外部資金をとってきたのと同等である。ちなみに大型の科研費「特別推進研究」でも 5 億円程度（らしい）で、私のグループのコストパフォーマンスが高さを宣伝しておく。というか、これが言いたいために執筆を引き受けた。

また、本文にもあるように、自分の意見でグループを変えたり、勤務地を変えたり、メーカーに常駐したりしているが、当然周囲の理解がないとできないことである。この点は自分を信頼していただき計画を実行できるようにサポートしてくれた周囲の方々には非常に感謝している。

8 おわりに

我々電磁石グループは「電力変換器」という加速器研究者がこれまで内部にあまり手を付けてこなかった部分を自ら開発することにより、大幅なコストダウンに成功した。当初は、電磁石電源など「縁の下の力持ちのようなもので大事ではあるが主役ではない」などと思っていたが、電力変換器を手掛けることでビームパラメータをよりコントロールできるようなり [4][5]、電力変換器の情報を直接使ってビームを補正するという我々電磁石グループが担当するビーム物理の研究も大幅に増えた [6][7]。電力変換器以外の研究紹介でも本文が埋められるほどだ。残念ながら、学生をまだ担当したことはまだないが、高エネ研で電力変換器をやれば、ビーム物理をやりながら他のキャリアパスにも乗り換えがしやすいのでは、と思っている。電力変換器という分野は自動車の電化に伴い求人も非常に増えている今ホットな分野でも

あるし、今後もインフラの部分なので仕事はなくならないだろう。海外のあらたな送電網を設計するといった壮大な仕事もある（らしい）。加速器をやった人たちのある割合が、他の分野で活躍することは人材の多様性の観点から重要であると思う。

日本の科学技術予算が厳しいと言われはじめてかなりの月日が流れたが、それが改善する傾向は今のところ見られない。資金が多いことが最高なのは間違いないが、実際にはないのだから何か新しいことを考えなければならない。さもなければ、「資金が重要である」と30年間言い続けるだけで私の研究者人生が終わってしまう。また、「機構が予算をとてこれないから仕方がない」と言っているだけでは我々の業績は増えないので、現場は現場で何かできることをしたい。我々の電力変換器開発のように、ひょっとすると電力変換器とは違う加速器の分野でも「買い物だと思っているが本気で取り組めばコストも下がるし研究力や人材の幅が広がる分野」があるかもしれない。そのためにも、「アイディアを出し、（やったことないけど）実行しようとする人」にもっと来てほしいと思っている。素粒子実験や加速器実験は大人数であるため、見栄えのいい学術的結果が必ずしも、その人の能力を必ずしも反映しているわけではないのは、読者は私より承知であろう。もし、学生やPDで「俺は超優秀だ」という人だけでなく、「ハードやソフトの設計を沢山してきたが学術的アウトプットがなかなかない」とか「やったことないけど、設計や開発を立ち上げてみたい」という人はぜひ一度見学に来てほしい。

参考文献

- [1] Y. Kurimoto *et al.*, Precise Current Control in Accelerator Magnets with a Digital Feedback System, IEEE Transactions on Nuclear Science 61 (1) (2014) 546–552. doi:10.1109/TNS.2013.2293024.
- [2] T. Shimogawa *et al.*, A Control System of New Magnet Power Converter for J-PARC Main Ring Upgrade (2018). arXiv:arXiv:1806.08884.
- [3] Y. Morita *et al.*, Capacitor bank of power supply for J-PARC MR mainmagnets, Nucl. Instrum. Meth. A901 (2018) 156–163. doi:10.1016/j.nima.2018.06.002.
- [4] Y. Kurimoto and K. Nakamura, “development and applications of a multi-purpose digital controller with a system-on-chip fpga for accelerators”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 840 (2016) 160–167. doi:10.1016/j.nima.2016.10.009.
- [5] A. Kobayashi *et al.*, Bunch train tune shift study for higher beam power at J-PARC MR, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [6] Yoshinori Kurimoto, Tetsushi Shimogawa and Daichi Naito, Real-Time Betatron Tune Correction with the Precise Measurement of Magnet Current (2018). arXiv:arXiv:1806.04022 to be published in IEEE Transactions on Nuclear Science.
- [7] Y. Kurimoto *et al.*, Evaluation of slow-extracted beam quality with real-time betatron tune correction using magnet current at J-PARC Main Ring, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.