



季刊誌

NO.22

# J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX

2026

特集

## MR (Main Ring) の 主電磁石電源

インタビュー

主電磁石電源とは  
MRのビームパワーを増強  
新たな主電磁石電源の開発  
主電磁石電源開発の先にあるもの



# J-PARCの 加速器

J-PARC には3つの加速器があり、それぞれ別の役割を持っています。

## LINAC

全長約250mの最初にある加速器で、水素ガスから陽子1個と電子2個からなる負水素イオンのプラズマ（電気を帯びた気体の塊）を作ります。ここで光速の71%まで加速されます。

## RCS (Rapid-Cycling Synchrotron)

周長約350mの周回型加速器で、LINACで加速された負水素イオンの塊はRCS到着直前に2個の電子が剥ぎ取られ、陽子ビームになります。ビームダクトの中を1万回以上周回し、最終的に運動エネルギーは3GeV、速度にして光速の97%まで加速されます。RCSで加速された陽子の大部分は、物質・生命科学実験施設に送られて実験に利用されますが、一部は次の加速器であるMRに送られます。

## MR (Main Ring)

周長約1600mの周回型加速器で、RCSからそれぞれ20兆個以上の陽子を含む8つの塊（バンチ）を受け取り、ダクトの中を30万回周回する間にエネルギーは30GeV、速度にして光速の99.95%に達します。加速後、大強度バンチはハドロン実験施設とニュートリノ実験施設に送られ、各施設で標的にぶつけて二次粒子を生成し、素粒子・原子核実験に利用されます。

\* 光速とは：光が真空中を進む速さで、秒速約30万キロ。1秒間に地球を7.5周する速さです。

## 今回の主役

# 主電磁石電源

今回は主電磁石電源を取り上げます。

まず、主電磁石とはなんでしょう？

主電磁石とは、MRでエネルギーが3GeVから30GeVまで変化する陽子ビームの軌道を一定に保つための電磁石で3種類あります。

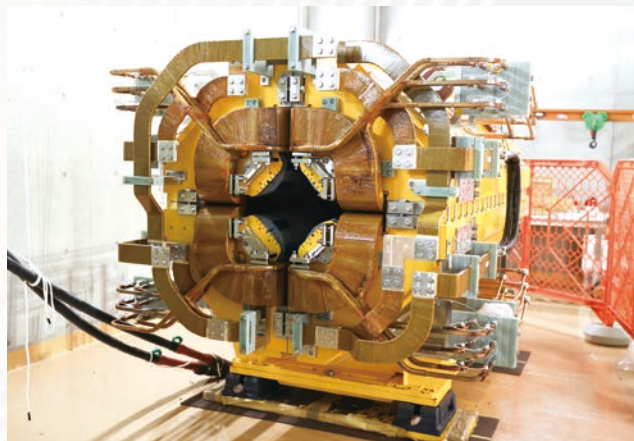
## 偏向電磁石

陽子ビームの軌道をローレンツ力で曲げて円形に回すための電磁石です。長さは6m、重さは約30トンでアーク部のみに計96台設置されています。



## 四極電磁石

クーロン力で発散しようとする陽子を磁場で収束させるための電磁石です。長さは2m、重さは約10トンです。計216台設置されています。





## 六極電磁石

運動量収差の補正をする電磁石です。長さは1m、重さは約2トンでアーク部に計72台設置されています。



四極電磁石（黄色）と六極電磁石（緑色）

## ステアリング電磁石

微力ですが微調整のきく偏向電磁石です。長さは34cm、重さは240kgです。微調整のために各四極電磁石の側に計216台設置されています。

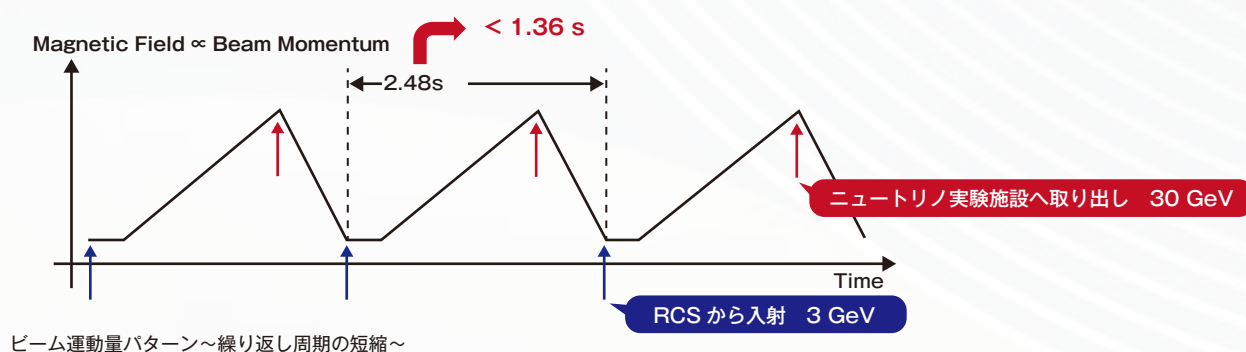
これらの主電磁石を動かすためには、大きな電源が必要になります。“電源”という言葉聞いて多くの人がイメージするのは、ACアダプターなど身近にある電源ではないでしょうか。たとえば、スマートフォン用の電源の出力は20Wですが、それとは比べものにならないくらい大きな電力を出力できる電源がJ-PARCには存在しています。それがMR主電磁石電源です。

## なぜMRのビームパワーを

## 増強する必要があったのでしょうか？

J-PARC 建設当初はMRのビームパワー、すなわち陽子の運動エネルギーと単位時間あたりに取り出される陽子数の積は100kW程度でしたが、ビーム調整と改良を重ね、2019年には500kWに到達しました。ニュートリノ実験施設やハドロン実験施設では、MRから供給される陽子ビームを標的に照射し、そこから発生する2次粒子を実験に利用するため、単位時間あたりの陽子ビームの生成数が実験の効率を上げる鍵となります。

そのため、陽子ビームのパワーを増強することが加速器運転の重要な目標となっていました。ビームの入射から取り出しまでの周期を短縮することで、ニュートリノ実験施設やハドロン実験施設への陽子ビームの供給数を増やすことができます。ビームパワー増強のためには、MRの運転周期を2.48sから1.36sに短縮する、すなわち高繰り返し化が求められていました。



# なぜ新たな主電磁石電源を

## 開発する必要があったのでしょうか？

主電磁石電源は、電磁石のコイルに電流を流し、磁場を変化させるための電力変換器です。既存の主電磁石電源では、ビーム加速中の電磁石は電力系統からエネルギーがコイルに供給され磁場を強め、ビームを取り出してから次のビームが入射するまでの間はコイルから電力系統にエネルギーを戻して磁場を弱めるという、電力系統と電磁石の間で電力が往復

する仕組みとなっていました。そのため、電力系統に大きな電力変動が発生していました。MR が目標とする1.36s 周期となると、電力会社から提示された許容値を超える大きな電力変動が発生し、変電所の電圧に悪影響が出ることが予想され、その対策が求められました。さらに、高繰返し化すると電源の出力電圧が増大し、その対策も求められました。

### 対策1：コンデンサバンクで構築したエネルギー貯蔵装置の導入

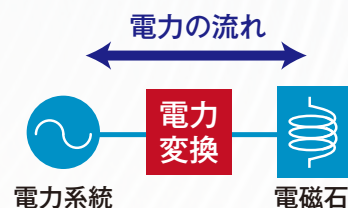
電力変動を抑制するための有力な方法として、コンデンサによるエネルギーの貯蔵があります。新電源ではたくさんのコンデンサを並列に接続したコンデンサバンクによるエネルギー貯蔵装置を導入しました。電磁石とコンデンサバンクの間で電力を往復させることにより、受電を大幅に抑える仕様としまし

た。新電源1台あたり6台のコンデンサバンクがあります。コンデンサバンク1台あたりの静電容量は約0.5Fであり、約0.7MJのエネルギーを貯蔵します。6台のうち2台は電力系統から受電するための整流回路が接続されています。残りの4台のコンデンサバンクは整流回路を接続されていないフローティングコンデンサで、高出力電圧を得ることが可能になるとともに、整流回路が大幅に削減できることにより、価格を抑え省スペース化にも貢献しました。電源棟の周りに、エアコン付きの海上輸送用コンテナが並んでいますが、このコンテナがコンデンサバンクです。

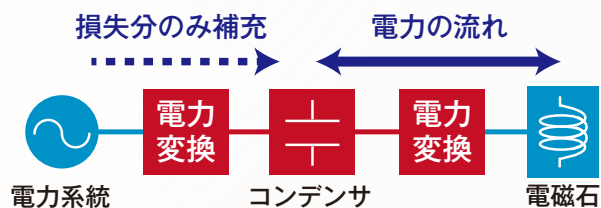


コンデンサバンク内部

#### 既設電源



#### 新電源



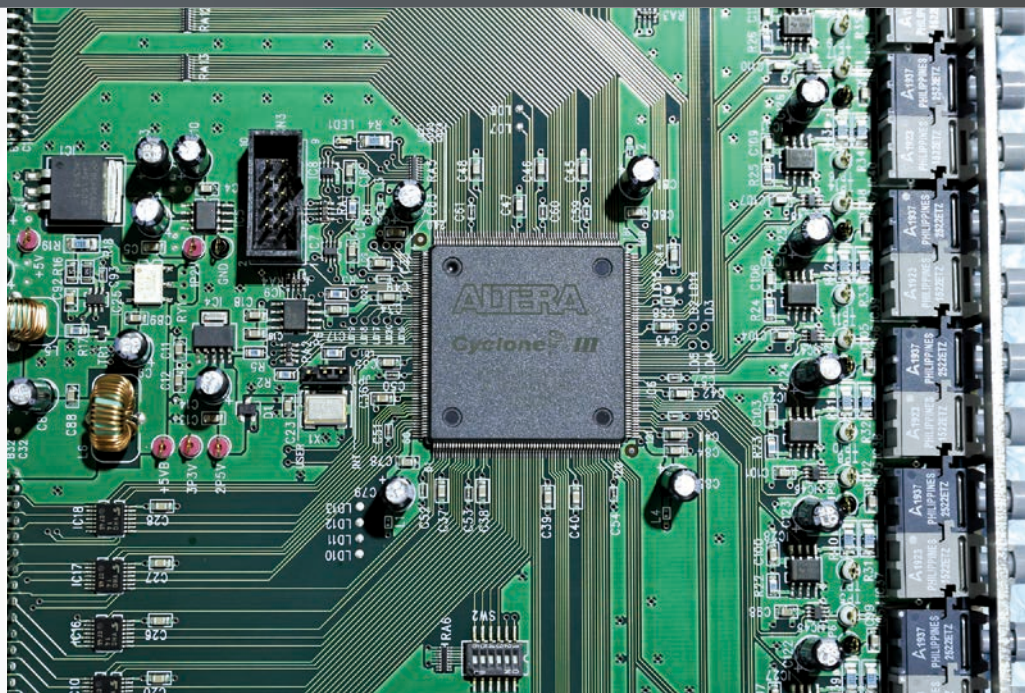
既設電源と新電源の電力の流れの比較



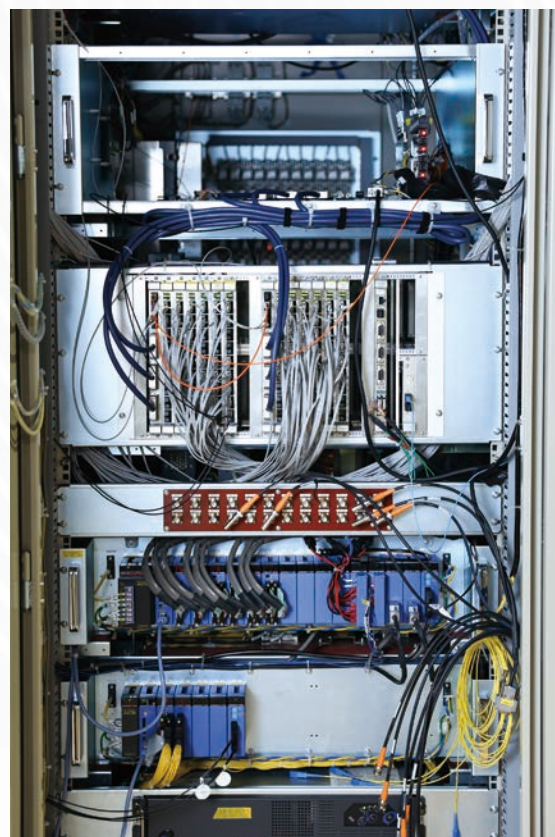
FPGA を用いた制御基板

新電源は既存電源に対して約2倍の出力電圧、系統電力変動抑制、デジタル制御を可能とした電源で、複雑な電力制御と高精度の出力電流制御を両立させる必要がありました。新電源の開発や設計にあたっては、メーカーは主回路部分、FPGA（製造後に内部回路をプログラムで変更できる集積回路）を用いた制御部分は

KEK と分担して進めました。また、製作を依頼する際、通電した最後の精度は製作した企業に責任を持たせない、という条件で依頼しました。この体制で開発、設計を進めるためには、メーカーと密に連絡を取る必要があったため、設計・試験の間はKEKのスタッフが最低一人はメーカーに常駐していました。制御部の開発はKEK 職員が担当することになったことで、制御アルゴリズムの修正や改造が柔軟に素早く行えるようになり、予算が限られている中、コストの削減に繋がるという利点がありました。



扉を開けると IGBT ユニットが見える



制御盤の内部。KEK が担当した制御部分が収められている。

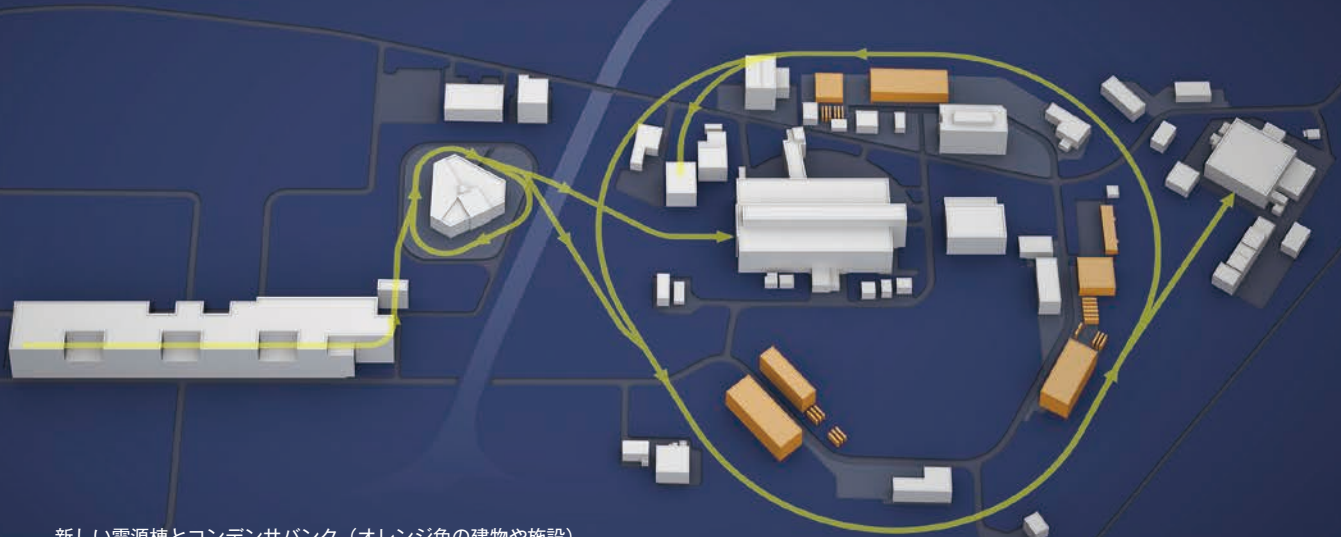


## 対策2：既存電源の再構成

2016年度末に新電源棟3棟が完成し、2021年度MRを長期シャットダウンして、高繰り返し化のための大規模な工事が行われました。

コスト削減のため、一部の電磁石は電源のみを入れ替え、残りの電磁石は既設電源を再利用することで対応

しました。すなわち、高繰り返し化後には出力電圧が増加するため、既設電源1台が励磁する電磁石台数を半減して出力電圧を抑制することになりました。そのため、既設電源と電磁石の配線を大幅に変更する必要があり、電磁石電源が20台から24台に増えました。



新しい電源棟とコンデンサバンク（オレンジ色の建物や施設）

この電源の再構成は、電源棟からトンネルまでの再配線を行い、使用した電力線と制御線の総延長はそれぞれ35km、12kmに達しました。配線を間違えないよう、細心の注意を払う作業が続いた後も、配線の導通確認、目視点検、磁場の極性に間違いがないかなどを順次確認していきました。



三浦 一喜

高エネルギー加速器研究機構  
J-PARC センター 加速器ディビジョン



森田 裕一

高エネルギー加速器研究機構  
J-PARC センター 加速器ディビジョン

2022年7月にビーム運転が再開されMRにビームが入射された時、ビームをスムーズに周回させることができました。2023年12月には、当初の目標を超えるビームパワー760kWを達成しました。電力変動を高繰り返し化前の半分程度に抑えながら、これまでと同じ消費電力で1.5倍のビームパワーを供給できるようになり、大幅な省エネも実現しました。



# 主電磁石電源開発の 先にあるもの

## 企業の成長

今回、共に主電磁石電源の開発、設計にあたったメーカーは大手企業ではなく、これほど大きな電源製造の経験がないメーカーでした。そのため、これだけ大きな電源の開発、設計は企業にとっては大きな挑戦だったと言えます。この電源を納品後、この企業はこれまでより大きな電源を受注するようになり、KEK とともに開発、設計した経験で企業が成長できた一例になりました。

## 調整は続く

2023年12月にはビームパワー760kW を達成し、当初の目標を超えることができました。しかし、今後も主電磁石電源を調整して、もっと細かく補正する作業が続いていきます。職人技とも言える作業なので、人材育成がとても大切です。主電磁石グループでは大型実験で活躍を希望する新人をいつでも歓迎しています。そんな中、主電磁石電源の開発にも自身の研究や実務経験を活かし、KEK の加速器研究に貢献したいと考えて海外から参加した研究者がおり、Trim-S プロジェクトに従事しています。このプロジェクトの中で、六極電磁石の補助コイルを励磁することによって個々の磁石の磁場を微調し、ビーム損失の原因の一つである3次共鳴を補正する研究をしています。今後の抱負は、J-PARC MR の次期アップグレード計画にとって、有意義な結果をもたらす Trim-S プロジェクトを完了させることだそうです。



Tan Yulian

高エネルギー加速器研究機構  
J-PARC センター  
加速器ディビジョン

## ハイパーカミオカンデ計画とMRの大強度化

J-PARC では、生成したニュートリノを295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町にあるニュートリノ検出器「スーパーカミオカンデ」に打ち込み、ニュートリノの基本的な性質を調べるスーパーカミオカンデ実験（T2K 実験）を行っています。現在、2028年の実験開始に向け、ハイパーカミオカンデの建設が進んでいます。ハイパーカミオカンデはスーパーカミオカンデの約8倍の有効体積を持ち、タンク壁に取り付けられた4万本の大型の高感度光センサーによって、水中で発生するチェレンコフ光を捉える検出器です。

ハイパーカミオカンデ実験（HK 実験）でもこれまでの T2K 実験同様、J-PARC の加速器で作られたニュートリノビームをハイパーカミオカンデに打ち込みます。HK 実験にあわせ、J-PARC MR では、ニュートリノビームラインに1.3MW の陽子ビームを供給できるよう繰り返し周期を1.36s から1.20s 以下に速める高繰り返し化が求められています。



Super-Kamiokande  
(ICRR, Univ. Tokyo)



T2K 実験



J-PARC Main Ring  
(KEK-JAEA, Tokai)

画像提供：KEK neutrino group



表紙：偏向電磁石電源。この電源1台で偏向電磁石16台分を駆動しています。ハビナー半導体であるIGBTを用いたスイッチング電源です。MRの周りに周波数調整用コンデンサ（外部に設置されています）と偏向電磁石の間でエネルギーを往復させています。出力電流、電圧はそれぞれピーク約1800A、約6kV、サイズは幅2m、奥行2.4m、高さ2.4mです。



主電磁石電源チームの集合写真

ご意見、ご感想をお待ちしております。 ✉ [web-staff@j-parc.jp](mailto:web-staff@j-parc.jp)

#### < 編集後記 >

今回取り上げた主電磁石電源の開発及び調整により、ハイパーカミオカンデが完成時には、より多くのニュートリノビームを打ち込むことができるようになります。主電磁石電源は、ニュートリノ実験やハドロン実験を支える重要な装置です。これからもJ-PARCの実験を支える装置群をご紹介します。と思っています。