

J-PARC(大強度陽子加速器施設) 加速器建設への取り組み

Actions of Hitachi for J-PARC Accelerator Construction

千田 豊 Yutaka Chida

吉成 孝文 Takabumi Yoshinari

渡辺 隆 Takashi Watanabe

古関 庄一郎 Shoichiro Koseki

阿部 充志 Mitsushi Abe



航空写真提供:独立行政法人日本原子力研究開発機構

図1 50 GeVトンネル内に据付けられた電磁石(左)と、建設中の大強度陽子加速器施設 J-PARC (右)

太平洋に臨む茨城県東海村の独立行政法人日本原子力研究開発機構東海サイトに建設中の大強度陽子加速器施設を示す。リニアック, 3 GeVシンクロトロンは建屋の建設が終了し, 50 GeVシンクロトロン, 物質生命研究施設, ハドロン実験室およびニュートリノビームラインは建設工事が進行中である。また, 建屋内では電磁石をはじめとした機器の据付け・試験が進められている。

1.はじめに

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)は, 原子核・素粒子物理, 物質・生命科学, 原子力工学の分野において最先端の研究を行うため, 世界最高クラスの陽子ビーム強度の陽子加速器群と各種実験施設とから構成されている。陽子加速器群は, 入射器としてのリニアック, 3 GeV(Giga Electron Volt)シンクロトロン, 50 GeVシンクロトロンで構成され, MW級の大強度陽子ビームを実現するものである。

ここでは, J-PARCの陽子加速器群を構成する機器のうち, 日立製作所が担当した主要機器, および, その技術開発について述べる(図1参照)。

2.リニアック

2.1 RFQ

J-PARCのリニアックは負水素イオンを発生させ, 3 GeVシンクロトロンへ入射を行う。日立製作所は, 初段加速器のRFQ(Radio Frequency Quadrupole Linac:高周波四重極型リニアック)を製作した(図2参照)。RFQはマイクロ波の力でビームを絞りながら加速するもので, 加速ビームエネルギーは3 MeVであり, 電極は数十マイクロメートル精度で加工を行った。

2.2 リニアック用クライストロン電源

加速に用いるマイクロ波を発生するクライストロンに電力を

大強度陽子加速器施設「J-PARC」の加速器は全長約330 mのリニアック、周長約350 mの3 GeV速い繰り返しのシンクロトロン、および周長約1,570 mの50 GeVシンクロトロンで構成される。JAEA(独立行政法人日本原子力研究開発機構)とKEK(大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構)が共同でJAEA東海研究開発センターに建設を進めており、2008年には全加速器システムのビームコミッショニングを行うことが目標とされている。日立製作所はこれまで培ってきた電磁石、電源の技術をベースにJAEAおよびKEKとともに技術開発を行い、要求仕様が世界最高レベルにあるJ-PARCの主要機器を製作した。

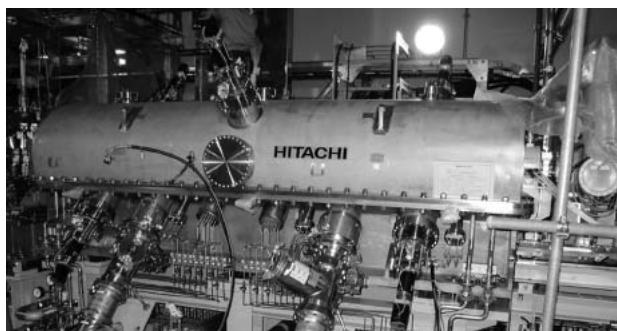


図2 リニアック棟に設置されたRFQ
RFQ(Radio Frequency Quadrupole Linac)で加速されたビームはDTL(Drift Tube Linac:後段加速器)でさらに加速され、シンクロトロンへ入射される。

供給するための高電圧パルス電源である。110 kVの高電圧直流電源6台、およびモジュレーションアノードと呼ぶ制御電極に93 kVの信号を加える変調器21台で構成している。

変調器からの信号でクライストロン1台当たり最大3 MWの電力を600 μ s幅、50 Hzの繰り返しで供給する。カソード電圧変動が0.2%に抑えられることが確認され、すでにRFQによるビーム加速試験に使われている。

3.3 GeVシンクロトロン

3 GeVシンクロトロンは、25 Hzで運転する速い繰り返しのシンクロトロンである。日立製作所は、主電磁石、共振電源、入射パンプシステムを製作した(表1参照)。

3.1 主電磁石

3 GeVシンクロトロン主電磁石の特徴的な仕様は、(1)25 Hz正弦波通電に対する交流損失低減と、(2)100 MGyの放射線量に耐えるコイルである。

対策として、(1)の交流損失については、導体にはアルミ送電線の技術を用いたアルミストランド線を開発して、鉄心端部はスリットを入れたロゴスキー形状とし、(2)については、コイル絶縁として高耐放射線絶縁を用いた。

偏向電磁石は、磁極間隔210 mm、全長3.4 m、質量約40 tであり、世界最大級の電磁石である。

電磁石完成後、JAEA(独立行政法人日本原子力研究開

表1 3 GeVシンクロトロンの製作電磁石と電源

偏向電磁石は、シンクロトロンを構成する24台のほかに、発生磁場モニタ用の1台を加えて通電する。

電磁石名称		台数	通電波形	電源方式
主電磁石	偏向電磁石	25	正弦波	共振電源
	四極電磁石	60	正弦波	
	六極電磁石	18	正弦波	
入射パンプ電磁石		10	パルス	パルス電源

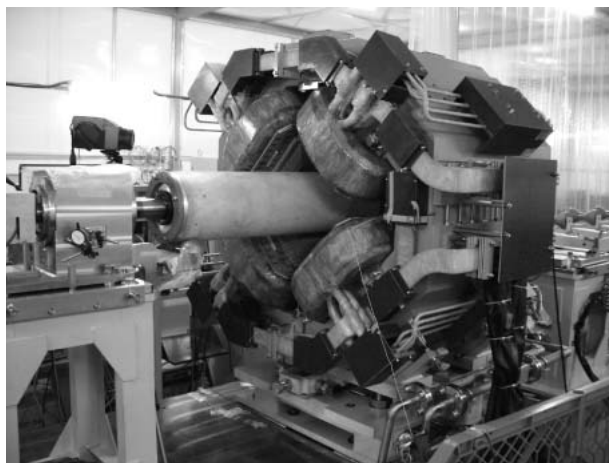


図3 磁場測定中の四極電磁石
中心に位置する円筒(ハーモニックコイル)で磁場を測定し、電磁石の磁場中心と実効電磁石長を求める。

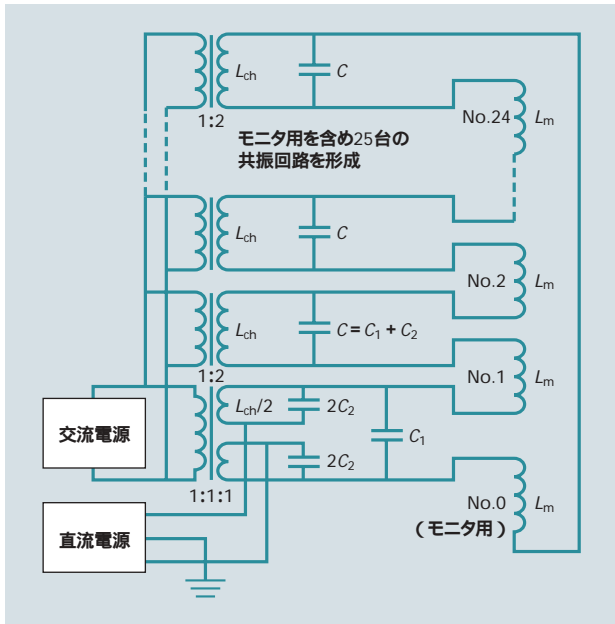
発機構)による磁場測定の実施を経て(図3参照)、主トンネル内に搬入・据付けした。

3.2 主電磁石励磁用共振電源³⁾

モニタ用1台を加えた25台の偏向電磁石を励磁する偏向電磁石電源、および60台の四極電磁石を7つのグループに分けて励磁する7台の四極電磁石電源で構成している。

どの電磁石も直流をバイアスした25 Hzの交流電流を電磁石に通電する。偏向電磁石の場合、直流1,667 Aに1,002 A、25 Hzの交流電流を通電する。25台の偏向電磁石全体では約250 kVの交流電圧が必要となる。このため、共振を利用した電源方式を採用した。世界最大級の共振電源システムである(図4参照)。

計8台の電源によってビームを安定に加速しなければなら



注:略語説明 L_c (電磁石), L_c (交流電力を供給するためのチョークトランス。巻数比を記載), C, C_1, C_2 (共振コンデンサ)

図4 偏向電磁石励磁電源システム

直流電源は、1,667 Aのバイアス電流を通電する。交流電源は、共振を利用して1,002 A、25 Hzの交流電流を通電する。

いことから、計算機を用いた電源全体制御システムを用いて0.01%級の安定度、精度を確保できるようにするとともに、制御の自由度も確保している。

3.3 入射バンブシステム

J-PARCでは、リニアックで加速された負水素イオンを3 GeVシンクロトン入射部で荷電変換して陽子とする。このための入射バンブ軌道を作り、さらにビーム強度を増すためにペイント入射を行うように、入射バンブシステムが計画された。このシステムでは、40 ms周期で約1 msのパルス磁場を発生させる。

入射バンブ電磁石は、3種10台(水平シフトバンブ4台、水平ペイントバンブ4台、垂直ペイント2台)の電磁石から構成される。鉄心材料は、高周波特性をよくするため、板厚0.1 mmと0.15 mmの電磁鋼板を採用した。特に0.1 mmの電磁鋼板は大型電磁石への適用が初めてであったため、加工精度の確保に留意した。

電源は、4台の電磁石を直列に励磁する水平シフトバンブ電磁石電源、ならびに電磁石を1台ずつ励磁する水平ペイントバンブ電磁石電源および垂直ペイント電磁石電源で構成している。

水平シフトバンブ電磁石電源は、最終仕様が320 MVA、10 kV、32 kAピークとなる最大容量の電源である。水平ペイントバンブ電磁石電源も、最大のもは最終仕様が1.2 kV、29 kAピークとなる大電流パルス電源である。今回は、約60%の電流の当初仕様で製作した。

フィードフォワード制御を併用することによって数百マイクロ

秒で変化する大電流パルスパターンに対して±1%の精度でトラッキングする高速制御性能を満たし、ビームを軌道に分布させるなどの機能を達している。

3.4 電磁石渦電流解析

電磁石は25 Hz通電であるため、渦電流発熱・温度上昇の評価を行った。主電磁石では鉄心のみ、バンブ電磁石では導体を含む動的な電磁場解析と熱解析を行った。

(1) 電磁場解析

鉄心積層方向は鋼板絶縁皮膜による方向性を考慮した解析で、渦電流発熱、実測B-H曲線を利用しヒステリシス発熱を求め、バンブ電磁石では銅板型コイル導体中の電流分布と発熱も求めた。動的電磁場解析の結果の一例を渦電流分布で図5に示す。解析領域は全体の1/4である。鉄心ではスリット部を渦電流が迂(う)回し、コイル導体では電流分布が偏ることが把握できる。JAEAが実施した性能評価試験の結果を図6に示す。実測値に対し解析値はよい一致性を示している。

(2) 熱解析

電磁場解析による発熱と表面の自然対流冷却および鉄心内部の熱伝導を鋼板と空気または絶縁皮膜を設計割合で考慮し、温度上昇を評価した。鉄心では端部のスリットを磁場分布に影響のない範囲で深さと位置を調整し発熱を軽減した。バンブ電磁石の導体では、一部水冷とし、また鉄心との位置関係を最適化して、温度上昇を軽減した。

以上の検討を通して、熱的に安定に運転できる見通しを得て機器の詳細設計を行った。

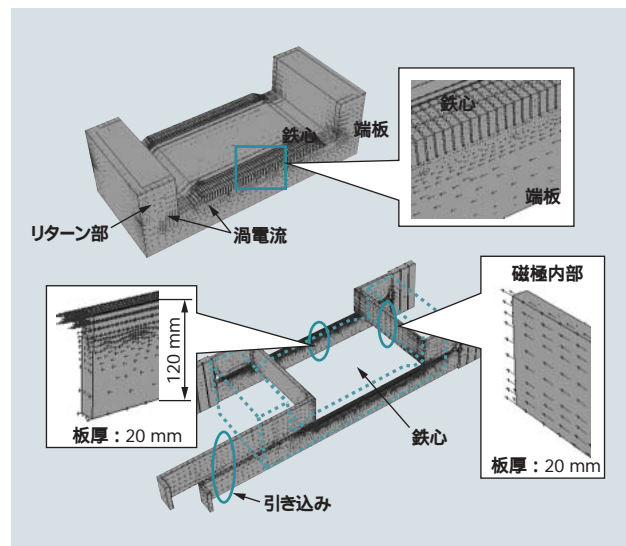


図5 水平シフトバンブ電磁石の電磁解析結果(渦電流分布)

対称条件を用い1/4領域を解析、上側と奥側に同じものが配置されている体系である。最大電流到達時の渦電流分布を矢印で示した。

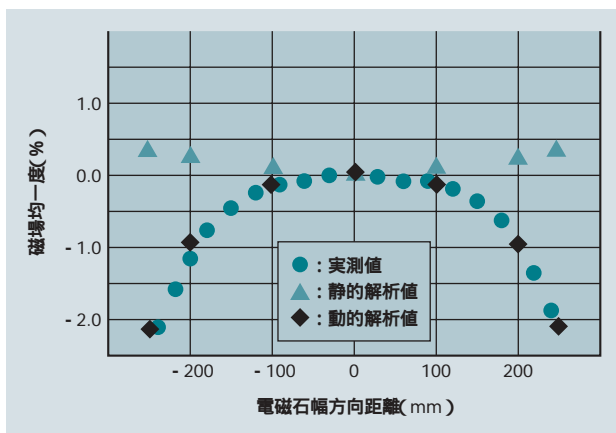


図6 水平シフトバンパ電磁石の磁場均一度

パルス通電時の幅方向磁場分布を、ビーム軸(0 mm)の値を基準としたビーム軸方向の線積分(BL積)値で示す。渦電流を考慮した動的解析値が実験値によく一致した。

表2 50 GeVシンクロトロン電磁石仕様

四極電磁石は鉄心長で7種類、ボア径で3種類に分類され、全体では11種類となっている。

項目	偏向電磁石	四極電磁石
鉄心長	約5.85 m	最大1.86 m
磁極間隔 / ボア径	106 mm	最大直径140 mm
磁束密度	1.9 T	最大18 T/m
質量	約33 t	最大約12 t
運転周波数	0.3 Hz	

4. 50 GeVシンクロトロン

50 GeVシンクロトロンは、偏向電磁石96台、四極電磁石216台、六極電磁石80台(出射用共鳴六極電磁石8台を含む。)補正電磁石186台で構成され、日立製作所は、偏向電磁石と四極電磁石を製作した。

偏向電磁石および四極電磁石の仕様を表2に示す。

3 GeVシンクロトロン主電磁石同様、偏向電磁石は、大きさ、発生磁束密度とも積層電磁石としては世界最大級である。

鉄心にはパッキングファクタ向上の観点から板厚0.65 mmの電磁鋼板を採用した。従来炭素鋼を用いていた側板については、高い磁束密度のため渦電流の影響が無視できないことから、偏向電磁石にはSUS304を適用した。

偏向、四極電磁石とも、その大きさゆえに組立精度の確保に困難を極めたが、日立製作所埠頭工場で実施されたKEK(大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構)による磁場測定で、所定の磁場性能が得られていることが確認された。

5. おわりに

ここでは、陽子加速器群を構成する機器のうち、日立製作所が担当した主要機器、および、その技術開発について述べた。

J-PARCは、2008年度の利用開始に向け、建設が最終段階を迎えており、21世紀の科学を切り開く最重要の加速器となると期待される。

装置建設を通じて開発、確立された技術は、今後新たな展開が期待される大型加速器プロジェクトに適用拡大されるものとする。

終わりに、これら主要機器の建設にあたっては、JAEA(独立行政法人日本原子力開発機構)とKEK(大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構)をはじめ、関係各位から、多大なご指導、ご協力をいただいた。ここに深く謝意を表する次第である。

参考文献など

- 1) J-PARC, <http://j-parc.jp/>
- 2) 吉岡, 外: プロジェクトJ-PARC大強度陽子加速器計画, 季刊文教施設21号, 100~116(2006.1)
- 3) 渡辺, 外: ラビッドサイクルシンクロトロンの電源方式, 電気学会論文誌D, 126, 5, 681~689(2006.5)
- 4) 唐司, 外: J-PARC 3 GeVシンクロトロン用入射バンパ電磁石の3次元渦電流・熱解析, 日本原子力学会2006春の年会, J21(2006.3)

執筆者紹介



千田 豊
1989年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 医療・核装置生産本部 核融合・加速器部 所属
現在, 加速器用機器の設計に従事
日本加速器学会会員



吉成 孝文
1982年日立製作所入社, 電力グループ 原子力事業部 原子力技術本部 所属
現在, 核融合・研究用加速器の事業戦略に従事



渡辺 隆
1975年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 医療・核装置生産本部 核融合・加速器部 所属
現在, 研究用および医療用加速器設計に従事
日本加速器学会会員, プラズマ・核融合学会会員



古関 庄一郎
1975年日立製作所入社, 情報・通信グループ 情報制御システム事業部 電機制御システム本部 所属
現在, 半導体電力変換システムの設計に従事
工学博士, 技術士(電気部門)
電気学会会員, IEEE会員, 日本技術士会会員



阿部 充志
1977年日立製作所入社, 電力グループ 電力・電機開発研究所 反応計測システムプロジェクト 所属
現在, 電磁応用機器の電磁構造最適化の研究に従事
日本物理学会会員, プラズマ・核融合学会会員, 米国物理学会会員