

J-PARC 3GeV 出射用キッカ電磁石

神谷潤一郎^{A)}、高柳智弘^{A)}、中村英滋^{A,C)}、島田太平^{A)}、鈴木寛光^{A)}、
川久保忠通^{A,C)}、志垣賢太^{B)}、村杉茂^{C)}、田澤七郎^{C)}

^{A)} 日本原子力研究所東海研究所 〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

^{B)} 広島大学 〒739-8526 東広島市鏡山 1-3-1

^{C)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

大強度陽子加速器の 3GeV 陽子シンクロトロン出射用キッカ電磁石システムの先行機を製作し性能試験を行ったのでその結果を報告する。キッカ電磁石システムは電源と電磁石を別個に製造しているため、組み合わせ時の%オーダーの微調整が必要となる。ここでは励磁電源側での出力電流波形補正と、電磁石側での水平分布補正の施工結果について述べる。また電磁石の特性インピーダンス測定、分散曲線の測定を行ったのであわせて報告する。

1 序

大強度陽子加速器研究施設(J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex)はイオン源と線形加速器、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種類の加速器から構成されている。RCS は 25Hz の繰り返しで 20msec の間に 8.3×10^{13} 個の陽子を 400MeV から 3GeV へ加速し、1MW の大強度ビームを達成する。本キッカ電磁石[1]は 3GeV の陽子ビーム軌道を、瞬間的に周回軌道から MR 及び物質・生命科学実験施設へのビーム輸送ラインに切り替えるという役割を担っている。本キッカ電磁石は 1MW のビームに対し 1%以下のビーム損失を達成するために磁場の有効領域を広くせねばならず、横方向 280mm 縦方向 146~190mm という大口径の構造となる。そのためギャップ出入口の分布が B-L 積分値の分布に影響を与えることが懸念される。しかしながら高速パルス励磁であるため、パルス電流自体どのような電流路をどのような分布で流れているかを確認するのは非常に困難である。キッカ電磁石に対する技術課題として、このような均一磁場の他に速い立ち上がり時間及び長いフラットトップが挙げられる[2]。今回これらの技術課題を達成するための方法と結果について報告する。

2 キッカ電磁石電源

キッカ電磁石電源の主要パラメータを表 1 に示す。電源回路のブロック図は参考文献[1]に示した。キッカ電磁石は双子型であるため、本電源は 2 系統のパルス電源で構成される。充電方式にはコマンドチャージによる定電流充電を採用した。充電には 110m の高圧同軸ケーブルを Pulse Forming Network (PFN) として用いており最大充電電圧は 80kV である。特性インピーダンスは 10Ω であるため、サイラトロンスイッチ(CX1193C)による放電で最大 4000A の電流を得る。電磁石の終端は次に述べるように短絡され

ており、反射によって励磁電流は 8000A となる。反射されたパルスは電磁石からサイラトロン、PFN 回路へ戻り終端に取り付けられたダイオード付マッチング抵抗器(ダミーロード)によって消費される。

表 1: キッカ電磁石電源主要パラメーター

出力電流波形	矩形波
充電方式	コマンドチャージ
充電用 PFN	高耐圧同軸ケーブル 110m
サイラトロン	CX1193C
最大励磁電流	8000A
最大充電電圧	80kV
特性インピーダンス	10Ω
電流立ち上がり時間	80nsec 以下
BL 立ち上がり時間	300nsec 以下
励磁電流フラットトップ	900nsec 以上

3 キッカ電磁石

キッカ電磁石の主要パラメータを表 2 に示す。各数値は先行機のものを示した。キッカ電磁石先行機の写真を図 1 に示す。実機は L, M, S 型 3 種類の寸法の電磁石が計 8 台用いられる。先行機は M 型とほぼ同じ大きさである。電磁石は双子・分布定数型であり終端短絡により 2 倍の励磁電流を得る。使用磁場は 400gauss 程度でありこの磁場により陽子ビームを 1 台あたり約 2mrad 蹴り出す。フェライトを高圧電極板と接地板で挟むことで 1 セルを形成し、全 21 セルで分布定数回路を形成する。キッカ電磁石は耐電圧のため真空中で用いられる。ロングサーチコイルによる磁場波形を図 2 に示す。

表 2: キッカ電磁石主要パラメーター

形状	双子・分布定数型, 終端短絡
台数	8 台
口径	H280, V166, L705mm
外寸	H800, V900, L705mm
有効長	680mm
磁性体	フェライト(PE14)
使用磁場	340~450gauss
蹴角	1.8~2.4mrad/1 台
特性インピーダンス	10Ω
静電容量	約 300pF/セル
インダクタンス	約 30nH/セル
全セル数	21 セル/1 台

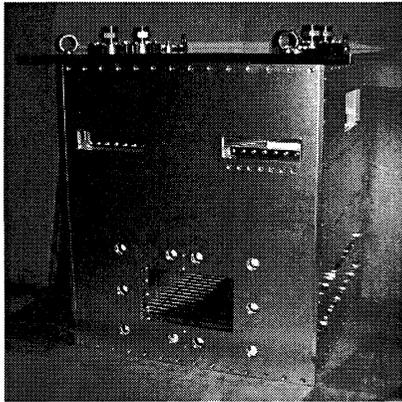


図 1: キッカ電磁石

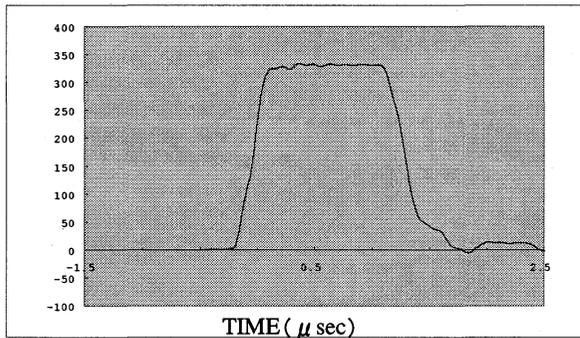


図 2: ロングサーチコイルによる磁場波形

4 電流立ち上がり波形

パルス電流の波形改善及び微調整方法の確立を目的としてヘッドセル増設による波形補正を試行した。試験測定では、PFN 先頭部に補正用コンデンサを挿入し、容量を変化させ立ち上がり時間の測定を行った。測定時の回路図を図 3 に示す。波形検出は電送線末端の CT を用いた。補正用コンデンサ CC の容量を変化させた時の立ち上がり時間の変化を図 4 に示す。CC の容量を増やしていくと時定数が増すため立ち上がりは速くなった。やがてオーバーシュートを起こしリングングが発生した。次に電源回路のモデル化を行った。測定を再現するように図 3 における各部の静電容量及びインダクタンスの値を決定し、回路シミュレーター PSpice[3] で計算を行った。CC を変化させていった時の計算結果を図 5 に示す。このモデルで補正用コンデンサの影響をオーバーシュートやリングングも含めほぼ一致する結果が得られており、磁石との組み合わせ時の調整の為に計算が可能となった。量産機ではこのモデルをもとに最終 B-L 波形の調整を行う。

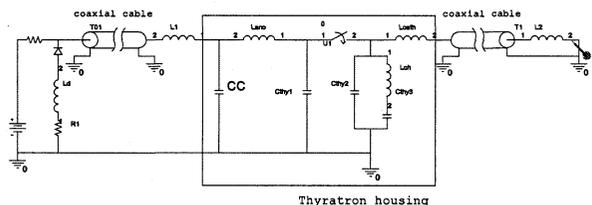


図 3: 立ち上がり時間測定時の設定

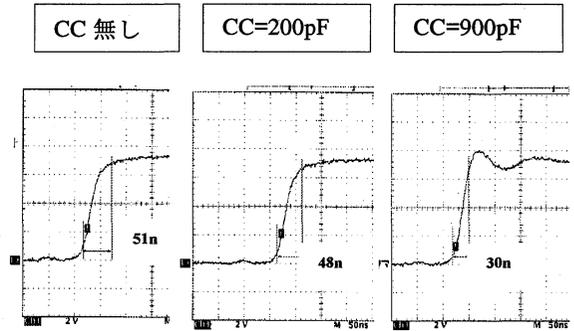


図 4: 立ち上がり時間測定結果

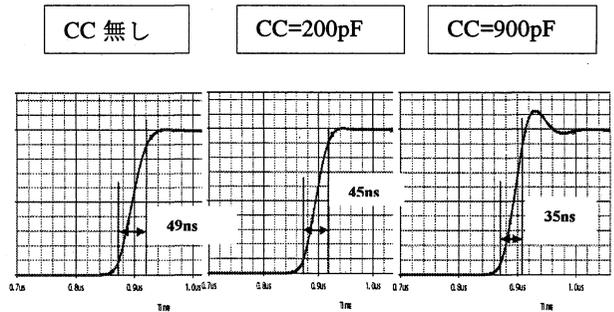


図 5: 立ち上がり時間計算結果

5 磁場の均一化

本キッカ電磁石には X 方向±90mm で 1% 以内の B-L 積分値が要求されている。ロングサーチコイルで測定した B-L 積分値の X 方向分布を図 6 に示す。ショートサーチコイルによる磁場測定結果の X 方向分布を図 7 に示す。初期設計時の縦方向のコイル長は 162mm であり、その際の測定結果は□で示した。コイル長 162mm では要求磁場を満たしていない。この原因は図 7 に示したようにコイル出口付近(Z=300mm)での磁場分布の均一性がないためである。縦方向のコイル長をおよそ 10mm づつ短くしていった場合の B-L 積分値を図 6 の○と●でそれぞれ示す。コイル長を短くすると横方向から磁力線が入る。結果として B-L 積分値の X 方向の均一度が増す。

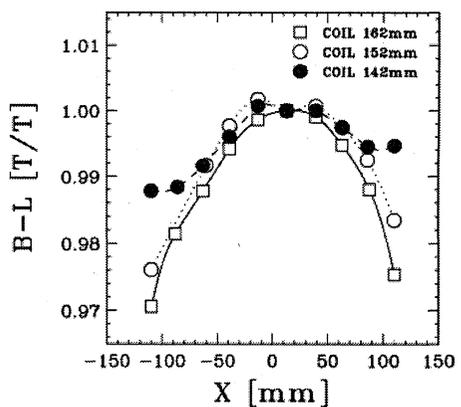


図 6: B-L 積分値の X 方向分布

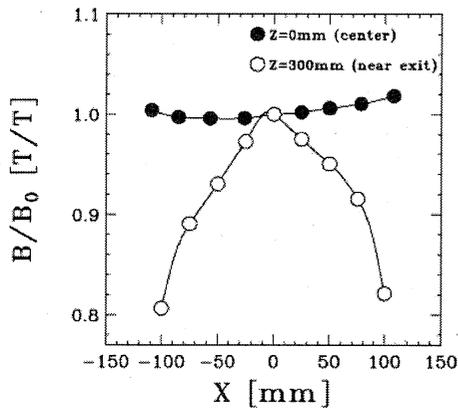


図7: 磁場の X 方向分布

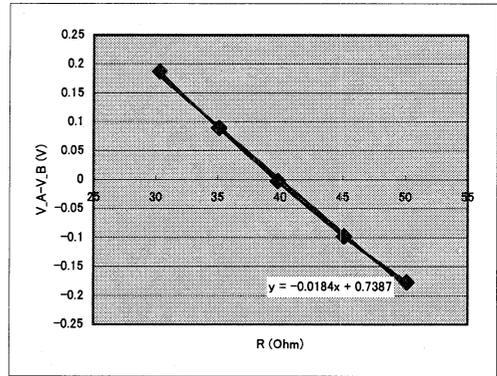


図9: 抵抗値を変えた時の反射波高値

6 特性インピーダンス測定

表 2 に示したようにキッカ電磁石は特性インピーダンス Z_0 が 10Ω に設計されている。キッカ電磁石入口に可変抵抗を取り付け、矩形波を送りその反射波を実測し、伝送線路理論に基づいてキッカ電磁石の特性インピーダンスを決定した。オシロスコープでの波形を図 8 に示す。不整合状態時は反射波 B のレベル (V_B) が A のレベル (V_A) とずれる。抵抗値を変えた時の反射波高値 ($V_A - V_B$ [V]) を図 9 に示す。図から特性インピーダンスは $Z_0 = 9.8\Omega$ であると判断される。またキッカ電磁石入口にサイン波を送り、周波数を変化させた時のインピーダンスの極大、極小点から分散曲線を測定した。結果を図 10 に示す。●が終端開放、□が終端短絡時である。実線は L,C の理想的な分布定数回路の場合である。ここで f_c は cut off frequency である。高周波領域で測定とずれてくるのが分かる[4]。

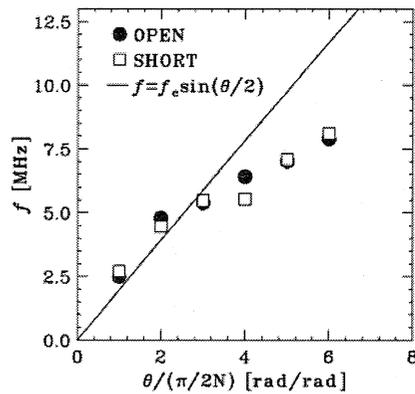


図10: 分散曲線

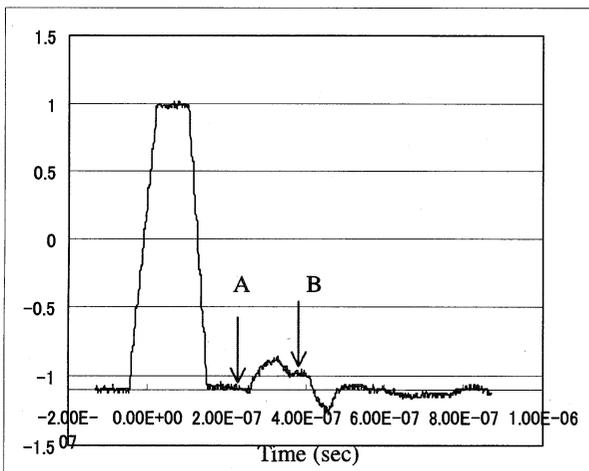


図8: 反射波による特性インピーダンス測定時の波形

7 まとめ

J-PARC 3GeV RCS 出射用キッカ電磁石に関する現状報告を行った。速い立ち上がりを実現するための補正用コンデンサの影響を測定した。また、回路シミュレーターにより電源のモデル化を行った。B-L 積分値の X 方向分布の均一化を改善するために縦方向のコイル長を変化させて測定を行った。コイル長を短くすることで理想磁場の実現が可能となった。キッカ電磁石の特性インピーダンス測定、分散曲線の測定もあわせて行った。

参考文献

- [1] 中村英滋 他, J-PARC 3GeV RCS 出射用キッカシステム, 本会
- [2] 川久保忠通, KEK 高エネルギー加速器セミナー OHO '96 = 大型ハドロン計画の大強度陽子加速器=: “速い取り出し,” Aug. 1996, written in Japanese.
- [3] PSpice PSD14.2 (orcad family 9.2.3), Cadence Design Systems, 2002
- [4] K. Takata, S. Tazawa and Y. Kimura, “Full Aperture Kicker Magnets for KEK Proton Synchrotron,” KEK Preprint KEK-76-21, March 1977, written in Japanese.