

J-PARC 主リングにおける補償用キッカー電磁石試験機の実験 MEASUREMENT OF A PROTOTYPE COMPENSATION KICKER MAGNET IN J-PARC MAIN RING

福岡翔太^{A)}、松本浩^{B)}、石井恒次^{B)}、樊寛軍^{B)}、杉本拓也^{B)}

Shota Fukuoka^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{B)}, Koji Ishii^{B)}, Kuanjun Fan^{B)}, Takuya Sugimoto^{B)}

^{A)}University of Tsukuba

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

The injection system of J-PARC Main Ring (MR) employs four lumped kickers to deflect the incoming beam. Because the tail field caused by a slow falling edge and a reflection of the excitation current exists and increases a particle loss. To realize a high power operation, this particle loss must be decreased at the injection. The correction method using a fast kicker system to compensate the remaining error angle is being developed. The kicker magnet is a transmission line type but uses ceramic capacitors instead of parallel metal plates to make the magnet compact and to reduce stray inductance. A Marx generator using semiconductor switches has been developed, which is able to generate arbitrary current waveform to compensate the irregular kicker tail. A prototype magnet has been fabricated for parameters test. In this paper, we will report the details of the system designs, analyze the measurements results and give future prospects.

1. はじめに

J-PARC 主リング (MR) には 2 個の陽子ビームバンチが 40 msec 毎に 4 回入射され、計 8 個の陽子ビームバンチを現状 1 サイクル 2.48 秒の周期で入射・加速・出射している。MR の入射セクションには 4 台 (1 台当たりの磁極長 60 cm) の集中定数型キッカー電磁石が設置されており、合計約 8 mrad の蹴り角で陽子ビームバンチを入射している^{[1], [2]}。入射キッカー電磁石は周回リング上に設置されており、入射済みの MR のリング内を周回するビームバンチを偏向しないように、立ち上がり・立ち下りの速いパルス磁場を発生させることが必要となる。

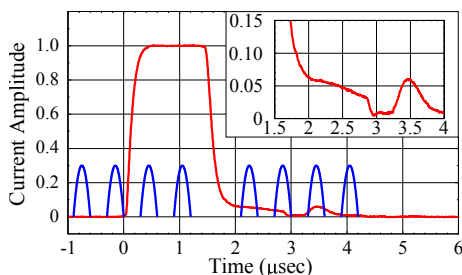


Figure 1: Injection kicker's excitation current (red) and corresponding beam bunch position (blue) at the 4th injection timing. Upper right is extended figure of the tail field. The current waveform is normalized by flat top value.

しかし、現行の入射キッカー電磁石の励磁電流にはテールが存在しており (図 1)、3 回目 4 回目の入射の際に周回ビームバンチがこのテール磁場によって蹴られ、軌道が広がってしまう^[3]。このようにして余分に蹴られたビームバンチは、軌道が収束していく前にコリメータ部でビームロスが発生、ビームパワーを制限しているビームロスを増やす結果となる。より高いビームパ

ワーを実現するには、このテールによる影響を補正することが現状の必須課題となっている。

このテールは、反射と遅い立ち下りから構成されており、前者は高周波領域でのインピーダンスの不整合によって生じ、後者は電源から電磁石までの長い伝送ケーブルの影響やサイクロトロン等の複合的な要因であると考えられる。このため現行の入射キッカー電磁石及び電源の改良だけでは、この問題を完全に解決することは難しく、偏向されたビームバンチの軌道を補正するため、補償用の電磁石・電源システムの開発を行った。

2. 補償用キッカー電磁石システム

2.1 システムデザイン

補償用のキッカー電磁石システムは、広帯域の電源及び電磁石から構成される。入射キッカー電磁石の下流に設置された小型のキッカー電磁石により、テール磁場で蹴られて広がったビームバンチを 1 度のキックだけで反対方向に蹴り戻す。パルス電源では、テール磁場波形を再現するために任意の励磁電流波形の出力することが必要となる。また、電磁石にも再現した波形を歪ませないために同程度の帯域が要求される。

蹴り戻すために必要な積分磁場強度は 0.006 Tm であり、補償キッカー電磁石の磁極長を 60 cm、整合インピーダンスを 10 Ω として設計した場合、励磁電流としては 500 A、充電電圧 10 kV が必要となる。

2.2 キッカー電磁石

広帯域を得るために、電磁石には分布定数型の構造を採用する。電磁石全体のサイズを可能な限り小さく抑えることで、浮遊のインダクタンスや静電容量を低減している。一つ一つの磁極コアを薄くすることで、コイルの各セルのインダクタンスを低くしている。この電磁石は真空中にインストールされるため、印加電圧と材質の沿面絶縁距離から各セルの磁性体コアの厚さは 10 mm とした。インピーダンス整合のために、各々のセ

fukuoka@tac.tsukuba.ac.jp

ルには静電容量 100 pF のセラミックコンデンサを接続する。セラミックコンデンサを用いることで、従来の並行平板型のコンデンサと異なり、物理的に小さな構造で必要な静電容量を与えている。

電磁石の概念図を図 2 に示す。磁極は C 型のフェライトコアを用い、それらは互いに向かい合わせに配置している。また、コンデンサは各フェライトコアの間を通して引き出された極板とアース板の間に接続している。

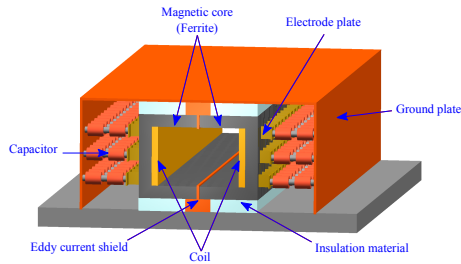


Figure 2: Conceptual design of compensation kicker magnet.

2.3 電源

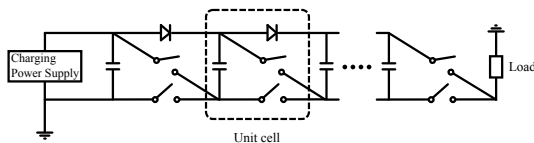


Figure 3: Simplified diagram of a Marx cell.

電磁石電源としては、半導体スイッチング素子を用いたマルクス型電源^[4]を採用した。図 3 に示されるように、マルクス型電源は多段接続されたセルから構成される。並列に多段充電されたコンデンサの電気的エネルギーを直列に出力することで必要な高電圧を得ている。任意の励磁電流波形を得るために、各々セルのスイッチタイミングと長さを制御する。

各セルにおけるスイッチの長さやタイミングを制御することで、任意の励磁電流波形を実現する。広帯域を得るために、応答時間が速く、かつ浮遊インダクタンスの小さい MOS FET をスイッチング素子として用いる。

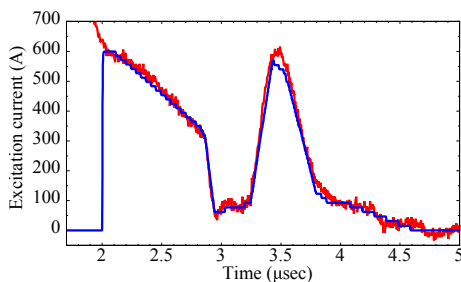


Figure 4: Current waveform which were reproduced by the SPICE simulation (blue) and the measured tail current.

現在使用を検討している MOS FET の定格電圧は 600 V であることから、必要な充電電圧を得るためには 40

段程度のセルが必要になる。図 4 は、電気回路シミュレーションソフト (SPICE) でのテール電流部の再現を表している。示されるように、個々のスイッチの制御することで、テール電流波形が再現可能である。

3. 電磁石試験機の実験

3.1 電磁石試験機

図 5 の写真に示されるような電磁石の試験器を製作し、性能評価試験を行った。この試験機は磁性体コアとして厚さ 20.5 mm の CMD5005 を使用し、10 段のセルで構成されている。コイル 1 セル当たりのインダクタンスは 14.3 nH、また静電容量 100 pF のセラミックコンデンサを用い、特性インピーダンスは 12.0 Ω、帯域は約 114 MHz と計算される。

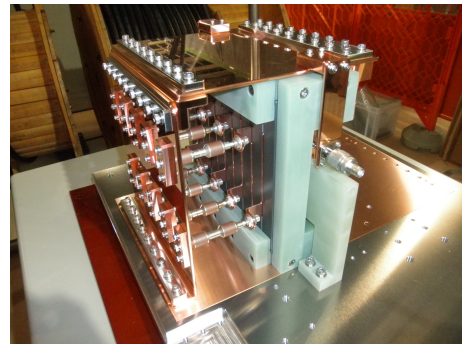


Figure 5: Photograph of the prototype kicker.

3.2 インピーダンス測定

Frequency Response Analyzer (FRA) を用い、電磁石試験機のインピーダンスを測定した。測定には以下のような 2 パターンの測定回路 (図 6) を用いた。周波数 f に対して測定されるそれぞれのインピーダンス Z_L^{total} 、 Z_C^{total} より、電磁石全体の総インダクタンス (L^{total}) と総静電容量 (C^{total}) をそれぞれ求める。それらの値を用いて電磁石のインピーダンス (Z^{total}) を算出した。

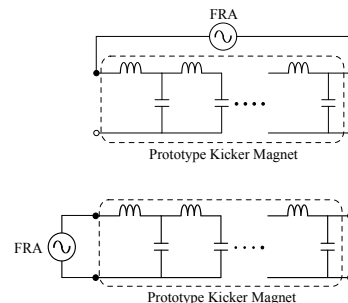


Figure 6: Impedance measurement system by using FRA. Above and below diagrams are circuits for measurement of total inductance and capacitance respectively.

測定の結果、周波数領域 10 kHz ~ 1 MHz において試験機の実験機特性インピーダンスは 13.8 Ω でほぼ一定であることが判明した (図 7)。この実測値はデザイン値よりやや大きな値である。これは、電磁石が片側だけの構造

であるために磁場が外側に大きく広がっていることが原因であると考えている。

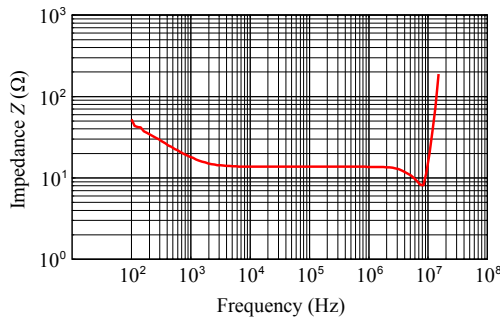


Figure 7: Characteristic impedance of the prototype magnet.

3.3 周波数特性測定

Vector Network Analyzer (VNA) を用い、電磁石試験機の周波数特性を測定した。図 8 に示す測定回路を用いて反射率の測定を行った。このとき電磁石終端は 10 Ω で終端されている。

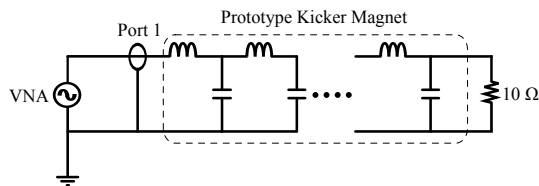


Figure 8: S_{11} parameter measurement system by using VNA.

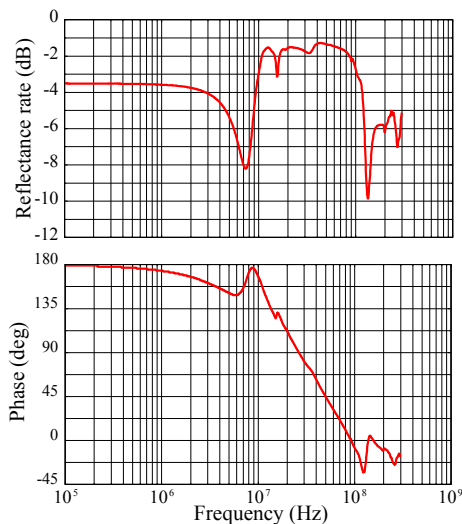


Figure 9: Measured frequency characteristics of S_{11} and phase.

測定された反射率 (S_{11}) 及び、位相 (θ_{11}) を図 9 に示す。式 (1)、(2)、(3) を用いることで負荷入力インピーダンス Z_{in} が求められる。ここで、 R はレジスタンス、 X はリアクタンス、 Z_0 は基準インピーダンスである。図 10 に算出された試験器の入力インピーダンスを示す。

$$R = \frac{1}{(1 - |S_{11} \cos \theta_{11}|)^2} \frac{(S_{11} \cos \theta_{11})^2}{(S_{11} \sin \theta_{11})^2} \quad (1)$$

$$X = \frac{2S_{11} \sin \theta_{11}}{(1 - |S_{11} \cos \theta_{11}|)^2 + (S_{11} \sin \theta_{11})^2} \quad (2)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3)$$

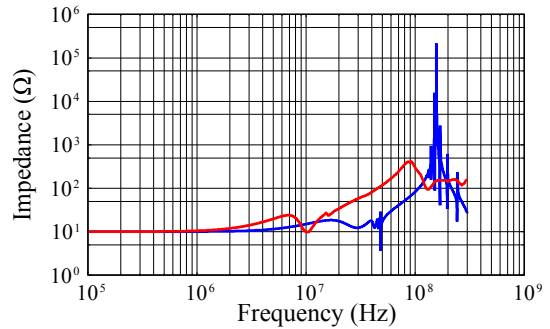


Figure 10: Input impedance of the prototype magnet. Measured data is shown as a red line and simulated data is as a blue one.

赤い線が実測値より、青い線が電気回路シミュレーションにより、それぞれ求めた入力インピーダンスである。

セラミックコンデンサ接続の際に生じてしまう浮遊のインダクタンスと静電容量は、計算から求めた値を付与してシミュレーションを行った。低周波数においては、実測値とシミュレーションで入力インピーダンス値の良好一致が見られ、予想される特性インピーダンスの値となることが確認された。一方、高周波数ではどちらも予想される制限帯域 (114 MHz) よりも低い領域からインピーダンスの増加が始まり、実測値はさらに低い周波数でインピーダンスの増加が開始していることが分かった。このインピーダンスの増加、すなわち帯域の制限に対し、実測値とシミュレーションで差異が生じている原因として、以下の要因を考えている。

1. フェライトコアの周波数特性
2. 試験器の構造によるインダクタンスの増加
3. 慮されていない浮遊成分の存在

1 番目の要因は、磁極に用いているフェライトコアの構造に起因していると考えている。フェライトコア自身は十分に良い周波数特性を持っているものと考えているが、ある大きさ・形状を持っているために周波数特性が悪化しているのではないかと懸念している。今後、フェライトコア自身の周波数特性や、形状の違ったフェライトコアの測定を実施したいと考えている。

2 番目の要因は、試験機の構造から来るもので、全体の大きさ・セル数・セル構造から何らかの共鳴等が起き、周波数特性の悪化を招いているのではないかと疑っている。

3 番目の要因は、シミュレーションで浮遊成分を見落としている可能性である。セラミックコンデンサ周りの浮遊成分は考慮しており、確かに周波数特性が悪化する

ことは確認された。しかしその量は十分ではなく、逆に実測値に合わせるためには非常に大きな浮遊成分が必要で、コンデンサ周りだけでは現実的ではなく、他に見落としている可能性がある。

尚、透過波による解析がこれらの要因を特定するのに有効だと考えているが、確からしい結果はこれまで得られていない。実機の設計には周波数特性悪化の原因究明が必要不可欠なため、今後も研究を継続する。

3.4 パルス応答試験

測定回路を図 11 に示す。詳細は論文 [5] 参照のこと。

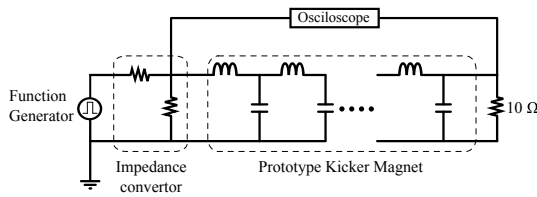


Figure 11: Measurement system of the pulse response.

インピーダンス整合のために 50 Ω の測定ケーブルと電磁石は T 型のインピーダンス変換器を介して接続されている。この変換器による減衰率は 20 dB である。ファンクションジェネレーターからの入力パルスと電磁石の透過パルスをそれぞれ電圧プローブを用いて測定し、それらのパルス波形出力の 10% から 90% までの立ち上がり時間を算出する。

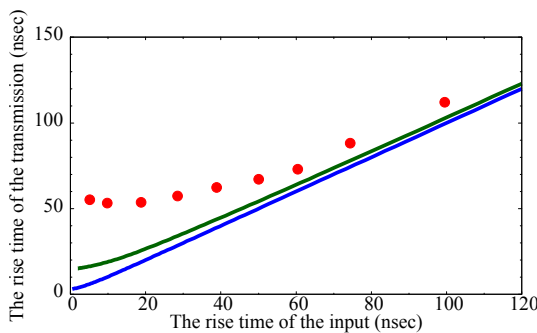


Figure 12: Input rise time versus transmitted rise time. Measured data is shown as dots (red) and simulation data are shown as lines (blue and green).

図 12 に、入力パルスの立ち上がり時間の関数として透過パルスの立ち上がり時間をプロットした。立ち上がり時間が 50 nsec までは、透過シグナルの立ち上がりは入力シグナルの立ち上がり時間に比例している。しかし入力パルスの立ち上がり時間が 50 nsec よりも速い領域では、電磁石を透過したパルスの立ち上がりはほぼ一定の値となっている。これは電磁石の帯域がパルスの立ち上がり 50 nsec 程度の周波数によって制限されていることを意味している。同図 12 の 2 本の実線は、電気回路シミュレーションから算出された試験機の立ち上がり時間である。青色の線が理想的な電磁石のシミュレーション結果、緑色の線はコンデンサ周りの浮遊のインダクタンスや静電容量を反映させたシミュレーション結果である。これらの立ち上がり時間の最小値はそれぞれ 5 nsec、10

nsec となっており、測定された立ち上がり時間は、シミュレーションで計算された値よりも大きい。この実測とシミュレーションのパルスの立ち上がり時間の不一致は、先に示した電磁石のインピーダンスの周波数特性と同じ傾向を示しており、帯域の制限が起こっている事を示唆する。

4. 結論

J-PARC 主リングの入射ビーム軌道を改善するための補正方法の開発を行っている。システム構成として、分布定数型のキッカー電磁石とマルクス型電源を検討している。

分布定数型のキッカー電磁石の試験機を製作し、その特性試験を行った。実測された特性インピーダンスは 13.8 であり、デザイン値 12.0 よりも大きな値となった。また周波数特性の測定より、試験機でのパルスの立ち上がり 50 nsec 付近で制限されていることが判明した。これは想定される試験機の立ち上がりよりも遅いため、その原因の特定を今後行っていく。考えられる原因としては、磁性体コアの周波数特性、及び試験機の構造から来るコイル自身のインダクタンス増加が考えられる。今後、原因を特定して、広帯域を実現するための改善を行う。その後、実機の設計及び製作を計画している。

参考文献

- [1] K.Fan et. al, "DESIGN AND TEST OF INJECTION KICKERS FOR JPARC MAIN RING", Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, THPPP004, 2012
- [2] K.Fan et. al, "Upgrade plan of Injection Kicker", Proceedings of PASJ9, Osaka, Japan, THPPP004, 2012
- [3] T.Sugimoto, et. al, "Performance of Injection Kicker Magnet for the J-PARC Main Ring", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Osaka, Aug. 8-11, 2012
- [4] Weihua Jiang, et. al, "Solid-State LTD Module Using Power MOSFETs", IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 38, NO. 10, OCTOBER 2010
- [5] S.Fukuoka, et. al, "DEVELOPMENT OF A FAST COMPENSATION KICKER SYSTEM FOR J-PARC MAIN-RING INJECTION", Proceeding of IPAC13, Shanghai, China, MOPWA009, 2013