

# Performance of Injection Kicker Magnet for the J-PARC Main Ring

Takuya Sugimoto<sup>#A)</sup>, Kuanjun Fan<sup>A)</sup>, Koji Ishii<sup>A)</sup>, Hiroshi Matsumoto<sup>A)</sup>, Takeshi Toyama<sup>A)</sup>  
Shota Fukuoka<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> University of Tsukuba  
1-1-1, Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577

## Abstract

A new injection kicker magnet (lumped constant type) for the J-PARC Main Ring have been installed and operated since December 2011. Before fabricating the magnet, a transmission-line type kicker was used for the J-PARC beam commissioning. However, one unit of the old magnet could not apply required charging voltage ( $\sim 50\text{kV}$ ) because of the discharge in the vacuum chamber. For the new magnet, fast rising time of excitation pulse, less than 300ns, is required to inject 3GeV multi-bunch proton beam from the RCS into the Main Ring. Total kick angle of 8.5mrad (max) is required. The injection kicker system is divided into four units. Each unit consists of two coils, which consist of 15 ferrite C-cores stacked horizontally and one copper plate with 600mm length. Inductance of each coil is calculated as 600nH. Excitation current of 3kA for each coil is required for beam injection. Fabrication of the magnet had been carried out since October 2011. In December, the magnet had been installed to the Main Ring. Discharge was detected when high-voltage was applied at first. After aging for some days, frequency of discharge was decreased. First beam was injected on December 19<sup>th</sup> successfully. In the beginning of 2012, several ceramic-resistors for impedance matching were broken by discharge.

## J-PARC メインリング 入射キッカー電磁石の性能評価

### 1. はじめに

J-PARC メインリング (以下、MR) の入射直線部を図 1 に示す。RCS で 3GeV まで加速され取り出された陽子ビームは、ビーム輸送ライン(3-50BT)を通り、MR へと入射される。2011 年 3 月に東日本大震災が発生するまでは、2 台のセプタム電磁石(Sep1, Sep2)と、3 台の分布常数型入射キッカー電磁石(KM1-3)で運転していた。

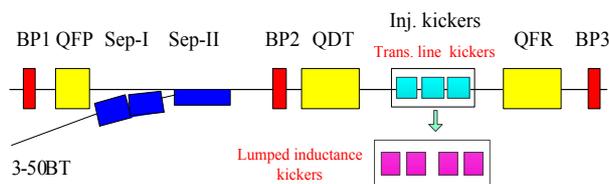


図 1 J-PARC MR 入射セクション

2008 年のビームコミッショニング開始当初から使用していた分布常数型入射キッカー電磁石<sup>[1]</sup>であったが、構成する 3 台のうちの 1 台 (KM3) が、真空チャンバー内部で発生した放電により高電圧を印可する事が出来なくなってしまった。そこで、KM3 をそれまでの終端整合型から反射型 (終端を短絡) に変更して励磁電流を 2 倍にし、放電しない低電圧での運転を続けていた。しかしながら、その後も耐電圧が徐々に低下し続けた。さらに、反射型に変更した事で増加した反射波により周回ビームが蹴られてしまい、ビームロスが増加して安定した運転が困難

となった。そのため、新しい入射キッカー電磁石を製作する事となった。

2012 年の夏期停止期間中に、分布常数型キッカー電磁石 3 号機の解体が行われ、放電箇所の調査がなされた。その際に発見された放電痕を図 2 に示す。高圧側のプレートと、その左右にある GND 側のプレートとの間で激しく放電していた事が分かった。また、放電していた高圧側のプレートを支えていたセラミック碍子にも焼け跡が見られた。

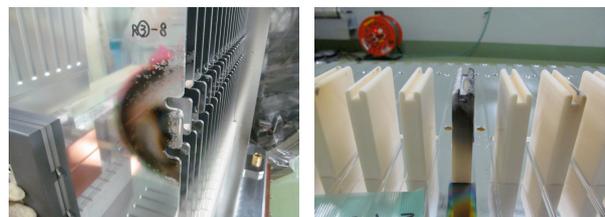


図 2 分布常数型キッカー電磁石内部で見られた放電痕。高電圧側の電極板(左図)と、それを側面から支えるセラミック碍子(右図)

### 2. 新しい入射キッカー電磁石

これまで用いていた分布常数型キッカー電磁石は、速い立ち上りが実現出来る反面、構造が複雑で部品点数も多く、耐電圧を支持碍子表面での沿面距離に頼るしかないと、長期間安定に動作させるには高い技術が必要となる。それに対して、集中常数型のキッカー電磁石は、立ち上り時間は分布常数型に比

<sup>#</sup> takuya.sugimoto@j-parc.jp

べて遅くってしまうが、構造がとてもシンプルで部品点数も少なく、空間的に絶縁距離を確保する事が出来る。このため、我々は新しい電磁石の構造として集中常数型を採用し、台数も4台に増やす事にした。

分布常数型キッカー電磁石は、1台あたり27セグメントから構成されており、1セグメントあたり  $L=20\text{nH}$ 、 $C=200\text{pF}$  であった。これより、集中常数型キッカー電磁石においても同程度のインダクタンスとなるよう設計を進めた。コイルの磁極長を決定するために、CST Microwave Studio によるビームインピーダンスの評価、ならびに Opera-3D による磁場分布や渦電流の評価を行った。これにより、長さ600mmの銅板(厚さ8mm)と15個のフェライトを用いる事で、600nHの1ターンコイルを作成する事が可能である事が分かった<sup>[2]</sup>。フェライト境界部で発生する渦電流ならびにそれより発生する熱を冷却するために、上下のT時型の仕切り板(eddy-current shield)に直接冷却水を流すための銅パイプをロウ付けし、フェライトと密着させる事で、フェライトで発生した熱を冷却する構造とした。

フェライトは、米 Ceramic Magnetics 社の Ni-Zn フェライト CMD10<sup>[3]</sup>を採用した。キュリー点が250°Cと、従来のもよりも高く飽和しにくくなっている。分布常数型キッカー電磁石と同じアパーチャー 130mm(H) x 98mm(V) (=81π mm mradに相当)にするために、フェライトの開口部の寸法は77mm(H) x 98mm(V)とし、厚さは40mmとした。コイルとフェライトとの間隔は、放電を避けるため8mmとした(真空中は10kV/mmで設計した)。組み上がったコイルとフェライトを図3に示す。

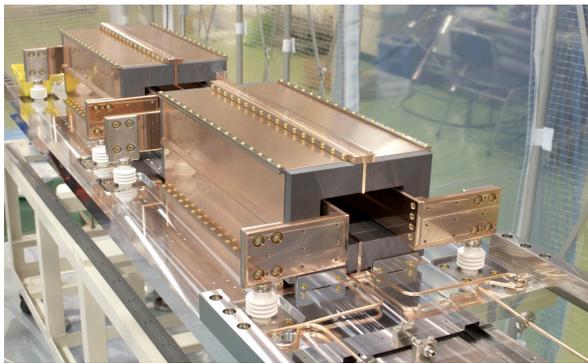


図4 集中常数型電磁石のフェライトとコイル

マグネットおよび電源の等価回路を図4に示す。開発時間とコストを押えるため、パルス電源はこれまでの物を再利用した。パルス電流の形成には、約150mのPFLとサイラトロン(e2V社製CX1193)を用いる。分布常数型キッカー電磁石の特性インピーダンスが10Ωで、PFLおよび伝送線は、フジクラ製架橋ポリエチレン高圧ケーブルを2本並列にして用いている。ケーブルの特性インピーダンス  $Z_0$  をTDR法(Time Domain Reflectometry)により測定したところ、2本全体で9.7Ωを得た。このため、負荷側の整合回路インピーダンスも9.7Ωとして設計した。

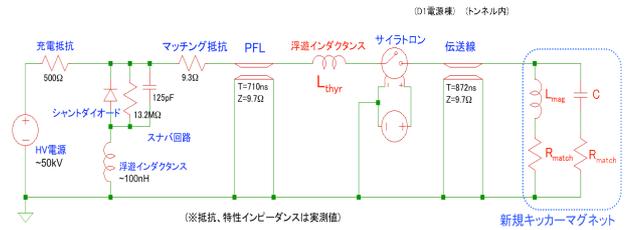


図3 集中常数型キッカー電磁石の等価回路図

高周波成分に対してもインピーダンスを整合させるため、コイルに対し並列にRC回路を導入した。コンデンサの静電容量CはコイルのインダクタンスLとの関係式

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

より  $Z_0=9.7\Omega$  となるよう決定した。

マグネットを接続する前に、回路系の浮遊成分を評価するために、抵抗のみを負荷として接続し、その立ち上り時間から浮遊インダクタンスを評価した。その結果、550nH程度のインダクタンスを持つ事が分かった。これは

- ① サイラトロンハウジング
- ② 140mの伝送ケーブル
- ③ 高圧コネクタ

が主な成分であると考えられる。この影響を考慮し、Linear Technology社のLTSpiceにより回路シミュレーションを行った。その結果、コイルのインダクタンスを600nHとした場合、立ち上り時間が353.6nsec(0~100%)となる事がわかった。MRでは、加速ハーモニック(h=9)に対し、8個の陽子バンチを40msec毎に4回に分けて入射する。MRの周長が1567.5mより、3GeVにおけるバンチ間隔は598nsecとなる。2011年のビームコミッショニングにおけるバンチ幅は200nsec程度であったため、今回のキッカー電磁石のデザインは、この値を元に行ったが、将来、750kW出力をするためには、加速高周波に対し、2倍高調波を重畳する事が必須である<sup>[4]</sup>。この場合、バンチ長は340nsec程度に広がるため、入射ロス率を1%以下にするためには、入射キッカーの立ち上り時間を250nsec程度(1~99%)にしなければならない。そのためには上記の浮遊インダクタンスを減らす事が必須で、改善に向けた研究が進んでいる<sup>[8]</sup>。

波形整合のための抵抗器ならびにコンデンサは、専用ボックスに収め、真空チェンバーの直上に配置しフィードスルーを用いてコイルと接続する。フィードスルーを用いるのは、ケーブルを用いると、ケーブルの持つインダクタンスやコネクタでのインピーダンス不整合などにより波形が乱れてしまうからである。整合回路とコイルとを接続するためのフィードスルー、ならびにそれを支持するための円盤型セラミック碍子を図5に示す。セラミックはKEKと京セラで共同開発された、新しい高沿面耐電圧セラミック<sup>[5]</sup>を用いた。



図 5 高耐圧セラミックを用いたフィードスルー

整合回路の素子は、これまでの使用実績を考慮して、抵抗器は東海高熱工業製のセラミック抵抗器を、コンデンサは仏 AVX 社のセラミックコンデンサを用いた。整合回路ボックスと真空チェンバーとの間は、高耐圧セラミックで仕切られているため、万一の事を考えると絶縁油を使う事が出来なかった。そのため、ボックス中は大気とし、素子間の絶縁距離は 300V/mm で設計した。

2011 年 10 月より KEK つくばキャンパス内において製作を開始した。組み立て作業は簡易クリーンルーム内で行った。コイルの組立てとアライメントを行った後、11 月末に東海キャンパスへ運搬しトンネル内へとインストールした。12 月よりトンネル内でインピーダンス測定を行い、さらに高電圧を印加して立ち上がり時間と磁場の測定を行った。完成しビームラインにインストールされた集中常数型キッカー電磁石を図 6 に示す。

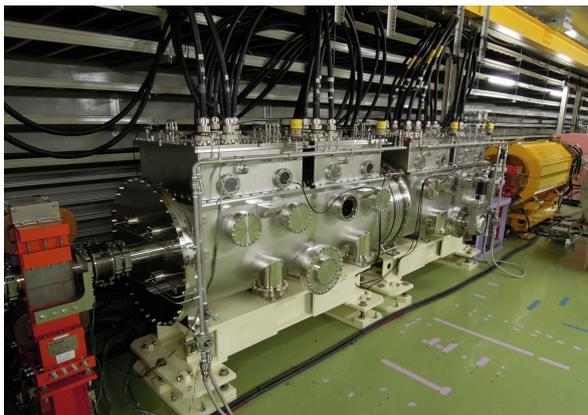


図 7 集中常数型入射キッカー電磁石

### 3. 性能評価

#### 3.1 ビームインピーダンス

ビームはキッカー電磁石のもつインピーダンスにより影響を受ける<sup>[6]</sup>。キッカー電磁石とビームとのインピーダンスを測定するために、マグネット中心にワイヤーを張り、ネットワークアナライザを用い

て透過係数 S21 やビームとの結合インピーダンスを測定した。図 7 に single-wire method で得られた、ビーム軸方向のインピーダンスの測定結果を示す。高い周波数で見られたピークが無くなり、広い周波数領域で低インピーダンスを実現する事が出来た<sup>[7]</sup>。

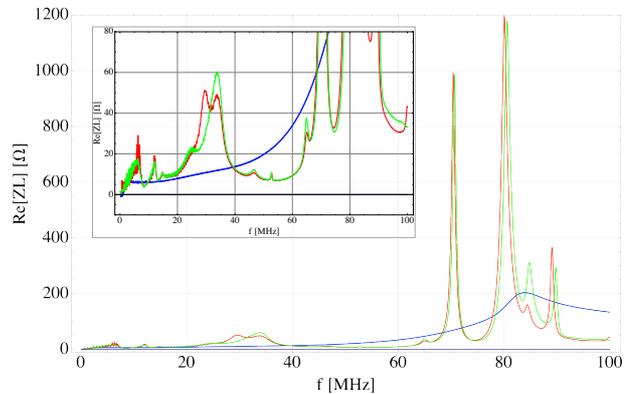


図 6 single-wire method によるビーム軸方向のインピーダンス。分布常数型キッカー(赤線、緑線)と、集中常数型キッカー(青線)

#### 3.2 磁場分布

マグネット中にサーチコイル(長さ  $L=2.4\text{mm}$ 、幅  $w=4\text{mm}$ 、巻数  $n=1$ )を挿入し、それを上下左右に移動して磁場のマッピングをした。コイルの誘導起電力  $V$  は、サーチコイルを貫く磁束  $\Phi$  より

$$V = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dB_y \cdot S}{dt} = \frac{dB_y \cdot L \cdot w}{dt}$$

となる。この出力をオシロスコープの積分機能を用いて積分し

$$Vt = \int \frac{d\Phi}{dt} dt = B_y L w$$

の関係から、積分磁場  $B_y L$  は

$$B_y L = \frac{Vt}{w}$$

として求める事が出来る。

図 8 に磁場の印加電圧依存性の測定結果を示す。印加電圧に対し、非常に良い線形性を持つ事を確認した。測定は大気中で行い、サーチコイルとの間で放電を防ぐため、24kV 充電を上限として測定を行った。SAD を用いたシミュレーションにより、3 台の分布常数型キッカー電磁石の場合、蹴り角は 8.5mrad、積分磁場は 0.110Tm と求められた。Opera-3D によるシミュレーションで、同じ積分磁場を得るには、集中常数型キッカー電磁石 4 台を 61.9kV で励磁する必要がある事が分かった。今回の測定結果を 62kV へ外挿し 4 倍しても、積分磁場は 0.0836Tm と少し少ない結果となった。これは、隣接するマグネットの fringe field の影響が考慮されていない事が原因と考えているが、今回は時間的な制約から、複数のマグネットを同時に励磁した時の、fringe field の評価が出来なかった。また、サーチコ

イルを含む測定系の浮遊成分が原因で生じるリングがとても大きく、立ち上りも鈍っていた事も、磁場の絶対値の精密な測定が出来なかった要因と考えている。そのため、4 台全て励磁した場合の積分磁場は、シミュレーションの値を信用し、充電電圧の微調整はビームを用いて行った。

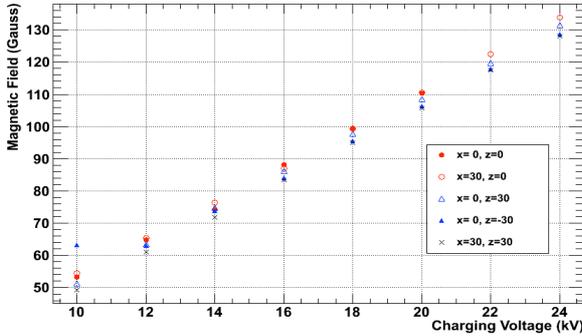


図 8 中心磁場の充電電圧依存性

### 3.3 高電圧印加試験

磁場ならびにインピーダンス測定後に、ビームパイプと接続し、真空ポンプによる排気を開始した。ターボ分子ポンプによる排気で、 $10^{-5}$ Pa 程度にまで圧力が十分に下がった事を確認した後に、徐々に高電圧を印加し始めた。充電電圧が 62kV を超えた頃から真空チェンバー内部での放電が数回観測され、それに伴って圧力も瞬間的に急上昇した。そのため、シングルショットで 68kV まで印加出来る事を確認した後は、60kV に下げてエージングを行い、ビームの入射に備えた。

### 3.4 パルス波形と立ち上り時間

コイルに流れる電流をモニターするために、コイル側の整合用抵抗器の直後に CT (ピアソン社製 Model4997) が取付けられている。図 9 に CT で測定した電流波形を示す。縦軸はフラットトップの出力が 1 となるよう規格化してある。反射型に変更した分布常数型キッカー電磁石の出力波形 (青線) に比べて、立ち上り時間はやや遅い。しかし、高周波領域で整合が取れていないために生じる、立ち上がり/立ち下がり領域でのリングや、反射波が無く、フラットトップの平坦性も良い波形が得られた。

図 10 に立ち上り時間の電圧依存性を示す。これは主にサイクロトロン出力に電圧依存性がある事が原因であると考えている。充電電圧 55kV に対し、立ち上り時間が 348nsec となり、回路シミュレーションの結果 (353.6nsec) とほぼ同じ結果を得た。今後、立ち上がり時間の高速化には、フィードスルーとコイルの間を繋ぐ電極板のもつ浮遊インダクタンスを減らす事が必要で、研究が進んでいる<sup>[8]</sup>。

### 3.5 ビーム入射調整

J-PARC MR では、キッカー電磁石の下流に置かれた 4 台の BPM (水平方向 2 台、垂直方向 2 台) によって測定されたビーム位置を元に、約 100 ターン

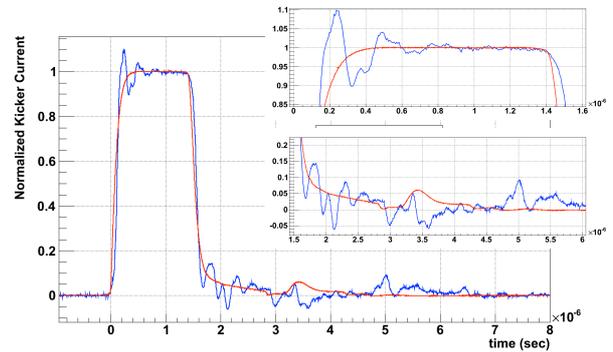


図 9 励磁電流波形の比較 (青線：分布常数型、赤線：集中常数型)

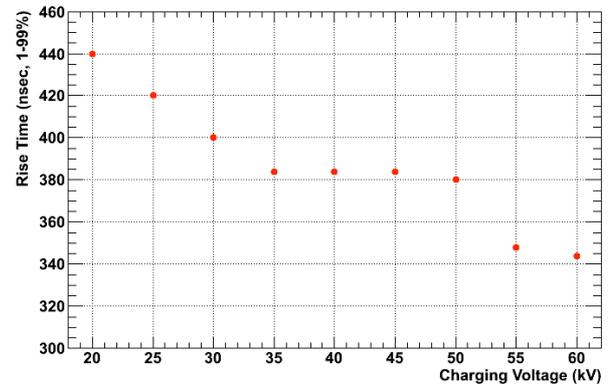


図 10 立ち上り時間の充電電圧依存性

分のビームの位相空間をプロットする。その広がり (入射エラー) が最小になるようキッカーならびにセプタムの充電電圧を調整する事で、入射軌道を調整する<sup>[9]</sup>。SAD シミュレーションにより、求められた値を用い、セプタム電磁石の調整も行う事で、最適な運転電圧を決定した。

### 3.6 タイミング調整

キッカー電磁石を励磁するためのタイミング信号は、上流の RCS 取り出しキッカーのタイミング信号と同期しており、TD4V モジュールで遅延させてサイクロトロングリッドトリガ信号としている。図 11 は、入射エラー (5 ショットの平均値。エラーバーはその RMS) と TD4V での遅延時間の相関を示す。4 バッチ (K1 から K4 と呼ぶ) のうち、K1 のみの 2 バッチを MR に入射すると、その後の K2 から K4 タイミングで励磁されたキッカー電磁石の立ち上りやテールによっても周回しているビームが再び蹴られ、位相空間 (=入射エラー) が大きくなり、ビームロスも増加する。図より、テールや反射波が大きいところでは入射エラーも大きくなる事がわかる。したがって、入射エラーを最小にする遅延時間を求める事が必要となる。サイクロトロンジッターが 10nsec 程度である事を考慮し、ビーム試験を行う前に、4 台のキッカー電磁石の相対的なタイミングを 10nsec のオーダーで揃えた。そしてビームを用いて TD4V の遅延時間の調整を行い、2012 年の連続運転は集中常数型キッカー電磁石を用いて行った。

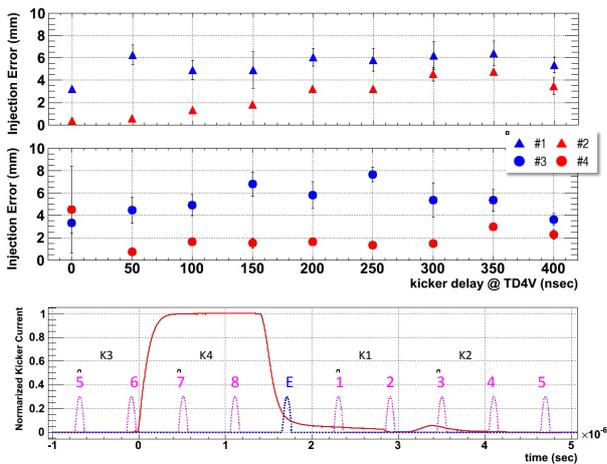


図 11 遅延時間に対する入射エラーの変化

#### 4. 抵抗器の放電

2012 年の運転開始後しばらくして、終端整合用の抵抗器が放電により損傷を受けているのを発見した。図 1 1 に放電した抵抗器を示す。抵抗器は東海高熱工業製のカーボン入りセラミック抵抗器 (AS タイプ、1 本あたり 139Ω) を 15 本並列にして用いている。これらの抵抗器の電極付近で放電が発生し、抵抗値が数百 kΩ にまで上昇していた。そのため、合成抵抗が上昇してインピーダンスが整合出来なくなり、コイルの励磁電流値が下がってビームが入射出来なくなってしまった。放電は電圧印加開始後すぐには表面化せず、徐々に劣化が進行するため、なかなか発見する事が出来なかった。この問題の発見以降、1 週間から 10 日に一度の割合で抵抗器の交換をする事態となり、その都度ユーザー運転を停止しなければならなかった。

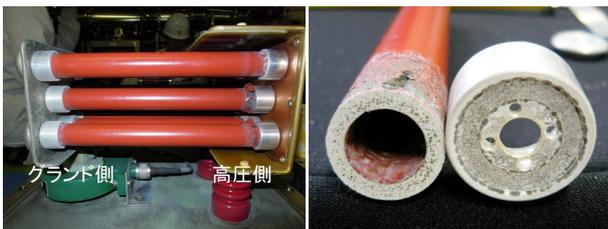


図 12 放電した抵抗器(左図)とその断面(右図)

電極を形成するために、セラミック断面にはアルミニウムがアーク溶射されている。さらに、アルミ製のエンドキャップが、セラミック中心を通る FRP 製の棒 (両端にタップが切られている) により、ボルトとバネワッシャーで押し付けられる事で固定されている (いわゆる断面電極タイプ)。

原因の一つとして、電極面が粗い事による接触の悪さを疑っている。セラミック断面へのアルミ溶射では、アルミの食い込みを良くするために、セラミック断面をブラスト処理している。しかし、ブラストにより荒れた表面に溶射をすると、表面に凹凸が残ってしまう。アルミ溶射直後のセラミック断面

をレーザー顕微鏡で観察すると、数十μm の凹凸が無数にあるのがわかった。電極との接触率が 30% と仮定すると、抵抗器 1 本あたりの電流密度はおよそ 0.35A/mm<sup>2</sup> になる。すると、局所的な温度上昇によりセラミック抵抗器の組成変化 (カーボンが燃焼され遊離するなど) が起こり、抵抗値が上昇する事で電極付近の電位勾配が高くなり、ついには微小放電へと進むのではないかと考えている。電極の接触を改善するために、0.1mm 厚の焼鈍し銅のスペーサーを 1 枚挟むと、少し寿命が延びる事が分かった。現在、セラミック断面をメタライズ処理し、電極の直接ろう付けを試みている。

また、セラミック抵抗体の気孔率が 33% (メーカー提示値) ととても高く、多孔質である事も要因の一つと考えている。セラミック内部の気孔 (特に電極付近) でマイクロ放電が起こっている可能性がある。気孔率を下げ密度を上げるために、HIP (熱間静水圧) 形成処理による圧縮や、より緻密なセラミック (SiC など) を用いた抵抗器の開発を進めている。

#### 5. まとめ

J-PARC MR 入射キッカー電磁石は、放電により耐電圧の低下した分布常数型電磁石に代わり、構造のシンプルな集中常数型電磁石を新たに製作しインストールした。磁場やインピーダンス、立ち上り時間を測定し、要求を満たしている事を確認した。2011 年 12 月に行われた、震災後初のビーム入射の際には、既存のセプタム電磁石も使い、ビームを入射する事に成功した。しかし、今後の大強度化に向け、より早い立ち上り時間を実現しなければならず、更なる改良が必要である。2012 年のユーザー利用運転で、終端整合用の抵抗器に放電が見られた。現在、より安定に動作する抵抗器の開発を進めている。

#### 参考文献

- [1] E.Nakamura, et al., "J-PARC MR 入射系キッカー電磁石システム", Proceedings of the 4th Particle Accelerator Society Meeting, Wako, Saitama, Aug. 1-3, 2007
- [2] K.Fan, et al., "DESIGN AND TEST OF INJECTION KICKERS FOR J-PARC MAIN RING", Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, 2012
- [3] CMD10 Data sheet, <http://www.cmi-ferrite.com/Materials/Datasheets/NiZn/CMD10.pdf>
- [4] Y.Sato, et al., "J-PARC Main Ring における大強度運転", This proceedings.
- [5] S.Mihara, et al., "高浴面耐電圧セラミックの開発研究", This proceeding.
- [6] Y.Shobuta, et al., "ビームの受けるインピーダンスとビーム不安定性の理論", OHO10
- [7] K.Fan, et al., "COUPLING IMPEDANCE STUDY OF THE JINJECTION KICKER MAGNETS OF THE JPARC MAIN RING", Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, 2012
- [8] K.Fan, et al., "UPGRADE DESIGN OF INJECTION KICKERS FOR JPARC MAIN RING", This proceedings.
- [9] S.Hatakeyama, et al., "J-PARC MR 横方向の入射エラー及びベータatron チューンモニターシステム", Proceedings of the 7th Particle Accelerator Society Meeting, Himeji, Hyogo, Aug. 4-6, 201