

# パルス6極電磁石で発生する渦電流の影響を抑える セラミックチェンバーのコーティングパターンについての評価 EVALUATION OF COATING PATTERN OF CERAMICS CHAMBERS TO REDUCE THE EFFECT OF EDDY CURRENTS BY THE PULSED SEXTUPOLE MAGNET

高木宏之 \*<sup>A)</sup>、満田史織 <sup>A)</sup>、魯垚 <sup>B)</sup>、帯名崇 <sup>A)</sup>、高井良太 <sup>A)</sup>、野上隆史 <sup>A)</sup>、  
内山隆司 <sup>A)</sup>、原田健太郎 <sup>A)</sup>、上田明 <sup>A)</sup>、長橋進也 <sup>A)</sup>、小林幸則 <sup>A)</sup>

Hiroyuki Takaki\*<sup>A)</sup>, Chikaori Mitsuda<sup>A)</sup>, Yao Lu<sup>B)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Ryota Takai<sup>A)</sup>, Takashi Nogami<sup>A)</sup>,  
Takashi Uchiyama<sup>A)</sup>, Kentaro Harada<sup>A)</sup>, Akira Ueda<sup>A)</sup>, Shinya Nagahashi<sup>A)</sup>, Yukinori Kobayashi<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup>The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), 240-0193, Hayama, Japan

## Abstract

The Photon Factory has been continuously developing a new technology for the top-up injection using pulsed multipole magnets. One of the important issues to be solved in this injection is the effect of eddy currents generated by the multipole magnets and the inner coating of the ceramic ducts on the stored beam. The magnetic field of the pulsed multipole magnet is designed so that it does not affect the stored beam, however, the eddy currents that occurred on the coating give an unwanted kick to the stored beam at the injection. In this paper, we report the coating pattern of ceramic chambers to reduce the effect of the eddy currents.

## 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、パルス多極電磁石によるトップアップ入射の新技术の開発を不断に進めている。これは、Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) における2005年のパルス4極電磁石を用いた入射 [1] から始まり、Photonn Factory (PF) においては、2010年からパルス6極電磁石1号機 (PSM1) を用いたトップアップ入射をユーザー運転を提供し (2011年3月に起きた震災後半年間の中断があったが2011年秋より復帰し) 大きな成果を上げた [2]。2014年からは、セラミックダクトの形状を円形 (内径60mmから) 長方形 (68mm x 18mm) に変更しそれに合わせて6極磁石自身も新形状のもの (PSM2) へと作り変えた (Fig. 1)。新形状のPSM2では、入射時のビームロスを抑えるために水平方向の物理口径を大きくし、低いピーク電流で入射に必要なパルス磁場を発生させることができるように垂直方向の磁極の距離を短くした。この改造によって、PSM1に比べて入射が楽になる予定であったが、PSM1において200  $\mu\text{m}$  程度であった蓄積ビームの水平振動が、PSM2を用いた入射では数mmも発生してしまい、結果としてユーザー運転でのPSM2の利用は出来なくなった。

この入射時の蓄積ビームの振動の原因のひとつとして、セラミックダクト内面のTiコーティングで発生する渦電流が考えられる。通常、セラミックチェンバーの内部は、ビーム壁電流のインピーダンスを

抑制するために導電性の物質でコーティングしているが、パルス磁場がこのコーティングを抜けようとするとその磁場の变化を抑えようとしてコーティング面に渦電流が発生する。パルス多極入射においては、入射時に蓄積ビームが振動しないよう蓄積ビームが通過する場所における磁場成分がゼロになる電磁石を設計しているので、この渦電流に起因する余分な磁場が発生してしまうと蓄積ビームを振動させてしまうことになる。

今回、3次元の磁場解析コードを用いて現在のコーティングで発生する渦電流の影響を見積るとともに、渦電流が蓄積ビームに影響を与えないようなコーティングパターンについて検討し評価したので報告する。

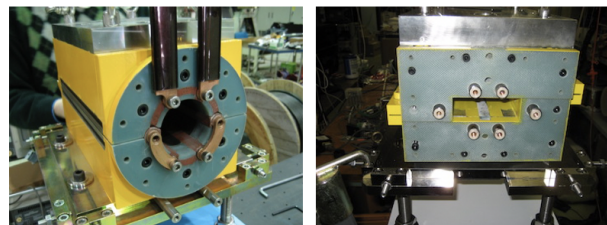


Figure 1: Photos of pulsed sextupole magnets. PSM1(left) and PSM2(right).

\* hiroyuki.takaki@kek.jp

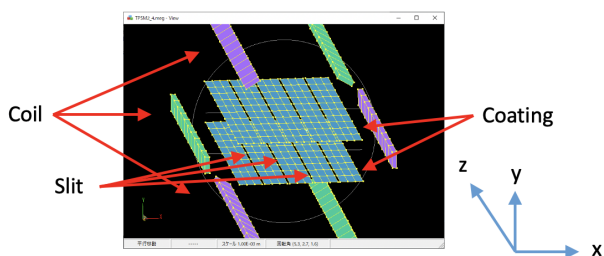


Figure 2: Layout of the magnet, slits, and chamber coating.

## 2. 6極電磁石とチェンバー内コーティングのモデリング

パルス6極電磁石によってセラミックチェンバー内部のコーティングで発生する渦電流を見積るにあたり、要素を3次元でモデリングし計算を行った。使用した3次元の磁場解析コードはELF/MAGIC(株式会社エルフ)で、コードの特徴として積分要素法を使用している[3]。

まず、電磁石については空芯とし棒状のコイルが存在するだけとした(Fig.2参照)。コイルは6極磁場が発生するように蓄積ビームの軌道を中心とした同心円上の6回対称の位置に配置した。セラミックチェンバーのコーティング面に発生する渦電流は、コーティング面を通過する磁場に対するリアクションという形で発生するので、発生する磁場に対して何%の磁場が渦電流によって生じたかという形で評価をおこなえば空芯にして簡略化する事ができる。

次に、コーティングは $3\mu\text{m}$ 厚のTiとし全面で均一な厚さとした。セラミック部分はモデリングの必要がないので、コーティング面はビーム中心( $x=y=0$ )の $\pm 9\text{mm}$ に配置した $W=68\text{mm}$ ,  $L=300$ ,  $t=3\mu\text{m}$ のTiの板2枚の板となる。チェンバー側面部のコーティングは蓄積ビームに対して水平の振動を起こす磁場を発生させないので無視する。

このコーティング面に対してパターンを作る場合、Fig.2に示すようにz軸に沿ってx方向に切れ目を入れ板状のコーティングを作る。このコーティングを区切る部分をスリットと呼ぶことにし、その幅は1mmとする。各コーティングパターンは板状とし、各パターンはz軸上の両端が電氣的に絶縁されており渦電流は板状の面内にしか流れないとする。評価する磁場はFig.2のチェンバー中心( $y=z=0$ )に発生するもののみとする(対称性からByだけが発生する)。コーティング幅を5mm, 10mm, 15mm, 20mmと変え、全面コーティング(現状)及びコーティング無し(渦電流なし)の場合と渦電流の影響を比較する。

次に、コイルに流すパルス電流は、Fig.3のように幅 $1.2\mu\text{sec}$ のハーフサイン、ピーク電流は1000Aとした。PFにインストールしたパルス6極電磁石のコイルは1ターンなので、図中の隣り合うコイルは交互に逆向きのパルス電流が流れることになる(図中の同色の3本のコイルは同方向に電流が流れるグルー

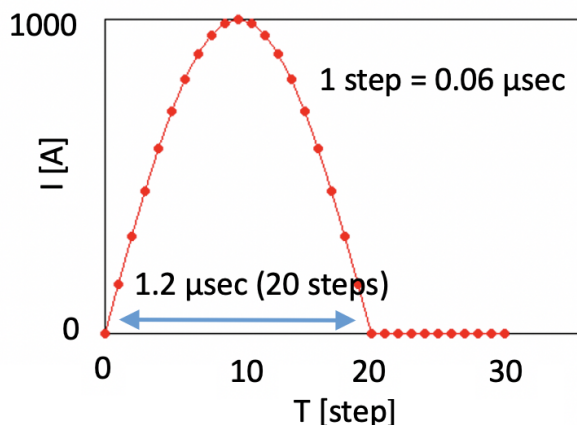


Figure 3: Time evolution of the applied current.

プである)。磁場の過渡計算において、電流はハーフサインの部分をも20分割し、1ステップ $0.6\mu\text{sec}$ で刻んだ。電流のピーク値は10ステップ目にあり、21~30ステップ目までは0Aとした。また、コイルの材質は銅とした。

## 3. 全面コーティングの場合

全面コーティングにおいては、Fig.4に示すようにスリットの無い2枚のコーティング面で蓄積ビームを挟む形になる。このモデルに対してFig.3の電流を流すと、Fig.4の赤線で示す測定領域( $y=z=0\text{mm}$ で $x=0\sim 15\text{mm}$ )における磁場の時間的変化はFig.5のようになる。

渦電流の影響のひとつは、時間と共にx軸方向に6極磁場が発生し消えて行く様子に現れている。グラフの縦軸は、内部コーティングがない(渦電流が発生しない)場合に $x=15\text{mm}$ の場所に発生する磁場のピークを100%として規格化している。本来10ステップ目でピークを迎えるはずの磁場が、2~3ステップ遅延してピークを迎えるとともにそのピークが100%に達していないのは渦電流の影響である。

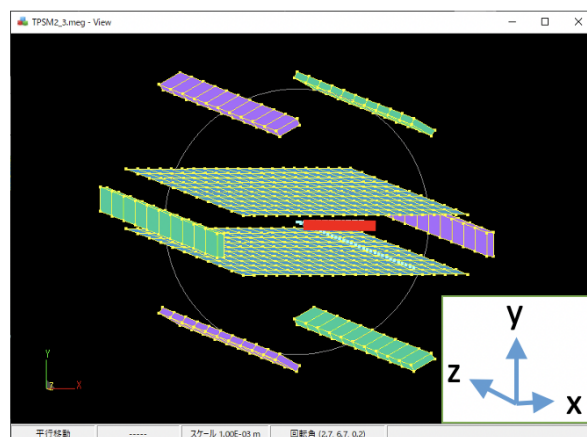


Figure 4: Full coating case.

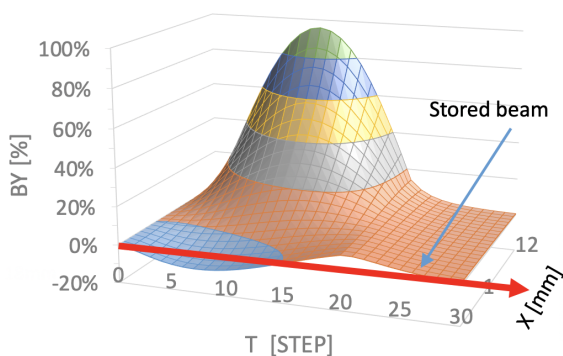


Figure 5: Time evolution of the sextupole field.

渦電流の影響が見えているもうひとつの点は、蓄積ビームが通過する  $x=0\text{mm}$  において発生した6極磁場を打ち消すようなタイミングで逆向きの磁場が発生している部分である。ここではピーク磁場の微分波形に似た渦電流独特の磁場の時間発展が見えており、効果としてはパルス磁場の渦電流無しの時のピーク値に対して10%弱の強さとなっている。残念ながら、今回  $x=0\text{mm}$  で渦電流により発生した磁場は、過去に行った積分磁場の実測結果を完全に説明するものではなく、電磁石本体に起因する渦電流の効果についても今後詳細に検討する必要がある。この6極電磁石本体に起因する渦電流については、本学会で総研大の魯氏により「KEK-PFにおけるパルス六極電磁石の精密磁場測定による渦電流効果の評価」(WEPP45)で報告されているのでそちらを参考にされたい。

#### 4. スリットを入れた場合

セラミックチェンバーの内側に全面均一のコーティングを施すと、そこに発生した渦電流が蓄積ビームに対して影響を及ぼすというのが前章の結果である。これに対して、コーティング面のz軸に沿ってx方向に幅1mmのスリットを入れてコーティング面を分割し板状にする。分割された板状のコーティングの配置は、まず蓄積ビームが通過する位置  $x=0$  の部分に板状コーティングの中心線が来るように配置する。その後、この板状コーティングの左右

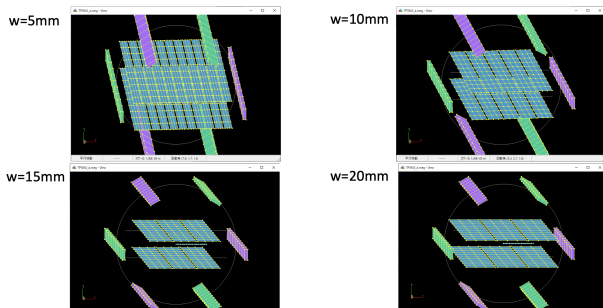


Figure 6: Plate-coating arrangement.

にスリットを配置し更に次の板状コーティングを配置する。したがって、配置したスリットは  $x=0$  に対して対称性を持つ事になると共に、ビーム軸の鉛直方向に対しては必ずコーティングが存在することになる。Figure 6に示すように、コーティングの幅が5mm、10mm、15mm、20mmの4種類を用意し計算を行った。

Figure 7は、蓄積ビームが通過する位置における渦電流の影響を示している。コーティング無し(w.o. coat)の時には渦電流による磁場は発生していないが、前章でも述べたように、全面コーティング(all coat)では渦電流による磁場が発生している。コーティング面にスリットを入れた場合、幅が5~15mmではほぼ渦電流の影響を抑える事ができる事がわかる。幅が10mm以下だと影響もピークで1%以下となっている。

Figure 8は渦電流の影響で必要とする6極磁場に遅延が発生するとともに磁場強度も下がるという事を示しているが、スリットを入れる事で遅延も磁場の低下も抑えられる事が分かる。

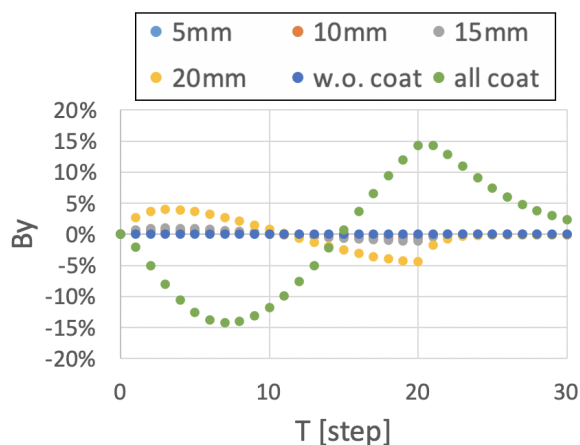


Figure 7: Effect of eddy currents on the stored beam.

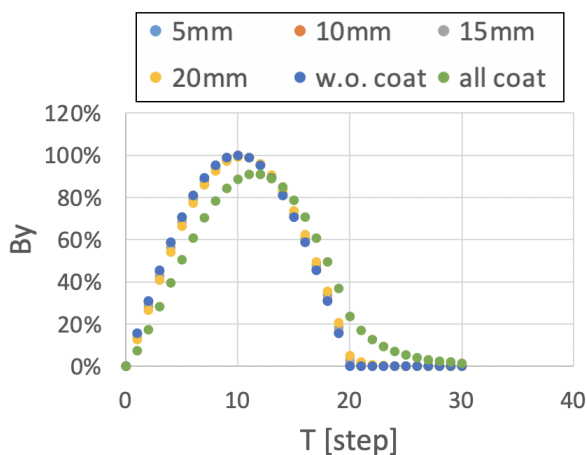


Figure 8: Effect of eddy currents on the injection beam.

## 5. まとめ

PFにおいて、パルス6極電磁石設置箇所を用いているセラミックチェンバーの内面コーティングは、今までは全面均一のTiコーティングを施していた。このコーティングで発生する渦電流が蓄積ビームに対して影響を与える事が計算からも判明した。このコーティングに対して、幅1mmスリットを数mm間隔で入れ歯構造のコーティングにする事により、全面コーティング時に渦電流に起因して発生していた $x=0$ 付近における $B_y$ を抑える事ができる事が分かった。また、この構造だと本来必要となる6極磁

場成分も0.1%以下にすることができた。

今後、このコーティングパターンを施したセラミックチェンバーをPFリングに導入し、入射時の蓄積ビームの振動が抑えられるようになるかについてビーム試験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] K. Harada *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 123501 (2007).
- [2] H. Takaki *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **13**, 020705 (2010).
- [3] <http://www.elf.co.jp/>