

## あいち SR における入射用パルス多極電磁石の開発

### DEVELOPMENT OF PULSED MULTIPOLE MAGNET FOR AICHI SR STORAGE RING

伊藤圭哉<sup>#, A, B)</sup>, 山本尚人<sup>C)</sup>, 保坂将人<sup>D)</sup>, 篠本考秀<sup>E)</sup>, 真野篤志<sup>D)</sup>,  
高野琢<sup>D)</sup>, 林憲志<sup>B)</sup>, 高嶋圭史<sup>D)</sup>, 加藤政博<sup>B)</sup>

Keiya Ito<sup>#, A, B)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>C)</sup>, Masahito Hosaka<sup>D)</sup>, Takahide Shinomoto<sup>E)</sup>, Atsushi Mano<sup>D)</sup>,  
Takumi Takano<sup>D)</sup>, Kenji Hayashi<sup>D)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>D)</sup>, Masahiro Katoh<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Nagoya University, <sup>B)</sup> UVSOR IMS, <sup>C)</sup> KEK, <sup>D)</sup> NUSR, <sup>E)</sup> SES

#### Abstract

We designed a Pulsed Multipole Magnet (PMM) for Aichi SR storage ring. The design goal is to suppress displacement of stored electron beams smaller than 10 percent of stored beam size. In our past research, we established a technique to compensate magnetic field error. In this work, we estimated effects of magnetic field generated by current leads and of electric field caused by potential differences in the coil. Then, we designed the configuration of current leads to minimize the perturbations to the stored beam. It is expected that the amplitude of electron beam would be suppressed to 4 percent horizontally and 0.08 percent vertically of the beam size.

#### 1. はじめに

あいち SR は 2013 年に稼働を始めたシンクロトロン光施設であり、1.2 GeV の蓄積リング光源を持つ。その蓄積リングは、4 台の超伝導偏向電磁石を備え、これにより 10 本以上のビームラインへ硬 X 線を供給することが可能である。ここで、蓄積リングのパラメータを Table 1 に示す。本施設は 2013 年の稼働当初より、トップアップ運転を実施している。蓄積電流値は 300 mA であり、電流値安定性は 0.2 % を実現している<sup>[1]</sup>。蓄積リングへの電子ビームの入射のために、4 台のキッカー電磁石（パルス二極電磁石）によるローカルバンプ軌道を形成している。ビーム入射の際、このバンプ軌道内のビームラインでは、蓄積ビーム軌道の瞬間的な変異のために、瞬間的に放射光が失われてしまう。あいち SR は比較的小さな蓄積リング（周長 72 m）であり、リングの約半分をバンプ軌道が占めるため、影響を受けるビームラインが多く、この問題の解決が重要である。これに加えて、バンプ軌道内にある六極電磁石の非線形磁場の影響でバンプ軌道が完全には閉じないことから、リング全周に渡って蓄積ビームがビームサイズの

20%~30%の振幅で振動する。

以上の問題の解決を目的として、我々はパルス多極電磁石（以下、PMM）を用いた入射システムの開発を開始した<sup>[2]</sup>。PMM を用いた入射では、理想的には入射ビームのみ蹴られ、蓄積ビームに影響を与えることはない<sup>[3,4,5]</sup>。しかしながらこれまでの先行研究では、PMM は蓄積ビームへの影響を完全に消すことはできていない。四極磁場成分による影響は<sup>[3]</sup>で、誤差磁場（二極成分）とその補正方法については<sup>[5]</sup>で議論されている。

本研究では、これまでの先行研究では議論されてこなかった、PMM 内の電場の影響や電流導入端子から発生する磁場の影響についても考慮し、PMM の設計を行った。

我々の設計目標は、蓄積ビームの振動振幅をビームサイズの 10%未満に抑えることである。

Table 1: Parameters of Storage Ring

Electron energy	1.2 GeV
Circumference	72 m
Beam current	>300 mA
Natural emittance	52 nm-rad
Betatron tune	(4.72, 3.18)
RF frequency	499.7 MHz
Harmonics number	120
$(\beta_{x1}, \beta_{y1})$ @superbend	(1.63, 3.99) m
$(\beta_{x2}, \beta_{y2})$ @straight section	(29.9, 3.72) m
$(\sigma_{x1}, \sigma_{y1})$ @superbend	(0.328, 0.0909) mm
$(\sigma_{x2}, \sigma_{y2})$ @ straight section	(1.60, 0.0849) mm

<sup>#</sup> ito.keiya@j.mbox.nagoya-u.ac.jp

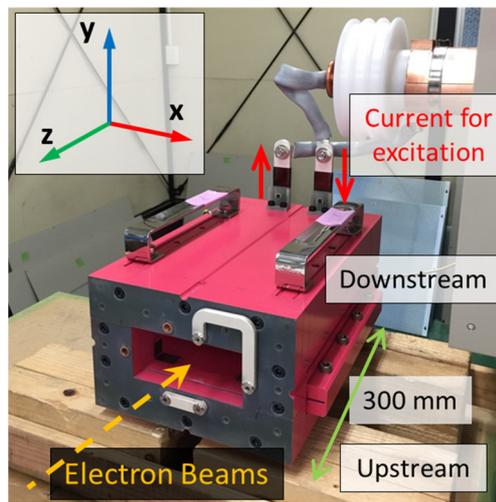


Figure 1: The PMM for Aichi SR. (A part of upstream current leads are removed.)

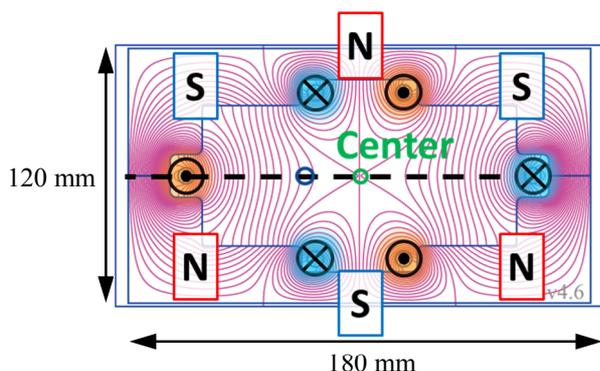


Figure 2: The cross section of the PMM for Aichi SR.

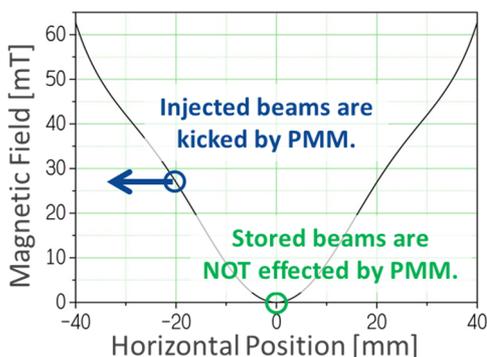


Figure 3: Magnetic field distribution in the horizontal plane.

## 2. パルス多極電磁石

Figure 1 に PMM の外観を示している。PMM はヨーク（積層ケイ素鋼板、図中では青色）と 1 回巻きコイル（銅、図中では橙色）から構成される。また、ヨーク内部にはセラミックダクトが挿入され、その内面は Ti コーティング ( $<1 \mu\text{m}$ ) が施されている。電極は便宜上、3 つに分割して考えることとし、(A) ヨークの内側にある部分を「電極」、(B) Figure 1 でヨークの左側に位置する部分を「上流側電流導入端子」、(C) Figure 1 でヨークの右側に位置する部分を「下流側電流導入端子」と呼ぶこととする。ここでの「上流」や「下流」とは、電子ビームの周回方向に対する上流・下流である。

PMM を励磁する為のパルス電流はコイル内を図中の赤矢印の方向に流れる。また、励磁電流には、パルス幅が 960 ns の正弦半波の使用を予定している。Figure 2 は PMM 断面と発生する磁力線（電磁場解析コード Poisson 使用）を示しており、この磁場はヨーク内部の 6 本の電極内を電流が互い違いの向きで流れることによって発生する。図中の緑色の円はヨーク中心を通過する蓄積ビームを、青色の円は中心から 20 mm 離れたところを通過する入射ビームを示している。

Figure 3 は励磁電流 1.5 kA 通電時における、ヨーク内の磁束密度成分  $B_y$ （計算値）の水平方向分布（Figure 2 中の破線部）を示しており、緑色と青色の円は Figure 2 と対応している。Figure 3 に示した磁

場分布からわかるように、PMM の電極から発生する磁場によって磁石中心を通る蓄積ビームは蹴られることないが、入射ビームは約  $7.3 \text{ mT}\cdot\text{m}$  の磁場積分によって約 1.8 mrad のキックを受ける。なお、あいち SR での入射に必要なキック量は 1mrad 程度である。

## 3. 電磁場の最適化

### 3.1 磁場誤差

実際の PMM 内部では主に製作誤差の影響により、Figure 3 のようにヨークの中心で磁場がちょうどゼロにはならない。この磁場誤差は PMM 内部に磁性体を挿入することによって補正できることが先行研究から分かっている<sup>[5]</sup>。

### 3.2 PMM 内部の電場

先行研究ではこれまで取り上げられた例は無いが、PMM 内部では電場の発生も予想される。この電場は、インダクタンスを持ったコイルをパルス電流が流れる際の電位差によって生じる。

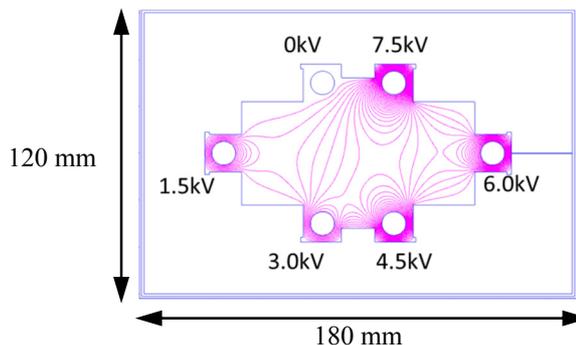


Figure 4: Potential and isoelectric lines in PMM for Aichi SR.

Figure 4 は、電源において PMM を駆動した際に PMM 断面で発生する等電位曲線（電磁場解析コード Poisson<sup>[6]</sup>使用）を示している。電源による電極入口での駆動電圧を 7.5 kV とした際に発生する電場積分はヨーク中心において、水平方向成分 ( $E_x \cdot L$ )  $-5.87 \text{ kV}$ 、垂直方向成分 ( $E_y \cdot L$ )  $0.033 \text{ kV}$  と計算された。蓄積ビームはこの電場により、水平方向に  $4.9 \mu\text{rad}$ （蓄積リング外向き）、垂直方向に  $-0.028 \mu\text{rad}$ （鉛直下向き）に蹴られることになる。

ここで、我々はセラミックスダクト内面の Ti コーティング（膜厚およそ  $1 \mu\text{m}$ ）の影響を無視している。実際はこのコーティングによって電場が遮蔽され、電子ビームは電場の影響を受けないことも予想される。つまり、我々は最悪の場合を想定した計算を行った。

### 3.3 電流導入端子から発生する磁場

本研究で設計した PMM 電磁石では電流導入端子を流れるパルス電流からも磁場が発生する。我々は 3 次元シミュレーションの代わりに、2 次元シミュレーションと解析的計算を組み合わせることで、この電流導入端子から生じる磁場を見積もった。

計算では、ワンターンコイルで構成される電流導入端子を直線のパーツとして細分化し、それら各部に対してビオ・サバルの法則を適用した。式 (1) は水平方向 (x 軸方向) に伸びた部分から発生する磁場成分を、式 (2) は垂直部分 (y 軸方向) から発生する磁場成分を示している。表記していない磁場成分はゼロである。以上の二式において、z は電流導入端子の存在する面からの座標を表す。X,Y は、式 (1) においては水平方向に伸びる直線パーツの左端の座標、式 (2) においては垂直方向に伸びる直線パーツの下端の座標を表す。また、I は電流値を表しており、電流の正方向は、式 (1) においては水平方向右向き、式 (2) においては垂直方向上向きとしている。

$$B_x = 0$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{z}{Y^2 + z^2} \left\{ \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2 + z^2}} - \frac{X+L}{\sqrt{(X+L)^2 + Y^2 + z^2}} \right\} \quad (1)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{Y}{Y^2 + z^2} \left\{ \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2 + z^2}} - \frac{X+L}{\sqrt{(X+L)^2 + Y^2 + z^2}} \right\}$$

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{z}{X^2 + z^2} \left\{ \frac{Y+L}{\sqrt{X^2 + (Y+L)^2 + z^2}} - \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2 + z^2}} \right\}$$

$$B_y = 0$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{X}{X^2 + z^2} \left\{ \frac{Y+L}{\sqrt{X^2 + (Y+L)^2 + z^2}} - \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2 + z^2}} \right\} \quad (2)$$

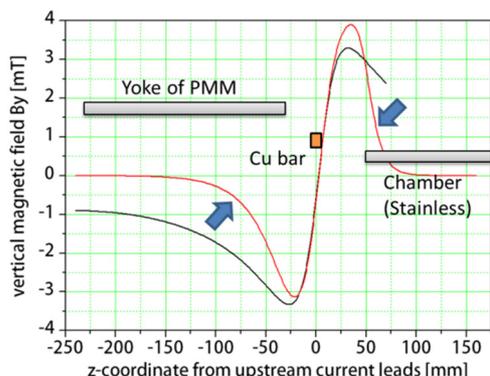


Figure 5: Shift of longitudinal magnetic field distribution on beam axis by eddy current (around current leads).

実際にはパルス磁場を扱うため、渦電流が発生し、その磁場を打ち消そうと逆向きの磁場が発生する。渦電流が発生する箇所として、主に積層ケイ素鋼板

製のヨークとそれに近接するステンレス製のチャンバーが挙げられる。そこでそれらの干渉を考慮に入れるために、磁場がヨークに対しては x,y 方向には侵入するが、z 方向には渦電流の影響で侵入できないと仮定し、ステンレス製チャンバーには一切の磁場が侵入しないと仮定した (Figure 5)。Figure 5 では、電流導入端子のうち、或る 1 つの直線パーツから発生する磁場の分布が、ヨークやステンレス製チャンバーの影響でどのようにシフトするかを示している。黒色の曲線は自由空間中に置ける磁束密度分布を示し、赤色の曲線はシフト後の磁束密度分布を示す。z 座標は電流導入端子を持つ平面を z=0 としている。この仮定を用いて計算した 2 次元のシミュレーション<sup>[6]</sup>の結果を、前述の 3 次元の解析的計算に適用することで、磁場を求めた。

### 3.4 電流導入端子配置の最適化

電場はヨーク内部の電極によって発生するものが支配的であるため、電流導入端子の配置形状には依存しない。電場による蓄積ビームのキック方向は常にリング中心を向いている (水平成分)。その一方で、磁場による蓄積ビームのキックの向きや量は、電流導入端子の配置形状を変更することによって調節することができる。そこで我々は、この磁場によってリング外向きに蓄積ビームを蹴り、電場と磁場の影響が正味でなるべく小さくなるよう、電流導入端子の配置形状を設計した。Figure 6 は工夫を施す前の最も単純な電流導入端子の配置形状を示し、Figure 7 は工夫を施して設計し、実際に製作した電流導入端子の配置形状を示している。赤線は電流導入端子の輪郭、黒線は前述の通り、計算を簡便にするために簡略化した電流導入端子の配置形状を表す。Figure 6 の配置形状に対して工夫を施すことで、以下の 2 つの効果を得られることが解析的計算の結果から分かった。

- (1) 上流側電流導入端子では、上側の水平直線パーツを上へ遠ざけるほど、蓄積ビームをリング外向きに強く蹴るようになる。
- (2) 下流側電流導入端子では、下側の水平直線パーツを下へ遠ざけていくと、蓄積ビームをリング中心方向から外向きに蹴るようになる。

Figure 7 で示す配置形状は、周りの部材との干渉や放電の問題について考慮し、それらの制限の下で最適化して設計したものである。

Table 2 には、最も簡単な形状と今回設計した配置形状における、それぞれの蓄積ビームへの電磁場の影響を示している。表中の  $\Delta\theta_{x,M}$  および  $\Delta\theta_{x,E}$  はそれぞれ、電流導入端子から生じる磁場とヨーク内部の電場による水平方向への蹴り角を表している。また、 $COD_x$  は蓄積ビームの水平方向の閉軌道歪み (Closed Orbit Distortion) を表している。蓄積リングの長直線部における水平方向ビームサイズ  $\sigma_{x2}$  は、Table 1 を参照のこと。

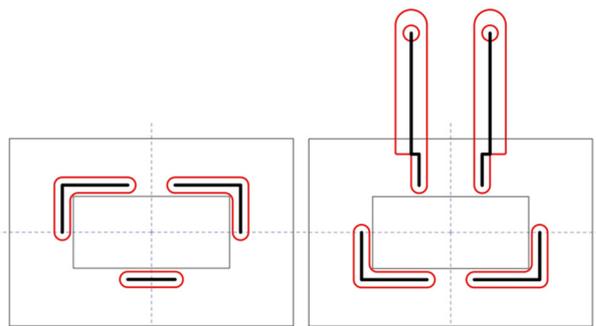


Figure 6: The simplest configurations of current leads ; upstream (left) and downstream (right).

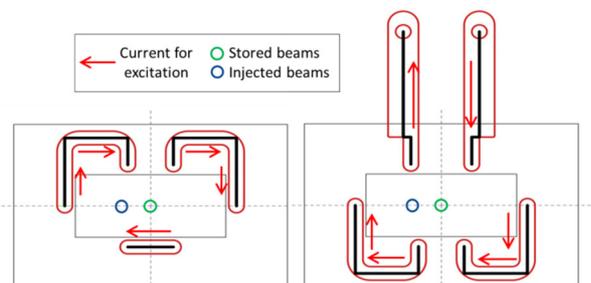


Figure 7: Design strategy for the current leads; Upstream (left) and downstream (right). We placed the upper bars at the upstream side and the lower bars at the downstream side as far from the center as possible.

Table 2: Comparison of the Effects by Different Configurations of Current Leads

Configuration	Simplest	Optimized
$B_y \cdot L [\mu T \cdot m]$	-2.67	7.77
$\Delta\theta_{x,M} [\mu rad]$	0.7	-1.9
$\Delta\theta_{x,M} + \Delta\theta_{x,E} [\mu rad]$	4.9+0.7=5.6	4.9-1.9=3.0
COD <sub>x</sub> [μm]	84	45
COD <sub>x</sub> /σ <sub>x2</sub> [%]	5.3	2.8

## 4. 磁場測定

### 4.1 実験方法

製作した PMM の性能の確認のため、我々は磁場測定実験を行った。パルス磁場の電子ビーム進行方向 (z 軸方向) に渡る積分を確認するためにロングコイル、局所的な磁場を確認するためにショートコイルを設計・製作し、さらに、局所的な静磁場を確認するためにホールプローブを用意した。測定ベンチの様子は Figure 7 に示す通りである

### 4.2 測定データの解析・今後の予定

現在、我々は測定・解析を進めている。今後、詳細な磁場測定により、PMM 性能を評価するとともに電流導入端子のある PMM 端部の影響についても明らかにする予定である。

PMM の健全性が確認された後、2015 年 10 月には蓄積リング内へ挿入・試験運転を行う予定である。

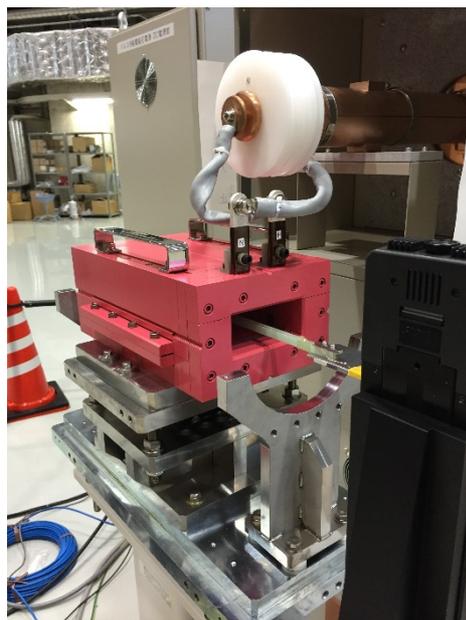


Figure 8: Magnetic field measurement for PMM. Pulsed magnetic field is measured by long coil inserted into the yoke of PMM.

## 謝辞

あいち SR 所長の竹田美和様には、このプロジェクトにおいて多大なるご支援を頂きました。ここに深く感謝致します。また、高見清様や多くのシンクロトン関係者の皆様には様々なご助言を頂きまして、プロジェクトの進捗をすることができております。皆様に深く感謝致します。

本研究の一部は、高エネルギー加速器研究機構大学等連携支援事業による支援を受けて行いました。

## 参考文献

- [1] N. Yamamoto, *et. al.*, *AIP*, **1234**, pp. 591-594 (2010).
- [2] N. Yamamoto, *et. al.*, *Proc. of IPAC 2014*, WEP0011 (2014).
- [3] K. Harada, *et. al.*, *Phys. Rev. STAB* **10** (12) (2007) 123501.
- [4] H. Takaki, *et. al.*, *Phys. Rev. STAB* **13** (2010) 020705.
- [5] N. Yamamoto, *et. al.*, *NIM. A*, **767** (2014) 26-33.
- [6] Poisson/Superfish, Los Alamos National Laboratory Report No. LA-UR-96-1834.