

STUDY OF PULSED SEXTUPOLE MAGNET SYSTEM FOR BEAM INJECTION AT UVSOR

Yohei Hida ^{#,A,B)}, Heishun Zen ^{D)}, Naoto Yamamoto ^{C)}, Masahiro Adachi ^{B)}

Kenji Hayashi ^{B)}, Jun-ichiro Yamazaki ^{B)}, Sei-ichi Tanaka ^{B)}

Masahito Hosaka ^{C)}, Yoshifumi Takashima ^{A,C)}, Masahiro Katoh ^{B)},

^{A)} Graduate School of Engineering Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603

^{B)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

38, Nishigounaka, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

^{C)} Nagoya University Synchrotron Radiation Research Center

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603

^{D)} Institute of Advance Energy, Kyoto University

Gokasho Uji Kyoto 611-0011

Abstract

In order to introduce Pulsed Sextupole Magnet (PSM) injection at UVSOR, we performed simulation of the injection beam, and design of PSM. This PSM was designed to excite a stronger magnetic field by making a gap small. And the simulation was performed using designed PSM. As a result, it revealed that beam injection was sufficiently possible using this PSM at UVSOR, but injected beam must feel magnetic field for several turns by the PSM because of short revolution period of the storage ring.

We have measured a magnetic field of this PSM which was completed in this Spring and evaluated the performance of it. A magnetic field remains in a center in PSM because of manufacturing error. So it is necessary that the magnetic field of center is rectified. We considered the method of rectifying the magnetic field of center using a thin ferrite, and confirmed effect of this method.

UVSOR におけるパルス六極電磁石を用いた入射システムの研究

1. はじめに

シンクロトロン光施設におけるストレージリングへのビーム入射には、従来は複数台のダイポールキッカー電磁石により生成したバンブ軌道を利用した方法が採用されてきた。しかしながら、この方法は励磁タイミングの誤差や6極電磁石のような非線形磁場がバンブ内に存在する影響から完全に閉じたバンブ軌道を作ることが難しい。また、特に小規模施設においては蓄積リング全長に占めるバンブ軌道の割合が非常に大きく、トップアップ運転ではバンブ軌道上のシンクロトロン光が入射の瞬間に失われるという問題が深刻である。

こうした問題を解決するために、我々はパルス6極電磁石(PSM)を用いた入射を研究し、愛知県岡崎市にある UVSOR(周長53.2 m)に導入することを検討した。この PSM をストレージリング上に設置し入射時に励磁することで、磁場中心から外れた位置にいる入射ビームには運動量(Courant-Snyder 不変量)を縮小する方向にキックが生じ、一方で磁場中心にいる蓄積ビームにはキックを与えないことで、入射を可能にする^[2]。この入射方法に必要な電磁石は1台のみであり、機材を設置するための物理的空間の小さな小規模リングにおいてはこちらの点でもダイポールキッカーによるバンブ入射より優れている。

しかしながら、PSM には、製作誤差等により中心にダイポール磁場が残ってしまうという問題点があるため、中心磁場補正案を考える必要がある。

2. UVSOR におけるパルス6極電磁石(PSM)の導入

2.1 UVSOR 用 PSM の設計

まず、ダイポールキッカー電磁石で用いられている、フェライト板(TDK PE12C)を流用する設計を行い、Poisson で磁場計算を行った。

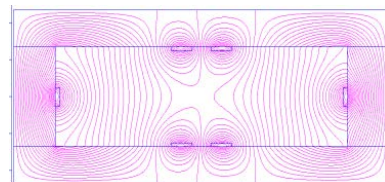


図1：既存のフェライトを流用した PSM

図1の PSM では、励磁電流値(2200 A)における、入射ビームキック位置(x = 40 mm)での磁場は515.8 G と求められた。この値を基準に、より高い磁場強度が得られるよう設計の最適化を行った。最適化においては次の点に留意した。

(1) 磁束密度を考慮し、ヨークを積層鋼板に変更。

hida.yoei@g.mbox.nagoya-u.ac.jp

- (2) 垂直方向の開口を限り小さくする。
 - (3) 電極を磁性体に埋め込む。
 - (4) 放電を考慮し電極を円柱とする。
- これらの最適化を行った PSM を図 2 に示す。

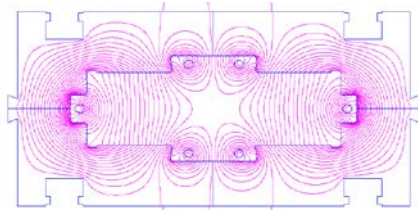


図 2：最適化を行った PSM

図 2 の PSM では、励磁電流値(2200 A)における、入射ビームキック位置($x = 40 \text{ mm}$)での磁場は615 G となり、最適化する前に比べ20 %ほど磁場強度を上げることができた。

2.3 中心磁場補正案

図2に示すパルス6極電磁石は電極位置などで十分な製作精度が得られないと、中心にダイポール磁場が残ってしまう。中心磁場をゼロにするためには、磁場補正が必要となる。現在、検討している補正案は、電磁石に薄い磁性体を取り付ける方法である。この磁性体も、渦電流の流れにくい材料を用いる必要がある。ヨークにも使用した積層鋼板には、渦電流の流れない方向と流れる方向が存在する。この磁性体を積層鋼板で製作するには、幅1 mm の薄板を積層することになってしまう。したがって今回は、フェライトの使用を検討している。使用するフェライトの詳細データは3章に載せる。

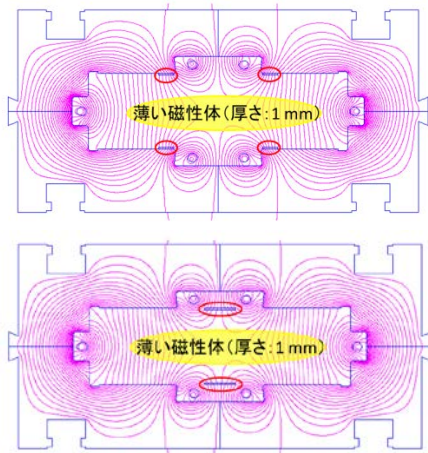


図 3：磁場補正の方法。上図は+方向に、下図は-方向に中心磁場を補正できる。

図 3 に磁場補正案を図示する。このようにフェライトの設置位置を変えることで+方向、-方向両磁性の磁場補正が可能となると考えられる。実際に Poisson により各条件において計算した結果、厚さ1 mm のフェライトを用いると、製作誤差による、中心の±5 [Gauss]のダイポール磁場を補正できること

が分かった

5.4 入射シミュレーション

UVSOR のような小型リングでは PSM を挿入する位置は限定されている。そこで今回はダイポールキッカーを設置している個所を含む、長直線部の上流下流計8か所へ、設計した PSM を設置しシミュレーションを行った。図 3 に UVSOR のリングにおいて、設置可能な8か所とその位置での位相平面分布図を載せる。

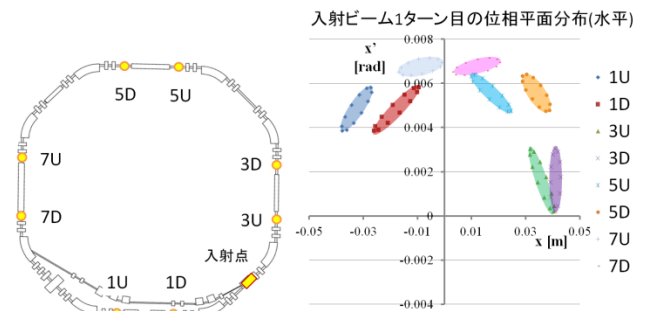


図 4：UVSOR における、PSM 設置可能な位置と、その位置での位相平面分布図。

8か所でシミュレーションを行ったの結果、入射点からおよそ5 m の地点(図4の3U)に設置する場合は、最も入射効率が良いことが分かった。図5にセプタム位置でのトラッキングの結果を載せる。入射条件は下記の通りである。

入射位置 $x_i = -40.0 \text{ [mm]}$, 角度 $x'_i = 0.8 \text{ [mrad]}$
 入射ビーム Twiss パラメタ $\alpha_{inj,x} = 0, \beta_{inj,x} = 1.5 \text{ [m]}$
 入射エミッタンス $\epsilon_{inj,x} = 680 \text{ [nm rad]}$
 ピーク電流値 2200 A

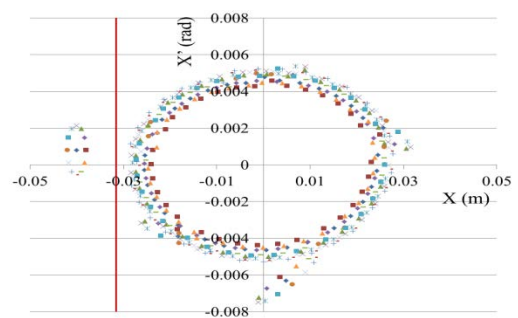


図 5：セプタム位置におけるトラッキング結果

シミュレーションでは、35周まで計算しており、セプタム板に当たることなく入射できていることが分かる。また、入射ビームのエミッタンスは 2σ の範囲で計算しているため、入射効率は95 %以上である。なお、この計算には、リングの6極成分も含まれている。

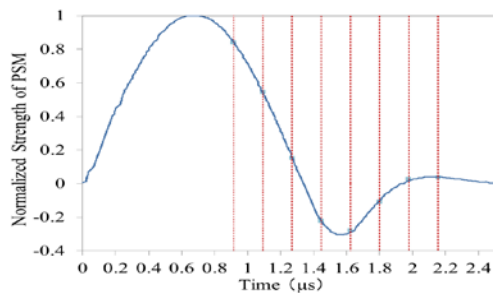


図 6 : 入射計算に使用した電源パルス(実測値)

UVSOR においては図 6 のようなパルス幅 1.3 マイクロ秒の電源を導入した。電源パルスは実測値を使用し、シミュレーションを行った。アンダーシュートを含めると入射ビームは 8 回のキックを受けることとなる。

3. パルス六極電磁石の製作及び磁場測定

3.1 電磁石の製作

前節の設計に基づいて、PSM の製作を行った。基本パラメータを表 1 に示す。

PSM の磁極長は設置スペースを考慮し 240 mm とした。より強い磁場を出すために、磁極の Vertical gap を 45 mm と小さくした。磁極は渦電流対策のため、珪素鋼板を金型で打ち抜き、積層し製作した。コイルは 1 ターンで直径 5 mm の銅の円柱を用いた。導体とヨークの間はエポキシ樹脂により固定されている。インダクタンスは 1.56 μH と計算された。

表 1 PSM のパラメータ

Core length [mm]	240
Vertical gap [mm]	45
Horizontal gap [mm]	136
Calculated inductance [μH]	1.56
Peak current [A]	2200
Pulse width [μsec]	1.3

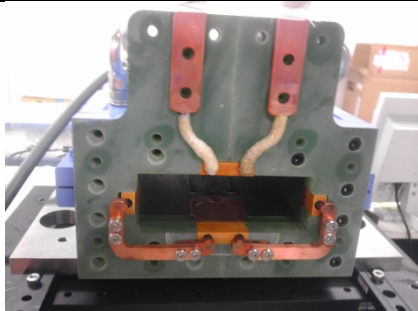


図 7 : PSM の断面図

3.2 磁場測定

製作した電磁石において、磁場測定を行った。今回は、パルス電流ではなく一定電流(30 A)を流し Poisson と比較した。測定風景を図 8 に載せる。

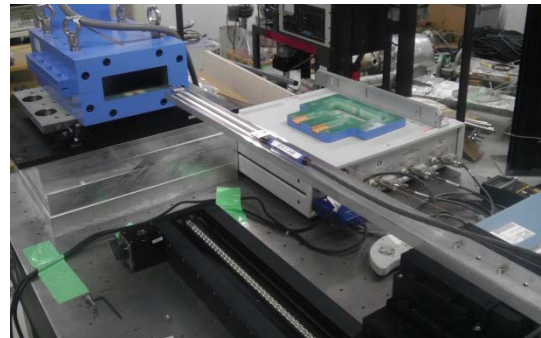


図 8 : パルス六極電磁石の磁場測定風景

測定に用いたホールプローブ(Lake Shore 社 : MMZ-2512-UH)は 300 mm のアルミ板で固定し、さらに 800 mm のチャンネルで xyz ステージに固定している。ステージは、z 軸(ビーム進行方向)をパルスモーターでリモート制御し、x, y 軸は手動で測定を行った。z 軸ステージの移動精度は 0.8 μpulse となっている。測定座標は、z 軸はパルス六極電磁石の中心をゼロ点とし、x, y 方向は垂直方向磁場の絶対値が最小に近い位置をゼロ点とした。

3.3 測定結果

3.3.1 水平方向の磁場分布

磁極の中心($z = 0$)、垂直方向の中心($y = 0$)の位置で、水平方向(x 軸)の磁場分布と 2次元磁場計ソフト Poisson を使用して計算した結果を図 9 に示す。水平方向は、2 mm 間隔で測定を行った。(中心付近は 1 mm 間隔)

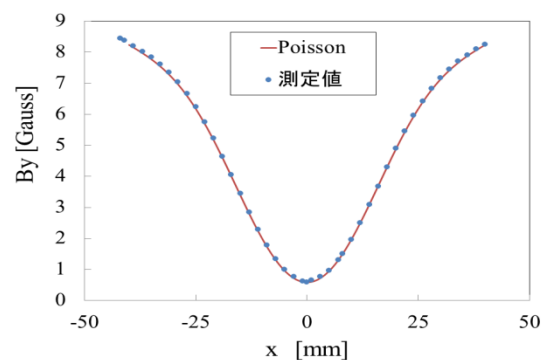


図 9 : 水平方向の磁場分布と 2次元シミュレーションの比較(電流値 : 30 A)

製作設計時の打合せにおける手違いにより設計した電磁石と完成した電磁石の中心電極間距離が違っており、ピーク電流値(2200 A)で励磁した場合、中心に 40 G ほどの磁場が残ってしまうという結果になってしまった。しかし、完成した電磁石の磁場分布は、製作寸法を元に計算した値とよく一致していることが分かる。

3.3.2 ビーム軸方向の磁場分布

ビーム軸方向(z 軸)の磁場分布を図 10 に示す。

z 軸方向には、8 mm ステップで測定を行った。z = 0 の位置はパルス六極電磁石の中心を表しており、z = ±120 mm の位置が、六極電磁石の出入り口となっている。磁場の強さが半分に落ちる位置は z = ±140 mm の位置であり、有効磁極長は280 mm である

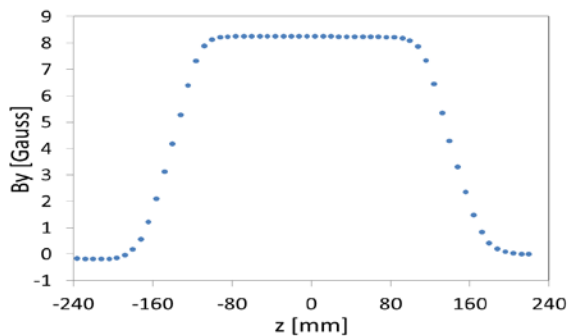


図 1 0 : ビームキック位置(x = 40 mm)での磁場分布

3.3.3 中心磁場補正

パルス六極電磁石を用いた入射には、中心にダイポール磁場が残ってしまうという問題点がある。この問題を解決するために考案した、薄型フェライトを用いた磁場補正についても磁場測定を行った。

図 1 1 に薄型フェライトを取り付けた電磁石の写真を載せる。

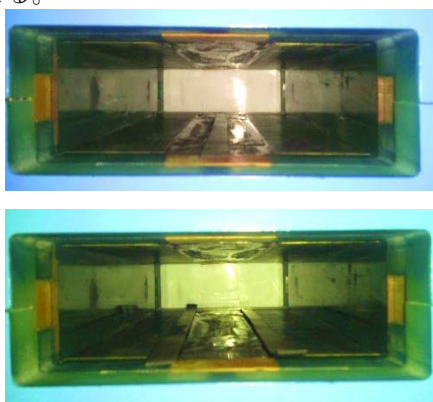


図 1 1 : 薄型フェライトを取り付けた電磁石。

本実験には、厚さ：1 mm，幅：10 mm のフェライトを使用した。上図が+方向、下図が-方向に補正するものである。

今回使用した薄型フェライトは、北川工業株式会社製の EMI 吸収シート(品番：MAB)である。この製品の B-H 特性を測定したグラフを図 1 3 に載せる。この測定には VSM 磁化測定装置(Vibrating - Sample Magnetometer)を用いた。この結果から、飽和磁束密度は3380 G ほどであり、Poisson の計算結果から、ピーク電流(2200 A)を流しても飽和することはないと考えている。

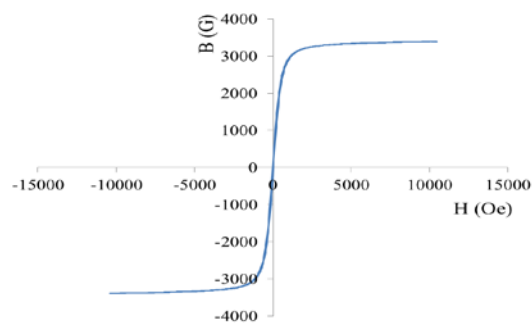


図 1 2 : VSM で測定した B-H 特性のグラフ

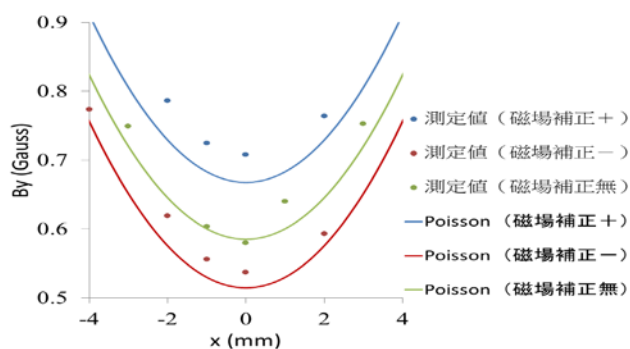


図 1 3 : 磁場補正の有無による測定値の違い

このフェライトを用いて補正した磁場分布の測定結果を図 1 3 に示す。+方向では中心磁場は0.58 G から0.71 G へと、-方向では中心磁場は0.58 G から0.54 G へと補正された。ピーク電流値ではそれぞれ 9.38 G，-3.14 G の補正をしたことになる。測定値が計算値よりも大きくなってしまっているが、これは設置誤差等の影響ではないかと考えている。

今回の測定には厚さが1 mm のものを使用したが、この製品には0.4，2.0，4.0 mm のものがあり、幅広い磁場補正を行うことができる。

4. 中心磁場対策

3.2.3 中心磁場補正で六極電磁石の中心磁場の調整について述べたが、今回製作した電磁石の中心磁場は、想定より大きくなってしまったため、この補正案のみで対応することは難しい。そこで、中心磁場対策として考えたのが図 1 5 である。

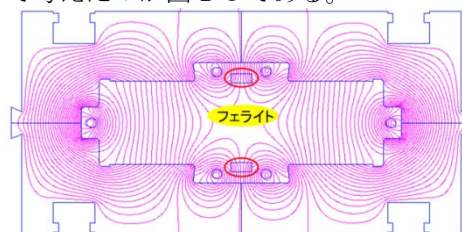


図 1 5 : 中心磁場対策

この方法は、電極を固定しているエポキシ樹脂を削り取り、その部分に厚さ5 mm のフェライトを埋

め込むものである。この方法を用いると磁場分布は図16のようになり、中心磁場をほぼゼロに抑えることができる。

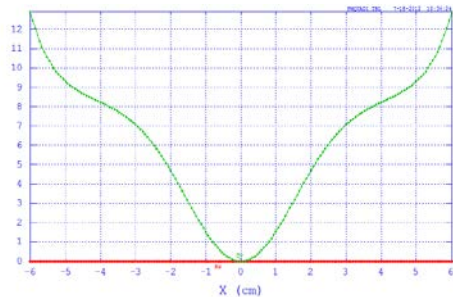


図16：中心磁場を補正した後の磁場分布

フェライトは薄型のものを重ね合わせることで、厚さを変化できるようにし、中心磁場を調整しようと考えている。

5. まとめ

我々は UVSOR におけるパルス六極電磁石を用いた入射システムの研究を行った。

電磁石の設計ではより強い磁場の出る形状を模索し、従来のフェライトを用いたものよりも、20%ほど大きな磁場が得られた。シミュレーションによりこの電磁石を用いると、ピーク電流値が2200 A、パルス幅が1.3 μsec の電源で入射が可能なことを明らかにした。

製作した電磁石は、中心電極間距離が設計値と異なっており、想定よりも高い中心磁場が残ってしまっているが、おおむね計算通りの磁場が出ていることを確認した。

パルス6極電磁石は2次関数的な蹴り力を与えるため蓄積ビームサイズへの影響が小さいが、ゼロ磁場点を作るために高い工作精度や磁場補正案が要求される。今回、考案した磁場補正案を実際に導入し、実測したところ、予定通りの効果が得られた。

今後は、パルス電流で磁場測定を行い、一定電流を流した場合の磁場分布と比較し、さらに性能を評価していきたい。また、中心磁場対策の有効性も確認し、9月末の入射実験に備えたいと考えている。

6. 謝辞

今回の磁場測定に当たって、磁場補正用の薄型フェライトを提供してくださった、北川工業株式会社様に感謝いたします。またそのフェライトの B-H 特性の測定に協力してくださった、名古屋大学工学研究科結晶材料工学専攻浅野研究室の皆様にも感謝いたします。そして、ホールプローブとガウスメーター、リニアステージを貸していただいた、京都大学エネルギー理工学研究所の皆様にも感謝いたします。パルス六極磁石の詳細設計・製作は(株)トヤマ、(株)IDX によるものです。

参考文献

- [1] Hiroyuki Takagi et al., 電子蓄積リングにおけるパルス6極電磁石を用いた入射システムの開発研究
<http://jairo.nii.ac.jp/0201/00001654/en>
- [2] Yoshiaki Gotoh et al., Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan)
- [3] http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml