

## Design of Bending magnet for HiSOR-II

Y. Morimoto<sup>1-(A)</sup>, H. Tsutsui<sup>2-(B)</sup>, A. Miyamoto<sup>3-(C)</sup>, T. Hori<sup>3-(C)</sup>

<sup>1</sup>Department of Physical Science Hiroshima University

<sup>3</sup>Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

<sup>2</sup>Sumitomo Heavy Industrial, Ltd

<sup>(A)</sup>1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8526, Japan

<sup>(B)</sup>2-1-1 Tanido, Nishitokyo, Tokyo, 188-8585, Japan

<sup>(C)</sup>2-313 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-0046, Japan

### Abstract

HiSOR-II is a succession machine of HiSOR. The ideal features of HiSOR-II are compact and low-emittance. The designed characteristics of this machine are to emit high brightness SR around several 10eV from the insertion devices, which are undulators in straight sections. In this research, I referred to MAX-III that is the ring of the same energy as HiSOR for designing the HiSOR-II system. However, the shape of bending magnets is referred to MAX-II. The magnets of an octagonal type ring are designed with Poisson that is a two-dimensional electromagnetic field calculation code.

It is inevitable for the Poisson to ignore thickness of bending magnets. Therefore, the infinite thickness is assumed. Thus, three-dimensional calculation is necessary to optimize the pole shape. In this research I used Radia as a 3D code.

## HiSOR-IIの偏向電磁石設計に関する研究

### 1. はじめに

現行のアクティビティ「軟X線を用いた物質科学（固体物理）の分野において、世界トップレベルの高分解能光電子分光を用いた研究拠点としての地位を維持する」ためにさらなる高い性能を持つ放射光リング「HiSOR-II」の建設が発案された。

このHiSOR-IIは現在稼働中であるHiSORの後継器であり、ビームエネルギー400~700MeV、HiSORと同じくHiSOR-IIがセンターの敷地内にリングが収まるような大きさにしなければならないという要求を満たすため、小型である必要性は現在と変わらない。そのため周長50mとし、低エミッタンス化を目指し目標エミッタンスを50nm-rad以下とした。直線部の挿入光源を主な放射光源とする数~数10eV領域の強い光を出すことが特徴である。

#### 1. 2. 本研究の意義

HiSOR-IIに使われる予定の偏向電磁石は四極成分と磁極の端部に六極成分をもち、これらの強さは磁極面の形状により決定されるものなので変えることができない。これを解決するために2次元空間でトリムコイルを配置した。本研究は四極と六極成分について、トリムコイルを配置することで磁場成分がどの程度変化できるのかを調べる。又、四極、六極成分の可変範囲及び精度について研究し、又、3次元で電磁石を考え2次元と比較することで8角形タイプのHiSOR-IIを検討する場合の参考にすることが

意義である。以下にHiSOR-IIの要求仕様と8角形リングの概要、及びパラメータを示す。

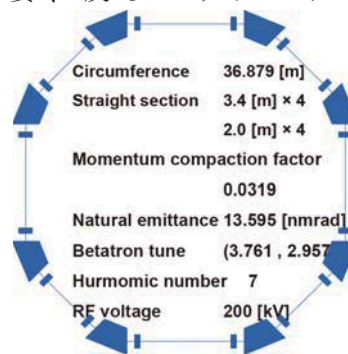


図 1 8角形リング概要図とパラメータ

ビームエネルギー	700 [MeV]
周長	~50 [m]
エミッタンス	<50 [nm-rad]
磁場	1.4 [T]

### 2. シム挿入前後の磁場の変化

シムとは磁極の両端で磁束が減少していくのを抑え、磁場の有効範囲について磁極幅を固定した条件のもとで出来るだけ広く取るために取り付ける。シムは2次元空間では幅(x方向)と厚み(y方向)を持っており垂直方向にわずかなずれを生むが、一般に、幅の増減がx方向の磁束に、厚みの増減がy方向の磁

束の増減に対応している。今回の磁極幅では右側のシムと左側のシムの大きさが互いに及ぼす磁場の影響はなく独立に考えることができた。

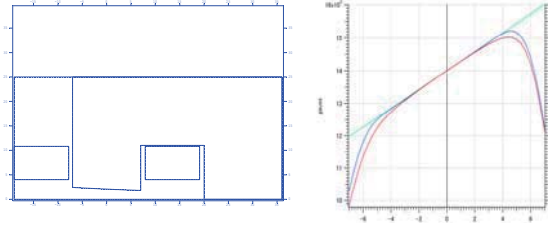


図 2 電磁石全体図 x-By比較

上図で赤線がシム取り付け前、黒線が取り付け後となっている。これにより有効範囲がシム取り付け前より広がっているのが確認できる。

### 3. トリムコイルによる四極及び六極磁場成分の変化

トリムコイルは補助コイルとも呼ばれる。HiSOR-II で使われる予定の偏向電磁石は端部に六極成分をもち、これは形状によって決められるものなので変えることはできない。そこでこの四極及び六極成分を変化させるためにトリムコイルの配置を工夫しなければならない。今回トリムコイルの配置について何種類か検討し配置を決めた。まず四極と六極磁場を発生させる必要がある。このとき六極磁場を発生させるには最低でも3組のコイルが必要になる。つまり磁束の向きを中央と左右で逆にしなければならない。

今回、偏向電磁石の磁極幅は14cmであるので、トリムコイルを入れる数も横一列に入れる場合ある程度制限される。そこでまず、磁極面の幅、トリムコイルの幅と厚み及び間隔等を考慮し横一列に3組配置した。

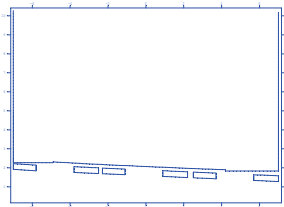
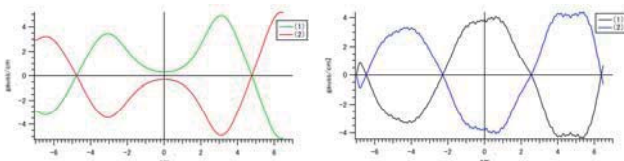


図 3 (a)トリムコイル配置図



(b)  $x - \partial B_y / \partial x$  (c)  $x - \partial^2 B_y / \partial x^2$

四極成分についての図を見てみると、平坦部が全

く足りないことがわかる。一方、平坦部が狭いものの、六極成分を発生できているように見える。このため、改良する必要があり、この結果より3組のコイルでは難しいことがわかったのでトリムコイルを4組に増やした。

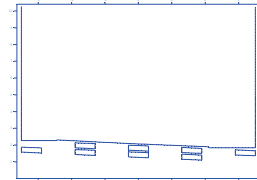
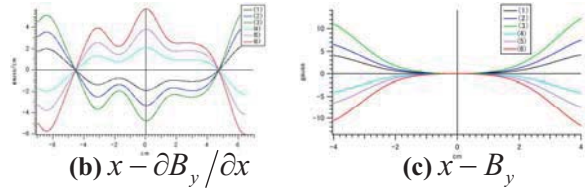


図 4 (a)トリムコイル配置図



図中の各線の色はトリムコイルに流す電流値別である。(b)の図から四極における平坦部はトリムコイル3組の時より改善されている。しかし(c)図において十極成分が出ているため放物線の形をとっていない。

#### 3. 2. 四極、六極成分の磁場精度

$\partial B_y / \partial x$  と  $\partial^2 B_y / \partial x^2$  を-3cmから3cmの間で、それぞれのトリムコイルに流す電流という条件下での磁束密度  $B_y$  をフィッティングによって求めた。そのときの精度  $\Delta B_y / B_y$  を以下に示す。図中の各線の色はトリムコイルに流す電流値別である。

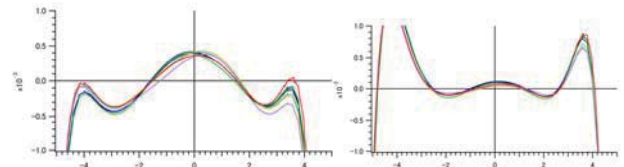
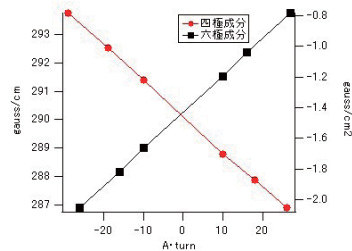


図 5 (a) 四極  $\Delta B_y / B_y$  (b) 六極  $\Delta B_y / B_y$



(c) 四極、六極成分の電流変化

$\frac{\Delta B_y}{B} \sim 1.0 \times 10^{-3}$  程度の範囲を持つときおよそ

$287 \leq \frac{\partial B_y}{\partial x} \leq 294$  の可変範囲を得る。設計に関し

ては3組配置した場合、平坦部分がほとんどなく難しい状況である。しかし、4組配置した時には平坦部分はある程度改善されているといえる。これはトリムコイルを4組配置したことにより局所的な磁束の増加が解消されたためと思われる。

六極成分については  $-2.1 \leq \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} \leq -0.8$  の可変範囲

となる。3組配置したときグラフは放物線に近いことが分かる。これに対し4組の場合、変形しており放物線とは言い難い。これは十極成分が出てきたためである。

#### 4. 3次元計算コードRadiaを用いた設計

Radiaは3次元の磁場計算をすることができるように作られた最初のコードである。これはアンジュレータやウィグラーの設計に最適化されている。Radiaに使用されている数値解析法は有限要素法(Finite element method)ではなく境界要素法(Boundary element method)である。これは計算領域の境界を要素分割し近似解を求める方法であり電磁場解析に有効である。このRadiaを用いて設計した電磁石が以下のものである。

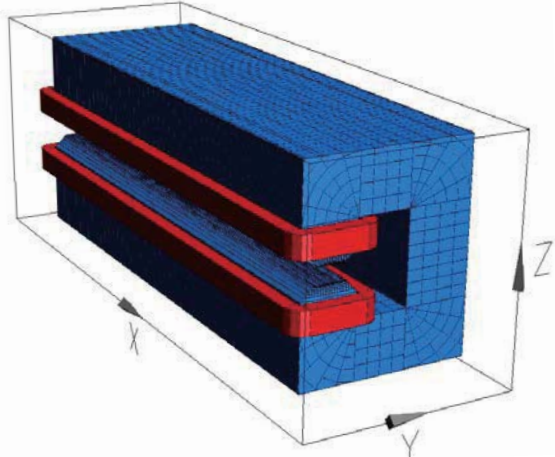
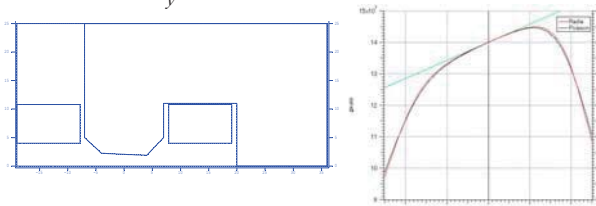


図 6 (a)3次元空間での偏向電磁石

次にシム挿入前のPoissonで考え、磁石の形をRadiaと同じになるようテーパーを入れた。以下にPoissonとRadiaでの  $B_y$  比較グラフを示す。



(b) 2次元偏向電磁石

(c) x-By比較

Radiaで設計した偏向電磁石のx-ByグラフはPoissonと比べるとほぼ重なっており完成度は高いといえる。有効範囲に関しては、テーパーを両端に入れた分狭くなっているがシムを挿入することである程度補うことが可能である。各磁場成分については二極磁場成分が1.4[T]、四極成分が2.91[T/m]となり有効長はそれぞれ1.35473(m)、1.30232(m)となる。

#### 5. まとめ

まず2次元の電磁場計算コードPoissonを用いて偏向電磁石を考え、これに発生する四極、六極成分及び可変範囲について研究を行った。これにより空冷による電流制限がある中で非現実的でない量の電流を流したときの四極、六極成分の可変範囲が求まった。又、今回のトリムコイルの配置ではそれぞれ一長一短であることから四極と六極成分を同時に満たす偏向電磁石の設計は難しいと思われる。しかしコイルのバランスをとることで十極成分と四極成分を調整でき、六極成分をうまく発生させることができると思われるため改良の余地はある。

3次元のRadiaではPoissonの結果に準じているので値は信頼できるものと思われる。今後の予定としてビーム進行方向に偏向電磁石を曲げるよう設計し、六極成分を考慮するためビーム軸に対して磁極の両端を曲げなければならない。シムを挿入し有効範囲を拡げ、トリムコイルもしくはストリップラインを取り付け四極、六極成分について検討する。

この研究はKEKの加速器科学総合支援事業における大学等連携支援事業の援助に基づいて行われています。

#### 参考文献

- [1] James H.Billen 「Poisson Superfish」
- [2] Å. Andersson et al, 「Design Report for the MAX-II Ring」
- [3] R.E.Pywell et al, 「RADIA Simulation of the CLS Storage Ring Quadrupole」
- [4] Igor Abrikosov et al, 「MAX IV Conceptual Design Report」