

## イオン蓄積リング S-LSR の偏向電磁石磁場測定

池上将弘<sup>A)</sup>、Hicham Fadil<sup>A)</sup>、渋谷 真二<sup>B)</sup>、竹内 猛<sup>B)</sup>、野田 章<sup>A)</sup>、  
野田 耕司<sup>B)</sup>、小川 博嗣<sup>B)</sup>、白井 敏之<sup>A)</sup>、頓宮 拓<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> 京都大学化学研究所附属原子核科学研究施設 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

<sup>B)</sup> 放射線医学総合研究所 〒263-8555 千葉県稲毛区穴川 4-9-1

### 概要

イオン蓄積リング S-LSR 用の偏向電磁石は全台数の製作が完了し、磁場測定による性能評価の段階にある。磁場測定はホール素子によるマッピングで行い、三次元磁場計算コード TOSCA による計算結果と実際の磁場分布に大きな相違がないか調べる。また、各電磁石の磁場分布の個体差を評価しリング上での最適な配置を決定する。S-LSR の新たな試みの一つとして、偏向磁石のギャップ内のビーム設計軌道に沿って円筒形電極を設置し、磁場と電場の重畳によって運動量分散関数の制御を行うということがある[1]。これを実現するためには磁場と電場の有効長を正確に揃える必要がある。S-LSR リング上では偏向磁石と四重極磁石の磁極端の間隔が 200mm になっており、偏向磁石のギャップ 70mm、四重極磁石のボア半径 70mm と比較して非常に近い位置に設置されることになる。偏向磁石側にはフィールドクランプが取り付けられているが、四重極磁石の磁場の影響で偏向磁場の有効長が計算値からずれる可能性がある。これも磁場測定によって評価する。

## 1 偏向電磁石の設計

### 1.1 設計の目標

S-LSR の偏向電磁石は中心軌道から水平方向に  $\pm 100\text{m}$  の範囲で磁場の平坦度を  $\pm 1 \times 10^{-4}$  以内に収めることを目標に設計された。

	仕様
鉄芯形状	H 型
台数	6
最大磁場	0.95T
曲率半径	1050mm
ギャップ幅	70mm
偏向角	60°
エッジ角	0°
磁極端部カット	ロゴスキーカット
鉄芯材質	電磁軟鉄
主コイル	鞍型と鉢巻型の組み合わせ
最大コイル電流	27000A・ターン
質量	4.5t

表 1. 偏向電磁石の仕様

また、ギャップ内には電極が設置され運動量分散関数の制御を行う。電極には駆動機構が組み込まれ、S-LSR は大きな水平方向のアーチャーを持った通常の磁場のみを用いた蓄積リングとしても、電磁場により運動量分散関数を調整可能なリングとしても利用できるようになっている。S-LSR の仕様は表 1 の様になっている。図 1 のようにリング上では偏向磁石と四重極磁石の間隔は 200mm と狭い。互いの fringing field の影響を軽減するため、フィールドクランプ用鉄板が設置されている。

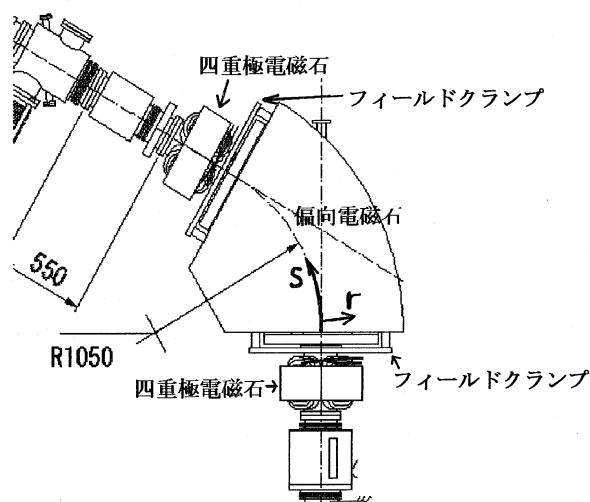


図 1. リング上での偏向磁石と四重極磁石の配置。ビーム進行方向の座標を  $s$ 、曲率半径方向の座標を  $r$  とする。

### 1.2 二次元磁場計算

$r$  方向の磁場分布の傾きを補正するためにコイルの上ヨークの厚みは内側と外側で変えてある。また、できるだけ狭い磁極幅で  $\pm 100\text{m}$  の磁場の有効領域を得るため図 2 のように磁極端部にシムを設けた。

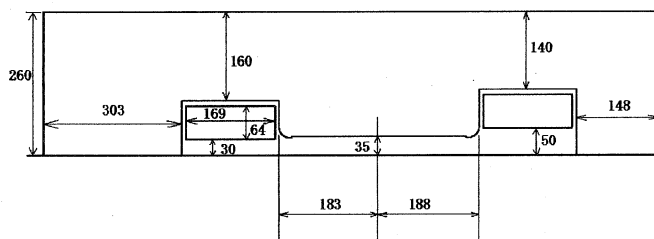


図 2  $r$  方向磁極断面形状

さらに、励磁電流が上がったときに鉄の飽和によって磁場分布が変わることがないように磁極の角は丸くカットされている。同様に、励磁電流によってs方向の有効磁極長が変化しないようにビームの出入口側の磁極端部にロゴスキークットを入れ、さらにその外側のフィールドクランプの存在も考慮に入れs方向の2次元磁場計算を行った。(図3)

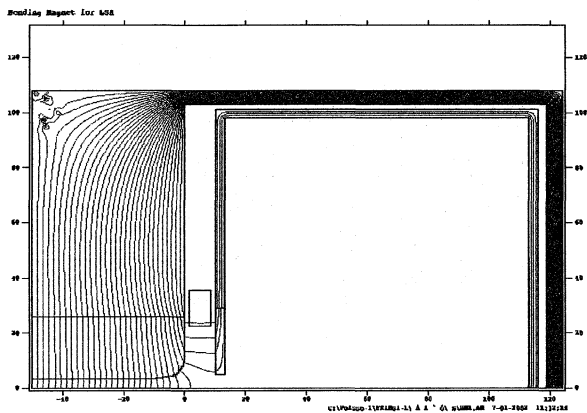


図3. POISSONによるs方向の2次元磁場計算。リターンヨークを再現するため鉄芯、フィールドクランプ上部には透磁率が無限大の物質を付けてある。

### 1.3 三次元磁場計算

三次元計算はシミュレーションコードTOSCAを用いて行った。三次元磁場計算の目的の一つは二次元磁場計算との比較を行うことによって双方の計算結果が正しいことを確かめることである。ギャップの奥の磁極中心付近のr方向の磁場分布の三次元計算結果と二次元磁場計算結果を比較したものを図4に示す

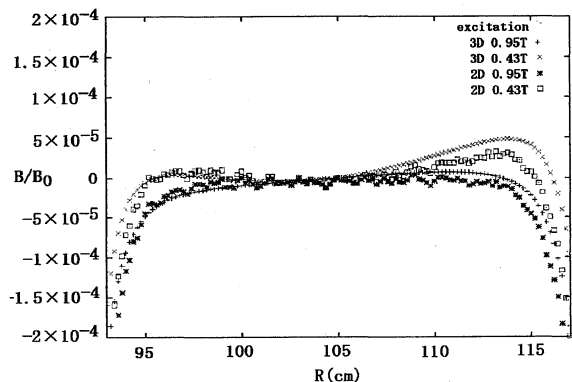


図4. 二次元磁場計算結果と三次元磁場計算結果の比較。両者はよく一致していることが分かる。

図3に示した二次元磁場計算は中心軌道付近の有効磁極長の評価に対応する。中心軌道から離れた所での有効磁極長を二次元計算で評価することは難しい。有効磁極長と実際の磁極長の差の1/2を $\Delta L(r)$ と置き、三次元計算でこれを評価した。磁極中心付近のr方向の磁場分布は図

4に示すように、中心軌道から $\pm 100\text{mm}$ の範囲でほとんど一様である。しかし、ビームの出入口付近のロゴスキークットのある部分では次第にギャップ広がっていく上に、図5に示すようにロゴスキークットの部分にはシムがないので、ビームの出入口付近でのr方向の磁場分布は中心軌道から離れるにつれて磁場が弱くなり、いわゆる6極磁場成分を多く含む磁場分布になる。このビーム出入口付近の6極磁場成分がBL積にも現れ、BL積はビーム軌道中心から離れるにつれて小さくなり、 $\Delta L(r)$ もrによって変化する。 $\Delta L$ がrに依らず一定の値をとるようにするためにロゴスキークットの最後の二段に図5に示すようなカットを入れた。

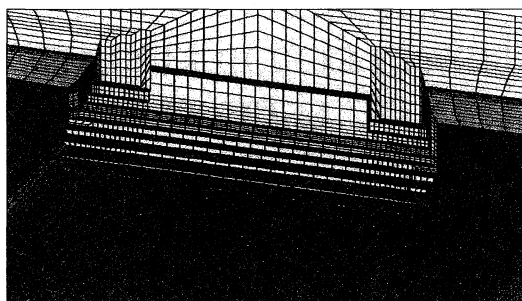


図5. ビーム出入口側磁極端部のカット形状

このカットによりビーム中心軌道付近の実際の磁極長が短くなる。そのためビームの軌道中心に近いところではBL積が小さくなり $\Delta L(r)$ は一定になるように補正される。(図6)

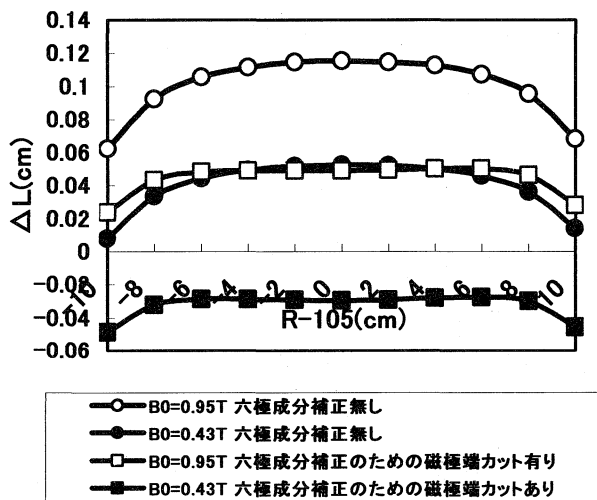


図6.  $\Delta L$ のr方向分布

運動量分散関数を制御する際には磁場と電場を同時に使用するが、その際に電場と磁場の有効長がそろっていることが望ましい。電場の場合は電極にかかる電圧を変えても有効長が変化することはない。磁場の場合も一般に磁極端部にロゴスキークットがあれば有効磁極長が励磁によって変化することはない。しかし、今回設計した磁石にはフィールドクランプが設けられており、フィールドクランプも有効磁極長に大きな影響を与える[2][3]。フィールド

クランプの大きさが十分でなければ、励磁電流が大きい時にはフィールドクランプの鉄が飽和し、フリンジの磁場の様子が変わり有効磁極長も変わってしまう。図7はフィールドクランプの大きさ、形状を最適化する前と後での $\Delta L(r)$ の励磁による変化の様子を表している。フィールドクランプを最適化すると $\Delta L$ は励磁によって変化することがほとんどなくなった。

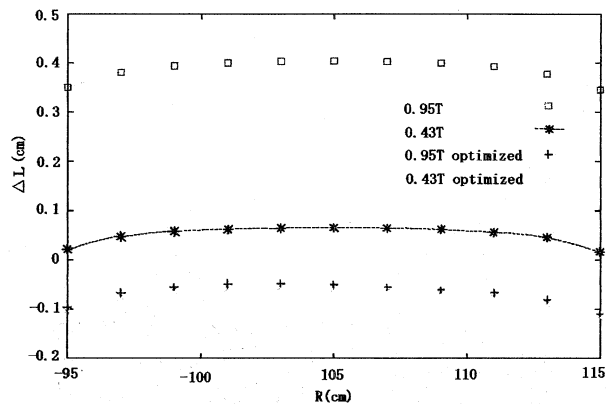


図7.  $\Delta L(r)$ の励磁による変化。フィールドクランプの形状、大きさを最適化すると $\Delta L$ は励磁電流に依らなくなった。

## 2 磁場測定

### 2.1 磁場測定の目的

実際に製作した電磁石(図8)が作る磁場と三次元磁場計算による磁場の設計値に大きなずれがないかどうか確かめるために磁場測定を行う。また測定結果から各電磁石の個体差を評価しリング上での六台の最適な配置を考える。残留磁場による影響も調べ実際に使用する際の励磁の順序を決める。フィールドクランプは偏向電磁石単体では励磁が最高するときでも飽和しないように設計されている。しかし、すぐ近くにある四重極磁石の磁場の影響は磁場計算の際に考慮されていない。

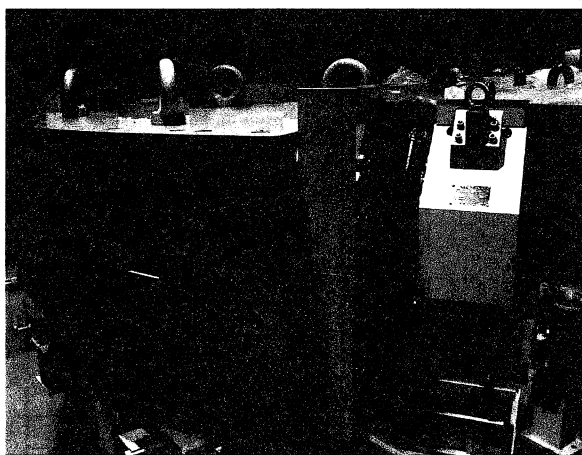


図8. 製作した偏向電磁石と四重極磁石の実際の位置関係。フィールドクランプのすぐ横に四重極磁石が設置される。

四重極磁石が励磁されていると中心軌道から離れた所

では偏向電磁石と同じ鉛直方向の磁場成分が多く現れる。そのためフィールドクランプの左右のいずれかの部分の鉄が飽和する可能性がある。すると、図6、図7に示したような $\Delta L$ の分布の内側と外側の対称性が崩れる可能性がある。またフィールドクランプの鉄が飽和すると有効磁極長も計算値からずれ、電場の有効長と一致しなくなる可能性がある。電極は現在設計段階にあるためできるだけ早く四重極磁石が偏向電磁石の有効磁極長に与える影響を調べ設計に反映させる必要がある。

### 2.2 磁場測定計画

磁場測定はホール素子によるマッピングで行う。測定範囲は図9に示す範囲で、①は四重極磁石の磁場の影響を調べるとき、②は偏向電磁石単体の磁場の様子を探る際の測定範囲である。②の場合は四重極磁石は置かない。座標系は直交座標である。

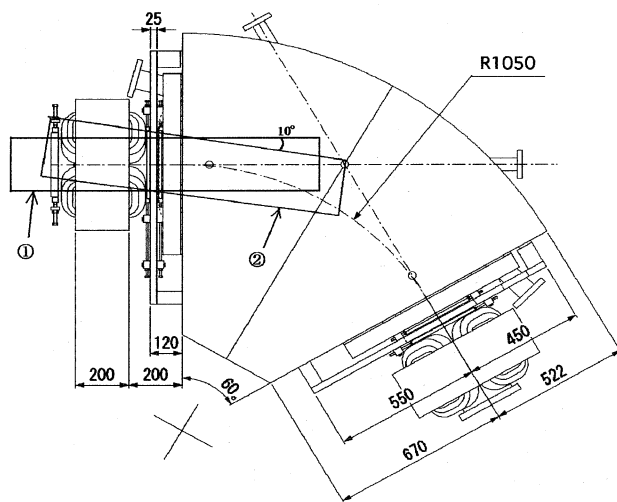


図9. 磁場測定範囲。フィールドクランプが存在するために磁極の中心まで磁場を測定する場合には磁石10°傾けて置く必要がある

測定する磁場成分は鉛直成分と測定範囲①、②の水平方向成分である。測定は直交座標上で行うため水平方向成分はビームに対する磁場の影響の評価には使えないが、磁場の中央面を出すときに利用する。水平方向成分が最も小さい平面を中央面とする。中央面から上下にずれた平面上でも磁場を測定し磁場の鉛直方向の対称性も確認する予定である。

### 参考文献

- [1] M. Ikegami et al, Phys. Rev. ST-AB, 投稿予定
- [2] T.Hori et al INS-NUMA-24 (1980)
- [3] M.Ikegami et al, BEAM SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol.8, February 2003, 5