

小型イオン貯蔵リング S-LSR のための 4 極電磁石製作と磁場測定

竹内 猛^{A)}、渋谷真二^{A)}、野田耕司^{A)}、池上将弘^{B)}、Fadil Hicham^{B)}、頓宮 拓^{B)}、
白井敏之^{B)}、岩下芳久^{B)}、野田 章^{B)}、

^{A)} 放射線医学総合研究所 〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

^{B)} 京都大学化学研究所原子核科学研究施設 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

概要

京大化研で建設予定されているイオン蓄積・冷却リング S-LSR に用いられる 4 極電磁石についてのデザイン設計と磁場測定が報告される。S-LSR のような小型リング用の 4 極電磁石は磁極長が比較的短く、大きい口径を持つことが特徴である。設計においては、3 次元計算により隣接する偏向磁石のフィールドクランプによる磁場の影響が考えられた。磁場測定については現状のところフィールドクランプによる影響のない場合がホール素子により測定が行われ、その ΔGL はモデル計算と良い一致を示している。

1 はじめに

京都大学化学研究所では、陽子 (7 MeV)、 $^{12}\text{C}^{6+}$ (2 MeV/u)、 $^{24}\text{Mg}^{+}$ (35 keV/u) の S-LSR イオン蓄積・冷却リング ($B_p = 1.05\text{Tm}$) が建設予定されている[1]。S-LSR は放射線治療用小型リング加速器の開発とレーザー冷却法によるビーム結晶化の実現との 2 つを主な目的とし放射線医学総合研究所と共同で研究が進められている。昨年度、6 台の偏向電磁石と 12 台の 4 極電磁石が製作され磁場測定が現在行われている。

本報告では S-LSR 4 極電磁石の要求スペックに対する製作デザインと磁場測定の現状を紹介する。

2 S-LSR 4 極電磁石の製作

2.1 S-LSR 加速器

図 1 に S-LSR リング加速器の全景を示す。S-LSR は周長 22 m、4 極磁石間ストレートセクション 1.85 m の 6 回対称リングで、ストレートセクションにはビーム入出射、ビームプロファイルモニター、電子冷却装置、レーザー冷却、RF キャビティと誘導加速器が設置される。リングの特徴の 1 つは小型リングとして設計されていることであ

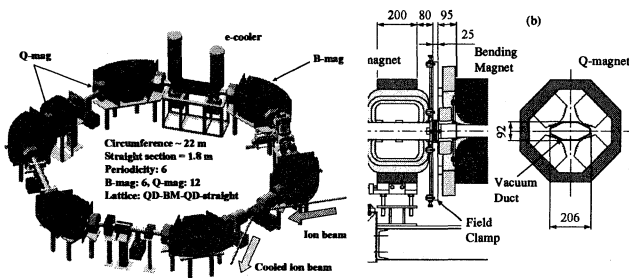


図 1 S-LSR 加速器の全景

図 2 アーク部配置

る。このためとくにアーク部コンポーネントは配置スペースに厳しい制限が与えられる (図 2) [2]。4 極電磁石の Requirements は、ラティスパラメータとスペースの制限から決定され表 1 にまとめられる[3]。

表 1: S-LSR 4 極電磁石の Requirements

最大磁場勾配	5 T/m
ボア半径	70 mm
磁極長	200 mm
ヨークサイズ (水平、垂直)	510 mm
ビームが存在する位置範囲	
$ Horizontal \leq 100\text{mm}$,	1~2 %
$ Vertical \leq 10\text{mm}$	
の磁場勾配積分の誤差	

2.2 S-LSR 4 極電磁石のデザイン (2 次元計算)

基本的なデザインと 2 次元ポール形状は 2 次元静磁場計算コード Poisson を用い設計された。4 極磁場の等ポテンシャルである双曲線の占める有限な範囲とヨークサイズやコイルスペースという幾何学的条件から最適化され、ポール幅を 149 mm と決定した。

次に x の大きい範囲まで磁場勾配誤差を小さく抑えるためにポール端にシム部を設ける。大抵の 4 極ポール設計では双曲線を直線で連結しシムをつくる、双曲線-接線の連結点の X [cm] 座標をパラメータとして磁場勾配誤差の x (horizontal) 方向分布を図 3 に示す。連結点 $X = 10.10, 10.15$ cm において磁場勾配の誤差を小さく抑えられているがその後発散が起これり水平方向 $x = 10$ cm の範囲までに磁場勾配誤差を抑えることは難しい。さらに $y \neq 0$ の場合、磁場勾配誤差は悪化する ($y = 0.5$ mm の場合、最大で 3.8 %)。

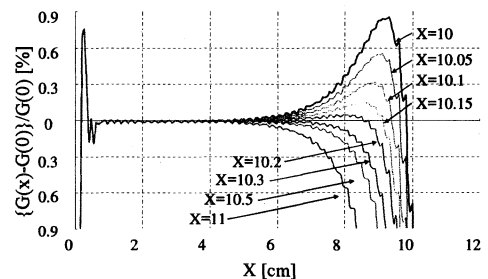


図 3 双曲線-接線モデルでの $y=0$ 磁場勾配誤差の x 方向分布。各曲線の X 値は接続点を表す。

そこで我々は、双曲線-円弧の接続を検討した。この場合、双曲線-接線接続では1パラメータであった最適化が円中心位置、半径等の複数のパラメータを用いることになる。円の半径を25 mm、中心(10.85, -0.29) [cm]において最適な結果が得られた。図4では $y=0 \sim 2$ cmでのそれぞれの結果が表される。 $y=0$ での磁場勾配の誤差は $x=10$ cmの範囲までで $\pm 0.3\%$ に収められ $y \neq 0$ に対しても $y=0.5$ mmで $3.8\% \rightarrow 1\%$ に軽減される。この時、ポール端での磁場は1.2 Tであった。

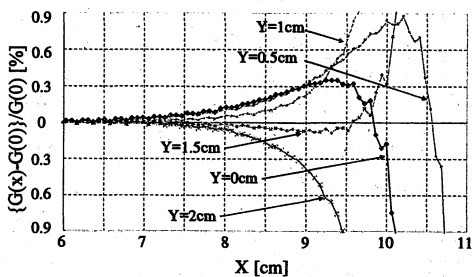


図4 双曲線-円弧モデルでの磁場勾配誤差の x 方向分布。各曲線は垂直方向 y が異なる面での磁場勾配誤差の x 方向分布を表す。

2.3 S-LSR 4 極電磁石のデザイン (3次元計算)

チャンファークット

フリンジング効果と隣接するダイポール電磁石のフィールドクランプの影響について3次元静電磁場計算コードTOSCAを用い計算した。磁石を通るビームが受ける影響 $G(x)L$ が位置に対して一定(許容誤差1~2%)になるようビーム軸方向のポール端を直線カット(図5: Δh と Δs)の最適化を図る。

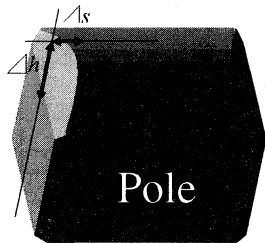


図5 ポール端のチャンファークット。

カット部 Δh と Δs にはボア半径に対するスケーリング則が存在する[4]。このスケーリングによればS-LSRの4重極電磁石ボア半径70 mmでは $\Delta h=4.06$ cm, $\Delta s=1.96$ cmと導出される。図6、7はそれぞれ Δh を固定し Δs を変えた場合と Δs を固定し Δh を変えた場合での結果である。 Δh 固定の図6では、 Δs が増加するにつれピークが大きくなりx方向へ移動していくことがわかる。 Δs 固定

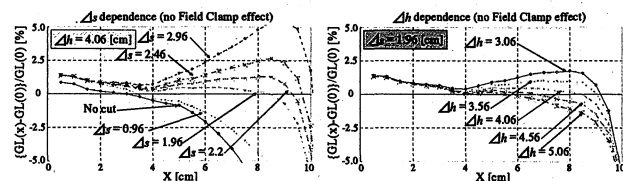


図6 Δs 依存: GL 値誤差の x 方向分布。

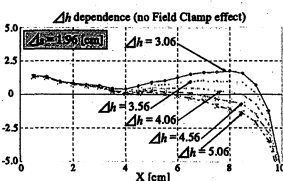


図7 Δh 依存: GL 値誤差の x 方向分布。

の図7では、 Δh が増加するにつれピークは低下の傾向を持つ。図6にはカット無しの場合の結果も含まれている、図6、7はどちらもフィールドクランプの影響は含まれていない、および磁石中心部 $x=2$ cm付近での誤差が比較的大きいのは、計算効率を考えて注目している $x=10$ cm付近の計算メッシュ数を多くとり中心部を少なくしたためである。

フィールドクランプの影響と最適化

前述された定性的な傾向を用い Δh と Δs の最適化を行った。図8は図7の条件にフィールドクランプの影響を含めた結果と最適化された $\Delta h=8.0$ cmと $\Delta s=3.0$ cmでの結果を表している。フィールドクランプはビームパイプが通るため中央に水平方向 ± 150 mm、垂直方向 ± 55 mmの開口穴(角型)を持つもので4重極電磁石ヨーク端から80 mmの地点に厚さ25 mmのものである(図2)。フィールドクランプによる影響はピークの全体的に大きくなるということがわかった。 $\Delta h=8.0$ cm, $\Delta s=3.0$ cmの条件では、 $x=9.5$ cmで1.5%である。またこの条件での $y \neq 0$ の場合は $\Delta h=4.06$ cm, $\Delta s=1.96$ cmの場合に比べ $x=10$ cm付近での磁場勾配誤差の補正が行われていることがわかった[5]。

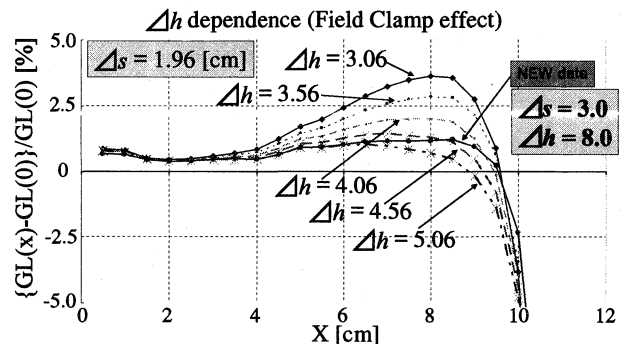


図8 フィールドクランプの影響を含めたGL値誤差の x 方向分布。

2.4 S-LSR 4 極電磁石の製作

以上の計算によるデザインに基づきS-LSR 4 極電磁石12台の製作が行われた。ホロコンのサイズ8.5mm \square 、4mm Φ 、ターン数は28、電流値は350 Aである。

3 S-LSR 4 極電磁石の磁場測定

3.1 ホールプローブによる測定

図9に測定装置等が示される。X-Yステージのアルミ棒先端に設置されたホール素子は sensitive aria: 1 mm \times 0.5 mmのGroup3(MPT-141-5s)が用いられた。X-Yステージは2台のステップモーターにより4極電磁石のビーム軸方向に ± 290 mm、水平面に ± 150 mmの2軸移動が可能となっている。ホールプローブ出力、温度とモーター制御、電磁石電源のモニター等はGP-IBに介しPCでモニター・コントロールされる。

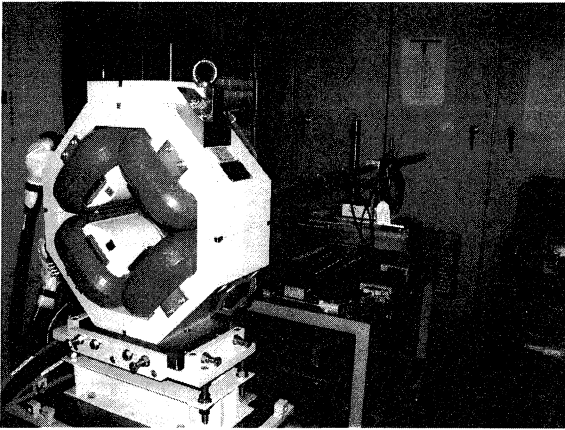


図9 4極電磁石のホール測定装置

励起カーブの測定を図10に示す。測定は磁石長中心 ($z=0$)で水平方向(x)に5cmの点で行われた。グラフからほとんど飽和による影響はないことがわかる。

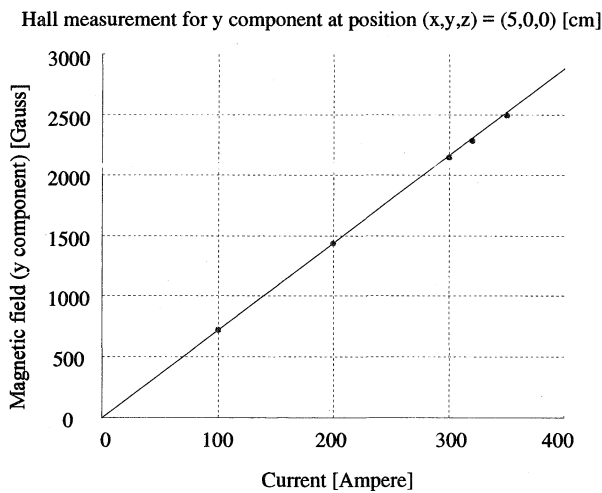


図10 励起カーブ

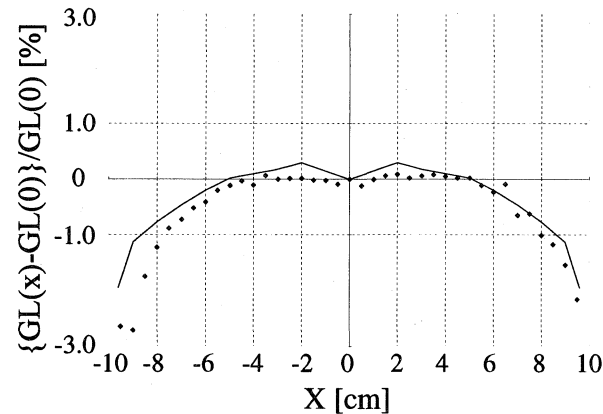


図11 フィールドクランプの影響なしでのGL値誤差のx方向分布。ポイントは測定値、直線は3次元計算結果。

ビーム軸方向 $-20 \leq z \leq 20$ [cm] についてのマッピングから得られたGL誤差を図11に示す。直線は同じ条件、つまりフィールドクランプ無しで $-20 \leq z \leq 20$ [cm] についての3次元計算結果である。

3.2 ロングサーチコイルによる測定

ビーム軸方向への漏れ磁場をカバーするロングサーチコイルを水平方向移動する際に生じる起電力により Δ GL測定システムを現在製作している。ロングサーチコイルはポール間隔に注意して長さ60cmで幅5mmのツインコイル(700ターン)を用いステッピングモーターにより水平方向に移動する。

4 まとめ

2次元、3次元計算によりS-LSR加速器に要求される4重極磁石のデザインを行った。隣接するコンポーネントであるフィールドクランプの磁場への影響は重要でありことがわかった。この影響を考慮して最適化を行い、磁極端部の直線カット $\Delta h = 8$ cm、 $\Delta s = 3$ cmを採用することで $x = \pm 10$ cm までのGLのx方向分布誤差を約1%以内におさめることが出来た。製作された4極電磁石をホールプローブにより測定した。またGLのx方向分布に対して、 Δh はxの大きい(10cm)付近で、 Δs はxの小さい(5cm)付近で影響があることがわかった。

製作された4極電磁石についてホールプローブによる測定が行われた。フィールドクランプの無い場合の測定のみ行われ、その結果は計算と良い一致を示している。

参考文献

- [1] A.Noda, et al., "Laser Equipped Cooler Storage Ring, LSR at ICR, Kyoto University", Proc. of the Workshop on Ion Beam Cooling - Toward the Crystalline Beam, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2002, p. 3.
- [2] 頓宮拓、他、"S-LSRの真空系", Proceedings of the 14th Symposium of Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Nov. 11-13, 2003.
- [3] T. Shirai, et al., "Compact Accelerator Development at S-LSR", Proceedings of the 14th Symposium of Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Nov. 11-13, 2003.
- [4] M. Kumada, et al., NIM, 211 (1983), p.283.
- [5] T. Takeuchi, et al., "Design study of quadrupole magnet for S-LSR", Beam Science and Technology, Kyoto Univ., 8 (2003), pp. 13-18.