

PF 直線部改造用の 4 極電磁石磁場測定

原田 健太郎、長橋 進也、小林 幸則

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

2003 年夏の PF リング直線部改造において、4-5 間、18-19 間に挿入した 4 極電磁石の磁場測定結果について発表を行う。新しい 4 極電磁石は従来のものに比べ、ボア半径が 35mm と 20mm 小さく、最大磁場勾配が 30T/m と 3 倍大きく、長さが 30cm と 20cm 短いコンパクトな設計になっている。今回の測定で設計通りの十分な性能（最大磁場勾配）が得られていることが分かった。また、多極成分を抑えるエンドシム厚の最適化と挿入光源の補正に用いる補正コイルの性能測定も行った。

1 序論

2003 年夏に PF 直線部増強計画の一環として偏向電磁石 4-5 番間及び 18-19 番間の改造が行われた。PF リング建設当初から用いられてきた 1981 年製の 4 極電磁石 2 台を磁石長が短くかつ高磁場勾配なものに取り替え、ラティスを再配置することで直線部の長さを 3.7m から 4.5m に伸ばした。B4-5 間には多極ウィグラーが設置されて 2003 年秋の運転からユーザーに供されている。図 1 に PF リングのラティスと、取り替えた 2 台の 4 極電磁石の位置を示す。

新旧の 4 極電磁石の比較を表 1 にまとめた。新しい 4 極電磁石は古いものに比べて、電流値で 1.7 倍、ボア半径は 20mm 小さくすることで、最大磁場勾配を約 3 倍の 30T/m まで高くし、長さを 20cm 短くした設計とした。今

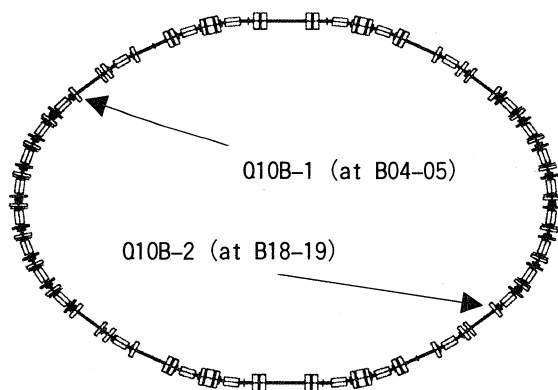


図 1 PF リングのラティスと新 4 極電磁石の位置

表 1 4 極電磁石の比較

	旧	新
コアの長さ [mm]	500	300
ボア半径 [mm]	55	35
最大磁場勾配 [T/m]	10	30
最大電流 [A]	450	780
コイル巻き数 [turns]	23	23
コイル抵抗 (75°C) [mΩ]	31.9	23
最大電圧 [V]	14.3	18

回の改造で挿入されるものは 2.5GeV 運転の場合で約 8.0T/m、3GeV の場合で 9.6T/m と最大磁場勾配付近では用いないものの、同じ設計で最大 28.4T/m となるものを将来の改造で設置する予定であり、その値がクリアできるかどうかを調べることも同時に必要であった。今回の測定では、励磁電源として、最大定格 800A のものを用い、最大電流値までの励磁曲線を測定した。また、4 極電磁石における高次の多極成分の中で最も大きい 12 極成分を抑えるために、エンドシムを取り付けることを想定していたが、最適にするために必要なエンドシムの厚さの決定も同時に行った。この新 4 極電磁石は、将来的に多極ウィグラーの補正に用いる目的で補正コイルを取り付けてあるので、どの程度の割合で磁場勾配を変化させることができるかも調べた。

2 磁場測定の方法

2.1 測定装置

ハーモニックコイルを用いた磁場測定システムの概略を図 3 に示す。ハーモニックコイルは積分磁場（実効磁

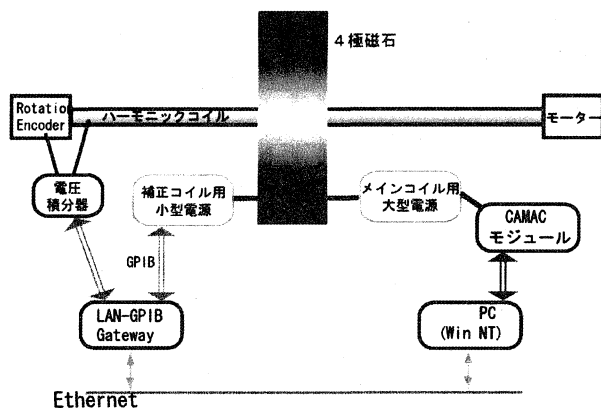


図 2 測定システムの概略

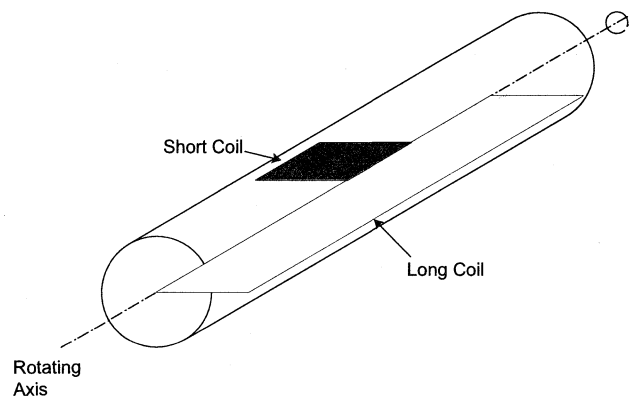


図 3 ハーモニックコイルの概略

場) 測定用の long coil と中心磁場測定用の short coil の両者を備えたものであり、同時に両方の測定が可能となっている。Long coil は長さ 1m、同径方向のオフセット $r_{in}=0.44\text{mm}$ 、外径 $r_{ex}=29.56\text{mm}$ 、巻き数 $N=10$ ターンであり、short coil は長さ 19.58mm、 $r_{in}=0.61\text{mm}$ 、 $r_{ex}=29.39\text{mm}$ 、 $N=50$ ターンである。回転エンコーダは 1 回転を 24000 点に分割し、電圧積分器はコイルに発生した電圧をエンコーダの 60 点ごとに積分する。測定器および電源はネットワークを通じて制御され、測定は全て遠隔で行われた。

2.2 測定原理

ハーモニックコイルの概略を図 2 に示す。ファラデーの法則により、コイルに発生する電圧はそのコイルを貫く磁束の時間微分に等しい。

$$V = -\frac{\partial}{\partial t} \phi = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B_\theta dr$$

ここで、 B_θ はコイルに垂直な方向 (すなわち角度方向) の磁場、積分はコイルで囲まれた面上の積分である。電磁石の磁場の角度方向成分は多極展開して

$$B_\theta = \sum_{n=1} nr^{n-1} (A_n \cos n\theta - B_n \sin \theta)$$

と書ける。ここで、 A_n は normal 磁場の n 極成分、 B_n は skew 磁場の n 極成分である。従って、ハーモニックコイルの内径 (オフセット) を r_{in} 、外径を r_{ex} とすると、コイルが水平から角度 θ の場所にある時にコイルを貫く磁束は以下のように書ける。

$$\phi = \sum_{n=1} L(r_{ex}^n - r_{in}^n) (A_n \cos n\theta - B_n \sin \theta)$$

ここで、 L はコイルの長さである。(長さ方向には磁場は一樣と仮定する。中心磁場に対してはこの仮定は正しく、実効磁場に対してはこれは定義となる。) 従って、コイルに発生する電圧は

$$V = \sum_{n=1} NLn (r_{ex}^n - r_{in}^n) (A_n \sin \theta + B_n \cos \theta) \dot{\theta}$$

となる。コイルの 1 回転を T 分割して電圧を積分するとすると、 $\Delta\theta = 2\pi/T$ として、角度 θ における電圧の出力値は

$$VS(\theta) \equiv \int_{\theta-\frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta+\frac{\Delta\theta}{2}} V(\theta) d\theta$$

$$= -2LN \sin n \frac{\Delta\theta}{2} \sum_{n=1} (r_{ex}^n - r_{in}^n) (A_n \sin \theta - B_n \cos \theta)$$

となる。従って、これをフーリエ展開すれば各極成分が得られ、

$$B_{skew}^{(n-1)} = \frac{n!}{2LN \sin n \frac{\Delta\theta}{2} (r_{ex}^n - r_{in}^n)} VS_{n,\cos}$$

$$B_{norm}^{(n-1)} = -\frac{n!}{2LN \sin n \frac{\Delta\theta}{2} (r_{ex}^n - r_{in}^n)} VS_{n,\sin}$$

となる。

3 磁場測定結果

3.1 エンドシムの枚数の決定

現実の 4 極電磁石では、ある有限の値で磁極形状が理想的な双曲線からずれるため、製作誤差がないとしても高

次の多極成分が発生することは避けられない。高次の成分は中心軸から離れた領域で大きくなり、磁場勾配が設計値からずれる原因となる。4 極よりも大きな次数の 4 回対称の多極成分は 12 極、20 極、28 極、36 極……と続くが、その中で最も大きい成分は最低次の 12 極成分である。この

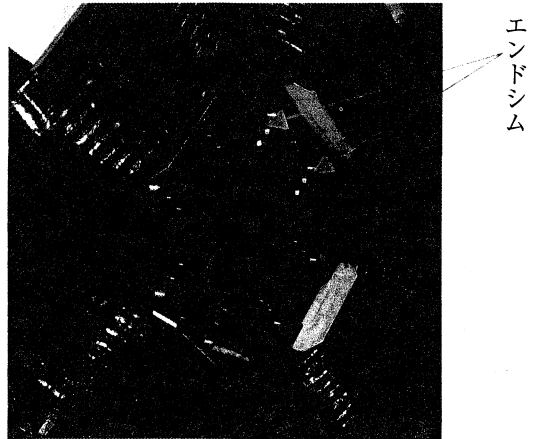


図 4 取り付けしたエンドシム

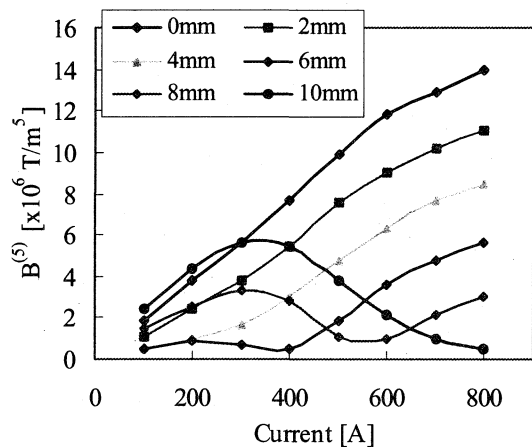


図 5 エンドシムの厚さと 12 極成分の強さ

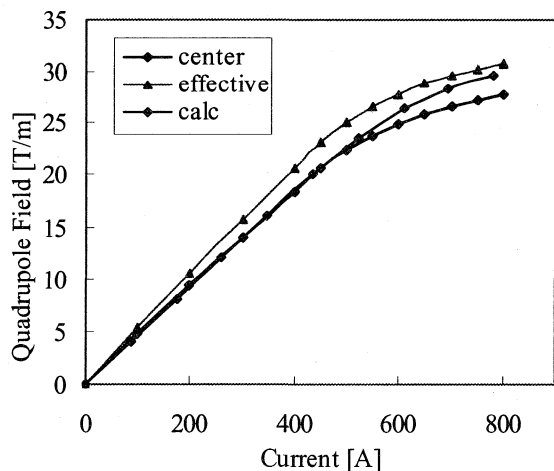


図 6 励磁曲線

12 極成分を小さく抑えて磁場勾配一定の領域 (Good Field Region) を広げるために、図 4 の様に磁極端にエンドシムと呼ばれる小さな板を取り付ける。エンドシムの最適厚さは励磁電流の大きさに依存することから、図 5 に示す様にシムの厚さ(シム 1 枚の厚さは 2mm)を変えて 6 通り(0mm ~ 10mm) の測定を行った。今回設置する 4 極電磁石は励磁電流 200A 以下で用いるので、シムの厚さとして 4mm が最適であることがわかった。

3.2 励磁曲線の測定

図 6 にシム厚 4mm における、励磁曲線の測定結果を示す。図において"calc"は 2 次元電磁場計算コード POISSON による計算結果を、"center"は short coil で測定した中心磁場を表す。"effective"は実効磁場であり、long coil で測定した磁場の積分値をコア長さ 30cm で割った値である。計算値に比べて測定の方が低い電流値(およそ 450mA)で磁場の飽和が始まっているが、計算は 2 次元であり、磁

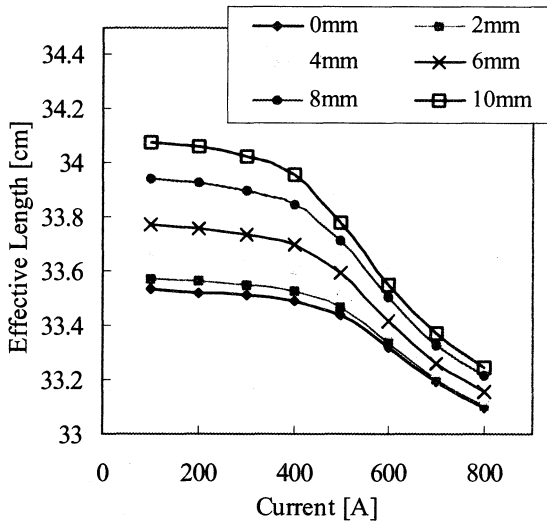


図 7 実効長

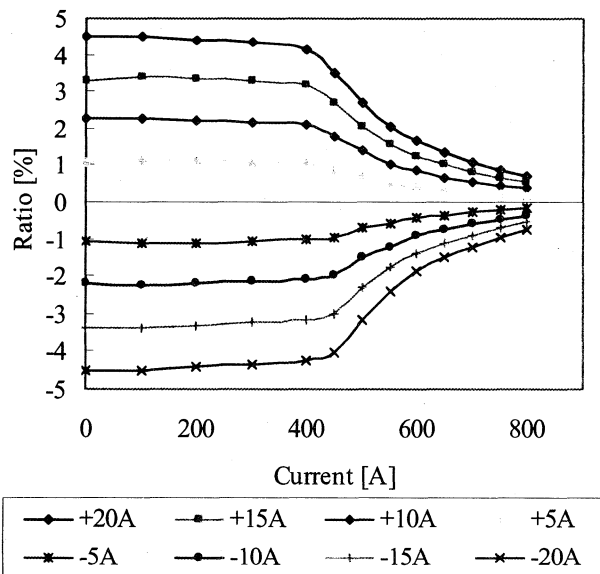


図 8 補正コイルによる磁場変化

極の長さの効果が入っていないためと思われる。図 7 に実効長の測定結果を示す。積分磁場を中心磁場で割ったものが実効長である。中心磁場は 800A の時で 28T/m であるが、実効長を考慮に入れた実効磁場では電流 750A 付近で 30T/m の磁場勾配に達しており、必要な磁場勾配が得られていることが分かった。

3.3 補正コイルの測定結果

PF リングでは多極ウィグラーに依るチューンシフトをその近接の 4 極電磁石を用いて補正している。直線部の 4 極電磁石は 1 台の電源に対して 4 台が直列に接続されているが、多極ウィグラーは場所によってパラメータが異なるため、直列 4 台の電磁石の磁場を独立に変えてやる必要がある。現在は電子シャントと呼ばれる並列可変抵抗を各 4 極電磁石に接続し、磁石に流れる電流の一部分をバイパスしてやることで補正を行っているが、将来的には補正コイルを用いることを予定している。

補正コイルによる磁場変化の測定値を図 8 に示す。磁極が飽和していない 400A 程度までは磁場は電流に対して線形に変化するため、およそ $\pm 1.4\text{T/m}$ の範囲で磁場勾配を変化させることができる。この値は最大磁場勾配に対して、 \pm 約 5% に相当する。また、補正コイルとメインコイルで励磁能力に差はなく、電流と巻き数の積 (A·turn) の和から磁場勾配を求めることができることが分かった。

4 結果

ハーモニックコイルを用いて 2 台の新 4 極電磁石の磁場測定を行った。これらの 4 極電磁石は 2003 年夏の直線部改造作業でリング内に設置され、現在運転に用いられている。

磁場が電流に対して線形な領域においては、測定した中心磁場は 2 次元計算による計算値と非常によく一致した。電流を増やして測定を行うと、450A 程度で飽和が始まり、これは計算に依る値よりも小さいが、磁極の長さが有限である効果と思われる。最大磁場勾配が旧型の 3 倍で、30T/m と大きいのが、実効長の効果も入れれば 750A 程度で設計上必要な最大磁場勾配 30T/m に達することが分かった。磁場勾配が一定の領域を増やすのに用いるエンドシムの厚さを決めるため、12 極成分の大きさを測定し、今回運転に用いる電流 200A 以下の付近では、4mm 厚でそれが最小になることが分かった。将来的に挿入光源の補正に用いるために取り付けた補正コイルについても測定を行った。400A~500A 付近で、最大磁場勾配に対して \pm 約 5% に相当する補正が可能であることから、既設多極ウィグラーの補正は十分に可能であることが確認された。