



### 3. 電磁石の鋼材と磁気特性

SPring-8 で現在も使用されているほぼ全ての四極電磁石はケイ素鋼板 50A600 を用いた積層型電磁石である。ケイ素鋼板を 0.5mm 厚で型抜きを行い、これを磁極長分重ね合わせて作られる。鋼板ロットごとの B-H カーブデータをもとに、ロットごとの違いをマージし電磁石全体の材質に依存する磁場特性の均一性を確保している。対して、ブロック型四極電磁石では、電磁軟鉄 SUYPO を用いたブロックからの NC 削り出しにより作成される。どちらも共に製作精度は 1 $\mu$ m であるが、磁場特性の均一性の確保は、積層型と同様には確保されていない。これらの鋼材の磁場特性は表 1 の通りであり、B50 は外部磁場 5000A/m における各鋼材の磁束密度である。この表から鋼材による磁束密度の違いは約 2.2% となる。即ち、材質による値の差以上の差異が認められれば、それは製作方法に由来する相違と考えられる。

表 1：各電磁石の材質と磁束密度

製作方法	材質	磁束密度 B50
積層型	50A600	1.743T
ブロック型	SUYPO	1.783T

### 4. 磁場測定結果

#### 4.1 初期化パラメータサーベイ

加速器においては、電磁石の磁場出力をより厳密に安定化させる必要がある。ここで殊に鋼材を用いた電磁石において磁場出力を安定化させる為には、鋼材自身に生じるヒステリシスをキャンセルさせる必要があり、その一つが電磁石の初期化である。この初期化シーケンスの最適値を求める為、電流パターンが台形になるように電流値を変え、この電流パターンを 10 回繰り返して、パターン回数ごとの磁場をガウスメータで測定した。この台形のフラット部分の電流保持時間を 10 秒、20 秒、40 秒と変えて測定し並べた結果が図 2 である。赤系統のグラフが積層型、青及び緑系統のグラフがブロック型 1 及び 2 を表している。1 回目に対して 2 回目以降をその比としてプロットしたグラフである。積層型は磁場再現性が 2 回目以降からの保持時間間隔でも 0.01% 以内に収まっているが、ブロック型では保持時間間隔 40 秒以上 4 回目以降でない磁場特性が飽和しない。積層型では、保持時間にかかわらず初期化出来るが、ブロック型では、保持時間も重要になり、且つ電流パターン回数も多く取る必要がある事が分かる。又、積層型では電流パターンを繰り返す事によって磁場強度が下がるが、ブロック型では、逆に増加する傾向が見られる。これらの傾向は製作したブロック型電磁石の 2 台いずれにも共に見られる為、積層型とブロック型の違いと考えられる。実際の加速器運転時でも初期化時の電流パターンの回数は積層型では 2 回と測定の結果と合っている。また、特徴的な傾向として、積層型は初期化後の磁場が初期値に対して

減少傾向にあるが、ブロック型は増加傾向になり、今回の結果を受け、ブロック型では測定結果から電流保持時間 40 秒でパターン回数を 4 回で初期化を行っている。

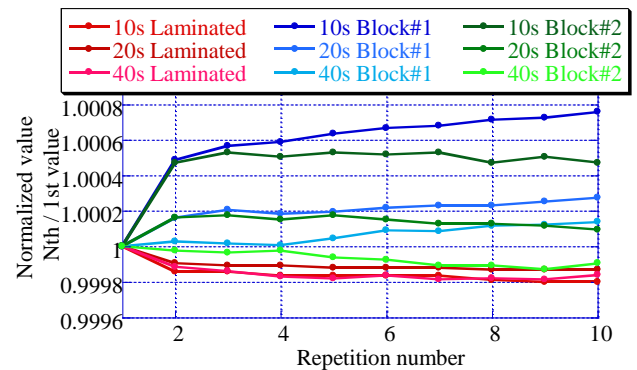


図 2：電流パターンの繰り返し回数に対する一回目からの割合。フラット部の時間を変えて比べた。

#### 4.2 ランプアップ時間

初期化パラメータと同様の手法で、今度は電流パターンの台形の立ち上がり及び立下り部分の傾きを変化させて、磁場の再現性を測定した。電流保持時間を 40 秒に固定して、目的電流値まで上下させる時間を変えての測定を行った。図 3 がその結果であるが、電流保持時間を変えた場合ほど、明確な違いは見られず、ランプアップ時間の違いによる積層型とブロック型は今回の測定範囲の中では明確な違いが見られなかった。ランプアップレートが磁場特性への影響を無視できるほど十分な長さであったと考えられる。実際に初期化の際は、時間が節約できる 50A/s で行うこととした。

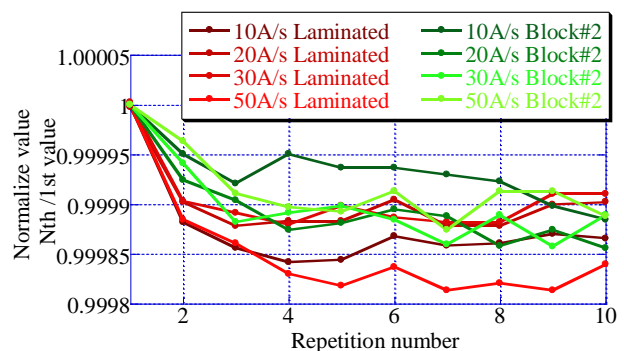


図 3：電流パターンにおいて立ち上がりの時間を変えて測定

#### 4.3 ヒステリシス測定

初期化は、鋼材のヒステリシスを消去する為に行うが、逆にこのヒステリシスが積層型とブロック型でどの程度違っているのかを次に測定した。初期化せずに電流を 100A ずつ上げてゆき各電流値での GL 積を測定し、最大電流値 600A になった所で電流値を今度は下げていき、同様に GL 積を測定した。その後

0A になったところで極性を逆にして同様に電流を変化させて GL 積測定を行った。始めの 0A→600A を基準に差分をとりヒステリシスが分かる様にグラフ化したのが図 4 である。ブロック 1 と 2 はほぼ重なっており、積層型ではループの広がり大きいのが分かる。この広がり面積が鉄損になる。鋼材の磁場特性に明確な違いは無い為、積層鋼板間の渦電流によりエネルギー損失が大きくなっていると推測される。又、0A 付近でブロック型は積層型に比べて閉じたループとなっていない。ブロック型は保磁力が大きい為と考えられる。積層型に比べてブロック型は、磁場の不均一性により残留磁場が残りやすい事が分かり、初期化が積層型に比べて容易ではないことが分かる。

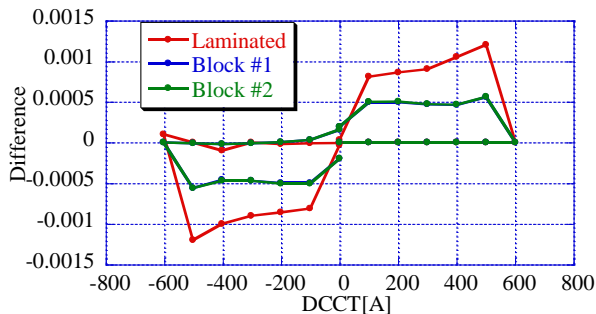


図 4: ハーモニックコイルで GL 積を測定し 0A→600A を基準にして各電流値での値の差分を取りヒステリシスを表した。

#### 4.4 GL 積の測定

図 5-(a)は、2次（四極）成分の GL 積の励磁電流特性をツインコイルで測定した結果である。今回の測定では、電流値を変化させて電流値毎の GL 積を測定した。特に飽和特性が現れる 500A~600A の間は、特に細かく 10A 刻みで測定を行なっている。このグラフから 500A 以下の電流値では、ブロック型と積層型で有意な差は見られなかったが、500A を超えた所から GL の値が離れていき、600A ではおよそ 10% 程度積層型の方が小さくなった。これは、前章から材質による磁場特性の違いは 2.2% である事が分かっている為、この 10% の違いは鋼材の違いだけに由来するものではないと言える。鋼材の材質の特性の違いによって出てきた差異ではなく、純粋にブロック型と積層型という製作方法の違いで磁場が小さくなるのではないかと考えられる。磁場飽和領域において、積層型電磁石の長手方向に対するパッキングファクタの差が顕著に現れてくる。

#### 4.5 多極磁場成分の測定及び含有率

次はハーモニックコイルでの磁場測定から得られたデータから、磁場中心から 0.01mm の場所での磁束密度 B を概算し、メインの四極（B2）成分に対する高次成分の割合を図 6 で示した。積層型、ブロック型共に 3 次以上の高次成分は  $10^{-4}$  のオーダー以下の範囲で収まっており、従来通りの仕様に十分満たす

ものである。同じブロック型同士で比較した場合、六極（B3）十二極（B6）については、#2 より #1 の方が明確に低いことが分かる。これはブロックから削り出す際、材質の均一性の低い場所から削り出し、それが高次成分の特性に表れた可能性があることを示唆している。

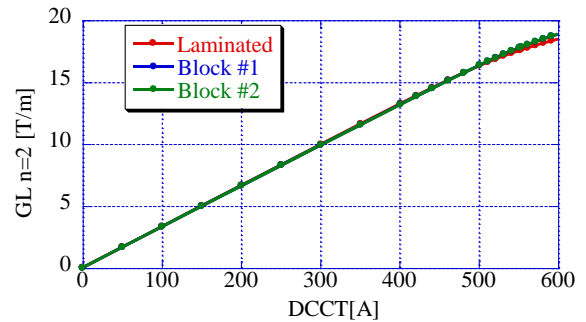


図 5-(a) : 電磁石毎の GL 積測定と電流値依存性。

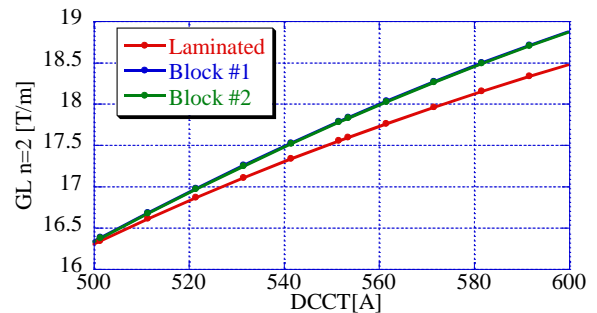


図 5-(b) : 図 5-(a) を 500A から 600A の部分で拡大した

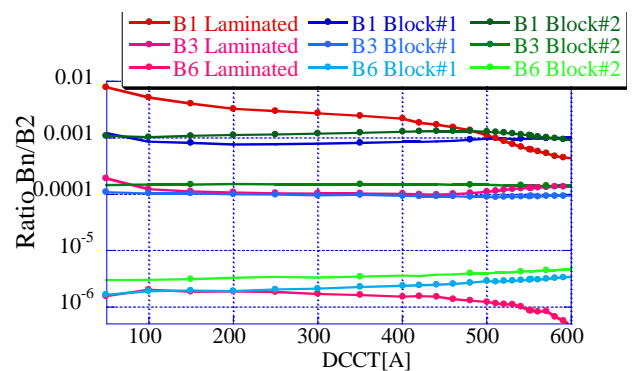


図 6 : 磁束密度 B の各成分をメイン磁場の四極成分 B2 を分母に割合を出した。B1 が二極成分、B3 が六極成分、B6 が十二極成分。赤系統が積層型、青及び緑がブロック型を表している。

#### 4.6 飽和温度と温度特性

電磁石の通電時に発生する熱が、電磁石を構成する鋼材を膨張させ、電磁石形状を変形させ磁場形状そのものを変化させる。この影響を少なくする為、ヨーク温度が一定温度、つまり冷却と発熱のバランスの平衡状態になるまで、最大定格電流 552A にて通電開始からヨーク温度が飽和する時間を測定したグラフが図 7 のグラフである飽和温度からフィッティ

ングし、その式から各電磁石の温度上昇の時定数を求めた。この時、ブロック1・2はそれぞれの時定数は0.27と0.23に対し積層型は0.18と40%程小さかった。又、室温、冷却水温度は同条件にもかかわらず、平衡温度自体もブロック型と積層型では到達温度に違いが出ており、その差0.6Kあった。又、図7に磁場測定により示される磁場中心位置の変化をプロットした。温度が上昇するにつれてブロック1で最大20 $\mu\text{m}$ 程度変化している。対して積層型でも5 $\mu\text{m}$ 変化している。この $dx/dy$ の変化の時定数は、ブロック型で0.22に対して積層型は0.6であった。 $dx/dy$ が飽和する時定数は、積層型の方が良い。ヨーク温度の安定化は非常に磁場測定に対する依存度が高い為、ヨーク温度が飽和するのを待って磁場測定する必要がある。積層型とブロック型の違いは、製造方法による絶縁層、断熱層がある為、熱伝導がブロック型より低くヨーク全体に熱が伝わるのが鈍い為と考えられる。又、同様に熱伝導率の違いから、温度分布にむらがある可能性がある。図8はこの温度上昇している際の電磁石のGL積の変化である。この図からヨーク温度の上昇に従ってGL積はブロック型で約0.008%、積層型で約0.005%小さくなっていることが分かる。電磁石の温度変化によるGL積に与える影響は、0.01%以下である。製作方法による到達温度の違いは表れているが、その違いによるメイン磁場のGL積への影響は比較的小さいが、磁場中心位置に対する影響は大きい。電磁石の温度は、鋼材の製作方法に直結するパラメータである為、到達温度には、顕著に表れているが、十分な励磁時間を取り、温度が安定してしまえば、材質の違いにかかわらずそれぞれの磁場特性はほぼ一定となる。

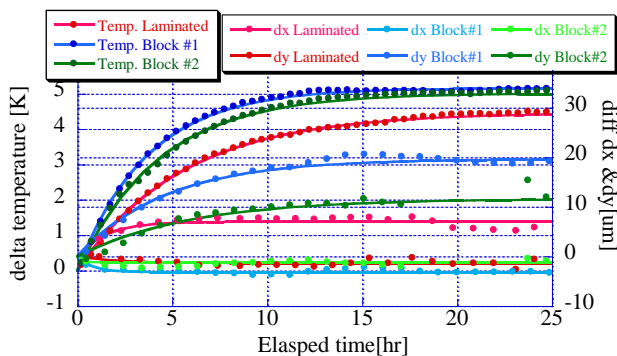


図7: 通電開始からヨーク温度の飽和までの時間変化と立ち上がり温度をフィッティングした曲線を示した。又、ローテーティングコイルを連続して回し続け、磁場中心の位置の時間変化を $dx/dy$ として、開始時からの差分をプロットした。測定点の一部抜けているのはトラブルにより測定できなかった点である。

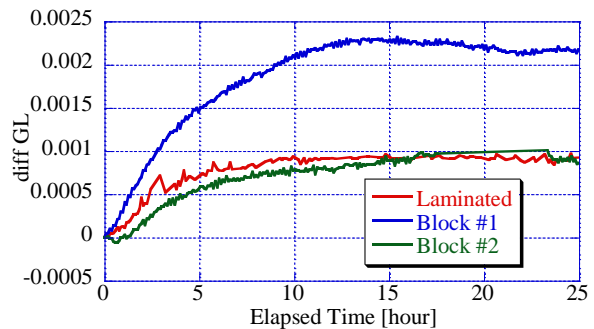


図8: 飽和温度までのGL積の相対変化

#### 4.7 磁場中心測定

電磁石の機械的な中心位置から磁場中心までの距離は、実際に蓄積リングへ設置する際に非常に重要となってくる。電磁石設置後に機械中心にアライメントを行い、その結果から磁場中心を算出する。この時の、機械中心から磁場中心までの距離をプロットした物が図9である。今回測定した積層型四極電磁石は、磁場中心と機械中心の距離が水平方向80 $\mu\text{m}$ 垂直方向120 $\mu\text{m}$ 程度とブロック型と比べても大きいことが分かった。そこで、建設当時の同タイプの電磁石の測定データから飛び値を持つ磁石があることは確認されている為、それを再現しているものとする。図10には建設時に測定した48台の同タイプの電磁石の統計を載せた。このデータから、磁場中心分布の $\sigma$ は垂直27 $\mu\text{m}$ 水平12 $\mu\text{m}$ となり、ブロック型2台に関しては、 $3\sigma$ に収まっている為、磁場中心と機械中心との差は過去の建設期データと相違なく、問題がないと考えられる。

又、定格電流552Aでの磁場中心位置が電流値変化によってどの様に磁場中心位置が変化するかを測定を行い、その結果が示す磁場中心位置の変化をプロットしたものが図10のグラフである。ブロック型では変化量が5 $\mu\text{m}$ 以内に収まっている。対して、今回測定した積層型では磁場中心位置の水平方向成分で電流値依存性が高いことが分かる。

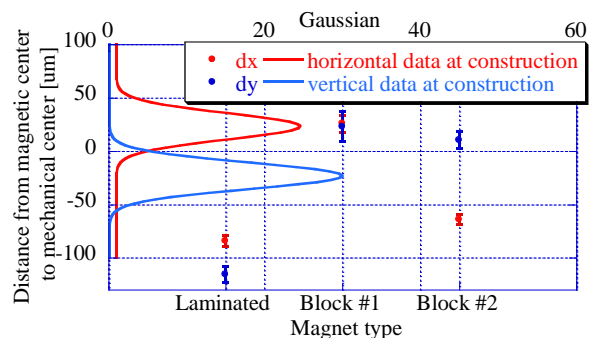


図9: 各電磁石の機械中心と磁場中心の垂直方向の差 $dx$ と水平方向の差 $dy$ を示し、曲線は建設時48台の統計データをガウシアンフィットしたデータ

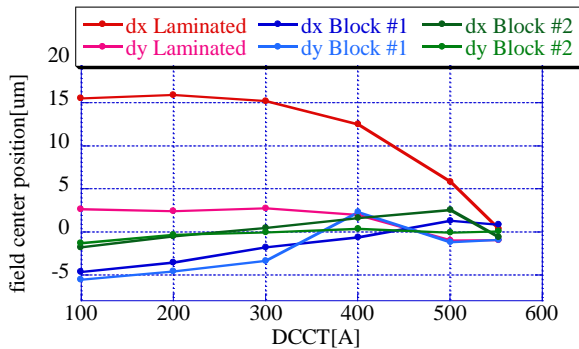


図 10：電流値に対する磁場中心の水平方向位置 dx と垂直方向位置 dy の変化

#### 4.8 電磁石載せ替えによるエラー評価

本測定は、電磁石載せ替えによる誤差がどの程度発生しているのかを評価するために、ひと通りの測定が終了した後に、電磁石を測定装置から取り外し、再度測定装置に載せてアラインメントし再測定を行い、再現性を見た。図 11 は再設置前の四極磁場の GL 積から再設置後の GL 積の差分を出し平均値で割った値を各電流値でプロットした。積層型は、前と後で  $10^{-5}$  のオーダーの違いしか見られなかった。ブロック型も最大定格電流値である 552A 付近では  $10^{-5}$  のオーダーであるので、電磁石を載せ替えによる誤差の影響は、製造方法による違いに比べて無視出来る。電流値に対するばらつきが見られ、特に 600A 付近ではブロック型で変化する傾向が見られた。

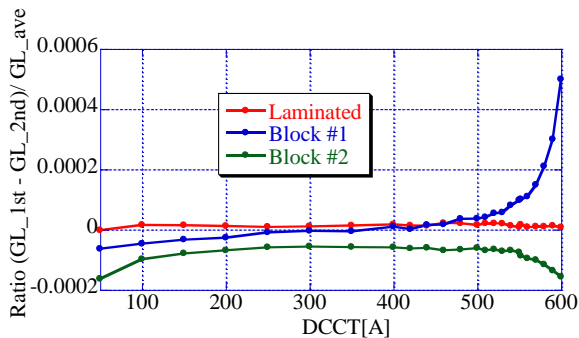


図 11：再設置前と後の四極磁場の GL 積の差分を平均値で割った割合の電流値毎の比較。

## 5. まとめ

加速器運転に大きくかわるパラメータとして初期化パターンの相違であるが、ブロック型においては 0.01%の磁場再現性を実現するのに積層型より多くの初期化経験をさせる必要がある。メイン磁場である四極磁場の GL 積の測定結果からブロック型と積層型で飽和領域に 10%の差が存在する。磁石設計は材質及び製作方法以外磁極長、ポール形状を含め同構造となっており、材質の磁場特性も 2.2%の違いしかないため、純粋にブロック型と積層型での違いと判

断出来る。高次多極成分含有率については、ブロック型・積層型共に高次成分について低いレベル  $10^{-4}$  で抑えられており、特に問題になる成分はなかった。ブロック型での電流値に対する磁場中心の変化幅は、過去に測定した積層型の統計に対して、各電流値の  $1\sigma$  以内に収まっていた為、どの電流値でも既存電磁石と同様に扱うことが出来る。磁場中心位置については、機械中心から磁場中心までの距離は、ブロック型では過去の積層型の平均と比べるとブロック 2 の水平が最大  $40\mu\text{m}$  大きかった。

## 謝辞

磁場測定を行うにあたり、適切な助言を頂いた電磁石チームの方々、並びに実験環境を整えて下さった加速器運転員に感謝します。

## 参考文献

- [1] K. Soutome, et al., “Local Lattice Modification of Long Straight Section in the SPring-8 Storage Ring”, Proceedings of 9<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka University, Japan, 2012
- [2] J. Ohnishi, et al., “Results of Magnetic Field Measurements of SPring-8 Magnets”, Proceedings of IEEE, Jul 1996, p3069 - 3072
- [3] N. Kumagai, et al., “Design of the magnet for the SPring-8 Storage Ring” Proceedings of Particle Accelerator Conference, '91, San Francisco, California, p2465