

積層パーメンジュール鋼板を用いた高磁場勾配四極電磁石の試作

PROTOTYPE OF HIGH GRADIENT QUADRUPOLE MAGNET USING LAMINATED PERMENDUR SHEETS

谷内 努^{#, A)}, 松原 伸一^{A)}, 山口 博史^{A)}, 深見 健司^{A, B)}, 渡部 貴宏^{A, B)}, 北平 宗一郎^{C)}, 岩田 仁志^{C)}
Tsumoto Taniuchi^{#, A)}, Shinichi Matsubara^{A)}, Hiroshi Yamaguchi^{A)}, Kenji Fukami^{A, B)}, Takahiro Watanabe^{A, B)},
Soichiro Kitahira^{C)}, Hitoshi Iwata^{C)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

^{C)} Moriya Cutlery Laboratory, Ltd.

Abstract

High gradient quadrupole magnets are required for next generation light sources, but it is also important to consider the electric power consumption. In the case of a prototype quadrupole magnets for SPring-8-II, the electric power consumption rapidly increases above the field gradient of 55 T/m due to the magnetic saturation of silicon steel plate. It can be reduced to adopt permendur instead of silicon steel at magnet poles where the magnetic flux density becomes near the saturation. In this study, we designed and evaluated a quadrupole magnet where the magnet poles were made of laminated permendur plates, and the return yoke was made of pure iron. To ensure the accuracy of pole positions, pole tips were machined by wire erosion after all magnet poles were assembled with the return yoke. The excitation characteristics of the magnet were measured, and it was confirmed that the linearity was expanded to higher field gradient region (>70 T/m) than that of pure iron. However, the saturation level was slightly low compared with a simulation result. To investigate the cause of this degradation, test pieces with different conditions for the lamination were prepared and measured. As a result, it was found that residual stresses due to the lamination affected.

1. はじめに

現在、世界の放射光界は次世代光源に向かっており、MAX-IV や ESRF-EBS などによってスタートしたこの流れは、昨今、次世代計画の後発組の登場により、さらにチャレンジングなものになってきている。このようなチャレンジングな加速器設計においては、どこまで多極磁場を強く出来るかが一つのカギとなっている一方、加速器の消費電力を抑制することも重要な Figures of merits になりつつある。

大型放射光施設 SPring-8 でも 1997 年の放射光供用開始から 25 年以上が経過しているため様々な老朽化対策が施されている一方、次期計画である SPring-8-II[1,2] に向けた取り組みが精力的に進められている。SPring-8-II では放射光輝度を従来の約 100 倍に上げる光源性能の向上に加え、施設の省エネルギー化も目指している。2020 年には 1 GeV 線型加速器および 8 GeV ブースターシンクロトロンからなる入射器を休止し、XFEL 施設 SACLA の 8 GeV 線型加速器を蓄積リングへの入射器として併用することにより、SPring-8-II で必要となる低エミッタンスビーム入射および入射器系の消費電力削減を実現している[3]。また、SPring-8-II 蓄積リングでは Multi-bend achromat ラティスの偏向磁石を永久磁石化[4]し、さらなる電力削減を行う予定である。

次世代放射光源加速器ではラティス磁石の空間的な packing factor が上がるため、四極磁石では 100 T/m 程度の高磁場勾配が検討されることもある[5]。例えば、SPring-8-II のプロトタイプ四極電磁石を純鉄で製作した

場合、55 T/m を超える辺りから磁気飽和により励磁特性の線形性が悪化して消費電力が急激に増加するが、純鉄よりも飽和磁束密度の高いパーメンジュールを採用することで消費電力を抑えることができる。

今回、磁極に積層パーメンジュール鋼板、リターンヨークにブロック純鉄を用いた四極電磁石を製作し、評価した。

2. 設計

2.1 SPring-8-II プロトタイプ四極電磁石

現時点における SPring-8-II のラティス設計は、四極電磁石の磁場勾配の上限を 55 T/m とする方針が進められており、Fig. 1 に示すコア形状のプロトタイプ機が積層珪素鋼板で製作された。ボア直径は 34 mm で、真空チェンバーとの干渉を避けるため、最小ギャップは 15 mm となっている。コイルは 20 ターン/磁極で、励磁電流 352 A の時に 56 T/m の磁場勾配を発生する。

ラティス磁石の詳細は確定していないため、より高い磁場勾配が必要となる可能性もある。そこで、飽和磁束密度が純鉄(2.1 T)よりも大きいパーメンジュール(2.3 T)を用いてプロトタイプ機と同じボア径の電磁石を設計・製作し、より高い磁場勾配の発生を確認することとした。

[#]ihcuinat@spring8.or.jp

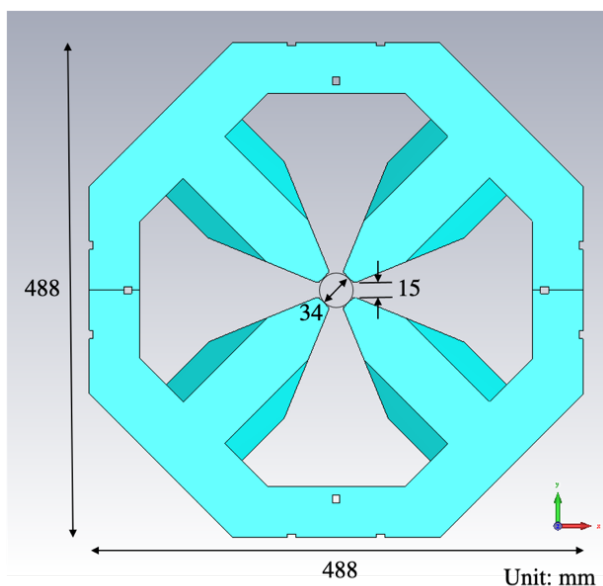


Figure 1: Core of prototype quadrupole magnet for SPring-8-II.

2.2 パーマンジュール

パーメンジュールは鉄(Fe):コバルト(Co)が 1:1 の割合の合金で、約 2.3 T の高い飽和磁束密度を有する。一方で、硬く脆い材料であるため冷間加工や切削加工が難しく、加工性を高めるためにバナジウム(V)を 2% 添加した組成 (Fe-49Co-2V) が一般に用いられている。パーメンジュールは強磁場を発生する電磁石で使用される他、近年は、EV に搭載されるモーターの高出力化・小型化への期待から採用が検討されている。そのため、試作検討用途を中心にパーメンジュールの需要は増加傾向にある。

パーメンジュールも鉄の場合と同様に、ブロック材または積層鋼板で電磁石コアを製作することが可能である。ブロック材の場合は任意の形状で製作可能であるが、溶解ロットが ton オーダーとなる場合や、納期が 6 ヶ月以上などとなるケースもある。

一方、パーメンジュール鋼板は大きさに制限はあるが、一定量が流通しているためブロック材に比べ入手しやすい品質の安定性も確認されており、少量や短期間での試作にも適している。ブロック材に比べやや高価であるが、量産の場合はプレス加工を行うことで製造コストを低減できる場合もある。今回は量産を念頭に置いて積層鋼板方式を選択し、磁気性能や加工精度などを確認することを目的とした。

2.3 コア設計

純鉄や珪素鋼板に比べてパーメンジュールは高価であるため、コア全体をパーメンジュールで製作するのではなく、磁束密度が飽和に近くなる磁極部分のみにパーメンジュールを使用することを検討した。

Figure 2 に以下の 3 条件での励磁特性のシミュレーション (CST Studio Suite® [6]) 結果を示す。(1)コア全体に純鉄を使用した場合 (凡例 “Iron”)、(2)コア全体にパー

メンジュールを使用した場合 (凡例 “Permendur”)、(3)磁極にパーメンジュール、リターンヨークに純鉄を使用した場合 (凡例 “Permendur + Iron”)。なお、プロトタイプ機と同じリターンヨーク寸法で 60 T/m を超える磁場勾配を発生させるとリターンヨーク内で磁気飽和が起こるため、ヨーク幅をプロトタイプ機の 50 mm から 70 mm へ増やしている。また、CST 計算で使用したパーメンジュールの BH データは、メーカーのカタログ値を元に CST のマクロで作成した。CST 計算で使用したパーメンジュールおよび純鉄の BH 曲線、メーカーカタログ値を Fig. 3 に示す。

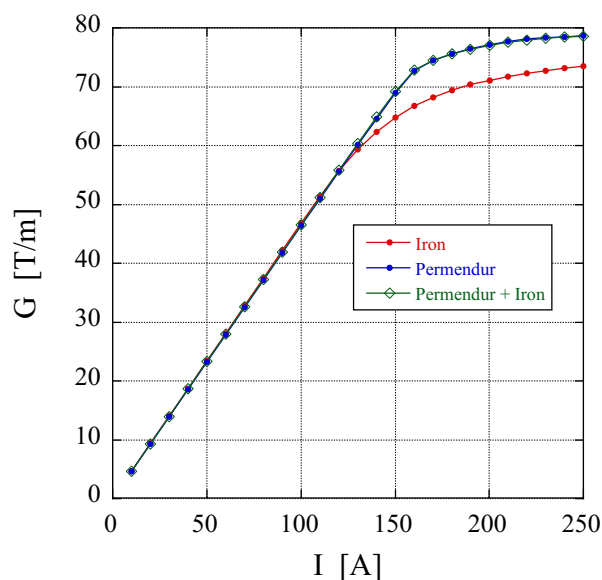


Figure 2: Simulated excitation curve for various core materials.

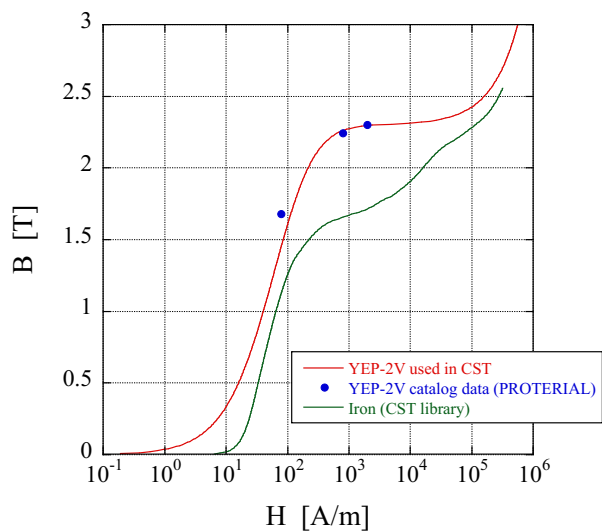


Figure 3: BH curves used in CST simulation.

磁場勾配に対してアンペアファクター (透磁率無限大の時の電流値に対する比率で磁気飽和の程度を示す) をプロットしたものが Fig. 4 である。純鉄では 55 T/m を超

えると飽和が始まりアンペアファクターが上昇するのに対して、パーメンジュールでは 70 T/m まで線形性が保たれている。

消費電力で純鉄とパーメンジュールを比較すると、例えば磁場勾配 70 T/m の時の純鉄とパーメンジュールのアンペアファクターの比は $1.27 : 1.02 = 1.25$ 倍であるので、消費電力で純鉄はパーメンジュールの $1.25^2 = 1.56$ 倍、73 T/m では 2.4 倍となる。純鉄でも励磁電流を上げれば非効率ながら磁場勾配を上げることはできるが、飽和領域では磁場分布の平坦度や漏れ磁場が変化するので、その意味においても、パーメンジュールの方が有利である。

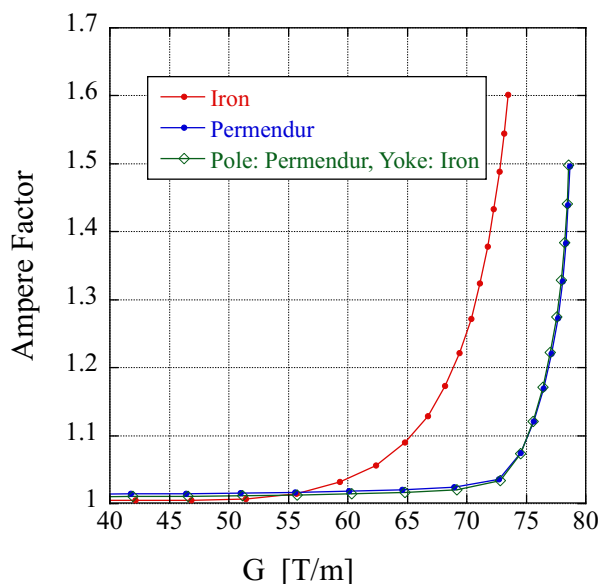


Figure 4: Simulated Ampere factor for various core materials.

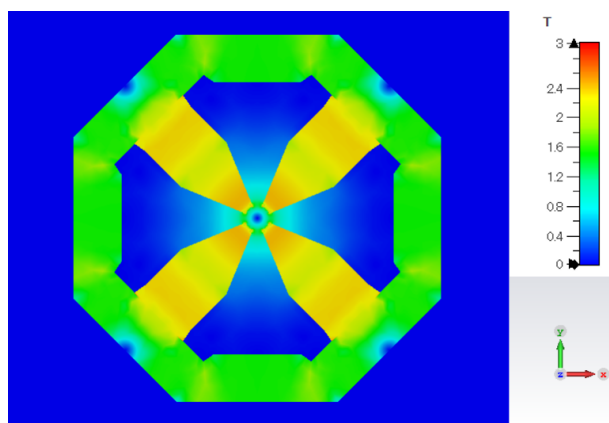


Figure 5: Distribution of magnetic flux density at 250 A. (pole: permendur, return yoke: iron)

Figure 5 はコア内の磁束密度分布である。コア全体をパーメンジュールとする場合と、磁極のみをパーメンジュールとしリターンヨークを純鉄とする場合で励磁特性はほぼ同じである。これは、リターンヨーク内の磁束密度

が磁気飽和に達していないためであると考えられる。

3. 製作

3.1 主要設計パラメータ

パーメンジュール積層鋼板を磁極に用いた四極電磁石の主な設計パラメータを Table 1 に示す。

磁極先端形状は SPring-8-II プロトタイプ四極電磁石と同じである。磁極当たり 54 ターンのコイルに 200 A を流し、75 T/m を発生させる。

Table 1: Design Parameters of Permendur Quadrupole Magnet

Bore diameter	34 mm
Minimum pole gap	15 mm
Pole length	181 mm
Coil turn / pole	54
Coil current	> 200 A
Field gradient	> 75 T/m

3.2 磁極製作

磁極に用いたパーメンジュール鋼板はプロテリアル社 YEP-2V (0.2 t) である。パーメンジュールは加工歪などの残留応力で磁気特性が劣化しやすいため、ブロック材の場合は形状仕上げ後に磁性焼鈍を行って性能を回復させるが、積層鋼板の場合は接着剤の耐熱温度が低いため、接着前に磁性焼鈍を施している。

Figure 6 は外形加工後のパーメンジュール積層体磁極の写真である。

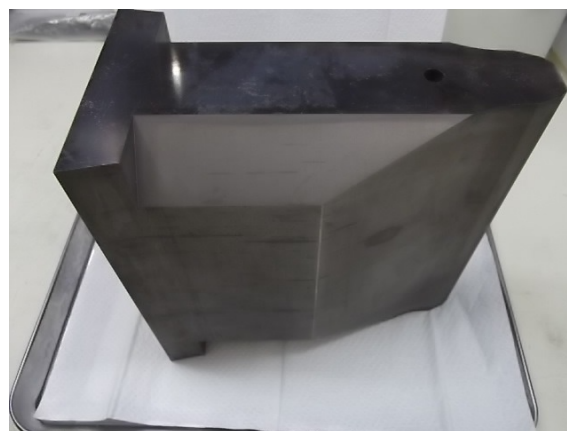


Figure 6: Laminated permendur magnet pole before assembly.

積層および真空含浸接着にて所望の厚みの積層体を製作し、磁極先端以外の形状加工およびコイルと干渉する角の面取り加工(ワイヤ放電加工)、リターンヨークと磁極の接触面の研削加工を行なった。積層体は磁性焼鈍後であるため、加工歪みが極力加わらないようワイヤ放電加工や研削加工にて加工を行っている。接触

面の隙間は磁気性能に影響するため、平面度は 0.003 mm以内に仕上げられている。

3.3 リターンヨークおよび磁極取り付け

リターンヨークには磁性焼鈍を施した快削純鉄 (ME1F, SUY-1 相当) を使用し、コイル組み込みのため4分割で製作した。分割面には平行キーおよび位置決めピンを入れ、磁石半割やコイル組み込みなどの再組み立てにおける寸法再現性を確保している。また磁極と同様に、磁極との接触面は研削加工を施している。

通常、磁極とリターンヨークはボルトで連結されるが、パーメンジュール積層体にタップ加工を施すと接着剥がれを起こす可能性があるため、磁極の根元に設けたテーパ部分を固定金具 (SUS304) で挟み込む構造とした。

3.4 磁極先端加工

積層鋼板による電磁石製作では、プレス加工により最終寸法に仕上げられた分割形状の鋼板を積層、接着し、一体に組み上げる方法が一般に行われるが、本磁石では磁極とリターンヨークを分離して製作するため、同様の方法では組み上げ精度が落ちて4つの磁極の相対位置誤差が大きくなる懸念された。そこで、リターンヨークに磁極を取り付けた後に磁極先端の最終形状をワイヤー放電加工により精密加工する方法を採用した。加工後の寸法精度は± 0.03 mm 以内 (奥行き方向は4ヶ所測定)、ボア半径は± 0.01 mm 以内であった。

3.5 励磁用コイル

励磁用コイルには外寸7×7 mm、内寸4×4 mmのホローコンダクターを使用しており、磁極当たりのターン数は54である。冷却水は圧損0.2 MPaで3.0 L/min、200 A時の温度上昇は13℃である。

コイルは取り付け金具でリターンヨークに固定されており、できるだけパーメンジュール磁極にコイル荷重がかからないよう配慮した。

4. 磁場測定

4.1 磁場測定装置

磁場測定中のパーメンジュール磁極四極電磁石の写真を Fig. 7 に示す。磁場測定は、3軸ホール素子プローブ (SENIS 社デジタル3軸テスラメーター, 3MH3A) を3軸方向に移動可能な3次元磁場測定器により行なった。本プローブは3軸のホール素子センサー位置が同一となる設計になっており、我々の測定ではX, Yのセンサー位置は約20mm以内で一致した。

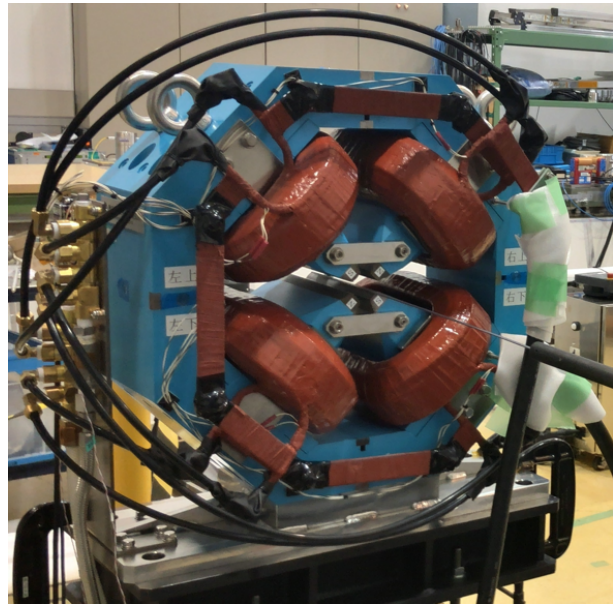


Figure 7: Permendur quadrupole magnet under magnetic field measurement.

4.2 励磁特性

水平方向位置 $x = 10$ mm (良磁場領域内) における磁場強度から算出した磁場勾配の励磁特性とシミュレーション結果の比較を Fig. 8 に示す。

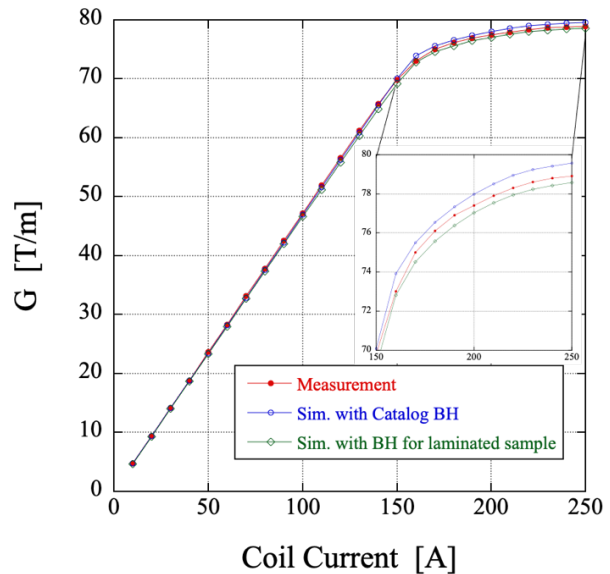


Figure 8: Excitation curves for measurement and simulation.

純鉄では磁場勾配 55 T/m を超える辺りから飽和が始まっていたのに対して、パーメンジュールでは 70 T/m 付近まで線形性が保たれている。測定値とシミュレーションを比較すると、BH データとしてカタログ値を使用したシミュレーション結果よりも到達磁場勾配が 0.8 % 小さくなった。

ている。一方、磁極と同じ製作条件で作成した試験片の BH 測定データを用いたシミュレーション結果とは 0.4% 以内で一致した。特性劣化の原因としては、積層工程における締め付け応力や接着応力、加工応力等の影響が考えられる。したがって、これらの応力を緩和することができれば、磁気特性が改善されると考えられる。

BH 特性劣化の原因調査のため、非接着のパーメンジュール鋼板および積層工程における締め付けトルク(従来は非管理)を管理したサンプルについて BH 測定を行なった結果を Fig. 9 に示す。

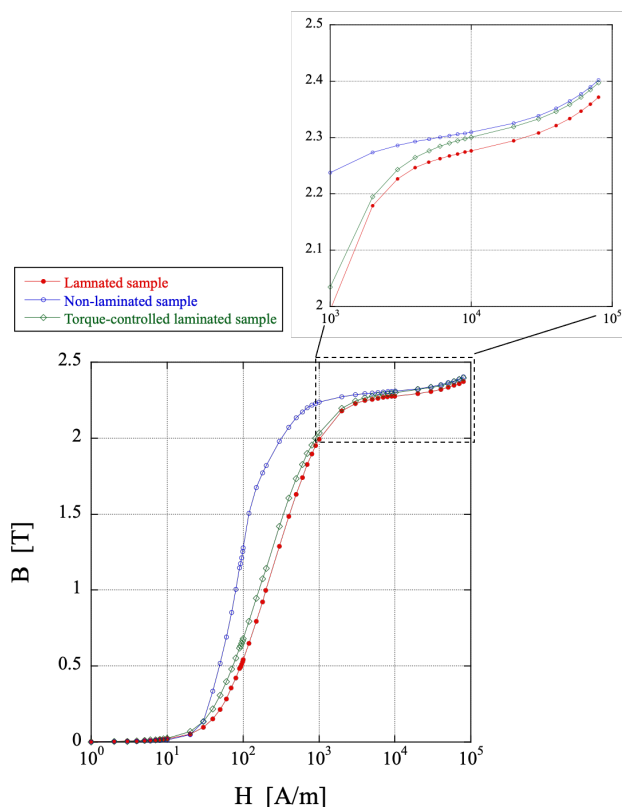


Figure 9: Measured BH curves for laminated and non-laminated permendur sample.

非接着サンプルに比べて接着積層サンプルは中磁界領域(100~1000 A/m)および飽和磁束密度で特性劣化が見られる。一方、積層工程での締め付けトルクを管理した場合は中磁界領域および飽和磁束密度ともに改善が見られた。

Figure 10 は、これらの BH データを使用したシミュレーション結果である。非接着の場合と比べて締め付けトルク非管理で積層接着したものは到達磁場勾配が約 1% 低いものに対して、トルク管理して作成したサンプルの BH データを用いた場合は非接着とほぼ同等の磁場勾配が得られている。従来は、より高いトルクで締め付けていた可能性がある。

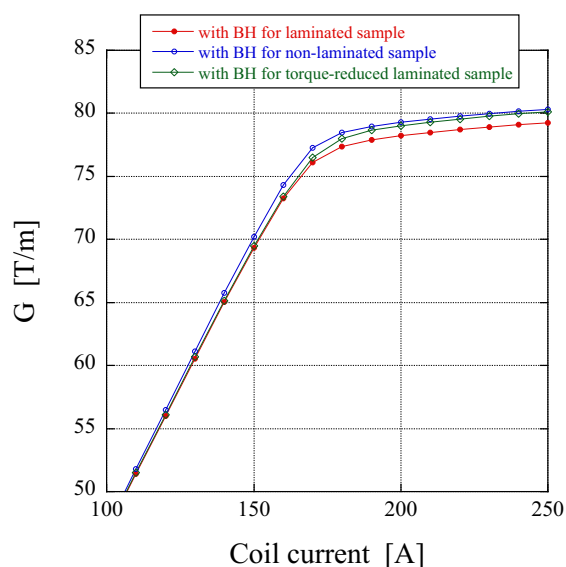


Figure 10: Simulated excitation curves with BH data for laminated and non-laminated permendur sample.

5. まとめ

次世代放射光源の高磁場勾配四極電磁石を想定し、純鉄よりも飽和磁束密度が高いパーメンジュール積層鋼板を磁極に使用した四極電磁石を試作して性能評価を行なった。純鉄を上回る磁気特性が確認されたが、到達磁場勾配は設計よりもやや低い結果となった。特性劣化の原因としては、積層工程における圧縮、接着、加工等による残留応力の影響が考えられる。今後は積層・加工条件を見直すことにより、特性の向上を目指す方針である。

謝辞

本研究は理化学研究所による研究費助成を受けたものである。

参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, in Proceedings of IPAC2016, (Busan, Korea, 2016), p. 2867;
<https://accelconf.web.cern.ch/ipac2016/papers/wepow019.pdf>
- [2] T. Watanabe and H. Tanaka (2023), “SPRING-8 Upgrade Project: Accelerator Redesigned and Restarted”, *Synchrotron Radiation News*, 36:1, 3-6;
<https://doi.org/10.1080/08940886.2023.2186117>
- [3] T. Hara *et al.*, *Phys. Rev. Accel. Beams* **24** 110702;
<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.110702>
- [4] T. Watanabe *et al.*, *Physical Review Accelerator and Beams*, **20**, 072401 (2017);
<https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.072401>
- [5] S. Shin, “New era of synchrotron radiation: fourth-generation storage ring.”, *AAPPS Bull.* **31**, 21 (2021).;
<https://doi.org/10.1007/s43673-021-00021-4>
- [6] Dassault Systèmes., CST Studio Suite®;
<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>