

SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システムの開発 -ビーム最終収束用超伝導 4 極電磁石設計-

Development of Final Focusing Superconducting Magnet System for SuperKEKB -Designs of the superconducting quadrupole magnets for beam final focusing-

大内徳人, 有本靖, 大木俊征, 川井正徳, 近藤良也, 宗占国, 土屋清澄, 東憲男, 山岡広(高エネルギー加速器研究機構);
田中学(三菱電機システムサービス); 遠藤友成(日立プラントメカニクス)

OHUCHI Norihito, ARIMOTO Yasushi, OKI Toshiyuki, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ZONG Zhanguo,
TSUCHIYA Kiyosumi, HIGASHI Norio, YAMAOKA Hiroshi (KEK); TANAKA Manabu (Mitsubishi System Service);
ENDO Tomonari (Hitachi Plant Mechanics)
E-mail: norihito.ohuchi@kek.jp

1. はじめに

KEK では、 B ファクトリーマシンとして稼働してきた KEKB ビーム衝突型加速器のアップグレード (SuperKEKB) を 2010 年度から行っている。SuperKEKB では、電子・陽電子ビーム衝突部の超伝導電磁石を新しく作り変え、2014 年度にビーム運転を開始する予定である [1]。ビーム最終収束用の超伝導 4 極電磁石に於いては、プロトタイプの開発を完了し [2]、基本的な磁石の性能を確認した。実機では、このプロトタイプの結果とビーム光学の要求をもとに、磁石の設計に修正を加え改良を行った。本学会では、この最も衝突点に近い位置に設置される超伝導 4 極電磁石 (QC1E, QC1P) の設計について詳細な報告を行う。

2. ビーム衝突点超伝導 4 極電磁石の設計

図 1 に超伝導 4 極電磁石 QC1P と QC1E の断面設計を示した。共に各ビームラインの最も衝突点に近い位置に設置され、クライオスタット内では両ビームラインが接近している為磁石断面設計では厳しい空間的な制約を受ける。QC1P に対しては、磁石設計の為のスペースは最も小さい部分で距離として 19 mm である。この為、QC1P のコイル内半径は 25mm で設計され、カラー外周までの厚みは 10.5mm である。又、ヘリウム容器内筒の外半径は 21 mm で、この 4 mm の隙間に 3 種類の超伝導補正コイルが組み込まれている。超伝導磁石は、ダブルパンケーキコイルで構成されている。コイル内半径が 25mm と小さいために、ケーブルのキーストン角度は大きく 2.14 度である。超伝導 4 極磁石及び超伝導ケーブルの設計パラメーターを表 1、2 に纏めた。

QC1P は、素粒子検出器超伝導ソレノイドと加速器超伝導ソレノイドの合成磁場の中で運転される。このソレノイド磁場は 2.5T である。このソレノイド磁場分布も加速器の運転に組み込まれる為、QC1P は磁気ヨークの無い磁石として設計されている。QC1E はヨークを持つ磁石であるが、ヨークの材質はパーメンジュールを用いている。

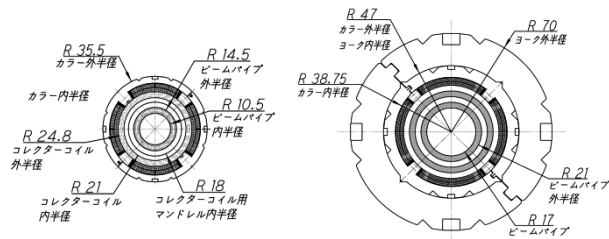


Fig. 1 Cross sections of the QC1P (left: positron beam) and QC1E (right: electron beam) magnets.

3. 超伝導 4 極電磁石 QC1P コイル形状

図 2 に QC1P のコイル形状を示した。コイル設計に於いては端部のエラー磁場を極力小さくし、且つ端部の占める

Table 1: Design parameters of QC1P and QC1E magnets

	QC1P	QC1E
Magnet type	2-layer w/o Yoke	2-layer with Yoke
Coil I.R	25.0 mm	33.0 mm
Coil O.R.	30.485 mm	38.485 mm
Turns in one pole	25	34
Field gradient	75.99 T/m	91.57 T/m
Current	1800 A	2000 A
Effective mag. length	337.2 mm	373.05 mm
Max. field with sol. field	4.4 T	4.1 T
Operating point w.r.t I_c	65.0%	80.6%

Table 2: Parameters of NbTi cables for QC1P and QC1E

	QC1P/1E	QC1P/1E	
Strand:			
Diameter	0.5 mm	Cable:	
Cu/Sc ratio	1.1	Width	2.5 mm
Filament dia.	8 μ m	Thickness	0.93 mm
# of filaments	2113	Keystone ang.	2.14°/1.66°
RRR	≥ 150	# of strands	10
I_c at 6T, 4.2K	≥ 235 A	I_c at 6T, 4.2K	≥ 2250 A

領域を小さくする為コーナー部でのケーブル曲げ半径を最小部で 5 mm まで小さくした。この端部設計は、ビーム光学設計上、4 極磁石を可能な限り衝突点に近づける必要性から採用された。磁石軸方向の磁場分布については、学会発表の中で紹介する。

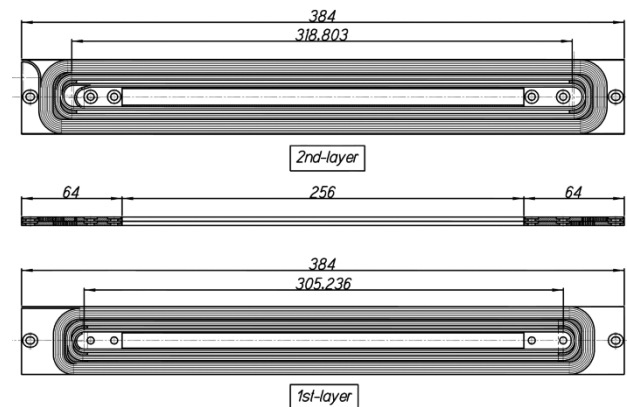


Fig. 2 Coil configuration of the QC1P magnet

4. まとめ

SuperKEKB ビーム衝突点超伝導 4 極電磁石は、プロトタイプの開発後、設計の一部修正を行い、現在実機製作の準備中である。今回の報告会では、実機の設計について磁場設計を中心に報告を行った。

参考文献

- [1] N. Ohuchi, et al.: 第 9 回加速器学会年会 プローセディングス (2012), P. 21.
[2] Y. Arimoto, et al.: Abstract of CSJ Conf. 86 (2012), P. 122.

SuperKEKB 衝突点色収差補正用超伝導6極電磁石システムの開発 - 電磁石システムの概要 -

Development of Superconducting-Sextuple Magnet for Chromaticity Correction at Interaction Point on SuperKEKB
- Outline of Magnet System -

有本靖, 大内徳人, 川井正徳, 近藤良也, 宗占国, 土屋清澄, 榎田康博, 山岡広 (KEK); 岡村哲至 (TIT)
ARIMOTO Yasushi, OHUCHI Norihito, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ZONG Zanguo,
TSUCHIYA Kiyosumi, MAKIDA Yasuhiro, YAMAOKA Hiroshi (KEK); OKAMURA Tetsuji (TIT)
E-mail: yasushi.arimoto@kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では高エネルギー、高ルミノシティ電子・陽電子衝突型加速器 (SuperKEKB) の建設が進められている¹⁾。SuperKEKB では最終収束系での色収差を補正するために、ビーム衝突点 (IP) を中心とする約 200m の直線部に、計 16 台の補正 6 極電磁石が設置される (図 1)。現在、これらの電磁石は常伝導で開発が進められているが、発生磁場勾配の大きさ、発生可能な多極成分の数、磁場調整のしやすさ等の面では超伝導の方が好ましい。一方、クエンチによる時間のロス、冷凍機による電磁石の振動等、加速器の運転・ビーム性能の観点から好ましくない点もある。このため要求性能を満たす超伝導 6 極電磁石システムの検討を進めている。本講演ではこの超伝導 6 極電磁石システムの概要について述べる。

2. 要求性能

ビーム光学シミュレーションより補正 6 極磁石に必要とされる磁場パラメーターを表 1 に示す。ここで SL は 2 次の磁場勾配 (d^2B/dx^2) をビーム軸に沿って積分したものであり、 L は有効磁場長を表わしている。また、 B_3 , A_3 は参照半径における 6 極磁場成分の大きさであり、HER.SLY, HER.SLX, LER.SLY および LER.SLX の参照半径は、各々 40 mm, 40 mm, 45 mm, 45 mm である。ここで、ノーマル 6 極コイルとともに磁場補正のためにスクュー 6 極コイル、ノーマル及びスクュー 4 極コイルが 1 台の超伝導 6 極電磁石に組込まれる。

6 極磁石に許される加速器ビームラインにおける物理的スペースは HER.SLY, HER.SLX, LER.SLY および LER.SLX において、ビーム軸方向に 0.6 m, 0.5 m, 0.3 m, 0.3 m であるため、クライオスタットはこの領域内に収められなければならない。またビームの品質は磁石の振動に非常に敏感なので、その振動の振幅は $5\mu\text{m}$ 程度以内に抑えられることが要求される。また、加速器運転時間のロスを少なくするため、クエンチからの復帰時間は 5 時間程度以内であることが要求される。

3. 概念設計

6 極電磁石は LER 用、HER 用とも約 200 m の領域に並べられている。このため 1 台のヘリウム冷凍機を使って液体ヘリウムによる冷却を行なう場合、配管部の熱負荷が 240 W と非常に大きくなる。さらにその他の熱負荷と運転マージンを考慮すると冷凍能力として約 600 W@4.4 K の大型冷凍機が必要となる。そこで今回は、必要な磁場強度は比較的小さく磁石一台当りの冷凍能力はそれほど大きい必要がないことから、小型冷凍機でのシステム構築を進めることにした。

現在設計中の超伝導 6 極電磁石はコイル内最大磁場が 3 T

となる。6 極磁場の補正のために、4 極コイル-ノーマル 6 極スクュー 6 極が組み込まれ、その外周には鉄ヨークが取り付けられる。小型冷凍機を用いることから、電流値は 300 A 以下となるよう設計される。

小型冷凍機としてパルスチューブ冷凍機を用いる予定である。これはパルスチューブ冷凍機は膨張部に可動部を持たないため他の小型冷凍機よりも振動が小さいためである。冷凍機は室温から 50K までの冷却ステージと 50K から 4.4K までの冷却ステージの 2 段で用いられる。また第 1 ステージと第 2 ステージの間の電流リードは HTS を用いて接続することが検討されている。300 K から 50 K までの熱負荷は電流リードに起因するものが最も大きい。このため電流リードの材質及びその形状の最適化が重要な課題となる。

4. 今後の予定

今年度は現在所有の GM 小型冷凍機を用いて R&D 用のクライオスタット (図 2) を製作して振動の解析、電流リードにおける熱負荷の R&D を行なう予定である。

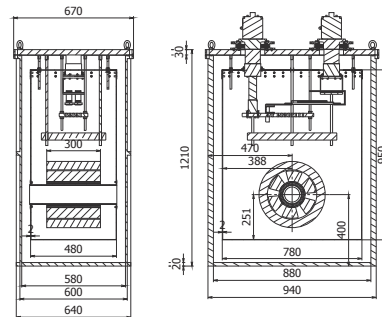


Fig. 2. Schematic drawing of the R&D cryostat.

Table 1. Specification of sextuple magnets

Magnet name	Normal		Skew	
	SL (T/m)	B_3 (T)	SL (T/m)	A_3 (T)
HER SLY	234	0.312	2.34	3.1×10^{-3}
HER SLX	187	0.299	9.35	15×10^{-3}
LER SLY	40	0.121	2.67	8.1×10^{-3}
LER SLX	13.3	0.040	2.67	8.1×10^{-3}

参考文献

- 1) Y. Ohnishi, *et al.*: “Accelerator design at SuperKEKB”, Prog. Theor. Exp. Phys., 03A011 (2013)
- 2) N. Ohuchi, *et al.*: 第 9 回日本加速器学会年会プロシーディングス (2012).

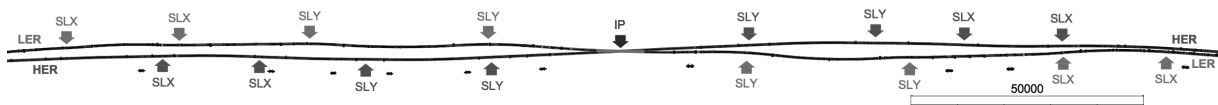


Fig. 1. Layout of sextuple magnets for local chromaticity correction at a straight section of SuperKEKB.

ラディアルセクタ FFAG 加速器用高温超電導コイルの開発

Development of HTS coils for radial sector FFAG accelerator

高山 茂貴, 小柳 圭, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 長内 昭宏, 来栖 努, 石井 祐介(東芝);
雨宮 尚之(京大・工); 森 義治(京大・原子炉); 荻津 透(KEK)

TAKAYAMA Shigeki, KOYANAGI Kei, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, OSANAI Akihiro, KURUSU Tsutomu, ISHII Yusuke
(Toshiba); AMEMIYA Naoyuki, MORI Yoshiharu (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK)

E-mail: shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

1. はじめに

高効率で小型な加速器システムの実現を目指し、イットリウム系(Y系)線材を用いたコイルの巻線技術開発を進めている[1]。このプロジェクトでは、加速器を実現するための幾つかのモデルについて検討を進めているが、そのひとつとして、重粒子線がん治療装置用加速器へのラディアルセクタ型固定磁場強収束(FFAG)加速器の適用を検討している。このラディアルセクタ型 FFAG 加速器は加速器リング中心からの距離に対して累乗関数となっている非線形な固定磁場によって強い収束力が得られるという特徴があるため、パルス運転のマグネットと比べて交流損失が軽減できる利点があり、超電導線材を適用し易い。これまでの検討で加速器設計、コイル設計を実施しているが[2]、今回、磁場の非線形性を高めることでマグネットの小型化に関して検討した結果を報告すると共に、本結果をもとに行ったコイル設計の結果を報告する。

2. 加速器設計

ラディアルセクタ型 FFAG 加速器の外観を Fig.1 に示す。マグネットとしては収束、発散を交互に三台並べたものを1セルとしており、クライオスタット内に 3 つのコイルが収められている。マグネットの作る磁場はリング中心からの距離に対して累乗関数となっており、乗数(k 値)を大きくし、磁場の非線形性を高めることで、ビームが入射から出射までに径方向に移動する量が小さくなり、コイルを小型化できる。一方で k 値を高くすると加速器が許容するビームのばらつき(アクセプタンス)が小さくなるため、要求されるビーム強度を満足できなくなってしまう。そのため、粒子軌道を逐次計算することでアクセプタンスを確認しながらコイルの小型化に関して検討を行った。得られた加速器諸元を Table 1 に示す。

3. コイル設計

加速器設計をもとに、コイル設計を実施した。諸元を Table 2 に、1 セル分のコイルの外観を Fig.2 に示す。軌道計算から求めたビームの通る領域(有効領域)は $\pm 351\text{mm}$ であるため、断熱空間等を考慮しコイル内径は 751mm とした。層数を 5、電流値を 500A とすることで、ビーム軌道上での最大磁場が 3.6T となっている。本コイル設計の結果、線材長は加速器全体で 1200km 程度となり、これまでの検討より 4 割線材長が削減可能であることが明らかとなった。

4. まとめ

重粒子がん治療装置にラディアルセクタ型 FFAG 加速器を適用した場合を想定し、ビーム安定性およびコイル小型化に関して検討を行った。その結果、磁場の非線形性を高めることで線材長 4 割削減できる見込みが得られた。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】の支援によって行われた。

Table 1 Specifications of the FFAG accelerator

Accelerated type	radial sector FDF
Accelerated particle	C6+
Injection/Extraction energy	20 / 400 MeV/u
Mean radius	4.2 ~ 5.3 m
Number of cell	6
Field index (k value)	9.5
Open angle	17.2 deg. (F) / 10.3 deg. (D)
FD ratio (bending angle)	3

Table 2 Specifications of defocus magnets

Type of coil winding	Saddle-shape coil
Effective area	$\pm 351\text{ mm}$
Inner radius	751 mm
Number of turns	1500
Number of layers	5
Current	500 A

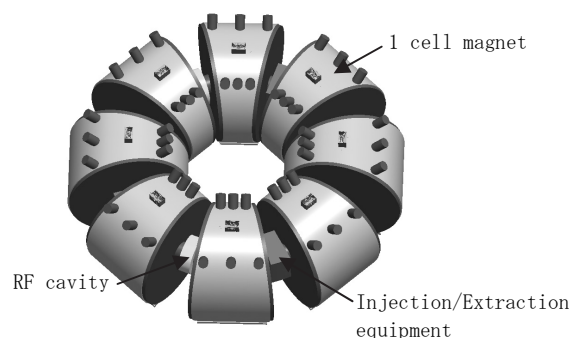


Fig.1 Outer view of the radial sector FFAG accelerator

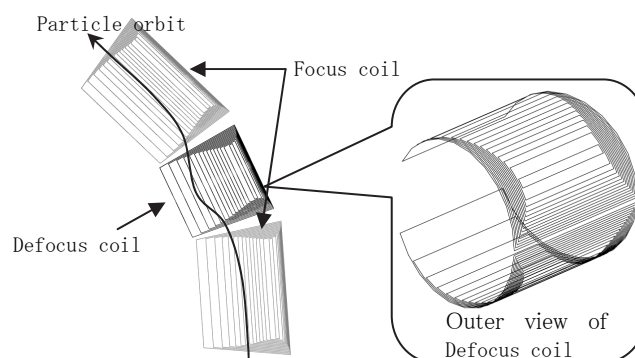


Fig.2 Outer view of coils for 1cell

参考文献

1. N. Amemiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.184
2. K. Takahashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.145

変形シングルパンケーキコイルと立体コイルの組み合わせによる スパイラルセクタ FFAG 加速器用コイル支配型マグネットの検討

Feasibility of coil-dominated HTS magnets combined with deformed single pancake coils and three-dimensional coils for spiral-sector Fixed Field Alternating Gradient accelerators

合田 和弘, 雨宮 尚之, 中村 武恒, 森 義治(京都大学);
 荻津 透(KEK); 来栖 努(東芝); 野田 耕司(放医研); 吉本 政弘(原子力機構)
 GODA Kazuhiro, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune, MORI Yoshiharu (Kyoto University);
 OGITSU Toru(KEK); KURUSU Tsutomu(TOSHIBA); NODA Koji(NIRS); YOSHIMOTO Masahiro(JAEA)
 E-mail: goda@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は高温超伝導体を用いたスパイラルセクタ FFAG 加速器 (Fig. 1(a)) 用のコイル支配型マグネットの研究を行っている。超伝導線材の機械特性を考慮すると、コイルの巻き線は単純である方が望ましい。そこで今回、巻き線の施工をより容易にするマグネットの設計を提案する。本稿では、そのマグネットの2次元断面設計の結果を報告する。

2. FFAG 加速器用マグネット設計の概念の提案

FFAG 加速器用のマグネットには加速器径方向の累乗に比例するような磁場 (Fig. 3(a)) を発生する必要がある。このような磁場分布を実現するような楕円断面上の面電流分布を計算により求め、それを模擬するような導体配置を設計してきた。しかし、これまで設計したマグネットは巻き線工程が複雑な3次元的に線材を変形させた立体コイルだけで構成されていた (Fig. 1(b), (c))。

Fig. 2 に今回設計するコイルの概念図を示す。Fig. 2(a) は変形シングルパンケーキコイルで、平面的なコイルである。Fig. 2(b) はビーム通過領域を確保するため3次元的な変形を加えた立体コイルである。これらを上面から見ると Fig. 1(a) のマグネットと同一の形状となっている。この2種類のコイルを組み合わせ、Fig. 2(c) に示すマグネットを構成する。

巻き線が複雑な立体コイルの使用を必要最低限に抑え、比較的巻き線が簡単な変形シングルパンケーキコイルを積極的に利用することで FFAG 加速器用マグネットの磁場を発生出来ないかというアイデアのもと、従来の設計を改善した。

3. 2次元断面設計結果

Fig. 3(b) に、2次元断面設計結果を示す。これはアンペアターンが 75750 AT の結果である。実際は、マグネットの発生磁場を大きくするためにアンペアターンを大きくする。

今後は3次元コイル形状の最適化、リターンヨーク・フィールドクランプといった磁性体の影響を考慮した解析などを行い、マグネットの実現可能性を検討する。

謝辞

本研究は科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援によって行われた。

参考文献

1. K. R. Symon, et al.: "Fixed-Field Alternating-Gradient Particle Accelerators," Phys. Rev., vol. 103, no. 6, (1956) pp. 1837-1859.
2. S. Russenschuck: "Field computation for accelerator magnets", WILEY-VCH (2010) pp. 293-326.

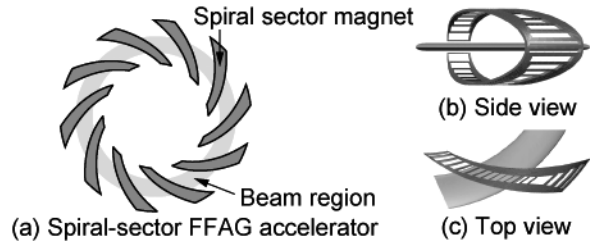


Fig. 1 Coil shape of coil-dominated magnet

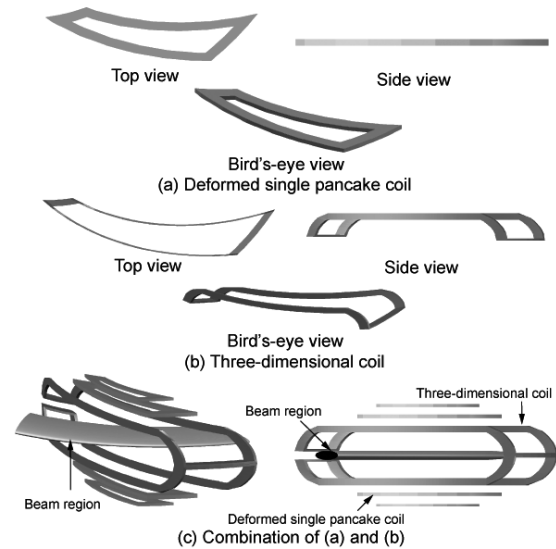


Fig. 2 Magnet combined with deformed single pancake coils and three-dimensional coils

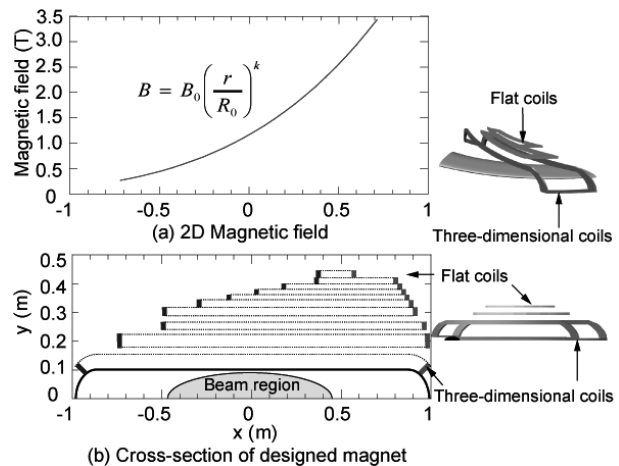


Fig. 3 Cross-section of designed magnet

冷凍機で伝導冷却されたレーストラックコイル 2 個からなる 2 極マグネットの多極磁場成分測定

Magnetic field harmonics measurements of dipole magnet consisting of two race-track coils
conduction-cooled by using a cryo-cooler

佐野 拓也, 雨宮 尚之, 中村 武恒(京大); 小柳 圭(東芝), 荻津 透(KEK); 来栖 努(東芝)

SANO Takuya, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University);

KOYANAGI Kei (Toshiba); OGITSU Toru (KEK); KURUSU Tsutomu (Toshiba)

E-mail: t-sano@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

加速器用マグネットへの薄膜高温超伝導線材の適用を目指した研究開発を進めている[1]-[2]. 多くの実用的高温超伝導線材はテープ形状をしており, 線材磁化(遮蔽電流)が発生磁場の精度に影響を及ぼす. 今回, GM 冷凍機でマグネットを伝導冷却し, マグネット発生磁場の多極成分を回転ピックアップコイル法により測定し, マグネット運転温度が多極磁場成分に与える影響について実験的に検討した.

2. 実験方法

測定対象のマグネットは幅 5mm, 厚さ 0.2mm の GdBCO 薄膜超伝導線材(株式会社フジクラ製)で巻いたシングルバンケーキ型レーストラックコイルを 52.8mm の距離を置いて 2 個配置したものである. コイルの内径, 外形, ターン数はそれぞれ 40mm, 66mm, 76.5turn である. このマグネットを GM 冷凍機で伝導冷却し, 回転ピックアップコイル法を用いて多極磁場成分の測定を行った. 本稿では 2 つの結果について説明する.

3. 結果

10 K と 30 K において, 250 A 通電と電流遮断を 3 回繰り返した時の遮断時の多極磁場成分の時間変化を Fig. 1 に示す. 2 極成分は, 温度が高いほど残留磁場が大きく, 減衰も早くなっていることがわかる. また, 6 極成分も同様に温度が高い方が残留磁場は大きい, 10 K, 30 K どちらの温度においても磁場の時間変化はあまりみられない.

通電電流を 250 A と一定にして, 温度を 10 K から 30 K に変化させた時の多極磁場成分の時間変化を Fig. 2 に示す. Fig. 2 の(a), (b)の縦軸は, 一様電流分布の 2 極磁場成分の理論値を基準として発生磁場を規格化した値で, 電流の時間変化による発生磁場のドリフトの影響は無視できる. 温度を 10 K から 30 K に変化させた時は, 2 極成分, 6 極成分ともにドリフトが確認できるが, それぞれのドリフトの様子は異なっている. ドリフトが生じた原因としては, 温度が高くなることで臨界電流密度が減少し, それに伴って遮蔽電流が減衰したためだと考えられる. また, 温度の時間変化に比べて多極磁場成分の時間変化が緩やかなのは, 温度変化によって線材内の電流分布が変わり, 磁束が変化するが, その磁束の変化を妨げる向きに誘導電流が生じたためだと推察される.

謝辞

本研究は科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援によって行われた.

参考文献

1. N. Amemiya, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.20, no. 3 (2010), pp. 364-367
2. N. Amemiya, et al.: Physica C, Supercond., vol.482 (2012), pp. 74-79

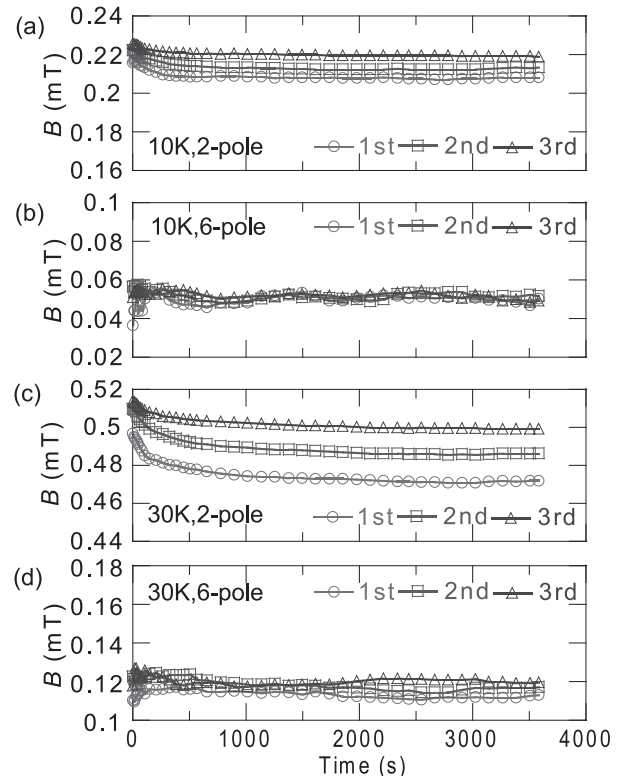


Fig 1. Residual magnetic field harmonics after shutting down transporting current:

(a)2-pole,10 K (b)6-pole,10 K (c)2-pole,30 K (d)6-pole,30 K

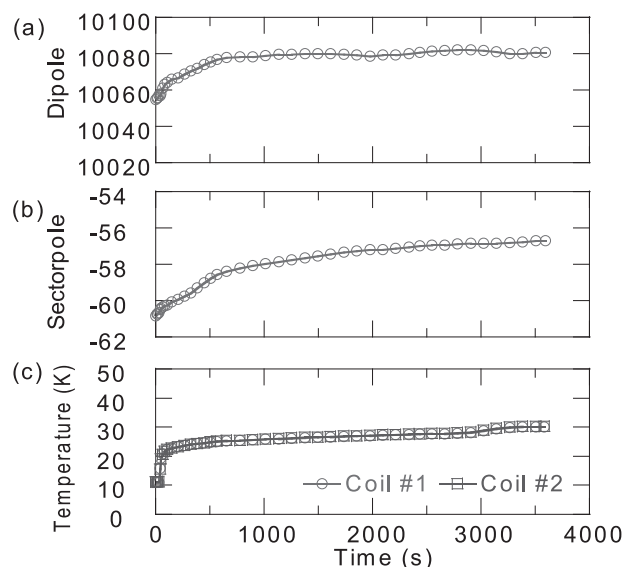


Fig 2. Magnetic field harmonics when changing temperature from 10 K to 30 K: (a)2-pole (b)6-pole (c)Temperature

わが国における次期定常強磁場施設の建設計画 -大型設備整備計画に関する学術会議マスタープラン-

Planning of the High Stationary Magnetic Field Facilities in the Next Generation in Japan
- Japanese Master Plan of Large Research Projects, the Science Council of Japan -

熊倉浩明, 木吉 司, 清水 禎(物材機構)
渡辺和雄, 佐々木孝彦, 野尻浩之(東北大金研)
Kumakura Hiroaki, KIYOSHI Tsukasa, SHIMIZU Tadashi(NIMS)
WATANABE Kazuo, SASAKI Takahiko, NOJIRI Hiroyuki(Tohoku Univ.)
E-mail: KUMAKURA.Hiroaki@nims.go.jp

磁場は物質が晒される基本的な環境の一つである。特に強磁場は電子のもつスピンと軌道運動に直接作用する極めて制御性の良い「場」として、物質科学の研究に欠くことができない。その利用は磁性、超伝導、半導体などの物性科学や、それに基づいた材料科学はもとより、化学、生物、医学など、科学技術の広い範囲にわたっており、強磁場発生装置は科学技術を支える基盤的な装置の一つとなっている。強磁場を発生する磁石には大きく分けて二種類あり、その一つは定常磁場を発生させるもので超伝導磁石や水冷銅磁石、ならびにこれらを用いたハイブリッド磁石が該当する。もう一つは瞬間的に非常に高い磁場を発生させるパルス磁石である。いずれもそれぞれに特長があり、上述した科学技術分野の進展には欠くべからざる装置となっている。

強磁場施設の世界の状況を見ると、米国の国立強磁場研究所(NHMFL)は定常・パルスを統合した国立施設であり、欧州では仏が同様の国立施設を形成し、独・蘭の強磁場施設の更新と併せて EU 全体で運用するという統合が行われた。また中国においても欧米に匹敵する規模の強磁場施設が、武漢(パルス)および合肥(定常)の2拠

点で建設・運用されるなど、世界的に強磁場研究拠点の増強が進んでいる。

翻って日本の現状を見ると、特に定常強磁場施設においては老朽化が進み、世界水準からは大きく後れ取っている。また強磁場を発生する磁石はいずれも大型の設備であり、これらの建設・運用は個々に行うよりも、国が一体として建設・運営した方が効率的であり、強磁場のユーザにとっても利用しやすくなる。

そこで、国内において強磁場施設を有する物質・材料研究機構、東北大学金属材料研究所、東京大学物性研究所ならびに大阪大学極限量子科学研究センターの四機関は、日本学術会議の提言に基づき、また強磁場フォーラムを中心とする強磁場科学の研究者コミュニティでの議論も参考にして、オールジャパン体制で運営する「強磁場コラボラトリー」の計画を進めている。定常磁場に関しては、下図に示すように物材機構と東北大金研が協力して、ハイブリッドマグネット、水冷銅マグネット、30T 超伝導マグネットならびに 25T の無冷媒超伝導マグネットを開発・設置することとし、共同して効率的な運営を目指す。

強磁場コラボラトリー定常磁場施設

5つのターゲット

- ・超伝導研究-----線材・材料評価に必須の国内施設を維持発展
- ・磁気材料研究-----高機能・省元素磁石等の環境・エネルギー対応材料開発
- ・高度分析機器の開発-----NMR, MRIなど生命・材料研究を支援
- ・基盤的物質・材料研究推進 --新現象から新素材のイノベーションへ
- ・若手研究者支援 -----世界水準研究のためのプラットフォーム

定常強磁場コラボラトリーとして
物材機構、東北大(金研)一体となって磁石開発・施設運営

物材機構

東北大(金研)

50T級ハイブリッド磁石
+水冷銅磁石(4台)

特長

- ・世界最高の定常磁場をハイブリッド磁石で発生
- ・水冷銅マグネットは励磁速度が速く短時間で多くの試料の計測が可能

30T超伝導磁石(世界最高)+
25T無冷媒超伝導磁石(世界唯一)

特長

- ・省エネタイプの高性能磁石
- ・安定した強磁場において長時間の計測が可能

相補的な定常強磁場磁石群

一体としての運営で
高い利用効率を実現

50T 級ハイブリッドマグネット建設に向けた NIMS サイトでの 24MW 電源・水冷却設備整備計画と 15MW-35T ハイブリッドマグネットの現状

A future plan of 24MW power supply and water cooling system for 50T class hybrid magnets in NIMS, and the present status of 15MW-35T hybrid magnet.

二森茂樹, 熊倉浩明, 浅野稔久, 松本真治, 清水禎 (NIMS); 渡辺和雄, 淡路智, 高橋弘紀, 小黒英俊 (東北大)
NIMORI Shigeki, KUMAKURA Hiroaki, ASANO Toshihisa, MATSUMOTO Shinji, SHIMIZU Tadashi (NIMS); WATANABE Kazuo,
AWAJI Satoshi, TAKAHASHI Kohki, OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: NIMORI.Shigeki@nims.go.jp

1. はじめに

強磁場コラボラトリ計画において、日本における強磁場施設の基礎設備の試験的開発とそれを用いた最先端の研究を可能にする協調的なアプローチの一環として、NIMS と東北大が連携し最大磁場 50T 級のハイブリッドマグネットおよび 30T 以上の単独水冷銅マグネットの開発計画を推進している。

ヨーロッパでは、グルノーブル、ナイメーヘン、ドレスデン、トゥールーズが強磁場研究の中心として国境を越えたネットワーク (EuroMagNETII, EMFL) を構築して共同研究活動を行い、世界最高の強磁場インフラと研究リソースを有するアメリカと対抗できる強磁場環境とその利用による高度な科学的スループットを欧州にもたらしつつある。この連携を参考に、強磁場コラボラトリ計画では、日本の強磁場施設間の協調・連携を基礎にした定常強磁場施設における NIMS と東北大の連携が、日本国内の強磁場施設間の協調体制に向けた重要なステップと位置づけている。

2. 直流電源

超伝導マグネットと水冷銅マグネットを組み合わせるハイブリッド方式は現在最も強い定常磁場を得る手段となっている。一方で、単独の水冷銅マグネットはタラハシー (アメリカ) やナイメーヘン (オランダ) では 4~8 台を設置し高い研究スループットを実現している。単独水冷銅マグネットは最高磁場までの掃引時間を非常に柔軟に実験に応じて任意に選択可能 (数秒から数時間) かつ設備構成が比較的シンプルなため、利便性と実験能率が高く、効率の良い研究が可能である。

次期計画における 50T 級ハイブリッドマグネットと複数の水冷銅マグネットを利用して他国と対抗しうる研究アウトプットを得るには、24MW 以上の直流電源を必要とする (表 1: 世界各国の直流電源出力を参照。NHMFL は複数の水冷銅マグネットの同時稼働を行うため他の施設より相当に電源出力が大きい)。超伝導マグネットに比較して低インダクタンスの水冷銅マグネットは電源の性能の影響を受けやすく、NMR 測定を中心とした磁場安定度が要求される高度な研究用途においては電源の安定性が重要なキーポイントとなっている。

計画している電源は、他国と同様なサイリスタ 24 相整流により基本リップル周波数を高周波化することでリップルの抑制

TABLE 1 Power supply output of the main high magnetic field facilities.

Facilities	Output (MW)
NIMS	15
Tohoku Univ.	8
NHMFL (Tallahassee)	56
HMFL (Nijmegen)	20
LNCMI (Grenoble)	24

を容易にすると共に、低周波ゆらぎをドロップパーによりアクティブ制御することにより、最大磁場付近で 1ppm(RMS) 程度の磁場安定度を達成目標としている。

3. 水冷システム

水冷銅マグネットは、大電流によるジュール発熱による自身の溶融を避けるため毎分 1 万リッター前後のイオン交換処理された水で冷却されている。水冷銅マグネットの電源の電気エネルギーのほとんどは熱エネルギーに変換され水により除熱されるため、電源の増強には対応する冷却システムが同時に必要とされる。

マグネット電源に要する電力と冷却設備の電力は大型の貯水槽を導入し蓄熱槽とすることで、両者の電力ピーク時間差を発生させ分散化 (オフピーク化) が電力料金の削減に非常に有効である。また、熱交換器を用いてマグネット通水用のイオン交換水の量を減らすことで管理が簡易になり維持費を抑制する。大型貯水槽はバッファとして利用することで様々な励消磁パターンに対応可能なため、研究者にとってもメリットが大きい。

4. 35T NIMS ハイブリッドマグネットの現状

NIMS の 35T ハイブリッドマグネットは 14T の超伝導磁石のバックアップのもと水冷銅マグネットの 21T を加算して内径 32mm、35T の磁場環境を研究者に提供している。2006 年から始まった NMR などの精密な最先端の高度研究を可能にするための直流電源のリップルと高周波ノイズの改善および低周波の磁場揺らぎ改善の数年に渡る継続的な電源改造の取り組みは、磁場安定度を顕著に改善し [1]、ハイブリッドマグネットを用いた NMR 実験が実現された [2]。

水冷却システムは利用者の利便性とエネルギーの効率利用の観点から直接冷却方式から熱交換器を介した間接冷却方式に変更され、水冷銅マグネットの長所である高効率の実験が可能になった。同時に電力の分散化により電気料金の大幅削減を達成している。さらに、安定した冷却システムの完成は、現有の単独水冷銅マグネットの運用の最高磁場を 25T から 27T へ引き上げた運用を可能にしている。ヘリウム冷凍機の更新やヘリウムの自動注液システムにより超伝導マグネットは 14T での終日連続励磁を行い、ハイブリッドマグネットにおける実験の効率性を高めている。

これらの NIMS のハイブリッドマグネットシステムのバージョンアップ改造の取り組みを経て得られた知見は、次期定常強磁場施設の設備建設・整備において重要な価値を提供すると考えている。

参考文献

1. S. Nimori, et al.: J. Low Temp. Phys., vol. 159 (2010) 358.
2. K. Hashi, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., vol. 48 (2009) 010220.

仙台サイトでの 8MW-27.5T 無冷媒ハイブリッドマグネットの改善 Improvement of a 8MW-27.5 T Cryogen-Free Hybrid Magnet in HFLSM

鶴留 武尚, 橋本 篤, 大久保 洋司, 三上 行雄, 渡澤 恵一, 三堀 仁志, 櫻庭 順二(住重)
; 渡辺 和雄, 淡路 智, 小黒 英俊(東北大); 花井 哲, 井岡 茂(東芝)

TSURUDOME Takehisa, HASHIMOTO Atsushi, OOKUBO Hiroshi, MIKAMI Yukio, WATAZAWA Keiichi, MITSUBORI Hitoshi,
SAKURABA Junji (SHI); WATANABE Kazuo, AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi(HFLSM)

; HANAI Satoshi, IOKA Shigeru (TOSHIBA)

E-mail: Tkh_Tsurudome@shi.co.jp

1. はじめに

東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導研究センターに設置されている 8MW-27.5T 無冷媒ハイブリッドマグネットは無冷媒超伝導マグネットと水冷銅マグネットで構成されている。

無冷媒超伝導マグネットは Nb₃Sn コイル、NbTi コイル各々で独立した電気回路で構成されている。これまでの励磁試験では Nb₃Sn コイルの発熱が大きく、8.5T 発生時に Nb₃Sn コイル巻枠内面で 6.5K まで温度上昇することが確認された。[1][2]そこで超伝導マグネット部分について励磁時の温度上昇を抑制するために冷却性能の改善設計・製作を行い、冷却・励磁試験も行った。本講演ではコイル単独での励磁試験及び組み合わせ励磁試験の結果を報告する。

2. 冷却性能の改善

無冷媒超伝導マグネットの内部構成を Fig. 1 に示す。超伝導マグネットは 4KGM 冷凍機 (RDK-415) 4 台で冷却され、Nb₃Sn コイル 2 体及び NbTi コイル 2 体で構成されている。当初、Nb₃Sn コイルには 200MPa 以上の応力でも臨界電流値が低下しない Cu/NbTi 強化型 Nb₃Sn 線材 (Nb バリア) にて製作したが、Nb バリア部分に設計以上の Nb₃Sn が形成され励磁中の発熱が非常に大きかった。[1-4]

そこで、Ta バリアに変更した NbTi 強化型 Nb₃Sn 線材にて Nb₃Sn コイルを製作し、従来のコイルとの置き換えを実施した。更に冷却効率を向上させるために、各コイルに純アルミ及び銅の伝熱部材を設置し、その伝熱部材を冷凍機と接続した伝熱スペーサと接続した。

3. 冷却性能確認試験

冷却性能改善実施前後での NbTi コイル単独励磁試験結果を Fig. 2 に示す。励磁速度 0.1A/s、330 A 到達直前において Nb₃Sn 内層コイルの内面温度が当初 5.4K から改善後 3.6K に冷却されたことを確認した。また各コイル温度が全て 4K 以下であり、各コイルの温度差が 0.5K 以内であることも確認した。

4. 組み合わせ励磁試験

Nb₃Sn コイル単独励磁試験を実施し、定格電流値である 260 A までの通電を確認した。各コイル単独励磁試験実施後、Nb₃Sn コイル及び NbTi コイルの組み合わせ励磁試験にて 9.7T の中心磁場発生を確認した。Nb₃Sn コイル単独励磁試験及び組み合わせ励磁試験の詳細については当日報告する。

参考文献

1. K. Watanabe, et al.: IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol.16, No.2 (2006) p.934
2. S. Awaji, et al.: Journal of the Cryogenic Society of Japan, Vol. 41 (2006) p.310
3. T. Hasebe, et al.: IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol.14, No.2 (2004) p.368

4. K. Miyoshi, et al.: IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol.14, No.2 (2004) p.1004

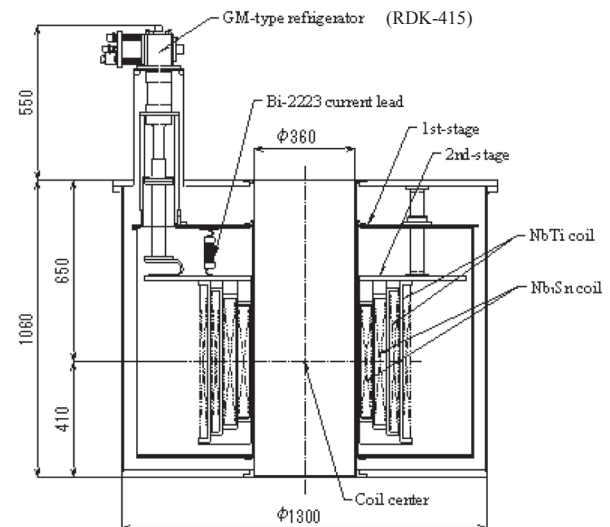
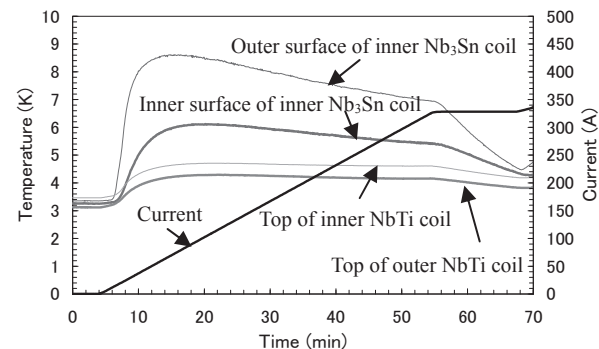
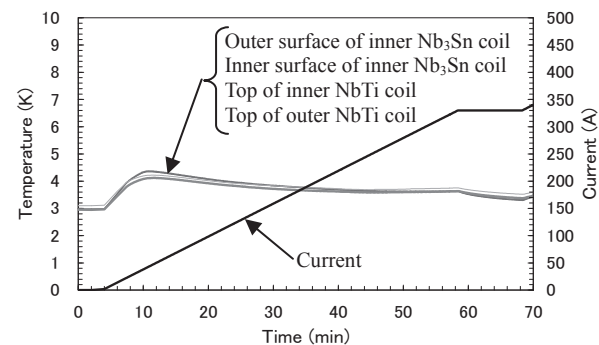


Fig. 1 Schematic image of the cryocooled superconducting magnet for a 8 MW-27.5 T hybrid magnets.



(a) Before improvement



(b) After improvement.

Fig.2 Temperature and current profile for the NbTi excitation test.

50T級ハイブリッドマグネット 用大口径 20T 無冷媒超伝導マグネット の設計

Design of a wide-bore 20T cryogen-free superconducting magnet for a 50T-class hybrid magnet

渡辺和雄、淡路智、小黑英俊 (東北大)、熊倉浩明 (NIMS)、花井哲、井岡茂(東芝)、杉本昌弘、坪内宏和 (古河電工)
 K. Watanabe, S. Awaji, T. Oguro (Tohoku Univ.); H. Kumakura (NIMS); S. Hanai, S. Ioka (Toshiba); M. Sugimoto, H. Tsubouchi (Furukawa); E-mail: kwata@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

わが国の次期定常強磁場施設計画における 50T 級ハイブリッドマグネット建設に向けて、ハイブリッドマグネット用の大口径強磁場超伝導マグネットを設計している。400mm 室温ボア大口径の 20T 超伝導マグネットを開発する予定で、わが国の技術戦略として無冷媒型の伝導冷却方式を採用する。高強度 Nb₃Sn 線材を用いたラザフォードケーブルによる 13T-Nb₃Sn コイルと、REBCO テープによる 7T-RE123 コイルからなる設計である。世界に類を見ない大口径の大型無冷媒超伝導マグネットとして、15MW の水冷銅マグネットと組み合わせた 32mm 室温ボアに 47T 発生できる無冷媒ハイブリッドマグネットが期待できる。

2. 大口径 20T 無冷媒超伝導マグネットの設計

これまでに、液体ヘリウム浸漬冷却方式として 8MW-47T ハイブリッドマグネット用の 20T-400mm 室温ボア超伝導マグネットの設計を報告してきた [1]。NbTi ラザフォードケーブルコイル、CuNb/Nb₃Sn ラザフォードケーブルコイル及び Y 系高温超伝導コイルからなる構成である。ハイブリッドマグネットは、内側の水冷銅マグネットを応力限界で使用しているため、短い寿命で水冷銅マグネットがフェイルすることは避けられない。金研の液体ヘリウム浸漬冷却型ハイブリッドマグネットはインダクタンスが小さく、水冷銅マグネットがフェイルしても数十 A の誘導電流が増える程度であるため、部分冷却安定化の思想で設計されている。しかし、この安定化設計では導体が太くなるため超伝導マグネットが大型化してしまう欠点がある。最近では、クエンチしても壊れない設計であればよいとする方式で、コンパクトな超伝導マグネットを開発してきた。この結果コイルインダクタンスは大きくなるために、水冷銅マグネットのフェイルで超伝導マグネットのクエンチが避けられない。クエンチしても安全性が高く、高温超伝導体のホットスポット問題を可能な限り回避するためには、液体ヘリウムを使わない無冷媒型超伝導マグネットを採用することが考えられる。液体ヘリウムがある場合のクエンチでは液体ヘリウムの急激なガス化等の問題が多いため、無冷媒型はその長所も含んでいる。

そこで、20T-400mm 大口径超伝導マグネットの設計として、Table 1 に示すように無冷媒超伝導マグネットにして液体ヘリウム浸漬冷却超伝導マグネットと比較検討してみた。無冷媒超伝導マグネットの運転温度で条件が厳しいのは NbTi の転移温度が低いことである。大型コイルではコイル温度勾配が大きくなると想定されるため、この設計では Nb₃Sn と Y123 のコイルからなる線材構成として、NbTi 線材を使用しないコイル設計を行った。

4K でのラザフォード平角撚線と Y123 テープ共巻線の設計を行

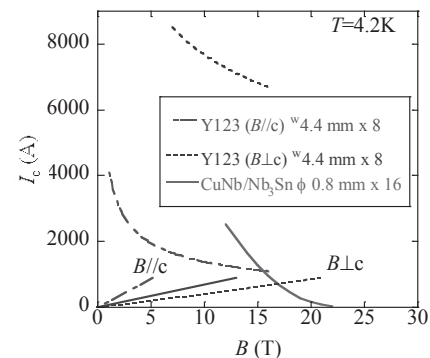


Fig. 1. Estimated critical current properties for 18-strand CuNb/Nb₃Sn Rutherford cable conductor and 8-cowound Y123 tape. The straight lines are the designed coil load lines. The CuNb/Nb₃Sn coil is operated along the load line in fields up to 13 T, and the load lines of the Y123 coil are indicated in two directions of fields up to 5.2 T B//c and 20 T for B⊥c.

った。Fig. 1 に示す I_c - B 特性とコイルロードラインから、運転電流値は臨界電流値の 1/2 として電流マージンを確保した。CuNb/Nb₃Sn ラザフォードケーブルは、事前曲げ処理をしていないストランドの臨界電流特性実測値をもとに、18 本ストランドとして推定した特性である。また、Y123 テープでは、コイルの特性を制限するのは、 $B//c$ の磁場成分である。20T 発生時で、Y123 には 5.2T の $B//c$ 成分が生じるため、この磁場領域で運転電流値の 2 倍の臨界電流を得られるように 8 枚重ねの共巻きとした。コイルインダクタンスは 190H、蓄積磁気エネルギーは 77MJ のコンパクトな無冷媒超伝導マグネットが設計できる。クエンチは低温超伝導側で検出して電源遮断を行い、蓄積エネルギーは分割してコイルの保護ダイオードの回路ごとにコイル熱容量で決まる温度上昇により消費される。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 (基盤 A) 及び JST による補助 (A ステップ: ハイリスク挑戦) を受けています。

参考文献

[1] K. Watanabe et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 3564-3567.

Table 1 Coil parameters of a cryogen-free 20-T superconducting outsert with a 400-mm room temperature bore

Coil ID		YBCO1	YBCO2	Nb ₃ Sn1	Nb ₃ Sn2	Nb ₃ Sn3	Nb ₃ Sn4
Inner diameter	mm	440	569	705	827	941	1055
Outer diameter	mm	568	689	826	940	1053	1190
Coil height	mm	715	715	1138	1138	1138	1138
SC conductor size	mm ²	4.4 ^w × 0.2 ^t		6.45 ^w × 1.53 ^t			
Conductor size	mm ²	4.4 ^w × 2.8 ^t , 4.4 ^w × 2.6 ^t		6.45 ^w × 2.53 ^t , 6.45 ^w × 2.33 ^t , 6.45 ^w × 1.93 ^t , 6.45 ^w × 1.53 ^t			
Operation current	A	900		900			
Conductor current density	A/mm ²	73.1	73.1	62.1	68.2	84.7	112
Overall current density	A/mm ²	56.0	60.2	45.1	48.6	57.6	70.6
Field contribution	T	3.70	3.40	2.87	2.73	3.07	4.25
Central field	T	20.0					
Hoop stress	MPa	333	373	277	272	264	173

18T 無冷媒超伝導マグネットの改善:20.1T 磁場発生成功

Upgrade of Cryogen-free 18T Superconducting Magnet

- Magnetic Field of 20.1T is Successfully Achieved -

花井 哲, 土橋 隆博, 峯元 祐二, 井岡 茂(東芝); 渡辺 和雄, 淡路 智, 小黒 英俊(東北大)

HANAI Satoshi, TSUCHIHASHI Takahiro, MINEMOTO Yuji, IOKA Shigeru (Toshiba);

WATANABE Kazuo, AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi (Tohoku UNIV.)

E-mail: satoshi.hanai@toshiba.co.jp

1. はじめに

東北大学金属材料研究所では、これまでに無冷媒超伝導マグネットの世界最高の 18T の磁場発生を達成した[1]。このマグネットは、2.52T を発生する Bi2223 線材の高温超伝導インサートコイルと 15.48T を発生する 5 層の低温超伝導コイルから構成されていた。今回、この高温超伝導インサートコイルを最新の高性能 Bi2223 線材を用いた高温超伝導インサートに置き換えること等により、20.1T の磁場発生に成功したので、その内容を紹介する。

2. 18T 無冷媒超伝導マグネットの改善内容

今回のマグネット改善では、高温超伝導コイル(H1)と最内層の低温超伝導コイル(L1)の更新を行った。マグネット改善後のコイルパラメータを Table 1 に示す。

18T 無冷媒超伝導マグネット建設当初は、77K での臨界電流値が 90A レベルの銀シース Bi2223 線材しか入手できなかったため、ステンレステープ線を共巻き補強して使用していたが、その後の Bi2223 線材の技術開発により、最近では銅合金で補強された 77K での臨界電流値が 180A 以上の高強度高性能 Bi2223 線材が入手可能になった。今回、この高強度高性能 Bi2223 線材を採用することにより、コイルの導体占積率が向上、ターン数を 1.6 倍にすることが可能になった。さらに、通電電流値も 1.2 倍にすることにより、発生磁場を 2.52T から 4.45T に向上することができた。

また、低温超伝導コイルの最内層コイルには、当初臨界電流密度の高い内部拡散法の Nb3Sn 線を採用していたが、この線材は、臨界電流値が高い利点をもつもののヒステリシス損失も大きく、マグネットの運用に制限を与えていたため、今回のもうひとつの改善ポイントとした。新しいコイルには、臨界電流密度は内部拡散法に劣るもののヒステリシス損失の低いブロンズ法の Nb3Sn 線を採用し、導体断面を矩形にすることにより、導体占積率を向上させるとともに銅比を下げることによって、従

来を若干上回るコイル電流密度を確保した。このことにより、ヒステリシス損失を大きく低減しながら、発生磁場も 1.53T から 1.61T と若干ながら改善させることができた。

3. 通電試験結果

改善後の 18T 無冷媒超伝導マグネットの 20T 通電試験結果を Fig.1 に示す。通電試験に問題はなく、新マグネットが約 60 分で 20T 励磁可能なこと。最大 20.1T 通電での健全性が確認できた。また、従来、60 分励磁モードで 7K 強まで温度上昇していた L1 コイル最高温度も 4.7K に抑えられ、L1 コイル改善の効果も確認された。

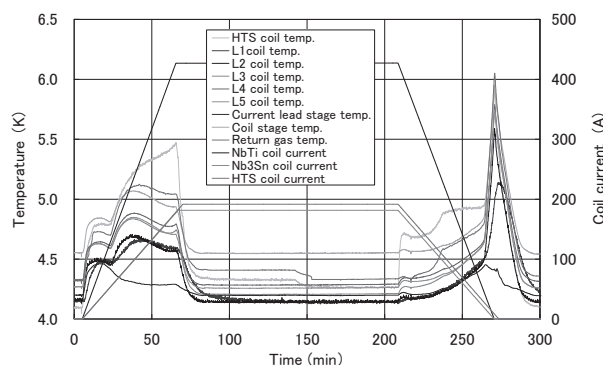


Fig. 1 Coil current and coil temperature during the 20T Operating Test

参考文献

1. S. Hanai, et al.: "Design and Test Results of 18.1 T Cryocooled Superconducting Magnet with Bi2223 Insert" IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 17, No.2 (2007) pp. 1422-1425.

Table 1 Parameters of Upgraded Cryogen-free 18T Superconducting Magnet

Coil ID	H1	L1	L2	L3	L4	L5
Superconductor	Ag/Bi2223	Cu/Nb ₃ Sn		Cu-NbTi/Nb ₃ Sn		Cu/NbTi
Matrix/Reinforcement/Superconductor Ratio	1.6/1.2/1	0.37/-/1		0.5/0.5/1		0.9/-/1
Wire dimension without insulation (mm)	4.5×0.36	1.45×2.35	1.82	1.50	1.35	1.80
Inner radius (mm)	44.9	97.8	136.7	185.6	225.6	259.7
Outer radius (mm)	89.0	133.0	182.6	222.4	255.9	307.0
Coil height (mm)	274.9	315.0	450.6	579.2	641.0	709.8
Number of turns	5670	2750	5928	8400	9372	10416
Operating current (A)	191.5			181.5		427.0
Current density of conductor (MA/m ²)	117.9	54.5	69.5	102.4	126.4	167.8
Current density of coil (MA/m ²)	89.3	45	53.5	75.5	91.9	134.8
Inductance (H)	1.33	0.84	5.25	14.3	22.4	33.5
Magnetic field contribution (T)	4.45	1.61	2.44	2.70	2.66	6.15
Maximum field (T)	20.1	15.6	14.0	11.5	8.8	7.3
Operating temperature (K)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Current sharing temperature (K)	—	8.1	7.3	8.5	9.8	5.9
Hoop stress (MPa)	212	113	169	234	231	91
Compressive stress (MPa)	10	7	16	37	54	92

高強度 Nb₃Sn 線材とラザフォードケーブルの開発

Development of Rutherford cable composed of high strength Nb₃Sn strands

杉本 昌弘, 坪内 宏和(古河電工); 渡辺 和雄, 淡路 智, 小黒 英俊(東北大)
 SUGIMOTO Masahiro, Tsubouchi Hirokazu (Furukawa Electric Co., Ltd.);
 WATANABE Kazuo, AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.)
 E-mail: masahiro@nikko.furukawa.co.jp

1. はじめに

我々は、次期定常強磁場施設計画における大型強磁場超伝導マグネットに適用可能な Nb₃Sn 導体の開発を行っている[1]。Nb₃Sn 線材はその超伝導特性がひずみに弱いことから、強力な電磁力下で使用するために高強度化する必要がある。Cu 母材の中に Nb ロッドを多数本埋め込む Nb-rod 法という新しい手法で製作した CuNb 強化材を有する内部補強型 Nb₃Sn 線材は、従来の In-situ 法 CuNb 強化線材よりも高応力下での超伝導特性に優れており[2]、残留抵抗比が大きく、製造性も良好であるという特長がある。ここでは、実規模製造で得られた 16km 長の長尺素線を用いてラザフォードケーブル(撚線)を製作し、Nb₃Sn 生成熱処理後、繰り返し曲げ歪を印加し、その臨界電流特性について調査した結果について報告する。

2. 試料と実験方法

開発した Nb-rod 法 CuNb 強化 Nb₃Sn 素線と撚線の諸元と断面写真を Table 1 と Fig.1 に示す。Nb₃Sn 生成熱処理(670°C×96h)後の撚線のフラットワイズ方向に正方向の繰り返し曲げ歪 ϵ_{pb} を、Fig.2 に示す曲げ歪印加用のプリーの直径(=2R)を変えて印加した。比較のために、Nb₃Sn 生成熱処理後の同じ素線に同様に曲げ歪を印加したサンプルを準備した。 ϵ_{pb} (%)は、素線の直径を d (mm)とし、胴径 D_0 (=270mm)の熱処理ポビンからサブライする時に印加される曲げ歪みを考慮して、式(1)で算出した。

$$\epsilon_{pb} = \left(\frac{d}{2R} - \frac{d}{D_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

I_c 測定は、サンプル長 50 mm、電圧端子間距離 10 mm、外部磁場 10~17T で実施し、 I_c は電界 $10\mu\text{V/m}$ で定義した。

3. 実験結果と考察

Fig. 3 に、事前曲げ加工を施した撚線から取り出した素線の 14T での I_c と、素線レベルで事前曲げ歪み加工を施した素線の I_c の事前曲げ歪依存性を示した。縦軸は、素線の $\epsilon_{pb}=0$ の I_c で規格化した。撚線の I_c は、事前曲げ歪によって、素線と同様に事前曲げ歪印加前よりも増大した。それらの規格化された I_c は、 ϵ_{pb} が 0.5%~1.0% の範囲内においていずれも 1.3 倍~1.5 倍であることから、素線レベルで得られる知見を撚線に展開することが可能であることが分かった。

Nb rod 法-CuNb 強化型 Nb₃Sn 線材を用いたラザフォードケーブルは、Nb₃Sn 生成熱処理後、繰り返し曲げ歪を印加することにより通電特性が向上することから、リアクト・アンド・ワインド法で製造される強磁場超伝導マグネットに適していると考えられる。

謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構(JST)研究成果展開事業A-STEP本格研究開発ハイリスク挑戦タイプの支援を受けて行われました。

参考文献

1. K. Watanabe et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 22 (2012) 4300804

2. H. Oguro et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.86 (2012) p.69

Table 1 Conductor specifications

(a) Strand	
Superconductor	Bronze- processed Nb ₃ Sn
Reinforcement	Nb-rod-method Cu-20vol%Nb
Diameter	0.8mm
Cu/CuNb/non-Cu	20%/35%/45%
Filament diameter	3.3 μm
Twist pitch	20 mm
(b) Rutherford cable	
Number of strands	16
Dimensions	6.4mm ^w x 1.5 mm ^t
Cabling pitch	65mm

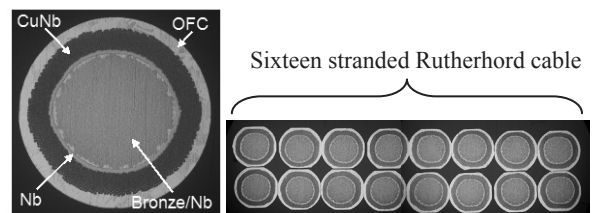


Fig.1 Cross-section of Rutherford cable composed of 16 Nb₃Sn strands with Nb-rod method CuNb reinforcement

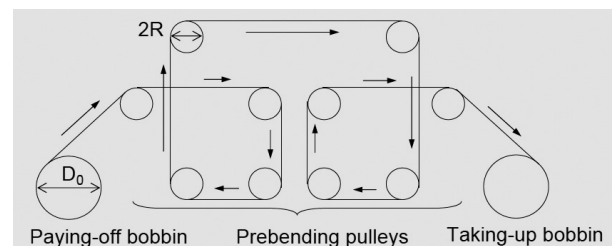


Fig.2 A schematic image of the prebending treatment

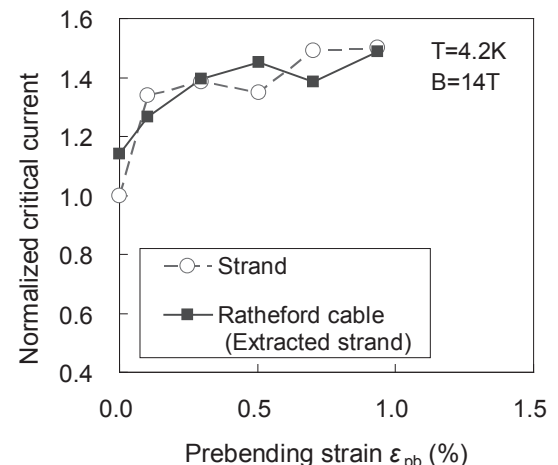


Fig.3 Normalized critical currents as a function of prebending strain for CuNb/Nb₃Sn strands and cables

高強度 Nb₃Sn ラザフォードコイルの磁場中通電試験

Performance of high strength Nb₃Sn Rutherford coil in high fields

小黒 英俊, 渡辺 和雄, 淡路 智(東北大); 熊倉 浩明, 木吉 司, 二森 茂樹(NIMS); 杉本 昌弘, 坪内 宏和(古河電工); 花井 哲(東芝)

OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);

KUMAKURA Hiroaki, KIYOSHI Tsukasa, NIMORI Shigeki (NIMS);

SUGIMOTO Masahiro, TSUBOUCHI Hirokazu (Furukawa Electric);

HANAI Satoshi (Toshiba)

E-mail: h-oguro@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

日本の強磁場グループでは、次世代の強磁場マグネット開発のために、協力してマグネット開発を進めることを計画している[1]。その中で、東北大では超伝導マグネット開発を担当することになっており、50T ハイブリッドマグネット用 20T 大口径超伝導マグネット、30T オール超伝導マグネット、そして、25T 無冷媒超伝導マグネットを開発することを計画中である。

これらのマグネットでは、大電流通電による運転が考えられているため、Nb₃Sn 線材をケーブル化して利用することが求められている。これに対して我々のグループでは、これまでに開発してきた CuNb 内部補強 Nb₃Sn 線材[2]をラザフォードケーブルとして使用することとし、そのケーブル化を行ってきた。ケーブルから取り出した素線は、良好な超伝導特性を維持していることはすでに報告している[3]。今回は、导体そのものの特性評価として、ラザフォードケーブルをコイル化し、14 T の磁場中において通電特性を評価したので報告する。

2. 試料と実験方法

素線には 0.8 mm 径の In-situ 法 CuNb 補強ブロンズ法 Nb₃Sn 線材を用い、これを 16 本用いてラザフォードケーブルを作製した。そのラザフォードケーブルを直径 268 mm の巻棒に 1 層 3 ターン巻き付けて試料とした。巻き付ける際には、補強のためにステンレステープを共巻きした。

測定は NIMS の大口径 14 T 超伝導マグネットを用いて行った。このため、温度 4.2 K、最大磁場 14 T 中で最大電流 2000 A の条件で測定を行った。電圧端子はコイルの端から端までとし、ラザフォードケーブルの電圧の測定を行った。ラザフォードコイルのひずみは、共巻きしたステンレステープに貼り付けたひずみゲージで測定した。

3. 実験結果

通電試験は 14 回行い、1 回ごとに通電電流を増やしながらか 1900 A まで通電を行った。Fig. 1 に、通電電流の最も大きくなった 12 回目の通電時の、通電試験結果を示す。ノイズが大きいのが、1800 A 程度から電圧の発生が見られ、0.1 μ V/cm 基準で決めた I_c は 1823 A となった。14 T における素線の I_c (1 μ V/cm 基準) が 97.2 A であるため、素線の I_c の 16 倍よりラザフォードコイルの I_c は大きくなっている。これは通電時に加わるひずみによる効果が考えられる。

Fig. 2 には、上記の通電試験時における、共巻きしたステンレステープのひずみ変化を示した。通電開始時のひずみが 0.12% となっているが、これは数回の通電による電磁力によって、塑性変形しているためである。グラフより、最大で 0.6% までひずみを印加したことが分かる。Nb₃Sn 素線に同程度のひずみがかわっていたとすると、このひずみによって I_c が変化したと考えられる。

本試験では上記の 12 回目の試験によって最大の I_c を示したが、13 回目の通電で 1820 A でクエンチし、14 回目の通電では I_c (0.1 μ V/cm 基準) が 1766 A となり劣化が観測された。

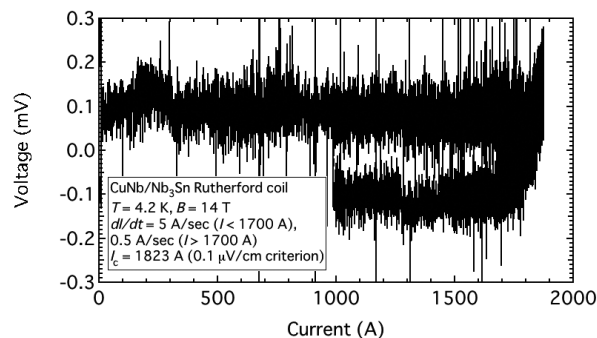


Fig. 1 The voltage of the Rutherford coil as a function of operating current up to 1900 A at 4.2 K and 14 T.

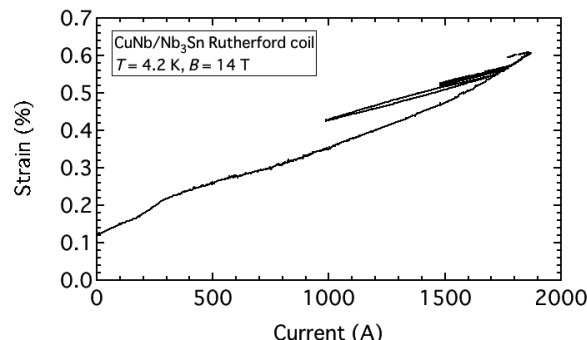


Fig. 2 The strain of the stainless steel tape as a function of operating current up to 1900 A at 4.2 K and 14 T.

25 T 無冷媒超伝導マグネットでは、Nb₃Sn ケーブルに 12 T 中で 1000 A を通電するため、我々が開発したラザフォードケーブルは、上記マグネット用ケーブルとして十分な性能を持っていることが示された。

4. まとめ

日本の次世代強磁場超伝導マグネットに使用する、高強度 Nb₃Sn ラザフォードケーブルの磁場中通電試験を実施した。コイル状に巻いたラザフォードケーブルに、4.2 K、14 T の条件で通電を行い、 I_c が 1823 A であることが分かり、このときに 0.6% 程度のひずみがかわることが分かった。この結果より、開発した Nb₃Sn ラザフォードケーブルは、25T 無冷媒超伝導マグネット用ケーブルとして十分な性能を持つことが分かった。

謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤(A)の援助を受けました。

参考文献

1. K. Watanabe et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 22 (2012) 4300804
2. H. Sakamoto et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 12 (2002) p. 1067
3. H. Oguro et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p. 76

REBCO テープ線材特性と電磁力試験

Mechanical and in-field critical current properties of REBCO coated conductors and electromagnetic force test

大保 雅哉, 藤田 真司, 飯島 康裕, 伊藤 雅彦, 齊藤 隆(フジクラ); 淡路 智, 小黒 英俊, 渡辺 和雄(東北大);
花井 哲, 丸川 宏太郎(東芝); MIYOSHI Yasuyuki, CHAUD Xavier, DEBREY Francois(LNCMI)
DAIBO Masanori, FUJITA Shinji, IJIMA Yasuhiro, ITOH Masahiko, SAITOH Takashi(FUJIKURA);
AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo(Tohoku Univ.); HANAI Satoshi, MARUKAWA Kotaro(TOSHIBA),
MIYOSHI Yasuyuki, CHAUD Xavier, DEBREY Francois(LNCMI)
E-mail: masanori.daibo@jp.fujikura.com

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(REBCO, RE;希土類)テープ線材はその高い機械特性から強磁場マグネット応用が期待されている。強磁場マグネット設計のためには REBCO テープ線材の低温下での磁場特性の挙動, 機械特性の把握が必要である。

当社は 2010 年度から東北大学金属材料研究所・強磁場超伝導材料研究センターと強磁場マグネット向けの REBCO テープ線材の共同研究を実施しているが, 今回, フジクラ製 REBCO テープ線材の低温磁場中の臨界電流(I_c)特性の評価結果, および, 液体窒素中での引張特性について評価状況を報告する。

2. REBCO テープ線材の磁場特性

測定に用いた線材は 75 μ m Hastelloy 基板上に IBAD(Ion-beam-assisted deposition)中間層を介して PLD(pulsed laser deposition)法により 3 μ m の超伝導層(GdBCO)が成膜された線材であり, I_c (77K, self field)は 658 A/cm-w である。低温で測定するため, 線材はウェットエッチングにより約 0.4 mm 幅にブリッジ加工した。ブリッジの長さは 10 mm であり, ブリッジ加工後の I_c (77K, self field)は 28 A, 10^{-7} ~ 10^{-6} V/cm での n 値は 21 である。サンプルは伝導冷却により冷却し, ϕ 200mm ボアの 3T マグネット中で 4 端子法により測定した。サンプル取付台が回転できるようになっている。

各温度, 磁場に対する I_c 磁場角度依存性の測定結果を Fig.1, Fig.2 に示す。Fig 中では線材の垂直方向磁場($\theta = 90^\circ$)を B//c, 水平方向を B//ab と表し, 縦軸は 1cm 幅換算値である。1~3T と低磁場ではあるが, B//ab 付近の角度依存性が, 同じ磁場では温度が低くなるほど拡がり, 同じ温度では磁場が高くなるほど鋭くなっていく挙動を示している。現在, 東北大学の施設を利用して 20 K 以下, 10 T 以上の高磁場中の I_c 特性を評価中である。

3. REBCO テープ線材の液体窒素中機械特性

REBCO テープ線材の引張特性はより使用環境に近い環境で評価することが望まれるため, 液体窒素中で REBCO テープ線材の引張特性を評価した。サンプル長約 200 mm のサンプルに引張試験機にて荷重印可前に試験前 $I_c(I_{c0})$ を測定し, 引張速度 4.8 mm/min で所定の荷重を負荷した状態で I_c を測定した。引張歪みは試料に歪ゲージを貼り付けて荷重印可前後で可逆/不可逆領域を測定した。

可逆領域である引張応力 750 MPa, 引張歪み 0.45%の繰り返し引張試験結果例を Fig.3 に示す。測定に用いた線材は 100 μ m Hastelloy 基板上に IBAD 中間層, 2.5 μ m の PLD 法による超伝導層(GdBCO)が成膜され, 25 μ m 厚の銅めっきを施した 10 mm 幅線材である。強磁場用最内層マグネットの場合, コイル配置の制約から高電流密度化する必要性が高いため, 銅めっきテープ線材を評価した。Fig.3 より, 1000 回繰り返し試験後でも I_c に変化がないことを確認している。なお, 引張試験, 繰り返し引張試験については引き続き 5 mm 幅線材の評価なども実施している。

4. まとめ

フジクラ製 REBCO テープ線材の低温磁場中の臨界電流(I_c)角度依存性の挙動, および, 液体窒素中での引張特性, 繰り返し引張試験結果について評価を実施中である。なお, 発表では東北大学で実施されたエポキシ含浸コイルの 8T 磁場中電磁力試験結果についても述べる。

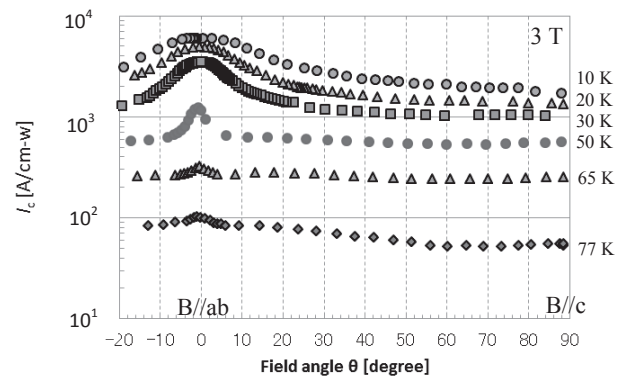


Fig.1 Angler dependence of critical current at 3T

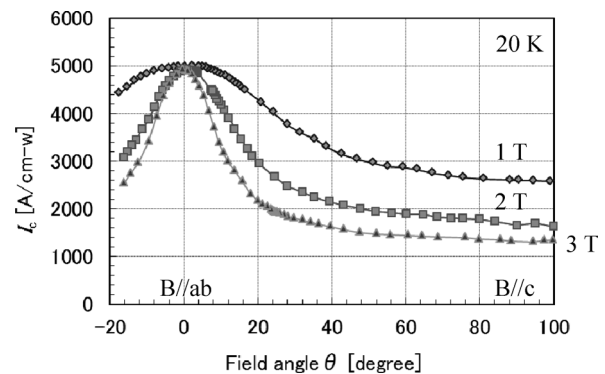


Fig.2 Angler dependence of critical current at 20K

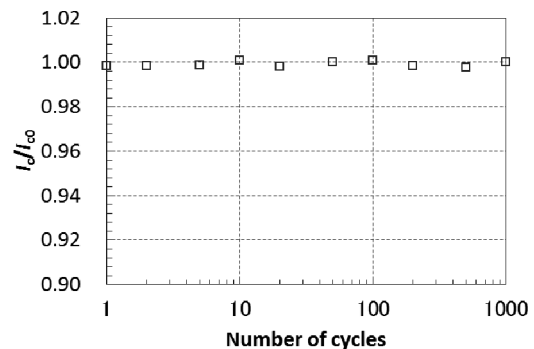


Fig.3 Tensile cycle test at 77 K

22T 無冷媒超伝導マグネット用 REBCO インサートコイル開発

Development of REBCO insert coil for a cryogen-free 22 T superconducting magnet

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 花井 哲, 井岡 茂,
石井 祐介(東芝); 淡路 智, 小黒 英俊, 渡辺 和雄(東北大)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, HANAI Satoshi, IOKA Shigeru,
ISHII Yusuke (TOSHIBA); AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)
E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

18 T の磁場発生が可能な無冷媒超伝導マグネットに最新の Bi2223 線材を用いた高温超伝導インサートコイルに置き換えることによって 20.1 T の磁場発生に成功した[1]. 現在, RE 系($RE_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$)超伝導線材を用いたインサートコイルに置き換えることで 22 T の磁場発生可能な無冷媒超伝導マグネットを開発中である. 本発表では, インサートコイルの設計結果および実機を模擬した要素コイルの伝導冷却試験結果について報告する.

2. REBCO インサートコイル設計

REBCO インサートコイルは, シングルパンケーキコイルを 50 枚積層して構成されており, 定格 200 A 通電時 6.6 T の磁場を発生し, 外層の LTS マグネットと組み合わせることにより 22.1 T の磁場を発生させる. RE 系線材およびコイル諸元を Table 1 に示す. 冷却構造は, 2 積層コイル間に 0.25 mm 厚の高純度アルミを挿入し, コイル内層および外層から伝導にて冷却する構成となっている. また, 定格通電時の最大経験磁場は 22.3 T であり, 平均軸圧縮力は 17.4 MPa, BJR の最大値は, 基板のみで全ての電磁力に耐えると仮定すると基板断面換算で 679 MPa となった.

3. 要素コイル試作

実機インサートコイルを製作前に, 実機とほぼ同サイズのシングルパンケーキコイルを 2 枚積層したコイルを用いて, 液体窒素中および伝導冷却中にて通電試験を実施し, 冷却時の熱応力, ヒートサイクルおよび 5 T バックアップ磁場による電磁力によりコイルが劣化しないかどうか調査した. 試作したシングルパンケーキコイルの外観を Fig. 1 に示し, 諸元を Table 2 に示す. #1 および #2 コイルに 0.25 mm の伝熱板を挿入して接着し, 2 つのパンケーキコイルを電気的に接続した.

4. 通電試験結果

試作した 2 積層コイルの液体窒素中での通電試験結果を Fig. 2 に示す. #1 および #2 のコイル I_c は, 72 A および 76 A, n 値($10^{-9} \sim 10^{-7}$ V/cm 定義)は, 33 および 31 であり良好な超伝導特性を有しており劣化がないことを確認した. 次に 2 積層コイルを伝導冷却試験装置に組み込み 5 T バックアップ磁場中にて通電試験を実施した. 5 T バックアップ中で最大 472 A まで通電し, #1 および #2 コイルともに異常な電圧発生がないことを確認した. 472 A 通電時の最大 BJR は基板換算で 430 MPa であった. バックアップ磁場中試験前後の 10 K での電流-電圧特性を Fig. 3 に示す. 今回は, 試験装置の制約で実機と同程度の電磁力まで印加することはできなかったが, ヒートサイクルやバックアップ磁場中試験によりコイルに劣化が生じないことを確認した.

5. まとめ

実機を模擬した要素コイルを伝導冷却にてバックアップ磁場中試験を実施し, 冷却時の熱応力や電磁力による劣化がないことを確認した. 今回の試験結果を元に, 22 T インサートコイルの詳細設計および製作を進めていく.

Table 1 Specification of REBCO insert coil

Tape width (mm)	4
Tape thickness (mm)	0.23
Tape length / pancake (m)	61
Inner diameter (mm)	96
Outer diameter (mm)	180
Height (mm)	227
Turns / pancake (turn)	140
Number of pancakes	50
Inductance (H)	2.5

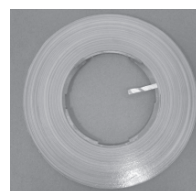


Fig. 1 Photograph of single pancake coil

Table 2 Specification of single pancake coils

Coil No	#1	#2
Tape width (mm)	4	4
Tape thickness (mm)	0.224	0.222
Tape length (m)	53	53
Inner diameter (mm)	94.6	94.6
Outer diameter (mm)	169.8	169.3
Height (mm)	4.25	4.23
Turns (turn)	126	126
Inductance (mH)	2.8	2.8
Tape I_c (77 K, .s.f.) (A)	222	230

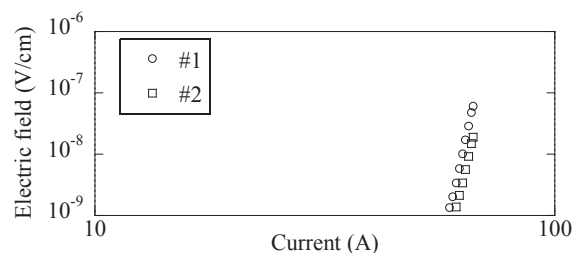


Fig. 2 $E-I$ characteristics of 2 stacked pancake coils at 77 K

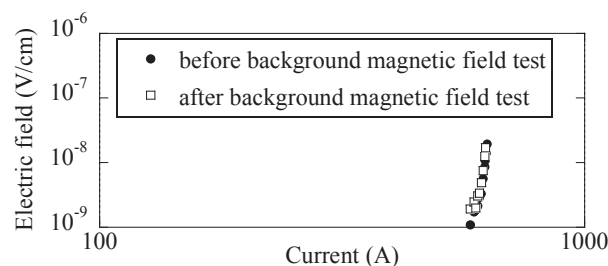


Fig. 3 $E-I$ characteristics of 2 stacked pancake coils at 10 K

参考文献

- S. Hanai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) 3A-a10

25T 無冷媒超伝導マグネットの建設計画 Development plan of 25T cryogen-free superconducting magnet

淡路 智, 渡辺和雄, 小黒英俊(東北大金研), 熊倉浩明(物材機構), 宮崎寛史, 戸坂泰造, 花井哲, 井岡茂(東芝), 杉本昌弘, 坪内宏和(古河電工)

AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo, OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.), MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, HANAI Satoshi, IOKA Shigeru (Toshiba), SUGIMOTO Masahiro, TSUBOUCHI Kazuhiro (Furukawa)

E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

日本の定常強磁場とパルス強磁場を融合させた「強磁場コラボラトリー計画」は、ネットワーク型のオールジャパン強磁場施設の建設計画である。定常強磁場パートでは、東北大金研と物材機構が共同で 50T 定常強磁場マグネット開発を実施する。目玉となるのは、50T 無冷媒ハイブリッドマグネット、30T 無冷媒超伝導マグネット、25T 無冷媒超伝導マグネット開発であり、後者から順番に開発することで、線材やコイル化技術の積み上げを行う計画である。これらの計画の中で、平成 24 年度に、25T 無冷媒超伝導マグネット計画が採択された。本講演では、その計画内容について報告する。

2. 建設計画

これまで、我々は高強度 Nb₃Sn 線材開発、高温超伝導コイル化技術開発などを実施し、これらを用いた無冷媒超伝導マグネット(CSM)開発を実施してきた(図1)。無冷媒超伝導マグネット開発において重要な点は、高強度 Nb₃Sn 線材を用いることによるマグネットのコンパクト設計と、主に高温超伝導電流リード等による熱侵入の低減である。これらの技術により、世界初の無冷媒ハイブリッドマグネットや、無冷媒では世界一の強磁場マグネットである 18T-CSM の開発に成功してきた。特に 18T-CSM には、最内層に Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y (Bi2223)コイルを採用し、高温超伝導線材を用いた世界最高の実用無冷媒超伝導マグネットとなっている。この Bi2223 内層コイルは最近、近年開発された高性能 Bi2223 コイルに置き換えることで、20.1T の磁場発生に成功した[1]。これらの技術をさらに発展させることで、25T 無冷媒超伝導マグネット(25T-CSM)開発を実施する予定である。

25T-CSM 開発において重要な技術は、1) 高温超伝導コイル化技術と、2) 高強度 Nb₃Sn 導体コイル技術の主に2点である。1)は、高温超伝導コイルの高電流密度と高電磁力下の運転を伝導冷却で実現する必要がある、含浸した高性能コイル開発が重要となる。これまで我々は、REBa₂Cu₃O_y (RE123, RE は希土類元素)コイルを用いた電磁力試験等を実施してきたが[2]、さらに上記の 20T-CSM の Bi2223 内層コイルを、RE123 内層コイルに置き換えることにより、コイル化技術を実証する。結果として、20T-CSM は 22T-CSM となる予定である[3]。また、2)では、これまで開発してきた高強度 Nb₃Sn 素線を導体化することで大容量化したラザフォード導体を開発している[4]。すでに 0.8mm 径 CuNb/Nb₃Sn 素線を 16 本撚り合わせたラザフォード導体を作製し、14T のバックアップ中での動作確認が終了している[5]。この実験では、14T バックアップ磁場中の導体 I_c は素線の I_c の 16 倍以上であった。このとき、導体には最大で 430MPa の電磁力がかかっている計算である。この導体を用いて、25T-CSM の中層コイルを R&W 法にて作製する予定である。

これらの結果を踏まえて平成 25 年度には、RE123 コイル及び高強度 Nb₃Sn ラザフォードコイルを作製し、伝導冷却下において 18T までの強磁場中の試験を実施する。その結果を踏まえて 25T-CSM の設計を確定し、平成 26 年度末までに完成するスケジュールである。作製したマグネットは、東北大金研強磁場センター西側に新たに建設する別棟に設置されることになる。

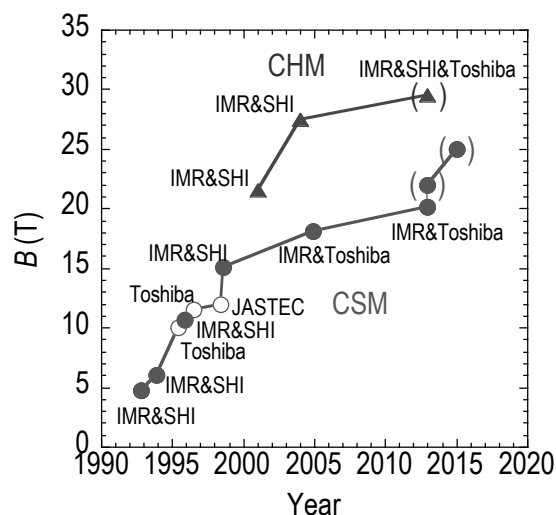


Fig. 1 Progress of cryogen-free hybrid and superconducting magnets. Solid symbols indicate the magnets developed by IMR, Tohoku University. Bracketed symbols mean the plan.

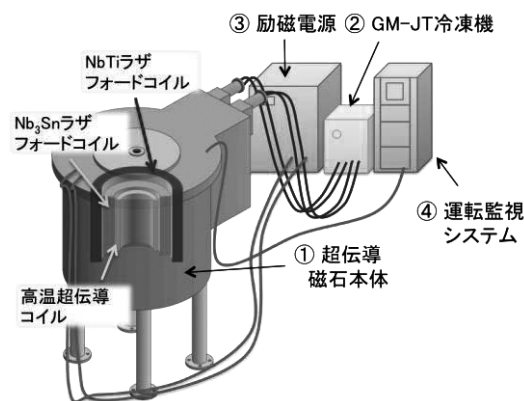


Fig. 2 Image of the 25T cryogen-free superconducting magnet.

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤A)の補助を受けて実施しました。

参考文献

- Hanai *et al.*, Abstract of CSJ Conference **87** (2013) presented.
- Awaji *et al.*, IEEE TAS, **23** (2013) 4600305.
- Miyazaki *et al.*, Abstract of CSJ Conference **87** (2013) presented.
- Sugimoto *et al.*, Abstract of CSJ Conference **87** (2013) presented.
- Oguro *et al.*, Abstract of CSJ Conference **87** (2013) presented.

SMES 用超電導コイルの最大磁場と線材使用量の関係

Relationship between maximum magnetic field and superconducting wire usage of a SMES coil

最知 庸, 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 濱島 高太郎(八戸工大)

SAICHI Yo, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku University); HAMAJIMA Takataro (Hachinohe Institute)

E-mail: saichi@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

SMES 用超電導コイルの設計では、最大磁場を大きくすることでコイルサイズを小さくし、エネルギー密度を高くすることができることから、一般的に高磁場設計が行われる。しかし、その場合、線材に印加される磁場も大きくなるため臨界電流密度の低下も大きくなる。これは、線材使用量を最小化するには、必ずしも高磁場設計が最適であるとは限らないことを意味している。そこで、 MgB_2 、Bi2223、Y 系の 3 つの線材に対して、単一ソレノイド型とトロイダル型の 2 つのコイル形状で最大磁場と線材使用量の関係を明らかにし、線材使用量低減に効果的な SMES 用コイル設計の指針を明確にしたので報告する。

2. 最大磁場と線材使用量の関係

環状ソレノイド型トロイダルコイルのアスペクト比 a_t をトロイダル主半径 R_c 、コイル半径 r_c を用いて次のように定義する。

$$a_t = \frac{r_c}{R_c} \quad (1)$$

このとき自己インダクタンス L 、最大磁場 B_m 、貯蔵エネルギー E はコイルの巻き数 N 、通電電流 I 、真空の透磁率 μ_0 を用いて次式のように表せる。

$$L = \mu_0 N^2 R_c (1 - \sqrt{1 - a_t^2}) \quad (2)$$

$$B_m = \frac{\mu_0 N I}{2\pi R_c (1 - a_t)} \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{2} L I^2 \quad (4)$$

また、線材使用量 l は線材の厚さを無視し、 $l = 2\pi r_c N$ とする。これらの式より線材使用量は次式のようにコイル半径、最大磁場、臨界電流密度 J_c に反比例した形で表すことができ、有限長の円筒ソレノイドコイルの場合も同様である。

$$l = \frac{2a_t^2 E}{(1 - a_t)(1 - \sqrt{1 - a_t^2}) r_c B_m I} \propto \frac{1}{r_c B_m J_c} \quad (5)$$

ある一定の貯蔵容量の SMES コイルにおいてコイル半径は最大磁場に依存しており、超電導線材の臨界電流は線材に印加される磁場に依存している。つまり、各コイル形状において最大磁場と線材に印加される磁場の関係を求めることで、式(5)から線材使用量と最大磁場の関係を明確にすることができる。

3. 解析条件

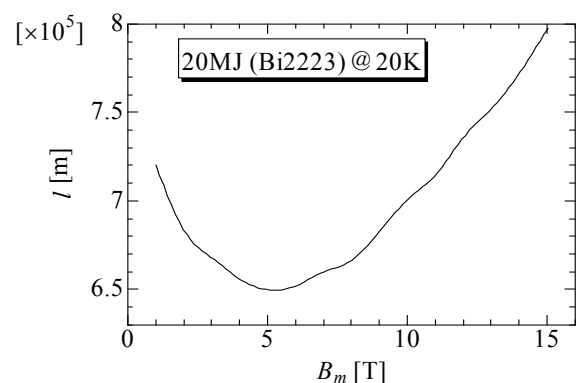
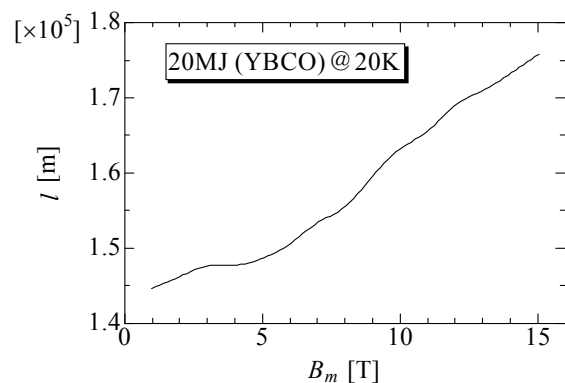
最大磁場と線材に印加される磁場の関係は、Biot-Savart の式を用いて検討した。最大磁場の測定点は、ソレノイドコイルにおいてはコイル内表面の中心、トロイダルコイルにおいてはコイル内表面の内側と中心の 2 点とした。解析に用いたコイルの諸元を Table.1 に示す。コイル半径は式(1)-(4)から求め、各コイル形状のアスペクト比はアンペアメートルが最小となる値を採用した。トロイダルコイルの要素コイル間の距離はできるだけ小さくなるように設計した。また、超電導線材の臨界電流密度特性は、 MgB_2 線材においては IMD 法のチャンピオンデータ[1]、Bi2223 線材と Y 系線材においてはパーコレーションモデルによって求めた値を用いた。

Table.1 Specifications of solenoid and toroidal coils

Stored energy [MJ]	20
Aspect ratio	0.262 / 0.6
Operating temperature [K]	10, 20
Current road factor	0.8

4. 解析結果

得られた最大磁場と線材に印加される磁場の関係から臨界電流密度を決定し、式(5)より最大磁場と線材使用量の関係を求めた。トロイダルコイルの Bi2223 線材と Y 系線材においての結果を Fig.1 と Fig.2 にそれぞれ示す。線材使用量は Bi2223 線材では極小値をとり、Y 系線材では単調増加となる結果が得られた。この関係を明らかにすることで、SMES 用コイルの最大磁場を設計する際に、線材使用量も考慮することができる。

Fig.1 l - B_m characteristic curve of Bi2223 toroidal coilFig.2 l - B_m characteristic curve of YBCO toroidal coil

参考文献

1. K Togano, et al.: "Microstructures and critical currents of single-and multi-filamentary MgB_2 superconducting wires fabricated by an internal Mg diffusion process" Supercond. Sci. Technol.23 (2010) 085002 (7pp)

高アスペクト比のテープ線材を用いた超伝導パルスコイルの性能向上 2 —損失低減効果に及ぼす運転パターンの影響—

Improvement of superconducting pulse coil by use of tapes with high aspect ratio of cross-section 2 — The effect of operating pattern on loss reduction —

片山 拓郎, 石橋 広脩, 川越 明史(鹿児島大・工); 三戸 利行, 柳 長門(核融合化学研究所)

KATAYAMA Takuro, ISHIBASHI Kosuke, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima University); MITO Toshiyuki, YANAGI Nagato (NIFS)
E-mail: k5076271@kadai.jp

1. はじめに

通常丸線で使用される NbTi 線材や MgB₂ 線材をテープ形状に加工すると、幅広面に平行な磁界中で臨界電流が向上し、交流損失が低減する。我々は、このような高アスペクト比のテープ形状線材を活用することによって、超伝導パルスコイルを高性能化させることを提案している。これまでに、テープ線で巻線したコイルと丸線で巻線したコイルを組み合わせる複合コイル法によって、テープ線の性能を引き出すコイル構造の検討を行った[1]。また、コイルエッジ付近でテープ線幅広面に垂直に印加される変動磁界を低減するために、付加コイルを設置する新しい損失低減方法も提案し、その損失低減効果を実証している[2]。この損失低減法では、変動磁界分のみを遮蔽する方法であることから、SMES の充放電時のように直流バイアス電流が存在する場合に、複合コイル法に比べて少ない線材量で損失を低減できる。今回は、直流バイアス電流に交流電流を重畳した電流を通電した状態で交流損失を測定し、損失低減効果に及ぼす運転パターンの影響について検討した。

2. 損失測定法の原理

提案している損失低減法は、瞬時電圧低下補償用 SMES などのように、待機時間が比較的長い運転パターンの応用を想定しており、放電時の交流損失を低減する。本損失低減法では、Fig.1 に灰色で示すような付加コイルを、メインコイルのエッジ付近にメインコイルと同軸に設置する。付加コイルは、テープ面に垂直な成分の磁界が鎖交するような閉ループを二つの同軸コイル (Edge coil と Middle coil) で形成している。したがって、メインコイルエッジ付近に加わる垂直方向の磁界が変化すると、その磁界変化を打ち消すような電流が誘起される。その結果、テープ面に垂直な磁界変動が抑制されて交流損失が低減する。

3. 損失低減効果の実証実験

コイルに使用した線材は、メインコイル、付加コイル共に、幅 4.2 mm、厚み 0.22 mm の Bi-2223 多芯テープ線材である。メインコイルは、内径 80 mm、64 ターンのコイルでインダクタンスは 360 μ H である。付加コイルは、メインコイル両端に Edge コイルを配置し、Middle コイルを共通にすることによって 1 つの閉ループにした。付加コイルを取りつけた後のインダクタンスは 291 μ H である。Middle コイルと Edge コイルは同半径であり、内径 92 mm である。Middle コイルは 8 ターン、Edge コイルは 4 ターンである。

今回は、損失低減効果に及ぼす運転パターンの影響を調べるために、直流バイアス電流に交流電流を重畳した場合と、交流電流のみの場合の二つのケースの比較を行った。その際、通電電流のピーク値は、直流バイアス電流の有無に関わらず同じになるようにした。すなわち、振幅 20A の交流電流のみの

場合と、直流 10A に振幅 10A の交流電流を重畳した場合である。ピーク値は 20A と 56A の場合について実験を行った。

交流損失の測定は、メインコイル両端に取り付けた電圧端子を使用し、4 端子法を用いて行った。冷却は、液体窒素を用いた浸漬冷却で行った。

4. 結果

付加コイルの有りと無しで、上述の条件で測定を行い、付加コイル有りによってどの程度損失が低減したかを損失低減率として求めた。その損失低減率の周波数依存性を Fig. 2 に示す。横軸は周波数、縦軸は付加コイルを取り付けたことによる交流損失の低減率である。20A ピークと 56A ピークの時の損失低減率を、それぞれ○と□で示している。また、直流バイアス電流有りを黒塗り、無しを白塗りで示している。

20A ピークの場合は、直流バイアスの有無にかかわらず、損失低減率が変化しないのに対し、56A ピークの場合では、直流バイアスの有無によって特性が大きく異なっている。これは、直流バイアスがない場合は、付加コイルを流れる電流が I_c を超えたためである。したがって、SMES などの運転を想定する場合、本損失低減法により、少ない線材量で損失を低減させることができ、高アスペクト比のテープ線の性能を引き出せることがわかる。

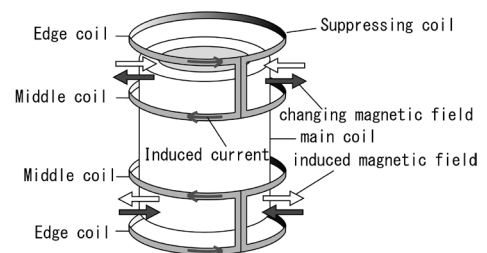


Fig.1 Principle of the new method to reduce ac losses

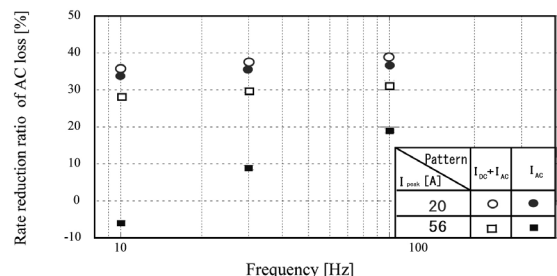


Fig.2 Frequency dependence of the reduction rate of ac losses

参考文献

1. T.Furubeppu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2009) p209
2. T.Katayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.86 (2012) p15

全身用3T 磁気共鳴イメージングマグネット

Superconducting Whole Body 3T Magnetic Resonance Imaging Magnet

山本 俊二, 児仁井 克己, 田邊 肇, 横山 彰一, 松田 哲也(三菱電機)

YAMAMOTO Shunji, KONII Katsumi, TANABE Hajime, YOKOYAMA Shoichi, MATSUDA Tetsuya (Mitsubishi Electric)
E-mail: Yamamoto.Shunji@bp.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

我々は、超電導技術の開発を 1961 年に開始し、以後連続して 50 年間、様々な超電導製品、極低温製品を製造している。現在の超電導製品群は、これまでの長い歴史に裏打ちされた技術により構成されている。

MRI マグネットについては、1983 年に国産初の全身用超電導 MRI マグネットを製造、以来継続して MRI マグネットを生産し、開放型、水平型 (1.5T/3T) 共に製造する能力を有している。マグネット軸方向長さは、1991 年の当社比 40%短軸化させているが、その間、磁界均一度、クリアボアなど他の性能は、維持もしくは向上させている。極低温での断熱技術の向上と冷凍機搭載によりヘリウム蒸発量ゼロを実現させている。工業製品化に際しては、長期の信頼性確保に最大限の注意を払っている。

1.5T イメージングシステムの普及に続き、イメージング性能が向上した 3T システムが普及し始めてきたが、その超電導マグネット概要について報告する。

2. 超電導マグネットの諸元

マグネットの諸元を表 1 に、また全体写真を図 1 に示す。マグネットはヘリウム浸漬冷却であり冷凍機を搭載している。

Table 1 Specification of the 3T Magnet

タイプ	超電導 水平型 全身用
中心磁界	3 T
運転方式	永久電流モード
磁界安定度	0.1ppm/hr
パワーリード	着脱式/固定式
超電導導体	NbTi 多芯線
もれ磁界(5G ライン)	2.8m(径方向)×4.5m(軸方向)



Fig.1 Whole body 3T MRI magnet

3. 磁気設計

MRI マグネット設計のために、線形計画法と非線形計画法の両者を用いる。線形計画法を実行した後、線形計画法の結果を元に非線形計画法を適用する 2 段階法を採用している。

線形計画法

線形計画法では、1 次の関数で構成する目的関数を最小化する。まず、コイル配置可能領域を与え、電流が作る一様磁界成分・誤差磁界成分・マグネット外周部分の漏れ磁界成分をあらかじめ計算しておく。各電流メッシュの主磁界成分を B_0 ・誤差磁界成分を B_1, \dots, B_n とすると、これらの磁界成分の強度は電流に線形に比例するため、例えば各 B_n 誤差磁界成分の合計 f_n は

$$f_n = \sum_i B_{ni} \cdot I_i$$

となり、この f_n を用いて制約条件式を次式で構成する。

$$C_{up} \geq f_n \geq C_{down}$$

C_{down} と C_{up} は、各々 f_n の下限と上限である。更に、各メッシュの電流を I とすれば、目的関数 f_{obj} は次式になる。

$$f_{obj} = \sum_i |I_i|$$

I をパラメータとして目的関数を最小化する様に線形計画法を実行する。

非線形計画法

非線形最適化では、各評価項目で構成する目的関数を最小化する。目的関数はこれらの評価項目に重み係数 W を掛けて和を取る。マグネット設計毎に仕様が異なるため、重み係数の設定が重要である。

設計した磁界分布を、図 2 に示す。我々の設計では、中心磁界の大小に関わらず、漏れ磁界領域は殆ど同じである。中心磁界が 1.5T と 3T のマグネットを入れ替えた場合でも、周囲の磁気環境はほぼ同じであり、中心磁界が異なるマグネットの交換に際して、互換性がある。

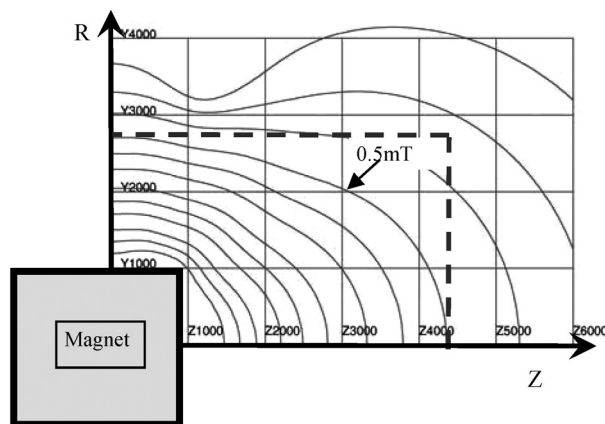


Fig.2 Leakage magnetic field analysis (B=3T)