

Gd 系高温超電導コイルにおける超電導層断面アスペクト比 と遮蔽電流特性の関係

Relationship between aspect ratio of superconducting area's cross section
and its effect on shielding current characteristics in Gd-system HTS coil

柴山 優花, 中村 武恒 (京大); 横山 彰一 (三菱電機)

SHIBAYAMA Yuka, NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.); YOKOYAMA Shoichi (Mitsubishi Electric Corp.)

E-mail: y-shibayama@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、経済産業省の産業技術研究開発委託費(高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト)[1]の一環として、高温超電導MRIの開発に向けたコイル中心磁場安定度の評価と同改善法の検討を実施している。前報では、GdBCO系小型高温超電導コイルにおける電流輸送特性の定量評価法[2]や、線材長手方向バラツキの非対称Weibull関数による統計学的評価手法[3]に関する検討結果を報告した。

高温超電導線材における遮蔽電流特性は、形式的には同線材における電界-電流特性を正確に表現できればその特性が記述できていることになる。しかしながら、当該特性が複雑な磁界ベクトル依存性を有していることから、コイル形状という特有の境界条件に伴って、その本質が複雑になっている。さらに、RE系高温超電導線材では、超高アスペクト比という線材構造の特異性も相俟って、さらに問題が複雑である。そこで本解析では、小型コイルを対象として、超電導層の断面アスペクト比と遮蔽電流特性の関係を解析的に検討し、薄膜構造の影響を詳細に検討した。

2. 解析方法

本研究では、(株)フジクラ製のGdBCO高温超電導小型パンケーキコイルを検討対象とした。3次元有限要素法を適用し、1/4の軸対称モデルとした。 E -構成方程式としては、本来はパーコレーション遷移モデル式[4]を適用すべきであるが、現状収束性が悪いことから、時間変化の時定数に気を付けながらn値モデル+Kimモデルを適用して解析を実施した。

Fig. 1には、解析モデル図の一例を示す。巻数15のシングルパンケーキコイルを対象として、テープ断面を 4×10 分割した。上記条件下において、テープ厚みを $160 \mu\text{m}$ ~ $1.6 \mu\text{m}$ まで変化させ、遮蔽電流特性を解析した。強制電流条件としては、 1 s でランプアップして、その後 1 s 間一定電流値に保持した。なお、テープ幅が狭くなるほどメッシュ作成の際にその幾何学性に注意する必要がある。

3. 解析結果と考察

Fig. 2には、テープ厚 $16 \mu\text{m}$ のモデルについて得られた遮蔽電流特性解析例(ランプアップ直後)を示す。紙面の都合で詳細は当日報告するが、テープ厚 $160 \mu\text{m}$ では厚み方向の遮蔽電流が生じていたが、 $16 \mu\text{m}$ では当該方向の遮蔽が制限され、幅方向遮蔽電流が支配的となった。

Fig.3には、縦軸を次式で定義される α とし、コイル内の変化をプロットした解析結果を示す。

$$\alpha = \frac{B - B_S}{B} \quad (1)$$

ここで、 B は遮蔽電流特性を考慮しない(強制通電のみ)場合の磁束密度であり、 B_S は遮蔽電流を考慮した場合の結果である。横軸は中心からコイル内端までの距離を示す。

テープ材厚みを薄くしていくと、コイル中心においては遮蔽電流の影響がより大きくなるのが分かった。従って、例えば全体に超電導層が存在すると考えられるビスマス系テープ材と、非常に薄い超電導層を有する希土類系テープ材では、支配的遮蔽電流分布が異なると推測される結果が得られている。更に薄いテープ材の結果など、詳細は当日に報告する。

謝辞

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費(高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト)の一環として、三菱電機からの再委託を受けて実施した。

参考文献

1. 横山彰一 他: 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, 3A-p01 (2014)
2. 中村武恒 他: 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, 3A-p03 (2014)
3. 柴山優花 他: 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, 3A-p04 (2014)
4. 木須隆暢 他: 低温工学, Vol. 34, No. 7 (1999) pp. 322-331

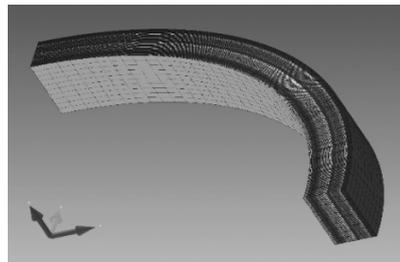


Fig.1 Three dimensional FEM model for analyzing shielding current of GdBCO small sized coil (turn number: 15)

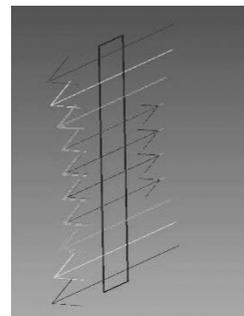


Fig. 2 Example of analysis result of shielding current distribution for a GdBCO superconducting layer

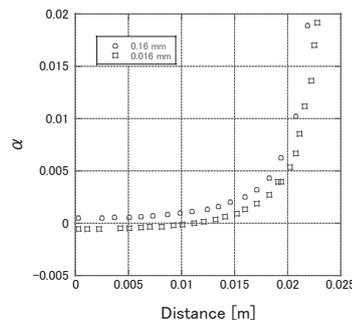


Fig. 3 Influence of magnetic field distributions of GdBCO pancake coils for different thickness of the tapes, i.e., $160 \mu\text{m}$ and $16 \mu\text{m}$.

REBCO 線材の超電導特性のばらつきが遮蔽電流磁場に与える影響

Influence of Nonuniformity of Superconductivity Characteristics in REBCO tapes on Screening Field

松見 絢子, 今市 洋平, 持田 歩, 有谷 友汰, 齋藤 隼, 王 韜, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(阪大);
宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 野村 俊自, 来栖 努(東芝)

MATSUMI Ayako, IMAICHI Yohei, MOCHIDA Ayumu, ARIYA Yuta, SAITO Jun, WANG Tao,
ISHIYAMA Atsushi (Waseda univ.); UEDA Hiroshi (Osaka univ.);

MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba)

E-mail: ayako_matsumi@akane.waseda.jp

1. はじめに

我々は、経済産業省プロジェクトである「高温超電導定磁場コイルシステムの研究開発」で、10T 級(9.4T)のヒト全身用MRI の実現を目指している[1]。高温超電導コイルにおいて、高温超電導線材がテープ形状をしているため、遮蔽電流が顕著に誘導され、それによって生じる磁場がコイルの発生磁場の空間的均一性や時間的安定性を損なう可能性がある。また線材内部での臨界電流分布は均一ではなく、この不均一性が設計磁場、遮蔽電流磁場に更に影響を与えることが考えられる。そこで今回は、線材内部の超電導特性の不均一性が遮蔽電流磁場に与える影響を評価することを目的とし、これまでに開発した3次元電磁場解析手法を用いて、上記プロジェクトで設計・検討を行っている200mmφ、10T 級均一磁場発生コイル等を対象として、評価・考察したので報告する。

2. 解析モデル

2.1 解析対象のコイル

解析対象のコイルは、幅5 mm、厚さ約0.1 mm(超電導層2.0 μm)のREBCO 線材の離散配置を考慮して、10 ppm @ DSV 100 mm 以下かつ巻線使用量が少なくなるように最適化設計[2]された内径200 mm の10 T 級小型磁石である。概略図をFig. 1, 諸元をTable 1に示す。

2.2 線材内 I_c の不均一性

線材内 I_c の不均一性が遮蔽電流磁場に与える影響について評価した。 I_c の不均一性としてGauss分布を仮定し、線材長手方向(平均10 mm間隔)および幅方向(0.5 mm間隔)の各要素に正規乱数で I_c 分布を与えた。今回は、平均値を理想的な I_c 特性として標準偏差を0.1として解析を行った。

3. 解析結果

通電パターンは、コイル電流を0.1 A/sで288 Aまで励磁し、6000 s まで保持した。励磁完了時の I_c 分布の例として、各コイルを構成するダブルパンケーキコイルの内、最低 I_c をもつパンケーキコイルの I_c 分布をFig. 2に示す。破線は運転電流の値を示している。不整磁場の解析結果をFig. 3に示す。(a)の全コイルが作る不整磁場は、励磁直後で不均一性を考慮しない場合-0.041 Tなのに対し、考慮した場合-0.038 Tと減少した。また、(b)より、Coil 1はほとんど変わらないが、Coil 2-4全てについて各々が作る不整磁場の減少が確認された。特にCoil 4で不整磁場の減少が最も大きくなった。これは、Fig. 2から I_c の不均一性の影響が、Coil 1は負荷率が低いため現れず、負荷率が特に高いCoil 4で最も大きく表れたと考えられる。

<謝辞>

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<高磁場コイルシステムの研究開発>」を通じて実施された。

参考文献

1. T. Tosaka, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.90 (2014) 3B-p05.
2. A. Ishiyama, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol. 89 (2014) p.153

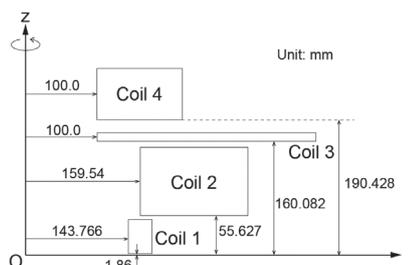


Fig. 1 Schematic diagram of 10-T class small-size model magnet.

Table 1 Specifications of 10-T class small-size model magnet

	Coil1	Coil2	Coil3	Coil4
Inner radius[mm]	143.77	159.54	100.00	100.00
Outer radius [mm]	176.89	310.26	406.24	219.52
height [mm]	48.0	96.0	12.0	72.0
Turns / Single pancake	69	314	638	249
Number of single pancakes	8	16	2	12
Transport current [A]	288	288	288	288

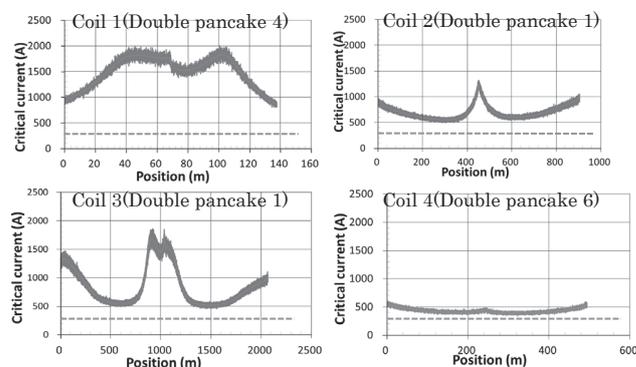


Fig. 2 Longitudinal distributions of I_c in the tape winding the double pancake coil with lowest I_c in each of Coil 1-4.

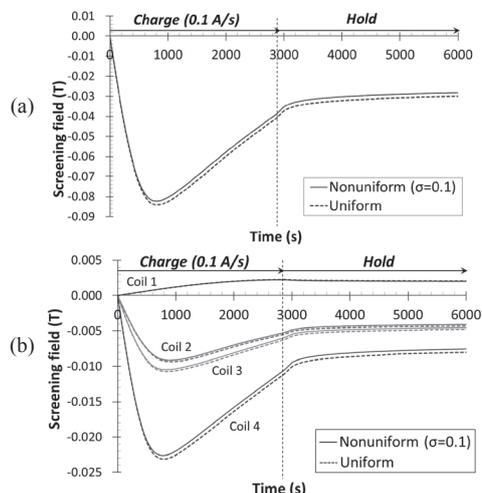


Fig. 3 Numerical results of screening field at center generated by (a) all coils and (b) each coil.

薄膜超伝導線材で巻かれた三次元形状をもつコイルに適用可能な電磁界解析モデルのモデル化誤差評価

Modeling error evaluation of the modeling for electromagnetic field analyses of three-dimensional-shape coils wound with coated conductor

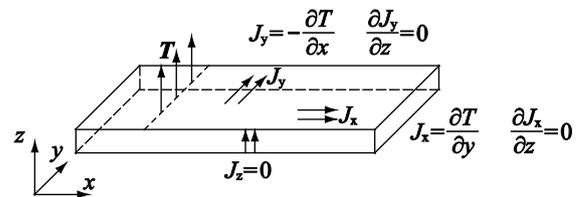
曾我部 友輔, 塚本 伊秋, 美船 健, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大)

SOGABE Yusuke, TSUKAMOTO Tadaaki, MIFUNE Takeshi, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

E-mail: y-sogabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導マグネットの設計や性能評価のためには電磁界解析が有用であるが、三次元形状をもち、ターン数の多いマグネットの電磁界解析を行うためにはコンピュータのメモリや計算時間を抑制できるモデルの構築が重要である。我々は薄膜高温超伝導線材で巻かれた三次元形状をもつコイルの電磁界解析モデルを構築している。



2. 三次元形状をもつコイルの電磁界解析モデル

電磁界解析の支配方程式として以下の式を用いた。

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma} \nabla \times \mathbf{n} T \right) \cdot \mathbf{n} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu_0 t_s}{4\pi} \int_{S'} \frac{(\nabla \times \mathbf{n}' T') \times \mathbf{r} \cdot \mathbf{n}}{r^3} dS' + \mathbf{B}_{\text{ext}} \cdot \mathbf{n} \right) = 0$$

ここで、薄膜高温超伝導線材は超伝導層の断面アスペクト比が非常に大きいため、線材厚さ方向で電磁界分布が一様であると仮定する薄板近似を適用している[1], [2]。Fig. 1 に薄板近似の概念図を示す。

コンピュータメモリ、計算時間を抑制したコイルのモデル化のため、入れ子近似とブロック近似という近似を導入した[3]。

入れ子近似は、コイルを、閉ループを線材厚さ方向に重ね、各ターンが回路的に並列接続された状態とし、全てのターンに同じ大きさの電流が流れているとする近似である。この近似は従来も広く用いられてきたものであるが、その近似が解析結果に与える影響については十分検討されていない。Fig. 2 に入れ子近似の概念図を示す。この近似により、2極マグネットなどのようなS極、N極を一つの組として用いるようなコイルでは、コイルの幾何学的対称性により電磁界解析における解析領域をコイル全体の八分の一に縮小できる。

ブロック近似では、隣接する複数のターンを一つのブロックとして扱い、そのブロックを代表する一つのターンのみを解析対象とし、同じブロックに属する代表するターン以外は代表するターンと同様の電流分布となっていると仮定して解析を行う。ブロック近似の概念図を Fig. 3 に示す。この近似によって、多くのターンからなるコイルの電磁界解析の際に、コンピュータメモリや計算時間を抑制できる。

上記の近似を用いて、三次元形状をもつ高温超伝導コイルに適用可能な電磁界解析モデルを構築した。この解析モデルを適用することによって、どの程度のモデル化誤差が生じるかを、Fig. 4 に示すコイルの電磁界解析により比較検討した。

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。

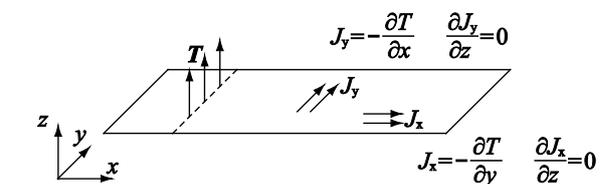


Fig. 1 Thin strip approximation.

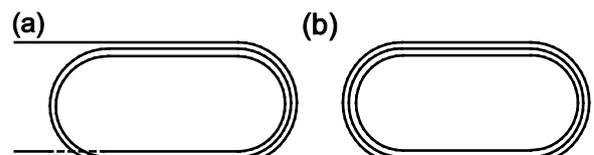


Fig. 2 (a) Without nested loops approximation; (b) Applied nested loops approximation.

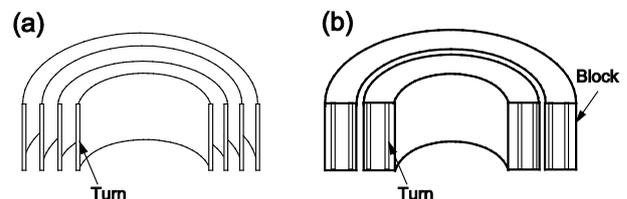


Fig. 3 (a) Without block approximation; (b) Applied block approximation.

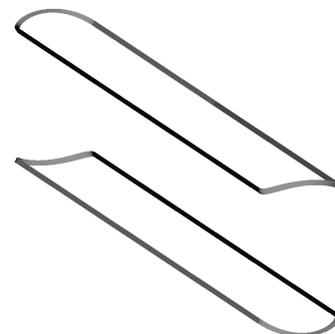


Fig. 4 Three-dimensional-shape coil.

参考文献

1. Y. Ichiki, et al.: Physica C 412-414 2 (2004) 1050-1020
2. M. Nii, et al.: Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 095011
3. Y. Sogabe, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89 (2014) p. 5

CuNb/Nb₃Sn ラザフォードケーブルの通電特性に与える曲げ径の影響 Influence of bending diameter on transport properties of CuNb/Nb₃Sn Rutherford cable

小黒 英俊, 大村 拓也, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 三好 康之, Chaud Xavier(LNCMI, CNRS);

二森 茂樹, 清水 禎(物材機構); 杉本 昌弘, 坪内 宏和(古河電工); 花井 哲(東芝)

OGURO Hidetoshi, OMURA Takuya, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); MIYOSHI Yasuyuki,

CHAUD Xavier (LNCMI, CNRS); NIMORI Shigeki, SHIMIZU Tadashi (NIMS); SUGIMOTO Masahiro,

TSUBOUCHI Hirokazu (Furukawa Electric); HANAI Satoshi (Toshiba)

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

1. はじめに

我々のグループでは、次期定常強磁場施設建設のために新しい Nb₃Sn 線材及び、ラザフォードケーブルを開発してきた。その結果、Nb rod 法 CuNb 補強 Nb₃Sn 線材(CuNb/Nb₃Sn)、及び CuNb/Nb₃Sn ラザフォードケーブルの開発を行い、これらが強磁場で高い機械特性及び臨界電流特性を持つことを報告してきた[1, 2]。さらに、CuNb/Nb₃Sn ラザフォードケーブルが、現在建設中の 25 T 無冷媒超伝導マグネット(25T-CSM)に適用可能であることを、多層コイルの強磁場中通電試験により示した[2]。

25T-CSM では、Nb₃Sn ラザフォードコイルを事前曲げ処理を利用した React & Wind 法で作製している。このとき、巻き枠へラザフォードケーブルを巻くことで、純粋曲げひずみが印加されてしまうが、熱処理ポビンとコイル径を等しくすることで、コイルに巻いた際に純粋曲げひずみが発生しないように調整している。今後のマグネット開発において、React & Wind 法でコイル作製を行う際に、コイルに巻いた際に加わる純粋曲げひずみをどこまで許容できるかを知ることは、コイル設計における指針として重要なパラメータとなる。本研究では、CuNb/Nb₃Sn ラザフォードケーブルを巻き枠の径を変えたポビンに巻き、そのときの通電特性を強磁場で評価した結果を報告する。

2. 実験方法

試料コイルとして、Nb rod 法 CuNb 補強 Nb₃Sn ラザフォードケーブルを用いた、1 層 3.5 ターンのダブルパンケーキコイルを作製した。ラザフォードケーブルは、φ150 mm の熱処理ポビンにて 670°C×96 h の熱処理を行った。熱処理後は、ケーブルのフラットワイズ方向に正方向の事前曲げ処理を、φ65 mm のプーリーに通すことで行った。これを内径φ110 mm(純粋曲げひずみ 0.2%)及びφ70 mm(純粋曲げひずみ 0.6%)となるようにコイル巻きを行い、エポキシで含浸した。

通電試験は LNCMI(Grenoble)の 17T 水冷マグネットを使用し、最大 18 T までの磁場で実験を行った。このとき、φ170 大口径冷凍機冷却クライオスタットを用いて、温度を変えて最大 500 A までの通電電流で臨界電流(I_c)測定を実施した。また、NIMS の 14T 大口径超伝導マグネットを利用して、液体ヘリウム中にて最大 14 T、2000 A として通電試験を行った。

3. 実験結果

図 1 に温度、磁場を変えて I_c を測定した結果を示す。I_c の値は、0.1 μV/cm の電界基準で評価した。結果として、6 K から 12 K までの温度範囲で、18 T 以下の磁場中での I_c の評価ができた。250 A を超える範囲では、試料の温度上昇が大きく、評価することが出来なかった。この図から、明らかに 0.2% 純粋曲げを与えたコイルの I_c が高いことが分かる。また、磁場、温度が変化してもこの傾向は変わらないことが分かった。

これらのコイルに対して、4.2 K での I_c の磁場依存性を評価した結果を図 2 に示す。0.2% 純粋曲げコイルは、14 T において 2 回のトレーニングとみられるクエンチの後に I_c に到達した。これは、そのコイル径が 110 mm と大きいと、大きな電磁力(約 150 MPa)が印加されたためだと思われる。I_c は 0.01 μV/cm の電界基準で評価した。0.2% 純粋曲げコイルでは I_c が

1641 A となり、n 値は 33 と高い値を持っていた。n 値モデルによって 1 μV/cm の電界基準での 0.2% 純粋曲げコイルの I_c を見積ると 1870 A となり、素線の I_c が 116 A のため[3]、劣化が無いことが分かった。0.6% 純粋曲げコイルは 0.2% 純粋曲げコイルより、I_c が 25% 程度低下していることが分かった。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(基盤 A)による補助を受けました。

参考文献

1. H. Oguro, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.9
2. H. Oguro, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.140
3. H. Oguro, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol 24, (2014) 8401004

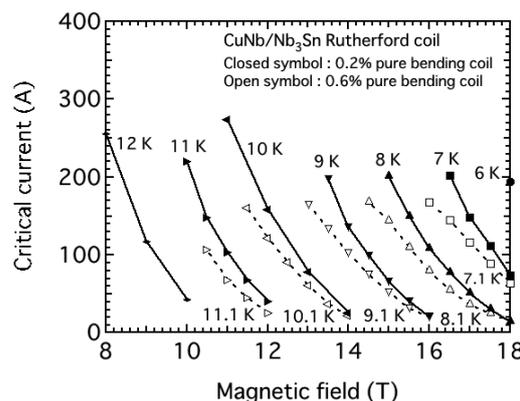


Fig. 1 Critical current as a function of magnetic field for the CuNb/Nb₃Sn Rutherford coil at various temperature. The closed and open symbols show the results of 0.2% and 0.6% pure bending coil, respectively.

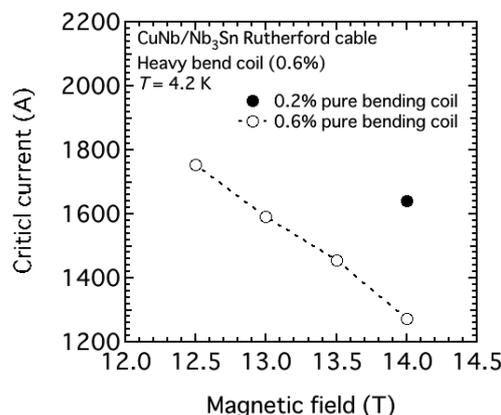


Fig. 2 Critical current as a function of magnetic field for the CuNb/Nb₃Sn Rutherford coil at 4.2 K.

外挿 LTS コイルクエンチに対する内挿 REBCO コイルのクエンチ保護

Protection of Insert REBCO Coils from Quenches of Outsert LTS Coils

土屋 雄司, 武藤 翔吾, 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大学);

宮崎 寛史, 花井 哲, 井岡 茂 (東芝); 大保 雅哉, 飯島 康裕 (フジクラ)

TSUCHIYA Yuuji, MUTO Shogo, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);

MIYAZAKI Hiroshi, IOKA Shigeru (Toshiba); DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (Fujikura)

E-mail: y.tsuchiya@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-x}(REBCO, RE:希土類)線材は、機械特性や強磁場下の臨界電流特性が優れることから、強磁場超伝導マグネットへの応用が期待されている[1]。一方、REBCO 線材は LTS 線材に比べ常伝導伝播速度が遅いため、クエンチ時に局所的熱暴走(ホットスポット)が発生して劣化、焼損することが懸念される。特に、外挿 LTS コイルと内挿 REBCO コイルを組み合わせた超伝導マグネットにおいて最もホットスポットの発生しやすい条件は、LTSコイルのクエンチ時にREBCOコイルに過電流が誘起される状況であると考えられている[2]。

本報では、無冷媒 LTS 超伝導マグネットを用いた REBCO コイルに対する外部磁場遮断試験の実験手法について紹介し、クエンチ保護の方針について検討する。

2. クエンチ保護方法の比較

クエンチ保護の主な方針としては、以下の3種類が挙げられる。(1)臨界電流を超えないように運転してクエンチを予防する。(2)自律的にクエンチから回復する非絶縁コイルを用いる。(3)ヒーターによってコイル全体を常伝導転移させてホットスポットの発生を防止する。以上の方法は、運転電流密度と、クエンチに対して能動/受動的という点から Fig. 1 のように分類される。我々は、東北大学強磁場超伝導材料研究センターにおける 25T 無冷媒超伝導マグネットの開発に際し、方針(1)を採用してきた[1]。また、米国フロリダ州立大学国立強磁場研究所においては、方針(3)が採用されている[3]。

3. 実験方法

冷凍機で伝導冷却された外挿 LTS マグネットと内挿 REBCO コイルの外観と模式図を Fig. 2 に示す。無冷媒超伝導マグネットを用いるため、磁場遮断時に冷媒の蒸発がないという利点がある。Table 1 に、最大磁場、最大通電電流、運転温度、遮断試験後の復帰時間を示す。エポキシ含浸した REBCO シングルパンチキコイルに対して、定常磁場下通電試験と、保護抵抗をつないで外部磁場遮断試験を行った。

4. 実験結果及び考察

REBCO コイルの 40 K 自己磁場下の臨界電流は 303 A であった。初期温度 40 K において保護抵抗を変化させたときの電流電圧曲線の典型例を Fig. 3 に示す。保護抵抗値 6.53 mΩ 時には 2 つのピーク構造を持ち、履歴の形状から転移温度以上まで温度上昇したことが示唆される。また、誘導電流は臨界電流を超えたにもかかわらず、REBCO コイルの劣化や焼損は起こらなかった。当日は、遮断試験の結果からクエンチ保護の方針について検討する予定である。

謝辞 本研究は科学研究費補助金 基盤研究(A)25246032 の支援を受けて行われました。

参考文献

1. S. Awaji *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 24, (2014) pp. 4302005.
2. Y. Yanagisawa *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 24, (2014) pp. 4301005.
3. H. W. Weijers *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 24, (2014) pp. 4301805.

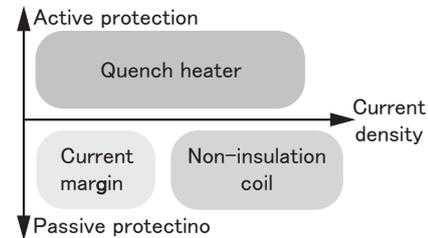


Fig. 1 Classification of the quench protection for the REBCO coils as a function of the current density and the active/passive mechanisms.

Table 1 Specifications of the LTS magnet and the cryostat for the shutdown and the burn-in tests of the sample coils.

	LTS magnet	cryostat
Maximum magnetic field (T)	5	N/A
Maximum current (A)	187	500
Temperature range (K)	3.5 - 4	4.2 - 50
Period of shutdown test (h)	6	N/A

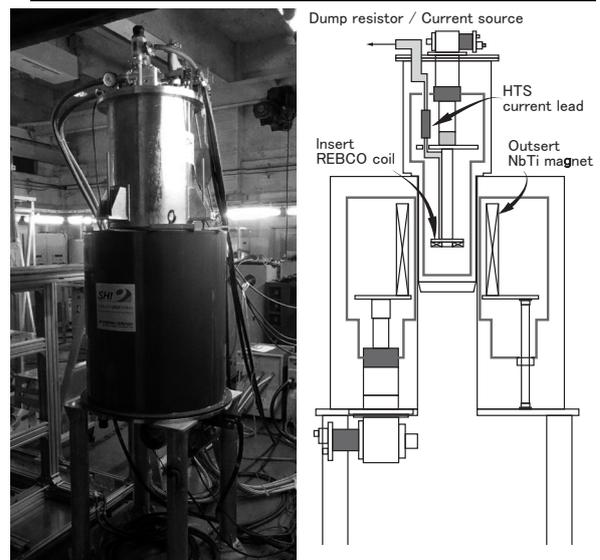


Fig. 2 Picture of and schematic drawing of the shutdown test setup with the cryogen-free superconducting magnet (8T-CSM) and the cryo-cooler for the sample coil.

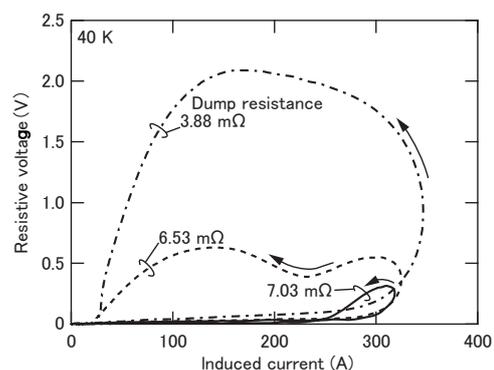


Fig. 3 Current-voltage hysteresis loop during the shutdown test with the different dump resistor.

無冷媒 25T 超伝導マグネット用 HTS インサートの現状と対策

Present status and remedies of the HTS inserts for a 25T cryogen-free superconducting magnet

淡路智、小黒英俊、渡辺和雄 (東北大)、宮崎寛史、花井哲、井岡茂 (東芝)、三好康之、Xavier Chaud (LNCMI, CNRS)

AWAJI Satoshi, OGURO Hidetoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.), MIYAZAKI Hiroshi, HANAI Satoshi, IOKS Shigeru (TOSHIBA), MIYOSHI Yasuyuki, CHAUD Xavier (LNCMI, CNRS)

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

1. はじめに

東北大では、強磁場コラボラトリ計画の一環として、25T 無冷媒超伝導マグネットを建設中である [1]。このマグネットは、14.5T の金属系超伝導コイルの中に、10T の磁場を発生させる高温超伝導マグネットを組み合わせて 25.5T の磁場を発生させる設計としている。高温超伝導コイルは、 $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Gd123, RE; 希土類) コート線材 (Coated conductor) を採用することになっているが、伝導冷却に必要な不可欠なエポキシ含浸による劣化が危惧されている。含浸コイルを機械的に分割して、熱収縮による剥離応力を減少させることで、エポキシ含浸 Gd123 コイルを製作することとしている。今回は、R&D として Gd123 エポキシ含浸コイルを作製し、バックアップ磁場最高 18 T 中、伝導冷却条件でのテストを実施した結果について報告する。

2. 実験方法

用いた線材は、75 μm 厚ハステロイ基板上にバッファー層を介して成膜された Gd123 テープであり、20 μm の銅メッキを施してある、実機と同じ仕様の線材である。この線材を、内径 96mm のポビンに巻線し、58 ターンのシングルパンケーキを 2 個作製したものを重ねて 2 積層コイルとした。コイル外径は約 120 mm である。線材の I_c は 77.3K 自己磁場で 198A である。コイルはエポキシ含浸をしているが、剥離応力低減のため、2 分割している。分割によりコイルの内径外径比は約 1.1 程度となっている。このコイルを、液体窒素中で試験した結果、コイル I_c は約 108-109 A であり、 n 値は 28-29 と良好な特性を示した。その後、コイルを、伝導冷却クライオスタットにセットし、18 T のバックアップ磁場中、20 K で通電試験を実施した。試験は、フランスグルノーブルの強磁場研究センター(LNCMI) の水冷マグネットを用いて行った。

3. 結果と議論

図1は、20K、19 T における通電試験結果を示す。インダク

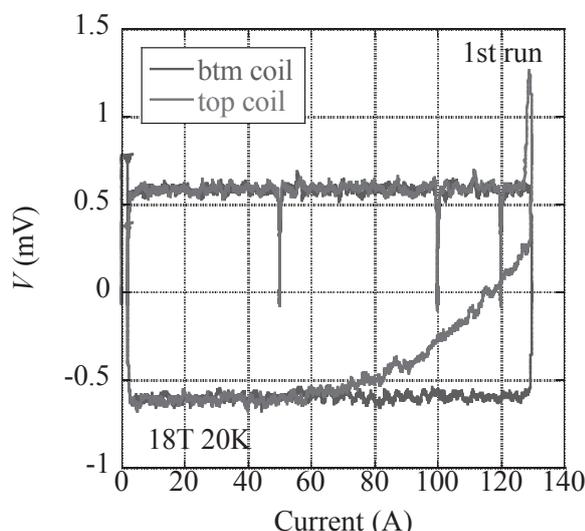


Fig. 1 Current vs. Voltage property of each coil in 18 T at 20 K.

タンスによる電圧が約 0.5 mV 通電直後から発生し、その後一定となっているが、約 130 A 近傍で急激な電圧上昇が、上コイルのみで発生した。その後、電流をホールド中もわずかな電圧上昇が見られた。この結果は、20K までの冷却による熱応力では、コイルに問題はなかったが、通電によるわずかな電磁応力が加算されることで、コイルの一部が劣化したことを示唆している。図2は、バックアップ磁場 18 T、通電電流 130 A の時のコイル内部応力分布である。Hoop 応力は、最大でも 240 MPa であり、特性が劣化する応力限界の半分以下である。したがって、今回の劣化は、剥離によるものであると結論せざるを得ない。室温から 20 K までの冷却によって誘起される剥離応力は、最大で約 0.48 MPa と見積もられ、さらに電磁力によって約 0.42 MPa が加算される。したがって、トータルで 0.9 MPa の剥離応力によってコイルが劣化したと考えられる。コイルに電極を追加し、77.3 K 自己磁場で試験をした結果、内コイルの外側部分で I_c と n 値が大きく減少していることが分かった。

これらの結果から、Gd123 テープ線の場合には数セクションに分割しただけでは、剥離応力の低減が十分ではない可能性がある。したがって、Gd123 コイルは、全ターン分割を採用することとした。一方で、最近の Bi2223 線材の高性能化・高強度化を受けて、Bi2223 線材を用いたコイル設計も実施することとした。全ターン分割コイルのテスト結果については次の講演で、Bi2223 線材を用いたコイル設計については、次々講演で詳細報告を行う。

謝辞

本研究の一部は科学研究費基盤研究(A)の支援を受けています。

参考文献

1. S. Awaji *et al.*, IEEE TAS 24 (2014) 4302005.

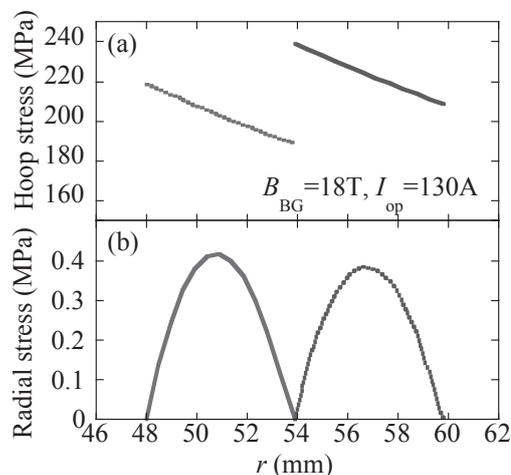


Fig. 2 Stress distributions at $I_{op}=130\text{A}$ and $B_{BG}=18\text{ T}$.

無冷媒 25 T 超伝導マグネット用 REBCO 内挿コイルの開発 —積層パンケーキコイルによる検証—

Development of REBCO insert coil for a cryogen-free 25 T superconducting magnet —Test results of stacked pancake coils—

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 高橋 政彦, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 根塚 隼人, 井岡 茂(東芝);
淡路 智, 渡辺 和雄, 小黒 英俊(東北大);大保 雅哉, 飯島 康裕(フジクラ)
MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TAKAHASHI Masahiko, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji,
NEZUKA Hayato, IOKA Shigeru (TOSHIBA); AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo,
OGURO Hidetoshi (Tohoku Univ.); DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro (Fujikura)
E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

内挿の REBCO コイルは定格 140 A 通電時に 11.5 T の磁場を発生し, LTS コイルが発生する 14 T と組み合わせることによって ϕ 52 mm の室温空間に 25.5 T の磁場を発生させる。今回, REBCO 線材の許容剥離応力のばらつきに起因する特性劣化を防ぐため, 巻き線部を各ターンで分割する方式を検討した。本手法の有効性を検証するため, 内径 ϕ 96 mm, 外径 ϕ 172 mm の 6 積層コイルを試作し, 伝導冷却にて実施した通電試験結果について報告する。

2. コイル製作方法検討

許容剥離応力のばらつきに起因すると考えられる特性劣化を回避するために, 20 μ m の銅メッキ線材に 50 μ m の銅テープを貼り合わせて補強する構造を検討し, 要素コイル試験で検証してきた。その結果, 許容剥離応力のばらつきに改善は見られたものの, 補強するだけでは劣化を完全に回避するには至らなかった。そこで, 巻き線部を各ターンで分割することで径方向応力を限りなくゼロにする構成を採用することとした。具体的には, 離形処理したポリイミドテープを線材と共巻して樹脂含浸することで, 全ターンで分割した構造となっている。

3. 6 積層コイル試作・評価

全ターン分割コイルの有効性を検証するため, Table1 に示したシングルパンケーキコイル 6 枚を積層したコイルを試作し, 通電試験を実施した。試作した 6 積層コイルを Fig. 1 に示す。6 積層コイルには, 通常の銅メッキ線材と銅テープで補強した線材の 2 種類を使用した。各シングルパンケーキコイルには, 厚さ 0.25 mm の高純度アルミ板をエポキシ樹脂で貼り付け, 高純度アルミ板の端部を GM 冷凍機の 2 段階冷却ステージに接続してコイルを冷却した。各シングルパンケーキコイルの最外周に電圧タップを取り付け, 2 積層コイル(#1-#2, #3-#4, #5-#6)の両端電圧を測定した。伝導冷却試験前に実施した液体窒素中での通電試験結果を Fig.2 に示し, 伝導冷却 20 K での通電試験結果を Fig.3 に示す。液体窒素中および伝導冷却においても低電界領域まで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。また, コイル温度 20 K においては, 最大 462 A まで通電し, 中心磁場 4.7 T(最大発生磁場 7.5 T)においても安定に通電可能であることを確認した。

4. まとめ

巻き線部各ターンを分割する方式の有効性を検証するため, 6 積層コイルを試作し, 液体窒素中および伝導冷却にて通電試験した結果, 良好な超伝導特性を有することを確認した。今後は, 実機サイズのパンケーキコイルで本方式の有効性を検証し, 実機コイル製作を進める。

謝辞: 本研究の一部は科学研究費補助金(基盤A)による補助を受けています。

Table1. Specifications of single pancake coils

Parameter	#1, #3, #5	#2, #4, #6
Stabilizer	Electroplated copper	Electroplated copper + copper tape
Tape width	5 mm	5 mm
Tape thickness	0.12 mm	0.17 mm
Inner diameter	96 mm	96 mm
Outer diameter	172 mm	172 mm
Turns	208	160
Tape length	87 m	68 m

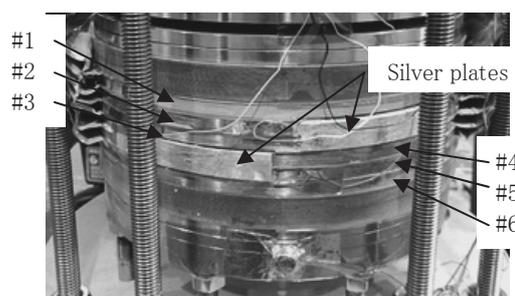


Fig.1 Photograph of six stacked pancake coils

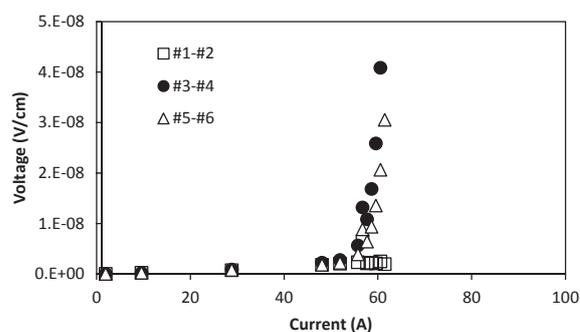


Fig.2 V-I characteristics of six stacked pancake coils at 77 K

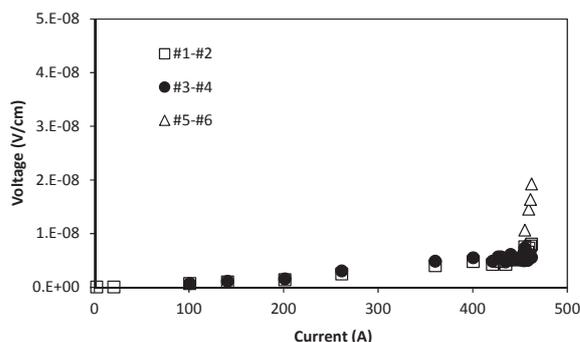


Fig.3 V-I characteristics of six stacked pancake coils at 20 K

高強度 BSCCO 導体による無冷媒 25T 超伝導マグネット用内挿コイルの設計検討

Insert coil design for a cryogen-free 25T superconducting magnet by high strength BSCCO conductor

花井 哲, 根塚 隼人, 土橋 隆博, 瀧上 浩幸, 井岡 茂(東芝); 渡辺 和雄, 淡路 智, 小黑 英俊(東北大)
 HANAI Satoshi, NEZUKA Hayato, TSUCHIHASHI Takahiro, TAKIGAMI Hiroyuki, 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、無冷媒 25T 超伝導マグネット(以下 25T-CSM)の建設を進めている。本マグネットは、高温超伝導コイルと低温超伝導コイルを組み合わせることにより、25T の定常高磁界を発生させるものであり、超伝導導体には高強度でかつ高い超伝導特性を有することが求められる。

これまで高温超伝導導体としては、ReBCO 線材を適用することで開発を進めてきているが[1]、最近になって、高強度の BSCCO 線材が開発されたことから、この高強度 BSCCO 線材を用いた 25T-CSM 用内挿コイルの成り立ちについても設計検討を行ったので、紹介する。

2. 高強度 BSCCO 線材による内挿コイルの設計検討

2012 年度にアップグレードした無冷媒 20T 超伝導マグネット用内挿コイルに採用した BSCCO 線材は、銅合金で強化されたもので、250MPa の許容引張り強度(77K)を有するものであったが、今回開発を進めている 25T-CSM 用内挿コイル用導体としては強度不足であった。ところが、今年になり Ni 合金で強化され、400MPa 以上の許容引張り強度(77K)を有する新しい高強度 BSCCO 線材が開発されたため、この線材を用いてあらためて 25T-CSM 用内挿コイルの設計検討を実施した。

設計検討の結果を Table 1 に示す。Table 1 には、比較のため、ReBCO 線材を用いて設計した 25T-CSM 用内挿コイルのパラメータを併記した。シングルバンケーキコイルを積層し、内外径を接続し、ボルトで上下方向にクランプする ReBCO コイルに対して、ダブルバンケーキコイルを積層し、エポキシ樹脂で固めた Bi コイルは、径方向にゆとりがあり、コイル高さが低くできるため、起磁力は 4%程度小さくなる。

また、線材が厚く、定格電流値も大きいことから、コイルのスペース効率が高くなり、導体電流密度は、ReBCO コイルの 72%に下がり、同時に発生電磁応力も ReBCO コイルの 72%に低減される。

Table 1 Coil parameter of HTS insert coil for 25T-CSM

Coil	Bi coil	ReBCO coil
Superconductor	Bi2223	ReBCO
Wire dimension without insulation (mm)	4.5×0.32	5×0.13
Inner radius (mm)	48	51
Outer radius (mm)	139.3	138.0
Coil height (mm)	391.4	408.0
Number of turns	17784	29580
Ampere turn (MA)	3.98	4.14
Operating current (A)	224	140
Current density of conductor (MA/m ²)	156	215
Current density of coil (MA/m ²)	112	117
Magnetic field contribution (T)	11.5	11.5
Maximum field (T)	25.6	25.7
Operating temperature (K)	10	10
Load factor (%)	89	77
Hoop stress (MPa)	330	455
Compressive stress (MPa)	32	35

BSCCO 線材の I_c -B-T 特性と BSCCO 線材による 25T-CSM 用内挿コイルの運転ポイントを Fig. 1 に示す。ReBCO 線材を用いたときの設計と比較すると余裕が小さくなるものの、 $T_{cs} > 20K$ を確保しており、通常の運転温度 10K に対しては十分な余裕がある。

Fig. 2 は、HTS コイルを径方向に分割することによる応力低減効果を示したものであるが、図に示すように径方向に 3 分割以上にすることにより、フープ応力を 350MPa 以下にでき、採用可能なレベルに応力低減できる。

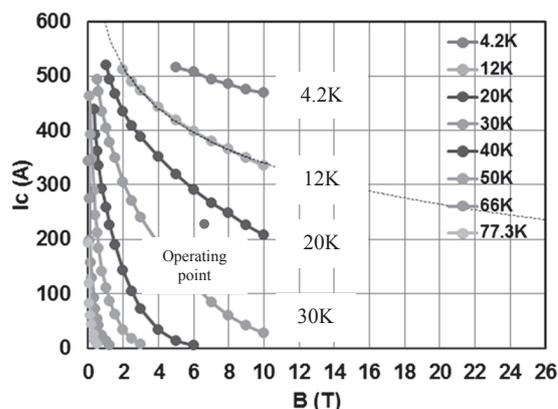


Fig. 1 I_c -B-T property of BSCCO conductor and operating point of 25T-CSM insert coil (T. Nakashima, Pre-print ASC2014)

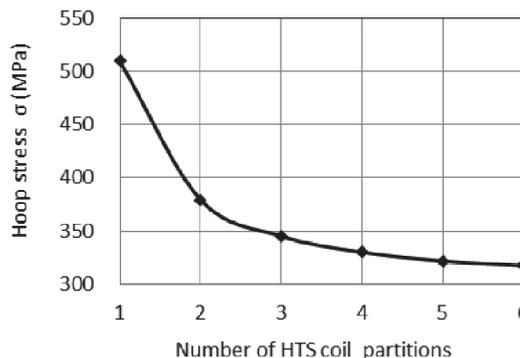


Fig. 2 Relation between number of coil partitions and coil hoop stress

3. まとめ

上記に示すように新しく開発された Ni 合金により強化された高強度 BSCCO 線材を用いて、25T-CSM 用内挿コイルが設計可能であることが、確認できた。

参考文献

1. S. Miyazaki, et al.: "Design of a REBCO Insert Coil for a Cryogen-free 25 T Superconducting Magnet" Pre-print ASC 2014