

# ポーラス安定化材付 REBCO 線材における超伝導復帰性能の インジウム接合条件依存性評価

## Evaluation of recovery performance in porous-stabilized REBCO tape depending on indium-joining condition

結城 光平, 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大)

YUKI Kohei, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: kohei.yuki.t2@dc.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

抵抗型超伝導限流器で用いられる希土類系銅酸化物超伝導体 (REBCO) 線材は, 事故時に高抵抗を示し, その後素早く超伝導状態に復帰することが要求されている. そこで著者らは, Ni-Cr 安定化層適用による高抵抗化[1]およびフィン装荷による冷却性能の向上[2]の知見を基に, 2つの要求を同時に満たすため, 安定化材として金属多孔質体 (ポーラス体) を接合したポーラス安定化材付 REBCO 線材を提案した[3]. ポーラス体は大小様々な孔を持つ複雑構造であり, パルク体に比べ高抵抗かつ, ポーラス体が有する強い毛細管力により膜沸騰の抑制が可能となる.

これまでに, ポーラス体をインジウム箔を介して REBCO 線材に接合することで復帰性能が向上することが実験により確認されている[4]. そこで本研究では, インジウム接合条件が復帰性能に与える影響を解析で評価することで, 復帰性能に優位に働く線材構造の検討を行った.

### 2. 解析方法

本解析では幅 4 mm, 長さ 50 mm で厚さ 2 μm の保護銀層を有し (銅安定化材なし), 臨界電流値が 34 A, n 値が 31 である REBCO 線材を想定した. インジウム接合条件が復帰性能に与える影響を評価するため, 銀層上にインジウムを接合しないモデル (Model 1), 全体に接合したモデル (Model 2) に加え, Fig. 1 に示すように接合間隔  $D$  を 1 mm (Model 3), 5 mm (Model 4), 10 mm (Model 5) としたモデルを用いて, 一次元非定常熱伝導方程式を解くことで各モデルの温度分布を評価した.

解析には直流定電圧電源, 回路内抵抗 (0.01 Ω) および REBCO 線材 (液体窒素 77 K で浸漬冷却) が直列に接続されている回路を想定した. 電源電圧は 0.01 s において最大電圧 3 V に到達するよう線形に増加し, その後 3 V 一定で出力される. したがって, REBCO 線材無接続時には回路に最大 300 A の電流が流れる. また, 回路は実系統と同様に 0.05 s で遮断されることとした.

### 3. 解析結果・考察

Fig. 2 に各モデルの最大通電電流と復帰時間の関係を示す. 限流性能が最も高いものが Model 1, 最も低いものが Model 2 であり, Model 3, 4, 5 に関しては, 若干の差異はあるもののほぼ同様の限流性能を有している. 一般的に, REBCO 線材が高抵抗で, 限流性能が高いほど, 線材内の発生ジュール熱を抑制できるため復帰時間は短くなる. 本解析においても, Model 1, 2, 3 および 5 では同様の挙動を示している. 一方, Model 4 では, 最も限流性能に優れる Model 1 よりも復帰時間が 20% 短縮するという従来とは逆の傾向が確認された. ここで, Fig. 3 に Model 4 におけるインジウム接合部付近の線材長手方向温度分布を示す. ただし, グラフ中の実線は, 最大温度が高い順に 0.05 s (回路遮断時) および 0.15 s の温度分布となっている. Fig. 3 より, インジウム無接合部の温度は最大で 180 K 程度まで増加するが, インジウム接合部との間で温度勾配が生じており, 熱伝導によりインジウム無接合部からインジウム接合部へ熱が輸送されることで, 熱負荷が低減され復帰性能の向上に繋がることが確認された. 一方, Model 3 と Model

5 においては, 線材内の温度勾配が小さいため熱輸送が行われず, 復帰時間の短縮には繋がらない結果となっている.

### 4. まとめ

本研究ではインジウム接合条件と復帰性能の関係を解析により評価し, インジウムを 5 mm 間隔で接合することで, 線材の熱負荷が低減されインジウム無接合時に比べ復帰時間が 20% 短縮した. この接合条件においてポーラス体を接合した際の復帰性能に関しては発表当日に報告する.

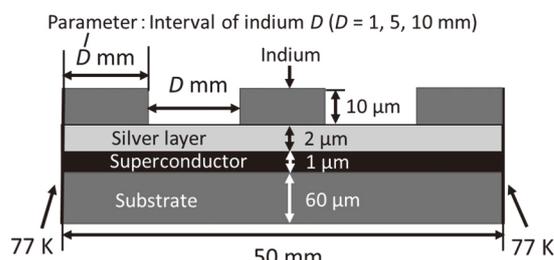


Fig. 1 Schematic drawing of analytical model

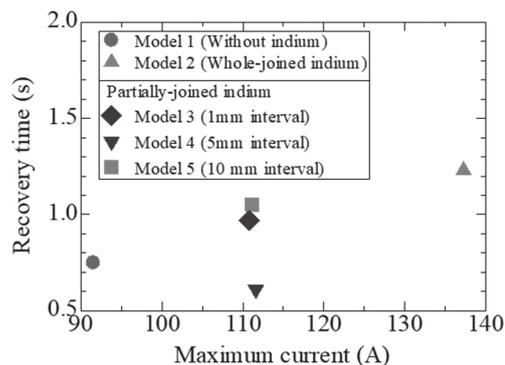


Fig. 2 Relationship between Maximum current and Recovery time of each model

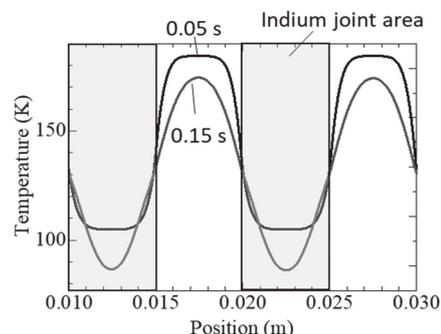


Fig. 3 Temperature distribution of Model 4

### 参考文献

- [1] T. Yazawa et al., Physica C, Vol. 468 (2008) P.2046
- [2] M. Tamashima et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.27 (2017) 5601805
- [3] K. Yuki et al., Abstracts of HTSJ Conference (Tohoku branch), Vol. 18 (2018) p.7
- [4] K. Yuki et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.8

# パンケーキコイルを用いた変圧器磁気遮蔽型超電導限流器の限流特性解析

## Analysis of Current limiting characteristics on a magnetic shielding type Superconducting Fault Current Limiter composed of pancake coils

坂本 大輝, 白井 康之, 坂本 拓哉 (京都大学);  
 SAKAMOTO Daiki, SHIRAI Yasuyuki, SAKAMOTO Takuya (Kyoto University)  
 E-mail: d-sakamoto@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

故障電流の抑制や系統の安定度の向上のため、超電導限流器 (Superconducting Fault Current Limiter: SFCL) が注目されている。SFCL は通常時は低インピーダンス、事故時には高インピーダンスであることが必要である。本研究では、REBCO 線材を用いたソレノイドコイル型の変圧器磁気遮蔽型限流器を設計製作し、限流特性を報告してきた[1]。今回、これをパンケーキコイル型として設計製作し、基礎特性実験を行って限流動作を調べた。

### 2. パンケーキコイル型変圧器磁気遮蔽型 SFCL

パンケーキコイル型変圧器磁気遮蔽型 SFCL の構造と概観を Fig.1 に示す。4つのパンケーキ型 REBCO 超電導コイルを同軸上に配置し、内側の2つをダブルパンケーキとして一次側コイルとし系統に接続する。外側の2つを短絡して二次側コイルとする。REBCO 線材の臨界電流は 85A で、2 次側コイルの巻数を少なくして、一次電流が 37.6A (動作開始電流) で二次電流が臨界電流となるようにした。通常時は一次側で発生する磁束を打ち消す誘導電流が二次側に流れ低インピーダンスである。事故電流が流れると、まず二次側が先に常電導転移し、磁束が打ち消せずリアクタンス成分が発生し、L 型限流が行われる。さらに大きな電流が流れると一次側も常電導転移し、抵抗成分も加わった R+L 型限流が行われる。

ソレノイドコイル型と比べ、パンケーキコイルを用いることでサイズが小さくなり、同じ限流インピーダンスを得るのに使用する線材が少なくなるという利点がある。

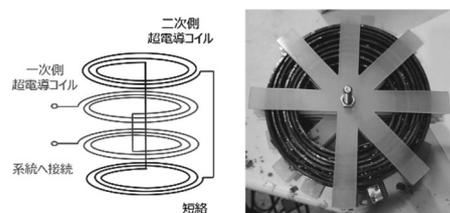


Fig.1 Schematic diagram and photo of SFCL

### 3. 実験・結果

基礎特性実験回路を Fig.2 に示す。電磁スイッチをオンにして、0.1 秒間 SFCL に電流を流した。この時ボルトスライダの電圧を周波数 60Hz、電圧 5~100V の間で変化させ、様々な事故電流を発生させた時の限流器端子電圧、一次側コイル電流、二次側コイル電流を測定した。二次側電流はログスキーコイルで測定した。

実験結果の一例としてボルトスライダ電圧 100V の時の一次側コイル電流、限流器端子電圧を Fig.3 に示す。一次側電流が臨界電流 85A を超え、一次側、二次側共に常電導転移している。SFCL がない場合の電流は、電力系統瞬時値解析プログラム (XTAP) を用いて求めた。限流器によって事故電流は 60%程度まで限流されていることが分かる。電流が 85A を越えた期間に、電圧の歪みが見られることから、一次側コイル抵抗が現れていることがわかる。

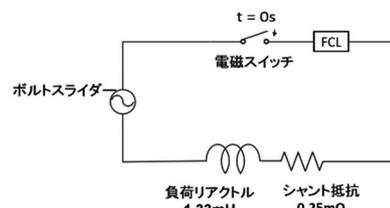


Fig.2 Schematic diagram of the experimental circuit

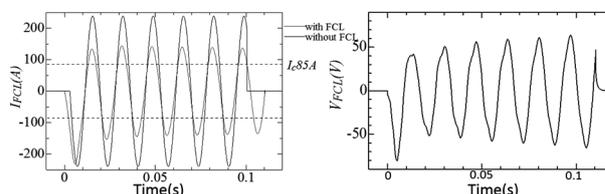


Fig.3 Fault current and SFCL voltage

電圧を変えて行った実験結果をそれぞれフーリエ解析し、限流器電圧、一次側電流の基本波を求め、一次側電流のピーク値に対するインピーダンスと位相差を算出し、Fig.4 に示す。今回 SFCL の結合係数  $k$  が 0.81 と小さく、漏れリアクタンス分の  $0.09\Omega$  ( $240\mu\text{H}$ ) が待機時に発生している。動作開始電流 37.6A を超えたあたりからリアクタンス、抵抗成分が徐々に増え、リアクタンス成分が支配的な L 型限流が行われている。一次側コイルの臨界電流 85A を超えると抵抗成分が増加し、R+L 型限流が行われている。140A 以上になると抵抗成分が急激に増加しているのは、線材の発熱によるものと考えられる。リアクタンス成分は  $0.25\Omega$  に収束しており、設計時に想定した値  $0.258\Omega$  と概ね一致した。

限流器の電圧・電流の位相差は、動作開始電流を超え、110A 程度までは  $65^\circ$  程度であり主に L 型限流であることが分かる。一次側電流がさらに大きくなると位相差が小さくなっていき、R+L 型限流に移行している。

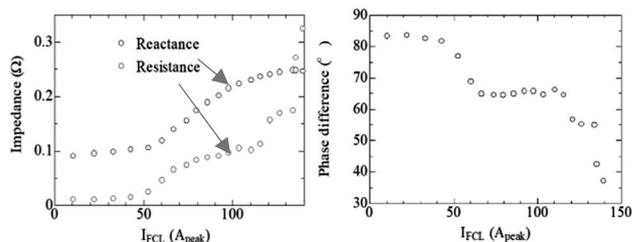


Fig.4 Impedance and phase difference

### 参考文献

- [1] Y. Shirai, et al., IEEE Trans. on ASC, Vol.28, No.4, 5600405, (2018)

# 抵抗型超電導限流器を目的とした液体窒素 GdBCO 無誘導巻コイルにおける復帰特性向上に関する検討

## Study on Improvement of Recovery Characteristics of GdBCO Non-Inductive Coil for Resistive SFCL

柳井 創太, 前田 知滉, 白井 康之, 塩津 正博(京大); 磯嶋 茂樹(住友電工)  
 YANAI Sota, MAEDA Chihiro, SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro (Kyoto University);  
 ISOZIMA Shigeki (Sumitomo Electric Industries)  
 E-mail: yanai@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

抵抗型超電導限流器の実用化にあたり、故障電流の遮断の後、素早く超電導状態に復帰することが求められる。超電導線材表面に PTFE (PolyeTetraFluoroEthylene) コーティングを施したり、液体窒素に圧力をかけたりすることで、復帰特性が向上することがすでに確認されている[1]が、本研究では表面状態及び圧力の大きさの違いによる復帰時間の差異について、GdBCO 線材に過電流を通電し、様々な条件下で線材の抵抗と流れる電流を計測することで調べた。

### 2. 試験体

本実験に使用した無誘導巻コイル試験体(住友電工製)を Fig. 1 に示す。治具には二重螺旋状に溝が刻まれており、その溝に超電導線材をはめ込むことで、試験体に電流が流れたとき発生する磁場を軽減させる構造になっている。また、実用化にあたって同じ形のものを複数枚積み重ねることで系統に沿った容量にすることを考慮して作成されている。使用した超電導線材は幅 3 mm、厚さ 0.13 mm、長さ 2480 mm で単位長さ当たりの常温抵抗値が 278 mΩ/m の GdBCO 線材であり、これを使用した試験体を Bare 試験体とした。一方 PTFE を GdBCO 線材に塗布した試験体を PTFE 試験体とし、PTFE の塗布による冷却の影響を調べるために様々な PTFE の塗布の仕方を試みた。

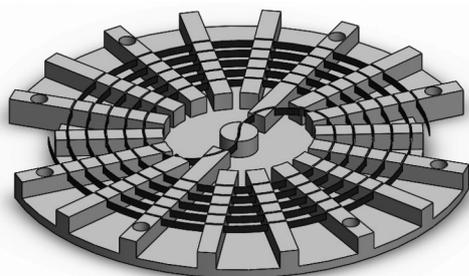


Fig.1 Non-inductive coil

### 3. 試験方法

Fig. 2 のように実験回路を組んだ。スイッチ 1 を閉じ、100 ms 間交流電圧を試験体にかけてクエンチさせた。電圧値はクエンチ後の抵抗値が 600 mΩ に達するように調整した。復帰特性を観察するため、GdBCO 線材が超電導状態に戻るまで、一定電流(100 mA)を通電し、抵抗を計測した。また、試験体の側面から超電導線材の表面の一部をハイスピードカメラで撮影し、復帰中の沸騰現象を観察した。液体窒素にかける圧力は 0.10 MPa (大気圧) から 0.50 MPa まで 0.05 MPa 刻みで変化させて実験を行った。

### 4. 実験結果と考察

Fig. 3 に 0.10 ~0.50 MPa でのクエンチ後の Bare 試験体の抵抗値の時間変化を示す。液体窒素を加圧するに従い復帰時間が短縮しているのが分かる。ただし 0.40 MPa 以降においてはそれ以上加圧しても復帰時間が短縮されな

かった。また各圧力下において、復帰開始直後にみられる抵抗値の減少の傾きが緩やかな領域と復帰開始後しばらくして見られる傾きの急な領域を確認した。これは、どの圧力下においても、クエンチ後は線材表面が膜沸騰状態となり冷却が遅くなるが、ある時点(0.10 MPa では 1700 ms)を境に線材表面が核沸騰状態に遷移し復帰が早くなるという復帰の過程を示している。

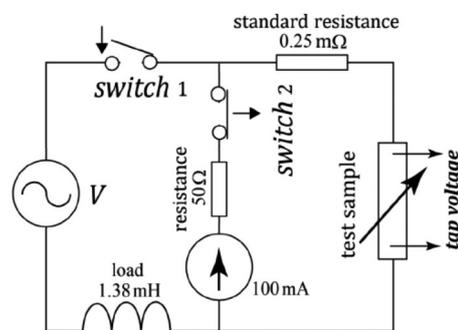


Fig.2 Test circuit

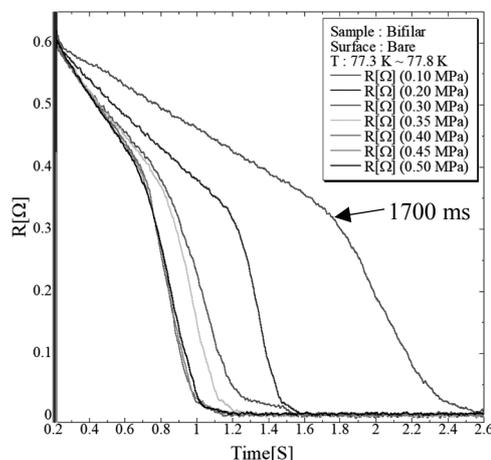


Fig.3 Temporal change of resistance of Bare from under 0.10 MPa to under 0.50 MPa

### 5. まとめ

先行研究と同様に無誘導巻コイル試験体においても液体窒素の加圧により復帰特性が向上した。また PTFE 試験体でも同様の実験を行い、Bare 試験体より良好な復帰特性を確認した。

### 参考文献

- [1] S.Takaya, et al (2018): "Recovery Characteristics of Superconducting Tape with Several Surface Conditions and under Pressurized Condition for Resistive Superconducting Fault Current Limiter" 京都大学大学院エネルギー科学研究科修士論文(未公開)

# 差分進化法を用いた超伝導変圧器の機器定数推定

## Machine parameter estimation of superconducting transformer using differential evolution

米中 友浩, 村岡 樹, 小田部 莊司(九州工業大学); 徳永 義孝(岡山県立大学)  
 YONENAKA Tomohiro, MURAOKA Tatsuki, OTABE Edmund Soji (Kyushu Inst. of Tech.);  
 TOKUNAGA Yoshitaka (Okayama Pref. Univ.)  
 E-mail: otabe@cse.kyutech.ac.jp

### 1. はじめに

現在電力系統において使用している変圧器を電力系統へ投入する際、励磁突入電流が発生し保護リレーの不要動作、制御装置の誤作動・停止、照明類のちらつき・消灯など電力品質に影響を与えている。これらの影響を把握・対策するためには任意の投入条件における励磁突入電流発生時の電圧・電流の瞬時値波形の解析[1]が必要になる。超伝導変圧器を将来的に使用する場合もこの様なことが生じると考えられる。先行研究では遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm:GA)を用いて励磁突入電流から超伝導変圧器の機器定数推定を行っている[2]。本研究ではさらなる精度向上を目指して差分進化法(Differential Evolution:DE)[3]を用いて機器定数推定を行った。その結果について考察する。

### 2. 推定方法

今回は推定する機器定数を、漏れインダクタンス $L_c$ 、励磁インダクタンス $L_m$ 、空心インダクタンス $L_{air}$ 、定格磁束密度 $B_n$ 、初期位相 $\theta_0$ 、残留磁束値 $\phi_r$ とする。これらの機器定数をDEにより求める。初期集団を20個、世代数を2000、スケールンクファクター $F$ 、交叉率 $CR$ をそれぞれ0-1で適当な値に設定し、与えられた範囲内で計算を行う。また評価関数を式(1)に示す。

$$d = \frac{1}{N} \sum |i_{MEA} - i_{SIM}| \quad (1)$$

ここで、 $i_{MEA}$ は励磁突入電流の測定値、 $i_{SIM}$ は励磁突入電流の計算値、 $N$ はサンプル数を表す。

### 3. 結果および考察

DEとGAそれぞれで計算した評価関数 $d$ と推定にかかった時間をTable1に示す。また、推定した機器定数を用いて常微分方程式より求めた励磁突入電流波形をFig.1に示す。Table1よりDEで計算したところ、計算時間が10倍ほどに短縮され評価関数は半分ほどの値になった。特に、Fig.1に注目するとGAでは立ち上がり部分で大きな誤差が見受けられたが、DEで計算したところ大幅に改善され、測定値に近付いたことが分かる。

次に、Fig.2にスケールンクファクター $F$ 、交叉率 $CR$ を変化させた場合の評価関数の変化を示す。 $F$ は大きい値の方が良い結果が得られるが、 $F=1.0$ のときは、優れない結果が得られた。差分ベクトルが大きくなるため、探索終盤に解があると思われる付近を詳細に探索できないためであると考えられる。また、特に $F$ の値が小さいとき、評価関数の値が大きく増加する。これは差分ベクトルが小さすぎることによって、探索初期に十分な範囲で解探索を行えず、局所解に陥っていると考えられる。 $CR$ も値が大きい方が良好な結果を示している。 $CR$ が小さいときは、交叉が比較的行われなため解の改善速度が遅くなる。一方、 $CR$ の値が大きい場合は積極的に交叉が行われており広範囲を探索可能であり、解の改善速度が速い。したがって、同じ世代数で計算を行っても $CR$ の値が大きい方が、評価関数値が大幅に小さくなったと考えられる。しかし、10000世代計算を行うと $CR$ の値が小さい場合でも良好な結果が得られた。 $F$ 、 $CR$ はそれぞれDEの精度を大きく左右するものであり、適切に設定することが、機器定数推定を行うために重要である。

Table1 Evaluation function and calculation time by GA and DE

	Evaluation function $d$	Time [s]
GA	19.5	5.54
DE	9.57	0.515

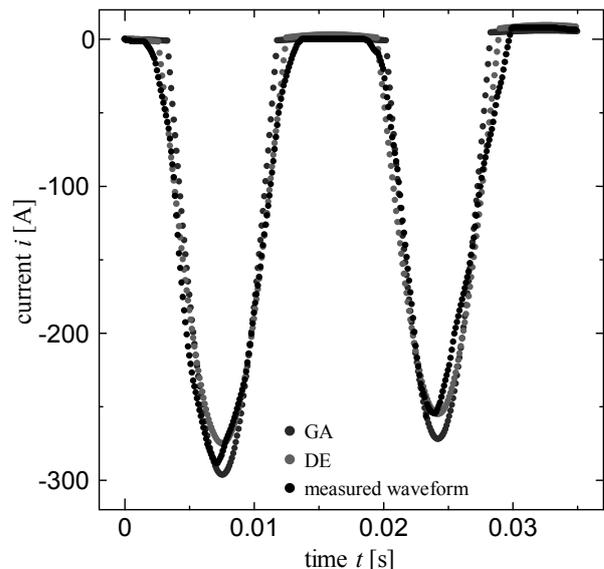


Fig. 1 Inrush current waveform calculated by GA and DE

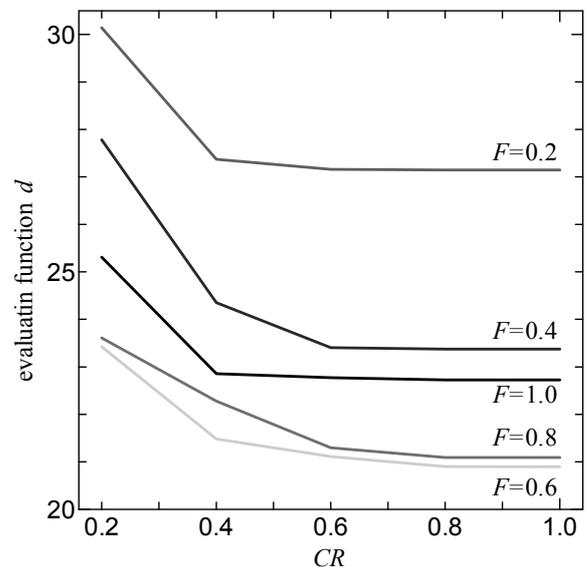


Fig. 2 Values of the evaluation function at various  $F$  and  $CR$

### 参考文献

1. Y. Tokunaga, K. Kubota: IEEJ Trans. PE, Vol. 128 No. 9 (2008) pp. 1075-1081
2. Y. Tokunaga: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 53 No. 1 (2018) pp. 17-22
3. E. S. Otabe, et al.: The 78th JSAP Autumn Meeting, (2017) 6p-S42-18

# 超伝導バルクを用いた高周波コイルの高 Q 値化の基礎検討

## The Basic Study on High Q Factor High Frequency Coil Using Superconducting Bulk

藤田 貴紀, 關谷 尚人(山梨大学)  
 FUJITA Takanori, SEKIYA Naoto (Yamanashi Univ.)  
 E-mail: g19te016@yamanashi.ac.jp, nsekiya@yamanashi.ac.jp

### 1. はじめに

近年, 無線電力伝送 (WPT) の研究開発が進んでいる。WPT の効率は結合係数  $k$  と  $Q$  値 ( $= \omega L/R$ ) の積で決まる。そのため, 高効率化を実現する一つの方法はコイルの高  $Q$  値化である。しかし, 銅コイルのさらなる損失改善は困難であるため, コイルの  $Q$  値を高める事はできない。

我々はコイルの高  $Q$  値化の一つとして, 超伝導線材を用いる方法を提案しており, 従来の超伝導線材を 2 枚貼り合わせることで  $Q$  値が飛躍的に改善することを明らかにした[1]。しかし, 2 枚の超伝導線材を重ね合わせなければならず, 実装面の課題がある。そこで, より容易に高  $Q$  値コイルを実現する新たな方法として超伝導バルクコイルに着目した。従来, 超伝導バルクコイルは直流用の磁石として研究されていたため[2], 高周波に適した構造を検討する必要がある。本報告では高  $Q$  値を実現するために必要な超伝導バルクコイルの構造について検討したので報告する。ここで, 今回検討する超伝導バルクコイルは日本製鉄で製造されたコイルを想定している。

### 2. 超伝導バルクコイル構造の検討

図 1 に超伝導バルクコイルの形状を示す。初めに線幅  $w$  [mm] とギャップ  $g$  [mm] がコイルの  $Q$  値に与える影響について電磁界シミュレータで計算した。図 2 に線幅とギャップに対する  $Q$  値の変化を示す。ただし, コイル強度を考慮し, 線幅の最小値は 1.5 mm とした。図 2 より,  $w$  を減少させ,  $g$  を広げることで  $Q$  値が改善することを確認した。特に線幅 1.5 mm, ギャップ 1.5 mm のときに非常に高い  $Q$  値 (約 32000) が得られることを明らかにした。

### 3. 超伝導バルクコイルの支持材の検討

現在実現できる超伝導バルクコイルの厚さは約 1 mm と非常に薄いため固定方法を検討する必要がある。そこで, 図 3(a) のようにコイルの両側を誘電体で挟み込んだ構造を提案する。初めに, 図 3(b) のように誘電体の誘電体損失がコイルに与える影響をシミュレーションし, 誘電体損失が  $1 \times 10^{-6}$  以下であればコイルの  $Q$  値にほぼ影響しないことを明らかにした。さらに, 誘電率が共振周波数に与える影響についても検討を行った結果, 誘電率が大きい程共振周波数が低くなることを明らかにした。つまり, コイルサイズを大きくすることなく共振周波数を低くすることができる。

### 4. まとめ

本稿では超伝導バルクを用いたコイルを高周波で利用するための構造を検討した。コイル構造の検討から, 線幅とギャップによって  $Q$  値が大きく変化することが明らかとなり, 最適な値を選択することで 30000 以上の  $Q$  値を得られることをシミュレーションで示した。また, 超伝導バルクコイルの支持材に誘電体損失が  $1 \times 10^{-6}$  以下である材料を用いることで, コイルの  $Q$  値にほぼ影響を与えずに支持材として利用できることを明らかにした。

### 謝辞

本研究は総務省 SCOPE(181603014)の委託を受けて実施した。

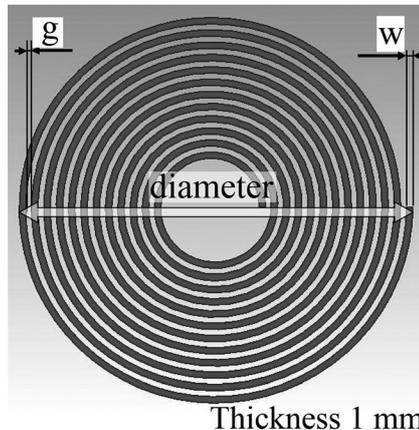


Fig.1 The structure of superconducting bulk coil

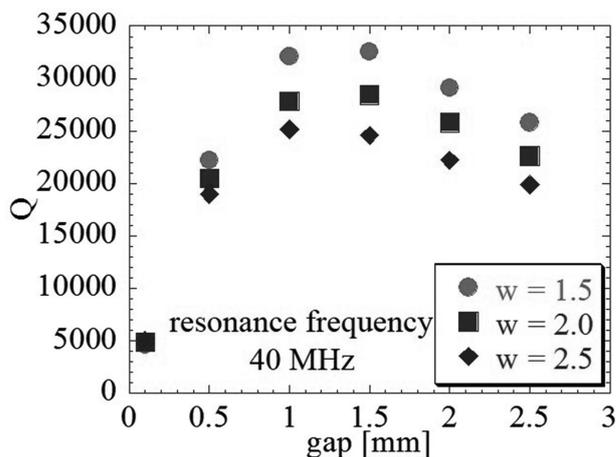


Fig.2 Q factor dependences on the gap

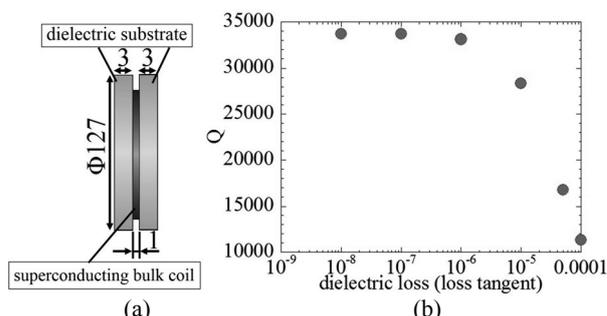


Fig.3 (a) The structure of superconducting bulk coil and dielectric substrates, (b) Q factor dependence on the dielectric loss

### 参考文献

- [1] N. Sekiya, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4 (2017)
- [2] M. Morita, M. Kumada, A. Sato, H. Teshima, H. Hirano, Physica C (2007) p. 387

MgB<sub>2</sub> ラザフォードケーブルによるダブルパンケーキコイルの開発

## (1) 3号機の製作と3台連結励磁試験結果

Development of Double Pancake Coils consist of MgB<sub>2</sub> Rutherford Cable

## (1) Fabrication of 3rd DP coil and excitation test results of a 1st +2nd + 3rd DP coil composition.

榎田 康博, 新富 孝和 (KEK); 濱島 高太郎, 駒込 敏弘, 塚田 健一, 星野 昌幸 (前川);  
谷貝 剛, 高尾 智明 (上智大); 津田 理 (東北大); 宮城 大輔 (千葉大); 平野 直樹 (NIFS);  
繁森 敦, 中島 健太郎 (岩谷産業); 富田 優, 恩地 太紀 (鉄道総研)

Yasuhiro Makida, Takakazu Shintomi (KEK); Takataro Hamajima, Toshihiro Komagome, Kenichi Tsukada (Mayekawa MFG. Co., Ltd.);  
Tsuyoshi Yagai, Tomoaki Takao (Sophia Univ.); Makoto Tsuda (Tohoku Univ.); Daisuke Miyagi (Chiba Univ.); Naoki Hirano (NIFS);  
Atsushi Shigemori, Kentaro Nakajima (Iwatani Corp.); Masaru Tomita, Taiki Onji (RTR)

E-mail: yasuhiro.makida@kek.jp

## 1. はじめに

水素-電力システムに液体水素で冷却される SMES を連携させ、電力制御の高度化を実現する装置を提案している[1]。この SMES に用いられる線材として MgB<sub>2</sub> に注目してケーブルやコイルの開発を進めており、素線を調達してラザフォードケーブルに加工後、ダブルパンケーキコイル (DP) を試作し、冷却励磁試験を行ってきた[2]。これまで W&R 法による 1 号機 (DP1)、R&W 法による 2 号機 (DP2) を製作し、励磁試験結果について報告した[3]。また、3 号機 (DP3) 用のケーブル開発状況も報告している[4]。

その後、DP1~3 まで組合せて、液体ヘリウムの浸漬冷却で励磁試験をおこなったので、その報告をする

## 2. 線材・ケーブル・ダブルパンケーキコイルの仕様

MgB<sub>2</sub> 素線としてハイパーテック (HT) 社製の 30-NM (30 フィラメント) 及び 24-NM (24 フィラメント) を購入し、コイル用に Fig. 1 に示す断面構成のラザフォードケーブルを作製した。

1 号機用のケーブルは、巻き線後に MgB<sub>2</sub> 生成熱処理 (約 675°C × 1 時間) を行うため、S-glass の編組で絶縁を施している。一方 2 号機用のケーブルは、24-NM を 10 本撚線後に熱処理し、ポリイミドテープで絶縁を施している。3 号機用のケーブルは、30-NM を採用するが、20 K 運転時の臨界電流 (I<sub>c</sub>) を考慮し、本数を増やして 12 本撚線とした。撚り及び圧縮加工による劣化が、以前の試作ケーブル (撚線ピッチを調整) においても確認されたため、厚さ方向は 95 % 程度のローラー圧縮加工にとどめ、撚線ピッチも 82 mm とした。また 2 号機において巻線による超伝導特性の劣化は顕著に認められなかったため、2 号機同様 R&W 巻用の導体とした。コイルの仕様を Table 1 にまとめる。

## 3. ダブルパンケーキコイル液体ヘリウム浸漬冷却励磁試験

DP3 単独及び DP2-DP1-DP3 組合せコイルともに液体ヘリウム浸漬冷却下では目標の 600 A をトレーニングクエンチ無しで到達した。クエンチ検出器用バランス電圧のスパイクを一度観測した以外は、コイル内の擾乱は発生していない。

DC 励磁に引き続いて、交流損失測定を目的にした繰り返し励消磁試験 (結果は 2C-p02 にて報告) を実施した。現在、液体水素冷却・励磁に向けたコイルの伝導冷却化改造及びサーモサイフォン方式のクライオスタットの準備を進めている。

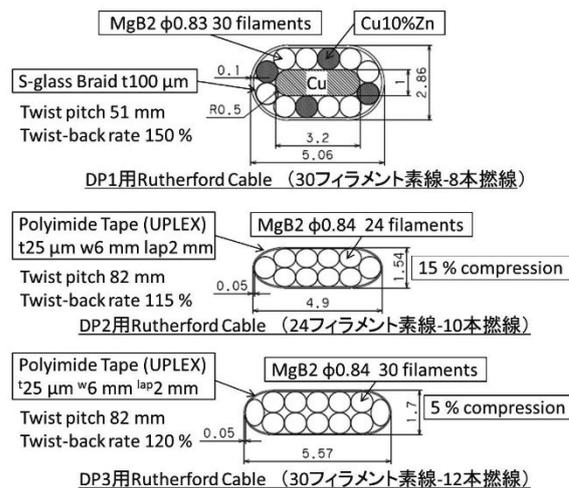


Fig. 1 Cross sections of each MgB<sub>2</sub> Rutherford trial cables.

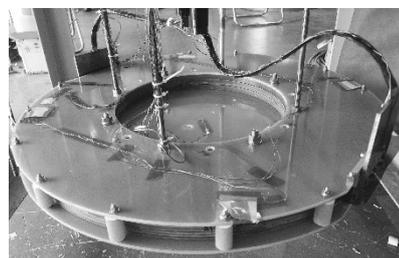


Fig. 2 Photo of double pancake coils for LHe cooling test.

## 謝辞

本研究は、科学技術振興機構の先端的低炭素化技術開発 (JPMJAL1002) の助成を受けて実施しています。

## 参考文献

1. T. Hamajima, et al.: IEEE Trans. Appl. Super. Vol. 22, no.3(2012) Art.no. 5701704.
2. Y. Makida, et al.: Abst. of CSSJ Conf., Vol. 95 (2017) p.127
3. T. Komagome, et al.: Abst. of CSSJ Conf., Vol. 97 (2018) p.180
4. Y. Makida, et al.: Abst. of CSSJ Conf., Vol. 97 (2018) p.71

Table 1 Specifications of MgB<sub>2</sub> double pancake coils

	DP1	DP2	DP3
Winding Method	W&R	R&W	R&W
Coil I.D., O.D. & H (mm)	400, 603.0~604.0, 12.3	400, 606.5~607.5, 12.3	400, 604.5~605.5, 13.5
Turn Number	2 × 35	2 × 55	2 × 55
MgB <sub>2</sub> type, Strand.D.(mm)	Hyper Tech. 30-NM, 0.83	Hyper Tech. 24-NM, 0.84	Hyper Tech. 30-NM, 0.84
Cable Transposition Length (mm)	51	82	82
Insulation	S-glass braid	Polyimide Tape (UPILEX)	Polyimide Tape (UPILEX)
Impregnated Resin		Meiden Chemical ReXP421A+B	
Operation Current (A)		600 (max 700)	
Magnetic Field (T)		Center 0.61, Maximum 1.26	

## MgB<sub>2</sub> ラザフォードケーブルによるダブルパンケーキコイルの開発 —(2)カロリメトリック法による交流損失評価

### Development of Double Pancake Coils Consist of MgB<sub>2</sub> Rutherford Cable — (2) AC loss Measurement of Double Pancake Coils by Calorimetric Method.

駒込 敏弘, 塚田 謙一, 星野 昌幸, 濱島 高太郎(前川); 榎田 康博, 新富 孝和(KEK); 高尾 智明, 谷貝 剛(上智大); 津田 理, 宮城 大輔(東北大); 平野 直樹(中部電力); 富田 優, 恩地 太紀(鉄道総研); 繁森 敦, 中島 健太郎(岩谷産業)

KOMAGOME Toshihiro, TSUKADA Kenichi, HOSHINO Masayuki, HAMAJIMA Takataro (Mayekawa MFG. Co., Ltd.;

MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK); TAKAO Tomoaki, YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.;

TSUDA Makoto, MIYAGI Daisuke (Tohoku Univ.); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co., Inc.);

TOMITA Masaru, ONJI Taiki (RTRI); SHIGEMORI Atsushi, NAKAJIMA Kentaro (Iwatani Corp.)

E-mail: toshihiro-komagome@mayekawa.co.jp

#### 1. はじめに

先進超電導電力変換システム (ASPCS: Advanced Superconductivity Power Conditioning System)[1]は、再生可能エネルギーによる発電電力の変動の短周期成分を超電導磁気エネルギー貯蔵装置 SMES に、残りの長周期成分を水素貯蔵系に貯蔵・放出することで、安定した電力を系統や負荷に供給可能とするシステムである。ASPCS では、液体水素貯蔵と SMES の液体水素冷却を組み合わせることで、変動のある大容量エネルギーをコンパクトに貯蔵することができる。

SMES 向け MgB<sub>2</sub>コイル冷却系の設計・製作において、コイルのパルス通電に伴う交流損失量を把握することは重要な課題の一つである。我々は、MgB<sub>2</sub> 素線を撚り合わせて成形したラザフォードケーブルを用いてダブルパンケーキコイルを巻線製作し、液体 He で浸漬冷却し、三角波の連続した電流波形を印加してパルス運転を行った。運転時のヘリウム蒸発量から交流損失を評価したので、その結果について報告する。

#### 2. MgB<sub>2</sub> 導体およびコイル製作

Hyper Tech 社製の MgB<sub>2</sub> 素線 (30 フィラメントの 30-NM および、24 フィラメントの 24-NM) を用いて、ラザフォード導体を製作した。製作した導体で、内径と外径をそろえた DP1 から DP3 の 3 個のダブルパンケーキコイルを巻線した。Table 1 に示すとおり、DP1 は Wind & React (W&R)法により、DP2 と DP3 は React & Wind (R&W)法により製作した。各コイル詳細仕様は 2C-p01 にて報告する。DP1、DP2 は直列接続した状態において、液体ヘリウム中で運転電流 600A まで励磁することに成功している[1]。その後、DP3 も直列に接続し、600A 励磁に成功した(2C-p01 で報告)。

#### 3. 製作コイルの交流損失評価

Fig.1 に示す試験系にて、製作した 3 つのコイルを電氣的に直列接続し、液体ヘリウム(He)浸漬冷却条件下で励消磁を繰り返し、交流損失を評価した。交流損失評価は、液体 He の蒸発流量から発熱量に換算するカロリメトリック法により行った。コイルを、液体 He に浸漬された後、振幅 600A、掃引速度 50A/s の三角波で 1 時間繰り返し励磁した。励磁により、コイルおよび電流リードと各接続部の抵抗成分に起因するジュール損失、素線の磁化特性に起因するヒステリシス損失等により液体 He が蒸発する。蒸発 He ガスは、両極の電流リード冷却用を含む 3 本のガス配管を経由してクライオスタット外に排出される。各配管に取り付けたマスフローメータにより、クライオスタット内の He 蒸発流量を測定した。蒸発流量から、連続三角波励磁に伴う交流損失を評価した。通電電流を一定モードからパルス運転モードなど種々の条件の基に蒸発量を測定して、それらの結果から交流損失を評価した。

#### 4. まとめ

製作した 3 個の SMES 向けの大電流量 MgB<sub>2</sub>コイルを、直列接続し液体ヘリウム浸漬冷却環境で三角波による交流励磁を行い、カロリメトリック法による交流損失を評価した結果、評価値は予測と同程度であった。

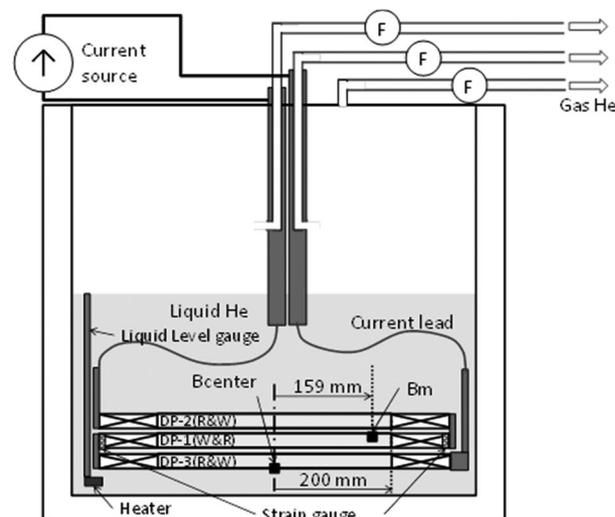


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1 Specification of MgB<sub>2</sub> Coils.

	DP1	DP2	DP3
Winding method	W&R	R&W	R&W
Inner Diameter	400 mm		
Outer Diameter	603~607.5 mm		
Number of turn	72	110	110
Rated current	600 A		
Inductance	58.1 mH		
Stored energy	10.5 kJ		

#### 謝辞

本研究の一部は、JST 先端的低炭素化技術開発事業 (JPMJAL1002) の委託を受け実施した。

#### 参考文献

1. T. Hamajima, et. al : IEEE Trans. Appl. Super. Vol. 22, no.3, June. 2012, Art.no. 5701704.
2. T. Komagome, et. al : Abst. of CSSJ Conf., Vol. 97, p.180

## MgB<sub>2</sub> ラザフォードケーブルによるダブルパンケーキコイルの開発 - (3) ケーブル劣化メカニズムの解析

### Development of Double Pancake Coils consist of MgB<sub>2</sub> Rutherford Cable - (3) Analysis of Ic Deterioration in the Rutherford Cables.

谷貝 剛, 高尾 智明(上智大学); 新富 孝和, 榎田 康博(KEK); 駒込 敏弘, 塚田 謙一, 星野 昌幸(前川製作所); 平野 直樹(NIFS); 恩地 太紀, 富田 優(鉄道総研); 宮城 大輔(千葉大); 津田 理(東北大); 中島 健太郎, 繁森 敦(岩谷産業); 濱島 高太郎(前川製作所)

YAGAI Tsuyoshi, TAKAO Tomoaki (Sophia University); SHINTOMI Takakazu, MAKIDA Yasuhiro (KEK); KOMAGOME Toshihiro, TSUKADA Kenichi, HOSHINO Masayuki (Mayekawa MFG); HIRANO Naoki (NIFS); ONJI Taiki, TOMITA Masaru (RTRI); MIYAGI Daisuke (Chiba University); TSUDA Makoto (Tohoku University); NAKAJIMA Kentaro, SHIGEMORI Atsushi (IWATANI); HAMAJIMA Takataro (Mayekawa MFG)  
E-mail: Tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

#### 1. はじめに

筆者らは、超電導電力貯蔵装置(SMES)を用いた再生可能エネルギー発電電力の電圧変動を、燃料電池と水電解装置および SMES に補償させる先進超電導電力貯蔵システム(ASPCS)を提案してきた[1]。現在は液体水素との組み合わせでシナジー効果を得るため、臨界温度が 39 K、ありふれた元素で構成される MgB<sub>2</sub> 線材を用いて定格 600 A の大容量ラザフォードケーブルを設計・製作してダブルパンケーキコイル(DPC)を構成、積層することで容量 30 kJ の SMES の製作を進めている。これまで 10 kJ 分の SMES 製作が終了し、液体ヘリウム中における直流・交流励磁試験が終了した[1]。

その中で、素線の許容曲げ歪み耐性確認のための素線・ケーブル単体特性や、小型試験コイルによる特性試験も同時に行われてきたが、ケーブル単体試験において、素線 Ic の本数倍に届かない導体 Ic 劣化現象が確認された。

そこで本研究は、許容曲げ歪みの範囲内で設計・製作され、健全であるはずの導体の劣化原因を、実験および有限要素法による解析を用いて明らかにする事を目的としている。

#### 2. MgB<sub>2</sub> 素線とラザフォードケーブルの仕様

MgB<sub>2</sub> 線材は、Hyper Tech 社製 30 本フィラメントの素線 30-NM を用いている。MgB<sub>2</sub>/Cu 比は 17 % / 13 % であり、ラザフォードケーブルは 600 A 定格電流と熱的安定性を考慮して 12 本撚り線としている。撚りピッチは許容曲げ歪みの範囲内で収まるよう、81 mm ピッチとし、ケーブルの剛性を確保するための厚み方向の圧縮は 95 % とした。仕様の詳細を Table 1 に示した[2]。

Table.1 Specifications of MgB<sub>2</sub> strand and Rutherford cable

30-NM Strand	
Diameter	0.83 mm
Num. of filament	30
Max. Strain (before / after treatment)	4 % / 0.23 %
MgB <sub>2</sub> / Cu Ratio	17 % / 13 %
Rutherford Cable	
Twist pitch [mm]	81 mm
Number of strands	12
Dimension [mm×mm]	5.57×1.71 mm
Packing Factor [%]	95 %

#### 3. 30-NM 素線の断面構造

Fig. 1 は Hyper Tech 社製 MgB<sub>2</sub> 線材である 30-NM 素線の断面図である。Continuous Tube Forming and Filling (CTFF) 法で製作されており、長尺化が容易である反面、MgB<sub>2</sub> 粉を覆う Nb が溶接されていないために、クラックが入りやすく、粉体が漏れ出しやすい。そのため熱処理工程で他の金属と反応して Ic の劣化に繋がった事が報告されており[3]、本研究では、ケーブル化工程において生じる圧縮変形と Nb バリアの破れ

の進展の相関を調査するため、金属材料の塑性変形に加えてクラックまでシミュレーションできる拡張有限要素法(XFEM)を用いて数値解析した。

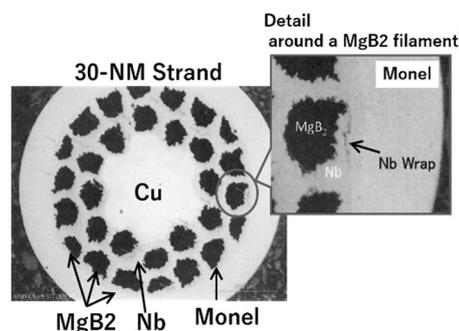


Fig.1 Cross section of 30-NM Strand and an enlarged view around a MgB<sub>2</sub> filament, observed by A. Kikuchi (NIMS)

#### 4. 拡張有限要素法(XFEM)によるき裂進展解析

XFEM 解析の利点は、き裂位置が任意に設定でき、特異性や不連続性を簡単にモデル化できる点にある。XFEM を適用して Nb 周囲のクラックの進展を計算した結果を Fig.2 に示す。素線は上下方向に直径の 10 % 圧縮されており、濃淡はせん断応力分布を示している。計算結果では、MgB<sub>2</sub> 粉体の周囲に設置したクラックが、素線圧縮変形と共に進展する様子が確認された。き裂への粉体の漏れが臨界電流特性劣化の原因と考えられており、詳細については講演で報告する。

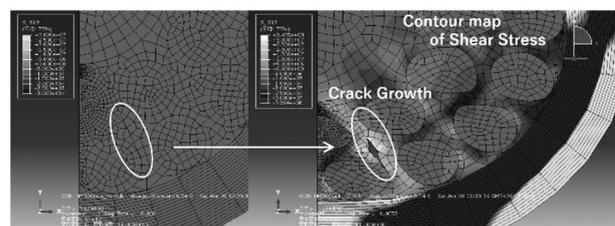


Fig.2 The calculation result of XFEM analysis showing crack development

#### 謝辞

この研究は、JST-ALCA 課題番号 JPMJAL1002 の助成を受けて行われた。また CT 画像は NIMS 菊池氏の協力による。

#### 参考文献

1. T. Hamajima, et. al : IEEE Trans. Appl. Super. Vol. 22, no.3, June. 2012, Art.no. 5701704.
2. T. Yagai, et al.: Presented at ISS2018 (2018) APP 7-4.
3. M. Jimbo, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. (Early Access), DOI 10.1109/TASC.2019.2911309 (2019)

# スーパーフェリクマグネットを構成する高温超伝導コイルの交流損失特性の マグネット形状依存性

## AC loss characteristics of HTS coils in superferric magnets having different magnet geometry

曾我部 友輔, 安永 将広, 不破 康裕, 石 禎浩, 雨宮 尚之(京大)

SOGABE Yusuke, YASUNAGA Masahiro, FUWA Yasuhiro, ISHI Yoshihiro, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

E-mail: sogabe.yusuke.6s@kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は高繰り返しシンクロトロンへのスーパーフェリクマグネット適用を目指した研究を行っている。スーパーフェリクマグネットは高温超伝導コイルと強磁性材料から構成される磁極及びヨークから構成される (Fig. 1)。高繰り返しシンクロトロン用マグネットには時間変動する磁界を発生することが要求されるため、高温超伝導コイルにおける交流損失評価及び低減がシステムの消費電力削減の観点において重要な課題である。今回は、異なる形状のスーパーフェリクマグネットについて高温超伝導コイルの交流損失特性を比較、検討したので報告する。

### 2. 交流損失評価手法と解析条件

スーパーフェリクマグネットを構成する高温超伝導コイルの交流損失を評価するため、三次元電磁界解析を行う。非線形な磁気特性をもつ鉄ヨークによって高温超伝導コイルの経験磁界が通電電流に比例せずに変化するため、これを考慮可能なモデルを適用した [1]。加えて、大規模三次元電磁界解析モデル [2] を適用し、三次元形状をもつコイル内の交流損失分布を評価した。

Fig. 2 に解析における通電パターンを示す。ここで示している電流値は高温超伝導線一本あたりの電流値である。また、超伝導線の導電特性として、磁界強度・印加角度を考慮した  $n$  値モデル [3] を使用した。

### 3. 解析対象としたマグネットと交流損失解析結果

本研究では、機能分離型と機能結合型の二種類の加速器システム (ラティス) を検討対象とした。機能分離型ラティスの偏向マグネット (BB magnet, Fig. 1(a)) はビームを偏向させる二極磁界成分のみを磁界発生領域に発生し、機能結合型ラティスの偏向マグネット (CF magnet, Fig. 1(b)) は二極磁界成分に加え、四極磁界成分を発生させることで、ビームの偏向と収束又は発散の両方の機能をもつ。ここで、CF magnet はビーム方向の長さが約 1 m であるのに対し、BB magnet はビーム方向の長さが約 2 m であり、ラティスを構成する偏向マグネットの台数は、機能結合型ラティスでは 32 台であるのに対し、機能分離型ラティスでは 16 台と、二倍である。

Fig. 3 に  $t = 15$  ms におけるコイル内交流損失密度分布を示す。ここで、交流損失密度は線材単位長さ当たりの損失として示している。このことから、今回のマグネットにおいては、いずれのマグネットについても損失はコイルエンド部に集中していることが確認できる。コイルエンド部は鉄ヨークに覆われていない箇所であり、この位置での超伝導線の経験磁界強度及び印加角度が他の箇所と異なることによって、交流損失密度が高くなったと考えられる。

$t = 10$  ms から  $t = 20$  ms におけるマグネット当たりの交流損失の時間変化を Fig. 4 に示す。この結果から、各マグネット当たりの損失の時間変化はほぼ等しいことがわかった。これは、交流損失がコイルエンド部に集中しており、マグネット当たりの交流損失がコイル長さに影響されないことによる。

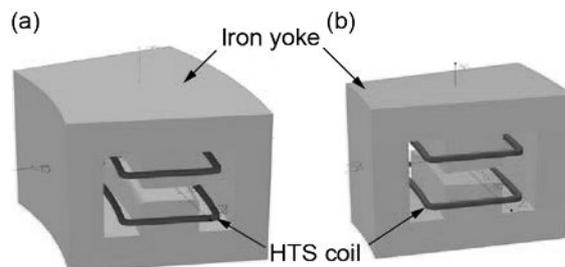


Fig. 1 Superferric magnets: (a) Beam-bending (BB) magnet; (b) combined-function (CF) magnet [1].

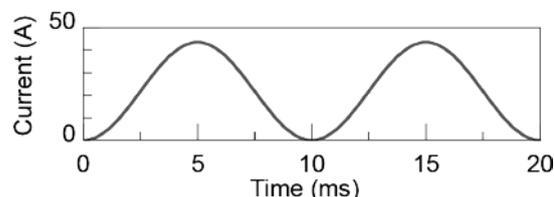


Fig. 2 Temporal current profile.

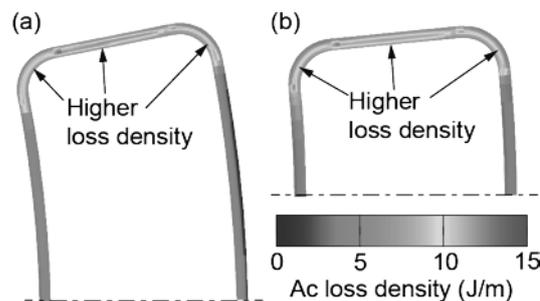


Fig. 3 AC loss density distribution in HTS coil: (a) BB magnet; (b) CF magnet.

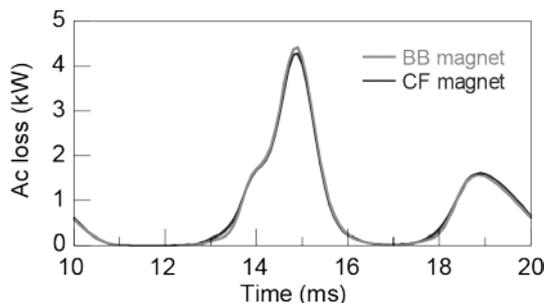


Fig. 4 Time evolution of ac losses in the magnets.

### 謝辞

本研究の一部は文部科学省の原子力システム研究開発事業の支援によって行われた。

### 参考文献

1. Y. Sogabe, et. al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 29, No. 5 (2019) 5900505.
2. N. Tominaga, et. al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 28, No. 3 (2018) 4900305.
3. Y. Sogabe, et. al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 28, No. 3 (2018) 4700105.

## 運転中の高温超伝導巻線に生じた異常の診断法 3 ～数値解析結果と実験結果の比較～

### Diagnosing method of abnormal conditions produced in the HTS windings under operation 3 -The comparison between the numerical analysis and the experiment -

藤原 明弘, 園田 修久, 川越 明史 (鹿児島大学)  
FUJIWARA Akihiro, SONODA Nobuhisa, KAWAGOE Akifumi (Kagoshima University)  
E-mail: K5108614@kadai.jp

#### 1. 背景

高温超伝導機器の実用運転の際には、意図しない遮断をできるだけ避けるために、常伝導転移前の段階で、超伝導特性の低下を把握する必要がある。そこで我々は、非接触のピックアップコイル対を用いることで、巻線の交流損失特性に対応した電磁エネルギーの流れ(エネルギーフロー)を測定し、このエネルギーフローから臨界電流の推定を行うことを検討している[1]。そのためには、巻線周囲のエネルギーフローを定量的に予測できることが必要である。そこで、1ターンのコイル形状線材のエネルギーフローを数値解析で求め、実験結果を比較した。

#### 2. 本診断システムの概要

我々の提案する異常診断システムは、巻線内の電磁現象に伴って巻線周囲で観測されるポインティングベクトルを測定し、その有効電力成分を求める。この成分をエネルギーフローと呼んでいる。エネルギーフローを磁界で割ると損失性電界が求まる。Fig. 1 に、1ターンコイル状サンプルの実験システムの概略図を示す。周方向電界を測定するピックアップコイル(PC-E)と軸方向磁界を測定する(PC-H)が設置されている。損失性電界は、PC-E の電圧のうち、磁界と同相の損失性電圧から求められる。

#### 3. 解析モデルと解析条件

Fig. 2 に今回使用した解析モデルを示す。解析モデルには、サンプルとPC\_E 6個を考慮した。サンプルは、内径70mmのパンケーキ状に9.5ターン巻いたものとした。ピックアップコイル対の位置は、Fig.1 に示すようにそれぞれ中心から、37mm～65mmの範囲に設置している。

解析は、PC-E で測定される損失性電圧( $V_{loss}$ )の解析のみとした。すなわち、外部磁界から位相が90度遅れた基本波成分のみの磁化電流をサンプルに通電させて、PC-E の電圧を解析した。この電流成分は、サンプルの磁化損失から求めることができる。この磁化電流は、フィラメント束に均一に流れているとした。すなわち、印加磁界振幅は、中心到達磁界を超える大きさであることを想定した。

#### 4. 結果

Fig. 3 に数値解析結果を示す。横軸がサンプルからの距離で、縦軸が損失性電圧である。○印が解析結果で、■が実験結果である。実験結果が解析結果よりも2倍程度大きいことがわかる。この原因は、PC\_H にも、サンプルの磁化の影響が観測されるためだと考えられる。そこで、サンプルから70mm 上部に PC-H-NU を設置して実験を行った。その結果を Fig. 2 に◆で追記している。、解析結果とよく一致しており、磁化損失から磁化電流を逆算し、それを元に損失性電界を計算できることを示している。

#### 5. まとめ

高温超伝導コイルの健全性を診断するシステムを開発するために、測定信号と巻線の臨界電流の関係を調べている。今回は、外部磁界中の損失から求まる磁化電流をサンプルに与えて、PC-E で観測される損失性電圧を解析した。その結果、PC-H をサンプルから十分離れた場合の測定結果をよく再現することができた。今後は、PC-H を考慮した解析を行い、エネルギーフローを解析できるようにする。

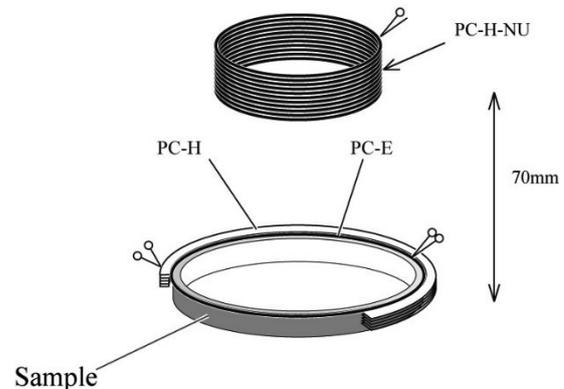


Fig. 1 Experimental set up

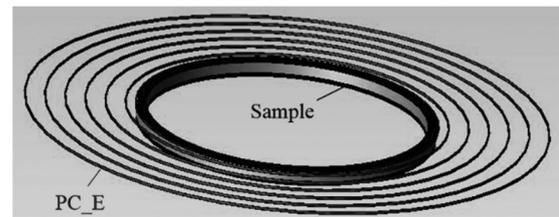


Fig. 2 Analysis model of Sample and Pick up coil

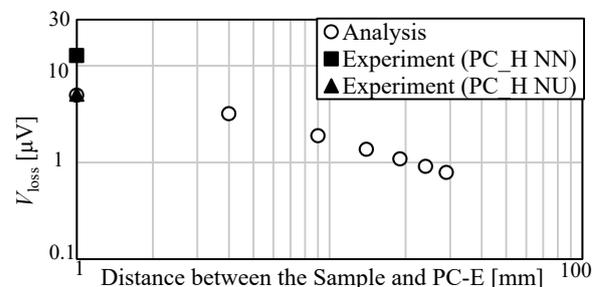


Fig. 3 Loss component of voltages of PC-E set around the sample.

#### 参考文献

1. K. Hosoda, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 97 (2018) p. 181