

中空フォーマを用いた 275 kV 級 YBCO 超電導ケーブルの過電流通電特性解析

Numerical Simulation on Overcurrent Characteristics of 275-kV-class YBCO Power Cable with Hollow Former

王 旭東, 石山 敦士(早大); 八木 正史(古河電工); 丸山 修, 大熊 武 (ISTEC-SRL)
 WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); YAGI Masashi (Furukawa Electric Co., LTD.);
 MARUYAMA Osamu, OHKUMA Takeshi (ISTEC-SRL)
 E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

1. はじめに

275 kV 級電力ケーブルは最大で 63 kA_{rms}, 0.6 s の短絡事故電流が流入する恐れがある。それゆえ、短絡事故電流による突発的な温度上昇が超電導ケーブルの劣化を引き起こさないよう、保護層としての線材安定化層、銅フォーマや銅シールド層を設計することが必要となる。これまでに筆者らは保護層の最適化設計のための計算機シミュレータの開発を行い、超電導線材やモデルケーブルの過電流通電試験を行うとともに、計算機シミュレータの開発および妥当性の検証を行ってきた[1]。今回は、中空フォーマを用いて試設計したモデルケーブルの過電流通電特性解析を行ったので報告する。なお、本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施されたものである。

2. 数値解析手法

我々が開発した 3 次元有限要素法と回路方程式に基づく電流分布・熱伝導連成解析の計算機シミュレータを用いて、中空フォーマを用いた 275 kV 級 YBCO 超電導ケーブル用の解析プログラムを開発した。解析モデルの諸元とケーブル断面模式図をそれぞれ Table 1 と Fig. 1 に示す。電流分布解析は式(1, 2), 熱解析は式(3)を用いて定式化した。超電導線材は 3 次元有限要素法を用いてモデル化し、*I-V* 特性には *n* 値モデルを採用した。銅フォーマと HTS 導体層、また HTS シールド層と銅シールド層が端部のみで電氣的に接触しているとした。フォーマ中空部とケーブル最外層の表面は液体窒素に触れているとして、初期温度 70 K のサブクール液体窒素の熱伝達特性を考慮した。また、インダクタンス *L*, *M* はケーブルを円筒モデルで近似し、集中定数とした。

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla \phi) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} R_{cond} & 0 \\ 0 & R_{shield} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{cond} & M \\ M & L_{shield} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_{cond} \\ V_{shield} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{cond} \\ \theta \end{Bmatrix} \tag{2}$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j \tag{3}$$

式(1)の ϕ はスカラーポテンシャル、 σ は導電率である。式(2)の *I* は電流、*V* は式(1)から得られる超電導線材の電圧降下、*E* は両端電圧である。添え字の cond は導体層、shield はシールド層を示す。式(3)の ρ は密度、*c* は比熱容量、*k* は熱伝導率、*Q_j* は電流分布から求まるジュール発熱を意味する。

3. 解析結果とまとめ

短絡電流通電時のシールド電流を Fig. 2 に、各層の温度上昇を Fig. 3 に示す。なお、短絡電流には定常成分 (63 kA_{rms}) に加えて直流成分 (最大 89 kA, 時定数 90 ms) も考慮した。Fig. 2 より、シールド電流の遮蔽率は 98% で、短絡電流との位相差もほぼ 180° 遅れとなっている。よって、短絡事故時にケーブル外部への漏れ磁場の影響はほぼないと言える。Fig. 3 より、中空フォーマと HTS 導体層は 30 K 弱、HTS シールド層と銅シールド層 20 K 程度の温度上昇であった。63 kA_{rms}, 0.6 s の短絡事故に対して、先行研究の丸撚り形状のフォーマで設計したモデルケーブルは、HTS 導体層が 80 K 以上であったが、今回の解析結果は 50 K 以上低く抑えること

ができた。さらに 0.2 s までは超電導層を臨界温度以下に抑えることができるので、瞬時復帰も可能とする高性能なケーブル設計ができると考えられる。今後はこの設計に基づくモデルケーブルの作製と検証実験を行う予定である。

Table.1 Specifications of Superconducting Model Cable

	Outer diameter (mm)
Copper former	30.6 (400 mm ²)
Hollow diameter	14
HTS conductor layer	35.4(2 layers, <i>I_c</i> =5850 A)
Electrical insulation (PPLP)	79.4
HTS shield layer	80.0 (1 layer, <i>I_c</i> =6900 A)
Copper shield layer	88.5 (310 mm ²)

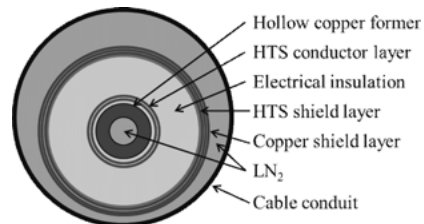


Fig. 1 Cross-sectional Structure of Model Cable

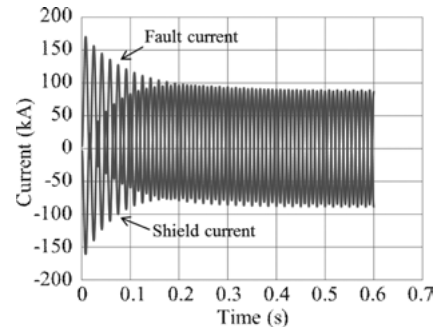


Fig. 2 Simulation Results of Shield Current

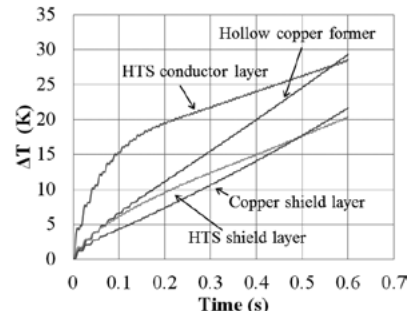


Fig. 2 Simulation Results of Temperature Increase

参考文献

1. X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21 (2011), no. 3, pp. 1017-1020

275 kV 級 YBCO 超電導ケーブルのケーブル間接続部における過電流通電特性

Overcurrent Characteristics of Cable Joint of 275-kV-class YBCO Superconducting Power Cable

王 旭東, 石山 敦士(早大); 八木 正史(古河電工); 丸山 修, 大熊 武 (ISTEC-SRL)
 WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); YAGI Masashi (Furukawa Electric Co., LTD.);
 MARUYAMA Osamu, OHKUMA Takeshi (ISTEC-SRL)
 E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

1. はじめに

275 kV 級 YBCO 超電導ケーブルは最大で 63 kA_{rms}, 0.6 s の短絡電流が想定されており, そのためケーブル間接続部も含めたケーブルの耐過電流特性が要求される。これまでに, 接続部を持たないモデルケーブルの過電流通電特性評価と保護設計や, 短絡事故に対する電流裕度・経年劣化の評価実験を行ってきた[1]。今回は, 接続部を含むモデルケーブルを用いて, 短絡事故に対する電流裕度の評価実験および接続部での通電・伝熱解析を行ったので報告する。なお, 本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施されたものである。

2. 裕度評価実験

これまでに筆者らは 275 kV 系統 YBCO 超電導電力ケーブルの耐過電流保護設計のための計算機シミュレータの開発を行っており[2], 今回はこのシミュレータを用いて, Table 1 のケーブル構造を想定し, 素線あたりの事故電流波形を解析評価した (Fig. 1)。素線あたりの事故電流は最大波高値 (I_{peak}) が 412 A である。裕度評価実験は, Table 1 のケーブル構造を模擬したモデルケーブル (銅フォーマと超電導線材 5 本と絶縁層 (PPLP) で構成) を用いて液体窒素浸漬冷却下で行った。初期 I_{c0} (1 μ V/cm 基準) を測定し, 素線に Fig. 1 の事故電流を通電したのちに I_c を測定して特性劣化の有無を確認した。劣化するまでに Fig. 2 の波形を大きくしながら過電流通電と I_c 測定を繰り返した。実験結果を Fig. 2 に示す。 I_{c0} は約 160 A である。Fig. 2 より, I_{peak} が 680 A 以上で劣化が観測され, 想定される事故電流の約 1.6 倍の裕度がある。

3. 通電・伝熱解析

通電・伝熱解析は接続部断面をモデル化して, 式(1, 2)を有限要素法により定式化して行った。接続部の解析モデルを Fig. 3 (a) に示す。2 本の線材上をラップするようもう 1 本を半田付けして接続する構造である。接続長は 10 cm である。伝熱解析では線材上部の PPLP も含めて, 初期温度 77 K で解析を行った。境界条件として, PPLP の表面が液体窒素に触れているとして, その他の断面は自然境界とした。式(1)の u は電流ベクトルポテンシャル, σ は導電率, μ は透磁率である。式(2)の T は温度, ρ は密度, c は比熱容量, k は熱伝導率, Q_j は式(1)から求まるジュール発熱, Q_q は冷却項である。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \sigma \mu \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + Q_j - Q_q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

裕度評価実験後に測定した接続部の MO 像を Fig. 3 (b) に示す。また, 接続部の中央付近における電流ベクトルと全体の温度分布を Fig. 3 (c) と (d) に示す。なお, Fig. 3 (b)–(d) は Fig. 3 (a) の図中の指定範囲と一致する。MO の結果から, 接続部中央付近において局所的に劣化していることがわかる。これは接続部中央での電流転流により, 発熱が集中したためと考えられる。そこで, 接続部中央の電流分布の解析結果から, 接続端部に電流偏流が発生していることがわかる。これは,

交流通電による表皮効果の影響である。更に接続部の温度分布の解析結果から, 接続部中央の温度上昇が最も高く約 172 K であることがわかる。よって, 接続端部の電流偏流がケーブル間接続の局所劣化を引き起こす可能性があることが明らかとなった。今後は, 接続部の裕度評価実験と解析評価を行うとともに劣化しにくい接続方法の検討も行っていく予定である。

Table.1 Specifications of Superconducting Model Cable

	Outer diameter (mm)
Copper former	21.7 (325 mm ²)
HTS conductor layer	26.9 (2 layers)
Electrical insulation (PPLP)	79.0
HTS shield layer	80.0 (1 layer)
Copper shield layer	90.0 (310 mm ²)

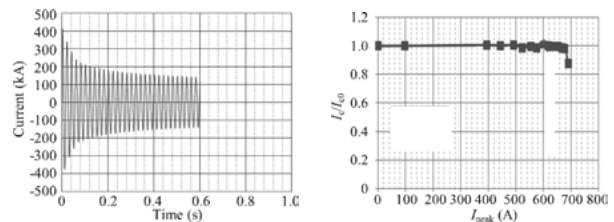
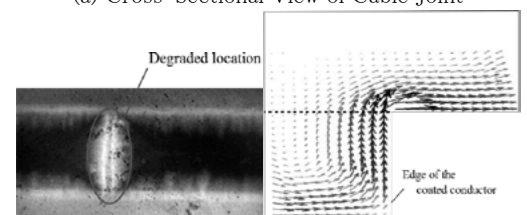
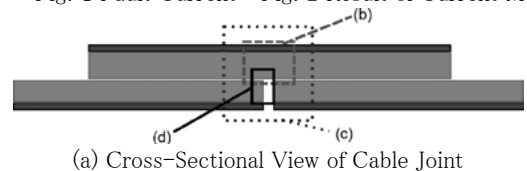
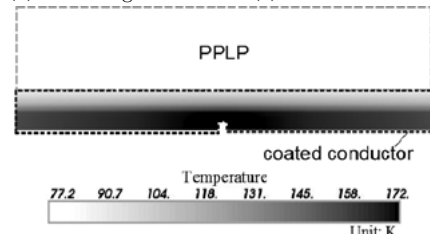


Fig. 1 Fault Current Fig. 2 Result of Current Margin



(b) MO Image (c) Current Distribution



(d) Temperature Distribution

Fig. 3 Results of MO Image and Simulations

参考文献

1. X. Wang, A. Ishiyama et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 83 (2010) p.265
2. X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21 (2011), no. 3, pp. 1017-1020

275 kV 高温超電導ケーブルの絶縁材料の長期特性評価 Long Period Properties of Insulating Material Used by 275 kV HTS Cable

藤 軍, 八木 正史, 三賢 隆治, 野村 朋哉(古河電工); 早川 直樹(名古屋大); 大熊 武, 丸山 修(超電導工研)
TENG Jun, YAGI Masashi, MITSUHASHI Takaharu, NOMURA Tomoya (Furukawa Electric); HAYAKAWA Naoki (Nagoya Univ.);
OHKUMA Takeshi, MARUYAMA Osamu (ISTEC-SRL)
E-mail: ten.jun@furukawa.co.jp

1. はじめに

現在、YBCO 線材を用いた 275 kV-3 kA 級高温超電導ケーブルの開発を進めている。ケーブル構造最適化検討の一環とする絶縁設計において、コンパクト性の要請として、外径を 150 mm 以下にする開発目標があり、実用的・合理的な絶縁層厚みを選定することが必要である。我々は初期の選定試験で決めた、ポリプロピレンとクラフト紙の半合成紙絶縁材料に対し、その部分放電特性(PD)とインパルス耐圧性能(Imp)を評価してきた[1]。今回は、絶縁厚 1 mm, 10 mm と 20 mm のモデルケーブルの PD と Imp 課電試験を通じて見出した、275 kV 高温超電導ケーブルの絶縁設計値(PD フリー電界と Imp 耐圧電界)を基に、長期特性(部分放電開始の V-t 特性と破壊の V-t 特性)を評価し、ケーブルの長期課通電試験における試験条件を纏めたので報告する。

2. 高温超電導ケーブルの絶縁設計値

選定したポリプロピレンとクラフト紙の半合成紙絶縁材料を使用して、絶縁厚 1 mm, 10 mm と 20 mm のモデルケーブルを作製し、液体窒素に浸漬して、0.3 MPa(abs)に加圧した条件下で部分放電(PD)試験とインパルス(Imp)破壊試験を実施した。Fig.1 は部分放電開始(PDIE)特性を示しており、部分放電が 1 回目に検出された電圧から、モデルケーブル導体直上の電界を算出した。その結果、絶縁厚みが変わっても、PDIE に変化は無く、0.1%の発生確率の 22 kV/mm を設計ストレスとした。次に、Fig.2 から、Imp 破壊特性は絶縁厚みと相関があり、絶縁厚 10 mm のデータを使い、絶縁厚 1 mm と同様のバラツキ(3 σ)をもつとして、83 kV/mm を設計ストレスとした。その結果、Imp 特性は絶縁厚 20 mm で 83 kV/mm 以上、絶縁厚 22 mm で目標とした ± 1155 kV 以上の性能を確認した。

3. 絶縁材料の長期特性評価試験

Fig.1 の 1 mmt モデルケーブルの PDIE 測定後に、長期課電試験を実施した。最長約 1 ヶ月(760 時間)の長期特性データを取得し、寿命指数 n=80 を得た(Fig. 3)。試験後の PDIE は、Fig.1 の結果に対して劣化のないことが確認されたので、そのまま破壊の長期特性試験に移行した。この時の設定電界は、PDIE 電界の 2 倍近くであり、常に部分放電が出ている状態であった。65 時間後にサンプルの一つが破壊した。破壊サンプルを切り離して生き残ったサンプルの PDIE を測定したところ、明らかな劣化が確認された。生き残ったサンプルに引き続き同じ条件で課電を継続したところ、102 時間でも破壊しなかったため、試験を終了し、PDIE を測定した。その結果、さらなる劣化の進行が確認された。この時に得られる寿命指数 n は 50 となった(Fig. 3)。

4. 275 kV ケーブルの長期課通電試験条件

今後の 275 kV ケーブルの長期課通電試験に向けて、絶縁材料の長期特性から得られた寿命指数 n で長期課通電試験の条件(試験期間とそれに対応する課通電電圧)を設定した。

275 kV ケーブルの運転電圧 160 kV(対地電圧)に対して、1 ヶ月の試験期間で 30 年相当の寿命を想定すると、対地電圧で 200 kV (n=50), 190 kV (n=80)となる。

5. 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発研究機構(NEDO)の委託により実施したものである。

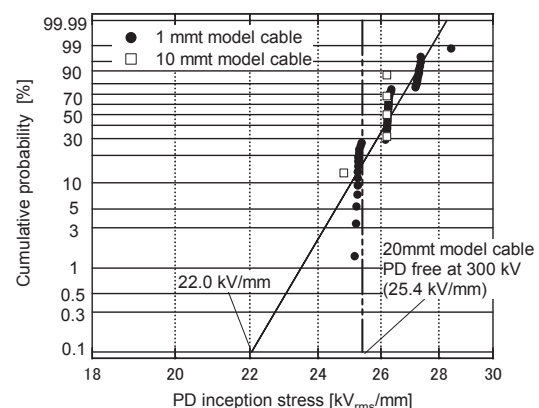


Fig.1 PDIE Properties

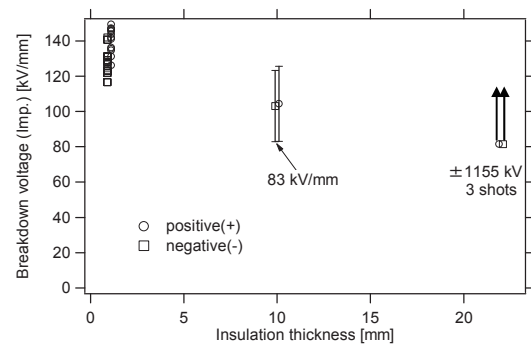


Fig.2 Imp Properties

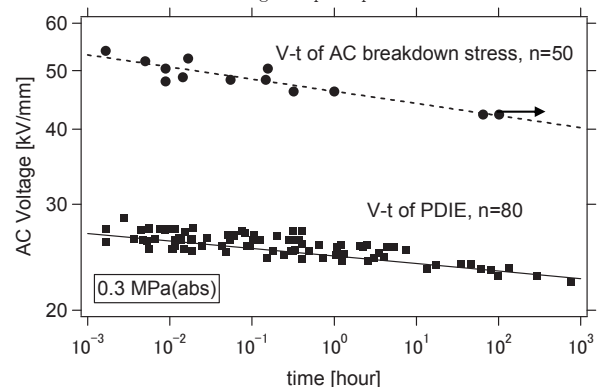


Fig.3 Long Period Properties (V-t) of PDIE and Breakdown

参考文献

1. T. Nomura, et al. Abstract of CSJ Conference, vol. 84 p.193(2011)

多層導体ケーブルにおける線材幅方向の損失分布

Ac loss distribution along the coated conductor width

-in multilayer superconductor power transmission cables

西野 竜平, 雨宮 尚之, 李 全, 中村 武恒(京大)
大屋 正義(住友電工);丸山 修, 大熊 武(SRL)

NISHINO Ryohei, AMEMIYA Naoyuki, LI Quan, NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.)

OHYA Masayoshi(SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.); MARUYAMA Osamu, OHKUMA Takeshi (SRL)

E-mail: r-nishino@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

次世代高温超伝導線材を用いた超伝導送電ケーブルは、円断面のフォーマに沿ってテープ線材をスパイラル状に複数重ねるため、超伝導送電ケーブルの断面は Fig.1 に示すような多層導体で構成される多角形となる。多層化により、内層と外層の線材配置は超伝導送電ケーブル長手方向に Tape on tape (T/T)、Tape on gap (T/G) 或いは T/T と T/G の過渡的な状態である Edge on gap (E/G) が混在する。さらに内層と外層を構成する線材の幅が同じ超伝導送電ケーブル (Fig.2 (a, b, c)) と、内層と外層を構成する線材の幅が異なる超伝導送電ケーブル Fig. 2(d, e) では、内外層の線材の相対位置が異なる。

超伝導送電ケーブルの長手方向の断面形状を模擬した様々な線材配置の 2 層導体モデルに対して 2 次元の交流損失解析を実施した。

2. 解析モデル

Table 1 に示すような 2 層の導体層を有する超伝導送電ケーブルモデルの内層/外層の内直径をそれぞれ 22.32 mm/22.97 mm に固定した。Cable A、B、C では内外層の線材幅の組み合わせが異なる。この解析モデルの外層を Table 1 に示す線材位置の位相(Phase)の範囲で反時計回りに回転させて超伝導送電ケーブルの長手方向に現れる様々な 2 次元断面を模擬した。

3. 解析結果

2層の超伝導送電ケーブルの外層の線材位置の位相ごとの交流損失解析の結果をFig.3に示す。

Cable A、B、Cの交流損失分布の傾向は次の通りである。Cable Aの交流損失分布は線材配置T/T~E/Gの範囲に極大が存在し、T/Gの範囲に極小が存在する。Cable Bの交流損失分布は線材配置E/G~E/G+T/Tの範囲に極大が存在し、T/G+T/Tの範囲に極小が存在する。Cable Cの交流損失分布は線材配置T/T~E/Gの範囲に極大が存在し、T/Gの範囲に極小が存在する。

各超伝導送電ケーブルモデルの交流損失分布を比較すると次の通りである。Cable A、Cの交流損失の極大と極小の差は約2倍である。一方、Cable Bの交流損失の極大と極小の差は約3.5倍である。

Cable A、B、Cに共通する交流損失分布の傾向は次の通りである。外層の線材端部が内層の線材間ギャップに存在する線材配置E/Gの場合、交流損失は増加する。外層の線材端部が内層の線材間ギャップに存在しない線材配置T/T、T/Gの場合、交流損失は減少する。

線材間ギャップと線材端部の相対位置が超伝導送電ケーブルの交流損失に大きく影響すると考えられる。

謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託のもと、国際超電導産業技術研究センターとの共同研究として実施されたものである。

Table 1 Specification for analysis

	Width of	Number of	Gap	Phase
	C.C. (mm)	C.C.	(mm)	(degree)
	Inner/Outer	Inner/Outer	Inner/Outer	Inner/Outer
Cable A	4/4	15/15	0.77/0.91	0/0 - 24
Cable B	4/2	15/30	0.77/0.43	0/0 - 12
Cable C	2/2	30/30	0.37/0.43	0/0 - 12

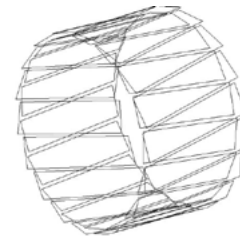


Fig.1 Two-layer cables with spiral structure

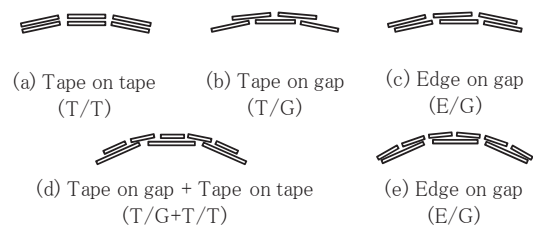


Fig.2 Position of coated conductor (C.C.)

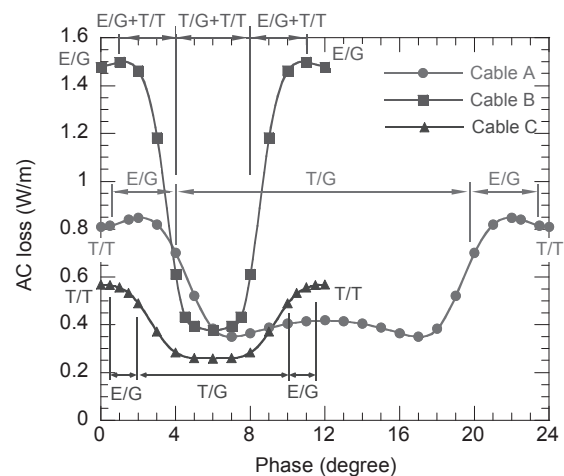


Fig.3 AC loss distribution of each phase

参考文献

1. N. Amemiya; Journal of the Cryogenic Society of Japan, Vol. 45 No. 8 (2010) p.376

直流き電鉄道システムへの超電導ケーブルの適用可能性に関する解析

Simulation Study on Application of Superconducting Power Cables to DC Electric Railway Systems

呂 臻, 関野 直樹, 大崎 博之(東大); 富田 優(鉄道総研)
 LV Zhen, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)
 Email: ro-shin@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

現在日本の電気鉄道で広く使われる直流き電システムには、送り出し電圧が低い、回生ブレーキ利用の不確実性、エネルギー損失等の問題がある。直流き電鉄道システムの直流き電線と並行に高温超電導直流ケーブルを導入すると、損失の低減、回生率の上昇、変電所容量の抑制および変電所数の削減等が期待できる[1]。高温超電導直流ケーブルを直流鉄道き電システムに導入することについて、モデル路線を設定してエネルギーの得失に焦点を当ててシミュレーションによる検討を行い、前回の低温工学学会においては超電導ケーブルの導入効果について紹介した[2]。今回はケーブルの導入方法及び変電所数の削減の影響を調べるためにさらにモデルを作成して解析による検討を行った。

2. モデリングと解析手法

Fig.1 (a) に示すように、前回のモデルコースは路線全長 26.5 km、駅数 24、変電所数 5 (SS1~SS5)、運行間隔を 5 分間に設定した。さらに 22.2 km 長の超電導ケーブルが 5 カ所の変電所を結ぶように、き電線と並列に施設した。この路線条件で、今回は変電所数を 5 個から 4 個 (Fig.1(b)), 3 個 (Fig.1(c)) に変更し、また 3 変電所数条件でさらに 2.5 km 毎に超電導ケーブルとき電線を繋ぐケース (Fig.1(d)) の 3 条件で解析を実施、結果を比較した。超電導ケーブルの熱侵入は 1 kW/km、端末部熱侵入は 0.25 kW/端末、冷凍機の COP は 0.1 を仮定した。Matlab/Simulink を用いて、5 分間の回路各部の電流、電圧等の変化を、解析し、エネルギー等を評価した。

3. 解析結果と今後の課題

Fig.2 は、超電導ケーブルの導入のし方によって電車電力がどのように変化するかを示し、プラスが力行、マイナスが回生ブレーキを表す。変電所数の削減により、回生率の低下が見られるが、超電導ケーブルとき電線の間を 2.5km おきに接続することにより改善されている。一方、Tab.1 は各条件における変電所の最大電力と最大電流を示す。変電所が 5 箇所ある場合の最大電流 1.3 kA、最大電力 2.0 MW に比べ、変電所を 3 箇所にした場合はそれぞれ 1.61 kA、2.5 MW となり、1.25 倍しか増加しなかった。超電導ケーブルの導入により、変電所の稼働率の向上が見られた。

今後は電車の駆動制動特性をより詳細にモデル化するとともに、他の超電導ケーブル導入方法との比較など、システム最適化を検討する予定である。

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)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。

参考文献

1. 富田優, 2010 年度春季低温工学・超電導学会, 3 A-a09 (2010) p.186
2. 呂 臻, 2010 年度冬季低温工学・超電導学会, 1 P-p37 (2010)

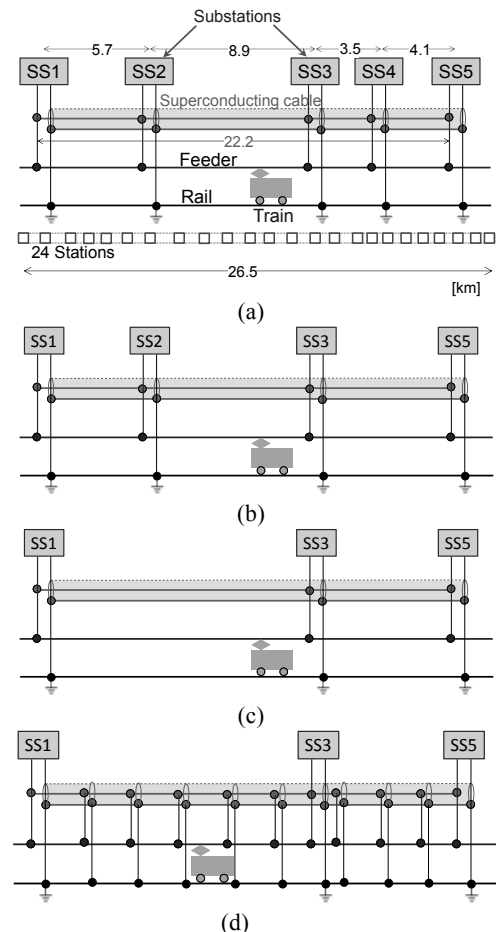


Fig.1 Analysis models

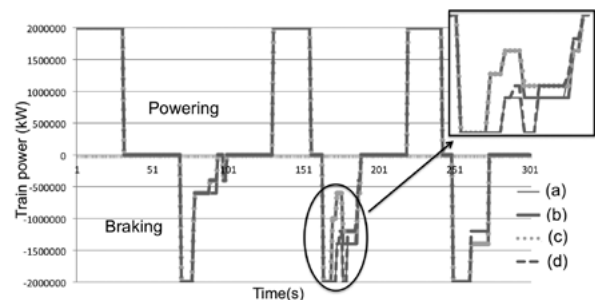


Fig.2 Regenerative power performance for 5 min. for analysis models shown in Fig. 1

Tab.1 Comparison of substation conditions

Model In Fig. 1	(a)	(b)	(c)	(d)	
HTS Cable	NO	YES			
Intermediately connected to feeders (every 2.5 km)	NO			YES	
Substation Number	5	5	4	3	3
Max. substation current (kA)	2.1	1.3	1.42	1.61	1.65
Max. substation power (MW)	3.2	2.0	2.21	2.5	2.56

イットリウム系超電導変圧器の限流機能付加技術開発 —モデル変圧器の限流特性試験結果—

Current Limiting technology development of Y-based HTS transformers —Current limiting test results of model HTS transformer—

富岡 章, 坊野 敬昭, 各務 修平, 磯崎 優, 渡邊 和幸, 外山 健太郎, 杉山 修一, 今野 雅行(富士電機);
岡元 洋, 五所 嘉宏, 林 秀美(九州電力); 堤 智章, 岩熊 成卓(九州大学); 齊藤 隆(フジクラ); 田辺 圭一, 塩原 融(SRL)
TOMIOKA Akira, BOHNO Takaaki, KAKAMI Syuhei, ISOZAKI Masaru, WATANABE Kazuyuki, TOYAMA Kentaro,
SUGIYAMA Syuichi, KONNO Masayuki(Fuji Electric);
OKAMOTO Hiroshi, GOSHO Yoshihiro, HAYASHI Hidemi(Kyushu Electric Power Co.);
TSUTSUMI Tomoaki, IWAKUMA Masataka(Kyushu Univ.); SAITO Takashi(Fujikura Ltd.);
TANABE Keiichi, SHIOHARA Yuh(SRL)
E-mail: Tomioka-akira@fujielectric.co.jp

1. はじめに

経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の超電導変圧器技術開発では、66kV/6.9kV-20MVA級超電導変圧器の実用化を見通すために巻線技術、限流機能付加技術及び冷却システム技術などの開発を行っている。

超電導変圧器巻線に限流機能を付加することにより、電力系統事故時に発生する過電流が、超電導巻線の常電導転移により低減される。このために超電導導体の構成を最適化し、限流機能付加モデル変圧器を製作し、限流特性試験(短絡試験)を行ったので報告する。

2. 試験方法

限流機能付加モデル変圧器の主な仕様を Table.1 に示す。限流機能を比較するため、昨年度試験した短絡モデル変圧器[1]と同容量にした。用いた超電導導体は、短絡電流解析の結果[2]から仕様を決め、イットリウム系超電導線材に厚さ $50\mu\text{m}$ の銅線を付加したものである。

試作した変圧器は耐電圧試験や通電試験などを行い、設計通りであることを確認した。

Table.1 Main Specification of model HTS transformer.

	Primary	Secondary
Number of Phase	Single Phase	
Rated capacity	400kVA	
Rated voltage	6.9kV	2.3kV
Rated current	58A	174A
Rated frequency	60Hz	
%Impedance	10.6% (400kVA standard level)	
Number of turn	576	192
Operation temperature	66K(Sub-cooled LN ₂)	

3. 試験方法・結果

短絡発電機を用い、限流モデル変圧器の二次側を短絡させておき、一次側に 6.9kV を印加して限流特性試験を行った。短絡電流を最大にするため、投入位相が零度になるように投入位相制御装置を使用した。また、励磁突入電流が短絡電流に重畳しないように、一次側に電圧を印加してから約 10 秒後に短絡状態にした。短絡継続時間は実際の配電システムで用いられている 0.2 秒を目標とした。

Fig.1 に試験場状況を、Fig.2 に試験時の電流と電圧を示す。試験回路の都合により印加電圧が 6.3kV になったため、限流時に発生する熱エネルギーがほぼ等価となるように短絡継続時間を約 0.25 秒に設定した。一次側の短絡電流は、短絡直後では 559A であり、短絡後 0.25s 後に 174A に限流した。

限流特性試験後に、超電導巻線の I-V 特性を測定し、

試験前後で特性劣化が無いことを確認した。

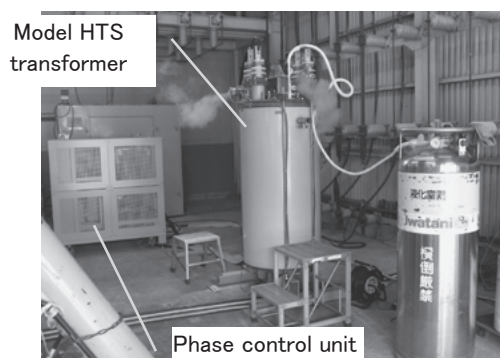


Fig.1 Current limiting test equipments during cooling.

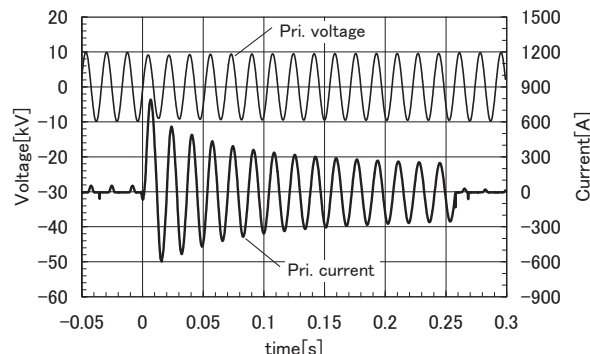


Fig.2 Voltage and current during current limiting test.

4. まとめ

限流モデル変圧器を製作し、限流特性試験を行った。一次側の短絡電流は 559A から 174A に限流し、目標である定格電流の 3 倍以下になることを確認した。また、この試験前後で特性劣化が無く、限流動作に耐えることを確認した。

謝辞

本研究は、経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発(超電導変圧器技術開発)」をNEDOからの委託を受けて実施した。また、(株)上電機製作所の短絡試験設備を用いて実施した。関係者に謝意を表します。

参考文献

- H. Okamoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.141
- H. Okamoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.51

中型超電導同期モータの概念設計のための基礎検討

Fundamental study on conceptual design for medium class superconducting synchronous motor

土井 昭幸, 金 錫範(岡山大)

DOI Akiyuki, KIM SeokBeom (Okayama University)

E-mail: kim@elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

現在、モータの小型軽量化・高効率化を目標として高温超電導体を用いた様々なモータの研究が行われている。しかし、その大多数は数 MW 級の大型モータであり、数百 kW 級の中型モータにおいてはあまり検討が行われていないのが現状である。我が国の電力消費の 50% 以上は回転機駆動に使われており、その内 8 割は中小容量機であるため、超電導回転機による真の技術革新を達成するためにも中小型の電動機への超電導応用を進める必要があると考えられる。従って、本研究では、低速回転時のみならず、高速回転時においても高効率を維持できる 300kW 級の超電導同期モータの開発を目的として行っ。その基礎研究として、中型回転機用の界磁超電導コイルの概念形状設計について数値的に検討したので、その結果について報告する。

2. 二次元手法の 300kW 級高温超電導モータの概念設計

Fig.1 は、本研究で設計した高温超電導モータの断面図を示す。4 極の界磁回転子にレーストラック型の超電導コイルを用いており、空隙磁束密度を正弦的にするために階段状に積層された構造とした。また固定子である電機子の巻線方式には全節巻の 2 層巻を用いており、各相は Y 結線された構造としている。概念設計段階においては、300kW 級の高温超電導モータの設計入力パラメータを決定する必要があり、機器の基本設計パラメータである端子電圧、周波数と回転数はモータの応用分野と既存の同クラスモータの仕様を参照して決定した。界磁コイルにはテープ形状を有する高温超電導線材を用いており、これはテープ面に垂直に作用する磁場に対して臨界電流値が最も低くなる。本研究では、界磁コイルとして YBCO 薄膜線材を用いることにする。超電導モータの界磁コイルを構成する高温超電導線材面に垂直に作用する最大磁場を 1.0T 程度とすると、現在の YBCO 薄膜線材の臨界電流密度特性から運転温度を 40K 以下に設定する必要がある。巻線後の臨界電流の減少を考慮して運転電流を 150A とし、界磁コイルの冷却には液体ネオンを想定した運転温度 30K に設定している。また、同期リアクタンスは小さいほど機器の体積は減少し、効率は増加する。しかし、同期リアクタンスが小さい場合、通常状態での機器の特性は良いが短絡故障や負荷変動時の過渡電流が増加するという短所もある。そこで、本設計では外国の開発事例(ドイツの SIEMENS の 400kW 超電導モータや米国の 5000hp 超電導モータ)を参照して、励磁制御がなくても負荷に応じた電圧変動率が 10% 以下になるように同期リアクタンス値を 0.4p.u. とした。

以上のことをまとめた設計する高温超電導モータの仕様と主な設計諸元を Table.1 と Table.2 に示す。

3. 三次元解析方法による超電導モータの最終設計

前に決定した 2 次元的概念設計案は、機器の軸方向に沿った磁場の変化がない場合に相当するものである。しかし、

超電導同期回転機は空隙が機器の大部分を占めているため、従来の装置とは異なり、3 次元的な実際の磁場分布は 2 次元的に行った解析結果とはかなり異なると予想される。また、コイルの端部による影響を考慮するためにも今後は 3 次元的な解析手法に基づいた概念設計が必要となるため今後の課題としている。

Table.1 Designed main specifications of a 300kW HTS synchronous motor

Rated capacity	300 kW
Revolution	3600 rpm
Terminal voltage	1500 V
Power factor	1.0
Frequency	120 Hz
Synchronous reactance	0.4 p.u.
Field coil operation current	150 A
Number of poles	4
Max. magnetic flux density of field coil	0.9 T

Table.2 Conceptual design results of a 300kW HTS motor

Number of armature slots	24
Armature coil rated current	120 A
Number of armature coils	80 turns/phase
Armature coil inner/outer radius	160/200 mm
Machine shield inner/outer radius	210/239 mm
Damper inner/outer radius	143.2/149.6 mm
Field coil inner/outer radius	110.9/132 mm
Number of field coils	500 turns/poles
Field coil straight axial length	250 mm
Winding wire for field coil	YBCO tape
Field coil type	Racetrack
Field coil winding type	Double Pancake
Field coil operating current	150 A
Max. magnetic flux density of field coil	1.0 T

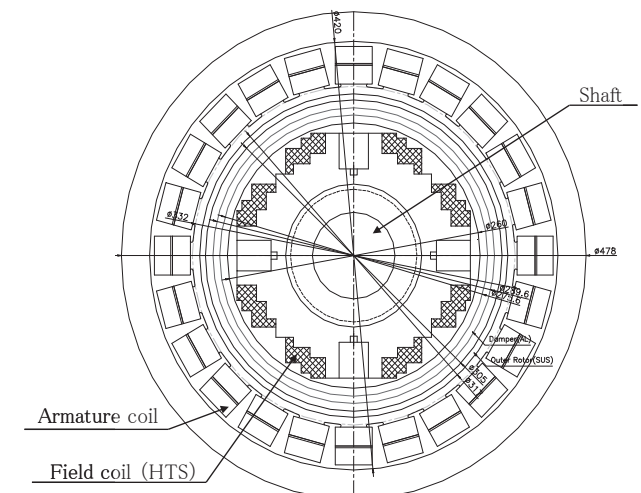


Fig.1 Cross-sectional view of conceptual structure of a 300kW HTS synchronous motor

10 MW 級全超電導風力発電機の電磁特性

Electromagnetic characteristics of 10 MW class fully superconducting wind turbine generators

寺尾 悠, 関野 正樹, 大崎 博之(東大)
TERAO Yutaka, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)
E-mail: y_terao-008@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

風力発電は、現在最も注目されているクリーンエネルギーの一つである。近年、風車単機あたりの発電容量は増加傾向にあり、10 MW 級発電機の研究開発も行われている[1]。この発電機の実現には、搭載されるナセル部分の重量増加を抑えるため、発電機を高出力密度化する必要がある。

我々は 10 MW 級風力発電機への応用を目指し、2 種類の超電導線材を用いた全超電導風力発電機を提案している[2]。本稿ではこの発電機について、有限要素法 (FEM) を用いた電磁設計を行い、それらに基づいた等価回路からの発電機特性、必要超電導線材量及び電機子コイルでの交流損失の算出結果を報告する。

2. 全超電導風力発電機の電磁設計

本発電機は界磁コイルに高温超電導 (HTS) テープ線材、電機子コイルに MgB_2 線材を用いた全超電導風力発電機である (Fig.1)。低速運転 (10 rpm) を前提としており、発電機直径 3.67m、8 極とした。全超電導構造により、界磁・電機子コイル間の機械的なエアギャップを減らし、界磁コイル部分の HTS テープ線材の使用量を低減する。また多芯・細線構造の MgB_2 線材を集中巻の電機子コイルに用いることで、低速回転と合わせて交流損失を低減可能と考えた。本発電機について有限要素法 (FEM) による電磁設計を行った。すなわち、電機子コイル部分に掛かる最大経験磁束密度 B_{max} を 2.0、2.5、3.0 T と変化させた発電機 A、B、C の特性を求め、さらに MgB_2 電機子コイル部分での交流損失の計算を行った。

3. 解析結果

TABLE. 1 に発電機特性を示す。いずれの場合も出力として 10MW を得た。これらに用いる線材量を Fig.2 に示す。全超電導機では、界磁コイルの構成に最大 450km 程度の HTS テープ線材が必要となる。さらに MgB_2 電機子コイルの交流損失を見積り、1.06-1.52 kW となった。鉄損をはじめとした他の損失も考えると、撚り線構造などを採用した上で最適設計を行い、数百 W オーダーまで低減することが必要と考える。

4. まとめ

2 種類の超電導線材を用いた 10 MW 級全超電導風力発電機について、電機子コイルに掛かる最大経験磁束密度を変化させて 3 通りの発電機を設計し、発電機特性の評価を行った。10MW の出力を得るには最大で 450km 程度の HTS テープ線材が必要であった。また、界磁コイル部分での最大経験磁束密度は約 8.0T となった。さらに電機子コイルでの交流損失の計算を行い、損失は 1.0 kW 周辺となることが分かった。今後は交流損失低減のための詳細検討を行い、電機子部分の最適設計を行う必要がある。

参考文献

1. M. HASEGAWA, et. al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011), p. 55
2. Y. TERAQ, et. al.: presented at MT-22 (2011), 4EP2-3

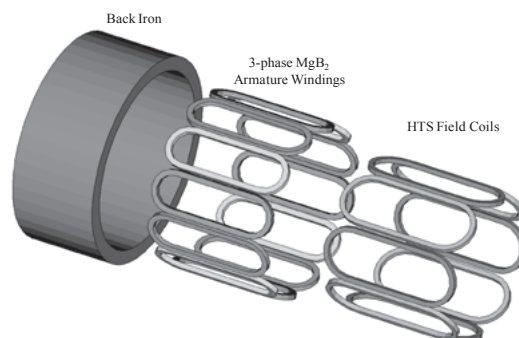


Fig.1. Illustration of fully superconducting wind turbine generator (8 poles)

TABLE. 1 Characteristics of designed generators

	Generator	A	B	C
Output [MW]		10.0	10.2	10.3
Line current [kA]		1.76	1.77	1.78
Line-to-line voltage [kV]		3.31	3.33	3.34
Synchronous reactance [pu]		0.53	0.41	0.32
Field coils				
Current density [A/m^2]		1.68×10^8		
Total current [MA]		1.18	1.54	2.00
B_{max} @ field coils [T]		5.73	6.73	8.05
Armature windings				
Number of turn		150	92	68
Back iron				
Thickness [mm]		250	285	297
Weight [t]		31.7	35.7	37.1

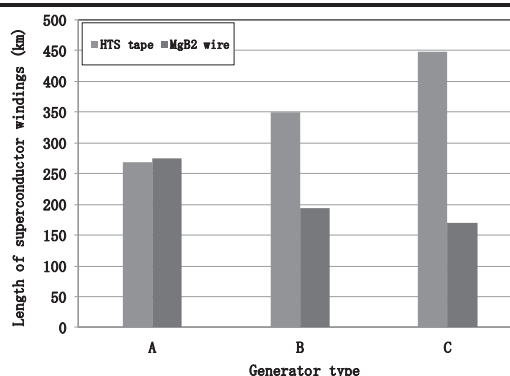


Fig.2. Length of superconductor windings

系統接続された超電導同期機のモデリングに関する研究

Modeling of Grid-connected Superconducting Synchronous Machines

ケバル ロイキ, 関野 正樹, 大崎 博之(東大)

QUEVAL Loic, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)

E-mail: lqueval@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

We developed an accurate, efficient and flexible modeling method for the steady-state and transient analysis of grid-connected superconducting synchronous machines. The potential of the method is demonstrated by simulating a 10 MW superconducting wind turbine generator connected to the grid through a AC/DC/AC converter under fault condition.

2. Coupled FE Phase-Domain model

The synchronous machine is modeled with the coupled finite element phase-domain model. Saturation and iron losses are neglected. The phase-domain model is expressed as,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abc} \\ \mathbf{v}_{qdr} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{qdr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abc} \\ \boldsymbol{\lambda}_{qdr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abc} \\ \boldsymbol{\lambda}_{qdr} \end{bmatrix} = \mathbf{L}(\theta) \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{qdr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_m + T_e + T_{damp} \quad (3)$$

$$T_e = T_e(\theta, \mathbf{i}_{abc}, \mathbf{i}_{qdr}) \quad (4)$$

where \mathbf{v} , \mathbf{i} and $\boldsymbol{\lambda}$ are respectively the instantaneous voltage, current, and flux linkage vectors. J is the moment of inertia, and T_m , T_e and T_{damp} are respectively the mechanical torque, the electromagnetic torque and the damping torque. \mathbf{R} is the resistance matrix of the windings. The inductance matrix \mathbf{L} depends on the rotor position θ . It is evaluated through static FE analysis, stored in a lookup-table and retrieved in terms of rotor angle. The electromagnetic torque T_e depends on the rotor position and currents. It can be derived from \mathbf{L} using the global virtual work method or directly calculated from FE analysis using the Maxwell stress tensor method.

3. Application Example

We built a complete simulation model of a superconducting wind turbine generator connected to the grid through an AC/DC/AC converter. The generator is a 10 MW class superconducting synchronous generator [1]. The AC/DC converter is a three-phase uncontrolled full-wave rectifier bridge in series with a DC/DC boost converter. The objective of the DC/DC converter control is to maximize the power extracted by regulating the generator speed to its optimal value (MPPT). The DC/AC converter is an IGBT-based PWM inverter. The objectives of the DC/AC converter controls are to guarantee that all the power coming from the rectifier is instantaneously transferred to the grid by keeping the DC-link voltage constant, and to actively support the grid by regulating the reactive power fed to it. Finally the blade angle control system ensures that the reference optimum power does not exceed the rated power of the generator.

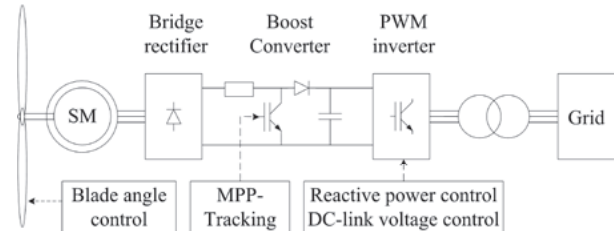


Fig.1 Simulation overview, grid-connected 10 MW superconducting wind turbine generator.

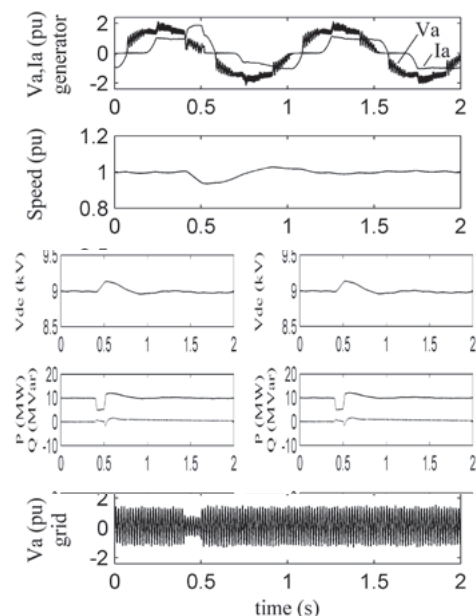


Fig.2 Simulation results, dynamic response to a voltage sag resulting from a remote fault.

Initially the system is in steady-state conditions. At $t=0.4$ s the positive-sequence voltage of the grid drops to 0.5 pu causing an increase of the DC-link voltage, a decrease of the generator speed and a drop of the wind turbine output power. After the fault elimination at $t=0.5$ s, the system returns to its steady-state. We underline that, as opposed to the classical dq model, both space and time harmonics are taken into account with the phase-domain model.

4. Conclusion

The proposed method permits to calculate steady-state and transient performances of grid-connected SC synchronous machines. The accuracy and efficiency of the model are obtained by the combination of the FE model and the phase-domain model. The flexibility of the method is demonstrated by simulating a grid-connected superconducting wind turbine generator under fault condition.

References

- [1] Ohsaki *et al*, *ICEMS 2010 Proc.*, pp.1303–1306, 2010

三次元シミュレーションを用いたパルス着磁における 超電導バルク内の磁束運動

Flux motion in the HTS bulk during pulsed field magnetization using a three-dimensional simulation

小山 允, 内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大)

OYAMA Mitsuru, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail:t2211004@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

本グループではこれまでに、超電導バルクのパルス着磁における磁束運動と温度変化を、実験的検討と共に、均一な臨界電流密度 J_c を持つバルクに対する二次元の軸対称シミュレーションにより検討を行ってきた[1]。しかし実際のバルク内の J_c は不均一であり、磁束の侵入や捕捉に大きく影響する。そのため、場所により異なる J_c を仮定した三次元シミュレーションによる磁束の捕捉分布について検討を現在行っている[2]。本研究では、超電導バルクに欠陥が存在する状態の磁束運動と温度変化を求めめるため、バルク内の一部に低い J_c の要素をもつ超電導バルクで三次元シミュレーションを行った。超電導バルク内での磁束運動と温度変化を均一な J_c 分布の場合の解析結果や、実際の超電導バルクの実験結果との比較を行った。

2. 解析と検討

図 1(a)に三次元シミュレーションの実験配置を示す。40K に冷却した超電導バルク ($\phi 45$ mm, 15 mm 厚)の周囲に solenoid-coil を設置した。図 1(b)に領域を色分けして示す。領域毎の J_c 分布を異なる値で設定し解析を行った。電磁界と熱伝導の連成方程式は大崎らの解析を参考に解析した[3]。超電導体の非線形な E - J 特性は n 値モデルを用い、臨界電流密度 J_c の磁場依存性は(1)式のように Kim モデルを用いて表現した。

$$J_c(T, B) = \alpha \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \frac{B_0}{|B| + B_0} \quad (1)$$

J_c は欠陥と仮定する小さな部分(領域 1)を $\alpha=0.46e9$ ($J_c(40K, 0T)=0.33 \times 10^9 A/m^2$) とし、それ以外の部分(領域 2)を $\alpha=1.83e9$ ($J_c(40K, 0T)=1.33 \times 10^9 A/m^2$) とする。印加するパルス磁場 $B_{ex}(t)$ は立ち上がり時間 $\tau=0.01$ s とし、実験のパルス波形に近似させた。

図 2 の左図にバルクの表面中心における捕捉磁場の印加磁場依存性を示し、■と●は J_c の不均一な分布時の各領域結果で、□と○は J_c の均一分布時での捕捉磁場の印加磁場依存性を示す。また、代表的なバルクの表面中心の捕捉磁場の実験結果は破線で示す。右図はバルクを上方から見た簡略図を示し、図中の■・●はバルク表面における捕捉磁場の計測位置を示す。左領域 1 の中心捕捉磁場(■)は $\alpha=1.83e9$ で均一分布の中心捕捉磁場(□)の時よりも 3

T 低い印加磁場で捕捉し始めている。また、図 2 より捕捉磁場●と領域 2 の中心捕捉磁場■の概型が近いことから不均一分布時の領域 2 の中心の捕捉磁場は、領域 2 の外周部から侵入した磁束ではなく領域 1 から侵入した磁束の影響を大きく受けていることがわかる。また、不均一な分布時の三次元シミュレーションの捕捉磁場の概型は均一な分布時のシミュレーション結果(○, □)よりも代表的な実験結果に近い形となった。これにより、不均一分布のバルク内での磁束運動の様子を解析により確認できた。当日は異なる不均一を導入した場合のシミュレーション結果についても報告を行う。

参考文献

- [1] 藤代ほか、第 84 回 2011 年度春季低温工学・超電導学会 [2D-a06] (つくば)
- [2] H. Fujishiro *et al.* (EUCAS2011)
- [3] Y.Komi, *et al.*, Physica C **469**(2009)1262

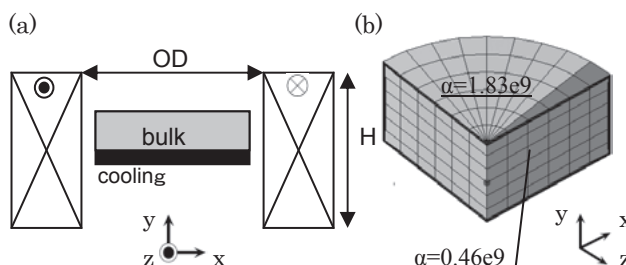


Fig.1 (a) The analytical setup for the pulsed field magnetization using the solenoid coil.

(b) Inhomogeneous distribution in bulk and positional spatial relationship with a coil

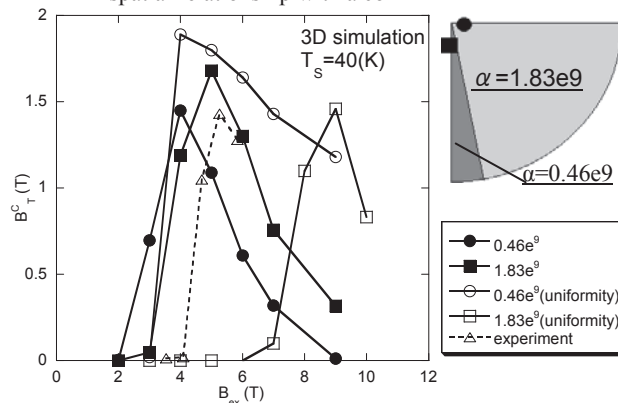


Fig.2 The applied field dependence of trapped field at 40K for the center of the bulk surface.

Y-Ba-Cu-O バルク超伝導体における BaSnO₃ 添加による Y₂BaCuO₅ 相の微細化 Refinement of Y₂BaCuO₅ with BaSnO₃ addition in Y-Ba-Cu-O bulk superconductors

岩崎 弥作, 本間 優作, 菊池 暢, 馬越 純人, 池田 洋二, 関 宏範, 腰塚 直己, 村上 雅人 (芝浦工業大学)
IWASAKI Mitomo, HOMMA Yusaku, KIKUCHI Toru, UMAKOSHI Sumito, IKEDA Yoji, SEKI Hironori, KOSHIDUKA Naoki,
MURAKAMI Masato (Shibaura Institute of Technology)
E-mail: mb11010@shibaura-it.ac.jp

1. 緒言

溶融法により作製した REBa₂Cu₃O_{7-δ} (RE123; RE: 希土類元素) 系バルク超伝導材料は臨界電流密度を向上させるために、磁束のピンニングセンターとして非超伝導相粒子を分散させている。これまで利用されてきたピンニングセンターの代表が RE₂BaCuO₅ (RE211) であり、RE123 と RE211 界面が磁束のピンニングに寄与するため、RE211 粒子の微細化により臨界電流密度の向上が報告されている[1]。

一方、最近では RE₂Ba₄CuMO_y (M = Zr, Hf, Nb, Ta, W, Mo, U, Sn, and Re) 組成の複合ペロブスカイト型化合物などをピンニングセンターとして用いる試みも検討されている。この RE₂Ba₄CuMO_y は、RE211 より粒径が小さいということが報告されており、RE211 の 1~5μm 程度に対し、RE₂Ba₄CuMO_x 相では 50~300nm 程度とされている[2]。

そこで本研究では、Y₂BaCuO₅ (Y211) に 30 及び 60mol% の BaSnO₃ を添加することで、Y₂Ba₄CuSnO_x と Y211 を共焼結させ、その反応を利用することで Y123 相中に分散する Y211 を微細化させることを目的として実験を行った。

2. 実験方法

Y₂O₃, BaO₂, CuO, SnO₂ を原料粉とし、Y123, Y211, BaSnO₃ を作製した BaSnO₃ を Y211 に対し 30 及び 60mol% 混合し、1000°C で焼結を行い、その後 Y211 と Y₂Ba₄CuSnO_x の共焼結反応を X 線回折装置 (XRD) により確認した。

つぎに走査型電子顕微鏡 (SEM) により、焼結粉と無添加 Y211 の粉を観察し、粒径の比較を行った。

作製した Y211 と Y₂Ba₄CuSnO_x の焼結粉を Y123 と混合した。混合比は Y123 : Y211 : Y₂Ba₄CuSnO_x = 100: 40-x (x = 4, 8) mol% としている。これら試料を φ 20mm の治具を用い圧粉成形し前駆体を作製したのち、Top-Seeded Melt -Growth 法により NdBa₂Cu₃O_x を種結晶として溶融成長させ、単一ドメインからなるバルク超伝導体を作製した。その後、酸素アニール処理を施した。

作製したバルク超伝導体に、液体窒素中 (77K) で Fe-Nd-B 磁石により 0.5T の磁場を印加して、磁場を捕捉させ、二次元走査型磁場分布測定装置を用いて磁場分布を測定した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に Y211 : BaSnO₃ = 100: x (x = 30, 60) mol% の焼結粉の XRD による回折データと、無添加 Y211 の回折データを示す。BaSnO₃ を添加することで図中に黒丸で示した箇所に Y211 と異なるピークを得た。これは Y₂Ba₄CuSnO_x 特有のピークである。このことから Y₂Ba₄CuSnO_x と Y211 が共焼結されたことがわかる。

Fig. 2 に Y211 : BaSnO₃ = 100: 30 mol% の焼結粉と無添加 Y211 を、それぞれ SEM により観察を行ったものを示す。図 2 から無添加 Y211 の試料に比べ、BaSnO₃ を加えた試料は全体的に微細化していることがわかる。

Fig. 2(a) 中の 1μm 程度の粒子が Y211 であり、50~300nm 程度の粒子が Y₂Ba₄CuSnO_x である。また、Fig. 2(a) の Y211 は Fig. 2(b) の Y211 に比べ、球状の形状を呈しており、Y211 の周りから Y₂Ba₄CuSnO_x が生成していることが分かる。以上の結果から、BaSnO₃ と Y211 が反応し、Y₂Ba₄CuSnO_x が生成される過程で、Y211 が微細化したものと考えられる。

BaSnO₃ 添加量 0, 30, 60mol% のそれぞれ測定したバルク体の捕捉磁場特性においては、30mol% BaSnO₃ 添加試料において最も高い値が出ており、無添加試料に比べ 2 倍以上の特性を示した。これは第二相が微細化されることにより捕捉磁場特性が向上した結果と考えられる。一方、60mol% BaSnO₃ 添加試料においては無添加試料よりも特性が低下する結果となった。この原因としては 30mol% に比べ添加量が 2 倍になったが、焼結条件が同じであるため、BaSnO₃ が残留し、超伝導特性を劣化したものと考えられる。

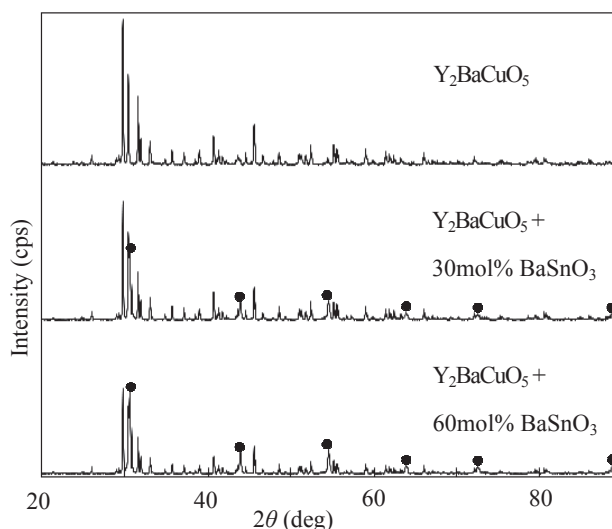


Fig.1 X ray diffraction patterns for Y211, Y211+30mol%BaSnO₃, and Y211+60mol%BaSnO₃.

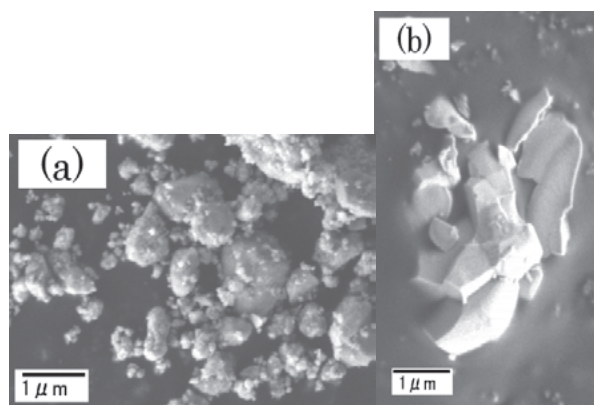


Fig.2 Scanning electron micrographs for the powders: (a) Y211+30mol%BaSnO₃; (b) Y211

参考文献

- 成木 紳也, 坂井 直道, 村上 雅人, 平林 泉: 低温工学, vol.40 No. 6, (2005), p238
- N. Hari Babu, K. Iida, D.A. Cardwell: Physica C, 445-448, (2006), p.353

Y 系バルク超伝導体に磁性粒子を添加した際の影響

Effect of magnetic particle additions on flux pinning in bulk Y-Ba-Cu-O superconductors

土屋 拓己, 池田 洋二, 馬越 純人, 本間 優作, 腰塚 直己, 村上 雅人(芝浦 工大)

TSUCHIYA Takumi, IKEDA Yoji, UMAKOSHI Sumito, HOMMA Yusaku, KOSHIZUKA Naoki, MURAKAMI Masato(Shibaura Institute of Technology)

E-mail: mb11036@sic.shibaura-it.ac.jp

1. 緒言

第二種超伝導体では、外部磁場の大きさが下部臨界磁場 (H_{c1}) を越えると、超伝導体内部に量子化磁束が侵入する。この状態で電流を流すとローレンツ力が磁束に作用し、その運動のため、電気抵抗が発生する。そこで、あらかじめ超伝導体内部に常伝導粒子を導入することで、磁束流抵抗の発生を防ぐ方法が講じられている。これがピン止めセンターの導入である。現在、Y 系バルク超伝導体においては、ピン止めセンターとして Y_2BaCuO_5 (Y211) や金属酸化物が利用されている。磁性を有する金属粉は、量子化磁束とより強い正の相互作用を有するため、バルク超伝導体のピン止め力の向上が期待できる。

そこで、本研究では磁性体であるセンダスト (Fe-Si-Al 系合金) 粉末をピン止めセンターとして導入することによりピン止め力の向上を目指した。また、粒子の形状が針状の γ -酸化第二鉄の添加も行い、両者の比較を行った。

従来の研究では、比較的小さな試料を用いて、ピン止め効果に及ぼす影響が調べられている。しかし、実用的な観点からは、より大きなバルク体として捕捉磁場特性に及ぼす影響を調べることが望ましい。

よって、本研究では、単一ドメインバルク超伝導体を合成したうえで、そのマクロ特性としての捕捉磁場を測定することにより、ピン止め効果に及ぼす影響を調べた。

2. 実験方法

供試体のバルク超伝導体の原料粉として、 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123): Y_2BaCuO_5 (Y211)=10:4 のモル比で混合し、 CeO_2 を 1wt% 添加したものを作製する。その後、作製した粉末にセンダストをそれぞれ 0、0.02、0.04、0.08、0.12wt% 添加する。それらを $\phi 20$ mm の治具を用いて圧粉成形し、Hot-seeding 法を用いた熔融成長法により単一ドメインバルク超伝導体を作製したのち、酸素アニール処理を施した。また、非磁性の γ -酸化第二鉄を添加したものも同様の手法で作製した。

ピンギ特性評価は捕捉磁場測定により行った。表面磁場 0.5 T の Fe-Nd-B 磁石をバルク超伝導体の上部に設置した後、液体窒素 (77 K) にて冷却し、静磁場着磁を施す。磁石を取り除いた後で、超伝導体に捕捉された磁場をホール素子走査型 2 次元磁場分布測定装置により測定した。

また、センダストを添加したバルク超伝導体の表面をエメリ紙とラッピングフィルムを用いて研磨を行い、光学顕微鏡を用いて表面観察を行った。0.5 T の Fe-Nd-B 磁石をバルク超伝導体の上部に設置した後、液体窒素 (77 K) にて冷却し、静磁場着磁を施す。磁石を取り除いた後で、超伝導体に捕捉された磁場をホール素子走査型 2 次元磁場分布測定装置により測定した。

また、センダストを添加したバルク超伝導体の表面をエメリ紙とラッピングフィルムを用いて研磨を行い、光学顕微鏡を用いて表面観察を行った。

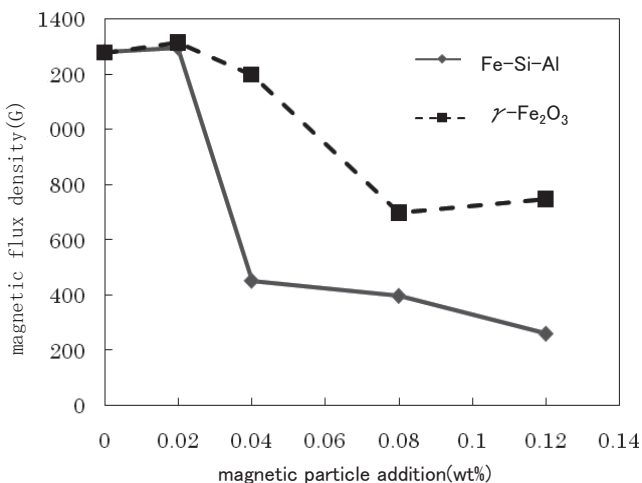


Fig.1 Effect of magnetic particle addition the maximum trapped magnetic field for bulk Y-Ba-Cu-O superconductors

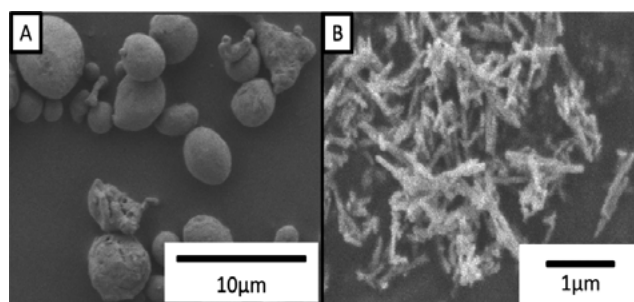


Fig.2 A). Fe-Si-Al powder

B). γ -Fe₂O₃

3. 実験結果及び考察

Fig.1にセンダストおよび酸化第二鉄の添加量がバルク超伝導体の最大捕捉磁場に及ぼす影響を示す。

センダスト添加材では 0.02wt% のバルク体が 1296G と最も高く、0.04wt% 以上を添加すると、捕捉磁場は急激に低下した。以上より、磁性粒子添加によって、マクロなピン止め特性である捕捉磁場が向上することを確認した。

また、磁性粒子添加によるピンギ効果の向上は 0.02wt% 程度が上限であり、それ以上の添加では、磁性およびバルク体との反応などにより、超伝導特性に悪影響を与えるものと予想される。非磁性の γ -第二酸化鉄も添加においても同様の傾向がみられる。これは、バルク体との反応が原因と考えられる。

Fig.2に示すように、添加したセンダストおよび γ -酸化第二鉄粉末の SEM 写真を示す。両者の形状は、明らかに異なり、これら形状因子もピンギ効果に影響を及ぼすことから、今後は、分散粒子の形状についても調べる必要があると考えられる。

Y-Ba-Cu-O バルク超伝導体のためのバインダー添加方法の最適化 Optimization of the binder addition methods for bulk Y-Ba-Cu-O superconductors

池田 洋二, 馬越 純人, 菊池 暢, 本間 優作, 腰塚 直己, 村上 雅人(芝浦工大); 関 宏範, 丸山 忠勝(淡路マテリア)
IKEDA Yoji, UMAKOSHI Sumito, KIKUCHI Toru, HOMMA Yusaku, KOSHIZUKA Naoki, MURAKAMI Masato (Shibaura Institute
of Technology); SEKI Hironori, MARUYAMA Tadakatu (AWAJI MATERIA)
E-mail: m210006@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

バルク超伝導体の前駆体合成の際に、アクリルやポリビニールアルコール(PVA)のようなバインダーを添加すると、クラックの抑制とともに、その後の超伝導体の単一ドメイン成長に有効であることが分かっている。

ただし、バインダー添加量がバルク体内で不均一であったり、添加量を制御しないと、逆に、クラックが導入され、単一ドメイン成長を阻害してしまう場合もある。

本研究では、バインダー添加手法の最適化を目的として、バルク Y-Ba-Cu-O 系超伝導体において、熔融成長後のバルク体の超伝導特性に及ぼすバインダー添加の影響を調べた。また、 $\phi 40\text{mm} \times 15\text{mm}$ の Y-Ba-Cu-O バルク超伝導体の熔融成長に及ぼすバインダーの影響についても検討した。

2. 実験方法

原料粉末として $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Y123) と Y_2BaCuO_5 (Y211) を 10 : 4 のモル比で秤量し、 CeO_2 を 1wt% 加えたものを用意し、バインダーを添加する。今回使用したバインダーは、アクリル酸系バインダー (AS-2000, 東亜合成株式会社)、PVA (水 200 ml、ポリビニールアルコール 2 g、グリセリン 1 ml、エタノール 30 ml を混合) の 2 種類であり、各々 2wt% 添加した。

これら混合粉を、内径 48 mm の治具に封入し、一軸プレスにより厚さ 18 mm の前駆体に成型した。前駆体の機械的特性を評価するために圧縮試験を行った。その後、前駆体に熔融成長 (ホットシーディング法) および酸素アニール処理を施し、単一ドメインバルク超伝導体を作製した。

各バインダーを添加した混合粉の TG-DTA 結果を Fig.1 および Fig.2 に示す。

以上の結果をもとに、バインダーを添加した混合粉は熔融成長前に TG-DTA で確認した脱バインダーが生じる温度域を $5^\circ\text{C}/\text{h}$ で加熱することによりバインダーを除去した。

捕捉磁場特性評価は、磁束密度 1T の電磁石を用いて液体窒素 (77K) 中で磁場中冷却を行い、ホール素子を用いて二次元走査測定をする手法で行った。また、バインダー添加がバルク超伝導体の微細組織に及ぼす影響を調べるため光学顕微鏡観察を行い、バインダー添加がバルク超伝導体の機械的特性に及ぼす影響を調べるため圧縮試験を行った。

3. 実験結果および考察

Fig.3 に各種バインダーを添加した前駆体の圧縮試験結果を示す。バインダー添加により前駆体の圧縮強度が向上していることが分かる。これは、バインダーが前駆体の粒子間の隙間に入り粒子をより強固に結合させているためと考えられる。アクリルバインダーより PVA の圧縮強度が高い理由はアクリルバインダーの粘性が高すぎるため、試料全体に浸透できなかったためと考えられる。

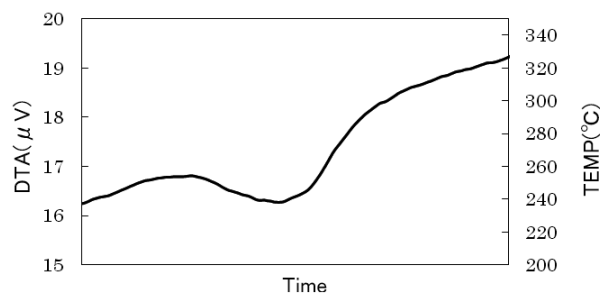


Fig.1 TG-DTA curve for PVA added Y-Ba-Cu-O

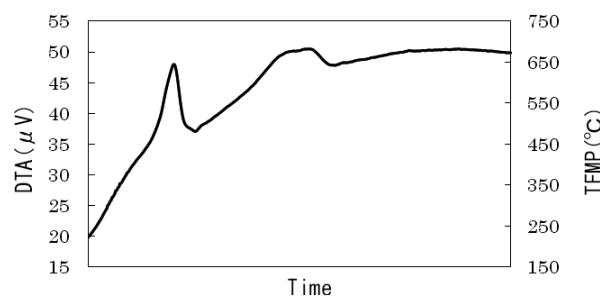


Fig.2 TG-DTA curve for Y-Ba-Cu-O with acrylic binder

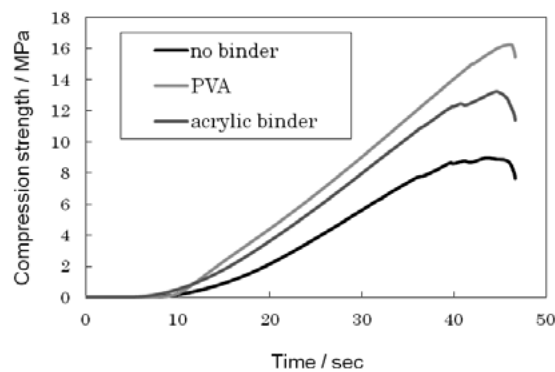


Fig.3 Compression strength of the precursors with and without the binder additions.

Top-seeded infiltration-growth (TIG) 法を用いて合成した Y123 超伝導バルク体の前駆体へのバインダー添加の影響

Effects of binder addition on the precursor for Y-Ba-Cu-O bulk superconductors fabricated with a top-seeded infiltration growth

馬越 純人, 池田 洋二, 菊池 暢, 腰塚 直己, 村上 雅人(芝浦工業大学)

UMAKOSHI Sumito, IKEDA Yoji, KIKUCHI Toru, KOSHIZUKA Naoki,

MURAKAMI Masato (Shibaura Institute of Technology)

E-mail: m210009@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導バルク体は大きな捕捉磁場、高い磁気浮上力を有することから、フライホイールや超伝導モータなどへの応用が期待されている。超伝導バルク体の捕捉磁場を向上させるためには、高い臨界電流密度が求められる。臨界電流密度に影響を与える要因として、溶融法で作製した Y-Ba-Cu-O 超伝導バルク体では、微細構造がある。

近年、超伝導バルク体の作製法の一つにインフィルトレーション法がある。インフィルトレーション法は Y123 内に Y211 相の粒子を均一分散させるのに有効であると報告されている。

その作製には Top-seeded infiltration-growth (TIG) 法が用いられる。焼結法で作成した Y_2BaCuO_5 (Y211) 前駆体に、液相 (Ba-Cu-O) を浸透させることで、Y211 と液相が反応し、Y123 超伝導相が生成する。製法時に、前駆体に種結晶を設置すると、単一ドメインバルク超伝導体の合成が可能となる。従来の溶融法と比較して、バルク体の密度が増加し、空孔が減少することが知られている。ただし、前駆体の成型および、その機械特性の低さが製造時に問題となる。

そこで、本研究では、前駆体である Y211 焼結体へのバインダー添加がインフィルトレーション法に及ぼす影響を精査することを目的とした。

2. 実験方法

実験の前段階としてバインダー無添加 Y211 粉を内径 ϕ 20mm の治具により、一軸等方プレスし、前駆体を作製した。同様にして、バインダー添加量 1%、2% の前駆体を作製した。その後、これら前駆体に圧縮試験を行った。

また、上記と同様な方法にて作製した前駆体表面を光学顕微鏡にて観察した。

TIG 法による Y-Ba-Cu-O 超伝導バルク体の作製手順を以下に示す。仮焼した Y211 粉を内径 ϕ 20mm の治具により、一軸等方プレスし、前駆体を作製した。この前駆体を 1200 度で仮焼した。また、仮焼した $Ba_3Cu_5O_8$ も同様に一軸等方プレスし、前駆体を作製した。Y211 粉は市販の Y_2O_3 、 BaO_2 、 CuO 粉を攪拌し、1173K で仮焼したものを用いた。

また、 $Ba_3Cu_5O_8$ は市販の BaO_2 、 CuO 粉を攪拌し、1073K で作製した仮焼したものを用いた。支持部材として、市販の Yb_2O_3 粉を一軸等方プレスしたものを敷き、さらにその下に MgO 単結晶基板を敷いた。種は Sm123 単結晶を使用した。

作製した前駆体および支持部材を Fig. 1 のように設置した。最後に熱処理及び、酸素アニール処理を施し、超伝導バルク体を作製した。また、仮焼した Y211 粉に市販のアクリル系バインダーを 1wt%、2wt% 添加した粉末を上記と同様な作製手順を行い、超伝導バルク体を作製した。

超伝導バルク体の磁化特性の評価は、PPMS (Physical

Property Measurement System) により 77K (液体窒素温度) にて行った。また、光学顕微鏡、SEM による組織観察を行った。

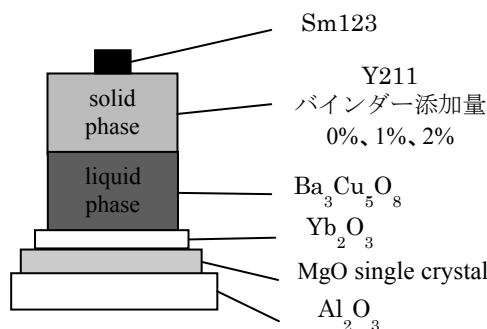


Fig. 1. Arrangement of the precursors for top-seeded infiltration process.

3. 実験結果および考察

Fig. 3 にバインダー添加量 0%、1%、2% の Y211 粉前駆体の圧縮試験の結果を示す。

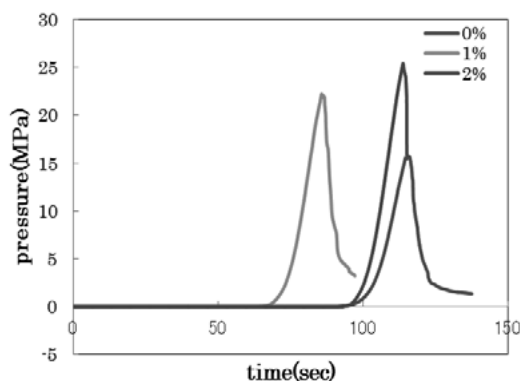


Fig. 3 Compressive strengths of the compacted Y211 precursors with and without binder additions

圧縮強度はバインダー無添加では 15.7 MPa、添加量 1% は 22.2 MPa、添加量 2% は 25.4 MPa となった。バインダー添加量が増加するにつれて前駆体の機械特性の向上が見られた。このことからバインダーは前駆体の機械的特性向上に効果があると考えられる。

謝辞

本研究において超伝導特性評価で御協力頂いた ISTE の筑本知子博士に謝意を表します。

炭素置換 ex situ 法 MgB₂ 線材の作製と超伝導特性

Preparation and superconducting properties of ex situ processed MgB₂ tapes

藤井 宏樹, 小澤 清, 北口 仁(NIMS)
 FUJII Hiroki, OZAWA Kiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)
 E-mail: fujii.hiroki@nims.go.jp

1. 序

MgB₂ 線材の J_c の高磁界特性の改善に対し、炭素置換は最も有効な手法の一つである。線材の一般的製法であるパウダー・イン・チューブ(PIT)法のうち、ex situ 法では in situ 法と比べて、高密度コア層が得られるものの、置換反応が起こりづらく、また、結晶粒間結合も強固ではない。これまで有機酸溶液処理による炭素置換によって、ex situ 法線材の J_c 特性の向上を図ってきたが、粒間結合の改善による更なる特性向上を試みた。

2. 実験

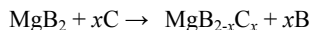
市販 MgB₂ 粉末を油に浸し、ボールミルによる粉碎混合を行った。また、一部の粉末には、対 MgB₂ で Mg 粉を 10:1 のモル比で添加し、同様の粉碎混合を行った。これらの粉末を真空中で乾燥させ、充填粉とした。こうして得られた粉末を Fe 管に充填後、線材形状に加工し、Ar ガス気流中加熱処理を行った。また比較のために市販粉や、ボールミリング未処理粉を用いた線材作製も行った。

3. 結果と考察

Fig.1 に、4.2K での種々の線材の J_c - B 特性を示す。市販粉使用線材の J_c 特性と比較すると、油含浸により、高磁界特性が大幅に向上しており、4.2K、10T での値を比較すると、およそ 10 倍となった。また、Mg 添加とミリング処理によってその J_c 値は更に向上し、およそ 9kA/cm² となった。

これらの線材の MgB₂ コア層の XRD を測定すると、 J_c 向上がみられた線材試料では、市販粉と比較して、MgB₂ の 110 ピークが高角度側にシフトしており、 a 軸長の減少が確認された。また、Fig.2 に示すように DC 磁化曲線から求めた T_c も、3K ほど低下していた。以上のことから、Mg 無添加線材試料の J_c 特性の向上は、炭素置換によるものと考えられ、この炭素源は乾燥時に結晶粒に吸着残存している油成分からによるものと思われる。

ミリング処理による充填粉末の活性化によって、炭素置換反応の促進が期待されたが、TEM による組織観察から、結晶粒径の微細化は確認されたものの、Mg 無添加試料では J_c 特性の向上も炭素置換量の増大も確認できなかった。一方、Mg 添加試料ではミリング処理による J_c 特性の向上がみられた。炭素置換により、以下の式に従って組成のずれが起こる。



放出された硼素や炭素化合物の分解生成物は結晶粒界に析出し、弱結合を引き起こす。Mg 添加によってこの組成ずれが補償されて結合が改善され、 J_c 特性が向上したものと考えられる。

ミリング処理を行わない試料で、Mg 添加によって逆に特性が劣化しているのは、添加した Mg 表面が酸化されているための弱結合によるものと考えられる。一方、ミリング処理による特性向上は、処理によって Mg 表面が活性化されて結合が改善され、組成補償の効果が表れたためだと考えられる。

現在のところ、得られる J_c 特性はバッチごとのばらつきがやや大きい、これは J_c 特性が炭素置換量に対して敏感であるのに対し、試料ごとの炭素置換量の厳密な再現性が得られていないためであると推察される。

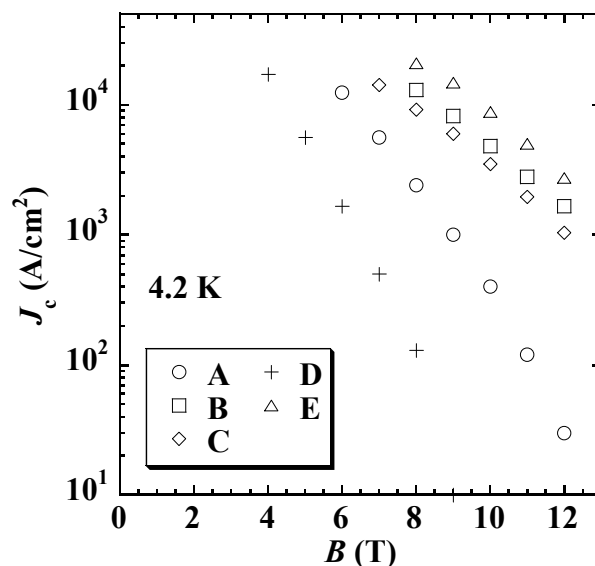


Fig. 1. Transport J_c as a function of magnetic field for MgB₂ tapes A (pristine), B (with oil), C (ball-milled with oil), D (with Mg) and E (with Mg and ball-milled with oil). The field is applied parallel to the tape surface.

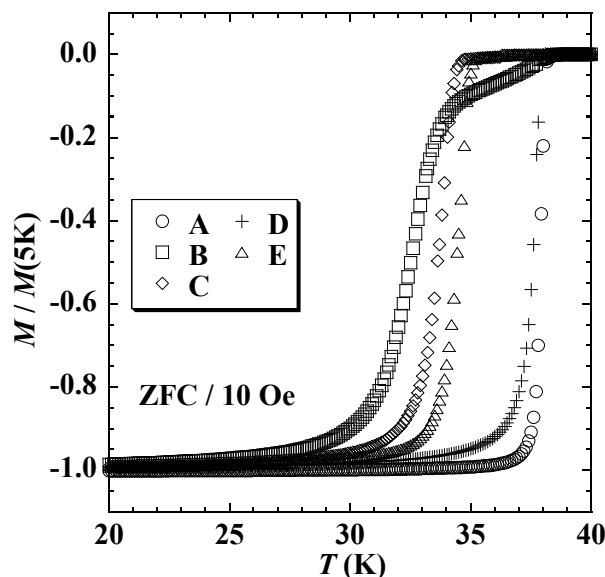


Fig. 2. DC magnetization curves as a function of temperature for MgB₂ tapes A – E shown in Fig. 1 in 10 Oe in a ZFC mode. The magnetization M is normalized to that measured at 5 K, $M(5\text{K})$, for each tape.

In-situ/MgB₂ 線材の J_c 特性に及ぼす B₄C 添加効果

Effect of B₄C addition on J_c performance of in-situ MgB₂ wire

田中 和英, 児玉 一宗, 一木 洋太, 岡本 和孝(日立・日立研)

TANAKA Kazuhide, KODAMA Motomune, ICHIKI Yota, OKAMOTO Kazutaka (Hitachi)

E-mail: kazuhide.tanaka.je@hitachi.com

1. はじめに

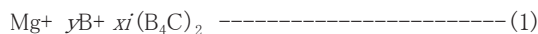
MgB₂ 超電導体は比較的高い T_c (~40K) を有し、かつコヒーレンス長さが 6-7nm と酸化物系に比べて数倍長く超電導接続が可能であることから、ヘリウムフリー、小型・軽量、低コストなマグネットを実現する唯一の高温超電導材料である。MRI をはじめとするマグネット応用には磁場中で高 J_c 化を実現する必要があるが、その手法として主に C 添加が行われてきた[1]。中でも B₄C 添加は、分解しても副次的に生成する化合物がないため、有効な添加材であるといえる。しかし、B₄C は安定な化合物であるため、その分解には 800°C 以上の高温熱処理が必要であり、MgB₂ 結晶粒が粗大化し、粒界が減少するためピンニング特性が低下する問題がある。このことから、できるだけ低温で B₄C を分解させ、粒界を維持することができれば、磁場中で高い J_c を有する線材が実現できる可能性がある。

本報では、B₄C 添加 in-situ/MgB₂ 単芯線材の高 J_c 化を目的に、初期配合組成を種々変化させた線材を 630°C の低温で熱処理し、 J_c の磁場依存性及び T_c を評価した結果について報告する。

2. 実験方法

線材の作製は、in-situ/PIT 法により行った。Mg、B 及び B₄C 粉末を一度にボールミル混合した後、外径 6.0mm、内径 3.5mm の Fe 管に充填した。その後、溝ロール圧延により、1.5mm × 1.5mm の角状線材に加工し、MgB₂ 単芯線材とした後、630°C で熱処理することにより、超電導線材とした。

B₄C の添加量と J_c の関係を明らかにするために、初期配合組成 (以下、 xi) として B₄C を 10mol% 添加した。具体的には、



として、(1)式における y を 1.0-2.6、 xi を 0.10 にして、 J_c の磁場依存性を直流四端子法により測定した。磁化の温度依存性は、SQUID を用い、印加磁場は 10 Oe として測定した。

3. 実験結果

Fig.1 に作製した各試料の J_c の磁場依存性を示す。 xi を 0.10 にした場合、 y が 1.0 のときに化学量論組成となるが、 y の増加に伴い J_c は向上し、 $y=2.2$ のときに最大値を持つことがわかった。 $y=2.2$ のときの B と C の合計モル比は、Mg が 1.0 に対して 3.2 になる。化学量論組成に対して、B と C の合計モル比を 60% 過剰にしたにも関わらず、 J_c の向上が確認された。比較のために、B₄C を添加しない (Mg+2B) 線材の J_c についても併せて示す。7T では B と C を過剰にすることで J_c が 4 倍に向上した。 $y=2.2$ のときの B サイトへの C 置換量は 0.22 であり、初期配合組成を工夫することで、低温熱処理でも元素置換効率を高められることが明らかとなった。

SQUID による磁化の温度依存性を測定し、 T_c を比較した結果を Fig.2 に示す。縦軸は 40K での質量磁化を 0、25K での質量磁化を -1 として規格化している。ここで、 T_c オンセットは

規格化質量磁化が -0.1 のときの温度と仮定すると、B と C の合計モル比を過剰にすることで T_c は高くなる傾向が認められたが、C 添加を行わない Mg+2B のときに比べて T_c は 2K 低下した。この低下が冷凍機冷却で想定される 20K 程度の温度領域でどのような影響を与えるかについては、今後、 J_c の磁場-温度依存性を検討する等して、明らかにする必要がある。

(1)式における xi を 0.50-0.20 まで変化させたときの J_c の磁場依存性、ならびに各線材の格子定数、C 置換量については当日報告する。

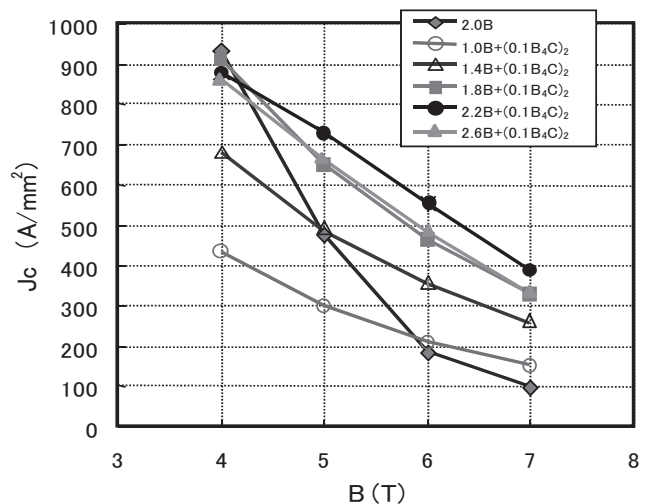


Fig.1 J_c -B Properties of MgB₂ mono-core wires.

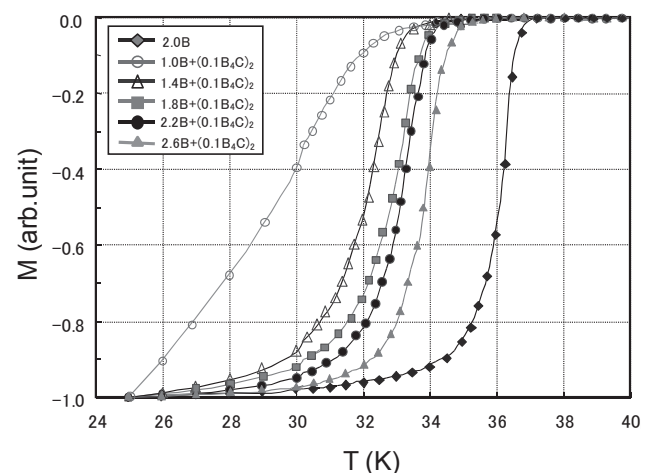


Fig. 2 Relationship between the normalized magnetization and temperature for MgB₂ mono-core wires.

参考文献

- [1] A. Yamamoto *et al.*; Supercond. Sci. Technol. **18**, (2005) 1323.

内部拡散法(IMD)による 19, 37 芯 MgB₂ 線材の作製

Fabrication of internal Mg diffusion (IMD) processed 19- and 37- filamentary MgB₂ wires

葉 術 軍 (九大、NIMS); 松本 明善, 戸叶 一正, 熊倉 浩明 (NIMS);

寺西 亮 (九大); 木吉 司 (九大、NIMS);

Shujun YE (Kyusyu University, NIMS);

Akiyoshi MATSUMOTO, Kazumasa TOGANO, Hiroaki KUMAKURA (NIMS);

Ryo TERANISHI(Kyusyu University); Tsukasa KIYOSHI(Kyusyu University, NIMS)

Email: YE.Shujun@nims.go.jp

1. はじめに

内部拡散法(Internal Mg diffusion, IMD)による MgB₂ 線材は Mg を B 層に拡散で供給するために体積の収縮が少なくなり、充填率が高くなるため、高い臨界電流密度(J_c)が得られる。これは伝統的な Powder-In-Tube (PIT)法 MgB₂ 線材の充填率低下の解決策として、注目されている。本研究では、外部シースが Cu、内部シースが Fe の 19 芯(Cu-Fe 19)線材及び内部シースが Ta の 37 芯(Cu-Ta 37)線材を作製して、組織の観察と臨界電流特性の測定を行った。

2. 実験

(1) IMD 法による 19 芯(Cu-Fe19)MgB₂ 線材の作製

① 外径 4mm, 内径 1.5mm の Fe tube の中心に直径 2.0 mm の Mg 棒を置き、周りは 10mol% のナノ SiC を混ぜた Boron 粉末を充填する。この線材を直径 1.7mm の単芯線に冷間加工(groove rolling, swaging と drawing)する。

② ①で作成した単芯線を 19 本集めて、Cu tube (外径: 12.6mm, 内径: 8.5mm)の中に入れて、上記と同じプロセスで直径 1.5mm までの線材を加工する。

(2) IMD 法による 37 芯(Cu-Ta 37)MgB₂ 線材の作製

① 外径 4mm, 内径 1.5mm の Ta tube の中心に直径 2.0mm の Mg 棒を置き、周りは 10mol% のナノ SiC を混ぜた Boron 粉末を充填する。これを直径 1.2mm の単芯線に冷間加工(groove rolling, swaging と drawing)する。

② ①で作成した単芯線を 37 本集めて、Cu tube (外径: 12.6mm, 内径: 8.5mm)の中に入れて、上記と同じプロセスで直径 1.6mm までの線材を加工する。

(3) 組織観察と臨界電流測定

上記線材から 4cm の短尺線材を切って、670°C で 3 時間熱処理した。組織は光学顕微鏡ならびに SEM で観察した。熱処理後の線材に対して磁場中で 4 端子抵抗法を使って臨界電流を測定した。反応層面積によって臨界電流密度を計算した。

3. 結果

(1) 断面写真

Fig.1, Fig.2 に示した熱処理後線材の断面には hollow(黒い部分)が残った core と Mg が残った core があるが、殆ど全て core には MgB₂ が生成していた。

(2) SEM Image

Fig.3 は線材(Cu-Ta 37)の core 内部 (Fig.2 の赤い丸枠内)の SEM Image である。MgB₂ 層において B rich 部分(黒いスポット)がはっきり観察できる。

(3) 臨界電流密度 Fig.4 は 10mol% ナノ SiC 添加した IMD 法による(Cu-Ta 37)と(Cu-Fe 19)の臨界電流密度を示す。両線材の磁場依存性は殆ど同じであるが、4.2K, 10T で(Cu-Ta 37)線材で約 60 kA/cm² と高い値が得られた。一方、(Cu-Fe 19)線材の J_c は 27k A/cm² しか得られなかった。これは Ta の加工性が Fe より良好で均一なフィラメントができたためと考えられる。

謝辞

本研究は科学技術振興機構(JST)の先進的低炭素化技術開発事業(ALCA)の助成を受けた。

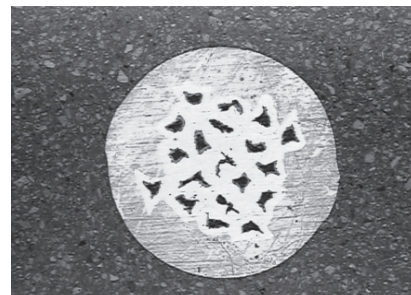


Fig.1 Cu-Fe sheathed 19-filamentary MgB₂ wires by IMD process (After heat treatment at 670°C for 3 hours)

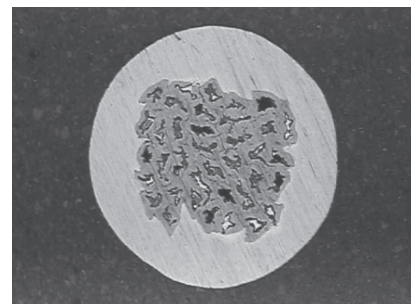


Fig.2 Cu-Ta sheathed 37-filamentary MgB₂ wires by IMD process (After heat treatment at 670°C for 3 hours)

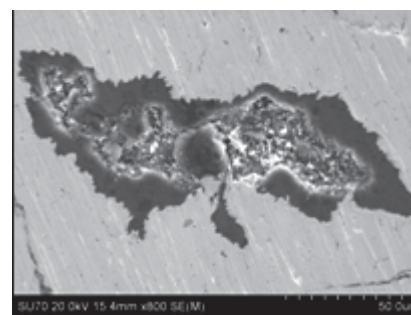


Fig.3 SEM Image of Cu-Ta sheathed 37-filamentary MgB₂ wires by IMD process

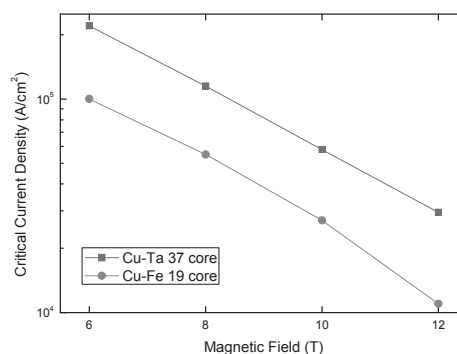


Fig.4 J_c -B curve of IMD processed multi-filamentary MgB₂ wires

3 テスラ級 MgB₂ 超電導バルク磁石の開発

Development of 3 Tesla Class MgB₂ Superconducting Bulk Magnets

富田 優, 石原 篤 (鉄道総研); 山本 明保 (東大, JST さきがけ); 下山 淳一, 岸尾 光二 (東大)
 TOMITA Masaru, ISHIHARA Atsushi (Railway Technical Research Institute);
 YAMAMOTO Akiyasu (The Univ. of Tokyo, JST-PRESTO); SHIMOYAMA Jun-ichi, KISHIO Kohji (University of Tokyo)
 E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

冷凍機冷却による 15-30 K で応用可能な超電導バルク磁石として MgB₂ バルク体を検討した。金属系超電導体としては最高の転移温度 T_c (40 K) を持つ MgB₂[1] は、超電導コヒーレンス長が長く電磁的異方性が低いことから、無配向の多結晶体においても 10^5 A/cm² 以上の比較的高い臨界電流密度 J_c を持つ巨視的超電導電流が得られる[2]。この結晶粒間における弱結合の不在は、多結晶試料全体にわたっての均一な超電導電流分布を可能とする[3]。また、MgB₂ バルク体はマグネシウムとホウ素の混合粉末に熱処理を施す *in-situ* 法などにより比較的容易に、かつ低コストで作製可能である。

MgB₂ は線材化研究が積極的に行われているが、弱結合フリーに由来する特徴は RE 系溶融凝固バルクで研究が進んでいる超電導バルク磁石としても最適である。すなわち、40 K 以下で動作可能な強力磁石として、輸送・医療等への応用が期待でき、とくに、高い磁場均質性が求められる MRI, NMR 等の計測機器への応用に適すると考えられる。

最近我々はクラックの無い均一な組織を持つ MgB₂ バルク体を作製する技術を開発し、比較的大型のバルク体の作製が可能となった。本研究では、Mg と B の混合粉末の圧粉成型体を熱処理することにより円盤型 MgB₂ バルク体を作製し、その捕捉磁場特性を評価した。

2. 実験方法

Mg と B の混合粉末を 20, 30 mm ϕ , 厚さ 10 mm の円盤状に成型し、Ar 雰囲気下で 850 $^{\circ}$ C, 3 h の熱処理を行い MgB₂ バルク体を得た。一部のバルク体は、機械的強度を高めるために MgB₂ バルク体/金属(SUS)複合体とした。得られたバルク体試料、および 1 対のバルク体を厚さ 2.4 mm のスペーサーを介して組み合わせたバルクペア試料をヘリウム冷凍機で 15 K 以下まで冷却し、超電導マグネットを用いて磁場下冷却 (FC) 条件により 6 T の磁場下で着磁を行った。バルク体の捕捉磁場特性に関してはスペーサー内、バルク体表面、または一定ギャップをもって配置したホール素子を用いて測定し、捕捉磁場の温度、時間、位置依存性を評価した。なお、試料温度はバルク体底面の温度とした。また、バルク体から切り出した試料片に対して SQUID 磁束計により磁化特性を評価した。

3. 結果と考察

作製した MgB₂ バルク体試料は、表面にマクロスケールのクラック、ポイド等はみられず、均一な組織を有していた。バルク体から切り出した試料の磁化特性を調べたところ、 T_c は約 39 K であり、 J_c は 30 K において 1×10^5 A/cm² 以上であった。

直径 30 mm ϕ , 厚さ 10 mm のバルク体試料を着磁後、バルク体表面中心において測定した捕捉磁場の温度依存性を Fig.1 に、位置依存性を Fig.2 に示す。15 K において 2.25 T が得られ、27.5 K 程度まで 1 T 以上の、ほぼ同心円状の捕捉磁場分布が得られた。次に、直径 30 mm ϕ , 厚さ 10 mm のバルク体試料 2 枚を対向させたバルクペア試料を着磁後、バルク体間の中心の位置において捕捉磁場を測定した。得られた捕捉磁場は 17.5 K において 3.1 T であり、30 K 程度まで 1 T 以上の磁場を捕捉した。単一の直径 30 mm ϕ , 厚さ 10 mm のバルク体試料の表面中心における捕捉磁場は 17.5 K で 2.05 T であったことから、バルクペア試料では単一試料の 1.5 倍以

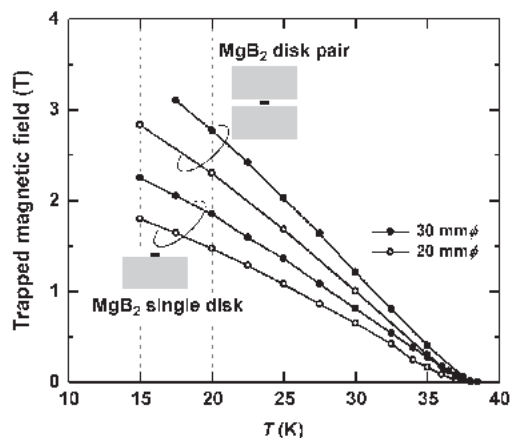


Fig. 1. Trapped magnetic field as a function of bottom face temperature for MgB₂ bulk disks with 20 or 30 mm ϕ \times 10 mm^t and disk pairs with 20 or 30 mm ϕ \times 20 mm^t.

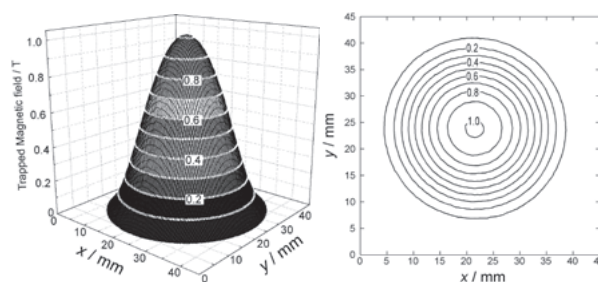


Fig. 2. Position dependence of trapped magnetic field (@20K, 3 mm gap) for a MgB₂ bulk disk with 30 mm ϕ \times 10 mm^t.

上の捕捉磁場が得られていることが分かる。なお、測定後の試料にクラック発生等のバルク破壊は認められず、測定を繰り返した際の特性劣化は認められなかった。

4. 結論

MgB₂ バルク体を作製し、超電導バルク磁石としての素質を検討した。30 mm ϕ MgB₂ バルク体においてほぼ同心円状の捕捉磁場分布を確認し、2つのバルク体を対向させることで約 3.1 T (@17.5 K) の中心捕捉磁場が得られた。バルク体の臨界電流密度、微細組織の改善により捕捉磁場のさらなる向上が可能で、MgB₂ バルク体は数テスラ級の強力超電導バルク磁石候補として有望であるといえる。

5. 謝辞

本研究は科学研究費補助金 (23246110) の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu, *Nature* **410**, 63 (2001).
- [2] D. C. Larbalestier *et al.*, *Nature* **410**, 186 (2001).
- [3] 山本明保, アレクサンダー・グレビッチ, デビッド・ラバレスティエ, 下山淳一, 岸尾光二, 応用物理 **79**, 48 (2010).

磁化測定法による PLD-GdBCO 線材の低電界領域における電流輸送特性評価

Characterization of current transport properties in low electric-field range of PLD-GdBCO coated conductor by use of magnetization measurements

今村 和孝, 廣松 聖人, 山口 仁正, 榊原 崇志, 井上 昌睦, 東川 甲平, 木須 隆暢(九大);
淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 飛田 浩史, 吉積 正晃, 和泉 輝郎(ISTEC)

IMAMURA Kazutaka, HIROMATSU Masahito, YAMAGUCHI Yoshimasa, SAKAKIBARA Takashi, INOUE Masayoshi,
HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu Univ.); AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.);
TOBITA Hiroshi, YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (ISTEC)

E-mail: imamura@ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

YBa₂Cu₃O_{7-δ}線材に比べて T_C が高く、磁場依存性も優れている GdBa₂Cu₃O_{7-δ} (GdBCO) 線材を用いた線材の開発研究が現在精力的に進められている。BMO(M=Metal)系の新しいピン止め材料を用いた人工ピンニングセンターの導入により、磁場中の臨界電流特性が飛躍的に向上することが示されている。[1, 2]。これら高性能線材の開発に伴い、電力機器等の開発研究も期待されるが、NMR や磁気浮上列車などの永久電流状態で動作させる機器においては、磁束クリープ現象による磁化の緩和の影響を強く受けることから、その特性を十分に把握する必要がある。すなわち、10⁻¹⁰V/m 程度の超低電界領域の E-J 特性の定量的評価が不可欠である。本研究では、新材料を用いてピン止め点を導入した試料について、磁化測定によって、低電界領域における E-J 特性を評価すると共に、四端子法による測定結果との比較を行い、機器設計の際に重要となる広い電界領域に亘る E-J 特性について考察した。

2. 実験

実験には、BaHfO₃ を添加しナノ欠陥を導入した PLD-GdBCO 線材を用いた。磁化測定法では長さ 3mm 幅 1mm の矩形形状に加工したものを、四端子法では長さ 500μm、幅 60μm のマイクロブリッジに加工したものを試料として用いた。直流磁化の緩和測定は、SQUID を用いた磁束率計によって行った。通電法による電流-電圧測定は、直流四端子法にて実施した。

3. 結果及び考察

Fig.1に65Kでの磁化の緩和特性を示す。両対数プロット上で線形に変化する典型的な磁化の緩和特性が得られていることが確認できる。

磁化の緩和特性からの E-J 特性を以下の表式によって導出した。

$$J = \frac{12m}{w^2 d(3l-w)} \quad (1)$$

$$E = \frac{\mu_0 G}{2d(l+w)} \cdot \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

ここで、d は膜厚、l は長辺、w は短辺、Gは形状パラメータである。

Fig.2に65Kでの磁化の緩和特性より得られた E-J 特性ならびに四端子法により得られた E-J 特性を示す。両者の E-J 特性が系統的によく一致していることが確認できる。これにより、7桁を超える電界領域に亘る E-J 特性を求められることが確認できた。その他の条件における測定結果及び解析の詳細については当日報告する。

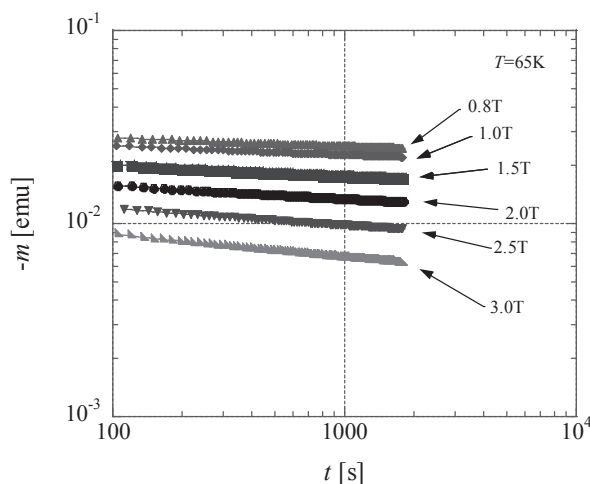


Fig.1 Relaxation of magnetization at 65K.

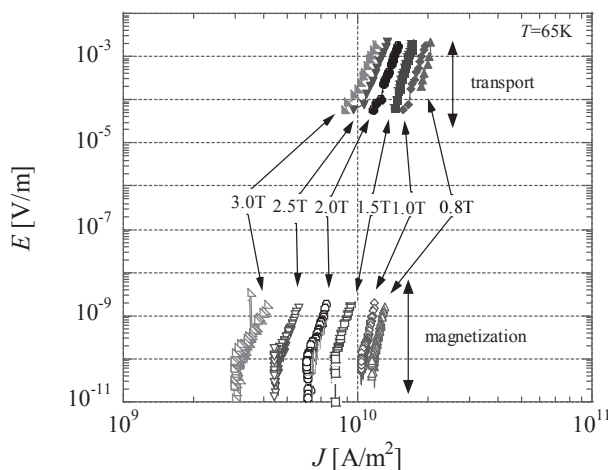


Fig.2 E-J characteristics at 65K

謝辞

本研究の一部は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施した。

参考文献

1. H.Tobita *et al.*, presented at this conference, 3A-p04.
2. M. Inoue, *et al.*: presented at this conference, 1A-a03.

高温超電導線材の高温加熱による特性変化 Characteristic Change in HTSs due to High-temperature heat

矢崎 真二郎, 青木 徹, 神林 佑, 柄澤 彰良, 琴寄 拓哉, 石山 敦士(早大); 宮原 信幸(放医研)
YAZAKI Shinjiro, AOKI Toru, KAMBAYASHI Yu, KARASAWA Akira, KOTOYORI Takuya,
ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

超電導線材を機器応用する際には、その加工時に、はんだ付けやエポキシ含浸などが行われるため、線材の加熱に対する耐性のデータは工学的・工業的に非常に重要であるといえる。そこで我々は市販の Bi-2223 線材および YBCO 線材を恒温炉で加熱し、加熱前後の I - V 特性 (I_c) を評価してきた[1]。今回は電気炉を用いて、より高い温度環境下での特性変化と、製造プロセスの異なる YBCO 線材について実験を行ったので報告する。

2. 実験方法

試料線材の諸元と設定温度を Table 1 に示す。温度をこのように設定したのは以下の理由による。Sample 1 については、前回の実験[1]で幅 4.8 mm の線材が 220 °C 付近で劣化したことから、今回の幅 4.4 mm の線材では 200 °C 付近を細かく温度を設定した。Sample 2 については、今回初めて測定したので前回同様、超電導コイル製作時に用いるエポキシ剤の硬化温度や、ハンダ融点を考慮して 130 °C から 250 °C まで広く温度を設定した。Sample 3 (Bi-2223 線材) については、前回 250 °C 以下では劣化しなかったことから、今回 300 °C 以上の温度を設定した。

はじめに、超電導線材の I_c を計測しこれを初期 $I_c(I_{c0})$ とする。 I_c 測定は 77 K 液体窒素浸漬冷却、自己磁場中、1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準で行った。熱電対を付けた試料を炉内にセットし、設定温度に達したら各種線材を各設定温度につき 2 本ずつ測定するとし、計 38 本を炉に投入した。加熱時間を 10 分間で固定し(一定温度を保持)、温度をパラメータとして特性変化を調べていった。最後に、昇温試験後の I_c 測定を行い、 I_c と比較することで温度と I_c/I_{c0} の関係性を評価した。

Table 1 Specification of HTS samples, preset temperature

Number	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Material	YBCO		Bi-2223
Manufacturer	AMSC 344Superconductors	SuperPower SCS4050 2G HTS	Sumitomo DI-BSCCO (TypeH)
Process	MOD/RABiTS	MOCVD/IBAD	CT-OP
Width	4.4 mm	4.0 mm	4.3 mm
Length	100 mm	100 mm	100 mm
Thickness	0.22 mm	0.1 mm	0.23 mm
I_c (nominal)	90 A	135 A	140 A
Preset temperature	150 °C		
	180 °C	130 °C	300 °C
	185 °C	150 °C	350 °C
	190 °C	180 °C	400 °C
	195 °C	200 °C	450 °C
	200 °C	220 °C	500 °C
	205 °C	250 °C	
	210 °C		

3. 実験結果

Sample 1, Sample 2, Sample 3 の結果をそれぞれ Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 に示す。試料は設定温度ごとに新しいものに交換したので、各パラメータにつき 2 本の値をそれぞれプロットした。Sample 1 は 2 本とも 200 °C 付近から I_c 値の低下が確認され、205 °C においては I_c がおおよそ 10% 低下した。さらに 210 °C で超電導状態が失われた。Sample 2 についても 2 本とも 200 °C 付近から I_c 値の低下傾向が確認されたが、Sample 1 のそれと比較して非常に僅かであり、250 °C でもおおよそ 5% 低下したのみであった。また Sample 3 については、400 °C 付近から I_c 値の低下が確認され、500 °C でおおよそ 20% 低下した。

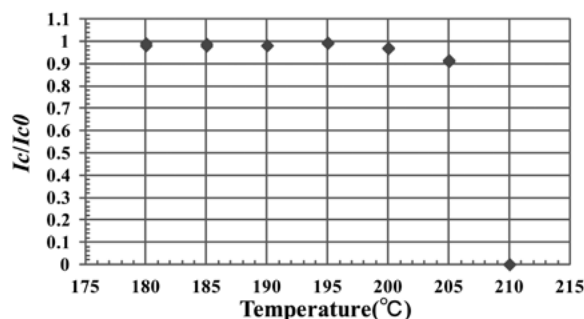


Fig. 1 Temperature vs. I_c/I_{c0} of Sample 1

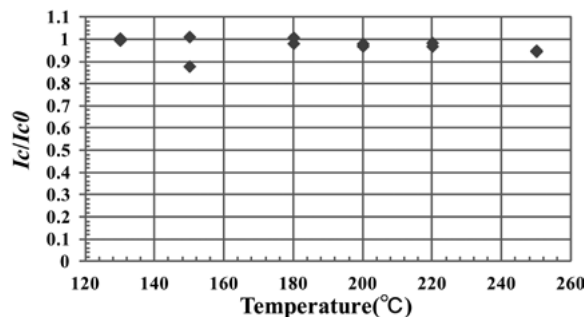


Fig. 2 Temperature vs. I_c/I_{c0} of Sample 2

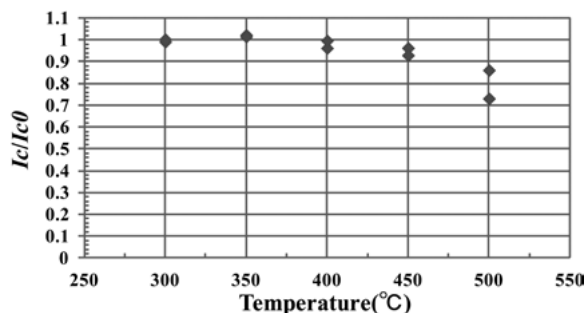


Fig. 3 Temperature vs. I_c/I_{c0} of Sample 3

本研究は「科研費(基盤研究 A)」により実地したものである。

参考文献

1. A. Ishiyama, A. Karasawa, et al.: Characteristic Change in HTSs due to Temperature Rise, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.151

RE123 系線材の剥離に対する欠陥の影響

Influence of defects on delamination of RE123 coated conductor

坂井 直道、重森正隆、町敬人、衣斐頭、高橋保夫、徳丸美幸、吉積正晃、田辺圭一、和泉輝郎 (ISTEC-SRL)
 SAKAI Naomichi, SHIGEMORI Masataka, MACHI Takato, IBI Akira, TAKAHASHI Yasuo, TOKUMARU Miyuki, YOSHIZUMI
 Masaaki, TANABE Keiichi, IZUMI Teruo (ISTEC SRL)

E-mail: nsakai@istec.or.jp

1. はじめに

近年、RE123 系テープ線材を用いた各種機器開発が活発に進められている。ここで、機器製作の際に線材の剥離が原因で特性劣化したケースがいくつか報告されており、信頼性向上の観点で耐剥離性の改善が求められている。そのため我々は、RE123 系テープ線材の剥離に関し、その原因を調査するとともに改善方法の検討を行っている。剥離した線材を多数調査した結果、剥離する線材には欠陥が存在しており、その欠陥を起点として、その後の各種処理による機械歪や熱歪等により剥離が生じたものと推測された。剥離の仕方はいくつかの種類があるが、本報告では、そのうち、切断加工で導入された欠陥および線材に内在する欠陥による影響に関して報告する。

2. 実験方法及び結果

剥離評価は、垂直引張剥離強度試験およびEPMAによる組織、組成分析により行った。Fig.1(a)に、垂直引張剥離強度試験治具の外観写真を示す。評価試料は、主にIBAD基板(CeO_2 /LMO/MgO/GZO/Hastelloy)上にPLD法でGd123を成膜した線材(Ag被覆)を用いた。以下、切断加工と内在する欠陥の影響に関して述べる。

(1) 切断加工の影響

10mm幅の線材を、YAGレーザーを用いて5mm幅に切断した。ここで、試料Aは、スポット径40 μm でかつ収束の悪いレーザーで切断し、試料Bは、スポット径20 μm で収束が良くなるように改良したレーザーで切断した。これらを、Fig.1(b)に示す様に、3mm角のCuアンビルをレーザー切断端にハンダ付けし、剥離試験を実施した。剥離強度をFig.2(a)に、剥離した基板側の端部写真をFig.3(A)および(B)に示す。試料Aの剥離強度は、10-20 MPaと低く、端部には150-200 μm の欠陥(基板の露出)が生じていた。一方、改良後のレーザーで切断した試料Bの強度は、30-60 MPaと高く、切断端に大きな欠陥は観察出来なかった。線材Aは、その後の液体窒素浸漬やコイル化の際に、 I_c 低下や剥離が見られた。一方、線材Bに劣化は観測されなかった。これより、切断加工時に導入された欠陥が剥離起点となったと考えられた。また、この剥離は切断条件の調整により回避可能であることが分かった。

(2) 内在する欠陥の影響

線材中には不純物のコンタミやプロセス条件の不具合に起因する欠陥が内在することがある。そこで、内在する欠陥と強度の関係に関して調査した。試料Cは、GZO ベッド層を試験的にMOD法で成膜した試料(MOD ベッド)であり、試料Bはスパッタ法で成膜した標準的な試料である。剥離強度(3mm ϕ 治具使用、線材中央で測定)および剥離面(基板側)の組織をそれぞれFig.2(b)およびFig.3(C1)、(D1)に示す。試料Cの強度は、10-15 MPaで、剥離面には基板が露出した欠陥が多数見られた。また、試料Dの強度は、30MPa-70 MPaと幅広く分布していた。ここで、試料Dの強度が低い箇所D1の組織から、剥離面には、数百 μm の欠陥が観察され、強度の高い箇所D2には、この様な大きな欠陥は見られなかった。これらのことから、大きな欠陥の存在が剥離強度を引き起こしたものと推測された。ここで、MOD ベッド法に関しては、その後

の条件調整により基板との密着性を改善し、剥離強度が改善可能であることが確かめられている。また、コンタミが原因と考えている欠陥部の抑制に関しては、洗浄の強化などで改善可能であると考えている。なお、今回示した剥離面は一つの例であり、線材種類と作製条件により多少異なる場合がある。

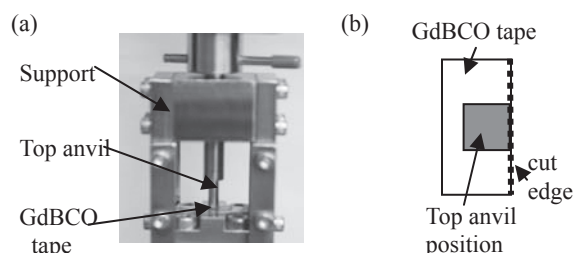


Fig.1 Method of transverse tensile test.

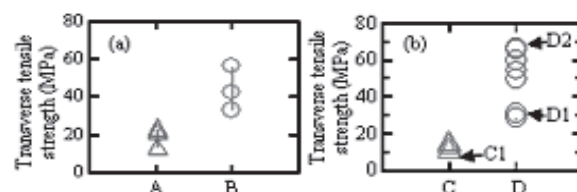


Fig.2 Transverse tensile strength for various samples.

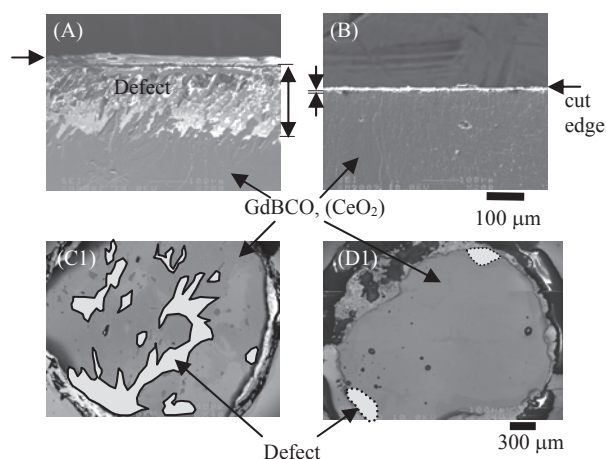


Fig.3 Photographs of defects shown in delaminated surface (substrate side).

3. まとめ

切断加工時やプロセス時に線材に内包されてしまった欠陥が線材の剥離に影響していることを示した。しかしながら、切断加工で導入された欠陥は切断条件の改良で抑制可能であり、内包された欠陥を除去することも可能であることから、剥離は本質的な問題ではなく、線材作製プロセスが洗練されるとともに改善され、線材の信頼性は向上するものと考えている。本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」としてNEDOの委託により実施したものである。

HTS バルクの高調波磁界による交流損失の測定

Measurement of AC losses in HTS bulk by the harmonics magnetic field

山岸 一人, 塚本 修巳(横浜国大); 宮城 大輔(東北大学)

YAMAGISHI Kazuhito, TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University); MIYAGI Daisuke (Tohoku University)

E-mail: yamagisi@ynu.ac.jp

1. はじめに

我々は、バルク超伝導体を用いた交流高温超伝導機器の実用化のために、バルクがさらされる様々な変動磁界による捕捉磁束への影響について調査研究を行ってきた[1][2]。電動機などの交流機器は様々な変動磁界にさらされており、その変動磁界により交流損失が発生する。その交流損失によりバルクの温度上昇が起こり、捕捉磁束の減少を引き起こす。本報告では、回転機等で問題となる高調波成分を含んだ交流磁界がバルクの交流損失に与える影響について検討を行ったので報告する。

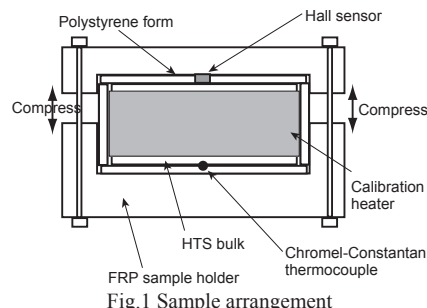


Fig.1 Sample arrangement

2. 実験方法

今回の実験で使用した HTS バルクは、Gd 系の直径 34.4mm×厚さ 10.4mm の円筒型のものであり、最大捕捉磁束は液体窒素温度で 1.17T となっている。臨界電流密度 J_c は、捕捉磁束分布より求めた到達磁界を元に計算したものであり、およそ $6.8 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ となっている。その HTS バルクを図 1 に示すような FRP 製のサンプルホルダーで挟み込み、バルク円筒側面には昇温およびキャリブレーション用のヒータが設置されている。バルク下面中心には温度上昇を計測するための熱電対を設置し、上面には捕捉磁束を測定するためのホールセンサが設置されている。また、バルクの冷却特性を調整するためにバルク周囲を断熱材で覆い、サンプルホルダーを上下に圧縮することで、微調整を行うことを可能とした。この HTS バルクをセットしたサンプルホルダーは、外部磁界を印加するために図 2 に示すような、液体窒素中で冷却された交流マグネットの中心にセットされている。この交流マグネットの電源は、外部コントロールにより、様々な波形を励磁することが可能となっており、今回の測定では高調波を含んだ波形により励磁を行った。さらに、HTS バルクを着磁するためにクライオスタット全体を最大 5T まで発生させることが可能な直流マグネットに挿入されている。今回の交流損失の測定は、印加磁界の波形に高調波成分を含ませるため、精度の高い電気的測定法は使用できない。よって、熱電対を用いて熱量から損失を測定するカロリメトリック法[3]により測定を行った。

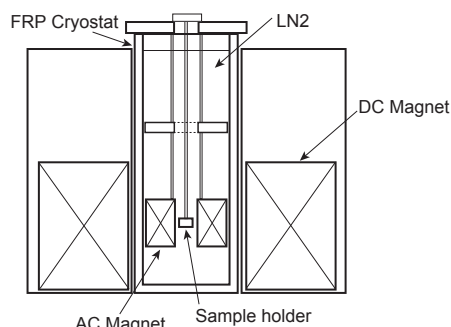


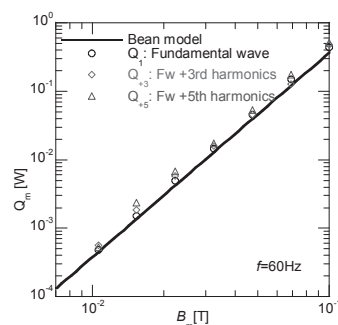
Fig.2 Arrangement of the experimental set-up

3. 実験結果とまとめ

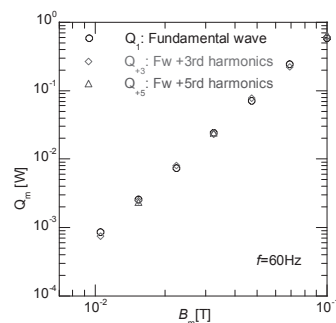
図 3(a)にバルクが着磁されていない状態の交流損失の測定結果を示す。 Q_1 が、基本波である 60Hz の交流磁界を印加した際の損失の値であり、実線で示された値は Bean モデルによる損失の計算値である。この二つの値は、良く一致していることがわかる。 Q_{+3} は、基本波に 3 次の高調波(180Hz)を含めた際の損失の測定値であり、基本波のみの場合に比べて若干ではあるが大きな値となっている。また同様に Q_{+5} は 5 次の高調波(300Hz)を含めた際の測定値は、3 次の値よりも若干大きな値になっている。図 3(b)はバルクを着磁した状態での交流損失の結果である。着磁なしの状態と比べると、 Q_1 、 Q_{+3} 、 Q_{+5} の測定値は、ほぼ同じ値となっている。しかし、これらの結果から、カロリメトリック法の測定精度の問題もあり、精度向上とデータの蓄積が必要と思われる。

謝辞

本研究は、科研費・基盤研究C(21560292)の助成を受けて実施したものである。



(a) Without trapped magnetic flux.



(b) With trapped magnetic flux.

Fig. 3 Measured values of B_m vs. Q_m

参考文献

1. O. Tsukamoto, et al.: Journal of Materials Processing Technology, 161, 1-2, (2005) pp52-57
2. Y. Zushi, et al.: Cryogenics, 45, (2005) pp17-22
3. K. Yamagishi, et al.: Journal of Physics: Conference Series 43, (2006) pp.595-598

大電流直流超伝導ケーブル向け積層構造高温超伝導テープ線材の臨界電流測定 Critical current measurements on multi-stacked HTS tapes for large-current DC superconductivity power transmission

小原 久人、山内 駿、孫 建、渡辺 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎(中部大学)
Ohara Hisato, YAMAUCHI Shun, SUN Jian, WATANABE Hirohumi, HAMABE Makoto, KAWAHARA Toshio,
YAMAGUCHI Sataro
E-mail: te11006@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導テープ線材の開発が進み、実際への応用が広く検討され、高電圧電力ケーブルの開発も進んできた。一方、応用先の一つに超伝導バスバーなどの低電圧・大電流直流応用の検討も行われている^{1),2)}。電圧はDC400V～DC1500V程度であり、電流は20kA以上である。応用先としては、データセンター(iDC)や電気鉄道などがある。iDCでは直流を利用することによって、節電につながり、大電流応用として期待されている。また、電気鉄道では長く直流が使われてきて、超伝導利用により路線に沿った変電所を集約し、コスト削減につながると言われている。

一方で、超伝導ケーブルに大電流を流すと自己磁場が大きくなり、テープ線材の臨界電流が下がることがある。このため、大電流応用では自己磁場の影響を最小化することが重要であると思われる。本報告では、自己磁場の影響を少なくなるようテープ線材を配置したことについて述べる。また、このことから超伝導ケーブルの設計を見直し、新しい導体構造の検討を始めた。

2. 実験方法

これまでにビスマス系線材では積層構造を取り、各層毎の電流方向を反転させる導体が提案されている^{1),3),4)}。Fig.1に線材配置の一例を示す。テープ線材である住友電気工業製Bi2223をそれぞれカプトンテープで電気絶縁し、積層構造になっている。Fig.1の様子に積層構造を採ったものを液体窒素に入れた。中央のテープ線材の臨界電流測定を行った。この時、上下の非測定線材には一定電流を0～160Aの範囲で流し、上下で往復電流とした。また、中央の線材には別電源を用意した。三層の場合には中央の一本にだけ流れるようにし、四層の場合には中央の二本に往復電流が流れる構成とした。これによって、導体部の磁場は大電流になっても高くなり、特にテープ面に垂直方向の磁場は低く押さえられる。これはビスマス系線材にとって望ましく、臨界電流が増大する。

3. 結果と考察

Fig.2に臨界電流の測定例を示す。非測定線材の電流は0Aである。線材の単独での臨界電流測定では、それぞれ164Aであったが、積層構造では線材の臨界電流はそれぞれ221A,248Aと増大した。

Fig.3に非測定線材に流す電流を変えた時の線材の臨界電流を示す。線材単独一本の臨界電流に比べ、臨界電流が大幅に増加していることが分かる。特に四層の場合非測定線材に140A流した場合、240Aまで増加している。また三層の場合には同様に160A流した場合、248Aまで増加した。これは増加率にして約50%増加していることになる。

以上より、このような導体構成によって性能向上を計る可能性がでてきた。

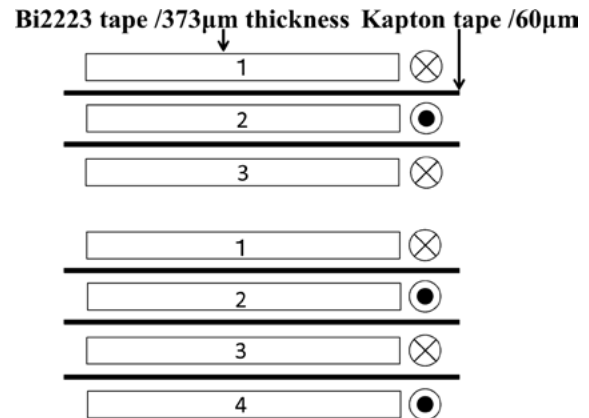


Fig.1 The schematic arrangements of the three and four HTS tapes in the experiment

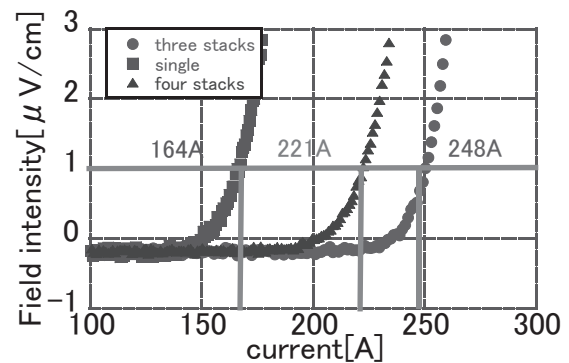


Fig.2 V-I characteristics for critical current measurement

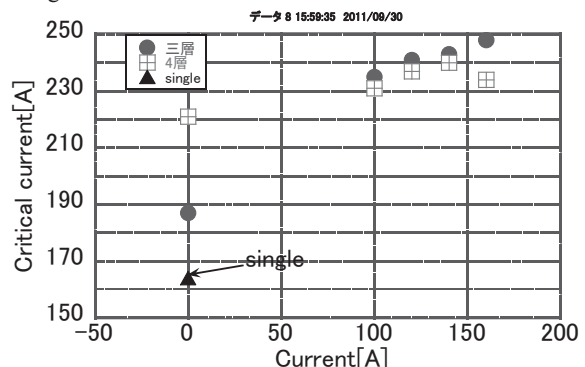


Fig.3 Critical currents versus outer tape current for Three and four tapes stack conductor

参考文献

- 1) 羽田 幸一, 羽根 晶 特開平5-236649 酸化物高温超伝導導体の送電方法
- 2) M. Takayasu, J. Minervini, L. Bromberg, CEC-ICMC 2009, M1-K-04, Arizona (2009)
- 3) Ballino Amail et al, 4-LD-P48 EUCAS 2011
- 4) J. SUN et al, 4-LB-P31 EUCAS 2011

超伝導線安定化材の低温での中性子照射試験

Neutron Irradiation Tests of Superconductor Stabilizer Materials at Low Temperature

吉田 誠, 中本 建志, 荻津 透 (KEK); 板橋 高久, 久野 良孝, 佐藤 朗 (阪大); 栗山 靖敏, 宮田 清美, 森 義治, 秦 斌, 佐藤 紘一, 徐 虬, 義家 敏正 (京大)

YOSHIDA Makoto, NAKAMOTO Tatsushi, OGITSU Toru (KEK); ITAHASHI Takahisa, KUNO Yoshitaka, SATO Akira (Osaka Univ.); KURIYAMA Yasutoshi, MIYATA Kiyomi, MORI Yoshiharu, QIN Bin, SATO Koichi,

XU Qiu, YOSHIIE Toshimasa (Kyoto Univ.)

E-mail: makoto.yoshida@kek.jp

1. 超伝導磁石の放射線耐性

加速器の大強度化、高エネルギー化に伴い、加速器や実験装置に用いる超伝導磁石にも非常に高い放射線環境下で運転できることが要求されるようになってきた。CERN 研究所の LHC 加速器のアップグレード計画や、J-PARC に提案されているミューオン電子転換仮定探索実験 COMET[1]では 10^{21} ~ 10^{22} n/m² の中性子に超伝導磁石がさらされると計算されている。本研究では、超伝導磁石材料の低温環境下での中性子照射による劣化を調査することを目的とする。今回の発表では、アルミ安定化超伝導線に安定化材として用いられるアルミ合金に原子炉からの中性子を低温環境下で照射し、電気伝導度の劣化をその場測定した結果について報告する。

2. アルミ安定化超伝導線

COMET 実験 (J-PARC E21) ではこれまでにない大強度負ミューオンビーム生成のために強磁場を発生できる超伝導磁石を使用する計画である。直径 1.3 m の超伝導ソレノイド磁石の中心に陽子標的を配置し、ミューオンの親となるパイオンを強磁場でトラップする。陽子標的からの強烈な放射線から超伝導コイルを守るためコイル内側にシールドを挿入するが、それでも透過してくる中性子量は、実験終了までに 10^{21} n/m² に達すると予想されている。放射線による核発熱を抑えるためにアルミ安定化超伝導線を用いる。図 1 は COMET 実験で提案されているアルミ安定化超伝導線の断面図である。

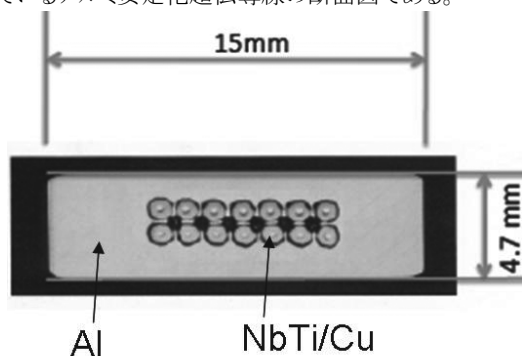


FIGURE 1. Cross section view of the aluminum stabilized superconducting cable designed for the COMET experiment.

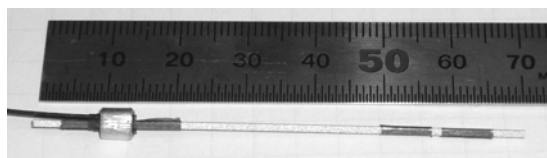


FIGURE 2. The aluminum sample cut from the aluminum stabilized superconductor attached with a voltage sense wire.

3. 照射試料

今回は、5N 純アルミに Mg (40ppm) と Cu (20ppm) を添加して高強度化したアルミ材を用いた超伝導線の試作品からアルミ試料を切り出した (図 2)。冷間加工による歪を保存するため

ワイヤー放電加工によって断面 1x1 mm²、長さ 70 mm に成型し、銅スリーブにてリード線を圧着した。試料の両端には電流導入用リード線を圧着、電圧測定用リード線を 45 mm 間隔で圧着し、4 端子法により電気抵抗を測定した。

4. 結果

中性子源には京都大学原子炉実験所の研究炉 (KUR) を用いた。試料と共に照射した Ni 片の放射化量測定によると、熱出力 1 MW で原子炉を運転したときの高速中性子束は 1.4×10^{15} n/m²/sec であった。試料は KUR に設置された低温照射設備 LTL[2] のクライオスタットに挿入され、冷凍機からのヘリウムガスを循環させることで 1 MW 運転時にはおよそ 12K に冷やされる。低温下での抵抗増加をその場測定した結果、1 MW 運転時、5 MW 運転時ともに、 10^{20} n/m² 当り 1.2 μΩ の抵抗増加を観測した (図 3)。また、1 MW 運転後に室温まで昇温することにより劣化が回復することも確認した。これより、COMET 実験においては多くとも年に数回程度の昇温によって中性子によるアルミ安定化材の劣化は回避できると期待される。

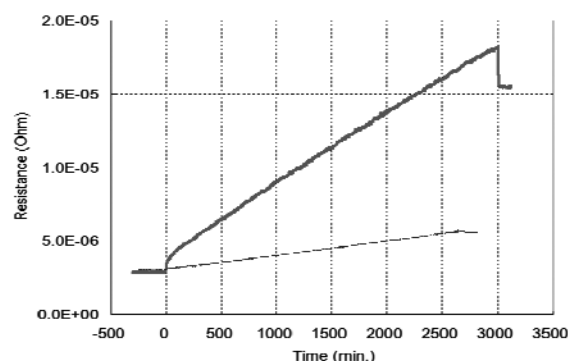


FIGURE 3. Measured resistance changes during neutron exposure by KUR as a function of exposure time. The origin of time is set at the reactor activation. Thick red line indicated the irradiation data with a 5 MW reactor operation (~3000 min.). Fine blue line indicates data with a 1 MW reactor operation (~2700 min.).

5. 謝辞

本研究は、京都大学原子炉実験所の共同利用研究として実施され、原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブにより実施する「京大炉 (KUR) 及びホットラボの利用高度化に関する研究」、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】、強磁場磁石 R&D における CERN-KEK 協力事業、日米協力事業の支援を受けた。

参考文献

- COMET (J-PARC E21) Collaboration, Conceptual Design Report (2009)
- M. Okada et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **463**, pp. 213-219 (2001).

中性子照射による高温超電導体への影響

Effect of Neutron Irradiation on High-Temperature Superconductors

琴寄 拓哉, 神林 佑, 柄澤 彰良, 矢崎 真二郎, 石山 敦士(早稲田大学);
 宮原 信幸(放射線医学総合研究所); 植田 浩史(大阪大学)

KOTOYORI Takuya, KAMBAYASHI Yu, KARASAWA Akira, YAZAKI Shinjiro, ISHIYAMA Atsushi(Waseda University);
 MIRAHARA Nobuyuki (NIRS); UEDA Hiroshi(Osaka University)
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. 概要

我々は高温超電導技術を応用し、医療用重粒子線加速器の小型化、効率化を実現するための基礎研究を行っている。加速器運用中に高温超電導体が放射線環境中で使用される事を想定し、超電導線材への中性子線照射実験を行った。先行研究では放医研大型サイクロトロン(AVF-930)を用い、水冷ベリリウムターゲット上に 30 MeV 重水素を 20 μ A を照射することにより発生した中性子線(77 kGy \times 3回)を Bi-2223 線材と Y 系線材照射し、臨界電流特性に影響がないことを確認した[1]。今回の実験ではさらに多量の中性子線照射(77 kGy \times 7回)による高温超電導線材の臨界電流特性への影響を調べたので報告する。

2. 実験方法

実験では Bi-2223 線材と Y 系線材に中性子線を照射し、その前後で I_c 測定を行った。 I_c の測定は液体窒素中(77 K)で行い、Bi-2223 線材と Y 系線材をそれぞれ一本ずつ、計 2 本のサンプルを測定した。電圧測定端子の配置を Fig. 1 に、使用した線材の諸元を Table 1 に示す。

中性子線照射には先行研究[1]と同様に放医研大型サイクロトロン(AVF-930)を用い中性子線を Bi-2223 線材および YBCO 線材に照射した。Be ターゲット上の d 電流は 20 μ A でターゲットからの距離 10 cm で照射野直径 5 cm である。この位置では、中性子のフラックスが高すぎて直接測定できないので、ターゲットから 2 m 離れた位置での中性子フラックスならびに線量率から推定した。中性子線照射は計 7 回行い、総量は 539 kGy(1.74×10^{15} n/cm²)である。

Table 1 Specification of HTS Samples

	Sample 1	Sample 2
Material	Bi-2223	YBCO
Manufacturer	Sumitomo Electric	American Superconductor
Model number	DI-BSCCO (Type H)	344 Superconductors
Process	CT-OP	RABiTS/MOD
Width	4.4 mm	4.4 mm
Length	90 mm	120 mm
Thickness	0.22 mm	0.22 mm
I_c (@ 77 K)	146.0 A	90.0 A

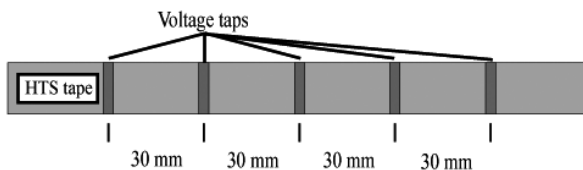


Fig.1 Arrangement of Voltage taps

3. 実験結果

Sample1 の実験結果を図 2, Sample2 の実験結果を図 3, まとめたものを図 4 に示す。図 2,3 では中性子線照射前の I - V 曲線と中性子線 539 kGy 照射後の I - V 曲線を同一のグラフに示してある。Sample1, Sample2 ともに中性子線照射後も目立った I_c の低下は見られなかった。なお、本研究の一部は科研費(基盤研究 A)によったことを付記する。

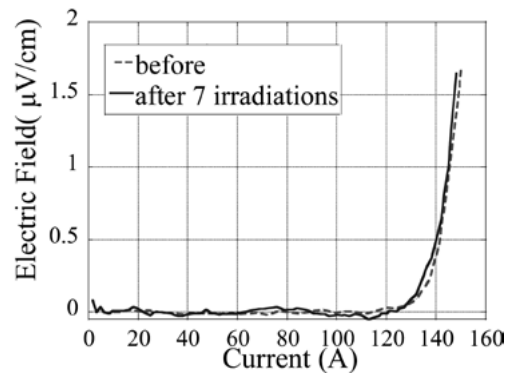


Fig.2 Experimental Result of Sample1

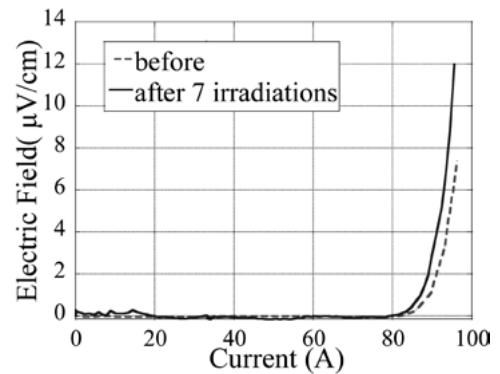


Fig.3 Experimental Result of Sample2

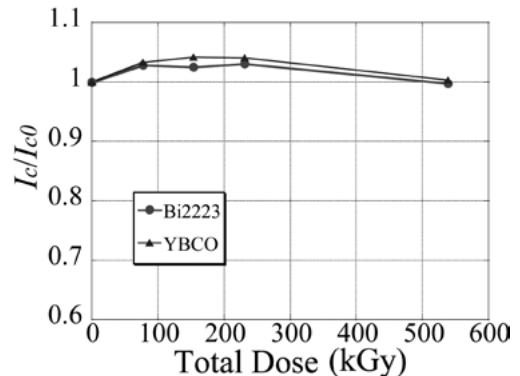


Fig.4 Experimental Results of all Samples

参考文献

1. Y. Kambayashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.166

次世代超電導サイクロトロン設計: 電磁応力評価

Design of Next Generation HTS Cyclotron: Analyses of Electromagnetic Stress

柄澤 彰良, 石山 敦士 (早大); 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治 (阪大); 長屋 重夫, 鹿島 直二 (中部電力); 宮原 信幸 (放医研)

KARASAWA Akira, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi, FUKUDA Mitsuhiko, HATANAKA Kichiji (Osaka Univ.); NAGAYA Shigeo, KASHIMA Naoji (Chubu Electric Power Co.); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS)

E-mail: ak_0323.karasawa@suou.waseda.jp

1. はじめに

筆者らは、小型・高効率・高性能の次世代型重粒子線がん治療用加速器の開発を目指し、YBCO 超電導コイルを用いたサイクロトロンの概念設計を進めている。軽量・コンパクトなシステムを実現するためには、高機械強度のコイルシステムの開発が必要となる。

開発中のサイクロトロン用超電導コイルシステムは、等時性磁場発生用の円形スプリットコイルとAVF発生用のスパイラルセクターコイルから成り、これらのコイルは、等時性磁場とAVFが重畳された複雑な磁場を形成する。そのため、コイルシステムの各要素は、フープ応力に限らず複雑な応力を経験するため詳細な解析を要する。ここでは、基本設計により得られたサイクロトロン用コイルの電磁応力計算を試みたので報告する。

2. AVF 発生のための超電導コイルシステム

重粒子を高いエネルギーまで加速するためには、磁場を等時性に保ちつつ、かつ、周方向に強弱を持つ磁場(AVF)を形成する必要がある。特に、磁場分布をスパイラル状にするとより強い収束効果が得られ、高いエネルギーのビーム出力が可能となる。上記のような磁場分布(Fig.1)を形成するためには、等時性磁場発生用円形スプリットコイル(ここでは3対を想定)および、AVF形成用のスパイラルセクターコイル(4対を想定)を組み合わせた複雑なコイルシステムとなる。Fig.2に、試設計した次世代超電導サイクロトロン用コイルシステムの全景図を示す。このコイルは、放医研 HIMAC と同等の出力(400[MeV/核子], 300[nA])を想定して、以下の条件の下に使用線材の最小化を図ったものである。

- i) YBCO 超電導線材は、幅 10[mm]・厚さ 200[μm]
- ii) 線材の V-I 特性の磁場強度・角度依存性を考慮
- iii) 運転温度は伝導冷却による 20[K]で負荷率は 0.7
- iv) 占積率 0.7(絶縁等を含む)
- v) コイルに加わる引っ張り応力の最大は 600[MPa]
- vi) 複数のスプリットコイルは同一電源により励磁される
- vii) セクターコイルにおける最少曲げ半径は 30[mm]

3. コイル経験磁場

設計したコイルシステムについて、メインコイル 1 およびスパイラルセクターコイルにおける経験磁場分布を例として、それぞれ Fig.3(a)(b)に示す。これらのコイルにおける最大経験磁場はそれぞれ 6.44[T], 8.35[T]である。

4. 電磁応力

三次元有限要素法を用いて電磁応力を計算した。Y 系超電導線材の積層構造は考慮せず、コイル一体を弾性体として解析した。本解析において想定している線材の構造は、基板(Hastelloy): 100[μm]・YBCO 層: 1[μm]・安定化層(Copper): 100[μm]の三層構造である。

コイルシステムの各コイルについての電磁応力の例として、ここでは代表としてメインコイル1、およびスパイラルセクターコイルに働く周方向の電磁応力分布をそれぞれ Fig.4(a)(b)に示す。

超電導特性および電磁応力の視点から、次世代型超電導サイクロトロンの成立性を評価する。

まず、超電導特性については、コイルの経験する磁場より、メインコイル 1 とスパイラルセクターコイルの I_c はそれぞれ 420[A], 369[A]となる。運転電流は I_c 以下であり、通電可能範囲である。

電磁応力の視点では、Y 系超電導線材の機械強度については、超電導特性が劣化しない限界値として引っ張り応力 600[MPa]が得られている。これに比して、メインコイル 1 については線材自身の強度で電磁応力に耐えることができるが、スパイラルセクターコイルについてはフープ応力によるふくらみを抑えるような補強を施す必要があると考えられる。

最後に本研究は、科研費(基盤研究A)により行われたことを付記する。

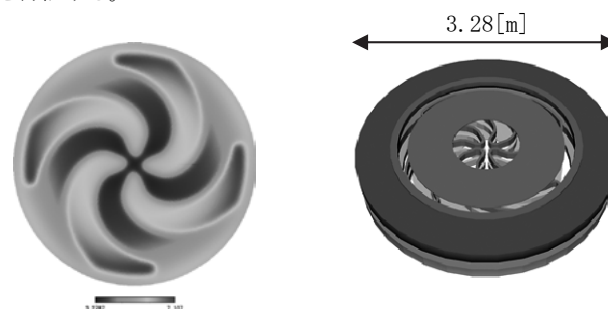


Fig.1 Magnetic Field Distribution on Mid-Plane

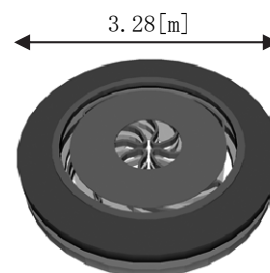


Fig.2 Overview of Coil System

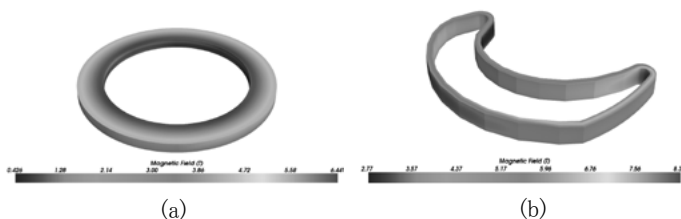


Fig.3 Magnetic Field Distribution of (a) Split Coil (b) Spiral Sector Coil

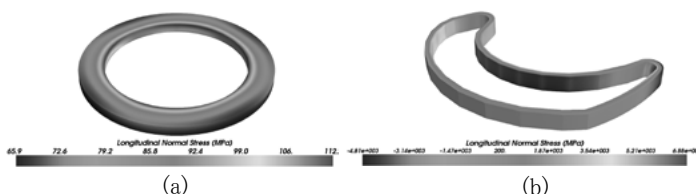


Fig.4 Electromagnetic Stress Distribution of (a) Split Coil (b) Spiral Sector Coil

参考文献

1. 石山他: 「高温超電導技術を活用した先進ハイブリッド・サイクロトロン開発」, 電気学会超電導応用電力機器研究会資料, ASC-11-009 (2011.1).

次世代高温超電導サイクロトロンのための高温超電導コイルの遮へい電流による磁場の空間的・時間的変化 – (2) 計算例 –

Spatial and Temporary Behavior of Magnetic Field Distribution by Shielding Current in HTS Coil for Next Generation HTS Cyclotron application – (2) Calculation Example –

植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治(阪大), 石山 敦士(早大)

UEDA Hiroshi, FUKUDA Mitsuhiro, HATANAKA Kichiji (Osaka Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.)

E-mail: hueda@rcnp.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、高温超電導技術を活用した小型・高効率・高性能の次世代超電導サイクロトロンを開発・実現を目指している[1]。サイクロトロン用高温超電導コイルにおいては、空間的・時間的に高精度な磁場が3次元的に分布することが要求される。高温超電導コイルでこのような高精度磁場を実現する際の問題として、遮へい電流により誘導される磁場がある。Y系超電導コイルでは、Y系超電導線材のテープ面がコイルの発生中心磁場方向と平行になるように巻かれるため、コイルの上下端部ではテープ面を貫く磁場が大きく、遮へい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設計磁場に影響を及ぼし、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。本報告では、新たに開発した数値解析手法[3]を用いて、Y系超電導線材に流れる誘導電流が発生させる磁界の空間的かつ時間的変化の計算例を示す。

2. 次世代高温超電導サイクロトロン

重粒子を高いエネルギーまで加速するためには、磁場を等時性に保ちつつ、かつ、周方向に勾配を持つ磁場(AVF)を形成する必要がある。特に、磁場分布をスパイラル状にするとより強い収束効果が得られ、高いエネルギーのビーム出力が可能となる。上記のような磁場分布を形成するためには、等時性磁場発生用円形スプリットコイル(3対)および、AVF形成用のスパイラルセクターコイル(4対)を組み合わせた複雑なコイルシステムを要す。Fig.1に、試設計した次世代超電導サイクロトロン用コイルシステムの全景図およびFig.2にメインコイルの断面図を示す。このコイルは、放医研HIMACと同等の出力(400 MeV/核子, 300 nA)を想定して、使用線材の最小化を図って設計したものである[2]。

3. 解析例

線材はYBCO線材で幅1 cm, 超電導層1 μm , ハステロイ100 μm , 安定化層(銅層)100 μm とする。従って、巻線内で線材は200 μm 離れていることになる。超電導特性は n 値モデルで表わされる E - J 特性により表現し、 $I_C = 540\text{A}$, $n = 30$ とした(運転温度20 Kを想定)。コイルは上述した設計したサイクロトロン用メインコイル(Fig.2参照)の1/4モデルとした。ここで解析対象にしたのは、最も外側にありVolumeも大きいコイルである。コイル内径は0.5 m, 外径0.6 m, 高さ0.05 m, 巻数200である。通電電流は300 Aとした。計算結果(中心磁場)をFig.3に示す。励磁直後の発生磁場は所望の磁場の約98%になっている。その後、時間経過に伴い、所望の磁場に近づいていく。

4. おわりに

Y系超電導コイルについて線材に流れる誘導電流が発生させる磁界の時間的変化の計算例を示した。我々が用いた数値計算手法[3]は3次元電磁界解析でも適用可能である。今後は、我々が提案している次世代超電導サイクロトロン用コイル(メインコイルおよびスパイラルセクターコイル)の誘導電

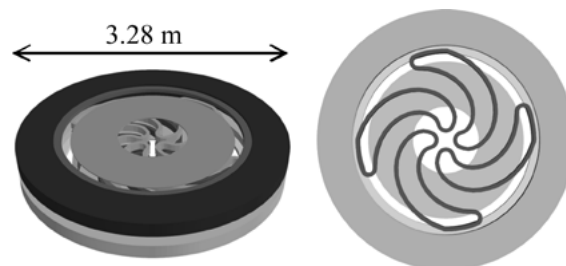


Fig. 1. Schematic drawing of superconducting coils for next generation cyclotron.

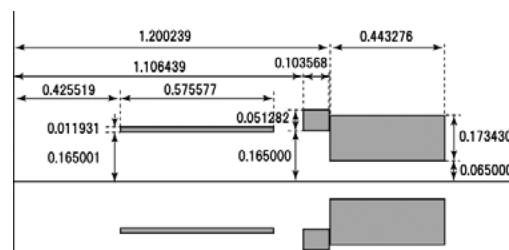


Fig. 2. Cross-sectional view of main coil for next generation cyclotron.

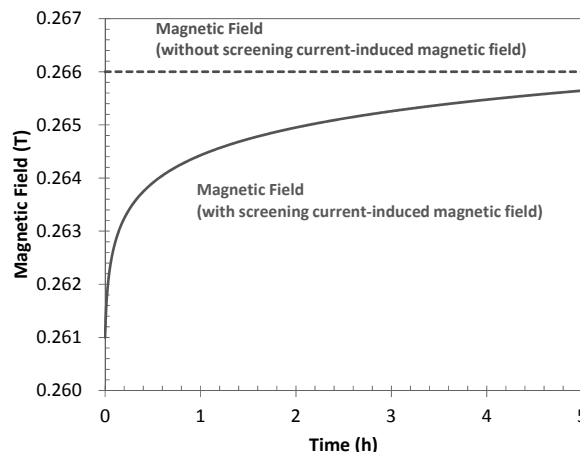


Fig. 3. Magnetic field drift at center of coil with time.

流の影響、さらに冷却時、励磁時のコイル変形による磁場精度について調べていく予定である。

なお、本研究の一部は科研費(若手研究B)によったことを付記する。

参考文献

1. A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.134
2. A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.135
3. H. Ueda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) 1B-p02

薄膜線材のテープ形状を考慮したコイル支配型 FFAG 加速器マグネットの 3 次元磁場設計

Three dimensional magnetic field design of coil-dominated magnet for FFAG accelerator
considering flat tape shape of coated conductors

高橋 慶多, 雨宮 尚之, 中村 武恒, 森 義治(京大); 荻津 透(KEK);
吉本 政弘(原子力機構); 渡辺 郁男, 長内 昭宏, 吉行 健(東芝)

TAKAHASHI Keita, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune, MORI Yoshiharu (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK);
YOSHIMOTO Masahiro (JAEA); WATANABE Ikuo, OSANAI Akihiro, YOSHIYUKI Takeshi (Toshiba)

E-mail: amemiya@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

薄膜線材のテープ形状を考慮し, コイル支配型 FFAG 加速器マグネットの磁場設計を行った。コイル支配型マグネットとは, 導体配置を精密に設計することにより, 加速器マグネットに要求される精密な磁場を発生するマグネットである[1]。

FFAG 加速器は磁場が時間的に一定であるため直流マグネットにより構成でき, かつ強集束性を併せ持った加速器である[2]。FFAG 加速器では, Fig. 1 に示す様に, ビームの加速と共にビーム軌道の半径は大きくなるが, ビーム軌道径方向に非線形に増大する磁場を利用して, 軌道の変位はサイクロトロンほど大きくはない。

2. FFAG 加速器用マグネットの磁場設計

今回 FDF triplet 型ラジアルセクタ型 FFAG 加速器用マグネットの磁場設計を行った。k 値は 4, セル数は 8, ビーム軌道半径は 3.63 m から 5.09 m である。設計マグネットの概要を Table 1 に示す。線材幅 5 mm, 厚さ 0.2 mm の薄膜線材を 10 本束ねて巻線することを想定し, 線材断面に対する電流密度は 500 A/mm^2 まで許容すると仮定した。加速器中心を中心とする円に沿って磁場を積分した積分磁場が加速器設計の要求を満たすように導体配置の最適化を行った。

マグネット開口部の巻線部では Frenet-Serret の式を用いて線材の edge-wise 曲げ歪, flat-wise 曲げ半径を計算した[1]。ここで, 0.3%以下の edge-wise 曲げ歪, 20 mm 以上の flat-wise 曲げ半径は許容すると仮定した。Fig. 2 (a) に設計した集束マグネットの鳥瞰図, Fig. 2 (b) に集束マグネット最内層の上面図を示す。最大 edge-wise 曲げ歪は 0.275%で, 最小 flat-wise 曲げ半径は 50.3 mm であった。

3. まとめ

薄膜線材の edge-wise 曲げ歪, flat-wise 曲げ半径を設定した許容範囲に抑え, ラジアルセクタ型 FFAG 加速器用マグネットの 3 次元磁場設計を行った。今後は使用線材量及び磁場強度を低減するため, スパイラルセクタ型 FFAG 加速器用マグネットの設計を目指す。

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. S. Russenschuck: "Field computation for accelerator magnets," Weinheim: WILEY-VCH, (2010) pp. 293-326, pp. 609-636.
2. K. R. Symon, et al.: "Fixed-Field Alternating-Gradient Particle Accelerators," Phys. Rev., vol. 103, no. 6, (1956) pp. 1837-1859.

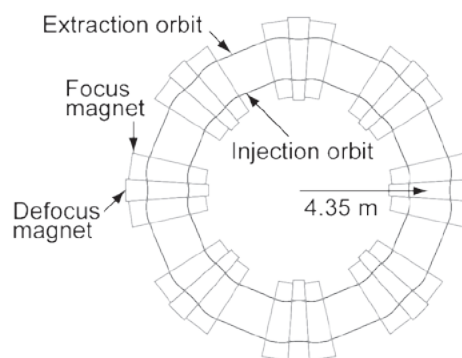


Fig. 1 Arrangement of magnets and beam orbit of designed radial sector FFAG accelerator

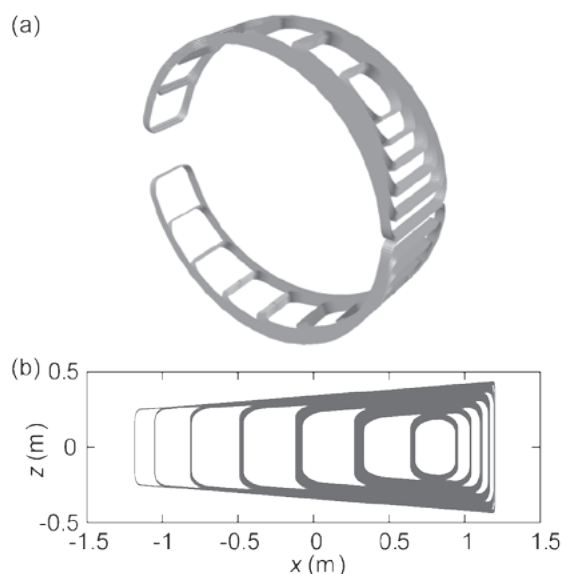


Fig. 2 (a) Bird's-eye view of designed focus magnet (b) Top view of inner-most layer of designed focus magnet

TABLE 1 OUTLINES OF THREE-DIMENSIONAL MAGNET DESIGNS

Type of magnet	F magnet	D magnet
Distance between magnet center and accelerator center	4.35 m	4.35 m
Radius of beam pipe	1.2 m	1.3 m
Inner radius of iron yoke	1.4 m	1.5 m
Good field region	$\pm 0.77 \text{ m}$	$\pm 0.77 \text{ m}$
Operation current per tape	461 A	465 A
Integrated field at $r=4.35 \text{ m}$	1.64 T·m	1.06 T·m
Number of turns	2158×10	2066×10
Number of layers	10	10

Warm bore anti-cryostat to investigate temperature profile of the SuperKEKB IR magnet coil bobbin

宗 占国, 大内 徳人, 土屋 清澄, 東 憲男, 岩崎 昌子, 山岡広, 多和田 正文(KEK)

ZONG Zhanguo, OHUCHI Norihito, TSUCHIYA Kiyosumi, HIGASHI Norio, IWASAKI Masako, YAMAOKA Hiroshi, TAWADA Masafumi (KEK)

E-mail: zhanguo.zong@kek.jp

1. Abstract

In the proposed SuperKEKB interaction region (IR), the superconducting (SC) quadrupole magnet system is designed with a small coil inner radius. The vacuum gap for the thermal insulation between the cold coil bobbin and warm beam pipe is just about 3.5 mm and the thermal radiation will increase the coil temperature. This paper will introduce a warm bore anti-cryostat for investigating the temperature profile of the coil bobbin and the preliminary results and analysis.

2. Introduction

The SuperKEKB is proposed as the upgrade project of KEKB, with the 40 times higher target luminosity. In the interaction region, the final focus system for each beam consists of the superconducting quadrupole, compensation solenoid and correction magnets. The quadrupole and correction magnets are located between two beams and are required to be as close to the interaction point (IP) as possible, with strong space constraint. The superconducting wire will be placed on the bobbin with a small inner radius, against which in the cryostat the beam pipe will be kept at room temperature. The distance between the warm beam pipe and the coil bobbin is only about 3.5 mm, as shown in Fig. 1 of QC1RP half cross section [1]. The thermal radiation from the warm tube will increase the coil temperature and limit the superconductor operation. This R&D is dedicated to investigating the influence of the thermal radiation on the superconductor. A vertical cryostat prototype with warm bore was designed and fabricated. Several multi-insulation layers were applied in the evacuated narrow gap of 3.5 mm between 300 K and LHe temperature and cryogenic experiments were carried out. In this paper, the configuration of the cryostat prototype will be introduced and the preliminary results will be presented.

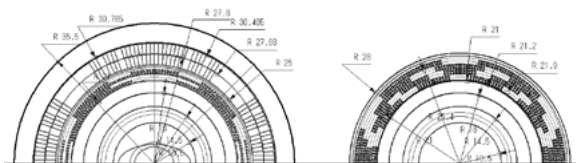


Fig.1 Cross section (half) of QC1RP SC quadrupole for positron beam and correction coils for electron beam.

3. Configuration of the anti-cryostat

A quarter of the warm bore cross section of the vertical anti-cryostat is shown in Fig. 2, in which the LHe and vacuum vessels of other side are schematically sketched. The inner tube is kept at room temperature by blowing the gaseous nitrogen of 300 K. Several multi-insulation layers can be applied in the vacuum gap of 3.5 mm to reduce the thermal radiation. The helium vessel inner tube is covered by a G10 cylinder and attached by three precious Cernox temperature sensors. The liquid helium (LHe) temperature is also measured by an immersed Cernox sensor. To reduce the heat leak to the

LHe from outer side, the vessel over vacuum chamber also accommodates LHe to keep the same temperature.

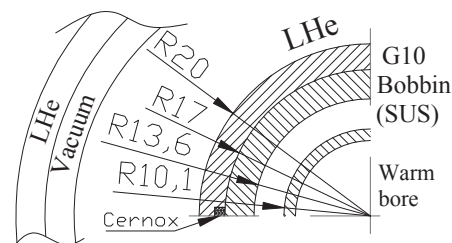


Fig.2 Quarter of the warm bore cross section of the anti-cryostat with a schematic sketch of other side.

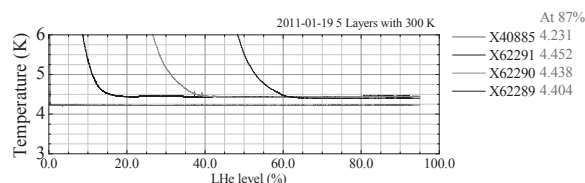


Fig.3 Temperatures evolution of the Cernox sensors with the LHe level.

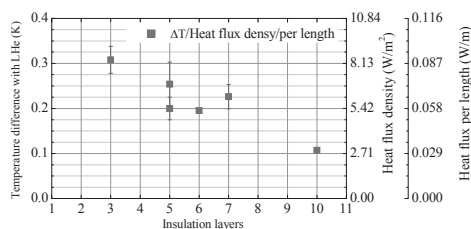


Fig.4 Measured temperature differences with insulation layers and corresponding the heat flux density and per length.

4. Experiment results and analysis

The measured Cernox temperature evolution with the LHe level is shown in Fig. 3. By comparison with the LHe temperature (Cernox X40885), the temperature differences can be concluded. Due to the narrow gap and the assembling accuracy, the insulation layers may touch the LHe tube, which will cause the thermal short circuit and can be reflected by the standard deviations of the three Cernox sensors. Fig. 4 summarizes the results with small deviations (<0.03 K, shown by the error bar in the figure). The heat flux density (W/m^2 , on the R17 surface) or per length (W/m) due to the thermal radiation is calculated according to the heat conduction over the G10 wall.

5. Conclusion

A warm bore anti-cryostat was designed and fabricated for the investigation. With more than 3 layers of thermal insulation, the temperature difference is less than 0.4 K and correspondingly the heat flux density by thermal radiation is less than $10 \text{ W}/\text{m}^2$.

6. Reference

1. N. Ohuchi, et al., in Proc. CSJ2011s, Paper 1D-P04.

2T 級無冷媒型超伝導磁石の設計・製作

Trial manufacture of 2T class superconducting magnet

沼島 辰明, 富岡 孝裕, 重松 利信 (佐世保高専); 佐藤 誠樹, 河江 達也 (九大工)

NSHIMA.Tatuaki, TOMIOKA.Takahiro, SHIGEMATU.Toshinobu (Sasebo National College of Technology),

SATO Seiki, KAWAE Tatsuya (Kyushu Univ.)

E-mail : shige@post.cc.sasebo.ac.jp

1. はじめに

当研究室では機能性脂質を生産する微生物に対する磁場印加効果を調べている。これまでの研究で低磁場(~0.5T)では磁場が脂質生産に大きくかわり、高磁場 (4T, 6T) ではほとんど磁場に依存しない結果を得ている^[1]。磁場の印加は飽和酸素濃度の増加にもつながり、磁場の強さと脂質生産量の増加分とは比例関係になると予測できるが、その予測と大きく食い違う結果となっている。この違いを明らかにするためには、2T 程度までの系統的な磁場印加実験が非常に有効である。そこで、当研究室内で培養中の磁場印加実験が行えるように、微生物実験に適した 2T 級の電磁石の製作を計画した。

電磁石は超伝導磁石を製作し、その冷却にはGM冷凍機 (IWATANI; HE05) を用いる。本冷凍機に関しては、一般に無冷媒型超伝導磁石に用いられている冷凍機の冷凍能力に比較して、小さ目であるため、十分な熱シールド対策や寒冷の伝達方法など数々の工夫を行う必要があると考えている。

本稿では現在製作が完了した超伝導磁石部分の詳細について示す。

2. 無冷媒型超伝導磁石の設計・製作

2-1 コイルの設計

設計する電磁石は、微生物への磁場印加効果を調べることに特化した装置である。そこで微生物培養実験として以下の3点の要請があった。

- ① 実験空間内の磁場均一度が 10% 以下であること
- ② 実験空間は磁場方向、動径方向ともに 100[mm] 以上の空間が確保できること
- ③ 最大磁場が 2[T] 程度まで安定して発生できること

これらの条件を満足するソレノイドコイルを設計したところ、コイル長 300mm, コイル径 150mm となった。このままの設計では、Quench の発生を抑えることが出来ない可能性が高い。そこで、円筒コイルを 2 つ製作し、それらを連結させる方法を採用することにした。以下の Table.1 に設計したコイルの諸諸元表を示す。

Table 1. Outline design of superconducting Magnet

超伝導線材	JASTEC 社製 NbTi(K55 / 1.3 / 50)
設計電流	50A (2T)

コイル	ボビン	アルミ材
	内径	150 mm
	長さ	110 mm
	巻数	5300 巻
	コイル間距離	30mm

2-2 製作

製作には専用の巻き線機が必要である。そこで、高エネルギー加速器研究機構の細山先生にお願いし、巻き線機を使用させて頂き、製作した。製作した超伝導磁石の長さは 280mm (上下フランジ含)、ボビン内径 141 mm であり、室温のサンプル挿入空間は $\phi 110$ である。

3. 性能実験

コイルの性能評価は液体ヘリウムに浸漬した状態での印加電流と発生磁場の関係を調べた。Fig.1 に 50A 印加時の発生磁場の空間分布を示す。設計通りの分布となっている。

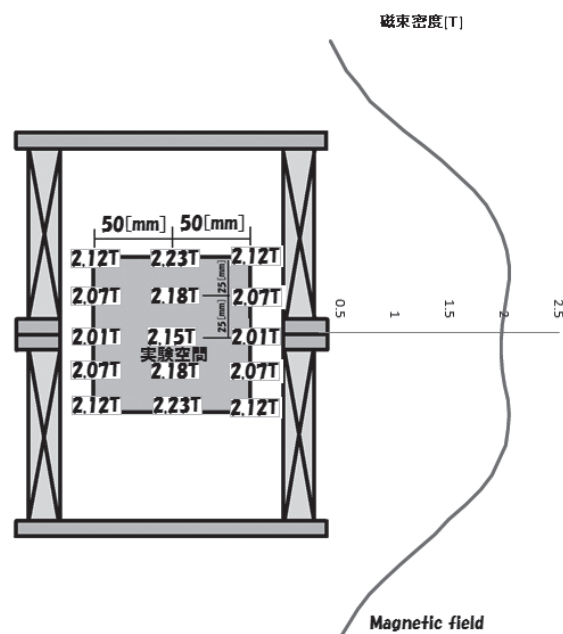


Fig.2 Field profile at 50[A]

参考文献

1. T.Shigematsu et al.: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平成 21 年度年次報告書 (2009) 175

活性炭へのヘリウム吸着量測定

Measurement of Helium Adsorption on Charcoal under Cryogenic Conditions

岡田 竜太郎, 岡村 崇弘, 大島 洋克(KEK), 高田 卓(筑波大), 都丸 隆行, 木村 誠宏, 羽澄 昌史,

荻津 透, 山本 明(KEK), 中西 努, 後藤 修一(ジェック東理社)

OKADA Ryutarō, OKAMURA Takahiro, OHHATA Hirokatsu (KEK), TAKADA Suguru (Tsukuba Univ),

TOMARU Takayuki, KIMURA Nobuhiro, HAZUMI Masashi, OGITSU Toru, YAMAMOTO Akira (KEK),

NAKANISHI Tsutomu, GOTO Syuichi (JECC Torisha Co. Ltd.)

E-mail: ryutarō.okada@kek.jp

1. 緒言

現在, 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 実験を始めとする高エネルギー・宇宙物理学実験分野において, 1K 以下で性能を発揮する検出素子の冷却に必要なヒートスイッチ並びにソーブション冷凍機等の超低温機器の開発・製作技術の確立が求められている. ソーブション冷凍機はヘリウムガスの活性炭への吸着現象を利用することで 250 mK 程度を実現できるものであり, ヘリウムを用いたガスギャップヒートスイッチも同様の吸着現象を利用した熱スイッチである. こうした機器の R&D を進めるにあたり, ヘリウムガスの活性炭への吸着特性を把握しておくことは必要不可欠である. そこで我々はまず定容式吸着量測定装置を製作し, 活性炭に対するヘリウム吸着量を 4.2 K ならびに 77 K で測定した. 本報では吸着実験装置ならびに吸着量測定結果に関して報告する.

2. 吸着測定装置並びに測定原理

Fig.1 に本実験で用いた定容積型吸着測定装置の構成を示す. 試験装置は活性炭ポット ($v_2 = 84.5 \text{ cm}^3$) とバッファ ($v_1 = 279 \text{ cm}^3$) から構成されており, 両者はバルブ (V1) を介して 1/4 インチ SUS 配管で連結されている. 活性炭ポットはクライオスタット内に収められ, 液体ヘリウムもしくは液体窒素により一定温度になるよう浸漬冷却される. ヘリウムガスはバルブ (V2) を開けることによりボンベからバッファタンクに充填され, さらに V1 を開けることで活性炭ポットへ供給される. 本試験装置を用いた吸着量測定原理を以下に記す. 一般に吸着量 M は以下のように温度 T , 吸着質平衡圧力 p_{eq} , 吸着相互作用ポテンシャル E の関数で記述される [1].

$$M = f(T, p_{eq}, E), \quad E = E(T) \quad (1)$$

本実験では, $T = \text{const}$, ($E = \text{const}$) 下における吸着量に着目することで吸着量 M と吸着平衡圧力 p_{eq} の関係

$$M = f(p_{eq})_{T,E} \quad (2)$$

を明らかにする. (2) は吸着等温式と呼ばれており吸着特性を明らかにする上で重要な指標となる. 以下に吸着等温線を得るための手順を示す. (step0): V1, V3 を open し, 活性炭ポット並びにバッファを真空引きする. (step1-a): V1, V3 を close, V2 を open することで, バッファに圧力 $p_B^{(1)}$ を加えた後 V2 を close する. (step1-b): V1 を open し, 活性炭にヘリウムを吸着させる. 圧力ゲージ (P1, P2) の値 $p_{eq}^{(1)}$ が一定 (平衡状態になったら) V1 を close する. このとき標準状態における吸着量 $M^{(1)} \text{ cm}^3(\text{STP})$ は以下の式から算出される.

$$M^{(1)} = \frac{22414}{R} \left(\frac{p_B^{(1)} v_1}{T_1} - \frac{p_{eq}^{(1)} v_1}{T_1} - \frac{p_{eq}^{(1)} v_2'}{T_2} \right) \quad (3)$$

ここで v_2' は活性炭ポットの体積 v_2 から活性炭体積を引いた体積である. 以上の操作を n 回繰り返すことで n プロットからなる吸着等温線が得られる. (3) を一般化することで n

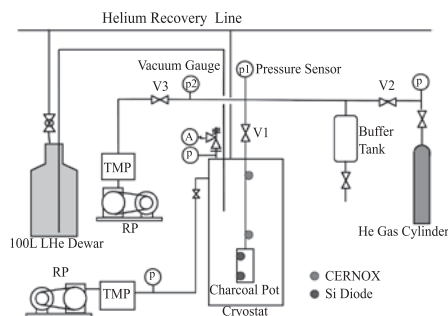


Fig. 1 Helium adsorption measurement system

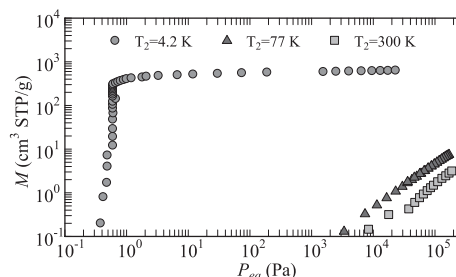


Fig. 2 Adsorption isotherm at 4.2 K, 77 K, 300 K.

ステップ目における吸着総量 $M \text{ cm}^3(\text{STP})$ は以下式から求められる.

$$M = M^{(1)} + \frac{22414}{R} \sum_{j=2}^n \left(\frac{p_B^{(j)} v_1}{T_1} + \frac{p_{eq}^{(j-1)} v_2'}{T_2} - \frac{p_{eq}^{(j)} v_1}{T_1} - \frac{p_{eq}^{(j)} v_2'}{T_2} \right) \quad (4)$$

T_1, T_2 はバッファ温度 (室温), 活性炭ポット温度を意味する. また本実験ではクラレコール粒状活性炭を用い, これを活性炭ポットに充填した後, 真空引きしながら約 12 時間 400 K でベーキングを行った.

3. 結果と考察

Fig.2 に $T_2 = 300 \text{ K}, 77 \text{ K}, 4.2 \text{ K}$ における吸着等温線を示す. 縦軸は活性炭 1g あたりの吸着量, 横軸は吸着平衡圧力 p_{eq} である. $T_2 = 300 \text{ K}, 77 \text{ K}$ の場合, 吸着量は吸着平衡圧力と比例関係にあり, 吸着剤 (活性炭) と吸着質 (ヘリウム) 間の相互作用が比較的弱い系において成立する Henry 型の吸着等温線となる. 一方で $T_2 = 4.2 \text{ K}$ の場合は Henry 型とはならず, 低圧部分 $p_{eq} \sim 10^{-1} \text{ Pa}$ で吸着量の増大が著しい一方で, p_{eq} が凡そ 1 以上で勾配 (dM/dp_{eq}) はなだらかとなる傾向にある. これは勾配の大きな部分では細孔内への吸着が起き, なだらかな部分では細孔への吸着が飽和したことにより活性炭表面への吸着が進行していることを示している. これは微小細孔 (マイクロ孔) を有するゼオライトなどの吸着剤で見られる吸着等温線と同タイプとなる.

参考文献

1. 近藤他: “吸着の科学” 第 2 版 (丸善).

蓄冷材の同軸配置による GM 冷凍機の冷凍性能 Cooling performance of a GM cryocooler by co-axial layout of regenerator materials

増山 新二, 松井 康平, 田村 昂大(大島商船高専); 沼澤 健則(NIMS)

MASUYAMA Shinji, MATSUI Kohei, TAMURA Kota (Oshima National College); NUMAZAWA Takenori (NIMS)

E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

前報において、蓄冷器内に HoCu_2 と $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ (以下、GOS とする) の二種類の材料を同軸配置構造とすることで、同軸部が等価的にこれら両方の比熱特性を有した蓄冷材として働くことを実験的に実証した[1]。これは、ヘリウムガスが同軸部を二分して流れることに起因するものであり、一般的な層構造では実現しない。

今回は、同軸配置のさらなる可能性を調査するため、中心部に充填される GOS の球径を変えることによる冷凍性能の影響を調べた。また、ベークライト棒を入れた実験も行った。以下に、実験方法、冷凍性能試験結果を述べる。

2. 同軸配置の概略

蓄冷材の同軸配置(co-axial layout)構造の概略図を図 1 に示す。GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器(内径:15mm Φ , 長さ:100mm)の高温側に Pb を一層充填し、同軸部である低温側の外側に HoCu_2 、内側に GOS が充填された構造である。同軸部の体積比は、 HoCu_2 :GOS=30:20 である。同軸部を仕切るために、内径 9mm Φ , 長さ 50mm, 肉厚 0.5mm のステンレス管を使用し、その管内に GOS が充填されている。また、各蓄冷材を分離・固定する目的でフェルトを使用している。なお図 1 中には、ステンレス管、フェルトは省略してある。

冷却試験の結果を受けて、GOS 部分(仕切用ステンレス部分も含む)をベークライト棒(外径 10mm Φ , 長さ 50mm)に置き換えた構造による実験も行った。

3. 実験方法・結果

2 段 GM 冷凍機(SHI:SRDK-101D, 電気入力:1.3kW@60Hz)を使用し、冷凍性能評価を行った。なお動作周波数は 1.2Hz である。実験した蓄冷器タイプと充填した蓄冷材重量を表 1 に示す。ここで、Layer 1, 2 は一般的な三層構造、Co-axial 1, 2 は同軸構造、Bakelite はベークライト棒入り構造を示す。球径は、Pb, HoCu_2 が 0.2mm 一定であり、GOS は 0.25 と 0.1mm の二種類を試験した。

図 2 に 5 つの蓄冷器タイプにおける冷凍能力試験結果を、図 3 に 4.2K での冷凍能力比較を示す。Layer 構造では、6K 以上において冷凍能力の傾きが急激に減少している。これは、GOS の比熱が小さくなる温度領域に一致している。GOS の球径による影響は、0.25mm が 4.2K において有効であることが分かり、0.1mm では全温度領域において冷凍能力が小さい。これは圧力損失が影響していると考えられる。

一方、Co-axial 構造においては、GOS の比熱特性による傾きの減少は見られず、10K 以上においては、三層構造より 1.7-2.0 倍の冷凍能力を示しており、同軸構造の効果がよく表れている。さらに注目すべきは、7K 以上の温度領域において、0.1mm の方が 0.25mm より大きな能力を発揮していることである。0.1mm 球のような微粒子を充填すると、流路抵抗の増加により冷凍能力が低下することを予測していたが、意に反した結果となった。これは、外側の HoCu_2 部のヘリウム流量が増加したことが要因と考えられる。

そこで、中心部のヘリウム流をベークライト棒を使って止めてしまう Bakelite 構造を試みた。その結果、4.2K での能力は小さくなったが、7K 以上の温度領域においては、最も大きな能力を示すという興味ある結果が得られた。

4. まとめ

同軸構造の可能性を調査するため、GOS の粒径を変えて冷凍性能を評価した。同軸構造とすることで、0.1mm という微粒子を使用しても十分な性能を発揮できることが証明された。また Bakelite 構造においては、さらなる検討を続ける。

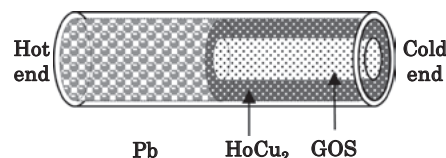


Fig.1. Co-axial layout of regenerator materials

Table1. Regenerator type and filling volume ratio

Regenerator type	Filling volume ratio [%]			
	Pb (0.2)	HoCu_2 (0.2)	$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ (0.25)	$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ (0.1)
Layer 1	50	30	20	—
Layer 2	50	30	—	20
Co-axial 1	50	30	20	—
Co-axial 2	50	30	—	20
Bakelite	50	30	—	—

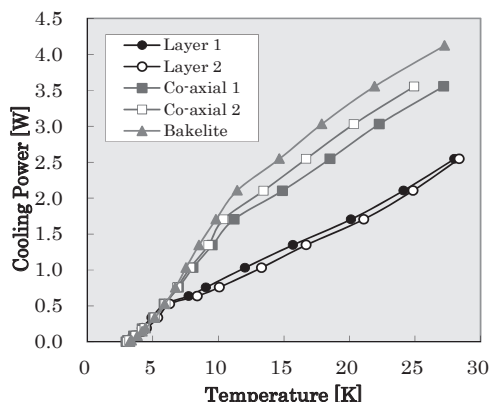


Fig.2. Cooling power results

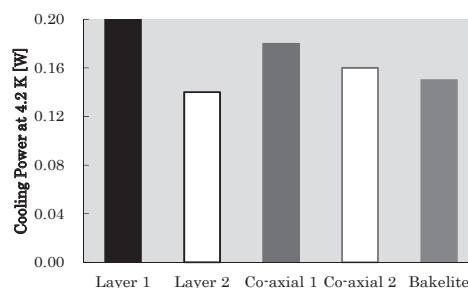


Fig.3. Cooling power comparison at 4.2 K

参考文献

1. S. Masuyama, K. Tamura and T. Numazawa: Abstracts of CSJ Conference Vol.84 (2011) p.129

4バルブ型1段パルスチューブ冷凍機の鉛蓄冷材の効果

Effect of lead regenerator material of a 4-valve type single stage pulse tube cryocooler

滝口 雄太, 丸岡 剛, 増山新二(大島商船高専)

TAKIGUCHI Yuta, MARUOKA Tsuyoshi, MASUYAMA Shinji

E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

本研究は、液体水素や高温超電導システムなどに適応可能な、20K 高効率 1 段パルスチューブ冷凍機の開発[1]が目的である。今回、新たに 4 バルブ型 1 段パルスチューブ冷凍機を製作し、性能評価を行った。蓄冷材として、ステンレス(SUS)メッシュを用いた 1 層蓄冷材、SUS メッシュと鉛(Pb)球の 2 層蓄冷材において冷却試験を行い、低温端での Pb 蓄冷材の効果を検査した。以下に、パルスチューブ冷凍機の概要、冷却試験結果について述べる。

2. 4バルブ型1段パルスチューブ冷凍機の概要

Fig. 1 に本研究で製作した 4バルブ型 1 段パルスチューブ冷凍機の概略図を示す。冷凍機は U 字構造とし、4 個のソレノイドバルブ(CKD; 流体制御バルブ)、2 個のニードルバルブ(Swagelok; SS-4L)から構成される。また、パルスチューブ高温端は水冷している。蓄冷器は、長さ 160mm、内径 52mmφ であり、蓄冷材として、SUS#200 メッシュ、Pb(0.2mmφ)球を準備した。パルスチューブと蓄冷器の両端には、銅メッシュを適量積層するとともに、ヘリウムガスの流れを整える整流器が挿入されている。また、概略図では省略されているが、室温部での圧力測定も行っている。

ヘリウムの初期充填圧力を 1.6MPa とし、動作周波数は 2Hz とした。圧縮機は C-300G(SUZUKISHOKAN)を使用し、その電気入力は 7.3kW@60Hz である。

3. 実験方法・結果

冷却試験は、ソレノイドバルブの開閉タイミング、ならびにニードルバルブの開度は、すべて一定として行った。

Fig. 2 は、SUS#200 メッシュを充填した 1 層蓄冷材の冷却特性を示す。縦軸は温度、横軸は冷却時間である。室温から冷却後、約 35 分で 30K レベルに到達し、最低到達温度は 113 分で 31.6K を達成している。ただし、多少の温度不安定性も観測されている。なお、以下に示す Pb を組み合わせた場合でも同様な冷却過程を示した。

Fig. 3 は SUS#200 メッシュ(高温側)と Pb 球(低温側)を組み合わせた 2 層蓄冷材での到達温度を示す。縦軸は到達温度、横軸は SUS と Pb の割合を示している。Pb の量を 0% から増加すると到達温度は低下し、SUS:Pb=70:30 の時、16.9K の最低到達温度を達成した。Pb:40%では、到達温度が少し上昇している。以上のことから、到達温度を下げるためには、Pb は非常に有効な材料であり、また、その分量も重要なパラメータとなることが理解できる。

4. まとめ

高効率 20K 冷凍機の開発を目指して、4バルブ型 1 段パルスチューブ冷凍機を構築し、冷却試験を行った。実験結果から、Pb 蓄冷材の有効性が十分に確認できた。また、最低到達温度として 16.9K が得られており、目的達成の第一段階として、よいスタートが切れた。

今後は、冷却過程で見られた温度不安定性を改善するとともに、磁性体蓄冷材の使用を視野に入れ、研究を進める予定である。

参考文献

- [1] S. MASUYAMA, Y. TAKIGUCHI, et al; Abstracts of CSJ Conference Vol. 83 (2010) p.54

謝辞

本研究は、NIFS 一般共同研究 NIFS11KECA007「無冷媒冷却システムを目指した高効率冷凍機の開発」の一環として実施している。ここに感謝する。

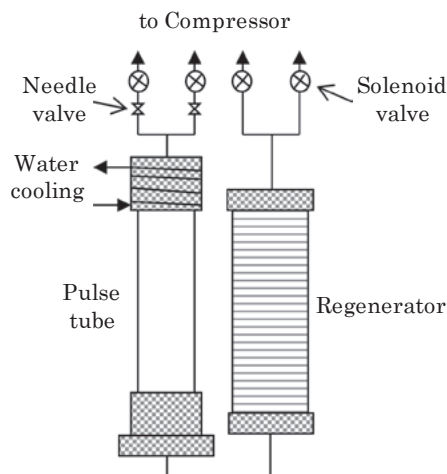


Fig. 1 A schematic of the 4-valve type single stage pulse tube cryocooler

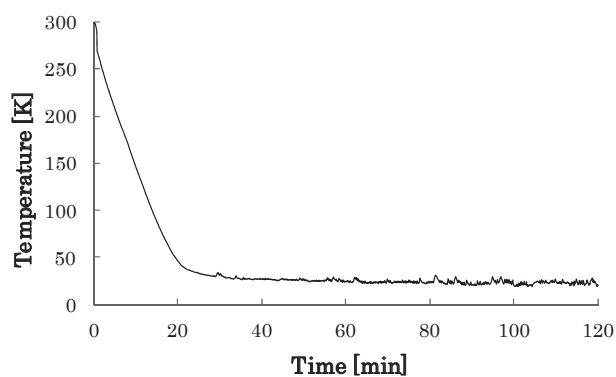


Fig. 2 A result of cooling characteristic

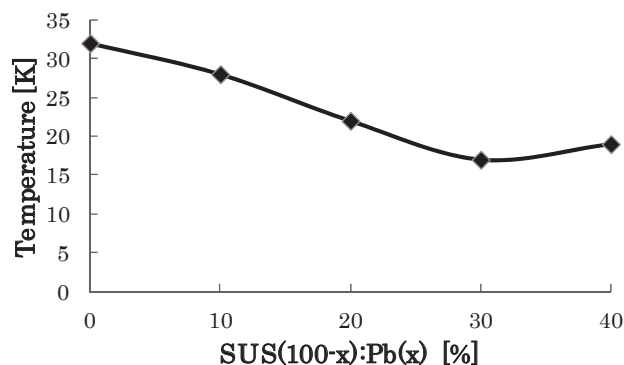


Fig. 3 Achievable lowest temperature and filling ratio of regenerator materials

MEG 用ヘリウム循環装置の自動制御

Development of an automatic control system of the Helium Circulation System for MEGs

岡本 雅美(東大, 新領域技術研); 武田 常広(東大)

OKAMOTO Masayoshi (Univ. of Tokyo, FTI); TAKEDA Tsunehiro (Univ. of Tokyo)

E-mail: okamoto@brain.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

MEG(脳磁場)計測では、SQUID センサを超伝導に保つため液体ヘリウムを必要としている。年間数千リットルにもなる多量の液体ヘリウムの使用が脳磁計の維持費を押し上げていたが、ヘリウム循環装置(HCS)により液体ヘリウムの消費量を大幅に削減できるようになった[1]。従来、HCS の運転操作は動作モードの変更を手動で行っていた。今回、動作モードを自動で遷移させる制御システムを開発したので報告する。

2. ヘリウム循環装置の概要

Fig.1 に HCS の概要図を示す。デュウで蒸発したヘリウムガスは冷えた状態でトランスファーチューブを経由し凝縮器に吸い込まれ液化される。液化されたヘリウムは重力によりデュウへ流れ落ちる。また、熱シールドとして GM 冷凍機の 1st ステージで約 40K に冷却されたガスをトランスファーチューブ経由でデュウ上部に循環ポンプを用いて流す。

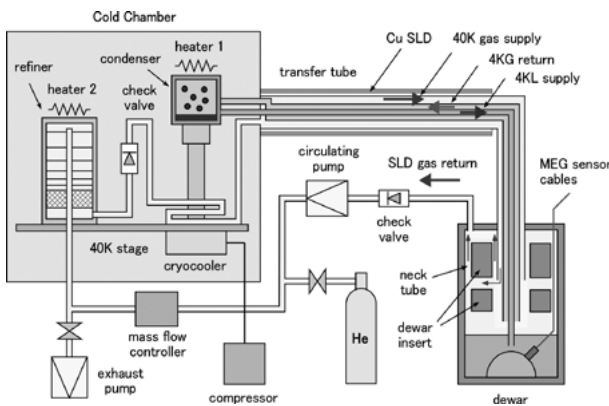


Fig.1 Helium circulation system

3. 動作モード

制御ソフトウェアの開発を容易にするため、HCS の運転に必要な動作モードを次のように分類した。

- ◆停止(standby) 冷凍機が停止した状態にする。起動前、および、停止操作後はこの状態となる。
- ◆清浄化(clean out) 精製器とその配管内のガスを排気する。
- ◆冷却(cool down) ヘリウム循環装置を液化運転が可能な状態まで冷却する。冷却の段階に応じた制御を行っていく。
- ◆液化(liquefied) 液化運転の状態である。液を増加させる運転や液量を保持する制御が可能である。
- ◆精密測定(low noise) 冷凍機を停止させ MEG 測定へのノイズの影響を最小にする。精製器の排気を行う。
- ◆冷凍機保守(maintenance) 冷凍機を室温にする。コールドチャンバ全体が室温になるため、精製器の排気を行う。
- ◆閉塞解除(blocking release) 精製器を昇温させ凍結していた不純物を気化排出する。
- ◆昇温(heat up) コールドチャンバを昇温させガス循環を行なうことで MEG のデュウを積極的に昇温させる。

4. 状態遷移

Fig.2 に動作モードの遷移図を示す。起動時の運転では、停止状態から清浄化、冷却を経て液化モードへと遷移する。

液化モードでは、精密測定、冷凍機保守、閉塞解除へスイッチ操作により遷移させることができる。停止時は精密測定を経由した後には停止する。

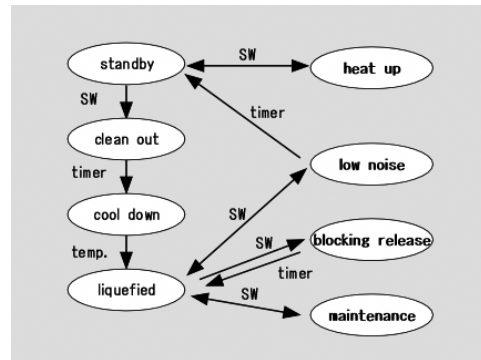


Fig.2 State transition diagram

5. 操作パネル

装置の操作はコントローラと LAN 接続された PC 上のリモートパネルから行う。Fig.3 はプロセス操作用のリモートパネルである。通常の使用においてユーザが行う操作は、このパネル中の液化運転スイッチの ON/OFF のみで良い。また、精密測定や冷凍機保守モードへの移行などの基本機能の操作もこのパネル内で行うことができる。各動作モードの詳細な設定等については別パネルにて行う。

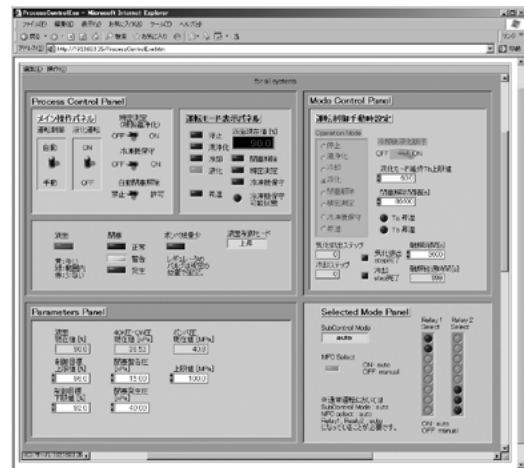


Fig.3 Process control panel of Compact Field Points

6. まとめ

ヘリウム循環装置は運転状態に応じて様々な動作モードに遷移させる必要があるが、開発した制御システムにより、起動から液化モードの運転までをスイッチ操作一つで制御することが可能となった。今後は自動制御のさらなる最適化を行い、装置性能を向上させていく予定である。

参考文献

1. T. Takeda, et. al.: Cryogenics, Vol. 49 (2009) p.144-150

低温動作振動式ヒートパイプの開発 — 熱輸送特性評価への半経験的モデルの適用 —

Development of cryogenic oscillating heat pipes

- An application of semi-empirical modeling to prediction of the heat transfer performance -

夏目 恭平(総研大); 三戸 利行, 柳 長門, 田村 仁(NIFS); 玉田 勉, 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)
NATSUME Kyohei (SOKENDAI); MITO Toshiyuki, YANAGI Nagato, TAMURA Hitoshi (NIFS)
; TAMADA Tsutomu, SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki and NAGAYA Shigeo (CEPCO)
E-mail: natsume@nifs.ac.jp

1. はじめに

次世代の大型超伝導マグネット冷却方式として期待されている伝導・間接冷却方式に応用可能な低温動作の自励振動式ヒートパイプ(Oscillating Heat Pipe: OHP)の開発を行っている。これまでの低温動作 OHP の動作実証試験及び熱輸送特性評価試験で得られたデータに無次元数を用いた半経験的モデルを適用することによって解析を行った。

2. 自励振動式ヒートパイプ (Oscillating Heat Pipe: OHP)

OHP は細いパイプを何重にも折り曲げた形状をしている。封入された流体はパイプ内部に気泡と液柱が長手方向に交互に分布し、入熱部で液柱が蒸発し、冷却部で気泡は蒸発する。それに伴う圧力変化が振動流を駆動し、潜熱と顕熱の両方を以て熱は輸送される。

3. 低温動作 OHP の熱輸送特性評価試験

実験では、OHPを低温クライオスタットの真空容器内に設置し、OHPに冷凍機とヒーターを接続することによって、OHPの断熱及び冷却と加熱を行う。また各所に温度計や圧力系を設置することで、熱輸送特性の評価し、OHP内部の圧力振動を観測する。実験パラメーターはヒーター入熱量、流体封入量、パイプ径、OHP設置方向(鉛直上向き、水平向き、斜め45度など)である。実験は作動流体として窒素、ネオン、水素を用いて行い、運転温度範囲はそれぞれ、67-91 K, 26-34 K, 17-30 Kになった。実験の結果[1]、測定されたOHPの実効的な熱伝導率はそれぞれ5000-18000 Wm⁻¹k⁻¹, 1000-20000 Wm⁻¹k⁻¹, 500-12000 Wm⁻¹k⁻¹になった(図1)。これは安定化材として用いられる純度の高い銅やアルミニウムの熱伝導率と同程度から10倍程度の値であり、低温動作OHPを超伝導マ

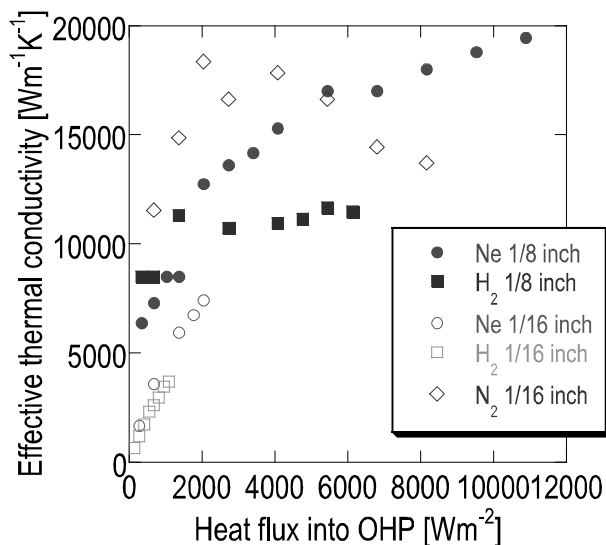


Fig. 1 Measured effective thermal conductivities of OHP in vertical operation mode. The fluid filling ratio is fixed at 50%. Legends in graph indicate the outer diameter of OHPs.

グネットに応用することによって、高い熱拡散性能を実現し得ることがわかった。

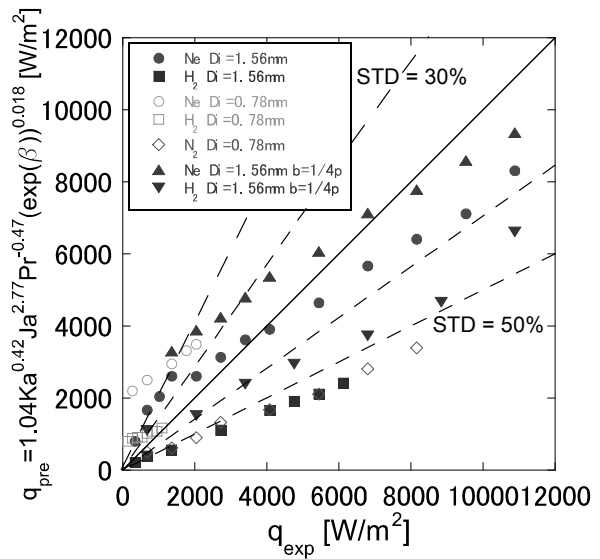


Fig. 2 Comparison of a semi-empirical model with experimental results. Legends in graph indicate the inner diameter of OHPs.

4. 半経験的モデルの適用

S. Khandekar et al.による室温動作 OHP の研究[2]において、測定された実験データに基づいて、無次元数を用いた半経験的なモデルが提案された。そのモデルでは、プラントル数(Pr)、ヤコブ数(Ja)、カルマン数(Ka)及び OHP 設置角度(β)によって、OHP の熱輸送量を表している。我々の実験結果も同様の式を用い、重回帰分析によって実験データをフィッティングした。図2にその解析結果の一つを例示している。横軸は実験によって得られた熱流束を示し、縦軸はフィッティングによって得られた変数の値を用いた半経験式から計算される熱流束を示している。本会議では、この半経験的モデルと解析結果の詳細について報告する。

本研究は、核融合科学研究所、科研費(21360456)の助成を受けたものである。

参考文献

[1] T. Mito and K. Natsume et al., "Achievement of High Heat Removal Characteristics of Superconducting Magnets with Imbedded Oscillating Heat Pipes", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, NO.3, page 2470-2473, (2011).
[2] S. Khandekar et al., "Closed loop pulsating heat pipes Part B: visualization and semi-empirical modeling", *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, 16, page 2021-2033, (2003).