

センサー冷却用断熱消磁冷凍機の開発 -パワーリード用 REBCO 線材の伝熱特性-

Continuous ADR system for sensor cooling -Heat transfer characteristics of REBCO coated conductor for current leads-

植田 隼治, 園田 健悟 (NIMS,千葉大); 沼澤 健則 (NIMS); 中込 秀樹 (千葉大); 都丸 隆行 (KEK)
UEDA Shunji, SONODA Kengo (NIMS, Chiba Univ.); NUMAZAWA Takenori (NIMS); NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.);
TOMARU Takayuki (KEK)
E-mail: s-ueda@chiba-u.jp

1. はじめに

X 線天文学の分野において、宇宙背景放射の偏光測定に使用する TES 型 X 線マイクロカロリメータを 100mK まで冷却することが求められている。そこで我々は、連続冷凍が可能な連続作動型断熱消磁冷凍機 (CADR) の開発を行っている。これまでに、パワーリードに高温超伝導線材である REBCO 線材を使用する事による CADR クライオスタットへの熱侵入の影響を評価してきた。

本報告では、実際に CADR クライオスタットを製作し、REBCO 線材による熱伝導の影響を評価したことについて報告する。

2. 連続作動型断熱消磁冷凍機 (CADR: Continuous ADR)

断熱消磁冷凍機とは磁性体が持つ磁気熱量効果を利用した冷凍機であり、外部磁場の操作によって磁性体のエントロピーを制御することで低温が生成される。この性質を利用し、磁性体の断熱磁化・等温磁化・断熱消磁・等温消磁という4つの過程でカルノーサイクルを形成することにより冷凍を行うのが ADR の原理である。従来の ADR では、サイクルの性質上、冷凍できるのは等温消磁過程のみであり、一定温度を連続的に発生することができなかった。この課題を解決するために、NASA の Peter Shirron によって提案されたのが連続作動型断熱消磁冷凍機である[1]。

3. CADR クライオスタット冷却試験

CADR クライオスタットを製作し、冷却試験を行った。Fig.1 に本研究の CADR クライオスタットの構造を示す。なお、クライオスタットを冷却する 0.1W 型 4K-GM 冷凍機は 2 つのステージで構成されており、1st stage は 60K シールド、2nd stage は 4.2K シールド(4.2K Baseplate)と熱的に接触している。

今回の冷却試験では、60K~4.2K シールド間に、厚さ 0.1mm、幅 5.0mm の REBCO 線材を 8 本接続したときと線材を接続しないときの結果を比較することで、REBCO 線材の熱侵入量を評価した。

4. 結果と考察

Fig.2 に REBCO 線材を 8 本接続したときの冷却試験結果を示す。REBCO 線材を接続しないとき、最低到達温度が 2.60K、定常状態までの時間が約 46 時間となった。一方、REBCO 線材を 8 本接続したとき、最低到達温度が 3.19K、定常状態までの時間が約 47 時間となった。最低到達温度の差は 0.59K となり、以前行った GM 冷凍機冷却試験の結果より、REBCO 線材による 1st stage への熱侵入量が約 60mW だということが分かった。Fig.3 に REBCO 線材の有無による最低到達温度の比較を示す。

5. まとめ

本研究では、CADR クライオスタットを製作し、REBCO 線材

による熱伝導の影響を評価した。その結果、最低到達温度は 3.19K、熱侵入量は 60mW となり、今後使用が可能である事が示された。

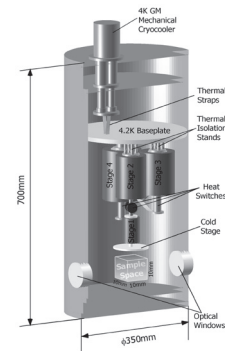


Fig.1 Schematic of the CADR cryostat

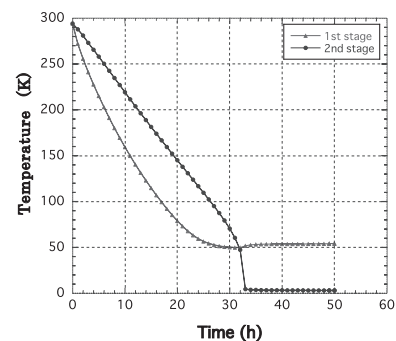


Fig.2 1st stage and 2nd stage temperature (REBCO coated conductor for current leads are connected)

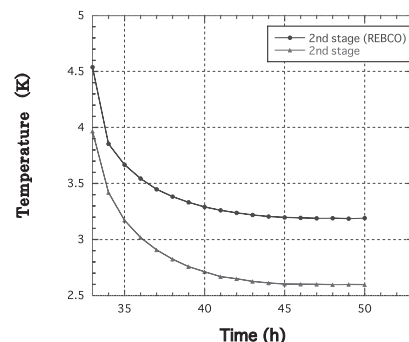


Fig.3 Comparison of the temperature of the 1st stage

謝辞

本研究は、科学研究費助成事業 (新学術領域研究「背景放射で拓く宇宙創成の物理」) において実施されている。

参考文献

- [1] Shirron, P., et al., "A compact, high-performance continuous magnetic refrigerator for space missions", Cryogenics 41 (2002) 789-795

宇宙機用断熱消磁冷凍機の軽量多層磁気シールドに関する研究

Study of multi-layer magnetic shields of light weight for adiabatic demagnetization refrigerators for space use

原田 匠(筑波大学); 高田 卓(NIFS); 木村誠宏(KEK)

HARADA Takumi (University of Tsukuba); TAKADA Suguru (NIFS) ; KIMURA Nobuhiro(KEK)

E-mail: s1220903@u.tsukuba.ac.jp

1. 諸言

衛星による天文観測では、高感度検出器のために100mK級の極低温が必要とされる。断熱消磁冷凍機(Adiabatic demagnetization refrigerator, ADR)は冷却過程において、機械的な動作が無いため、宇宙機の搭載に適した冷凍機である。しかしながら、ADRは冷却過程で超伝導磁石を用いて数Tの高磁場が発生するため、観測素子や他の機器に対して、磁場を遮蔽する必要があり、軽量化・省スペース化された磁気シールドが求められている。本研究では1枚の薄い遮蔽材をロール状に重ねることで、軽量、簡便な製作方法で実現に向けての検討を行った。

2. 多層磁気シールドによる軽量化

磁気シールドは遮蔽材の間に隙間を設けて、多層化することで高い遮蔽効果を得ることができる[1]。磁気シールドを多層化することで遮蔽効果の向上と質量・体積を減少させることができる。

ADRマグネットに対して多層磁気シールドを用いた場合の遮蔽効果の変化と質量の変化についてシミュレーションを行った。遮蔽効果は磁気シールド内部の最大磁場 H_i とモデルの中心軸から70mmはなれた場所の磁場 H_o との比を遮蔽度として評価した(Fig.1)。解析モデルは Fig.1 のように4分の1軸対称モデルで、中央に最大磁場2.1Tの超伝導ソレノイドマグネットを置き、その周りにケイ素鋼(透磁率 $\mu = 7000$)を用いた3層のシールドを用いた。

Fig.2は隙間を1mmに固定し、1層ごとの厚さを増やし、シールド全体の厚さが増加した3層の多層シールドの遮蔽度と質量の変化を、同じように厚さを変化させた、隙間の無い単層のシールドと比較した。地磁気レベルまで磁気遮蔽を達成する際に、同じ遮蔽度でも質量は単層よりも3層に分けた場合50%程度まで減らすことができる。

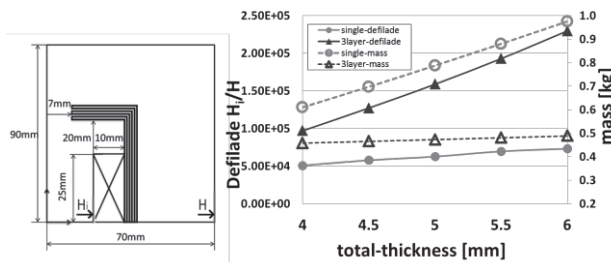


Fig.1 Analytical model

Fig.2 Analytical result

3. ロール型多層磁気シールド

本研究では1枚の遮蔽材とスペーサーに熱伝導率の高い純アルミを重ねて巻くことで、ロール型の磁気シールドを製作した。Fig.1のような多層シールドは高度な制作技術が必要としてしまうため、本研究ではロール状に巻くことで簡便な多層シールドの製作を試みた。ロール型の磁気シールドは各層が磁気回路的に閉じられない。効果をシミュレーションによって検証した。

無限円筒の断面を解析モデルとして、各層が独立して閉じた多層磁気シールドとロール型の磁気シールドを、ANSYS

シミュレーションによって比較した。Fig.2に内径25mm、厚さ1mmのパーマロイ($\mu = 24000$)に均等に隙間を設けた多層シールドと、シールド内部に永久磁石を置き漏れ磁場分布を比較した。

ロール型磁気シールドは閉じた多層磁気シールドに比べて全体的に漏れ磁場が大きく遮蔽効果が下がっていることが分かる。しかし、遮蔽効果の減少はロール型磁気シールドの総数を増やしていく毎に閉じられた多層磁気シールドの値と漸近し、磁気回路が1層ずつ閉じている場合に比べては5層で70%、10層で90%の磁気遮蔽度になる。

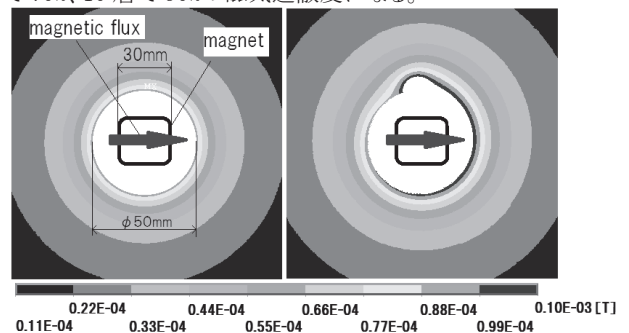


Fig.2 Analytical results multilayer shield and rolled shield

4. 実験装置

ロール型の磁気シールドを製作し、遮蔽効果を自作したADR用マグネットを用いて低温環境下で実験により検証するため極低温環境下における磁気遮蔽効果の測定セットアップを製作した。

Fig.3に実験装置の概略図を示す。最大磁場2.1Tの自作の超伝導ソレノイド磁石の周りに、0.1mmのPBパーマロイと0.1mmの純アルミを重ねたシールド材を用いて、ロール型磁気シールドを製作した。磁場の計測点はコイルの中心とコイル中心から半径方向に28.5mmの地点でホール素子を設置した。磁気シールドを回転させ、円周方向の磁場分布を測定する。実験結果については当日報告する。

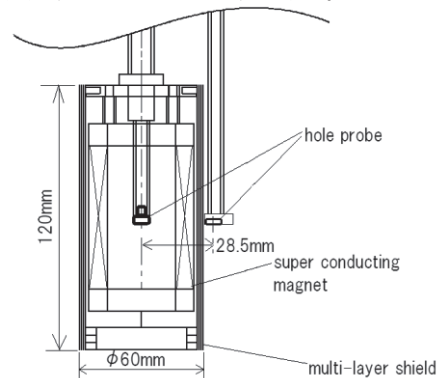


Fig.3 Sketch of experimental setup

参考文献

1. T.Ogasawara, et al.: Journal of CSJ Vol.8 No.5 (1973) p.217

超伝導マグネットを用いた大型磁気冷凍機の可能性検討

Feasibility study about a highly effective and large scale magnetic refrigeration system using a high temperature superconducting magnet

松井 智亮, 岡村 哲至(東京工業大学); 平野 直樹(中部電力); 高橋 祐樹, 高橋 幹雄(竹中工務店)
 MATSUI Tomoaki, OKAMURA Tetsuji (TIT); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power);
 TAKAHASHI Hiroki, TAKAHASHI Mikio (Takenaka)
 E-mail: matsui.t.ag@m.titech.ac.jp

1. はじめに

現代社会での生活において冷凍空調機は家庭用・業務用と様々な場所で使用されており, 新興国でも需要が伸びているため, 今後世界中で利用されると予想される。

現在主要となっている冷凍空調機は不燃性, 科学的安定性, 金属や高分子への影響が少ないといった利点から CFC や HFC といった代替フロンを冷媒として利用している。しかし, これらの代替フロンは地球温暖化を促進する能力を示す温暖化係数が非常に高く, これらを使用しない冷凍空調機が要求されている。

そこで注目されているのが磁気冷凍技術である。磁気冷凍技術を用いた冷凍サイクルを作ることによって磁場と磁性体金属を使って冷凍空調機を作ることが可能である。本研究では熱輸送媒体として水を用いた磁気冷凍機について考え, サイズは数百 kW 級の冷凍能力を持つ大型のタイプのものを対象としており, 数値解析によってその実現可能性を検討した。

2. 数値解析モデル

円柱ダクト二つとダクト同士をつなぐ円柱のパイプ内を熱輸送媒体である水が流れる機構を考える。ダクト内には粒子状のガドリニウム(Gd)が詰められており, ダクトの一方は外部からの磁場により励磁され, もう一方は消磁されている状態となっている。水は消磁されたダクトから低温端側に向かって流れ, 励磁されているダクトを通して高温端側のようにポンプによって循環しており, 水がダクト内を流れている間は, 水とガドリニウムの間で熱交換が行われている。一定の時間が経過すると, モーターの回転により二つのダクトの位置が逆転し, 先ほどまで励磁されていたダクトは消磁され, 消磁されていたダクトは励磁される。

3. 計算条件

計算の条件は Table.1 のようになっており, 各磁場において流量と回転数を変えて解析を行った。また装置を動かすときの動力として, ダクトを回転させるためのモーター, 水を循環させるためのポンプ, そして超伝導を維持するためのクーラーが含まれている。

今回熱移動を一次元モデルで解析するのに用いた式は水のエネルギー保存式と磁性体のエネルギー保存式を用い, また熱伝達率を表すのに用いたヌッセルト数はランツの式より導出した。

今回行った解析により, 各磁場における流量に対する冷凍能力を表すグラフ, そして各回転数における磁場に対する COP を表すグラフを描いた。ここで冷凍能力とは低温端と高温端の温度差が 0°C のときの熱付加とする。また COP を導出する際, 回転数, 流量の値を一定値にした条件における冷凍能力を装置の合計動力で割った値としている。このとき装置の合計動力はさきほど述べたポンプ動力とモーター動力とクーラーの動力の和としており, ポンプ動力は流量に比例し, モーター動力は回転数, 磁場に比例する。ポンプ動力とモーター動力を個別に見ていくと, モーター動力は今回の条件では大きくても 600W 程度だが, ポンプ動力は 6000W 程度までの動力を必要とし, 一方でクーラーの動力は常に 9000W である。よってほとんどクーラーの動力が支配的になっており, ポンプ動力がわずかに影響していることがわかった。

4. 結果

Fig.1 の結果からそれぞれの磁場において冷凍能力がピークを示す流量と回転数の条件があることがわかる。また磁場が大きいくほど, そして回転数が多いほど冷凍能力も大きくなることを示しており, 10T においては 250kW を超える結果となった。さらに, 冷凍能力のピークをとる流量の値が磁場を大きくするにつれて左にシフトしていることがわかるが, これは磁場が大きいくほど発熱量が多くなり, 熱輸送媒体である水との温度差が大きくなるため, 熱の伝わりが早いからではないかと考えられる。

Fig.2 では磁場ごとの COP を表しており, 回転数によってプロットの種類を変えている。この結果から磁場に比例して COP の向上が見られ, また回転数が多いほど比例直線の傾きが大きくなり, COP の向上に貢献していることがわかる。Fig. 1 から回転数を増やすことでサイクル数を増やすことができるため冷凍能力が向上するが, このときの合計動力に注目すると, 回転数の増加によるモーター動力の増加が合計動力に及ぼす影響は小さいため, COP への影響も小さくなるのである。

Table1. Calculation condition

Duct size	Diameter[m]	5.2×10^{-2}
	Length[m]	3.2×10^{-1}
Diameter of magnetic material[m]		6.0×10^{-4}
Magnetic field[T]		1, 5, 10
Number of revolutions[rpm]		5, 10, 20
Flow rate[l/min]		160~500
Hot end temperature[°C]		20
Specific heat[J/kg·K]		The value of specific heat at 0T and 1T.

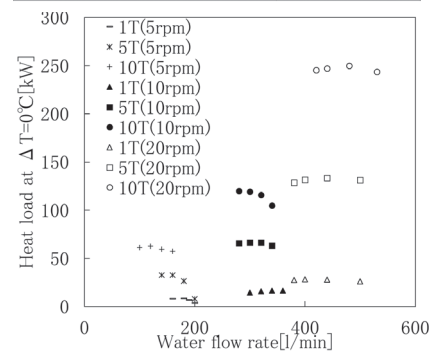


Fig.1 Magnetic flux dependence of maximum heat load when temperature span is 0°C

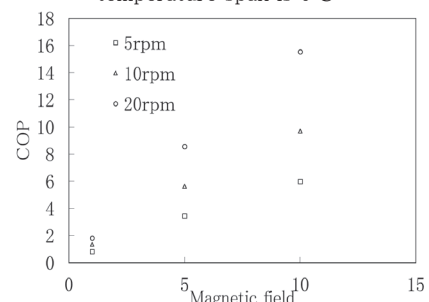


Fig.2 Relation of magnetic field and COP

kW 級磁気冷凍機の特性評価

Characterization of a kW class magnetic refrigerator

宮崎 佳樹, 脇 耕一郎, 荒井 有気, 水野 克俊, 吉澤 佳祐, 池田 和也, 長谷川 均, 長嶋 賢(鉄道総研),
平野 直樹(中部電力), 妻 相哲(サンデン), 高田 裕章(三徳), 岡村 哲至, 野口 芳直(東工大),
和田 裕文(九大), 川南 剛(神戸大)

MIYAZAKI Yoshiki, WAKI Koichiro, ARAI Yuuki, MIZUNO Katsutoshi, YOSHIZAWA Keisuke, IKEDA Kazuya, HASEGAWA Hitoshi, NAGASHIMA Ken (RTRI); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co); BAE Sangchul (Sanden Corporation); TAKATA Hiroaki (Santoku Corporation); OKAMURA Tetsuji, NOGUCHI Yoshinao(Tokyo Tech);
WADA Hirofumi(Kyushu Univ); KAWANAMI Tsuyoshi(Kobe Univ)
E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

1. はじめに

現在の冷房システムの主流は代替フロン等を用いた蒸気圧縮式冷凍である。特定フロンは、オゾン層保護の観点からモントリオール議定書により、生産の段階的な廃止が義務付けられている。温室効果ガスである代替フロン等についても京都議定書において排出削減対象ガスに指定され、代替フロンを使わない製品の開発や温室効果の低い物質への転換が求められている[1]。

一方で、昨今の電力事情や環境問題から、省エネルギーなどの環境負荷低減に対する要求は一段と厳しくなっており、より環境影響の少ない空調システムの研究・開発が進められている。このような情勢の中、ノンフロンで高効率期待できる磁気冷凍が注目されている。

本研究は、鉄道車両用空調の省エネルギーを目的とし、磁気熱量効果を用いた kW 級磁気冷凍機の開発に取り組んでいる。磁気作業物質には室温領域で実績のあるガドリニウム(Gd)系材料を用い、磁気冷凍システムの冷凍能力および、冷却温度幅(温度スパン)の評価を行った。

2. kW 級磁気冷凍機

製作した磁気冷凍機のフローを図 1 に示す。磁気作業物質を充填した 12 組のダクトは、全体でディスク形状をなすよう円周方向に配置されている。永久磁石は磁気作業物質充填ダクトを挟み込むように配置される。永久磁石が回転することで各ダクトは励磁または消磁される。磁気回路には、150 W 級の磁気冷凍機[2]にも用いた円環状ハルバツハ配列磁気回路構成とした。

本磁気冷凍機は、上記のような永久磁石-磁気作業物質充填ダクトの磁気回路を 2 組有している。一方のダクトには Gd のみ、他方のダクトには Gd とイットリウム(Y)、ジスプロシウム(Dy)の合金材料を 3 種類配置してカスケード構成とした。永久磁石およびロータリバルブは 1 つのモータの回転により同期して運転される。

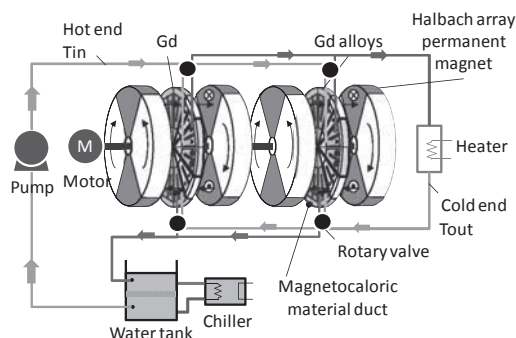


Fig. 1 Schematic of the kW-class magnetic refrigerator

3. 試験結果

GdダクトおよびGd合金カスケードダクトの冷凍能力および温度スパンを測定した。冷凍能力は図 1 に示すヒータの出力

とし、同図の T_{in} と T_{out} の差を温度スパンとした。図 2 に 2 組のダクトを並列運転した場合の、温度スパンゼロにおける冷凍能力を示す。磁石の回転数は 25 min^{-1} 、Gdのみ充填したダクトへは 21 L/min 、カスケードダクトへは 11 L/min の水を熱交換させた条件において冷凍能力 1388 W が得られた。

図 3 には、Gd ダクトの温度スパンを示す。 20 min^{-1} 、 5 L/min の条件において、最大温度スパン 12.6 K が得られた。

4. まとめ

kW級磁気冷凍システムを製作し、特性評価試験を実施した。冷凍能力は温度スパンゼロにおいて 1388 W が得られた。 T_{in} が 23°C 付近の時に、最大の冷凍能力を示した。

温度スパンについては、Gd単体ダクトにて 12.6 K が得られている。当日はカスケードダクトも合わせて報告予定である。

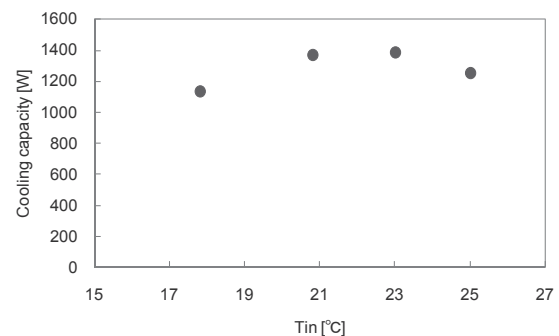


Fig. 2 Cooling capacity of the magnetic refrigerator

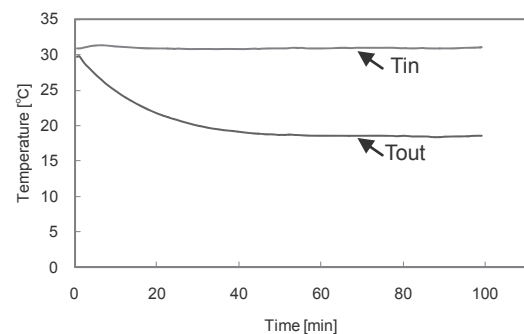


Fig. 3 Temperature span of the magnetic refrigerator

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. K. Waki, et al.: RTRI REPORT Vol.26, No.5 (2012). p47
2. K. Waki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84(2011) p.130

kW 級磁気冷凍機に異種材料を充填した場合の性能評価

Performance of a kW grade magnetic refrigerator using a series of different materials

野口 芳直、岡村 哲至(東工大); 平野 直樹(中部電力); 宮崎 佳樹(鉄道総研);
 妻 相哲(サンデン); 高田 裕章(三徳)

NOGUCHI Yoshinao, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co); MIYAZAKI Yoshiki (RTRI);
 PE Sanchoru (Sanden Corporation); TAKATA Hiroaki (Santoku Corporation)

E-mail: noguchi.y.ac@m.titech.ac.jp

1. はじめに

磁気冷凍機は磁性材料に与える磁場変化により温度変化が生じる磁気熱量効果を利用する。特に室温磁気冷凍機は代替フロンを用いない冷凍機として近年注目されているが、実用化に向けては冷凍性能の向上が不可欠である。また冷凍性能のうち温度スパンに関しては、磁性材料を複数種類充填(カスケード)することで取れる温度スパンが拡大することが確認されている。本研究ではkW級磁気冷凍機で磁性材料をカスケード充填した場合の温度スパンについて伝熱数値解析を用いて検討したので報告する。

2. 解析で使用した材料の物性

20°C付近がキュリー点であるガドリニウム(Gd)及びジスプロシウム(Dy)、イットリウム(Y)を用いた化合物(GdDy, GdY)をカスケードの材料として想定した。これらの物性値として、励磁時及び消磁時におけるそれぞれの断熱温度変化特性、比熱の磁場依存性[1]を考慮した。Gdについて用いた物性値をFig.1に示す。GdDy, GdYはGdのキュリー点である20°Cを基準にそれぞれ15°C, 10°Cと5°Cずつキュリー点がずれるように、物性値すべてを平行移動したものをを使用した。

3. 伝熱数値解析結果

上記3種類の材料をAMRダクト1つにつき、高温端側から順にGd:GdY:GdDy=3:2:3の比率で充填した場合の伝熱数値解析を行った。熱輸送媒体は水を想定し、高温端温度は20°Cとした。水の流量および磁石の回転数ごとの、無負荷における温度スパンをGdのみ充填した場合と比較した。数値解析結果をFig2およびFig3に示す。3種のGd化合物をカスケード充填することにより、特に低流量域において温度スパンがより拡大する結果が得られた。

4. まとめ

kW級磁気冷凍機に3種のGd化合物をカスケード充填した場合の伝熱数値解析を行った。カスケード充填することでGdのみ充填した場合より温度スパンが拡大する結果が得られた。当日は実験結果も合わせて報告予定である。

5. 謝辞

本研究は、「省エネルギー革新技術開発事業/先導研究(事前研究一体型)/磁気ヒートポンプ技術の研究開発」として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

参考文献

- Luca A. Tagliafico, et al.: Refrigeration: Theory, Technology and Applications, pp. 71-131

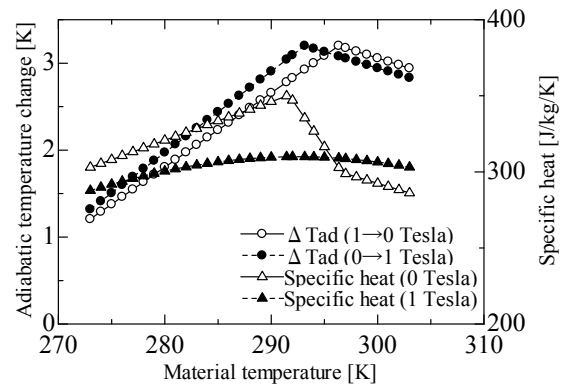


Fig.1 Physical property of Gd used numerical analysis

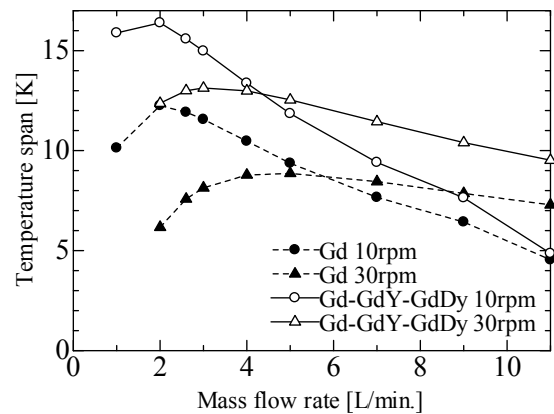


Fig.2 Numerical results of the temperature span as a function of mass flow and frequency of magnet

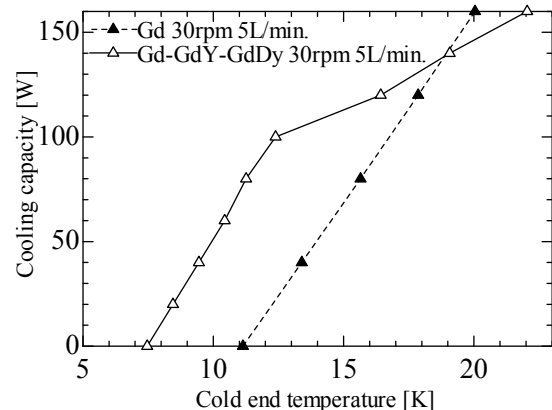


Fig.3 Numerical results of the cooling capacity as a function of the temperature span

一次元モデルによる室温磁気冷凍の冷凍性能解析

—材料系による相違の基礎検討—

Numerical analysis of magnetic refrigeration at room temperature

山田 雄太, 中込 秀樹(千葉大)

YAMADA Yuuta, NAKAGOME Hideki (Chiba University);

E-mail: y.yamada@chiba-u.jp

1.はじめに

室温磁気冷凍技術は環境負荷の小さい未来の冷凍技術として期待が寄せられている。これまでの研究により、永久磁石を用いた AMR(能動的蓄冷型磁気冷凍)方式により、室温付近から零下の温度生成を達成している[1]。また室温域における磁気冷凍特性について、Gd 磁気冷凍材料をベースに実験および計算による検討を進めてきた。

一方、世界的には他の磁気冷凍材料として、様々な物質が提案されている。そこで、今回は材料物性に着目し、大きく異なる磁気熱量効果特性を持つ2つの系について、実際の試験装置(Fig.1)を模擬した一次元モデルによる数値実験で冷凍性能に与える影響について基礎検討したので報告する。

2. 計算モデル

数値実験では、AMR bed 内に充填される冷媒と磁性体間の熱移動と、冷媒と放熱部(Hot end)および吸熱部(Cold end)間の外部熱移動を考慮した。Fig.2 に、冷媒と磁性体のエネルギー保存式を示す。上が冷媒についてのエネルギー保存式、下が磁性体についてのエネルギー保存式である。試験装置の AMR bed を熱流方向に複数セルに分割し、各々のセルにおいて、エネルギー保存式の関係が成り立つようにした。磁性体の磁場印加・除去に伴う発熱・吸熱は、磁性体のエントロピー変化と比熱の温度依存性を考慮した。AMR サイクルにおける冷媒移動時間、距離については、実験と対応が取れる条件にて模擬した。

3. 数値実験結果

3-1 同一条件による単純比較

Fig.3 には、今回使用した2つの系の磁気熱量効果から得られる温度変化(ΔT)を示す。Gd は広い温度域に対して A 材よりも高い ΔT を、A 材は局所的に Gd よりも高い ΔT をそれぞれ有している。これら2つの系を用いた場合について、AMR サイクルの数値実験を行った。ここでは、材料の量、サイズ、磁場条件などを同一とし、動作環境温度、冷媒移動量、サイクル周波数などをパラメータとした。Fig.4 に、数値実験による AMR サイクルで得られる温度生成の様子を示す。2つの特徴的な ΔT が、温度生成過程にも反映しているのがわかる。

3-2 熱負荷に対する温度変化

上記の温度生成過程の検討に加えて、低温端に熱負荷を与えた場合のサイクルの振る舞いについても検討を行った。この結果、Gd、A 材ともに、高周波数になるにつれ、熱負荷耐性が向上していることがわかった。しかし、材料充填位置の温度上昇による違いから、冷媒移動量による相違も得られた。この他の冷媒移動量特性・周波数特性など結果の詳細、また物性との関連の考察などについては講演にて報告する。

1 . T. Kobayashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.138

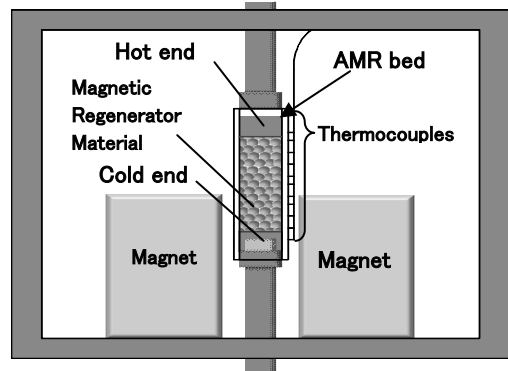


Fig.1 Schematic illustration of the experimental apparatus.

$$\rho_f c_f A \varepsilon \frac{\partial T_f}{\partial x} + m c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = K_f A \varepsilon \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{Nu}{d_r} a_s A (T_r - T_f)$$

$$\rho_r c_r A (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_r}{\partial t} = K_r A (1 - \varepsilon) \frac{\partial^2 T_r}{\partial x^2} + \frac{Nu}{d} a_s A (T_f - T_r) - A (1 - \varepsilon) \rho_r T_r \frac{\partial S_r}{\partial t}$$

T_f : 流体温度 c_f : 流体比熱 d_r : 磁性体粒径 m : 質量流量
 T_r : 磁性体温度 c_r : 磁性体比熱 a_s : 熱拡散率 Nu : ヌッセルト数
 ρ_f : 流体密度 K_f : 流体熱伝導率 A : セル断面積 S_r : 磁気エントロピー
 ρ_r : 磁性体密度 K_r : 磁性体熱伝導率 ε : 空隙率

Fig.2 Energy conservation equation.

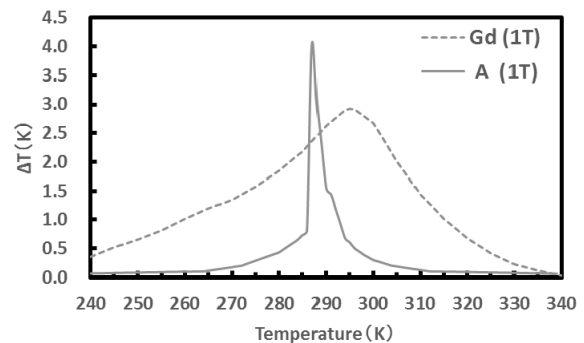


Fig.3 Temperature dependence of temperature change ΔT.

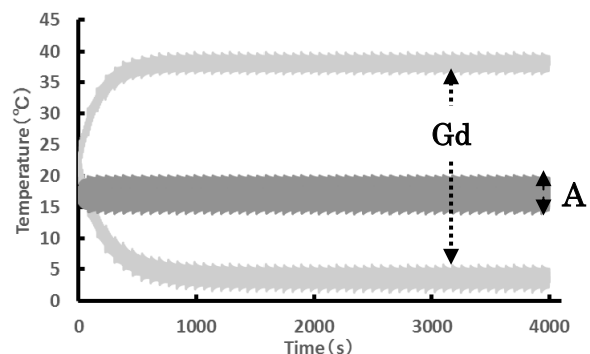


Fig.4 Temperature change of Gd and A in AMR cycle.

4K-GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器の等価的形狀変化

Equivalent configuration changing of the 2nd stage regenerator of 4K-GM cryocooler

増山 新二, 鈴木 雄文, 長尾 望宏 (大島商船高専); 沼澤健則 (NIMS)

MASUYAMA Shinji, SUZUKI Yuya, NAGAO Takahiro (Oshima National College); NUMAZAWA Takenori (NIMS)

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

1. はじめに

われわれは、GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器内の同軸上にベークライト棒を挿入するという、新たな蓄冷器構造を考案し、その性能評価を主に鉛蓄冷材が充填された蓄冷器で行ってきた[1]。試験結果より、ベークライト棒の体積が適切であれば、蓄冷材分量が減少しても、冷凍能力に影響を与えないことが証明されている。

そこで今回は、磁性体蓄冷材である HoCu_2 球が充填された蓄冷器に本構造を適応させ、4K レベルでの性能評価を試みた。以下に、蓄冷器構造、ならびに実験結果を報告する。

2. 2 段目蓄冷器構造の概略と GM 冷凍機

本構造の特徴の一つは、挿入するベークライト棒の位置や形状を変えることで蓄冷器形状を等価的に変化できることである。その最適条件を見出すために、直径や長さが異なる円筒状のベークライトを数種類準備し、性能評価を行った。以下に、ベークライト形状における蓄冷器タイプの呼称を示す。

- ▶ ベークライトを挿入しない状態 → Normal タイプ
- ▶ 蓄冷器の 1/2 長さの円筒状ベーク → 1/2rod タイプ
- ▶ 蓄冷器の 1/4 長さの円筒状ベーク → 1/4rod タイプ (ただし、高温端側に挿入した時を 1/4rod_H とする。)

これらの概略図を Fig. 1 に示す。2 段目蓄冷器の低温側半分に球径 150-300 μm の HoCu_2 球が充填され、その同軸方向にベークライト棒が挿入される。ベークライトの体積分だけ HoCu_2 の充填量が減少することに注意していただきたい。高温側には球径 212-300 μm 鉛 (Pb) 球が一定量充填される。蓄冷器低温端から見た外観を Fig. 2 に示す。

性能試験に使用した GM 冷凍機は、コールドヘッド:RDK-408D2 (SHI), 圧縮機:C-300G (SUZUKISHOKAN)で、電気入力 7.3 kW である。動作周波数は 1.2 Hz 一定とした。なお、ヘリウムガスの初期封入圧力は 1.6 MPa である。

3. 冷凍能力実験方法・結果

GM 冷凍機は室温から運転され、各ステージの温度が安定した時を到達温度とし、その後 2 段目ステージに取り付けてある電気ヒータにより定常熱負荷を加え冷凍能力を測定した。

4.2 K の冷凍能力とベークライトを挿入することで減少した HoCu_2 分量の減少割合の実験結果を Fig. 3 に示す。横軸の 0% が Normal タイプ時の能力で、その値は 1.11 W である。まず、1/2rod タイプに注目すると、 HoCu_2 分量を 10% まで減少させても冷凍能力にまったく影響を与えないことが分かる。その後、 HoCu_2 分量とともに能力が小さくなっている。1/4rod_H タイプの場合、 HoCu_2 減少割合が 15% 程度で 1/2rod タイプの能力を若干上回っているものの、全体的に見ると、それとほぼ同様な能力特性を示している。つまり、 HoCu_2 の分量が同じ場合、ベークライトの形状や位置では、冷凍能力に大きな差が生じていない。

4. まとめ

GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器内に種々のベークライトを挿入し、等価的に蓄冷器形状を変化させたときの 4K レベルでの冷凍性能を実験的に評価した。現在得られている結果から、 HoCu_2 分量が同じ場合、4.2 K の冷凍能力への影響は小さいようである。本構造が有する注目すべき点としては、ベークライトを挿入することで冷凍機全体のさまざまなスペックや運転条

件などを変更することなしに蓄冷材の最適分量を見出すことが可能となることである。今回使用したコールドヘッドと圧縮機の組み合わせでは、 HoCu_2 の充填量を 10% まで減少できることが証明された。

なお今後は、1/4rod タイプの測定値を増やすとともに、円錐状のベークライトを挿入した実験を行う予定である。

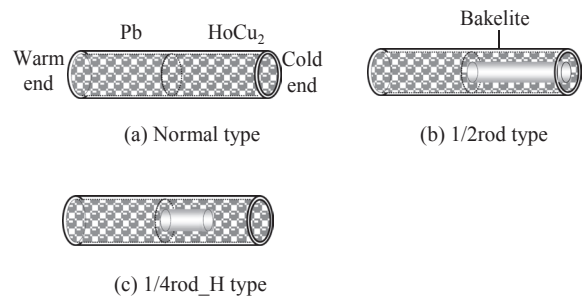


Fig. 1 Three types of regenerator structures: (a) Normal type, (b) 1/2-rod type and (c) 1/4rod_H type.

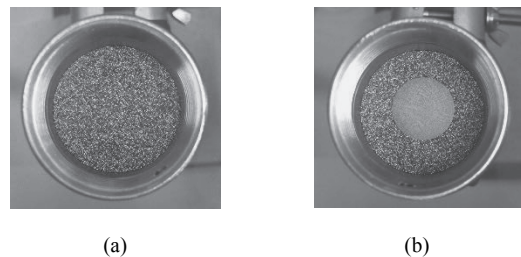


Fig. 2 Photos of the regenerator housing, HoCu_2 spheres, and a bakelite rod (view from the cold-end): (a) Normal type and (b) 1/2rod type.

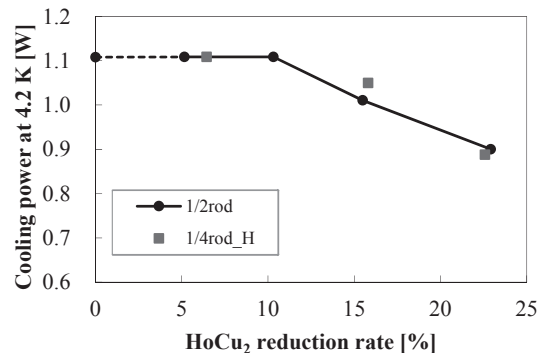


Fig. 3 Experimental results of the cooling power at 4.2 K as a function of HoCu_2 reduction rate

【謝辞】 本研究は、科学研究費助成事業 (基盤研究(C)24561064), ならびに核融合科学研究所一般共同研究 (NIFS13KECA022) の一部により実施された。

【参考文献】

1. 増山新二, 平塚善勝: 低温工学 Vol.47 No.7 (2013) pp.358-363

50K,100W 級高効率パルス管冷凍機の開発

Development of High Efficiency 100W-Class at 50K Pulse Tube Cryocooler

高橋 貞充, 平井 靖夫 (エア・ウォーター総合開発研究所)
 TAKAHASHI Sadamitsu, HIRAI Yasuo (AIR WATER R&D)
 E-mail: takahashi-sad@awi.co.jp

1. はじめに

経済産業省発行の超電導技術分野の技術ロードマップ [1]により, 高温超電導機器冷却用として 50K の温度領域で高効率な小型冷凍機の要望 (冷凍能力:100W, COP:0.025 [12.5%カルノー]@50K) が示されている。しかしこの領域に最適化された冷凍機は, あまり無いのが現状である。

我々はこれまでに160W@80K, 13%カルノーの冷凍機[2]や, 1kW級@65K, 13.6%カルノーの冷凍機[3]と, GM型で世界最高級の効率の単段パルス管冷凍機を開発してきた。そこで今回この要望に応えるべく, 50Kの温度領域での最適化開発を行ない, 目標性能を達成したのでその実験結果について報告する。

2. 試験システム

Fig.1に試験システムの概略フローを示す。試験システムは今回試作したパルス管冷凍機, 水冷 He 圧縮機ユニット, アクティブバッファタンク 2 個, 電磁弁ユニット 1 式, フレキシブルホース, 真空チャンバーで構成した。なお, 冷凍機は内部の構成部品や蓄冷材を変更可能な構造としている。冷端部には金鉄-クロメル熱電対とヒーターを取り付け, 多層断熱材 (MLI) を施した。パルス管温端部は水冷し, ガスの位相制御はアクティブバッファ方式とした。

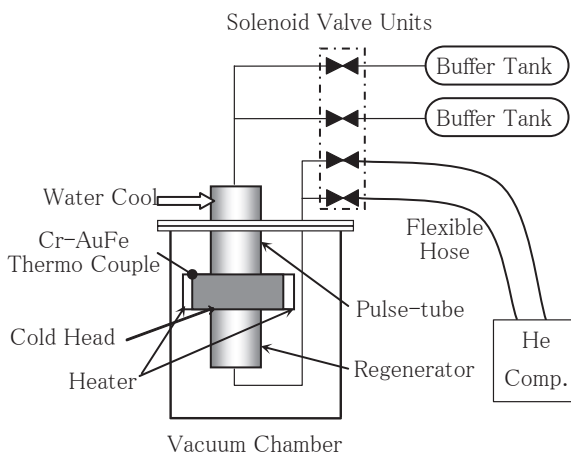


Fig.1 Schematic of the experimental system

3. 試験方法

真空チャンバー内に冷凍機を設置し, 電源入力 4.1kW で運転し, 50K 付近となるようにヒーター負荷を加え, パルプタイミングを最適化した。ヒーター負荷を無負荷と 77K 付近になるよう変更し, それぞれ切替周波数を最適化しデータを取得した。内部の構成部品や蓄冷材を変更し, 実験を繰り返した。

4. 試験結果

Fig.2 に 50K で最も高い性能が得られた構成における, 冷凍能力と COP カーブを示す。

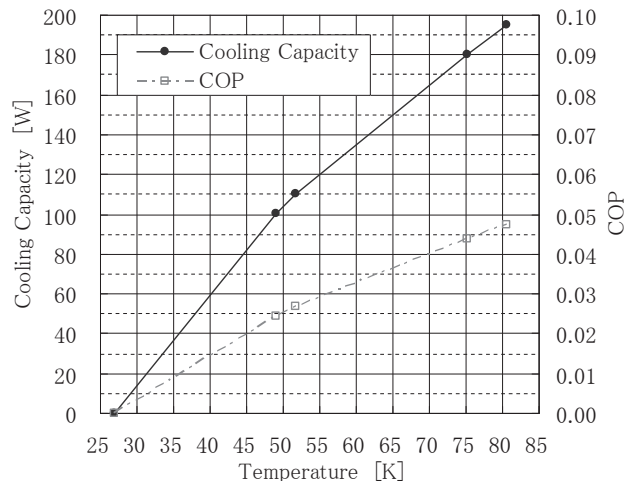


Fig.2 Cooling capacity and COP curves

無負荷時の到達温度 27K, 50K における冷凍能力 103.7W, COP 0.025, 12.6%カルノー, 77K における冷凍能力 185.2W, COP 0.045, 13.1%カルノーと, 目標を超える良好な結果が得られた。

5. まとめ

今回単段パルス管冷凍機の50K領域での最適化開発を行ない, ストレートタイプのコールドヘッドにおいて電源入力 4.1kWで, 100W超@50K, COP 0.025超, 12.6%カルノーの, 高出力かつ高効率化を達成し, GM型の冷凍機の50K領域における冷凍能力・COPとしては, 非常に高い性能を有するものとなった。

本冷凍機は, 高温超電導機器冷却の用途だけに留まらず, 輻射熱シールドや電流リードなどの冷却用としても, 十分な性能を有していると考えられる。

6. 今後の予定

今後はリターンタイプのコールドヘッドを製作し評価する予定であるが, 更なる高出力化などの要望があれば応えていきたい。

参考文献

1. 超電導技術分野の技術ロードマップ 2009 (共通基盤技術 - 冷凍・冷却): 経済産業省(2009)
2. Shaowei Zhu, et al.: Cryogenics, Vol.37 No.8 (1997) p.461-471
3. K Ikeda, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn, 43 (2008) p.143-149

二段階のアニール処理を施した $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 超伝導薄膜への重イオン照射による柱状欠陥の導入

Introduction of columnar defects by heavy ion irradiation of $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconducting thin film prepared two step annealing

吉村兆貢, 桑原遼, 末吉哲郎, 藤吉孝則 (熊本大); 松本明善, 北口仁 (物材機構)

YOSHIMURA Hiroataka, KUWAHARA Tohru, SUEYOSHI Tetsuro, FUJIYOSHI Takanori (Kumamoto-Univ.);

MATSUMOTO Akiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

E-mail: yoshimura@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

近年, Bi 系超伝導体は, 実用線材材料として注目を浴びており, 実装に向け様々な研究が行われている。しかし, Bi2223 を始めとする Bi 系超伝導体は, その生成機構や超伝導電流経路など未知の部分も多い。本研究では, Bi系超伝導体に関する基礎研究の一環として, Bi2223 薄膜を作製し, 薄膜に 2 段階のアニール処理を施し, 薄膜のアニール温度依存性の評価を行った。またアニールした薄膜に対し重イオンの照射を行い, ピンニング特性の向上を図った。

2. 実験方法

薄膜は, DC スパッタ法によって作製した。ターゲットとして $\text{Bi}_{1.5}\text{Pb}_{1.0}\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{2.5}\text{Cu}_{2.5}\text{O}_y$ を用い, 純酸素圧 50Pa, 出力 100W, 基板温度 690°C で 2.5 時間成膜を行い, STO 基板上に 300nm 程度の薄膜を堆積させた。その後作製した薄膜に対し, Fig. 1 に示すように二段階のアニールを施した[1]。まず STEP1 にて, Bi2223 薄膜を Bi,Pb2223 ペレットで包みこみ, 大気中において $830^\circ\text{C}\sim 850^\circ\text{C}$ の温度範囲で 100 時間, 更に, STEP2 にてペレットを取り除き, 酸素雰囲気中において 450°C で 10 時間アニール処理した。

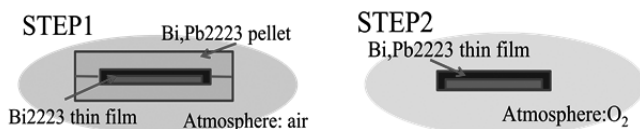


Fig. 1 Schematic view of two step annealing

また, 二段階のアニール処理を施した薄膜に対し, 重イオンの照射を行い, 柱状欠陥の導入を行った。イオン種は Xe イオン, エネルギーは 270MeV, c 軸平行(膜面垂直)の方向に 2.5×10^{10} ion/cm²(マッチング磁場 $B_\phi=0.5\text{T}$)の照射量で照射を行った。

3. 実験結果

Fig. 1 にアニール温度の異なる試料の抵抗率温度依存性を示す。 850°C 試料において二段転移が見られたが, $T_{c\text{-onset}}$ の比較では, 850°C 試料の方が高い値を示した。また, 各試料の XRD においては, 850°C 試料で, より大きな Bi2223 に関するピークがみられた。このことから, より高温でのアニールは結晶性の向上に大きく寄与すると考えられる。

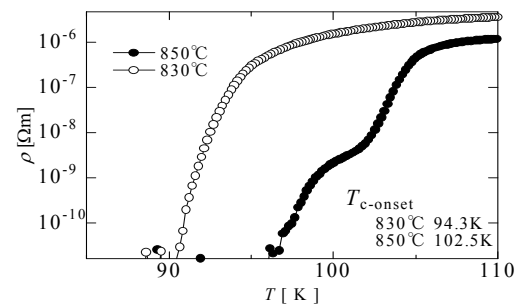


Fig. 2 Temperature dependence of resistivity

Fig. 3 に重イオン照射前後の Bi2223 薄膜の臨界電流密度 J_c の磁場依存性を示す。77K においては 2T 以下, 60K では 3T 以下の磁場で c 軸方向の磁場に対する J_c の値は向上した。さらに詳細な特性に関しては当日紹介する。

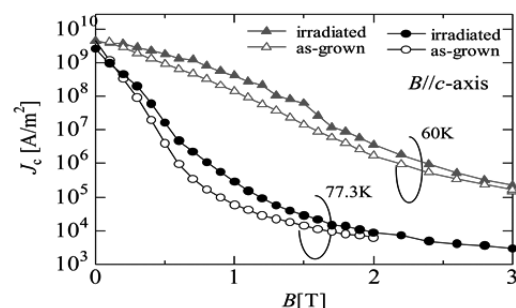


Fig.3 Magnetic field dependence of J_c

参考文献

[1] A. Matsumoto, H. Kitaguchi, T. Doi, S. Hata,

ICEC24-ICMC2012

ピンニングのない超伝導ストリップにおける臨界電流密度の理論的境界

Upper limit of the critical current density in superconducting strips without bulk pinning centers

馬渡 康徳, 柏谷 聡 (産総研)
 MAWATARI Yasunori and KASHIWAYA Satoshi
 E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

1. はじめに

超伝導体における臨界電流密度の理論的境界として、対破壊電流密度が知られている。様々なバルクピン(人工ピン)を導入するなどの手法により、超伝導線材・薄膜の臨界電流密度を対破壊電流密度に近づけるための研究開発が進展している。一方、バルクピンが無くても場合によっては高い電流密度が得られる可能性も指摘されている。

本研究では、バルクピンのない理想的な超伝導体を考え、また簡単のため熱揺らぎの効果も無視して、超伝導ストリップにおける臨界電流密度の上限を理論的に考察した。

2. 対破壊電流密度

超伝導体における臨界電流密度の理論的境界として、対破壊(depairing)電流密度 J_d が知られている。これは、コヒーレンス長 ξ より小さい径をもつ超伝導細線が運ぶことのできる超伝導電流密度の限界値として定義され、一次元 Ginzburg-Landau 方程式より次で与えられる[1]。

$$J_d = \frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \frac{H_c}{\lambda} = \frac{\phi_0}{3\sqrt{3} \pi \mu_0 \lambda^2 \xi} \quad (1)$$

ここで、 ϕ_0 は磁束量子、 μ_0 は真空透磁率、 H_c は臨界磁場、 λ は磁場侵入長、および ξ はコヒーレンス長である。例えば、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 薄膜における典型的な数値として $\lambda_{\text{ab}} = 150\text{--}250\text{nm}$ および $\xi_{\text{ab}} = 1.4\text{--}2.0\text{nm}$ を(1)式に代入すると、対破壊電流密度として $J_d = 1\text{--}3 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ の値が得られる[2]。

Ginzburg-Landau 理論はもともと臨界温度近傍($T \sim T_c$)で有効であり、 λ と ξ の温度依存性をともに $\sim (1-T/T_c)^{-1/2}$ とすると、 T_c 近傍における J_d の温度依存性として、 $J_d \sim (1-T/T_c)^{3/2}$ が得られる。また、Bardeen [3] は、全ての温度領域 $0 < T/T_c < 1$ における経験式として $J_d(T) = J_d(0)[1 - (T/T_c)^2]^{3/2}$ を提案し、この式は実験データの解析にしばしば用いられる。

Stejic ら[4]は、厚さ $d = 120\text{nm}$ ($= \lambda/2$) の NbTi 薄膜において、自己磁場で臨界電流密度 $J_c = 1 \times 10^{11} \text{A/m}^2$ を観測している。この高い J_c は、 $J_d = 3 \times 10^{11} \text{A/m}^2$ の 30% 程度に達しており、薄膜表面の効果であると考えられている[4]。

Maksimova [5] は、幅 w が Pearl length λ^2/d [6] より狭い超伝導ナノストリップにおける量子化磁束線の安定性について理論的に考察し、臨界電流密度が対破壊電流密度程度に達することを示した。この解析ではバルクピンの効果は無視されており、高い $J_c \sim J_d$ の起源はエッジ効果である。

3. 超伝導ストリップの臨界電流密度

Fig. 1 のように、幅 w ($0 < x < w$)、厚さ d ($|z| < d/2$)、および無限長で、輸送電流 $I_t = J_c w d$ を運ぶ超伝導ストリップを考える。外部磁場の印加はなく、バルクピンのない理想的な超伝導ストリップを考え、また、厚さは幅に比べて十分薄い ($w \gg d$) とする。ストリップ面に垂直な z 方向を向く量子化磁束線が $x = x_0$ に存在するときの自由エネルギー $G(x_0)$ を考える。 $I_t = 0$ のとき、 $G(x_0)$ は上に凸の関数となり、量子化磁束線はストリップ内に安定に存在することはできない。 I_t を増加させていくと $G(x_0)$ の形が傾き、量子化磁束線はストリップ幅方向に駆動される。しかし、 I_t が臨界電流 $I_c = J_c w d$ より小さいときは、ストリップのエッジ ($x_0 = 0$) 付近に有限のポテンシャルバリアが存在し、量子化磁束線は(熱揺らぎ等で励起されない限り)超伝導ストリップ内部に侵入することはなく、安定に超伝導電流を流すこ

とができる。しかし、 $I_t > I_c$ ではポテンシャルバリアがなくなり、量子化磁束線が $x_0 = 0$ のエッジから侵入して $x > 0$ の方向に流れ、有限の電圧を生じる。この場合の $I_t = I_c$ の条件は、 $x_0 = 0$ において $dG(x_0)/dx_0 = 0$ であるという条件と等価である。自由エネルギーの微分は駆動力すなわち電流密度に比例し、また量子化磁束線の核の周囲での局所的な電流密度は J_d 程度であることから、この条件はさらに簡略化される。つまり、 $I_t = I_c$ の条件は、「量子化磁束線が存在しない Meissner 状態において、エッジでの局所的な電流密度が対破壊電流密度に達する」という条件と等価であることが示される。ただし、たとえバルクピンが無くても、磁場中ではエッジから侵入した量子化磁束線がストリップ内に捉えられる効果が働くので、上の条件は H_{c1} より小さい低磁場中でのみ有効である。

Fig. 2 に、こうして得られたゼロ磁場中での臨界電流密度 $J_c = I_c/wd$ のストリップ幅 w 依存性を示した。 $w d/\lambda^2 \rightarrow 0$ の極限で $J_c/J_d \rightarrow 1$ となっているが、今の解析では絶対値を正確に議論することができないので、数値因子には不確定の要素があることに注意されたい。Maksimova の解析結果[5]と同様に、 $w < \lambda^2/d$ のナノストリップでは $J_c/J_d \sim 1$ 程度となり、これはエッジバリア(geometrical barrier)の効果により高い J_c が得られることを示している。一方、 $w \gg \lambda^2/d$ では $J_c \sim w^{-1/2}$ のように w とともに J_c は減少する。

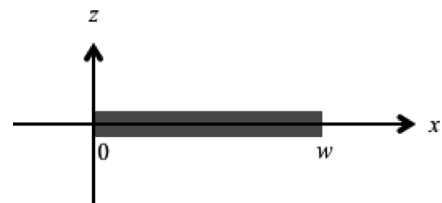


Fig. 1: Cross section of a superconducting strip of width w ($0 < x < w$) and the thickness d ($|z| < d/2$).

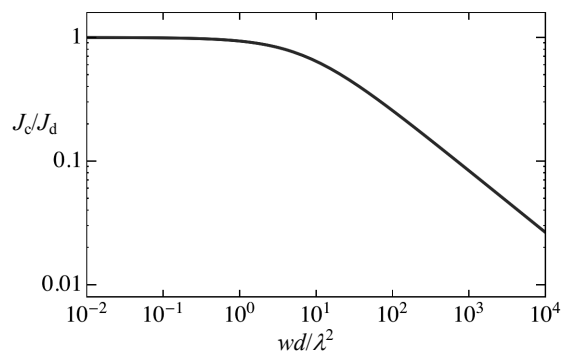


Fig. 2: Width w dependence of the critical current density J_c in superconducting strips. w is normalized by λ^2/d .

参考文献

- [1] M. Tinkham, "Introduction to Superconductivity," 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, 1996.
- [2] S. Nawaz et al., Physica C **495**, 33 (2013).
- [3] J. Bardeen, Rev. Mod. Phys. **34**, 667 (1962).
- [4] G. Stejic et al., Phys. Rev. B **49**, 1274 (1994).
- [5] G. M. Maksimova, Phys. Solid State **40**, 1607 (1998).
- [6] J. Pearl, Appl. Phys. Lett. **5**, 65 (1964).

PLD 法 GdBCO コート線材の緩和特性

Magnetization relaxation properties in PLD processed GdBCO coated conductors.

水上 総司, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大); 小西 昌也 (住友電工)

MIZUKAMI Soushi, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

KONISHI Masaya (SEI)

E-mail : mizukami@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE: 希土類) 超電導線材は、高温・高磁界下で高い臨界電流密度 J_c が得られることから、様々な電力関連機器への応用が期待されている。しかし、低温領域においても高磁界下では磁束クリープの影響を受け、磁化が緩和することで、結果的に臨界電流密度が減少する。このため、特に SMES 等の応用機器の運用が期待される温度 20 K での超電導体の緩和特性を評価し、適した線材を開発することが重要である。

これまでに、CVD 法による YGdBCO コート線材の緩和特性の超電導層厚依存性の評価では、臨界電流密度特性、および磁化緩和特性が超電導層の厚さに依存することを示した[1]。特に、ピンニング相関距離の影響によって、超電導層の厚い試料の方が見かけ上のピンポテンシャル U_0^* が大きく、磁界依存性が良好であるという結果が得られた。このことから、SMES 等への応用に際しては、超電導層の厚い試料ほど有利であることが示唆された。

本研究では、これまでよりも広い範囲で超電導層厚を変化させた PLD 法による GdBCO コート線材の低温領域の臨界電流密度と U_0^* を測定し、超電導体の種類や作製方法の違いが、低温領域の緩和特性にどのような影響を与えるのかを調査した。

2. 実験

試料は、基板に配向 Ni クラッド合金を用い、PLD 法により作製された GdBCO (GdBa₂Cu₃O_y) コート線材である。超電導層の成膜プロセスの回数を変化させ、超電導層の厚さ d を 1~3 μm 程度まで変化させた。Table 1 に超電導体の厚さと臨界温度 T_c を示す。各試料の J_c - B 特性は SQUID 磁力計を用いた直流磁化測定より、また、見かけ上のピンニングポテンシャル U_0^* はその磁化の時間緩和率から求めた。なお、外部磁界は試料の c 軸方向に対して平行に印加した。

Table 1: Specifications of specimens

Sample	#1	#2	#3
T_c [K]	92.6	92.2	92.3
d [μm]	1.04	2.08	3.12

3. 結果及び検討

Fig. 1 に 20 K における J_c - B 特性を示す。各試料の J_c は同様の磁界依存性となった。また、 J_c の大きさは、超電導層が薄い試料の方が高く、厚くなるにつれて小さくなった。これは膜厚の増加に伴う結晶の乱れによるものだと考えられる。

Fig. 2 に 20 K における U_0^* の磁界依存性を示す。各試料の U_0^* は外部磁界 B に対して同様の依存性を示し、 B が 2 T 付近で最大値を取り、それ以降は B が増加するに従って減少する傾向にある。

また、 U_0^* 特性は超電導層厚 d が 2 μm 程度の試料 #2 が最も優れており、 d が最大の #3 では逆に劣化していることがわかった。これは、厚膜化による膜質の劣化によって超電導層が不均一にな

り、 J_c 及び U_0^* 特性が劣化したと考えられる。

以上の実験結果について磁束クリープ・フローモデルを用いた解析を行い、各試料のピンニングパラメータが緩和特性に与える影響について調査した。詳細な議論は当日行う。

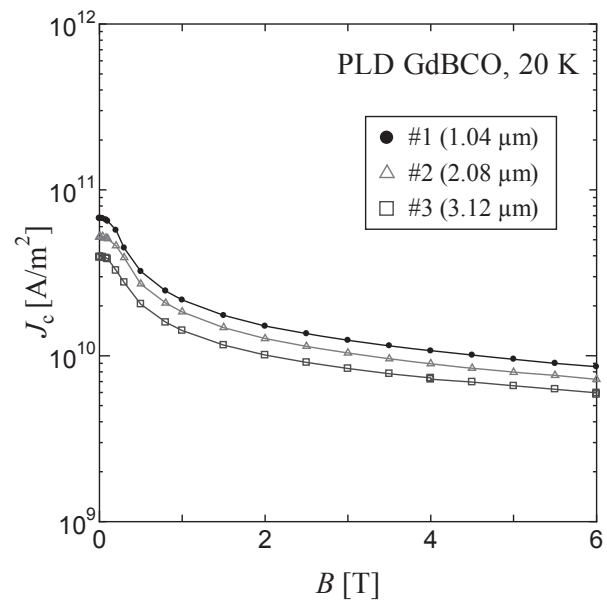


Fig. 1 : Magnetic field dependence of critical current density at 20 K.

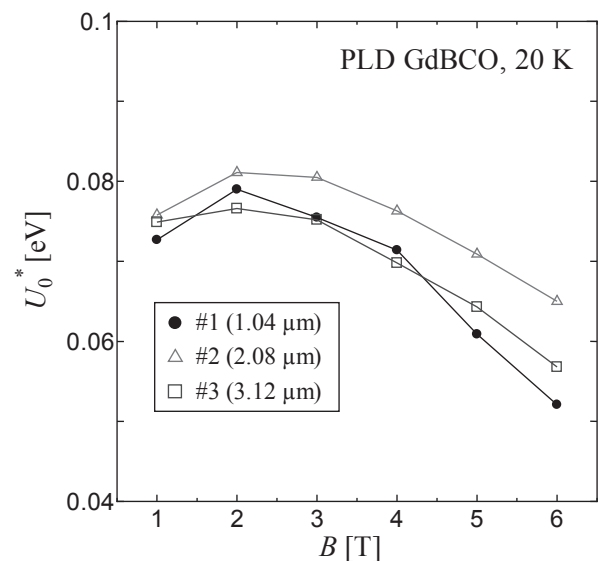


Fig. 2 : Magnetic field dependence of apparent pinning potential at 20 K.

参考文献

[1] Takahashi et al., Physica C 471 (2011) 1025–1028.

重イオン照射した RE 系コート線材の縦磁界下での臨界電流密度

Critical current density in heavy ion irradiated RE-coated conductor in longitudinal magnetic field

木内 勝, 大橋愛一郎, 田邊賢次郎, ヴァトキン・ウラジミール, 小田部荘司, 松下 照男(九工大); 岡安 悟(原子力機構);
 KIUCHI Masaru, OHASHI Aiichiro, TANABE Kenjiro, VYATKIN Vladimir, OTABE S. Edmund,
 MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.); OKAYASU Satoru (JAEA)
 E-mail: kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

金属基板の最適化により、超電導応用機器でも使用できる高い臨界電流密度 J_c を持った Y 系超電導コート線材が開発されてきている。このような高品質の線材では、線材内で均一な電流の流れが期待できることから、金属超電導体でよく知られた縦磁界効果による高い J_c が得られる可能性がある。

これまでに Y 系コート線材の電流通電方向に磁界を加えた縦磁界下 ($B \parallel I$) での J_c 特性を報告した[1]。特に電流 I が磁界 B に対して垂直となる垂直磁界下 ($B \perp I$) の J_c に比べて、縦磁界下では J_c が大きく増加することが明らかになった。

一方で、垂直磁界下では強いピン導入により J_c 特性を向上させることが出来る。したがって、縦磁界下でも有効なピンの導入により、 J_c 特性向上の可能性もある。今回は、酸化物超伝導体で強いピンとして知られる重イオン照射による円柱状欠陥を Y 系コート線材に導入し、縦磁界下の J_c 特性への影響を調べた。

2. 実験

試料は Ni-クラッド基板に PLD 法で超電導層を作製した GdBCO ($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) コート線材である。超電導層の厚さは $2.1 \mu\text{m}$ である。この線材を幅 $50 \mu\text{m}$ 、長さ 1.0 mm のマイクロブリッジに加工し、原子力機構にて、テープの広い面、すなわち c 軸方向から、 200 MeV のエネルギーで Xe と Au の重イオンの照射を行った。照射量は、マッチング磁界 B_{ϕ} に換算すると 1.0 T である。試料の自己磁界の $J_c(0)$ 、臨界温度 T_c 及び欠陥半径 r_0 を表 1 に示す。

J_c 特性は、直流四端子法を用いて E - J 特性を測定し、 $E_c = 1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$ の基準で決定した。コート線材に加える磁界は全て ab 平面内で、電流 I と磁界 B が平行になる、すなわち縦磁界下 ($B \parallel I$) が Fig. 1(a)、垂直磁界下 ($B \perp I$) が Fig. 1(b) として測定を行った。また、全ての測定は液体窒素中で行った。

Table 1. Specification of specimens.

Specimen	$J_c(0)$ at 77.3 K [A/m ²]	T_c [K]	Radius r_0 [nm]
Pure	1.01×10^{10}	93.2	-
Au	2.67×10^9	90.4	5.0
Xe	7.38×10^9	91.5	3.8

3. 結果及び検討

Fig. 2 に Au と Xe の重イオン照射したコート線材の縦磁界下での J_c ($B \parallel I$) 及び垂直磁界下 J_c ($B \perp I$) の磁界依存性を示す。2 つの照射コート線材で、大きく J_c が増加した。さらにその増加率は Xe の方が大きい。一般に 77.3 K 近傍で、 c 軸方向に磁界を加えた場合、照射欠陥の半径が大きい Au の方が J_c の増加率は大きくなるが[2]、縦磁界下では半径が小さい Xe の方が J_c の増加率が大きくなった。これは、縦磁界下では電流と磁界が平行になることにより J_c が増加するため、超電導層にダメージが少なく、電流の流れを障害しない Xe の方が、有効なピンとして作用したためと考えられる。

Fig. 3 に外部磁界を 0 から 0.1 T へ変化させた場合の J_c の増減と自己磁界 $J_c(0)$ の関係を調べるため、 $J_c(0.1 \text{ T})/J_c(0)$ と $J_c(0)$ の関係を示す。参考に超電導層の厚さが異なる Ni クラッドを用いたコート線材の結果も示す[1]。この結果から、この領

域で、 $J_c(0)$ より増加しているのは Xe のみであり、ピンの導入は、縦磁界下での J_c 特性向上に有効であることがわかる。詳細は当日発表する。

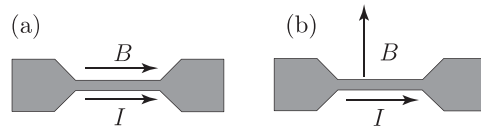


Fig. 1 Arrangement of specimen and magnetic field for the measurement of the critical current density.

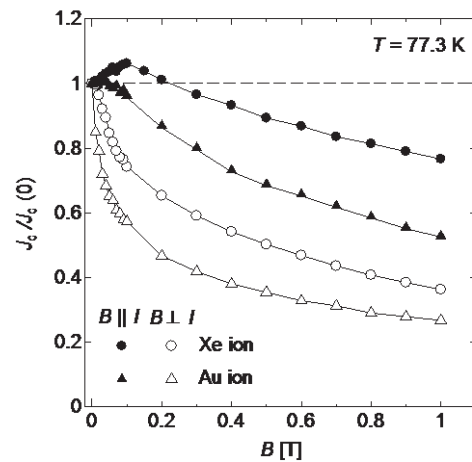


Fig. 2 Magnetic field dependence of J_c at 77.3 K .

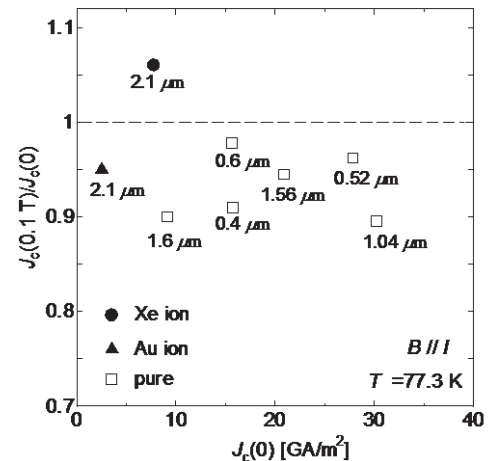


Fig. 3 Relationship between the normalized critical current density in longitudinal field of 0.1 T and the self-field current density $J_c(0)$. The numbers show the thickness of superconducting layer.

参考文献

[1] M. Kiuchi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 85 (2011) p. 1
 [2] H. Nagamizu, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p. 69

高温超電導テープ線材の磁場測定

Magnetic field measurement of HTS conductors

タロウリ モハメド, 孫 建, 渡辺 裕文, 浜辺 誠, 河原 敏男, 山口 作太郎 (中部大);
 二ノ宮 晃 (成蹊大); 張 騰 (中国科学院); シャルフィーカッドウル サミア (チュニス・エルマナール大)
 TALLOULI Mohamed, SUN Jian, WATANABE Hirofumi, HAMABE Makoto, KAWAHRA Toshio, YAMAGUCHI
 Satarou (Chubu Univ.); NINOMIYA Akira (Seikei Univ.), ZHANG Teng (IEE/CAS), CHARFI-KADDOUR Samia (UTM)
 te13802-3107@sti.chubu.ac.jp

1. Introduction

We investigate the behavior of one HTS tape at the phase of the over-current, such as fault condition or overload. It will be useful to make a safety system of the HTS cable. The magnetic field time history and profiles are measured for just after the over-current in short time condition, and the constant current phase. The BSCCO tape is used and its critical current is 200A. We prepared the dc power supply, and its largest current is 200A for dc operation, but the magnitude of the current just after switch ON is higher than 450A and its duration is shorter than 5ms for a low impedance load. This characteristic of the dc power supply is good for the experiment.

2. Experiment

The experimental setup is shown in Fig. 1, and we use an open LN₂ bath. The stepping motor is used to scan the Hall probe. The computer controls the position of the probe and the data acquisition system. The direction of the current is along x axis, and the B_z is measured by the hall probe. We connect the BSCCO tape through the NFB (no fuse breaker) from the dc power supply. The over-current condition is realized by the characteristic of the power supply, and its waveform of the current is shown in Fig. 2. Just after the NFB switch ON, the current is higher than 450A in short time, and after the current is constant of 50A for longer than one hour as in Fig. 2.

The magnetic field near the edge of the HTS tape decays and is changing with time as shown in Fig. 3 in spite that the current is constant with time. We also scanned the probe to measure the vertical component (B_z) of the magnetic field across the HTS tape. The scanning time is 4 min., and the profiles are different especially near the edge.

3. Discussion and Present Conclusion

Since high electric field was applied to the HTS tape in order to realize high current at time of switch ON, the current distribution of the HTS tape would be hollow profile. However, the quality of the HTS tape near the edge would not be good as compared with the center part of the HTS tape. Moreover, the perpendicular component of the magnetic field is higher at the edge than its value at the center. This would be one of the reasons why the magnetic field decays gradually for a long time.

We develop the software to calculate the current density profile from the magnetic field profile as the collaborations between the foreign universities. The first version of the software was completed and we can show the results of the calculation in the presentation.

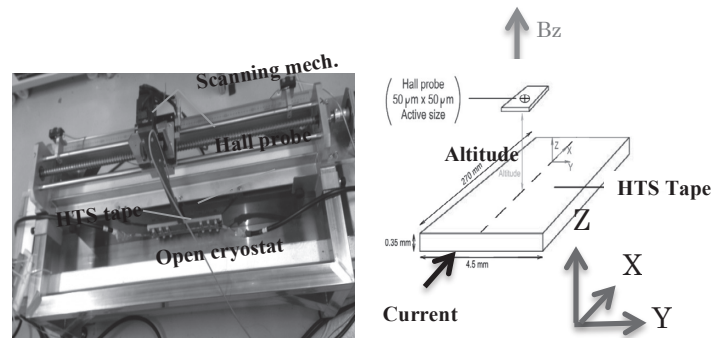


Fig.1 Experimental setup

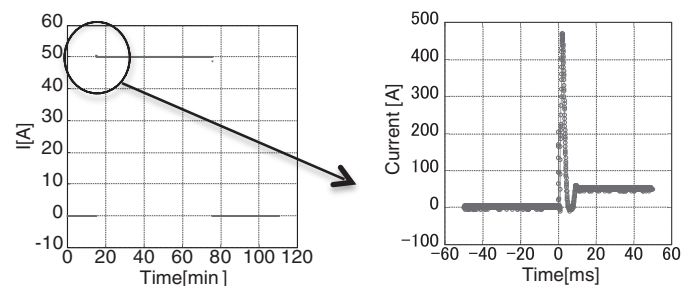


Fig.2 Waveform of Current

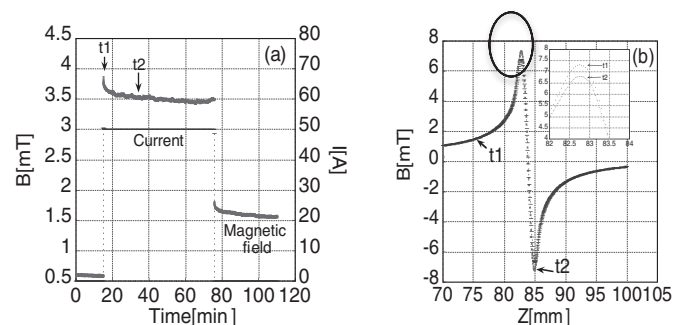


Fig.3 magnetic field time history at the edge (a) and magnetic field profiles at t1 & t2 (b)

Reference:

1. M. Tallouli et al, submitted to ISS 2013.

IBAD-MgO 基板上に製膜した GdBCO 線材の引張応力による 超伝導特性および結晶構造への影響

Influence of applied external strain during the deposition on superconducting properties and crystal structure of the GdBCO coated conductors

浅野 純, 吉田 隆, 一野 祐亮(名大); 吉積 正晃, 和泉 輝郎 (ISTEC-SRL)

ASANO Jun, YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke (Nagoya Univ.); YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (ISTEC-SRL)

E-mail: asano-jun13@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

外部負荷を印加した状態でアニールした超伝導線材において超伝導特性が変化することや、一軸方向の引張負荷を加え、残留応力を打ち消すことで超伝導特性が極大値を示すことが報告されている[1-2]。さらに、熱機械的な処理を行うことで無双晶 YBCO 単結晶が作製されている[3]。これらの報告から製膜時 (in-situ 時) の REBCO 線材にかかる応力を制御することで超伝導特性の向上や双晶境界の影響を明らかにできる可能性がある。

そこで、本研究では reel-to-reel PLD システムを用いて引張応力を加えた状態で IBAD-MgO 基板上に GdBCO 薄膜の製膜を行い、製膜時の引張応力が結晶構造や超伝導特性、双晶に与える影響およびその原因を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

GdBCO 薄膜はパルスレーザー蒸着法(PLD 法)を用いて IBAD-MgO 金属基板上に作製した。ヒーター部における基板の支持台として bending 治具(曲率半径約 38 cm)と flat 治具の二種類を使用し、bending 治具によって外部応力を印加した状態で成膜を行った。また、製膜後にこれらの試料は管状電気炉にて無負荷状態で、大気圧酸素中で 350°C の酸素アニールを行った。作製した薄膜の結晶性、配向性を X 線回折法(XRD)、超伝導特性を直流四端子法で測定した。

3. 実験結果及び考察

XRD の結果から作製した全ての薄膜は良好な 2 軸配向であることを確認した。また、逆格子マッピングを用いて各試料の a 、 b 軸長を求めた。Fig. 1 に外部応力を加えて作製した試料および外部応力を印加していない試料のアニール後の a 、 b 軸長に対してバルクの a 、 b 軸長 ($a_0 = 3.84 \text{ \AA}$ 、 $b_0 = 3.90 \text{ \AA}$) [4] より算出したひずみ量 $(a-a_0)/a_0$ と $(b-b_0)/b_0$ を示す。なお、bending 治具を用いて印加した引張量は 0.013 % である。これは試料の厚さ(約 100 μm)と曲率直径の商から算出した。図より製膜中に外部引張応力が加わることで a 、 b 軸長が圧縮されることが確認された。また、 c 軸長はどの試料でも同程度伸びており、 c 軸方向のひずみ量はほぼ同じであった。このことから引張応力が印加されることで膜内部の酸素量が減少したことが考えられる。

Fig. 2 に薄膜の b 軸長のひずみ量 $(b-b_0)/b_0$ と、それに対する T_c および J_c^{self} の変化を示す。この変化は a 軸のひずみ量 $(a-a_0)/a_0$ においても同様な傾向である。図(a)より、 $(b-b_0)/b_0$ が 0 以下のとき T_c が大きくなる、つまり膜中の a 、 b 軸が外部応力を印加されて圧縮されることで T_c が向上した。一方、図(b)より、ひずみ量の絶対値が大きいつま J_c が下がる傾向に

あった。また、引張応力を印加した試料の J_c が上昇した。これらの原因の詳細は不明であるが、 a 、 b 軸の圧縮・引張は、超伝導に寄与する CuO_2 面に影響を与えるため[5]、ひずみ量が小さくとも CuO_2 面のキャリア濃度が変化し、超伝導特性に変化が現れたと推察される。

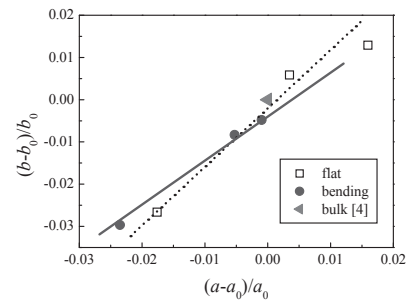


Fig. 1 Strain for a, b -axes of after-annealed samples.

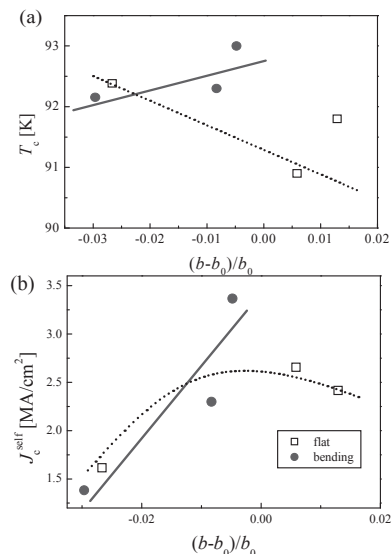


Fig. 2 Superconducting properties as a function of $(b-b_0)/b_0$ in after-annealed samples.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(19676005, 23226014, 25289358)の助成および(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. T. Suzuki et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013) p. 8000104
2. S. Awaji et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) p. 1
3. U. Welp et al.: Physica C, Vol.161 (1989) p. 1
4. J. M. Tarascon et al.: Phys. Rev. B 36 (1987) p. 229
5. 立木昌, 藤田敏三: 高温超伝導の科学(裳華堂, 1999) 第2章高温超伝導物質.

第三高調波電圧誘導法による曲げ歪を加えた GdBCOコート線材の 輸送特性劣化の検出

Detection of degradation of transport properties in GdBCO coat conductor due to bending strain using third harmonic voltage induction method

笠原 慎平, 荒木 薫, 甲野 輝, 末吉 哲郎, 藤吉 孝則(熊本大学)

KASAHARA Shinpei, ARAKI Kaoru, KOUNO Hikaru, SUEYOSHI Tetsuro, FUJIYOSHI Takanori (Kumamoto Univ.)

E-mail: shinpei@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

近年、超伝導コイルや超伝導ケーブルの開発に向けた長尺のコート線材の開発が盛んである。コート線材の応用には、コート線材の臨界電流密度 J_c が高いことや、 J_c の空間分布が均一であることが求められる。また、コート線材には結晶粒界や欠陥が存在するため、 J_c を局所的に評価することが重要になる。そこで本論文では、コート線材の加工時に加わる曲げ歪の J_c への影響を調べるために、GdBCOコート線材に対して引張り曲げ歪を与え第三高調波電圧誘導法によって輸送特性劣化の検出を試みた。コイル電流 I_0 における第三高調波電圧 V_3 の依存性 (V_3 - I_0 特性) を測定し、周波数ごとに規格化した V_3/fI_0 特性を求め、第三高調波電圧誘導法[1]の曲げ歪検出における有用性について考察した。

2. 実験

本実験はフジクラ製の GdBCO コート線材を試料として用いた。実験に用いたコート線材の大きさは $10\text{mm} \times 30\text{mm}$ である。Table.1 に試料構造を示す。また、試料の許容曲げ直径は 30mm であり、Ag 層は第三高調波電圧 V_3 の測定のために除去している。

測定コイルは、駆動コイルと誘導コイルを分離した 2 コイルを用い、ポピンの内側に誘導コイルを 200 回巻き、外側に駆動コイルを 400 回巻いた。各コイルは線径 $50\mu\text{m}$ のエナメル銅線から成り、誘導コイルは内径 1mm 、外径 2.4mm 、高さ 1mm 、駆動コイルは内径 2.4mm 、外径 5mm 、高さ 1mm で、コイル定数が 90.78mm^{-1} であり、またコイルと試料の間は 0.2mm である。駆動電流の周波数は $0.5\text{kHz} \sim 5.0\text{kHz}$ の範囲で測定を行った。

曲げ試験は Goldacker 式装置[2]を参考に行った。曲げ直径は ∞ (曲げ無し) $\sim 10\text{mm}$ の範囲で引張り方向と圧縮方向の曲げ歪を与え、試料を直線状に戻してから磁場中 ($0 \sim 0.51\text{T}$) で Fig.1 の 1R \sim 5L の各位置で測定した。

Table.1

Layer	Thickness
Ag	$8.2 \mu\text{m}$
GdBa ₂ Cu ₃ O _x	$2.3 \mu\text{m}$
CeO ₂	$0.4 \mu\text{m}$
MgO	5nm
Y ₂ O ₃	30nm
Al ₂ O ₃	100nm
Hastelly tape	$75 \mu\text{m}$

3. 実験結果

Fig.1 に試料の中心である測定位置 3C, $B=0.51\text{T}$ における曲げ直径 ∞ と 20mm の V_3 - I_0 特性を示す。曲げ直径 ∞ では V_3 の立ち上がりを検出出来ず、臨界値に達していないことが分かる。これは曲げ直径 25mm まで同じ振る舞いを示す。しかし、曲げ直径 20mm では V_3 の立ち上がりを観測できた。これは施した曲げ歪により試料の輸送特性が著しく低下したためだと考えられる。

Fig.2 に測定位置 3C, $B=0.51\text{T}$ における曲げ直径 20mm の V_3/fI_0 - I_0 特性を示す。このとき低 I_0 および高 I_0 時において2つの V_3 の増加がみられた、これは曲げ歪によって生じたマイクロクラックにより遮蔽電流の流れが変化したためと考えられる。

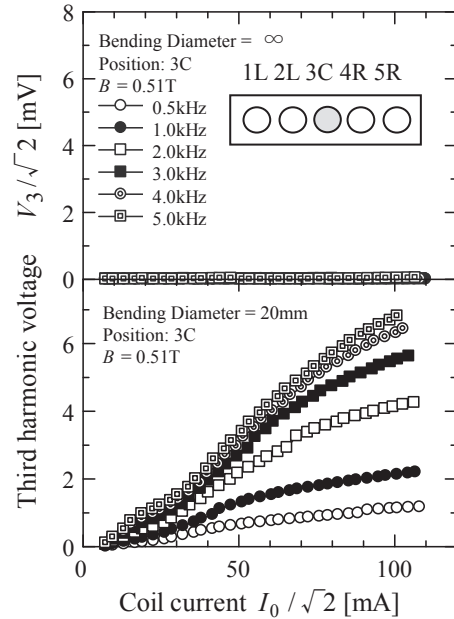


Fig.1 V_3 - I_0 curves of bending diameter ∞ and 20mm where the coils were placed at the center of GdBCO film.

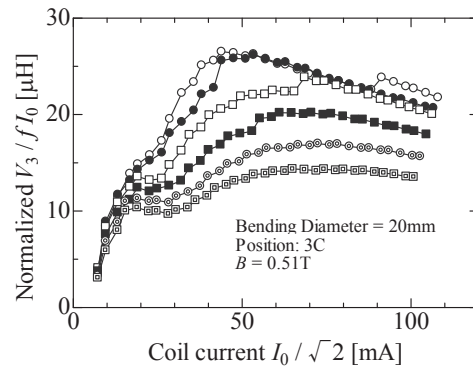


Fig.2 The V_3/fI_0 curves of Bending Diameter 20mm

4.まとめ

本研究では、第三高調波電圧誘導法を用いて GdBCO コート線材の曲げ直径依存性を評価した。その結果、曲げ直径 20mm 以下において V_3 - I_0 特性を周波数ごとに規格化した V_3/fI_0 特性をにおいて試料超伝導層への曲げ歪の影響を検出、評価することが出来た。したがって第三高調波電圧誘導法による曲げ歪による欠陥検出の有用性を示すことが出来た。

参考文献

1. J. H. Claassen, et al.: Rev. Sci. Instrum. 62 (1991) 996.
2. 黒田恒生, 片桐一宗, 伊藤喜久男, H.S. Shin, 和田仁, 熊倉浩明: 日本金属学会誌 72 (2008) 4

REBCO coated conductor の X 線回折装置を用いた内部ひずみ測定法の開発

Development of internal strain measurement system for REBCO coated conductors by using X-ray diffraction

小黒 英俊, 諏訪 友音, 武藤 翔吾, 鈴木 匠, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大)

OGURO Hidetoshi, SUWA Tomone, MUTO Shogo, SUZUKI Takumi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)

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

1. はじめに

REBCO coated conductor の I_c のひずみ依存性はこれまでによく調べられており、ひずみの 2 乗に従って I_c が劣化していくことが知られている[1]。この変化は、一軸圧縮による T_c の変化から定性的には説明ができるが、定量的にうまく説明ができていない[2]。これを説明するには、引張りひずみを与えた際の、格子の変形の様子を理解することが必要である。

このため我々は、放射光を用いて REBCO coated conductor の内部ひずみ測定を引張りひずみ下で行い、REBCO の結晶格子が Coated conductor 内でどのように変化するかを調べてきた[2, 3]。この実験は、REBCO の各結晶軸が、外部から印加した引張りひずみによって、変化の様子を観測するのに威力を発揮している。ただし問題点として、放射光施設の短いビームタイム内で測定する必要があり、多くの条件での測定が困難であったことがある。

そこで、新たに実験室 X 線を用いた内部ひずみ測定装置を立ち上げ、じっくりと時間をかけた実験が可能な環境を作製した。これにより、細かい条件の変更や、放射光施設での実験前における予備実験など、実験の幅が広がる可能性ができたので、この装置を紹介する。

2. 実験方法

X 線回折装置として、市販されているリガク製 Ultima IV を用いた。この X 線回折中心に試料が設置できるように、小型の引張り装置を設置した。その様子を Fig. 1 に示す。図中左より X 線が入射し、中央部に位置する試料を透過し、右の検出器で回折線を観測する。管球には、市販されている中では発生する X 線のエネルギーが高い、Mo 管球(エネルギー: 17.44 keV、波長: 0.7093 Å)を使用した。引張り装置は、2 kN までロードセルで測定できるようにしており、試料に加わるひずみはひずみゲージで測定した。装置上部のボルトを回すことで、ネジの先に付いているつかみ具の片側が上部に引き上げられるため、線材にひずみを与えることができる。

測定されるのは、REBCO からの回折線であり、ここから各回折線に対応した面の面間隔が導出される。この面間隔を比較することで、格子ひずみ(結晶格子に発生するひずみ)を算出することができる。

3. 測定結果

実際にひずみを与えながら、フジクラ製 Coated conductor の内部ひずみ測定を行った。フジクラの線材は、線材長手方向に GdBCO の [110] 方向が向いているため[3]、今回は GdBCO 110 面からの回折線を測定した。このとき、回折によるピークが観測できたため、そのピーク位置から面間隔を求め、ひずみに換算した。Fig. 2 に測定された格子ひずみの引張りひずみによる変化を示す。図のように、はっきりとひずみの変化を捉えることができることが分かった。エラーバーが大きいのは、ピーク強度が弱かったことが原因だと考えられる。

今回の結果を過去の放射光による測定結果と比較すると、精度は劣るが、格子ひずみの変化の傾向は同じようにとらえられていることが分かった。つまり、小さなひずみ領域(0.4%以下)では、外部から印加したひずみに比例して格子ひずみが増加し、それ以上のひずみでは外部ひずみに依存しない様

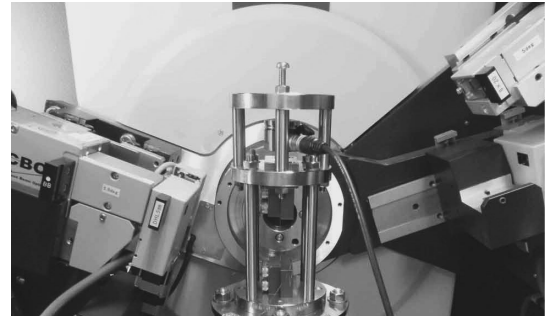


Fig. 1 The apparatus for internal strain measurement of the coated conductors by X-rays.

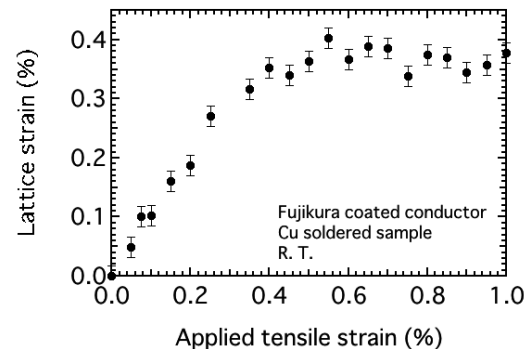


Fig. 2 The lattice strain of the REBCO crystals as a function of the applied tensile strain for the REBCO coated conductor.

子が観測されている。このことから、0.4%程度のひずみで GdBCO 層が破壊されたため、ひずみの変化が起こらなくなったと考えられる。このように、精度では放射光に劣るが、変化の様子を観測することは、問題なく可能である事が分かった。

4. まとめ

実験室の X 線回折装置において、引張りひずみ下の Coated conductor に対する、内部ひずみ測定を行う装置を開発した。X 線源として Mo 管球を用い、小型の引張り装置でひずみを与えながら、coated conductor 内の REBCO からの回折線を測定した。その結果、内部ひずみの変化の様子を観測することが、可能である事が分かった。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構(JST)の先端的低炭素化技術開発事業(ALCA)の支援を受けました。

文献

1. M. Sugano, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 23 (2010) 085013
2. H. Oguro, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013) 8400304
3. M. Sugano, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 25 (2012) 054014

Nd:YAG レーザーによる PLD 法を用いた(Bi,Pb)2223 超伝導体薄膜の作製 Fabrication of (Bi,Pb)2223 superconducting thin films by Nd:YAG pulsed laser deposition method.

高平 俊輔¹, 秋田 純弥¹, 一野 祐亮¹, 吉田 隆^{1,2}(名古屋大¹, JST-ALCA²)

TAKAHIRA Shunsuke¹, AKITA Junya¹, ICHINO Yusuke¹, YOSHIDA Yutaka^{1,2} (Nagoya Univ.¹, JST-ALCA²)

E-mail: takahira-syunsuke13@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₇ 超伝導体は高い T_c を持ち、線材化が比較的容易なため、実用的超伝導線材として市販されている。しかし、磁場中において臨界電流密度 J_c が低いという課題点を持っている。磁場中における臨界電流密度を改善することができれば、Bi 系超伝導体の機器応用の幅が広がるはずである。そこで、本研究では結晶粒界が少なく J_c の向上が見込める(Bi,Pb)2223 エピタキシャル薄膜の作製を目的とした。(Bi,Pb)2223 エピタキシャル薄膜の作製はスパッタリング法を用いた報告がされている[1]。本研究では、Nd:YAG レーザーによる PLD 法を使用し、PLD 法で薄膜を作製したのち、Pb の導入及び結晶性向上のため大気中でポストアニールを行い、(Bi,Pb)2223 薄膜の作製を試みた。

2. 実験方法

本研究では、(Bi,Pb)2223 薄膜を LaAlO₃(100)単結晶基板上に、Nd:YAG レーザーを用いた PLD 法で作製した。PLD 法で使用したターゲットは固相反応法で作製し、ターゲットの組成は Bi_{2.1}Pb_{1.5}Sr₂Ca_{2.3}Cu₄O₇ となるようにした。薄膜作製条件として、基板温度を 800°C、酸素分圧を 0.2 Torr、ターゲット基板間距離を 40 mm と固定し成膜を行った。

成膜直後の薄膜には、Pb が含まれておらず、また Bi₂Sr₂CaCu₂O₇ 相が主相となっていたためポストアニールを行った。ポストアニールを行うに際して、2 枚の薄膜表面を重ね合わせる face to face アニールを導入した[2]。Face to face アニールを導入することで、薄膜から Bi の再蒸発を防ぎ、(Bi,Pb)2223 相の分解を防ぐことが出来る。さらに、薄膜に Pb を導入するために、PLD 法で使用したターゲットと同じ組成のバルク体で薄膜を囲みポストアニールを行った。ポストアニールを行う温度は 833°C と固定し、アニール時間を 12~48 時間と変更することで(Bi,Pb)2223 が主相となる条件の探索を行った。ポストアニール後、超伝導特性の向上のため 450°C 酸素雰囲気中においてもアニールを行った。薄膜の結晶性及び配向性を X 線回折法、薄膜組成を SEM-EDX、超伝導特性を直流四端子法でそれぞれ測定及び観察した。

3. 実験結果及び考察

ポストアニール後の薄膜について SEM-EDX を使用して組成を測定したところ、薄膜中に Pb が添加され目的の (Bi,Pb)2223 組成になっていることが確認された。また、XRD 測定より、(Bi,Pb)2223、Bi2212 及び Bi2201 相が確認された。Fig. 1 に各アニール時間における XRD 測定結果を示す。ポストアニール時間が 20 時間及び 30 時間において、(Bi,Pb)2223 相のピークが強く確認された。それ以外の薄膜に関しては、Bi2212 相と (Bi,Pb)2223 相が混在しているピークが観察された。これは、短時間の熱処理においては Bi2212 相が (Bi,Pb)2223 相に変化している途中段階と考えられ、長時間の熱処理では Bi2212 相及び Bi2201 相が増加していることから Bi2223 相の分解が進んでいると考えられる。Fig. 2 に Bi2201(0010)と Bi2212(0012)と Bi2223(0014)の強度の和に対する Bi2223(0014)の割合 R を示す。ポストアニール時間が 20 時間のとき、Bi2223 強度が 70%程度と最も高くなった。さらに、(Bi,Pb)2223 相の(2214)回折ピークを用いた ϕ スキャン測定結

果より、90°ごとにピークが観察されておりエピタキシャル成長していることが確認された。以上より、ポストアニール時間は 20 時間が最適と考えられる。Fig. 3 に作製した薄膜の抵抗率の温度依存性を示す。いずれの薄膜も 105 K 付近で抵抗率が低下し始め、 T_c^{zero} は 100 K 程度であり、再現性も確認された。当日は、磁場中 J_c や不可逆磁場など他の超伝導特性についても報告する。

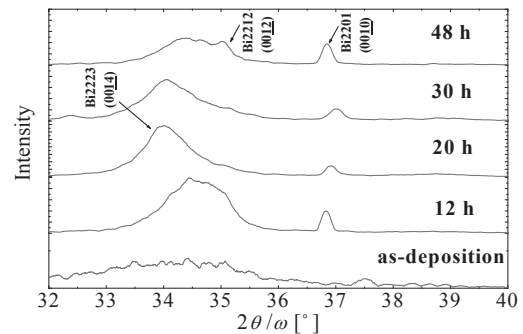


Fig. 1 X-ray diffraction patterns of post-annealed samples.

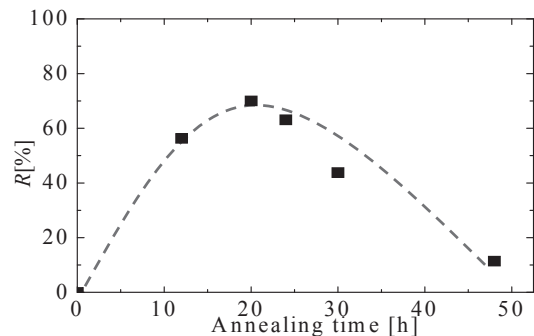


Fig. 2 XRD intensity ratio R of Bi2223(0014) to the total intensity of Bi2201(0010), Bi2212(0012) and Bi2223(0014) as a function of post-annealing time.

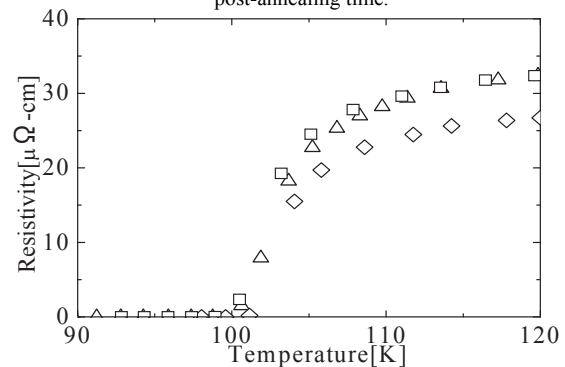


Fig. 3 Temperature dependences of the resistivity of the (Bi,Pb)2223 films post-annealed for 20 hours.

4. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(23226014, 19676005, 25289358)および先端的低炭素技術開発事業(ALCA)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] T. Yoshimura, et al.: J. Cyro. Super. Soc. Jpn., Vol. 48 (2013) p.95
- [2] K. Hamanaka, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48 (2009) 125502

異なる液相組成で作製した VLS 成長 LaBa₂Cu₃O_y 薄膜の表面形状

Surface morphologies of LaBa₂Cu₃O_y films fabricated by Vapor-Liquid-Solid growth mode with different compositions of liquid phase

山垣 陵太, 一野 祐亮, 吉田 隆(名大)
 YAMAGAKI Ryota, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)
 E-mail: yamagaki-ryota13@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

臨界電流密度 J_c を向上させるためには、人工ピンニングセンターを導入する他に高 T_c 材料を用いることも有用である。現在広く研究されている REBa₂Cu₃O_y (REBCO) 材料の中でも LaBa₂Cu₃O_y は、最も高い臨界温度を持つことが期待されている[1]。一方で、REBCO 材料は、RE³⁺イオンと Ba²⁺イオンが置換することで固溶体を形成することも知られている。その傾向は RE³⁺イオンが大きいほど顕著にみられるため、最も大きいイオン半径を持つ LaBCO は固溶体を最も生成しやすい材料である。この置換によって形成される固溶体は、材料の T_c を大きく低下させるため、高 T_c の LaBCO 薄膜を作製するにあたって置換の抑制が最重要課題となる。本研究では、La/Ba 置換を抑制する手段として Vapor-Liquid-Solid(VLS)成長法を用いて、LaBCO 薄膜の作製を行った。VLS 成長では、成長界面に Ba-Cu-O 系の液相を設け、La の濃度を低くすることで固溶体の形成を抑制できる可能性がある。以上から本研究では、Ba-Cu-O 液相組成が La/Ba 置換に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

薄膜試料作製には Nd:YAG-PLD 法を用いた。VLS-LaBCO 薄膜は、成長の核となる固相(solid 層)上に液相(liquid 層)の Ba-Cu-O 層を設け、その上に原料となる La, Ba, Cu を気相(vapor 層)から供給し、SrTiO₃ (100)基板上に作製した。liquid 層は、一枚の基板上に連続的に組成を変化させて作製できるコンビナトリアル法を用いて液相組成を Ba : Cu = 3:5 から 3:12 まで変化させた。solid 層、liquid 層、vapor 層ともに、基板温度(T_s)870°C、酸素分圧(pO_2)0.4 Torr、ターゲット基板間距離(d_{T-S})40 mm 及びレーザー周波数 $f = 2$ Hz とした条件下で作製した。膜厚は、250 nm とした。作製した試料は、PLD-LaBCO 薄膜を用いた予備実験で最適化した条件 (350°C, 2.5 h)を用いて酸素アニールを行った。

3. 結果及び考察

まず、VLS-LaBCO 薄膜を作製するにあたり、PLD-LaBCO 薄膜の作製を行った。PLD-LaBCO 薄膜では、VLS-LaBCO 薄膜と同じ基板温度及び酸素分圧で、 $f = 5$ Hz、 $d_{T-S} = 19$ mm の時に T_c が 76.6 K であり、その時の c 軸長は 11.88 Å であった。また、この試料の置換量 x は ICP 測定より $x \sim 0.2$ であった。 d_{T-S} を変化させることで、LaBCO 膜の組成が化学量論比に近づき T_c が向上したが、置換が低 T_c に大きく影響している。

次に、Fig. 1 に VLS 成長法を用いた液相組成に対する LaBCO 薄膜の c 軸長と T_c の変化を示す。同条件で作製した PLD-LaBCO 薄膜は $T_c = 34.4$ K であったことから、全ての VLS-LaBCO 薄膜において T_c の向上が確認された。各薄膜の c 軸長を調べた結果、PLD-LaBCO 薄膜の c 軸長は、11.93 Å であったのに対し、作製した5つの VLS-LaBCO 膜は 11.80 Å から 11.83 Å であった。薄膜中に酸素欠損がないと仮定して、置換量 x に対する LaBCO バルクの c 軸長の関係[2]を用いて、本研究で作製した LaBCO 薄膜の c 軸長から x を求めた。その結果、PLD-LaBCO では $x \sim 0.4$ で、VLS-LaBCO では $x \sim 0.2$ であった。一方で、各置換量に対する c 軸長は $x = 0.4$ で 11.73 Å、 $x = 0.2$ で 11.74 Å であり、本研究の VLS、

PLD 試料共に長く、一致しない。この要因として LaBCO 薄膜内には置換に加えて酸素欠損も含まれていると考えられる。LaBCO に次いで置換が起きやすい NdBCO において、Nd/Ba 置換により酸素拡散を妨げることが報告されており[3]、La/Ba 置換領域が酸素拡散を妨げ、酸素欠損を生じた可能性がある。正確な x と酸素欠損量を求めることは難しいが、両方が T_c の低下に寄与していると考えられる。

また、VLS-LaBCO 膜同士で比較すると、液相内の Cu 組成が増えるに従って、 T_c の減少がみられた。フラックス法で作製された NdBCO 単結晶においても、液相組成のうち低 Cu 濃度では Nd/Ba 置換が少なく、高 Cu 濃度では Nd/Ba 置換が起きやすくなる傾向が報告されており、本研究の結果と一致する[4]。しかし、他の REBCO の T_c を超えるような LaBCO 薄膜は得られておらず、さらに作製条件の最適化が必要である。

Fig. 2 に、VLS-LaBCO 膜の DFM 像を示す。図より、本研究で作製した VLS-LaBCO 膜において 2 次元核成長が確認でき、また他の液相組成においても 2 次元核成長が観測された。当日には、さらに広い温度領域、酸素分圧領域で作製した LaBCO の表面形状、超伝導特性について報告する。

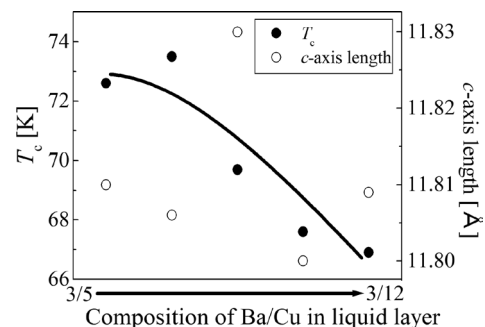


Fig.1 T_c and c -axis length of VLS-LaBCO films which have different composition of the liquid layer

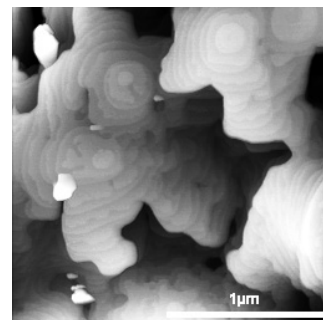


Fig.2 DFM image of VLS-LaBCO films with composition of the liquid layer of Ba : Cu = 3:5

4. 謝辞

本研究の一部は、科学研究補助金(19676005, 23226014 及び 25289358)の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

1. D. Klibanaow and et al.: J. Am. Ceram. Soc., Vol. 71 (1988) p.C-267
2. T. Wada and et al.: Phys. Rev. B, Vol. 39 (1989) p.9126
3. A. Oka and et al.: Physica C, Vol. 305 (1998) p.213
4. M. Yoshizumi and et al.: Physica C, Vol. 334 (2000) p.77

Sr₂CuO_{4-δ} 薄膜の超伝導化による希土類フリー超伝導線材への挑戦

Challenges for rare-earth-free superconducting coated conductors by fabricating superconducting Sr₂CuO_{4-δ} thin films

一野 祐亮, 山垣 陵太, 杉原 和樹, 吉田 隆(名大)

ICHINO Yusuke, YAMAGAKI Ryota, SUGIHARA Kazuki, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.);
E-mail: ichino@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

90 K 以上の T_c を持ち、磁場中で高い J_c を示す REBCO コーテッドコンダクターは実用化に向けて機器開発の段階まで進んでいる。しかし、希少なレアアース元素を含むため、元素戦略を考慮した超伝導線材についても検討を進める必要があると考えている。

そこで、我々は AE-Cu-O 系酸化物に着目した。高压合成された Sr₂CuO_{4-δ} パルクは 90 K を越える T_c を持つことが報告されている[1, 2]。また、MBE 法で作製した AE₂CuO_{4-δ} (AE=Sr, Ba)エピタキシャル薄膜はオゾンアニールによってオンセット $T_c=75\sim 90$ K 程度の試料が作製されている[3]。

本報告では、レアアースフリー超伝導線材を目指した Sr₂CuO_{4-δ} (SCO)超伝導薄膜の作製を目的として、PLD 法を用いて SCO エピタキシャル薄膜を作製した。SCO は CuO₂ 面の酸素欠損が非常に起こりやすいため、成膜条件やポストアニール条件に対する結晶構造や電気特性を評価し、超伝導化を目指した。

2. 実験方法

SCO 薄膜は、Nd:YAG($\lambda = 266$ nm)パルスレーザーを用いたパルスレーザー蒸着(PLD)法により作製した。基板には、LaAlO₃(100)単結晶基板を用いた。ターゲットとして、大気中で焼成した Sr₂CuO₃ 焼結体を用いた。なお、この Sr₂CuO₃ 焼結体の磁化率測定から、超伝導転移は確認されなかった。成膜時の基板ヒーター温度は 700~800°C、酸素分圧は 110 Pa で作製を行った。ターゲット-基板間距離は 40 mm、レーザーのエネルギー密度は 2.0 J/cm²、またレーザー周波数は 2 Hz とした。SCO 薄膜は水分に弱く、大気中に放置すると黒色の薄膜が透明になり、XRD 法でもピークが確認出来なくなるため、成膜後に Au を保護層として PLD 法を用いて室温、10⁻⁶ Torr 下で蒸着した。作製した薄膜の結晶性は XRD、超伝導特性は直流四端子法で評価した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に様々な成膜温度で作製した SCO 薄膜の XRD パターンを示す。図から、どの温度でも c 軸配向していることが確認された。また、SCO(103)面を使った ϕ スキャン測定から、SCO [100] // LAO [100]であった。以上から、SCO 薄膜が LAO 基板上にエピタキシャル成長していることを確認した。また、 c 軸長は 12.68~12.70 Å であった。成膜後にチャンバーを大気開放せずに酸素を導入し、様々な温度、時間条件下で in-situ アニールを行ったが、XRD パターンや c 軸長に大きな変化はなかった。

Fig. 2 に SCO 薄膜 (Au 保護層付き)における電気抵抗率の温度依存性を示す。Au 保護層の無い SCO 薄膜はテスター抵抗が 2 MΩ 程度の絶縁体であることと、低温で不純物に起因する温度に対して平坦な抵抗の挙動が見えることから、図では Au 保護層の抵抗だけが見えていると言える。

SCO に関する過去の報告によると、SCO は CuO₂ 面に多くの酸素欠損があるため、CuO₂ 面から成る導電パスがほとんど無いため抵抗が高い。そのため、高压合成やオゾンアニールなどで強酸化する必要がある。そこで本研究では、SCO 薄膜 (保護層無し)を様々な条件下でポストアニールした。条件は、温度 200~500°C、時間 1~100 h で 1 気圧の酸素気流中とした。

また、酸化剤として SrO₂ や BaO₂ 粉末中でのポストアニールも試みた。アニール後、テスター抵抗は 300 kΩ 程度まで低下したものの、 c 軸長はほとんど変化しなかった。

4. まとめ

Nd:YAG-PLD 法を用いて LAO 基板上に SCO エピタキシャル薄膜を作製できたが、抵抗率が非常に高く、超伝導転移は見られなかった。また、様々な条件下でポストアニールを行ったところ、テスター抵抗の減少は見られたものの、 c 軸長に大きな変化はなかった。今後は、オゾンアニールなど強酸化を試みる予定である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (23226014, 24656580, 25289358)からの助成を受けて実施した。

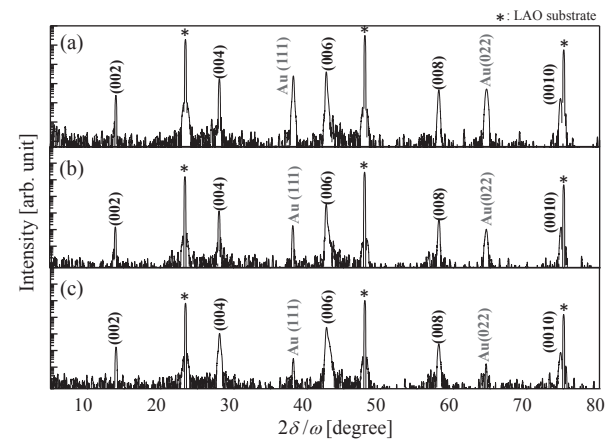


Fig. 1 XRD patterns of Sr₂CuO_{4-δ} thin films deposited at (a) 700°C, (b) 750°C and (c) 800°C.

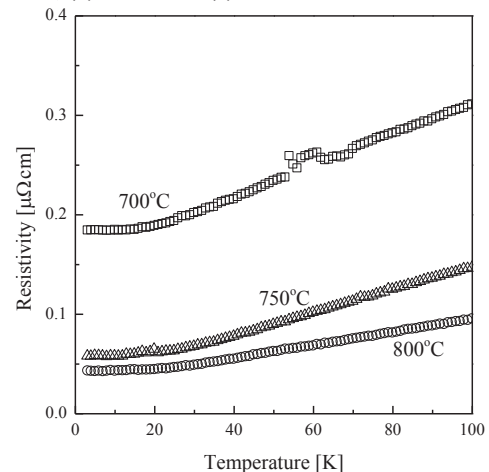


Fig. 2 Temperature vs. resistance in Sr₂CuO_{4-δ} thin films with Au cap layer.

参考文献

1. P. Laffez, et al.: Physica C, Vol. 222 (1994) p. 303
2. P. D. Han, et al.: Physica C, Vol. 228 (1994) p. 129
3. S. Karimoto, et al.: J. Low Temp. Phys., Vol. 131 (2003) p. 619

鉄系超伝導体 Fe(Te,S)の不純物効果

Impurity effect on superconductivity of Fe(Te,S)

佐藤 和輝, 石川 恵介, 亀卦川 尚子(一関高専)
 SATO Kazuki, ISHIKAWA Keisuke, KIKEGAWA Takako (INCT)
 E-mail: a12611@g.ichinoseki.ac.jp

1. はじめに

鉄系超伝導体の中で 11 系に属する Fe(Te,S)は、他の鉄系超伝導体に見られる絶縁層がなく、超伝導を担う Fe - (Te,S)面のみが積層した単純な結晶構造を有する。さらに、As や Se などの毒劇物元素を含まない唯一の鉄系超伝導体であり、扱いやすく応用に適しているという利点がある。母物質である FeTe はバルクでは超伝導を示さず、70 K 近傍で tetragonal から monoclinic へ構造相転移し、それに伴って反強磁性磁気秩序を示す[1]。FeTe の層間には過剰鉄が数%含まれており、これが超伝導性を抑制している[2]。これまでの報告によると、Fe(Te,S)の超伝導性はアニール処理を施すことによって初めて現れる[3]。しかしながら、我々は S を 20~30% 置換した試料において、as-grown で抵抗ゼロを観測した。そこで本研究では、as-grown で超伝導を示した要因を明らかにすべく、試料の構造及び物性を測定した。

2. 実験方法

FeTe_{1-x}S_x バルク試料(x=0~0.3)は、出発原料として Fe、Te、TeS を用いて固相反応法で合成した。出発原料を組成比に従って秤量、混合した後、ペレット状に加圧成型した。それを石英管に真空封入し、600°Cで10時間焼成した。均質な試料を得るため、焼成後の試料を細かく砕き、再度ペレット状に加圧成型したものを、石英管に真空封入し、750°Cで12時間焼成した。酸素アニールは、石英管に試料と1気圧の酸素を共に封入し、200°Cで2時間アニールした。試料の特性評価はX線回折(XRD)と4端子法電気抵抗測定で行なった。磁気抵抗は、最大印加磁場7Tで測定した。

3. 実験結果

図1に母物質であるFeTeと超伝導が出現したFeTe_{0.8}S_{0.2}のXRDの結果を示す。これらの試料から、FeTe₂やFe₃O₄といった不純物相の析出が観測された。また、酸素アニールによるピーク位置の顕著な変化は見られない。図2にas-grown試料の電気抵抗率 ρ の温度依存性を示す。300Kにおける ρ の値は、3~6 m Ω cm程度であり、温度の低下とともに非金属的に増加する。S置換をしないFeTeでは、85K近傍で顕著な極大値を取り、それより低温で急激に減少する。S置換をした試料では、FeTeのような極大は観測されないが、100K近傍で ρ の温度係数($d\rho/dT$)の不連続な変化が認められる。FeTeは低温でほぼ一定の値をとるように見えるが、8Kより低温領

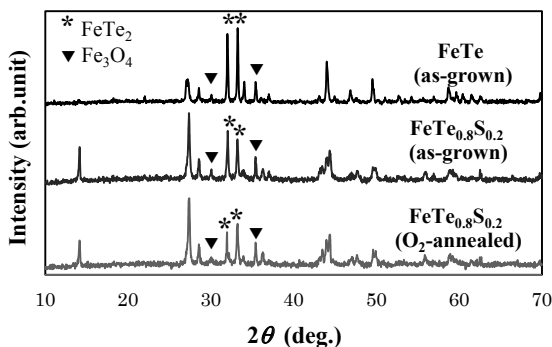


Fig. 1 The XRD patterns of the FeTe (as-grown), FeTe_{0.8}S_{0.2} (as-grown) and FeTe_{0.8}S_{0.2} (O₂-annealed).

域を拡大してみると、内挿図に明らかなように、 $T_{\min} \sim 4$ Kで極小値をとる。これは T_{\min} より低温の ρ が対数的温度依存性を示すことから、希薄な磁性不純物による近藤効果であると推測される。Sを20%置換したFeTe_{0.8}S_{0.2}は $T_c^{\text{onset}} = 9.2$ K、 $T_c^{\text{zero}} = 3.4$ Kの超伝導を示した。これらの値は酸素アニールを施すことによって、 $T_c^{\text{onset}} = 9.8$ K、 $T_c^{\text{zero}} = 5.2$ Kに上昇する。図3に常伝導状態の磁気抵抗 $\Delta\rho/\rho(0) = (\rho(H) - \rho(0))/\rho(0)$ を示す。FeTeが正の磁気抵抗を示すのに対して、超伝導転移が観測された酸素アニール試料FeTe_{0.8}S_{0.2}は負の磁気抵抗を示す。

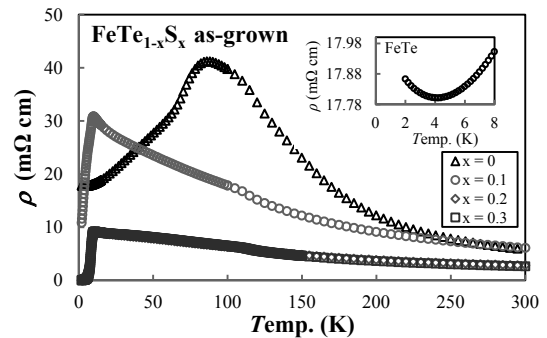


Fig. 2 Temperature dependence of resistivity for as-grown samples of FeTe_{1-x}S_x (x = 0, 0.1, 0.2, 0.3).

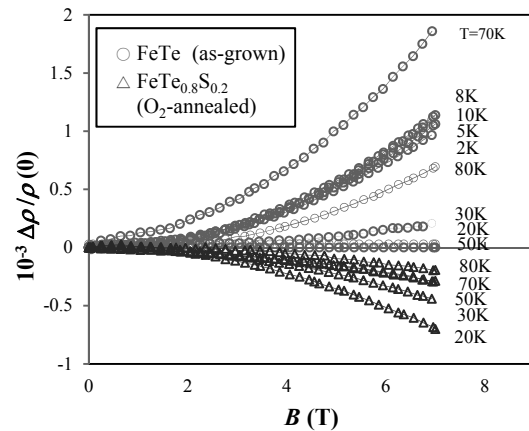


Fig. 3 Field dependence of magnetoresistance in FeTe (as-grown) and FeTe_{0.8}S_{0.2} (O₂-annealed).

4. まとめ

本研究の結果から、as-grown 試料における超伝導発現は、FeTe₂ や Fe₃O₄ といった不純物相の析出による、過剰鉄の軽減に起因していると推測される。また、酸素アニールによる超伝導性の向上は、アニールによってインターカーレートされた酸素が過剰鉄の影響の抑制に寄与したと思われる。常伝導状態の磁気抵抗は、超伝導を示さないFeTeが正の磁気抵抗を示すのに対し、S置換した試料では負の磁気抵抗が観測された。その大きさは 10^{-3} と非常に小さいが、明らかな B^2 依存性が認められた。

参考文献

- [1] S. Li, et al.: Phys. Rev. B **79** (2009) 054503
- [2] M. Bendele, et al.: Phys. Rev. B **82** (2010) 212504
- [3] Y. Mizuguchi, et al.: Europhys. Lett. **90** (2010) 57002

Mg₂Cu 添加 MgB₂ 線材の微細組織と超伝導特性に及ぼす ホウ素粉末サイズの影響

Influences of boron powder sizes on microstructure and superconducting properties of MgB₂ wires with Mg₂Cu addition

柏井 太郎, 嶋田 雄介, 波多 聡, 中島 英治 (九州大学); 菱沼 良光 (核融合研);
KASHIWAI Taro, SHIMADA Yusuke, HATA Satoshi, NAKASHIMA Hideharu (Kyushu University);
HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS)
E-mail: t.kashiwai.494@s.kyushu-u.ac.jp

1. 目的

MgB₂ 超伝導体は 39 K と高い臨界温度 T_c を有し、低放射線物質であることから核融合炉用コイルへの応用が期待できる。核融合炉のような大型コイルの作製には、原料粉末を充填し、巻線加工後に熱処理をすることによる Wind and React プロセスが提案されており、MgB₂ 線材では、原料の Mg と B 粉末に Mg₂Cu を添加することにより、Mg を 500 °C 以下で液相化して MgB₂ を生成することが可能である⁽¹⁾。しかし、こうした低温合成においても、線材中の空隙、未反応物等の存在による臨界電流密度 J_c の低下⁽²⁾が実用化に向けた課題である。本研究では、この in-situ 低温焼成プロセスの最適化を目的とし、B 粉末の微細化による超伝導特性への影響と微細組織との関係について調べた。

2. 実験方法

WC 製容器に液体窒素と B 粉末 5 g を充填し、高速振動試料粉碎機により粉碎時間 1 分、3 分及び 5 分の条件でミリングを行った。B 粉末の平均粒径は、未粉碎で 1.07 μm 、粉碎時間 1 分で 0.22 μm 、粉碎時間 3 分及び 5 分では 0.20 μm であった。B 粉末と Mg、Mg₂Cu を次の反応のモル比となるように混合した。



この混合粉末を Ta 管に充填した後、伸線加工を行った。得られた単芯線を Cu 管に 19 本挿入し、Ar 雰囲気下で、450~550 °C で 200 h の熱処理を施し、MgB₂ の 19 芯線材を得た。得られた線材の SQUID 磁化測定から T_c を推定し、磁化 $M(T)$ と磁場 $H(\text{A/m})$ の関係を表した $M-H$ 曲線をもとに Bean モデルを用いて J_c を算出した。線材の長尺方向の微細組織観察に走査電子顕微鏡 (SEM) (加速電圧: 12 kV, Working Distance = 3 mm) を用いた。

3. 結果及び考察

未粉碎の B 粉末を用いた線材も各条件で粉碎した B 粉末を用いた線材も T_c は約 36.5 K とほぼ一定であった。一方、磁化率は微粒化に伴って増加し、粉碎時間 3 分で最も大きくなった。この傾向は 450~550 °C の各熱処理温度において確認され、525 °C での磁化率が最大であった。

Fig. 1 に未粉碎 (Normal) および粉碎時間 3 分 (3min) の線材の J_c 磁場依存性を示す。5~30 K の測定温度において粉碎後の粉末を用いた線材が高い J_c を示した。

Fig. 2 に B 粉末未粉碎 (a)、粉碎時間 3 分 (b) の 500 °C 熱処理線材断面の SEM 反射電子像を示す。いずれの線材においても図中破線で示す領域の粒径 1 μm 以下及び 2~3 μm 図中実線で示す領域の未反応 B 領域が存在しており、大きさ数 μm の空隙も多数存在している。

こうした線材中に存在する未反応 B と空隙の面積割合は、未粉碎及び 1 分粉碎試料に比べて 3 分粉碎及び 5 分粉碎試料の方が減少する傾向があった。すなわち、B 粉末の微粒化により線材断面における MgB₂ 面積分率が増加し、

低温焼成プロセスにおいても J_c 向上に寄与していると考えられる。

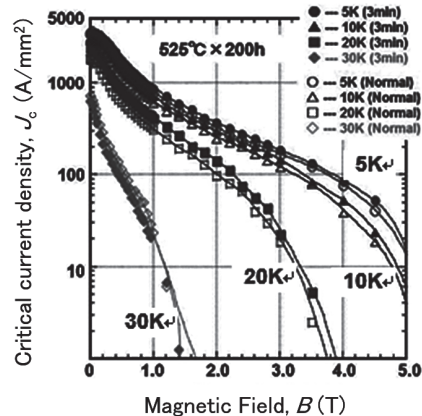


Fig.1 J_c - B curves as functions temperature and ball-milling treatment.

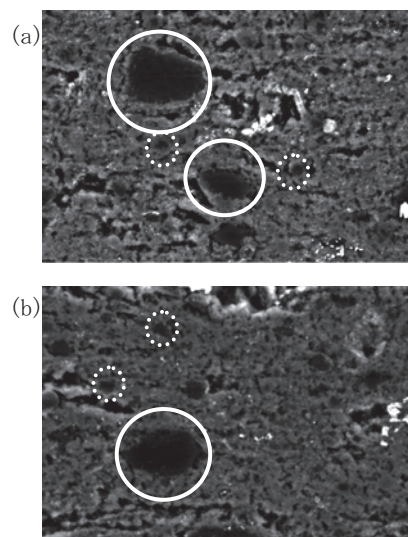


Fig.2 Cross-section SEM images of MgB₂ wires sintered at 500 °C for 200 h using as-prepared B powders (a) and 3 min-milled powders (b).

4. 謝辞

本研究は NIFS 一般共同研究 (KFCF004) において行われたものである。電子顕微鏡観察の一部は九州大学超高压電子顕微鏡室微細構造解析プラットフォームにおいて行った。以上の研究・解析支援に謝意を表します。

参考文献

1. Y. Hishinuma et al.: Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) 1178-1183
2. K. Tachikawa.: J. Cryo. Soc. Jpn. 46 (2011) 53-64.

MgB₂ 線材の輸送臨界電流特性に与える原材料の硼素粉末の影響Effect of boron powders with different grades
on the transport critical current density of MgB₂ wires

前田 穂, 高野 良紀(日大); Jung Ho Kim, Md. Shahriar Al Hossain, Ashukan Motaman, Shi Xue Dou (Wollongong 大)

MAEDA Minoru, TAKANO Yoshiki (Nihon Univ.);

KIM Jung Ho, HOSSAIN Md. Shahriar Al, MOTAMAN Ashukan, DOU Shi Xue (Univ. Wollongong)

E-mail: maeda@phys.cst.nihon-u.ac.jp

1. はじめに

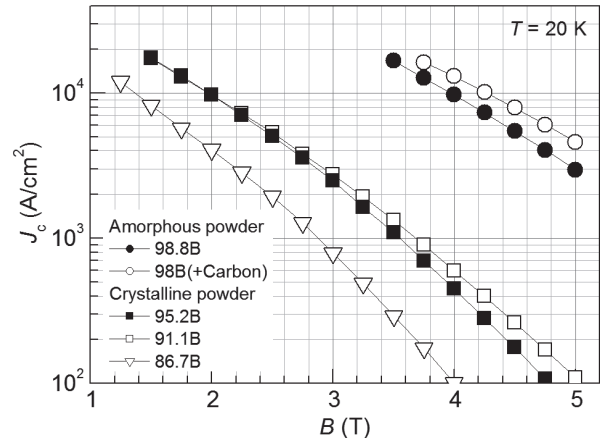
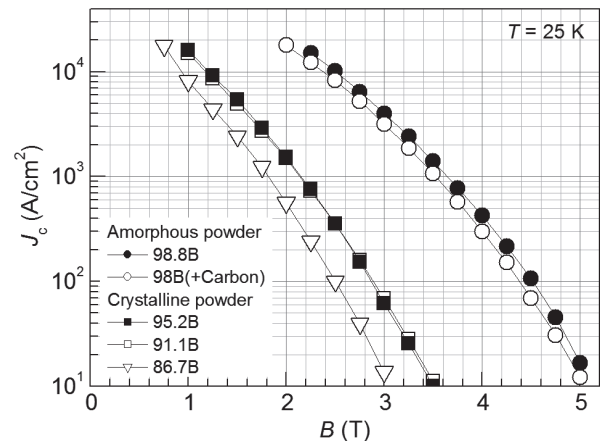
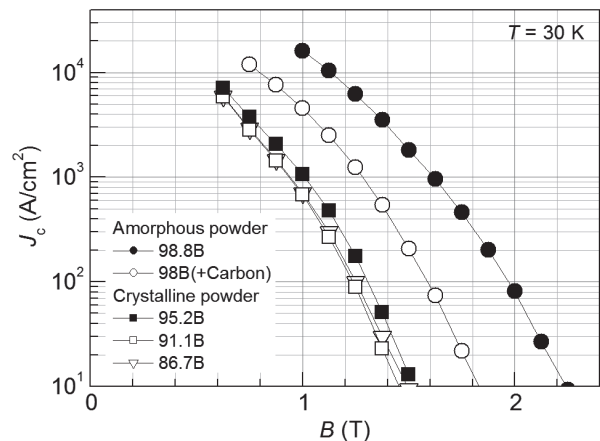
軽元素からなる MgB₂ は、産業応用している超伝導体 NbTi と Nb₃Sn に比べて 20 K 以上高い超伝導転移温度 (T_c) を有する。このため、15~25 K の冷却温度で運転可能な次世代の小型で軽量の磁気共鳴画像(MRI)装置の応用などに期待が持たれている。現在、MgB₂ 材料を実用化するための課題の一つとして、原材料の硼素粉末の最適化が挙げられている。硼素の結晶質や非晶質とその粉末の粒径や純度は、MgB₂ 線材の輸送臨界電流密度 (J_c) の増減に大きな影響を与えることが知られている。特に、高 J_c 特性を有する線材の作製には、高価な非晶質のナノ粉末が必要不可欠であり、作製コスト低減への課題となっている。この硼素の埋蔵量が世界の約 72% を占めるトルコにある Pavezyum Kimya San. Diş. Ticaret Ltd. Şti が、最近 University of Wollongong と協力して、高純度な硼素のナノ粉末を低コストで精製する研究に従事している。この研究で現在までに純度と粒径の異なるさまざまな硼素粉末を作製した。本研究では、これらの硼素粉末から MgB₂ 線材を作製し、その J_c 特性に及ぼす影響を調べた。

2. 実験方法

原材料の硼素粉末として、純度が 98.8% (98.8B) と 98% (98B) の 2 種類の非晶質の粉末と、純度が 95.2% (95.2B) と 91.1% (91.1B) 及び 86.7% (86.7B) の 3 種類の結晶質の粉末を用いた。平均粒径は、非晶質の粉末が 1 ミクロン以下であり、一方で結晶質の粉末が 1 ミクロン以上である。炭素で包まれた硼素粉末[1]を作製するために、粉末精製工程において 98B の粉末のみに炭素を加えた。これらの粉末を用いて *In situ* 法から MgB₂ 線材を作製した。焼結は 700 °C、30 分の条件で行った。磁場下の臨界電流は 20~30 K の温度範囲で測定し、 J_c をコア面積で算出した。

3. 結果と考察

本研究で作製した MgB₂ 線材の 20 K と 25 K 及び 30 K の温度下における輸送臨界電流特性を、それぞれ図 1 と図 2 及び図 3 に示す。まず、非晶質の硼素粉末から作製した線材は、結晶質の硼素粉末から作製した線材に比べて、20~30 K の範囲のどの温度領域においても磁場下の J_c が極めて高いことがわかる。具体的に、20 K、4 T と 25 K、3.5 T 及び 30 K、1.5 T の温度・磁場下で、それぞれ 10 倍と 100 倍及び 10~100 倍以上高いことがわかる(図 1, 図 2, 図 3)。これは、臨界電流特性の増減に寄与する不純物生成や MgB₂ の結晶粒サイズの観点から、非晶質の粉末が結晶質の粉末よりも高純度で細かい粒径であることに起因していると考えられる。また、2 種類の非晶質の粉末(98.8B と 98B) の粉末から作製した線材は、各温度領域でその臨界電流特性が互いに大きく異なる。具体的に、20 K、3.5~5 T の温度・磁場下では、98.8B の粉末から作製した線材の J_c が 98B の粉末から作製した線材よりも低い(図 1)、一方で 25 K、2~5 T の温度・磁場下では高い(図 2)。さらに測定温度を 30 K まで上げると J_c の差がより明確になる(図 3)。これは、炭素を含む 98B の粉末から作製した線材が 98.8B の粉末から作製した線材よりも T_c が十分低いことが原因であると考えられる。当日は、結晶質の粉末から作製した線材の臨界電流特性に関する考察を含め、さらに SEM や TEM の結果を用いてより詳細に報告する。

Fig.1 Transport J_c -B curves at 20 K for MgB₂ wires prepared from various boron powders.Fig.2 Transport J_c -B curves at 25 K for MgB₂ wires prepared from various boron powders.Fig.3 Transport J_c -B curves at 30 K for MgB₂ wires prepared from various boron powders.参考文献 [1] J. H. Kim *et al.*: *Advanced Materials* (2011) **23** 4942

ITER インサート・コイルの試験計画

Test Plan of Insert Coils for ITER

磯野 高明, 河野 勝己, 布谷 嘉彦, 高橋 良和, 奥野 清(原子力機構)

ISONO Takaaki, KAWANO Katsumi, NUNOYA Yoshihiko, TAKAHASHI Yoshikazu, OKUNO Kiyoshi (JAEA)

E-mail: isono.takaaki@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構では、現在調達を進めているITER用TF導体及びCS導体を用いて、長尺での導体性能評価試験を行うことを計画している。今まで導体性能評価試験は、スイスのサルタン試験装置を用いて行ってきたが、最高磁場部は約0.4mと短く、最終撚りピッチとはほぼ同じ長さである。一方、インサート・コイルは直径1.5m、約9ターンのソレノイド状で、原子力機構が保有するCSモデル・コイル[1]に組み込み試験し、高磁場部は10m以上あるため、より信頼性のある試験が期待できる。また、CSインサート・コイルについては、フープ力による歪など、より実機に近い条件で評価ができる。試験は2014年度及び2015年度に計画しており、本稿では、これらの試験計画について報告する。

2. CSインサート・コイルの試験計画

CSインサート・コイルの形状をFig.1(a)に示す。導体は一边49mmの角形で、厚肉ジャケットの内側に576本のNb₃Sn超伝導線を用いた撚線が挿入された構造である。運転条件は、磁場13T、通電電流40kA、動作温度4.5Kである。センサーの配置をFig.2に示す。ここでスター電圧タップとは、同一断面内に6点配置した電圧タップを意味し、サルタン試験で用いている電圧測定と同じ方法で測定するために取付ける。

主な試験として、定格通電試験、分流開始温度(Tcs)測定、繰返し通電によるTcsの変化、温度サイクルによるTcsの変化測定、クエンチ試験を予定している。

Tcs測定では、CSモデル・コイルで磁場を発生し、インサート・コイルに通電後、冷媒供給温度を上げて電圧発生を測定する。サルタン試験では、サンプルは直状であるためフープ力は発生しないが、インサート・コイルではフープ力による、より実機に近い条件で試験できる。また、通電方向を変えることで、フープ力によるコイル変形がTcsに与える影響を測定する。Fig.3は、正方向通電における磁場と歪の計算値、及び超伝導素線の臨界電流(Ic)の温度・磁場・歪の依存性の測定値から、Tcsの分布を計算したもので、コイルの中央でTcsが最も低くなるようコイル設計されている。この時の導体の温度および歪を直接測定するため、温度センサーおよび歪ゲージを導体上に取り付ける。

サルタン試験では、繰返し通電によるTcsの変化、温度サイクル(室温までの昇温及び再冷却)によるTcsの変化を測定しており[2]、インサートでも同様の試験を計画する。CSモデル・コイルの磁場中でインサートを0kAから40kAまで1万回通電し、その間にTcsを測定する。

クエンチ試験では、コイル中央に配置した誘導ヒータで導体加熱し、常伝導伝播速度、冷媒挙動を測定する。

3. TFインサート・コイルの試験計画

TFインサート・コイルの形状をFig.1(b)に示す。TFコイルのラジアルプレートに相当する巻棒が外周側にあり、導体をその溝に収める構造である。導体は、直径43.7mmの外形で、薄肉ジャケットの内側に900本のNb₃Sn超伝導線を用いた撚線が挿入された構造である。運転条件は、磁場11.8T、通電電流68kA、動作温度5.0Kである。センサー配置は、CSインサートとほぼ同様であるが、歪ゲージは導体上ではなく、巻棒に取り付ける。

試験項目も、CSインサートと同様に、定格通電試験、分流開始温度(Tcs)測定、繰返し通電によるTcsの変化、温度サイ

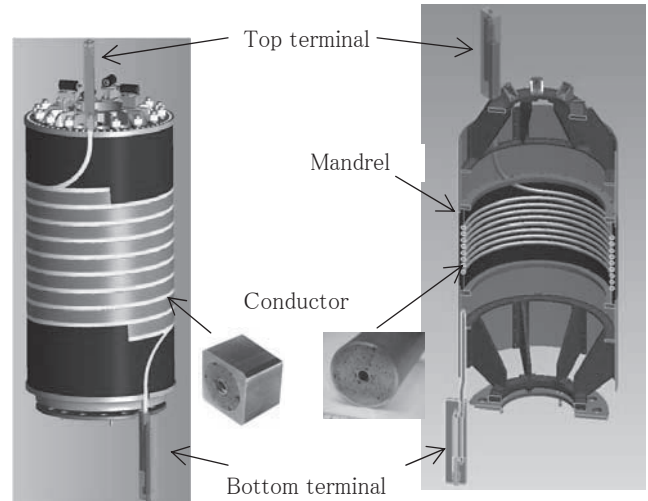


Fig.1 Figures of the insert coils

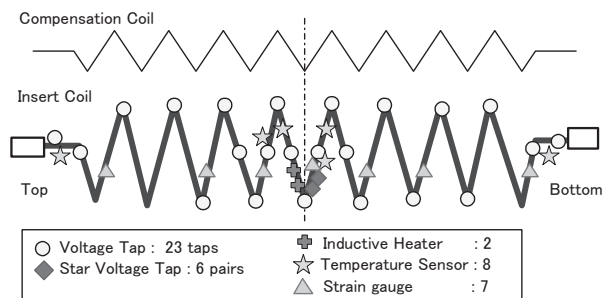


Fig.2 Instrumentation of the CS insert coil

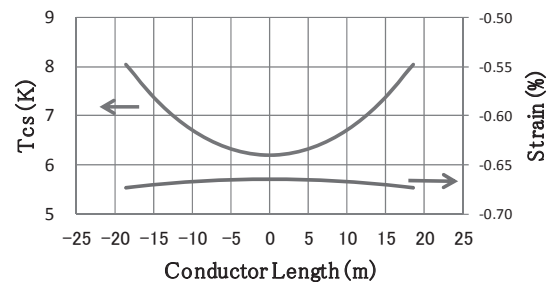


Fig.3 Estimated Tcs and strain distribution of the CS insert coil

クルによるTcsの変化測定、クエンチ試験を予定しているが、繰返し通電回数は千回であり、通電方向は正方向(発生磁場の方向が同じ)のみ行う予定である。

参考文献

1. T. Kato, et al.: J. Cryo. Soc. Jpn., Vol. 36 (2001) p.13
2. Y. Nabara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.185

ヘリカル型核融合炉への適用をめざした大電流高温超伝導導体の 臨界電流測定と解析

Measurement and analysis of the critical current of large-current capacity HTS conductors developed for the LHD-type helical fusion reactor

寺崎 義朗 (総研大) ; 柳 長門、夏目 恭平、濱口 真司、野口 博基、田村 仁、三戸 利行、相良 明男 (NIFS) ;
伊藤 悟、清野 祐太郎、橋爪 秀利 (東北大)

TERAZAKI Yoshiro (Sokendai); YANAGI Nagato, NATSUME Kyohei, HAMAGUCHI Shinji, NOGUCHI Hiroki,
TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki, SAGARA Akio (NIFS); ITO Satoshi, SEINO Yutaro, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: terazaki@nifs.ac.jp

1. 背景

現在、核融合科学研究所で設計活動が進められているヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 のヘリカルコイルでは 100 kA 級の導体が必要とされており、著者らは高温超伝導線材 (HTS) を用いた大電流導体の開発研究を行っている[1]。これまでに、30 kA 級 HTS 導体の製作・試験を行い[2, 3]、温度 20 K、磁場 6 T にて 45 kA の臨界電流を得た[4]。この結果を受けて 2013 年 10 月に行った 100 kA 級導体の製作・試験では、温度 20 K、磁場 5.3 T にて 100 kA、温度 4 K、磁場 0.4 T にて 120 kA の電流を流すことができた。この実験の詳細と、同時に行った接合部抵抗の評価については別講演[5, 6]にて報告される。この講演では、これまでに行った大電流 HTS 導体試験で得られた臨界電流を線材単線のデータから再現するための数値解析を行い、実験で得られた値との比較を行った結果について報告する。

2. 臨界電流数値解析

HTS 線材が単純積層された導体内の自己磁場分布と電流密度分布とを自己無撞着に解く数値解析を行った。この解析では Fig. 1 のような導体断面において、線材束をひとつの導体とみなし、それを細かい電流要素に分割した。この要素に所定の輸送電流値を与えて、ビオ・サバルの法則によって各要素での磁場を求め、その磁場強度から各要素の臨界電流値を決めた。輸送電流値が臨界電流値を上回ったとき、その要素は臨界に達したとみなし、余剰分を再配分しながらすべての要素が臨界に達したとき、このときの各要素の臨界電流値の和を導体の臨界電流とした。臨界電流の磁場特性は文献[7]から引用した。

Fig.2 の上・下にそれぞれ、温度 4.2 K、外部磁場 0 T で臨界電流に達したときの線材内の自己磁場分布と電流密度分布を示す。ここでの自己磁場は、線材面に対して垂

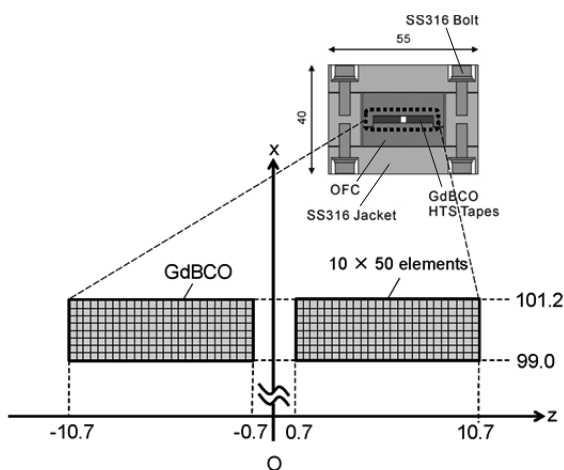


Fig.1 Schematic Illustration of the model of the critical current analysis. The units of the x- and z-axis are millimeter.

直な成分の磁場が線材の臨界電流に大きな影響を与えると考え、c 軸方向に平行な成分のみを考慮した。これらの図より、電流が自己磁場の低いところに集中して流れていることがわかる。このとき、解析によって得られた臨界電流値は 61.6 kA で、実験値から外挿して得られた値 70.8 kA との差は 13 % と比較的良い一致を見た。このことから、線材を積層した導体の臨界電流値は自己磁場の特に線材面に垂直な成分によって決まると考えられる。

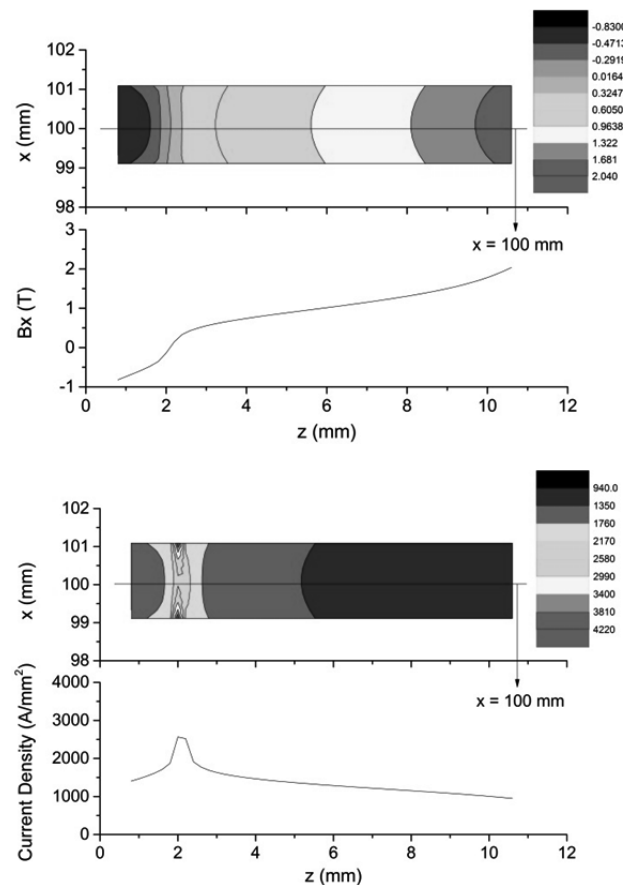


Fig.2 Self-magnetic field (upper) and current density (lower) distribution and their profile at $x = 100$ mm at 4.2 K and zero external magnetic field.

参考文献

- [1] Y. Terazaki et al., Plasma and Fusion Research, 7 (2012) 2405027.
- [2] N. Yanagi et al.: Abst. CSJ Conf., Vol. 87 (2013) 1C-p01
- [3] S. Ito et al.: Abstract CSJ Conf., Vol. 87 (2013) 1C-p03
- [4] Y. Terazaki et al.: Abst. CSJ Conf., Vol. 87 (2013) 1C-p02
- [5] N. Yanagi et al.: Abst. CSJ Conf., Vol. 88 (2013) 3C-p07
- [6] S. Ito et al.: Abstract CSJ Conf., Vol. 88 (2013) 3C-p08
- [7] M. Inoue, et al., IEEE Trans. Appl. SC., 21 (2011) 3206

浮上式鉄道用 RE 系高温超電導磁石の開発 -熱設計-

Development of REBCO HTS Magnet for Maglev -Thermal Design-

水野 克俊, 小方 正文, 長谷川 均(鉄道総研)

MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi, HASEGAWA Hitoshi (RTRI);

E-mail: mizuno.katsutoshi.14@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では、希土類系高温超電導線材(以下 REBCO 線材)の磁場中での優れた通電特性から、浮上式鉄道への適用を検討している。磁石の高温超電導化は構造の簡略化に伴う製作性向上が期待される一方で、浮上式鉄道応用には従来の車上超電導磁石と同等以上の信頼性が求められる。そこで、REBCO 線材を用いた車上超電導磁石の高温超電導化のための熱設計を行った。

2. 高温超電導化に伴う構造の変化

高温超電導化による構造の変化は複数あり、もっとも特徴的な変化は冷媒の液体窒素および液体ヘリウムが不要になる点である。従来の車上超電導磁石においてはこれらの冷媒を車載冷凍機で再液化する構造であった。そのため、冷媒の優れた熱伝達により均一な冷却が可能になるだけでなく、冷凍機異常停止時も一定の時間にわたり極低温を維持することができた。高温超電導化にあたっては、異常発生時の温度上昇が緩やかになるよう設計する必要がある。

また、高温超電導コイルの永久電流モードは技術的に確立しているとは言い難く、現時点では車上電源による常時通電が最も容易な選択肢である。ただし、常時通電の問題点として熱侵入の増加が挙げられる。

加えて、REBCO 線材の通電特性を考慮すると、ふく射シールドを持たない構造でも浮上式鉄道に必要な起磁力が実現できると考えられる。しかしながら、無冷媒化同様に構造の簡素化という利点があるものの、外部からの熱侵入がふく射シールドを介さずに直接超電導コイルへ到達するのでコイル内部に温度差がつきやすく、冷凍機温度までコイル端部が冷却されず通電性能を活かしきれなくなる恐れもある。

3. 高温超電導磁石熱設計

浮上式鉄道用の高温超電導磁石の設計条件を下記のように仮定した。

1. 起磁力は従来同様 700 kA とし、通電電流については 250 A とする。
2. 運用温度は 40 K を基本とし、冷凍機異常停止時にも 50 K までは安定して励磁できることとする。
3. 冷凍機停止時の 40 K から 50 K までの保冷時間は 1 時間以上とする。
4. ふく射シールドを持たず、一段冷凍機による冷却とする。
5. コイル内温度差は 1 K 以下とする。

運用温度をこのように設定したのは、車上超電導磁石には重量の制約があるためである。将来の線材性能向上を考慮しても、50 K を超える運用温度ではコイルが重くなりすぎ、既存の車上超電導磁石と同等の重量を実現することは困難である。逆に運用温度が低すぎると、ふく射シールドレスの構造は困難になり、冷凍機の消費電力も増加してしまう。Fig.1 に RE 系高温超電導車上磁石の構成を示す。

上に挙げた保冷時間やコイル内温度差は、REBCO コイル本体だけでは実現できず、熱機能材料をコイル周辺に配置する必要がある。重量の制約に加えて、超電導コイル周辺の空間は限られているので、体積当たりの熱容量も考慮する必要がある。熱機能材料には高純度アルミと無酸素銅を想定し

た。高純度アルミは軽量且つ熱伝導率が高いものの、体積当たりの熱容量では無酸素銅に劣る。

既存の車上超電導磁石のコイル内槽容器と同等の体積空間に REBCO コイルと熱機能材料を収めると仮定し、無酸素銅と高純度アルミの配分を変化させた時のコイル重量、保冷時間および最大温度差の計算結果を Fig.2 に示す。

無酸素銅の割合が増えるにつれて保冷時間が伸びるものの、コイル全体重量が増加し温度差も大きくなる。熱機能材料の割合によらず、保冷 1 時間以上と温度差 1K 以内は達成可能な結果となった。重量とコイル内温度差、あるいは保冷時間のどちらかを優先するかで最適な熱機能材料配分は異なることが分かる。

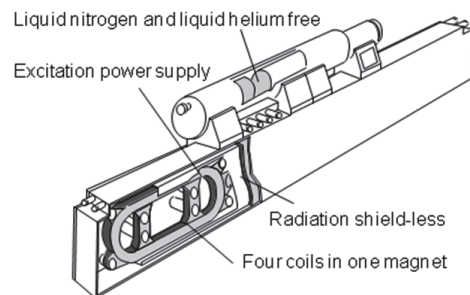


Fig.1 Characteristics of REBCO HTS onboard magnet

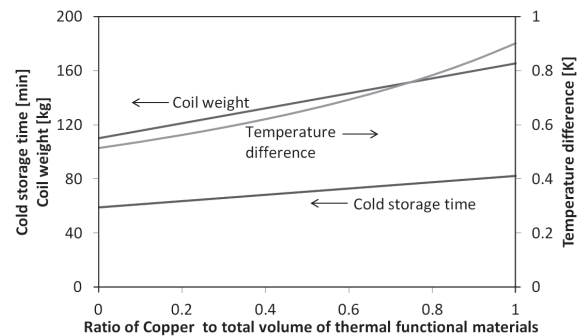


Fig.2 Coil weight, cold storage time and temperature difference in a coil

4. 終わりに

希土類系高温超電導線材を浮上式鉄道に用いた場合でも、磁石全体重量を従来のものから増やすことなく、冷凍機異常時でも 1 時間以上の保冷時間を確保できるという計算結果が得られた。しかしながら、実際の超電導磁石においては冷凍機が停止するとアウトガスによる熱侵入が増加することも明らかになっている¹⁾。また、REBCO コイルと熱機能材料との熱接触が悪ければコイル温度のみ上昇し、想定外の熱暴走が発生する可能性もある。これらの要素はモデル化が極めて困難であり、今後は実験による検証も行う計画である。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて行った。

参考文献

1. K. Mizuno, et al.: Cryogenics, Vol. 51, No.6 (2009) p.321-325

II型熱電素子を電源として用いる宇宙機用高温超電導マグネットの検討

Study of HTS magnet excited by II-type thermoelectric element for spacecraft

長田 浩幸, 岡村 哲至(東京工業大学)

NAGATA Hiroyuki, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)

E-mail: nagata.h.ab@m.titech.ac.jp

1. 諸言

現在, 惑星探査衛星の推進方法の一つとして考えられている磁気プラズマセイルでは高温超電導マグネットを用いることが検討されている。磁気プラズマセイルは高温超電導マグネットによって磁場を発生させ, その磁場で太陽風を受けることで太陽と反対方向への推進力を得るシステムである。

Fig.1 にII型熱電素子によって磁気プラズマセイル用の高温超電導マグネットを励磁するシステムの概略図を示す。

このシステムは主にII型熱電素子, 受熱板, 冷却板, 超電導リード, 高温超電導コイルから構成されている。受熱板と熱電素子高温端が接続されており, 冷却板と熱電素子低温端が接続されている。これによって太陽から熱を受け, 熱電素子内に温度差を生じさせ, 深宇宙へと排熱される。

本研究は, 木星探査を目的とした宇宙機に搭載する高温超電導マグネットの電源とする可能性について検討するために, まずシステム全体の大きさや重量について検討する。

2. I型熱電素子及びII型熱電素子の検討

Fig.2 にI型熱電素子とII型熱電素子の比較を示す。

熱電素子は主にI型熱電素子とII型熱電素子の2種類の利用方法がある。同じ温度差の条件においては, I型熱電素子の方が低温端への熱流量が小さくなる。[1]

一方, II型熱電素子は, 超電導リードを用いる場合, 超電導線を両端とも熱電素子低温端に接続することが可能であるため, I型熱電素子に比べて, 熱電素子高温端温度を高くすることが可能であるという利点があるため, 本研究ではII型熱電素子を採用した。

3. II型熱電素子システム条件検討

本研究では, 今回は宇宙機が木星軌道上にあるとして検討を行った。

熱電素子組数については, 熱電素子高温端温度(TH)とII型熱電素子低温端温度(TL), 及び高温超電導コイルの通電電流から算出した。また, 受熱板については, 太陽からの輻射熱を受け, 同時に深宇宙へ反射される熱と熱電素子へ流れる熱を考慮することで, 受熱板面積を算出した。同様に, 冷却板についても, 熱電素子から流れてきた熱を深宇宙へ輻射排熱することで, 冷却板面積を算出した。なお, ここでは必要な通電電流を得るために, 複数個のII型熱電素子を並列に接続することとした。

本解析では, 基本条件として, 熱電素子低温端温度を64[K]一定とした。これは高温超電導線の性能を考慮した際, 温度が低い方が好まれる。しかし, 熱電素子は一般的に使用する温度が高くなるにつれ, ゼーバック係数が大きくなり, 同じ温度差において1個の熱電素子から得られる起電力が大きくなる。今回, この双方を考慮し, 熱電素子低温端温度を決定した。

熱電素子高温端温度を変数とし, 通電電流が200[A]となっているため, それに必要なII型熱電素子組数, 受熱板面積, 冷却板面積についての検討を行った。

今回, 検討する熱電素子は, 低温において性能の良いBiTe系熱電素子と考えた。また, 受熱板・冷却板については, ともに材質をAl6061とした。

Fig.3 にII型熱電素子高温端温度と受熱板面積及びII型熱電素子組数の関係について示す。

高い熱電素子高温端温度を得ようとする, 受熱板面積は大きくなるが, 熱電素子高温端温度が140[K]を超えると受熱板面積の増加する割合が急激に大きくなる。これは, 熱電素子高温端温度が高くなりすぎてしまい, 太陽から受ける輻射熱と比べ, 深宇宙へ反射される熱が大きくなるためであると考えられる。

また, 熱電素子高温端温度が低くなると, 熱電素子内に生じる温度差が小さくなり, 起電力が小さくなるため, 通電電流を得るために必要となるII型熱電素子組数が増える。

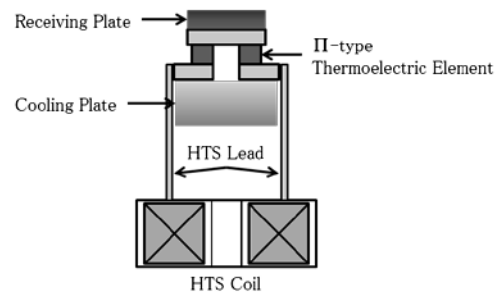


Fig.1 Schematic of HTS magnet excited by II-type thermoelectric element for spacecraft

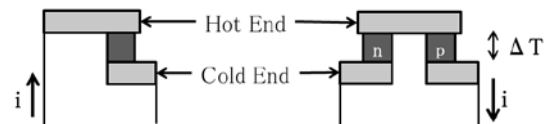


Fig.2 Compared I-type thermoelectric element with II-type thermoelectric element

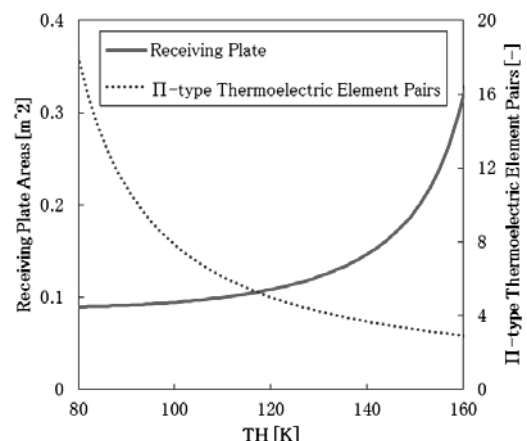


Fig.3 Number of II-type thermoelectric element pairs and Receiving plate area

参考文献

1. N. Oyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.87

スターリング冷凍機を用いたポータブル超伝導バルク磁石装置の開発

Development of a portable superconducting bulk magnet using a Stirling cryocooler

横山 和哉, 三田 裕幸, 津久井 友隆, 坪野谷 典之(足利工大); 岡 徹雄(新潟大)

YOKOYAMA Kazuya, MITA Hiroyuki, TSUKUI Tomotaka, TUBONOYA Noriyuki (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.)

E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

1. はじめに

本研究は、超伝導バルク磁石(以下、バルク磁石と略す)を小型の強力磁場発生装置として用い、産業応用することを目的としている。この時、磁石装置には強磁場化と同時に、小型化や取り扱い易さが重要である。著者らは、2段 GM 冷凍機を用いた単極型装置や、1段 GM 冷凍機を用いた対向型装置を所有しているが、更に小型化を図るべく、小型スターリング冷凍機を用いたパルス着磁専用のバルク磁石装置の開発している。本文では、開発中の磁石装置について報告する。

2. ポータブル超伝導バルク磁石装置

Fig. 1 にポータブル超伝導バルク磁石装置の写真を示す。本装置はスターリング冷凍機を用いるため外部にコンプレッサを必要とせず、また一般的な単相 100V のコンセントで駆動することができる。磁化方法をパルス着磁に限定することで磁極を短くすることができ、全長約 580mm、幅約 330mm のコンパクトな装置となっている。

使用する超伝導体は、 $\phi 45\text{mm} \times 15\text{mm}$ の Gd 系バルク体で補強のため厚さ 2 mm のステンレスリングを装着している。これをサンプルフォルダに挿入し、コールドステージに取り付ける。バルク体及び冷却ヘッドはスーパーインシュレーションで輻射熱を遮蔽し、さらにチャンバを取り付けて、外部の真空排気装置を用いて真空断熱している。なお、バルク体表面と磁極表面は約 3 mm である。

3. 各種磁石装置の比較

Table 1 に既存の対向型および単極型磁石装置、および今回開発したポータブル磁石装置のスペックを比較した表を示す。対向型および単極型は GM 冷凍機を用いているが、本装置はスターリング冷凍機を用いている。最低到達温度は高いものの、必要な冷凍能力は備えている。また消費電力が 320 W と小さく、ランニングコストが安価である。現在、冷却試験のみを実施した段階のため、発生磁場は未知数であるが、1.0 T 以上を目標に実験を行いたい。

4. 冷却試験

Fig. 2 にバルク体を取り付けたときの、コールドステージ部の温度変化を示す。約 3 時間で 70 K 以下となり、約 4 時間半で最低到達温度 60 K となった。GM 冷凍機に比べて出力が小さいため、冷却時間が長く、また到達温度も若干高めとなった。このため、今後のパルス着磁実験では、発熱を抑えて大きな磁場を捕捉させる工夫が必要となる。

5. まとめ

本研究は、装置の取り扱い易さを考慮したポータブルバルク磁石装置を開発した。冷却装置にスターリング冷凍機を用い、また磁化方法をパルス着磁に限定したことで磁極を短くし、装置全体を小型化することができた。冷却試験の結果、60 K まで冷却できることが確認でき、今後、パルス着磁実験を行って捕捉磁場を評価する予定である。

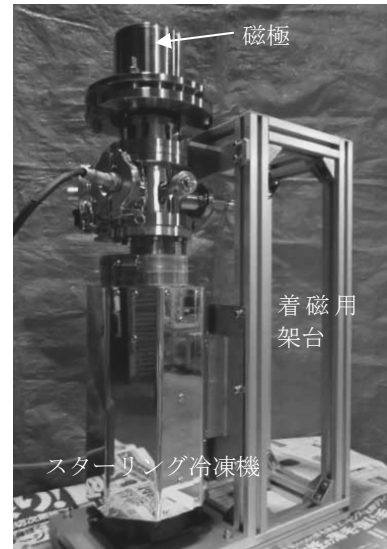


Fig. 1. Photograph of a portable superconducting bulk magnet system.

Table 1. Spec of each bulk magnet systems.

	対向型	単極型	ポータブル
超伝導体	GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} $\phi 60 \times 20$ mm	GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} $\phi 60 \times 20$ mm	GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} $\phi 45 \times 15$ mm
発生磁場	3 T以上	3 T以上	N/A
冷凍機	1段GM冷凍機 (GR101, アイシン精機)	2段GM冷凍機 (RS271, アイシン精機)	スターリング式 クライオクーラー (SC-UF01, ツインバード)
最低到達温度	40 K以下	20 K以下	60 K程度
出力(W)	10 W@77 K	5 W@20 K(1 st) 19 W@80 K(2 nd)	10 W@80 K
入力	単相100V	三相200V	単相100V
消費電力	800 W	1600 W	320 W
外部装置	・コンプレッサ ・真空排気装置	・コンプレッサ ・真空排気装置	・真空排気装置

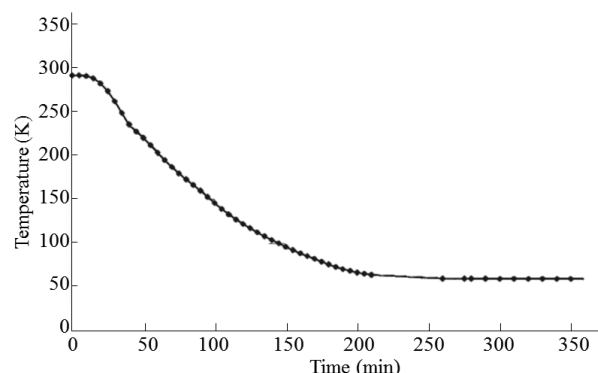


Fig.2. Time response of temperature (cooling test)

20MVA 級超電導変圧器の突発短絡時における応答特性の解析 Numerical analysis of response of 20MVA REBCO power transformers against fault excess current

大坪 祐平, 片野坂 祐太, 松尾 政晃, 佐藤 誠樹, 岩熊 成卓 (九州大学);
江口 徹 (九州電力); 富岡 章 (富士電機)

1. まえがき

変圧器の超電導化では、小型・軽量・高効率化が期待され、さらに、REBCO 巻線に限流機能を付加させることで、電力機器の保護にも貢献できる。高信頼性を持つ超電導変圧器を実現するためには、過大電流に対する超電導巻線の応答特性を明らかにし、超電導器に適した設計を行う必要がある。

本研究では、66kV-20MVA REBCO 超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の解析結果について報告する。

2. 変圧器仕様

解析した変圧器の仕様を Table.1 に示す。通常運転時の%IZ を10%に設定して電圧変動を抑制し、突発短絡事故時においては、0.2秒後の%IZ を33%に設定し短絡電流を定格の3倍以下に限流することを目標とした。巻線には、REBCO 線材に CuNi 線を並列配置したものをを用いた。

Table.1 Parameter of the 20MVA REBCO power transformer

	一次	二次
相数	三相	
定格容量	20MVA	
定格電圧	66kV	6.9kV
定格電流	175A	1673A
定格周波数	60Hz	
%インピーダンス	10%	
超電導線並列本数	3	24(12重ね×2)
ターン数	918	96
運転温度	66K	

3. 回路方程式

解析では、磁束フロー状態を考慮した次のような回路方程式を用いた。

$$L \frac{dI}{dt} + \rho_n \frac{l_n}{S} I + \int_0^{l_f} \rho_f \frac{I - I_c}{S} dx = V \quad (1)$$

ここで、Lは巻線の漏れインダクタンス、 ρ_n 、 l_n はそれぞれ巻線の常電導部抵抗率、常電導部長、 ρ_f 、 l_f はそれぞれ巻線のフラックスフロー抵抗率、フラックスフロー領域長、Iは巻線の通電電流、 I_c は線材の臨界電流、Sは線材の断面積、Vは巻線の両端の電圧である。この回路方程式より通電電流を算出する。

4. 解析

限流機能付き超電導変圧器の限流目標は

- ① 短絡電流を0.2秒後に定格の③倍以下に抑制
- ② 突発短絡後の巻線温度を室温(300K)以下に抑制としている。(1)の回路放映式を用いて数値解析を行うことにより、短絡事故時の通電電流、巻線温度等の時間変化を求め、導体構成について検討した。

一例として、REBCO 線材表面の Ag 層の厚さを $15\mu\text{m}$ 、CuNi 線厚さ $300\mu\text{m}$ とした場合について、突発短絡後の電流波形を Fig.1 に示す。また、この際の一次巻線、二次巻線の温度上昇の様相を Fig.2 に示す。結果から、開発目標①、②ともに達成されたことが確認できる。

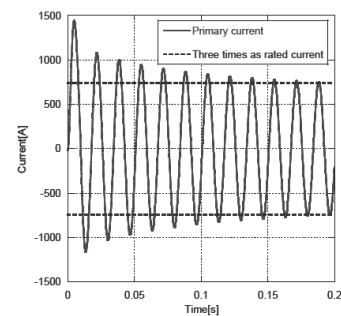


Fig.1 Numerically simulated primary current waveform

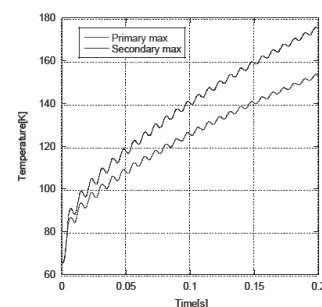


Fig.2 Temperature rise of the windings

5. まとめ

本研究では、磁束フロー状態を考慮した数理解析プログラムを開発し、これを用いて 66kV-20MVA 級限流機能付超電導変圧器の突発短絡時の応答特性について検討した。その結果、CuNi 線を $300\mu\text{m}$ 、Ag 層を $15\mu\text{m}$ としたとき、0.2秒後の短絡電流を定格電流の3倍位以下に、巻線温度も約 180K 以下に抑制された。

本研究開発はイットリウム系超電導電力危機技術開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から受託して実施したものである。

鉄心利用超電導風力発電機用コイルモジュールを想定した冷却試験 Cooling test of a supposed superconducting coil module used for a wind turbine generator with iron cores

山崎 裕文, 名取 尚武, 古瀬 充徳(産総研)

YAMASAKI Hirofumi, NATORI Naotake, FURUSE Mitsuho (AIST)

E-mail: h.yamasaki@aist.go.jp

1. はじめに

自然エネルギーで最も有望な風力発電について、発電サイトの総発電容量を増大させる風車の大型化が大きなトレンドとなっているが、現用技術の延長では発電機の大型化に伴う重量増大が問題となるため、高電流密度・高磁界を特長とする超電導技術の利用による小型軽量発電機が期待されている。我々は、10 MW 級の次世代洋上風車用発電機への超電導の応用について、大学・産総研・メーカー等で構成する調査WGを主催して、どのような方式の超電導発電機が望ましいかの検討を進めてきた [1]。そして、超電導マグネットの高磁界を活用できる空心コイル方式(回転子のみ超電導)で発電機の超小型軽量化が可能であるが、高価な高温超電導線材を大量に使用するため、線材価格が大幅に低下しない限り 10 MW 級発電機の実現は困難であることが分かった [1, 2]。我々は、発電機の低コスト化を重視する観点から、線材長を大幅に低減できる鉄心利用方式が適当と判断し、超電導コイルの冷却方法などについて検討した。

2. 超電導コイルモジュール方式

鉄心利用超電導発電機では、鉄心を含めて回転子全体を冷却する方式と、鉄心の周りに配置する超電導コイルのみを冷却するコイルモジュール方式(Fig. 1)の2通りが考えられる。電磁設計を行ったところ、前者では、極低温容器の存在により回転子と固定子との空隙が大きくなって磁束の利用効率が悪くなるため、後者と比較して小型化に難があることがわかった [3]。このため、後者の方式が実現可能か検討した。

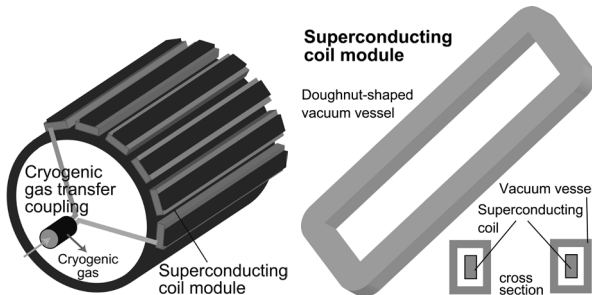


Fig. 1 Schematic diagrams for an iron-cored superconducting rotor (left) and a superconducting coil module (right).

3. 超電導コイルの固定方法及び侵入熱の見積り

風車用 10 MW 発電機の一設計例では、幅が約 42 cm、有効長 1.5 m の超電導コイルを格納する 36 個のコイルモジュールが必要となる [1]。クライオスタットのコストと熱侵入の低減が重要な課題となるが、ドーナツ型の断熱真空槽を有する極低温容器は非常に高コストであるため、単純な真空容器を用いることにする。高真空中に保持したコイルを極低温のヘリウムガスが流れる配管と冷却板で冷却し、スーパーインシュレーションでシールドして、輻射熱の侵入を防ぐ。レーストラック型超電導コイルは、真空容器の内側の壁とコイルの間にガラスFRP製の固定具で固定する。コイルが低温になって熱収縮するが、それを常温側に設置したOリングで吸収する。

ガラスFRPの熱伝導率 $\lambda \approx 0.2\text{--}0.7 \text{ W/mK}$ (at 20–300 K) ゆえに近似で 0.4 とし、FRP固定具のロッド部分の断面

積を 2 cm^2 、長さを 3 cm とすると、それを通しての熱侵入は、 $Q = \lambda \times \Delta T \times S/L = 0.4 \times (300 - 20) \times 0.01 \times 2/3 \approx 0.75 \text{ W}$ となる。FRP固定具を8つコイルの内側に設置すると熱侵入は約 6 W である。輻射熱は、真空容器の内表面積 $S_H \approx 2 \text{ m}^2$ 、スーパーインシュレーション 20 層、アルミ鏡面仕上げの輻射率 $\varepsilon = 0.05$ として、シュテファン・ボルツマン係数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ を用いて、 $Q = \varepsilon \sigma (S_H T_H^4 - S_L T_L^4) / 2(n+1) = 1.1 \text{ W}$ となる。これら以外に、極低温冷媒を導入する配管と電流リードからの熱侵入がある。最適設計した銅電流リード(2本)を通しての熱侵入(ジュール損を含む)は、常時通電電流が 100 A のとき、高温超電導酸化銅電流リードの利用を想定して約 9 W となる [4]。

4. 銅製ダミーコイルの冷却試験

上記検討を元にして実際に真空容器を製作し、銅製のダミーコイルを液体窒素・ヘリウムで冷却する実験を行った。ダミーコイルの大きさは、横幅はほぼ実サイズの 47 cm 、長さは実サイズの半分の 83 cm 、断面は超電導コイルのサイズと同じ ($15 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$) とし [1]、6個のFRP固定具で保持した。作製した真空容器の外観を Fig. 2 に、ダミーコイルを液体窒素・ヘリウムで冷却した実験結果を Fig. 3 に示す。ダミーコイルが約 15 K に冷却された後で、液体ヘリウムの供給を止め、断熱状態に保持した。その時の温度上昇から侵入熱を計算したところ、 $7.1\text{--}7.5 \text{ W}$ であり、3. の見積りとかかなり良い一致を得た。これから、電流リードも含めて、実サイズのモジュール1つ当たりの熱侵入は約 20 W と予想される。

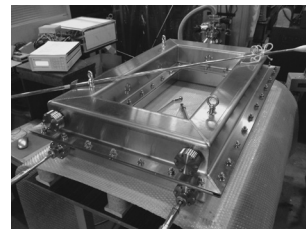


Fig. 2 Photo of a vacuum vessel containing a doughnut-shaped dummy coil made of copper.

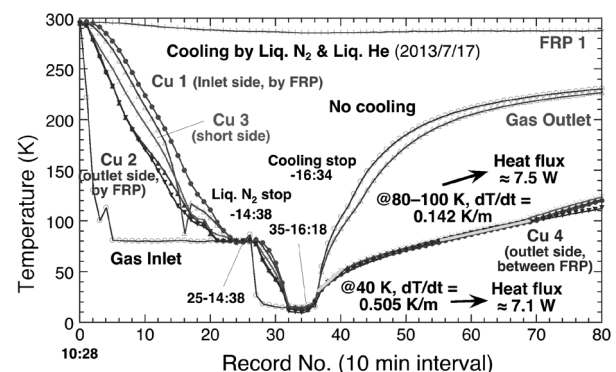


Fig. 3 Cooling test result of a doughnut-shaped dummy coil.

参考文献

1. S. Fukui: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., Vol. 47 (2012) p. 362
2. A. B. Abrahamsen & B. B. Jensen, presented at ASC2012.
3. S. Fukui, M. Furuse, et al.: unpublished results.
4. M. Furuse et al.: Cryogenics, Vol. 49 (2009) p. 263

風力用 10MW 級 Y 系超電導発電機の設計検討 Design study of a 10MW REBCO superconducting synchronous generator

猿渡 将貴、大嶽 晃、岩熊 成卓(九州大学);長谷 吉二、富岡 章(富士電機);
和泉 輝郎、塩原 融(ISTEC)

1. はじめに

東日本大震災を受け、国内で風力発電を新エネルギー源とする期待が高まっている。日本の広大な排他的経済水域を活かすことができる洋上風力発電が注目されており、建設コストや発電コストの面から発電機の大容量化かつ小型軽量化が求められている。

風力発電機は容量が大きくなるほど発電コストが安くなるため、発電機単機当りの発電容量は増加傾向にあり、同時に発電機の重量も増加している。発電機の出力は電気装荷と磁気装荷の積に比例する。常伝導発電機では電気装荷はジュール熱、磁気装荷は鉄心の磁気飽和により制限されていたが、発電機を超電導化し、空心構造にすることで磁気装荷の制限がなくなり、発電機を大容量化、または発電機の出力を保ったまま小型化することが可能である。ギャップ磁束密度が大きいほど発電機を小型化することができるが、漏れ磁場を防ぐための固定子ヨークの厚さは増加し、使用線材長も長くなる。本研究ではギャップ磁場と発電機重量、体格、使用線材長の最適なバランスを見出すことを目的とする。

2. 風力用 10MW 級 Y 系超電導発電機の比較

比較を行う 4 種類のモデルを D²L 法により基本設計を行った。発電機概略図を Fig.1 に、モデルの仕様を Table.1 に示す。それぞれギャップ磁束密度が 1T,2T,3T,4T としており、ギャップ磁束密度の増加が発電機の重量、体格、使用線材長に与える影響を比較する。いずれも回転子の界磁巻線のみ超電導化した回転界磁超電導同期発電機である。ダイレクトドライブ方式での運用を想定し、回転数 10rpm、極数を 30 とした。解析は電磁場解析ソフト JMAG を用いた FEM 解析である。固定子継鉄の外径を変化させ、漏れ磁束密度が 0.1mT 以下となる最小の値を固定子継鉄の外径として採用した。

3. 解析結果と考察

解析により得られた各モデルの重量と使用線材長を Fig.2 と Fig.3 に示す。A を基準とすると、重量比は B が 89%、C が 75%、D が 49% となった。また、使用線材長は A を基準とすると、B が 2 倍、C が 2.5 倍、D が 3.5 倍となった。ギャップ磁束密度を大きくすることで大幅な小型化が期待できるが、同時に線材の使用量も増加し、コスト大となる。今後は小型化とコストのバランスをとりながら、最適な構造を探索していく。

Table.1 Specification of a REBCO superconducting generator

	A	B	C	D
Output Power[10MW]	10	10	10	10
Magnetic flux density in air gap[T]	1.0	2.0	3.0	4.0
Stator inner diameter[m]	10.0	8.0	7.0	6.0
Rotor outer diameter[m]	9.7	8.7	6.7	5.7

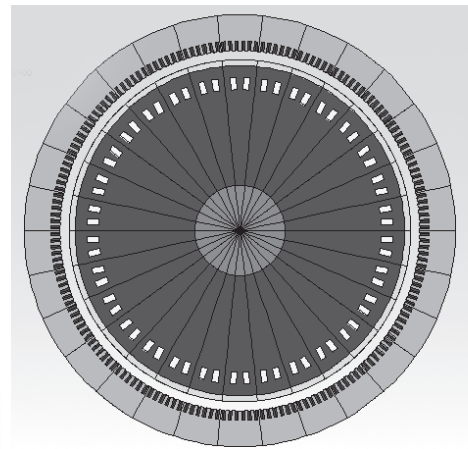


Fig.1 Cross section of superconducting wind turbine

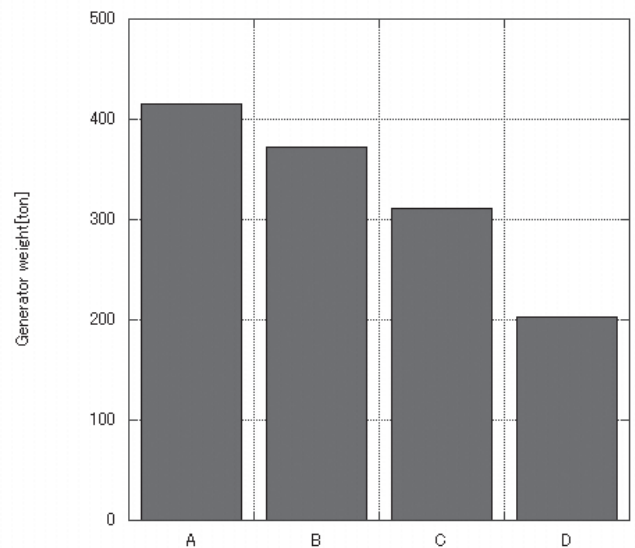


Fig.2 Weight of superconducting wind turbine generators

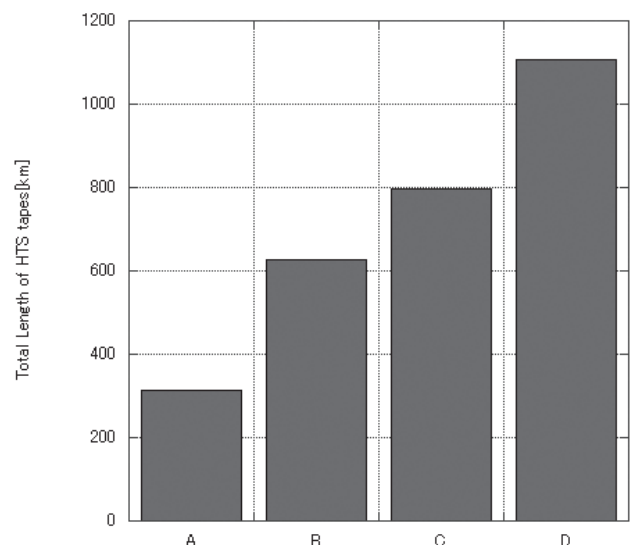


Fig. 3 Total length of HTS tapes

大型超電導フライホイール蓄電装置の開発

Development of large-scale flywheel energy storage system using a superconducting magnetic bearing

吉澤 佳祐, 荒井 有気, 山下 知久, 小方 正文, 長谷川 均, 長嶋 賢(鉄道総研)

YOSHIZAWA Keisuke, ARAI Yuuki, YAMASHITA Tomohisa,

OGATA Masafumi, HASEGAWA Hitoshi, NAGASHIMA Ken (RTRI)

E-mail: yoshizawa.keisuke.57@rtri.or.jp

1. はじめに

筆者らは、超電導コイルと超電導バルク体を組み合わせた超電導磁気軸受を用いた鉄道用フライホイール蓄電装置の開発を進めてきている。これまでに、小型の試験装置によって、超電導磁気軸受のみでロータを支えて毎分 3000 回転を達成した。さらに大型の試験装置によって 200 A 通電時に 60 kN 以上の力を発生可能であることを確認した[1]。これまでの装置はすべて Bi 系超電導線材を用いた超電導コイルによるものである。筆者らはさらなるステップとして RE 系超電導線材による超電導コイルを用いた 1 組の超電導磁気軸受で 10000 kg のフライホイールを支える超電導フライホイール蓄電装置の製作を検討している。本発表では、この超電導磁気軸受を設計するために行った、有限要素法による電磁界解析について報告する。

2. 解析条件

超電導磁気軸受は、ステータ側に超電導コイルを、ロータ側に超電導バルク体を配置する構成としている。超電導コイルの作る強力な磁界を、超電導バルク体の完全反磁性によってはじくことで発生する大きな力を利用するものである。超電導コイルと超電導バルク体配置の概略図を Fig.1 に示す。超電導コイルは 6 mm 幅の RE 系超電導線材によるダブルパンケキコイル (583 ターンコイル×2) を 7 つ積層したものである。超電導コイル単体では 110 A 通電で中心磁界が 5 T となるように設計されている。超電導バルク体は直径 140 mm, 厚さ 20 mm のものを 1 つと、直径 90 mm, 厚さ 20 mm のものを 3 つ組み合わせたものである。なお、本発表では直径 140 mm の超電導バルク体下面と、超電導コイルの上面との間を coil-bulk separation gap と呼ぶ。本研究では、超電導コイルを励磁した際に超電導バルク体に加わる浮上力と、超電導バルク体の中心がコイル中心軸から偏心した際の径方向力の計算を行った。

解析は有限要素法解析ツール ANSYS を用いて行った。ライセンスは電磁界解析が可能な Emag13.0 を用いた。解析モデルは 2 次元回転対称モデルと 3 次元ハーフモデルの 2 種類を作成した。前者は超電導バルク体が上下に移動した際にはたらく浮上力を、後者は偏心した際にはたらく径方向力を計算するためのモデルである。解析モデルでは、超電導バルク体の完全反磁性を模擬するために、超電導バルク体部分の透磁率を 0.001 とし磁界の侵入はほぼ無いものとして計算している。

3. 発生電磁力

超電導バルク体に加わる浮上力を Fig.2 に示す。結果より、coil-bulk separation gap を 30 mm 以下とすることで約 10000 kg の荷重に相当する、98 kN 以上の浮上力が発生可能であるといえる。また、超電導バルク体が上方に移動する程浮上力が小さくなる傾向が得られており、浮上力とロータの重量がバランスする位置で縦方向に安定な浮上が可能であることが確認できた。

次に、超電導バルク体が偏心した際の径方向力を Fig.3 に示す。結果は 1 mm 変位した場合と 3 mm 変位した場合を表示しているが、いずれも変位と逆方向に力がはたらくことが確

認できた。したがって、本超電導磁気軸受は径方向変位に対しても安定な構造である。

4. まとめ

本発表では、RE 系超電導線材を用いた超電導コイルと、超電導バルク体を組み合わせた超電導磁気軸受について、磁界解析を行った。結果、1 組の超電導磁気軸受で 98 kN の浮上力が発生可能であり、かつ軸方向および径方向ともに安定浮上可能であることが確認できた。

今後は装置の製作に向けて具体的な設計検討を行っていく予定である。

なお、本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けて実施したものである。

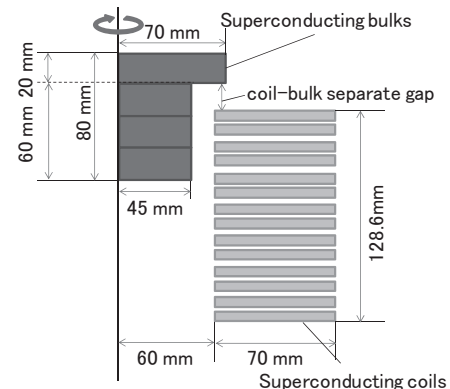


Fig.1 Components of superconducting magnet bearing

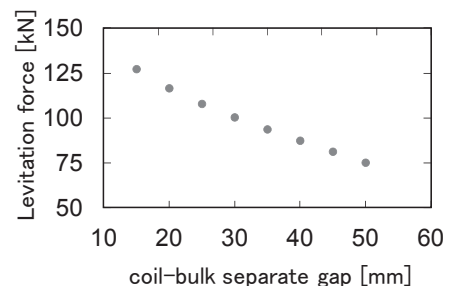


Fig.2 Levitation force of superconducting magnetic bearing

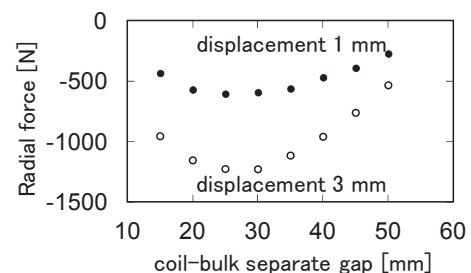


Fig.3 Radial force of superconducting magnetic bearing

参考文献

1. Y. Arai, et al.: 2P-LS2-07, EUCAS 2013