

長距離超伝導ケーブルの断熱二重管の真空排気について

Vacuum pumping for long cryogenic pipe of superconducting cable

イワノフ ユーリ, 渡邊 裕文, 筑本 知子, ビャトキン ウラジミール, 高野 廣久, 井上 徳之, 山口 作太郎 (中部大)
 IVANOV Yury, WATANABE Hirofumi, CHIKUMOTO Noriko, VYATKIN Vladimir, TAKANO Hirohisa, INOUE Noriyuki,
 YAMAGUCHI Satarou (Chubu University)
 E-mail: ivanov@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

Successful tests of the experimental high-temperature superconducting power transmission (HTS PT) lines around the world and operation some of them in real power grids make it possible to construct commercial projects to meet the needs of large energy consumers. In order to reduce the cost and improve the efficiency of the line the number of intermediate cooling stations should be reduced as far as possible. In other words, the distance between stations should be maximized. It is necessary to take into account the fact that under certain condition (for example, submarine HTS cable) construction of intermediate stations can be technically impossible. The obvious way to solve this problem is to improve the quality of the thermal insulation. The generally used multi-layer superinsulation (MLI) exhibits the best characteristics, but the performance depends on the degree of vacuum. Ideally, the number of vacuum pumps should be minimal, and they have to be located near the cryocoolers. We assume the aim is to achieve a distance between stations of at least 10 km. Therefore, the study and optimization of pumping conditions become very important.

2. Experiment

Currently, we are able to extrapolate the pumping conditions for the long line based on the experimental data obtained from 1 km DC HTS cable facility located in Ishikari (Hokkaido). The design of this facility is much different from the conventional HTS PT lines because of it was developed to achieve advanced capability in energy transfer range. Among other innovations, the straight cryogenic pipes are used instead of traditional corrugated ones in order to reduce the circulation losses. The large-diameter outer pipes provide higher pumping speed and improved conductance. One segment of the cryogenic pipe is additionally protected by means of radiation screen being in thermal contact with the liquid nitrogen return pipe. The vacuum space was purged with dry carbon dioxide (CO₂) before pumping. Several gauges monitor the time evolution of the vacuum level in the MLI area.

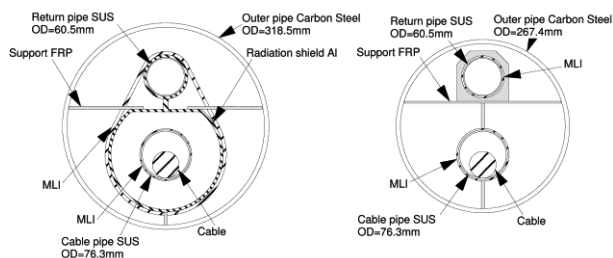


Fig. 1. Design of the thermal insulation with (left) and without (right) radiation screen.

3. Results

Time dependence of the vacuum level was obtained for the period of about two months.

Analysis of the pumping speed was carried out using non-steady-state diffusion equation

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (1)$$

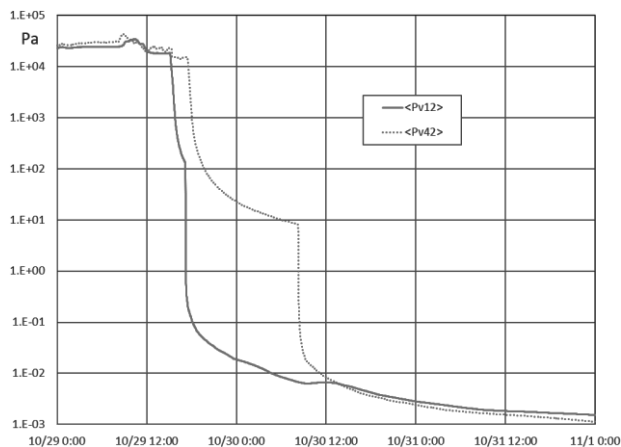


Fig. 2. Pressure inside terminals as a function of time during vacuum pumping.

The outgassing rate was estimated with steady-state one

$$D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + q = 0 \quad (2)$$

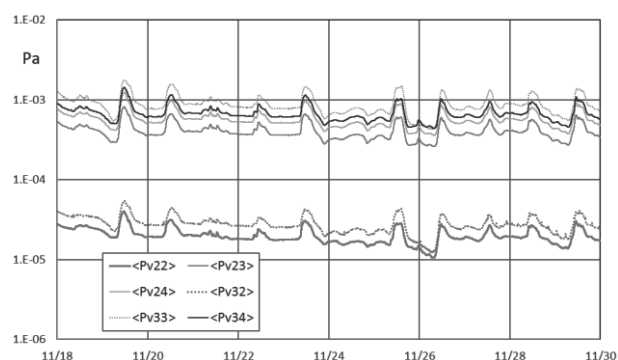


Fig. 3. Daily fluctuations of the vacuum level in the pipe under quasi-steady state conditions.

The obtained parameters allow us to make valid conclusions on the possibility of effective pumping of long HTS PT lines.

Reference

1. S. Yamaguchi et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** (2015) #5402504
2. H. Watanabe et al.: *Physics Procedia* **67** (2015) 239-244

This work was supported in part by the Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry (METI).

水冷ジャケット付きペルチェ電流リードの最適電流値評価試験

Optimal current value evaluation test of Peltier Current Lead with Water-cooled jacket

山内健吾*, イワノフ・ユーリ, ビャトキン・ウラジミール, 渡邊裕文, 宮田成紀, 井上徳之, 山口作太郎 (中部大学)

Kengo Yamauchi, Yury Ivanov, Vladimir Vyatkin, Hirofumi Watanabe, Seiki Miyata,

Noriyuki Inoue, Satarou Yamaguchi (Chubu University)

E-mail: ts15001-2303@sti.chubu.ac.jp

1. はじめに

直流超伝導送電は、現在主流の常温交流送電に比べ、交流損失やジュール熱損失が無く、高効率な送電が可能な技術である。一方、超伝導ケーブルを冷却して 77K 以下に保つ際に、常温側と低温側をつなぐ電流リードでの侵入熱量が問題となる。そこで、侵入熱量の低減を図ることを目的として、ペルチェ電流リード (PCL: Peltier Current Lead) を開発している。

本研究では高性能のペルチェ素子と水冷ジャケット方式を組み合わせた PCL を開発すると同時に、熱輸送について議論し、最終的に侵入熱量の低減を目的としている。

2. 実験方法

①PCL の侵入熱量は、真空断熱されたテストスタンドを用い、LN2 タンク側面の銅ブロックを通して LN2 を気化させたガス量により測定した (蒸発法)。

②侵入熱量は、銅ブロックを下部ヒータで加熱した時の加熱量とガス量の関係により校正した。

③PCL の電流依存性は、通電電流を 0~150A に変化させた時の各特性 (LN2 蒸発量、PCL 電圧 (N 型・P 型)、各部の温度など) の変化を調べた。

3. 結果と考察

(1) ヒータによる校正試験

入力電力と蒸発法より求めた侵入熱量の関係式は、 $y = 0.9912x + 5.7616$ となり、1W の入熱に対して、 $0.9912 \pm 0.010W$ であるため、良い校正となっている。

(2) 通電時の PCL 侵入熱量

Fig1 は、熱侵入量 [W] 及び単位電流あたりの熱侵入量である。Fig2 には、電流とペルチェ素材の電圧の関係を示している。電流ゼロ値の電圧は、ゼーベック係数に対応し、N 型が $190.4 [\mu V/K]$ 、P 型が $179.0 [\mu V/K]$ であった。

1 kA あたりの PCL の侵入熱量の最小値は 33.6W (電流 100A 時) であった。1kA に規格化した侵入熱量に極小値があるのは、2つの関数の電流依存により PCL にジュール熱 ($Q = RI^2$) と、ペルチェ効果 ($Q = \pi I$) の 2つの関数に依存するためである。

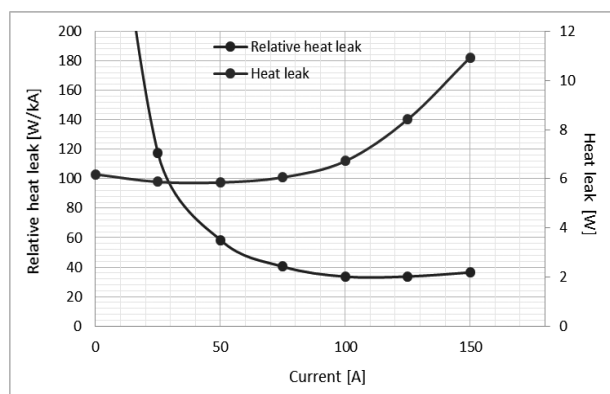


Fig. 1. Heat leak into LN2

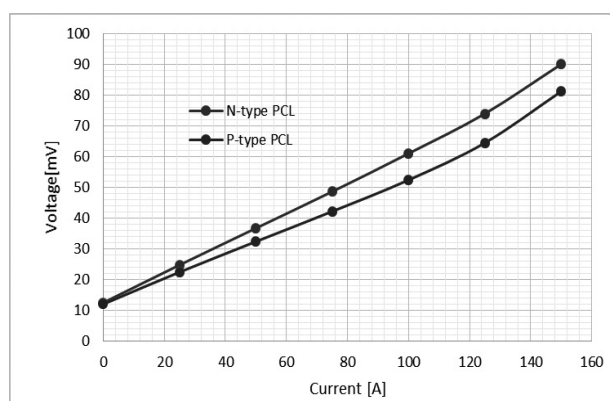


Fig. 2. Voltage across the Peltier element as a function of transport current

4. まとめ

水冷することによって、ペルチェ素子高温単温度がほぼ一定になり、ペルチェ効果がよく発揮した。今後は熱輸送データ解析を通じてトムソン熱についても議論する予定である。

5. 参考文献

磯貝俊輔: 「200m級超伝導直流送電実験装置用ペルチェ電流リードの性能評価」, 中部大学 卒業論文 (2013).

スエーピングを用いて線材加工した MgB₂ 単芯線材の組織と超伝導特性(第二報)

Microstructure and superconducting properties of MgB₂ single filament wire cold worked by swaging(2nd report)

齊藤 祐亮, 村上 雅人(芝浦工大); 葉 術軍(東北大); 熊倉 浩明(NIMS)

SAITO Yusuke, MURAKAMI Masato (Shibaura Institute of Technology); YE Shujun (Tohoku Univ); KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-Mail:mb15019@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

MgB₂は金属系超伝導体で最高の $T_c=39$ K を有するため、液体ヘリウムを使用しない機器への応用が期待されている。今後、MgB₂超伝導線材の応用を実現するためには、臨界電流密度 J_c を向上させることが重要である。磁場下における J_c を向上させる一般的な手段は、B サイトの一部を炭素置換させることである。この場合は使用するドーパントにもよるが、均一性や不純物の生成を考慮する必要がある。また MgB₂ の充填率が J_c 向上に非常に重要であるが、我々は前回、スエーピングによる線材加工が MgB₂ の充填率向上に有効であることを示した。今回は、上記の問題を考慮してカーボンコートボロン粉末(以下 CCB)ならびに C₂₄H₁₂ 添加ボロン粉末を用いて Powder-In-Tube (PIT)線材および Internal Mg Diffusion (IMD)線材を試作したので、その組織と特性について報告する。

2. 実験方法

線材作製は *In-situ* PIT 法および IMD 法を用いた。それぞれの原料粉末、線材加工方法、熱処理条件を Table.1 および 2 に示す。添加元素としてカーボン(CCB)および C₂₄H₁₂ を用いた。粉末を充填するシースには純鉄(99.5%, 外径/内径:6/3.5 mm)を用いた。また ϕ 0.6mm の IMD 線材を作製する際には、中間焼鈍を 570°C/1h で行った。

線材の臨界電流 I_c を 4.2K、磁界中で 4 端子抵抗法により測定した。作製した線材の組織を光学顕微鏡(OM)および走査電子顕微鏡 (SEM) で観察した。また粉末 X 線回折(XRD)で構成相の同定および炭素置換量を調査した。充填度の評価として、熱処理後の MgB₂ コアの硬さをビッカース硬さ試験器により調べた。

3. 結果と考察

無添加 PIT 線材ならびに添加 PIT 線材何れにおいても、スエーピングのみで加工を行った線材が最も優れた臨界電流特性を示す。これは、スエーピング加工を適用することによって Mg+B 混合粉末の充填率が上昇し、その結果として MgB₂ の充填率が向上するためである¹⁾。Fig.1 に 4.2K における PIT 線材の臨界電流特性を示す。まず無添加線材に関しては、600°C の熱処理温度で最高の J_c を示し、その値は 10T で 4.29×10^3 A/cm² であった。C₂₄H₁₂ を添加およびカーボン (CCB) を用いた線材においては J_c の最大値は、異なる熱処理温度で得られた。C₂₄H₁₂ を添加した場合は、熱処理温度の上昇に伴い J_c は向上する。これは温度の上昇と共に C₂₄H₁₂ の分解が促進されて炭素置換量が増加するためと考えられる。一方 4.5%CCB を使用した場合は、600°C において最も高い J_c 値を示した。無添加線材と同様に低温で熱処理を行うことで結晶成長が抑制され、ピンニングに有効な結晶粒界密度が増大したためであると考えられる。CCB の場合は C₂₄H₁₂ のように化合物の分解を伴わないので低温で炭素置換 MgB₂ が得られ、微細組織でより高い J_c が得られると考えられる。

今回得られた最高の J_c (10T)は、4.5%CCB を使用した場合で $J_c = 3.52 \times 10^4$ A/cm² ($J_c = 1.11 \times 10^4$ A/cm²)、5% C₂₄H₁₂ を添加した場合は $J_c = 2.39 \times 10^4$ A/cm² ($J_c = 7.26 \times 10^3$ A/cm²)で、通常の溝ロール+線引きによる加工と比べてはるかに高い値が得られた。

当日は、各加工工程における SEM 像および XRD の結果、IMD 線材の J_c 特性などを含めて議論を行う予定である。

Table.1 Specifications of PIT wire

Raw powder	Mg (99.5%) <45 μ m	<ul style="list-style-type: none"> Amorphous B (98%), <250 nm 1.5, 4.5%CCB 5, 10mol%C₂₄H₁₂ added
Mechanical Processing	1. Swaging 2. Groove rolling+ Roller drawing(CRD) 3. Groove rolling+ Drawing	
Diameter	1.0 mm	
Heat treatment	600.650.700°C/1 h	

Table.2 Specifications of IMD wire

Raw powder	Mg rod (OD:2 mm)	<ul style="list-style-type: none"> Amorphous B (98%), <250 nm 1.5, 4.5%CCB 5, 10mol%C₂₄H₁₂ added
Mechanical Processing	1. Swaging 2. Groove rolling+ Roller drawing (CRD)	
Diameter	1.0, 0.6 mm	
Heat treatment	675°C/8 h	

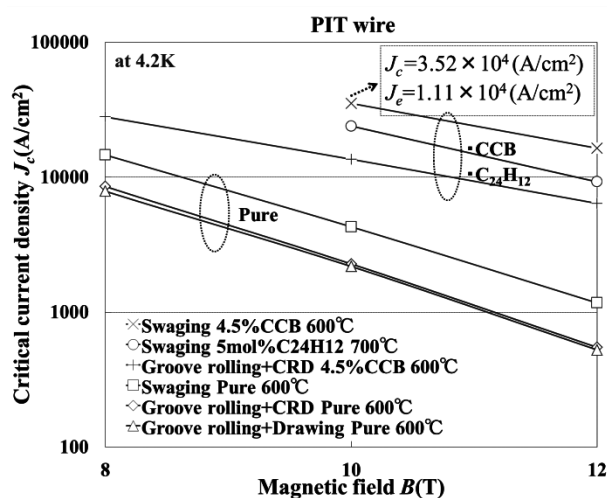


Fig.1 J_c -B curve of PIT wires

参考文献

1. Y.Saito, et al.:2015 年春季低温工学 講演番号 1P-p06

活性粉末を使用した ex situ 法 MgB₂ 線材の作製と臨界電流密度特性

Fabrication and critical current density property of ex situ processed MgB₂ tapes using reactive filling powder

藤井 宏樹, 石戸 谷章, 伊藤 真二, 小澤 清, 北口 仁(NIMS)

FUJII Hiroki, ISHITOYA Akira, ITOH Shinji, OZAWA Kiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

E-mail: fujii.hiroki@nims.go.jp

1. 序

ex situ 法 MgB₂ 線材においては, in situ 法線材に比べて弱結合の問題が深刻であるが, MgB₂ 粒周囲に付着する MgO 層が要因であると考えられる。MgB₂ 粉末の粉碎処理は, この MgO 層の除去や微細化によるピン留め点の増加などによって, J_c 特性の改善に有効であるが, その度合いは報告者によって大きく異なっている。これは処理粉末が高活性で, 線材試料の作製工程中に劣化したためだと考えられる。本研究では, 試料の取り扱いに注意することによって, J_c 特性がどこまで改善され得るのかを調べた。

2. 実験

市販 MgB₂ 粉 A1(Aldrich)及び A2(Alfa Aesar)の所定量を WC 製容器で種々の時間粉碎処理した。これらを充填粉として PIT 法で Fe シース線材を作製し, Ar ガス気流中で 1 時間加熱処理を施して評価を行った。この最終加熱処理まで, 粉末及び線材試料は Ar ガス雰囲気中で取り扱い, 保管し, 極力大気に触れないようにした。

3. 結果と考察

3-1. 粉末試料

XRD を測定すると, 粉末 A1, A2 共に不純物として MgB₄ や MgO を含んでいた。一方, 処理粉末については, 粉碎処理時間の増加に伴い, MgB₂ のピーク強度は減少し, その半値幅は大きくなり, WC のピーク強度が大きくなった。ICP による組成分析の結果を Table 1 に示す。粉碎時間の増加に伴い, W の混入量が増加していることが明らかとなった。

3-2. 線材試料

Fig. 1 に 4.2 K での J_c-B 特性を示す。粉碎処理によって特性は改善されたが, 10 時間の処理が最適であり, その値は 10, 12 T で, A1 で 180 及び 90 A/mm² であり, A2 では若干低下した。また, 更に長時間処理すると逆に劣化した。これは容器からの WC の混入量が増加したためだと考えられる。一方, 加熱処理前の試料を真空デシケーター中に不用意に保管しておく, 加熱処理後の特性が著しく劣化するものもあった。

充填粉の処理の有無に関わらず, A1 の方が A2 よりも優れた特性を示し, 処理粉末使用線材の特性は未処理粉末使用線材の特性を反映していることが示唆された。また, 未処理粉末の XRD から, A1 の方が A2 に比べて不純物が少なく, 高純度粉末の粉碎処理が優れた特性を得るのに重要であると考えられる。即ち, 単相高純度 MgB₂ 粉を用いれば, 更なる特性の向上が期待できる。

A1 粉使用線材での加熱処理温度に対する 4.2 K, 10 及び 12 T の J_c 値を Fig. 2 に示す。最も優れた特性を示す最適加熱処理温度は粉碎時間によって低下し, 10 時間粉碎で 780°C 前後であった。また, この温度は A2 粉使用線材でもほぼ同じであった。一方, 未処理粉末使用線材の最適温度は 900°C 以上であり, この低下は, 粒表面の MgO 層が除去されて活性度が上がり, 焼結反応が促進されたためと考えられる。

上記 Fig. 1 試料の磁化測定から求めた T_c は, 粉碎時間とともに低下し, 15 時間粉碎試料でおよそ 30 K となった。これは粉碎による結晶への歪みの増大や, その歪みが最適加熱処理温度の低下によって除去されないためであると考えられる。

Table 1. Mg and W contents in mass % in MgB₂ powders A2 milled for different times. The contents were determined by ICP analyses.

	1h	2h	5h	10h	30h
Mg	47.4	46.7	46.2	43.3	37.0
W	0.62	0.79	2.37	7.80	19.2

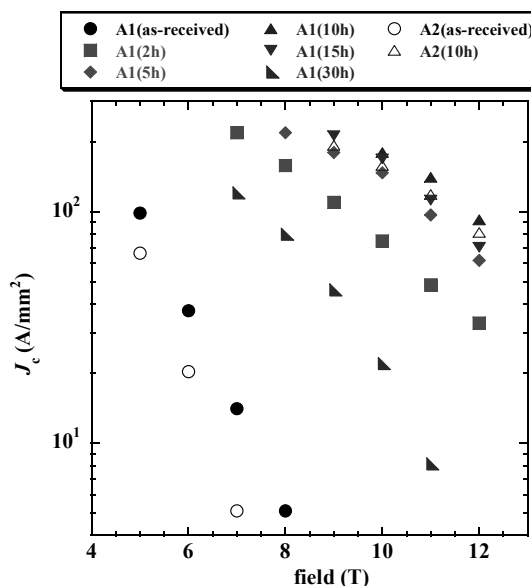


Fig. 1. J_c-B properties for the tapes using as-received and ball milled MgB₂ powders A1 and A2. The measurements were performed at 4.2 K in a magnetic field applied parallel to the tape surface.

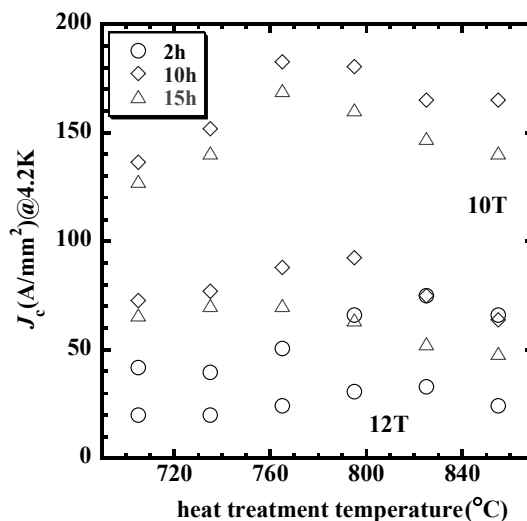


Fig. 2. J_c values at 4.2 K in 10 and 12 T as a function of heat treatment temperature for the tapes using powders A1 milled for different times.

冷却速度制御溶融成長法を用いた Gd-Ba-Cu-O バルク高温超伝導体の作製と捕捉磁場特性

Property of the Gd-Ba-Cu-O Bulk Superconductors Fabricated by Cooling-Rate-Controlled-Melt-Growth

末海 竜, 和泉 充 (海洋大); Yao Xin (上海交通大学)

Ryo Matsumi, Mitsuru Izumi (Tokyo University of Marine Science and Technology); Yao Xin (Shanghai Jiao Tong University)

E-mail:m154031@edu.kaiyodai.ac.jp

1. はじめに

REBCO(RE=Y,Sm や Gd などの希土類元素) バルク高温超伝導体は従来の永久磁石より遥かに大きい捕捉磁場のため、超伝導磁石として応用が期待されている。高い超伝導転移温度(T_c)を示す超伝導バルクを作製することで、最大捕捉磁場を向上させることが可能であるが、空気中での溶融成長法では RE イオンが Ba イオンと置換してしまうため結晶性が悪くなり T_c が低下する。しかし、空気中であってもバルクの結晶成長中の冷却速度を変化させる。

Cooling-Rate-Controlled-Melt-Growth(CRCMG) を用いることにより、結晶性を向上させることが NdBCO や SmBCO において確認されている[1]。

本研究では CRCMG を用いて作製した GdBCO バルク高温超伝導体の結晶性長速度と捕捉磁場を報告

2. 実験方法

Gd₂O₃, BaO₂, CuO の原料粉を混合し、GdBa₂Cu₃O_y 粉末を固相反応法により合成した。合成した GdBa₂Cu₃O_y 粉末と Gd₂BaCuO₅ 粉末(豊島製作所(株)製)を Gd123:Gd211=10:3 の割合で秤量し AgO を 10 wt%と Pt を 0.5 wt%を添加し混合後、20 mm φ の金型と一軸プレスを用いて成型したものを前駆体とした。Nd123 単結晶を種結晶とし前駆体を電気炉にて空気中で溶融凝固を行った。従来までの方法と CRCMG を用いた時の電気炉の熱処理パターンと熱処理条件をそれぞれ Fig.1, Table.1 に示す。溶融凝固後 350 度、200 時間アニール処理を行った。

3. 結果と考察

今回作製した試料の上部写真を Fig.2 示す。従来の方法を用いて試料作成を行った結果、20 mm φ のバルクの徐冷時間は 40 時間必要であった。(Fig.2 (a)) しかし、CRCMG 法を用いた場合の徐冷時間 20 時間ほどで結晶成長したバルクが得られた。(Fig.2 (b)) これは徐冷速度変化によって結晶成長速度が変化すること示しており、適切な冷却速度を用いれば従来の半分ほどの徐冷時間で結晶成長したバルク体が得られることが確認できた。Fig.2 (c) のバルク体左側では核生成が起きていることが観察できた。これにより CR2 = -1.0 °C/h 以上の速度で徐冷すると結晶成長していない場所から核生成が起こると考えられる。

今回の発表では上記以外にも試料 1,2 の捕捉磁場を測定した結果を発表する。

参考文献

1. X.X. Cui, et al.: J. ALLOY. COMPD, Vol. 663 (2016) p.10

Table.1 Thermal conditions.

	CR ₁ [°C/h]	H ₁ [h]	CR ₂ [°C/h]	H ₂ [h]
試料 1 (Conventional)	0.3	40		
試料 2 (CRCMG)	0.3	10	0.8	10
試料 3 (CRCMG)	0.3	10	1.0	10

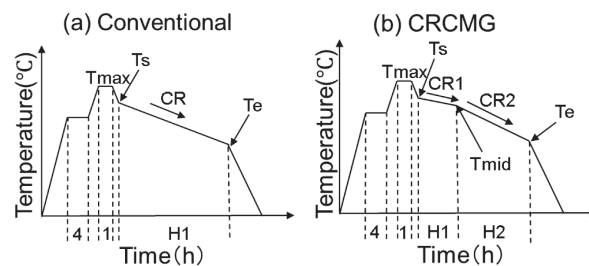


Fig.1 Thermal procedures, (a) Conventional and (b) CRCMG.

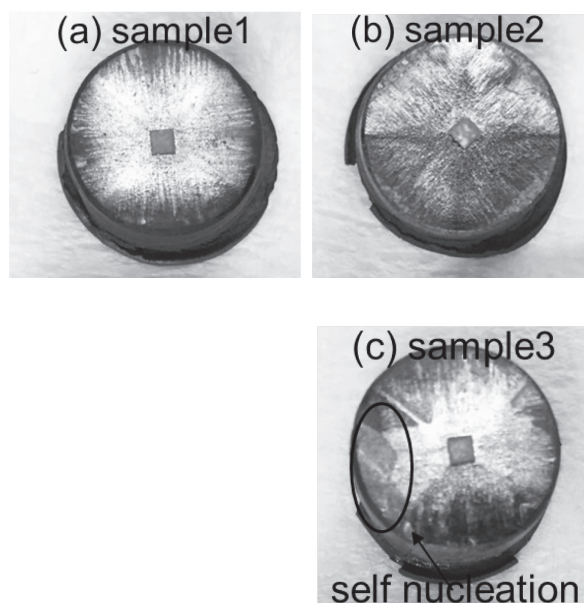


Fig.2 Top-view of Gd123, (a) Conventional, (b) and (c) CRCMG.

MgB₂バルク磁石の捕捉磁場の試料密度依存性

Sample density dependence of the trapped field for MgB₂ superconducting bulk magnets

石原 篤, 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 富田 優(鉄道総研); 岸尾 光二(東大)
 ISHIHARA Atsushi, AKASAKA Tomoyuki, ONJI Taiki, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute);
 KISHIO Kohji (The University of Tokyo)
 E-mail: ai@rtri.or.jp

1. はじめに

MgB₂は、金属系超電導体最高の約40 KのT_cをもち[1]、冷凍機冷却による超電導磁石などへの応用が期待される。さらにMgB₂は異方性が低く、比較的長いコヒーレンス長を持つことから、無配向の多結晶体においても粒間の弱結合の問題がなく、優れた臨界電流特性を示し[2]、試料全体で均一な超電導特性を示すことが期待される。すなわち、MgB₂は超電導バルク磁石としてNMR等の計測機器への応用に実用上有利であると考えられる。

これまで我々は、均質性の優れた、大型MgB₂バルク体の開発を行ってきた[3]。本研究では、試料密度を系統的に変化させたMgB₂超電導バルク体の捕捉磁場についての評価結果を報告する。

2. 実験方法

MgとBの混合粉末を用い、粉末充填量、成形圧力(75-200 MPa)を制御し、20 mmφ厚さ10 mmの円盤状になるように成型した。得られた粉末成形体を、Ar雰囲気下で850°C、3 hの熱処理を行い、MgB₂バルク体を作製した。その後、得られたバルク体を冷凍機で20 Kまで冷却し、超電導マグネットを用いて磁場中冷却により最大3 Tの磁場下で着磁を行い、ホール素子を用いてバルク体表面の捕捉磁場特性の評価を行った。

3. 結果と考察

粉末充填量と成形圧力を系統的に変化させ、粉末成形体の密度を評価した結果をFig.1に示すが、成形圧力の対数と試料密度の間に正の相関があることがわかる。また粉末充填量が多くなるほど、すなわち粉末成形体の厚みが厚くなるほど、密度が若干下がっているが、これは試料厚みが厚いほど、プレス圧力が散逸し、実効圧力が低下しているためと考えられる。各圧力で成形し焼成したMgB₂バルク体試料は、作製時の成形圧力にかかわらず、いずれも表面にマクロスケールのクラック、ポイド等は見られなかった。得られた試料の捕捉磁場の温度依存性をFig.2に示すが、成形圧力が高くなるほど、すなわち粉末成形体の密度が高くなるほど、系統的に高くなっていることがわかる。これは粉末成形体の密度があがるほど、焼結体密度が向上し、平均J_cが高くなったことを反映していると考えられる。

当日は、試料内の空隙率の評価結果などについても議論する予定である。

4. 結論

粉末成形圧力を制御したMgB₂バルク体を作製した結果、クラック、ポイド等は見られず、また焼結体の密度に応じた捕

捉磁場が得られた。すなわち、*in-situ*法で作製する多結晶MgB₂バルク焼結体においては、粉末成形圧力を調整することで、任意の空隙率をもつ試料を作製できることが明らかになった。

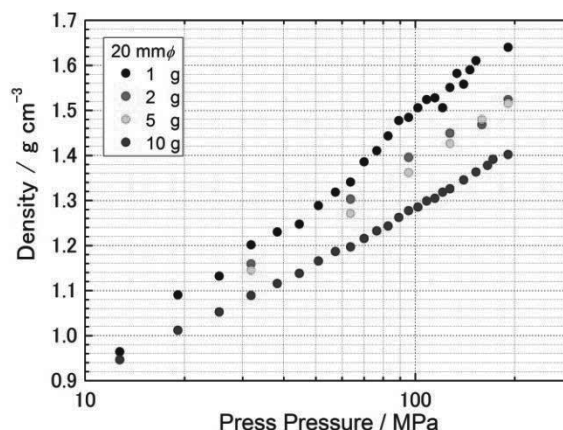


Fig.1 Press pressure dependence of powder compact density in mixed powder with Mg and B.

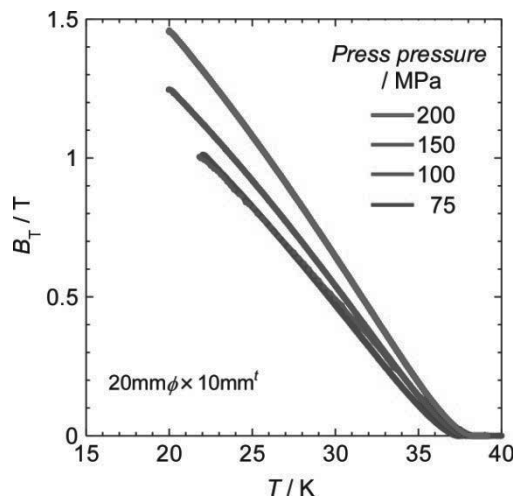


Fig.2 Temperature dependence of trapped field in a MgB₂ bulk pressed on 75-200 MPa.

5. 謝辞

本研究は JSPS 科学研究費助成事業(16H01860)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] J. Nagamatsu *et al.*, *Nature* **410**, 63 (2001).
- [2] D. C. Larbalestier *et al.*, *Nature* **410**, 186 (2001).
- [3] 例えば、富田優 ほか, 第 83 回低温工学・超電導学会講演概要集 p.86 (2010).

Y123 バルクの超伝導特性に対するカーボンナノチューブ添加の効果

Effects of carbon nanotube addition on superconductivity in Y123 bulk superconductors

井上 和朗, 三宅 佑弥, MIRYALA Muralidhar, 村上 雅人(芝浦工大)
 INOUE Kazuo, MIYAKE Yuya, MIRYALA Muralidhar, MURAKAMI Masato (SIT)
 E-mail: k-inoue@sic.shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

YBa₂Cu₃O_y (Y123) バルク体は、高い臨界温度 (T_c)、大きな捕捉磁場及び高い磁気浮上性能を有するため、小型超伝導マグネットシステムや攪拌機等の浮上回転装置への応用が期待されている。

バルク超伝導体の特性向上には、磁束の運動を抑制するピン止めセンターの導入が必要である。ピン止めセンターとしては、一般に常伝導粒子が有効とされている。ピン止め効果は粒子径に依存することが知られており、微細粒子の分散によって臨界電流密度(J_c)は大きく向上する。特にナノスケールのピン止めセンターの導入により、 J_c の飛躍的な増大が報告されている[1]。カーボンナノチューブ (CNT) の直径は、 ab 面内におけるコヒーレンス長に近いこと、高温超伝導体において効果的なピン止めセンターになる可能性があり、高い J_c と捕捉磁場特性を有するバルク超伝導体の作製が期待できる。これまで約 900°Cでの固相反応で作製された Y123 焼結体の粒界に CNT が分布するという報告例があるが[2]、熔融法で作製したバルク体内では確認されていない。

本研究では、CNT を添加したバルク体を熔融法で作製し、ナノサイズのピン止めセンターとしての有効性を調べることで、Y123 バルク超伝導体の臨界電流密度特性の向上を図ることを目的とした。

2. 実験方法

YBa₂Cu₃O_y と Y₂BaCuO₅ をモル比 10:4 となるように秤量した後、CeO₂ を 1wt% 添加し、湿式混練法を用いて混合した。さらに、CNT を 0~1wt% 添加し、凝集状態の CNT を分散させるためにアセトンを経由して超音波攪拌器にて混合した。次に混合粉を一軸等方プレス機により 20mm φ の前駆体にペレット成型した。熔融成長は、Nd123 を種結晶として、等温成長法により行った。995°C 付近において 25h 結晶成長させた。その後、超伝導化するために、400°Cにて 100h の酸素アニール処理を行った。

作製したバルク超伝導体の組織観察は、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて行った。また、SQUID 磁束計を用いて、 J_c 及び T_c の評価を行った。

3. 結果と考察

Fig. 1 に熔融成長を行った Y123 バルク超伝導体の SEM 像を示す。Y123 内に CNT が分布していることが確認できる。焼結体においては、粒界に CNT が分布するが[2]、熔融成長させたバルク体においては、Y123 母相内に CNT が微細分散することが分かった。しかし、元々、数 μm の長さを有していた CNT が熔融成長させることで数十 nm サイズまで短くなっている。これは、熔融成長温度が高いため、CNT の一部が熱分解し、断片化した可能性が考えられる。

Fig. 2 に CNT を 0.25、0.5 及び 1.0wt% 添加した試料と無添加試料の 77K における J_c の磁場依存性を示す。CNT 添加によって、低磁場領域において、 J_c が顕著に増加することが分かる。特に 0.25wt% 添加した試料では、無添加試料に比べて、自己磁場下において J_c が 2 倍程度向上している。これは、Y123 母相中で微細分散している CNT がピン止めセンターとして有効に作用し、 J_c が向上したものと推測される。CNT 添加量を 1.0wt% まで増加させていくと、低磁場領域において J_c の低下がみられたが、2T 近傍に第 2 ピークが観察された。

Sofie ら[3]は、0.8 wt%以上の炭素含有試料において、磁場誘起型ピンニングによるピーク効果を報告している。今回のピーク効果の原因については、さらに詳細に調べる必要があるが、CNT の一部が分解されて放出された炭素によって、Sofie らと同様の効果が得られた可能性も考えられる。

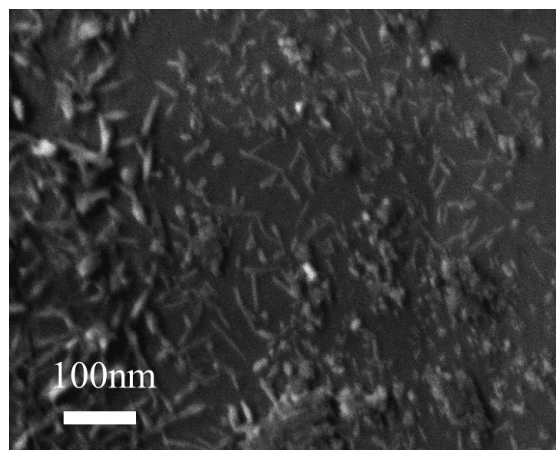
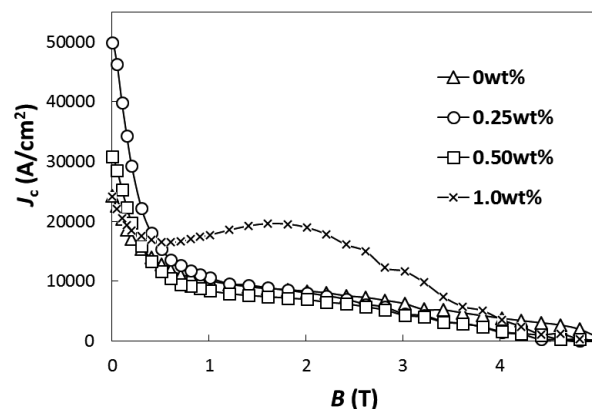


Fig. 1. SEM micrograph of 1wt% CNT added Y123.

Fig. 2. Magnetic field dependence of J_c at 77 K for CNT-added Y123 bulk superconductors.

参考文献

- [1] M. Muralidhar, N. Sakai, M. Jirsa, N. Koshizuka, M. Murakami: Appl. Phys. Lett. vol. 85 (2004) 3504-3506.
- [2] S. Dadas, Y. Liu, Y.S. Chai, V. Daadmehr, K.H. Kim: Physica C vol. 469 (2009) 55-59.
- [3] S. W. Sofie, F. Dogan: Supercond. Sci Technol. vol. 15 (2002) 735-740.

組成勾配法による(Gd,Y)BaCuO 大型単結晶バルクの機械的特性

Mechanical properties of (Gd,Y)BaCuO large single-grain bulk fabricated by compositional gradient technique

村上 明(一関高専);手嶋 英一, 成木 紳也, 森田 充(新日鐵住金);岩本 晃史(NIFS)
 MURAKAMI Akira (Ichinoseki College); TESHIMA Hidekazu, NARIKI Shinya, MORITA Mitsuru (NSSMC);
 IWAMOTO Akifumi (NIFS)
 E-mail: amura@ichinoseki.ac.jp

1. はじめに

酸化物超電導バルク材料(以下、「バルク」.)の大型化は、バルクを用いた応用機器の高性能化にとって有効な手段とされる。一般にバルクは単結晶の材料であり、その作製は、単一組成の前駆体を加熱して半熔融状態にした後、種結晶を配置して温度勾配下で結晶成長させて行われる。この作製プロセスによって大きいサイズのバルクを得ようとする、種結晶から離れた位置では過冷却度が大きくなり余分な核生成を生じて多結晶化しやすくなるため、直径 80 mm 程度以上のバルクサイズでは単結晶化が非常に難しかった。一方、前駆体の中心から半径方向に離れるに従い包晶分解温度が低下するよう同心円状に組成を変化させた前駆体を結晶成長させる組成勾配法により、過冷却度の増大を抑制でき、直径 150 mm 級の大型単結晶バルクが得られることが報告されている [1]。バルクの応用においては、電磁力や熱応力がバルクに加わるため、バルクの機械的特性を正確に把握することが重要となる。そこで、本研究では、組成勾配法による大型単結晶(Gd,Y)BaCuO バルクについて、組成の異なる領域やその境界部での機械的特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

組成勾配法により作製した直径 100 mm の(Gd,Y)BaCuO 単結晶バルクを 90 mm に加工した後、試料とした。機械的特性の評価は、バルクから試験片を採取して、曲げ試験を通して行った。前駆体の組成および結晶成長後の試験片の切り出し位置の概略を Fig.1 に示す。前駆体の中心付近では、GdBaCuO(希土類元素の Gd が 100%, Y が 0%)であり、そこから離れるにしたがい Gd が 95%(Y が 5%), Gd が 90%(Y が 10%)というように、Gd の代わりに Y の割合を増やしている。結晶成長後のバルクから Fig.1 のように試験片を採取して、大気中において 4 点曲げ負荷を行った。組成の異なる領域の境界を横切らないように採取した試験片を試験片 A、横切るように採取した試験片を試験片 B と呼ぶ。

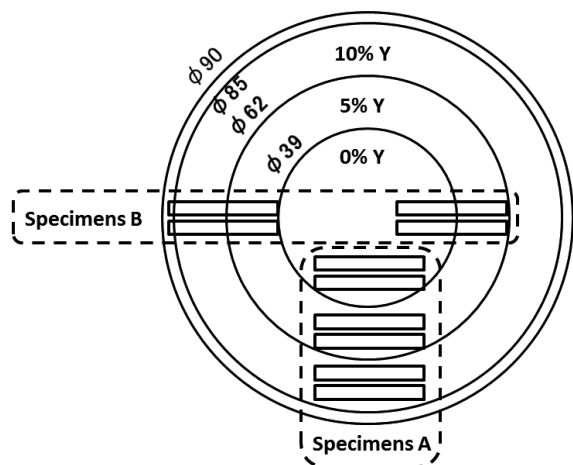


Fig.1 Schematic illustration of cutting out of bending test specimens.

3. 実験結果と考察

組成の異なる領域の境界を横切らないように採取した試験片 A と横切るように採取した試験片 B の室温での 4 点曲げ強さの比較を Fig.2 に示す。曲げ強さのデータにはバラツキが見られたが、試験片 B の曲げ強さは、試験片 A の曲げ強さと同等かそれ以上であり、組成の境界がバルク全体の機械的特性の低下を招くことはないかと推測される。

曲げ強さのワイブルプロットを Fig.3 に示す。図中の σ_p , F, m は、それぞれ曲げ強さ、累積破壊確率、ワイブル係数であり、m が大きいほどデータのバラツキが小さく、良好であると言える。試験片 B の m は 14 であり、良好である。試験片 A の m は 9 であり、試験片 B と比較して小さいが、試験片 A と B のワイブルプロットにおいて、破線で囲った高強度側に位置するデータ点は、ほぼ重なっている。試験片 A で m が小さいのは、低強度側に位置する例外的なデータ点が存在するためであり、そのようなデータの殆どがバルクの外周部に近いところから採取した試験片によるものであることから、材料自体の特性ではなく、試験片の採取前にバルクを加工した際に欠陥が導入した可能性が考えられる。

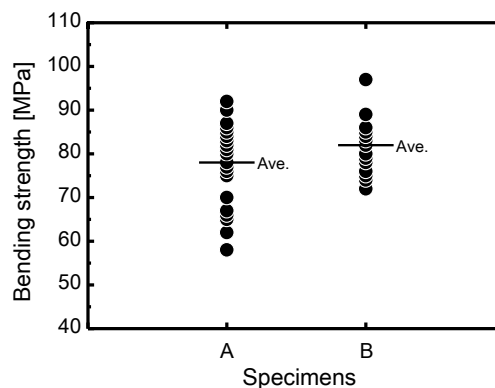


Fig.2 Bending strength of Specimens A and B.

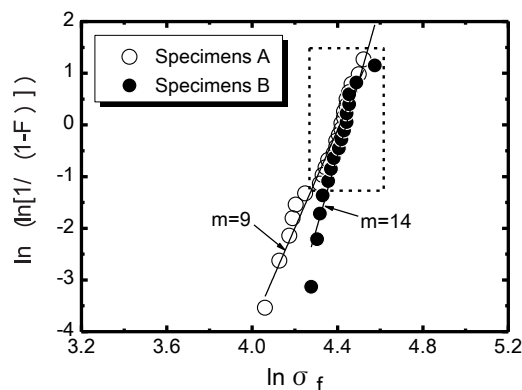


Fig.3 Weibull plots of bending strength of Specimens A and B.

参考文献

1. H. Teshima et al.: 24th Int. Cryo. Eng. Conf. Int. Cryo. Mater. Conf. 2012, pp.879-882.

JT-60SA CS バットジョイントの微細構造観察

Microstructural observations on butt joint of JT-60SA CS

尾花 哲浩, 時谷 政行, 高畑 一也 (NIFS); 木津 要, 村上 陽之 (量研機構)

OBANA Tetsuhiro, TOKITANI Masayuki, TAKAHATA Kazuya (NIFS); KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki (QST)

E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所と量子科学技術研究開発機構が共同で、JT-60SA 中心ソレノイド(CS)用バットジョイント(突合せ接続)の性能評価試験を実施し、設計要求値を満足する試験結果が得られた[1,2]。本研究では、性能評価試験で使用したバットジョイントサンプルを解体し、接続部の界面状態を電界放出型走査電子顕微鏡(FE-SEM, 形式:JSM-7100F)で観察した。本講演では、観察結果について報告する。

2. CS バットジョイントサンプル

Fig.1 に、CS バットジョイントサンプルの概略図を示す。本サンプルは、CS 導体間のバットジョイントを有する全長 1.8m 程のヘアピン形状である。CS 導体は、ブロンズ法で製造した Nb₃Sn 素線と銅線を撚り合わせたケーブル・イン・コンジット(CIC)導体である。導体の詳細を Table1 に示す。バットジョイントは、Fig.2 に示すように、2つの超伝導ケーブルを厚さ 0.1mm の銅シートを介して接続した形状であり、拡散接合されている。

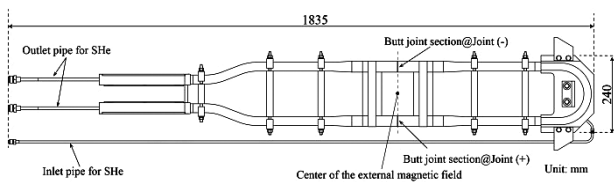


Fig.1 Schematic view of the butt joint sample.

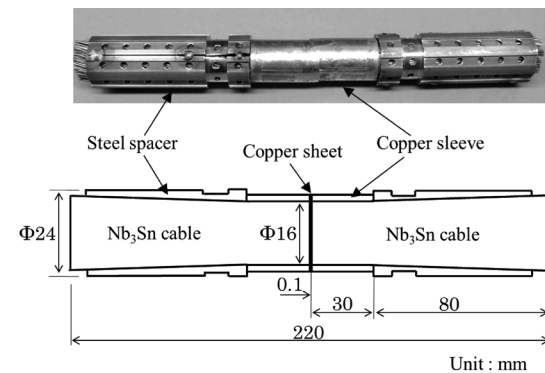


Fig.2 Configuration and photograph of the butt joint.

3. バットジョイントの微細構造観察

バットジョイント微細構造観察のために、性能評価試験で使用したバットジョイントサンプルを解体し、接続界面を有する観察用サンプルを作製した。本観察では、FE-SEM を使用し、接続界面を Nb₃Sn フィラメントが確認できる倍率で観察した。Fig.3 に、バットジョイント界面の観察結果を示す。ケーブルと銅シートの上に大きなギャップは生じておらず、適切に拡散接合されていることが確認できる。また、接続界面付近での Nb₃Sn フィラメント状態を観察した。Nb₃Sn フィラメントの観察結果を Fig.4 に示す。Nb₃Sn フィラメント(Nb₃Sn 層)には、銅シートに対して垂直方向(ケーブル長手方向)に沿って、き裂が生じている。その原因として、バットジョイントの拡散接合作業で加えた接続面への圧縮応力が考えられる。

Table 1 Main parameters of CS conductor.

Nb ₃ Sn filament diameter [μmm]	3.5 (Nominal value)
Number of Nb ₃ Sn filament	8130
Strand diameter [mm]	0.82
Number of Nb ₃ Sn strands	216
Number of Cu wires	108
Cabling pattern	(2 +1Cu) ×3×6×6
Jacket outer size [mm×mm]	27.9×27.9
Cabling diameter [mm]	21.0
Central spiral (id/od) [mm]	7/9

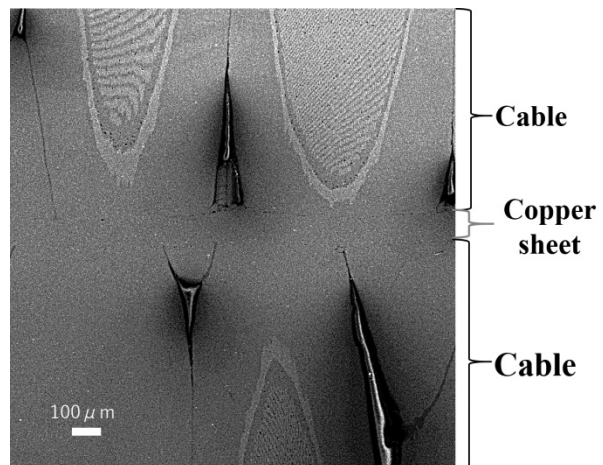


Fig.3 Micrograph of the butt joint interface at a strand scale.

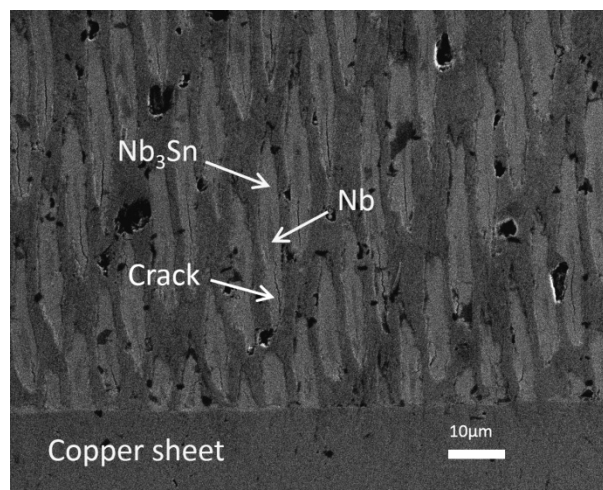


Fig.4 Micrograph of the Nb₃Sn filaments close to the butt joint interface.

参考文献

1. T. Obana, et al.: Cryogenics, Vol. 73 (2016) p.25
2. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87 (2013) p.40

ヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 への適用をめざした 100 kA 級高温超伝導 STARS 導体の安定性解析

Stability analysis of 100 kA-class HTS STARS conductors for the LHD-type helical fusion reactor FFHR-d1

寺崎 義朗 (総研大); 柳 長門, 濱口 真司, 田村 仁, 三戸 利行, 相良 明男 (NIFS); 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大)
 TERAZAKI Yoshiro (Sokendai); YANAGI Nagato, HAMAGUCHI Shinji, TAMURA Hitoshi, MITO Toshiyuki,
 SAGARA Akio (NIFS); ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: terazaki@nifs.ac.jp

1. 背景

核融合科学研究所ではヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 の設計活動が鋭意進められている。FFHR-d1 のヘリカルコイルには 100 kA 級の導体が必要とされており[1]、我々はそれに適した高温超伝導 (HTS) 導体の開発を行っている[2]。STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure) と名付けたこの導体は Y 系 HTS テープ線材を単純積層した構造を持ち、高い冷却安定性と強固な機械特性が特徴である。我々はこれまでに 30 kA 級導体[3]、100 kA 級導体[4]を試作 (全長約 3 m) して通電試験を行い、単純積層導体でも安定に臨界電流まで流せることを示してきた。特に、30 kA 級導体では臨界電流に到達した場合においても熱暴走が生じない通電例なども観測した。そこで、今回、この導体に対して擾乱に対する安定性数値解析を行い、実験結果の説明を試みた。

2. 30 kA 級導体の安定性解析

今回の数値解析では、1 次元の熱伝導方程式について有限要素法を用いて解いた。物性値の温度依存性を考慮した非線形・過渡解析であり、Fig. 1 に示す 30 kA 級 STARS 導体を対象として、導体長手方向の 1 次元解析を行った。この導体は SUS316 ジャケット、銅ジャケット、GdBCO 線材から構成されている。物性値について、導体の密度と比熱は SUS316 と銅の平均値、電気抵抗と熱伝導率はそれぞれ銅と GdBCO 線材、SUS316 と銅の並列回路として求めた。銅の物性値は磁場 6 T、RRR100 の値である。GdBCO 線材の電圧・電流特性にはパーコレーションモデルを用いた。磁場は一様に 6 T、初期温度は 20 K である。導体のある位置から擾乱が発生した際の温度分布の変化を求めた。ただし、6 T、20 K での臨界電流値は 45.3 kA である。

Fig. 2 に導体長手方向の温度分布の時間変化を示す。上から輸送電流が 20 kA、30 kA、40 kA の場合であり、いずれも 0.5 kJ の擾乱 (0.1 秒間) を仮定して計算した。輸送電流が 20 kA、30 kA の場合、最初擾乱によって上昇した温度は時間の経過とともに減少していくが、40 kA の場合は温度上昇は止まらずに熱暴走しているのがわかる。

Fig. 3 に熱暴走が発生する擾乱の大きさを銅ジャケットの電流密度に対して示す。この場合も擾乱の発生時間は 0.1 秒間としている。電流密度が小さくなると熱暴走する擾乱は急激に大きくなっており、極めて高い安定性を示している。発表当日はさらなる解析結果について、実験結果と対比して報告する。

参考文献

- [1] A. Sagara et al., *Fus. Eng. Des.*, **89** (2014) 2114
- [2] N. Yanagi et al., *Nucl. Fusion*, **55** (2015) 053021
- [3] Y. Terazaki et al., *IEEE Trans. Appl. SC.*, **24** (2013) 4801305
- [4] Y. Terazaki et al., *IEEE Trans. Appl. SC.*, **25** (2014) 4602905

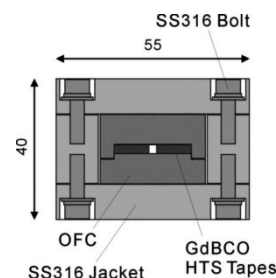


Fig. 1 Cross-sectional illustration of a 30 kA-class STARS conductor.

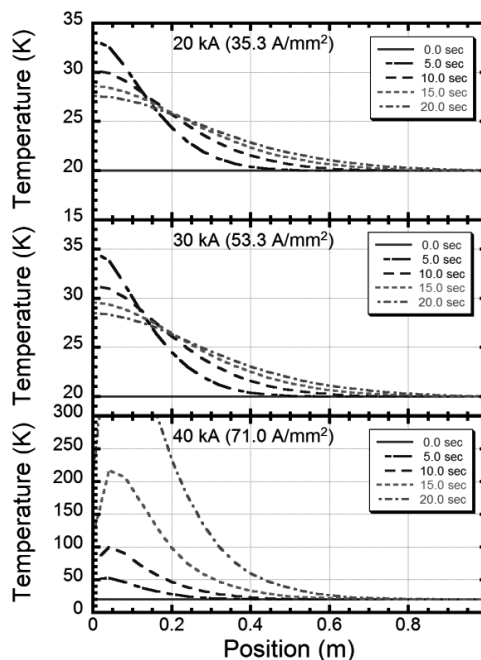


Fig. 2 Waveforms of the sample temperature in a 30-kA-class STARS conductor with a transport current of 20 kA (top), 30 kA (middle) and 40 kA (bottom).

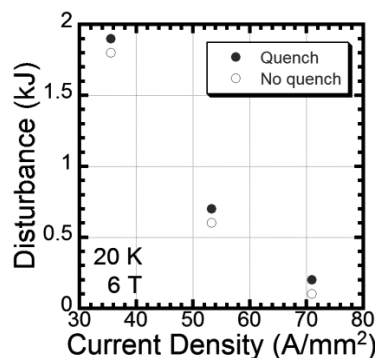


Fig. 3 Disturbance energy for observing a quench as a function of the current density in the copper jacket.

超伝導バルク磁石を用いたセシウムの磁気分離 Magnetic Separation of Cesium Using Superconducting Bulk Magnet

一重 佳那, 佐々木 翔, 小川 純, 福井 聡, 佐藤 孝雄, 岡 徹雄(新潟大学); 横山 和哉(足利工大);
青木 茂幸(JNC 石油化学 株式会社)

ICHIJU Kana, SASAKI Sho, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, SATO Takao, OKA Tetsuo (Niigata University);
YOKOYAMA Kazuya (Ashikaga Institute of Technology); AOKI Shigeyuki (JNC Petrochemical Corporation)
E-mail: fl5c034d@mail.cc.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルク磁石は、強磁場、高勾配磁場、コンパクトという特徴を持ち、強力な擬似永久磁石として応用ができる。強力な磁場を必要とする磁気分離には、超伝導バルク磁石の導入が有効である。東日本大震災で問題となった放射性セシウム(Cs)の磁気分離が様々な方法で進められるなか、我々は環境省が定める排水基準を達成するため、磁選機と連動したコンパクトで高効率な除染方法を目指す。本実験では非放射性セシウム(Cs)を使用する。

2. 実験方法

本来磁性を持たない Cs に強磁性体原料を結合させることにより、高効率磁気分離を可能とする。磁性処理過程は、まず Cs 水溶液にフェロシアン化物を添加し、Cs 結合体を作る。次に磁性体原料(鉄イオン)を添加し Cs 結合体を磁性体と反応させる。最後に pH 調整を行うことで磁性を持つ Cs 結合体が生成される。[1]

分離対象となる粒子の分離率は以下の通り定義する。

$$S_R = \frac{c-c'}{c} \times 100$$

S_R :分離率 C :原液濃度 C' :採取溶液濃度

磁性処理によって 100%の Cs が鉄と結合しているため、ICP 発光分析器によって鉄濃度の測定を行った。原液中の鉄濃度と採取した鉄濃度との差を、原液中の鉄濃度で除したものを分離率として定義し評価を行う。

通常の永久磁石による磁選機を用いた磁気分離方法と超伝導バルクを用いた方法を連動させた工程を想定して、磁選機においての処理流量 60ℓ/h (4.828ppm) と 120ℓ/h (2.196ppm)(凝集剤あり)、処理流量 40ℓ/h (9.240ppm)(凝集剤無し)をデータとして用いた。超伝導バルク磁石の最大磁束密度は 2.10 T (N 極)、処理流量は 3.0ℓ/min とし、処理時間 60s を 10 回連続し、交替型磁気分離装置(Fig.1)を用いて分離実験を行った。装置の配管には非磁性ステンレス材(SUS304)を使用し、高勾配磁気分離(HGMS)[2]を行うため、配管内に φ 0.6 mm の磁性網フィルタ(SUS430)を充填した。

3. 実験結果とまとめ

実験結果を Fig.2, Fig.3 にそれぞれ示す。最大分離率は処理流量 60ℓ/h で 99.98% (鉄濃度 0.11ppm), 120ℓ/h で 99.99% (鉄濃度 0.041ppm), 40ℓ/h で 99.54% (鉄濃度 3.0ppm)。凝集剤を使用した場合、目標値である 99.91%をすべての条件において達成した。

磁選機と超伝導バルク磁石を用いた交替型磁気分離装置を組み合わせることで、2次廃棄物を生まず高分離率が達成可能であることが分かった。今後は処理流量の増加や長時間連続運転時の調査、また凝集剤を用いない溶液に応じた分離方法の検討を行い、実用化に向けて研究を進める。

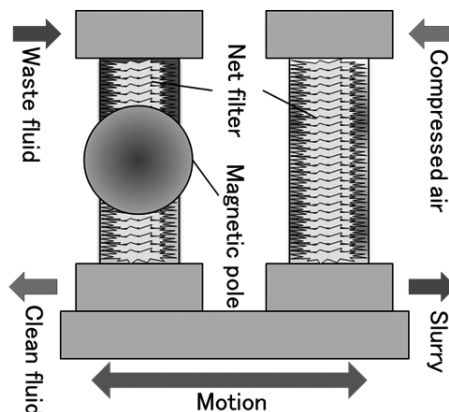


Fig. 1 Interchanging Magnetic Separation System

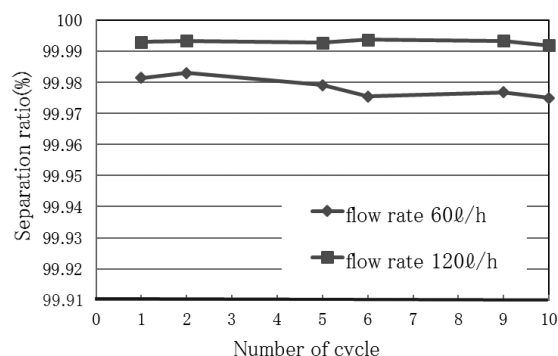


Fig. 2 Separation rate (using flocculant)

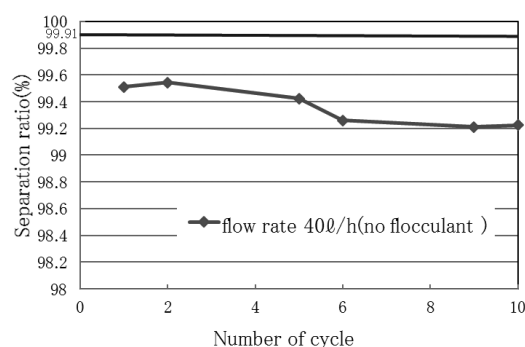


Fig. 3 Separation rate (no flocculant)

参考文献

- [1] S.Aoki, et al. 特開 2015-166080
[2] T.Oka et al. Physica C, Vol.468, pp.2128-2132, 2008

可搬型磁化活性汚泥法パイロットプラントの有用性と磁気分離性能の評価

Usefulness of Mobile Pilot Plant for Magnetic Activated Sludge Process and Evaluation of Magnetic Separation Performance

武藤 勇希, 酒井 保藏(宇都宮大学); 井原 一高(神戸大学); 高田 清信(足尾化学工業(株));

ミヒル ラル サハ(ダッカ大学); 弓場 誠, 中岡 潤一(NEOMAX エンジニアリング(株))

MUTO Yuki, SAKAI Yasuzo (Utsunomiya Univ.); IHARA Ikko (Kobe Univ.); TAKADA Kiyonobu (Ashio Chemical Co., Ltd.);

Mihir Lal SAHA (Dhaka Univ.); Makoto YUNBA, Junichi NAKAOKA (NEOMAX ENGINEERING Co., Ltd.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、生物学的水処理法である活性汚泥法の固液分離に磁気分離を適用した磁化活性汚泥(MAS)法について研究している。本研究では、MAS 法パイロットプラント実験を迅速に開始するため、可搬型パイロットプラント標準装置を設計し、その有用性を検証した。また、パイロットプラントの磁気分離装置を直列二段とすることによる磁気分離性能の向上を検証した。

今まで MAS 法パイロットプラントでは一段磁気分離を用いてきたが、分離性能が十分でなく、後段に沈降分離槽などを配する必要がある。そこで、二段磁気分離とすることで、磁気分離のみでの固液分離を目指した。本研究では、可搬型パイロットプラント標準装置を栃木県那須塩原市の牧場に設置し、酪農排水を対象として実地試験をおこなった。

2. 実験

(1)パイロットプラントの設置

FRP 製の曝気槽(容積 4 m³)、磁気分離装置(NEOMAX エンジニアリング(株)製クーラントセパレーターNCS-4 及び、NCS-12 を改造した装置)とポンプなどをユニック車で牧場の排水処理設備に運搬し、現地で組み立てた。上記の磁気分離装置は、一段磁気分離実験をおこなう際には NCS-12 のみを用い、二段磁気分離実験をおこなう際には前段に NCS-4、後段に NCS-12 を用いた。

(2)酪農排水処理及び磁気分離

本研究では、スクリーン処理(一次処理)と活性汚泥法処理(二次処理)の後段に MAS 法パイロットプラントによる処理プロセスを設置した。Fig.1 に二段磁気分離による固液分離のフロー図を示す。磁気分離性能の評価には、マグネタイト回収率および懸濁物質(SS)除去率を用いた。

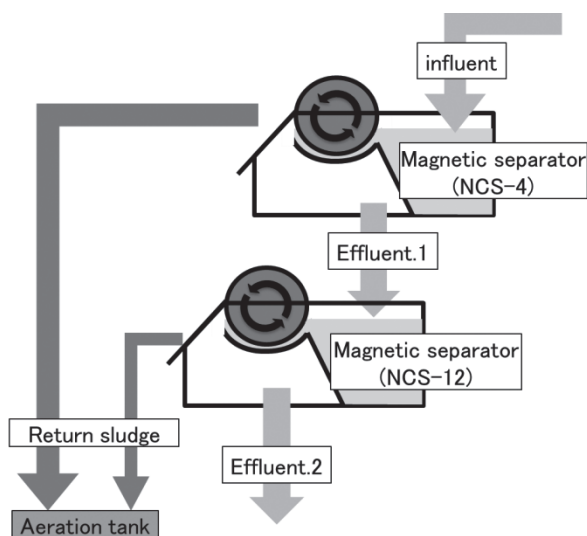


Fig.1 Flow Chart of Two Stage Magnetic Separation

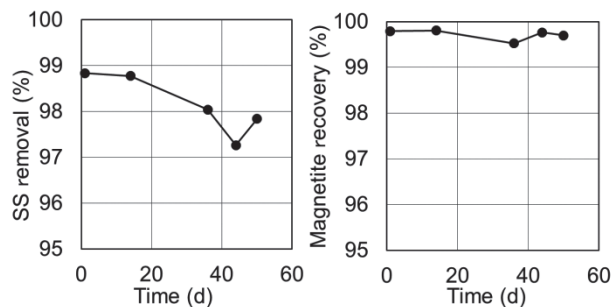


Fig.2 SS Removal and Magnetite Recovery Changes in 50 d Wastewater Treatment Experiment

3. 結果と考察

(1)パイロットプラントの設置

パイロットプラントを工場から運搬し、現地で組み立てる工程は、一日でおこなうことができた。しかし、制御系の構築と試運転には数か月を要した。可搬型パイロットプラントによりパイロットプラント実験の実施のリスクが大幅軽減できることが分かったが、より迅速に実験開始するために、標準的なプロセスの制御システムも準備する必要があることがわかった。

(2)磁気分離性能

一段磁気分離では、2.4 L/min の流入流量で SS 除去率が 86%、マグネタイト回収率が 99.2%となった。磁石ドラムの回転数(2~10 rpm)の影響は観察されなかった。流量 12 L/min のとき、SS 除去率は 72~77%、マグネタイト回収率は 97.3~97.5%となった。ドラム回転数が小さいほうが除去率、回収率は良好だった。二段磁気分離では 2.4 L/min の流入流量で、約 99%の SS 除去率、99.95%のマグネタイト回収率が得られた。二段磁気分離による連続処理では、17,000 mg/L の SS 濃度の磁化活性汚泥(SS 中に 7,600 mg/L のマグネタイトを含む)を分離でき、磁気分離のみで 50 日間の連続水処理を継続できた。一方で、現地の酪農排水には牛の糞便由来の植物片などが含まれており、これらには磁性粉がほとんど付着しないため、磁気分離後に、約 200 mg/L の SS が漏出した。あらかじめ排水中への糞便の混入を避けるか、漏出 SS を分離するために、砂ろ過などの分離装置が必要になることが示唆された。

4. まとめ

可搬型パイロットプラントに標準的な制御系を組み込んでおくことで現地でのパイロットプラント実験の迅速な開始が可能になることが示唆された。二段磁気分離を用いることにより磁気分離性能の向上が確認できた。しかし、水処理設備として排出基準を満たすためには流出水中の非磁性の SS を低減するための前処理や後処理の工夫が必要となることが示唆された。

水処理プロセスにおける磁気分離応用の可能性と磁気分離装置の要件

Current possibility of magnetic separation application in water treatment and the requirement for the magnetic separator

本間 司, 酒井 保藏 (宇都宮大学)

HOMMA Tsukasa, SAKAI Yasuzo (Utsunomiya Univ.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

排水処理には物理的、化学的、生物的など多岐にわたる手法があるが、最終的に汚水から汚濁物質を不溶化して分離するという工程は共通している。その分離法には沈降分離、浮上分離、膜分離などがある。磁気分離では、汚濁物質に磁性粉(Fe_3O_4)を添加(磁気シーディング)して磁気力によって分離する。本発表では、凝集沈降分離法と活性汚泥法に磁気分離を適用した場合のコスト比較および磁気分離装置の要件について検討し、報告する。

磁気分離は高濃度・高速の分離が可能な方法であるが、これまで磁性粉のコストが障壁となり、水処理分野では極めて限定的な用途にしか使われてこなかった。ところが近年になり、従来の 1/5 程度の価格(100 円/kg)で強磁性粉が提供されるようになり、コスト面では十分に競争できる状況になっていると考えられる。

2. 凝集沈降分離法への磁気分離の応用

懸濁液 1,000 m^3/d をポリ塩化アルミニウム(PAC) 500 mL/ m^3 で凝集沈降させる場合を想定する。沈降速度を 20 m/d(水道施設基準)とすると、直径 8 m の沈殿池(表面積 50 m^2)が必要となる。年間 300 日運転とすると、PAC 添加量は年間で 150 m^3 /年となる。

一方、同条件での磁気分離を考える。磁性粉濃度を 25 mg/L とすると、年間の磁性粉添加量は 7.5 t/年となる。また、分離装置は 700 L/min で SS 濃度 20 mg/L(一般的な排出基準)まで分離する能力が要求される。

両者のコスト比較を表1に示した。PAC、磁性粉のコストをそれぞれ 50 円/L、100 円/kg とした。磁性粉コストがわずかに上乗せされるが差は小さい。従って、分離装置の初期コストが重要となる。上記の規模の沈殿池(8m ϕ 、深さ 3m、排泥システムなど)を 2,000 万円とすると、我々が汚泥の磁気分離に利用しているドラム型ネオジム磁石磁気分離装置はドラム長が約 20 m 必要となる。磁気分離領域の有効容積は 2 cm \times 15 cm \times 20 m、60 L となる。現在、このような大型装置は市販されていないが、3,000 万円で製作可能とされている。現状では磁気分離装置のコストが沈殿池より高いが、量産によりコストが抑えられれば、沈殿池の面積を削減できる利点もあるため、磁気分離が有利になると考えられる。

磁気分離法として超電導磁気分離を導入する場合、一つは、高勾配磁気分離法のような高速化であり、もう一つは、同等勾配でより大きな空間に磁場を配する大容量化である。高速化では、1 秒の分離時間と仮定すると 5 倍の性能向上が期待されるが、最大磁場が 2 T の超電導磁石は 0.5T のネオジム磁石の 4 倍から 10 倍以上の空間に同等の勾配磁場を配し、性能向上が期待できる。分離した汚泥が磁気分離空間を占有してゆくことから、SS 濃度が

Table 1 Cost comparison of coagulating separations

Cost	Coagulating sedimentation	Magnetic separation
Initial	Settling tank ¥20,000,000	Magnetic separator ¥30,000,000
Running	Coagulant ¥7,500,000/y	Coagulant, magnetite ¥8,250,000/y

Table 2 Cost comparison of biological treatments

Cost	Activated sludge	Magnetic Activated sludge
Initial	Settling tank ¥40,000,000	Magnetic separator ¥60,000,000 Magnetite ¥3,000,000
Running	Sludge disposal ¥55,000,000/y	Magnetite supplied ¥3,000,000/y

高くなるほど後者のアプローチが有利になると考える。強磁場化による性能向上により、超電導磁石や冷却電力コストを吸収できるかどうか導入のカギになると考えられる。

3. 活性汚泥法への磁気分離の応用

表2にコスト比較の結果を示す。有機性工場排水 3,000 m^3/d (1,000 mg-BOD/L)を活性汚泥濃度(MLSS) 2,000 mg/L、容積負荷 1 kg/($m^3 \cdot d$)、曝気槽 3,000 m^3 で処理する場合を想定する。活性汚泥の沈降速度を 20 m/d(下水道施設計画・設計指針と解説)とすると、沈殿池は直径 14 m となる。この規模の沈殿池は 4,000 万円程度と考えられる。また、余剰汚泥(10 g-SS/L、150 m^3/d)の濃縮・脱水装置が必要となる。脱水汚泥(80%水分として 7.5 t/d)の処分費(2 万円/tとして 5,500 万円/年)も必要となる。

一方、磁気分離を用いる磁化活性汚泥法の場合、同条件で運転し、MLSS は 20,000 mg/L (10,000 mg/L の Magnetite を含む)で平衡濃度になるとする。最初の磁性粉添加量は 30 t、300 万円となる。磁化活性汚泥法は余剰汚泥が原則として発生しないため、多額の汚泥処分費が不要となる。ドラム型ネオジム磁石磁気分離装置はドラム長 40 m 必要とすると、6,000 万円で製作可能と考えられる。凝集磁気分離のときと比べると、活性汚泥法はランニングコストとして汚泥処分費が多額になるため、マグネタイトの漏出分の補充や磁気分離装置の初期コストを吸収することは容易である。

4. まとめ

生物学的水処理法では磁化活性汚泥法は余剰汚泥の処理コストが節約できることから有利となる。凝集磁気分離でも、磁気分離装置のコストダウンによって十分にコスト的に競争できる可能性がある。超電導磁石による磁気分離はコストを性能向上によって吸収する工夫が必要となると予想された。

凝集汚泥を磁気分離した場合の脱水効果

A dewatering effect of coagulated sludge by application of magnetic separation

関 政泰, 酒井 保藏, 渡辺 紡(宇都宮大)

SEKI Masayasu, SAKAI Yasuzo, WATANABE Tsumugi (Utsunomiya University)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

現在, 広く利用されている物理化学的水処理法の1つである凝集沈降分離法は, 磁性粉を添加すると凝集フロックが強磁性となり, 磁気分離が適用できる。磁気分離法は沈殿池が不要となるだけでなく, 沈降分離より濃縮された汚泥を回収できる利点がある。本研究では, 種々の懸濁物質を凝集磁気分離し, 得られる濃縮汚泥を沈降分離と比較したところ, 2倍以上の濃縮度が得られた。

物理化学的水処理法では, 溶解あるいは懸濁成分を無機凝集剤や高分子凝集剤で凝集させて, 沈降分離することで水を浄化する。一方で, 分離された汚泥は濃縮・脱水を経て焼却・最終処分(埋立)される。磁気分離法は分離時に磁力によって汚泥を水中から引き上げることができるため, 沈降分離法に比べて分離後の汚泥を高濃縮できる。現在, 我々が多用しているネオジム磁石を用いた回転ドラム型磁気分離装置は磁気分離した汚泥を一度水中から引き上げたのちに, スクレーパーで剥離させて汚泥を回収する。水中から磁力で引き上げるときに間隙水が落下するため, ほとんどエネルギーを消費することなく, 一定の脱水効果が期待できる。今回は簡易的にマグネットバーを用いて, その脱水効果による利点を定量的に考察した。

2. 実験方法

模擬廃水としてカオリンを水に分散させ, 濃度を 500 mg/L としたものをを用いた。これに磁性粉としてマグネタイトと, 高分子凝集剤を添加し, 沈降分離と磁気分離を比較した。まず, 模擬廃水に高分子凝集剤を添加し, 濁度を測定しながら緩速攪拌しフロックを成長させた後, 攪拌を止め沈降による現象を 30 分間測定し, 高分子凝集剤の種類と添加量の最適条件を検討した。凝集磁気分離はマグネットバーを使用した。模擬廃水に 100~1000 mg/L のマグネタイトと 20 mg/L のノニオン系高分子凝集剤を添加し, 緩速攪拌しながら模擬廃水にマグネットバーを 20 秒間浸漬させ, 引き上げた後, マグネットバーに付着したフロックの含水率を測定した。また, カオリン以外の模擬廃水についても同様に検討した。

3. 結果と考察

凝集沈降分離において高分子凝集剤濃度の影響を調べた結果を Fig.1 に示す。高分子凝集剤単独の場合, ノニオン系高分子凝集剤が沈降速度・最終濁度共に最もよい結果が得られた。最適濃度は 20 mg/L であった。

カオリン模擬廃水に 20 mg/L のノニオン系高分子凝集剤とマグネタイト 100~1000 mg/L を加えて磁性フロックを生成させ, マグネットバーで磁気分離したときの分離汚泥の SS 濃度を Fig. 2 に示した。マグネタイトを除いた SS 濃度では最大 200 g/L の濃縮汚泥が得られた。沈降分離では, 凝集フロックの密度が水とほとんど同じため, 十分に沈降させても 10~20 g-SS/L までしか濃縮できない。磁気分離では, 磁力で磁石面に付着させた磁性フロックを水から引き上げるため, 水だけが落下し, ほとんどエネルギーを使わず濃縮できた。沈降分離に比べて, カオリン濃度で約 10 倍の濃縮汚泥を分離できることがわかった。マグネタイト濃度を増加させると, マグネタイトを含む分離汚泥の全 SS 濃度は増加するが, カオリンの濃縮率は低下した。

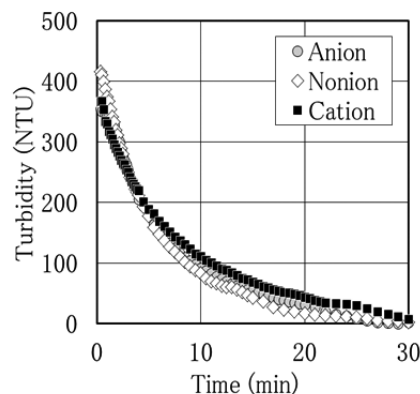


Fig.1 Coagulation Settling Curves

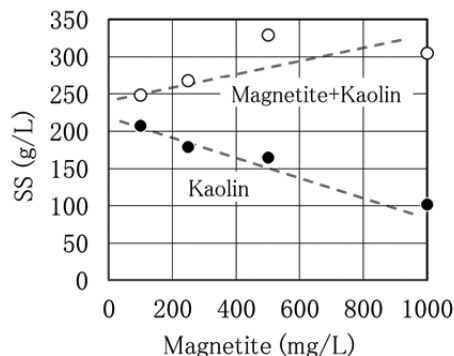


Fig.2 SS Concentrations of the Separated Sludge

凝集磁気分離では凝集フロックを強磁性にするためにマグネタイトを添加する。最近, マグネタイトが 100 円/kg で入手可能となり(従来の約 1/5), 凝集沈降分離とのランニングコストの不利はほとんど問題とならなくなった。一方, 同等性能の沈殿池と磁気分離装置を比較すると, 現時点では, 沈殿池の方がやや安価と予想される。ただし, 沈殿池の占有面積のコストは考慮されていない。

本実験結果から, 磁気分離により回収された汚泥は 200 g/L まで濃縮され, 水分 80%まで脱水されていることが示された。汚泥の脱水装置は沈殿池に匹敵する大きなインシャルコストと, 運転動力, 脱水助剤などランニングコストを発生する。磁気分離装置導入のコストは, 沈殿池と脱水装置のコストを合わせて比較されるべきであり, 磁気分離導入がより有利となる可能性が示唆された。

また, 磁気分離汚泥をさらに脱水する場合も, 沈降分離汚泥の 1/10以下まで減容されているため, 小型の脱水機を導入でき, 脱水コストを抑制することができる。

4. まとめ

凝集磁気分離における磁気分離装置のインシャルコストは, 凝集沈降分離の沈殿槽と脱水装置を合わせたコストと比較すべきであることが示唆された。磁気分離はほとんどエネルギーを消費せず高濃縮汚泥を得られるため, さらに脱水する場合もより小型の脱水装置を利用できると考えられた。

酸化物超伝導並列導体の通電特性を考慮した電流分流特性の解析(2)

Analysis on the current sharing properties of the oxide superconducting parallel conductors in consideration of the I-V characteristics(2)

本田正太郎, 福本祐介, 岩熊成卓, 吉田幸市, 佐藤誠樹(九州大学); 和泉輝郎(AIST); 富岡章, 今野雅行(富士電機);
 HONDA Shotaro, FUKUMOTO Yusuke, IWAKUMA Masataka, YOSIDA Koichi, SATO Seiki(Kyushu-Univ.); IZUMI Teruo(AIST);
 TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki(FujiElectric)
 E-mail:honda-s@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

酸化物超伝導線材を電力機器や大型超伝導マグネットに適用するためには大電流量化が必要である。現在の酸化物超伝導線材は、結晶の配向性を揃えるためにテープ形状であり、従来の撚線導体は適用できず、大電流量化するにはテープを重ね合わせて並列導体を構成しなければならない。しかし、単に積層しただけでは素線間のインダクタンスバランスがとれず、偏流が発生し、交流損失が増大する。そこで適切な位置で素線の位置を入れ替える転位を施すことにより、素線間のインダクタンスを均等化する必要がある。我々はこれまでY系超伝導テープ線材で構成した転位並列導体について、電流リード部の接触抵抗と、n 値モデルに基づく通電時の磁束フロー抵抗を考慮して電流分流の解析を行ってきた。今回は新たに Ic の磁場依存性を考慮に入れて考察を行った。

2. 数値解析

REBCO 線材に転位を施しながら並列導体を構成し、ソレノイドコイルに巻いた場合について考察する。素線間電流分流の様相を数値解析により調べた。転位は、これまでに判明している最適な転位方法を適用している。素線数が3本の場合、各素線の自己インダクタンス及び相互インダクタンス、および、電流リードとの接触抵抗 R_N と、超伝導素線における磁束フロー抵抗 R_{HTS} を考慮にいと、等価回路は Fig.1 で表され、回路方程式は(1)式となる。

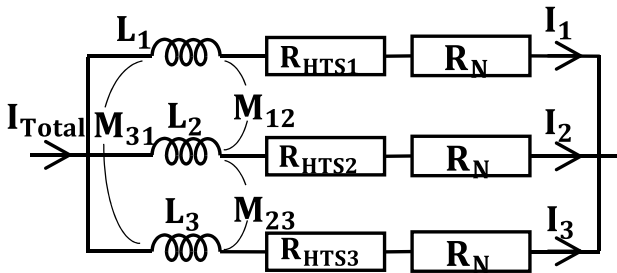


Fig. 1 Equivalent circuit of a 3-strand parallel conductor.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega L_1 + R_N + R_{HTS1} & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} \\ j\omega M_{21} & j\omega L_2 + R_N + R_{HTS2} & j\omega M_{23} \\ j\omega M_{31} & j\omega M_{32} & j\omega L_3 + R_N + R_{HTS3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、各素線の磁束フロー抵抗 R_{HTSx} は高温酸化物超伝導線材の通電特性を n 値モデルで近似すると、(2)式で表される。

$$R_{HTSx} = \frac{V}{I} = V_C \left(\frac{I^{n-1}}{I_C^n} \right) \quad (2)$$

接触抵抗 R_N には実測値を用いた。

ここで Fig.2 に示すように、磁場計算結果をもとに I_c -B- θ 特性を参照し、各素線、各ターンの I_c を求め、(2)式に代入し、各素線 1 ターンごとの磁束フロー抵抗 R_{HTS} を導出し、すべてのターンで足し合わせることで、各素線の磁束フロー抵抗 R_{HTSx} とした。

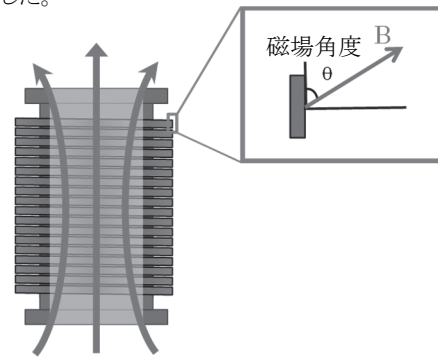


Fig.2 Magnetic field distribution.

3. 結果

$n=10$ 各 I_c が 120A, 100A, 80A の 3 素線 30 ターン 3 層のソレノイドコイルに 150A を通電したときの周波数-分流比特性を Fig. 3 に示す。高周波ではインダクタンスバランスにより電流分流が決まり、低周波になるほど、 I_c のばらつきの影響を受けて、電流が偏流することがわかる。

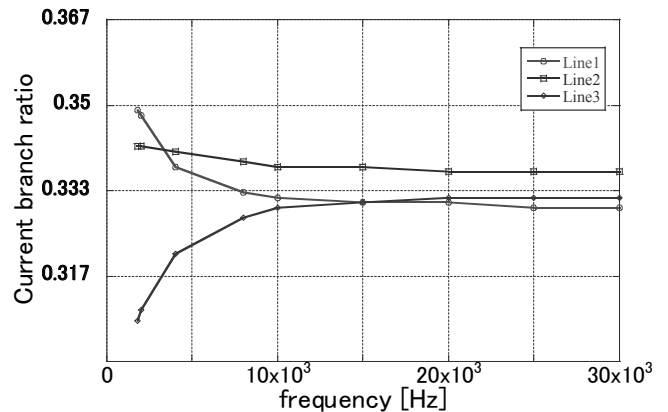


Fig.3 Frequency dependence of branch current ratio.($n=10$, $I_c=120,100,80A$, $I_t=150A$).

4. まとめ

REBCO 線材を素線として並列導体を構成する場合、適切な転位を施しインダクタンスのバランスをとったとしても、REBCO 線材の通電特性、すなわちn値、 I_c にばらつきがあると電流偏流が発生することが明らかになった。詳細は当日発表する。

(50T・500A/mm²・5GPa)-REBCO 超電導コイルシステムの開発

Development of (50T・500A/mm²・5GPa)-REBCO coil system

石山 敦士, 我妻 洸, 齋藤 隆(早大);野口 聡(北大);植田 浩史, 金 錫範(岡山大);渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)
ISHIYAMA Atsushi, AGATSUMA Ko, SAITO Takashi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); UEDA Hiroshi,
 KIM SeokBeom (Okayama Univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power)
 E-mail:atsushi@waseda.jp

1. はじめに

筆者らは、Li イオン電池を凌駕する貯蔵密度 (600kWh/m³) を有する SMES 用コイルシステムの開発を目的として、必要となる超電導コイルの要求仕様を、REBCO 線材の使用を想定して簡易計算により試算した。その結果、発生磁場 50T 以上、機械強度 (フープ応力) 5GPa 以上、工学的電流密度 500A/mm² 以上を達成すれば実現の可能性があることがわかった。そしてこれらを達成するための革新的コイル化技術として、1) 飛躍的な高機械強度化技術の実現、2) 高電流密度化と高安定化を両立する技術の実現、3) 目標とする貯蔵容量 (10MWh 級/数十 GJ 級~100MWh 級/数百 GJ 級) を有するコイルシステム設計のための設計最適化技術の確立について検討をはじめた。今回は以上の概要を報告する。

2. 目標とする SMES 実現の効果

従来の我国の技術ロードマップでは、SMESは短時間 (秒単位)・大出力貯蔵装置 (例えば瞬低補償用) という位置づけであったが、目標とするSMESが実現すれば、分単位 (例えば負荷平準化) から時間単位 (揚水発電の代替) までSMES応用の範囲が大幅に拡大することになる (Fig.1)。

3. 5GPa, 500A/mm², 5Tとした根拠

同一の断面構成・寸法を有する REBCO 線材の使用を仮定して、必要となるコイル仕様を次のように試算した。

- REBCO テープ線材：幅 6mm、厚さ 100 μ m、基板・超電導層・安定化層の構成比固定。
- コイル寸法：内径を 300mm、500mm、1000mm の 3 種類に固定。コイル高さを 100mm に固定。
- インダクタンス L と貯蔵エネルギー密度 $= [(1/2)L^2 / \text{巻線体積}]$ を繰返し計算し、60kWh/m³、600kWh/m³ となるときの巻数、コイル外径を求める (6kWh/m³ は NEDO プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」2008 年~2012 年における実証値)。
- 得られた結果から、巻線内最大磁場とフープ応力 (GPa)、線材単位長さ (km) 当たりの貯蔵エネルギー (MJ/km) を計算し、図にプロット。

以上の試算結果を Fig.2 に示す。単位体積当たりの貯蔵密度 (kWh/m³) と通電電流密度 (A/mm²) をパラメータとしてプロットしている。図中◇印は 600kWh/m³、△印は 60kWh/m³、○印は 6kWh/m³ である。そして、それぞれ一番左のプロットがコイル内径 300mm、2 番目が 500mm、3 番目が 1000mm としたときの結果である。

4. 目標を実現するためのコイル化技術 (Fig.3)

- 飛躍的な高機械強度化技術
貯蔵密度 600kWh/m³・発生磁場 50T 達成に必要となる機械強度の目標値 (耐フープ応力 BJR > 5GPa) をクリアするための巻線・補強構造とするため「YOROI コイル構造」[1]の改良を試みる。
- 高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術
貯蔵密度 600kWh/m³ 達成に必要となる高電流密度化 (500A/mm²) と高熱的安定化 (含むコイル保護) の両者を成り立たせるために、「無絶縁コイル巻線方式」を採用した「層間電気抵抗制御技術」を検討する。

3) 超電導コイル化システムの最適設計技術

要求される貯蔵容量に応じた SMES 用コイルシステムの設計最適化を行う。すなわち、複数のダブルパンケーキコイルから成る要素コイルとそれを組み合わせたコイルシステム (トロイダル構造・マルチソレノイド構造) の設計最適化を実施する。

本研究は、科研費挑戦的萌芽研究 (16K14220) による。

参考文献

- [1] S.Nagaya et al., IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 23, 3, 4601204, 2013]

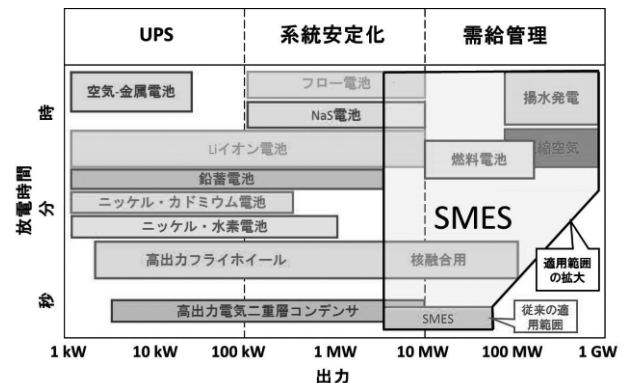


Fig.1 Increase of the range in SMES application

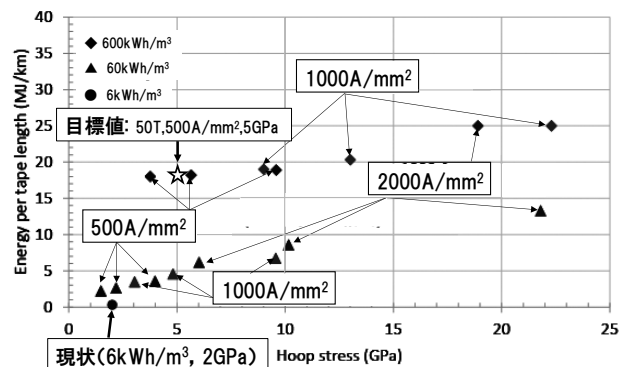


Fig.2 Hoop stress vs. Energy per tape length

貯蔵密度 (600kWh/m³) と貯蔵容量 (10MWh 級/数十 GJ 級~100MWh 級/数百 GJ 級) のコイルシステムの実現

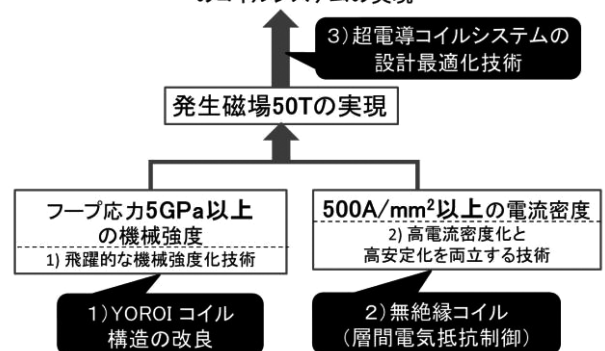


Fig.3 Development of magnet technology for 600Wh/m³-SMES

短尺 MRI マグネット設計の検討

Design study of short MRI magnets in length

尾崎 修(神戸製鋼所)

OZAKI Osamu (KOBE STEEL Ltd.)

E-mail: ozaki.osamu@kobelco.com

1. はじめに

MRI は、ボア径に対し比較的大きな空間において、高均一度な磁場を発生する事を要求されている。それ故、超電導マグネットの軸長を短くする事は難しくなっている。軸長を短弱化する試みとして3層以上(主コイルを2層以上、遮蔽コイルを1層)の多層構造にする事が提案されている[1]。今回、何故多層構造にすれば短尺化出来るのかについて考察したので報告する。

2. 数値計算モデル

Fig. 1(a) に示すマグネット中心軸上の任意の位置に存在する円環電流が原点を中心とする半径 r の球面上に発生する軸方向磁場 B_z は式(1)の様にルジャンドル関数の多項式で表される。

$$B_z = \sum_{n=0}^{\infty} C_n P_n(\cos\theta) \quad (1)$$

$$C_n \equiv \frac{\mu_0 I}{2f} (P_n(\cos\alpha) - \cos\alpha P_{n+1}(\cos\alpha))(n+1) \left(\frac{r}{f}\right)^n \quad (2)$$

ここで、 P_n は n 次のルジャンドル関数である。Fig. 2(b) に示す半径 R 、軸長 L の円筒表面に周方向に流れる表面電流 J_{ϕ} が分布しているとすると、その表面電流により発生する軸方向磁場の不均一成分は式(2)と J_{ϕ} の積の積分で求める事ができる。よって、高い磁場均一度を得るためには0次以外の積分値が充分小さくなるように J_{ϕ} の分布を求めればよい。

3. 短尺 MRI マグネット設計

多層化による短尺化の効果を確認し易くする事を考えて、主磁場を発生する主コイルのみを考える事とした。即ち、アクティブシールドを持たない非シールド型である。1層の場合と2層の場合でどの様な電流分布になるのか前節の数値計算モデルを用いて計算した。その時の計算条件を Table 1 に示す。マグネットの軸長は市販されている全身用 MRI マグネットと比べ約 2/3 の 900 mm 以下になる様に条件設定した。直径 900 mm、軸長 900 mm の円筒表面だけに表面電流が分布している1層の場合と、軸長は同じで直径 1350mm の円筒も加えた2層の場合で J_{ϕ} の分布を計算した。

それぞれの場合での J_{ϕ} の軸方向分布の計算結果を Fig. 2 に示す。巻線部のオーバーオール電流密度を 200 A/mm² と仮定すると、1層の場合 (Fig. 2 (a)) マグネット端部に必要なコイル厚みは 1000 mm 以上となる。また、マグネット赤道面付近は正転コイルと反転コイルが軸方向に狭いギャップを挟んで交互に配置させる必要もある。このような巻厚みやコイル配置は実現困難である。

一方、2層の場合 (Fig. 2 (b))、 J_{ϕ} の絶対値は1層の場合と比較して1桁小さくなり、巻線部オーバーオール電流密度を 200 A/mm² と仮定すると、最大コイル厚みは 75 mm となり、最大となる場所は外層の両端部に位置する。内層では更にコイル厚みは小さくなり、最大でも 25 mm に収まっている。電流密度の分布に着目すると、外層での J_{ϕ} は全領域で正であり、内層は全領域で負となっている。よって、1層の場合の様に正転コイルと反転コイルを軸方向に交互に配置する必要が無く、余裕を持ってコイルを配置する事が可能である。

以上より、主磁場を発生するコイルを2層にする事で軸長 900 mm 以下の全身用 MRI マグネットが実現出来ると思われる。

4. 考察

2層にする事で短尺 MRI マグネットの設計が可能になる理由を考察した。1層の場合、短尺にする事で2次で負の値の磁場不均一成分が大きくなり、それに応じて両端部の電流密度を大きくして2次の不均一成分をキャンセル必要がある。しかし、2層にして内層の赤道面付近に反転コイルを配置することで効率的に2次のプラス成分を作り出す事が出来、結果として外層の両端部の電流密度を大きくする必要がなくなったからであると考えている。

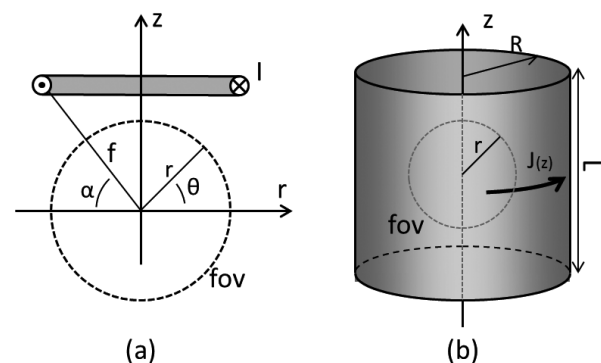


Fig. 1 Schematic of one turn loop (a) and cylindrical model (b).

Table 1 Conditions for calculation.

Center field	1.5 T
Homogeneity	< 10ppm @450mmDSV
Inner diameter of windings	> 900 mm
Length of magnet	< 900 mm

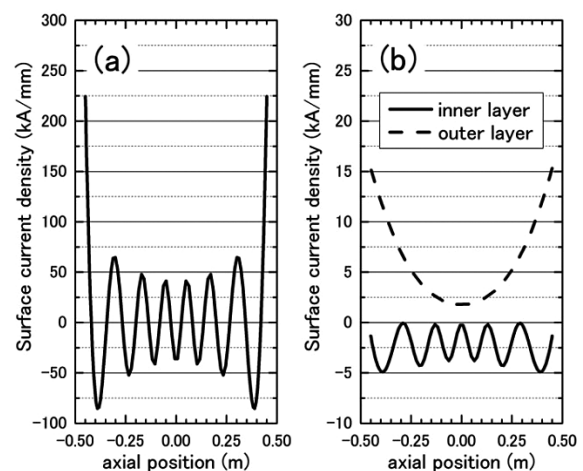


Fig. 2 calculated surface current densities, (a) one layer, (b) two layers.

参考文献

- H. Zhao et al.: Magnetic Resonance in Medicine, Vol. 45 p.331-340 (2001)