

イットリウム系超電導変圧器の限流機能付加技術開発 - 限流特性解析 -

Current Limiting technology development of Y-based HTS power transformers - Analysis of current limiting property -

岡元 洋, 林 秀美(九州電力); 岩熊成卓, 富岡 章(九州大学); 藤代博之(岩手大学);
齊藤 隆(フジクラ); 五所嘉宏, 町敬人, 田辺圭一, 塩原 融(SRL)

OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.); IWAKUMA Masataka, TOMIOKA Akira (Kyushu Univ.);
FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.); SAITO Takashi (Fujikura Ltd.);
GOSHO Yoshihiro, MACHI Takato, TANABE Keiichi, SHIOHARA Yuh (SRL)
E-mail: hiroshi_a_okamoto@kyuden.co.jp

1. はじめに

経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の超電導変圧器技術開発では、20MVA(66/6.9kV)級超電導変圧器の実用化を見通すために、巻線技術、限流機能付加技術および冷却システム技術の開発を行っている。超電導変圧器巻線に限流機能を付加することで、電力系統事故時に発生する過電流が、超電導巻線の常電導転移による抵抗によって低減される。このために、超電導巻線の保護導体の構成を最適化し、限流機能付加モデル変圧器(400kVA 6.9/2.3kV, 58/174A)により、超電導変圧器巻線の限流機能を実証する。

今回は、超電導巻線の保護導体構成による限流特性の解析結果を報告する。

2. 限流機能の導体構成解析

超電導変圧器巻線の限流特性は、同変圧器の等価回路による回路方程式(1)と熱平衡式(2)(巻線は断熱と仮定)の連立方程式により、電流と温度上昇を解析した。

$$RI + L \frac{dI}{dt} = V_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\rho(T) \cdot \frac{1}{S} \cdot I(t, T)^2 = l \cdot S \cdot \gamma \cdot C_p(T) \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

ここで、R:巻線抵抗、L:巻線インダクタンス、 ρ :抵抗率、 γ :密度、C:比熱、l:導体長、S:導体面積。

保護導体厚(Cu:50,100 μ m, CuNi:100,200 μ m)と銀厚(10~40 μ m)をパラメータにして、変圧器二次を短絡後の電流と温度上昇を解析した。解析条件は、①液体窒素への熱伝達なし、②電気抵抗への寄与は保護導体(Cu or CuNi)と銀のみ、超電導層とハステロイ間は通電なし、③熱容量への寄与は保護導体(Cu or CuNi)、銀、ハステロイである。

3. 解析結果

Fig.1 には、保護導体(Cu or CuNi)厚に伴う短絡後 0.2 秒の過電流の定格電流倍率(実線)と到達温度(破線)における銀厚依存性の解析結果を示す。保護導体と銀の組合せが、限流特性および発熱に影響することが分かる。Fig.2 には、短絡後 0.2 秒に定格の 3 倍程度に限流が予測できる保護導体(Cu50 μ m+Ag18 μ m)の電流波形を示す。今後は、特性モデルコイルおよびモデル変圧器の試験によって、解析結果を検証する。

謝辞

本研究は、経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発(超電導変圧器技術開発)」をNEDO委託事業により実施した。富士電機(株)関係者の支援に謝意を表します。

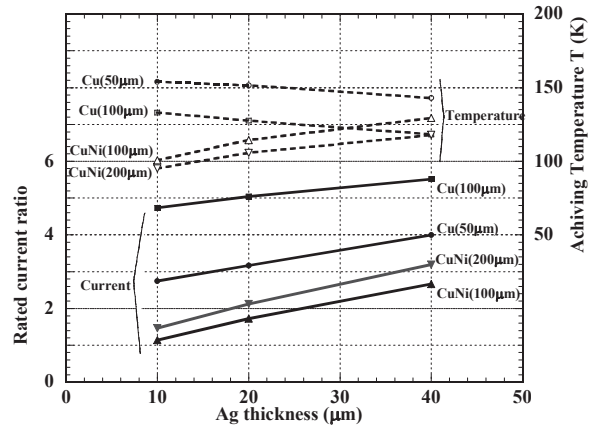


Fig.1 Ag thickness characteristics of current limiting and temperature rise for the coils with stabilizer (Cu and CuNi).

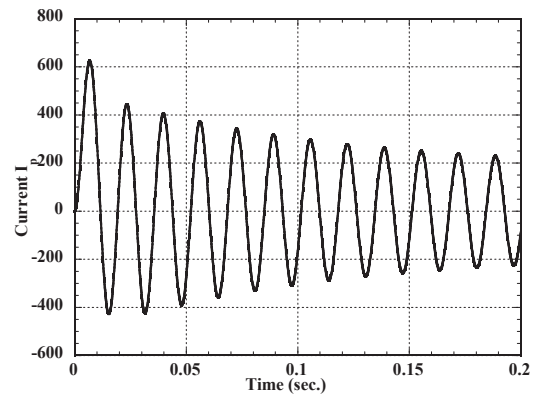


Fig.2 Analysis result of current wave for the coil with stabilizer (Cu 50 μ m and Ag 18 μ m).

REBCO 超電導変圧器の過大電流に対する応答特性の検討

Study on the response of a REBCO superconducting transformer to fault excess current

堤 智章, 富岡 章, 松尾 政晃, 佐藤 誠樹, 岩熊 成卓(九州大学); 岡元 洋, 林 秀美(九州電力);

飯島 康裕, 齊藤 隆(フジクラ); 大熊 武, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

TSUTSUMI Tomoaki, TOMIOKA Akira, MATSUO Masaaki, SATO Seiki, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.);

OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.); IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.);

OHKUMA Takeshi, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

E-mail: tsutsumi@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

超電導を電力機器に応用することで、小型・軽量化、高効率化といった効果が得られることが期待されている。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」では、66kV/6.9kV-20MVA級の超電導変圧器の設計・製作技術の確立を目指している。配電用変圧器として実用化する為には、電力系統での短絡事故による過大電流に耐える短絡性能が必要となる。そこで、本研究では、20MVA級の超電導変圧器の技術が検証できる最小容量の6.9kV/2.3kV-400kVA級の超電導変圧器を試作し、二次側の短絡事故を模擬した突発短絡試験により、過大電流に対する応答特性の評価を行った。さらに、数値解析コードを用いて、応答特性の詳細を検討した。

2. 設計・試作・試験

今回、試験に使用した超電導変圧器の仕様を Table.1 に示す。超電導変圧器に用いた超電導導体は、銅線をハンダ付けした REBCO 線である。この短絡モデルでは、短絡過大電流が流れた際に、銅線に電流を転流させることで発熱を抑えること、さらに REBCO 線材特性劣化を防ぐ事を目的としている。この構成では限流効果は期待できないが、発熱量を抑制するという観点からは限流効果を有する場合と同等の効果を得られる。試作した変圧器は、耐電圧試験や通電試験などを行い、設計通りであることを確認した後、突発短絡試験を行った。短絡試験前後において、I-V 特性、変圧器巻線のインピーダンスに変化が無かったことから、短絡電流に耐えることが出来たといえる。

Table.1 parameters of superconducting transformer

	一次	二次
相数	単相	
定格容量	400kVA	
定格電圧	6.9kV	2.3kV
定格電流	58A	174A
定格周波数	60Hz	
%インピーダンス	15%(400kVA 基準)	
超電導線並列本数	1本	3本
ターン数	576	192
運転温度	66K(過冷却液体窒素)	
外寸	幅 1175mm×奥行 1020mm ×高さ 2284mm	
重量	2800kg(冷媒含)	

3. 数値解析

二次側を一次側に換算した回路方程式を用いた数値解析コードにより数値解析を行い、通電電流、巻線温度の時間変化を算出した。

突発短絡試験における通電電流の時間変化を Fig.1 に示す。図から読み取れるように、実験結果と数値解析結果はよく一致しており、解析コードは概ね妥当であると考えられる。

次に、並列につないだ銅線の厚さをパラメータとして、突発短絡試験の通電電流の変化を比較したので Fig.2 に示す。銅線の厚さを薄くすることで温度が上昇して、常電導抵抗により短絡電流が限流していると考えられる。今後、温度と短絡電流の兼ね合いを考えていく必要がある。

当日、巻線温度、限流モデルの検討等も報告する。

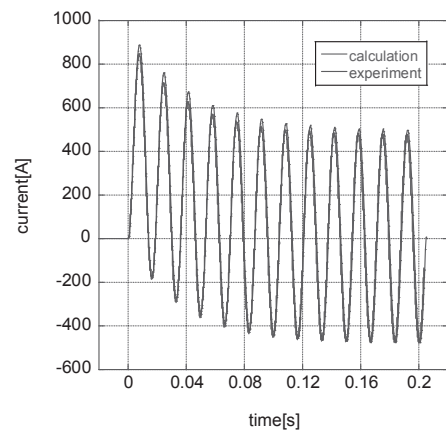


Fig.1 calculation and experiment current

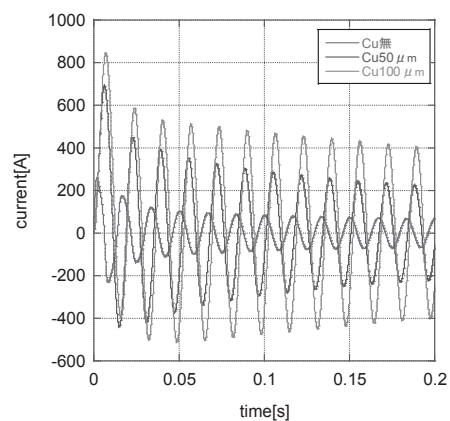


Fig.2 parameter of copper thickness

謝辞

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。

500kW REBCO 半超電導同期モータの設計検討

Design study of a 500kW REBCO superconducting synchronous motor

友田 慎一郎, 岩熊 成卓(九州大学); 山田 穰, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC)

TOMODA Shinichiro, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.); YAMADA Yutaka, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)

E-mail: tomoda@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO 超電導線材は良好な磁場中臨界電流密度特性を有し、それをモータに応用することで小型化、高効率化が期待できる。我々は、REBCO 超電導線材を用いた産業用の 500kW-1800rpm 超電導同期モータの設計検討を行っており、これまでに REBCO 超電導線材の臨界電流の温度、磁場依存性、電機子とのギャップを考慮した上で、最も効率の良いモータについて検討した。次に、ギャップの磁束密度を 2T とした場合のモータ構造、特性を明らかにした。今回は、体積最小化した場合について検討を行い、定格速度時におけるトルクリプル、界磁超電導巻線の変動磁場及び交流損失について計算したので報告する。

2. 500kW REBCO 半超電導同期モータの仕様

Table 1 に計算した超電導同期モータの仕様を示す。使用する REBCO 超電導線材としては、厚さ 100 μm のハステロイトテープを基板とする幅 5mm、超電導層厚 1 μm 、銀層厚 10 μm で銅安定化層を加えた全体が 200 μm 厚のものを想定した。この臨界電流 I_c 、交流損失の温度、磁場特性としては、現在開発されている線材を参考にしており、臨界電流 128A @77K、0T である人工ピン入りの IBAD(GZO)-PLD(GdBCO+BZO)線材を想定した。

3. 解析方法

Fig.1 にモータ断面を示す。回転子内の超電導界磁巻線は巻数の異なるダブルパンケークコイルを積層したひし形断面構造とし、界磁電流は臨界電流の 0.8 倍に設定した。電機子巻線の素線は銅線とした。解析は市販の電磁場解析ソフト Ansys を用いた 2 次元磁場解析である。まず、体積を最小化する超電導界磁巻線の構造を明らかにし、次に、電機子巻線に三相交流を流し、回転子を定格速度で回転させながら、回転子に印加される磁場変動について数値解析を行った。さらに、その磁場振幅から超電導界磁巻線に発生する交流損失を見積もった。ここで、臨界電流および交流損失については線材の垂直磁界成分より算出した。

4. 解析結果と考察

数値解析の結果、本研究で想定する仕様では、超電導界磁巻線を、巻数の異なるダブルパンケークコイルを Fig.2 に示すように積層したひし形断面構造としたとき、体積を最小化できることが分かった。また、交流損失は磁場変動の振幅が 10^{-3}T 以下であることから、1 極当たり 1W 以下と見積もられ、定格運転中はほとんど発生しないことが分かった。今後、さらに小型化、高効率化を目指して設計検討を進めていく。トルク等詳細については当日報告する。

謝辞

本研究は、NEDO からの委託研究「希少金属代替材料開発プロジェクト」の一部として実施したものである。

Table.1 Design parameters of the Superconducting motor

Rating/speed	500kW/1800rpm
Rating voltage	440V
Rating current	700A
Frequency	60Hz
Number of pole	4
Inside diameter of stator	365mm
Outside diameter of stator	779mm
Direct axial length	177mm
Field coil	Diamond-shaped coil
Maximum magnetic field in the gap	2.35T
Minimum critical current	271A
Rated current	217A
Tape length per a pole	1930m
Operating temperature	40K
Armature winding	Copper winding
Number of turn per slot	6

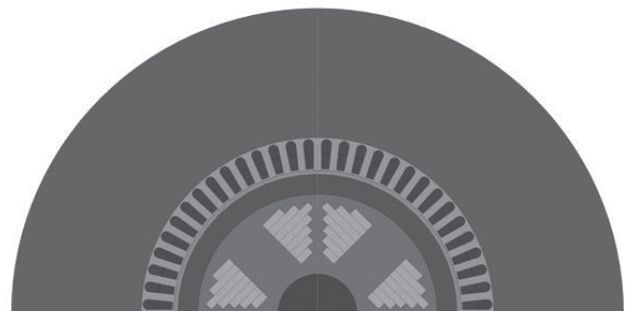


Fig.1 Cross section of REBCO Superconducting motor

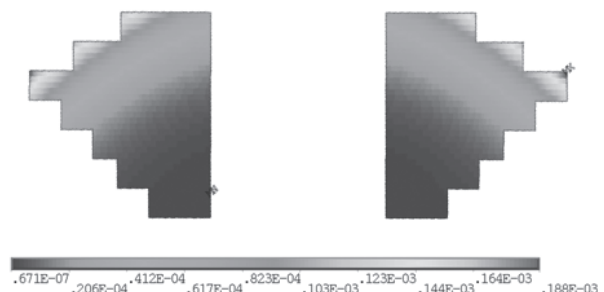


Fig.2 2D FE calculation results of fluctuations in magnetic field for field coil cross section

船舶推進用高温超伝導同期モータの界磁巻線の最適化設計の検討

Study of Optimization Design of HTS Field Winding of Synchronous Motor for Ship Propulsion

河井 利宏, 福井 聡, 高橋 政樹, 小川 純, 佐藤 孝雄(新潟大); 塚本 修巳(横浜国立大学)
 KAWAI Toshihiro, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, SATO Takao (Niigata University);
 TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University)
 E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

近年、環境性・省エネルギー性・操船性などの観点から、電気推進船が普及しつつある。しかしながら、タンカーなど大出力の大型船舶への適用を考えると、現用モータでは鈍重な設計になってしまい、電気推進を適用するメリットを阻害する恐れがある。高温超伝導線材を用いた超伝導モータは、小型、軽量ながら低回転域でも高トルクと高効率期待され、船舶向けに研究が進みつつある。大型超伝導モータの実用化のためには、コンパクトでかつロバーストな高温超伝導界磁コイルの開発が必要である。従って、回転機用の高温超伝導界磁コイルの設計にあたっては、超伝導特性を十分に考慮する必要がある。本研究では、回転機出力を決定づける空隙磁束密度を制約条件とし、高温超伝導界磁コイルの負荷率を目的関数として、超伝導モータの界磁コイルの断面形状（層毎に異なるターン数で構成、内径を変更）を設計変数とする最適化設計について検討を行った。

2. 解析方法

本解析では、高温超伝導モータのある断面のみを考え、2次元軸対称モデルで考える (Fig. 1)。まずコイルの形状を決定し、線材に印加される磁界の大きさとテープ面に対する角度を求める。得られた磁界分布から各ターンに発生する電界を計算し、これをコイル全体で積分し、コイル全体の発生電圧を算出する。計算したコイルの電流-電圧特性から臨界電流を求め、短尺線材で測定した電流-電圧特性に基づき、コイル内部の平均電界(端子電圧/線材長)が 1.0×10^{-4} V/m 時の電流値として定義する。超伝導コイルは、一定の磁界をなるべく低い負荷率 $I_{coil}/I_{c,coil}$ (I_{coil} : 定格電流, 200 A とする) で発生できることが望ましい。そこで負荷率をコイルの形状を設計変数とした目的関数 W とし、これを最小化する最適化問題として解く。

3. 解析結果

Tab. 1 及び Tab. 2 に各コイルの最適化結果を示す。またそのときのコイル形状を Fig. 2 に示す。観測点 P での磁束密度 $B \cdot i$ を低下させることなく、コイル直線部の線材長 l_{tape} を減らすことができ、レーストラックコイルの場合は負荷率を 0.6945、鞍型コイルの場合は 0.6744 まで減少させることができた。またそのコイル形状は各コイルともに a_1 がある程度のところまで小さくなり、解析点 P に近い位置で、ターン数を増加させる形状となった。

なお本研究は、科学技術振興機構「戦略的イノベーション創出推進事業 (S-イノベ)」のもとで実施している。

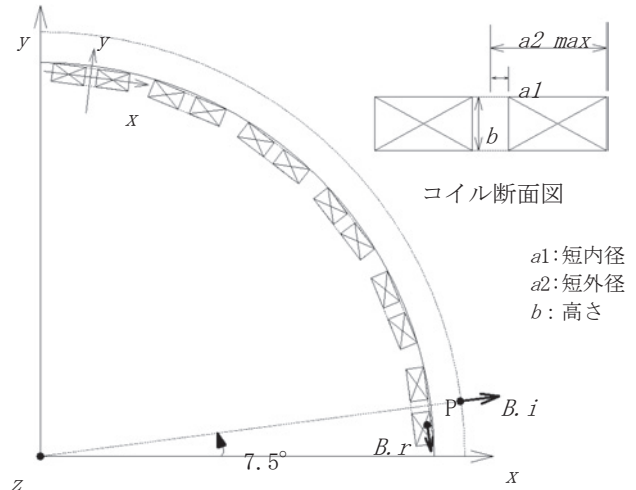


Fig. 1 Schematic illustrations of numerical model (24-pole model)

Tab. 1 Results of Optimization (Race-track coil)

	最適化前	最適化後	最適化前	最適化後	最適化前	最適化後
極数	24	24	16	16	12	12
$I_{c,coil}$ [A]	262.83	263.28	263.01	283.47	260.44	287.97
Load factor	0.761	0.760	0.760	0.706	0.768	0.695
l_{tape} [m]	345600	352656	193920	211968	169560	186048
$B \cdot i$ [T]	1.712	1.700	1.869	1.815	1.845	1.839

Tab. 2 Results of Optimization (Saddle-shape coil)

	最適化前	最適化後	最適化前	最適化後
極数	16	16	12	12
$I_{c,coil}$ [A]	260.74	284.85	257.76	296.55
Load factor	0.767	0.702	0.776	0.674
l_{tape} [m]	184800	185664	162720	150336
$B \cdot i$ [T]	1.873	1.792	1.838	1.839

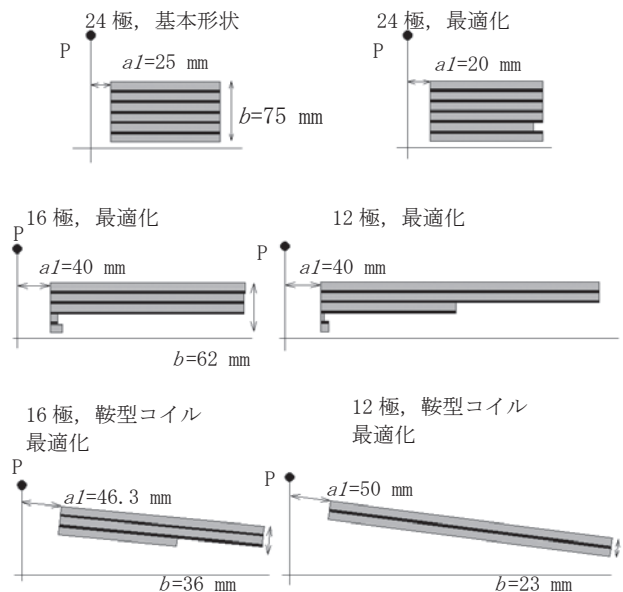


Fig. 2 Measured AC loss in coil A and coil B

大規模風力用高温超伝導同期発電機の電磁設計の検討

Study of Electric Design of HTS Synchronous Generator for Large Scale Wind Turbine

長谷川 誠, 福井 聡, 小川 純, 佐藤 孝雄(新潟大学); 塚本 修巳(横浜国立大学); 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力)

HASEGAWA Makoto, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, SATO Takao (Niigata University);

TSUKAMOTO Osami (Yokohama National University); KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (CHUBU Electric Power Co. Inc.)

E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

エネルギー源の多様化の観点から、自然エネルギーの利用伝達が政策的課題として位置づけられることが多くなってきている。風力発電ではスケールメリットの効果が大きく、欧州では単機容量5MW以上の大規模風力発電の開発が進められている。近年、高温超伝導の線材技術の進歩は著しく、高電流密度・高磁界という超伝導の特徴を生かすことにより、風力発電機の軽量・高出力・高効率化の可能性が出てきた。超伝導の特性を十分に発揮するためには、直流の界磁巻線のみを超伝導化し、かつ鉄心の飽和磁束密度を大きく上回るような高磁界化を図った空心機が望ましい。本研究では、風力発電用の界磁超伝導型の10MW級空心同期発電機のプロトタイプ設計を行うことにより、その電磁設計の検討を行うことを目的とする。

2. 大規模風力発電用同期発電機のプロトタイプ設計

超伝導の特徴（高電流密度・高磁界・直流では損失ゼロ）を十分に生かすには、界磁巻線のみを超伝導化して空心で高磁界化を図ることが良いと考えられる。本研究では容量10MVA/電圧3.3kVを想定し、回転数は10rpm、極数は8とする。

(1) 界磁巻線：使用線材はYBCO線材を想定し、界磁巻線の電流密度は $1.7 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ とする。YBCO線材の20K冷却の高温超伝導線材の臨界電流特性を考慮し、巻線部の最大磁界を10T以下としつつ、電機子巻線部の磁界が3T程度になるようにする。これらの条件をもとに界磁巻線の断面寸法を決定し表1にまとめた。

(2) 電機子巻線：電機子巻線は短節・分布巻の2層巻とし、毎相毎極のスロット数を $q=3.5$ とする。まず、電機子巻線の必要直列導体数 n_0 を求める。図3から空隙磁界の基本波成分の振幅を $B_0=3\text{T}$ として計算する。相電圧は $E_0=1905\text{V}$ であるから、毎相の直列導体数は $n_0=14$ とする。それらを含めた発電機のプロトタイプ設計諸元を表1にまとめた。

(3) FEM解析：発電機のプロトタイプ断面構造をFig.1に示す。Tab.1の設計値をもとにFEM解析を行った。無負荷時の断面磁界分布のコンター図をFig.2に、空隙部分の磁界分布及び相電圧・電流波形をFig.3に示す。Fig.3から相電圧・電流の基本波成分の実効値はそれぞれ1859V, 1810Aとなりおおよそ設計値通りとなった。

Tab.1 Design Specifications of 10MW Wind Turbine Generator

界磁巻線		
超伝導線材	YBCO線材	巻線寸法 126×126mm ²
電流密度	$1.7 \times 10^8 \text{ A/m}^2$	最大磁界 9.59T
運転温度	20K程度	内径 1065mm
設計空隙磁界	2.5-4T	線材長 572km
電機子巻線		
スロット数/相・極	$q=3.5$	中心半径 1446mm
スロット数/相	$Q=28$	巻線抵抗 0.0141Ω
導体数/slot	14	バックヨーク
電流密度(導体)	3 A/m^2	厚さ 250mm
導体寸法	$25 \times 24 \text{ mm}^2$	重量 32.3t
スロット寸法	$70 \times 230 \text{ mm}^2$	外直径 3.67m
発電機特性		
相電圧	1859 V	出力 10.1 MVA
線電流	1810 A	同期インピーダンス 0.203Ω

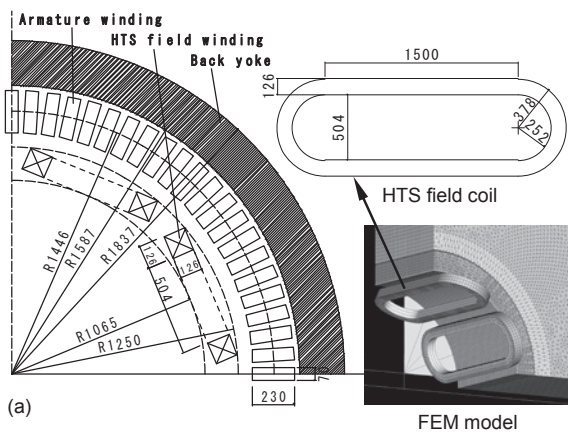


Fig.1 Schematic illustrations of cross section of 10MW HTS wind turbine generators and their FEM models.

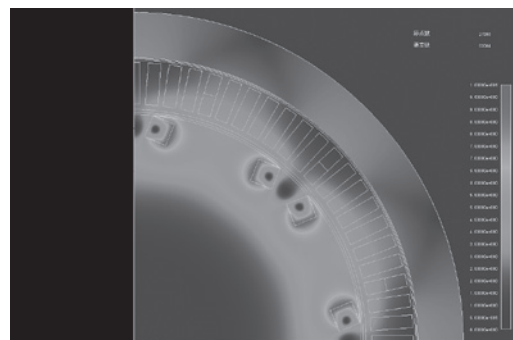
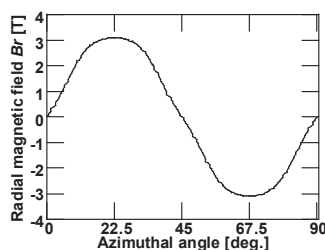
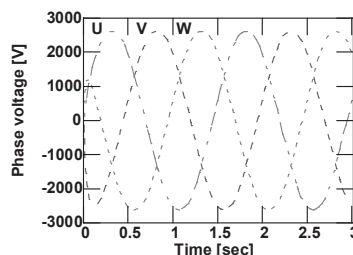


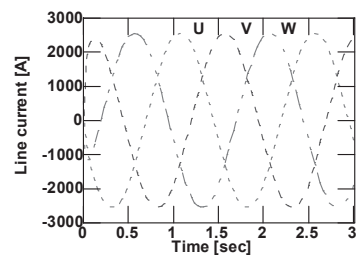
Fig.2 Flux distribution



Flux distribution in air gap



Phase voltage



Line current

Fig.3 Numerical results

電気分解と磁化活性汚泥法を組み合わせた化学めっき廃液の無害化処理 ～パイロットプラントでの検討

Pilot Plant Experiment of Chemical Plating Wastewater Treatment by Electrolysis and Magnetic Activated Sludge Process

甘 強, 酒井 保藏(宇都宮大); 大和 弘之, 仁平 淳史(栃木県産業技術センター);
齊藤 哲男, 島津 義政, 仁平 務, 鷹觜 勲(桑名商事(株)); 鈴木 松雄, 安野 光則(パルシステム(株))
GAN Qiang, SAKAI Yasuzo (Utsunomiya Univ.); YAMATO Hiroyuki, NIHEI Atsushi (Ind. Tech. Center of Tochigi Pref.);
SAITO Tetsuno, SHIMAZU Yoshimasa, NIHEI Tsutomu, TAKANOHASHI Isao (Kuwana Co. Ltd.);
SUZUKI Matsuo, YASUNO Mitsunori, (Pal System Inc.)
E-mail: sakai@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

本研究では磁気分離を活用した新しい水処理法である磁化活性汚泥法と Ni 電気回収を組み合わせて無電解めっき廃液の無害化処理プロセスを構築することを目的として 200L のパイロットプラントを用いて検討した。電解することで、大部分の Ni^{2+} を除去・回収できた。磁化活性汚泥法は、余剰汚泥の引抜きはほとんど不要であり、汚泥濃度を管理する必要もなく、運転管理が簡単であった。有機酸の除去率(分解率)はほぼ 100%となった。

前回の報告では 5 L のベンチスケールの実験装置により、基本的なプロセスフローなどを検討してきた。本発表ではパイロットプラントを組み立て、実廃水を用いた磁化活性汚泥法による処理水性状や余剰汚泥ゼロエミッションの可能性などについて報告する。

2. 実験方法

廃液は実際のめっき工場廃液を用いた。全体のプロセスフローを Fig. 1 に示した。

まず電解プロセスでは 200 L のめっき廃液に水酸化ナトリウム溶液を加えアルカリ性とした後、約 240 A で 7 時間以上電解する。次にこの電解処理後の液を地下水で 10 倍希釈し、HRT:1.67 日で磁化活性汚泥法パイロットプラント(反応槽 200 L)により、処理した。汚泥の磁気分離装置は永久磁石ドラムタイプのものを用いた、磁石ドラムは直径 10mm × 長さ 417mm, ポリ塩化ビニルパイプにプラスチック磁石(マグネックス製, 両面多極着磁, ピッチ 6mm)を巻付けて接着した。表面に垂直方向の磁束密度は表面付近で最大約 90mT, 表面から 5mm, 10mm 離れた場所それぞれ約 30~40mT, 10mT 以下である。これを 7~15rpm で回転させた。ドラムと分離槽内壁との距離は約 4mm 磁気分離装置の容積は約 260mL である。概念図を Fig. 2 に示した。

磁性粉として四三酸化鉄(関東化学製)を微生物濃度と同じ濃度になるように投入し、磁気分離により汚泥全量を返送しながら余剰引抜きなしで水処理をおこなった。汚泥濃度の上昇に伴って、微生物/強磁性粉比が約 1 を保つように磁性粉を添加した。

流出液の濁度, リン酸態リン, アンモニア態窒素, 硝酸態窒素, BOD, 有機酸等の経時変化を測定した。

3. 結果と考察

電解プロセスでは処理水の Ni^{2+} 濃度を 100 mg/L 以下まで除去できた。98% の Ni を回収できた。

磁化活性汚泥法パイロットプラント(反応槽 200 L)での水処理実験において汚泥濃度は Fig. 3 に示す。実験開始 1 年で約最初濃度の 4 倍になった。沈降分離では MLVSS 5000mg/L を超える活性汚泥は上澄みが取られず固液分離できないが、磁気分離は、高濃度の活性汚泥であっても速やかに固液分離できた。1 年間汚泥の引き抜きもおこなっていないため、反応槽に化学めっき廃水処理に対応する耐塩性微生物を保持することができ、有機酸の分解率はほぼ 100%となった。

磁気分離を使ったので、通常の活性汚泥のように沈降性維持のために、汚泥濃度を管理する必要もなく、運転管理が非常に簡単であった。めっき業は中小企業がほとんどであり、廃水処理の運転管理が軽減できることは重要である。

パイロットプラントの結果をもとに、めっき廃液をそのまま外部委託した場合と、本プロセスで処理した場合のランニングコストを比較したところ、本プロセスのランニングコストが委託費用を下回ることが試算された。

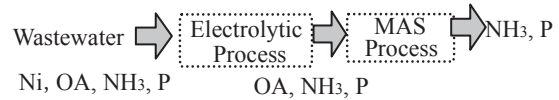


Fig.1. Schematic of Purification of Chemical Plating Wastewater (OA: Organic Acid, MAS: Magnetic Activated Sludge)

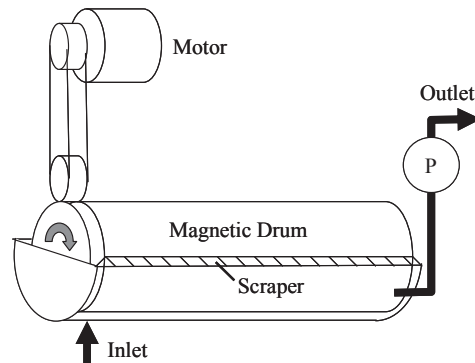


Fig.2. Schematic of the Magnetic Separator

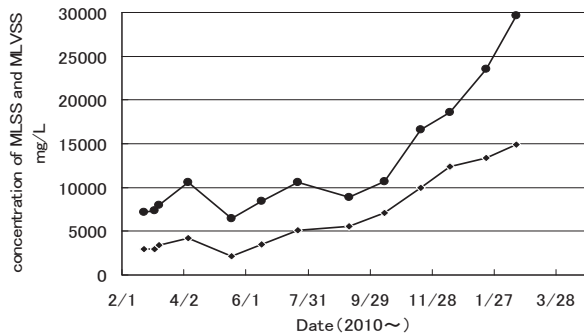


Fig.3. The concentration of MLSS and MLVSS

4. おわりに

本研究により、Ni 電気回収と磁化活性汚泥法を組み合わせ、無電解 Ni めっき廃液から Ni^{2+} を取り除いた後、磁化活性汚泥法により有機酸の余剰汚泥ゼロエミッションでの分解処理をおこなうことができた。

謝辞

本研究は JST 地域イノベーション創出支援事業「地域ニーズ即応形」の支援を受けた。また、活性汚泥をご提供いただきました(財)栃木県建設総合技術センター県央浄化センターならびに宇都宮市川田水再生センターに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) SAKAI Yasuzo, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80(2009) p.202
- 2) SAKAI Yasuzo, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82(2010) p.43

炭酸カルシウムを懸濁物質として含む界面活性剤排水への 磁化活性汚泥法適用の検討

Research on Magnetic Activated Sludge Process for Surfactant Wastewater with Calcium Carbonate as Suspended Solids

陳 燕仔, 酒井 保藏, 甘 強 (宇都宮大)
CHEN Yanzi, SAKAI Yasuzo, GAN Qiang (Utsunomiya Univ.)
E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

無機懸濁物質として炭酸カルシウムが含まれる界面活性剤排水に対して磁化活性汚泥法で水処理できるかを確かめた。流出水はやや懸濁するが、有機物は曝気槽でほとんど分解され、余剰汚泥の引き抜きも必要なく長期運転が可能であることが示された。

磁化活性汚泥法は、通常の活性汚泥に磁性粉(Fe_3O_4)を添加することにより、磁気分離可能としたプロセスである。高濃度の活性汚泥であっても速やかに固液分離できるため、活性汚泥の増殖と自己消化をバランスさせることができ、余剰汚泥ゼロエミッション化が可能である。パルキング抑制のためのデリケートな運転管理から解放され、発展途上国でも安定した水処理を期待できる。

本研究では、インドネシアにある歯磨ペースト工場への磁化活性汚泥法の適用を目標としてベンチスケールの処理実験を行った。

2. 実験方法

インドネシア製歯磨き粉 10.5g を水道水で溶かし 1 L とし、水処理実験を行った。この模擬排水は COD_{Cr} 濃度約 3500 mg/L、全リン濃度 5.6 mg/L、懸濁物質 (SS) 4.8 g/L であった。窒素成分はほとんど含まれていない。

用いたベンチスケール装置の曝気槽は 5 L である。種汚泥は市の水再生センターの活性汚泥を用い、マグネタイトを微生物濃度とほぼ同濃度になるように添加して、磁化活性汚泥とした。最初 21 日目まで模擬排水をそのまま流入させた。22 日目から $\text{Fe}(\text{OH})_3$ を添加し凝集沈殿させた上澄みを流入させた。51 日から模擬排水を 1 時間自然沈殿した後の上澄みを流入させた。

SS、リン酸態リン、MLSS、MLVSS、 COD_{Cr} 、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素等を JIS 法に従って測定した。

3. 結果と考察

MLVSS (微生物濃度) の経時変化を Fig.1 に、 COD_{Cr} の経時変化を Fig.2 に示す。22 日目以降、水処理性は次第に安定した。馴養後は界面活性剤による発泡もほとんどなくなった。流出水の COD_{Cr} 濃度は全 COD_{Cr} 、溶解 COD_{Cr} 共に約 70mg/L であり、 COD_{Cr} の除去率は 98% と良好である。また全 COD_{Cr} と溶解 COD_{Cr} がほぼ等しいことから流出水中には有機懸濁物質はほとんど含まれないことが示された。0~21 日目まで 4.8 g/L の SS が流入した。22~50 日目まで SS の流入はゼロ、51 日目から約 1.5g/L

の SS が流入した。炭酸カルシウムは磁気シーディングされないため、曝気槽にある程度蓄積すると、それ以降は流出するので曝気槽の生分解能が維持できることが分かった。沈降分離や膜分離では流入 SS が蓄積するため水処理を継続することは不可能と考えられる。

実験期間中、汚泥の引抜きや濃度管理は不要であった。磁気分離による強制固液分離で微生物は曝気槽に完全に保持され、強磁性粉の流出もほとんどなく、磁性粉を追加する必要はなかった。また、磁性粉と吸着するフロック形成菌のみが優先的に増殖するため、窒素やリンのバランスが崩れても水処理が継続でき、維持管理の手間は大幅に軽減された。さらに、通常の活性汚泥と比べると汚泥濃度が一定に達した後、微生物の生存に必要な窒素やリンの添加量を減らして流出水中の窒素やリンを排出基準値以下に制御できる可能性がある。薬品のコストも低くなる可能性がある。

4. おわりに

懸濁物質を含む界面活性剤排水を磁化活性汚泥法で長期間安定して処理できた。無機 SS がマグネタイトに吸着されず、流出するため曝気槽に大量に蓄積せず、排水に含まれる無機 SS は水処理の障害にならなかった。

謝辞

本研究は科学研究費基盤研究(A)21241020の支援を受けた。

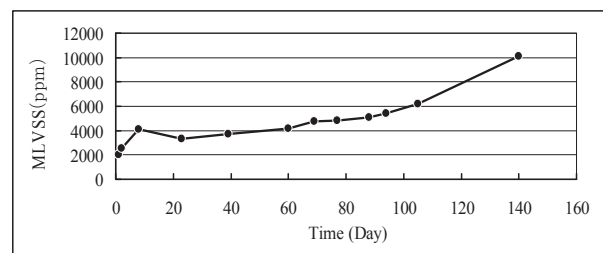


Fig.1 Changes of MLVSS with Time

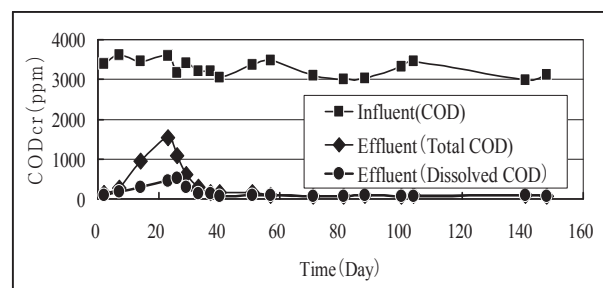


Fig.2 Changes of COD_{Cr} with Time

磁化活性汚泥から脱着可能な磁気シーディング用マグネタイトに関する研究 ～粒子径の最適化

Research on Desorption of Magnetite Particles from Magnetic Activated Sludge

廣島 浩二, 酒井 保藏, 猪野 隼也 (宇都宮大)

HIROSHIMA Koji, SAKAI Yasuzo, INO Junya (Utsunomiya Univ.)

sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

粒子径 $1\mu\text{m}$ 以下のマグネタイトは活性汚泥と混合するだけで強固に微生物フロックに吸着して安定した磁気分離を可能とする半面, 脱着しようとするとは簡単には分離できない。一方で, $20\mu\text{m}$ 以上の強磁性粉は重すぎて微生物フロックに吸着しないことが分かっていた。そこで $6\mu\text{m}\sim 9\mu\text{m}$ のマグネタイトを用いて, 吸着脱着の特性をしらべた。これらのマグネタイトは磁石を用いて比較的簡単に微生物フロックから回収できることが示された。

磁化活性汚泥法は汚泥の引き抜きを行わない条件で運転されるが, 磁気シーディングされた汚泥から磁性粉のみを回収できれば, 高負荷運転など余剰汚泥を引き抜く運転条件にも対応できる。また, 磁性粉の脱着が簡単に行えるようになれば凝集分離等の物理化学的処理に対して磁気分離を広く利用できる。

本研究では粒子径の異なるマグネタイトによる微生物フロックへの吸着および脱着性能を評価し, 主に磁性粉の回収・再利用に焦点を当て磁化活性汚泥法への応用を検討した。

2. 実験方法

都市下水処理場から採取した活性汚泥に, マグネタイトを MLVSS 比で 1:1 になるように添加して磁化活性汚泥を調製した。マグネタイトの粒子径の比較について $6\mu\text{m}$, $9\mu\text{m}$ およびイセタイト等の粒子径の異なる磁性粉を用いた。これらを用いて, (A)微生物フロックへの吸着と磁気分離性能, (B)物理的な力による脱着性能を調べた。

(A) 微生物フロックへの吸着と磁気分離性能 粒子径 $0.4\mu\text{m}$, $6\mu\text{m}$, $9\mu\text{m}$ およびイセタイトで磁気シーディングされた磁化活性汚泥を 200 ml ビーカーに採り, 30 分の攪拌曝気を実施した後ネオジウム磁石の上へ静置した。そして磁化活性汚泥の体積が半分になるまでの時間を計測し, フロックへの吸着を評価した。

(B) 物理的な力による脱着性能 上記のうち $6\mu\text{m}$, $9\mu\text{m}$ およびイセタイトの磁化活性汚泥をそれぞれマグネットバー(最大磁束密度:1.1T)に付着させ(付着汚泥), 200~1600 rpm の回転を与え遠心力で微生物フロックを引き離した(Fig. 1)。これを 200 ml ビーカーで受け(流出汚泥), 両者の汚泥濃度を測定し脱着性能を評価した。

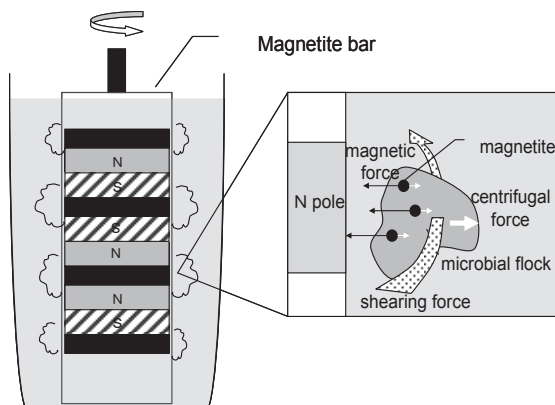


Fig. 1 Centrifuge Device.

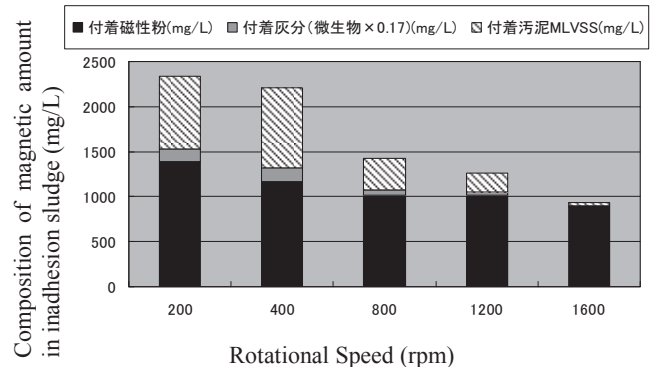


Fig. 2 Magnetite Amount in Inhesion Sludge. (particle diameter : $9\mu\text{m}$)

3. 結果と考察

(A) 微生物フロックへの吸着と磁気分離性能 粒子径 $0.4\mu\text{m}$ のマグネタイトは磁気分離によりおよそ 60 秒で汚泥体積が半分になった。それに対して, 粒子径 $9\mu\text{m}$ および $6\mu\text{m}$ では倍の時間を要した。また, イセタイトは 80 秒であった。 $9\mu\text{m}$ のマグネタイトの添加量を 1.5 倍に増やすことにより, $0.4\mu\text{m}$ の磁性粉と同等の磁気分離性能を発揮することが確かめられた。なお, 自然沈降ではすべての磁化活性汚泥において体積が半分になるまで 360 秒以上かかっており, 磁気分離による高速化は認められた。いずれの強磁性粉も微生物フロックに吸着した。

(B) 物理的な力による脱着性能 粒子径 $9\mu\text{m}$ のマグネタイトの脱着性能を(Fig. 2)に示す。回転数が増えるにつれてマグネットバーに付着している汚泥の磁性粉含有率は高くなったが, 磁性粉の絶対量は低下した。遠心力により微生物フロックが引き離されたと考えられる。回転数 1600 rpm のとき付着汚泥の 95.6% が磁性粉であり, 全体の磁性粉量の 50.7% に相当する。残りの半分は遠心力で汚泥とともに脱離したと考えられる。

使用した各々のマグネタイトは粒径に分布が認められた。流出汚泥中には比較的粒子径が小さく, 汚泥との吸着の強いマグネタイトの割合が高い可能性がある。従って分離操作を繰り返すたびに, 回収される磁性粉は脱着性能の良いものになっていくと予想される。

4. まとめ

マグネタイトの微生物フロックへの吸着・脱着は粒子径と密接に関わっており, $6\sim 9\mu\text{m}$ のマグネタイトを用いることにより微生物フロックの磁気シーディングと脱着を制御できる可能性が示唆された。これによって磁気分離のメリットがより生かされ, 柔軟で広範な廃水処理が期待できる。

謝辞:

本研究は科学研究費基盤研究(A)21241020 の支援を受けた。粒子径 $6\mu\text{m}$ および $9\mu\text{m}$ の磁性粉は新東工業株式会社から研究用に提供を受けた。ここに謝意を表します。

ローレンツ体積力を利用した海水・油分離装置内での海水の流れに関する研究

Study of seawater flow in a seawater-oil separator using Lorentz body forces

赤澤輝彦, 岩本雄二, 梅田民樹 (神戸大学)

AKAZAWA Teruhiko, IWAMOTO Yuji, UMEDA Tamiki (Kobe University)

E-mail: akazawa@maritime.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

我々のグループが研究しているローレンツ体積力を利用した海水・油分離装置の原理を説明する。対向する電極板をもつダクト (Fig.1) には、油で汚染された海水が流れている。この海水に、ダクト入口から出口に向けた磁場 B を印加し、電極板より通電を行うと、海水にはローレンツ体積力が働く。一方、油は不導体であるためローレンツ体積力は働かず、ローレンツ体積力を受けるまわりの海水から反作用を受ける。つまり、海水が受けるローレンツ体積力と逆方向の力を油は受ける。この結果、Fig.1 に示すように、電極板より下流に分離板を設ければ、油が濃縮された海水の流れ(A)と、浄化され油濃度が下がった海水の流れ(B)に分けられる。

分離装置内での海水の流れは、分離効率に大きな影響を与えると考えられるにもかかわらず、詳細に研究されていなかった。我々は、純粋な海水が分離装置を流れた場合について数値計算実験を行った[1]。計算には、海水をイオンと水からできた電解液と考える電気化学的なモデルを採用し、分離装置内の海水の流れだけでなく、電流密度分布やイオン濃度分布についても評価を行った。その結果、分離装置が実用的に動作するパラメータ範囲において、電流密度が電極板に挟まれた空間でのみ有限な値を持ち、陽極から陰極方向に向けた一様な分布をもつと近似できるほど、電極板の端に現れる電流の回り込み効果はわずかであることがわかった。そこで本研究では、電極間にある海水にのみ一様なローレンツ体積力が作用していると仮定し、油で汚染された海水が分離装置を流れる場合について数値シミュレーションを行った。学会では、その結果の詳細な報告を行う。

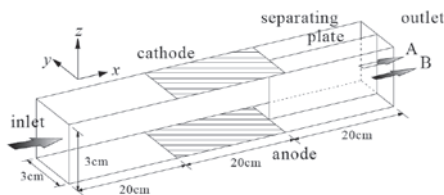


Fig.1 The device assumed in this study.

2. 数値計算モデル

本研究の数値計算で想定した分離装置は、全長 60cm で、1 辺 3cm の正方形流路断面をもつダクトからなる (Fig.1)。ダクトの中央には、対向する 1 組の電極板 (長さ 20cm) が取り付けられている。さらに、電極板より下流側の流路には、流路の断面を等分し、 x - z 面に平行な仕切り板 (厚さ 1mm) が設置されている。また、計算では、ダクト入り口から流入する海水の初期流速 u_0 は一様と仮定し、電極間を流れる電流の大きさを 1A とした。

海水の運動については、ローレンツ体積力を考慮したナビエ・ストークス方程式を用いた。油の濃度計算には、ローレンツ体積力を考慮した移流拡散方程式を用いた。ここで油は、半径 a の球状の油滴として海水に混入しており、油滴は海水からストークス抵抗を受けると仮定した。以上の方程式を連立し、有限要素法を用いて数値的に解いた[2]。

3. 結果と考察

出口 A 側 (汚水側) と出口 B 側 (浄化水側) から排出される海水の量を Q_A , Q_B とする。 $u_0=0.1\text{m/s}$ での $Q_A / (Q_A + Q_B)$ の磁場依存性を Fig.2 に示す。ローレンツ体積力の向きは、海水の初期速度に対し垂直であるため、ローレンツ体積力は海水の流れを電極板入り口付近で湾曲させる効果がある。また、磁場増大に伴い、電極間の海水に作用するローレンツ体積力も大きくなる。このため 2 つの排出口から出る海水量の偏りも磁場とともに大きくなる。磁場による排出量の偏りは、浄水側から排出される海水の浄化度だけで分離効率を判断するのではなく、排出 (処理) 量も同時に考慮する必要があることを示している。

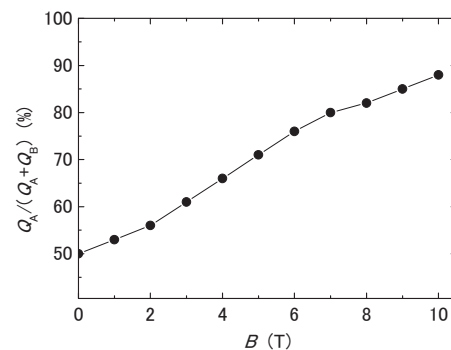


Fig.2 Field dependence of $Q_A / (Q_A + Q_B)$ at $u_0=0.1\text{m/s}$.

ダクトに流入する海水に含まれる油の初期濃度、B側から排出される海水に含まれる油の濃度を、それぞれ ϕ_0 , ϕ とする。印加磁場 1T, $u_0=0.1\text{m/s}$ における、B側から排出される海水の浄化度 $(\phi_0 - \phi) / \phi_0$ と油滴半径 a の関係を Fig. 3 に示す。油滴に作用する分離力は体積力であるため、 a の増大とともに浄化度は大きくなる。半径約 80 μm 以上の油滴は、海水からほぼ完全に分離することが可能であり、数 10 μm の大きさを持つ油滴にも分離装置が有効であることが示唆される。

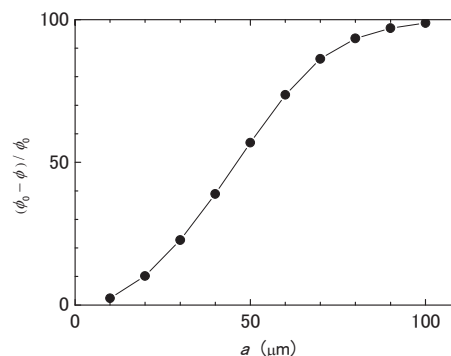


Fig.3 $(\phi_0 - \phi) / \phi_0$ vs. a at 1T and $u_0=0.1\text{m/s}$.

参考文献

1. T. Akazawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.29.
2. *Comsol Multiphysics User's Guide*, Version 3.5a, Comsol AB, 2009.

Cu フィラメント間バリアにより磁氣的に安定化した急冷法 Nb₃Al 線材

Magnetically stable RHQT Nb₃Al superconducting wire with Cu interfilamentary barrier

竹内 孝夫, 二森 茂樹, 伴野 信哉, 飯嶋 安男, 菊池 章弘 (NIMS);
土屋 清澄, 中本 建志 (KEK); 中川 和彦 (日立電線)

TAKEUCHI Takao, NIMORI Shigeki, BANNO Nobuya, IJIMA Yasuo, KIKUCHI Akihiro (NIMS); TUSCHIYA Kiyosumi,
NAKAMOTO Tatsushi (KEK); NAKAGAWA Kazuhiko (Hitachi Cable)
E-mail: TAKEUCHI.Takao@nims.go.jp

1. はじめに

NMR マグネット応用を主目的に開発がなされた初期の急熱急冷変態法 Nb₃Al 線は、超伝導接続を優先して Nb₃Al フィラメント以外の断面構成要素 (マトリックス: フィラメント間バリア、外皮) が 1T 付近まで超伝導性を保持する Nb で構成されていた。約 1950°C の高温で行う reel-to-reel 通電加熱と続けて行われる熔融 Ga 電極への急冷処理において高温クリープ強度と Ga, Al と反応しないことが超伝導接続の容易性ととも求められるので、高融点金属の中から Nb が選択された。一方、そのような Nb マトリックス線 Nb₃Al フィラメントは 1T 以下の低磁界中で Nb₃Al フィラメントが電磁氣的に結合し低磁界不安定性 (フラックスジャンプ) が不可避であった。耐ひずみ性の観点から期待が大きい核融合・加速器マグネットへの応用にはその磁氣的安定性の改善が求められていた。

低磁界不安定性を解消するためにフィラメント間バリアを Ta に変更した線材の開発が進められているが、Nb と比べて Ta の伸線加工性が劣ることに由来して Ta フィラメント間バリア部を起点とした前駆体線の断線頻発という問題が生じている。本研究では低磁界不安定性の抑制と前駆体線の伸線加工性の改善を両立させることを目的に、常伝導金属で Ta より伸線加工性が優れる Cu をフィラメント間バリアとする新世代の急熱急冷変態法 Nb₃Al 線の開発状況について報告する。

2. Cu フィラメント間バリア・前駆体線

Cu の融点は 1085°C であり、bcc 相 Nb(Al)ss 過飽和固溶体を生成するための約 1950°C での高温処理で Cu は熔融する。したがって単純に Nb/Al 複合体フィラメントの周りに Cu を配置しただけでは、熔融した Cu が Nb(Al)ss と反応し非超伝導の三件化合物を生成してしまう。そこで、Ta が ~1950°C の高温でも Cu と反応しないことに注目して、前駆体の Nb/Al フィラメントを先ず Ta で被覆しその外側を Cu が被覆する断面構造を採用した。具体的には、JR 法 Nb/Al 複合体の周りに Ta シートを巻き付け Cu 管の中に挿入し伸線加工して Cu/Ta/(Nb/Al) 六角シングルロッドを成形した。従来の Cu のエッチング除去工程を省略し、そのまま多数本に切断し、別途準備した Cu 被覆 Ta 六角ロッドと一緒に最密充填に積層・集合化した。次いで、この集合体を Ta シートで被覆して Cu-Ni 管に挿入して伸線加工し、最終的に最外層の Cu-Ni 層をエッチング除去して Cu フィラメント間バリア・前駆体線を試作した。Nb/Al フィラメント周りの Ta 層厚をパラメータとして変えた 3 種類の Cu フィラメント間バリア線材を試作した。

3. 組織と特性

図1に Ta 層厚が 5.0µm でフィラメント間 Cu バリア厚が 6.6µm の前駆体線を急熱急冷処理した後の断面写真を示す。Cu バリアが融けてフィラメントが再配列し、局部的にフィラメント間バリアが薄くなる場合も生じる。図2はフィラメント間バリア材種ごとの磁化曲線を比較した。Cu バリアは 4K のみならず 2K でもフラックスジャンプを抑制している。Cu は Nb や Ta と比べて柔らかい材料であるため、前駆体線自身の伸線加工性を改善するのみならず、変態熱処理後も Nb₃Al 線材の耐曲げ特性を改善する効果が認められる。図3は、0.46% の曲げひずみを加えた際に表面側から発生したクラックが Cu バリア部で止まっている様子が判る。

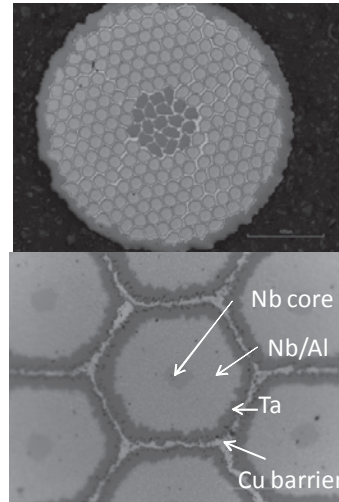


Fig. 1 Cross sections of a typical Cu interfilamentary-barrier Nb₃Al wire after RHQ operations.

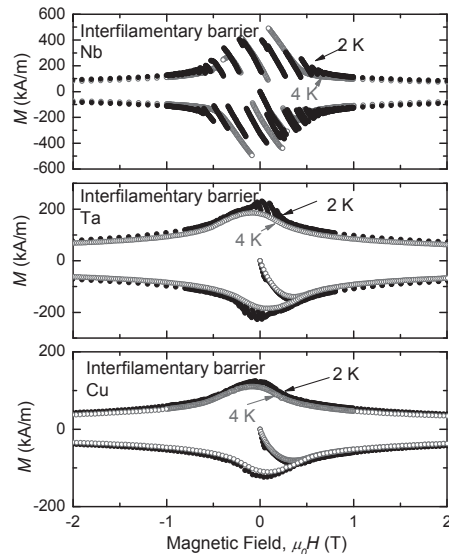


Fig.2 Comparison of magnetization curves for samples with different interfilamentary-barrier-species.

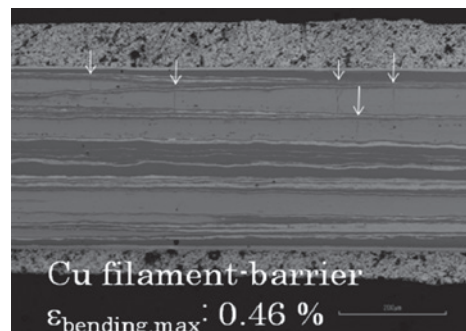


Fig.3 Microcracks of the Cu interfilamentary barrier Nb₃Al wire after bending test.

SuperKEKB 衝突点用超伝導 4 極電磁石の開発(1)

Development of the Superconducting Quadrupole Magnet for the SuperKEKB Final Focusing system (1)

岩崎昌子、大内徳人、土屋清澄、多和田正文、東憲男、宗占国、大木俊征、山岡広(高エネルギー加速器研究機構)
 IWASAKI Masako, OHUCHI Norihito, TSUCHIYA Kiyosumi, TAWADA Masafumi, HIGASHI Norio, ZHANGUO Zong,
 OKI Toshiyuki, YAMAOKA Hiroshi (KEK)
 E-mail: masako.iwasaki@kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、KEKB 電子・陽電子ビーム衝突型加速器を用いた B ファクトリー実験が行われてきた。現在、KEKB 加速器の更なる高輝度化を目的として、SuperKEKB 加速器の設計・建設が進められている。SuperKEKB 加速器では、KEKB 加速器で記録した世界最高の電子・陽電子衝突頻度を約 40 倍高めることを目標としている。この高輝度化において、SuperKEKB 加速器の心臓部である電子・陽電子ビーム衝突部のビーム最終収束用超伝導電磁石も新しく作り変え、2014 年度にビーム運転を開始する予定である。本学会では、検討が進んでいる SuperKEKB ビーム衝突用超伝導電磁石の開発について報告を行う。

2. ビーム衝突点超伝導電磁石システム

SuperKEKB の最終ビーム収束システムは、電子・陽電子各ビームラインに組込まれる超伝導 4 極電磁石ダブレットで構成される。図1にビーム衝突点(Interaction Point : IP)のシステム概略を示す。IP の最も近傍には、陽電子ビーム収束用の QC1RP、QC1LP 磁石を配置し、その後方に電子ビーム収束用 QC1RE、QC1LE 磁石を配置している。QC1 磁石の後方に QC2 磁石をそれぞれ配置し、合計 8 台の超伝導 4 極磁石で構成されている。

3. 開発試験用超伝導 4 極電磁石の製作

我々は、開発試験用の超伝導 4 極磁石として、QC2RP 磁石の試作を行った。開発試験用磁石は、磁石の巻き枠と下層コイルの上に、超伝導線を直接巻きつける方法で作成した。開発試験用超伝導 4 極磁石のデザインを図 2 (ビーム軸方向の断面図)と図 3 (長手方向)に示す。また、開発試験用磁石の主要なパラメータを表 1 に示す。

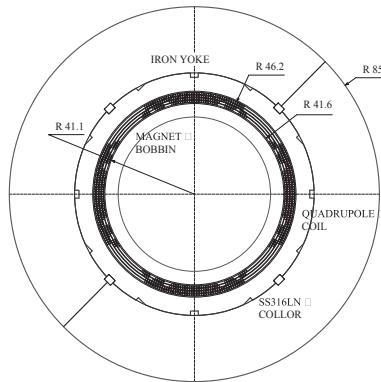


Fig. 2 Cross sectional design of the R&D Magnet

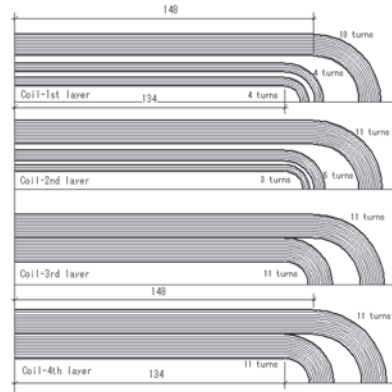


Fig. 3 Longitudinal coil design

Table 1 Parameter of the R&D magnet

R&D magnet		Superconducting wire	
Inner radius of cold bore	35 mm	Diameter	0.648 mm
Inner radius of the magnet	41.6 mm	Number of filament	1338
Outer radius of the magnet	46.2 mm	Filament diameter	10.6 μm
Outer radius of SS316LN collar	55.0 mm	Cu/Sc	1.8
Outer radius of iron yoke	85.0 mm	I_c (4.2 K, 3 T)	545 A
Magnet length	400 mm	I_c (4.2 K, 4 T)	452 A
Design field gradient	28.26 T/m	I_c (4.2 K, 5 T)	375 A
Effective magnetic length	328.8 mm		
Operation current	368 A		
Current density in the bare wire	997 A/mm ²		
Peak magnetic field w/o iron yoke	1.19 T		
Peak magnetic field with iron yoke	1.59 T		

4. まとめ

我々は、SuperKEKB 衝突点用超伝導4極磁石開発の一環として、QC2RP 磁石の試作を行った。本磁石は液体ヘリウムで冷却され、励磁試験、磁場測定を行った。その結果について、学会で詳細を報告する。

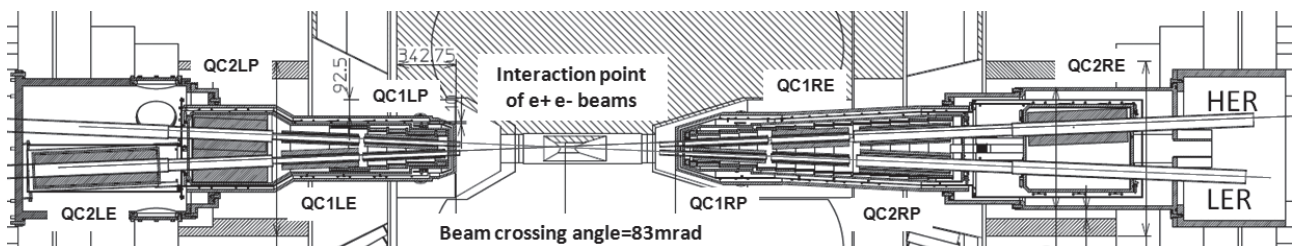


Fig. 1 Superconducting magnet system for the SuperKEKB interaction region

バランス電圧信号を利用した LHD 超伝導コイルの機械的擾乱量 評価手法の自動化

Automatic evaluation of mechanical disturbances for the LHD superconducting coils using
balance voltage signals

二ノ宮 晃(成蹊大); 岡野 稔, 田辺 豊(共和電業); 柳 長門, 山田修一, 今川信作, 三戸利行(NIFS)
NINOMIYA Akira (Seikei Univ.); OKANO Minoru, TANABE Yutaka(Kyowa E.I.); YANAGI Nagato, YAMADA Shuichi,
IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS)
E-mail: ninomiya@st.seikei.ac.jp

1. はじめに

我々は、大型ヘリカル装置(LHD)の超伝導コイル巻線内で発生する機械的擾乱量について解析し、コイルの安定性を向上させる励磁方式を探る研究を進めている。特に条件の厳しいヘリカルコイルの内層ブロックで発生する擾乱量については注視している。そのため、バランス電圧信号やAE信号の挙動に着目して研究を進めている。このうち、バランス電圧信号にはフラックスジャンプに伴う信号やプラズマ放電に伴うノイズ成分などが重畳してくるので、これらを除去する必要がある。これまで、これら不要な信号は手動で除去していたが、これを自動化できれば今後の解析に有益になる。そこで、バランス電圧信号の中から、フラックスジャンプなどのノイズ成分を除去し、機械的擾乱のみを抽出する手法について検討し良好な結果を得ることができた。

2. データ処理方法と結果

利用したソフトウェアは、NI DIAdem である。このソフトウェアの特徴は、AE 信号のような莫大なデータ処理が可能で、作成した処理アルゴリズムを自動化させる機能を有していることである。

ここで検討している LHD のヘリカルコイルは、内層(H-I)、中間層(H-M)、外層(H-O)と呼ばれる3ブロックに分割されており、それぞれ独立に励磁される。Fig.1 の上部 3 信号は、ブロック別に個別励磁したときのバランス電圧信号そのものの特性である。これらの信号には、機械的擾乱信号以外に、励磁に伴う長時定数の直流変動信号やフラックスジャンプによる信号などが多く含まれている(ここではこれをノイズ信号と呼ぶ)。そこで、これらを除去して機械的擾乱信号のみを抽出する方策について検討した。

処理方法は、はじめに励磁時の直流成分を除去した後、電圧信号として判断するための閾値電圧(ここでは1mV)を設定してフラックスジャンプ信号を取り除き、機械的擾乱信号のみを抽出する方式を採用した。

このとき、機械的擾乱信号とその他のノイズ信号との区分けには、バランス電圧信号の極性により判断する手法をとった。すなわち、機械的擾乱信号は、コイル内での導体の動きに起因する速度起電力信号である。この信号によって発生する起電力は、それぞれ自己誘導分、相互誘導分の電圧信号として検出できる。従って、機械的擾乱信号の判断は、取得した3つのバランス電圧信号の中から正負の極性の揃った信号として取り出すことが可能になる。こうすると、3つの電圧信号の内、1つでも極性の異なる信号があれば、それをフラックスジャンプ等のノイズ信号として判断できる。

Fig.1 の4番目の信号は、フラックスジャンプなどのノイズ信号を「0」、機械的擾乱信号を「1」に変換した特性である。この信号に直流成分を除去した元の信号を乗ずることで機械的擾乱信号のみを抽出するようにした。5番目の信号は、この方法で取得した機械的擾乱信号である。なお、この「1」[0]の符号を逆にすると機械的擾乱信号以外のノイズ信号についても検出が可能になる。Fig.2 は、取得した機械的擾乱信号を用

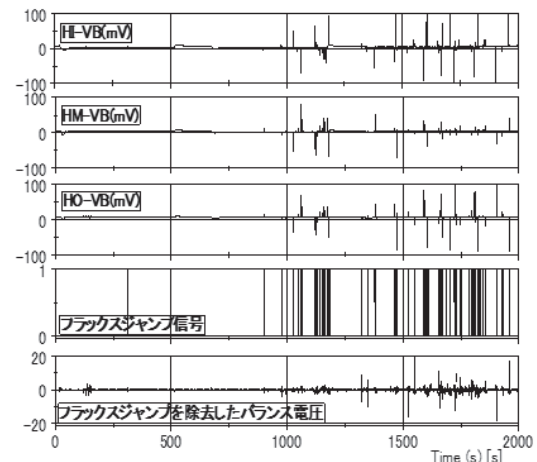


Fig.1 Balance voltage signals of the LHD helical coils containing the noise signals such as flux jump and mechanical disturbance signals.

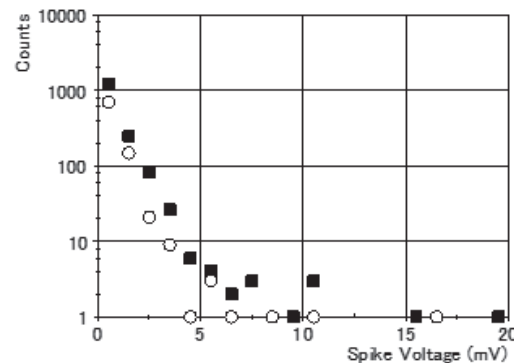


Fig.2 Comparison of mechanical disturbance signals of the LHD H-I block (■ : individual excitation, ○ : conventional excitation)

いてヒストグラム特性を1mVの分解能で求めたものである。なお、ここでは3つのコイルを個別励磁した場合と通常実施している同時に励磁した場合について比較している。このとき、導体が経験する磁場値は両者で一致するようにした。

これより判断できることは、個別励磁時の方が通常励磁時よりも機械的擾乱量が多いことである。これは、トレーニング特性とも関係するので、一概に安定性の高い励磁方式を判断することはできないが、取得した電圧信号より、コイルの機械的安定性の推移は判断できるものと考えている。

参考文献

1. N.YANAGI, et al.: FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol.58(2010),pp571-580.

強制冷却超伝導導体の温度マーシンの解析法の高速度化

Speeding up of Temperature Margin analysis Method in Forced Flow Cooled Superconductors

市毛 寿一、村上 陽之、木津 要、吉田 清(原子力機構)

ICHIGE Toshikatsu, MURAKAMI Haruyuki, KIZU Kaname, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)

E-mail: ichige.toshikatsu@jaea.go.jp

1. はじめに

強制冷却導体を使用する核融合装置用超伝導導体の温度マーシンを求めるには、交流損失などの発熱分布を考慮した熱流体解析を行う必要があり、この計算には複数の解析プログラムを用いて、数ヶ月という膨大な時間を要していた。ヘリウム流量の最適化による温度マーシンの解析及び、電流シナリオによる超伝導コイルの運転状態の解析を行うには計算の高速度化が求められた。ここでは、温度マーシンの解析法の高速度化について述べる。

2. 温度マーシンの解析法

JT-60SA 用超伝導コイルは、18 個のトロイダル磁場コイル、4 個の中心ソレノイド(CS)モジュール、6 個の平衡磁場(EF)コイルから構成される。ここでは交流損失が大きい CS と EF コイルについて示す。CS と EF コイルの鳥瞰図を Fig. 1 に示す。コイル内の磁場分布は大きく変化するので、これらをパンケーキ単位に分割して計算を行う必要がある。

超伝導コイルの温度マーシンの算出は、コイルに流れる電流、電流で発生する磁場、電流と磁場で発生する交流損失の時間分布を与え、燃線部ヘリウム、中心チャンネルヘリウム、ジャケット及び素線の熱拡散について伝熱および流体解析を行う。CS 導体の断面を Fig. 2 に、温度マーシンの時間分布を Fig. 3 に示す。最小の温度マーシスが 1.1 K であることが分かる。

3. 交流損失解析の高速度化

温度マーシンの解析には交流損失解析が必須である。交流損失の計算には電流シナリオ以外に様々な現象や動作電流による交流損失を計算しなくてはならず、その計算方法は、表計算ソフトのマクロを用いて 70 万個の磁場データを、表計算ソフトに添付する方法でデータの読み取りを行っていたため、計算に時間がかかっていた。そこで計算をすべて Fortran プログラムに置き替えた解析コード「ACLOSS」を作成し、磁場データの読み取りをプログラムで直接行い、交流損失解析の高速度化を行うことで、温度マーシンの解析の高速度化を実施した。交流損失解析の高速度化の結果は Table. 1 に示すように計算時間 78 h から 3 h へ 25 倍の高速度化できた。交流損失解析の高速度化をしても、現況の解析ですべてのコイルの温度マーシンを求めるには、磁場、交流損失及び温度マーシンの解析でそれぞれ 211 h、3 h、396 h の合計 610 h を要している。

また、JT-60SA が完成するとプラズマ運転が開始される。プラズマ運転は 30 分間隔で行なわれ、2 ショット目以降ではコイル内の液体ヘリウムが排出される前に次のショットが始まるため、前ショットの履歴を考慮した解析が必要である。このため、プラズマのショットを打つ前に、その運転シナリオでも、導体の温度マーシスが保たれることを確認する必要がある。よって、すべての超伝導導体の温度マーシスを 30 分程度で求めることが期待される。磁場解析や温度マーシンの解析の高速度化を行う必要がある。

4. まとめ

超伝導導体の温度マーシンを求める解析手法の高速度化は、ヘリウム流量の最適化や圧力の解析及び電流シナリオによる

超伝導コイルの運転状態の解析を円滑に進め、超伝導コイルやヘリウム冷凍機の設計検討に貢献した。今後は、プラズマ運転の監視のために、更なる高速度化が期待されている。

参考文献

- [1] 市毛 寿一, 他: JAEA-Data/code 2010-021 (2010)
[2] L. Bottra, et al., Journal of Computational Physics 125, (1996) 26-41

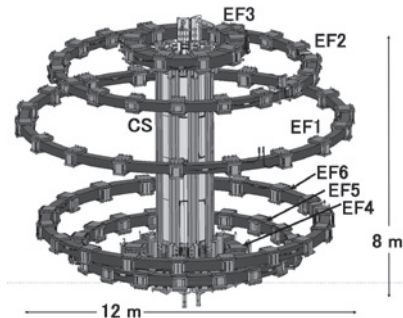


Fig. 1 Superconducting poloidal field coils for JT-60SA

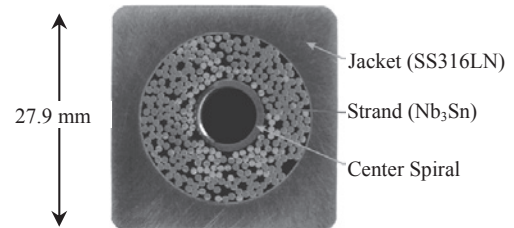


Fig. 2 CS conductor for JT-60SA

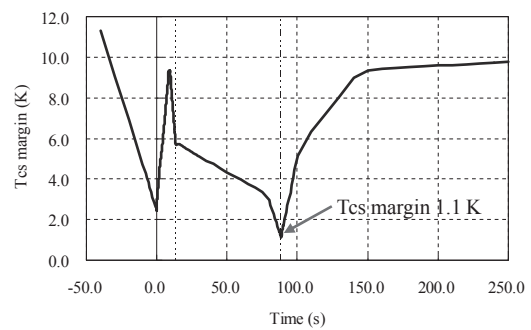


Fig. 3 Temperature margin at the innermost turn during plasma operation

Table 1 Computation time of AC loss analysis at PF coil

Condition	Macro (h)	Fortran (h)
Operating scenario	2.1	0.1
Mini collapse	30.6	1.2
ELM	30.6	1.2
RWM	0.4	0.02
Plasma disruption	14.3	0.6
Total	78	3

JT-60SA の誤差磁場補正コイルの概念設計

A conceptual design of the error field correction coils for JT-60SA

浅川 修二, 吉田 清(原子力機構)
 ASAKAWA Shuji, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
 E-mail: asakawa.shuji@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA のトカマク本体を超伝導化する計画が、日本と欧州連合(EU)間の共同プロジェクト「サテライトトカマク装置(JT-60SA)」として推進されている。コイルシステムは中心ソレノイド(central solenoid:CS), 平行磁場コイル(equilibrium field coil:EF coil), トロイダル磁場コイル(toroidal field coil:TF coil)などの超伝導コイルや高速位置制御コイル(fast plasma position control coil:FPC coil), 誤差磁場補正コイル(error field correction coil:EFC coil)などの真空容器内コイルから構成される。誤差磁場補正コイルは平行磁場コイルやトロイダル磁場コイルなどの製造,組み立て誤差の補正や MHD 研究などを目的としている。現在,いくつかの構造について検討を進めているが,本報では,誤差磁場補正コイルを真空容器内の上側と下側に取り付けた場合の設計,熱・構造解析について報告する。

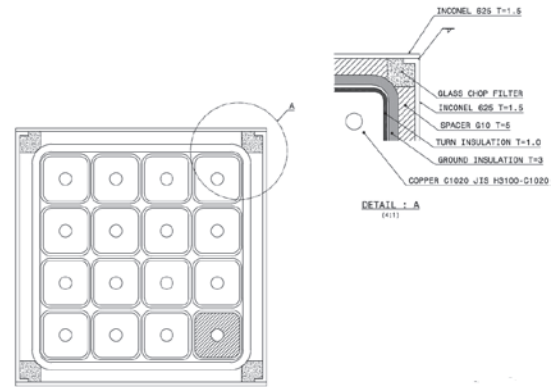


Fig.1 Cross section of EFC coil

2. 設計

誤差磁場補正コイルは中心から上下に約 2m,半径約 4m の位置の真空容器と安定化板との間に,上下にそれぞれ 6 個ずつ,合計 12 個設置される。大きさは,おおよそ 4m×1m の矩形である。設計仕様は電流値 30 kAT, 通電 140 秒(予備時間 40 秒を含む), インターバル 1800 秒, ベーキング温度 200℃, 絶縁材の吸収線量は 0.6MGy/10year などである。コイルは直径 7mm の冷却孔を有する 18×18mm の無酸素銅 15 ターンなどにより構成される。導体のコイル部分の長さは約 150m となる。冷却水の流速は 1.3m/s とし, 0.8MPa の圧力損失を確保する。耐熱クラス 220(220℃以下), 吸収線量 1MGy 以上に耐えうる絶縁材 BT レジン(Bismaleimide-Triazine Resin)などを使用する。導体はターン絶縁, 対地絶縁が取られ, 全体をスペーサとインコネル 625 の板により囲う。さらにサポート構造として,コイルをクランプして, 支えにより 18 箇所真空容器に取り付ける。導体はコイルからフィーダによりポートを通して真空容器の外側に取り出される。フィーダはジョイントボックスにより接続される。誤差磁場補正コイルの断面を Fig.1 に, コイルとサポート構造を Fig.2 に,コイル全体とフィーダを Fig.3 に示す。

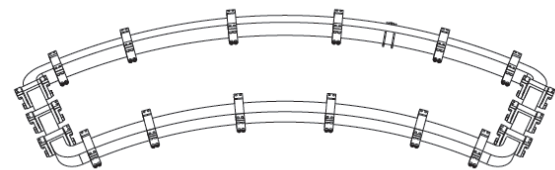


Fig.2 EFC coil and Support structures

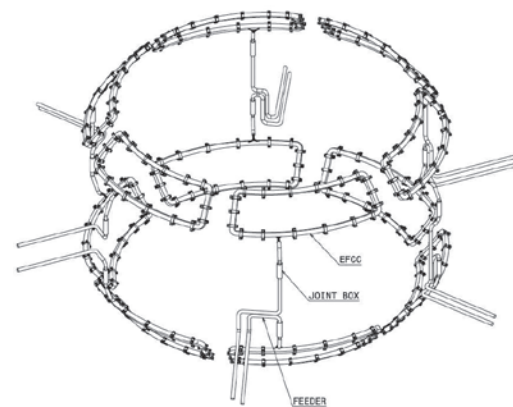


Fig.3 EFC coils and the feeders

3. 熱・強度解析

誤差磁場補正コイルとサポート構造を解析対象とした熱解析と構造解析により構造の健全性を確認している。解析モデルは電磁力が大きい「縦」部分とし,コイルとサポート構造の対称性を考慮したモデルとする。非定常の熱解析によると通電時のコイルの温度は 70℃以下であり, またベーキング時の温度は 200℃であるので,耐熱クラス 220 を満たす。ディスラプション時には,電流値は定常状態の 2kA から 14kA になる。「縦」部と「横」部の磁束密度は,それぞれ 2T,1T であり,いずれもコイルの内側に向き,最大の電磁力が「縦」部に発生する。非定常の熱解析により得られた温度分布による熱荷重,最大の電磁力が作用した場合とベーキング時に熱荷重のみが作用した場合の構造解析を行なう。解析結果はコイルとサポート構造ともに設計基準を満たす。

参考文献

1. S.Asakawa, et al. : J. Plasma Fusion Res. SERIES, VOL.9 (2010) p.226-231
2. K.Yoshida, et al. : J. Plasma Fusion Res. SERIES, VOL.9 (2010) p.214-219
3. 松永, 他 : 「JT-60SA における誤差磁場補正コイル設計」, 第 8 回核融合エネルギー連合講演会 (2010)
4. JAME : JSME S KAI-2008 (2008)

重イオン照射で柱状欠陥を導入した $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.07})_2\text{As}_2$ の 凝縮エネルギー密度評価

Condensation energy density properties in $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.07})_2\text{As}_2$ with columnar defects introduced by heavy-ion irradiation

村上 晃司, 明瀬 一顕, 木内 勝*, 小田部 荘司*, 松下 照男(九工大);
葛 君, 倪 宝栄*(福工大);
仲島 康行*, 為ヶ井 強*(東大)(*JST-TRIP)
MURAKAMI Kouji, MYOSE Kazuaki, KIUCHI Masaru*, OTABE Edmund Soji*
MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.); GE Jun, NI Baorong*(Fukuoka Inst. of Tech.);
Yasuyuki Nakajima*, Tsuyoshi Tamegai*(Univ. of Tokyo) (*JST-TRIP)
E-mail:murakami@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

2008年に発見された鉄系超伝導体は臨界温度が55 Kにも達し、物性的な興味から盛んに研究が行われてきている。実用的には線材化が重要であり、Powder in Tube(PIT)法が試みられてはいるものの、臨界電流はいまだに10 A程度と低いままである。一方で将来、有効なピン止め中心が導入されたときや、結晶間の接合が十分に改善されたときに、どのくらいの臨界電流密度が得られるかを予想するためには凝縮エネルギー密度の評価が重要である。

これまでわれわれのグループでは銅系酸化物超伝導体に重イオン照射をすることにより人工的に柱状欠陥を導入して、このときの臨界電流密度特性より凝縮エネルギー密度を評価してきた[1]。重イオン照射では柱状欠陥の密度と大きさを知らることができ、ピンニングの加算理論を使って凝縮エネルギー密度を評価できる。本研究では、 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.07})_2\text{As}_2$ 鉄系超伝導体についてこの手法を導入して、凝縮エネルギー密度の評価をおこなった。

2. 実験および検討

$\text{Ba}(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.07})_2\text{As}_2$ 鉄系超伝導体単結晶試料はFeAs/CoAs自己フラックス法により作製した。臨界温度は24 K、試料の大きさ $164\mu\text{m} \times 309\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ である。そして200 MeVの金イオンをマッチング磁界2 Tで厚さ方向に照射した。TEM観察により、欠陥はマッチング磁界から予想される密度の40%しか入っておらず、また長さ方向には20–240nmの長さで非連続的に欠陥ができていたことがわかった。欠陥の直径は2–5 nmで分布している。照射後の臨界電流密度は2 Kで $6 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ であり、照射前よりも6倍ほど増加した[2]。

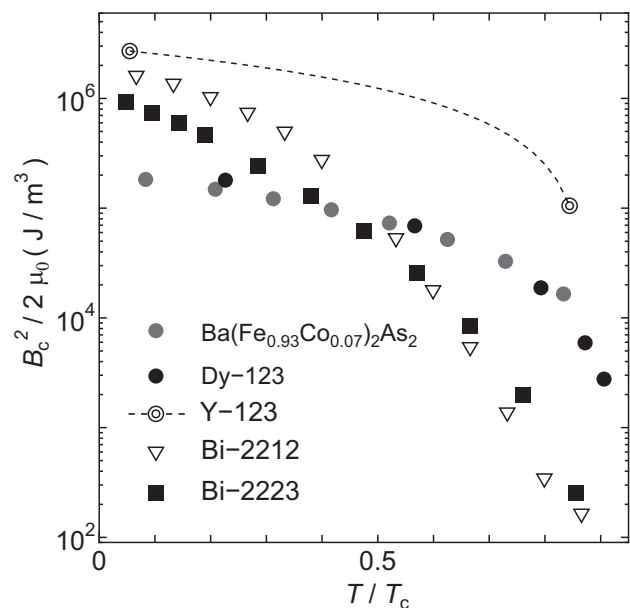


図1: Temperature dependency of condensation energy density on various superconductors

この臨界電流密度特性より、磁束クリープ・フロー理論と加算理論を用いて凝縮エネルギー密度を評価した[1]。その結果を図1に示す。希土類-123系、Bi-2212系およびBi-2223系の凝縮エネルギー密度と同程度の値があることがわかる。また温度依存性は希土類-123系に近く、異方性が小さいことがその原因と考えられる。したがって臨界温度付近で応用に有利であると言える。

参考文献

1. E. S. Otabe et. al.: Adv. Cryo. Eng. **52** (2006) 805.
2. Y. Nakajima et. al.: Phys. Rev. B **80** (2009) 012510.

大気圧アルゴン中熱処理による Fe(Te,S)前駆体膜の固相エピタキシャル成長

Solid phase epitaxial growth of Fe(Te,S) precursor films by heat-treatment in Ar atmosphere

一野 祐亮, 久留美 賢祐, 吉田 圭, 吉田 隆(名大, JST-TRIP); 松本 要(九工大, JST-TRIP);
寺西 亮(九大); 一瀬 中(電中研, JST-TRIP)

ICHINO Yusuke, KURUMI Kensuke, YOSHIDA Kei, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.);
MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Of Technol.); TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.); ICHINOSE Ataru (CRIEPI)
E-mail: ichino@nuce.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

Fe ニクタイト系超伝導体でもっとも構造がシンプルである 11 系材料は、エピタキシャル薄膜が作製しやすいことが予想され、デバイス応用や物性解明のために有望である。この 11 系薄膜を得るために、PLD 法[1-3]や固相エピタキシーなどが用いられている[4]。バルクや固相エピタキシーで 11 系材料を作製する場合、酸化や組成ずれを防ぐために真空封止された石英管内で熱処理する必要がある。本稿では、パルスレーザー蒸着(PLD)法で作製した Fe(Te,S)前駆体膜を真空封止せずに大気圧アルゴン中で固相エピタキシャル成長させる簡便な手法について報告する。

2. 実験方法

Fe(Te,S)前駆体膜は、Nd:YAG レーザー(2 倍波、532 nm)を用いて SrTiO₃(100)基板上に室温で蒸着した。用いたターゲット組成は Fe(Te_{0.8}S_{0.2})である。2 枚の前駆体膜の膜面同士を合わせて、SUS 製のプレートではさみ、ボルトとナットで固定し機械的に圧着させた。管状電気炉内に試料を置き、500 cc/min でアルゴンガスをフローしながら 400~600°C の温度で熱処理を行った。得られた試料の配向性、結晶構造を X 線回折(XRD)法、膜組成をエネルギー分散型 X 線分光法(EDX)、そして超伝導特性を直流四端子法で評価した。

3. 実験結果及び考察

図 1 に前駆体膜と 400°C、500°C そして 600°C で熱処理した試料の XRD パターンを示す。前駆体膜には基板以外のピークが見られないことから、アモルファスであると考えられる。この前駆体膜を 400°C と 500°C で熱処理した試料の XRD パターンには Fe(Te,S)の多結晶ピークや異相のピークが確認された。600°C で熱処理した試料では Fe(Te,S)の 00l ピークのみで、c 軸配向していることが確認された。また、この試料は四回対称の面内配向性も持っており、本実験の作製方法でエピタキシャル成長した Fe(Te,S)試料を得ることができた。

これらの試料の膜組成は、400°C および 500°C 試料では Te/Fe = 0.8 であったが、600°C 試料では Te/Fe = 0.63 と、Te が蒸発していることがわかった。600°C 試料は高い熱処理温度によって Te 組成がプアになっているものの、XRD ピーク強

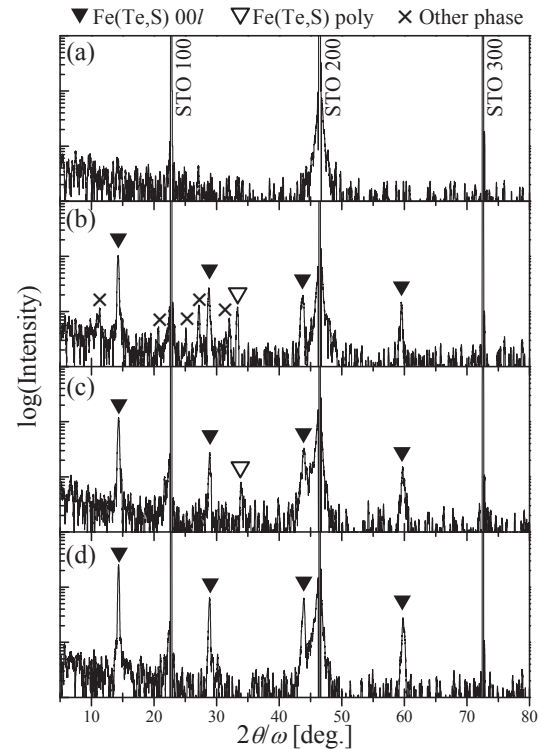


Fig. 1 XRD patterns of Fe(Te,S) thin films heat-treated in Ar atmosphere. (a) precursor film, (b) heat-treated film at 400°C, (c) at 500°C and (d) at 600°C.

度は最も強く、良好な Fe(Te,S)が成長していると考えられる。

これらの薄膜の超伝導特性は、最高で、ゼロ抵抗 $T_c=7.97$ K、オンセット $T_c=10.8$ K、そして 2 K における J_c の最大値は、 2.0×10^3 A/cm²であった。

4. まとめ

PLD 法で作製した Fe(Te,S)前駆体膜を膜面同士密着させて機械的に固定し、大気圧アルゴン中で熱処理することで固相エピタキシャル成長することがわかった。 T_c はバルク値に比べて低い、熱処理条件の最適化でさらなる向上が期待できる。

参考文献

1. P. Mele, et al.: Supercond. Sci. Technol., 23 (2010) 052001
2. I. Tsukada, et al.: arXiv 0909 (2010) 4985
3. E. Bellingeri, et al.: Appl. Phys. Lett. 96 (2010) 102512
4. 武田 宗一郎, 他: 2010 年春季応用物理学関係連合講演会 19a-T-1, 東海大学, 2010 年 3 月

(Pb,M)Sr₂(Y,Ca)Cu₂O_z (M : Fe, Co, Ni) の合成と評価

Synthesis and characterization of (Pb,M)Sr₂(Y,Ca)Cu₂O_z (M: Fe, Co, Ni)

前田 敏彦, 武市 将平, 阿部 雷太, 田代 大陸, 春田 正和, 堀井 滋 (高知工科大)

TOSHIHIKO Maeda, SHOHEI Takechi, RAITA Abe, TAIRIKU Tashiro,

MASAKAZU Haruta, SHIGERU Horii (Kochi Univ. Tech.)

E-mail: maeda.toshihiko@kochi-tech.ac.jp

1. はじめに

(Pb,Cu)Sr₂(Y,Ca)Cu₂O_z ((Pb,Cu)-"1-2-1-2") は、いわゆる "1-2-1-2" 型結晶構造を有する超伝導物質である。この構造は多くの銅酸化物高温超伝導物質にみられ、多様な元素置換が可能である。(Pb,Cu)-"1-2-1-2" の結晶構造に含まれる (Pb,Cu)O 層中の Cu の Fe 置換を意図して合成された (Pb,Fe)Sr₂(Y,Ca)Cu₂O_z については、(Pb_{0.5}Fe_{0.5})Sr₂(Y_{0.5}Ca_{0.5})Cu₂O_z の配合組成でのみ単一相試料が得られており、これまでのところ超伝導物質であることの確認はなされていない。また Fe の占有サイトや酸素含有量などについても不明な点が多く残されている。本研究では、Y サイトの種々の希土類元素 (RE) による置換効果を調べるとともに、電気抵抗率 (ρ) に及ぼすポストアニールの効果を検討した。また、X 線回折 (XRD) データを用いた予備的な結晶構造解析も行った。さらに、Fe の代わりに Co, Ni を用いた場合の "1-2-1-2" 相の生成についても調べた。

2. 実験方法

試料は、PbO, Fe₂O₃, SrCO₃, RE₂O₃ (RE : Y, Sm, Gd, Dy, Ho, Er), CaCO₃, CuO, Co₃O₄, NiO の粉末試薬の固相反応により作製した。主たる配合組成を (Pb_{0.5}M_{0.5})Sr₂(RE_{0.5}Ca_{0.5})Cu₂O_z (M : Fe, Co, Ni) とした。原料混合粉末を大気中、850°C で 10 時間仮焼し、大気中、900~1080°C で 1 時間の本焼成を行った。単一相が得られているかを XRD 法 (CuK α) により評価し、 ρ の温度依存性の評価には 4 端子法を用いた。RE=Y の単一相試料については、種々の温度での酸素気流中 10 時間のアニール処理 (徐冷) を施し、 ρ への影響を調べるとともに、XRD データを用いて Rietveld 法による結晶構造の精密化を行った。解析には、Izumi and Momma により開発されたコンピュータプログラム RIETAN-FP [2] を用いた。

3. 結果と考察

(Pb_{0.5}Fe_{0.5})Sr₂(RE_{0.5}Ca_{0.5})Cu₂O_z の組成において、RE 種により最適焼成温度はそれぞれ異なるものの、本研究で用いた RE 種すべてについて "1-2-1-2" のほぼ単一相試料が得られた。RE=Y の試料については 77.3 K 以上の温度では超伝導転移は観測されなかったものの、Fig. 1 に示すように、O₂ アニール処理による ρ の低下が見られ、アニール温度が高いほどその効果は顕著であった。

この物質の結晶構造は二次元 CuO₂ 平面を含み、高温超伝導銅酸化物の構造的特徴を備えている。現時点で超伝導を示していないのは、CuO₂ 面へのキャリアのドーピング量が充分ではないこと、Fe の一部が CuO₂ 面上の Cu サイトに固溶すること等に起因すると考えられる。Table 1 に示した Rietveld 解析の結果は、Fe が CuO₂ 面上の Cu サイトに固溶していない条件で行った予備的結果であるが、R_{wp} として 7.7 % という比較的低い値が得られた。今後、より詳細な解析による Fe の占有サイトの確定を試みるが、

XRD によって Cu と Fe を区別することは困難であることも知られており、中性子回折データによる解析等も検討する予定である。

M として Fe の代わりに Co, Ni を用いた場合においても、(Pb_{0.5}M_{0.5})Sr₂(Y_{0.5}Ca_{0.5})Cu₂O_z の配合組成で "1-2-1-2" のほぼ単一相が得られ、また M=Co については、(Pb_{0.5}Co_{0.5})Sr₂YCu₂O_z の配合組成でもほぼ単一相が得られた。Co は Fe と同様に +2 価と +3 価を取り易いが、"1-2-1-2" 相生成についての両者の挙動は大きく異なることが分かった。これらの試料について、今後、 ρ の温度依存性、Y/Ca 比の効果等を詳細に検討していく予定である。

参考文献

1. T. Maeda *et al.*, "Advances in Superconductivity V", *Proc. 5th Int. Symp. Superconductivity*, Nov. 16-19, 1992, Kobe, Japan, eds. Y. Bando and H. Yamauchi (Springer Verlag, Tokyo, 1993), pp. 353-356.
2. F. Izumi and K. Momma, *Solid State Phenom.*, **130**, 15-20 (2007).

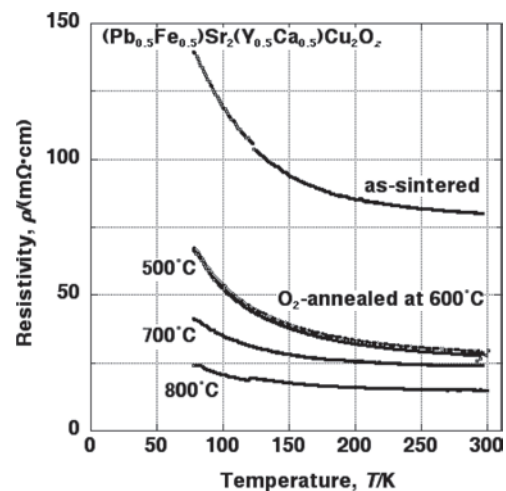


Fig. 1. Temperature dependence of ρ for (Pb_{0.5}Fe_{0.5})Sr₂(Y_{0.5}Ca_{0.5})Cu₂O_z samples O₂-annealed at various temperatures.

Table 1. Result of Rietveld refinement.

(Pb _{0.5} Fe _{0.5})Sr ₂ (Y _{0.5} Ca _{0.5})Cu ₂ O _z						
Atom	Site	g	x	y	z	B (nm ²)
M1(Pb ⁴⁺ /Fe ³⁺)	1a	1	0	0	0	0.0436137(1)
Sr/Sr ²⁺	2h	1	1/2	1/2	0.207443(4)	0.00986823(1)
M2(Y ³⁺ /Ca ²⁺)	1d	1	1/2	1/2	1/2	0.0012738(1)
Cu/Cu ²⁺	2g	1	0	0	0.354427(4)	0.00611664(1)
O1/O ²⁻	4i	1	1/2	0	0.366347(3)	0.0251999(1)
O2/O ²⁻	2g	1	0	0	0.176668(3)	0.00776301(1)
O3/O ²⁻	1c	1	1/2	1/2	0	0.211197(1)

R_{wp} = 7.657 %, R_p = 5.817 %, R_c = 4.483 %, a = 0.383072(2) nm, c = 1.17557(1) nm.

ナノロッドを導入した PLD 法 GdBCO コート線材の臨界電流特性に及ぼす超電導層膜厚の影響

In uence of superconducting layer thickness on critical current property in PLD processed GdBCO coated conductors with nanorods

鯉田 貴也, 和田 純, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男(九工大);

淡路 智, 渡辺 和雄(東北大・金研);

宮田 成紀, 衣斐 顕, 和泉 輝郎(超電導工学研究所)

KOIDA Takaya, WADA Jun, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); MIYATA Seiki, IBI Akira, IZUMI Teruo (SRL-ISTEC)

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

1. はじめに

REBCO 線材(RE:希土類)は、高温、高磁界で高い臨界電流密度が得られることから電力機器への利用が有望視されている。実用化に向けて臨界電流密度 J_c の更なる特性改善が求められている。これまでの研究で REBCO コート線材にナノロッドを導入することにより臨界電流密度の値が向上することがわかってきている。しかし、ナノロッドが超電導層厚に及ぼす影響についてはよくわかっていない。本研究では、ナノロッドを導入した PLD 法 GdBCO コート線材の臨界電流密度の印加磁界角度依存性の測定結果から、超電導層の厚さと、ナノロッドが臨界電流特性にどのように影響を与えるかについて調べた。

2. 測定方法

測定した試料は、PLD 法で作製された GdBCO コート線材で、超電導層厚がそれぞれ $1.0\mu\text{m}$ のナノロッドなし(#1)とナノロッドあり(#2)、 $2.5\mu\text{m}$ のナノロッドなし(#3)とナノロッドあり(#4)の4種類である。Table 1 にそれらの諸元を示す。 J_c の印加磁界角度依存性を評価するために、直流四端子法を用いた。線材は、幅 $w = 100\mu\text{m}$ 、長さ $l = 1.0\text{mm}$ のマイクロブリッジ形状に加工し、通電による発熱を抑えた。測定は、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの 20 T マグネットを使用して測定を行った。尚、磁界は c 軸方向に平行に印加したときを $\theta = 0^\circ$ 定義した。 J_c は $E_c = 1.0 \times 10^{-4}\text{V/m}$ の電界基準で決定した。

3. 結果

Fig. 1 に #1 と #2 の 77.3 K における $J_c - \theta$ 特性を示す。 J_c の絶対値に違いはあるが、 $\theta = 0^\circ$ 、つまり c 軸に平行に磁界を印加した場合、高磁界になればなるほどナノロッドを導入した試料の方が磁界に対して強い特性を示していることが確認できる。次に、Fig. 2 に #2 と #4 の 77.3 K における $J_c - \theta$ 特性を示す。ナノロッドの導入により、 $\theta = 0^\circ$ 付近に緩やかなピークが見られる。これは $\theta = 0^\circ$ 付近でのナノロッドが強いピンとして働いているためである。また、超電導層の厚さの違いに注目してみると、 $\theta = 90^\circ$ 近傍以外では膜厚の厚い試料の方が高い J_c 値を示している。これは、超電導層の厚い試料の方がナノロッドの成長方向が c 軸方向を中心に広がって、いろいろな磁界角度でピンとして有効に働いていることが示唆される。また、超電導層厚の違いによる J_c の磁界依存性にほとんど違いが見られないことから、磁束クリープの影響に大きな差がないと考えられる。これらの結果に対する詳細な議論は当日行う。

Table 1: Specification of specimens

specimen	thickness d (μm)	T_c (K)	process
#1	1.0	92.1	PLD
#2	1.0	90.4	PLD+BZO
#3	2.5	92.1	PLD
#4	2.5	90.5	PLD+BZO

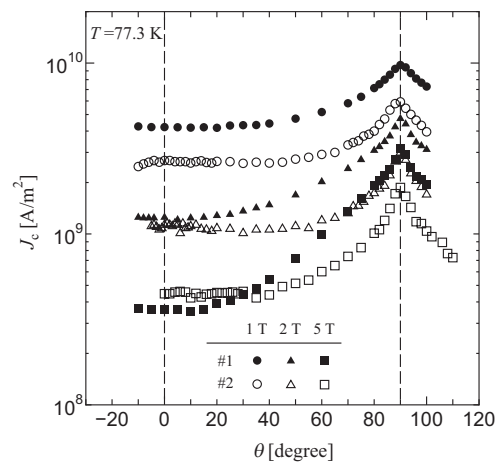


Fig. 1: $J_c - \theta$ properties at 77.3 K for specimens #1 and #2.

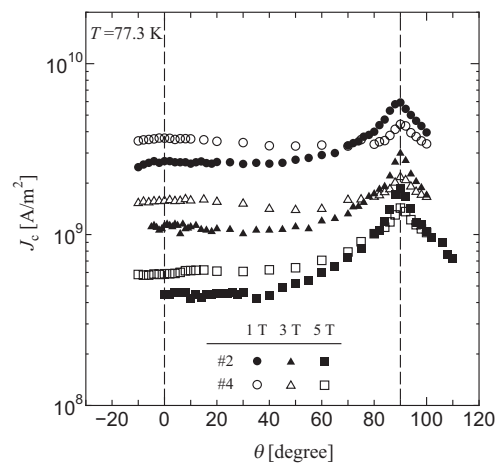


Fig. 2: $J_c - \theta$ properties at 77.3 K for specimens #2 and #4.

謝辞 本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、IS-TEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施したものである。

重イオンを照射した GdBCO 線材における臨界電流密度の 印加磁界角度依存性

Field angle dependence of critical current density in heavy-ion-irradiated GdBCO coated conductors

永水 隼人, 中村 遼太, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大); 大松 一也 (住友電工);
岡安 悟 (日本原子力機構)

NAGAMIZU Hayato, NAKAMURA Ryota, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji,
MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech); OMATSU Kazuya (Sumitomo Electric Industries);
OKAYASU Satoru (Japan Atomic Energy Agency)
E-mail: nagamizu@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

REBCO 線材 (RE:希土類) は、高温、高磁界で高い臨界電流密度が得られることから応用機器への利用が有望視されている。しかしながら実用化に向け、印加磁界角度に対する異方性をはじめとした臨界電流密度 J_c の更なる特性改善が求められている。これまでの研究で、 c 軸方向等に人工ピンを導入することで J_c の異方性が小さい線材が得られることが分かっている。しかしながら、人工ピンと J_c の関係は解明されていない。本研究では、2 種類の重イオンを c 軸方向に照射し、臨界電流密度の印加磁界角度依存性を測定した。それらの結果からピンである柱状欠陥の大きさの違いが特性にどのような影響を与えるかを調べた。

2. 実験

測定した試料は、Ni クラッド基板を用いて PLD 法により作製された GdBCO コート線材である。線材の超電導層厚は $2.1 \mu\text{m}$ である。この線材を幅 $w = 50 \mu\text{m}$ 、長さ $l = 1.0 \text{mm}$ のマイクロブリッジ形状に加工し、日本原子力機構にて c 軸に平行に Au, Xe の重イオン照射を行った。二つの試料の照射エネルギーは 200MeV 、照射量は $B_0 = 1.0 \text{T}$ である。 J_c は直流四端子法を用いて E - J 特性を評価し、 $E_c = 1.0 \times 10^{-4} \text{V/m}$ の電界基準で決定した。尚、測定は液体窒素中で行った。また c 軸からの磁界角度を θ とした。

3. 結果及び考察

Fig. 1 に c 軸方向に磁界を印加した際の照射なしの試料 (#pure)、Au, Xe イオンを照射した試料 (#Au, #Xe) の J_c - B 特性を示す。 $B = 0 \text{T}$ では #pure に比べて #Au, #Xe の J_c が低く、照射により試料が劣化していることが確認できる。また、#Au において劣化が顕著である。一方で、#pure に比べて #Au, #Xe の磁界特性は非常に優れており、照射による柱状欠陥がピンとして有効に作用していることが分かる。

Fig. 2 に比較の為に J_c を $J_c(B//ab)$ で規格化した #pure, #Au, #Xe の 77.3K , 1T における J_c - θ 特性の測定結果を示す。#Au, #Xe では c 軸に大きなピークが存在し、照射により $B//c$ での J_c が向上したことが分かる。また、#Au と #Xe を比較すると、#Au のピークの方が約 1.7 倍大きい。したがって、イオン半径が大きい #Xe より大きな柱状欠陥が導入されたと考えられる #Au の方がピンニング特性が良いことが分かる。これらの結果に対する詳細な

議論は当日行う。

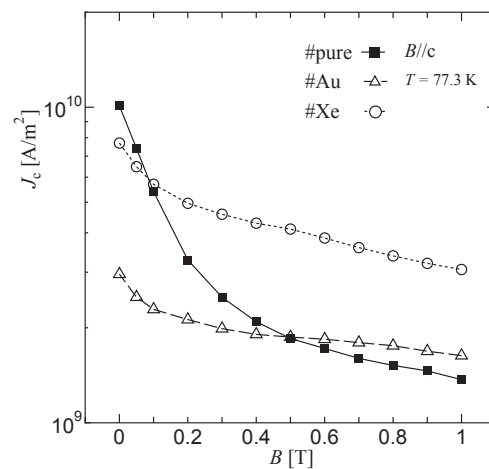


Fig. 1: Field dependence of J_c at 77.3K .

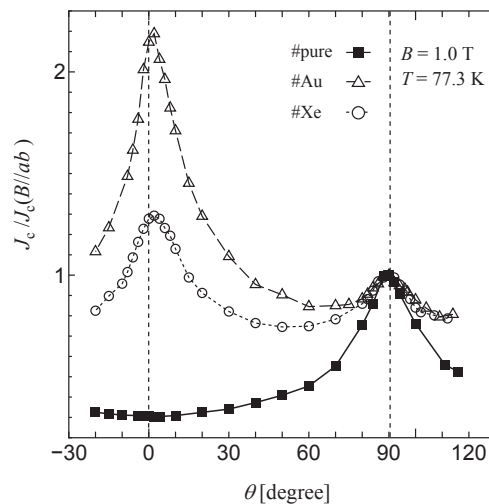


Fig. 2: Field angle dependence of J_c at 77.3K at 1.0T .

謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、住友電工を通じて NEDO からの委託を受けて実施したものである。

参考文献

[1] M. Namba, S. Awaji, K. Watanabe, T. Nojima, S. Okayasu: Physica C 468 (2008) 1652-1655.

PLD 法 GdBCO 線材の臨界電流密度の印加磁界角度依存性

Magnetic field angle dependence of critical current density in PLD-processed GdBCO coated conductors

和田 純, 永水隼人, 中村遼太, 木内 勝, 小田部荘司, 松下照男(九工大);
大松一也 (住友電工);

WADA Jun, NAGAMIZU Hayato, NAKAMURA Ryota, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund SOJI,
MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.)
OMATSU Kazuya (SEI);

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

1. はじめに

PLD 法で作製された希土類系超電導コート線材は優れた面内配向と高い臨界電流密度 J_c を持ち、電力ケーブルをはじめとした様々な分野での応用が期待されている。しかしながら、一般的に基板として使用される無配向ハステロイ基板では中間層の作製に特別な処理が必要となり、コスト面に課題が残る。そこで中間層に特別な処理を行う必要もなく超電導層の 2 軸以上の配向が得られる配向 Ni クラッド基板を用いた線材の作製が注目される [1]。また、コート線材を応用器機で使用する場合、線材に様々な方向から磁界が加わるため異なる印加磁界角度における臨界電流密度の特性の把握が重要となる。

本研究では、配向 Ni クラッド基板 PLD 法 GdBCO 線材の臨界電流密度の印加磁界角度依存性について詳細に調べた。

2. 実験

本研究において使用した試料は、基板に配向 Ni クラッド合金を用い、中間層を $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ とした PLD 法 GdBCO 線材で、保護層に Ag を、安定化層に Cu を使用している。今回の測定では超電導層厚が異なる 1.6 μm (#1.6)、2.1 μm (#2.1) の 2 つを用いた。臨界温度 T_c は 91.2 K、93.4 K であった。 J_c は四端子法を用いて、 $E_c = 1.0 \times 10^{-4}$ V/m の電界基準から決定した。磁界は電流に対して垂直な方向に 0.5 T、1 T、3 T、5 T を印加し、 c 軸からの磁界角度を θ とした。測定は He ガス雰囲気中で行い、温度誤差は ± 0.2 K であった。

3. 結果及び考察

Fig.1 に様々な磁界下での 77 K における J_c - θ 特性を示す。超電導層が厚い #2.1 では $\theta = 90^\circ$ 方向で積層欠陥などの強いピンによる J_c の大きなピークが

現れ、 $\theta = 0^\circ$ 方向では磁界の増加と共に J_c は大きく減少し、わずかにピークが現れた。一方で、薄い #1.6 では $\theta = 90^\circ$ 方向で顕著な J_c のピークはほとんどなく、逆に $\theta = 0^\circ$ 近傍で緩やかなピークを示した。この傾向は 3.0 T でより顕著となった。また、#1.6 の $\theta = 0^\circ$ 近傍の J_c ピークは c 軸から 10° 程度ずれており、この方向で有効になるピンの存在を示唆するような結果となった。理論評価との比較や詳細な議論は当日行う。

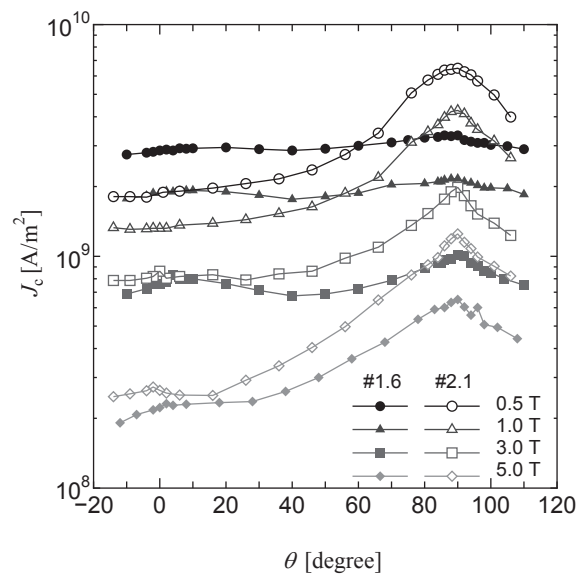


Fig. 1: J_c - θ properties of GdBCO coated conductors at various magnetic fields at 77 K.

謝辞

本研究はイットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、NEDO からの委託を受けて実施したものである。

参考文献

[1] Y. Shingai, *et al.*: SEI Technical Review **174** (2009) 105.

BaZrO₃/YBa₂Cu₃O_y疑似多層膜の磁場中 J_c に対する層厚および成膜温度の影響

Influence of layer thickness and growth temperature on in-field J_c in BaZrO₃/YBa₂Cu₃O_y quasimultilayered films

末吉 哲郎, 森 正吉, 土屋 啓輔, 米倉 健志, 藤吉 孝則, 光木 文秋, 池上 知顯 (熊本大)
 SUEYOSHI Tetsuro, MORI Masayoshi, TSUCHIYA Keisuke, YONEKURA Kenji, FUJIYOSHI Takanori,
 MITSUGI Fumiaki, IKEGAMI Tomoaki (Kumamoto Univ.)
 E-mail: tetsu@cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超伝導体の高磁場特性を改善するために、様々な人工ピンの導入が試みられている。ナノロッドのような1次元ピンは、その方向の磁場に対して顕著な臨界電流密度 J_c を向上できる[1]。一方、3次元ピンは全磁場方向において J_c を向上させる作用がある[2]。

本研究では、PLD法によりBaZrO₃/YBCO疑似多層膜を作製することでBaZrO₃をナノ粒子として導入し、YBCOの層厚や成膜温度によりBaZrO₃ナノ粒子の空間分布の制御を試み、磁場中 J_c に与える影響について調べた。

2. 実験方法

YBCO疑似多層膜は、ターゲット切替法によるPLD法によりSrTiO₃基板上に作製した。使用したKrFエキシマレーザーは、エネルギー密度1 J/cm²、繰り返し周波数5 Hzであり、酸素雰囲気ガス300 mTorrの下で成膜した。基板温度 T_s における疑似多層膜の作製において、YBCO層を堆積した後BaZrO₃を1パルスで堆積し、これを n 回繰り返して積層した試料をB(1, n) T_s と定義する。ここで、全ての試料においてYBCO層の総堆積パルス数は3625パルス、多層膜の膜厚は約260 nmである。これらの成膜後に600 Torrの酸素雰囲気中で室温まで自然冷却した。結晶成長について調べるために、AFMによる表面観察を行い、またXRDにより結晶構造解析を行った。 J_c の評価は直流四端子法を用いて電界基準を $E_c=1 \mu\text{V/cm}$ として行った。 J_c の磁場角度依存性では電流と常に直交するように磁場を印加し、磁場と c 軸のなす角度 θ とした。

3. 結果および検討

Fig.1に、層数が60, 84, 110層で、基板温度がそれぞれ780°Cと810°Cで作製した疑似多層膜の $B=1$ Tにおける J_c の磁場角度依存性を示す(77.3 K)。 $T_s=780$ °Cの多層膜において、どの層数の疑似多層膜も77.3 Kでは c 軸方向のピークはみられず、ランダムピンに特徴的な J_c の磁場角度依存性を示している。 $T_s=810$ °Cの疑似多層膜においては、層数が少ない、すなわちYBCOの層厚が厚い場合には、90°付近を除いてほぼフラットな J_c の磁場角度依存性を示している。これは、Zr添加したMOD法 $Y_{1-x}RE_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜[2]と同様な振る舞いである。層数が多い(YBCOの層厚が薄い)場合には、 c 軸方向にブロードなピークが現れ、層厚が薄いほどより顕著になっている。また、基板温度が高くなるほど90°付近を除く範囲で、 J_c が大幅に増加している。

Fig.2に、 $T_s=810$ °Cで作製した疑似多層膜の65 K, 3 Tにおける J_c の磁場角度依存性を示す。層数が少なく(YBCOの層厚が厚く)なるにつれて、 c 軸方向のピークは小さくなり、60層では c 軸方向でディップが生じている。

これらの原因として、(1)成膜温度が低い場合には、BaZrO₃付着原子の表面拡散距離が抑制されるために、BaZrO₃ナノ粒子の空間分布はランダムになりやすい、(2)YBCOの層厚が薄くなると各層のBaZrO₃ナノ粒子が膜厚

方向に相関して配列しやすくなることが考えられる。

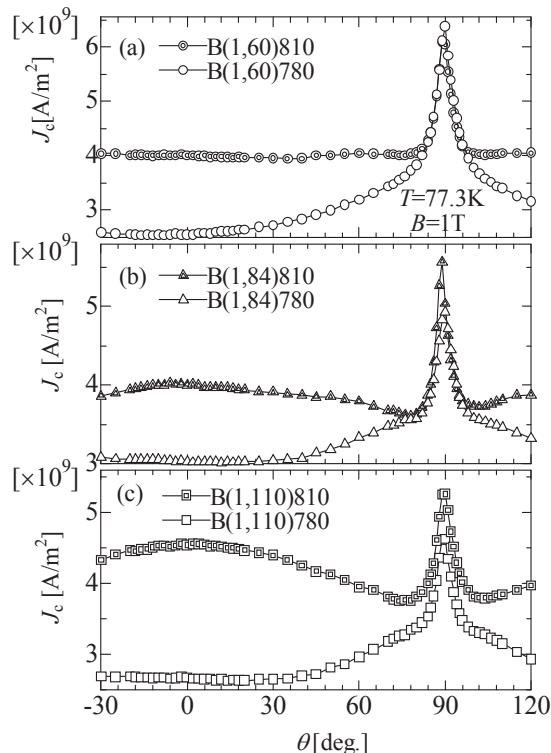


Fig.1 Angular dependences of J_c at 77.3 K for $B = 1$ T.

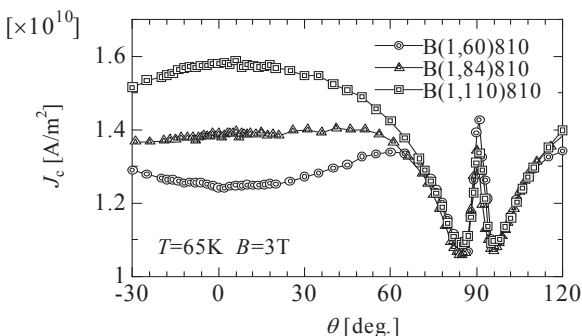


Fig.2 Angular dependences of J_c at 65 K for $B = 3$ T.

参考文献

1. P. Mele, *et al.*: Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 032002.
2. M. Miura, *et al.*: Appl. Phys. Express 2 (2009) 023002.

REBCO 超電導テープ線材のピンニングロスに関する新現象

New phenomenon of AC loss property of REBCO coated superconductor

林 卓矢, 中村 聡介, 木須 隆暢, 岩熊 成卓(九大);

川越 明史, 住吉 文夫(鹿児島大); 衣斐 顕, 和泉 輝郎, 塩原 融(SRL);

HAYASHI Takuya, NAKAMURA Sosuke, KISS Takanobu, IWAKUMA Masataka (Kyushu- Univ.);

KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima-Univ.) IBI Akira, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC);

E-mail: taku884@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

超電導機器応用における重要な問題は発生する熱負荷であり、その大部分を交流損失が占めている。REBCO 超伝導テープ線材は、その断面の巨大なアスペクト比から磁場印加角度に対し臨界電流特性や交流損失特性に大きな異方性を持ち、その特性を明らかにする必要がある。我々は鞍型ピックアップコイルを用いて、REBCO 超伝導テープ線材の交流損失の磁場の強度及び印加角度依存性を測定し、従来の理論では説明のつかない非常に興味深い現象を発見した。

2. 試料と測定法

今回測定した 2 つの線材 IBAD(GZO)-PLD(YBCO)線材(試料 A)と IBAD(GZO)-PLD(GdBCO+BZO)線材(試料 B)の諸元を Table.1 に示す。試料 B は試料 A と比較して新しく、そのため成膜条件の最適化が進んでいる。よって ab 面の配向性を示す $\Delta \phi$ の値が小さく、これは試料 B の結晶面内配向性が高いことを示している。

これらの試料について鞍型ピックアップコイルを用いてテープ幅広面に対する磁場印加角度を 15° 30° 45° 90° と変化した場合の磁化曲線及び交流損失特性を測定した。

3. 実験結果

64K における試料 B の磁化曲線を Fig.1 に示す。また、77K における試料 A の交流損失特性を Fig.2(a)に、35K における試料 B の交流損失特性を Fig.2(b)にそれぞれ示す。Fig.2 において横軸は印加磁界振幅、縦軸は交流損失値をそれぞれ示している。

Fig.1 に示すように、斜め磁界中での REBCO 超伝導テープの磁化曲線は印加磁界 B_e 及び磁化 M の値の極性が変化するとき、 J_c の異方性を考慮した理論的な予測から大きく逸脱している。逸脱した分だけ磁化曲線の面積が小さくなり、結果として交流損失が減少している。

Fig.2(a)に示すように、試料 A の交流損失特性はテープ幅広面と印加した磁界の間の角度を θ 、そのときの交流損失値を W_θ としたとき、 $W_\theta = W_{90\text{deg}} \sin \theta$ におおよそ比例している。一方、Fig.2(b)では試料 B の $\theta = 15^\circ$ における交流損失特性は $W_{90\text{deg}} = W_{90\text{deg}} \sin 15^\circ$ をさらに 10 分の 1 ほど下回っており、これは交流損失特性が $\sin \theta$ に比例するという予測から大きく外れている。

4. 考察

配向性の高い REBCO 超伝導テープ線材において、試料幅広面に対して斜めに磁場を印加したとき、従来観測されていたものと大きく異なる磁化曲線が観測され、結果として発生する交流損失が劇的に減少していることが分かった。

この交流損失が大幅に減少する現象は、温度が低く、磁場が高く、磁場印加角度が小さく、線材の特性が優れるほど顕著に現れることが分かっている。また従来の臨界状態モデルではこの現象は説明がつかず、その発現機構を明らかにする必要がある。

Table.1 Specifications of Samples

	Sample A	Sample B
Production process	PLD	PLD
Self-field I_c at 77K	234A	254A
Self-field J_c at 77K	$1.02 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$	$2.12 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$
Width	10mm	10mm
Stabilizer	Ag(20Am)	Ag(10Am)
Superconductor	YBCO (2.3Am)	GdBCO+BZO (1.2Am)
Cap and buffer layers	CeO ₂ (0.4Am) Gd ₂ Zr ₂ O ₇ (0.8Am)	CeO ₂ (0.4Am) Gd ₂ Zr ₂ O ₇ (0.8Am)
Substrate	Hastelloy (100Am)	Hastelloy (100Am)
$\Delta \phi$	5.4°	3.0°
$\Delta \omega$	2.9°	3.3°

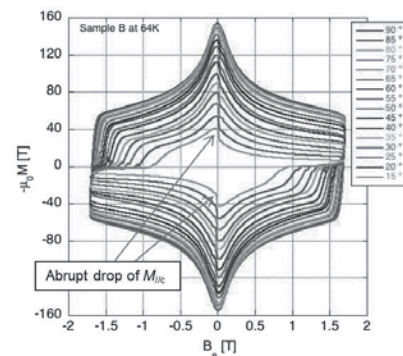
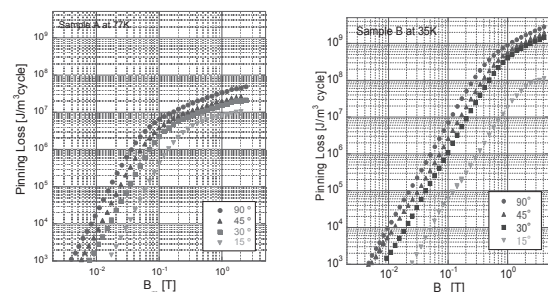


Fig.1 Hysteresis Curve of Sample B at 64K



(a) Sample A at 77K

(b) Sample B at 35K

Fig.2 The AC loss property

5. 謝辞

本研究は、超電導応用基板技術研究開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO の委託を受けて実施しているものである。

TFA-MOD 法による BZO ピン導入 YGdBCO 線材磁場中高 J_c 化技術の開発Development of BZO doped YGdBCO coated conductors with high infield- J_c by TFA-MOD Process

高橋保夫、中岡晃一、吉積正晃、和泉輝郎、塩原融、(ISTEC-SRL)
 青木裕治、長谷川隆代 (SWCC Showa Cable System Co. Ltd.)
 加藤丈晴、平山司 (JFCC)

Y.Takahashi, K.Nakaoka, M.Yoshizumi, T.Izumi, Y.Shiohara (ISTEC-SRL)
 Y.Aoki, T.Hasegawa (SWCC Showa Cable System Co. Ltd.)
 Takeharu KATO, Tsukasa HIRAYAMA (JFCC)

e-mail: y.takahashi@istec.or.jp

はじめに：

TFA-MOD 法は低コストかつ高性能な超電導層を作製可能な製造プロセスとして知られており、昭和電線において 500m 級で 300A/cm 幅の J_c を有する YBCO 線材を作製したという報告がなされている。[1] しかしながら、MOD により作製した YBCO 線材は比較的磁場による J_c 低下が大きく、磁場中特性の向上が必要とされてきた。ISTEC では TFA-MOD 法を用いた YGdBCO 膜中に BaZrO₃ (BZO) ナノ粒子を導入することによる磁場中特性向上技術を開発しており [2]、現在、長尺線材における磁場中特性向上の技術開発を進めている。本研究では特殊な焼成条件を適応することにより磁場中特性の向上に成功したので報告する。

実験方法：

YGdBCO 膜の作製は TFA-MOD 法で行い、YGd 混晶溶液に ZrO 塩を添加した原料を用いた。本原料は Y,Gd,Ba,Cu,ZrO のモル濃度をそれぞれ 0.154, 0.046, 0.32, 0.6, 0.02mol/L (Y:Gd:Ba:Cu:ZrO=0.77:0.23:1.6:3:0.01) となるように調整したものをを用いた。仮焼膜の作製は CeO₂/LMO/IBAD-MgO/GZO/ハステロイ™ 基板上に上記原料溶液をディップコーティングし、RTR タイプの電気炉で仮焼を行った。塗布・仮焼速度は 5m/h で行い、本焼後 1.5-2 μ m となるように多層成膜した。本焼時の温度プロファイルを改良し、温度プロファイルと磁場中 J_c の関係を調べることで磁場中特性を向上させるための適正条件を検討した。YGdBCO 膜の評価は表面及び断面観察を SEM、TEM を用い、結晶構造の評価は XRD ($\theta/2\theta$ 、極点図) で行い、輸送電流特性 (J_c) の測定は 77K、自己磁界中及び 3T 中で直流四端子法を用いて行い、1 μ V/cm の電圧基準で定義した。3T 中の J_c 測定については印加角度を変化させた磁場下で J_c の角度依存性を評価した。

結果：

本焼昇温途中の T_{max} (760 $^{\circ}$ C) 以下の温度で保持ステップを導入した中間熱処理を施し 77K, 3T における磁場中 J_c への影響を調査した。図 1 に本焼温度プロファイル改良前後の 77K, 3T 中の J_c -B- θ 測定結果を示す(超電導層厚 1.5 μ m)。図に示す改良後試料の中間熱処理温度は 575 $^{\circ}$ C、保持時間は 3 時間である。また、77K, 自己磁界における J_c はそれぞれ 355A(改良前), 438A(改良後)であった。77K, 3T における J_c の角度依存性は図に示すようになり、 $J_{cmin}(3T)$ は改良前の 15.4A に対し、中間熱処理を施した改良後では 26.1A と大幅な磁場中の J_c 向上が見られた。 J_c 残存率 ($J_{c77K,3T}/J_{c77K,s.f.}$) も 4.3%(改良前)から 5.9%(改良後)に向上しており、3T における J_c 向上には自己磁界 J_c 向上以上の効果が確認された。プロファイル改良前後の試料の

断面観察を SEM で行った結果(図 2)、中間熱処理を施した改良後の試料では改良前の試料と比較して Pore が非常に少なく緻密な膜になっており J_c 向上の一因となることが示唆された。本発表では中間熱処理による J_c 向上の原因検討として TEM による BZO ナノ粒子の分散状態等の微構造観察結果や更なる J_c 向上のための中間熱処理条件等の最適化や厚膜化などのについても報告する。

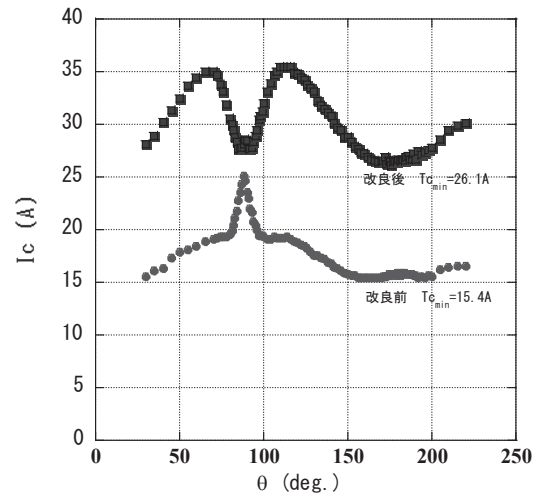


図 1. 本焼条件改良前後の J_c -B- θ 測定結果 (改良後：中間熱処理有、改良前：中間熱処理無)

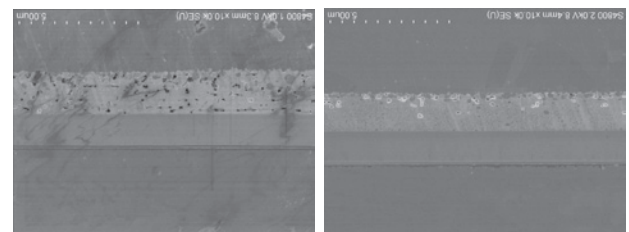


図 2. 本焼条件改良前後の断面 SEM 写真

謝辞：

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の研究として、新エネルギー産業技術開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

参考文献

- [1] 小泉ら 第 80 回・低温工学・超電導学会講演概要集、3A-a08, p. 187.
 [2] 吉積ら 第 81 回・低温工学・超電導学会講演概要集、2B-a05, p. 127

In-plume PLD 法で作製した BSO 添加 GdBCO 線材のピン止め特性

Pinning characteristics of GdBCO+BSO coated conductors prepared by in-plume PLD method

筑本 知子, セルゲイ・リー, 田辺 圭一 (ISTEC)

CHIKUMOTO Noriko, LEE Sergey, TANABE Keiichi (ISTEC)

E-mail: chiku@istec.or.jp

1. はじめに

我々は、基板-ターゲット間距離を短くして成膜する in-plume PLD 法の開発を行っており、GdBCO 系において J_c 値が 300A/cm-w 以上の均一長尺線材 (>50m) を再現性良く得られるまでになっている。なお、ここで J_c 値は製造速度により線材の膜厚を変えることで、制御可能である[1]。

一方、SMES や超電導磁石等の機器応用においては、磁場中 J_c の向上及び J_c の磁界角度依存性の低減化が望まれている。特に、GdBCO は層状の結晶構造をもつため、本質的に J_c の異方性が大きく、それを低減するためにはピン止め中心の導入が必要不可欠である。そこで、本研究では、 BaSnO_3 (BSO) の添加によりピン止め中心の導入を行い、そのピン止め特性を評価した。前回の報告では 77K での特性において、BSO 添加により磁場中 J_c が向上し、 J_c の磁界角度依存性が低減することを報告した。また磁界角度依存性は成膜時の線速が速い程、小さくなることわかった。そこで、今回は、より広い温度領域での効果について調べた結果について報告する。

2. 実験方法

成膜には $\text{CeO}_2/\text{LaMnO}_3/\text{IBAD-MgO}/$ ハステロイ基板 (IBAD-MgO 基板) ($\Delta\phi=4-5^\circ$) を用いた。GdBCO 層は XeCl エキシマレーザ (レーザーパワー: $\sim 650\text{mJ}$) を用いて、in-plume Reel to reel 成膜を行なった。なお、酸素分圧、温度は一定とし、基板の搬送速度 (線速) を $20-90\text{m/h}$ の範囲で変化させた。

成膜には $\text{Gd}:\text{Ba}:\text{Cu}=1:1.8:3$ の組成比のターゲットを用いた。得られた膜の Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) 法による分析組成は線速によらず、ほぼ $\text{Gd}_{1.1}\text{Ba}_{1.9}\text{Cu}_3\text{O}_y$ であった。また、BSO の添加はターゲット組成 $\text{GdBa}_{1.8}\text{Cu}_3\text{O}_y$ に対して 5mol% の BaSnO_3 を混合することによって行なった。作製したテープは Ag を $10\ \mu\text{m}$ 程度スパッタ蒸着後、酸素気流中でアニール処理を行った。不可逆温度は交流磁化測定 (PPMS, Quantum Design 社) の第三高調波成分のオンセットから求めた。磁場中 J_c 測定は液体窒素冷却下四端子法又は直流磁化測定から求めた。なお四端子法における J_c 値は $1\ \mu\text{V/cm}$ の電圧基準により決定した。

3. 実験結果

Fig. 1 に BSO 添加 GdBCO 線材について、成膜中の線速をかえた時の 8 T の磁場中 ($B_a//c$) の不可逆温度 T_{irr} の変化を示す。線速が速い程、 T_{irr} は低くなっており、より BSO によるピンングが弱くなっていることを示唆する。

Fig. 2 に BSO 添加 GdBCO 線材の低温での J_c - B 特性に対する線速の影響を比較する。IPL246 は線速 90m/h で 3 回成膜したのに対し、IPL235 は線速 30m/h で 1 回成膜した。TEM 観察の結果、両者の膜厚はほぼ同じ $1.3\ \mu\text{m}$ であり、 J_c に対する厚さの影響は無視できる。Fig. 2 より低温においても、線速が遅い方がより高い磁場中 J_c 値を示し、その差は低温になるほど大きくなっている。

77K での結果をあわせて考えると、線速が速いほど、より等方的なピン止め特性が得られる一方で、 $B_a//c$ の時のピン止め力が弱くなり、その結果、低温・高磁場での J_c や不可逆温度が小さくなると考えられる。実際の応用に

おいては、これらのことを考慮して、製造条件の最適化を行う必要がある。

4. 謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。なお、本研究で用いた IBAD-MgO 基板の提供いただきました、ISTEC の線材研究開発部の皆様に感謝致します。

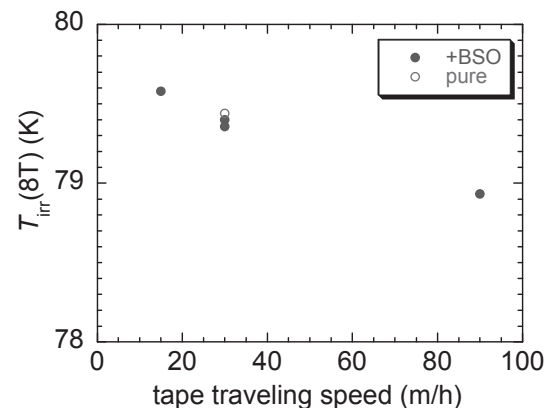


Fig.1 Dependence of irreversibility temperature at $B_a=8\text{T}$ ($B_a//c$) on the tape travelling speed during deposition of GdBCO layer.

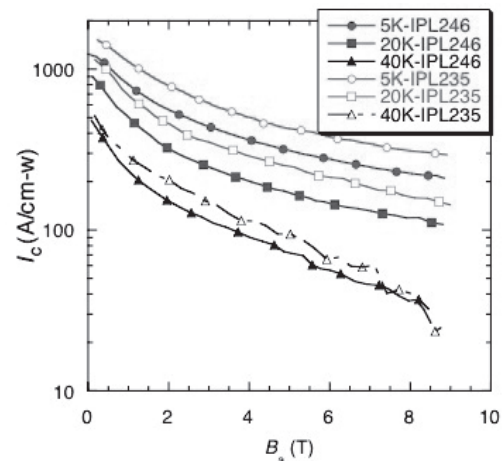


Fig.2 Effect of tape travelling speed during the deposition on the J_c - B curves of GdBCO+BSO. IPL246 was deposited at the travelling speed of $90\ \text{m/h}$ and 3 passes, while IPL235 was 30m/h and 1 pass.

参考文献

1. N. Chikumoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.14

RE 系超電導線材の磁場中 n 値特性 N value characteristics of REBCO coated conductor

藤田 真司, 大保 雅哉, 飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ)
FUJITA Shinji, DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.)
E-mail: sfujita@fujikura.co.jp

1. はじめに

近年、RE 系超電導線材を用いてコイル試作等が行われている。コイルの設計には線材の I_c - B 特性が必要であるが、より詳細な設計には I_c の磁場角度依存性や線材の E - J 特性が必要となる。 E - J 特性は簡便には n 値モデルで表現されるが、 n 値は温度や磁場に依存する。コイルに使用する線材の I_c と n 値の磁場依存性が分かると、コイル内の磁場分布計算と併せることで、コイル内に発生する電圧の分布を比較的簡単に計算できる。

今回、GdBCO 線材を用いて 77K~20K の範囲で磁場中の n 値を測定したので報告する。

2. 測定方法

測定に用いた線材は Hastelloy 基板上に IBAD 中間層を介して PLD 法により $1.6\ \mu\text{m}$ の GdBCO が成膜された線材である。77K、自己磁場での I_c は $550\ \text{A/cm-w}$ であり、 $10^{-7}\sim 10^{-6}\ \text{V/cm}$ での n 値は 32 である。

低温で測定を実施するため、線材はウェットエッチングにより約 0.5mm 幅にブリッジ加工した。ブリッジの長さは、より低電界の測定を可能にするため 100mm とした。ブリッジ加工後の 77K、自己磁場での I_c は $27\ \text{A}$ であり、 $10^{-7}\sim 10^{-6}\ \text{V/cm}$ での n 値は 27 である。ブリッジ加工により n 値が若干低下しているが、これはブリッジが長いためにブリッジ幅のバラつきが影響していると考えられる。

サンプルは伝導冷却により冷却し、 $\phi 200\text{mm}$ ボアの 3T マグネット中で 4端子法により測定した。外部磁場は基板面に対して平行方向 ($B \parallel ab$) と垂直方向 ($B \parallel c$) の 2 方向にそれぞれ印加して測定した。

3. 測定結果

Fig.1 に測定の例として 50K、 $B \parallel c$ 磁場で I - V 特性を示す。ここでは $10^{-7}\sim 10^{-6}\ \text{V/cm}$ の電界領域のみを示している。

Fig.2 に $B \parallel c$ 磁場の n 値の温度依存性を示す。 n 値は $10^{-7}\sim 10^{-6}\ \text{V/cm}$ での I - V カーブから算出したものである。Self field は低温では I_c が高くなりすぎたため 40K までしか測定できなかったが、77K~40K では n 値はほとんど変化しなかった。77K では磁場によって n 値は顕著に低下するが、60K 以下、1T 以上ではほとんど磁場に依存しない結果となった。また 60K~30K では n 値はほとんど温度に依存しなかった。Fig.3 に $B \parallel ab$ 磁場の n 値の温度依存性を示す。50K~40K で磁場中 n 値が大きく低下し、それより低い温度では増大する傾向が見られた。

RE 系超電導線材では低温で $B \parallel ab$ 磁場を印加した場合に n 値が低下する現象が報告されているが[1]、今回の結果は MOCVD 線材を用いて詳細に測定された結果[2]とも一致する。

当日はより低電界での測定結果についても報告する。

参考文献

- [1] L. Civale et al.: IEEE Trans. Appl.Supercond. 15 (2005) 2808.
- [2] S. Awaji et al.: Applied Physics Express 4 (2011) 013101

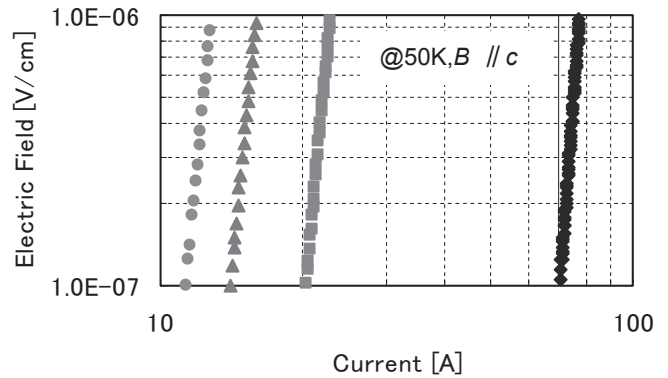


Fig.1 I-V property at 50K, $B \parallel c$

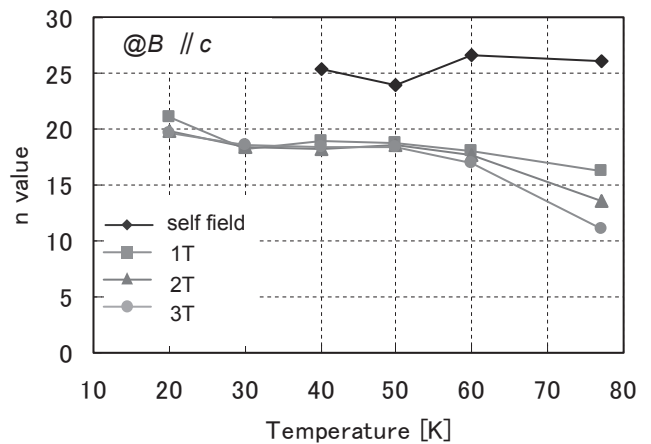


Fig.2 Temperature dependence of n value ($B \parallel c$)

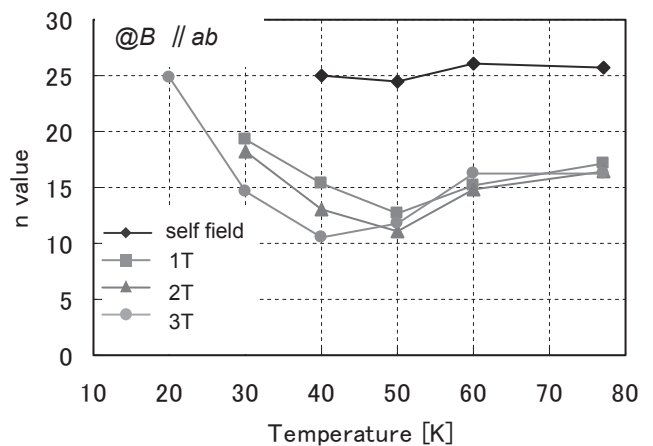


Fig.3 Temperature dependence of n value ($B \parallel ab$)

磁束クリープ・フローモデルの GA を用いたパラメータ解析における評価方法の検討及び GPGPU を用いた高速演算の性能評価

Investigation of evaluation procedure of parametric analysis of flux creep flow model with genetic algorithm and performance evaluation of fast operation with GPGPU

南 潤, 瓜生 幸太郎, 石橋 知裕, 木内 勝, 小田部 荘司(九工大)

MINAMI Jun, URYU Kotaro, ISHIBASHI Tomohiro, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji (Kyushu Inst. of Tech.)

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

1. はじめに

現在、高温超電導体の工学分野での応用に向け、盛んに研究がおこなわれている。高温下での超電導体の応用においては磁束クリープが及ぼす影響を考慮する必要があり、磁束クリープ・フローモデルを用いることによって解析可能である。しかし、解析を行う際に適切なパラメータの設定をしなければならない。前年度の研究から、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) を用いることによって磁束クリープ・フローモデルのパラメータの自動探索が可能となった[1]。GA を用いる場合、パラメータの組み合わせ等を個体とし遺伝的操作を施す。この個体が対象の解としてどれだけ優れているかを評価関数を用いて判断する。

また、磁束クリープ・フローモデルの計算を CUDA (Computa Unified Device Architecture) で並列化した。CUDA は、NVIDIA 社の GPU (Graphics Processing Units) 向けの統合環境であり、変数の型に GPU 特有の方しか使えない Cg (C for Graphic) とは違い C 言語のような言語を採用しているため汎用計算に向いている。CUDA で並列処理を行うことで高速な数値計算を行った。

2. 解析方法

今回求めるパラメータは、ピン力を強さの最頻値 A_m 、ピン力の分散を表す σ^2 、磁束クリープがないと仮定した場合の仮想的な臨界電流密度 J_{c0} の磁界依存性を示す γ 及び温度依存性を示す m の 4 つである。以上の 4 つのパラメータを事前に設定し導出した電界-電流密度 (E - J) 特性のデータに対してパラメータの推定を行う。1 解析 100 世代とし、50 回の解析を行う。なお比較する評価関数を用いた評価 1 とする。 P は評価値である。実験値 (E_{exp}) と解析値 (E_{theo}) のずれを表す d_k の定義は図 1 のようになっている。評価 2 も式 (1) を用いるが d_k の定義は図 2 となっている。評価 3 は E - J 曲線の立ち上がりの鋭さを表す n 値を考慮した式 (2) を用い、 d_k の定義は図 1 のようになっている。

$$P = \sum_{k=1}^N d_k \tag{1}$$

$$P = \sum_{k=1}^N d_k \sum_{l=1}^M \frac{|n_{exp} - n_{theo}|}{n_{exp}} \tag{2}$$

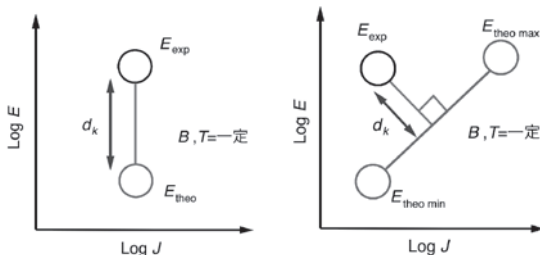


図 1: d_k の定義 1

図 2: d_k の定義 2

3. 結果及び検討

図3は各評価での最良解の世代ごとの評価値の推移を示している。図3の評価値は同じ条件下で解析したものである。表1は各評価でのパラメータを表している。図3から、評価3で行った場合が最も評価値が良くなり、評価1、評価2と続く。評価3が最も良い結果が得られたのは表1に示すように A_m と σ^2 が他の評価より最適解に近づいたからである。 σ^2 は n 値を決定する重要な要素でもある。そのため、 n 値を考慮することにより σ^2 が最適解に近づいたと考えられる。また、 σ^2 の変化に伴い、 σ^2 と関係の強い A_m も最適解に近づいたと言える。評価 2 は評価値が最も悪くなったが、解析時間は 3 つの中で最も早く解析することが出来た。

次に、この解析プログラムに CUDA プログラムを適用した。その結果を表 2 に示す。計算時間が CPU では 720 分かかったのに対し、GPU では 25 分と CPU に比べ約 29 倍速く計算することが出来た。

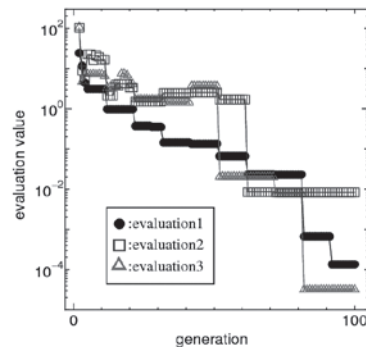


図 3. 各評価での世代ごとの評価値の推移

表 1: 各評価でのピンニングパラメータ

	A_m [A/m ²]	σ^2	γ	m
評価1	3.76×10^{11}	7.05×10^{11}	6.50×10^{-1}	2.41
評価2	3.07×10^{11}	4.90×10^{11}	6.40×10^{-1}	2.39
評価3	3.86×10^{11}	7.38×10^{11}	6.50×10^{-1}	2.40
最適解	3.80×10^{11}	7.20×10^{11}	6.50×10^{-1}	2.40

表 2: CPU と GPU の処理時間の比較

CPU (Intel Core-i7 870)	GPU (GeForce GTS 250)
720 [min]	25 [min]

4. まとめ

評価関数を変更することにより、GA を用いた磁束クリープ・フローモデルのパラメータ探索において解精度の向上が可能となった。また、CUDA プログラムを用いることで高速化することが出来た。

参考文献

[1] J. Minami, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.78

新しい転移概念による Y 系および Bi 系線材の臨界電流の理論的評価

Evaluation of critical current based on a new transition concept for high-temperature superconducting wires

石栗 慎一, 池上 大輔 (福井工業高等専門学校)

ISHIGURI Shinichi, IKEGAMI Daisuke (Fukui national college of technology)

E-mail: ishiguri@fukui-nct.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線材の臨界電流は一定温度の下では、磁界強度と磁界印加角度に依存するが、本研究では、臨界電流の評価式を新しい転移概念に基づいて電子理論の立場から理論的に導出した。この理論式中のパラメータは数値解析ではなく、物理的意味と次元をもつ。また、従来の評価式のようにたくさんの測定データからパラメータを求める必要がないため、汎用性ももつ。提案した転移概念と理論式の妥当性を確認するため、Bi 系線材と Y 系線材の両方の高温超伝導線材の臨界電流について、それぞれ磁界強度と磁界印加角度をいろいろ変えた場合で測定値と比較を行った。その結果、かなりの精度で測定値と一致する結果を得ることができ、本研究で提案した転移概念と理論評価式の妥当性を示すことができた。

2. 転移概念と評価式の理論的導出

従来の臨界電流に関する転移仮説は、磁束量子がローレンツ力により運動し、それに伴うダイナミクスにより電磁誘導により電圧が発生するといものである。しかしながら、これには以下の疑問点がある。

1) 転移後の物質内部は磁束量子の分布ではなく、均一磁界になっていなければならないが、上記の仮説ではそれを説明できず、さらに磁束量子の運動によりたくさんの磁束量子が物質端部に集まってしまう。一度このようになってしまった場合、電磁誘導で電圧は発生しない。

2) 上記の仮説では臨界電流密度を理論的に導出できていない。したがって、これまでの評価式にはかならず、物理的意味と単位の不明な数値パラメータが存在する。

そこで本研究では、新しい転移概念を提案し、そこから電子理論(量子力学)の立場から理論的に臨界電流を導出することに成功した。具体的には、まず単体の磁束量子に注目する。このとき、この単体磁束量子の周りにはシールド電流が還流している。これの波動関数^[1]を

$$\Phi = |\Phi| \exp(i\varphi) \quad (1)$$

$$\varphi = \oint \frac{q\vec{A}}{\hbar} d\vec{r} = 2n\pi$$

(i :虚数単位、 q :クーパー対電荷、 A :ベクトルポテンシャル、 \hbar :プランク定数)

とする。この磁束量子値はつねに $(h/2e)$ の値を保持することに注意する。印加磁界を大きくしていくと、磁束量子はその値を保持しなければならないため、その半径、つまりシールド電流の半径が小さくなる。さらに印加磁界を大きくしていくと、ある時点で、ピンの空間的半径とシールド電流の半径が一致するときがある。この瞬間が転移である。これ以上磁界を大きくしても、シールド電流の半径はピンの存在のためそれ以上小さくならず、したがって、シールド電流は壊れ、同時に注目している磁束量子も崩壊する。磁束量子の内部はもともとノーマル電子が多数存在するが、これらはクーパーペアの束縛エネルギーがない分だけ、運動エネルギーが大きい。したがって、磁束量子の崩壊にともない、この電子が超伝導領域に拡散し、次々とクーパーペアに衝突エネルギーを与え、このペアを壊

しノーマル電子がまた生まれ、これらの電子がさらに別のクーパーペアに衝突しエネルギーを与えるといことを繰り返すことで転移は全領域に達し、同時に磁界分布が均一になる。

この転移の考えと物理的洞察を併用して、その波動関数を求めると、

$$\psi = |\Phi| \exp\left(-\frac{eA}{2\hbar}|x|\right) \quad (2)$$

(e :電子電荷、 x :一次元における座標)

ここで、2次元電流シートに対して、平行磁界成分 B_{\parallel} と垂直磁界成分 B_{\perp} についての転移の波動関数を結合すると、最終的な臨界電流密度の表式を得る。

$$j_c = j_{c0} \exp\left\{-\left(\frac{ea^2}{\hbar} B_{\perp} + \frac{ead}{\hbar} B_{\parallel}\right)\right\} \quad (3-1)$$

(j_{c0} :ゼロ印加磁界における臨界電流密度、 a :ピンの半径、 d :二次元電流シートの厚さ)

磁界角度と磁界強度を導入して、

$$J_c = J_{c0} \exp\left\{-B\left(\frac{ea^2}{\hbar} \cos\theta + \frac{ead}{\hbar} \sin\theta\right)\right\} \quad (3-2)$$

(B :磁界強度、 θ :テープ線材に対する磁界印加角度)

3. 測定との比較

理論の妥当性を確認するために、市販 Y 系線材と Bi-2223 線材のそれぞれについて、77 K で磁界強度と磁界印加角度を変えた場合で測定値^[2]と比較を行った。図 1 に市販 Y 系線材でのその一例を示す。良い程度で測定値と合っていることがわかる。他の場合の測定データは当日報告するが、任意の磁界角度と強度について、おおむね妥当性を得た。式中のパラメータであるピンポテンシャル半径 a [m] と 2次元電流シートの厚さ d [m] も妥当な値であることがわかり本研究の有効性を示せた。

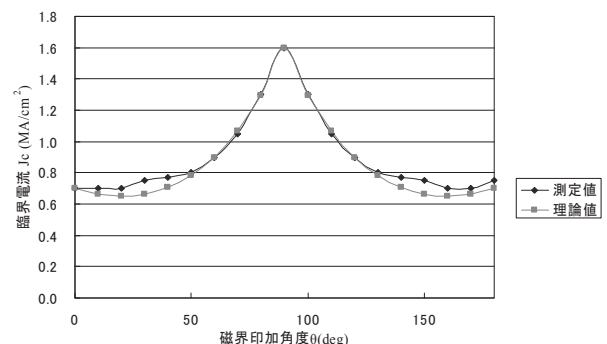


図1 臨界電流の磁界・角度特性 B=0.5 (T)

参考文献

- [1] M.Yamamura, M. Sugawara, O.Tsukamoto, M.Yamaguchi, M.Yamamoto, Technology of Superconductivity, Institute of Electrical Engineers of Japan, p.25
- [2] 李 潤錫 他:「市販 YBCO テープ線材の液体窒素温度における臨界電流密度の磁界角度依存性と磁束ピン止め」、低温工学 vol.44 No.12 p.561(2009)

メカニカルスリッタによる切断が薄膜線材の臨界電流密度分布に及ぼす影響

Influence of cutting by mechanical slit on J_c distribution of coated conductors

西野 竜平, 雨宮 尚之, 李 全, 中村 武恒(京大)

小西 昌也, 大松 一也(住友電工); 丸山 修, 大熊 武(SRL)

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

KONISHI Masaya, OHMATSU Kazuya (SEI); MARUYAMA Osamu, OHKUMA Takeshi (SRL)

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

1. はじめに

高温超伝導薄膜線材を用いた送電ケーブルの交流損失を低減する方法に薄膜線材の細線化がある。薄膜線材を細線化する方法の一つとしてメカニカルスリッタ(Fig. 1 左)を用いる方法がある。メカニカルスリッタにより線材を切り出す際、線材端部に歪みが生じる(Fig. 1 右)。この歪みが線材幅方向の臨界電流密度 J_c 分布に影響を与える可能性がある。その影響は薄膜線材の両端付近における臨界電流密度 J_c の低下を助長する。線材端部での臨界電流密度 J_c の低下は線材幅が小さい場合、交流損失に大きく影響する。

そこで、線材端部の歪みが臨界電流密度 J_c 分布へ与える影響を把握するため、磁気ナイフ法により線材幅方向の臨界電流密度 J_c 分布を計測した。

2. 実験方法

磁気ナイフ法に用いる実験装置の構成は Fig. 2 に示す通りである。対向した同型の C 型鉄芯コイルは、同じ強さで逆向きの磁界を C 型鉄芯コイルの間に発生させる。この磁界分布 B_z 中に薄膜線材を置き、電流を流すと、電流は磁界がゼロになる点(以下 Null line (Fig. 2)と呼ぶ)近傍に集中して流れる。これは臨界電流密度 J_c に磁界依存性があるためである。このように外部磁界を印加された薄膜線材の Null line における臨界電流 I_c は電流-電圧特性を測定することで求めることができる。また、薄膜線材の幅方向の臨界電流 I_c 分布は薄膜線材の幅に沿って一定間隔ごとに Null line を移動させることで計測できる。この時、一定間隔ごとに計測した臨界電流 I_c は Null line 近傍の臨界電流密度 J_c を強く反映している。したがって、磁気ナイフ法により計測した臨界電流 I_c 分布は薄膜線材の幅方向の臨界電流密度 J_c 分布の情報を含んでいる。この時、臨界電流密度 J_c 分布は計測した臨界電流 I_c 分布を数学的に変換することで求めることができる。

3. 実験結果

まず、Fig. 3 (a)L-A、(b)R-A は、メカニカルスリッタの刃の間隔を調整する過程で切り出した線材の臨界電流密度 J_c 分布の計測結果である。この時、メカニカルスリッタの刃の間隔は、②では相対的に広く、①、③では狭かった。メカニカルスリッタの刃の間隔が広い②の部分では、切断された薄膜線材(a)L-Aおよび(b)R-Aの②の端部で臨界電流密度 J_c 分布の肩が大きくなっていることが分かる。線材端部の断面写真観察から、メカニカルスリッタの刃の間隔が広いとき、線材端部で超伝導層に歪が生じてしまって、これが臨界電流密度 J_c を劣化させていると推察できる。次に、Fig. 3 (c)L-B、(d) R-B は、メカニカルスリッタの刃の間隔が均等になるように調整し、切り出した線材の臨界電流密度 J_c 分布の計測結果である。線材端部②の臨界電流密度 J_c 分布の肩は Fig. 3 (a)L-A、(b)R-A と比較して小さい。

以上より、メカニカルスリッタの刃の間隔が薄膜線材端部の臨界電流密度 J_c 分布の肩の大きさに影響を及ぼすことから、メカニカルスリッタの刃の調整が重要であることが明らかになった。

謝辞

本研究は、イットリウム系超伝導電力機器技術開発の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託のもと、

(財)国際超電導産業技術研究センターとの共同研究として実施されたものである。

参考文献

1. N. Amemiya: Journal of the Cryogenic Society of Japan, Vol. 45 No. 8 (2010) p.376
2. N. Amemiya et al.: "Lateral critical current density distributions degraded near edges of coated conductors through cutting processes and their influence on ac loss characteristics of power transmission cables" submitted to International Symposium on Superconductivity.

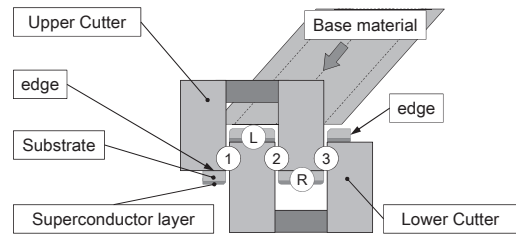


Fig. 1 Mechanical slit.

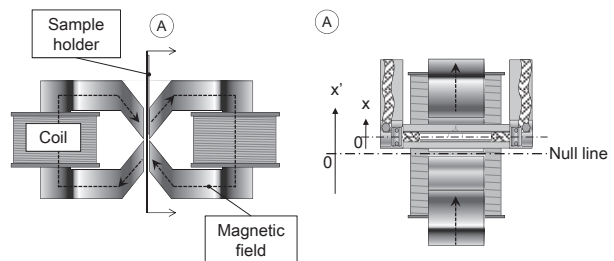


Fig. 2 Magnetic knife system.

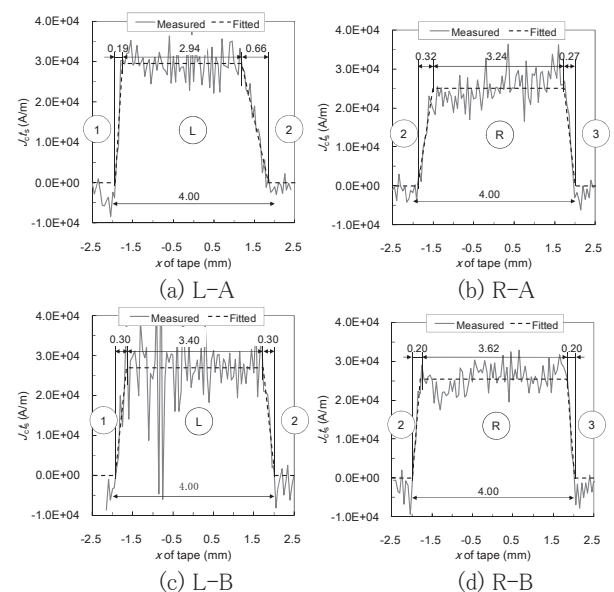


Fig. 3 J_c distributions measured by magnetic knife.

電流輸送特性のモデリングに基づく REBCO 線材の臨界電流密度マップ

 J_c mapping based on a modeling of current transport property in REBCO coated conductors

榊原 崇志, 兒玉 青樹, Fuger Rene, 井上 昌睦, 東川 甲平, 木須 隆暢(九大);
飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ); 和泉 輝郎 (ISTEC);

SAKAKIBARA Takashi, KODAMA Seiju, FUGER Rene, INOUE Masayoshi, HIGASHIKAWA Kohei, KISS
Takanobu (Kyushu Univ.); IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); IZUMI Teruo (ISTEC);

1. はじめに

高温超伝導線材の臨界電流密度 (J_c) 特性は、温度 (T) や磁場 (B) に対する依存性が強いことから、その詳細を明らかとすることが実用上重要である。これらの特性の表現方法としては、 J_c - B 特性を複数の温度条件下で測定し、それらの結果を同一平面上にプロットした J_c - B - T 特性が用いられているが、動作環境とコストを含めた機器設計・検討を行う際に必要とする情報の全てを得ることは困難である。そこで、本研究では臨界電流特性の温度、磁場依存性を様々な形式でマッピングすることを試みたので報告する。

2. 実験及び電流輸送特性のモデリング

PLD 法により作製された $Gd_{1-x}Ba_xCu_3O_{7-\delta}$ (GdBCO) 線材の電流-電圧 (I - V) 特性を、四端子法を用いて系統的に測定した。得られた実験結果から、電流輸送特性の定式化に必要なパラメータを抽出した。電流輸送特性のモデリングには、我々がこれまで提案してきたパーコレーション転移モデルを用いている[1,2]。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 に、モデリングにより得られた J_c - B 特性と実験結果との比較を示す。両者は幅広い温度、磁場領域に亘って良く一致しており、我々の用いたモデリング手法が有効であることが確認できる。本モデリング手法を用いることで、任意の温度、磁場における電流輸送特性を推定できることから、様々な形式によるマッピングが可能となる。その一例として、温度-磁場平面上に等 J_c 曲線を求めた結果を Fig.2 に示す。このような等 J_c 曲線は、任意の温度、磁場における J_c 値の参照や、動作温度の検討に有効である。モデリングの詳細ならびに、他の形式によるマッピングについては、当日報告する。

謝辞

本研究の一部は、イットリウム系超伝導電力機器技術開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施するとともに、日本学術振興会の科研費 (20360143) の助成を得て行ったものである。

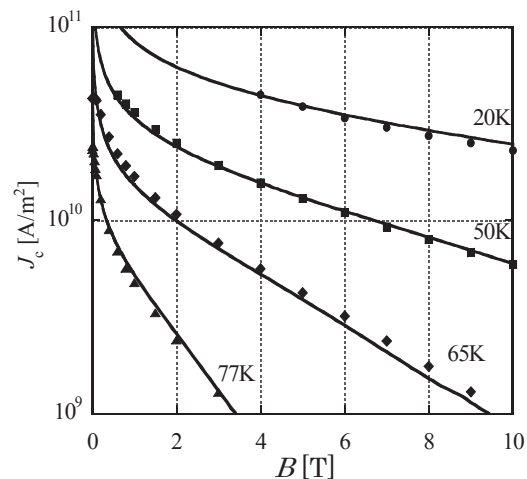


Fig.1 J_c - B - T characteristic. Dots and lines are measurement results and analytical expressions, respectively.

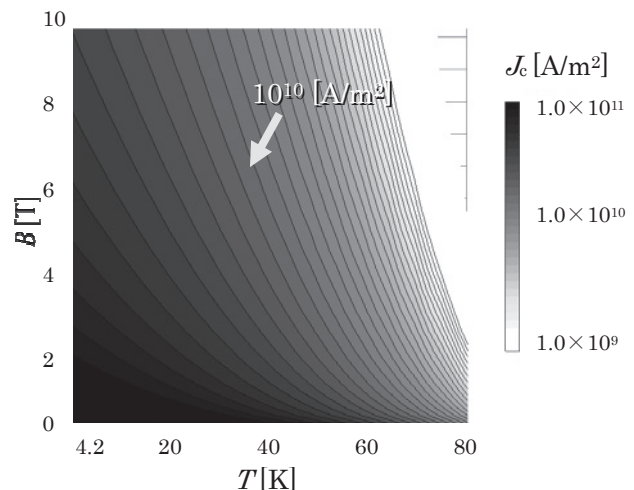


Fig.2 Contour map of J_c in B - T plane.

参考文献

1. T. Kiss et al., SuST 12 (1999) 1079,
2. 井上昌睦 他, 2010 年秋季低温工学・超電導学会, 1P-p35

第三高調波電圧誘導法によるバイクリスタル SrTiO₃ 基板上 YBCO 薄膜の J_c 磁場依存性の測定

The magnetic field dependence of J_c for YBCO thin film on SrTiO₃ bicrystal substrate measured by the third harmonic voltage method

沖田 健佑, 畠中 裕宅, 藤吉 孝則, 末吉 哲郎(熊本大学)

OKITA Kensuke, HATANAKA Yuta, FUJIYOSHI Takanori, SUEYOSHI Tetsuro(Kumamoto Univ.)

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

1. はじめに

結晶粒界などによる弱結合は、高温超伝導テープ線材の臨界電流密度 J_c の大きな減少を引き起こす。そのため、この弱結合を非破壊・非接触で検出する方法が必要となる。

本研究では、超伝導薄膜の J_c を非破壊・非接触で、さらに局所的に測定できる第三高調波電圧誘導法を用いて、SrTiO₃ バイクリスタル基板上に作製した YBCO 薄膜の J_c の磁場依存性を測定し、通電法による測定結果と比較する[1]。

2. 実験

傾斜角 10° の SrTiO₃ バイクリスタル基板上に厚さ 239nm の YBa₂Cu₃O₇ 薄膜を PLD 法により作製した。第三高調波電圧誘導法による J_c の磁場依存性の測定は、結晶粒界の直上にコイルを置き、ネオジウムマグネットにより磁場を印加して行った。薄膜とマグネットの距離を変えることにより、磁場は 0~0.25T まで変えることができる。本測定では、駆動コイルと誘導コイルを分離した 2 コイル法を用いた。ポビンの内側に誘導コイルを 200 回巻き、外側に駆動コイルを 300 回巻いた。各コイルは線径 50 μ m のエナメル銅線から成り、誘導コイルは内径 1mm、外径 2mm、高さ 1mm、駆動コイルは内径 2mm、外径 4.75mm、高さ 1mm、コイル定数は 58.3mm⁻¹ であった。 J_c は電界基準 $E_c = 5.0\mu$ V/m より算出した。

3. 結果と考察

Fig.1 に結晶粒界の直上にコイルを置いたときの $B=0$ T, 0.05T, 0.25T における V_3 - I_0 特性を示す。自己磁場における V_3 - I_0 特性から V_3 が 2 段階で立ち上がっていることが分かる[2]。1 回目、2 回目の立ち上がりは、それぞれ粒間と粒内に流れる遮蔽電流の臨界値を反映していると考えられる。また、YBCO 薄膜に印加する磁場を強くしていくと、2 段階の立ち上がりが単調な立ち上がりに変化している。これは、YBCO 薄膜に印加する磁場を強くしていくと、粒間に流れる遮蔽電流が急激に減少するので、遮蔽電流が粒内電流のみで構成されるようになるためであろう。ただし、結晶粒界によるエッジ効果を考慮する必要がある。このことを確かめるために、通電法による J_c の測定結果と比較を行う。

Fig.2 に第三高調波電圧誘導法と通電法でそれぞれ測定した J_c 磁場依存性を示す[3]。○, ●が結晶粒界の直上にコイルを置いたときの第三高調波電圧誘導法によって 1 回目と 2 回目の立ち上がりからそれぞれ見積もった J_c 値である。一方 △, ▲は、通電法によってそれぞれ粒間と粒内を測定した J_c 値である。粒内を測定した▲と比較すると、比較的近い磁場依存性を得ることが出来た。次に、○は低磁場では、かなり△に近い値を示しているが、通電法の場合とは異なり、磁場と共に増加している。したがって、第三高調波電圧誘導法による○の値は粒間と粒内に流れる遮蔽電流の分流によって決まっていると考えられる。

4. まとめ

本研究では、第三高調波電圧誘導法を用いて SrTiO₃ バイクリスタル基板上に作製した YBCO 薄膜の J_c 磁場依存性を評価した。その結果 V_3 - I_0 特性が 2 段階で立ち上がり、YBCO 薄

膜に印加する磁場を強くすると V_3 の立ち上がりは単調となる。また、 J_c - B 特性を通電法の測定結果と比較することにより、 V_3 - I_0 特性の 1 回目の立ち上がりは、粒間、粒内に流れる遮蔽電流の分流によって決定されると考えられる。

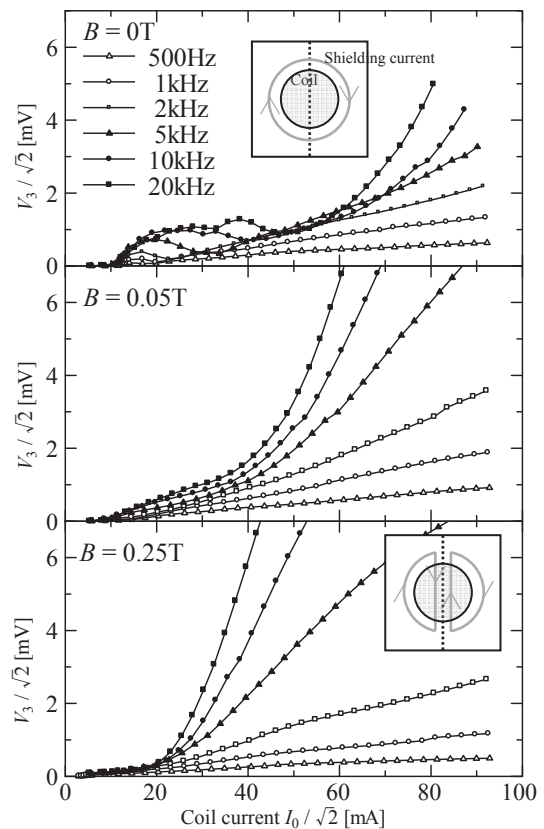


Fig.1 The third harmonic voltage V_3 as a function of the coil current $I_0\sqrt{2}$ at $B = 0$ T, 0.05 T, 0.25 T.

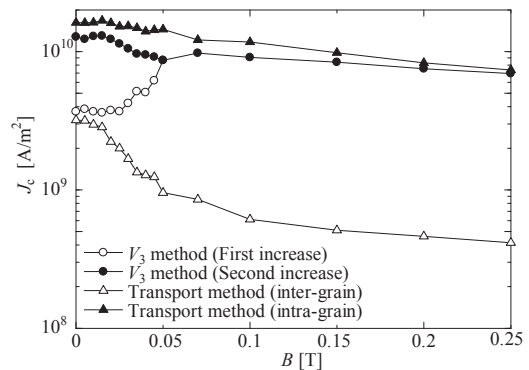


Fig.2 The magnetic field of J_c .

参考文献

1. H. Yamada, et al.: Physica C **451** (2007) 107.
2. H. Yamaski, et al.: Supercond. Sci. Technol. **17** (2004) 916.
3. D. Dimos, et al.: Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 219.

GdBCO 超電導線材の小型パンケーキコイル通電特性

Characteristics of the pancake coils using GdBCO coated conductor

大保 雅哉, 藤田 真司, 原口 正志, 日高 輝, 飯島 康裕, 斉藤 隆(フジクラ)

DAIBO Masanori, FUJITA Shinji, HARAGUCHI Masashi, HIDAKA Hikaru, IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura Ltd.)

E-mail : mdaibo@fujikura.co.jp

1. はじめに

RE 系超電導コイルは冷却時に線材に加わる熱応力に留意して含浸コイルを製作する必要があり、製作されたコイルの健全性はコイルの電流-電圧特性から算出される低電界 (10^{-7} V/cm 以下) の n 値をもって健全性を示す必要性が指摘されている。また、超電導コイルを伝導冷却下で適用する際、コイルの熱暴走を避けるためコイル内発生電圧を定量的に把握する必要がある。今回、GdBCO 線材を用いて含浸コイルを試作し、コイル内磁場分布と線材の磁場角度依存性からコイル内電界分布およびコイル I_c を算出し、液体窒素中でのコイル I_c 実測値と比較した。また、劣化なく製作されたパンケーキコイルを 6 層積層して伝導冷却下での通電特性を評価したので、その結果を報告する。

2. パンケーキコイル試作と液体窒素中通電評価

使用した線材の諸元を Table. 1 に示す。線材は無誘導巻き状態で液体窒素中で電流-電圧特性を測定し、線材 I_c (10^{-6} V/cm 定義)、線材 n 値 ($10^{-7} \sim 10^{-6}$ V/cm 定義) を測定した。次に、線材を FRP 巻枠に巻線し Table. 2 の諸元のパンケーキコイルを製作し、パンケーキコイルを 2 個ずつ積層 (No.1-2, 3-4, 5-6) した状態で含浸し、液体窒素中で通電試験を実施した。試作した 2 層コイルの外観を Fig.1 に、試験結果を Table. 2 に示す。コイル I_c は 10^{-6} V/cm で定義し、コイル n 値は $10^{-8} \sim 10^{-7}$ V/cm で定義している。Fig.2 にはコイル含浸前後の E-I 特性例を示す。Fig.2 より、 $10^{-9} \sim 10^{-6}$ V/cm の領域で特性が一致しており、含浸による劣化はないと考えられる。また、Table. 2 より、すべての製作したコイルにおいて n 値が 30 以上でありコイルが健全であるといえる。

さらに、Fig. 3 にはコイル内磁場分布と線材の磁場角度依存性から算出した No.2 のコイル I_c 計算値とコイル I_c 時 (10^{-6} V/cm 定義) における各ターンの電界分布計算結果を示す。コイル I_c は実測値とほぼ一致しており、77K のコイル I_c 時ではコイル内層より 8 ターン目で 9.2×10^{-6} V/cm の電界が発生する計算結果であった。なお、他の 5 個のコイルについてもコイル I_c 計算値と実測値が 5% 以内であることを確認した。

3. 積層(6層)コイルの伝導冷却通電試験

2 層コイル間およびコイル上下に無酸素銅を冷却板として取り付け、パンケーキコイルを計 6 層積層したコイルを試作し、GM 冷凍機による伝導冷却下で通電試験を行った。各パンケーキコイル両端で発生電圧を測定し、積層コイル中心磁場の測定も行った。通電電流は約 1A ずつ上げていきコイル内で熱暴走が確認された時点で消磁した。77, 60, 50K の各温度での通電試験結果を Table. 3 に示す。 10^{-7} V/cm 定義のコイル I_c 付近で熱暴走が確認された。また、50K では 166.4A 通電時に中心磁場 1.27T に到達した。

Table 2 Specifications of REBCO single pancake coils

Coil No.	1	2	3	4	5	6
Inner dia. (mm)	60	60	60	60	60	60
Outer dia. (mm)	132	131	132	132	132	133
Turns	100	100	100	100	100	100
Tape Length (m)	31	31	31	31	31	31
Coil I_c @77K (A)	88	85	85	85	88	90
n value@77K	30	31	33	35	35	33

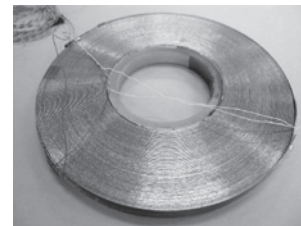


Fig.1 two layer pancake coils

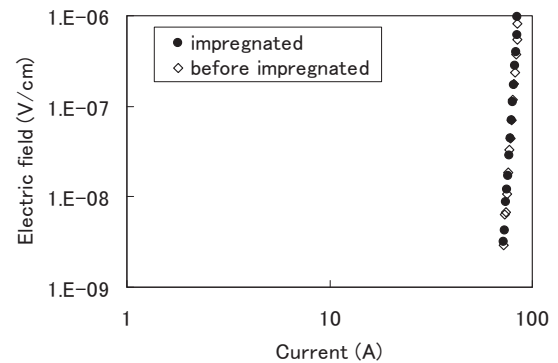


Fig.2 E-I characteristics of pancake coil at 77K (Coil No. 4)

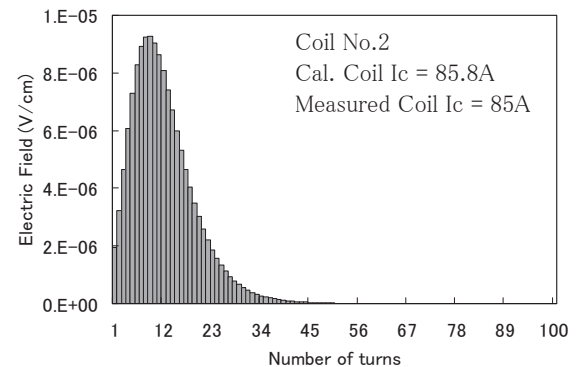


Fig.3 Electric field distributions of pancake coil at 77K

Table 1 Specifications of GdBCO tapes

Type	FYSC-SC05 Cu (0.1mm) / Hastelloy (0.1mm)
Thickness (mm)	0.3
Width (mm)	5
I_c @77K, s.f. (A)	204~219
n value@77K, s.f.	32~37

Table 3 Test results of stacked pancake coils

Temp.	Thermal runaway currents (A)	Central magnetic field (T)	Coil I_c (A) (10^{-7} V/cm)
77K	62.8	0.45	61.5
60K	129.6	0.98	130
50K	166.4	1.27	170

パンケーキコイル状酸化超伝導並列導体の電流分流特性の検討

Study on the current sharing properties of oxide superconducting parallel conductors wound into pancake coil

宇都 浩史, 澤田 俊幸, 富岡 章, 岩熊 成卓(九州大学);
林 秀美, 岡元 洋(九州電力);
大熊 武, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC);

UTO Hiroshi, SAWADA Toshiyuki, TOMIOKA Akira, IWAKUMA Masataka (Kyushu-Univ.);
HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power CO.);
OHKUMA Takeshi, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)
E-mail: uto@sc.kyushu-u.ac.jp

1 はじめに

酸化超伝導線を電力機器の巻線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となる。現在の酸化超伝導線材は、結晶の配向性を向上させるためにテープ状に加工されているため、大電流量化するためにはテープ状の素線を並列に重ね合わせて並列導体を構成する必要がある。しかし、単に積層しただけでは自己磁界効果によりそれぞれの素線に流れる電流が偏ってしまうため、適切な位置で素線の位置を入れ替える転位を施し、電流分流比を均一にしなければならない。

本研究では YBCO 超伝導テープ線材を用いて並列導体を構成し、パンケーキコイルを作成した場合に電流分流比を均一にする転位方法について、また考案した転位方法の機器適用可能性について考察をしたので報告する。

2 転位方法

これまでの研究により、ソレノイドコイルにおける最適転位方法は確立されている。しかし転位を施したソレノイドコイルの製作は困難である。そこで、今回は比較的製作が容易なパンケーキコイルにおける最適転位方法の確立を目指した。その為に本研究では、YBCO 超伝導テープ線材 3 本、4 本、5 本により構成されたパンケーキコイル型並列導体において、最も電流分流比が均一になる転位方法を提案し、その転位方法の有効性を検討した。Fig.1 に素線数 4 本における最も有効な転位方法を、Fig.2 にその場合のパンケーキコイルの電流分流比を示す。#1~#4 はそれぞれ素線の番号である。

3 コイル形状変化及び巻き乱れの及ぼす影響

最適転位方法を実用化するためにはコイルの大型化を図る必要がある。そこでコイルの大型化への適用のために、コイル形状変化による電流分流特性への影響について検討を行った。パンケーキコイルの枚数を1枚から増やした場合、ターン数を一定にしてコイル内径を変化させた場合、そしてコイル内径を一定にしてターン数を変化させた場合について検討を行った。また、これまでは、コイルがきれいに巻かれている状態での検討を行ってきたが、実際にコイルを作成する際には巻き乱れが生じる。そこで巻き乱れが起きた際に電流分流比にどれだけの影響が出るかの検討を行った。今回は素線数 3 本のパンケーキコイルを想定して解析を行った。

4 結論

素線数が 3 本、4 本、5 本の際に並列導体をパンケーキ状に巻いた場合の最も電流分流比を均一に近づける構成法を提案した。またこの補正方法ではコイル形状を変化させても電流分流比の変化がほとんど見られず、巻き乱れの影響も小さかった。以上の事から、考案した転位方法の機器適用可能性を示すことが出来た。

5 謝辞

本研究は、イットリウム系超伝導電力機器技術開発の一環として、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。

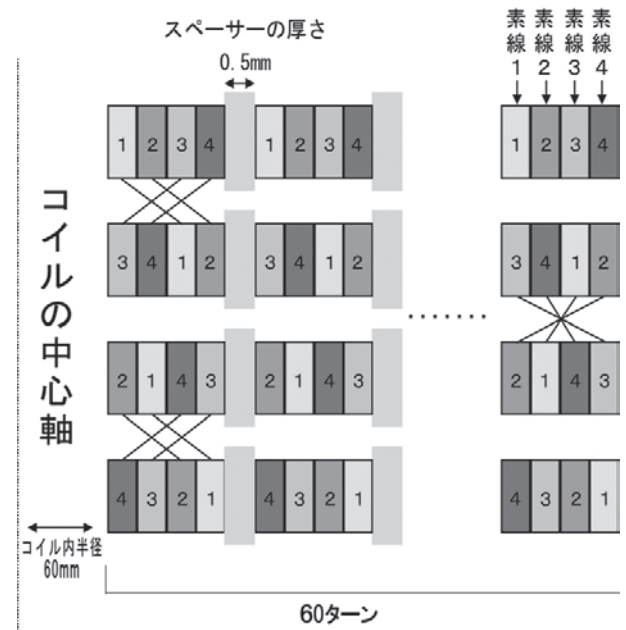


Fig.1 Most effective transposition pattern of 4-strands parallel conductor

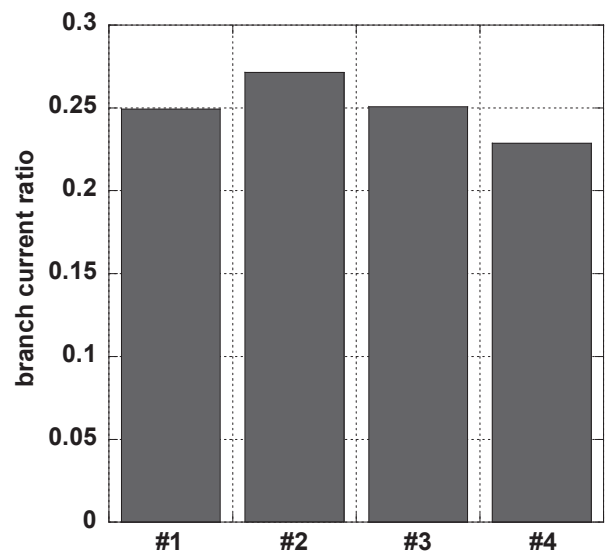


Fig.2 The branch current ratio in a 4-strands parallel conductor

超伝導二本転位並列導体の付加的交流損失に関する検討

Examination concerning an additional AC loss of transposed two parallel SC conductors

森脇 大輔, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九州大学); 林 秀美, 岡元 洋(九州電力); 大熊 武, 五所 嘉宏, 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC); MORIWAKI Daisuke, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo(Kyushu-Univ.); HAYASHI Hidemi, OKAMOTO Hiroshi(Kyushu Electric Power Co.); OHKUMA Takeshi, GOSHO Yoshihiro, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh(ISTEC);

E-mail: moriwaki@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

我々は大電流量酸化超伝導体の構成法として、素線を用いて巻線を行い、その途中で転位を施す方法を提案している。本研究はこの転位並列導体に不均一な外部磁界を印加した場合に発生する付加的交流損失を定量的に明らかにすることを目的としている。

今回は、巻き数の半分で転位し、素線の途中で巻き乱れが発生した場合の二本転位並列導体の付加的交流損失について解析を行った。

2. 並列導体の交流損失

図1は二本転位並列導体をNターンの1層コイルに巻き、全体の巻き数の半分の位置で転位を行い、さらにコイルの途中で巻き乱れが起こり、これより外側のターンがすべて $\angle l$ ずれた場合のコイル鳥瞰図である。図2は想定した導体に印加されるn次曲線の磁界分布のグラフである。コイルの真ん中の位置での磁界振幅を B_m とした。このように巻き乱れのずれがあると並列導体に磁束が鎖交し、それを打ち消すように遮蔽電流が発生する。その遮蔽電流が素線の臨界電流値に達しない場合の、非飽和条件下の付加的交流損失の式は次式で表される。

$$W = \frac{1}{K} \frac{\pi \omega \tau}{1 + (\omega \tau)^2} \frac{1}{2N^2 \mu_0 d_s w} \left(\frac{\Phi_{B(x)}}{L} \right)^2$$

一方、遮蔽電流が臨界電流値に達する場合である飽和条件下における交流損失は次式で表される。

$$W = \frac{2d_s I_c}{N^2 u w} \left(\frac{\Phi_{B(x)}}{d_s L} - \mu_0 \frac{K}{u} I_c \right)$$

3. 考察

図3は、巻き乱れが転位位置から25巻き目で発生し、そのずれ幅が $\angle l/w=10$ の場合の付加的交流損失の磁界振幅 B_m 依存性である。その他に巻き乱れが1巻き目で発生した場合、50巻き目で発生した場合についても解析を行った。その結果、いずれの場合にも付加的交流損失は、磁界振幅 B_m が大きいほど大きくなり、遮蔽電流が臨界電流値に達し飽和状態になると付加的交流損失は一気に増大することがわかった。

さらに、上記の解析結果に加え実際に二本転位並列導体を図1のように巻きつけた1層コイルを試作し、コイル長さ方向に分布を持つ外部磁界が印加された場合に発生する付加的交流損失をピックアップコイル法により測定し、実験結果と解析結果との比較および考察を行う。発表当日は、実験の詳細および実験結果と解析結果の比較と考察についても報告する。

4. 謝辞

本研究は、イットリウム系超伝導電力機器技術開発の一環として、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。

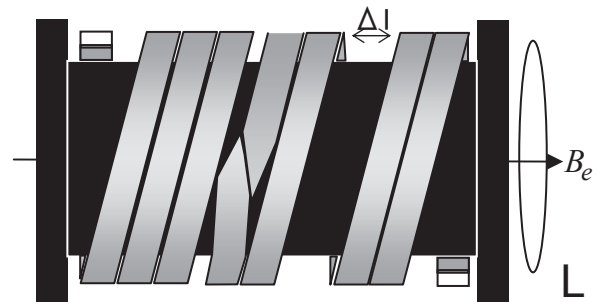


Fig.1 Transposed parallel SC

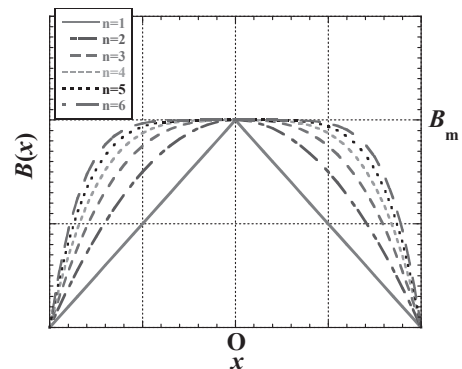


Fig.2 Magnetic field distribution

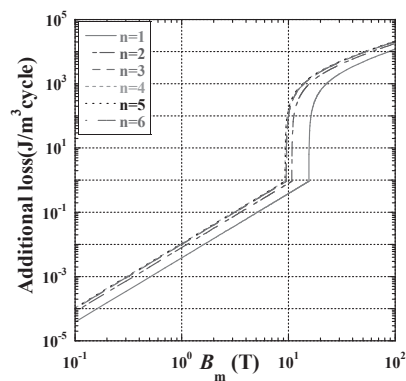


Fig.3 The gap of rolling disorder dependences of the Additional loss

大電流容量Y系高温超電導導体への転位構造の適用

Feasibility of large-current capacity HTS conductors with transposed YBCO tapes

柳 長門, 三戸利行, 田村 仁 (NIFS);, 岩熊成卓 (九大), 青木裕治 (昭和電線), 和泉輝郎, 塩原 融 (ISTEC-SRL)

YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki, TAMURA Hitoshi (NIFS); IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.), AOKI Yuji (SWCC); IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)

E-mail: yanagi@nifs.ac.jp

1. はじめに

高温超電導(HTS)線材の今後の電力機器等への応用において、特に大きな蓄積磁気エネルギーを伴う大型超電導マグネットへの適用を考えると、方向性の一つとして、大電流容量の導体を用いることが考えられる。これまでのところ、HTS線材のマグネット応用については、線材単体でのコイル巻線が主として想定されてきたため、大電流容量の導体開発はまだ本格化していない。ここで、多数本の線材を用いて大電流を流す際には、線材間の電流分布を均一にするとともに交流損失を低減するために、線材間に転位構造を入れることが有効であることが示されている [1]。ただし、導体としてコンパクトに線材を集合する場合、HTS線材はテープ形状であるため、低温金属系導体のように素線間に撚線構造を採用して転位を施すことは難しい。そこで、Y系線材を用いてどのような転位構造が適正であるかを検討することは、今後のマグネット応用を考えるうえで重要な課題であると考えられる。

2. 線材間接続方式による転位型導体の製作

Y系線材間に転位を施した導体の開発例としては、ドイツのカルスルーエ工科大学 KIT を中心に開発が行われている Roebel 型導体が挙げられる [2]。この導体ではテープ形状の線材をパンチングで切り欠くことでミアンダー形状に加工し、それらを撚り合わせて転位構造を実現する。ここで、この製作方法では、最初にテープ線材を切り欠いたものを用意する必要があるため、結果として線材の半分近くが捨てられることになってしまい、問題と考えられる。そこで、今回我々は、短尺の線材を途中で接続することによって実効的にミアンダー構造を入れ、Roebel 型導体を構成する方式を考えた。この方式の導体では、接続部におけるジュール発熱を、交流損失やその他の発熱要因に対して小さく抑えることで、準超伝導体として成立させることが可能となる。また、適用するコイルの仕様に合わせて、転位の導入位置やピッチを自由に設定できることも特長である。

この方式を採用して、今回、5 mm 幅の MOD 線材を用いて短尺導体を製作した。線材幅は 5 mm、臨界電流は温度 77 K、自己磁場において ~ 130 A である。サンプルでは、この線材を 20 枚用いているが、これは 20 K、8 T の条件で 10 kA 級の導体となる仕様である。導体全体の転位長は 1200 mm として設定し、これをもとに個々の線材のミアンダー構造のピッチ長を 600 mm、接続部の長さを 60 mm とした。導体の断面図とミアンダー構造の線材 20 本を実際に撚り併せて銅ジャケットの門型部に収めた様子を図1に示す。銅ジャケットには蓋部をかぶせて全体を半田付けで固めた。

3. 通電試験結果

上記のように製作した導体サンプルについて、液体窒素中、外部磁場なしの条件で通電試験を行った。臨界電流の測定時に得られた電圧タップ(長さ 120 mm)の波形を通電電流に対してプロットしたものを図2に示す。この場合、導体全体の臨界電流は、1800 A であった。これに対して、レファレンスとして試験した転位を施さない単純積層構造の導体については、臨界電流は 2050 A であった。両者の差については、導体内部

で各線材にかかる自己磁場を考慮することで説明でき、特に、Roebel 型導体については、線材間に転位構造が存在するために電流が一樣に流れ、結果として全体の臨界電流が低下するものと解釈できる。この結果より、この導体の製作方法自体については、大きな問題はないことが確認できた。

一方、観測された電圧波形を拡大すると、線材間の接続抵抗についても調べることができ、導体長 1.2 m あたり 22 n Ω と評価できる。これに対して、線材1本の接続抵抗の実測値から予測した全体抵抗は 1.2 m あたり 24 n Ω であった。よって、この導体の製作では多数本の線材間接続を行ったが、全体としてはほぼ予測どおりの接続抵抗となっていたと言える。なお、導体に曲げ歪みを与えた通電試験も行ったところ、現状のサンプルでは 0.4%の曲げ歪みにおいて臨界電流が 16%ほど低下する結果となった。今後、線材の転位ピッチ等の最適化を図ることで、特性改善を行う計画としている。

4. 謝辞

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) の研究開発委託事業として行いました。

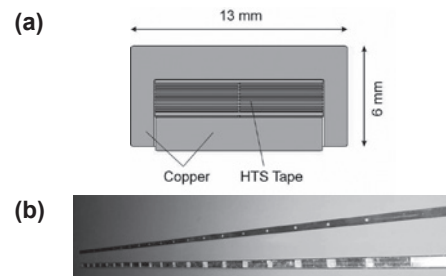


Fig. 1 (a) Cross-sectional image of a 10-kA class YBCO conductor and (b) a 1.2-m conductor sample with a Roebel-assembled bundle of tapes formed by joints.

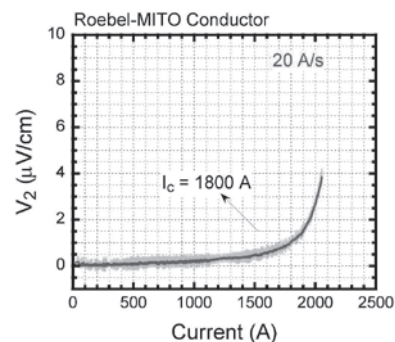


Fig. 2 Critical current measurement of a Roebel-type conductor at 77 K, self-field.

参考文献

- [1] M. Iwakuma et al., *Physica C* **469** (2009) 1726.
- [2] W. Goldacker et al., *Supercond. Sci. Technol.* **22** (2009) 034003.

マグネットの分割巻き設計を簡便にする図式手法

Graphical method to design split magnet

海保 勝之, 山崎 裕文(産総研)

KAIHO Katsuyuki, YAMASAKI Hirofumi (AIST)

E-mail: k-kaiho@aist.go.jp

1. はじめに

高温超電導体を用いて製作されたマグネットは電気機器等への広い応用が期待される。実用化が進んでいる高温超電導体はテープ状であり、流すことができる電流値は超電導体に加わる磁界の大きさだけでなく、方向にも影響を受ける。このためマグネットの設計に当たっては巻き線各部の磁界を考慮に入れて通電可能な最大電流を決定する必要がある^[1]。本論文においてはこのように複雑な特性を有するマグネットを2種の異なる導体を用いて巻く(分割マグネット)場合の最適な組み合わせを簡便に知る事ができる図式手法について述べる。マグネット分割により、必要な導体コストを削減できる。

2. 断面積の異なる2種の導体の場合

マグネットを製作するのに必要な超電導体の体積を最小にすることが最適な組み合わせであるとして検討を進める。マグネットは均一に巻かれ必要な磁界を発生できているものとしてスタートし、そこから必要な超電導体をできるだけ多く減らすことを行う。電流の最大値は経験磁界が最も厳しい条件で決定されている。マグネットの経験磁界は場所によって異なり、条件が緩やかな部分では通電電流値をより大きくすることができる。逆に言えば、このような部分には、より断面積の小さな導体の使用が可能である。全ての経験磁界に合わせて導体を変えることは不可能であり、ここでは先ず2種類の断面積を有する導体を用いた場合の最適化について述べる。

Fig.1 に最適分割点を見出す図式方法を示す。Y 座標に超電導体の臨界電流密度 J_c 、X 座標に各臨界電流密度以上の電流を流す事ができる巻き線部の体積をプロットする。つまり、a 点は最も経験磁界が厳しい条件であるため、臨界電流密度が最も小さく、巻き線部全体にこの電流密度で電流を流す事が可能である。b 点は最も磁界の条件が緩やかで、この電流密度で電流を流す事ができるのは、レーヤー巻なら一層、パンケーキ巻なら2パンケーキ分の体積である。

最適分割点を求めるには、a 点を通り X 軸に平行な直線 a-c、任意の臨界電流密度の点 d と原点 O を結ぶ直線 d-o、d から X 軸に下ろした垂線 d-e の3本の直線で囲まれた L の長さを最大にするよう d 点を求める^[2]。このときの臨界電流密度、体積が分割点となる。d 点以上の臨界電流密度を有する部分の導体断面積は d 点の臨界電流密度が臨界電流となるように導体の断面積を小さくする事ができる。線分 a-c に対する L の長さの割合は節約できる超電導体の体積の割合に比例しており、Fig. 1 の特性から分割が有効であるか否かが容易に推定できる。Fig. 1 の特性が急峻に変化している場合は分割がより有効であり、緩やかに変化している場合は分割の効果は余り期待できない。

3. 臨界電流密度の異なる導体を組み合わせる場合

テープ状超電導体は人工ピンの導入により臨界電流密度の角度依存性が複雑に変化する^[3]。経験磁界に応じた導体の選択もマグネット設計には重要となる。このように特性の異なる2種の導体を組み合わせ分割マグネットを設計する場合の方法について述べる。

Fig.2 に示すように、2種の導体について Fig.1 と同様なプロットを行う。但し、2種の導体の特性がプロットされるため、2本の曲線が描かれる。より臨界電流密度が大きい値を結ぶ曲線を用いて、Fig.1 に示すと同様の手続きにより、最適な分割

点 d を決定する。Fig.2 の場合、体積 o-e は A 導体、それ以外は B 導体を用いるのが最適となる。

なお、この Fig.2 に示す2種の導体のプロットを Y 座標について、臨界電流密度/コストとすれば、最も低コストの分割マグネットが設計できる。

4. まとめ

2種類の導体を用いてマグネットを設計する場合の作業を簡便にする図式手法について述べた。マグネット巻線上の制約を考慮する事により任意の形状(パンケーキ型、ソレノイド型、レーストラック型、等)に適用可能である。

本方法の拡大により、より多い数の分割設計も可能であるが、手続きの煩雑さを考慮すると実用上は3分割程度である。

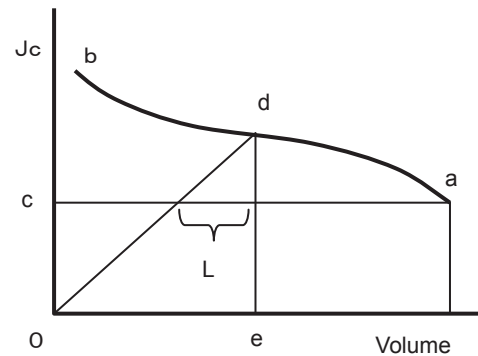


Fig.1 Graphical method of minimizing the winding volume for the two sectioned magnet.

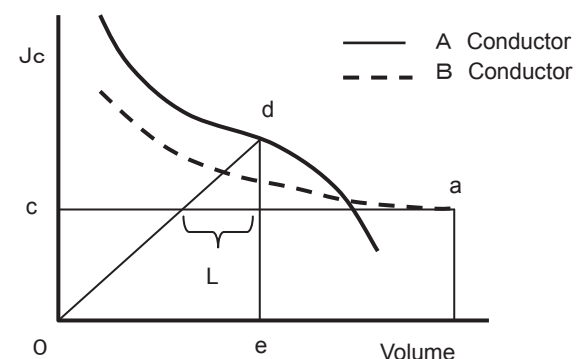


Fig.2 Graphical method of minimizing the winding volume for a magnet constructed from two different superconducting materials.

参考文献

1. 駒込 他: 83 回低温工学・超電導学会、12 月(2010) p236
2. K.Kaiho et al.: Cryogenics, Oct (1976) P587
3. 山崎 他: 83 回低温工学・超電導学会、12 月(2010) p252

SMES 応用を想定した YBCO コイルのクエンチ検出と保護

Quench Detection and Protection in YBCO Coil for SMES application

大西 秀明, 青木 佳明, 鈴木 貴裕, 室町 和輝, 王 旭東, 石山 敦士(早稲田大学);
式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力); 植田 浩史(大阪大学)

ONISHI Hideaki, AOKI Yoshiaki, SUZUKI Takahiro, MUROMACHI Kazuki, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi
(Waseda Univ.); SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

現在, NEDO プロジェクトにおいて通電容量 2kA, 絶縁電圧 2kV, 運転温度 20K の SMES 用伝導冷却 Y 系超電導コイルの開発が進められている。その中で, 我々は結合損失を抑えるために素線絶縁した Y 系積層導体を巻線したコイルの熱的安定性・保護の検討を行っている。先に, 導体を構成する素線内の局所的な常電導転移を素線間の電流転流を監視することで検出が可能であることを数値シミュレーションによって示した[1], [2]。今回は実際に 4 本の Y 系線材を積層した導体を用いたモデルコイルを作製し, ヒーターによる常電導転移に伴う観測実験を行ったので報告する。

なお, 本研究は「イットリウム系超電導電力技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により, 実施したものである。

2. 実験方法

本研究で作製したモデルコイルは素線絶縁を施した銅メッキ Y 系線材を 4 本集合導体化し, これをパンケーキ状に巻線したものである。コイルの内径は 226mm, 外径は 280mm である。実験は液体窒素浸漬冷却, 自己磁場中で行った。コイル内における常電導領域の発生を模擬するため, 予備実験を行い, 超電導線材 1 本に対してヒーターによる熱的擾乱を 4W 以上投入することで常電導領域が発生することを確認した。また, 素線絶縁された積層導体では各素線に流れる電流を直接測定することができないため, Fig.1 に示すようにコイル電流端子部付近にホール素子を配置し, 磁場分布測定から電流分布逆算により推定した。一定電流(150[A])を流している状態で, ヒーターを投入し, ヒーター付近(常電導領域)の電圧, ホール素子の出力電圧(Hall1~Hall4), コイルの両端電圧を測定した。

3. 実験結果

常電導領域の常電導電圧とヒーターの入力値の波形 (Tape1 にヒーター入力) を Fig.2 に, ホール素子(Hall1~Hall4)電圧の波形とヒーターの入力値の波形を Fig.3 に示す。Fig.2 より, ヒーターを投入するとその部分の線材が常電導に転移することを確認した。また, 常電導が発生した状態でもその発生電圧はわずか $40 \mu\text{V} \sim 50 \mu\text{V}$ であり, クエンチ検出が難しいことがわかる。一方, Fig.3 より, ヒーター投入時にホール素子電圧の変化がわずかではあるが観測することができた。特にヒーターが設置された Tape1 の上部の Hall1 ではホール素子電圧が減少する方向, Hall3 では上昇する方向に変動しており, Tape1 から Tape3 への転流を確認することができた。

4. まとめ

集合導体内の電流転流によるクエンチ検出の可能性を実験的に検証するため, 積層導体で構成された Y 系モデルコイルを用いて, ホール素子による電流分布の測定と, 局所的な常電導転移に伴うコイル電圧とホール素子による電流転流の観測実験を行った。その結果, ホール素子による電流分布測定により, 常電導転移に伴う抵抗発生により生じた素線間の電流転流をわずかではあるが観測することに成功した。

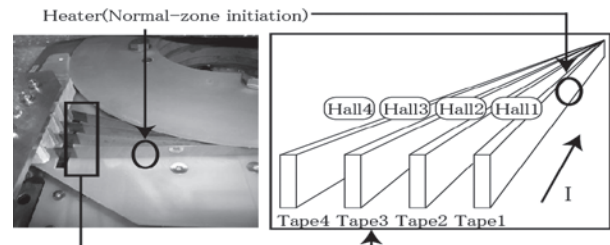


Fig.1 Arrangement of Heater and Hall sensors

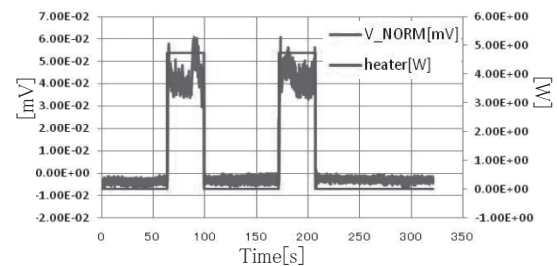


Fig.2 Resistive voltage and Heater input

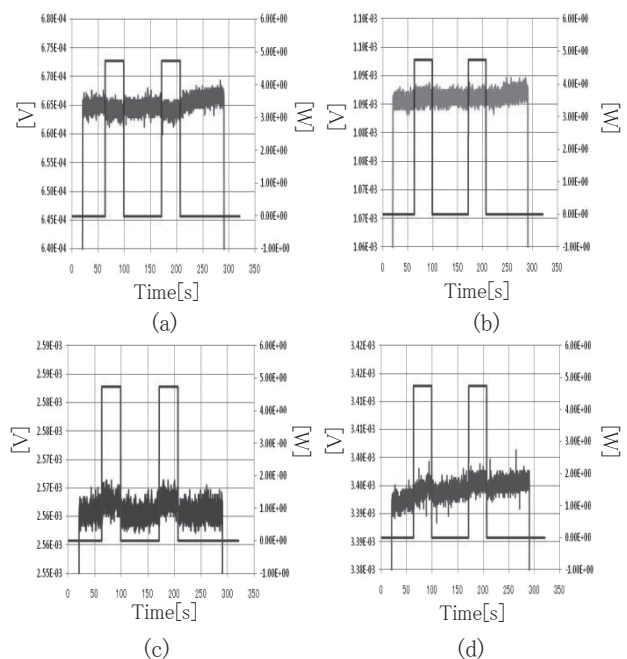


Fig.3 Hall sensor voltage ((a) Hall1, (b) Hall2, (c) Hall3, (d) Hall4) and Heater input

参考文献

1. A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.101
2. A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.154

直流き電鉄道システムへの超電導ケーブルの適用可能性に関する解析

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

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

1. はじめに

現在日本の電気鉄道で広く使われる直流き電システムには、送り出し電圧が低い、回生ブレーキ利用の不確実性、エネルギーの非有効利用等の問題がある。直流き電鉄道システムの直流き電線と並行に高温超電導直流ケーブルを適用されると、回生率の上昇、送電容量の増大および変電所数の低減が期待できる[1]。本研究では、高温超電導直流ケーブルを直流鉄道き電システムに導入することについて、モデル路線を設定してエネルギーの得失に焦点を当ててシミュレーションによる検討を行った。

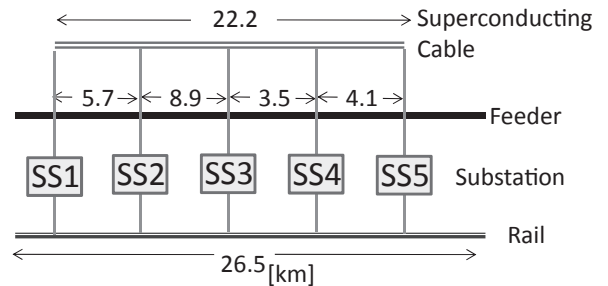


Fig.1 Analysis model

2. モデリングと解析手法

電気鉄道のき電系を電気回路として扱う際に、時間とともに電車が移動するので回路インピーダンスの変更が必要であり、また、電車が変電所を通過すると回路構成が変わる。路線上の電車数にも変化がある。本研究では、直流き電システムの構成要素である変電所、き電系、電車、および冷凍系について、エネルギーの入出力を定量的に整理した後、実路線を参考にモデルコースを設定して解析を行った。

Fig.1 に示すように、モデルコースは路線全長 26.5 km、駅数 24、変電所数 5 (SS1~SS5)、運行間隔を 5 分間に設定した。さらに超電導ケーブルを設置するケースは、22.2 km 長の超電導ケーブルが 5 カ所の変電所を結ぶように、き電線と平行に施設する場合を検討した。超電導ケーブルの熱侵入は 1 kW/km、端末部熱侵入は 0.25 kW/端末、冷凍機の COP は 0.1 を仮定した。路線全体の運行パターンを Fig.2 に示す。本解析モデルにおける 5 分間の回路各部の電流、電圧等の変化を、汎用解析ソフトウェア Matlab/Simulink を用いて解析した。

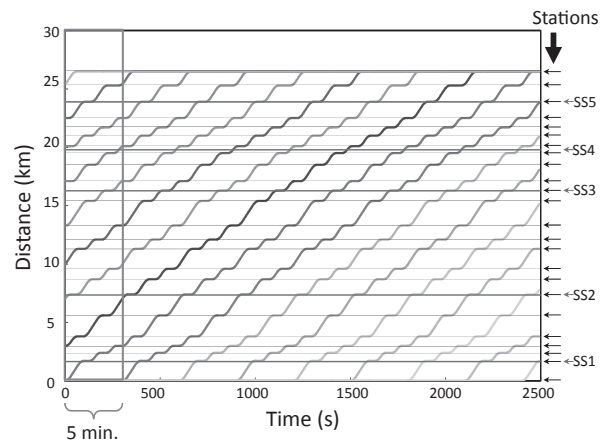


Fig.2 Analysis model of train operating pattern

3. 解析結果と今後の課題

Fig.3 は、超電導ケーブルの導入により、き電系に沿った電圧変動が抑制されたことを示している。これが回生率向上に大きく寄与する。Fig.4 は電車電力を示し、プラスが力行、マイナスが回生ブレーキを表す。超電導ケーブルの導入により、回生率の向上が明らかに見られる。さらに超電導ケーブル導入により、5分間に、ジュール損失が 32 MJ 減少、回生エネルギーが 103 MJ 増加し、その結果、変電所入力は 135 MJ 低減できた。一方、超電導ケーブルの冷却系にエネルギーが 74 MJ 必要であり、結局、システム全体で 61 MJ の省エネ効果を得ることができた。

今後は電車の駆動制動特性をより詳細的にモデル化を行うとともに、変電所数、変電所位置、超電導ケーブル導入方法等を変更して、システム最適化を実現するモデルを検討する予定である。

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の産学イノベーション加速事業[戦略的イノベーション創出推進]の支援によって行われた。

参考文献

1. 富田優, 2010 年度春季低温工学・超電導学会, 3A-a09 (2010) p.186

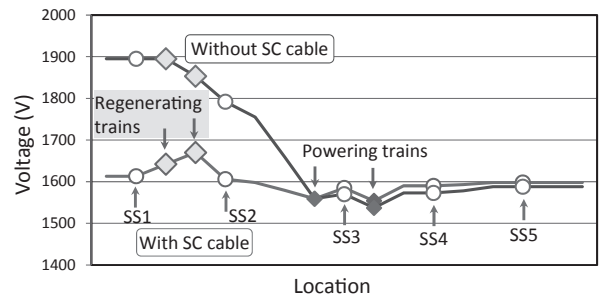


Fig.3 Feeder voltage variation with and without superconducting cables

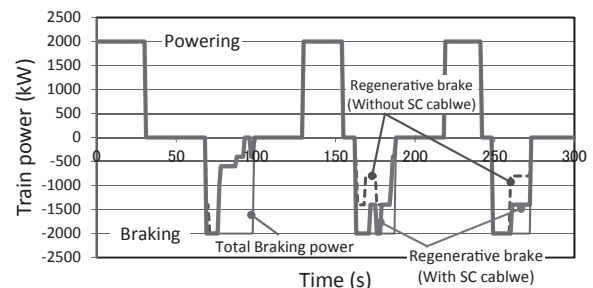


Fig.4 Regenerating power performance in 5 minutes with the application of superconducting cables

200m 超伝導直流送電ケーブル実験装置の通電試験 - 2

Current-feeding test of a 200 m DC superconducting power cable test facility - 2

浜辺 誠, 渡邊 裕文, 河原 敏男, 孫 建, IVANOV Yury, 芳村 幸治, 山口 作太郎 (中部大学)
 HAMABE Makoto, WATANABE Hirofumi, KAWAHARA Toshio, SUN Jian, IVANOV Yury,
 YOSHIMURA Kouji, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.)
 E-mail: hamabe@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では、超伝導直流送電システムの実用化を目指して、平成 18 年にケーブル長 20 m 級の超伝導直流送電ケーブルの実験装置 (CASER-1) の建設を行ない、実験を行ってきた[1]。そして、ここで得られた知見をもとに平成 21 年より、ケーブル長 200 m 級の超伝導直流送電ケーブル実験装置 (CASER-2) の建設を開始し、平成 22 年 1 月～3 月、同年 8 月～10 月の二度の冷却・通電試験を行ってきた[2]。本講演では、平成 23 年 1 月より行なった三回目の冷却試験の結果のうち、通電試験の結果として、設計値である 2kA まで超伝導状態のまま通電した直流通電試験の結果、および通電に伴うケーブル配管の磁気特性の評価の結果について報告する。

2. CASER-2 の仕様

Table 1 に CASER-2 の主な仕様を示す。これまでの CASER-1 では電圧の仕様を単相としたため、線材層は一層のみの構造としていた[1]が、CASER-2 では超伝導ケーブル本体の構成について線材層を二層とした同軸二極構造とし、電圧の仕様 ± 10 kV とした。ここで、超伝導線材として DI-BSCCO[®] (住友電工製) を採用したことにより、CASER-1 において単極で 2 kA の設計とした線材数 (39 本) と同じ線材数で二極通電ができる設計になっている。本実験装置の特徴の一つに、超伝導線材 1 本ずつに電流リードを接続している点がある。そして、この電流リードからの熱侵入を低減させるために、ペルチェ電流リード (PCL) を使用しているが、比較のために一部に銅のみの電流リードを用いている。

3. 第三回冷却試験の結果

過冷却の状態では冷媒 (液体窒素) を循環させるためには 200m におよぶ断熱配管部分での熱侵入が問題となるが、今回、約 170 m 離れた位置の低温配管の温度と液体窒素の流量から算出した断熱配管部分での熱侵入量は、250～300 W となった。

これまで、電流リード部の材質 (ペルチェ素子、銅) の抵抗の違いによる偏流の影響もあり、1.5 kA 程度までしか通電していなかったが、今回の冷却試験では 77 K よりも低い温度で液体窒素を循環させることができたこともあり、仕様にある 2 kA での通電を目指した。その結果、まず、1) 線材の設計に十分余裕のある 75 K 付近での 2 kA までの通電を行なった。ここで問題がなかったため、液体窒素の温度を 77 K 付近まで上げて、同じく 2 kA までの通電を行った。その結果を Fig. 1 に示す。また、各線材ごとに流れる電流も測定しているが、以前に比べて、電流値の突出した線材が見られない分布となった (Fig.2)。

CASER-2 の特徴の一つに、ケーブル部分の真空断熱配管の気体側が磁性体である炭素鋼でできているという点がある。この点は真空断熱容器によく使われるステンレスやアルミよりも、通電時に磁気エネルギーをより多く貯蔵できるという利点がある。本講演では、この磁気エネルギー貯蔵の効果を評価するために行なった、CASER-2 のケーブル配管の磁気特性の評価についても報告する予定である。

参考文献

1. M. Hamabe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19 (2009) p.1778
2. S. Yamaguchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.272, Yu. Ivanov, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.83 (2010) p.110, M. Hamabe, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.83 (2010) p.139

Table.1 Specification of CASER-2

Current	DC 2 kA at 78 K
Voltage	DC ± 10 kV
Cable structure	Coaxial, bipolar current feed
SC tape	39 DI-BSCCO [®] (SEI) HTS tapes (23 tapes in inside SC layer, 16 tapes in outside SC layer)
Current leads	72 Peltier current leads and 6 copper leads

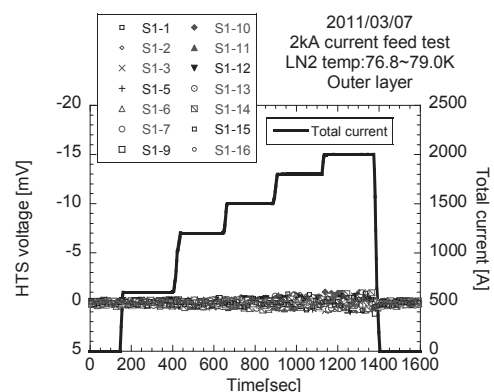


Fig. 1 Time evolution of total current up to 2 kA and voltages of 16 HTS tapes in the outside SC layer

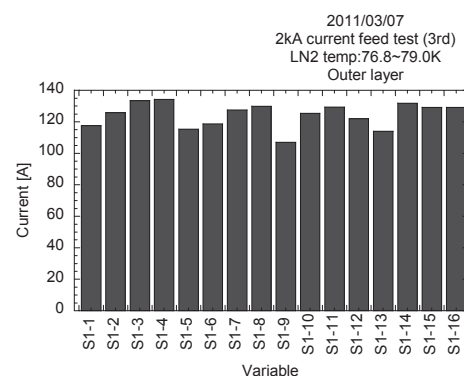


Fig.2 Current distribution of HTS tapes in the outside SC layer