

磁化活性汚泥法のための実用磁気分離ユニットの開発と 超電導磁気分離ユニットの必要性

Development of the practical magnetic-separator unit of the magnetic activated sludge and necessity of the superconductive magnetic-separator unit

渡辺 紡, 酒井 保藏, 荷方 稔之(宇都宮大); 弓場 誠, 中 聖一(NEOMAX エンジニアリング);
ミヒル ラル サハ(ダッカ大); 三浦 大介(首都大)

WATANABE Tsumugi, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.); YUNBA Makoto,
NAKA Shoichi (NEOMAX Engineering); SAHA Mihir Lal (Dhaka Univ.); MIURA Osuke (Tokyo Metropolitan Univ.)
E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

磁化活性汚泥(MAS)法は、活性汚泥を磁気分離する生物処理法である。余剰汚泥削減、運転の簡易化、処理安定性などの利点を有する。現在 MAS 法はパイロットスケールでの実証段階にあるが、100 m³/日を超える実用磁気分離装置が未開発であった。本研究では永久磁石による実用磁気分離ユニットを試作し性能を評価した。処理流量 240 m³/日で磁性粉回収率 99.9%であった。さらに大規模処理のための超電導磁気分離ユニットの必要性についても考察した。

MAS 法は、汚泥と処理水の分離をおこなう磁気分離装置以外のプロセスについては活性汚泥法の知見で同様に設計できる。活性汚泥法の最終沈澱池は、処理水量や水面積負荷などのパラメータを用いて設計するが、MAS 法の磁気分離装置を同じ手法で設計することはできないため、MAS 法の設計指針を新たに確立する必要がある。本研究では処理水量に対して MAS 法の仕様策定や予算見積りを可能とすること、また磁気分離装置の規格化による設計の標準化や合理化を目標とした。

2. 実験方法

実験は宇都宮市の水再生センターに設置した MAS 法パイロットプラント(曝気槽容積 8 m³)でおこなった。磁気分離装置は NEOMAX エンジニアリング製の回転ドラム型のものを使用した。ネオジム磁石をドラム(直径 16.5 cm, 長さ 150 cm)内に固定し、外側のドラムのみを回転させる二重構造となっている。そのため汚泥が付着するドラム下部では 0.5 T、汚泥を剥離するスクレーパー部分は 2 mT 以下の磁場に抑えられている。磁気分離基本ユニットは直列 2 段の磁気分離装置で構成される。磁気分離ユニットを Fig. 1 に示す。1段目の流出水は2段目に流れ込み、取りきれなかった磁性粉が回収される。磁気分離装置への曝気槽懸濁液(MLSS 15 g/L)の流入量を変化させ、処理水の濁度と磁性粉濃度を測定し性能を評価した。

3. 結果と考察

実験結果を Fig. 2 に示す。実用磁気分離ユニットは、処理流量 240 m³/日で 99.9%の磁性粉を分離でき、流出磁性粉濃度は 17 mg/L、濁度は 68 NTU だった。この結果は同直径、長さ 36 cm の小型磁気分離装置と比べ、ほぼドラム長に比例して性能が向上したと考えられた。小型の磁気分離装置で磁気分離試験をおこなうことにより、数千 m³/日の処理水量に対してユニット数を算出することができ、実プラントのデザインが可能となった。磁気分離性能は処理水量だけでなく、SVI(汚泥の圧密性を表す指標)や曝気槽内磁性粉濃度などによって影響を受けるが、実際の汚泥で小規模な磁気分離試験をおこなうことで合理的な設計指針を立てることができる。

有機性の工場排水処理では 2 千 m³/日程度までの規模が多く、本実用磁気分離ユニットが 10 程度で対応できる。一方、下水処理では 1 万 m³/日～数十万 m³/日が一般的であり、本ユニットが数十～数百必要になるため、少ない台数で大規模

処理に対応できる、強磁場・大磁場空間を持つ超電導磁気分離装置の開発が必要だと考えられる。超電導を用いる場合、永久磁石より1桁多い 2 千～5 千 m³/日を1ユニットの処理規模として達成できると良いと考えられる。

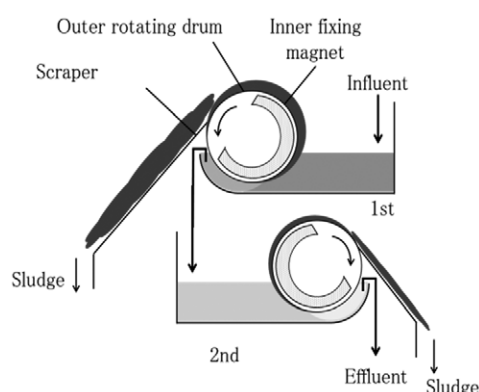


Fig.1 Magnetic separator unit

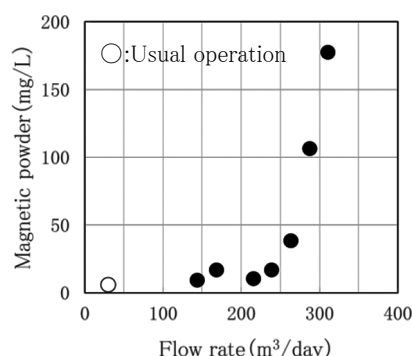


Fig.2 Magnetic powder in effluent

4. まとめ

試作した実用磁気分離ユニットは本実験条件で 240 m³/日の分離が可能であることが示唆された。これにより数千 m³/日規模の MAS 法のデザインが可能となると予想された。さらに大規模排水処理のために、超電導磁気分離ユニットの開発の必要性が示唆された。

余剰汚泥を削減できる磁化活性汚泥法による水処理低炭素化と 超電導磁気分離の活用分野開拓

Low carbon wastewater treatment of magnetic activated sludge process by excess sludge reduction and a potential of new application field of superconductive magnetic separation

酒井 保藏, 渡辺 紡, 荷方 稔之(宇都宮大);

弓場 誠, 中 聖一(NEOMAX エンジニアリング); サハ ミヒル ラル(ダッカ大); 三浦 大介(首都大)

SAKAI Yasuzo, WATANABE Tsumugi, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.);

YUNBA Makoto, NAKA Shoichi (NEOMAX Engineering); SAHA Mihir Lal (Dhaka Univ.); MIURA Osuke (Tokyo Metro. Univ.)

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

1. はじめに

磁化活性汚泥法は、余剰汚泥の発生を抑制することで汚泥処理に必要な化石燃料の削減や、汚泥燃焼による N_2O ガスを抑制でき、活性汚泥法の低炭素化を実現できる可能性を有する。本研究では、磁化活性汚泥法による活性汚泥法からの排出される温室効果ガスの削減について検討するとともに、磁化活性汚泥法を手段とした、超電導磁気分離の社会実装、地球環境保全への寄与について考察する。

活性汚泥法は、公共下水道の終末処理や、食品工業などの有機排水処理に広く利用されている。一般に、排水中の有機物の半分は微生物が水と CO_2 に分解するが、残りの半分は微生物菌体に転換され、余剰汚泥として引き抜かれる。下水処理だけで、年間 7500 億 t/y の汚泥が発生すると報告されている。これら汚泥は産業廃棄物と集められ、中間処理されるが、電力や重油を消費する。輸送にも燃料が必要である。また、汚泥の燃焼では、温暖化係数が約 300 の N_2O が発生する。下水汚泥処理からの温室効果ガス排出量は日本の全排出量の 0.14% と見積もられる。工場排水でも同様に、余剰汚泥処理から温室効果ガスが排出されている。

磁気分離を活性汚泥に導入した磁化活性汚泥法は、現在、永久磁石による磁気分離装置で 2000 t/d までの磁化活性汚泥法を 10~20 基の磁気分離ユニットでデザインできるようになった。永久磁石の磁場は 0.5 T 程度までであり、下水処理のように、数万~100 万 t/d の処理には、100 基以上の磁気分離装置が必要となるため、大流量の超電導磁気分離装置も必要とされている。本研究では、磁化活性汚泥法を手段として、永久磁石、超電導磁石による磁気分離技術による地球温暖化対策と水環境保全の推進を提唱する。

2. 方法

排水処理の規模は様々であり、計画、予算、プロセスデザインの標準化などを考慮し、永久磁石、超電導磁石のいずれの磁気分離装置も、基本流量を設定した標準的な磁気分離ユニットを提案するのが合理的であると考えた。

永久磁石を用いた磁気分離ユニットは、200 m^3/d の試作機がすでに開発され、磁性粉添加量、微生物濃度、汚泥圧密性などの分離性能への影響について検討を始めている。

超電導磁石を用いた磁気分離装置は、2000 m^3/d を基本流量とし、概念設計から検討を開始した。

3. 考察

磁化活性汚泥法は、新規の水処理法であり、普及させ、水環境保全と温室効果ガスの排出削減に貢献するために、現行の活性汚泥法に対する経済的な優位性が必要となる。磁気分離ユニットの価格は同等性能の沈降分離装置より安価であることが望ましい。Fig. 1 に示す永久磁石による磁気分離装置ユニット試作機は、500~600 万円での市販が予定されている。工場で作製し、現地に取り付けるだけなので、普及すれば量産効果も期待できる。一方、同等性能の沈殿池は



Fig. 1 Permanent magnet-separator unit

直径 5m、深さ 3m 程度と想定され、底部からの汚泥抜き取り機構などを含む工事を考えると磁気分離ユニットより安価に建設することは難しいと思われる。さらに、磁気分離ユニットは、500kg 程度で、反応槽上部に設置できるため、分離のためのスペースを必要としないが、沈殿池は反応槽の 1/3 程度の敷地が必要とされる。また、磁化活性汚泥法は汚泥処理が原則不要であるが、活性汚泥法は、余剰汚泥の脱水装置が必須となり、この装置だけで磁気分離装置ユニットの価格を上回る可能性もある。これらの点から、磁化活性汚泥法は、低炭素であるだけでなく経済的にも従来法より優位と考えられる。

超電導磁石を用いた磁気分離ユニットは、下水処理のような大規模水処理では、運転管理上、永久磁石による磁気分離ユニットより優位になると予想される。装置の概念設計には永久磁石による磁気分離ユニットが参考となると思われる。高濃度の強磁性汚泥を分離するため、汚泥の分離より、磁石あるいは強磁性マトリックスに付着した汚泥を剥離させるプロセスが律速となる可能性があるためである。運転条件によっては、流入する懸濁液の 20%以上を分離汚泥として排出する場合もあり、2000 m^3/d の分離ユニットは、汚泥剥離速度も 400 m^3/dl 以上の性能が要求される。装置のコストは、C/P から、永久磁石による磁気分離装置のコストの 10 倍以下であることが望ましい。これらを考慮しながら、超電導磁石による 2000 m^3/d の磁気分離ユニットの概念設計を進めて行く必要があると考えられる。これらの要求を満たす超電導磁気分離ユニットが実現すれば、超電導技術の大きな社会貢献が期待できる。

磁化活性汚泥法の処理安定性における磁気分離の寄与

Contribution of Magnetic Separation in the Process Stability of Magnetic Activated Sludge Process

佐藤 翔大, 酒井 保藏, 荷方 稔之, 六本木 美紀(宇都宮大); サハ ミヒル ラル(ダッカ大)
 SATO Shodai, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPONGI Miki (Utsunomiya Univ.);
 SAHA Mihir Lal (Dhaka Univ.)
 E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

有機排水処理法として広く用いられている活性汚泥法は、曝気槽内の菌叢や微生物量を一定に管理しながら処理を行うため、毒物の流入、負荷変動などの流入トラブルに弱く、沈降性の悪化による処理能力の低下や復旧の長期化を引き起こす可能性がある。磁化活性汚泥法は活性汚泥に磁性粉を吸着させ、磁気力で固液分離を行うため、曝気槽に微生物を安定かつ高濃度に保持でき、活性汚泥法に比べ、流入トラブルに対する安定性が期待できる。

活性汚泥法の固液分離プロセスである沈降分離法は、沈降性の良好な微生物だけでなく、沈降性を悪化させる糸状菌も等しく分離回収し、曝気槽に戻す。したがって、曝気槽で糸状菌が優先的に増殖すると、分離トラブルを引き起こす。一方、磁化活性汚泥(Magnetic Activated Sludge: MAS)法は、磁気分離される微生物が選択的に曝気槽に戻され、優先的に増殖できるため、流入トラブルに対しての安定性を有する。また、磁気力による分離であるため、不安定な汚泥沈降性の影響がほとんどない。

本研究では人工的なショックロード試験を行い、MAS 法の処理安定性を検証した。

2. 実験方法

ショックロード試験には MAS 法ベンチスケール標準装置を用いた[1]。5 L の曝気槽内に市の水再生センターから採取した下水汚泥(約 5,000 mg/L)と磁性粉(約 10,000 mg/L)を混合し、MAS とした。酢酸、ポリペプトン、無機栄養塩の濃縮液(酢酸: 4,000 mg/L、ポリペプトン: 3,000 mg/L)を水で希釈して模擬排水とし、流入速度 10 L/d、間欠曝気条件下で 30 日程度馴養した。その後、24 時間、馴養時の流入負荷を約 3 倍、10 倍に上昇させ、負荷を元に戻した。この時の TOD(Total oxygen demand)および TN を測定し処理性能を評価した。なお、負荷増加 3 倍および 10 倍の系をそれぞれ MAS_{1d,3}、MAS_{1d,10} とし、各処理条件は実験の前中で同一とした。

3. 結果

ショックロード試験の結果を以下のように示した。Table 1 には負荷増加時の TOD および TN の流入水濃度、試験期間中のそれぞれの平均処理水濃度を示した。また、括弧内にそれぞれの平均除去率を示した。Fig.1 および Fig.2 に TOC および TN それぞれの流入水、処理水濃度の経日変化および一律排水基準値を示した。

Table 1 TOD, TN and Removal

Influent		
	MAS _{1d,3}	MAS _{1d,10}
TOD (mg/L)	1616	4720
TN (mg/L)	69	200
Effluent		
	MAS _{1d,3}	MAS _{1d,10}
TOD (mg/L)	55 (90.7)	905 (48.9)
TN (mg/L)	4.4 (86.5)	63 (40.5)

なお、TOD について排水基準値は設けられていないが、模擬排水中に難生分解性物質が含まれないことから、処理水中の TOD と BOD がほぼ同程度の値になる。したがって、BOD 一律排水基準値を本実験の TOD の排水基準値とした。

実験結果から、本実験において、流入負荷が 24 時間上昇した場合、3 倍負荷ショックの MAS_{1d,3} では生物処理への影響はほぼなく、TOD および TN それぞれの処理水濃度は一律排水基準値を達成した。また、10 倍負荷ショックの MAS_{1d,10} では処理性状が悪化したものの、負荷が元に戻った後、TOD の処理濃度はおよそ 12 時間でほぼ復帰し、TN 濃度はおよそ 8 時間で一律排水基準値以下まで減少した。また、試験期間中、曝気槽から MAS の流出はなく、固液分離への影響はほぼなかった。これらの結果から、磁気分離により、想定外の高濃度有機物の流入に対する処理耐性が向上する可能性が示唆された。

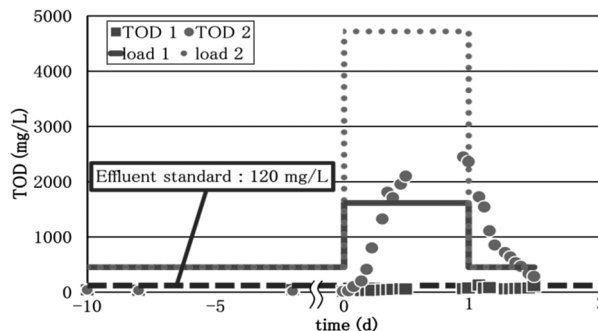


Fig.1 Result of TOD

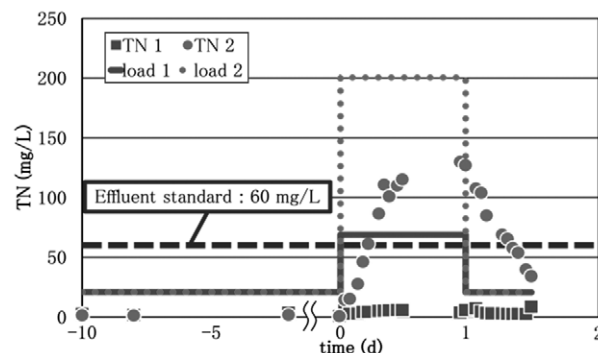


Fig.2 Result of TN

4. まとめ

3 倍の負荷増加ショックでは、TOD および TN は一律排水基準値以下で推移したが、10 倍の負荷増加ショックでは処理性状は悪化し、除去率は約 50%となった。しかし、試験期間中に分離トラブルは発生せず、負荷が戻ると処理性状も 1 日程度で自動的に復帰する。これらの結果から、想定外の有機物流入に対する処理安定性が向上した可能性が示された。

参考文献

1. S. Sato, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.149

小規模工場排水への磁化活性汚泥法の適用の試みと 従来活性汚泥法との比較検討

Challenge of Magnetic Activated Sludge Process to Small-scale Food Industrial Wastewater Treatment and Comparing of Standard Activated Sludge Process

武藤 勇希, 酒井 保藏, 荷方 稔之(宇都宮大学);ミヒル ラル サハ(ダッカ大学);
花井 洋輔, 中田 栄寿(富士電機(株));長沼 拓磨, 中埜 智之(アグリフーズ(株))

MUTO Yuki, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.); Mihir Lal SAHA (Dhaka Univ.);

HANAI Yosuke, NAKADA Eiju (Fuji Electric Co.,Ltd); NAGANUMA Takuma, NAKANO Tomoyuki (Agrifoods Co.,Ltd)

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

1. はじめに

我々は、生物学的水処理法である活性汚泥法に磁気分離を適用した磁化活性汚泥法(MAS 法)を研究している。本研究では、排水排出量 100m³/d 規模の食品工場への MAS 法商用プラントの実現を目指して、ベンチスケールでの適応性試験とパイロットプラント試験をおこない、MAS 法の食品工場排水への適用可能性の検証及び従来活性汚泥法との比較をおこなった。

小規模工場において、排水を下水放流すると下水道使用料が負担となるため、より安価な工場内水処理を検討したいというニーズがある。しかし、標準的な活性汚泥法の維持管理は専門知識を必要とし、また、余剰汚泥の処理費用が掛かるため、小規模工場にとっては大きな負担となる。そこで我々は、余剰汚泥を大幅に抑制でき、かつ維持管理容易な MAS 法を提案する。本研究では、実際の食品工場から採取した排水を用いたベンチスケール試験と現地でのパイロットプラント試験をおこなった。

2. 実験方法

(1)ベンチスケールでの適応性試験

食品工場より採取した実排水を用いてベンチスケール実験装置(5L)で連続処理実験をおこなった。本研究では、通常の MAS 法と MAS にバチルス菌を接種したバチルス MAS 法(B-MAS 法)について適応性の確認をおこなった。

(2)パイロットプラント試験

現地の工場へ可搬型のパイロットプラント実験装置(1.5m³)を運搬し、設置した。(Fig.1)この装置を用いて実排水の連続処理実験をおこなった。本研究では、ベンチスケールでの適応性試験においてより良好な水処理性能を示した B-MAS 法を用いて処理実験をおこなった。



Fig.1 Installation of Mobile Pilot plant

3. 結果と考察

(1) ベンチスケールでの適応性試験

ベンチスケール試験での曝気槽内 MLVSS 濃度はそれぞれ、MAS 法は 6500~13000 mg/L、B-MAS 法は 11000mg/L 前後で推移し、余剰汚泥の発生は確認できず、余剰汚泥の引き抜きは不要であることが示唆された。また、処理水の水质分析では、B-MAS 法はすべての測定項目で排水基準を満たしたが、MAS 法は測定項目で排水基準をわずかに上回る結果となり、後処理の必要があると考えられる。

(2) パイロットプラント試験

パイロットプラント実験においては、曝気槽内 MLVSS 濃度は 10,000~15,000 mg/L で推移し、実験期間中では余剰汚泥の引き抜きは必要なかった。また、流出水中の磁性粉濃度は実験期間中で平均 9 mg/L であり、磁気分離装置による磁性粉の回収率は平均 99.9%以上であった。このことから磁気分離装置により良好に固液分離がおこなわれていると考えられる。しかし、流出水中の SS は平均 146 mg/L と多く、排水基準を超過しているため、後処理に砂ろ過を付与する必要性が示唆された。

(3) MAS 法と従来活性汚泥法(AS 法)の比較

適応性試験の結果から処理流量 100m³/d を処理可能な MAS 法、活性汚泥法(汚泥脱水設備あり)、活性汚泥法(汚泥脱水設備なし)のそれぞれの規模とコストを推算した。(Table.1)

MAS 法では沈殿槽を設置する必要がないため、設置面積は従来活性汚泥法よりも大幅に削減できる。また、余剰汚泥の脱水設備を設置する活性汚泥法では汚泥脱水設備設置分(約 1 千万円)インシャルコストが多く掛かり、汚泥脱水設備を設置しない活性汚泥法は業者に汚泥処理を依頼する必要があるため、汚泥処理費用分(約 5 千 5 百万円)ランニングコストが多く掛かる。しかし、MAS 法では、余剰汚泥は大幅に抑制できるためこれらの費用は掛からず、コストも従来活性汚泥法よりも削減できる。これらのことから、MAS 法は運転維持管理の容易さだけでなく、設置面積とコストの面においても従来活性汚泥法よりも優れていると考える。

Table.1 Comparing Magnetic Activated Sludge Process and Standard Activated Sludge Process.

	Installation Area (m ²)	Initial Cost (1,000 yen)	Running Cost (1,000 yen/y)
MAS Process	25	40,000	9,200
AS Process (including Dehydrator)	47	50,000	10,000
AS Process (Not Including Dehydrator)	38	40,000	64,000

磁気アルキメデス法による非鉄金属の選別に関する研究

Study on Separation of nonferrous metal Utilizing Magneto-Archimedes Method

伊藤 祐介, 三澤 弘平, 秋山 庸子(大阪大学); 西嶋 茂宏(福井工業大学)

ITO Yusuke, MISAWA Kohei, AKIYAMA Yoko (Osaka University); NISHIJIMA Shigehiro (Fukui University of Technology)

1. はじめに

近年、廃棄物の減量と資源の有効利用を目的として、家電のリサイクルが推進されてきた。しかし廃家電の破砕物には数種類の非鉄金属が混合しており、単一金属への選別が必要であるが、その高精度な選別は難しい[1]。そこで本研究では、磁気アルキメデス法を用いた、非鉄金属の種類ごとの高精度な選別を目指し、一例として銅、アルミニウム、亜鉛単体の金属片について分離条件の検討と磁気アルキメデス浮上実験を行った。また装置設計に向け、実際の廃家電に含まれる金属部品について、形状の影響や合金の挙動を確認し、より高精度な選別が可能な条件の再検討と分離システムの検討を行った。

2. 分離条件の検討

磁気アルキメデス法とは、常磁性媒質中の物質に磁場を印加し、物質をその密度と磁化率に応じた異なる高さに浮上させることで、分離を行う手法である。常磁性媒質として溶解度が大きく、その密度・磁化率の調整が容易な塩化マンガン水溶液を選出し、媒質の濃度、磁場発生源、印加磁場等の条件の検討を行い、その条件における金属の浮上高さの計算を行った。

検討の結果、塩化マンガン水溶液 33 wt.%, 超電導ソレノイド磁石、最大中心磁場 6 T の条件において、Fig. 1 に示すように、各金属にそれぞれ 1 cm 以上の浮上高さの差が生じることが計算された。

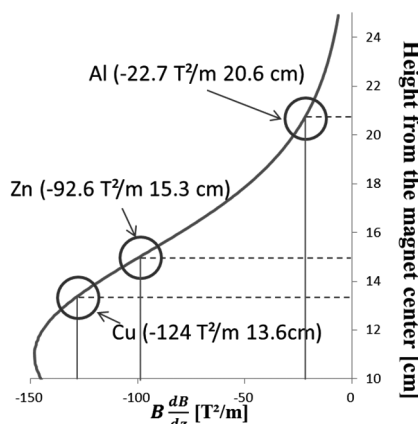


Fig.1 Height from the magnet center (calculated value)

3. 分離実験

銅板・アルミニウム板・亜鉛板をそれぞれ約 6 mm×6 mm×0.5 mmの大きさに切断した金属片を用意し、これを 33 wt.% に調製した塩化マンガン水溶液が入った容器に投入した。この容器を、最大中心磁場 6 T を印加した超電導ソレノイド磁石のボア内の磁石中心から 12 cm 上の位置に静置し、それぞれの浮上高さを測定した。次に実際の家電に含まれている金属部品として銅線・真鍮ねじ・ステンスタッピングに対して、同様の条件で、容器の静置位置を変化させ浮上高さを測定した。

その結果 Fig. 2(a)のように銅、アルミニウム、亜鉛がそれぞれ異なる高さに浮上することが確認できた。またその浮上高さは計算で求めた値とほぼ一致した。金属部品を用いた実験の結果を Fig. 2(b)に示す。銅片と銅線の浮

上高さに差が表れなかったことから形状による影響がないこと、また合金である真鍮、ステンレスの浮上高さについてそれぞれ確認した。

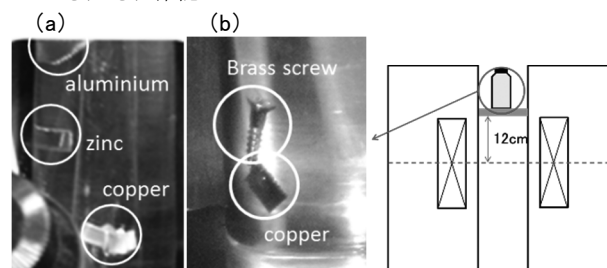


Fig.2 State of the magnetic levitation

4. 選別システムの検討

Fig. 2(b)に示す通り、銅とその合金である真鍮に生じる浮上差は小さく、選別精度に影響することが考えられた。そこで、より高精度な選別のためには、銅のみを沈降させることが有効であると考え、分離条件の再検討を行った。その結果、Fig. 3 に示すように塩化マンガン水溶液 25 wt.%, 最大中心磁場 6.5 T において銅のみが沈降し、その高精度な選別の可能性が示された。また、その条件における選別システムの検討を行った。

この結果をもとに、浮上しない銅は下から、それぞれの浮上高さに浮上した金属については、超電導ソレノイド磁石をあらかじめ傾けておくことで、側面に集積させ回収を行う分離システムを提案した。

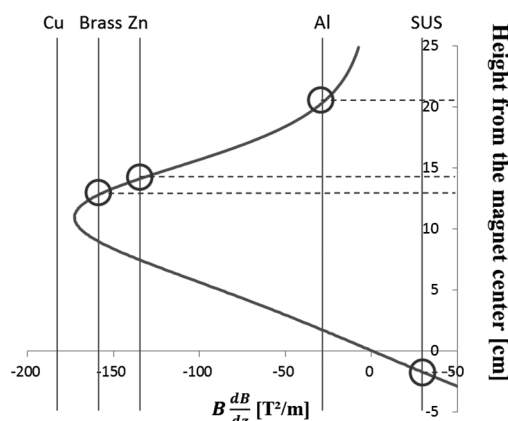


Fig.3 Height from the center (calculated value)

5. 結論

本研究では廃家電の破砕物に含まれる非鉄金属として銅、アルミニウム、亜鉛、真鍮、ステンレスについて選別条件の検討と磁気アルキメデス浮上実験を行うことで、その選別の可能性が示された。また、銅のみが沈降する条件を再検討し、浮上実験を行い、より高精度な選別の可能性が示された。今後は本手法の実用に向け、システムの検討を行う。

参考文献

1. 家電リサイクルング 地球環境を守る社会へ、工業調査会, 1999, pp. 64-72

磁気分離法による火力発電所給水中のスケール除去に関する研究 —スケールの物理・化学的性質の検討—

Study of Removal of Scale in Feed-water of Thermal Power Plant with Magnetic Separation — Physical and Chemical Property of Scale —

平松 まみ, 山本 隼也, 秋山 庸子(大阪大学); 三島 史人, 西嶋 茂宏(福井工業大学); 岡田 秀彦, 廣田 憲之(NIMS); 松浦 英樹, 難波 正徳(四国総研); 関根 智一(荏原工業洗浄株式会社)

HIRAMATSU Mami, YAMAMOTO Junya, AKIYAMA Yoko (Osaka University);

MISHIMA Fumihito, NISHIJIMA Sigehiro (Fukui University of Technology); OKADA Hidehiko, HIROTA Noriyuki (NIMS);

MATSUURA Hideki, NAMBA Seitoku (Shikoku Research Institute Inc.); SEKINE Tomokazu (Ebara Industrial Cleaning Co.,Ltd.)

E-mail: hiramatsu@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. 研究背景

環境保全の観点から、CO₂の排出量削減が必要とされている。国内のCO₂排出量の内、約36%が発電に伴うものであり、またそのほとんどが火力発電に由来する。このような背景から、CO₂排出量削減のために、火力発電の発電効率向上技術が求められている。火力発電の発電効率低下の一因として、給水系配管の腐食によって発生する酸化鉄スケールの配管表面への付着が挙げられる。そこで、スケールの磁気的性質に着目し、超電導磁石を用いた高勾配磁気分離法(HGMS)による給水中のスケールの除去を検討した。実用化に向けては、最適な導入箇所を検討する必要があるが、採用するボイラー給水処理方式の違いにより、給水条件(温度・pH・酸素濃度・圧力)が変化し、酸化鉄スケールの性質が変わるため(Fig.1.)、磁気分離装置の最適な設置箇所も異なる。そのため、あらゆる発電所において最適なフィルター設置箇所を判断できる汎用的な手法を構築する必要がある。本研究では、磁気分離をする上で性能に大きく関わるスケールの組成の給水条件に対する依存性について検討した。発電所給水には、配管の腐食を防ぐため、薬品添加による給水処理が施されている。本実験では、今後導入が進むと考えられる、酸素処理(Oxygenated treatment, OT)を適用した発電所を模擬した。

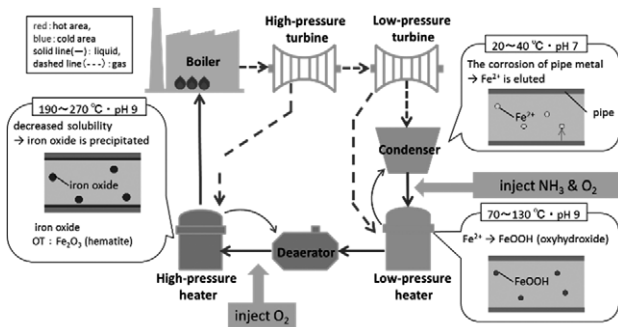


Fig.1. Schematic diagram of scale generation mechanism in thermal power plant

2. 実験方法

復水器出口付近で溶出した鉄成分が高温部に流入して、加熱されることを模擬し、スケールの成分の温度と溶存酸素濃度への依存性について検討した。実験の流れと実験条件をFig.2.に示す。まず復水器出口を模擬するため、アンモニア添加、窒素曝気によって蒸留水のpH、溶存酸素濃度を酸素処理条件下の給水条件に調整し、その溶液中で、配管材料である鉄鋼(SS400、30 mm×20 mm×2 mm)を压力容器を用いて50°Cで加熱した。その後、鉄鋼を取り出し、鉄成分が溶出した給水の条件を、アンモニア添加、空気曝気により再調整、再加熱して高温部中のスケールを模擬した。加熱はFig.2.に示す温度、溶存酸素濃度が異なる6条件で行った。加熱後の溶液を目開き0.1 μmのメンブレンフィルターで吸引ろ過し、固液分

離した。ろ物について、メンブレンフィルターごと乾燥させ、X線回折分析装置(XRD)で成分を分析した。

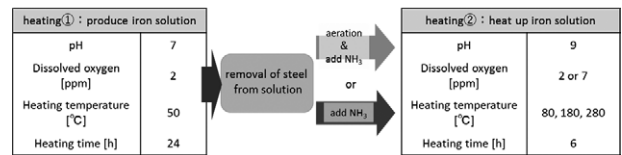


Fig.2. procedure of experiment and condition of feed-water

3. 結果と考察

スケールのXRDによる同定結果をFig.3.に示す。本実験では酸素濃度による変化は確認できなかった。スケールの成分は給水温度によって変化し、加熱温度が80°Cの場合は、オキシ水酸化鉄(α, γ-FeOOH)とマグヘマイト(γ-Fe₂O₃)、130°Cの場合は、マグヘマイトとヘマタイト(α-Fe₂O₃)、280°Cの場合は、ヘマタイトのみであった。

この結果から、酸素処理を行った場合、低温部では、常磁性のオキシ水酸化鉄が多く含まれ、高温部に移動するにつれ、フェリ磁性のマグヘマイトを含む領域を経た後、常磁性のヘマタイトが主成分となることが分かった。このことから、磁気分離装置は、マグヘマイトを含む領域に設置することで、小さい磁場強度でスケールの磁気分離が可能となると考えられる。

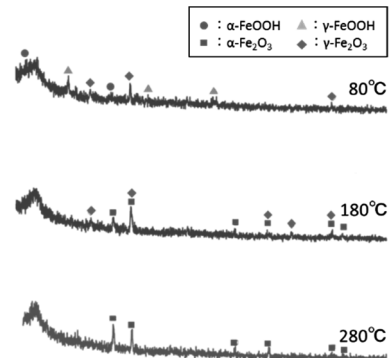


Fig.3. XRD spectrum of simulated scales

4. まとめ

以上の結果から、80°C~180°Cの領域の酸化鉄スケールには、より小さい磁場強度で磁気分離が可能であるマグヘマイトが多く含まれると考えられる。今後はこの領域について、さらに磁気分離を容易に行うことができる箇所を検討するため、酸化鉄スケールの組成を調べ、マグヘマイトが多く存在する領域を明らかにする必要がある。

謝辞

本研究の一部は日本科学技術振興機構(JST)の先進的炭素化技術推進開発(ALCA)「磁気分離法による発電所ボイラー給水中の酸化鉄除去」の助成を受けて実施したものである。

磁気分離法による火力発電所給水中のスケール除去に関する研究 -フィルターシステムの設計-

Removal of Iron Scale with Magnetic Separation from Feed-water in Thermal Power Plant -Design of Filtering System-

山本 隼也, 平松 まみ, 秋山 庸子(大阪大学); 三島 史人, 西嶋 茂宏(福井工業大学); 岡田 秀彦, 廣田 憲之
(物質・材料研究機構); 松浦 英樹, 難波 正徳(四国総合研究所); 関根 智一(荏原工業洗浄株式会社)
YAMAMOTO Junya, HIRAMATSU Mami, AKIYAMA Yoko (Osaka University); MISHIMA Fumihito, NISHIJIMA Shigehiro
(Fukui University of Technology); OKADA Hidehiko, HIROTA Noriyuki (National Institute for Material Science);
MATSUURA Hideki, NAMBA Seitoku (Shikoku Research Institute Inc.);
SEKINE Tomokazu (Ebara Industrial Cleaning Co.,Ltd.)
E-mail: yamamoto@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

火力発電所の給水系では、配管の腐食生成物を主成分とするスケールが発生し、発電効率が低下する。そのため、スケールの除去を行うことで発電効率の低下を抑制し、二酸化炭素の排出削減が可能である。本研究では、超電導磁石を用いた高勾配磁気分離法 (High Gradient Magnetic Separation, HGMS) によるスケール除去を検討した。先行研究では、強磁性のマグネタイトを主成分とするスケールに関して HGMS の有効性が報告されている[1]。本研究では、常磁性のヘマタイトを主成分とするスケールを分離対象とし、分離に最適なフィルター構造についての検討を行った。また、実際のスケールはヘマタイトとマグネタイトが混合していることも考えられるため、マグネタイトの存在がヘマタイトの分離に与える影響について検討した。

2. 実験方法

ソレノイド型超電導磁石のボア内にフィルターを設置し、そこに懸濁液をポンプで流入させることで連続的な HGMS 実験を行った。フィルターには 6 T の磁場を印加し、懸濁液の流入速度は 0.6 m/s として 3 種類の実験を行った。それぞれの実験を実験 A, B, C とする。まず、実験 A, B ではヘマタイト粒子 (磁化率 1.3×10^{-3} , 平均粒径 $4.5 \mu\text{m}$) の濃度をそれぞれ 10 ppm, 20 ppm とした懸濁液について HGMS 実験を行った。実験 C では、ヘマタイト粒子とマグネタイト粒子 (飽和磁化 0.6 T, 平均粒径 $4 \mu\text{m}$) を重量比 8:2 で混合した計 20 ppm の懸濁液について HGMS 実験を行った。実験は Table 1 に示すフィルター構造を用いて行った。実験中は、磁気分離部前後で懸濁液のサンプリングを行い、含まれている鉄イオン量を測定することで分離率の時間変化を算出した。また、磁気分離部の前後の圧力を計測することで圧力損失の時間変化を調べた。

Table 1 Filter condition

Experiment	A	B, C
Material	Magnesten®	SUS430
Form	Plain wave	Demister
Wire diameter	0.1 mm	0.1 mm
Mesh number	60	—
Interval	1.25 mm	—
Number of filters	80	—
Filter weight	42 g	110 g
Packing factor	2.9%	7.2%

3. 結果と考察

分離率の時間変化を Fig.1 に示す。実験 A, B の分離率を比較すると、実験 B の分離率が実験 A を上回った。これは、実験 B で用いたフィルターの方が充填率が大きく、粒子の付着可能な表面積が大きかったことによると考える。また、実験 B, C を比較すると、実験 C の分離率が実験 B を上回った。

これは、懸濁液に含まれるマグネタイトが高い分離率で分離された事と、マグネタイトがフィルター表面に付着することによって新たな磁場勾配が形成され、ヘマタイトの捕捉が促進された可能性が考えられる。

次に、圧力損失の時間変化を Fig.2 に示す。実験 A, B では時間変化による圧力損失の増加は確認できなかったが、実験 C では圧力損失の増加が確認された。これは、実験 A, B では、分離対象が常磁性体のヘマタイトであり、フィルター表面に複数層にわたって堆積しなかったが、実験 C では強磁性体のマグネタイトがフィルター表面に多層にわたって堆積し、フィルターの閉塞が起こった可能性を示す。

今後は、さらなるヘマタイトの分離率の向上と、マグネタイトを含む場合の閉塞緩和を目指してフィルター構造の検討を行う予定である。

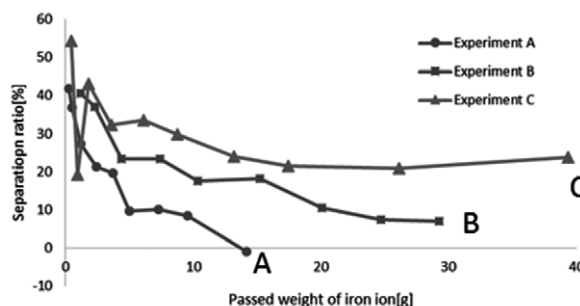


Fig. 1 Change in separation ratio

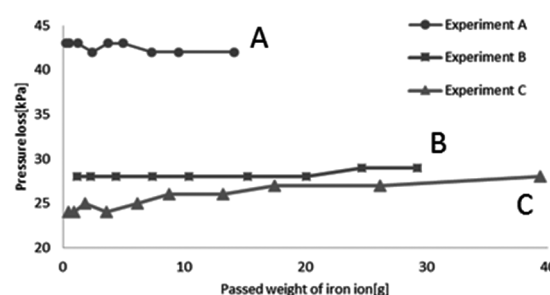


Fig. 2 Change in pressure loss

謝辞

本研究の一部は日本科学技術振興機構 (JST) の先端的低炭素化技術推進開発 (ALCA) 「磁気分離法による発電所ボイラー給水中の酸化鉄除去」の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] S. Shibatani, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol. 26 (2016) NO. 4

HTS バルク磁石を用いた Ni メッキ廃液からの Ni 化合物の磁気分離による リサイクル技術

Recycling Technique for Ni Compound by Magnetic Separation from Ni-Plating Waste with Use of HTS Bulk Magnet

岡徹雄, 佐々木 翔, 小川純, 福井聡, 佐藤孝雄, 大泉学(新潟大学); 辻村盛夫(愛知技研); 横山和哉(足利工大)
OKA Tetsuo, SASAKI Sho, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, SATO Takao, OOIZUMI Manabu(Niigata Univ.);
TSUJIMURA Morio(Aichi Giken); YOKOYAMA Kazuya(Ashikaga IT)
E-mail: okat@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導バルク磁石は急峻な磁場勾配をもち、強力な擬似永久磁石として応用できることから、磁気分離への応用が有効であると考えられる。無電解ニッケルめっきでは、年間約 125,000 トンの廃液が発生し、その多くが委託を受けた廃棄業者により処理されているが、資源としての Ni の再利用が困難である。本研究は、無電解ニッケルめっき廃液を再生処理して得られる亜リン酸ニッケルと硫酸ニッケルの混合溶液(以下再生液と呼ぶ)から硫酸ニッケル結晶を回収し、これを再利用できるプロセスの確立を目的とする。

2. 実験方法

実験に使用した装置の写真を Fig.1 に、その配管の概略と再生液を Fig.2 に示す。再生液は実際に排出されるめっき廃液から作製した。これをポンプで吸い上げ、矢印のように循環させると、溶液中の硫酸ニッケル結晶が磁極部の回収容器側面に磁気力によって吸着する。実験では対向型バルク磁石装置の片極を用いた。チャンバー表面の最大磁場は 1.95T (右極) と 1.53T (左極) であった。流量を 0.1 l/min, 0.2 l/min, 0.4 l/min に、処理時間を 5 min, 10 min とし、回収した結晶の成分と量、粒度分布を測定した。回収した結晶と、これに付着する溶液分を脱水をしたものを試料とした。成分を測定する際は、亜リン酸(H_3PO_3)と硫酸ニッケル($NiSO_4$)を比べるため、リン(P)と硫酸(SO_4)に着目し、P と S の含有量を ICP 分析によって評価した。

3. 実験結果と討論

磁場空間で回収された結晶の量は、磁気分離時間が 10 min で磁場が 1.95T の場合、最大 22.3g であり、磁場による回収工程の有効性がわかった。Fig.3 に、吸着分離した結晶の ICP 分析による P と S の測定結果から計算した比 (P/SO_4) を示す。磁気分離した結晶の P/SO_4 の流量依存性によると、磁気分離時間が 10 min で磁場が 1.95T、流量 0.1 l/min の場合、回収結晶を脱水乾燥させると、最小で 1.91% が得られた。実験溶液全体では 33.0% であることから、硫酸ニッケルが選択的に吸着分離されていることがわかる。 P/SO_4 は磁場の強化と流量の増大によって小さくなる傾向にある。なお、脱水しない場合は回収結晶に残る液中の P が影響して値は上方にシフトする。

4. まとめ

使用済みのニッケルめっき廃液に残留するニッケル成分を硫酸ニッケルに変性し、その磁性を使って分離する技術開発を行った。生成速度が遅く不安定な硫酸ニッケルをその晶出段階の初期に、バルク磁石の発生する強磁場を使って分離回収することで、従来は非効率であった回収工程を現実的な生産工程とするめどがたった。

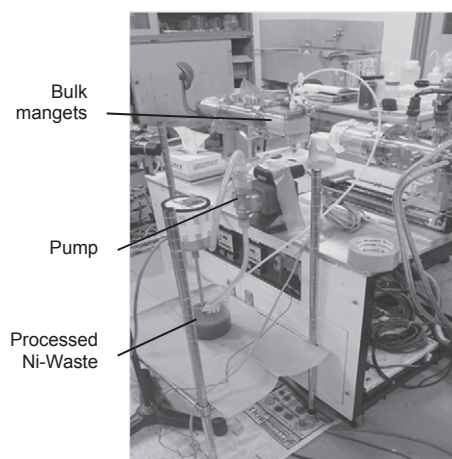


Fig.1 View of experimental setup of magnetic separation for Ni-plating waste.

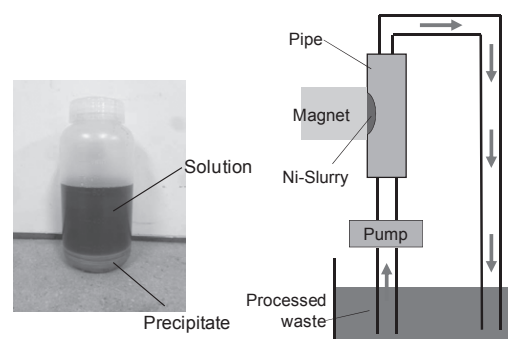


Fig.2 Processed waste liquid with Ni-precipitate (left), and the schematic pump system for the experiment (right).

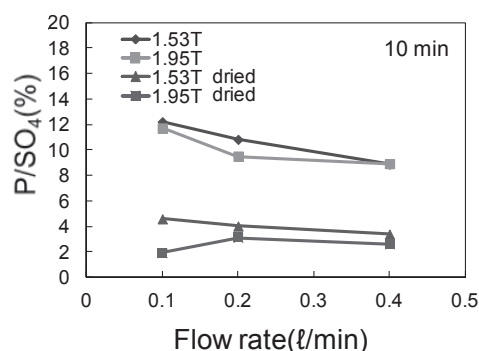


Fig.3 Ratios of P/SO_4 ions estimated by ICP for the crystals collected on the magnetic pole containing the bulk magnet.

縦磁界効果を利用した 3 層 RE 系超電導直流電力ケーブルの臨界電流特性

Critical current characteristics of three layers RE based superconducting DC power cable using the longitudinal field effect

木内 勝, 木戸 竜馬, 田邊 裕也, 小田部 莊司, 松下 照男(九州工業大学); 八木 正史, 福島 弘之(古河電工)
 KIUCHI Masaru, KIDO Ryoma, OTABE Edmund S., MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);
 YAGI Masashi, FUKUSHIMA Hiroyuki (Furukawa Electric Co., Ltd.)
 E-mail: kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

現在、高い臨界電流を有する RE 系コート線材が開発され、その線材を利用した超電導機器応用が検討されている。なかでも高効率で電力輸送を可能にする電力ケーブルへの利用が期待されるが、大容量化のためには更なる臨界電流 I_c の増加が必要である。この I_c の向上には、線材作製の最適化や適切な人工ピンの導入などが必要であるが、線材の利用環境を変化させる、すなわち電流 I と磁界 B が平行となる縦磁界下では、 I_c が増加するので、この縦磁界効果を利用した方法がある。この縦磁界下での I_c 増加は金属超電導体ではよく知られた現象で、最近、酸化物超電導体でも確認できるようになった[1]。

一方で、超電導線材の巻き方を工夫することで縦磁界環境を作り、高い I_c を利用する直流電力ケーブルが提案されている[2]。この縦磁界直流ケーブルは多層化によるケーブルの大容量化に優れるうえに、縦磁界が強められることからケーブルの大容量化に優れるが、縦磁界効果により I_c も増加することからコンパクトなケーブルにおいても有効な手法であると考えられる。

本研究では、市販されている REBCO 系コート線材を用いて、内側 3 層の縦磁界超電導直流電力ケーブルを設計及び作製し、ケーブルの通電試験を液体窒素中で行った。得られた実験結果と設計値との比較を行い、コート線材を用いた縦磁界ケーブルの有効性について議論する。

2. 実験方法

今回の縦磁界直流電力ケーブルは、SuperPower 社の 2 mm 幅の REBCO コート線材を使用した内側層が 3 層ある構造とした。ケーブルの構造を Fig. 1 に示す。フォーマーの外径は 10 mm とした。この構造で縦磁界効果が最大となる REBCO コート線材の巻角度 θ を、短尺コート線材の臨界電流密度 J_c の縦磁界依存性を用いて理論的に算出した[3]。解析結果を Fig. 2 の点線で示す。なお、精密な解析では線材のフォーマーに巻き付け角が層間で $1 \sim 2^\circ$ の角度差が必要となるが、今回の設計では 3 層共に同じ角度とした。解析から本作製ケーブルは、線材の巻角度を $\theta = 10^\circ$ とした場合、縦磁界が $B = 0.1$ T の時にケーブルの臨界電流 I_c が最大となる結果となった。

上記の設計に基づき古河電工にてケーブルを作製した。ケーブルの全長は、電流端子部を含み 700 mm である。外観を Fig. 2 に示す。このケーブルの I_c 特性評価は、直流四端子法で行った。電圧端子は最外層の 3 層目の中央に 100 mm の間隔で取り取り付けた。ケーブルの I_c は、電圧端子間に $V = 1.0 \times 10^{-5}$ V の電圧が生じる電流で決定した。また、今回のケーブルは内側 3 層のみのため、外側層が作る縦磁界 B を外から加える必要がある。そこで今回は Bi-2223 超電導コイルを用いて 0.5 T まで加えた。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 にケーブルの I_c の縦磁界依存性を示す。●が実験結果で、点線がケーブル設計値を示す。また、実験値と設計値で定量的に違いがあるので、自己磁界臨界電流 $I_c(0)$ で規格

化した結果も示す。この結果から、縦磁界が 0.1 T でケーブルの I_c が最大になっており、設計値とよく一致する結果が得られた。したがって、増加率は大きくないが、3 層でも縦磁界効果による電流容量の増加が得られ、本手法の有効性を確認することができた。なお、実験の I_c が設計値に比べて僅かに小さい理由は、設計では各層で均一な電流の流れを仮定しているが、実際のケーブルでは線材間で電流が流れない部分があるためである。

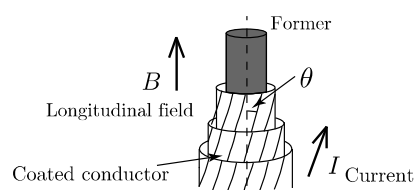


Fig. 1 Cable configuration.

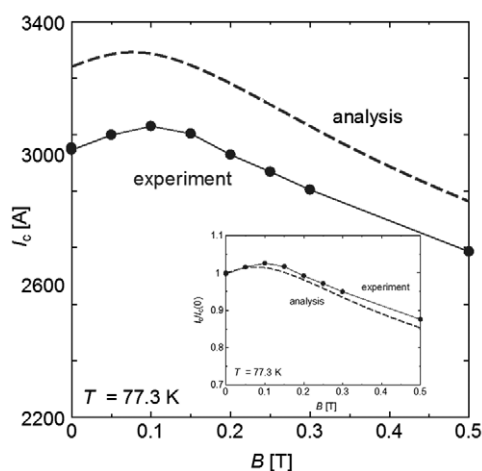


Fig. 2 Critical current properties in longitudinal magnetic field for the DC power cable. Symbol (●) is experimental result and dotted line is theoretical analysis. The inset shows the magnetic field dependence of the normalized critical current by the self-field $I_c(I)/I_c(0)$.

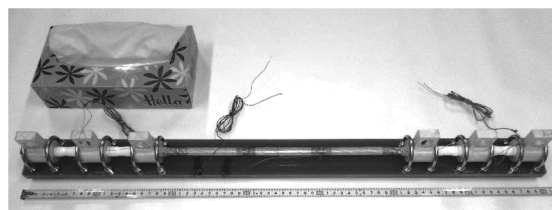


Fig. 3 Three layers superconducting DC power cable.

参考文献

- [1] R. Kido *et. al.*, Physics Procedia **81**(2016) 117-120.
- [2] T. Matsushita *et.al.*, Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 125009.
- [3] V.S. Vyatkin *et.al.*, Physica C, **494** (2013) 135-139.

液体窒素冷却 GdBCO テープ線材の復帰特性における 冷却フィンの高さの効果に関する実験的検討

Experimental study about the effect of the height of cooling fins for improvement of recovery characteristics of GdBCO tape with cooling fins in a pool of liquid nitrogen

高谷 聡志, 玉嶋 愛美, 白井 康之, 塩津 正博(京大); 磯嶋 茂樹(住友電工)

TAKAYA Satoshi, TAMASHIMA Manami, SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro (Kyoto University); ISOJIMA Shigeki(SEI, LTD.)

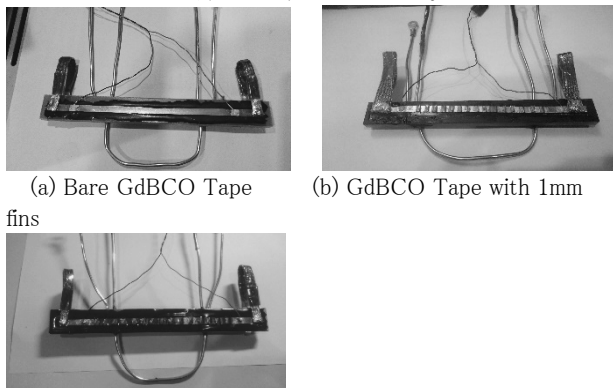
E-mail: takaya@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

超電導限流器の実用化にあたり、故障電流の遮断の後、素早く超電導状態に復帰することが求められる。線材表面に冷却フィンを施すことで、復帰特性が向上することがすでに確認されている[1]が、本研究では、フィンの高さの違いによる復帰時間の差異について、GdBCO 線材に過電流を通電し、様々な条件下で線材の抵抗と流れる電流を計測することで調べた。また、線材表面の沸騰状態を確認するため、ハイスピードカメラでの撮影を行った。

2. 試験体

Fig.1 は、(a)が長さ 130mm、幅 4mm、厚さ 0.2mm の GdBCO 線である。(b)、(c)は、(a)と同様の線にそれぞれ高さが 1mm、3mm の冷却フィンを 6mm 間隔で取り付けただけのものである。これら 3 種類の試験体はすべて GdBCO 線をスタイクキャストで FRP ブロックに貼り付け、断熱している。



(a) Bare GdBCO Tape (b) GdBCO Tape with 1mm fins (c) GdBCO Tape with 3mm fins

Fig.1 Test samples

3. 試験方法

電源電圧を $V=V_0 \exp(t/\tau)$ のように、時定数 τ の指数関数状に増加させ、臨界電流を越えて通電した。その後指定値で遮断し、復帰特性を観察するため、一定電流(100mA)を通電し、抵抗を計測した。また、各試験体の表面の一部をハイスピードカメラで撮影し、沸騰現象を観察した。

4. 実験結果と考察

Fig.2 は、高さ 1mm のフィン及び 3mm のフィンを施した試験体の表面をハイスピードカメラで撮影した画像である。高さ 1mm のフィンを施した試験体(b)は、 $t=696$ [ms]で核沸騰を経ずに膜沸騰へ直接遷移した。また、その際膜がフィンを含み、線全体を覆っていた。電源を遮断した後、 $t=972$ [ms]で線材の一部から核沸騰への遷移が始まった。 $t=1150$ [ms]では、伝熱面全体が核沸騰へと遷移している。高さ 3mm のフィンを施した試験体(c)は、 $t=712$ [ms]でフィン間が膜沸騰に直接遷移した後、フィン部分から核沸騰への遷移が始まった($t=840$ [ms])。また、フィンの先端は沸騰膜の外に出ている状態であった。その後徐々にフィン間の伝熱面に核沸騰が広がり、 $t=1130$ [ms]で全体が核沸騰に遷移した。Fig.3 は、時定数 $\tau=100$ [ms]での各試験体の実験結果であり、縦軸は抵抗、横軸は時間を表している。試験体(b)と(c)では、試験体(c)の方が核沸騰への遷移開始が早く、フィンが沸騰膜外に出ていることが、核沸騰への遷移の起点として重要であると考えられる。

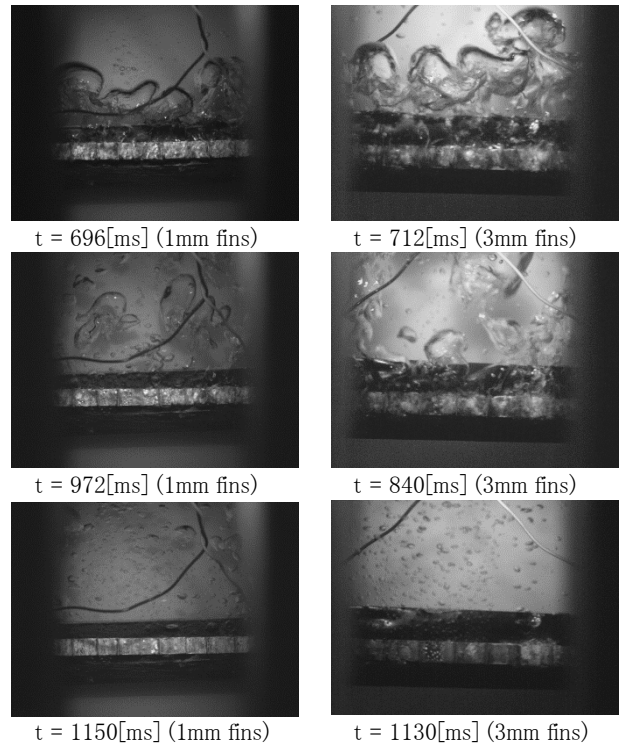


Fig.2 Boiling phenomena of sample with 1mm fins (left) and sample with 3mm fins (right)

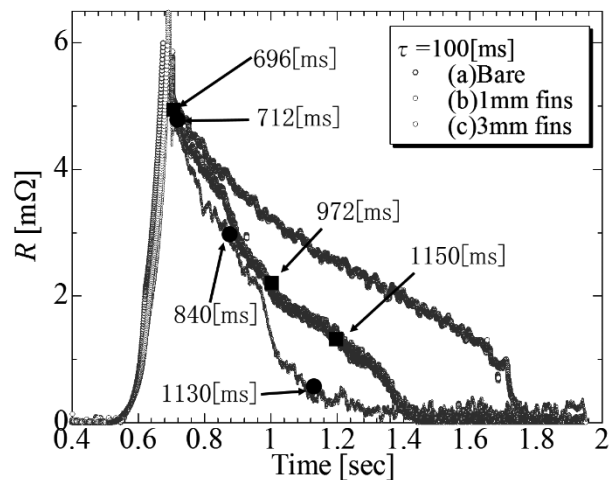


Fig.3 Resistance appearance of test samples

5. まとめ

沸騰膜の厚さは1~3mmの間であり、沸騰膜から出た冷却フィンの先端が核沸騰の起点となる。また、膜厚以下のフィンを施した場合より早く核沸騰への遷移が開始する。

参考文献

- [1] M. Tamashima, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.161

ハードウェア閉ループ試験による RE-123 線材の 限流動作時過渡特性の評価とモデリングに関する検討

Transient Behavior in Fault Current Limiting Operation in RE-123 Coated Conductor Demonstrated by Hardware-in-the-loop Simulation and Its Modeling

東川 甲平, 浦崎 祥悟, 田島 正博, 井上 昌睦 (九大); 福本 祐介, 富田 優 (鉄道総研); 木須 隆暢 (九大)
 HIGASHIKAWA Kohei, URASAKI Shogo, TAJIMA Masahiro, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.);
 FUKUMOTO Yusuke, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute); KISS Takanobu (Kyushu Univ.);
 E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

再生可能エネルギーの大量導入や電力自由化の流れから、電力系統の機能増強は重要な課題であり、超伝導限流器 (SFCL) が期待されている。一方、SFCL は抵抗状態への遷移による事故電流の抑制という電力系統との相互作用の大きな応用であり、系統導入時の現象を把握しながら最適化していくことが特に重要となる。そこで我々は、リアルタイムデジタルシミュレータ (RTDS) を用いたハードウェア閉ループ試験 (HILS) により、限流動作時の RE-123 線材の過渡現象を模擬することに成功している^[1]。本研究では、同線材の非線形電流輸送特性と熱的挙動を詳細に考慮することで、限流動作時の過渡特性を定量表現することに成功し、SFCL 設計における重要な知見が得られたと報告する。

2. HILS による限流動作の模擬

直流き電システムを対象として SFCL を導入した際の HILS の概略を Fig. 1 に示す。超伝導電力機器において線材由来の非線形電流輸送特性は同機器の最も大きな特徴を表すものであり、実際の超伝導線材の特性を同機器の特性として反映することを目的としている。実規模システムの解析は RTDS によって行い、規模調整を通じて電流と電圧の瞬時値をリアルタイムで (50 マイクロ秒ごとに) 通信することにより、超伝導ハードウェアの規模が小型のものであっても、実規模相当の系統内挙動として評価することができる^[1]。具体的には RTDS によって実規模システムで計算された電流値を電流容量の比 (1.7 kA → 60 A) を考慮して RE-123 線材に通電し、この際に線材に発生した電圧を線材長の比 (80 mm → 400 m) を考慮して SFCL の発生電圧としてフィードバックした。き電線が時刻 0.2-0.4 s において地絡した際の電流波形とその際に線材に発生している抵抗を Fig. 2 と Fig. 3 にそれぞれ示す。SFCL が無い場合は 8 kA 程度の事故電流が流れるものを想定したものであるが、超伝導線材の抵抗状態への遷移により、事故電流が大幅に低減される様子を模擬することに成功している。

3. 限流動作のモデル化

限流動作の模擬には RE-123 線材の非線形電流輸送特性とその温度依存性の表現が鍵となる。そこで、パーコレーション遷移モデルに基づいて同線材の電流輸送特性の温度依存性を考慮した^[2]。なお、線材の銅安定化層も並列回路として考慮した。また、液体窒素への熱伝達率をパラメータとして熱方程式を解き、熱的な挙動を評価した。そのような電気回路-熱連成解析によって得られた結果を Fig. 2 と Fig. 3 に合わせて示している。双方ともに HILS による実験結果をよく記述できていることがわかる。また、このように数値解析によってモデル化できたことにより、RE-123 線材の限流動作時の複雑な特性を次のように解釈することができた。まず、事故電流の第一波はほぼ温度変化を伴わない磁束フロー抵抗によって抑制される。次に、磁束フロー抵抗は温度上昇に伴って比較的急激に増大し、事故電流がさらに抑制される。温度が臨界温度に達して以降 (この例では $t = 0.25$ s 以降) は銅安定化層の抵抗によって支配される。また、詳細は当日に報告するが、事故後の超伝

導状態への緩やかな復帰には、特に冷却の線材長さ方向のばらつきが関与していることが明らかとなった。以上の評価スキームにより、磁束フロー抵抗の発生から常伝導状態への遷移およびゼロ抵抗状態への復帰といった過程が定量的に明らかとなり、実際の系統導入時の現象を対象とした最適な導体仕様の検討とその検証に展開できることが期待される。

謝辞

本研究は、JST の戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ) 「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」の一環として実施するとともに、日本学術振興会の科研費 (16K14216) の助成を得て行ったものである。

参考文献

- [1] K. Higashikawa et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 (2016) 540210.
- [2] T. Kiss et al., Cryogenics 80 (2016) 221.

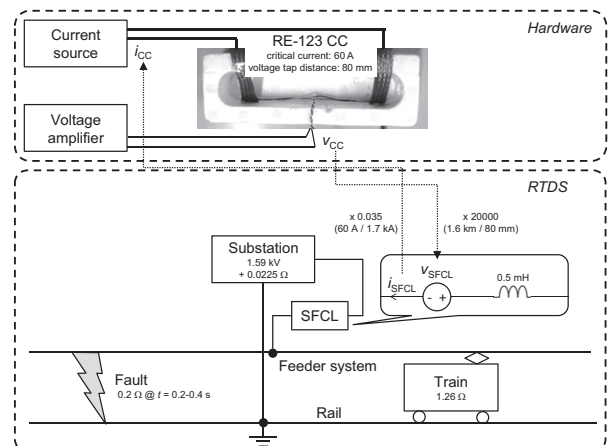


Fig. 1. Model for the HILS using RE-123 coated conductor for SFCL in a DC railway system.

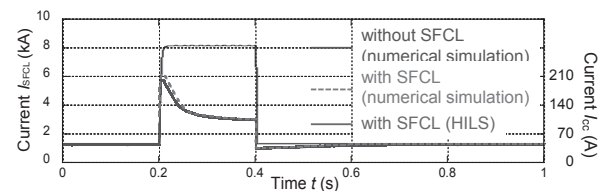


Fig. 2. Fault current waveforms obtained by the HILS and the numerical simulations.

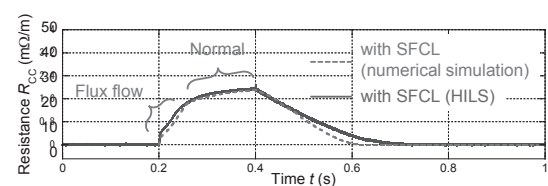


Fig. 3. Temporal variation of the resistance of the RE-123 coated conductor at the fault and recovery.

高温超電導コイルを用いた S-P 型非接触給電システム における電力伝送効率の基礎的検討

Basic study on Electric Power Transmission Efficiency of an S-P Type Wireless Power Transmission System with High Temperature Superconducting Coils

宮城 大輔, 井上 良太, 田村 紳, 津田 理, 松木 英敏(東北大)

MIYAGI Daisuke, INOUE Ryota, TAMURA Shin, TSUDA Makoto, MATSUKI Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: dmiyagi@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我々は、これまで高温超電導コイル (HTS コイル) を用いた Series-Series (S-S) 型非接触給電システムの電力伝送特性に関して、検討を行ってきた[1]。しかし、S-S 型非接触給電システムはコイルとキャパシタとを 1 次側, 2 次側それぞれにおいて直列共振させることから、流れる電流量が少なく、HTS コイルのメリットを生かしきれなかった。そこで本発表では 2 次側コイルとキャパシタとを並列接続し、1 次側は直列共振させた Series-Parallel (S-P) 型非接触給電システムの電力伝送効率の共振周波数依存性に関して、1 次側に銅コイルおよび 2 次側 HTS コイル (Cu-HTS)、1 次側銅コイルおよび 2 次側銅コイル (Cu-Cu) で構成されるシステムの検討を行った。

2. S-P 型非接触給電システムの共振周波数

Fig.1 に S-P 型非接触給電システムの等価回路を示す。 v_{in} は電源電圧, L_1, L_2 は 1 次側, 2 次側コイルの自己インダクタンス, C_1, C_2 は 1 次側, 2 次側のコンデンサのキャパシタンス, r_1, r_2 は 1 次側, 2 次側コイルの内部抵抗, M は相互インダクタンス, $R_{L\eta}$ は効率最大となる負荷を表す。HTS コイルの内部抵抗は、同サイズの GdBCO コイルの交流損失測定結果から求めた[2]。S-P 型非接触給電システムの共振周波数は大きく分けて 2 点報告されている[3][4]。1 点目は、2 次側の力率を 1 とし、全体共振させる共振周波数 f_{01} であり、式(1)で表される。2 点目は、2 次側を自己共振させ、全体共振させる共振周波数 f_{02} であり、式(2)で表される。

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2} - \left(\frac{1}{C_2 R_L}\right)^2} \quad (1)$$

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_2}{C_1(L_1 L_2 - M^2)}} \quad (2)$$

3. 電力伝送効率の共振周波数依存性

Fig.2 および Fig.3 に共振周波数 f_{01} および f_{02} を用いた S-P 型非接触給電システムの電力伝送効率の共振周波数依存性を示す。ここで、1 次側および 2 次側キャパシタンス C_1, C_2 は各周波数において、効率最大となる負荷となるように選定している。Fig.2 より共振周波数 f_{01} において、Cu-HTS の電力伝送効率は、Cu-Cu のそれに比べ、低周波領域で高くなった。しかし、その差はわずかであり、これは、共振周波数 f_{01} において、見かけ上、2 次側を直列共振させることで、2 次側の電流を抑え、大電流時においても低損失である HTS コイルのメリットを活かしきれなかったためと考えられる。Fig.3 より共振周波数 f_{02} において、Cu-HTS の電力伝送効率は、Cu-Cu のそれに比べ、低周波領域で大幅に高くなるのがわかった。これは、共振周波数 f_{02} において、2 次側を自己共振させることで、2 次側に大電流が流れ、HTS コイルを用いることで高効率になったと考えられる。一方で、受電電力を増加すると電力伝送効率が低下している。これは、受電電力の増加に伴い、HTS コイルに印加される磁場が大きくなり、HTS コイルの交流損失が増加したためである。そのため、kHz 帯における HTS コイルの交流損失の低減が重要である。

本研究の一部は、パワーアカデミー研究助成により実施されたものである。

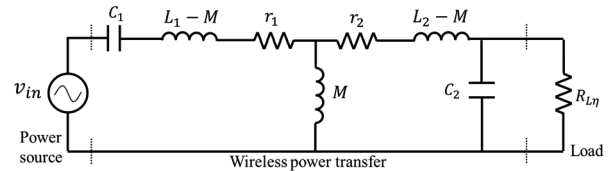


Fig.1. An equivalent circuit of a magnetic resonance coupling type wireless power transfer using a series-parallel circuit.

Table 1. Specifications of HTS and copper coils.

Type	GdBCO	Cu (Litz wire)
Superconducting layer thickness [μm]	2.0	-
Copper stabilizer thickness [μm]	75.0	-
Tape width [mm]	5.0	-
I_C ($1\mu\text{V}/\text{cm}$ at 0T, 77K) [A]	225	-
Coil Radius [mm]	45	45
Coil Height [mm]	10	10
Number of Turns	10	10
Self-inductance [μH]	19.7	18.9
Mutual inductance [μH]	4.5	4.5

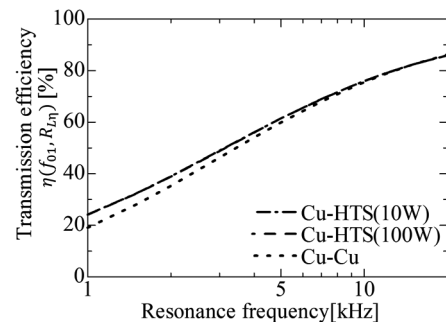


Fig.2 Calculation results of transmission efficiency as a function of resonance frequency f_{01} .

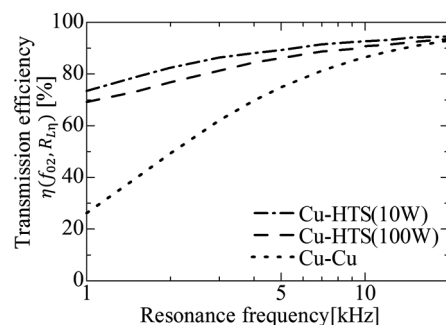


Fig.3 Calculation results of transmission efficiency as a function of resonance frequency f_{02} .

参考文献

- [1] R.Inoue et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.27, No.1 (2017) 5400106
- [2] R.Inoue et al.: The papers of technical meeting on "application of superconductivity", *IEEJ*, ASC-17-011
- [3] T. Imura et al.: *IEEJ Trans. Appl. IA*, Vol.135, No.6(2015)
- [4] T. Hujita et al.: *IEEJ Trans. Appl. IA*, Vol.127, No.2(2007)

高温超伝導線材で巻いた加速器用マグネットにおける鉄ヨークの影響を考慮した交流損失解析

Ac loss calculation of a cosine-theta dipole magnet wound with coated conductor considering iron yoke influence

曽我部 友輔(京大・日本学術振興会特別研究員 DC); 雨宮 尚之(京大)

SOGABE Yusuke, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

E-mail: y-sogabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

シンクロトロンやビームライン、回転ガントリーなどのマグネットにおいては、時間的に変化する磁場を発生する磁界を発生することが要求される。これらの加速器用マグネットを高温超伝導マグネットに置き換える上で、交流損失の予測は大きな課題である。加速器用マグネットは多くの場合鉄ヨークをもち、これがマグネットの交流損失に影響を及ぼしうる。我々は鉄ヨークの影響を考慮に入れ、加速器用マグネットにおいて想定される運転パターンを模擬した励磁を行った場合の交流損失を、三次元電磁界解析によって評価した。

2. 鉄ヨークの影響を考慮に入れた三次元電磁界解析

解析対象としたマグネットの断面形状を Fig. 1(a)に、マグネットを構成するコイルの三次元形状を Fig. 1(b)に示す[1]。このマグネットは回転ガントリー用マグネットを意識して設計されたコサインシータ型マグネットで、定格運転条件はコイル温度 20 K、電流 200 A、最大発生磁場 2.88 T である。鉄ヨークの影響を考慮に入れるために、鉄ヨークの外径は無制限であると仮定し、影像電流を用いて計算した。コイルエンド部においては、曲線状のコイル電流を有限個の折れ線の集合で近似し、各折れ線の z 成分のみの影像電流を考慮した。鉄の比透磁率は 3000 で固定した。この条件で有限要素法による三次元電磁界解析を実施し、高温超伝導コイルにおける交流損失の時間発展とその密度分布を評価した[2]。

3. 交流損失解析結果

Fig. 2(a)に電流の時間変化を示す。回転ガントリー用マグネットの励磁パターンを意識し、励消磁を繰り返すとともに消磁中に粒子取出しを意識したステップを設定している。Fig. 2(b)に高温超伝導コイル全体での交流損失の時間発展を示す。1 回目のランプアップにおいては、線材内に完全に遮蔽電流が存在していない初期状態から 200 A まで励磁しているため、線材内での磁束の変化が大きく、結果として交流損失が大きく発生している。加速器用マグネットでは複数サイクルを繰り返す運転が想定されるため、初期状態の影響はほぼ無視できる。そのため、今回は初期状態の影響を強く受けている 1 回目のランプアップにおける交流損失は無視する。2 回目ランプアップおよび 1, 2 回目ランプダウン中における損失の最大値は約 0.7 W であり、冷凍機による伝導冷却は可能な程度であると考えられる。一方で、フラットトップやランプダウン中のステップにおいては、通電電流は変化していないにもかかわらず、微小ながら損失が発生している。これは、遮蔽電流が電流一定条件においても減衰することに起因する現象である。

Fig. 3 に、マグネットの最内層コイルにおける、2 回目ランプアップ終了直前の時刻での交流損失密度分布を示す。最内層コイルは最も経験磁界の大きいコイルである。この結果から、コサインシータ型マグネットのコイルエンド部分における損失はあまり大きくなく、コイルミッドプレーンに近い直線部に高い交流損失密度が分布していることがわかった。これは、直線部において線材に垂直な磁界成分が大きくなっていることによる。

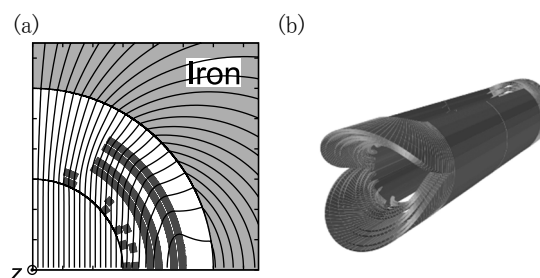


Fig. 1 Analyzed magnet; (a) cross section of the magnet and flux lines; (b) three dimensional shape of the coil in the magnet.

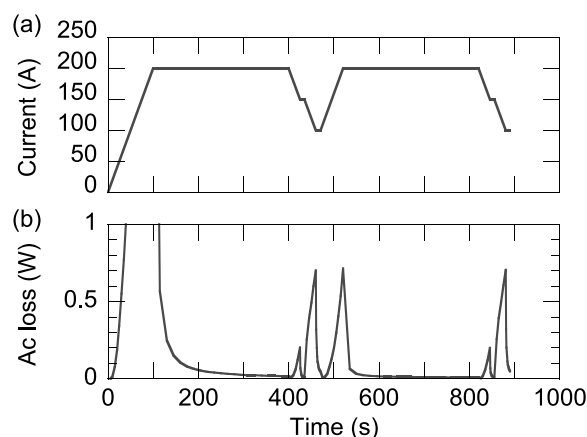


Fig. 2 (a) Current profile of the magnet; (b) time evolution of ac loss in whole coil

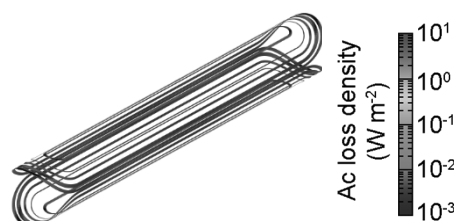


Fig. 3 Ac loss density distribution in the innermost layer at the end of the second ramp-up phase.

謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援によって、一部は科研費特別研究員奨励費(16J07799)によって行われた。

参考文献

1. N. Amemiya, et al.: Phys. Procedia, **67** (2015) p. 776-80
2. Y. Sogabe, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., **25** (2015) 4900205

REBCO 線材の剥離強度信頼性評価(1)—含浸コイル劣化確率解析—

Evaluation of delamination strength reliability for REBCO coated conductors (1)

— Degradation probability analysis of impregnated REBCO coils —

藤田 真司, 武藤 翔吾, 吉田 朋, 飯島 康裕, 直江 邦浩 (フジクラ)

FUJITA Shinji, MUTO Shogo, YOSHIDA Tomo, IJIMA Yasuhiro, NAOE Kunihiro (FUJIKURA)

E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

1. はじめに

REBCO 線材で作製したエポキシ樹脂含浸コイルを冷却すると、熱応力が REBCO 線材に対して剥離方向に作用し、REBCO 層が剥離することでコイル特性が劣化することがある[1]。また、REBCO 線材の許容剥離応力は大きければつきがあることが指摘されており、REBCO 線材単体の剥離試験で得られる剥離強度よりもはるかに小さい熱応力でコイルが劣化する場合がある[2]。今回、我々は小型の含浸 REBCO コイルを多数評価し、その劣化確率から体積や応力分布を考慮したワイブル解析[3]を用いることで、ばらつきも含めた線材の剥離強度を評価したので報告する。

2. 評価方法

評価に使用した REBCO 線材は 75 μm 厚 Hastelloy[®] 基板の上に IBAD-MgO 層を含む中間層と PLD による GdBCO 層 (膜厚 $\sim 2 \mu\text{m}$)、Ag 保護層、20 μm 厚 Cu めっき層を形成したものである。今回の評価では 2013 年頃に製造された 5 mm 幅線材(Old)と、2016 年に製造された 4 mm 幅線材(New)を用いて Table 1 に示す線材長、コイル内径外径比 (OD/ID) の異なるエポキシ含浸パンケーキコイルを製作した。線間絶縁はポリイミドテープを 1 枚共巻きし、超電導層を内側にして巻線した。パンケーキコイル製作後、液体窒素中でコイル n 値 (0.01 \sim 0.1 V/cm) を評価し、コイル n 値が 20 を下回ったものを劣化と判断した。各寸法のコイルについて、同仕様のコイルをそれぞれ 20 \sim 80 個程度評価し、劣化したコイルの個数から劣化確率 F を求めた。線材 Old と New に対して求めた F をそれぞれ式(1)、(2)で与えられるワイブル関数[3]で近似し、ワイブルプロットによりワイブルパラメータ m 、 σ_0 を最小二乗法で求めた。 V は超電導層の体積、 V_0 は任意の規格化定数であり、今回は $V_0 = 1 \text{ mm}^3$ とした。 $\sigma(\vec{x})$ はコイル内の線材のテープ垂直方向の応力分布、 σ_c はその最大値であり、各コイル寸法について有限要素法を用いて求めた。

$$F(\sigma_c, V) = 1 - \exp\left[-\frac{V_E(m, V)}{V_0} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (1)$$

$$V_E(m, V) = \int_V \left(\frac{\sigma(\vec{x})}{\sigma_c}\right)^m dV \quad (2)$$

3. 結果

Fig. 1 にワイブル解析により求めた単位体積 (1 mm^3) あたりの累積破壊確率 (劣化確率) とコイル内の最大剥離応力の関係、およびワイブルパラメータの値を示す。エラーバーは Willson-score 法による 95% 信頼区間を示している。線材 Old と New は共通して、熱応力が増加するとともに累積破壊確率が増加している。線材 Old は 8 MPa の応力において、約 0.06(6%) が破壊しているが、線材 New では約 0.02(2%) と累積破壊確率が小さくなっている。ばらつきの程度を表す m 値は線材 Old と New ではほぼ同じ値であるが、New の方が σ_0 が大きくなっている。平均強度は σ_0 に比例するため、定量的に剥離強度が改善されていることが確認できた。しかしながら依然として m 値が小さく、ばらつきが大きいので、さらなる強度改善が必要である。

4. まとめ

複数の線材長、内径外径比条件で、同寸法のコイルを多数評価することで、線材長、内径外径比に対するコイル劣化確率を求めた。2013 年頃に製造された線材と 2016 年に製造された線材について評価し、体積と応力分布を考慮したワイブル解析を用いることで、定量的に線材の剥離強度が改善していることを確認した。これらの手法を用いて、今後も線材の剥離強度改善に向けた取り組みを実施する。

Table 1. Specifications of REBCO test coils.

	Old-1	Old-2	Old-3	Old-4	New-1	New-2
Conductor width [mm]	5	5	5	5	4	4
Conductor length [m]	4.2	4.2	4.2	2.6	2.3	3.9
Inner diameter [mm]	60	40	30	30	30	30
Outer diameter [mm]	71.4	55.4	48.7	42.8	42.9	48.9
OD/ID ratio	1.19	1.39	1.62	1.43	1.43	1.63
Max. thermal stress [MPa]	1.4	4.2	8.5	4.8	4.8	8.6
Number of turn	20	28	34	22	23	34
Number of coils	21	24	23	58	80	43

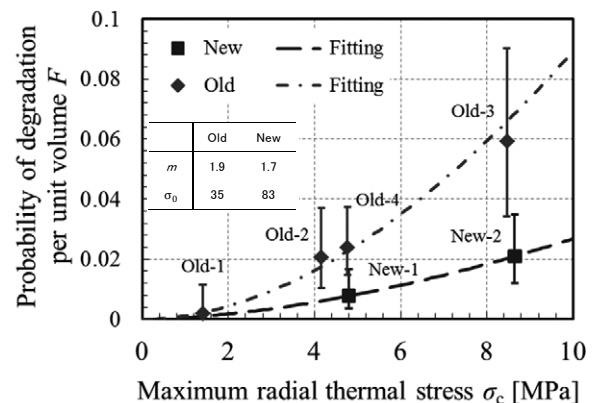


Fig. 1. Probability of coil-degradation per unit volume as a function of maximum radial thermal stress of impregnated coils. A table in the graph shows the Weibull parameters determined by the Weibull plots.

謝辞

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである。

参考文献

- [1] T. Takematsu *et al.*, *Physica C*, 470 (2010) 674-677.
- [2] H. Miyazaki *et al.*, *IEEE TAS* 25, 6602305 (2015).
- [3] Munz and Fett, *Ceramics*, Springer (1999).

REBCO 線材の剥離強度信頼性評価(2) —疲労特性評価—

Evaluation of delamination strength reliability for REBCO coated conductors (2)

— Fatigue tests for practical REBCO coated conductors —

武藤 翔吾, 藤田 真司, 佐藤 大樹, 飯島 康裕, 直江 邦浩 (フジクラ)
 MUTO Shogo, FUJITA Shinji, SATO Hiroki, IJIMA Yasuhiro, NAOE Kunihiro (Fujikura Ltd.)
 E-mail: shogo.muto@jp.fujikura.com

1. はじめに

信頼性の高い超電導線材を開発するためには、線材の疲労挙動を把握することは重要である。REBCO 線材は銅酸化物セラミックスにより構成されているため、セラミックス的観点から疲労現象について調査する必要がある。一般的に、セラミックスには金属の応力腐食割れに相当する疲労現象が存在するとされているが[1], REBCO の疲労に関する研究は少なく、疲労挙動については十分明らかになっていない。そこで本研究では REBCO 線材の疲労挙動を把握することを目的とし、テープ面垂直方向に対する一定荷重試験(静疲労試験)および、一定負荷速度試験(動疲労試験)を実施し、室温における REBCO 線材の疲労係数を見積った。

2. 実験方法

評価に使用した線材は 75 μm 厚の Hastelloy[®] 基板上に IBAD-MgO 層を含む中間層と PLD による GdBCO 層(膜厚 $\sim 2 \mu\text{m}$), Ag 保護層, 片側 20 μm 厚の Cu めっき層を形成した 5 mm 幅の線材である。サンプルの GdBCO 層側の線材表面中央に、 $\phi 2.7 \text{ mm}$ の円形スタッドピンを樹脂で接着したものと、 $4 \times 8 \text{ mm}$ の矩形アンビルをはんだで接着した二種類を用意した。スタッドピンサンプルは静疲労、動疲労試験を実施し、アンビルサンプルは動疲労試験のみ実施した。

静疲労試験はクリープ試験機を用いて実施した。テープ垂直方向に初期強度の約 0.5 - 0.6 倍の負荷を印加して、破断するまでの時間 t_c を計測した。破断時間 t_c は線材の初期欠陥に依存するため、ばらつきが大きい。そこで各荷重条件ごとに破断時間について前報のワイブル解析を適用することで、統計的に強度のばらつきを排除した。疲労係数 N は下記の破断時間 t_c と一定荷重応力 σ の関係式より導出した[2]。

$$\ln t_c = -N \ln \sigma + C \quad (1)$$

このときの代表破断時間 t_c は破壊確率 $F = 1 - e^{-1}$ のときの時間とした。 C は定数である。

動疲労試験は島津製作所製の引張試験機(AGS-X)を用いて実施した。印加応力速度 $\alpha = 0.05 - 5 \text{ MPa/sec}$ の条件で引張り、破断応力 σ を測定した。静疲労試験と同様にワイブル解析により、強度のばらつきを排除した。疲労係数 N は下記の印加応力速度 α と破断強度 σ の関係式より導出した[2]。

$$\ln \alpha = (N + 1) \ln \sigma_c + C \quad (2)$$

3. 実験結果および考察

Fig. 1 に静疲労試験の結果を示す。縦軸が破断時間の自然対数で、横軸が一定負荷荷重の自然対数である。負荷荷重が増加するに従い、破断時間が減少することがわかる。Fig. 2 に動疲労試験の結果を示す。縦軸が印加応力速度の自然対数で、横軸が破断強度の自然対数である。速度が増加するに従い、強度が増加していることがわかる。アンビルとスタッドピンとの間に強度に差があるが、これは寸法効果による影響であると考えられる。

Fig. 1, 2 を(1), (2)式でそれぞれフィッティングして求めた疲労係数 N を Table 1 に示す。全試験で $N \sim 20$ 程度の値となりほぼ一致した。疲労係数 N は材料固有の値であり、環境条件が同じであれば両者の試験で一致するとされており[2], それと矛盾のない結果が得られた。また、報告されているセラミックスの値とほぼ同程度であることがわかった[2]。

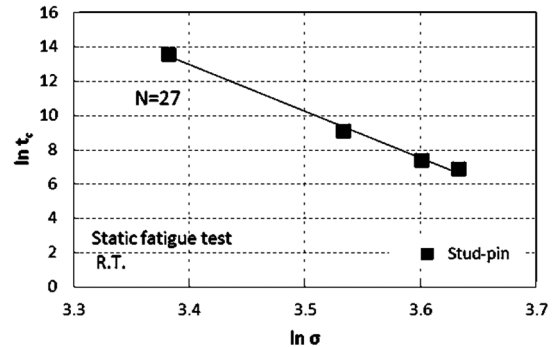


Fig. 1 Static fatigue test results with constant vertical stress applied to a REBCO tape at room temperature.

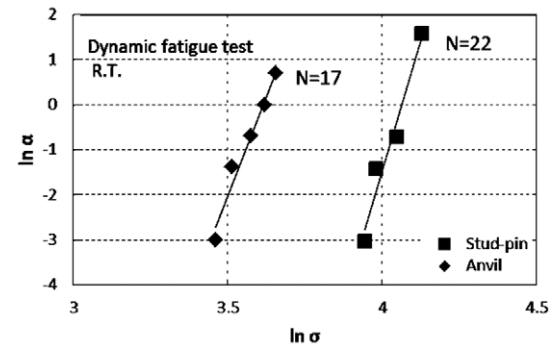


Fig. 2 Dynamic fatigue test results with constant vertical stress velocity applied to a REBCO tape at room temperature.

Table 1 Fatigue coefficients obtained from the static fatigue tests and the dynamic fatigue tests at room temperature.

Fatigue coefficient N	Static fatigue	Dynamic fatigue	
	Stud-pin	Stud-pin	Anvil
	27	22	17

4. まとめ

REBCO 線材の疲労挙動を調査するため、室温において静疲労試験と動疲労試験を実施した。これらの試験で得られた疲労係数はほぼ一致し、既報のセラミックスの値と同程度であることがわかった。今後は液体窒素中における動疲労試験試験を実施し、低温環境中の疲労特性を評価する予定である。

謝辞

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである。

参考文献

- [1] H. Kobayashi, *et al.*, Bulletin of the Japan Institute of Metals Vol. 27 (1988) 10 p.757.
- [2] D. Munz, *et al.*, Ceramics: Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection Springer Verlag (1999).

MgB₂ 線材を用いた大電流容量導体設計と SMES 用ダブルパンケーキコイルの安定性解析

Design Study of Large Scale Conductor and Stability Analysis of Pancake Coil using MgB₂ wire.

大久保 徹, 水野 伸哉, 谷貝 剛, 水落 空, 上林 昌弘, 神保 茉那, 高尾 智明(上智大学); 平野 直樹(中部電力); 槇田 康博, 新富 孝和(KEK); 駒込 敏弘, 塚田謙一(前川製作所); 恩地 太紀, 荒井 有気, 富田 優(鉄道総研); 濱島 高太郎(前川製作所)

OKUBO Toru, MIZUNO Shinya, YAGAI Tsuyoshi, MIZUOCHI Sora, KAMIBAYASHI Masahiro, JINBO Mana, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co., Inc.); MIKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK); KOMAGOME Toshihiro, TSUKADA Kenichi (Mayekawa MFG Co. Ltd); ONJI Taiki, ARAI Yuuki, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute); HAMAJIMA Takataro (Mayekawa MFG Co. Ltd)
E-mail: t-okubo@eagle.sophia.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ 線材の特性向上は 2T 程度の磁場中で臨界電流密度が 1000A/mm² を超えるものが市販されており、一方で次世代の電力システムでは、低炭素化を目指した水素の積極利用と、再生可能エネルギーによる発電の導入量増加が期待されている。我々のグループでは、MgB₂ 線材を用いた数 10kJ 規模の SMES コイルを液体水素間接冷却し、不安定な再生可能エネルギーの発電出力を安定化するシステムの開発を目指している。MgB₂ コイルの製作では、熱処理前後の許容歪み範囲内での大電流容量導体およびコイル設計が必要である。本計画では、熱処理後に撚り線・巻き線または撚り線後に熱処理して巻き線するリアクト・アンド・ワインド(R&W)および撚り線と巻き線後に熱処理するワインド・アンド・リアクト(W&R)法によるコイル製作を予定しており、歪みによる劣化を防ぎ、かつ熱的に安定なコイル設計・運転条件に関する包括的な研究が重要である。本報告では、このうち W&R コイル製作のための許容歪み内導体設計およびコイルの熱的安定性に関して報告を行う。

2. 導体・コイルの仕様と実験設定

MgB₂ 素線は HyperTech 社製(NM-30)を用いる。導体は、Table 1 に示したように、撚りピッチ 51 mm でレーストラック形状の Cu コア周りに 8 本の MgB₂ 素線と 2 本の Cu 線を撚り線したラザフォードタイプである。3次元空間曲線の理論より、熱処理前の許容曲げ歪み以内に収まっている事を確認している[1]。熱的安定性試験用に小型の試作コイル(内径 260 mm)を製作し、熱処理後にエポキシで含浸している。外乱印加用のヒータは 0.1mm 厚の Hastelloy を用いたジグザグパターンで、抵抗値 0.33 Ω、長さは約 17 mm である。ヒータは 10 ターンコイル中心(第5, 6 ターン間)に設置し、ヒータを中心に導体に沿って熱電対を 5 個(2 ターン分)、さらに第 4, 6 ターンに 2 個設置し、導体長手方向およびターン間方向の伝熱を観測する。また、電圧タップも同様に導体に沿った方向とターンを横切る方向に合計 14 か所設けて常伝導伝播の観測を行う。

Table.1 Specifications of MgB₂ conductor and test Coil

Strand, Conductor	
Diameter	0.83 mm
Num. of filament	30
Acceptable Strain (before heat treatment)	4 %
Construction	8 SC+2 Cu
Race Track Cu Core	1.0×2.2 mm (R0.5 mm)
Twist pitch	51 mm
Test Coil	
Type	Single Pancake
Inner diameter	260 mm
Num. of turn	10

3. 安定性解析

コイルの安定性を解析するにあたって、1次元の非定常熱伝導の方程式を以下に示す。

$$\gamma_d C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + G(T, I_t) - Q(T, t) + G_d(x, t) \quad [\text{W/m}^3] \quad (1)$$

左辺は導体の単位体積、単位時間当たりの熱の増加を表している。右辺第1項は熱伝導により隣接する要素に移動する熱量、第2項は常伝導転移した際に発生するジュール熱、第3項は冷媒に伝達される熱量、第4項は擾乱によって導体に加えられる熱である。冷凍機による伝導冷却を想定しているため、冷却項は無視する。この式は解析的に解けないため、収束が最も早いとされている Crank-Nicolson 法を用いて数値解析する。離散化した結果が式(2)である。時刻のサフィックスは j で、位置のサフィックスは i で表わす。

$$\lambda_d C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_d C_{i,j} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t}$$

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = k_{i,j} \frac{1}{2} \left\{ \frac{T_{i+1,j+1} - 2T_{i,j+1} + T_{i-1,j+1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right\}$$

$$\frac{\partial k}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 = \left(\frac{\partial k}{\partial T} \right)_{i,j} \cdot \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{T_{i+1,j+1} - T_{i-1,j+1}}{2\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta x} \right)^2 \right\}$$

$$G = G_{i,j}, G_d = G_{d,i,j} \quad (2)$$

4. 解析結果

解析結果の一例を Fig.1 に示した。ヒータ投入エネルギーが 24J と 9J のケースで、ヒータから 50mm 離れた位置での温度変化を、ヒータ投入時間 3sec 以後 10sec まで計算した。クエンチからの回復の有無が確認できるので、これを用いて実験結果の解析を行い、その結果を報告する。

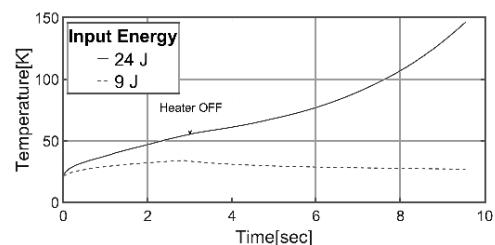


Fig.1 Time evolution of temperature at 50mm from heater

本研究の一部は、科学技術振興機構 先端的低炭素化技術開発(ALCA)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

1. T. Yagai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.11

高強度 Bi-2223 コイルと REBCO コイルの熱暴走の振る舞いの顕著な差

Remarkable difference in thermal runaway behavior between a Ni-alloy reinforced Bi-2223 coil and a REBCO coil

末富 佑(千葉大); 持田 寛希, 高尾 智明(上智大学); 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)
 SUETOMI Yu (Chiba Univ); MOCHIDA Hiroki, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ);
 YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (RIKEN)

1. はじめに

高磁場・高電流密度の REBCO コイルでは、機械的な劣化に起因して熱暴走が起き、焼損する事例が多い。[1] 一方で、同様の条件で運転可能な Ni 合金補強の高強度 Bi-2223(以下 Bi2223NX)コイルでも、この線材の特徴である折れや座屈による劣化[2]に起因した熱暴走が問題となる可能性があるが、その振る舞いは明らかになっていない。本報では、折れによる局所劣化を持つ Bi2223NX パンケーキコイルと REBCO パンケーキコイルの 77 K 自己磁場における熱暴走の振る舞いを観察し、両コイル間の顕著な差を明らかにした。

2. 実験方法

住友電工製の Bi2223NX 線材(幅 4.5 mm、厚み 0.30 mm、補強材厚み $30 \mu\text{m} \times 2$)とフジクラ製の REBCO 線材(幅 4.0 mm、厚み 0.13 mm、銅厚み $50 \mu\text{m}$ 、ハステロイ厚み $75 \mu\text{m}$)を用いて、内径 80 mm の 5 ターン巻シングルパンケーキコイルをそれぞれ作製した。これらのコイルを液体窒素に浸し、励磁速度 0.133 A/s で過電流試験を行い、熱暴走を発生させ、コイル電圧をサンプリング周期 6 s で測定した。また、3 層目中央に折れによる劣化箇所を与えた局所劣化コイルをそれぞれ作製し、同様の実験を行った。劣化部における発生電圧は、100 A 通電時に REBCO コイルで 2.0 mV、Bi2223NX コイルで 3.0 mV であり、同程度の劣化にした。

3. 実験結果

Fig. 1 に REBCO コイル, Fig. 2 に Bi2223NX コイルの V-I 特性を示す。劣化のない健全 REBCO コイルは、コイル臨界電流値 $I_{c,coil} = 128 \text{ A}$ に対する負荷率 127%に相当する 162 A (線材電流密度 $J_{cond} = 311 \text{ A/mm}^2$) で熱暴走した。ここで、 $I_{c,coil}$ は短尺線材における I_c -B 曲線とコイルのロードラインの交点から求めた電流値である。健全 Bi2223NX コイルは、 $I_{c,coil} = 116 \text{ A}$ に対する負荷率 173%に相当する 201 A ($J_{cond} = 149 \text{ A/mm}^2$) で熱暴走した。

局所劣化 REBCO コイルの場合、コイル臨界電流値以下の 117 A (負荷率 91%, $J_{cond} = 225 \text{ A/mm}^2$) で熱暴走に至った。このときの劣化ターンの発熱量は 0.7 W であった。一方、劣化 Bi2223NX コイルの場合、コイル臨界電流値を大きく上回る 190 A (負荷率 164%, $J_{cond} = 141 \text{ A/mm}^2$) まで熱暴走に至らなかった。このときの劣化ターンの発熱量は 4.7 W であった。すなわち、Bi2223NX コイルにおいては、折れという破壊的な劣化を有しているのにも関わらず、REBCO コイルと比べて熱暴走が起きにくく、また、熱暴走電流は健全コイルとほぼ差が無い事が明らかとなった。

4. 数値解析による考察

実験結果が示す通り、77 K 自己磁場において、同程度の局所劣化を持つ Bi2223NX コイルは REBCO コイルと比べ、一桁大きい発熱に耐える。この顕著な差異について、数値解析を用いて考察する。

両コイルについて、コイル周方向と径方向の熱伝導と、安定化層と超伝導層の並列回路からなる回路方程式によってモデル化した。解析結果の V-I 特性が、劣化コイルの実験結果と振る舞いが一致する事を確認し、モデルの妥当性を確認した。

この解析モデルを用いて、局所劣化コイルの劣化部近傍

の健全部における、単位体積あたりのジュール発熱-温度 (Q - T) 曲線を比較した。Bi2223NX コイルは、REBCO コイルに比べて電流分流通温度 T_{cs} から臨界温度 T_c までの温度マージンが 3 倍大きく、 T_{cs} - T_c 間の Q - T 曲線の勾配は、REBCO コイルに比べて 1/3 であった。これは熱暴走の駆動力となる温度上昇/抵抗増加/発熱量増加の熱的フィードバックが弱い事を示している。このため、REBCO に比べて熱暴走が大幅に起きにくいのである。

5. まとめ

Bi2223NX コイルは REBCO コイルに対し、熱的安定性が高く、局所劣化があっても、77 K 自己磁場の浸漬冷却下において、健全コイルと同レベルの電流まで熱暴走を起こさない。これは高磁場コイル応用を想定した場合、有利な特徴である。今後、実コイルの運転条件下である 4.2 K 外部磁場中における熱暴走特性の検証を行う。

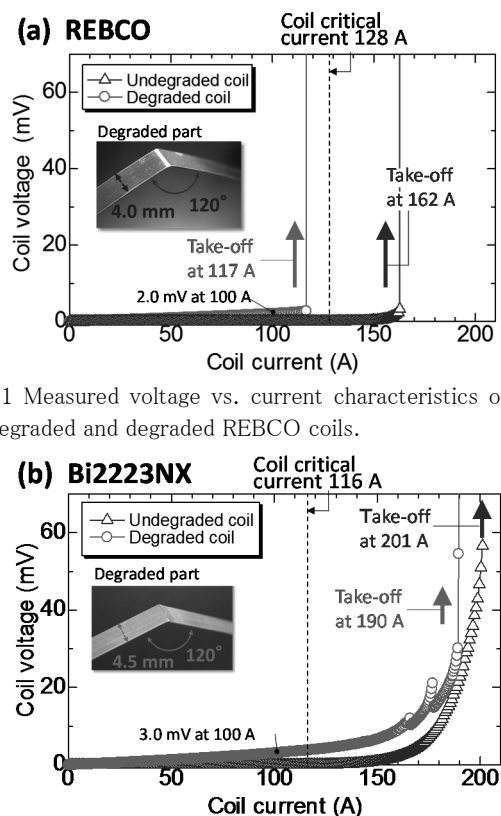


Fig.1 Measured voltage vs. current characteristics of the undegraded and degraded REBCO coils.

Fig.2 Measured voltage vs. current characteristics of the undegraded and degraded Bi2223NX coils.

参考文献

1. Y. Yanagisawa, et al.: IEE/CSC & ESAS SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM (2016) HP112
2. M. Nawa, et al.: IEEE TAS 27 (2017) 8400404

謝辞

本研究は JST の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノバ)の支援によって行われた。

高温超電導コイルのクエンチ保護と線の最大許容欠陥長さ(MAD)

Quench protection of HTS coil and maximum allowable defect of HTS tape

小島 あかね, 松尾 竜太, 松田 直大, 澁田 佳稀, 高尾 智明, 塚本 修巳 (上智大学)

Akane Kojima, Ryuta Matsuo, Naohiro Matsuda, Yoshiki Fuchida, Tomoaki Takao, Osami Tsukamoto

(Sophia University, Tokyo, Japan)

E-mail: a-kojima-we8@eagle.sophia.ac.jp

1. はじめに

HTS コイルの予期せぬクエンチの主要原因は線材にある欠陥によるものと考えられる。本稿ではコイルの運転が継続できる欠陥の大きさの最大許容値(Maximum allowable defect: MAD)についてシミュレーションにより検討を行った。検討の結果、クエンチを検出し適正に保護すれば、運転条件を変えることにより、クエンチを起こす電流値を向上させることができることが分かった。さらに、クエンチ保護条件についても検討を行った。

2. 最大許容欠陥長さ(MAD)

カプトテープにより電気的に絶縁された線材を平行に並べ、その両端及び底面に冷却板を取り付けたことを想定したモデルを作成した。中心となる層に劣化部を設け、HTSコイルが部分的な欠陥における I_c の低下によりクエンチが発生することを模擬している。本解析モデルにおける熱伝導方程式を以下に示す。[1]

$$C_p \frac{\partial T_i(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(K \frac{\partial T_i(x, t)}{\partial x} \right) + P_i(x, t) - h_l(2T_i - T_{i-1} - T_{i+1}) - h_b(T_i(x, t) - T_{CB}) \quad (1)$$

C_p は熱容量、 $T_i(x, t)$ は第 i 層における温度、 T_{CB} は運転温度、 K は線材単位長さ当たりの熱伝導率、 h_l 及び h_b はそれぞれ層間、底面への熱伝導率である。また、 $P_i(x, t)$ は第 i 層におけるジュール熱を表す。層方向及び冷却板との間の熱伝達率は実験値を用いている。このモデルにおいて劣化部の長さ及び劣化率を変化させて解析を行った。ただし、劣化率 η とは、劣化部の I_c についての値であり以下の式に定めるものとする。

$$\eta = \frac{(\text{線材の } I_c) - (\text{劣化部の } I_c)}{(\text{線材の } I_c)} \quad (2)$$

Fig. 2 に通電電流 250 A とした場合の劣化率 η と最大許容欠陥長さの関係を示す。劣化率が高くなるほど、MAD は短くなった。これは劣化率が大きくなることにより、劣化部での発熱量が増えることによるものである。

また劣化率を一定とすれば、運転温度を下げることで MAD は長くなった。したがって、同じ長さ及び劣化率の劣化部を持つ HTS コイルについて、運転温度によりクエンチ電流値を向上させることができる。

3. クエンチ解析

通電電流 250 A、電流減衰時定数 $\tau = 10$ s、劣化率 $\eta = 100$ %とし、劣化部の長さを変えコイルを保護することのできるクエンチ検出電圧の最大値を Fig. 1 に示すモデルにより求めた。その結果を Fig. 3 に示す。ただし、クエンチ保護の過程においてホットスポットとなる劣化部の温度が 280 K を超えない場合、コイルはクエンチによる損傷から保護可能であるとされた。

クエンチ保護を行わなかった場合 Fig. 3 中の点線に示すように MAD=1.28 cm であったにもかかわらず、クエンチ保護を行うことにより MAD を 23 cm までのばすことができた。また、劣化部の長さが 23cm 未満の場合、Fig. 3 に示す値よりもクエンチ検出電圧を小さく設定することでコイルを保護することができる。

4. まとめ

以上、HTS コイルに欠陥がありクエンチを起こした場合、適切なクエンチ保護条件を設定することによりコイ

ルを保護することができることを示した。また、適正に保護をしたうえで運転温度を下げることにより、クエンチを起こす電流値を向上させることができることが分かった。

参考文献

- [1] E. Sasaki, et al, IEEE TAS, Vol.26 (2016) 6603705, et al, IEEE trans. on ASC, Vol.26(2016), Issue: 4, June 2016 art. ID. 4701404

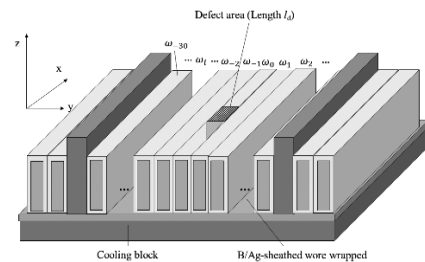


Fig. 1. Analytical model of winding pack of HTS coil for numerical simulation

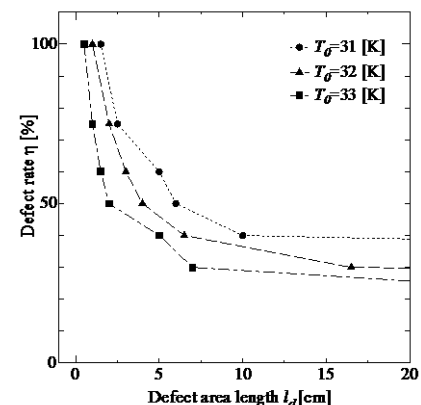


Fig. 2. Analytically obtained graphs of l_d vs. η for $T_\delta=31$ -33 K

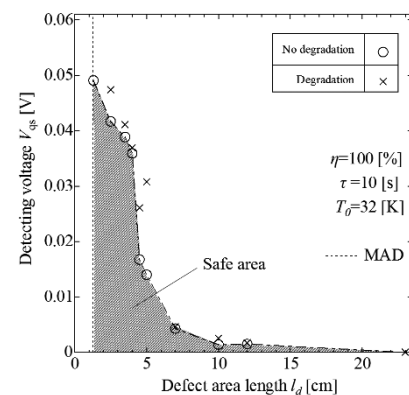


Fig. 3. Analytically obtained safe area where a coil is free from damages in V_{gs} vs. τ .

ML-MI REBCO パンケーキコイルにおける 層間電気抵抗の調整実験

Experiment of Adjustment of Turn-to-turn Electrical Resistance in ML-MI REBCO Pancake Coil

市川 哲理, 矢代 聡佳, 鄭 齊一, 柿本 雄太, 石山 敦士(早稲田大学); 野口 聡(北海道大学)
 ICHIKAWA Tetsuri, YASHIRO Satoka, Zheng Qiyi, KAKIMOTO Yuta, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
 NOGUCHI So (Hokkaido Univ.)
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

無絶縁コイル(以下「NIコイル」)は、二律背反の関係にある高電流密度化と高熱的安定性を両立できる巻線方式として期待されている。しかし、NIコイルには励磁の際に発生磁場が遅れるという課題がある。そこで、NIコイル内の層間電気抵抗を調整することで励磁遅れを抑制する方法が検討・提案されている[1]。先行研究[2]により、高熱的安定性を保ちつつ励磁遅れを抑制することができる適切な層間電気抵抗の値が求められているが、実際に NI コイル内の層間電気抵抗を調整する方法は未だ確立されていない。そこで、金属テープを複数枚共巻きする巻線方式である:ML-MI (Multi-Layer Metal-Insulation)を提案する。今回は内径 60[mm]の小口径 ML-MIコイルを複数作製して実験を行い、層間電気抵抗を接触面の数(金属テープの枚数)によって調整する方法について検討したので報告する。

2. 実験方法

今回の実験で用いた試作コイルのREBCO線材の諸元を Table.1 に、各コイルの諸元を Table.2 に示す。また、試作コイルの写真を Fig.1 に示す。ML-MIコイルはそれぞれ厚さの異なる金属テープを用いて、共巻きなし、1枚共巻き、2枚共巻きの計 5 つを作製した。共巻きした金属テープはSUSテープであり、厚さは 30[μm]と 50[μm]の 2 種類を用意した。

これらの試作コイルにおいて遮断実験を行い、中心磁場の減衰時定数からそれぞれの層間電気抵抗を求めた[3]。

3. 実験結果

実験結果から SUS テープを共巻きした際の、各コイルの層間電気抵抗を求めたグラフを Fig.2 に示す。層間電気抵抗は共巻きする SUS テープの枚数が多くなるほど大きくなり、SUS テープの厚さの影響はなく、接触面の数に比例している。この結果から、層間電気抵抗の大きさは層間の接触電気抵抗が支配的であることがわかる[1]。したがって、共巻きする金属テープの枚数を増やすことで接触面の数を増やし、層間電気抵抗を調整できる可能性を確認することができた。

今後は SUS テープの代わりに銅テープを共巻きした場合等について検討していく予定である。

本研究は科研費基盤研究 A(No. 26249036)によった。

参考文献

1. S. Noguchi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 24, no. 3, art. no. 4701504, 2014
2. K. Katsumata, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) P.93
3. X. Wang, et al.: Supercond. Sci. Technol., vol. 26, art. no. 035012, 2013

表 1 REBCO 線材の諸元

Overall [mm]	4.02
Copper stabilizer thickness[μm]	20per
Tape Ic @77K, self-field [A]	>80

表 2 試作 ML-MI コイルの諸元

Coil Parameters	
Height [mm]	4.02
Turns	60
i.d [mm]	60
SUS tape	
Width [mm]	4.00
Thickness [μm]	30,50

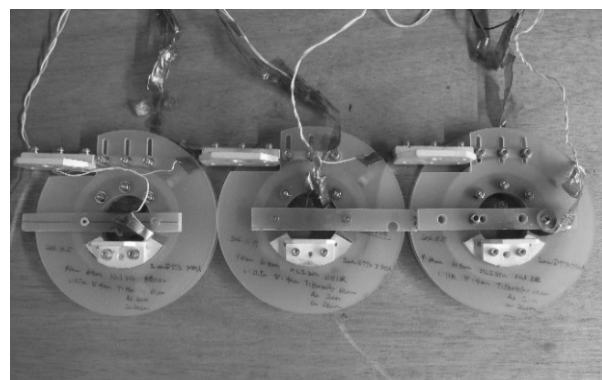


図 1 ML-MI コイルの写真

Fig.1 Picture of ML-MI coils

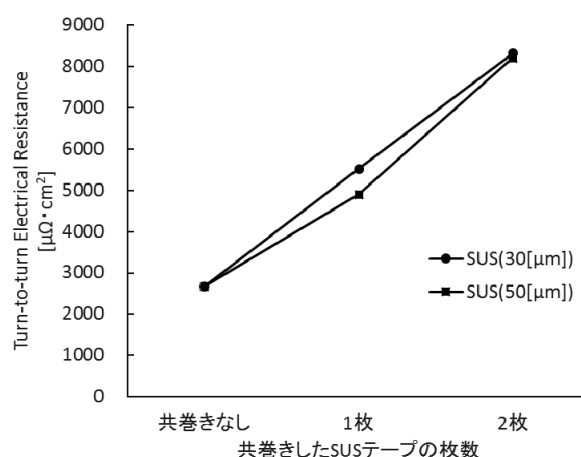


図 2 SUSテープを共巻きしたML-MIコイルの層間接触電気抵抗

Fig.2 Turn-to-turn contact resistance of ML-MI coils co-wound with stainless steel strips