

特集：浮上式鉄道の技術と超電導の実用に向けた研究

二ホウ化マグネシウム線材を用いた超電導コイルの開発

恩地 太紀* 小林 祐介* 富田 優**

Development of Superconducting Coils Using MgB₂ Wires

Taiki ONJI Yusuke KOBAYASHI Masaru TOMITA

To realize carbon neutrality, we are developing energy storage technology. In the railway field, superconducting magnetic energy storage (SMES) has an advantage assuming a unique power load that frequently changes by train powering and braking. So, we have been developing superconducting coils for SMES using MgB₂ superconducting wire which has low cooling cost and manufacturing cost. It has been reported that MgB₂ superconducting wire is sensitive to bending strain and MgB₂ wire deteriorates under certain bending strain. Therefore, we evaluated superconducting characteristics of superconducting stranded conductors. Also, the deterioration due to the dent was investigated. As a result, it was clarified that not only bending strain but also dents due to compression lead to deterioration of superconducting characteristics.

キーワード：超電導, 二ホウ化マグネシウム, 電力貯蔵装置, 曲げ歪み, 超電導コイル

1. はじめに

近年, 多くの国でカーボンニュートラルが掲げられ, 温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする脱炭素社会の実現に向け, 活発な取り組みがなされている。日本の二酸化炭素総排出量は2020年度で11億4900万 ton-CO₂であり, エネルギー転換部門の直接排出量は約4割を占める¹⁾。このほとんどは発電に伴うものであり, その中でも石炭や石油といった発電燃料の燃焼による火力発電が大半を占めている。そのため, 電源の脱炭素化のカギとして, 再生可能エネルギーの導入拡大による主要電力化が検討されている。しかしながら, 太陽光や風力といった再生可能エネルギーは自然条件によって出力が変動するため, この調整力として, 電力貯蔵装置や水素, デマンドレスポンスの活用といった取り組みがなされ, 特に電力貯蔵では大容量化や数時間の連続充放電の実現に向けた技術開発が望まれている。

一方, 鉄道分野においても再生可能エネルギーに関する取り組みがなされている。主に駅や駅ビル等の照明やバリアフリー設備に係る電力の補助として活用されているが, 調整力としての電力貯蔵技術開発が進展すれば, 今後運転用電力として賄うことも十分に想定される。

現在, 鉄道分野における電力貯蔵は, 他の車両で消費しきれない回生電力を一時的に蓄えるものとして, リチウムイオン電池やニッケル水素電池を用いた電力貯蔵が主に使用されている。鉄道車両の駆動電力は力行とブレーキを繰り返すことから, 充放電の頻度が高い特有の

負荷である。しかしながら, 従来の電池は化学反応を利用しているため, 急速な充放電は難しく, 回数に制約があるといった課題を有する。

そこで鉄道総研では, 超電導技術を用いた電力貯蔵の研究開発を進めている²⁾。超電導とは, 物質をある温度まで冷却することで電気抵抗が突然ゼロになる現象(完全導電性)のことを指し, この現象が生じる物質を超電導体と呼ぶ。超電導となる温度を超電導転移温度(T_c)といい, この T_c が比較的高い(25K以上)超電導体は一般に高温超電導体と呼ばれる。冷媒に従来の超電導体で必要とされた液体ヘリウム(沸点4.2K)を使用せずに超電導状態となることから, 実用的な材料として応用に向けた研究開発が活発に進められている。

本報告では, 完全導電性を利用し, 超電導体によるコイルに電力を磁気エネルギーとして直接保存する電力貯蔵装置である超電導磁気エネルギー貯蔵装置(以下, SMES)について概略を述べ, 超電導コイルへの適用を想定した新しい超電導体である二ホウ化マグネシウム(MgB₂)の特性評価について報告する。

2. 超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES)

SMESとは, 超電導線材をコイル状に巻いた超電導コイルに直流電流を流すことでエネルギーを貯蔵する装置である。超電導の完全導電性により, 超電導コイルに電流を流し続けても発熱せず, また, 超電導コイルのインダクタンス L [H]と抵抗 R [Ω]に依存する電流の減衰時定数($\tau=L/R$)が無限大となるため, 半永久的にエネルギーの貯蔵が可能となる。一方, 銅などの一般的な金属材料を使用した場合は, 電気抵抗を有するため時間と

* 浮上式鉄道技術研究部 超電導・低温研究室

** 浮上式鉄道技術研究部

もに電流が減衰，貯蔵エネルギーも減少する。つまり，超電導体を使用することで初めて成立する装置である。

2.1 SMES の原理

SMES は，電力を貯蔵する超電導コイル，永久電流スイッチから構成される。図1に SMES の原理を示す。充電時は永久電流スイッチを開放し，外部から超電導コイルへ通電する。電流が流れている状態で永久電流スイッチを投入することで閉回路が構成され，電流は超電導コイル内を流れ続け，磁気エネルギーとして電力を貯蔵する。放電時には，永久電流スイッチを開放することで外部に電流を放出する。SMES の貯蔵エネルギー E [J]は，超電導コイルのインダクタンス L [H]と通電電流 I [A]の二乗に比例し，式(1)で表される。そのため，貯蔵エネルギーの増加は，超電導コイルのインダクタンス，または電流の増加によって制御でき，大容量化が容易である。

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

2.2 SMES の特徴

SMES は他の電力貯蔵装置と異なり，電気エネルギーを化学エネルギーや運動エネルギーなどに変換することなく，超電導コイルに電流を流したまま貯蔵するため変換の損失がなく，貯蔵効率が高い。また，1秒程度の短時間で貯蔵エネルギーをすべて放出できるほど入出力時の応答性が早く，さらに，化学変化や摩擦部が存在しな

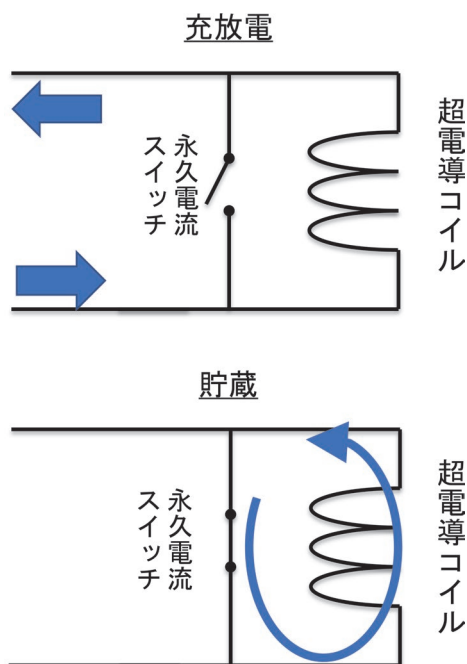


図1 SMES の原理

いため，繰り返しの充放電に対して機器の寿命が長いことが特徴として挙げられる。これらの理由により，力行やブレーキによる短時間での電流の出し入れが想定される鉄道負荷に適した貯蔵装置であるといえる。

3. ニホウ化マグネシウム (MgB₂)

MgB₂ は 2001 年に発見された比較的新しい超電導体である³⁾。従来の超電導コイルやマグネットには，Nb-Ti (T_c : 9.5K) や Nb₃Sn (T_c : 18.3K) といった金属系超電導体を使用されており，液体ヘリウム温度まで冷却する必要があったが，MgB₂ は金属系超電導体として 39K という最も高い T_c を有し，液体ヘリウムを必要としない温度領域で動作可能な超電導体である。冷凍機による冷却も可能となることから，冷却コストの低減が期待できる。以上のことから，鉄道総研では，MgB₂ 線材を用いた超電導コイルの設計・試作に取り組んでいる。

4. MgB₂ を用いた超電導コイルの開発

MgB₂ 線材を用いた 30kJ 級の超電導コイルについて設計・検討を行った(表1)。5つのダブルパンケーキコイル (SDP) から構成し，定格電流 600A 通電時に，最大磁場 1.7T，貯蔵エネルギー 30kJ となる。

4.1 MgB₂ 線材

MgB₂ 線材 (図2) は，一般的に Powder In Tube (PIT) 法で製作される。PIT 法は，材料粉末を金属管に充填して加工・焼成する方法であり，MgB₂ 線材の場合は焼成時に他の元素との反応を防ぐため金属管にはニオブ (Nb) や鉄 (Fe)，タンタル (Ta)，ステンレスが使用される。さらに，ある程度加工した線材を束ねて金属管に挿入し，これを加工して得られる多芯線も製作される。MgB₂ 線材は焼成により超電導特性を示すが，焼成が曲

表1 30kJ 級 SMES コイルの仕様

使用コイル	5 ダブルパンケーキコイル (SDP)	
定格電流 [A]	600	
最大磁場 [T]	1.7	
貯蔵エネルギー [kJ]	30	



図2 MgB₂ 線材の外観

げ歪みなどの機械特性を低下させる要因となっている。

本開発では、PIT法とよく似たCTFF (Continuous Tube Filling and Forming) 法で製作された未焼成 MgB_2 線材を使用した。CTFF法とは、金属テープを水平方向に送りながら半円状に成型し、MgとB粉末を充填した後、円形に成形するとともに継ぎ目を閉じ、連続的な金属パイプとし、さらに圧延加工や伸線加工を加えて単芯線とする方法である(図3)。これを複数本束ねて多芯線とし、 MgB_2 線材が構成されている。

図4にCTFF法で製作した MgB_2 線材の断面図を示す。線材径は0.83mmであり、安定材としての銅(Cu)を中心部とし、その周りに30本のニオブ(Nb)で覆われた MgB_2 フィラメントを配置、最外層をニッケル銅(CuNi)とした。また、許容曲げ歪みは焼成前で約4%となっている。

直線状で焼成した MgB_2 線材に対して、冷凍機による伝導冷却下で通電し、磁場中の超電導特性(臨界電流値:超電導状態で流すことができる最大電流値)を評価した。結果を図5に示す。20Kゼロ磁場で約240Aの臨界電流値を示し、磁場を印加するほど、また、温度が高いほど臨界電流値が低下する。30kJ級の超電導コイルを構成する場合、1.7Tの磁場下で600Aの臨界電流値が必要となるが、 MgB_2 線材1本では不足するため、複数の線材を熱線導体化する必要がある。

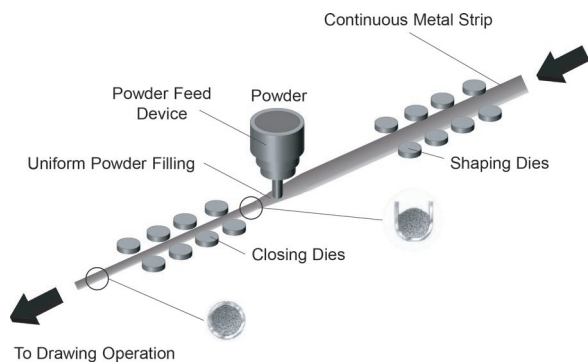


図3 CTFF法による製法過程

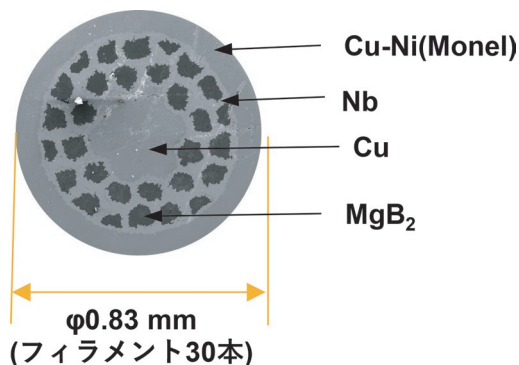


図4 MgB_2 線材の断面図

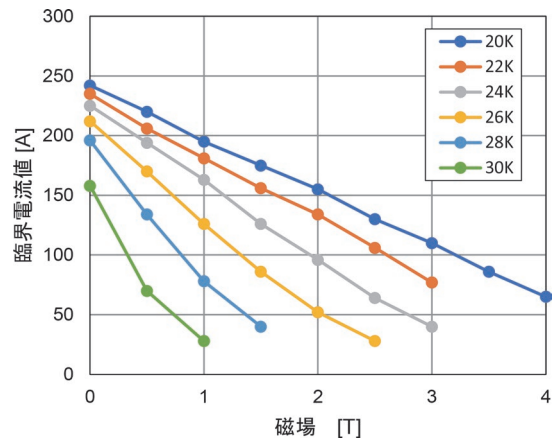


図5 伝導冷却下での臨界電流値の磁場依存性

4.2 MgB_2 線材を使用した超電導コイル

前述の通り MgB_2 線材1本では必要な電流容量が不足するため、複数の MgB_2 線材を用いて熱線導体を構成し、それを用いて超電導コイルを試作した。 MgB_2 線材は、焼成により超電導特性を示すが、この焼成により機械特性が低下する。コイルを構成する方法として、焼成を施した線材を用いて巻線するReact & Wind (R&W)法と、巻線後に焼成を施すWind & React (W&R)法の2つの方法がある。巻線するには線材に機械的応力が加わるため、W&R法が適しているが、コイルが収まる大きな焼成炉が必要となるため、大型コイルを製作するには、R&W法を適用せざるを得ない場合がある。本開発では、W&R法でコイルを製作し、超電導特性を評価した。

構成した MgB_2 導体の断面図を図6に示す。中心のコアにはCuNi被膜のCuを使用し、その周りに MgB_2 線材8本と同径のCu線を4本、合わせて12本の線材を撚りピッチ52mmで巻き付けた形状とした。

この MgB_2 導体を用いて超電導コイルを構成した場合

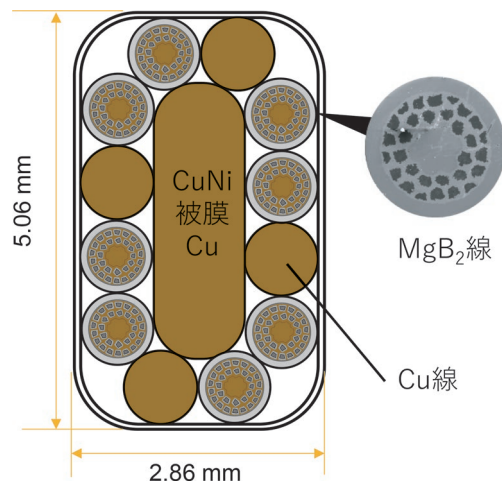


図6 MgB_2 導体の断面図

の MgB_2 線材が受ける複合曲げ歪みについて、微分幾何学に基づき解析を実施した(図7)。 MgB_2 線材の許容曲げ歪みが4%であることから、裕度をとり最大曲げ歪みが2%以下となるよう設計し⁴⁾、W&R法で MgB_2 超電導コイルを試作した(図8)。試作した超電導コイルの仕様を表2に示す。内径200mm、10ターンのシングルパンケーキコイル(SP)形状で、実機としては2つのSPが合わさったDPを複数個積層することを想定している。

冷凍機による伝導冷却下で実機を想定した外部磁場中における通電試験を実施した⁵⁾。結果を図9に示す。印加磁場1.7Tで定格電流600Aを通電させるためには、26Kより低温に冷却する必要があることを確認し、30kJ級の超電導コイルへの適用が可能であることを示した。

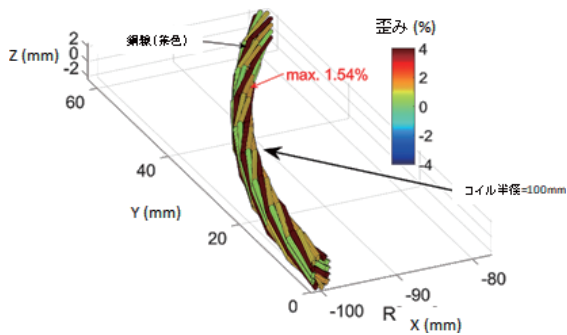


図7 MgB_2 超電導コイルの曲げ歪み解析の一例

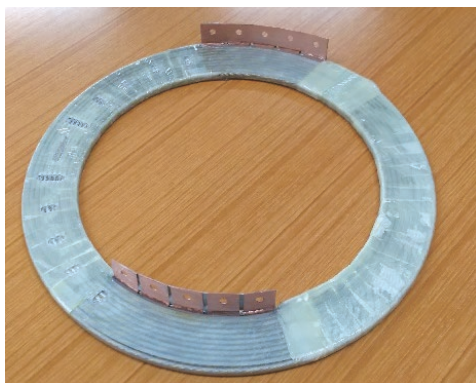


図8 試作した MgB_2 超電導コイルの写真

表2 試作した MgB_2 超電導コイルの仕様

製法	W&R	
内径	[mm]	200
外径	[mm]	269
ターン数	[-]	10
定格電流	[A]	600
高さ	[mm]	5.06
最大磁場	[T]	0.168

しかしながら、撚線導体化およびコイル化加工を施した超電導コイルの超電導特性を、コイル化の際に使用した線材8本分の超電導特性と比較すると(図10)、コイル化した状態では最大で65%程度まで超電導特性が低下していることがわかる。そこで、 MgB_2 線材単体の許容曲げ歪み以内で製作したにもかかわらず、特性が低下した原因について調査を行った。

5. 超電導コイル加工による劣化原因の調査

5.1 MgB_2 線材の撚線導体

撚線導体加工に伴う MgB_2 線材の特性変化を調べるため、 MgB_2 線材を10本使用した撚線導体(図11)を製作した。製作した撚線導体は表3に示す様に撚りピッチを変化させ、撚線状態における超電導特性と、撚りほぐした線材における超電導特性の両方を評価できる構造とし、撚線加工後に焼成を施した。撚りピッチは導体形状が維持できるよう、82mm、69mm、58mmとし、ローラーによって大きく圧縮されない程度に固定した。圧縮

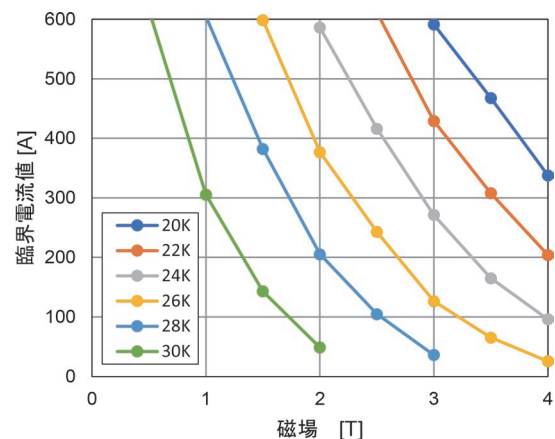


図9 超電導コイルの臨界電流値の磁場依存性

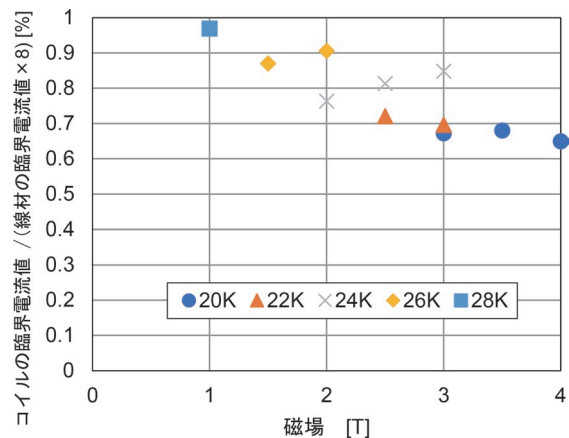


図10 コイル加工後の超電導特性と線材での超電導特性の比較図

された撚線導体は撚線前と比較し、導体幅が最大で3%程度減少した。厚み、幅はそれぞれ準備したサンプルごとにはばらつきがあるが、平均値を示した。また、比較対象として、直線の線材を Original とした。

Original の臨界電流値との比較を図 12 に示す。撚線導体は Original の 10 本分の値と比較した。いずれの撚りピッチにおいても直線線材 (Original) と比較すると臨界電流値が低下していることが分かる。さらに、撚りほぐし線材より撚線導体の方が大きく低下している。これは、撚線導体で加わる曲げ歪みは塑性変形と弾性変形の両方の領域における力が印加しており、撚りほぐした際には、弾性変形領域の歪みが緩和されるためだと考えられる。

5.2 MgB₂ 線材の圧縮歪み加工

撚線導体化するには、機械的に密着してまとまりが確保できるよう、導体の厚み方向および幅方向から 2 組のローラーダイスによって圧縮する必要がある (図

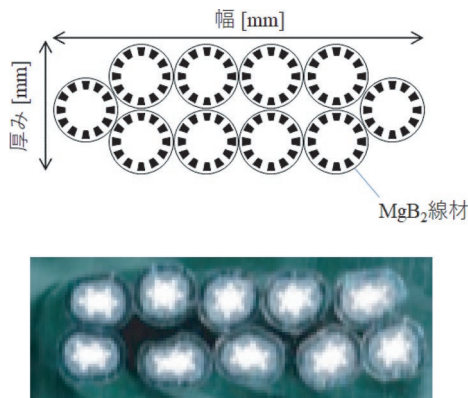


図 11 撚線導体の断面模式図および断面写真

表 3 製作した撚線導体の諸元

ID	厚み [mm]	幅 [mm]	形状	ピッチ [mm]	数
Original	-	-	-	0	2
10-S82	1.62	4.82	撚りほぐし線材	82	3
10-R82			撚線導体		4
10-S69	1.60	4.82	撚りほぐし線材	69	4
10-R69			撚線導体		3
10-S58	1.61	4.81	撚りほぐし線材	58	4
10-R58			撚線導体		2

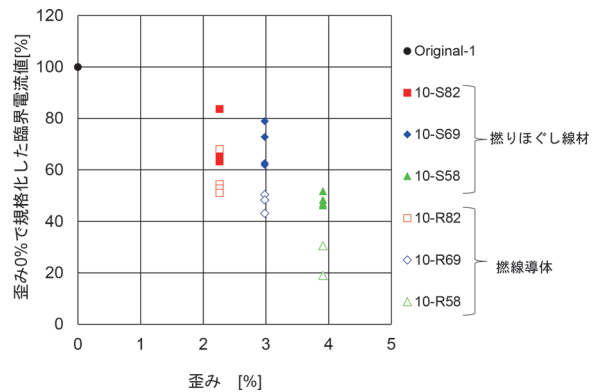


図 12 直線線材 (Original) と撚線導体および撚りほぐし線材との臨界電流値の比較

13)。この圧縮によって線材が変形し、超電導特性に影響を及ぼしている可能性がある。そこで、この圧縮に対する耐力を確認するため、撚りピッチに対応する交差角度をつけた MgB₂ 線材 2 本を上下から圧縮 (交差圧縮荷重) させて臨界電流値を測定することで、MgB₂ 線材の交差圧縮荷重依存性を測定した。例として、撚りピッチを 82mm (交差角度 14 度) とした場合の評価結果を図 14 に示す。

交差圧縮荷重が 400N を超えると臨界電流値の低下が見られたことから、撚線導体化する場合は 400N 未満の荷重で成型する必要がある。また、撚線加工によって線材が変形することで、許容曲げ歪み以内の範囲であっても、超電導特性が低下する可能性があることを明らかにした。

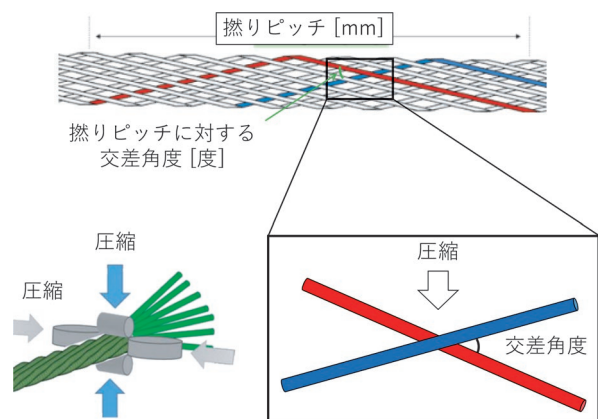


図 13 成型時の交差圧縮荷重のイメージ図

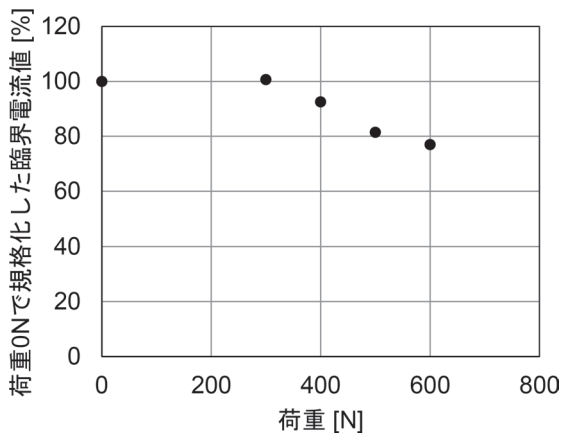


図 14 撚りピッチ 82mm の時の交差圧縮荷重依存性

6. まとめ

回生電力を一時的に蓄える電力貯蔵装置として、従来の Nb-Ti や Nb₃Sn といった金属系超電導体と異なり、冷却コストの低減が期待できる MgB₂ 線材を用いた超電導コイルの開発を進めている。

MgB₂ 線材は製造過程で焼成が必要であるが、焼成が曲げ歪みなどの機械特性を劣化させる要因となっている。特に焼成後のほうが劣化しやすいが、焼成前においても一定の曲げ歪み以上で超電導特性が劣化することが知られている。一方で、許容曲げ歪み以内で超電導コイルを試作したにもかかわらず、超電導特性の低下を確認した。その原因究明として、複数の撚りピッチで試作した撚線導体を用いた超電導特性の評価、及び、撚線導体製作時に加わる圧縮凹みによる劣化の調査を実施した結果、曲げ歪みによる超電導特性の劣化以外にも、導体化する際

の交差圧縮荷重の影響が大きいことを明らかにした。

本研究は国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業・先端的低炭素化技術開発 (ALCA) JPMJAL1002 の助成を受けて実施した。

文献

- 1) 国立環境研究所 2020 年度 (令和 2 年度) の温室ガス排出量 (速報値) について: <https://www.nies.go.jp/whatsnew/20211210/20211210.html> (参照日: 2022 年 3 月 11 日)
- 2) 恩地太紀, 石原篤, 小林祐介, 福本祐介, 富田優, 濱島高太郎: ニホウ化マグネシウム超電導線材を用いた蓄電用超電導コイルの基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.32, No.10, pp.41-46, 2018
- 3) J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, I. Zenitany and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," Nature, Vol.410, p.63, 2001.
- 4) S. Mizuno, T. Yagai, T. Okubo, S. Kamibayashi, M. Jimbo, T. Takao, Y. Makida, T. Shintomi, N. Hirano, T. Komagome, K. Tsukada, T. Onji, Y. Arai, M. Tomita, D. Miyagi, M. Tsuda, T. Hamajima, "Feasibility Study of MgB₂ Cable for Pancake Coil of Energy Storage Device," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.28, No.3, 4602505, 2018.
- 5) M. Tomita, T. Onji, A. Ishihara, Y. Kobayashi, Y. Fukumoto, S. Mizuno, T. Yagai, T. Takao, T. Komagome, K. Tsukada, T. Hamajima, "Superconducting Properties of a Prototype Pancake Coil Using a MgB₂ Rutherford-Type Stranded Conductor," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.28, No.3, 5700604, 2018.