

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008 ～ 2009

課題番号：20760186

研究課題名（和文）：高抵抗金属母材を持つ低損失型線材による伝導冷却型低温超伝導パルスコイルの高性能化

研究課題名（英文）：Improvement of performance of conduction cooled LTS pulse coils by using low temperature superconducting wires with high resistive matrix

研究代表者

川越 明史 (KAWAGOE AKIFUMI)

鹿児島大学・大学院理工学研究科（工学系）・助教

研究者番号：40315396

研究成果の概要（和文）：半導体工場などを瞬時電圧低下から保護するための電力貯蔵装置の開発が期待されている。このためには数 MW 級の出力を 1 秒間出力することが要求される。このような装置として超伝導電力貯蔵装置が期待されている。本研究では、この装置に使用する伝導冷却型パルスコイルを低コストで開発するための検討を行った。生産コストの最も低い NbTi 線材を使用する場合、CuNi 等の高電気抵抗材料を母材に使用した低損失線材を使用した方が、よりコンパクトで低コストにできることを示した。また、安定性の高い Cu 母材の NbTi 線材でも、テープ形状導体を使用し、コイル構造材への熱拡散効果を最適設計することによって、従来型よりも性能向上が期待できることを明らかにした。さらに、20K で使用することが期待されている MgB₂ 線材を使用した場合の検討も行い、その性能向上のためには高アスペクト比のテープ形状にすることが有効であることを短尺線材の試験で明らかにした。ならびにこのようなテープ形状の線材を活用するための導体設計についても検討を行い、3T 級の磁界が発生できる小型のコイルを並列導体で巻線し、安定に通電できることを実験的に示した。

研究成果の概要（英文）：

It is expected to develop the devices for protection of some production plants, such as semiconductor production plants, from momentary voltage drops. These devices are required to output the power of several MW for 1 second. As one of candidates, superconducting magnetic storage systems (SMES) using conduction cooled superconducting pulse coil wound with low temperature superconducting (LTS) conductors, are expected. The study has been carried out to develop the conduction cooled LTS pulse coil with low cost. In case of using NbTi wires which are produced with the lowest cost, it has been shown that pulse coils can be fabricated with low cost by using the superconducting conductors with high resistive matrix such as CuNi. In case of using Cu stabilized NbTi wires with high stability, it is shown that coil performance can be improved by both of using NbTi tapes and optimizing thermal diffusions from superconducting conductors to coil structures. In addition, improvement of performance of the MgB₂ wires which are expected to use at 20K has been studied. It has been cleared that deformation of cross-sectional shape from the round shape into the tape shape is valuable for improvement of the wire performance from experiments using short samples of MgB₂ tapes. Moreover, the design method to make the best use of the MgB₂ tapes has been studied. The coil which can generate 3T of magnetic field has been wound by the parallel conductor composed of two tapes. It has been shown experimentally that the coil can drive stably.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：超伝導コイル、伝導冷却、電力貯蔵、瞬低、NbTi、MgB₂

1. 研究開始当初の背景

半導体工場などを瞬時電圧低下から保護する装置として期待されている超伝導電力貯蔵装置には、液体ヘリウムなどの冷媒を使用しないタイプの超伝導パルスコイルを低コストで開発する必要がある。したがって、現在工業的に大量生産されている低コストな NbTi 線材を使用した線材を伝導冷却型で開発することが望まれていた。そこで、Cu 安定化された NbTi 線材を使った導体を用いて、伝導冷却型 NbTi パルスコイルが開発され、励磁試験まで行われていた。しかしながら伝導冷却型パルスコイルでは、瞬低補償時に交流損失による局所的な温度上昇が発生するため、これによってコイルの性能が決定される。このため前述のコイルは大型化しており、コンパクト化と低コスト化が必要であった。そのためには、交流損失の低減が重要であった。しかしながら、一般に使用される低抵抗母材を用いた線材では、交流損失の低減には限界がある。また伝導冷却された温度可変の状態の交流損失や安定性に関しては十分理解されていない。したがって従来の冷媒を使用するタイプのコイルの設計思想ではなく、新しい設計思想の導入が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、伝導冷却型パルスコイルを開発するための設計指針を得ることを目指した。そのために本研究では、次の点を明らかにすることを目的とした。従来型の低抵抗母材を使用した高安定型線材ではなく、高抵抗母材の線材を使用した低損失型線材を使用したコイルを開発する方が有効かどうかを明らかにする。従来型の低抵抗母材を使用した高安定線材を使用しても、コイル内の発熱分布などをコントロールすることによってどの程度の高性能化が達成できるかどうかを明らかにする。臨界温度が高く低コストで線材製造が可能な MgB₂ 線材を用いて作製

するコイルに、どの程度の性能が期待できるかを明らかにする。高性能化が期待できる MgB₂ 線材を圧延したテープ線形状線材の性能を明らかにし、導体化のための設計指針を明らかにする。

3. 研究の方法

コスト低減がどの程度可能かに関しては、主として理論的な検討を行った。コイルに使用する巻き枠やスペーサーなどの構造材と使用超伝導導体の電磁・熱的な特性を温度依存性まで考慮に入れて評価し、瞬低補償用 SMES として最適設計を行った。また、MgB₂ 線材に関しては、テープ線による性能向上効果を実験的に明らかにし、またその線材を使用したコイル開発を行って、その性能評価まで行った。

4. 研究成果

本研究では、伝導冷却型パルスコイル内の最高到達温度を可能な限り抑えることにより、コイルのコンパクト化と導体量削減と、それによる装置全体サイズのコンパクト化と低コスト化を狙っている。コイルの最高到達温度を下げるには、パルス運転時にコイル巻線で生じる交流損失を低減する方法がある。もう一つの方法は、巻線内の発熱分布、巻線内の熱拡散と構造材への熱拡散を最適に設計し、コイル内の最高到達温度を抑える方法がある。

また、温度上昇を下げるのではなく、使用する巻線材料を臨界温度の高い材料に換え、許される到達温度を高くすることによって高性能化することもできる。ここでは、線材コストの高い高温超伝導線材ではなく、MgB₂ 線材を使用した場合について検討した。

以下、CuNi 母材線材の特性評価結果と、種々のコイル設計結果について説明する。

一般的な Cu 母材の NbTi 丸線材を使用するのでは十分に低損失化が達成できない。そこで本研究では、CuNi などの高抵抗材料を母材

に使用した線材に着目した。ここでは、交流用に開発されたいわゆる3層構造の複雑な高コスト線材ではなく、NbTi フィラメントがCuNi 母材に埋め込まれた単純な構造を基本とし、Cuのコアを中心に配置した線材を考えた。このような線材を瞬低補償用途の伝導冷却型コイルに使用する場合に、交流損失低減効果はどの程度かについてまず検討した。その結果、交流損失は約1/100に低減することが可能であることがわかった。また、伝導冷却された超伝導線材の安定性に及ぼす母材の電気抵抗率の影響を、理論面から明らかにするために、2次元の数値解析を行った。その結果、CuNi 母材の多芯線でも、Cu コアを配することにより最小クエンチエネルギーが向上し、十分な安定性を確保でき得ること、同時にコイル保護も可能なことを示した。

次に、種々の設計思想でコイルを設計した結果について説明する。設計したコイルは、CuNi を使用した低損失線材でコイルを設計した場合と、Cu 母材を使用した高安定線材を使用し、熱拡散効果を最適に設計した場合、また、MgB₂ 線材を用いた場合の3つケースである。設計したコイルは、2個で1セットとし、1セットで1MWを1秒間出力可能とした。ここで、待機運転時の通電電流は1000A、コイル1個のインダクタンスは2Hとした。これは、実際に製作実績のあるコイルの仕様である。

CuNi を母材に使用したNbTi 線材は、交流損失を低減することによって上昇温度を抑制し、コイルの高性能化を狙ったものである。このコイルは、低損失型コイル(LLType: Low Loss Type)とする。

Cu 母材のNbTi 線材は、安定性が高いが損失が大きいので、次のような設計思想を取り入れた。テープ線を使用し、コイル内の最大磁界点と最大損失発生点と同じ場所にならないようにする。これにより、最大損失発生場所はコイルの両端に移る。コイルの両端は発熱しないコイル構造材に近いので、この構造材への大きな熱拡散効果が得られる。このような熱拡散効果により上昇温度を抑える。このコイルは、高熱拡散型コイル(HTDType: High Thermal Diffusion Type)とする。

MgB₂ 線材は、臨界温度が高く温度マージンが大きい。したがって上昇温度の制限がNbTi コイルよりも緩い。この大きな温度マージンがあることによってコイルの高性能化が達成できる可能性がある。また、20Kでの運転が可能な点も有利である。MgB₂ コイルは、高温度マージン型コイル(HTMType: High Temperature Margin Type)とする。

それぞれのコイルに使用した線材・導体のパラメータを表1、2、3に示す。低損失型のコイルに使用する導体は、直径0.823mmの線材を8本使用したラザフォードケーブルを想

表1 LLType コイル用導体のパラメータ

Strand	
diameter	0.823 mm
twist pitch	10 mm
Cu /CuNi/NbTi	0.87/1.6/1.0
Conductor	
number of strand	8
twist pitch	35 mm
width	3.49 mm
thickness	1.85 mm
Spacer	
thickness	2.0 mm

表2 HTDType コイル用導体のパラメータ

Strand	
width	2.22 mm
thickness	1.11 mm
twist pitch	38 mm
Cu/NbTi	2.4/1.0
Conductor	
number of strand	2
width	2.42 mm
thickness	2.62 mm
Spacer	
thickness	2.0 mm

表3 HTMType コイル用導体のパラメータ

Strand	
width	1.05 mm
thickness	0.504 mm
Cu/Nb/ MgB ₂	1.1/1.7/1.0
Conductor	
number of strand	10
width	2.30 mm
thickness	3.62 mm

表4 伝導冷却型パルスコイルの設計例

	Old coil	LLType	HTDType	HTMType
B _{max}	2.48 T	6.92 T	2.76 T	2.25 T
Conductor length	5650 m	4277 m	4710 m	5246 m
Cryostat diameter	2.39 m	1.41 m	1.86 m	2.01 m

定している。線材のマトリクスはCuNiで、中心にはCuコアが配置されている。高熱拡散型のコイルは、Cu母材の線材をテープ形状に圧延した線材2本を束ねた導体を使用することを想定している。線材の幅は2.22mm、厚みは1.11mmである。高温度マージン型のコイルに使用するMgB₂導体は、単芯線材を素線として、10本の素線から構成される転位並列導体を想定している。MgB₂線材の臨界電流密度は、4.2K、4Tで、6.6×10⁸A/m²程度のもを使用するとした。この数値は、現状

の MgB_2 線材の性能であるので、今後向上が見込めるものである。

以上のコイルをそれぞれ設計した結果を表 4 に示す。比較のために、Cu 安定化された NbTi 線材で作製したアルミ押出型導体を用いた伝導冷却型 NbTi パルスコイルの実績値を Old Coil として載せている⁽¹⁾。導体長 (Conductor length) は、使用する導体の長さである。直径 (Diameter) は、1 セットを冷却するクライオスタットの直径である。これらの数値が小さいほど、コンパクト化が達成されていて、低コスト化されていると言える。いずれのコイルも現在製作されたコイルよりもコンパクトに達成できることがわかる。特に CuNi を使用した低損失型コイルは、大幅にコンパクト化できる可能性が高いことがわかる。Cu 母材の線材を使用した高熱拡散型コイルは、コンパクト化が可能なものの、大きな効果は期待できない。このことより、瞬低補償用の伝導冷却型 NbTi パルスコイルでは、CuNi などの高抵抗な母材を使用した線材の方が有利であることがわかる。

MgB_2 線材を使用した高温度マージン型のコイルは、従来の作製実績のあるコイルとほ

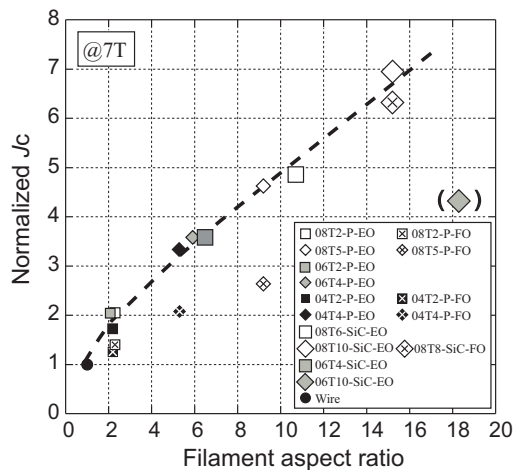


図 1 MgB_2 テープ線材の臨界電流密度向上効果

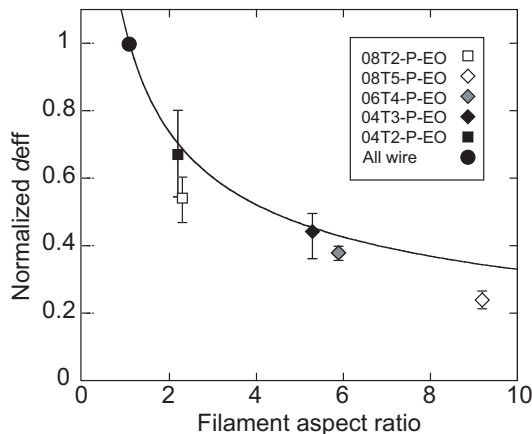


図 2 MgB_2 テープ線材のヒステリシス損失低減効果

ぼ同等である。現状の線材性能で、しかも交流損失の大きな単芯線材を想定しても、比較的实现可能性のあるコイルの設計が可能であった。今後、線材性能向上が進むことで、十分実用に耐えられると考えられる。臨界電流密度が 1.5 倍になった場合を想定して設計すると、高熱拡散型のコイルと同程度のコイルが設計可能であることがわかった。さらに 3 倍に臨界電流密度が向上したとすると、高熱拡散型のコイルと同規模のコイルを、20K で運転可能であることもわかった。

本研究では、 MgB_2 線材を用いた瞬低補償用 SMES 開発を目指して、 MgB_2 線材の高性能化と導体の設計法についても検討を行った。上記のように、 MgB_2 線材の臨界電流密度を向上させることが重要であると同時に、交流損失の低減も重要である。そこで、 MgB_2 線材を圧延したテープ線材の特性を評価し、臨界電流と交流損失の両方の性能が大きく向上することを示した。またその線材を使用して導体の試作とコイルの試作・通電まで行った。

MgB_2 テープ線の臨界電流密度を測定し、テープ線に圧延する前の丸線と比較した結果を図 1 に示す。横軸はフィラメントのアスペクト比で、縦軸はテープ線と丸線の臨界電流密度の比である。最大で 7 倍まで向上していることがわかる。上述した 3 倍の臨界電流密度向上は、テープ線にするだけで達成できる可能性がある。

また、磁化の測定も行って、ヒステリシス損失の低減効果の評価も行った。その結果を図 2 に示す。縦軸は丸線に対してテープ線のヒステリシス損失がどの程度低減できるかを示したものである。横軸はフィラメントのアスペクト比である。テープ線にすることによって、ヒステリシス損失が大幅に低減していることがわかる。

さらに、線材のアスペクト比が 2 の MgB_2 テープ線を用いて、小コイルを実際に作製した。このコイルでは、2 本のテープ線を重ねた並列導体で巻線した。 MgB_2 線材の安定性の高さを利用し、素線絶縁を行い、素線間結合損失を低減したコイルとした。このコイルの臨界電流を 4.2K 中で測定した結果、丸線で巻いた場合の予測値の約 2 倍に相当する 360A となった。この結果は、単尺線材の臨界電流の測定データからの予測とよく一致していて、 MgB_2 テープ線を使った並列導体で劣化なく巻線できることを実証した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) A. Kawagoe, et. al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 20, No. 2, 2010, in press, 査読有。

(2) A. Kawagoe, et.al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 19, No. 2, 2009, pp. 2686-2689, 査読有.

[学会発表] (計 6 件)

(1) 松島 健介, 吉留 佑介, 若林 佑樹, 川越 明史, 他, 第 81 回 2009 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集、p. 216、2009 年 11 月 20 日、岡山県岡山市。

(2) A. Kawagoe, et.al., 21st International Conference on Magnet Technology, Oct. 22, 2009, Hefei.

(3) 若林 佑樹, 松島 健介, 川越 明史, 他, 第 80 回 2009 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集、p. 197、2009 年 5 月 15 日、東京都新宿区。

(4) 川越 明史, 他, 第 80 回 2009 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集、p. 198、2009 年 5 月 15 日、東京都新宿区。

(5) A. Kawagoe, et.al., Applied Superconductivity Conference, Aug. 21, 2008, Chicago.

(6) 川越明史、低温工学協会 九州・西日本支部 第 2 回超電導ワークショップ、2008 年 7 月 28 日、沖縄県石垣市。

[その他]

ホームページ等

<http://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~sumi-lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川越 明史 (KAWAGOE AKIFUMI)

鹿児島大学・大学院理工学研究科 (工学系)・助教

研究者番号 : 40315396