

機関番号：32621

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560277

研究課題名 (和文) 低温で膨張する次世代高熱伝導プラスチックによる
伝導冷却超伝導コイルの高性能化研究課題名 (英文) Conduction-cooled superconducting coil using high-thermal
conduction plastic having negative thermal expansion coefficient

研究代表者

高尾 智明 (TAKAO TOMOAKI)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：30245790

研究成果の概要 (和文)：

超伝導コイルの巻枠材料としてダイニーマ繊維強化プラスチック (DFRP) を用いることにより、コイルの安定性を向上させる研究である。伝導冷却型の超伝導コイルでは、伝熱材料として窒化アルミが用いられている。窒化アルミは加工性が悪いため、これを DFRP に変えることにより高い安定性とコイル加工性の両立を図った。また、DFRP は温度低下について膨張する特性があるため、コイル巻枠材料として DFRP を用いて、交流通電時の機械的損失を低減させた。

研究成果の概要 (英文)：

This work is that increase of stability in superconducting coils using the Dyneema fiber reinforced plastic (DFRP) as a coil bobbin material. Aluminum nitride (AlN) has been widely used as the heat-sink material. AlN is so hard and brittle; it is difficult to do cutting and drilling. Hence, we proposed DFRP as the heat-sink material, and demonstrated DFRP was useful. And we decreased mechanical loss by use of DFRP, because DFRP expanded with cool down.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：電気機器

1. 研究開始当初の背景

1980年代の高温超伝導体の発見とその後の進歩により、液体窒素の沸点 77 K を越える臨界温度を持つ超伝導線も開発されている。それに伴い、伝導冷却型の超伝導コイルにおいて、例えば到達温度 40 K 程度でも十分に使用できるようになっている。

このような冷凍機冷却型の超伝導コイルは冷媒がなく、真空断熱容器の中で冷凍機のコールドヘッドと超伝導コイルを固体でつ

ないでコイルを冷やしている。そのため、熱伝導率の高い固体を使えば、コイルを効率よく冷却できる。現在は、この固体として窒化アルミが一般的に用いられている。窒化アルミが使いづらい点は、硬くてもろいことである。研究現場では窒化アルミの切断や穴開けなど小規模な加工さえ難しい。製造業者に再加工を依頼する必要がある。研究段階では、装置の変更のため窒化アルミを小規模に再加工しなければならない場面がしばしばあ

る。研究現場からの声として、現場にてすぐ
に再加工が容易な代替材料が望まれている。

2. 研究の目的

そこで窒化アルミの代替材料として、高熱
伝導のプラスチックを提案する。それはダイ
ニーマ繊維強化プラスチック（DFRP：
Dyneema fiber reinforced plastic）である。
熱伝導率は窒化アルミに劣るが金属のステン
レス並であり、なによりも研究現場で加工
（切削、穴開け等）ができる。このDFRP
が窒化アルミの代替材料となり得るか、その
可能性を実験的に検討してゆく。

超伝導コイルから冷凍機のコールドヘッ
ドへの伝熱特性は、単に両者をつなぐ伝熱材
料の熱伝導率だけでは決まらない。熱伝導率
が高い方が望ましいのは確かであるが、コ
ールドヘッドと伝熱材料との接触面での熱伝
達特性も重要である。超伝導コイルと伝熱材
料との接触面での熱伝達も同様である。

窒化アルミを含め、一般に物質は冷却過程
で収縮する。そのため、常温での製造時には
十分な熱伝達を持つようにコールドヘッド
と伝熱材料との接触面圧を調整しても、低温
では接触面圧が低下して熱伝達特性が低下
してしまう。一方DFRPは、温度低下につ
れて膨張するという特異な性質を持つ。その
ため、DFRPを伝熱材料にすれば、低温に
しても接触面圧は低下しない。このようにD
FRPの熱伝導率は窒化アルミに劣るが、コ
ールドヘッドや超伝導コイルとの熱伝達特
性が向上するため、全体をみれば窒化アルミ
を使う場合よりも、コイルの冷却性能を高く
できる可能性がある。これについても実験に
より実証してゆく。

最もよく知られる超伝導の特徴は低温で
電気抵抗がゼロになることである。超伝導線
が使われている機器では、電気抵抗が零のた
め大きな電流を流してもジュール損失が
発生せず、これが高効率化や省エネルギーの源
になっている。しかし、電気抵抗が零になる
のは、実は直流を流している時に限られる。
交流を超伝導線に流すと、銅線のジュール損
失に比べれば小さいものの、超伝導線とい
えども損失が発生する。この損失を交流損失
という。交流損失を低く抑えれば機器の高効
率化や省エネルギーがいつそう進むので、交
流損失低減は超伝導分野における技術課題の
一つの柱になっている。本研究では直流通電
だけでなく、伝導冷却型の超伝導コイルに交
流を流す。そして、交流損失のうち構造材
と関連が深い機械的損失に着目し、コイル巻
材材料としてDFRPを使うことにより、機
械的損失によるコイルの温度上昇をどの程
度まで抑制できるかも併せて検討する。

3. 研究の方法

(1) 直流通電でのコイルの安定性向上

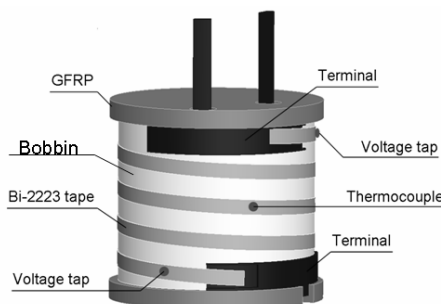


図 1：試験コイル

DFRPパイプを巻材として図1のよう
な小型コイルを作成する。また、比較のため
に同一寸法の窒化アルミ製およびGFRP製の
パイプを入手し、これを用いて同一サイズの
小型コイルを作る。超伝導線とコイルの諸元
を表1に示す。冷凍機のコールドヘッドにこ
れらのコイルを乗せ直流通電する。そして端
子間電圧の上昇を測定する。

表 1：超伝導線とコイルの諸元

Coil	Height	50 mm
	Inner diameter	40 mm
	Outer diameter	55 mm
	Turn/layer	4 turns / 1 layer
Conductor	Superconductor	Bi-2223
	Sheath	Silver alloy
	Width	3.3 mm
	Height	0.7 mm
	Silver ratio	2.2
	Critical current	86 A at 77K

(2) 交流通電での機械的損失の低減

バックアップ用外部磁界コイルを用いる
必要があり、また交流損失による発熱に対
してある程度の通電時間を維持する必要もあ
るため、ここでは試験コイルを液体窒素中
に浸漬冷却した。交流損失の測定は、試験
コイルに交流通電し、コイル電圧と電流を
測定した。そして電圧の中で電流との同相
分をロックインアンプにより取り出し、そ
れに電流値を掛けることにより損失を算出
する。

なお、用いる超伝導線およびコイルは前
述と同一である。巻材材料は膨張特性を持
つDFRPと収縮特性を持つGFRPである。

4. 研究成果

(1) 直流通電でのコイルの安定性向上

まずコイルの巻線張力のコイル安定性へ

の影響を評価した。その結果を図2に示す。

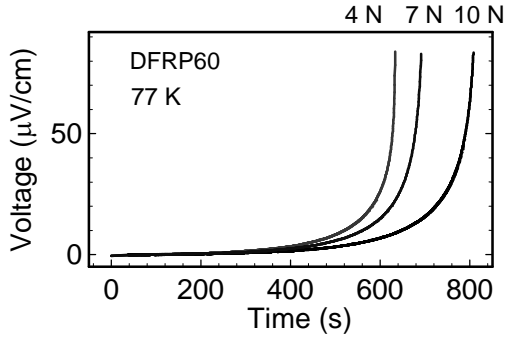


図2：巻線張力依存性

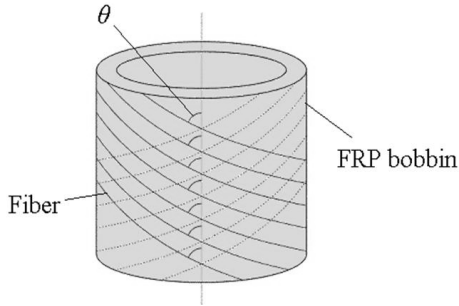


図3：巻枠における繊維巻角度

同図にて、横軸は通電開始からの時間である。巻線張力を4, 7, 10Nと増加させると、電圧の立ち上がり時間が遅くなっている。巻線部における超伝導線から巻枠への接触熱伝達が向上したためと考えられる。より強い巻線張力とすれば安定性は更に向上するが、線の臨界電流が低下し始める限界があり、これが巻線張力の上限になる。

次に、巻枠内におけるダイニーマ繊維の巻角度を変えて、巻枠の膨張の程度を変化させた。巻角度は、図3に示すようにフィラメントワインディング法によるパイプ作成時の繊維巻き付け角度である。繊維は冷却時に伸長するため巻角度θが大きければパイプは大きく膨らむことになる。そこで、三種類の巻角度30, 45, 60度でDFRPパイプを作成し、これらを巻枠としたコイルを作製した。巻線張力7Nでの通電結果を図4に示す。

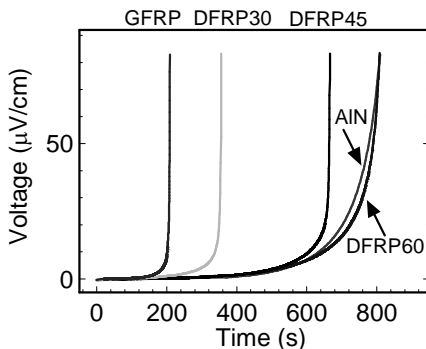


図4：巻枠の繊維巻角度とコイル安定性

縦軸と横軸は図2と同一である。この図より繊維巻角度が大きくなると巻枠が膨張して、巻枠と超伝導線との接触がよくなるため、熱伝達が向上して安定性も高くなったものと考えられる。なお、同図中には窒化アルミを巻枠材料としたコイルの試験結果も描かれており、ほぼDFRPの60度と同じ特性である。

最後に、巻線張力10Nにて幾つかの巻枠材料を用いてコイルを作製した。材料の種類は、非金属構造材料の代表であるGFRP、今回の対象のDFRP、窒化アルミである。測定データを図5に示す。

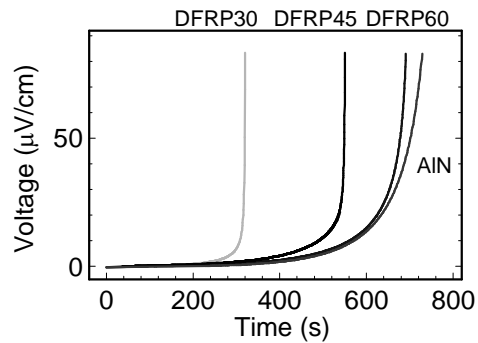


図5：巻枠材料とコイル安定性

図5より、熱伝導が悪くかつ低温で収縮するGFRPが最も悪いデータである。熱伝導は良好だが低温で収縮するDFRP30が次に来る。熱伝導が良好かつ低温で膨張するDFRP60がよい結果であり、これは窒化アルミに並ぶ。このように、DFRPは窒化アルミと同等の冷却性能を示す巻枠材料であると考えられる。

(2) 交流通電での機械的損失の低減

通電損失の測定結果例を図6に示す。同図の横軸は、超伝導線の臨界電流で規格化した交流電流のピーク値、縦軸は交流1周期あたりの通電損失である。

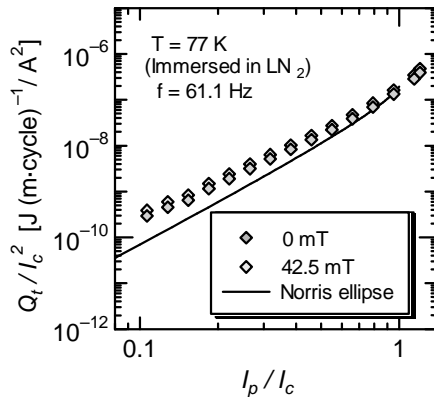


図6：直流外部磁界中の通電損失

この図より、外部磁界を 0 から 42.5mT 印加すると損失はわずかに増加する。これは外部磁界により周期的に変動する電磁力が大きくなり機械的損失が増加したためと思われる。

コイルの巻線張力を、GFRP で 1 と 10N, DFRP で 5N とし、各コイルの通電損失を測定した。そして、各コイルに生じるヒステリシス損失は等しいことから、測定データ相互に引き算することにより、機械的損失を求めた。その結果を、図 7 に示す。

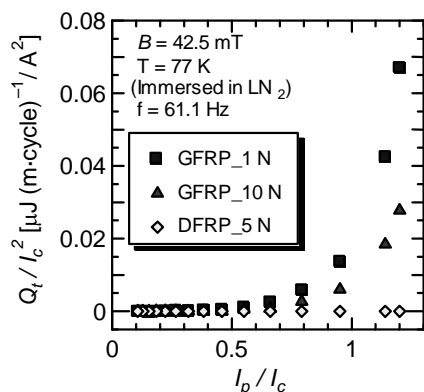


図 7：巻棒材料による機械的損失の違い

図 7 より、低温で収縮する GFRP でも巻線張力を 1 から 5N に増加させると、脇線部の固定がよくなるために振動が減り機械的損失も低減できる。しかし DFRP を用いる方が、巻線張力を大きくしなくても効果的に機械的損失を低減できている。

この様に、DFRP の使用は、DFRP の膨張特性を生かして、交流損失の一つである機械的損失の低減策として有効であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、連携研究者に下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

(1) 高尾智明, 他, "Mechanical loss and bobbin materials in AC superconducting coil under AC magnetic field", IEEE Transactions on Superconductivity, 査読有り, vol. 21, pp. 2420-2424 (2011 年).

(2) 高尾智明, 他, "Evaluating cooling performance of high-thermal-conduction composite in conduction-cooled superconducting coils", IEEE Transactions on Superconductivity, 査読有り, vol. 20, pp. 2126-2129 (2010 年).

(3) 高尾智明, 他, "Reduction of mechanical losses due to frictional heat in Bi-2223 tapes using structural materials of various thermal expansion properties",

IEEE Transactions on Superconductivity, 査読有り, vol. 20, pp. 2115-2118 (2010 年).

[学会発表] (計 10 件)

(1) 西村和希, 高尾智明, 他, "新機能構造材料を用いた Bi-2223 ソレノイドコイルの機械的損失の評価", 電気学会, 全国大会, 大阪, 2011 年 3 月 18 日

(2) 浅野峻介, 高尾智明, 他, "伝導冷却 HTS ダブルパンケーキコイルにおける高熱伝導コンポジットの冷却性能評価 (その 2)", 電気学会, 全国大会, 大阪, 2011 年 3 月 18 日

(3) 西村康平, 高尾智明, 他, "新機能構造材料を用いた Bi2223 コイルの機械的損失の低減" 電気学会, 超電導応用電力機器研究会, 大阪, 2011 年 1 月 20 日

(4) 湯原拓朗, 高尾智明, 他, "伝導冷却 HTS ダブルパンケーキコイルにおける高熱伝導コンポジットの冷却性能評価" 電気学会, 超電導応用電力機器研究会, 大阪, 2011 年 1 月 20 日

(5) 高尾智明, 他, "Mechanical loss and bobbin materials in ac superconducting coil under AC magnetic field", Applied Superconductivity Conference, アメリカ合衆国, ワシントン, 2010 年 8 月 11 日

(6) 高尾智明, 他, "Estimation of cooling performance in contacting between Bi2223 tape and high thermal conduction composite in conduction-cooled superconducting coil", Applied Superconductivity Conference, アメリカ合衆国, ワシントン, 2010 年 8 月 10 日

(7) 高尾智明, 他, "伝導冷却 Bi2223 線と高熱伝導コンポジットの接触における冷却性能評価 (その 7)", 電気学会, 全国大会, 東京, 2010 年 3 月 19 日

(8) 高尾智明, 他, "Evaluating cooling performance of high-thermal-conduction composite in conduction-cooled superconducting coils", Magnet Technology 2009, 中国, 合肥, 2009 年 10 月 21 日

(9) 高尾智明, 他, "伝導冷却 Bi2223 線と高熱伝導コンポジットの接触における冷却性能評価 (その 6)", 電気学会, 全国大会, 札幌, 2009 年 3 月 19 日

(10) 高尾智明, 他, "Cooling performance of conduction cooled superconducting magnet using high thermal conduction plastic", Applied Superconductivity Conference, アメリカ合衆国, シカゴ, 2008 年 8 月 19 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高尾 智明 (TAKAO TOMOAKI)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号: 30245790

(2)研究分担者
無し

(3)連携研究者
中村 一也 (NAKAMURA KAZUYA)
上智大学・理工学部・准教授
研究者番号：00407339