

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13893

研究課題名(和文) NMR/MRI用高温超伝導磁石のための熱電素子による擬似永久電流モードの実現

研究課題名(英文) Investigation of quasi-persistent current mode by thermoelectric element for NMR/MRI high-temperature superconducting magnets

研究代表者

高橋 雅人 (TAKAHASHI, Masato)

国立研究開発法人理化学研究所・ライフサイエンス技術基盤研究センター・上級研究員

研究者番号：60392015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：外部電源と電流リードを用いずに、効率よく高温超伝導磁石を励磁する手法の研究を行った。熱電素子などの半導体を極低温側に持ち込む方式は、外部電源に比べて非常にコンパクトで単純な構造で励磁が可能である。そこで、入手性の高いビスマステルルを用いて実験を行い、大電流の発生と安定的な励磁が可能であることを確認した。しかし、高温超伝導時磁石の冷却に使われる小型冷凍機の冷却性能を考慮すると、より変換効率の高い素子が必要であることが明らかになった。さまざまな素子を検討したところ、現状では大電流向けではないものの、変換効率が高く低温でより特性が向上する素子を発見できた。

研究成果の概要(英文)：The method to drive high-temperature superconducting magnets efficiently has been studied without using an external power supply and a current lead. The method of using a semiconductor such as a thermoelectric element to the cryogenic side is very compact and can be driven in a simple structure compared to an external power supply. The experiment was performed using a commonly used bismuth tellurium. It was confirmed that it is possible to generate a large and stable current. However, considering the cooling performance of the cryogenic refrigerator used to cool the high-temperature superconducting magnet, it became clear that the device with higher conversion efficiency is needed. A variety of devices were investigated. It was able to find the element which improved the characteristic by low temperature with high conversion efficiency.

研究分野：NMR装置開発

キーワード：高温超伝導磁石 熱電素子

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導(HTS)は1980年代に発見されたものの、長い線材の開発に難航し、実用的なHTS線材が市販化されたのは2000年代になってからである。その後、市販化された線材を用いて実用化研究が進んできた。実用化されたHTS線材の有望な用途として超伝導磁石がある。超伝導磁石は、銅線では達成不可能な強力な磁場を発生する装置として、MRI、NMR、シリコン単結晶引き上げ装置、リニアモーターカー、加速器などに広く使われている。

HTS磁石が、従来型の低温超伝導(LTS)磁石に対して優れている点は、高い運転温度(4Kの液体ヘリウムが不要で、小型冷凍機で運転可能(20K以上))、高い臨界電流密度(磁石の小型化が可能)、高磁場中での高い臨界電流密度(より強磁場が可能)である。しかし、REBCO系では超伝導接続技術が未発達、Bi系では超伝導接続技術がなく、 n 値が小さい。このため、電気抵抗ゼロのループを作ることができず、LTS磁石では可能であった永久電流モードが実現できない。よって、HTS磁石では外部電源で常に励磁する必要がある。

しかし、非常に高価な超伝導磁石用電源(特に高安定化されたもの)が常に必要な点や電流リードが熱侵入源になる点が問題となる。熱侵入低減には、HTS電流リードを使用する方法もあるが、冷凍機が停止したときにHTS電流リードが焼損してしまうなどの別の問題を引き起こす。

これらを鑑みて、外部電源を必要としないHTS磁石の電流維持・磁場安定化技術の開発が必要であると考え、熱電素子に着目した。熱電素子は温度差を電圧に変換する素子であり、超伝導磁石に必要な大電流を取り扱うことができる。提案者らはすでに、熱電素子を用いて小型のHTS磁石の励磁試験を行っており上記の目的で使用可能である。熱電素子で発生した電圧によって磁石の抵抗電圧を補償し、さらに、温度変化を補償する回路を本提案で開発する。これにより、液体ヘリウムが不要で冷凍機が動いている限り、磁場を高い安定度で出し続けることが可能になる。

2. 研究の目的

高温超伝導(HTS)磁石をNMRやMRIなどに普及させるために、従来型の低温超伝導(LTS)磁石と同等かそれ以上の利便性をHTS磁石が持つことができる技術を開発する。LTS磁石では、永久電流モードにより冷却している限り、電源が不要であたかも永久磁石のように磁場を安定に出し続けることが可能である。一方、HTS磁石では、接続技術の問題や残留抵抗により永久電流モードが実現できず、常に外部電源が必要である。この

短所を解決するために熱電素子によって励磁・磁場安定化する技術を開発する。熱電素子は温度差を電圧に変換する素子であり、大電流を取り扱うことができる。熱電素子によって抵抗電圧を補償し、温度変化を補償する回路を開発することで、電源と液体ヘリウムが不要で冷凍機が動いている限り、磁場を安定に出し続けることが可能となる。

3. 研究の方法

熱電素子の極低温での性能が不明であるため、まず極低温での特性を評価する。液体窒素冷却による簡易試験装置と小型冷凍機を用いた試験装置を併用して、素子の熱起電力と内部抵抗を測定する。また、熱電素子の配置とアスペクト比について最適化を行う。

小型冷凍機冷却の高温超伝導磁石を用いて、熱電素子による励磁試験を行う。励磁試験中のヒーター出力をコントロールすることで、磁場の安定度がどのように変化するか調べる。

4. 研究成果

熱電素子の性能評価の手法として、熱電素子両端を開放して発生電圧を測定する手法と、短絡して発生した電流値を測定する手法の両方を行った。短絡には高温超伝導線を用いた熱電素子の性能がより正確に評価できるよう工夫した。短絡電流の測定には、DCCTを用いた。DCCTは電線の周囲に取り付けることにより非接触で流れている電流値を測定できる。しかし、本研究では、短絡線に高温超伝導線を用いているため、DCCTも一緒に冷却する必要がある。DCCTを液体窒素で冷却したところ、全く作動しなかった。しかし、一部のDCCTは磁場を測る素子部分だけを残し、それ以外の電子回路を室温側に配置し、素子と回路を電線で接続したところ、極低温でも作動することが確認できた。一部のDCCTで用いられている磁場を測定するホール素子にはアンプが内蔵されていないため、極低温でも作動することがわかった。ただし、出力係数は極低温で変化するため、事前に液体窒素中で電源から既知の電流値を供給しそれをDCCTで測定することで測定値の較正を行った。この結果を図1に示す。またオフセット電圧が変動する点も注意が必要である。

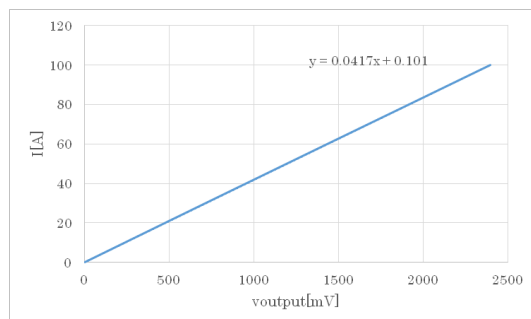


図1 液体窒素中でのDCCTの特性

ビスマステル熱電素子の開放と短絡実験を行った。開放実験については図2の配置で行い、それぞれの起電力を測定した。冷却後ヒーター出力を大きくしていくことで、温度変化と起電力の変化を記録した。その様子を図3に示す。この実験から各温度におけるゼーベック係数を求めると図4のようになる。この図から使用しているビスマステル素子は温度が下がるにつれて性能も低下していることがわかる。

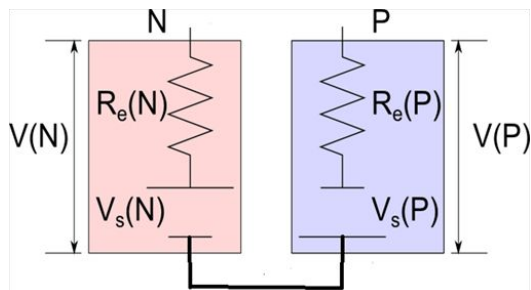


図2 熱電素子開放実験の回路図

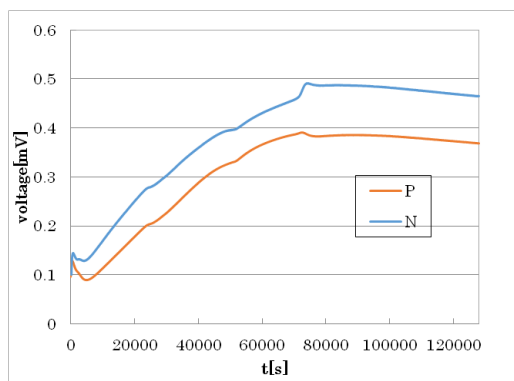


図3 熱電素子による熱起電力の時間変化

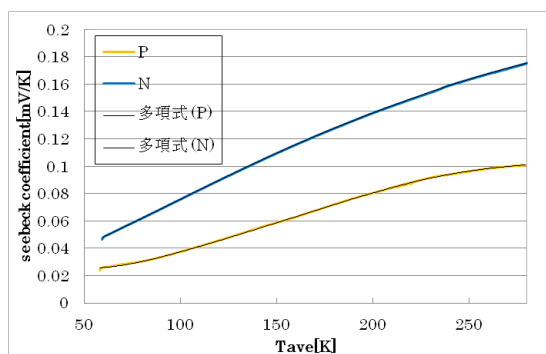


図4 ゼーベック係数の温度依存性

さらに、この素子を用いて高温超伝導磁石の励磁を試みた。熱電素子の共通の高温端 (TH)とP型、N型の低温端の温度(TLP, TLN)を図5に示す。またこのときの熱電素子の起電力を図6に示す。熱電素子の配置や接続方法を改良することでより大きな起電力を得ることができた。一方で、超伝導磁石に流れた電流は小さく図7で示す発生磁場からの逆算では 20 A 程度となった。これは、期待した電流値 100 A より小さく高温超伝導磁石との接続部分に微小抵抗があったためと推測

している。

また 14500 秒付近で一度磁場が減衰し、熱電素子両端電圧が上昇している。これは、超伝導磁石の冷却が十分進んでいない状態で、熱電素子による励磁がはじまってしまったためと推測している。それにより超伝導磁石が一度クエンチしたものの、その後再励磁することができた。この特性はコイル保護の観点から非常に望ましい特性である。

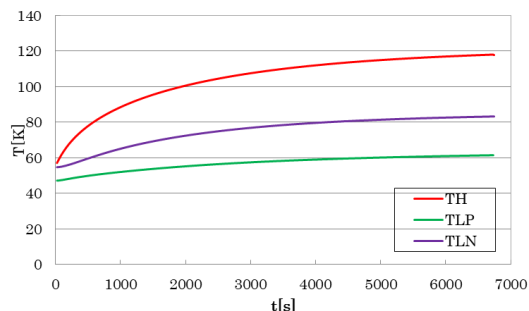


図5 高温超伝導磁石接続時の熱電素子両端温度

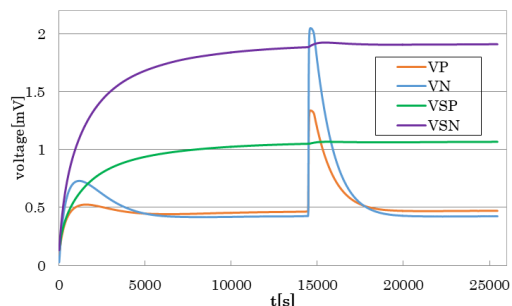


図6 高温超伝導磁石接続時の熱起電力

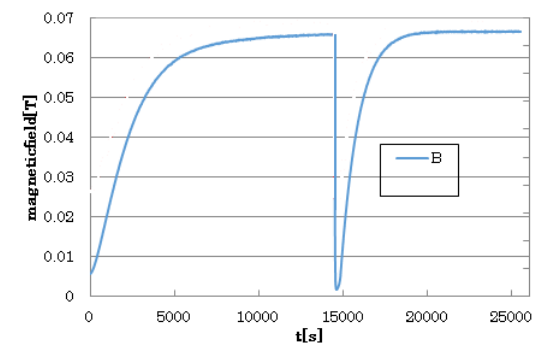


図7 熱電素子による高温超伝導磁石の励磁

さらにより高性能な素子の探索を行った。これまでこの用途に見合った素子として、入手性の高いビスマステルを用いて実験を行ってきた。ビスマステルの場合、大電流の発生は可能であるが、室温より上の温度での作動に最適化された素子であるため、必要な出力を得るためには、入力パワーが大きくなる傾向にあった。これまで素子の配置や構造を最適化してきたが、新たに別の素子についても検討を行った。こちらの素子は現状では大電流向けではないものの、変換効率が高く、また低温でより特性が向上するため、こ

の用途では有望であることがわかった。従来方式である電流リードを用いたときの熱侵入量と同等レベルの入力エネルギーで磁場を維持できることが理想である。特に小型冷凍機の冷凍能力より小さい入力パワーであれば装置として成立する。今後この素子を用いて 100 A クラスの大電流を発生させる方法について検討を行いたい。また、この素子の電流安定性は従来とは異なる特性を持つため、この素子の電流安定性についても別途評価を行いたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 雅人 (TAKAHASHI, Masato)

国立研究開発法人理化学研究所・ライフサイエンス技術基盤研究センター・上級研究員

研究者番号：60392015

(2) 研究分担者

岡村 哲至 (OKAMURA, Tetsuji)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：10194391

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()