Proposal for peltier current lead and FGM for current lead of superconducting magnet system

ペルチェ電流リード及び電流リード用傾斜機能材の提案

Satarou YAMAGUCHI and Hiroaki NAKAMURA

National Institute for Fusion Science, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01, JAPAN

TEL:81-52-789-4538 FAX:81-52-789-4538, e-mail: yamax@YSL.nifs.ac.jp, hiroaki@rouge.nifs.ac.jp

Kazuaki IKEDA

Graduate University for Advanced Studies, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01, JAPAN

TEL:81-52-781-5111(EX.7672) FAX:81-52-789-4248, e-mail: ikeda@rouge.nifs.ac.jp

Kotaro KURODA

Department of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01, JAPAN

TEL:81-52-789-3349 FAX:81-52-789-5035, e-mail: kuroda@numse.nagoya-u.ac.jp

Kiyoshi TAKITA

Applied Superconductivity Group, Fuji Electric, 7 Yawata-kaigandori, Ichihara, Chiba 290, JAPAN

TEL:81-52-436-41-6577 FAX:81-436-43-8922

(Received 27, September 1996 Accepted 25, December 1996)

The current lead is a key component in a superconducting magnet system. Yet heat conduction and ohmic heating of the current lead should be kept to a minimum for economic reasons and for the cryogenic stability of the system. High temperature superconducting materials (HTS) has recently been used to solve the contradiction in the current lead. A third generation current lead, called the Peltier current lead, is described. The Peltier current element is a heat pump made of N-type and P-type semiconductors. The technology of the Peltier element can be applied with HTS current lead. Experiments with the Peltier current lead demonstrate the reduction of heat leak of 15 to 25 %. Since the HTS and the semiconductor are made from Bi-based materials, for example, Bi-2223 for HTS and BiTe (Sb) for the semiconductor, we might make a whole current lead from Bi-based material, and this is one of the functionally gradient material (FGM).

Keywords: Peltier effect, Peltier current lead, superconducting magnet, current lead, High temperature superconducting material, HTS, thermoelectric conversion, functionally gradient material, FGM

1. INTRODUCTION

超伝導コイルシステムは核融合、加速器、電力応用等の研究が進められている。これらのシステムでは超伝導コイルのエネルギー損失が極めて低いことを利用している。超伝導では直流電気抵抗はゼロであるから、コイル部での損失は原理的にゼロになるが、低温を保持するために電力が使われる。低温への熱侵入は2つある。一つは断熱真空容器を通じて入ってくる熱であり、装置全体にわたっている。これは最近断熱材などの改良により大幅に低減されて来た。超伝導コイ

ルは低温に保持され、それを励磁する電源は常温であり、これらは電氣的に接続されるので、電気回路の一部に常温から低温までの温度差がある機器が必要であり、これを電流リードと呼ぶ。¹⁾ 従って、電流リードを通じて入ってくる熱がある。この侵入熱は2種類ある。それは常温からの熱伝導と通電時のジュール発熱である。簡単な解析により、熱伝導率と電気抵抗率の積が低い材料が熱侵入が低いので、一般に銅やアルミ等の金属が利用されている。従って、電流リードからは熱侵入が大きくなることが容易に想像される。従来から利用されてきた電

流リードはガス冷却型電流リードと呼ばれ、低温への熱侵入によって発生する冷たいヘリウムガスを電流リード部を通してから大気へ放出する構造を取っている。これによって、常温側から低温側に侵入してくる熱を電流リード部で熱交換し低温への熱侵入を低減している。これは画期的なアイデアあり、これによって初めて超伝導コイルシステムが利用できるようになった。同様なアイデアは熱電変換素子の効率を向上させる方法として多孔質構造の熱電発電素子として提案されている。²

しかしながら、電力貯蔵用に超伝導コイルシステムを用いる実験³ (Superconducting Magnet Energy Storages, SMES) ではガス冷却型電流リードでは、電流リード部からの熱侵入が大きく、低温に保持するための電力消費が大きくなり、経済的に引き合わないことが報告されている。このため、最近では高温超伝導材 (HTS) を電流リードに利用する方式が研究されている。⁴ これは、低温 (～4 K) から窒素温度近くまで超伝導が保持されるためにジュール発熱がないことに加えて、この温度領域では金属の熱伝導率に比べて極めて低い熱伝導率 (約1000分1以下) がその大きな理由である。液体窒素温度以下 (77K) では銅とHTSでは熱伝導率が1000倍以上も異なる。最近の成果ではHTSの利用によって初めて液体ヘリウムを利用しない伝導冷却による小型の超伝導コイルシステム⁵ が作られ始めた。

以下では、更なる電流リードからの熱侵入を低減するためにペルチェ素子を利用した電流リードを提案し、最初の原理実験について述べる。また、これを発展として傾斜機能材料のアイデアを適用し、半導体と超伝導体の接続について提案を行う。

2. PROPOSAL

超伝導コイルシステムの更なる運転経費の低減と超伝導コイルの安定性の向上のために、我々はここでペルチェ電流リードを提案する。⁶ これはペルチェ素子を利用した電流リードであり、その概念図の一例を Fig. 1 に示す。

FIG.1. A Concept of Peltier Current Lead

現在、実用化されている超伝導コイルはNbTiなどの金属系の超伝導材料が用いられていて、4 K付近で運転される。一方、HTSは現時点ではせいぜい77K程度以下でしか利用できない。臨界温度は130 K程度の材料も見つかっているが、磁場及び電流密度が高くなると超伝導転移温度が低下するからである。一

方、現時点で商用に利用されているペルチェ素子材料はBiTe-Sb系であり、この熱負荷がないときの到達最低温度は200K程度である。従って、HTSと半導体の間には常伝導材が挿入されている。これは、熱伝導率が高く、ジュール発熱は熱負荷になるので、将来的には半導体とHTSが直接接合できることが望ましい。

この電流リードを用いると、ペルチェ素子によって発生した温度差だけで低温への熱侵入が減少する。即ち、常温からペルチェ素子によって200 K程度まで通常の電流リードの高温端の温度が低下したと考えることが出来る。更に、金属に比べて半導体の熱伝導率は1/200程度であるため、非通電時にも低温への熱侵入が減少することが考えられる。また、77K以下で動作する半導体があれば、HTSの高温端の温度を77 K以下にすることが可能になる。一般にHTSの電流容量は温度の低下によって急激に高くなるので、高価なHTSを使用量を少なくすることが出来る。

この提案は通常のペルチェ素子と下記の点で異なる。

- 1) ペルチェ素子の低温端は必ずしも熱を吸収する必要はない。
最適運転を行っている電流リードでは、その高温端では熱流がないからである。
- 2) 大電流で運転される超伝導コイルがあるので、1 kA以上の電流容量が必要である。
電力貯蔵用のSMESでは1 kA級が現在作られている。核融合では50 kAのコイルが計画されている。
- 3) P型とN型の半導体の熱バランスが独立に扱う。
熱回路が別になっているので、良い材料をそれぞれに利用すれば良い。

Figure 1の例では、上記1)に理由によりペルチェ素子としては最大温度差を作るように設計・運転を行うこととなる。

3. PRINCIPAL EXPERIMENT

今回行った原理実験の構成を Fig. 2 に示す。低温冷媒は液体窒素である。用いた熱電半導体は、BiTe-Sbであり、一般商用で使われているものである。大きさは28 mm角5 mm厚であり、メーカーからの仕様では最大温度差は700 Aで70 K程度である。半導体の高温端を水冷却し、低温端には銅ロッドを接続し、液体窒素の中を通した。これによって温度定点を得ている。また、低温の窒素ガスとの熱交換は原理実験では複雑するだけであるため、ロッドの表面には熱絶縁層をもうけた。また、ロッド径は2種類用いた。これによって、液体窒素に熱伝導で半導体の低温端から出る熱流とジュール発熱によって低温端に入る熱流の調整を行うことが出来る。

更に、液体窒素のレベルを変えたり電流を変化させて半導体の温度差及び電圧を測定した。液体窒素レベルが高いと

半導体低温端での熱流は流出し、電流値が高いと熱流は流入す

FIG. 2. Experimental Setup

る。Fig. 3 に N 型半導体の電流電圧特性を示す。

FIG.3. Voltage and Current of N-type Semiconductor

全電圧については最小 2 乗法で線形近似を行っているが、極めて良い相関を得ている。従って、この温度範囲内で電気抵抗と熱電能がほぼ一定であることが推定される。

半導体の熱伝導率が銅 ($\approx 350 \text{ W/(mK)}$ at RT) の $1/200$ であるため、電流がゼロでも半導体の両端に大きな温度差が生じ、これによって熱起電圧が発生する。逆に、これから熱電能が得られるので、半導体の電気抵抗と熱電効果による電圧を分離することが出来る。更に、これは非通電時も効果的に熱侵入を減少さ

せていることの証明でもあるでもある。

Figure 4にN型及びP型の両方の半導体の電流・温度特性を示す。

FIG.4. Current and Temperature of Semi-conductor

温度差は銅ロッドの口径に依存する。これは、ジュール発熱と液体窒素への熱伝導の大小で半導体低温端への熱流の符号が変わるからである。ロッド径が細いと電気抵抗が大きくなり、ジュール発熱が増すことによって最大温度差を与える電流値が低くなる。ロッド径が細くても液体窒素レベルまでの距離が短いと最大温度差を与える電流値は大きくなる。従って、半導体に接続する金属ロッドには最適値が存在することになる。

10mmφ ロッドの時は最大温度差は 400 A の時に 65 K である。これは半導体の低温端に熱流の流入があることを意味する。一方、16mmφ ロッドの時は、温度差がすべて 70 K を越している。これは半導体の低温端で熱流が流出していることを意味する。従って、電流リードを過冷却の状態で利用していることになる。しかし、一般に電流リードは過冷却の状態で利用する。これは、超伝導コイルシステムの低温系には電流リード以外から熱侵入があり、そのため発生する低温ガスは電流リード部を通るので、過冷却になりやすい。また、過冷却は電流リード部が事故などによって熱暴走することを防ぐので、場合によっては液体ヘリウム中にヒーターを入れてわざわざ低温ガスを発生して運転していることすらある。即ち、過冷却での利用が電流リードの一般的な運転形態であり、これは半導体の性能向上には、性能指数の他に熱伝導率の改善が別途あることを意味する。

4. CONCLUSION AND FUTURE CURRENT LEAD

以上述べてきたようにペルチェ素子を用いることによって電流リードの高温端温度を下げる事が出来た。これは自動的に低温系への熱侵入を低減することは明らかである。更に、非通電時にも半導体の熱伝導率が低いことによって大きな温度差が

発生した。これも低温系への熱侵入が低減したことを意味する。従って、電流リードに熱電半導体を利用することによって低温系への熱侵入が常に低減することが出来た。尚、常温は300Kであるから、100 Kの高温端温度の低下は約33%熱流が減少したことを意味するが、これはガス冷却を用いない電流リードに対しての値になる。

一方、現在ガス冷却型パルチェ電流リード実験を予定している。これは、熱侵入によって発生した低温ガスで金属部、半導体部を冷却する。特に、半導体の高温端を冷却することは重要である。今回の実験では半導体の高温端温度は水冷却を行っていたが、もし、低温ガスを利用して半導体それ自体を冷却すれば、より半導体低温端温度は低くなったであろう。冷却方法などが今後の実験課題である。また、これらの実験解析を行う計算機コードの開発を行っている。⁷

今後の展望の一つに半導体とHTSを直接接合できるようなれば、電流リードからの熱侵入はほとんどなくなる可能性がある。このためにはHTSの超伝導転移臨界温度の上昇と、熱電半導体の到達最低温度の低温化が求められるが、幸い低温特性が良い熱電半導体としてBiSbなどが知られている。⁸ これは液体窒素温度以下でも高い性能指数を持っている。従って、前述のBiTe-Sb系半導体と組み合わせる他に、現在電流リードに用いられているHTSの高温端温度（＝液体窒素温度）を下げることに利用できる可能性がある。これによってHTSを小型化しコストを低減することが出来る。

一方、低温では原理的にN型半導体の特性は良いが、P型については今後の研究の進展が望まれるが、しかし、電流リードに熱電半導体を応用する場合熱回路はそれぞれ別々になるので、良い材料が見つかり次第利用すればよい。

このような考え方は傾斜機能材料のアイデアにつながっていく。Fig. 5にその一例を示す。

今まで述べたように常温付近で利用する熱電半導体はBiTe-Sb系であり、液体窒素温度あたりで利用するN型の熱電半導体はBiSb系であり、電流リードに利用するHTSはBi-2223などが用いられている。従って、常温から低温まですべてBiをベースにした材料を利用している。そして、半導体と超伝導体の接合を目指すことになる。これはまさに傾斜機能材料の考え方であり、電流リードについて言えば熱侵入をもっとも低減した究極の構造になる。

FIG.5. Functionally Gradient Material for Current Lead

最後になりましたが、この研究の一部は科研費（基盤研究（A）(1) 06558074）を用いました。また、この研究を進めるために核融合科学研究所の飯吉厚夫所長他多くの方々から励ましを頂きました。また、熱電半導体のデータ等についてはコマツエレクトロニクスの森勇鋼氏から多くを提供していただきました。また富士電機の皆様には実験に配慮していただきました。ここに厚く礼を述べます。

REFERENCES

- ¹ M. N. Wilson, Superconducting Magnets, p. 256. Oxford Univ. Press, 1983.
- ² R. Echigo, Proc. 10th Int. Heat Transfer Conf. Brighton UK, 1994
- ³ Superconducting Engineering, p. 241, 2nd Edition, Edited by Institute of Electrical Eng. Japan, (Ohm, 1988), (in Japanese).
- ⁴ K. Ueda, J. Cryogenic Engineering Japan, 30, 552(1995), (in Japanese).
- ⁵ K. Jikihara, T. Hasebe, M. Ishihara, J. Sakuraba, T. Yanagiya, S. Yasuhara, K. Watazawa, Y. Yamada, S. Awaji and K. Watanabe, J. Cryogenic Engineering Japan, 30, 583(1995), (in Japanese).
- ⁶ S. Yamaguchi, K. Takita and O. Motojima, Int. Cryogenic Eng. Conf./ Int. Cryogenic Mat. Conf., Kita-Kyushu, Japan, PS3-e2-15, May, 1996.
- ⁷ H. Okumura and S. Yamaguchi, Applied Superconductivity Conf., IEEE, Pittsburgh, Aug. 1996
- ⁸ G. E. Smith and R. Wolfe, J. Applied Phys., 33, 841(1962).

熱電変換特集