

解説

核融合炉におけるエネルギー変換 —熱電変換を中心にして—

山 口 作太郎
(核融合科学研究所)
(1996年8月31日受理)

Thermoelectric Energy Conversion in Fusion Reactor

YAMAGUCHI Satarou
National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan
(Received 31 August 1996)

Abstract

Since a fusion plasma can be confined by high magnetic field induced by the superconducting magnets, the fusion reactor is one of high current system and there is large temperature difference in the fusion reactor. Thermoelectric conversion needs high temperature difference and essentially is high current and low voltage system as compared with the conventional electric system because of improving the energy efficiency of conversion and the characteristics of semi-conductors which are used in thermoelectric conversion. Because of these situations, it is natural to use thermoelectric effect in a fusion system, and we can expect many ideas of thermoelectric conversion applied for a fusion reactor. Nernst element was proposed and the first data of the Nernst voltage is presented for InSb. Peltier current lead was proposed to reduce the heat loss to the low temperature parts of superconducting magnet system, and the first experiment is summarized. The first result reduces about 30% of the heat loss. A new concept of the functionally gradient material (FGM) is proposed in this paper to reduce the heat loss of the current lead, and Bi is the basic material of this proposal.

Keywords:

thermoelectric conversion, thermoelectric effect, Nernst effect, energy conversion, fusion reactor, Peltier element, current lead, Peltier current lead, functionally gradient material, superconductivity

1. はじめに

核融合研究が広く公開され世界中で積極的に研究・開発が行われるようになっておおよそ30年以上経ち、その多大な努力によって、現在の大型トカマク装置ではほぼプラズマの臨界条件が達成されつつある。そして、JET, TFTR ではDT 反応によって大きな核反応エネルギーが観測されている[1]。これに伴って、ITER 計画も詳細に詰められてきている[2]。このような核融合炉研究の進展に従って、核融合の最終目的であるエネル

ギー生産をどのように行うかについての検討を始めることは時期的に良いと考えられる。

従来までの核融合炉での発電は核反応エネルギーの大部分を担う高速中性子をプラズマを取り囲んだブランケットの中でリチウムと反応させ3重水素を生産すると同時に高温水蒸気を作ることによってエネルギーの回収を行い、蒸気タービン発電機を駆動する。蒸気タービン発電機を利用する方式は信頼性が高く、各種の発電装置に広く用いられているが、しかし高圧水蒸気温度に上限が

あり、そのため変換効率を現状より高くすることは困難である。

しかし、元々プラズマは高温であり、強い輻射があるので、極めて良質のエネルギー源である。熱機関は熱サイクルが大きな温度差を持つと変換効率を上げることができるからである。また、輻射は熱機関を用いずに直接エネルギー変換することができる。したがって、色々なエネルギー変換のアイデアを核融合炉に適用することは極めて自然なことであり、これによってより高い変換効率を実現することは重要である。

高い変換効率は余分な熱エネルギーを地球環境に排出しなく、これからのエネルギー開発を考える上で最重要課題である。さらに、これはプラズマ閉じ込め条件にも関連する。核融合炉が成立するためのローソン条件はエネルギー変換効率が33%としてプラズマの閉じ込め時間と密度の積を決めている。もし、より高い変換効率を実現すれば、閉じ込め時間と密度の積が低くても核融合炉として成立する。閉じ込め時間と変換効率に関して式(1)が核融合炉の成立条件である[3]。

$$\frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle Q \tau \geq 3nT_i \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right) \quad (1)$$

ここで n はプラズマ密度であり、同じ燃料を用いる。 $\langle \sigma v \rangle$ は核反応率であり、 Q は一つの核反応で生じるエネルギーであり、 τ は閉じ込め時間であり、 T_i はイオン温度であり、 ϵ はエネルギー変換効率である。したがって、変換効率がローソン条件で使われた値の倍(=66%)になれば、式(1)の左辺は1/4倍で良い。

最近の大型トカマクでは20keV以上高温のプラズマの閉じ込めに成功しているので[4]、ヘリウム3などの先進的核融合燃料を利用したより安全な燃料サイクルの展望も開けると思われる。その意味でエネルギー変換の研究は核融合炉成立の基礎の一部をなすと考えられることができるであろう。

このような状況下で1993年9月に新型核エネルギー国際会議(International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems, ICENES'93)が千葉で開かれた[5]。これは核エネルギー一般に関する国際会議で核融合の他に核分裂炉、加速器炉などについて新しいアイデアを競い、新しい核エネルギーシステムの構築を目指したものであった。この会議で筆者を含む核融合科学研究所グループは4件の発表を行い、輻射を利用して水素を生産する方法、荷電粒子からの直接エネルギー変換、そして熱電変換について発表を行った。

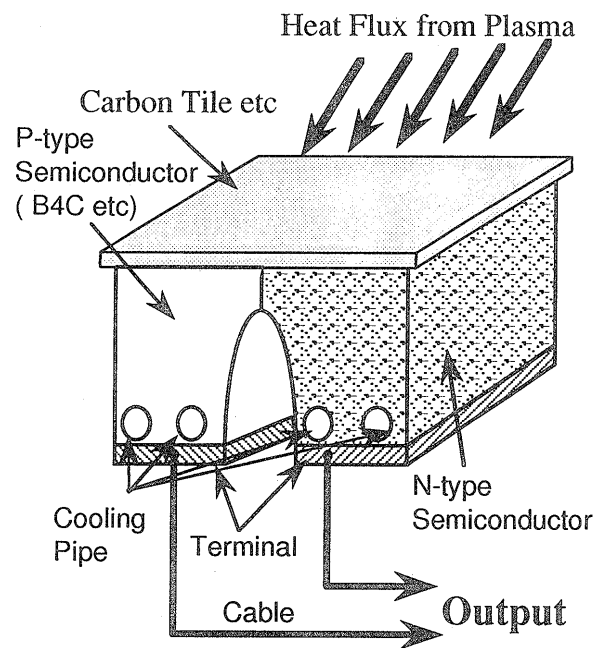


Fig. 1 Schematic drawing of thermoelectric divertor.

その中で筆者が中心になり熱電変換によるエネルギー変換を検討した。熱電変換は古くから研究が行われていて、可動部がないなどの特長を備えているが、変換効率が低いため、特殊用途(宇宙、深海など)の利用に限定されている。そして、この問題解消の手段の一つに大きな温度差での利用を想定している。核融合炉ではプラズマは高温であり、閉じ込め磁場を発生する超伝導コイルは低温であるから、装置の性格上そこには大きな温度差があり、さらに多くの電気機械が利用されている。このため熱電変換素子を利用できる部分が多いと考えられる。したがって、最初に熱電変換を利用できる核融合機器について検討した。次に、エネルギー変換効率を改善するための方策を検討した。

それらの幾つかは本学会等で発表を行ってきた。例えば、熱電ダイバータである。その構造をFig.1に示す。ダイバータにはプラズマから大きな熱流束があり、冷却が問題になっている。ダイバータ材料の一つにボロンカーバイトがある。これはプラズマ閉じ込め改善の観点から実験が行われているが、これは熱起電力の大きなP型の高温用半導体である。同時に、現在数々のN型半導体が開発されていて、それらを組み合わせるとFig.1のような熱電素子を作ることができる。この素子の高温側の温度を1700Kとし、低温側を350Kとすると、現在の材料で約5%のエネルギー変換が可能である[6]。この値は低い、発電によって熱を高温側から低温側に

熱伝導以外のプロセスでも運ぶことができるので、実効的な冷却効率は高くなる。また、逆に冷却パイプ側に高温媒体を流し、素子に電源を接続し、ヒーターおよびヒートポンプとして利用すると効率の良いベーキングを行うことができる。

さらに、熱電素子の出力電圧は一般には低いので直列接続で利用することが多い。すると、熱電素子は直接プラズマに接しているの、プラズマに複数の電位を印加することになる。したがって、周辺プラズマ制御にも利用できる可能性もあり、実験が待たれる。もちろん、これはダイバータではなく第一壁にも適用可能である。プラズマ対向材料の研究は熱およびプラズマとの相互作用を中心にして開発が今までは行われてきたが、これは新たに電気的な性質を考慮した研究を付加することの提案でもある。

以下この解説では核融合科学研究所で93年以降行われた研究を中心にして、熱電効果を用いたエネルギー変換研究を述べる。最初に熱電変換の紹介を行う。次に、上記でも述べたように熱電変換の問題である変換効率について、筆者らは磁場の存在によるネルンスト効果を利用した新しい熱電変換を提案している[7]。核融合炉では高温プラズマの閉じ込めのために高い磁場を利用するので、その利用は自然である。しかしながら、半導体のネルンスト効果については従来それほど研究が行われなく、材料の物性値もあまり知られていない。そこで、核融合科学研究所で物性値の測定装置を制作し、それによって実験を始め、ようやく実験データが得られ始めたのでその最初の結果について述べる。次に、筆者は熱電素子の応用として超伝導コイルシステムへの提案を行っている[8]。これは熱電素子を利用することによって超伝導コイルなど低温機器への熱侵入を下げようとするものである。そして、最後に今後の展望を述べる。ここでは最近核融合研究でも注目を集めている傾斜機能材料[9]についての新しい提案を行う。

2. 熱電変換

熱電変換を簡単に紹介する。1821年に熱電変換の基礎になるゼーベック効果(=温度差で発電する。これはオーム法則発見以前である)が発見された。また、1834年に逆過程であるペルチェ効果(=電流を流すことによって冷却を行う。これはジュール法則、熱の仕事当量の発見以前である)が発見された。それらの理論解析は1851年にトムソン(ケルビン卿)によって行われ、熱力学的に可逆過程であることが明らかにされ、トムソン効果とも

熱電効果とも呼ばれるようになった。

トムソンの解釈については理論物理上の問題として長く議論され、1931年にオンサガーの相反定理によって比較的確かな基礎付けが行われた。その後、日本の久保、横田、中嶋らによって微視的基礎付けが1950年代以降に行われている。

マクロ的には一般化したオーム法則と熱流方程式で熱電効果をかける[10]。

$$E = \eta J + \alpha \text{grad} T + RH \times J + NH \times \text{grad} T \quad (2)$$

$$q = \alpha TJ - \kappa \text{grad} T + NTH \times J + LH \times \text{grad} T \quad (3)$$

ここで E は電場、 η は電気抵抗率、 J は電流密度、 α は熱電能、 T は温度、 R はホール係数、 H は磁場、 N はネルンスト係数、 q は熱流束、 κ は熱伝導率、 L はリーギ・ルデック係数である。式(2)右辺の第1項はオーム法則であり、第2項は熱電効果であり、第3項はホール効果であり、第4項はネルンスト効果を表している。式(3)の右辺の第1項は熱電効果に対応した熱流であり、第2項は熱伝導であり、第3項はネルンスト効果に対応した熱流でありエッチングスハウゼン効果とも呼ばれる。第4項はリーギ・ルデック効果である。これから発電に利用できるのは熱電効果とネルンスト効果であることがわかる。

1909年頃アルテンキルヒは熱電効果による発電の定式化を行い、性能指数 Z_t を導入し、これによって最大出力変換効率 ε を与えた。

$$Z_t(T) = \frac{\alpha^2}{\kappa \eta} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta T}{T_{hj}} \frac{1}{2 + \frac{1}{T_{hj}} \left(\frac{4}{Z_t(T)} - \frac{\Delta T}{2} \right)} \quad (5)$$

ここで、 ΔT は熱サイクルの温度差であり、 T_{hj} は素子の高温側の絶対温度である。同様な定式化によって最大温度差を与えたり、最大変換効率を与えることは容易である。

これから熱電能が大きく、熱伝導率と電気抵抗率の積が小さい材料を探すことが指針となった。しかし、金属では電気抵抗率と熱伝導率の積はビーデマン・フランツ則によって決まり、大きな値になる。このため、金属の利用は断念された。

1929年にヨッフフェはII-V, IV-VI, V-VI族の元素の半導体を利用すれば理論的に効率の高い熱電素子がつくれる

ことを提唱し、材料研究が進展させた。その後、半導体のバンド構造の理論的実験的理解が進み詳細な検討が行われている。現在利用されている材料としては、BiTe (Sb) 系（市販のペルチェ素子材料として利用されている）、PbSnTe 系、SiGe 系、FeSi 系等である。

応用としてよく知られているのは、宇宙用ラジオアイソトープ熱発電器である。これは発電装置が静止機器のため打ち上げ時の大きな加速度にも耐えやすいからである。古くはアポロ計画から始まり、火星に行ったバイキング計画、木星・土星に行ったボイジャー計画などで利用されている。特に太陽から離れた惑星を探索する場合には太陽電池の利用が限られるので、放射性元素（主にプルトニウム238を利用する）を熱源として発電を行っている。宇宙用発電装置では約10%の変換効率が得られている。これは太陽光発電とほぼ同レベルの値である。

民生用としては最近小型の冷蔵庫／温熱庫が販売されている。また、病院などで血液や乳児用は乳の精密な温度制御などに利用されている。熱電変換および半導体の教科書としては文献[11, 12]が有名である。

3. ネルンスト素子

ネルンスト効果は温度差と磁場の方向をそれぞれ垂直に半導体の印加すると、それぞれに垂直な方向に電場が発生することである。したがって、これを利用して電力を取り出すことができる。一例を Fig. 2 に示す[7]。中心部に高温流体を流し、外側に低温流体を流す。これによって半導体の径方向に温度勾配が生じる。これに外側から磁場を矢印の方向に印加すると（これはソレノイドコイルで発生できる）半導体には円周方向に電場が誘起されるので、これを電極をつけて取り出す。

ネルンスト素子の性能指数 Z_N は熱電効果のそれと同様に定義され、式（6）で与えられる。

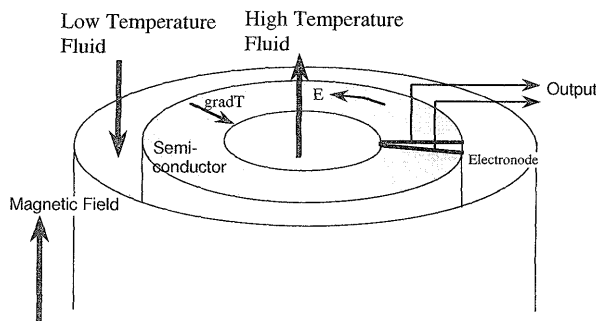


Fig. 2 Energy conversion pipe which uses Nernst effect.

$$Z_N(T) = \frac{(NH)^2}{\kappa\eta} \quad (6)$$

したがって、熱電効果と異なり性能指数は物性値のみで決まるのではなく、磁場が外部パラメータとなる。このため高磁場であると変換効率を高くできる可能性がある。また、ネルンスト素子は一種類の半導体で構成できるが、熱電素子は N, P 型の 2 つの半導体が必要なのでどちらか一方が悪いと、良い変換素子ができない。その意味で材料探査が比較的容易と言えよう。

次に材料の検討を行う。キャリアが一つの非縮退半導体モデルではネルンスト係数および電気抵抗率はボルツマン方程式から下記のように与えられる[13]。

$$N = \frac{3\pi}{16} \frac{k}{e} \mu \quad (7)$$

$$\eta = \frac{1}{ne\mu} \quad (8)$$

ここで、 n はキャリア密度であり、 e はキャリアの電荷であり、 μ は移動度、 k はボルツマン定数である。したがって、ネルンスト効果の性能指数 Z_N は式（9）で表される。

$$Z_N \propto \frac{\mu^3}{\kappa} H^2 \quad (9)$$

したがって、高移動度で低熱伝導率の材料を見つけることが指針となる。電子の移動度はホールより高いので、N 型半導体の利用することになろう。熱伝導率は半導体ではフォノンによって主に決まり、したがって結晶構造等を考慮する必要がある。

移動度の高い半導体としてよく知られている材料は InSb である。これは前節で述べた BiTe (Sb) 系の半導体に比べて約 2 桁大きな値である。したがって、式（9）によればネルンスト効果に対する性能指数は非常に大きくなる可能性がある。このため、最初に検討を行う材料として InSb を選んだ。

そこで最初に InSb の物性値を文献などで調べ理論的な検討を行い、同時に過去にネルンスト効果を利用した実験がないかを調べた。しかしながら、1970年代以降では全くこのような研究を見つけることができなかった。また、物性値に関しても上記の検討を行うための十分なデータが不足していた。

このため磁場中の物性値の測定装置を制作し、実験を始めた。Fig. 3 に実験装置を示す。液体ヘリウム冷却超

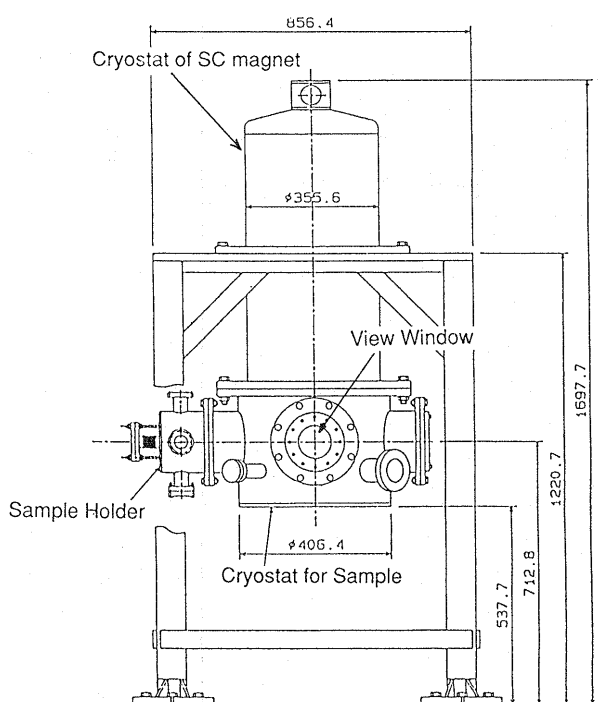


Fig. 3 Experimental device to measure the transport coefficient of materials

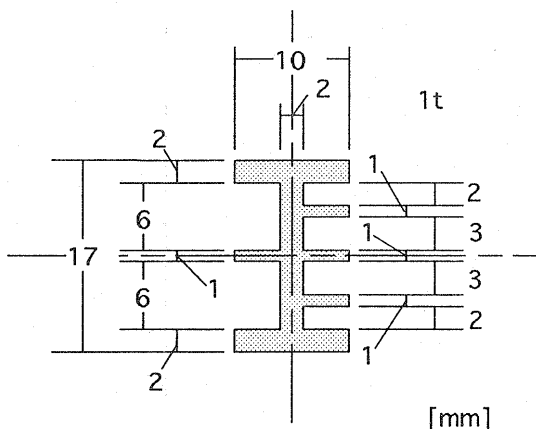


Fig. 4 One figure of the sample for the measurement of the transport coefficient

伝導コイルによって最大4テスラの磁場を発生し、常温ボア 60φを持っている。加熱・冷却系が真空断熱されたクライオスタットの中に設置された半導体材料の温度を制御する。

実験を行うためには測定系を整備し、半導体を加工し、電極取り付けなどの実験上のいくつかの課題を解決する必要がある。Fig. 4にサンプル形状の一例を示す。これによって、熱電能、ネルンスト係数、ホール係数、電気抵抗率を測定している。一般に半導体や超伝導体の物性

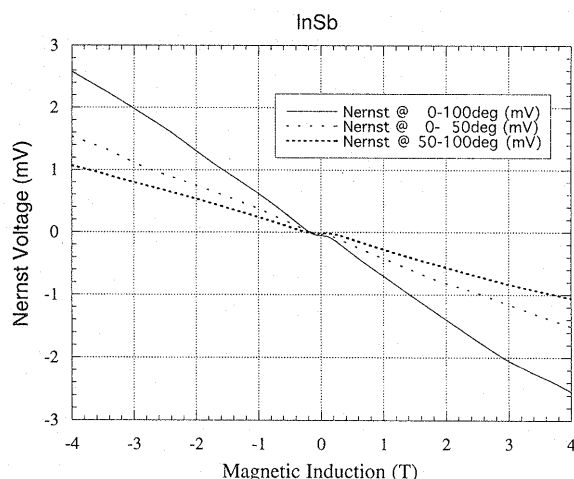


Fig. 5 Nernst voltage and Magnetic field in InSb.

値の測定には色々な形状で行われていて、今後実験の進展に応じて形状を変える必要もある。形状加工は放電加工機を用いた。磁場中の測定では形状によって測定値が変化することが知られているので[14]、そのような形状効果は物性値自身から除く必要があり、さらに、最適形状を見つけるためにも実験データを評価するためにも有限要素法のコードが必要と考えられ、現在開発を行っている。また、電極はスポット溶接で銅線を接合し、接合がオーミックになっていることを確認している。Fig. 5に最近測定されたInSbのネルンスト電圧測定の一例を示す[15]。横軸は磁場であり、縦軸はネルンスト電圧である。同じサンプルに対して温度差を変え測定を行い、温度差が大きいと出力電圧が高い。また、測定電圧の単位はmVであり、測定系の能力から精度の高い測定が行われている。磁場は-4Tから+4Tまで変化させ、磁場が低い時を除き、測定電圧が磁場にほぼ比例しているので、1T以上であればほぼネルンスト係数は一定である。また、ネルンスト係数に対しては特にヒステリシスは観測されなかった。このサンプルはキャリア密度は $2.9 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ (77 K)であり、一般の熱電半導体の密度に比べてかなり低い。今後密度の異なる複数のサンプルについて測定を継続する予定である。

半導体のキャリア密度を上げると（不純物を多くドーピングする）電気伝導率は上がり、移動度や熱電能は減少し、熱伝導率は上昇するので、密度について性能指数を最大にする最適値が存在する。従来の熱電素子に用いる半導体は不純物半導体とも言われ、キャリア密度は 10^{25} から 10^{26}m^{-3} 程度であり、かなり高く半金属程度の値になる。同様な検討はネルンスト素子材料についても

必要となり、今後の検討課題である。

実験データが得られ始めたので、理論解析も本格的に始めた[16]。一般に半導体のキャリアは電子とホール両方を持ち、1種類ではない。また、キャリアの散乱はイオン化散乱、光学フォノン散乱などがあり、それによって輸送パラメータが変わる。さらに、これらの散乱は、温度とキャリア密度によって異なる。これらは半導体のバンド構造により説明される。このため、各種の輸送パラメータ（電気抵抗率、熱電能、ネルンスト係数、ホール係数など）について、ボルツマン方程式から上記を考慮して求めた結果と文献から得られたデータの比較を行っている。InSbについてはネルンスト係数を除き、ほぼ理論値とよい一致を示すが、ネルンスト係数については条件によってその符号すらも一致しないことがある。これはまるでプラズマの輸送現象として磁場平行成分の電気抵抗率が古典論で説明がつくが、磁場に垂直方向の閉じ込めは単純な古典論で説明がつかないかのようである。

一般にバンド構造を議論するとき、放物線構造からのずれによってその輸送特性が変化する。Si, Ge, GaAsなどについてはよく調べられているが、InSbについては放物線構造のみで議論が行われていて、詳細な検討は1970年以降は行われていない[17]。そして、その当時の結果は必ずしも互いに満足し合うものではない。逆にこれら理論的再評価と高精度物性値測定がネルンスト素子材料を決める上での主な研究テーマであると考えられる。今後InSb以外の物質の探索も行う予定である。

なお、1960年代に米国で高磁場発生装置の完成に関連して、ネルンスト効果（=エッチングスハウゼン効果）を利用して冷却を行う研究が行われている。そこでは材料に半金属であるBiを用いて、常温から約100K低い温度を達成している[18]。

4. ペルチェ電流リード

プラズマ閉じ込めのための強磁場は低温の超伝導コイルによって発生する。一方、コイル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ている。そのために、電気回路の一部に温度が常温から4K程度の低温まで変化している部分が必要となり、この機器を電流リードと呼ぶ。この部分では温度差のため熱伝導によって低温への熱侵入がある。また、その部分の電気抵抗によって発熱し、一部が低温への熱侵入となる。電流リードからの熱侵入は大型の超伝導コイルシステムへの熱侵入の半分以上を占め、超伝導コイルの安定性および運転の経済性

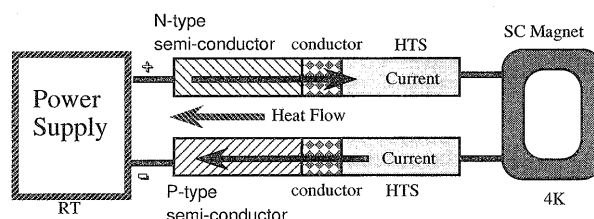


Fig. 6 Schematic drawing of Peltier current lead.

の観点から望ましくなく、できる限り熱侵入を低くしたい。

従来までは熱侵入を低減するためにガス冷却型電流リードが使われている。これは、熱侵入のため気化した冷たいヘリウムガスを電流リード部を通すことによって、電流リード導体と熱交換し、最終的には電流リードの上部から外に出ていく構造を取っている[19]。簡単な解析から電流リードは熱伝導率と電気抵抗率の積が最小になる材料で作ることが望ましい。このため、通常は銅、アルミなど熱伝導率の高い金属材料で作られている。しかしながら、大型の大電流超伝導コイルではガス冷却型電流リード部からの熱侵入が大きく、SMESなどの電力応用を考えると更に熱侵入を低減する必要がある。

このため、最近では高温超伝導体 (HTS) を利用した電流リードの研究開発が広く行われている[20]。最新のHTSでは液体窒素温度 (77K) 以下で磁場が低い時、大電流が流せる。Bi系およびY系のHTSでは100K-10K付近で熱伝導率が銅の約1/1000であり、熱侵入を低くできる。このため、HTSを電流リードの低温部に利用することによって液体ヘリウムを利用しない超伝導コイルシステムが初めて実用化された。

さて、最初に述べたように熱電効果は温度差があり電流を流す部分に応用することは自然であり、筆者はFig. 6のシステムを提案しペルチェ電流リードと名付けた[8]。N型半導体とP型半導体に図のように電流を流すとこれらはヒートポンプとして働き、低温側から高温側に熱を汲み上げる。したがって、単に熱伝導率を下げるのではなく、能動素子として働く。現在市販されている半導体はBiTe (Sb)系があり、これらは熱負荷がない状態で常温から70K程度低い温度を保持する能力がある。したがって、Fig. 6の構成を取ると通常の電流リードの高温端温度が下がることを意味し、これによって低温端での熱侵入を低減することができる。一方、HTSは液体窒素温度以下で利用するので、その間には常伝導材が利用されている。しかし、将来より高性能の熱電素子およびHTSが開発されれば、それらを直接接合すること

によって電流リードからの熱侵入は現在の値に比べてほとんどゼロにすることができるであろう。究極の電流リードとなるであろう。

このシステムは通常の熱電素子を利用したシステムに比べて下記の特徴がある。

- 1) ペルチェ素子として必ずしも低温で熱吸収する必要はない。
- 2) 超伝導コイル電流は kA 級以上であり、したがって半導体にもその電流を流す必要がある（通常のペルチェ素子は数 A 程度）。
- 3) N, P 型の半導体の熱については独立に扱う。

通常の電流リードの最適運転の解析から低温端への熱侵入を最小にすると、高温端の熱流はゼロになる。このため、ペルチェ素子は熱吸収をする必要がない。その上、一般に電流リードは過冷却の状態で運転されるので、半導体の低温端は熱吸収ではなく熱放出する状態になる。また、市販されているペルチェ素子はその電流容量を下げるために熱電半導体を小さく切り、それを直列接続している。したがって、大電流を流す素子の製作は比較的容易である。

このアイデアを検証するため Fig. 7 のような実験装置を作り、その原理実証を行った。半導体は BiTe (Sb) を用い、大きさは 28mm 角 × 5mm 厚であり、最大温度差を与える電流値は約 700A である。熱電半導体の解析から断面積と最適電流値は比例し、厚さは反比例する。したがって、大電流用の熱電半導体でもそれほど大きく

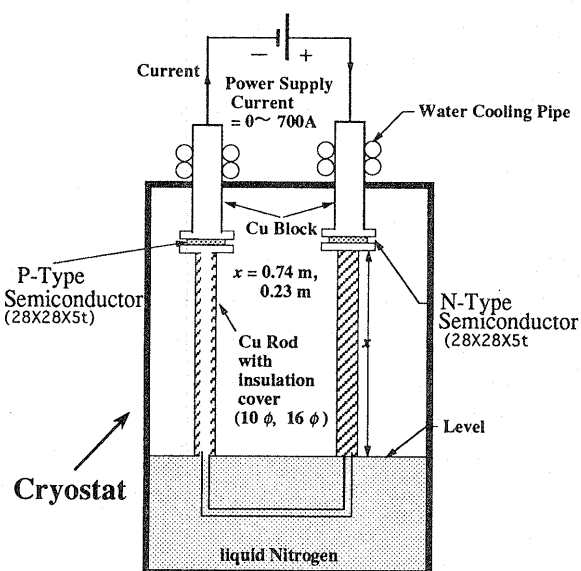


Fig. 7 The first experimental set-up of the Peltier current lead.

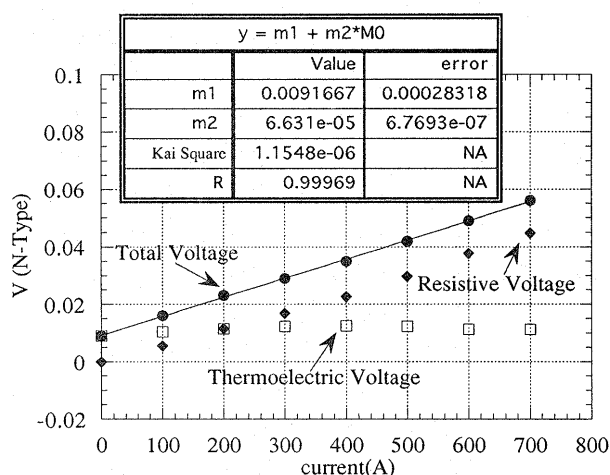


Fig. 8 Current and voltage of BiTe(Sb) semiconductor for Peltier current lead.

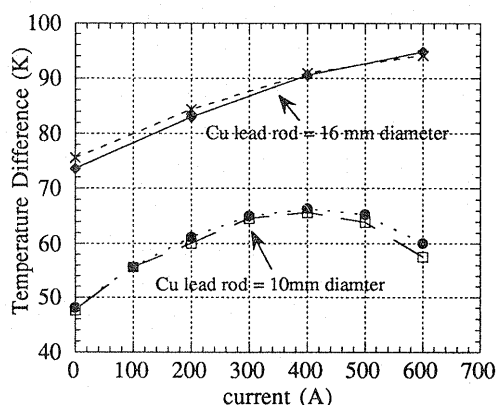


Fig. 9 Current and temperature of BiTe(Sb) semiconductor for Peltier current lead.

ならない。熱伝導率は $1.5\text{W}/(\text{mK})$ であり、HTS と同じオーダーの値である。半導体は銅ブロックで挟み、高温端は水冷却で温度が一定になるように制御した。低温側は液体窒素の中を通した銅ロッドに接続し、電圧、電流、温度を測定した。これらはクライオスタット内に設置されるが、冷たいガスとの熱交換があると解析が困難になるので、銅ロッドおよび半導体はガスと熱絶縁するために断熱材でカバーした。

Fig. 8 は電流および半導体の電圧特性である。電流ゼロでも電圧が生じているのは半導体の両端で温度差のためである。全電圧は電流に比例している。図ではこの電圧を熱電効果による電圧と電気抵抗による電圧に分けて示してある。

Fig. 9 はその時の電流と半導体両端の温度差の関係である。半導体は銅に比べてこの温度領域で約200倍以上熱伝導率が低いので、電流を流さない状態でも熱侵入を

低減している。さらに、通電すると、式(3)からわかるように、電流によって熱流が運ばれるので、温度差が増大し、熱絶縁が向上する。

ここでは、銅ロッドの直径が10φ、16φの2つについて行っている。直径の細いロッドでは抵抗が高いのでジュール発熱が液体窒素への熱伝導による冷却より大きくなり半導体低温部への熱負荷となるため、低い電流値で温度差がピークになると同時に温度差が低い。これは半導体に合わせて常伝導部の構造に最適値があることを意味するが、今回の実験では16φ銅ロッドが最適となっている。また、N、P型半導体の熱・電気特性はほぼ同じであり、両者に大きな相違はない。

一般には電流リードは自己冷却条件(=電流リードから侵入する熱で気化したヘリウムガスを用いて冷却すること)よりは過冷却で利用される。これは電流リード以外からの熱侵入で気化したガスも電流リード部を通過させ冷却を行うからである。これによって熱侵入を低減すると同時に電流リードの安定性を増している。このため、半導体の低温端から熱放出があることになり、より大きな温度差が発生する。実験では100Kを越す温度差も観測されている。

今後より低温まで到達する材料を探すことが研究の一方針になる。200Kから液体窒素温度の範囲であるとBiSbが比較的よいN型半導体材料として知られ研究されている[21]。これは同時にFig.7のようなシステムの他に低温でよく働く熱電素子とHTSを組み合わせたことによって前述のHTS電流リードの性能を向上させることができる。コイルを作る超伝導体は常伝導への相転移があるので導体安定性を確保するために銅やアルミなどの電気抵抗率の低い材料を安定化材として超伝導材に付加している。しかし、このような方法は電流リードでは利用できない。それは、銅やアルミによって熱伝導による熱侵入が著しく増大するからである。このため、現在の電流リード用HTSは極めて大きな安定性マージンを取っている。しかし、もしBiSbを用いて液体窒素温度から10K程度温度を下げる如果能够と、HTSの電流密度は大幅に向上するので安定性が改善されると同時にコストも下げることができる。今後の低温での熱電材料研究の進展が待たれる。

5. 今後の展望

核融合科学研究所での熱電変換の研究を述べてきた。上記のようによく実験が本格的に始まり、データが一部出てきた段階である。そして、今後の展望としては、

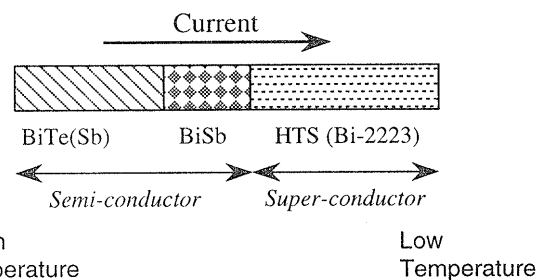


Fig. 10 New concept of functionally gradient material for Peltier current lead in which Bi is basic material.

以上述べてきた研究の推進と同時に、下記のようなことを考えている。

最初にも述べたように核融合炉では大きな温度差があり、電気機器を利用するので熱電変換の利用は自然である。一方、大きな温度差に耐える材料として傾斜機能材料(FGM)の研究が最近盛んに行われている[9]。この基本的なアイデアは文献[22]に述べられている。従来までの材料開発はできる限り均一に作ってきたが、FGMでは材料の不均一度を制御して作り、それによって数々の新しい性質・機能を持たせようとする方法である。例えばロケットエンジンの材料として、内側はセラミックスで耐熱材料とし、徐々に組成を変えて外側では金属になり機械的強度と熱伝導性を確保しようとするところがある。このようなアイデアは核融合でも今後多く利用されるであろう[9]。このアイデアは多方面にわたり、機械的傾斜機能(熱応力緩和型耐熱材料)、電気的傾斜機能、化学的傾斜機能(耐食性プラント材料)、生物的傾斜機能、核的傾斜機能(耐放射線損傷材料)、光学的傾斜機能(無損失光ファイバー)などが概念として提案されていて、数多くの研究開発が大学から通産省、科技庁の研究所で広く行われている。

そのようなFGMの概念に新たに超伝導熱電傾斜機能を追加したい。Fig.10にその構造の一例を述べる。これは上記で述べたペルチェ電流リードのアイデアをFGMの概念を入れて展開した考えである。常温から200K付近まではBiTe(Sb)系の材料を用い、そこから液体窒素温度付近まではBiSb系の材料を用いる。さらに、HTSとしてはBi系の材料(Bi-2223など)を用いると、Biが基材になり、それに混合する物質を変えることによって、半導体から超伝導体まで連続的に変化させることになる。従来から物質組成を変えることによって最適化した熱電機能材料の提案はあるが、このアイデアはそれに超伝導材を新たに組み合わせている。これを用いた電流リードは超伝導コイルシステムの低温部への

熱侵入を大幅に低減できることができるであろう。

以上、核融合炉における熱電変換を述べてきた。最初に述べたように核融合炉は良質のエネルギー源であり、エネルギー変換は数々の方式が考えられが、ここでは熱電変換について述べた。なお、この研究の一部は文部省・科学研究補助費の助成を受けて行われたものである。

謝辞

この研究を遂行するにあたり、名古屋大学工学部・黒田光太郎さんには全般的な実験の推進に関して有益な助言を頂きました。核融合科学研究所・中村浩章さんには主に文献の調査、その内容の検討、理論的な検討を行っていただきました。総合研究大学院大学・池田一昭さんは実験遂行に多くの努力をしていただきました。この研究を進めるために核融合科学研究所・飯吉厚夫先生には多くの援助を頂きました。また、核融合科学研究所の本島修先生を始め多くの方々に興味を持っていただき数々のお世話になりました。そして、多くのメーカ等企業の方々にも研究を進める上で多大な助言と援助を頂いたことを記し、ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] JET Team, Nucl. Fusion **32**, 187 (1992); J. D. Strachan *et al.*, Phys. Rev. Lett. **72**, 3526 (1994).
- [2] 小特集「ITER 物理 R&D」専門家グループの現状と展望, プラズマ核融合学会誌 **72**, 495 (1996).
- [3] 吉川庄一, 飯吉厚夫: 「核融合入門－高温プラズマの閉じ込め」, 共立出版 **18**, (1972).
- [4] H. Takenaka *et al.*, Nucl. Fusion **35**, 853 (1995).
- [5] H. Yasuda, edit, *Emerging Nuclear Energy Systems- ICENES'93*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- [6] 山口作太郎他: 「直接発電を目指した高機能ダイバータの提案」プラズマ核融合学会第10回年会予稿集, 154 (1993); 林浩巳他, 「核融合における熱電変換とその応用(1)」平成8年電気学会全国大会講演論文集, 分冊7, p.7.
- [7] S. Yamaguchi *et al.*, Proc. 12th Int. Conf. Thermo-electrics, 521 (1994).
- [8] S. Yamaguchi *et al.*, 16th International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Material Conference (ICEC16/ICMC), PS3-e2-15, May 20-24 (1996).
- [9] 山崎誠一郎: プラズマ核融合学会誌 **72**, 593 (1996).
- [10] L. D. Landau, E. M. Lifshitz and L. P. Pitaevskii, Electrodynamics of Continous Media, *Course of Theoretical Physics*, 2nd Edition, Pergamon Press, 101 (1984).
- [11] 上村欣一, 西田勲夫: 「熱電半導体とその応用」, 日刊工業新聞社, 昭和63年12月発行.
- [12] K. Seeger, *Semiconductor Physics*, 5th edition, Springer-Verlag (1991).
- [13] E. H. Putley, *The Hall Effect and Related Phenomena*, (Butterworth & Co. Ltd., London 1960).
- [14] H. Welker and H. Weiss, Z. Phys. **138**, 322 (1954).
- [15] 池田一昭他: 「熱電半導体の輸送係数の測定」熱電変換シンポジウム '96 TEC'96, 論文集 p. 30, 1996年7月 (熱電変換研究会, 湘南工科大学)
- [16] 中村浩章他: 「熱電半導体の理論的検討」熱電変換シンポジウム '96 TEC'96, 論文集 p. 64, 1996年7月 (熱電変換研究会, 湘南工科大学)
- [17] Ya. Agaev, O. Mosanov and O. Ismailov, *Transverse Nernst-Ettingshausen Effect in InSb in the Intrinsic Conduction region*, Soviet Physics-Semiconductor **1**, 711 (1967).
- [18] T. C. Harman, J. M. Hoing, S. Fischler, A. E. Paladino and M. J. Button, Appl. Phys. Lett. **4**, 77 (1964).
- [19] M. N. Wilson, *Superconducting Magnets*, Oxford Science Publications, 256 (1983).
- [20] 植田和雄: 低温工学 **30**, 552 (1995).
- [21] G. E. Smith and R. Wolfe, J. Appl. Phys. **33**, 841 (1962).
- [22] 新野正之: セラミックス **29**, 179 (1994).