

# 磁場中の熱電発電

—核融合研究における熱電変換—

Thermoelectric Conversion in Magnetic Field

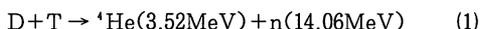
— Thermoelectric Conversion for Nuclear Fusion Study —

山口 作太郎\*

Satarou Yamaguchi

## 1. はじめに

現在、核融合研究は日本、米国、ECで大型トカマク型実験装置による実験が精力的に行われ、ローソン条件（＝プラズマに inputs エネルギーと核反応の結果生ずるエネルギーが釣り合う条件）がほぼ達成され、熱核融合反応の科学的実証が行われる段階まで研究が進んできた<sup>1)</sup>。この結果、次の段階としてエネルギーを具体的に取り出すための研究・開発が本格化し、研究の主体が今までのプラズマ物理から炉工学に移ろうとしている。炉工学における主要な研究の一つに機器コンポーネント及びその材料開発が挙げられ、ブランケット、第一壁、ダイバータなどが主な研究対象である。図-1にトカマク型核融合炉の断面構成図と現在の段階での研究課題とを示す。現在、研究が行われているのは式(1)に示すように、DT反応（三重水素と重水素の反応）と呼ばれるもので、ヘリウム4 ( ${}^4\text{He}$ ) と中性子 ( $n$ ) が発生する。



式(1)から反応の結果生じるエネルギーの約80%を中性子が得るので、このエネルギー回収が重要である。中性子は電荷を持たないので、プラズマを閉じている磁場と無関係にプラズマを囲んでいる廻りの構造の中に入って行く。ブランケットはこの中性子からエネルギーを取り出す機器で、プラズマを取り囲むように設置する。ここでは熱エネルギーを取り出す他に、自然界に存在しない燃料の三重水素 (T) をリチウム (Li) と中性子との反応を利用して生産する。また、効率よく三重水素を生産するためにこの中性子の増培を行う反応も想定されている。従って、ここでエネルギー生産の意味で炉心と言うことが出来る。

従来から想定されている核融合炉のエネルギー変換は、ブランケットで発生した熱エネルギーを熱交換機を通して外部の蒸気タービンまで導き発電を行う<sup>2)</sup>。これは、核分裂炉や火力発電所と同じ方式であり、その意味でより確実な方法を想定してきた。これは、今までの核融合研究がプラズマの閉じ込め物理に注力してきた為である。

しかし、現在、核融合の研究がローソン条件をみたく段階まで来たことを踏まえ、更に、21世紀の発電所が核融合反応によって担われるのであれば、著者等はエネルギー変換方式についても、核融合炉の特徴を生かした方法を再度検討することは意味があると考えた。そこで最初に核融合で可能であるエネルギー変換全般について検討を行なった<sup>3)</sup>。そして、今回ここで紹介する熱電交換を提案した<sup>4, 5)</sup>。

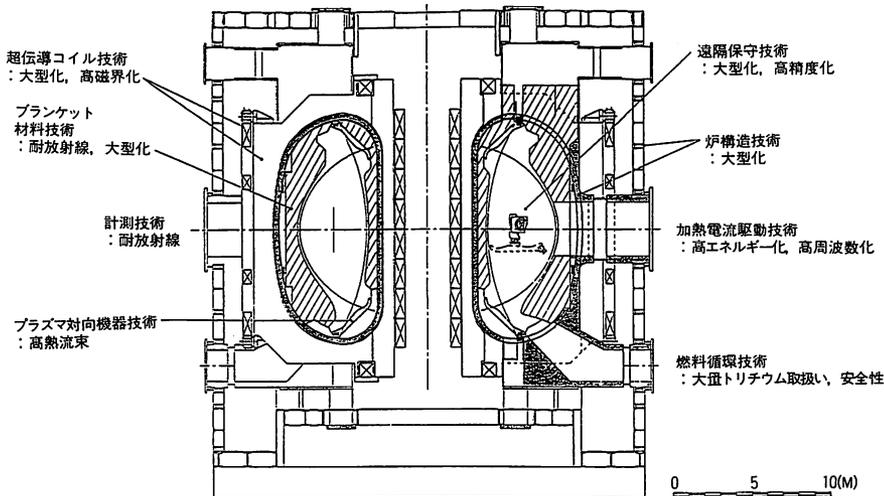
以下では、発想を明確にするため著者等が今までに行ってきた研究を時系列的に述べる。更に、核融合研究と熱電変換の将来展望を述べると同時に民生技術への派生効果も含めて述べる。

## 2. 核融合炉の高熱流速機器と熱電発電

図-1を用いて説明を行う。第一壁及びダイバータと呼ばれる構造は図-1の中ではプラズマ対向機器と呼ばれるもので、直接プラズマに面している。これは、プラズマからの放射や高エネルギー粒子、周辺プラズマなどと接していて、そのエネルギー熱流速は数100 kW/m<sup>2</sup>から10 MW/m<sup>2</sup>にも及ぶ。このエネルギー源は主に式(1)で示した核反応の結果生じる荷電粒子 ( ${}^4\text{He}$  (3.52MeV)) である。このため、冷却が極めて重要であり、高熱流速機器として開発が行われている。

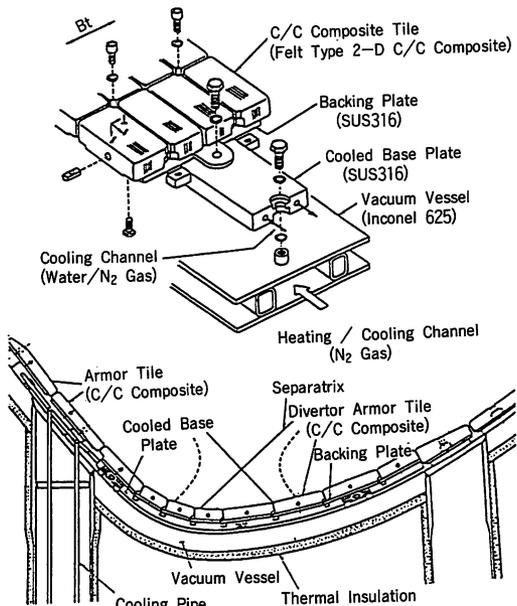
今までの実験ではこれらの高熱流速機器はカーボンを主材料としてきた。これは高融点材料であると同時に低原子番号材料のためにプラズマへこれらの原子が

\*文部省 核融合科学研究所 プラズマ制御研究系助教  
〒464-01 名古屋市千種区不老町



(日本原子力研究所編「核融合炉をめざして」, 1992年p. 17より引用)

図-1 トカマク型核融合炉の断面模式図と研究課題



(T.Ando et al, "Operation Experiences with JT-60U Plasma Facing Component and Evaluation Tests of B4C over laid", Proc. 17th Sympo. Fusion Tech. vol. 1, p. 162, Sept. 14-18, 1992から引用)

図-2 JT-60Uダイバータの構造

混入した時に放射損失が少ないからである。ダイバータの一例を図-2に示す。ここでC/C Composite Tileと書かれているのがカーボン系材料である。カーボン系材料は内部にポラスを持つので真空中で利用するには一度脱ガスをしてやる必要があり、通常はベーキング及び密度・温度の低いプラズマをそれに当ててい

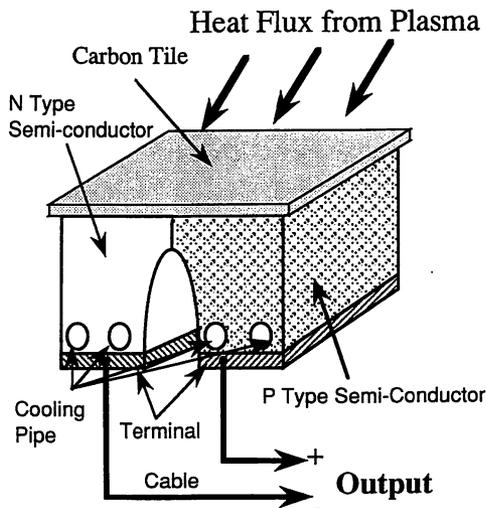


図-3 熱電ダイバータの概念図

る。

更に、プラズマ物理の実験として、プラズマに直接ダイバータは接しているの、これらを他の構造物と電氣的に絶縁し、外部の電源と接続すればプラズマの閉じ込めや電流駆動に関する電位を直接制御できるため、数々の実験が行われてきた。

さて、ダイバータや第一壁は高熱流速下で利用されるので、プラズマ側(1500°C程度)と冷却側(50°C)で大きな温度差(1450°C)を持っている。これは熱電発電にとって極めて都合の良いことである。一般に熱

電発電はタービン発電機などに比べて効率が低いために大きな温度差を用いる必要があるからである。そこで、最初に熱電ダイバータ (Thermoelectric Divertor) を提案した<sup>6)</sup>。概念図を図-3に示す。従来の熱電素子をダイバータに応用した構造である。プラズマからの熱と反対側の冷却で大きな温度差がP型&N型半導体に生じ、それによって発電を行うことを目的とした。

同時に、このダイバータはプラズマに電位を印加する実験が出来る。更に、外部電源を接続し、冷却水を流す部分に高温のガスか流体を流して、ゼーベック素子として運転を行うとダイバータ板のベーキングが効果的に行うことが出来ることを指摘した。これがこの研究を始めた最初の動機である。

### 3. 磁場中の熱電発電

熱電発電は従来から変換効率が低いことが問題とされてきた。効率は材料によって決まり、現在高効率のものでもせいぜい10%程度である。そこで、この問題を検討するため核融合炉で熱電発電を行うことを前提に、その特徴を生かすために原点から検討を行うことにした。従来の熱電素子が利用されてきた環境と大きく異なる点の1つに磁場の存在がある。従って、磁場の効果を入れた検討が必要である。熱電発電の基礎方程式は電場についての式(2)及び熱流速密度についての式(3)で表される。

$$E = J/\sigma + S \text{ grad}T + R_H H \times J + N H \times \text{grad}T \quad (2)$$

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

ここで、Eは電場の強さ、Jは電流密度、 $\sigma$ は電気伝導率、Sは熱電能率、Tは温度、 $R_H$ はホール係数、Nはネルンスト係数、qは熱流速密度、 $\kappa$ は熱伝導率、Lはリーヒ・ルデック係数である。

式(2)の右辺第1項はオームの法則と呼ばれ、第2項は従来から研究されている熱電効果である。第3項はホール効果と呼ばれ、第4項はネルンスト効果と言われる。また式(3)の右辺第2項は熱伝導を表し、第4項はリーヒ・ルデック効果を表す。第1項及び第2項は熱電効果及びネルンスト効果の熱流速密度への寄与である。これらから、熱電効果とネルンスト効果は可逆過程であり、この過程によってエントロピーは増大しなく、このため発電の他に加熱/冷却が行える。従来の熱機関は発電によってエントロピーを増大させるのでこのようなことは出来ない。尚、式(3)の第3項はネルンスト効果の熱流速密度への貢献であるが、

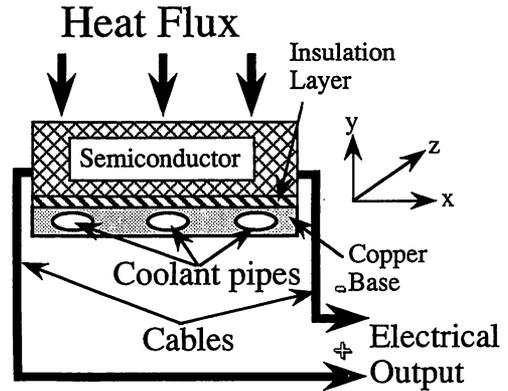


図-4 ネルンスト素子の概念図

これは発見者にちなんでエッチングハウゼン効果とも言われる。簡単な考察から発電にはネルンスト効果と熱電効果が利用できる。

熱電効果を利用した素子は式(2)の右辺第2項と式(3)の右辺第1項に対応するので、温度差の方向と電流密度の方向は並行である必要があり、図-3の素子が作られている。一方、ネルンスト効果を利用する素子は式(2)の右辺第4項と式(3)の右辺第3項に対応するので、温度差、電流密度、磁場の方向はそれぞれ垂直である必要がある。

以上の検討の結果、図-4に示すようなネルンスト素子を提案した。熱流速は図の上から来て、素子の下側を冷却するので温度差の方向は上下(y方向)になる。一方、磁場はこの紙面に垂直(z方向)に印加される。従って、左右方向(x方向)に電場が誘起される。冷却は銅ベースを用いているので、誘起された電場が短絡されないために半導体と銅ベースの間に絶縁物を挟んである。この特徴は半導体が1種類で良いことである。従来の熱電素子はP型とN型の2種類の半導体が必要であり、それぞれの特性に合わせて最適設計を行う。しかし、一方に良い半導体が見つかって、もう一方が良くなければ、その性能は悪い方で決まってしまう。その意味でネルンスト素子用の半導体材料を探す手間は半分になることを意味する。更に、図-4に於いてx方向の長さによって誘起される電場の強さは比例するので、熱設計とは別に素子の長さを変えることによって誘起電圧を変化させることが出来る。従来の熱電素子は熱設計によって完全に誘起電圧は一意的に決まってしまう。一般に熱電素子の1固当りの誘起電圧は低いのでこれは工学設計上有利になろう。

尚、今回筆者等がこの研究を始める段階では知らな

かったが、ネルンスト効果（エッチングハウゼン効果）については1960年代初頭に米国で原理的に冷却できることが実験で実証されている<sup>7, 8)</sup>。しかし、これらの論文では発電及びその効率については特に言及していない。

4. 熱電素子とネルンスト素子

新しい素子としてネルンスト素子を提案したが、それが従来の素子と比較して効率がどの程度改善されるかを検討する必要がある。残念なことに磁場中の半導体物性としてのホール係数は数多く測定されているが、ネルンスト係数についてはほとんどデータがないのが現状である。このため、半導体の物理モデルを利用して、現在測定されているデータを元に従来の熱電素子とネルンスト素子の性能比較を行った。

熱電半導体の変換効率を表す指標として性能指数が用いられる。熱電素子の性能指数Zは式（4）及びネルンスト素子の性能指数Z<sub>N</sub>は式（5）で表される。

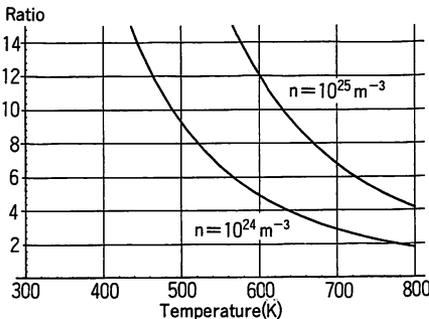
$$Z = \frac{S^2}{\sigma \kappa} \tag{4}$$

$$Z_N = \frac{N^2 H^2}{\sigma \kappa} \tag{5}$$

ここでの記号は式（2）と式（3）による。

従って、ネルンスト素子の性能指数は磁場の2乗に比例するので、高い磁場であると急激に性能指数は改善される。従来の素子の性能指数は常温付近の良い材料でZ=0.001K<sup>-1</sup>程度であった。これ以後の計算については複雑になるので、詳しくは文献3）及び4）を参照していただき、ここでは主な結果を述べる。

図-5にネルンスト素子の性能指数と熱電素子の性能指数の比を示す。この計算は電荷密度を10<sup>24</sup>m<sup>-3</sup>及び



計算条件は電荷及び質量は電子の値、磁場10Tesla、常温での移動度、8 m<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>

図-5 ネルンスト素子と熱電素子の性能指数の比

10<sup>25</sup>m<sup>-3</sup>に対して行った。また、計算を行う上での主な仮定は、

- 1) 熱伝導率及び電気伝導率は磁場によって変化しない。
- 2) 計算条件は図の説明のようで、電荷及びその質量は電子の値を使った。磁場10Tesla、常温での移動度は8 m<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>とし、温度の1.5乗で減少するとした。

この計算は性能指数の比が取ってあるので、1以上の値であれば熱電素子に比べてネルンスト素子の性能指数が高いことを意味する。常温から800K以上まで比が1以上なので、ネルンスト素子は高い変換効率を持つ可能性がある。

性能指数が分かると変換効率が計算できる。図-5のように温度によって性能指数は変化するので変換効率は温度の関数になるが<sup>9)</sup>、温度差を500°C~700°Cとして、性能指数=0.05K<sup>-1</sup>程度であると現在の蒸気タービン発電機程度の変換効率が得られ、これが一つの大きな目標になる。

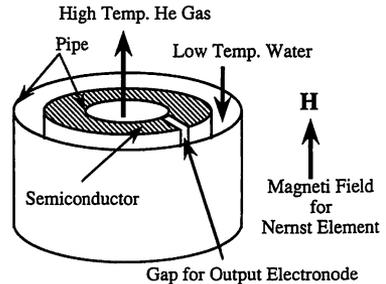


図-6 ネルンスト素子用エネルギー変換パイプ

さて、このようなエネルギーの直接変換を行う構造について一例を図-6に示す。中心に高温の流体が流れ、半導体の外側に低温の水が流れるので、径方向に温度差がつく。外部から印加する磁場は↑の方向に印加する。すると半導体の円周方向に電場が誘起されるので、ギャップを設けそこに電極を付けて外部に電気エネルギーを取り出す。このようなエネルギー交換パイプを複数本集合し、その外側に単純な超伝導ソレノイドコイルを設置することで、必要な磁場を発生することが出来る。従って、コイルも含めたシステムの構造は比較的単純であり、製作も容易と思われる。

5. 今後の展望

今後の展望を核融合科学研究所の研究を中心に幾つ

か述べたい。まず、ネルンスト素子についてであるが、上で述べた計算を確定するために、実験を行い半導体の輸送係数（電気伝導率、熱伝導率、ホール係数、ネルンスト係数、熱電能率などを総称して言う）を求める必要がある。現在、筆者は文部省の科研費やメーカー及び大学・研究所の研究者の協力を得て、色々な半導体の輸送係数を磁場中で測定する実験装置を製作し、実験を開始した所である。幾つかの半導体について検討を進めている段階であり、今後2年間の科研費が利用できる期間中に複数のネルンスト素子材料の候補を見つきたいと考えている。また、この研究は今まで半導体の磁場中の輸送についての研究がホール効果に集中していた状況を変化させ、物性物理として半導体の理解をより豊富にするであろう。

また、従来型の熱電半導体についても、熱電能率が磁場の印加によって向上する結果<sup>10)</sup>が報告されているので、これについても同様に研究を進めたいと考えている。

更に、この実験ではネルンスト素子になる材料の他に、最初にこの研究を始めたきっかけになったカーボン系材料の研究も行う予定である。これらの物質は高融点材料であり、現在プラズマ実験ではカーボンの他にボロン・カーバイド (B<sub>4</sub>C) など用いられている。これは最初に述べたように、プラズマにダイバータ材料などが混入したときボロンはカーボンより低原子番号材料のため、放射損失が大きくなるなどの理由

による。一方、現在ボロン・カーバイド (B<sub>4</sub>C) はP型の半導体であり、その熱電能率は高温まで極めて高いことが報告されている。このため、図-1で示した熱電ダイバータをカーボン系材料で作ることを筆者等は提案<sup>11)</sup>している。問題点としては、B<sub>4</sub>Cに対応したN型半導体を見つけることであるが、これは核融合研究で現在開発が行われている材料について熱電能率が測定されていないので、その測定結果を待って決めたいと思う。カーボン系材料の変換効率はそれほど高くない。しかし、熱機関として利用する温度領域を、一般商用の火力発電所で熱媒体として利用されている水（水蒸気も含む）の最高温度が566°Cから、火力発電所のボイラーの炎の温度1300°C程度までとし、熱電素子の低温側に流す水蒸気を蒸気タービンに回せば、発電に預からない熱エネルギーは失われないので、発電所としては正味の変換効率が增大する可能性がある。従って、熱電素子の変換効率が低いことは大きな問題にはならない。概念図を図-7に示す。この図に於いて、タービン発電機の変換効率が39%とし、熱電素子の変換効率が5%あれば、このシステム全体の変換効率は42%を越す。これは現在多くの努力が払われているガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインド・サイクル発電システムと同程度の変換効率である。

また、以上で述べた研究は常温より高温での熱電変換素子の利用を考えてきた。一方、核融合炉は高温プラズマを閉じこめるための高磁場を発生する超伝導コ

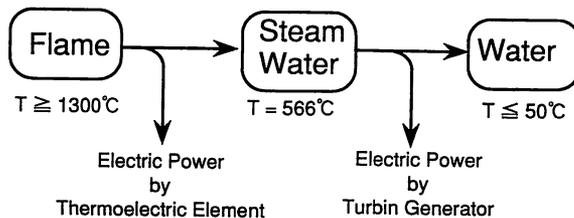


図-7 商用発電所への熱電変換装置の提案とそのエネルギー流れと温度

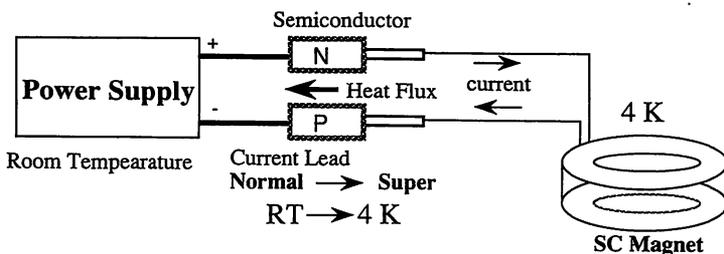


図-8 超伝導コイルシステムと熱電半導体を利用した電流リード

イルを利用している。このシステムを図-8に示す。電源は常温であり、超伝導コイルはNbTiなどの材料を用いているので約4Kの低温である。従って大きな温度差がこのシステムには存在する。超伝導コイルと電源を電氣的に接続する機器は電流リードと呼ばれる。(パワーリードと呼ばれることもある。)超伝導コイルに熱エネルギーが流入すればコイルの安定性が損なわれ、低温に熱負荷がかかることはエネルギー的に見て損失が大きい。従って、電流リードは電流は通すが、熱は通さない事が理想的である。

超伝導コイルは電気抵抗が無いので、これを励磁する電源電圧は極めて低く、現状の電源では電圧に余裕がある。電流リードの温度は常温から4Kまで変化するので、電氣的には常伝導から超伝導状態まで変化する。そこで、図-8にあるように、この部分に熱電変換素子としてのペルチェ素子を利用する事が考えられる<sup>12)</sup>。これによって常温から低温部への熱の侵入を大幅に下げることが可能になろう。これは超伝導コイルの安定性及びそのエネルギー経済性を改善し、超伝導コイルの一般民生機器への応用を広げるであろう。

## 6. 最後に

以上核融合と熱電発電(変換)研究について、主に核融合科学研究所で行われている研究を中心に述べてきた。以上で述べたように核融合研究には多くの熱電変換の技術が応用できる可能性がある。これは、核融合科学が複合領域と呼ばれ、本質的に多くの科学技術分野を含んでいるためと考えられる。

例えば、磁場の利用である。ネルンスト素子は発電を行うために高磁場を必要とする。60年代初頭に半導体の応用として磁場利用も含めて多くの提案がされたが、半導体応用はそれ自身の性質だけであまりに広い応用があるため、磁場を用いた研究は後回しにされたようである。しかし、筆者自身も現在、核融合科学研究所でプラズマ核融合実験のために大型の超伝導コイルの開発を行っている。最近では大型の超伝導コイルが実用化され、少ない電力で高磁場を発生できる状況となっている。これは、磁場中での半導体応用研究の位置を変える事になろう。超伝導コイルの開発は主に核融合や高エネルギー物理研究のために進められてきた。その意味で、今までは関連し合わなかった分野の研究(半導体と超伝導コイル)が核融合研究を通じてこのような交流を生み出したとも言える。

いままで熱電変換はその変換効率の低さのため、発電システムの中で主機の位置を占めることは出来なかった。しかし、熱電半導体の研究が核融合や超伝導コイルシステムの研究を通じて発電システムの主機の研究の中心になれば、熱電変換が本来持っている特徴から発電システムの主流になる可能性もある。これは同時に核融合研究の民生技術の派生効果とも言え、筆者の大きな望みである。

最後になりましたが、この研究を支持していただいている、核融合科学研究所の飯吉厚夫所長他多くの共同研究者にお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) T.Nishitani et al, "Attainment of High Fusion Reactivity under High Bootstrap Current Fraction in JT-60U", Nucl. Fusion vol. 34, p.1069, 1993.
- 2) 例えば、日本原子力研究所, "核融合炉をめざして" p. 8, 1993年の第2.2図参照
- 3) A. Iiyoshi et al, "Innovative Energy Production in Fusion Reactor", Proc. 7 th Int. Conf. Emerging Nucl. Energy Systems, p.495, 1994.
- 4) S.Yamaguchi et al, "Direct Conversion of Radiation Energy in Fusion Reactor", Proc 7 th Int. Conf. Emerging Nucl. Systems, p.495, 1994.
- 5) S. Yamaguchi et al, "Thermoelectric and Galvanomagnetic Conversion in Fusion Reactor" Proc. 12th Int. Conf. Thermoelectrics, p.521, 1994.
- 6) 山口 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回年回予稿集, p.154, 1993年3月.
- 7) K.F.Cuff, R.B.Horst, J. L. Weaver, S. R. Hawkins, C. F.Kooi, and G. M. Enslow, "The Thermomagnetic figure of merit and Etingshausen cooling in Bi-Sb alloy", Appl. Phys. Lett. vol. 2, p.145, 1960.
- 8) T. C. Harman, J. M. Hoing, S. Fischler, A.E. Paladino and M. J. Button, "Oriented single-crystal Bi Nernst-Etingshausen refrigerators", Appl. Phys. Lett. vol. 4, p.77, 1964.
- 9) この種の教科書として、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
- 10) V. L. Kuznetsov et al, "Investigation of Maximal Possibility of Thermoelectric Cooling at Liquid Nitrogen Temperature", Proc. 12th Int. Conf. Thermoelectrics, p. 424, 1994.
- 11) S. Yamaguchi et al, "Thermoelectric Conversion at the Divertor Plates and the First Wall of a Fusion Reactor", 18th Sympo. Fusion Tech., PA-024, Aug. 22-26, 1994.
- 12) 山口, 「ペルチェパワーリードの提案」, 低温工学・超伝導学会, 1995年春期講演会, 予稿集A1-4, p. 4.