

氏 名 池 田 一 昭

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第428号

学位授与の日付 平成11年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 ネルンスト効果を利用した直接エネルギー変換のための基礎研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 小森 彰夫
教 授 本島 修
助 教 授 富田 幸博
助 教 授 山口 作太郎
教 授 中村 幸男（核融合科学研究所）
助 教 授 米永 一郎（東北大学）

論文内容の要旨

核融合装置を利用した発電では、DT反応を用いるシステムにおいて核反応エネルギーの大部分を担う高速中性粒子から熱エネルギーを回収し、タービンを用いた既存の熱エネルギー変換方式を利用することが検討されている。蒸気タービン発電器を利用する方法は、各種の発電装置に広く用いられており、信頼性も高く、発電方法としては最も有用な方法の1つである。しかし反面、高圧水蒸気温度に上限があることから、現状よりも高い変換効率を達成することは難しい。このような観点に立ち、既に確立されたエネルギー変換方法と独立にあるいは相補的にエネルギー変換方法を導入し、システム全体としてより高いエネルギー変換効率を達成するための方法として、磁場中で効果を発揮する熱電効果であるネルンスト効果を利用することが提案された。

熱電変換は素子に可動部がないなどの利点があるが、従来から広く研究されているゼーベック効果による熱電変換は変換効率が低いために主たる発電方式にはなっていない。熱電変換にはゼーベック効果の他に磁場中で効力を発揮するネルンスト効果がある。磁場中での熱電効果についての研究は、ネルンスト効果の可逆過程であるエッチングスハウゼン効果による熱電冷却について、半金属ビスマスを用いた研究が理論と実験の両面からなされたことはあるが、ネルンスト効果を利用した発電については1960年代前半にわずかに理論的な検討がなされただけで実験的研究は殆ど行われていない。これはネルンスト効果が有意な効力を発揮するためには強磁場を必要としたためである。90年代に入り超伝導マグネットの利用により実験室レベルで比較的容易にかつ低エネルギー損失で強磁場を発生できるようになってきた状況の中で、強磁場の利用によってはじめて可能になる研究が広く行われるようになってきた。ネルンスト効果の研究もその1つに位置づけられ、熱電変換の新しい可能性として、核融合装置への応用を念頭においたネルンスト効果によるエネルギー変換の研究を開始した。

ネルンスト効果を利用したエネルギー変換では、ゼーベック効果による場合と同様に、そのエネルギー変換効率を性能指数を指標として示すことができる。性能指数はエネルギー変換素子として用いられる材料の輸送特性に依存している。ゼーベック効果では電気伝導度、および熱電能の二乗に比例し、熱伝導率に反比例する。ネルンスト効果については電気伝導度、およびネルンスト係数の二乗に比例し、熱伝導率に反比例する以外に、外部パラメータとして磁場の二乗に比例する。このことから、ネルンスト効果を利用したエネルギー変換では強磁場中で大きな性能指数が得られる可能性がある。またネルンスト変換では、熱電変換による場合よりも小さい性能指数で高変換効率を達成する可能性があることが理論的検討によって示めされる。

本研究では、ネルンスト効果によるエネルギー変換のための基礎研究を行った。半導体のバンドモデルより導出される輸送係数の理論式からネルンスト素子材料としてインジウムアンチモン (InSb) 選定し、常温近傍において真性領域および不純物領域にあった不純物濃度が $10^{20} \sim 10^{23} \text{ m}^{-3}$ である4種類のインジウムアンチモンを入手した。0から4Tの磁場範囲、270Kから360Kの温度範囲で輸送係数を測定するシステムを構築してネルンスト係数、熱電能、電気伝導度、ホール係数の温度と磁場に対する依

存性を測定し、理論式との比較検討を行った。また、測定されたネルンスト係数および電気伝導度および文献から引用した熱伝導率から性能指数を見積もり、ネルンスト効果を利用したエネルギー変換の有用性について議論を行った。

電気伝導度およびホール係数については、実験値の磁場と温度に関する依存性が理論式によって定性的に解釈された。これより本測定システムによって輸送係数の測定が精度良くなされたことが確認された。強磁場領域でのネルンスト係数は不純物状態では磁場の増加にしたがって消失し、真性状態では両極性項の寄与により磁場に対してほぼ一定な値を示した。これは理論式で示される値と定量的に一致しており、その温度依存性についても理論と実験で定性的な一致を得た。ネルンスト係数の弱磁場領域における絶対値、および磁場の有無による熱電能の変化を示す縦ネルンスト効果については、電荷の散乱過程において単一の散乱機構のみを考慮した理論モデルによっては説明がつかず、理論式から予想される値と比較してネルンスト係数では20%以下、熱電能の変化量では35%以下であった。これは電荷の散乱が複数の機構によって支配されていることが1つの大きな要因と考えられ、ネルンスト係数および縦ネルンスト効果について定量的に解釈するためには、輸送係数を求める理論モデルにおいて電子あるいは正孔の散乱機構として音響フォノン散乱、光学フォノン散乱、イオン化不純物散乱といった複数の機構を検討に入れた計算を行う必要があることが示唆された。輸送係数の実験値から算出された0.1T以下の弱磁場領域でのネルンスト係数は4つの材料のいずれについても $2.5 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$ 以下であり、性能指数は $1 \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$ を越えなかった。今実験におけるネルンスト係数の最大値は、真性領域にある材料の273K近傍で $8.7 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$ が得られた。また、性能指数では不純物領域から真性領域へ状態の移行が起こっていた材料の358K近傍において最大値 $2.5 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$ が得られた。これは移行状態にあった材料の特性として、不純物領域の材料が示す高い電気伝導度と真性領域の材料が示す両極性項の寄与が同時に得られた為と考えられる。この性能指数の値は実用化への目安の2.5%に達していた。

本研究の結果から、真性領域にあるインジウムアンチモンの強磁場領域において性能指数が一定値 Z_N を示し、この Z_N は温度の増加関数であることが理論的に示され、実験によって確認された。このことから常温よりも高温領域で性能指数が改善される可能性が示され、高温領域での実験の必要性が示唆された。また、本研究以外の輸送係数についての実験報告から、 10^{26}m^{-3} 程度の高不純物濃度のインジウムアンチモンにおいて本研究で得られた値よりも大きい性能指数が算出された。このような材料もネルンスト素子材料として期待できる。さらに、真性領域にあった材料の強磁場領域における性能指数の一定値 Z_N を表す理論式は、インジウムアンチモン以外の材料についても良い近似を与えると考えられ、ネルンスト素子材料の選定指針と成り得ると考えられる。これによるとネルンスト素子材料として、正孔の移動度が大きく、温度に対するバンド幅の比が小さい材料が適当であることが示された。

論文の審査結果の要旨

本論文は、将来の熱核融合炉における高効率発電の実現に向けて、半導体のネルンスト効果を利用したエネルギー変換の基礎研究をまとめたものである。ネルンスト効果を利用したエネルギー変換は、磁場中で高い性能指数が得られると考えられている熱電変換で、広く研究されているゼーベック効果を利用したものと同様、半導体の黎明期に既に提案されていたが、強磁場を必要とするため、殆ど理論的実験的研究がなされていない。申請者のグループは、強磁場中で高温高密度プラズマの閉じ込めを行う熱核融合炉からエネルギーを取り出す方法の一つとして、ネルンスト効果を利用したエネルギー変換を提案している。ネルンスト効果を用いた素子の性能指数は素子の輸送係数だけでなく磁場の増加関数となっていることから、ネルンスト素子は強磁場を用いた熱核融合炉で高い変換効率を達成できると考えられており、ネルンスト素子は高効率発電素子として実用化できる可能性がある。本論文では、これまで実験が行われたことのない2テスラを超える強磁場中で、高い性能指数が得られると予測されたインジウム・アンチモンの各種輸送係数を詳細に明らかにしている。また、実験的に得られた輸送係数を理論計算値と比較検討する等してエネルギー変換の最適条件を求めるための解析を行い、ネルンスト効果を利用したエネルギー変換素子開発の指針を示している。

本論文では、4テスラまで実験が可能な超伝導を利用した強磁場発生装置を製作し、ネルンスト係数、熱電能、電気伝導度、ホール係数を詳細に計測するシステムを構築している。1960年代に行なわれたこれまでの実験ではビスマスが素子材料として用いられたが、本実験に用いた素子材料には、半導体の1バンド及び2バンドのパラボリック・モデルから導出される輸送係数の理論式を用いてネルンスト係数及び性能指数を求め、高い変換効率が期待できると予測されるインジウム・アンチモンを選択している。本論文で、この理論的考察により、ネルンスト素子の性能指数の強磁場依存性等を素子材料選択の観点から初めて理論的に明らかにし、これまで示されていなかったネルンスト素子材料選択の基本的指針を構築している。

実験では、インジウム・アンチモンのキャリアー濃度の異なる4つのサンプルの輸送係数を計測している。これらの測定値を上述の理論的考察で得られる理論値と比較すると同時に、性能指数を見積もった結果、1テスラを超える強磁場中では測定したすべての輸送係数が2バンドモデルから求めた理論値と一致することが示されている。このことは、性能指数が磁場の増大と共に大きくなり、強磁場の極限では一定値に近づくことを初めて理論的実験的に示したことを意味しており、高く評価できる。弱磁場で実験的に得られた輸送係数も、ネルンスト係数を除くと、1バンドモデル及び2バンドモデルで求めた理論値と一致している。ネルンスト係数の場合、弱磁場での実験値は理論値より低い値が得られているが、本論文では、この理由として、半導体中のキャリアーの散乱現象に単一のプロセスではなく複数のプロセスが関与していることを挙げている。最後に、これらの実験データ解析結果と上記の理論的考察から、今後ネルンスト効果を利用したエネルギー変換素子開発研究を進める上で必要となる素子材料選定指針がより明確に示されている。

このように本論文は、半導体のネルンスト効果を利用したエネルギー変換の基礎研究として、これまで測定されていなかった強磁場領域での輸送係数を示すと同時に、性能指数の強磁場依存性等を素子材料選択の観点から初めて理論的実験的に明らかにし、今後のネルンスト素子材料選択の指針を示している。従って、本論文は、内容に独創性と新規性が認められ、得られた知見はこの分野の発展に寄与するものと認められる。よって、本論文が博士学位論文として十分な水準にあり、本専攻にふさわしい内容を持つものであると判断した。

審査委員全員出席のもとで口頭試問を実施し、論文内容に関する知識等について試験を行った。その結果、エネルギー変換、半導体の輸送現象についての理論的な知識、実験手法、データ処理方法などについて、本研究に必要な多岐にわたる知識と技術に精通していると認められた。また、申請者を主著者とする論文を英文3編、共同著者としての論文を英文5編、和文1編発表している。語学力については、論文要旨の英語版、添付された英文の参考論文等の審査により、十分な能力を持つと判断した。8月19日に開催された論文公開発表会においては、指定時間内に内容を要領よくまとめ、聴衆からの質問にも明確に答えていた。

以上より、本審査委員会は学力審査合格と判定した。