

市販熱電変換デバイスの振動耐久性評価システムの開発

山本佳嗣*, 谷澤之彦**, 井上幸司*, 富村哲也*

Development of the Experimental System for Evaluation of Vibration Durability of Commercial Thermoelectric Devices

Yoshitsugu YAMAMOTO, Yukihiro TANIZAWA, Koji INOUE and Tetsuya TOMIMURA

An experimentally special equipment was developed for vibration test of a commercial thermoelectric devices under simulating actual use conditions. For the Bi-Te type devices, the vibration of an acceleration of 110 m/s^2 and a frequency of 33 Hz was applied at $\Delta T \sim 100 \text{ K}$ for 96 h. After about 50 h or more, the power output reduction of over 10 % was observed and the graphite sheets used as heat conductive materials were damaged. It was suggested that the sufficient durability against vibration is necessary not only for the device but also for the entire power generation system.

Key words: Thermoelectric Generation, Vibration Durability Test System, Bi-Te Device, Heat Utilization, Energy Device

1. はじめに

省エネルギー・低炭素社会実現の必要性から、エネルギー関連の技術開発が盛んに行われている。中でも、エネルギーの利用に伴い大量に廃棄される排熱の有効活用は非常に重要なテーマである。

熱エネルギー（温度差）から電気エネルギーを取り出す熱電変換技術は、幅広い分野への展開が見込まれるとともに、排熱の有効活用にも繋がることから、特に注目すべき技術の一つであり¹⁻³⁾、これを利用した種々の熱発電システムが提案されている⁴⁻⁷⁾。これら熱発電システムの実用化に向けては、デバイスおよびシステムの耐久性・信頼性の確保が重要であり、耐酸化性や熱的耐久性の評価および改善手法の提案等が為されているところである^{8,9)}。

一方で、熱電変換技術は小型・軽量といった特

長を活かし、自動車の排熱回収にも適用されることが期待されるが^{1,2,10)}、自動車のような移動体に適用した場合、デバイスは「熱勾配」と「振動」といった異なる負荷に同時に曝されることになる。デバイスの信頼性確保のためには、これらの負荷に対するデバイスの耐久性を適切に評価する必要がある。しかしながら、熱発電デバイスの熱勾配印加時（＝発電時）における振動耐久性が評価された例はこれまでになく、このため、共通化・標準化された適切な評価手法や、耐久性に関する指針が存在していない。

そこで本研究では、熱電変換デバイスの発電状態下における振動耐久性を評価するため、評価用システム及び評価手法を試作・提案するとともに、提案した手法で実際にデバイスを評価することで、デバイスの劣化状態を調べたので報告する。

2. 実験方法

2. 1 評価ユニットの作製

* エネルギー技術研究課

** プロジェクト研究課

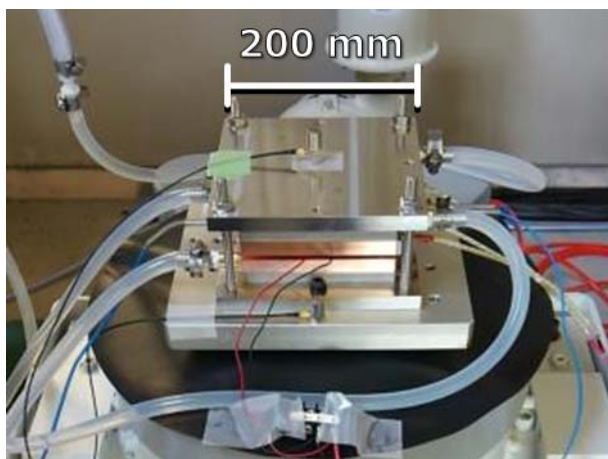


図 1 試作評価ユニット外観

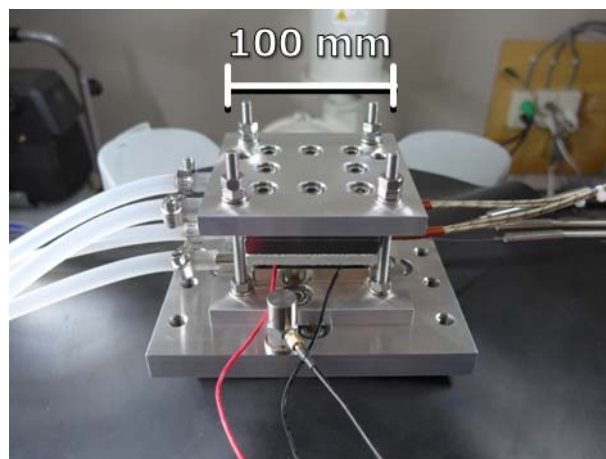


図 3 小型軽量化ユニット外観

熱電変換デバイスを発電状態(熱勾配印加状態)に保ったまま振動耐久性を評価するための、専用特殊ユニットを試作した。図 1 に試作した評価ユニットの写真を示す。ユニットは、熱電変換デバイスに温度差を印加するため、デバイスの片面を高温に保つヒーター部と、もう一方の面を低温に保つ冷却板からなっており、ヒーター部は自動車等への実装を想定した、500℃まで昇温が可能となっている。冷却板には配水管が通され、冷却水循環装置(東京理化工機(株)製 CA-3110)を繋げて、約 10℃の冷却水を循環させる構造とした。ユニットの概略図を図 2 に示す。熱電変換デバイスをヒーター部及び冷却板で挟み、さらにその上下を金属板で挟んだ上、ボルトで締め付ける構造となっており、これにより、ユニット全体を一つの剛

体と見做すことができ、熱電変換デバイスを適切に固定するとともに、ユニット自身の耐振動性が確保できる構造としている。締め付け強度はトルクレンチを用いて制御し、デバイスに 1 MPa の圧力が加わるよう調整した。また、ヒーター部及び冷却板と熱電変換デバイスとの熱交換を円滑に行うため、熱伝導に優れたグラファイトシート(東洋炭素(株)製 PERMA-FOIL PF-42UHPUC(厚さ 0.42 mm))を熱電変換デバイスの上下面に配置している。これにより、固定した熱電変換デバイスとの熱接触が確保され、接触面全体の温度が均一に保たれることで、デバイスの発電性能を適切に評価することが可能となる。また、より強い振動を加えることを目的として、小型軽量化したユニットも試作した(図 3)。

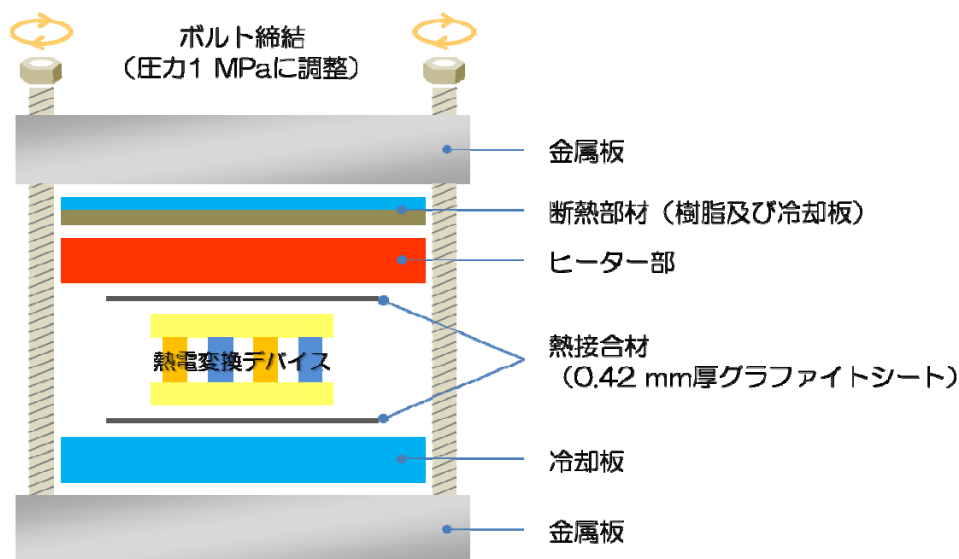


図 2 試作評価ユニット概略図

2. 2 振動耐久性評価試験

2. 2. 1 一軸圧縮による予備試験

熱電変換デバイスの振動耐久性評価試験を行う前に、予備試験として、デバイスを上下面から一軸圧縮し、その際の内部抵抗値の変化を読み取ることで、圧縮に対する耐久性を調査した。試験対象には、ペルチェ素子として広く利用され、十分な実績がある Bi_2Te_3 系の材料を選択し、市販汎用デバイス（HB Electronic Components 社製 TEC1-12706 (40 mm×40 mm)）を用いた。デバイス上面に鉄板、下面にはアルミ板を配置して、最大負荷容量 100 kN の精密万能試験機（㈱島津製作所製 AG-100kNplus）により負荷を印加し、加重、ストローク、及びデバイスの内部抵抗を記録した。クロスヘッド速度は 1 mm/min の等速とした。内部抵抗測定にはデジタル低抵抗計（鶴賀電機㈱製 3566-RY）を用いた。

2. 2. 2 振動耐久性評価試験

熱電変換デバイスを配置した評価ユニットを振動発生装置（IMV㈱製 i210/SA1M）上に固定し、ヒーター部及び冷却水の温度を所定の温度に設定して熱電変換デバイスを発電状態に保ちながら、ユニットごとデバイスを振動させることで振動耐久性評価試験を行った。発電時の電流・電圧・出力特性のデータ取得には電子負荷装置（菊水電子工業㈱製 PLZ164WA）を、内部抵抗値測定にはデジタル低抵抗計（鶴賀電機㈱製 3566-RY）を用いた。評価システム全体図を図 4 に示す。

振動条件は、JIS D1601（自動車部品振動試験方法）を参考に、「1 種 主として乗用車系」の

「C 種 エンジンに取り付けられ、比較的振動の小さい場合」及び「D 種 懸架装置のばね下に取り付けられる場合及びエンジンに取り付けられ、比較的振動の大きい場合」に対応するよう、振動加速度を 70 または 110 m/s^2 、振動数を 33 Hz とし、連続試験時間を最大 8 時間に設定した。

3. 結果・考察

3. 1 一軸圧縮による熱電変換デバイスの内部抵抗の変化

精密万能試験機を用いてデバイスを一軸圧縮した際の、荷重、ストローク、及びデバイスの内部抵抗値の変化を図 5 に示す。デバイスに負荷が加わり始めると同時に内部抵抗が徐々に小さくなっていき、約 23.3 kN (14.6 MPa の圧縮応力に相当) の荷重が加わったところで、内部抵抗が急激に増加するとともに、負荷が大幅に減少した。この際、破壊音が生じたことから、内部抵抗の増加及び負荷の減少は圧縮によるデバイスの損傷によるものと考えられる。次に、この状態のままでクロスヘッドを停止させ、一定の負荷を継続して印加したところ、内部抵抗も一定の値を保ち、除荷したところで再度、内部抵抗が急激に増加した。これは、負荷を印加し続けることにより、デバイスの構造は一定程度保持されるが、除荷することで構造が保たれなくなり、デバイスの損傷が進むことを示していると考えられる。このことから、強い圧縮応力が加わることでデバイスの破壊が生じるが、静的な負荷を保つことで、急激には破壊が進展せず、一定程度、デバイス性能が保たれる可能性が

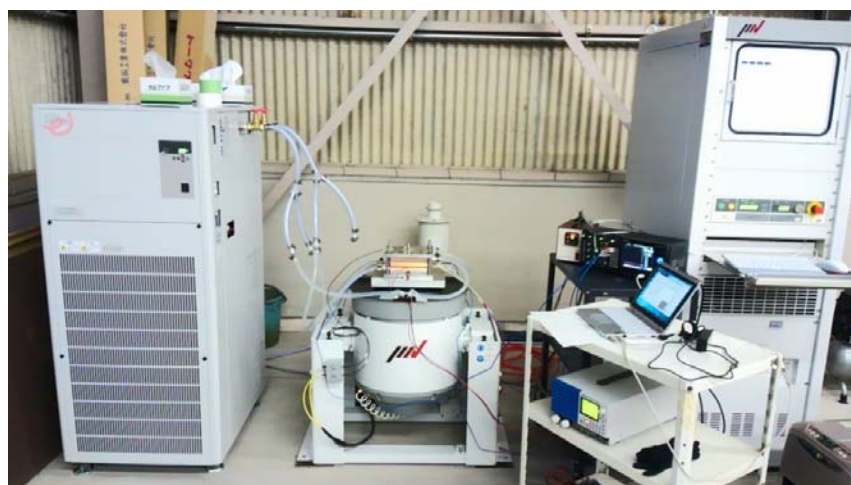


図 4 評価システム全体図

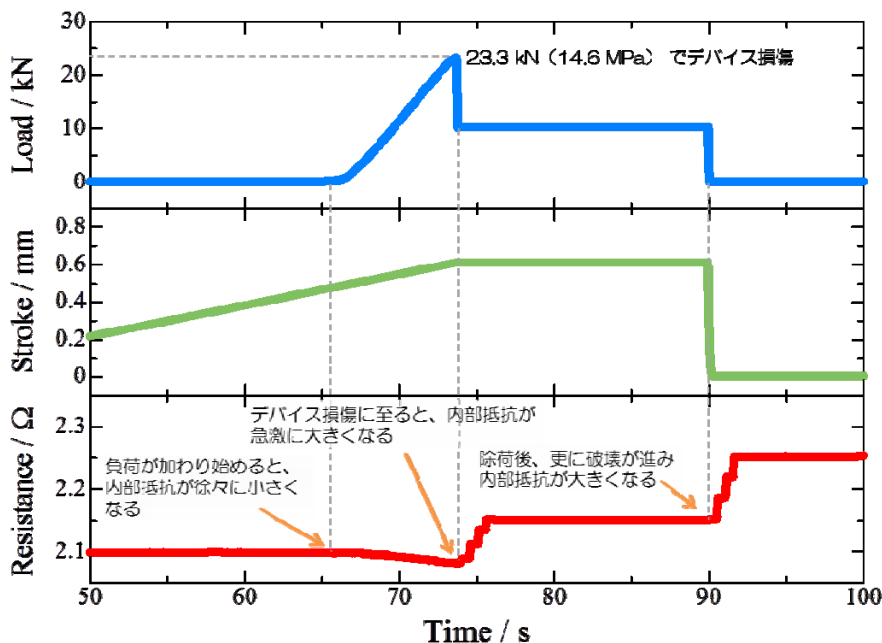


図5 一軸圧縮試験時における荷重，ストローク，デバイス内部抵抗値の変化

示唆された。このことは、熱電変換デバイスを実際の熱源に適用する際にも注意すべき点であると言える。

3. 2 振動試験による熱電変換デバイスの出力特性の変化

振動加速度を 70 m/s^2 、振動数 33 Hz とし、約 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ の温度勾配（ヒーター温度 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、冷却水温度 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ）を加えながら、連続で4時間、振動を加えた際のデバイス出力結果を図6に示す。出力値に明確な変化は見られなかった（なお、出力値の微小な増減は、冷却水循環装置の ON-OFF 制御による冷却水温度の上下動（ $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度）によるものである）。振動加速度を 110 m/s^2 に上げ、試験時間を連続8時間に延ばして試験を行ったが、同様に出力値の変化は見られなかった（図7）。そこで、振動加速度 110 m/s^2 、連続8時間の試験を繰り返すことで試験時間を累積し、最大96時間の振動を加えたところ、累積時間が50時間を過ぎたあたりでデバイス出力の低下が確認された（図8）。出力低下率は $\sim 12\%$ と見積もられた。

3. 3 熱電変換デバイスの出力低下要因の考察

試験を終えた熱電変換デバイスを一旦ユニットから取り外し、詳細に調査したところ、熱接合材として用いたグラファイトシートのデバイス接触面が大きく凹んでおり、かつ冷却板に強く貼り付

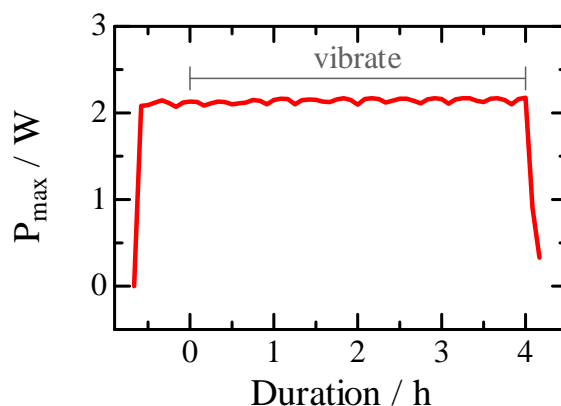


図6 70 m/s^2 、 33 Hz 、4 h の振動試験時におけるデバイス出力測定結果

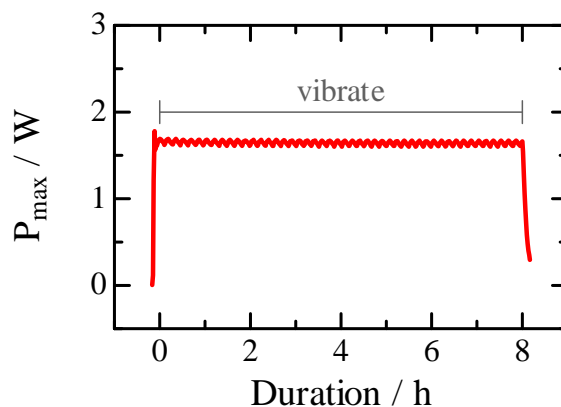


図7 110 m/s^2 、 33 Hz 、8 h の振動試験時におけるデバイス出力測定結果

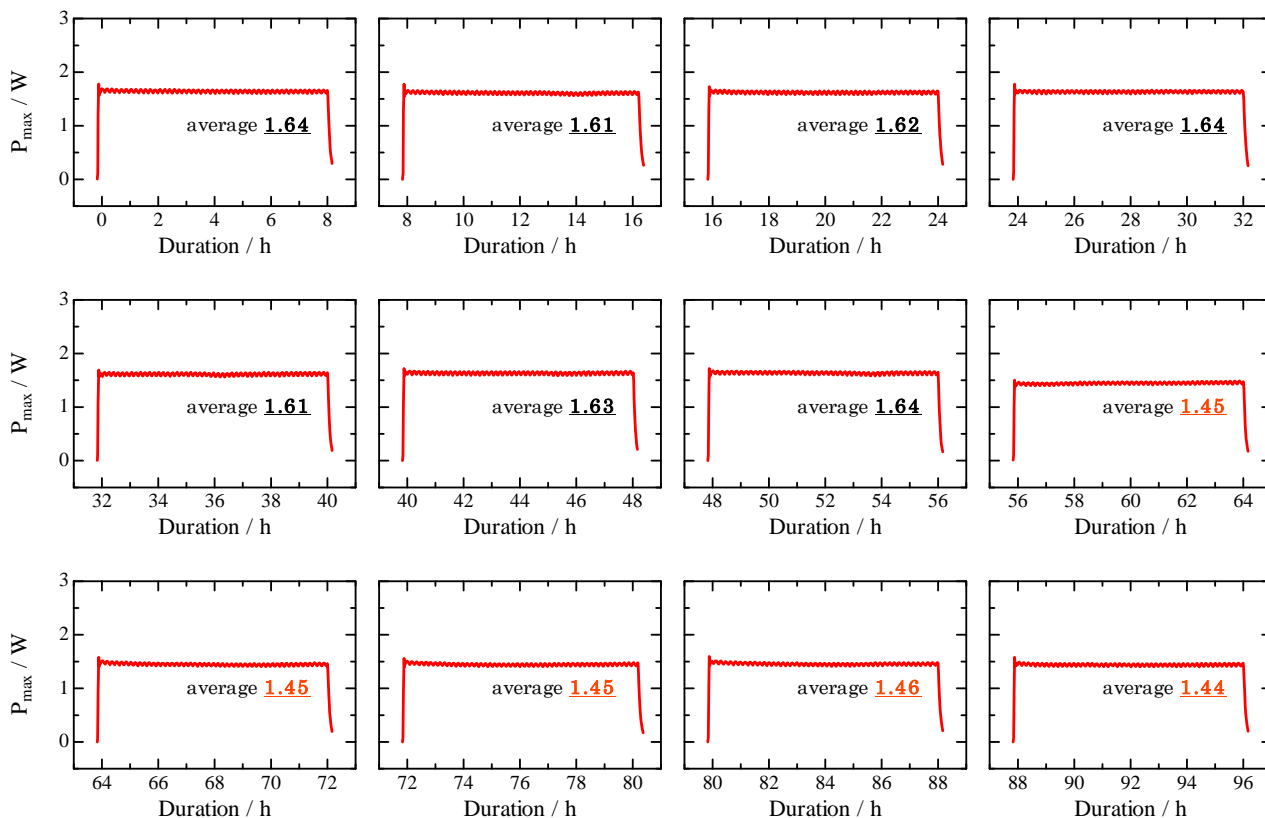


図 8 110 m/s², 33 Hz の累積振動試験によるデバイス出力の変化

いていた。図 9 に、劣化が生じたグラファイトシートの外観写真を示す。このことから、グラファイトシートが長時間の振動に曝されたことで劣化し、デバイスとヒーター部、及び冷却板との熱交換が阻害されることで、発電出力が低下した可能性が考えられる。再度、劣化したグラファイトシ



図 9 劣化したグラファイトシートの外観
(上部の損傷は、ユニットから剥離した際に付いたもの)

ートを用いて 40 分間、振動を加えずに約 100 °C の温度勾配を加えてデバイス出力を測定し、その後、新たなグラファイトシートに交換して同様の測定を行い、交換前の出力と比較したところ、出力が回復することが確認された (図 10)。このことから、長時間の振動を加えると、熱電発電デバイスそのものには影響がなくとも、熱接合材等を含む複合デバイス、或いは熱発電システム全体として劣化が生じる可能性があることが確認された。よって、熱電変換デバイスの振動耐久性の評価においては、デバイスのみでなく、熱接合材等の周辺部材を含んだ、実使用を模した使用条件下で評価を行うことが重要であると考えられる。

4. まとめ

熱電変換デバイスの発電状態下における振動耐久性評価手法を提案し、実際にデバイス进行评估することでデバイスの劣化状態を調べたところ、以下の結果を得た。

- ・熱電変換デバイスを発電動作状態としながら加振耐久性を評価するための評価システムを試作・

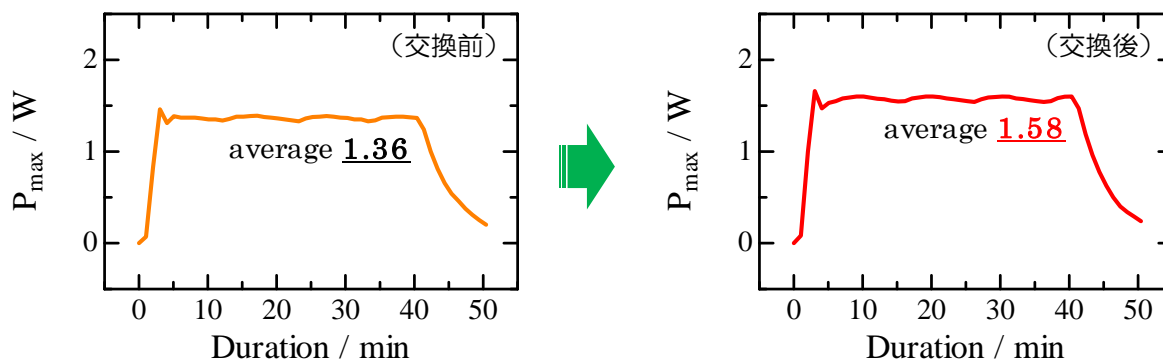


図 10 グラファイトシートの交換によるデバイス出力の回復

構築した。

- ・振動加速度を 70 から 110 m/s²とし、振動数を 33 Hz として数時間の振動を加えたところ、デバイス出力に明確な変化は生じなかった。
- ・振動加速度 110 m/s²、振動数 33 Hz の振動を累積して数十時間 (~50 時間以上) 加えると、熱接合材を含めた複合デバイス、或いは熱発電システム全体として劣化が生じる可能性が示された。
- ・熱電変換デバイスの振動耐久性評価においては、デバイスのみでなく、熱接合材等の周辺部材を含んだ、実使用を模した使用条件下で評価を行うことが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 梶川武信ほか：熱電変換技術ハンドブック，NTS 出版 (2008)。
- 2) 河本 洋：“排熱回収用高効率熱電変換材料の研究開発動向”。科技政策研・科学技術動向 No.90 (2008 年 9 月号) レポート 2
- 3) 特許庁：平成 25 年度特許出願技術動向調査報告書「熱電変換技術」，(2014 年 3 月)
- 4) 佐野精二郎ほか：“高効率熱電発電システムの開発”。コマツ技報，49(152)，p20-26 (2003)

- 5) 舟橋良次ほか：“熱電発電を利用した小型コジェネシステムの開発”。Synthesiology, 1(2), p94-100 (2008)
- 6) 飯田 努：“環境低負荷型 Mg₂Si による排熱発電モジュールの開発の現状”。日本熱電学会誌, 6(2), p13-17 (2009)
- 7) 坂之上悦典ほか：“環境対応型熱電変換素子材料の廃熱利用可能性について”。京都府中小企業技術センター技報, 38, p37-41 (2010)
- 8) 舟橋良次ほか：“シリサイド熱電モジュールの耐久性向上に関する研究”。第 75 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, p09-083 (2014)
- 9) 水戸洋彦ほか：“耐久性が改善された n 型マグネシウムシリサイド熱電素子”。第 64 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, p08-131 (2017)
- 10) 矢野経済研究所：自動車排熱利用技術動向に関する調査結果 2015, (2015 年 6 月)

(本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「クリーンデバイス社会実装推進事業」により実施しました。)