2006

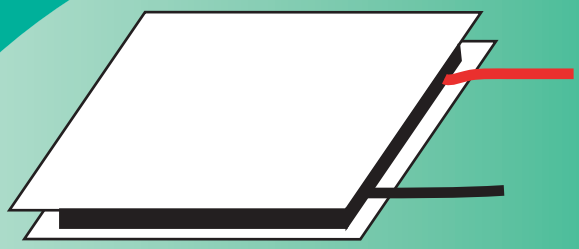
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構　助成事業「高効率熱電変換システムの開発」

熱電発電フォーラム

プロジェクトの成果を紹介し、熱電発電の未来を考える

開催日　2006年10月31日（火）

会　場　オリンピック記念青少年総合センター　国際交流棟



主催：財団法人エンジニアリング振興協会
共催：独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
後援：経済産業省
協賛：日本熱電学会、(社)日本機械学会、(社)日本伝熱学会、(社)電気学会、
(社)金属学会、(社)日本セラミックス協会、(社)応用物理学会、(社)日本材料学会

熱電発電フォーラム　プログラム

プロジェクトの成果を紹介し、熱電発電の未来を考える

ポスター・デモ展示：12：00～19：00

13：00～13：05　**主催者挨拶**　（財）エンジニアリング振興協会　常務理事　入澤　博
13：05～13：10　**共催者挨拶**
（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構　ナノテクノロジー・材料技術開発部
統括研究員　寺本　博信
13：10～13：15　**来賓挨拶**　経済産業省　製造産業局　ナノテクノロジー・材料戦略室
室長　岩野　宏

13：15～13：40　**■熱有効利用技術としての高効率熱電変換システム**
柏木　孝夫（東京農工大学大学院）
13：40～14：05　**■「高効率熱電変換システムの開発」の総括**
梶川　武信（湘南工科大学）

休憩　：　14：05～14：25　**《休憩をとりながら、ポスター展示やデモをご覧ください》**

14：25～14：40　**■カスケードモジュールの開発（高温域 Zn-Sb 系、低温域 Bi-Te 系材料）**
藤井　一宏（宇部興産㈱）
14：40～14：55　**■高効率熱電変換モジュール・システムの開発**
畠　康彦（コマツ）
14：55～15：10　**■抵抗加熱式工業炉用熱電変換システムの開発**
上松　和夫（石川島播磨重工業㈱）
15：10～15：25　**■100～150℃の温度域の排熱を想定した熱電変換システムの開発**
日野　武久（㈱東芝）
15：25～15：40　**■民生用光源等排熱利用熱電変換素子及びシステムの開発**
堀尾　裕磨（ヤマハ㈱）

休憩　：　15：40～16：10　**《休憩をとりながら、ポスター展示やデモをご覧ください》**

16：10～16：25　**■熱電発電モジュールの性能評価技術**
小原　春彦（（独）産業技術総合研究所）
16：25～16：45　**■熱電変換システムの多様な活用に向けて**
藤田　稔彦（東京海洋大学）
16：45～17：00　**■総合質疑**

懇親会　：　17：15～19：00　：**国際交流棟内、レセプションホールにて**

【目　次】

1. 熱有効利用技術としての高効率熱電変換システム ･･････････････････････････････････････1
経済産業省総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会長
高効率熱電変換システム実用化推進委員会　委員長
国立大学法人　東京農工大学大学院　教授　柏木孝夫

2. 「高効率熱電変換システムの開発」の総括 ･･････････････････････････････････････5
「高効率熱電変換システムの開発」プロジェクトリーダー
湘南工科大学　学長･教授　梶川武信

3. カスケードモジュールの開発(高温域 Zn-Sb 系、低温域 Bi-Te 系材料) ･･････････････････13
宇部興産㈱　研究開発本部　宇部研究所
知能材料研究グループリーダー　藤井一宏

4. 高効率熱電変換モジュール･システムの開発 ･･････････････････････････････････････17
コマツ　研究本部　熱電発電開発室
室長　畠　康彦

5. 抵抗加熱式工業炉用熱電変換システムの開発 ･･････････････････････････････････････21
石川島播磨重工業㈱　技術開発本部　基盤技術研究所
応用理学研究部　部長　上松和夫

6. 100～150℃の温度域の排熱を想定した熱電変換システムの開発 ･･････････････････････25
㈱東芝　電力･社会システム技術開発センター
金属･セラミックス材料開発部　主務　日野　武久

7. 民生用光源等排熱利用熱電変換素子及びシステムの開発 ･･････････････････････････29
ヤマハ㈱　イノベーティヴテクノロジー本部　素材素子開発センター
TG プロジェクトリーダー　堀尾裕磨

8. 熱電発電モジュールの性能評価技術 ･･33
㈱ 産業技術総合研究所　エネルギー技術研究部門
熱電変換グループ　グループ長　小原春彦

9. 熱電変換システムの多様な活用に向けて ･･････････････････････････････････････37
国立大学法人　東京海洋大学　海洋工学部長･教授　藤田稔彦

1．　熱有効利用技術としての高効率熱電変換システム
―エネルギー政策等の視点から―

柏木　孝夫　Takao KASHIWAGI
国立大学法人　東京農工大学大学院
kashiwagi@cc.tuat.ac.jp

■エネルギー政策の視点

二年後に迫った京都議定書の履行義務と共に、石油の行く末も本格的に見え始めてきました[1)]。枯渇まで 40 年と言われ続けてきましたが、これは使用量が増加すれば新しい油田開発が活発に行われてきた証拠でもあります。しかし、新しく発見される油田の埋蔵量が産油量を下回ったとき、ピークを迎えて調整に入りますが、ここにきて、中国、インド等での急激な需要増大に伴い、この傾向が顕著になってきました。エネルギー革命の始まりです。

エネルギーは生活と産業の基盤であり、エネルギーの確保の戦略は国の繁栄そのものです。もはやエネルギー無しには社会・経済活動が何一つできないことは言うまでもなく、世界的に見てエネルギー源の多様化がエネルギーセキュリティーに対する重要なソリューションになりつつあります。

我国では、2002 年 6 月に議員立法でエネルギー政策基本法が成立しましたが、エネルギー政策のバイブルと言われるこの基本法には 3 つの大きな視点があります。

第一は「安定供給の確保」です。エネルギー自給率がわずか4%、原子力を入れても20%弱であり、大部分の化石燃料資源を海外からの輸入に頼っている我国にとって、エネルギー政策の基本は、まずエネルギー確保が第一であることに異論はありません。

第二の視点は「環境への適合」です。京都議定書の発効は炭素制約経済社会の到来を意味し、エネルギー経済の中に環境コストが内部化され、炭素排出制約ルール下での産業構造の変革を意味します。

三つ目の視点は、「市場原理の活用」です。これからのエネルギー市場の中にマーケットメカニズムを積極的に導入し、エネルギー市場の自由化を推進してゆくことが法律の中に明記されています。但しここで注意すべきことは、まず安定供給と環境への適合性を担保した上で、我国の社会構造の変化に合わせて自由化を進めてゆくべきであるとしており、三つの基本的視点は同格ではありません。最近、特にその傾向が強くなってきており、現在エネルギー基本計画の改定が成されつつあります。

これらの視点を踏まえ、我国においてセキュリティー上、エネルギー源の多様化を可能にする技術開発とは何かを原点に戻って真剣に考える時期であり、国家的取組みが必要不可欠となってきました。最終的には、膨大な排熱からのエクセルギー回収技術がキーポイントとなります。

	第一次 石油ショック （1973.10～ 1974.08）	第二次 石油ショック （1978.10～ 1982.04）	湾岸戦争 （1991.01～ 1991.04）	イラク戦争 （2003.03 ～）	現在
一次エネルギーに占める石油の割合	77% （1973年度）	72% （1979年度）	58% （1990年度）	50% （2002年度）	50% （2004年度）
原油の中東依存度	78% （1973年）	76% （1979年）	71% （1990年）	86% （2002年）	89% （2004年）
発電電力量に占める石油等火力の割合	75% （1973年）	54% （1979年度）	29% （1990年度）	10% （2002年度）	10% （2004年度）
総輸入額に占める原油金額の割合	16% （1973年） 30% （1974年）	30% （1979年度）	13% （1990年度）	11% （2002年度）	12% （2004年度）
石油備蓄水準	民間在庫 67日分 （1973年10月末）	民備：85日 国備：　7日 計：92日 （1978年末）	民備：88日 国備：54日 計：142日 （1990年末）	民備：78日 国備：92日 計：170日 （2002年末）	民備：82日 国備：91日 計：173日 （2005年末）

表 1　石油依存度の推移

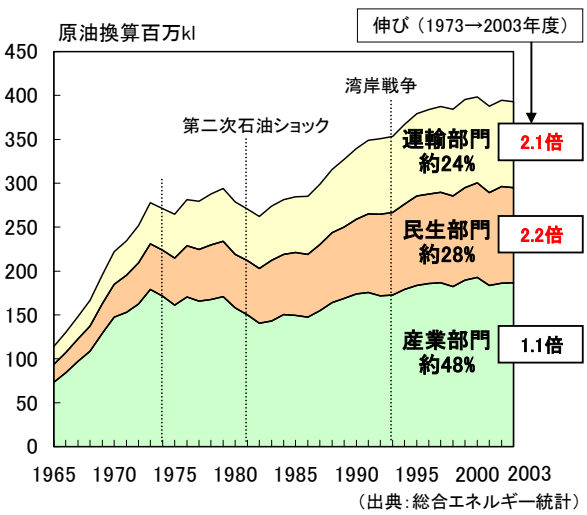


図 1　部門別最終エネルギー消費量の推移

■新しい国家エネルギー戦略

●戦略の骨子

表 1、図 1 に我国の需給構造の推移を示します[2)]。表 1 では石油に視点を当て我国が石油ショック以後、石油依存度を低下させるべく、原子力の推進、天然ガスの利用拡大を行うと共に、石油備蓄などを推進し、エネルギー需給構造の柔軟化や強靭化に取り組んできた様子が示されています。

一方、需要側に目を向けると、図 1 に示すように産業部門では GDP の延びにも拘らず、多大な省エネルギーが達成されたことを示していますが、運輸・民生部門を中心に国内の需要は着実に伸び続けています。

これらの背景を踏まえ 2006 年に入り新国家エネルギー戦略の構築に着手しました[3)]。戦略によって実現を目指す目標として、

(1) エネルギー安全保障を確立し、国民経済に安全と安心を提供する
(2) エネルギー問題と環境問題の一体的解決による持続可能な成長基盤を確立する
(3) アジア・世界のエネルギー需給経済に安全と安心を提供する

を掲げています。

●5 つの数値目標

上記の目標を確実に達成するため、国民レベルで共有すべき長期的な方向性として、次の 5 つの数値目標を設定しました。

(1) 省エネルギー目標

石油ショック以降、過去 30 年間で、約 37%の改善を実現し、我国の省エネルギーは世界最先端に到達している実情を踏まえ、今後、2030 年までに更に 30%の効率改善を目指す。

(2) 石油依存度低減目標

我国の一次エネルギー供給に占める石油依存度は、第一次石油ショック以後低下し、現在はおよそ 50%であるがセキュリティー上、今後、2030 年までに、40%を下回る水準に引き下げる。

(3) 運輸部門における石油依存度低減目標

現在、運輸部門の石油依存度は、ほぼ 100%であるが、技術開発を進め、今後、2030 年までに、80%程度への引き下げを目指す。

(4) 原子力発電目標

原子力発電は我国の発電電力量の約 3 割を占める基幹電源となっている。供給安定性、CO_2 問題などを踏まえ、2030 年以降においても、原子力発電の比率を 30～40%程度、もしくはそれ以上にすることを目指す。

(5) 海外での資源開発目標

我国の原油輸入量に占める自主開発比率は 8%から徐々に拡大し、現在、我国企業の自主開発比率は、取引量ベースで、15%程度を維持している。国際的に資源獲得競争が激化する中、今後、更に拡大し、2030 年までに 40%程度を目指す。

これら数値目標を達成するためには、省エネルギーを含む革新的エネルギー技術の開発をはじめ、新エネルギー源の商用的導入が欠かせません。

■エネルギー源の多様化の旗手・新エネルギーとその導入見通し

現在、我国で定義している新エネルギーは、供給サイドの新エネルギーと需要サイドの新エネルギーに大別され、前者には再生可能エネルギー、リサイクル型エネルギーなどが含まれていますが、現在、図 2 に示すように、その概念整理が行われ、新エネルギーの見直しが行われ、10 月 26 日の新エネルギー部会で最終的に審議されることになっています[4)]。この見直しは、持続可能なエネルギーシステムを考える際、国際的に一様かつ共通に重要視されている新エネルギー源は、再生可能エネルギーであることに起因しています。

再生可能エネルギー源とは、太陽・風力・波力・水力・バイオマス（生物エネルギー）など、地球の自然環境の中で、繰り返し起こっている現象の中から得られる無限に近いエネルギーをいい、新国家エネルギー戦略の達成をはじめ、エネルギー

源の多様化に不可欠となります。特に、太陽や風力のエネルギーは“Intermittent Renewable（間欠性再生可能)”と呼ばれ、出力が不安定で変動も多いため、水力やバイオマスなどと区別しており、大量導入には既存のシステムに調和させるための新技術の開発が重要となります。

現状における太陽光発電などは未だコストは高いが、クリーンで、枯渇することなく、どこの地域でも得られ、需要地にも直結しているという、持続可能なエネルギー需給構造を築く上では魅力的な特性を持つため、今後共最大限の導入促進を推進することで、国際的な合意が得られていることは言うまでもありません。

これら再生可能エネルギーは、当面、在来エネルギー源の補完的役割として育成していくことになりますが、重要なことは、再生可能エネルギーを導入することが、枯渇性のある化石エネルギーの削減となり、自給率の向上と共に化石エネルギーより長い活用を可能にする省エネルギー技術そのものであることを、肝に銘じておきたいです。

		2002年度	2010年度目標
発電分野	太陽光発電	15.6万kl (63.7万kW)	118万kl (482万kW)
	風力発電	18.9万kl (46.3万kW)	134万kl (300万kW)
	廃棄物発電+ バイオマス発電	174.6万kl (161.8万kW)	586万kl (450万kW)
熱利用分野	太陽熱利用	74万kl	90万kl
	廃棄物熱利用	164万kl	186万kl
	バイオマス熱利用	－	※1　308万kl
	未利用エネルギー	4.6万kl	※2　5万kl
	黒液・廃材等	471万kl	※3　471万kl
合計 （対１次エネルギー供給比）		923万kl (1.6%)	1910万kl (3%程度)

表２　再生エネルギーなどの更なる導入促進・新エネルギー導入実績と目標

単位：原油換算（万 kl)、設備容量（万 kW）

※　発電分野及び熱利用分野の各内訳は、目標達成にあたっての目安である。

※１　輸送用燃料におけるバイオマス由来燃料(50万kl)を含む。

※２　未利用エネルギーには雪氷冷熱を含む。

※３　黒液・廃材等はバイオマスの１つであり、発電として利用される一部を含む。黒液・廃材などの導入量は、エネルギーモデルにおける紙パの生産水準に依存するため、モデルで内生的に試算する。

表２に 2005 年に策定された我国における再生可能エネルギーなどの現状と導入目標を示します。

■革新的エネルギー技術と国家プロジェクト

図２に示すように、今後重要となる革新的エネルギー技術開発に関しては、これまで需要サイドの新エネルギーとして定義されていた技術をベースとして、さらに社会的意義が大きい技術を含め、革新的エネルギー技術としての定義を試みたものであり、将来の国家的プロジェクトとしての進展が期待されるところであります。

図２の革新的エネルギー技術開発利用では、

①再生可能エネルギーの普及、

②エネルギー効率の飛躍的向上、

③エネルギー源の多様化に資する新規技術

を対象とし、その普及を図ることが特に必要なものとして定義されており、具体的には、社会的背景を踏まえ、機動的に捉えられるべきであると考えられます。

現状においては、①の再生可能エネルギーの普及に資する新規技術として、太陽光発電（高効率のもの、新規材料を用いたもの)、太陽光発電・風力発電併設用蓄電池（キャパシタを含む)、セルロース系バイオマスからのエタノール製造技術、BTL 製造技術、バイオマスのガス化発電などが考えられています。

また、②のエネルギー効率の飛躍的向上に資する新規技術としては、定置用燃料電池、ハイブリッド自動車、天然ガスコージェネレーション、ヒートポンプ、石油残渣ガス化技術（IGCC、IGFC 等)、クリーンコール技術（石炭ガス化（IGCC、IGFC 等))があげられます。

そして、③のエネルギー源の多様化に資する新規技術としては、燃料電池自動車、電気自動車、プラグイン・ハイブリッド自動車、天然ガス自動車、ディーゼル代替 LP ガス自動車、水素自動車、高濃度バイオ燃料自動車（FFV 等)、GTL 製造技術、DME 製造技術、非在来型化石燃料利用技術（メタンハイドレートの利用技術、オイルサンド等超重質油の効率的分解技術)、ただし年度の導入目標を設定しているクリーンエネルギー自動車、天然ガスコージェネレーション、燃料電池については引き続き導入目標を設定し、普及支援を図ることにしています。

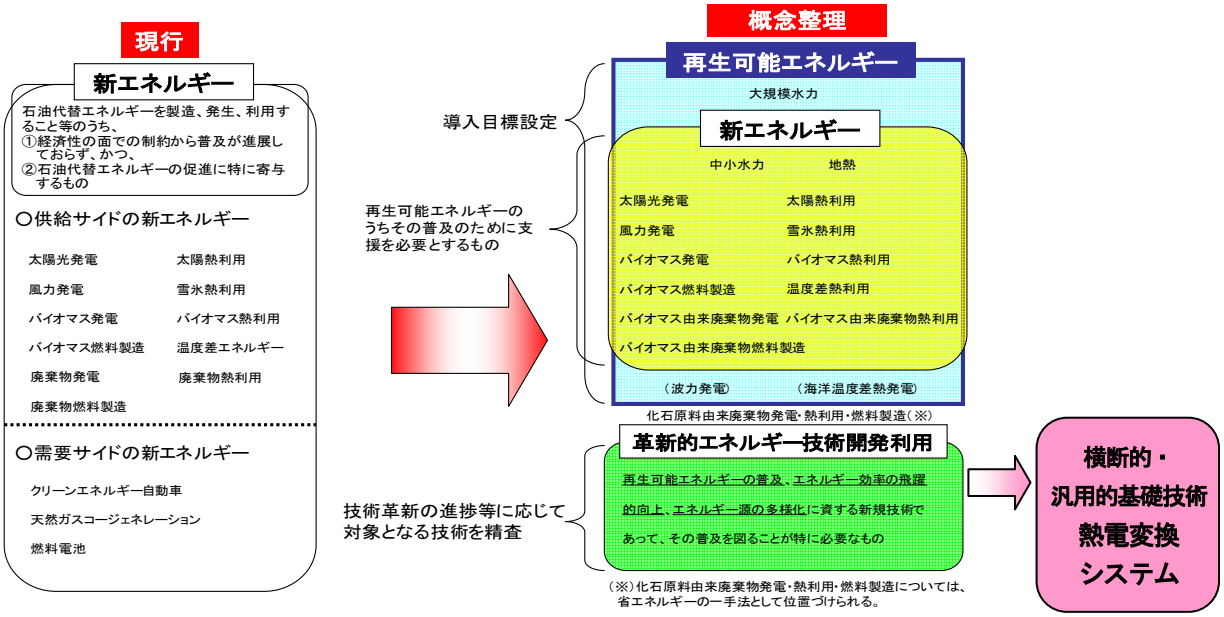


図 2　新エネルギーと再生可能エネルギーの概念整理

これらの革新的エネルギー技術のうち、今後、我国が国策として推進すべき技術やシステムを新しい国家プロジェクトとして位置づけ、ポスト京都議定書に向け、技術立国日本として国際的イニシアティブをとってゆくことが強く望まれるところであります。

横断的かつ汎用性に富んだ革新的基盤技術として、排熱を含む各種熱源からのエクセルギー回収技術があります。規模に拘らず高効率利用を可能とする熱電変換システムの商用段階が目前にせまっており、本プロジェクトの意義は極めて大きいと言えます。

参考文献

1）ポール・ロバーツ（久保恵美子 訳）、石油の終焉、2005、5 月、初版、光文社
2）総合エネルギー統計 2006、2006、4 月、経済産業省
3）新・国家エネルギー戦略、経済産業省総合資源エネルギー調査会総合部会資料、2006、5 月 15 日、経済産業省
4）新エネルギー部会中間報告骨子、経済産業省総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会資料、2006、5 月 11 日、経済産業省

2．　「高効率熱電変換システムの開発」の総括

梶川　武信　Takenobu　KAJIKAWA
湘南工科大学
kajikawa@elec.shonan-it.ac.jp

Key Words：熱電変換、熱電発電、未利用排熱、排熱回収、カスケードモジュール

■熱電変換技術の経緯

熱電変換の原理のペルチェ効果とゼーベック効果は 19 世紀前半に発見されました。1950 年代に、化合物半導体を利用すれば性能が飛躍的に向上することが見出され、1960 年代にペルチェ効果を利用した熱電冷却は、局所冷却や精密温度制御を特徴として実用化が進みました。

一方、ゼーベック効果を利用した熱電発電は、構造の簡単さと無保守性を特徴として宇宙探査機や僻地用電源などの特殊用途で 1970 年代に実用化されましたが、変換効率の低さから普及しませんでした [1)]。

しかし 1990 年代から、材料科学特に、材料設計手法の進展とナノテクノロジーの結合により、熱電変換材料の高性能化の展望が拓け、無次元性能指数 ZT は 1.0 をはるかに超え、最近では 2～3 も視野に入ってきました。アメリカ、ヨーロッパ各国でも研究開発が活発になりました。日本も世界のトップを競い、底辺の広い研究実績を積み上げてきました。

このような熱電変換の技術革新と地球環境問題が契機となり、国（NEDO）が助成するかつてない予算規模と強力な研究体制による「高効率熱電変換システムの開発」が、熱電変換システムの実用化技術の確立を目指し、2002 年度から 2006 年度までの 5 ヵ年計画でスタートしました。

■本プロジェクトの位置付け

「高効率熱電変換システムの開発」プロジェクトは、実用化を目指した技術開発で、（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の課題設定型の助成事業です。本プロジェクトは、「地球温暖化対策推進大綱」推進のための「地球温暖化防止新技術プログラム」における「革新的エネルギー消費削減技術」の一環として実施されています。熱電変換技術を用いて、これまで活用されずに排出されていた未利用熱エネルギーや各種排熱を電気エネルギーに直接変換し利用することにより、2010 年度には、温室効果ガスの排出削減に貢献することを目指します [2), 3)]。

■第 3 期科学技術基本計画と熱電変換技術

熱電変換技術は、2006 年 3 月に閣議決定された第 3 期科学技術基本計画において、「エネルギー分野」と「ナノテクノロジー・材料技術分野」の中に重点研究開発課題の「熱有効利用技術」や「未普及なエネルギー利用を具現化する材料技術」として位置付けられています [4)]。

■本プロジェクトの目標

本プロジェクトの目標は、「高効率熱電変換モジュールを開発し、それらを用いた熱電変換システムの実用化技術を確立する」ことにあります。高効率熱電変換モジュールの開発では、温度差 550K で熱電変換モジュール効率 15.0%の目処を確立することが目標です。この場合、温度差は、モジュール両面の電極温度差で定義しています。

対象とする熱電変換システムには、産業用と民生用への適用を想定した 4 種のシステムを選定し、それらの実用化技術の確立を目指します。

■本プロジェクトの開発予算

図1に本プロジェクトの総費用を示します。このうち NEDO からの補助率は 2/3 です。

（単位：百万円）

2002 年度	2003 年度	2004 年度	2005 年度	2006 年度	総額
594	660	611	480	377	2,721

図 1　本プロジェクトの総費用

■本プロジェクトの実施体制

図 2 に本プロジェクトの実施体制を示します。本プロジェクトは、「協調と競争」をキーワードとして、研究開発責任者（湘南工科大学学長、梶川武信教授）を中心に、財団法人エンジニアリング振興協会（エン振協）と独立行政法人産業技術総合研究所（産総研）および助成事業者 6 社で研究連携体を形成しています。エン振協は、研究連携体の研究開発の円滑な推進を図るとともに産総研

の協力を得て統一的かつ公正な熱電変換モジュールの性能評価技術を開発します。エネルギー技術分野や熱電変換技術分野の専門家から成る高効率熱電変換システム実用化推進委員会（略称：熱電推進委員会）および 2 つの分科会は、本プロジェクト推進の助言と審議を行います。

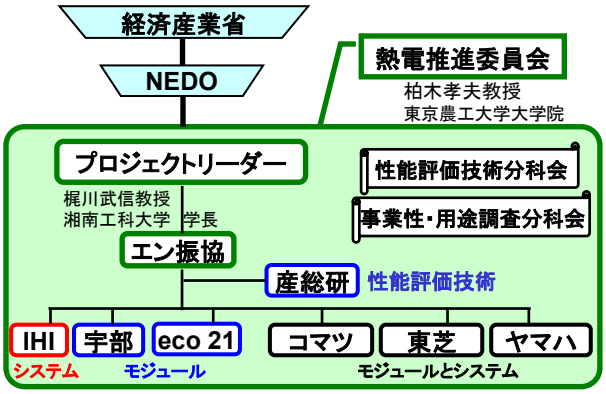


図 2　本プロジェクトの実施体制

■開発目標と内容

●熱電変換モジュールの開発目標と内容

発電用の熱電変換モジュールの開発では、大きな温度差をつけて高温域から低温域にわたる広い温度域で性能を発揮するモジュールが必要です。そのため、用途と使用温度域に合わせて 3 種類のカスケードモジュール(2 段重ねモジュール)および低温域の発電に適した 2 種類の高性能 Bi-Te 系モジュールを開発します。温度差はいずれも熱電変換モジュールの高温側、低温側の電極温度を基準にしています。

(1) 宇部興産(株)は、高温域Zn-Sb系／Co-Sb系と低温域Bi-Te系を積み重ねた高温用カスケードモジュールを開発し、温度域323Kから723K、温度差400Kで変換効率11%の目処確立を目指します。

(2) (株)エコトゥエンティーワンは、高温域Co-Sb系と低温域Bi-Te系を積み重ねた高温用カスケードモジュールを開発し、温度域300Kから700K、温度差400Kで変換効率11.5%を目指します。

(3) コマツは、高温域シリサイド系と低温域Bi-Te系を積み重ねた高温用カスケードモジュールを開発し、温度域303Kから853K、温度差550Kで変換効率15.0%の目処確立を目指します。

(4) (株)東芝は、高性能Bi-Te系モジュールを開発し、温度域303Kから403K、温度差100Kで変換効率4.2%の目処確立を目指します。

(5) ヤマハ(株)は、高性能Bi-Te系モジュールを開発し温度域323Kから473K、温度差150Kで変換効率5.3%の達成を目指します。

図3に開発を進めている5種類の熱電変換モジュールの素子材料系と目標効率（目処を含む）、温度条件及び開発担当をまとめました。

●熱電変換システムの開発

熱電変換モジュールの開発と並行して、それらの適用先である産業用と民生用の 4 つの有望と思われる排熱源を対象とした熱電変換（熱電発電）システムを開発します。図 4 に、適用 4 種の熱電変換システムの目標と開発担当を示します。

(1) 石川島播磨重工業(株)は、抵抗加熱式工業炉用の熱電変換システムの実用化技術を開発します。高温の炉内の熱をふく射で効率よく受熱する特長的な熱電変換システムであり、モジュール端温度873K～323K、温度差550Kで変換効率15.0%のモジュールを用いることを前提として、発現率67%以上を実現し、システム効率10.0%の検証を目指します。

	熱電変換モジュール	温度条件[K]			目標値	開発担当
		T_{he}	T_{ce}	ΔT	変換効率 η	
1	高温域Zn-Sb/Co-Sb系 低温域Bi-Te系 カスケードモジュール	723	323	400	11.0%	宇部興産(株)
2	高温域Co-Sb系 低温域Bi-Te系 カスケードモジュール	700	300	400	11.5%	eco 21
3	高温域Silicide系 低温域Bi-Te系 カスケードモジュール	853	303	550	15.0%	コマツ
4	低温域用Bi-Te系 モジュール	403	303	100	4.2%	(株)東芝
5	低温域用Bi-Te系 モジュール	473	323	150	5.3%	ヤマハ(株)

図 3　熱電変換モジュールの開発目標

熱電変換システム		目標値	開発担当
1	抵抗加熱式工業炉用 熱電変換システムの開発	ﾓｼﾞｭｰﾙ端温度600～50℃の ふく射伝熱環境下で 効率10.0%のユニット開発	石川島播磨重工業(株)
2	ディーゼルエンジン コージェネレーション向け 高効率熱電変換システムの開発	熱交換効率77% 500～50℃の熱源条件で システム効率4.3% 発電出力3kW級を開発	コマツ
3	低温排熱（変圧器用等） 回収熱電変換システムの開発	社会ｲﾝﾌﾗ関連機器 適用ｼｽﾃﾑとして 3.0%の目処を確立	(株)東芝
4	プロジェクター光源等の 低温域排熱利用 熱電変換システムの開発	150～50℃の熱源条件下で ｼｽﾃﾑ効率3.2% 200～50℃の熱源条件下で ｼｽﾃﾑ効率4.5%	ヤマハ(株)

図 4　熱電変換システムの開発目標

(2) コマツは、ディーゼルエンジンコージェネレーション向けの熱電変換システムを開発します。排ガス熱源とモジュール間の熱交換効率を高くするため、相変化を利用した沸騰・凝縮型熱交換器を開発し、排ガス熱源温度773Kと冷却水温度323Kでシステム効率4.3%を目指します。

(3) (株)東芝は、低温排熱（変圧器用等）回収熱電変換システムを開発します。社会インフラ関連機器適用システムとして、変圧器本体のタンク外壁からの放熱を熱源とし、タンク外壁に取り付けた熱電変換モジュールにより排熱を電気に変換して回収します。大気との熱源間温度差100Kでシステム効率3.0%の目処をつけます。

(4) ヤマハ(株)は、プロジェクター光源等の低温域排熱利用熱電変換システムを開発します。ランプレフ外壁から効率よく熱を吸収するための最適設計を折り込み、ランプ消灯後電源をOFFにしても冷却ファンを約90秒駆動できるよう熱電変換システムで発電し電力を供給させます。熱源温度473Kとプロジェクター内部の空気温度323Kとの間で、システム効率4.5%の目処を目指します。

■熱電変換システム実用化のポイント

熱電変換システムの実用化技術の確立の主なポイントは次の 3 つにまとめられます。図 5 に技術開発のポイントを熱電変換システムの構成例と各部位の模式的温度分布を対比して示します。

(1) 熱電材料性能の向上

p 型と n 型の金属または半導体を用いる熱電変換素子材料の性能は、次式で定義される熱電性能指数 Z $[K^{-1}]$で決まります。

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda}$$

（α :ｾﾞｰﾍﾞｯｸ係数[V/K]、σ :導電率[S/m]、λ :熱伝導率[W/mK]）

熱電変換材料を実用素子とするためには、Z の高い材料の開発に加え、素子製造・成型技術、形状の最適化、安定化などが課題です。

(2) モジュール化技術

実用においては、熱電変換素子対を多数並べて一体化した熱電変換モジュールが使われます。モジュール化には、高性能化と同時に耐久・高信頼構造技術が必要で、電極接合技術、電気絶縁・良熱伝導並立技術、熱応力緩和技術、雰囲気封止技術、組立技術などが重要な課題です。

(3) 伝熱性能の向上

熱源（高温側および低温側）の温度差を最大限利用して熱電変換モジュールで発電するには、熱源と熱電変換モジュール間の熱移動を小さい熱抵抗で効率良く行う必要があります。まず熱源の熱荷体の種類や電力用途および使用環境に適した熱交換形態（ふく射、対流、熱伝導、沸騰、凝縮）の選定が重要です。次に各々の制約条件や費用対効果を考慮して、各伝熱形態の伝熱促進手法を可能な限り折り込むことが必要です。

また、こうした技術課題と共に、熱電変換モジュールおよびシステムの経済性、信頼性・耐久性、対環境性などは、実用化・事業化の成否のポイントになります。

本プロジェクトでは、産業用と民生用それぞれの適用システムごとに、それぞれの主システムに精通した企業が担当し、個々の制約条件を十分熟

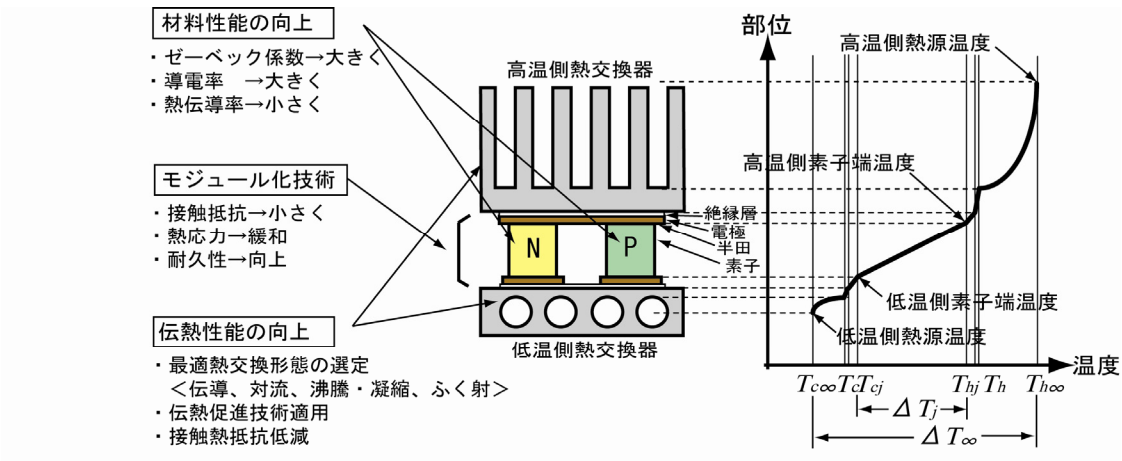


図 5　熱電変換システム実用化のポイントとシステム構成及び温度分布の模式図

知した上で、これらのポイントを有機的に統合させた開発を推進しています。これは、本プロジェクト推進の上での研究連携体の持つ、大きな、従来にない特徴です。

■開発の成果

●熱電変換モジュールの開発の成果

図 6 に、本プロジェクトで開発している 5 種類の熱電変換モジュールと 4 種類の熱電変換システムを作動温度を軸に模式的に表示しています。

エン振協と産総研は、各企業と協調して 700℃級熱電変換モジュール評価技術を確立しました。各熱電変換モジュールは、これにより統一的かつ公正に計測評価されました。

図 7 に、5 種類の熱電変換モジュールの現時点(2006 年 9 月)での開発達成状況を目標値と共に示します。

熱電変換モジュールの開発結果は以下のように要約できます。

(1) 高温域 Zn-Sb 系/Co-Sb 系と低温域 Bi-Te 系を積み重ねた高温用カスケードモジュールの開発は、好適プロセスの検討と元素添加により高温用 p 型 Zn-Sb と n 型 Co-Sb の機械的強度問題を解決し、特性安定化の見込みを得ました。低温用 p 型、n 型 Bi-Te とで構成したカスケードモジュールの最終目標効率 11.0%に向けた評価を実施中です。現在、耐久性の課題解決に注力しています。

(2) 高温域 Co-Sb 系と低温域 Bi-Te 系を用いたカスケードモジュールの開発は、Co-Sb 系(フィルド)スクッテルダイト系材料を用いた原料組成粉作製において急速凝固法を確立し、最適な濃度の希土類金属を添加することにより高性能化を達成しました。低温用 Bi-Te は、

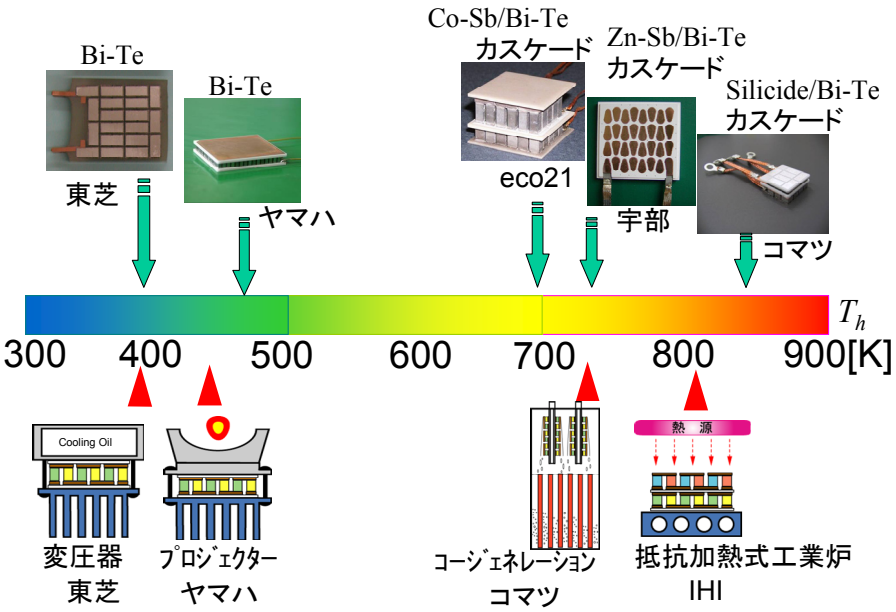


図 6　開発したモジュールとシステム

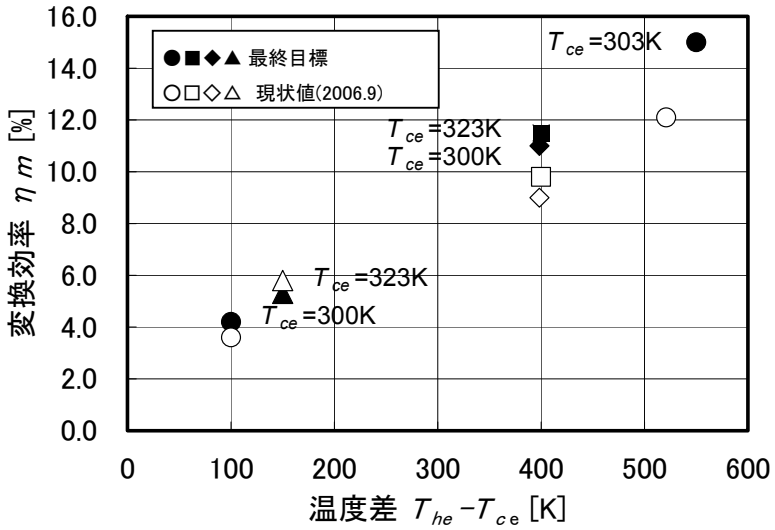


図 7　熱電変換モジュールの開発達成成果

特性の高温シフトを行い、カスケードモジュールに組み上げ一体化し、変換効率 9%（ΔT=400K）を達成しました。

(3) 高温域シリサイド系、低温域Bi-Te系を用いたカスケードモジュールの開発は、p 型 Mn-Si 系で主に製法の改善、n型Mg-Si系で主に組成の適正化、低温用 Bi-Tei で新組成による高温シフトを図り、変換効率 12.1 %（ΔT=520K）を達成し、15.0%への目処をつけようとしています。

(4) 低温域 Bi-Te モジュールは、ドーパント添加量による高温シフトおよび電極損失の低減により、変換効率 3.6%（ΔT=100K）を達成し、塑性加工による結晶方位制御を加え更なる向上を目指しています。

(5) プロジェクター光源等の低温域排熱用 Bi-Te モジュールは、独自の材料製造プロセス（液体急冷法＋特殊固化成形法）、高精度・高密度実装技術により、変換効率 5.7%（ΔT=150K）を達成し、最終目標を大きく超えることができました。

●熱電変換システムの開発の成果

図 8 に、開発した 4 種類の熱電変換システムの現時点（2006 年 9 月）の開発達成状況を示します。

熱電変換システムの開発結果は以下のように要約できます。

(1) 抵抗加熱式工業炉用熱電変換システムの開発は、熱源からのふく射を効率的に利用するため、電極表面上に吸収率 90%以上が確保できる炭化シリコン系の塗膜を施して吸収効率の向上と熱吸収層と電極間の熱抵抗の低減を図りました。

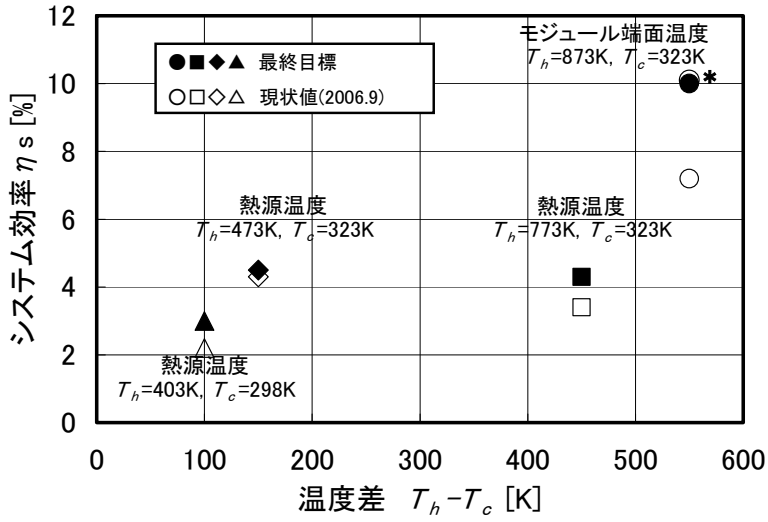


図 8　熱電変換システムの現状開発成果

その結果、発現率〔=(ユニット効率)/(モジュール効率)〕68%以上を実証し、カスケードモジュールの装着により 600℃級システムのユニット効率 7.2%(⊿*T*=550K)を達成しました。これは、図 8 に＊で示しましたが、モジュール効率 15.0%を想定するとユニット効率 10.0%を超えるもので、システムの最終目標値を達成したことになります。信頼性確立のため、ふく射受熱面の耐久試験に注力しています。また、カスケードモジュールを装着する400℃級システム実証試験に入っています。

(2) ディーゼルエンジンコージェネレーション向け高効率熱電変換システムの開発は、燃焼排ガスからモジュール表面への熱抵抗を徹底的に低減させるため沸騰・凝縮の相変化を利用した特長的な熱交換器を開発し、空気温度 500℃(723K)において熱交換効率 60.5%、システム効率 3.4%を達成しました。本年中に熱交換効率 77%、システム効率 4.3%を達成する計画です。

(3) 低温排熱(変圧器用等)回収熱電変換の開発は、徹底的な各部の接触伝熱抵抗の低減と大気への効率的放熱技術の開発がポイントで、空気冷却側フィン形状の改善、各部接触熱抵抗低減方策とモジュールへの流入熱流の均一化技術により、小型システムにおいてシステム効率 2.2%を得ています。また、信頼性シミュレーションと熱サイクル試験を総合的に検討した信頼性評価技術の確立を目指しています。

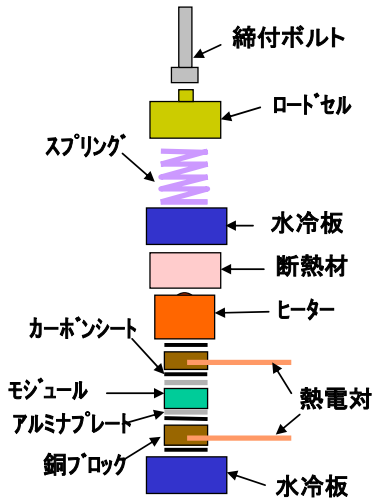
(4) プロジェクター光源等の低温域排熱利用熱電変換システムの開発は、ランプ光源のレフレクタからモジュールへの熱移動を効率よく行うための吸熱部材やアルミ製レフレクタ部材の採用と伝熱の最適化により、システム効率 4.3%(⊿*T*=150K)を達成しました。システム効率 4.5%(⊿*T*=150K)が達成される目処を得ています。電力利用回路を組み込み商品化向け試作プロジェクターの段階に進んでいます。

■耐久性評価法確立と信頼性試験

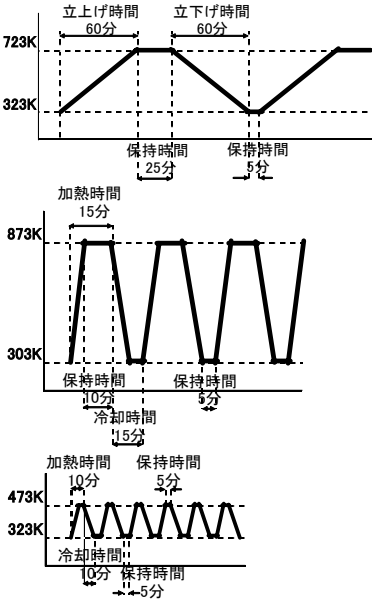
熱電変換システムが社会に普及されるためには、各システムの仕様を満たす熱電変換モジュールの性能と共に、熱電変換システムのそれぞれの運用に応じた耐久性・信頼性の保証が重要です。

適用システム	モジュール温度(電極部)(℃)		起動頻度	法定耐用年数	総サイクル数
	T_{he} (高温側)	T_{ce} (低温側)	回/日	年	回
抵抗加熱式工業炉	600	50	1	10	3700
コージェネレーション	300	70	2	11	8000
プロジェクター	200	50	3	5	5500
変圧器	130	50	1回/年	15	15

図 9　熱サイクル試験のガイドライン



＜熱サイクル試験装置の構成例＞



＜熱サイクルの例＞

図 10　熱サイクル実証試験の実施例

本プロジェクトでは、耐久性の評価・実証についても性能評価と並ぶ重要課題として検討を進めています。耐久性評価法について、さまざまな項目を列挙して検討し、発電状況下での熱サイクル試験は最重要項目であると認定し、熱サイクル試験方法の具体化とそれに基づく実証試験を進めて来ています。図 9 は、本プロジェクトで開発中のシステムの標準的な作動条件と法定耐用年数から想定した目標熱サイクル数についてまとめたものです。

開発した各モジュールは、適用システムの熱サイクル条件に基づいて図 10 に模式的に示すような熱サイクル実証試験を実施しています。

■事業化の展開

●熱電変換モジュールとシステムの展開

本プロジェクトで開発した熱電変換モジュールと熱電変換システムは、研究連携体各社が適用を想定した用途への事業化だけでなく、それらをさらに応用発展させた他の用途への幅広い展開が期待できます。図 11 に、熱電変換モジュールと熱電変換システムの適用先の連係の概要を本プロジェクト外への展開例を含めて示しました。図中数値は温度差を示しています。

●事業化へのプロセス

事業化のプロセスは、まず、研究開発成果に基づいて、企業の関連部署場合によっては外部を含め、その総力を挙げて「実用システム設計」を行います。同時に量産化技術および品質管理プロセスの確立を行います。事業化の決定判断は、これらの技術成熟度、市場調査結果、採算性などに基づいて行います。設備を整備して生産体制を整え、モジュールやシステムを出荷し、順次改良を重ね量産体制に移行していきます。

これらの過程では、NEDO の産業技術実用化開発助成制度などの活用も有効と考えています。

●導入効果の見通し

本プロジェクト終了後 2 年間の製品化開発期間を経て実用システムの導入が開始されます。これらの導入予測には、本プロジェクト外、例えば移動体用などに、熱電変換モジュールを供給することの仮定も含めています。

熱電発電モジュールとシステム開発企業の 2010 年度における導入予測に基づいて、発電量、二酸化炭素排出削減量、原油換算削減量を予測した結果を図 12 に示します。2020 年、2030 年は、普及率 1.5%/年（対総稼動基数）で導入が進むと仮定しています。

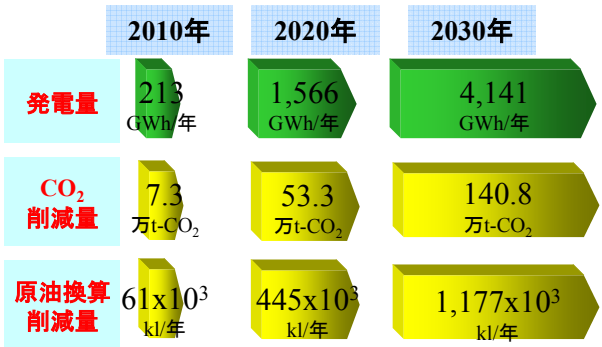


図 12　導入効果の見通し

システム / 適用先 / モジュール	本プロジェクト				プロジェクト外への展開（候補の例）			
	産業用			民生用	産業用		民生用	移動体
	工業炉	ｺｰｼﾞｪﾈ	社会ｲﾝﾌﾗ	ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾀｰ	プロセス排熱	燃焼排熱	機器その他	
	IHI	コマツ	東芝	ヤマハ				
宇部興産	○ 400K				○ 汚泥処理	○		○
eco21	○ 400K				○ 鉄鋼排熱	○		
コマツ	○ 550K	○ 200K				○		○
東芝			○ 100K		○ 社会ｲﾝﾌﾗ			
ヤマハ				○ 150K			○ 各種光源	

図 11　熱電変換モジュール及び熱電変換システムの導入先

■まとめと展望

●本プロジェクトの成果

本プロジェクトは、これまでに幾多の技術的課題を克服しながら、ほぼ計画通りに 5 ヵ年の開発を進めてきました。最終年度の半ばに至り、研究連携体は一丸となって残された個別技術課題の克服に励んでいます。これまでの本プロジェクトの成果を以下にまとめます。

(1) 熱電変換システムの開発において、数 10W レベルから3kWレベルの小型システムを実証し、高効率熱電変換モジュールの開発において、実際の作動条件での熱電変換モジュールの熱サイクル試験による信頼性評価、経済的製造プロセス検討なども含めた実用化技術を確立するという本プロジェクトの目標は、ほぼ達成の目処がついて来たと言えます。

(2) 図 13 は、熱電変換モジュールの成果を効率の形で従来技術と比較したものです。これから見られるように、本プロジェクトでは、実用レベルのモジュールで画期的な効率を実証することができました。

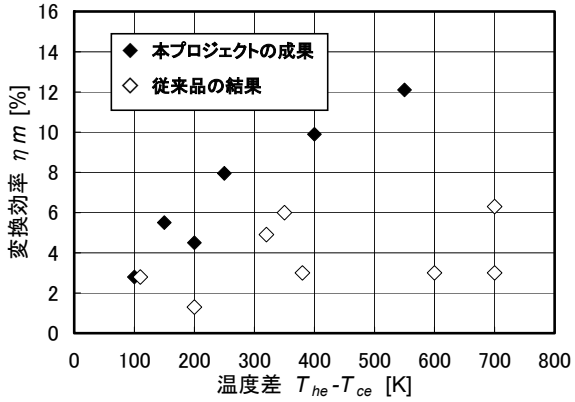


図 13　本プロジェクトの変換効率と従来技術

(3) 熱電発電システムの効率は、熱源の形態や状態に大きく依存するので一律に効率のみで技術の良否を判断することは出来ません。図 8 に熱電変換システムの効率をまとめましたが、種々の伝熱技術を用いたシステム効率として低温域でも 4%台を、また高温域では10%程度も可能であることを示した意義は大きいと考えます。その意味で本プロジェクトは、熱電変換技術の社会への適用と普及に向けての大きな一歩であるといえます。

●熱電変換材料の展望

わが国を始め、世界各国の熱電変換材料に関する研究開発は、今まさに続々と進展が続いています。例えば、図 14 に示すように、熱電素子の無次元性能指数 ZT は、マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所の研究グループによる量子ドット素子の研究において、ZT=3.5～4.0（T=300℃）の高い値が報告されています。

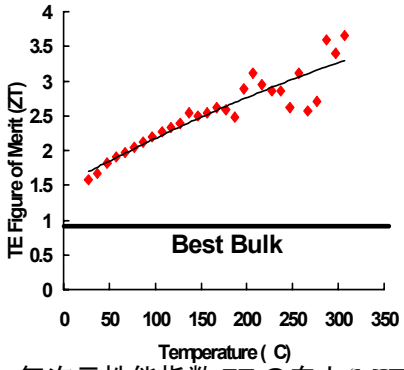


図 14　無次元性能指数 ZT の向上(MIT の結果)

また、我が国が発祥となる層状酸化物の研究や、ナノスケールが局在する構造を持つとされるLAST（Ag-Pb-Sb-Te）、ハーフホイスラー系、クラスレート系材料などの研究でも、更なる性能向上が期待されています。その他、性能向上の可能性を持つ熱電変換材料は、枚挙に暇がないほど目白押しです。

これらの熱電変換材料は、まだ実験室レベルですが、次世代熱電モジュールを形成する新しい基盤材料になる大きな可能性を秘めています。

●熱電変換システムへの波及効果

熱電変換システムの効率は、こうした新たな熱電変換材料の実用化により、更に向上して行き、産業部門、民生部門、及び、運輸部門での排熱利用が拡がっていくことになると思います。その上、今まで適用が不可能と考えられていた未利用熱エネルギー源への適用も可能になり、熱電変換システムによる環境問題への貢献が一層期待できるようになります。

“熱あるところ、熱電あり”です。本プロジェクトを契機に熱電変換技術の普及が加速されていくことを祈念いたします。

参考文献

1) 坂田、松原、西田、梶川編、熱電変換工学、（2001）、リアライズ社
2) Kajikawa, T. et al, Proc. of 23rd Int. Conf. on Thermoelectrics, Aderade, Australia. (2004)
3) Kajikawa, T. et al, Proc. of 24th Int. Conf. on Thermoelectrics, Clemson, U.S.A. (2005)
4) 分野別推進戦略、(2006)、総合科学技術会議

3.　カスケードモジュールの開発(高温域 Zn-Sb 系、低温域 Bi-Te 系材料)

藤井　一宏　Itsuhiro FUJII
宇部興産㈱
27323u@ube-ind.co.jp

Key Words :　熱電変換、熱電発電、熱電材料、Zn-Sb、Co-Sb、カスケードモジュール

■熱あるところに熱電あり
−熱電発電技術の実用化に向けて−

●これまでの経緯

熱電発電技術は、まさに熱あるところにはどこでも適用できる夢のある技術です。実用化のためには、具体的な熱源を想定し、その熱源に対し、材料、モジュール、熱交換システムなどの各要素技術を高度化していくことが重要です。弊社は、ほぼ 10 年間にわたり、熱電発電技術の実用化に向け、種々の具体的熱源への適用技術を開発してきました。[1, 2)]

最初に取り組んだ課題は、九州電力殿との共同開発で取り組んだ、内燃力発電所の排ガスを熱源とする熱電発電システムの開発でした。この開発において、Bi-Te 系材料を用いた、低温熱源用の独自の大型熱電変換モジュールの開発に成功し、材料からモジュール、システムまで一貫して開発する貴重な経験をすることが出来ました。

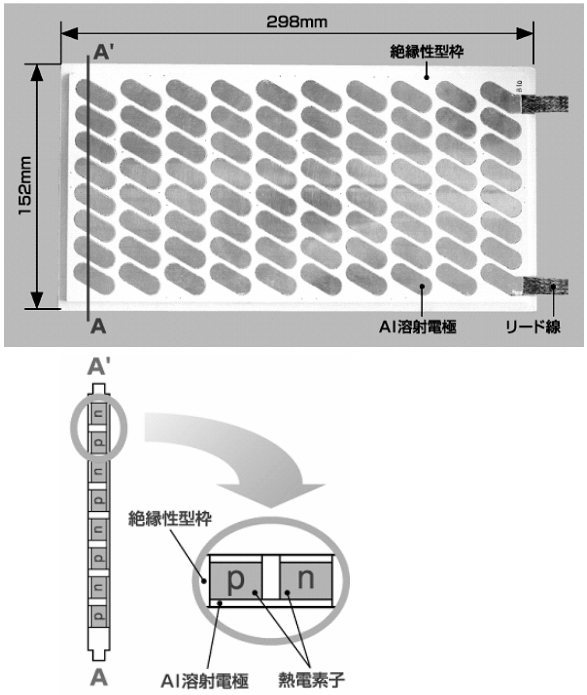


図 3　独自の大型熱電変換モジュール

●より広い温度域への適用に向けて

2000 年～2001 年に実施された NEDO プロジェクト「高効率熱電変換素子開発先導研究」においは、移動体（自動車）への適用性を実証するため、システムを実際に製作し、ベンチテストを実施しました（図 1、2 参照）[2)]。

図 1　移動体用熱電発電システム
ベンチテスト状況

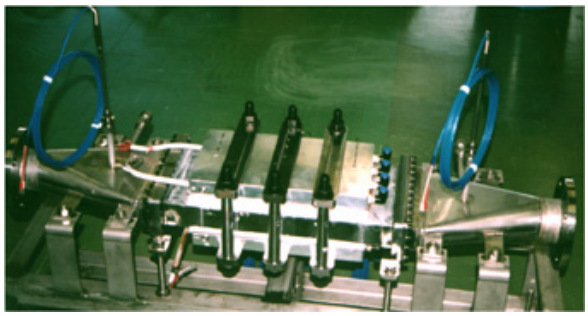


図 2　移動体用熱電発電システム本体

そのプロジェクトにおける検討の結果、自動車のように、600℃にもなる排ガスは、分散型電源や中、小規模のプラントなどから相当量排出されており、これらを対象にする、高効率の熱電変換モジュールの開発が必要であることが明らかになりました。

●カスケードモジュール

熱電変換材料は、材料によって高い性能を発揮する温度領域が異なっているので、それらを適材適所で用いることで、全体として高効率の熱電変換モジュールを構成できます。これをカスケード

モジュールと呼びます。

現在開発中のカスケードモジュールは、高温用のモジュールと低温用モジュールを重ねる方式で高効率化を図るものです。低温用熱電変換モジュールには、Bi-Te 系材料を用いたものが最も高性能で、上述のように、我々はこれまでに、この材料系を用いた、独自の大型熱電変換モジュールの開発にも成功していますので、本プロジェクトにおける、主たる技術課題としては、カスケードモジュールの高温側に用いるモジュールを開発することです。

■Zn-Sb 系熱電変換材料の開発

中温度領域の高性能熱電変換材料としては、Zn-Sb 系材料を開発することにしました。この材料系の中では、β-Zn_4Sb_3 と呼ばれる結晶相が最も高い性能を示すことが報告されていますが、これまでは機械的強度に問題があり、実用化されませんでした。

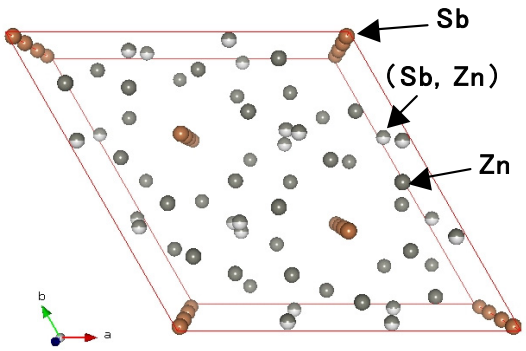


図 4　β-Zn_4Sb_3 の結晶構造

弊社は、先に紹介した先導研究において、実用熱電変換材料である Bi-Te 系材料と同等の機械的強度を達成すると共に、従来のデータを凌駕する性能を達成しました[3)]。本プロジェクトにおいては、このβ-Zn_4Sb_3 のさらなる高性能化を図るため、電子構造シミュレーションを活用して添加元素を絞り込み、材料試作と評価を行いました。

熱電変換モジュールでは、半導体である熱電変換材料の p 型と n 型を交互に直列接続します。低温用の Bi-Te 系材料は、同じ材料系で p 型、n 型の両方があるので、モジュール構成も簡単です。ところが、β-Zn_4Sb_3 はp型のみで、n 型のβ-Zn_4Sb_3 はまだ開発されていません。そこで、n 型のβ-Zn_4Sb_3 に着手しましたが、電子状態計算結果等からもn型材料の開発は困難が予想され、試作の結果、いずれも n 型特性は得られませんでした。しかしながら、この過程で、特定の元素添加により、無次元性能指数が 2.0 を超える特性を確認し、現在特性の安定化プロセスを検討しています（図 5 参照）。

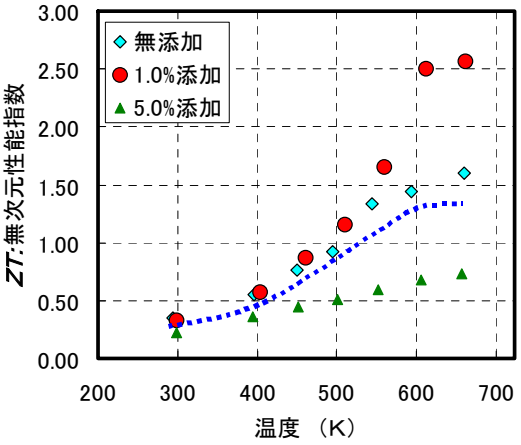


図 5　β-Zn_4Sb_3 の無次元性能指数

●高温用モジュールの開発

上述のような事情で、p 型のβ-Zn_4Sb_3 に対して、n 型材料としては、同じ温度域で比較的高い性能を示す、Co-Sb 系材料を用いることにしました。

また、電極としては、これまで低温用モジュールに用いてきた、アルミニウムの溶射皮膜に替えて、高温に耐える銅の溶射皮膜を用いることにし、異なる材料に共通の接合プロセス条件検討を実施しました。

$$\left(\frac{A_n}{A_p}\right)\left(\frac{h_n}{h_p}\right)^{-1} = \left(\frac{\rho_n}{\rho_p}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\kappa_n}{\kappa_p}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここで、A：素子の表面積、h：素子厚さ、ρ：比抵抗、κ：熱伝導率を示し、添え字 p、n はそれぞれ、p 型、n 型を意味します。その結果、β-Zn_4Sb_3 の断面積を Co-Sb 系材料の約 3 倍として試作したものです。図 6 には、上記モジュール設計の模式図を示します。

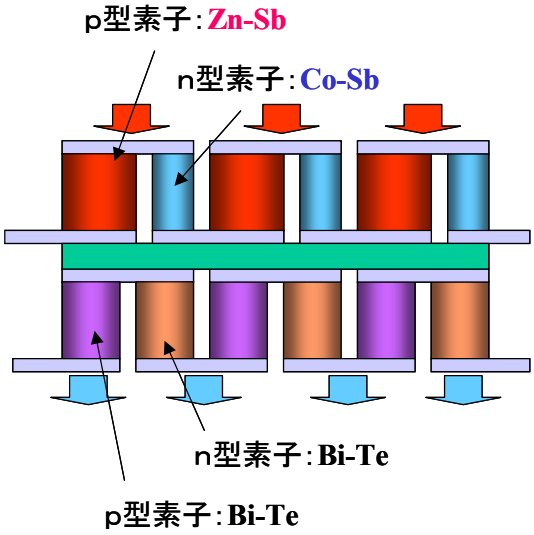


図 6　カスケードモジュールの設計模式図

■開発結果

こうして得られたモジュールは、低温側 250℃、高温側 450℃の条件で、プロジェクトの中間評価では、中間評価の目標である、変換効率 4.5%を達成しました。図 7 には試作した高温用熱電変換モジュールの外観写真を示します。

ただ、このモジュールには一部組成の拡散により性能低下を引き起こすなど、耐久性に課題があり、現在その解決に注力しています。

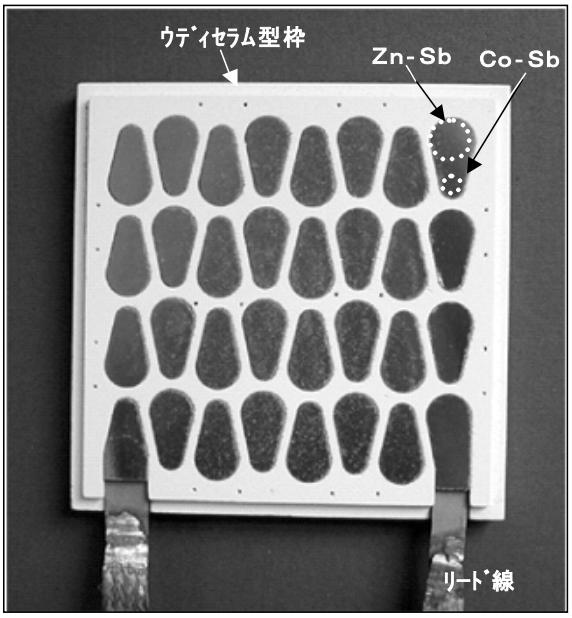


図 7　p 型 Zn-Sb 系/ n 型 Co-Sb 系材料を用いた、高温用熱電変換モジュールの外観写真

■熱電発電技術の実用化・事業化への独自の取り組み

以上のような、プロジェクトにおける開発と並行して、ユーザーからのご要望にお答えし、熱電発電システムの共同開発を進めております。その一例を紹介させていただきます。

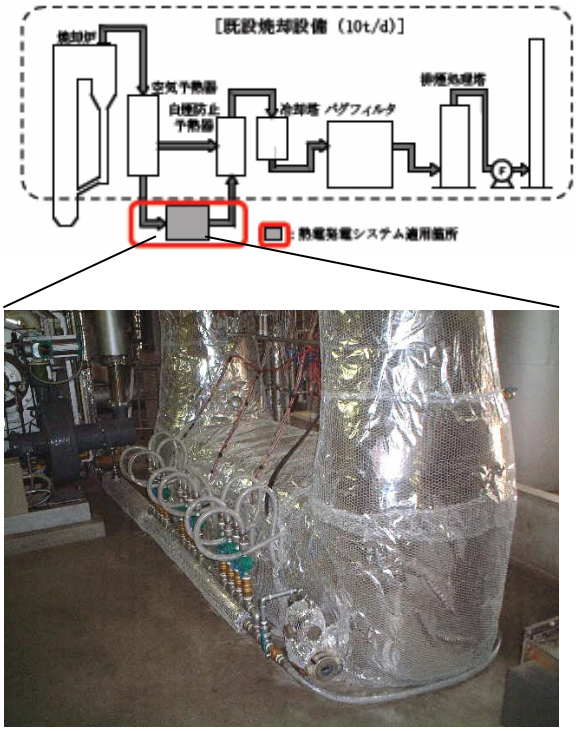


図 8　下水道汚泥焼却設備の概要と試験実施の状況写真

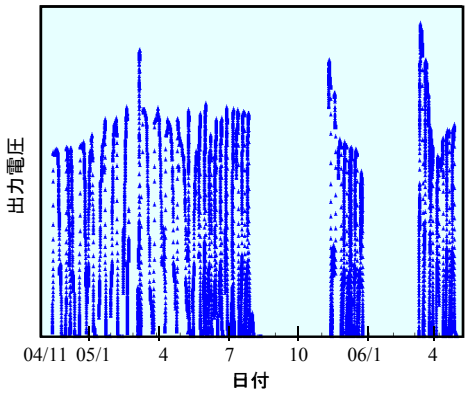


図 9　試験期間中の全発電状況

図 8 は住友重機械工業殿と共同開発しました下水道汚泥焼却設備のブロック図とその排ガスを熱源とする熱電発電システムの写真です。実証試験は、美幌町殿のご協力により、同町で実稼動中の設備にて実施させていただきました[4]。試験図 9 に、全運転期間の発電状況を示します。試験期間は 2004 年 11 月から 2006 年 4 月、ほぼ 1 年半に及びました。運転は 1 週間ごとの起動、停止の

周期で実施されており、処理量により発電量が異なる様子がわかります。特筆したいのは、図 10 です。この図では、横軸にシステム全体の熱電変換モジュールの無負荷での出力電圧の合計、縦軸は一定負荷の場合の全出力電力を示します。この曲線には、試験期間中の全測定点を記入しています。横軸は、熱電変換モジュールの温度差の合計を意味しますので、温度差に対する出力電力が、期間を通じて変化していないことを意味します。即ち、この試験期間中、熱電発電モジュールの性能は全く変化なかったことを示しています(もしも、熱電変換モジュールが劣化した場合は、この曲線の傾きが小さくなるように変化します)。試験期間中は、電話回線を利用して、データ収集用パソコンをリモートアクセスでモニターする他は、発電については全くメンテフリーで安定に稼働しました。

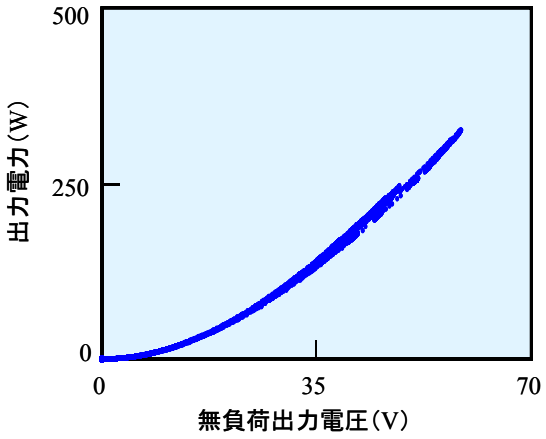


図 10　熱電変換モジュールの安定性

■まとめ

(1)作製プロセスを改良して得られたβ-Zn_4Sb_3 の特性を、さらに元素添加により、高性能化することに成功しました。

(2)p 型 Zn-Sb 系/n型 Co-Sb 系材料を用いた、高温用熱電変換モジュールの試作に成功し、プロジェクトの中間評価目標である、変換効率 4.5%を達成しました。

(3)上記高性能材料及び熱電変換モジュールの開発と並行して、複数のユーザーと共同で様々な熱源へ適用する熱電発電システムの開発・実証試験を進めており、実用化・事業化に向け着実に実績を積んでいます。

参考文献

1)桜田, 鎌倉, 井上, 長尾, 長井, 大空, 藤井, 藤本:熱電変換シンポジウム 2000, 論文集, 90−91(2000).

2)大空靖昌, 長井淳, 林英邦, 藤井一宏:熱電変換シンポジウム 2002, 論文集, 132−133 (2002).

3)大空靖昌、長井淳、林英邦、藤井一宏, 熱電変換シンポジウム 2002, 論文集, 24−25 (2002)

4)菅原勝、中川崇、藤井一宏, 第 43 回下水道研究発表会講演集, 473-475 (2006)

4．　高効率熱電変換モジュール・システムの開発

畠　康彦　Yasuhiko　HATA
コマツ
yasuhiko_hata@komatsu.co.jp

Key Words：熱電変換、熱電発電、モジュール、システム、耐久性、低価格、CO_2 削減

■ねらい

熱電発電技術は排熱から電気を直接回収でき、省エネルギーと共に世界各国の共通課題である CO_2 削減に貢献できる技術です。排熱源としては、デイーゼルをはじめ各種エンジンの排ガス、焼却炉や工業炉の排熱などがあります。コマツは約 10 年前より熱電発電の材料研究とシステムの研究を実施してきましたが、2002 年から 5 ヵ年間の「高効率熱電変換システムの開発」プロジェクトに参画することで、性能あるいは実用化に向け大きな前進となる成果が得られました。

ここでは、この成果を報告すると共に、実用化の姿と将来に向けた展望について紹介します。

■技術の特長

熱電材料は過去 1 世紀以上に渡り、各種の材料が報告されています。コマツは発電用として、～300℃の領域ではペルチェ素子用として実績の高い、Bi-Te 系材料の開発を、～500℃の領域では環境に優しく安価で高性能が期待できるシリサイド系材料を主に開発してきました。熱電発電材料から素子を作成しかつ効果的に使用するためには素子で構成されたモジュール化をする必要があります。コマツは、Bi-Te 系材料、シリサイド系材料、およびこれらを 2 段重ねたカスケード型の実用的なモジュールを目指しています。なお Bi-Te 系材料やモジュール化については、コマツのグループ会社でペルチェ素子とモジュールおよび応用商品の製造販売で、40 年以上の実績がある小松エレクトロニクス（株）の知見と経験を活かすことができました。

これらの熱電発電モジュールを用い、実際の排熱に対応する発電システムの開発には、システムの高効率化を期待できる、沸騰・凝縮型のシステムの開発を目指しました。また平行して低価格が期待できるシステムの開発も進めました。

■開発目標

本プロジェクトにおいてコマツが受け持つ最終目標および 2004 年度末の中間目標と成果を下記に示します。

	中間目標 2004 年度末	最終目標 2006 年度末
モジュールの 熱電変換効率	12% （達成）	15%目処
システムの 熱交換器効率	58% （達成）	77%
システム効率	3.4% （達成）	4.3%
システムの 発電出力	1kW 級 （達成）	3kW 級

ここで、モジュールの熱電変換効率とはカスケード型モジュールを示し、低温側が 30℃、高温側が 580℃の際のモジュールを通過する熱量の電気エネルギーに変換する効率を示しています。この中間評価時に達成した 12%は、世界最高の変換効率であります。

またシステム効率とはシステムに入る排気ガスの熱量を電気エネルギーに変換する効率を示しており、システムの熱交換器効率と熱電変換効率の掛け算となります。システム効率向上には、適正な熱交換器設計と熱電モジュールの配置さらにトータルの熱抵抗の低減が必要となります。中間評価では過去の熱電変換システムでの実績値を大幅に向上させた、システム効率 3.4%を達成することができました。

■開発内容

ここから主な開発内容と成果について、熱電材料とモジュールの開発、およびシステムの開発を紹介します。

●Bi-Te 系モジュールの開発

まず～300℃の領域で使用する Bi-Te 系材料について紹介します。本来、ペルチェ素子用に使用されていたこの材料の性能ピークは室温付近にあります。従ってそのまま、～300℃の

領域で発電に適用すると熱電変換効率は 4%程度にしかなりません。コマツは効率向上のために性能ピークを高温側へシフトさせる手段として、材料組成と材料製造方法の改善を多岐に進めました。併せてモジュール構造の適正設計を行い、約 2 年の間に熱電変換効率を 8.2%に上げる事ができました。その後、耐久性の改善を行い、実用型 Bi-Te 系発電モジュールを開発しました。図 1 は、その 1 例ですが、この 45mm□のモジュールは、高温側温度 250℃、低温側温度 30℃の時に 20W 以上発電することが出来、これは発電密度でいえば、1W/cm^{2}程度となり、太陽電池の約 100 倍に相当する高い発電密度となります。

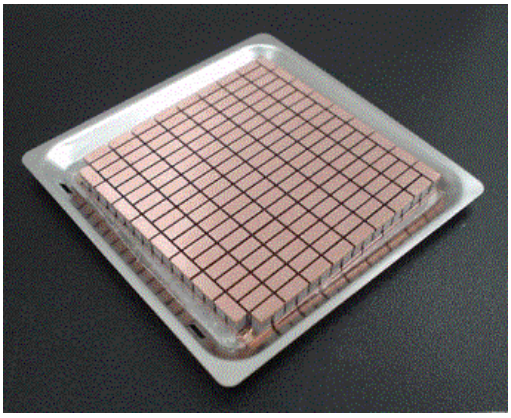


図 1　BiTe 発電モジュール

●シリサイド系モジュールの開発

次に 300～500℃領域の発電材料である、シリサイド系材料とモジュールについて紹介します。コマツは独自に、種々の材料の検討を進めていましたが、環境へのやさしさと低コスト化の可能性の点からシリサイド系材料が将来の主要な実用材料となると判断し、課題である性能向上を目指すことにしました。

当初は熱電変換効率が 2%に満たない性能でしたが、p 型に使用する Mn-Si 系では主に製造方法の改善を、n 型に使用する Mg-Si 系材料については組成の適正化を図ることで性能改善が進み、8%を超える変換効率が得られるようになりました。現在は、Bi-Te 系に続く実用型モジュール開発を進めており、主に耐久性の改善を実施しています。図 2 は、そのシリサイド系モジュールの外観の一例です。シリサイド系材料は、将来的にはトラックや建設機械等の移動体向け発電モジュールとして使用されていくと予測しています。

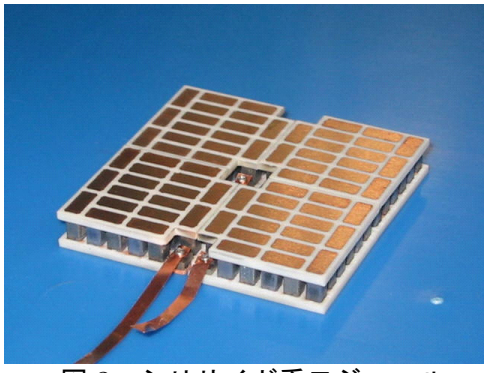


図 2　シリサイド系モジュール

●カスケードモジュールの開発

次に、Bi-Te 系熱電モジュールとシリサイド系熱電モジュールを上下段に組合わせたカスケード型モジュールについて紹介します。

これは、高温電極温度が 580℃から低温電極温度が 30℃までの熱の流れがある時に、高温から 300℃までの領域をシリサイド系モジュールで発電し、300℃から室温までの領域を Bi-Te 系モジュールで発電させる事により、全体で高い発電効率が得られるよう工夫したものです。図 3 は、開発したカスケード型モジュールの外観ですが、このタイプのモジュールで、世界最高の熱電変換効率、12.1%（ΔT=520K）を達成しました。

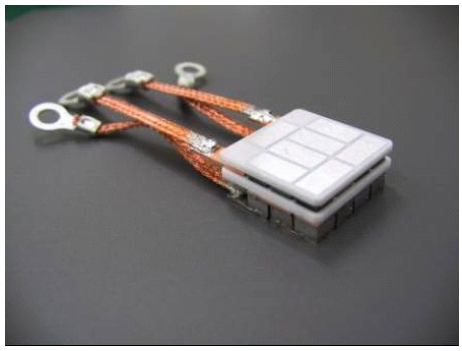


図 3　カスケード型モジュール

●耐久試験装置

このようにコマツは高温域のシリサイド系モジュール、低温域の Bi-Te 系モジュール、さらにカスケード型モジュールと多様な発電モジュールを開発してきました。現在コマツが実施しているモジュールの耐久試験装置を紹介します。この装置はモジュールの状態で、大気あるいは窒素ガス雰囲気の下、高低温保持試験、熱サイクル試験が実施できるもので、4 個のモジュールが各々独立して実施することが出来ます。コマツはこの試験装置を 2 台導入し、まさに昼夜休まず試験を実施している状況です。

図 4　耐久試験装置

●熱電発電システムの開発

熱電発電システムは、高温熱源から熱電発電モジュールの高温側表面に熱を与え、また低温側面より熱を奪う機能を要求されます。そのため吸熱用の熱交換器と、水冷や空冷の放熱用の熱交換器を、熱電モジュールを介し近接して設置する構造となります。ここではモジュールと熱交換器間の接触熱抵抗の低減、熱交換器間の断熱方法などが性能と信頼性に大きく影響します。またコージェネレーションへの適用のように排ガスからの吸熱を行う際は、排ガス中のススや腐食成分などが熱電発電モジュールに接触しないように工夫する必要があります。

●沸騰・凝縮型熱交換器

従来、熱電発電システムに使われていた吸熱部は排ガスからフィンで熱を集めモジュールに熱伝達させ冷却部は水冷したものが一般的でした。しかしこの方式では排ガスの熱量を効率的にモジュールに伝達することができず、熱交換器効率は50%以下という状況でした。コマツはこの課題を解決するために沸騰・凝縮型という革新的な方法を利用することとしました。この方法は熱媒の潜熱を熱伝達に利用するもので熱交換器効率の大幅な向上が可能となります。図 5 に概念図を示します。

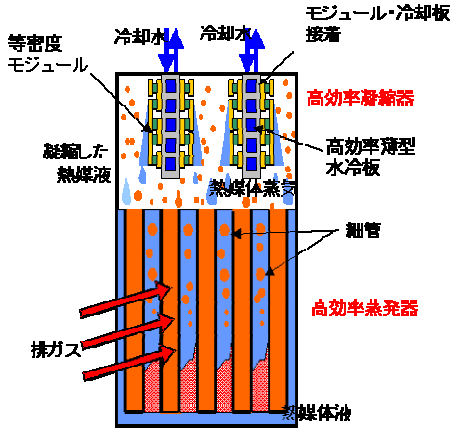


図 5　沸騰・凝縮型熱交換

沸騰・凝縮型は蒸発器と凝縮器の 2 つの部分から構成されます。排ガス通過部に設置された蒸発器には熱媒を充填した細い蒸発管が多数配置され、ここで熱媒が沸騰し蒸気となり上部にある凝縮器に移動します。凝縮器では水冷板上に設置された熱電モジュールがあり、モジュールの高温側電極上に到達した熱媒蒸気は、熱をモジュールに移動させ、自らは凝縮して液滴となり蒸発器へ戻り、再び熱をもらい蒸発します。この方法により、熱電モジュールの高温側温度は排ガスの流量や温度の影響を受けず、常に均一に同じ温度に維持されます。これにより高効率でコンパクトなシステムが可能となります。

蒸発器の開発では、上流から下流まで均一熱流束になるよう蒸発管の径と密度を最適設計しました。凝縮器については、熱媒蒸気が接触し凝縮液が付着する熱電モジュールの銅電極面の形状適正化、モジュール接触面や水冷板などの熱抵抗低減を実施しました。これらの改善により、開発当初の熱抵抗を2004 年度末までに、約 1/10 にまで低減することができました。

開発した蒸発器と凝縮器および Bi-Te 系熱電モジュールを用い、1kW 級の熱電発電システムを試作しました。図 6 にその外観を示します。性能評価試験はディーゼルエンジン排ガスを想定した熱風風洞試験装置に装着して実施しました。熱風風洞試験装置は空気をヒーター加熱し、流量 3～20m³/分、温度は～800℃の環境を作ることができます。性能評価試験の結果、空気温度 500℃で熱交換器効率 60.5%、システム効率 3.4%が得られました。この値は従来の熱電変換システムでの開発事例に比べ 2 倍以上の値であり、実用化へ一歩近づいたと考えられます。現在は、3kW 級の発電システムを試作しており、熱交換器効率 77%以上、システム効率 4.3%を、本年度中に達成する計画です。

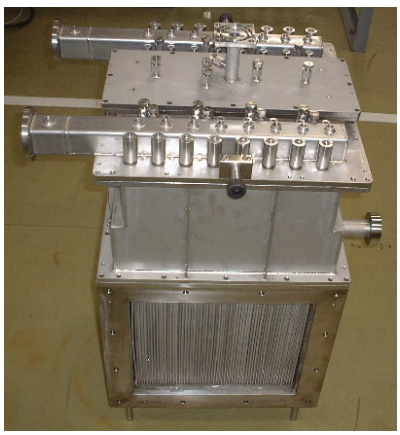


図 6　試作した 1kW 級発電システム

●プレートフィン方式熱電発電システム

ところで熱電変換システムは、熱伝達システムと発電モジュールが熱的に機械的に多数集合化したシステムとなります。熱伝達システムは単相流熱伝達を用いたプレートフィン方式と流体の相変化を利用した沸騰・凝縮型に大きく分けられます。熱電変換システムの効率、コスト、メンテナンス性および信頼性などの基本的性能は、この熱伝達システムと熱電モジュールとの結合方法や集合化方法等によって大きく影響を受けます。

相変化を利用する沸騰・凝縮型では、熱交換器の高効率化が可能になるほかに蒸発部と熱電変換部が分離可能なため、排気ダクトへの装着やシステムのメンテナンスなどがしやすくなり、また複数箇所の低密度蒸気を集めて、小面積で高効率に集中発電ができるなどの利点がありますが、熱媒体とそれを囲う密閉容器が必要となるために装置価格が高めになります。

一方、プレートフィン方式では、熱交換器効率はやや低くなりますが、構造がシンプルで部品も安価なため、低価格のシステムが可能となります。コマツは沸騰・凝縮型とプレートフィン方式は、各々の利点と規模の関係から用途によって適正な補完関係になると考え、プレートフィン方式の熱電発電システムの開発を 2005 年度より着手しました。

図 7 は開発した 1kW 級プレートフィン方式熱電発電システムの外観です。現在、コマツの研究所で稼動しているデイーゼルエンジンコージェネレーションシステムに装着し実機試験を実施しています。実験開始当初は、ススに関係する問題が発生しましたが改善を重ね、現在ではほぼ安定した発電結果が得られています。

図 7 プレートフィン方式熱電発電システム

■期待効果

エネルギー事情がますます厳しくなる世界そして日本において優れた省エネルギー技術の開発が望まれています。熱電発電技術は排熱を直接電気に変換する技術であり、まさに省エネルギーそして二酸化炭素削減に貢献できる技術です。たとえ数パーセントの排熱の回収でも、広く普及することにより、全体で大きな成果が期待できます。例えば日本で毎年新車登録されている自動車の 10%に熱電発電システムが搭載されると、年間約 10 万トンの二酸化炭素削減ができます。さらにこの技術が日本において実用化され世界に向けて展開されることでさらに大きく貢献できると考えられます。

■将来展望

本プロジェクトでは、デイーゼルエンジン利用のコージェネレーションを適用候補として開発を進めてきました。しかし弊社の建設機械を始め、トラックさらに自動車などへの搭載に向け実用化を進めて行きたいと考えています。価格についても量産時には省エネルギー効果で充分採算が取れるレベルに下がると予測しています。ただし普及過程には太陽電池の際のような補助制度が必要と考えています。そのための活動についても今後努力して行きたいと考えています。

■まとめ

2002 年度から開始した本プロジェクトは、2004 年度の中間目標であるカスケードモジュールで変換効率 12%、発電システムのシステム効率 3.4%、という世界最高値を達成しました。現在は実用化に向け、耐久性、コスト低減に重点を移して開発を進めています。

熱電発電システムは排ガス等の棄てている熱エネルギーを直接電気に変換し、燃料も消費せず、小規模でも効率を落とさず、可動部が無いため高信頼性が期待できる技術です。コージェネレーション、トラックや建設機械、そして自動車への適用によって、日本の省エネルギー、CO_2 削減に貢献していく所存です。

５．　抵抗加熱式工業炉用熱電変換システムの開発

上松　和夫　Kazuo UEMATSU
石川島播磨重工業㈱
kazuo_uematsu@ihi.co.jp

Key Words：熱電変換、熱電発電、ふく射伝熱、工業炉、排熱発電

■ねらい

抵抗加熱式工業炉は比較的小規模な装置であり、各炉から排出される熱量はそれほど多くはありません。しかも分散設置されているため、大規模な排熱源の場合のような効率的な排熱回収方法は開発されていません。しかしながら国内には相当数が稼動中であり、効率的な排熱回収技術の開発が望まれています。このような工業炉での排熱回収には、小規模でも高い性能が期待できる熱電発電システムが適しています。そこで弊社は新しい考え方の熱電変換システムを提案し、その技術実証と実用化を目標に要素技術の開発を進めています。

■提案する熱電変換システムの特徴

●抵抗加熱式工業炉

適用を検討している抵抗加熱式工業炉の内部構造の一例を図 1 に示します。この方式の工業炉は、通常、熱処理や焼結などに用いられる。ヒーターを内蔵する高温度の断熱炉が中央部にあり、真空の空間を介して水冷ジャケットを備えた真空壁が囲う構造になっています。この断熱炉壁から外側へ熱放射によって漏れ出る熱の回収を考えます。

●輻射受熱方式

そのために水冷ジャケットの内壁に熱電変換モジュールを取り付けます。この方式には下記のような特長があります。

1) 高温部電極は絶縁の必要がなく、断熱炉壁からの放熱により直接加熱される。つまりふく射受熱のため、通常方式に比して高温側の熱抵抗損失が少なく、システム効率の改善が期待できます。
2) 熱変形の少ない冷却側が水冷ジャケットに固定され、温度変化の大きい高温側が機械的に拘束されていない。このためにモジュール内の熱応力が軽減され、システムの信頼性向上が期待できます。

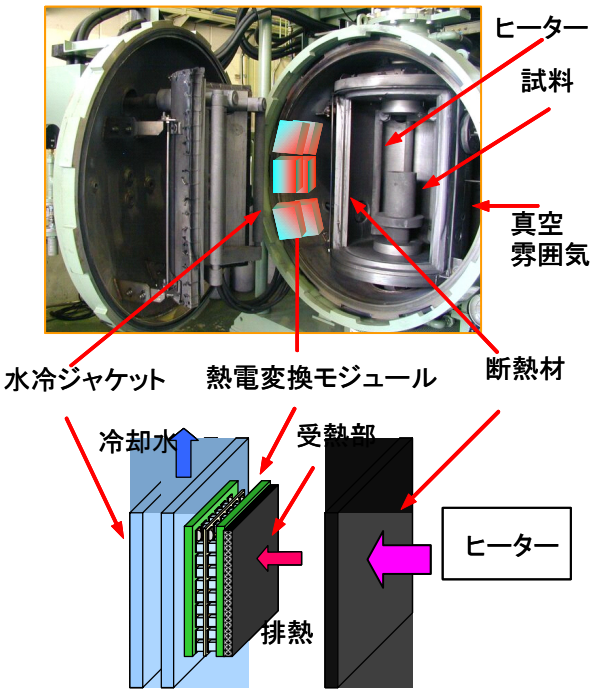


図 1　抵抗加熱式工業炉内部および
熱電変換モジュール設置例

■開発目標

このプロジェクトにおいて高効率の熱電モジュールが研究開発されます。それを用いて発電ユニットを構築する際に、熱抵抗などによる熱損失を抑え、モジュール固有の性能をいかに高く発現させるか、発現率【＝(ユニット効率)/(モジュール効率)】68%以上を実証することです。

炉の運用形態の検討から、試作する熱電変換ユニットの高温部温度を 400℃級と 600℃級に設定(冷却水温度は 30℃)しました。そして温度差 550K での目標発現率の達成と、400℃級ユニットによる熱電発電の模擬実証を目指します。

■開発内容

ここで熱電変換ユニットとは、皆様が通常手にする、熱電素子と電極と絶縁基板が一体となったモジュールに対して、さらにふく射受熱部と冷却部を加えて一体化した系を表します。このユニットを炉の内壁に並列配置し、電気配線処理を施す

ことでシステム化されていきます。従い、モジュールと水冷壁との間の熱抵抗軽減策の検討はもちろんのこと、受熱部の高性能化と信頼性の評価、熱電発電ユニットの試作と発現率の評価、およびシステム化検討と模擬実証が主な開発内容です。

■熱電変換モジュール

先に設定した温度域に対して、低温側と高温側にそれぞれ性能の高い 2 種の熱電モジュールを重ねたカスケード型モジュールが使われます。弊社が提案する発電システムでは、高温側がスケルトン型で、一体化されたモジュールにおいてその特徴がフルに発揮されます。

我々はプロジェクト参加企業から供与されました 2 種の熱電モジュールを使い、以下に述べる開発研究を行いました。一つは図 2 に示す 400℃級（低温側；Bi-Te 系・高温側；Co-Sb 系）で、高温部がスケルトン型の一体化モジュールです。もう一つは低温側が Bi-Te 系、高温側はシリサイド系で構成される 600℃級で、分離されたカスケード型熱電モジュールです。

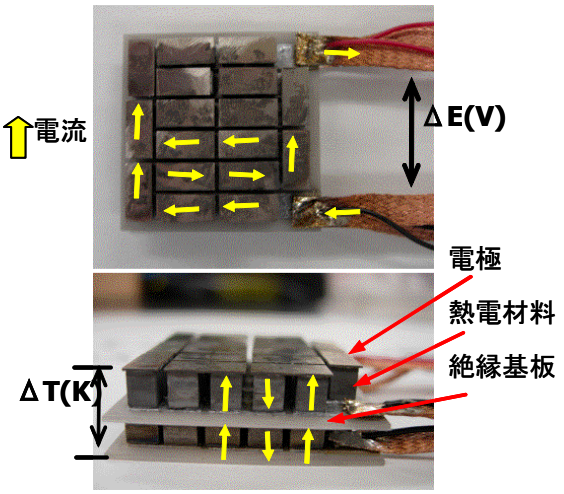


図 2　カスケード型熱電変換モジュール

■開発結果

●受熱効率の改善

モジュール高温側の電極を受熱体として併用し、その表面を黒化処理することで吸収率を高めました。まず通常モジュールの構造、材質、表面性状について、さらに塗膜の可能な材料との相性について検討し、その幾つかの組み合わせにおける吸収率の温度依存性を調べました。結果の一例を図 3 に示します。そして、炭化シリコン系の塗膜により、吸収率 90%以上を確保できることが確認できました。

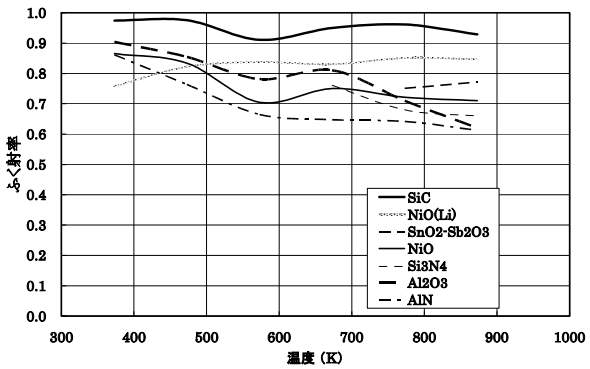


図3　各種材料のふく射率の温度依存性

●受熱部の信頼性検討

工業炉は概ね 1 回/日の運転であり、温度変化はかなり緩やかですが、塗膜が熱サイクルを受けた場合、母材との間で生じる熱膨張差に起因する熱応力による“剥がれ”が懸念されます。このため、塗膜の厚さや塗布方法の検討のもとに作製した模擬電極を用い、温度域は 400℃、約 1 サイクル/10～15 分の加速試験を行っています。黒化処理された模擬電極の温度変化の様子を図 4 に示します。

法定耐用年数から算出されるサイクル数を信頼性の目安のひとつとして、受熱部の熱サイクル試験を実施しています。真空中で、高温輻射体の温度を制御して、モジュール模擬電極に輻射による熱サイクルを与えます。図 4 は、この時の高温輻射体と電極の温度変化の様子です。そして図 5 は、この電極の最高値の温度履歴です。開始初期に少し変動していますが、ほぼ定常値を維持しており、塗膜処理を施した受熱部の状態は安定していることがわかります。

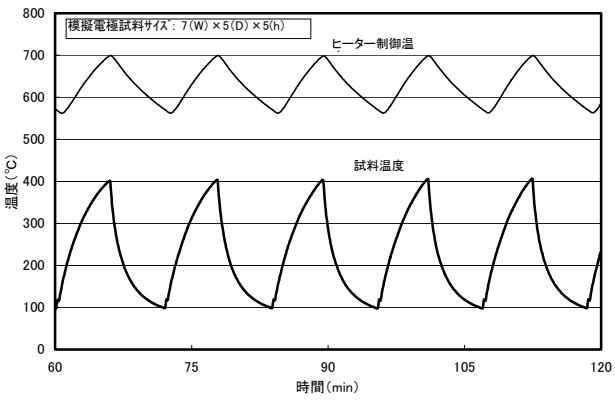


図 4　模擬電極の熱サイクル試験の温度変化

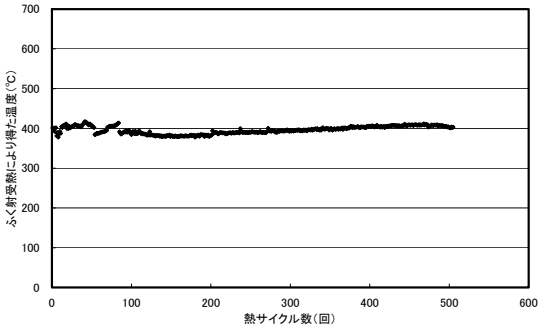


図 5　熱サイクル回数による塗膜処理した模擬電極の温度変化の様子

●熱電性能評価試験装置

抵抗加熱式工業炉の内部を模擬して試作した、熱電発電ユニットの性能評価装置を図 6 に示します。

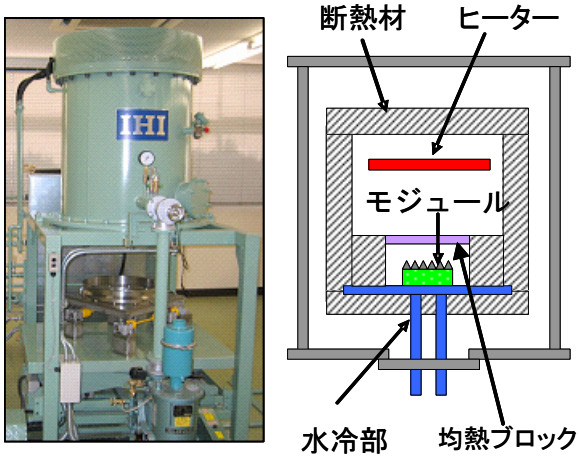


図 6　性能評価装置外観および内部概略

ヒーターからのふく射熱は、一旦均熱ブロックに吸収させたあと、供試体にふく射伝熱されます。以下に示す性能評価試験では、ユニット通過熱量は冷却水流量とその温度上昇量から算出しますが、均熱ブロック内の温度差からも求められ、熱計測の信頼性を高めています。そして、この通過熱量と発電量とから熱電発電ユニットの変換効率を求めます。

●400℃級ユニットの性能評価

図 2 に示しました熱電変換モジュール表面を塗膜処理して吸収率を高めます。低温側には柔軟性のある高熱伝導性パッドを挟み込むことで熱抵抗の低減化を図り、その低温側絶縁基板の端を押さえ込む方法で、水冷壁模擬の冷却板に取り付けます。側面や熱電素子の間には断熱材をあてがい、熱電変換モジュール両端の温度差(ΔT)をパラメーターとして発電性能を評価しました。結果を図 7 に示します。

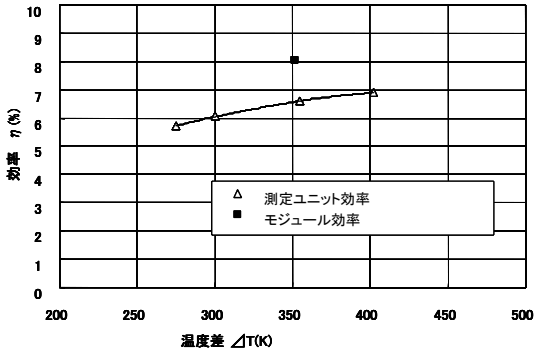


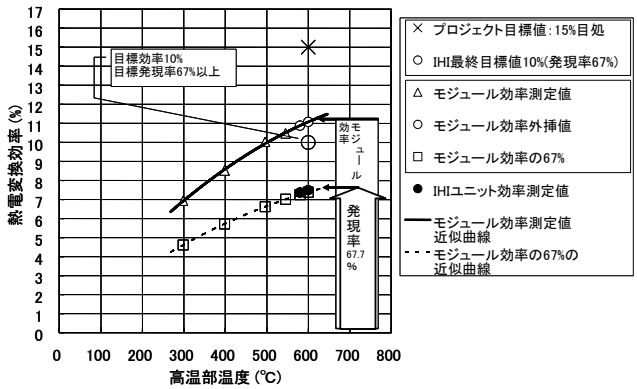
図 7　400℃級ユニットの効率

この図から明らかなように、温度差 350K において変換効率 6.59%、発現率にして 82%の高い値を得ることができました(モジュール効率 8.04%[1])。

●600℃級ユニットの性能評価

同様に、600℃で使用可能な熱電モジュールについて性能試験を実施しました。このモジュールは低温部と高温部が分離されています。塗膜処理を施した後、可能な限りに受熱面を広く確保しつつ、高温側中央を基点に、押さえ棒を使って冷却板に取り付けました。測定結果を図 8 に示します。ユニットの高温端温度 T_h＝600K にて発電効率 7.2% を得、目標とする温度差 ΔT＝550K にて発現率＞68%を得ることができました。

図 8　600℃級ユニットの効率



●模擬実証試験

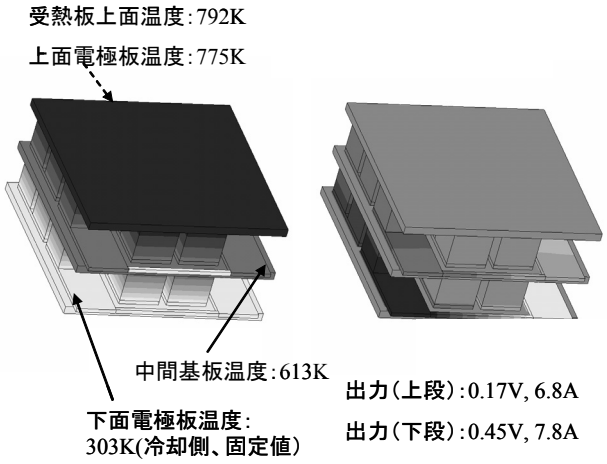
図 1 に示すように、実際に熱処理を行っている試験炉を用いた 400℃級模擬実証試験を計画しています。使用する熱電モジュールは、図 7 にそ

の性能を示した、分離型の 2 段カスケード型で、総数は10個、予定発電量は～30Wです。曲面状の水冷壁に、高温側中央を基点にして圧接により取り付ける必要があり、現在、慎重に準備を進めています。

■解析的検討

実炉への適応に際して、熱電ユニットを挿入することによる熱システムへの影響の評価や、より適したモジュール特性の選択など、熱評価は極めて重要である。この準備として、ゼーベック効果を含む電場解析と伝熱場解析の連成により、電位と温度の分布を評価する解析技術を開発しています。また、この解析結果を応力解析ツールと連携することでモジュールの応力評価ができます。先に述べ性能評価の実験データの分析から、より実際的な接触熱抵抗や電気抵抗値を組み込むなどして、これら解析精度の向上を図っています。

図 9 は、解析結果の一例を示しており、定常熱流束が高温側上面に入力されたときの、温度分布(a)と最大効率となる条件での電位分布および発電出力(b)を表しています。



(a) 温度分布図　　(b)電位分布図

図 9 解析結果の例

熱境界条件

① 上面からのみ熱流束負荷
② 下面温度一定
③ 側面方位断熱

■回収電力の利用

現状では、本システムにより最大電力 200kW 級の炉から数 kW 程度の電力回収が可能と考えています。その利用により、炉制御盤の表示灯や盤内冷却・除湿電源など、単独の炉システムでの消費電力低減が見込めます。また、複数の炉から回収した電力を集約することで、工場ユーティリティーとしての利用も可能と考えられます。また停電時など、安全なシステムダウンのための補助電源として役立つと考えています。

■まとめ

ふく射受熱型熱電発電技術を、抵抗加熱式工業炉を模擬した試験装置を用いて評価しました。その結果、熱電変換効率として7.0%の高い値を得ることができました。実用化に際して、高性能モジュールの発電能力をいかに発現させるか。この課題に対して、発現率として 68%以上を確認しました。スケルトン型の一体化熱電モジュールにおいては、さらに高い発現率が得られ、本技術の有効性を示すことができました。

参考文献

1)熱電フォーラム 2005、P13-14

６．　100～150℃の温度域の排熱を想定した熱電変換システムの開発

日野　武久　　Takehisa HINO
中谷　祐ニ郎　Yujiro NAKATANI
佐々木　恵一　　Keiichi SASAKI
新藤　尊彦　　Takahiko SHINDO
伊藤　義康　　Yoshiyasu ITO
株式会社　東芝
takehisa.hino@toshiba.co.jp

Key Words：熱電変換、熱電発電、社会インフラシステム、ビスマステルル

■ねらい

一般に150℃以下の低温排熱は、回収が困難もしくは回収コストが割高になる等の理由から、多くは使用されずに捨てられています。

しかしながら低温の排熱は一般家庭を含めて至るところに存在し、その回収が可能になれば、二酸化炭素削減への効果は計り知れないものがあります。そこで150℃以下の比較的低温での排熱回収を目的として熱電変換システムの開発を行ないました。

■技術の特長

(1) 社会インフラシステム機器をターゲットとし、その排熱温度である 100～150℃を高温熱源温度と設定しました。またこれら機器の多くは空冷であるため、冷却部を空冷としたシステムを検討しました。
(2) 150℃以下の温度域にて良好な特性を示すビスマス･テルル系熱電変換材料を選択し、一方向凝固法，押出し加工をすることで、熱電変換効率の向上を図りました。
(3) モジュール製造時の材料ロスや工程削減のため、材料形状を工夫しました。
(4) 実条件を模擬した信頼性評価装置を開発し、モジュールの寿命評価を実施しました。

■開発目標

本プロジェクトでは低温排熱の有効利用を目指し、100～150℃の排熱を熱源とした熱電発電システム製作のための実用化技術の確立を目指しました。具体的には、低温排熱を効率的に電気に変換する高効率熱電変換モジュールの開発、電気および熱的にロスのない熱電変換システムの設計技術、長期の使用においても信頼性の高いモジュールを提供するためのモジュールの信頼性評価技術の開発を行いました。

■熱電変換システムの開発

変圧器や圧縮機などの社会インフラ機器への適用を想定していますが、特に「高効率熱電変換システムの開発」プロジェクトでは、油冷式変圧器をターゲットに開発を進めました。図 1 に変圧器の概略を示します。変圧器は本体タンクとラジエータ部分から構成されています。電圧、電流の変換時に本体タンク内のコイルの抵抗によって、ジュール熱が発生します。この熱は熱輸送媒体（油）によってラジエータ部に輸送され放熱されています。ラジエータは底部に放熱を促進するためのファンが設置されており、そのファンにより強制冷却がなされています。

本プロジェクトでは、変圧器本体部に熱電変換モジュールを複数個組み合わせた熱電変換ユニットを多数設置し、変圧器本体の発熱とラジエータファンによる吸気による冷却により、熱電変換モジュール上下面により温度差をもうけ、発電するシステムを検討しました（図 2）。

●小型システム

システムの検討は数個のモジュールを用いた小型システムにて基礎的データを収集し、そのデータを大型システムの設計に反映するといった手順で実施しています。

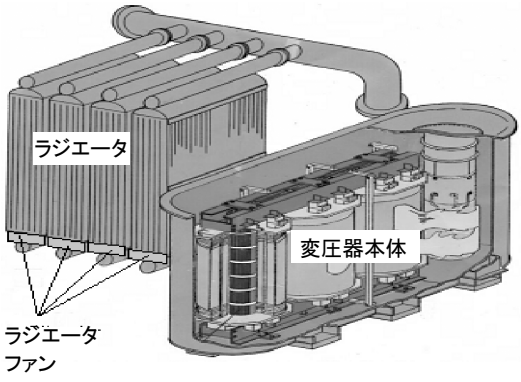


図 1　　油冷式変圧器

小型システムの構成を図 3 に示します。小型システムは変圧器鋼板を模擬したヒータを組み込んだ鋼板の上に熱伝導グリース等の熱伝導媒体を介して熱電変換モジュールを縦2×横3個の配列で設置し、さらにその上部に熱伝導グリースを介して強制冷却フィン形状のヒートシンクが設置されています。ヒートシンクと変圧器表面鋼板を模擬した鋼板との間は断熱ボルトで締結しています。なお大型システムの構成は小型システムと同様であり、単純にスケールアップしたものです。

●小型システムによる検討結果

まず小型システムをもちいて、①モジュール高さのばらつき、②熱伝導媒体の材質と厚さ、③ヒートシンクのフィン形状をパラメータとして発電試験を実施しました。

その結果、①モジュール高さのばらつきは、モジュールへの熱流の不均一化の原因となり、効率低下を招く、②熱伝導媒体は、上述のモジュール高さのばらつきを吸収するクッションの役割はあるものの、可能な限り薄く、熱伝導率が高い熱伝導グリースを使用することが好ましいことを確認しました。

ヒートシンクのフィン形状として検討初期はフィン表面が平滑なものを選択していました。しかし、フィン表面に突起（以下、乱流促進体と示します）をつけることで、冷却空気の流れが乱れ、かつ表面

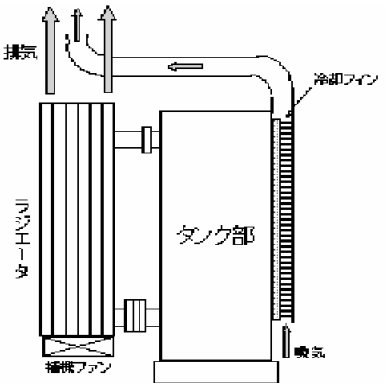


図 2　検討した熱電変換システム

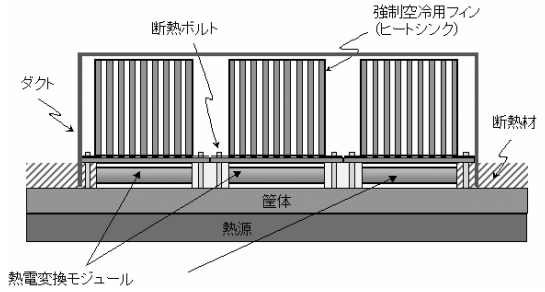


図 3　小型システム構成

積の増大により伝熱促進が狙えるため、数種のフィン形状を設計し評価を実施しました。また、当初、高温端温度は 130℃と低いため、①ヒートシンクと鋼板間の締結ネジを通じた熱伝導、②鋼板からヒートシンク、システム側面から空気のふく射による熱の逃げの影響は少ないと予想していましたが、試験の結果、これらの影響も無視できないことが明らかとなりました。

以上の結果より、①モジュール高さの均一化、②高熱伝導グリースの採用（メーカーカタログ値 8.0W/m･K）、③突起状乱流促進体のついたヒートシンクの採用、④締結ネジを鋼製ネジ＋テフロンワッシャから断熱性能が高い FRP（繊維強化プラスチック）製ボルトへの変更、⑤装置側面の断熱の強化を行いました。

これら施策を行った小型システムの代表的な効率測定結果を図 4 に示します。熱源温度を 303K、大気温度を293Kとしたときモジュール高温端と低温端の両電極間の温度差は 83K となり、モジュール推定効率 3.6%に対し、システム効率 2.2%を得ることができました。

●大型システム

小型システムでの効率向上と平行し変圧器を模擬したモックアップを製作し、実用化検証を進めています。大型システムでは、熱源部 130℃と室温 25℃の条件にて 100W の排熱回収を目標としています。大型システムの外観と熱電モジュール設置部の拡大写真を図 5 に示します。熱電モジュール設置部は縦 50cm×横 50cm の寸法であり、上述の小型システム6セットから構成されています。現在、小型システムで得られた結果をこの大型システムに適用し、評価を実施中です。

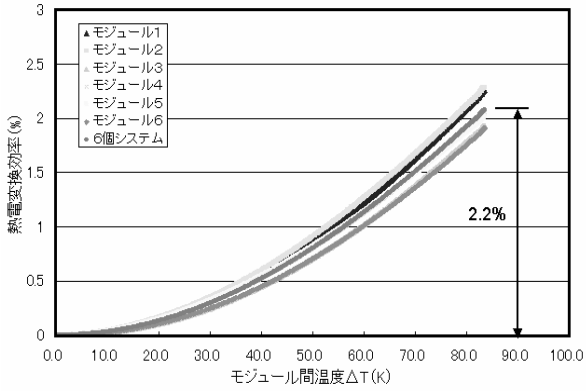


図 4　小型システムを用いたシステム効率測定結果

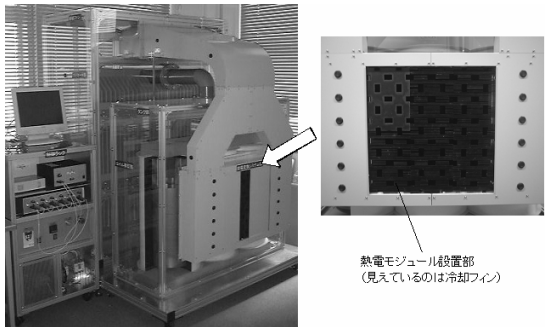


図 5　大型システムと熱電変換モジュール設置部

■熱電変換モジュールの開発

ビスマス･テルル系熱電変換材料では特定の結晶方位が良好な材料特性を示します。そこでブリッジマン法と塑性加工により結晶方位の制御を試みました。

●ブリッジマン法

ブリッジマン法は結晶を温度勾配下でゆっくり成長させることにより、上下の熱流に沿って結晶を成長させる手法です。ビスマス･テルル系熱電変換材料の場合、この結晶成長方位が良好な特性を示す方位と一致します。そのため、ブリッジマン法などの溶製技術を利用して作成した材料は高い性能を示します。さらに当社ではブリッジマン法に独自の精密鋳造技術を加え、種々の寸法の棒状材料を得る技術を開発しました。得られた棒状試験片の一例を図 6 に示します。一般に熱電変換材料はブロック状の材料を作製し、その後数回の切断によって 1～3mm 程度のサイコロ状に加工した素材によりモジュールを作製しますが、当社の開発した方法を用いれば、切断回数、切りしろともに少なくすることができ、大幅なコストダウンを図ることができます。

図 7 に上記ブリッジマン法により作成した材料を用いたモジュールの外観写真を示します。モジュールは、熱ロスが少なく、絶縁板による拘束力が小さくなるよう樹脂モールドで側方から保持するスケルトン形状としました。また 150℃以上の温度域においても、短時間は耐えられるよう、電極にはペルチェモジュールに良く見られる銅電極にはんだで接合する方法ではなく、モリブデンとアルミの 2 層溶射皮膜を採用しています。

●高温ピークシフト

通常ペルチェモジュールに使用される材料は室温にて特性のピークを示します。発電素子として使用する場合は、この特性のピークを高温側にずらす必要があります。そこでドーパント添加量の調整により、ピークの高温側へのシフトを試みました。

図 8 に高温端を 130℃、低温端を 30℃、温度差を 100℃としたときのブリッジマン法により作製した素材を用いたモジュールの代表的な特性図（電流-効率線図）を示します。現状、モジュール熱電変換効率は 3.6%の値が得られています。

●塑性加工

ブリッジマン法によりある程度結晶方向の制御は可能ですが、それでも材料長手方向と良好な特性を示す方向には十数度の傾きがでます。そこで、続いてこの傾きを押出し変形により修正することにより結晶方位の矯正を試みました。その結果、n 型材料の押出し変形後の性能指数が温度 303K で $3.0\times10^{-3}K^{-1}$ を超える材料を得ることができました。モジュール化時のロスを 20%程度と想定すると、モジュール最大効率は 4.2%と予想されます。

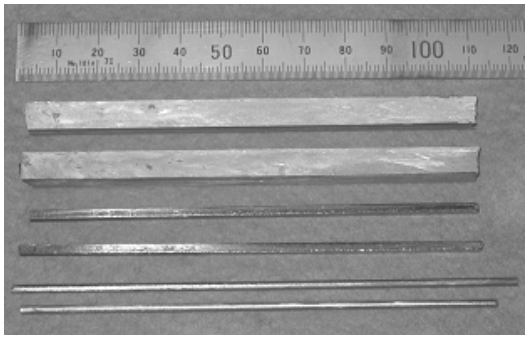


図 6　精密鋳造法にて作製した熱電変換材料

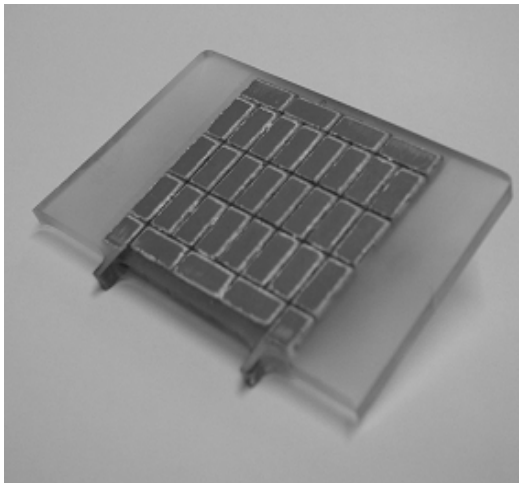


図 7　モジュール写真

■モジュール信頼性評価装置の開発

社会インフラシステムは製品寿命が長く、熱電変換システムを適用するためには長時間の寿命評価を行う必要があります。そこで、モジュールに実際かかる温度差を印加し熱サイクル試験が可能なモジュール信頼性評価装置（図 9）を開発し、モジュール寿命の評価を行っています。

■開発結果

現状、熱流の制御、ヒートシンクのフィン効率の向上により、熱電変換システムで出力 60W、効率で 2.2%の値が得られました。また熱電変換モジュールでは 3.6%の性能が得られています。

■ 期待効果

変圧器などの社会インフラシステムの排熱から得られた電力をファン駆動や制御システムの電力に利用することができます。

電力、化学、鉄鋼、窯業では 200℃以下の排熱が大量に存在し、年間の総排熱量は 5.1×10^{11}J になると予想されます[1)]。これら排熱の 1%を電気エネルギーに変換すると年間の CO_2 削減量は 3.45×10^{5}t と推測され、削減効果は計り知れないものがあります。

■将来展望

システムが大量生産によってコストが下がれば、上述のように 150℃以下の排熱は多量に存在し、かつ環境負荷軽減の面からも注目されていくと考えます。

■まとめ

現状、熱電変換システムでは出力 60W、効率 2.2%、熱電変換モジュールで 3.6%の性能が得られています。

システムでは冷却フィンの高性能化、熱ロスの低減、システムと合った熱電変換モジュールの設計等により 3.0%を目指していきます。また熱電変換モジュールについては塑性加工による結晶制御によって熱電変換材料の高効率化を図り、モジュール効率 4.2%を目指し最終目標の目処をつけていく予定です。

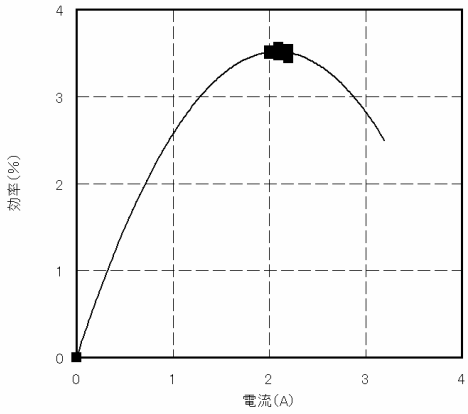


図 8　モジュール特性

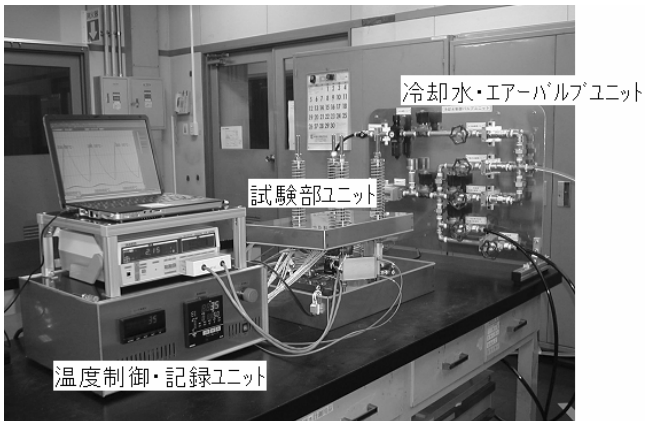


図 9　モジュール信頼性評価装置

参考文献

1）省エネルギーセンターホームページ
（http://www.eccj.or.jp/wasteheat）より試算

７．　民生用光源等排熱利用熱電変換素子及びシステムの開発

堀尾　裕磨　Yuma　HORIO
ヤマハ株式会社
yuma_horio@gmx.yamaha.com

Key Words：熱電変換、熱電発電、民生用、光源排熱利用、ビスマス-テルル、液体急冷法

■ねらい：民生用熱電変換への挑戦

皆さん、毎日の生活の中で「この機械（装置）から出る熱って熱いな」とか「パソコンが事務所にたくさんあると部屋が暑いな」などと気になったことがありませんか？特に夏場に道を歩いていて、エアコンの室外機から排出される熱風を浴びて、いやな思いをされたことがありませんか？これらの熱も立派なエネルギーであり、しかも捨てられているのです。確かに、これらのエネルギーは、一つ一つは低品位であり、少量です。しかし、同じような装置・機器から排出されるのであれば、製造段階でエネルギー変換や回収機能を内蔵しておくことによって、多くのエネルギーを有効利用できるのではないでしょうか？これを実現するためには、熱電変換材料の高性能化という単純な課題のクリアだけでは全く不十分です。どのように熱エネルギーを回収し、何のためにエネルギーを使うのか、さらに 21 世紀の世の中において、このような挑戦がいかに重要であるかを皆さんに実感していただくことがも重要であると考えます。

熱電（変換）材料は熱エネルギーを電気に変換する機能を有するため、近年の京都議定書に見られる二酸化炭素問題の対策としての熱エネルギー利用の観点から注目が集まっています。私たちの身の回りにある熱を利用しようとすると、熱いといっても数十℃から 100℃、高温でも 200℃から300℃くらいのものと考えられます。この温度領域で性能を発揮できる熱電材料はビスマステルル系半導体材料です。本研究開発では、民生用熱電変換用途にビスマステルル系材料を適応するための最適化に重点をおいて開発を行いました。

素子化（熱電変換モジュール化）技術としては、ペルチェ素子（電子冷却素子）と同様のインフラが利用できるため量産化への移行が比較的容易ではないかと期待されています。ただし、信頼性試験の評価項目及び検査項目は、ユーザーとの十分な協議・検証が必要であり、モジュール構造、はんだ材料や部材の検証が再度必要になると考えます。

研究開発された熱電材料・熱電変換モジュールを搭載する民生用製品の対象として、今回、まずは、プロジェクター等の光源排熱の利用に着目し試作検証を行いました。

■キーとなる技術の特長

(1)熱電材料とプロセス

室温近傍において高い性能指数(Z)を有するビスマステルル系の熱電材料を選択しました。基本組成は$(Bi,Sb)_2(Te,Se)_3$ です。ヤマハ独自の材料プロセス（液体急冷法＋特殊固化成形法）を用いて作製しました。量産時に性能ばらつきの要因となるハロゲン化合物は一切使用しません。

(2)熱電変換ユニット

高輝度光源（例えばプロジェクションシステム用光源）からの排熱を有効に回収し、熱電変換モジュールに集熱するために、アルミ合金製レフクタを試作しました。交換性、放熱性、熱電変換モジュールの取り付け容易性を向上させました。

(3)プロジェクションシステム

開発された熱電材料、熱電変換モジュール及びユニットを搭載したプロジェクターを試作しました。現在のユーザーの構想に必ずしもマッチングしない場合でも、熱電変換による排熱利用の具体例としてわかりやすいものを試作しました。

■開発目標

熱電変換システムが民生用品の筐体内に搭載されることを想定して、熱電変換モジュールの低温側（T_c）が 50℃、高温側（T_h）が 150℃（温度差（ΔT=100℃））または 200℃（ΔT=150℃）の条件を設定しました。この場合、モジュール変換効率（ηm)とシステム変換効率（ηs）に対して以下の数値をプロジェクト目標としました。

ηm＝3.6%、ηs＝3.2%　（ΔT＝100℃）
ηm＝5.3%、ηs＝4.5%　（ΔT＝150℃）
（いづれも、T_c=50℃とする）

■開発内容

(1)熱電材料の最適化

同じビスマステルル系材料でも、ペルチェ素

子の用途に最適な性能と熱電変換素子(熱電発電)の用途に最適な特性とは異なります。具体的には、性能指数(Z)の温度依存性を、素子の使用温度範囲の平均値において最大となるように、特性を温度シフトさせます。変化させる条件は組成(成分)はもちろん、ミクロ組織、結晶配向、結晶粒径、結晶粒界、粒界の清浄性、キャリヤ濃度、キャリヤ移動度など多岐に及びます。

⑵熱電変換モジュールの開発

熱電変換モジュールの設計には、設置条件から規制される内部抵抗、モジュールそのものの熱伝導率、付与される温度差、さらに構造信頼性設計等を考慮します。

⑶システムの開発

システム開発においては、光源から捨てられている熱を効率良く回収すること、熱電変換モジュールを通過した熱をいかに効率よく放熱して温度差をつけるかがポイントです。このため、ランプ光源のガラスレフレクタにフィットする吸熱部材や、さらにレフレクタ部材そのもののアルミニウム合金化による軽量化及び高熱伝導率化を試みました。

■開発結果

⑴熱電材料開発結果

材料開発においては、性能を向上させるために結晶粒の大きさを小さくすること(微細化)、結晶の向きを揃える(配向)こと、粒界をきれいにすること(清浄化)の点に開発方針を絞りました。また、熱電変換素子に適した性能(特性)にするために、温度依存性を最適化しました。本研究において開発した材料は、図 1 に示すように、微細な結晶粒を有し、結晶方位が 1 方向に揃っています。このことは、熱伝導率(κ)及び電気抵抗値(ρ)の低減に貢献し、高い性能指数(Z)を得るために非常に有効です。

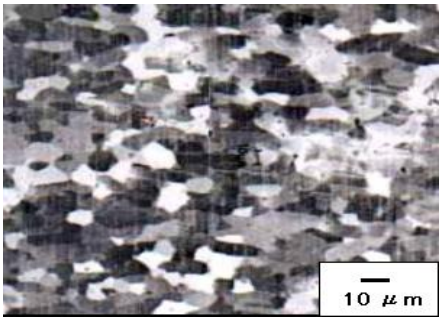


図 1　熱電材料のミクロ組織

図 1 に、(0001)面に対する極点図を示します。この図も、結晶の方位が一方向に揃って(配向して)いることを示しています。図 3 に、n 型材料における、Z の温度依存性を示す。組成とドーパント量制御により、Z の温度ピークシフトが実現されていることが確認されました。開発の結果、熱電材料の性能指数(Z)として、p,n 型ともに、50℃(323 K)から 200℃(473K)の温度域平均値で P 型で 2.4×10^{-3} K^{-1}以上、n 型で 2.5×10^{-3} K^{-1}以上の値が得られました。この性能は、モジュール作製にこの材料を使用した場合に従来に無かった高い発電性能が期待できます。

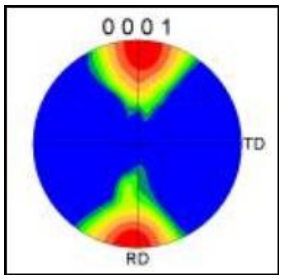


図 2　(0001)面の極点図例

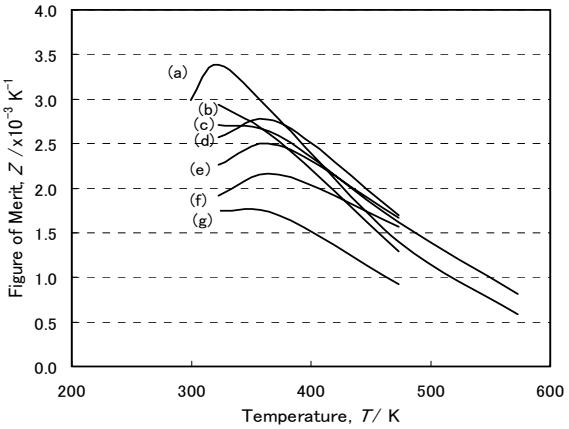


図 3　n 型熱電材料特性の温度依存性

⑵熱電変換モジュールの開発結果

光源排熱利用のためのモジュール性能の最適化設計技術を用いて、独自の高精度・高密度実装を応用して、熱電変換モジュールを試作しました。チップ接合用には、耐熱性と信頼性向上のために Au-Sn 系はんだを使用しました。実用化のためには高い信頼性が要求されます。本開発材料を用いて試作した熱電変換モジュールの外観を図 4(14mm×14mm)に示します。基板には、アルミナを使用していますが、使用条件によっては窒化アルミの使用も可能です。

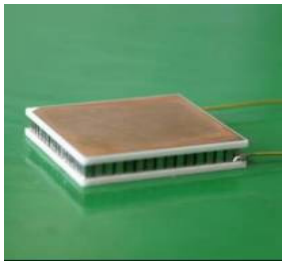


図 4　熱電変換モジュール外観

さらに図 5 に、前述の 14mm×14mm と並べて 28mm×28mm、40mm×40mm 角の試作モジュールの外観を示します。

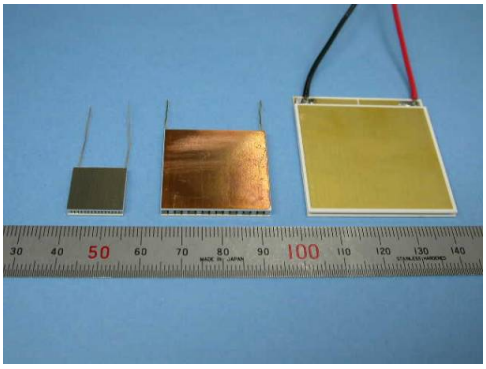


図 5　熱電変換モジュールの外観

次にモジュールの性能評価結果を示します。14mm×14mm サイズの熱電変換モジュールの特性を、図 6 及び 7 に示します。開放電圧は 8.18 V、最大電流値は 0.60 A、最大発電力は 1.24 W でした。さらに、14mm 角サイズの熱電変換モジュールの変換効率（η m）の値を図6に示します。T_c＝50℃（323K）、T_h＝200℃（473 K）（ΔT＝150K）において η m＝5.7％、T_c＝30℃（303K）、T_h＝180℃（453K）（ΔT＝150K）において η m＝5.8％の値が得られており、これは世界最高水準の変換効率です。また、この温度条件は、プロジェクターランプのレフレクターからの熱回収及び熱電変換を想定しており、実用的観点からも有効な性能であると判断できます。なお、モジュール性能評価として変換効率（η m）に対して、産業技術総合技術研究所における測定値との相関を取り確認しました。

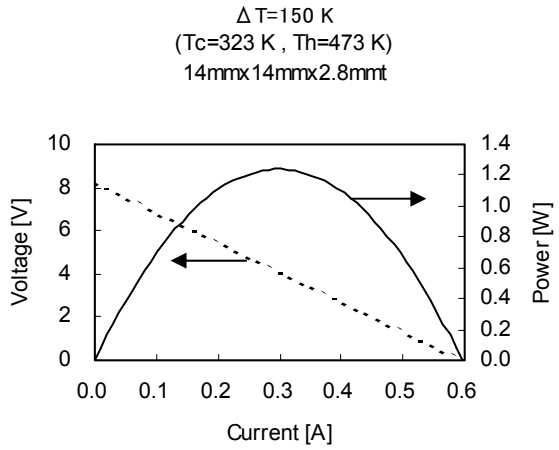


図 6　14㎜ 角モジュールの特性

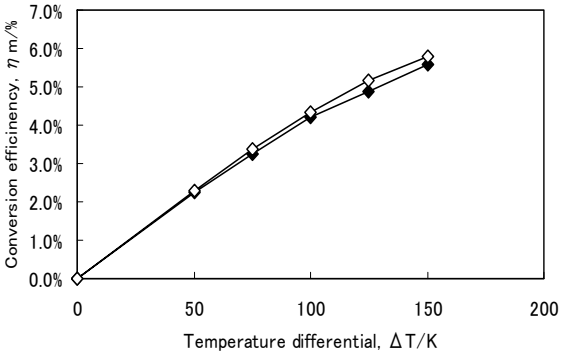


図 7　モジュール変換効率（η m）
（ΔT-150℃）
（◇：T_c＝30℃、◆：T_c＝50℃）

(3)プロジェクター光源排熱利用熱電変換ユニットの開発結果

本研究において開発した熱電変換モジュールを使用して「光源排熱利用熱電変換ユニット」を試作し、これを実際のプロジェクターシステムに搭載しました。光源からの排熱を熱電変換して得られた電力を、筐体内において冷却用ファンの駆動に利用できることを確認しました。

図 8 に、従来のガラス製レフレクタから得られる熱を利用する場合の熱電変換ユニットの概念図を示します。発生した電力の利用法例として、冷却ファン駆動の様子を示しています。さらに図 9 には熱電変換ユニットを実際に搭載した「試作プロジェクター」の外観を示します。開発した熱電変換ユニットにより発生した電力は、同一筐体内において、冷却用ファンの駆動電力として利用され、電源スイッチのオフ後にも、90 秒以上のファン駆動が確認されました。この結果は、消費電力の低減のみならず、システムの利便性向上にも貢献すると考えられます。

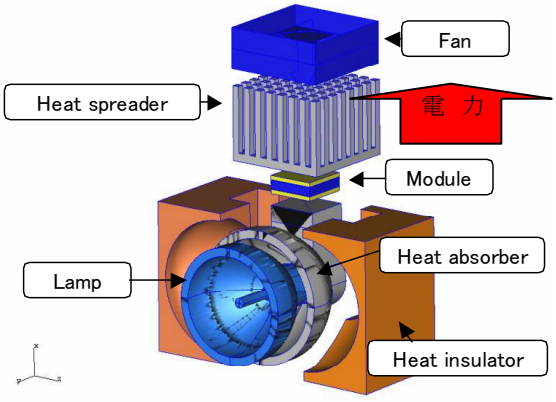


図 8　熱電変換ユニット概念図

図 9　試作プロジェクター外観

光源から熱電変換素子を通過した熱を、ヒートパイプを利用して光源から離れた位置まで誘導するコンセプトも考えました。筐体内の排熱設計の自由度を向上させるのが狙いです。このコンセプトの元に試作したプロジェクターの外観図を、図 10 に示します。ビューポートから確認されるファンは、ランプ光源とは異なった位置に設置されております。すなわち、他の電子部品や基板を同時に冷却できるため、ファンの総数を減らせる可能性が出てきます。

図 10　試作プロジェクターの外観

当然のことながら熱電変換ユニットから発生する電力は、ファン駆動以外の用途にも活用できます。最近は、高性能の 2 次電池やキャパシターが開発されており、これらと組み合わせることも可能で利用価値が向上すると考えます。図 11 には、電力利用回路の例を示します。熱電変換モジュールから発生した電力を、直接利用する経路と、余剰電力を蓄電する経路に分かれています。発電力が低下した場合には、2 次電池から電力を供給します。筐体の内部に新しいデバイスを組み込んだり、システム全体の熱設計の自由度を向上させることにより、従来にない新しいジャンルの民生用品ができあがると期待しています。

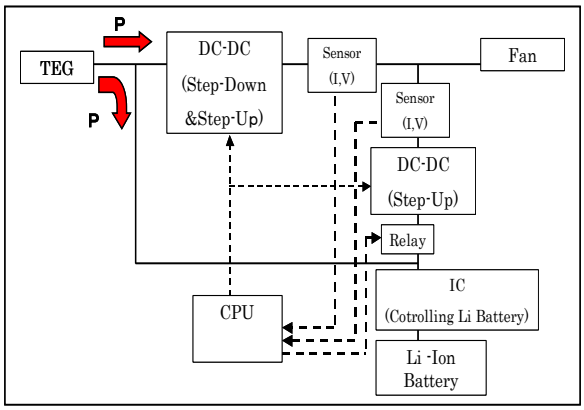


図 11　電力利用回路の例

■期待効果

皆さんの身の回りのある電子機器、家電製品から少しずつ放出されている（捨てられている）熱エネルギーを何かに活かせないでしょうか？皆さんも、ぜひ、身の回りの熱から電気が生まれたらこんなことができるかなと、自由な発想で想像してみてください。思いをめぐらす楽しさと同時に、地球環境に役に立つことを実感できるのではないかと考えます。

■将来展望

近年、白色 LED の応用開発が急ピッチで進んでいます。LED を使用して高輝度の光源を作製しようとすると、排熱量が非常に大きくなり、それ自身の寿命そのものにまで悪影響を及ぼすとの報告があります。LED ユニットの方が、熱電変換モジュールとの組み合わせが容易です。この例に見られるように、技術レベルの向上に伴ない、熱電変換技術が入り込み易い製品群が普及してくると感じています。

■まとめ

身の回りで捨てられている熱がたくさんあります。ひとつひとつの量は少なくても、数多く普及している家庭用品からの排熱は全体として見ると膨大な量になります。まず、少しでも電気に変えてみませんか？エコ意識から一歩進んで、新しいカテゴリーの民生用品がこれから世の中に出てくる“鼓動”を感じてとってくだされば幸いです。

８．　熱電発電モジュールの性能評価技術

小原　春彦　Haruhiko OBARA
高澤　弘幸　Hiroyuki TAKAZAWA
独立行政法人　産業技術総合研究所
h.obara@aist.go.jp

Key Words：熱電モジュール，効率，熱測定，発電

■ねらい

熱エネルギーから直接電気エネルギーを取り出すことが出来る熱電発電は、利用されずに捨てられているさまざまな廃熱をリサイクル出来る技術として近年注目されています。熱電発電の原理は、すでに 18 世紀には知られており、発電の逆現象であるペルチェ冷却は実用化普及が進んでいます。では、なぜ最近になって熱電発電が注目されるようになったのでしょうか。それは、熱電発電の性能、特に熱エネルギーから電気エネルギーへの変換効率を高くすることが出来る材料が相次いで見つかったためだと言われています。

熱電発電がこれまで普及しなかった大きな理由は、性能が低いことにあるとされてきました。熱電発電の性能が低いと取り出せる電気エネルギーが小さいので、熱電発電の導入や維持にかかるコストに見合わないというのが実情でした。熱電発電は固体素子に温度差を加えるもので、固体素子に使われる材料の性能が発電性能をほぼ決めていると言っても過言ではありません。そこで、高い性能を持つ材料が待望されていました。

1990 年代以降、さまざまな新しい材料が見つかり、高い性能の熱電発電が現実味を帯びるようになりました。その中で、「高効率熱電変換システムの開発」プロジェクトが開始され、これまで多くの成果を挙げてきています。

では、熱電発電の性能として、どのようなものが考えられるでしょうか。最初に挙げなければならないのが、発電効率でしょう。熱電発電における発電効率とは、熱エネルギーをどれだけ電気エネルギーに変換できるか、その比率で定義されます。新しく発見、開発された材料は、従来にない高い発電効率を可能とする材料です。

他にも、例えば発電モジュールの単位面積あたりの発電量などが重要な性能となります。利用形態からすると、単位重量あたりの発電量や、発電電圧などもチェックしなければならない性能となっています。さらに、耐久性、信頼性も実用上重要な性能です。

そこで、本プロジェクトでは、熱電発電モジュールの性能をより的確に評価できる技術開発をプロジェクト参画企業の協力の下、すすめてきました。特に、熱電発電モジュールの性能で最も重要な変換効率の測定を正確に行うことを大きな目標としてきました。さらに、実用化普及を想定して、信頼性、耐久性評価技術についても踏み込んだ議論を行ってきました。

■熱電発電モジュールの変換効率

熱電変換モジュールの変換効率 η は、入力である熱量をどれだけ電気エネルギーに変換できるかを示すもので、一般には、熱入力（図 1 では Q_h に相当）と電気出力Pとの比で定義されます。
しかし、本プロジェクトでは熱電モジュールの低温側から出てくる熱量 Q_c を用いて、効率 η を次の式で定義しています。

$$\eta = \frac{P}{Q_c + P}$$

この定義によって決定される効率は、熱電モジュールを熱が通過する際に、輻射などにより熱が逃げていく影響が無視できるとすると、ほぼ Q_h と P の比で与えられる効率と一致します。実は、この定義を用いると、輻射などの影響によらず精度良く熱電モジュールの効率を測定することができます。

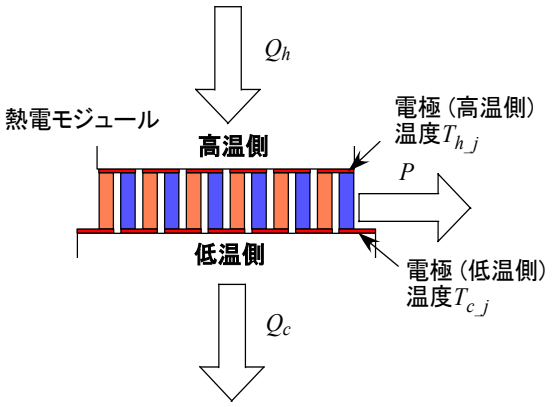


図 1　熱電モジュールの効率測定の原理

また、特にモジュールの高温側が 400℃以上となる高温モジュールでは低温側の熱量測定の方が精度の良い測定ができます。

基本的には、熱電変換は与えられる温度差が大きいほど発電効率は高くなります。したがって、効率を示す際には、同時にモジュールの温度差を明示しないと意味がないことになります。

本プロジェクトでは、熱電モジュールの中の熱電材料の端部（電極部分）の温度差をもって、モジュールに与えられた温度差を定義しています。T_{h_j} および T_{c_j} はそれぞれ高温側、低温側電極の温度です。

$$\Delta T = T_{h\_j} - T_{c\_j}$$

熱電モジュールは、電極が露出したもの（スケルトン型）や市販されているペルチェモジュールのように絶縁板ではさまれているものなどさまざまな形態があり、温度をどこで測定するかによって、モジュールの性能が変ってきてしまいます。モジュールの電極温度を正しく測定することは、容易ではありませんが、さまざまな構造のモジュールを公平に評価するには最も適した定義といえます。

実際の効率測定の概念図を図 2 に示します。熱電モジュールはヒーターによって加熱されます。ヒーターは通常の抵抗加熱式のカートリッジヒーターを銅ブロックに埋め込んだもので、モジュールが取り付けられた面で高い温度均一性が達成されています。

モジュールの低温側には、熱流測定用の銅ブロックが取り付けられています。熱流は銅ブロックに生じる温度差によって測定することができます。そのために、銅ブロックの上部と下部に精密な温度測定が可能な白金抵抗測温体が設置されています。

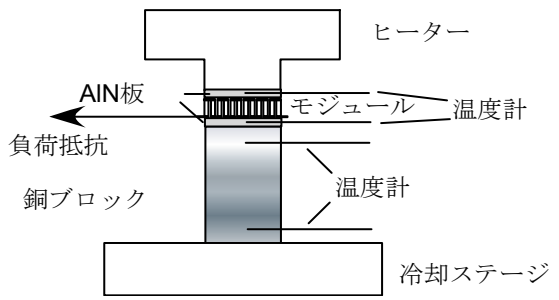


図 2　測定の概念図

低温側に銅ブロックを用いている理由は、モジュールの低温側を効率的に冷やすためです。基本的にモジュールの温度は、ヒーターと冷却ステージの温度で制御されていますが、冷却ステージとモジュールの間に取り付けられる金属ブロックの熱伝導率が低いと、十分にモジュールの低温側を冷やすことができません。また、モジュールの高温側に金属ブロックを取り付けることによって、モジュールの高温側への熱流を測定することが可能ですが、本プロジェクトで開発している高温モジュールの場合、高温側の温度が 400℃を越え、金属ブロック表面からの熱ロスが無視できずに精密な熱流測定が極めて難しいことが分かりました。

一方、低温側は室温付近での測定になるため、金属ブロックに生じる温度差は小さいですが、精密な熱流測定が可能となっています。

ヒーター、および銅ブロックとモジュールの間には、熱伝導率の高い AlN 板を挟んでいます。この AlN 板には中央に穴が空いており、ここに温度計を取り付けることによって、モジュールの高温側、低温側の温度を測定しています。なお、本プロジェクトのモジュール性能評価の定義では、モジュールの温度は高温側、低温側電極の温度となっています。そのために、AlN 板の温度勾配、AlN 板とモジュール電極の間の熱抵抗を推定し、電極温度を計算しています。

モジュールの電気出力は、負荷抵抗を取り付けて測定しています。一般的な電子付加装置を用いることができます。なお、内部抵抗の小さな熱電モジュールの場合には、電流リードでの電圧降下も無視できず、電圧端子をモジュールの電極付近からとり 4 端子法を用いることが必要です。

■精密な測定が難しい熱流の測定

熱電発電モジュールの変換効率を精密に決めるには、熱流と電気出力を精度良く測定する必要があります。電気出力の測定は、熱電モジュールに付加抵抗を接続することによって、比較的精度良く測定することが出来ます。

一方、熱流の測定には十分な注意が必要です。本プロジェクトで開発している熱電発電モジュールは、平板状のモジュールで、高温側と低温側の温度差が最大で 500K 以上となります。また、加熱部であるヒーターは 600℃程度となるために、加熱部からの輻射熱が熱流測定に影響を与えることが分かってきました。

このような厳しい条件の中で、熱量測定を 5% 以内の精度で行うことを目指して、評価装置には

さまざまな工夫が加えられています。図 3 には、評価装置の構造、特にヒーターからの輻射熱の影響を防ぐための熱輻射シールドの概念図を示しています。熱輻射シールドがないと高温側、とくにヒーターからの熱輻射は支柱などさまざまな部品を加熱します。また、それらの部品で反射した輻射熱が直接熱流測定用の銅ブロックに入ってしまい、精密な熱流測定を困難にします。これらの熱輻射の効果は、Bi-Te 系材料からなる従来の熱電モジュールの測定では問題になりませんでした。本プロジェクトで開発された高温モジュールの測定で初めて顕著になった問題で、これを解決し高温モジュールの性能評価を正確に行えるようになったことは、本プロジェクトの大きな成果の一つと考えられます。

■持ち回り（ラウンドロビン）測定

本プロジェクトでは、熱電発電モジュールの性能評価装置を産業技術総合研究所（産総研）に設置し、エンジニアリング振興協会と産総研が評価技術開発を担当しています。プロジェクト参画各社の熱電発電モジュールは産総研で性能評価を行いました。

一方、プロジェクト参画各社もそれぞれ各社が開発しているモジュール、システムに適した評価技術を保有しています。そして、プロジェクトとしては、産総研に設置された評価装置と、各社の評価装置との整合性を検証することが必要となります。そこで、共通の試料を用いて測定を行い、各社と産総研の評価装置との整合性を調べました。この手法は、持ち回り（ラウンドロビン）測定と呼ばれています。

図 4 は、熱量測定のラウンドロビン測定結果の一例です。電気測定については、測定の確度が高く、熱電発電モジュールの評価結果にあまり大きな影響を与えないので、今回は熱量測定のみについてラウンドロビン測定を行っています。

ラウンドロビン測定には、熱抵抗が熱電モジュールとほぼ等しい石英ガラスなどを用いました。石英ガラスは、熱電モジュールと同じ断面をもつもので、モジュールのダミーとして熱流測定を行うことができます。また、石英ガラスの熱伝導率から、測定の確度も推定することができます。

ラウンドロビンの測定の結果、図 4 に示されたように産総研と各社のデータは広い温度領域にわたって良く一致していることが分かりました。ここに至るには、本プロジェクトの委員会活動の一つである、性能評価技術分科会における活発な議論と情報交換が不可欠でした。特に、前節で記載した熱量測定における輻射熱の影響の除去は精密な測定には避けては通れない問題でした。

ラウンドロビン測定の結果から、各社の評価装置と産総研の評価装置の整合性が確かめられました。各社が開発しているモジュールをすべて産総研で測定することができないので、各社の評価装置と産総研の評価装置の整合性が確かめられた

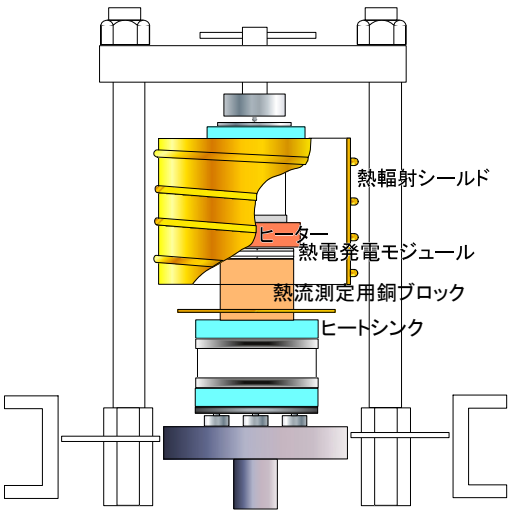


図 3　輻射熱の影響の除去

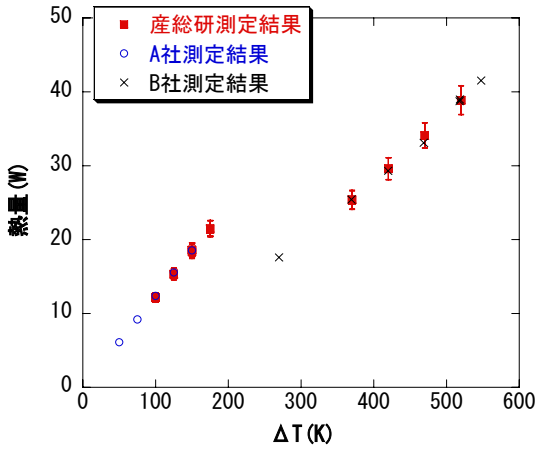


図 4　熱流のラウンドロビン測定結果（低温側と高温側は別々の試料を用いて測定）

ことが、モジュールの開発の点からも意義深いものと考えられます。

■本プロジェクトが目指す性能評価技術

本プロジェクトで開発された熱電発電モジュールの性能評価技術は、熱量測定まで含めた高い測定精度、企業、公的研究機関の測定結果の整合性を達成した点で、国際的にも高く評価されています。図 5 は開発された評価装置の外観です。

優れた性能評価技術は、モジュールの開発には必須であることは言うまでもありません。また、本プロジェクトでは、共通の定義によってモジュールの効率評価を行い、かつ各社の性能評価装置の整合性まで検証しています。モジュールのユーザーからみると、モジュールの性能を統一した規格で比較し、用途を検討することができるようになります。

このような規格化は、実用化普及が進んでいる太陽電池などでは、すでに国際的な取り決めがなされています。一方、開発途上にある熱電発電モジュールに関しては、これまで統一的な効率評価方法が確立されていませんでした。本プロジェクトでは、国内の熱電モジュールの製造技術ではトップクラスの企業が複数参加しています。その中で、効率評価の統一的な基準ができたことは、大きな意味を持っています。すなわち、ここで開発された評価技術が、熱電発電モジュールの評価技術のデファクトスタンダードとなりうるからです。

■将来展望

熱電発電モジュールの性能評価技術の開発は、モジュール開発やシステム開発に比べて、一見地味な課題と思われてきました。しかし、本プロジェクトで開発している高温用のモジュールの評価など、技術的にも難しい点が多々あり、モジュールの開発担当者の間では精度の高い評価技術開発が不可欠であるとの認識がありました。

また、これまでモジュール開発を行ってきた企業や研究機関がそれぞれの基準でモジュールの性能評価を行ってきましたが、それらの結果を直接比較することは困難でした。

そこで、本プロジェクトでは開始当初から性能評価技術開発に力を入れてきました。とくに、性能評価技術分科会では、プロジェクトのスローガンである「競争と協調」の「協調」部分として、各社がそれぞれ持っている性能評価技術のノウハウを持ち寄り、活発な議論を行ってきました。それらの成果を産総研に設置された実機にとりいれ、各社が開発したモジュールを統一的に評価する体制を構築することが出来ました。

開発された評価技術と評価装置は、本プロジェクト終了後も産総研において維持されます。プロジェクトには公的な資金が使われていますので、プロジェクト各社が提供した評価技術のノウハウに関する取り扱いには十分留意しつつも、プロジェクト参画企業以外からのモジュールの性能評価の依頼があれば対応することが求められています。

また、今後はより簡便な評価装置の開発など、実際の製造現場での使用を考慮に入れた技術開発も必要と思われます。優れた評価技術はとりもなおさず熱電発電モジュールの製造技術を高め、日本のモジュールメーカーの産業競争力を高めることにつながるものと期待されます。

■まとめ

1) 高い精度測定が出来る、モジュール性能評価装置を開発しました。
2) 本評価装置により、これまで各企業が独自に行ってきた熱電モジュールの性能評価を、統一的な基準のもと、同じ土俵で評価しました。
3) 熱電発電モジュールが普及した際には、本評価技術が、標準的な性能評価方法となることを目指しています。

図 5　評価装置外観

9．　熱電変換システムの多様な活用に向けて

藤田　稔彦　Toshihiko FUJITA
国立大学法人　東京海洋大学
fujita@kaiyodai.ac.jp

Key Words：　熱電変換、熱電発電、用途調査、コージェネレーション、シミュレーション

■はじめに

平成 14 年度に開始された NEDO 技術開発機構による助成事業「高効率熱電変換システムの開発」プロジェクトでは，平成 18 年度の事業完了後，その速やかな商品化，実用化を目指しています。この高効率熱電変換システムの多様なポテンシャルを活用するため，これまでの適用事例について広く調査・分析を行い，とくに有力視されているコージェネレーションシステム（CGS）については，シミュレーションによってその適用効果（省エネ性，環境性，経済性など）の検討を行いました。

■熱電変換の適用先

熱電変換システムの普及拡大のための基礎資料として，熱電冷却および熱電発電の適用事例，製品仕様，市場導入状況などを文献，ウェブ検索等によって調査し，データベースを作成しました。

表 1 のように，光通信，電子デバイス，半導体製造，理化学分析機器，センサ，医療用，家庭用，業務用，自動車，軍用，宇宙用電源，無保守電源，超電導など，冷却用途を中心に様々な分野で適用事例があります。また，今後の発展が予想される分野として，センサ，MEMS（マイクロマシン），空調，医療，超電導などの分野があります。

●熱電変換の歴史と今後の発展分野

熱電の歴史は，図 1 に示すように，T. J. ゼーベックが熱電発電の原理であるゼーベック効果を発見した 1820 年代に始まり，1834 年には J. C. A. ペルチェが熱電冷却のペルチェ効果を発見しました。

熱電変換の第 2 の波は半導体による効率向上によって到来し，1940 年代に灯油ランプ排熱を利用したラジオ等の商品化，1950～1960 年代にかけて電子冷蔵庫等が商品化され，宇宙用熱電発電技術も実用化されました。しかし，普及したのは電子恒温装置くらいでした。

第 3 の波は 1980～1990 年代にかけて半導体関連産業と情報通信産業分野の著しい発展とともに訪れ，熱電技術は小型電子部品の冷却用，精密温度制御用として市場に定着しました。

分野	段階	製品例	発電
光通信	○	半導体レーザパッケージ	
	○	赤外線センサパッケージ	
電子デバイス	○	CPU冷却	
	○	カロリメータ	
半導体製造	○	ウエハ冷却用プレート	
	○	循環水恒温装置	
	○	薬液恒温装置	
	○	電子恒温槽	
	○	恒温湿エア供給装置	
	○	熱電チラー	
理化学分析機器	○	0℃基準温度装置	
	○	除湿器	
	○	恒温水循環装置	
	○	冷却保管庫	
	○	電子氷温インキュベータ	
	○	培養器，血液分析器，ヘモグロビン分析器	
センサ	○	赤外線センサ	●
	△	水素センサ	●
	※	マイクロチップベースの化学センサ	●
	△	ナノ温度センサ	●
	○	水蒸気濃度センサ	
	○	熱伝導率測定センサ	
	○	CCD冷却	
医療用	※	能動カテーテル	
	※	人工心筋	
	※	心臓ペースメーカー用長期安定電源	
社会インフラ	△	変圧器	●
工業炉	△	抵抗加熱式工業炉	●
自家発電	△	コージェネレーション	●
自動車	△	大型ディーゼル車排ガス発電	●
	○	温度調節シート	
家庭用	○	小型冷温ボックス	
	○	冷水器	
	○	ワインセラー	
	○	ビールサーバー	
	○	ダストクーラー	
	○	保冷米びつ	
	△	快眠カプセル	
	○	ペルチェ式空気清浄器	
	○	ミニチュア発電器（ろうそくラジオ）	●
	○	熱電腕時計	●
	△	コードレスファンヒータ	●
	△	風呂釜温度制御	●
	※	マイクロコンバスタ、マイクロ発電システム（モバイル用電源）	●
	○	モスキートマグネット	●
	△	被災地緊急電源	●
	○	自己冷却システム	●
	○	室内空気循環装置	●
業務用	○	小型冷蔵庫	
	○	適温庫	
	○	業務用可搬クーラ	
	○	コーヒー豆温度制御	
	△	オフィスパーソナル空調	
	△	プロジェクタ	●
軍用	△	可搬型発電器	●
宇宙船電源	○	熱電発電（RTGなど）	●
	○	SP100計画	●
無保守電源	○	無線中継基地局電源	●
	○	パイプライン腐食防止用電源	●
超電導	※	超電導体冷却	
	※	電流リード	
その他	○	表面張力用マイクロポンプ	

注）段階：　○実用化　△試作　※基礎研究

表 1　熱電発電／熱電冷却の実用化の現状

創成期	1820年代	1821 1834	T.J. ゼーベック： ゼーベック効果を発見 J.C.A. ペルチェ： ペルチェ効果を発見
	1850年代	1851	ケルビン卿： ゼーベック効果とペルチェ効果が表裏一体という理論
		1885	レイリー卿： 熱電発電の可能性を提案
	1900年代	1929	A.F. ヨッフェ： 半導体による発電効率向上の理論
	1940年代		［灯油ランプ排熱利用ラジオなどの実用化］
第2の波	1950年代	1954	H.J. ゴールズミット： ビスマス・テルル系で高性能化実証 ［電子冷蔵庫などの商品化］
	1960年代		・電子恒温装置 ・宇宙用電源装置
	1970年代		・赤外線センサ冷却システム ・露点計
第3の波	1980年代		・CPU冷却 ・光通信 ・半導体レーザパッケージ ・半導体製造プロセス冷却
	1990年代		［情報産業分野の局所冷却素子として発展］ ・理化学分析機器 ・小型冷蔵庫 ・ワインセラー ・（熱電腕時計）
	2000年代		［性能指数向上による新たな発展段階］ ・業務用可搬クーラー ・適温庫
今後の発展分野			＊センサ類 ＊MEMS（マイクロアクチュエータ，マイクロポンプ，マイクロ電源等） ＊パーソナル空調，体温管理等 ＊医療分野（能動カテーテル，人工心筋，ペースメーカー用電源等） ＊超電導分野（冷却システム等）

図 1　熱電変換の歴史と今後の発展分野

そして 2000 年代には性能指数の向上による新たな発展段階に入り，従来コストや効率の面で商品化が難しかった発電分野にも様々なシステムの導入が試みられています。

●熱電変換技術の特長と今後の課題

熱電変換技術の特長として，熱電発電・冷却共通に以下のことをあげることができます。

- 長寿命で信頼性が高い
- 省スペース
- 小型軽量
- 形状が自由に選定できる
- 応答が速い
- 可動部がなく振動がない
- スケールメリットがないため，小型設備に有利

また，発電素子としては

- あらゆる熱源から電気を取り出すことが可能
- 単位表面積あたりの発電量はＰＶ（太陽光発電）の数倍から数十倍

ペルチェ素子としては

- 極の切替えで冷却も加熱も可能
- 高精度の温度制御が可能
- 冷媒が不要
- 電気配線のみで取扱いが簡単

などの特長があります。

一方，熱電変換技術の今後の課題として，次のことがあげられます。

① 高性能・高効率化：　材料開発・改良
② 経済性の向上：　量産によるコスト低減
③ 信頼性・耐久性の向上：　スケルトン構造等による熱応力緩和

●マイクログリッドへの展開

最近わが国でも，一定地域内において複数の多様な分散型電源をネットワーク化し，エネルギーを供給するマイクログリッドが注目されています。熱電変換は今後このようなシステムにおいても様々な展開が予想されます。例えば，配電用変圧器，病院等のボイラ，燃料電池，バイオガスエンジン，工場の加熱炉等の排熱を利用して発電を行うことで，マイクログリッド全体の省エネに貢献することができます（図２）。

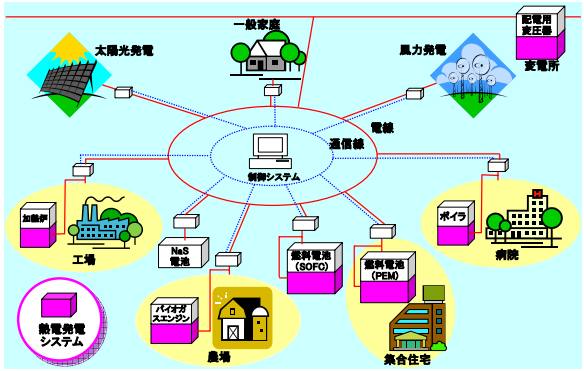


図 2　マイクログリッドへの展開

●マイクロ電源ニーズの拡大

あらゆる生活の場所に情報通信環境が整備され，いつでもそれを利用できるユビキタス社会においては，PC や携帯電話など様々な端末機器が使われ，それらの電源のニーズが拡大していきます。このマイクロ電源として，二次電池，燃料電池とともに，熱電発電素子の利用が期待されます（図 3）。

図 3　ユビキタス社会における
マイクロ電源ニーズの拡大

■熱電発電システムのコージェネレーションシステムへの適用

熱電変換のためのモジュール技術が確立した際の適用先として，コージェネレーションシステム（CGS）は特に有望と考えられます。そこで，熱電発電システム（TEG）の CGS への適用効果を検討し，普及のための諸条件を明らかにするためにシミュレーションを行いました。

まずモジュールの発電出力・効率，個数，熱源温度などが，その出力特性に及ぼす影響を検討し，その特性を用いてガスエンジン CGS およびガスタービン CGS の排熱を利用して発電した場合の効果を調べました。次に，事務所，病院など，様々な電力負荷，空調・給湯負荷のある建物への“CGS+TEG システム”の適用効果を検討しました。

●熱電変換モジュールの出力特性例

図 4 は電極間温度差 550℃（高温側 580℃，低温側 30℃）において発電効率が 15%，発電出力密度が 0.9 W/cm^2（出力 5.6 W，面積 6.25 cm^2）のカスケード型熱電変換モジュールについて，高温側と低温側の流体の熱コンダクタンスを仮定して計算した出力特性の例です。図中の η*，Qe*/A は上記の熱コンダクタンスがともに∞，すなわち熱抵抗 0 の理想的な場合です。

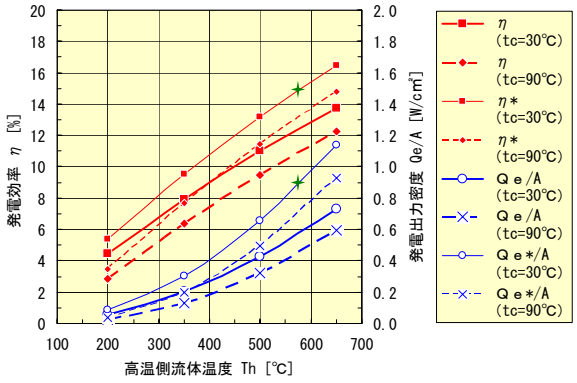


図 4　熱電変換モジュールの出力特性例

●“CGS＋TEG システム”の構成例

一例として，ガスエンジン発電機と排熱投入型ガス吸収冷温水機（ジェネリンク）からなるガスエンジン CGS に熱電変換システムを組み込んだシステムを図 5 に示します。

また，各種建物のエネルギーシミュレーション（年間の買電量，CGS 発電量，TEG 発電量，ガス消費量，排熱利用量などの計算）の対象としたシステムの構成台数を表 2 に示します。

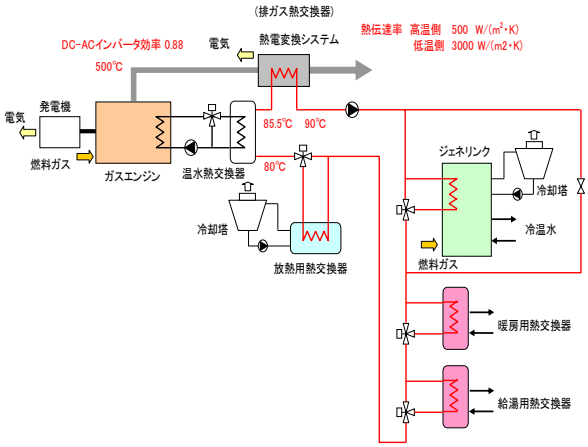


図 5　“CGS+TEG システム”の構成例

CGS	略称	定格性能	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
発電機	GP350	発電効率 36.1%(LHV)	1	1	2						
	GP450	発電効率 34.9%(LHV)				1	1	2			
	EP350	発電効率 40.5%(LHV)							1	1	2
ジェネリンク	Σ1.2	冷房COP 1.10 (HHV)	1	2	2	1	2	2			
	Σ1.4	冷房COP 1.28(HHV)							1	2	2

表 2　検討対象システムの構成台数

●各種建物への適用効果

事務所と病院の建物負荷（電力，冷房，暖房，給湯の各負荷）の代表的な値を表 3 に示します。

図 6 は，このような負荷のある病院に表 2 の A1～A3 のシステムを導入したときの年間の CGS，TEG 発電量および一次エネルギー消費量の計算結果です。図中の TEG（87,100）などの数値は，CGS に組み込んだモジュールの個数です。また，横軸の発電機導入率とは，建物の年間の最大電力負荷に対する CGS 総発電容量の割合のことです。

同様に，図 7 は事務所に C1～C3 のシステムを導入したときの計算結果です。

以上のような計算の結果から，一般的な事務所や病院に TEG を組み込んだ CGS を導入すれば，CGS 発電量の最大 4.2%程度の電力を TEG により増加できることが分かりました。

	電力負荷	冷房負荷	暖房負荷	給湯負荷
最大負荷	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2
事務所	50	105	58	16
病院	50	105	95	47
年間負荷	kWh/m^2	MJ/m^2	MJ/m^2	MJ/m^2
事務所	156	293	130	9
病院	170	335	310	335

表 3　事務所，病院の建物負荷

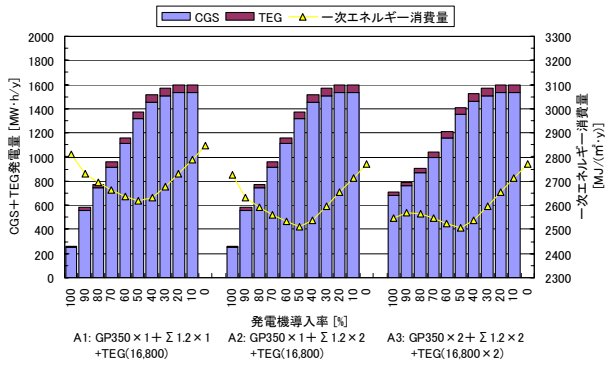


図 6　病院の年間 CGS，TEG 発電量，一次エネルギー消費量の計算例

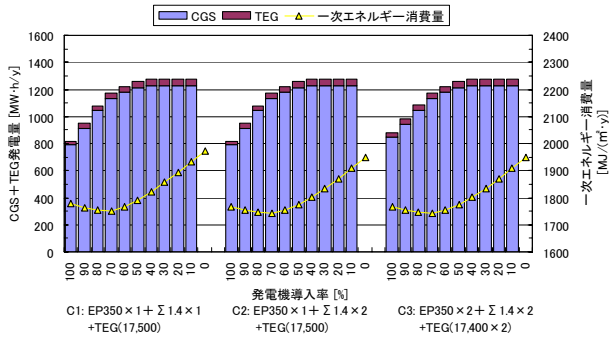


図 7　事務所の年間 CGS，TEG 発電量，一次エネルギー消費量の計算例

これは発電効率 35～40%の高効率発電機に対し，さらに 1.5～1.6%の効率上昇に相当します。

図 8 は熱電変換モジュールの個数とガスエンジンの排ガス温度による年間 TEG 発電量の変化を示しています。モジュール数を増やせば，そのぶん TEG 発電量は増えますが，排ガス温度が下がるのでモジュール 1 個あたり発電量は減ってきます。また，ガスエンジン排ガス温度が発電機負荷率 100%のとき TEG 入口で 500℃から 550℃に 50℃上昇したと仮定すると，例えば事務所では，TEG 発電量が最大で 26%，病院では 31%増加するという計算結果が得られました。

図 9 は熱電変換システムのイニシャルコストとランニングコスト削減効果とを比較して，単純に経済性を評価したものです。熱電発電の普及のためには，量産によるコスト低減でモジュール単価 100 円/W，TEG システムとして装置に組み込むときには 200～300 円/W が当面の目標となりますが，これが達成できれば，図のような単純償却年数の計算結果から見ても，“CGS+TEG システム”はかなり有望と考えられます。

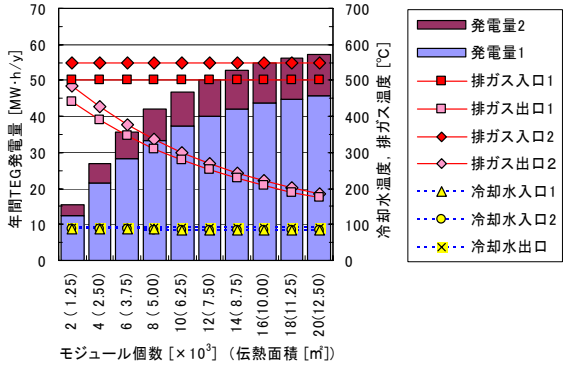


図 8　熱電変換モジュール個数および排ガス温度の影響（事務所，A2，発電機導入率 30%）

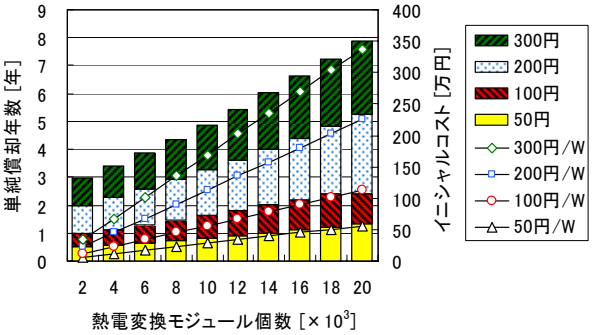


図 9　熱電変換システムの単純償却年数（事務所，C2，発電機導入率 50%）

■まとめ

熱電冷却については様々な分野で多様な製品が実用化されています。これは，小型･軽量，騒音・振動なし，局所冷却・加熱が容易，応答性がよく精密制御が可能など，その特長を活かし市場ニーズに応えてきた結果といえます。

一方，熱電発電は太陽光のない宇宙用電源，僻地用の無保守電源としての実績はありますが，他は民生用，産業用ともに開発・試作または基礎研究段階のものが多く，実用化されているものはまだ少ないのが現状です。

しかし，熱電発電には，

① 小規模高温の排熱を有効利用する発電システムを構築できる。

② 比較的低温の排熱でもそれなりの発電出力が得られる。

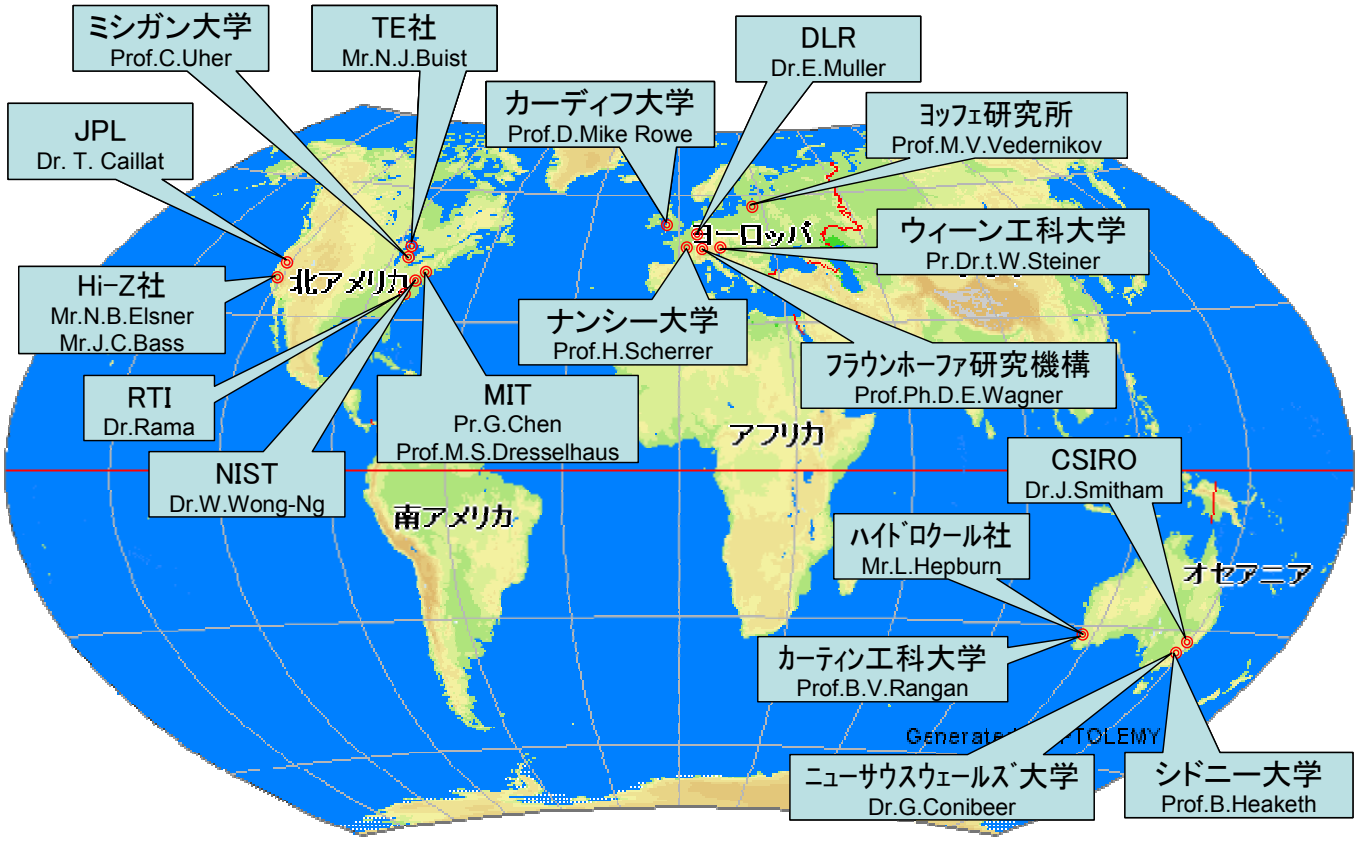
③ 微小電力ニーズに対して，適当な熱源が近くにあれば，電池に代わる電源となる。

などの利点があり，今後，本プロジェクトの成果である高効率熱電変換モジュールを活用した製品や応用システムが市場に導入されることが大いに期待されます。

参考資料

2002 年度～2006 年度　海外技術調査

熱電変換技術研究機関　訪問先



プロジェクトの成果を紹介し、熱電発電の未来を考える
熱電発電フォーラム
2006 年 10 月 31 日
財団法人エンジニアリング振興協会
〒105-0003　東京都港区西新橋一丁目 4 番 6 号
ＴＥＬ：03-3502-3671
内容問合せ先：Ｅ.mail　gec-adm@enaa.or.jp
本誌掲載記事の無断転載を禁じます。