

ふく射伝熱方式熱電変換技術の開発

Development of Thermoelectric Conversion Technology Using Radiation Heat Transfer

徳 良 晋 技術開発本部基盤技術研究所応用理学研究部
太 田 稔 智 技術開発本部知的財産部 主査
茂 垣 康 弘 産業システムセクター薄膜・表面処理プロジェクト部 部長 博士 (工学)
上 松 和 夫 技術開発本部 技監 工学博士

熱電変換モジュールを使った廃熱回収システムを、抵抗加熱式真空熱処理炉適用の省エネ技術として検討してきた。水冷された外壁の内面に電極が露出した熱電変換モジュールを配置する。内部の高温壁からのふく射廃熱は、モジュール表面に直接、伝導伝熱ではなく、非接触でふく射伝熱させる。これによってモジュール両端の温度差が大きくなり、結果として高いシステム変換効率と効果的な廃熱回収が期待できる。本稿では、この新規ふく射伝熱方式熱電変換技術の技術実証試験および適用検討の成果を紹介する。

A waste-heat recovery system using a thermoelectric module was examined as an energy-saving technology for industrial vacuum furnaces of the electric-heating type. The thermoelectric module of a skeleton type was installed on the inner surface of water-cooled wall for testing. The waste heat from the internal high temperature wall reached at the surface of the module by the radiation heat transfer, not by the conduction heat transfer. In the tests, the difference of temperature at module ends became large. Consequently, high conversion efficiency and effective waste heat collection were expected. The results of technical demonstration and the application examinations are described.

1. 緒 言

産業界における未利用熱から電気としてエネルギーを回収する熱電変換技術の開発は、地球温暖化防止策の一環として、特に開発が遅れている小規模分散型装置における省エネ技術として注目されている。この技術の特長は、可動部がなく静かで小型・軽量であること、また効率が処理エネルギーの規模に依存しないことである。しかし、まだ熱電素子の熱電変換効率が十分とはいえず、さらに装置化した場合の効率低下が課題とされ、実用にはほとんど至っていない。

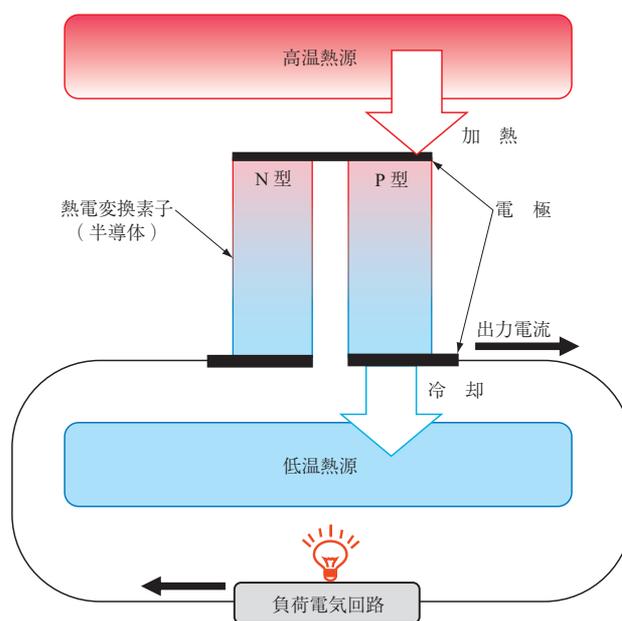
この装置化における効率低下問題の解決策として、熱源が比較的高温の場合にはより有効となる、高温熱源から熱電変換素子への熱の授受を、ふく射によって非接触で行う熱電変換方式を考案した⁽¹⁾。これをふく射伝熱方式熱電変換技術と呼び、当社製品である抵抗加熱式真空熱処理炉へ適用するため、技術実証および解析技術の開発を進めてきた。その成果を紹介する。

2. ふく射伝熱方式の熱電発電

2.1 熱電変換素子・モジュール

ある物質に温度差を与えると、その両端に熱起電圧が発

生する。これはゼーベック効果と呼ばれ、熱電対による温度計測はこの原理を活用している。このゼーベック効果を利用すると、第1図に示すように配置した半導体（熱電変換素子）に温度差をつけることによって、そこから電力を取り出すことができる。これが熱電発電である。



第1図 熱電発電のしくみ
Fig. 1 Principle of thermoelectric conversion

熱電変換素子の起電圧は極めて低く、このため実用においては複数の素子が直列接続されて、絶縁性のセラミックス板上で一体となった構造の熱電変換モジュールが使われる。さらに、幅広い温度領域にわたり発電特性が優れた素子材料はないため、数百度を超える高温の場合は、数種の素子列を重ね合わせたカスケード型熱電変換モジュールが製作され、実際に約 600℃までの温度域での応用開発が行われている。これらモジュールの熱電変換効率は温度が高いほど、そして温度差が大きいほど高くなる特性がある⁽²⁾。

2.2 ふく射伝熱方式の特長

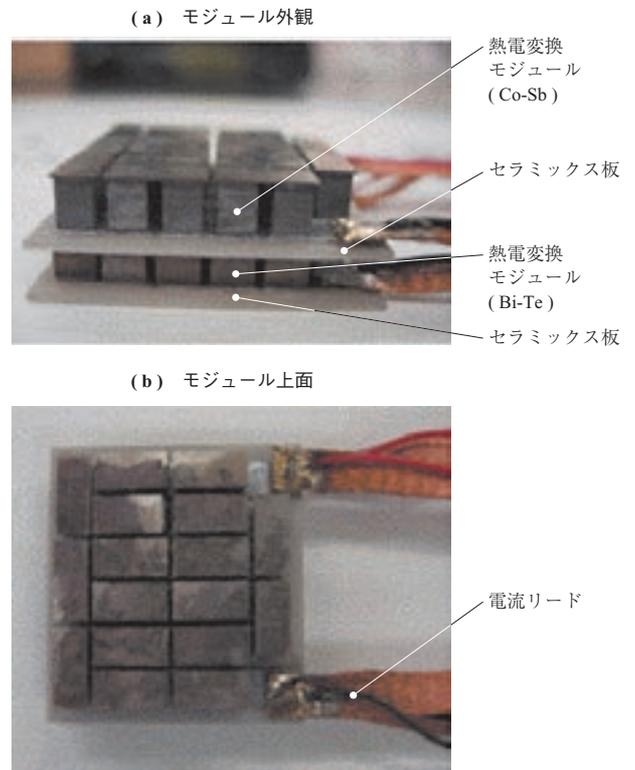
市販の熱電変換モジュールは、汎用性をもたせるためにセラミックス板で覆われている。適用に際しては、さらに受・放熱用のフィンなどが圧接で組み合わせられ、熱抵抗が次第に大きくなる。このため利用可能な熱源温度差に対して、この熱抵抗分の温度差が発電に寄与しなくなり、効率が低下する。一般に、装置化した場合の変換効率はモジュールの半分といわれてきた。

そこで当社の改善策として、適用は比較的高温の装置に絞られてくるが、ふく射によって非接触で熱の授受を行う形態を考案した。第 1 図において、低温熱源とはセラミックス板を介して圧接するが、高温側は電極を露出させ、ふく射によって直接伝熱する方式である。高温側のセラミックス板と集熱系が省かれるため、その分の熱抵抗損失が軽減され、より高い温度差を熱電変換素子材料に付加でき、変換効率の大幅な改善が期待される。さらに、モジュール高温部は圧接から開放されて片持ち梁構造となるために、従来課題とされていた温度差に起因した熱応力ひずみ問題も軽減され、取り付けにおける汎用性の拡大と信頼性向上にも効果が期待できる。

3. 実証試験

3.1 モジュールの試作

技術実証のために、ここではふく射体の温度を約 600～700℃、モジュール高温部の動作温度を約 400℃と設定して、モジュール製作メーカ⁽⁴⁾の協力を得て、第 2 図に示す二段カスケード型熱電モジュール (30×30×10 mm) を試作した。低温側はビスマス-テルル (Bi-Te) 系、高温側はコバルト-アンチモン (Co-Sb) 系の熱電変換素子、それぞれ 17 組が直列接続されてセラミックス板に接着されている。第 2 図 - (a) の低温側には同じくセラミックス板が接着され、高温側は電極が露出した、ハーフスケル



第 2 図 二段カスケード型熱電変換モジュール
Fig. 2 Thermoelectric conversion module of two-stage cascade type

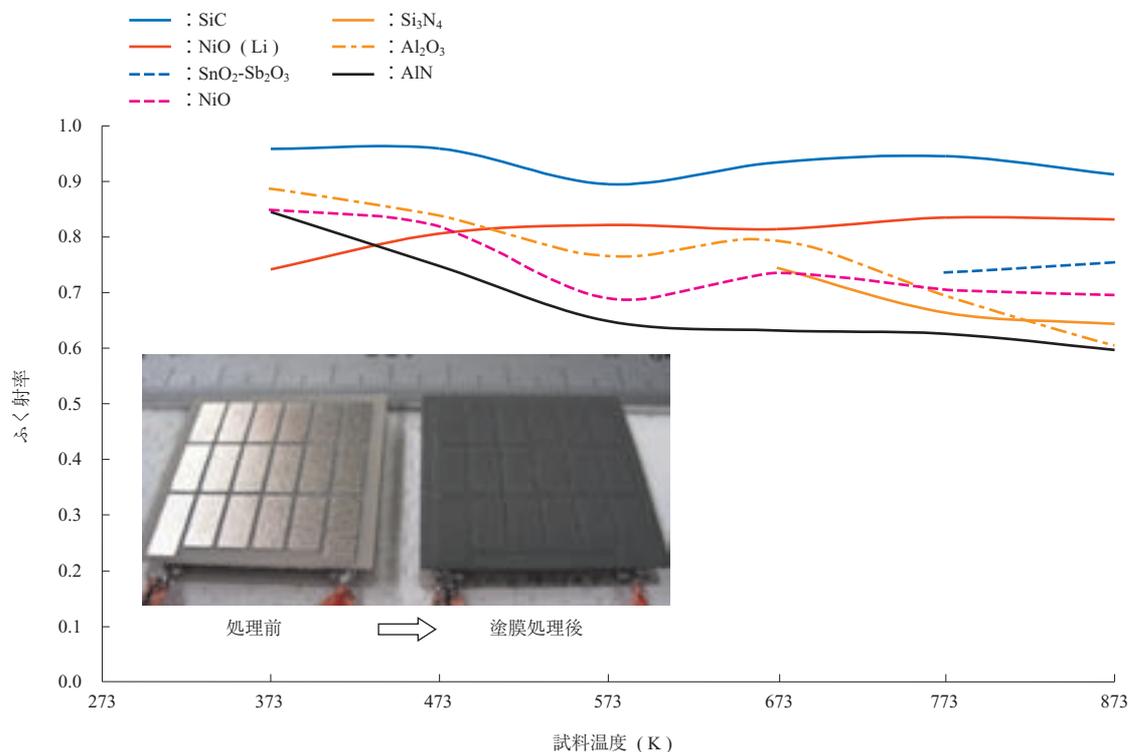
トン型と呼ばれる構造である。

ふく射伝熱に対する伝熱効率を高める目的で、露出されている高温側電極表面を塗膜処理した。高温部材からのふく射に対する吸収率が高く、高温で使用可能な塗膜材料を、電極材試験片を用いて調査した。第 3 図に塗膜処理前後の様子の一例および幾つかの候補材料についてふく射率の計測結果を示す。目標とする温度域においては炭化シリコン系の塗膜によって高い吸収率を確保できることが分かった。

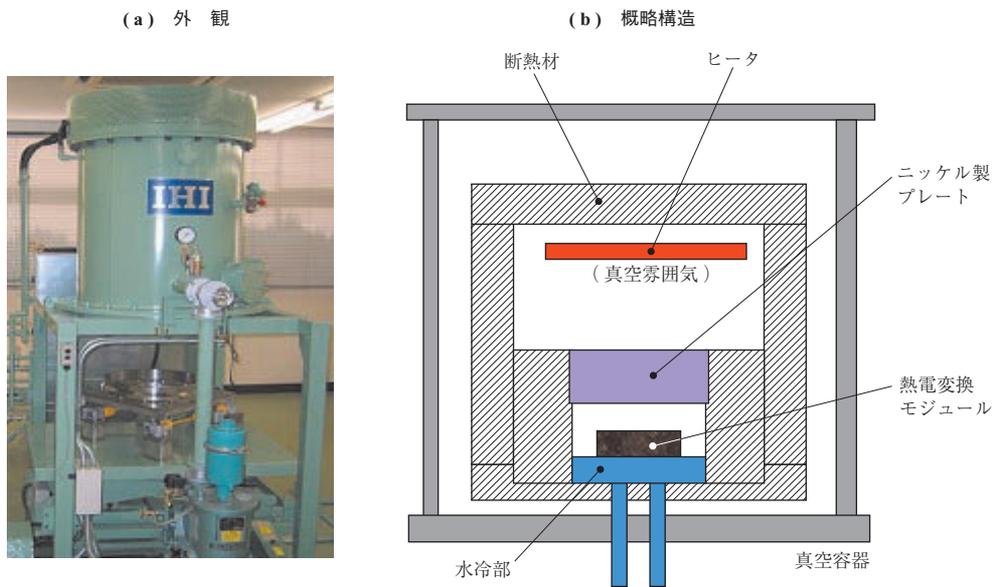
塗膜の存在は熱抵抗の増加になるが、金属性電極表面の低い吸収率と比較して、変換効率を高めるために必要である。ここで、塗膜が熱サイクルを受けた場合、母材との間で生じる熱膨張差に起因した脱離が懸念される。そこで本開発では、第 5 章で述べられるバッチ式の抵抗加熱式工業炉への適用を想定した、塗膜の健全性評価試験を行った。この結果、この炭化シリコン系塗膜は長期間にわたって安定したふく射伝熱を実現できることが分かった⁽³⁾。

3.2 熱電性能評価

伝熱面を塗膜処理した熱電変換モジュールの熱電変換効率を、本開発において試作した熱電性能評価装置を使って実施した (第 4 図)。モジュールの低温側セラミックス板を、伝熱を促進させる目的で市販のシートを挟



第3図 受熱面のふく射率
Fig. 3 Radiation rate of heat input surface



第4図 性能評価装置
Fig. 4 Thermoelectric performance evaluation device

み低温熱源に固定する。効率は冷却水の水量と昇温量（素子を通過する熱流束）および発電量から算出される。精度を高めるために次のような注意をした。

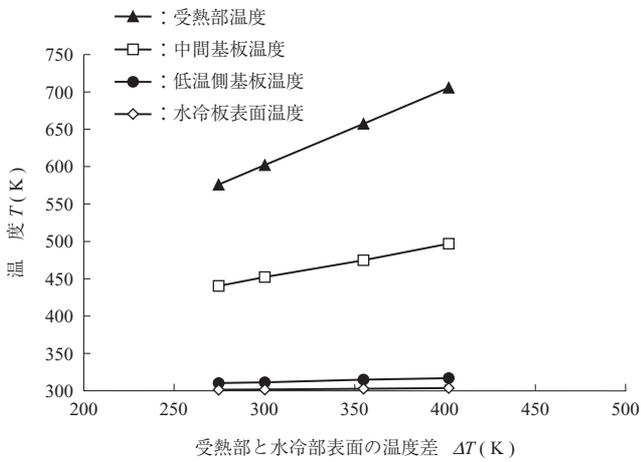
ヒータからの放射熱は黒体化処理を施した肉厚のニッケル板を経由して、垂直かつ均一にモジュールに射出させた。この均一性は、埋め込まれた熱電対による温度評価から確

認した。モジュールの側面は断熱材で囲い、放射熱が低温部へ直接入射しない構造とした。

さらに、同様の目的でモジュールの素子間のすき間も、絶縁性のあるセラミックスを充てんした。熱対流の影響を避けるため、評価試験は約 1 Pa 以下の高真空下で実施した。発電量、つまり温度差はヒータ電流で調整した。

二段カスケードモジュール両端電極（穴を開け、直径 0.5 mm のシース熱電対を挿入して固定）および各セラミックス板表面の温度モニタを行った。評価試験におけるモジュール各部の温度変化の一例を第 5 図に示す。なお、冷却水の入口温度は約 50℃になるよう温度調整されている。

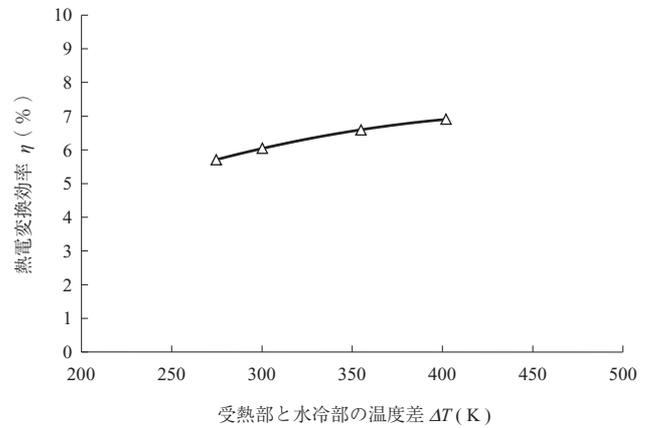
第 6 図は、このようにして実施されたふく射伝熱方式による熱電発電の電力評価データ例である。外部負荷抵抗を変えて負荷電流を調整する。負荷電流の変動



第 5 図 モジュール各部の温度変化

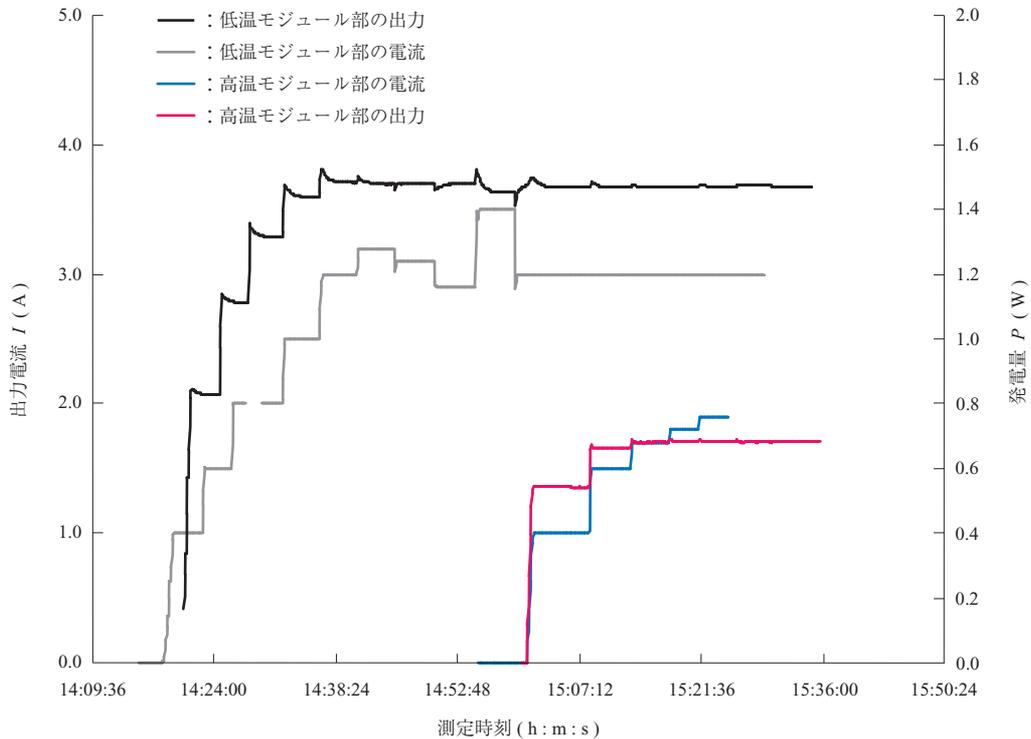
Fig. 5 Temperature changes in various parts of thermoelectric module

時に出力（起電圧×電流）は微少に変動するが、これはペルチェ効果に由来する温度分布の変動によるものであり、時間経過とともに温度は安定し、出力も安定化する。このように電流値を微少に変化させながら出力が最大になる点を求める。この操作をまずモジュール低温側（Bi-Te）について行い、次に高温側（Co-Sb）を、というようにこれらの操作を何度も繰り返して、モジュールとしての温度差に対する最大発電量 P を得た。これらのデータから熱電変換効率（ $\eta = P / (Q + P)$ ）を評価した。結果を第 7 図に示す。第 5 図の結果と合せて、変



第 7 図 熱電変換効率

Fig. 7 Thermoelectric conversion efficiency



第 6 図 発電電力評価試験のデータ例
Fig. 6 Data example of power generation tests

換効率は受熱部温度の上昇につれて上がり、温度差とともに増加することが分かった。また、温度差 400 K において約 6.9%の変動効率を得ることができた。モジュール試作メーカーで評価されたモジュール効率は 8.4%である⁽⁴⁾。

今回得られた値を装置化効率と定義し、また発電率を装置化効率・モジュール効率と定義するならば、2.2節に述べたように従来値 50%に対して、本方式では 83%となり、装置化した場合の効率低減に対する格段の改善効果を実証できた。

4. 熱電解析技術

実用化においては、装置本来の熱的機能に対する熱電モジュール挿入の影響について事前評価が必要である。同時に、装置の熱特性や発電量に応じて適切な性能の熱電変換モジュールを選定し、設計に反映する必要がある。この目的に対して解析ツールの準備は不可欠である。このため新たに、汎用の電磁場解析ソフト⁽⁵⁾JMAG（株式会社JSOL）の熱解析と電流分布解析の基礎方程式にゼーベック効果を考慮するための項を追加し、熱と電界との連成解析を行った。

温度差 T において、ゼーベック係数 α の熱電材料に生じる熱起電圧は $-\alpha T$ であり、電位ポテンシャルを ϕ とすれば、電界強度は

$$E = -(\nabla\phi + \alpha\nabla T) \dots\dots\dots(1)$$

となり、電流密度 j は電気伝導率を σ として、

$$j = \sigma E = -\sigma(\nabla\phi + \alpha\nabla T) \dots\dots\dots(2)$$

と表される。

電流分布解析では電位ポテンシャル ϕ を未知数としているため、熱起電力の効果を電流分布解析に組み込むためには、(2)式の両辺の発散をとり、

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \phi = -\nabla \cdot \sigma \alpha \nabla T \dots\dots\dots(3)$$

として熱起電力の効果を荷重ベクトルに追加する。

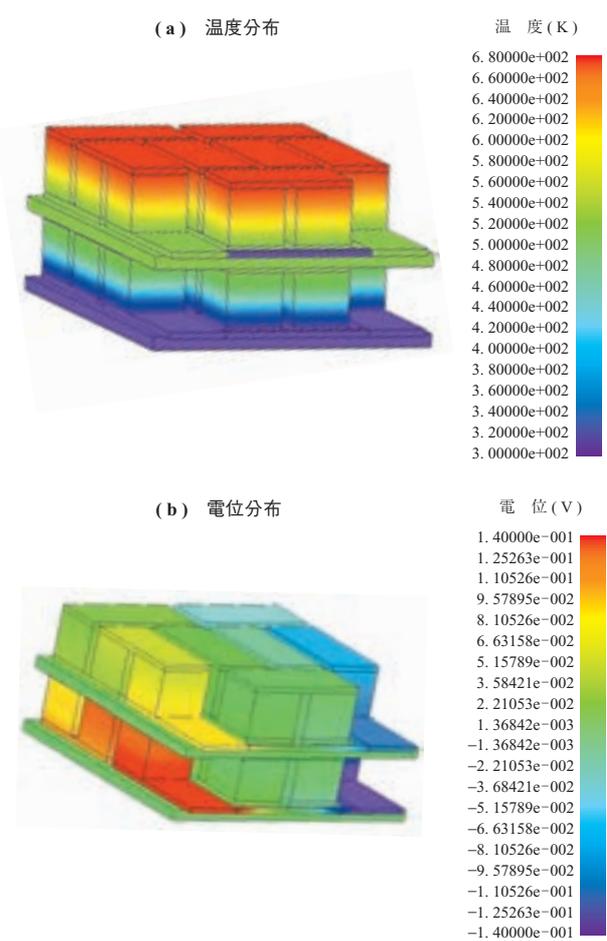
熱方程式は、密度を ρ 、比熱を C 、熱伝導率を λ として、

$$\rho C (\partial T / \partial t) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - (j \cdot \nabla \alpha) T + (j \cdot j) / \sigma \dots\dots\dots(4)$$

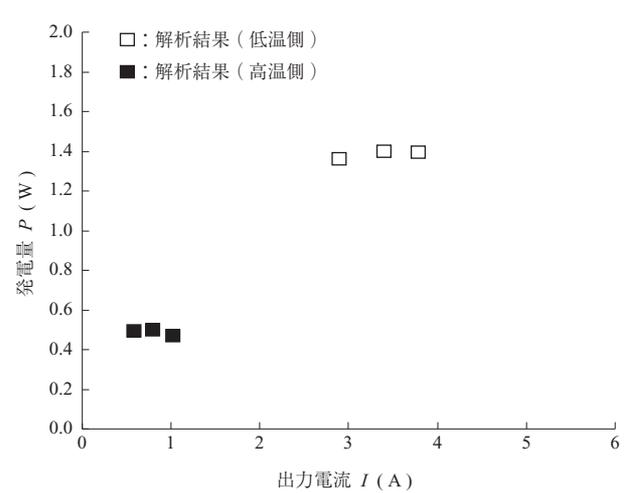
となる。右辺第 2 項と第 3 項の発熱は電流分布解析から要素ごとに計算され、その結果を熱解析モジュールに取り込めば、熱解析では内部発熱源がある場合の解析として実行される。

このようにして得られた熱電モジュール温度分布と電位分布の解析出力例を第 8 図に示す。ここでは高温炉壁を模

擬したふく射板からの一次元ふく射伝熱と、モジュール内の三次元伝熱および電流分布解析が実行される。熱電変換素子の物性値をモジュール製作メーカーから入手して、実験における各部の温度データや発電データとの合わせ込みから、熱および電気的な接触抵抗値を見積もった。第 9 図は、



第 8 図 モジュール解析出力例
Fig. 8 Simulation results



第 9 図 解析による発電電力量の予測
Fig. 9 Analytical prediction of electric energy generated



第10図 抵抗加熱式工業炉への適用概念

Fig. 10 Applied concept to industrial furnace of resistance-heating type

最高出力を与える動作点を求めるための変換効率評価試験に対応した熱電変換量の解析結果である。ゼーベック効果を考慮するための項を追加したことによって、解析手法の改善を行うことができ、実験を良好に模擬できた。これらの解析結果は応力解析ツールと連携させることで、モジュールの電気的・熱的検討に加え、構造的評価にも役立てることができる。

5. 抵抗加熱式工業炉への適用

抵抗加熱式真空熱処理炉は熱電変換システムの適用にたいへん適した条件にある。その適用概念を第10図に示す。

現在普及している真空熱処理プロセスに用いられる炉の多くはバッチ式である。断熱性能を高めれば運転時の熱損失は軽減されるが、冷却時間が長くなり、炉の稼働率が低下する。このため、ヒータを内蔵する中央部の高温断熱壁の断熱性能には一定の制限を設けており、この断熱壁からのふく射熱は、真空炉外壁の水冷ジャケットを流れる冷却水を介して排熱されている。このように、高温熱源と低温熱源が真空域を介して二次元的に対向しており、炉外壁の内面に、高温部電極を露出させたハーフスケルトン型の熱電変換モジュール（第2図参照）を取り付ければ、ふく射伝熱方式の特長が発揮されて変換効率の大幅な改善が十分に期待できる。

試算では、200 kW 高温炉からのふく射損失熱量は、処理温度の上昇につれて高くなり、1 300℃において抵抗加熱電力の約60%にも達する。この場合、実用的なモジュール効率15%の熱電材料が開発されれば、発電率80%以上である本方式によって、6 kWを超える廃熱回収が可能となる。この技術は新規の炉への適用はもとより、既存の工業炉システムに対しても、熱電発電パネルとユニットを事前に準備すれば、大きな改造を加えることなく適用が可

能である。そのほか、材料を積極的に冷却する連続式工業炉の冷却部や、製鋼関連設備でのしゃく熱した材料に対する防熱パネルなどに適用が考えられる。

回収される直流電力は、単独では炉制御用に、あるいは盤内冷却や除湿電源などに活用が可能である。また、複数の炉から回収した電力の集約による工場ユーティリティとしての利用、さらには停電時などの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る。発電量は多くないが、技術進歩の目ざましい蓄電設備との組み合わせによって、用途はさらに拡大するものと思われる。このように、排熱回収の熱電変換システムを開発できれば、民生や産業の各分野で大幅な省エネが達成できる。

6. 結 言

熱電変換材料の開発とモジュール効率の向上は多くの研究機関で盛んに行われている。実用化・事業化においては、その高い性能を生かして、いかに高い装置化効率を達成するかが大きな課題の一つとなる。ここに紹介したふく射伝熱方式熱電変換技術は、この課題の克服に有効であることが示された。さらに、モジュールの適正化も含む熱電発電システムの解析技術を整備することができた。

なお、本稿における実証試験は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成を受けて実施（2002～2006年度）された。

参 考 文 献

- (1) 太田稔智：高効率熱電変換システムの開発 日本熱電学会誌 Vol.4No.2 2007年10月 pp.15-17
- (2) 梶川武信 監修：熱電変換技術ハンドブック 株式会社エヌ・ティ・エス 2008年12月
- (3) 財団法人エンジニアリング振興協会：抵抗加熱式工業炉用熱電変換システムの開発 熱電発電フォーラム講演資料集 2006年10月
- (4) 財団法人エンジニアリング振興協会：カスケードモジュールの開発（高温域 Co-Sb 系，低温域 Bi-Te 系材料） 熱電発電フォーラム講演資料集 2005年10月
- (5) C. Tokunaga, K. Fujita, T. Ota and J. Ochiai : Development of Thermoelectric Power Generation System in Industrial Furnace, Proc. 23th International Conference on Thermoelectrics (2004)