

熱電変換応用技術の未来像

Future of Thermoelectric Energy Conversion System

梶川 武 信*

Takenobu Kajikawa

1. 序

熱電変換応用技術即ち熱電発電及び熱電冷却システム技術の未来像を、熱電変換技術の持つ固有の特徴と発電については、主に熱源と、冷却においては、特に利用形態の各々の特性とを如何に一致・整合していくかという視点から、その発展の流れを概観しながら検討してみようと思う。熱電変換応用技術は、歴史的にも発電と冷却の各々の技術が相互に絡み合い、刺激し合いつつ進展してきており、1つ1つ切り離すことは、難しい。強いて分けるとすると、発電においては、変換効率と信頼性に関わる技術に、冷却においては、制御性と局所性に関わる技術に重点が置かれてきていると考えることが出来る。共通的なことは、「性能向上」及び「経済性の達成」技術が挙げられる。図-1に熱電変換システムを発電と冷却に分けたときの歴史的なシステム目標の大きな流れを示した。

歴史的には、まず発電が先行し、1900年代初期では、当時の熱電変換システムの変換効率は、蒸気機関を凌駕しており、将来は熱電変換システムが大勢を占めるとさえ考えられていた。しかし、熱電発電が実用機と

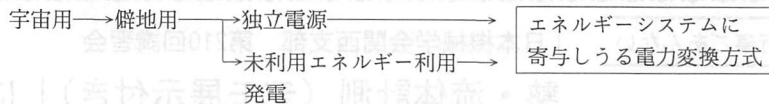
して最初に力を発揮したのは、宇宙用としてである。宇宙用では、特に信頼性技術にウエイトが置かれていたと言えよう。図に示すようにその波及効果として、僻地用電力源が発展し、現在独立電源や自然エネルギー及び各種排熱エネルギーの有効利用の観点からの熱電発電システムの開発に向かっており、最終目標は、エネルギーシステムの中で有る程度の電力源としての貢献できる位置を占めることである。

一方、冷却は、発電より一步先行し、1960年代には実用化している。図に示すように代表として、恒温槽を挙げたが、比較的小型で制御性が評価されたものである。技術の発展は、2つに分かれ一つは、精密制御性の追求であり、もう一つは、局所性を発揮させることであったと言える。現在もこの二つの流れがフロン等の冷媒による地球環境問題への対処できる脱フロン冷却・冷蔵・空調方式を最終目標として熱電冷却システムの開発が進められている。精密制御性と局所性に重点を置いた技術と最終目標である大規模利用を前提とした技術とのつながりは、底流で高性能化、低コスト化技術において結びついている。

以下に、熱電発電と、熱電冷却応用技術に分けて、

熱電変換システム

発電



冷却



図-1 熱変換システムの歴史的発展の流れ

* 湘南工科大学工学部電気工学科教授
〒251 藤沢市辻堂西海岸 1-1-25

各々のニーズに対する熱電変換技術の対応とその技術開発の現状及びその将来性を検討し、未来像に迫ってみたいと思う。

2. 熱電発電システム技術

2.1 技術評価指標から見た熱電発電システム

p形とn形の2種類に熱電半導体を熱的に並列に、電氣的に直列に接続し、接合部に温度差を与えると、熱流が高温源から低温源に流れ、両端に起電力が発生する。外部に負荷を接続すれば、回路に電流が流れ、そこから電力を取り戻すことが出来る。熱エネルギーを電力に変換する最も簡単な方法である。

熱電発電システムは、構造が単純であること、高い信頼性を持ちうること、頑丈で持ち運びが容易であること、耐久性に優れ、規模に依存することなく、小規模分散型にも適用可能であること、熱源の種類に対応した柔軟な材料設計が出来ること、効率が一般的に低いこと、現時点では、価格が高いこと等の特徴を有している。

熱電発電システムの最大の効率 η_{max} は、局所解析によれば次式で示される。

$$\eta_{max} = (T_h - T_c) / T_h \cdot (M - 1) / (M + T_c / T_h) \quad (1)$$

$$M = (1 + Z(T_h + T_c) / 2)^{0.5} \quad (2)$$

$$Z = \alpha^2 \sigma / \kappa \quad (3)$$

ただし、 T_h , T_c , Z , α , σ , κ は、各々高温接合部温度、低温接合部温度、性能指数、ゼーベック係数、導電率、熱伝導率を示し、 M は、システムの内部抵抗 R と負荷抵抗との比 $m = RL/R$ の最大効率となるため

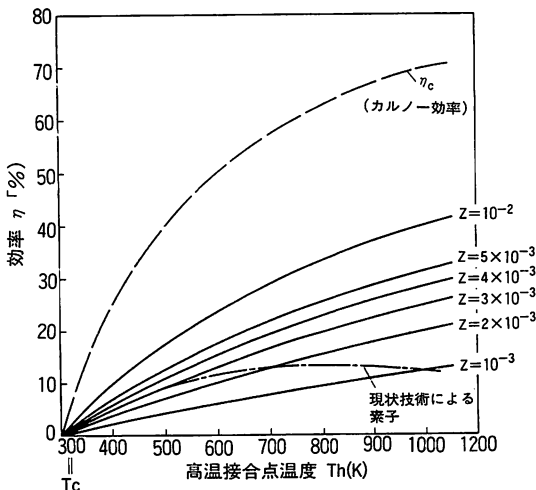


図-2 熱電発電における効率

の最適値である。図-2に性能指数をパラメータとして、横軸に高温接合部温度をとり、 η_{max} の変化を示した。Z-無限大でカルノー効率に近づくことが分かる。温度を850~900K (低温接合部温度373K) とした場

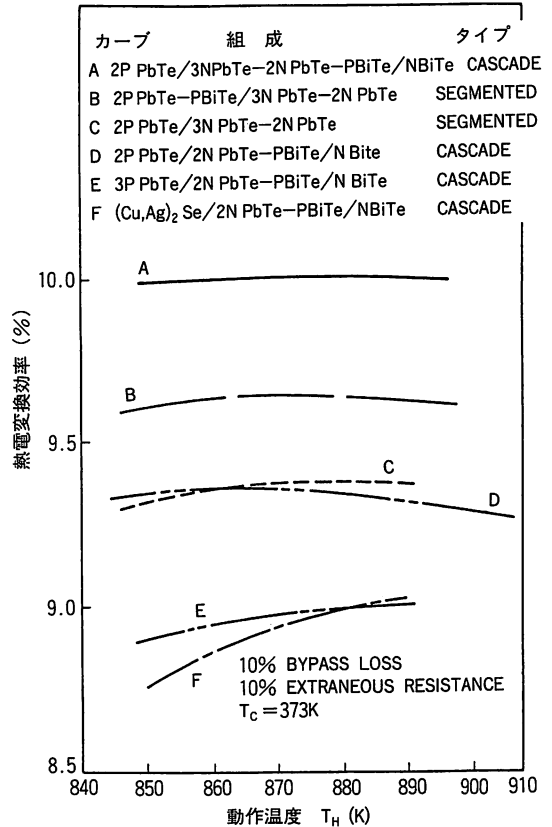


図-3 熱電発電システム効率の実績例¹⁾

表1 エネルギー評価指標から見た熱電発電システムの評価

エネルギー変換効率	現状で10%程度、一般に近い
発電出力	数μW-数100kW、柔軟性大
エネルギー密度	3-5kW/m ²
応答性	大、熱容量による制約
モジュール化	良好
スケール効果	なし
耐久性	大、20年以上実績あり。
安全性	駆動部が無く、取り扱い容易。
エネルギー源への対応	良好
信頼性	大、構造単純。
保守・管理	容易、20年以上無保守実績あり。
材料資源制約	一部にある。
環境負荷	材料精製時に注意が必要。
民生用への波及	大

合の熱電発電システム効率の実績例を図-3に示した¹⁾。現状では、約10%程度が得られている。

エネルギーシステムの評価因子から熱電発電システムの特徴を検討してみると表1の様にまとめることが出来る。これらの長所を生かきってシステムの効率向上及び、低コスト化技術の推進が実用化の成否にとって重要となってくる。そのためには、(1)各々のシステムのニーズを、より明確にすること、(2)高温源から低温源への温度配分をきめ細かく明らかにして、熱電材料の持つ効率を最大限システムの中で発揮させる技術開発を行うことが必要である。

2.2 熱電発電システム技術のポイント

熱電発電システムは、高温源—熱電モジュール（絶縁層—電極—素子—電極—絶縁層）—低温源に至る構成から成り立っている。技術の目標は、高温源と低温源の間の熱源の持つ熱流と温度差を以下に効率よく配分し、素子の持つ性能を最大限引き出すことにある。ただし、高い信頼性と経済性を満たすことは前提条件となる。以下に i) 宇宙用における熱電モジュール技術の進展を通して信頼性を確保しながら、熱電の効率及び、出力密度を向上させていった道筋をたどってみる。ii) 廃熱利用を目指したサーモサイホン方式の熱電発電を取り上げ、種々の不純物の混入した化学的に活性なガスを熱源とした場合の対応例として検討する。

i) 宇宙用にみる熱電モジュール技術の進展

1961年に打ち上げられたSNAP 3 (2.7W) から、16年後の1977年ボイジャー I, II (出力500W) が軌道に乗り、現在も太陽系外で活動を続けている。図-4に、ボイジャーに搭載された熱電発電システムのユニカップルと呼ばれる素子対の構造を示した²⁾。ベリリウム

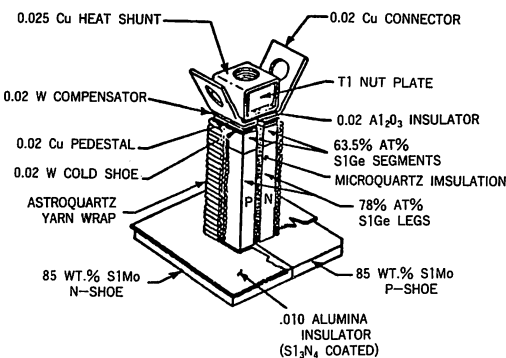


図-4 熱電発電ユニカップル²⁾

の外筒に入れられた13対×24列の312対が、熱源 (PuO₂) に直接接触して発電する。二連の直並列回路結線となっていて、素子対のどれかが短絡又は、オープンとなっても稼働に支障を起こさないようになっている。高温側1000°C、低温側を300°Cである。

1985年のガリレオ衛星には、更に進んだモジュール構造が採用された。図-5にその概要を示す。1対方式でなく、モジュール方式を採用し出力密度の向上を目指した。3.5Vのモジュール (18対) 8個を直列接続し28Vを得ている。

高温部は、シスコンの拡散接合になっており、低温側は、タングステンコーティングが施されている。端部及びリード線 (Ni) はSiO₂ ガラスコーティングされている。表2に、宇宙用熱電発電システムの性能の変遷を示した。特に、初期に比べ重量当たりの出力に大きい向上が見られる。

更に、大型化を目指し、原子炉を熱源とし、熱媒体に液体金属 (NaK) を用いたSP100が計画された³⁾ (1994年に中断)。図-6にモジュール及びシステム化の様子を示した。100kWシステムに対して、(a) に示す8素子対からなるセルを2段10×6列で、34.8V、1.5 kWeの1プレースを構成する。このプレースを6枚併せて、9 kWeのユニットを作り上げ、このユニット12個で、100kWe (108kWe) システムを構成する。1プレースの大きさは、164.4×363.2×30.2mmとなっている。出力密度は、25kWe/m²の高い値となっている。基本は、8対の素子対からなるセルであり、信頼性を確保しつつ熱応力を緩和し、且つ付加的熱抵抗を最小限にする努力が為されている。

宇宙用の波及効果が、化石燃料 (石油、天然ガス)

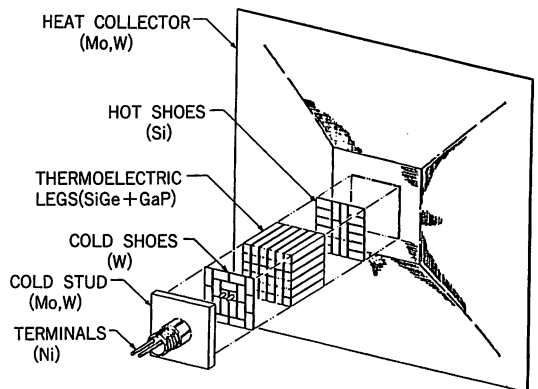


図-5 ガリレオ衛星搭載熱電発電モジュール²⁾

表2 宇宙用熱電発電システムの性能の変遷

	SNAP-3 A	SNAP-9 A	SNAP-27	SNAP-19	MHW-RTG	CPHS-RTG
Mission	Transit A	Transit 5 BN	Apollo	Pioneer	Voyager	Galileo/Ulysses
BOM ^{*1} power/RTG, W(e)	2.7	26.8	73.4	40.3	158	292
Thermoelectric Type	PbTe	PbTe	PbTe	PbTe/Tegs	SiGe	SiGe
Pu-238 Fuel Form	Metal	Metal	Oxide Microspheres	PMC ^{*2}	Pressed Oxide	Pressed Oxide
Conversion efficiency%	5.1	5.1	5.0	6.2	6.6	6.6
Specific Power W(e)/kg	1.29	2.2	2.3 ^{*3}	3.0	4.2	5.2

* 1 : Beginning of Mission

* 2 : Plutonia molybdenum cermet

* 3 : The SNAP - 27 specific power is shown with the fuel-cask mass included

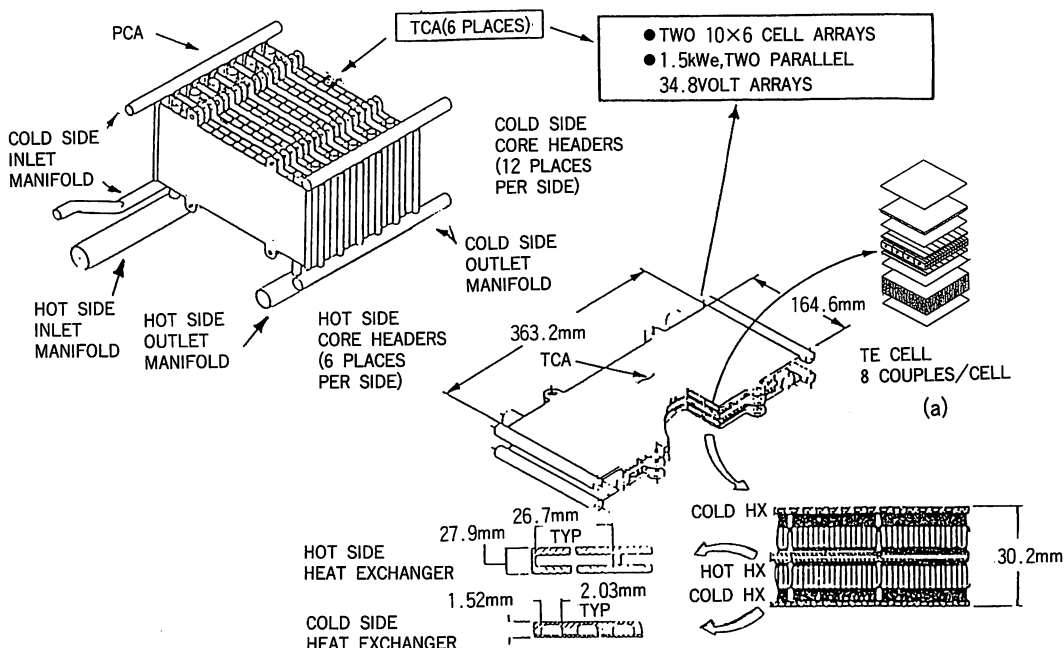


図-6 100kW用熱電発電³⁾

を熱源とする独立型システムへと及び、100W~500W級軍用の可搬形熱電発電システム、僻地用の30~500W級通信中継局電源及び、パイプライン電食防止用電源として採用されるようになってきている。

ii) サーマサイホン方式廃熱利用熱電発電

各種工業炉、ボイラー、プロセス排熱等の産業排熱は、排熱ボイラーや空気余熱用として利用されているが、熱輸送問題や負荷整合性の問題など実際の運用上に困難があり、そのまま利用されずに排出されている場合が多い。このような排熱を熱電発電によって質の高い電力に変換し、その一部でも回収することが出来れば、エネルギーの有効利用の観点から好ましいこと

といえる。

産業プロセス排ガスは、一般に粉塵を含みまた酸など腐食性が激しい等の特性を持つ。このような熱源に対する熱電変換システム化技術として、サーモサイホン方式の熱電発電が試みられた。

この方式は、図-7に示されるように、排ガスを熱交換器(排熱ボイラー)に導き、熱をクリーンな高圧蒸気に変換する⁴⁾。高温高圧蒸気は上部に置かれた熱電発電モジュールの高温源として作用する。この方式は、(a)熱電素子を排ガスの汚損から保護することが出来る。(b)蒸気側は、機械的拘束を受けないので、素子への熱応力及び接着部への応力を小さくできる。

(c) 熱電素子の高温接合部にはほぼ同じ温度を供給でき、均一な発電が可能となる。(d) 熱電発電側と排ガス側と切り離されているので、それぞれの機器の点検保守が容易である。(e) 既存の排ガスボイラーを活用できる。等の利点を持っている。欠点は、排ガスボイラーが必要となること、排ガスを或る一定の流速で流動させるブローフが必要になることである。その構造は、図-8に示すようなプレートフィン水冷部をサンドイッチする構成となっている。排ガス温度130℃、冷却水温度20℃とし、熱電材料は、BiTe系材料が用いられた。素子は、11.5×11.5×3 mmで、17対を1モジュールとして44個(748対)取り付けられている。出力は、200Wである。最適排ガス流速は、8 m/sで

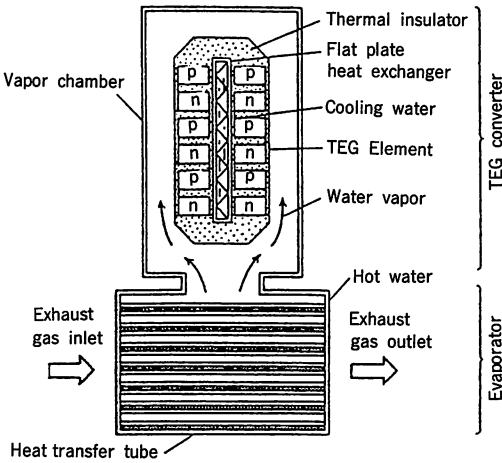


図-7 サーマサイホン形排熱利用熱電発電³⁾

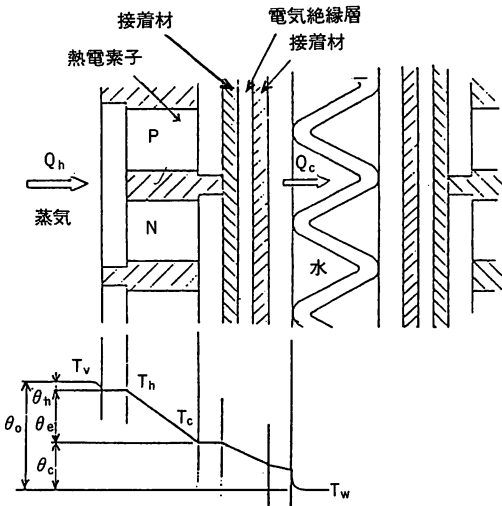


図-8 モジュール構造⁴⁾

あった。変換効率は、1.3%であったが、200℃に排ガス温度を上げると4.5%になることが推定されている。

素子間でなく熱源間の温度差を問題にする実際的な場合は、熱伝達を考慮した温度差の適正配分が必要であり、システム化技術の大きな部分を占める最適化技術である。図-9及び図-10に素子厚みに対する温度差配分の変化とそれに伴う効率の変化を示した。熱源条件に対応したシステム設計技術の確立が必要であることを示している。この場合には、規模が小さいので局所解析と実験とは良い一致を示したが、実用規模においては、流れ方向の分布が全体性能に大きい影響を及ぼすので、多次元解析が必要となる。最適化において重要なことは、その評価指標を何にとるかということ

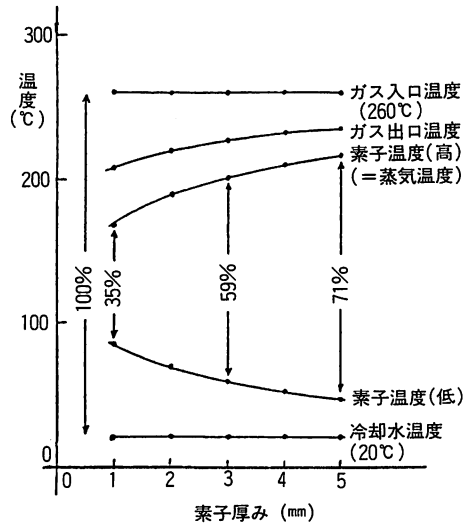


図-9 正味出力最大の場合の素子厚みと素子温度⁴⁾

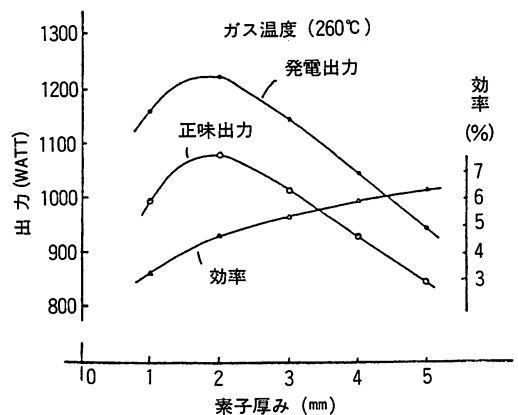


図-10 熱電素子厚みと出力、効率⁴⁾

である、最終的には、コストであるが、熱電モジュールに注目したときには、コンパクト化を中心にした： (W/m^2) 、熱電材料使用量を中心にした： (W/kg) もその評価指標になりうる。

また、図-11に示すように⁵⁾、廃棄物燃焼の温度変化に見られるように、時間的に激しい変化をしているので、より実際の検討には、動的解析が必要となる。図-12に2つのモジュールの並列運転時に1つのモジュールの温度が急変した場合の特性を示したが、各々単独で動作させた場合より大きく出力が低下すること示しており、大規模システムの実際の課題を提起している。

3. 熱電冷却システム技術

3.1 熱電冷却システム

熱電冷却技術とは熱電半導体に電流を流すとその両端に電流に比例した発熱と吸熱が起こり、温度差が発

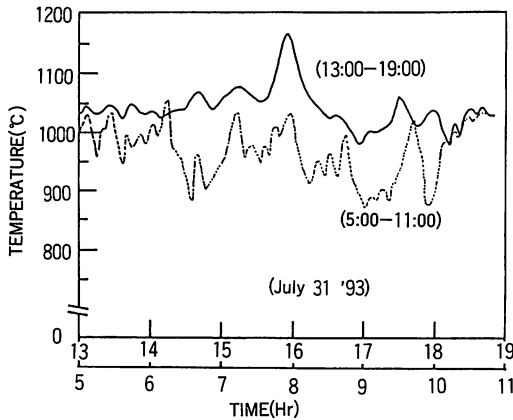


図-11 燃焼温度の変動の実例⁵⁾

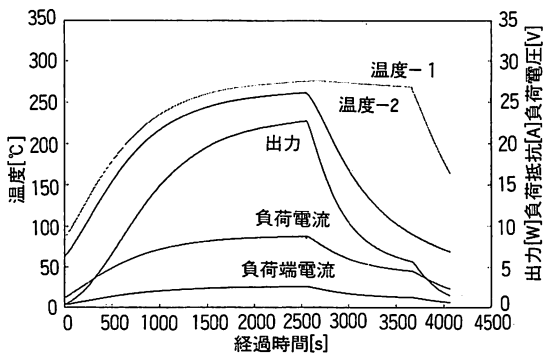


図-12 2個のモジュールの並列接続運転時に一つの熱源温度変化による全体出力への影響

生するというペルチェ効果を利用して冷却しようとする技術である。これは、固体素子を用いてその界面で熱を吸収するという他に見られない特異な現象である。

その基本的構成は、固体素子と電極からなるモジュールと熱伝達サブシステム、駆動用直流電源である。もっとも特異の特徴は、温度の高精度、高速制御性及び、局所性である。温度領域は、原理的制約はないが、従来は、 $100^{\circ}C$ から $-100^{\circ}C$ である。可動部分がないため、保守作業がいらず高信頼性、堅牢（ $20,000G$ に耐える）な長寿命システムとすることが出来る。運用においては、負荷変動に対する柔軟性、方向を変える可逆性もあり、遠隔性も優れている。

熱電冷却の素子の両端でのエネルギー収支は、吸熱量 Q_c 、発熱量 Q_h 、各々の温度を T_{c_j} 、 T_{h_j} 、電流 I 、内部抵抗 R 、熱コンダクタンス K とすると次式で表される。

$$Q_c = \alpha T_{c_j} I - 1/2 RI^2 - K(T_{h_j} - T_{c_j}) \quad (4)$$

$$Q_h = \alpha T_{h_j} I + 1/2 RI^2 - K(T_{h_j} - T_{c_j}) \quad (5)$$

ただし、 α は、ゼーベック係数である。

冷却のための消費電力 P は、 $(\alpha(T_{h_j} - T_{c_j}) + RI^2)$ である、成績係数COPは、 Q_c/P で表され、図-13にその特性を示した。 $dT/dI = 0$ (T_{h_j} , Q_c 一定)、最大成績係数、 $d(COP)/dI = 0$ (T_{h_j}, T_{c_j} 一定)よりそれぞれ求められる。例として、 $300K$ 付近で性能指

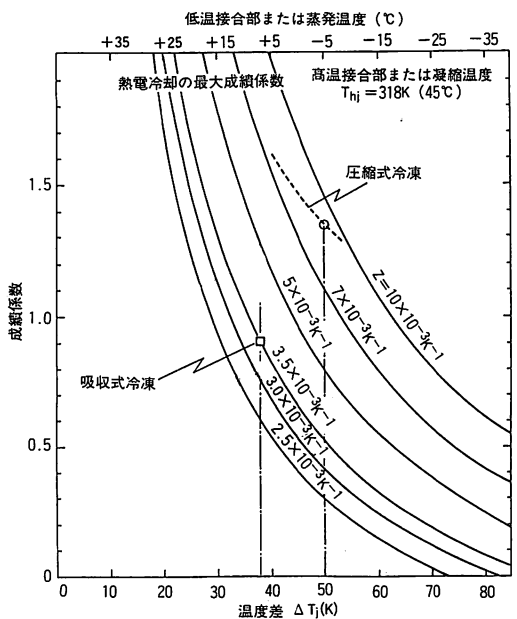


図-13 熱電冷却とその他冷却方式との成績係数の比較

数Zが $3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ で、 20°C の温度差を得るとき、熱電冷却システムでのCOPは、約2で従来の圧縮式の約1/3である。

3.2 熱電冷却システム技術のポイント

熱電冷却は、その特徴を十分発揮することによって、他の冷却方式では、代替出来ない分野から実用化や開発が進んでいる。最終目標は、序で述べたように環境保全性、個人のアメニティの実現容易性を加味して、従来の圧縮式冷却冷蔵・空調システムの代替を図ることである。

その戦略は、熱電冷却のもつ局所性、及び、高精度制御性を十分活用して、他の追従を許さない分野を更に拡大して、材料の高性能化を含めた技術の高機能化及び材料の高性能化を含めた技術の成熟度を達成すると共に、熱電材料本来の性能が発電システム同様、熱電冷却システムに置いて十分発揮できるシステム化技術を確立していくことである。以下に i) 熱電冷却固有の局所冷却システム及び、ii) 中・大型規模をね

らう熱電冷却システムの高性能化技術の展開を例示とともに示し、技術のポイントを明らかにしていきたい。

i) 局所冷却システム技術

小型電子デバイスの冷却としては、固体撮像素子、レーザダイオード、発光ダイオード、赤外線検出素子、GaAsFET、マイクロ波検出素子、分光計、CPU基板、LSI基板、パラメトリックアンプ及び、マイクロ波トランジスタアンプ等の冷却で、枚挙にいとまがない。基本的には、冷却による低雑音化、動作安定化、信頼性向上、長寿命化に寄与している。

例示として、レーザダイオードの熱電冷却システムを図-14に示した⁶⁾。レーザダイオードの消費電力は、4~8.28Wで、熱除去量は、20.1~25.0Wとなり、且つその表面を 20°C に保つように設計される。接触面積は、 0.45cm^2 (熱流束 $8.1\text{W}/\text{cm}^2$)である。接触熱抵抗を低減するため、 0.13mm のインジウム箔を挟み、 $1.14\text{W}/\text{cm}^2\text{K}$ の熱抵抗としている。高い熱流束を効率的にとるために図に示されるような配置をとっている。ここでは、 $1.91\text{cm} \times 1.91\text{cm}$ の4つのモジュールが取り付けられる。除熱側には、高さ 3.33cm の2つのアルミフィン ($12.7 \times 7.6\text{cm}^2$)を取り付け空冷している。図-15に本システムの熱の伝達を回路的に示す。これらの熱設計に基づき、熱電モジュールの動作が決定される。

電子デバイスは、極低温状態での使用が望ましい場合があり、大がかりな装置を必要とせずを得る方法として、モジュールの多段化技術がある。図-16にその概念図を示した。 -120°C 程度を得るためには、7~10段の多段化が現状では必要である⁷⁾。しかも、 10^{-6} T

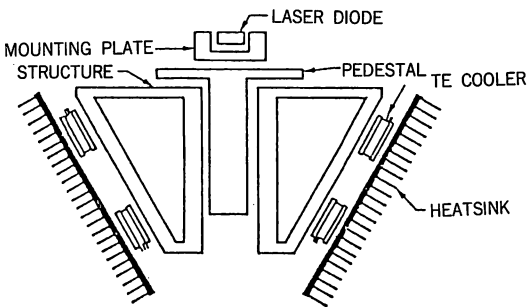


図-14 熱電冷却式レーザダイオード⁶⁾

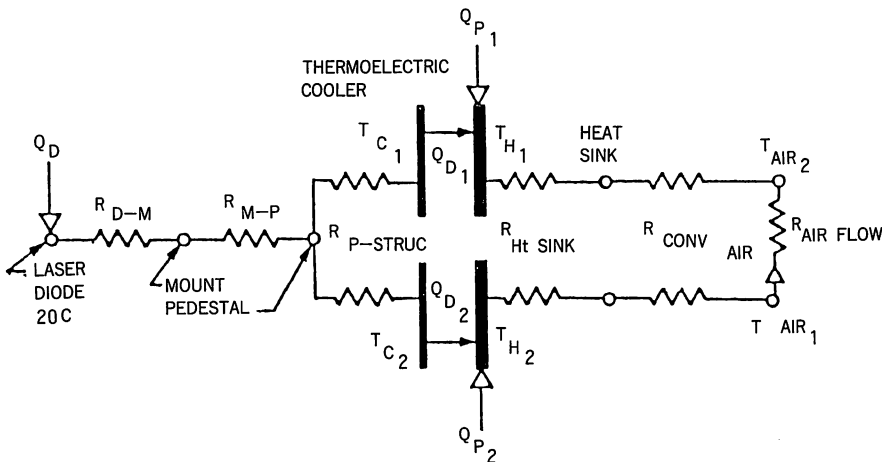


図-15 熱回路解析⁶⁾

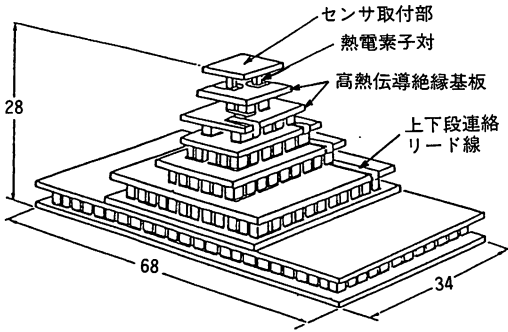


図-16 -120°C電子クーラの寸法と構成

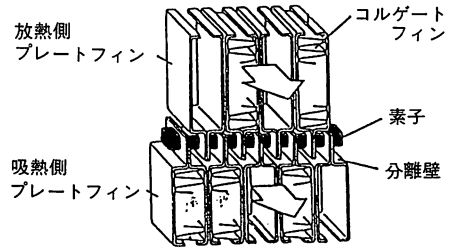


図-17 素子配列と熱交換の一体化⁸⁾

orrの真空と厳重な輻射シールドが要求される。

この分野では、冷却に必要な部分のみを高精度で冷却するという熱電冷却の最も得意とするところであり、低温化についても、高温超伝導デバイスへの適用など、将来性は大きいと考えられる。

ii) 熱電冷却システムの高性能化技術

ここでは、局所冷却においては余り考慮されなかった高効率化、低コスト化が、大きい技術目標となる。従来方式では、素子自体の性能の50%程度しかシステムで発揮されていないという場合が多く、熱解析による放熱条件の改善や、p形とn形の直列接続の間の電極を放熱及び冷却面とするように素子配列と冷却とを一体として発想することによるシステム全体効率の向上の提案が為されている。図-17にコルゲートフィンと組み合わせた空気-空気冷却方式を例として示した。

4. 今後の課題と展望

熱電変換応用技術の未来像に迫るため、前節までにそのシステム化技術におけるポイントとなる項目について調べた。これらの上に乗って熱電変換システムにより広範な展開を期するための今後の課題を本節で検討してみたい。

課題は、1) 設計及びシステムの最適化等のソフト的課題、2) 熱電変換モジュールの高性能、高信頼性化技術の課題、3) 素子材料の高性能化技術の課題に大別される。

1) ソフト的課題

システムの規模、稼働条件を設定することによって次のようなシステム課題が出てくる。

a) 設計指針の決定。即ち、システムの経済性、システムからの最大熱回収率、最大出力条件、定常的出力供給、システム全体の環境安全性、固定費の制御、段

階的スケールアップレベル設定、将来の需要予測を組み入れたシステム構築シナリオの検討、b) ユニット規模の決定、電圧・電流の決定に対する最適化の課題容量、安全率、制御性、変動に対する応答性及びそれらの冗長度の決定。

2) 熱電変換モジュール化技術の課題

a) 熱応力対策技術、b) 腐食環境、電食対策技術、c) 電気絶縁の耐久性、d) 熱伝達と熱電変換を一体化させたシステム技術、e) 熱除去促進技術、f) 低補機動力システム技術の確立。また、熱電モジュールについては、電極と素子との接合が課題となる。熱応力緩和FGM(傾斜機能材料)技術、熱応力フリー電極構造、及びモジュールの故障を自発的に対処する自己修復機能熱電モジュール技術等の確立が望まれる。

3) 素子材料の高性能化技術

本特集の中で既に述べられているような新材料の広範・活発な開発の展開、FGM等に見られる微細構造制御材料技術の確立が必要である。材料研究と並んで、実験室材料を生産ラインにのせるプロセス技術及び素子化技術の重要性を忘れてはならない。

5. むすび

熱電変換応用技術の進展の方向を眺めてきたが、以下のようにまとめることが出来る。

熱電発電システムでは、特殊から一般化へという流れが必要であり、特徴の発揮できる小型分散システム、排熱や自然エネルギー等の未利用エネルギーを対象とした分散システムへの適用の方向と考えられる。また、熱電冷却システムでは、よりマイクロにまた、集積化される方向と大規模化に進む2つの方向がある。

材料とシステムは、車の両輪の如く密接な関連を持ち発展していく、高性能材料の出現は、新しいシステムの展開を引き出す。熱あるところに必ず適用する場を持つ熱電変換システムは、非常にユニークな特徴のあるシステムであり、熱と電気、材料・デバイス・シ

ステムとが密着したインテグレートされるべき技術である。

参考文献

- 1) J. C. Bass, N. B. Elsner, Design status of the improved fossil fired thermoelectric generator program, Proc. of 4th International Conf. on Thermoelectric Energy Conversion 26-28 (1982).
- 2) P. A. O' Riordan, The U. S. Department of Energy's thermoelectric development program for space power, Proc. of 4th ICTEC 15-25 (1982).
- 3) W. R. Terrill, V. F. Haley, Thermoelectric converter for SP-100 space reactor power system, Proc. of 21th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference 869448, 1950-1961 (1986).
- 4) M. Oaku, K. Uemura, Thermosiphon-type thermoelectric electricity generating system using a low grade heat source, Proc. of 8th International Conf. on Thermoelectric Energy Conversion 165-170 (1989).
- 5) T. Kajikawa, M. Ito, E. Shibuya, N. Hirayama, Conceptual design of thermoelectric power generating system utilizing heat of combustible solid waste, Proc. of International Conf. on Thermoelectrics 491-496 (1994).
- 6) R. K. Wedal, G. Gal, G. A. Horine, Thermal analysis of a laser diode design, ASME 57, 57, 239-243 (1986).
- 7) D. M. Rowe, C. M. Bhandari, Modern Thermoelectrics, Reston Publishing Co. Inc. (1983).
- 8) 西沢ら, 新型素子冷却システムの開発, 第27回空気調和・冷凍連合講演会29-32 (1993).

共催行事ごあんない

「第33回燃焼シンポジウム」について

<主催> 日本燃焼学会

<共催> 日本学術会議熱工学研究連絡委員会
日本化学会他

<開催日> 平成7年11月23日(木)~25日(土)

<会場> 東京都立科学技術大学 科学技術交流施設
〒191 日野市旭ヶ丘6-6

<講演申込締切日> 平成7年7月14日(金) (必着)

<前刷原稿提出締切日> 平成7年9月14日(木) (必着)

<講演申込書請求先・問合せ先>

〒191 日野市旭ヶ丘6-6

東京都立科学技術大学航空宇宙システム工学科内
第33回燃焼シンポジウム事務局

TEL 0425-83-5111

ext. 3506(湯浅) / 3514(後藤)

FAX 0425-83-5119