

電力システム用電源としての 固体電子装置による熱電気直接発電

松 浦 虔 士*

1 はじめに

Solid State Power Electronics が電力システムにおける電力の変換，制御の分野に導入され，信頼度の高い高電圧直流送電 (HVDC) が実現した．現在のパワーエレクトロニクス分野では，HVDC が処理する電力変換の電力の規模 (数百 MW) は極めて大きいといえる．しかし，Solid State Power Electronics は，まだ，電気事業レベルの電力の発生 (発電) という領域には踏み込んでいない．

太陽電池は，昨今多くの研究者が手がけているが，中緯度地方では敷地面積当たりの平均電気出力が $15\text{w}/\text{m}^2$ 程度であるから大規模電源とはなり難いであろう．表題の研究は，太陽電池のような光→電変換によるアプローチではなく多数の P 形 N 形半導体素子による熱→電変換 (矢印が左右を向いていることにも重大な意味がある—後述) を対象としている．

このような固体電子装置の静止電源で，海洋温度差のような低質の自然エネルギーでも，また原子炉 (高温ガス炉，核融合炉など) の発生する高温の熱エネルギーでも，直接大規模の電気エネルギーに変換すると同時に，それを電力網に直結し，電子効果による高速の入出力制御

を併用して電力システムの体質を変えようとすることも本研究は狙っている．ここでは，1981年に開始したこの研究のこれまでの経過と今後の展望を述べる．

2. 熱電気発電器の出力性能

図1は，多数の P 形および N 形熱電半導体素子対が，熱エネルギーの運び手である流体 (水，海水，He ガス etc) からベリリアセラミックの薄板を介してエネルギーを得，電気出力を発生する場合の積層モジュール構成を示している．このような積層モジュールによる熱電気発電器を実際に著者の実験室で製作した．図2はその1部の側面写真であるが，発電器全体は，Bi, Sb, Te, Se, 4元合金の PN 素子対3720組をベリリアセラミック薄板 (厚さ 0.6mm) で挟んだ3層のモジュール群で構成し，矩形断面 ($80\text{mm} \times 40\text{mm}$) のアルミ製流体ダクトと一体化してある．全体を2ユニットで構成しており，全長は 3m におよんでいる．

図3は，PN 31素子対よりなる各単位モジュールの開放端子電圧を発電器長さ方向に測定した結果である．ユニット端部では，流れの状態が不安定で，管とモジュールとの接触も不均一となるため，中央部より出力電圧が低下してい

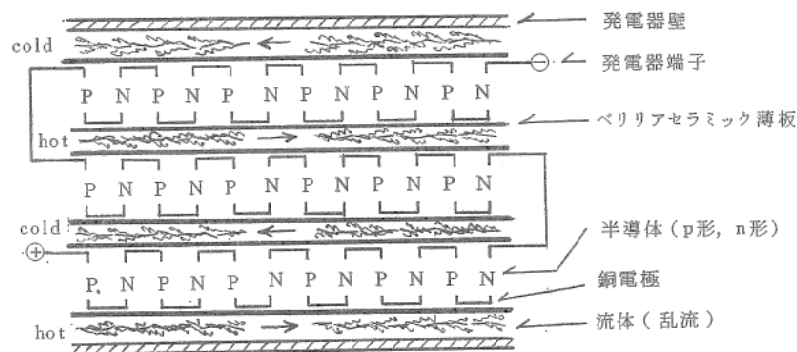


図1 モジュール積層形半導体熱電気発電器

*松浦虔士 (Kenji MATSUURA), 大阪大学, 工学部, 電気工学科, 助教授, 工学博士, 電力工学

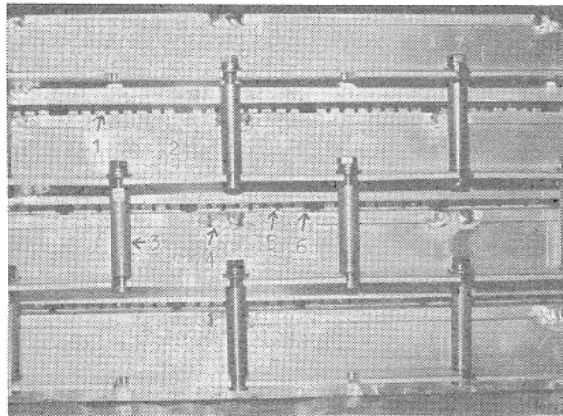


図2 試作積層モジュール熱電気発電器
1-半導体素子, 2-流体ダクト, 3-積層用支柱,
4-積層用金具取付アルミ溶接, 5-銅電極, 6-ベ
リリアセラミック絶縁体

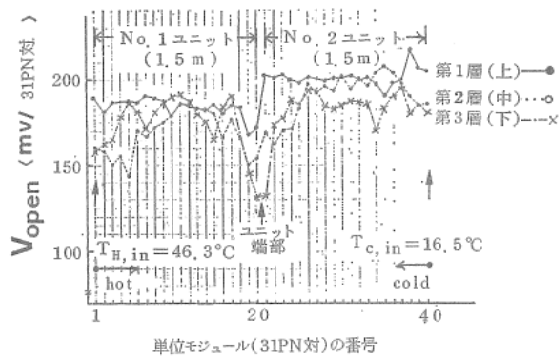


図3 発電器長さ方向の出力電圧分布

る。この辺の均一性を改善することは、発電器ハードの設計・製作上の今後の課題の一つである。図4は、実験用発電器の定常出力特性を高低温流体(水)の温度差 ΔT と流体の平均レイノルズ数 \bar{R}_e をパラメータとして測定した結果である。また、このような積層モジュール構成の発電器出力の計算プログラムを開発し²⁾、それによる予測値とも比較している。両者は乱流域でよく一致しているが、いずれにせよ、ある一つの流体条件に対し最大出力点が存在する。

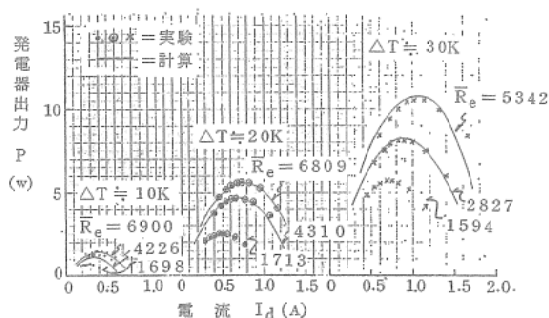


図4 試作発電器の出力特性

出力性能のより一般的な評価を行う目的、あるいは太陽電池などと比較する意味で、一層のモジュールの単位面積当たりの出力 P (w/m^2) を得られた実験値から求めると、 $\bar{R}_e=5000$ のとき、 $\Delta T=20K$ では $P_{max}=14w/m^2$ 、 $\Delta T=30K$ では $P_{max}=32w/m^2$ である。

実際には、流体用ポンプ動力を差し引いた送電端出力 P_{eff} (w/m^2) が重要である。 P_{eff} の求め方については、1984年3月テキサス大学で開催された Fifth International Conference on Thermoelectric Energy Conversion で著者が発表した²⁾。 P_{eff} は半導体に関する電子的パラメータと流体に関する力学的パラメータを用いて表わされる。ここでは、流体が水の場合について計算結果のみを記す。最高水準のカルコゲナイト系熱電半導体 (Bi, Sb, Te, Se 4元合金) の figure of merit は工業的に 2.3×10^{-3} (1/K) のレベルまで到達しているので、 $\Delta T=25K$ 、 $\bar{R}_e=4100$ の条件に対し $P_{eff} \approx 20w/m^2$ となる。通常、全出力 P の数%はポンプ動力に費やされるから、先の実験用発電器で $\Delta T=20 \sim 30K$ 、 $\bar{R}_e=5000$ に対し $P=14 \sim 32 w/m^2$ であったことを考えても、この P_{eff} 値は合理的といえる。ところで、 $P_{eff} \approx 20w/m^2$ は、中緯度地帯に設置した太陽電池(効率10%、日照率考慮)の平均電気出力 $P_{sun} \approx 15w/m^2$ と同程度である。太陽電池の場合、同じ場所に多数の電池を積層することは影を生ずるので意味がない。熱電気発電器の場合は、図2のように多層積層構造が可能であるから、例えば1000層積み上げたとして流体ダクトも含め発電器高さは数十mとなるが、単位敷地面積当たりの P_{eff} は $20kw/m^2$ と高密度化される。

冒頭に述べた電気事業のレベル出力規模を仮に 100 MW 以上とすれば、海洋温度差発電のような極めて低質(低温度差)の自然エネルギーを利用する場合には $5000m^2$ 以上の敷地が必要となるが、この程度の発電所の大きさならば実現可能である。

3. 電力システムにおける熱電気直接発電

前章で半導体素子による熱電気直接発電が電力システム用の電源として、物理的に決して現

実はなれしたものではないということを示した。もちろん、この他にコストの問題があるがコストは流動的であり、新素材・新製法の開発および関連市場の出現により極めてドラスティックに変化すること、また、最近世界的にコスト問題と取り組む勇気ある試みの数々が新しく出現してきているということのみを記すにとどめ、現時点ではあえてこれに触れないことにする。

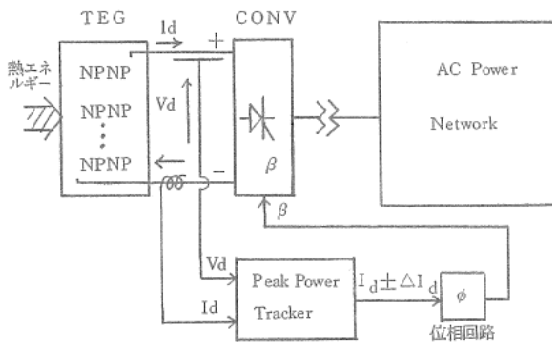


図5 固体電子装置による熱電直接発電と出力制御システム

図5は、半導体素子の熱電気発電器を制御用半導体素子からなる逆変換器を介して電力系統へ接続した状況を示す。このような発電システムには、も早やタービンのような回転機は存在せず、発電部、電力変換部とも静止した solid state の電子電力装置で構成される。したがって、出力の制御は電力変換部のゲートパルスの位相制御を中心として極めて高速に行える。

ところで、海洋温度差発電のように自然エネルギーを利用する場合は、与えられた自然条件の下で引き出せる最大の出力を電力系統に注入するのが望ましい（経済的な）運転パターンである。先に実験で得た $P-I_d$ 特性は、 ΔT によって大きく変化し、かつ常に最大値を有していた。そこで、図6(a)に示すように、例えば ΔT の急変があったとき、定電流制御を行わせている電力変換部（逆変換器）の電流設定値に摂動 ($\pm \Delta I_d$) を加えて出力電力の変化を観測し、摂動の方向と電力の増減の関係から次の摂動方向をきめて行けば、図6(b)のように、過渡変動期間 (A→B) も含め常に最大出力点近傍での運転が可能となる。実際、前章に示した実験用発電器の単位モジュールに対して、 P のサーチを50msecで行った結果、ほぼ理想の P_{max} 追従が達成されることが、図6(a)-②のシミュレーションカーブにより明らかとなった（サーチ時間100msecの制御=図6(a)-①ではやや劣る結果となっている）。最適サーチ時間は、流体ダクト/セラミック絶縁/電極/半導体素子よりなる系の熱伝導と電子伝導の特性に関連しており、大形の発電器の場合についてそれを求める手法を現在研究中である。この摂動観測法による最大出力運転制御は、熱エネルギーのインプット条件の変動や流体ダクト内面の汚染による状態変化などの外乱に対して十分対処し得るもので、信頼性の大きい実用的な出

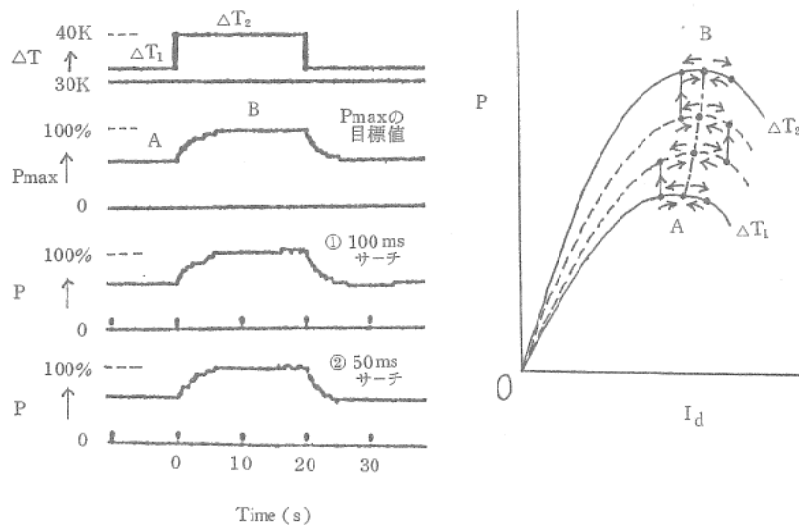


図6 最大出力運転制御（摂動観測法）

力制御方式として期待できる。

4. 今後の研究の展望

図5の電力変換部に順変換の機能を付加し、PN素子対への通電電流方向を発電モードの場合と逆にすれば電力系統からエネルギーを吸収することも可能となる。この機能は、通常の火力や原子力発電所のタービン発電機の同期安定度を高めるために有効と考えられる。この着想が実際にどの程度安定度向上に寄与できるものであるかは、熱電気発電器の過渡出力特性の実験や系統解析を実施しつつ解明中である。

熱電気発電器に関しては、本稿では主として海洋温度差のような低質の自然エネルギーを利用するものについて試作器の出力性能などをまじえ論じたが、高温ガス炉 (HTGR) や核融合炉の高温熱エネルギーを利用するタイプの発電

器は1985年から試作にとりかかる予定である。これに使用する半導体エレメントは、資源的にきわめて豊富なFeとSiからなるFeSi₂ (iron disilicide) を母体とするもの⁹⁾で、高温部は700~800°Cで動作できる可能性があり、出力密度も十分大きなものが期待される。

参考文献

- 1) 松浦, 黒部, 名田, 木下: 電気学会研究会資料 新・省エネルギー研究会, ESC-84-14 (1984)
- 2) K. Matsuura and H. Kinoshita: "An Improved Method in Generating Thermoelectric Power from Low-Grade Heat," Fifth International Conference on Thermoelectric Energy Conversion at the University of Texas, Arlington, March 1984
- 3) T. Kojima, M. Okamoto and I. Nishida: "Semiconducting and Thermoelectric Properties of Sintered Iron Disilicide", *ibid.*