

# 太陽エネルギーを利用した熱電子発電機の発電効率および出力特性

荻野 明久\*、神藤 正士\*  
(2000年12月21日受理)

## Electrode Heating and Efficiency of Solar Thermionic Energy Converter

Akihisa OGINO, Masashi KANDO  
(Received Dec.21, 2000)

### Abstract

A solar energy driven thermionic energy converter is aimed to generate electric power by solar energy, which is used to emitter heating and auxiliary discharge for the establishment of the ignited mode. In the present paper, the conversion efficiency was evaluated to consider the possibility of such a novel thermionic energy converter. In the calculation, output current from the converter was assumed to be equal to the thermionic electron emission current in the case of ignited mode operation. The potential drop induced in the space between the electrodes of the converter is also presumed in the calculation. The emitter temperature was numerically calculated by heat conduction equation as a function of solar power density on the surface of the earth and the emitter surface.

The numerical results show that at a certain emitter work function, the conversion efficiency has a maximum, which increases with solar power and emitter temperature. The conversion efficiency at solar power of 1000 W is typically 9%, when the emitter with light trap for efficient emitter heating by solar light is considered.

The emitter heating carried out using 105x75 cm square fresnel lens approved that SUS emitter with 15 mm in diameter and 1 mm thick was heated up to the temperature higher than 1800 K by solar power density of 840 W/m<sup>2</sup>. This will assure the actualization of the thermionic energy converter proposed here.

The preliminary experiment has been carried out using a Solar TEC operated by solar light illumination. The operation mode remained in unignited mode so that the short circuit current density was only 0.97 mA/cm<sup>2</sup> at  $T_E=1400$  K and  $T_{C_3}=402$  K for solar power density of 919 W/m<sup>2</sup>. In order to increase the output current, it is necessary to induce the ignited mode which will be taken place at  $T_{C_3}$  at least higher than 500 K.

### 1. 緒 言

熱電子発電は、高温に加熱された電極(エミッタ)からの熱電子放出を利用して、熱を電気エネルギーに変換する直接発電である。エミッタから放出された熱電子は、これと近接して設置され低温に維持された電極(コレクタ)で捕集され、負荷を經由して元のエミッタに戻る過程で電気的な仕事をする。熱電子発電器は、多様な熱源が利用でき、理論的な変換効率が高く、コンパクトな形状で高出力が得られるので、宇宙用から地上用まで種々の応用が考えられている。

しかしエミッタからの熱電子自身が作る負の空間電位によって、熱電子はコレクタに到達できなくなり、出力が大幅に抑制されることが熱電子発電の課題となっている。この問題への対処として、電極間隔を1 mm以下に狭くするとともに、発電器内にセシウムを封入し、エミッタ面上での接触電離もしくは電極間空間における体積電離により正イオンを生成することによって、負の空間電荷の中和が行われてきた。さらに、電極間隔を狭くすることで電極間の熱電子の集積を低減できるので、電極間隔は通常1 mm以内となっている。

当研究室では、熱電子発電器の電極間空間に光照射を行い、これによるセシウム原子の光励起・電離を補助放電として利用することで、出力特性の改善を計るための研究を行っている。

これまでの研究で明らかにされている点は、1)エミッタ近傍でセシウムイオンが過剰となるように発電器の動作条件を設定すれば、電極間隔を10 mm以上に広くしても出力電流の低下が避けられること、2)電子過剰の場合に太陽光と類似のスペクトルを持つキセノンランプの放射光を照射すると、非点火モード動作時において、出力電流が10倍以上に増大すること、3)エミッタの仕事関数が2.2 eV以上、熱電子放出電流密度が1 mA/cm<sup>2</sup>以上、空間電荷中和度が10<sup>-2</sup>以下の場合に光照射を行うと、非点火モードから点火モードへの移行が助長されること、が明らかにされた。これらの現象は主としてセシウムの光励起・電離により引き起こされていることで説明できる<sup>1)-5)</sup>。

本研究では上記の成果を基に、太陽エネルギーを熱源とする熱電子発電器の開発を目的とする。本方式の熱電子発電器では、太陽光の長波長成分でエミッタを加熱し、短波長成分で補助放電を行うことにより、太陽光の全ての波長成分が発電に利用されることが期待される。我が国の地表面での太陽光の年平均照射電力密度は、晴天時の南中時で840 W/m<sup>2</sup>であることが知られている。太陽エネルギーは電力密度が低いので、太陽熱温水器や太陽電池など、低電力密度で動作可能な機器での利用に留まっている。しかし太陽光の集光により、高温動作の熱電子発電にも利用が可能となる。太陽電池よりも高い発電効率を実現できる太陽エネルギー利用熱電子発電器は、製造コストが低く利用価値も高いので、地球環境に負担の少ない新たな発電方式として有望である。

本論文では、太陽エネルギー利用熱電子発電器の発電効率を数値計算により評価すると共に、これにより判明する高効率発

\* 静岡大学大学院電子科学研究科 電子応用工学専攻 波動制御講座  
Graduate School of Electronic Science and Technology, Shizuoka University, Hamamatsu 432, Japan

電に必要とされるエミッタ温度を太陽光照射でどの程度実現可能かを調べるためのエミッタ加熱の実験結果を紹介する。さらに予備的な段階ではあるが、太陽光照射による発電実験を行っているので、その成果についても触れる。

## 2. 発電効率の評価

### 2.1. 計算方法

理想モードの熱電子発電器の最大出力 $P_{\max}$ は、出力電圧 $V$ がエミッタとコレクタの仕事関数の差： $V_0 = \phi_E - \phi_C$ に等しいときに $P_{\max} = J_R S_E V_0$ で与えられる。ここで $J_R$ はエミッタからの飽和熱電子電流密度で、Richardson-Dushmanの式で与えられる。また $S_E$ はエミッタ表面積である。理想モードとは、空間電位制限効果や電子-中性粒子間衝突のような熱電子のコレクタへの流れを阻害する要因を全て無視して求めた動作モードで、その出力特性は図1の点線で示される。理想モードでは出力電圧 $V$ が接触電位差 $V_0 = \phi_E - \phi_C$ より低い場合、エミッタから放出された熱電子はすべてコレクタに到達することができる。

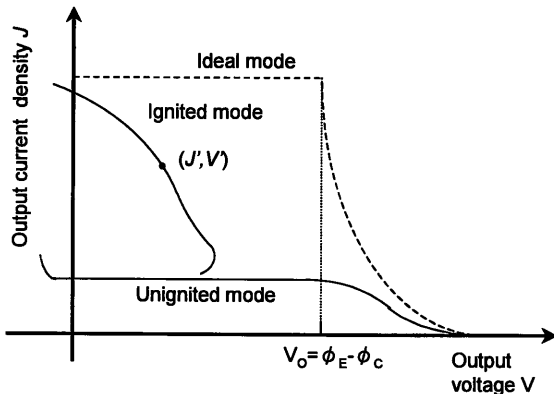


Fig. 1 Typical output characteristics of TEC for ideal, unignited and ignited mode.

しかし現実の発電器では、空間電荷制限効果、電子のセシウム原子との弾性及び非弾性衝突による電子のエネルギー損失、拡散や再結合による電子密度低下などの種々の要因が存在する。これらは、エミッタからコレクタに向かう電子に対する実質的な電位障壁となり、理想モードと比べて最大出力ならびに出力電圧は低下する。図1の実線は点火モードの出力特性の一例である。点火モードでは空間電荷を中和するセシウムイオンが、電子とセシウム原子の衝突電離によって生成されると考えられている。発電器内の電子のエネルギーは0.2 eV程度とセシウムの電離電圧3.89 eVよりもかなり低いため、セシウムの電離過程は累積電離によるものと考えられる。体積電離により生成されるセシウムイオン密度は、通常、空間電荷の中和に十分であることから空間電荷制限が取り除かれ、非点火モードに比べ大きな出力電流を得ることができる。

図2は点火モードにおける電極間空間のポテンシャル分布の一例<sup>6)</sup>であり、横軸は電極間空間の位置、縦軸は空間電位である。点火モードにおける電子の衝突効果は、理論的には発電器内部で生じる電位降下 $V_D$ として取り扱うことができる。物理的には $V_D$ はコレクタの仕事関数 $\phi_C$ を実質的に高めることになるので、新たに $V_B = \phi_C + V_D$ で表現されるバリエインデックス $V_B$ <sup>7)</sup>を導入すれば、 $P_{\max}$ は $V_0 = \phi_E - V_B$ のときに得られる。図2のモーティブ図では、 $V_D$ が考慮されている。なお、 $V_B$ はエ

ミッタとコレクタの温度および仕事関数ならびにセシウム蒸気圧 $P_{Cs}$ を変数とする複雑な関数である。

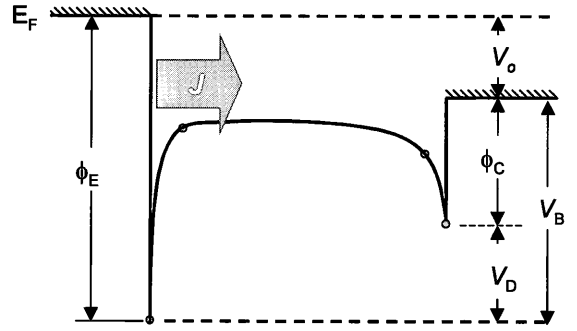


Fig. 2 Motive diagram of thermionic energy converter under the ignited mode operation.

熱電子発電器の発電効率 $\eta$ は、太陽光入射電力 $Q_{in}$ および発電器の最大出力 $J S_E (\phi_E - V_B)$ を用いて、

$$\eta = \frac{J S_E (\phi_E - V_B)}{Q_{in}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで $J$ は出力電流密度を表すが、正確な $J$ を理論的に導出することは非常に困難である。ここでは、点火モード動作の発電器では、空間電荷制限が無視できると仮定し、簡単のために $J = J_R$ とした。 $J_R$ は式(2)で与えられる。

$$J_R = \frac{4\pi e m k^2}{h^3} T_E^2 \exp\left(\frac{-e\phi_E}{kT_E}\right) \quad (2)$$

ここで $e, m, k$ および $h$ はそれぞれ電子の電荷、質量、Boltzmann定数およびPlanck定数である。 $V_D$ は $V_0$ を低下させるだけでなく $J$ にも影響し、一般には $J \leq J_R$ と考えられる。このため(2)式から求まる $\eta$ は幾分過大な評価となることがあるが、 $\eta$ と $\phi_E$ 、エミッタ温度 $T_E$ および $P_{Cs}$ との関係を知る上には十分な情報を与えるものと考えられる。

太陽光照射で加熱される $T_E$ は、次の熱伝導方程式

$$\frac{d(McT_E)}{dt} = \alpha q_L Q_{in} - \epsilon \sigma S_E (T_E^4 - T_s^4) - \kappa \frac{S_C}{L_C} (T_E - T_s) - J_R S_E (2kT_E + \phi_E) \quad (3)$$

より、 $\phi_E$ 、 $Q_{in}$ および $S_E$ の関数として求めることができる。ここで、 $\alpha$ および $q_L$ は、エミッタの照射光吸収率および集光系全体の集光効率を表す。また $M, c$ および $\epsilon$ は、それぞれエミッタの質量、比熱および放射率、また $k, S_C$ および $L_C$ は、エミッタ固定用導線の熱伝導率、断面積および長さを表す。 $T_s$ および $\sigma$ は、それぞれ周囲温度およびStephan-Boltzmann定数を表す。(3)式の右辺の各項は、エミッタに吸収される太陽光入射電力、エミッタからの放射損失、熱伝導損失および熱電子放出に伴う電子冷却を表す。なお対流による損失は、発電器内のガス圧が低いために他の損失に比べ無視できる。

$\phi_E$ および $\phi_C$ は一般に $T_E, T_C$ 及び $P_{Cs}$ の関数である。 $V_B, T_C$ 及び $P_{Cs}$ を与えてやれば、 $\eta$ を $Q_{in}$ の関数として数値計算することができる。

### 2.2. 計算結果および考察

$V_B$ をパラメータとした時の $\eta$ および $T_E$ と $\phi_E$ の関係を図3に示す。実線は $\eta$ 、点線は $T_E$ を表す。ここで、エミッタは光ト

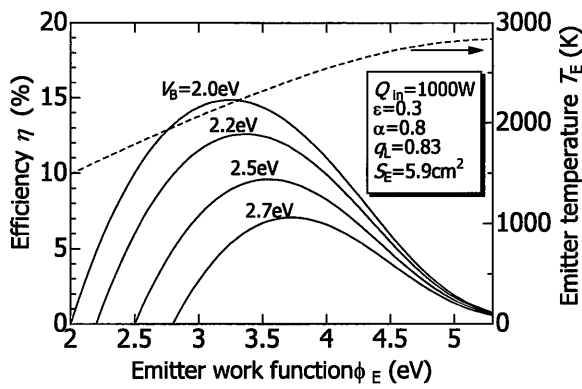
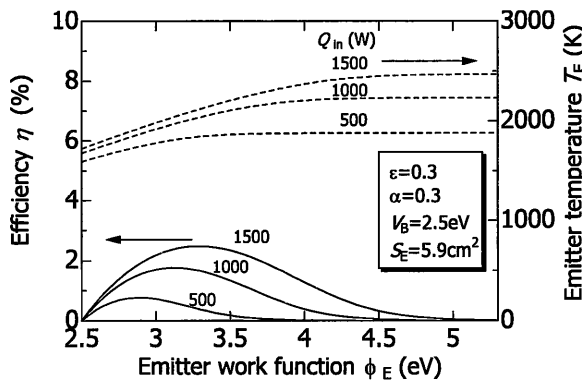
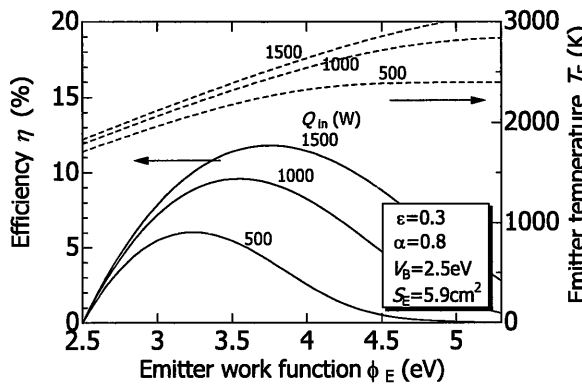


Fig. 3 TEC efficiency  $\eta$  and emitter work function  $\phi_E$ .



(a) Emitter without light trap.



(b) Emitter with light trap.

Fig. 4 Solar TEC efficiency  $\eta$  and emitter temperature  $T_E$  calculated for emitter with and without light trap.

ラップ付とし、その内部で入射光を多数回反射させることで実効的な吸収率が高まるので、計算では  $\epsilon = 0.3$  および  $\alpha = 0.8$  を仮定した。実現性のある値として  $Q_{in} = 1 \text{ kW}$ ,  $q_L = 0.83$  とした。  $T_E$  は  $V_B$  に依存せず、  $\phi_E$  の関数となる。

図3で  $T_E$  が  $\phi_E$  と共に増大するのは、熱電子放出が減少して電子冷却による損失が減少するためである。また  $V_B$  が小さいほど出力電圧が増大するため、出力が増大して  $\eta$  は上昇する。  $\eta$  が  $\phi_E$  に対して最大値  $\eta_{max}$  とするのは、  $J_R$  および  $V_0$  が共に  $\phi_E$  に依存するためである。  $J_R$  は  $\phi_E$  の増大と共に減少するが  $V_0$  は増大するため、  $\eta$  は増大して  $\eta_{max}$  に達するが、さらに  $\phi_E$  が増大すると、  $V_0$  の増大よりも  $J_R$  の減少が顕著となり、  $\eta$  は減少に転じる。

図4に照射光吸収率  $\alpha$  が増大したときの  $\eta$  の変化を示す。  $Q_{in}$  をパラメータとし、(a)は光トラップ無しの場合で  $\epsilon = \alpha = 0.3$ 、(b)は光トラップ有りの場合で  $\epsilon = 0.3$ ,  $\alpha = 0.8$  とし、それぞれ

$V_B = 2.5 \text{ eV}$ ,  $S_E = 5.9 \text{ cm}^2$  の下で  $\eta$  および  $T_E$  を数値計算した。日射量が  $840 \text{ W/m}^2$  の場合、レンズ径が  $87 \text{ cm}$  の時  $Q_{in}$  は  $500 \text{ W}$ ,  $123 \text{ cm}$  では  $1000 \text{ W}$ ,  $150 \text{ cm}$  で  $1500 \text{ W}$  となる。図4(b)より、光トラップ付きエミッタの場合、  $Q_{in} = 1000 \text{ W}$  および  $q_L = 0.83$  に対して、  $\phi_E = 3.6 \text{ eV}$  および  $T_E = 2200 \text{ K}$  の時、  $\eta = 9\%$  となることが判る。

セシウムを封入した熱電子発電器では、  $T_E$  および  $P_{Cs}$  により電極表面のセシウム付着状態が変化するため、  $\phi_E$  はセシウムの仕事関数  $1.7 \text{ eV}$  から電極固有の仕事関数の間で変化する<sup>8)</sup>。  $P_{Cs}$  は発電容器の温度を調節することにより自由に制御することができるため<sup>9)</sup>、  $\eta$  を最大にする  $\phi_E$  を選択することが可能である。図5に、仕事関数  $4.6 \text{ eV}$  のタングステンをセシウム蒸気中に浸した時の仕事関数と  $T_E/T_{Cs}$  の関係を示す<sup>10)</sup>。例えば、  $\phi_E = 3.6 \text{ eV}$  を得るには、  $T_E/T_{Cs} = 3.6$  であるので、  $T_E = 2200 \text{ K}$  とすれば、  $T_{Cs} = 611 \text{ K}$  ( $P_{Cs} = 640 \text{ Pa}$ ) となる。

次に、  $S_E$  をパラメータとした場合の  $\eta$  と  $T_E$  の関係を図6に示す。これまでと同様に、  $\eta$  は光トラップの有無により変化するとともに、  $S_E$  にも大きく依存することが判る。エミッタの表面積を小さくすることによる  $T_E$  の上昇が  $\phi_E$  の上昇に伴う  $J_R$  の低下を補うこととエミッタ表面積に比例する放射損失が減少するため、  $\eta$  は  $S_E$  が小さくなるほど増大する。

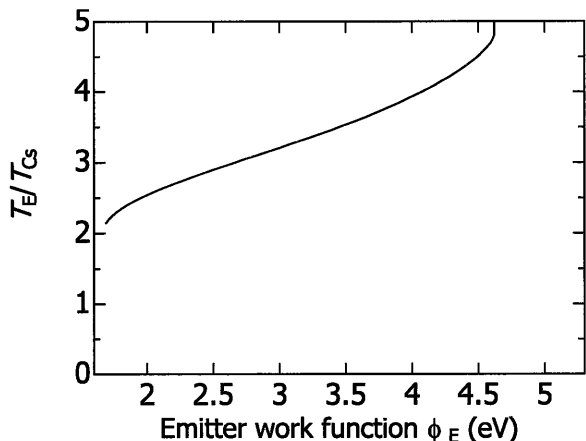


Fig. 5 Emitter work function  $\phi_E$  v.s.  $T_E/T_{Cs}$ .

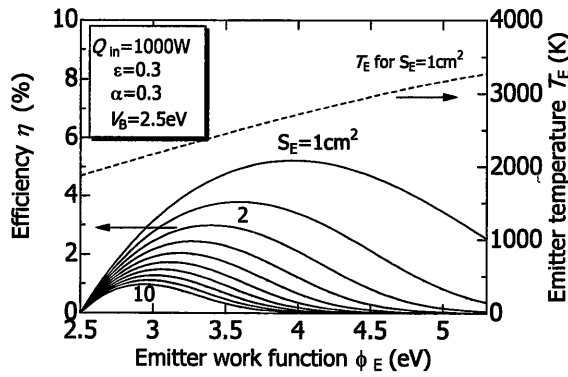
### 3. 太陽エネルギーによるエミッタ加熱

#### 3.1. 実験装置および方法

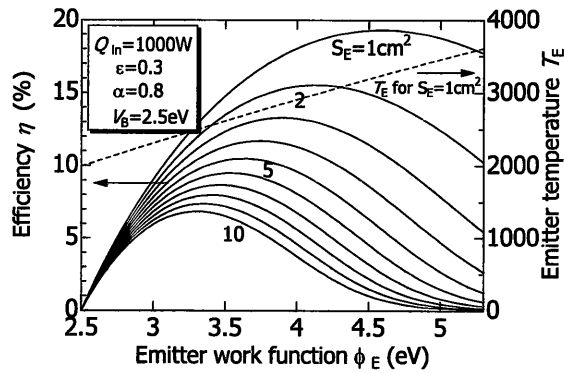
図7は太陽光によるエミッタ加熱用太陽光集光装置の概略図である。太陽光の集光には、  $105 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$ 、焦点距離  $100 \text{ cm}$  の長方形フレネルレンズを使用した。フレネルレンズはプラスチック材料を利用でき軽量かつ安価であり、大型化も容易である。今回用いたレンズは厚さ  $2 \text{ mm}$  のアクリル樹脂製で、  $1 \text{ mm}$  あたり  $9$  本の溝が刻まれている。

太陽光によるエミッタ加熱実験では、対流による冷却を除去するために、外形寸法  $\phi 185 \text{ mm} \times h 100 \text{ mm}$  の真空容器内の中央にエミッタを固定した。エミッタには、厚さ  $1 \text{ mm}$ 、直径  $15$  または  $25 \text{ mm}$  のステンレスを使用した。フレネルレンズの色収差による焦点の広がりがあるため、エミッタは公称の焦点距離を中心に前後に  $\pm 50 \text{ mm}$  にわたって可動できるようにした。真空容器には入射光透過用のパイレックスガラスが取り付けられている。

実験では、太陽光が垂直に入射するようにレンズおよびエミッタを設置し、太陽追尾は手動で行った。エミッタ温度は、

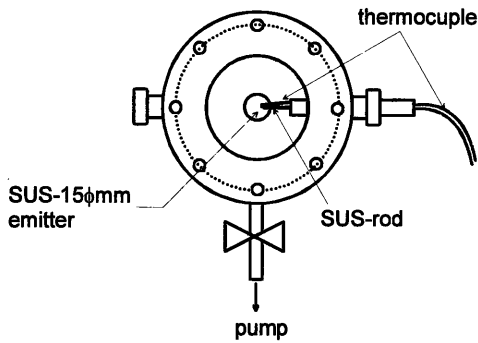


(a) Emitter without light trap.

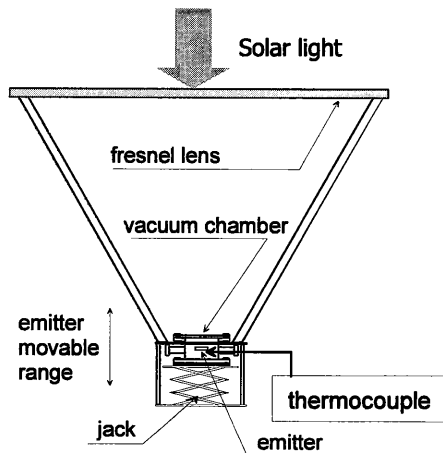


(b) Emitter with light trap.

Fig. 6 TEC efficiency  $\eta$  and emitter temperature  $T_E$  for different emitter surface  $S_E$ .

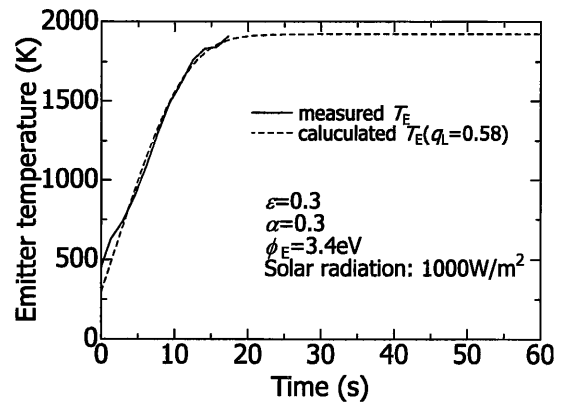


(a) Vacuum chamber with 15 φmm SUS emitter.

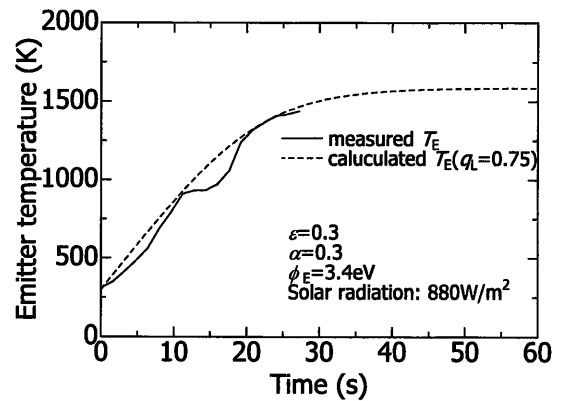


(b) Concentration of emitter heating.

Fig. 7 Vacuum chamber and concentration system for emitter heating by solar light illumination.



(a) 15 mm SUS disk emitter.



(b) 25 mm SUS disk emitter.

Fig. 8 Change of  $T_E$  after the onset of solar light illumination. Date: Oct. 2000 in Hamamatsu (N34° 43', E137° 43').

エミッタの照射面の裏側に溶接した熱電対で測定した。また日射量は、受光部に入射光波長域で均一の分光感度を有するサーモパイルを使用した日射計(EKO製:MS-601)により測定した。なお、この日射計に使用されるサーモパイルは3000 nm以上の赤外放射も同時に検知してしまうので、3000 nm以上の放射を完全にカットできるガラスドームで覆われている。

### 3.1. 実験結果および考察

この実験では、エミッタの照射光吸収率  $\alpha$  とエミッタへの太陽光入射電力  $Q_{in}$  を測定した。熱電対は被照射面裏側の中央に取り付けたが、エミッタの直径に比べて照射光の集光スポットのサイズが大きく、また、ステンレスエミッタの比熱および質量がそれぞれ0.51 J/g•K および0.44 g と小さく、その熱容量が0.22 J/K と小さいために、本実験ではエミッタの温度分布は場所によらず一様であると考えている。

105 cm × 70 cm 方形フレネルレンズにより加熱されたエミッタ温度の測定値ならび計算値の時間変化を図 8 に示す。図 8 (a) は、2000年10月14日正午の晴天時、1000W/m<sup>2</sup> の場合の直径15 mm、厚さ1 mmのステンレス製エミッタ温度の測定値と計算値である。実線は白金-ロジウム熱電対により測定した  $T_E$  である。光照射を開始して約10秒後にエミッタは融解し始め、 $T_E$  は1840 Kに達した。同様に、図 8 (b) は、2000年10月19日11時における直径25 mm、厚さ1 mmのステンレス製エミッタの実験結果を示す。880 W/m<sup>2</sup> の日射量に対して、 $T_E$  の測定値は1437 Kに達した。光照射開始10秒後、エミッタ温度の曲線が大きく変化しているのは、一時的にはあるが、太陽が雲に覆われ日射量が低下したためである。

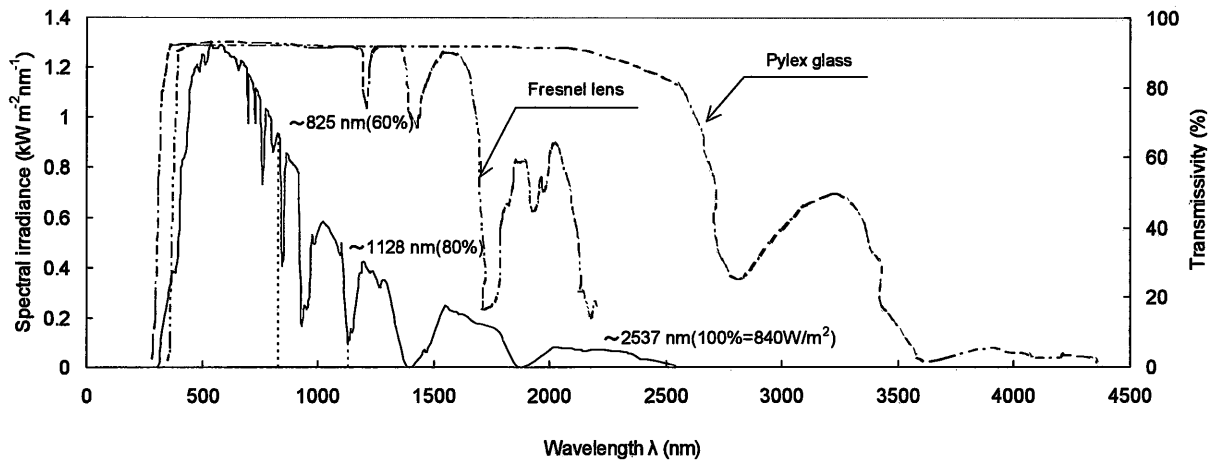


Fig. 9 The solar spectrum at ground level and transmissivities of fresnel lens and pylex glass.

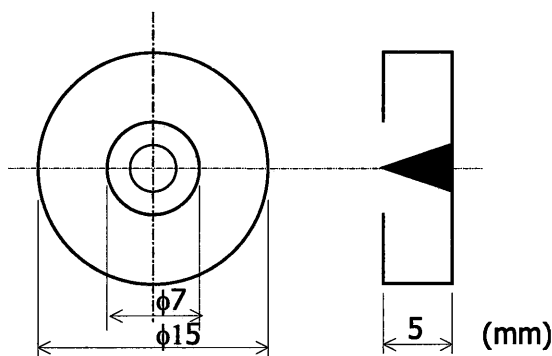


Fig.10 Schematic diagram of emitter with light trap.

点線は熱伝導方程式(3)より求めた計算値であり、光照射後の  $T_E$  の時間変化を示す。 $q_L$  は、レンズおよびパイレックス窓の透過率から算出した値である。図9はパイレックスガラスおよびフレネルレンズの分光透過率ならびに日本の地表面での晴天時における太陽光スペクトル分布である。分光透過率は、パイレックスガラスでは、350~2200 nmの光に対し90%、フレネルレンズでは、400~1100 nmの光に対して90%であることが判る。太陽光スペクトルは地表面で300~2500 nmの波長を持つので、フレネルレンズでは長波長成分を十分に透過できない。しかし、太陽光では1100 nm以下の波長成分が全エネルギーの80%を占める。このため、数値計算では、フレネルレンズおよびパイレックス窓の透過率を波長に依らずそれぞれ0.91とした。またステンレスエミッタの仕事関数は、 $\phi_E=3.4\text{eV}$ とした<sup>11)</sup>。エミッタ温度の時間変化を $\alpha$ と $q_L$ をパラメータとして数値計算し、熱電対による測定値の時間変化と最も良く一致する時の $\alpha$ および $q_L$ が、このエミッタの照射光吸収率と本集光系の集光効率とを与える。

数値計算によると直径15 mmのステンレスエミッタでは、 $\epsilon = \alpha = 0.30$ で $q_L = 0.58$ の時、直径25 mmのステンレスエミッタでは、 $\epsilon = \alpha = 0.30$ で $q_L = 0.75$ の時、計算値と測定値が良い一致を示した。数値計算では、 $\epsilon$ および $\alpha$ の波長依存性は無視し、かつ $\epsilon = \alpha$ とした。直径15 mmのエミッタに対して $q_L$ が小さくなるのは、焦点のスポットがエミッタよりも大きく、太陽光が十分に集光しきれていないことに起因する。すなわち、焦点のサイズは20 mm×14 mm程度であり、直径15 mmのエミッタに照射される照射光利用率は、両者の面積比で与えられるので、約

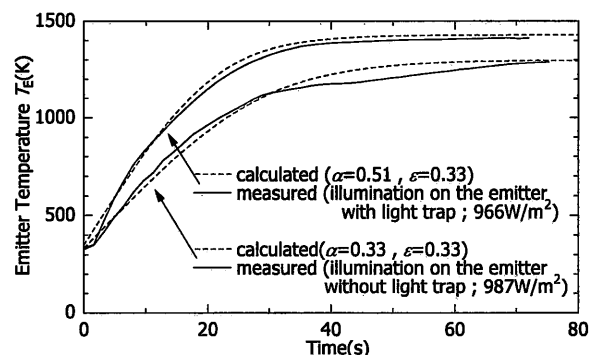


Fig.11 Change of  $T_E$  with time after the onset of solar light illumination. Date: Aug. 2, 2000 in Hamamatsu ( $N34^\circ 43'$ ,  $E137^\circ 43'$ ).

63%となる。

以上のように、太陽光によるエミッタ加熱では、集光効率を高くすると同時にエミッタの太陽光吸収率を高くする必要がある。図10はエミッタに光トラップ機構を持たせ、その内部で入射光を多数回反射させることで、実効的な吸収率を高める工夫を施したエミッタである。直径は15 mm、高さ5 mmであり、部材の厚さは0.7 mmとした。エミッタ上部には光入射のために直径7 mmの開口部が設けられている。エミッタ内部に設置された円錐が光トラップを行う。円錐の頂点の角度は、開口部からの入射光がエミッタ内部で繰り返す反射の軌跡(Ray-tracing)を数値計算により求め、エミッタ内部での反射回数が最大となる角度を算出することにより決定した。本実験で使用するフレネルレンズでは、この値は36度となる。

光トラップ付きのエミッタによる実験結果を図11に示す。図11は、エミッタ上面より光照射を行って光トラップ機能のある場合と、同エミッタの底面より光照射を行って光トラップ機能の無い場合の $T_E$ の温度上昇を比較したものである。実線は $T_E$ の測定値を、点線は計算値を表している。なおこれらの実験は2000年8月2日に行ったもので、この時には直径880 mmの円形フレネルレンズ( $f=760$  mm、溝2本/mm)を用いている。このレンズは溝の切り方が荒く矩形のレンズに比して集光率が低い。

光トラップのない場合、日射量 $987\text{ W/m}^2$ に対して $T_E=1288\text{ K}$ であるが、光トラップが有る場合では、 $966\text{ W/m}^2$ のより低い日射量であるにも拘わらず、エミッタは $1413\text{ K}$ まで加熱された。

$T_E$ の測定値と計算値の比較から $\alpha$ および $\epsilon$ を決定した結果、光トラップの無い場合の照射光吸収率は $\alpha = 0.33$ だったのに対

し、光トラップのある場合は  $\alpha = 0.51$  となり、光トラップが照射光吸収率の改善に効果があることが確かめられた。

#### 4. 太陽エネルギー利用熱電子発電機の出力特性

##### 4.1 実験装置および方法

図12は太陽エネルギー利用熱電子発電機の概略図である。この発電機では一つの円板状エミッタの前後に同一形状の二つのコレクタAおよびBを近接して配置した。エミッタは直径25 mm、厚さ1 mmの円板状タンタルで発電機中央に設置した。コレクタはエミッタ側の開口部が直径25 mm、照射光入射側の開口部が直径40 mm、全長が30 mmの中空部が円錐状ステンレス(SUS304)であり、図示のように配置した。またエミッターコレクタ間の最小電極間隔は1 mmとした。

発電機内にセシウムを封入する前に、発電機本体を約100℃から約180℃までの温度範囲で十分なガス出しを行い、さらに $10^{-4}$  Pa以下に排気した後、セシウムを封入した。フレネルレンズにより集光された太陽光はコレクタAの開口部を通してエミッタを照射し、エミッタを加熱する。このコレクタAの内部のプラズマおよびセシウム蒸気は照射光に曝される。

図13に出力測定用回路を示す。発電機の出力特性は1 Hz、-3 ~ 3 Vの三角波電圧をエミッターコレクタ間に印加し、これに対する出力電流を測定することにより測定した。三角波電圧を  $V_T$ 、出力電流を  $I_{out}$ 、負荷抵抗を  $R$  とすると接地に対するエミッタおよびコレクタの電位はそれぞれ  $V_T$  および  $-R I_{out}$  となる。従って、熱電子発電機の出力電圧  $V_{out}$  は

$$V_{out} = V_T + R I_{out}$$

で与えられる。 $R I_{out}$  が  $V_{out}$  に影響を与えないよう測定を行うには  $V_T \gg R I_{out}$  の関係が必要である。 $R$  は  $R I_{out}$  が  $V_T$  の波高値の3%以内に収まり、かつ良好なSN比が得られるように1.2  $\Omega$ とした。

##### 4.2 実験結果および考察

太陽エネルギー利用熱電子発電機を太陽光で駆動して発電実験を行った。エミッタ温度を知るために、同形のエミッタを別に用意された真空容器内に設置して、太陽光照射による加熱特性を調べた。図14はその実験結果であり、2000年11月30日12時における直径25、厚さ1 mmのタンタル製エミッタの  $T_E$  の変化である。光照射の開始後100秒で  $T_E$  は飽和し1415 Kに達した。発電実験に使用する発電容器内の  $T_E$  もこれにほぼ等しいと考えられる。

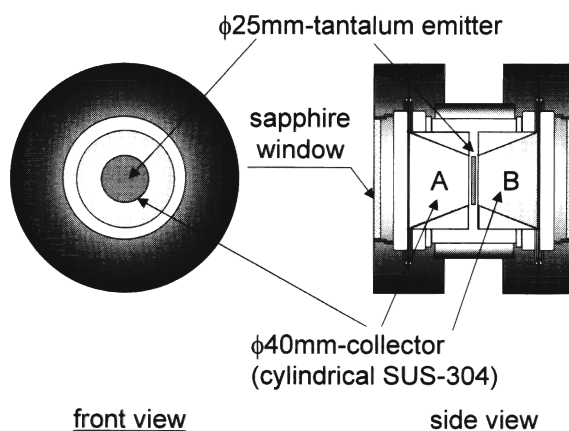


Fig.12 Schematic diagram of thermionic energy converter for solar light illumination.

図15に2000年11月28日13時5分に太陽光照射を開始した時の出力特性を示す。なお  $T_{Cs}$  は発電容器温度  $T_R$  に等しいとして実験データを整理した。太陽光の照射開始と同時に  $T_E$  および  $T_{Cs}$  は上昇し、約100秒後に  $T_E$  は1400Kに達し一定となるが、 $T_{Cs}$  は発電容器の熱容量が非常に大きいため上昇し続けた。この出力特性は、発電機が非点火モード動作している時のものであるが、光照射によるセシウムの光励起・電離効果により電極間空間の負の電荷は中和されていると考えられる。セシウム雰囲気中では  $T_E$  =一定の条件下で  $T_{Cs}$  を上昇させると  $\phi_E$  が低下するため、エミッタからの熱電子電流が増加する。この結果、出力電流は図15に示されるように  $T_{Cs}$  に敏感に応答し、照射時間の経過とともに上昇した。 $T_{Cs} = 402$  Kの時の短絡電流密度は、0.97 mA/cm<sup>2</sup>であった。仕事関数4.6 eVのタングステンをセシウム蒸気中に浸した時の  $\phi_E$  は、図5より  $T_{Cs} = 402$  K および  $T_E = 1400$  K において  $\phi_E = 3.45$  eV となる。しかし実際に実験に使用したタンタル本来の仕事関数は4.2 eVであり、タングステン本来の仕事関数よりも低い。従って、 $T_{Cs}$  および  $T_E$  が同じでもタンタルエミッタの

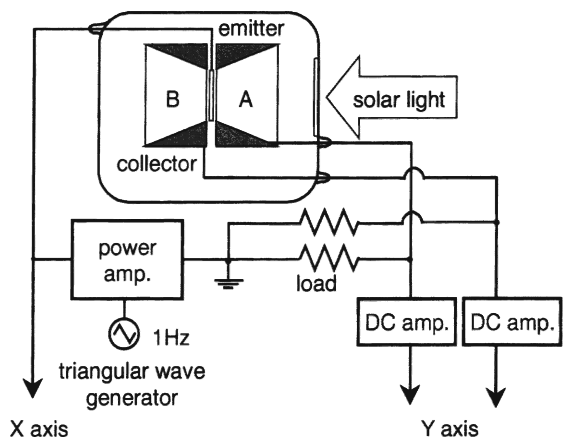


Fig.13 Schematic diagram for the measurement of the output characteristics.

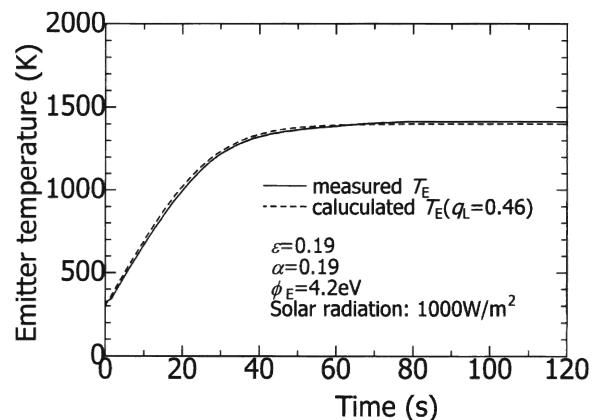


Fig.14 Change of  $T_E$  after the onset of solar light illumination. Date: Nov. 30, 2000, in Hamamatsu ( $N34^\circ 43'$ ,  $E137^\circ 43'$ ).

$\phi_E$  はタングステンエミッタに比して低くなることが予想される。実験結果の0.97 mA/cm<sup>2</sup>の熱電子電流密度は  $T_E = 1400$  K、 $T_{Cs} = 400$  Kの時の  $\phi_E$  を3.16 eVと仮定すれば、エミッタからの全熱電子流が出力電流となっていることが判る。これは太陽光照射によって、負の空間電荷が中和された結果と考えられる。

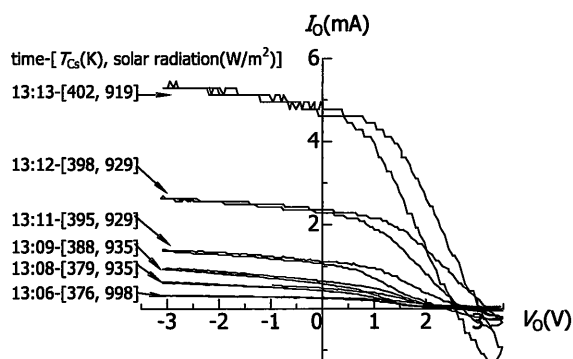


Fig.15 Change of output characteristics after the onset of solar light illumination. Date: Nov. 28, 2000 in Hamamatsu (N34° 43', E137° 43').

## 5. 結 論

太陽エネルギー利用熱電子発電器は、太陽光をエミッタの加熱と補助放電に利用することにより太陽光の全ての波長成分を有効に利用しようとしたものである。

発電効率の数値計算より、エミッタ温度が高いほど発電効率が高くなることが判明した。このため、照射光の吸収率の高いエミッタが高効率の発電に必要となるが、これには光トラップ機能が有効であることが実験により確かめられた。因みに、 $Q_{in}=1000$  Wで $q_L=0.83$ の時、光トラップ付きエミッタを用いると、 $\phi_E=3.6$  eV および  $T_E=2200$  K で  $\eta=9\%$ であった。

またフレネルレンズを使用した太陽光によるエミッタ加熱実験では、直径15 mm、厚さ1 mmのステンレスエミッタでは1840 K、直径25 mm、厚さ1 mmのエミッタでは1437 Kまで加熱することができた。この温度は、熱電子発電器を高発電効率で動作させるのに十分な温度である。

以上のように、本研究では始めに太陽エネルギー利用熱電子発電器の発電効率  $\eta$  の評価を行った結果、 $T_E=2200$  K で  $\eta=9\%$

が期待されることを示した。本方式の発電器の実現には太陽光集光系およびエミッタ加熱方法の確立が重要であり、光トラップ機能付きエミッタが有望であることを実験により確認した。

発電実験では、出力電流密度と  $J_R$  が、ほぼ一致する結果が得られた。これは太陽光照射によってセシウム原子が励起・電離された結果、負の空間電荷が緩和され、エミッタ前面に生じる負の電位障壁が解消されたことによるものである。 $T_E \leq 10400$  Kの低温動作で発電効率をより一層高め、発電器出力を実用レベルにまで増大させるには、 $T_E$  および  $T_{Cs}$  を更に高めて点火モード動作を実現することが必要である。

## 参考文献

- 1) M. Kando, H. Furukawa, M. Ichikawa and S. Yokoi: Proc. 29th Intersoc. Energy Conversion Engineering Conf., U.S.A., Vol. 2 (1994), p.1067.
- 2) Y. Shibahara and M. Kando: Proc. 4th Int. Symp. Functionally Graded Materials, Tsukuba, Japan, 1996 (Elsevier Science, Amsterdam, 1996), p.673.
- 3) A. Ogino, W. Zheng and M. Kando: Trans. IEE Jpn. Vol. 119-A (1999), p. 1120 [in Japanese].
- 4) Wei Zheng, A. Ogino and M. Kando: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39 (2000), p.2816.
- 5) J. Yamada, T. Kawaguchi, N. Tsuda and M. Kando: Trans. IEE Jpn. Vol. 120-A (2000), P. 357 [in Japanese].
- 6) Robert H. Bullis. J.Appl.Phys.Vol.38, No.9 (1967), p.3425
- 7) N. S. Rasor: IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 19, No. 6 (1991), p.1191.
- 8) J. M. Houston and H. F. Webster: *Advanced in Electrons* (Academic Press, New York,1962) p.147.
- 9) J. B. Taylor and I.Langmuir: Phys. Rev. 44 (1933), p.423.
- 10) N. S. Rasor and C. Warner: J. Appl. Phys. Vol.35 (1964), p.2589.
- 11) R. G. Wilson: J. Appl. Phys. Vol.37, No.8 (1966), p.3161.