

光照射型熱電子発電器の諸特性

鄭 偉* 神藤 正士*

(1998年12月9日 受理)

Properties of Irradiated Thermionic Energy Converter

Wei ZHENG*, Masashi KANDO*

(Received Dec. 9, 1998)

Abstract

The effective work function of tungsten reduces from 4.5 to 1.7eV as a result of the formation of cesium layers on the metal surface even at the temperature lower than 1400K. With such a low work function, a large number of thermionic electrons are expected to emit from the tungsten plate. This phenomenon may lead to the development of a thermionic energy converter (TEC) operated in a low emitter temperature if total emitted electrons can reach to the collector. However, under such a condition a large negative space charge is built up in the interelectrode space so that the output current of TEC is strictly limited to a low value.

In the present study, photoionization due to irradiation of xenon lamp is estimated to be able to produce 10^9 cm^{-3} cesium plasma at cesium temperature of 490K. It can relax the negative space charge at relatively lower emitter temperature than 1400K. A TEC with a cylindrical ring collector was made for experimental investigation. The experimental results showed that irradiation increased the short circuit current both for unignited and ignited mode operation and that it also enhanced the ignition of TEC at low emitter temperature of 1280K and cesium temperature 490K. The short circuit current increased 20% by irradiation at emitter temperature up to 1600K.

1. 緒 言

熱電子発電器は高温の金属エミッタから飛び出した熱電子を対向配置されたコレクタで捕集し、両電極に結ばれる外部負荷に電力を提供する直接熱電変換の発電装置である。熱源としては、原子力、化石燃料および集束太陽光などを利用することができる。熱電子発電器は高出力密度、高変換効率および小型軽量、可動部がないなどの特徴をもっている。

これまでの熱電子発電器研究の主流は宇宙用セシウム封入型発電器であり、主としてアメリカと旧ソ連で実施されている¹⁾。この発電器の電極間距離は0.1~0.25mmで、エミッタ温度1,850~2,050Kで動作され、電気出力密度5~10W/cm²を達成している。高温で動作する熱電子発電器は気密性および狭い電極間距離を維持しなければならないが、電極の蒸発や結晶成長などが起こりやすく、電極が短絡したり、ヒートサイクルなどによるリークが発生などが生じて、発電器の信頼性や寿命を阻害する要因となっている。

また、省エネルギーの観点からは火力発電の前段に熱電子発電器を用いて総合的な発電効率を向上させる熱電子火力複合発電システムや産業用熱電併給コジェネレーションシステムとしての利用が検討されている²⁾。熱電子発電器の本格的な実用化には高効率、高信頼性、低コスト、長寿命化と容易なメンテナンスが求められ、封入ガスとして微量な酸素を加えてコレクタの仕事関数を下げたり³⁾、熱電子放出特性の良いエミッタや低い仕事関数のコレクタ電極材料の開発⁴⁾などが研究されている。

さて、当研究室では自然エネルギーの太陽エネルギーを熱源とする新型の熱電子発電器を提案してきた^{5),6)}。この光照射型熱電子発電器は光照射によるセシウム光電離を利用するため、電

極間距離が広く比較的低いエミッタ温度で動作する特徴を持っている。

本論文では先ず熱電子発電器の動作原理を述べ、次いで期待される光照射効果、最後に、光照射型発電器の構造と実験結果を述べる。

2. 熱電子発電器の動作原理

2.1 熱電子放出現象

金属を高温に加熱すると、金属内自由電子のうち、高いエネルギーを獲得した電子は、金属と自由空間(真空)の間に存在するエネルギー障壁に打ち勝って自由空間へ放出される。このエネルギー障壁の大きさを仕事関数と呼び、金属の種類およびその表面状態により決まる値をもつ。放出される熱電子流の大きさはリチャードソンの式、

$$J_s = \frac{4\pi m e k^2}{h^3} T^2 \exp\left[-\frac{e\phi}{kT}\right] \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 m : 電子の質量、 e : 電子の電荷、 k : ボルツマン定数、 h : プランクの定数、 T : 金属の温度、 ϕ : 金属の仕事関数である。エネルギー変換の観点から見ると、熱電子放出現象は熱エネルギーが電子の位置及び運動エネルギーに変換される過程とみなすことができる。

一方、後述するように、熱電子発電器の出力特性は主として電極間に形成される負の空間電位により左右される。このため負の空間電荷を中和することが重要となるが、通常は電離電圧の低いセシウムの電離が利用される。セシウムは金属表面に吸着される性質があり、これにより、金属本来の仕事関数 ϕ_0 が著しく低下される性質をもっている。図1はセシウムの蒸気温度をパラメータとして測定されたタングステンから熱電子電流密度であり、曲線の形状から「S」字曲線と呼ばれる⁷⁾。タングステ

* 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

ン温度の非常に高いところでは表面にはセシウム吸着されていないため、仕事関数は4.6eVであるが、温度の低下とともにセシウムが表面に吸着され始め、仕事関数は低下し、最終的にはセシウムの仕事関数1.69eVまで低下する。この結果、温度の低下による電流密度の減少効果に比べて仕事関数が小さくなることによる電流密度の増大効果が大きくなり、電流密度が極大となる温度領域が現れる。図により、セシウム蒸気温度 $T_{Cs}=500K$ を越えると、エミッタ温度 $T_E=1200K$ でも $1A/cm^2$ の熱電子放出電流密度を得られる。これを利用すれば、比較的低い T_E でも大出力で高効率の熱電子発電ができると考えている。ただし、実効的なエミッタ仕事関数 ϕ_E が下がるので、出力電圧が低下する。この問題を解決するため、熱電子発電器内部損失の低下と熱電子の作る空間電位の中和が必要となる。

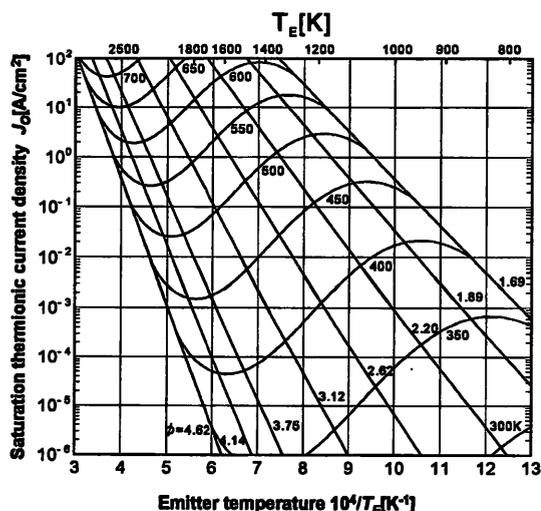


Fig. 1: Electron emission from cesium absorbed tungsten.

2.2 熱電子発電器の動作モード

図2に熱電子発電器の基本的な構造を示す。高温に加熱されたエミッタ電極から放出された電子は、エミッタ電極に近接して対向配置されているコレクタ電極に捕集される。いま、エミッタ温度 T_E とコレクタ温度 T_{Cs} が $T_E > T_{Cs}$ で、かつエミッタ仕事関数 $\phi_E >$ コレクタ仕事関数 ϕ_C であり、電極間には空間電荷がないものと仮定すると、エミッタとコレクタ電極の間には、両仕事関数の差に相当する $(\phi_E - \phi_C)/e$ の電位差が発生するため、エミッタから全ての熱電子はコレクタに捕集され、外部回路に電流が流れることになる。しかし、実際には熱電子に

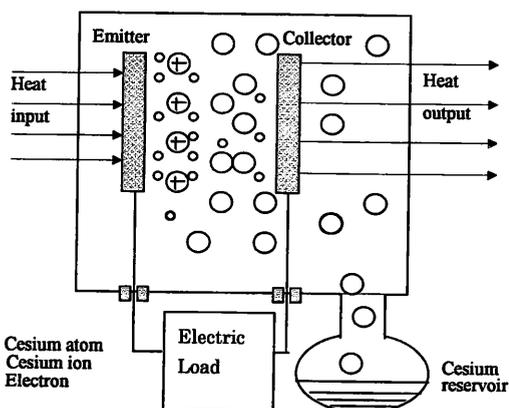


Fig. 2: Principal schematic diagram of cesium filled thermionic energy converter.

よって、エミッタとコレクタ電極の間には負の空間電位が形成される。その結果、電子の移動が大きく妨げられ、出力電流が低下する。この空間電位は正イオンによって中和するかもしれないが、通常は前者の方法が採用され、一般には、図2に示すように、電極間空間をセシウム蒸気で満たし、中性セシウム原子電離によって、正のイオンを供給する^{8,9)}。なお、後者は熱電子発電の研究の初期に試みられ、真空型熱電子発電器と呼ばれているが、構造上に難点が多く、最近では殆ど研究されていない。

セシウム封入型熱電子発電器の動作はセシウムの電離機構の相違によって、非点火モードと点火モードの二種類の動作モードに分けられる。すなわち、電離機構にはエミッタ面上における表面電離と電極間空間での電子との衝突による体積電離があり、動作条件により表面電離のみか又は両者が同時に起る場合がある。前者を利用する動作を非点火モード、後者を点火モードと呼んで、両者を区別する。一般に点火モードは非点火モードより高いエミッタ温度とセシウム蒸気圧が必要となり、出力も大きくなる。セシウム原子の電離電圧はエミッタ電極材料の仕事関数よりも低い場合があり、高温のエミッタ表面に到達したセシウム中性原子が熱的に電離してイオンが生成される。非点火モードの出力電流最大値はエミッタから放出された熱電子がすべてコレクタに到達できる時である。その条件は、電極間の空間電荷が完全に中和され、かつ粒子間の衝突がない時である。それらの条件を満足するため、電極間のギャップは電子の自由平均行程より小さくしなければならない。このため、セシウム蒸気圧を低くするか又は電極間隔を狭くすることが必要となる。

他方、点火モードは空間電荷を中和するイオンが、主として電子とセシウム原子の衝突電離によって生成される動作モードである。発電器内の電子のエネルギーは0.2eV程度と低いため、電離過程は累積電離と考えられている。すなわち、電子のエネルギーがセシウム電離電圧より低くても、セシウム原子の励起を積算することによって、電離に至る過程である。このような体積電離により供給されるセシウムイオンの密度は空間電荷の中和には十分である上に高温動作であることから、一般に非点火モードの場合よりは大きな出力電流を得ることができる。このため、点火モードは現在最も多く研究されている。しかし、エミッタからの熱電子が少なくともセシウム励起電圧1.4eV以上のエネルギーをもたないと、両電極間で十分な体積電離が生じないことがある。一般に上記の条件を満たすために、エミッタ温度は2000K以上に加熱される。

著者らは1600K以下のエミッタ温度でも点火モードを実現するために、光励起の利用を可能とする構造を有する光照射型熱電子発電器の研究を行ってきた。以下では光電離・励起によるセシウムプラズマの生成および空間電荷中和効果を述べ、更に実験により得られた発電器の出力特性を述べ、それとエミッタ温度 T_E 、セシウム蒸気温度 T_{Cs} との関係を検討する。

3. 光照射効果

3.1 光電離によるセシウムプラズマの生成

セシウム中性原子のエネルギーレベルを図3に示す¹⁰⁾。熱電子発電器内の電子のエネルギー0.2eV程度と低いため、セシウム中性原子の直接電離は不可能である。このため、発電器内のセ

の時間は光の照射時間の数秒よりも短く、言い換えれば、キセノンランプ照射により、少なくとも 10^7 、 10^8 、 10^9 cm^{-3} 程度のセシウムプラズマが生成されると考えることができる。

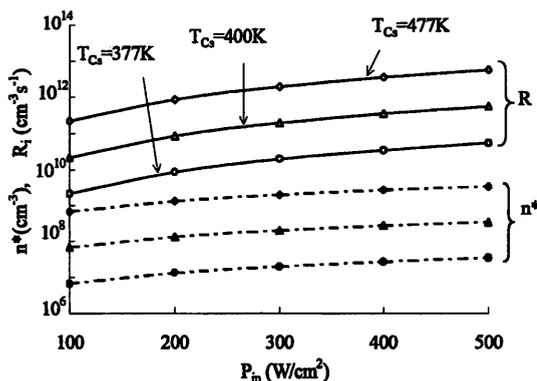


Fig. 5: Excited cesium atom density and its ionization frequency by photon absorption.

3.2 光電離による中和作用

熱電子発電器内の負の空間電荷の中和度 α は

$$\alpha = \frac{n_{iE}}{n_{eE}} = \sqrt{\frac{M}{m}} \frac{\Gamma_i}{\Gamma_e} \quad (7)$$

より計算することができる。ここで、 n_{eE} 、 n_{iE} はエミッタ前面における電子及びイオン密度、 M はイオン質量である。また Γ_e 、 Γ_i はエミッタから放出される熱電子流束とイオン流束である。 Γ_e と Γ_i はリチャードソンの式(1)とラングミュア-サハの式

$$\Gamma_i = \frac{P_{Cs}}{(2\pi mkT_{Cs})^{1/2} \left\{ 1 + 2 \exp \left[\frac{e(V_i - \phi_E)}{kT_E} \right] \right\}} \quad (8)$$

によって算出することができる。ここで、 P_{Cs} はセシウム蒸気圧、 V_i はセシウム電離電圧である。一方、光照射がある場合は、光電離により生成された電子とイオンを考慮し、

$$\alpha = \frac{n_{iE} + n_i}{n_{eE} + n_e} \quad (9)$$

より空間電荷中和度を求めることができる。ここで、 n_i 、 n_e は光電離により生成されるイオンと電子の密度である。図6は式(9)を用いて $T_{Cs}=490\text{K}$ の時の計算結果である。図より、 $T_E \leq 1400\text{K}$ の場合、光電離により $n_p = n_i = n_e = 10^9 \text{cm}^{-3}$ のプラズマ密度が生成されれば、 α が1に近づき、負の空間電荷が大幅に中和されることが判る。

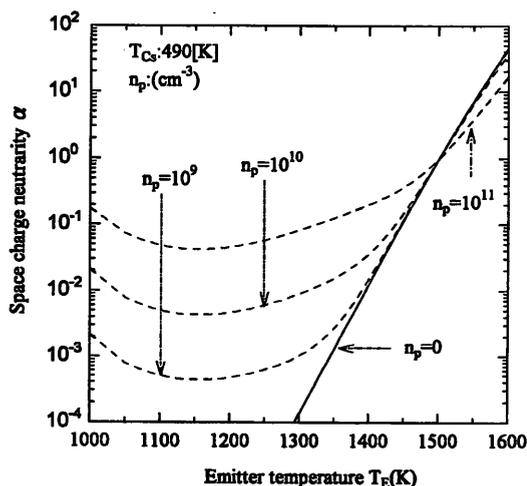


Fig. 6: Space charge neutrality versus emitter temperature.

4. 実験装置及び方法

図7に円筒コレクタを有する光照射型熱電子発電器の概略図を示す。発電器の容器はパイレックスガラスで、その内部にはセシウムが満たされており、セシウム圧力は発電器の温度を調節して、制御される。エミッタは直径0.5mm、全長340mmのタングステン線を渦巻き状に8回巻いたもので、その直径は18mm、実質的な面積は約 5.0cm^2 である。エミッタは60Hzの半波電流を流すことにより直接加熱する。コレクタは直径38mm長さ20mmのステンレス製の円筒で、図のように配置する。この時の両電極間の最短距離は10mmである。実験ではこのコレクタの前面から、エミッタに向かって光を照射する。

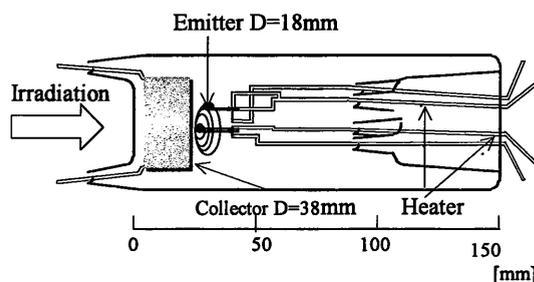


Fig. 7: Thermionic energy converter for irradiation.

図8は熱電子発電器出力特性の測定回路図である。外部回路の三角波発振器は両電極間の印加電圧を制御するために、用いられ外部抵抗は出力電流を電圧に換算するために取り付けられる。またエミッタの加熱電流が出力特性に影響しないように、測定はサンプリングとホールディング回路によって、加熱半波電流の流れていない加熱休止時に行う。本実験では、照射光によってエミッタ電極が加熱され、出力特性が変化することを避けるために、光照射時間は三秒以内に制限し、出力特性に及ぼす光電離の効果のみを調べることにした。

光源には太陽光と類似したスペクトルをもつキセノンランプ(XD5000/H-OL、東芝ライテック社製)の放射光を用いた。このランプはオゾンの発生を防ぐために、200nm以下の紫外線をカットする石英放電管を使用している。キセノンランプ放射光のスペクトル分布は図4に示すように、可視部付近において自然光に近い分布を有している。ランプの光量はランプ電流を調節することにより変化できるが、その場合のスペクトル分布の変化はほとんどない。ランプの電気入力力は4.5kWで、そのうち50%以上は対流及び伝導による熱損失に変わる。またランプハウス内のミラーや集光用レンズなどの光の吸収による損失があるため、実際に熱電子発電器内の入射パワー P_m は200W程度である¹⁶⁾。

容器パイレックスガラスは高温でセシウムを吸収し白色化する性質がある。このため、実験では容器の温度を500K以下に制限した。また T_E は1200Kから1600Kまで変化させた。

5. 実験結果と考察

始めに、図7に示される光照射型熱電子発電器の出力特性を調べた。

図9は、 $T_{Cs}=400\text{K}$ を一定とし、 T_E をパラメータとして測定された光照射のない場合の出力特性である。 T_E が1200Kから1600Kまで上昇すると、出力電流 I_0 が増大していることが判る。図1のS字曲線によると、上記の T_E の範囲では放出熱電子電流はむしろ

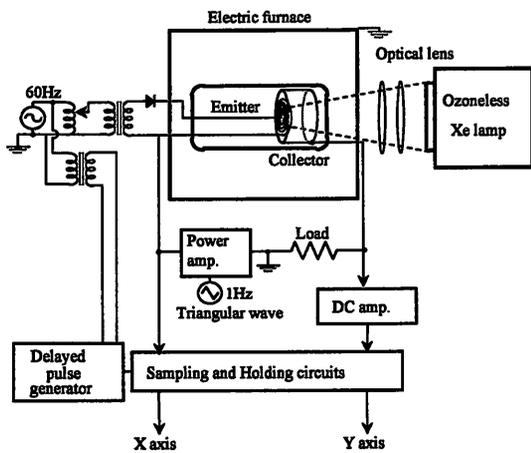


Fig. 8: Schematic diagram for experiment.

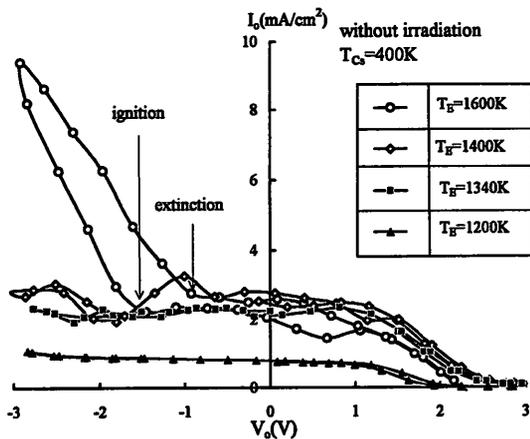


Fig. 9: Output characteristics of TEC.

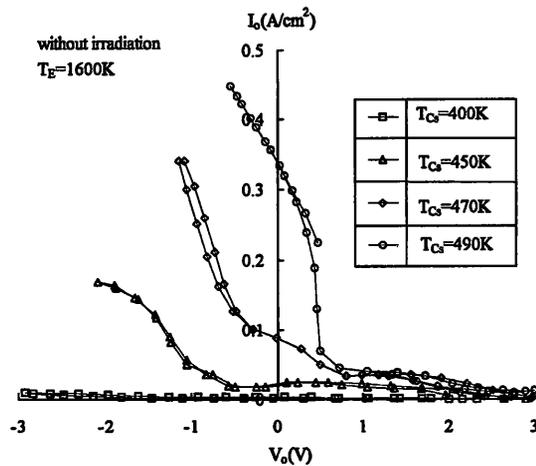


Fig. 10: Ignited mode operation without irradiation.

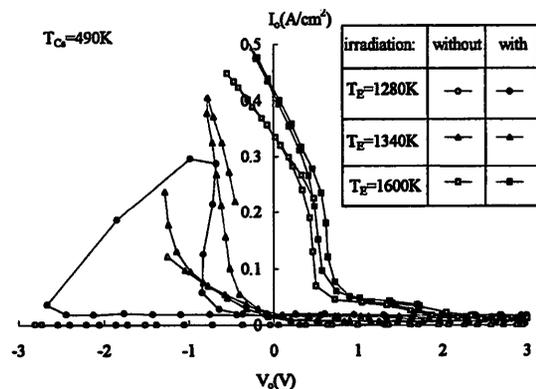


Fig. 11: Output characteristics with and without irradiation.

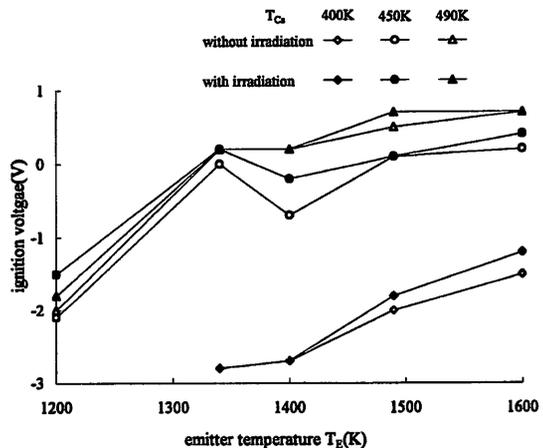


Fig. 12: Emitter temperature dependence of ignition voltage.

一桁程度下がるはずである。しかし、 $T_{Cs}=400K$ の時の空間電荷中和度 α によると、図6に示される実線が左にシフトし、 $T_E \cong 1400K$ で $\alpha \cong 1$ となるためである。エミッタからの熱電子がエミッタ附近の負の空間電位障壁の緩和によってコレクタに到達できるようになり、 I_0 が増大したものと解釈できる。エミッタ温度が1600Kまで上昇すると、発電器内に放電が生じ、 I_0 が急増した。これは放電により生じた電子が両電極間に印加されている加速電圧によりコレクタに引き寄せられて生じたもので、発電に貢献する電流ではない。一旦点火が始まると、放電はしばらく維持され、図9に示されるように点火開始と消滅の電位にはずれが生じる。

次に $T_E=1600K$ 一定とし、 T_{Cs} を400Kから490Kまで変化させた時に現われる点火モード動作の出力特性を測定した。その結果を図10に示す。 $T_{Cs}400K$ の場合には I_0 が数mA/cm²程度であったが、 T_{Cs} の上昇とともに、 I_0 は0.5A/cm²に近づくなり、点火開始電圧はダイオード領域から発電領域にシフトしていくことが分かる。これは T_{Cs} が高くなることによりセシウム原子密度 n_0 が上昇し、熱電子との電離衝突が増大することによって生じたものと考えられる。

このような出力特性を有する光照射型熱電子発電器に光照射を行った時の諸特性の変化を実験的に調べた。

図11に光照射の有無による出力特性の変化を示す。ここでは $T_{Cs}=490K$ で、 T_E を1280Kから1600Kまで変化させ測定を行った。 $T_E=1280K$ の時、光を照射しない場合には出力電流が非常に小さく、数mAであった。光照射によりダイオード領域ではあるが、発電器内に点滅的な赤紫色の放電が生じた。これは光照射により多量の励起セシウム原子が発電器内に生成されて、放電が起り易くなったものと考えられる。また、放電に至らない場合、図5、6に示したように、 $T_E=1280K$ 及び $T_{Cs}=490K$ 附近に、200W程度の光を照射すると、 10^9 cm⁻³程度のセシウムプラズマが生成されるが、 $\alpha < 10^2$ に留まり、負の空間電荷が中和されないため、 I_0 は余り改善されていない。

$T_E=1340K$ にすると、放電が強くなり、連続的になり、プラズマ放射光は赤紫から白色に変化した。これは T_E の上昇に伴って、セシウム表面電離による正イオンの数が増えた結果、エミッタのシーズ電圧が増大し、点火の起り易い状況が生まれ、点火の開始電圧が小さくなったものと考えられる。更に、 $T_E=1600K$ にすると、自発点火が生じ、発電器は点火モード動作となる。また、光照射により短絡電流は約20%増大した。エミッタ温度1340K以上の場合、光照射による出力電流の増大が確認された

が、点火開始電圧は光照射のない時と比べると、変化にばらつきが見られ、最大0.5Vであった。 $T_E=1600\text{K}$ の時、図6から判るように、光照射しなくても $\alpha \geq 1$ となっていて、空間電荷の中和は必要がなくなっているため、光照射による特性改善は生じないと考えられる。

図12は T_{Cs} をパラメータとする点火開始電圧の T_E 依存性を示す。点火開始電圧は T_E よりは T_{Cs} に強く依存し、光照射により最大0.5V程度上昇することが判る。一方、 T_{Cs} はセシウム蒸気圧に大きく影響し、50Kで圧力が一桁程度変化する。点火開始電圧はPaschenの法則により説明できると考えられる。 $T_{Cs}=400\text{K}$ の場合、 $P_{Cs} \sim 10^{-2}\text{Torr}$ であり、圧力が低く、Paschen曲線では低圧力側にある。点火開始電圧は圧力の上昇と共に、即ち T_{Cs} の上昇とともに低下すると考えられる。また、光照射による点火開始電圧の改善は主として、熱効果による P_{Cs} の上昇が原因と考えられる。

6. 結 論

光照射型熱電子発電器は低温動作で高出力を得るために、セシウムの光電離・励起を利用して、負の空間電荷の中和を図ることに特徴がある。光照射効果を調べるために、光照射型熱電子発電器を製作して、出力特性を測定し、 T_{Cs} と T_E をパラメータとして、光照射の有無による相違を調べた。

$T_{Cs}=477\text{K}$ の場合、セシウム原子の励起及び電離断面積を用いて光電離により生じるセシウムイオン密度を求めたところ、 10^9cm^{-3} 程度であることが判った。 $\alpha < 1$ の下での光照射は熱電子発電器の出力電流を増大させることが明らかになったが、点火開始電圧の改善は顕著ではなく、むしろ T_{Cs} を上昇させ、セシウム蒸気圧を高くすることで、点火電圧を発電領域にシフトさせることができた。これは動作条件がPaschenの最小値より低圧側にあるためであり、高出力電流を得るには T_{Cs} を十分に高くして点火モードを実現することが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) N. S. Rasor: IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 19, No. 6, (1991), p.1191
- 2) L.R. Wolff, W.B. Veltkamp, V.I. Yarigin: Proc. 2nd Intersoc. Conf. On Nuclear Power Eng. In Space, Phys. Of thermionic Energy Converter, PTI Sukhumi, Georgia, 1991, p.72
- 3) R. Fukuda, Y. Kasuga, K. Katoh: Functionally Graded Materials 1996, Ed. By I. Shiota and Y. Miyamoto, p.647
- 4) M. Katoh, R.Fukuda, T. Igarashi: Functionally Graded Materials 1996, Ed. By I. Shiota and Y. Miyamoto, p.655
- 5) Y. Shibahara and M. Kando: Proc. of the 4th int. symp. on functionally graded materials 1996, ELSEVIER SCIENCE B.V., Tsukuba, 1996, Japan, p.673
- 6) M. Kando, H. Furukawa, M. Ichikawa and S. Yokoi: Proc. of 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf., U.S.A, Vol. 2, p.1067, (1994)
- 7) J.M. Houston and H.F. Webster, "Thermionic Energy Conversion", advances in Electronics, Vol. XVII, Academic Press Inc., New York, 1962
- 8) R.H. Bullis, L. K. Hansen, C. Warner, J. M. Houston, M. F. Koskinen and N. S. Rasor: J. Appl. Phys., Vol. 38, No. 9, (1967), p.3425
- 9) F.G. Baksht, G. A. Dyuzhev, A. M. Martsinovskiy, B. Ya. Moyzhes, G. Ye. Pikus, E. B. Sonin, and V. G. Yur'yev: Thermionic Converters and Low Temperature Plasma, Academy of Science of the USSR, Eng. Ed. by L. K. Hansen, pub. National Technical Information Service/U.S. Depart. of Energy, 1978, chap. 9, p.293
- 10) Yu. A. Dunaev, et. al.: Sov. Phys.-Tech. Physics, Vol. 11, No. 3, Sept. 1966, p.395
- 11) Kaare J. Nygaard: IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-9, No. 10, Oct., 1973, p. 1020
- 12) R.D. H. Pollock and A. O. Jensen: J. Appl. Phys. Vol.36, No.10, 1965, p. 3184
- 13) Jun Yamada and Takayoshi Okuda: Journal of Physical Society of Japan, Vol. 35, No. 3, Sept., 1973, p.881
- 14) L. M. Chanin and R. D. Steen: Phys. Rev. 132, 1963, p.2554
- 15) N. D. Morgulis, Yu. P. Korchevoi and A.M. Prezhonskii: Sov. Phys.-JETP, vol26, No.2, 1968, p.279
- 16) 荻野 明久: 1996年卒業論文