

## 熱電子発電器研究開発の現状

神 藤 正 士  
(静岡大学工学部)  
(1994年 8 月 9 日受理)

### Recent Technology Development of Thermionic Energy Converter

KANDO Masashi  
*Faculty of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu 432, Japan.*

(Received 9 August 1994)

#### Abstract

The brief historical survey of thermionic energy converter is described. The basic principles and several modes of operation of the thermionic energy converter are outlined. Its application to space nuclear thermionic power system and combustion heated thermionic power system for terrestrial uses, which have been developed to sufficiently high level for practical uses, is reported, with the thermionic research program recently proceeded in our country.

#### Keywords:

thermionic energy converter, ignited mode, unignited mode, contact ionization, cumulative ionization, thermionic reactor, combustion heated thermionic energy converter, barrier index, emitter, collector, work function, functionally gradient material,

#### 1. はじめに

熱電子発電は、高温に加熱された電極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の一つである。高温のエミッタ電極から放出された熱電子は、これと対向して近接設置され低温に維持されたコレクタ電極で捕集され、外部負荷で仕事をした後再び元のエミッタに戻る。熱電子発電の動作原理は、電子を作用流体と見立てて汽力発電におけるランキンサイクルと

対応させて考えると理解しやすい。熱電子を放出するエミッタは外部から熱の供給を受けて多量の水蒸気を発生するボイラーに、コレクタは水蒸気を凝集して水に戻す復水器に相当する。汽力発電ではこれら両機器によって生じる水蒸気の大きな圧力差を利用してタービンを回転させ発電機を廻して発電するが、熱電子発電ではエミッタに比べて高い位置エネルギーにあるコレクタに到達した電子がこの電位差に相当する電氣的な仕事を外部

負荷に対して行うことになる。この様に、熱電子発電では熱エネルギーは機械的なエネルギーに変換されずに電気エネルギーに変換されるため、この種の発電方式は直接発電と呼ばれる。

熱電子発電器は二つの電極で構成された簡単な構造であるため、用途に応じて種々の電極形状と配位が可能である。また発電効率がよく高温で動作するため小型でも大きな出力が得られ、可動部の無い静止器のため静かで保守が容易である等、多くの優れた特徴を有している。これらの特徴を生かすには、長期にわたって燃料補給の必要が無く、多量の熱を安定に供給できる原子炉が熱電子発電器の熱源として最適と考えられる。惑星探査機の電気推進用電源や海底油田の開発基地の電源等、燃料補給が困難な特殊な環境で使われる電源が熱電子発電器の特色を発揮できる用途として考えられるが、大出力の熱電子発電原子炉への応用も可能と考えられている。熱電子発電原子炉は炉内で炉心熱を直接電気エネルギーに変換して炉外に取り出すため、冷却材の循環系に加わる負担が大幅に軽減され、故障の少ない発電システムが構築されるものと期待される。

高温動作を特色とする熱電子発電器は、より低温で動作する汽力発電の前段に組み込んでいわゆるトッパーとして利用することにより、火力発電の発電効率を向上させることが出来る。既にアメリカではこのような応用に対して具体的な検討が加えられ、経済的に魅力のあるプラントとして成り立つことが報告されている[1]。

熱電子発電器の身近な用途として、都市ガスを燃料とする家庭用ボイラーと組み合わせてコージェネレーションシステムとして利用する試みが実用化を目前にしている[2,3]。この種のシステムに利用される発電方式としてわが国では既に燃料電池が実用化されているが、熱電子発電はこれと競合関係にあり今後の展開に興味を持たれる。熱電子発電器の多様性を反映して上記の他にも太陽熱や放射性同位元素の崩壊熱を熱源とする熱電子発電器[4]についても研究が進められている。

ところで、熱電子発電器の内部で起こる物理現象に関してはほぼ解明されたものと考えられてお

り[5]、現在では電極や絶縁物の材料の開発あるいは高性能のバーナーやコレクタの熱回収用ヒートパイプ等の周辺機器の開発に研究の中心が移っている。わが国では太陽電池や燃料電池が脚光を浴び華やかな話題を集めている中で、熱電子発電は極めて目立たない存在であった。本稿では、実用化を間近に控えて最近になって欧米で再び活性化してきた熱電子発電の研究の現状を概説する。

## 2. 熱電子発電研究の経緯

熱電子発電の基本原則である熱電子放出の研究は19世紀末から20世紀初頭にかけて行われた。すなわち、熱電子放出は1885年に Edison によってランプの研究中に発見された現象で Edison 効果として知られているが、1902年に Richardson により熱電子放出流の式として定式化され、十分な理解が得られるに至った。

熱電子放出の応用としてその頃から熱電子発電が考えられていたが、研究が本格化したのはアメリカと旧ソ連で宇宙開発が本格化した1950年代に入ってからである。宇宙での使用に便利な特性を備えた宇宙用電源の必要性から、燃料電池、太陽電池や熱電素子とともに熱電子発電の開発研究が開始されている。1950年代半ばには既に幾つかの熱電子発電器が試作され、1965年頃までには発電器内で起こる物理現象の解明やそこで使用される材料の研究が進んだ。その後の約10年間は、独、仏、オランダ、スウェーデン等の欧州諸国も加わってこの分野の研究が最も盛り上がった時期である。Table 1はRasor[5]がまとめた主要国の熱電子発電研究の経緯である。この時期に欧米では、原子炉を熱源とする熱電子発電燃料要素に関する基礎的な研究が実施され、並行してこれを利用した宇宙用電源の概念設計が行われている。

旧ソ連では、出力10kW級の炉内型熱電子発電器“TOPAZ”が製造され試運転に成功している。ソ連ではその後も一貫してこのタイプの改良が続けられ、メガワットクラスの宇宙用電源実用化の見通しを立てた。しかしアメリカでは1973年に熱電子発電原子炉の研究プロジェクトが打ち切ら

Table 1 Historical summary of major thermionic energy conversion study [5].

・アメリカ

基礎研究	セシウム封入熱電子発電器の基礎研究	点火モード熱電子発電器の研究	改良型熱電子発電器の研究	改良型熱電子発電器の研究
応用研究	太陽熱, RI*) 原子炉を熱源とする発電器	熱電子発電核燃料要素(TFE)の開発	化石燃料用熱電子発電器の開発	高温動作モードの研究 改良型熱電子発電原子炉の研究 TFE技術の復活 TOPAZ2型宇宙用電源
	1957	1965	1973 1975	1983 1985 1990 1992

\*) RI:放射性同位元素

・ロシア(旧ソ連)

基礎研究	セシウム封入非点火モード熱電子発電器の研究	セシウム封入熱電子発電器の物理現象に関する包括的基礎研究	点火モード動作熱電子発電器の研究	非点火モード高温動作熱電子発電器の研究	改良型熱電子発電器の研究
応用研究	太陽, RI, 原子炉用熱電子発電器の開発	熱電子発電原子炉 TOPAZの開発	TOPAZの実験	TOPAZ飛行テストシステムの開発	TOPAZの改良
	1957	1962 1965	1970	1975 1979	1987

・西欧諸国

基礎研究	セシウム封入点火モード発電器の研究	点火モードの研究	点火モード発電器の研究	
応用研究	熱電子発電核燃料要素(TFE)の開発	エミッタ材料の研究	化石燃料用熱電子発電器の開発	
	1957	1965	1973 1975	1982 1985

A:独、仏、Euratom、 B:独、オランダ、 C:独、 D:スウェーデン、 E:オランダ。

れ、新たにより低温で動作する化石燃料の燃焼熱を利用する熱電子発電器の研究が開始された。この研究は1983年まで継続され、電極材料や器内現象面で進展がみられた。1983年にアメリカのレーガン大統領の提唱したスターウォーズ計画に沿って、寿命7~10年、数メガワットの高出力電源の開発を目標とする宇宙用熱電子発電原子炉の研究が開始され、1986年からは、6年にわたる研究プロジェクトの下で熱電子発電器の電極や絶縁材料の長期間の高速中性子照射試験や燃料要素の寿命試験が実施されている。

さて、最近の特筆すべき出来事として TOPAZ のアメリカへの売却が挙げられる[6]。ソ連の崩

壊は熱電子発電の分野にも影響を及ぼし、従来厳重な軍事機密下に置かれていた宇宙用熱電子発電原子炉 TOPAZ II 型数機が地上テスト用機器とともに1000万ドルで、1992年初頭にアメリカの BMDO (The Ballistic Missile Defense Organization) に売り渡された。毎年アメリカで開催される IECEC (Intersociety Energy Conversion Engineering Conference) はこの分野の研究発表の場であるが、本年8月の第29回会議では熱電子発電関連の40件の講演中8件が TOPAZ II に関するもので、BMDO の主導の下に進められている安全性や操作性の検討、データベース用データ集積の実験等に関する組織的かつ包括的な

研究成果が発表された。

欧州諸国では1975年以降、燃焼熱利用の産業用もしくは家庭用熱電子発電器に開発の重点が移っている。一方、わが国では科学技術庁航空宇宙技術研究所が中心になって、わが国で考案された傾斜機能材料を応用したエネルギー変換材料の開発に関する研究が組織的に行われることになり、1993年度を初年度とする5ヵ年計画がスタートした。この中で熱電子発電用の新しい電極材料の開発が計画されており、研究の進展が期待される。

### 3. 熱電子発電器の動作モード

熱電子発電器は、基本的には熱電子を放出するエミッタとこれを捕集するコレクタとで構成される2極管である。簡単な構造であるが故に様々な形状と動作モードが考案され研究されてきた。現在の研究の中心は、電極や絶縁用材料あるいは高レベルの中性子線照射を受ける過酷な条件の下での長期間にわたる使用に耐えられる優れた材料の開発研究にあると言われている[5]。熱電子発電器の動作モードに関しては多くの著書[7]や論文[5,8]に詳しいので、ここではその要点を紹介するに留める。

熱電子発電器では、出力電流はエミッタからの熱電子放出流に関係し、出力電圧は $\phi_E - \phi_C$ に依存する。ここで、 $\phi_E$ と $\phi_C$ はエミッタとコレクタの仕事関数である。熱電子発電器の出力を増加させるにはこれらとともに増大させればよいが、エミッタの仕事関数と熱電子放出流とを同時に増加させることは原理的にできない。また、エミッタから放出された電子は電極間空間で負の空間電位を形成してコレクタに向かう電子に対して障壁となって出力電流を抑制する。負の空間電位を解消もしくは緩和するには電極間隔を $10\mu\text{m}$ 以下に狭くするか、あるいは発電器内にセシウムを封入してエミッタ上での接触電離により生成されるセシウムイオンにより中和する、の二つの対策が講じられている。前者は真空型と呼ばれ研究の初期に試みられた方式であるが、発電器の製作面および寿命の点で非現実的であるため、現在の研究対象

は後者のセシウム封入型に絞られている。

周知のようにセシウムは電離電圧 $V_i$ が $3.89\text{eV}$ と元素中で最も低く、電極表面に付着してその仕事関数を広範囲にかえることができる。Fig. 1はセシウム雰囲気中におかれた金属の仕事関数 $\phi$ と $T/T_g$ の関係であり、Rasor et al [9]により与えられた。ここで、 $T$ は金属の温度、 $T_g$ はセシウムガス温度であり、 $\phi_0$ は清浄な金属表面の仕事関数である。金属温度が低い場合にはセシウムが表面に吸着されて被膜を作り $\phi_0$ に較べて遥かに低い仕事関数値をとるが、金属の温度が上昇して付着していたセシウムが蒸発し減少するにつれて、本来の値 $\phi_0$ に戻る。このように、セシウムは空間電荷の中和と電極の仕事関数の調整という二つの働きをして発電特性の改善に重要な役割を果たす。また同図から、 $\phi_0$ が大きな金属では実質的な仕事関数 $\phi$ が $T/T_g$ とともに大きく変化し、実用的な $\phi$ の値とされる $3\text{eV}$ を与える $T/T_g$ が $\phi_0$ とともに増加することが判る。これは、仮にエミッタ温度とその仕事関数を一定とすれば $\phi_0$ の大きなエミッタほど器内のセシウムガス圧を低くできることを意味し、結果として内部損失の減少と出力の増加をもたらす。従って、熱電子

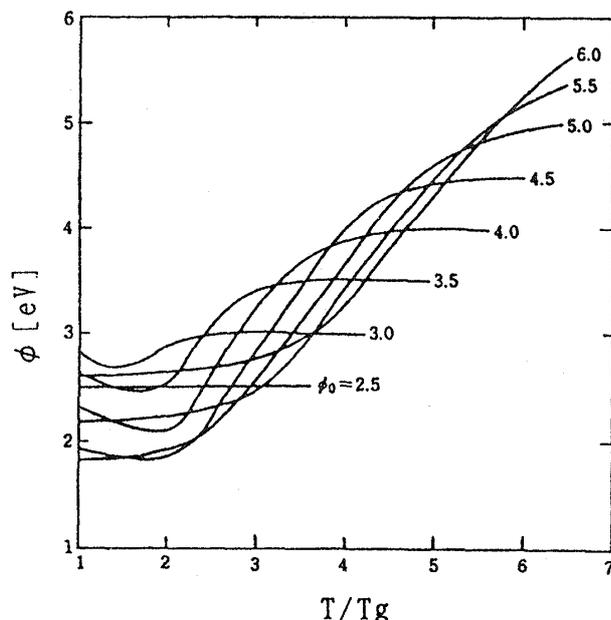


Fig. 1 Work function  $\phi$  of metal surfaces immersed in cesium vapor as a function of  $T/T_g$ ,  $T$  and  $T_g$  are temperatures of metal and cesium gas,  $\phi_0$  is a work function of metal with pure surface [8].

発電ではエミッタ材料として  $\phi_0$  の大きな金属が有利となる。以上のように、Fig. 1 に示されるデータは熱電子発電器の材料と動作条件を決める上で重要である。

さて、熱電子発電器の出力を上げるためにエミッタの仕事関数を下げて熱電子放出を増やすと、出力電流は増加しても出力電圧が低下するので、必ずしも出力の増大には至らない。このためセシウム封入型熱電子発電器では、電極間空間でセシウムを電離させて電子を増倍させることにより出力の増大が図られる。この動作モードは点火モード (ignited mode) と呼ばれ、熱電子発電器の研究の主流となっている。一方、電極間空間では電離が無くエミッタ表面での接触電離によってセシウムイオンが生成されるモードは非点火モード (unignited mode) と呼ばれる。Fig. 2 には、両モードに加えて理想モードにおける出力特性が示されている。出力特性は一般にセシウムガス圧、エミッタ温度並びに電極間隔によって影響されるためいつもこのような形をとるとは限らないが、同図は動作モードを理解する上で十分な内容を含んでいる。以下でそれぞれの動作モードを説明する。

### 3.1 理想モード

空間電位の影響や中性粒子との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、仮想的ではあるが最も大きな出力を生じる動作モードは理想モードと呼ばれ、その出力特性は Fig. 2 の点線で示される。発電器の動作は、

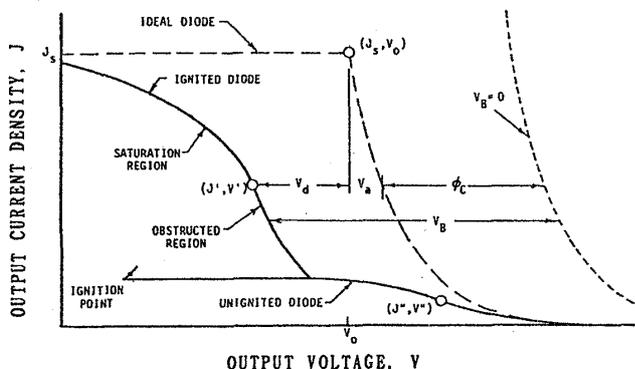


Fig. 2 Typical output characteristics of cesium filled thermionic energy converter. The ideal, ignited and unignited modes are compared [5].

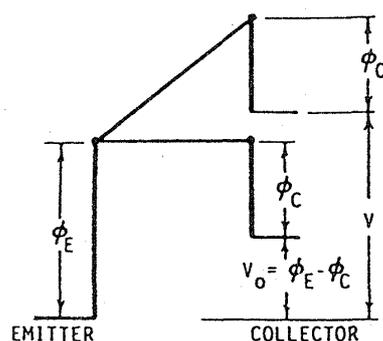


Fig. 3 Motive diagram of thermionic energy converter under the ideal mode operation [5].

出力特性とモーティブ図 (motive diagram) とを対応させて考えると理解し易い。モーティブ図は、横軸に電極間空間の位置を、縦軸には電位をとって下向きを正とし、発電器内での電子の循環をエネルギー的に分かりやすく表示した図である。Fig. 3 は理想モードにおけるモーティブ図であるが、この図から明らかのように出力電圧  $V$  がエミッタとコレクタの仕事関数の差  $V_0$  より低い場合、すなわち  $V \leq \phi_E - \phi_C = V_0$  ではエミッタから放出された熱電子は全てコレクタに到達できるから、出力電流密度  $J$  は Richardson-Dushman の式に等しく、

$$J = AT_E^2 \exp(-e\phi_E/kT_E) = J_s \quad (1)$$

である。  $V \geq V_0$  となるとコレクタ電位はエミッタ電位より低くなるため、低エネルギー電子はコレクタに到達できず  $J$  は低下して

$$J = AT_E^2 \exp\{-e(V + \phi_C)/kT_E\} \quad (2)$$

となる。ここで、 $A$  は熱電子放出定数、 $k$  はボルツマン定数、 $e$  は電子の電荷である。最大出力は  $V = V_0$  のとき得られる。

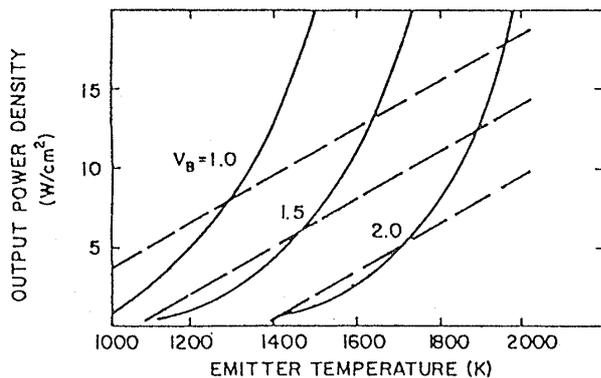
このモードは熱電子発電器の動作特性や性能を検討する際の基準となるため重要である。例えば、電子と他の粒子の衝突や衝突電離が無視できない場合の出力特性の解析は、理想モードの出力特性を基にして以下のようにして評価される。電子の散乱や電離衝突は電子のエネルギーの損失を伴ない、出力電流を低下させる。従ってこれらの衝突効果は等価的には電子に対する電位障壁とな

る。散乱及び電離衝突による電子のエネルギー損失がそれぞれ  $V_a$  及び  $V_d$  の電位障壁に相当すると考えると、この場合の発電器の出力電流密度は、(2)式において  $\phi_c$  の代わりに

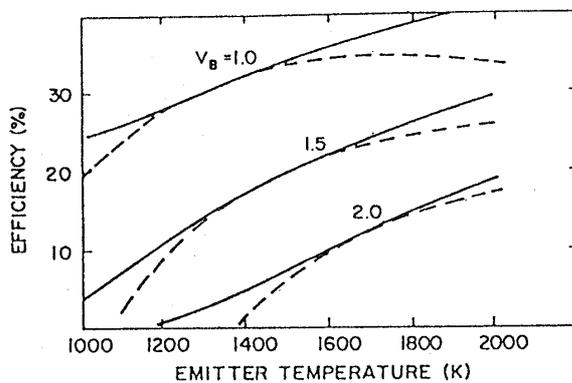
$$V_B = \phi_c + V_a + V_d \quad (3)$$

を代入することで与えられる。  $V_B$  はバック電圧 (Back-Voltage) またはバリアインデックス (Barrier Index) と呼ばれ、発電器内で起こる電子のエネルギー損失の総量を表すパラメータを意味する。

ところで理想モードにおける熱電子発電器の出力と効率は、  $V_B$  をパラメータとして  $T_E$  の関数として数値的に求めることが出来る。 Fig. 4 において、点線は  $J = 10 \text{ A/cm}^2$  を一定に維持した場合の特性である。この図から明らかなように  $V_B$  が僅かに減少すると、出力と効率は大幅に改善され



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Output power density v.s. emitter temperature, (b) efficiency v.s. emitter temperature, solid lines are maximum efficiency and dashed lines are for  $J = 10 \text{ A/cm}^2$ , ideal mode operation [5]:

る。従って、熱電子発電器の特性改善には  $V_B$  の低下が有効であり、仕事関数の低いコレクタ材料の開発が求められている。

### 3.2 非点火モード

この動作モードは、電子が電極間でのセシウム原子との衝突が無視できるヌーセン型または低圧型と、多数回の衝突を繰り返す拡散型または高圧型とに区別され、いずれの出力特性も数値解析が実験結果と良好な一致を示すことが知られている [5]。

電極間空間の電位分布の形状はポアソンの式とボルツマンの式を解くことにより求まる。その形状はエミッタ近傍におけるイオンと電子の密度比  $\beta$  に依存し、  $\beta > 1$  の場合には一つの電位極大値 (モーティブ図では極小値) を、  $\beta < 1$  の場合には極小値 (モーティブ図では極大値) を持った電位分布になる。ここで、  $\beta$  は空間電荷中和度と呼ばれ、

$$\beta = n_i/n_e = (m_i/m_e)^{1/2} J_i/J_e \quad (4)$$

である。ここで、  $J_i$  はエミッタから接触電離により放出されるセシウムイオン流であり、Langmuir-Saha の式

$$J_i = ep (2\pi m_i k T_g)^{-1/2} [1 + 2\exp\{e(V_i - \phi_E)/kT_E\}]^{-1} \quad (5)$$

で与えられる。ここで、  $p$  はセシウムのガス圧である。

セシウムイオンによる空間電荷の中和が不十分な  $\beta < 1$  の場合、出力電流は負の空間電位に阻害されるため (1) 式を下回ることになるが、  $\beta > 1$  の場合にはほぼ (1) 式で与えられる電子電流に等しい出力電流が得られる。特にヌーセン型で  $\beta > 1$  の条件で発電器を動作させると、  $V_a$  および  $V_d$  がともに無視できる上、負の空間電位が無く、内部損失の少ない理想モードに近い出力特性が得られる。しかし、(1) および (5) 式を考慮すると、  $\beta > 1$  の条件はエミッタ温度とセシウムガス圧がある程度高いことを必要とし、これは電子の平均自由行程  $\lambda$  を短くするので、無衝突であるため

の条件  $\lambda > d$  ( $d$  は電極間隔) を満たすことを困難にする。出力電流を増加させるためにエミッタ温度をさらに上げると  $\beta > 1$  の条件が破れ、エミッタ電位より低い空間電位が生じて発電効率が低下する。従って非点火モード動作を実用的な動作モードにするには、エミッタ温度を 2000K 程度の高温にし且つセシウムガス圧を低めに設定し、セシウムイオンは器内に挿入された補助電極によって補給する等の対策が必要となる。

### 3.3 点火モード

出力電圧を下げて短絡状態に近づけると、コレクタに向かう電子を加速する電界がコレクタ電極付近に生じ、電子はセシウム原子を電離するようになる。電離によってセシウムイオンの密度が電子密度に比して相対的に高まると空間電位は上昇し、Fig. 5 に示されるような電位分布に変化する。この後、エミッタから放出された電子はエミッタ前面のイオンシースによって加速されセシウム原子と衝突し、電極間空間の電離が維持される。なお、電子のエネルギーは一度の衝突で電離を起こすには不十分で、累積電離が支配的であると考えられている [10-13]。この放電はセシウムの励起電圧よりも低い電圧で維持されるため、低電圧アークと呼ばれることがある。

点火モードは  $\beta \leq 1$  でかつ  $pd \geq 0.5 \text{ Torr} \cdot \text{mm}$  の条件で生じることが知られている [14]。このモードは、電離に伴う電圧降下  $V_d$  により出力電圧が低下するものの出力電流密度は大幅に増加し、セシウムガス圧および電極間隔が実現可能な範囲に収まるため、現在の主要な熱電子発電器の研究

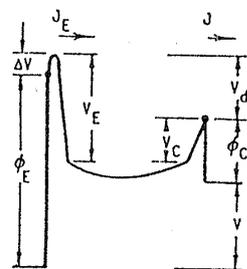


Fig. 5 Motive diagram of thermionic energy converter under the ignited mode operation.  $V_E$  and  $V_C$  are sheath voltages in front of the emitter and the collector,  $\Delta V$  is a negative potential barrier for electrons,  $J_E = J_s \exp(-e \Delta V / kT_E)$  and  $V$  are output current density and voltage [5].

開発はこのモードを対象としている。

### 3.4 正イオン補給による出力特性の改善

正イオンの供給を専用の補助電極を用いることで実現してセシウムガス圧、エミッタ温度等の動作条件を緩和し、出力特性の改善を期する幾つかの方策が従来から提案されている。ここでは、代表的な例を紹介する [15]。

a) イオンエミッタ：仕事関数の大きな加熱補助電極をセシウムガス中で利用すれば、セシウムの接触電離が効果的に生じて非点火モードで問題となる空間電荷中和の不足が解消され、発電効率が改善される。

b) 電子エミッタ：エミッタに対して負に深くバイアスされた電極から放出される電子は空間電位との電位差で加速され、気体の粒子を電離し多量の正イオンを生成する。この場合、エミッタから放出される低エネルギー電子に対して小さな衝突断面積を持つラムザウエル気体が封入ガスとして最適であり、点火モードで問題となる内部電圧降下を低減させることが可能である。

c) パルス放電：コレクタに、エミッタに対して正のパルス電圧を印加して強制的に放電を発生させて電極間空間に正イオンを供給し、パルスが印加されていない時間に発電する方式である。これは特別な電極が不要で実用的であるが、まだ実験では成功していない。

a) および b) の方法については、狭い電極空間に補助電極を挿入することを必要とするため構造が複雑になって様々な技術的な困難を招き、現段階では何れの方法も未だ実用化に至っていない。

## 4. 熱電子発電器の開発の状況

熱電子発電器の研究が本格的に開始されてから既に40年が過ぎようとしている。この間に発電器内の物理現象の多くは解明され、実用化への研究は電極等の材料の開発に絞られて来た感がある。近年著しく進歩した電子デバイス製造技術の応用により、この面の研究に大きな進展が期待される状況にある。ここでは、実用化が間近となった熱電子発電原子炉と燃焼熱利用熱電子発電器並びにわが国の最近の研究状況を紹介します。

### 4.1 熱電子発電原子炉

原子炉は熱電子発電器の熱源として有利な条件を備えているため、原子炉と組み合わせた熱電子発電器の開発が早くから進められている。発電器と核燃料の組み込み方法に炉内式および炉外式の2つの方式が考えられている[16]。炉内式は Fig. 6 に示される構造で、円筒状熱電子発電器の内側に配置されたエミッタの内部に高融点の核燃料  $UO_2$  ペレットを装填し、これを取り囲むように 0.5mm 程度の間隙を持たせてコレクタを配置し、点火モード動作により炉心熱を電気エネルギーに変換する。この結果、コレクタ表面の温度は現在運用されている商用炉の燃料棒表面温度に較べて低下し、冷却材による炉外への熱取り出しの負担が軽減される。熱電子発電燃料要素は上述の発電

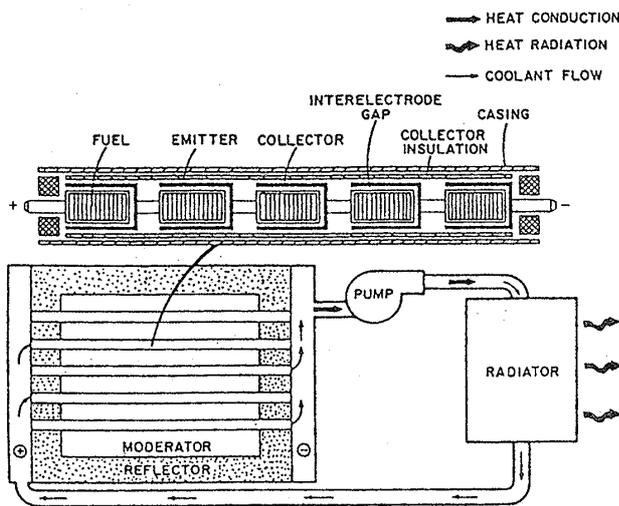


Fig. 6 In-core thermionic reactor concept [16].

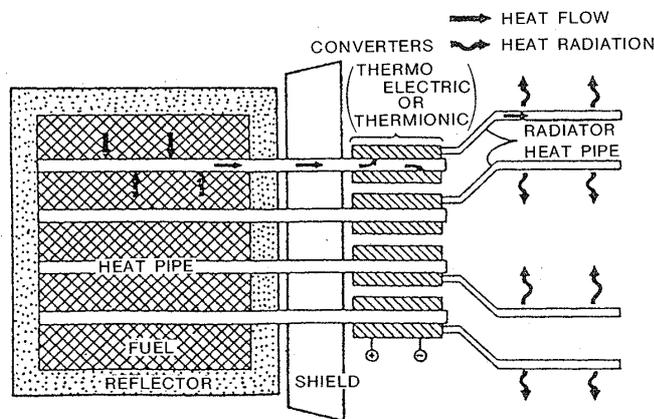


Fig. 7 Out-of-core thermionic reactor concept [16].

器をおよそ10個直列に接続して構成され、1本あたり約500Wの電力を発生する。炉の規模に依存して燃料要素の本数は相違するが、発電電力は数10kW~数MWまで可能である。また、燃料要素は燃料棒と構造が類似しているため商用炉との適合性が高い。しかしながら、発電器が常時高いレベルの放射線下に置かれ高温での動作を強いられるため、これに耐え得る電極材料の選択、核燃料の体積膨張に伴うエミッタの変形と両電極の短絡等の様々な障害が生じ易い欠点がある。

炉外式は炉内式の欠点を解消するため、熱電子発電器を炉外において発電する方式である。近年の発電器研究の進展によって、発電器の動作温度の低減が見込める状況にある。炉外式では炉心熱の抽出に Fig. 7 に示されるようなヒートパイプの利用を想定している。エミッタは少なくとも1500K程度が必要であり、高性能の高温ヒートパイプの開発が炉外式の成否を左右する。

さて、1970年代当初、世界に先駆けて旧ソ連は宇宙用の炉内式熱電子発電原子炉“TOPAZ”の長時間連続運転に成功し、熱電子発電原子炉実用化の可能性を実証した[17]。Fig. 8(a)はこの時使われたTOPAZ I型の概略図である。炉心は直

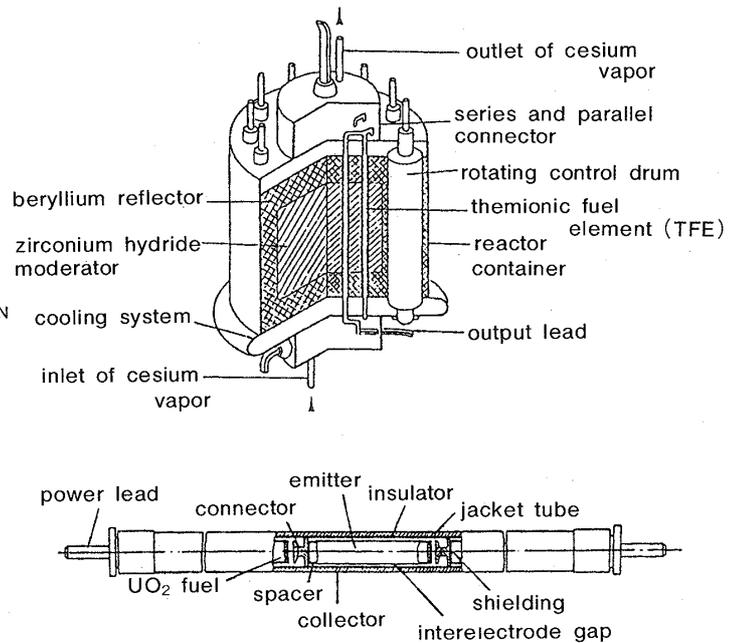


Fig. 8 (a) Thermionic reactor “TOPAZ”, (b) thermionic fuel element module [14].

径28cm, 高さ36cmの円筒形で, Fig. 8 (b)の熱電子発電燃料要素が79本装填され, 5~10kWの電気出力を得ている. この原子炉は水素化ジルコニウム (ZrH) 減速液体金属 (NaK) 冷却熱中性子炉で, 炉内には厚さ80mmのベリリウム反射体および中性子吸収体として炭化ほう素を用いた熱出力制御用ドラムが配置されている. 燃料は90%濃縮酸化ウランウムでエミッタにはモリブデンが使われ, コレクタとの間隔は0.4mmである. TOPAZはその後III型まで作られているが, いずれもおよそ2000時間の連続運転に耐えられ, 効率7%で数kWの出力電力が得られている. 問題は電極間隔が狭いため運転中に発生した燃料のスウェリングが主な原因となって電極が短絡し発電器の寿命を短くしていることで, 今後課題を

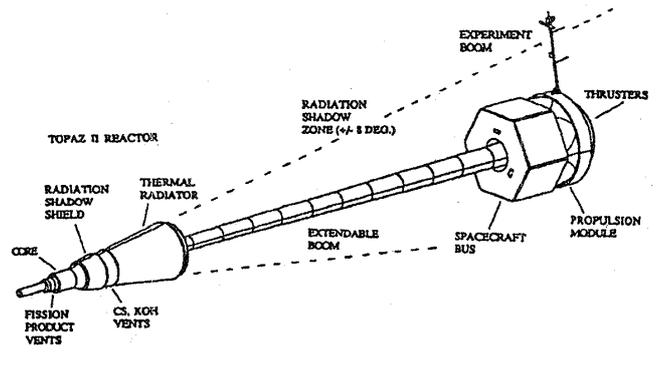


Fig. 10 Nuclear electric propulsion spacecraft orbital configuration [6].

残しているが, 熱電子発電原子炉の実現性に確かな見通しを与えた意義は大きい.

ところで, 1987年及び1988年の両年には, 人口衛星コスモスにTOPAZを搭載し, 宇宙での試運転に成功している[18,19]. ロシアではObninskのIPPE (Institute of Physics and Power Engineering)で全研究者6000名のうちの300名が熱電子発電の開発・研究に従事しており, この分野の組織的な研究が現在もなお継続されている.

アメリカでは, ロシアから購入したTOPAZに対する研究が大学及び研究所で組織的に行われている. Fig. 9 (a)にTOPAZ II型の炉心詳細図を, Fig. 9 (b)にはこれを統合して組み立てられた宇宙用熱電子発電原子炉を示す. 原子炉は燃料として96%濃縮の酸化ウランウム  $UO_2$ , 27gが装填され熱出力115kW, 電気出力6kWで3年間の連続運転が可能とされる. 出力の制御は内面の1/3に炭化ほう素を塗布したベリリウム製回転ドラムを回転させて炉内の熱中性子束を制御して行われる. Fig.10はTOPAZ IIを搭載した電気推進宇宙船の概念図で, 10mの距離を隔てて船室と電気推進機が連結される[6].

#### 4.2 ガス燃焼熱電子発電器

ガスの燃焼熱を利用する小規模な熱電子発電器が, 工場, 温室或は家庭でのコジェネレーションシステムとしての利用を想定して, オランダのWolff等により開発されている[2]. Wolffはアイントホーヘン工科大学で1978年からこのタイプの発電器の研究に取り組み, ガス燃焼加熱に耐え

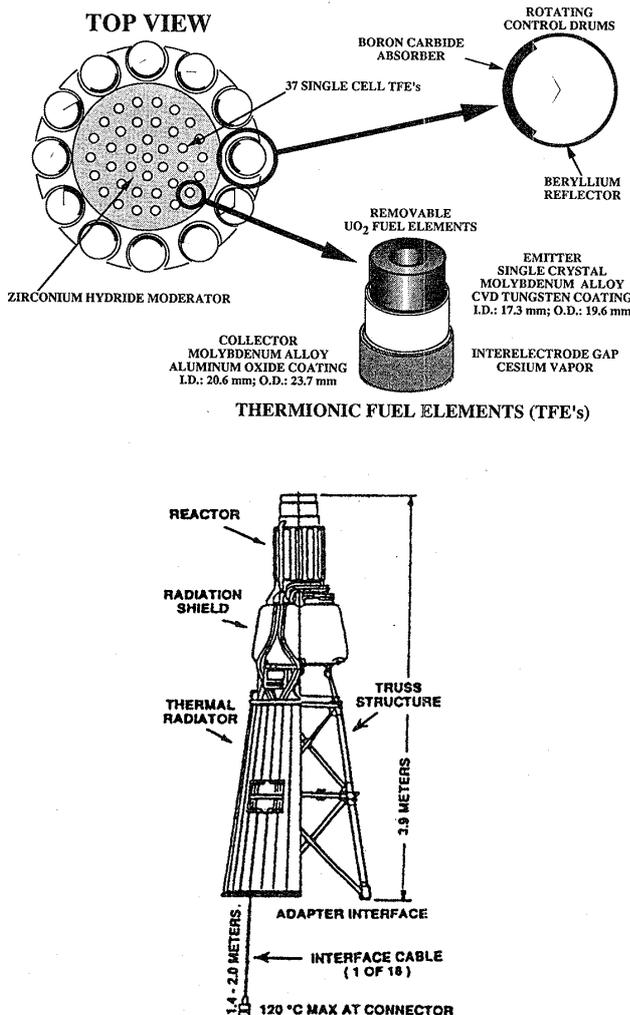


Fig. 9 (a)TOPAZ II space nuclear power system configuration, (b)TOPAZ II space nuclear reactor system [6].

るエミッタ材料として金属-セラミック複合材である W-TiN-SiC を実用化した。1989年からはロシアの IPPE の熱電子発電のグループと共同研究を開始し、1991年には両国の共同出資により ECS 社 (Energy Conversion System 社) をアイントホーヘンに設立し、ガス燃焼熱あるいは太陽熱を熱源とする発電器など、利用目的の相違する数種の発電器の開発を進めている。120kW 以下の発電システムでは、可動部が無く小型化のできる熱電子発電の方がシステムの維持費も少なく有利であるとの試算がこれらの開発の根拠になっている。

ECS 社およびロシアにおける姉妹社の ECS-Russia では、熱および電気出力の規模によって、TECTEM, GTB-TECTEM, TECBURNER 等の名称で呼ばれる種々のコジェネレーションシステムを開発している。TECTEM は熱出力 3kW, 電気出力 ~300W の家庭用セントラルヒーティング用設備で、6 個のガス燃焼熱電子発電器、給水と空気の予熱を行う装置並びに直流の低電圧大電流の電力を 50Hz, 220V の交流に変換するインバータとで構成される。GTB-TECTEM は温室用で、消毒用スチームと冬季の暖房用温水並びに電照用電力を供給する。TECBURNER は工業用の規模の大きなもので、計画では 90 個の発電器を装荷し 15kW の電力と 300kW の熱出力の供給を目指している。TECTEM に関してはコストダウンを図るために 1995 年から量産を開始する予定で、既にパイロットプラントの建設が始まっている。これと並行して TECTEM をオランダ国内に留まらず世界に普及させるための市場調査も着手されている。

Fig. 11 は TECTEM 等で使われている点火モード動作のガス燃焼型熱電子発電器 [2,3] である。エミッタは半球型でその面積は  $38\text{cm}^2$  であり、直接ガスバーナによって加熱される。コレクタはエミッタと  $0.3\text{mm} \sim 0.75\text{mm}$  の間隙をおいて設置され、水またはヒートパイプで冷却される。この発電器の技術的な問題点の一つは、エミッタを 1600K 程度まで加熱できるガスバーナの開発であった。このためには、ガスに混合する空気を

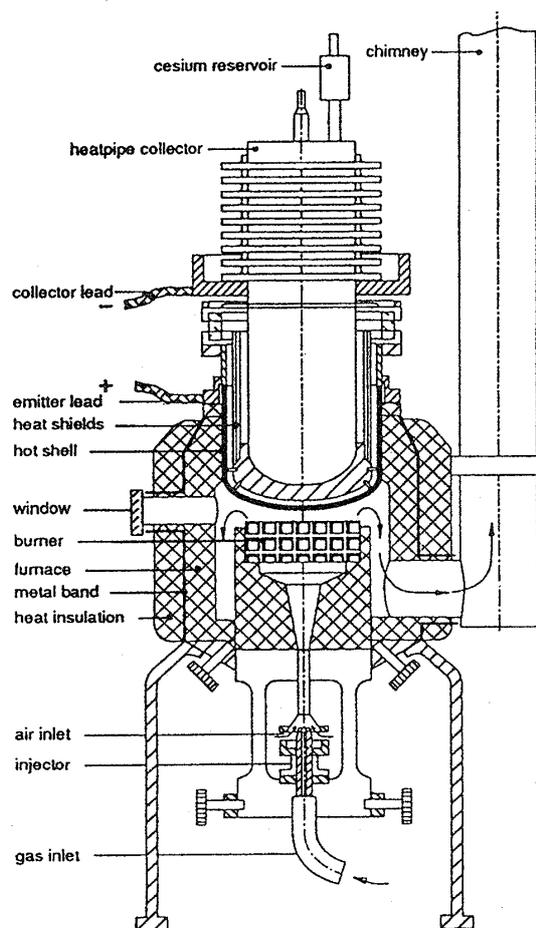


Fig. 11 Combustion heated thermionic energy converter [2].

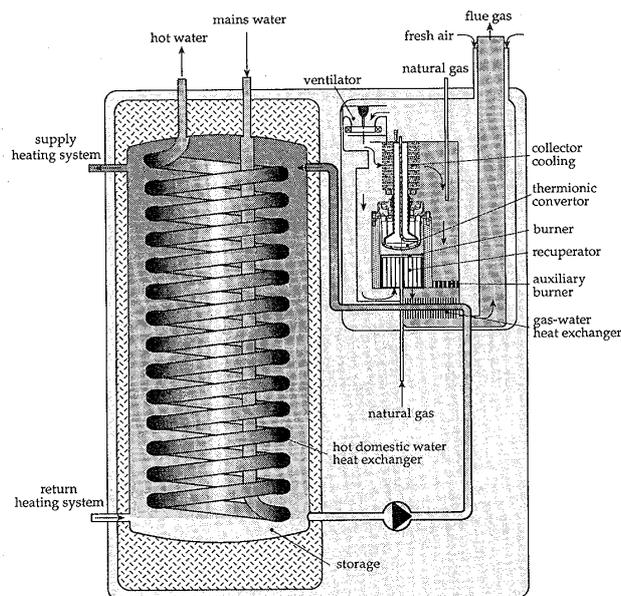


Fig. 12 Thermionic central heating facility for houses "TECTEM" [20].

高温に予熱する事が必要であり、燃焼ガスからの熱を回収して利用する空気予熱器もバーナと併せて新たに開発されている。Fig. 12はTECTEMの概略図[20]であり、 $\sim 100$ リットルの蓄熱槽とともに発電器が配置されている。

#### 4.3 わが国における研究

高度の機能を持つ次世代型新素材である傾斜機能材料を利用して、新しいエネルギー変換材料を開発する研究が、科学技術庁の主導で1993年度から5ヵ年計画で始まった。この研究の詳細は紙面の都合で省略するが、熱電子発電もこの研究プロジェクトに含まれている。現在の熱電子発電の研究が電極材料の開発に重点が置かれている状況を考えると、本研究は真に時宜を得たものと言えよう。研究は2年目に入ったばかりであるがこの間に得られた研究成果を報告する。

熱電子発電の高効率化にはコレクタの仕事関数の低減が最も効果がある。電子技術総合研究所の福田らは、低い仕事関数を持ちコレクタ材料として有望視されている高融点金属酸化物の評価を系統的に行うため、先ず $WO_x$ を製作しセシウム雰囲気中での仕事関数をマルチュク法を使って測定した。Fig. 13に示されるように、仕事関数の測定値は $T_c/T_r$ に対してほぼ一定の $1.45\text{eV}$ であり、Moの最小値と較べても $0.1\text{eV}$ 程度低くなっている[21]。ここで、 $T_c$ と $T_r$ はそれぞれコレクタ及びセシウム溜温度である。東海大学の平井らは、傾斜構造形成技術を応用してエミッタを溝型

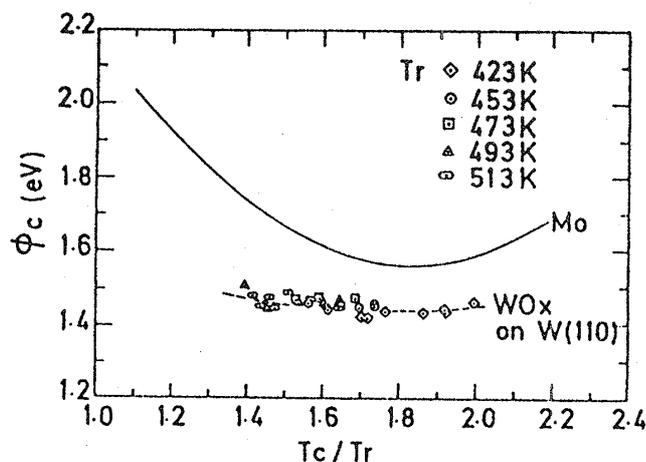


Fig. 13 Work function of  $WO_x$  on W(110) in cesium vapor [21].

構造とし、その表面積を増加させるとともに非点火モードと点火モードが混在するハイブリッド動作を実現して出力の向上を狙った研究を行っている。

#### 5. おわりに

熱電子発電器は構造が簡単で熱源に応じて種々の形状をとることが可能である上、可動部を持たず維持管理が容易な発電方式である。この点に着目して、原子炉と組み合わせた宇宙用熱電子発電原子炉が宇宙開発事業の一環として米ソを中心に開発されてきた。一方、ガス燃焼型熱電子発電器が家庭のセントラルヒーティングへの用途を念頭に研究開発され、着実な進展を見せている。これらの熱電子発電器は共に完成の域に近く、今後多くの分野で利用が進むものと思われる。

終わりに、本稿を書くに当たっては電子技術総合研究所の福田隆三氏に資料を提供して頂いた。ここに付記して感謝の意を表する。

#### 参考文献

- [1] G. Miskolczy, C. C. Wang and D. P. Lieb, *Proc. 16th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf.*, (Atlanta, GA) 2, 1956 (1981).
- [2] L. R. Wolff, W. B. Veltkamp, V. I. Yarigin, *Proc. 2nd Intersoc. Conf. on Nuclear Power Eng. in Space, Physics of Thermionic Energy Converter*, PTI Sukhumi, Georgia, 72 (1991).
- [3] V. I. Yarigin, A. V. Vizgalov, V. V. Klepikov, S. U. Tulin, V. A. Ruzhnikov, L. R. Wolff and W. B. Veltkamp, *27th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf.* 3, 437 (1992).
- [4] P. Louklove and J. G. Desteese, *Conf. Record of 1971 Thermionic Conversion Specialist Conf.* 59 (1971).
- [5] N. S. Rasor, *IEEE Trans. on Plasma Science* 19, 1191 (1991).
- [6] G. E. Cameron and E. L. Reynolds., *29th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf.* 1, 389 (1994)
- [7] G. W. Sutton., *Direct Energy Conversion* (McGraw-Hill Book Company, Inc., New York), (秋山守, 柳沢一郎共訳 直接エネルギー変換, 向学社).
- [8] J. M. Houston *et al.*, *Thermionic Energy Conversion*, *Advances in Electronics and Electron Physics*

- (Academic Press, New York 1962), **12**, 125.
- [9] N. S. Rasor and C. Warner, *J. Appl. Phys.* **35**, 2589 (1964).
- [10] B. Ya. Moizes *et al.*, *Sov. Phys. -Tech. Phys.* **10**, 215 (1965).
- [11] I. P. Stakhanov *et al.*, *Plasma Thermal Emission Energy Conversion*, AD-703170.
- [12] I. P. Stakhanov, *Sov. Phys. -Tech. Phys.* **12**, 1522 (1968).
- [13] D. W. Norcross and P. M. Stone., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **8**, 655 (1968).
- [14] 高橋重男, 天野文男: *応用物理学会誌*, **43**, 656 (1974).
- [15] N. S. Rasor *et al.*, *Proc. 3rd Inter. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation*, Julich, 1027 (1972).
- [16] F. Huffman, P. Reagan, G. Miskolczy and O. Merrill, *17th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf.* 1908 (1982).
- [17] T. M. Gryaenov *et al.*, *Peaceful Uses of Atomic Energy 7, Proc. of 4th Inter. Conf.* Geneva, 349 (1971).
- [18] G. L. Bennet, *Proc. 24th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf.* (1989).
- [19] I. P. Bogush *et al.*, *Proc. Anniversary Specialist Conf. Nuclear Power Engineering in Space*, Obninsk, Russia (1990).
- [20] W. B. Veltkamp *et al.*, *Thermionic Energy Conversion II*, Short Course, Goteborg, 3-4 May (1993).
- [21] R. Fukuda, Y. Kasuga, K. Hayashi, K. Katoh and S. Shimizu, *29th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf.* 2, 1041 (1994).