

共鳴光照射による熱電子コンバータのプラズマ特性

Plasma in Thermionic Energy Converter by Resonance Light Irradiation

稲熊 剛幸[†] , 津田 紀生^{††} , 山田 諄^{††}

Takayuki INAGUMA , Norio TSUDA , Jun YAMADA

Abstract : A thermionic energy converter is a generator that directly converts heat into electricity. At the low temperature operation, the converter output is not enough for the practical application. Irradiating the resonance light to the converter filled with cesium gas, the output characteristics are much improved since ionized cesium atom neutralizes the space charge. To investigate the plasma parameter in the converter, a single probe is inserted and the resonance light is irradiated. It is found that an electron density is the order of 10^{17}m^{-3} , an electron temperature is 2000~3000K.

1. はじめに

将来の分散型発電として期待される熱電子コンバータは、熱電子放出を利用して熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換する直接発電方式の一つである。高温に加熱されたエミッタ電極より放出された熱電子は、低温のコレクタ電極で捕集され、外部負荷を通過して再びエミッタに戻る。直接発電であるため発電効率が非常に高い上、コンバータは非常に簡単な 2 極管で構成され、様々な形状をとることができ、保守が容易である他、非常に小型かつ軽量にすることが可能である。

熱電子発電を行う上で問題となる空間電荷効果により、低速電子の作り出す負の空間電位が熱電子の放出を妨げ、出力は大きく制限を受ける。一般にこの問題を解決するためにコンバータ内部にセシウムを封入し、電極ギャップを極端に狭くする方法が採られる。封入されたセシウムは高温のエミッタ表面で接触熱電離され空間電荷の中和に働くだけでなく、エミッタに付着して実効的な仕事関数を低下させるため多くの熱電子が放出される。しかしセシウムを十分に接触熱電離させるためには、エミッタの温度を 2000K 以上の高温にする必要があり、それに伴って電極寿命や安定性等に問題が発生する。

そこでセシウムを光電離させる方法によってコンバータを比較的低温領域で動作させる研究が進められた。発振波長可変の色素レーザーを光源に用い、照射光の波長に注目して研究が行われた^{1,2,3,4)}。その結果セシウムの分子遷移に共鳴する可視光を照射すると出力特性はある程度改善されることが分かったが、実用化に対して十分な

値が得られるまでには至らなかった。そこで照射光の波長をセシウム原子の共鳴光に変え実験を行った。出力は可視光照射時より低いレーザーエネルギーでも 100 倍程度高い値が得られることが分かった。本研究では共鳴光照射時にコンバータ内部で生成されるプラズマの特性を調べるため、コンバータにシングルプローブを挿入して測定を行った。種々の条件に対する依存性が確認され、エミッタ加熱時において電子密度は 10^{17}m^{-3} のオーダー、電子温度は 2000~3000K であることが分かった。

2. 実験装置

実験装置の構成図を図 1 に示す。コンバータはパイレックスガラス製で直径約 50mm、長さ約 140mm の円筒形であり、熱電子を放出するエミッタと放出電子を捕獲するコレクタからなる二極管で構成されている。コンバータには光照射用の窓がついていて、窓の内径はエミッターコレクタ間の距離である 15mm よりも大きい約 20mm である。窓間隔は約 90mm である。エミッタは直径約 12.5mm のタングステン渦巻き状ヒータで、太さ約 0.7mm のタングステン線を 5 回巻いたものである。エミッタ温度は半波整流された交流電流により加熱及び制御されている。また熱の輻射を防ぐためヒータは、直径約 20mm、長さ約 15mm のニッケル製中空円筒に覆われていて、ヒータは円筒から約 1mm 奥に存在する。一方コレクタは直径約 40mm の円形をしていて、中央はモリブデン製のメッシュが張られている。コンバータは電気炉の中に設置されていて、その炉温度を変化させることで、封入されたセシウムの蒸気圧を調整する。封入されたセシウムは、エミッタ電極から離れたコンバータの下方に位置するセシウム溜まりにあり、蒸気となることで管内を満たす。光源にはエキシマレーザー励起の色素

[†] 愛知工業大学大学院 工学研究科
電気電子工学専攻 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

レーザを用い、直径約 8mm の光を半値幅約 33ns のパルスで照射した。エミッタ加熱用の交流電流による電界の影響を受けないようにするため、レーザ光は半波の休止期間中に照射され、測定もその間に行われる。

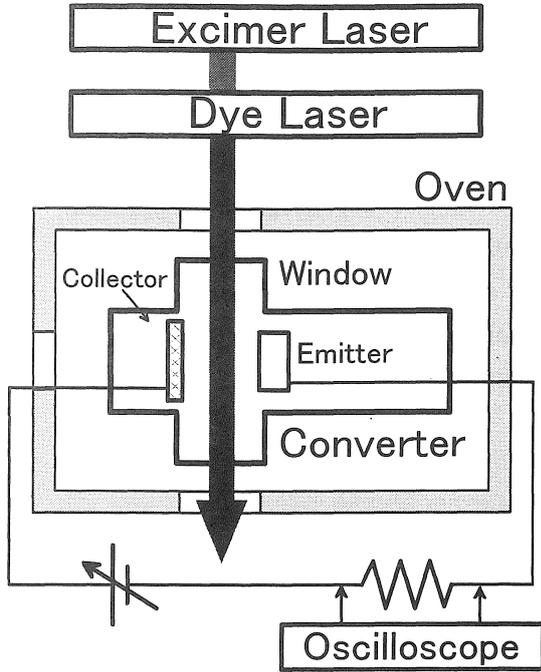


図 1 実験装置構成図

プローブ挿入位置を図 2 に示す。プローブは直径約 0.2mm、長さ約 2mm のタングステン線を用い、コンバータの電極間上方より挿入された。プローブは太さ約 1mm のガラスで覆われ固定されていて、プローブ先端は電極間の中心に位置し、照射光の中心とプローブの先端が一致している。光照射位置は電極の中心とした。エミッターコレクタ間は短絡されている。プローブ印加電圧を変化させ、その時のプローブ電流を電流測定用抵抗の電圧降下により求めた。

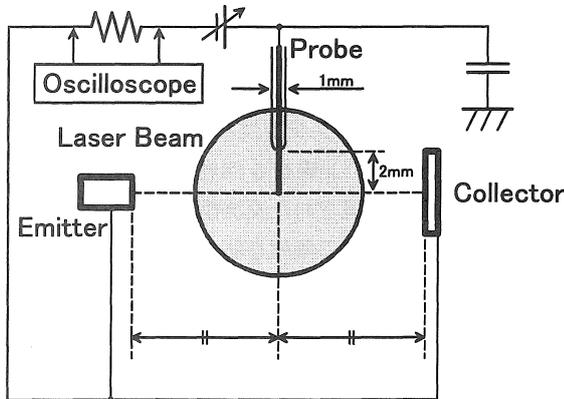
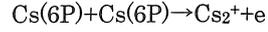
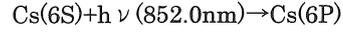


図 2 プローブ挿入位置

3. 短絡電流出力特性及び照射光吸収特性

プラズマ特性を調べるに先立ち、プローブを挿入しない状態で共鳴光を照射した時の短絡電流密度と照射光吸

収率について述べる。短絡電流密度と照射光吸収率の照射光波長に対する依存性を図 3 に示す。共鳴光を照射すると基底状態のセシウム原子(6S)が光エネルギーを得て励起原子(6P)となる。そして励起原子同士が衝突すると分子状イオンを生成し、空間電荷の中和に働くため出力も増加する⁵⁾。



短絡電流、吸収率とも波長 852.0nm でピークを持ち、この波長において照射光がセシウムに最も共鳴したことが分かる。吸収率は波長 852.0nm で、90%以上吸収される。このため光照射により生成されるイオンは主に入射窓付近で生成されると考えられる。短絡電流は最大で約 1kA/m² の高い値が得られ、共鳴光照射による空間電荷の中和が極めて効果的に働くことが明らかとなった。また、短絡電流、吸収率とも半値幅は約 0.5nm の狭い値である。原子遷移に寄与するため、狭い範囲の波長でしか反応しないためであると考えられる。

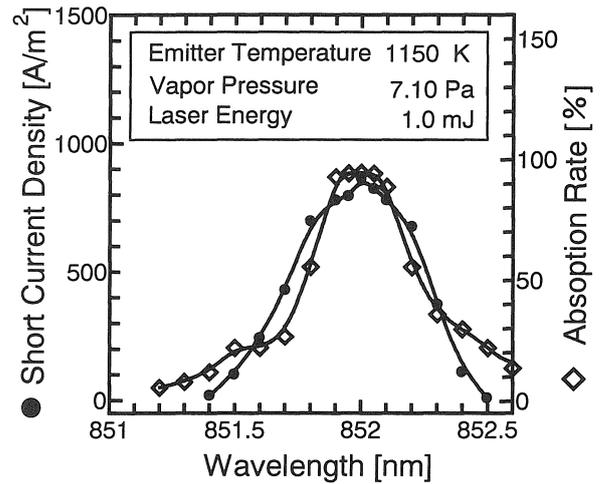


図 3 出力特性と照射光吸収特性

4. プラズマ特性

4.1 プローブ波形及び測定方法

プローブ波形のプローブ（印加）電圧に対する変化を図 4 に示す。縦軸はプローブ電流の最大値が 1 になるように規格化されていて、時間 0ms においてレーザ光が照射される。プローブ電圧は+3.0~-3.0V まで離散的に変化させた（図中に示す）。プローブ電圧が 2V 以上と高い場合は、主にプローブ周辺の電子が捕集されるため波形は飽和状態となる。そしてプローブ電圧の低下に伴って電荷の捕集が不十分となるためピーク値は低下し、ピーク時間も遅くなる。プローブ電圧が負になるとプローブに注入される電子は減少し、逆にイオンは増加する。そのため光照射直後はプローブ周辺において高密度に生成されたイオンが、電子よりも多くプローブに注入され波形は負になる。そしてイオンの拡散と共に放出される熱電子が多くなり、時間が経過すると波形は正になる。負

の印加電圧がさらに高くなると、プローブにはイオンのみが注入されるため波形は負の状態のみとなる。

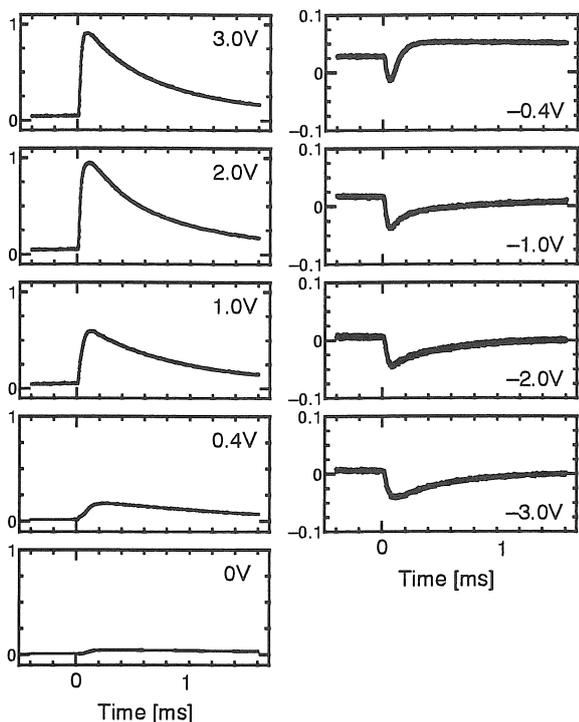


図4 プローブ波形

プローブ電圧が 3.0V と高い条件における飽和プローブ出力波形を図5に示す。この飽和状態の波形から出力ピークの前で計6つのサンプリング時刻 $t_1 \sim t_6$ を定める。出力ピークが t_3 になるようにした。プローブ電圧を変化させながらそれぞれの時刻6点における電圧値を測定し、1つの条件につき計6つの電圧-電流特性をつくる。

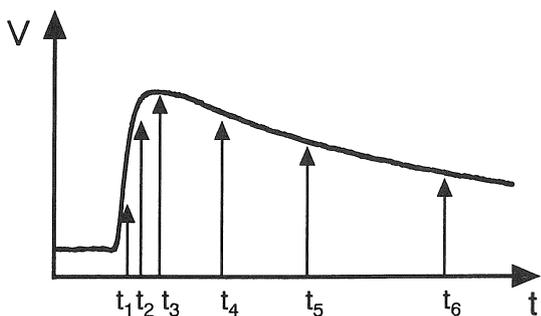


図5 飽和プローブ出力波形

その結果、図6のような電圧-電流特性が得られる。プローブ電圧が正の場合プローブ周辺の電子が多量に流れ込むため出力は正に大きくなり、プローブ電圧がプラズマの空間電位 V_s に等しくなると飽和する。この飽和電流 I_{ps} はほぼ電子飽和電流に等しい。しかし過剰なバイアスをプローブに印加すると放電を起こし、出力が異常に増加する。この図より空間電位 V_s における飽和電流 I_{ps} と傾き g_p を求める。さらに傾きから電子温度 T_e を、飽和電流と電子温度から電子密度 n_e を以下の計算式より求める。

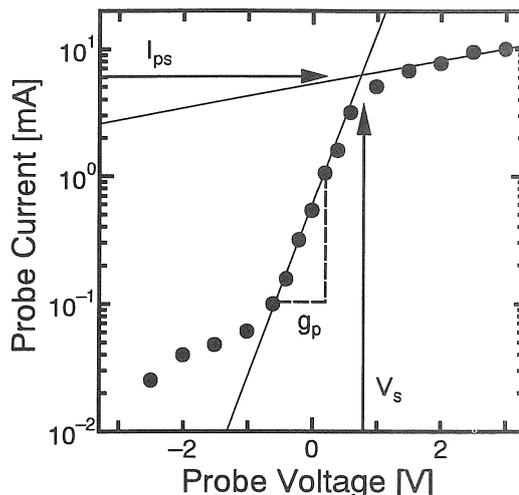


図6 プローブ電圧-電流特性

$$T_e = \frac{5042}{g_p}$$

$$n_e = \frac{I_{ps}}{2.02 \times 10^{-25} \times \sqrt{2.41 \times 10^6 T_e}}$$

計算された電子密度、電子温度を、横軸をサンプリング時間としたグラフにプロットする。図7は電子密度の時間依存性である。共鳴光照射により生成されたセシウムイオンが拡散し、エミッタの表面付近に到達すると空間電荷が中和され、多くの熱電子が放出される。そのため電子密度のピークは光照射よりイオンの拡散時間 (100 μs 程度) だけ遅れて現れる。その後はイオンの消滅に伴い空間電荷が中和しきれなくなり、電子密度も減少する。図8は電子温度の時間依存性である。光照射により生成された励起原子の逆励起過程において電子が加速されるため光照射から暫くは高温の時間帯が続き、その後は励起原子の減少に伴って低温の時間帯となる。低温になっても電子温度はエミッタ温度より高い。これは放出された熱電子の内、高いエネルギーを持ったものがプローブに多く流入するためであると考えられる。

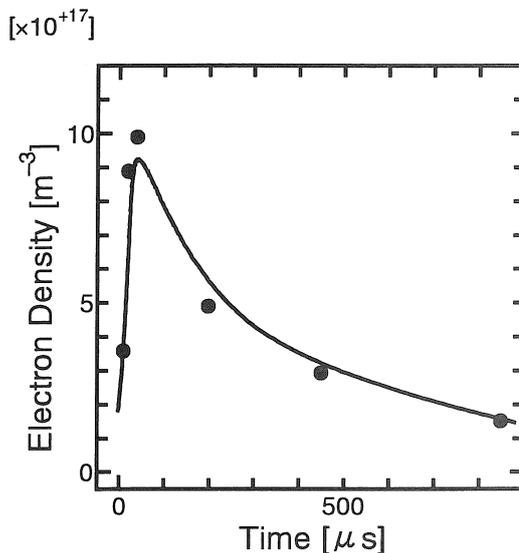


図7 電子密度 vs. 時間

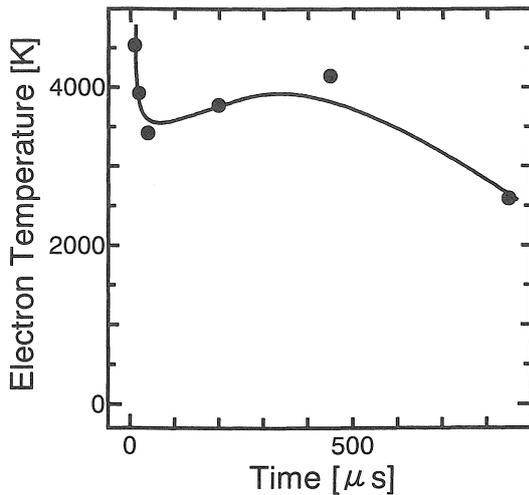


図 8 電子温度 vs. 時間

図 7 より電子密度ピークの時間を求め、その時間における電子密度を図 7 より、電子温度を図 8 より読み取り、種々の条件に対する依存性を調べた。

4・2 照射光波長依存性

電子密度ピーク値の照射光波長に対する依存性を図 9 に示す。電子密度は波長 852.0nm でピークを持ち、その値は $10^{17}m^{-3}$ のオーダーであった。照射光は 852.0nm で最もセシウムに共鳴して吸収されたため電子密度も高くなったと考えられ、これは図 3 の結果とも一致している。また半値幅は約 0.3nm であり、狭い範囲で反応していることが分かる。波長依存性の半値幅はセシウム蒸気圧に依存して変化する。蒸気圧が高くなると衝突拡がりの影響を受け、波長が 852.0nm から幾分ずれても照射光がセシウムに吸収されイオンが生成される。そのため空間電荷が中和され出力特性や電子密度も広がるようになる。

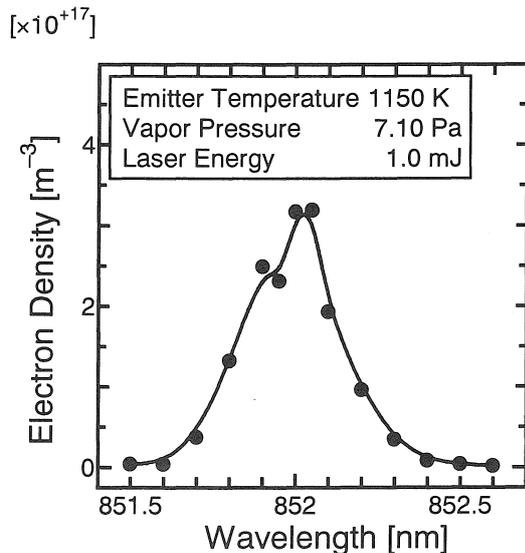


図 9 電子密度 vs. 照射光波長

電子密度ピークの時間における電子温度の照射光波長に対する依存性を図 10 に示す。電子温度は約 2000K で

一定であった。波長 852.0nm 付近の光はセシウムに非常に強く吸収され、与えられる合計のエネルギーは大きいですが、多くのセシウムにエネルギーが分けられ電子密度はあまり上昇しない。波長が共鳴光からずれると吸収が少なくなり与えられる合計のエネルギーは小さいが、エネルギーを受け取るセシウムの数が少なく電子温度は上昇する。従って照射光波長が変化しても電子温度はほぼ一定になったと考えられる。

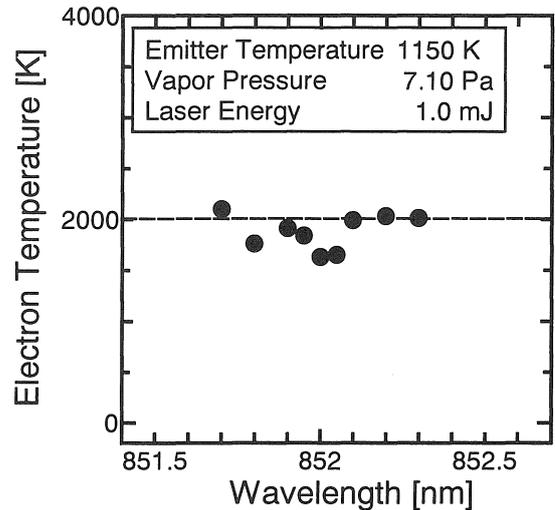


図 10 電子温度 vs. 照射光波長

4・3 セシウム蒸気圧依存性

電子密度のセシウム蒸気圧に対する依存性を図 11 に示す。電子密度はどのエミッタ温度においてもセシウム蒸気圧が数 Pa でピークを持った。蒸気圧が高くなると多くのイオンが生成され、空間電荷が中和される。そのため放出される熱電子の数も多くなり、電子密度が高くなる。しかし蒸気圧が高くなりすぎると生成されるイオン数は増加するものの、イオンの拡散や電子の移動が衝突の影響を受けて制限されるため、電子密度は低くなると考えられる。

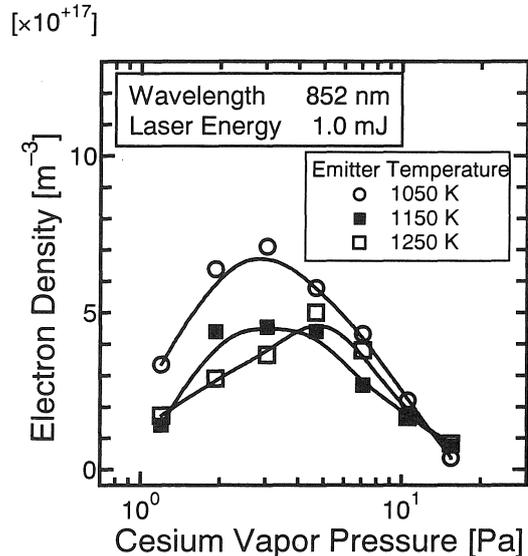


図 11 電子密度 vs. セシウム蒸気圧

エミッタから放出される熱電子数はエミッタの電極温度と仕事関数に依存する。コンバータにはセシウムが封入されているため、エミッタの実効的な仕事関数はエミッタ温度とセシウム蒸気圧に従って変化する。エミッタ温度が低くセシウム蒸気圧が高いと、タングステンヒータ表面から蒸発するセシウムよりも、ヒータに吸着するセシウムの割合が大きくなり、エミッタの実効的な仕事関数はセシウムに近い低い値となる。そのため熱電子が放出されやすい。従って電子密度はパラメータのエミッタ温度が高いほど、高いセシウム蒸気圧でピークを持つはずである。しかし測定結果からはあまり明確な測定結果が現れていない。さらに蒸気圧に対する電子密度の変化も小さく、出力特性と完全に対応した結果を得られていない。使用するコンバータの特性、照射光吸収、光照射位置、プローブ挿入による影響などが原因として考えられる。

電子温度のセシウム蒸気圧に対する依存性を図 12 に示す。電子温度は 2000~3000K の範囲でほぼ一定であり、あまり明確な変化を示していない。電子温度の評価は図 6 の様な対数グラフの傾きから算出するため、接線の引き方や測定変動の影響を強く受ける。従って同じ条件でも変動が大きくなると、電子温度の評価も数百 K の変動を持ってしまう。

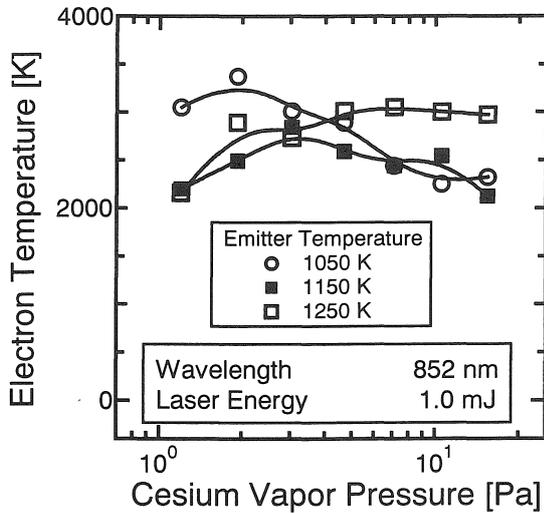


図 12 電子温度 vs. セシウム蒸気圧

4・4 エミッタ温度依存性

電子密度のエミッタ温度に対する依存性を図 13 に示す。電子密度はエミッタ温度の上昇に伴って高くなるが、蒸気圧依存性と同様にエミッタの仕事関数変化による影響は現れなかった。またエミッタ温度に対する変化も小さく、出力特性とは対応しない。

電子温度のエミッタ温度に対する依存性を図 14 に示す。電子温度はバラツキがあるものの、エミッタ温度の上昇に伴って僅かに高くなっている。エミッタ温度に対する電子温度上昇の傾きは、パラメータのセシウム蒸気圧が変化してもほぼ一致している。この温度上昇はエミ

ッタ温度の上昇分にほぼ一致しているため、放出熱電子の温度がエミッタ温度の上昇分だけ上がった結果と考えられる。

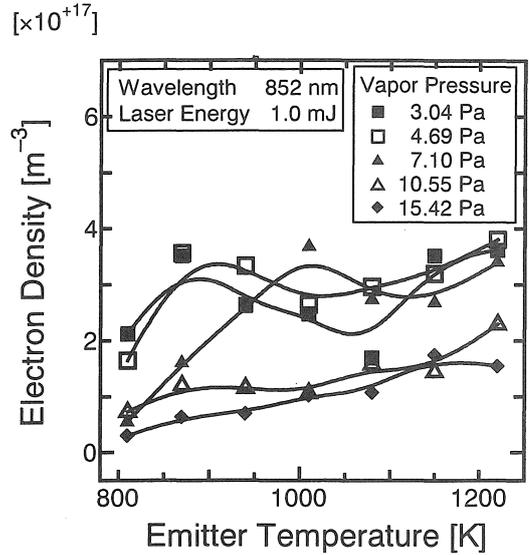


図 13 電子密度 vs. エミッタ温度

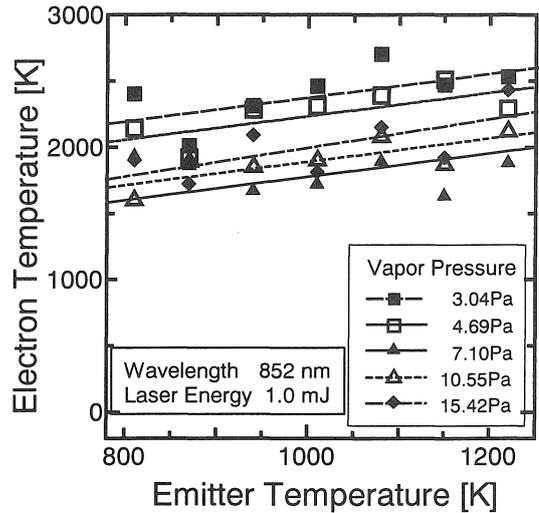


図 14 電子温度 vs. エミッタ温度

4・5 レーザエネルギー依存性

電子密度のレーザーエネルギーに対する依存性を図 15 に示す。電子密度はレーザーエネルギーの上昇に伴って増加する。入射光のエネルギーが高くなると生成されるイオン数も増加し、空間電荷が十分中和されようになる。そのためレーザーエネルギーが高くなるほど電子密度も高くなったと考えられる。またパラメータのセシウム蒸気圧が変化しても電子密度は変化していない。セシウム蒸気圧が高い場合でもレーザーエネルギーが高ければ、電極間空間でも多くの電離が起こるはずであるが、測定結果では蒸気圧変化に対する電子密度の増加は殆どない。出力特性では蒸気圧が数Paの範囲で高くなると短絡電流は増加した。即ち電極間空間から離れた位置において生成されたイオンでも拡散の後に十分空間電荷を中和し、出力を増加させることが分かる。

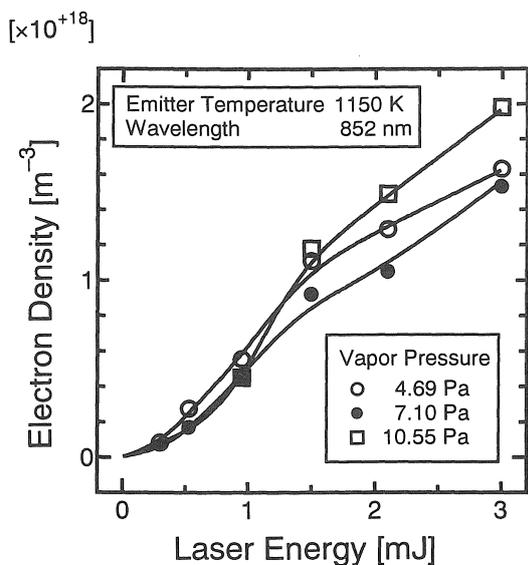


図 15 電子密度 vs. レーザエネルギー

電子温度のレーザーエネルギーに対する依存性を図 16 に示す。セシウム蒸気圧が低い場合、レーザーエネルギーの上昇に伴って入力光エネルギーが高くなるため電子温度も高くなる。蒸気圧が高くなると、共鳴光により生成される励起原子は入射窓付近に限られる。そのためプローブ周辺の電子温度は上昇せず、ほぼ一定の結果になったと考えられる。

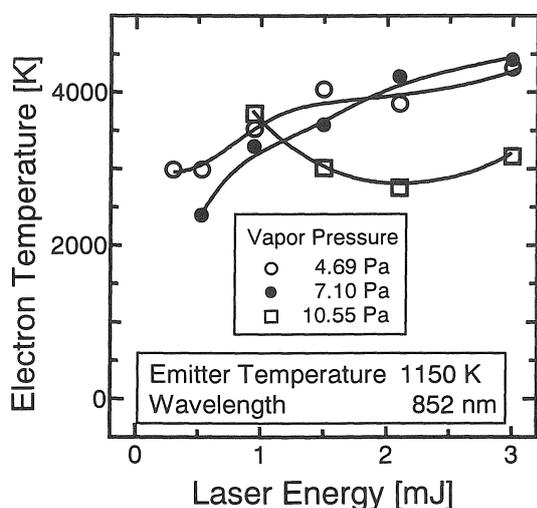


図 16 電子温度 vs. レーザエネルギー

5. まとめ

熱電子コンバータに光照射を利用することにより、比較的低温で研究を行った。

セシウム原子の共鳴光を照射した時のプラズマパラメータを測定するため、コンバータにシングルプローブを挿入して測定した。その結果、電子密度は 10^{17}m^{-3} のオーダー、電子温度は $2000 \sim 3000 \text{K}$ であることが分かったが、出力特性と十分に対応した結果を得ることはできなかった。使用するコンバータの特性、照射光吸収、光照射位置、プローブ挿入による影響などが原因として考えられる。そのためプローブ挿入型のコンバータで出力特性の測定を行い、プローブ測定との条件を出来る限り同じにする必要があると考えられる。さらにプローブを可動式とし、光軸方向やそれと垂直の方向に変化させ、詳しく測定を行うことで正確な評価が可能になり、内部の現象を明らかにすることが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 大竹知博、山田諄
愛知工業大学研究報告 第 31 号 B
pp44~48 1996
- 2) 川口朋秀、津田紀生、山田諄
愛知工業大学研究報告 第 33 号 B
pp55~60 1998
- 3) 五島敬史郎、津田紀生、山田諄
愛知工業大学研究報告 第 35 号 B
pp21~26 2000
- 4) 山田諄、川口朋秀、津田紀生、神藤正士
「光照射型熱電子発電器の空間電荷中和効果」
電気学会論文誌 A, 120-A
No.3,357 2000
- 5) J.Yamada, T.Okuda
"Production and Physical Properties of
Cesium Plasma by Resonance Absorption"
J.Phys.Soc.Japan, Vol.35, No.3, 881(1973)

(受理 平成 14 年 3 月 19 日)