


藤森科学技術振興財団 研究実施概要報告書

(西暦) 2024 年 5 月 28 日

公益財団法人藤森科学技術振興財団
理事長 藤森 明彦 殿

藤森科学技術振興財団の助成金による研究が終了しましたので、下記のとおり報告をいたします。

所属機関	東京大学
職名	准教授
氏名	小泉 宏之 

【提出書類】

(1) 研究実施概要報告書(本紙)

添付書類(A4 版 3 枚以内): 研究状況を示す写真等の資料

(2) 収支報告書

添付書類: 助成金を充当した経費の領収書

領収書を添付しない場合: 支払一覧表と支払部門担当者確認署名

(1)テーマ

※スペースが足りない場合は、枠を追加いただいて構いません。

持続可能な宇宙環境創出に向けた六硼化ランタン熱電子カソードのプラズマブリッジに関する研究

(2)本研究の期間

(西暦) 2023年4月～2024年3月

(3)本研究の目的

従来多くのプラズマエンジンでは、希少ガスや強毒性のガスが推進剤として利用されてきた。しかし、宇宙開発の持続可能性を高めるためには、より入手性が高く、より安全な代替推進剤をプラズマエンジンに利用することが欠かせない。本研究のゴールは、代替推進剤、特に「水」を用いたプラズマエンジンでの利用に適した、ディスク型六硼化ランタン熱電子カソードの実現である。

従来標準的に利用されてきたプラズマエンジン用のカソードの電子放出材は、酸素雰囲気下での劣化が激しく、「水」を含む腐食性を有する代替推進剤での利用は適さない。一方で六硼化ランタンは耐腐食性を有し、それらの代替推進剤に適合性を持つ物質として有力視されている。ディスク型の六硼化ランタンを1600℃以上の高温に加熱し、熱電子放出により電子を供給するカソードがディスク型六硼化ランタン熱電子カソードである。

熱電子カソードは従来型のカソードとは異なり、カソード内でプラズマを発生させずに電子のみを放出するため、空間電荷制限により引き出し電流が制限を受ける。この制限こそ熱電子カソードの実用化を阻む最大の課題であり、引き出し電流の向上のためにはカソードをプラズマエンジンのアノードと適切にカップリングさせ、アノードからカソード近傍に到達するイオンにより空間電荷制限を緩和させるプラズマブリッジを形成することが必要になる。本研究では、アノードとのカップリング作動時におけるプラズマブリッジ現象やカソード性能の解明、空間電荷制限を緩和する設計の模索を目標とする。

(4) 本研究の概要

本研究の目的は、アノードとのカップリング作動時におけるプラズマブリッジ現象やカソード性能の解明と、空間電荷制限を緩和する設計の模索である。この目標の達成に向け、アノードとのカップリング作動試験、数値シミュレーションによる電子の運動解析、そして、グリッド状電極の開発を実施した。

アノードとのカップリング作動試験では、ディスク型六硼化ランタン熱電子式カソードを「水」作動アノードと同時に作動させ、空間中に放出される電子電流を測定した。本実験結果と単体作動時の作動特性との比較より、水プラズマの存在によってカソード性能が大きく向上することが示された。また、カップリング作動の直後から六硼化ランタンが変色し、表面素性も変化していることが明らかになった。

数値シミュレーションによる電子の運動解析では、独自に開発した計算コード(PIC法)により、電極のジオメトリや印加電圧等を変更したパラメトリックスタディを実施し、電子挙動の変化を解析した。

グリッド状電極の開発では、六硼化ランタンディスク表面付近により急峻な電場を印加し、引き出し電流を向上させるために、イオンエンジンに着想を得たグリッド構造の電極を用いた新型カソードの開発を行った。本研究では、このカソードの設計・組立を行い、単体作動での実作動に成功した。

(5)本研究の内容及び成果

【カップリング作動】

「水」作動アノードを用いて、ディスク型六硼化ランタン熱電子式カソード(旧モデル)のカップリング作動を実施した(図 1)。作動中は、カソードからプラズマへと放出される電子電流を測定した。そしてその結果を、カソードと電子捕集電極のみからなる単体作動系における結果と比較した。さらに、カップリング作動の前後において、六硼化ランタンの電子放出性能の測定や表面分析を実施した。

まずカップリング作動では、70 mA 級の電子が放出されていることを確認した。この時、六硼化ランタンあるいは多層構造電極のいずれかに 100 V 級の電圧を印加していた。一方で、単体作動系での性能は 1 kV 級の電圧印加にて 30 mA 程度の電子電流であり、水プラズマの存在によりカソード性能が大きく向上していることがわかった。

カップリング作動の直後には、六硼化ランタンが紫色から灰色へと変色していることが確認された(図 2)。変色前後の六硼化ランタンについて、単体作動系において仕事関数(熱電子の放出に必要なエネルギーを示す指標)を測定した。その結果、変色前の仕事関数 3.3 eV が、変色後には 2.5 eV と低くなっており、より熱電子が放出しやすくなっていることが確認された。エネルギー分散型 X 線分光法によって変色前後の六硼化ランタン表面を計測すると、変色後にはボロン(B)の存在比率が低下し、代わりに変色前は皆無であった酸素(O)の存在が確認された。

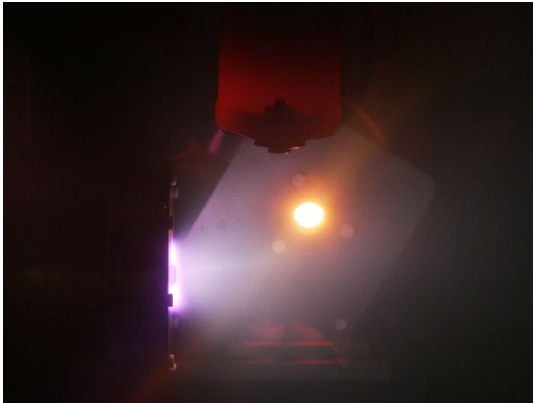


図 1 カップリング作動の様子。水プラズマの発光(紫色)と高温の六硼化ランタンの発光(橙色)が確認できる。

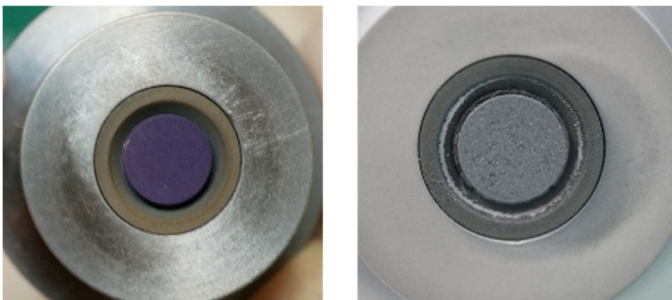


図 2 カップリング作動前(左)と作動後(右)の六硼化ランタンの外観。

【数値シミュレーションによる電子の運動解析】

独自に開発した、二次元軸対象領域内での電子の運動を解析する PIC 法計算コードにより、カソードから供給される電子の挙動を解析した。まず、計算コードの検証のため、ディスク型六硼化ランタン熱電子式カソードの単体作動系を計算上で再現し、実験と同等の条件下で行った計算結果を実験結果と比較した。計算結果と実験結果の傾向を再現し、定量的にも、電子放出材から放出された電子電流が 17% 以内の誤差で一致した。(図3)

次に、電極のジオメトリや電極、コレクタへの印加電圧を変数としたパラメトリックスタディを実施し、電子挙動の変化を解析した。この研究では、空間に放出される電子電流が電極、コレクタ電流に大きく依存することが示された。特に、コレクタ電圧を一定以下にした場合に生成される Virtual cathode(空間中の電子密度が過大となり生じる電位の谷)により、電子電流が大きく制限された。(図4)また、カソード単体作動時にコレ

クタ電圧 50 V(プラズマエンジンの一種であるホールスラストの代表的な作動条件に相当)で引き出せる電子電流は最大で 22.4 mA であった。

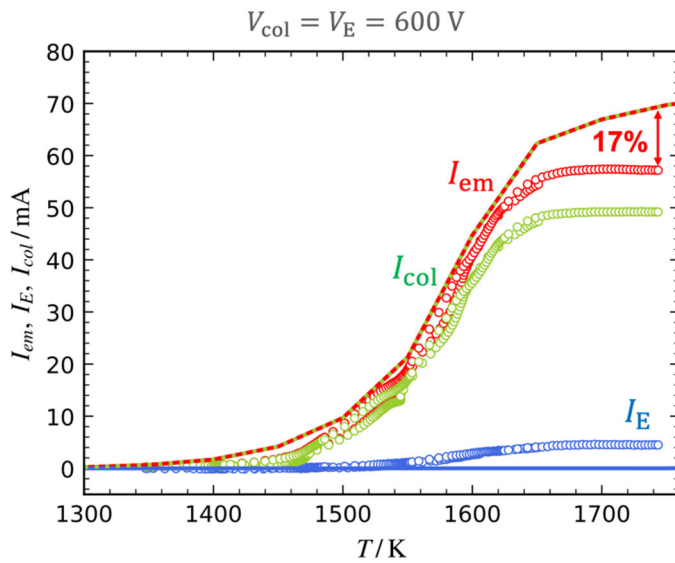


図3 数値計算結果と実験結果の比較. 点線・実線が計算結果, プロットが実験結果. I_{em}, I_{col}, I_E はそれぞれ, 電子放出材から放出された電子電流, コレクタで捕集した電流, 電極に流入した電流を示す.

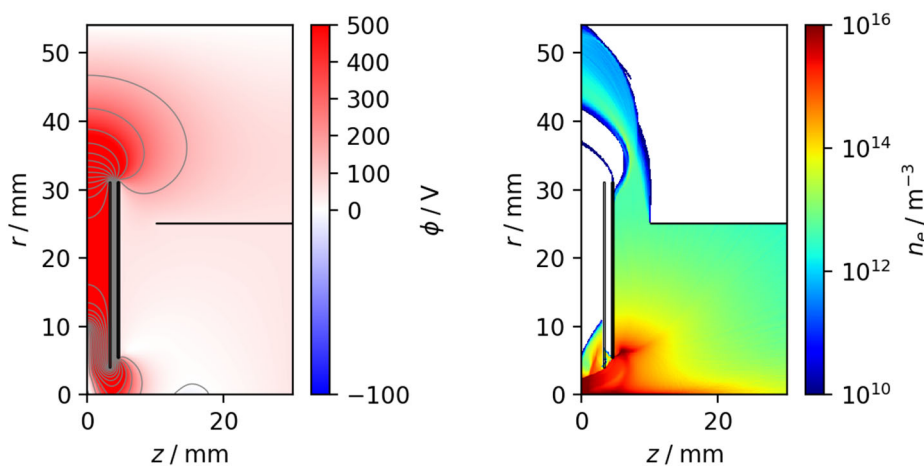


図4 計算結果の例. 空間の電位分布(左)と空間の電子密度分布(右). $0 \leq r \leq 2.5 \text{ mm}, z = 0 \text{ mm}$ から電子が流入する. $z = 3.2 \text{ mm}, 4.4 \text{ mm}$ は2層の電極(各2000 V, 50 V印加), $r = 25 \text{ mm}, 0 \leq z \leq 30 \text{ mm}$ および $0 \leq r \leq 25 \text{ mm}, z = 30 \text{ mm}$ はカップ型コレクタ(50 V印加)を模擬している. $z = 5.0 \text{ mm}$ 付近には Virtual Cathode が生成されている様子が確認できる.

【空間電荷制限を緩和するグリッド状電極の開発】

六硼化ランタンディスク表面付近により急峻な電場を印加し, 引き出し電流を向上させるために, イオンエンジンに着想を得たグリッド構造の電極を用いた新型カソードの開発を行った(図5).

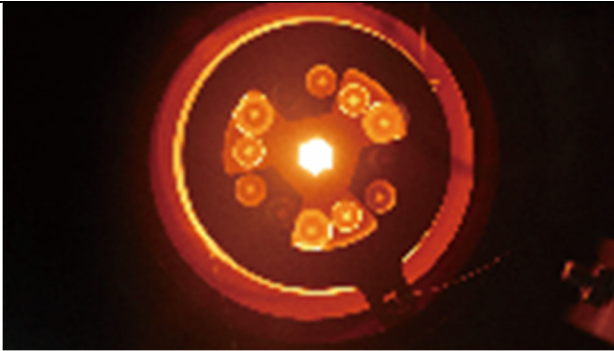


図5 グリッドを用いたカソードの作動の様子. グリッド構造から六硼化ランタンの発光が漏れ出ている.

このカソードは3枚のグリッドを用いる(図6). 電子ビームを引き出すための高電圧を印加するのが2枚目のグリッド(イオンエンジンにおけるアクセルグリッドに相当)であり, 1枚目のグリッド(イオンエンジンにおけるスクリーングリッドに相当)付近で電子ビームを内側に収束させるポテンシャル場を形成する, 3枚目のグリッドは, 下流に流れた電子ビームがグリッド2の高電圧により逆流することを防ぐためのものである.

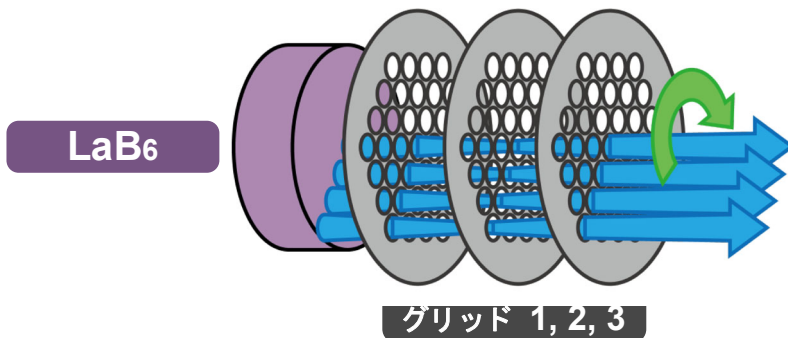


図6 グリッドを用いたカソードの模式図. 3枚のグリッドを利用して電流を引き出す.

本研究では, このカソードの設計・組立を行い, 単体作動での実作動に成功した. この作動試験においては, コレクタ(イオンプルームを模した金属板)の電圧が 50 V という, これまでの実験と比較して低い値の条件下で, およそ 20 mA の引き出し電流が確認された.

(6) 本研究の考察

【カップリング作動】

カップリング作動中に六硼化ランタンの加熱電力を増加させると、最初はそれに対応して電子電流も増加したが、ある作動点からは電流値が増加しなくなった。これより、カソードは単体作動時と同様に空間電荷制限領域にあることがわかる。しかしその制限電流値は単体作動時より高く、水プラズマの有する正電荷による電化制限緩和効果が実験的に測定できた。電圧印加に関しては、電極への正電圧印加よりも、六硼化ランタン自体への負電圧印加の方が電子電流増加に強い感度で寄与した。実験結果より、電極への電圧印加は 2 点の課題；プラズマ中へ放出すべき電子の吸い込みおよびプラズマ中の正電荷粒子の排斥が予想される。特に後者はカップリング特有の課題であり、例えば静電シールドのような、プラズマから高電圧電極を遮蔽する電極設計が求められる。一方で、当初懸念されていた水プラズマへの暴露による六硼化ランタンの電子放出性能劣化は確認されなかった。したがって、さらなる電子電流増加に向けて、プラズマ密度の濃い配置でのカソード作動が有力であるという示唆を得た。

また、六硼化ランタンの表面分析から、酸化反応が生じていることは確かである。特にボロン欠乏という結果は、蒸気圧の低いボロン酸化物が優先的に離脱してランタン(La)が過多になるという既知の反応と合致している。一方で仕事関数の変化は説明がつかず、La と O により構成される化合物の特定が求められる。

【数値シミュレーションによる電子の運動解析】

計算コードの検証では、計算結果が単体作動系における実験結果を比較した。電子放出材から放出された電子電流の誤差は最大で 17%であった。また、実験で見られた電極への電子流入は、数値計算では再現されなかった。これらの相違の要因としては、実験系の工作・組み上げ誤差や、低コスト化のため低次数の形状関数を採用したこと、粒子間の衝突を無視していることなどが考えられる。一方、定性的な挙動をよく再現できており、定量的にも十分小さい誤差範囲で一致していることから、本計算コードによる解析は妥当であると結論し、先に述べたパラメトリックスタディに進んだ。

パラメトリックスタディによる電子運動解析では、空間に放出される電子電流が電極、コレクタ電流に大きく依存することが示された。特に、Virtual Cathode の生成に関して、電子電流とコレクタ電極電圧の $3/2$ 乗の比で定義されるパービアン스에閾値が存在することが確認された。パービアン스의閾値はジオメトリに依存し向上の余地が少ないことから、空間に放出される電子電流を増加させるためには、アノードからのイオンによる空間電荷の中和が必須である。空間電荷の中和に必要なイオン密度の見積もりは、今後の研究課題の一つである。

(7)共同研究者(所属機関名、役職、氏名)

東京大学、大学院生、高崎大吾
東京大学、大学院生、藤森蒼天
東京大学、大学院生、大日勇海

(8)本研究の成果の公表先

学会発表…3件

- 1) Daigo Takasaki, Aoma Fujimori, Kento Shirasu, Hiroyuki Koizumi, Hiroki Watanabe, Yuichi Nakagawa, Hokuto Sekine, Kimiya Komurasaki “Coupling Operation of a LaB6 Thermionic Cathode with a Low-power Water-vapor Hall Thruster” International Symposium on Space Technology and Science. Kurume in Fukuoka, Japan, June 3-9, 2023
- 2) Daigo Takasaki, Aoma Fujimori, Isami Dainichi, Kento Shirasu, Hokuto Sekine, Hiroyuki Koizumi, Kimiya Komurasaki “キセノンおよび水蒸気プラズマ雰囲気における LaB6 熱電子カソードの作動特性” 第 67 回宇宙科学技術連合講演会. Toyama, Japan, October 17-20, 2023
- 3) Aoma Fujimori, Daigo Takasaki, Hokuto Sekine, Hiroyuki Koizumi, Kimiya Komurasaki “耐腐食性を有する熱電子カソードへの電圧印加による引き出し電流量向上” 第 67 回宇宙科学技術連合講演会. Toyama, Japan, October 17-20, 2023

出願予定特許…1件

[注]この報告書を当財団のホームページ等に掲載します。予めご了承ください。