

# 大気圧マイクロ波ヘリウム・プラズマ・ジェットにおける放電構造分岐

## Structural Bifurcation of Microwave Helium Jet Discharge

### at Atmospheric Gas Pressure

高村秀一<sup>†</sup>、鬼頭真和<sup>†</sup>、曾我忠祐<sup>†</sup>、高嶋博慶<sup>†</sup>、西野祐司<sup>†</sup>、  
早川真司<sup>†</sup>、番祐介<sup>†</sup>、結城翼<sup>†</sup>、神藤正士<sup>††</sup>、大野哲靖<sup>†††</sup>

Shuichi TAKAMURA<sup>†</sup>, Masakazu KITO<sup>†</sup>, Tadasuke SOGA<sup>†</sup>, Hiroyoshi TAKASHIMA<sup>†</sup>, Yuji NISHINO<sup>†</sup>,  
Shinji HAYAKAWA<sup>†</sup>, Yusuke BAN<sup>†</sup>, Tsubasa YUHKI<sup>†</sup>, Masashi KANDO<sup>††</sup>, Noriyasu OHNO<sup>†††</sup>

**Abstract** Structural bifurcation of microwave-sustained jet discharge at atmospheric gas pressure was found to produce a stable helium plasma jet, which may open the possibility of a new type of high-flux test plasma beam for plasma-wall interactions in fusion devices. The fundamental discharge properties are presented including hysteresis characteristics, imaging of discharge emissive structure, and stable ignition parameter area.

#### 1. はじめに

大気圧プラズマは材料合成、医療技術、環境問題等への応用に関連して、近年強い関心を呼んでいる。また、これらは ITER（国際熱核融合実験炉）やデモ炉等の次世代核融合装置におけるプラズマ-壁相互作用基礎研究のための高粒子束、高熱流束プラズマビームにも応用される可能性を持っている。最近、Pilot-PSI 装置はこのような目的のためのプラズマ生成としてカスケード直流アーク放電を採用している<sup>1)</sup>。そこでは導電性標的板へアーク放電から熱をもたらすために、いわゆる移行アーク方式が用いられている。この場合、熱を運ぶのは主として電子であり、核融合実験装置におけるダイバータでの状況とはずいぶん異なっている。何故なら、ダイバータでは標的板へのイオン衝撃が重要であるからである。このような欠陥は直流アーク放電によって決定される静電的電位構造に由来すると考えられる。

このような困難を克服するものとして、大気圧マイクロ波プラズマ・ジェットが高粒子束・高熱流束を持つ

新しいプラズマ源になり得ると考えられる。何故なら、このようにして生成されたプラズマは外部からの静電位関係によって規定されず、また、高電力のマイクロ波電磁場は表面波としてプラズマ・ビームに沿って伝搬・吸収され、プラズマ電子を加熱するのに役立つと考えられるからである。本研究はこのような目標に動機付けられて、放電の基本特性を明らかにしたものである。特にヘリウムに注目したのはこれが核融合反応生成物であるので、水素同位体と同様に核融合にとって重要な粒子種であるからである。

#### 2. プラズマ発生装置

図 1 にプラズマ生成のためのマイクロ波回路系を示す。周波数 2.45 GHz、電力 1 kW 以下程度のマイクロ波を標準的導波管 WRJ-2 を用いて、アイソレーター、方向性結合器と E H チューナーを接続し、その後テーパ導波管により TE<sub>10</sub> を維持しつつマイクロ波電場を強める工夫がされている。H 面間の間隔を狭めた直線導波管の中央に、図 2 にその詳細を示す TIAGO（仏語：Torche à Injection Axiale sur Guide d'Ondes）ノズルが設置されている。直線導波管の後は再びテーパ導波管によって WRJ-2 に戻され、標準的なショートプランジヤーで終端されている。これにより電場の定在波を作り出し、ノズルの位置が定在

<sup>†</sup> 愛知工業大学 工学部 電気学科

<sup>††</sup> 静岡大学 工学部 電気電子工学科

<sup>†††</sup> 名古屋大学 エコトピア科学研究所

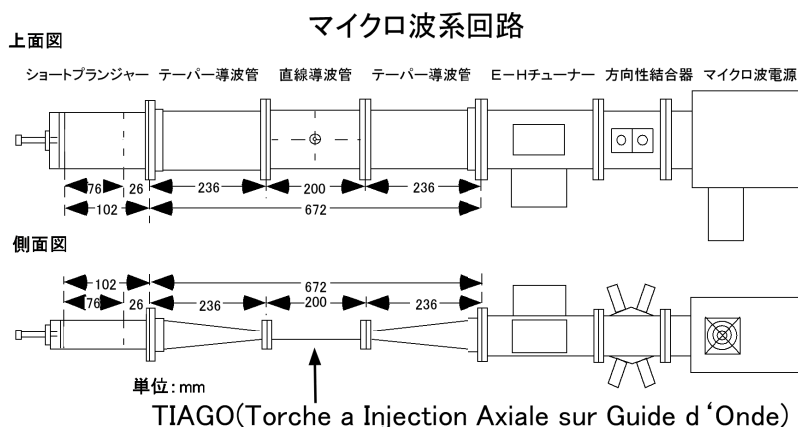


図 1 大気圧マイクロ波プラズマジェット生成のためのマイクロ波回路系

波の腹になるように調整されている。具体的には短絡板とノズルとの間隔は  $11 \times (1/4)\lambda_g$  である。ここに  $\lambda_g$  は管内波長であり、その長さは 147.7 mm である。

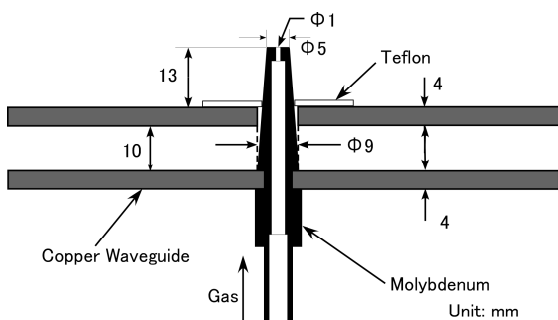


図 2 直線導波管に設置された、マイクロ波維持大気圧プラズマジェットのための TIAGO ノズルの詳細。

TIAGO ノズルは Moisan によって考案された<sup>2)</sup>。ノズル内部の空洞を通して下部より動作ガスが供給される。ノズル先端に向けて円錐状に細くなり、先端でマイクロ波電場が強くなるように工夫されている。

### 3. 放電点火における分岐現象

図 3 に放電で得られた典型的なプラズマジェットの写真を示す。放電の開始はテスラーコイル先端に発生したコロナ放電により初期電子を供給することによって行われた。ノズル下部からのガスの供給の度合いが放電点火に大きな影響を及ぼすことがわかった。図 3 (a) は最初に十分なヘリウムガスを流した上で点火することによって得られたジェットであり、非常に安定でまっすぐ上に最大

20 cm 程度のびる。長さは供給電力の増加と共に伸長する。これを紡錘型と呼ぶ。一方、同図(b) は当初のガス供給割合が少ない場合に得られた像である。ノズル上の放電の足はノズル中央部に位置するのではなく先端周辺部に置かれる。この結果、放電路はいきおい湾曲して上方に向かう形状を取る。放電の足はノズルの周囲を不規則に時計回りあるいは反時計回りと回転する。

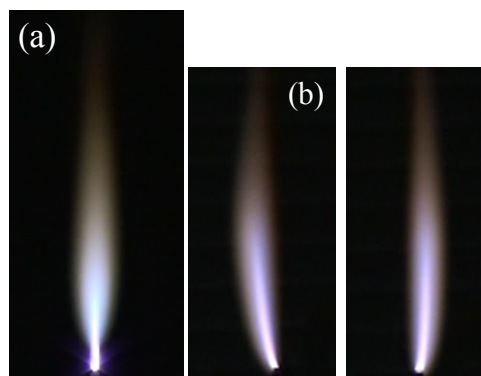


図 3 マイクロ波電力で維持されたプラズマ・ジェットの静止画。(a) 安定な紡錘型放電、(b) 湾曲型放電。

ノズル先端近傍の足下からの発光を分光計測した結果を紡錘型放電と湾曲型放電それぞれに対して図 4 (a) と (b) に示す。放電で熱せられたプラズマ・ガス混合流体は上昇気流を作り、それに伴い周りの空気をも抱き込む。両者共に空気成分からの発光が紫外域に認められる。決定的な相違は図 4 (a) の安定放電からはヘリウム原子・イオンからの強い輝線スペクトルが観測されるものの、同図(b)

の湾曲型放電ではヘリウムからの発光が認められないことである。従ってこの場合空気が主要な放電ガスと判断される。加えてモリブデン原子からの発光が認められる。これは図 3 (b) の写真からもわかるようにプラズマがモリブデン・ノズル表面と接触する面積が大きいことが影響していると考えられる。

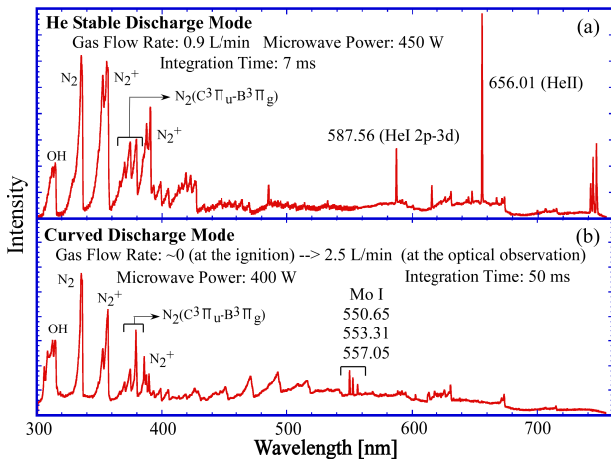


図 4 ノズル先端の放電の足元からの発光スペクトル。(a) 安定な紡錘型ヘリウムプラズマジェット、(b) 湾曲型放電モードの場合。

図 5 は、ノズル下部からのヘリウムガス供給割合と入射マイクロ波パワーの二つのパラメータ空間において、安定な紡錘型放電点火が得られる領域を二つの境界線の間に図示するものである。まず上の破線は、これを超えてガス流量を増すと放電が点火しなくなる境界を示す。一方、下の破線は湾曲放電を点火する最大の初期ガス流量であり、これ以下のガス供給率では湾曲型放電を点火する。図 5 よりわかるように紡錘型放電点火領域は入射マイクロ波電力の増加と共に拡大する。不十分なガス供給率で湾曲放電を点火してしまうと、その後ヘリウムガス流量を増加しても図 4 (b) に示すように安定放電には至らない。他方、十分なガス流量の下いったん安定な紡錘型放電が得られると、点火後ガス流量を図 5 の下の境界線を横切って下げても紡錘型放電は維持される。このように放電の二つの状態はガス流量に対してヒステリシス特性を持って出現する分岐現象である<sup>3)</sup>。

#### 4. 分岐発生の物理機構に関する検討

これまでに紹介してきた放電点火に現れる分岐がどのような物理過程に基づくものであるか検討したい。その前提として、湾曲型放電について考察を深める。図 4 (b) に示されるように、この曲がった放電プラズマからはヘリウムに起因する発光が観測されないで、ノズル中心から流れ出るヘリウムは放電に関与せず、湾曲プラズマはその周りの上昇気流を介した放電によって生成されたと考えなければならない。放電の世界では窒素分子や酸素分子を含む空気よりも単原子分子であるヘリウムガスの方が電離ポテンシャルが高いにも拘わらず放電し易いと考えられている。エンタルピーの違いから来ると考えても良いかもしれない。では何故放電し易いヘリウムではなく空気層の放電が得られるのであろうか。十分解明されているわけではないが、いくつかのポイントを指摘できる。まず、ノズル先端の角の部分は局部的にマイクロ波電場が強いという点、そしてある程度のガス流量がないと供給されるパワーとのバランスがとれないという側面もあろう。また、アルゴンガスを用いた場合には、このような分岐現象はなく、常に安定放電が得られ、湾曲型放電は現れない。これらすべてを説明できるモデルは今のところ得られていない。

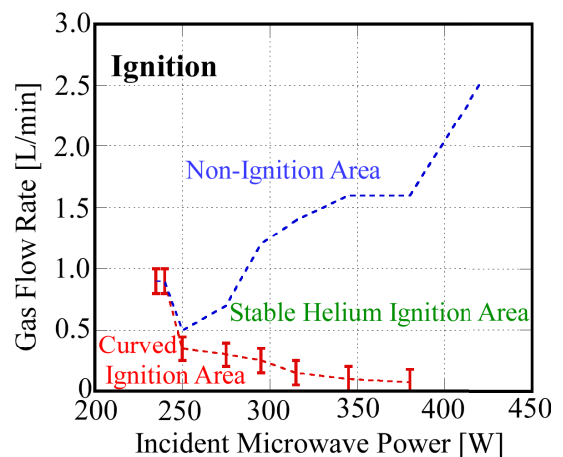


図 5 ヘリウムガス流量とマイクロ波入射電力のパラメータ空間における、安定な紡錘型ヘリウム放電点火が得られる領域。両破線の間に相当。上の境界線はそれを越えると放電点火が不可能になる限界。下の境界線は湾曲型放電を得る最大の当初ガス流量。

湾曲型放電では、図 3 (b) からわかるように、放電プラズマがノズルと接触する面積は同図(a) よりも大きく、プラズマとノズル表面の相互作用は強い。このためモリブデン原子からの発光も見られると考えられる。ノズル先端角のマイクロ波局部電場の強いところでは電子の加速も強く、それによってモリブデン表面からの二次電子が放出され、豊富な電子の供給が空気の放電のし難い性質を補ってあまりあるのかもしれない。

## 5. まとめ

本実験研究において、安定なヘリウム大気圧プラズマジェットが得られる領域をマイクロ波入射電力とヘリウムガス流量の二次元パラメータ空間において同定することができた。安定な紡錘型放電と湾曲型放電という二つの放電形態の構造分岐過程が明らかにされた。分岐発生の物理機構は完全に解明されていないが、ノズル形状に基づくマイクロ波電場が局部的に強くなるノズル先端縁における電子の加速とそれに起因する表面からの二次電子の発生による豊富な電子の供給が生み出しているのではないかと推測している。安定な高ガス圧マイクロ波プラズマジェットは PWI (Plasma-Wall Interactions) 研究のための新しいプラズマ源として応用されるポテンシャルを持つ。

## 6. 謝辞

本研究は平成 19 年度愛知工業大学教育・研究特別助成の支援を受けて実施されたものである。また一部科学研究費補助金基盤研究(A) (課題番号: 17206093) から支援を受けた。加えて浜松メトリックス (株) との共同研究によるところも大である。ここに感謝する次第である。

## 参考文献

1. B.de Groot, R.S. Al, R. Engeln, W.J. Goedheer, O.G. Kruijt et al., “Magnum-psi, a plasma generator for plasma-surface interaction research in ITER-like conditions”, Fusion Eng. Design, Vol.74, pp.155-159, 2005.
2. M. Moisan, Z. Zakrzewski and J.C. Rostang, “Waveguide-based single and multiple nozzle plasma torches: the TIAGO concept”, Plasma Sources Sci. Technol. Vol.10, pp.387-394, 2001.
3. S. Takamura, M. Kitoh, T. Soga, H. Takashima, Y. Nishino et al., “Structural Bifurcation of Microwave Helium Jet Discharge at Atmospheric Pressure”, Plasma Fusion Res., Vol.3, pp.012 (2 pages), 2008.

(受理 平成 20 年 3 月 19 日)