愛知工業大学研究報告
第 47 号　平成 24 年

大気圧マイクロ波プラズマ生成のための
ノズル - 気密容器 - 導波管系の電磁解析

Electromagnetic Analysis of Nozzle – Airtight Chamber – Waveguide System
for Generation of Microwave Plasma at Atmospheric Gas Pressure

内山　雄貴†，高村　秀一††，アブドゥール　ラザック††
Yuki UCHIYAMA, Shuichi TAKAMURA and. M. Abdur RAZZAK

Abstract　Launcher nozzle for microwave plasma jet at atmospheric pressure has been developed by improving the original TIAGO nozzle which has no air-tight configuration. The electromagnetic analysis code, PHOTO Series -‘Wave jω’ gives field distributions around the nozzle of launcher, aiming on optimization of launcher nozzle. The distribution of microwave electric field is discussed using the transmission line model and compared with the experimental results. Generation of microwave plasma jet at atmospheric pressure in airtight chamber was successfully done during 15min by purging oxygen in the air, and it would make the PWI experiment possible.

1.　序論

大気圧プラズマは現在様々な分野で応用されている。例えば医療分野における殺菌･滅菌技術や加工分野における溶接技術等その分野は多様である。他にも大気圧プラズマの高粒子束、高熱流束を利用して、熱核融合炉に対する PWI 実験の基礎研究にも応用できるのではないかと当研究室では考えている。大気圧プラズマを用いて PWI 実験を行う際には反応性の高い空気中の酸素成分を排除することが求められる。よって気密容器を使用し外気を遮断する方策を考えなければならない。

大気圧プラズマジェットを生成するノズルの一つに TIAGO ノズルが知られている[1]。しかし、我々が特に注目する He 放電において TIAGO ノズルには分岐現象が存在し、紡錘型放電と湾曲型放電とに分岐してしまうことが知られている [2, 3]。その点を改良した変形 TIAGO ノズルも存在する [3]。図 1 にこれらを示す。しかし PWI 実験を行う際には気密容器の必要性から、この変形 TIAGO ノズルの形態のままでは気密性の保持という点で問題がある。よって、この変形 TIAGO ノズルを発展させ気密容器と導波管とを接続し気密性を確保するノズルが必要となる。当研究室では気密性確保のためにランチャーノズルを開発している [4]。ランチャーノズルの概要は図 2 に実験装置と併せて示す。

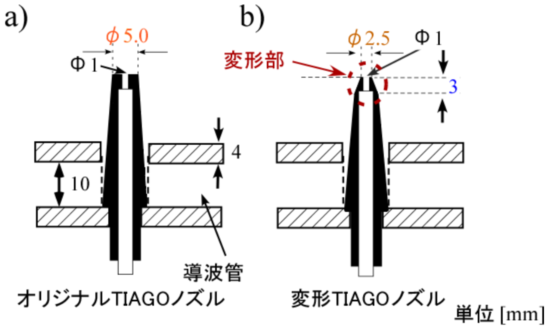

図 1. 導波管に装着した a）オリジナル及び b）変形 TIAGO ノズル

†　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　工学部　電気学科
電子情報工学専攻　（豊田市）

今回の研究目的は気密容器を使用して大気圧マイクロ波による高熱流 He プラズマを生成する点にある。また、それに先立ち電離しやすいノズル形状の模索としてランチャーノズルの電磁解析も行った。

2. 実験装置及びマイクロ波回路の概要

2.1 マイクロ波回路

TIAGO ノズルを用いて大気圧マイクロ波プラズマトーチを生成するために図 2 に示すようにマイクロ波電源によって発生したマイクロ波をまずテーパー導波管を用いて電界を強めている [5]。次に、ショートプランジャーを用いて入射波と反射波の干渉によって生じる定在波のピークがノズル中心に来るように調整することにより電界強度を更に強めている。採用した導波管モードは TE_{10} 基本モードである。ランチャーノズルは TIAGO ノズルを改良・発展させたもので、ノズルは先端にマイクロ波電界を集中させるためにテーパー状にしている。図 2 にはランチャーノズルの詳細と導波管との配置についても示す。図 3 に示す円筒気密容器は導波管に対して鉛直に設置することにより、ガス高温化により生じる浮力による上昇気流と整合させ、加えてガス流れに乱れを生じさせないように円筒テーパー管をその上に配位する配置となっている。

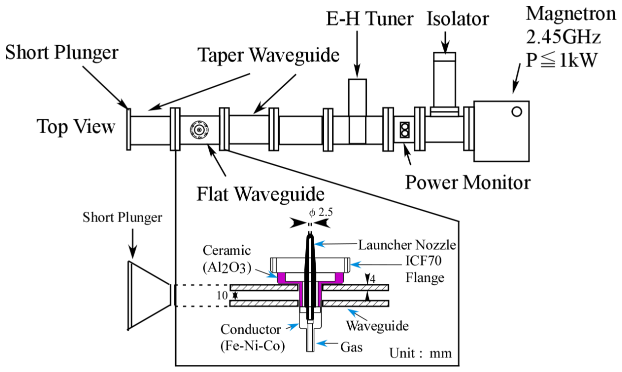

図 2. 大気圧プラズマ生成のためのマイクロ波回路

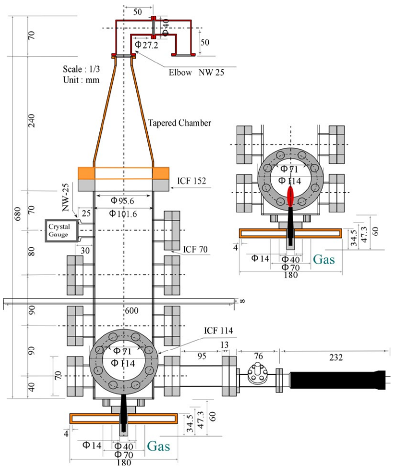

図 3. 気密容器 – 導波管接続図

2.2 伝送線路のインピーダンス特性

導波管からノズルへ結合したマイクロ波のノズルに沿っての伝搬については伝送線路の考え方を用いることができる。伝送線路はその終端を短絡したり開放したり、または負荷を接続することでそのインピーダンス特性は変わってくる。図 4 に終端負荷がキャパシティブの場合とインダクティブの場合についての電圧定在波を示す [6]。ノズル先端の負荷特性をこの電界パターンから推定することができる。

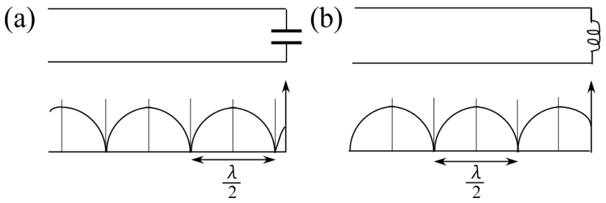

図 4. 伝送線路におけるリアクタンス負荷と定在波の関係 (a) キャパシティブ、(b) インダクティブ負荷.

3 ランチャーノズルの電磁解析の準備

3.1 電磁解析モデル

今回、ノズルと導波管のマイクロ波結合に関して採用した解析ソフトとして(株)フォトンの PHOTO Series Wave jω を使用した。この特徴は有限要素法による三次元周波数応答解析を行い、形状・電磁特性・境界条件を与えることにより電磁界分布を計算し、解析することができる点にある。条件として、対称境界条件(金属境界条件)と、無反射境界条件を設定する。メッシュサイズは入力周波数(2.45GHz)に対する自由空間波長の 1/6 以下(<20.40mm)に設定。ノズル位置から管内波長の 1/4 離れた点(36.94mm)を短絡し、ノズル位置の電界強度を強めた配置にしていることは前述のとおりである。入射導波管断面中心部にて Ey=1V/m とし、これをマイクロ波電界分布の基準として比較を行った。解析におけるランチャーノズルと導波管の配置モデルおよびそのメッシュを図 5 に示す。

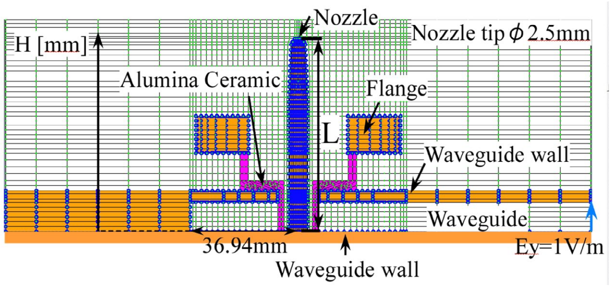

図 5. 電磁解析によるメッシュ及び導波管-ランチャーノズル系のモデル

3.2 ランチャーノズルに沿っての電界分布

本解析ではノズル長を変化させ、ノズルに沿ってのマイクロ波電界分布を比較検討する。ノズル長 L の定義については図 6 に示すように導波管下の導波管 H 内面から先端までの高さである。図 6 の左側に示す H は高さ方向の座標を表している。また、今回はプラズマを点火していない状態での解析である。

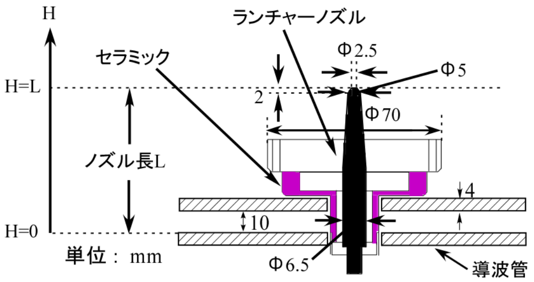

図 6. 導波管に装着されたランチャーノズル

4　ランチャーノズルの電磁解析

4.1　ノズルの高さ方向におけるマイクロ波電界分布

まずノズルの高さ方向に沿ったマイクロ波電界分布を調査した。図 7(a)に L が 66mm の時のマイクロ波電界強度分布図を示す。また、その時のノズル先端部のメッシュを拡大したものを図 7(b)に示す。図 7(b)に対しては見やすいように電界強度を色調で表現している。

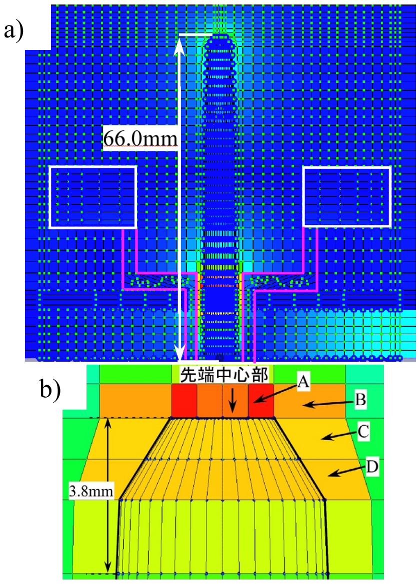

図 7. ノズル長 L:66mm 時のマイクロ波電界強度分布図

図 8 にノズルの高さ H に対するマイクロ波電界強度分布をノズル長 L=66～188.4mm にわたって示す。図 7(b)で示した C 点までの電界強度分布を示している。C 点からノズルに沿って戻り、最初に電界強度がほぼ零になる節までの距離を d として、この d を各ノズル長に対してまとめたのが図 9 となる。ここではノズル長 L を絶対値のみならず自由空間波長 λ で規格化した値も示している。

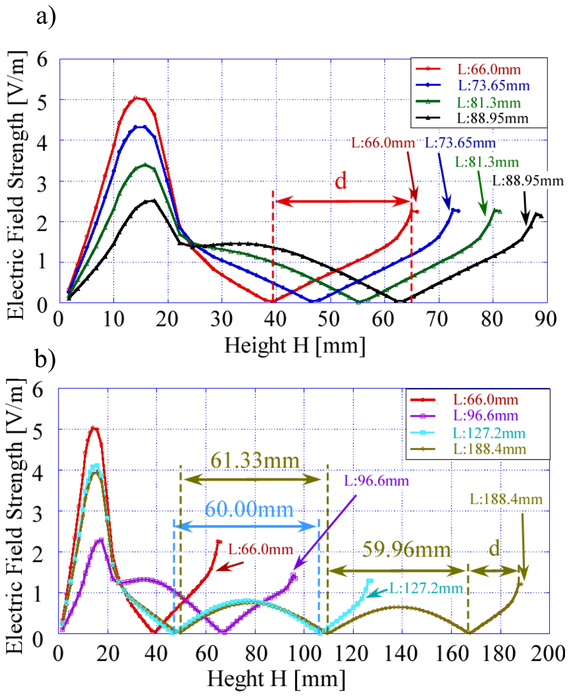

図 8. ノズルの高さ H に対するマイクロ波電界分布
(a)　L:66～88.95mm, (b) L:66mm 及び 96.6～188.4mm

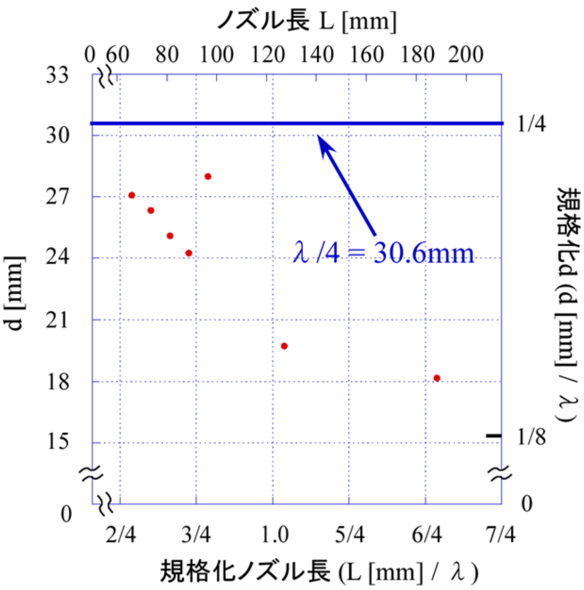

図 9. d の規格化ノズル長依存性

図 9 を見ると、どのノズル長においても d は自由空間波長の 4 分の 1 すなわち λ/4 より短くなっていることがわかる。この定在波の特性を 2.2 節で示して分布定数伝送線路と比較すると先端の負荷がキャパシティブに相当する定在波分布と類似である。これは、ノズル先端部における電気力線の様相が静電的であり、電界によるエネルギーが強くノズル先端部にコンデンサが接続された時と等価であ

ることに由来していると考えることができる。一方、図 8(b)に示す 127.2mm や 188.4mm の長いノズル長の場合では自由空間波長の半波長程度の定在波が確認された。特にノズル長 188.4mm ではこのような定在波が先端に近づくにつれその間隔が短くなっている。このような特徴は図 10 に示す過去に当研究室で行った実験によるノズルの分布測定から得られた定在波の変化の仕方に一致している。また、実験的にも d が評価され、自由空間波長の 4 分の 1 より小さかった [4]。このような一致点が解析と実験の結果から見られた。

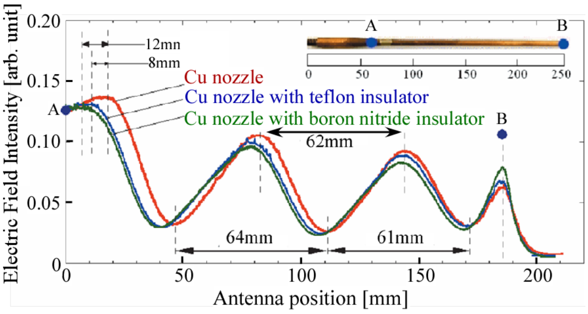

図 10. 実験で得られたノズルに沿ってのマイクロ波電界分布 [4]

4.2 ノズル先端部の電界強度

次に図 7(b)に示すノズル先端部の電界分布について詳細に検討した。図 11 にノズル長に対する先端部である中心ならびに A～D のマイクロ波電界分布を棒グラフで示す。

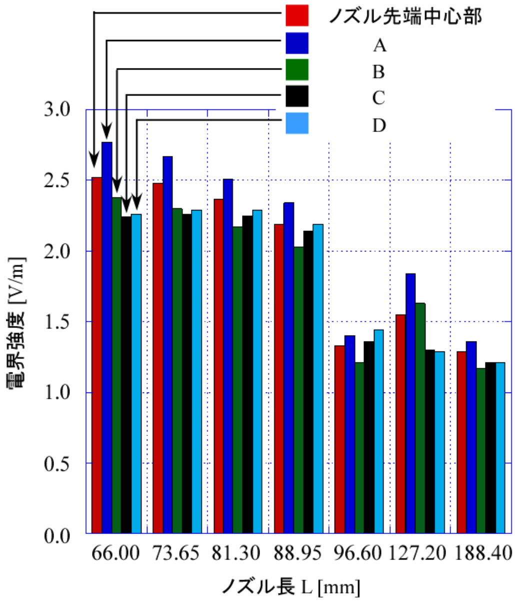

図 11. ノズル先端部の電界分布のノズル長依存性

どのノズル長でも A 点やノズル先端部の電界強度が他の部分に比べ強い傾向がある。しかし 96.6mm のノズル長については D 点が強い傾向がある。このような分布がノズル先端部で確認された。

5 大気圧マイクロ波プラズマ生成実験

5.1 実験装置

本節では高熱流 He プラズマ生成について述べる。過去に気密容器を水平に設置して大気圧プラズマジェットを水平に吹き出させる実験を行ったが、高温ガス・プラズマに浮力が作用しジェットが上に弧を描き、水平なプラズマ柱生成に支障をきたした。この結果を踏まえ今回は図 3 に示すように気密容器を鉛直に設置した。このことにより管に沿って吹き上るプラズマジェット生成を目指した。気密容器を鉛直に設置した時の実験装置の概観図を図 12 に示す。次にエルボウと呼ばれる L 字管を鉛直に設置された気密容器の上端部に用いた。これを図 12 に示すように 2 個使用することにより、気密容器内への空気の流入の抑制を目指したまた、プラズマを生成する前に気密容器内に He ガス→N_2 ガス→He ガスと順に入れ替えてゆき、気密容器内の残存酸素を排出させる作業を行った。このような手順により酸素の少ない He 環境が生成できた。以前にこのような手順を踏まずにプラズマを生成し、PWI 実験を行ったときにターゲットであるタングステンの表面が黄色に変化し、タングステンが残存酸素と化学反応して三酸化タングステンとなってしまった経験を克服することができた。気密容器内の He 純度を知るために、N_2 と He の混合ガス比率が必要となる。N_2 と He の混合ガス比率に対するクリスタルゲージの指示を図 13 に示す。これは気密容器側面に設置されたクリスタルゲージが空気(N_2)と He とで感度が異なることを利用している。

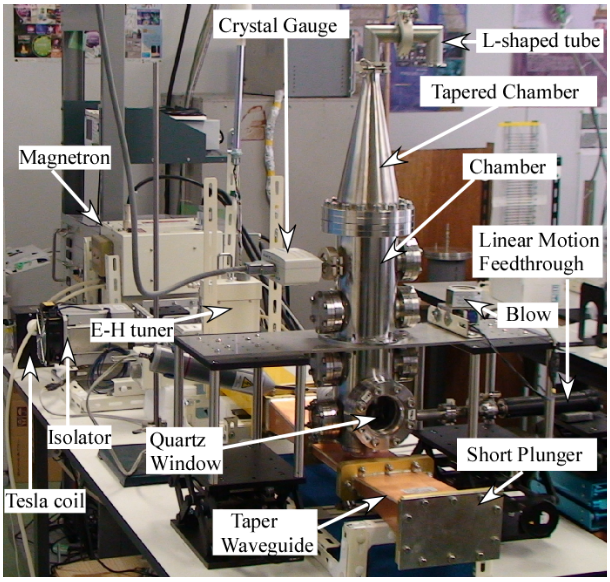

図 12. 大気圧プラズマ実験装置

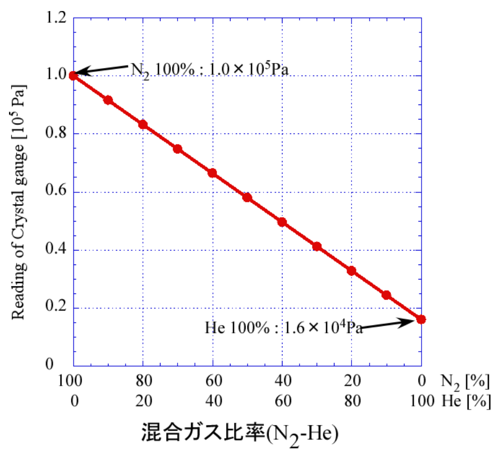

図 13. N_2 − He 混合ガス比率とクリスタルゲージの指示値

5.2　高熱流 He プラズマ生成実験

本実験ではクリスタルゲージを用いて気密容器内の圧力を測定している。ランチャーノズルに下部から供給されるガスは He である。プラズマ生成に伴うクリスタルゲージの変化と図 13 から導き出される He 純度の時間変化を図 14 に示す。

図 14 を見ると He 純度が 90%程度まで高めることができた。また、マイクロ波を遮断しプラズマを切った時に He 純度が 70%程度にまで下がっている。この原因として、プラズマによって熱せられた He がプラズマを切ることにより冷却され、それにより気密容器内に L 字管を通して空気が逆流し、そのため He 純度が下がったのではないかと考えている。

今回の実験では安定したプラズマジェット生成を 15 分以上続けることができ、また、純度の高い He 環境を作ることができた。しかし He プラズマの発光部の長さは、He の純度が上昇するにつれて短くなっていくようである。周囲ガスとして電離し難くエンタルピーの高い窒素ガス(N_2)が必要なのかもしれない。この点については更に研究が必要である。

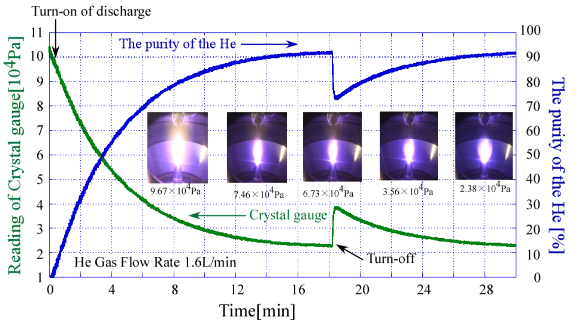

図 14. 高熱流 He プラズマ生成実験.
He ガス流量 1.6L/min, マイクロ波電力 390W

6　まとめ

本研究では気密容器と導波管との接続用ランチャーノズルの電磁解析及び高熱流 He プラズマ生成実験を行った。

前者のランチャーノズルの電磁解析についてはまず、伝送線路の考え方からノズルの高さに沿ったマイクロ波電界分布の特性から先端負荷がキャパシティブである伝送線路に類似であることが分かった。これは解析結果の定在波と、2.2 節での議論を考慮した結果から得ることができた。また、過去の実験によって得られた電界分布と比較し、自由空間波長の半波長程度の定在波等、解析と実験との一致点を確認するこができた。他にもノズル先端部のマイクロ波電界分布の詳細を明らかにすることができた。

後者の高熱流 He プラズマ生成実験については、気密容器を鉛直に設置することで水平設置時に発生した浮力の問題を克服した。また、気密容器内の酸素を排して 90%程度の He で満たすことができ、高純度の He 環境を作ることができた。15 分以上の安定したプラズマを生成することにも成功した。

今後の課題としてランチャーノズルの電磁解析ではプラズマを模擬しての解析があげられる。現在の解析ではプラズマが点火していない状態を対象としている。プラズマが点火した状態を模擬することが最終目的である。実効的にプラズマの効果を模擬する案の一つとして、過去の研究からコアプラズマがノズル先端から 2mm 程度離れているところに存在しているため[7]、そこにコアプラズマを想定するような電磁波をすべて吸収するような無反射負荷を設置することが考えられる。模擬プラズマ解析へ向けてのコアプラズマの配置を図 15 に示す。これらのことを考慮し、またノズル長が 66 mm より短い場合の解析を含めてノズル形状の最適化を行っていく必要がある。

プラズマ生成に関しては、元来このようなノズルを用いたプラズマジェットの場合、周囲ガスとしてエンタルピーの高い窒素ガスが必要なのかどうか検証する必要がある。このためには気密容器の内壁部に沿って外部から積極的にこのようなガスを導入することも考えられる。

次に PWI 実験として一つに He 損傷 W のクラッキングやアーキング耐性の調査が挙げられる。他にもターゲット

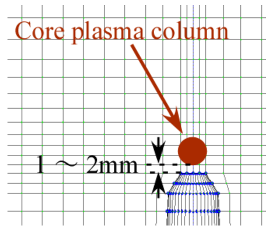

図 15 プラズマの効果を取り入れるための配置

板への十分なイオンエネルギーを確保して W ターゲットと He プラズマ間の相互作用の研究が挙げられる。タングステンナノ構造形成の観点から興味深い。しかし現時点の配置では、ターゲットとノズルとの間隔が広すぎるので改善する必要がある。十分にコアプラズマのイオンが W ターゲットと接触する配置での実験が望まれる。

謝辞

本研究を進行するにあたり、実験や解析等の補助を行ってきた卒研生の本杉優次君や渋谷悠君に感謝します。

参考文献

[1] M. Moisan, Z. Zakrzewski and J.C. Rostang : “ Waveguide - based single and multiple nozzle plasma torches : the TIAGO concept ” : Plasma Source Sci. Technol. **10**, 387 (2001).

[2] S. Takamura, M. Kitoh, T.Soga, H.Takashima, Y.Nishino, S.Hayakawa, Y. Ban, T. Yuhki, M. Kando and N. Ohno : “ Structural Bifurcation of Microwave Helium Jet Discharge at Atmospheric Pressure ” : Plasma Fusion Res. **3**, 012 (2008).

[3] S. Takamura, M. Kando, N. Ohno : “ Discharge Bifurcation of Microwave - sustained Helium Plasma Torch at Atmospheric Pressure ” : Plasma Fusion Res. **8**, 910 (2009).

[4] M. A. Razzak, S. Takamura, T. Tsujikawa, H. Shibata and Y. Hatakeyama : “ Measurement of Electric Field Distribution along the Plasma Column in Microwave Jet Discharges at Atmospheric Pressure ” : Plasma Fusion Res. **4**, 047 (2009).

[5] S. Takamura, S. Saito, G. Kushida, M Kando and N.Ohno : “ Dynamic Properties and Discharge Bifurcation of Microwave – sustained Plasma Torch at Atmospheric Pressure “, 7th Int. WS on Microwave Discharge : Fundamentals and Applications, CURREAC, Hamamatsu, Japan, September 22-27, I-6, 2009, pp.65 – 74, ed. by M. Kando and M. Nagatsu, Scientific Council of RAS on Physics of Low Temperature Plasmas.

[6] 中島将光 著：「マイクロ波工学」, p85, 森北出版株式会社, 東京, 1975

[7] S. Takamura, S. Amano, T. Kurata, H. Kasada, J. Yamamoto, M. A. Razzak, G. Kushida, N. Ohno, and M. Kando : “ Formation and decay processes of Ar/He microwave plasma jet at atmospheric gas pressure ” : Journal of Applied Physics. **110**, 4 (2011).

（受理 平成 24 年 3 月 19 日）