

1 章 序論

1.1 背景

現在、宇宙の商業利用は活発となっている。天気予報、カーナビなど、様々な分野で人工衛星が利用されている。その中で、小型の人工衛星に関する研究が進められている。その理由として、小型であるために開発期間が短くてすみ、最先端の技術が投入できること。低コストで人工衛星の製作が可能であること。一つのシステムを分散して打ち上げるためにリスクが軽減できることなどが挙げられる。しかしながら、そのサイズの制約のため、小型人工衛星の多くは、モーメントムホイールのみ、高々、磁気トルカ¹やコールドガスジェット等の低性能のエンジンが搭載されているだけであるため、現状では、大型衛星にとって脅威とはなっていない。

人工衛星は月や太陽の引力の影響を受けて正規の衛星軌道上から外れることがあり、軌道上に戻すために推力が必要となる。また、地球観測衛星においては、任意の地点を観測するためには、軌道の変更が必要であり、さらに、軌道維持には大気によるドラッグを補正する必要がある。Fig1.1 に軌道修正の概念図を示す。これらの動作には、衛星自体にエンジンを搭載しなければならない。もし、エンジンを小型人工衛星に搭載することができたならば、小型衛星の機能を大幅に向上でき、従来の小型衛星では不可能であった長期間の地球観測や火星探査、また衛星自身が宇宙デブリとならないための自主廃棄なども可能となる。これらの用途として、小型衛星用の 100W 程度で、10 mN クラスのエンジンの需要が今後増えると考える。

従来の化学推進ロケットは燃料と酸化剤を燃やして得た単位時間当たりのエンタルピー上昇を推進パワーに変換する。これと異なり、電気推進ロケットは太陽電池等からの電気エネルギーを推進剤に与えることで反力を得ようとするもので、比投入エンタルピーを任意に与えることができるため高性能なロケットエンジンとなる¹⁾。また、電気推進ロケットは比推力が従来の化学推進に比べて大きいいため、推進剤の消費量を低減でき、ペイロード重量の増加や化学推進では達成できないような宇宙ミッションが可能となる。しかし、電気推進ロケットでは加速度は低いものしか得られないため、地上からの発射のように高重力場に打ち勝つ必要がある場合には適当でない。このシステムが最もよく機能を発揮するのは、宇宙空間など非常に小さい重力場においてである。電気推進システムを使った飛行計画はすべて宇宙空間で始まる²⁾。電気推進の概念図を Fig.1.2 に示す。

電気推進ロケットには推力を得るために様々な方法が用いられている。電氣的加熱を利用して高温ガスを製造し、空気力学的加速を行う電熱加速や、粒子を電離したうえで電磁力を直接作用させる電磁加速、静電力を作用させる静電加速と呼ばれるものである。このような推進原理の違いにより、排気速度、比推力も異なってくる³⁾。それぞれの代表的電気推進ロケットの比推力と推力密度の関係を Fig.1.3 に示す。

静電加速に代表されるイオンエンジンは推力密度こそ大きくないが、比推力が大きい

ため長時間利用可能な人工衛星の南北姿勢制御用として用いられる。また、軌道変更時などの短時間に大きな推力を必要としたときに用いられるものが、本研究の対象であるRF(Radio Frequency)スラスタである。

RFスラスタとはアンテナであるコイルに高周波を流すことにより、渦電流を誘起し、推進剤をプラズマ化させる。それにより、エンタルピーを上昇させ、ノズルを用いて運動エネルギーに変化させ推力を得るシステムである。RFスラスタの利点としては、まず、アンテナを放電室の外に設置しているためイオンによる損傷が少なくすむこと。また、ECRやヘリコンに必要なDC磁界が不要であること。そして投入電力に対して推力が大きいことである。このスラスタに関して、昔から様々な研究機関で研究開発が行われてきた。また、近年は、ICPは再突入を模擬できる高エンタルピー風洞として、様々な研究機関(JAXA、NASA、等)で研究開発が盛んである。このRFスラスタを小型化できれば、小型衛星の性能を格段に向上させることができる。

小型人工衛星にエンジンを搭載する上で最大の障壁となりうるサイズの制約を解決する手段として、本研究では推進剤にアルゴンやヒドラジン等ではなく、水を用いる。主な理由を3つ挙げると、一つ目は、水は常温で液体であるので、イオンエンジンの推進剤に使われるArやXeのような希ガスより密度が大きいのでエンジンシステムの容量を減らすことができる。二つ目は、我々に身近な物質であり安価で入手し易い。三つ目として、ヒドラジン(N_2H_4)のように人体に有害でなく扱い易いことが挙げられる。

1.2 研究目的

本研究グループでは小型人工衛星用ロケットエンジンとしてRFスラスタの研究、開発を行ってきた。しかしながら、その推進効率は0.3%と非常に低く、実用化には程遠かった。そこで、RFスラスタの性能向上を目指すためにRFスラスタのエネルギー収支を解明する。エネルギー収支を解明することにより、RFスラスタの改善の指針を得る。

本論文は章構成となっており、以下に全体の構成を述べる。

第1章では、背景と研究目的についてすでに述べた。第2章では、RFスラスタ、推進構造の原理、電力伝達効率、発光分光強度法、について述べる。第3章では、本実験で用いた実験装置と実験方法、第4章では、実験結果および考察、第5章では、結論を述べる。

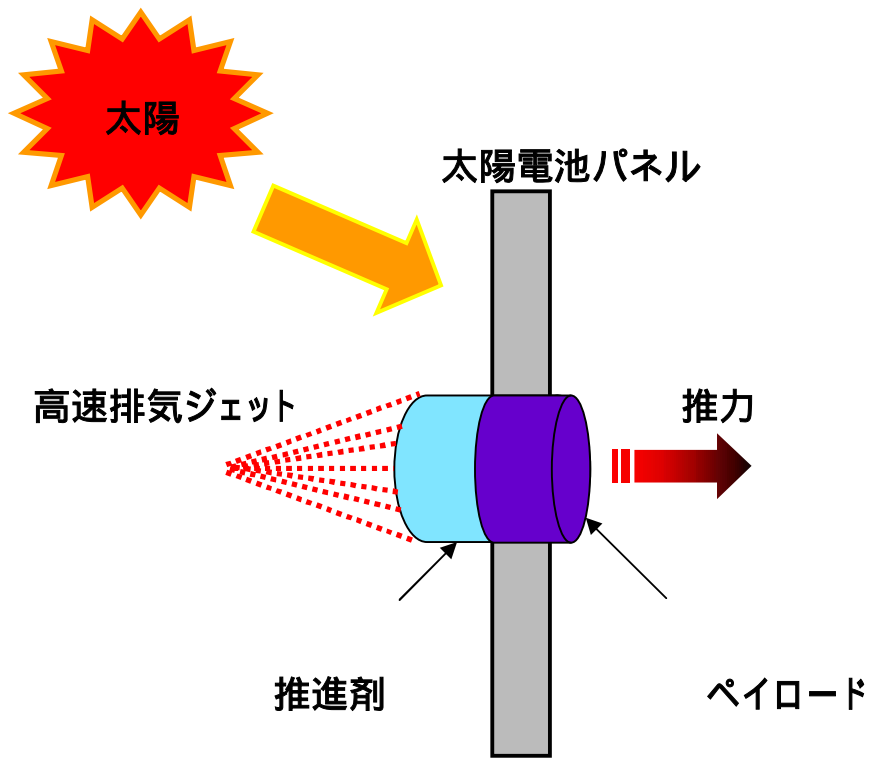


Fig.1.1 電気推進システムの概念

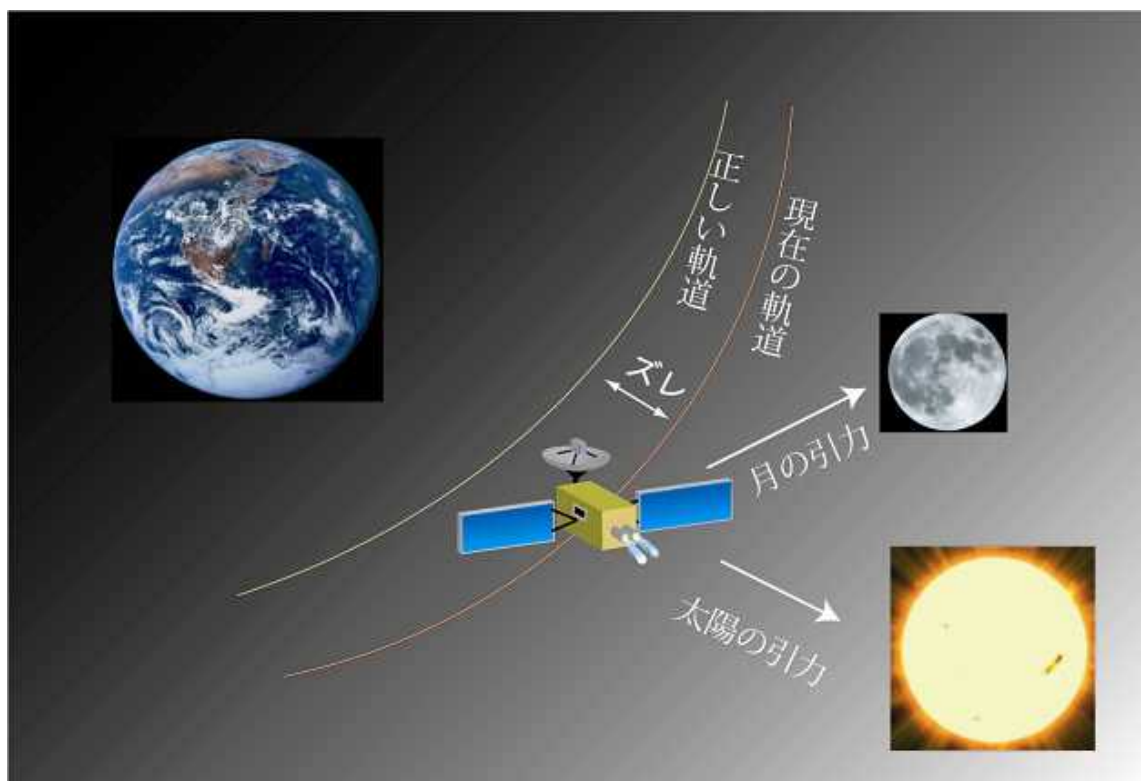


Fig.1.2 軌道修正概念図

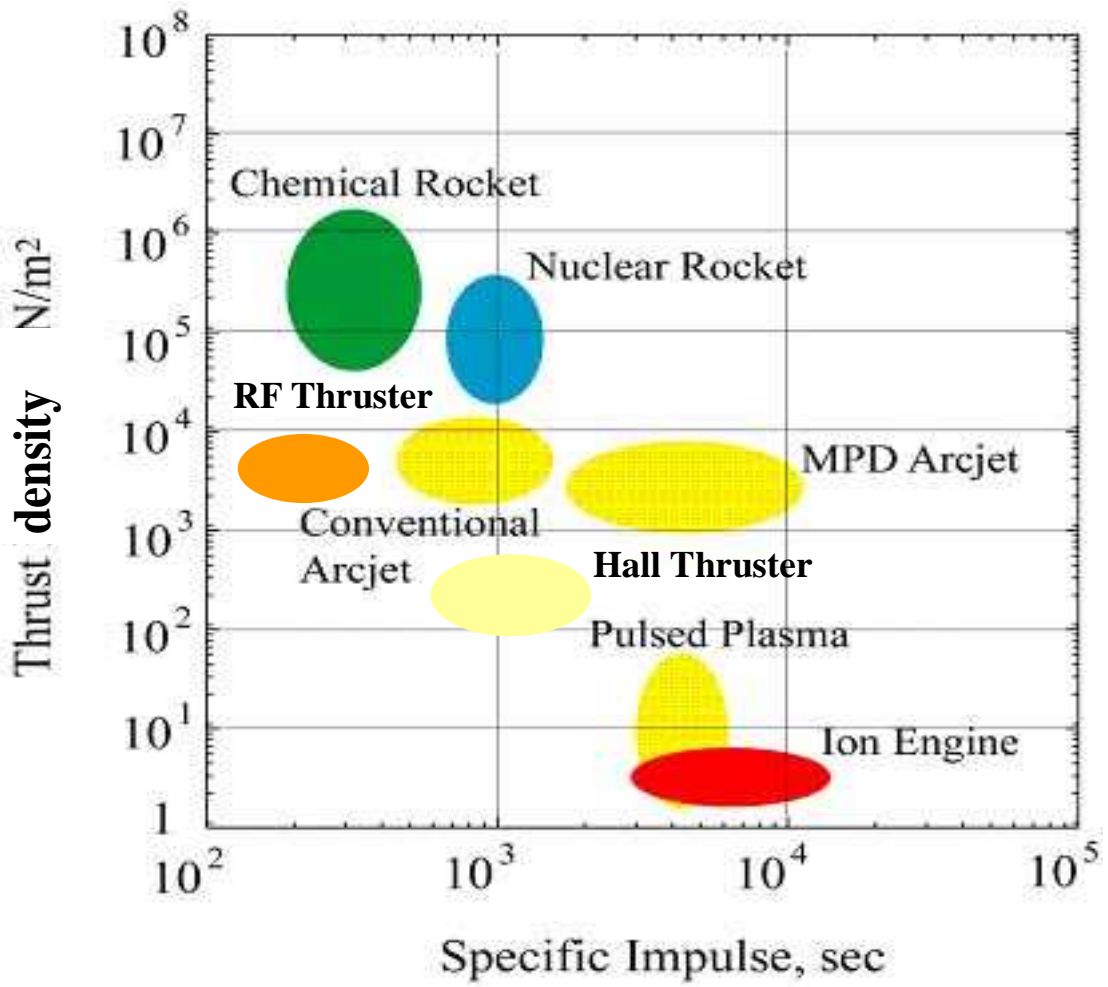


Fig.1.3 電気推進機の比推力と推力密度

第2章 原理

2.1 RF スラスタ

RF スラスタは電気推進システムの一つであり、推進剤を高周波により加熱しプラズマ化させ、高速の排気ガスを噴射させて推力を得る装置である。このエンジンの概念図を Fig.2.1 に示す。主に以下の3つの領域により構成されている。

推進剤を放電室に投入する。

高周波を用いて推進剤を電離する

電離された粒子を気体力学的に加速して推力を得る

上の各過程はそれぞれ放電室、ノズルにおいて行われる。

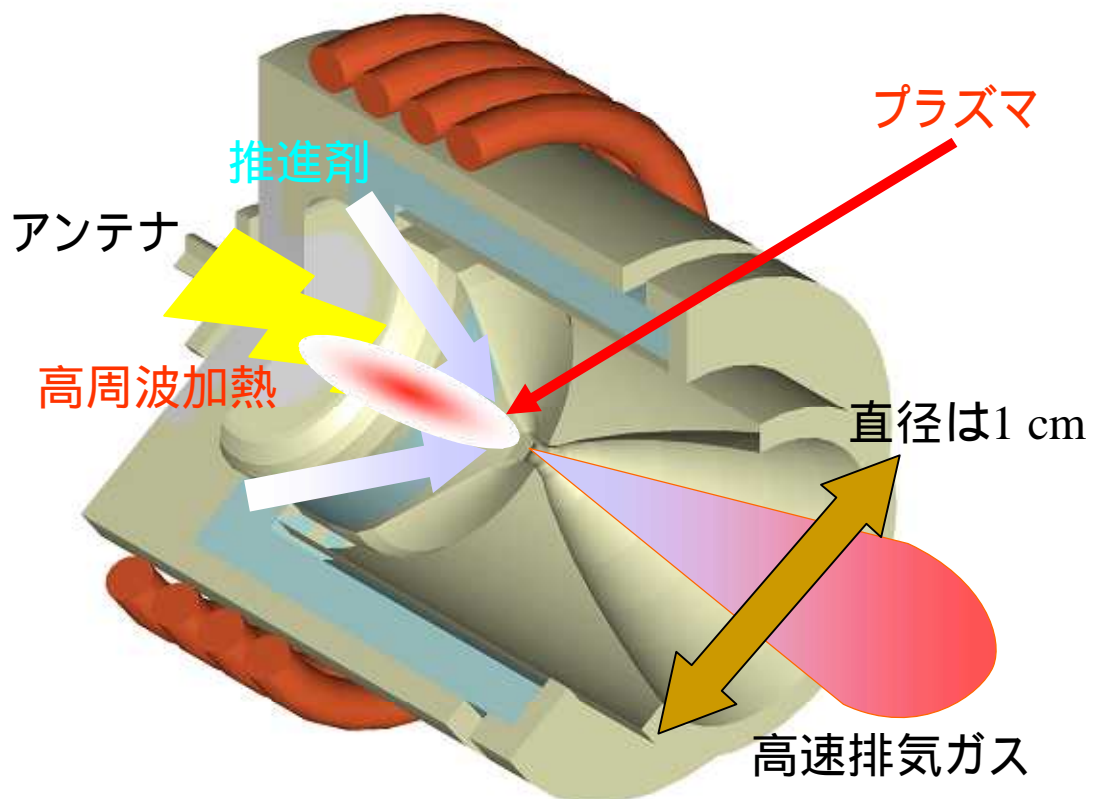


Fig.2.1 高周波放電エンジンの概念図

2.2 誘導結合プラズマ(ICP)の原理⁽³⁾

本研究ではプラズマ生成に ICP (Inductively Coupled Plasma) 放電を利用している。ICP の原理と概念図を Fig.2.2 に示す。ICP においてプラズマが生成される過程を考えると、以下のようなになる。高周波電流が誘導コイルの中を流れると磁力線は放電管内に楕円形の閉回路を形成して、放電管内に軸方向の高周波磁界が形成される。電磁誘導のため、この高周波磁界の時間変化に比例した電界が放電管周方向に発生する。電子はこの電界によって加速されると同時にガス分子との衝突を繰り返し、さらにその一部を電離、単位時間内における電子の発生量が消滅量より多くなると電子密度が急増し、放電管内にプラズマを形成する。プラズマができると電子はイオンとの再結合が進行するが、一方、推進剤ガスは一定流速で高周波電界域を通過してイオンや電子が消失していく。ガス分子の電離によるイオンや電子の生成と消滅がつり合って放電が維持されるわけである。この衝突性の電力消費により、電力は電界からプラズマ表面近くの表皮深さ層内のプラズマ中の電子に伝達され、電子は衝突によりこの電力をガスに伝達する。このプラズマのガス流速や電力を適当に調節するとドーナツ型のプラズマが形成される。プラズマがドーナツになる現象は高周波電流の表皮効果によるものである。表皮効果(skin effect)は導体断面中の高周波電流密度が一様に分布せず、導体内部よりむしろ表面層に集中する現象である。この表皮層の厚さ(表皮深さ) δ は、

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2-1)$$

で示される。ここで f は周波数、 μ は透磁率、 σ は伝導度である。すなわち、表皮深さは周波数の平方根の逆数に比例するので、周波数が高いほど表皮深さは小さくなり、電流は表面付近で流れやすくなる。このことは、中心部のドーナツの穴が周波数とともに大きくなることを示している。その結果、電流によるプラズマの加熱が周辺部で生じ、プラズマ中心部は、周辺部からの熱伝導や輻射で加熱される。以上のように、コイルに印加した誘導電流に起因する誘導電界を利用したプラズマ生成方式を誘導結合型プラズマ(ICP : Inductively Coupled Plasmas)と呼ぶ。

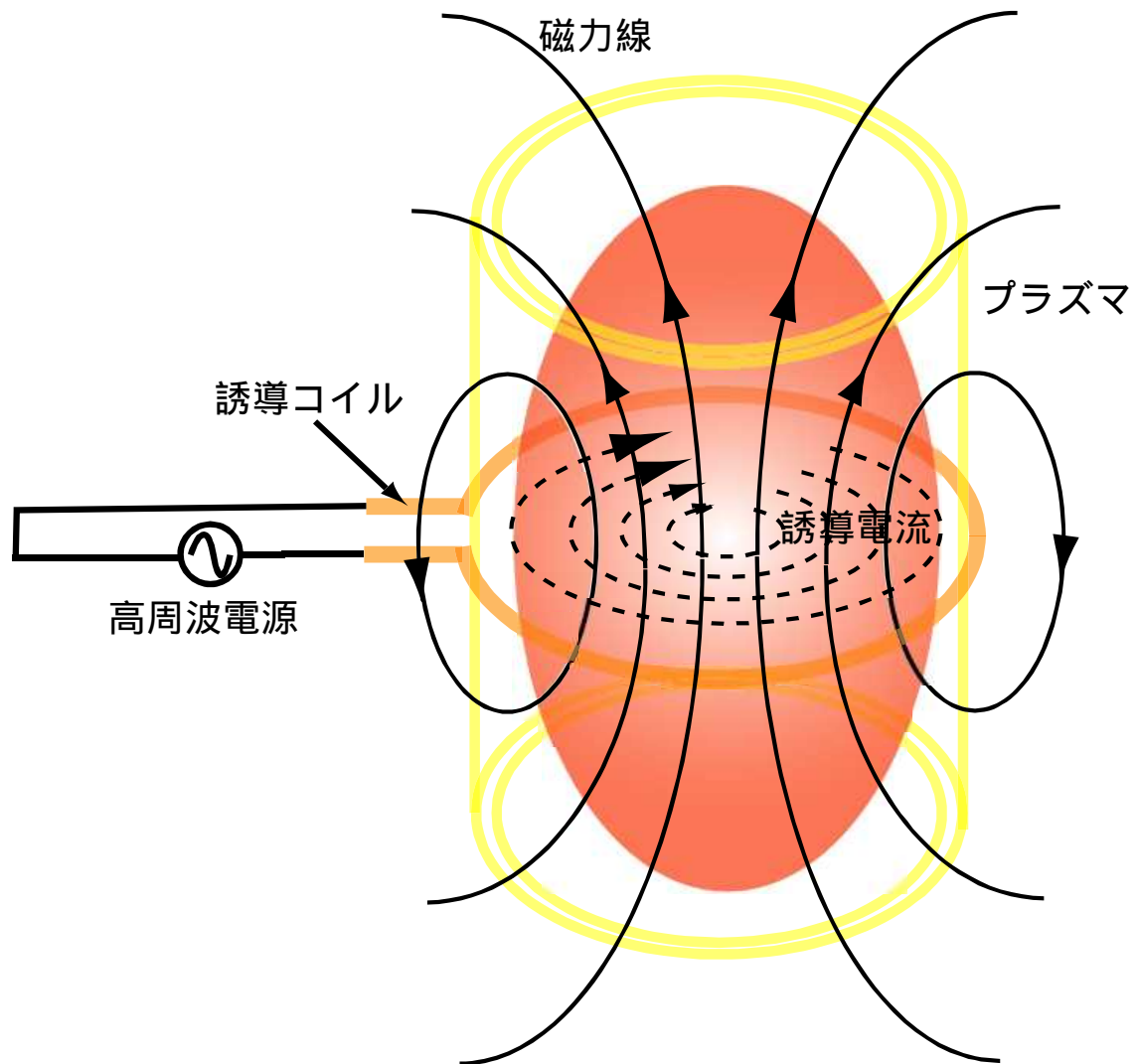


Fig.2.2. 誘導結合プラズマ(ICP)の概念図

2.3 推進原理(気体力学的加速理論)⁽⁴⁾

推進剤ガスはジュール加熱により熱せられるとともに、分子振動励起、解離/電離が進行する。生成された高エンタルピー気体はノズルを通過して膨張する。この時ジュール加熱により推進剤ガスが得た熱エネルギーは運動エネルギーに変換されて加速を受け、ノズル出口において高速流となる。このようにしてノズル出口で得られた高い速度が推力を生み出す。

2.3.1 等エントロピー流

\dot{m} を推進剤ガス流量、 A_e をノズル出口面積、 u_e 及び p_e をそれぞれノズル出口における推進剤ガス速度及び圧力、 p_∞ を噴射ジェット周囲圧力とすれば、推力 F は、

$$F = \dot{m}u_e + A_e(p_e - p_\infty) \quad (2-2)$$

で与えられる。ノズル出口速度 u_e が高ければ、高い推力を生み出すことがわかる。この高い速度を得るために、推進剤ガスを高周波放電により加熱し、その熱エネルギーを運動エネルギーに変換することが望まれる。推進剤ガスが高周波放電により温度 T_c まで加熱され、そのときの速度を u_c とする。ノズルを通過して膨張するとき、ノズル壁からの熱損失がない、すなわち等エントロピー流とみなせば、加熱後の状態(添え字 c)とノズル出口の状態(添え字 e)との間にエネルギー保存が成り立つので、 h をエンタルピーとすれば、

$$h_c + \frac{1}{2}u_c^2 = h_e + \frac{1}{2}u_e^2 \quad (2-3)$$

と表現できる。ノズルを通過して気体力学的に加速されると、加熱後のエンタルピー h_c が運動エネルギーに変換され、ノズル出口で推進剤ガスは高い速度 u_e をもつようになる。

式(2-2)と(2-3)より

$$F = \dot{m}\sqrt{2(h_c - h_e) + u_c^2} + A_e(p_e - p_\infty) \quad (2-4)$$

を得る。

通常、推力への圧力寄与(上式の右辺第2項)は小さいので、これを省略して、

$$F = \dot{m} \sqrt{2c_p(h_c - h_e) + u_c^2} \quad (2-5)$$

と書く。ノズル断面は通常円であるので、軸対称流の取り扱いが必要であるが、まず、断面積が変化するノズル内の流れを一次元流として取り扱う。

推進剤ガスがノズル内を膨張するとき、もっているエネルギーがノズル壁を通して外へ逃げないとする断熱的な流れでは、推進剤ガスを熱量的完全気体（比熱一定）と仮定し、加熱後の推進剤ガスの運動エネルギーはエンタルピーに比べて十分小さい、すなわち、 $u_c^2/2 \ll h_c$ とすると、ノズル出口運動エネルギーは(2-3)式より次式で表される。

$$\frac{u_e^2}{2} = h_c - h_e \quad (2-6)$$

気体が熱量的完全気体（比熱一定の気体）であれば、 $h = c_p T$ （ c_p :定圧比熱、 T :温度）

と書けるから、

$$\frac{u_e^2}{2} = c_p \Delta T \quad (2-7)$$

と変形できる。これより、推力 F は次式より求められる。

$$F = \dot{m} u_e = \dot{m} \sqrt{2c_p \Delta T} \quad (2-8)$$

また、 F_p を推進剤流量による推力、 F_w をプラズマ点火時の推力と定義すると、 F_{to} は次式で表される。

$$F = F_{to} = F_p + F_w \quad (2-9)$$

また比推力を表す I_{sp} は、

$$I_{sp} = \frac{F_{to}}{\dot{m}g} \quad (2-10)$$

で表せる。ここで g は重力加速度である。推進効率 η_i は次式で定義される。

$$\eta_i = \frac{\frac{1}{2} \dot{m} u_e^2}{P} = \frac{\frac{1}{2} \dot{m} v_{plasma}^2 - \frac{1}{2} \dot{m} v_{gas}^2}{P} = \frac{\frac{1}{2} \dot{m} \times \left(\frac{F_{total}}{\dot{m}} \right)^2 - \frac{1}{2} \dot{m} \times \left(\frac{F_p}{\dot{m}} \right)^2}{P} = \frac{F_{total}^2 - F_p^2}{2 \dot{m} P} \quad (2-11)$$

推進効率とは、投入電力がどれだけ推力に変換されたかをみる指標である。

2.3.2 凍結流損失

式(2-8)で与えられる推力は、もっとも理想的な場合である。しかし、現実には推進剤ガスが分子気体の場合、気体はジュール加熱を受けると解離、電離するので、投入電力の一部は解離エネルギー、電離エネルギーに用いられる。また、回転、振動エネルギーを高めるためにも消費される。ノズル膨張の際、これらの解離、電離エネルギーおよび回転、振動エネルギーも運動エネルギーに変換されることが望ましい。解離、電離の逆反応、すなわち再結合反応の速度は、密度が高ければ大きい、ノズル膨張をして気体密度が非常に低くなると、再結合反応速度も小さくなり、その結果ノズル膨張により大きくなった推進剤ガス流速より小さくなる。そうすると、再結合反応が完了しないまま、つまり反応が凍結したまま推進剤ガスはノズル出口に達し、解離、電離エネルギーは運動エネルギーに変換されないで、推進剤ガスに含まれたままノズルより放出される。このように、解離、電離エネルギーが推力に寄与しない損失を凍結流損失という。

2.4 プラズマ電力伝達効率⁽⁵⁾

高周波からプラズマへのプラズマ電力伝達効率を次式で定義する。

$$\eta = \frac{P}{P_{abs}} \quad (2-12)$$

プラズマへの電力流を積分すると、次式が得られる。

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \frac{J}{\sigma} 2\pi R l \delta_p \quad (2-13)$$

この式は、等価的に表皮深さ δ_p 内を流れる一様正弦波状電流密度の電力損を表す。ここで、 J は放電管壁付近のプラズマ端において誘導された周方向の RF 電流の振幅、 σ は導電率、 R はプラズマ半径、 l は巻いたコイルの全体幅である。

プラズマへの投入電力 P は次式より得られる。

$$P = \frac{1}{2} V_{RF} I_{RF} \cos \phi \quad (2-14)$$

V_{RF} 、 I_{RF} 、 ϕ はそれぞれ I-V センサにより計測して得られる。回路全体のインピーダンスは次式で得られる。

$$Z_s = \frac{\tilde{V}_{RF}}{\tilde{I}_{RF}} = R_e + I_m \quad (2-15)$$

$$R_e = Z_s \cos \phi \quad I_m = Z_s \sin \phi \quad (2-16)$$

次式を誘導される全 RF 電流の振幅とする。

$$I_p = J l \delta_p \quad (2-17)$$

プラズマ抵抗 R_p は次式から得られる。

$$R_p = \frac{R_e - R_{coil}}{N^2} \quad (2-18)$$

ここで N はコイルの巻数である。

プラズマ・インダクタンス L_p は $V_p = -I_p R_p$ を用いて求められる。ここで、 V_p は表皮電流と交叉する全磁束である。 $H = J_p$ を表皮電流によって生じる磁界とすれば、回路をモデル化 (Fig.2.3) することができる。この変成器のインダクタンス・マトリックスを次式で定義する。

$$\tilde{V}_{RF} = j\omega L_{11} \tilde{I}_{RF} + j\omega L_{12} \tilde{I}_p \quad (2-19)$$

$$\tilde{V}_p = j\omega L_{21} \tilde{I}_{RF} + j\omega L_{22} \tilde{I}_p \quad (2-20)$$

ここで ω は投入周波数である。インダクタンス・マトリックスはそれぞれ次式で表すことができる。

$$L_{11} = \frac{\mu \pi b^2 N^2}{l} \quad (2-21)$$

$$L_{12} = L_{21} = \frac{\mu \pi R^2 N}{l} \quad (2-22)$$

$$L_{22} = L_p = \frac{\mu \pi R^2}{l} \quad (2-23)$$

ここで、 μ は自由空間の透磁率、 b はコイル半径である。

(2-17)式を変形することにより、次式が得られる。

$$I_p = \frac{V_{RF} - \omega L_{11} I_{RF}}{\omega L_{12}} \quad (2-24)$$

(2-18)式 $V_p = -I_p R_p$ の関係を用いて、(2-17)式に代入すると、コイル端で見たインピーダンス Z_s について次式のように表せる。

$$Z_s = \frac{\tilde{V}_{RF}}{\tilde{I}_{RF}} = j\omega L_{11} + \frac{\omega^2 L_{12}^2}{R_p + j\omega L_p} \quad (2-25)$$

$p < R$ の場合、(2-16)式、(2-21)式、から明らかのように、 $R_p^2 < \omega^2 L_p^2$ である。したがって、(2-23)式の分母を展開すると次式が得られる。

$$Z_s = \frac{2\pi R}{\sigma l \delta_p} N^2 + j\omega \frac{\mu \pi R^2 N}{l} \left(\frac{b^2}{R^2} - 1 \right) \quad (2-26)$$

(2-12)(2-24)式よりプラズマ半径が次式によって得られる。

$$R = \sqrt{b^2 - \frac{I_m l}{\omega \mu \pi N^2}} \quad (2-27)$$

よって、電力伝達効率

$$\eta_p = \frac{P_{abs}}{P} = \frac{I_p^2 R_p}{2P} \quad (2-28)$$

以上の計算により、電力伝達効率が求まる。

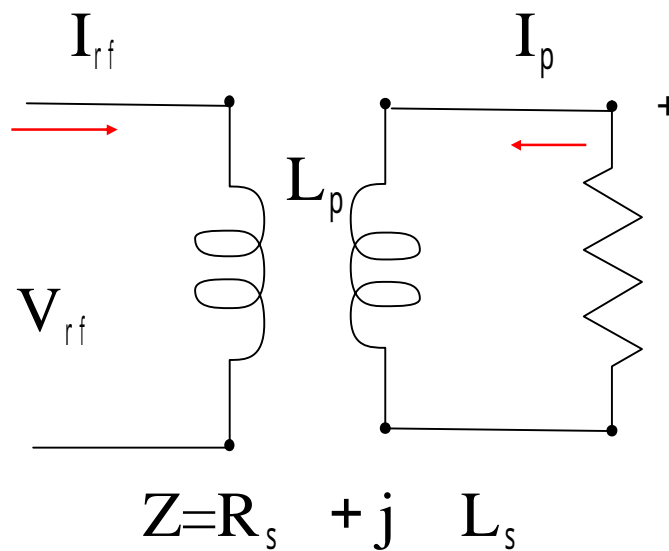


Fig.2.3 ICP 放電の変成器結合形等価回路

2.4.1 校正直線

プラズマへの投入電力 P は次式より得られる。

$$P = \frac{1}{2} V_{RF} I_{RF} \cos \phi \quad (2-29)$$

V_{RF} 、 I_{RF} 、 ϕ 、それぞれを I-V センサにより計測し、オシロスコープを用いて出力した。校正のために 50 Ω の抵抗を接続して、50 W、100 W、150 W、200 W、250 W の電力を投入した。それぞれ 5 回ずつ計測しフィッティングした V_0 、 I_0 の値により、投入電力 $P=1/2I_0^2R_p$ 、 $P=1/2I_0V_0$ の関係式より校正係数 α 、 β を次式より求めた。

$$\alpha = \frac{V_e}{V_0} \quad (2-30)$$

$$\beta = \frac{I_e}{I_0} \quad (2-31)$$

この校正係数をプロットし校正曲線を得た。それぞれの校正曲線を Fig.2.4 に示す。この校正曲線の傾きより校正係数

$$\begin{aligned} \alpha' &= 4071.2 \\ \beta' &= 105.7 \end{aligned} \quad (2-32)$$

が得られた。

またフィッティングした位相差の平均より、

$$\phi = 0.06566 \quad (2-33)$$

が得られた。I-V センサに流れる電流、電圧が大きすぎるために、位相差が大きくなったものと考えられる。

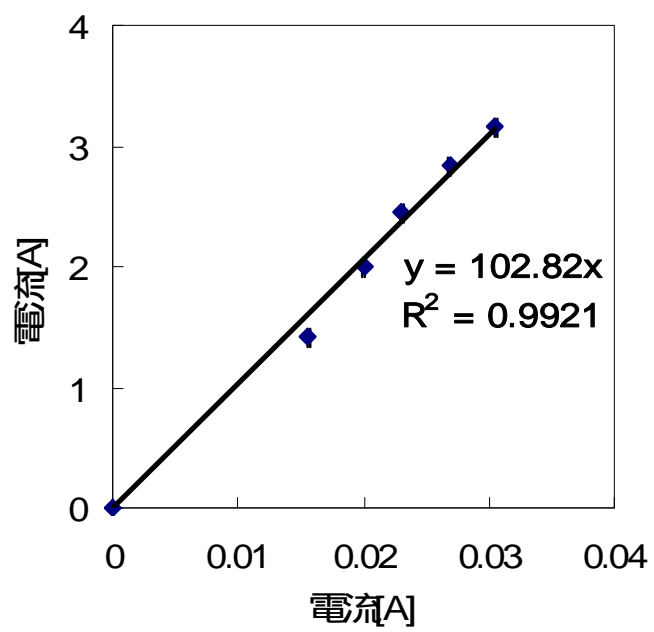
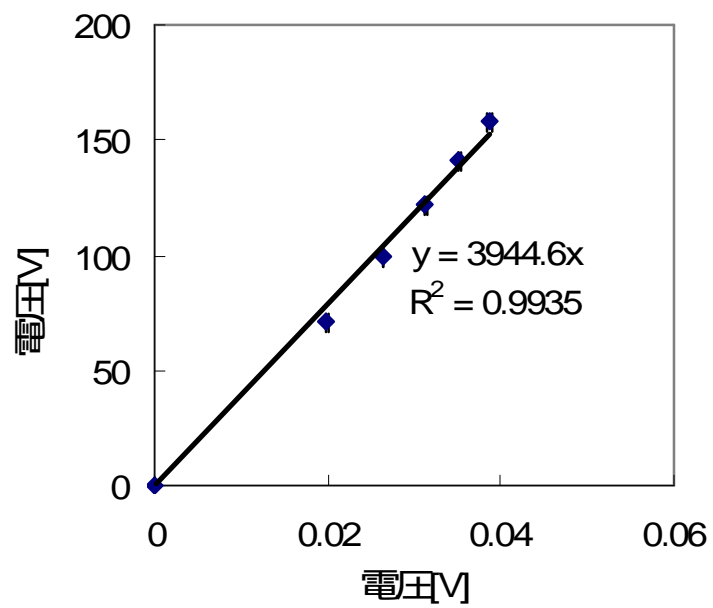


Fig.2.4 電圧、電流の校正曲線

2.5 発光分光強度法⁽⁶⁾

熱平衡プラズマにおいては、ボルツマン分布が成り立つ。スペクトル線強度は、ボルツマン分布から定まる励起状態の原子濃度（またはイオン濃度）に比例するので、強度を測定することにより原子（またはイオン）の励起温度が求められる。準位 n から準位 m への遷移で振動数 ν_{nm} のスペクトル線が発光する場合、そのスペクトル線強 I_{nm} は一般に

$$I_{nm} = h\nu_{nm} \frac{g_n}{Z(T)} A_{nm} N \exp(-E_n/kT) \quad (2-34)$$

で表される。ここで、

g_n : 励起準位 n の統計的重価

E_n : 励起準位 n の励起エネルギー

A_{nm} : n から m への遷移に対する遷移確率

$Z(T)$: 温度 T におけるその原子の分配関数

(2-34)式を ν_{nm} を用いて変形すると、次式が得られる。

$$\frac{I_{nm} \lambda_{nm}}{A_{nm} g_n} = \exp\left(\frac{-E_n}{kT}\right) \frac{hc_0 N}{Z(T)} = K \exp\left(\frac{-E_n}{kT}\right) \quad (2-35)$$

ここで定数 K は、同一温度で、同一原子のスペクトル線について共通の定数である。(2-2)式の対数をとると、次式を得る。

$$\ln \frac{I_{nm} \lambda_{nm}}{A_{nm} g_n} = -\frac{E_n}{kT} + \ln K \quad (2-36)$$

同一原子の複数スペクトル線について、(2-3)式の左辺の量を縦軸に、横軸に E_n をとると、直線が得られ、その傾斜は $-1/kT$ に比例する。その傾きを a とすると、電子温度 T を次式より求めることができる。

$$T = \frac{k}{a} = \frac{1}{a} \times 11600 \quad (2-37)$$

直線にならないときは、熱平衡が成立していないか、あるいはスペクトル線の自己吸収、妨害線の影響、遷移確率の不正確など様々な要因が考えられる。この方法を用いるには、 A 係数が既知の複数本のスペクトル線が必要である。ただし、 A 係数の絶対値は必ずしも必要ではなく、複数のスペクトル線の A 係数の相対値がわかればよい。

2.5.1 エンタルピー変換効率

エンタルピー変換効率とは、高周波電源からの投入電力が推進剤ガスのエンタルピー上昇にどの程度寄与しているかを見るための指標である。この変換効率 η_h を以下のように定義する。電子温度よりこのエンタルピー変換効率を求める。

$$\eta_h = \frac{\Delta H}{P/\dot{m}} \quad (2-38)$$

ここで、

ΔH : 比エンタルピー上昇

P : 投入電力

\dot{m} : 流量

である。放電管内のガスを理想気体とみなすと、エンタルピーは定圧比熱と絶対温度の積で与えられるので、エンタルピー上昇 ΔH は

$$\Delta H = \int_{T_0}^T c_p(T') dT' \quad (2-39)$$

で表される。これにより、変換効率が求まる。

2.5.2 分光計測系の感度較正

カメラの感度は、波長依存性があり、また、プラズマからの放射はレンズにより測定し、出力されるまでの過程に含まれる系の多くは波長の関数となる減光率を持っている。このため、較正は任意の波長ごとに行われる必要がある。相対的な感度の較正の場合、光源の波長に対する相対的なエネルギーが分かればよい。Fig.2.5 に標準光源の波長に対する実測値と既知の発光強度の値を示す。Fig.2.5 より、長波長側で感度が減少していることが分かる。この場合、測定のとときに長波長のときの発光強度は見かけ上、小さく見えることになる。この図から波長に対する補正係数が求まる。補正係数を c とすると、これは系に入射する I_{input} と最終的な信号出力 I_{output} の比で表される。すなわち、

$$I_{input}(\lambda) = c(\lambda)I_{output}(\lambda) \quad (2-40)$$

c を得るためには I_{input} が既知でなければならないが、(I_{output} は測定値)が、 c は標準光源を

測定したものと等しいので、

$$c(\lambda) = \frac{I_{input}(\lambda)}{I_{output}(\lambda)} = \frac{I_{lamp}(\lambda)}{I_{lamp-measured}(\lambda)} \quad (2-41)$$

すなはち、Fig.2.5 のそれぞれの信号の比をとればよい。それにより得られた較正曲線を Fig.2.6 に示す。

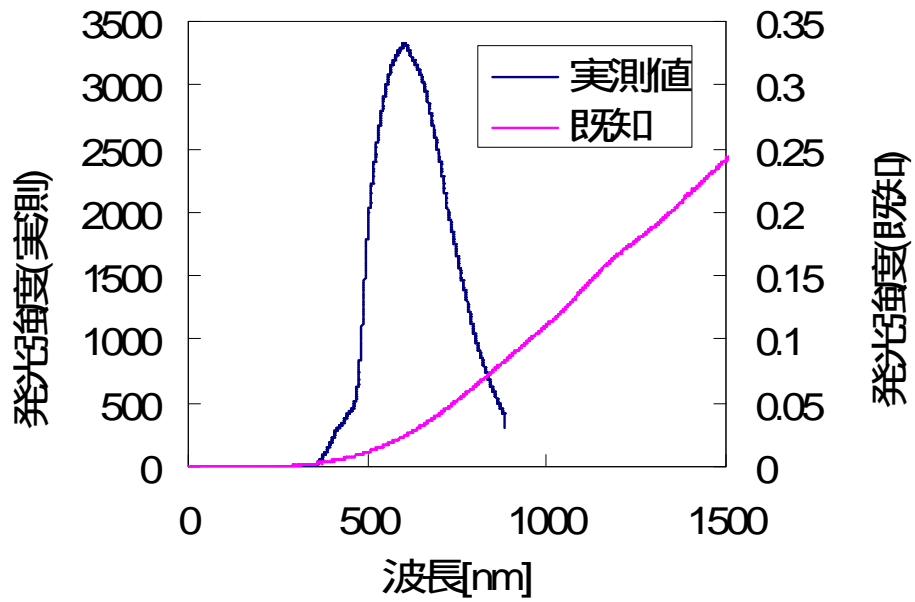


Fig.2.5 標準光源のスペクトル

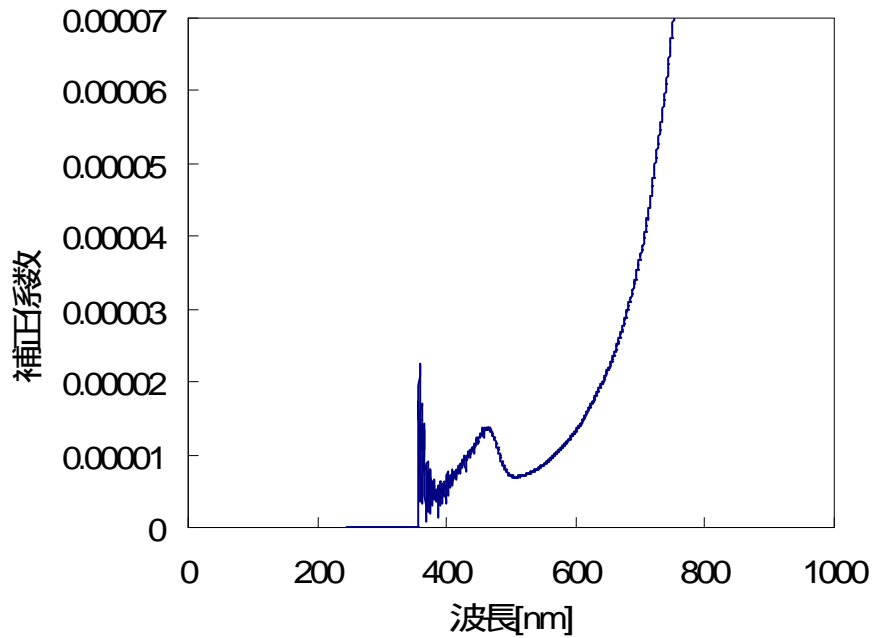


Fig.2.6 較正曲線

第3章 実験装置及び実験方法

3.1 真空系

(1)小型チャンバ

小型チャンバに放電管を直接接合し、真空状態にした。真空排気は排気速度 310 l/min をもつ油回転ポンプのみで行なった。今回の実験での真空引きは放電管に生成するプラズマ気体の組成を一定に保つのが目的であり、 10^{-2} torr 以下まで排気してからプラズマの点火を行なった。実験装置外観を Fig.3.1 に示す。

(2)大型チャンバ

真空容器は内径 267 mm ,長さ 400 mm の円筒型であり、材質はステンレスなかでもとくに磁化しにくい SUS-316 製でできている。真空容器側面とヘッド部と反対側のフランジには計 5ヶ所の観測窓を設置しており、プラズマの生成及びイオン引き出しを目視により確認することができる。容器下側には真空排気用のフランジが2つ設置されている。なお全実験を通してこの真空容器は電氣的に基準電位となっている。

油回転ポンプは粗排気用として用いられ、排気速度は 310 l/min である。油回転ポンプによって臨界背圧 0.1 Torr 以下まで粗排気した後、メカニカルブースターポンプを本引き用として用いる。メカニカルブースターポンプの排気速度は 150 l/sec であり。排気口は油回転ポンプで接続され、常に背圧が下げられた状態にある。

真空容器と排気ポンプとは、リークバルブ、レデューサ(フランジ変換機)及びゴム管によって接続されている。また容器内の圧力は大気圧から 0.01 Torr までは熱電対真空計、 5.0×10^{-3} Torr 以下は電離真空計により計測される。

本研究においては、後に述べる推力測定のみを大型チャンバ内にて行った。

以下に、本実験で使用した各ポンプの特徴について簡潔に説明する。

ロータリーポンプ

ロータリーポンプ (Rotary Pump) は、回転する内部の板が気体をかき出すように排気する真空ポンプの一種である。超高真空を必要とするチャンバの粗挽きや、背圧を維持するための補助ポンプとして使われる。到達真空度は 10^{-1} Pa (10^{-3} Torr) 程度である。油を密閉のために用いるが、この油が真空装置には大敵となるため、高真空を要求される装置と接続する場合はフィルタなどを挟む必要がある。使用すると油は徐々に減っていくため、定期的に油を交換する必要がある。水が混ざると油が劣化してしまうため、1週間に一回は油交換を行った。

メカニカルブースターポンプ

メカニカルブースターポンプは、ケーシング内にある2個のマユ型ロータが、その軸端の駆動ギアにより互いに反対方向に同期回転するようになっている。吸気口から入った気体はケーシングとロータ間の空間に閉じ込められ、ロータの回転で排気口側に排出さ

れ、後段の補助ポンプで大気中に放出される。ロータはロータ同士およびケーシングとわずかな隙間(0.1~0.3 mm)を保って回転するので、ロータ室内には、潤滑油を必要としない。したがってオイルフリーな真空排気が可能である。またロータを高速回転することができ、ケーシングとの間に摩擦の心配もない。メカニカルブースターポンプは、粗引ポンプと組み合わせて使用することにより粗引ポンプの排気速度の落ち込む領域を大幅にアップさせることができる。メカニカルブースターポンプの名前の由来は油回転ポンプと油拡散ポンプの作動領域の中間で作動する蒸気噴射型のブースターポンプに対して、機械的なブースターポンプと呼んだのに発している。これでも分かるように大気から排気するポンプではなく後段(大気側)に油回転ポンプを設けて使用される。中、低真空領域(1Pa~1000Pa)でガス負荷の大きな雰囲気形成に主に使用される。

3.2 RF スラスタ

RF スラスタは放電管、タンク、バルブ、熱交換器、アンテナによって構成されている。

放電管部分には外径 18 mm、内径 15 mm、長さ 150 mm の石英管(耐熱温度 1000 K)を用いた。

アンテナは径 1 mm、25 巻の銅線を用いた。放電管に巻きつけるよう円筒型のアンテナを作成した。Fig.3.2 にアンテナ写真を示す。このアンテナから高周波電力を投入しプラズマ生成を図った。

水の推進剤流量調整には、ソレノイドバルブを用いた。ソレノイドバルブと電力 12 V、オリフィス径 1.5 mm のものを用いた。また、推進剤タンクにヒーターを巻くことにより、ヒーターの温度を変化させて流量調節を行った。推進剤投入機構としては、ヒーターによりタンクの水を気化させた状態で放電管へ投入した。タンクの形状は水が液体のまま放電管に流入しないようサイフォン型を採用した。Fig.3.3 にタンク内部の写真を示す。

アルゴンの推進剤流量調整には、マスフローを用いて調整した。0~300 sccm の範囲で流量調整を行った。

放電管内の圧力を調整するため、小型チャンバとの間にオリフィスを取り付けた。オリフィスは銅製で中心部に直径 1 mm の穴が開けてあるものを用いた。Fig.3.4 に写真を示す。この穴をノズル部分の仮想スロートとした。

3.3 高周波電源

本研究で用いた周波数帯は 3 MHz である。投入電力はパワーモニタにより表示された入射波と反射波の差より算出される。アンテナとの整合は高周波電源とアンテナの間に入れた整合器内の可変コンデンサーを調整して行なった。整合器を Fig.3.5 に示す。ダイヤルを回すことにより、コンデンサーのキャパシタンスを変化させた。コンデンサーの可動範囲は、10~1000 pF である。整合回路を Fig.3.6 に示す。

3.4 I-V センサ

高周波電源とアンテナとの間に I-V センサを介すことにより、アンテナに投入された電圧、電流、位相差を計測した。I-V センサはセンサ内の銅線を流れる電流がビオ・サバールの法則より誘導磁場を発生させる。その磁場がループ内に作る電圧から電流が計測される。電圧は銅線とセンサおよびグランドでコンデンサを形成し、センサの電位は、高周波電圧と以下の式で表されるような相関関係となる。

$$V_M = V_{RF} \frac{50}{\frac{-j}{\omega C} + 50} \quad (3-1)$$

電圧、電流、それぞれの値はオシロスコープによって出力した。

3.5 発光分光計測器

生成されたプラズマの一番輝度の高い中心部分に、レンズで焦点を合わせて計測を行った。分光器にはファイバー入力の小型分光器を用いた。2048 素子リニア CCD が内臓され、分光出力を USB2 経由にて PC にマルチチャンネル出力した。収差補正凹面グレーティング、1024 アレで、測定波長は 245nm から 880nm，分解能は 0.85nm である。。実験方法概念図を Fig.3.7 に測定時外観を Fig.3.8 に示す。

3.6 推力測定器

推力測定のみ大型チャンバにて行った。スラストスタンド外観を Fig.3.9 に示す。スラストスタンドを大型チャンバ内に配置し、背圧 0.01Torr にしたうえでプラズマ生成を行った。スラストスタンドとは生じた推力を振り子の原理により感知するためのものである。このとき、推力はロードセルを用いて計測を行った。ロードセルとは、先端のロッド部分に生じたひずみを電気信号として出力するものである。この電気信号を校正することにより推力として測定した。大型チャンバ設置時の外観を Fig3.10 に示す。

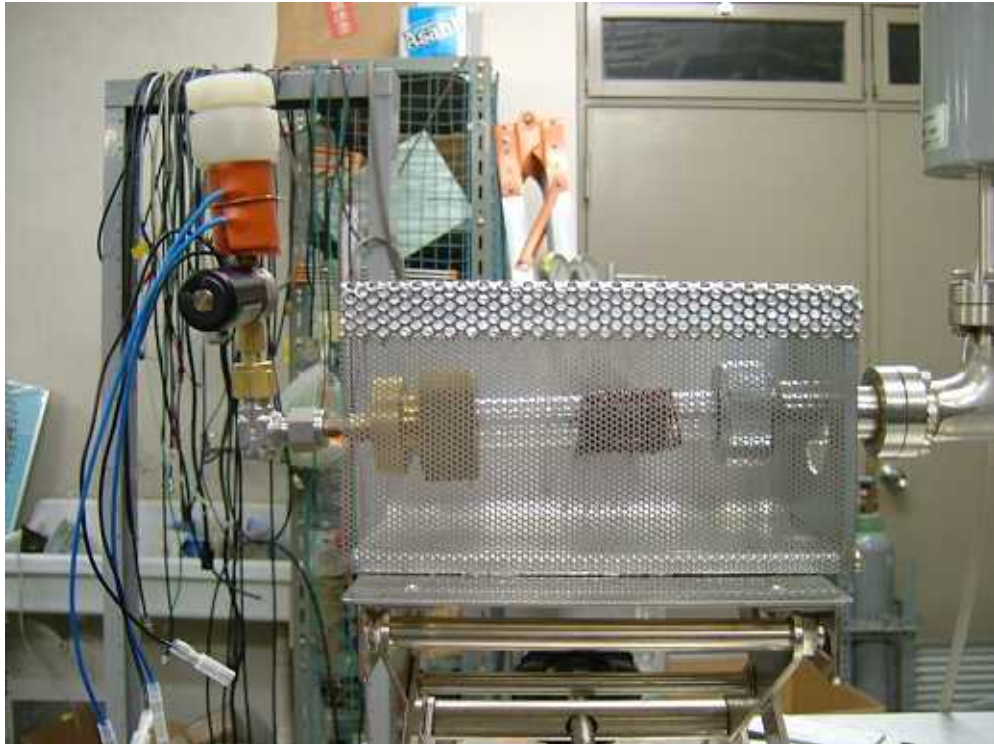


Fig.3.1 実験装置外観

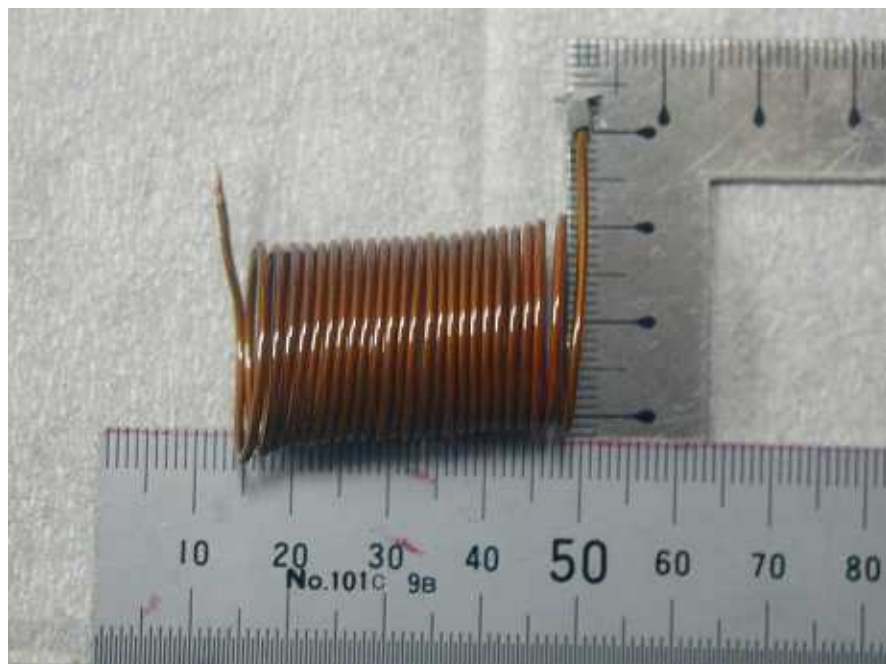


Fig.3.2 アンテナ 25 巻



Fig.3.3 タンク形状

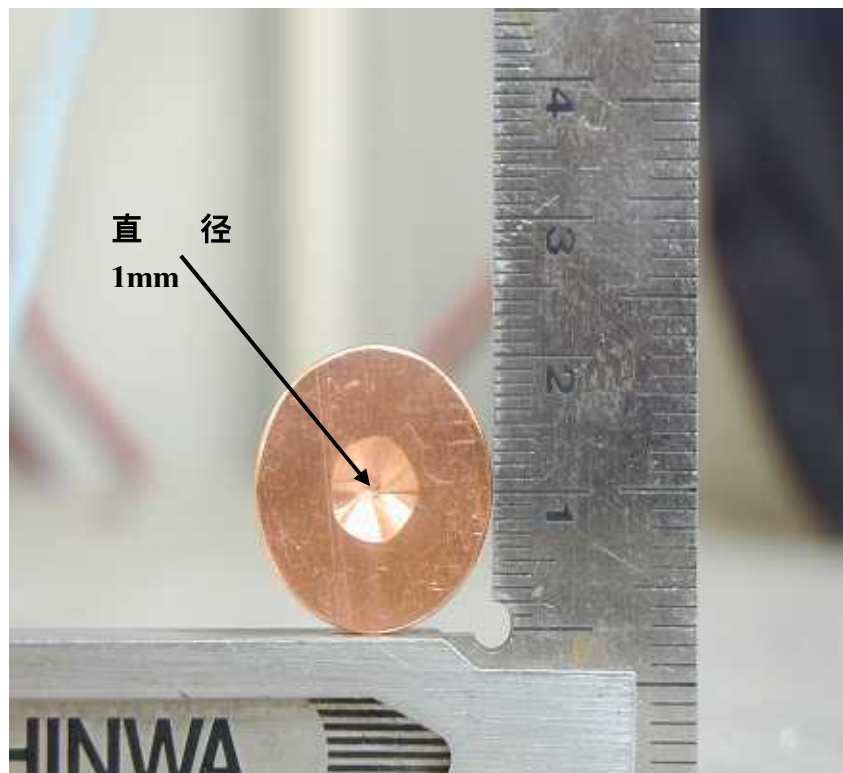


Fig.3.4 オリフィス形状



Fig.3.5 整合器外觀

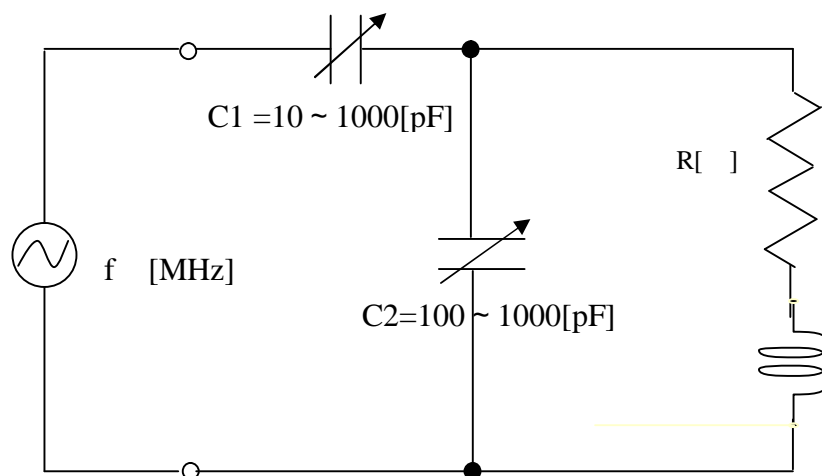


Fig.3.6 整合回路

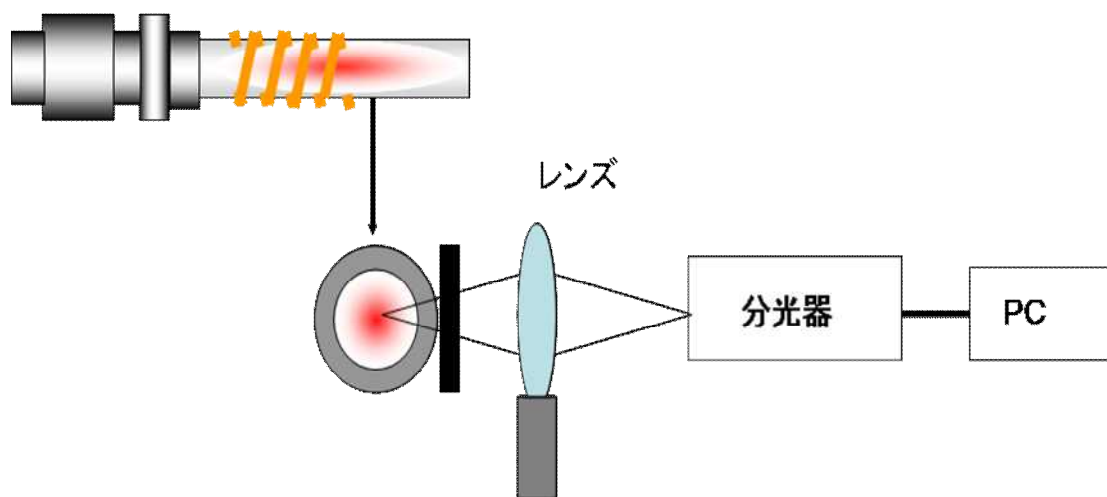


Fig.3.7 分光計測概念図

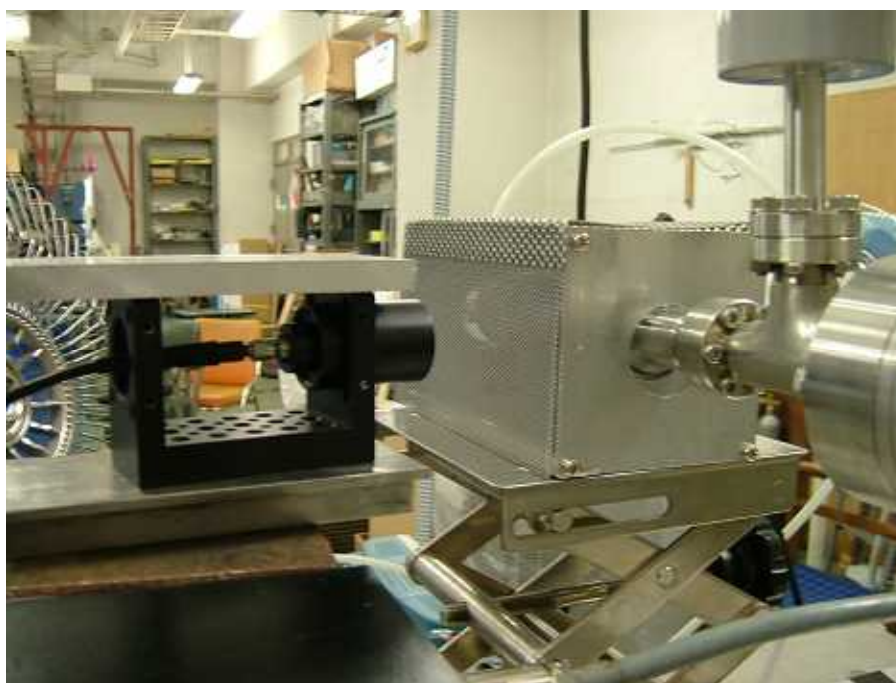


Fig.3.8 分光計測外観

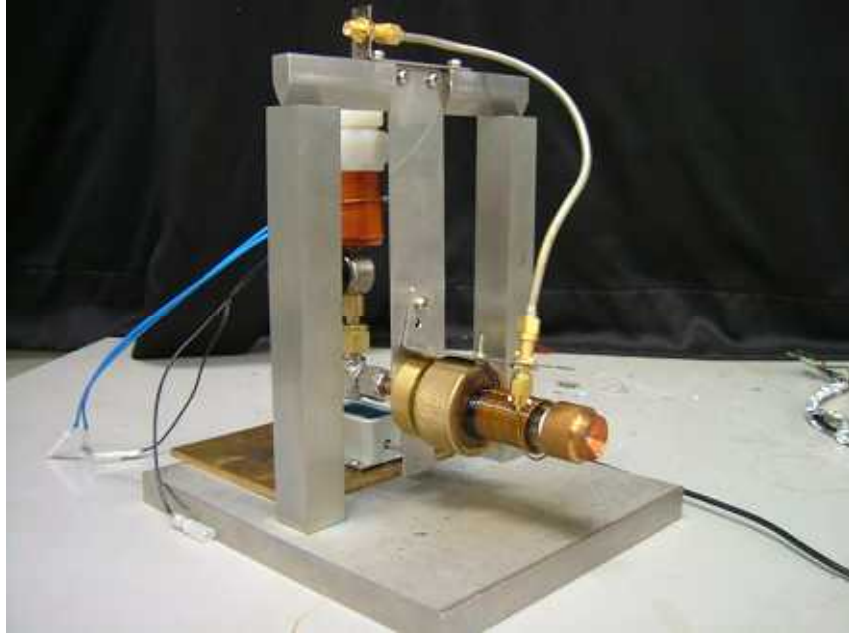


Fig.3.9 スラストスタンド

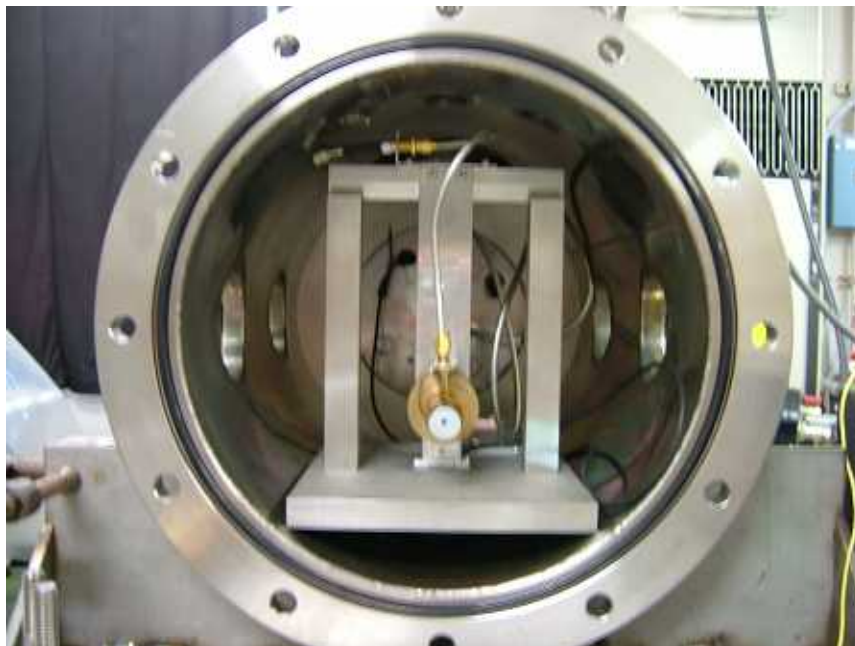


Fig3.10 推力測定時外観

第4章 実験結果

4.1. プラズマ電力伝達効率

4.1.1. 測定結果

4.1.1.1. 巻数依存性

駆動周波数 3 MHz、オリフィス径 1 mm の実験条件の下で行った。実験装置概念図を Fig.4.1 に示す。アンテナの巻数を決定するため、まず巻数を 15、20、25、と変化させプラズマを点火させた。Fig.4.2 にそれぞれの巻数と電力伝達効率の関係を示す。Fig.4.2 より 25 巻の場合が一番効率よく生成していることがわかる。これは、巻数が増加したことにより渦電流が生じる領域が増加することで、密度が増え、プラズマ抵抗も増加するためであると考えられる。このことは、Fig.4.3 に示したプラズマ発光写真の輝度が高くなっていることからわかる。また巻数を 25 巻以上にしてしまうとコンデンサーの可動範囲を超えてしまいマッチングがとれなくなったため、以下の実験ではアンテナの巻数は 25 巻を用いた。

推進剤には水、また性能を比較するため他の研究機関で主に用いられているアルゴンの 2 種類を用いて実験を行った。

投入電力と流量を変化させ計測を行った。Fig.4.4 に 50~200 W におけるアルゴンと水のそれぞれのプラズマ写真を示す。

4.1.1.2. 投入電力依存性

Fig.4.5 に 50~200 W の投入電力に対するそれぞれの推進剤の電力伝達効率を示す。投入電力の増加とともに伝達効率が少しだけ上昇していることがわかる。とくに、水の場合、低投入電力時は、高周波とプラズマは一部容量性結合していたが、電力の増加とともに、プラズマ密度が増加し、誘導性結合の割合が増加したためと考える。このことは、Fig.4.4 に示したプラズマ写真を示すが、50W 時には、コイル部分だけではなく、上流部でも、どちらの作動ガスにおいてもはっきり発光が見られていたが、投入電力の増加に伴い、上流の発光が弱くなり、コイル部での発光輝度が増加していることからわかる。

水がアルゴンより効率が悪いのは、水がアルゴンよりも衝突面積が小さいために、プラズマ抵抗が小さくなり、結果として、水の方がアルゴンに比べカップリングが悪くなる。このため、高周波回路に流れる電流が増加し回路損失が大きくなるからである。実際に、アルゴンと比較して水の回路を流れる電流は 9.2 A とアルゴンの 2 倍程度ある。

4.1.1.3. 圧力依存性

Fig.4.6 に 100 W 時における圧力に対する電力伝達効率を示す。圧力に対して電力伝達効率はほぼ一定である。これは、一般に流量増加に伴い、比投入エンタルピーが減少し、電子がもらうエネルギーが減少するために、衝突係数が減少し、効率は下がるが、流量

が増加したことによりガス密度が増加し、この効果により、衝突係数が減少せず、プラズマ密度がほぼ一定であったためと考えられる。

4.2. エンタルピー変換効率

4.2.1 測定結果

水は 1 mg/sec、アルゴンは 9 mg/sec の流量で 200 W 投入時の較正を行った発光強度分布を Fig.4.7 に示す。水については H 原子のスペクトルである 486、656 nm の発光強度を用いて、アルゴンについては、Ar 原子のスペクトルである 555、560、641、676、696、706、727、738、794、826、840、842、852、856 nm の相対強度法を用いて、電子励起温度を求めた。本研究で用いた H 原子と Ar 原子のターゲットスペクトルの遷移データを表 1 に示す。LTE (Local Thermodynamic Equilibrium) を仮定して、電子励起温度をガス温度とした。LTE が成立していない可能性があるが、圧力から、ある程度の傾向はいえらと考える。

発光分光測定時においてノイズが入ってしまい測定誤差が生じた。また、水の場合有効とみられるスペクトルが 2 点しかなかったためにさらに誤差が大きくなった。

4.2.1.1 投入電力依存性

投入電力に対する変換効率の変化と温度変化を Fig.4.8 に示す。投入電力が増加するにしたがって、変換効率は減少していることがわかる。変換効率が減少した原因として、これは温度が増加し、その結果として、壁面損失および解離によるエネルギー損失が増加したためである。また、投入電力が増加したことにより、放電管壁への熱損失が上昇したこと、輻射熱損失が大きくなったことが挙げられる。また、水の方がアルゴンよりも変換効率が良いのは、アルゴンに比べ温度が低いいため熱損失が少なかったことと、熱損失となるはずのエネルギーが解離に用いられ解離エネルギーとして蓄えられたためと考えられる。ここで温度変化による水のモル分率の変化を Fig.4.10 に、その変化に伴う解離エネルギーに消費される電力を Fig.4.11 に示す。2000~3000 K 付近において水の組成変化が活発となり、解離エネルギーも上昇していることがわかる。

もしくは、LTE の仮定が成り立たず、パワーの増加とともに、LTE に近づくため、電子のエネルギーが重粒子に伝達され、結果として、電子のエネルギーすなわち、電子励起温度が低下するからとも考えられなくもない。

4.2.1.2 プラズマ温度

流量に対するプラズマ温度の変化を Fig.4.9 に示す。流量が増加するに伴いプラズマ温度が上昇していることがわかる。これは、流量が増加したため、プラズマ密度が増加し、その結果、カップリングが容量性から誘導性へと変化していったために温度が増加したと考えられる。

4.3 推進効率

推進効率についてスラストスタンドを用いて計測を行った。推力測定時のプラズマブルームの様子を Fig.4.12 に示す。推進剤には水を用いた。表.2 に推力測定によって得た値を示す。

表.2 推力測定結果

P[W]	\dot{m} [m/s]	Fp[mN]	Fw[mN]	Fto[mN]	Isp[s]	t[%]
100	2.5	3.86	2.29	6.15	251	4.58
100	1.075	1.43	2.17	3.6	341	5.07
100	1.88	2.17	3.97	6.14	333	8.77

ここで、P は投入電力、 \dot{m} は流量、Fp は推進剤流量による推力、Fw はプラズマ点火時の推力、Fto は全推力、Isp は比推力、t は推進効率を表す。

ここで、4.1、4.2 において求めた伝達効率、変換効率を用いることにより、プラズマガスにおけるエネルギーが、どれだけ運動エネルギーに変換され推力となったかがわかる。推進剤に水を用いたときの投入電力 100 W 時のパワーフローを Fig.4.8 に示す。まずプラズマに吸収される際に回路損失が 25 W あることがわかる。次に、水のエンタルピーを上昇させる際に、熱損失、輻射損失、解離エネルギーとして、61 W 消費されている。また推力に変換される際に 14 W の損失があることがわかる。推力に変換される際の損失の原因として、ノズル部分において損失があったことと、凍結流損失が挙げられる。今回の実験において、100W 投入時は、まだ温度が低いために、解離や電離等にエネルギーを費やさなため、それほど凍結流損失は大きくないが、200 W においては非常に大きくなると思われる。残念ながら、200W においてはアンテナが燃えてしまうため、推力の測定は行えなかったが 200 W においては、温度も 3000 K と高く、解離エネルギーとして 30 W 程度消費することになる。一番圧力の高い放電室においても 1.5 kPa と、圧力が低いために、再結合反応が完了しないまま、ノズル出口に達したため、凍結流損失が大きくなると思われる。

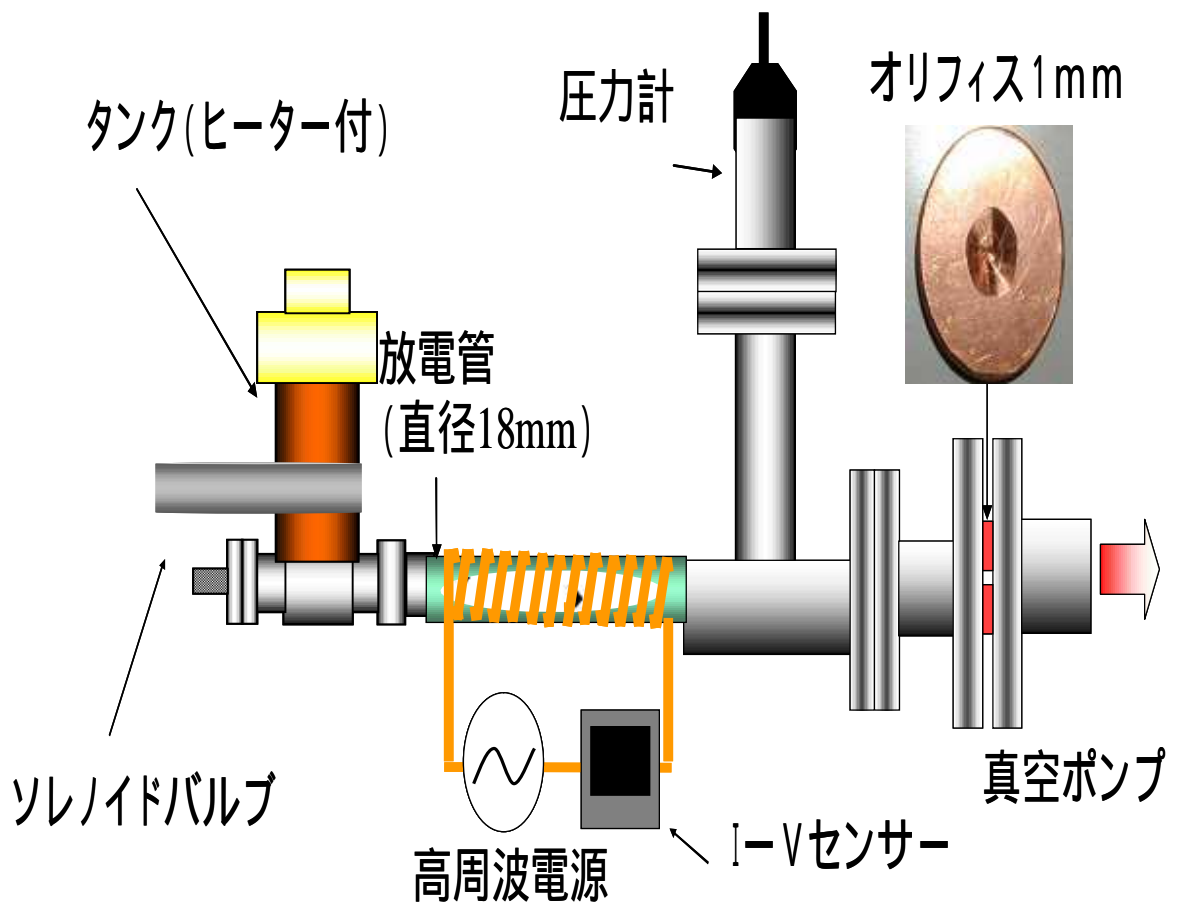


Fig.4.1 実験装置概念図

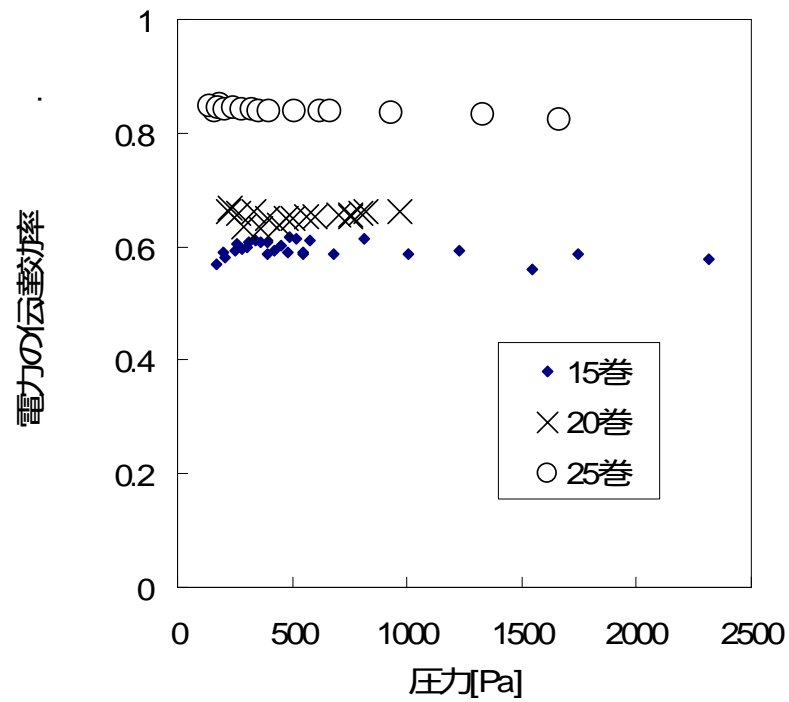


Fig.4.2 電力伝達効率巻数依存性

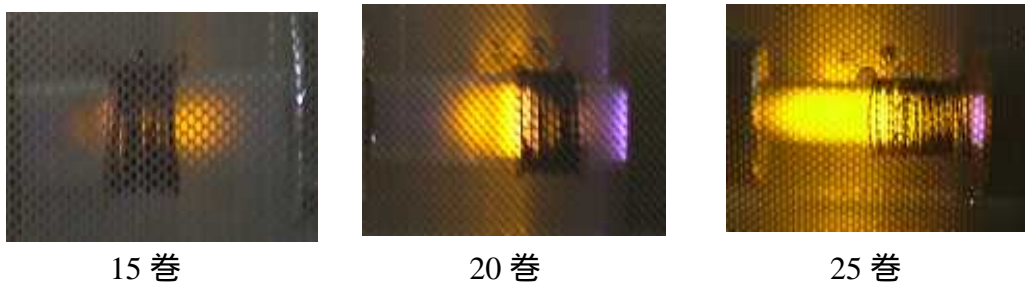
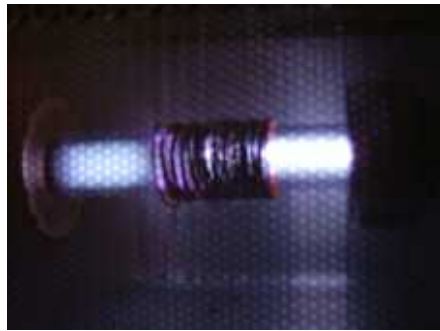


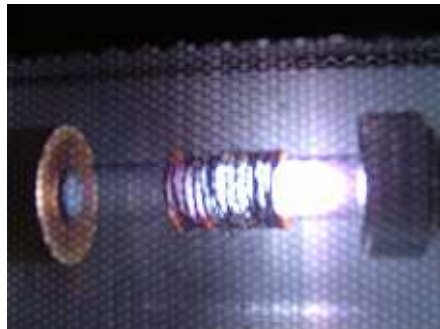
Fig.4.3 巻数変化による水プラズマ写真



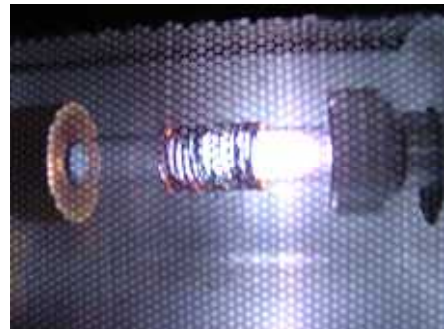
50 W 投入時



150 W 投入時



100 W 投入時



200 W 投入時

Fig.4.4 (a) アルゴンプラズマ写真



50 W 投入時



150 W 投入時



100 W 投入時



200 W 投入時

Fig.4.4 (b) 水プラズマ写真

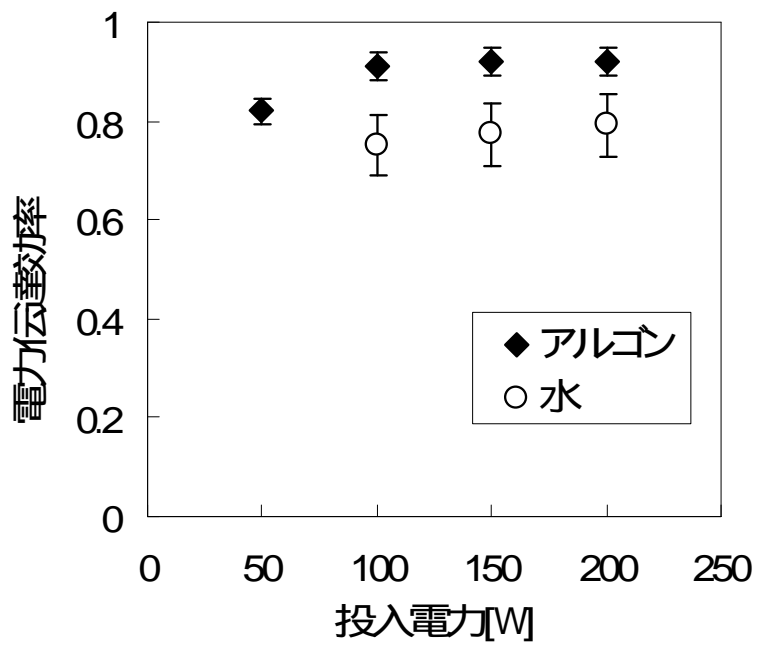


Fig.4.5 投入電力対電力伝達効率

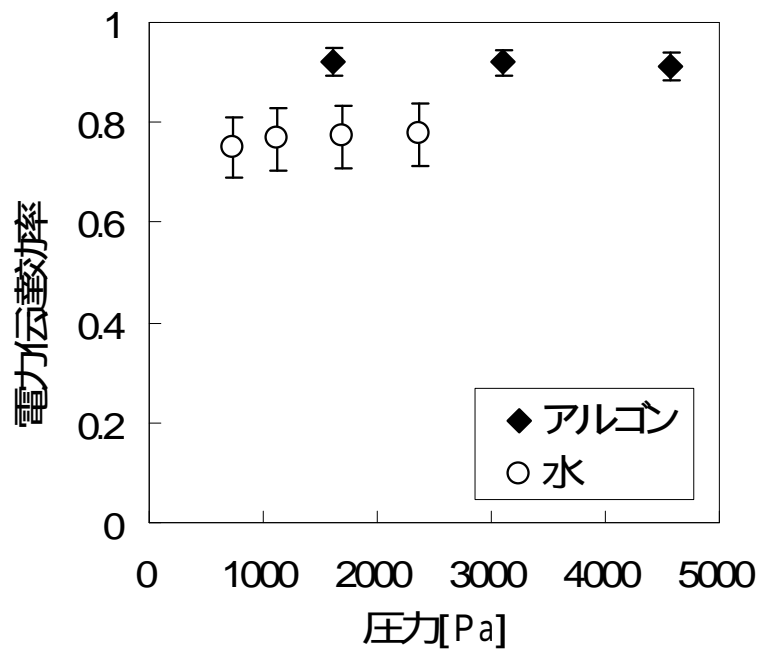


Fig.4.6 圧力対電力伝達効率

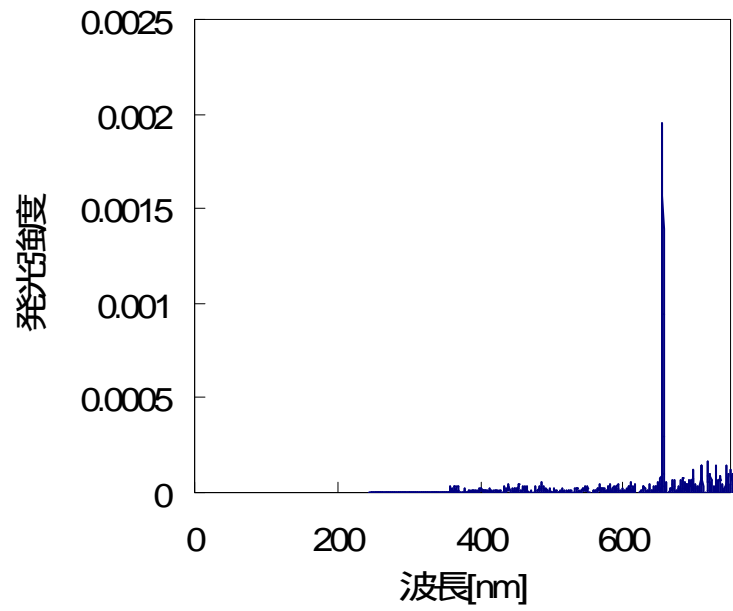


Fig.4.7 (a) 水の発光スペクトル

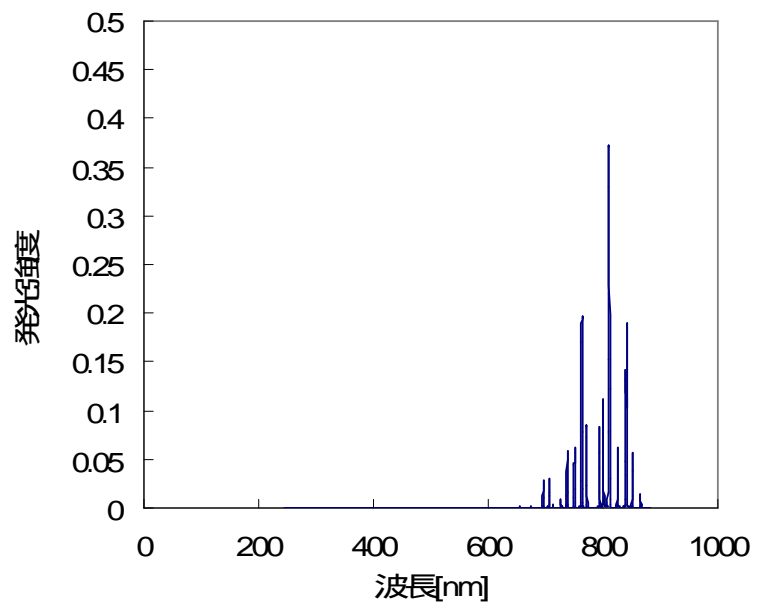


Fig.4.7 (b) アルゴン発光スペクトル

表 1 (a) H 原子ターゲットスペクトルの遷移データ

波長[nm]	A[1/s]	E 1[eV]	E 2[eV]	準位	g	Imm
486.13	2.06E+07	10.1989	12.7485	$2p - 4d$	6	5.06E-05
486.13	3.44E+06	10.1989	12.7485	$2p - 5d$	4	5.06E-05
656.27	2.25E+07	10.1988	12.0875	$2s - 3p$	4	1.95E-03
656.29	6.47E+07	10.1989	12.0875	$2p - 3d$	6	1.95E-03

表 1 (b) Ar 原子ターゲットスペクトルの遷移データ

波長	A[1/s]	E 1[eV]	E 2[eV]	準位	g	Imm
555.9	1.4E+06	12.907	15.14	$3s^23p^5(^2P_{3/2})4p - 3s^23p^5(^2P_{3/2})5d$	5	2.9E-04
560.7	2.2E+06	12.907	15.12	$3s^23p^5(^2P_{3/2})4p - 3s^23p^5(^2P_{3/2})5d$	3	2.6E-04
641.6	1.2E+06	12.907	14.84	$3s^23p^5(^2P_{3/2})4p - 3s^23p^5(^2P_{3/2})6s$	5	4.2E-04
675.3	1.9E+06	12.907	14.74	$3s^23p^5(^2P_{3/2})4p - 3s^23p^5(^2P_{3/2})4d$	5	9.1E-04
696.5	6.4E+06	11.548	13.33	$3s^23p^5(^2P_{3/2})4s - 3s^23p^5(^2P_{1/2})4p$	3	2.8E-02
706.7	3.8E+06	11.548	13.30	$3s^23p^5(^2P_{3/2})4s - 3s^23p^5(^2P_{1/2})4p$	5	3.0E-02
727.3	1.8E+06	11.624	13.33	$3s^23p^5(^2P_{3/2})4s - 3s^23p^5(^2P_{1/2})4p$	3	8.7E-03
738.4	8.5E+06	11.624	13.30	$3s^23p^5(^2P_{3/2})4s - 3s^23p^5(^2P_{1/2})4p$	5	5.9E-02
763.5	2.5E+07	11.548	13.17	$3s^23p^5(^2P_{3/2})4s - 3s^23p^5(^2P_{3/2})4p$	5	2.0E-01
794.8	1.9E+07	11.723	13.28	$3s^23p^5(^2P_{1/2})4s - 3s^23p^5(^2P_{1/2})4p$	3	8.3E-02
826.5	1.5E+07	11.828	13.33	$3s^23p^5(^2P_{1/2})4s - 3s^23p^5(^2P_{1/2})4p$	3	6.3E-02
840.8	2.2E+07	11.828	13.30	$3s^23p^5(^2P_{1/2})4s - 3s^23p^5(^2P_{1/2})4p$	5	1.4E-01
842.5	2.2E+07	11.624	13.09	$3s^23p^5(^2P_{3/2})4s - 3s^23p^5(^2P_{3/2})4p$	5	1.9E-01
852.1	1.4E+07	11.828	13.28	$3s^23p^5(^2P_{1/2})4s - 3s^23p^5(^2P_{1/2})4p$	3	5.7E-02
866.8	2.4E+06	11.723	13.15	$3s^23p^5(^2P_{1/2})4s - 3s^23p^5(^2P_{3/2})4p$	3	1.4E-02

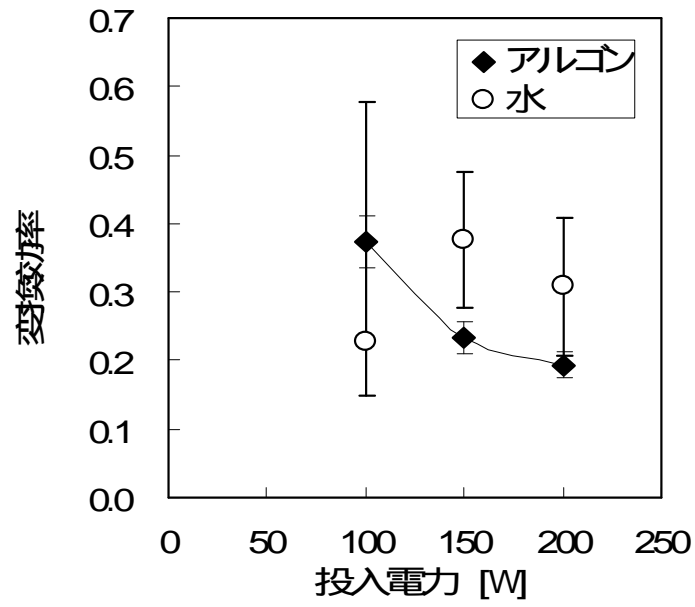


Fig.4.8 (a) 投入電力対変換効率

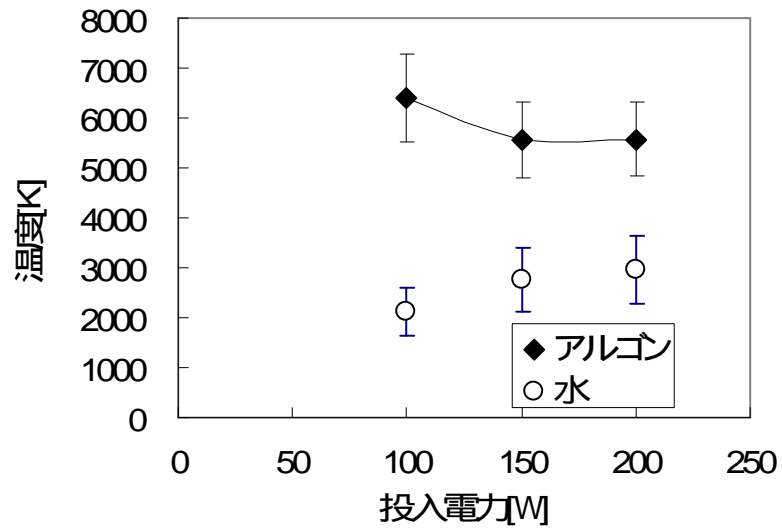


Fig.4.8 (b) 投入電力対温度

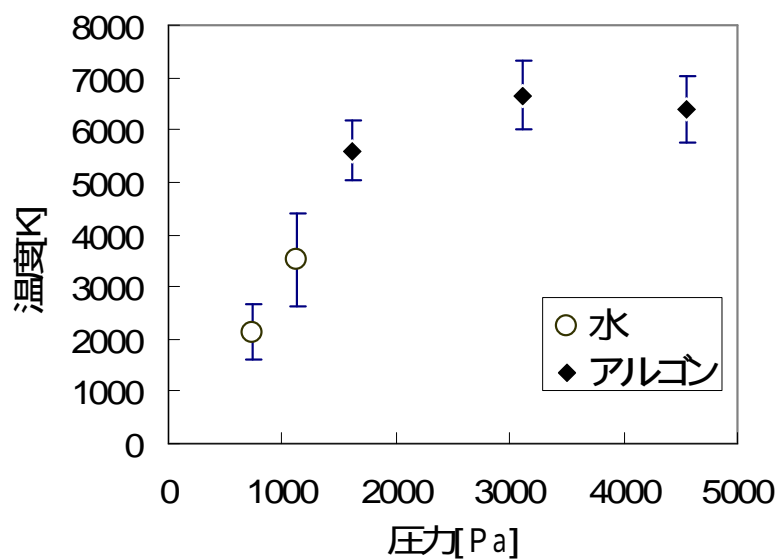


Fig.4.9 圧力対温度

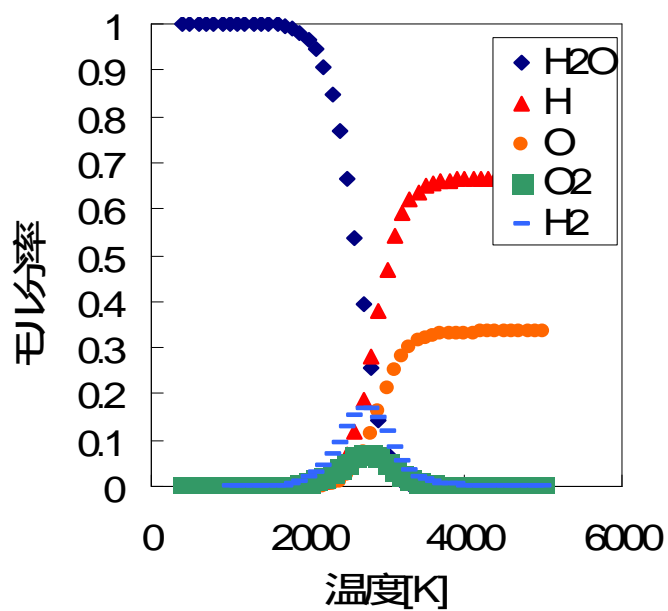


Fig.4.10 水の温度によるモル分率分布

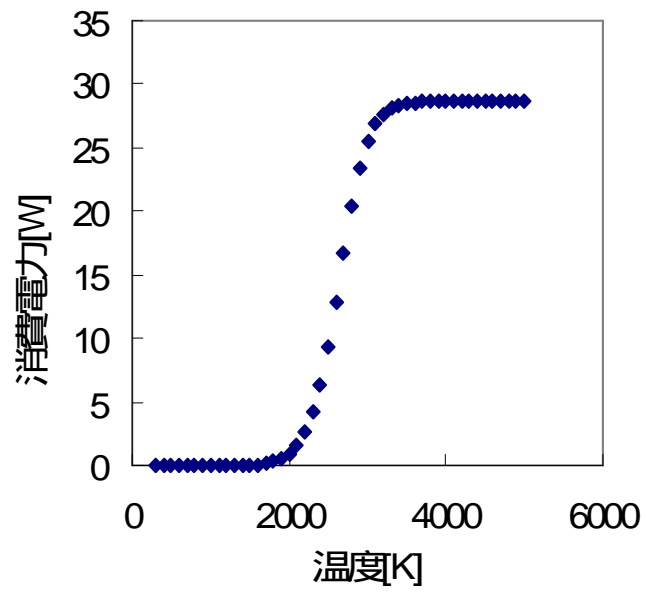


Fig.4.11 温度による解離エネルギー消費電力分布



Fig.4.12 スラストスタンド取り付け時のプラズマ点火前後

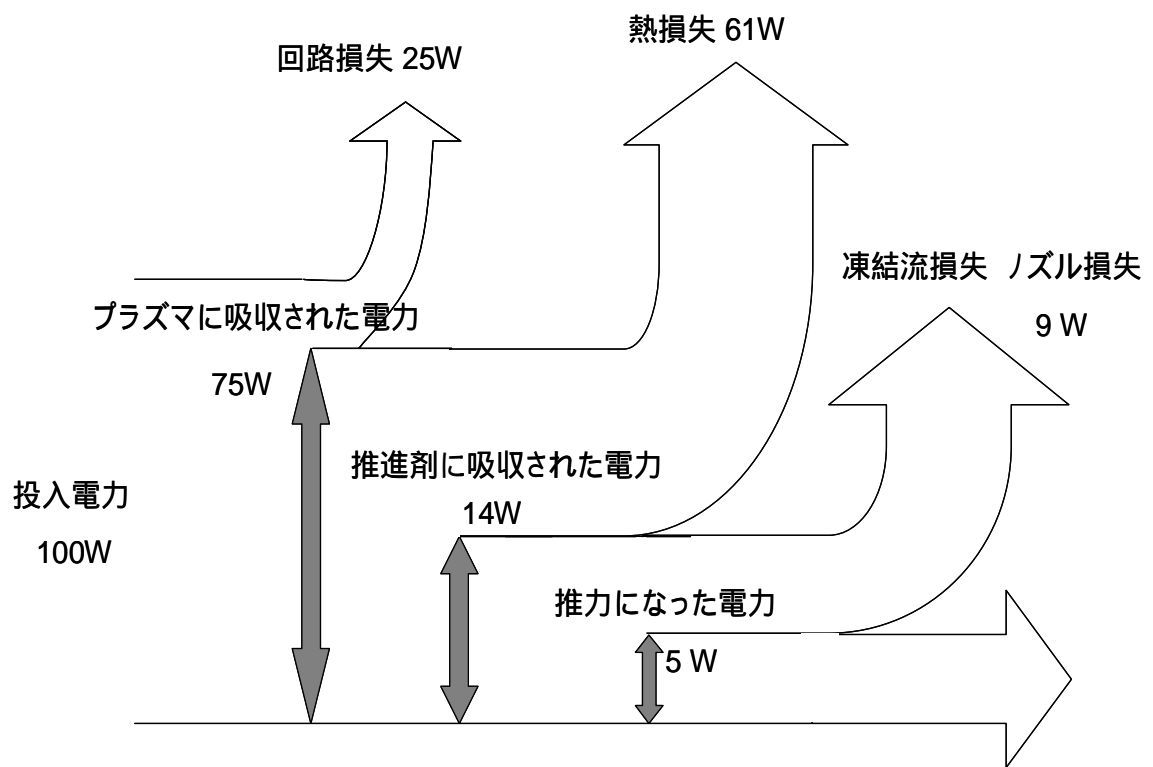


Fig.4.13 水 RF スラスタのパワーフロー

第5章 結論

RF スラスタの性能改善の指針を得るために、RF スラスタのエネルギー収支の解明を行い、以下の結論を得た。

1. エネルギー収支を明らかにするために高周波からプラズマへの電力の伝達効率を測定した。水を作動ガスとして用いた場合、回路損失は 25 W と推定された。また、アルゴンと比較すると、水の方が衝突係数が小さいため、プラズマ密度が低いと考えられ、容量性結合によりプラズマが生成されやすくなっているからである。そのため、回路内で位相差が生じアンテナを流れる電流が増加し、回路損失でアルゴンより 10 W 程度損失が増加した。
2. 比エンタルピーを測定した。熱損失で 61 W、また、水は分子であるので解離エネルギーのために損失が生じた。100 W 投入時では、プラズマ温度が 2000 K 程度であるため、1.5 W 程度の損失であるが、投入電力が増加し、温度が上昇すると解離エネルギーによる損失は増大し、30 W の損失が生じると考えられる。
3. 推力を測定した。凍結流、ノズル損失によって 9 W の電力を消費していたことがわかった。

性能改善を行うため、損失が一番大きかった熱損失である廃熱を再生冷却することにより、格段の改善が見込める。また、回路損失を減少させるために、容量性から誘導性へ結合しやすいよう、放電室形状の変更や、アンテナの最適化を行う必要がある。また、アルゴンやナトリウムなどを水と混ぜることにより、プラズマ密度を増加させることも候補として、挙げられる。

