

136 同位体を取り除いた Xe の電気推進への適用検討

○笠上聡志, 鳥井夏実, 太田知里, 青柳潤一郎, 竹ヶ原春貴 (首都大学東京)

1. 研究背景^{1), 2), 3)}

イオンスラスタは推進剤をプラズマ化させ、プラズマ中のイオンを静電気力によって加速することによって、その反力として推力を得る。プラズマを生成する過程は方法によって差異はあっても、ほぼ電離衝突に基づいて生成している。電離衝突は推進剤の粒子に十分なエネルギーを与える必要があり、そのエネルギーは推進剤に固有の量である。プラズマの生成に要する電力は推力に直接寄与しないので、可能な限り低くすることが望まれる。イオンスラスタの作動には一般的に希ガスが用いられるが、その中でも以下の理由によって特に Xe が用いられている。

- 1) 希ガスの中で電離電圧が低く衝突断面積が大きいので、電離に必要なエネルギーが低い。
- 2) 原子量が大きいので必要以上の比推力の増大を伴わずに推力を高めることができ、また熱速度も小さく放電室内に存在する時間が長くなるので電離せずに排出される割合が少ない。
- 3) 不活性ガスであるので、宇宙機を腐蝕することがない。

他にも Xe は物理学、エレクトロニクス、医療などの分野にわたって広く用いられているが、地球上にはなぜか Xe の存在量が少ない。地球は太陽系の他惑星に比べて明らかに Xe の量が少ないのは地球が形成された際に宇宙に放出されてしまったとする説⁴⁾や地球のマントルに多量に溶けているとする説⁵⁾など研究はされているものの、現状では Xe の量は限られており、その需要も相まって非常に高価である。電気推進による太陽発電衛星の輸送ミッションを検討した際にも、Xe を用いた場合はスラスタの性能は良いものの、Xe が高価であるためにミッションに要するコストは Ar や Kr などの他の希ガスを用いた場合のコストより高くなってしまおうという報告もされている⁶⁾。

近年、東北大学でカムランド禅 (KamLAND-ZEN) というニュートリノの性質を調べるためのプロジェクトがあり、Xe の中でも ¹³⁶Xe だけを 1000 kg 以上用いて実験が行われている^{7), 8)}。それによって、¹³⁶Xe だけが除かれた Xe が Depleted-Xenon (De-Xe) として安価に手に入る可能性があることがわかった。

表 1 に従来用いられてきた自然存在比を有する Xe と De-Xe の同位体の割合を示す。Xe の同位体の中でも最も重い ¹³⁶Xe が除かれたことによって原子量がやや小さくなっている。

表 1 各ガスの諸元

	Molecular mass g/mol	Isotope (Volume fraction)								
		124	126	128	129	130	131	132	134	136
Xe	131.3	0.10	0.09	1.92	26.4	4.07	21.2	26.9	10.4	8.87
De-Xe	131.1	0.09	0.09	2.04	28.8	4.61	23.6	29.5	10.8	0.35

2. 研究目的

本研究では従来の Xe と De-Xe で、誘導結合プラズマ電子源 (Inductively Coupled Plasma Cathode : ICP/C) の性能について比較を行い、De-Xe が従来用いていた Xe と同様に扱うことができることを示す。

3. 実験装置・手順

実験に用いた ICP/C を図 1 に示す。ICP/C は放電室、コイル、イオンコレクタ、およびシールドから成っている。放電室はアルミナ製で内径 20 mm、長さ 40 mm の円筒形状を有しており、この内部でプラズマが生成、維持される。放電室には直径 1.6 mm の銅線を 5 巻きしたコイルが巻かれており、高周波を導入した際に生じる誘導電場によって電子を加速しプラズマを生成、維持する。また、放電室の下流端には直径 1.7 mm のオリフィスが設けられており、このオリフィスによって作動ガスが閉じ込められ、オリフィスを通して電子が引き出される。放電室の壁面に沿うようにイオンコレクタと呼ばれるタングステン製の電極が挿入されており、オリフィスを通じて引き出

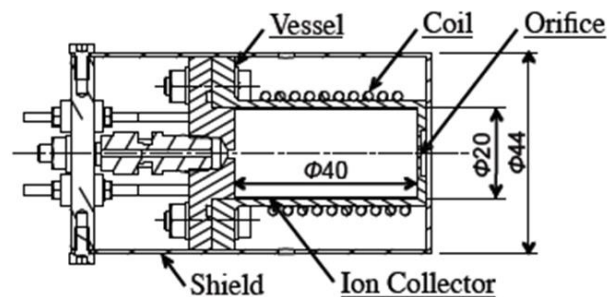


図 1 ICP/C 概要図

された電子と等量のイオンがイオンコレクタで再結合することによって電気的な中性を保っている。またイオンコレクタには開口部が設けられており、渦電流を抑制するとともに、開口部で火花放電が発生することによって ICP/C 単体によるプラズマ点火を可能としている。電界が外部に漏れないように放電室を覆うように SUS 製のシールドが設けられている。

実験コンフィグレーションを図 2 に、実験装置を表 2 に、その諸元を表 3 に示す。実験は直径 1.6 m、長さ 3.2 m の円筒形状を有する真空槽内部で行った。内部はクライオポンプによって排気し、 1.2×10^{-4} Pa の真空状態に保っている。真空槽内部に ICP/C のオリフィスから下流方向に 50 mm の位置に一辺 200 mm の正方形で厚さが 0.5 mm の SUS 製であるアノード電極を設け、アノードに電圧を印加することによって ICP/C から電子を引き出している。その電源には NISTAC 製の NH-120/0MS を用いた。ICP/C にはマスフローコントローラ (MFC 1, MFC 2) を通して作動ガスが供給される。ここで MFC 1 は Aera Japan 製の FC-260J, MFC 2 は HORIBA STEC 製の SEC-Z512KX を用いており、2 SCCM までは高精度である MFC 1, 2 SCCM より多い流量を流す場合は MFC 2 を用いた。ここで, Xe, De-Xe の場合は 1 SCCM ≈ 0.0977 mg/s である。高周波の導入系は高周波電源からマッチング回路を介して ICP/C のコイルに 13.56 MHz の高周波が導入されている。高周波電源は Ion Tech 製の RF5-S を、マッチング回路には同じく Ion Tech 製の AM-5, AMPS-2A を用いた。電源内部で進行波と反射波の電力を測定しており、進行波と反射波の電力差を正味の投入電力 P_{RF} とし、高周波はマッチング回路を通すことによって反射電力をゼロとしている。アノード電極に流れる電子電流をアノード電流 I_a 、イオンコレクタに流れるイオン電流をコレクタ電流 I_c と呼び、それぞれを計測し、ICP/C が正常に動作していることを確認するためアノード電流とコレクタ電流が等しいことを確かめつつ実験を行った。

本実験では電子源の性能の指標として点火特性と電子放出特性について取得し比較を行った。点火特性ではガス流量を変化させ、そのそれぞれにおいてプラズマが点火した最小の高周波電力を取得し、電子放出特性ではガス流量、高周波電力を一定にし、アノード電圧を変化させたときのアノード電流を取得した。

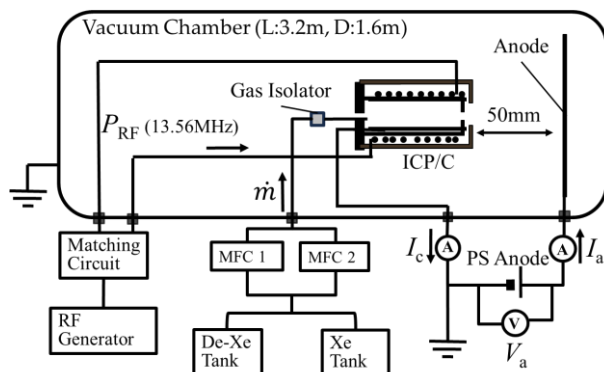


図 2 実験コンフィグレーション

表 2 実験装置一覧

	Company	Model
PS anode	NISTAC	NH-12010MS
RFG	Ion Tech	RF5-S
MB	Ion Tech	AM-5 & AMPS-2A
MFC 1	HORIBA STEC	SEC-Z512KX
MFC 2	Aera Japan	FC-260J

表 3 実験装置諸元

(a) Mass Flow Controller			
	Calibration gas	Control range	Accuracy
MFC 1	Xenon	0.04 - 2.00 SCCM	± 0.01 SCCM
MFC 2	Xenon	0.5 - 10.0 SCCM	± 0.2 SCCM

(b) Radio Frequency Generator			
	Frequency	Output Power	Regulation mode
RFG	13.56 MHz	0 - 500 W	CW

(c) Matching Box			
	Series capacitance	Parallel capacitance	Regulation mode
MB	0 - 500 pF	0 - 500 W	CW

(d) DC Power Supply of Anode Plate			
	Output Voltage	Output Current	Regulation mode
PS anode	0 - 120 V	0 - 1 A	CV, CC

4. 結果・考察

図 3 に Xe, De-Xe のそれぞれで作動させた場合に得られた点火特性を示す。一見すると De-Xe が点火に要する電力が低いように見えるが、点火特性は特に壁面の状態によって影響を受ける。その影響によってエラーバーが大きくなっているため有意な差とは言い切れない。しかし、点火に要する電力が上昇し始める流量、および低流量側でエラーバーが大きくなるといった傾向は同一のものを示した。

次に、図 4 に電子放出特性を示す。こちらは Xe と

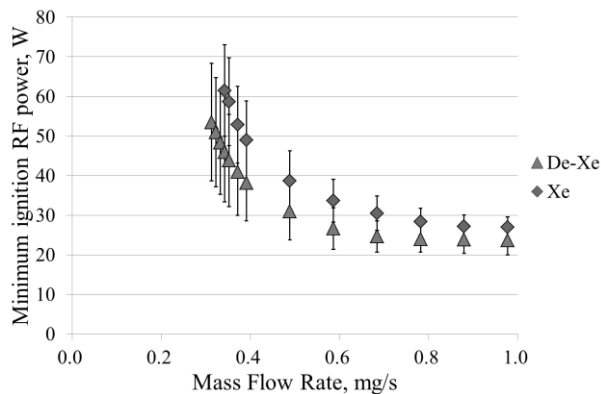


図3 点火特性

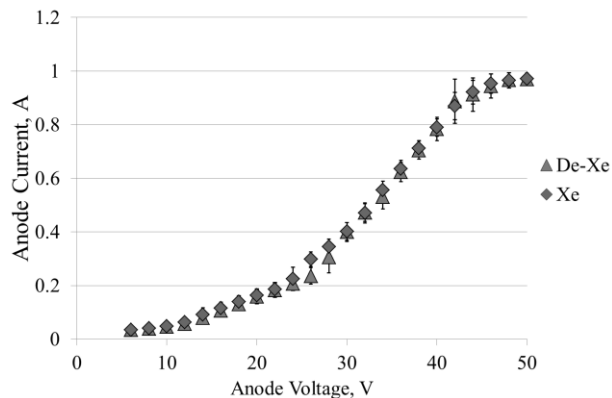


図4 電子放出特性

De-Xe で一致する結果が得られ、これによって Xe と De-Xe は電子源の作動においては差が見られないと判断できる。

また、点火特性が同一の傾向を示したことから Xe と De-Xe の物性は同じであるとする、De-Xe をスラスタに適用した場合、推力は Xe で作動させた場合より分子量の差分だけ減少するが、それは割合にして 0.2%、推進効率も推力の 2 乗に比例するので 0.4% と非常に小さい。したがって、スラスタに対しても同様に用いることができる。

5. 結論

De-Xe が従来用いられてきた Xe と同様に電気推進に用いられると示すことを目的として ICP/C を用いて実験を行い、点火特性と電子放出特性を取得、比較することによって以下の結論を得た。

- 1) 電子源の作動においては Xe と De-Xe では有意な差が見られなかった。
- 2) 推力を発生することを考えてもその差は非常に小さい。

以上から、電気推進に対して従来用いてきた Xe と同様に De-Xe を用いることが可能である。

参考文献

- 1) 栗木恭一, 荒川義博, “電気推進ロケット入門,” 東京大学出版会, 2003
- 2) 荒川義博, 國中均, 中山宜典, 西山和考, “イオンエンジンによる動力航行,” コロナ社, 2006
- 3) Dan M, Goebel and Ira katz, “Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thruster,” JPL Space Science Technology Series, John Wiley & Sons, 2008
- 4) Svyatoslav S. Shcheka & Hans Keppler, “The origin of the terrestrial noble-gas signature,” Nature, Vol. 490, pp. 531-534, 2012
- 5) Qiang Zhu, Daniel Y. Jung, Artem R. Oganov, Colin W. Glass, Carlo Gatti & Andriy O. Lyakhov, “Stability of xenon oxides at high pressures,” Nature Chemistry, Vol. 5, pp. 61-65, 2013
- 6) 中野正勝, 伊藤裕樹, 小紫公也, “電気推進を用いた太陽発電衛星の輸送ミッション,” 第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2012-4194, 2012
- 7) 井上邦雄, “カムランド禅,” IPMU News, No. 16, pp. 36-41, 2011
- 8) 丸藤祐仁, 井上邦雄, “KamLAND-ZEN 実験,” 高エネルギーニューズ, Vol. 30, pp. 198-209, 2011