

20cm マイクロ波放電式イオンエンジン

西山 和孝*

20-cm Diameter Microwave Discharge Ion Engine

By

Kazutaka NISHIYAMA*

Abstract: In order to advance the technology of electron cyclotron resonance (ECR) microwave discharge ion thrusters known as the “ μ (mu)” family, we have been developing a 20-cm diameter thruster μ 20 after successful development and flight experiences of an asteroid explorer “Hayabusa” employing four 10-cm diameter thrusters μ 10. In contrast to the μ 10 whose ion beam current was saturated to 150 mA at higher microwave powers than 30 W, the μ 20 can generate 500 mA ion beam current with 100 W microwave power and 1100 – 1300 V acceleration voltage, yielding beam ion production cost (discharge power per unit beam current) of 200 W/A and thrust of 27 mN thanks to enlargement of the discharge chamber and moderate plasma density below cutoff. The μ 20 will be applied to deep space missions with larger delta-v and more massive spacecraft than Hayabusa.

Key words : Microwave Discharge, Electron Cyclotron Resonance, Ion Engine

1.1. はじめに

我々は「はやぶさ」以降のさらに大規模な小天体探査機への適用を想定して、「はやぶさ」搭載イオンエンジン μ 10 のビーム口径を 2 倍にした μ 20 の開発を 2000 年から行ってきた。この μ 20 は直径 20 cm、深さ 3 cm の極めて薄型のフラットな放電室内部に、電子サイクロトロン共鳴(ECR)放電を周波数 4.25 GHz のマイクロ波を用いて起こし、静電加速に適した密度のキセノンプラズマを生成する。表 1 に μ 20 の目標性能とこれまでに達成した性能とを示す。磁気回路やガス供給方法の工夫により、目標とする 500 mA のイオンビーム生成を 100 W 以下のマイクロ波電力で実現するという目標は早期に達成された。しかし、そのために必要なキセノンガスの流量が 10–11 SCCM と高いため、推進剤利用効率が 70 %以下にとどまっており、この点が最後の要調整項目であったが、プラズマ密度分布に合わせて孔径を縮小したアクセルグリッドにより改善できた。2008 年時点では、高圧絶縁破壊頻度を極力抑えた安定性重視の電極間隔設定で長時間運転を開始しているが、推進剤利用効率は 74 % と許容可能な値になっている。

この μ 20 イオンエンジンの搭載を想定した近い将来のミッションとして、表 2 に掲げる小惑星探査機「マルコ・ポーロ」と黄道面脱出型太陽観測衛星「Solar-C」の二つが検討されている。まだ概念検討段階のため、いずれの情報も確定的なものではないが、大きなトータルインパルスが必要とされることは間違いない。Solar-C では、現在小惑星ベスタに向かって飛行中の Dawn 探査機の 425 kg にせまるキセノン搭載量が要求されている。 μ 20 のビーム電流密度は μ 10 のそれと同程度であるため、20000 時間に及ぶ地上耐久試験での μ 10 アクセルグリッド損耗状況からの類推で μ 20 でもグリッドの 25000 時間の耐久性は十分確保できると考えられる。さらにリスクを低減するため、アクセル電圧の大きさの低減に努めてきており、従来の μ 10 と同じであった -350 V から -150 V に変更している。イオン衝撃によるスパッタリング率が半分以下に減少することから、グリッドの延命効果が非常に大きいと期待される。

* JAXA Space Exploration Center (JSPEC)/JAXA

表 1 $\mu 20$ の目標性能と達成性能

	$\mu 10$	$\mu 20$ (当初目標)	$\mu 20$ (2008年)
ビーム電圧 (V)	1500	1200	1300
ビーム電流 (mA)	140	500	540
アクセル電圧 (V)	-350	-350	-150
マイクロ波電力 (W)	32	100	100
イオン生成コスト (W/A)	230	200	185
比推力 (s)(中和器含む)	3000	2800	2800
推力	8.5	27	30
システム電力 (W)	350	900	1050
推力電力比 (mN/kW)	22	30	28
目標寿命 (h)	20000(地上実証済み)	20000	25000
推進剤利用効率	0.85	0.8	0.74

表 2 $\mu 20$ を想定して検討中のミッションと「はやぶさ」の比較

	はやぶさ	マルコ・ポーロ	Solar-C (Plan A)
目標天体・軌道	1989SF36(イトカワ)への往復 0.8~1.7 AU	Wilson-Harrington への往復 ターゲットの小天体は他にも複数候補あり	軌道傾斜角最大 45 度 軌道遷移中の太陽距離は 0.7~1.3 AU
ミッション時期 (年)	2003~2007(当初予定, その後 2010 まで帰還延期)	2018~2026, 2017~2022, 2016~2023 など	2016~2022
イオンエンジン搭載台数 (最大同時運転台数+予備)	$\mu 10 \times (3+1)$	$\mu 20 \times (4+1)$	$\mu 20 \times (4+2)$
キセノン搭載量 (kg)	65	300	400
太陽電池発生電力 (kW@1AU)	2.5	9 他に 10, 5 など複数案	6
1 台あたり運転時間 (h)	13000	20000	25000

1.2. システム構成

図 1 はマイクロ波放電型イオンエンジンの構成を示したものである。ビーム電圧分の正の高電位とわずかに負の電位とに位置する二つのプラズマ発生装置（イオン源と中和器）があり、それぞれが DC ブロックと呼ばれるマイクロ波部品を介して共通のマイクロ波源からプラズマ生成用のエネルギーの供給を受ける。このように 1 台のマイクロ波電源で 2 つのプラズマを原理的には生成できるのが、 $\mu 20$ の場合はイオン源が必要とする 100 W は既存の宇宙用進行波管増幅器で供給できるほぼ上限の電力であるため、分岐して中和器の放電電力をまかなう余力がない。したがって、イオン源と中和器とで独立した増幅器を搭載することを検討している。「はやぶさ」イオンエンジンシステムの方式を踏襲して、3 枚グリッド構成、中和器を衛星電位に対して負にバイアスする。このため、スクリーン、アクセル、中和器（ディセル共用）の 3 つの直流電源をパワープロセッシングユニットに内蔵することになる。推進剤供給系についても、「はやぶさ」同様のプレナムと流体抵抗素子を用いたバンバン流量制御方式を基本に考えているが、中和器流量制御方式について「はやぶさ」と同様にイオン源に対して一定比率の供給が適当かどうか検討を行っているところであり、結論はまだ出ていない。2 つの将来ミッションで、ほぼ同様のサブシステム構成になると思われるが、2008 年度中に衛星メーカーを交えて両ミッションでなるべく共通化するようにサブシステム検討を予定している。

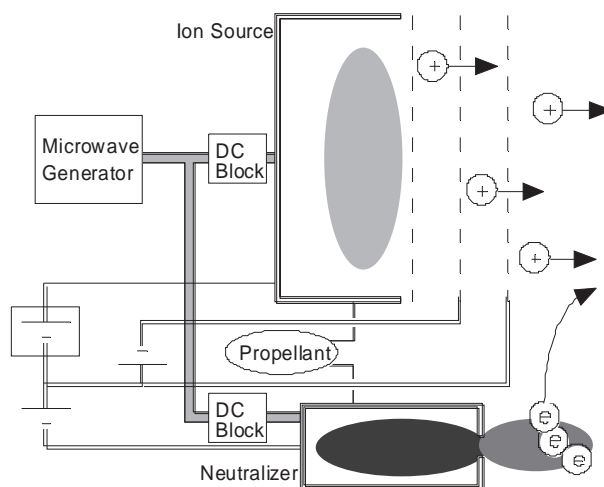


図 1 マイクロ波放電型イオンエンジンの構成図

1.3. イオン源と中和器

図 2 に口径 20cm のイオン源の断面図，ラジエーター付きの外観写真，最内周 1 列のみ SmCo 磁石で残りは耐熱温度 190℃ の NdFeB 磁石の配列の写真を示す。磁石とガス供給口の独特な配列はイオン生成コストと推進剤利用効率を最適化するためのものである。真空チャンバーをまったく冷却しない状態では，4 時間近くかけてラジエーターの温度が 90℃ 弱の熱平衡状態に落ち着く。このときの NdFeB 磁石の根元の温度が 130℃，放電室の最高温度点である中央のアンテナコネクタの温度が 170℃ である。最内周磁石を SmCo にしたのは耐熱性の不安もあるが，これを NdFeB にすると内側のプラズマが濃くなりすぎて全体としては 2 割近いビーム電流減少を招いたためでもある。

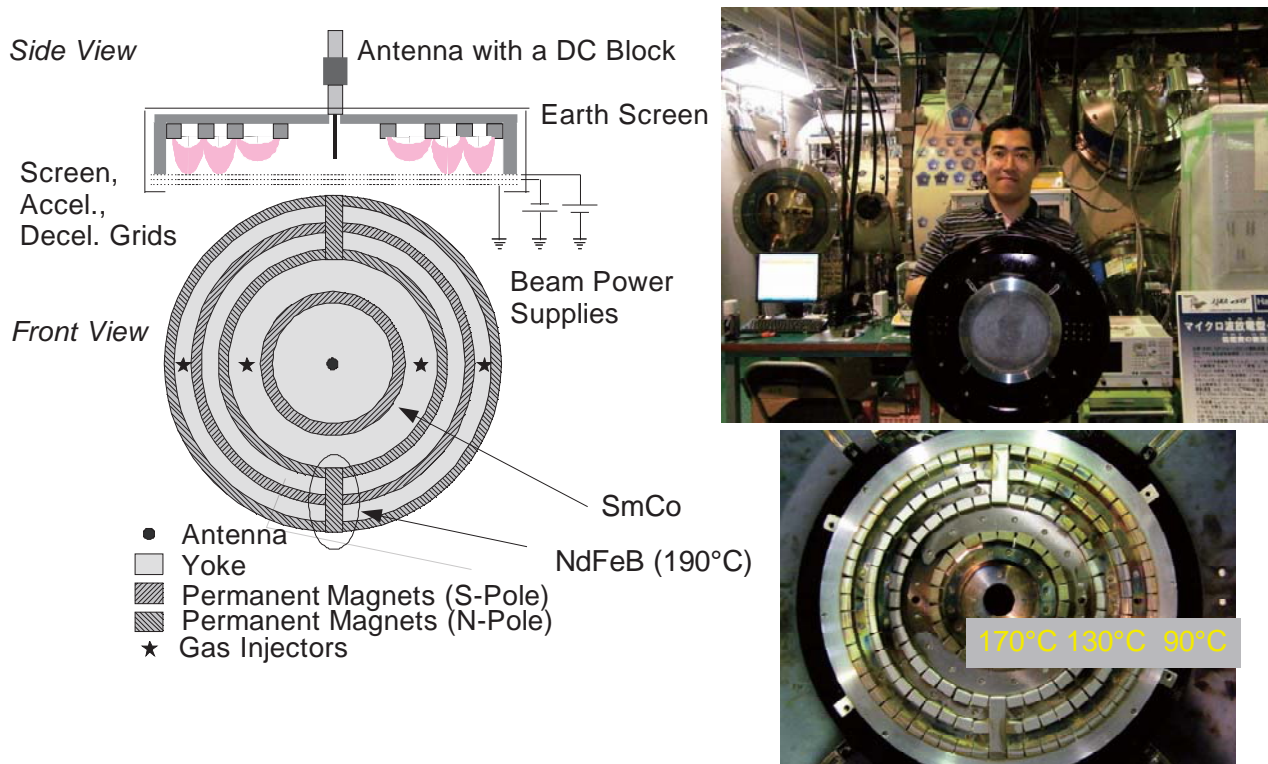


図 2 イオン源の断面図と外観および磁石配列

μ10 イオンエンジン用に開発された中和器をほぼそのままに，磁場の強度やオリフィス径を微調整し，流量と

マイクロ波電力の増大により、 $\mu 20$ イオンエンジン用の中和器を開発した。図 3 のようにイオン源の側面方向から電子を供給する配置で約 100 時間の運転を行い、イオン源の 1/10 以下の流量と 1/4 のマイクロ波電力でノミナル動作点のビーム電流 500 mA の運転が可能であることを実証した。2008 年度中にイオン源と同じラジエーター上に中和器を取り付ける際の位置・角度などの確定作業を実施予定である。

図 3 真空チャンバー側面に取り付けた中和器によるイオン源との噛み合わせ試験

1.4. 寿命評価のための長時間運転

2008 年 1 月より、イオン源単体での昼夜連続の長時間運転を開始している。この試験の目的は、開口率を極限まで小さくしたアクセルグリッドのイオンビーム自身による最適加工（ミリング）と、エンジン設計の未知の問題点の洗い出しである。当初の約 900 時間は、ノミナル推力 27 mN に対応する 500 mA のビーム電流で、続く 1000 時間は最小推力 13 mN に対応する 250 mA のビーム電流で運転し、パービアンスリミットとクロスオーバーリミットの両方のイオン加工の結果をフラットベッドスキャナーによる形状解析で確認した。その後、累積作動時間にして 2300 時間までは、徐々にビーム電流を 540 mA 間で増加させながら運転してきている。途中、数回の真空中マイクロ波伝送路の故障を経験しているが、何種類かのケーブル・コネクタ類を評価して、大電力でも信頼のおける部品選定を進めてきた。ケーブルに関しては焼損しやすいテフロンを廃したセラミックスを誘電体とする日本の衛星でも実績のあるものが見つかった。DC ブロックについてもテフロンをなくすべく改良を進めているところである。

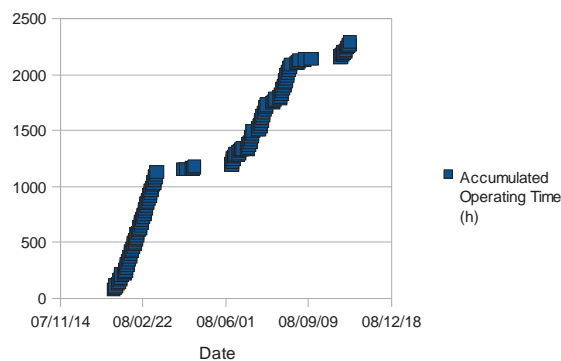


図 4 イオン源の長時間運転累積作動時間履歴