

th Symp. on Fusion Eng. 1, 103 (1991).

- [8] 武藤 敬, 熊沢隆平, 関 哲夫, 渡利徹夫, 他: プラズマ・核融合学会誌 **77**, 495 (2001).
- [9] T. Mutoh, R. Kumazawa, T. Seki *et al.*, J. Plasma Fusion Res. SERIES1, 334 (1998).
- [10] R. Kumazawa, T. Mutoh, T. Seki *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **70**, 2665 (1999).
- [11] R. Kumazawa, T. Mutoh, T. Seki, K. Saito *et al.*, 13th Top. Conf., AIP Conf. Proc. **485**, 441 (1999).
- [12] K. Saito, R. Kumazawa, T. Mutoh *et al.*, Proc. European

Physical Soc. Conf. on Plasma Phys. **29C**, P4.107 (2005).

- [13] K. Saito, Y. Torii, R. Kumazawa, T. Mutoh *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 2015 (2001).
- [14] K. Saito, R. Kumazawa, C. Takahashi, M. Yokota *et al.*, submitted to J. Korean Phys. Soc.
- [15] 熊谷寛夫, 富永五郎, 他: 真空の物理と応用 (裳華房, 1970).
- [16] S. Moriyama, H. Kimura, M. Saigusa, T. Fujii *et al.*, Fusion Eng. Des. **39**, 135 (1998).



むとう たかし
武藤 敬

京都大学卒, 京都大学ヘリオトロン核融合研究センターにてヘリオトロン装置のICRF加熱を研究, 平成元年から核融合科学研究所に移り, LHDのICRF加熱を担当し, 特に定常加熱用の機器開発とプラズマ加熱を研究. 趣味は, 結果が予想と微妙にズレるプラズマ実験. 他にはテニス, ゴルフ, 囲碁等で, 自分では器用な方だと思っているが, もっと風変わりな役に立つ趣味はないかと探している.



さいとう けんじ
斎藤 健二

2002年名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻博士後期課程修了. 博士(工学). 自然科学研究機構 核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部 高周波加熱プラズマ研究系助手. 大電力ICRF加熱による長時間運転, ICRF加熱によって生成される高エネルギー粒子の研究などに取り組んでいる.

メガヘルツ帯を用いたプラズマロケット推進

安藤 晃 (東北大工)

電気推進機は, 燃料をプラズマ化させ高速で噴出することで従来の化学推進ロケットでは実現できなかった高速なガス噴出速度を得ることができるため, 重力の影響の少ない宇宙空間での長期ミッション用主推進機として精力的に研究開発が進められている[1, 2]. 電気推進機には様々な種類があり, 軌道遷移や惑星探査用主エンジンなど多様な運行計画に応じた利用が広がっている.

惑星間航行など長期間にわたるロケットの運航を考えた場合, ロケット性能として推力と比推力を自由に制御できる推進機が有用である. 2020年代の有人火星探査を目指した高性能の比推力可変電気推進機VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket) がNASAを中心に提案され注目されている[3]. 概念図をFig 1に示すが, このシステムでは, ヘリコン波を用いて生成されたプラズマ中のイオンを, 軸磁場中でのイオンサイクロトロン加熱によって高周波加熱し, 下流部に形成した発散型磁気ノズルによってその熱エネルギーを推力に変換する. この手法によれば, プラズマを生成する電力と加熱する電力を制御することで, 噴出されるイオンの密度と流速を独立に変化させることができる. すなわち推力と比推力を自由に制御することができ, ミッションの状況に応じた様々なエンジン動作が実現可能となる.

このシステムを実現するには高周波によるプラズマ流

の生成と加熱, また磁気ノズルによるプラズマ流の加速と離脱に関する技術を確立することが求められている. 現在, このVASIMR型のプラズマ推進機の開発はNASAの宇宙飛行士であったChang Diazらのグループと東北大学のHITOP (HIGH density TOhoku Plasma)グループが実験を進めている. HITOPグループでは, 直線型磁場発生装置HITOPにMPDA (Magneto-Plasma-Dynamic Arcjet)をプラズマ源として設置し, 高速プラズマ流のイオン加熱と磁気ノズル加速を複合させた比推力の制御を世界で初めて実証した. プラズマ流の波動加

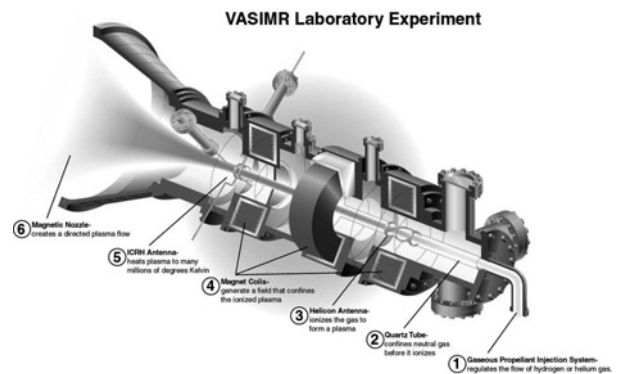


Fig. 1 VASIMR 概略図 (NASA JSC)

熱では核融合研究での研究をもとに、加熱部を短時間に通過する間に効率よく加熱をする手法を見出し、ドップラー効果など流れに起因する共鳴現象の変化なども明らかにした。さらに磁場中を流れる高速プラズマ流の挙動を調べ、発散型磁気ノズルを用いることで、高周波印加によって加熱され増加した熱エネルギーを流れのエネルギーへと変換させる研究を行っている。

このように電気推進機の研究には、核融合開発によって培われてきた多彩なプラズマ生成・加熱・制御・計測技術が大変有用であり、今後、宇宙開発と核融合開発と

の協力体制を構築することで両者の技術開発をますます発展させることが求められている。

参考文献

- [1] 吉川孝雄, 荒川義博 他: 小特集「次世代の宇宙電気推進技術」プラズマ・核融合学会誌 77, 763 (2001).
- [2] 栗木恭一, 荒川義博 編: 電気推進ロケット入門 (東京大学出版会, 2003).
- [3] F.R.ChangDiaz, Scientific American 283, 90 (2000).

小型 RF ヘリコン波プラズマ源によるプラズマ推進機の研究

都木恭一郎 (東京農工大共生科学)

近年、電気推進機は、米国の惑星間探査機 Deep Space 1, 日本の小惑星サンプルリターン「はやぶさ」での活躍が報道されるようになってにわかに活気を呈してきた。化学推進のように瞬発力はないが(30 mN/kW 程度)、燃費に優れており(比推力 3,000 s 程度)、無重力で真空の宇宙空間を飛翔する宇宙機なら、時間をかけて加速することで推進剤の大幅な節約が可能となる。しかし、電気推進は推進剤をプラズマにしてから加速するため、必ず放電が必要である。アーク放電やグロー放電を行えば電極が消耗し、その消耗限界が電気推進機の寿命を先に決定してしまう。そこで、プラズマの生成を無電極放電で行い、さらに加速をも無電極で行えば、理屈上は損耗する箇所のない、したがって電極寿命の制限を受けない電気推進機が可能なはずである。その一つとして RF ヘリコン源によるプラズマ推進機が考えられる。現在の設計は、内径 2.5 cm のガラス管に RF アンテナを巻き、数十 MHz 帯の ICP モードからヘリコンモードで 10^{13} cm^{-3} のプラズマを生成する。その下流に巻いた加速コイルに MHz 帯の鋸歯状電流を流すことで、プラズマ中への電磁界の浸透時間(skin time)の違いを利用する。つまり、減速の効果はプラズマ表面にとどめ、加速の効果はバルクのプラズマに与えようと言うものである。東京農工大学では、このようなパルス繰り返しの電磁加速、およびガラス管まわりに回転電場を印加する連続的な電磁加速法が実験されている。

ヘリコン波を利用したプラズマ生成は、これまでのところ大電力で高密度のプラズマを造ることに主眼が置かれてきたが、電気推進機への応用としては加速まで含めて何十 kW もの電力を宇宙空間で得るのがむずかしいこ

とから、必然的にまずは小型を対象とせねばならない。ヘリコン波プラズマ源はウクライナではすでに静電加速型のイオンエンジンのイオン源として開発されており、日本でも小型の電子源である中和器としての研究され始めている。また、比較的大型のものとして、米国の VA-SIMR がそのプラズマ源をヘリコン波励起によって作動させている。しかし、そのいずれもがプラズマ生成に RF アンテナを使用しているだけで、プラズマ加速に RF アンテナを使用した非接触のプラズマ加速をめざした例は少ない。上記の東京農工大学の電磁加速による挑戦、米国プリンストン大学およびウクライナ核物理学研での静電加速による挑戦があるが、いずれも原理検証の段階であり、工学的にどれほどの効率を得られるかはこれからの課題と言える。

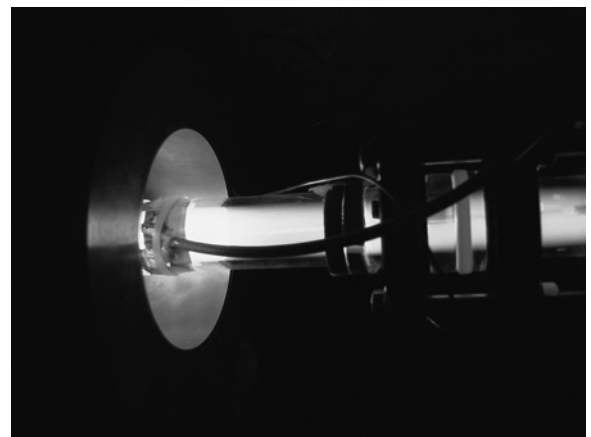


Fig. 1 ヘリコン源による Ar プラズマ生成 (RF = 500 W @ 27.12 MHz).