原子力電気推進システムの提案

中島秀紀＊+，永田英隆＊，三好　誠＊，小谷優介＊，山本直嗣＊，梶村好宏＊

Proposal of Nuclear Electric Propulsion System: Twin Star

By

Hideki NAKASHIMA＊+, Hidetaka NAGATA＊, Makoto MIYOSHI＊, Yusuke KOTANI＊,
Naoji YAMAMOTO＊, Yoshihiro KAJIMURA＊

Abstract : We here propose a nuclear electric propulsion system that adopts a small nuclear reactor, MHD energy conversion system, ceramic laser, and magnetic nozzles. The present status of the system design is presented along with the future plan. The system is a combination of technologies that Japan has been playing the leading role in their development.

Key Words : space nuclear reactor, MHD energy conversion, space laser, magnetic nozzle

1. はじめに

本研究の目的は，宇宙用小型原子炉を搭載し，日本独自の技術を装備した次世代の原子力利用電気推進システム（図1）を設計し，その課題を明確にすることである．ミッションとしては，木星の^{3}He（理想的な核融合燃料）資源の探査を考える．

宇宙探査機「はやぶさ」（図2）は，幾多の試練と戦い，2005年11月に，小惑星「イトカワ」に世界で初めて舞降り，そして飛び立つと言う快挙を成し遂げた．この探査機には，メインエンジンとして，世界に先駆けて開発された出力350W の「マイクロ波放電型イオンエンジン」が４台搭載され，十分に性能を発揮し，快挙達成を支えた．このエンジンの動力は太陽電池から得た電力であるが，次に期待される木星探査において，木星は太陽から離れているため，太陽電池では十分な電力を得ることが困難である．従って，太陽からの距離に依存しない電源が求められている．

一方，将来の宇宙推進システムとしては，高い比推力と比出力を同時に達成可能な，核融合ロケットが有望視されている．代表例であるレーザー核融合ロケット「VISTA」（図3）では, 150MW の電源が想定されている［*1*］．この型のロケットについては，従来から，申請者が研究を行い，推進のメカニズムを解明した［*2*］．しかし，実用化の目処がたっていない．

このような状況下で，その中間の出力である原子炉を搭載した推進システム（いわゆる原子力ロケット）が，米国，ロシア等で，1950年代から研究が行われて，技術･知見の蓄積が計られて来た［*3*］．さらに，2004年には，原子炉を電源とした原子力電気推進システム計画，JIMO（Jupiter Icy Moon Orbiter）が計画された．原子炉電源は，太陽からの距離に依存しない安定な電源であるためである．一方，日本では，まだ宇宙推進用原子炉を本格的に

＊　九州大学 総合理工学府 先端エネルギー理工学専攻
+nakasima@aees.kyushu-u.ac.jp

This document is provided by JAXA.

検討した例はない．しかしながら，日本が持つ原子力の技術は世界的に見ても極めて高く，その蓄積された技術力を生かさない手は無い．まずは，この研究分野を立ち上げる．すなわち，本研究を契機として，日本で本研究分野の展開を計る．

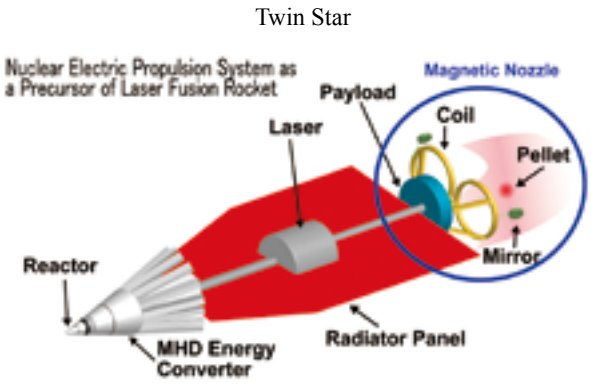


図 1　ここで提案する原子力電気推進システム



図 2　イトカワを目指す「はやぶさ」



図 3　VISTA 概念図

2.　研究方法

まず，独自の原子力電気推進システムを設計する．原子炉は，**高温ガス炉**を採用し，電気への変換は，**MHD（電磁流体）**方式を，また，推力発生には，レーザー核融合ロケットで採用されている**磁気ノズル**を採用する．すなわち，**レーザー**によりペレット（推進材・プラスチック小球）をプラズマ化し，磁場により一方向に放出し推力を得る．（図4参照．）

（磁場がバネの役割をし，プラズマを跳ね返す．）

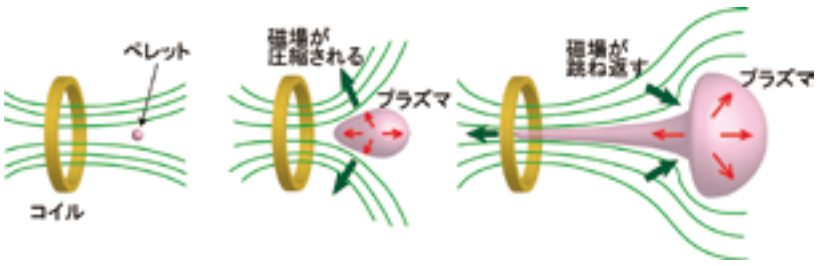


図 4　磁気ノズルでの推力発生のメカニズム

This document is provided by JAXA.

このために，各分野において実績のある研究者でチームを組み，設計を行う．それにより開発・研究課題を抽出し，今後の開発のロードマップを作製する．

3. 研究の特色

日本においては，原子炉などの各コンポーネントについての検討はあるにしても，推進システムとして本格的に検討した例がない．本研究により，電源の制約が大幅に解消され，深宇宙探査におけるミッションの多様化に大きく貢献する．すなわち，電源の確保により，より多くの観測機器の搭載が可能になり，様々な目的の観測・探査が行われ，学術的な研究の発展，将来の資源確保に貢献が期待出来る．本研究の成果は，日本において今後の深宇宙探査計画の方向付けに大きな指針を与えうるものと考えられる．ここで提案するシステムは，高温ガス炉，MHD 変換方式，セラミックレーザー，磁気ノズル等，日本が誇る技術の強固な結びつきを実現するものであり，世界でも類がない．言い換えれば，今ようやく米国の圧倒的な技術的蓄積に迫る研究ができる段階に到達し，本研究が時宜を得たものであることを示している．

また，本システムは，将来の**レーザー核融合ロケット**の研究につながるものであり，世界的に見ても殆ど行われていない．従って，核融合ロケットの分野でも世界をリードできる．

^{3}He は，重水素と核融合燃料として用いれば，中性子の発生も無く，即ち誘導放射能の生成も無く，理想的な核融合燃料として注目されている．この資源は，地球上には殆どないが，月面には，100万トンの資源が存在するとされている．このため，中国を始め各国は，月面の資源探査を急ぎつつ有る．すなわち，この資源をめぐり国家間の政争が繰り広げられることが, 危惧されており, それは半分現実となりつつあると言われている．一方，木星には，多量の資源が存在するとされており，しかもガス状に存在するから採取しやすい．ならば，これを利用すれば，先ほどの政争を避けられ，しかも世界のエネルギー問題を解決出来ることが期待される．

4. 研究結果

数年にも及ぶ木星へのミッションを原子力電気推進システムで実現する上で，各コンポーネントに対して検討すべき項目が挙げられる．各項目について検討を行い，検討結果を総合して，実現可能なシステムの設計，提案を行う．

1）電力供給用小型原子炉の設計

現在，原子力研究所で開発が進んでいる高温ガス炉を採用する．利点として，冷却材を高温で取出せ，熱容量が大きいため冷却材喪失事故にも耐えうること等が挙げられる．この利点を生かし，臨界計算，燃焼計算，安全性の計算を SRAC コードシステムにより行う．数年（目標は７年）にわたり，炉を自動で安全に稼働出来るかがポイントとなる．熱出力100kW, 出口冷却材 He/Xe 温度1800K の炉心熱設計を行い, 炉寸法を概算した．今後，この炉心モデルに対して臨界・燃焼計算を行う．

2）エネルギー変換系の検討

原子炉で生じた高温のガスを利用して高効率で MHD 変換による発電を行う．この技術については，既に検討が進んでいる［*4*］.

3）レーザー装置の設計

基本的には，レーザー核融合発電プラント (KOYO-Fast) の概念設計を参考にする［*5*］．すなわち，半導体レー

This document is provided by JAXA.

ザー励起セラミックレーザーをもとに設計する．この分野は，日本が得意とするところであり，他国は，未だ追随出来ていない．また，電気からレーザーの変換効率が大幅に改善されて来ており，コンパクトで高効率のレーザー発生装置が，近未来に利用出来る可能性が非常に高い．

4）推力発生用磁気ノズルの設計

上記装置で発生したレーザーをペレット（推進材）に照射し，プラズマを生成する．照射法は，レーザー核融合で考えられている間接照射方式である．（図5参照.）この方式では，レーザーの吸収は，100% と考えて良く，推進材の重さを調節することにより，推力／比推力の調節が可能である．



図 5　ペレット／推進材のレーザー照射法

プラズマは，磁場のバネで後方へ放出され，推力を発生する．磁気ノズル中のプラズマ挙動解析については，シミュレーション，実験とも，レーザー核融合ロケットの研究の中で，世界をリードする実績を積んで来た．

ノズルは，冗長性を考慮して複数とする．

図6に，３次元ハイブリッドコードで計算したプラズマ粒子の分布の１例を示す．今後は，推進効率を最大化するような磁場配位を求める．

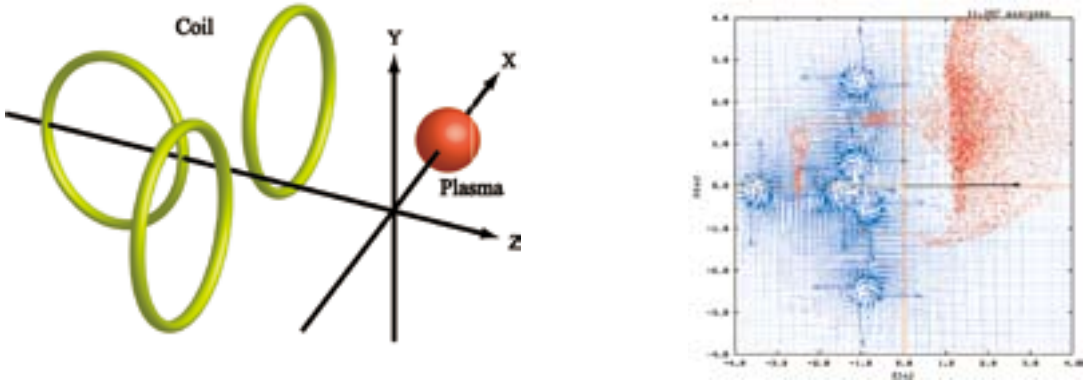


図 6　磁気ノズル中のイオン粒子分布（左図は，計算モデル）

尚，核融合反応は生じさせないので，中性子発生も無く，放射化，および遮蔽による重量の増加を考える必要はない．

5）全体システム設計

上記項目の検討結果をまとめる．また, 推進材タンクの設計, ターゲット射出機, He 回収装置の調査等を行い, システムとして構築する．比出力等の性能を評価し, 軌道解析コード（開発者:都立航空高専中野氏）を用いて, ミッションの可能性を検討する．

This document is provided by JAXA.

6）成果の公表

下記のホームページに，研究の進行状況を掲載している．

http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/nucl/nuclSV.files/frame.htm

7）今後の計画

米国の設計等との比較を行い，特徴を明確にする．今後の開発のロードマップを作成する．

5. まとめ

日本独自の新しい原子力電気推進システムを提案し，検討結果を示した．今後さらに詳細に設計を詰め，開発課題を明確にする．

補足：レーザー核融合ロケットへの展開法

・宇宙用原子炉……始動用原子炉（最初のレ　ーザー・ショット用電源）へ転用可能
・MHD 変換系……パルス運転方式を確立する必要有り
・レーザー装置……出力を増大する必要有り
・ペレット……核融合燃料を使用，初期には DT を利用予定
・磁気ノズル……磁場発生用超伝導コイルの中性子遮蔽が新たに必要となる

参考文献

［*1*］ C. D. Orth, UCRL-TR-110500, 2003

［*2*］ 中島秀紀他，「レーザー核融合ロケットの設計」，核融合研究，第66巻，pp.291-319，1991

［*3*］ M. S. El-Genk, editor “ A Critical Review of Space Nuclear Power and Propulsion, 1984-1993”, American Institute of Physics Press, 1994

［*4*］ N. Harada, L. C. Kien, T. Tashiro, “Closed Cycle MHD Generator using He/Xe Working Plasma,” AIAA Paper 2002-2144, Proc. of the 14th International Conference on MHD Power Generation and High Temperature Technologies, pp.163-171, 2002.

［*5*］ 宮永憲明他，「高速点火レーザー核融合発電プラント (KOYO-Fast) の概念設計，５．レーザー設計」，プラズマ・核融合学会誌，第83巻，pp.3-18，2007

This document is provided by JAXA.