

一般セッション | III. 核分裂工学：302-1 新型炉システム

2024年9月11日(水) 15:35 ~ 16:45 G会場(講義棟B棟1F B101)

[1G11-14] 宇宙原子力利用

座長:小原 徹(東工大)

15:35 ~ 15:50

[1G11]

宇宙原子力に関する規制動向及び課題

(1)地上用途SMR・マイクロ炉の開発・規制動向

*八木 伸太郎¹、川合 康太¹、佐藤 郁也¹、富永 大樹¹ (1. 三菱総研)

15:50 ~ 16:05

[1G12]

宇宙原子力に関する規制動向及び課題

(2)宇宙原子力利用における米国の検討状況

*佐藤 郁也¹、川合 康太¹、八木 伸太郎¹、富永 大樹¹ (1. 三菱総研)

16:05 ~ 16:20

[1G13]

宇宙原子力に関する規制動向及び課題

(3)宇宙原子力に係る現況と今後の課題整理

*川合 康太¹、佐藤 郁也¹、八木 伸太郎¹、富永 大樹¹ (1. 三菱総研)

16:20 ~ 16:35

[1G14]

核熱ロケット炉心の制御ドラム回転による出力分布の変化及びXeによる毒作用の影響と対策

*森田 大¹、波園 真一¹ (1. 福井大学)

16:35 ~ 16:45

座長持ち時間

宇宙原子力に関する規制動向及び課題

(1) 地上用途 SMR・マイクロ炉の開発・規制動向

Regulatory status and issues in space nuclear energy

(1) R&D and regulatory status of SMR and micro reactors for terrestrial applications

*八木 伸太郎, 川合 康太, 佐藤 郁也, 富永 大樹

三菱総合研究所

宇宙用原子力システムは地上での立地検討が不要、輸送・打上げが必要、遠隔地での自律運転が想定されているなどの点から、既存の原子力発電所の許認可とは異なるプロセス・要件が適用されると想定される。著者らは、宇宙における原子力システムの利用条件を検討する前段階として、地上用途小型モジュール炉（SMR）・マイクロ炉の規制要件や輸送要件について、諸外国の新型炉開発動向及び米国の許認可動向から調査・整理した。

キーワード：宇宙原子力、マイクロ炉、規制、許認可、輸送

1. 緒言

宇宙用原子力システムに関しては、地上用途として現在研究開発が進められている SMR 及びマイクロ炉と同様の炉型やコンセプトが用いられると想定される。一方で、宇宙用原子力システムの規制要件や輸送要件は、地上用途 SMR・マイクロ炉の要件を基礎としつつも、宇宙環境を考慮した要件にアレンジする必要がある。本研究では、宇宙用原子力システムに向けて想定される審査プロセス・要件について検討することを目的として、地上用途 SMR・マイクロ炉の開発・規制動向を調査・分析した。

2. 諸外国の新型炉動向及び米国の許認可動向

宇宙用原子力システムでは、出力や寸法の関係から、マイクロ炉が用いられることが予想される。マイクロ炉は既存軽水炉との設計的な違いのみでなく、その用途の違い、輸送性などから既存の規制枠組みでは解決できない課題がいくつか存在している。米国原子力規制委員会 (NRC) や米国原子力エネルギー協会 (NEI) は今後のマイクロ炉の安全審査・許認可対応に向けて想定課題を整理し、対応方針を示している。本研究では、諸外国の新型炉動向及び米国の許認可動向として、マイクロ炉における規制対応状況を深掘するとともに、①設計認証・ライセンス取得、②立地許可（環境レビュー、緊急時計画等）、③外部ハザード・物理的セキュリティ、④輸送規則、⑤運用方法、オペレータ要件の 5 つの観点に分類し、既存規制と想定課題・対応方針の整理を行った。

設計認証・ライセンス取得に関して、NRC は、現在開発中の規制プロセス 10 CFR Part 53 を整備することにより、炉型に依存せず、リスクインフォームド・パフォーマンスベースな規制基準を整備している。

また、輸送規則に関して、NRC と米国運輸省 (DOT) は放射性物質の輸送について共同で規制を行っており、工場で製造し燃料を装荷した状態のマイクロ炉を輸送するためには、核物質輸送規則を満たす必要がある。NRC は現在、マイクロ炉の製造工場での燃料装荷について検討しており、「原子炉が運転中かどうかを判断するための臨界排除の特徴の活用」、「製造工場での燃料装荷を可能にするために必要な許認可」、「製造工場での運転試験を可能にするための許認可」の観点から検討を実施している。また、燃料を装荷したマイクロ炉の輸送を可能にする輸送パッケージ開発も必要であり、いくつかの対処法が検討されている。

*Shintaro Yagi, Kota Kawai, Fumiya Sato, Daiki Tominaga

Mitsubishi Research Institute, Inc.

宇宙原子力に関する規制動向及び課題 (2) 宇宙原子力利用における米国の検討状況

Regulatory status and issues in space nuclear energy

(2) Discussions in the U.S. for space nuclear energy

*佐藤 郁也, 川合 康太, 八木 伸太郎, 富永 大樹

三菱総合研究所

米国では宇宙空間における原子力技術の安全な利用に向けて、原子力システムを搭載した宇宙船の打ち上げに係る許可プロセス・要件を策定している。著者らは、米国における宇宙原子力利用に向けた枠組み形成の動向を調査・整理するとともに、打上げ、及びそれ以降の運用も含め、宇宙用原子力システムに想定される許可プロセス・要件を分析した。

キーワード：宇宙原子力、マイクロ炉、規制、許認可、輸送

1. 緒言

宇宙空間において原子力技術を利用する場合においては、放射性物質の打ち上げに係る安全評価・許可プロセス、及び宇宙空間における原子力システムの起動・運用に係る安全評価・許可プロセスの確立が必要となる。本研究では、宇宙空間において原子力技術を活用する場合に想定される許可プロセス・要件について検討することを目的として、宇宙用原子力技術の開発が先行する米国における原子力システムの打上げに係る許可プロセス・要件を調査・整理するとともに、起動・運用等に係る許可プロセス・要件を確立する際の論点・課題の分析を行った。

2. 原子力技術の宇宙利用に係る安全枠組み

米国ではこれまで宇宙ミッションにおいて原子力電池が活用されており、放射性物質のロケットでの打上げに係る許可プロセス・要件は既に確立されていた。近年、米国では月面での原子力発電・原子力電池利用、推進力としての原子力利用に向けた研究開発を加速させており、将来の月面原子力発電、原子力推進の実用化に向け、宇宙用原子力システムを搭載した宇宙船の打上げに関するプロセスを更新するための大統領覚書を2019年に発効した。この中では、対象とする原子力システムの仕様や放射性物質質量に応じて3つのレベルに分類を行い、各レベルにて必要となる安全評価及び許可プロセスを規定している。加えて、安全性を評価・レビューするための省庁間原子力安全審査委員会（INSRB）の設置をNASAに要請している。本研究では、これら米国における原子力システムの打上げに係る要件・許可プロセスの調査・整理を行った。

打上げについてのプロセスは既に確立されている一方、宇宙空間・月面上にて原子力システムを起動・運用する際の安全評価・許可プロセスについては、米国においても議論途上である。特に月面においては、将来的に有人月面活動を支援する形での利用が想定されていることから、地上同様に人への影響も含めた安全評価が必要となると想定されるが、月面という特異な環境を踏まえ、地上とは大きく異なる環境への影響評価及び外部環境からの原子炉への影響評価が必要になると想定される。本研究では、地上・月面の環境要因の相違点も踏まえ、将来の月面用原子力システムの起動・運用時に想定される許可プロセス・要件を分析した。

* Fumiya Sato, Kota Kawai, Shintaro Yagi, Daiki Tominaga

Mitsubishi Research Institute, Inc.

宇宙原子力に関する規制動向及び課題

(3) 宇宙原子力に係る現況と今後の課題整理

Regulatory status and issues in space nuclear energy

(3) Current status and future issues related to space nuclear energy

*川合 康太, 佐藤 郁也, 八木 伸太郎, 富永 大樹

三菱総合研究所

米国での宇宙原子力利用に係る検討状況を、原子炉製造、地上輸送、打上げ、設置、起動・運用の5つのフェーズで整理した。日本においても、宇宙戦略基金の技術開発テーマとして、半永久電源システムが言及されており、米国での議論動向などは、半永久電源システムの社会実装の際にも参考になる。

キーワード：宇宙原子力、マイクロ炉、規制、許認可

1. 緒言

今後の宇宙における原子力システムの利用を見据え、宇宙原子力利用に係る議論が本格化している米国の動向を整理した。本稿では、(1) 地上用途 SMR・マイクロ炉の開発・規制動向、(2) 宇宙原子力利用における米国の検討状況のシリーズ発表を踏まえ、宇宙原子力利用を i) 原子炉製造、ii) 地上輸送、iii) 打上げ、iv) 設置、v) 起動・運用の5つのフェーズに分解し、各フェーズにおいて想定されるプロセス・要件を整理した。

2. 米国における宇宙原子力利用の検討状況

米国における宇宙原子力利用の検討状況の整理として、上記5つのフェーズごとの要件・プロセス策定レベルを図1に示す。要件・プロセス策定レベルを、「検討・議論段階」と「具体策定段階」の2つに分け、更に以下の4つに分類した。

- 初期検討：学会や一部機関内で議論が行われている段階
- 関係者間議論：関係機関間での議論が行われている段階
- 要件・プロセス具体化：所掌機関における要件・プロセスの策定が行われている段階
- 規制策定済み：既に該当規制要件・プロセスが策定されている段階

図1に示すように、i) 原子炉製造、iii) 打上げに関しては、具体的な議論が進められている一方、ii) 地上輸送、iv) 設置、v) 起動・運用については、現時点で具体化まで進んでいない。一方、日本においても宇宙戦略基金の技術開発テーマとして、半永久電源システムが言及されており、継続して米国動向を注視していくことが重要であり、日本での宇宙原子力利用においても参考になると考えられる。

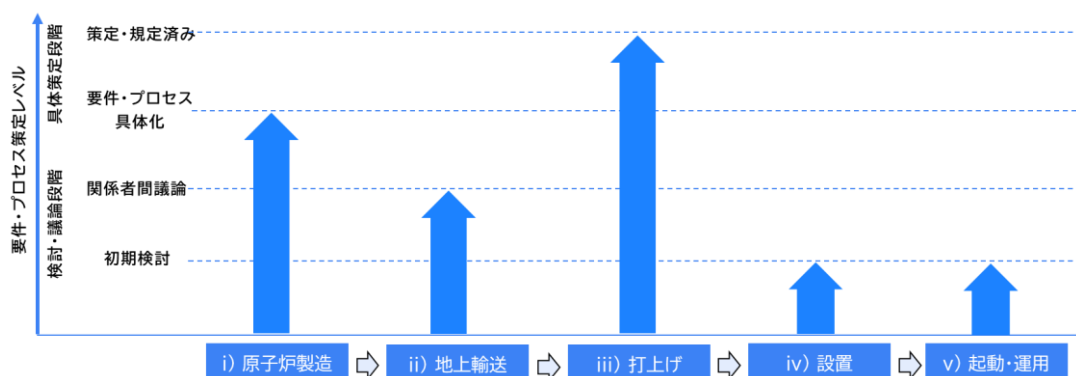


図1 米国における宇宙原子力利用の検討状況

*Kota Kawai, Fumiya Sato, Shintaro Yagi and Daiki Tominaga

Mitsubishi Research Institute

核熱ロケット炉心の制御ドラム回転による出力分布の変化及び
Xe による毒作用の影響と対策

Effects and countermeasures of power distribution change by control drum rotation and
Xenon override in nuclear thermal rocket core.

*森田 大¹, 浪園 真一¹,
¹福井大学

核熱ロケットは原子炉によって推進剤を高温に加熱し噴射することで推進力を得るロケットである。本研究では解析コード SCALE を用いてロケット稼働時に制御ドラムを回転させた際に生じる炉心内の出力分布の変化及び原子炉停止時に発生する ¹³⁵Xe による毒作用の影響を解析した。

キーワード：核熱ロケット，高温ガス炉，Xe 毒作用，制御ドラム，出力分布変化

1. 緒言

核熱ロケットは既存の化学ロケットより高い比推力を実現可能である。過去には、1970 年代に米国及び旧ソ連で研究開発が行われており、現在では火星の有人探査用のロケットとして研究されている^[1]。核熱ロケットにおける原子炉の制御は、炉心外周に配置された制御ドラムを回転させ炉心内に反射する中性子量を調整することで行う。この制御ドラム回転時における炉心内の出力分布変化及び ¹³⁵Xe による毒作用の影響が不明確であり、ロケット稼働時に燃料の性能を確保可能であるかが課題となっている。

2. 解析結果

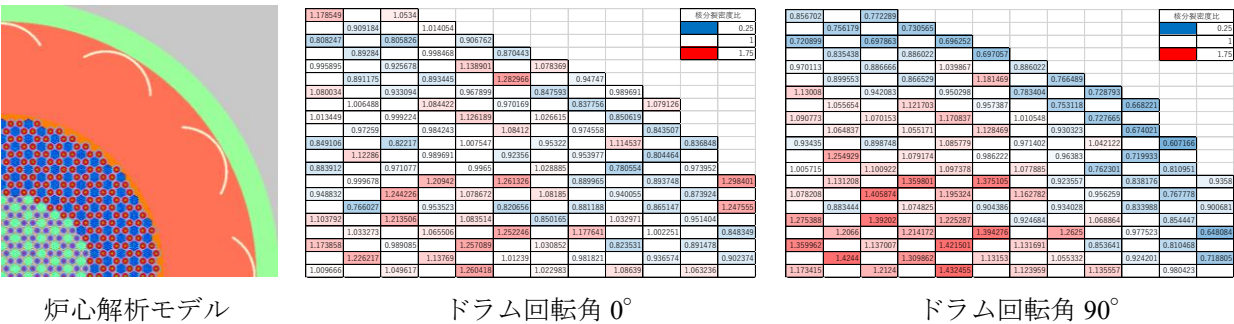


図 1 解析モデル及び燃料要素ごとの核分裂密度比

本研究では、モンテカルロ計算コード SCALE^[2]を用いた。まず、炉心断面の解析モデルを作成し制御ドラム回転時の各燃料要素における核分裂密度の計算を行った。解析の結果、ロケット稼働時に制御ドラムの回転によって平均値から約 0.6~1.8 倍の出力密度の変化が生じることが分かった。そのため、燃料要素について制限温度を超過することがないか検討を行う必要がある。また、全炉心の解析モデルを作成し、燃焼計算を実施した。解析条件は火星探査ミッションを想定して 1.5 時間原子炉を定格出力で運転したのち原子炉を停止するものとした。解析の結果、原子炉停止後に ¹³⁵Xe の蓄積によって原子炉に最大で約-0.25(Δk/k)の負の反応度が加わることが分かった。この原子炉の余剰反応度は 0.083(Δk/k)程度であり、原子炉停止後から約 50 時間程度原子炉を再起動することが不可能となることが分かった。

参考文献

[1] Paolo F. Venneri, Yonghee Kim .A feasibility study on low enriched uranium fuel for nuclear thermal rockets II: Rocket and reactor performance ,Progress in Nuclear Energy 87(2016),156-167p

[2] W. A. Wieselquist, R. A. Lefebvre and M. A. Jessee, Eds., SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39,Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2020). Available from Radiation Safety Information Computational Center as CCC-834.

*Oki morita¹, Shinichi Namizono¹

¹Fukui Univ.,