

宇宙原子力技術研究専門委員会 活動報告
「宇宙における原子力利用と炉物理の重要性」

高木直行

1. はじめに

近年の科学技術の発展とともに、天体物理や宇宙化学分野における知の探究や人類の活動範囲拡大を目的として、太陽系外縁天体や地球外の生命の探査、有人火星探査などのプロジェクトが検討・実施されている。これら宇宙探査には機器の動力源としての電源が必須だが、木星以遠になると太陽光強度は1/25以下に減少するため、太陽パネルや蓄電池に依存する限りは探査範囲や観測内容に制約が生じる。太陽系外縁や生命の存在が期待されている木星の衛星エウロパや土星の衛星エンケラドスなどの探査、頻繁に砂嵐の吹き荒れる火星表面への有人基地建設、月の極地や堅穴内の探査活動などには、原子炉を含めた原子力エネルギーが最有力な選択肢となる。

世界（特にアメリカやロシア）では、放射性同位体を用いた電源利用・熱源利用、宇宙基地用の小型原子炉、ロケット推進のための原子炉技術などの研究開発が長年進められてきており、中でも原子力電池（RTG）は実際に宇宙探査に使われた多数の実績がある。近年では欧州、中国、韓国によるRTG開発・利用も活発化している。また、米国・ロシア・中国を中心として月面用原子炉の開発も具体化しつつある。

一方で、日本には小惑星探査機「はやぶさ」に代表される無人探査の実績の他、電気推進技術や高性能宇宙用電池などの要素技術力が蓄積されており、原子力との組み合わせに適した宇宙用技術に強みがある。

本専門委員会では、日本における宇宙探査や宇宙開発にさらなる発展と飛躍をもたらす「原子力技術の具体的な応用法やその適用可能性」を提示することを目的とし、原子力技術の宇宙利用に関する世界の最新動向調査や、原子力技術応用に適した具体的な宇宙探査ミッションにおいて、要求される性能、技術的制限や規制、現状の技術レベルについて取りまとめる。

本報告では宇宙原子力技術の概観を整理するとともに我が国が原子力技術を宇宙開発・探査に適用して可能となるミッションおよびその将来的な可能性を示し、その中での炉物理の重要性について論じる。

2. 宇宙原子力技術の概観

本章では宇宙向けの原子力技術の概観について整理する。アイデアとしては様々なものがあるが、ここでは熱源・電源としての放射性同位体の利用と原子炉の利用という2つに焦点を当てる。

2.1. 放射性同位体の利用

放射性同位体の利用としては、長半減期の同位体を用いる事で数十年単位という非常に寿命の長いエネルギー源が得られる。核種としてこれまでに ^{238}Pu , ^{210}Po , ^{90}Sr などが利用されてきた。利用形態は放射性同位体の崩壊熱を熱電素子で電力へ変換する Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG)が主な利用方法である。ここで表 2.1-1 に米国における過去の RTG の適用例を示す。α崩壊時に殆どγ線を放出せず、遮蔽が容易であること、半減期が約 87 年と長期ミッションに対して十分な半減期を持ち、かつ発熱密度が高い事から核種としては ^{238}Pu が広く用いられてきた。

表 2.1-1 過去の RTG の適用例

プロジェクト	発電能力	発生熱	放射性同位元素	燃料質量
ボイジャー 1 号 ボイジャー 2 号	160 We	2400 Wth	^{238}Pu	4.5 kg
パイオニア 10 号 パイオニア 11 号	40.3 We	525 Wth	^{238}Pu	1 kg
アポロ 12 号	73 We	1480 Wth	^{238}Pu	3.8 kg
バイキング 1 号 バイキング 2 号	42.7 We	525 Wth	^{238}Pu	1 kg
ガリレオ カッシーニ ニューホライズン ユリシーズ	300 We	4400 Wth	^{238}Pu	7.8 kg
キュリオシティ	100 We	2000 Wth	^{238}Pu	4 kg

RTG を用いた探査機の一例として図 2.1-1 にボイジャーの構造図を示す。ボイジャー 1 号は、1977 年に打ち上げられ、木星や土星、およびそれらの惑星が従える衛星群の観測を行いつつ、太陽系離脱を図った探査機である。構造の特徴としては、両端に伸びるマストを二本備えており、一方のマストの末端に RTG が配置され、他方のマストの末端には蓄電用のキャパシタ（コンデンサー）や観測用のカメラ等が設置されている。この構造は、長期のフライト中に放射線が機器に与える影響を最小とするために図られた構造上の工夫

である。

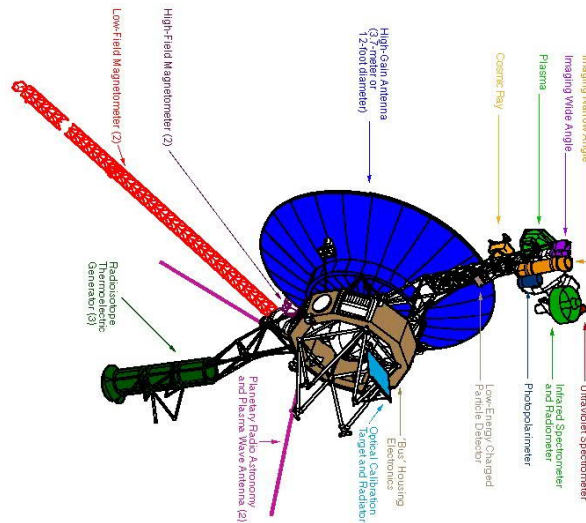


図 2.1-1 ボイジャー構造図

特に米国では、Pu-238 を熱源とした RTG の利用が進められてきた。図 2.1-2 には、木星探査機「ガリレオ」に使用された RTG を例に示している。この構造は、米国が使用してきた RTG すべてにおいて基本的な点で共通している。円筒状の容器の中心には熱源としての Pu-238 酸化物が熱コアとして存在する。この発熱部分からの熱を放熱するためには多数のフィンが配置されており、中心の発熱体とフィンの間には断熱層が設けられるとともに、半導体の熱電変換素子が配置され、温度差発電が可能になる。

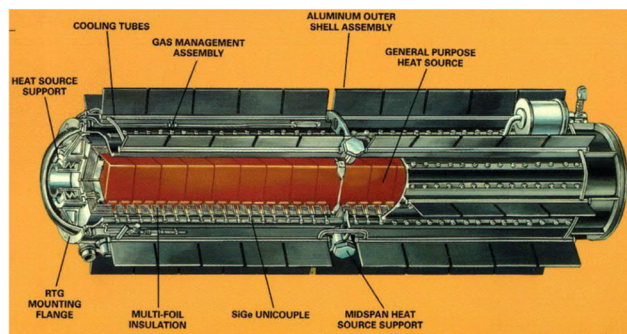


図 2.1-2 ガリレオに搭載された RTG

類似の技術は、今日の火星表面探査においても活用されている。図 2.1-3 には米国が火星探査に投入した Mars Science Laboratory 「Curiosity」 のモックアップを示した。カメラと反対側/後方に突き出る形で、RTG が搭載されている。この探査車では、基本的な発電は RTG で行い、電力の一部はバッテリーに蓄電され、特に電力を必要とする作業にはバッテリーからの電力供給が可能となっている。

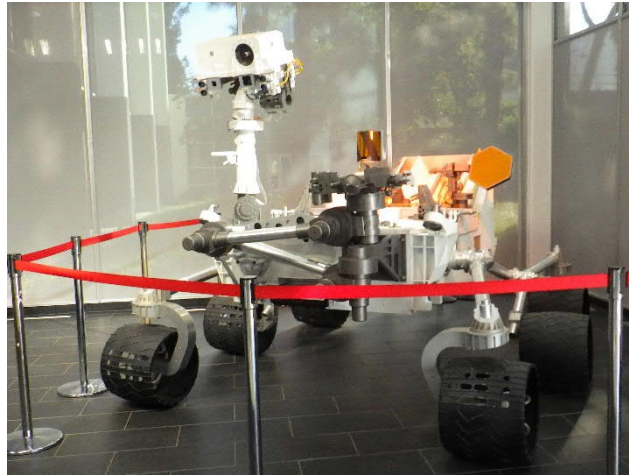


図 2.1-3 キュリオシティのモックアップ

国内では ^{241}Am を用いた RTG の開発が 2024 年度より宇宙戦略基金において開始され、JAEA は「Am 発熱体と熱電変換デバイスからなる半永久電源システムの開発」を提案し、採択された。全体予算約 15 億円、期間は 2025 年 3 月から 2029 年 2 月までの 4 年間であり、産業総合研究所を再委託先として以下の 6 項目を実施する。

(1) Am ペレット及び封入ピンの作製技術開発

大規模なアメリシウム (Am) ペレット製造に向け、プルトニウム (Pu) 中に蓄積された ^{241}Am を化学分離し、酸化物粉末として利用する方法を採用する。RI として管理するには、Am 中の Pu 濃度に制限値を設ける必要があるが、国内基準がないため、他国の例を参考に純度と収率の関係を試験で明らかにし、妥当な基準を設定する。ペレット製造は遠隔操作で行われ、安定な焼結体を得るための添加物検討や操作治具の準備、操作習熟を行う。さらに、ペレットの長期保管時の物理的安定性や大気暴露時の挙動も検証も実施する。

Am ペレットは、ピンに封入し密封化を行う。ピン封入と密封性検査も遠隔操作で行うことから、ピン封入に向けた溶接装置の設計・習熟運転等を行う。さらに輸送のための特別形承認試験の準備、RI 使用許可の変更申請も進める。

(2) 発熱体ユニット設計・試作

発熱体ユニットは、複数の Am 封入ピンを遮蔽構造で覆い、発生する熱を伝熱棒で取り出し、放熱フィンを通じて宇宙空間へ放出する装置である。さらに、熱電変換デバイスを組み込むことで発電も可能となる。このユニットの設計には、熱・遮蔽・構造の各面で課題がある。熱設計では、真空中での構造材料間の熱伝達に関する知見が不足しており、熱評価モデルの精度も不明確である。遮蔽設計では、放射線評価の精度向上が必要であり、構造設計では事故時の衝撃波解析手法が未整備であるほか、高線量下での遠隔組立や RI 輸送容器としての法的要件への対応も求められる。

これらの課題に対し、熱設計では、接触部材の試作と真空中での熱伝達測定、電気加熱による模擬試験を通じて熱構造モデルを設計する。遮蔽設計では、遮蔽材の種類と配置を変えて放射線強度を測定し、解析手法を検証する。構造設計では、模擬封入ピンを用いた衝撃試験により安全性を確認し、遠隔組立性や輸送容器要件への適合性も試作体で検証する。

(3) 打ち上げ時のリスク評価

日本国内での発熱体ユニット打ち上げ実績がないため、ミッション全体にわたるリスク評価手法の確立が必要である。特に、Am 漏洩防止の構造設計と、打上げ事故時の被ばくリスク評価が重要課題となる。技術開発では、ロケット事故や再突入時に発生する衝撃・熱荷重を解析し、最悪条件に基づいた構造設計を行う。また、事故シナリオの確率と被害の度合いを評価するため、確率論的手法を用いて被ばく線量の発生可能性を定量化する。さらに、米国の解析ツールの活用可能性を調査し、精度向上を図る。Am が地上に飛散する可能性については、JAEA の WSPEEDI を用いて大気拡散と被ばく線量をシミュレーションし、公衆への影響を評価する。

(4) 大規模化に向けた装置・設備・施設の概念検討

将来、 ^{241}Am を熱源とする RTG (放射性同位体熱発電機) を本格運用するには、1 基あたり数百 g~kg 規模の ^{241}Am が必要となる。これに対応するためには、年間 100g 以上の Am 製造が可能な専用施設の整備が不可欠である。例えば 100gAm/年の製造には約 10kg の MOX 粉末処理が必要であり、Pu を含む溶液系の取り扱いには臨界管理を含む高度な安全設計が求められる。施設には、Am 分離・精製、ペレット化・封入、検査・保管などの各工程に対応した装置群が必要で、これらを収納するグローブボックスや鉄遮蔽セルの規模も処理能力に応じて検討する必要がある。JAEA の現有施設 NUCEF には一部装置が既設されており、臨界管理設計も施されているため流用可能だが、非密封粉末の大量取り扱いに対応した排気設備が法令基準を満たしておらず、現状では利用困難である。そのため、新たな施設設計では、給排気設備や排気筒の性能、廃液処理、搬出入設備、RI 防護対策などを含めた総合的な検討と、予算規模の概算を行う。

(5) 発熱体ユニットの耐衝撃波試験

発熱体ユニットの耐衝撃波試験は、ロケット打ち上げ時の事故など異常事象に備え、放射性物質の飛散を防ぐために不可欠である。設計には、燃焼・爆発による衝撃荷重の評価が必要だが、過去の知見が不足しており、新たな基礎データの整備が求められる。まず数値解析により、ロケット搭載燃料などの爆発挙動を評価し、発熱体ユニットに加わる衝撃条件を明確化する。次に、解析結果をもとに試作ユニットを製作し、火薬を用いた実地試験を爆発試験場で実施する。衝撃による変形やひずみを計測し、ユニットの耐衝撃性能と

放射性物質の保護能力を検証する。得られた結果は、構造改良に反映され、安全性向上に寄与する。

(6) 熱電変換デバイスの放射線耐久試験

^{241}Am を熱源とする発熱体ユニットでは、低温域で高性能を示す Bi_2Te_3 系熱電変換材料が有力候補とされるが、放射線耐久性に関する知見が乏しい。特に、 $^{241}\text{AmO}_2$ から発生する中性子による材料損傷の可能性が課題である。これに対し、J-PARC のビームラインを用いた照射試験を実施し、照射前後で発電特性（電気抵抗、出力電力、変換効率など）を比較して劣化の有無を評価する。また、PHITS などの計算コードを用いて放射化量や核種の同定を行い、実験と解析の両面から耐久性を検証する。損傷が著しい場合は、材料の代替や中性子吸収材の導入など設計見直しを検討する。

2.2. 原子炉の利用

宇宙空間における原子炉の利用は古くから研究されており、これまでに実際にロケットで打ち上げられ、宇宙空間において運転された原子炉は合計 31~34 基である。1 基は米国の SNAP-10A であり、それ以外の 30~33 基は旧ソ連によるものである。そのうち 28~31 基は BES-5 (Buk)、2 基は図 2.2-2 に示される TOPAZ である。

ここでロシアアラモス国立研究所による運転期間・電気出力に対応する宇宙空間における最適な電源を図 2.2-1 に示す。これまでに打ち上げられた宇宙用原子炉は数 kW の電気出力で 1 年以上程度の運転期間が想定されており、本図に示されるように原子炉が最適な電源となる領域であった。これは原子炉システムでは重量当たりの出力である比出力が高いためであり、高出力・長期運転の領域では原子炉システムが最も有利な電源となる。

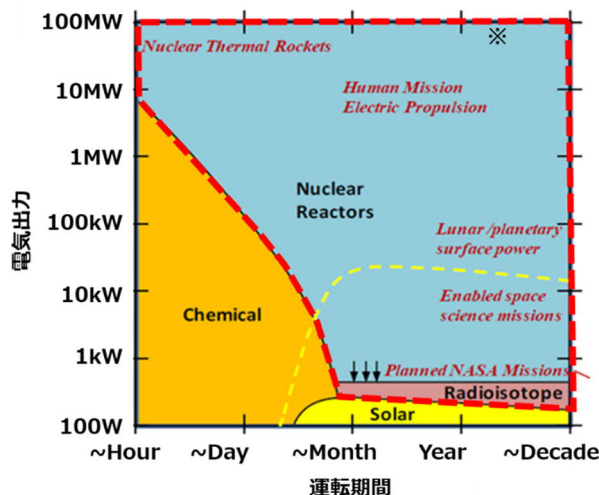


図 2.2-1 運転期間・電気出力に対応する最適な電源 (P. McClure, D. Poston, Design and Testing of Small Nuclear Reactors for Defense and Space Applications, LA-UR-13-27054, LANL, Sep, 2013)

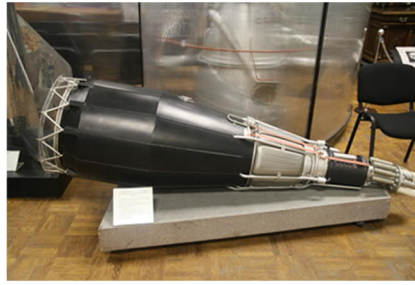


図 2.2-2 TOPAZ のモックアップ (Refer from NASA HP
https://en.wikipedia.org/wiki/TOPAZ_nuclear_reactor)

SNAP-10A や TOPAZ 以降, 宇宙空間における原子炉利用の検討は下火であったが, 近年は Fission Surface Power (FSP)として月面や火星での利用を想定した原子炉の検討が盛んにおこなわれている. その中でもロスアラモス国立研究所が検討している Kilopower は検討が進んでいる (図 2.2-3). 本開発では KURSTY 実験にて実際に核燃料を臨界に到達させてヒートパイプで除熱を行い, スターリングエンジンで発電するという FSP'のシステムを実際に構築して試験を行った点が特徴的である.

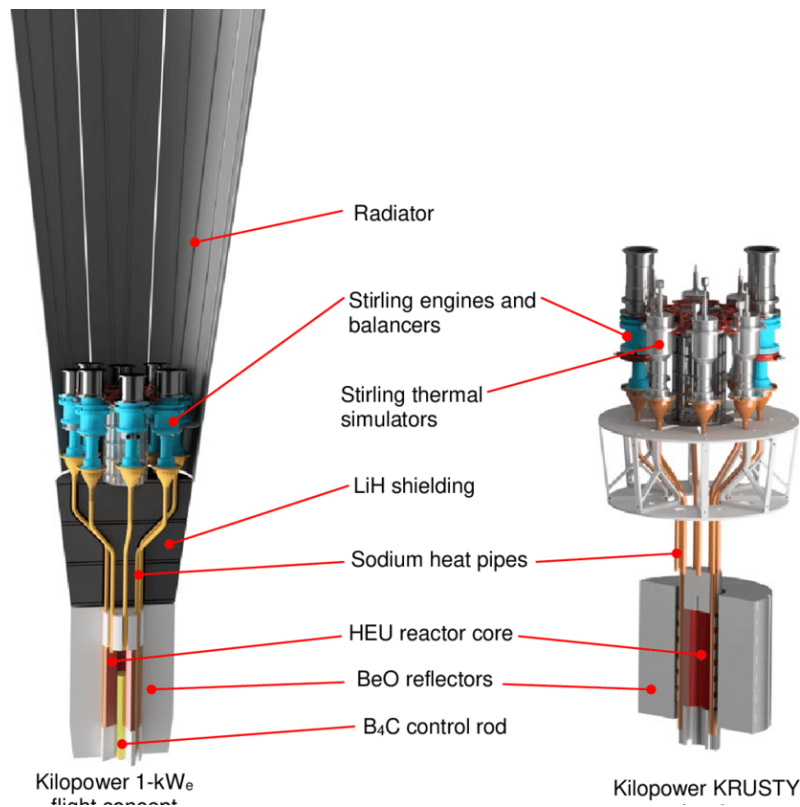


図 2.2-3 Kilopower のイメージ図 (Kilopower Reactor Using Stirling Technology (KRUSTY) Nuclear Ground Test Results and Lessons Learned, NASA/TM-2018-219941, 2018)

このほかに中国やロシアも 2030 年代に月に原子炉を建設すると宣言をしており、今後の月面活動においては原子力エネルギーの重要性は高まっていると言える。

我が国では 2026 年 3 月現在では電中研で提案された RAPID-L や大学・研究機関で検討されている宇宙用原子炉研究の例はあるものの、国として本格的な開発に取り組んでいる状況にはない。

3. 原子力技術適用により可能となるミッション例およびその将来的な可能性

原子力技術を適用する事で、太陽光にエネルギーを依存しないミッションが可能となる。例えば深宇宙探査を考えた場合、地球で受け取る太陽光のエネルギーを 1 とすると土星では 1/100 程度となり、太陽電池による発電は現実的な選択肢ではなくなる。ここに RTG をはじめとする原子力技術を適用すると太陽との距離にかかわらず一定量のエネルギーを確保することが出来る。

深宇宙探査での原子力エネルギー利用は先に述べたようにボイジャーやガリレオ、カッシーニ、ニューホライズンズなどで実績があり、わが国で RTG が実現できればこのようなミッションへの道が拓けるものと考えられる。また、月面探査などでも越夜の為の熱源・電源としての活用が考えられ、将来的な宇宙探査の自在性に貢献できると考えられる。

宇宙空間で原子炉を用いる事により可能となるミッションとしては、有人月面探査・有人火星探査などの有人ミッションが考えられる。月面は多くの場所では夜間が 2 週間続き、最も夜間が短い極地であっても数日間太陽光が当たらない時間が存在する。有人ミッションは無入探査に比して生命維持のために大きなエネルギーを必要とする。小規模な滞在でも数 kW、将来的な月面基地では数 100kW 以上の電力が必要になる可能性があり、これは RTG に比べて原子炉が重量の観点から有利となる。

米国では KRUSTY 実験において実際に原子炉システムとして運転を行い技術実証がなされているほか、複数の民間会社が概念設計開発に関する契約を結んでおり、実現に向けて具体的な開発に取り組んでいる。

我が国で宇宙用原子炉開発に取り組むためには技術的な課題のほかに可搬型原子炉の法的取り扱いや、打ち上げ時の安全基準の設定、核物質管理の在り方など、様々な規制上の課題が整理される必要がある。今後、開発が行われる場合は規制側との議論を密にしながら研究開発を進めていく必要があると思われる。

4. 炉物理の重要性

宇宙用原子炉の開発において、炉物理が果たすべき役割は非常に大きいものと考えられる。宇宙炉設計において炉物理が直面する課題は地上の大型炉と大きく異なるものになると予想される。例えば打ち上げ重量の制約から炉心は可能な限り小さなものとなり、更に

これを実現するためにこれまでに用いたことのない材料や幾何形状が使われる可能性もある。

このような炉心を、動特性を含めて正確に評価する為には上記に対しても精度よく評価できる計算コードが求められる他、これらを検証するための炉物理実験も必要となる。さらに、打ち上げ・輸送時の臨界安全確保も炉物理の重要課題であり、打ち上げ失敗時における燃料の散逸・浸水シナリオに対して炉心の未臨界性を保証する解析が将来の安全審査においても重要な論点になる可能性がある。

我が国においてもアメリシウムを用いた半永久電源の開発に着手するなど宇宙用原子力技術の実用化に対する関心が高まりつつある。炉物理は原子炉を設計する工学としてその存在価値がある以上、炉物理コミュニティが長年培ってきた技術や知見を新しいフロンティアに向けて積極的に発信し、学際的な連携を深める事で100年先の我が国の宇宙開発の礎となる研究開発に取り組むことが重要であると考えている。

5. まとめ

本報にて2023年～2025年の2年間の「宇宙原子力技術研究専門委員会」の活動について、その調査・議論の概要と炉物理の重要性について報告した。詳細な報告は本委員会の最終報告書を参照されたい。

宇宙用原子力技術はこれまで我が国でも開発を立ち上げる動きはあったようであるが、世論も含めた社会情勢を鑑みてこれまで本格的に立ち上がる事は無かった。しかしながら宇宙戦略基金においてアメリシウムを用いた原子力電池の開発が開始されるなど、宇宙における原子力技術開発がタブーではなくなった事は歴史的な転換点と言える。

今後も紆余曲折はあると思われるが、原子力電池の開発が成功裏に終われば次は原子炉を宇宙で活用する流れは十分に現実的である。宇宙用原子炉は既存の原子炉の枠から大きく外れたアイデアを採用する可能性があり、炉物理としてはその様な要求に応える技術を提供していくことで、学術的な検討を「炉心を設計する炉心内の物理」である炉物理の存在感や価値を内外に示していくことになるのではと思う。