



Jxiv_v1_2501

月面核融合発電システムに関する国際動向と論点整理

中谷樹^{*2*4*5}, 有吉志満^{*3*4}

International Trends and Key Issues in Lunar Fusion Power System

Tatsuki Nakatani, Shima Ariyoshi

Key Words: Energy Policy, Space Policy, Lunar Fusion Power System

Abstract

The energy demand on the lunar surface is expected to increase in the future. Fusion power systems can produce a large amount of energy with minimal fuel. The fusion fuel ^3He exists on the lunar surface, making a sustainable fuel supply expected. This paper summarizes international trends related to fusion power systems and identifies key issues for development consideration.

1. はじめに

月開発の進展に伴い、将来的に月領域でのエネルギー需要の増加が予想される。令和5年度 宇宙基本計画工程表では「月面活動に向けたエネルギー関連技術について、将来的に開発が必要とされる要素技術を2024年までに整理する」と記載されており、月面での発電システムの検討は喫緊の課題となっている [1]。現在、宇宙開発で広く利用されている太陽光発電は、夜間や永久影での運用が難しい。太陽光に依存せず、長期的に大量の電力を得る手段として原子力発電の利用が期待されている [2]。原子力発電は質量削減（輸送コスト削減）の観点からも再生燃料電池や太陽光と比較して優位性があるとされている [3] [4]。2017年に米国は月面で利用する小型原子炉の開発を発表、2030年初頭には月への打ち上げを予定している [5] [6]。2024年3月にロシアと中国は共同で月面に原子力発電施設を設置する構想を発表、2033~35年を目途にプロジェクトの完了を予定している [7]。しかし、原子力発電は事故リスクが高く、高レベルの放射性廃棄物を排出するという難点がある。特に日本は、核兵器による被害経験や原子力発電所の事故から「核」を取り扱う技術開発には慎重な国情がある。そこで、代替案としてより安全でクリーンな

エネルギーである核融合発電の利用が考えられる。核融合発電は現在研究段階であり、月面での電源利用は世界的にも検討が進んでいない。これらを踏まえ、本研究では核融合発電を月面活動のためのエネルギーシステムの一つとして捉え、月面核融合発電システムに関わる国際動向の調査と開発検討のための論点整理を行う。日本が他国に遅れをとることなく、国際社会において有利な立場を確保するためにも先行して議論を行うことは有意義であると考え。

2. 月面核融合発電システムの利点

本章では、議論の前提となる核融合発電システムの利点をまとめる。核融合技術は現在も研究開発中の技術である。そのため、他の発電方式との定量的な比較は今後の課題とする。

2.1. 事故リスクが低い

月面での利用を想定する場合、宇宙飛行士の安全性確保は重要な課題となる。原子力発電は予め炉内に用意した数年分の燃料を利用して核分裂反応を起こすため、連鎖反応の制御に失敗すると甚大な事故に繋がる恐れがある。対して、核融合発電は2つの原子核を衝突・融合させたときに生じるエネルギーを利用する発電方式であり、燃料を炉外から供給するため、燃料の供給や電源を止めると必然的に反応

^{*1} ©日本航空宇宙学会

本論分は、第68回宇宙科学技術連合講演会「OS-10 宇宙分野におけるSDGsの取り組みと連携について (1)」3L04にて発表されたものである。

^{*2} 東京工業大学 工学院 機械系

^{*3} 早稲田大学 基幹理工学研究科 機械科学・航空

宇宙専攻

^{*4} 一般社団法人ニュースペース国際戦略研究所 学生研究員(New Space Global Strategy Lab)

^{*5} 責任著者(Corresponding author)

が停止する．さらにプラズマ制御も同様に安全性が高い．仮に問題が生じて炉中温度が上昇し炉壁が蒸発した場合でも，プラズマに不純物が混入することで温度が低下し，反応は自然に停止する．このように核融合発電は原理上，原子力発電と比較して甚大な事故が起これにくい特性を持っている．

2.2. 燃料資源の供給が安定している

地球上では化石燃料を用いた発電システムへの依存が高く，資源の枯渇が問題となっている．月面においても電源の長期利用を見据えた場合，燃料の持続可能性は重要な課題である．現在，地上の核融合炉で利用が期待されている主な燃料は，水素の同位体である重水素 (D) とトリチウム (T) の組み合わせ (D-T 反応) である．重水素は海水中に豊富に存在し，トリチウムは炉内で増殖させることが可能であるため燃料の持続可能性が高い．さらに，重水素 (D) とヘリウム 3 (^3He) の組み合わせ (D- ^3He 反応) も検討されている． ^3He は月面に存在することが確認されており，現地での燃料調達の可能性も考えられる．しかし，月面の正確な量や分布，採取方法は研究中であるため経済合理性の評価については今後の課題である．

2.3. 環境負荷が低い

持続可能な開発の観点から，月開発において月面環境の保全を考慮する必要がある．原子力発電では半減期が極めて長い高レベルな放射性廃棄物が生成される．対して，核融合発電の D-T 反応や D-D 反応で生成される放射性廃棄物は低レベルで比較的浅い地層に埋設処分が可能である．さらに月資源である ^3He を用いた D- ^3He 反応では中性子発生量が少なく，放射化による材料劣化を低減することができる．そのため米国や中国のように ^3He を採取し，地球上で利用することも十分に有効である．また，陽子 (p) とホウ素 11 (^{11}B) による p- ^{11}B 反応では蒸気タービンが不要で直接発電が可能，放射性廃棄物を生成しないことが知られている．

2.4. エネルギー効率が低い

将来的な月面活動では，太陽光に依存しない安定的で大量の電力供給が求められる．核融合発電は燃料を元にした発電方式であり，燃料 (D-T 反応) 1g から得られるエネルギーが火力発電における石油 8t を燃やして得られるエネルギーに相当する．核融合炉の小型化が実現すると，発電システム全体の質量あたりのエネルギー効率が上がり，月への輸送コストという観点からも他の電源システムと比較して優位性が高まる可能性がある．ただし，核融合反応を起こすためには非常に高い温度まで加熱が必要であり，

起動時には別の発電システムが必要となる点は留意すべきである．

3. 月面核融合発電システムに関わる国際動向

3.1. 月面核融合発電に関わる米国の動向

米国では 1988 年に NASA が月面の ^3He を輸送して地球上での核融合エネルギー生産に利用する可能性について議論を行っている [8]．さらに月面活動に関するシンポジウムの中では月面における ^3He の採取が月面基地の発展と運用に与える影響についても検討が進められた [9]．その後，アポロ計画によって取得したサンプルや月面観測の調査から ^3He の量や分布の調査が進んだ [10]．2020 年代には月資源の採掘方法や ^3He の抽出方法に関して設計検討が行われた [11]．

3.2. 月面核融合発電に関わる中国の動向

中国の北京ウラン地質研究所 (BRIUG) は嫦娥 4 号 (2018 年) と嫦娥 5 号 (2020 年) を通じて月の土壌中の ^3He の含有量を測定し，抽出方法について研究を進めている [12]．2024 年 6 月には「嫦娥 6 号」が月の裏側から採取した月資源を地球に持ち帰った． ^3He の利用は検討しているが，月面での核融合発電の利用に関しては不明確である．

3.3. 宇宙を市場とする核融合民間企業の動向

Table 1 は核融合産業協会 (FIA) の調査による核融合技術の応用先としている市場別の企業数を示している [13]．核融合技術の応用先として宇宙推進を主要市場としている企業は 2 社，スピノフ市場としている企業は 7 社存在する．また，同調査によると ^3He を利用した D- ^3He 反応を検討している企業は 2 社，直接発電が期待されている p- ^{11}B 反応を検討している企業は 4 社存在する．

Table 1 Number of companies by market application for fusion technology.

	Primary Markets	Spin-off markets
Electricity generation	32	0
Space propulsion	2	7
Marine propulsion	2	5
Medical	3	7
Off-grid energy	10	10
Hydrogen and/or clean fuels	7	11
Industrial heat	11	16

宇宙での核融合技術の利用を構想している企業について調査し，Table2 にまとめた (著者作成)．結果から宇宙船やロケットの推進システムでの利用が最も多いことが明らかになった．一方，月面での発電システムとしての利用を検討している企業は 1 社のみ

Table 2 Companies considering fusion technology for space applications.

Company	Target market	Location	Year founded
Rocketstar	Space propulsion (Rocket)	USA	2022
Nearstar Fusion	Space propulsion (Spaceship), Electricity generation, Off-grid energy	USA	2021
Helicity Space	Space propulsion (Rocket)	USA	2018
AVALANCHE	Space propulsion (Spaceship), Marine propulsion	USA	2018
Princeton Fusion Systems	Space propulsion (satellite), Off-grid energy	USA	2017
Helion	Space propulsion (Rocket), Electricity generation	USA	2013
Horne Technologies	Space propulsion, Electricity generation, Off-grid energy, Marine propulsion, Industrial heat, Medical, Hydrogen and/or clean fuels	USA	2008
LPPFusion	Off-grid energy (Earth, Mars), Space propulsion (Rocket), Marine propulsion, Industrial heat, Electricity generation	USA	2003
Pulsar Fusion	Space propulsion (Rocket)	UK	2011
Rolls-Royce Holdings	Space propulsion (Spaceship), Off-grid energy (Earth, Lunar)	UK	1904

※各社 HP を参照し著者作成（2024 年 8 月時点）。構想を含む。

確認された。開発が進められている宇宙推進に対して、月面における発電システムは構想段階にとどまっており、具体的な計画や研究成果は見られなかった。

4. 月面核融合発電システム開発の意義

月面核融合発電システムは、世界的にも先駆的な構想である。実現には長期にわたって多額の資金が必要であり、国際プロジェクトになる可能性もある。本章では、日本が国家戦略として開発に関わる意義について明確化する。

4.1. 社会課題の解決による国際社会での地位向上

月面でのエネルギー問題については、地上の問題ほど議論が進んでいない。現在の SDGs は主に地球上の課題に焦点を当てており、その解決策として衛星技術の活用が増加している。将来的には、SDGs の対象範囲が宇宙空間や月面にまで拡大する可能性も考えられる。人類共通の財産である月のエネルギー問題は、社会課題としてのポテンシャルが高い。国際的な合意形成が不十分である社会問題に早い段階で取り組むことは、将来的に世界規模の社会問題となった際にグローバルリーダーシップを獲得する機会に繋がる。日本がグローバルリーダーとなるためには、既に社会課題として認識された SDGs の 17 の目標の中から選択して解決を目指すのではなく、18 番目の目標を作るという強い意識が重要である。月面のエネルギー問題解決に対して月面核融合発電システム開発という先見性のある取り組みを推進することで国際社会での地位向上が期待できる。

4.2. 国際協力による技術開発と安全保障の確保

宇宙と核融合は国際協力が見込まれる分野である。世界各国が協力するプロジェクトで投資額が最も多

いのが ISS 計画、第 2 位が世界的な核融合炉開発プロジェクトである ITER 計画である。米国が主導するアルテミス計画への日本の参画や核融合の実現に向けた日米両政府による共同声明の発表など、日米関係においても「宇宙」と「核融合」の両分野へ期待が高まっている。核融合分野で日本は ITER 計画に参画し、自国に実験装置 (JT-60SA) を建設した。単独で原型炉を製造可能な数少ない国の一つとして認識されている。宇宙分野で日本は数多くの宇宙飛行士を輩出し、ISS 計画では設計段階から参加、現在は運用に携わっている。月面開発においても JAXA や民間企業が成果をあげている。さらに、日本はものづくり産業における信頼性が高く、基礎研究の基盤や人材育成システムを有している。これらの強みを考慮すると月面核融合発電システムの開発は日本の優位性を十分に活かすことができる分野だと考えられる。他国と連携して研究開発を進めることで、新技術の獲得や産業競争力の強化を図ることが可能になる。

月面核融合発電システムは技術安全保障を基盤とした経済安全保障の確保としても重要である。これまでの歴史では天然資源の保有国が国際社会で大きな影響力を持ってきたが、核融合はこの構図を変える可能性がある。核融合はわずかな燃料から莫大なエネルギーを生み出すことができ、燃料資源は人類共通の資産である月と海洋から採取することが可能である。そのため、将来的には月面においても資源の保有ではなく核融合技術の保有が国際的な競争力や地位を決定づける重要な要因になると考えられる。

5. 論点整理

月面核融合発電システムは既存の核融合開発戦略と宇宙開発戦略を基盤とするものである。本章では既存の戦略とは異なる部分に焦点を当て論点を明示するとともに関連する国際動向について整理した。各論点について、開発を進めるべきか否かの判断に必要な「検討段階での論点」と開発を推進する上で具体的な課題や方策となる「開発段階での論点」に分かれる。しかし、これらは必ずしも明確に区別されるものではなく、連続的に捉えることが重要である。

5.1. 開発戦略

3章で示したように世界的にも月面での核融合利用は具体的に計画されていない。日本として開発する場合の戦略に関して以下の論点が挙げられる。

- ① 既存の宇宙開発戦略と核融合開発戦略、国際動向を踏まえた上でどのような戦略を策定するか。
- ② 開発ロードマップを描く際、関連するシステムとして戦略にどこまでを含めるべきか。
- ③ 宇宙産業と核融合産業の協力を踏まえた国内の推進体制をどのように構築するか。

月面核融合発電システムの開発では、長期計画を見据えてシステム全体を俯瞰する必要がある。核融合炉建設のみに焦点を当てるのではなく、月資源探査や採掘についても一貫した戦略の中に含めるべきであると考えられる。産業の予見性を高め、投資を促進させるためには長期の開発ロードマップの策定が重要となる。国内外の地上核融合開発と月面開発の進捗状況を合わせた三軸で捉え、適宜計画を更新する柔軟性が求められる。段階を踏む場合、採取した ^3He の地上利用に関しても議論の余地がある。国際協力が予想されるため国が指針を示すとともに、国内の宇宙産業と核融合産業の連携を取っていく必要がある。

5.2. 経済的観点

月面核融合発電システム開発の検討段階において特に経済的観点からの評価は重要になる。以下の論点が挙げられる。

- ① 開発の実現可能性を検討するためにどのような調査・試算を行うべきか。
- ② 月面電源として月面核融合発電システムを評価するためにどのような試算を行うべきか。

実現可能性の評価の基礎としては月面でのエネルギー需要量の将来予測や月資源の正確な量・分布の把握、採掘に関わるコスト試算が挙げられる。レゴリス中の ^3He の平均濃度は非常に低いことが指摘されている。しかし、 ^3He の分布は不明確で、含有量は太

陽風にさらされた時間によって異なるため極地域ではより多く含有されている可能性がある [10]。1GWの核融合発電を1年稼働させることを目的に ^3He を100kg抽出するためには、約2km²の月面を深さ3mまで採掘が必要だという試算もある [14]。

月面電源として核融合発電システムを評価する必要がある。その場合は、長期利用の可能性や月への輸送コストに関わるシステム全体の質量当たりの発電量が優位性になると考えられる。経済的観点からの評価に関しては核融合炉建設とその他システムに関わる研究開発・建設・月輸送・長期運用・解体にかかるコスト試算が考えられる。 ^3He 採取のための月資源採掘では、副産物として他の物質の取得も可能であり、月面での建築技術等は他産業にも転用できる。そのため波及効果についても試算して評価する必要がある。

5.3. 技術的観点

月面核融合発電システムに関して技術的観点から以下の論点が挙げられる。

- ① 月面核融合発電システムに必要な関連システムの開発にどのように取り組むべきか。
- ② 月面環境に適した核融合炉の開発にどのように取り組むべきか。

月面核融合発電システム構築に特に必要な技術として月資源の採掘および燃料の抽出技術、月面での建設技術の2つが挙げられる。月資源の採掘および ^3He の抽出技術に関しては米国と中国が先行して研究を行っている。NASAは採掘のために2つのコンセプトを発表している [11]。2022年の発表では中国の月探査機「嫦娥5号」による月資源サンプルから ^3He がチタン鉱石表面のガラス状の気泡に多量に存在していることが示された [12]。従来 ^3He の抽出には高温処理が必要だと考えられていたが、中国の研究成果から、単にすりつぶして気泡を破壊するだけで簡単に抽出可能であることが明らかになった。

月開発後期での利用が予想される核融合炉は大型建造物になる可能性があり、その場合は組み立てや関連インフラの構築に高度な建築技術が要求される。現在、各国では主に簡易的な居住施設の建設を目的とした研究が多く進められており、日本も政府の宇宙開発利用加速化戦略プログラムの一環として、月面における無人建設技術や建材製造技術を推進している [15]。月面での核融合炉建設を視野に入れた技術開発を本プログラムで採択することも有効な戦略だと考えられる。また、日本が国際的に高い評価を受けている材料科学や生産加工の分野と宇宙核融合技

術の連携にも注力すべきである。

月面での核融合炉は地上のものとは異なる設計要件になる可能性が高い。宇宙環境では蒸気タービンによる発電が難しいため、直接発電が期待されている $p\text{-}^{11}\text{B}$ 融合の利用も検討に値する。地上で利用が想定されている D-T 融合と比較して $\text{D-}^3\text{He}$ 融合や $p\text{-}^{11}\text{B}$ 融合では、反応により高い温度が要求される。また、核融合はプラズマ安定化のために真空状態を作り出す必要があるが、宇宙空間の真空環境を活かせる可能性もある。日本では 2023 年にムーンショット型の研究開発制度に新たに核融合が追加され、挑戦的な研究に対しても予算が分配される仕組みが整備された [16]。技術開発では複数の手法で検討して知見を蓄え、より確度の高い技術に集中させていくことが望ましい。しかし、現在の核融合開発では限られた一部の炉型に集中して予算が組まれている。月面利用を視野に入れることで新たな炉型の開発意義が生まれる。複数の炉型での研究開発が進むことは、地上の核融合開発にも良い影響を与えられられる。

5.4. 法的観点

月面核融合発電システムは月環境の利用であり、国際的な協力も予想される。法的観点から以下の論点が挙げられる。

- ① 月資源の採掘と利用に関してどのような国際的な取り決めを行うべきか。
- ② 国際プロジェクトになる場合、研究成果や技術の共有に関してどのような協定を設けるべきか。

月資源である ^3He を利用して発電する場合、国際法上の月資源の取り扱いについて議論が必要である。日本は 2021 年に宇宙資源法を策定し、第 5 条において私人による宇宙資源の所有を認めている [17]。しかし、あくまでも国内法であるため宇宙資源法を持たない他国との間で法的な効力はない。国際条約である宇宙条約で月は「国家による主権の主張や占拠の対象とはならない」としている [18]。新たなガイドラインの策定や国際機関設立の際には、既存の国際条約や国内法の解釈や整合性についても論じる必要がある。現状、月資源の採掘や抽出した燃料資源によるエネルギーの利用に関する詳細な法的枠組みは存在せず、複数の方法が提案されている段階である [19]。国際プロジェクトとなった場合の国家や企業間での協定内容についても議論が求められる。

5.5. 安全性

安全規制の内容によってシステムに関わる機器の要求性能や設計等が変わるため、早期の規則策定が必要である。安全性について以下の論点が挙げられ

る。

- ① どのような国際的な安全規制の枠組み、安全審査体制を確立すべきか。

月面核融合発電システムは、月面での運用ということで国際的な安全基準が定められると考えられる。しかし、国連宇宙空間平和利用委員会 (UNCOPUOS) でも核融合について活発な議論は行われていない。特に安全規制が厳しい宇宙機器で過度に厳格化すると、技術開発の難易度が上がりスピード感が失われる可能性がある。核融合が核分裂と原理が異なることを念頭に要件を検討すべきである。その他、宇宙環境による事故リスクの影響や宇宙飛行士の安全確保についても論じる必要がある。

月面核融合の安全規制に関して議論する際には、宇宙原子力と地上での核融合の安全規制が参考になる。現在、地上の核融合に対する安全規制は日本を含め世界的にも検討段階である。ITER 計画でも技術基準や安全ガイドラインを定めてはいるが、あくまで実験炉であるためプロジェクト固有の指針であり、商業炉用の安全基準ではない。核融合装置に関して米・英・日では RI 法的な規制、仏では炉規法的な規制を適用している。商業用核融合炉の規制に関しては米・英・EU で議論が先行しており、2030~40 年代の稼働への対応を目標にしている。

宇宙空間での原子力の扱いに関する安全規制については、米国が先行して議論を行っている。宇宙での核利用の実績があるのは米国（主に RTG）と旧ソ連（主に SNR）のみで、旧ソ連はミッションの安全性評価プロセス等を明らかにしていない。米国は 1963 年に原子力電源を搭載した宇宙ミッションの打ち上げに対して安全審査を開始した [20]。2019 年には National Space Policy Directive-20 が発行され、7 つの連邦機関から構成される INSRB (Interagency Nuclear Safety Review Board) が設立された。宇宙核システムの打ち上げや再突入における商業活動の増加を背景に、安全審査プロセスの効率化が行われた [21]。月面核融合発電については計画がないため検討されていないが、開発プロジェクトが稼働している核熱推進や核電気推進、月面原子力炉に関しては審査対象として検討されている。また、2023 年には米国原子力規制委員会 (NRC) が開催する規制情報会議 (RIC) の技術セッションにて、米国民間企業が宇宙開発で核の利用を進めている事を背景として規制の考慮事項について議論が行われた [22]。国際的な規制については、1992 年に採択の「宇宙空間における原子力電源の使用に関する諸原則」が存在するが、月面上に

おける利用に関しては議論の余地がある [23] [24].

5.6. アウトリーチ・人材育成

月面核融合発電システムの開発は長期で多額の資金が必要であり、宇宙戦略と核融合戦略の進展にも左右されるため計画の大幅な変更も予想される。そのため、開発初期段階から社会受容性向上を目指したアウトリーチ活動にも注力すべきである。

- ① 月面での核融合利用に向けた国民理解増進のために有効なアウトリーチ活動は何か。
- ② 長期にわたっての人材確保にどのように取り組むべきか。

核融合の国内認知度を調査した研究によると一般認知度は 40.0%であり、核融合に対してネガティブなイメージを持つ割合が高い。また、86.0%が核融合と原子力が異なる技術であることを認知していなかった [25]。特に日本は核兵器による被害と原子力発電所の事故の経験から核関連技術に危険なイメージを持つ人が多い傾向にあると考えられる。適切なアウトリーチ活動は長期的かつ安定的な人材確保にもつながる。人材育成に関しては、分野横断型で長期的な計画であるため、雇用の安定性を確保する必要があると考える。

6. 最後に

本研究では月面における核融合発電の利用に関して国際動向を踏まえながら論点を整理した。検討には中立的な立場の各専門家による慎重な議論が求められる。本研究が今後、国家戦略の議論のきっかけになることを期待する。

謝辞

本研究の遂行にあたり、NGSL 理事の皆様ならびに国際宇宙法・核融合に関連する有識者の皆様から貴重なご意見、ご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

1. 宇宙基本計画 工程表,宇宙開発戦略本部決定,令和 5 年度 12 月 22 日。
2. 星野：宇宙探査とエネルギー 原子力エネルギー利用の歴史・現状・将来日本原子力学会誌,Vol.51,No.3,2009。
3. Colozza, Anthony J.:Small Lunar Base Camp and in Situ Resource Utilization Oxygen Production Facility Power System Comparison,NASA/CR-2020-220368, 2020。
4. Marcin Kaczmarzyk, Marcin Musial:Parametric Study of a Lunar Base Power Systems,MDPI AG,21 February 2021。

5. Marc A.Gibson et al.:NASA's Kilopower reactor development and the path to higher power missions,2017 IEEE Aerospace Conference,04-11 March 2017。
6. Ellen Bausback:"NASA's Fission Surface Power Project Energizes Lunar Exploration",Explore,Jan,31,2024,<https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/glenn/nasas-fission-surface-power-project-energizes-lunar-exploration/>。
7. "Russia, China Planning For Joint Nuclear Power Plant On The Moon By 2035",Forbes,May,5,2024,[https://www.forbes.com/sites/tyler-roush/2024/03/05/russia-china-planning-for-joint-nuclear-power-plant-on-the-moon-by-2035/\(2024.9\)](https://www.forbes.com/sites/tyler-roush/2024/03/05/russia-china-planning-for-joint-nuclear-power-plant-on-the-moon-by-2035/(2024.9))。
8. Lunar Helium-3 and Fusion Power,NASA-CP-10018,September 1,1988。
9. Crabb, T. M.,Jacobs, M. K.:Synergism of He-3 acquisition with lunar base evolution,NASA. Johnson Space Center,September 1,1992。
10. Ian A. Crawford, et al. Lunar Resources: A Review Published in Progress in Physical Geography, Vol. 39, pp. 137-167, 2015。
11. Aaron D.S.Olson:Lunar Helium-3: Mining Concepts, Extraction Research, and Potential ISRU Synergies,AIAA,3 Nov 2021。
12. Ao Li et al. "Taking advantage of glass: capturing and retaining the helium gas on the moon" 2022。
13. The global fusion industry in 2024,Fusion Companies Survey by the Fusion Industry Association。
14. Harrison H.Schmitt:Lunar Helium-3 Energy Resources,AAPGMemoir101,p.33-51.2013。
15. 宇宙開発利用加速化プログラム（スターダストプログラム） 宇宙無人建設革新技術開発。
16. ムーンショット型研究開発制度における新目標案（フュージョンエネルギー）について 文部科学省。
17. 「宇宙資源の探査及び開発に関する事業活動の促進に関する法律」,令和 3 年 12 月 23 日施行。
18. 「月その他の天体を含む宇宙空間の探査及び利用における国家活動を律する原則に関する条約」,1967 年 10 月 10 日発効。
19. Sarah Coffey:Establishing a Legal Framework for Property Rights to Natural Resources in Outer Space,41 Case W. Res. J. Int'l L. 119,2009。
20. Literature Review:Safety Review Process for Space Nuclear System Launches, U.S.BRC,2023.6。
21. Interagency Nuclear Safety Review Board (INSRB) "Playbook" Non-binding Guidance for INSRB and Its

Counterparts,INSRB,January 20, 2023.

22. RIC2023 T1 「Beyond Earth: The Future of Nuclear Technology in Space」,March 13,2023.

23. 「宇宙空間における原子力電源（NPS）の使用に関する原則」.1992 年 12 月 14 日採択.

24. 高屋友里：月面における原子力電源（NPS）の使用および事故に関する国際法上の課題-国連宇宙空間平和利用委員会科学技術小委員会における議論を中心に - ,『空法』第 64 号（勁草書店）71-94 頁,2024 年.

25. 武田,長島:「核融合」の国内認知度・イメージ分析,J. Plasma Fusion Res. Vol.96, No.4 (2020) 191-198,2020.