O-26

核融合炉の月面設置に関する考察

Technical Evaluation of Fusion Reactors for Lunar Installation

鈴木媛香[1]，浅井朋彦[2]，松本優資[3]，日野吉彦[3]
Himeka Suzuki[1], Tomohiko Asai[2], Masashi Matsumoto[3], Yoshihiko Hino[3]

A sustainable energy supply on the Moon is crucial for future exploration and lunar base development. Fusion energy is promising but there are some challenges in adapting it to the Moon's unique environment—low gravity, vacuum, and extreme temperatures—poses challenges. Tokamak reactors, like ITER (D-T fusion), rely on steam turbines, which are unsuitable for the lunar environment. Additionally, high-energy neutrons from D-T fusion cause frequent wall damage, increasing the need for replacements. In contrast, p-^{11}B fusion generates minimal neutrons, reducing wall damage and enabling direct energy conversion, making p-^{11}B-based Field-Reversed Configuration (FRC) reactors ideal for lunar energy needs.

月面での持続可能なエネルギー供給は，今後の宇宙探査や月面基地建設において不可避な課題である。核融合はクリーンなエネルギー源として有望視されているが，月面特有の環境条件—低重力，真空，極端な温度変動，資源—に対応するためには，従来の技術にない新たなアプローチが求められる。そこで本研究では，月面に適した核融合炉の技術的選定を検討し，さまざまな方式の比較を通じて，最適な炉型について論じる。

現在，核融合によるエネルギー生産に最も近いとされる炉心プラズマの候補は，ITER でも採用されているトカマク型である。これらの炉型は，地球上での利用を想定して多くの研究が進められているが，いずれも D-T（重水素-三重水素）反応を用いることを前提としている。D-T 反応では，高速中性子として放出される運動エネルギーをブランケットで熱に変換することでエネルギーを取り出すが，この中性子が炉壁に深刻な損傷を与え，約 2〜3 年ごとに炉壁の交換が必要とされる。しかし，月面での頻繁なメンテナンスや大量の物資輸送は現実的でない。現在の月面輸送コストは，100kg あたり約 1.5〜3 億円と見積もられ，例えば ITER サイズ（23,000 トン）の核融合炉の輸送には 35〜69 兆円の費用がかかることになる[1]。

さらに，D-T 炉では，トリチウムは月面の閉鎖空間で安全に管理しなければならず，地上とは異なる特殊な対策が必要である。加えて，D-T 反応で発生する熱エネルギーをスチームタービンで電力に変換する方式は，月面の低重力・真空環境の影響で効率が低下することが予想される。

D-^{3}He 反応を用いた核融合炉では，月面上で採取可能な ^{3}He を用いることから候補として挙げられるが，月の砂 100 万トンから得られる ^{3}He は，わずか 10 トンであり，膨大な量の砂を処理する必要がある。また、D-T 反応と比較すると微量ではあるが中性子を放出するため，遮蔽の必要性や部材の放射化への対応などの問題が完全には解消されない。

諸問題を踏まえると，p-^{11}B 反応を用いた核融合方式が有力な選択肢として浮上する。まず，p-^{11}B 反応は中性子をほとんど放出しないため炉壁の損傷が大幅に軽減され，長期間にわたって安定した運用が可能となる。また，トリチウムを使用しないため，放射性物質の取り扱いに伴うリスクも排除される。さらに，p-^{11}B 反応では直接エネルギー変換が可能であり，スチームタービンを使用せずに発電ができるため，月面の低重力・真空環境に適応できる点が大きな利点である。

こうした比較から判断すると，月面での核融合炉の設置においては，p-^{11}B 反応との親和性の高い FRC 型核融合炉が最も適していると考えられる。中性子による炉壁損傷の少なさ，トリチウムの不使用，さらには直接エネルギー変換の可能性が，月面特有の技術的課題を軽減するものと期待される。発表では，月面設置型核融合炉の設計に必要な条件と，FRC 核融合炉心の技術的実現性について，さらに詳しく議論を行う予定である。

参考文献

[1] 近藤貴：「“究極のエネルギー” 核融合を実証する実験炉 ITER，公益社団法人応用物理学会，
https://www.jsap.or.jp/columns/gx/e2-8（参照 2024-09-25）
[2]御手洗修：「D-^{3}He, D-D 先進燃料核融合炉の探究 」，プラズマ核融合学会誌，Vol.98，No.2，p72-80，2022.

1：日大理工・学部・物理　2：日大理工・教員・物理　3：株式会社大林組.