

微濃縮ウランを用いた長寿命小型月面炉の概念設計

Conceptual design of a long-life small lunar reactor using slightly enriched uranium

*矢口陽樹¹、西山潤¹、高木直行¹

¹ 東京都市大学大学院総合理工学研究科 共同原子力専攻

打ち上げ失敗による水没時にも未臨界を確保でき、月の表面や地下空洞でも安定した電力を長期間供給できる微濃縮ウラン燃料小型月面炉の概念設計を行った。

キーワード: 宇宙炉、月面炉、微濃縮ウラン

1. 背景・目的

2030年代には、月面活動が国際的に活発化すると予想されている。太陽光の届かない環境での活動も考慮すると太陽光に依存しない大規模な電源が必要になる。国際宇宙探査グループ (ISECG) は、月面で中長期的な有人探査活動を行うには、4~6人が500日間滞在できるインフラが必要だと予測している^[1]。中でも電力供給は、人類が月面で活動するために必要な生命維持と探査活動に不可欠なインフラであり、月面で活動するためには300kWeの電力供給が必要であるとしている。JAXAも「国際宇宙探査に向けた日本のシナリオ JAXA 提案 2021」^[2]にて月面で中長期的に有人探査を行うための電源の規模を300kWeとしており、特に原子力発電 (Fission Power System: FPS) は周辺環境の影響を受けることなく長期間電力供給が可能であるため月面での発電方法として有効であるとしている。FPSの設計要件として、2030年までに総重量を2000kg未満に抑えつつ電気出力40kWe達成を目標としている。本研究では、比出力が20W/kg以上で10年以上臨界可能な40kWe級の月面炉の概念設計を行った。

2. 原理と方法

核分裂性物質の拡散防止やロケット打ち上げ失敗後の水没時再臨界防止の観点からは、核分裂性物質の含有量が少ない天然ないし微濃縮ウラン燃料の利用が望ましいが、軽量かつコンパクトな炉心を臨界にすることは容易ではない。そこで注目したのが中性子増倍材 Be-9 である。Be-9 は (n,2n) 反応による中性子増倍材としてだけでなく、減速材としても機能する。(n,2n) 反応を効率的に起こすためには、U 燃料と Be の境界面積を十分に大きくする必要があり、より良い臨界性を得るためには減速効果を得るために Be 層の厚さを十分に厚くする必要がある。そのため、炉心は薄い燃料層を厚い Be 層で挟んだ多層構造として設計した (図1)。Be は優れた熱伝導体でもあり、冷却材を使用せず、発生する熱をすべて伝熱のみで除去する炉心の設計を試みた。

3. 結果

最小重量で長期間の臨界維持を達成する事を目標として、板状天然 U 燃料と Be 減速材の厚さについて無限体系モデルを用いてサーベイを行ったところ、U 燃料の厚さを 1cm、Be 減速材の厚さを 12cm とした時が最適となった。続く全炉心体系解析により、炉心の体積と重量を最小にしなから 10 年以上臨界を維持できる原子炉の寸法を決定した。その結果、反射体厚さ 15cm、炉心直径 180cm、炉心高さ 81cm の時に最小重量での臨界となり、10 年以上の長期運転には濃縮度 1.5wt% の燃料が必要であることがわかった (表1)。また熱解析コード Ansys を用いて、本炉心の上下面からの除熱と炉心側面から宇宙空間への熱輻射を考慮した熱解析を行った。結果として、炉心中心部の燃料領域にて最高温度が 990K となり融点を下回っているものの、相変化が起きる転移温度 (941K~) を超えることが確認された。除熱方法について今後検討を深めていく予定である。

3. 結論

Be を中性子増倍材/減速材として、微濃縮ウラン燃料を用いた小型月面炉の概念設計を行った。10 年以上の臨界維持は達成出来たが、Be の加工性や炉心重量、除熱に関しては検討の余地がある。今後は、優れた減速比を有し利用実績豊富な減速材 (黒鉛等) の検討も進めていく予定である。

参考文献

[1] 国際宇宙探査協働グループ: 国際宇宙探査ロードマップ追補版最新月面探査シナリオ, 2020.

[2] 宇宙航空研究開発機構国際宇宙探査センター宇宙探査システム技術ユニット: 日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021, 2022.

*Hiroki Yaguchi¹, Jun Nishiyama¹ and Naoyuki Takaki¹

¹Tokyo City Univ.

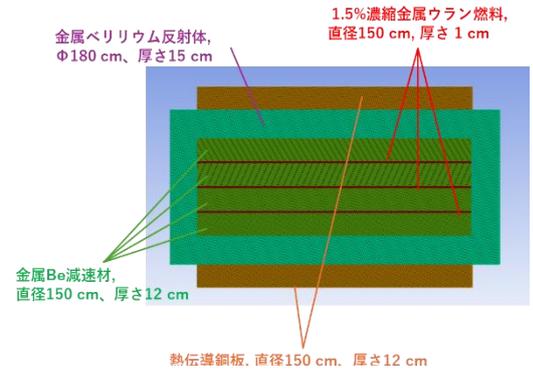


図.1 月面炉の概略図

表.1 月面炉仕様

Design parameters of core	
熱出力	200kWe 40kWe
熱変換効率	スターリングエンジン (変換効率: 20%)
燃料	金属ウラン
減速材	金属ベリリウム
ウラン層数	3
ベリリウム層数	4
ウラン層厚さ	1 cm
ベリリウム層厚さ	12cm
反射体厚さ	15cm
炉心高さ	81cm
炉心直径	180cm
濃縮度	1.5%
炉心平均温度	650°C
金属ウラン密度	19.05 g/cc
金属ベリリウム密度	1.85g/cc
HM重量	1.01 t

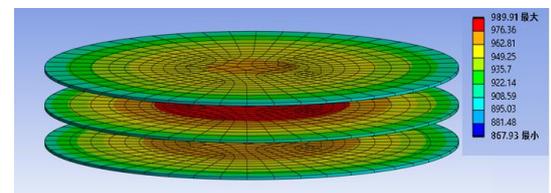


図.2 燃料領域での温度分布