宇宙探査用電源としての小型 CANDLE 燃焼炉の研究

Study on Small CANDLE Burn-up Reactor for Space Nuclear Power

*西山 潤[1], 小原 徹[1]
[1]東京工業大学 原子炉工学研究所

Pu-238 を熱源とする原子力電池に代わる宇宙探査機用の電源システムとして、CANDLE 燃焼型原子炉概念を適用した小型宇宙原子炉について成立性と特性の評価を行った。
キーワード： CANDLE 燃焼炉、宇宙探査用、可燃性毒物、燃焼計算

1. 緒言

宇宙や惑星の探査のため科学機器と通信機器を搭載した宇宙探査機にとって、電源システムは必要不可欠な機器である。放射性同位体の崩壊熱を熱電変換素子によって直接電気に変換する原子力電池は、可動部がなく電気出力がほぼ放射性同位体の半減期のみに依存する。その信頼性の高さのため、太陽光の弱い外惑星の探査では放射性同位体 Pu-238 の α 崩壊を熱源とする原子力電池がこれまで利用されてきた。しかし専用の核燃料中性子照射・分離施設の停止に伴い現在では Pu-238 を大量に製造することが困難となっている。一方、核分裂反応を用いる原子炉も宇宙用の電源として考えられており、1960 年代から研究開発が行われ、実際に製造され衛星に搭載されたことがある。しかし出力を得るためには原子炉の臨界を維持しなくてはならず、中性子を吸収する制御ドラムなどで運転中の調整が必要であり、これまでのところ長期間の探査ミッションには使用されていない。

進行波型の原子炉である CANDLE 燃焼型原子炉[1]は核分裂が活発に起こっている燃焼領域があたかも蝋燭のように自発的に移動していく原子炉であり、臨界の維持に制御棒を必要としない。本研究では、自己制御性を持つ CANDLE 型原子炉概念を宇宙用の原子炉にも適用し、制御系などの機械駆動部や冷却材の流れなどの動的部分を一切持たない原子炉についてその成立性と特性の評価を行った。

2. 小型 CANLDE 燃焼炉の概要

宇宙用探査の電源は、小型軽量であることが必要不可欠である。これまでの発電用原子炉の研究において、濃縮ウラン、減速材、中性子吸収剤をうまく組み合わせることにより CANDLE 型原子炉の小型化ができることを確かめた[2]。本研究では、濃縮ウラン燃料を使用した UZrH 合金水素吸蔵燃料をベリリウム反射体で覆った原子炉について計算を行った。図 1 に示すとおり、可燃性毒物を含まない領域を原子炉起動部分とし、可燃性毒物を含む燃料へ燃焼領域が移動していく形である。

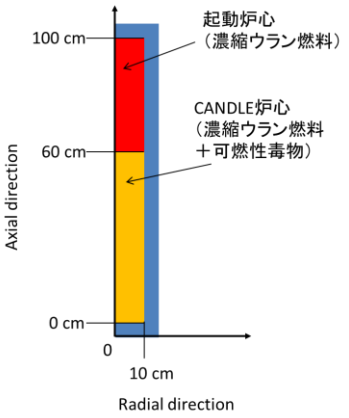


Fig. 1 Conceptual diagram of a small CANDLE reactor

3. 計算と結果

炉心燃焼計算には、連続エネルギーモンテカルロ燃焼計算コード MVP-BURN と JENDL-4.0 データライブラリを使用した。U/Zr 比、ウラン濃縮度、可燃性毒物密度（Gd-157）、炉心半径をパラメータとして、燃料高さ 100 cm, 熱出力 20 kWth の原子炉について CANDLE 燃焼炉の成立の確認を行った。

図 2 に U/Zr=0.01, H/Zr=1.6, 濃縮度 100%, Gd-157 濃度 0.001 g/cm^3, 燃料半径 10 cm, ベリリウム反射体厚 5 cm の場合の中性子束分布の時間変化の計算結果を示す。起動後から $k_{eff} \geqq 1$ を維持したまま、燃焼領域が軸方向に移動する CANDLE 燃焼に特徴的な現象を確認することができた。このとき燃焼領域の移動速度は約 0.7 cm/year となった。熱源の重量は燃料、反射体込みで 280 kg となり、土星探査機カッシーニに使用されている Pu-238 を用いた GPHS モジュールの 13.5 kWth, 78 kg（製造時）と比較して単位質量当たりの熱出力は約半分の結果になった。今後、より詳細な熱解析を含めた最適化により重量低減を目指す。

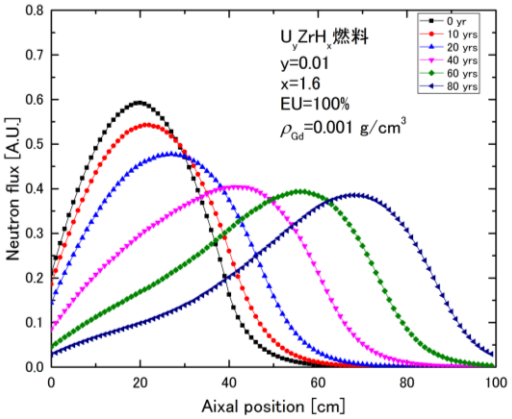


Fig. 2 Change of neutron flux distribution along burn-up after start-up

参考文献

[1] H. Sekimoto, *et al. Nucl. Sci. Eng.*, **139**, 306-317 (2001).
[2] 西山潤、小原徹、 日本原子力学会 2014 年秋の大会予稿集 H44 (2014).

*Jun Nishiyama[1], Toru Obara[1]
[1] Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology.