

< 炉物理夏期セミナー若手研究会報告 2 >

宇宙用原子炉を基盤とした可搬型小型熱供給炉の炉心概念設計

東北大学工学研究科 郡司 智
GUNJI Satoshi

岩崎智彦
IWASAKI Tomohiko

1. 緒言

21 世紀を迎え、エネルギーの需要と供給の体系は、新たな展開を見せつつある。化石燃料の枯渇が懸念され、新エネルギー開発の目処が付かない状況で、我々は現在の技術で十分に実現可能なシステムであり、電源炉、熱供給炉として使用できる小型汎用原子炉に着目した。本報告はこのような観点に立ってロシアの宇宙用原子炉を原型炉とした小型汎用炉心の概念設計とその核的特性について述べる。

2. 基本設計

今回ベースとした炉心は、ロシアの炉心ヒートパイプ挿入型高速炉である[1]。この炉は熱電子発電炉であり、高濃縮ウラン燃料(濃縮度 90%)炉心からヒートパイプを用いて熱を炉心外に取り出して熱電子発電を行い、展開した放熱板から熱を放出している。この炉の大きな特徴は、メンテナンスフリーで可動部分がないヒートパイプを冷却系も兼ねた熱輸送媒体として用いることで、それまで高速炉の冷却材として主に用いられてきた液体金属冷却系を排することにより高い信頼性を獲得している点にある。しかし、本研究を始めるにあたりロシア宇宙炉に関する文献を調査したところ、材質や寸法等はある程度書かれていたが、核特性についてはほぼ皆無であった。

そこでこのヒートパイプ使用炉を原型とし、ヒートパイプ出口より高温を取り出すことが可能な炉心を試設計した。装荷燃料は 90%濃縮の二炭化ウラン燃料とし、燃料ピン中央にヒートパイプを配した。ピン配置は三角配列とし、

必要な無限増倍率が得られるように適宜ピン径とピンピッチの変更を行った。挿入するヒートパイプは構造材が Mo、作動流体が Li のものとした。燃料部分は BeO 反射体によって側面、両端部を覆われ、うち側面反射体には 12 本の制御ドラムを装備する。これは BeO で構成された円筒形のドラムの 1/3 ほどの表面に吸収体として B_4C を取り付けられた回転式のもので、吸収体を内向きにするだけで炉に負の反応度を投じる。目標実効中性子増倍 1.06、燃料無交換で目標寿命約 10 年として設計した炉心の諸元は、表 1 のようなものである。

3. 核特性の解析結果と検討

設計した炉心の核的特性をモンテカルロコード MVP 及びその燃焼計算である MVP-BURN の各計算コードと JENDL-3.2 のライブラリを用いて評価した。主な解析項目は次のようなものである。

(1) 制御棒価値

制御棒を全て吸収体が外を向いた状態から回転制御した場合、回転角が 60° を超えたあたりから急激に負の反応度が投入され、最終的には実効増倍率が 0.931 程度となる。回転式制御ドラムを使用した宇宙炉は制御ドラムを強制排除し、炉心からの中性子漏洩を大きくしてスクラムをかけるが、この場合の実効増倍率は 0.785 となる。これらの値は設計上十分な値である。また、制御ドラムの幾何形状に起因する反応度係数の回転角度依存もみられた。

(2) エネルギースペクトル

炉心燃料部における中性子エネルギー70群に対する中性子束分布を図2に示す。全体として硬いスペクトルを持っているが中心部より両端部の方が軟らかいスペクトルになっており、この部分では反射体の存在によって熱中性子による核分裂の割合が大きくなっていることが分かる。熱外領域で見られる吸収ピークはヒートパイプの構造材であるMoによるものであると思われる。また、炉心にメッシュを切って出力ピーキングを調査した結果、1.24という値が得られた。

(3) Li喪失事象によるボイド反応度の評価

ヒートパイプ作動流体であるLiが何らかの原因で漏洩した場合のボイド反応度を調査した。その結果Li封入量が初期値の1/10程度になるまで断続的に正の反応度を投じることが明らかになった。最終的に投入されるボイド反応度は0.47% $\Delta k/k$ であった。この値は比較的大きいものであり、制御棒によって投じられる負の反応度によって十分に相殺可能な値であるが、今後の検討課題である。

(4) ドップラー効果の評価

燃料温度を冷態停止状態(室温=300K)より炭化ウランの融解温度である約2600Kまで変化させた場合のドップラー反応度を調査した。この場合負の反応度が投入され、その値は-0.084% $\Delta k/k$ であった。この値は前述したボイド反応度に比べて小さい。

(5) 燃焼寿命

熱出力を5MWt, 7MWt, 10MWtとしてMVP-BURNコードで燃焼計算を行った。この結果、順におよそ4700日, 3600日, 2500日の燃焼日数が得られ、熱出力約7MWtで目標寿命の10年を満たすことが判明した。計算結果を図3に示す。

4. まとめ

小型汎用熱供給炉として、ロシアのヒートパイプ炉心挿入型宇宙用原子炉の技術に着目し、熱出力5~10MWtを想定し燃料無交換で10年間の運転寿命を達成する高速炉炉心の核的試設計を行った。核的検討の結果、この小型炉心はほぼ十分な核特性を持ち、制御面でも十分な能力を有しており、今後の検討に値することを示すことが出来た。本研究で得られた核モデルは今後必要となる熱水力特性解析、動特性解析、材料評価、遮蔽計算、熱輸送計算などの基礎データとして活用できる。

[1] G.M.Gryaznov, et al., "PARAMETRIC ANALYSIS OF A NUMBER OF SPACE NUCLEAR POWER SYSTEMS WITH A HEAT-PIPE ENERGY-CONVERSION SYSTEM", Atomic Energy, Vol.89, No.1, 2000

表1 設計炉心諸元

使用燃料	90%濃縮二炭化ウラン
反射体材料	酸化ベリリウム
吸収体	炭化ホウ素
ヒートパイプ構造材/作動流体	Mo/Li
ヒートパイプ内径/外径	16mm/18mm
炉心有効高さ	54.5cm
炉心等価直径	44.6cm
燃料ピン(ヒートパイプ挿入数)	91本 (91本)
燃料ピン直径	3.7cm
ピンピッチ	3.8cm
実効中性子増倍率 [k_{eff}] (計算誤差)	1.081 (±0.035%)

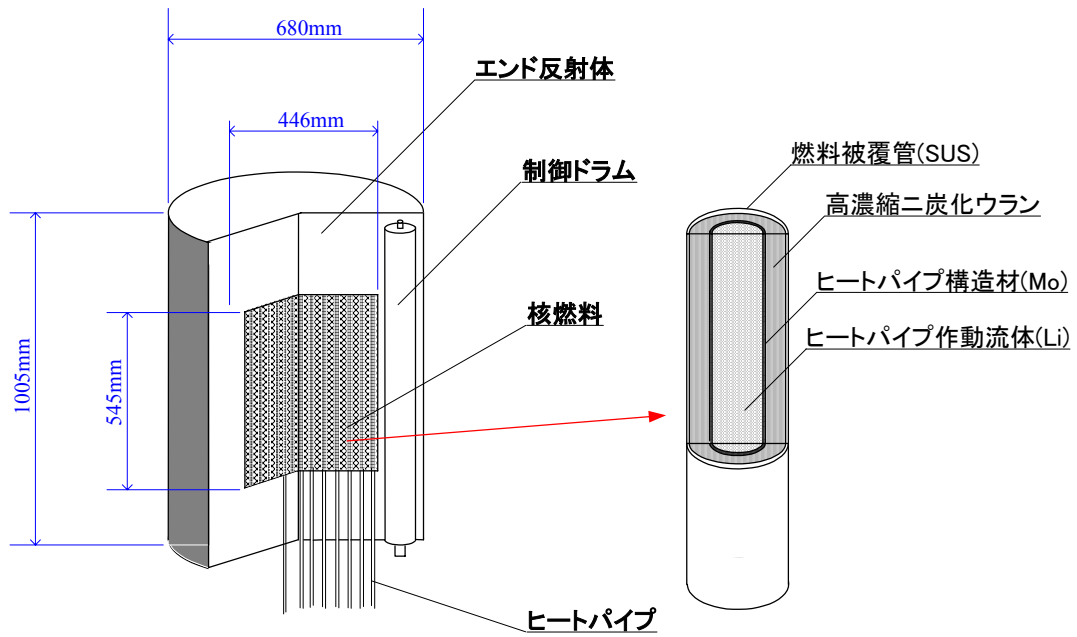


図1 設計炉心概略図

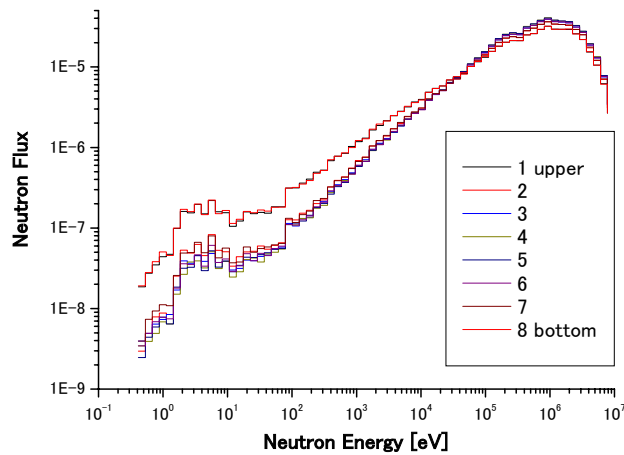


図2 エネルギースペクトル
91 pin power (include 91 heat-pipes)

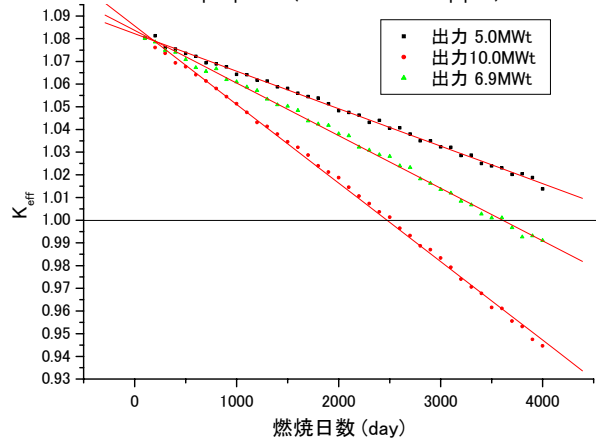


図3 燃焼計算結果