

低密度燃料を用いた超高中性子束炉の設計

理工学科 量子エネルギー工学コース 干場元祐

1. 背景 現在、中性子利用における中性子源としては、RI 中性子源、加速器中性子源、研究用原子炉(研究炉)が用いられている。これらの中性子源の中でも、研究炉は他の中性子源に比べ連続的に高強度の中性子束が得られることから、多くの利用目的に対応することができ、中性子源として非常に重要である。研究炉は、一般に知られている発電用原子炉とは異なり、中性子の利用を主な目的とした原子炉である。そのため、研究炉は高い中性子束が得られるように設計され、特に高い中性子束を発生する炉は、超高中性子束炉とも呼ばれる。これらの原子炉は中性子利用の需要に対応するために、より高い中性子束が得られるように改良されてきた。現在、世界で最も高い性能を誇るアメリカ合衆国の超高中性子束炉 HFIR では、最大熱中性子束 $2.5 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ が得られ、さらに $10^{16} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ を超える熱中性子束を目指して研究が行われている。そこで、本研究では、高い中性子束を得るために燃料の密度を小さくすることを提案し、低密度燃料を用いた超高中性子束炉の概念設計を行うことを目的とする。

2. 設計方針 原子炉内の中性子束と出力密度の関係は式(1)で表される。中性子束を高めると、それに比例して出力密度が増加するが、出力密度は冷却能力によって制限されている。そのため、高い中性子束を得るには、巨視的核分裂断面積を小さくして、出力密度当たりの中性子束 ϕ/p を高めることが重要となる。巨視的核分裂断面積は燃料核種の原子数密度に比例するため、本研究では、燃料の密度を小さくすることを検討する。

$$p = \kappa \Sigma_f \phi \quad (1)$$

ϕ : 中性子束
 p : 出力密度(体積当たりの熱出力)
 κ : 核分裂当たりの発生エネルギー
 Σ_f : 巨視的核分裂断面積

3. 六フッ化ウラン燃料を用いた炉心設計 六フッ化ウランはウランの化合物の中で最も沸点が低く、約 60°C で気体となる。この気体状態の六フッ化ウランを燃料に用いることで、燃料の密度を小さくすることが可能である。ウラン濃縮度については、20wt%(低濃縮ウラン)及び93wt%(高濃縮ウラン)それぞれの場合について設計を行った。設計する炉心は円柱形状とし、さらに、炉の中心部において高い熱中性子束を得るために、燃料領域の内側に反射体を設ける(図1)。また、反射体材料には中性子の吸収が少なく減速能に優れた重水を用いる。この設計体系におけるパラメータは炉心各部の寸法(炉心半径、炉心高さ、内側反射体半径、外側反射体厚さ)である。本研究では核計算コード MVP を用いてパラメータサーベイを行い、その結果を基に各部寸法を決定した。また、炉心の性能は「平均出力密度当たりの最大熱中性子束」により評価した。

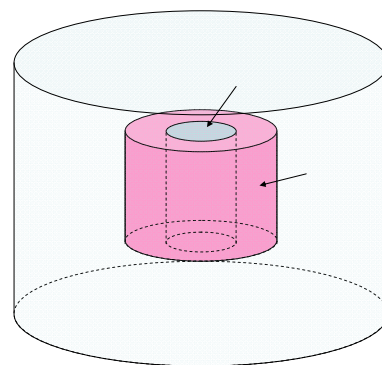


図1 円柱炉心体系の概略図

4. 設計結果と今後の課題 設計した炉心の最終案を表1にまとめる。本設計では、平均出力密度当たりの最大熱中性子束を現行の研究炉の約25倍にすることが出来た。このことから、超高中性子束を得るためには、低密度燃料を用いることが有効であることが確かめられる。本研究では、炉心の冷却能力を考慮せず、出力密度当たりの中性子束を高めることを重視したが、今後は、熱設計も行い、炉心の冷却能力を考慮した設計を行うことが必要である。

表1 設計した炉心の最終案

炉心形状	円柱	
燃料	UF ₆	
燃料圧力[atm]	1.0	
炉心温度[°C]	100	
ウラン密度[g/cm ³]	0.0079	
反射体材料	重水	
ウラン濃縮度[wt%]	20	93
内側反射体半径[cm]	50	50
外側反射体厚さ[cm]	200	200
炉心半径[cm]	185	85
炉心高さ[cm]	370	170
炉心体積[m ³]	36.9	2.5
平均出力密度当たりの最大熱中性子束 [(n/cm ² /s)/(W/cm ³)]	7.0×10^{13}	1.6×10^{13}
現行研究炉との比較	約25倍	約6倍