固有安全性を有するガス冷却高速炉 KAMADO-FR2 の概念
-超長寿命炉心(ULLC)の設計-

An inherent safety gas-cooled fast reactor concept of KAMADO-FR2
Design of ultra-long life core

*松村 哲夫[1]、亀山 高範[1]
[1]東海大

炭酸ガスを冷却材とし固有安全性を有する高速炉概念 KAMADO-FR2 [1)]に金属燃料(U-Pu-10Zr)を適用することで、Pu 富化度 8%で取出燃焼度 262MWd/kgHM の超長寿命炉心(ULLC)を設計した。ステンレス鋼の燃料集合体枠と金属燃料板で構成された燃料集合体は 333K 以下の原子炉プール（最終ヒートシンク）内に設置され、LOCA/LOF 時にも崩壊熱は燃料集合体枠表面から冷却されるため、核・熱的に固有の安全性が達成されることも解析により確認した。

キーワード：固有安全性、高速炉，ガス炉、超長寿命炉心(ULLC)、金属燃料

1. 炉心・燃料集合体概念　KAMADO-FR2 の燃料集合体形状は PWR17×17 燃料集合体と同じとし、5mm 厚のステンレス鋼(SUS)の燃料集合体枠と 0.3mm の SUS で被覆された 6mm 厚×3.7m 高の金属燃料板(9 枚)で構成されている（図 1)。4 体の燃料集合体をセットとし、このうち△の燃料集合体 2 体の内部の流路に上昇流、他の▽の燃料集合体 2 体の内部の流路に下降流として、1.55MPa の炭酸ガスが流れ、燃料板を冷却する。

2. 超長寿命炉心の実現方法　MVP 3.0 [2)]および MVPBURN を用いて、炉心周囲の中性子反射体を検討し、黒鉛（Graphite）が SUS より優れており、厚さは 1m 程度必要である事が示された（図 2)。燃料集合体内の体積比を燃料 26.1%、SUS などの構造材 11.5%、冷却材 57.8%にすることで、商用組成 Pu 富化度 8%で取出燃焼度 262MWd/kgHM の超長寿命炉心(ULLC)が達成できる（累積転換比 1.001)。燃料集合体枠および金属燃料板の表面に 0.02mm の B_4C を被覆することで燃料集合体内外が水没した場合も負の反応度効果(全水没時と運転時の差 $\Delta k_{inf}/k_{inf}$=-1.5%)となり、核的な固有の安全性を達成できる。

3. 燃料集合体の温度分布解析　有限要素法解析コード LISA [3)]を用いて、燃料集合体の温度分布を解析した。下降流の冷却材の炭酸ガスの平均温度を 650K とし、運転時の燃料の最高温度は 784K になった。これは、金属燃料の液相形成温度(923K 程度)を十分に下回っている。LOCA/LOF 時にも運転時の 1%の崩壊熱（炉停止後、数時間）で燃料の最高温度は 761K になり、熱的な固有の安全性を達成できる。

4. 議論　金属燃料は燃焼とともに大幅にスウェリングするため、実験炉の板状燃料の様に製造時に金属燃料板を湾曲しておくことで、その影響を吸収できると考えられるが、照射試験による実証が必要である。また、燃料集合体内外の圧力差による構造強度を緩和するため、原子炉プールを冷却ガスと同圧にすることが考えられるが、圧力調整の機能が必要である。

5. まとめ　本炉心概念では、^{235}U 濃縮度 9%のウラン燃料でも、233 MWd/kgHM まで燃焼が可能であり、FBR 使用済燃料を再処理することなく、ウラン、プルトニウム資源を有効に活用できる。

参考文献［1］松村, 亀山：原子力学会 2021 年春の年会 3B08, ［2］長家, 他, JAEA-Data/Code 2016-019 (2016), ［3］Sonnenhof Holdings. https://www.lisafea.com/index.html.

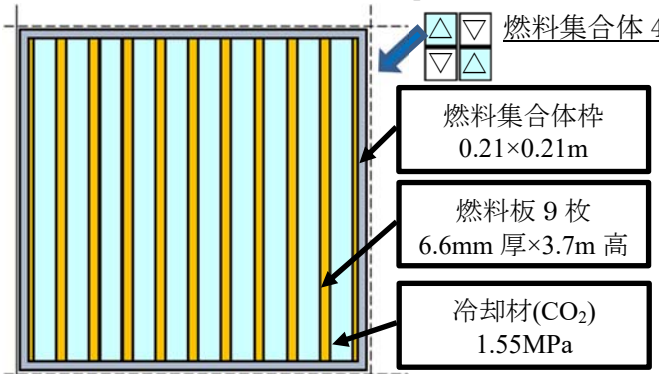

図 1 KAMADO-FR2 の燃料集合体概念（水平面）

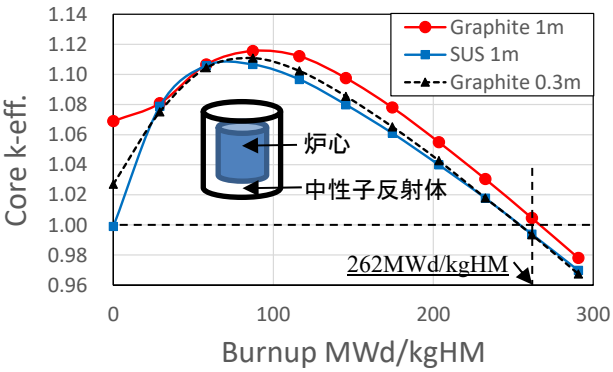

図 2 (U-Pu-10Zr)炉心の中性子反射体の検討

* Tetsuo MATSUMURA[1] and Takanori KAMEYAMA[1]
[1] Tokai University