

〔コメント3〕 炉物理・炉設計の見地から(2)

MAP I 嶋田 昭一郎

1. 高転換軽水炉開発の意義

高転換軽水炉はウラン利用を従来の軽水炉以上に向上させることを目的に、燃料棒の配列をより稠密にすることによって、燃料に対する冷却材(減速材)の体積比を下げ、中性子スペクトルを熱中性子領域から熱外中性子領域に移行させ、U-238やPu-240などの親核種への共鳴吸収を増し、転換比を従来の軽水炉における0.5~0.6から0.8~0.9に向上させることをねらって、提案された炉型である。米国¹⁾や西独²⁾の初期の設計では、冷却材対燃料ペレットの体積比を~0.5にしたものであった。しかし、その後西独のカールスルイエ³⁾や三菱の設計⁴⁾では構造上及び熱水力設計上成立可能な体積比は0.7~0.8程度となっている。体積比が0.5~0.8の程度の炉心では転換比は高いが、プルトニウム装荷量は多くなり、導入できるプラントの基数は少なくなる。

高速炉へのつなぎとして、プルトニウム貯蔵炉として優れているという議論もあるが、高転換軽水炉導入初期には、軽水炉へのプルトニウム利用(プルサーマル)との対比が問題にされるであろうから、プルトニウム装荷量は少ない方がよいという考えもある。フランスのフラマトム社の設計は冷却材対燃料比を1.1~1.4程度にしてプルトニウム装荷量を少なくしている⁵⁾。高転換軽水炉といっても炉型戦略により、稠密度には幅があることを念頭に置いて基礎研究を進める必要がある。

2. 燃料被覆材の選択と炉心特性

プルトニウム装荷量の点から、やや稠密度を落とした設計も考えられるが、この場合軽水炉において実績のある被覆材であるジルカロイ-4の使用が可能となる。ジルカロイ-4はステンレス鋼より中性子捕獲断面積が低いが、LOCA(1次冷却材喪失事故)時の膨水量や燃料棒彎曲に対する燃料棒間隙の制約が生ずる。しかし、冷却材対燃料体積比が1.0近傍以上では、上記の事象が問題とならない程度の燃料棒間隙を取ることができる。中性子スペクトルの熱中性子側への移行で、ステンレス鋼とジルカロイ-4の中性子捕獲断面積の差の効果により、転換率はジルカロイ被覆の方が有利になる。

ステンレス鋼被覆炉心では炉心の稠密度を高め、プルトニウム装荷量を多くし、高い転換率の達成が可能であり、ジルカロイ被覆炉心では炉心の稠密度を下げざるを得ないため、転換率はやや低下するが、プルトニウム装荷量を下げることができ、また、稠密度の低下によりPWR型軽水炉では使用しているケミカルシスが有効になり、制御棒本数を減らすことができる。被覆管の材質も炉型戦略によって変わる。

3. 炉設計上の問題点

本会合の目的から、核設計上の問題点に限定する。高転換炉はウラン資源節約の点からプルトニウムを有効に利用できる炉として注目をあびている。従って、高転換比で高燃焼度を達成する必要があるが、この2者は相反するものである。つまり高転換比を達成しようと炉心を稠密にすると、同じ富化度の場合燃焼度は低下する。又、稠密にするとボイド係数が正になる。PWRで使用されているケミカル・シムの効果は炉心の稠密化と共に悪くなり、制御棒に期待する反応度制御量が増加する。必要な制御棒を設置するのは炉心構造上大変である。高転換軽水炉の特性から、特に重要な設計量は

- 転換比
- 燃焼度
- ボイド係数
- 制御棒反応度効果

である。

この他に Power capability の点から

- 出力分布

が重要である。これらの設計を精度よく求める必要がある。

4. 設計精度要求と現状

核設計精度についてプロテウス実験データを WIMS-E で解析した結果から計算精度を求めると表1のようになる⁶⁾。k_∞の誤差は現PWRよりかなり大きい(2σベースで≤1.86%)。この点からも実験データの蓄積と設計手法の改善が必要である。

高転換炉といっても炉心の稠密度の点で

$$V_m / V_p = 0.5 \sim 1.4$$

の範囲が考えられる。高速炉に近いスペクトルから熱中性子炉に近い範囲にわたっている。

現在、熱中性子炉と高速炉に関してはデータも多く設計手法はほぼ確立していると見て良い。共鳴反応が主力である高転換炉では、共鳴反応の取扱いが重要である。最近、モンテカルロコードの発展がめざましくなり、形状近似に関する補正はモンテカルロコードとの対比である程度可能であろう。従ってライブラリーデータの整備と共鳴吸収の取扱いが主なテーマである。断面ライブラリー及び共鳴断面積処理法の違いによる影響をSRACコードにより、PROTEUSの実験データを解析することにより調べた結果は、表2のようである⁶⁾⁷⁾。ライブラリーの差による影響が大きい。

5. 臨界実験への要求

核設計精度を改善するには、実験データが必要である。原研で計画されている臨界実験へ期待するところが大きい、最終的にはプルトニウム棒による、ドライバー領域なしの臨界実験がほしい。この際、次の量をパラメータとすべきである。

1) 富化度 4%～8%

低富化度を必要とするのは、燃焼による富化度低下データを得るためである。

2) V_m/V_p 0.5～1.5

Hot状態では実質的に $\sim 0.7 \times V_m/V_p$ となるので V_m/V_p の小さい領域は有益である。

3) 被覆管材質

ステンレス鋼ジルカロイ-4

プルトニウムの成分は軽水炉より得られたものが望ましい。

6. 燃焼度データ

燃焼度を精度良く予測するには臨界実験データだけでは不十分で、何んらかの形で燃焼による反応度変化の実測データがほしい。高転換炉ではプルトニウムの元素成分比が余り変化しないので、臨界実験でプルトニウム成分変化及び富化度変化に対応した反応度変化はデータが得られると考えられる。従って分裂生成物の生成とその反応度効果に関するデータが得られれば良い。フラマトムが計画している振動法は1つの方法であろう。

参考文献

- 1) M. C. Edlund et al. : " Technical feasibility of a pressurized water reactor design with a low water volume fraction ", EPRI-NP-1833, May 1981
- 2) W. Zeggel et al. : " General features of advanced water reactors with improved fuel utilization ", Nuclear Tech. Vol. 159 Nov. 1982
- 3) C. H. M. Broeders et al. : " Design of a heterogeneous or homogeneous (Pu, u)O₂ core with a tight fuel rod lattice for an advanced pressurized light water reactor ", IAEA-TECDOC-344, p.72, 1984
- 4) S. Ogura et al. : " Development strategy on advanced and future PWR ", IAEA-TECDOC-344, p.21, 1984
- 5) J. P. Millot : " FRAMATOME studies on high conversion water reactor concept ", IAEA-TECDOC-344, p.43, 1984
- 6) 佐治悦郎, 他 : 三菱重工試験研究報告書, 1986

7) 石黒幸雄, 他: “高転換加圧水炉(HCPWR)の核特性解析上の問題点”, JAERI-M 84-180, 1984

表 1

E I R P R O T E U S P h a s e - 1 実験解析をベースとしたWIMS-E誤差評価

WIMS-EによるPROTEUS実験解析結果

(C/E値)

平均高化度 反応度比*	ボイド率	6 w t %		8 w t %	
		0 %	1 0 0 %	0 %	1 0 0 %
F_5 / F_9		0.989	0.953	1.027	0.950
C_8 / F_9		0.951	1.017	1.025	1.016
F_8 / F_9		0.983	0.940	1.034	1.009
F_1 / F_9		0.979	0.940	—	—
k_{∞}		0.995	1.022	—	—

* F: Fission, C: Capture, 5: U^{235} , 8: U^{238} ,
9: Pu^{239} , Pu^{241}

核設計計算を待ちうる不確定性

PROTEUS実験解析におけるWIMS-Eの評価誤差

核パラメータ	ボイド率	0 %	1 0 0 %
k_{∞}		1.2 %	2.6 %
転換比		3.5 %	—
ボイド反応度		2.6 % $\Delta k / k$	

1のベース

表2 断面積ライブラリー及び共鳴断面積処理法の違いによる影響
 (SRACによるPROTEUS実験解析)

核パラメータ		ボイド率	
		0 %	100 %
* 断面積ライブラリーの差	k_{∞}	1.1 %	2.4 %
	転換比	3.4 %	—
** 実効分離共鳴断面積作成法の差	k_{∞}	0.5 %	<0.1 %
	転換比	1.5 %	—

(1 σ の不確定性ベース)

* JENDL-2 or ENDF/B-IV

** PEACO or f-Table