

話 題(その I)

高転換軽水炉の炉物理と核データ

—日本原子力学会 61 年年会・核データ炉物理特別会合—

最近、高転換軽水炉に対する関心が高まっている。今までは、高速炉や熱中性子炉を主たるセンサーとして核データの整備が行われてきた。しかし、高転換軽水炉では今までと違った見地から核データに対する要望が出されている。今回の核データ炉物理特別会合では、この点に焦点を当て、次のようなプログラムで高転換軽水炉の性格、それに対する核データの現状について講演をしていただき、さらに、種々の立場からのコメントを出していただいた。

- | | | |
|------------------------------|--------|--------|
| 1. 炉物理 | (原研) | 石黒 幸雄 |
| 2. 核データ | (NAIG) | 吉田 正 |
| 〔コメント〕 | | |
| 1) 感度解析 | (阪大) | 竹田 敏一 |
| 2) 炉物理・炉設計の見地から(1) | (NAIG) | 水田 宏 |
| 3) " (2) | (MAPI) | 嶋田 昭一郎 |
| 4) " (3) | (日立) | 竹田 練三 |
| 5) 実験的検証 | (原研) | 吉田 弘幸 |

本稿は各講演者に特にお願いして、講演の内容を「核データニュース」用にまとめていただいたものである。

(1) 炉物理

原研 石黒 幸雄

高転換軽水炉(HCLWR)においては、炉心内の冷却水を極端に少なくし、中速中性子スペクトルが実現するように設計されている。炉心の中性子スペクトルを硬化させることによって ^{238}U の共鳴吸収を増加させ転換比を高めることが、HCLWRの狙いである。スペクトルの硬化による ^{238}U の核分裂の増大も、直接核燃料の有効燃焼につながり、HCLWRの意義を高めるものとなっている。

Table 1には、在来LWRとの比較においてHCLWRの炉物理的特徴が示されている。LWR及びFBRに比べて、HCLWRでは共鳴エネルギー領域の核データ及びスペクトルが極めて重要となり、このような炉物理系については、我々は未経験である。ちなみに、HCLWR炉心においては、分裂反応の約40%、吸収反応の約70%が共鳴エネルギー領域(1eV~1keV)で起こる。

共鳴エネルギー領域といえば、実効断面積の計算や核データ評価のうえで、最も複雑で面倒な取り扱いを必要とする領域である。HCLWRの場合、状況をさらに複雑にしている点は、臨界性や燃焼度を保つためにPu富化度を高める必要があることである。これまで設計例では、Pu fissile富化度は6~9%である)。富化度を高めることによる ^{240}Pu の1eVの共鳴レベルの影響は大きく、HCLWRの炉特性が在来LWR特性と決定的に異なる要因となっている。HCLWR系で、冷却材中にボイドが発生すると中性子スペクトルが硬化し、 ^{240}Pu の1eVレベルの中性子共鳴吸収が減少することにより、炉内に正の反応度が導入される。一方、冷却材ボイド反応度は種々の核反応やスペクトルのボイドによる変化の複合的競争過程の結果として表現される。FBRの場合と比べて、HCLWR系では ^{240}Pu の影響の大きいことから、ボイド反応度係数の計算の際の競争過程が複雑化し、高い予測精度を得るには困難を伴うものと予想される。それ故、安全性上最も重要度の高いボイド反応度係数の予測精度を向上させ、設計マージンを低減させるためには、感度解析等に基づく核種相互間に矛盾のない核データ評価が重要であると考えられる。ここで注意しておきたいことは、 ^{235}U 濃縮燃料を用いて中速スペクトルを実現する炉心を設計しても、減速材ボイド係数が設計上の重要な問題となることがないということである。

HCPWR系の共鳴領域の問題の1つとして、これまでの重核種の共鳴吸収に関する課題の他に、新たにFPの共鳴の遮蔽効果の重要性が浮かび上がってきた。即ち、HCLWR系では転換比が高いため、燃焼に伴う反応度損失のうちfissileの減少によるものが40%程度を占めるに過ぎず、残り約60%はFPの蓄積によるものである。FPの中で寄与度の大きい核種の大部分は鋭い共鳴構造を持っており、FPの蓄積効果を正確に評価するためには、FP共鳴の自己遮蔽効果及び重核種による干渉効果を考慮することは極めて重要であることが判明している。現在、原研の原子炉システム研究室では、高野氏を中心に、FP共鳴の遮蔽効果の研究が精力的になされている。Fig. 1には、研究成果の一部であるFPの共鳴自己遮蔽効果の燃焼反応度損失に対する影響が示されている。この図は $V_M/V_F \cong 0.8$ に対応している。50GWD/Tまで燃焼可能と仮定すると、自己遮蔽効果を考慮した場合、反応度で約0.5%、燃焼度で約10%程度得する可能性のあることを示している。 ^{238}U 等の重核との干渉効果を考慮すれば、燃焼度がさらに伸びると期待される。一方、FPの蓄積効果が重要であることから、FPの核データ自身の不確かさを低減することも極めて重要な課題であり、シグマ委員会に期待するものが大きい。

上では、2つの例を挙げてHCLWRにおける共鳴エネルギー領域の重要性を指摘してきた。この領域での炉物理及び核データ上の具体的問題点について触れる代りに、HCLWR開発の先進国であるヨーロッパの3国の研究開発項目をTable 2及び3に示した。これらの表は、昨年11月のヨーロッパでの海外調査に基づいて作成したものである。合同会合当日、瑞慶覧氏(日立)から、「今さ

ら項目……のような研究をやるとはどのようなことですか？」との質問を受けたが、ヨーロッパのHCLWRの設計に用いられているソフトウェアの現状も把握できるものと考えて、これらの表を示した。

幸いにも、我が国で開発されたHELIOS・HX (NAIG-東芝)¹⁾及びSRAC (原研)²⁾では、Table 2及び3に示した課題のうちソフトウェアに関するものは、大部分解決されている。Fig. 2には、HCLWR系における k_{∞} 及び主な反応率比の実験値³⁾に対する種々のコードの予測精度の現状を示した。ここで、WIMS-D及びEPRI-CPMは、熱中性子炉用に開発されたものである。これらを最新のコードの結果と一緒にして比較するのは適当でないかもしれないが、これらに近いデータ及び手法に基づいてHCLWR特性の評価が行われているのも現状である。新しいコードによる解析結果は概ね良好であるが、FBRやLWRでのベンチマーク解析に比べて、必ずしも予測が良くない。特に、転換比に関係するC8/F9及び速中性子核分裂に関係するF8/F9の予測精度が悪く、 k_{∞} に対するC/Eが良いのは、偶然の一致とも考えられる。これらの実験体系においては、用いる核データが同じ場合、モンテカルロ・コードと解析コードの結果の差が、上記C/Eの1からの差に比べはるかに小さいことから^{4) 5)}予測精度の悪さの大部分の原因を核データに帰すことが妥当と判断される。それ故、炉物理積分量に対する実験値も重要な核データ情報として捉えて、感度解析による核データ評価又は核データの調整が必要であると考えられる。

これからHCLWRの開発研究を進めるに当たっては、転換比 ~ 0.9 の確保、十分な負の出力係数の確保、さらに十分に反応度制御をできる炉心を設計する必要がある。したがって、設計マージンを低減し、HCLWR性能の向上を図るためには、FBRとも共通点が多い次のデータ及び手法上の研究課題を着実に解決することが不可欠であると考えられる。

- (1) 炉物理量に対する実験値も考慮したPu同位元素及び ^{238}U の同時核データ評価 (^{238}U の速中性子核分裂が重要であることから、その非弾性散乱断面積の評価も重要である。)
- (2) FP断面積評価 (特に、共鳴エネルギー領域)
- (3) 燃焼チェーン・モデルの確立
- (4) 共鳴レベル間の干渉効果 (特に、重核種とFP核種との相互干渉効果)

参考文献

- 1) Yamamoto, M. et al.: "Development and Validation of TGBLA BWR Lattice Physics Methods", ANS Topical Meeting on Reactor Physics and Shielding, Sept. 17-19, Chicago, Vol. I, 364 (1984).
- 2) Tsuchihashi, K. et al.: "SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code

- System for Reactor Design and Analysis”, JAERI-1285 (1983).
- 3) Chawla, R. et al. : Nucl. Technol., 67, 360 (1984).
 - 4) 石黒幸雄, 他 : 日本原子力学会, 昭和60年秋の分科会, E-12 (1985).
 - 5) 山本宗也, 他 : 日本原子力学会, 昭和61年年会, A 6 (1986).

Table 1 在来PWRとの比較におけるHCLWRの炉物理特徴

特 徴	1 次 的 影 響	2 次 的 影 響	備 考
<p>減速能→低減 ↓ 格子→稠密化 ↓ (六方格子) ↓ Pu含有量→高</p> <p>◎Puの質劣化しない。 ○最良のPu貯蔵施設</p>	<p>スペクトル→硬化</p> <p>非均質効果→大 (?)</p>	<p>◎転換比→大</p> <p>◎減速材ポイド係数→正方向へ (温度係数)</p> <p>◎熱エネルギー領域の重要度→小 ○$1/\nu$ 吸収体効果→小</p> <p>◎共鳴エネルギー領域の重要度→大 ○共鳴を有する核種の反応率割合→大</p> <p>◎速中性子領域の重要度→大</p>	<p>○K_{eff} の燃焼変化→小 (FP効果大) ○燃焼に伴う出力変動→小 ×安全余裕→厳しくなる</p> <p>○FP及び構造材吸収効果→小 ×制御棒及びケミカルシムによるボロン価値→小</p> <p>○新しい炉制御方式の開発必要</p> <p>○分裂反応の約50%, 吸収反応の約70%が起る。 ○FP→自己遮蔽効果 ○共鳴吸収制御材の可能性 ×計算手法の複雑化</p> <p>×フルエンス→大</p>

Table 2 炉物理的研究課題(I)

フランスにおける研究開発課題 (APOLL02, CRONOS)

- ◎ 共鳴エネルギー領域の断面積データ及びそれらの取り扱い
 - ・ 特に、共鳴自己遮蔽効果、共鳴レベル間の干渉効果
 - ・ 高アクチノイドの取り扱い方
 - ◎ 熱中性子炉用コードと異なる幾何形状の取り扱い
 - ◎ Pu / 水系格子におけるボイド及び温度反応度係数
 - ◎ 燃焼チェーン及びFPデータの充実
 - ・ 六方格子燃料集合体の設計
 - ・ ブランケットの有効性
 - ・ 炉心内部の変更
- } 設計関連課題
-
- ◎ CEAでは、炉物理実験 → 最重点課題
 - ・ データ及び手法の信頼性の向上
(炉物理パラメータの予測精度の不確定性の低減)
 - ◎ 臨界集合体EOLEでの実験：ERASME
 - 目的：U₀₂ - PuO₂ 燃料稠密軽水格子系での
計算手法の妥当性の検討
 - ◎ グルノーブルのMULUSINE施設での照射試験：ICARE
 - 目的：高いアクチノイドやFPの吸収率を測定し
燃焼計算に有効なデータの取得
 - ◎ MINERVEでのオシレーション技術を用いた補足実験
 - 目的：照射燃料内のFPのグローバルな吸収のオシレーション法
による測定 (燃焼による反応度損失の測定)

Table 3 炉物理的研究課題(II)

西独における研究開発課題 (K f K + K B U)

- ・ (F B R解析コード KAPROS + WIMS/D + KARABUS (燃焼))
- ◎コードの改良及び検証
 - ・ 共鳴の取り扱い (Nordheim theory の導入)
 - ・ 群定数計算でのWeighting spectrumの改良
 - ・ 実験データによる検証

- ◎E I R, K f K, K W U 協力研究 (under contract)
 - ・ E I R : 炉物理実験 (PROTEUS)
 - ・ K f K : データ及び手法の確立
 - ・ K W U : 設計及びプロジェクトの推進
 - ――→ 1988までにfeasibility study を終了させる。

スイス (E I R) における研究開発課題

- ◎P R O T E U SにおけるPhase II 実験 (1985年6月臨界)
(7.5% fissile Pu, iron cladding, $V_f/V_m = 2.07$)
 - ・ k_∞ ($\Delta k_\infty > 0$?)
 - ・ 中心反応率比 (中性子バランスを決定する)
 - ・ 種々の制御棒材物質の中心ロッド価値
 - ――→ロッド価値比
 - (1986年初頭にcore7の実験完了) → (ボイド実験)
 - ・ 格子配置変更効果、ブランケット・ゾーン等での出力特性→
 - 1987年中に実施

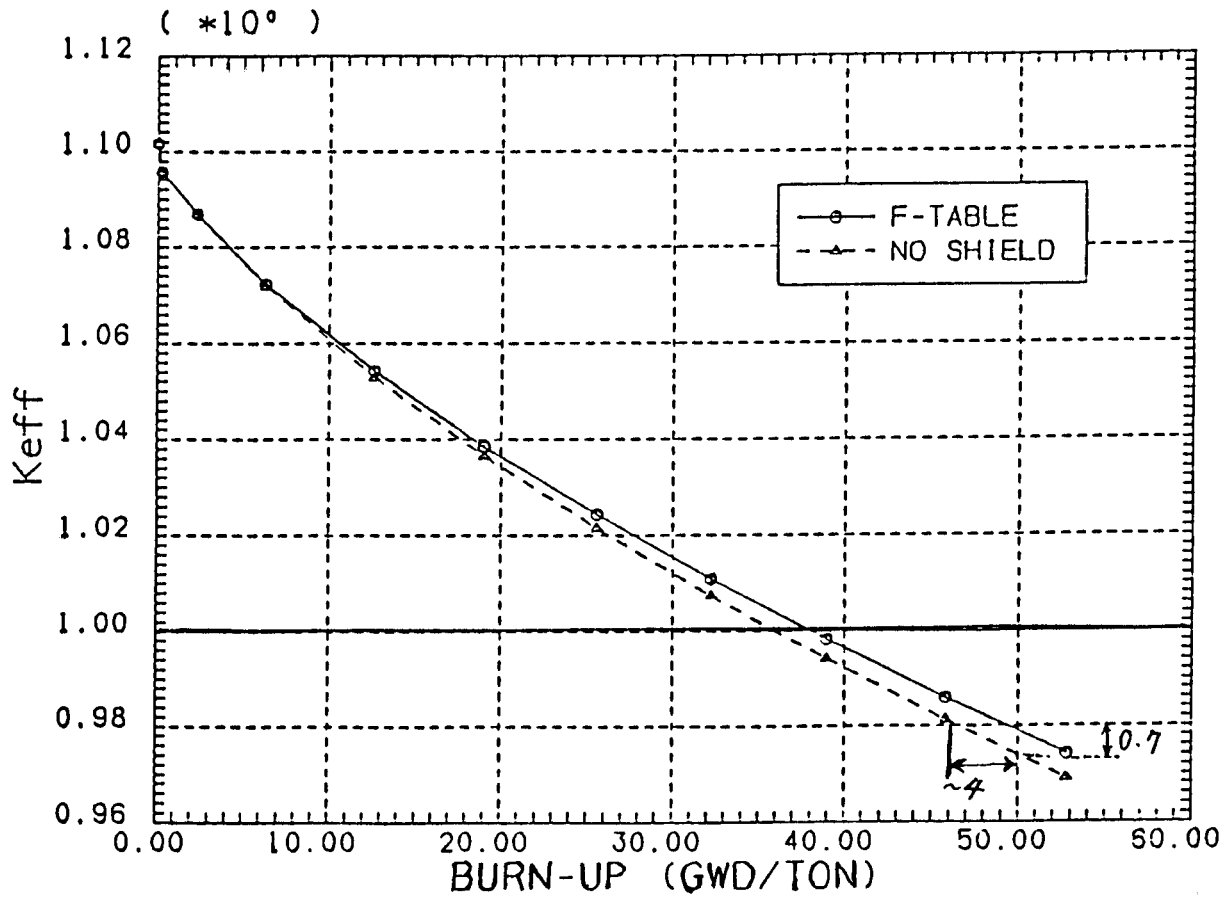


Fig.1 Reactivity Loss by burnup

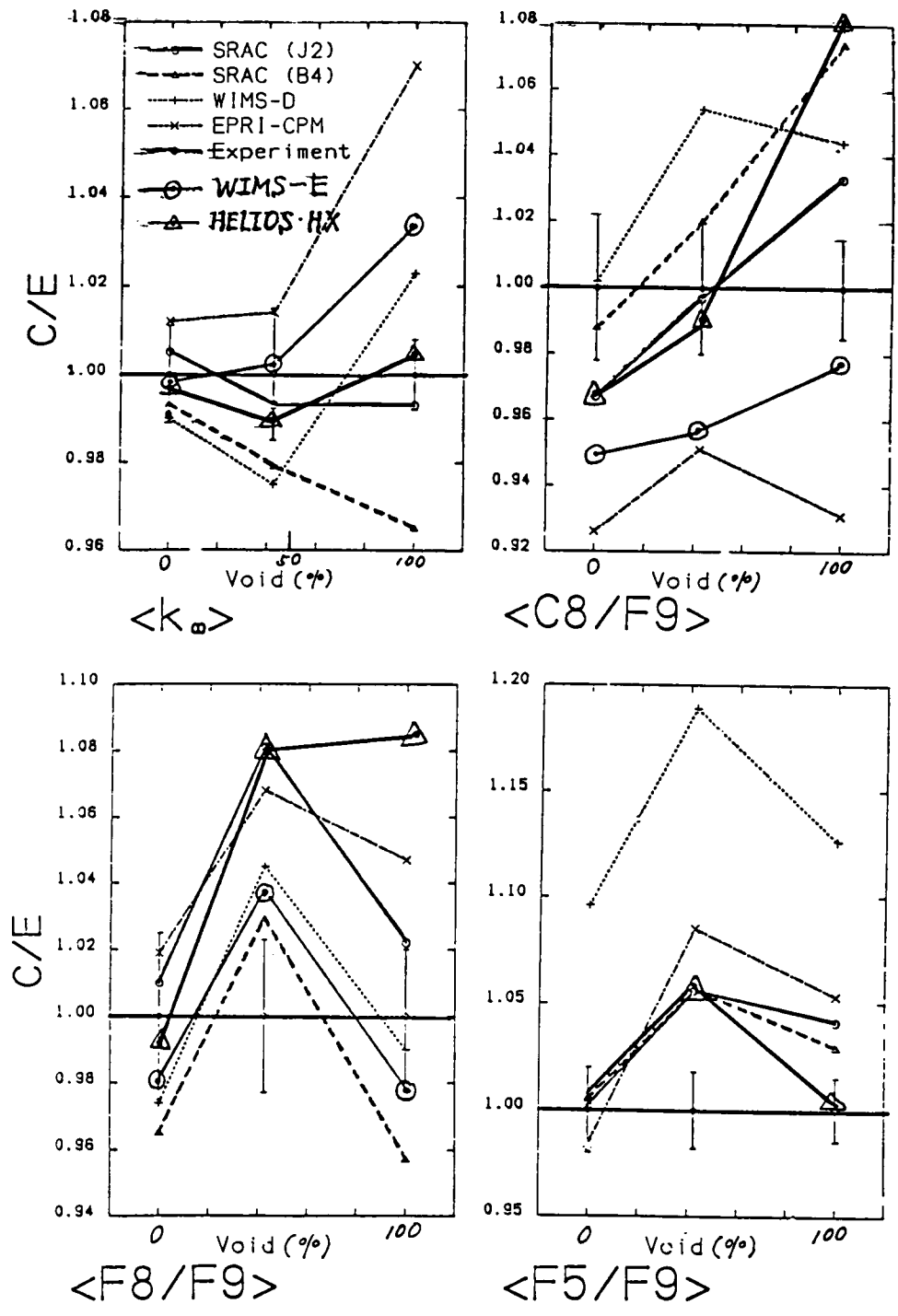


Fig. 2 Reaction rate ratio core 1~3 (SRAC & other codes)