

＜委員会報告・「炉物理研究委員会」活動報告＞ 「軽水炉次世代燃料の炉物理」ワーキングパーティー活動報告

原子力安全委員会事務局 佐治悦郎

1. はじめに

炉物理研究委員会の下部組織である原子炉システム専門部会において平成11年度より始まったワーキングパーティー（WP）形式の活動は、原則、継続とせず2年毎に成果報告を行って解散し、その後は、新しいテーマを選定しグループもそれに応じて新たに組織するという方式を採ることとされている。そのひとつとして組織された「軽水炉次世代燃料の炉物理」WPは、平成12年度までの活動報告をJAERI-Research 2001-046¹⁾にまとめたが、その活動内容に鑑み継続が必要と考える意見がWPメンバーの大勢を占め、平成13年度から始まる第2期のWPのひとつとして活動の継続を提案した。炉物理研究委員会はそれを受け、他のWPの新設と平行して、当WPの活動継続を決定した。第2期WPのメンバーは以下の通り(五十音順、所属は平成14年度末当時)。

相沢乙彦(武蔵工大)、青山肇男(日立)、秋保秀一(開発計算センター、平成13年11月まで)、池原正(GNF-J)、井田俊一(三菱重工)、伊藤卓也(原燃工)、猪原敏照(電源開発)、今村康博(四電)、宇根崎博信(京大炉、幹事)、大木繁夫(サイクル機構)、奥村啓介(原研、幹事)、亀山高範(電中研)、北田孝典(阪大)、小坂進矢(TEPSYS)、阪元重康(東海大)、櫻木廣隆(四電エンジニアリング)、桜田光一(東芝)、佐治悦郎(原安委、リーダー)、茂野一雄(開発計算センター、平成13年11月から)、杉暉夫(原研OB)、中島健(原研、幹事)、中島鐵雄(NUPEC)、長谷川明(原研)、別所泰典(NUPEC)、山本章夫(原燃工、幹事)、山本徹(NUPEC)、吉岡研一(東芝)

本稿は、こうして始まった「軽水炉次世代燃料の炉物理」WPの第2期（平成13～14年度）活動内容についてその概要を報告するものである。

第1期で得られた成果については、上記報告書を参照されたいが、概ね以下の通りである。

- ・ 軽水炉の次世代燃料仕様を想定した核解析ベンチマーク問題の設定
- ・ WPメンバー所属の各機関によるベンチマーク問題解析
- ・ 得られた解析結果の比較検討

第2期の活動を開始するに当たっては、以下のような活動内容や目標を念頭に置いた。

- ① 既に提出されている解析結果の見直しや新たな解析の実施

- ② 本WP活動成果の対外発表の促進と外部からの参加勧誘
- ③ 解析結果のばらつきが大きいものについての原因分析
- ④ 臨界実験データや照射後試験データを利用した最良解の探索
- ⑤ 各解析項目に対する要求精度の検討
- ⑥ 現行炉心の解析精度との比較
- ⑦ 望まれる実験や今後の研究課題の抽出、提案

以下、これらの項目に沿って成果概要を報告する。

2. 既に提出されている解析結果の見直しや新たな解析の実施

MVP-BURN と MCNP-BURN2 の結果の見直しによって、JENDL-3.2 を用いた2つの連続エネルギーモンテカルロ計算結果の一致の度合いが向上した。まだ、一部検討の余地は残るものの、連続エネルギーモンテカルロ計算において同じ核データライブラリを用いる限り、異なるコード間でも結果の一致を見ることがある核データライブラリを用いた場合の参照解を与えるという点で、非常に有意義な成果である。一般に連続エネルギーモンテカルロ計算は、理論的にはそのような理解がされてはいるものの、実際には個々の計算コードが取り得る自由度やバグの存在が否定できないこと等から、現実の参照解の存在はなかなか確認できない。今回は、異なるコード間の比較をかなり詳細に行った結果として、現実一致を見た解を得ているのであり、当 WP が提案したベンチマーク問題に対する JENDL-3.2 を用いた場合の参照解を、部分的にせよ与えることができたと考えられる。また、このことは個々の連続エネルギーモンテカルロコードの信頼性を相互に高める結果となっている。

新たな解析結果としては、まず JENDL-3.3 を用いた SRAC 解析が注目される。SRAC を用いた解析では、今までも異種の核データライブラリ間の比較検討が実施されていたが、今回の結果が加わることによって、核データの違いによる核特性への影響の定量的検討が一層進められた。

PHOENIX-P による解析結果が加わったことも意義深い。このことにより、我が国の発電用軽水炉の炉心設計を行っている主要機関からの解析結果がほぼすべて出揃ったことになる。従来、実用炉設計コードの計算結果を専門家同士が相互に議論する機会は、許認可や商業機密との関係から難しいと考えられていたが、今回の試みにおいては、次世代燃料という仕掛けを用意することにより、そのハードルを越えることに成功した。このことは、今般、原子力産業界に要求されている透明性の確保の観点から大変意味のあることである。本 WP 活動が、我が国の軽水炉炉心核解析技術の向上への貢献はもとより、原子力利用において専門家が社会への説明責任を果たしていくに当たって、この分野での専門家同士の意見交換の場の素地を形成できたと評価したい。

表1に、現時点でのベンチマーク参加機関とコード一覧を示す。

表1 ベンチマーク参加機関とコード一覧 (太字は改訂または新規追加)

Data Index	Organization	Code	Base Library	Pin Cell		PWR Assembly		BWR Assembly	
				UO2	MOX	UO2	MOX	UO2	MOX
MVP-BURN(J32)	JAERI	MVP-BURN	JENDL-3.2	12/03/2002	12/03/2002	-	-	-	-
SRAC(J32)	JAERI	SRAC	JENDL-3.2	11/03/2002	11/03/2002	-	12/03/2002	-	-
SRAC(J33)	JAERI	SRAC	JENDL-3.3	04/02/2003	04/02/2003	-	-	-	-
SRAC(F22)	JAERI	SRAC	JEF-2.2	11/03/2002	11/03/2002	-	-	-	-
SRAC(B65)	JAERI	SRAC	ENDF/B-VI(R5)	11/03/2002	11/03/2002	-	-	-	-
MVP-BURN(J32/KU)	KURRI	MVP-BURN	JENDL-3.2	-	-	23/05/2001	23/05/2001	-	-
MVP-BURN(J32/OS)	Osaka Univ.	MVP-BURN	JENDL-3.2	-	-	-	-	23/05/2001	23/05/2001
CASMO(F22/TE)	TEPSYS	CASMO-4	JEF-2.2	05/11/2002	05/11/2002	-	-	23/05/2001	23/05/2001
CASMO(B4/NF)	NFI	CASMO-4	ENDF/B-IV,V	23/05/2001	23/05/2001	23/05/2001	23/05/2001	-	23/05/2001
NULIF(B5)	NFI	NULIF	ENDF/B-V	23/05/2001	-	-	-	-	-
CASMO(B4/NU)	NUPEC	CASMO-4	ENDF/B-IV,V	-	-	-	-	23/05/2001	23/05/2001
SHETRAN(B63)	SEPCO/YONE	SHETRAN	ENDF/B-VI(R3)	28/05/2002	28/05/2002	28/05/2002	28/05/2002		-
TGBLA(B5)	GNF-J	TGBLA	ENDF/B-V	23/05/2001	23/05/2001	-	-	23/05/2001	-
VMONT(J32)	GNF-J	VMONT	JENDL-3.2	23/05/2001	23/05/2001	-	-	23/05/2001	-
MCNP-BURN2(J32)	Toshiba	MCNP-BURN2	JENDL-3.2	20/10/2002	07/02/2003	-	-	07/02/2003	-
FLEXBURN(J32)	CRIEPI	FLEXBURN	JENDL-3.2	23/05/2001	23/05/2001	23/05/2001	23/05/2001	-	-
LWRWIMS(F22)	EPDC/KCC	LWRWIMS	JEF-2.2	23/05/2001	23/05/2001	-	-	-	-
PHOENIX-P(B63)	MHI	PHOENIX-P	ENDF/B-VI(R3)	31/01/2003	31/01/2003	31/01/2003	31/01/2003	-	-
HELIOS(B6/KA)	KAERI	HELIOS	ENDF/B-VI	19/12/2001	19/12/2001	19/12/2001	19/12/2001	-	19/12/2001

日付(日/月/年)はデータの最終更新日を示す。"- "は該当データ無し。

JAERI : 日本原子力研究所、KURRI : 京都大学原子炉実験所、Osaka Univ. : 大阪大学工学部、TEPSYS : テプコシステムズ、NFI : 原子燃料工業、
 NUPEC : 原子力発電技術機構、SEPCO : 四国電力、YONE : 四電エンジニアリング、GNF-J : グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン、
 Toshiba : 東芝、CRIEPI : 電力中央研究所、EPDC : 電源開発、KCC : 開発計算センター、MHI : 三菱重工業、KAERI : 韓国原子力研究所

3. 本WP活動成果の対外発表の促進と外部からの参加勧誘

WP の各メンバーにより、精力的に外部発表が行われた。ベンチマーク問題の詳細な仕様は、英文化して日本原子力学会の英文誌に掲載され⁷⁾、これにより海外での紹介を容易にした。活動成果については、日米原子力学会の定例会や炉物理国際会議において論文発表を継続して実施した^{2)~6), 8), 9)}。今後も、炉物理国際会議(PHYSOR2004)において論文の発表を予定している¹⁰⁾。また、ベンチマーク問題の詳細仕様やすべての計算結果がインターネットを通して取得できるよう、ホームページを開設した。アドレスは以下の通り。

<http://hachi.tokai.jaeri.go.jp/Committee/LWR-benchmark/>

以上の努力により、韓国及びフィンランドから各 1 件、ベンチマーク解析に参加申し出があった。

ホームページの開設は、ベンチマーク問題やその計算結果の利用の容易さを飛躍的に向上させた。潜在的な需要は国内外を問わずあるはずであり、今後も各メンバーによる自主的な広報活動が期待される。

4. 解析結果のばらつきが大きいものについての原因分析

計算結果の見直し等により、ばらつきは前回報告のときよりは小さくなってきている。ピンセル問題の計算結果の差異については、同一コードで異なったライブラリを用いた結果やその逆の組み合わせ、燃焼チェーンの違い、1 群断面積の比較、主要核種の核データの感度解析等を通して、原因分析がかなり進んだ。UO₂ ピンセルの無限増倍率は核データライブラリへの依存性、特に主要核種である U-235 の差異が大きく効いていること、MOX ピンセルでは同様の依存性は比較的小さいものの、それは各核種の寄与の相殺によるものであること等が判明した。MOX ピンセルの無限増倍率においては、ENDF/B-IV, V 他の核データライブラリ(以下、単に B4 という)を用いた CASMO-4 の結果が他のコードとは異なった傾向を示している(図 1 参照)が、この原因は、プルトニウム同位体の断面積にあるようである。しかし、CASMO-4/B4 の MOX 燃料に対する精度検証は他コードに比較しても充実しており、現段階ではどちらが正しいかを結論することはできない。さらに MOX ピンセルの燃焼度反応度損失やドップラー反応度についてみると、CASMO-4 と並んで検証結果が充実している PHOENIX-P の結果が、CASMO-4 と非常に近い値を与え、しかもそれらは他コードの結果とは異なった傾向を示している。燃焼反応度損失については、分析の結果、同様の原因に基づくものではないことが判明しているが、次に述べる TGBLA のケースも含め、実績や検証結果の豊富な設計コードが他のコードとは異なった傾向を示すという事実は興味深い。

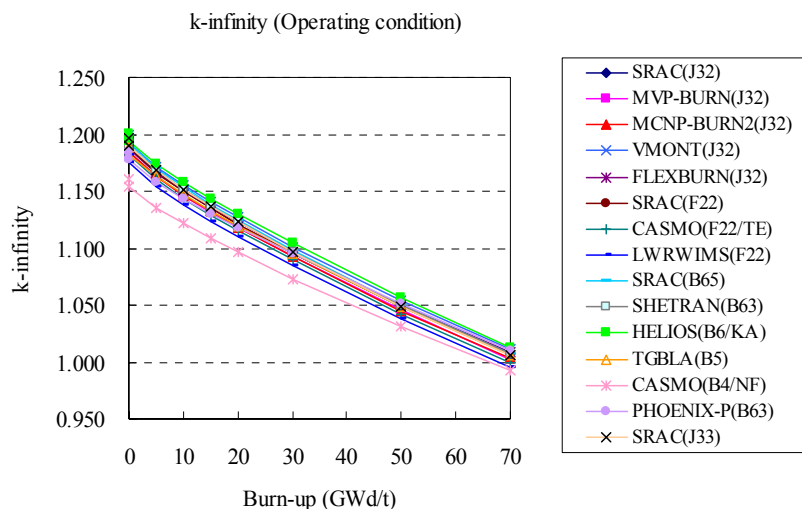


図 1 MOX 燃料ピンセル問題における無限増倍率

集合体計算において注目すべき結果の差異は、集合体無限増倍率の Gd 燃焼に伴う増加傾向の差異である。特に BWR-UO₂ 集合体において、世界的に見て最も実績が豊富と考えられる BWR 核設計コード、TGBLA が他のコードと異なった傾向を与えていること(図 2 参照)は特記に値する。今回はその差異を分析するまでには至っていないが、高燃焼度化が進めば進むほど、Gd の燃焼解析の重要性は増すことになるので、今後の検討課題として認識しておくべきであろう。

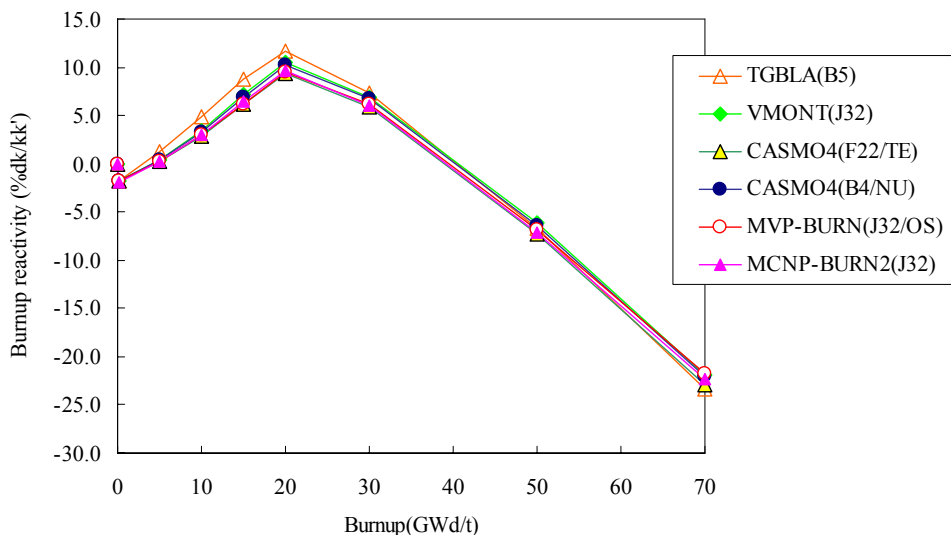


図 2 燃焼反応度の比較 (BWR-UO₂ 集合体)

5. 臨界実験データや照射後試験データを利用した最良解の探索

VENUS(VIP-BWR/PWR), VENUS-2, MISTRAL 臨界実験(いずれも MOX 燃料を用いた臨界

実験)結果に基づく実効増倍率の検討が行われた。これらのうち、まず計算手法上の参照解を与えると考えられる連続エネルギーモンテカルロ計算コード、MVPによる実効増倍率の結果に着目する。JENDL-3.2を用いた結果が最も多く得られているが、概ね過大評価が多い(VIP-BWR結果は良好)。一方、JENDL-3.3の結果は、VENUS-2では良好な結果を与えるものの、VIP-BWRでは過小評価となっている(MISTRALの結果はない)。VIP-BWRは、Gd入り燃料を有しているので、仮にGd価値の過大評価があるとすれば、JENDL-3.2は過大評価側にシフトし、JENDL-3.3は一致度がよくなって、他の結果と整合することになるが、ベンチマーク問題におけるピンセル結果と集合体結果を比較してもそのような傾向はみられない(MVP/JENDL-3.2が増倍率を大きめに評価する傾向は、ピンセルからGd入り燃料を含む集合体になっても変わらない)。結果として、これらの実験解析からは、 UO_2 、MOX燃料ともMVPと組み合わせて最良といえる核データライブラリの組み合わせは見出せない。

他のコードに対する検討結果としては、CASMO-4の検討結果がある。前述の通り、CASMO-4/B4は、MOXベンチマーク結果の無限増倍率において他のコードと異なった傾向を示していたが、臨界実験解析結果では、VIP-BWR、PWRともほぼ良好、MISTRALで過大評価(但し、MVP/JENDL-3.2ほどではない)という結果になっている。因みにVIP-BWRでは、JEF-2.2の結果も報告されているが、B4の結果とほとんど同じである。このようにベンチマーク結果で見られた差異が臨界実験解析結果において見られないのは、プルトニウム富化度の違いにあることが判っている。高富化度MOX燃料による臨界実験が待たれるところである。

実効増倍率以外の結果としては出力分布があるが、一部の問題を除いて概ね実験と解析の一致は良好であり、これはベンチマーク結果のばらつきが少ないこととあいまって、解析結果の信頼性が高いことを示している。上述の一部の問題とは、 UO_2 領域とMOX領域の出力 mismatchesの再現性の問題であるが、これは実験データ側に検討の余地があるようで、現状では解析結果を吟味する材料には使わないほうが良さそうである。

燃焼後の各核種存在量の検討として、照射後試験で得られた UO_2 燃料棒中の核種存在量の測定結果とSRAC解析結果の比較に基づく検討が行われた。そして、 UO_2 ピンセルベンチマーク解析結果において比較的ばらつきが大きく、また信頼性の高いC/E結果が得られていると考えられるNp-237, Pu-238, Am-242m, Cm-244, Cm-245, Sm-152について最良解の推定を試みた。

6. 各解析項目に対する要求精度の検討

本検討の意図は、ベンチマーク結果のばらつきの大きさと核設計上の要求とを比較することであったが、本件についての議論をはじめてみて、これは各メンバーにとって正面から取り組むには大変に難しい課題であることが判明した。結果的に、ピンセルや集合体計算のみの要求精度を明示することは現状、困難であり、検討の中心は要求精度を議論する上での前提として、各種核特性と炉心挙動等との定性的な関係の整理、臨界実験測定誤差及び到達限界精度という観点からの内容に移っていった。

7. 現行炉心の解析精度との比較

今までに提唱された BWR ベンチマーク問題との比較の観点からの検討が行われた。従来のベンチマーク結果と今回の結果では、特にばらつきの増大等は見られないことが報告されたが、これは参加機関やコードの水準のばらつきも反映されるものであるので、必ずしも精度の比較にはならないとのことである。結果的に、本件も前節と同様、大変に扱いにくい課題であった。

8. 望まれる実験や今後の研究課題の抽出、提案

連続エネルギーモンテカルロ計算を参照解とするために残された課題、望まれる実験・測定データとして、軽水炉取り出し燃料組成のプルトニウムからなる高富化度 MOX 燃料を用いた臨界実験、ウラン燃料領域と MOX 燃料領域の出力ミスマッチの精度良い測定、Rh-103、Gd-155 等の照射後生成量データの必要性等があげられた。

9. おわりに

以上、本 WP の活動を開始する時点で、目標に掲げた項目ごとに、成果の概要について述べてきた。詳細については、近々、第 1 期と同様に JAERI-Research として刊行の予定である。もとより高い目標を掲げたため、困難な課題も多く、目標に対して 100%の成果を得たとまでは言えない。しかしながら、軽水炉の核解析手法や同精度について、実用の最前線に従事する技術者を含めた専門家の中で、具体的な解析結果に基づいてでき得る限りの分析が行われ、それらを背景に真摯な議論が繰り返されたことは大変に価値があることと考える。限られた時間と資源の中でここまでの成果を出せたことは十分に満足の結果であると総括したい。

今後、これだけの資産をどう生かしていくかは、大変に重要な課題である。もとより本 WP の各メンバーは、率先して広報活動に努め、貴重なデータ集が国内外で広く利用されるよう努力を払っていくべきであるが、炉物理部会員各位におかれても、この貴重な資産の活用についての検討・提案等をお願いしたい。また、日本原子力研究所においては、ホームページの運営管理に対して組織的な対応がなされることを期待したい。

平成 14 年 8 月末に明らかになった原子力発電施設における自主点検記録の不正等の問題では、原子力事業者の品質管理の徹底、透明性の確保、また規制側の判断根拠の明確化、等様々な対応が必要となった。炉物理や核データの分野では、そうした問題に直面することが少なく、正面からの取り組みは従来、少なかったように思われる。今回の WP の成果としては、炉物理・核データへの研究課題を提供するという本来の目的と同時に、上記の問題への取り組みの端緒を生み出すことができたのではないかと考えている。折しも、一般の日本原子力学会・2003 年秋の大会(静岡大学)においては、「核データ・炉物理研究は、社会にいかに係わるべきか」というテーマで企画セッションが開催され、核設計コードの精度評価の客観的な基準作りが今後共同で取り組むべき課題のひとつとして議論された。

近々、核データ・炉物理部会合同で、具体的な活動への準備が開始されようとしている。こうした活動へも、今回の WP 活動の成果と実績が生かされていくことを願うものである。

参考文献

- 1) 炉物理研究委員会, “軽水炉次世代燃料の炉物理に関するベンチマーク問題の提案及び解析結果”, JAERI-Research 2001-046 (2001).
- 2) LWR Working Party, Research Committee on Reactor Physics, Etsuro Saji (Secretariat of the Nuclear Safety Commission), “Proposal and Preliminary Analysis of the Benchmark Problem Suite for Reactor Physics Study of LWR Next Generation Fuels”, 日本原子力学会 2001 年秋の大会(北海道大学), 日韓ジョイントセッション(炉物理部会, 核データ部会合同), (2001).
- 3) 奥村啓介(原研), 宇根崎博信(京大炉), 北田孝典(阪大・工), 佐治悦郎(原子力安全委員会事務局), “軽水炉次世代燃料の炉物理ベンチマーク(1) –ピンセル問題の結果–”, 日本原子力学会 2002 年春の年会 F19 (2001).
- 4) 宇根崎博信(京大炉), 奥村啓介(原研), 北田孝典(阪大・工), 佐治悦郎(原子力安全委員会事務局), “軽水炉次世代燃料の炉物理ベンチマーク(2) –PWR 集合体問題の結果–”, 日本原子力学会 2002 年春の年会 F20 (2001).
- 5) 北田孝典(阪大・工), 宇根崎博信(京大炉), 奥村啓介(原研), 佐治悦郎(原子力安全委員会事務局), “軽水炉次世代燃料の炉物理ベンチマーク(3) –BWR 集合体問題の結果–”, 日本原子力学会 2002 年春の年会 F21 (2001).
- 6) Etsuro Saji (Nucl. Safety Commission-Japan), “Proposal and Analysis of the Benchmark Problem Suite for Reactor Physics Study of LWR Next Generation Fuels”, 2002 ANS Annual Meeting, Hollywood, Florida, June 9-13, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **86**, pp330-331 (2002).
- 7) A. Yamamoto, T. Ikehara, T. Ito, E. Saji, “Benchmark Problem Suite for Reactor Physics Study of LWR Next Generation Fuels,” *J. Nucl. Sci. Technol.* **39**, No.8, pp900-912 (2002).
- 8) K. Okumura, H. Unesaki, T. Kitada and E. Saji, “Benchmark Results of Burn-up Calculation for LWR Next Generation Fuels,” *Proc. of Int. Conf. on the New Frontiers of Nuclear Technology : Reactor Physics, Safety and High-Performance Computing (PHYSOR 2002)*, 9A-03(paper index number in CD), Seoul, Korea, 7-10 October, (2002).
- 9) H. Unesaki, K. Okumura, T. Kitada and E. Saji, “Update Status of Benchmark Activity for Reactor Physics Study of LWR Next Generation Fuels (invited)”, 2003 ANS Annual Meeting, San Diego, California, June 1-5, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **88**, pp.436-438 (2003).
- 10) T. Kitada, K. Okumura, H. Unesaki and E. Saji, “Analysis of Benchmark Results for Reactor Physics of LWR Next Generation Fuels”, *Proc. of Int. Conf. on The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments (PHYSOR 2004)*, Chicago, IL USA, 25-29 April, (2004), to be published.