

2. 軽水炉ベンチマーク

日本原子力研究所

高野 秀機

(1) はじめに

IAEA の予測によれば、余剰プルトニウムは 2010 年には最小に見積もっても 100 トンを越えるとされている。ここでの余剰 Pu とは、再処理によって分離されたもので使用済み燃料に含まれる Pu は勿論考慮していない。これは、核不拡散上大きな問題であり、如何にこの余剰 Pu を処理するか IAEA の課題となっている¹⁾。さらに、米口の冷戦終結による核兵器の段階的縮小を目指した核解体条約によると両国から 50 トンずつ 100 トンの高品質の Pu が余剰 Pu として上記の値に加わることになる。高速炉を用いてこれら大量の Pu を早急に処理するには、高速炉はまだ未成熟な技術システムである。軽水炉を利用することがもっとも容易である。このような背景により多量の Pu を軽水炉で燃焼させる必要性が生じている。軽水炉での Pu のマルチリサイクルは、Pu-242 が増加して品質を劣化させ燃料中の Pu 富化度が増加する。このため、OECD/NEA-NSC においてワーキングパーティが設けられベンチマーク問題が提案された。

ベンチマーク問題は二つに分かれている。一つは、Pu を PWR でリサイクルするときの燃焼特性に関するもので軽水炉取り出し (Better Pu) とリサイクル 5 回目の劣化した (Dirty Pu) 組成からなっている。ベンチマーク問題としては、後者が主であり、前者はそのリファレンスである。二つ目は、富化度の増大に伴って生じてくる正のボイド反応度係数である。これらについては、EC ないで予備的な比較がなされドイツやフランスの結果間に顕著な相違があったとのことである。これがベンチマーク問題提起の大きな要因となっている。

会議は 3 回にわたってパリの OECD/NEA Data Bank で 1993 年 3 月、1994 年 3 月及び 1994 年 11 月に行われた。参加国はフランス、日本、ベルギー、ドイツ、カナダ、イタリア、オランダ、アメリカ、イギリス、スイス、スウェーデン、韓国そして国際機関の IAEA であった。当然、軽水炉を用いて Pu の処理に関わっているフランス、ドイツ、日本、ベルギーの参加者、参加機関及びメーカーが中心であった。日本からは、原研、東芝、日立、東電ソフトウェアが計算に参加した。スウェーデンは、多くの機関が使用している WIMS 及び CASMO 系列コードの開発当事者として最後の第 3 回会合に参加した。これは、これらのコードを用いた計算結果間に大きなばらつきが見いだされたため参加を求められたものである。韓国は Pu リサイクルはできないことになっているため計算には参加せず、WIMS、CASMO を使用していることもあり、オブザーバーとし

て第3回会合に出席したものである。

(2) ベンチマーク問題

1) Plutonium recycling in PWR

① Dirty Pu benchmark: J. Vergnes (EDF)

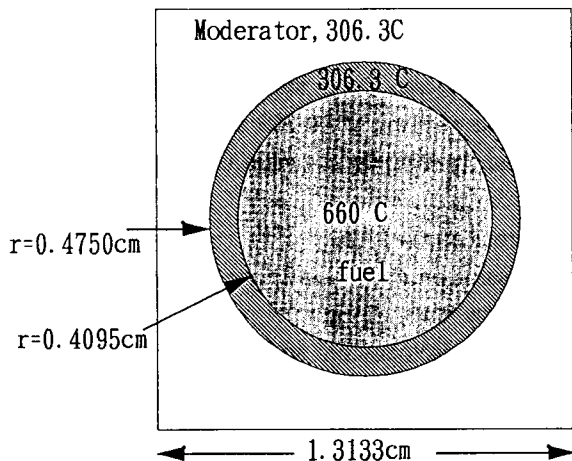
② Better Pu benchmark: H. Wiese (KfK) and G. Schlosser (KWU)

Pu の組成を Table 1 に、セルモデルを Fig. 1 に示す。計算する量は、燃焼ステップごとの k_{eff} 及び主要なアクチニドと FPs 核種の生成量である。

参加国、機関、使用計算コード及びデータライブラリーについては Table 2 示す。また、共鳴吸収領域の計算法の特徴についても Table 2 に示す。

Table 1 Plutonium composition

	Pu 富化度	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
Dirty-Pu	12.5%	4	36	28	12	20
Better-Pu	5.5%	1.8	59	23	12.2	4



計算条件: $B_g^2=0$

Boron 濃度: 500 ppm (B-10 = 18.3%, B-11 = 81.7 %)

Power: 38.3 W/g

Burnup step: 0 - 50000 MWd/t を 18 分割

Fig.1 Cell geometry

Table 2 Summary of participants and information about resonance treatment

Institute	Country	Code	Data Base/Library	No. of Groups
ANL	USA	VIM	ENDF/B-V	infinite
BEN	Belgium	LWRWIMS	1986 WIMS	69
BNFL	England	LWRWIMS	1986 WIMS	69
CEA	France	APOLLO 2	JEF-2.2 CEA 93	172
ECN	Netherland	WIMS-D	JEF-2.2 SCALE	172
EDF	France	APOLLO 1	CEA 86	99
Hitachi	Japan	VMONT	JENDL-2/ENDF/B-IV	190
IKE 1	Germany	CGM/RSYST	JEF-1	45
IKE 2	Germany	MCNP 4.2	JEF-2.2	infinite
JAERI	Japan	SRAC	JENDL-3.1	107
PSI 1	Switzerland	BOXER	JEF-1	70
PSI 2	Switzerland	CASMO 3	ENDF/B-IV	40
Siemens	Germany	CASMO 3	J70	70
Studsvik	Sweden	CASMO4	JEF 2.2	70

- ANL: continuous energy Monte Carlo, shielding of unresolved resonance
- BEN: selfshielded cross sections of Pu-239 and Pu-240
- CEA: self- and mutual shielding for the main U, Pu and Zr isotopes, local effects included
- CEN: selfshielded cross section
- ECN: all actinides, fission products and Zr are self shielded
- ENEA: continuous energy Monte Carlo
- HIT: U, Pu, Am and Cm isotopes are selfshielded
- IKE 1: self- and mutual shielding for the main U and Pu isotopes, by performing an ultrafine group cell-calculation
- IKE 2: continuous energy Monte Carlo, no special treatment of unresolved resonances
- IPP: selfshielded cross sections of U, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Am-241
- JAE: self- and mutual shielding for all U, Pu, Am isotopes and many fission products by performing an ultrafine group cell-calculation
- JAE2: continuous energy Monte Carlo
- SIE 1: no information available
- TOS: continuous Monte Carlo

計算の結果は、Figs. 2 と 3 及び Table 3 に示されている。Darty Pu では、燃焼初期で4%、末期で5%ものばらつきが見られる。Better Pu では、このばらつきは小さくなる。この大きなばらつきは、WIMS系(CASMOを含む)のコードが小さな値をとるためである。これは主にPu-242共鳴吸収の取り扱いに起因している。約10年前に行われた高転換軽水炉のベンチマークにおいても指摘されたようにPu-242の2.6eV共鳴の自己遮蔽効果を考慮していないためである。古いWIMS系のコードはMOX燃料を考慮していないためである。Table 2 に示すように、新しいCASMO4はこの点が改善されているということで、第3回目の会合にはStudvik(STU)と東電ソフトウェア(TSW)が急遽参加して面目を果たした。しかし、まだ2から3%ものばらつきが存在している。

Table 3 Comparison of k_{inf} calculated for the dirty plutonium recycling benchmark problem

Burnup GWd/t	ANL VIM B-V	BEN WIMS 1986	BNFL WIMS 1986	CEA APOLLO2 JEF2.2	ECN WIMS-D JEF2.2	EDF APOLLO1 CEA86	HIT VMONT J-2/B-IV
0.0	1.1324	1.1044	1.1043	1.1334	1.1313	1.1217	1.1396
10.0		1.0400	1.0398	1.0707	1.0707	1.0593	1.0777
33.0		0.9645	0.9645	0.9974	0.9974	0.9863	1.0087
42.0		0.9405	0.9405	0.9716	0.9716	0.9626	0.9833
50.0		0.9208	0.9208	0.9497	0.9497	0.9433	0.9625
Burnup GWd/t	IKE1 CGM JEF1.0	IKE2 MCNP4.2 JEF2.2	JAE SRAC J-3.1	PSI1 BOXER JEF1.0	PSI2 CASMO3 B-IV	SIE1 CASMO3 J70	STU/TSW CASMO4 JEF2.2
0.0	1.1308	1.1319	1.1336	1.1304	1.1006	1.0995	1.1336/1.1321
10.0	1.0688		1.0718	1.0686	1.0454	1.0497	1.0747/1.0731
33.0	0.9949		1.0028	0.9974	0.9743	0.9868	1.0055/1.0037
42.0	0.9705		0.9799	0.9743	0.9493	0.9643	0.9827/0.9809
50.0	0.9507		0.9610	0.9554	0.9282	0.945	0.9641/0.9624

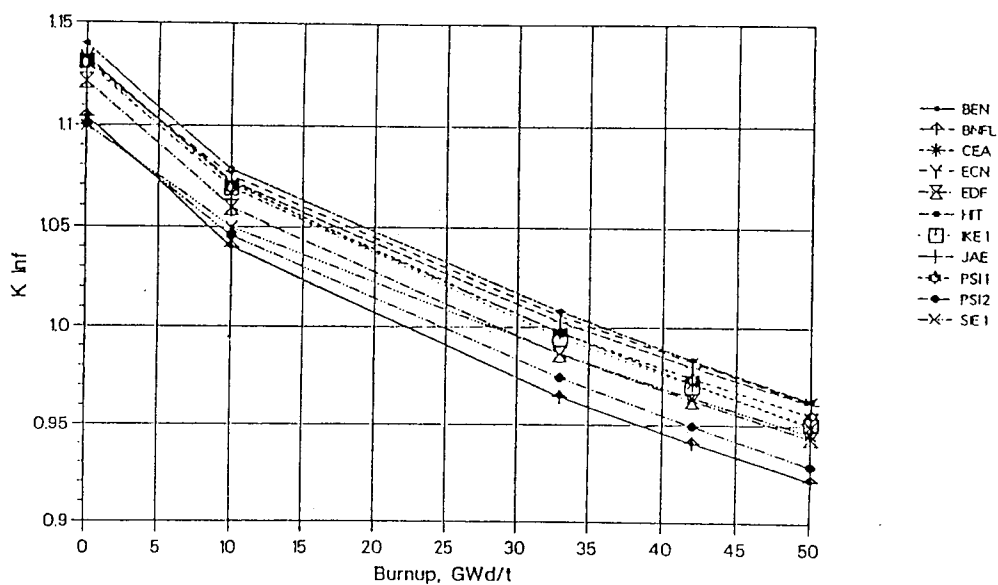


Fig. 2 Comparison of burnup reactivities for the dirty plutonium benchmark

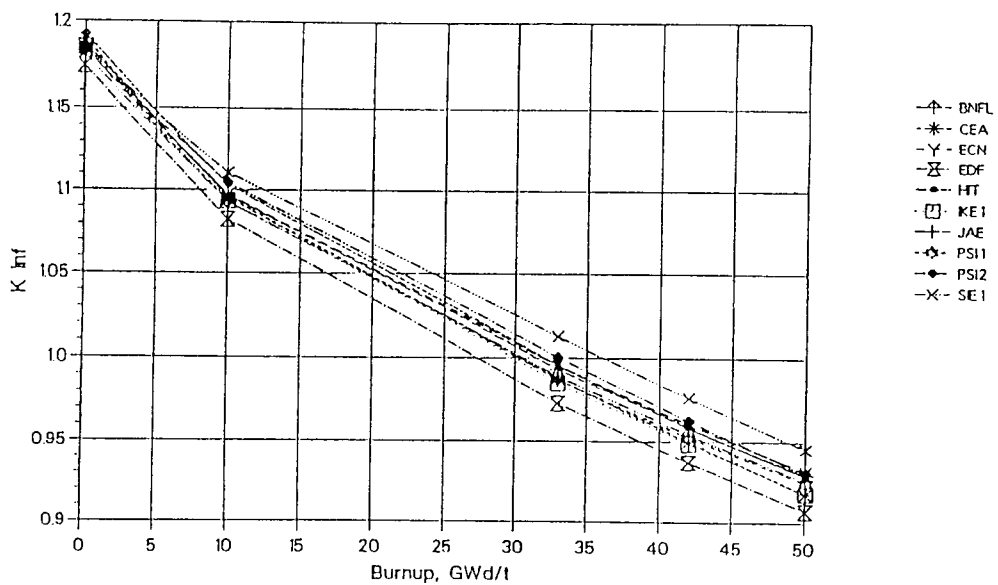


Fig. 3 Comparison of burnup reactivities for the better plutonium benchmark

これらの差の原因としては、以下のような点が考えられた。

- a) FPs の取り扱い：共鳴遮蔽効果、燃焼チェーン、核データ評価等の相違から約 1 % の生ずる。
- b) U-238 共鳴計算法：超詳細群による厳密計算、異核種間の干渉効果から 0.5%.
- c) 燃料領域多メッシュ計算：CEA は燃焼初期で 0.5%、末期で 1% の存在を主張。JAERI と IKE は燃焼初期には多領域効果はなく 1 または 2 メッシュで十分と意見が分かれた。これについては、新しくベンチマーク問題を設定して行うこととなった。
- d) fission energy release を考慮する核種数、セル円柱化近似 (0.1%)、Pu、Am、Cm の核データ、Am-241 の捕獲分岐比等

標準解としては、連続エネルギーモンテカルロによる計算結果が適切と判断されたが、a) 各コードのライブラリーで準備されている温度パラメータに制限があり、ベンチマーク設定温度と燃料、被覆管、減速材で不一致が生じた。b) 核データ評価の相違の影響が大きい (JAERI(JENDL-3.1) と IKE(JEF2.2) の UO_2 炉心の差)。c) MCNP コードの非分離共鳴領域取り扱い：自己遮蔽効果が考慮されないためボイド反応度等への影響が大きい。

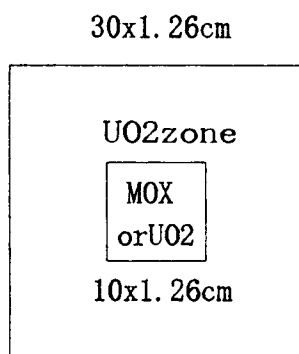
2) Void reactivity effect in MOX lattice

ベンチマーク問題は Fig. 4 に示すように 30×30 単位セルからなるマクロセル形状で中心に MOX 燃料集合体領域があり外側は UO_2 燃料集合体で取り巻かれている。Table 4 示すように 3 種類の Pu 富化度の燃料が考えられている。この計算によって、ボイド反応度は Pu 富化度が 12% 以上にになると正になることを検証する。

参加国、機関、使用計算コード及びデータライブラリーについては Table 5 に示す。

Table 4 Pu contents for three MOX assemblies

	UO ₂	L-MOX	M-MOX	H-MOX
U-235	3.35%EU			
Pu		5.2w%	9.5w%	14.0w%
Pu-fis.		3.6w%	6.5w%	9.9w%



計算条件: boundary condition=reflective

lattice pitch=1.26 cm, fuel pellet outer diameter=0.4095 cm,

Cladding outer radius=0.4750 cm, fuel and water temperature= 20°C,

moderator= water and aluminium mixture

Fig.4 Macro cell model for void coefficient benchmark

Table 5 Summary of participants for the void reactivity benchmark

Institute	Country	Code	Data Base/Library	No. of Groups	Remarks
ANL	USA	VIM	ENDF/B-V	infinite	Zircaloy
BEN	Belgium	LWRWIMS	1986 WIMS	69	
CEA3	France	APOLLO 2	JEF-2.2 CEA 93	172/99	
CEA4	France	ECCO52/ERANOS	JEF-2.2 CEA 93	1968/172	
CEA5	France	APOLLO 1	ENDF/BV+ JEF1 CEA 86	99	
CEN	Belgium	DTF4/DOT 3,5	MOL-BR2	40	
ECN	Netherland	MCNP 4.2	JEF-2.2 SCALE	172	
ENEA	Italy	MCNP 4.2	JEF-1	infinite	
Hitachi	Japan	VMONT	JENDL-2/ENDF/B-IV	190	
IKE 1	Germany	CGM/RSYST	JEF-1	60	
IKE 2	Germany	MCNP 4.2	JEF-2.2	infinite	
IPPE	Russia	WIMSD4	FOND-2 WIMS/ABBN		
JAERI 1	Japan	SRAC	JENDL-3.1	107	
JAERI 2	Japan	MVP	JENDL-3.1	infinite	
JAERI 3	Japan	SRAC/PIK	JENDL-3.1	107	
JAERI 4	Japan	SRAC/MOSRA	JENDL-3.1	107	
Siemens	Germany	CASMO 3	J70	70	
Toshiba	Japan	MCNP 4.2	JENDL-3.1	infinite	

ボイド反応度ベンチマークの計算結果の一例を Fig. 5 と 6 に示す。Fig. 5 はセル計算の結果で UO_2 炉心でのボイド反応度は勿論大きく負となっている。MOX 燃料炉心では L-MOX と M-MOX では負であるが、Pu 富化度が 12% を越える H-MOX 炉心では、予想通り正のボイド反応度になっている。一方、Fig. 6 は Fig. 4 に示すように周囲が UO_2 集合体で中心が UO_2 または MOX 集合体として、その中心の集合体のみの冷却材をボイド化した場合の局所ボイド化に対応する結果である。この場合でも UO_2 集合体ではボイド反応度は負値であるが、MOX 集合体では L-MOX においても半数以上の計算が正の値を示している。この Pu 富化度が増加するに従いボイド反応度が正值をとることは連続エネルギーモンテカルロコードによっても検証され、解析手法や核データによらない結果である。しかし、ボイド反応度の大きさは核データや計算コードにかなり依存しており、その大きさについての検証には積分実験の必要性が議論された。また、径方向の出力分布についても計算コード間の比較がなされた。ボイド状態での比較では MOX 集合体と UO_2 集合体の境界近傍でモンテカルロ計算と拡散計算では大きな差が生じた。

(3) まとめ

Pu リサイクルベンチマーク問題では、組成の劣化した Dirty Pu ほど計算値間のばらつきが大きく、旧 CASMO 系列コードの Pu-242 共鳴遮蔽効果の問題が明らかになった。しかし、これを改善してもまだ各計算コード間には 2～3% の差が残り、FPs の取り扱い及び核データ、U-238 の共鳴計算法及び燃料多領域メッシュ効果の問題等が指摘された。

最後の燃料多領域メッシュ効果の検討については、Cadache と JAERI 及び IKE とで意見の相違があり、新しいベンチマーク問題として計算を行うこととなった。これについては再度モンテカルロコード MVP と解析計算コード SRAC で調べたが燃焼初期においては多メッシュ効果は見られなかった。

今回のベンチマークの結果は、Pu 燃焼及びボイド反応度においても計算値間のばらつきが大きく核データ評価へのフィードバックを考えるには積分実験データの必要性が明らかになった。

参考文献

- 1) P.M.Chantoin and J. Finuecane: "Plutonium as an energy source: Quantifying the commercial picture", IAEA Bulletin, Vol.35, No.3, p38, 1994.

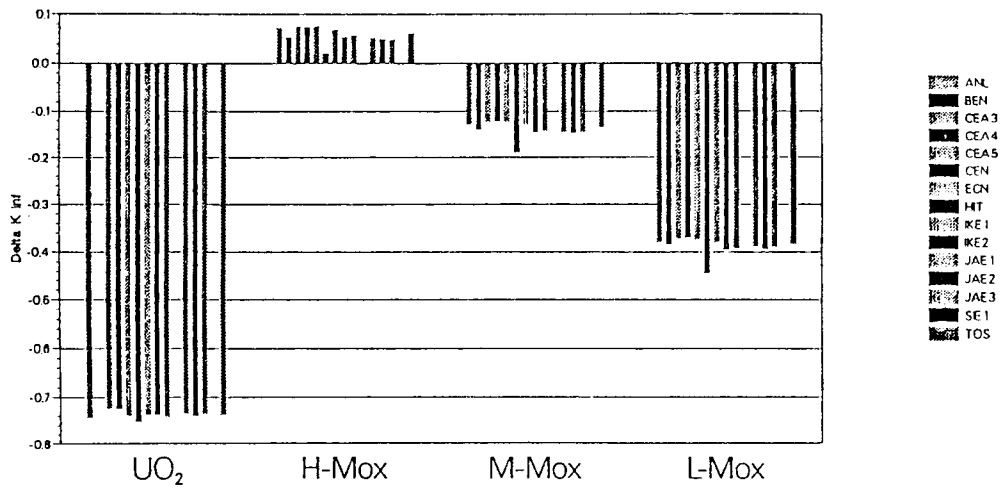


Fig.5 Void reactivity calculated with pin cell model

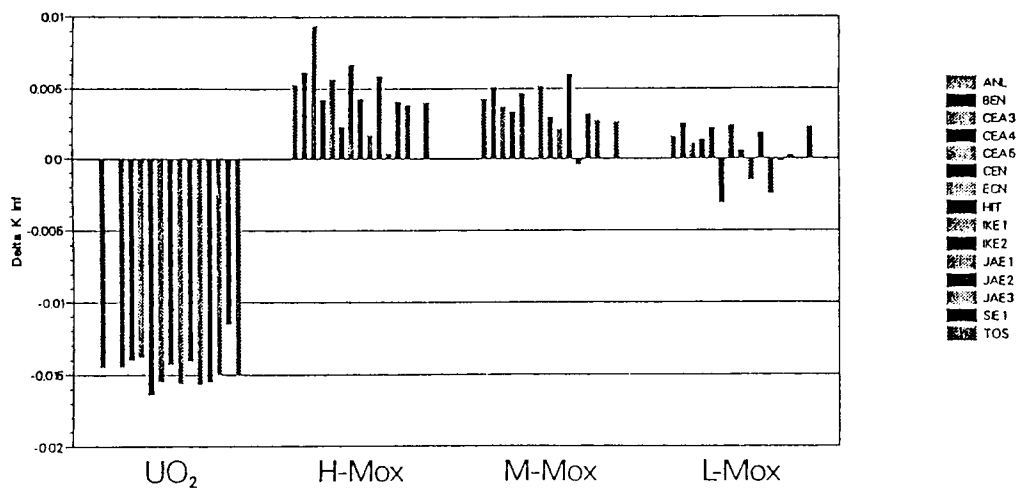


Fig.6 Void reactivity calculated with assembly model