

低 Pu 富化度 Pu, U 混合燃料体系に 対する SCALE-4 の臨界ベンチマーク計算

Benchmark Calculations by SCALE-4 for Pu-U
Systems with Low Pu Content

1995 年 9 月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technology Management Section Tokai Works Power Reactor and
Nuclear Fuel Development Corporation Tokai 4 - 33, Muramatsu,
Tokai - mura, Naka - gun, Ibaraki - ken 319 - 11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1995

低Pu富化度Pu, U混合燃料体系に対するSCALE-4の臨界ベソチマーク計算

須藤 俊幸*、白井更知*

要 旨

核燃料施設で軽水炉 MOX 燃料を取扱う場合の臨界評価に用いることを想定して、SCALE-4コードシステムによる、低Pu 富化度(10wt%以下)のPu, U混合燃料を用いた臨界実験を計算対象とした臨界ベソチマーク計算を実施した。SCALEコードはパソコン版とワークステーション版の2つを用い、計算件数は、均質 MOX 粉末系について11件、均質硝酸溶液系について13件、非均質 MOX 格子系について57件の合計81件である。

計算の結果、コードのパソコン版とワークステーション版の有意な違いはなく、ワークステーション版で計算された実効増倍率の最小値は0.999、最大値は1.026、平均値は1.005である。また、上記の各燃料体系毎の平均値及び標準偏差はそれぞれ 1.015 ± 0.006 、 1.011 ± 0.003 、 1.001 ± 0.004 であり、SCALE-4コードによる臨界計算が十分な精度を有していることが確認できた。

* 再処理工場 工務部 技術課

Benchmark Calculations by SCALE-4 for Pu-U Systems with Low Pu Content

Toshiyuki SUTO* and Nobutoshi SHIRAI*

Abstract

This report presents the results of criticality benchmark calculations performed to validate the SCALE-4 code system for Pu-U mixtures with low Pu content (less than 10wt.%) on the assumption that the SCALE is applied to the criticality safety analysis for nuclear fuel facilities handling LWR-MOX fuels. The SCALE-PC 4.1 on a personal computer and the SCALE 4.2 on a SUN EWS were used. The number of the calculated cases are 11 for homogeneous MOX systems, 13 for Pu-U nitrate solutions, and 57 for heterogeneous MOX fuel pin systems, sums up to 81.

The calculation results show that there are no significant differences between the results from SCALE-PC 4.1 and SCALE 4.2 calculations. Maximum, minimum, and average k-effectives calculated by SCALE 4.2 are 0.993, 1.026, and 1.005 respectively. The average k-effectives for the critical systems mentioned above are 1.015 ± 0.006 , 1.011 ± 0.003 , and 1.001 ± 0.004 respectively, which indicates that SCALE-4 can accurately predict the k-effective for Pu-U mixtures with low Pu content.

* Maintenance Section, Technical Service Division, TOKAI Reprocessing Plant

目次

1. はじめに.....	1
2. 低Pu 富化度 Pu, U 混合燃料体系に対する臨界ベータ計算.....	1
2.1 均質 Pu, U 混合系.....	1
2.1.1 均質 MOX 粉末系.....	2
2.1.2 均質 Pu, U 混合硝酸溶液系.....	4
2.2 非均質 MOX 格子体系.....	6
3. U, Pu 混合系に対する他のベータ文献.....	13
3.1 日米共同臨界実験による検証.....	13
3.2 その他の文献データ.....	14
4. まとめ.....	16
参考文献.....	17
別添資料 SCALE 4 ベータ計算インプットデータリスト.....	19

Contents

1. Introduction.....	1
2. Criticality Benchmark Calculations for Pu-U mixtures with low Pu Content.....	1
2.1 Homogeneous Pu-U Mixtures.....	1
2.1.1 Homogeneous MOX Systems.....	2
2.1.2 Homogeneous Pu-U Nitrate Solutios.....	4
2.2 Heterogeneous MOX fuel Pin Systems.....	6
3. Literature Review of Validadttion Studies concerning Pu-U Mixtures.....	13
3.1 Validation Studies using Joint PNC/USDOE Critical Experiments.....	13
3.2 Other Studies.....	14
4. Summary.....	16
References.....	17
Appendix : SCALE-4 Input Listings.....	19

1. はじめに

核燃料施設で軽水炉 MOX 燃料を取扱う場合の臨界評価に対して、SCALE-4コードシステムの検証作業を実施した。これまで Pu, U 混合燃料体系に対して SCALEコードシステムを用いた臨界ベンチマーク計算はいくつか行われているが、ほとんどは FBR 燃料取扱いを想定した Pu 富化度の高いものばかりであり^[1,2]、軽水炉 MOX 燃料のような低 Pu 富化度燃料に着目して、種々の燃料形態に対してまとまった評価を行ったものはない。

本報告では、低 Pu 富化度(10wt%以下)の Pu, U 混合燃料を用いた臨界実験を計算対象とした、SCALE-4コードシステムによる臨界ベンチマーク計算について報告する。使用した SCALE のバージョンと使用機種並びに OS を以下に示す。

SCALE バージョン:	SCALE 4.2 ^[3]	SCALE-PC 4.1 ^[4]
使用機種	: SUN ワークステーション(S-4/10 model 40)	IBM-PC(PS/V model 2410)
使用 OS	: SunOS Release 4.1.3	IBM DOS J5.0/V

U, Pu 混合燃料体系の臨界実験に関しては、FBR 燃料サイクル施設の臨界評価に使用する目的で実施された SCALE-2 によるベンチマーク計算の文献^[1]並びに臨界安全解析コードシステム JACS の計算誤差評価を行った文献^[5]より網羅できる。既に検証済の JACS による計算と比較を行うという観点からこれらの文献を調査した結果、低 Pu 富化度 Pu, U 混合燃料を用いた実験は、均質体系に関する文献が 2 件、非均質体系に関する文献が 2 件であった。以下、順にこれらの文献データを用いたベンチマーク計算について述べる。

2. 低 Pu 富化度 Pu, U 混合燃料体系に対する臨界ベンチマーク計算

ベンチマーク計算は特に断らない限り、全て以下に示す計算入力条件で行った。また、実効増倍率(以下 keff と記す)は、KENO-V. a の出力において、スキップ世代数に対する平均 keff のプロットの箇所(PLOT OF AVERAGE K-EFFECTIVE BY GENERATION SKIPPED)の次行に示される、最も少ない標準偏差に対応する値を採用した。

使用シケンス	CSAS25
使用ライブラリ	27 群 ENDF/B-IVライブラリ (27GROUPNDF4)
計算世代数	103
世代当りの中性子発生数	300
スキップ世代数	3
初期中性子発生分布	一様分布

2.1 均質 Pu, U 混合系

臨界実験の体系は均質 MOX 粉末系と均質 Pu, U 混合硝酸溶液系とに分類できる。以下にこれらの文献の臨界データを用いて行ったベンチマーク計算の結果について述べる。

2.1.1 均質 MOX 粉末系

文献[6, 7]ではPu 富化度約 8wt%の均質 PuO₂-UO₂-ボリスリソコハ^o外を積重ねた直方体体系について、種々の減速度に対する臨界データが与えられている。燃料コハ^o外の集合体は、反射体として15cm厚のプレキシグラスで囲まれている。燃料コハ^o外は MM&M#471^テフ (クラッド) で被覆されている。臨界データは燃料コハ^o外の配列個数で与えられているか、またはコハ^o外間のわずかな空隙(ボイド)並びにクラッドの効果を実験的に補正することによる実効炉心 (PuO₂-UO₂-ボリスリソ) 寸法で与えられている。

計算は、与えられている臨界データに応じて、燃料コハ^o外、クラッド、ボイドを明示的に記述した詳細モデル (モデル C) あるいは実効寸法を用いた単純モデル (モデル S) または両方のモデルで行った。なお、文献[6]には補正を行った実効燃料寸法のみが記載されているが、同実験に関する詳細データが別の文献[8]に記載されており、詳細モデルはこれを使用したものである。

計算結果を表 2.1.1 に示す。表には比較のために JAERI 1303^[9]より JACSコードシステムによる計算結果を並記した。なお、JACSの結果は単純モデルを用いたものである。

まず、詳細モデルと単純モデルの結果を比べると、詳細モデルの方の keff が若干低く (おおよそ 1%)、かつ 1 に近い値を与える。単純モデルで用いている燃料寸法は実験的に補正されたものであるため、系統的な誤差を生じさせているものと考えられる。従ってここでは詳細モデルによる計算値をベンチマーク計算値とする。SCALE 4.1、4.2 及び JACS との比較では 1~2 σ の違いであり実質的に差はない。

計算された keff の平均値及び標準偏差を表の最後に示した。また、ヒストグラムを図 2.1.1 に示す。

表 2.1.1 均質 MOX 粉末系ベンチマーク計算結果

(1) NSE50:PuO₂-UO₂-ボリスリソコハ^o外, 7.89wt%Pu, 8.0wt%²⁴⁰Pu, 0.151wt%²³⁵U, H/(Pu+U)=51.8

① 臨界データ^[6]

ケース名	反射体	燃料コハ ^o 外の数 ^[8]				実効臨界寸法 ^[6] (cm)
		長さ (5.090cm)	幅 (5.080cm)	高さ (5.090cm)	高さ (1.324cm)	
D078	プレキシグラス	8	9	7	2.357	40.72×45.72×32.89
D079	プレキシグラス	10	10	6	0.430	50.90×50.80×26.40
D080	プレキシグラス	12	12	5	0.934	61.08×60.96×22.66
D081	プレキシグラス	12	13	5	0.438	61.08×66.04×22.09
D082	プレキシグラス	12	11	5	1.442	61.08×55.88×23.22
D083	プレキシグラス	10	12	5	2.462	61.08×50.80×24.37
D084	プレキシグラス	8	8	8	1.657	40.72×40.64×36.42

② 計算結果(keff ± σ)

ケース名	SCALE-PC 4.1		SCALE 4.2		JACS ^[9]
	モデル C	モデル S	モデル C	モデル S	(モデル S)
D078	1.0137 ± 0.0043	1.0308 ± 0.0038	1.0162 ± 0.0036	1.0462 ± 0.0038	1.0211 ± 0.0043
D079	1.0228 ± 0.0041	1.0276 ± 0.0046	1.0194 ± 0.0046	1.0267 ± 0.0040	1.0158 ± 0.0045
D080	1.0150 ± 0.0039	1.0252 ± 0.0048	1.0259 ± 0.0036	1.0289 ± 0.0041	1.0104 ± 0.0041
D081	1.0271 ± 0.0035	1.0309 ± 0.0037	1.0181 ± 0.0041	1.0343 ± 0.0044	1.0151 ± 0.0044
D082	1.0294 ± 0.0044	1.0291 ± 0.0037	1.0195 ± 0.0036	1.0258 ± 0.0043	1.0065 ± 0.0047
D083	1.0194 ± 0.0041	1.0363 ± 0.0041	1.0168 ± 0.0042	1.0416 ± 0.0043	1.0253 ± 0.0041
D084	1.0155 ± 0.0043	1.0370 ± 0.0042	1.0146 ± 0.0040	1.0431 ± 0.0049	1.0181 ± 0.0046
平均	1.0203	1.0310	1.0187	1.0352	1.0161
標準偏差	0.0062	0.0043	0.0036	0.0084	0.0063

表 2.1.1 均質 MOX 粉末系ベソマク計算結果 (続き)

(2) NSE61:PuO₂-UO₂-ホリスチソコハ^oク^oト, 8.1wt%Pu, 11.5wt%²⁴⁰Pu, 0.2wt%²³⁵U, H/(Pu+U)=7.3

① 臨界データ^[7]

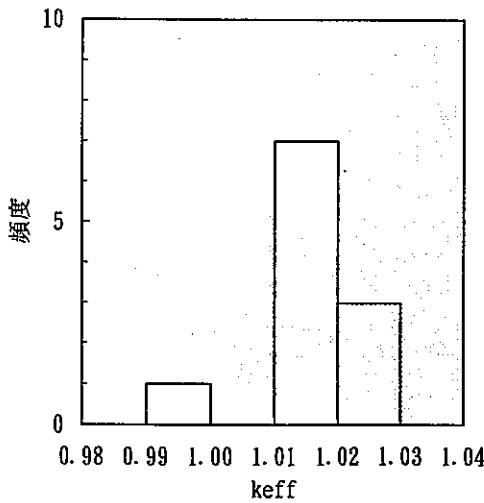
ケース名	反射体	燃料コソハ ^o ク ^o トの数		
		長さ (5.090cm)	幅 (5.090cm)	高さ (5.081cm)+(1.274cm)
D140	フレシソ ^o ラ ^o ス	10	9	9
D141	フレシソ ^o ラ ^o ス	10	11	7
D142	フレシソ ^o ラ ^o ス	12	12	6
D143	フレシソ ^o ラ ^o ス	14	13	5

② 計算結果(keff ± σ)

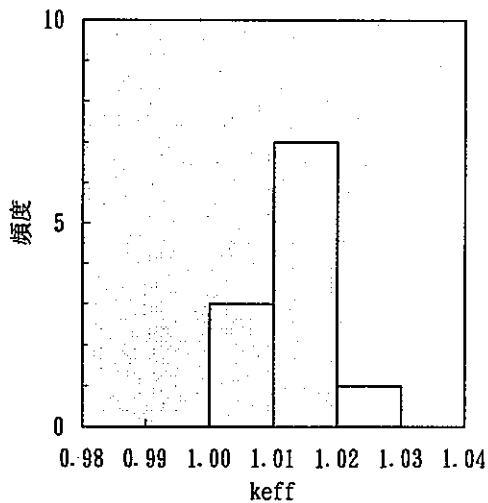
ケース名	SCALE-PC 4.1	SCALE 4.2	JACS ^[9]
	モデル C	モデル C	(モデル S)
D140	1.0118 ± 0.0044	1.0141 ± 0.0042	1.0220 ± 0.0046
D141	1.0118 ± 0.0042	1.0079 ± 0.0043	1.0197 ± 0.0046
D142	1.0130 ± 0.0040	1.0056 ± 0.0048	1.0120 ± 0.0042
D143	0.9993 ± 0.0043	1.0060 ± 0.0040	1.0154 ± 0.0041
平均	1.0090	1.0084	1.0173
標準偏差	0.0065	0.0039	0.0045

(1)+(2)の keff の平均値及び標準偏差

	SCALE-PC 4.1		SCALE 4.2		JACS ^[9]
	モデル C	モデル S	モデル C	モデル S	(モデル S)
データ数	11	7	11	7	11
平均値	1.0162	1.0310	1.0149	1.0352	1.0165
標準偏差	0.0083	0.0043	0.0063	0.0084	0.0055



(a) SCALE-PC 4.1



(b) SCALE 4.2

図 2.1.1 ベソマク計算結果 (均質 MOX 粉末系)

2.1.2 均質 Pu, U 混合硝酸溶液系

文献[10]では Pu 富化度 5~8wt% の Pu, U 混合硝酸溶液を用いた円筒体系水反射条件での臨界データが与えられている。但し、燃料溶液の密度が示されていないため、以下の 3 つの方法で物質組成を入力してそれぞれベソマーク計算を行った。

- ① SCALE 内蔵の U 硝酸溶液及び Pu 硝酸溶液の密度式にそれぞれ(U+Pu)濃度、酸度を入力して得られる組成を U と Pu の濃度比で平均化する
- ② 「臨界安全ハンドブック(科技庁編)」に示された(U+Pu)混合硝酸溶液の密度算出式(LMT 式)より得られる溶液密度を用いる
- ③ LMT 式をさらに改良した式(改良密度式)^[11]より得られる密度を用いる

表 2.1.2 に計算結果を示す。なお、表には前節と同様に JACSコードシステムによる計算結果を並記した。溶液密度については、改良密度式は LMT 式に対して約 0.5% 高めの密度を与える。それぞれの密度を用いた keff の結果はいずれも 1 σ 程度の違いであり、この程度の溶液密度の違いの影響は見られない。

SCALE 4.2 で LMT 密度式を用いた場合の結果のヒストグラムを図 2.1.2 に示す。13ケースの keff の平均値は 1.011、標準偏差は 0.004 となり、約 1% 過大評価する傾向である。

表 2.1.2 均質(U+Pu)硝酸溶液系ベソマーク計算結果

NSE55:Pu, U混合硝酸溶液, 23wt%²⁴⁰Pu, 0.66wt²³⁵U

① 臨界データ

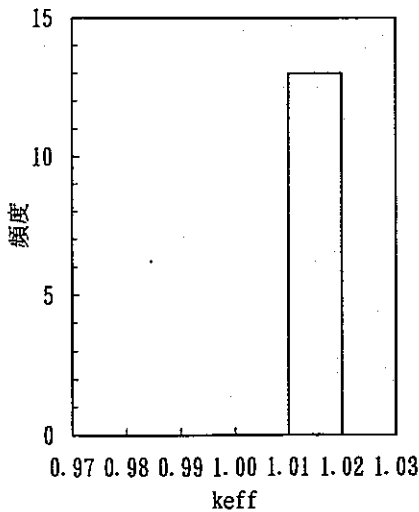
No.	臨界データ ^[10]			臨界高さ (cm)	溶液密度計算値(g/cm ³)	
	溶液組成		H'(mol/l)		LMT式	改良密度式
	U(g/l)	Pu(g/l)				
1	390.2	30.63	0.45	50.27	1.582	1.590
2	394.5	29.00	0.44	54.66	1.585	1.593
3	399.0	27.32	0.44	61.04	1.588	1.596
4	403.3	25.71	0.37	70.49	1.589	1.597
5	407.1	24.28	0.36	84.86	1.592	1.599
6	408.7	23.66	0.36	94.56	1.593	1.601
7	390.7	30.44	0.43	51.41	1.582	1.590
8	373.8	29.13	0.47	52.29	1.559	1.567
9	351.1	27.28	0.54	56.87	1.528	1.536
10	331.3	25.76	0.56	60.99	1.500	1.508
11	312.5	24.35	0.56	67.59	1.473	1.481
12	296.7	23.04	0.54	76.96	1.450	1.457
13	281.9	21.85	0.56	89.61	1.429	1.436

表 2.1.2 均質(U+Pu)硝酸溶液系¹の²³⁵U計算結果(続き)

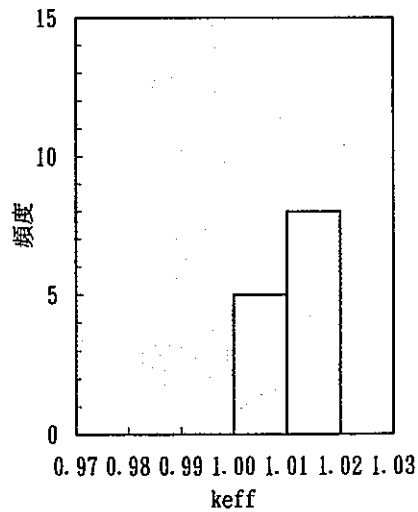
② 計算結果($k_{eff} \pm \sigma$)

No.	SCALE-PC 4.1(上段)、SCALE 4.2(下段)			JACS ⁽⁹⁾
	内蔵密度式	LMT式	改良密度式	
1	1.0117 ± 0.0038	1.0135 ± 0.0039	1.0155 ± 0.0037	1.0046 ± 0.0039
	1.0112 ± 0.0037	1.0133 ± 0.0039	1.0114 ± 0.0041	
2	1.0151 ± 0.0035	1.0138 ± 0.0037	1.0148 ± 0.0034	0.9992 ± 0.0040
	1.0252 ± 0.0033	1.0042 ± 0.0034	1.0161 ± 0.0034	
3	1.0148 ± 0.0038	1.0108 ± 0.0034	1.0140 ± 0.0032	0.9928 ± 0.0034
	1.0119 ± 0.0035	1.0094 ± 0.0039	1.0133 ± 0.0041	
4	1.0191 ± 0.0034	1.0153 ± 0.0034	1.0198 ± 0.0034	0.9929 ± 0.0034
	1.0136 ± 0.0034	1.0111 ± 0.0035	1.0102 ± 0.0034	
5	1.0075 ± 0.0036	1.0115 ± 0.0031	1.0168 ± 0.0035	0.9909 ± 0.0034
	1.0082 ± 0.0032	1.0067 ± 0.0031	1.0140 ± 0.0034	
6	1.0085 ± 0.0036	1.0125 ± 0.0035	1.0126 ± 0.0031	0.9972 ± 0.0033
	1.0140 ± 0.0032	1.0132 ± 0.0034	1.0114 ± 0.0030	
7	1.0166 ± 0.0032	1.0195 ± 0.0035	1.0210 ± 0.0030	1.0036 ± 0.0039
	1.0157 ± 0.0038	1.0137 ± 0.0036	1.0185 ± 0.0035	
8	1.0192 ± 0.0037	1.0143 ± 0.0033	1.0139 ± 0.0038	0.9996 ± 0.0034
	1.0165 ± 0.0034	1.0113 ± 0.0039	1.0172 ± 0.0032	
9	1.0144 ± 0.0032	1.0130 ± 0.0035	1.0152 ± 0.0037	1.0019 ± 0.0033
	1.0140 ± 0.0039	1.0141 ± 0.0036	1.0161 ± 0.0038	
10	1.0098 ± 0.0038	1.0117 ± 0.0029	1.0170 ± 0.0032	1.0075 ± 0.0035
	1.0143 ± 0.0036	1.0084 ± 0.0040	1.0124 ± 0.0032	
11	1.0163 ± 0.0034	1.0146 ± 0.0032	1.0128 ± 0.0033	0.9955 ± 0.0037
	1.0144 ± 0.0042	1.0096 ± 0.0031	1.0121 ± 0.0036	
12	1.0056 ± 0.0034	1.0186 ± 0.0035	1.0131 ± 0.0037	0.9910 ± 0.0031
	1.0175 ± 0.0033	1.0100 ± 0.0029	1.0122 ± 0.0035	
13	1.0126 ± 0.0032	1.0136 ± 0.0032	1.0057 ± 0.0035	0.9925 ± 0.0033
	1.0109 ± 0.0031	1.0164 ± 0.0039	1.0099 ± 0.0028	

	SCALE-PC 4.1			SCALE 4.2			JACS ⁽⁹⁾
	内蔵密度式	LMT式	改良密度式	内蔵密度式	LMT式	改良密度式	
平均値	1.0132	1.0141	1.0148	1.0144	1.0109	1.0134	0.9976
標準偏差	0.0043	0.0026	0.0038	0.0041	0.0033	0.0027	0.0056



(a) SCALE-PC 4.1 (LMT密度式使用)



(b) SCALE 4.2 (LMT密度式使用)

図 2.1.2 ¹の²³⁵U計算結果(均質硝酸溶液系)

2.2 非均質 MOX 格子体系

(1) TCA 臨界実験 (正方格子体系)

文献[12]は、JACSコードの検証作業の一環として実施された、原研の軽水臨界実験装置 TCA で行われた臨界水位測定実験データを用いたベンチマーク計算についての報告である。この中には Pu 富化度 3wt% の MOX 燃料を用い軽水を減速材として、燃料棒の格子ピッチと縦横の燃料棒本数を変えて種々の炉心パターンを形成して行った 48ケースについてのデータが含まれている。これらには、燃料中の ^{241}Pu が ^{241}Am に壊変していくことにより燃料組成が変化するため、同一ピッチ、同一パターンの炉心について1年ごとに臨界水位を測定したデータも含まれている。

計算モデルは、基本的に文献[12]と同じであるが、相違点として燃料ペレットと被覆管内面との間のギャップをボイドとし、被覆管の下部端栓を考慮した。燃料棒上部は燃料ペレット上端位置までを考慮し、燃料棒の正方格子の側面は直径 183.2cm の水、燃料ペレット下端位置より下方 30cm を水とし、その外側はボイドとした。計算モデルを図 2.2.1 に示す。また、ここでは計算条件として計算世代数及び世代当りの中性子発生数を文献[12]と同じくそれぞれ 200, 300 とした。 ^{241}Pu 、 ^{241}Am の原子個数密度については、分析日から実験日までの経過日数により文献[12]と同様の計算により求めた。表 2.2.1 に実験日毎の ^{241}Pu 、 ^{241}Am の原子個数密度を示す。表 2.2.2 及び図 2.2.2 に計算結果を示す。

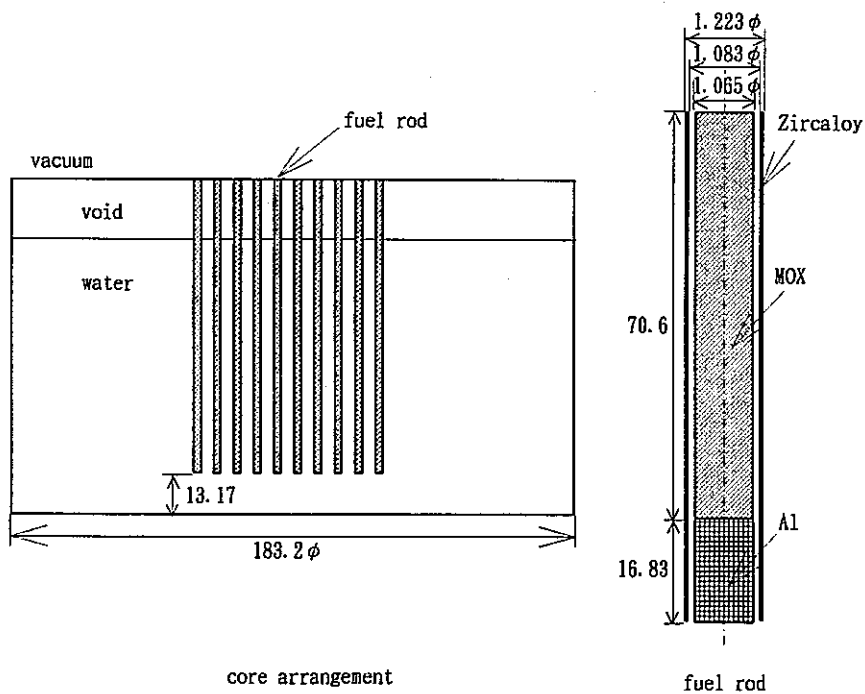
計算された k_{eff} の実験パラメータに対する依存性について図 2.2.3 に示す。燃料棒の燃料部有効長は 70.6cm であり、臨界水位が最も低い場合は燃料部の 4 割弱が空気中にている状態であり、水位の上昇とともにこの部分は減少していく。

SCALE CSAS25ソークスでは1つのエントリ条件についてのみ共鳴吸収処理及びダブコフ補正を含む断面積処理を行なうことができる。従って、ベンチマーク計算では、水中部の燃料格子に対し上記の断面積処理計算を行わせ、空中部の燃料格子に対しては、別途 CSAS2ソークスを用いて求めたダブコフ係数並びに物質番号、形状寸法を追加データとして指定する方法を用いた非均質モデルとして実行した。図 2.2.3(1)では k_{eff} に対する臨界水位に対する有意な依存性は現れておらず、上記方法の妥当性が示されている。また、図 2.2.3(2)には k_{eff} に対する格子ピッチの影響を示したが、SCALE 計算では格子ピッチが増加するとともに k_{eff} が僅かではあるが増加していく傾向が見られる。この傾向については他の MOX 燃料体系のベンチマーク計算を行った文献^[13]でも触れられており、原因として低エネルギー領域に対する ^{239}Pu 、 ^{240}Pu の共鳴吸収に関係していると述べられている。一方、同図には JACSコードシステムによる結果も示したが、格子ピッチに対して逆の傾向が現れているようである。

格子体系の計算では、計算モデルを単純化するためエントリに対する均質化断面積を用いた均質化モデルで計算を行うことが多い。そこで、参考として CSAS2ソークスを用いることにより、前記非均質計算モデルに対して、水中部分の燃料格子の均質化断面積を用いた均質の直方体炉心とした均質化モデルでの計算を行った。但し、空中部の燃料格子は非均質モデルと同様としたが、便宜上水中部の被覆管の下部端栓は無視した。計算結果を表 2.2.3 及び図 2.2.4 に、また、図 2.2.5 に k_{eff} に対する格子ピッチの影響を示す。非均質計算モデルと均質化計算モデルによる結果は有意な違いは見られない。

表 2.2.1 ^{241}Pu 、 ^{241}Am の原子個数密度

実験日	原子個数密度($\times 10^{24}\text{atoms/cm}^3$)	
	Pu241	Am241
1971/08/19	2.903E-05	2.121E-07
1972/04/13	2.814E-05	1.103E-06
1972/04/14	2.814E-05	1.107E-06
1972/04/26	2.809E-05	1.151E-06
1972/04/28	2.808E-05	1.159E-06
1972/05/18	2.801E-05	1.232E-06
1972/06/05	2.794E-05	1.298E-06
1972/06/07	2.794E-05	1.305E-06
1973/05/14	2.672E-05	2.526E-06
1973/05/22	2.669E-05	2.554E-06
1973/05/29	2.666E-05	2.578E-06
1973/06/06	2.664E-05	2.606E-06
1973/06/07	2.663E-05	2.610E-06
1974/05/14	2.547E-05	3.773E-06
1974/05/28	2.542E-05	3.820E-06
1974/06/05	2.540E-05	3.846E-06
1974/06/06	2.539E-05	3.850E-06
1975/05/16	2.427E-05	4.969E-06
1975/05/21	2.426E-05	4.985E-06
1975/05/28	2.424E-05	5.007E-06



(単位 : cm)

図 2.2.1 MOX 燃料格子計算モデル

表 2.2.2 非質 MOX 格子体系へのマージン計算結果 (TCA 臨界実験：正方格子配列、非均質モデル計算)

格子ピッチ (cm)	臨界水位 (cm)	keff ± σ		
		SCALE-PC 4.1	SCALE 4.2	JACS ^[12]
1.825	69.41	0.9948 ± 0.0029	0.9987 ± 0.0029	1.0013 ± 0.0030
	69.57	1.0017 ± 0.0030	0.9982 ± 0.0029	0.9939 ± 0.0031
	59.55	0.9993 ± 0.0031	1.0005 ± 0.0030	1.0000 ± 0.0030
	61.90	0.9952 ± 0.0029	0.9964 ± 0.0029	0.9936 ± 0.0030
	64.06	0.9977 ± 0.0030	0.9964 ± 0.0030	0.9949 ± 0.0031
	66.46	1.0023 ± 0.0029	0.9999 ± 0.0027	0.9962 ± 0.0032
	60.06	0.9969 ± 0.0026	0.9960 ± 0.0028	0.9961 ± 0.0028
	53.30	0.9957 ± 0.0031	0.9984 ± 0.0029	0.9942 ± 0.0031
	56.68	1.0018 ± 0.0028	0.9996 ± 0.0030	0.9982 ± 0.0031
	58.36	1.0005 ± 0.0030	0.9968 ± 0.0028	0.9956 ± 0.0030
	1.956	67.10	1.0028 ± 0.0027	0.9987 ± 0.0030
61.50		0.9982 ± 0.0028	1.0004 ± 0.0030	0.9973 ± 0.0029
64.39		1.0024 ± 0.0028	0.9981 ± 0.0030	0.9957 ± 0.0028
66.87		0.9983 ± 0.0028	0.9966 ± 0.0029	0.9980 ± 0.0030
69.40		1.0020 ± 0.0028	1.0031 ± 0.0029	1.0058 ± 0.0028
57.38		0.9944 ± 0.0030	1.0027 ± 0.0031	0.9988 ± 0.0028
60.37		1.0056 ± 0.0028	0.9985 ± 0.0028	1.0005 ± 0.0028
61.92		0.9997 ± 0.0029	1.0008 ± 0.0030	0.9986 ± 0.0031
63.88		1.0002 ± 0.0028	0.9986 ± 0.0025	0.9950 ± 0.0031
57.83		0.9979 ± 0.0029	1.0047 ± 0.0029	0.9947 ± 0.0030
54.72		1.0013 ± 0.0028	0.9967 ± 0.0026	0.9945 ± 0.0026
51.94		1.0025 ± 0.0028	1.0014 ± 0.0028	0.9968 ± 0.0029
49.82		0.9980 ± 0.0029	1.0024 ± 0.0029	0.9932 ± 0.0030
47.78		0.9953 ± 0.0028	1.0027 ± 0.0028	0.9959 ± 0.0028
48.68		0.9970 ± 0.0027	1.0099 ± 0.0027	1.0015 ± 0.0031
2.225		68.67	1.0015 ± 0.0028	1.0035 ± 0.0027
	60.32	1.0018 ± 0.0027	0.9979 ± 0.0030	0.9922 ± 0.0029
	62.95	1.0037 ± 0.0028	1.0091 ± 0.0026	0.9956 ± 0.0027
	65.63	1.0050 ± 0.0029	1.0019 ± 0.0027	0.9849 ± 0.0030
	68.18	1.0050 ± 0.0028	1.0010 ± 0.0029	1.0005 ± 0.0029
	61.07	1.0068 ± 0.0026	1.0075 ± 0.0026	0.9907 ± 0.0028
	53.41	1.0061 ± 0.0028	0.9990 ± 0.0028	0.9907 ± 0.0028
	55.48	1.0016 ± 0.0026	1.0055 ± 0.0027	0.9949 ± 0.0030
	57.28	0.9982 ± 0.0028	1.0033 ± 0.0028	1.0009 ± 0.0029
	59.05	1.0076 ± 0.0027	1.0048 ± 0.0027	0.9990 ± 0.0027
	54.33	0.9960 ± 0.0027	1.0055 ± 0.0027	0.9989 ± 0.0028
	51.74	1.0008 ± 0.0028	1.0031 ± 0.0026	0.9931 ± 0.0029
	47.72	1.0070 ± 0.0025	0.9994 ± 0.0026	0.9935 ± 0.0029
	44.67	1.0044 ± 0.0029	1.0013 ± 0.0028	0.9911 ± 0.0029
	45.62	1.0029 ± 0.0029	1.0020 ± 0.0028	0.9942 ± 0.0031
2.474	69.16	1.0073 ± 0.0025	1.0036 ± 0.0026	0.9919 ± 0.0026
	62.05	1.0025 ± 0.0027	1.0047 ± 0.0027	0.9966 ± 0.0029
	64.53	0.9979 ± 0.0028	0.9999 ± 0.0027	0.9999 ± 0.0028
	58.73	1.0053 ± 0.0027	1.0026 ± 0.0025	0.9852 ± 0.0027
	61.10	1.0079 ± 0.0030	1.0031 ± 0.0029	0.9905 ± 0.0028
	58.08	1.0069 ± 0.0027	1.0010 ± 0.0027	0.9896 ± 0.0025
	55.69	1.0007 ± 0.0027	1.0065 ± 0.0028	0.9956 ± 0.0026
	53.50	1.0038 ± 0.0028	1.0038 ± 0.0026	0.9916 ± 0.0029
平均値	1.0013	1.0014	0.9955	
標準偏差	0.0038	0.0034	0.0041	
最小値	0.9944	0.9960	0.9849	
最大値	1.0079	1.0099	1.0058	

表 2.2.3 非質 MOX 格子体系ベンチマーク計算結果 (TCA 臨界実験: 正方格子配列、均質化モデル計算)

格子ピッチ (cm)	臨界水位 (cm)	keff ± σ	
		SCALE-PC 4.1	SCALE 4.2
1.825	69.41	1.0023 ± 0.0028	0.9931 ± 0.0028
	69.57	0.9977 ± 0.0026	0.9987 ± 0.0030
	59.55	1.0033 ± 0.0026	0.9986 ± 0.0031
	61.90	1.0049 ± 0.0027	1.0021 ± 0.0030
	64.06	0.9992 ± 0.0025	0.9988 ± 0.0028
	66.46	0.9957 ± 0.0030	1.0016 ± 0.0028
	60.06	0.9987 ± 0.0032	0.9958 ± 0.0029
	53.30	1.0017 ± 0.0028	1.0050 ± 0.0030
	56.68	0.9973 ± 0.0027	0.9960 ± 0.0027
	58.36	0.9991 ± 0.0031	0.9998 ± 0.0030
	1.956	67.10	1.0013 ± 0.0028
61.50		0.9999 ± 0.0026	1.0028 ± 0.0028
64.39		1.0015 ± 0.0030	1.0057 ± 0.0028
66.87		1.0000 ± 0.0028	1.0062 ± 0.0026
69.40		1.0046 ± 0.0027	0.9970 ± 0.0029
57.38		0.9956 ± 0.0029	0.9997 ± 0.0027
60.37		1.0009 ± 0.0029	1.0063 ± 0.0028
61.92		0.9994 ± 0.0026	0.9965 ± 0.0031
63.88		1.0027 ± 0.0027	1.0030 ± 0.0028
57.83		1.0037 ± 0.0030	1.0004 ± 0.0027
54.72		1.0032 ± 0.0029	1.0021 ± 0.0031
51.94		1.0027 ± 0.0025	0.9970 ± 0.0028
49.82		1.0081 ± 0.0028	1.0040 ± 0.0027
47.78		1.0057 ± 0.0028	1.0045 ± 0.0027
48.68	1.0084 ± 0.0029	1.0012 ± 0.0028	
2.225	68.67	1.0008 ± 0.0026	1.0048 ± 0.0028
	60.32	1.0060 ± 0.0027	1.0012 ± 0.0028
	62.95	1.0072 ± 0.0026	1.0035 ± 0.0028
	65.63	1.0063 ± 0.0026	1.0075 ± 0.0027
	68.18	1.0050 ± 0.0024	1.0034 ± 0.0026
	61.07	1.0020 ± 0.0024	0.9995 ± 0.0027
	53.41	1.0072 ± 0.0028	1.0010 ± 0.0028
	55.48	1.0074 ± 0.0025	1.0022 ± 0.0027
	57.28	1.0037 ± 0.0026	1.0026 ± 0.0026
	59.05	0.9991 ± 0.0028	1.0070 ± 0.0025
	54.33	1.0038 ± 0.0028	0.9974 ± 0.0025
	51.74	0.9997 ± 0.0027	1.0003 ± 0.0027
	47.72	1.0014 ± 0.0026	1.0058 ± 0.0028
	44.67	1.0099 ± 0.0026	1.0027 ± 0.0027
45.62	1.0061 ± 0.0021	1.0014 ± 0.0025	
2.474	69.16	1.0045 ± 0.0026	1.0069 ± 0.0022
	62.05	1.0025 ± 0.0026	1.0033 ± 0.0023
	64.53	1.0030 ± 0.0025	1.0064 ± 0.0026
	58.73	1.0009 ± 0.0025	1.0057 ± 0.0024
	61.10	1.0011 ± 0.0025	1.0067 ± 0.0025
	58.08	1.0062 ± 0.0025	1.0081 ± 0.0025
	55.69	1.0051 ± 0.0026	1.0066 ± 0.0024
	53.50	1.0068 ± 0.0024	1.0002 ± 0.0025
平均値	1.0022	1.0028	
標準偏差	0.0036	0.0034	
最小値	0.9931	0.9956	
最大値	1.0081	1.0099	

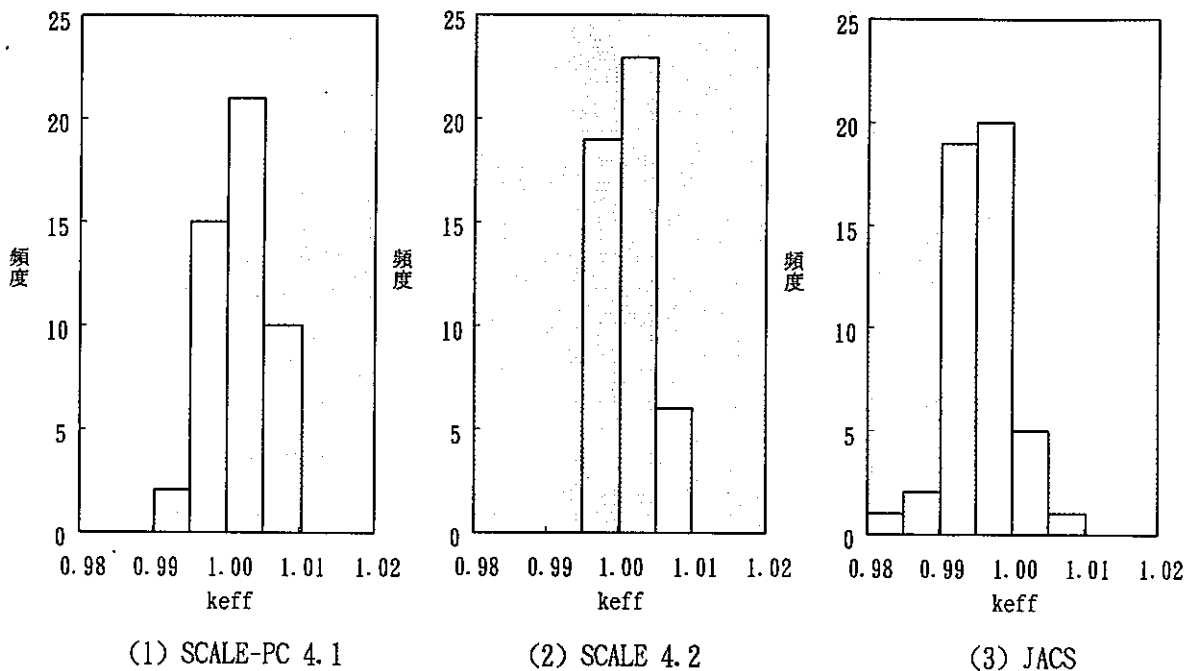


図 2.2.2 ベンマーク計算結果 (非均質 MOX 格子系 : 正方格子配列、非均質燃料計算)

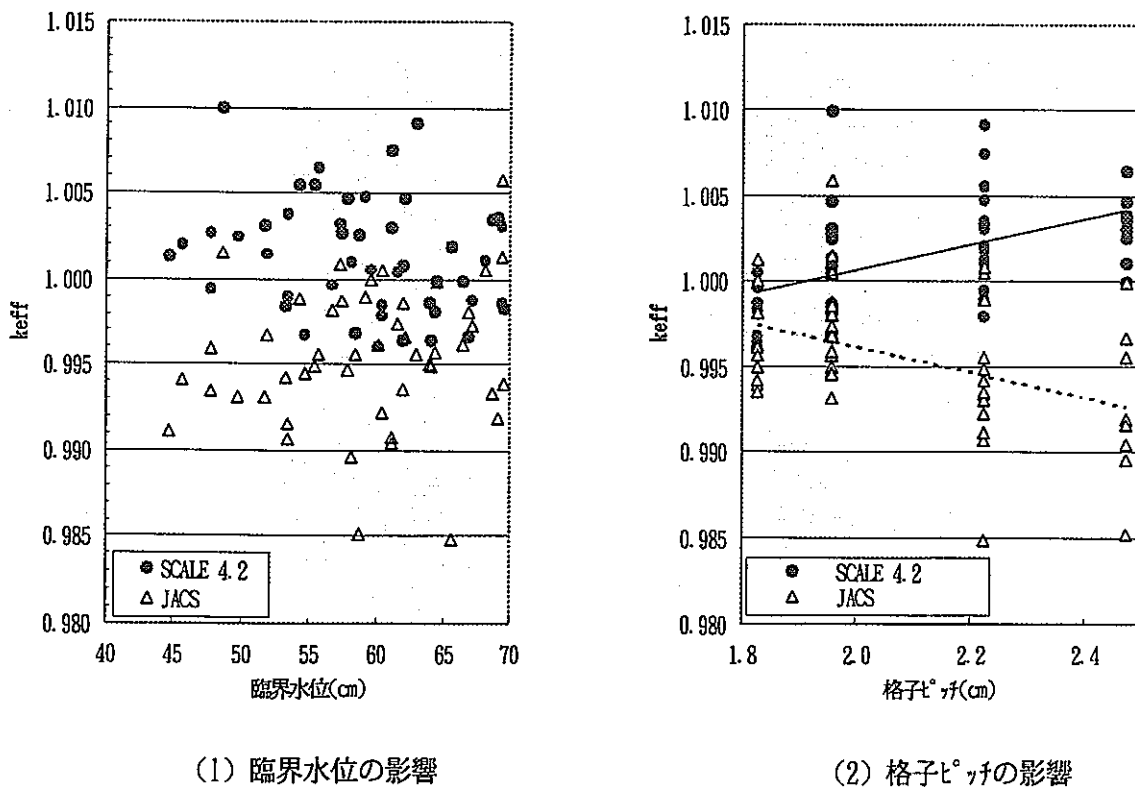


図 2.2.3 ベンマーク計算値のパラメータ依存性

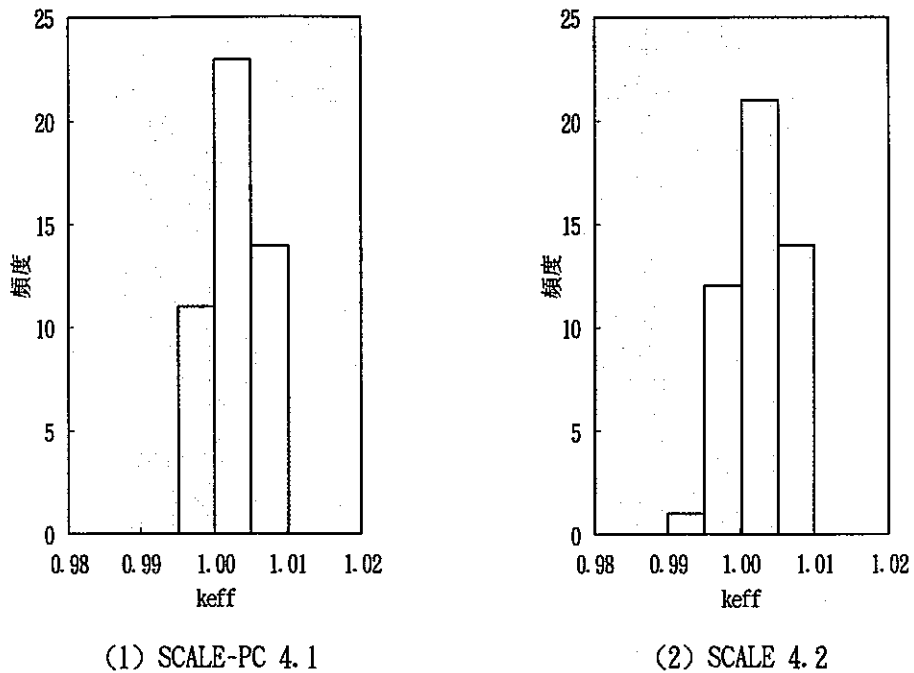


図 2.2.4 ベンチマーク計算結果（非均質 MOX 格子系：正方格子配列、均質化で keff 計算）

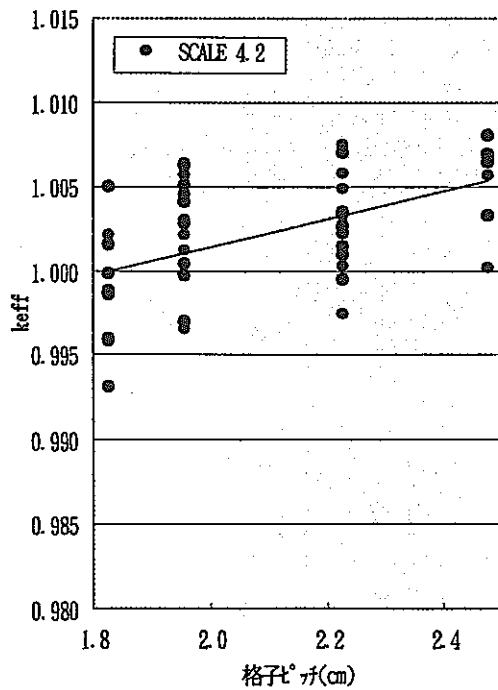


図 2.2.5 ベンチマーク計算値への格子ピッチの影響（均質化で keff 計算）

(2) 三角格子体系

文献[14]は前節同様 JACSコードの検証作業の一環として実施された、軽水炉内で MOX 燃料棒を三角格子配列状に並べて円筒状炉心を形成した場合の、臨界となる燃料棒本数データを用いたベンチマーク計算についての報告である。この中には ^{240}Pu 同位体割合が 8, 18, 24wt%、Pu 富化度 2, 4wt% の MOX 燃料を用い、燃料棒格子ピッチを変え、減速材に硼酸溶液を用いたものも含めて種々の炉心パターンを形成して行った 15ケースについてのデータが含まれているが、ここでは減速材に中性子吸収材を含まない 9ケースについてのベンチマーク計算を行った。

計算モデルは文献[14]と同様に、燃料有効長部分について燃料領域及び被覆管領域から成り、上下に続く端栓その他の構造材を省略した燃料棒の三角格子配列を円筒状に形成した炉心を 30cm 厚の水反射体で囲み、その外側を真空とした非均質格子モデル (モデル L) 及び CSAS2X シーケンスにより、前記モデルの炉心部を、均質化断面積を用いて燃料棒本数と格子ピッチより求められた等価炉心半径を持つ円柱炉心と置換えた均質化モデル (モデル H) の 2つを用いた

計算結果を表 2.2.4 及び図 2.2.6 に示す。非均質格子モデルと均質化モデル、SCALE 4.1 と 4.2 の比較ではいずれも 1~2 σ の違いであり有意な差はなく、 k_{eff} の誤差はほとんど 1%以内である。

表 2.2.4 非均質 MOX 格子体系ベンチマーク計算結果 (三角格子体系)

① 臨界データ

No.	燃料棒 (有効長 91.4cm)		燃料外径 (cm)	被覆管外径 (cm)	格子ピッチ (cm)	燃料棒本数	炉心半径 (cm)
	Pu 富化度 (wt%PuO ₂)	$^{240}\text{Pu}/\text{Pu}$ (wt%)					
27	2	8	0.6414	0.7176	2.032	319.7(320)*	19.076
28	"	"	"	"	2.667	152.1(152)	17.269
29	"	"	"	"	3.520	179.5(180)	24.764
36	"	24	"	"	2.032	519.5(520)	24.317
37	"	"	"	"	2.667	233.2(233)	21.383
38	"	"	"	"	3.520	365.3(365)	35.387
39	4	18	0.6318	"	2.159	252.6(253)	18.016
40	"	"	"	"	2.667	138.9(139)	16.503
41	"	"	"	"	4.318	271.9(272)	37.383

* ()内は詳細モデルで用いた燃料棒本数を示す

② 計算結果 ($k_{\text{eff}} \pm \sigma$)

No.	SCALE-PC 4.1		SCALE 4.2		JACS ^[14] (モデルL)
	モデル L	モデル H	モデル L	モデル H	
27	0.9958 ± 0.0039	0.9885 ± 0.0038	1.0021 ± 0.0038	1.0022 ± 0.0046	0.9954
28	1.0034 ± 0.0036	0.9958 ± 0.0042	0.9934 ± 0.0045	0.9984 ± 0.0038	0.9913
29	1.0111 ± 0.0034	1.0046 ± 0.0031	1.0053 ± 0.0031	1.0044 ± 0.0030	1.0256
36	0.9989 ± 0.0037	0.9917 ± 0.0038	0.9975 ± 0.0040	0.9979 ± 0.0036	0.9936
37	0.9978 ± 0.0041	0.9977 ± 0.0041	0.9951 ± 0.0040	1.0013 ± 0.0039	1.0035
38	1.0040 ± 0.0034	1.0059 ± 0.0031	1.0006 ± 0.0034	1.0100 ± 0.0030	1.0064
39	1.0026 ± 0.0044	1.0001 ± 0.0039	0.9951 ± 0.0047	1.0020 ± 0.0044	1.0104
40	1.0072 ± 0.0045	1.0068 ± 0.0045	1.0088 ± 0.0035	1.0032 ± 0.0045	1.0058
41	1.0072 ± 0.0034	1.0054 ± 0.0028	1.0015 ± 0.0036	1.0077 ± 0.0026	1.0115
平均	1.0031	0.9996	0.9999	1.0030	1.0048
標準偏差	0.0050	0.0067	0.0051	0.0040	0.0107

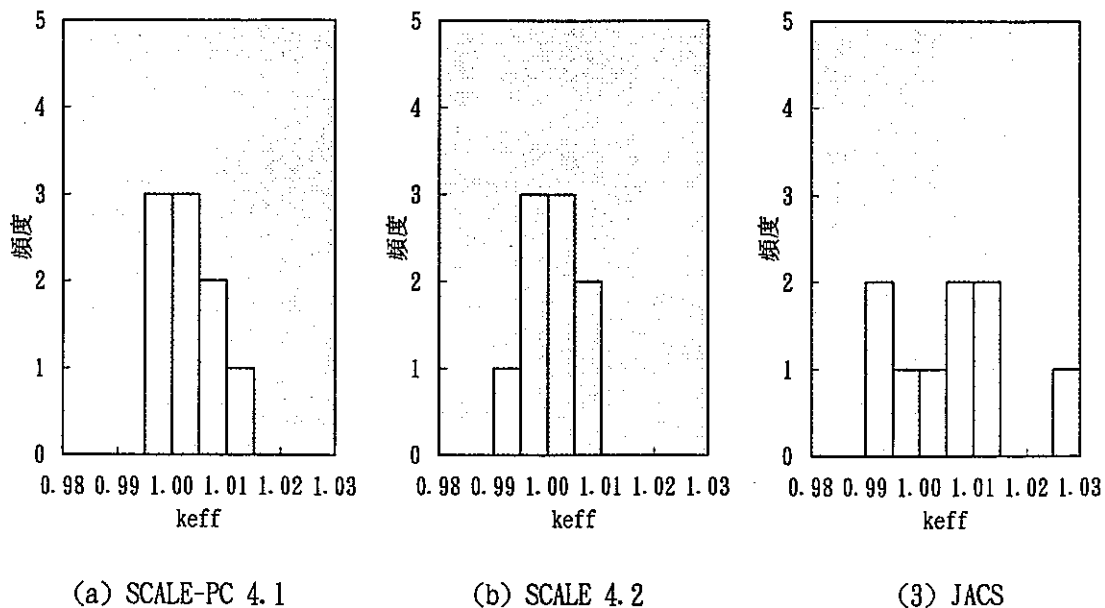


図 2.2.6 ベンチマーク計算結果 (非均質 MOX 格子系 : 三角格子配列)

3. U, Pu 混合系に対する他のベンチマーク文献

SCALE-4 及び 27 群ライブラリを用いた、主として高い Pu 富加度の U, Pu 混合系に対してのベンチマーク計算による検証報告がいくつかなされている。これらの結果について以下に簡単にまとめる。

3.1 日米共同臨界実験による検証^[15-18]

円筒、平板並びに円環形状、Pu 富化度 20~97wt%、Pu+U 濃度 20~490g/l の均質 Pu+U 溶液系に対する 57ケースのベンチマーク計算による keff の平均値及び標準偏差は 1.007 ± 0.006 (最小値 0.990) である。また、Pu 富化度 22wt% の非均質 MOX 格子体系 (但し、減速材も燃料溶液) に対する 12ケースのベンチマーク計算結果は 0.999 ± 0.002 (最小値 0.996) である。これらのベンチマーク計算結果を下図に示す。

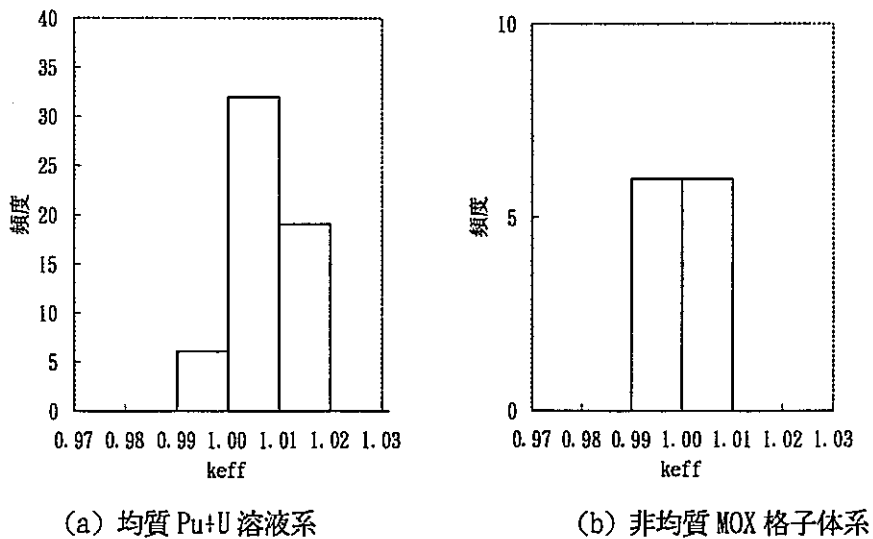


図 3.1 日米共同臨界実験に対する SCALE-4 の計算結果

3.2 その他の文献データ

その他のベンチマーク計算文献に基づき、Pu, U 混合系に加えて、比較のために低濃縮 U 系に対する結果も含めて以下に簡単にまとめる。

(1) 非均質 UO_2 格子体系

文献[19]には、20ケースの水減速 UO_2 燃料棒格子体系に対するベンチマーク計算結果が与えられている。これらの臨界実験には、濃縮度 2.3~5.7wt%の燃料棒の正方格子配列で、構造材として Boral、アルミニウム、ステンレス鋼を使用したもの、反射体として減損ウラン、鉛、スチールを使用したもの、減速材中にボロンを含んだものや、Gd 入りの燃料棒を使用したものなど多様な条件の実験が含まれている。また、文献[20]には、2.46wt%濃縮 UO_2 燃料棒の三角または正方格子配列で水またはボロン溶液を使用した8ケースのベンチマーク計算結果が与えられている。これら28ケースの k_{eff} 計算値の平均値、標準偏差は 0.9919 ± 0.0059 (最小値 0.9772) である。ベンチマーク計算結果を図 3.2(a)に示す。

(2) 非均質 MOX 格子体系

文献[19]には、13ケースの水減速 MOX 燃料棒格子体系に対するベンチマーク計算結果が与えられている。これらの臨界実験には、98wt%天然 $UO_2 + 2wt\%PuO_2$ (8wt% ^{240}Pu) または 93.4wt%天然 $UO_2 + 6.6wt\%PuO_2$ (9wt% ^{240}Pu) の燃料棒の正方格子配列で水またはボロン溶液を使用したもの、98wt%天然 $UO_2 + 2wt\%PuO_2$ 燃料棒と 4.31wt%濃縮 UO_2 燃料棒を三角格子で均一に配置した条件の実験が含まれている。 k_{eff} 計算値の平均値、標準偏差は 1.0014 ± 0.0071 (最小値 0.9840) である。ベンチマーク計算結果を図 3.2(b)に示す。

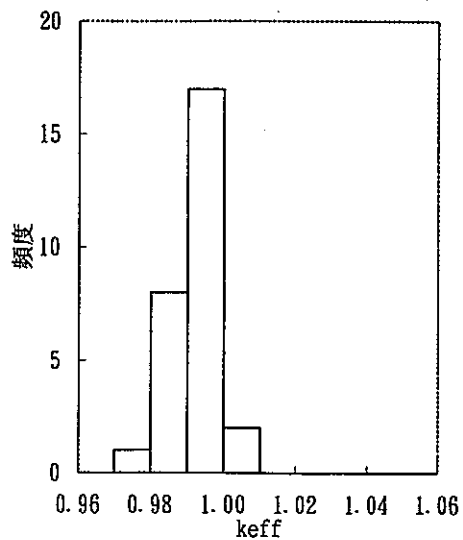
(3) 均質低濃縮 U 系

文献[20]には、低濃縮 U 系に関する 51 のベンチマーク計算結果が与えられている。この内、均質系である以下の 20ケースに対する k_{eff} 計算値の平均値、標準偏差は 0.9959 ± 0.0083 (最小値 0.9854) となる。ベンチマーク計算結果を図 3.2(c)に示す。

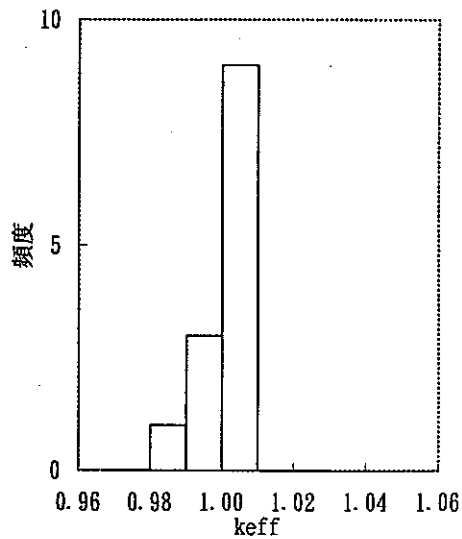
4.9wt%濃縮 UO_2F_2 溶液	5ケース
4.9wt%濃縮 U_3O_8 含有プラスチック	5ケース
1.4~3wt%濃縮 UF_4 含有パラフィン	10ケース

(4) 均質 MOX 系

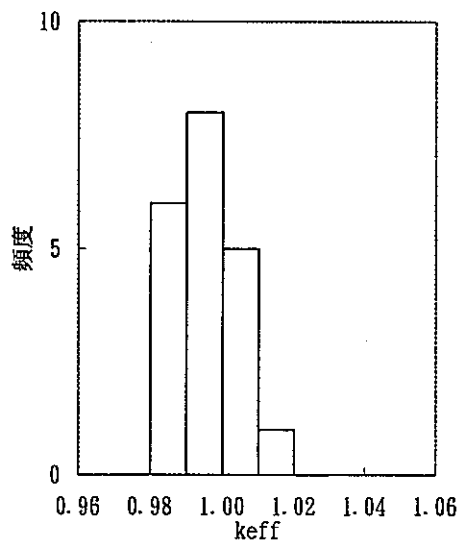
文献[21, 22]には、MOX 含有ポリスチレンを用いた 136ケースの臨界実験に対するベンチマーク計算結果が報告されている。これらの臨界実験には、Pu 富化度 7~30wt%、Pu 中の ^{240}Pu 割合は 8~23wt%で、反射体を用いたものと裸の場合、各種中性子吸収材を使用したものが含まれている。 k_{eff} 計算値の平均値、標準偏差は 1.016 ± 0.013 (最小値 0.971) である。ベンチマーク計算結果を図 3.2(d)に示す。



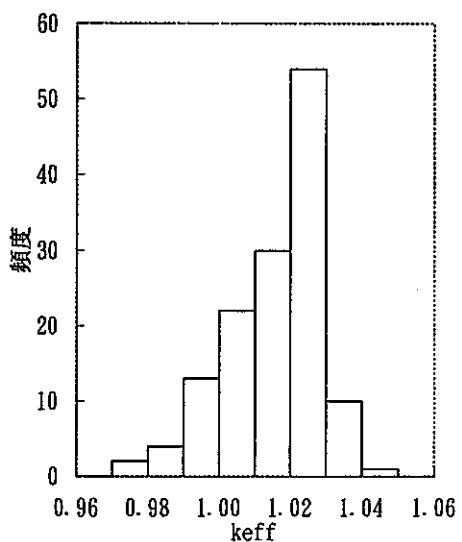
(a) 非均質 UO₂ 格子体系



(b) 非均質 MOX 格子体系



(c) 均質低濃縮 U 系



(d) 均質 MOX 系

図 3.2 その他の文献による SCALE-4 の計算結果

以上の結果と、2章で行った低Pu富化度Pu,U混合系に対する結果では有意な違いはみられない。また、低濃縮U系とPu,U混合系との比較では、同様あるいは後者がやや高めの結果を与えているようである。

4. まとめ

軽水炉 MOX 燃料の再処理における臨界安全評価に対する SCALE-4コードシステムの適用性を確認するためにベンチマーク計算を実施した。計算対象は低 Pu 富化度(10wt%以下)の(U+Pu)混合系である。使用コードはパソコン版である SCALE-PC 4.1 とワークステーション版の SCALE 4.2 である。

計算の結果、両コードによる結果に有意な差はなく、ともに十分な計算精度を有すること、並びに、非均質格子体系に対しては、非均質計算モデル及び均質化計算モデルによる結果にも有意な違いはないことが確認された。SCALE 4.2 によるベンチマーク計算の結果を下表にまとめる。

表4 ベンチマーク計算結果のまとめ

評価体系	Pu 富化度 (wt%)	²⁴⁰ Pu/Pu (wt%)	その他条件	データ数	keff	
					平均値	標準偏差
均質 MOX 粉末系 (PuO ₂ -UO ₂ -ボリスチン)	7.89	8.0	H/(U+Pu)=51.8	7	1.0149	0.0063
	8.1	11.5	H/(U+Pu)=7.3	4		
均質(U+Pu) 硝酸溶液系	5.5~7.3	22.8	水反射体付 円柱体系	13	1.0109	0.0033
非均質 MOX 格子体系	3.01	22.0	正方格子	48	1.0014	0.0034
	2, 4	8, 18, 24	三角格子	9	0.9999	0.0051
上記全体				81	1.0046 最大 1.0259 最小 0.9934	0.0068

参考文献

1. Y. Kishimoto, T. Matsumoto, et al., "Verification of Criticality Module in SCALE for the Fast Breeder Fuel Cycle", ISCS'87, pp. 219-225, AESJ/PNC/JAERI, Tokyo, Oct. 19-23, 1987
2. 松本忠邦、清野英昭ら、「日米共同臨界実験の成果 Pu+U 系臨界安全データの取得と未臨界度の測定」, 日本原子力学会誌, 37[2], 1995
3. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, NUREG/CR-0200, Rev. 4 (ORNL/NUREG/CSD-2/R4), Vols. I, II, and III (draft Nov. 1993); available from Radiation Shielding Information Center as CCC-545
4. "SCALE-PC: Modular Code System for Performing Criticality Safety Analysis for Licensing Evaluation, Version 4.1", available from Radiation Shielding Information Center as CCC-619, 1993
5. 奥野浩、内藤倣孝, "臨界安全解析コードシステムJACS の計算誤差評価", JAERI-M 87-057, 1987
6. S. R. Bierman, E. D. Clayton, L. E. Hansen, "Critical Experiments with Homogeneous Mixtures of Plutonium and Uranium Oxides Containing 8, 15, and 30 wt% Plutonium", Nucl. Sci. Eng., 50, 115-126, 1973
7. S. R. Bierman, E. D. Clayton, "Critical Experiments with Low-Moderated Homogeneous Mixtures of Plutonium and Uranium Oxides Containing 8, 15, and 30 wt% Plutonium", Nucl. Sci. Eng., 61, 370-376, 1976
8. S. R. Bierman, "Critical Experiments Benchmarks (Pu-U Systems)", Nucl. Technol., 26, 352-381, 1975
9. Y. Nomura et al., "Benchmark Calculations by the Nuclear Criticality Safety Analysis Code System JACS (MGCL, KENO-IV)", JAERI 1303, 1986
10. R. C. Lloyd, S. R. Bierman, E. D. Clayton, "Criticality of Plutonium-Uranium Mixtures Containing 5 to 8 wt% Plutonium", Nucl. Sci. Eng., 55, 51-57, 1974
11. 桜井聡、館盛勝一, "プルトニウム(IV)-ウラン(VI)-硝酸水溶液の密度式の改良", JAERI-M 88-127, 1988
12. 小室雄一、野村靖、内藤倣孝、鶴田新一郎、片倉純一, "KENO-IV コードベンチマーク計算(10) (軽水型原子炉臨界集合体による臨界実験)", JAERI-M 9147, 1980 (臨界実験レポートは JAERI-1254, 1978 参照)
13. M. D. DeHart, S. M. Bowman, "Validation of the SCALE Broad Structure 44-Group ENDF/B-V Cross-Section Library for Use in Criticality Safety Analyses", ORNL/TM-12460, 1994
14. 野村靖、下桶敬則、山口康泰, "KENO-IV コードベンチマーク計算(7) (プルトニウム富化燃料棒の三角格子配列)", JAERI-M 9079, 1980 (臨界実験レポートは NUREG/CR-0210, 1987 参照)

15. T. Matsumoto, H. Takeda, S. Hayashi, "Summary and Application of Criticality Data from PNC/USDOE Joint Program", NEA/CSNI/R(91)10, 1991, pp.90-102, OECD-NEA/STA/JAERI/PNC, Tokyo, Oct.7-9, 1991
16. G. R. Smolen, R. C. Lloyd, F. Hideyuki, "Criticality Data and validation Studies of Plutonium-Uranium Nitrate Solution in Cylindrical and Slab Geometry", Nuclear Technology, 107, 304-325, 1994
17. G. R. Smolen, R. C. Lloyd, K. Tomozo, "Criticality Data and validation Studies of Plutonium-Uranium Nitrate Solution in Annular Geometry", Nuclear Technology, 107, 326-339, 1994
18. G. R. Smolen, S. R. Bierman, M. Tadakuni, "Criticality Data and validation Studies of Mixed-Oxide Fuel Pin Arrays in Pu+U+Gd Nitrate", Nuclear Technology, 107, 340-355, 1994
19. M. D. DeHart, S. M. Bowman, "Validation of the SCALE Broad Structure 44-Group ENDF/B-V Cross Section Library for Use in Criticality Safety Analyses", ORNL/TM-12460, 1994
20. W. C. Jordan, "Validation of SCALE 4.0 - CSAS25 Module and the 27-Group ENDF/B-IV Cross-Section Library for Low-Enriched Uranium Systems", ORNL/CSD/TM-287, 1993
21. 野尻一郎、百瀬琢磨、成田修、高田友幸、"SCALE-4コードシステムを用いた臨界ベンチマーク計算-MOX 粉末系及び Pu 粉末系を対象とした-", 日本原子力学会「1992 春の年会」予稿集 H43, 1992
22. 清水義雄、野尻一郎、成田修、深作康宏、"MOX 粉末系の臨界ベンチマーク計算における MCNP4 と KENO V. a の比較計算(II)", 日本原子力学会「1994 秋の大会」予稿集 G38, 1994

別添資料 SCALE 4 ベンチマーク計算入力データリスト

以下に、本文各節で行ったベンチマーク計算の入力データの代表例を示す。なお、SCALE-PC 4.1 及び SCALE 4.2 両者とも同一の入力データを使用している。

1. 均質 MOX 粉末系

(1) NSE50:PuO₂-UO₂-²³⁸Plutonium⁹⁰ 7.89wt%Pu, 8.0wt%²⁴⁰Pu, 0.151wt%²³⁵U, H/(Pu+U)=51.8

ケース名 : D078

詳細モデル

```
=csas25
nse50; d078c 7.89pu(8.0)-u(0.15) powder
27groupndf4 infhommedium
am-241 1 0.0 1.741-7 293.0 end
pu-239 1 0.0 6.528-5 293.0 end
pu-240 1 0.0 5.941-6 293.0 end
pu-241 1 0.0 3.481-7 293.0 end
u-235 1 0.0 1.285-6 293.0 end
u-238 1 0.0 8.376-4 293.0 end
h 1 0.0 4.719-2 293.0 end
c 1 0.0 4.540-2 293.0 end
o 1 0.0 1.830-3 293.0 end
h 2 0.0 4.489-2 293.0 end
c 2 0.0 3.110-2 293.0 end
cl 2 0.0 0.724-2 293.0 end
h 3 0.0 5.712-2 293.0 end
c 3 0.0 3.570-2 293.0 end
o 3 0.0 1.428-2 293.0 end
end comp
nse50; d078c 7.89pu(8.0)-u(0.15) powder
read param
tme=99.9 gen=103 npg=300 nsk=3
end param
read geom
width length height
box type 1
cuboid 1 1 2p2.5400 2p2.545 2p2.545
cuboid 2 1 2p2.5580 2p2.557 2p2.557
cuboid 0 1 2p2.5945 2p2.564 2p2.564
box type 2
cuboid 1 1 2p2.5400 2p2.545 2p0.662
cuboid 2 1 2p2.5580 2p2.557 2p0.680
cuboid 0 1 2p2.5945 2p2.564 2p0.719
box type 3
cuboid 1 1 2p2.5400 2p2.5450 2p0.236334
cuboid 2 1 2p2.5580 2p2.5570 2p0.242760
cuboid 0 1 2p2.5945 2p2.5640 2p0.256683
corebdy 0 1 -0.0 -0.0 -0.0
cuboid 3 1 61.701 -15.0 56.024 -15.0 54.285366
-15.0
end geometry
read array
nux=9 nuy=8 nuz=10 loop
1 1 9 1 1 8 1 1 7 1
2 1 9 1 1 8 1 8 9 1
3 1 9 1 1 8 1 10 10 1
end loop
end array
end data
end
```

単純モデル

```
=csas25
nse50; d078n 7.89pu(8.0)-u(0.15) powder
27groupndf4 infhommedium
am-241 1 0.0 1.741-7 293.0 end
pu-239 1 0.0 6.528-5 293.0 end
pu-240 1 0.0 5.941-6 293.0 end
pu-241 1 0.0 3.481-7 293.0 end
u-235 1 0.0 1.285-6 293.0 end
u-238 1 0.0 8.376-4 293.0 end
h 1 0.0 4.719-2 293.0 end
c 1 0.0 4.540-2 293.0 end
o 1 0.0 1.830-3 293.0 end
h 2 0.0 5.712-2 293.0 end
c 2 0.0 3.570-2 293.0 end
o 2 0.0 1.428-2 293.0 end
end comp
nse50; d078n 7.89pu(8.0)-u(0.15) powder
read param
tme=99.9 gen=103 npg=300 nsk=3
end param
read geom
box type 1
cuboid 1 1 45.72 -0.0 40.72 -0.0 32.89 -0.0
cuboid 2 1 60.72 -15.00 55.72 -15.00 47.89 -15.0
end geometry
end data
end
```

(2) NSE61:PuO₂-UO₂-ホ°リスチレンコソハ°クト, 8.1wt%Pu, 11.5wt%²⁴⁰Pu, 0.2wt%²³⁵U, H/(Pu+U)=7.3

ケース名 : D140

詳細モデル

```

=csas25
nse61; d140c 8.1pu(11.6)-u(0.2) powder
27groupndf4 infhommedium
am-241 1 0.0 3.132-6 320.0 end
pu-238 1 0.0 3.809-7 320.0 end
pu-239 1 0.0 3.490-4 320.0 end
pu-240 1 0.0 4.678-5 320.0 end
pu-241 1 0.0 7.745-6 320.0 end
pu-242 1 0.0 1.116-6 320.0 end
u-235 1 0.0 9.116-6 320.0 end
u-238 1 0.0 4.606-3 320.0 end
o 1 0.0 1.178-2 320.0 end
c 1 0.0 3.567-2 320.0 end
h 1 0.0 3.680-2 320.0 end
h 2 0.0 4.489-2 320.0 end
c 2 0.0 3.111-2 320.0 end
cl 2 0.0 7.240-3 320.0 end
h 3 0.0 5.666-2 320.0 end
c 3 0.0 3.510-2 320.0 end
o 3 0.0 1.428-2 320.0 end
end comp
nse61; d140c 8.1pu(11.5)-u(0.2) powder
read param
tme=99.9 gen=103 npg=300 nsk=3
end param
read geom
box type 1
cuboid 1 1 2p2.5450 2p2.5450 2p2.5405
cuboid 2 1 2p2.5570 2p2.5570 2p2.5840
cuboid 0 1 2p2.5690 2p2.5690 2p2.5850
box type 2
cuboid 1 1 2p2.5450 2p2.5450 2p0.6370
cuboid 2 1 2p2.5570 2p2.5570 2p0.6805
cuboid 0 1 2p2.5690 2p2.5690 2p0.6905
box type 3
cuboid 1 1 2p2.5450 2p2.5450 2p0.0859950
cuboid 2 1 2p2.5570 2p2.5570 2p0.0918675
cuboid 0 1 2p2.5690 2p2.5690 2p0.0932175
corebdy 0 1 -0.0 -0.0 -0.0
cuboid 3 1 61.242 -15.0 66.38 -15.0 63.097435 -15.0
end geometry
read array
nux=9 nuy=10 nuz=11 loop
1 1 9 1 1 10 1 1 9 1
2 1 9 1 1 10 1 10 10 1
3 1 9 1 1 10 1 11 11 1
end loop
end array
end data
end

```

2. 均質(U+Pu)硝酸溶液系

NSE55:(U+Pu)硝酸溶液, 23wt%²⁴⁰Pu, 0.66wt²³⁵U

ケースNo. 1

内蔵密度式を用いる場合

```
=csas25
nse. 55,51-57: 30.63gpu/l+390.2gu/l nitrate sol.
27groupndf4 infhommedium
solnpu(no3)4 1 420.83 0.45 0.07278 293
          94238 0.07 94239 73.00 94240 22.80
                    94241 3.22 94242 0.91 end
solnuo2(no3)2 1 420.83 0.45 0.92722 293
          92234 0.01 92235 0.66 92236 0.01 92238 99.32 end
ss304 2 1.0 end
h2o 3 1.0 end
end comp
nse. 55,51-57: 30.63gpu/l+390.2gu/l nitrate sol.
read parm npg=300 gen=103 nsk=3 end parm
read geom
unit 1
cylinder 1 1 30.514 50.27 0.0
cylinder 0 1 30.514 105.73 0.0
cylinder 2 1 30.593 105.809 -0.95
cylinder 3 1 50.523 105.809 -21.90
cylinder 2 1 50.800 105.809 -22.177
cuboid 0 1 50.8 -50.8 50.8 -50.8 105.809 -22.177
end geom
end data
end
```

密度を指定する場合

```
=csas25
nse. 55,51-57: 30.63gpu/l+390.2gu/l nitrate sol.
27groupndf4 infhommedium
solnpu(no3)4 1 420.83 0.45 spg=1.583 0.07278 293
          94238 0.07 94239 73.00 94240 22.80
                    94241 3.22 94242 0.91 end
solnuo2(no3)2 1 420.83 0.45 spg=1.583 0.92722 293
          92234 0.01 92235 0.66 92236 0.01 92238 99.32 end
ss304 2 1.0 end
h2o 3 1.0 end
end comp
nse. 55,51-57: 30.63gpu/l+390.2gu/l nitrate sol.
read parm npg=300 gen=103 nsk=3 end parm
read geom
unit 1
cylinder 1 1 30.514 50.27 0.0
cylinder 0 1 30.514 105.73 0.0
cylinder 2 1 30.593 105.809 -0.95
cylinder 3 1 50.523 105.809 -21.90
cylinder 2 1 50.800 105.809 -22.177
cuboid 0 1 50.8 -50.8 50.8 -50.8 105.809 -22.177
end geom
end data
end
```

3. 非均質 MOX 格子体系

(1) TCA 臨界実験 (正方格子配列)

① 非均質セル

ケースNo. 1

=csas25

no.74:tca 242p pat.24 water level 69.41cm 72/6/5

27groupndf4 latticecell

*in-water part of fuel

u-234 1 0.0 7.436-7 end

u-235 1 0.0 9.393-5 end

u-238 1 0.0 1.295-2 end

pu-238 1 0.0 2.000-6 end

pu-239 1 0.0 2.749-4 end

pu-240 1 0.0 8.843-5 end

pu-242 1 0.0 8.124-6 end

o 1 0.0 2.784-2 end

pu-241 1 0.0 2.794-5 end

am-241 1 0.0 1.298-6 end

*in air part of fuel

u-234 2 0.0 7.436-7 end

u-235 2 0.0 9.393-5 end

u-238 2 0.0 1.295-2 end

pu-238 2 0.0 2.000-6 end

pu-239 2 0.0 2.749-4 end

pu-240 2 0.0 8.843-5 end

pu-242 2 0.0 8.124-6 end

o 2 0.0 2.784-2 end

pu-241 2 0.0 2.794-5 end

am-241 2 0.0 1.298-6 end

zircalloy 3 1.0 end

h2o 4 1.0 end

h2o 5 1.0 end

al 6 1.0 end

end comp

squarepitch 1.825 1.065 1 4 1.223 3 1.083 0 end

more data

res=2 cylinder 0.5325 dan(2)=0.961469

end more

*===== keno data =====

no.74:tca 242p pat.24 water level 69.41cm

read param

gen=203 npg=300 nsk=3 pit=no

end param

read geom

unit 1

com=/fuel-pin in water/

cylinder 6 1 0.5325 0.0 -16.83

cylinder 1 1 0.5325 69.41 -16.83

cylinder 0 1 0.5415 69.41 -16.83

cylinder 3 1 0.6115 69.41 -16.83

cuboid 4 1 2p0.9125 2p0.9125 69.41 -16.83

unit 2

com=/fuel-pin in air/

cylinder 2 1 0.5325 1.19 -0.0

cylinder 0 1 0.5415 1.19 -0.0

cylinder 3 1 0.6115 1.19 -0.0

cuboid 0 1 2p0.9125 2p0.9125 1.19 -0.0

unit 3

com=/fuel region in water/

array 1 2*-20.075 -16.83

cylinder 5 1 91.6 69.41 -30.0

cuboid 0 1 4p91.6 69.41 -30.0

unit 4

com=/fuel region in air/

array 2 2*-20.075 0.0

cuboid 0 1 4p91.6 1.19 0.0

global unit 5

array 3 2*-91.6 -30.0

cuboid 0 1 4p91.6 71.0 -30.0

end geom

read array

ara=1 nux=22 nuy=22 nuz=1 fill f1 end fill

ara=2 nux=22 nuy=22 nuz=1 fill f2 end fill

ara=3 nux=1 nuy=1 nuz=2 fill 3 4 end fill

end array

end data

end

上記インプットの more data により指定しているガンマ係数の値は、下記の CSASN シーケンスにより得られる。

=csasn parm=chk

tca 242p pat.24 water level 69.41cm

27groupndf4 latticecell

u-234 1 0.0 7.436-7 end

u-235 1 0.0 9.393-5 end

u-238 1 0.0 1.295-2 end

pu-238 1 0.0 2.000-6 end

pu-239 1 0.0 2.749-4 end

pu-240 1 0.0 8.843-5 end

pu-242 1 0.0 8.124-6 end

o 1 0.0 2.784-2 end

pu-241 1 0.0 2.794-5 end

am-241 1 0.0 1.298-6 end

zircalloy 3 1.0 end

end comp

squarepitch 1.825 1.065 1 0 1.223 3 1.083 0 end

end

② 均質化モデル

```

ヶ-スNo. 1
=csas2x
no. 74:tca 242p pattern 24 water level 69.41cm 72/6/5
27groupndf4 latticecell
'in-water part of fuel
u-234 1 0.0 7.436-7 end
u-235 1 0.0 9.393-5 end
u-238 1 0.0 1.295-2 end
pu-238 1 0.0 2.000-6 end
pu-239 1 0.0 2.749-4 end
pu-240 1 0.0 8.843-5 end
pu-242 1 0.0 8.124-6 end
o 1 0.0 2.784-2 end
pu-241 1 0.0 2.794-5 end
am-241 1 0.0 1.298-6 end
'in air part of fuel
u-234 2 0.0 7.436-7 end
u-235 2 0.0 9.393-5 end
u-238 2 0.0 1.295-2 end
pu-238 2 0.0 2.000-6 end
pu-239 2 0.0 2.749-4 end
pu-240 2 0.0 8.843-5 end
pu-242 2 0.0 8.124-6 end
o 2 0.0 2.784-2 end
pu-241 2 0.0 2.794-5 end
am-241 2 0.0 1.298-6 end
.
zircalloy 3 1.0 end
zircalloy 7 1.0 end
h2o 4 1.0 end
h2o 5 1.0 end
al 6 1.0 end
end comp
squarepitch 1.825 1.065 1 4 1.223 3 1.083 0 end
more data res=2 cylinder 0.5325
dan(2)=0.961469 end more
'==== keno data ====
no. 74:tca 242p pattern 24 water level 69.41cm
read param
gen=203 npg=300 nsk=3 plt=no
end param
read geom
unit 1
com=/fuel-pin in air/
cylinder 2 1 0.5325 1.19 0.0
cylinder 0 1 0.5415 1.19 0.0
cylinder 7 1 0.6115 1.19 0.0
cuboid 0 1 2p0.9125 2p0.9125 1.19 0.0
unit 2
com=/fuel region in air/
array 1 2*-20.075 0.0
cuboid 0 1 4p91.6 1.19 0.0
unit 3
com=/fuel region in water/
cuboid 500 1 4p20.075 69.41 0.0
cylinder 5 1 91.6 69.41 -30.0
cuboid 0 1 4p91.6 69.41 -30.0

```

```

global unit 4
array 2 2*-91.6 -30.0
cuboid 0 1 4p91.6 71.0 -30.0
end geom
read array
ara=1 nux=22 nuy=22 nuz=1 fill f1 end fill
ara=2 nux=1 nuy=1 nuz=2 fill 3 2 end fill
end array
end data
end

```

(2) 三角格子配列体系

ケ-スNo. 27

①格子モデル (モデル L)

00=csas25

no. 27:triangle pitch

27groupndf4 latticecell

' fuel

u-235 1 0.0 1.504-4 end

u-238 1 0.0 2.073-2 end

pu-238 1 0.0 4.000-8 end

pu-239 1 0.0 3.974-4 end

pu-240 1 0.0 3.344-5 end

pu-241 1 0.0 2.640-6 end

pu-242 1 0.0 1.200-7 end

am-241 1 0.0 4.700-7 end

o 1 0.0 4.401-2 end

' clad

zr 2 0.0 4.226-2 end

' moderator

h 3 0.0 6.671-2 end

o 3 0.0 3.336-2 end

'

h2o 4 1.0 end

end comp

triangpitch 2.032 1.2828 1 3 1.4352 2 end

' ===== keno data =====

no. 27:triangle pitch

read param gen=103 npg=300 nsk=3 end param

read geom

unit 1

com=/right-half part of fuel rod/

zhemicyl+x 1 1 0.6414 0.0 -91.40

zhemicyl+x 2 1 0.7176 0.0 -91.40

cuboid 3 1 1.016 0.0 0.880 -0.880 0.0 -91.40

unit 2

com=/left-half part of fuel rod/

zhemicyl-x 1 1 0.6414 0.0 -91.40

zhemicyl-x 2 1 0.7176 0.0 -91.40

cuboid 3 1 0.0 -1.016 0.880 -0.880 0.0 -91.40

unit 3

com=/part of moderator water/

cuboid 3 1 1.016 0.0 0.880 -0.880 0.0 -91.40

global unit 4

array 1 -20.32 -18.48 -91.40

cylinder 4 1 50.32 30.00 -121.40

cuboid 0 1 51.0 -51.0 51.0 -51.0 30.00 -121.40

end geom

read array

ara=1 nux=40 nuy=21 nuz=1 loop

3 1 40 1 1 21 1 1 1 1

2 14 28 2 1 1 1 1 1 1

1 15 29 2 1 1 1 1 1 1

2 9 29 2 2 2 1 1 1 1

1 10 30 2 2 2 1 1 1 1

2 8 32 2 3 3 1 1 1 1

```

1 9 33 2 3 3 1 1 1 1
2 7 33 2 4 4 1 1 1 1
1 8 34 2 4 4 1 1 1 1
2 6 34 2 5 5 1 1 1 1
1 7 35 2 5 5 1 1 1 1
2 5 35 2 6 6 1 1 1 1
1 6 36 2 6 6 1 1 1 1
2 4 36 2 7 7 1 1 1 1
1 5 37 2 7 7 1 1 1 1
2 3 37 2 8 8 1 1 1 1
1 4 38 2 8 8 1 1 1 1
2 2 38 2 9 9 1 1 1 1
1 3 39 2 9 9 1 1 1 1
2 3 39 2 10 10 1 1 1 1
1 4 40 2 10 10 1 1 1 1
2 2 38 2 11 11 1 1 1 1
1 3 39 2 11 11 1 1 1 1
2 1 37 2 12 12 1 1 1 1
1 2 38 2 12 12 1 1 1 1
2 2 38 2 13 13 1 1 1 1
1 3 39 2 13 13 1 1 1 1
2 3 37 2 14 14 1 1 1 1
1 4 38 2 14 14 1 1 1 1
2 4 36 2 15 15 1 1 1 1
1 5 37 2 15 15 1 1 1 1
2 5 35 2 16 16 1 1 1 1
1 6 36 2 16 16 1 1 1 1
2 6 34 2 17 17 1 1 1 1
1 7 35 2 17 17 1 1 1 1
2 7 33 2 18 18 1 1 1 1
1 8 34 2 18 18 1 1 1 1
2 8 32 2 19 19 1 1 1 1
1 9 33 2 19 19 1 1 1 1
2 9 31 2 20 20 1 1 1 1
1 10 32 2 20 20 1 1 1 1
2 12 26 2 21 21 1 1 1 1
1 13 27 2 21 21 1 1 1 1
end loop
end array
end data
end
    
```

②均質化セル (セル H)

=csas2x

no.27:triangle pitch

27groupndf4 latticecell

' fuel

u-235 1 0.0 1.504-4 end

u-238 1 0.0 2.073-2 end

pu-238 1 0.0 4.000-8 end

pu-239 1 0.0 3.974-4 end

pu-240 1 0.0 3.344-5 end

pu-241 1 0.0 2.640-6 end

pu-242 1 0.0 1.200-7 end

am-241 1 0.0 4.700-7 end

o 1 0.0 4.401-2 end

' clad

zr 2 0.0 4.226-2 end

' moderator

h 3 0.0 6.671-2 end

o 3 0.0 3.336-2 end

,

h2o 4 1.0 end

end comp

triangpitch 2.032 1.2828 1 3 1.4352 2 end

'===== keno data =====

no.27:triangle pitch

read param gen=103 npg=300 nsk=3 end param

read geom

cylinder 500 1 19.076 0.0 -91.40

cylinder 4 1 49.076 30.0 -121.40

cuboid 0 1 50.0 -50.0 50.0 -50.0 30.0 -121.40

end geom

end data

end