

PWR使用済燃料の燃焼度クレジット

臨界ベンチマーク解析

— 軸方向燃焼度分布の効果 —

1996年8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

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

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

PWR使用済燃料の燃焼度クレジット
臨界ベンチマーク解析
- 軸方向燃焼度分布の効果 -

野尻 一郎^{*1}、深作 泰宏^{*2}

要 旨

核燃料サイクル施設の臨界安全性の評価では、従来は核燃料の燃焼に伴って生じる反応度の低下を無視し、初期燃料組成を用いて解析を実施している。しかし、この方法では必要以上の安全裕度を見込むこともあり、施設の建設等において費用の高騰をもたらすこともある。

経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）では、国際的に施設の設計及び建設時の費用低減要求が高まってきている背景を踏まえて、燃焼度クレジット評価への従来の臨界安全解析コードの適用性を検討するため、臨界ベンチマーク解析を実施している。

本資料では、OECD/NEA燃焼度クレジット臨界ベンチマーク解析のPhase IIとして提案されたPWR使用済燃料を対象とした軸方向燃焼度分布の効果の計算結果について報告する。計算には、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）において開発されたSCALE 4を使用した。

Phase IIは、PWR使用済燃料ピンの無限配列体系（Phase II-A）及び使用済燃料輸送キャスク体系（Phase II-B）について、初期燃料組成及び使用済燃料組成における中性子増倍率を計算し、FP核種、軸方向燃焼度分布等の効果を検討するために設定された課題である。計算の結果、Phase II-A及びII-Bいずれも燃焼度が30GWd/MTUを超える使用済燃料組成では、軸方向の燃焼度分布を考慮した体系が中性子増倍率を高く評価する傾向があることが示された。

また、Phase II-Aの課題を用いて複数燃料領域の体系を評価するためのSCALE 4の3つの計算手順の比較を行い、いずれの計算手順を用いてもほぼ等しい計算結果が得られることを確認した。

*1 安全管理部 安全技術課

*2 原子力システム（株）

目 次

1. はじめに	1
2. OECD/NEA燃焼度クレジット臨界ベンチマーク解析	2
3. 使用した計算コード及び断面積ライブラリ	3
4. Phase II-Aの計算解析	6
4.1 ベンチマーク解析の課題	6
4.2 計算モデル	7
4.3 計算結果及び検討	9
4.3.1 Phase II-Aの計算結果	9
4.3.2 計算手順の比較・検討	16
5. Phase II-Bの計算解析	18
5.1 ベンチマーク解析の課題	18
5.2 計算モデル	20
5.3 計算結果及び検討	21
6. おわりに	24
参考文献	25
 付 錄	
A. Phase II-Aで用いた構造材のデータ	28
A.1 初期燃料、燃料ピン構造材及び反射体の組成	28
A.2 使用済燃料の組成	29
A.2.1 使用済燃料の核種組成 (1)	29
A.2.2 使用済燃料の核種組成 (2)	30
A.2.3 使用済燃料の核種組成 (3)	31
A.2.4 使用済燃料の核種組成 (4)	32
A.2.5 使用済燃料の核種組成 (5)	33
A.2.6 使用済燃料の核種組成 (6)	34
B. Phase II-Bで用いた構造材のデータ	35
B.1 燃料組成一覧及び使用済燃料輸送キャスクの構造材組成	35

B.2 使用済燃料の組成	36
C. サンプル入力データ	37
C.1 Phase II-Aの計算に用いた入力データ	37
C.1.1 CSASN - CSAS25	37
C.1.2 CSASI - WAX - KENO V.a	41
C.1.3 CSASIX - WAX - KENO V.a	43
C.2 Phase II-Bの計算に用いた入力データ	45
D. ベンチマーク解析の課題	47
D.1 Phase II-Aの課題	47
D.2 Phase II-Bの課題	81

1. はじめに

核燃料サイクル施設の臨界安全性の評価では、従来は初期燃料組成を用いて行うことが一般的であった。言い換れば、核燃料は燃焼に伴う核分裂性物質の減少、核分裂生成物の蓄積により中性子増倍率は低下するが、その低下分を無視して設計及び安全解析が行われてきた¹³⁾。しかしながら、この方法では必要以上の安全裕度を見込むこととなり、施設の建設等において費用の高騰をもたらすこともある。このため、近年、経済性の観点から燃焼度クレジット（Burnup Credit）を考慮した安全解析等によって、現実的な安全裕度を見込んだ安全解析を行うことが検討されている。

経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）では、1991年から使用済燃料を対象とした簡易体系及び現実的な体系における燃焼度クレジット評価のための臨界ベンチマーク解析を実施している。このベンチマーク解析には米国をはじめ、仏国、日本等約10カ国からの研究機関が参加している。事業団では、このベンチマーク解析が整備した臨界計算コード等の検証の場となり、また安全解析手順の確認の場にもなることから当初から参加している。臨界ベンチマーク解析は、OECD/NEA/NSCワーキンググループにおいて検討された計算体系、燃料及び構造材の組成を用いて、各国で使用している様々な臨界安全解析コード及び断面積ライブラリを用いて中性子増倍率等を算出し、結果を相互比較して得られた知見について議論を行い、報告書を作成するという手順で行われる。これまでの課題は、無限長のPWR使用済燃料ピンの無限配列体系における中性子増倍率等の計算（Phase I-A）¹²⁾と使用済燃料中の核種組成の算出（Phase I-B）¹³⁾であった。

本資料では、Phase IIとして提案されたPWR使用済燃料を対象とした簡易体系（Phase II-A）¹⁴⁾及び現実体系（Phase II-B）¹⁵⁾における軸方向燃焼度分布について検討を行った内容について報告する。

第2章では、OECD/NEA/NSCワーキンググループにおいて検討されている燃焼度クレジット臨界ベンチマーク解析の課題について述べる。第3章では、臨界ベンチマーク解析に使用したSCALE 4の臨界安全解析モジュールについて述べる。第4章では、Phase II-Aの課題、計算モデル及び計算結果について述べ、第5章ではPhase II-Bの課題及び計算解析について述べる。最後に、第6章として燃焼度クレジット評価における軸方向燃焼度分布の考慮の有意性について述べる。

なお、使用計算機として、Sun micro systems社製 SPARC Station2及びPanasonic社製のSunUNIX互換機P2200（SunSPARC10相当）を使用した。

2. OECD/NEA燃焼度クレジット臨界ベンチマーク解析

OECD/NEA/NSCワーキンググループでは、使用済燃料の輸送及び貯蔵に際して燃焼に伴う反応度の低下を考慮した燃焼度クレジット評価のための臨界ベンチマーク解析が計画された。この解析は、核燃料サイクル施設の臨界安全評価に用いられてきた安全解析コードが、燃焼度クレジットを考慮した臨界計算に適用可能なことを検討することを目的として、1991年から始められた。この解析では、PWR、BWR及びMOX燃料を対象に初期²³⁵U濃縮度、燃焼度、冷却期間等をパラメータとして、中性子増倍率の計算値に対する核分裂生成物、軸方向燃焼度分布等の効果を検討する。

燃焼度クレジット臨界ベンチマーク解析の概要について表1に示す。

表1 OECD/NEA 燃焼度クレジット臨界ベンチマーク解析の概要

Phase		概 要
I	A	中性子増倍率、主要アクチニド核種及びF.P核種の各反応率計算 (生成反応率、吸収反応率及び核分裂当たりの中性子放出数)
	B	燃焼度履歴を再現した使用済燃料における同位体元素の予測計算
II	A	無限配列のPWR使用済燃料ピンの軸方向への燃焼度分布の効果計算
	B	使用済燃料輸送キャスクにおける燃焼度分布の効果計算
III		BWR使用済燃料ピンを対象とした燃焼度クレジット評価計算
IV		MOX燃料を用いたPWR使用済燃料の燃焼度クレジット評価計算

Phase I-A^[2]では、PWR使用済燃料の燃料ピン無限体系における中性子増倍率、核種毎の生成反応率及び吸収反応率、核分裂当たりの中性子発生数等の計算が行われた。Phase I-B^[3]では、PWR原子炉の照射履歴データを基に、使用済燃料の組成を算出するために使用される核種の生成・消滅コードの適用性を検討するための計算が行われた。この計算では、初期燃料組成を基に、ベンチマーク問題として示されている燃料照射履歴を考慮し、使用済燃料中に存在する核種毎の質量及び放射能量を算出した。この計算結果については、予め実測されたデータ^[4]との相互比較も行われている。

Phase II-A^[5]では、PWR無限配列体系を対象に初期燃料組成及び使用済燃料組成の中性子増倍率を算出し、使用済燃料の燃焼に伴う反応率の低下、燃料の軸方向燃焼度分布の効果等について検討を行う。Phase II-B^[6]では、PWR使用済燃料輸送キャスクを対象とした現実的な体系における中性子増倍率を算出し、燃料の軸方向燃焼度分布の効果について検討を実施する。

今後は、Phase IIIとしてBWRの使用済燃料、Phase IVとしてMOX燃料の使用済燃料を対象に燃焼度クレジットの評価が行われる計画になっている。

3. 使用した計算コード及び断面積ライブラリ

事業団では、核燃料サイクル施設のための臨界安全解析手法の開発の一環として、SCALE 4の導入・整備を実施している。本臨界ベンチマーク解析を整備したSCALE 4の検証、安全解析手順の確認の場として位置づけている。なお、本計算には、計算を実施した当時最新版であったSCALE 4.2^mを用いた。

Phase II-Aの計算では、SCALE 4の臨界安全解析モジュールの中からCSASN¹¹及びCSAS25¹⁰を組合せた手順（以下、CSASN-CSAS25とする）及びCSASI¹¹、WAX¹⁰及びKENO V.a¹⁰を組合せた手順（以下、CSASI-WAX-KENO V.aとする）、さらに、複雑な体系を対象とした臨界安全解析に用いられるCSASIX^m、WAX及びKENO V.aを組合せた手順（以下、CSASIX-WAX-KENO V.aとする）の3通りの計算手順を用いることとした。

Phase II-Bでは、使用済燃料キャスクを対象とした複雑な体系の計算であるため、CSASIX-WAX-KENO V.aを用いることとした。

CSASN-CSAS25の計算手順を図1に示す。CSASNは通常、BONAMI-S¹¹、NITAWL-II¹²を用いて微視的実効断面積の計算を行うモジュールであるが、ここでは共鳴自己遮蔽因子ダンコフ係数の算出に用いた。算出したダンコフ係数を用いて、CSAS25のBONAMI-S及びNITAWL-IIにより全燃料領域の断面積について共鳴自己遮蔽因子による補正を行い、各燃料領域毎の微視的実効断面積を算出する。これらの断面積を用いて三次元モンテカルロ法のKENO V.aにより中性子増倍率等の計算を行う。

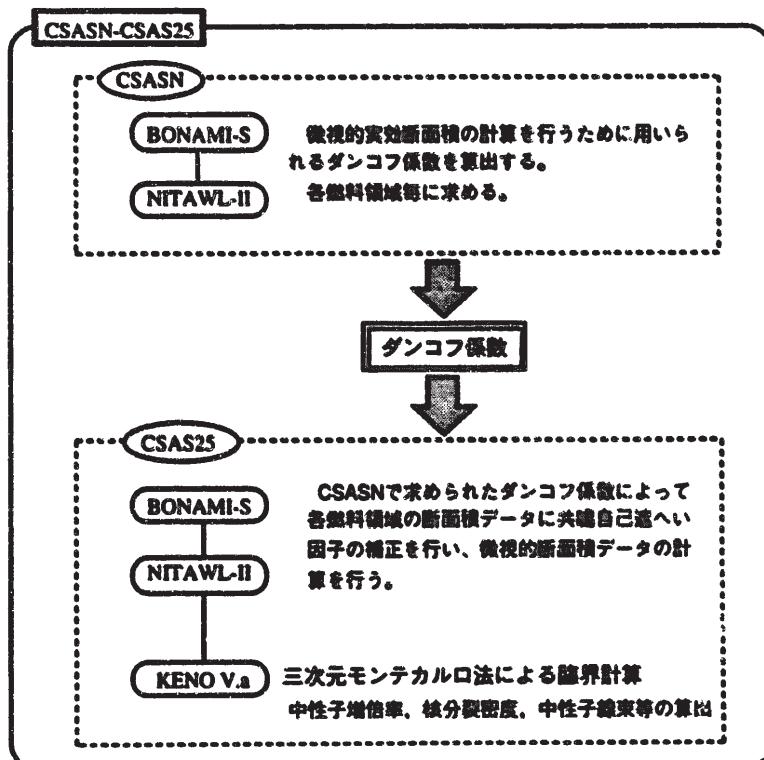


図1 CSASN - CSAS25の機能概要と計算手順

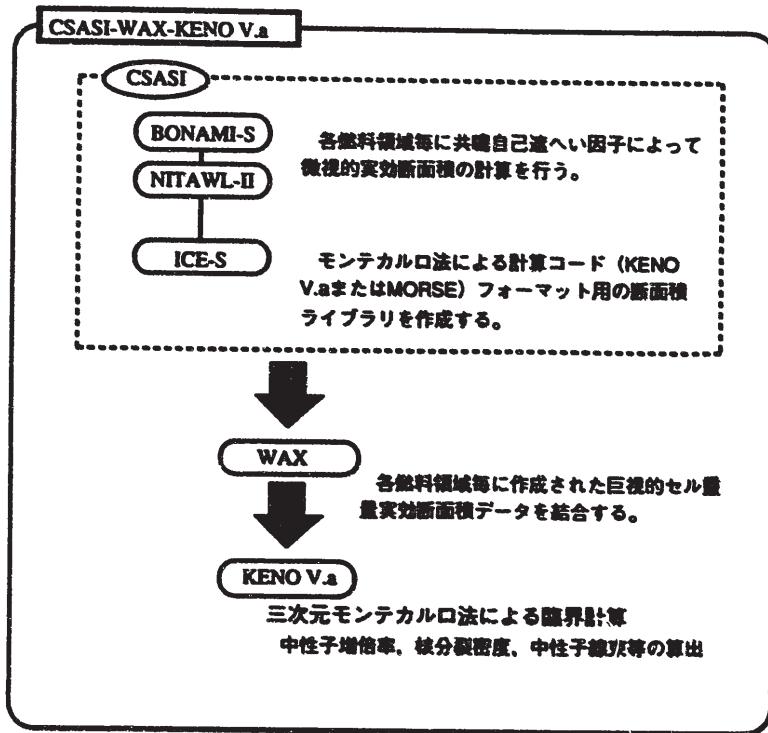


図2 CSASI - WAX - KENO V.aの機能概要と計算手順

CSASI-WAX-KENO V.aの計算手順を図2に示す。CSASIのBONAMI-S、NITAWL-IIにより各燃料領域毎の微視的実効断面積を算出し、ICE-S^[13]によりモンテカルロ計算コードのためのフォーマット変換を行い、巨視的実効断面積を作成する。WAXで断面積データの結合を行い、KENO V.aにより中性子増倍率等の計算を行う。

CSASIX-WAX-KENO V.aの計算手順を図3に示す。CSASIXでは、XSDRNPM-S^[14]によって各燃料領域毎に燃料、被覆管及び反射材の物質を混ぜ合せたセル重量均質化断面積を作成する。この各燃料領域毎の断面積はWAXによって結合され、このデータを用いてKENO V.aにより中性子増倍率等の計算を行う。

SCALE 4.2の断面積ライブラリ^[15]にはHansen-Roach16群断面積ライブラリ、ENDF/B-IV27群断面積ライブラリ、123群GAM-THERMOS断面積ライブラリ、ENDF/B-IV218群断面積ライブラリ及びENDF/B-IV・V27群Burnup断面積ライブラリが使用できるようになっているが、ベンチマーク解析に使用する核種（アクチニド12核種、FP16核種）を全て含む唯一の断面積ライブラリであるENDF/B-IV・V27群Burnup断面積ライブラリを本解析では用いることとした。

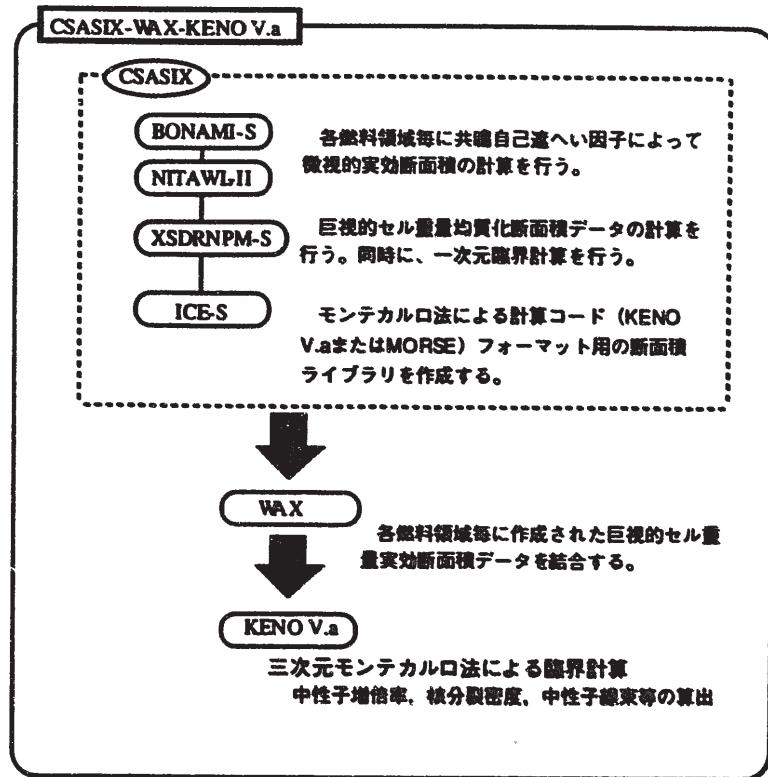


図3 CSASIX - WAX - KENO V.aの機能概要と計算手順

4. Phase II-Aの計算解析

4.1 ベンチマーク解析の課題

Phase II-Aでは、PWR使用済燃料ピンの無限配列体系を対象に軸方向燃焼度分布の効果について検討する。計算ケースは、燃焼度、初期 ^{235}U 濃縮度、冷却期間、FP核種考慮の有無、燃焼度分布の考慮の有無をパラメータとして表2に示す26ケースが設定されている。

表2 Phase II-Aの計算ケース

計算パラメータ			計算ケース						
冷却期間	FP核種	燃焼度分布	初期 ^{235}U 濃縮度：3.6wt%			初期 ^{235}U 濃縮度：4.5wt%			
			燃焼度 (GWd/MTU)			燃焼度 (GWd/MTU)			
			初期燃焼	10	30	初期燃焼	30	50	
1年	考慮	考慮		2	6		15	19	
		無視		3	7		16	20	
	無視	考慮		4	8		17	21	
		無視		5	9		18	22	
5年	考慮	考慮	1	10		14	23		
		無視							
	無視	考慮		11			24	25	
		無視		12					
				13				26	

計算体系は、図4に示す簡易的なPWR燃料ピンで、半径0.412cmの燃料ペレットと被覆管（ジルカロイ4製：厚さ0.063cm）で構成されている。燃料ピンの周囲は水反射体がある。燃料ピンの軸方向は、Santamaría及びAlbaredeによって測定された軸方向の燃焼度分布^[4]を基に、図4に示すように燃料領域両端40cmを9領域に分割され、燃焼度分布を考慮するケースでは各領域に燃焼度の異なる使用済燃料組成が設定される。燃料領域両端にはジルカロイ4製の端栓（1.75cm厚）があり、その外側は30cm厚の水反射体に覆われている。境界条件は、軸方向の上下が真空、側面が全反射として設定されている。

初期燃料及び使用済燃料の組成、燃料ピン構造材の組成、反射材の組成はそれぞれ、核種毎に原子個数密度 (atoms/barn · cm) で示されている。

計算には、断面積データの補正及び取扱いが比較的容易なCSASN-CSAS25を用いた。さらに、異なる燃料組成が複数領域ある複雑な体系を容易に評価するためのSCALE 4の計算手順を検討するため、CSASI-WAX-KENO V.a及びCSASIX-WAX-KENO V.aを用いた計算も行うこととした。

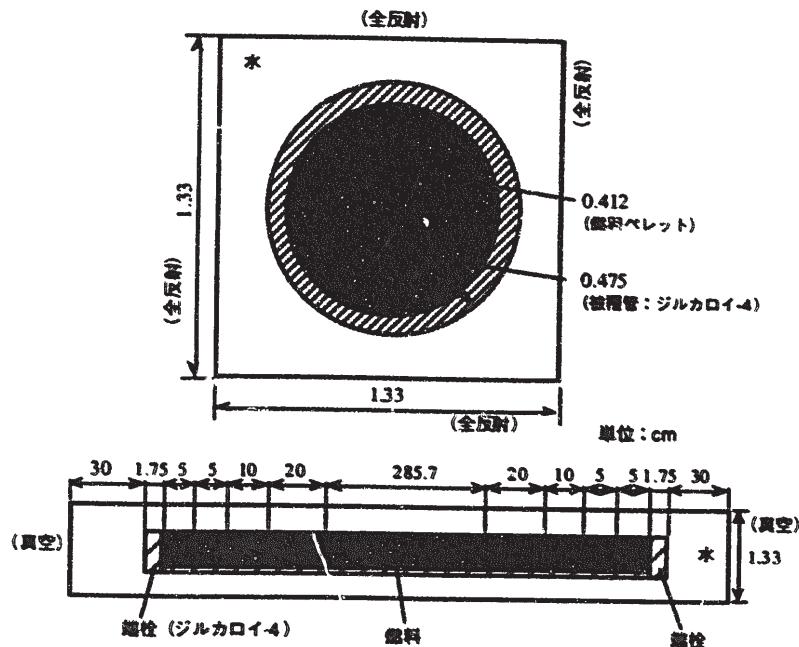


図4 Phase II-Aの計算体系

4.2 計算モデル

計算に用いたCSASN-CSAS25及びCSASI-WAX-KENO V.aの計算モデルを図5に示す。

燃料ピンの燃料領域は、軸方向の燃焼度分布を考慮した計算ケースについては、ベンチマーク課題で設定されている通り両端40cmの範囲をそれぞれ5cm、5cm、10cm、20cmとした全9領域に分割した。図中の○数字は燃料領域を示しており、燃料領域1・9、2・8、3・7及び4・6にはそれぞれ同一の使用済燃料の組成を設定することになっている。その他の計算ケースでは、全燃料領域が平均組成で一様に分布しているものとした。

計算に用いた燃料組成、被覆管（ジルカロイ4製）及び水反射体の組成は、付録に示す。

体系の温度は燃料領域、被覆管及び反射体いずれも300° Kとしている。

境界条件は燃料ピン上下方向を真空、側面方向を全反射条件として燃料ピン1.33cmピッチの無限配列体系を模擬した。

図6には、CSASN-WAX-KENO V.aの計算モデルを示す。この計算手順で扱われる断面積データは、燃料組成、被覆管及び水反射体組成を均質に混合した巨視的セル重量均質化断面積として扱われる。燃料ピンは燃料、被覆管及び反射体それぞれで物質組成が異なるため、図5に示したように3領域の形状で表現するが、この計算手順では、燃料領域の形状は図6に示すように直方体の单一形状として表現される。但し、端栓部分は水反射体と混ぜ合せた均質化断面積としては扱えないため、実形状として入力した。

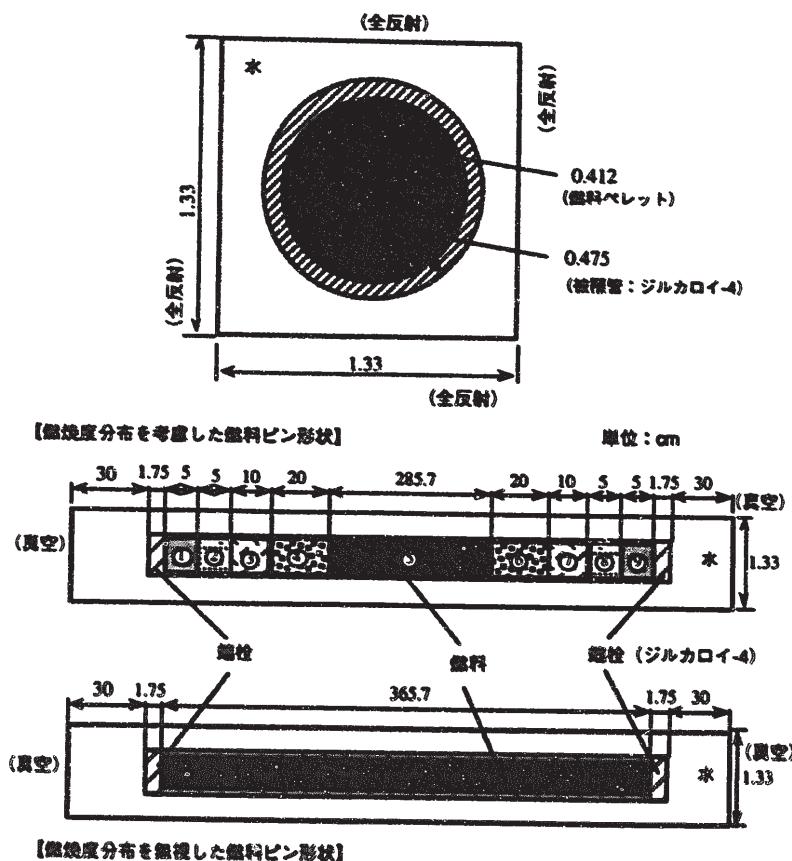


図5 CSASN-CSAS25及びCSASI-WAX-KENO V.aの計算モデル

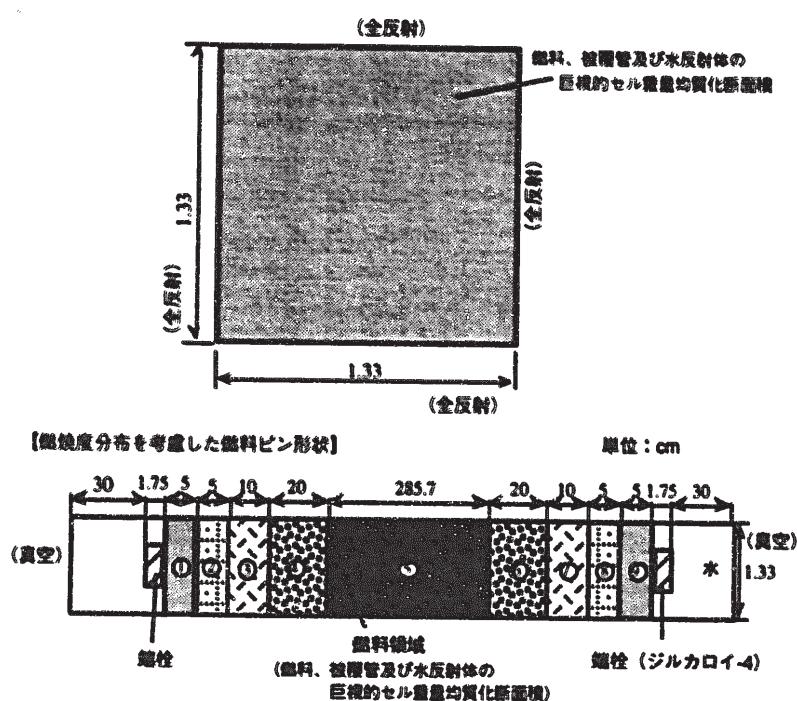


図6 CSASIX-WAX-KENO V.aの計算モデル

4.3 計算結果及び検討

4.3.1 Phase II-Aの計算結果

初期²³⁵U濃縮度3.6wt%及び4.5wt%について得られた中性子増倍率の計算結果を表3に示す。この計算結果は、CSASN-CSAS25を用いて計算世代数210、一世代当たりの中性子数500、スキップ世代数10とした総ヒストリー100,000の計算により求めたものである。

表3 Phase II-Aの計算結果

計算パラメータ			初期 ²³⁵ U濃縮度：3.6wt%		
冷却期間	FP核種	燃焼度分布	初期燃料	10 GWd/MTU	30 GWd/MTU
			$k_{eff} \pm \sigma$	$k_{eff} \pm \sigma$	$k_{eff} \pm \sigma$
1年	考慮	考慮	1.420 ± 0.0017	1.297 ± 0.0015	1.128 ± 0.0016
		無視		1.304 ± 0.0016	1.130 ± 0.0015
	無視	考慮		1.351 ± 0.0015	1.226 ± 0.0017
		無視		1.359 ± 0.0016	1.230 ± 0.0016
5年	考慮	考慮	1.465 ± 0.0015	1.108 ± 0.0016	1.102 ± 0.0015
		無視		1.212 ± 0.0017	1.223 ± 0.0016
	無視	考慮		1.102 ± 0.0015	1.108 ± 0.0016
		無視		1.223 ± 0.0016	1.212 ± 0.0017

計算パラメータ			初期 ²³⁵ U濃縮度：4.5wt%		
冷却期間	FP核種	燃焼度分布	初期燃料	30 GWd/MTU	50 GWd/MTU
			$k_{eff} \pm \sigma$	$k_{eff} \pm \sigma$	$k_{eff} \pm \sigma$
1年	考慮	考慮	1.465 ± 0.0015	1.193 ± 0.0015	1.074 ± 0.0017
		無視		1.194 ± 0.0015	1.055 ± 0.0015
	無視	考慮		1.293 ± 0.0016	1.188 ± 0.0017
		無視		1.299 ± 0.0017	1.194 ± 0.0015
5年	考慮	考慮		1.051 ± 0.0016	1.008 ± 0.0014
		無視		1.171 ± 0.0017	1.169 ± 0.0016
	無視	考慮		1.008 ± 0.0014	1.051 ± 0.0016
		無視		1.169 ± 0.0016	1.171 ± 0.0017

さらに、初期燃料組成の中性子増倍率に対する各計算ケースの中性子増倍率の差を減少率(Δk (%))として以下の式で定義し算出した(表4)。

$$\Delta k(\%) = \frac{k_{sf} - k_{in}}{k_{in}} \times 100 \quad \dots \dots \quad (1 \cdot 1)$$

k_{sf} : 使用済燃料組成を用いたときの中性子増倍率

k_{in} : 初期燃料組成を用いたときの中性子増倍率

表4 初期燃料組成の中性子増倍率に対する各計算ケースの減少率

計算パラメータ			初期 ^{235}U 濃縮度：3.6wt%		初期 ^{235}U 濃縮度：4.5wt%	
冷却期間	FP核種	燃焼度分布	燃焼度 (GWd/MTU)			
			10	30	30	50
1年	考慮	考慮	-8.7	-20.6	-18.6	-26.7
		無視	-8.2	-20.5	-18.5	-28.0
	無視	考慮	-4.9	-13.7	-11.8	-18.9
		無視	-4.3	-13.4	-11.4	-18.5
5年	考慮	考慮		-22.0		-28.3
		無視		-22.4		-31.2
	無視	考慮		-14.7		-20.0
		無視		-13.9		-20.2

(1) 燃焼度の効果

表3及び表4に示した計算結果を用いて、各初期 ^{235}U 濃縮度における燃焼度の効果について検討を行った。

初期 ^{235}U 濃縮度3.6wt%の計算結果によれば、初期燃料組成の中性子増倍率1.42に対して、燃焼度10GWd/MTUでは、計算パラメータによって異なるものの中性子増倍率としては約1.36～1.3に減少する。 Δk 値では-4.3～-8.7%である。さらに、30GWd/MTUに燃焼度が上昇すると中性子増倍率は1.23～1.102まで低下し、初期燃料組成に対して Δk 値では-13.4～-22.4%である。

初期 ^{235}U 濃縮度4.5wt%では、初期燃料組成の中性子増倍率は1.465であり、燃焼度30GWd/MTUの使用済燃料組成で1.30～1.193に中性子増倍率は減少し、 Δk 値では概ね-11.3～-18.6%である。燃焼度50GWd/MTUの使用済燃料組成では、1.194～1.008に中性子増倍率は減少し、 Δk 値で約-18.5～-31.2%となる。

さらに、初期燃料及び冷却期間1年、FP核種無視、燃焼度分布無視のケースについて、燃料領域中のアクチニド核種の密度、全生成反応率及び全吸収反応率を算出し、検討を行った。算出したデータをそれぞれ表5及び6に示す。ここで、燃料領域中の全生成反応率及び全吸収反応率については式2・1及び2・2より求めた。

表5に示す燃料領域中のアクチニド核種の密度は、燃焼度を考慮したケースでは燃焼度の増加に伴い減少している。各燃焼度におけるアクチニド核種の存在量を初期燃料中の存在量に対する比として求めると、燃焼度10GWd/MTUでは約1%、燃焼度30及び50GWd/MTUにおいては約3.2%及び5.2%の減少となる。

$$R_f = \sum_{n=1}^9 R_{f_n} / \sum_{n=1}^9 V_n \quad \dots \dots \quad (2 \cdot 1)$$

$$(R_{f_n} = V_n \sum_{m=1}^{27} V_m \sum_{j} f_{(m,n)} \phi_{(m,n)})$$

$$R_a = \sum_{n=1}^9 R_{a_n} / \sum_{n=1}^9 V_n \quad \dots \dots \quad (2 \cdot 2)$$

$$(R_{a_n} = V_n \sum_{m=1}^{27} \sum_{j} \sigma_{(m,n)} \phi_{(m,n)})$$

R_f : 全生成反応率

R_a : 全吸収反応率

V_n : 燃料領域 n の体積

表5 アクチニド核種の存在量の比較

計算パラメータ				アクチニド核種の存在量 (atoms/barn · cm)			
冷却期間	FP核種	燃焼度分布	初期 ^{235}U 濃縮度	初期燃料	10 GWd/MTU	30 GWd/MTU	50 GWd/MTU
1年	無視	無視	3.6wt%	2.311E-02	2.286E-02	2.238E-02	
			4.5wt%	2.311E-02		2.238E-02	2.190E-02

表6 全生成反応率及び全吸収反応率の比較

全生成反応率				
初期 ^{235}U 濃縮度	初期燃料	10 GWd/MTU	30 GWd/MTU	50 GWd/MTU
3.6wt%	7.268E-03	6.979E-03	6.289E-03	
4.5wt%	7.519E-03		6.634E-03	6.113E-03
全吸収反応率				
初期 ^{235}U 濃縮度	初期燃料	10 GWd/MTU	30 GWd/MTU	50 GWd/MTU
3.6wt%	4.738E-03	4.753E-03	4.685E-03	
4.5wt%	4.795E-03		4.748E-03	4.717E-03

計算パラメータ : 冷却期間 1年
 FP核種 無視
 燃焼度分布 無視

次に、このアクチニド核種の減少に伴う反応率の影響について、表6を用いて検討すると、全吸収反応率は、初期 ^{235}U 濃縮度3.6wt%、4.5wt%いずれの場合も燃焼度が上昇しても約1.4%～1.7%であり、大幅な減少にはなっていない。これに対し、全生成反応率は、初期 ^{235}U 濃縮度3.6wt%の燃焼度10、30GWd/MTUでは初期燃料の全生成反応率に対して4.4%、13.8%減少した生成反応率になっている。初期 ^{235}U 濃縮度4.5wt%でも、各燃焼度で11.8%及び18.7%と大きく減少した値であった。エネルギー群毎に見ると、図7に示すように全エネルギー領域において生成反応率が低下している。

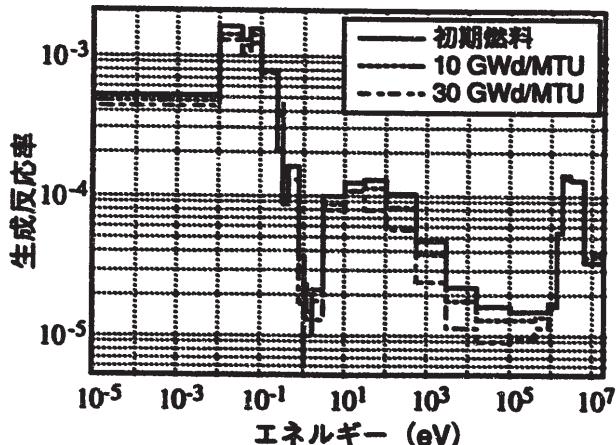


図7 生成反応率の比較

(初期²³⁵U濃縮度：3.6wt%，冷却期間：1年，FP核種：無視，燃焼度分布：無視)

のことから、燃焼度の増加による中性子増倍率の低下は、燃焼に伴い核分裂性核種が減少することにより、体系中の生成反応率が初期燃料より大幅に減少することに起因することがわかった。これに対して、吸収反応率はほぼ同等であった。

(2) 燃焼度分布の効果

燃焼度分布の効果について表4に示した減少率を基に検討した。

初期²³⁵U濃縮度3.6wt%における燃焼度分布の考慮の有無による中性子増倍率の違いを Δk 値で比較すると、全てのケースは1%以内の差であり、標準偏差±3σを考慮すると計算誤差の範囲内で一致する結果であった。初期²³⁵U濃縮度3.6wt%においては、燃焼度分布の考慮の有無による中性子増倍率への影響は、計算誤差の範囲内でとどまり有意な影響は見られなかった。

初期²³⁵U濃縮度4.5wt%においては、燃焼度50GWd/MTUのFP核種を考慮したケース以外は初期²³⁵U濃縮度3.6wt%と同様、1%以内の差であり有意な違いはなかった。但し、燃焼度50GWd/MTUのFP核種及び燃焼度分布を考慮したケースとFP核種考慮・燃焼度分布を無視したケースの違いは、 Δk 値を基に比較すると冷却期間1年で1.3%、冷却期間5年になると2.9%の差が見られ、標準偏差±3σを考慮してもその範囲を超える有意な違いであった。

この傾向について初期²³⁵U濃縮度4.5wt%、燃焼度50GWd/MTUのケースを基に、燃料中のアクチニド及びFP核種の総量を求め(表7)、検討を行った。

表7からわかるように、標準偏差±3σの範囲内で一致した中性子増倍率の得られているFP核種を無視したケースでは、燃焼度分布を考慮したケース及び無視したケースいずれもアクチニド核種の存在量は等しい結果を示した。一方、中性子増倍率に有意な差が見られたFP核種を考慮したケースでは、燃焼度分布を考慮したケース及び無視したケースいずれも、アクチニド核種については同様の存在量を示したが、FP核種においては、燃焼度分布を考慮した

ケースが若干少ない存在量（1%程度）を示した。

このFP核種の存在量の違いの反応率への影響を検討するため、体系中の全生成反応率及び全吸収反応率を算出した（表8）。反応率は、式2・1及び2・2より求めた。

表7 燃料中のアクチニド及びFP核種の存在量の比較

計算パラメータ			核種存在量 (atoms/barn · cm)	
冷却期間	FP核種	燃焼度分布	アクチニド核種	FP核種
1年	考慮	考慮	2.190E-02	4.125E-04
		無視		4.162E-04
	無視	考慮		
		無視		
5年	考慮	考慮	2.190E-02	4.169E-04
		無視		4.206E-04
	無視	考慮		
		無視		

初期 ^{235}U 濃縮度：4.5wt%
燃焼度：50 GWd/MTU

全生成反応率及び全吸収反応率をそれぞれ比較すると、中性子増倍率に有意な差がなかったFP核種を無視したケースでは、全生成反応率及び全吸収反応率いずれも、燃焼度分布を考慮したケース及び無視したケースの両ケースにおいてほぼ等しい反応率であった。この場合、生成反応率は、燃焼度分布を考慮したケースが0.2%以下の減少で、全吸収反応率は、燃焼度分布を考慮したケースが2.1%以下の減少である。

しかし、中性子増倍率に有意な差の見られたFP核種を考慮したケースの全吸収反応率は、FP核種を無視したケースの2倍近い約4%減少している。一方、全生成反応率は、FP核種を考慮することによって、燃焼度分布を考慮したケースが冷却期間1年で1.6%、冷却期間5年のケースで4.2%程高い値を示した。

表8 燃焼度分布の考慮の有無による全生成反応率・全吸収反応率の比較

計算パラメータ		全生成反応率		全吸収反応率	
冷却期間	FP核種	燃焼度分布			
		考慮	無視	考慮	無視
1年	考慮	5.499E-03	5.409E-03	4.576E-03	4.763E-03
	無視	6.101E-03	6.113E-03	4.647E-03	4.717E-03
5年	考慮	5.385E-03	5.169E-03	4.574E-03	4.758E-03
	無視	6.008E-03	6.011E-03	4.632E-03	4.729E-03

初期 ^{235}U 濃縮度：4.5wt%
燃焼度：50 GWd/MTU

FP核種・燃焼度分布を考慮したケースの生成反応率が高い結果を示す傾向について、燃料領域毎の生成断面積（ $\nu \Sigma_i$ ）、中性子線束（ ϕ ）及び生成反応率を燃焼度分布の考慮及び無

視の場合について比較する。

各データを表9に示す。なお、表中の比率は、燃焼度分布を考慮したケースの $\nu \Sigma_n \phi$ 及び生成反応率と無視したケースの $\nu \Sigma_n \phi$ 及び生成反応率との比を表している。

表9 燃料領域毎の生成断面積、中性子線束及び生成反応率の比較

計算パラメータ 冷却期間	FP核種	燃料領域 (長さ)	$\nu \Sigma_n$ (cm ⁻¹)		ϕ (n/cm ² /sec)		生成反応率		比率*		
			燃焼度分布		燃焼度分布		燃焼度分布				
			考慮	無視	考慮	無視	考慮	無視			
1年	考慮	1 (5)	8.821E+00		1.3	1.129E-01	7.377E-03	15.3	1.724E-02	9.078E-04	19.0
		2 (5)	8.638E+00		1.3	1.425E-01	1.112E-02	12.8	1.729E-02	1.157E-03	14.9
		3 (10)	8.138E+00		1.2	1.677E-01	1.746E-02	9.6	1.941E-02	1.791E-03	10.8
		4 (20)	7.394E+00		1.1	1.488E-01	2.835E-02	5.3	1.621E-02	2.962E-03	5.5
		5 (285.7)	6.457E+00	6.736E+00	1.0	2.382E-02	6.059E-02	0.4	2.401E-03	6.248E-03	0.4
		6 (20)	7.394E+00		1.1	1.324E-01	3.357E-02	3.9	1.427E-02	3.512E-03	4.1
		7 (10)	8.138E+00		1.2	1.581E-01	2.172E-02	7.3	1.816E-02	2.220E-03	8.2
		8 (5)	8.638E+00		1.3	1.385E-01	1.409E-02	9.8	1.633E-02	1.477E-03	11.1
		9 (5)	8.821E+00		1.3	1.138E-01	8.636E-03	13.2	1.708E-02	1.127E-03	15.2
		1 (5)	8.754E+00		1.3	1.145E-01	5.011E-03	22.8	1.685E-02	5.847E-04	28.8
5年	考慮	2 (5)	8.560E+00		1.3	1.462E-01	5.848E-03	24.6	1.772E-02	6.597E-04	26.9
		3 (10)	8.031E+00		1.2	1.649E-01	8.598E-03	19.2	1.875E-02	8.339E-04	22.5
		4 (20)	7.252E+00		1.1	1.340E-01	1.436E-02	9.3	1.424E-02	1.469E-03	9.7
		5 (285.7)	6.281E+00	6.569E+00	1.0	2.017E-02	6.112E-02	0.3	1.957E-03	6.044E-03	0.3
		6 (20)	7.252E+00		1.1	1.597E-01	3.878E-02	4.1	1.693E-02	3.788E-03	4.5
		7 (10)	8.031E+00		1.2	1.923E-01	2.670E-02	7.2	2.185E-02	2.634E-03	8.3
		8 (5)	8.560E+00		1.3	1.740E-01	1.874E-02	9.3	2.059E-02	1.936E-03	10.6
		9 (5)	8.754E+00		1.3	1.401E-01	1.344E-02	10.4	2.101E-02	1.554E-03	13.5

初期²³⁵U濃度 : 4.5wt%
燃焼度 : 50Gwd/MTU

* 比率 = 燃焼度分布を考慮したときの各種データ
燃焼度分布を無視したときの各種データ

生成断面積を見ると、冷却期間1年及び5年いずれも、燃料領域1~4及び9~6で比率が燃焼度分布を考慮したケースが大きな値であり、平均組成により一様に分布させた燃焼度分布を無視したケースが燃料領域1~4及び9~6において燃焼度を高く（1.3~1.1倍）見積っていることがわかった。

中性子線束は、燃焼度分布を考慮したケースと無視したケースにおいて異なる傾向が現れている。燃焼度分布を考慮したケースの中性子線束は、燃焼領域1~3（9~7）まで徐々に高くなり、燃料領域4（6）及び5になると低下し、燃料領域5では概ね1オーダー近く低下している。一方、燃焼度分布を無視したケースの中性子線束の傾向は、燃料領域5が最も高く、燃料領域4~1（6~9）の外側に移行するにともない減少している。

燃料領域毎に算出した生成反応率は断面積と中性子線束との積で求められるため、中性子線束の傾向とほぼ等しい。

これらの結果、燃焼度クレジットの評価における燃焼度分布の効果は、燃焼度50Gwd/MTUのFP核種を考慮したケースについてのみ、燃焼度分布を考慮したケースが無視したケースに比べ、燃料領域の全生成反応率を高く評価し、全吸収反応率は逆に低く評価することになり、中性子増倍率が標準偏差±3σを超える有意な影響が生じることがわかった。従って、高燃焼度のFP核種を考慮した使用済燃料の燃焼度クレジット評価では、燃焼度分布

を考慮して中性子増倍率を算出しないで、平均組成を一様分布と想定すると過少評価する恐れがあることが示された。

また、FP核種を無視したケース及び燃焼度30GWd/MTU以下でFP核種を考慮したケースでは、燃焼度分布の考慮の有無に関わらず計算誤差を考慮するとその範囲内で一致する結果であり、中性子増倍率へ有意な結果を与えるものではないことがわかった。

(3) FP核種の効果

FP核種の中性子増倍率への影響についての検討は、表4に示した減少率を用いて行った。

初期²³⁵U濃縮度3.6wt%の燃焼度10GWd/MTU・燃焼度分布を考慮したケースでは、FP核種を考慮したケースが初期燃料組成の中性子増倍率に対して-8.7%、FP核種を無視したケースでは-4.9%の減少率となり、FP核種を考慮したケースが無視したケースに比べ概ね1.8倍高い減少率となった。各燃焼度での燃焼度分布を無視したケースでは、-8.2%及び-4.3%の減少率となり、FP核種を考慮したケースでは約2倍近く高い減少率となった。燃焼度30GWd/MTUでは、冷却期間1年及び5年いずれも、FP核種を考慮したケースが無視したケースに対して約1.5倍高い減少率となった。同様に初期²³⁵U濃縮度4.5wt%について比較すると、燃焼度30GWd/MTUでは概ね1.6倍、燃焼度50GWd/MTUでは、FP核種を考慮したケースが約1.4～1.5倍の減少率となった。この傾向について、体系中の全生成反応率及び全吸収反応率の比較から、FP核種の中性子増倍率への効果について詳細な検討を行った。なお、各反応率は、式2・1及び2・2より求めた（表10）。

反応率の比較・検討にあたり、冷却期間1年の初期²³⁵U濃縮度3.6及び4.5wt%における燃焼度に伴うFP核種の存在量の比を求めた（表11）。燃焼に伴いFP核種は、燃焼度10GWd/MTUで燃料中に0.4%が存在し、30GWd/MTUで約1.2%存在する。さらに、30～50GWd/MTUで約2%近くまでFP核種が増加する。

表11 燃焼に伴うFP核種の変化

計算パラメータ				FP核種の存在量 (%) *		
冷却期間	FP核種	燃焼度分布	初期 ²³⁵ U濃縮度	10GWd/MTU	30GWd/MTU	50GWd/MTU
1年	考慮	無視	3.6wt%	0.42	1.18	
			4.5wt%		1.20	1.87
	考慮	考慮	3.6wt%	0.42	1.18	
			4.5wt%		1.20	1.85

$$* \text{FP核種の存在量 (\%)} = \frac{\text{FP核種の総量}}{\text{燃料の総量}} \times 100$$

各反応率については表10からわかるように、全生成反応率はいずれのケースでもFP核種を考慮することによって減少していることがわかる。

初期²³⁵U濃縮度3.6wt%の燃焼度10GWd/MTUでは、FP核種を無視したケースより考慮した

ケースが概ね5%の生成反応率が減少している。同様に、燃焼度30GWd/MTUではFP核種を考慮したケースが冷却期間1年で約8%、冷却期間5年では概ね9%減少する。初期²³⁵U濃縮度4.5wt%では、燃焼度30及び50GWd/MTU・冷却期間1年でそれぞれ、FP核種を考慮したケースが概ね8%及び10%の生成反応率が減少している。冷却期間5年では、初期²³⁵U濃縮度3.6wt%同様、FP核種を考慮することによって概ね1%の生成反応率が減少している。全吸収反応率については、いずれのケースにおいてFP核種を考慮したケースと無視したケースの違いは1%以内の差であり、ほぼ等しい吸収反応率であると言える。

表10 FP核種の考慮の有無による生成反応率・吸収反応率の比較

冷却期間	燃焼度分布	初期 ²³⁵ U濃縮度	燃焼度 (GWd/MTU)	全生成反応率		全吸収反応率	
				FP核種			
				考慮	無視	考慮	無視
1年	考慮	3.6wt%	10	6.648E-03	6.952E-03	4.734E-03	4.753E-03
			30	5.777E-03	6.270E-03	4.649E-03	4.670E-03
		4.5wt%	30	6.110E-03	6.622E-03	4.717E-03	4.709E-03
			50	5.499E-03	6.101E-03	4.576E-03	4.647E-03
		3.6wt%	30	5.693E-03	6.226E-03	4.641E-03	4.657E-03
			50	5.385E-03	6.008E-03	4.574E-03	4.632E-03
5年	無視	3.6wt%	10	6.669E-03	6.979E-03	4.749E-03	4.753E-03
			30	5.791E-03	6.289E-03	4.742E-03	4.685E-03
		4.5wt%	30	6.110E-03	6.634E-03	4.769E-03	4.748E-03
			50	5.409E-03	6.113E-03	4.763E-03	4.717E-03
		3.6wt%	30	5.660E-03	6.273E-03	4.746E-03	4.727E-03
			50	5.169E-03	6.011E-03	4.758E-03	4.729E-03

これらの比較結果から、FP核種の中性子増倍率への効果は、FP核種を考慮したケースと無視したケースでは吸収反応率に有意な差は見られないものの生成反応率に大きな減少があることから、中性子増倍率が減少することがわかった。この生成反応率の低下は、FP核種を考慮することによって生じる中性子線束の低下が大きく影響するものと思われる。

4.3.2 計算手順の比較・検討

燃料領域が複数ある計算体系では、各燃料領域の自己遮蔽効果をどのように断面積データに反映させるかが重要になる。ここでは、SCALE 4の3つの計算手順について自己遮蔽効果の補正方法の中性子増倍率への効果を検討した。

この検討には、燃焼度分布を考慮した全ての計算ケースを用いた。計算には、CSASN-CSAS25に加えて、CSASI-WAX-KENO V.a、CSASIX-WAX-KENO V.aの3つの手順を用いた。各計算手順の詳細については、第3章に示す。

各計算手順によって算出した中性子増倍率を表12に示す。計算結果は計算世代数210、一

世代当たりの中性子数500及びスキップ世代数10の総ヒストリー数100,000の中性子増倍率 k_{eff} と標準偏差(σ)の値である。

各計算手順における中性子増倍率の差は、-0.006~0.009の範囲内に分布しており、標準偏差 $\pm 3\sigma$ を考慮すると全て計算誤差の範囲内で一致することが示された。

CSASN-CSAS25及びCSASI-WAX-KENO V.aでは、断面積の共鳴自己遮蔽因子の補正は、全く同一の方法で行われる。そのため、KENO V.aで用いられる断面積データは、同一の断面積データと考えられる。CSASIX-WAX-KENO V.aでは、燃料、被覆管及び反射体の断面積を別々の物質として扱うのではなく、3物質を均質に混ぜ合せた巨視的セル重量均質化混合断面積として取り扱うことが他の手順と異なっている。しかしながら、中性子増倍率は全て標準偏差 $\pm 3\sigma$ の範囲内で一致した。

この結果から、組成の異なる複数燃料領域の体系においてSCALE 4を用いて臨界安全解析を行う場合、今回用いた3通りの計算手順全てにおいて全燃料領域の自己遮蔽因子による断面積の補正処理が等しく行われていることが確認できた。

表12 各計算手順の中性子増倍率

初期 ^{235}U 濃度	燃焼度分布	燃焼度 (GWd/MTU)	冷却期間	FP核種	中性子増倍率		
					CSASN-CSAS25		
					$k_{eff} \pm \sigma$	$k_{eff} \pm \sigma$	$k_{eff} \pm \sigma$
3.6 wt%	考慮	10	1年	考慮	1.297 ± 0.0015	1.292 ± 0.0015	1.296 ± 0.0015
				無視	1.351 ± 0.0015	1.352 ± 0.0016	1.351 ± 0.0017
				考慮	1.128 ± 0.0016	1.129 ± 0.0017	1.129 ± 0.0016
				無視	1.226 ± 0.0017	1.227 ± 0.0015	1.226 ± 0.0015
		30	5年	考慮	1.108 ± 0.0016	1.106 ± 0.0016	1.107 ± 0.0016
				無視	1.212 ± 0.0017	1.209 ± 0.0017	1.206 ± 0.0015
				考慮	1.193 ± 0.0015	1.199 ± 0.0017	1.198 ± 0.0016
				無視	1.293 ± 0.0016	1.291 ± 0.0018	1.293 ± 0.0016
		50	5年	考慮	1.074 ± 0.0017	1.079 ± 0.0017	1.075 ± 0.0017
				無視	1.188 ± 0.0017	1.190 ± 0.0018	1.189 ± 0.0015
				考慮	1.051 ± 0.0016	1.049 ± 0.0017	1.042 ± 0.0017
				無視	1.171 ± 0.0017	1.174 ± 0.0018	1.171 ± 0.0015

5. Phase II-Bの計算解析

5.1 ベンチマーク解析の課題

Phase II-Bでは現実的な体系における燃焼度クレジットの評価として、使用済燃料輸送キャスクを対象とした初期燃料組成及び使用済燃料組成を用いたときの中性子増倍率を算出する。計算には、Phase II-Aの計算に用いた初期 ^{235}U 濃縮度4.5wt%の初期燃料組成、冷却期間5年、燃焼度30及び50GWd/MTUの使用済燃料組成が設定されている。燃焼度クレジットの評価では、初期燃料組成の中性子増倍率と30、50GWd/MTUの燃焼を考慮したときの燃料組成を用いたケースの中性子増倍率を比較する。さらに、燃焼度分布を考慮したケース及び無視したケースの中性子増倍率を比較し、燃焼度クレジット評価における燃焼度分布の効果について検討する。

計算ケースは表13に示すように、燃焼度、FP核種の考慮の有無及び燃焼度分布の考慮の有無をパラメータに8ケース、さらに、初期燃料組成を合せた合計9ケースが設定されている。

表13 Phase II-Bの計算ケース

計算パラメータ				計算ケース	
冷却期間 (年)	燃焼度 (GWd/MTU)	FP核種	燃焼度分布		
初期燃料				A	
5	30	考慮	無視	B	
		考慮	考慮	C	
		無視	無視	D	
	50	考慮	考慮	E	
		無視	無視	F	
		考慮	考慮	G	
				H	
				I	

初期 ^{235}U 濃縮度：4.5 wt%

計算に用いる体系は、図8に示した使用済燃料輸送キャスクを用いる。使用済燃料輸送キャスクは、燃料ピン17×17配列の燃料集合体21体を格納する輸送キャスクで、内部は水で満たされた体系である。燃料ピンはペレット直径0.8192cm、被覆管の内径及び外径がそれぞれ0.8357及び0.95cm、燃料ピンピッチ1.25984cmの形状であり、燃料ピンの外側は水で覆われている。燃料ピンの軸方向は、Phase II-Aで用いられた形状及び寸法と同様に燃料領域を9領域に分割した形状である。燃料集合体は、1cm厚のボロン（1wt%）入りのステンレススチールで仕切られている。燃料ピン上下にはそれぞれ30cm厚及び10cm厚のハードウェア（体積比でステンレススチール50%と水50%の混合物質）が存在し、さらに、上部には7cm厚の水領域がある。キャスク本体は30cm厚のSUS304から構成されている。

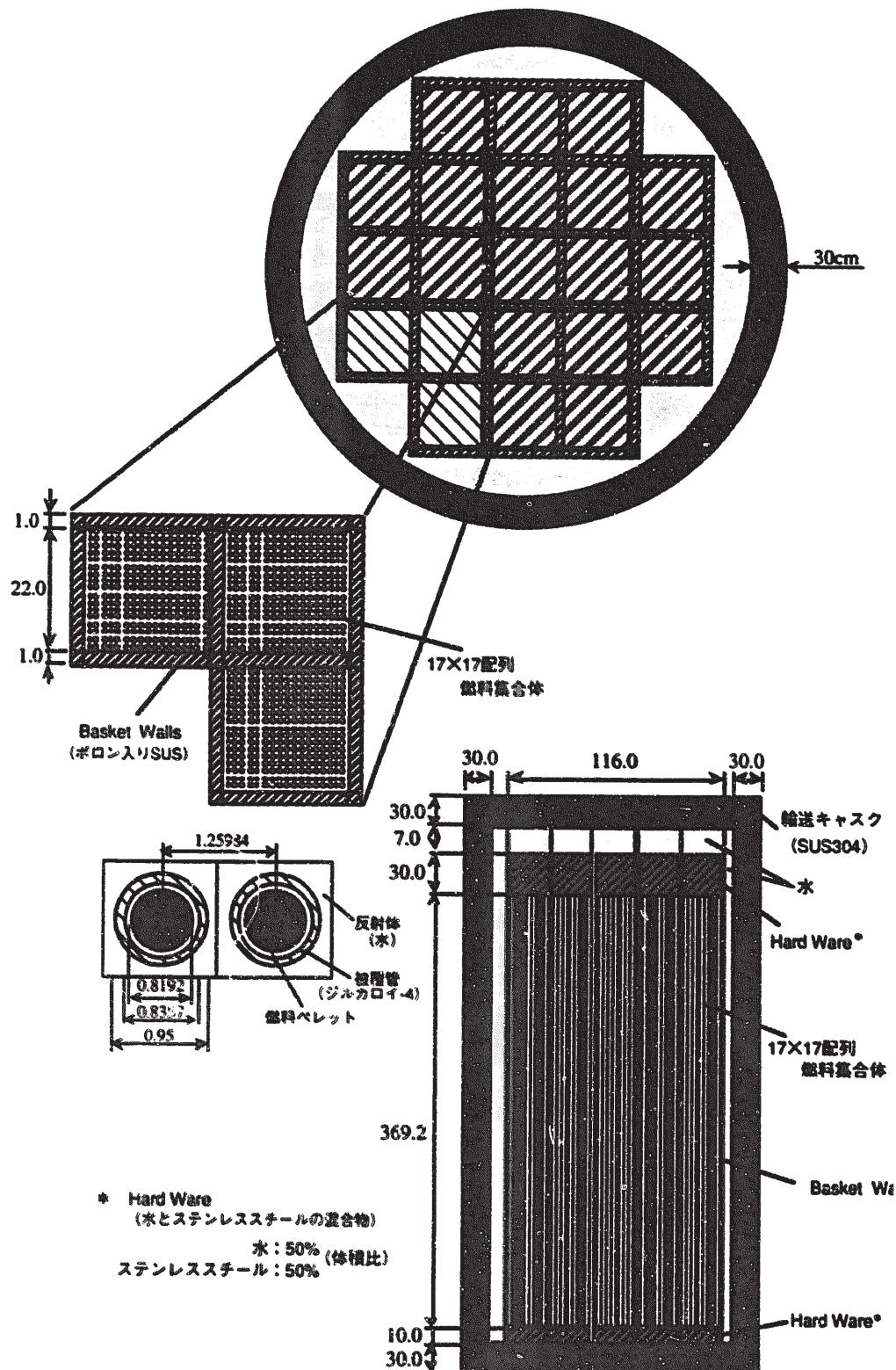


図8 Phase II-Bの計算体系

5.2 計算モデル

Phase II-Bの使用済燃料輸送キャスク体系を対象とした燃焼度クレジット評価の計算には、4.3.2節に示したSCALE 4.2における計算手順の比較結果を基に、断面積を巨視的セル重量均質化混合断面積として取扱うCSASIX-WAX-KENO V.aを用いて入力形状の簡素化を図り、図9に示すように 17×17 配列の燃料ピンの形状を簡易的に表現した。

燃料ピン配列の形状は簡易的に入力することができるが、それ以外の構成形状については断面積を均質化したデータとしては扱えないため、現実の形状を忠実に模擬した。

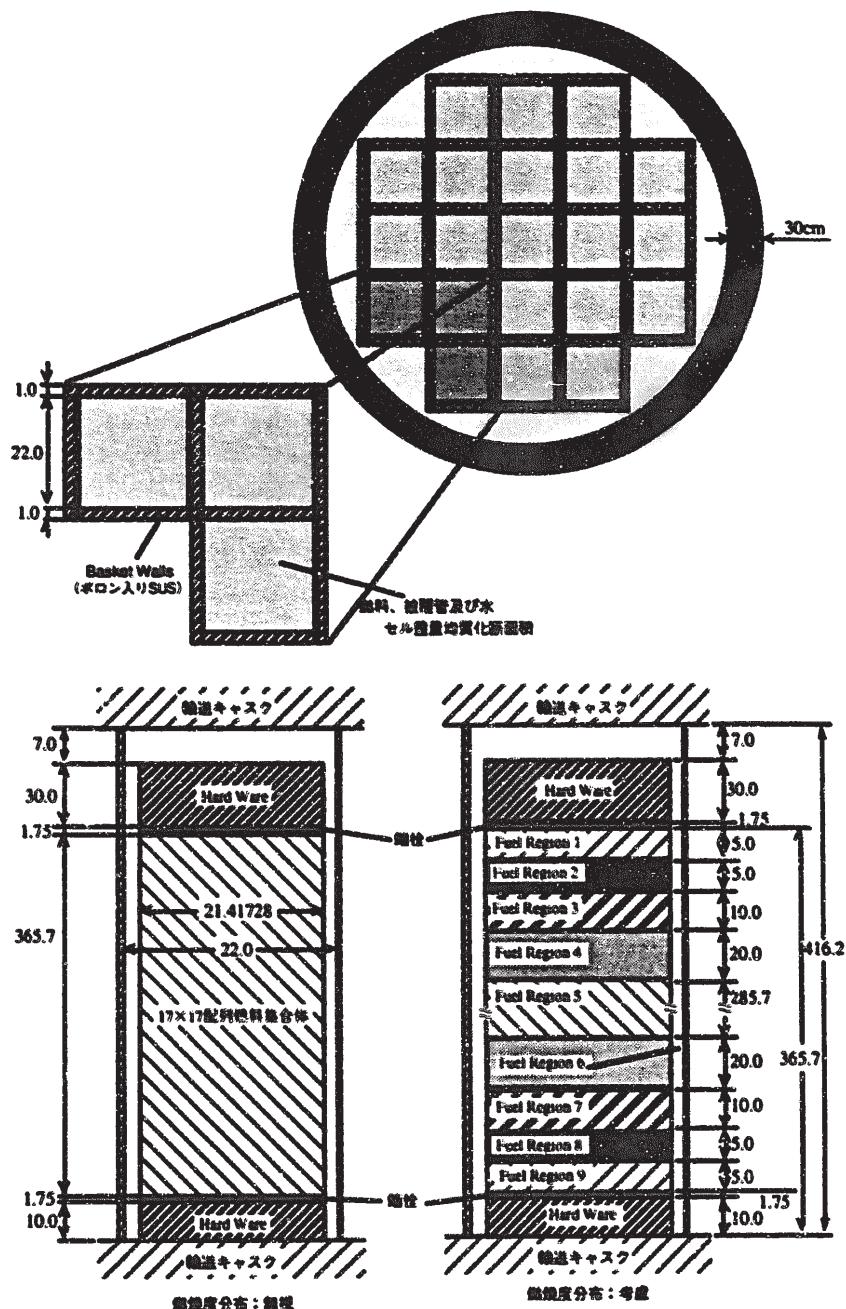


図9 使用済燃料輸送キャスクの計算モデル

ここで使用した燃料組成及び使用済燃料輸送キャスクの構造材の組成は、付録に示す。ま

た、体系中の温度は、燃料領域及び使用済燃料輸送キャスクとともに300° Kとした。

5.3 計算結果及び検討

計算は、計算世代数130、一世代当たりの中性子数5000及びスキップ世代数30の総ヒストリーリー500,000で行った。得られた中性子増倍率を表14に示す。表14には、初期燃料の中性子増倍率に対する各計算ケースの減少率 Δk （%）も示す。なお、 Δk は、4.3.1節に示した式1・1より算出した。

表14 Phase II-Bの計算結果

計算ケース	計算パラメータ				中性子増倍率 $k_{eff} \pm \sigma$	Δk (%)
	冷却期間 (年)	燃焼度 (GWd/MTU)	FP核種	燃焼度分布		
A	初期燃料				1.1190 ± 0.0009	
B	30	考慮	無視	0.8905 ± 0.0008	-20.4	
C			考慮	0.8920 ± 0.0009	-20.3	
D		無視	無視	0.9678 ± 0.0009	-13.5	
E			考慮	0.9605 ± 0.0008	-14.2	
F	5	考慮	無視	0.7636 ± 0.0006	-31.8	
G			考慮	0.7920 ± 0.0008	-29.2	
H		無視	無視	0.8709 ± 0.0007	-22.2	
I			考慮	0.8762 ± 0.0008	-21.7	

初期 ^{235}U 濃縮度：4.5 wt%

中性子増倍率は、燃焼度30GWd/MTUのFP核種を考慮したケースでは初期燃料組成を用いた値に対して約-20%、FP核種を無視したケースで約-14%減少している。燃焼度50GWd/MTUのFP核種を考慮したケースでは約-30%前後、FP核種を無視したケースで約-22%減少する中性子増倍率が得られた。燃焼度が30、50GWd/MTUでは中性子増倍率がそれぞれ、 Δk 値で概ね8%、12%減少している。

FP核種の効果を確認するため、FP核種を考慮したケースと無視したケースの中性子増倍率の変化を比較すると、燃焼度30GWd/MTUではFP核種を考慮したケースが無視したケースよりも Δk 値で概ね6%～7%減少している。燃焼度50GWd/MTUにおいても同様の減少傾向が見られ、FP核種を考慮したケースが約8%～10%の減少率となった。

FP核種の中性子増倍率への効果を全生成反応率及び全吸収反応率を基にして検討した。表15からわかるように、FP核種を考慮したケース及び無視したケースをそれぞれ比較すると、生成反応率では燃焼度30GWd/MTUでFP核種を考慮したケースが概ね7%、燃焼度50GWd/MTUでは約10～13%減少する。一方、全吸収反応率は燃焼度分布を考慮した場合FP核種を考慮することにより若干低下し、燃焼度分布を無視した場合にはFP核種を考慮することにより1%前後増加する。このため、FP核種を考慮することにより生成反応率が減少する

ことから、中性子増倍率が低下するものと考えられる。燃焼度分布の考慮の有無を加味してFP核種の効果について比較すると、燃焼度分布を考慮した場合は、FP核種を考慮したケースが生成反応率及び吸収反応率いずれも減少したが、吸収反応率に比べ生成反応率の減少率が大幅に大きいため中性子増倍率は減少している。燃焼度分布を無視した場合には、FP核種を考慮したケースの生成反応率は低下し、吸収反応率は逆に高くなるため、中性子増倍率が減少する割合が大きくなる。これらは、Phase II-Aの比較・検討の結果と同様の結果であった。

表15 FP核種の考慮の有無における反応率の比較

計算パラメータ			全生成反応率		全吸収反応率	
冷却期間	燃焼度 GWd/MTU	燃焼度分布	FP核種			
			考慮	無視	考慮	無視
5年	30	無視	2.529E-07	2.746E-07	2.252E-07	2.233E-07
		考慮	2.531E-07	2.727E-07	2.207E-07	2.216E-07
	50	無視	2.168E-07	2.474E-07	2.245E-07	2.218E-07
		考慮	2.249E-07	2.488E-07	2.149E-07	2.169E-07

燃焼度分布について表14を用いて比較すると、中性子増倍率は燃焼度分布を考慮したケースが高くなかった。これは、表16に示した全生成反応率及び全吸収反応率からもわかるように、燃焼度分布を考慮することによって生成反応率は燃焼度分布を無視したケースよりも若干高くなることによるものである。一方、吸収反応率は、燃焼度分布を考慮したケースが無視したケースよりも低くなっている。これは、表17に示した核種の存在量からもわかるように、燃焼度分布を考慮したケースのアクチニド核種の存在量が高いことによるものである。FP核種の存在量の検討からは、燃焼度分布を考慮したケースが若干低くなかった。これらの核種の存在量の比較からは、生成反応率及び吸収反応率は、アクチニド及びFP核種の存在量の相違に起因するものであることが示された。

表16 燃焼度分布の考慮の有無における反応率の比較

計算パラメータ			全生成反応率		全吸収反応率	
冷却期間	燃焼度 GWd/MTU	FP核種	燃焼度分布			
			考慮	無視	考慮	無視
5年	30	考慮	2.531E-07	2.529E-07	2.207E-07	2.252E-07
		無視	2.727E-07	2.746E-07	2.216E-07	2.233E-07
	50	考慮	2.249E-07	2.168E-07	2.149E-07	2.245E-07
		無視	2.488E-07	2.474E-07	2.169E-07	2.218E-07

表17 燃焼度分布の考慮の有無による核種の存在量の比較

計算パラメータ			核種	核種の存在量 (atoms/barn · cm)		
冷却期間	FP核種	燃焼度 GWd/MTU		燃焼度分布		
				考慮	無視	
5年	考慮	30	アクチニド	2.23782E-02	2.23775E-02	
		FP	FP	2.750E-04	2.764E-04	
	無視	50	アクチニド	2.19008E-02	2.18994E-02	
		FP	FP	4.169E-04	4.206E-04	

以上より、燃焼度分布を考慮することにより燃焼度分布を考慮しない場合に比べて、生成反応率が高くなり、逆に、吸収反応率が低くなることから中性子増倍率を高く評価することがわかった。

6. おわりに

OECD/NEA/NSC燃焼度クレジット臨界ベンチマーク解析で提案された課題Phase II-A、Phase II-Bについて、SCALE 4の臨界安全解析手順を用いて計算解析を行い、PWR使用済燃料体系における燃焼度クレジットの解析について有用な知見を得た。ここで報告した結果は、OECD/NEA本部で開催されている定例会合で報告し、本ベンチマークに参加している各国の計算結果と比較しても遜色なく、等しい解析結果であることが確認されている。このことから、事業団における計算解析の能力は、ベンチマーク参加各国と同等の解析レベルにあるものと考える。今後も本ベンチマーク解析が継続されるが、事業団として安全解析能力の維持・向上等を図るために、継続して燃焼度クレジット臨界ベンチマークに参加していく考えである。

参考文献

- [1]. 神田啓治 他、"臨界安全と燃焼度クレジット - 日本初、本格導入された新基準を探る - "、原子力工業、Vol.40 No.3、P9 - 48 (1994)
- [2]. Makoto TAKANO, "OECD/NEA BURNUP CREDIT CRITICALITY BENCHMARK - RESULT OF Phase I-A - ", JAERI-M 94-003 (1994)
- [3]. C.V.Parks, " OECD/NEA BURNUP CREDIT CRITICALITY BENCHMARK - RESULT OF Phase I-B - ", OECD/NEA/NSC/DOC (92)11, (1992)
- [4]. M.Takano, M.Brady, and A.Santamarina, " Burnup Credit Criticality Benchmark Phase II-A Effect of Axial Burnup Profile (Infinite Fuel Pin Array In Water) " , OECD/NEA/NSC/DOC (93)15, (October 1993)
- [5]. " Proposed Spent Fuel Cask Geometry OECD Phase II-B Benchmark, " OECD/NEA/NSC/DOC (94)25, (1994)
- [6]. S.R.Bierman, " Spent Reactor Fuel Benchmark Composition Data for Code Validation, " , PNL-SA-19700, DE92 007816 (September 1991)
- [7]. " SCALE 4.2: A Module Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, " , NUREG/CR-0200(ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R4), Vols.1,2 and 3 (November 1993), Available from Radiation Shielding Information Center as CCC-545
- [8]. N.F.Landers, and L.M.Petrie, " CSAS : Control Module for Enhanced Criticality Safety Analysis Sequences, " , Sect.C4 of *SCALE 4.2 : A Module Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*, NUREG/CR-0200(ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R4), Vols.1,2 and 3 (November 1993), Available from Radiation Shielding Information Center as CCC-545
- [9]. N.M.Greene, " WAX : Module to Merge, Collect, Assemble, Re-Order, Join, Copy Selected Nuclides from AMPX Working Interfaces, " , Sect.M15.10 of *SCALE 4.2 : A Module Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*, NUREG/CR-0200(ORNL/NUREG/CSD-2/R4), Vols.1,2 and 3 (November 1993), Available from Radiation Shielding Information Center as CCC-545
- [10]. L.M.Petrie, and N.F.Landers, " KENO V.a : An Improved Monte Carlo Criticality Program with Supergrouping, " , Sect.F11 of *SCALE 4.2 : A Module Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*, NUREG/CR-0200(ORNL/NUREG/CSD-2/R4), Vols.1,2 and 3 (November 1993), Available from Radiation Shielding Information Center as CCC-545
- [11]. N.M.Greene, " BONAMI-S : Resonance Self-Shielding by the Bondarenko Method, " Sect.F1 of *SCALE 4.2 : A Module Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*, NUREG/CR-0200(ORNL/NUREG/CS

D-2/V2/R4), Vols.1,2 and 3 (November 1993), Available from Radiation Shielding Information Center as CCC-545

- [12]. N.M.Greene, L.M.Petrie, and R.M.Westfall, " NITAWL-II : SCALE System Module for Performing Resonance Shielding and Working Library Production, " , Sect.F2 of *SCALE 4.2 : A Module Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*, NUREG/CR-0200(ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R3), Vols.1,2 and 3 (November 1993), Available from Radiation Shielding Information Center as CCC-545
- [13]. N.M.Greene, L.M.Petrie, and S.K.Fraley, " ICE-S : Module to Mix Multigroup Cross Section, " , Sect.F8 of *SCALE 4.2 : A Module Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*, NUREG/CR-0200 (ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R4), Vols.1,2 and 3 (November 1993), Available from Radiation Shielding Information Center as CCC-545
- [14]. N.M.Greene, and L.M.Petrie, " XSDRNPM-S : A One-Dimensional Discrete-Ordinates Code for Transport Analysis, " , Sect.F3 of *SCALE 4.2 : A Module Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*, NUREG/CR-0200(ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R4), Vols.1,2 and 3 (November 1993), Available from Radiation Shielding Information Center as CCC-545
- [15]. W.C.Jordan, " SCALE CROSS-SECTION LIBRARIES, " , Sect.M4 of *SCALE 4.2 : A Module Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*, NUREG/CR-0200(ORNL/NUREG/CSD-2/V3/R3), Vols.1,2 and 3 (November 1993), Available from Radiation Shielding Information Center as CCC-545

付 錄

A. PHASE-II.Aで用いた構造材のデータ

A.1 初期燃料、燃料ピン構造材及び反射体の組成

Phase II-Aの計算解析に用いた初期²³⁵U濃縮度3.6wt%及び4.5wt%の初期燃料組成を表A.1に示し、燃料ピンの構造材であるジルカロイ-4及び反射体の水の組成を表A.2に示す。

表A.1 Phase II-Aの初期燃料組成

核種	原子個数密度 (atoms/barn · cm)	
	²³⁵ U濃縮度 : 3.6wt%	²³⁵ U濃縮度 : 4.5wt%
U-234	7.5174E-06	8.4100E-06
U-235	8.4209E-04	1.0526E-04
U-236	3.7268E-06	6.4752E-06
U-238	2.2254E-02	2.2042E-02
O	4.6215E-02	4.6219E-02

表A.2 燃料ピン及び反射体の構造材組成

物質名	元素名	原子個数密度 (atoms/barn · cm)
被覆管・端栓 (ジルカロイ-4)	Cr	7.5891E-05
	Fe	1.4838E-04
	Zr	4.2982E-02
反射体 (水)	H	6.6621E-02
	O	3.3310E-02

A.2 使用済燃料の組成

A.2.1 使用済燃料の核種組成 (1)

初期²³⁵U濃縮度 : 3.6 wt%

燃焼度 : 10 GWd/MTU

冷却期間 : 1 年

表A.2.1 Case 2~5の燃料組成

核種	Case2 , 4					Case3 , 5	
	燃焼度 (MWd/MTU)						
	3.618	4.311	5.647	7.558	11.069		
	領域 1・9	領域 2・8	領域 3・7	領域 4・6	領域 5		
U-234	7.1727E-06	7.1073E-06	6.9819E-06	6.8042E-06	6.4825E-06	6.5794E-06	
U-235	7.4542E-04	7.2820E-04	6.9597E-04	6.5206E-04	5.7794E-04	5.9967E-04	
U-236	2.1526E-05	2.4671E-05	3.0535E-05	3.8459E-05	5.1643E-05	4.7807E-05	
U-238	2.2201E-02	2.2191E-02	2.2170E-02	2.2141E-02	2.2086E-02	2.2103E-02	
Pu-238	1.4782E-08	2.2662E-08	4.5152E-08	9.4031E-08	2.3783E-07	1.8519E-07	
Pu-239	3.9529E-05	4.5703E-05	5.6731E-05	7.0502E-05	9.0069E-05	8.4685E-05	
Pu-240	2.3787E-06	3.2047E-06	4.9284E-06	7.6945E-06	1.3567E-05	1.1749E-05	
Pu-241	4.2604E-07	6.7465E-07	1.3069E-06	2.5613E-06	5.8526E-06	4.7672E-06	
Pu-242	5.5378E-09	1.2935E-08	4.6519E-08	1.3880E-07	4.5786E-07	3.3278E-07	
Am-241	2.1921E-08	3.5244E-08	7.0854E-08	1.4450E-07	3.4621E-07	2.7770E-07	
Am-243	1.2915E-12	3.2474E-12	1.1026E-09	6.0436E-09	2.7360E-08	1.7490E-08	
Np-237	5.7921E-07	7.2613E-07	1.0344E-06	1.5325E-06	2.6147E-06	2.2679E-06	
Mo-95	5.4768E-06	6.5196E-06	8.5164E-06	1.1341E-05	1.6430E-05	1.4902E-05	
Tc-99	5.4625E-06	6.4947E-06	8.4682E-06	1.1253E-05	1.6254E-05	1.4751E-05	
Ru-101	4.5948E-06	5.4795E-06	7.1866E-06	9.6322E-06	1.4134E-05	1.2768E-05	
Rh-103	2.9969E-06	3.5905E-06	4.7355E-06	6.3753E-06	9.3808E-06	8.4763E-06	
Ag-109	1.3026E-07	1.7303E-07	2.6703E-07	4.2798E-07	7.9998E-07	6.7934E-07	
Cs-133	5.9784E-06	7.1063E-06	9.2639E-06	1.2312E-05	1.7790E-05	1.6145E-05	
Sm-147	4.7018E-07	5.6264E-07	7.4136E-07	9.9805E-07	1.4711E-06	1.3283E-06	
Sm-149	1.2328E-07	1.2673E-07	1.3232E-07	1.3783E-07	1.4238E-07	1.4063E-07	
Sm-150	8.8301E-07	1.0822E-06	1.4931E-06	2.1420E-06	3.4955E-06	3.0773E-06	
Sm-151	2.3324E-07	2.5674E-07	2.9689E-07	3.4245E-07	3.9505E-07	3.8042E-07	
Sm-152	4.2030E-07	5.2286E-07	7.2402E-07	1.0196E-06	1.5804E-06	1.4113E-06	
Nd-143	5.0905E-06	6.0185E-06	7.7663E-06	1.0171E-05	1.4304E-05	1.3086E-05	
Nd-145	3.3973E-06	4.0303E-06	5.2361E-06	6.9273E-06	9.9329E-06	9.0337E-06	
Eu-153	1.8745E-07	2.3222E-07	3.2705E-07	4.8217E-07	8.2472E-07	7.1408E-07	
Gd-155	4.2592E-09	5.0199E-09	6.5311E-09	8.7956E-09	1.3371E-08	1.1869E-08	
O	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	

atoms/barn · cm

A.2.2 使用済燃料の核種組成 (2)

初期 ^{235}U 濃縮度 : 3.6 wt%
 燃焼度 : 30 GWd/MTU
 冷却期間 : 1 年

表A.2.2 Case 6~9燃料組成

核種	Case6, 8					Case7, 9	
	燃焼度 (MWd/t)						
	12.330	14.041	18.006	24.009	32.855		
	領域 1・9	領域 2・8	領域 3・7	領域 4・6	領域 5		
U-234	6.3705E-06	6.2178E-06	5.8699E-06	5.3620E-06	4.6622E-06	4.8804E-06	
U-235	5.5336E-04	5.2093E-04	4.5143E-04	3.6010E-04	2.5228E-04	2.8377E-04	
U-236	5.5957E-05	6.1572E-05	7.3333E-05	8.8047E-05	1.0372E-04	9.9398E-05	
U-238	2.2066E-02	2.2039E-02	2.1973E-02	2.1869E-02	2.1705E-02	2.1759E-02	
Pu-238	3.1141E-07	4.3069E-07	8.0609E-07	1.6598E-06	3.5663E-06	2.8704E-06	
Pu-239	9.4448E-05	1.0142E-04	1.1449E-04	1.2775E-04	1.3790E-04	1.3551E-04	
Pu-240	1.5417E-05	1.8235E-05	2.4724E-05	3.4198E-05	4.6744E-05	4.2931E-05	
Pu-241	7.7995E-06	9.8114E-06	1.4601E-05	2.1718E-05	3.0723E-05	2.8085E-05	
Pu-242	6.5918E-07	9.7642E-07	2.0114E-06	4.3206E-06	9.1156E-06	7.4143E-06	
Am-241	4.6500E-07	6.0188E-07	9.5617E-07	1.5389E-06	2.3570E-06	2.1081E-06	
Am-243	4.5209E-08	7.7068E-08	2.0891E-07	6.2397E-07	1.8519E-06	1.3695E-06	
Np-237	3.0436E-06	3.6522E-06	5.1708E-06	7.6707E-06	1.1527E-05	1.0284E-05	
Mo-95	1.8236E-05	2.0626E-05	2.6014E-05	3.3792E-05	4.4455E-05	4.1124E-05	
Tc-99	1.7833E-05	2.0170E-05	2.5457E-05	3.3109E-05	4.3599E-05	4.0326E-05	
Ru-101	1.5775E-05	1.7961E-05	2.3014E-05	3.0617E-05	4.1684E-05	3.8144E-05	
Rh-103	1.0455E-05	1.1854E-05	1.4989E-05	1.9419E-05	2.5173E-05	2.3427E-05	
Ag-109	9.6301E-07	1.1788E-06	1.7249E-06	2.6462E-06	4.1267E-06	3.6406E-06	
Cs-133	1.9552E-05	2.2103E-05	2.7859E-05	3.6156E-05	4.7444E-05	4.3935E-05	
Sm-147	1.6643E-06	1.9070E-06	2.4589E-06	3.2457E-06	4.2452E-06	3.9475E-06	
Sm-149	1.5514E-07	1.5939E-07	1.6710E-07	1.7425E-07	1.7821E-07	1.7755E-07	
Sm-150	3.8040E-06	4.4133E-06	5.8464E-06	8.0459E-06	1.1269E-05	1.0241E-05	
Sm-151	4.1111E-07	4.3200E-07	4.7695E-07	5.3724E-07	6.1328E-07	5.9020E-07	
Sm-152	1.7856E-05	2.0469E-06	2.6305E-06	3.4583E-06	4.5663E-06	4.2236E-06	
Nd-143	1.5611E-05	1.7437E-05	2.1378E-05	2.6602E-05	3.2750E-05	3.0965E-05	
Nd-145	1.0993E-05	1.2392E-05	1.5528E-05	2.0005E-05	2.6033E-05	2.4165E-05	
Eu-153	9.6829E-07	1.1667E-06	1.6674E-06	2.5019E-06	3.8033E-06	3.3822E-06	
Gd-155	1.5168E-08	1.8028E-08	2.6254E-08	4.2823E-08	7.5143E-08	6.3853E-08	
O	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	

atoms/barn · cm

A.2.3 使用済燃料の核種組成 (3)

初期²³⁵U濃縮度 : 3.6 wt%
 燃焼度 : 30 GWd/MTU
 冷却期間 : 5 年

表A.2.3 Case 10~13の燃料組成

核種	Case10, 12					Case11, 13	
	燃焼度 (MWd/MTU)						
	12.330	14.041	18.006	24.009	32.855		
	領域 1・9	領域 2・8	領域 3・7	領域 4・6	領域 5		
U-234	6.3802E-06	6.2312E-06	5.8952E-06	5.4143E-06	4.7748E-06	4.9710E-06	
U-235	5.5337E-04	5.2094E-04	4.5145E-04	3.6012E-04	2.5230E-04	2.8379E-04	
U-236	5.5963E-05	6.1580E-05	7.3343E-05	8.8061E-05	1.0374E-04	9.9416E-05	
U-238	2.2066E-02	2.2039E-02	2.1973E-02	2.1869E-02	2.1705E-02	2.1759E-02	
Pu-238	3.0368E-07	4.2082E-07	7.9081E-07	1.6339E-06	3.5160E-06	2.8294E-06	
Pu-239	9.4437E-05	1.0141E-04	1.1447E-04	1.2773E-04	1.3788E-04	1.3550E-04	
Pu-240	1.5411E-05	1.8228E-05	2.4717E-05	3.4197E-05	4.6784E-05	4.2953E-05	
Pu-241	6.4290E-06	8.0873E-06	1.2035E-05	1.7902E-05	2.5324E-05	2.3150E-05	
Pu-242	6.5918E-07	9.7642E-07	2.0114E-06	4.3206E-06	9.1156E-06	7.4143E-06	
Am-241	1.8281E-06	2.3164E-06	3.5074E-06	5.3328E-06	7.7230E-06	7.0135E-06	
Am-243	4.5192E-08	7.7039E-08	2.0884E-07	6.2374E-07	1.8512E-06	1.3690E-06	
Np-237	3.0511E-06	3.6618E-06	5.1854E-06	7.6933E-06	1.1560E-05	1.0314E-05	
Mo-95	1.8451E-05	2.0840E-05	2.6225E-05	3.3996E-05	4.4649E-05	4.1322E-05	
Tc-99	1.7833E-05	2.0170E-05	2.5457E-05	3.3108E-05	4.3598E-05	4.0326E-05	
Ru-101	1.5775E-05	1.7961E-05	2.3014E-05	3.0617E-05	4.1684E-05	3.8144E-05	
Rh-103	1.0459E-05	1.1857E-05	1.4993E-05	1.9423E-05	2.5178E-05	2.3431E-05	
Ag-109	9.6301E-07	1.1788E-06	1.7249E-06	2.6462E-06	4.1267E-06	3.6406E-06	
Cs-133	1.9552E-05	2.2103E-05	2.7859E-05	3.6156E-05	4.7444E-05	4.3935E-05	
Sm-147	4.1077E-06	4.5466E-06	5.4627E-06	6.6054E-06	7.8342E-06	7.4917E-06	
Sm-149	1.5514E-07	1.5939E-07	1.6710E-07	1.7425E-07	1.7821E-07	1.7755E-07	
Sm-150	3.8040E-06	4.4133E-06	5.8464E-06	8.0459E-06	1.1269E-05	1.0241E-05	
Sm-151	3.9864E-07	4.1889E-07	4.6248E-07	5.2094E-07	5.9467E-07	5.7230E-07	
Sm-152	1.7857E-06	2.0470E-06	2.6306E-06	3.4585E-06	4.5665E-06	4.2238E-06	
Nd-143	1.5611E-05	1.7437E-05	2.1378E-05	2.6602E-05	3.2750E-05	3.0965E-05	
Nd-145	1.0993E-05	1.2392E-05	1.5528E-05	2.0005E-05	2.6033E-05	2.4165E-05	
Eu-153	9.6830E-07	1.1667E-06	1.6674E-06	2.5020E-06	3.8033E-06	3.3822E-06	
Gd-155	5.5547E-08	6.6016E-08	9.6135E-08	1.5685E-07	2.7544E-07	2.3399E-07	
O	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	4.6215E-02	

atoms/barn · cm

A.2.4 使用済燃料の核種組成 (4)

初期²³⁵U濃縮度 : 4.5 wt%
 燃焼度 : 30 GWd/MTU
 冷却期間 : 1 年

表A.2.4 Case 15~18の燃料組成

核種	Case15 , 17					Case16 , 18	
	燃焼度 (MWd/MTU)						
	12.330	14.041	18.006	24.009	32.855		
	領域 1・9	領域 2・8	領域 3・7	領域 4・6	領域 5		
U-234	7.2649E-06	7.1109E-06	6.7591E-06	6.2417E-06	5.5185E-06	5.7455E-06	
U-235	7.4704E-04	7.1102E-04	6.3249E-04	5.2583E-04	3.9296E-04	4.3273E-04	
U-236	6.3195E-05	6.9644E-05	8.3446E-05	1.0149E-04	1.2236E-04	1.1635E-04	
U-238	2.1871E-02	2.1846E-02	2.1787E-02	2.1693E-02	2.1547E-02	2.1595E-02	
Pu-238	2.8641E-07	3.9483E-07	7.3356E-07	1.5130E-06	3.3089E-06	2.6453E-06	
Pu-239	9.3233E-05	1.0091E-04	1.1569E-04	1.3159E-04	1.4511E-04	1.4176E-04	
Pu-240	1.2878E-05	1.5353E-05	2.1172E-05	2.9950E-05	4.2146E-05	3.8360E-05	
Pu-241	6.2410E-06	7.9972E-06	1.2395E-05	1.9338E-05	2.8801E-05	2.5933E-05	
Pu-242	4.2866E-07	6.4265E-07	1.3567E-06	3.0288E-06	6.7305E-06	5.3890E-06	
Am-241	3.7294E-07	4.9180E-07	8.1377E-07	1.3780E-06	2.2432E-06	1.9697E-06	
Am-243	2.9094E-08	4.8610E-08	1.2893E-07	3.9736E-07	1.2545E-06	9.1029E-07	
Np-237	3.1036E-06	3.7238E-06	5.2803E-06	7.8777E-06	1.1995E-05	1.0650E-05	
Mo-95	1.8489E-05	2.0938E-05	2.6487E-05	3.4552E-05	4.5717E-05	4.2217E-05	
Tc-99	1.7929E-05	2.0293E-05	2.5652E-05	3.3447E-05	4.4219E-05	4.0848E-05	
Ru-101	1.5737E-05	1.7916E-05	2.2952E-05	3.0530E-05	4.1575E-05	3.8040E-05	
Rh-103	1.0198E-05	1.1560E-05	1.4624E-05	1.8995E-05	2.4774E-05	2.3005E-05	
Ag-109	7.9138E-07	9.7122E-07	1.4313E-06	2.2210E-06	3.5242E-06	3.0914E-06	
Cs-133	1.9651E-05	2.2231E-05	2.8069E-05	3.6529E-05	4.8147E-05	4.4521E-05	
Sm-147	1.7068E-06	1.9623E-06	2.5505E-06	3.4066E-06	4.5297E-06	4.1903E-06	
Sm-149	1.7444E-07	1.8004E-07	1.8905E-07	1.9609E-07	1.9990E-07	1.9919E-07	
Sm-150	3.7319E-06	4.3299E-06	5.7784E-06	8.0419E-06	1.1326E-05	1.0286E-05	
Sm-151	4.7687E-07	5.0124E-07	5.5238E-07	6.1929E-07	7.0207E-07	6.7718E-07	
Sm-152	1.6948E-06	1.9507E-06	2.5243E-06	3.3453E-06	4.4607E-06	4.1136E-06	
Nd-143	1.6076E-05	1.8019E-05	2.2270E-05	2.8054E-05	3.5176E-05	3.3064E-05	
Nd-145	1.1161E-05	1.2599E-05	1.5837E-05	2.0493E-05	2.6836E-05	2.4862E-05	
Eu-153	9.0062E-07	1.0833E-06	1.5474E-06	2.3310E-06	3.5819E-06	3.1728E-06	
Gd-155	1.4974E-08	1.7587E-08	2.4865E-08	3.9606E-08	6.9558E-08	5.8933E-08	
O	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	

atoms/barn · cm

A.2.5 使用済燃料の核種組成 (5)

初期²³⁵U濃縮度 : 4.5 wt%
 燃焼度 : 50 GWd/MTU
 冷却期間 : 1 年

表A.2.5 Case 19~22の燃料組成

核種	Case19 , 21					Case20 , 22	
	燃焼度 (MWd/MTU)						
	21.565	24.023	30.580	40.424	54.605		
	領域 1・9	領域 2・8	領域 3・7	領域 4・6	領域 5		
U-234	6.4500E-06	6.2405E-06	5.6995E-06	4.9433E-06	3.9925E-06	4.2810E-06	
U-235	5.6755E-04	5.2560E-04	4.2453E-04	3.0000E-04	1.7106E-04	2.0683E-04	
U-236	9.4545E-05	1.0153E-04	1.1761E-04	1.3532E-04	1.4895E-04	1.4592E-04	
U-238	2.1732E-02	2.1693E-02	2.1585E-02	2.1413E-02	2.1142E-02	2.1232E-02	
Pu-238	1.1544E-06	1.5152E-06	2.7719E-06	5.4525E-06	1.0655E-05	8.8422E-06	
Pu-239	1.2592E-04	1.3162E-04	1.4250E-04	1.5066E-04	1.5301E-04	1.5300E-04	
Pu-240	2.6401E-05	2.9970E-05	3.9132E-05	5.1412E-05	6.5224E-05	6.1274E-05	
Pu-241	1.6516E-05	1.9354E-05	2.6524E-05	3.5395E-05	4.3713E-05	4.1552E-05	
Pu-242	2.2623E-06	3.0335E-06	5.6472E-06	1.0893E-05	2.0303E-05	1.7100E-05	
Am-241	1.1411E-06	1.3794E-06	2.0253E-06	2.9059E-06	3.7731E-06	3.5503E-06	
Am-243	2.6232E-07	3.9824E-07	9.7389E-07	2.5117E-06	6.1573E-06	4.8107E-06	
Np-237	6.7920E-06	7.8840E-06	1.0920E-05	1.5563E-05	2.1757E-05	1.9862E-05	
Mo-95	3.1317E-05	3.4570E-05	4.2926E-05	5.4612E-05	6.9709E-05	6.5040E-05	
Tc-99	3.0320E-05	3.3465E-05	4.1532E-05	5.2747E-05	6.6976E-05	6.2619E-05	
Ru-101	2.7452E-05	3.0548E-05	3.8751E-05	5.0881E-05	6.7875E-05	6.2443E-05	
Rh-103	1.7256E-05	1.9004E-05	2.3367E-05	2.9052E-05	3.5401E-05	3.3579E-05	
Ag-109	1.8879E-06	2.2230E-06	3.1774E-06	4.7134E-06	6.9836E-06	6.2520E-06	
Cs-133	3.3140E-05	3.6549E-05	4.5257E-05	5.7263E-05	7.2263E-05	6.7704E-05	
Sm-147	3.0651E-06	3.4086E-06	4.2601E-06	5.3175E-06	6.3252E-06	6.0644E-06	
Sm-149	1.9390E-07	1.9611E-07	1.9936E-07	1.9993E-07	1.9259E-07	1.9567E-07	
Sm-150	7.1174E-06	8.0472E-06	1.0496E-05	1.3997E-05	1.8627E-05	1.7185E-05	
Sm-151	5.9331E-07	6.1943E-07	6.8230E-07	7.6073E-07	8.4338E-07	8.1981E-07	
Sm-152	3.0176E-06	3.3471E-06	4.1841E-06	5.3313E-06	6.7635E-06	6.3275E-06	
Nd-143	2.5793E-05	2.8067E-05	3.3502E-05	3.9984E-05	4.5992E-05	4.4452E-05	
Nd-145	1.8633E-05	2.0504E-05	2.5263E-05	3.1783E-05	3.9893E-05	3.7428E-05	
Eu-153	2.0026E-06	2.3329E-06	3.2545E-06	4.6704E-06	6.5857E-06	5.9933E-06	
Gd-155	3.3040E-08	3.9645E-08	6.0994E-08	1.0133E-07	1.6688E-07	1.4556E-06	
O	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	

atoms/barn · cm

A.2.6 使用済燃料の核種組成 (6)

初期²³⁵U濃縮度 : 4.5 wt%
 燃焼度 : 50 GWd/MTU
 冷却期間 : 5 年

表A.2.6 Case 23~26の燃料組成

核種	Case23 , 25					Case24 , 26	
	燃焼度 (MWd/MTU)						
	21.565	24.023	30.580	40.424	54.605		
領域 1・9	領域 2・8	領域 3・7	領域 4・6	領域 5			
U-234	6.4862E-06	6.2881E-06	5.7868E-06	5.1152E-06	4.3280E-06	4.5595E-06	
U-235	5.6757E-04	5.2562E-04	4.2455E-04	3.0002E-04	1.7108E-04	2.0685E-04	
U-236	9.4556E-05	1.0155E-04	1.1763E-04	1.3534E-04	1.4897E-04	1.4594E-04	
U-238	2.1732E-02	2.1693E-02	2.1585E-02	2.1413E-02	2.1142E-02	2.1232E-02	
Pu-238	1.1322E-06	1.4876E-06	2.7262E-06	5.3656E-06	1.0471E-05	8.6947E-06	
Pu-239	1.2591E-04	1.3161E-04	1.4249E-04	1.5064E-04	1.5300E-04	1.5299E-04	
Pu-240	2.6395E-05	2.9965E-05	3.9140E-05	5.1484E-05	6.5540E-05	6.1487E-05	
Pu-241	1.3614E-05	1.5953E-05	2.1863E-05	2.9175E-05	3.6032E-05	3.4251E-05	
Pu-242	2.2623E-06	3.0335E-06	5.6472E-06	1.0893E-05	2.0303E-05	1.7100E-05	
Am-241	4.0266E-06	4.7603E-06	6.6579E-06	9.0866E-06	1.1404E-05	1.0805E-05	
Am-243	2.6222E-07	3.9809E-07	9.7353E-07	2.5108E-06	6.1550E-06	4.8089E-06	
Np-237	6.8089E-06	7.9041E-06	1.0948E-05	1.5602E-05	2.1806E-05	1.9909E-05	
Mo-95	3.1530E-05	3.4781E-05	4.3130E-05	5.4806E-05	6.9892E-05	6.5226E-05	
Tc-99	3.0319E-05	3.3465E-05	4.1531E-05	5.2746E-05	6.6975E-05	6.2619E-05	
Ru-101	2.7452E-05	3.0548E-05	3.8751E-05	5.0881E-05	6.7875E-05	6.2443E-05	
Rh-103	1.7260E-05	1.9008E-05	2.3371E-05	2.9057E-05	3.5406E-05	3.3584E-05	
Ag-109	1.8879E-06	2.2230E-06	3.1774E-06	4.7134E-06	6.9836E-06	6.2520E-06	
Cs-133	3.3140E-05	3.6549E-05	4.5257E-05	5.7263E-05	7.2263E-05	6.7704E-05	
Sm-147	6.4488E-06	6.9339E-06	8.0315E-06	9.2075E-06	1.0106E-05	9.9022E-06	
Sm-149	1.9390E-07	1.9611E-07	1.9936E-07	1.9993E-07	1.9259E-07	1.9567E-07	
Sm-150	7.1174E-06	8.0472E-06	1.0496E-05	1.3997E-05	1.8627E-05	1.7185E-05	
Sm-151	5.7531E-07	6.0064E-07	6.6160E-07	7.3765E-07	8.1779E-07	7.9494E-07	
Sm-152	3.0178E-06	3.3473E-06	4.1844E-06	5.3316E-06	6.7637E-06	6.3277E-06	
Nd-143	2.5793E-05	2.8067E-05	3.3502E-05	3.9984E-05	4.5992E-05	4.4452E-05	
Nd-145	1.8633E-05	2.0504E-05	2.5263E-05	3.1783E-05	3.9892E-05	3.7428E-05	
Eu-153	2.0026E-06	2.3329E-06	3.2546E-06	4.6705E-06	6.5858E-06	5.9934E-06	
Gd-155	1.1986E-07	1.4386E-07	2.2155E-07	3.6871E-07	6.0862E-07	5.3051E-07	
O	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	

atoms/barn · cm

B. PHASE-II.Bで用いた構造材のデータ

B.1 燃料組成一覧及び使用済燃料キャスクの構造材組成

表B.2には、Phase II-Bの燃焼度クレジット評価計算に用いた燃料、使用済燃料輸送キャスク等の組成を原子個数密度 (atoms/barn · cm) で示す。但し、燃料組成については、Phase II-Aの計算で使用した組成を一部用いているため、表B.1にデータ参照一覧を示した。

表B.1 燃料組成データ一覧

計算ケース	計算パラメータ				参照
	冷却期間 (年)	燃焼度 (GWd/MTU)	FP核種	燃焼度分布	
A	初期燃料				表A.1
B	5	30	考慮	無視	表B.3
C			考慮	考慮	
D			無視	無視	
E			無視	考慮	
F	5	50	考慮	無視	表A.2.6
G			考慮	考慮	
H			無視	無視	
I			無視	考慮	

初期²³⁵U濃縮度：4.5wt%

B.2 Phase II-Bの使用物質組成

物質名	元素名	原子個数密度 (atoms/barn · cm)	物質名	元素名	原子個数密度 (atoms/barn · cm)
被覆管	Cr	7.589E-05		Cr	1.743E-02
端栓	Fe	1.484E-04		Mn	1.736E-03
(Zircalloy)	Zr	4.298E-02	キャスク (SS304)	Fe	5.936E-02
	H	3.338E-02		Ni	7.721E-03
	O	1.669E-02			
Upper&Lower Hardware	Cr	8.714E-03	水	H	6.662E-02
	Mn	8.682E-04		O	3.331E-02
	Fe	2.968E-02			
	Ni	3.860E-03			
	Cr	1.691E-02			
	Mn	1.684E-03			
Brated SS	Fe	5.758E-02			
	Ni	7.489E-03			
	B-10	7.836E-04			
	B-11	3.181E-03			

B.2 使用済燃料の組成

初期 ^{235}U 濃縮度 : 4.5 wt%
 燃焼度 : 30 GWd/MTU
 冷却期間 : 5年

表B.3 CaseB～Eの燃料組成

核種	Case C, E					Case B, D 30 GWd/MTU
	Region 1&9	Region 2&8	Region 3&7	Region 4&6	Region 5	
	12.33MWd/MTU	14.041MWd/MTU	18.006MWd/MTU	24.009MWd/MTU	32.855MWd/MTU	
U-234	7.2738E-06	7.1232E-06	6.7821E-06	6.2892E-06	5.6227E-06	5.8288E-06
U-235	7.4705E-04	7.1103E-04	6.3251E-04	5.2585E-04	3.9298E-04	4.3275E-04
U-236	6.3201E-05	6.9650E-05	8.3455E-05	1.0151E-04	1.2238E-04	1.1637E-04
U-238	2.1871E-02	2.1846E-02	2.1787E-02	2.1693E-02	2.1547E-02	2.1595E-02
Pu-238	2.7907E-07	3.8525E-07	7.1790E-07	1.4854E-06	3.2553E-06	2.6014E-06
Pu-239	9.3222E-05	1.0090E-04	1.1568E-04	1.3158E-04	1.4509E-04	1.4175E-04
Pu-240	1.2872E-05	1.5346E-05	2.1165E-05	2.9945E-05	4.2164E-05	3.8367E-05
Pu-241	5.1443E-06	6.5919E-06	1.0217E-05	1.5940E-05	2.3740E-05	2.1376E-05
Pu-242	4.2866E-07	6.4265E-07	1.3567E-06	3.0288E-06	6.7305E-06	5.3890E-06
Am-241	1.4636E-06	1.8893E-06	2.9795E-06	4.7561E-06	7.2733E-06	6.4992E-06
Am-243	2.9083E-08	4.8592E-08	1.2888E-07	3.9721E-07	1.2540E-06	9.0995E-07
Np-237	3.1096E-06	3.7316E-06	5.2927E-06	7.8978E-06	1.2026E-05	1.0678E-05
Mo-95	1.8707E-05	2.1157E-05	2.6703E-05	3.4762E-05	4.5919E-05	4.2421E-05
Tc-99	1.7929E-05	2.0292E-05	2.5652E-05	3.3447E-05	4.4219E-05	4.0847E-05
Ru-101	1.5737E-05	1.7916E-05	2.2952E-05	3.0530E-05	4.1575E-05	3.8040E-05
Rh-103	1.0201E-05	1.1563E-05	1.4628E-05	1.8999E-05	2.4779E-05	2.3009E-05
Ag-109	7.9138E-07	9.7122E-07	1.4313E-06	2.2210E-06	3.5242E-06	3.0914E-06
Cs-133	1.9651E-05	2.2231E-05	2.8069E-05	3.6529E-05	4.8147E-05	4.4521E-05
Sm-147	4.2159E-06	4.6821E-06	5.6683E-06	6.9313E-06	8.3505E-06	7.9467E-06
Sm-149	1.7444E-07	1.8004E-07	1.8905E-07	1.9609E-07	1.9990E-07	1.9919E-07
Sm-150	3.7319E-06	4.3299E-06	5.7784E-06	8.0419E-06	1.1326E-05	1.0286E-05
Sm-151	4.6240E-07	4.8603E-07	5.3562E-07	6.0050E-07	6.8077E-07	6.5663E-07
Sm-152	1.6949E-06	1.9508E-06	2.5244E-06	3.3455E-06	4.4610E-06	4.1139E-06
Nd-143	1.6076E-05	1.8019E-05	2.2270E-05	2.8054E-05	3.5176E-05	3.3064E-05
Nd-145	1.1161E-05	1.2599E-05	1.5837E-05	2.0493E-05	2.6836E-05	2.4862E-05
Eu-153	9.0062E-07	1.0833E-06	1.5474E-06	2.3310E-06	3.5819E-06	3.1728E-06
Gd-155	5.4303E-08	6.3779E-08	9.0177E-08	1.4372E-07	2.5275E-07	2.1404E-07
O	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02	4.6219E-02

atoms/barn · cm

C. サンプル入力データ

C.1 Phase II-Aの計算に用いた入力データ

C.1.1 CSASN - CSAS25

(1) CSASN

```
=csasn      paxm='check'
oecd/nea criticarity benchmark pwr spent fuel - case02
27burnplib latticecell
***** fuel region 1&9 *****
u-234 1 0.0 7.1727e-06 300.0 end
u-235 1 0.0 7.4542e-04 300.0 end
u-236 1 0.0 2.1526e-05 300.0 end
u-238 1 0.0 2.2201e-02 300.0 end
pu-238 1 0.0 1.4782e-08 300.0 end
pu-239 1 0.0 3.9529e-05 300.0 end
pu-240 1 0.0 2.3787e-06 300.0 end
pu-241 1 0.0 4.2604e-07 300.0 end
pu-242 1 0.0 5.5378e-09 300.0 end
am-241 1 0.0 2.1921e-08 300.0 end
am-243 1 0.0 1.2915e-12 300.0 end
np-237 1 0.0 5.7921e-07 300.0 end
o 1 0.0 4.6215e-02 300.0 end
no-95 1 0.0 5.4768e-06 300.0 end
tc-99 1 0.0 5.4625e-06 300.0 end
ru-101 1 0.0 4.5948e-06 300.0 end
rh-103 1 0.0 2.9969e-06 300.0 end
ag-109 1 0.0 1.3026e-07 300.0 end
cs-133 1 0.0 5.9784e-06 300.0 end
sm-147 1 0.0 4.7018e-07 300.0 end
sm-149 1 0.0 1.2328e-07 300.0 end
sm-150 1 0.0 8.8301e-07 300.0 end
sm-151 1 0.0 2.3324e-07 300.0 end
sm-152 1 0.0 4.2030e-07 300.0 end
nd-143 1 0.0 5.0905e-06 300.0 end
nd-145 1 0.0 3.3973e-06 300.0 end
eu-153 1 0.0 1.8745e-07 300.0 end
gd-155 1 0.0 4.2592e-09 300.0 end
***** clad *****
cr 2 0.0 7.5891e-05 300.0 end
fe 2 0.0 1.4838e-04 300.0 end
zr 2 0.0 4.2982e-02 300.0 end
***** light water *****
h 3 0.0 6.6621e-02 300.0 end
o 3 0.0 3.3310e-02 300.0 end
end comp
squarepitch 1.33 0.824 1 3 0.95 2 end
end
```

(2) CSAS25

```
=csas25
oecd/nea criticarity benchmark pwr spent fuel - case02
27burnplib latticecell
***** fuel region 1&9 *****
u-234 1 0.0 7.1727e-06 300.0 end
u-235 1 0.0 7.4542e-04 300.0 end
u-236 1 0.0 2.1526e-05 300.0 end
u-238 1 0.0 2.2201e-02 300.0 end
pu-238 1 0.0 1.4782e-08 300.0 end
pu-239 1 0.0 3.9529e-05 300.0 end
```

pu-240	1	0.0	2.3787e-06	300.0	end
pu-241	1	0.0	4.2604e-07	300.0	end
pu-242	1	0.0	5.5378e-09	300.0	end
am-241	1	0.0	2.1921e-08	300.0	end
am-243	1	0.0	1.2915e-12	300.0	end
np-237	1	0.0	5.7921e-07	300.0	end
o	1	0.0	4.6215e-02	300.0	end
mo-95	1	0.0	5.4768e-06	300.0	end
tc-99	1	0.0	5.4625e-06	300.0	end
ru-101	1	0.0	4.5948e-06	300.0	end
rh-103	1	0.0	2.9969e-06	300.0	end
ag-109	1	0.0	1.3026e-07	300.0	end
cs-133	1	0.0	5.9784e-06	300.0	end
sm-147	1	0.0	4.7018e-07	300.0	end
sm-149	1	0.0	1.2328e-07	300.0	end
sm-150	1	0.0	8.8301e-07	300.0	end
sm-151	1	0.0	2.3324e-07	300.0	end
sm-152	1	0.0	4.2030e-07	300.0	end
nd-143	1	0.0	5.0905e-06	300.0	end
nd-145	1	0.0	3.3973e-06	300.0	end
eu-153	1	0.0	1.8745e-07	300.0	end
gd-155	1	0.0	4.2592e-09	300.0	end
***** fuel region 2&8 *****					
u-234	2	0.0	7.1073e-06	300.0	end
u-235	2	0.0	7.2820e-04	300.0	end
u-236	2	0.0	2.4671e-05	300.0	end
u-238	2	0.0	2.2191e-02	300.0	end
pu-238	2	0.0	2.2662e-08	300.0	end
pu-239	2	0.0	4.5703e-05	300.0	end
pu-240	2	0.0	3.2047e-06	300.0	end
pu-241	2	0.0	6.7465e-07	300.0	end
pu-242	2	0.0	1.2935e-08	300.0	end
am-241	2	0.0	3.5244e-08	300.0	end
am-243	2	0.0	3.2474e-12	300.0	end
np-237	2	0.0	7.2613e-07	300.0	end
o	2	0.0	4.6215e-02	300.0	end
mo-95	2	0.0	6.5196e-06	300.0	end
tc-99	2	0.0	6.4947e-06	300.0	end
ru-101	2	0.0	5.4795e-06	300.0	end
rh-103	2	0.0	3.5905e-06	300.0	end
ag-109	2	0.0	1.7303e-07	300.0	end
cs-133	2	0.0	7.1063e-06	300.0	end
sm-147	2	0.0	5.6264e-07	300.0	end
sm-149	2	0.0	1.2673e-07	300.0	end
sm-150	2	0.0	1.0822e-06	300.0	end
sm-151	2	0.0	2.5674e-07	300.0	end
sm-152	2	0.0	5.2286e-07	300.0	end
nd-143	2	0.0	6.0185e-06	300.0	end
nd-145	2	0.0	4.0303e-06	300.0	end
eu-153	2	0.0	2.3222e-07	300.0	end
gd-155	2	0.0	5.0199e-09	300.0	end
***** fuel region 3&7 *****					
u-234	3	0.0	6.9819e-06	300.0	end
u-235	3	0.0	6.9597e-04	300.0	end
u-236	3	0.0	3.0535e-05	300.0	end
u-238	3	0.0	2.2170e-02	300.0	end
pu-238	3	0.0	4.5152e-08	300.0	end
pu-239	3	0.0	5.6731e-05	300.0	end
pu-240	3	0.0	4.9284e-06	300.0	end
pu-241	3	0.0	1.3069e-06	300.0	end
pu-242	3	0.0	4.6519e-08	300.0	end
am-241	3	0.0	7.0854e-08	300.0	end
am-243	3	0.0	1.1026e-09	300.0	end
np-237	3	0.0	1.0344e-06	300.0	end
o	3	0.0	4.6215e-02	300.0	end
mo-95	3	0.0	8.5164e-06	300.0	end
tc-99	3	0.0	8.4682e-06	300.0	end

ru-101	3	0.0	7.1866e-06	300.0	end
rh-103	3	0.0	4.7355e-06	300.0	end
ag-109	3	0.0	2.6703e-07	300.0	end
cs-133	3	0.0	9.2639e-06	300.0	end
sn-147	3	0.0	7.4136e-07	300.0	end
sn-149	3	0.0	1.3232e-07	300.0	end
sn-150	3	0.0	1.4931e-06	300.0	end
sn-151	3	0.0	2.9689e-07	300.0	end
sn-152	3	0.0	7.2402e-07	300.0	end
nd-143	3	0.0	7.7663e-06	300.0	end
nd-145	3	0.0	5.2361e-06	300.0	end
eu-153	3	0.0	3.2705e-07	300.0	end
gd-155	3	0.0	6.5311e-09	300.0	end
***** fuel region 4&6 *****					
u-234	4	0.0	6.8042e-06	300.0	end
u-235	4	0.0	6.5206e-04	300.0	end
u-236	4	0.0	3.8459e-05	300.0	end
u-238	4	0.0	2.2141e-02	300.0	end
pu-238	4	0.0	9.4031e-08	300.0	end
pu-239	4	0.0	7.0502e-05	300.0	end
pu-240	4	0.0	7.6945e-06	300.0	end
pu-241	4	0.0	2.5613e-06	300.0	end
pu-242	4	0.0	1.3880e-07	300.0	end
am-241	4	0.0	1.4450e-07	300.0	end
am-243	4	0.0	6.0436e-09	300.0	end
np-237	4	0.0	1.5325e-06	300.0	end
o	4	0.0	4.6215e-02	300.0	end
mo-95	4	0.0	1.1341e-05	300.0	end
tc-99	4	0.0	1.1253e-05	300.0	end
ru-101	4	0.0	9.6322e-06	300.0	end
rh-103	4	0.0	6.3753e-06	300.0	end
ag-109	4	0.0	4.2798e-07	300.0	end
cs-133	4	0.0	1.2312e-05	300.0	end
sn-147	4	0.0	9.9805e-07	300.0	end
sn-149	4	0.0	1.3783e-07	300.0	end
sn-150	4	0.0	2.1420e-06	300.0	end
sn-151	4	0.0	3.4245e-07	300.0	end
sn-152	4	0.0	1.0196e-06	300.0	end
nd-143	4	0.0	1.0171e-05	300.0	end
nd-145	4	0.0	6.9273e-06	300.0	end
eu-153	4	0.0	4.8217e-07	300.0	end
gd-155	4	0.0	8.7956e-09	300.0	end
***** fuel region 5 *****					
u-234	5	0.0	6.4825e-06	300.0	end
u-235	5	0.0	5.7794e-04	300.0	end
u-236	5	0.0	5.1643e-05	300.0	end
u-238	5	0.0	2.2086e-02	300.0	end
pu-238	5	0.0	2.3783e-07	300.0	end
pu-239	5	0.0	9.0069e-05	300.0	end
pu-240	5	0.0	1.3567e-05	300.0	end
pu-241	5	0.0	5.8526e-06	300.0	end
pu-242	5	0.0	4.5786e-07	300.0	end
am-241	5	0.0	3.4621e-07	300.0	end
am-243	5	0.0	2.7360e-08	300.0	end
np-237	5	0.0	2.6147e-06	300.0	end
o	5	0.0	4.6215e-02	300.0	end
mo-95	5	0.0	1.6430e-05	300.0	end
tc-99	5	0.0	1.6254e-05	300.0	end
ru-101	5	0.0	1.4134e-05	300.0	end
rh-103	5	0.0	9.3808e-06	300.0	end
ag-109	5	0.0	7.9998e-07	300.0	end
cs-133	5	0.0	1.7790e-05	300.0	end
sn-147	5	0.0	1.4711e-06	300.0	end
sn-149	5	0.0	1.4238e-07	300.0	end
sn-150	5	0.0	3.4955e-06	300.0	end
sn-151	5	0.0	3.9505e-07	300.0	end
sn-152	5	0.0	1.5804e-06	300.0	end

```

nd-143 5 0.0 1.4304e-05 300.0 end
nd-145 5 0.0 9.9329e-06 300.0 end
eu-153 5 0.0 8.2474e-07 300.0 end
gd-155 5 0.0 1.3371e-08 300.0 end
***** clad *****
cr 6 0.0 7.5891e-05 300.0 end
fe 6 0.0 1.4838e-04 300.0 end
xr 6 0.0 4.2982e-02 300.0 end
***** light water *****
h 7 0.0 6.6621e-02 300.0 end
o 7 0.0 3.3310e-02 300.0 end
end comp
squarepitch 1.33 0.824 5 7 0.95 6 end
more data
res=1 cylinder .412 dan(1)=2.15273e-01
res=2 cylinder .412 dan(2)=2.15273e-01
res=3 cylinder .412 dan(3)=2.15273e-01
res=4 cylinder .412 dan(4)=2.15273e-01
end more
keno-v.a input : case23
read param tme=120.0 gen=210 npg=500 nsk=10
      flx=yes amc=yes fdn=yes
end param
read geom
unit 1
cylinder 1 1 0.412 5.0 -0.0
cylinder 5 1 0.475 5.0 -0.0
cuboid 7 1 4p0.665 5.0 -0.0
unit 2
cylinder 2 1 0.412 5.0 -0.0
cylinder 6 1 0.475 5.0 -0.0
cuboid 7 1 4p0.665 5.0 -0.0
unit 3
cylinder 3 1 0.412 10.0 -0.0
cylinder 6 1 0.475 10.0 -0.0
cuboid 7 1 4p0.665 10.0 -0.0
unit 4
cylinder 4 1 0.412 20.0 -0.0
cylinder 6 1 0.475 20.0 -0.0
cuboid 7 1 4p0.665 20.0 -0.0
unit 5
cylinder 5 1 0.412 285.7 -0.0
cylinder 6 1 0.475 285.7 -0.0
cuboid 7 1 4p0.665 285.7 -0.0
unit 6
cylinder 6 1 0.475 1.75 -0.0
cuboid 7 1 4p0.665 1.75 -0.0
global unit 99
array 1 2*-0.665 -0.0
cuboid 7 1 4p0.665 399.2 -30.0
end geom
read array
ara=1 nx=1 ny=1 nz=11 fill
      6 1 2 3 4 5 4 3 2 1 6 end fill
end array
read bounds
+xy=mirror
-xy=mirror
+z=vacuum
-z=vacuum
end bounds
end data
end

```

C.1.2 CSASI - WAX - KENO V.a**(1) CSASI**

```
=csasi
oecd/nea criticarity benchmark pwr spent fuel - case02
27burnuplib latticecell
***** fuel region 1&9 *****
u-234 1 0.0 7.1727e-06 300.0 end
u-235 1 0.0 7.4542e-04 300.0 end
u-236 1 0.0 2.1526e-05 300.0 end
u-238 1 0.0 2.2201e-02 300.0 end
pu-238 1 0.0 1.4782e-08 300.0 end
pu-239 1 0.0 3.9529e-05 300.0 end
pu-240 1 0.0 2.3787e-06 300.0 end
pu-241 1 0.0 4.2604e-07 300.0 end
pu-242 1 0.0 5.5378e-09 300.0 end
am-241 1 0.0 2.1921e-08 300.0 end
am-243 1 0.0 1.2915e-12 300.0 end
np-237 1 0.0 5.7921e-07 300.0 end
o 1 0.0 4.6215e-02 300.0 end
mo-95 1 0.0 5.4768e-06 300.0 end
tc-99 1 0.0 5.4625e-06 300.0 end
ru-101 1 0.0 4.5948e-06 300.0 end
rh-103 1 0.0 2.9969e-06 300.0 end
ag-109 1 0.0 1.3026e-07 300.0 end
cs-133 1 0.0 5.9784e-06 300.0 end
sm-147 1 0.0 4.7018e-07 300.0 end
sm-149 1 0.0 1.2328e-07 300.0 end
sm-150 1 0.0 8.8301e-07 300.0 end
sm-151 1 0.0 2.3324e-07 300.0 end
sm-152 1 0.0 4.2030e-07 300.0 end
nd-143 1 0.0 5.0905e-06 300.0 end
nd-145 1 0.0 3.3973e-06 300.0 end
eu-153 1 0.0 1.8745e-07 300.0 end
gd-155 1 0.0 4.2592e-09 300.0 end
***** clad *****
cr 2 0.0 7.5891e-05 300.0 end
fe 2 0.0 1.4838e-04 300.0 end
zr 2 0.0 4.2982e-02 300.0 end
***** light water *****
h 3 0.0 6.6621e-02 300.0 end
o 3 0.0 3.3310e-02 300.0 end
end comp
squarepitch 1.33 0.824 1 3 0.95 2 end
end
```

(2) WAX

```
=wax
0$$ 4 37
1$$ 5 1t
2$$ 33 3 2t
3$$ 1 2 3
4$$ 1 2 3 3t
2$$ 34 3 2t
3$$ 1 2 3
4$$ 4 5 6 3t
2$$ 35 3 2t
3$$ 1 2 3
4$$ 7 8 9 3t
2$$ 36 3 2t
3$$ 1 2 3
4$$ 10 11 12 3t
2$$ 37 5 2t
```

```

3$ 1 2 3 4 5
4$ 13 14 15 16 17 3t
end

```

(3) KENO V.a

```

=kenova
oecd/nea criticarity benchmark pwr spent fuel
read param tme=120.0 gen=210 npg=500 nsk=10
          flx=yes amc=yes fdn=yes lib=4
end param
read geom
unit 1
cylinder 1 1 0.415 5.0 -0.0
cylinder 2 1 0.475 5.0 -0.0
cuboid   3 1 4p0.665 5.0 -0.0
unit 2
cylinder 4 1 0.415 5.0 -0.0
cylinder 5 1 0.475 5.0 -0.0
cuboid   6 1 4p0.665 5.0 -0.0
unit 3
cylinder 7 1 0.415 10.0 -0.0
cylinder 8 1 0.475 10.0 -0.0
cuboid   9 1 4p0.665 10.0 -0.0
unit 4
cylinder 10 1 0.415 20.0 -0.0
cylinder 11 1 0.475 20.0 -0.0
cuboid   12 1 4p0.665 20.0 -0.0
unit 5
cylinder 13 1 0.415 285.7 -0.0
cylinder 14 1 0.475 285.7 -0.0
cuboid   15 1 4p0.665 285.7 -0.0
unit 6
cylinder 10 1 0.415 20.0 -0.0
cylinder 11 1 0.475 20.0 -0.0
cuboid   12 1 4p0.665 20.0 -0.0
unit 7
cylinder 7 1 0.415 10.0 -0.0
cylinder 8 1 0.475 10.0 -0.0
cuboid   9 1 4p0.665 10.0 -0.0
unit 8
cylinder 4 1 0.415 5.0 -0.0
cylinder 5 1 0.475 5.0 -0.0
cuboid   6 1 4p0.665 5.0 -0.0
unit 9
cylinder 1 1 0.415 5.0 -0.0
cylinder 2 1 0.475 5.0 -0.0
cuboid   3 1 4p0.665 5.0 -0.0
unit 10
cylinder 16 1 0.475 1.75 -0.0
cuboid   17 1 4p0.665 1.75 -0.0
global unit 99
array 1 2*-0.665 -0.0
cuboid 17 1 4p0.665 399.2 -30.0
end geom
read array
  ara=1  nrx=1  nry=1  nrz=11  fill
  10 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10  end fill
end array
read bounds
  +xy=mirror
  -xy=mirror
  +zb=vacuum
  -zb=vacuum
end bounds

```

```

read mixt
  mix=1 1 1.0      mix=2 2 1.0      mix=3 3 1.0
  mix=4 4 1.0      mix=5 5 1.0      mix=6 6 1.0
  mix=7 7 1.0      mix=8 8 1.0      mix=9 9 1.0
  mix=10 10 1.0     mix=11 11 1.0     mix=12 12 1.0
  mix=13 13 1.0     mix=14 14 1.0     mix=15 15 1.0
  mix=16 16 1.0     mix=17 17 1.0
end mixt
end data
end

```

C.1.3 CSASIX - WAX - KENO V.a

(1) CSASIX

```

=csasix
oecd/nea criticarity benchmark pwr spent fuel - case04
27burnplib latticecell
***** fuel region 1&9 *****
u-234 i 0.0 7.1727e-06 300.0 end
u-235 i 0.0 7.4542e-04 300.0 end
u-236 i 0.0 2.1526e-05 300.0 end
u-238 i 0.0 2.2201e-02 300.0 end
pu-238 i 0.0 1.4782e-08 300.0 end
pu-239 i 0.0 3.9529e-05 300.0 end
pu-240 i 0.0 2.3787e-06 300.0 end
pu-241 i 0.0 4.2604e-07 300.0 end
pu-242 i 0.0 5.5378e-09 300.0 end
am-241 i 0.0 2.1921e-08 300.0 end
am-243 i 0.0 1.2915e-12 300.0 end
np-237 i 0.0 5.7921e-07 300.0 end
o 1 0.0 4.6215e-02 300.0 end
***** clad *****
cr 2 0.0 7.5891e-05 300.0 end
fe 2 0.0 1.4838e-04 300.0 end
zz 2 0.0 4.2982e-02 300.0 end
***** light water *****
h 3 0.0 6.6621e-02 300.0 end
o 3 0.0 3.3310e-02 300.0 end
end comp
squarepitch 1.33 0.824 1 3 0.95 2 end
end

```

(2) WAX

```

=wax
0$$ 4 37
1$$ 5      1t
2$$ 33 1    2t
3$$ 500
4$$ 1      3t
2$$ 34 1    2t
3$$ 500
4$$ 2      3t
2$$ 35 1    2t
3$$ 500
4$$ 3      3t
2$$ 36 1    2t
3$$ 500
4$$ 4      3t
2$$ 37 3    2t
3$$ 500 4 5
4$$ 5 6 7    3t
end

```

(3) KENO V.a

```
=kenova
oecd/nea criticarity benchmark pwr spent fuel
read param tme=120.0 gen=210 npg=500 nsk=10
      flx=yes amx=yes fdn=yes lib=4
end param
read geom
unit 1
cuboid 1 1 4p0.665 5.0 -0.0
unit 2
cuboid 2 1 4p0.665 5.0 -0.0
unit 3
cuboid 3 1 4p0.665 10.0 -0.0
unit 4
cuboid 4 1 4p0.665 20.0 -0.0
unit 5
cuboid 5 1 4p0.665 285.7 -0.0
unit 6
cuboid 4 1 4p0.665 20.0 -0.0
unit 7
cuboid 3 1 4p0.665 10.0 -0.0
unit 8
cuboid 2 1 4p0.665 5.0 -0.0
unit 9
cuboid 1 1 4p0.665 5.0 -0.0
unit 10
cylinder 6 1 0.475 1.75 -0.0
cuboid 7 1 4p0.665 1.75 -0.0
global unit 99
array 1 2*-0.665 -0.0
cuboid 7 1 4p0.665 399.2 -30.0
end geom
read array
ara=1 nx=1 ny=1 nz=11 fill
  10 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 end fill
end array
read bounds
+xy=mirror
-xy=mirror
+z=vacuum
-z=vacuum
end bounds
read mixt
mix=1 1 1.0      mix=2 2 1.0      mix=3 3 1.0
mix=4 4 1.0      mix=5 5 1.0      mix=6 6 1.0
mix=7 7 1.0
end mixt
end data
end
```

C.2 Phase II-Bの計算に用いた入力データ

(1) CSASIX

```
=csasix
oecd/nea benchmark : 4.5wt%, 30gwd, 5year cooling
27burnuplib latticecell
***** fuel region 1&9 *****
u-234 1 0.0 7.2738e-06 300.0 end
u-235 1 0.0 7.4705e-04 300.0 end
u-236 1 0.0 6.3201e-05 300.0 end
u-238 1 0.0 2.1871e-02 300.0 end
pu-238 1 0.0 2.7907e-07 300.0 end
pu-239 1 0.0 9.3222e-05 300.0 end
pu-240 1 0.0 1.2872e-05 300.0 end
pu-241 1 0.0 5.1443e-06 300.0 end
pu-242 1 0.0 4.2866e-07 300.0 end
am-241 1 0.0 1.4636e-06 300.0 end
am-243 1 0.0 2.9083e-08 300.0 end
np-237 1 0.0 3.1096e-06 300.0 end
o 1 0.0 4.6219e-02 300.0 end
mo-95 1 0.0 1.8707e-05 300.0 end
tc-99 1 0.0 1.7929e-05 300.0 end
ru-101 1 0.0 1.5737e-05 300.0 end
rh-103 1 0.0 1.0201e-05 300.0 end
ag-109 1 0.0 7.9138e-07 300.0 end
cs-133 1 0.0 1.9651e-05 300.0 end
sm-147 1 0.0 4.2159e-06 300.0 end
sm-149 1 0.0 1.7444e-07 300.0 end
sm-150 1 0.0 3.7319e-06 300.0 end
sm-151 1 0.0 4.6240e-07 300.0 end
sm-152 1 0.0 1.6949e-06 300.0 end
nd-143 1 0.0 1.6076e-05 300.0 end
nd-145 1 0.0 1.1161e-05 300.0 end
eu-153 1 0.0 9.0062e-07 300.0 end
gd-155 1 0.0 5.4303e-08 300.0 end
***** clad *****
cr 2 0.0 7.5891e-05 300.0 end
fe 2 0.0 1.4838e-04 300.0 end
zr 2 0.0 4.2982e-02 300.0 end
***** light water *****
h 3 0.0 6.662e-02 300.0 end
o 3 0.0 3.331e-02 300.0 end
end comp
squarepitch 1.25984 0.8192 1 3 0.95 2 0.8357 0 end
end
```

(2) WAX

```
=WAX
0$$ 4 37
1$$ 5 1t
2$$ 33 1 2t
3$$ 500
4$$ 1 3t
2$$ 34 1 2t
3$$ 500
4$$ 2 3t
2$$ 35 1 2t
3$$ 500
4$$ 3 3t
2$$ 36 1 2t
3$$ 500
4$$ 4 3t
2$$ 37 6 2t
```

```

3$$ 500 4 5 6 7 8
4$$ 5 11 12 13 14 15 3t
end

```

(3) KENO V.a

```

=kenova
oecd/nea benchmark : spent fuel cask criticality data
read param tme=1200.0 gen=110 npg=5000 nsk=10
               flx=yes lib=4 fdm=yes
end param
read geom
unit 1
cuboid 12 1 4p10.70864 10.0 -0.0
cuboid 15 1 4p10.70864 10.96847234 -0.0
cuboid 11 1 4p10.70864 11.75 -0.0
cuboid 1 1 4p10.70864 16.75 -0.0
cuboid 2 1 4p10.70864 21.75 -0.0
cuboid 3 1 4p10.70864 31.75 -0.0
cuboid 4 1 4p10.70864 51.75 -0.0
cuboid 5 1 4p10.70864 337.45 -0.0
cuboid 4 1 4p10.70864 357.45 -0.0
cuboid 3 1 4p10.70864 367.45 -0.0
cuboid 2 1 4p10.70864 372.45 -0.0
cuboid 1 1 4p10.70864 377.45 -0.0
cuboid 11 1 4p10.70864 378.2315277 -0.0
cuboid 15 1 4p10.70864 379.2 -0.0
cuboid 12 1 4p10.70864 409.2 -0.0
cuboid 15 1 4p11.0 416.2 -0.0
unit 2
cuboid 14 1 4p0.5 416.2 -0.0
unit 3
cuboid 14 1 2p11.0 2p0.5 416.2 -0.0
unit 4
cuboid 14 1 2p0.5 2p11.0 416.2 -0.0
unit 5 array 1 0.0 0.0 0.0
unit 6 array 2 0.0 0.0 0.0
unit 7 array 4 0.0 0.0 -208.1
unit 8 array 5 0.0 0.0 -208.1
global unit 10
array 3 -35.0 -58.0 -208.1
cylinder 15 1 68.0 2p208.1
hole 7 -58.0 -35.0 0.0
hole 8 35.0 -35.0 0.0
cylinder 13 1 98.0 2p238.1
end geom
read array
ara=1 nxz=7 nyz=1 nz=1 fill
  2 3 2 3 2 3 2 end fill
ara=2 nxz=7 nyz=1 nz=1 fill
  4 1 4 1 4 1 4 end fill
ara=3 nxz=1 ny=11 nz=1 fill
  5 6 5 6 5 6 5 6 5 end fill
ara=4 nxz=2 ny=7 nz=1 fill
  2 3 4 1 2 3 4 1 2 3 4 1 2 3 end fill
ara=5 nxz=2 ny=7 nz=1 fill
  3 2 1 4 3 2 1 4 3 2 1 4 3 2 end fill
end array
read mixt
mix=1 1 1.0      mix=2 2 1.0      mix=3 3 1.0
mix=4 4 1.0      mix=5 5 1.0      mix=13 13 1.0
mix=11 11 1.0    mix=12 12 1.0    mix=15 15 1.0
mix=14 14 1.0
end mixt
end data
end

```

D. ベンチマーク解析の課題

D.1 Phase II-Aの課題

October 21, 1993 19:51

NEA/NSC/DOC(93)15
Revision October 1993

Burnup Credit Criticality Benchmark

Phase II-A Effect of Axial Burnup Profile

(Infinite fuel pin array in water)

Makoto TAKANO*, Michael BRADY and Alan SANTAMARINA
JAERI Sandia National Lab. CEA Cadarache

OCTOBER 1993

*E-mail address; Internet takano@s4a.tokai.jaeri.go.jp
 J3520@JPNJAERI
Bitnet (81)-292-82-6479
Telefax

October 21, 1993 19:51

1. Introduction

For the criticality calculation of a spent fuel system, burnup profile of the spent fuel needs to be considered. The effect of the axial burnup profile on criticality will be studied in Phase II of the Burnup Credit Criticality Benchmark. The Phase II will be divided by two programs, namely, Phase II-A and Phase II-B. In Phase II-A, the criticality calculation of an infinite array of PWR spent fuel rods is performed to grasp the effect of axial burnup profile (end effect) on criticality. In Phase II-B, the criticality of a spent fuel cask will be evaluated.

It is considered that the end effect is a function of the initial fuel enrichment, the burnup and the cooling time. The selection of these parameter values were discussed at meetings in Paris and at ORNL. The selected parameters are 10, 30 GWd/t burnups for 3.8 w/o initial fuel enrichment, 30, 50 GWd/t burnups for 4.5 w/o initial fuel enrichment, 1 and 5 years of cooling times. Further, the effect of fission products on the end effect is also investigated. The multiplication factors of spent fuel systems with these combinations of parameters will be obtained by all participants using their code and data. Here, the end effect is measured by the difference of multiplication factors between the cases with and without burnup distribution.

It is expected that the results will be helpful to know the degree of importance of the end effect in the burnup credit. The results can be utilized, for example, to obtain a unique D_k value of the end effect, by which the criticality of the spent fuel system can be evaluated by disregarding the burnup profile but employing the average burnup over the rod then simply adding the D_k value.

The burnup profiles of spent fuels at 10, 30, 40 and 50 GWd/t have been measured and supplied for the benchmark by Dr. A. Santamarina and Dr. P. Albareda. The profiles are digitized to obtain region-wise burnup values for the benchmark problem. In total, 60 sets of atomic number densities have been prepared by Dr. M. Brady (see Appendix A).

October 21, 1993 19:51

2. Geometry Data

The geometry of the fuel pin cell is defined by the following data. The cell is used to obtain the multiplication factor of the infinite fuel pin array.

A. Radial dimensions (see Fig. 1)

Fuel Cell Pitch	1.33 cm
Fuel Radius	0.412 cm
Cladding Inner Radius	0.412 cm
Outer Radius	0.475 cm
Radial Boundary Condition	Reflective

B. Axial dimensions (see Fig. 2)

Fuel length	365.7 cm
End plug(Each side)	1.75 cm
Water thickness(Each side)	30.0 cm
Axial Boundary Condition	Vacuum

C. Axial Fuel Modeling

There are 9 regions from top to bottom of the fuel.

Region 1	(Fuel top) 5 cm
Region 2	5 cm
Region 3	10 cm
Region 4	20 cm
Region 5 (Central region)	285.7 cm
Region 6	20 cm
Region 7	10 cm
Region 8	5 cm
Region 9	(Fuel bottom) 5 cm

October 21, 1993 19:51

3. Material Data (at 300 K)**A. Fuel**

**Fresh Fuel (3.6 w/o)
(for Case 1 in Table 1)**

Number density (atoms/barn*cm)	
U-234	7.5174E-06
U-235	8.4209E-04
U-236	3.7268E-06
U-238	2.2254E-02
O	4.6215E-02

**Fresh Fuel (4.5 w/o)
(for Case 2 in Table 1)**

Number density (atoms/barn*cm)	
U-234	8.4100E-06
U-235	1.0526E-03
U-236	6.4752E-06
U-238	2.2042E-02
O	4.6219E-02

The number densities of spent fuels are given in Appendix A.

B. Cladding and End plug

Zircalloy-4

Number density (atoms/barn*cm)	
Cr	7.5891E-05
Fe	1.4838E-04
Zr	4.2982E-02

C Moderator

Water

Number density (atoms/barn*cm)	
H	6.6621E-02
O	3.3310E-02

4. Parameters and Case Numbers

In total 26 cases of multiplication factors are requested to be evaluated. Parameters and case numbers for reference are tabulated in Table 1. For the cases of No FP, the following fission products should be omitted from the nuclides listed in Appendix A.

Mo-95, Tc-99, Ru-101, Rh-103, Ag-109, Cs-133, Sm-147, Sm-149, Sm-150, Sm-151, Sm-152, Nd-143, Nd-145, Eu-153, Gd-155

For Cases 2, 6 and 19, the fission densities of Region 1 to 5 are also requested. The fission density is defined as;

October 21, 1993 19:51

Fission Density = $\int \sum_f \phi dE$ (per unit fuel volume),
 and the sum of fission densities of 5 regions should be normalized to unity, i.e.,

$$\sum_{i=1-5}^{\text{Region}} \text{Fission Density of Region } i = 1.0.$$

5. Requested Information and Results

Please forward the results by an electronic mail to Dr. Takano at JAERI. The e-mail is the most convenient way for us to receive your data. Please avoid sending the results by a diskette. In Phase-IA, we had many problems in handling diskettes recorded by various PCs since we have no full IBM PC compatible in our laboratory. However, the results recorded as a text file on a 3.5 inch HD diskette of Macintosh or MSDOS may be also accepted.

Line No.	Contents
1	Date
2	Institute
3	Contact Person
4	E-mail address or Telefax Number of the contact person
5	Computer Code
6 to 31	Multiplication Factors of Cases 1 to 26
32 to 36	Fission densities from Region 1 to 5 of Case 2
37 to 41	Fission densities from Region 1 to 5 of Case 6
42 to 46	Fission densities from Region 1 to 5 of Case 19
47-	Please describe your analysis environment here. It will be included in Phase IIA report. The description should include: Institute and Country, Participants, Neutron data library, Neutron data processing code or method,

October 21, 1993 19:51

Neutron energy groups,
Description of your code system,
Geometry modeling (3-D , 2-D etc.),
Omitted nuclides if any.
Employed convergence limit or statistical errors for eigenvalues
Other related information.

6. Schedule

Mid October	Distribution of the specification
Mid January	Results should be sent to JAERI
Mid March	Distribution of draft report Phase-IIA
End March	Comments to draft report Phase IIA
End April	Final draft of Phase IIA for NSC

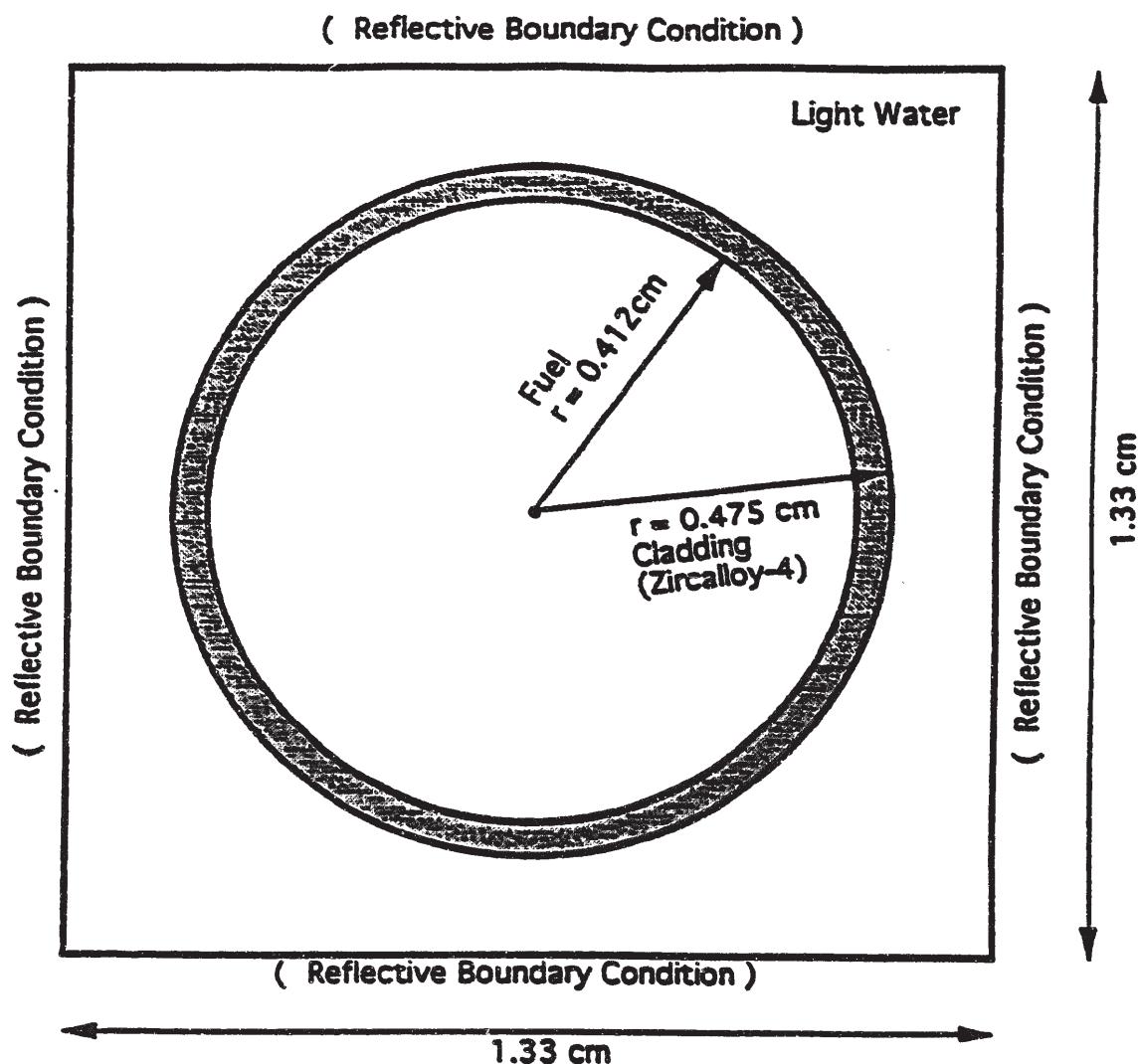


Fig. 1 Radial Dimensions

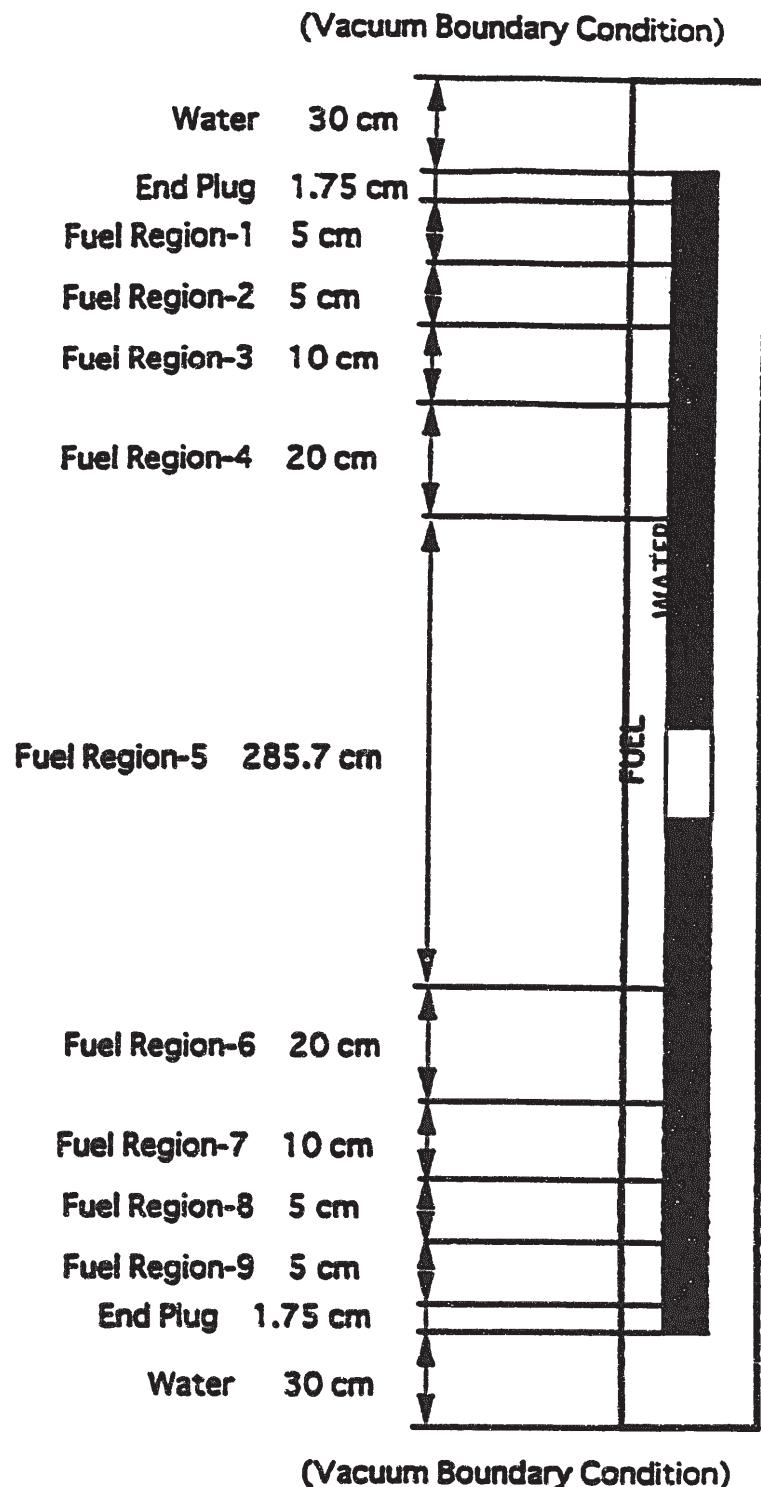


Fig. 2 Axial Dimensions

Table 1 Parameters and Case Numbers

Cooling Time	F.P.s	Burnup Profile	Initial Fuel Enrichment						
			3.6 w/o			4.5 w/o			
			Burnup		Burnup				
			Fresh	10 GWd/t	30 GWd/t	40 GWd/t	Fresh	30 GWd/t	
			CASE NUMBERS						
1 year	Yes	Yes	1	2	6	N/A	14.	15	19
		No		3	7	N/A		16	20
	No	Yes		4	8	N/A		17	21
		No		5	9	N/A		18	22
5 years	Yes	Yes		N/A	10	N/A		N/A	23
		No		N/A	11	N/A		N/A	24
	No	Yes		N/A	12	N/A		N/A	25
		No		N/A	13	N/A		N/A	26

The multiplication factors of 26 cases and related information should be sent to JAERI by 15 January 1994.

Fission Densities of Regions 1 to 5 for Cases 2, 6 and 19 are also requested.

Table 2 Parameters and Data Set Numbers of Appendix A for Analysis

Cooling Time	F.P.s	Burnup Profile	Initial Fuel Enrichment						
			3.6 w/o Burnup				4.5 w/o Burnup		
			Fresh	10 GWd/t	30 GWd/t	40 GWd/t	Fresh	30 GWd/t	50 GWd/t
			Data Set Numbers for Atomic Number Densities						
1 year	Yes	Yes	See Chap.3	11,13,15,17,19	21,23,25,27,29	N/A	See Chap.3	41,43,45,47,49	51,53,55,57,59
		No		1	3	N/A		7	9
		Yes		11,13,15,17,19	21,23,25,27,29	N/A		41,43,45,47,49	51,53,55,57,59
		No		1	3	N/A		7	9
5 years	Yes	Yes		N/A	22,24,26,28,30	N/A		N/A	52,54,56,58,60
		No		N/A	4	N/A		N/A	10
		Yes		N/A	22,24,26,28,30	N/A		N/A	52,54,56,58,60
		No		N/A	4	N/A		N/A	10

Please DO NOT MIXUP Case Numbers and Data Set Numbers.
(Case Numbers are NOT equal to Data Set Numbers.)

For cases of No F.P.s, omit F.P. nuclides as described in Chap.4.

October 21, 1993 19:51

Appendix A

Atomic Number Densities of Spent Fuels

Prepared by Dr. M. Brady

October 21, 1993 19:51

**INFORMATION REGARDING THE CALCULATION
OF ORIGEN-S/SAS2H ISOTOPICS TO GENERATE
THE SPENT FUEL ATOMIC NUMBER DENSITIES FOR PHASE II A
PWR assembly design description for tabulated cases**

Parameter	Data
Assembly general data	
Designer	Westinghouse
Lattice	17 x 17
Water temperature,	570 K
Water density, av, g-cm ⁻³	0.7295
Soluble boron cycle av, ppm (wt)	550
Number of fuel rods	264
Number of guide tubes	24
Number of instrument tubes	1
Fuel rod data	
Type fuel pellet UO ₂	
Pellet stack density, t ID	94.5
Rod pitch, cm	1.25984
Rod OD, cm	0.94966
Rod ID, cm	0.83566
Pellet diameter, cm	0.81915
Active fuel length, cm	365.8
Effective fuel temperature, K	811
Clad temperature, K	620
Clad material	Zircalloy
Guide tube data	
Inner radius, cm	0.5715
Outer radius, cm	0.61214
Tube material	Zircalloy

October 21, 1993 19:51

Operating History Data and Fuel Isotopic Content of PWR Cases**Specific Power:** 40 kW/kgU**Case Descriptions:****Case 1 - 4 cycle depletion of 3.6 wt% U-235 fuel assembly to 14 GWd/MTU**

	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4
Burnup (GWd/MTU)	3	3	4	4
Uptime (Days)	75	75	100	100
Downtime (Days)	0	0	0	62.5

Case 2 - 5 cycle depletion of 3.6 wt% U-235 fuel assembly to 50 GWd/MTU

Uniform cycles with the following cycle data:

Burnup (GWd/MTU)	10
Uptime (Days)	250
Downtime (Days)	62.5

Case 3 - 6 cycle depletion of 4.5 wt% U-235 fuel assembly to 60 GWd/MTU

Uniform cycles with the following cycle data:

Burnup (GWd/MTU)	10
Uptime (Days)	250
Downtime (Days)	62.5

Uranium Content (wt%)

3.6 wt% U-235		4.5 wt% U-235	
U-234	0.032	U-234	0.0358
U-235	3.600	U-235	4.5000
U-236	0.016	U-236	0.0278
U-238	96.352	U-238	95.4364

October 21, 1993 19:51

Notes on how the nuclide concentrations were obtained:

The nuclide concentrations for the 3.6 wt% 10 GWd/MTU assembly were obtained from Case 1. The concentrations for the 3.6 wt% 30 and 40 GWd/MTU assemblies were obtained from Case 2. The concentrations for the 4.5 wt% 30 and 50 GWd/MTU assemblies were obtained from Case 3. The SAS2 multi-cycle depletions saved nuclide concentrations at the end of each cycle prior to downtime in a single dataset (e.g., the 4.5 wt% depletion saved concentrations at 10, 20, 30, 40, 50 and 60 GWd/MTU). A utility program then interpolated on the values saved at these burnups to obtain the nuclide concentrations at the specified burnups for each axial region and for the assembly average burnup. (Since the assembly average burnups are consistent with the burnups where concentrations were saved, these interpolations are trivial but convenient.) The interpolated concentrations were then input to ORIGEN-S, where they were decayed for 1 year and 5 year cooling times. The concentrations for each axial region of a fuel assembly are taken from a single SAS2 multi-cycle depletion by interpolating between different cycles in the depletion. The result of this method is that the nuclide concentrations for the lower burnup regions at the end of the assemblies are generated at the same specific power as the higher burnup region in the center of the assembly. In our judgment, the effects of this approximation on k-eff are minor. The assembly average nuclide concentrations are based on the assembly average burnup, not on a volume-weighted average of the axial region concentrations. The assembly average burnup is already volume-weighted, and this method is consistent with the way that concentrations would be generated for an axially uniform assembly average analysis.

Isotopics for Phase IIA	Data set No. 1 3.6wt%u235, 10gwd/mtu cooling time (yr)=1.0	Data set No. 2 3.6wt%u235, 10gwd/mtu cooling time (yr)=5.0	Data set No. 3 3.6wt%u235, 30gwd/mtu cooling time (yr)=1.0
*****	u-234 6.5794E-06	u-234 6.5852E-06	u-234 4.8804E-06
***	u-235 5.9967E-04	u-235 5.9968E-04	u-235 2.8377E-04
SOTOPICS FOR AVERAGE	u-236 4.7807E-05	u-236 4.7812E-05	u-236 9.9398E-05
BURNUP CASES	u-238 2.2103E-02	u-238 2.2103E-02	u-238 2.1759E-02
*****	pu-238 1.8519E-07	pu-238 1.8036E-07	pu-238 2.8704E-06
pu-239	8.4685E-05	8.4675E-05	pu-239 1.3551E-04
pu-240	1.1749E-05	pu-240 1.1744E-05	pu-240 4.2931E-05
pu-241	4.7672E-06	pu-241 3.9295E-06	pu-241 2.8085E-05
pu-242	3.3278E-07	pu-242 3.3278E-07	pu-242 7.4143E-06
am-241	2.7770E-07	am-241 1.1109E-06	am-241 2.1081E-06
am-243	1.7490E-08	am-243 1.7484E-08	am-243 1.3695E-06
np-237	2.2679E-06	np-237 2.2724E-06	np-237 1.0284E-05
mo-95	1.4902E-05	mo-95 1.5117E-05	mo-95 4.1124E-05
tc-99	1.4751E-05	tc-99 1.4751E-05	tc-99 4.0326E-05
ru-101	1.2768E-05	ru-101 1.2768E-05	ru-101 3.8144E-05
rh-103	8.4763E-06	rh-103 8.4798E-06	rh-103 2.3427E-05
ag-109	6.7934E-07	ag-109 6.7934E-07	ag-109 3.6406E-06
cs-133	1.6145E-05	cs-133 1.6145E-05	cs-133 4.3935E-05
sm-147	1.3283E-06	sm-147 3.4563E-06	sm-147 3.9475E-06
sm-149	1.4063E-07	sm-149 1.4063E-07	sm-149 1.7755E-07
sm-150	3.0773E-06	sm-150 3.0773E-06	sm-150 1.0241E-05
sm-151	3.8042E-07	sm-151 3.6888E-07	sm-151 5.9020E-07
sm-152	1.4113E-06	sm-152 1.4113E-06	sm-152 4.2236E-06
nd-143	1.3086E-05	nd-143 1.3086E-05	nd-143 3.0965E-05
nd-145	9.0337E-06	nd-145 9.0337E-06	nd-145 2.4165E-05
eu-153	7.1408E-07	eu-153 7.1408E-07	eu-153 3.3822E-06
gd-155	1.1869E-08	gd-155 4.3474E-08	gd-155 6.3853E-08
o	4.5215E-02	o 4.6215E-02	o 4.6215E-02

Data set No. 4 3.6wt%u235, 30gwd/mtu cooling time (yr)=5.0		Data set No. 5 3.6wt%u235, 40gwd/mtu cooling time (yr)=1.0		Data set No. 6 3.6wt%u235, 40gwd/mtu cooling time (yr)=5.0		Data set No. 7 4.5wt%u235, 30gwd/mtu cooling time (yr)=1.0	
u-234	4.9710E-06	u-234	4.1448E-06	u-234	4.3224E-06	u-234	5.7455E-06
u-235	2.8379E-04	u-235	1.8507E-04	u-235	1.8509E-04	u-235	4.3273E-04
u-236	9.9416E-05	u-236	1.1190E-04	u-236	1.1192E-04	u-236	1.1635E-04
u-238	2.1759E-02	u-238	2.1565E-02	u-238	2.1565E-02	u-238	2.1595E-02
pu-238	2.8294E-06	pu-238	5.6243E-06	pu-238	5.5437E-06	pu-238	2.6453E-06
pu-239	1.3550E-04	pu-239	1.4152E-04	pu-239	1.4151E-04	pu-239	1.4176E-04
pu-240	4.2953E-05	pu-240	5.5277E-05	pu-240	5.5398E-05	pu-240	3.8360E-05
pu-241	2.3150E-05	pu-241	3.6150E-05	pu-241	2.9797E-05	pu-241	2.5933E-05
pu-242	7.4143E-06	pu-242	1.3914E-05	pu-242	1.3914E-05	pu-242	5.3890E-06
am-241	7.0135E-06	am-241	2.8937E-06	am-241	9.2066E-06	am-241	1.9697E-06
am-243	1.3690E-06	am-243	3.4343E-06	am-243	3.4330E-06	am-243	9.1029E-07
np-237	1.0314E-05	np-237	1.4570E-05	np-237	1.4610E-05	np-237	1.0650E-05
mo-95	4.1322E-05	mo-95	5.2430E-05	mo-95	5.2617E-05	mo-95	4.2217E-05
tc-99	4.0326E-05	tc-99	5.1400E-05	tc-99	5.1399E-05	tc-99	4.0848E-05
ru-101	3.8144E-05	ru-101	5.0489E-05	ru-101	5.0489E-05	ru-101	3.8040E-05
rh-103	2.3431E-05	rh-103	2.9115E-05	rh-103	2.9120E-05	rh-103	2.3005E-05
ag-109	3.6406E-06	ag-109	5.3636E-06	ag-109	5.3636E-06	ag-109	3.0914E-06
cs-133	4.3935E-05	cs-133	5.5752E-05	cs-133	5.5752E-05	cs-133	4.4521E-05
sm-147	7.4917E-06	sm-147	4.8850E-06	sm-147	8.5053E-06	sm-147	4.1903E-06
sm-149	1.7755E-07	sm-149	1.7826E-07	sm-149	1.7826E-07	sm-149	1.9919E-07
sm-150	1.0241E-05	sm-150	1.3787E-05	sm-150	1.3787E-05	sm-150	1.0286E-05
sm-151	5.7230E-07	sm-151	6.6650E-07	sm-151	6.4628E-07	sm-151	6.7718E-07
sm-152	4.2238E-06	sm-152	5.3740E-06	sm-152	5.3742E-06	sm-152	4.1136E-06
nd-143	3.0965E-05	nd-143	3.6479E-05	nd-143	3.6479E-05	nd-143	3.3064E-05
nd-145	2.4165E-05	nd-145	3.0439E-05	nd-145	3.0439E-05	nd-145	2.4862E-05
eu-153	3.3822E-06	eu-153	4.8428E-06	eu-153	4.8429E-06	eu-153	3.1728E-06
gd-155	2.3399E-07	gd-155	1.0618E-07	gd-155	3.8944E-07	gd-155	5.8933E-08
o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6219E-02

Data set No. 8 4.5wt%u235, 30gwd/mtu cooling time (yr)=5.0		Data set No. 9 4.5wt%u235, 50gwd/mtu cooling time (yr)=1.0		Data set No. 10 4.5wt%u235, 50gwd/mtu cooling time (yr)=5.0	
u-234	5.0288E-06	u-234	4.2810E-06	u-234	4.5595E-06
u-235	4.3275E-04	u-235	2.0683E-04	u-235	2.0685E-04
u-236	1.1637E-04	u-236	1.4592E-04	u-236	1.4594E-04
u-238	2.1595E-02	u-238	2.1232E-02	u-238	2.1232E-02
pu-238	2.6014E-06	pu-238	8.8422E-06	pu-238	8.6947E-06
pu-239	1.4175E-04	pu-239	1.5300E-04	pu-239	1.5299E-04
pu-240	3.8357E-05	pu-240	6.1274E-05	pu-240	6.1487E-05
pu-241	2.1376E-05	pu-241	4.1552E-05	pu-241	3.4251E-05
pu-242	5.3890E-06	pu-242	1.7100E-05	pu-242	1.7100E-05
am-241	6.4992E-06	am-241	3.5503E-06	am-241	1.0805E-05
am-243	9.0995E-07	am-243	4.8107E-06	am-243	4.8089E-06
np-237	1.0670E-05	np-237	1.9862E-05	np-237	1.9909E-05
mo-95	4.2421E-05	mo-95	6.5040E-05	mo-95	6.5226E-05
tc-99	4.0847E-05	tc-99	6.2619E-05	tc-99	6.2619E-05
ru-101	3.8040E-05	ru-101	6.2443E-05	ru-101	6.2443E-05
rh-103	2.3009E-05	rh-103	3.3579E-05	rh-103	3.3584E-05
ag-109	3.0914E-06	ag-109	6.2520E-06	ag-109	6.2520E-06
cs-133	4.4521E-05	cs-133	6.7704E-05	cs-133	6.7704E-05
sm-147	7.9467E-06	sm-147	6.0644E-06	sm-147	9.9022E-06
sm-149	1.9919E-07	sm-149	1.9567E-07	sm-149	1.9567E-07
sm-150	1.0286E-05	sm-150	1.7185E-05	sm-150	1.7185E-05
sm-151	6.5663E-07	sm-151	8.1981E-07	sm-151	7.9494E-07
sm-152	4.1139E-06	sm-152	6.3275E-06	sm-152	6.3277E-06
nd-143	3.3064E-05	nd-143	4.4452E-05	nd-143	4.4452E-05
nd-145	2.4862E-05	nd-145	3.7428E-05	nd-145	3.7428E-05
eu-153	3.1728E-06	eu-153	5.9933E-06	eu-153	5.9934E-06
gd-155	2.1404E-07	gd-155	1.4556E-07	gd-155	5.3051E-07
o	4.6219E-02	o	4.6219E-02	o	4.6219E-02

Axially Dependent Isotopics

The axial regions are of
the following widths:

1 & 9 - 5 cm
1 & 8 - 5 cm
1 & 7 - 10 cm
1 & 6 - 20 cm
1 - 285.7 cm

The shapes of the burnup
profiles were taken from
data provided by A.
Iantamarina and P.
Albarede of C.E.N.
Cadarache. The case of an
average burnup of 10
GWd/MTU used the French
OC1 profile, the cases of
10 and 40 GWd/MTU used
the EOC3 profile and the 50
GWd/MTU case used
the EOC4 profile.

Data set No. 11
3.6wt%u235, 10gwd/mtu
cooling time (yr)=1.0
axial locations 1 & 9
(3.618 GWd/MTU)

Data set No. 12
3.6wt%u235, 10gwd/mtu
cooling time (yr)=5.0
axial locations 1 & 9
(3.618 GWd/MTU)

Data set No. 13
3.6wt%u235, 10gwd/mtu
cooling time (yr)=1.0
axial locations 2 & 8
(4.311 GWd/MTU)

u-234	7.1727E-06	u-234	7.1731E-06	u-234	7.1073E-06
u-235	7.4542E-04	u-235	7.4543E-04	u-235	7.2820E-04
u-236	2.1526E-05	u-236	2.1527E-05	u-236	2.4671E-05
u-238	2.2201E-02	u-238	2.2201E-02	u-238	2.2191E-02
pu-238	1.4782E-08	pu-238	1.4322E-08	pu-238	2.2662E-08
pu-239	3.9529E-05	pu-239	3.9524E-05	pu-239	4.5703E-05
pu-240	2.3787E-06	pu-240	2.3777E-06	pu-240	3.2047E-06
pu-241	4.2604E-07	pu-241	3.5118E-07	pu-241	6.7465E-07
pu-242	5.5378E-09	pu-242	5.5377E-09	pu-242	1.2935E-08
am-241	2.1921E-08	am-241	9.6399E-08	am-241	3.5244E-08
am-243	1.2915E-12	am-243	1.2910E-12	am-243	3.2474E-12
np-237	5.7921E-07	np-237	5.7959E-07	np-237	7.2613E-07
mo-95	5.4768E-06	mo-95	5.6240E-06	mo-95	6.5196E-06
tc-99	5.4625E-06	tc-99	5.4624E-06	tc-99	6.4947E-06
ru-101	4.5948E-06	ru-101	4.5948E-06	ru-101	5.4795E-06
rh-103	2.9969E-06	rh-103	2.9994E-06	rh-103	3.5905E-06
ag-109	1.3026E-07	ag-109	1.3026E-07	ag-109	1.7303E-07
cs-133	5.9784E-06	cs-133	5.9784E-06	cs-133	7.1063E-06
sm-147	4.7018E-07	sm-147	1.3987E-06	sm-147	5.6264E-07
sm-149	1.2328E-07	sm-149	1.2328E-07	sm-149	1.2673E-07
sm-150	8.8301E-07	sm-150	8.8301E-07	sm-150	1.0822E-06
sm-151	2.3324E-07	sm-151	2.2616E-07	sm-151	2.5674E-07
sm-152	4.2030E-07	sm-152	4.2031E-07	sm-152	5.2286E-07
nd-143	5.0905E-06	nd-143	5.0905E-06	nd-143	6.0185E-06
nd-145	3.3973E-06	nd-145	3.3973E-06	nd-145	4.0303E-06
eu-153	1.8745E-07	eu-153	1.8745E-07	eu-153	2.3222E-07
gd-155	4.2592E-09	gd-155	1.5670E-08	gd-155	5.0199E-09
o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02

Data set No. 14		Data set No. 15		Data set No. 16		Data set No. 17	
3.6wt&u235, 10gwd/mtu		3.6wt&u235, 10gwd/mtu		3.6wt&u235, 10gwd/mtu		3.6wt&u235, 10gwd/mtu	
cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0		cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0	
axial locations 2 & 8 (4.311 GWd/MTU)		axial locations 3 & 7 (5.647 GWd/MTU)		axial locations 3 & 7 (5.647 GWd/MTU)		axial locations 4 & 6 (7.558 GWd/MTU)	
u-234	7.1079E-06	u-234	6.9819E-06	u-234	6.9833E-06	u-234	6.8042E-06
u-235	7.2821E-04	u-235	6.9597E-04	u-235	6.9598E-04	u-235	6.5206E-04
u-236	2.4673E-05	u-236	3.0535E-05	u-236	3.0537E-05	u-236	3.8459E-05
u-238	2.2191E-02	u-238	2.2170E-02	u-238	2.2170E-02	u-238	2.2141E-02
pu-238	2.1957E-08	pu-238	4.5152E-08	pu-238	4.3819E-08	pu-238	9.4031E-08
pu-239	4.5698E-05	pu-239	5.6731E-05	pu-239	5.6724E-05	pu-239	7.0502E-05
pu-240	3.2034E-06	pu-240	4.9284E-06	pu-240	4.9264E-06	pu-240	7.6945E-06
pu-241	5.5609E-07	pu-241	1.3069E-06	pu-241	1.0773E-06	pu-241	2.5613E-06
pu-242	1.2935E-08	pu-242	4.6519E-08	pu-242	4.6519E-08	pu-242	1.3880E-07
am-241	1.5318E-07	am-241	7.0854E-08	am-241	2.9930E-07	am-241	1.4450E-07
am-243	3.2462E-12	am-243	1.1026E-09	am-243	1.1022E-09	am-243	6.0436E-09
np-237	7.2675E-07	np-237	1.0344E-06	np-237	1.0356E-06	np-237	1.5325E-06
mo-95	6.6812E-06	mo-95	8.5164E-06	mo-95	8.7008E-06	mo-95	1.1341E-05
tc-99	6.4946E-06	tc-99	8.4682E-06	tc-99	8.4681E-06	tc-99	1.1253E-05
ru-101	5.4795E-06	ru-101	7.1866E-06	ru-101	7.1866E-06	ru-101	9.6322E-06
rh-103	3.5931E-06	rh-103	4.7355E-06	rh-103	4.7385E-06	rh-103	6.3753E-06
ag-109	1.7303E-07	ag-109	2.6703E-07	ag-109	2.6703E-07	ag-109	4.2798E-07
cs-133	7.1063E-06	cs-133	9.2639E-06	cs-133	9.2639E-06	cs-133	1.2312E-05
sm-147	1.6463E-06	sm-147	7.4136E-07	sm-147	2.1071E-06	sm-147	9.9805E-07
sm-149	1.2673E-07	sm-149	1.3232E-07	sm-149	1.3232E-07	sm-149	1.3783E-07
sm-150	1.0822E-06	sm-150	1.4931E-06	sm-150	1.4931E-06	sm-150	2.1420E-06
sm-151	2.4895E-07	sm-151	2.9689E-07	sm-151	2.8788E-07	sm-151	3.4245E-07
sm-152	5.2287E-07	sm-152	7.2402E-07	sm-152	7.2403E-07	sm-152	1.0196E-06
nd-143	6.0135E-06	nd-143	7.7663E-06	nd-143	7.7663E-06	nd-143	1.0171E-05
nd-145	4.0303E-06	nd-145	5.2361E-06	nd-145	5.2361E-06	nd-145	6.9273E-06
eu-153	2.3222E-07	eu-153	3.2705E-07	eu-153	3.2705E-07	eu-153	4.8217E-07
gd-155	1.8445E-08	gd-155	6.5311E-09	gd-155	2.3961E-08	gd-155	8.7956E-09
o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02

Data set No. 10		Data set No. 19		Data set No. 20		Data set No. 21	
3.6wt%U235, 10GWD/MTU		3.6wt%U235, 10GWD/MTU		3.6wt%U235, 10GWD/MTU		3.6wt%U235, 30GWD/MTU	
cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0		cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0	
axial locations 4 & 6 (7.558 GWD/MTU)		axial location 5 (11.069 GWD/MTU)		axial location 5 (11.069 GWD/MTU)		axial location 1 & 9 (12.330GWD/MTU)	
u-234	6.8071E-06	u-234	6.4825E-06	u-234	6.4898E-06	u-234	6.3705E-06
u-235	6.5207E-04	u-235	5.7794E-04	u-235	5.7795E-04	u-235	5.5336E-04
u-236	3.8462E-05	u-236	5.1643E-05	u-236	5.1649E-05	u-236	5.5957E-05
u-238	2.2141E-02	u-238	2.2086E-02	u-238	2.2086E-02	u-238	2.2066E-02
pu-238	9.1440E-08	pu-238	2.3783E-07	pu-238	2.3183E-07	pu-238	3.1141E-07
pu-239	7.0494E-05	pu-239	9.0069E-05	pu-239	9.0059E-05	pu-239	9.4448E-05
pu-240	7.6913E-06	pu-240	1.3567E-05	pu-240	1.3561E-05	pu-240	1.5417E-05
pu-241	2.1112E-06	pu-241	5.8526E-06	pu-241	4.8242E-06	pu-241	7.7995E-06
pu-242	1.3880E-07	pu-242	4.5786E-07	pu-242	4.5786E-07	pu-242	6.5918E-07
am-241	5.9217E-07	am-241	3.4621E-07	am-241	1.3690E-06	am-241	4.6500E-07
am-243	6.0413E-09	am-243	2.7360E-08	am-243	2.7350E-08	am-243	4.5209E-08
np-237	1.5349E-06	np-237	2.6147E-06	np-237	2.6203E-06	np-237	3.0436E-06
mo-95	1.1547E-05	mo-95	1.6430E-05	mo-95	1.6647E-05	mo-95	1.8236E-05
tc-99	1.1253E-05	tc-99	1.6254E-05	tc-99	1.6254E-05	tc-99	1.7833E-05
ru-101	9.6322E-06	ru-101	1.4134E-05	ru-101	1.4134E-05	ru-101	1.5775E-05
rh-103	6.3786E-06	rh-103	9.3808E-06	rh-103	9.3844E-06	rh-103	1.0455E-05
ag-109	4.2798E-07	ag-109	7.9998E-07	ag-109	7.9998E-07	ag-109	9.6301E-07
cs-133	1.2312E-05	cs-133	1.7790E-05	cs-133	1.7790E-05	cs-133	1.9552E-05
sm-147	2.7278E-06	sm-147	1.4711E-06	sm-147	3.7534E-06	sm-147	1.6643E-06
sm-149	1.3783E-07	sm-149	1.4238E-07	sm-149	1.4238E-07	sm-149	1.5514E-07
sm-150	2.1420E-06	sm-150	3.4955E-06	sm-150	3.4955E-06	sm-150	3.8040E-06
sm-151	3.3206E-07	sm-151	3.9505E-07	sm-151	3.8307E-07	sm-151	4.1111E-07
sm-152	1.0196E-06	sm-152	1.5804E-06	sm-152	1.5804E-06	sm-152	1.7856E-06
nd-143	1.0171E-05	nd-143	1.4304E-05	nd-143	1.4304E-05	nd-143	1.5611E-05
nd-145	6.9273E-06	nd-145	9.9329E-06	nd-145	9.9329E-06	nd-145	1.0993E-05
eu-153	4.8218E-07	eu-153	8.2472E-07	eu-153	8.2472E-07	eu-153	9.6829E-07
gd-155	3.2233E-08	gd-155	1.3371E-08	gd-155	4.8970E-08	gd-155	1.5168E-08
o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02

Data set No. 22		Data set No. 23		Data set No. 24		Data set No. 25	
3.6wt%U235, 30GWD/MTU		3.6wt%U235, 30GWD/MTU		3.6wt%U235, 30GWD/MTU		3.6wt%U235, 30GWD/MTU	
cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0		cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0	
axial location 1 & 9		axial location 2 & 8		axial location 2 & 8		axial location 3 & 7	
(12.330GWD/MTU)		(14.041GWD/MTU)		(14.041GWD/MTU)		(18.006GWD/MTU)	
u-234	6.3802E-06	u-234	6.2178E-06	u-234	6.2312E-06	u-234	5.8699E-06
u-235	5.5337E-04	u-235	5.2093E-04	u-235	5.2094E-04	u-235	4.5143E-04
u-236	5.5963E-05	u-236	6.1572E-05	u-236	6.1580E-05	u-236	7.3333E-05
u-238	2.2066E-02	u-238	2.2039E-02	u-238	2.2039E-02	u-238	2.1973E-02
pu-238	3.0368E-07	pu-238	4.3069E-07	pu-238	4.2082E-07	pu-238	8.0609E-07
pu-239	9.4437E-05	pu-239	1.0142E-04	pu-239	1.0141E-04	pu-239	1.1449E-04
pu-240	1.5411E-05	pu-240	1.8235E-05	pu-240	1.8228E-05	pu-240	2.4724E-05
pu-241	6.4290E-06	pu-241	9.8114E-06	pu-241	8.0873E-06	pu-241	1.4601E-05
pu-242	6.5918E-07	pu-242	9.7642E-07	pu-242	9.7642E-07	pu-242	2.0114E-06
am-241	1.8281E-06	am-241	6.0188E-07	am-241	2.3164E-06	am-241	9.5617E-07
am-243	4.5192E-08	am-243	7.7068E-08	am-243	7.7039E-08	am-243	2.0891E-07
np-237	3.0511E-06	np-237	3.6522E-06	np-237	3.6618E-06	np-237	5.1708E-06
mo-95	1.8451E-05	mo-95	2.0626E-05	mo-95	2.0840E-05	mo-95	2.6014E-05
tc-99	1.7833E-05	tc-99	2.0170E-05	tc-99	2.0170E-05	tc-99	2.5457E-05
ru-101	1.5775E-05	ru-101	1.7961E-05	ru-101	1.7961E-05	ru-101	2.3014E-05
rh-103	1.0459E-05	rh-103	1.1854E-05	rh-103	1.1857E-05	rh-103	1.4989E-05
ag-109	9.6301E-07	ag-109	1.1788E-06	ag-109	1.1788E-06	ag-109	1.7249E-06
cs-133	1.9552E-05	cs-133	2.2103E-05	cs-133	2.2103E-05	cs-133	2.7859E-05
sm-147	4.1077E-06	sm-147	1.9070E-06	sm-147	4.5466E-06	sm-147	2.4589E-06
sm-149	1.5514E-07	sm-149	1.5939E-07	sm-149	1.5939E-07	sm-149	1.6710E-07
sm-150	3.8040E-06	sm-150	4.4133E-06	sm-150	4.4133E-06	sm-150	5.8464E-06
sm-151	3.9864E-07	sm-151	4.3200E-07	sm-151	4.1889E-07	sm-151	4.7695E-07
sm-152	1.7857E-06	sm-152	2.0469E-06	sm-152	2.0470E-06	sm-152	2.6305E-06
nd-143	1.5611E-05	nd-143	1.7437E-05	nd-143	1.7437E-05	nd-143	2.1378E-05
nd-145	1.0993E-05	nd-145	1.2392E-05	nd-145	1.2392E-05	nd-145	1.5528E-05
eu-153	9.6830E-07	eu-153	1.1667E-06	eu-153	1.1667E-06	eu-153	1.6674E-06
gd-155	5.5547E-08	gd-155	1.8028E-08	gd-155	6.6016E-08	gd-155	2.6254E-08
o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02

Data set No. 26
3.6wt%U235, 30GWD/MTU
cooling time (yr)=5.0
axial location 3 & 7
(18.006GWD/MTU)

u-234	5.8952E-06
u-235	4.5145E-04
u-236	7.3343E-05
u-238	2.1973E-02
pu-238	7.9081E-07
pu-239	1.1447E-04
pu-240	2.4717E-05
pu-241	1.2035E-05
pu-242	2.0114E-06
am-241	3.5074E-06
am-243	2.0884E-07
np-237	5.1854E-06
mo-95	2.6225E-05
tc-99	2.5457E-05
ru-101	2.3014E-05
rh-103	1.4993E-05
ag-109	1.7249E-06
cs-133	2.7859E-05
sm-147	5.4627E-06
sm-149	1.6710E-07
sm-150	5.8464E-06
sm-151	4.6248E-07
sm-152	2.6306E-06
nd-143	2.1378E-05
nd-145	1.5528E-05
eu-153	1.6674E-06
gd-155	9.6135E-08
o	4.6215E-02

Data set No. 27
3.6wt%U235, 30GWD/MTU
cooling time (yr)=1.0
axial location 4 & 6
(24.009GWD/MTU)

u-234	5.3620E-06
u-235	3.6010E-04
u-236	8.8047E-05
u-238	2.1869E-02
pu-238	1.6598E-06
pu-239	1.2775E-04
pu-240	3.4198E-05
pu-241	2.1718E-05
pu-242	4.3206E-06
am-241	1.5389E-06
am-243	6.2397E-07
np-237	7.6707E-06
mo-95	3.3792E-05
tc-99	3.3109E-05
ru-101	3.0617E-05
rh-103	1.9419E-05
ag-109	2.6462E-06
cs-133	3.6156E-05
sm-147	3.2457E-06
sm-149	1.7425E-07
sm-150	8.0459E-06
sm-151	5.3724E-07
sm-152	3.4583E-06
nd-143	2.6602E-05
nd-145	2.0005E-05
eu-153	2.5019E-06
gd-155	4.2823E-08
o	4.6215E-02

Data set No. 28
3.6wt%U235, 30GWD/MTU
cooling time (yr)=5.0
axial location 4 & 6
(24.009GWD/MTU)

u-234	5.4143E-06
u-235	3.6012E-04
u-236	8.8061E-05
u-238	2.1869E-02
pu-238	1.6339E-06
pu-239	1.2773E-04
pu-240	3.4197E-05
pu-241	1.7902E-05
pu-242	4.3206E-06
am-241	5.3328E-06
am-243	6.2374E-07
np-237	7.6933E-06
mo-95	3.3996E-05
tc-99	3.3108E-05
ru-101	3.0617E-05
rh-103	1.9423E-05
ag-109	2.6462E-06
cs-133	3.6156E-05
sm-147	6.6054E-06
sm-149	1.7425E-07
sm-150	8.0459E-06
sm-151	5.2094E-07
sm-152	3.4585E-06
nd-143	2.6602E-05
nd-145	2.0005E-05
eu-153	2.5020E-06
gd-155	1.5685E-07
o	4.6215E-02

Data set No. 29
3.6wt%U235, 30GWD/MTU
cooling time (yr)=1.0
axial location 5
(32.855GWD/MTU)

u-234	4.6622E-06
u-235	2.5228E-04
u-236	1.0372E-04
u-238	2.1705E-02
pu-238	3.5663E-06
pu-239	1.3790E-04
pu-240	4.6744E-05
pu-241	3.0723E-05
pu-242	9.1156E-06
am-241	2.3570E-06
am-243	1.8519E-06
np-237	1.1527E-05
mo-95	4.4455E-05
tc-99	4.3599E-05
ru-101	4.1684E-05
rh-103	2.5173E-05
ag-109	4.1267E-06
cs-133	4.7444E-05
sm-147	4.2452E-06
sm-149	1.7821E-07
sm-150	1.1269E-05
sm-151	6.1328E-07
sm-152	4.5663E-06
nd-143	3.2750E-05
nd-145	2.6033E-05
eu-153	3.8033E-06
gd-155	7.5143E-08
o	4.6215E-02

Data set No. 30
 3.6wt%U235, 30GWD/MTU
 cooling time (yr)=5.0
 axial location 5
 (32.855GWD/MTU)

Data set No. 31
 3.6wt%U235, 40GWD/MTU
 cooling time (yr)=1.0
 axial location 1 & 9
 (16.439GWD/MTU)

Data set No. 32
 3.6wt%U235, 40GWD/MTU
 cooling time (yr)=5.0
 axial location 1 & 9
 (16.439GWD/MTU)

Data set No. 33
 3.6wt%U235, 40GWD/MTU
 cooling time (yr)=1.0
 axial location 2 & 8
 (18.722GWD/MTU)

u-234	4.7748E-06	u-234	6.0062E-06	u-234	6.0263E-06	u-234	5.8080E-06
u-235	2.5230E-04	u-235	4.7798E-04	u-235	4.7800E-04	u-235	4.3969E-04
u-236	1.0374E-04	u-236	6.8888E-05	u-236	6.8898E-05	u-236	7.5278E-05
u-238	2.1705E-02	u-238	2.1999E-02	u-238	2.1999E-02	u-238	2.1961E-02
pu-238	3.5160E-06	pu-238	6.4058E-07	pu-238	6.2753E-07	pu-238	8.8941E-07
pu-239	1.3788E-04	pu-239	1.0980E-04	pu-239	1.0978E-04	pu-239	1.1644E-04
pu-240	4.6784E-05	pu-240	2.2172E-05	pu-240	2.2165E-05	pu-240	2.5882E-05
pu-241	2.5324E-05	pu-241	1.2698E-05	pu-241	1.0467E-05	pu-241	1.5470E-05
pu-242	9.1156E-06	pu-242	1.5535E-06	pu-242	1.5535E-06	pu-242	2.2414E-06
am-241	7.7230E-06	am-241	8.1121E-07	am-241	3.0301E-06	am-241	1.0240E-06
am-243	1.8512E-06	am-243	1.4560E-07	am-243	1.4555E-07	am-243	2.4340E-07
np-237	1.1560E-05	np-237	4.5546E-06	np-237	4.5672E-06	np-237	5.4584E-06
mo-95	4.4649E-05	mo-95	2.3909E-05	mo-95	2.4122E-05	mo-95	2.6965E-05
tc-99	4.3598E-05	tc-99	2.3390E-05	tc-99	2.3389E-05	tc-99	2.6392E-05
ru-101	4.1684E-05	ru-101	2.1020E-05	ru-101	2.1020E-05	ru-101	2.3924E-05
rh-103	2.5178E-05	rh-103	1.3768E-05	rh-103	1.3772E-05	rh-103	1.5538E-05
ag-109	4.1267E-06	ag-109	1.5020E-06	ag-109	1.5020E-06	ag-109	1.8295E-06
cs-133	4.7444E-05	cs-133	2.5610E-05	cs-133	2.5610E-05	cs-133	2.8876E-05
sm-147	7.8342E-06	sm-147	2.2431E-06	sm-147	5.1169E-06	sm-147	2.5563E-06
sm-149	1.7821E-07	sm-149	1.6438E-07	sm-149	1.6438E-07	sm-149	1.6822E-07
sm-150	1.1269E-05	sm-150	5.2771E-06	sm-150	5.2771E-06	sm-150	6.1075E-06
sm-151	5.9467E-07	sm-151	4.5972E-07	sm-151	4.4577E-07	sm-151	4.8459E-07
sm-152	4.5665E-06	sm-152	2.4035E-06	sm-152	2.4036E-06	sm-152	2.7326E-06
nd-143	3.2750E-05	nd-143	1.9867E-05	nd-143	1.9867E-05	nd-143	2.2047E-05
nd-145	2.6033E-05	nd-145	1.4306E-05	nd-145	1.4306E-05	nd-145	1.6079E-05
eu-153	3.8033E-06	eu-153	1.4634E-06	eu-153	1.4634E-06	eu-153	1.7629E-06
gd-155	2.7544E-07	gd-155	2.2737E-08	gd-155	8.3258E-08	gd-155	2.7974E-08
o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02

Data set No. 34
3.6wt%U235, 40GWD/MTU
cooling time (yr)=5.0
axial location 2 & 8
(18.722GWD/MTU)

Data set No. 35
3.6wt%U235, 40GWD/MTU
cooling time (yr)=1.0
axial location 3 & 7
(24.008GWD/MTU)

Data set No. 36
3.6wt%U235, 40GWD/MTU
cooling time (yr)=5.0
axial location 3 & 7
(24.008GWD/MTU)

Data set No. 37
3.6wt%U235, 40GWD/MTU
cooling time (yr)=1.0
axial location 4 & 6
(32.012GWD/MTU)

u-234	5.8359E-06	u-234	5.3521E-06	u-234	5.4144E-06	u-234	4.7260E-06
u-235	4.3971E-04	u-235	3.6011E-04	u-235	3.6013E-04	u-235	2.6131E-04
u-236	7.5289E-05	u-236	8.8045E-05	u-236	8.8059E-05	u-236	1.0250E-04
u-238	2.1961E-02	u-238	2.1869E-02	u-238	2.1869E-02	u-238	2.1721E-02
pu-238	8.7306E-07	pu-238	1.6596E-06	pu-238	1.6338E-06	pu-238	3.3524E-06
pu-239	1.1643E-04	pu-239	1.2775E-04	pu-239	1.2773E-04	pu-239	1.3726E-04
pu-240	2.5876E-05	pu-240	3.4197E-05	pu-240	3.4196E-05	pu-240	4.5639E-05
pu-241	1.2752E-05	pu-241	2.1717E-05	pu-241	1.7901E-05	pu-241	2.9970E-05
pu-242	2.2414E-06	pu-242	4.3201E-06	pu-242	4.3201E-06	pu-242	8.5976E-06
am-241	3.7270E-06	am-241	1.5388E-06	am-241	5.3326E-06	am-241	2.2852E-06
am-243	2.4330E-07	am-243	6.2387E-07	am-243	6.2364E-07	am-243	1.7001E-06
np-237	5.4740E-06	np-237	7.6703E-06	np-237	7.6929E-06	np-237	1.1159E-05
mo-95	2.7176E-05	mo-95	3.3791E-05	mo-95	3.3995E-05	mo-95	4.3479E-05
tc-99	2.6392E-05	tc-99	3.3107E-05	tc-99	3.3106E-05	tc-99	4.2640E-05
ru-101	2.3924E-05	ru-101	3.0616E-05	ru-101	3.0616E-05	ru-101	4.0638E-05
rh-103	1.5542E-05	rh-103	1.9418E-05	rh-103	1.9422E-05	rh-103	2.4666E-05
ag-109	1.8295E-06	ag-109	2.6460E-06	ag-109	2.6460E-06	ag-109	3.9821E-06
cs-133	2.8876E-05	cs-133	3.6155E-05	cs-133	3.6155E-05	cs-133	4.6417E-05
sm-147	5.6138E-06	sm-147	3.2455E-06	sm-147	6.6053E-06	sm-147	4.1595E-06
sm-149	1.6822E-07	sm-149	1.7425E-07	sm-149	1.7425E-07	sm-149	1.7807E-07
sm-150	6.1075E-06	sm-150	8.0456E-06	sm-150	8.0456E-06	sm-150	1.0966E-05
sm-151	4.6989E-07	sm-151	5.3724E-07	sm-151	5.2094E-07	sm-151	6.0657E-07
sm-152	2.7327E-06	sm-152	3.4582E-06	sm-152	3.4584E-06	sm-152	4.4661E-06
nd-143	2.2047E-05	nd-143	2.6601E-05	nd-143	2.6601E-05	nd-143	3.2239E-05
nd-145	1.6079E-05	nd-145	2.0004E-05	nd-145	2.0004E-05	nd-145	2.5486E-05
eu-153	1.7629E-06	eu-153	2.5018E-06	eu-153	2.5019E-06	eu-153	3.6786E-06
gd-155	1.0243E-07	gd-155	4.2820E-08	gd-155	1.5684E-07	gd-155	7.1723E-08
o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02

Data set No. 38		Data set No. 39		Data set No. 40		Data set No. 41	
3.6wt%U235, 40GWD/MTU		3.6wt%U235, 40GWD/MTU		3.6wt%U235, 40GWD/MTU		4.5wt%U235, 30GWD/MTU	
cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0		cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0	
axial location 4 & 6		axial location 5		axial location 5		axial location 1 & 9	
(32.012GWD/MTU)		(43.807GWD/MTU)		(43.807GWD/MTU)		(12.330GWD/MTU)	
u-234	4.8319E-06	u-234	3.8901E-06	u-234	4.1066E-06	u-234	7.2649E-06
u-235	2.6133E-04	u-235	1.5577E-04	u-235	1.5579E-04	u-235	7.4704E-04
u-236	1.0252E-04	u-236	1.1482E-04	u-236	1.1484E-04	u-236	6.3195E-05
u-238	2.1721E-02	u-238	2.1488E-02	u-238	2.1488E-02	u-238	2.1871E-02
pu-238	3.3050E-06	pu-238	6.8627E-06	pu-238	6.7616E-06	pu-238	2.8641E-07
pu-239	1.3725E-04	pu-239	1.4251E-04	pu-239	1.4249E-04	pu-239	9.3233E-05
pu-240	4.5673E-05	pu-240	5.9179E-05	pu-240	5.9366E-05	pu-240	1.2878E-05
pu-241	2.4703E-05	pu-241	3.8375E-05	pu-241	3.1631E-05	pu-241	6.2410E-06
pu-242	8.5976E-06	pu-242	1.6677E-05	pu-242	1.6677E-05	pu-242	4.2866E-07
am-241	7.5195E-06	am-241	3.1214E-06	am-241	9.8225E-06	am-241	3.7294E-07
am-243	1.6995E-06	am-243	4.4734E-06	am-243	4.4718E-06	am-243	2.9094E-08
np-237	1.1191E-05	np-237	1.6097E-05	np-237	1.6140E-05	np-237	3.1036E-06
mo-95	4.3674E-05	mo-95	5.6436E-05	mo-95	5.6620E-05	mo-95	1.8489E-05
tc-99	4.2639E-05	tc-99	5.5288E-05	tc-99	5.5287E-05	tc-99	1.7929E-05
ru-101	4.0638E-05	ru-101	5.5095E-05	ru-101	5.5095E-05	ru-101	1.5737E-05
rh-103	2.4671E-05	rh-103	3.0949E-05	rh-103	3.0953E-05	rh-103	1.0198E-05
ag-109	3.9821E-06	ag-109	6.0171E-06	ag-109	6.0171E-06	ag-109	7.9138E-07
cs-133	4.6417E-05	cs-133	5.9862E-05	cs-133	5.9862E-05	cs-133	1.9651E-05
sm-147	7.7375E-06	sm-147	5.1613E-06	sm-147	8.7656E-06	sm-147	1.7068E-06
sm-149	1.7807E-07	sm-149	1.7770E-07	sm-149	1.7770E-07	sm-149	1.7444E-07
sm-150	1.0966E-05	sm-150	1.5068E-05	sm-150	1.5068E-05	sm-150	3.7319E-06
sm-151	5.8816E-07	sm-151	6.9223E-07	sm-151	6.7123E-07	sm-151	4.7687E-07
sm-152	4.4663E-06	sm-152	5.7726E-06	sm-152	5.7728E-06	sm-152	1.6948E-06
nd-143	3.2239E-05	nd-143	3.8045E-05	nd-143	3.8045E-05	nd-143	1.6076E-05
nd-145	2.5486E-05	nd-145	3.2614E-05	nd-145	3.2614E-05	nd-145	1.1161E-05
eu-153	3.6787E-06	eu-153	5.3722E-06	eu-153	5.3723E-06	eu-153	9.0062E-07
gd-155	2.6288E-07	gd-155	1.2348E-07	gd-155	4.5301E-07	gd-155	1.4974E-08
o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6215E-02	o	4.6219E-02

Data set No. 42
4.5wt%U235, 30GWD/MTU
cooling time (yr)=5.0
axial location 1 & 9
(12.330GWD/MTU)

u-234	7.2738E-06
u-235	7.4705E-04
u-236	6.3201E-05
u-238	2.1871E-02
pu-238	2.7907E-07
pu-239	9.3222E-05
pu-240	1.2872E-05
pu-241	5.1443E-06
pu-242	4.2866E-07
am-241	1.4636E-06
am-243	2.9083E-08
np-237	3.1096E-06
mo-95	1.8707E-05
tc-99	1.7929E-05
ru-101	1.5737E-05
rh-103	1.0201E-05
ag-109	7.9138E-07
cs-133	1.9651E-05
sm-147	4.2159E-06
sm-149	1.7444E-07
sm-150	3.7319E-06
sm-151	4.6240E-07
sm-152	1.6949E-06
nd-143	1.6076E-05
nd-145	1.1161E-05
eu-153	9.0062E-07
gd-155	5.4303E-08
o	4.6219E-02

Data set No. 43
4.5wt%U235, 30GWD/MTU
cooling time (yr)=1.0
axial location 2 & 8
(14.041GWD/MTU)

u-234	7.1109E-06
u-235	7.1102E-04
u-236	6.9644E-05
u-238	2.1846E-02
pu-238	3.9483E-07
pu-239	1.0091E-04
pu-240	1.5353E-05
pu-241	7.9972E-06
pu-242	6.4265E-07
am-241	4.9180E-07
am-243	4.8610E-08
np-237	3.7238E-06
mo-95	2.0938E-05
tc-99	2.0293E-05
ru-101	1.7916E-05
rh-103	1.1560E-05
ag-109	9.7122E-07
cs-133	2.2231E-05
sm-147	1.9623E-06
sm-149	1.8004E-07
sm-150	4.3299E-06
sm-151	5.0124E-07
sm-152	1.9507E-06
nd-143	1.8019E-05
nd-145	1.2599E-05
eu-153	1.0833E-06
gd-155	1.7507E-08
o	4.6219E-02

Data set No. 44
4.5wt%U235, 30GWD/MTU
cooling time (yr)=5.0
axial location 2 & 8
(14.041GWD/MTU)

u-234	7.1232E-06
u-235	7.1103E-04
u-236	6.9650E-05
u-238	2.1846E-02
pu-238	3.8525E-07
pu-239	1.0090E-04
pu-240	1.5346E-05
pu-241	6.5919E-06
pu-242	6.4265E-07
am-241	1.8893E-06
am-243	4.8592E-08
np-237	3.7316E-06
mo-95	2.1157E-05
tc-99	2.0292E-05
ru-101	1.7916E-05
rh-103	1.1563E-05
ag-109	9.7122E-07
cs-133	2.2231E-05
sm-147	4.6821E-06
sm-149	1.8004E-07
sm-150	4.3299E-06
sm-151	4.8603E-07
sm-152	1.9508E-06
nd-143	1.8019E-05
nd-145	1.2599E-05
eu-153	1.0833E-06
gd-155	6.3779E-08
o	4.6219E-02

Data set No. 45
4.5wt%U235, 30GWD/MTU
cooling time (yr)=1.0
axial location 3 & 7
(18.006GWD/MTU)

u-234	6.7591E-06
u-235	6.3249E-04
u-236	8.3446E-05
u-238	2.1787E-02
pu-238	7.3356E-07
pu-239	1.1569E-04
pu-240	2.1172E-05
pu-241	1.2395E-05
pu-242	1.3567E-06
am-241	8.1377E-07
am-243	1.2893E-07
np-237	5.2803E-06
mo-95	2.6487E-05
tc-99	2.5652E-05
ru-101	2.2952E-05
rh-103	1.4624E-05
ag-109	1.4313E-06
cs-133	2.8069E-05
sm-147	2.5505E-06
sm-149	1.8905E-07
sm-150	5.7784E-06
sm-151	5.5238E-07
sm-152	2.5243E-06
nd-143	2.2270E-05
nd-145	1.5837E-05
eu-153	1.5474E-06
gd-155	2.4865E-08
o	4.6219E-02

Data set No. 46		Data set No. 47		Data set No. 48		Data set No. 49	
4.5wt%U235, 30GWD/MTU		4.5wt%U235, 30GWD/MTU		4.5wt%U235, 30GWD/MTU		4.5wt%U235, 30GWD/MTU	
cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0		cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0	
axial location 3 & 7		axial location 4 & 6		axial location 4 & 6		axial location 5	
(18.006GWD/MTU)		(24.009GWD/MTU)		(24.009GWD/MTU)		(32.855GWD/MTU)	
u-234	6.7821E-06	u-234	6.2417E-06	u-234	6.2892E-06	u-234	5.5185E-06
u-235	6.3251E-04	u-235	5.2583E-04	u-235	5.2585E-04	u-235	3.9296E-04
u-236	8.3455E-05	u-236	1.0149E-04	u-236	1.0151E-04	u-236	1.2236E-04
u-238	2.1787E-02	u-238	2.1693E-02	u-238	2.1693E-02	u-238	2.1547E-02
pu-238	7.1790E-07	pu-238	1.5130E-06	pu-238	1.4854E-06	pu-238	3.3089E-06
pu-239	1.1568E-04	pu-239	1.3159E-04	pu-239	1.3158E-04	pu-239	1.4511E-04
pu-240	2.1165E-05	pu-240	2.9950E-05	pu-240	2.9945E-05	pu-240	4.2146E-05
pu-241	1.0217E-05	pu-241	1.9338E-05	pu-241	1.5940E-05	pu-241	2.8801E-05
pu-242	1.3567E-06	pu-242	3.0288E-06	pu-242	3.0288E-06	pu-242	6.7305E-06
am-241	2.9795E-06	am-241	1.3780E-06	am-241	4.7561E-06	am-241	2.2432E-06
am-243	1.2888E-07	am-243	3.9736E-07	am-243	3.9721E-07	am-243	1.2545E-06
np-237	5.2927E-06	np-237	7.8777E-06	np-237	7.8978E-06	np-237	1.1995E-05
mo-95	2.6703E-05	mo-95	3.4552E-05	mo-95	3.4762E-05	mo-95	4.5717E-05
tc-99	2.5652E-05	tc-99	3.3447E-05	tc-99	3.3447E-05	tc-99	4.4219E-05
ru-101	2.2952E-05	ru-101	3.0530E-05	ru-101	3.0530E-05	ru-101	4.1575E-05
rh-103	1.4628E-05	rh-103	1.8995E-05	rh-103	1.8999E-05	rh-103	2.4774E-05
ag-109	1.4313E-06	ag-109	2.2210E-06	ag-109	2.2210E-06	ag-109	3.5242E-06
cs-133	2.8069E-05	cs-133	3.6529E-05	cs-133	3.6529E-05	cs-133	4.8147E-05
sm-147	5.6683E-06	sm-147	3.4066E-06	sm-147	6.9313E-06	sm-147	4.5297E-06
sm-149	1.8905E-07	sm-149	1.9609E-07	sm-149	1.9609E-07	sm-149	1.9990E-07
sm-150	5.7784E-06	sm-150	8.0419E-06	sm-150	8.0419E-06	sm-150	1.1326E-05
sm-151	5.3562E-07	sm-151	6.1929E-07	sm-151	6.0050E-07	sm-151	7.0207E-07
sm-152	2.5244E-06	sm-152	3.3453E-06	sm-152	3.3455E-06	sm-152	4.4607E-06
nd-143	2.2270E-05	nd-143	2.8054E-05	nd-143	2.8054E-05	nd-143	3.5176E-05
nd-145	1.5837E-05	nd-145	2.0493E-05	nd-145	2.0493E-05	nd-145	2.6836E-05
eu-153	1.5474E-06	eu-153	2.3310E-06	eu-153	2.3310E-06	eu-153	3.5819E-06
gd-155	9.0177E-08	gd-155	3.9606E-08	gd-155	1.4372E-07	gd-155	6.9558E-08
o	4.6219E-02	o	4.6219E-02	o	4.6219E-02	o	4.6219E-02

Data set No. 50		Data set No. 51		Data set No. 52		Data set No. 53	
4.5wt%U235, 30GWD/MTU		4.5wt%U235, 50GWD/MTU		4.5wt%U235, 50GWD/MTU		4.5wt%U235, 50GWD/MTU	
cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0		cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0	
axial location 5		axial location 1 & 9		axial location 1 & 9		axial location 2 & 8	
(32.855GWD/MTU)		(21.565GWD/MTU)		(21.565GWD/MTU)		(24.023GWD/MTU)	
u-234	5.6227E-06	u-234	6.4500E-06	u-234	6.4862E-06	u-234	6.2405E-06
u-235	3.9298E-04	u-235	5.6755E-04	u-235	5.6757E-04	u-235	5.2560E-04
u-236	1.2238E-04	u-236	9.4545E-05	u-236	9.4556E-05	u-236	1.0153E-04
u-238	2.1547E-02	u-238	2.1732E-02	u-238	2.1732E-02	u-238	2.1693E-02
pu-238	3.2553E-06	pu-238	1.1544E-06	pu-238	1.1322E-06	pu-238	1.5152E-06
pu-239	1.4509E-04	pu-239	1.2592E-04	pu-239	1.2591E-04	pu-239	1.3162E-04
pu-240	4.2164E-05	pu-240	2.6401E-05	pu-240	2.6395E-05	pu-240	2.9970E-05
pu-241	2.3740E-05	pu-241	1.6516E-05	pu-241	1.3614E-05	pu-241	1.9354E-05
pu-242	6.7305E-06	pu-242	2.2623E-06	pu-242	2.2623E-06	pu-242	3.0335E-06
am-241	7.2733E-06	am-241	1.1411E-06	am-241	4.0266E-06	am-241	1.3794E-06
am-243	1.2540E-06	am-243	2.6232E-07	am-243	2.6222E-07	am-243	3.9824E-07
np-237	1.2026E-05	np-237	6.7920E-06	np-237	6.8089E-06	np-237	7.8840E-06
mo-95	4.5919E-05	mo-95	3.1317E-05	mo-95	3.1530E-05	mo-95	3.4570E-05
tc-99	4.4219E-05	tc-99	3.0320E-05	tc-99	3.0319E-05	tc-99	3.3465E-05
ru-101	4.1575E-05	ru-101	2.7452E-05	ru-101	2.7452E-05	ru-101	3.0548E-05
rh-103	2.4779E-05	rh-103	1.7256E-05	rh-103	1.7260E-05	rh-103	1.9004E-05
ag-109	3.5242E-06	ag-109	1.8879E-06	ag-109	1.8879E-06	ag-109	2.2230E-06
cs-133	4.8147E-05	cs-133	3.3140E-05	cs-133	3.3140E-05	cs-133	3.6549E-05
sm-147	8.3505E-06	sm-147	3.0651E-06	sm-147	6.4488E-06	sm-147	3.4086E-06
sm-149	1.9990E-07	sm-149	1.9390E-07	sm-149	1.9390E-07	sm-149	1.9611E-07
sm-150	1.1326E-05	sm-150	7.1174E-06	sm-150	7.1174E-06	sm-150	8.0472E-06
sm-151	6.8077E-07	sm-151	5.9331E-07	sm-151	5.7531E-07	sm-151	6.1943E-07
sm-152	4.4610E-06	sm-152	3.0176E-06	sm-152	3.0178E-06	sm-152	3.3471E-06
nd-143	3.5176E-05	nd-143	2.5793E-05	nd-143	2.5793E-05	nd-143	2.8067E-05
nd-145	2.6836E-05	nd-145	1.8633E-05	nd-145	1.8633E-05	nd-145	2.0504E-05
eu-153	3.5819E-06	eu-153	2.0026E-06	eu-153	2.0026E-06	eu-153	2.3329E-06
gd-155	2.5275E-07	gd-155	3.3040E-08	gd-155	1.1986E-07	gd-155	3.9645E-08
o	4.6219E-02	o	4.6219E-02	o	4.6219E-02	o	4.6219E-02

Data set No. 54 4.5wt%U235, 50GWD/MTU cooling time (yr)=5.0 axial location 2 & 8 (24.023GWD/MTU)		Data set No. 55 4.5wt%U235, 50GWD/MTU cooling time (yr)=1.0 axial location 3 & 7 (30.580GWD/MTU)		Data set No. 56 4.5wt%U235, 50GWD/MTU cooling time (yr)=5.0 axial location 3 & 7 (30.580GWD/MTU)		Data set No. 57 4.5wt%U235, 50GWD/MTU cooling time (yr)=1.0 axial location 4 & 6 (40.424GWD/MTU)	
u-234	6.2881E-06	u-234	5.6995E-06	u-234	5.7868E-06	u-234	4.9433E-06
u-235	5.2562E-04	u-235	4.2453E-04	u-235	4.2455E-04	u-235	3.0000E-04
u-236	1.0155E-04	u-236	1.1761E-04	u-236	1.1763E-04	u-236	1.3532E-04
u-238	2.1693E-02	u-238	2.1585E-02	u-238	2.1585E-02	u-238	2.1413E-02
pu-238	1.4876E-06	pu-238	2.7719E-06	pu-238	2.7262E-06	pu-238	5.4525E-06
pu-239	1.3161E-04	pu-239	1.4250E-04	pu-239	1.4249E-04	pu-239	1.5066E-04
pu-240	2.9965E-05	pu-240	3.9132E-05	pu-240	3.9140E-05	pu-240	5.1412E-05
pu-241	1.5953E-05	pu-241	2.6524E-05	pu-241	2.1863E-05	pu-241	3.5395E-05
pu-242	3.0335E-06	pu-242	5.6472E-06	pu-242	5.6472E-06	pu-242	1.0893E-05
am-241	4.7603E-06	am-241	2.0253E-06	am-241	6.6579E-06	am-241	2.9059E-06
am-243	3.9809E-07	am-243	9.7389E-07	am-243	9.7353E-07	am-243	2.5117E-06
np-237	7.9041E-06	np-237	1.0920E-05	np-237	1.0948E-05	np-237	1.5563E-05
mo-95	3.4781E-05	mo-95	4.2926E-05	mo-95	4.3130E-05	mo-95	5.4612E-05
tc-99	3.3465E-05	tc-99	4.1532E-05	tc-99	4.1531E-05	tc-99	5.2747E-05
ru-101	3.0548E-05	ru-101	3.8751E-05	ru-101	3.8751E-05	ru-101	5.0881E-05
rh-103	1.9008E-05	rh-103	2.3367E-05	rh-103	2.3371E-05	rh-103	2.9052E-05
ag-109	2.2230E-06	ag-109	3.1774E-06	ag-109	3.1774E-06	ag-109	4.7134E-06
cs-133	3.6549E-05	cs-133	4.5257E-05	cs-133	4.5257E-05	cs-133	5.7263E-05
sm-147	6.9339E-06	sm-147	4.2601E-06	sm-147	8.0315E-06	sm-147	5.3175E-06
sm-149	1.9611E-07	sm-149	1.9936E-07	sm-149	1.9936E-07	sm-149	1.9993E-07
sm-150	8.0472E-06	sm-150	1.0496E-05	sm-150	1.0496E-05	sm-150	1.3997E-05
sm-151	6.0064E-07	sm-151	6.8230E-07	sm-151	6.6160E-07	sm-151	7.6073E-07
sm-152	3.3473E-06	sm-152	4.1841E-06	sm-152	4.1844E-06	sm-152	5.3313E-06
nd-143	2.8067E-05	nd-143	3.3502E-05	nd-143	3.3502E-05	nd-143	3.9984E-05
nd-145	2.0504E-05	nd-145	2.5263E-05	nd-145	2.5263E-05	nd-145	3.1783E-05
eu-153	2.3329E-06	eu-153	3.2545E-06	eu-153	3.2546E-06	eu-153	4.6704E-06
gd-155	1.4386E-07	gd-155	6.0994E-08	gd-155	2.2155E-07	gd-155	1.0133E-07
o	4.6219E-02	o	4.6219E-02	o	4.6219E-02	o	4.6219E-02

Data set No. 58		Data set No. 59		Data set No. 60	
4.5wt%U235, 50GWD/MTU		4.5wt%U235, 50GWD/MTU		4.5wt%U235, 50GWD/MTU	
cooling time (yr)=5.0		cooling time (yr)=1.0		cooling time (yr)=5.0	
axial location 4 & 6		axial location 5		axial location 5	
(40.424GWD/MTU)		(54.605GWD/MTU)		(54.605GWD/MTU)	
u-234	5.1152E-06	u-234	3.9925E-06	u-234	4.3280E-06
u-235	3.0002E-04	u-235	1.7106E-04	u-235	1.7108E-04
u-236	1.3534E-04	u-236	1.4895E-04	u-236	1.4897E-04
u-238	2.1413E-02	u-238	2.1142E-02	u-238	2.1142E-02
pu-238	5.3656E-06	pu-238	1.0655E-05	pu-238	1.0471E-05
pu-239	1.5064E-04	pu-239	1.5301E-04	pu-239	1.5300E-04
pu-240	5.1484E-05	pu-240	6.5224E-05	pu-240	6.5540E-05
pu-241	2.9175E-05	pu-241	4.3713E-05	pu-241	3.6032E-05
pu-242	1.0893E-05	pu-242	2.0303E-05	pu-242	2.0303E-05
am-241	9.0866E-06	am-241	3.7731E-06	am-241	1.1405E-05
am-243	2.5108E-06	am-243	6.1573E-06	am-243	6.1550E-06
np-237	1.5602E-05	np-237	2.1757E-05	np-237	2.1806E-05
mo-95	5.4806E-05	mo-95	6.9709E-05	mo-95	6.9892E-05
tc-99	5.2746E-05	tc-99	6.6976E-05	tc-99	6.6975E-05
ru-101	5.0881E-05	ru-101	6.7875E-05	ru-101	6.7875E-05
rh-103	2.9057E-05	rh-103	3.5401E-05	rh-103	3.5406E-05
ag-109	4.7134E-06	ag-109	6.9836E-06	ag-109	6.9836E-06
cs-133	5.7263E-05	cs-133	7.2263E-05	cs-133	7.2263E-05
sm-147	9.2075E-06	sm-147	6.3252E-06	sm-147	1.0106E-05
sm-149	1.9993E-07	sm-149	1.9259E-07	sm-149	1.9259E-07
sm-150	1.3997E-05	sm-150	1.8627E-05	sm-150	1.8627E-05
sm-151	7.3765E-07	sm-151	8.4338E-07	sm-151	8.1779E-07
sm-152	5.3316E-06	sm-152	6.7635E-06	sm-152	6.7637E-06
nd-143	3.9984E-05	nd-143	4.5992E-05	nd-143	4.5992E-05
nd-145	3.1783E-05	nd-145	3.9892E-05	nd-145	3.9892E-05
eu-153	4.6705E-06	eu-153	6.5857E-06	eu-153	6.5858E-06
gd-155	3.6871E-07	gd-155	1.6688E-07	gd-155	6.0862E-07
o	4.6219E-02	o	4.6219E-02	o	4.6219E-02

October 21, 1993 19:51

Appendix B

**Burnup Profiles
(10, 30, 40 and 50 GWd/t)**

**Prepared by Dr. A. Santamarina
and
Dr. P. Albareda**

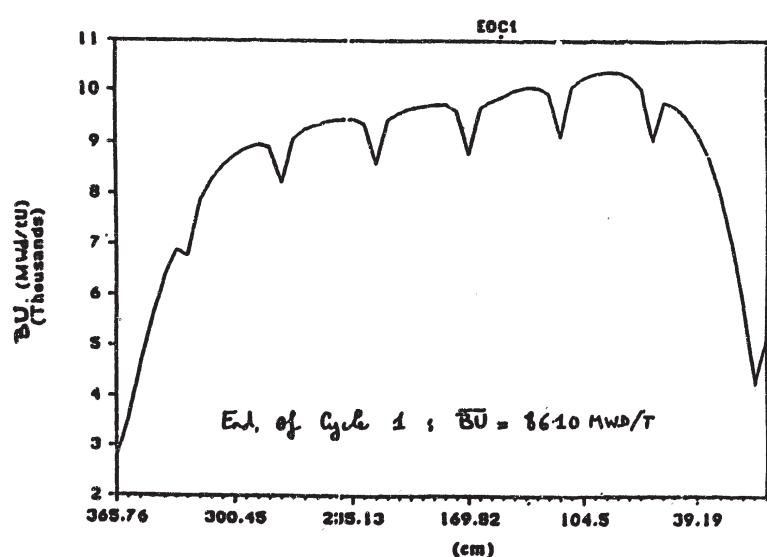


Fig. B.1 Burnup Profile for 10 GWd/t case

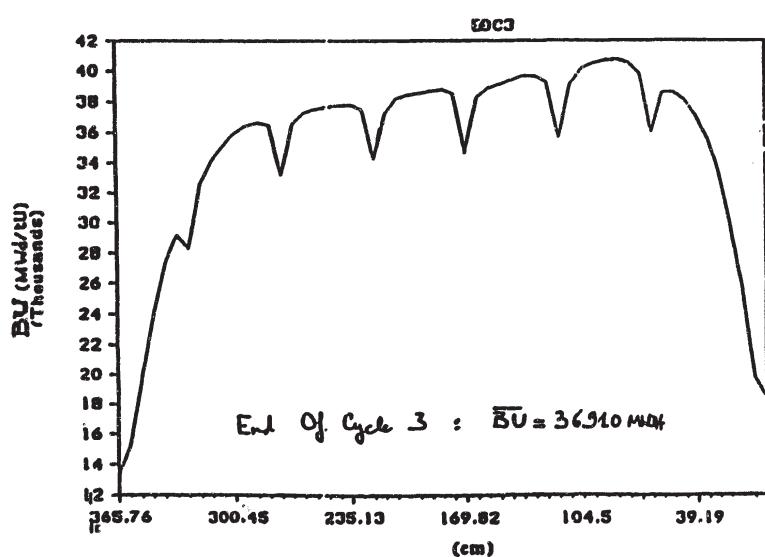


Fig. B.2 Burnup Profile for 30 and 40 Gwd/t cases

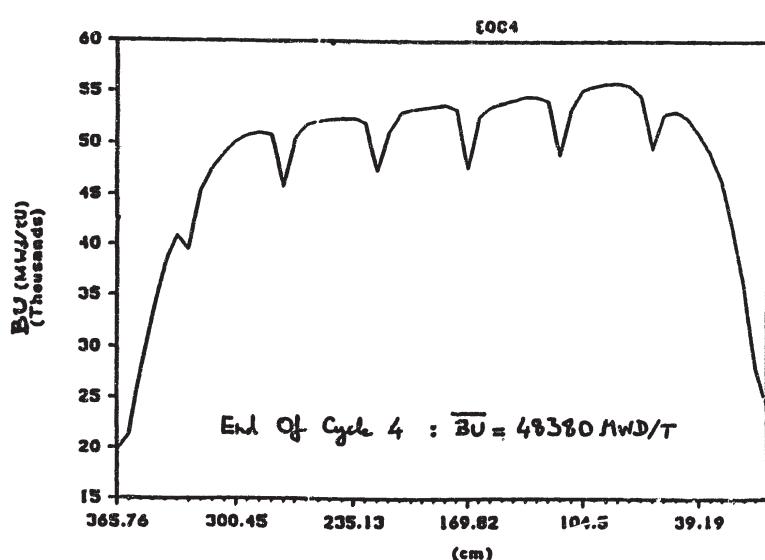


Fig. B.3 Burnup Profile for 50 GWd/t case

D.2 Phase II-Bの課題

12 July 94

Modifications of Problem II-B

1. Use geometry and materials as specified in letter from ORNL (M. DeHart) to M. Takano (JAERI). This letter is attached to meeting announcement.
2. The following five (5) cases will be calculated
 - A. 4.5 initial weight percent (wt%) ^{235}U
30 GWd/MTU
5 yr cooled
No axial distribution
 - B. Case A with axial distribution
 - C. 4.5 wt% ^{235}U
50 GWd/MTU
5 yr cooled
No axial distribution
 - D. Case C with axial distribution
 - E. 4.5 wt% ^{235}U - fresh fuel
> use isotopes specified in Problem II-A
3. Multi-zone (axially distributed) models will be as in II-A - reflected about mid-plane. However, I will provide (by letter) normalized profile data for the full length profiles.

Proposed Spent Fuel Cask Geometry

OECD Phase II-B Benchmark

Fuel Assembly (based on Westinghouse 17x17 design):

Fuel Rod Data:

Fuel diameter	0.8192 cm
Rod ID	0.8357 cm
Rod OD	0.9500 cm
Fuel Length	365.7 cm
Fuel Material	UO ₂ (assumed isotopic composition from Part II-A 4.5 wt %, 30 GWe/MTU fuel, 5 y cooling time)
Clad Material	Zircaloy
Gas Gap	Void
Endplug Material	Zircaloy
Endplug Height	1.75 cm
Full Rod Length	369.2 cm (fuel + 2 endplugs)
Upper Hardware	30.0 cm
Lower Hardware	10.0 cm
Upper Water Region	7.0 cm
Lower Water Region	0.0 cm

Axial Fuel Divisions (9 axial regions):

Region 1 (Fuel top)	5 cm
Region 2	5 cm
Region 3	10 cm
Region 4	20 cm
Region 5	285.7 cm
Region 6	20 cm
Region 7	10 cm
Region 8	5 cm
Region 9 (Fuel Bottom)	5 cm

Assembly Data:

Lattice	17x17, (289 fuel rods, no guide tubes)
Dimensions	21.41728 x 21.41728 x 409.2 cm
Pitch	1.25984 cm
Moderator	Water
Upper and Lower End Hardware	50% Stainless Steel, 50% H ₂ O (by volume) <i>Note: rather than attempt to model the detail of the assembly end hardware, it has been chosen to mock up the hardware as a region of smeared water and stainless steel. Other hardware (e.g., grid spacers) is ignored.</i>

Cask:

Cask shell:

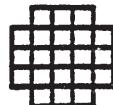
ID	136.0 cm
OD	196.0 cm
Material	Stainless Steel (SS304)
Height (outside)	476.2 cm
Height (inner cavity)	416.2 cm

Assembly basket:

Inner basket compartment dimensions	22 cm x 22 cm x 416.2 cm (per assembly position)
Material	Borated Stainless Steel (1 wt % boron)
Basket wall thickness	1 cm

Configuration:

21 assembly positions in a 5x5 array (no corner positions)
 Fuel assemblies are centered within basket region
 Cask is completely flooded with water

Material Compositions (densities in atoms/barn-cm)

<u>Zircaloy</u>	Cr	7.589E-05
	Fe	1.484E-04
	Zr	4.298E-02

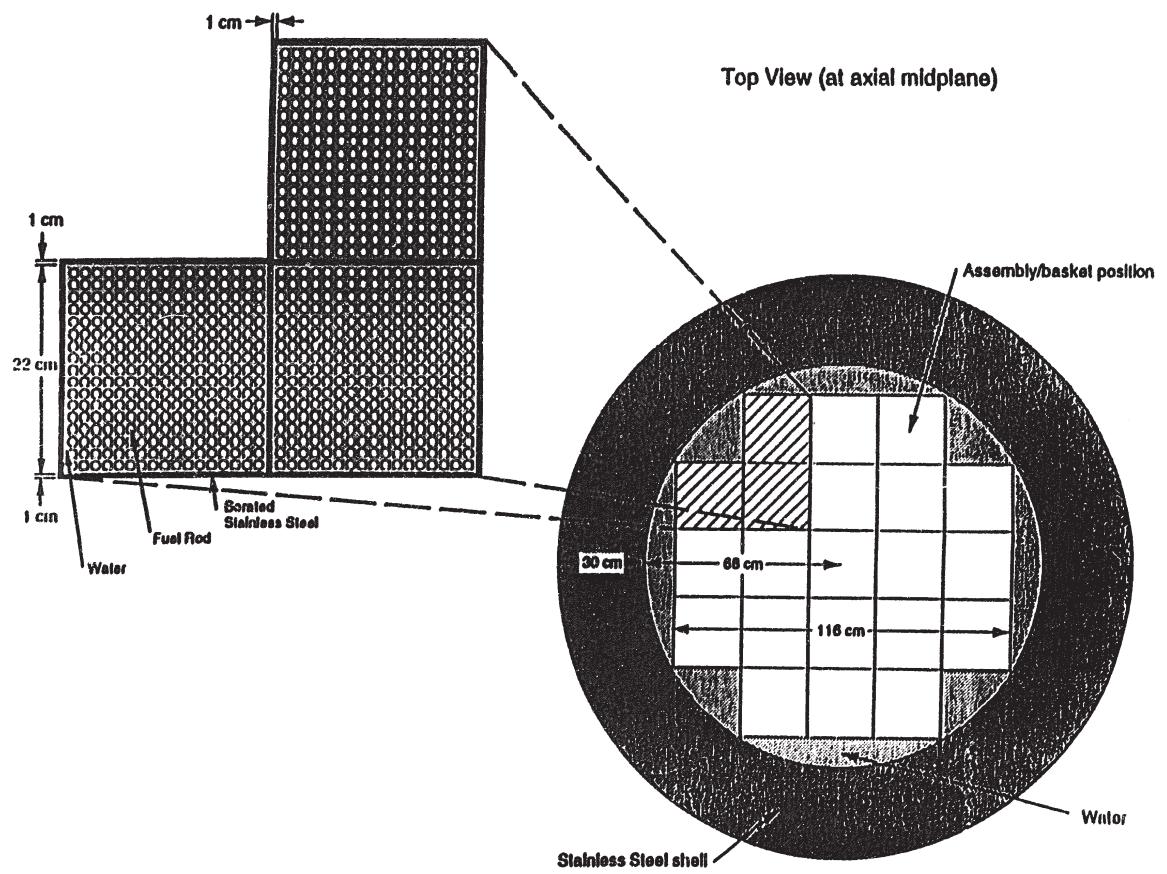
<u>Water</u>	H	6.662E-02
	O	3.331E-02

<u>Stainless Steel (SS304)</u>	Cr	1.743E-02
	Mn	1.736E-03
	Fe	5.936E-02
	Ni	7.721E-03

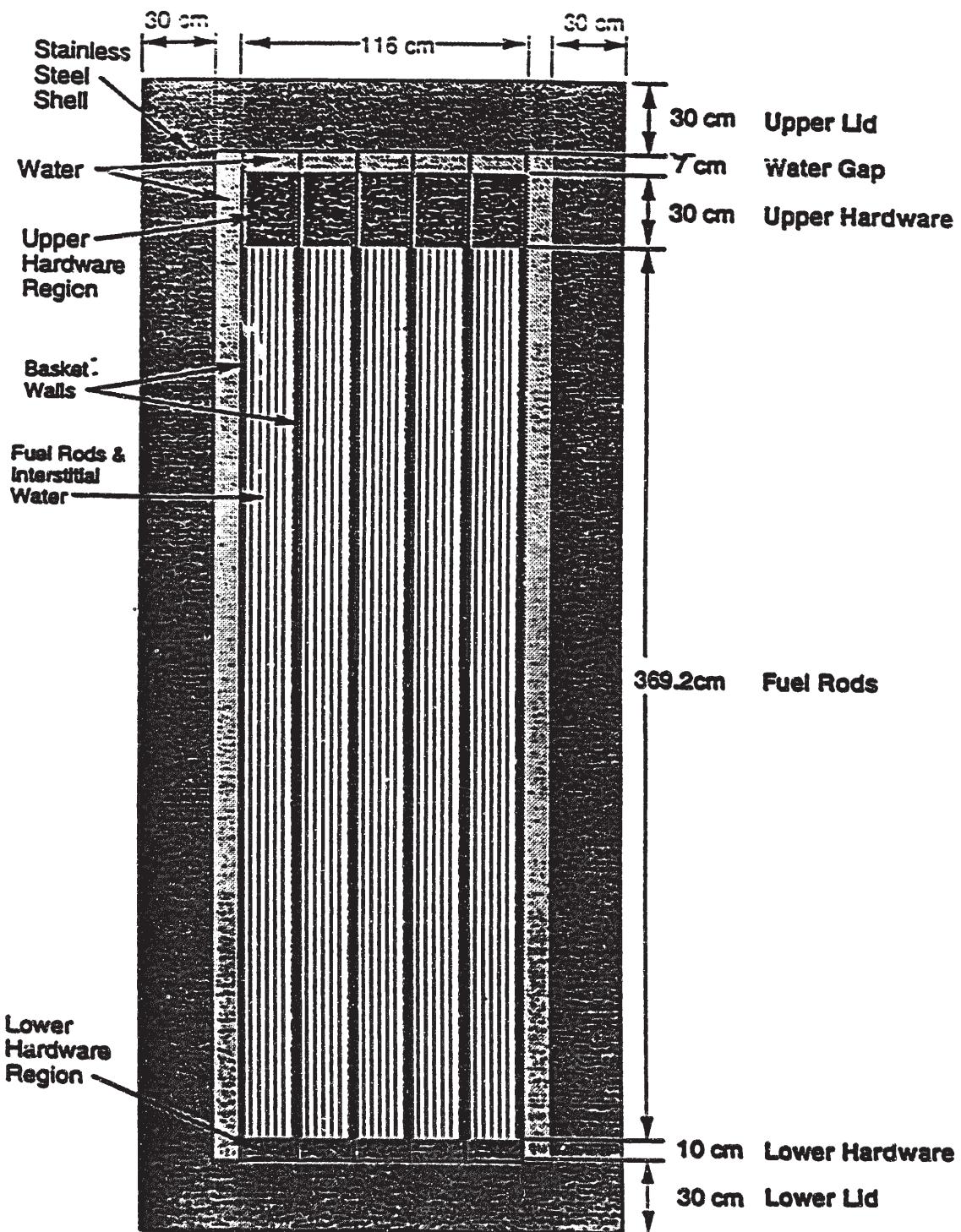
<u>Borated (1 wt %)</u>		
<u>Stainless Steel</u>	Cr	1.691E-02
	Mn	1.684E-03
	Fe	5.758E-02
	Ni	7.489E-03
	¹⁰ B	7.836E-04
	¹¹ B	3.181E-03

<u>50/50 Stainless Steel/Water Mixture</u>	H	3.338E-02
	O	1.669E-02
	Cr	8.714E-03
	Mn	8.682E-04
	Fe	2.968E-02
	Ni	3.860E-03

Drawings on the following pages illustrate some of the key aspects and dimensions of the proposed cask geometry.



SideView (cask)



Note: drawing is not to scale

