

電力中央研究所報告

使用済燃料の燃焼度評価技術の開発 -FPガンマ線計測による燃焼度指標測定の 数値シミュレーション-

研究報告:L16002

2017年5月

II 電力中央研究所



使用済燃料の燃焼度評価技術の開発 -FP ガンマ線計測による燃焼度指標測定の数値シミュレーション-

佐藤 駿介^{*1} 名内 泰志^{*2}

キーワード:使用済燃料 Key Word
 燃焼度
 燃焼度指標
 ガンマ線計測
 燃焼計算
 光子輸送計算

Key Words : Spent fuel Burnup Burnup indicator Gamma-ray measurement Depletion calculation Photon transport calculation

Development of burnup confirmation technique for spent fuel - Numerical simulation on measurement of burnup indicator by FP gamma-ray measurement -

Shunsuke SATO and Yasushi NAUCHI

Abstract

Numerical simulation on measurement of burnup indicator in assembly-wise geometry was carried out for burnup credit application. Variation of measured value of burnup indicator was evaluated for asymmetric burnup distribution inside a fuel assembly caused by loading patterns. Depletion calculation in multi assembly geometry, considering loading pattern in a typical PWR equilibrium core, was carried out by the MVP-BURN code, and pin-wise distribution of burnup and nuclide composition in the fuel assembly were evaluated to obtain pin-by-pin distribution of photon source. All types of fuel assembly in the equilibrium core were evaluated. Photon transport calculation was also performed by the PHITS code to design measurement system of burnup indicators, ¹³⁷Cs activity, ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs activity ratio, ¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs activity ratio, and ¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce activity ratio in assembly-wise geometry and detector response function was calculated for each fuel pin in fuel assembly. As a result, each burnup indicator varied within 6% relative standard deviation for fuel assembly discharged in 4th-cycle even by measurement from single direction of assembly and it is possible to estimate burnup of a target assembly within 6% accuracy by any burnup indicator. By measurement from 4 symmetric directions, variety of measured burnup indicator was decreased for fuel discharged in any cycle, and burnup could be estimated in 6% accuracy for fuel assembly in any cycle by any burnup indicator.

 ^{*1}原子力技術研究所 燃料・炉心領域 研究員
 *2原子力技術研究所 燃料・炉心領域 上席研究員

背 景

燃焼度クレジットの適用や炉管理データの信頼性向上、受払間差異の低減などには、 使用済燃料の燃焼度を実測に基づいて把握することが有益である。この際、特定の核分 裂生成物(FP)核種の放射能比などに代表される燃焼度の指標となる量(以下、燃焼度指標 (Burnup Indicator, BI))を測定し、対象とする燃料集合体の平均燃焼度を評価する。

当所では、燃料棒から切り出された燃料試料を用いて、FP ガンマ線スペクトル測定に よるBIの測定実験を実施し、各BIの長所や短所、精度などを検討してきた。しかし、評 価すべき燃焼度は集合体単位であるため、実際には燃料集合体に対するBIの測定が必要 となる。このBIの測定値は、燃料タイプや炉型、測定体系や燃料装荷履歴などに影響さ れる。これらの中でも、燃料装荷履歴は、炉内で隣接する集合体が対象集合体内の燃料 棒燃焼度の分布に影響を与えるため、BIの測定値に影響が大きいと考えられる。

目 的

炉心内での燃料装荷条件が燃焼度評価に及ぼす影響を評価する。

主な成果

典型的な PWR 平衡炉心の燃料装荷条件を考慮した燃料棒単位の核種組成分布を作成し、 その分布を用いて燃料集合体に対する各 BIの測定を模擬した。

(1)燃焼計算コード MVP-BURN を用いて、中心に対象集合体、その周囲に8体の隣接集合体を配置した2次元の3×3集合体モデルで燃焼計算を実施し、燃料棒単位の燃焼度及び核種組成の分布を評価した。この際に考慮した3×3集合体モデルは39通りあり、これで 炉内の集合体装荷条件が全て網羅されている。この計算により、周囲の集合体を考慮しない単一集合体燃焼計算よりも現実的な燃料棒燃焼度の分布を評価した結果(図1に評価例を示す)、特に第1サイクル終了時には燃料棒燃焼度の相対標準偏差が4%(単一集合体燃焼計算)から最大で26%(3×3集合体燃焼計算)まで拡大することを明らかにした。

(2)粒子輸送計算コードPHITSを用いて、燃料集合体に対するBIの測定に適した体系を設計し(図 2)、検出器で得られる測定値に対する各燃料棒の寄与割合を評価した。これと(1)で得られた分布により、各BIの測定を模擬して測定値を評価し(図 3)、集合体と検出器位置によるばらつきを評価した(図 4)。各BIが燃焼度に対して比例すると仮定した場合、使用済燃料輸送キャスクでは3,4 サイクル終了時の燃料集合体を対象とするため、いずれのBIでも1検出器による測定で燃焼度を6%以内の精度で評価可能であることがわかった。また、1検出器での測定では低燃焼度で誤差が大きくなるが、4検出器で測定することにより、全ての各サイクル終了時点の燃料に対して6%以内の精度で燃焼度を評価可能となることも明らかとなった。

ii



図1 4サイクル照射後のウラン燃料集合体における燃料棒燃焼度分布 (左:隣接集合体を考慮しない場合、中/右:隣接集合体を考慮した場合)



図2 燃焼度指標測定体系の概念図





関連報告書: [1]L14003「高燃焼度 PWR 燃料の放射能比測定と燃焼解析」(2015.07)

次

1.	緒言	i 1	
2.	燃燒	計算2	2
	2.1	計算条件2	2
,	2.2	計算結果	;
	2.3	ガンマ線源分布の評価	,
3.	ガン	マ線測定の数値シミュレーション7	1
	3.1	測定体系の設計	,
	3.2	検出器応答の評価)
4.	解析	- 結果)
5.	考察	٤14	ŀ
6.	結言	r	2
参	考文献	č	2

1. 緒言

使用済燃料の燃焼度を実測に基づいて把握する ことは、燃焼度クレジットの適用や炉管理データ の信頼性向上、原子力発電所と再処理工場間の受 払間差異の低減などにおいて有益である。ここで は、燃焼度クレジットの適用における燃焼度推定 に着目して説明する。

原子力発電プラントの運転に伴い使用済燃料が 発生する。使用済燃料は長期的に管理する必要が あるが、原子力発電所の使用済燃料プールや中間 貯蔵施設の保管容量には限りがある。また、使用 済燃料を輸送する際に使用されるキャスクも熱 的・核的な制限から、キャスク1体に収納可能な 燃料集合体の体数も制限される。

従来の臨界安全設計では、保守的に安全性を確 保するため、燃料が未燃焼の条件(新燃料仮定)が 基本的に用いられてきた[1]。この方法では、臨 界に対する安全裕度は最大となるが、近年の炉心 解析の精度向上により、核燃料の燃焼に伴う反応 度の低下を臨界安全設計において考慮すること (燃焼度クレジット)が可能となってきた[1]。燃焼 度クレジットを適用することにより、合理的な安 全裕度を設定することが可能となり、使用済燃料 の輸送や貯蔵の効率を向上させることができる [1]。

一方で、燃焼度クレジットを適用することによ り従来よりも臨界に対する裕度は小さくなる。こ れに伴い、燃焼度クレジットの適用対象とする燃 料集合体を取り違える誤装荷によって、臨界事故 が発生する可能性も生じる[2]。そのため、国際 原子力機関 IAEA(International Atomic Energy Agency)により、対象とする燃料集合体の燃焼度 を実測に基づいて確証することが求められている [3]。燃焼度確証時には、燃焼度に対応する燃焼 度指標の測定値と、炉管理データに基づく燃焼計 算により得られる燃焼度指標の一致、または燃焼 度指標の測定値から推定される燃焼度と炉管理デ ータにおける燃焼度の一致を確認する。この燃焼 度指標は、使用済燃料プールや中間貯蔵施設にお ける使用済燃料の円滑な管理や運用のため、非破 壊で測定する必要があり、一般的には燃焼度指標 として中性子またはガンマ線を計測することによ り得られる量を使用する[4]。

当所では、燃焼度確証手法に関する検討を継続 的に実施しており、これまでに先行照射燃料の燃 料棒から切り出された燃料試料を用いて、ガンマ 線スペクトル測定による燃焼度指標の測定実験と 燃焼解析を実施してきた[5-9]。具体的には、¹³⁷Cs 放射能、¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 放射能比、¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs 放射能比、 ¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比を対象として、各指標を用い る手法の長所や短所、精度などを評価した。

しかしながら、実際の燃焼度クレジットの適用 対象は燃料集合体単位であるため、燃料棒体系か ら燃料集合体体系への拡張が必要となる。この際、 炉型や燃料のタイプ、炉内での装荷履歴、測定体 系などが燃焼度指標の測定値に影響を与えると考 えられる。その中でも、対象とする燃料集合体の 炉内での装荷履歴は、集合体内の燃料棒ごとの燃 焼度の分布に影響を与えるため、燃焼度指標の測 定値に対する影響が大きいと考えられる。具体的 には、対象とする燃料集合体が取り出しまでに経 験する各運転サイクルにおいて、対象燃料集合体 の炉心内での装荷位置と隣接する燃料集合体の影 響により、集合体平均で同じ到達燃焼度でも燃料 棒ごとの燃焼度の分布に集合体間で差異(ばらつ き)が生じる。燃料棒燃焼度の分布がばらつくこ とによって、燃料棒ごとの放射能もばらつくため、 そのばらつきが燃焼度指標の測定値に影響する。

そこで、本研究では、典型的な PWR 平衡炉心 の燃料装荷パターンにおいて、サイクル毎に隣接 する集合体の影響を考慮した 3×3 集合体体系での 燃焼計算を実施し、炉心に装荷されている全燃料 集合体を網羅するパターン数の燃料棒燃焼度分布 を評価する。次に、各集合体の燃料棒単位の核種 組成分布に応じてガンマ線源分布を評価し、その ガンマ線源からのガンマ線輸送計算により各燃焼 度指標の測定を模擬した。これにより、燃料集合 体体系における各燃焼度指標測定時のばらつきを 評価し、測定された燃焼度指標から推定される燃 焼度の精度を把握することとした。

2. 燃焼計算

2.1 計算条件

炉心内での装荷位置や隣接集合体の影響を考慮 した燃料集合体の燃料棒単位の組成を、典型的な 3 ループ PWR 平衡炉心の燃料装荷パターン[10]に 含まれる全燃料に対して作成することとした。

当該炉心は、最高取出燃焼度 55GWd/tHM の 17×17 型 UO2燃料集合体(以下、U 燃料)及びガド リニア添加 UO2燃料棒を含む UO2燃料集合体(以 下、Gd 燃料)が装荷されており、一定出力条件で 取替炉心の安全性の要件を満たしている。なお、 この平衡炉心は AEGIS/SCOPE2 コードシステム [11, 12]を用いて作成されている。図 2.1(a)と図 2.1(b)にそれぞれ炉心内に存在する全 U 燃料と全 Gd 燃料の各サイクル終了時の集合体平均燃焼度 を示す。

一般的な平衡炉心では 1/4 対称の燃料装荷パタ ーンをとるため、全燃料の 1/4 を考慮することに より、炉心内にある全燃料を考慮したことと同等 となる。具体的には、3 ループ PWR の炉心は 157 体の燃料集合体で構成されるため、1/4 対称性を 持たない炉心中心の燃料集合体 1 体を除き、156 / 4=39 体の燃料を考えれば良い。この 39 体のうち、 U燃料と Gd 燃料は新燃料の状態でそれぞれ 6 体 ずつあり、U 燃料は 3 サイクル取り出し燃料が 4 体と4サイクル取り出し燃料が 2 体、Gd 燃料は 3 サイクル取り出し燃料が 5 体、4 サイクル取り出 し燃料が 1 体ある。3 サイクルで取り出される燃 料には、1,2,3 サイクル終了時点での3 通りの分 布があり、4 サイクルで取り出される燃料には、 1,2,3,4 サイクル終了時点での4 通りの分布があ る。このため、1,2,3 サイクル終了時点がそれぞ れ12 通り(U燃料6 通り、Gd 燃料6 通り)、4 サイ クル終了時点が3 通り(U燃料2 通り、Gd 燃料1 通り)、計39 通りの燃焼度分布が得られる。この 39 通りの分布を考慮することで平衡炉心内の全 燃料を網羅したこととなる。

ここで、各サイクル終了時の燃焼度は、2 種類 の集合体タイプ毎に全て同じと仮定した。実際に は図 2.1 に示したように各サイクル終了時点で集 合体燃焼度はある程度のばらつきを持つが、集合 体燃焼度そのものにばらつきがあると集合体燃焼 度が違うことによる燃焼度指標の変化なのか装荷 条件による燃焼度指標の変化なのかがわからず、 燃焼度指標のばらつきを評価できなくなるため、 上記仮定を採用した。今回の検討において使用し た各運転サイクルでの燃焼度を表 2.1 に示す。表 2.1 の燃焼度は、集合体タイプごとに図 2.1(a)と図 2.1(b)にそれぞれ示した全燃料集合体のサイクル 毎の平均値を採用している。また、表 2.1 中の BOC は Beginning of Cycle (サイクル初期)、 MOC は Middle of Cycle (サイクル中期)、EOC は End of Cvcle (サイクル末期)である。

対象とする燃料集合体に対する隣接集合体の影響を考慮するために、中心に対象燃料集合体を配置し、その周囲に装荷パターンを考慮した燃料集合体を8体配置した3×3集合体体系で燃焼計算を行うこととした。熱中性子炉における中性子の平均自由行程から、対象集合体に対してその外周1 周分の燃料集合体を配置することによって、集合体間の相互作用を十分に考慮できる。この計算を行う際、計算開始時点では対象の燃料集合体は1 サイクル目で新燃料であるが、周囲の燃料集合体は1 サイクル目の気合体がある場合には事前にその組成を作成しておくための燃焼計算を行う必要があ る。その計算の際にも隣接集合体が新燃料でなけ れば、そのための 3×3 集合体燃焼計算を行わなく てはならない。また、今回は対象とする集合体内 での燃料棒燃焼度の分布を評価するため、燃料棒 1本1本ごとに別々の燃焼領域として定義する必 要があり、対象集合体だけに着目しても最低で 264 領域となる。これに加えて、周囲の集合体の 燃料棒も考慮するとなると、膨大な燃焼領域数に なり計算ができない。

本研究ではこれらの問題を解決するため、周囲 の燃料は単一集合体燃焼計算により評価し、3×3 集合体燃焼計算では周囲の燃料は対象サイクルの MOC 一定の仮定を適用することとした。ここで、 U 燃料は反応度が燃焼度に対しておおむね線形に 減少していくと考えることができ、また、Gd 燃 料は一般に 15GWd/tHM 程度で反応度の最大値を とり、15GWd/tHM以下と15GWd/tHM以上はそれ ぞれ燃焼度に対して反応度はおおむね線形で近似 できる。表2.1に示したように今回のGd燃料の燃 焼履歴は第1 サイクル終了時の燃焼度が 17GWd/tHMとなっており、おおむねGd燃料が最 大値をとる燃焼度となっている。以上のことから、 U燃料とGd燃料ともに各サイクルのMOCでは各 サイクルの平均的な反応度となっており、反応度 の観点からは今回採用した周囲の燃料を対象サイ クルの MOC 一定で近似することは妥当であると 考えられる。以下に、計算の具体的な手順と条件 を示す。

まず、単一集合体体系の2次元無限格子配列で U燃料とGd燃料の両タイプの燃料集合体に対す る燃焼計算を実施した。この計算により、各サイ クルのMOCでの燃料棒単位の集合体組成を作成 した。この際、集合体内燃料棒配置の1/8対称性 を仮定した。

次に、対象とする燃料集合体を中心に置いた 3×3 集合体体系において、対象集合体のみ燃焼さ せる燃焼計算を実施した。対象集合体の周囲は、 装荷パターンに従った U燃料または Gd 燃料の対

象サイクルの MOC の組成で集合体を配置し、燃 焼はさせない条件とした。周囲の境界条件は完全 反射境界条件とした。この計算をサイクル毎に周 囲の集合体組成を装荷パターンに従って変更し、 対象集合体のサイクル終了時の組成を評価した。 3×3 集合体体系での燃焼計算の際には、対象集合 体内の燃料棒の対称性は取り扱わず、17×17型燃 料集合体の全燃料棒を別々の燃焼領域として取り 扱い、集合体内での燃料棒単位組成を評価した。 評価対象とする燃料集合体が炉心最外周面に面隣 接または点隣接する場合には、集合体の代わりに 減速材を配置し、装荷位置を模擬した。この際に はバッフル板は無視した。計算体系の例として、 4 サイクル取り出し燃料の U 燃料 2 通りと Gd 燃 料1通りに対する装荷パターンを考慮した計算体 系をそれぞれ図 2.2(a)から図 2.2(c)に示す。ただし、 図 2.2 中の"U"と"G"はそれぞれ U 燃料と Gd 燃料 を表し、次の数字"1,2,3,4"はサイクル数を表す。 また、"W"は炉心最外周の減速材を配置したこと を意味する。

上記の2ステップによる燃焼計算を実施するこ とにより、現実的な計算コストで、隣接集合体や 装荷位置を考慮した燃料棒単位の組成を作成した。

これらの燃焼計算では、計算コードには MVP-BURN[13]、評価済核データライブラリには JENDL-4.0[14]、燃焼チェーンには ChainJ40 の汎 用チェーン u4cm6fp119bp14T_J40[15]を使用した。 燃焼領域の設定は、U 燃料と Gd 燃料ともに燃料 棒の径方向分割はせず、1 燃料棒あたり 1 領域と した。基本の燃焼ステップは、0-0.5GWd/tHM で は 0.1 刻み、0.5-3.0GWd/tHM では 0.5 刻み、3.0-10.0GWd/tHM は 1.0 刻み、10GWd/tHM 以降は 2.0 刻みとした。これに加えて、単一集合体燃焼計算 時には各サイクルの MOC の燃焼度点を追加し、 3×3集合体計算時には各サイクルの EOC の燃焼度 点を追加して確保した。また、ヒストリー数の設 定は、バッチサイズ(1 バッチあたりの中性子発生 数)が 1.28×10⁶, アクティブバッチ数が 200, スキッ プバッチ数が 20 とし、当所保有の大規模並列計 算機にて MPI(Message Passing Interface)による 256 並列で計算を実施した。



(b) Gd 燃料の場合



表 2.1 各燃料タイプに対する各サイクル開始・ 中間・終了時の平均化した燃焼度

燃料集合体タイプ		U燃料	
Cuala	Bur	nup (GWd/	tHM)
Cycle	BOC	MOC	EOC
1	0.00	5.93	11.86
2	11.86	20.15	28.44
3	28.44	35.90	43.37
4	43.37	48.33	53.29
燃料集合体タイプ		Gd燃料	
Cuele	Bur	nup (GWd/	tHM)
Cycle	BOC	MOC	EOC
1	0.00	8.51	17.02
2	17.02	24.85	32.68
3	32.68	39.84	47.01
4	47.01	50.37	53.73

第11	ナイクル	,		第2ち	トイクル	,
w	w	w		G1	U3	G2
G2	U1	w	\rightarrow	U1	U2	U2
G2	U2	U2		w	w	U1
第3+	ナイクル	,	∠	第45	トイクル	,
G3	U2	U3		U2	U3	G3
G1	U3	U4	\rightarrow	U3	U4	U3
G2	G4	U3		G4	U3	U2
	(a) U\$	- 然料の	場合(1)	
第1サ	・イクル			第2サ	イクル	
U2	w	w		U1	U2	G2
U2	U1	w	\rightarrow	w	U2	U3
G2	G2	w		W	U1	G1
第3サ	・イクル		2	第4サ	イクル	
U3	U4	U3		G1	G2	G4
G4	U3	U2	\rightarrow	U1	U4	G2
G2	G1	G3		w	U1	G1
	(b) U\$	然料の	場合(2)	
第1サ	イクル			第2サ	イクル	
U2	G3	U2		W	w	W
U3	G1	U3	\rightarrow	U1	G2	U1
G3	G3	G3		U2	G2	U2
			4			
第3サ	・イクル			第4サ	イクル	
G3	U4	G3		U4	U3	G1
G3	G3	G3	\rightarrow	U3	G4	G2
U3	G1	U3		G1	G2	U4

(c) Gd 燃料の場合

図 2.2 4サイクル取り出し燃料に対する各サイク ルの 3×3 集合体計算モデル(U:U燃料、G:Gd燃 料、W:減速材、数字:サイクル数、中央が対象 燃料)

2.2 計算結果

2.1 節で示した燃焼計算により、集合体内燃料 棒単位での燃焼度及び核種組成の分布を評価した。 隣接集合体の影響を考慮した 3×3 集合体体系での 燃焼計算により、単一集合体燃焼計算では得られ ない非対称の燃焼度及び核種組成の分布が得られ た。

解析結果の例として、U 燃料と Gd 燃料の 4 サ イクル終了時における集合体内の燃料棒燃焼度の 分布をそれぞれ図 2.3 と図 2.4 に示す。図 2.3(a)は 周囲の集合体を考慮しない単一燃料集合体計算に よる結果であり、図 2.3(b)と図 2.3(c)は装荷パター ンに従う隣接集合体を考慮した 3×3 集合体計算に よる結果である。Gd 燃料も同様に、図 2.4(a)は単 一集合体計算、図 2.5(b)は 3×3 集合体計算による 結果である。なお、図 2.3(b)、図 2.3(c)、図 2.4(b) は、それぞれ図 2.2(a)、図 2.2(b)、図 2.2(c)に示し た計算モデルによる結果である。集合体平均燃焼 度は両燃料タイプごとに単一集合体計算と 3×3 集 合体計算で同じであり、図 2.3 と図 2.4 はそれぞ れ U 燃料と Gd 燃料でカラーマップのスケールを 統一している。

図 2.3 と図 2.4 より、単一集合体燃焼計算とは 異なり、3×3 集合体燃焼計算により、U燃料と Gd 燃料ともに集合体内での燃料棒燃焼度の分布に偏 りが発生していることがわかる。これは対象とす る集合体の装荷位置により隣接する集合体のタイ プ、サイクル数が異なり、出力分布が単一集合体 体系とは異なることに起因している。その影響は、 U燃料では、単一集合体燃焼計算時は最大燃料棒 燃焼度と最小燃料棒燃焼度の差が 5.4GWd/tHM 程 度 で あ る が 、3×3 集 合 体 燃 焼 計 算 時 は 15.8GWd/tHM 程度に拡大する。Gd 燃料では、単 一集合体で 14.7GWd/tHM 程度から 3×3 集合体で 21.0GWd/tHM 程度まで拡大する結果となった。 この分布は平衡炉心の装荷パターンを考慮したも のであり、より現実的な分布といえる。

また、集合体内の燃料棒平均燃焼度のばらつき を、標準偏差を平均値で除した相対標準偏差とし てまとめた結果を図 2.5 に示す。図 2.5(a)と図 2.5(b)はそれぞれ U 燃料と Gd 燃料の結果であり、 系列の"MultiAsy1"から"MultiAsy6"は 3×3 集合体 燃焼計算を行った 6 通りの集合体で、"SingleAsy" は単一集合体燃焼計算であることを表す。図 2.5(a)より、U 燃料は隣接集合体の影響を考慮す る 3×3 集合体燃焼計算を実施することにより燃料 棒間の燃焼度のばらつきは拡大し、燃焼とともに ばらつきは小さくなることがわかる。また、ばら つきが最大となる1サイクル終了時点に着目する と、単一集合体燃焼計算では相対標準偏差が約 4%であるが、3×3集合体燃焼計算により相対標準 偏差は最大で約26%まで拡大することも明らかと なった。図 2.5(b)より、Gd 燃料は隣接集合体の影 響を考慮した燃焼計算を実施しても、必ずしもば らつきは拡大するわけではないことがわかる。た だし、標準偏差という形で見てもばらつきは拡大 していないが、図 2.4 からわかるように分布に偏 りは生じていることに注意が必要である。また、 単一集合体燃焼計算と 3×3 集合体燃焼計算で、そ れぞれの燃料棒燃焼度の相対標準偏差は全サイク ルを通して最大でも4%程度の差異しか発生しな いこともわかった。

	_			_	_			_	_	_	_				_	
51.1	50.7	50.8	51.2	51.7	52.1	52.0	52.0	52.2	52.0	52.0	52.1	51.7	51.2	50.8	50.7	51.1
50.7	50.4	50.8	51.6	52.6	53.9	52.8	52.8	53.9	52.8	52.8	53.9	52.6	51.6	50.8	50.4	50.7
50.8	50.8	52.1	54.2	55.1		54.6	54.5		54.5	54.6		55.1	54.2	52.1	50.8	50.8
51.2	51.6	54.2		55.8	55.3	53.7	53.5	54.7	53.5	53.7	55.3	55.8		54.2	51.6	51.2
51.7	52.6	55.1	55.8	54.8	55.3	53.8	53.7	54.9	53.7	53.8	55.3	54.8	55.8	55.1	52.6	51.7
52.1	53.9		55.3	55.3		55.0	54.9		54.9	55.0		55.3	55.3		53.9	52.1
52.0	52.8	54.6	53.7	53.8	55.0	53.7	53.7	54.9	53.7	53.7	55.0	53.8	53.7	54.6	52.8	52.0
52.0	52.8	54.5	53.5	53.7	54.9	53.7	53.7	54.9	53.7	53.7	54.9	53.7	53.5	54.5	52.8	52.0
52.2	53.9		54.7	54.9		54.9	54.9		54.9	54.9		54.9	54.7		53.9	52.2
52.0	52.8	54.5	53.5	53.7	54.9	53.7	53.7	54.9	53.7	53.7	54.9	53.7	53.5	54.5	52.8	52.0
52.0	52.8	54.6	53.7	53.8	55.0	53.7	53.7	54.9	53.7	53.7	55.0	53.8	53.7	54.6	52.8	52.0
52.1	53.9		55.3	55.3		55.0	54.9		54.9	55.0		55.3	55.3		53.9	52.1
51.7	52.6	55.1	55.8	54.8	55.3	53.8	53.7	54.9	53.7	53.8	55.3	54.8	55.8	55.1	52.6	51.7
51.2	51.6	54.2		55.8	55.3	53.7	53.5	54.7	53.5	53.7	55.3	55.8		54.2	51.6	51.2
50.8	50.8	52.1	54.2	55.1		54.6	54.5		54.5	54.6		55.1	54.2	52.1	50.8	50.8
50.7	50.4	50.8	51.6	52.6	53.9	52.8	52.8	53.9	52.8	52.8	53.9	52.6	51.6	50.8	50.4	50.7
51.1	50.7	50.8	51.2	51.7	52.1	52.0	52.0	52.2	52.0	52.0	52.1	51.7	51.2	50.8	50.7	51.1

(a) 単一集合体燃焼計算の場合

53.1	52.5	52.5	52.7	52.9	53.1	52.8	52.6	52.5	52.1	52.0	51.4	50.6	49.2	49.8	50.1	51.2
50.2	49.9	50.3	51.4	52.7	53.8	52.3	52.1	53.4	51.4	51.2	52.4	50.1	48.8	48.1	48.3	49.7
49.0	50.4	51.4	53.6	53.7		54.1	53.6		52.9	52.6		52.9	51.9	49.3	48.3	50.1
49.5	50.1	52.7		53.0	55.7	52.1	52.6	53.4	52.0	51.6	53.0	53.7		51.9	49.2	51.1
50.3	52.0	54.3	55.1	53.7	54.5	50.9	51.0	54.2	52.2	51.6	53.4	53.0	53.6	52.8	50.8	52.0
51.1	53.1		54.7	54.0		53.6	53.2		53.4	52.2		52.2	50.7		53.3	53.2
51.2	51.3	53.5	52.1	52.0	55.0	51.6	51.2	52.3	50.1	49.3	53.1	52.6	50.5	51.8	50.8	54.6
49.6	50.4	54.6	53.1	53.3	54.9	52.9	52.7	54.0	51.9	52.4	53.8	51.1	53.2	54.4	52.5	54.8
51.3	53.8		54.7	54.5		54.8	54.5		54.4	53.8		53.2	53.8		54.7	54.5
51.4	52.7	54.8	53.2	53.0	54.3	52.7	52.6	53.8	52.1	51.9	53.6	52.0	52.5	54.7	52.6	57.1
51.1	52.0	54.0	52.6	52.0	54.1	52.4	51.9	54.5	51.9	51.9	53.1	51.8	52.2	53.9	53.7	55.9
49.8	52.2		55.3	54.0		53.4	52.9		52.7	52.7		52.8	53.4		54.0	56.4
47.6	51.5	51.9	52.9	51.8	52.7	50.7	53.0	54.7	53.0	53.4	55.7	55.6	57.3	56.4	55.6	59.3
49.9	49.9	52.5		55.7	55.1	53.0	53.0	54.4	53.3	53.8	56.3	56.6		56.8	55.1	58.2
47.9	49.6	51.6	54.4	55.3		55.3	55.1		55.1	55.6		57.2	56.7	54.3	55.5	59.5
50.4	50.2	50.8	51.9	52.8	54.7	54.5	55.0	56.6	55.3	56.1	57.6	56.4	55.9	55.0	57.2	60.1
54.1	53.8	54.4	55.2	56.1	56.8	56.9	56.6	58.7	58.3	60.8	61.1	60.8	61.0	61.0	61.6	62.9

(b) 3×3 集合体燃焼計算の場合(1)

(図 2.2(a)の計算モデルによる計算結果)

-																
58.8	56.5	55.7	55.4	55.3	55.0	54.4	53.8	53.3	52.6	53.9	52.9	51.9	50.5	48.8	48.8	50.2
62.4	57.4	54.4	54.5	53.5	55.5	53.9	53.7	54.7	52.5	52.0	52.9	50.5	49.0	47.0	46.7	48.7
62.1	55.8	54.8	56.2	56.3		52.8	53.3		53.1	52.5		52.5	50.1	48.6	47.6	48.8
62.1	56.7	57.0		56.2	52.8	53.0	51.4	53.0	50.8	51.4	52.7	53.4		51.2	48.3	49.7
62.5	57.1	58.1	57.7	55.6	54.6	52.8	51.4	51.4	51.0	51.0	53.1	52.1	53.1	52.2	50.0	50.6
61.0	59.1		56.8	55.8		55.2	54.9		53.3	53.7		53.3	52.1		48.8	49.9
59.8	56.4	56.4	54.0	53.6	52.0	53.1	52.8	54.1	52.2	51.7	51.8	50.3	50.8	52.2	50.8	50.0
60.2	56.1	55.8	53.2	53.1	54.8	52.8	52.6	54.1	52.2	50.8	52.2	50.6	49.3	51.5	49.9	51.1
59.1	57.1		55.0	54.6		53.1	54.6		54.5	54.0		53.2	51.7		52.2	51.6
57.3	54.8	55.5	51.1	52.9	54.2	52.9	52.9	54.3	52.6	52.5	54.1	52.4	50.7	51.2	50.6	50.8
58.1	55.4	55.8	53.9	53.3	54.9	53.3	53.1	53.3	53.1	53.1	54.3	52.8	52.8	54.0	50.9	52.0
56.7	56.1		54.8	55.8		55.6	55.4		55.4	55.4		55.2	54.9		53.8	52.4
57.1	53.7	56.0	56.5	55.3	55.5	53.3	52.9	54.7	53.0	53.2	55.4	54.0	55.6	54.9	49.3	51.9
55.7	52.4	53.7		54.1	54.3	52.9	52.9	54.5	52.9	53.7	55.8	55.9		50.9	50.1	52.0
54.8	50.4	51.9	53.4	54.5		54.4	54.6		54.2	54.4		55.1	54.1	51.6	47.9	51.2
55.0	51.4	50.6	50.4	52.1	53.7	51.4	52.3	54.0	52.4	52.8	53.6	51.8	50.9	50.0	47.2	51.1
56.6	52.0	50.8	50.8	50.8	51.8	51.9	51.6	51.3	51.4	49.1	50.4	50.3	50.2	50.1	49.1	53.4

(c) 3×3 集合体燃焼計算の場合(2)

(図 2.2(b)の計算モデルによる計算結果)図 2.3 4サイクル照射後のU燃料集合体における燃料棒燃焼度の分布(単位:GWd/tHM)

52.8	52.3	52.4	52.7	53.0	53.1	53.3	53.6	53.8	53.6	53.3	53.1	53.0	52.7	52.4	52.3	52.8
52.3	51.8	52.0	52.9	53.7	44.2	53.9	54.2	55.5	54.2	53.9	44.2	53.7	52.9	52.0	51.8	52.3
52.4	52.0	42.5	55.3	56.4		55.6	55.9		55.9	55.6		56.4	55.3	42.5	52.0	52.4
52.7	52.9	55.3		57.2	56.4	43.9	54.7	56.2	54.7	43.9	56.4	57.2		55.3	52.9	52.7
53.0	53.7	56.4	57.2	56.3	56.6	54.9	55.0	56.3	55.0	54.9	56.6	56.3	57.2	56.4	53.7	53.0
53.1	44.2		56.4	56.6		56.1	56.3		56.3	56.1		56.6	56.4		44.2	53.1
53.3	53.9	55.6	43.9	54.9	56.1	44.0	54.9	56.4	54.9	44.0	56.1	54.9	43.9	55.6	53.9	53.3
53.6	54.2	55.9	54.7	55.0	56.3	54.9	55.1	56.5	55.1	54.9	56.3	55.0	54.7	55.9	54.2	53.6
53.8	55.5		56.2	56.3		56.4	56.5		56.5	56.4		56.3	56.2		55.5	53.8
53.6	54.2	55.9	54.7	55.0	56.3	54.9	55.1	56.5	55.1	54.9	56.3	55.0	54.7	55.9	54.2	53.6
53.3	53.9	55.6	43.9	54.9	56.1	44.0	54.9	56.4	54.9	44.0	56.1	54.9	43.9	55.6	53.9	53.3
53.1	44.2		56.4	56.6		56.1	56.3		56.3	56.1		56.6	56.4		44.2	53.1
53.0	53.7	56.4	57.2	56.3	56.6	54.9	55.0	56.3	55.0	54.9	56.6	56.3	57.2	56.4	53.7	53.0
52.7	52.9	55.3		57.2	56.4	43.9	54.7	56.2	54.7	43.9	56.4	57.2		55.3	52.9	52.7
52.4	52.0	42.5	55.3	56.4		55.6	55.9		55.9	55.6		56.4	55.3	42.5	52.0	52.4
52.3	51.8	52.0	52.9	53.7	44.2	53.9	54.2	55.5	54.2	53.9	44.2	53.7	52.9	52.0	51.8	52.3
52.8	52.3	52.4	52.7	53.0	53.1	53.3	53.6	53.8	53.6	53.3	53.1	53.0	52.7	52.4	52.3	52.8
		(0	、 、	224		H.	~ 1	1.0		\rightarrow \rightarrow 1	hake			•		
		(a)	単.		€	台	本	然 / 5	も計	,算	.の	場	合		
51.6	51.0	(a 50.8) 51.0	.申. 51.0	51.0	集´ 51.2	合1 51.4	本 戊 51.6	 51.5	も計 53.1	►算 52.5	.D 52.6	場 52.2	合 53.2	53.6	53.2
51.6 49.8	51.0 49.3	(a 50.8 49.1) 51.0 48.7	早. 51.0 50.5	51.0 43.1	集 51.2 50.2	合1 51.4 51.2	4 虏 51.6 52.7	然烤 51.5 51.2	古言 53.1 50.6	►算 52.5 43.1	52.6 50.5	場 52.2 50.4	53.2 48.6	53.6 50.1	53.2 51.0
51.6 49.8 49.2	51.0 49.3 48.1	(a 50.8 49.1 40.4) 51.0 48.7 51.7	早 51.0 50.5 52.9	51.0 43.1	集 51.2 50.2 51.6	51.4 51.2 51.4	本 熮 51.6 52.7	次/5 51.5 51.2 52.2	53.1 50.6 50.5	►算 52.5 43.1	52.6 50.5 53.0	場 52.2 50.4 52.0	53.2 48.6 41.1	53.6 50.1 47.9	53.2 51.0 49.8
51.6 49.8 49.2 49.1	51.0 49.3 48.1 49.1	(a 50.8 49.1 40.4 51.9) 51.0 48.7 51.7	51.0 50.5 52.9 54.2	51.0 43.1 52.9	集 51.2 50.2 51.6 40.0	51.4 51.2 51.4 51.4	争 虏 51.6 52.7 51.7	51.5 51.2 52.2 50.7	生言 53.1 50.6 50.5 41.9	*算 52.5 43.1 52.7	52.6 50.5 53.0 54.6	場 52.2 50.4 52.0	53.2 48.6 41.1 52.4	53.6 50.1 47.9 49.8	53.2 51.0 49.8 50.4
51.6 49.8 49.2 49.1 50.3	51.0 49.3 48.1 49.1 49.6	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6) 51.0 48.7 51.7 54.0	51.0 50.5 52.9 54.2 53.8	51.0 43.1 52.9 52.7	集 51.2 50.2 51.6 40.0 51.5	51.4 51.2 51.4 51.4 50.9 51.8	◆火 51.6 52.7 51.7 53.8	51.5 51.2 52.2 50.7 52.1	53.1 50.6 50.5 41.9 51.4	· 舁 52.5 43.1 52.7 52.9	52.6 50.5 53.0 54.6 53.0	場 52.2 50.4 52.0 54.6	53.2 48.6 41.1 52.4 54.4	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1
51.6 49.8 49.2 49.1 50.3 50.5	51.0 49.3 48.1 49.1 49.6 43.9	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6) 51.0 48.7 51.7 54.0 53.0	51.0 50.5 52.9 54.2 53.8 53.5	51.0 43.1 52.9 52.7		51.4 51.2 51.4 50.9 51.8 52.8	51.6 52.7 51.7 53.8	51.5 51.2 52.2 50.7 52.1 52.1	生言 53.1 50.6 50.5 41.9 51.4 53.9	·算 52.5 43.1 52.7 52.9	52.6 50.5 53.0 54.6 53.0 55.3	場 52.2 50.4 52.0 54.6 54.9	53.2 48.6 41.1 52.4 54.4	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1 45.0	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1 50.5
51.6 49.8 49.2 49.1 50.3 50.5 51.6	51.0 49.3 48.1 49.1 49.6 43.9 51.9	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6 53.8) 51.0 48.7 51.7 54.0 53.0 43.7	51.0 50.5 52.9 54.2 53.8 53.5 52.6	51.0 43.1 52.9 52.7 54.1		51.4 51.2 51.4 50.9 51.8 52.8 52.3	 ◆ パ 51.6 52.7 51.7 53.8 54.3 	51.5 51.2 52.2 50.7 52.1 52.1 51.5	生言 53.1 50.6 50.5 41.9 51.4 53.9 44.2	52.5 43.1 52.7 52.9 54.9	52.6 50.5 53.0 54.6 53.0 55.3 52.8	与 52.2 50.4 52.0 54.6 54.9 44.2	53.2 48.6 41.1 52.4 54.4 53.9	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1 45.0 52.6	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1 50.5 53.0
51.6 49.8 49.2 49.1 50.3 50.5 51.6 52.9	51.0 49.3 48.1 49.1 49.6 43.9 51.9 53.5	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6 53.8 54.9	51.0 48.7 51.7 54.0 53.0 43.7 52.9	51.0 50.5 52.9 54.2 53.8 53.5 52.6 52.8	51.0 43.1 52.9 52.7 54.1 55.2	集 51.2 50.2 51.6 40.0 51.5 53.6 43.6 52.7	51.4 51.2 51.4 50.9 51.8 52.8 52.3 53.4	51.6 52.7 51.7 53.8 54.3 55.1	51.5 51.2 51.2 52.2 52.1 52.1 51.5 53.3	生言 53.1 50.6 50.5 41.9 51.4 53.9 44.2 53.6	→ 算 52.5 43.1 52.7 52.9 54.9 55.8	52.6 50.5 53.0 54.6 53.0 55.3 52.8 54.4	与 52.2 50.4 52.0 54.6 54.9 44.2 53.4	53.2 48.6 41.1 52.4 54.4 53.9 56.0	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1 45.0 52.6 53.8	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1 50.5 53.0 53.2
51.6 49.8 49.2 49.1 50.3 50.5 51.6 52.9 53.5	51.0 49.3 48.1 49.1 49.6 43.9 51.9 53.5 53.9	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6 53.8 54.9	51.0 48.7 51.7 54.0 53.0 43.7 52.9 56.1	早. 51.0 50.5 52.9 54.2 53.8 53.5 52.6 52.8 55.7	51.0 43.1 52.9 52.7 54.1 55.2	年 51.2 50.2 51.6 40.0 51.5 53.6 43.6 52.7 55.6	51.4 51.2 51.4 50.9 51.8 52.8 52.8 52.3 53.4 56.2	51.6 52.7 51.7 53.8 54.3 55.1	太/好 51.5 51.2 52.2 50.7 52.1 51.5 53.3 54.0	古子 53.1 50.6 50.5 41.9 51.4 53.9 44.2 53.6 56.0	52.5 43.1 52.7 52.9 54.9 55.8	52.6 50.5 53.0 54.6 53.0 55.3 52.8 54.4 55.9	場 52.2 50.4 52.0 54.6 54.9 44.2 53.4 56.5	53.2 48.6 41.1 52.4 54.4 53.9 56.0	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1 45.0 52.6 53.8 56.8	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1 50.5 53.0 53.2 55.0
51.6 49.8 49.2 49.1 50.3 50.5 51.6 52.9 53.5 54.6	51.0 49.3 48.1 49.6 43.9 51.9 53.5 53.9 55.2	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6 54.9 54.3	51.0 48.7 51.7 54.0 53.0 43.7 52.9 56.1 54.5	早. 51.0 50.5 52.9 54.2 53.8 53.5 52.6 52.8 55.7 54.9	51.0 43.1 52.9 52.7 54.1 55.2 56.2	年 51.2 50.2 51.6 40.0 51.5 53.6 43.6 52.7 55.6 54.6	51.4 51.2 51.4 50.9 51.8 52.8 52.3 53.4 55.4 54.2	51.6 52.7 51.7 53.8 54.3 55.1	51.5 51.2 52.2 50.7 52.1 52.1 51.5 53.3 54.0 54.8	古子 53.1 50.6 50.5 41.9 51.4 53.9 44.2 53.6 55.6 54.3	→ 算 52.5 43.1 52.7 52.9 54.9 55.8 56.7	52.6 50.5 53.0 54.6 53.0 55.3 52.8 54.4 55.9 53.7	場 52.2 50.4 52.0 54.6 54.9 44.2 53.4 55.7	53.2 48.6 41.1 52.4 53.9 56.0 55.5	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1 45.0 52.6 53.8 55.8	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1 50.5 53.0 53.2 55.0
51.6 49.8 49.2 49.1 50.3 51.6 52.9 53.5 54.6 55.0	51.0 49.3 48.1 49.6 43.9 51.9 53.5 53.9 55.2	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6 53.8 54.9 54.3 56.8	51.0 48.7 51.7 54.0 53.0 43.7 52.9 56.1 54.5 47.1	\$1.0 50.5 52.9 54.2 53.8 52.6 52.8 55.7 54.9 53.5	51.0 43.1 52.9 52.7 54.1 55.2 56.2 57.1	年 51.2 50.2 51.6 40.0 51.5 53.6 43.6 52.7 55.6 54.6 54.6 46.7	51.4 51.2 51.4 50.9 51.8 52.8 52.8 52.3 53.4 56.2 54.2 55.2	 本 劣 51.6 52.7 51.7 53.8 55.1 56.6 57.3 	太方 51.5 51.2 52.2 52.1 52.1 51.5 53.3 54.0 54.8 55.0	 53.1 50.6 50.5 41.9 51.4 53.9 44.2 53.6 56.0 54.3 46.7 	→ 算 52.5 43.1 52.7 52.9 55.8 55.8 55.1	52.6 50.5 53.0 54.6 55.3 52.8 54.4 55.9 53.7 55.6	52.2 50.4 52.0 54.6 54.9 44.2 53.4 56.5 55.7 47.3	53.2 48.6 41.1 52.4 54.4 53.9 56.0 55.5 57.8	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1 45.0 52.6 53.8 55.8 55.8	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1 53.0 53.0 55.0 55.2
51.6 49.8 49.2 50.3 50.5 51.6 52.9 53.5 54.6 55.0	51.0 49.3 48.1 49.1 49.6 51.9 53.5 53.9 55.2 55.2 48.7	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6 53.8 54.9 54.3 56.8	51.0 48.7 51.7 54.0 53.0 43.7 52.9 56.1 54.5 47.1 57.9	\$1.0 \$51.5 \$2.9 \$4.2 \$53.5 \$2.6 \$55.7 \$54.9 \$53.5 \$52.6 \$55.7 \$54.9 \$53.5 \$55.7 \$54.9 \$53.5	51.0 43.1 52.9 52.7 54.1 55.2 56.2 57.1	年 51.2 50.2 51.6 40.0 51.5 53.6 43.6 52.7 55.6 54.6 46.7 57.6	51.4 51.2 51.4 50.9 51.8 52.3 53.4 56.2 54.2 55.2 58.2	本	太方 51.5 51.2 52.2 50.7 52.1 52.1 51.5 53.3 54.0 54.8 55.0 58.4	古子 53.1 50.6 50.5 41.9 51.4 53.9 44.2 53.6 54.3 46.7 57.9	→ 算 52.5 43.1 52.7 52.9 54.9 55.8 55.8 55.1	52.6 50.5 53.0 55.3 52.8 54.4 55.9 53.7 55.6 58.9	52.2 50.4 52.0 54.6 54.9 44.2 53.4 55.7 47.3 58.0	53.2 48.6 41.1 52.4 54.4 53.9 56.0 57.8	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1 52.6 53.8 55.8 55.8 48.7	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1 50.5 53.0 53.2 55.0 55.2 55.0 55.7
51.6 49.8 49.2 50.3 51.6 52.9 53.5 54.6 55.0 55.0 56.0	51.0 49.3 48.1 49.6 43.9 51.9 53.5 53.9 55.2 48.7 55.0	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6 53.8 54.9 54.3 56.8 59.7	51.0 48.7 51.7 54.0 53.0 43.7 52.9 56.1 54.5 47.1 57.9 60.0	早 51.0 50.5 52.9 54.2 53.8 52.6 52.6 52.6 55.7 54.9 53.5 53.5 59.0 59.3	51.0 43.1 52.9 52.7 54.1 55.2 55.2 55.2 57.1 59.5	年 51.2 50.2 51.6 40.0 51.5 53.6 43.6 55.6 55.6 46.7 57.6 55.6 55.6 55.6	51.4 51.2 51.4 50.9 51.8 52.3 53.4 56.2 55.2 55.2 58.2 58.2 56.3	本 必 51.6 52.7 51.7 53.8 54.3 55.1 56.6 57.3 58.5	太方 51.5 51.2 52.2 52.1 52.1 51.5 53.3 54.0 54.8 55.0 58.4 55.1	 53.1 50.6 50.5 41.9 51.4 53.9 44.2 53.6 56.0 54.3 46.7 57.9 56.2 	→ 算 52.5 43.1 52.7 52.9 55.8 55.8 55.1 59.0	52.6 50.5 53.0 54.6 53.0 55.3 55.3 55.3 55.4 55.9 55.6 58.9 58.5	52.2 50.4 52.0 54.6 54.9 44.2 53.4 56.5 55.7 47.3 58.0 60.4	53.2 48.6 41.1 52.4 53.9 56.0 55.5 57.8 59.2	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1 52.6 53.8 55.8 55.8 48.7 56.3	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1 53.5 53.0 53.2 55.0 55.2 55.7 55.7 56.4
51.6 49.8 49.2 50.3 50.5 51.6 52.9 53.5 54.6 55.0 56.0 54.6	51.0 49.3 48.1 49.1 49.6 53.5 53.5 53.9 55.2 55.2 48.7 55.0 55.4	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6 53.8 54.9 54.3 56.8 59.7 58.0	51.0 48.7 51.7 51.7 54.0 53.0 43.7 52.9 56.1 54.5 47.1 57.9 60.0	早 51.0 50.5 52.9 54.2 53.8 53.5 52.6 52.6 52.8 55.7 54.9 53.5 53.5 59.0 59.3 60.6	51.0 43.1 52.9 52.7 54.1 55.2 56.2 57.1 59.5 58.6	朱 51.2 50.2 51.6 51.6 51.6 53.6 53.6 53.6 55.6 55.6 55.6 55.6 55	51.4 51.2 51.4 50.9 51.8 52.3 53.4 56.2 55.2 55.2 55.2 55.2 55.2 55.2 55.2	本 ぷ 51.6 52.7 51.7 53.8 54.3 55.1 56.6 57.3 58.5 58.5 58.6	太/ 51.5 51.2 52.2 50.7 52.1 51.5 53.3 54.0 54.8 55.0 58.4 55.1 56.6	53.1 50.6 50.5 41.9 51.4 53.9 44.2 53.6 56.0 54.3 46.7 57.9 56.2 47.6	→ 算 52.5 43.1 52.7 52.9 55.8 55.8 55.1 55.1 59.0 59.0	52.6 50.5 53.0 54.6 53.0 55.3 52.8 54.4 55.9 55.6 55.6 58.9 58.5 60.9	与 52.2 50.4 52.0 54.6 54.9 44.2 53.4 56.5 55.7 47.3 58.0 60.4	53.2 48.6 41.1 52.4 54.4 53.9 56.0 55.5 57.8 59.2 58.6	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1 52.6 53.8 55.8 55.8 55.8 48.7 56.3 55.8	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1 53.0 53.2 55.0 55.2 55.2 55.7 56.4 55.7
51.6 49.8 49.2 49.1 50.3 51.6 52.9 53.5 54.6 55.0 54.6 55.0 54.6 55.0	51.0 49.3 48.1 49.1 49.6 53.5 53.5 55.2 55.2 48.7 55.0 55.4 55.4	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6 54.3 54.9 54.3 56.8 59.7 58.0 46.2	51.0 48.7 51.7 53.0 43.7 52.9 56.1 54.5 47.1 57.9 60.0 59.1	\$1.0 51.0 50.5 52.9 53.5 52.6 52.8 55.7 54.9 53.5 59.0 59.3 60.6 59.5	51.0 43.1 52.9 52.7 55.2 55.2 56.2 57.1 59.5 58.6	年 51.2 50.2 51.6 51.6 51.6 53.6 53.6 55.6 55.6 55.6 55.6 55.6 55	51.4 51.2 51.4 50.9 51.8 52.8 52.8 53.4 55.2 55.2 56.2 58.2 58.2 56.3 56.3 56.3 56.3	本 埃 51.6 52.7 51.7 53.8 54.3 55.1 56.6 57.3 58.5 58.6	太/坊 51.5 51.2 52.2 52.1 52.1 51.5 53.3 54.0 54.8 55.0 58.4 55.1 56.6 58.9	53.1 50.6 50.5 41.9 51.4 53.9 44.2 53.6 56.0 54.3 46.7 57.9 56.2 47.6 58.3	 「算」 52.5 43.1 52.7 52.9 54.9 55.8 56.7 55.1 59.0 59.5 	52.6 50.5 53.0 54.6 53.0 55.3 55.3 55.3 55.4 55.9 55.6 58.9 58.5 58.9 58.5 60.9	52.2 50.4 52.0 54.6 54.9 44.2 55.7 47.3 58.0 60.4 58.9	53.2 48.6 41.1 52.4 54.4 53.9 56.0 55.5 57.8 59.2 58.6 48.4	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1 52.6 53.8 55.8 55.8 48.7 56.3 55.8 55.8 55.8	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1 53.2 53.0 53.2 55.0 55.2 55.0 55.7 55.7 55.7 55.7
51.6 49.8 49.2 49.1 50.3 51.6 52.9 53.5 54.6 55.0 55.0 55.0 54.6 55.4 55.4 55.4	51.0 49.3 48.1 49.1 49.6 53.5 53.9 55.2 55.2 48.7 55.0 55.4 55.4 54.6	(a 50.8 49.1 40.4 51.9 53.6 53.8 54.9 54.3 56.8 59.7 58.0 46.2 54.9	 51.0 48.7 51.7 53.0 43.7 52.9 56.1 54.5 47.1 57.9 60.0 59.1 55.3 	51.0 50.5 52.9 54.2 53.8 52.8 52.8 55.7 59.0 59.3 60.6 59.5 59.5 59.6	51.0 43.1 52.9 52.7 54.1 55.2 55.2 57.1 59.5 58.6 59.5 58.6	年 51.2 50.2 51.6 40.0 51.5 53.6 53.6 52.7 55.6 54.6 54.6 56.2 48.3 56.2 48.3 58.8 58.8 56.7	51.4 51.2 51.4 50.9 51.8 52.8 52.8 53.4 56.2 55.2 56.3 56.3 56.3 58.0 57.8	◆ パ 51.6 52.7 51.7 53.8 55.1 55.1 55.1 58.5 58.5 58.5 58.6 59.6	太/5 51.5 51.2 52.2 50.7 52.1 51.5 53.3 54.0 54.8 55.0 58.4 55.1 58.4 55.1 56.6 58.9 56.5	53.1 50.6 50.5 41.9 51.4 53.9 44.2 53.6 56.0 56.2 47.6 58.3 56.0	 「算」 52.5 43.1 52.7 52.9 54.9 55.8 55.8 55.1 59.0 59.5 49.6 	52.6 50.5 53.0 55.3 55.3 55.3 55.3 54.4 55.9 53.7 55.6 58.9 58.5 60.9 60.0 56.5	52.2 50.4 52.0 54.6 54.9 44.2 53.4 55.7 55.7 47.3 58.0 60.4 58.9 55.4	53.2 48.6 41.1 52.4 53.9 56.0 55.5 57.8 59.2 58.6 48.4 55.2	53.6 50.1 47.9 49.8 50.1 52.6 53.8 55.8 55.8 48.7 56.3 55.8 55.1	53.2 51.0 49.8 50.4 51.1 53.0 53.2 55.0 55.7 55.6 54.8

(b) 3×3集合体燃焼計算の場合

(図 2.2(c)の計算モデルによる計算結果)
 図 2.4 4 サイクル照射後の Gd 燃料集合体における燃料棒燃焼度の分布(単位:GWd/tHM)



図 2.5 燃料集合体内における燃料棒燃焼度の相対標準偏差

2.3 ガンマ線源分布の評価

2.2 節により得られた燃料棒単位の核種組成分 布から、今回ガンマ線源として取り扱う燃料棒単 位での¹⁰⁶Ru, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ¹⁴⁴Ce, ¹⁵⁴Euの放射能の分 布を得た。この際に使用した半減期データ[16]を 表 2.2 に示す。

次に、上記の各核種から放出されるガンマ線強 度を放射能から求めた。上記5核種から放出され るガンマ線のエネルギーとその放出確率[17]のう ち、放出確率が最も大きい代表的な値を表 2.3 に 示す。ガンマ線強度は上記の各核種に対して参考 文献[17]に掲載されている全てのエネルギーのガ ンマ線について評価した。なお、3×3 集合体燃焼 計算で得られた計算結果だけでなく、単一集合体 燃焼計算で得られた計算結果も同様に評価した。 ただし、今回の検討では簡単のため、これまでに 実施したガンマ線測定実験[5-9]の知見を活かすこ とができる 10 年冷却燃料を対象とする。

表 2.2 対象核種の半減期データ[16]

核種	半減期
¹⁰⁶ Ru	371.8(18) d
¹³⁴ Cs	2.0652(4) y
¹³⁷ Cs	30.08(9) y
¹⁴⁴ Ce	284.91(5) d
¹⁵⁴ Eu	8.593(4) y
	y:year,d:day

表 2.3 各核種の放出確率が最も高いガンマ線の エネルギーと放出確率[17]

核種	エネルギー (keV)	放出確率(%)
¹⁰⁶ Ru→ ¹⁰⁶ Rh	2366.04(7)	0.0233(8)
¹³⁴ Cs	604.721(2)	97.62(11)
¹³⁷ Cs	661.657(3)	85.10(20)
¹⁴⁴ Ce→ ¹⁴⁴ Pr	2185.662(7)	0.694(15)
¹⁵⁴ Eu	1274.429(4)	34.8(3)

3. ガンマ線測定の数値シミュレーショ ン

3.1 測定体系の設計

燃料集合体に対する燃焼度指標の測定体系を設 計するための計算を実施した。

燃料集合体のガンマ線を測定する際には、検出 器が耐えられる計数率の制限から、検出器に入射 するガンマ線の数を制限する必要がある。そのた め、今回の検討では、対象とする燃料集合体の周 囲を鉛(Pb)の壁で覆い、壁にコリメータホールを 開け、壁の外側に検出器を設置してガンマ線を計 測することとした。設定した測定体系の概念図を 図 3.1 に示す。Pb 壁の内部空間は、図 3.2 に示す ように燃料集合体の面(0 度)方向からの測定と頂 点(45 度)方向からの測定に対応するため、測定対 象の燃料集合体を回転させることができるよう、 間隔を設定した。測定環境は使用済燃料プールな どの水中での測定を想定しており、今回の体系で は検出器も含め全て純水中に配置している。その ため、腐食などの観点から Pb 壁とコリメータホ ールには全表面に厚さ 1mm の SUS ライナを設置 した。

まず、Pb 壁にコリメータホールを設けていな い条件で Pb 壁の厚さの設計を行った。具体的に は、実際の測定環境を考慮して検出器と壁の間に ある程度のクリアランスを設けるため、検出器を 配置する方向の壁の外側表面から1cm離れた位置 での計数率が十分に小さくなるように壁厚さを設 定した。この計算では、単一集合体燃焼計算で得 られた各燃料棒のガンマ線強度から最もガンマ線 強度の高い燃料棒を選定し、その燃料棒が検出器 の計数率が最も高くなる 45 度方向測定時に最近 接位置(集合体コーナー)にあると仮定し、保守的 な計数率設計を行った。この際、5 核種の全エネ ルギーのガンマ線を取り扱った相対的な線スペク トルを入力とした。この条件下で、直径 76.2mm で長さ76.2mmのBGOシンチレーション検出器の 計数率が1cps以下になるように十分な壁厚さを設 定した。その結果、Pb 壁の厚さは 350mm となっ た。

次に、上記壁厚さの条件で、コリメータの設計、 すなわち計数率の設計を実施した。コリメータは、 壁に対して垂直な円筒状とし、開口部の形状は円 形とした。コリメータの長さは壁の厚さと同じで ある。Pb壁の内面から 60cm 離れた位置に、コリ メータと同軸で円筒形の高純度ゲルマニウム(HP- Ge)検出器を配置した。検出器位置を Pb 壁内面か ら 60cm の位置に設置したのは、燃料と検出器の 間の距離を 60cm 確保するためである。これによ り、低エネルギーのガンマ線が高エネルギーのガ ンマ線と比較して相対的に減衰し、10年冷却し た燃料に対しても半減期の短い¹⁰⁶Ruと¹⁴⁴Ceを測 定できる[8,9]。HP-Ge 検出器は、Ge 結晶サイズ が直径 84.7mm で長さ 107.6mm、ホールの大きさ は直径 5.45mm で長さ 94mm である。ガンマ線源 として、上記のガンマ線強度が最も高い燃料棒を 集合体内の全燃料棒位置に配置し、保守的な設定 で検出器の計数率が10kcps程度になるよう、コリ メータ開口部の半径を調整した。この際、上記の 壁厚計算と同様に全てのエネルギーのガンマ線の 相対強度を線スペクトルで与えた。この結果、コ リメータ開口部の半径は3.8mmとなった。なお、 コリメータ及び検出器は対称位置に4箇所設定し、 1集合体に対して1回の測定で4方向からの測定 値を得られる測定体系とした。

本検討のガンマ線輸送計算は粒子輸送計算コード PHITS(Ver. 2.88)[18]を用いて実施した。



図 3.1 燃焼度指標測定体系の概念図



3.2 検出器応答の評価

3.1 節で示した方法で設定した燃焼度指標の測 定体系において、PHITS コードにより検出器の応 答を評価した。

対象集合体の各燃料棒から対象としているエネ ルギーのガンマ線を線源として与え、ガンマ線が 検出器に入射し、かつ、全エネルギーを検出器内 で失う確率を計算した。この際、光電ピーク計数 のみを求めることに着目し、ここでは全エネルギ ー付与確率のみを計算することとした。

この計算は、それぞれの燃料棒の寄与を評価す るため、1本の燃料棒に対して1つのガンマ線エ ネルギーを与えた計算を行い、これを集合体内の 全ての燃料棒に対して位置を変えながら実施する。 ただし、今回対象としている核種である¹⁰⁶Ru, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ¹⁴⁴Ce, ¹⁵⁴Euは様々なエネルギーのガン マ線を放出するが、今回の検討では表 2.3 に示し た放出確率が最も大きいエネルギーのガンマ線を その核種の代表ガンマ線と考え、そのエネルギー のガンマ線のみ取り扱った。

上記の計算を図 3.2 に示した 0 度方向と 45 度方 向からの測定の両方に対してそれぞれ実施した。 この際、効率的に計算を行うため、ガンマ線発生 角度の絞り込みを行った。光子と電子のカットオ フエネルギーは、ともに 1.0×10⁻³MeV とした。ま た、ヒストリー数の設定は、バッチサイズ(1 バッ チあたりのガンマ線発生数)を 6.0×10⁵、バッチ数 を 511 とし、MPI による 512 並列で計算を実施した。

各燃料棒からの全エネルギー付与確率の計算例 として、¹³⁷Csの662keVガンマ線に対して、図3.2 に示した集合体の0度方向の右側(④番の方向)か ら測定した際の計算結果と、45度方向の右上側 (⑧番の方向)から測定した際の結果をそれぞれ図 3.3(a)と図3.3(b)に示す。図3.3では全ての燃料棒 からの検出器への全エネルギー付与確率を100に 規格化し、それぞれの燃料棒の重みを示した。す なわち、図3.3は検出器における662keVガンマ線 の測定値に対する各燃料棒の寄与割合を表す。図 3.3と同様に、¹⁰⁶Ruの2366keVガンマ線に対する 計算結果を図3.4に示す。なお、図3.3と図3.4に おいては、全ての図でカラーマップのスケールを 統一している。

図 3.3 と図 3.4 より、エネルギーの高いガンマ 線のほうが、測定位置すなわち検出器からより遠 い燃料棒から放出されたガンマ線が測定値に相対 的に大きく反映されることがわかる。これはエネ ルギーの高いガンマ線は透過力が高く、より遠い 燃料棒からのガンマ線が検出器に到達するためで ある。すなわち、よりエネルギーの高いガンマ線 を使用することにより、より広範な集合体内の情 報が測定値として得られる。

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.01		0.02	0.11		0.36	0.82		2.63	7.25		23.99	64.58
0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	64.29
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	22.54	0.10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.21	7.89	0.16	0.00
0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20		0.21	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	2.07	0.20	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.12		0.16	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.52	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.20	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.04		0.06	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.01		0.02	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(a) 集合体右側(図 3.2 の④)から測定した場合 (b) 集合体右上側(図 3.2 の⑧)から測定した場合

図 3.3 662keV のガンマ線測定値に対する各燃料棒の寄与割合(単位:%)

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.12	0.11	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.22	0.33		0.60	0.84		1.44	2.22		3.68	5.55		9.38	14.19		24.12	36.33
0.12	0.11	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	35.24
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	22.73	0.24
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.42	14.30	0.33	0.00
0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47		0.42	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	7.75	0.47	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.49		0.49	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	4.13	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	2.66	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.36		0.42	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	1.48	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.89	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.19		0.25	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.16	0.50	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.13		0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
0.00	0.10	0.27	0.13	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.07	0.18	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.12	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(a) 集合体右側(図 3.2 の④)から測定した場合 (b) 集合体右上側(図 3.2 の⑧)から測定した場合 図 3.4 2366keV ガンマ線測定値に対する各燃料棒の寄与割合(単位:%)

4. 解析結果

2.3 節で示した方法により得られたガンマ線源 分布と、3.2節で示した方法により得られた全エ ネルギー付与確率の分布から、燃料棒毎に両者を 掛け合せて合算し、検出器で得られる応答(測定

値)を評価した。

U燃料に対して、図 4.1 から図 4.4 にそれぞれ ¹³⁷Cs 放射能、¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 放射能比、¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs 放射 能比、¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce放射能比の結果を示す。図4.1か ら図 4.4 の(a)と(b)はそれぞれ 0 度方向と 45 度方向 からの測定結果である。図中に示した系列"Asyl" から"Asy6"は、2.1 節で述べた炉心内にある 6 通 りの U 燃料のことを表す。各集合体に対して図 3.2 に示したように 4 方向にある検出器で測定し ているため同一燃焼度で 4 つの測定値が得られ、 この測定値を独立にプロットしている。すなわち、 1 つの集合体に対してある燃焼度で 4 つの測定値 が得られており、その測定値が独立して図中に示 されている。U 燃料と同様に、Gd 燃料に対する 結果を図 4.5 から図 4.8 に示す。

図 4.1 から図 4.8 より、Gd 燃料の ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 放 射能比がサイクル 4 で飽和・減少していることが わかる。これは今回の燃焼履歴では、Gd 燃料の サイクル4の出力が低くなっており、半減期の短い¹³⁴Csが崩壊する成分が優位になっているためである。同様に、¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs放射能比も¹⁵⁴Euの比較的短い半減期により燃焼とともに飽和に向かう傾向を示している。このように、燃焼度に対して一意に対応しない指標は燃焼度クレジット適用時の燃焼度指標として適していない。その一方で、¹³⁷Cs放射能と¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce放射能比は燃焼度に対して良好な比例関係を示しており、燃焼度指標として適切である。











(a) 0度方向から測定した場合 (b) 45度方向から測定した場合

図 4.3 U燃料に対する ¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs 放射能比の解析結果(集合体ごとに4検出器の測定値を独立にプロット)



(a) 0度方向から測定した場合

(b) 45 度方向から測定した場合

図 4.4 U燃料に対する ¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比の解析結果(集合体ごとに4検出器の測定値を独立にプロット)



図 4.5 Gd 燃料に対する ¹³⁷Cs 放射能の解析結果(集合体ごとに4検出器の測定値を独立にプロット)



(a) 0度方向から測定した場合 (b) 45度方向から測定した場合

図 4.6 Gd 燃料に対する ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 放射能比の解析結果(集合体ごとに 4 検出器の測定値を独立にプロット)



図 4.7 Gd 燃料に対する ¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs 放射能比の解析結果(集合体ごとに4検出器の測定値を独立にプロット)





5. 考察

4 章で示したそれぞれの燃焼度指標のばらつき から平均値と標準偏差を導出し、標準偏差を平均 値で割ることにより相対標準偏差を評価した。そ の結果をU燃料とGd燃料に対してそれぞれ図5.1 と図5.2に示す。図5.1と図5.2の(a)は0度方向か らの測定結果で、(b)は45度方向からの測定結果 である。この際、各対象集合体の4方向にある検 出器の測定データを独立に取り扱って平均値と標 準偏差を導出している。

まず、図 5.1 と図 5.2 の(a)と(b)すなわち 0 度方 向と 45 度方向からの測定値の相対標準偏差を比 較すると、燃焼度に対する各燃焼度指標の傾向は 同じだが、両集合体タイプともに1サイクル終了 時点において、0度方向から測定した場合には、 45 度方向から測定した場合よりも相対標準偏差 が小さい、すなわちばらつきが小さくなっている ことがわかる。図 2.3 より判明している通り、燃 焼が進むに連れて燃料棒燃焼度の分布は平坦に近 づいていくが、1 サイクル終了時点が最も隣接集 合体などの影響が反映されやすく、ばらつきが大 きくなっている。図 5.1 と 5.2 はこの燃料棒燃焼 度の分布が測定値に影響しにくい測定方向が 45 度方向ではなく、0度方向であったことを示して いる。これは、図3.3と図3.4よりわかるように、 0度方向の測定では45度方向の測定に比べ、検出 器から遠い燃料棒からのガンマ線の寄与がわずか に大きいため、より平均的な測定値が得られてい るからであると考えられる。その後の2サイクル 目以降は燃焼度分布が徐々に平坦化されていくた め、測定方向への依存性はそれほど大きくはない。

また、各燃焼度指標ともにU燃料では燃焼に伴 って単調に相対標準偏差が小さくなっていくが、 Gd 燃料では 2 サイクル終了時点が最も相対標準 偏差、すなわちばらつきが大きくなっていること がわかる。図 2.3(b)で示したように、燃料棒燃焼 度の相対標準偏差は燃焼とともに小さくなってい くことがわかっているため、燃料棒燃焼度の分布 の偏り(傾き)が大きくなっているのが 2 サイクル 目終了時点であると考えられる。また、Gd 燃料 に含まれるガドリニアは 15GWd/tHM 程度で燃え 尽きることが広く知られており、今回の Gd 燃料 の燃焼履歴では1 サイクル終了時点が約 17GWd/tHM であり、ちょうどガドリニアが燃え 尽きる燃焼度に近い。ガドリニアは中性子の吸収 効果が大きいため、燃え尽きるまで周辺の燃料棒 の出力が抑えられる。一般に、いずれのサイクル においても隣接集合体の非対称性により、中性子 の流入量にも非対称性が生じ、燃料棒ごとの燃焼 度は非対称な分布となる。そのため、1 サイクル 終了時点ではガドリニアが燃え尽きた燃料棒と残 存している燃料棒が混在することとなる。このた め、2 サイクル目において、ガドリニアが燃え尽 きた燃料棒周辺は出力が増加し、ガドリニアが残 存している燃料棒周辺は出力が抑えられ、燃焼度 の分布が大きくなることから、2 サイクル目終了 時にばらつきが大きくなったと考えられる。ただ し、その分布は燃焼とともに平坦化されていく。

各燃焼度指標の相対標準偏差を比較すると、U 燃料とGd燃料のそれぞれに対する45度方向から の測定では、各サイクル終了時点で¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放 射能比が最も小さくなっている。また、0度方向 からの測定では、U燃料と Gd 燃料ともに 1,2 サ イクル終了時は¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比が最もばらつ きが小さく、3,4 サイクル終了時は¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs 放 射能比が最もばらつきが小さくなっている。ほと んどの場合において ¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比が他の燃 焼度指標よりもばらつきが小さくなるのは、両核 種が放出するガンマ線のエネルギーが高いため、 透過力が高く、より検出器から遠い位置にある燃 料棒の寄与が相対的に大きくなる、すなわち、よ り広範な燃料棒の情報が測定値に反映されるため である。このため、特に燃料棒間の燃焼度のばら つきが大きい低燃焼度ではその影響を緩和するこ

とができる。先述した検出器から遠い燃料棒から のガンマ線の寄与の小さい 45 度方向からの測定 でもこの利点が活かされ、各燃焼度指標の中で全 サイクル終了時に渡って最もばらつきが小さくな っている。ただし、燃焼が進むにつれて燃料棒燃 焼度の分布は平坦化されていくため、このメリッ トは相対的に小さくなっていく。

今回対象とした平衡炉心の装荷パターンにおい ては、1.2 サイクル終了時点で取り出される燃料 はなく、3,4 サイクル終了時点で取り出される。 3,4 サイクル終了後に取り出される場合に着目す ると、最もばらつきが大きい燃焼度指標では10% 程度のばらつきを持つが、最もばらつきの小さい 燃焼度指標では 1%程度のばらつきとなる。また、 4 サイクル終了後に取り出される場合に限定すれ ば、どの燃焼度指標もおよそ 6%以内のばらつき となる。各燃焼度指標が燃焼度に対して比例関係 であると仮定すると、燃焼度指標と同じばらつき で燃焼度を推定することが可能である。すなわち、 例えば燃焼度が 55GWd/tHM の燃料に対して、い ずれの燃焼度指標でも誤差 3.3GWd/tHM 以内で推 定可能であり、最もばらつきの少ない燃焼度指標 では誤差 0.55GWd/tHM 程度で推定可能である。 以上より、使用済燃料を発電所から払い出す際の 輸送キャスクに対しては、燃焼度の誤差が数 GWd/tHM 程度しかない非常に利益の大きい燃焼 度クレジットを適用可能である可能性が示された。

その一方で、各サイクル終了時点の燃料が混在 する使用済燃料プール(SFP)においては、最大誤 差を全サイクルに当てはめるという運用方法では、 1,2サイクル目のばらつきが大きいことにより、 見込むべき誤差が大きく、あまりメリットを享受 できない可能性がある。例えば、今回の解析によ り得られた最大誤差40%を第1サイクル終了時の 15GWd/tHM の燃料に当てはめると、燃焼度が 15±6GWd/tHM となり、担保できる燃焼度欠損量 に大きな制限がかかることとなる。そのため、 SFP において燃焼度クレジットのメリットを大き く享受するためには、サイクル毎に、または、あ る燃焼度毎に誤差を設定する方がよいといえる。

上述した SFP の燃焼度クレジットのメリットが 小さくなる問題は、対象とする燃料集合体を1方 向の検出器のみで測定した場合に発生する。その ため、この問題に対する別の解決策として、対象 とする集合体の4方向にある検出器の測定値をま とめて1つの測定値とする、すなわち、4方向か ら測定することにより燃料棒燃焼度の偏りを平均 化できると考えられる。4 方向にある検出器の測 定値を合算(または平均化)し、1 つの測定データ として取り扱った場合の燃焼度指標のばらつきを 図 5.3 と図 5.4 に示す。図 5.3 と図 5.4 は、それぞ れ図 5.1 と図 5.2 に対応しており、これらのグラ フは集合体間の測定値のばらつきを見ていること となる。ただし、Gd 燃料は 4 サイクル取り出し が1通りしかないため、4サイクル終了時点の相 対標準偏差は評価できない。

図 5.3 と図 5.4 より、各サイクル終了時点にお いて、全ての燃焼度指標で相対標準偏差が 6%以 内となった。特に、1,2 サイクル目終了時点での 誤差の低減率が大きく、ばらつきが最も大きかっ た U燃料の第1サイクル終了時点では相対標準偏 差が 1/10以下となる。また、比較的ばらつきの大 きかった Gd 燃料の第2サイクル終了時点でもば らつきが 1/4 程度に低減されており、上述した SFP における燃焼度クレジットのメリットが小さ くなってしまう問題に対する有効な解決策になっ ていることが明らかとなった。

さらに、上記の0度方向からの測定における4 検出器と、45度方向からの測定における4検出器 の測定値、計8個の測定値を1つの測定値と考え た場合の相対標準偏差を図5.5と図5.6に示す。 図5.5と図5.6はそれぞれU燃料とGd燃料に対す る結果であり、両図における(a)-(d)はそれぞれ ¹³⁷Cs放射能比、¹³⁴Cs/¹³⁷Cs放射能、¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs放射 能比、¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce放射能比の各燃焼度指標の結果 である。また、系列データは順に、0度方向から の測定で4検出器の測定値を1つにまとめて測定 値とした結果(図 5.3(a)と図 5.4(a)に対応)、45度方 向からの測定で4検出器の測定値を1つにまとめ て測定値とした結果(図 5.3(b)と図 5.4(b)に対応)、 0度方向の4検出器と45度方向の4検出器の計8 個の測定値を1つにまとめた結果である。図 5.5 と図 5.6より、4検出器による測定値を1つにまと めて取り扱った場合と比較して、8検出器による 測定値を1つにまとめても、必ずしも相対標準偏 差が小さくなるわけではないことがわかる。すな わち、測定方向の増加に対する相対標準偏差の減 少が限定的であり、場合によっては増大するため、 大きなメリットはないといえる。このことから、 測定方向は集合体に対して4方向からで十分であ ることが示された。

単一集合体燃焼による各燃焼度指標の測定値の シミュレーション結果を図 5.7 から図 5.14 に示す。 図 5.7から図 5.14 は図 4.1 から図 4.8 に対応してお り、3×3 集合体燃焼計算の結果に、単一集合体燃 焼計算の結果を追加した。各図の系列 は、"SingleAsy"が新たに追加した単一集合体燃焼 計算結果を用いた測定値で、"MultiAsyl"か ら"MultiAsy6"は図 4.1 から図 4.8 の"Asy1"か ら"Asy6"に対応している。この結果から、単一集 合体燃焼計算によるシミュレーション結果は、 3×3 集合体燃焼計算によるシミュレーション結果 のばらつきの範囲内に収まっており、かつ平均値 をほぼ再現しているため、ばらつきではなく平均 値を評価したい際には単一集合体燃焼計算でも問 題ないと考えられる。すなわち、単一集合体燃焼 計算により、燃焼度に対する燃焼度指標の平均的 な挙動を評価できる。また、今回の 3×3 集合体燃 焼計算によるばらつき評価によって、単一集合体 燃焼計算結果では考慮できない測定値の幅が評価 できた。

燃焼に対する燃焼度指標の線形性では¹³⁷Cs 放 射能と¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比が優れ、燃焼度指標測 定時のばらつきの小ささでは¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比 と¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs 放射能比が優れる。すなわち、燃料 集合体に対する燃焼度指標として、今回の検討課 題の観点からは¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比が優れている 可能性が示された。

各核種のインベントリは生成と消滅(崩壊)のバ ランスで決まるため、特に半減期の短い核種のイ ンベントリは出力履歴への依存性が大きい。その ため、燃焼度に対する燃焼度指標の挙動は出力履 歴に依存する。一般に、U 燃料は燃焼初期に反応 度が大きく、Gd 燃料は燃焼初期に反応度が抑え られる。そのため、取出し平均燃焼度がU燃料と Gd 燃料で同じであったとしても、その燃焼度に 至るまでの出力履歴が異なるため、U 燃料と Gd 燃料で同一の燃焼度と燃焼度指標の関係を用いる ことはできない。また、今回の検討では、U 燃料 と Gd 燃料でそれぞれ燃焼履歴を同じと仮定した が、実際には燃料集合体ごとに燃焼履歴が多少異 なるため、今回評価した燃焼度指標のばらつきは 燃焼履歴の違いによるばらつきが含まれていない。 そのため、集合体ごとの燃焼履歴を考慮した燃焼 計算を用いた評価は今後の課題の1つである。



(a) 0度方向から測定した場合

(b) 45 度方向から測定した場合













(a) 0度方向から測定した場合

(b) 45 度方向から測定した場合





(a) 0度方向から測定した場合

(b) 45 度方向から測定した場合

図 5.4 4 検出器の測定値を合算して取り扱った場合の Gd 燃料に対する各燃焼度指標の測定値の相対標準 偏差



図 5.5 4 方向及び 8 方向からの測定値を合算して取り扱った場合の U 燃料に対する各燃焼度指標の相対標 準偏差



(c) ¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs 放射能比

(d) ¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比

図 5.6 4方向及び8方向からの測定値を合算して取り扱った場合のGd燃料に対する各燃焼度指標の相対標準偏差



図 5.7 U燃料の¹³⁷Cs 放射能に関する単一集合体計算と 3×3 集合体計算の比較



図 5.8 U燃料の¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 放射能比に関する単一集合体計算と 3×3 集合体計算の比較



図 5.9 U燃料の¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs 放射能比に関する単一集合体計算と 3×3 集合体計算の比較



(a) 0度方向から測定した場合

(b) 45 度方向から測定した場合

図 5.10 U燃料の¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比に関する単一集合体計算と 3×3 集合体計算の比較







図 5.12 Gd 燃料の¹³⁴Cs/¹³⁷Cs 放射能比に関する単一集合体計算と 3×3 集合体計算の比較



図 5.13 Gd 燃料の¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs 放射能比に関する単一集合体計算と 3×3 集合体計算の比較



(a) 0度方向から測定した場合

(b) 45 度方向から測定した場合

図 5.14 Gd燃料の¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比に関する単一集合体計算と 3×3 集合体計算の比較

6. 結言

本研究では、典型的な PWR 平衡炉心の装荷パ ターンを模擬した 3×3 集合体燃焼計算を実施し、 燃焼度クレジット適用のための燃焼度指標測定に 関する数値シミュレーションを実施した。燃焼度 指標として、ガンマ線スペクトル測定により得ら れる¹³⁷Cs放射能、¹³⁴Cs/¹³⁷Cs放射能比、¹⁵⁴Eu/¹³⁷Cs 放射能比、¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比に着目した。その 結果、単一集合体燃焼計算では評価できない燃料 棒燃焼度の非対称分布に起因する各燃焼度指標の ばらつきを評価できた。4 サイクル取り出し時に は、いずれの燃焼度指標も1方向からの測定のみ でばらつきが 6%以下となり、燃焼度指標が燃焼 度に対して比例関係であると仮定した場合、燃焼 度を6%以内の精度で推定可能である。1,2サイク ル終了時の燃料に対しては、1 方向からの測定で は測定値のばらつきの大きかったが、4 方向から の測定を実施することによりばらつきを大幅に低 減でき、いずれの燃焼度指標でも各サイクル終了 時点で燃焼度を 6%以内の精度で推定できる。ま た、8 方向から測定した場合には、4 方向から測 定した場合と比較して、必ずしもばらつきが小さ くなるわけではなく、測定方向は燃料集合体に対 して4方向で十分であることを示した。また、 ¹⁰⁶Ru/¹⁴⁴Ce 放射能比は、装荷パターンに起因する

測定値のばらつきという観点からは最も適切な燃 焼度指標であることが示唆された。

参考文献

- Nuclear Fuel Facility Safety Research Committee, "A Guide Introducing Burnup Credit, Preliminary Version," JAERI-Tech 2001-055, 2001.
- [2] United States Nuclear Regulatory Commission, "Burnup Credit in the Criticality Safety Analyses of PWR Spent Fuel in Transport and Storage Casks," Interim Staff Guidance 8, Revision 3, 2012.
- [3] International Atomic Energy Agency, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material," TS-R-1, 2009.
- [4] Alan Simpson, Martin Clapham, Bryan Swinson, Becky Battle, "Spent Fuel Measurements in Support of Burnup Credit," Proceedings of Institute of Nuclear Materials Management (INMM) 47th Annual Meeting, 16th-20th, July 2006, Nashville, TN, USA.
- [5] 佐藤駿介、名内泰志、早川岳人、木村康彦、 須山賢也、"PWR 先行照射燃料試料に対する 放射能比の測定と燃焼解析"、日本原子力学

会 2015 年春の年会、2015 年.

- [6] 佐藤駿介、名内泰志、早川岳人、木村康彦、 須山賢也、"高燃焼度 PWR 燃料の放射能比測 定と燃焼解析"、電力中央研究所報告 L14003、 2015 年.
- [7] 佐藤駿介、名内泰志、早川岳人、木村康彦、 須山賢也、"燃焼度クレジット導入に向けた 高燃焼度 PWR 燃料の放射能比測定と燃焼解 析"、日本原子力学会関東甲越支部第14回若 手研究者発表討論会、2015年.
- [8] 佐藤駿介、名内泰志、早川岳人、木村康彦、 須山賢也、"10 年以上冷却した使用済燃料に 対する 106Ru/144Ce 放射能比の測定と燃焼解 析"、日本原子力学会 2016 年秋の大会、2016 年.
- [9] 佐藤駿介、名内泰志、早川岳人、木村康彦、 須山賢也、"燃焼度確証時に利用可能な 106Ru/144Ce 放射能比の測定と燃焼解析"、 第5回炉物理専門研究会、2016年.
- [10] Y. Nauchi, T. Kameyama and A. Sasahara, "Numerical Simulations of Neutron Transport in Spent LWR Fuel Assemblies for Burn-up Credit Application Techniques," Proceedings of International Conference on Nuclear Criticality (ICNC) 2011, 19th-23rd, Sept. 2011, Edinburgh, Scotland, UK.
- [11] N. Sugimura, T. Ushio, A. Yamamoto and M. Tatsumi, "AEGIS/SCOPE2, a Next-Generation Incore Fuel Management System (1) Lattice physics code, AEGIS," Trans. Am. Nucl. Soc., 97, p559, 2007.
- [12] M. Tatsumi, H. Hyodo, N. Sugimura and A. Yamamoto, "AEGIS/SCOPE2, a Next-Generation In-core Fuel Management System (2) Core calculation code, SCOPE2," Trans. Am. Nucl. Soc., 97, p562, 2007.
- [13] K. Okumura, T. Mori, M. Nakagawa and K. Kaneko, "Validation of a Continuous-Energy

Monte Carlo Burn-up Code MVP-BURN and Its Application to Analysis of Post Irradiation Experiment," J. Nucl. Sci. Technol., 37, p128, 2000.

- [14] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto,
 A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N.
 Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A.
 Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura, "JENDL4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol., 48, p1, 2011.
- [15] 奥村啓介、小嶋健介、岡本力、"JENDL-4.0
 に基づく燃焼チェーンデータ ChainJ40 の開
 発"、日本原子力学会 2012 年春の年会、2012.
- [16] M. Namekawa, T. Fukahori, "Tables of nuclear data (JENDL/TND-2012)," JAEA-Data/Code 2012-014, 2012.
- [17] IAEA Nuclear Data Service, "Live Chart of Nuclides," https://wwwnds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.htm l, 2017/1/13 参照.
- [18] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, "Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52," J. Nucl. Sci. Technol., 50, p913, 2013.



	雷力中央研究所報告	
—	[不許複製]	
潁	編集・発行人 一般財団法人 電力中央研究所	
	神奈川県横須賀市長坂2-6-1	
	電話 046(856)2121(代) e-mail ntrl_rr-ml@criepi.denken.or.jp	
発	ě行·著作·公開 一般时団法人 電力中央研究所	
	東京都十代田区大手町1−6−1 電話 03(3201)6601(代)	
—	ISBN978-4-7983-1631-4	

