

CASMO4/SIMULATE3 コードシステムにおける  
ウラン炉心と MOX 炉心の違いについて

関西電力株式会社

## CASMO4/SIMULATE3 コードシステムにおけるウラン炉心と MOX 炉心の違いについて

CASMO4/SIMULATE3 コードシステム（以下、C4/S3 という）におけるウラン炉心と MOX 炉心の計算は表 1 に示す様に、原則的に同じ計算を行っているが、一部異なるモデルを採用しているため、その内容について説明する。

C4/S3 では、図 1 に示すとおり、C4 コードにおいて単一集合体体系で 2 次元輸送計算を実施し、その結果得られた集合体定数を用いて、S3 コードにより炉心全体を対象に 3 次元拡散計算を実施する。この計算の流れはウラン炉心、MOX 炉心において共通であるが、MOX 炉心の場合は MOX 炉心特有の物理現象である、MOX 燃料とウラン燃料の境界付近における熱中性子束の急激な変化や中性子スペクトル干渉効果を適切に取り扱うため、一部計算モデルを変更している。単一集合体計算においては、MOX 燃料とウラン燃料の境界を取り扱わないため、C4 コードでは MOX 燃料とウラン燃料で同じ計算モデルを採用している。一方、炉心体系の計算においては、上記の MOX 炉心特有の物理現象を適切に取り扱うため、S3 コードでの 3 次元拡散計算において、MOX 炉心に特化した 3 点の計算モデルを適用している。S3 コードの 3 次元拡散計算モデルのうち、ウラン炉心、MOX 炉心に共通の計算モデルを(1)に、MOX 炉心に特化した計算モデルを(2)~(4)にそれぞれ示す。

### (1) S3 コードの 3 次元拡散計算モデル

S3 コードでは、集合体をノード単位で均質化して扱い、近代ノード法に基づき 3 次元、2 群中性子拡散方程式を解く。S3 コードは、ノード境界における中性子流を正確に取り扱うため、ノード内のある方向 (x) に着目し、他の 2 方向 (y,z) について積分することにより得られる 1 次元 2 群拡散方程式を解いてノード内の中性子束分布を考慮している。S3 コードでは中性子束の空間分布を近似式 (4 次までの多項式など) で展開し、1 次元拡散方程式を解くことにより近似式の係数を決定している。

S3 コードはまた、ノード境界での中性子流が非均質計算と同等になるように中性子束不連続因子を用いて中性子束の不連続性を許容し、均質化に伴う誤差を効果的に低減している (図 3 参照)。中性子束不連続因子は C4 コードによる単一集合体体系での計算結果に基づき、非均質中性子束と平均中性子束の比として求められる。

### (2) 準解析的 2 群ノードモデル

前述のとおり、S3 コードでは 1 次元拡散方程式を解くことによりノード内の中性子束の空間分布を計算している。ウラン炉心の場合、(1)、(2)式に示すとおり、ノード内の高速群中性子束および熱群中性子束の空間分布を 4 次多項式で近似している。これに対し、MOX 炉心の場合、MOX 燃料とウラン燃料の境界において熱群中性子束の空間分布に急激な変化が見られるため、熱群中性子束を 4 次多項式では表現できないことがある。そこで、MOX 炉心においては、(4)式に示すとおり、4 次多項式に加え拡散方程式の解析解の項 (cosh および sinh) を用いて熱群中性子束の空間分布を表現するモデルを採用している。なお、高速群中性子束の空間分布については、MOX 炉心であっても急激な変化は見られないため、ウラン炉心同様、(3)式に示すと通りの 4 次多項式で表現している。

	(1)
	(2)
	(3)
	(4)

### (2) ノード輸送モデル

S3 コードでは、ノード境界での中性子流が非均質計算と同等になるように中性子束不連続因子を用いて中性子の不連続性を許容し、均質化に伴う誤差を避けている。中性子束不連続因子は、C4 コードでの単一集合体計算結果を用いて、均質化前後においてノード境界での中性子流が同等になるように求められる。

ウラン炉心では、炉内の燃料は全てウラン燃料であり、非均質性は弱いため、C4 コードで求めた中性子束不連続因子により集合体内の均質化の効果を取り扱うのみで十分である。よって、輸送方程式を近似した拡散方程式を用いた計算で求めても十分な計算精度が得られる。一方、MOX 炉心では、MOX 燃料とウラン燃料が混在するため、非均質性が強く、集合体内の均質化の効果だけでなく、集合体境界付近の非均質性を取り扱うことが重要となる。この非均質性の効果は拡散計算で取り扱うことが困難であるが、輸送計算と拡散計算の差に基づく中性子束不連続因子の補正により考慮することが可能である。

そこで、MOX 炉心においては、単純化した径方向 1 次元に対して熱中性子束の輸送計算および拡散計算を実施し、集合体境界に隣接する燃料棒セルの熱群中性子束が両者で一致するように、熱群の中性子束不連続因子を補正するモデルを採用している。なお、高速群中性子束については、MOX 炉心であっても拡散近似で追従可能であるため、当該モデルに基づく中性子束不連続因子への補正は適用していない。

### (3) 中性子スペクトル干渉モデル

ウラン燃料と MOX 燃料が隣接する場合、核特性の差異により、燃料間で中性子の流れ込みが発生し、単一集合体体系の場合とは異なる中性子束エネルギー分布（以下、中性子スペクトルという）となる。これを中性子スペクトル干渉効果という。

S3 コードの 3 次元拡散計算で用いる集合体定数は、C4 コードでの結果を基に断面積をエネルギー群 2 群に縮約したものであり、断面積のエネルギー群縮約では、中性子スペクトルを重みとした断面積の平均化が行われるため、用いる中性子スペクトルにより、縮約後の断面積は変化する。このため、単一集合体体系の計算で得られた中性子スペクトルに基づき縮約した断面積を、中性子スペクトル干渉効果が大きい炉心体系の計算に用いた場合、計算誤差の要因と

なる。従って、このような中性子スペクトル効果を適切に取り扱うために、断面積を適切な値に補正する必要がある。

ウラン炉心では、中性子スペクトル干渉効果が小さいため、中性子束スペクトルが断面積に与える影響は小さいことから、中性子スペクトルは考慮せず、燃焼度などのパラメータを基に断面積を設定している。一方、MOX 炉心では、ウラン燃料から MOX 燃料への熱群中性子の流れ込みが発生するため、中性子スペクトル干渉効果が大きくなる場合がある。この効果は熱群だけでなく高速群断面積にも影響を与える。そこで、MOX 炉心においては、ウラン炉心で考慮しているパラメータに加え、高速群、熱群ともに中性子スペクトルに応じて断面積を変化させることにより、中性子スペクトル干渉に伴う断面積変化を取り扱うモデルを採用している。具体的には中性子スペクトルの状態を表す指標として、S3 コードでの計算時における高速群と熱群の中性子束の比をインデックスとして、集合体内の核定数を空間依存で補正している。また、中性子スペクトル干渉の効果をより精緻に取り扱うため、断面積変化を空間依存で考慮している。

以 上

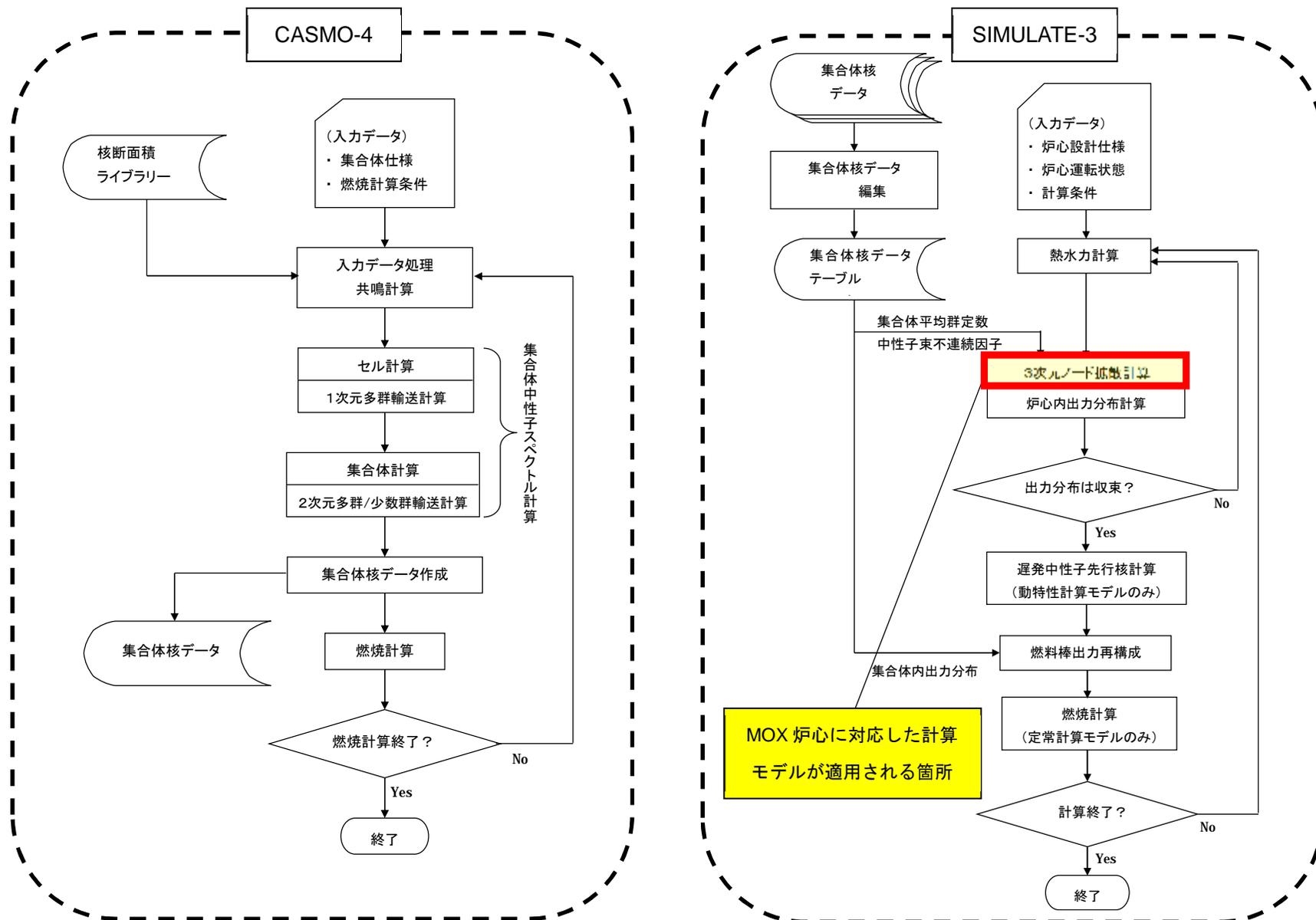


図1 C4/S3での計算の流れ

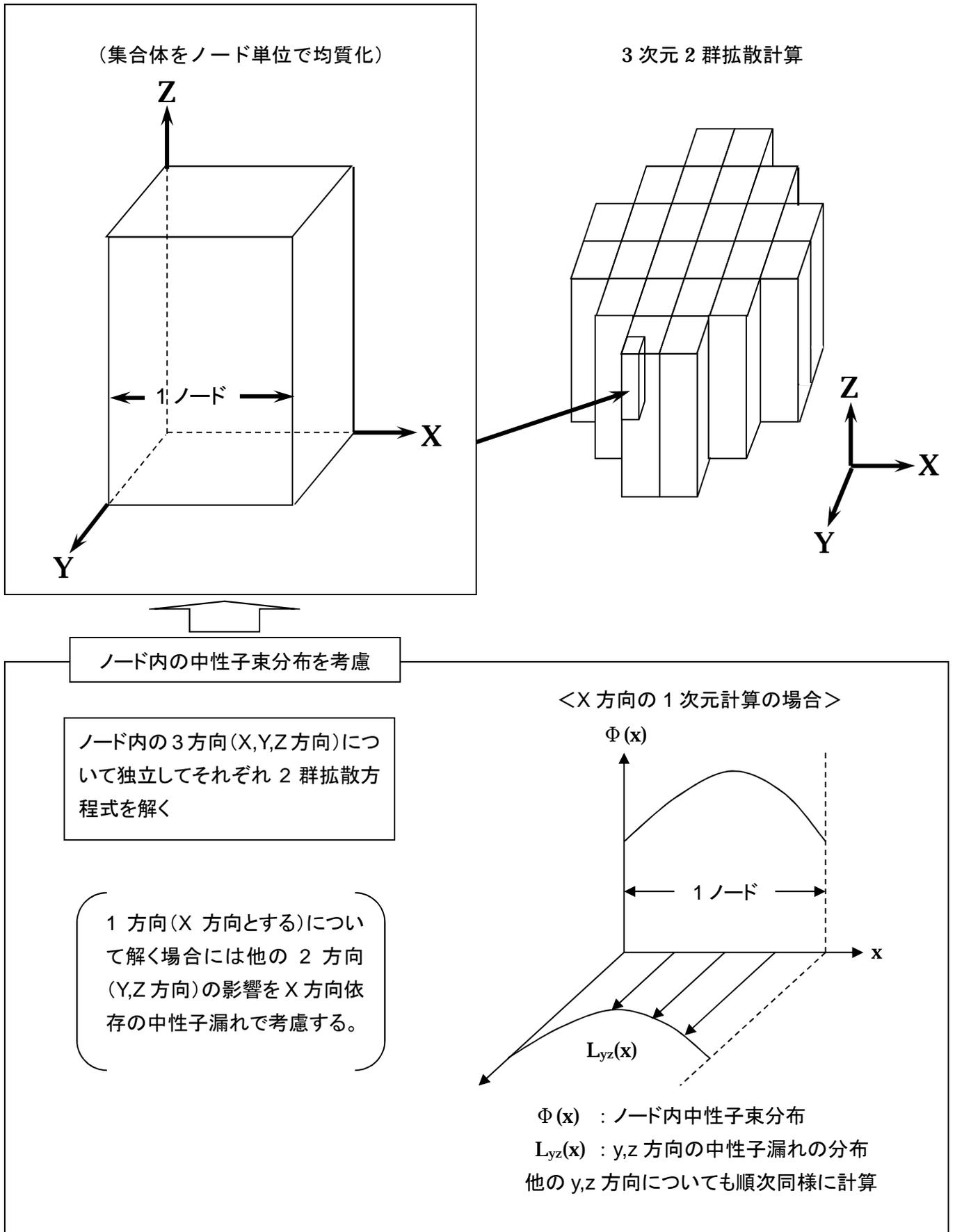


図2 S3コードにおける3次元拡散計算モデルの概要

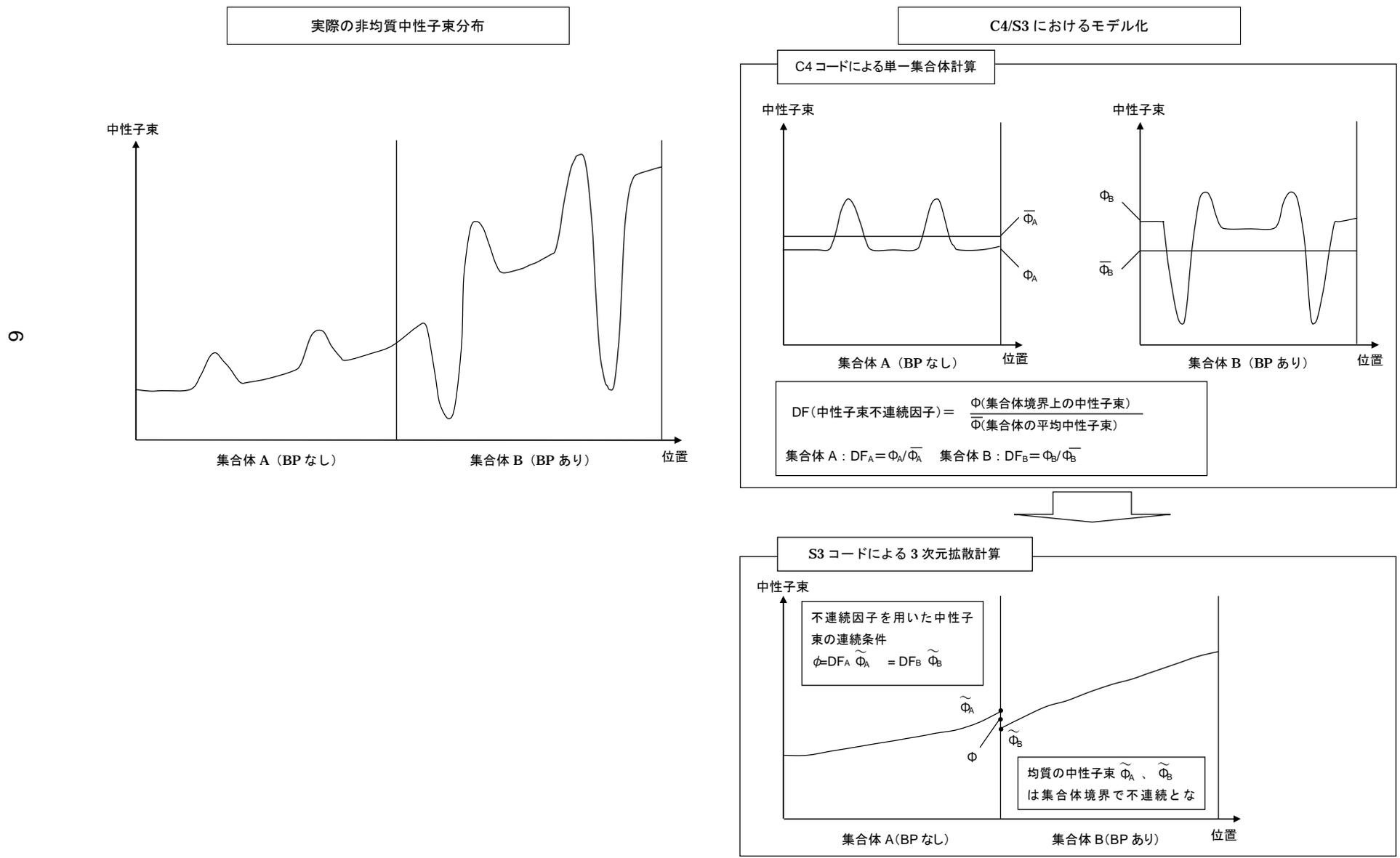


図 3 中性子束不連続因子の計算方法及び適用の概要

表 1 許認可コードと適用希望コードの比較（ウラン炉心と MOX 炉心の違いは、下線部で示す）

計算コード名		許認可コード (PHOENIX-P/ANC)		現在使用コード (CASMO-4/SIMULATE-3)	適用希望コード (CASMO-4/SIMULATE-3)
適用炉心		ウラン炉心	MOX 炉心	ウラン炉心	MOX 炉心
少数群計算コード (燃料集合体単位計算)	核データライブラリ	ENDF/B-V	ENDF/B-V	ENDF/B-IV	ENDF/B-IV
	スペクトル計算群数	42 群	42 群	70 群（ピンセル）	70 群（ピンセル）
	2次元中性子束分布計算	6 群輸送計算 (S <sub>N</sub> 法)	6 群輸送計算 (S <sub>N</sub> 法)	<input type="checkbox"/> 群輸送計算 (Characteristics 法)	<input type="checkbox"/> 群輸送計算 (Characteristics 法)
	空間の取扱い	セル内均質 (1 燃料集合体)	セル内均質 <u>(4 燃料集合体)</u>	幾何形状を直接取り扱う (1 燃料集合体)	幾何形状を直接取り扱う (1 燃料集合体)
炉心核計算コード	集合体均質化効果の取扱い	中性子束不連続因子	中性子束不連続因子	中性子束不連続因子	中性子束不連続因子※1
	3次元中性子束分布計算	2 群拡散計算	2 群拡散計算	2 群拡散計算	2 群拡散計算※2
	ノード内中性子束分布計算	多項式展開	多項式展開	多項式展開	多項式展開（高速群） <u>多項式+解析的展開（熱群）</u> ※3
	ノード分割	集合体内 2×2	集合体内 2×2	集合体内 2×2	集合体内 2×2
	燃料棒単位出力分布計算	詳細出力分布再構成法	詳細出力分布再構成法	詳細出力分布再構成法	詳細出力分布再構成法

※1) MOX 炉心への適用時は、ウラン燃料と MOX 燃料の境界における中性子束分布の急激な変化を拡散計算で取り扱うため、簡易条件の輸送計算を用いた中性子束不連続因子の補正を適用している。

※2) MOX 炉心への適用時は、ウラン炉心で考慮している燃焼度などのパラメータに加え、高速群、熱群ともに中性子スペクトルに応じて断面積を変化させることにより、中性子スペクトル干渉に伴う断面積変化を取り扱うモデルを採用している。

※3) MOX 炉心への適用時は、1),2)で示した 2 つの手法の適用に加え、集合体境界付近の熱中性子束分布の急激な空間変化を取り扱うため、熱群のノード内中性子束分布の展開に解析的な項を追加する手法を適用している。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。