

補足説明資料 16-2

第十六条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

臨界防止機能に関する説明資料

目 次

1	要求事項	3
2	要求事項への適合性	5
3	参考文献	20
別紙 1:	臨界解析における条件設定根拠について	
別紙 2:	臨界解析に使用する解析コードについて	
別紙 3:	CASTOR® geo26JP 型の取扱いフロー及び各状態における中性子実効増倍率について	

1 要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、特定兼用キャスクの臨界防止機能に関する要求事項は、以下の通りである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第十六条第2項第一号ハ

- ・燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする

②設置許可基準規則解釈 別記4 第16条第1項

- ・第16条第2項第1号ハに規定する「臨界に達するおそれがない」とは、第5項に規定するもののほか、使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（平成25年11月27日原子力規制委員会決定。以下「貯蔵事業許可基準規則解釈」という。）第3条に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。

・貯蔵事業許可基準規則解釈第3条

第3条に規定する「臨界に達するおそれがないもの」とは、以下の設計をいう。

- 一 使用済燃料貯蔵施設における金属キャスクは単体として、使用済燃料を収納した条件下で、技術的に想定されるいかなる場合でも臨界を防止する設計であること。
- 二 金属キャスク内部のバスケット（金属キャスク内に収納される使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するための構造物をいう。以下同じ。）が臨界防止機能の一部を構成する場合には、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が保たれる設計であること。
- 三 使用済燃料貯蔵施設は、当該施設内における金属キャスク相互の中性子干渉を考慮し、技術的に想定されるいかなる場合でも臨界を防止する対策が講じられていること。
- 四 臨界評価において、以下の事項を含め、未臨界性に有意な影響を与える因子が考慮されていること。

① 配置・形状

貯蔵エリア内の金属キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の燃料集合体の配置等において適切な安全裕度を考慮すること。

金属キャスクが滑動する可能性がある場合には、滑動等による金属キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮されていること。

事故時にバスケット及び使用済燃料集合体の変形（損傷）する可能性がある場合には、臨界解析においてもこの変形（損傷）が適切に考慮されていること。

② 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下の事項等が適切な安全裕度をもって考慮されていること。

a) 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）

b) 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

③ 減速材（水）の影響

使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たり当該使用済燃料が冠水することが、設計上適切に考慮されていること。

④ 燃焼度クレジット

燃焼度クレジット（臨界評価において、使用済燃料の燃焼に伴う反応度低下を考慮することをいう。）を採用する場合には、以下の事項を含め、適切な安全裕度を有する設計であることが確認されていること。

- a) 燃料集合体の燃焼度及び同位体組成並びにそれらの分布の計算精度
 - b) 貯蔵する燃料集合体の燃焼度等の管理
- 五 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、臨界評価で考慮した因子についての条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。

③設置許可基準規則解釈 別記4 第16条第5項

- ・第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。
 - ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
 - ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「2. 安全機能の確保 2.1 臨界防止機能」には、以下の様に記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、使用済燃料が臨界に達するおそれがないこと。
- (2) 兼用キャスクの臨界防止機能をバスケットで担保している場合は、設計上想定される状態において、バスケットが臨界防止上有意な変形を起こさないこと。

【確認内容】

『

以下を踏まえ臨界防止設計が妥当であること。

1) 配置・形状

兼用キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において、適切な安全裕度を考慮するとともに、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が維持されること。

兼用キャスクが滑動する可能性がある場合は、滑動等による兼用キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮すること。

2) 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下について適切な安全裕度を考慮すること。

- a. 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）
- b. 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

3) 減速材（水）の影響

使用済燃料を兼用キャスクに収納する際、当該使用済燃料が冠水することを、設計上適切に考慮すること。

4) 検証され適用性が確認された臨界解析コード及びデータライブラリを使用すること。

5) 設計上、バスケットの塑性変形が想定される場合は、塑性変形したバスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。

』

2 要求事項への適合性

(1) 設置許可基準規則への適合性

CASTOR® geo26JP 型の臨界防止機能については、以下の通り設置許可基準規則に適合している。

①設置許可基準規則第十六条第2項第一号ハ

- ・燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする

②設置許可基準規則解釈 別記4 第16条第1項

- ・第16条第2項第1号ハに規定する「臨界に達するおそれがない」とは、第5項に規定するもののほか、使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（平成25年11月27日原子力規制委員会決定。以下「貯蔵事業許可基準規則解釈」という。）第3条に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。
- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第3条
第3条に規定する「臨界に達するおそれがないもの」とは、以下の設計をいう。
 - 一 使用済燃料貯蔵施設における金属キャスクは単体として、使用済燃料を収納した条件下で、技術的に想定されるいかなる場合でも臨界を防止する設計であること。
 - 二 金属キャスク内部のバスケット（金属キャスク内に収納される使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するための構造物をいう。以下同じ。）が臨界防止機能の一部を構成する場合には、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が保たれる設計であること。
 - 三 使用済燃料貯蔵施設は、当該施設内における金属キャスク相互の中性子干渉を考慮し、技術的に想定されるいかなる場合でも臨界を防止する対策が講じられていること。
 - 四 臨界評価において、以下の事項を含め、未臨界性に有意な影響を与える因子が考慮されていること。

① 配置・形状

貯蔵エリア内の金属キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の燃料集合体の配置等において適切な安全裕度を考慮すること。

金属キャスクが滑動する可能性がある場合には、滑動等による金属キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮されていること。

事故時にバスケット及び使用済燃料集合体の変形（損傷）する可能性がある場合には、臨界解析においてもこの変形（損傷）が適切に考慮されていること。

② 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下の事項等が適切な安全裕度をもって考慮されていること。

- a) 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）
- b) 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

③ 減速材（水）の影響

使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たり当該使用済燃料が冠水することが、設計上適切に考慮されていること。

④ 燃焼度クレジット

燃焼度クレジット（臨界評価において、使用済燃料の燃焼に伴う反応度低下を考慮することをいう。）を採用する場合には、以下の事項を含め、適切な安全裕度を有する設計であることが確認されていること。

a) 燃料集合体の燃焼度及び同位体組成並びにそれらの分布の計算精度

b) 貯蔵する燃料集合体の燃焼度等の管理

五 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、臨界評価で考慮した因子についての条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。

バスケットには設計貯蔵期間中に温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して十分信頼性のある材料を選択し、また、必要とされる強度及び性能を維持することにより、設計貯蔵期間を通して使用済燃料集合体の幾何学的配置を維持するために、必要な構造健全性を保つよう設計する。経年変化に対して必要とされる強度及び性能を維持することについては、別途、長期健全性に関する補足説明資料で説明する。

CASTOR® geo26JP 型は、貯蔵施設における使用済燃料集合体の搬入から搬出までの乾燥状態及び貯蔵中、並びに使用済燃料プールにおける燃料装荷及び取り出し中の冠水状態を含む技術的に想定されるいかなる場合でも中性子実効増倍率が 0.95 未満であるように設計する。

臨界解析では、CASTOR® geo26JP 型と使用済燃料集合体の幾何形状を三次元でモデル化する。解析コードには SCALE コードシステムを用い、中性子実効増倍率を計算するために臨界解析コード KENO-VI を用いる。臨界解析では使用済燃料集合体は保守的に濃縮度上限の新燃料集合体とし（燃焼度クレジットは考慮しない）、また、貯蔵する使用済燃料集合体にはガドリニウムを可燃性毒物として添加した燃料棒が含まれている場合があるが、ガドリニウムの存在は保守的に無視する。バーナブルポイズン集合体は、本臨界解析では考慮しない。

CASTOR® geo26JP 型は、貯蔵施設内における金属キャスク相互の中性子干渉を考慮するため、無限配列とする。

解析モデルについては、中性子実効増倍率が最大になるように、バスケット内の使用済燃料集合体の配置を設定する。バスケットについては、製造上の公差を考慮して寸法及び位置を中性子実効増倍率が最大となるように設定する（別紙 1 参照）。中性子吸収材中のほう素量については製造工程により均質性が確保され、設計上の添加ほう素量は製造仕様の下限に設定する。なお、

中性子吸収による中性子吸収材の原子個数密度の減少は無視し得る程度であることは、別途、長期健全性に関する補足説明資料で説明する。

本設計の妥当性を確認するために臨界解析を実施し、中性子実効増倍率が乾燥状態と冠水状態の両方で、 3σ を考慮した上で基準値 0.95 未満であることを確認した。

なお、使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっての必要な措置については、型式証明申請の範囲外（原子炉設置（変更）許可申請時に別途確認を受ける

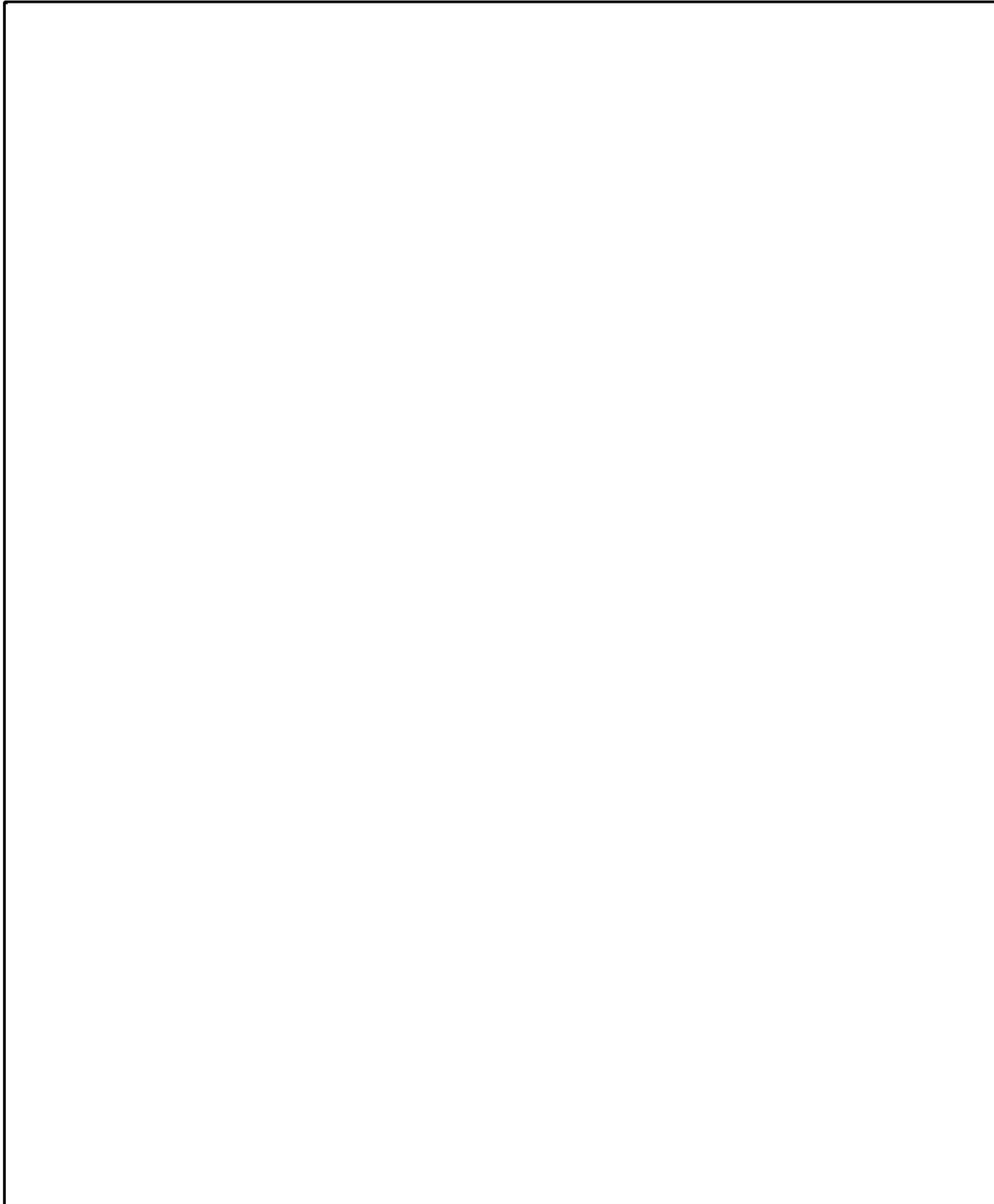


図 1 バスケット構造

③設置許可基準規則解釈 別記4 第16条第5項

- ・第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。
 - ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
 - ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

CASTOR® geo26JP 型の設計貯蔵期間は 60 年である。

別途、長期健全性に関する補足説明資料に示す通り、CASTOR® geo26JP 型を構成する部材は、設計貯蔵期間中の温度、放射線などの環境条件に対して、また、その環境条件下での腐食、クリープ、応力腐食割れなどの経年変化に対して信頼性のある材料を選定し、その必要な強度及び性能を確保することで、使用済燃料の健全性を確保する設計とする。

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、兼用キャスクの有する安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、CASTOR® geo26JP 型の臨界防止機能については、以下の通り審査ガイドの確認内容に適合している。

【確認内容】

1) 配置・形状

兼用キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において、適切な安全裕度を考慮するとともに、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が維持されること。

兼用キャスクが滑動する可能性がある場合は、滑動等による兼用キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮すること。

2) 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下について適切な安全裕度を考慮すること。

a. 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）

b. 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

3) 減速材（水）の影響

使用済燃料を兼用キャスクに収納する際、当該使用済燃料が冠水することを、設計上適切に考慮すること。

4) 検証され適用性が確認された臨界解析コード及びデータライブラリを使用すること。

CASTOR® geo26JP 型の臨界解析フローを図 2 に示す。

臨界解析では、CASTOR® geo26JP 型と使用済燃料集合体の実形状を三次元でモデル化する（図 3～図 6 参照）。解析コードとして SCALE コードシステムを用い、臨界解析コードとして KENO-VI を用い、その断面積ライブラリとして ENDF/B-VII.1 の 252 群ライブラリ（v7. 1-252n）を用いる。その検証及び適用性については別紙 2 に示す。

臨界解析条件を表 1～表 5 に示す。乾燥状態での解析に加え、使用済燃料を CASTOR® geo26JP 型に収納する際の冠水状態を考慮した解析を行う（中性子実効増倍率が最大となる水密度 1.0g/cm^3 を用いる）。また、CASTOR® geo26JP 型の部分的な浸水状態も評価する。水平姿勢における浸水は、CASTOR® geo26JP 型の取扱い及び貯蔵中には想定されないが、評価を行う。

最適臨界条件として設定した臨界解析モデルの縦断面図を図 4 に、横断面図を図 5 及び図 6 に示す。

表 1～表 5 及び図 3～図 6 に示す臨界解析用の境界条件は、別紙 1 に示す冠水条件での中性子実効増倍率の感度解析の結果を踏まえて設定している。乾燥状態では、水の代わりに真空中でモデル化することにより、同じ幾何形状のモデルを用いている。なお、乾燥状態における中性子実効増倍率は、冠水状態と比べて非常に小さいため、冠水状態と同様の感度解析は実施しない。

別紙 3 に示す通り、乾燥状態及び冠水状態の評価は CASTOR® geo26JP 型の全ての取扱い工程における中性子実効増倍率を包絡している。

臨界解析では使用済燃料集合体は保守的に濃縮度上限の新燃料集合体とし、燃焼度クレジットは考慮しない。

臨界解析では、以下の保守的な条件を設定する。

- ほう素水は考慮しない
- ガドリニウム等の可燃性毒物は考慮しない
- バーナブルポイズン集合体は考慮しない
- 使用済燃料集合体は濃縮度上限の新燃料とする（燃焼度クレジットは考慮しない）
- 冠水時は、水密度 $\rho = 1.0\text{g/cm}^3$ による最適減速を仮定する
- 冠水時は、燃料棒は全て浸水している仮定する
- 燃料組成に同位体 ^{234}U 及び ^{236}U は考慮しない
- 密度、材料組成及び幾何学的形状に関する公差範囲内における最も保守的な組合せとする

なお、ほう素量は保証可能な最低値を設定する。

表 1 臨界解析条件(収納物条件)

項目		収納物仕様	解析条件
貯蔵槽の仕様	燃料集合体 1体当たり	種類	
		初期濃縮度 (wt%)	
		ウラン質量 (kg)	
		最高燃焼度 ^(注1) (GWd/t)	
		冷却期間 (年)	
	バーナブルポイズン集合体 1体当たり	最高燃焼度 (GWd/t)	
		冷却期間 (年)	
	キャスク 1基当たり	平均燃焼度 ^(注2) (GWd/t)	

(注1) 最高燃焼度は、収納する燃料集合体のうち、最高の燃焼度を示す燃料集合体の燃焼度

(注2) 平均燃焼度は、収納する全ての燃料集合体の燃焼度の平均値

表 2 臨界解析における燃料集合体の仕様

項目	単位	15x15 燃料	17x17 燃料	
			A型	B型
種類	-	-		
燃料材質	-			
被覆管材質	-			
燃料密度	% 理論密度			
ペレット直径 ^(注1)	mm			
燃料棒直径	mm			
被覆管厚さ ^(注1)	mm			
燃料有効長	mm			
制御棒案内管の内径	mm			
制御棒案内管の外径	mm			
燃料棒配列	-			
燃料集合体当たりの燃料棒数	本			
燃料棒ピッチ	mm			
初期濃縮度	wt%			

(注1) 17×17燃料Type Bはペレット径が小さく被覆管厚さが大きい。そのためType Bの反応度は、燃料棒格子内の水による中性子減速がより大きいType Aに比べ低くなる。臨界解析では、反応度が高いType Aを用いる。

表 3 臨界解析条件

項目	目次	
臨界解析の方法	モンテカルロ臨界解析コードを用い、CASTOR® geo26JP型中性子実効増倍率を決定する。	
解析コード	SCALEコードシステム(6.2.2) - 共鳴計算: XSProc (BONAMI, CENTRM, PCM) - 臨界解析: 臨界解析コードKENO-VI (統計誤差 $\sigma \leq 50$ pcm) - 断面ライブラリ: ENDF/B-VII.1に基づく252群断面ライブラリ(v7.1-252n) - (解析条件を決めるための)感度解析: TSUNAMIプログラム	
中 性 子 解 析 条 件	燃料の種類	15x15 及び 17x17
	濃縮度	15 × 15燃料: <input type="text"/> , 17 × 17燃料: <input type="text"/>
	収納体数	26
	燃料配置	図5参照
	寸法条件	水ギャップ※、ステンレス鋼板、並びに熱伝導及び中性子吸収材は最小厚さとする。(別紙1の感度解析結果を参照)
	熱伝導及び中性子吸収材の配置	熱伝導及び中性子吸収材と燃料間は最大距離とする。 (別紙1の感度解析を参照)
	キャスク内部雰囲気	乾燥状態: 真空 冠水状態: 水による部分浸水($\rho = 1.0\text{g/cm}^3$) (別紙1の感度解析を参照)
	キャスク外部雰囲気	真空
	キャスク境界条件	無限配列(完全反射)
	燃料集合体構造物	乾燥状態: 真空(ボイド) 冠水状態: 水 ($\rho = 1.0\text{g/cm}^3$)
	ほう素含有量	熱伝導及び中性子吸収材へのほう素添加量は、最低保証値で設定し、解析に使用 ¹⁰ B 最低保証値: 面密度 <input type="text"/> mg/cm ²
	バーナブルポイズン集合体	バーナブルポイズン集合体は考慮しない
	中性子遮へい材	キャスク本体の中性子遮蔽材(ポリエチレン)をキャスク本体材質(球状黒鉛鋳鉄)に変更。 蓋部及び底部の中性子遮蔽材は考慮しない。
	蓋部	一次及び二次蓋を考慮する。貯蔵施設への搬入及び貯蔵施設からの搬出時に用いる三次蓋については考慮しない。

※ 燃料が収納されるバスケットの格子は、Hビームによって距離が確保され、冠水状態において水で満たされる空間(以下「水ギャップ」という)を構築する。

表 4 臨界分析における材料組成

--

表 5 臨界解析における寸法条件

項目	寸法条件	設定根拠
バスケット格子内のり寸法		全体に渡ってのバスケット位置の平均値 感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
水ギャップ厚さ		感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
ステンレス鋼板(Hビームフランジ)の厚さ		感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
熱伝導及び中性子吸収材の厚さ		感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
バスケット側板の厚さ		感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
水ギャップ中のHビームのウェブ厚さ		水ギャップの効果が最小となるように設定
燃料ペレット径	公称	表2参照。 感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
燃料有効長	公称	表2参照。 感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
被覆管外径	最小	表2参照。 感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
被覆管厚さ	最小	表2参照。 感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
制御棒案内管の内径	最大	表2参照。 被覆管外径及び厚さより判断
制御棒案内管の外径	最小	表2参照。 被覆管外径及び厚さより判断
燃料集合体の軸方向変位	公称 (バスケット内での軸方向中心)	感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
燃料集合体の径方向変位	公称 (バスケット位置内の半径方向の中心)	感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
エッジセグメントの厚さ	公称 	感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
水ギャップ中のバスケットクロス※	解析モデルに考慮	中性子束トラップ中の水の減少を考慮 感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
キャスクキャビティの鉛直方向の部分浸水	冠水条件	感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
キャスクキャビティの水平方向の部分浸水	最上段は浸水せず	図5参照。 感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)

項目	寸法条件	設定根拠
キャスク本体中の中性子遮蔽材(ポリエチレン)	球状黒鉛鑄鉄に置き換え	感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)
キャスク底部及び蓋部の中性子遮蔽材	キャスク底部は球状黒鉛鑄鉄、蓋部はステンレスに置き換え	感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)

※垂直に配向したHビームの交差領域(つまり隣接する格子の角と角の間の領域)の構造を「バスケットクロス」と呼ぶ。

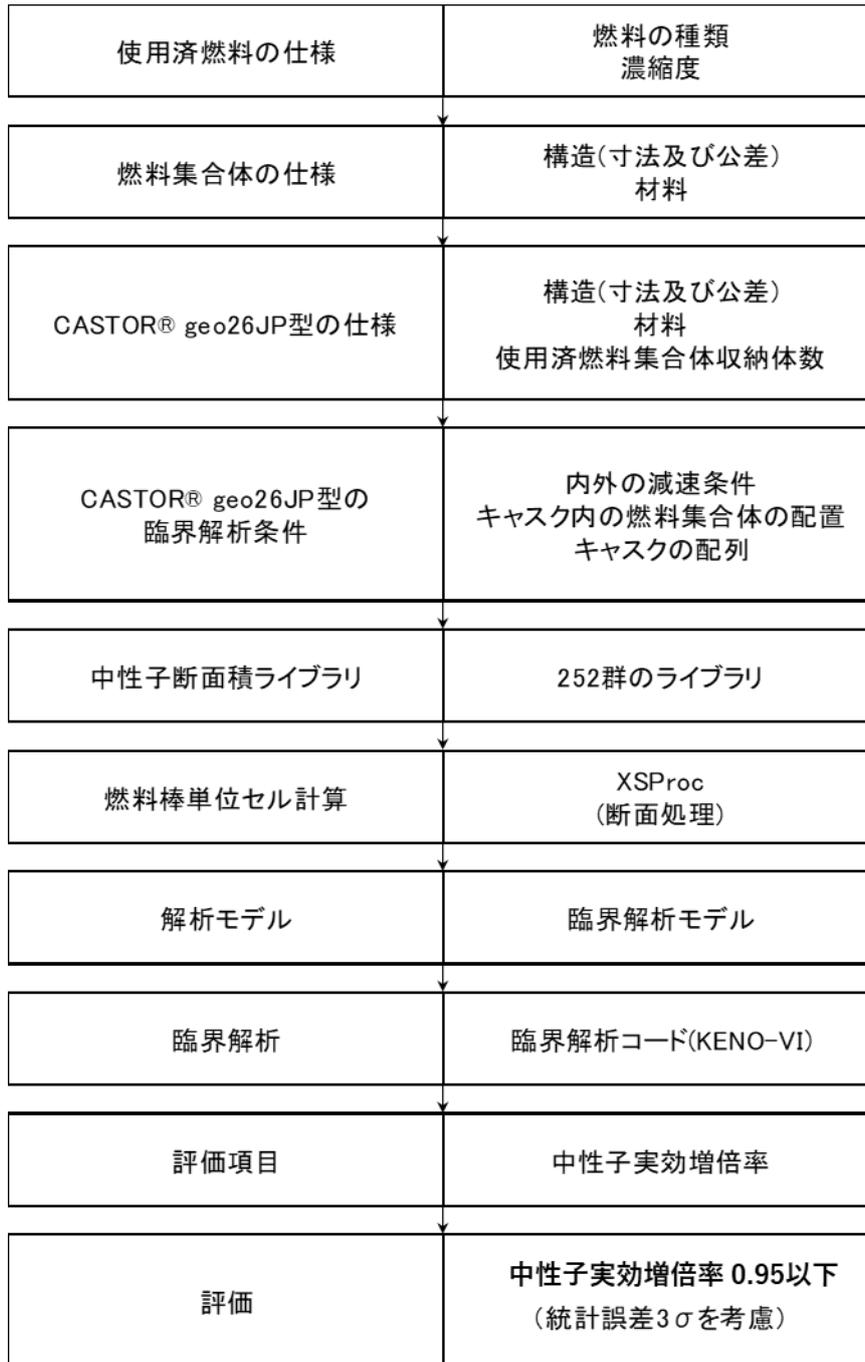


図 2 CASTOR® geo26JP の臨界解析フロー

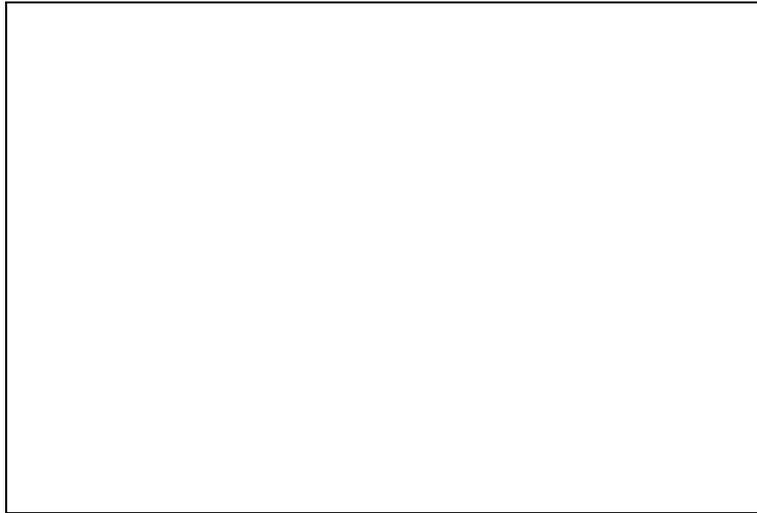


図 3 燃料体の臨界解析モデル(燃料領域横断面図)

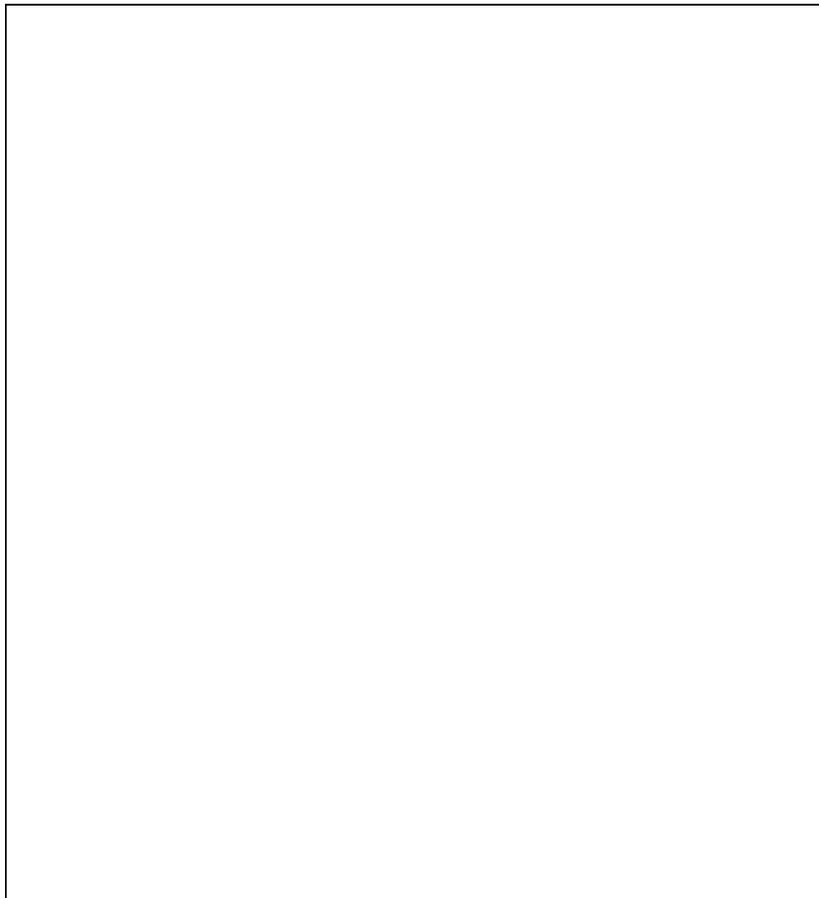


図 4 臨界解析モデル(縦断面図)



図 5 臨界解析モデル(横断面図)

表 6 に示す通り、CASTOR® geo26JP 型は、技術的に想定されるいずれの場合においても評価基準を満たし、未臨界が維持される。

表 6 評価結果

項目		評価結果		評価基準(注1)	備考
		15x15 fuel	17x17 fuel		
中性子実効増倍率	冠水状態	0.92751 (3σ: 0.00063)	0.93312 (3σ: 0.00075)	≤ 0.95	SCALEコードシステムは、統計誤差に関連するモンテカルロ法を使用するので、評価結果は、統計誤差σの3倍を考慮する。
	乾燥状態	0.38812 (3σ: 0.00032)	0.39403 (3σ: 0.00035)		

(注1) 参考文献 [1] によれば、「十分に検証された臨界安全解析コードシステムを用いる場合には、そのコードシステムによって算出された実効中性子増倍率が0.95以下となることを満足することにより未臨界性を判定することができる。」とされている。

表 6 の結果は、

その計算結果の統計誤差を示している。

【確認内容】

- 5) 設計上、バスケットの塑性変形が想定される場合は、塑性変形したバスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。

補足説明資料 1024-TR-00002、補足説明資料 1024-TR-00003 及び補足説明資料 1024-TR-00004 にて説明している通り、設計上考慮すべき自然事象（地震、津波及び竜巻）に対し、バスケットが弾性範囲内に留まることを設計基準とし、塑性変形が生じない設計とする。

3 参考文献

- [1] 日本原子力研究所, 「臨界安全ハンドブック第2版」, JAERI 1340, (1999)

別紙1: 臨界解析における条件設定根拠について

臨界解析モデルに用いた臨界解析条件のうち、以下の条件については感度解析を実施し、その結果に基づき設定した。（本資料本文表 5 参照）

- 材料密度及び組成
- ペレット径
- 燃料有効長
- 被覆管外径
- 燃料集合体の軸方向及び径方向の変位（図 A1-1 参照）
- キャスク内部のバスケット位置（バスケット位置の内寸）
- 水ギャップの厚さ
- ステンレス鋼板（H ビームフランジ）の厚さ
- 熱伝導及び中性子吸収材の厚さ
- バスケット側板の厚さ
- コーナーエレメントの肉厚
- バスケットクロスモデル化するか否か
- キャスク外側の境界条件（図 A1-2 参照）
- キャスクキャビティの垂直及び水平の部分浸水（図 A1-3 参照）
- キャスク本体内部の中性子遮蔽材を考慮するか否か（図 A1-4 参照）

本感度解析は、冠水状態で、17×17燃料収納のケースにおいて行った。なお、本感度解析の1回の計算の統計誤差 σ は 50 pcm (パーセントミル $10^{-2} \times 10^{-3} = 10^{-5}$)未満としている。

幾何学的条件に関する感度解析の結果を基準モデルに対する偏差 Δk として表 A1-3 に示す。この結果から、臨界解析用評価モデルで設定した各条件について表 1～表 5 及び図 3～図 5 に示す。

表 A1-1 材料密度の感度解析

--

表 A1-2 材料組成の感度解析

--

表 A1-3 感度解析条件と結果

		17x17 fuel	
基準モデルにおける k 値		0.92974	
パラメータ		Δk , pcm	評価モデルにおける設定
ペレット直径 mm			
		-36	公称値
		-15	
		-90	
		0	
		-49	
		-11	
		-156	
燃料有効長, cm			
		-106	公称値
		-66	
		-137	
		-105	
		0	
		-173	
		-98	
		-68	
		-138	
燃料被覆管外径, mm			
		858	最小値
		652	
		457	
		166	
		0	
		-358	
		-623	
		-950	
		-1202	
燃料集合体軸方向変位, cm			
	-4.0	-139	公称値
	-3.0	-112	
	-2.0	-86	
	-1.0	-134	
	0.0	0	
	1.0	-69	
	2.0	-100	
	3.0	-9	
	4.0	-98	
燃料集合体径方向変位, cm ("+ / -" - 外周方向変位 / キャスク中心方向変位)			
		-248	公称値
		-250	
		-69	
		-135	
		-43	
		0	
		-43	
		-63	
		-125	
		-200	
		-318	

表 A1-3 感度解析条件と結果（続き）

		17x17 fuel	
基準モデルにおける k 値		0.92974	
パラメータ	Δk , pcm	評価モデルにおける設定	
バスケット格子内のり寸法, mm			
		-236	最大値
		-186	
		0	
		-10	
		165	
		260	
水ギャップ厚さ, mm			
		0	最小値
		-100	
		-263	
		-267	
		-177	
		-322	
ステンレス鋼板(Hビームフランジ部)の板厚, mm			
		0	最小値
		-15	
		-55	
		-177	
		-111	
		-188	
		-230	
中性子吸収材の板厚, mm			
		0	最小値
		-23	
		-253	
		-376	
		-478	
バスケット側板の板厚, mm			
		0	公称値
		-166	
		-34	
		-106	
		-48	
コーナーエレメントの厚さ, mm			
		-41	公称値
		-100	
		0	
		-156	
		-107	

表 A1-3 感度解析条件と結果 (続き)

		17x17 fuel
基準モデルにおける k値	0.92974	
パラメータ	Δk , pcm	評価モデルにおける設定
バスケットクロスの有無		
バスケットクロスあり	160	評価モデルでは有りとする
外部境界条件		
配列系(乾燥状態)	0	配列系(乾燥状態)とする
配列系(冠水状態)	-119	
孤立系(20cmの水)	-137	
孤立系(乾燥状態)	-98	
鉛直方向部分浸水(蓋部からの水位設定), cm		
200	-554	冠水状態とする
150	-383	
100	-102	
90	-37	
80	-104	
70	-112	
60	-60	
50	-122	
40	-119	
30	70	
20	2	
10	-4	
0	0	
水平方向部分浸水		
	155	
	-102	
	-733	
	-98	
	-234	
	-740	
キャスク内部の中性子吸収材部の物性値		
球状黒鉛鑄鉄	0	球状黒鉛鑄鉄に置き換え
ポリエチレン	-677	
真空(ボイド)	-115	
水平方向部分浸水	-677	

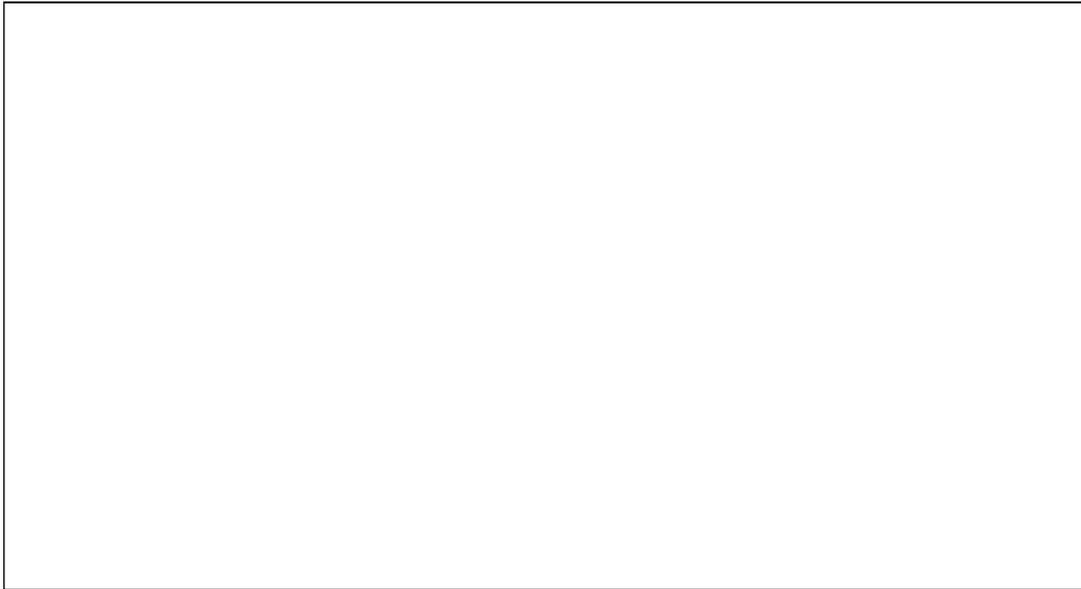


図 A1-1 燃料集合体の半径方向に対する計算モデル

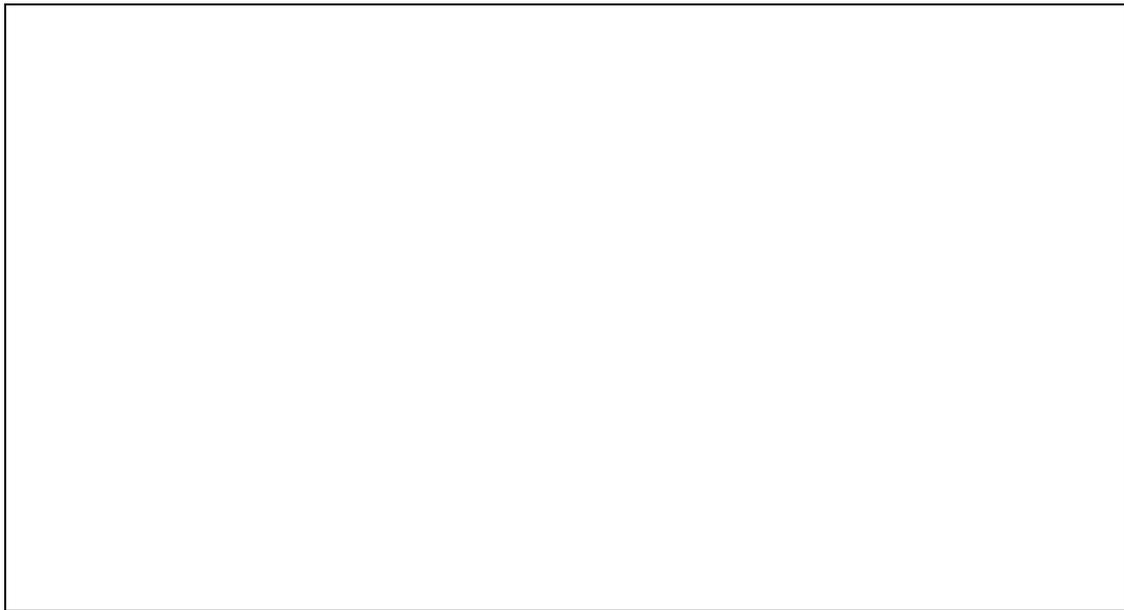


図 A1-2 外部境界条件に対する計算モデル

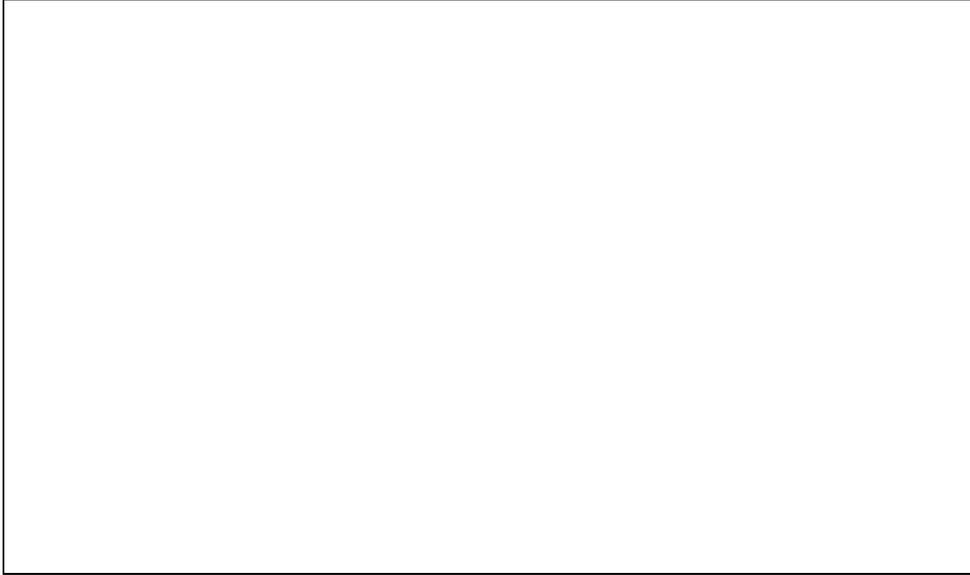


図 A1-3 キャスクの冠水状態の計算モデル

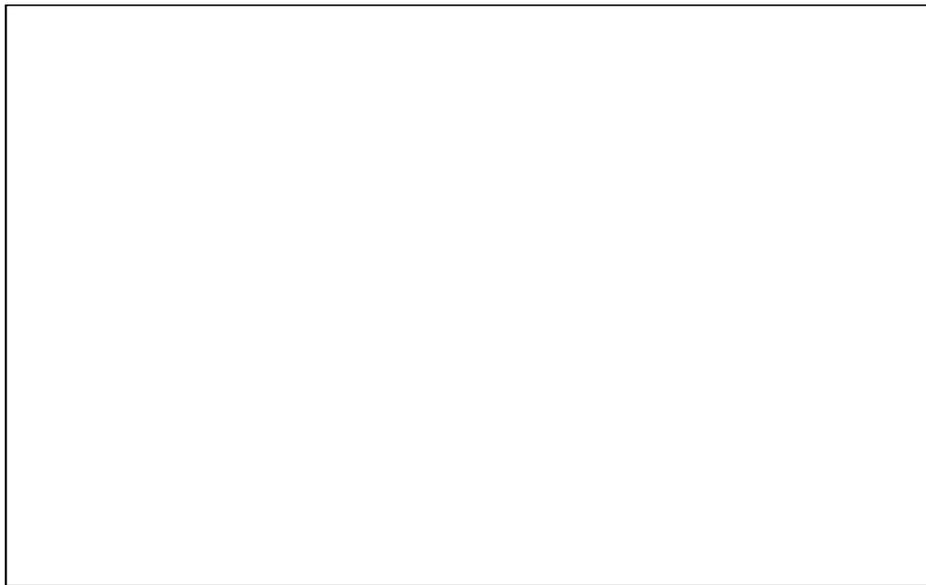


図 A1-4 キャスク胴の中性子遮蔽材（棒）に対する計算モデル

別紙2: 臨界解析に使用する解析コードについて

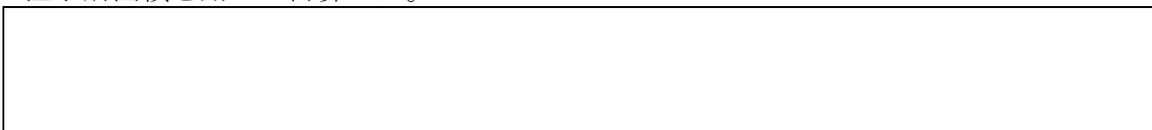
本章では、CASTOR® geo26JP 型の臨界安全解析に使用した解析コードの機能、計算手法、検証内容について説明する。

1. SCALE コードシステム

a. 概要

CASTOR® geo26JP 型の臨界解析には、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された公開の SCALE コードシステムのうち、SCALE 6.2 コードの 3 次元モンテカルロプログラム KENO-VI を使用した。[1]

中性子増倍率の計算には、ENDF/B - VII.1(V7.1 - 252n, T = 293 K)に基づく 252 群中性子断面積を用いて計算した。



b. 機能

SCALE コードシステムには、臨界解析のために以下の機能を有している。

- 燃料集合体や兼用キャスクの材料組成や幾何形状を与えることで、断面積作成から中性子実効増倍率の評価、

- SCALE には 3 次元輸送計算コードが含まれており、複雑な形状に対する臨界計算が可能である。

c. 解析フロー

臨界コード KENO-VI を使用した SCALE コードシステムの解析フローを図 A2-1 に示す。また、TSUNAMI-3D シーケンス及び TSUNAMI-IP モジュールを用いた SCALE コードシステムの解析フローをそれぞれ図 A2-2 及び図 A2-3 に示す。

d. 検証





2.参考文献

- [1] B. T. Rearden and M. A. Jessee, Eds. SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.2, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2017), Available from Radiation Safety Information Computational Center as CCC-834
- [2] International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA Nuclear Science Committee, September 2019 Edition, NEA/NSC/DOC(95)03
- [3] J. C. Neuber, Some words about the 95%/95% tolerance limit, IAEA-TECDOC-1547, Vienna (2007)

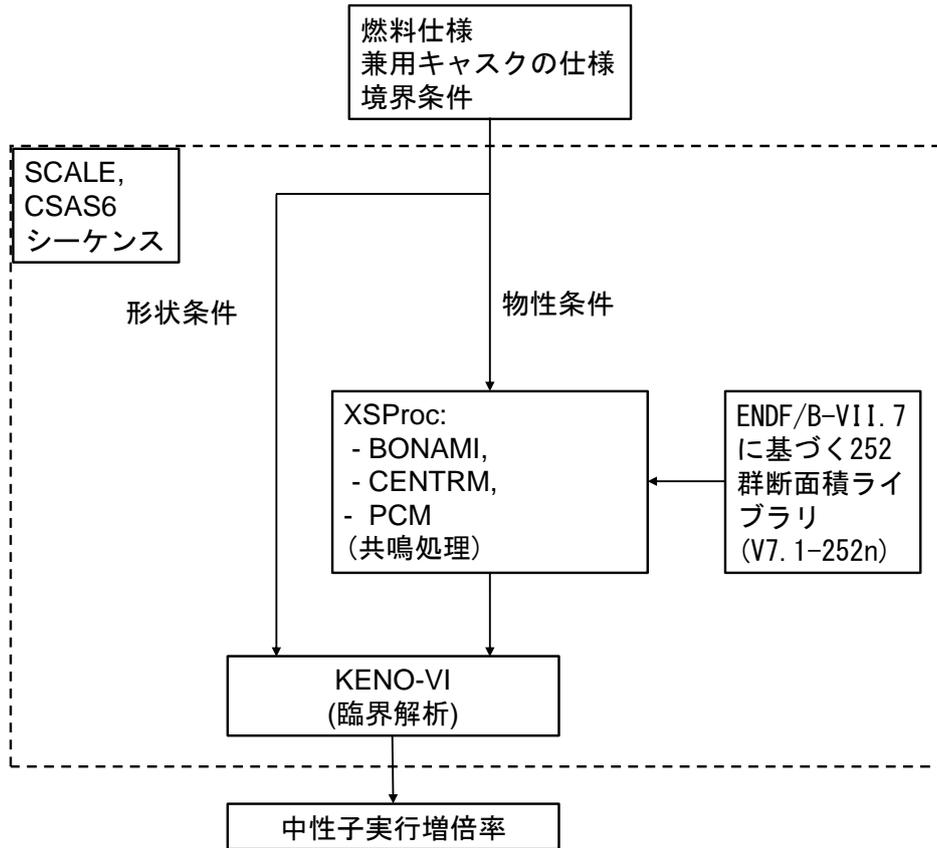


図 A2-1 KENO-VI 用いた SCALE コードシステムの解析フロー図

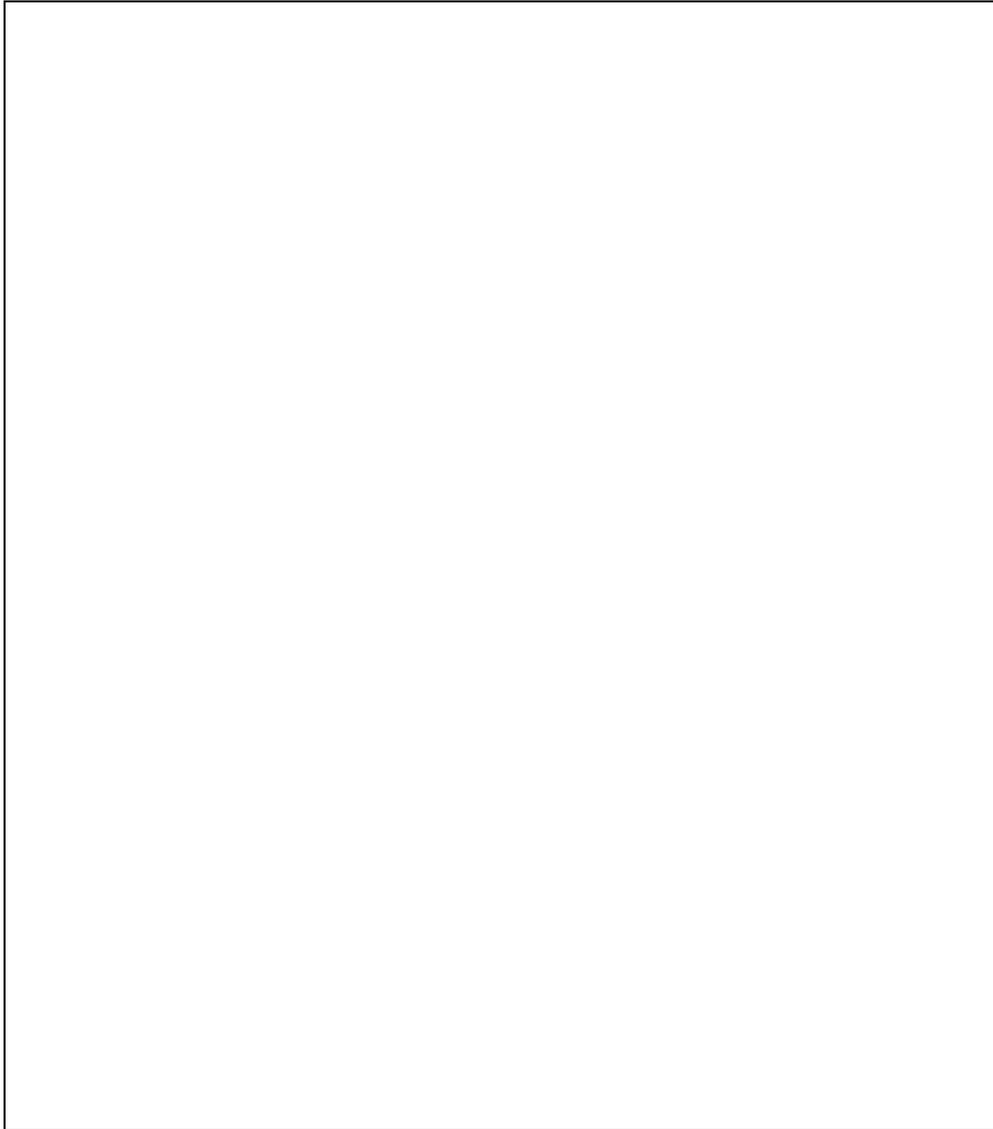


図 A2-2 TSUNAMI-3D シーケンスを用いた SCALE コードシステムの解析フロー図



図 A2-3 TSUNAMI-IP シーケンスを用いた SCALE コードシステムの解析フロー図

表 A2-1 選択されたベンチマークの結果

--

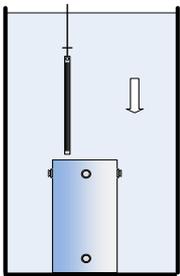
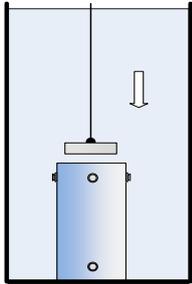
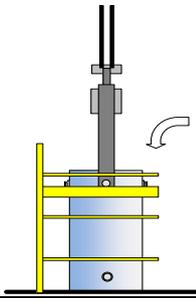
表 A2-1 選択されたベンチマークの結果 (続き)

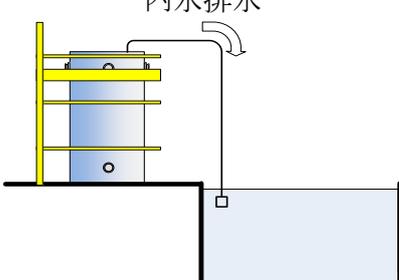
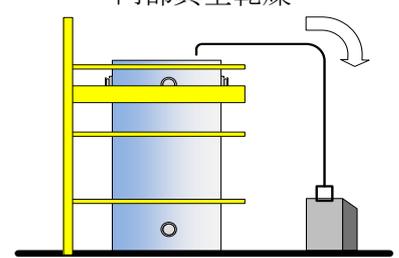
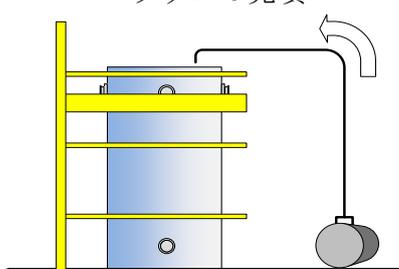
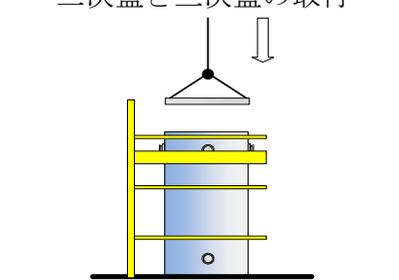
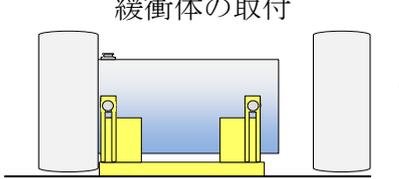
--

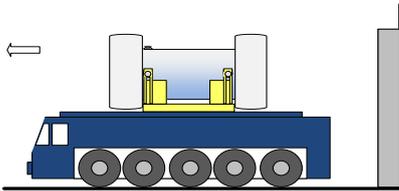
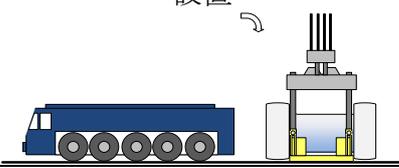
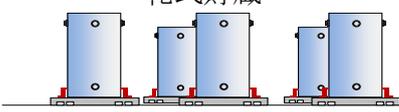
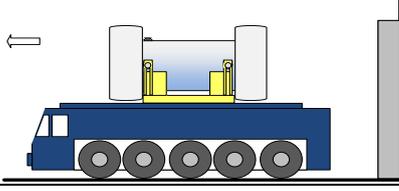
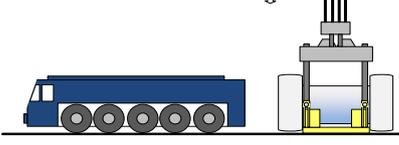
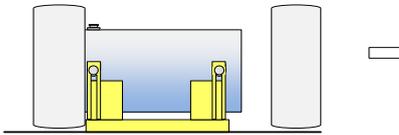
別紙3: CASTOR® geo26JP 型の取扱いフロー及び各状態における中性子実効増倍率について

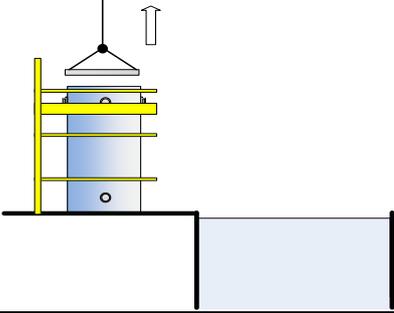
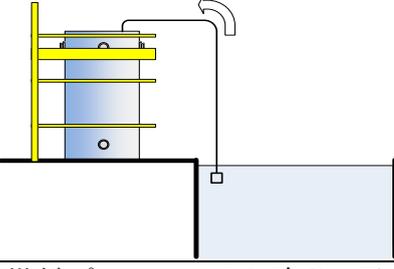
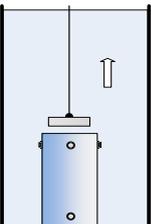
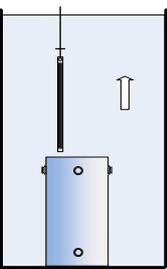
使用済燃料プール中での使用済燃料の装荷、乾式貯蔵、使用済燃料プール中での使用済燃料の取り出し等の CASTOR® geo26JP 型の取扱いの流れを表 A3-1 に示す。また、各段階の未臨界評価に適用した境界条件と中性子増倍率の結果も併せて示す。

表 A3-1 CASTOR® geo26JP の取扱いの流れ

No.	取扱手順	考慮すべき部品	内部／外部雰囲気	境界条件と中性子実効増倍率
1-1	<p>使用済燃料装荷</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット</p>	<p>水/水</p>	<p>冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.93312$)</p>
1-2	<p>一次蓋取付</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット、 一次蓋</p>	<p>水/水</p>	<p>冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.93312$)</p>
1-3	<p>燃料プールからのキャスクの 持ち上げ</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット、 一次蓋</p>	<p>水/空気</p>	<p>冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.93312$)</p>

No.	取扱手順	考慮すべき部品	内部／外部雰囲気	境界条件と中性子実効増倍率
1-4	<p>内水排水</p> 	キャスク本体、 バスケット、 一次蓋	水、空気 (部分的な浸水)/空気	冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.93312$)
1-5	<p>内部真空乾燥</p> 	キャスク本体、 バスケット、 一次蓋	真空/空気	乾燥状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.39403$)
1-6	<p>ヘリウムの充填</p> 	キャスク本体、 バスケット、 一次蓋	ヘリウム/空気	乾燥状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.39403$)
1-7	<p>二次蓋と三次蓋の取付</p> 	キャスク本体、 バスケット、 一次蓋、 二次蓋、 三次蓋	ヘリウム/空気	乾燥状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.39403$)
1-8	<p>緩衝体の取付</p> 	キャスク本体、 バスケット、 一次蓋、 二次蓋、 三次蓋、 緩衝体	ヘリウム/空気	乾燥状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.39403$)

No.	取扱手順	考慮すべき部品	内部/外部雰囲気	境界条件と中性子実効増倍率
2-1	<p>トレーラーへの設置と貯蔵施設へのキャスクの輸送</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット、 一次蓋、 二次蓋、 三次蓋、 緩衝体</p>	<p>ヘリウム/空気</p>	<p>乾燥状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.39403$)</p>
2-2	<p>トレーラーから貯蔵場所への設置</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット、 一次蓋、 二次蓋、 三次蓋、 緩衝体</p>	<p>ヘリウム/空気</p>	<p>乾燥状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.39403$)</p>
2-3	<p>乾式貯蔵</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット、 一次蓋、 二次蓋</p>	<p>ヘリウム/空気</p>	<p>乾燥状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.39403$)</p>
3-1	<p>トレーラーへの設置と貯蔵施設からのキャスクの輸送</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット、 一次蓋、 二次蓋、 三次蓋、 緩衝体</p>	<p>ヘリウム/空気</p>	<p>乾燥状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.39403$)</p>
3-2	<p>トレーラーからの荷揚げ</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット、 一次蓋、 二次蓋、 三次蓋、 緩衝体</p>	<p>ヘリウム/空気</p>	<p>乾燥状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.39403$)</p>
3-3	<p>緩衝体の取り外し</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット、 一次蓋、 二次蓋、 三次蓋</p>	<p>ヘリウム/空気</p>	<p>乾燥状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.39403$)</p>

No.	取扱手順	考慮すべき部品	内部／外部雰囲気	境界条件と中性子実効増倍率
3-4	<p>三次蓋・二次蓋の取り外し</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット、 一次蓋</p>	<p>ヘリウム/空気</p>	<p>乾燥状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.39403$)</p>
3-5	<p>キャスクへの注水</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット、 一次蓋</p>	<p>水、空気 (部分的な垂直 浸水)/空気</p>	<p>冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.93312$)</p>
3-6	<p>燃料プールへの吊り降ろし及 び一次蓋の取り外し</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット、 一次蓋</p>	<p>水/水</p>	<p>冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.93312$)</p>
3-7	<p>使用済燃料の取り出し</p> 	<p>キャスク本体、 バスケット</p>	<p>水/水</p>	<p>冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.93312$)</p>