

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	21
別紙 2	臨界解析に使用する解析コードについて	34
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	42
別紙 4	CASTOR® geo26JP 型のバスケット構造の注水時における水位傾向について	46

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。

CASTOR® geo26JP 型は、加圧水型原子炉の発電に用いた使用済燃料の未臨界性を維持するために、2枚のステンレス鋼板(以下「フランジ」という。)をステンレス鋼製のウェブで構成されたH形鋼状のステンレス製の構造材(以下「H-ビーム」という。)で区切られた格子構造であるバスケットの所定の位置に使用済燃料を収納することで幾何学的配置を維持し、また、H-ビームを中性子吸収材であるほう素添加アルミニウム板で挟む構造とすることにより、臨界を防止するよう設計する(図1参照)。なお、注水時において、バスケット内の水ギャップに空気溜まりが生じにくい設計としている(補足説明資料「特定兼用キャスクの構造と材料(1024-TR-00005)」参照)。また、ステンレス鋼製のコーナーエレメントによりバスケットをキャスクの所定の位置に保持し、バスケットの外周部とエッジセグメントの間には、ステンレス鋼製のバスケット側板を設ける。

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、補足説明資料「長期健全性に関する説明資料(1024-TR-00011)」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実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採用しない)、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も保守的に無視する。

CASTOR® _____ 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、**臨界解析の解析条件として、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)。熱伝導及び中性子吸収材(以下、中性子吸収材)におけるほう素量については製造工程により均質性が**担**確保され、**設計上の**ほう素添加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、補足説明資料「長期健全性に関する説明資料(1024-TR-00011)」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臨界評価で考慮した因子(使用済燃料の初期濃縮度、寸法等)についての条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置を講じることについては、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事項)**とする**である。

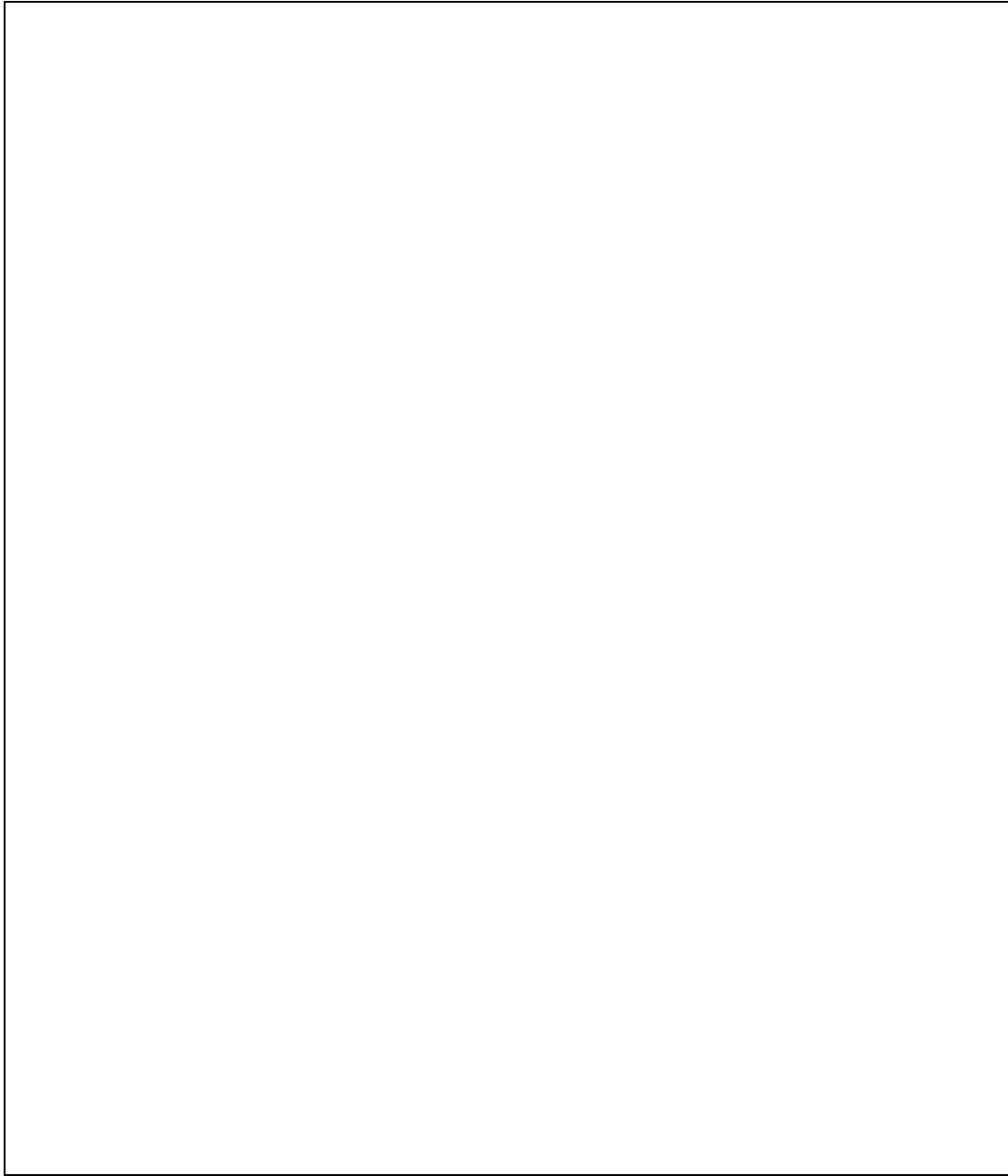


図1 バスケット構造

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 年とする。

別途、補足説明資料「長期健全性に関する説明資料（1024-TR-00011）」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 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ を用いる）。また、冠水状態については、CASTOR[®] 型の部分的な浸水状態も考慮する。

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、水の代わりに真空でモデル化することにより、同じ幾何学的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、以下の条件を設定する。

- ほう酸水は保守的に純水とする。
- ガドリニウム等の可燃性毒物は保守的に無視する。
- パーナブルポイズン集合体は保守的に無視する。
- 使用済燃料集合体は保守的に濃縮度上限の新燃料とする(燃焼度クレジットは採用しない)。
- 冠水時は、保守的に水密度 $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ による最適減速とする。
- 冠水時は、燃料棒は保守的に全て浸水しているとする。
- 燃料組成に同位体 ^{234}U 及び ^{236}U は保守的に ^{238}U に置き換える(^{234}U 及び ^{236}U は中性子吸収断面積が大きく、 ^{238}U も中性子を吸収するが ^{239}Pu となって反応度の増加に寄与するため)。
- 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、熱伝導及び中性子吸収材へのほう素添加量は保証可能な製造仕様の下限最低値を設定する。

表 1 臨界解析条件(収納物条件)

項目		収納物仕様		解析条件		
		種類	15x15	17x17	15x15	17x17
貯蔵時の仕様	燃料集合体 1体当たり	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]	≥ 12		-	
		パ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]			0	

(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

(注3) 表 2の臨界解析における燃料集合体の仕様より計算したウラン重量のため、収納物仕様の最大ウラン重量より大きくなっており、より保守的な値となっている。

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	A型	B型
種類	-	A型	B型	A型	B型
燃料材質	-	二酸化ウラン			
被覆管材質	-	[Redacted]			
燃料密度	% 理論密度				
ペレット直径	mm				
燃料棒直径	mm				
被覆管厚さ	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	-	15x15		17x17	
燃料集合体当たりの燃料棒数	本	204		264	
燃料棒ピッチ	mm	[Redacted]			
初期濃縮度	wt%				

(感度解析結果を踏まえて設定している)

表 3 臨界解析条件

項目	内容目次	
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: XSPProc (BONAMI, CENTRM, PMC) - 臨界解析: 臨界解析コードKENO-VI - 断面ライブラリ: ENDF/B-VII.1に基づく252群断面積ライブラリ(v7.1-252n) - (解析条件を決めるための)感度解析: <input type="text"/>	
解析条件	統計誤差	$\sigma \leq 50$ pcm
	燃料の種類	15x15燃料及び 17x17燃料
	濃縮度	15×15燃料: <input type="text"/> wt%、17×17燃料: <input type="text"/> wt%
	収納体数	26
	燃料配置	同じ燃料の種類で、燃料集合体を全数装荷。燃料集合体(図3)は径方向変位なしでバスケット格子の中心に配置(図6)。
	寸法条件	水ギャップ ^(注1) 、ステンレス鋼板、並びに中性子吸収材は最小厚さとする。詳細は表5に示す。(別紙1の感度解析結果を参照)
	中性子吸収材の配置	中性子吸収材と燃料間は最大距離とする。(別紙1の感度解析結果を参照)
	キャスク内部雰囲気	乾燥状態:真空(ポイド) 冠水状態:水 ($\rho = 1.0$ g/cm ³)
	キャスク外部雰囲気	真空(ポイド)
	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(ポイド) 冠水状態:水 ($\rho = 1.0$ g/cm ³)
	ほう素含有量	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無視する。
	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)に置き換え。 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。	

(注1) 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 臨界解析における材料組成

項目	密度 (g/cm ³)	元素	原子個数密度 (10 ²⁴ atoms/cm ³)	
			15x15燃料	17x17燃料
UO ₂ (燃料)	□	O	□	□
		²³⁵ U		
		²³⁸ U		
Zry-4 (燃料棒被覆管、制御棒案内管、計装用案内管)	□	Cr		
		Fe		
		Zr		
		Sn		
		Hf		
水	1.0	H		
		O		
アルミニウム合金 (エッジセグメント)	□	Mg		
		Al		
		Si		
		Cr		
		Fe		
ほう素添加アルミニウム合金 (中性子吸収材)		¹⁰ B		
		¹¹ B		
		C		
		Al		
ステンレス鋼 (H-ビーム)		N		
		Si		
		Cr		
		Fe		
		Ni		
	Mo			
球状黒鉛鋳鉄 (キャスク本体)	C			
	Si			
	Fe			
	Ni			
ステンレス鋼 (蓋部)	Cr			
	Mn			
	Fe			
	Ni			
	Mo			
ステンレス鋼 (コーナーエレメント、バスケット側板)	Si			
	Cr			
	Fe			
	Ni			

表 5 臨界解析における寸法等条件

項目	寸法条件	設定根拠
バスケット格子内のり寸法	最大 <input type="text"/>	感度解析結果に基づき、公差を考慮した設計上の最大寸法 <input type="text"/> で設定 (別紙1参照)
水ギャップ厚さ	最小 <input type="text"/>	感度解析結果に基づき、公差を考慮した設計上の最小寸法 <input type="text"/> で設定 (別紙1参照)
ステンレス鋼板(H-ビームフランジ)の厚さ	最小 <input type="text"/>	感度解析結果に基づき、公差を考慮した設計上の最小寸法 <input type="text"/> で設定 (別紙1参照)
中性子吸収材の厚さ	最小 <input type="text"/>	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	公称 <input type="text"/>	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	最大 <input type="text"/>	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)
コーナーエレメントの厚さ	公称 <input type="text"/>	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 ^(注1)	解析モデルに考慮	水ギャ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)
キャスク内部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、蓋部はステンレス鋼に置き換え	感度解析結果に基づき設定(別紙1参照)

(注1) 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。

使用済燃料の仕様	燃料の種類 濃縮度
燃料集合体の仕様	構造(寸法及び公差) 材料
CASTOR [®] geo26JP型の仕様	構造(寸法及び公差) 材料 使用済燃料集合体収納体数
CASTOR [®] geo26JP型の 臨界解析条件	内外の減速条件 特定兼用キャスク内の燃料集合体の配置 特定兼用キャスクの配列
中性子断面積ライブラリ	252群のライブラリ
燃料棒単位セル計算	XSProc (断面処理:)
解析モデル	臨界解析モデル
臨界解析	臨界解析コード (KENO-VI)
評価項目	中性子実効増倍率
評価	中性子実効増倍率 0.95以下 (統計誤差3 σ を考慮)

使用済燃料の仕様	燃料の種類 濃縮度
燃料集合体の仕様	構造(寸法及び公差) 材料
CASTOR [®] geo26JP型の仕様	構造(寸法及び公差) 材料 使用済燃料集合体収納体数
CASTOR [®] geo26JP型の 臨界解析条件	内外の減速条件 特定兼用キャスク内の燃料集合体の配置 特定兼用キャスクの配列
中性子断面積ライブラリ	252群のライブラリ
燃料棒単位セル計算	XSProc (共鳴処理)
解析モデル	臨界解析モデル
臨界解析	臨界解析コード (KENO-VI)
評価項目	中性子実効増倍率
評価	中性子実効増倍率 0.95以下 (統計誤差3 σ を考慮)

図 2 CASTOR[®] geo26JP 型の臨界解析フロー



図 3 燃料集合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)

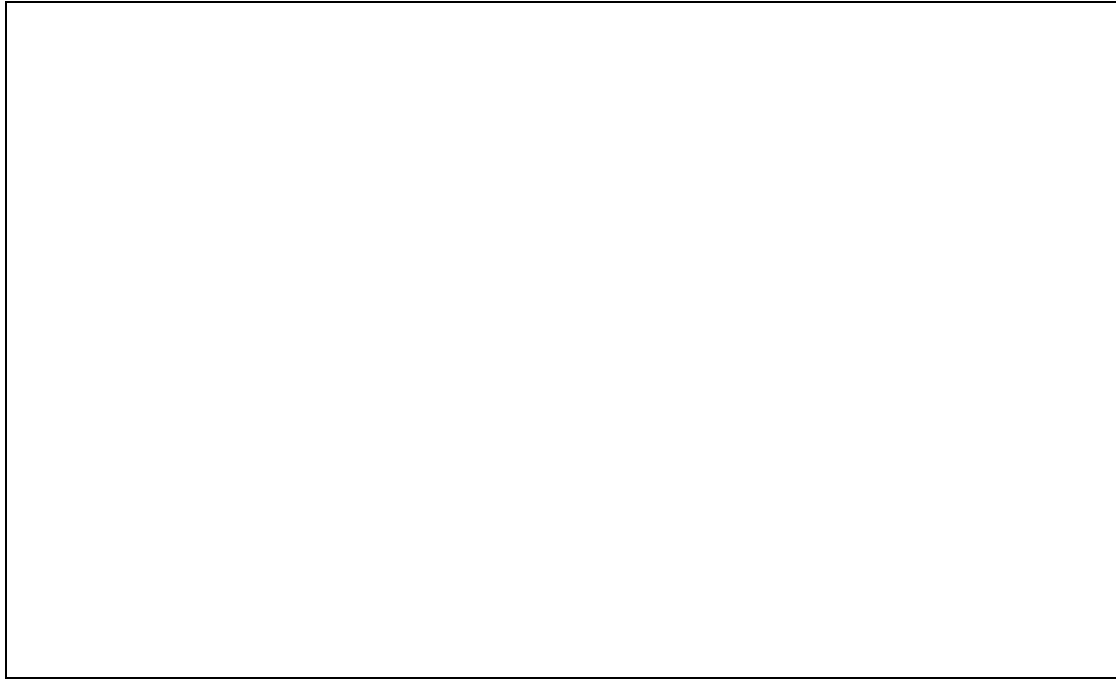


図 5 臨界解析モデル(横断面図)

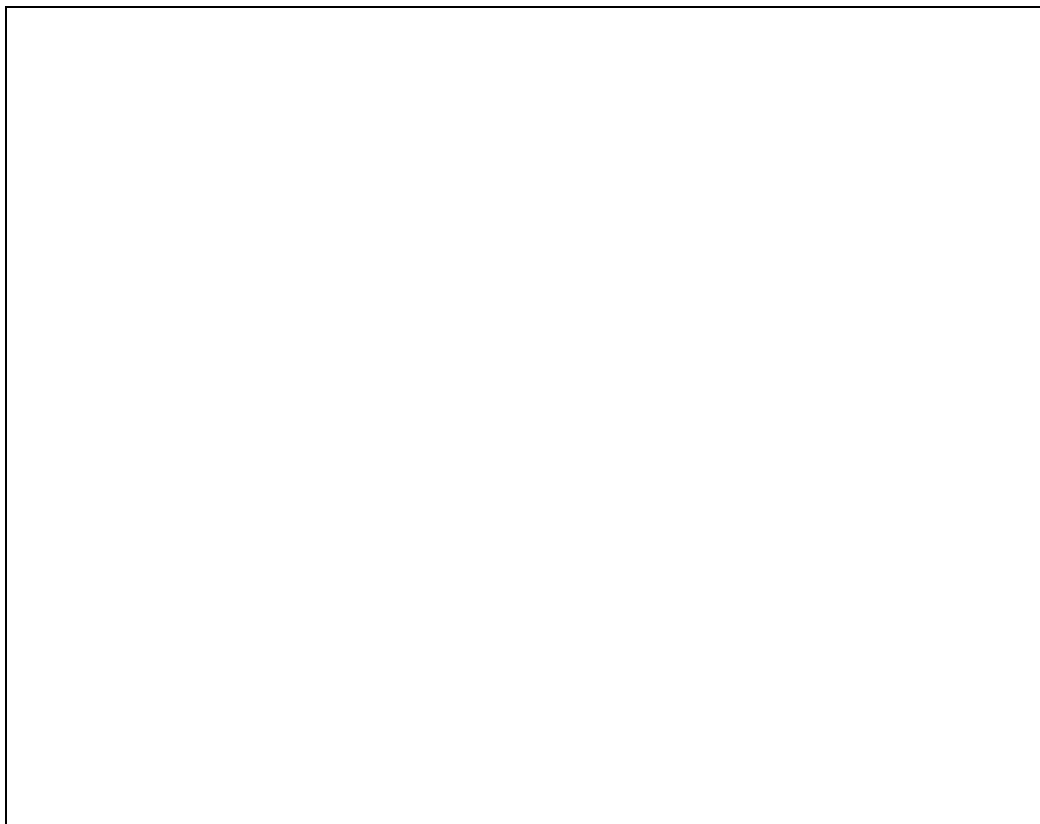


図 6 臨界解析モデル(1/4 横断面拡大図:燃料集合体は各バスケット格子の中心に配置)^(注)

(注)別紙1の図 A1-1(バスケット中心方向に片寄せ、バスケット外周方向に片寄せ)と比較して、燃料集合体は、各格子の中心に配置。

表 6 に示す通り、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 燃料fuel	17x17 燃料fuel		
中性子実効増倍率	冠水状態 A型	0.92073 (3σ: 0.00132)	0.92235 (3σ: 0.00150)	≤ 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し、統計誤差を伴うため、評価結果は、統計誤差σの3倍を加えた値である。
	冠水状態 B型	0.91929 (3σ: 0.00189)	0.91856 (3σ: 0.00150)		
	乾燥状態 A型	0.38131 (3σ: 0.00093)	0.38595 (3σ: 0.00067)		
	乾燥状態 B型	0.37749 (3σ: 0.00119)	0.37778 (3σ: 0.00095)		

(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中性子実効増倍率が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「地震に対する安全機能維持(1024-TR-00002)」、補足説明資料「津波に対する安全機能維持(1024-TR-00003)」及び補足説明資料「竜巻に対する安全機能維持(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関連するパラメータによる感度解析を実施し、その結果を利用して設定した。(本資料本文表 1～表 5 及び図 3～図 6 参照)

- 材料密度及び組成
- ペレット直径
- 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)
- 特定兼用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
- 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
- 特定兼用キャスク外側の境界条件(図 A1-2 参照)
- 特定兼用キャスク内部の垂直の部分浸水(図 A1-3 参照)
- 特定兼用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)
- H-ビームウェブ下部の真空部(水ギャップ)の存在を考慮(図 A1-5 参照)

臨界解析モデルを設定するための感度解析は、公称値、最大値や最小値等の代表値を与える。感度解析の主な目的は、評価されたパラメータによる傾向を特定することであり、得られた傾向は、実データを考慮した臨界解析モデルに利用される。したがって、感度解析のパラメータと臨界解析モデルのパラメータとの間の偏差は、感度解析の性質を反映している。

感度解析の正確さは、結果として得られる臨界解析モデルに適用される感度解析によってコントロールできるが、感度解析の結果として得られるパラメータの変化は臨界安全性の観点からは重要ではなく、観察される傾向が物理的特性と合致するため、得られた臨界解析モデルに基づく感度解析は必要ない。

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 $10^{-2} \times 10^{-3} = 10^{-5}$) 未満である。

寸法条件に関する感度解析(変化させるパラメータ以外は固定)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。基準モデルに適用される初期パラメータは、偏差 $\Delta k = 0$ pcm に対応し、統

計誤差 $\sigma_{\Delta k} = 2^{1/2} \sigma \approx 70$ pcm と表される。したがって、計算結果が $\Delta k < 2\sigma_{\Delta k}$ であれば、統計的に同一として扱うことができる。

感度解析の結果は次のように要約できる。

- 燃料 ペレット直径、燃料有効長、燃料集合体の軸方向変位、バスケット側板の厚さ、コーナーエレメントの厚さ、外側の境界条件、及び H-ビームウェブ下部の微小の真空部のパラメータは、体系の反応度に対して大きな影響はない。
- 被覆管外径の変化は、燃料集合体が被覆管外部の減速材の中性子の減速不足にならないように設計されていることを確認している。
- 燃料集合体の径方向変位とバスケット格子内のり寸法の変化は、ホウ素添加中性子吸収材と燃料棒の間の距離が小さくなると反応度が低下することを示している。
- 水ギャップの厚さ、ステンレス鋼プレート (H-ビーム) の厚さ、中性子吸収材の厚さのパラメータ、およびバスケットクロスは、隣接する燃料集合体の中性子の影響がないようにしており、臨界解析モデルで対応を考慮する必要がある。
- 鉛直方向の部分冠水評価は、完全に冠水したキャスク条件を臨界解析モデルに適用する必要があることを示している。
- 特定兼用キャスク内部の中性子吸収材の評価により、臨界解析モデルにおける中性子吸収材の黒鉛鉄への置き換えが正当化される。

感度解析の結果 (傾向) は、物理的特性の観点からよく理解でき、表 1～表 5 及び図 3～図 6 に示す臨界安全性解析のモデルの設定に活用している。

表 A1-1 材料密度の感度解析

項目項目	密度 [g/cm ³]			混合による 感度 ^(注2)	境界臨界解析モデル 密度 [g/cm ³]
	公称値 ^(注1)	最小値	最大値		
UO ₂ (燃料)					
Zry-4 (燃料被覆管、制御棒案 内管、計装用案内管)					
アルミニウム合金 (エッジセグメント)					
ほう素添加アルミニウム 合金 (中性子吸収材)					
ステンレス鋼 (H-ビーム)					
球状黒鉛鋳鉄 (キャスク本体)					
ステンレス鋼 (蓋部)					
ステンレス鋼 (コーナーエレメント、 バスケット側板)					
水					

(注1) 感度解析のために設定した初期値を示す。

(注2) 感度は、 $(\Delta k/k)/(\Delta \Sigma/\Sigma)$ で示す。

表 A1-2 化学組成の感度解析

項目材料	元素	重量比, wt. %			核種による感度 ^(注2)	境界臨界解析モデル重量比, wt. %
		公称値 ^(注1)	最小	最大		
アルミニウム合金 (エッジセグメント)	Si					
	Fe					
	Cu					
	Mn					
	Mg					
	Cr					
	Zn					
	Ti					
ほう素添加アルミニウム合金(中性子吸収材)	B					
	C					
ステンレス鋼 (H-ビーム)	Si					
	Mn					
	Ni					
	Cr					
	Mo					
	N					
球状黒鉛鋳鉄 (キャスク本体)	C					
	Cu					
	Mn					
	Ni					
	Si					
ステンレス鋼 (蓋部)	Cr					
	Mn					
	Mo					
	Ni					
	Si					
ステンレス鋼 (コーナーエレメント、バスケット側板)	Cr					
	Mn					
	Ni					
	Si					

(注1) 感度解析のために設定した初期値を示す。

(注2) 感度は、 $(\Delta k/k)/(\Delta \Sigma/\Sigma)$ で示す。(別紙2参照)

表 A1-3 感度解析条件と結果

--

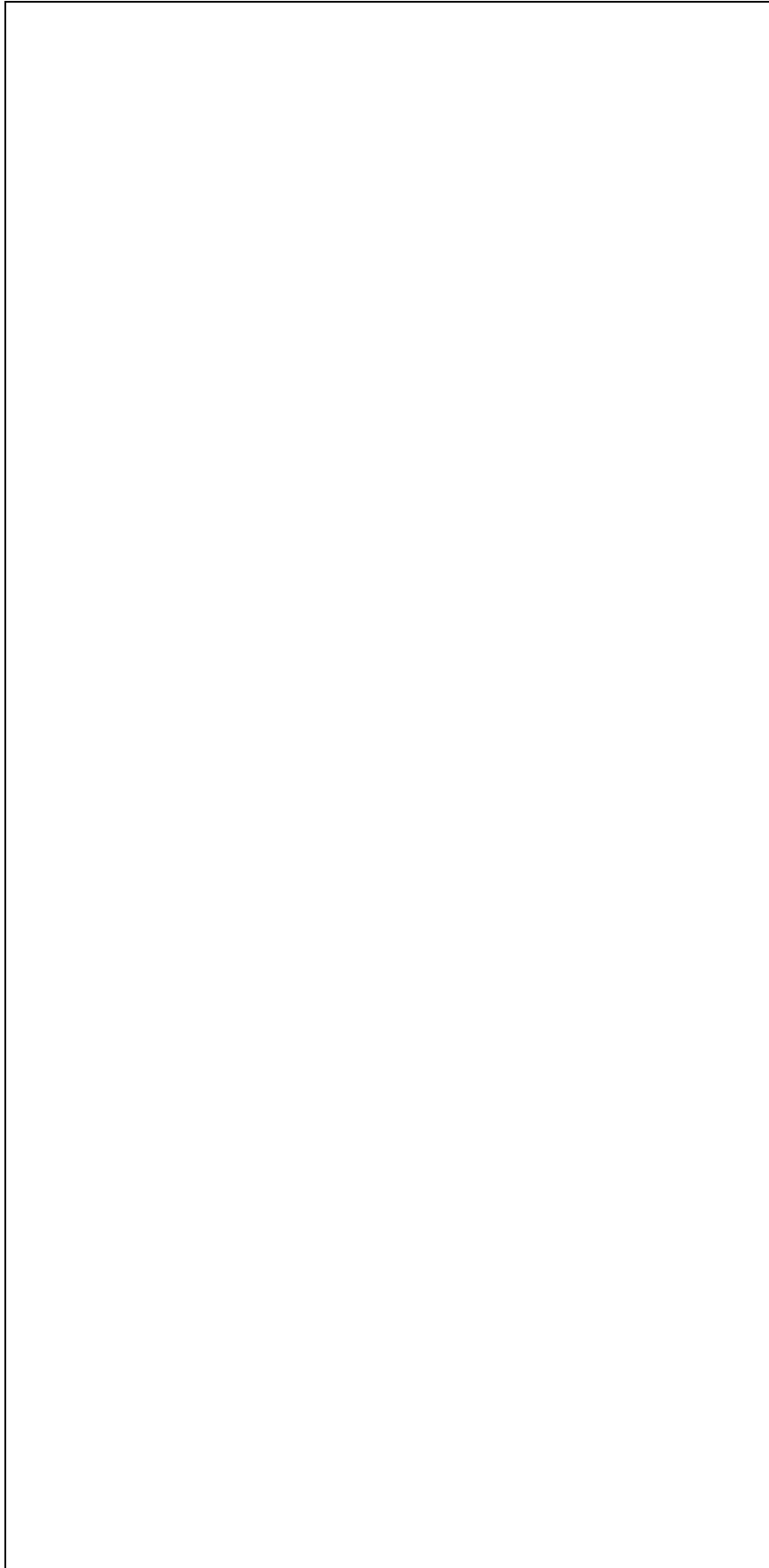


表 A1-3 感度解析条件と結果(続き)

--

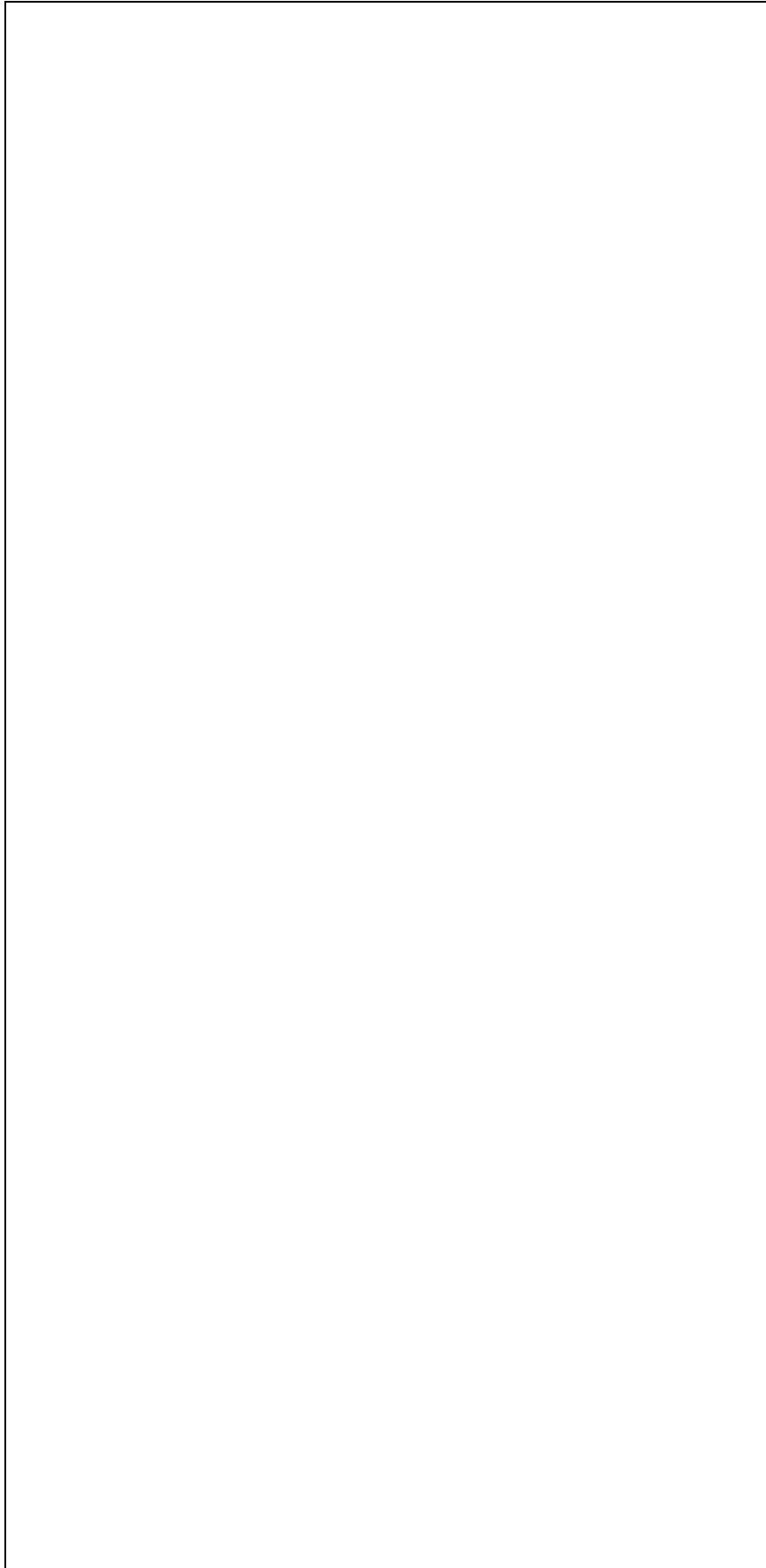


表 A1-3 感度解析条件と結果(続き)

--

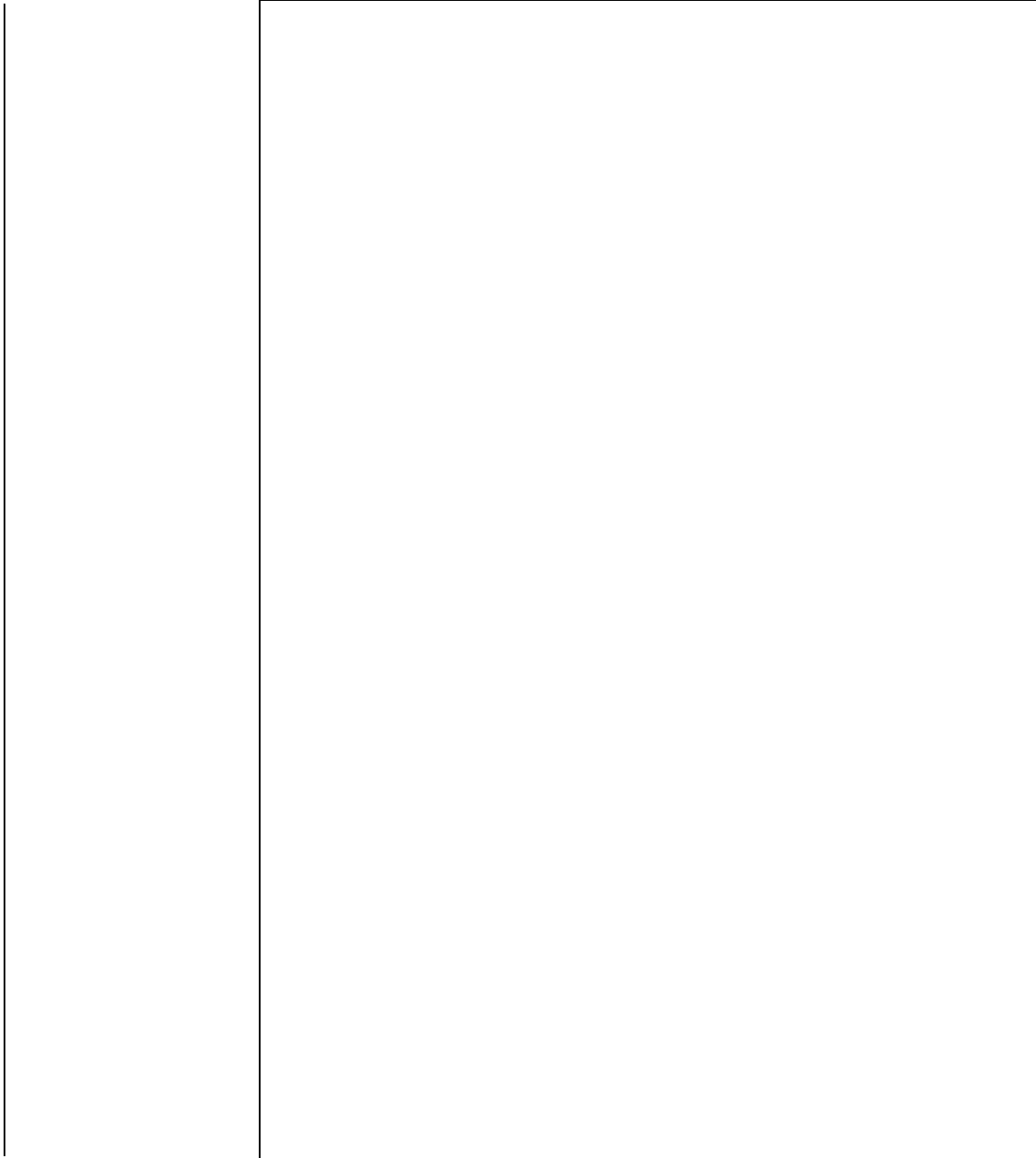




図 A1-1 燃料集合体の半径方向に対する計算モデル

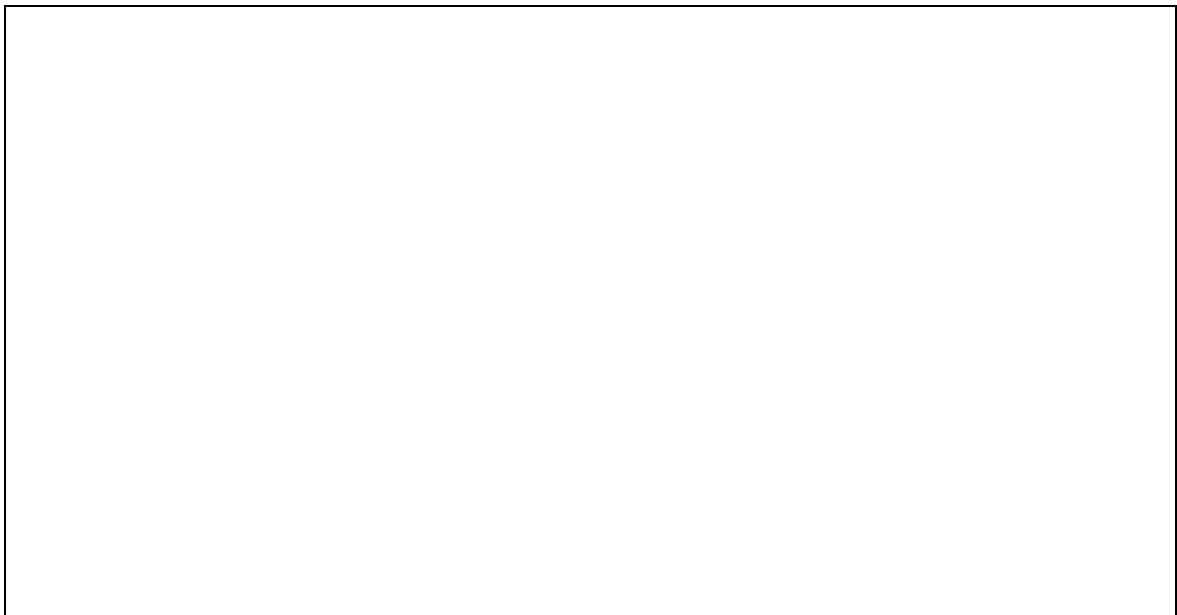


図 A1-2 外部境界条件に対する計算モデル



図 A1-3 特定兼用キャスク内部の部分浸水状態の計算モデル

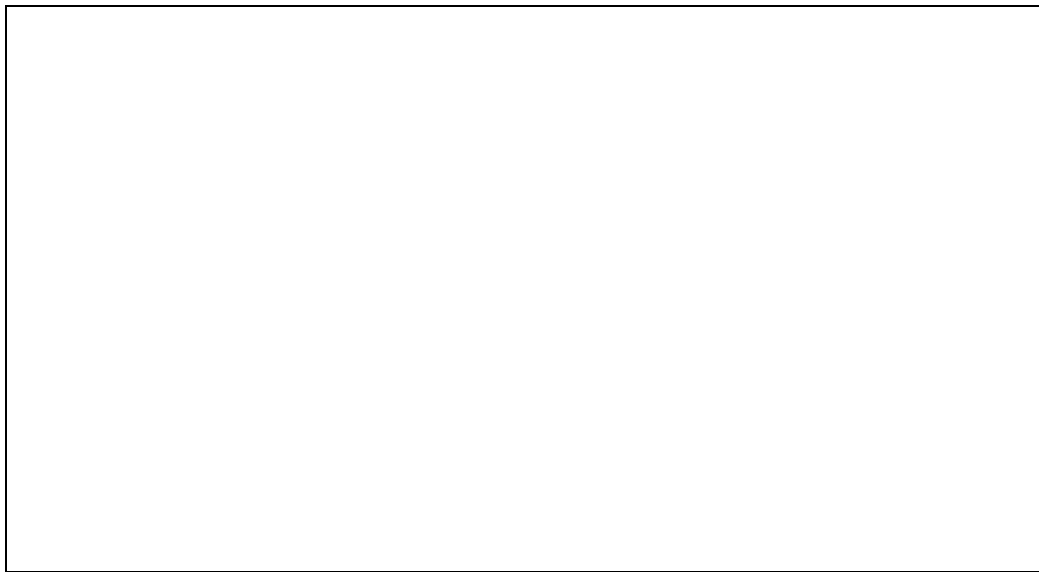


図 A1-4 特定兼用キャスク胴の中性子遮蔽材(棒)に対する計算モデル

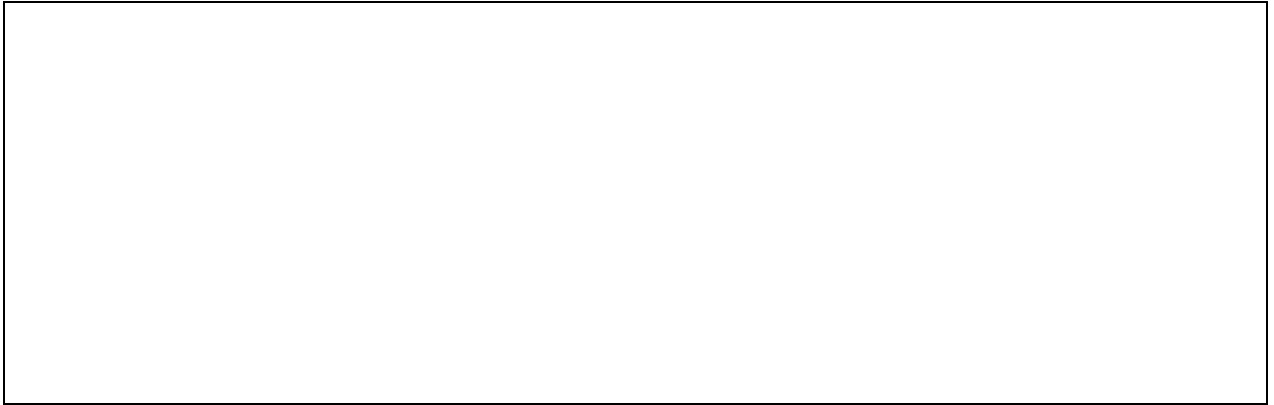


図 A1-5 H-ビームウェブ下部の真空部(空気層)を考慮した計算モデル(縦断面図)

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。[2]

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学的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

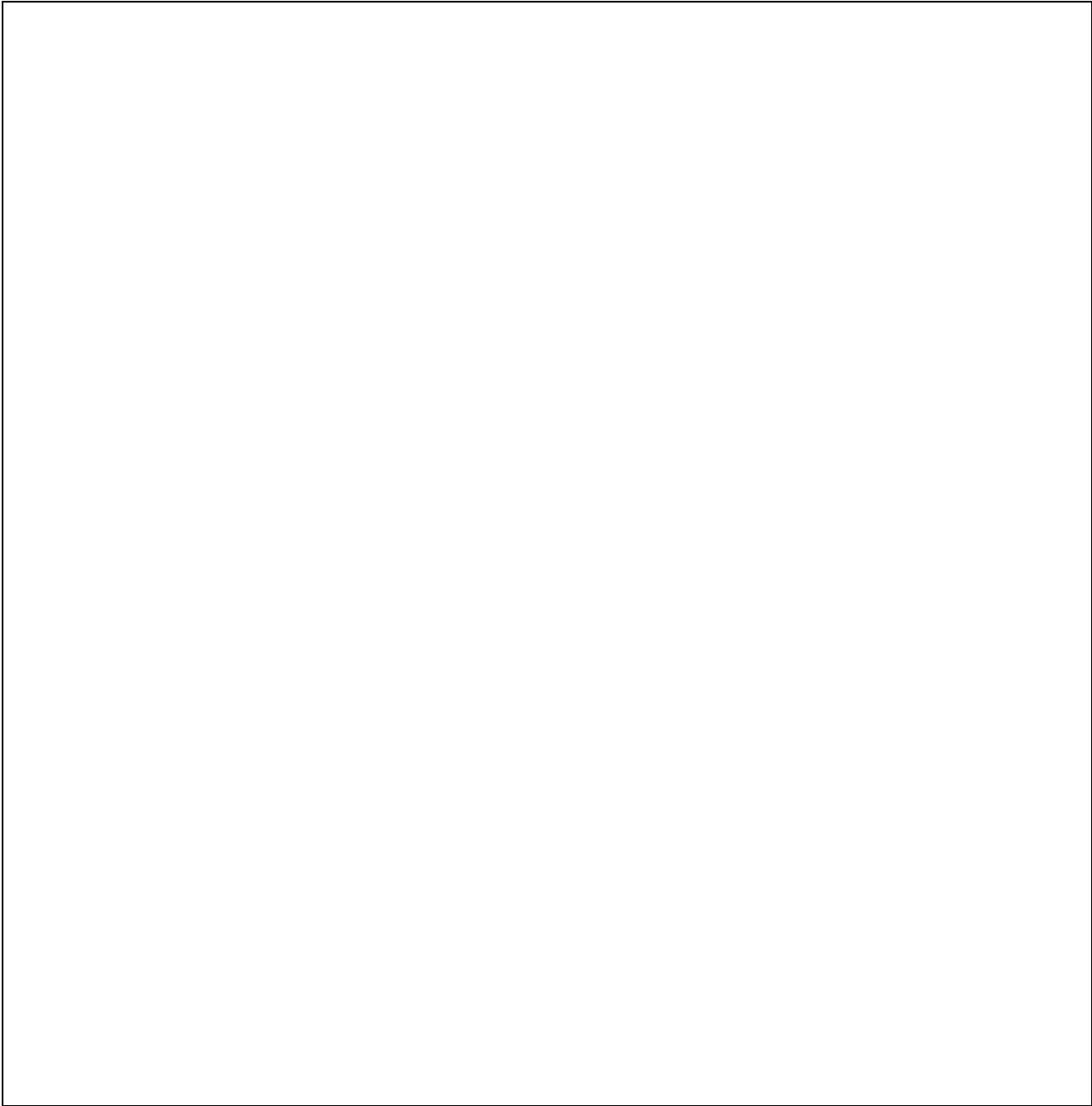
臨界コード KENO-VI を使用した SCALE コードシステムの解析フローを図 A2- 1 に示す。また、

--

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

--



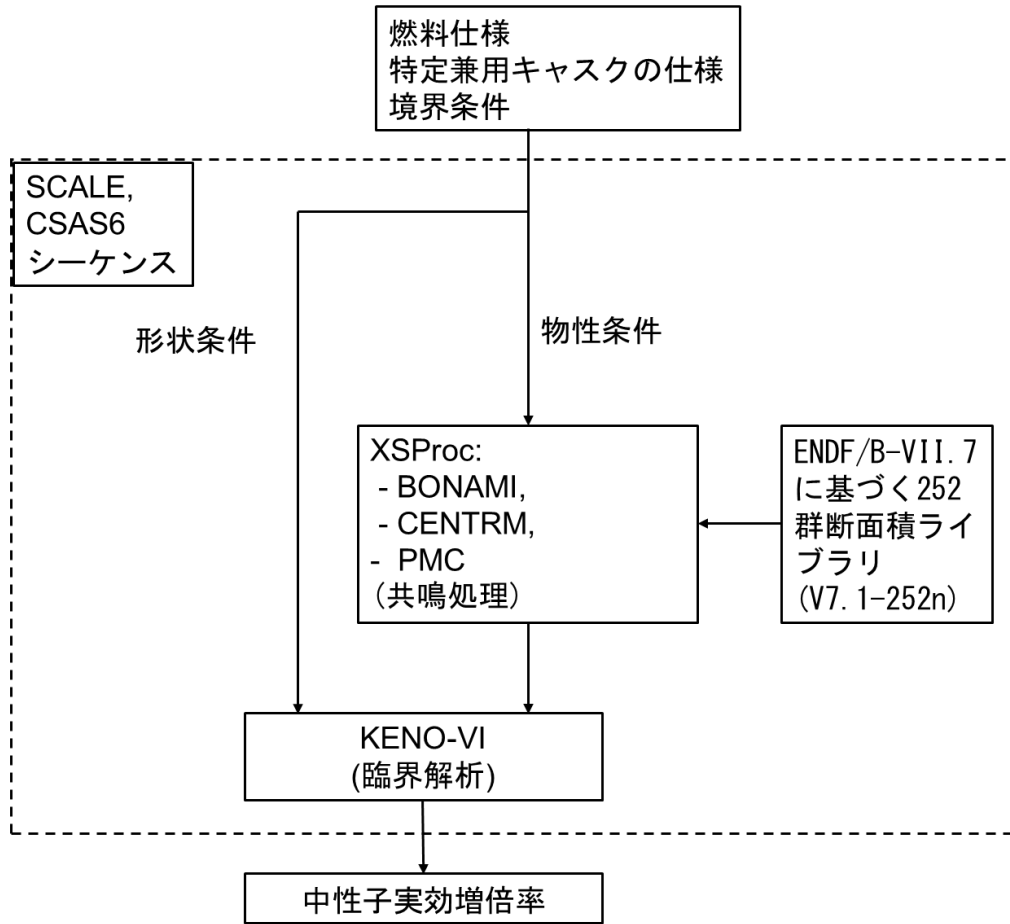
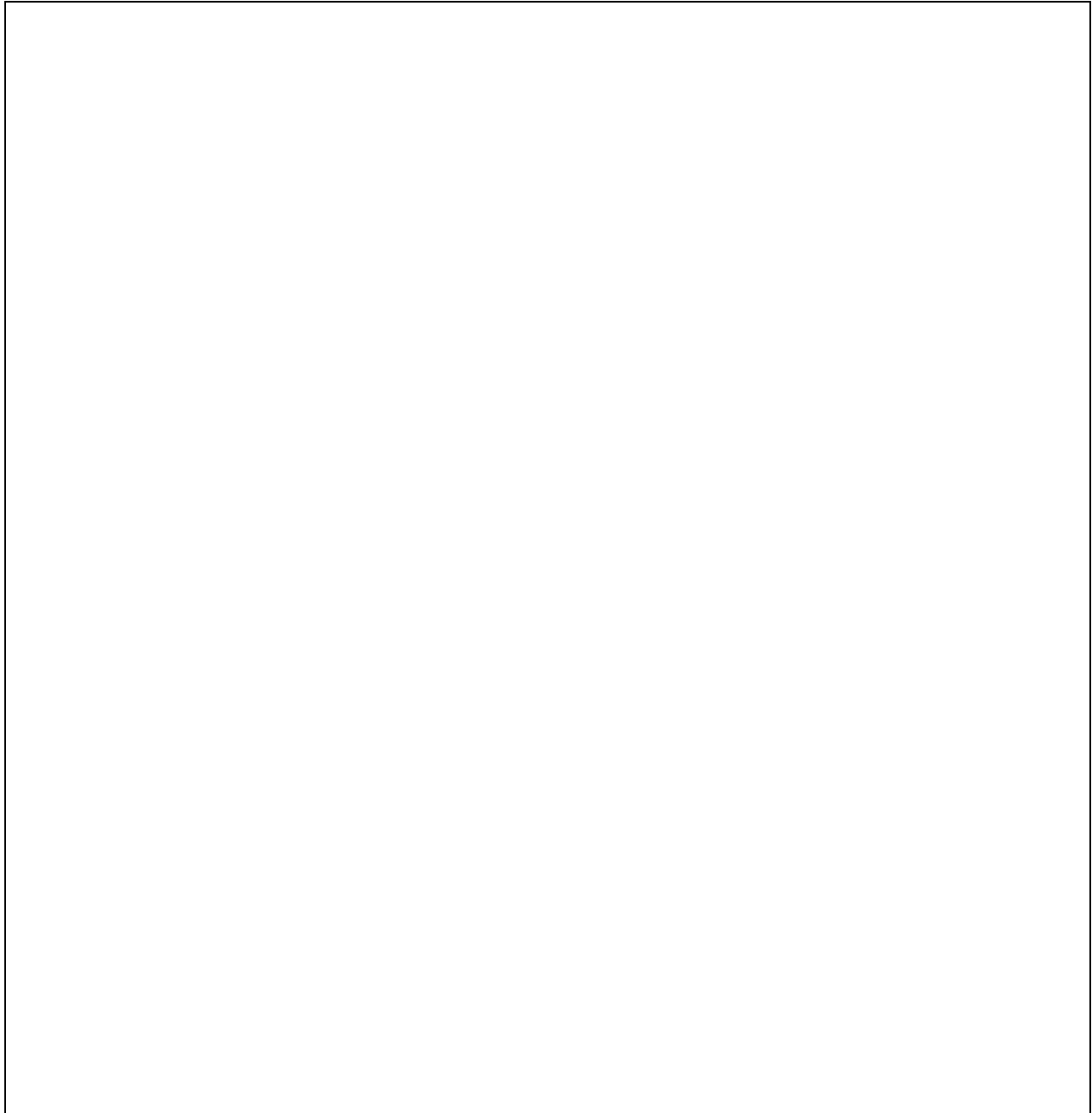


図 A2- 1 KENO-VI 用いた SCALE コードシステムの解析フロー図



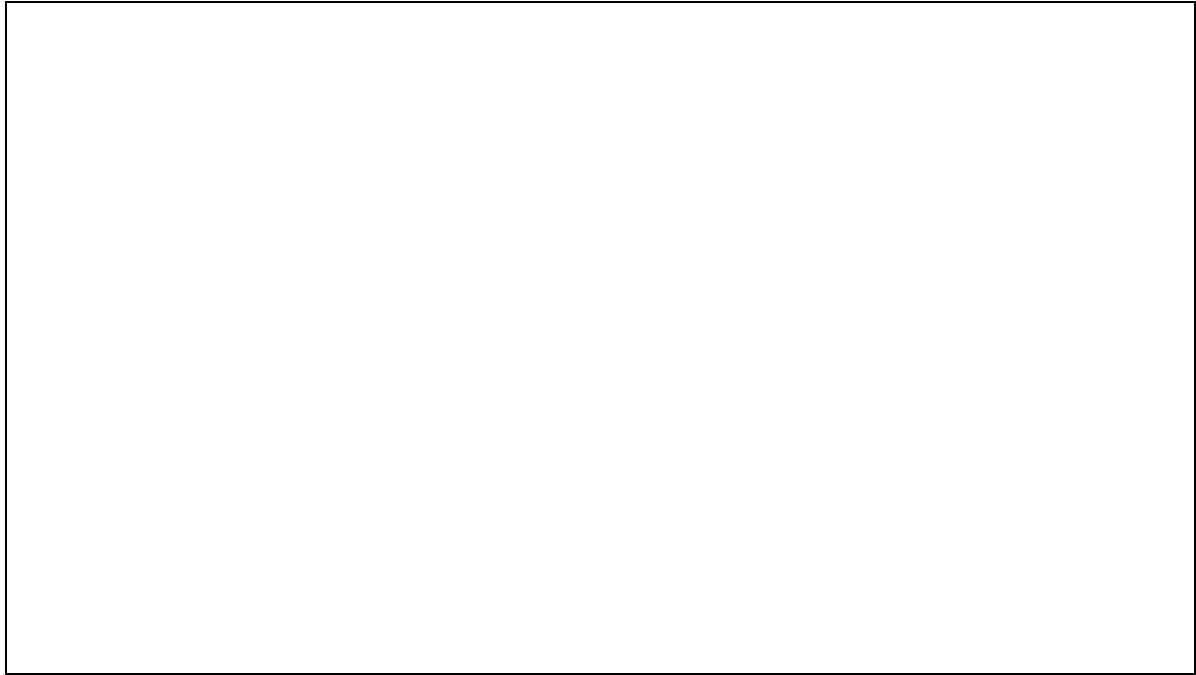


表 A2-1 選択されたベンチマークの結果

--

表 A2-1 選択されたベンチマークの結果(続き)

--

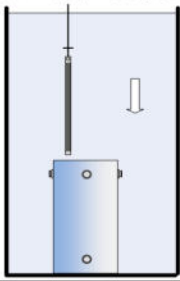
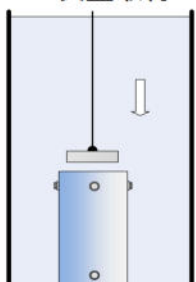
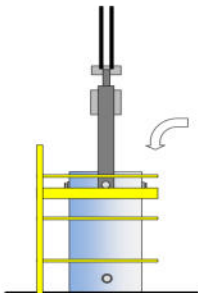
参考文献

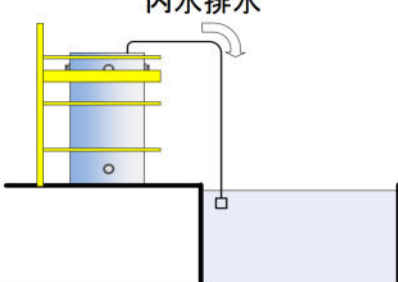
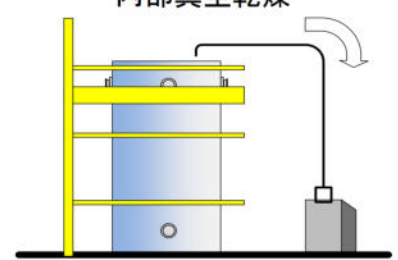
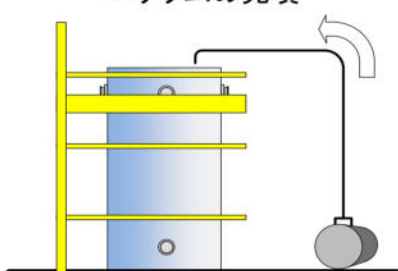
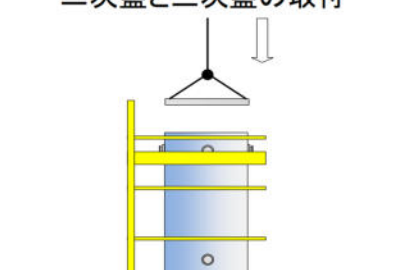
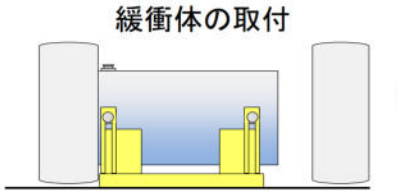

- [2] B. T. Rearden and M. A. Jessee, Eds. SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.2, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2017), Available from Radiation Safety Information Computational Center as CCC-834
- [3] International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark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


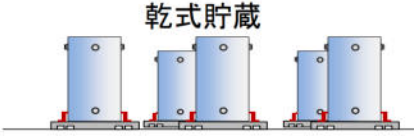
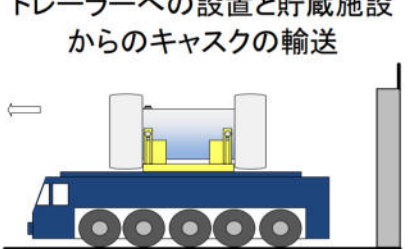
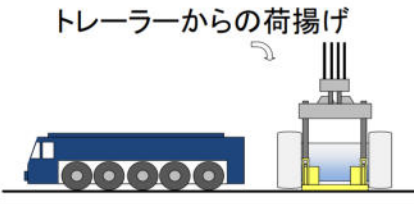
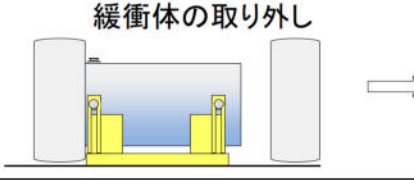
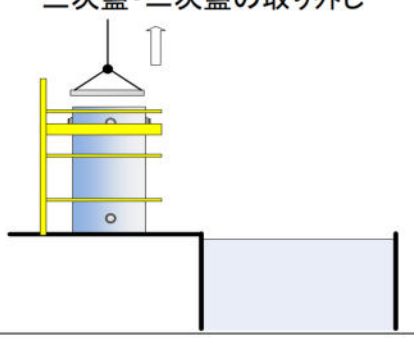
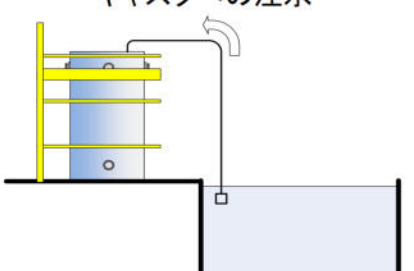
別紙3 CASTOR® geo26JP 型の取扱いフロー及び各状態における中性子実効増倍率について

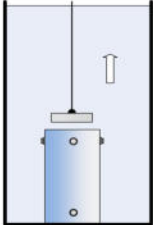
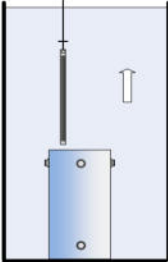
使用済燃料プール中での使用済燃料の装荷、乾式貯蔵、使用済燃料プール中での使用済燃料の取り出し等の CASTOR® geo26JP 型の取扱いの流れを表 A3-1 に示す。また、各段階の未臨界評価に適用した境界条件と中性子増倍率の結果も併せて示す。

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	使用済燃料装荷 	キャスク本体、 バスケット	水/水	冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.92235$)
1-2	一次蓋取付 	キャスク本体、 バスケット、 一次蓋	水/水	冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.92235$)
1-3	燃料プールからのキャスクの持ち上げ 	キャスク本体、 バスケット、 一次蓋	水/空気	冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.92235$)

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 ($k+3\sigma = 0.92235$)
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 ($k+3\sigma = 0.38595$)
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 ($k+3\sigma = 0.38595$)
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 ($k+3\sigma = 0.38595$)
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 ($k+3\sigma = 0.38595$)
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> 	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 ($k+3\sigma = 0.38595$)

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
2-2	トレーラーから貯蔵場所への設置 	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 $(k+3\sigma = 0.38595)$
2-3	乾式貯蔵 	キャスク本体、 バスケット、 一次蓋、 二次蓋	ヘリウム/空気	乾燥状態での キャスク無限配列 $(k+3\sigma = 0.38595)$
3-1	トレーラーへの設置と貯蔵施設からのキャスクの輸送 	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 $(k+3\sigma = 0.38595)$
3-2	トレーラーからの荷揚げ 	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 $(k+3\sigma = 0.38595)$
3-3	緩衝体の取り外し 	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 $(k+3\sigma = 0.38595)$
3-4	三次蓋・二次蓋の取り外し 	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 $(k+3\sigma = 0.38595)$
3-5	キャスクへの注水 	キャスク本体、 バスケット、 一次蓋	水、空気 (部分的な垂直 浸水)/空気	冠水状態での キャスク無限配列 $(k+3\sigma = 0.92235)$

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
3-6	燃料プールへの吊り降ろし及び 一次蓋の取り外し 	キャスク本体、 バスケット、 一次蓋	水/水	冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.92235$)
3-7	使用済燃料の取り出し 	キャスク本体、 バスケット	水/水	冠水状態での キャスク無限配列 ($k+3\sigma = 0.92235$)

別紙4 CASTOR® geo26JP 型のバスケット構造の注水時における水位傾向について

CASTOR® geo26JP 型のバスケット構造については、図 A4-1、補足説明資料「特定兼用キャスクの構造と材料(1024-TR-00005)」の図 6 に示しているように、注水時にはバスケット底板部分の穴及び H-ビーム/中性子吸収材部分の穴を経由してすべての水ギャップに水が満たされる設計としている。以下、注水時に全ての水ギャップに水が満たされて、水位が一様に上昇していくバスケット構造であることを評価した結果を説明する。

1.注水時の流路及び流速

H-ビームは高さ方向に [] あり、各段 には水ギャップに水を満たすための [] の穴がある。また、H-ビーム側方端部のバスケット側板及びコーナーエレメントの隙間からも水ギャップに水が流入する。さらに、直角に区切られている使用済燃料を収納するバスケット格子の各端部にも水が流入する隙間がある(図 A4-2 参照)。これら全ての穴や隙間を以下の評価で考慮する。

CASTOR® geo26JP 型の注水により満たされる容積は []、高さは [] であり、満水までの注水時間を保守的に [] と仮定(典型的な手順の注水時間は約 []) すると、高さ方向の流速 V_1 は約 [] となる。

水ギャップの総断面積 A_1 は [] で、図 A4-1 上図で示されている [] ステンレス鋼製ウェブの穴の断面積(各段ごとの [] の穴の面積)及び水ギャップへの流入可能な全ての隙間の断面積を合計した面積 A_2 は [] となる。水ギャップにおける圧力損失は、バスケット内の水位が高さ方向に増加するにつれて大きくなり、断面積が [] 小さい [] 段の H-ビームによる水ギャップ内での流路れの抵抗により平均流速が高くなる。水ギャップ内の流速 V_2 は、非圧縮流体(水)の定常流を仮定すると次の方程式が成り立つ。

$$V_1 \times A_1 = V_2 \times A_2$$

従って、水ギャップ中の流速 V_2 はを考慮すると約 [] の流速となる。

2.圧力損失及び水面高さ差異の評価

水ギャップにおける損失係数(ζ)は、一般的な文献([6]、[7])によれば、円管内のオリフィスの損失係数及び層流に対する管摩擦による損失係数により約 $2.2(=1.7(\text{管路抵抗たわみ})+0.5(\text{管摩擦}))$ となるが、流速 [] の水ギャップ流路断面における損失係数は、保守的に [] とした。

総損失係数 $\zeta_{\text{total}}=21 \times \zeta$ 及び圧力損失 ΔP は次の式で計算される。

$$\Delta P = 1/2 \times \zeta_{\text{total}} \times \rho_{\text{water}} \times V_2^2$$

圧力損失 (ΔP) = 総損失係数 ($\zeta \times []$) \times 水密度 (ρ_{water}) \times (流速 (V_2))² $\div [] = [] \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times [] = []$ となり、圧力損失 ΔP は [] となる。

求められた圧力損失から、水ギャップとキャスク内部の水面高さの最大高低差 (Δh) は次の式で与えられる。

$$\Delta P = \rho_{\text{water}} \times g \times \Delta h$$

すなわち、 $\Delta h = \Delta P \div (\text{水密度}(\rho_{\text{water}}) \times \text{重力加速度}(g)) = \square \div (1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) = \square$ となり、最大高低差 Δh は \square となる。

従って、最大高低差は \square であり、感度解析の結果(別紙1 表 A1-3、図 A1-5)より、臨界解析結果への影響は無視できる。

実際の注水時には製造公差による H-ビーム各段の間の水平隙間を通じて水ギャップへの水の流入が発生するが、本評価ではこうした流路は保守性の観点から無視しており、現実には水面高低差はさらに小さくなる。また、注水速度は本評価の計算条件以下に管理できるため、実際のバスケット内の水面高低差はより小さく無視できる。

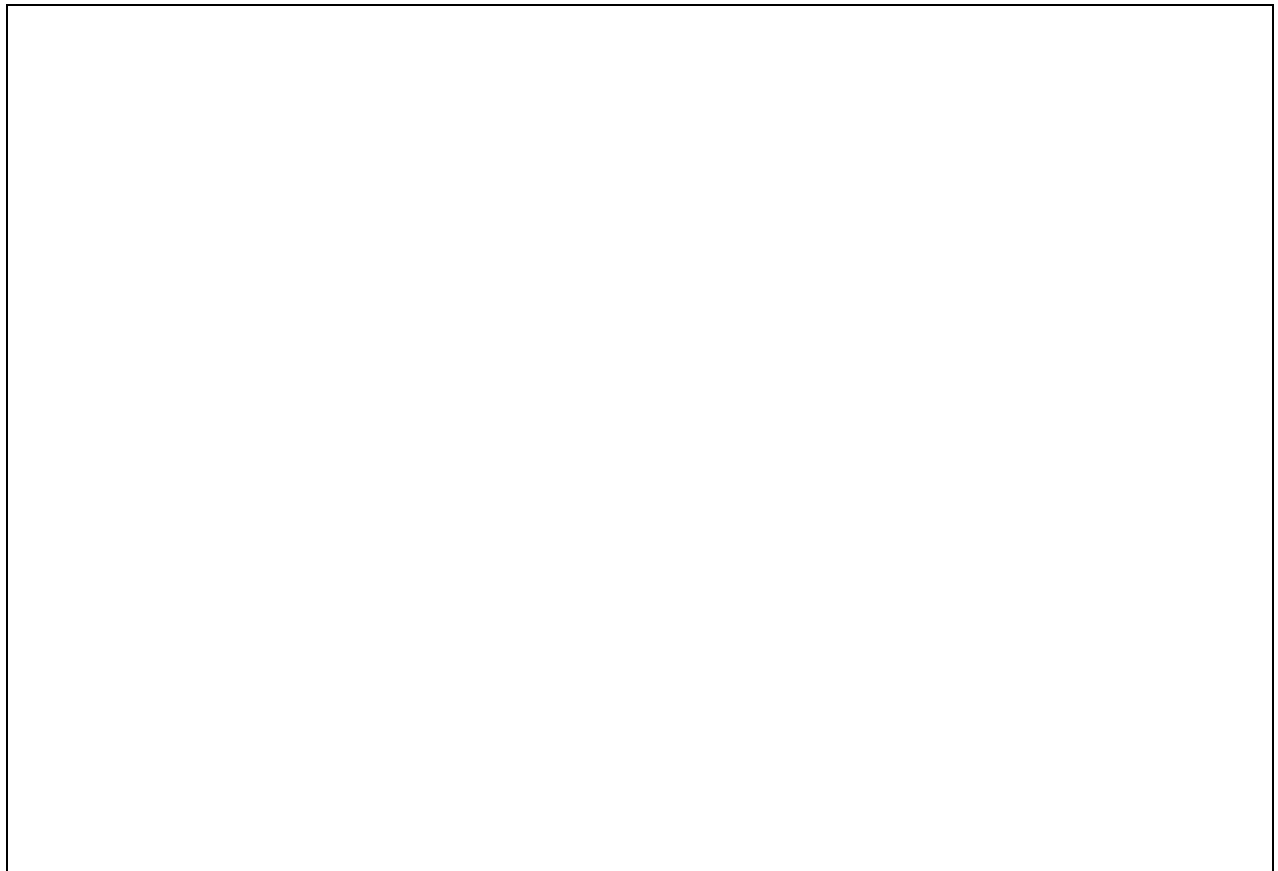


図 A4-1 H-ビーム／中性子吸収材部分の穴(上)、バスケット底板部分の穴(下)



図 A4-2 使用済燃料を収納する格子の端部の隙間

参考文献

- [6] I.E. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, 3.Edition, Jaico Publishing House
- [7] VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang
9.Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2002