

資料1-2

Doc No. 22-180-I-102 Rev. 3

2023年7月21日

トランスニュークリア株式会社

補足説明資料16-2

16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

本資料のうち、枠囲みについては商業機密のため非公開とします。

目 次

1. 要求事項.....	1
2. 要求事項への適合性.....	4
3. 参考文献.....	31

別紙1 臨界解析における条件設定根拠について

別紙2 臨界解析で使用する解析コードについて

別紙3 TK-26型の取扱フロー及び各状態における臨界防止機能の成立性について

別紙4 排水、注水時のバスケット内の水の流路の設計について

別紙5 17×17燃料及び15×15燃料混載時の影響評価について



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、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則第16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。

b. 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

- 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、末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に変形(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。

c. 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、以下のように記載されている。

【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

TK-26型の臨界防止機能については、以下のとおり設置許可基準規則に適合している。

- a. 設置許可基準規則第16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。
- b. 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、貯蔵事業許可基準規則解釈第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
- 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、末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。

TK-26型のバスケットは個々の使用済燃料集合体をTK-26型に収納するためのもので、運用中に使用済燃料集合体を分散・集合させず、かつ未臨界の状態を保持するように設けられる。バスケットは、未臨界性を維持するために、中性子吸収能力を有するほう素添加アルミニウム合金を、また、崩壊熱の除去のために高い伝熱性能を有するほう素添加アルミニウム合金或いはアルミニウム合金を用いている。バスケットは図1に示すように、ほう素添加アルミニウム合金製のバスケット格子材、及びステンレス鋼製のバスケット補助プレートから組立てられ、バスケットサポートで固定されている。また、バスケット格子材は胴の内面に施された溝に挿入されることにより支持されている。

バスケット格子材は、設計貯蔵期間中の温度、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な信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するために必要な構造健全性を維持する設計とする。

また、TK-26型の貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及びTK-26型に使用済燃料集合体を収納する際に冠水状態になること等、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以下となるように設計する。

補足説明資料16-6「材料・構造健全性(長期健全性)に関する説明資料」に示すとおり、バスケット格子材は、設計貯蔵期間中の温度、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信頼性を有する材料及び構造とし、構造健全性が維持されることを確認している。

後述する2 (2)審査ガイドへの適合性 [確認内容] 1) から4)への説明に示すとおり、TK-26型の貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態及び冠水状態での臨界評価を実施した。臨界解析では、TK-26型及び使用済燃料集合体の実形状を三次元でモデル化し、解析コードとしてSCALEコードシステムを用い、中性子実効増倍率の計算を臨界解析コードKENO-VIで行う。収納する使用済燃料集合体には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれる場合があるが、臨界解析では、中性子吸収効果のあるガドリニウムの存在を無視し、収納する使用済燃料集合体の濃縮度上限値を保守的に切り上げた値を用いるとともに、全て通常のウラン新燃料とした(燃焼度クレジットは採用しない)。なお、バーナブルポイズン集合体は考慮しない。

また、TK-26型相互の中性子干渉を考慮して、TK-26型が無限に配列した体系(完全反射)としており、配置制限は必要ない。なお、TK-26型は床等に固定するため、滑動等しない設計としている。さらに、バスケット内の使用済燃料集合体は、中性子実効増倍率が最大となるようにTK-26型に配置するとともに、バスケット格子材は製造公差を考慮し、中性子実効増倍率が最も大きくなる寸法としている。中性子吸収材中のほう素の均質性は製造管理により担保し、ほう素添加量は仕様上の下限値としている。なお、中性子吸収に伴う中性子吸収材の原子個数密度の減少については、無視し得る程度であり考慮していない。

上記条件に基づく解析の結果、中性子実効増倍率(モンテカルロ法による計算の統計誤差(3 σ)を加えたもの)は、乾燥状態及び冠水状態において0.95以下を満足することを確認した。

なお、貯蔵事業許可基準規則解釈第3条第1項第5号に示される、使用済燃料を収納するにあたっての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を講じることについては、型式証明申請の範囲外(設置(変更)許可時の別途確認事項)である。

c. 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。

TK-26型の設計貯蔵期間は60年である。また、補足説明資料16-6「材料・構造健全性(長期健全性)に関する説明資料」に示すとおり、TK-26型は、特定兼用キャスクの構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して十分な信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料集合体の健全性を確保する設計とする。

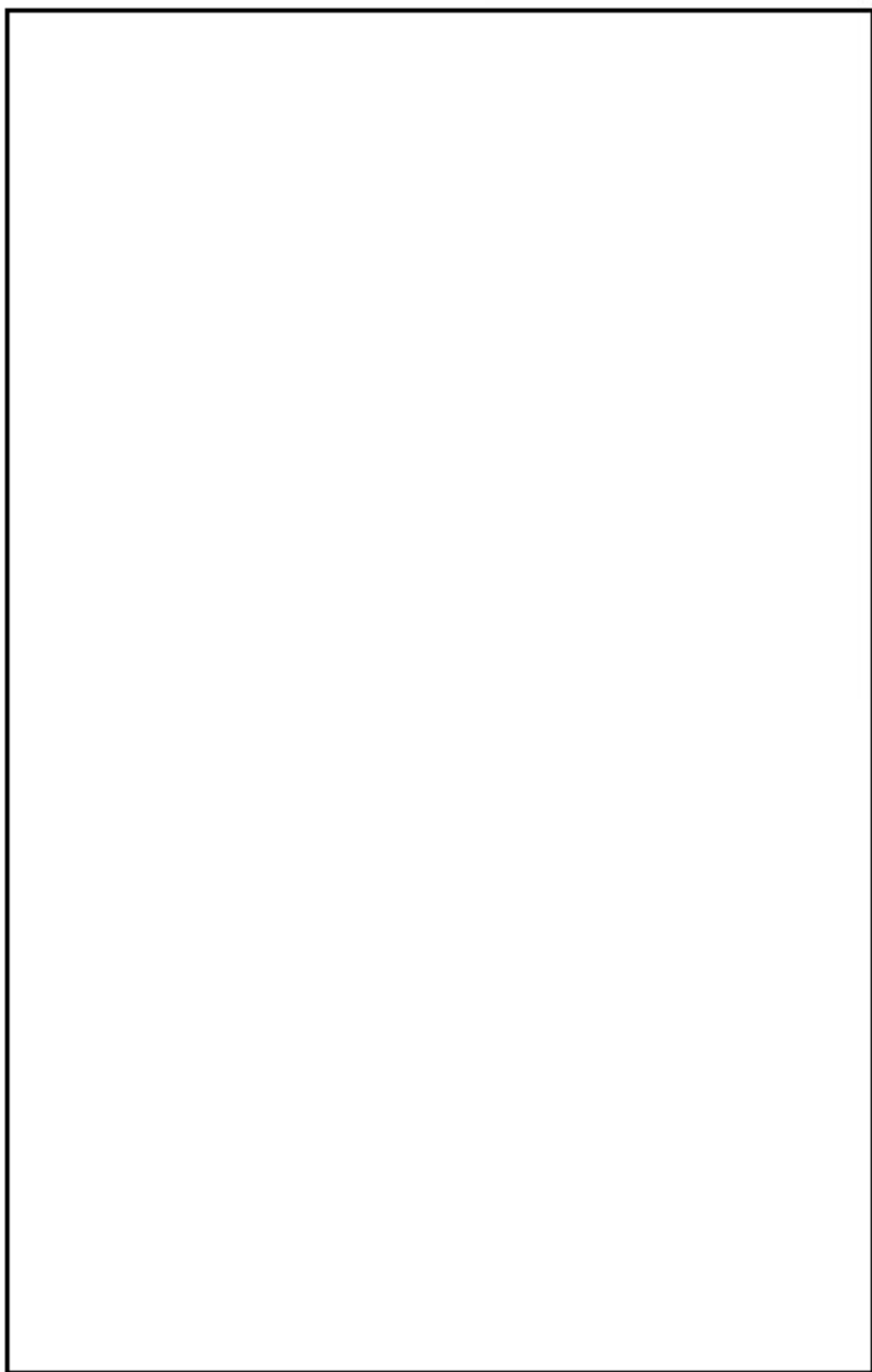


図1 バスケット構造図

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、特定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、TK-26型の臨界防止機能については、以下のとお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。

TK-26型の臨界解析フローを図2に示す。臨界解析では、TK-26型及び使用済燃料集合体の実形状を三次元でモデル化し(図3から図6参照)、解析コードとしてSCALEコードシステム(別冊2参照)を用いる。

解析条件は表1から表3のとおりとする。なお、乾式状態での臨界解析に加え、TK-26型に使用済燃料集合体を収納する際の冠水状態を考慮し、中性子実効増倍率が最も大きくなる水密度を $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ とした解析を行う。

また、臨界評価では、収納する使用済燃料集合体の濃縮度の上限值を用いるとともに、燃焼度クレジットは採用しない。

本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・収納制限に対する解析条件の保守性

- TK-26型に収納する使用済燃料集合体のウラン濃縮度は照射により減損しているが、燃焼度 $0\text{GWd}/\text{t}$ の減損していない新燃料とし、ウラン濃縮度を 17×17 燃料は保守的に $4.2\text{wt}\%$ 、 15×15 燃料は保守的に $4.1\text{wt}\%$ とする。

- 収納する使用済燃料集合体には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含ま

れる場合があるが、中性子吸収効果のあるガドリニウムの存在を無視し、全て通常のウラン燃料とする。

ー使用済燃料集合体とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、中性子吸収効果のあるバーナブルポイズン集合体を無視する。

・モデル化の保守性

ーTK-26型が無限に配列した体系(完全反射)とする。これにより、TK-26型の配置制限は必要なく、TK-26型相互の中性子干渉を考慮した評価となる。なお、TK-26型は床等に固定するため、滑動等しない設計としており、TK-26型の配置の変化はない。

ーバスケット格子内で使用済燃料集合体が偏ることにより中性子実効増倍率が変化するため、バスケット内の使用済燃料集合体の配置は中性子実効増倍率が最も大きくなる配置とする。具体的には、乾燥状態では17×17燃料及び15×15燃料収納時は共に中心偏向配置とする。冠水状態では17×17燃料収納時にはバスケット格子内中央配置とし、15×15燃料収納時には中心偏向配置とする。

ーバスケット格子材は、表4に示すとおり製造公差を考慮し、中性子実効増倍率が最も大きくなる寸法とする。

ー中性子吸収材中のほう素の均質性は製造管理により担保し、ほう素添加量は仕様上の下限値とする。

ー中性子遮蔽材は無視し、真空に置換する。

ーバスケット格子材は、中性子の吸収が小さくなるように、軸方向には燃料有効部に相当する部分のみモデル化することとし、それ以外の部分は水または真空に置換する。

なお、2 (1)設置許可基準規則への適合性の説明に示すとおり、バスケット格子材は、設計貯蔵期間60年間を通じて使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するために必要な構造健全性を維持する設計である。

表1 (1/2) 臨界解析における収納物条件の概要 (17×17燃料)

項目	17×17燃料			
	キャスク収納位置制限		解析条件	
	中央部	外周部	中央部	
収納物仕様	種類	48,000MWh/t型 (A型・B型) 39,000MWh/t型 (A型・B型)	48,000MWh/t型 (A型)	
	初期濃縮度 (wt%)	≤4.2	4.2	
	ウラン重量 (kg)			
	最高燃焼度 (MWd/t) (使用済燃料集合体平均)	≤48	≤44	
	冷却期間 (年)	48,000MWh/t型 A型: ≥15, B型: ≥20 39,000MWh/t型 A型: ≥20, B型: ≥20	—	
	照射期間 (日)		—	
	冷却期間 (年) (注)	48,000MWh/t型: ≥15, 又は ≥20 39,000MWh/t型: ≥20	—	
	平均燃焼度 (MWd/t)	≤44	0	
	配置			

(注) バーナブルポイズン集合体が挿入される使用済燃料集合体タイプの冷却期間による。

表1 (2/2) 臨界解析における収納物条件の概要 (15×15燃料)

項目	15×15燃料			
	キャスク収納位置制限		解析条件	
	中央部	外周部	中央部	
収納物仕様	種類	48,000MWd/t型 (A型・B型) 39,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型)	
	初期濃縮度 (wt%)	≤4.1	4.1	
	ウラン重量 (kg)			
	最高燃焼度 (MWd/t) (使用済燃料集合体平均)	≤47	≤43	
	冷却期間 (年)	48,000MWd/t型 A型: ≥15, B型: ≥20 39,000MWd/t型 A型: ≥20, B型: ≥20	—	
	照射期間 (日)		—	
	冷却期間 (年) (注)	48,000MWd/t型: ≥15、又は≥20 39,000MWd/t型: ≥20	—	
	平均燃焼度 (MWd/t)	≤43	0	
	配置			

(注) バーナブルポイズン集合体が入る使用済燃料集合体タイプの冷却期間による。

注) 全て新燃料が収納される条件

表2 臨界解析で使用する使用済燃料集合体の仕様

項目	単位	仕様	
		17×17燃料 (A型)	15×15燃料 (A型)
使用済燃料集合体の種類	—	17×17燃料 (A型)	15×15燃料 (A型)
燃料材質	—	二酸化ウラン	二酸化ウラン
被覆管材質	—	ジルコニウム ^(注1)	ジルコニウム ^(注1)
燃料密度	%理論密度		
燃料棒直径	cm		
ペレット直径 ^(注2)	cm		
被覆管内厚 ^(注2)	cm		
燃料有効長	cm		
燃料棒配列	—	17×17	15×15
使用済燃料集合体当たりの燃料棒本数	本	264	204
燃料棒ピッチ	cm		
使用済燃料集合体の幅 ^(注3)	cm		
初期濃縮度	wt%	4.2	4.1

(注1) 実際の仕様はジルコニウム合金(ジルカロイ-4)であるが、解析上は純度100%のジルコニウムとして扱う。なお、他の合金成分(スズ等)は中性子吸収効果がジルコニウムよりも大きいので、この扱いは保守的である。

(注2) 17×17燃料(B型)のペレット直径は□ cm、被覆管内厚は□ cmであり、A型燃料と若干異なるが、臨界解析ではペレット直径が大きく、スペクトルが硬化することで中性子吸収材による中性子吸収が抑制され、反応度が高い傾向となるA型燃料を対象としている。15×15燃料(B型)のペレット直径は□ cm、被覆管内厚は□ cmであり、A型燃料と若干異なるが、臨界解析ではペレット直径が大きく、スペクトルが硬化することで中性子吸収材による中性子吸収が抑制され、反応度が高い傾向となるA型燃料を対象としている。

(注3) (燃料棒ピッチ)×(燃料棒配列数)を臨界解析上の使用済燃料集合体の幅とする。

表3 (1/2) 臨界解析条件

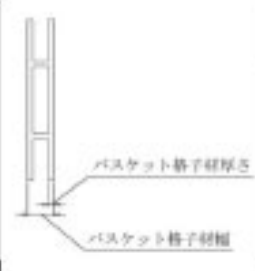
項目	内容	
臨界解析の方法	中性子実効増倍率の計算には臨界解析コードを使用し、燃料棒単位セル計算により求まる核定数を用い、TK-26型及び使用済燃料集合体の実形状をモデル化。	
解析コード	SCALEコードシステム(6.2.1) <ul style="list-style-type: none"> ・燃料棒単位セル計算：XSProcモジュール ・臨界計算：KENO-VI(中性子ヒストリー数 <input type="text"/>) ・断面積ライブラリ：SCALEコードシステムに内蔵されている、ENDF/B-VIIに基づく252群の多群断面積ライブラリ 	
解析条件	収納物	17×17燃料、及び15×15燃料
	濃縮度	17×17燃料：4.2wt%、15×15燃料：4.1wt%
	収納体数	26体
	使用済燃料集合体配置 ^(注)	17×17燃料：図3 (2/3) 及び図5 (2/3) 参照 15×15燃料：図4 (2/3) 及び図6 (2/3) 参照
	寸法条件 ^(注)	バスケット格子材厚さ、バスケット格子材幅、バスケット格子内のりの寸法は公差を考慮。
	TK-26型内界囲気 ^(注)	乾燥状態：真空 冠水状態：水密度1.0g/cm ³ (TK-26型内の水密度を1.0g/cm ³ とした場合に中性子実効増倍率が最大となる)
	TK-26型外界囲気 ^(注)	真空(解析モデルの境界条件を完全反射とし、TK-26型の外部に漏れ出た中性子が減速及び吸収されることなく反射してTK-26型へ戻る)
	TK-26型配列	無限配列(TK-26型の周囲は完全反射境界)

(注1) 解析条件に対する感度解析結果を別紙1に示す。

表3 (2/2) 臨界解析条件

項目	内容
使用済燃料 集合体構造材	乾燥状態：真空に置換。 冠水状態：純水(1.0g/cm ³)に置換。(構造材よりも中性子に対する減速効果及び反射効果の高い純水とする)
ほう素添加量	中性子吸収材に含まれるほう素添加量を仕様上の下限値に設定。 ・ほう素添加アルミニウム合金： ¹⁰ B □wt% なお、設計貯蔵期間(60年)経過後の中性子吸収材に含まれるほう素の減損割合は保守的に全中性子束を用いて評価しても10 ⁻⁶ 程度であり、無視し得るレベルである。
バーナブル ポイズン集合体	無し。 (中性子吸収効果のあるバーナブルポイズン集合体は保守的に無視)
中性子遮蔽材	側部、蓋部及び底部の中性子遮蔽材は保守的に真空に置換。
蓋	一次蓋及び二次蓋を考慮。

表4 TK-26型の臨界解析モデル寸法条件

		寸法条件		条件設定根拠
		乾燥状態	冠水状態	
<p>バスケット 格子材</p>  <p>バスケット格子材厚さ バスケット格子材幅</p>	厚さ	最小	最大	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥状態では、中性子吸収材による中性子吸収効果が小さくなるように最小としている。 冠水状態では、水で満たされる中空部（水ギャップ）における中性子の減速効果を少なくすることで、熱中性子が減少し、中性子吸収材による中性子吸収効果が小さくなるように最大としている。
	幅	最小	最小	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥状態では、隣接する使用済燃料集合体までの距離が短くなるように最小としている。 冠水状態では、水で満たされる中空部（水ギャップ）における中性子の減速効果を少なくすることで、熱中性子が減少し、中性子吸収材による中性子吸収効果が小さくなるように最小としている。
バスケット格子内のり		最小	最大	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥状態では、隣接する使用済燃料集合体までの距離が短くなるように最小としている。 冠水状態では、燃料領域での熱中性子が増加するように最大としている。

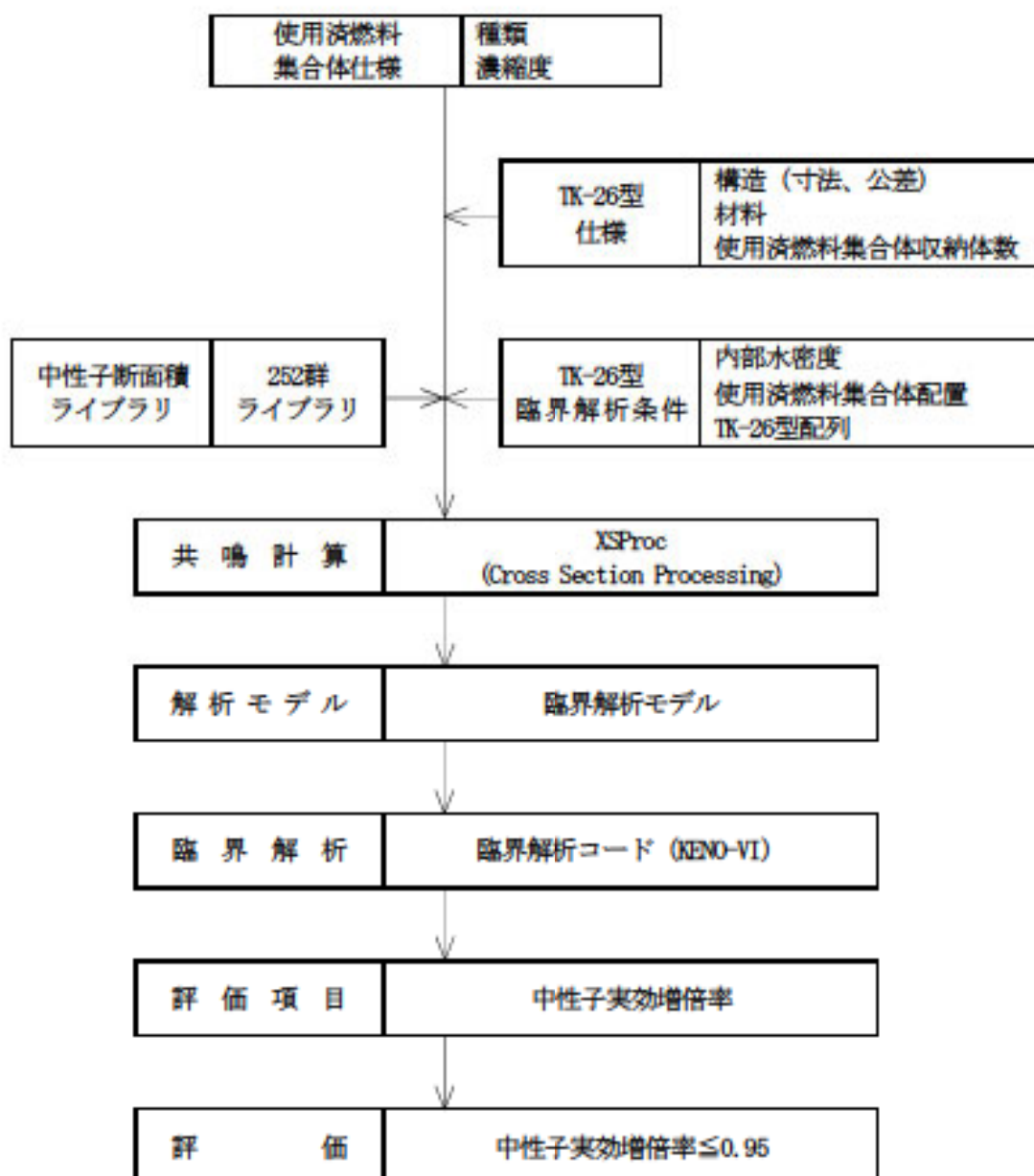


図2 TK-26型の臨界解析フロー図

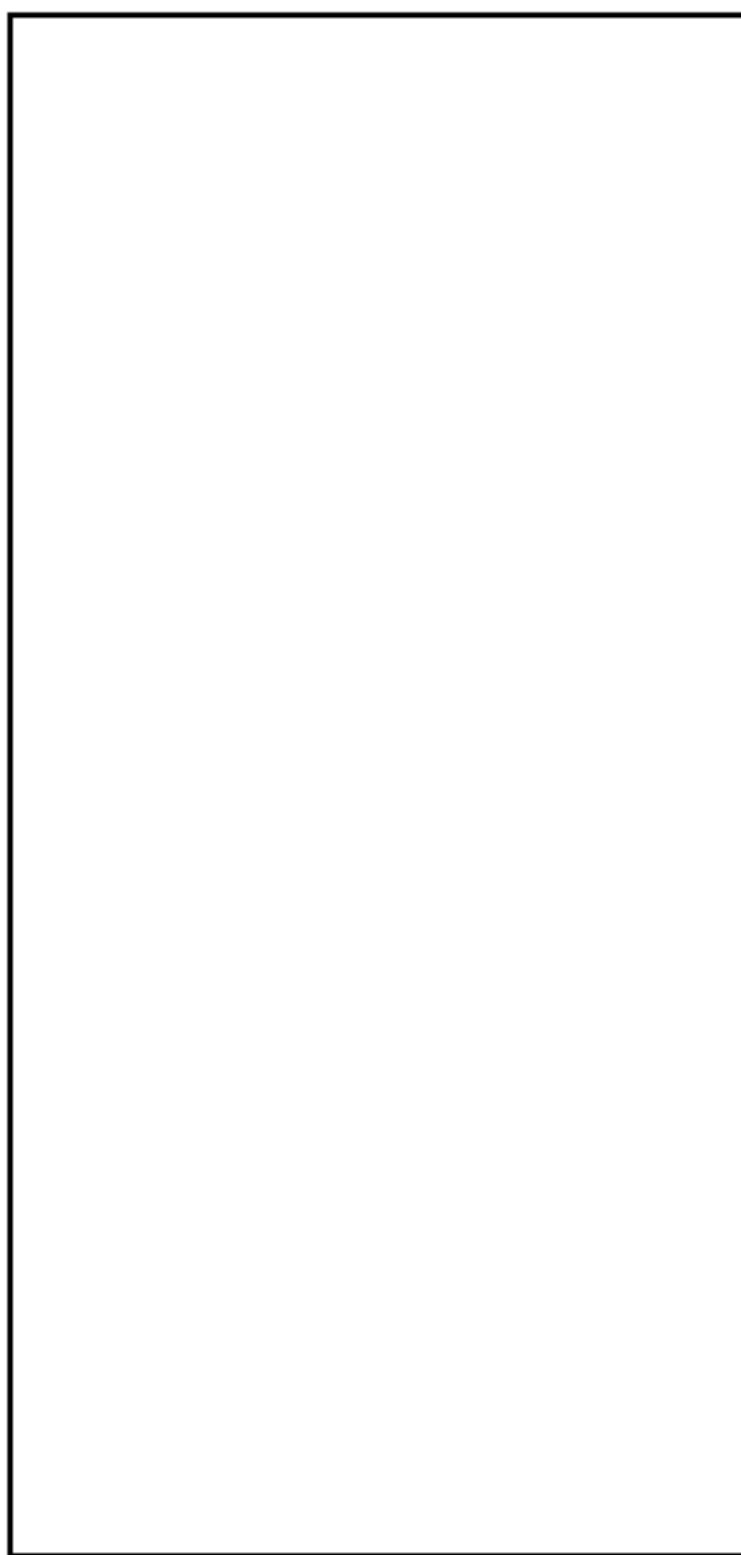


図3 (1/3) 17×17燃料収納時の臨界解析モデル(縦断面図、乾燥状態)

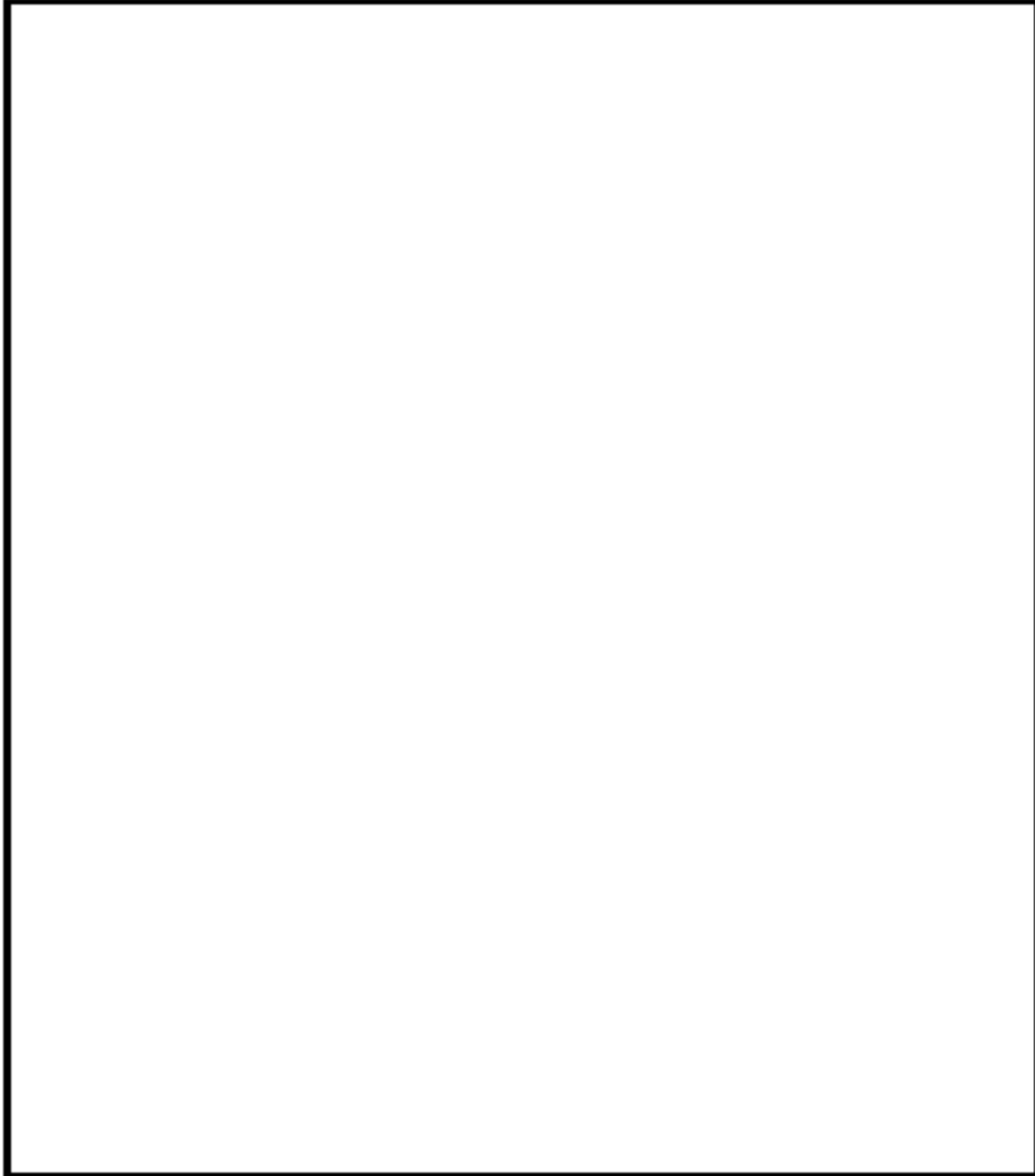


図3 (2/3) 17×17燃料収納時の臨界解析モデル(横断面図、乾燥状態)

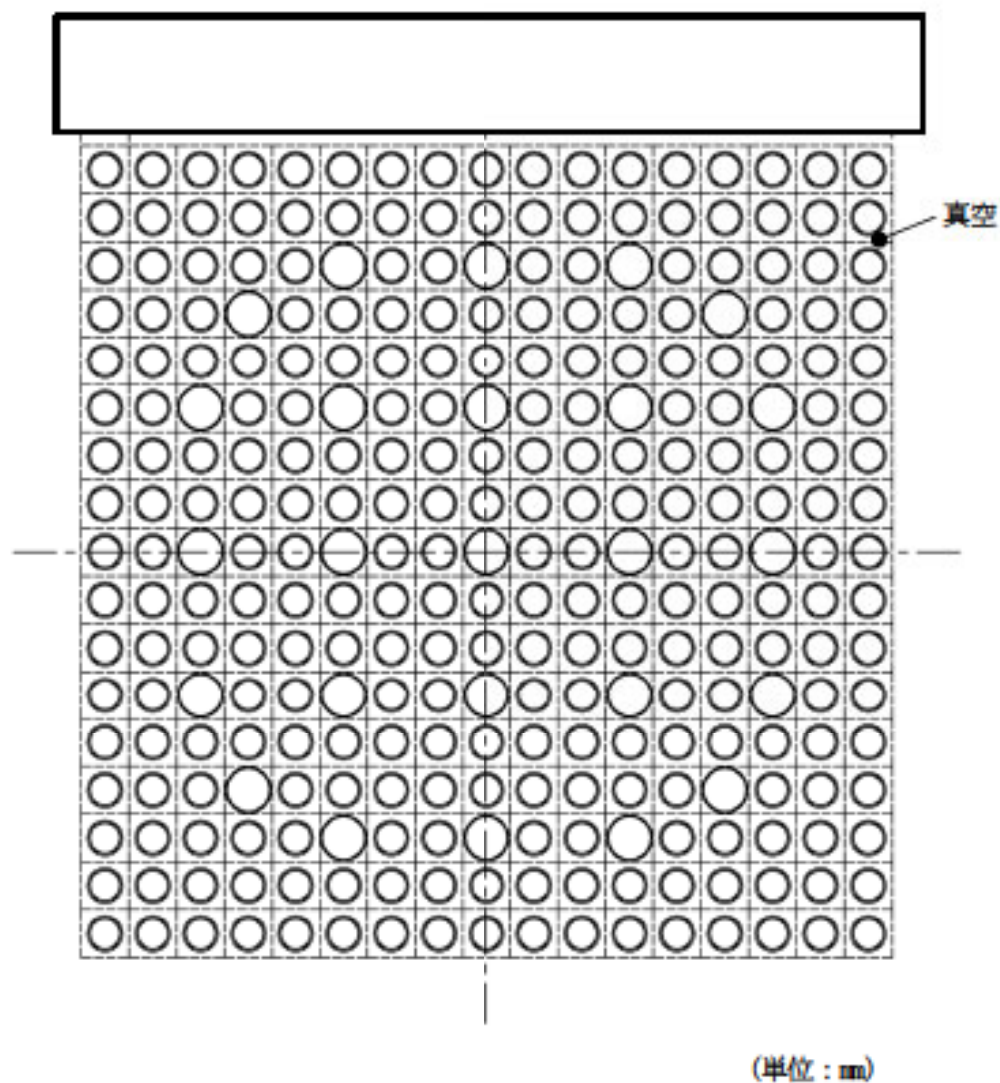


図3 (3/3) 17×17燃料収納時の臨界解析モデル(燃料領域拡大図、乾燥状態)



図4 (1/3) 15×15燃料収納時の臨界解析モデル(縦断面図、乾燥状態)

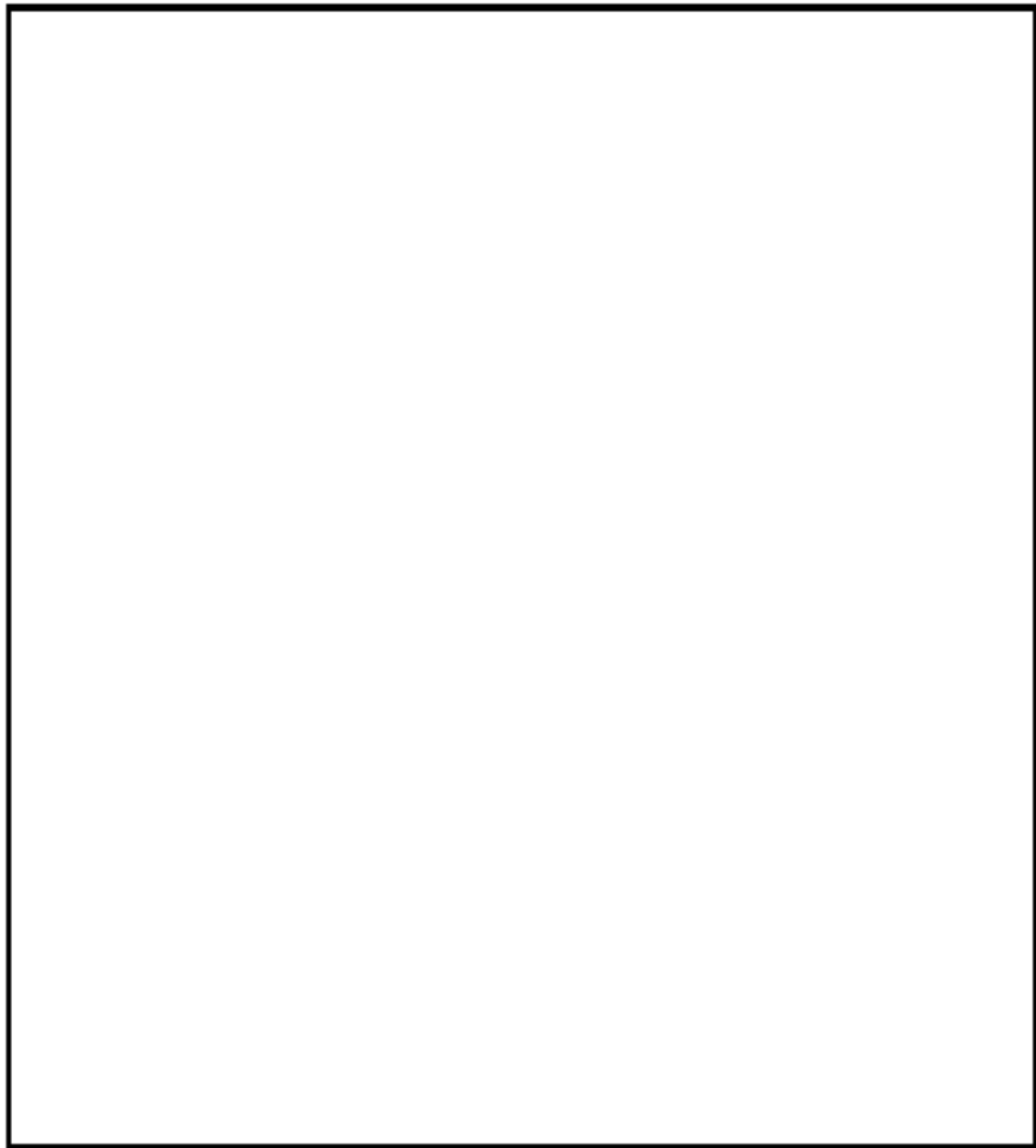


図4 (2/3) 15×15燃料収納時の臨界解析モデル(横断面図、乾燥状態)

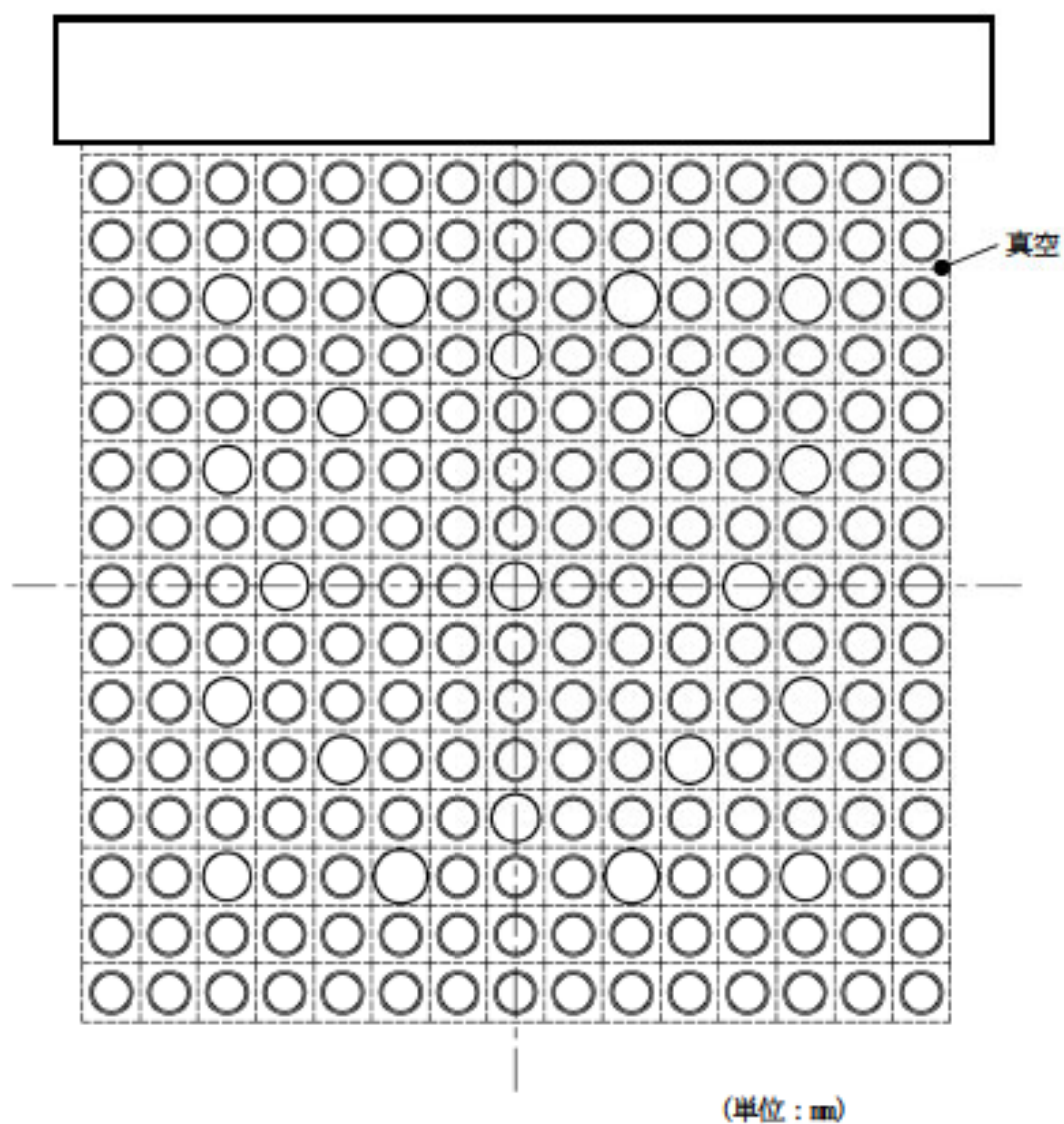


図4 (3/3) 15×15燃料収納時の臨界解析モデル(燃料領域拡大図、乾燥状態)

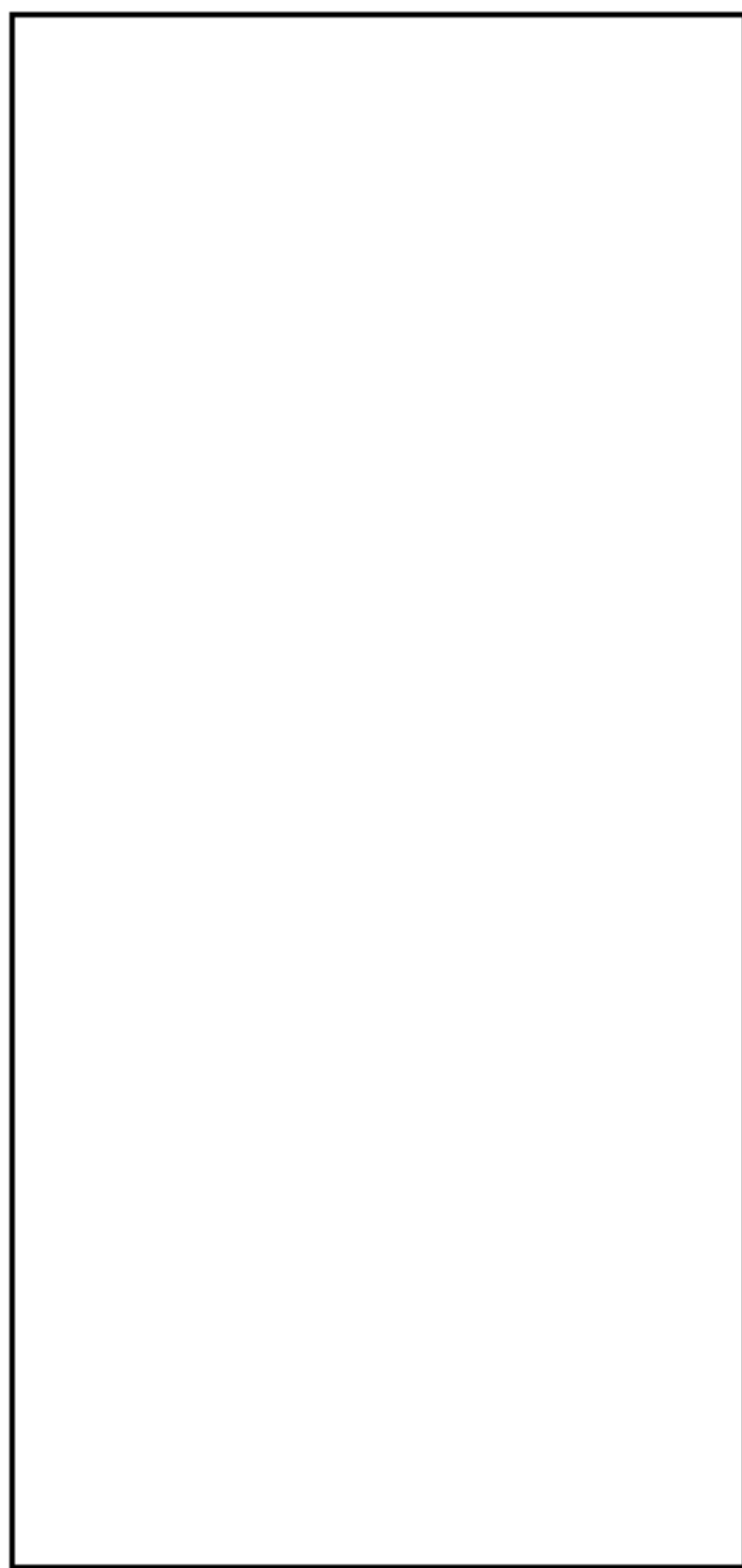


図5 (1/3) 17×17燃料収納時の臨界解析モデル(縦断面図、冠水状態)

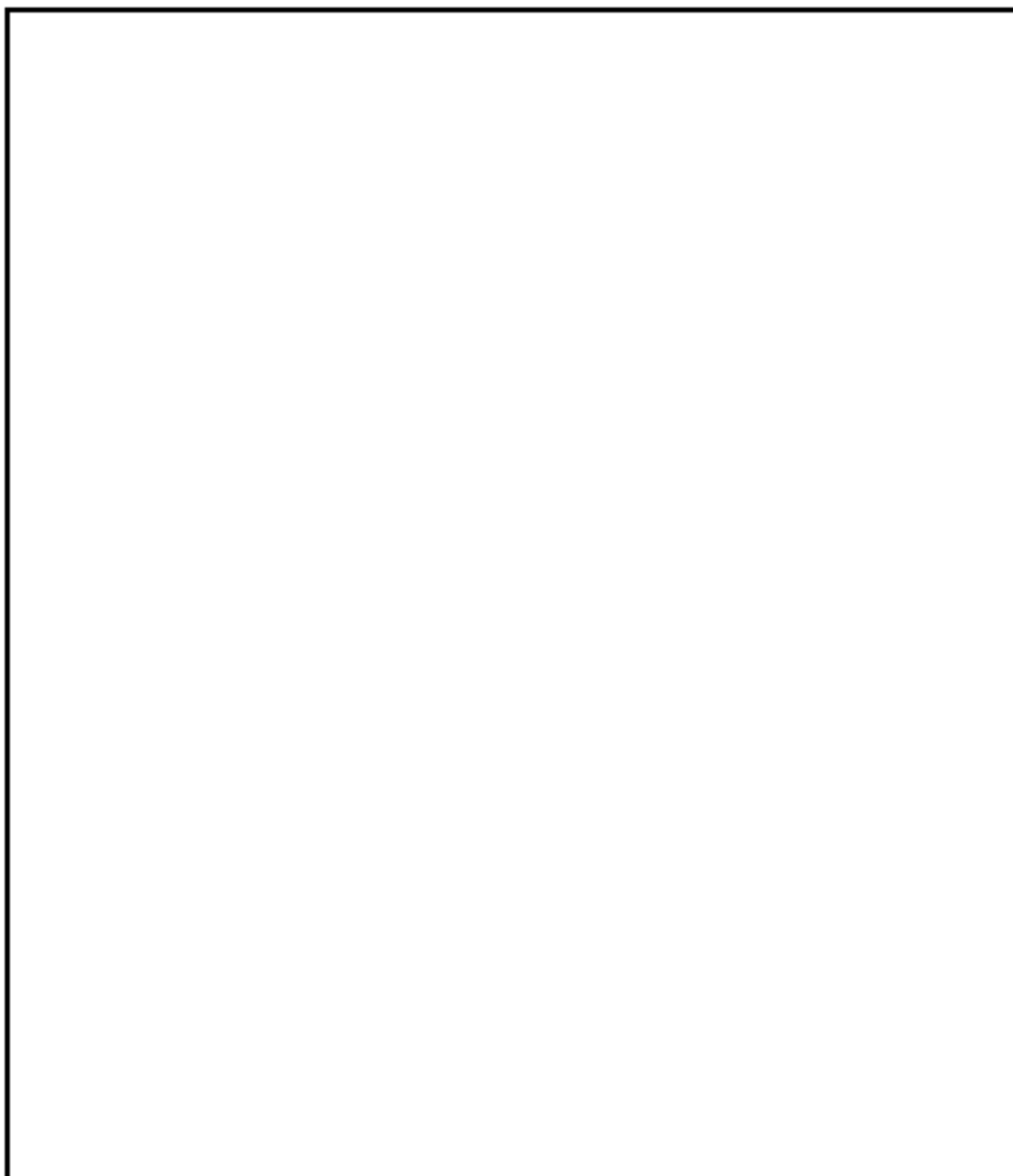


図5 (2/3) 17×17燃料収納時の臨界解析モデル(横断面図、冠水状態)

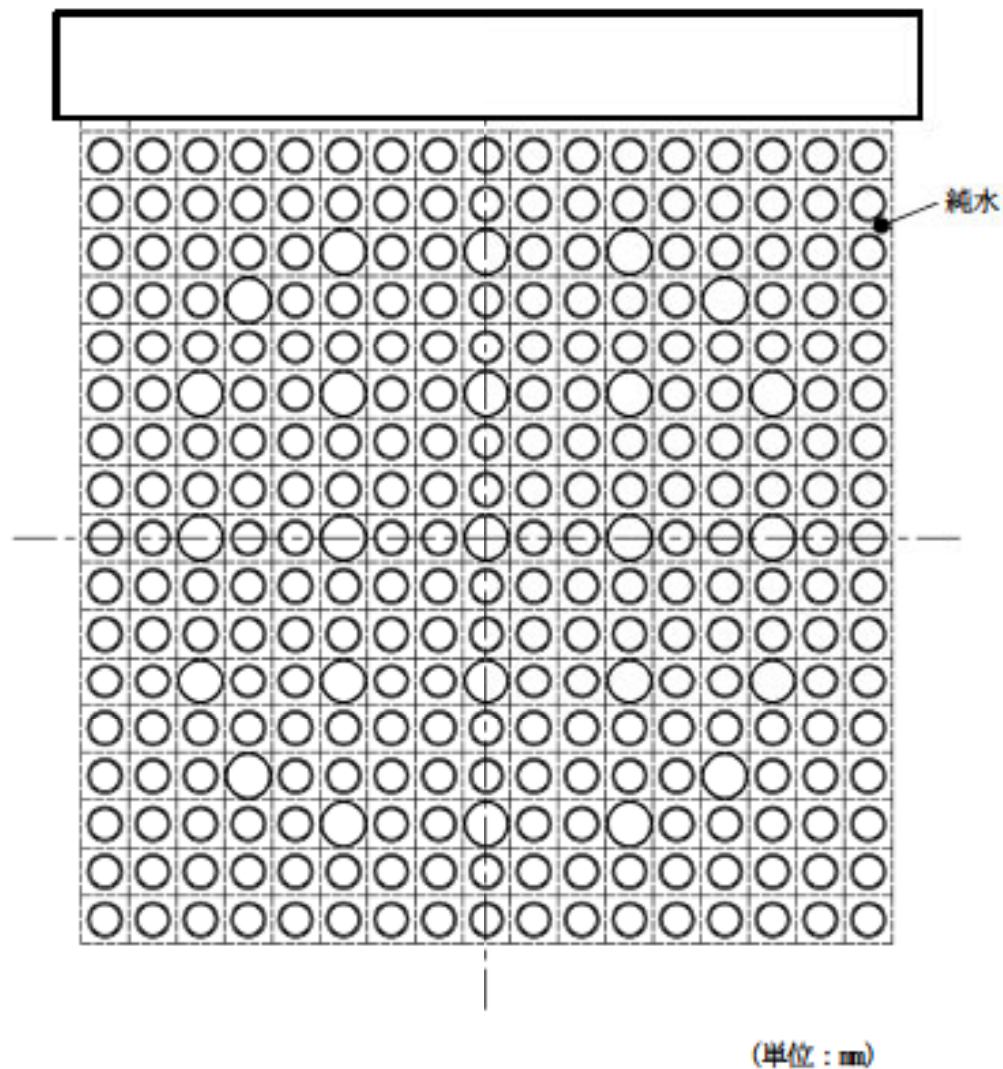


図5 (3/3) 17×17燃料収納時の臨界解析モデル(燃料領域拡大図、冠水状態)



図6 (1/3) 15×15燃料収納時の臨界解析モデル(縦断面図、冠水状態)

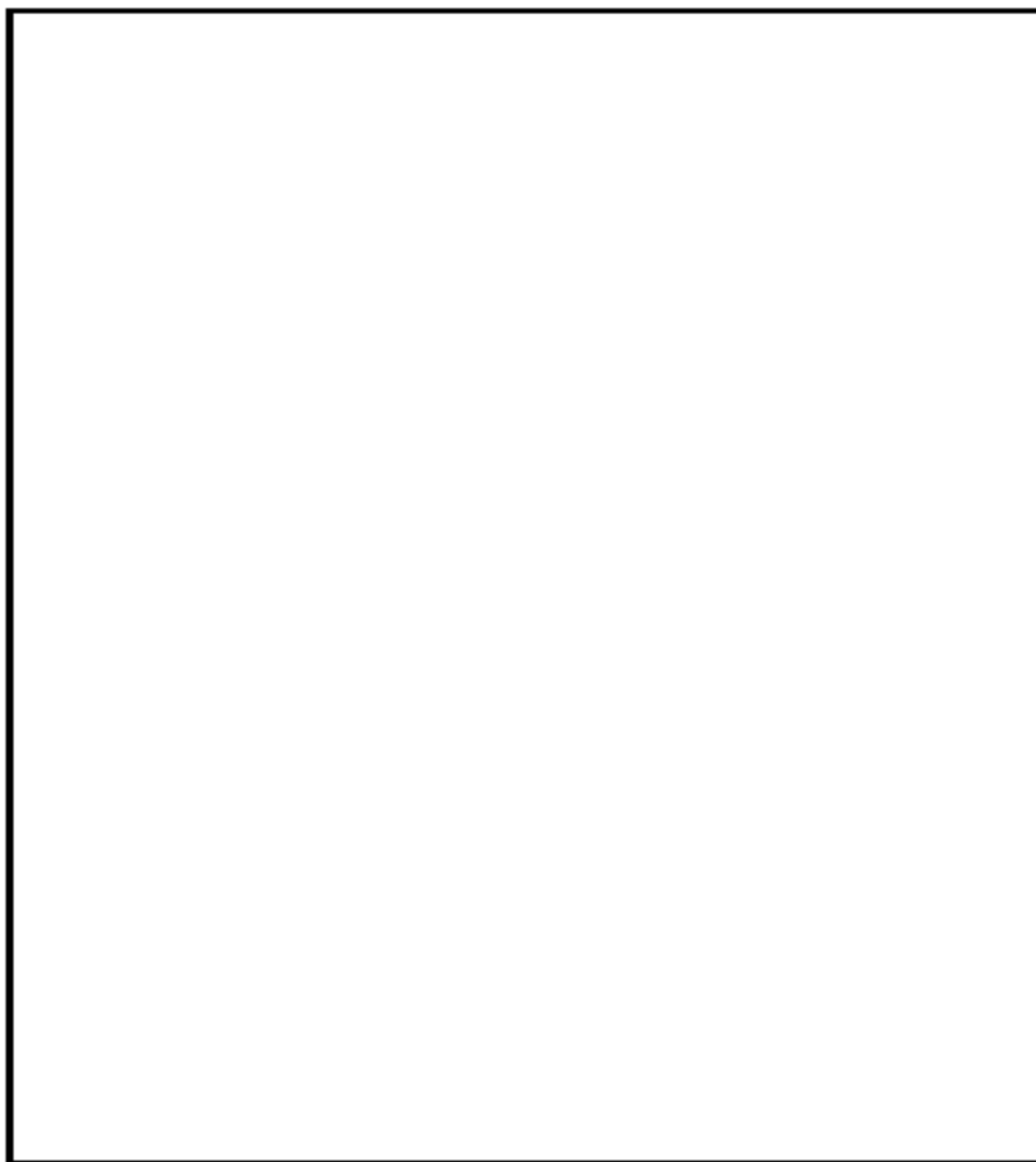


図6 (2/3) 15×15燃料収納時の臨界解析モデル(横断面図、冠水状態)

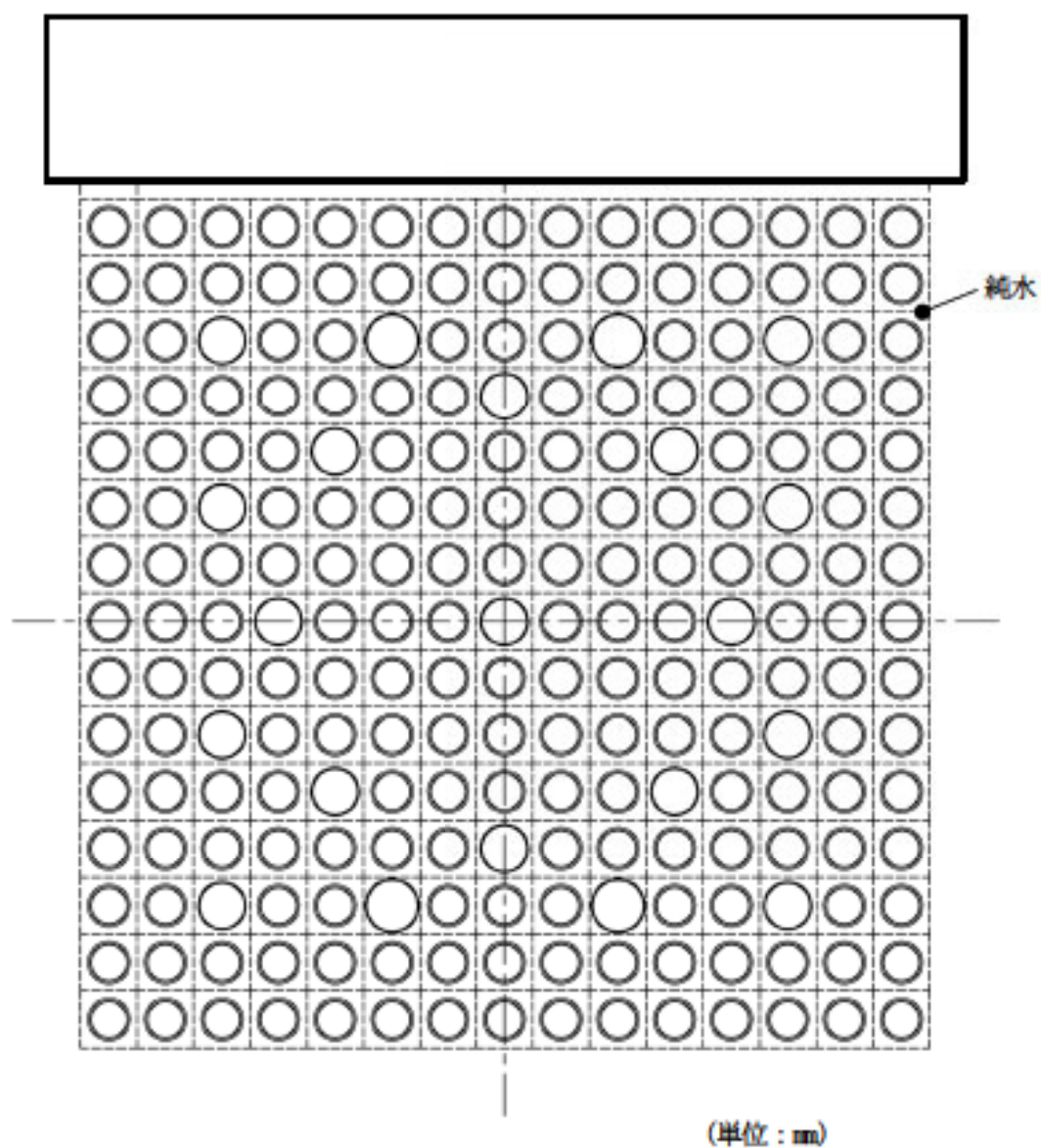


図6 (3/3) 15×15燃料収納時の臨界解析モデル(燃料領域拡大図、冠水状態)

技術的に想定されるいかなる場合においても、表5に示すとおり、評価基準を満足している。

なお、17×17燃料収納時と15×15燃料燃料収納時の中性子実効増倍率はほぼ同じであることから両燃料の反応度は同等と考えられ、両燃料を混載した場合であっても中性子実効増倍率は同等である。

表5 評価結果

項目		評価結果 ^(注1)		評価基準 ^(注2)	備考
		17×17燃料 収納時	15×15燃料 収納時		
中性子 実効増倍率	冠水 状態	0.914 (3 σ :0.00129)	0.914 (3 σ :0.00120)	0.95以下	評価に用いたKENO-VI コードはモンテカル ロ法に基づく臨界解 析コードであり、計 算結果には統計誤差 σ を伴うため、評価 結果にはその3倍(3 σ)を加えている。
	乾燥 状態	0.409 (3 σ :0.00045)	0.404 (3 σ :0.00048)		

(注1) 評価結果の3 σ はモンテカルロ法による計算に伴って評価される中性子実効増倍率の統計誤差(すなわち標準偏差： σ)を3倍した値である。

(注2) 参考文献(1)によると、「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以下となることにより未臨界性を判定できる」と記載されている。

[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。

TK-26型では、設計上考慮すべき自然現象(地震、津波及び竜巻)によりバスケットに塑性変形は生じない。(詳細は補足説明資料4-1「地震に対する安全機能維持に関する説明資料」、補足説明資料5-1「津波に対する安全機能維持に関する説明資料」、及び補足説明資料6-1「竜巻及びその他の外部事象に対する安全機能維持に関する説明資料」で説明)

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)

臨界解析における条件設定根拠について

臨界解析条件の中性子実効増倍率に対する感度を確認した。本別紙では、最初に17×17燃料収納時について感度解析を実施した後、15×15燃料収納時についてはその結果を踏まえて条件を絞り込んで実施した。また、TK-26型の内/外雰囲気の感度解析については、17×17燃料収納時で代表して実施した。

1. 17×17燃料収納時

(1) 冠水状態

以下の条件を変化させた際の中性子実効増倍率に対する感度を確認した。ここで、寸法条件のうちバスケット格子材幅については、水ギャップによる中性子の減速効果が小さくなる最小寸法を前提条件とした^(注)。

- ・バスケット格子内の使用済燃料集合体配置
- ・寸法条件(バスケット格子材厚さ、バスケット格子内のり)

(注)使用済燃料集合体から発生する中性子は、水ギャップ部の水で減速された後、バスケット格子材に添加されている²によって吸収される。よって、水ギャップによる中性子の減速効果が小さくなると中性子実効増倍率は大きくなる。

(2) 乾燥状態

乾燥状態では、胴内水による中性子の減速効果がないため、収納されている使用済燃料集合体それぞれがTK-26型の胴内で近くに集中している条件において中性子実効増倍率が大きくなる。よって、バスケット格子内の使用済燃料集合体配置は中心偏向、バスケット格子材幅は最小、バスケット格子内のりは最小の条件とした。バスケット格子材厚さについても最小の条件で中性子実効増倍率が大きくなると考えられるが、バスケット格子材は中性子吸収材を含む重要な機能部材であることからその寸法条件を振って感度解析を行った。

- ・寸法条件(バスケット格子材厚さ)

上記(1)及び(2)の感度解析結果を別紙1-1(a)表に示す。

2. 15×15燃料収納時

(1) 冠水状態

17×17燃料収納時の感度解析結果を踏まえ、以下の条件を変化させた際の中性子実効増倍

率に対する感度を確認した。

- ・バスケット格子内の使用済燃料集合体配置
- ・寸法条件(バスケット格子内のり)

(2) 乾燥状態

17×17燃料収納時の感度解析結果を踏まえ、中性子実効増倍率が最大となる条件は明らかであるため15×15燃料収納時についての感度解析は行わなかった。

上記(1)の感度解析結果を別紙1-1(b)表に示す。

3. TK-26型の内/外雰囲気

TK-26型の取扱時を想定し、以下に示す内/外雰囲気条件を変化させた際の中性子実効増倍率に対する感度を確認した。なお、本感度解析については17×17燃料収納時で代表して実施した。

- ・TK-26型の内/外雰囲気
- ・使用済燃料集合体の収納から取出しまでの流れを考慮した水位変動

TK-26型の内/外雰囲気の感度解析結果を別紙1-1(c)表、別紙1-2図、別紙1-3図、及び別紙1-4図に示す。また、使用済燃料集合体の収納から取出しまでの流れを考慮した水位変動の感度解析の結果を別紙1-1(c)表及び別紙1-5図に示す。内部雰囲気については、密度 1g/cm^3 の胴内水が満水の状態で中性子実効増倍率は最大になること、一方、外部雰囲気の水の有無については、中性子実効増倍率に殆ど影響を及ぼさないことが確認された。

以上の感度解析結果より、今回の臨界解析条件は妥当である。また、感度解析結果を踏まえたTK-26型の取扱時の臨界防止機能の成立性確認結果を別紙3に示す。

別紙1-1 (a) 表 臨界解析条件の感度解析結果 (17×17燃料収納時)

項目	乾燥状態		冠水状態		
	感度解析条件 ^(注1)	感度解析結果 ^(注2)	感度解析条件 ^(注1)	感度解析結果 ^(注2)	
使用済燃料集合体配置 (別紙1-1図)	中心偏向 ^(注3)	—	中心偏向	-0.00031	
寸法 条件	バスケット 格子材の幅 ^(注3)	最小: <input type="text"/> cm及び <input type="text"/> cm	外周偏向	—	
		バスケット 格子材厚さ			最小: <input type="text"/> cm
		バスケット 格子内のり			最小: <input type="text"/> cm
	寸法 条件	バスケット 格子材の幅 ^(注3)	最小: <input type="text"/> cm	—	—
			公称: <input type="text"/> cm		
			最大: <input type="text"/> cm		
寸法 条件	バスケット 格子内のり	最小: <input type="text"/> cm ^(注4)	—	—	
		公称: <input type="text"/> cm			
		最大: <input type="text"/> cm			

(注1) 表3及び表4に示す申請書記載値の解析条件から変更して感度解析を実施した条件のみを示す。

(注2) 表5に示す申請書記載値との中性子実効増倍率の差異(感度解析結果)-(申請書記載値)を示している。「—」となっている箇所の感度解析条件は申請書記載値の解析条件。

(注3) バスケット格子材の幅寸法は公称寸法で cmと cmの2種類があるが、両方の部材とも中性子実効増倍率が最大となる最小寸法を前提条件として設定した。(乾燥状態では、隣接する使用済燃料集合体までの距離が短く、冠水状態で水ギャップによる中性子の減速効果が小さくなる寸法)

別紙1-1 (b) 表 臨界解析条件の感度解析結果 (15×15燃料収納時)

項目		冠水状態	
		感度解析条件 ^(注1)	感度解析結果 ^(注2)
使用済燃料集合体配置 (別紙1-1図)	中心偏向		-
	格子中央配置		-0.00093
	外周偏向		-0.00556
寸法条件	バスケット 格子材の幅	最小 ^(注3) : <input type="text"/> m 及び <input type="text"/> m	-
		最大 : <input type="text"/> m ^(注4)	-
	バスケット 格子材厚さ	最小 : <input type="text"/> m	-0.00695
		公称 : <input type="text"/> m	-0.00410
		最大 : <input type="text"/> m	-

(注1) 表3及び表4に示す申請書記載値の解析条件から変更して感度解析を実施した条件のみを示す。

(注2) 表5に示す申請書記載値との中性子実効増倍率の差異(感度解析結果)-(申請書記載値)を示している。「-」となっている箇所は感度解析条件は申請書記載値の解析条件

(注3) バスケット格子材の幅寸法は公称寸法で m と m の2種類があるが、両方の部材とも中性子実効増倍率が最大となる最小寸法を前提条件として設定した。(冠水状態で水ギャップによる中性子の減速効果が小さくなる寸法)

(注4) 17×17燃料収納時の感度解析結果から最大値とした。

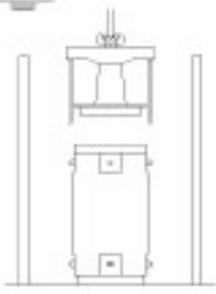
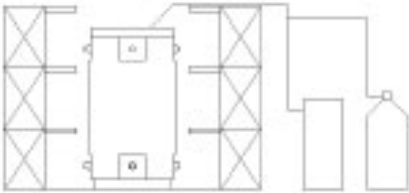
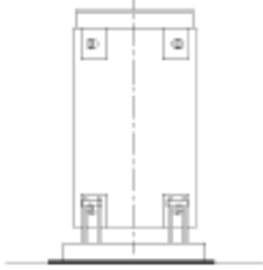
別紙1-1(c)表 臨界解析条件の感度解析結果 (TK-26型の内/外雰囲気)

項目	乾燥状態		冠水状態	
	感度解析条件 ^(注1)	感度解析結果 ^(注2)	感度解析条件 ^(注1)	感度解析結果 ^(注2)
TK-26型の内雰囲気			水密度0.0~1.0g/cm ³	別紙1-2図
TK-26型の外雰囲気			水密度0.0~1.0g/cm ³	別紙1-3図
TK-26型の内部水位の変動				別紙1-5図

(注1) 表3及び表4に示す申請書記載値の解析条件から変更して感度解析を実施した条件のみを示す。

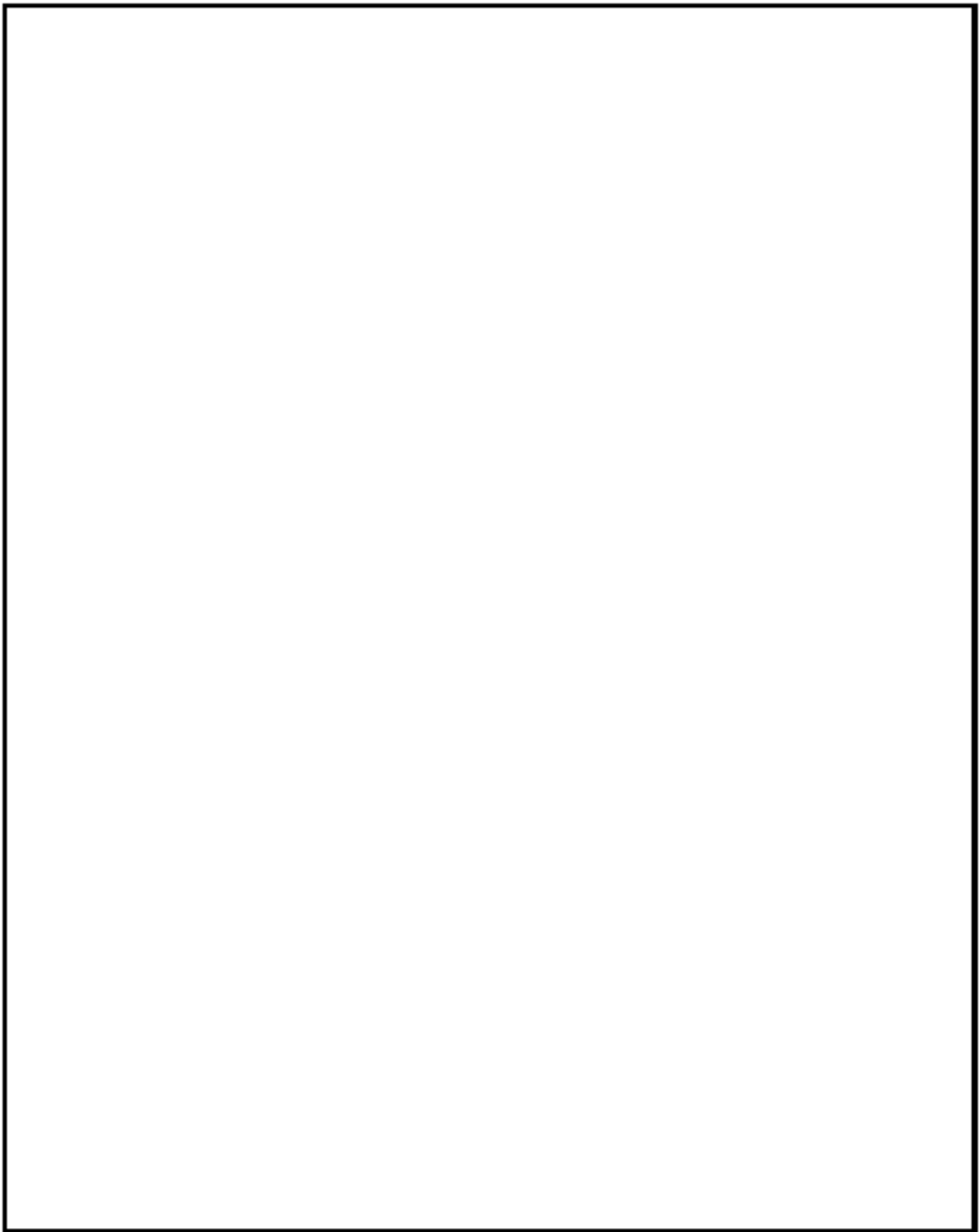
(注2) 17×17燃料収納時の結果である。

別紙1-2表 水位変動による中性子実効増倍率の感度評価結果

No.	取扱手順	臨界防止機能の成立性について
1	<p>使用済燃料集合体装荷・一次蓋取付け</p> 	<ul style="list-style-type: none"> 使用済燃料集合体を収納する際、特定兼用キャスクを貯蔵プールに沈めて収納するため、冠水時に使用済燃料集合体を26体収納しても臨界に達しないことを確認する必要がある。 臨界安全ハンドブックでは、水の反射体の厚さは、200mmあれば十分とされている。使用済燃料集合体の燃料有効部から一次蓋の底面までは200mm以上あるため、冠水時に蓋部の有無は臨界に影響しないといえる。 表5に示す冠水状態の臨界解析結果のとおり基準値を満足する。
2	<p>排水・真空乾燥・不活性ガス充填</p> 	<ul style="list-style-type: none"> 排水・真空乾燥前の特定兼用キャスク内部はNo.1、排水・真空乾燥後の特定兼用キャスク内部はNo.3の状態である。 TK-26型は、排水により、中性子を減速する効果を有する水が徐々に抜けていく。水位が減少した場合の中性子実効増倍率は冠水時の中性子実効増倍率を下回る。(別紙1-5図参照) 注排水時のバスケット格子内と水ギャップ部の水位差については別紙4に示すとおり中性子実効増倍率に及ぼす有意な影響はない。 表5に示す冠水状態の臨界解析結果のとおり基準値を満足する。
3	<p>貯蔵</p> 	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵中は特定兼用キャスク内部には水がない状態である。 表5に示す乾燥状態の臨界解析結果のとおり基準値を満足する。

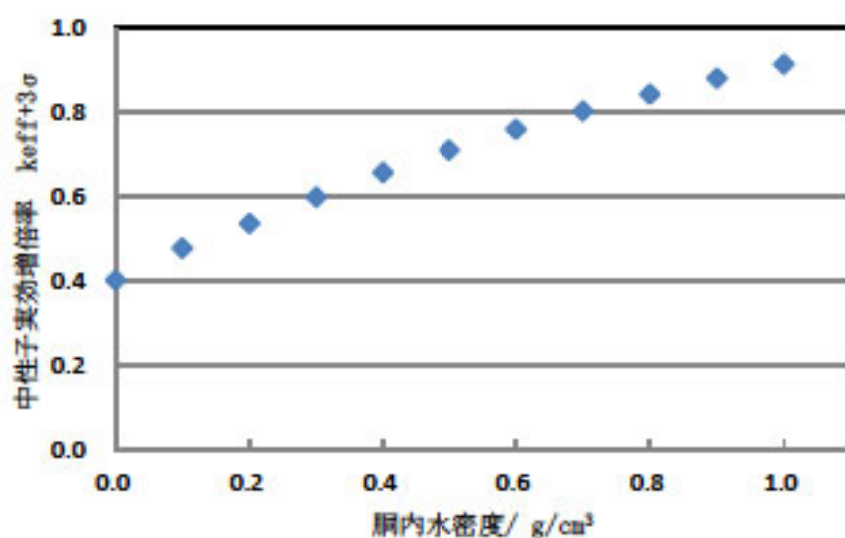
(参考文献)

日本原子力研究所、「臨界安全ハンドブック 第2版」、JAERI 1340、(1999)

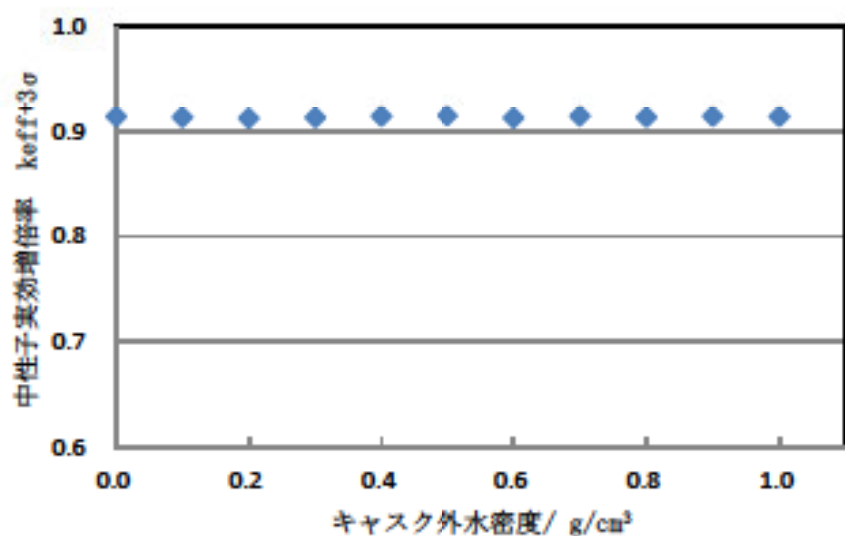


別紙1-1図 バスケット格子内使用済燃料集合体配置の感度解析条件

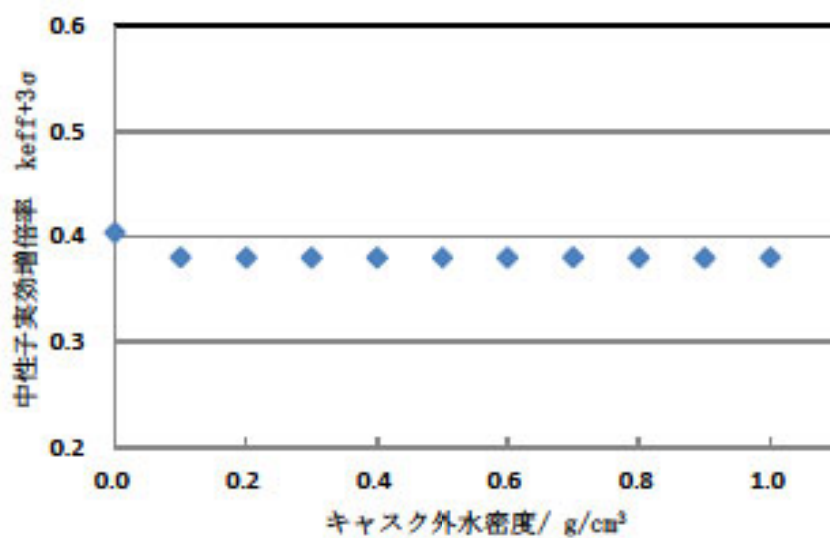
別紙1-7



別紙1-2図 TK-26型の内界囲気評価結果



別紙1-3図 TK-26型の外界囲気評価結果(冠水状態)



別紙1-4図 TK-26型の外雰囲気評価結果(乾燥状態)



別紙1-5図 胴内水位による中性子実効増倍率の変化

別紙1-9

臨界解析で使用する解析コードについて

TK-26型の臨界設計に用いられる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

1. SCALEコードシステム

(1) 概要

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^①を用い、中性子実効増倍率の計算には同コードシステムに含まれるKENO-VIコードを用いる。

SCALEコードシステムは、米国NRCにより認証された標準解析コードであり、国内外の臨界解析の分野で幅広く使用されている。

(2) 機能

SCALEコードシステムは、臨界解析に際して以下の特徴を有している。

- a. 使用済燃料集合体及び構造材の材質組成と幾何形状を与えることにより、断面積作成から中性子実効増倍率評価まで一連の解析を実行できる。
- b. 三次元計算コードであり、複雑な幾何形状における臨界解析が可能である。

(3) 解析フロー

SCALEコードシステムの解析フローを別紙2-1図に示す。

(4) 使用実績及び検証

臨界解析で使用したSCALEコードシステムに対しては、兼用キャスクを模擬した多数の臨界実験のベンチマーク試験解析が実施され、その妥当性が示されている。

文献^②に示す実験について、収納物である使用済燃料集合体の仕様並びに下記の①～⑦の条件を考慮し、ベンチマーク試験解析を実施する臨界実験を選定した。ベンチマーク解析ケースを別紙2-1表、解析結果を別紙2-2表に示す。別紙2-2表に示すとおりベンチマーク試験解析は実験をよく再現しており、妥当な結果が得られている。

- ① 燃料棒を配列した集合体を用いる場合
- ② 複数の集合体が近接して配列している場合

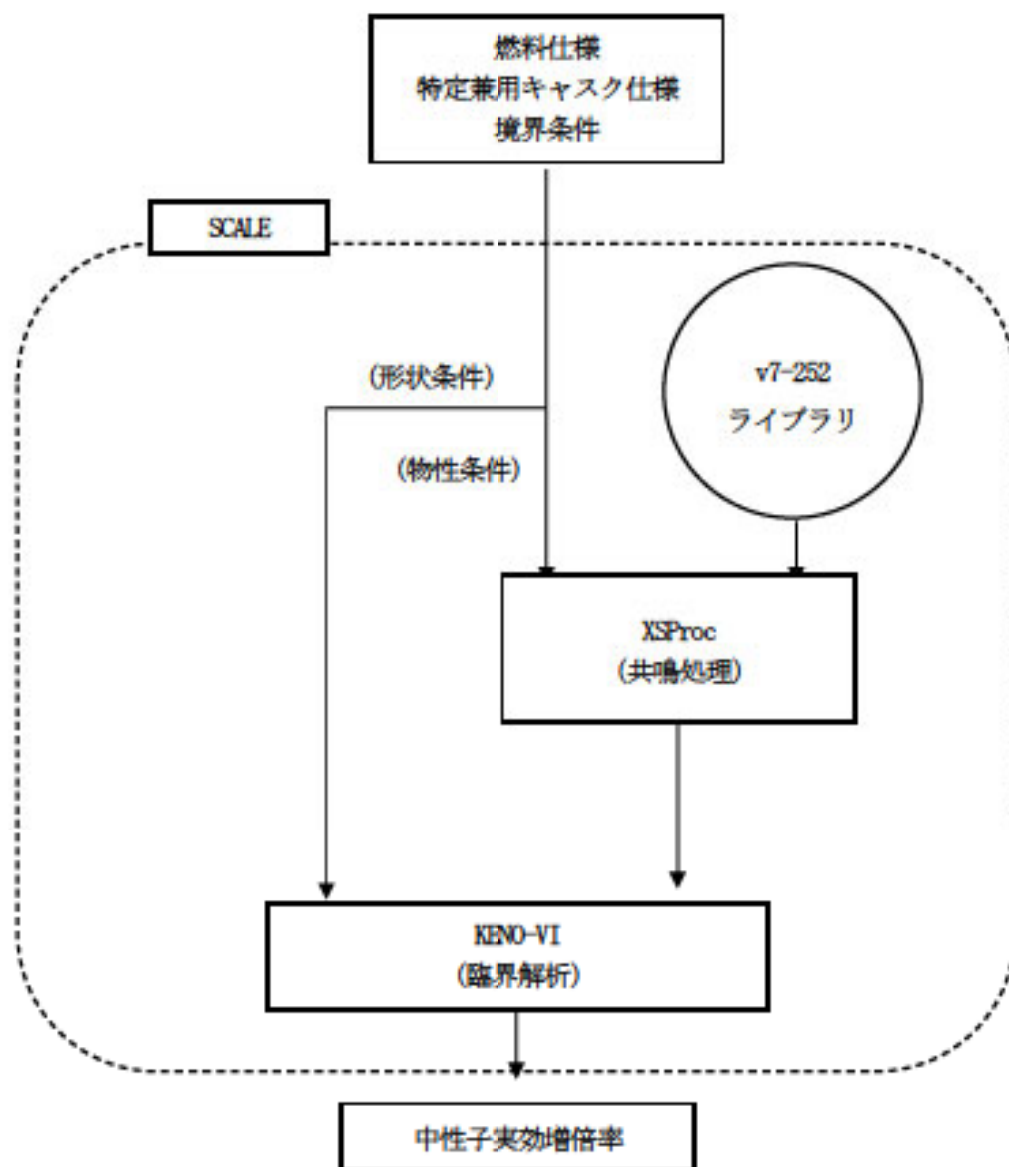
- ③ 集合体の配列の間に中性子吸収材が存在している場合
- ④ 周囲が厚い金属(反射体)に囲まれている場合
- ⑤ 集合体が水中に存在する場合
- ⑥ 燃料棒の仕様が兼用キャスクの収納物に近い場合
- ⑦ 乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いない場合

別紙2-1表 ベンチマーク解析ケース

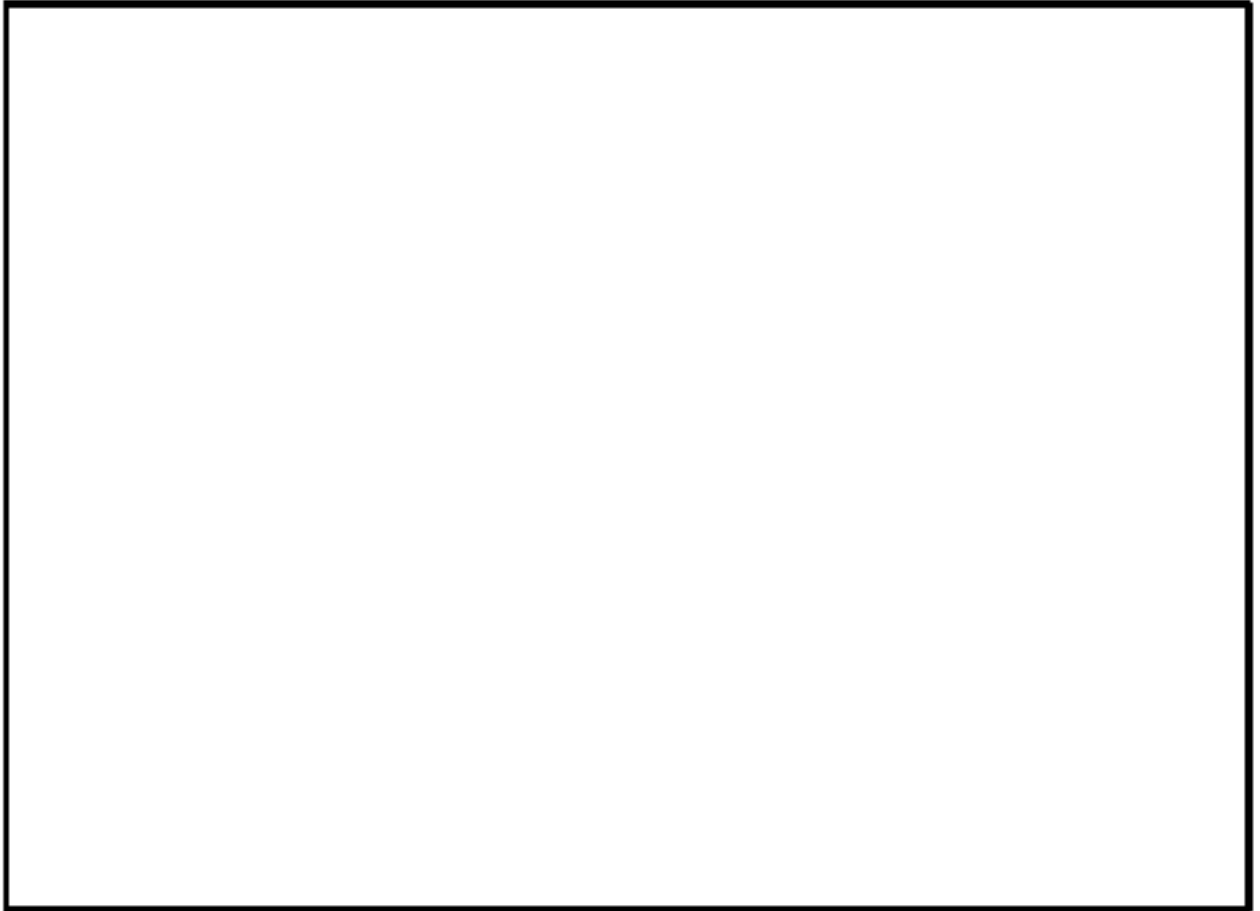
ケース	U濃縮度 [wt%]	中性子 吸収材	選定理由	臨界実験 体系
			①②④⑤⑦	別紙2-2図 別紙2-3図
			①②③④⑤⑦	
			①②④⑤⑦	
			①②③④⑤⑦	
			⑥	別紙2-4図 別紙2-5図

別紙2-2表 ベンチマーク解析結果

解析ケース	中性子 実効増倍率	統計誤差 σ
	0.99969	0.00044
	0.99842	0.00040
	0.99796	0.00040
	0.99839	0.00041
	0.99962	0.00039
	0.99910	0.00040
	0.99963	0.00041
	0.99753	0.00044
	1.00223	0.00044
	1.00098	0.00046
	1.00109	0.00042
	1.00080	0.00041
	1.00209	0.00043
	1.00077	0.00045
	1.00053	0.00042
	1.00092	0.00040
	1.00633	0.00040
	1.00059	0.00046
	1.00519	0.00039



別紙2-1図 SCALEコードシステムの解析フロー

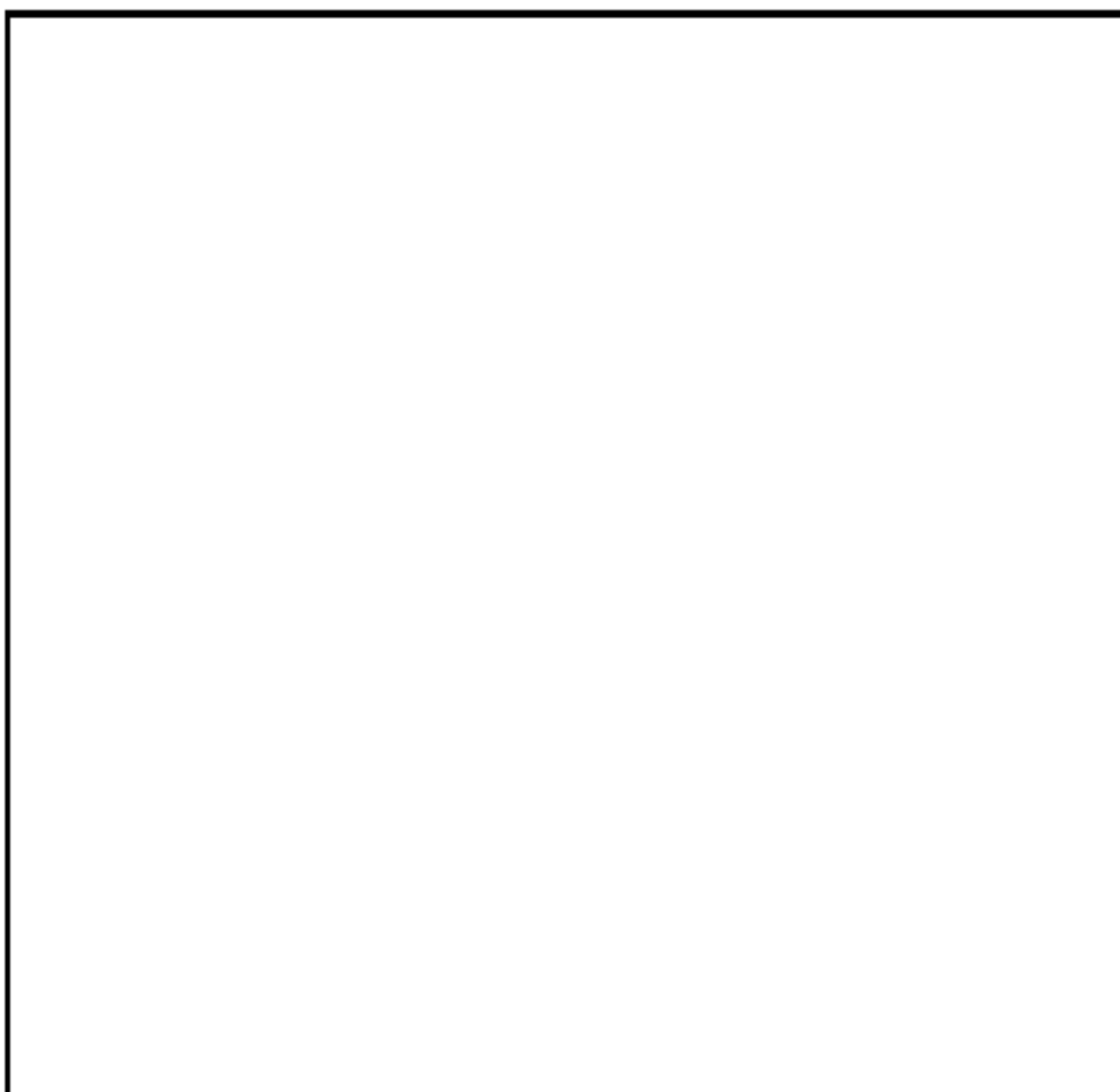


別紙2-2図 臨界実験に用いた燃料棒

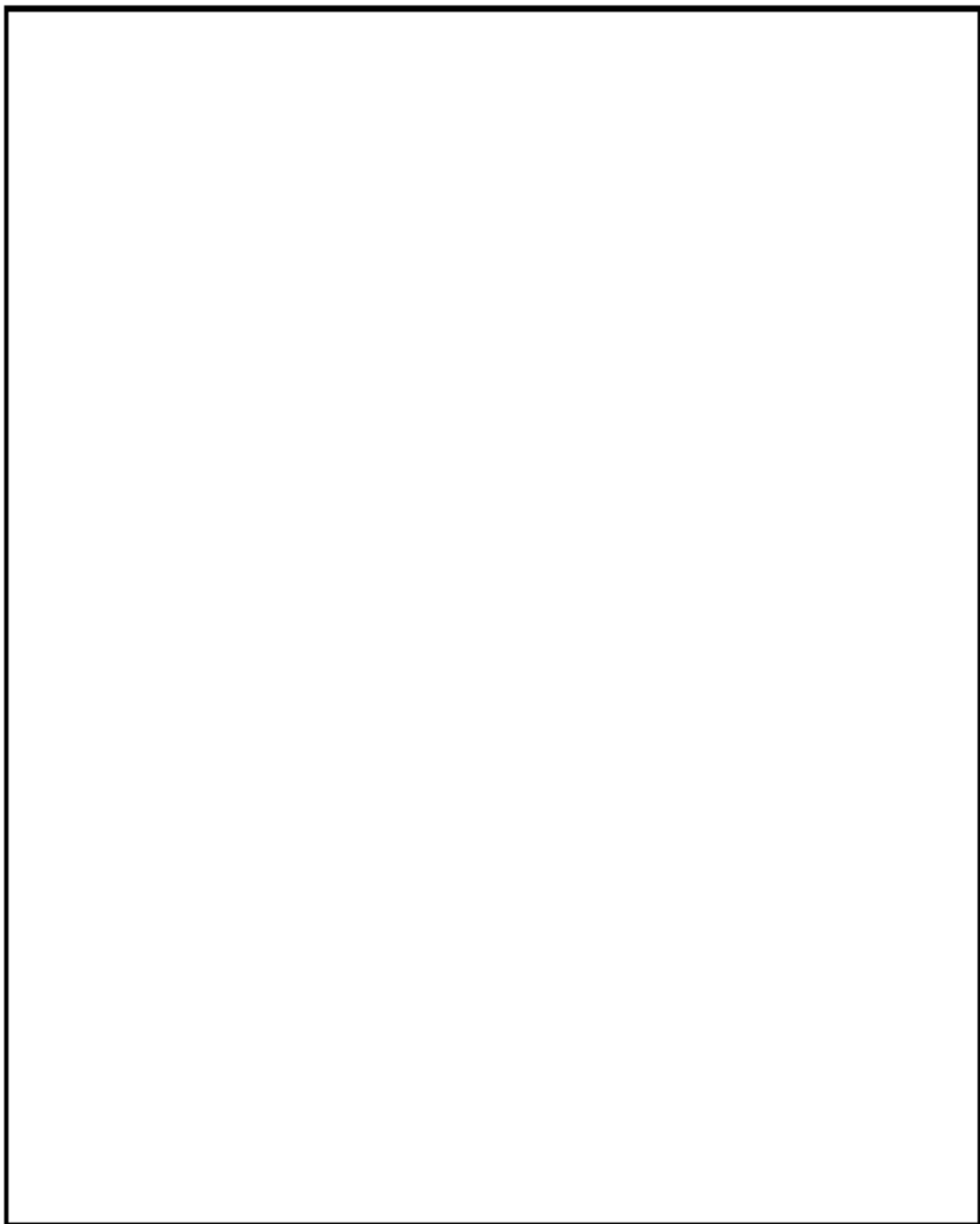


別紙2-3図 臨界実験体系

別紙2-7



別紙2-4図 ORNL Y12の臨界実験体系(4×4×1 配列のケース)



別紙2-5 図 ORNL Y12 の臨界実験体系(3×2×2 配列、及び3×3×2 配列のケース)

2. 参考文献

- (1) B. T. Rearden and M. A. Jessee, Eds., "SCALE Code System", ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, (2016)
- (2) Organisation for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency, "International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments", NEA/NSC/DOC (95) 03, (2014)

TK-26型の取扱フロー及び各状態における臨界防止機能の成立性について

TK-26型の臨界防止機能の評価における評価条件を別紙3-1表に示す。また、燃料取扱棟内及び貯蔵施設内におけるTK-26型の取扱フロー例、各状態におけるTK-26型の構成部品やTK-26型の内外雰囲気の状態、及び臨界防止機能の成立性を別紙3-2表から別紙3-4表に示す。ここで示す取扱フローについては、補足説明資料16-1「燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設」に示す取扱フロー例と同様のものであり、それぞれ以下に示す取扱い時の手順を想定したものとなっている。

- ・燃料取扱棟における使用済燃料集合体装荷～緩衝体取付け(別紙3-2表)
- ・貯蔵施設における緩衝体取外し～貯蔵(別紙3-3表)
- ・貯蔵施設における貯蔵～緩衝体取付け(別紙3-4表)

なお、使用済燃料集合体の取出し時については作業手順が使用済燃料集合体装荷時と逆になるのみであり、想定されるTK-26型の状態は使用済燃料集合体装荷時と同様となるため、中性子実効増倍率が表5に示す冠水状態よりも大きくなることはない。

別紙3-2表から別紙3-4表に示すとおり、取扱時に想定される状態において、表5に示す冠水状態における中性子実効増倍率が最も大きい値となる。

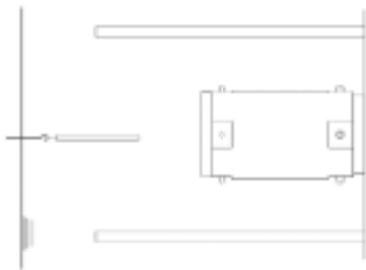
(参考文献)

日本原子力研究所、「臨界安全ハンドブック 第2版」、JAERI 1340、(1999)

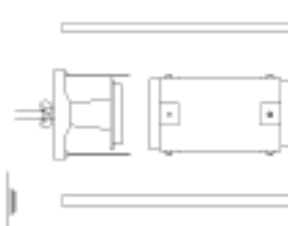
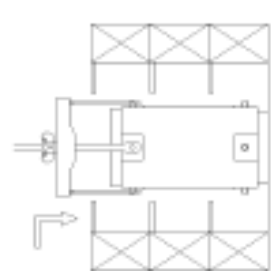
別紙3-1表 TK-26型の臨界防止機能の評価条件

No.	取扱いモード	TK-26型 構成部品	TK-26型 内雰囲気	TK-26型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
-	(臨界防止機能の評価条件)	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋	水、真空	真空	

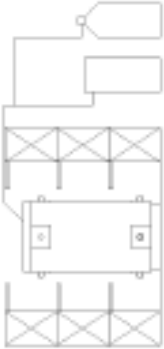

別紙3-2表 (1/5) TK-26型の取扱いフロー一例 (燃料取扱棟における使用済燃料集合体装荷～燃断体取り付け)

No.	取扱いモード	TK-26型 構成部品	TK-26型 内界囲気	TK-26型 外界囲気	臨界防止機能の成立性について
1-1a	<ul style="list-style-type: none"> 使用済燃料集合体装荷 	<p>本体 バスケット</p>	水	水	

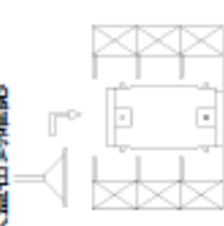
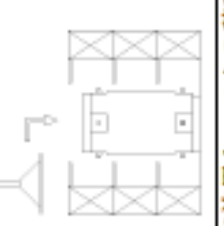
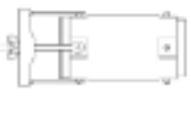
別紙3-2表 (2/5) TK-26型の取扱いモード TK-26型の取扱いモード (燃料取扱機における使用済燃料集合体装荷～燃断体取り付け)

No.	取扱いモード	TK-26型 構成部品	TK-26型 内雰囲気	TK-26型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
1-1b	<ul style="list-style-type: none"> 一次蓋取付け 	本体 バスケット 一次蓋	水	水	
1-2	<ul style="list-style-type: none"> 特定兼用キャスクの吊上げ、移動、吊降し 	本体 バスケット 一次蓋	水	空気	

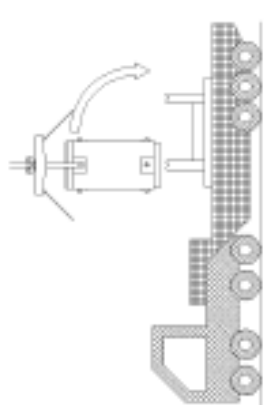
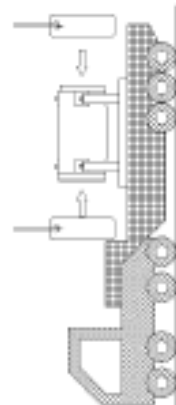
別紙3-2表 (3/5) TK-26型の取扱いモード TK-26型の取扱いモード (燃料取扱機における使用済燃料集合体装荷～継断体取り付け)

No.	取扱いモード	TK-26型 構成部品	TK-26型 内界囲気	TK-26型 外界囲気	臨界防止機能の成立性について
1-3a	<ul style="list-style-type: none"> ・排水、真空乾燥 	本体 パスケット 一次蓋	水	空気	
1-3b	<ul style="list-style-type: none"> ・不活性ガス充填、一次蓋密封確認 	本体 パスケット 一次蓋	不活性ガス	空気	

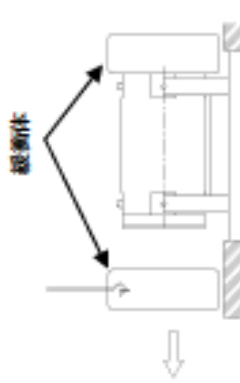
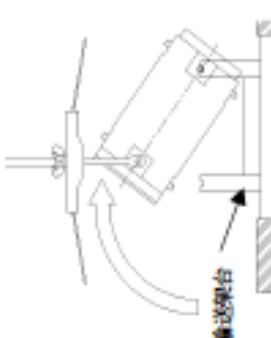
別紙3-2表 (4/5) TK-26型の取扱いモード TK-26型の取扱いモード例 (燃料取扱棟における使用済燃料集合体装荷～継断体取り付け)

No.	取扱いモード	TK-26型 構成部品	TK-26型 内雰囲気	TK-26型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
1-4	<p>取扱いモード</p> <ul style="list-style-type: none"> 二次蓋取付け、蓋間圧力調整、二次蓋密封確認 	<p>TK-26型 構成部品</p> <p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋</p>	不活性ガス	空気	
1-5	<ul style="list-style-type: none"> 三次蓋取付け、三次蓋密封確認 	<p>TK-26型 構成部品</p> <p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋</p>	不活性ガス	空気	
1-6	<ul style="list-style-type: none"> 特定兼用キャスクの移動 	<p>TK-26型 構成部品</p> <p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋</p>	不活性ガス	空気	

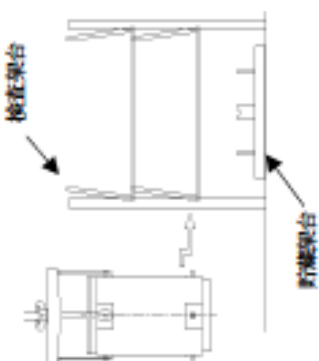
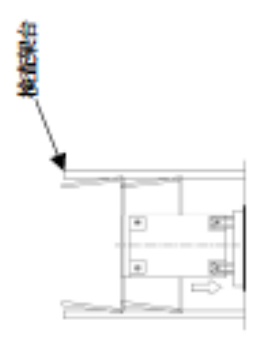
別紙3-2表 (5/5) TK-26型の取扱いモード (燃料取扱機における使用済燃料集合体装置～緩衝体取り付け)

No.	取扱いモード	TK-26型 構成部品	TK-26型 内界囲気	TK-26型 外界囲気	臨界防止機能の成立性について
1-7	<p>取扱いモード</p> <p>・ 撤去し</p> 	<p>本体</p> <p>バスケット</p> <p>一次蓋</p> <p>二次蓋</p> <p>三次蓋</p>	不活性ガス	空気	
1-8	<p>・ 緩衝体取付け</p> 	<p>本体</p> <p>バスケット</p> <p>一次蓋</p> <p>二次蓋</p> <p>三次蓋</p> <p>緩衝体</p>	不活性ガス	空気	

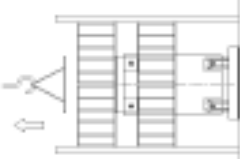


別紙3-3表 (1/3) TK-26型の取扱いフロー一例 (貯蔵施設における緩衝体取外し～貯蔵)

No.	取扱いモード	TK-26型 構成部品	TK-26型 内界囲気	TK-26型 外界囲気	臨界防止機能の成立性について
2-1	取扱いモード ・緩衝体取外し 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋	不活性ガス	空気	
2-2	・たて起こし 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋	不活性ガス	空気	



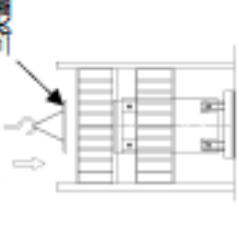
別紙3-3表 (2/3) TK-26型の取扱いフロー一例 (貯蔵施設における緩衝体取外し～貯蔵)

No.	取扱いモード	TK-26型 構成部品	TK-26型 内界囲気	TK-26型 外界囲気	臨界防止機能の成立性について
2-3	取扱いモード ・検査架台への移送 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋	不活性ガス	空気	
2-4	・貯蔵架台掃への設置、 下部トラニオンを固定 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋	不活性ガス	空気	

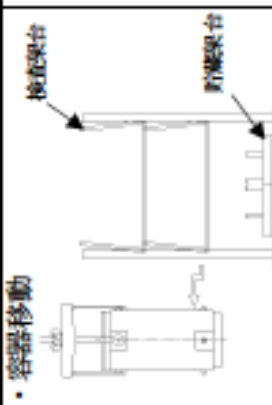
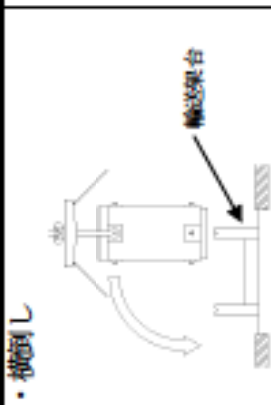
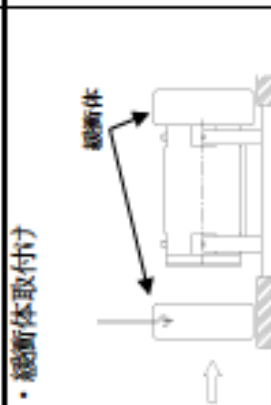
別紙3-3表 (3/3) TK-26型の取扱いフロー例 (貯蔵施設における緩衝体取外し～貯蔵)

No.	取扱いモード	TK-26型 構成部品	TK-26型 内界囲気	TK-26型 外界囲気	臨界防止機能の成立性について
2-5	<p>取扱いモード</p> <ul style="list-style-type: none"> ・三次蓋取り外し、圧力センサー取付け 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋</p>	不活性ガス	空気	
2-6	<ul style="list-style-type: none"> ・特定兼用キヤスクの移動 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋</p>	不活性ガス	空気	
2-7	<ul style="list-style-type: none"> ・所定の位置に特定兼用キヤスクを設置し、基礎ボルトによる固定 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋</p>	不活性ガス	空気	

別紙3-4表 (1/2) TK-26型の取扱いフロー一例 (貯蔵施設における貯蔵～緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	TK-26型 構成部品	TK-26型 内雰囲気	TK-26型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
3-1	<p>取扱いモード</p> <p>・基礎ボルトの取外し</p> 	<p>本体</p> <p>バスケット</p> <p>一次蓋</p> <p>二次蓋</p>	不活性ガス	空気	
3-2	<p>・容器移動</p>  <p>搬送台車</p>	<p>本体</p> <p>バスケット</p> <p>一次蓋</p> <p>二次蓋</p>	不活性ガス	空気	
3-3	<p>・圧力センサ取外し、 三次蓋取付け、 三次蓋密封確認</p>  <p>三次蓋</p>	<p>本体</p> <p>バスケット</p> <p>一次蓋</p> <p>二次蓋</p> <p>三次蓋</p>	不活性ガス	空気	

別紙3-4表 (2/2) TK-26型の取扱いフロー一例 (貯蔵施設における貯蔵～緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	TK-26型 構成部品	TK-26型 内雰囲気	TK-26型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
3-4	<p>取扱いモード</p> <p>・容器移動</p> 	<p>本体</p> <p>バスケット</p> <p>一次蓋</p> <p>二次蓋</p> <p>三次蓋</p>	不活性ガス	空気	
3-5	<p>・横倒し</p> 	<p>本体</p> <p>バスケット</p> <p>一次蓋</p> <p>二次蓋</p> <p>三次蓋</p>	不活性ガス	空気	
3-6	<p>・緩衝体取付け</p> 	<p>本体</p> <p>バスケット</p> <p>一次蓋</p> <p>二次蓋</p> <p>三次蓋</p> <p>緩衝体</p>	不活性ガス	空気	

排水、注水時のバスケット内の水の流路の設計について

1. 水位の変動が生じ得る事象

TK-26 型の取扱いにおいて、使用済燃料集合体を収納した状態でのバスケット内の水位の変動が想定されるのは、以下の場合である。

- ・使用済燃料集合体装荷後の排水時
- ・使用済燃料集合体取出し前の注水時

2. 排水、注水時の水の流路の設計

TK-26 型のバスケットは、バスケット格子材を菓子折り状に組み合わせることで使用済燃料集合体を収納するセルを構成する構造としている。TK-26 型のバスケット構造図を別紙 4-1 図に示す。

使用済燃料集合体が収納されるバスケット格子内部は、TK-26 型キャスク長手方向に連続した空間が存在するため、気層が局所的に留まることはない。バスケット格子材は TK-26 型長手方向に積層されるが、バスケット格子材内部の中空構造部（以下「水ギャップ部」という。）の水の出入りを行うために、バスケット格子の上端から下端まで通じた複数の通水孔が設けられており、水ギャップ部に気層が残留しにくい構造としている。また、バスケット格子材の両端は開口しており、この部分からも水の出入りが可能である。

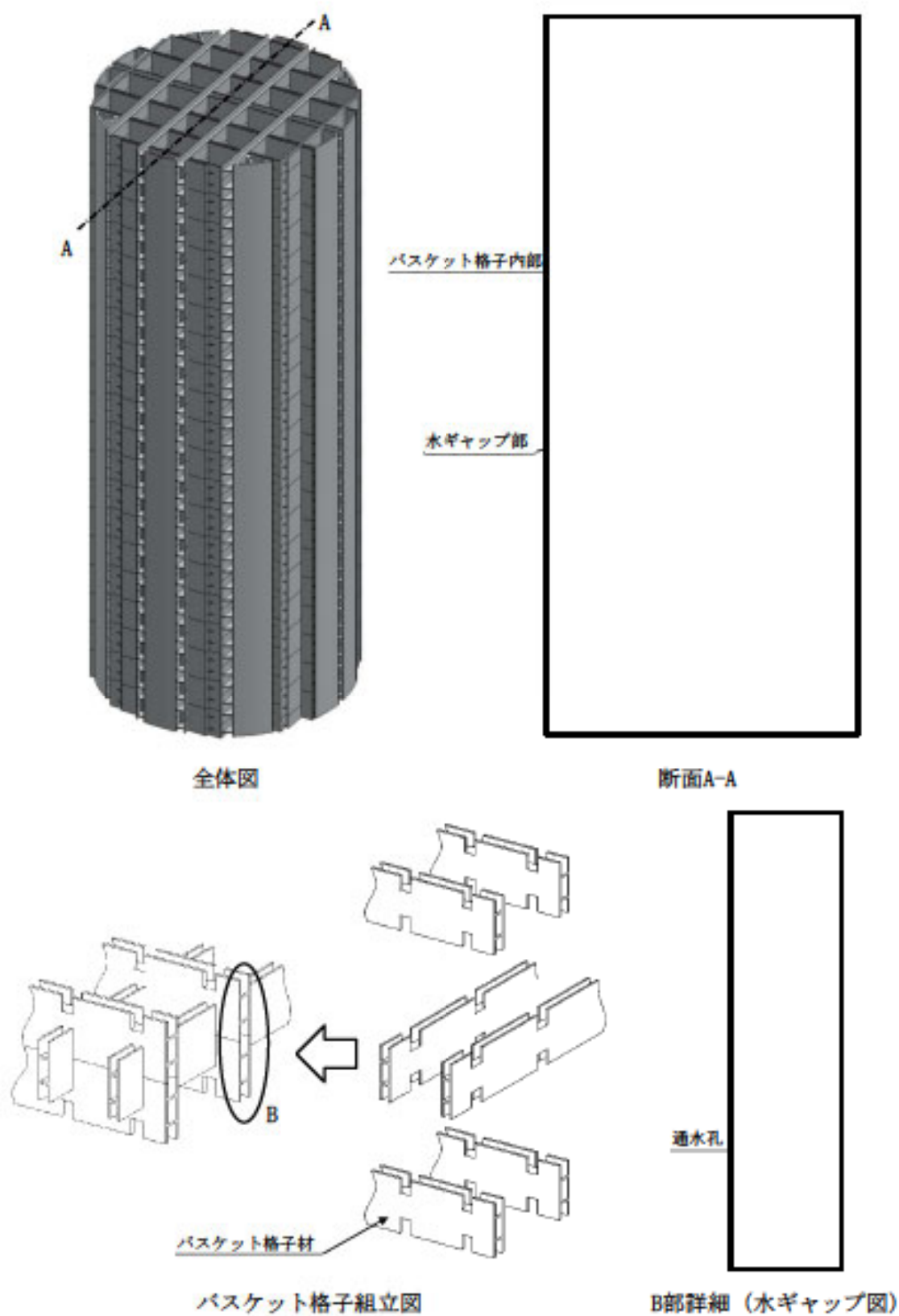
TK-26 型のバスケット内と外部との水の出入りはドレンパイプを介して行われる。ドレンパイプの上端は一次蓋のオリフィス部に取付けられて外部と通じており、下端はバスケット底面近傍で開口している。

3. 排水、注水作業時の取扱い手順と水位差

排水、注水時の流量を とした場合、使用済燃料集合体を収納した状態でのバスケット格子内部と水ギャップ部の水位差を評価した結果、水位差は 1mm 未満である。（補足参照）

4. 水位変動時の中性子実効増倍率の影響

排水、注水時に TK-26 型のバスケット内に生じる水位差は 1mm 未満であり、中性子実効増倍率に有意な影響は生じない。



別紙4-1 図 TK-26型のバスケット構造図

別紙4-2

(補足)

使用済燃料集合体を収納した状態でのバスケット全長を水で充填する場合における水ギャップ部とバスケット格子内部に生じる水位差について

1. 概要

使用済燃料集合体を収納した状態でのTK-26型への注水時におけるバスケット格子内部と水ギャップ部に生じる水位差の算出を行った。

2. 評価条件

注水時の流量を とする。

保守的に、バスケット格子内部の流れには損失が生じないものとする。

3. 評価

評価モデルを別紙 4-2 図に示す。バスケット格子内部と水ギャップ部に生じる水位差は、水ギャップ部の流路の変化において生じる損失ヘッド (次式⁽¹⁾⁽²⁾) により算出される。

$$h = \left(\lambda \frac{l}{d_h} + \sum_n \zeta_n \right) \frac{v^2}{2g}$$

ここで、

h : 損失ヘッド

λ : 管摩擦係数 (長方形管)

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \frac{1}{(1 + \varepsilon)^2} \left\{ 1 - \frac{192}{\text{Re}^5} \varepsilon \left(\tanh \frac{\pi}{2\varepsilon} + \frac{1}{3^5} \tanh \frac{\pi}{2\varepsilon} \right) \right\}$$

ここで、

Re : レイノルズ数

ε : 長方形管の縦横比

l : 管路の長さ

d_h : 水力直径

$$d_h = 4 \times \frac{(\text{流路断面積})}{(\text{流路断面の周長})}$$

ζ : 流入口、流出口及び通水孔部の損失係数 (別紙 4-1 表参照)

v : 管内平均流速

$$v = \frac{(\text{注水時の流量})}{(\text{排水体積}) / (\text{胴内全長})}$$

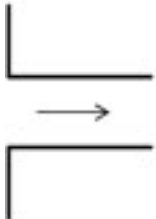
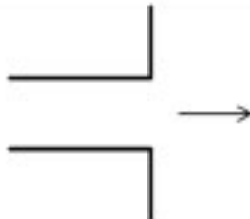

g : 重力加速度

損失ヘッド評価条件及び評価結果を別紙 4-2 表に示す。TK-26 型のバスケットを構成するバスケット格子材は幅 mm (流路幅 mm) と幅 mm (流路幅 mm) の 2 種類があるが、ここでは評価結果が厳しくなる幅 mm のバスケット格子材の結果を示す。バスケット格子内部と水ギャップ部に生じる水位差は、バスケット全長を水で充填した段階において 1mm 未満であり、無視しうるレベルである。

4. 参考文献

- (1) (一社)日本機械学会、機械工学便覧、(1987)
- (2) (一社)日本機械学会、技術資料 管路・ダクトの流体抵抗、管路・ダクトの流体抵抗出版分科会編、(1979)

別紙 4-1 表 流入口、流出口及び通水孔部の損失係数

管路形状		損失係数 (ζ)
流入口		0.5
流出口		1.0
通水孔部 (1箇所) ^(注1)		683.3 ^(注2)

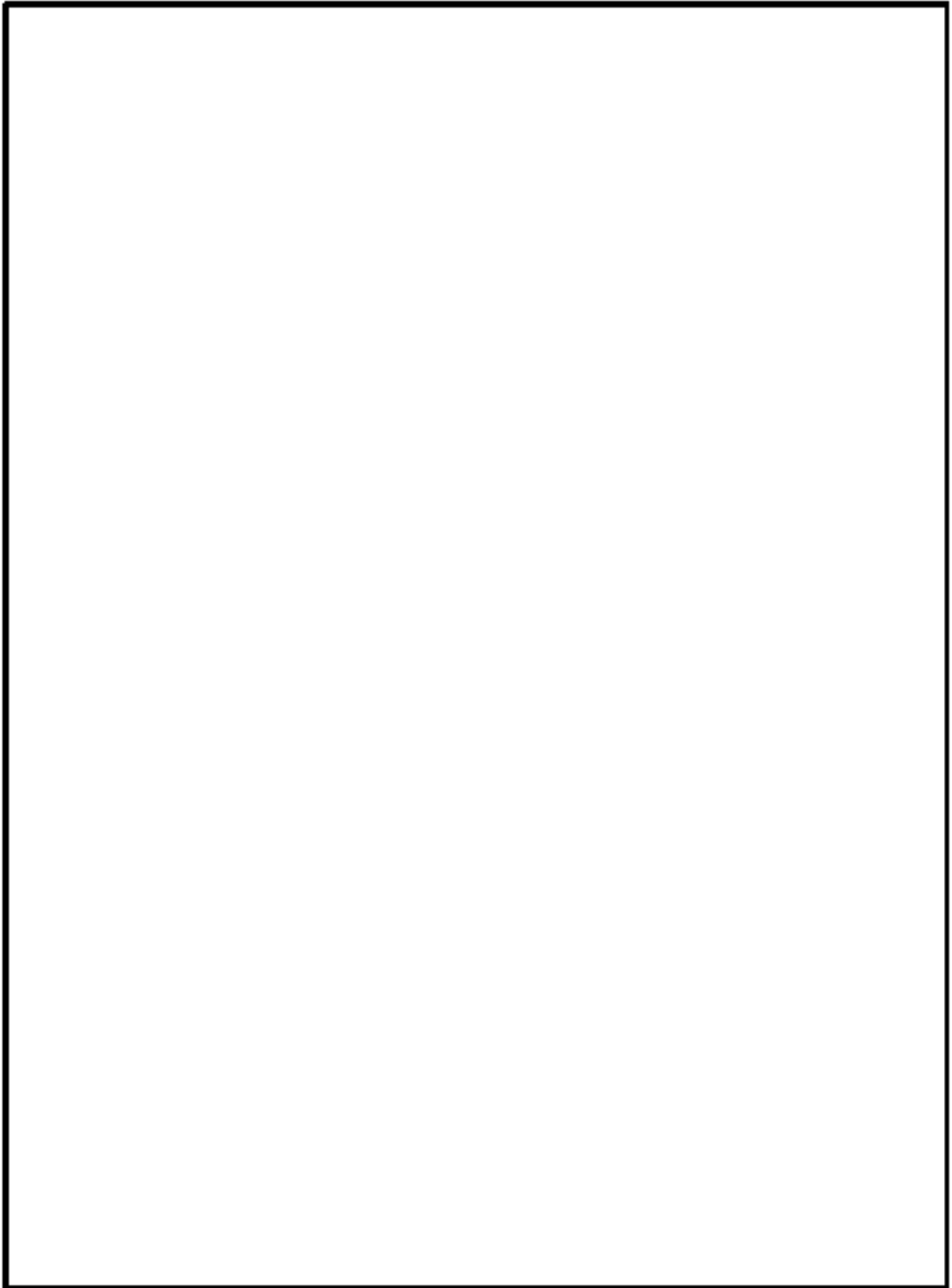
(注1) 管路全体に36箇所の通水孔が存在する。

(注2) 水ギャップ部の形状に依存し、損失ヘッドが最も大きくなる条件の数値。

別紙 4-2 表 損失ヘッド評価条件及び評価結果

項目	単位	数値
管路の長さ (l)	m	4.120
水力直径 (d_h)	m	[Redacted]
管内の平均流速 (v)	m/s	
重力加速度 (g)	m/s ²	
長方形管の縦横比 (ϵ)	-	
レイノルズ数 (Re)	-	
損失ヘッド (h)	m	

(注1) 管路の形状に依存し、損失ヘッドが最も大きくなる条件の数値。



別紙 4-2 図 評価モデル

別紙4-6

17×17 燃料及び 15×15 燃料混載時の影響評価について

TK-26 型は、17×17 燃料及び 15×15 燃料を混載可能な設計としている。本別紙ではこれらの燃料を混載した場合の相互作用による中性子実効増倍率への影響の有無について確認した。

1. 評価条件

本評価では、4 体の燃料集合体による 6 種類の配列について中性子実効増倍率を評価・比較することで、17×17 燃料及び 15×15 燃料の相互作用による反応度への影響の有無を確認した。

燃料集合体は燃料有効部のみをモデル化し、15×15 燃料の燃料有効部長さ は 17×17 燃料に合わせて とした。燃料集合体の周囲は、乾燥状態よりも反応度が高い冠水状態を想定して水 (1g/cm³) を設定し、20cm 以上の水反射条件とした。評価体系の境界条件は反射条件は設定せず単体でモデル化した。

燃料集合体間にモデル化するバスケット格子材の幅寸法は 2 種類あるが、反応度が高くなる幅の狭い でモデル化した。また、バスケット格子内の燃料集合体の配置についても反応度が高くなる中心偏向配置とした。

別紙 5-1 表に上記の評価条件をまとめて示す。また、別紙 5-1 図に評価モデルの縦断面図、別紙 5-2 図に評価した 4 体の燃料集合体の配列ケースをそれぞれ示す。

なお、その他の条件については、本文中に示す表 1～表 3 と同じである。

2. 評価結果

評価結果を別紙 5-2 表に示す。4 体全てを 17×17 燃料とした場合の Case 1-1 をベースに比較すると、中性子実効増倍率の差は 3 σ の範囲内であり、17×17 燃料及び 15×15 燃料の相互作用により中性子実効増倍率に与える有意な影響はないことが確認された。

別紙5-1表 評価条件

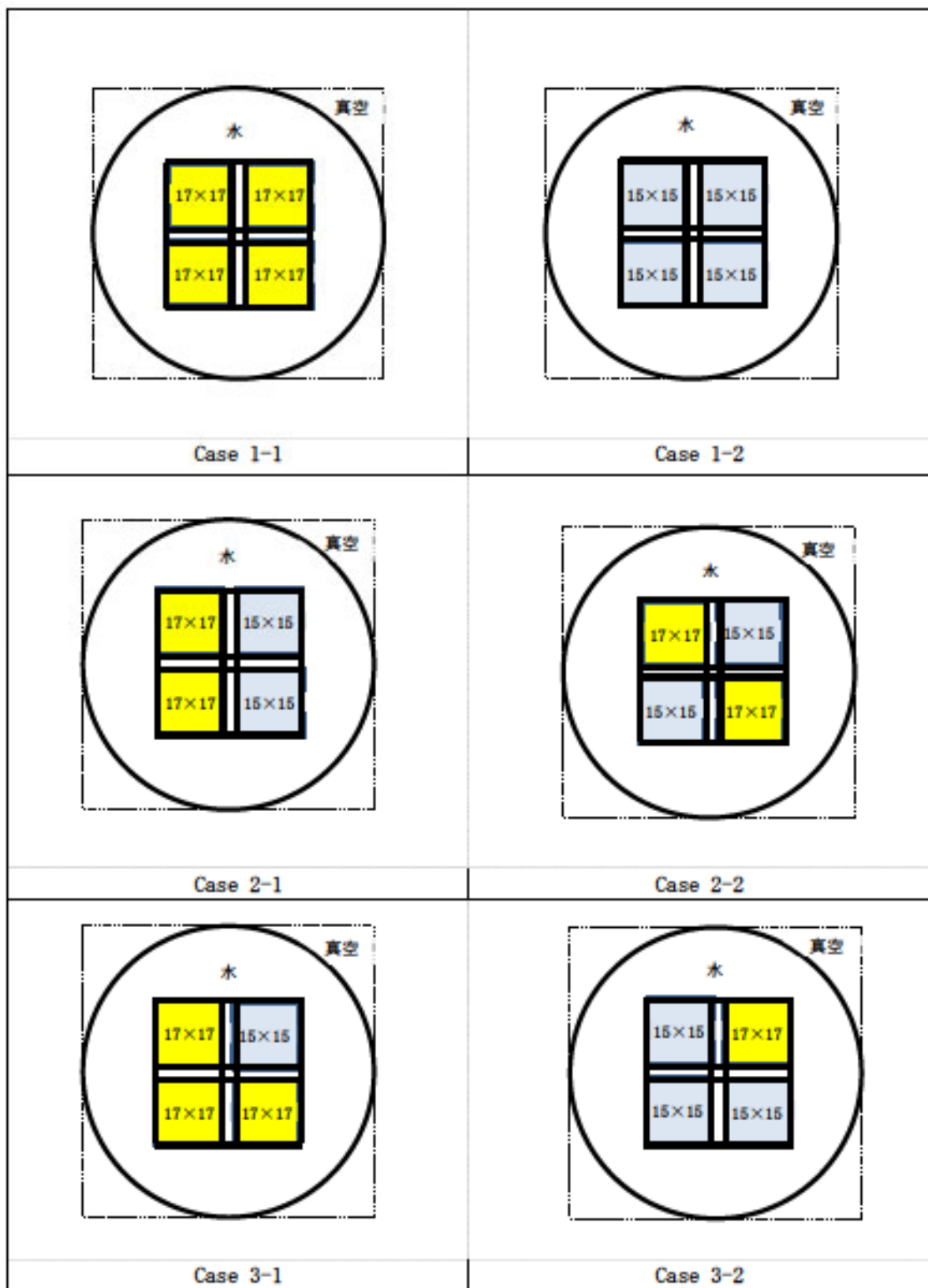
	評価条件	備考
燃料有効部長さ		15×15 燃料の燃料有効長は 17×17 燃料に合わせた
バスケット格子材の幅		
燃料集合体の配置	中心偏向	
燃料集合体の周囲	1g/cm ³ の水	周囲の水厚さは20cm以上



(単位：cm)

別紙5-1図 評価モデルの縦断面図

別紙5-2



別紙 5-2 図 燃料集合体の配列ケース

別紙5-2表 評価結果

燃料配列 ケース	解析結果			keff の比較	
	keff	σ	keff+3 σ	Case 1-1 との差	Case 1-1 との比
Case 1-1				-	-
Case 1-2				-0.00075	0.9992
Case 2-1				-0.00102	0.9989
Case 2-2				-0.00067	0.9993
Case 3-1				0.00062	1.0007
Case 3-2				-0.00073	0.9992