

資料 1-3

Doc No. MA035B-SC-E01 Rev.3

2022年3月17日

日立造船株式会社

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

目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	4
3. 参考文献	22

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 Hitz-P24 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

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、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、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。

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

Hitz-P24 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、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。

Hitz-P24 型のバスケットは、格子穴等を設けたアルミニウム合金製のプレートを軸方向に重ねた構造であり、個々の使用済燃料を Hitz-P24 型本体内部の所定の位置に収納する。バスケットは中央部と外周部に分割されており、バスケット外周部は固定金具を用いて胴内面に固定され、中心部の空間にバスケット中央部が挿入される。また、中性子吸収能力を有するほう素を偏在することなく添加した中性子吸収材及び冠水時に水で満たされるスペース（以下「水ギャップ」という。）を適切な位置に併せて配置することで、臨界を防止する設計とする（図 1 参照）。なお、バスケットは [] プレートから構成されており、それぞれのプレートは、中性子を効率的に減速させることで中性子吸収材による中性子の吸収を促進させる役割 [] と、水ギャップ内における中性子吸収材の位置を制限する役割 [] を持つ。

バスケットプレートは、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、Hitz-P24 型の貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及び Hitz-P24 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（MA035B-SC-F01）」に示すとおり、バスケットプレートは、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。

2. (2) 審査ガイドへの適合性〔確認内容〕1) から 4) の説明に示すとおり、Hitz-P24 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、Hitz-P24 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-V.a で行う。収納する使用済燃料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）。また、バーナブルポイズン集合体は考慮しない。

また、Hitz-P24 型相互の中性子干渉を考慮して、Hitz-P24 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、Hitz-P24 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 Hitz-P24 型に配置するとともに、バスケットプレート及び中性子吸収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（ 3σ ）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。

Hitz-P24 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（MA035B-SC-F01）」に示すとおり、Hitz-P24 型は、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確保する設計である。

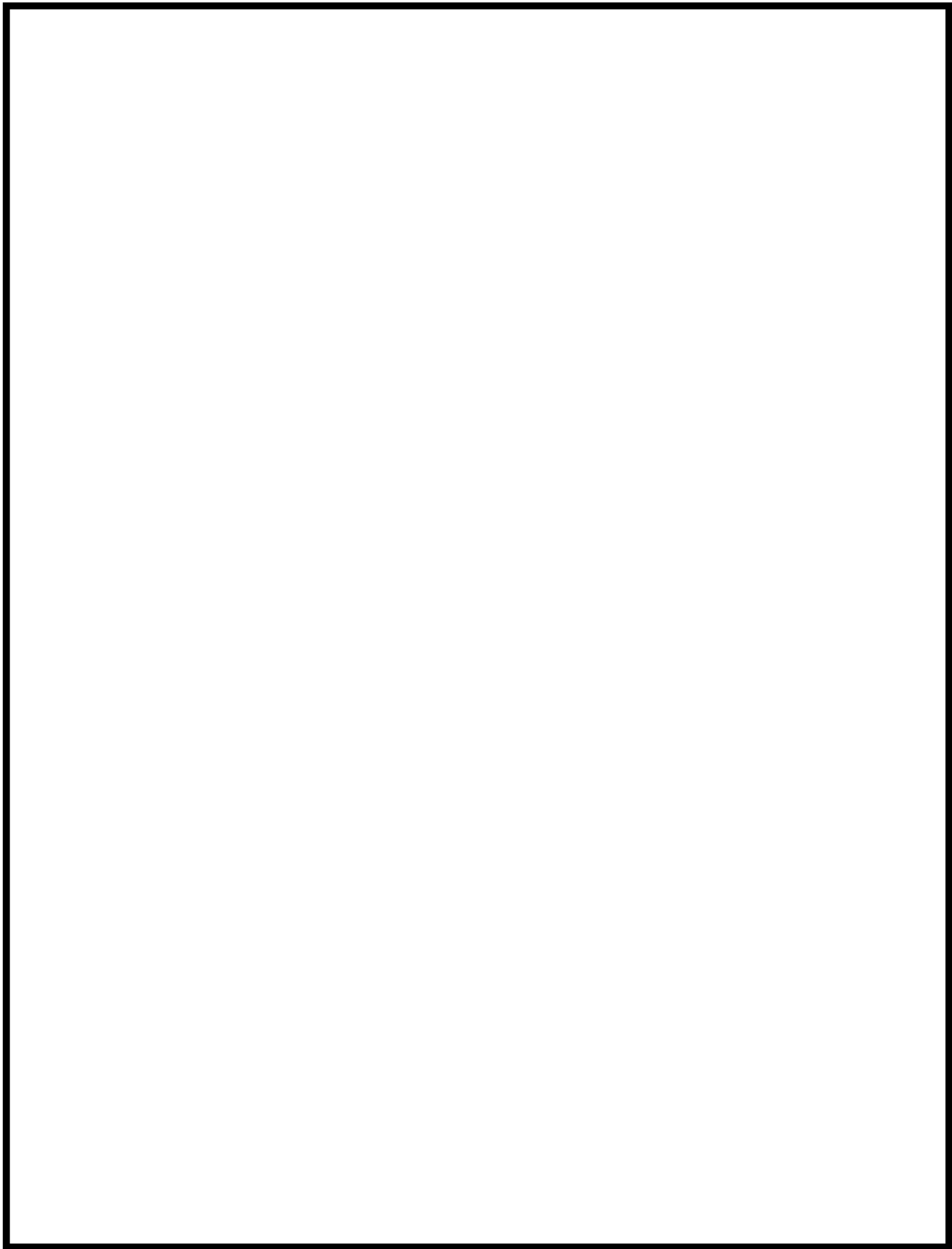


図 1 バスケット構造図

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、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、Hitz-P24 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。

Hitz-P24 型の臨界解析フローを図 2 に示す。臨界解析では、Hitz-P24 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 及び図 4 参照）、解析コードとして SCALE コードシステム（別紙 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、Hitz-P24 型に使用済燃料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 1.0g/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の濃縮度の上限値を用いるとともに、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
 - － Hitz-P24 型に収納する使用済燃料のウラン濃縮度は照射により減損しているが、燃焼度 0GWd/t の減損していない新燃料とし、ウラン濃縮度を保守的に $4.2\text{wt}\%$ とする。
 - － 収納する使用済燃料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が存在を無視し、全てのウラン燃料とする。

ー使用済燃料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Hitz-P24型が無限に配列した体系（完全反射）とする。これにより、Hitz-P24型の配置制限は必要なく、Hitz-P24型相互の中性子干渉も包絡する評価となる。なお、Hitz-P24型は床等に固定するため、滑動等しない設計としており、Hitz-P24型の配置の変化はない。

ーバスケット格子内で燃料が偏ることにより中性子実効増倍率が変化するため、バスケット内の燃料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、乾燥状態及び冠水状態ともに中心偏向配置とする。

ーバスケットプレート及び中性子吸収材は、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。

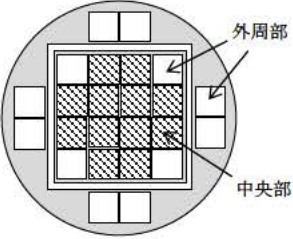
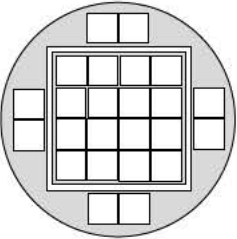
ー中性子吸収材中のほう素の均質性は製造管理により担保し、ほう素添加量は仕様上の下限值とする。

ー中性子遮蔽材は無視し、真空に置換する。

ーバスケットプレート及び中性子吸収材は、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、バスケットプレートは、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料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 臨界解析における収納物条件の概要

項目		キャスク収納位置制限		解析条件		
		中央部	外周部	中央部	外周部	
収納物仕様	燃料集合体 1体の仕様	燃料タイプ	17×17型 (A型・B型)		17×17型 (A型)	
		初期濃縮度 (wt%)	[Redacted]		4.2	
		ウラン重量 (kg)	[Redacted]			
		最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	0	
		冷却期間 (年)	A型 : ≥15 B型 : ≥17		—	
	バーナブルポイズン 集合体1体の仕様	最高燃焼度 (GWd/t)	[Redacted]			
		冷却期間 (年)	[Redacted]			
Hitz-P24型 1基あたりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		0		
配置						

(注) 組み合わせる使用済燃料集合体の冷却期間以上とする。

[Redacted] 内は商業機密のため、非公開とします。

表 2 臨界解析で使用する燃料集合体の仕様

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

(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ため、この扱いは保守的である。

(注2) B型燃料のペレット直径は [Redacted] cm、被覆管肉厚は [Redacted] 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。なお、一部の B 型燃料にはペレット直径及び被覆管肉厚の仕様が A 型燃料と同じものがある。

(注3) (燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列数) を臨界解析上の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、Hitz-P24 型及び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"> ・ 共鳴計算 : BONAMI、CENTRM、PMC ・ 臨界計算 : KENO-V.a (中性子ヒストリー数) ・ 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
	濃縮度	4.2wt%
	収納体数	24 体
	燃料配置 (注1)	乾燥状態 : 中心偏向 (図 3 (2/2)) 冠水状態 : 中心偏向 (図 4 (2/2))
	中性子吸収材配置 (注1)	厚さ方向の中性子吸収材間距離を最小、長さ方向の中性子吸収材間距離を最大とした配置 (図 5 参照)。
	バスケット配置	バスケット中央部 : Hitz-P24 型中心
	寸法条件 (注1)	バスケット外寸、水ギャップ幅、バスケット格子内のり、中性子吸収材の寸法及び胴内径は公差を考慮。
	Hitz-P24 型内雰囲気 (注1)	乾燥状態 : 真空 冠水状態 : 水密度 1.0g/cm ³ (Hitz-P24 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)
	Hitz-P24 型外雰囲気 (注1)	真空 (解析モデルの境界条件を完全反射とし、Hitz-P24 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 Hitz-P24 型へ戻る)
	Hitz-P24 型配列	無限配列 (Hitz-P24 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
解 析 条 件	使用済燃料 集合体構造物	乾燥状態：真空中に置換 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。 <ul style="list-style-type: none"> ・ほう素添加アルミニウム合金：¹⁰B 面密度 [] g/cm² ・ほう素添加ステンレス鋼：ほう素添加量 [] 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 ⁻⁵ 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中に置換。
	バスケット 固定金具	本体側の固定金具は、すき間の部分も含めて胴の材質と同じ低合金鋼に置換。バスケット側の固定金具は、すき間の部分も含めてバスケットプレートの材質と同じアルミニウム合金に置換。
	蓋	一次蓋及び二次蓋を考慮。

表 4 Hitz-P24 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	
バスケット プレート外寸	中央部	公称	公称	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子実効増倍率に対する感度が低いため、公称寸法としている。 ・中性子実効増倍率に対する感度が低いため、公称寸法としている。
	外周部	公称	公称	
バスケット 水ギャップ	幅	最大	最小	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥状態では、バスケットプレート材と反応する中性子を減らすように最大としている。 ・冠水状態では、中性子吸収材で反応する熱中性子が減少するように最小としている。
	長さ	最大	最大	
中性子吸収材 (ほう素添加アルミニウム合金、ほう素添加ステンレス鋼)	厚さ	最小	最小	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子吸収材の存在量が少ない方が中性子吸収効果を小さくできるため、厚さ及び長さを最小としている。
	長さ	最小	最小	
バスケット格子内のり		最大	最大	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥状態では、バスケットプレート材と反応する中性子を減らすように最大としている。 ・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。
バスケット格子位置	中央部	外周偏向	外周偏向	<ul style="list-style-type: none"> ・バスケット中央部と外周部のバスケット格子位置が近接するように格子位置の公差を考慮している。
	外周部	中心偏向	中心偏向	
胴内径		最小	最小	<ul style="list-style-type: none"> ・バスケット外周部が中央部に近接するように、胴内径を最小寸法とした。

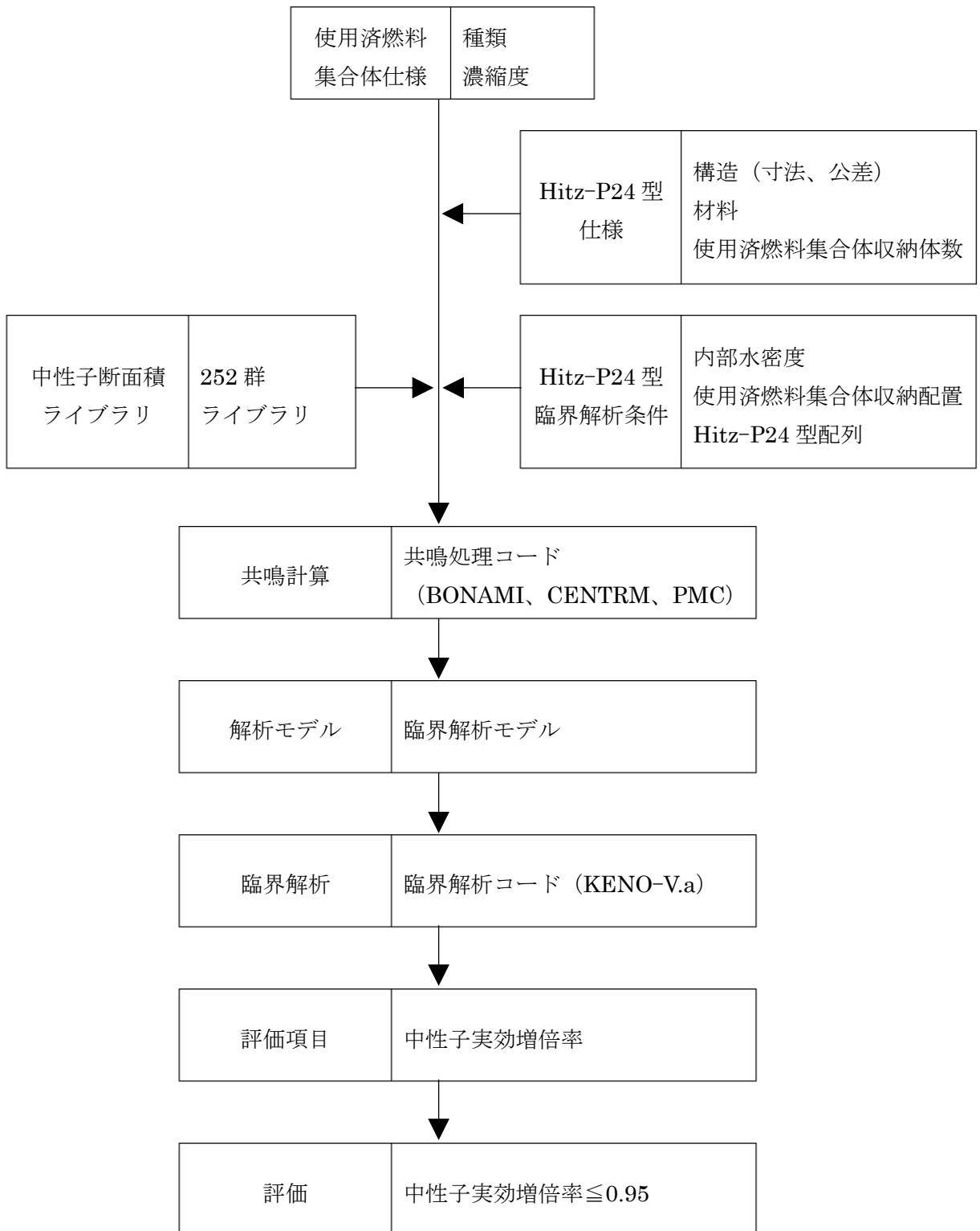


図 2 Hitz-P24 型の臨界解析フロー図

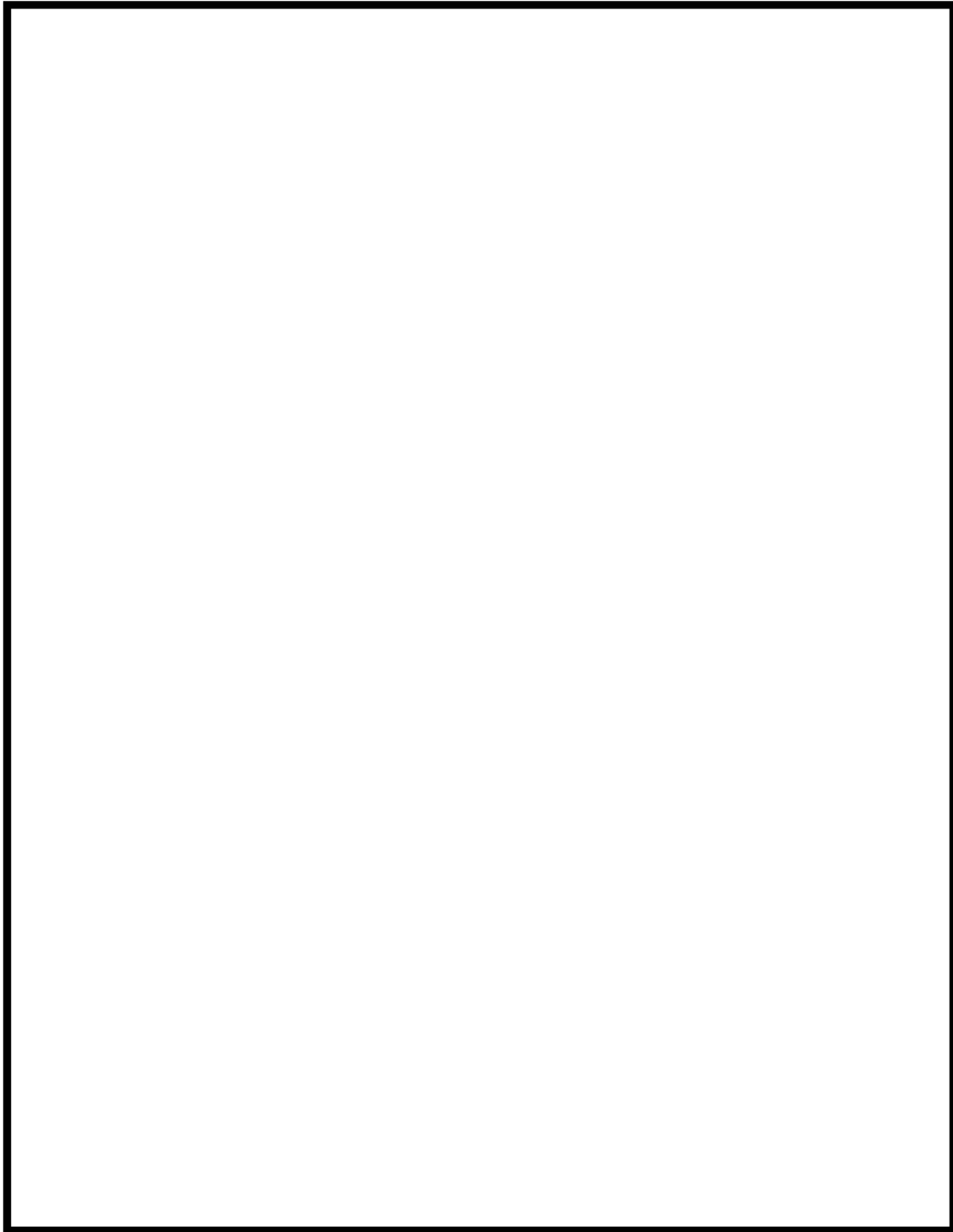


図 3 (1/2) 臨界解析モデル (縦断面図) (乾燥状態)

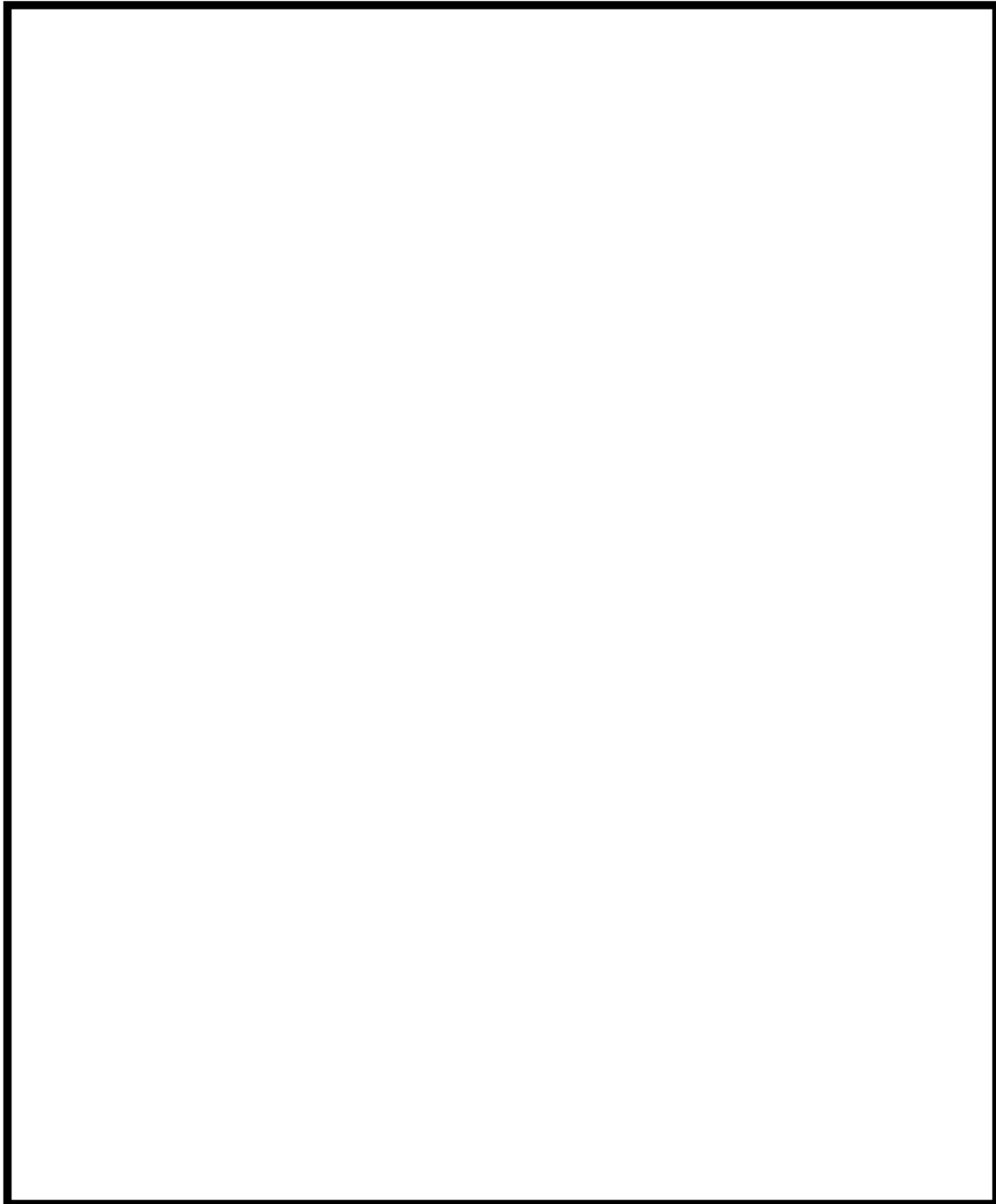


図 3 (2/2) 臨界解析モデル (横断面図) (乾燥状態)

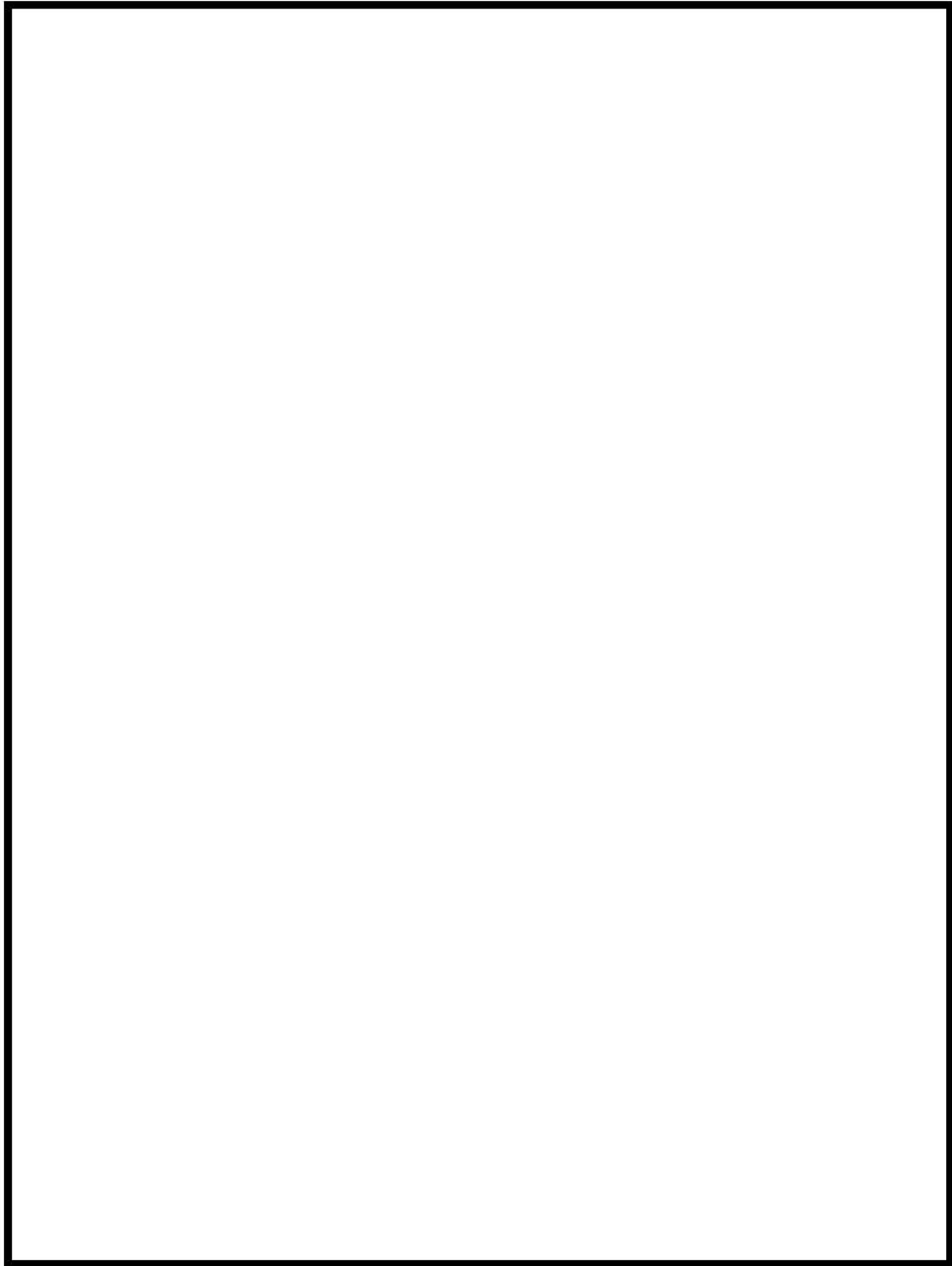


図 4 (1/2) 臨界解析モデル (縦断面図) (冠水状態)

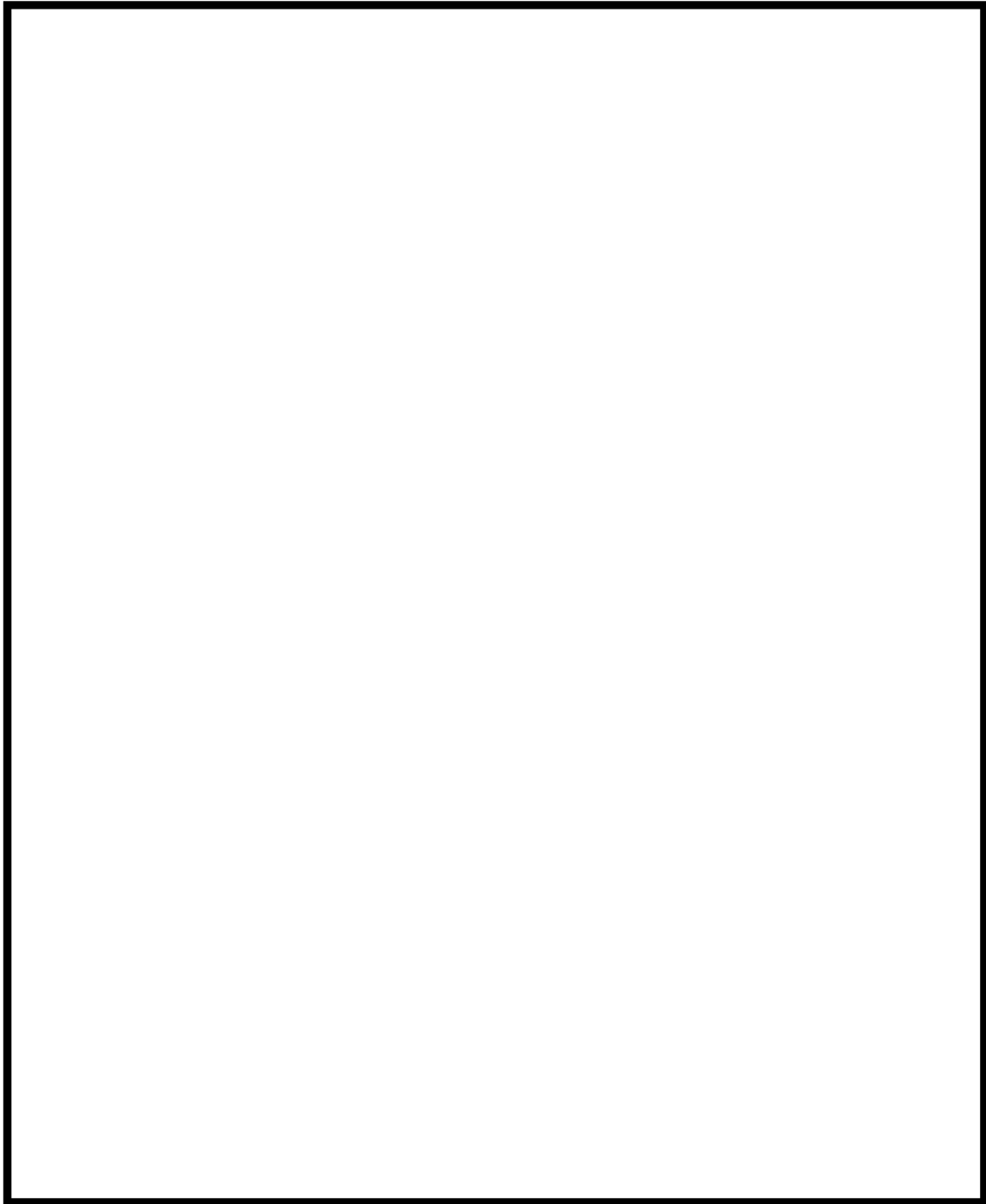


図 4 (2/2) 臨界解析モデル (横断面図) (冠水状態)

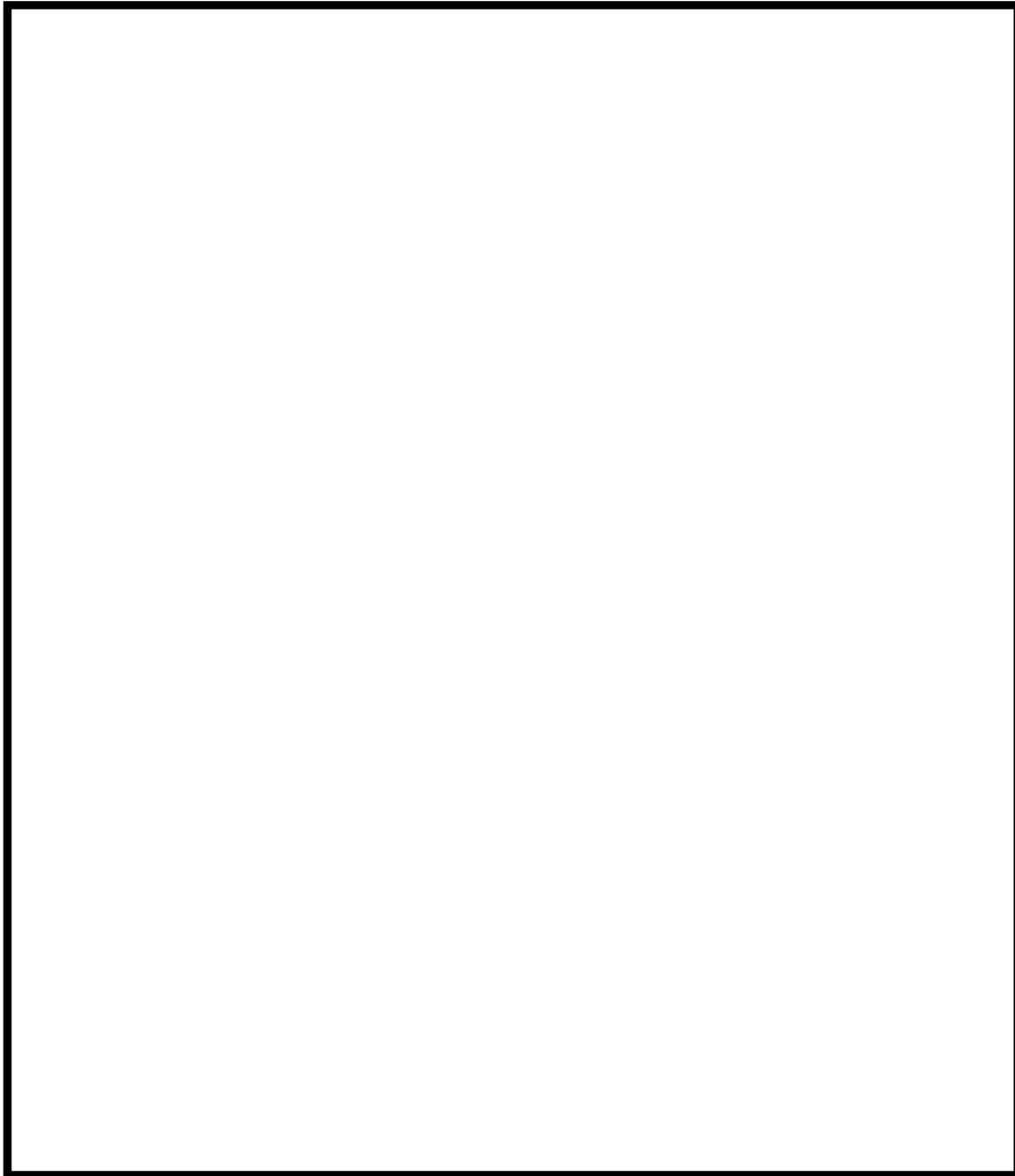


図5 水ギャップ（スリット）における中性子吸収材配置条件

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。

表 5 評価結果

項目		評価結果 (注 1)	評価基準 (注 2)	備考
中性子 実効増倍率	冠水 状態	0.908 (3σ : 0.00126)	0.95 以下	評価に用いた KENO-V.a 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 (3σ) を加えている。
	乾燥 状態	0.356 (3σ : 0.00039)		

(注1) 評価結果の 3σ 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。

Hitz-P24 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 (MA035B-SC-A01)」、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 (MA035B-SC-A02)」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 (MA035B-SC-A03)」で説明) が、特定兼用キャスクであるため、輸送時のバスケットの塑性変形に伴うバスケット格子の変形量を保守的に設定し、解析モデルに考慮して評価したうえで、未臨界が維持されることを確認している。

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)

臨界解析における条件設定根拠について

臨界解析条件のうち、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
確認する。

- ・バスケット格子内の燃料配置
- ・水ギャップ内の中性子吸収材配置
- ・バスケット中央部の配置
- ・寸法条件（水ギャップ幅、バスケット格子内のり）
- ・Hitz-P24 型の内/外雰囲気

また、Hitz-P24 型の取扱時を想定し、以下の条件において中性子実効増倍率に対する感
度を確認する。

- ・燃料収納から燃料取出しまでの流れを考慮した水位変動

感度解析結果を別紙 1-1 表及び別紙 1-2 表に示す。感度解析結果より、今回の臨界解析
条件は妥当である。なお、感度解析結果を踏まえた Hitz-P24 型の取扱時の臨界防止機能の
成立性の確認結果を別紙 3 に示す。

別紙 1-1 表 臨界解析条件の感度解析結果

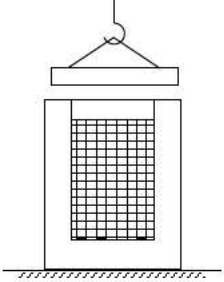
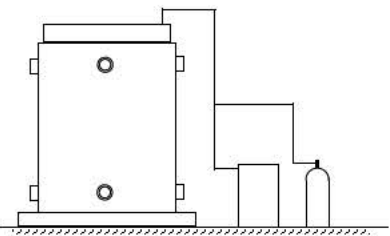
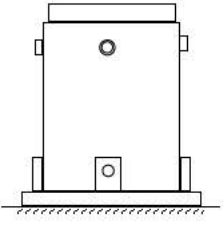
項目		乾燥状態			冠水状態		
		感度解析条件 (注1)		感度解析結果 (注2)	感度解析条件 (注1)		感度解析結果 (注2)
燃料配置 (別紙 1-1 図)		中心偏向		—	中心偏向		—
		格子中央配置		-0.00089	格子中央配置		-0.00070
		外周偏向		-0.00171	外周偏向		-0.00319
中性子吸収材配置 (別紙 1-2 図)	厚さ 方向	中性子吸収材 間距離	最小	—	中性子吸収材 間距離	最小	—
			最大	-0.00024		最大	-0.01257
	長さ 方向	中性子吸収材 間距離	最大	—	中性子吸収材 間距離	最大	—
			最小	-0.00054		最小	-0.00384
バスケット中央部配置 (別紙 1-3 図)		Hitz-P24 型中心		—	Hitz-P24 型中心		—
		45° 方向偏向		-0.00011	45° 方向偏向		-0.00077
		90° 方向偏向		-0.00016	90° 方向偏向		-0.00112
寸法 条件	水ギャップ幅	最大：公称 <input type="text"/> cm		—	最小：公称 <input type="text"/> cm		—
		最小：公称 <input type="text"/> cm		-0.00067	最大：公称 <input type="text"/> cm		-0.00619
	バスケット 格子内のり	最大： <input type="text"/> cm		—	最大： <input type="text"/> cm		—
		最小： <input type="text"/> cm		-0.00075	最小： <input type="text"/> cm		-0.00412
Hitz-P24 型の内雰囲気		—		—	水密度 0.0~1.0g/cm ³		別紙 1-4 図
Hitz-P24 型の外雰囲気		水密度 0.0~1.0g/cm ³		別紙 1-6 図	水密度 0.0~1.0g/cm ³		別紙 1-5 図

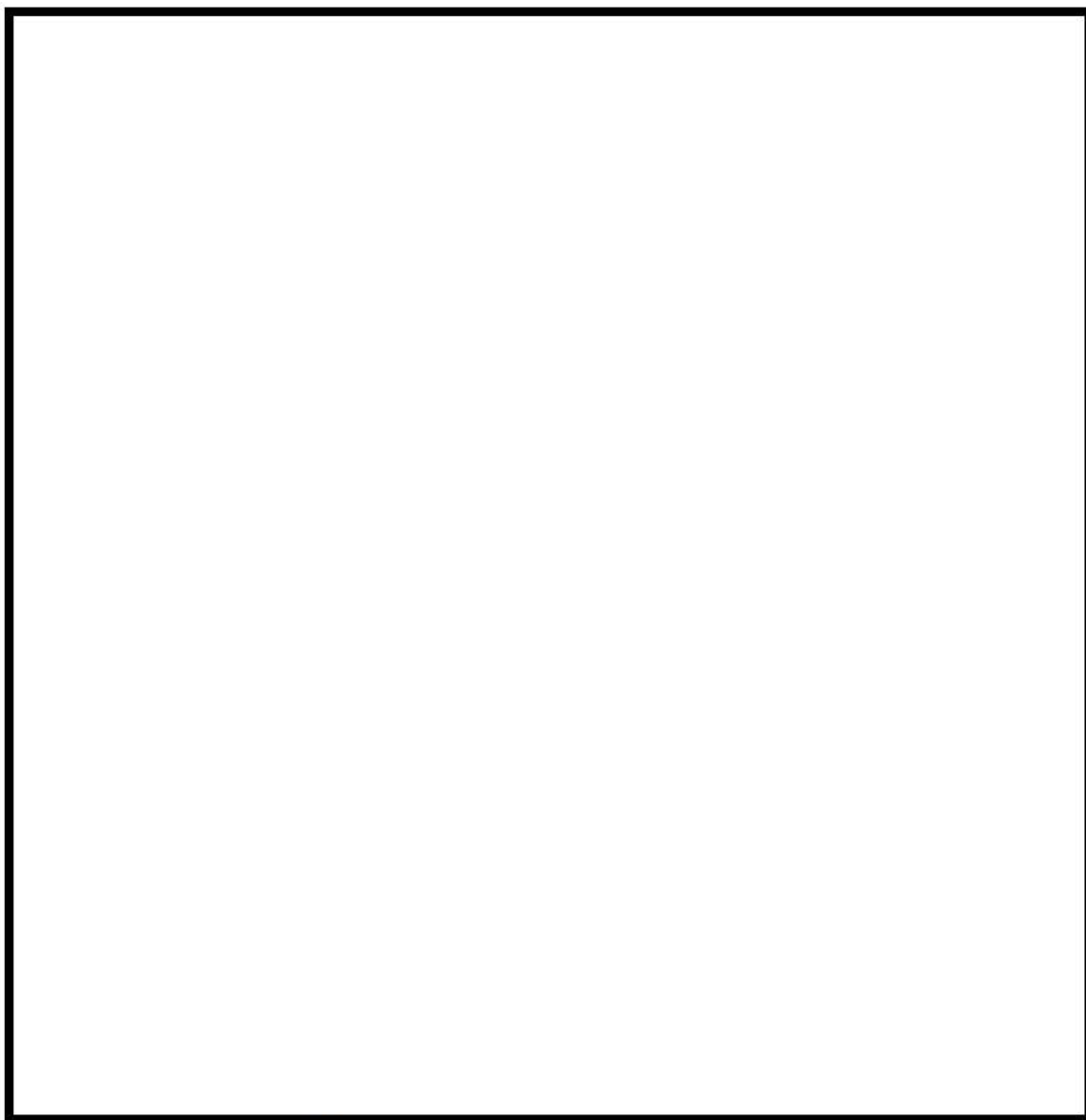
(注1) 表 3 及び表 4 に示す申請書記載値の解析条件から変更して感度解析を実施した条件のみを示す。

(注2) 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。

内は商業機密のため、非公開とします。

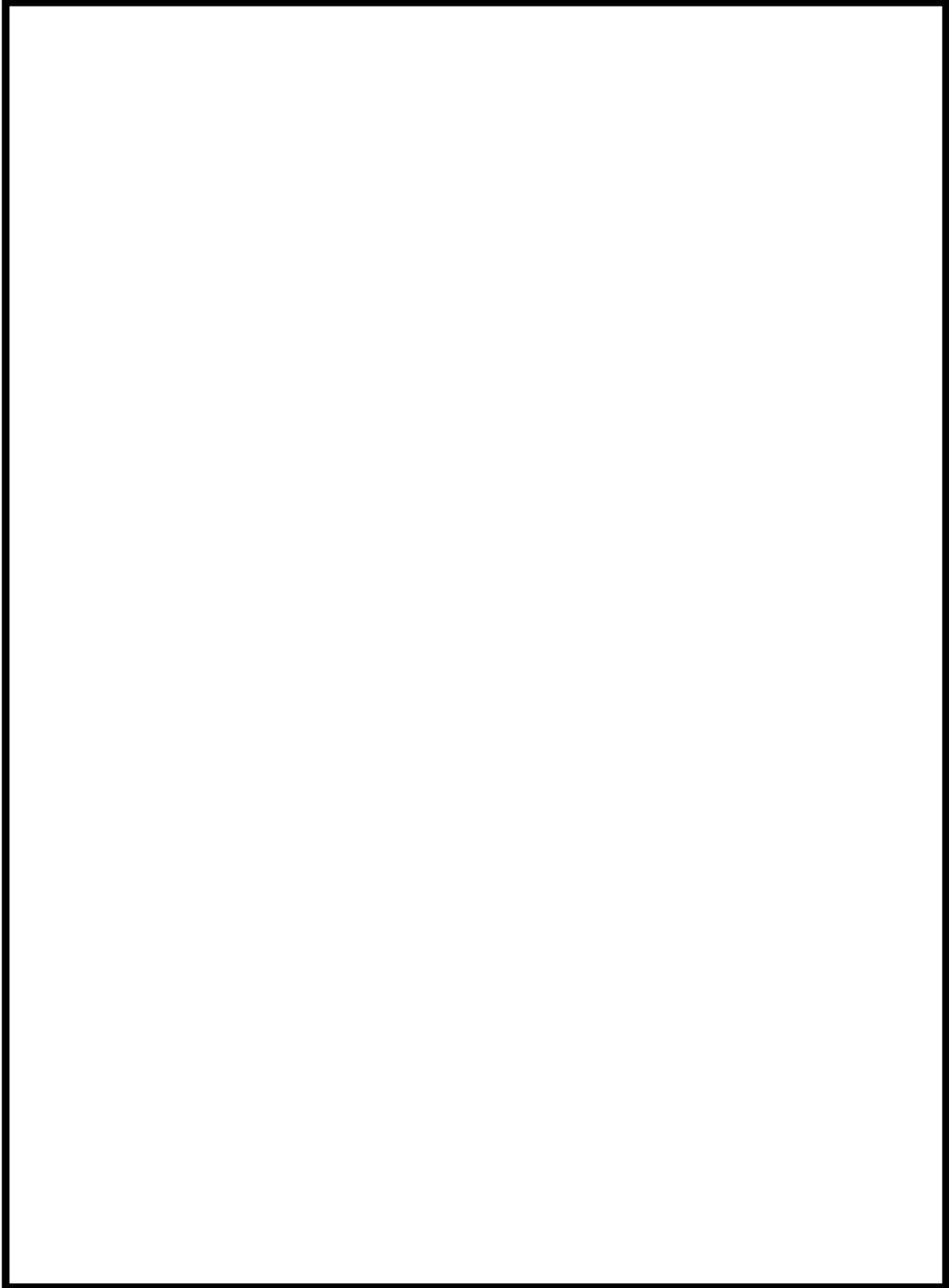
別紙 1-2 表 水位変動による中性子実効増倍率の感度評価結果

No.	取扱手順	
1	燃料装荷・一次蓋取付 	
2	排水 真空乾燥 不活性ガス充填 	
3	貯蔵 	

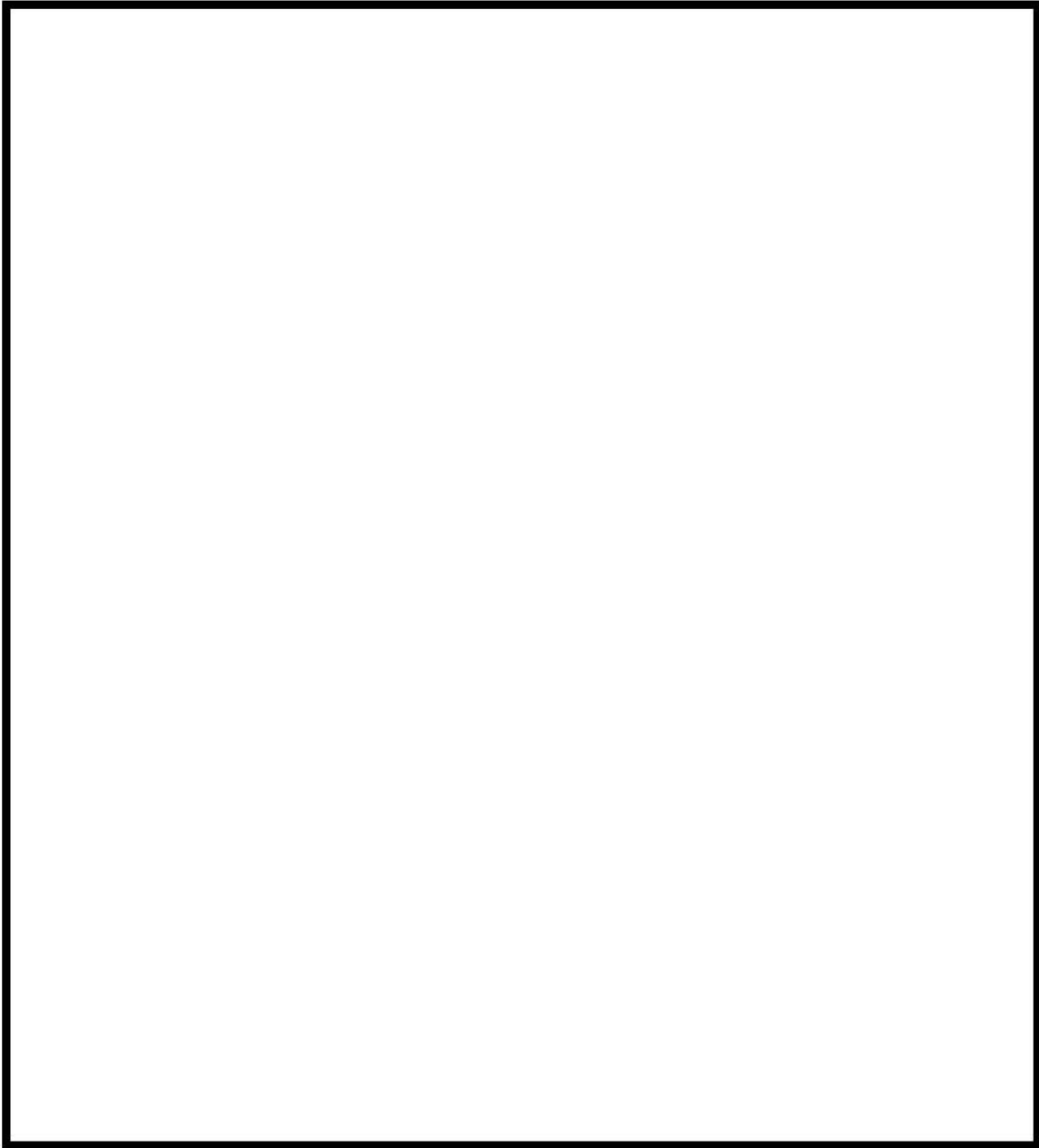


(注) 概略図であり、実寸法とは一致しない。

別紙 1-1 図 バスケット格子内燃料配置の感度解析条件

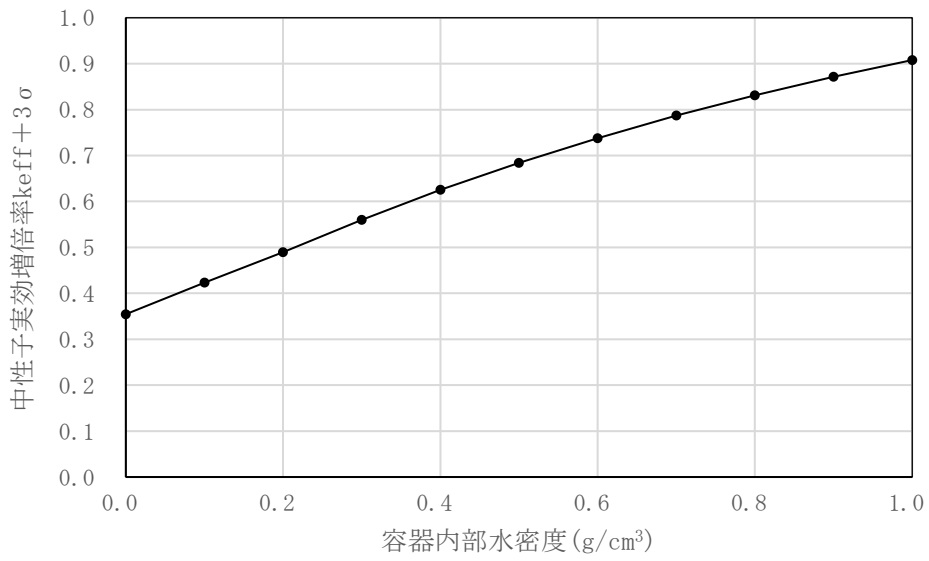


別紙 1-2 図 中性子吸収材配置の感度解析条件

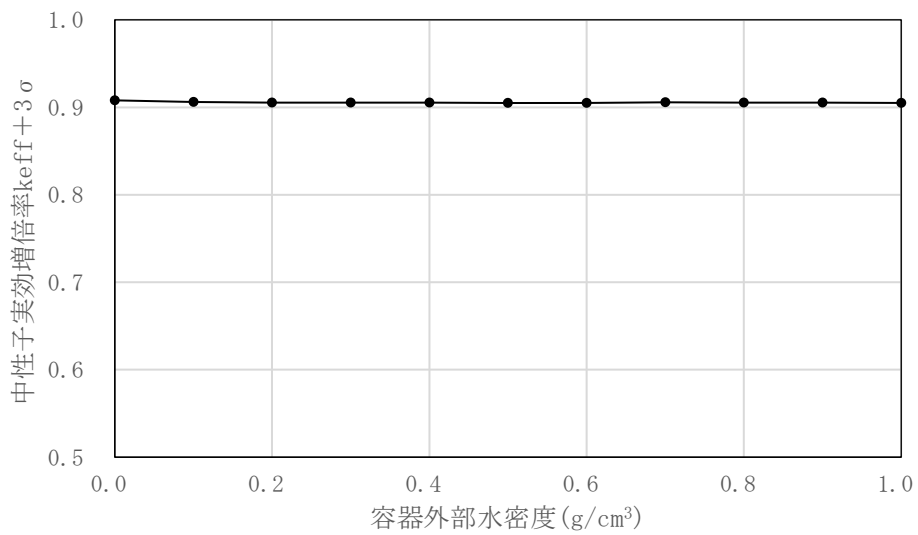


(注) 概略図であり、実寸法とは一致しない。

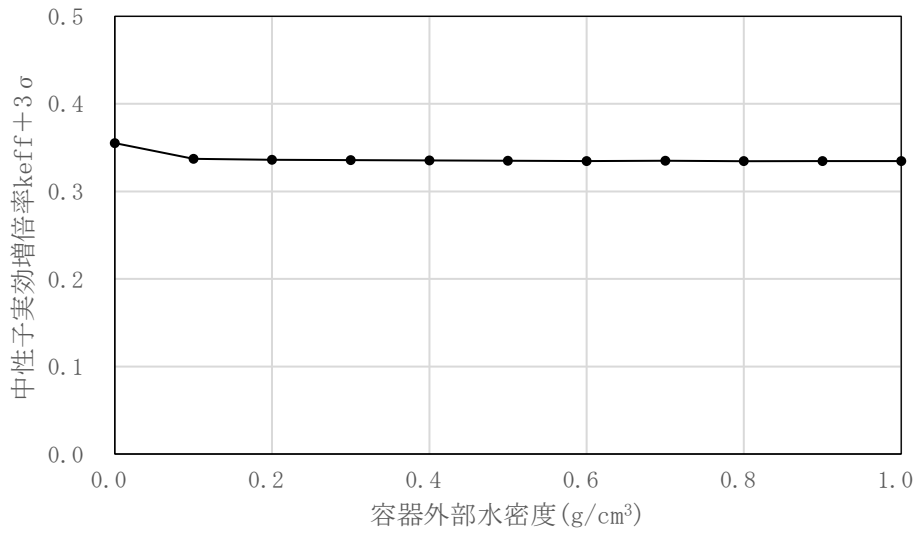
別紙 1-3 図 バスケット中央部配置の感度解析条件



別紙 1-4 図 Hitz-P24 型の内雰囲気評価結果



別紙 1-5 図 Hitz-P24 型の外雰囲気評価結果 (冠水状態)



別紙 1-6 図 Hitz-P24 型の外雰囲気評価結果 (乾燥状態)

臨界解析に使用する解析コードについて

Hitz-P24 型の臨界防止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-V.a 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. 燃料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. 三次元輸送計算コードであり、複雑な幾何形状における臨界計算が可能である。

(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。

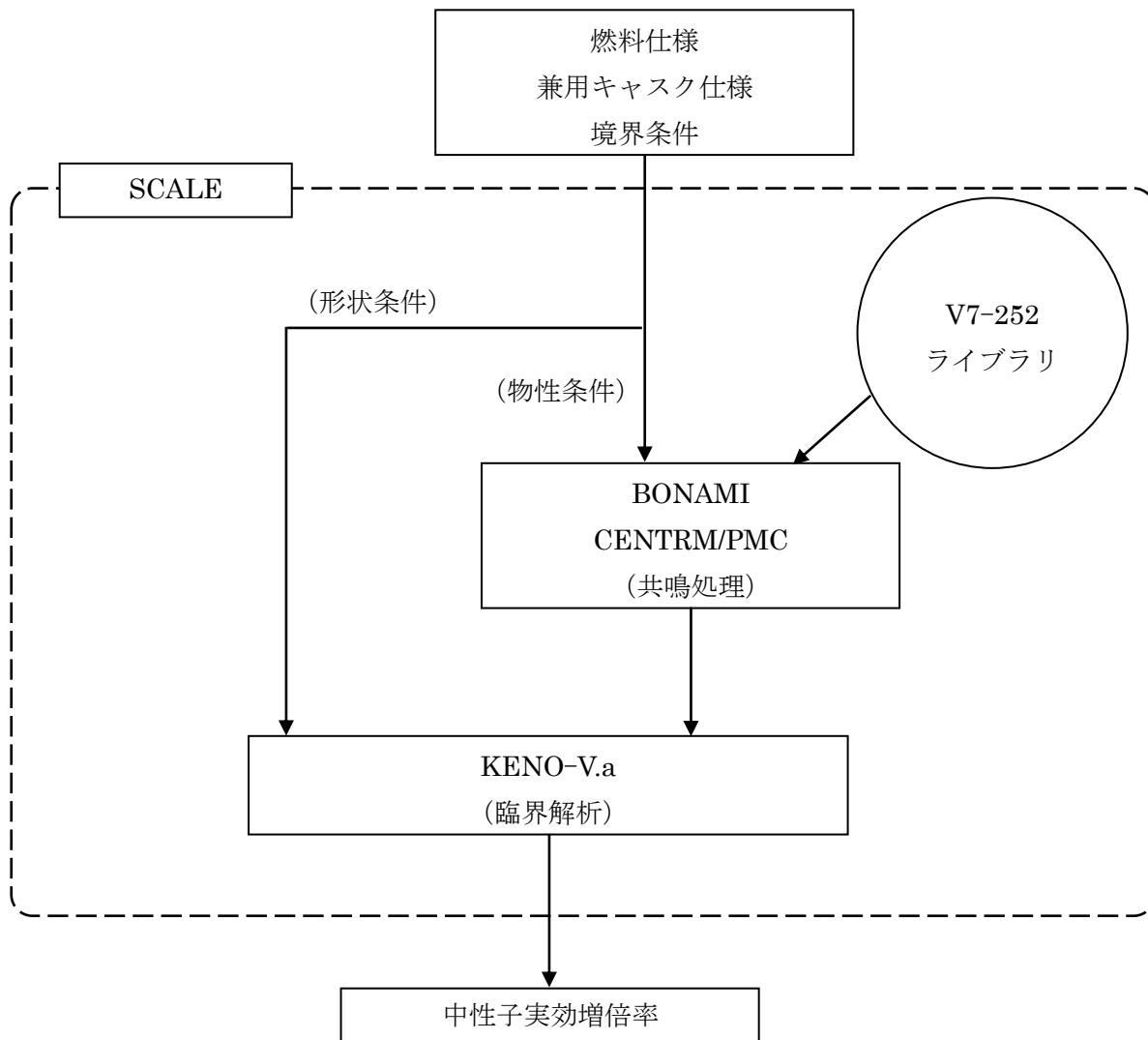
文献⁽²⁾に示す実験について、収納物である使用済燃料の仕様並びに下記の①～⑦の条件を考慮し、ベンチマーク試験解析を実施する臨界実験を選定した。別紙 2-1 表に示すとおりベンチマーク試験解析は実験をよく再現しており、妥当な結果が得られている。

- 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 ベンチマーク解析結果

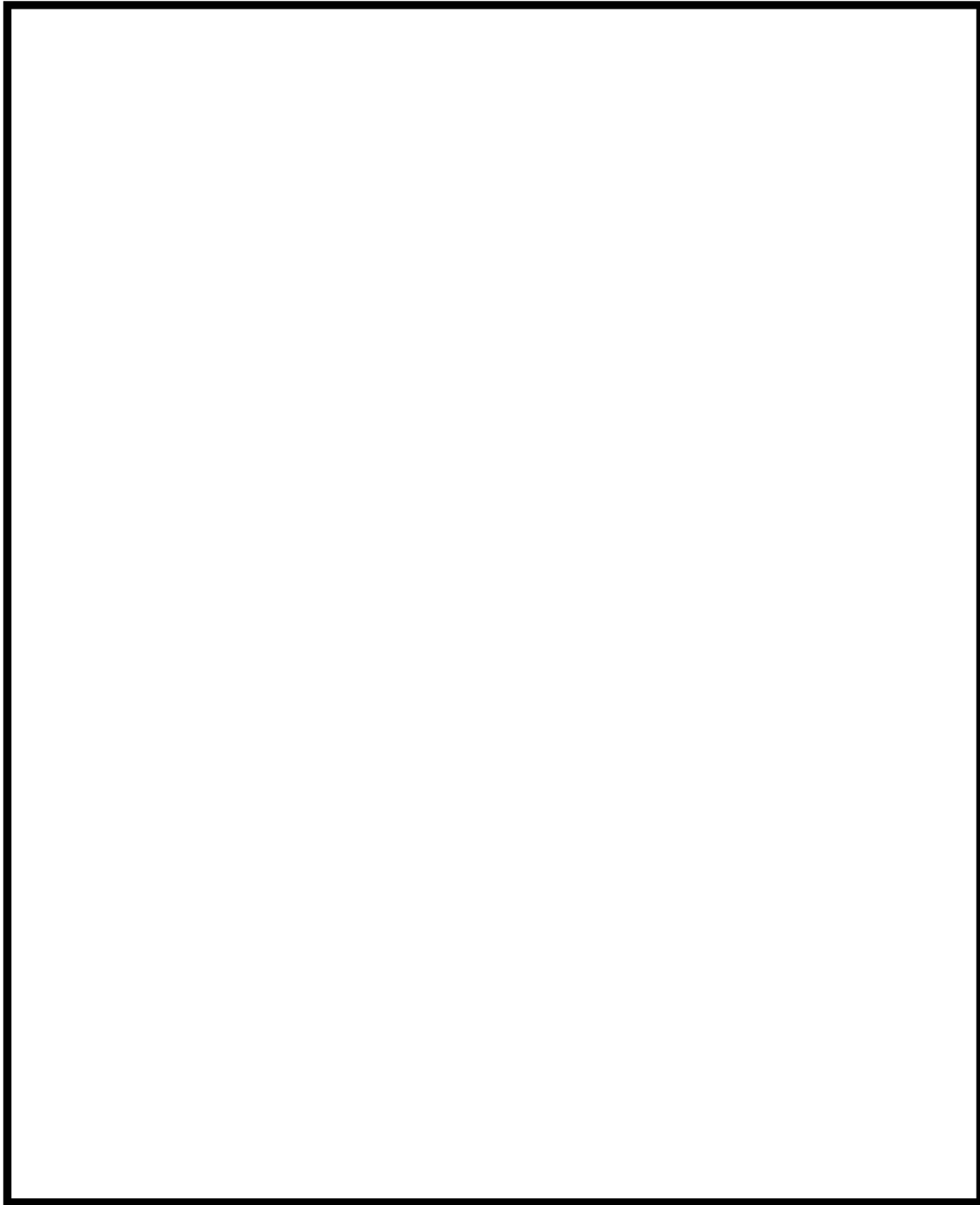
解析ケース	中性子 実効増倍率	統計誤差 σ
	1.00229	0.00048
	1.00144	0.00045
	1.00212	0.00043
	1.00022	0.00044
	1.00161	0.00048
	1.00177	0.00044
	1.00167	0.00041
	1.00062	0.00042
	0.99970	0.00037
	0.99739	0.00041
	0.99635	0.00044
	0.99860	0.00042
	0.99936	0.00046
	0.99876	0.00037
	0.99994	0.00040
	0.99742	0.00041
	1.00430	0.00043
	1.00024	0.00038
	1.00440	0.00039



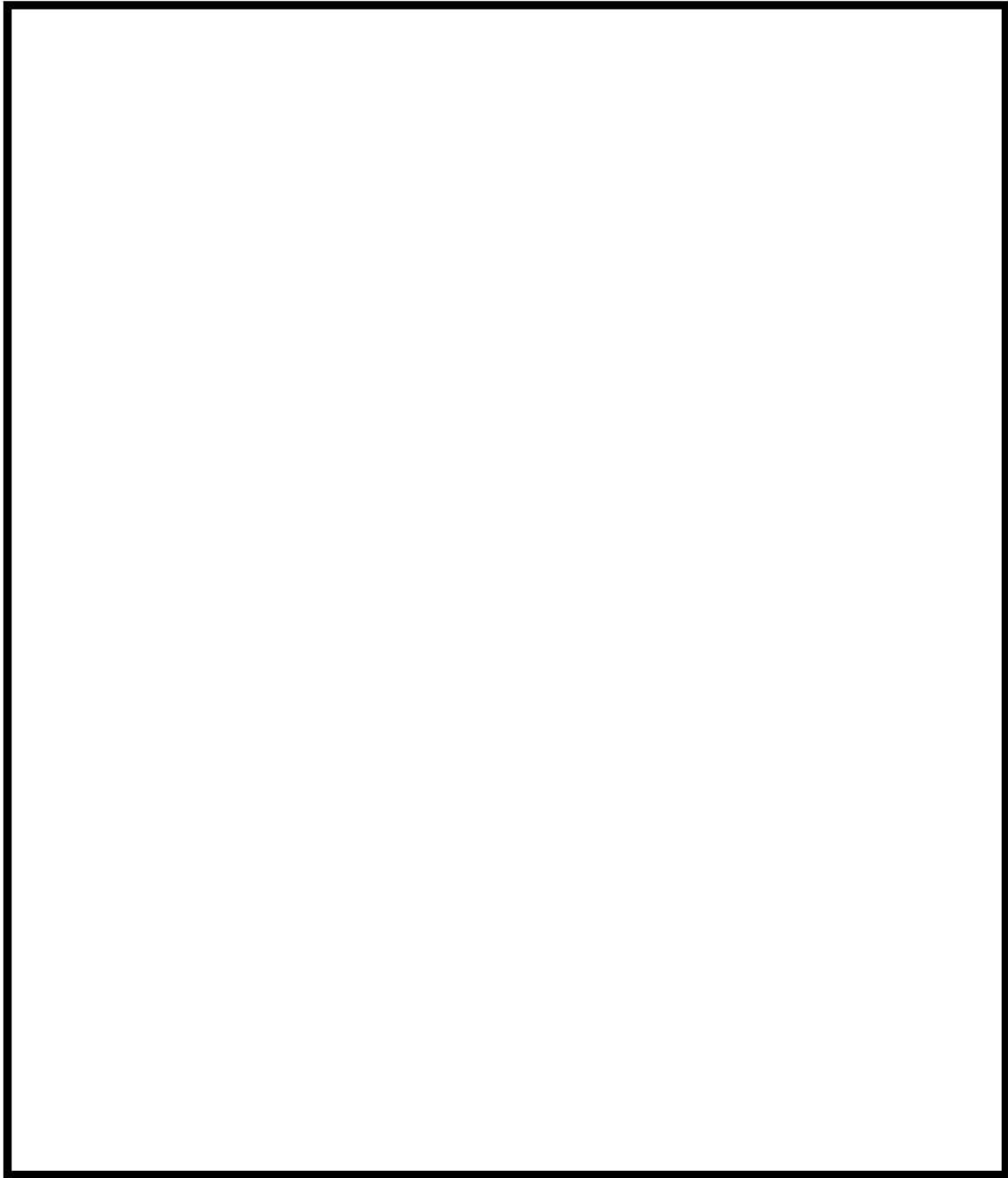
別紙 2-1 図 SCALE コードシステムの解析フロー



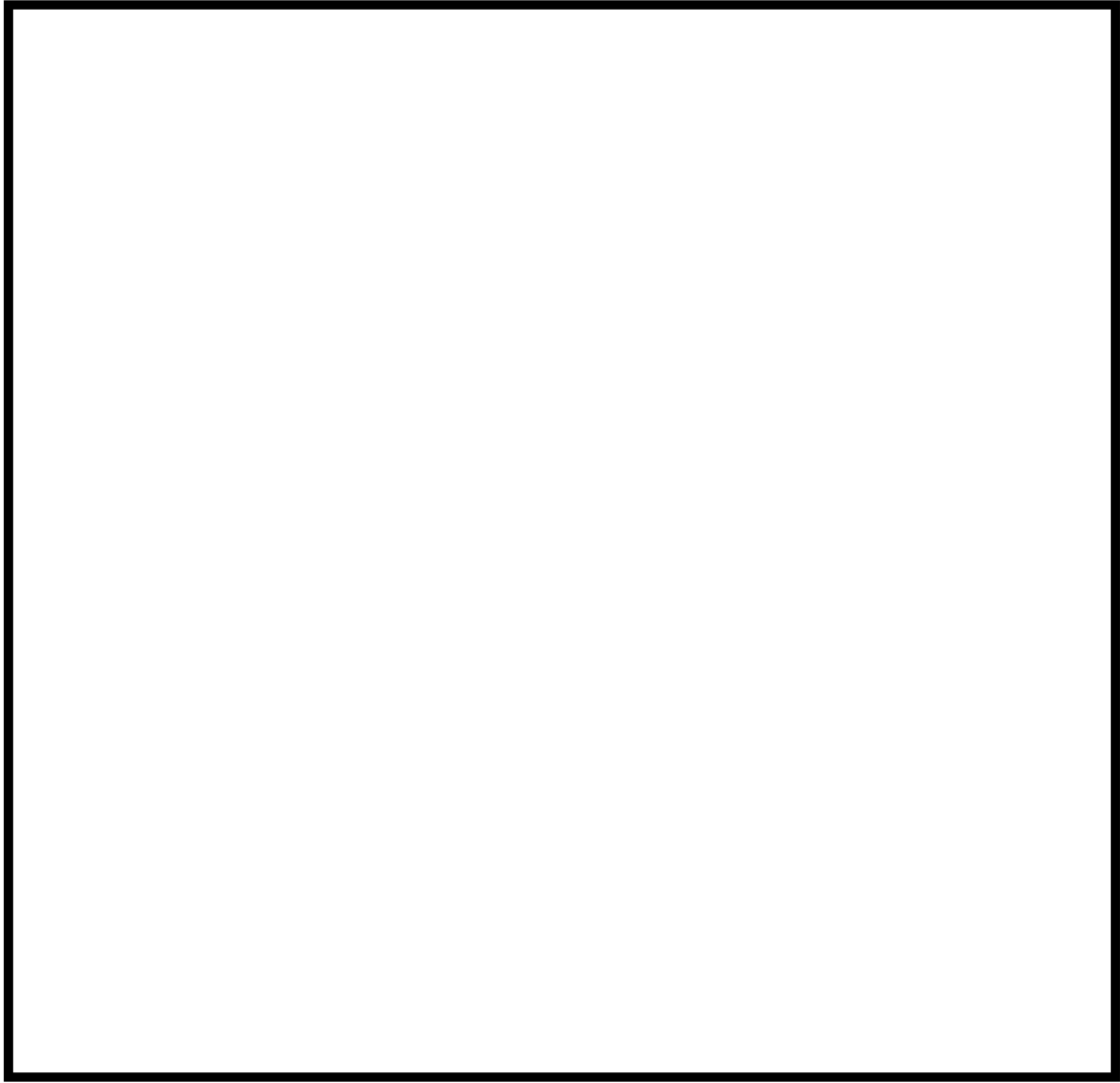
別紙 2-2 図  の臨界実験に用いた燃料棒




別紙 2-3 図 の臨界実験体系 (1)



別紙 2-4 図 の臨界実験体系 (2)



別紙 2-5 図  の臨界実験体系（4×4×1 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, (2009)

Hitz-P24 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

Hitz-P24 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 Hitz-P24 型の取扱フロー例、各状態における Hitz-P24 型の構成部品や Hitz-P24 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 (MA035B-SC-Z02)」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燃料装荷～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 Hitz-P24 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)

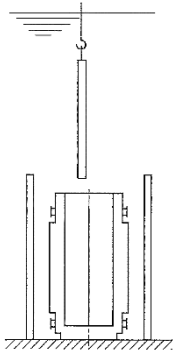
- (1) 日本原子力研究所、「臨界安全ハンドブック 第 2 版」、JAERI 1340、(1999)

別紙 3-1 表 Hitz-P24 型の臨界防止機能の評価条件

No.	取扱いモード	Hitz-P24 型 構成部品	Hitz-P24 型 内雰囲気	Hitz-P24 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	

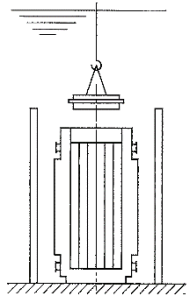
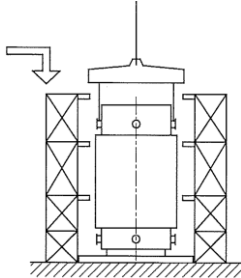
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-2 表 (1/5) Hitz-P24 型の取扱いフロー例 (燃料取扱棟における燃料装荷～緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-P24 型 構成部品	Hitz-P24 型 内雰囲気	Hitz-P24 型 外雰囲気	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>	<p>水</p>	<p>水</p>	

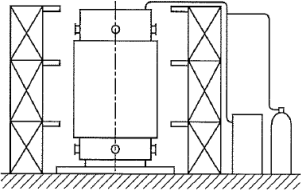
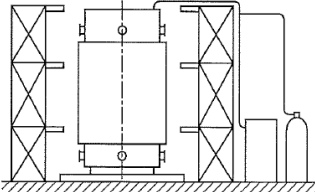
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-2 表 (2/5) Hitz-P24 型の取扱いフロー例 (燃料取扱棟における燃料装荷～緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-P24 型 構成部品	Hitz-P24 型 内雰囲気	Hitz-P24 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"> 容器吊上げ、移動、吊降し 	本体 バスケット 一次蓋	水	空気	

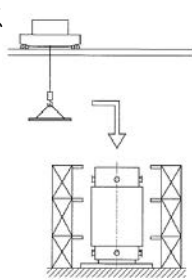
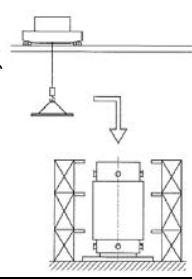
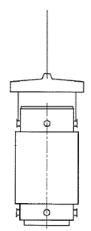
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-2 表 (3/5) Hitz-P24 型の取扱いフロー例 (燃料取扱棟における燃料装荷～緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-P24 型 構成部品	Hitz-P24 型 内雰囲気	Hitz-P24 型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
1-3a	<p>・排水、真空乾燥</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋</p>	<p>水～真空</p>	<p>空気</p>	<div style="border: 2px solid black; height: 600px;"></div>
1-3b	<p>・不活性ガス充填、 一次蓋密封確認</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋</p>	<p>不活性ガス</p>	<p>空気</p>	

内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-2 表 (4/5) Hitz-P24 型の取扱いフロー例 (燃料取扱棟における燃料装荷～緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-P24 型 構成部品	Hitz-P24 型 内雰囲気	Hitz-P24 型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
1-4	<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 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋	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 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋	不活性ガス	空気	
1-6	<ul style="list-style-type: none"> 容器移動 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋	不活性ガス	空気	

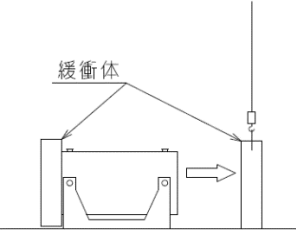
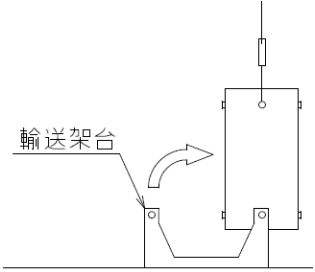
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-2 表 (5/5) Hitz-P24 型の取扱いフロー例 (燃料取扱棟における燃料装荷～緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-P24 型 構成部品	Hitz-P24 型 内雰囲気	Hitz-P24 型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
1-7	<p>・横倒し</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋</p>	<p>不活性ガス</p>	<p>空気</p>	
1-8	<p>・緩衝体取付け</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋 緩衝体</p>	<p>不活性ガス</p>	<p>空気</p>	

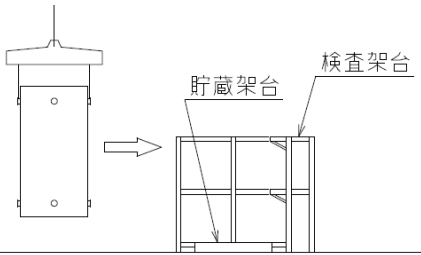
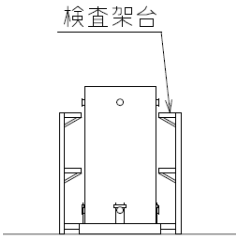
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-3 表 (1/3) Hitz-P24 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	Hitz-P24 型 構成部品	Hitz-P24 型 内雰囲気	Hitz-P24 型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
2-1	<p>・緩衝体取外し</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	
2-2	<p>・立て起こし</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	

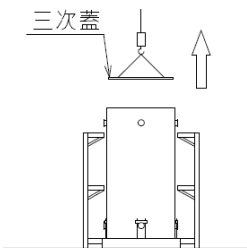
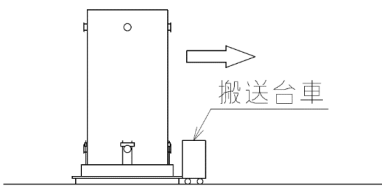
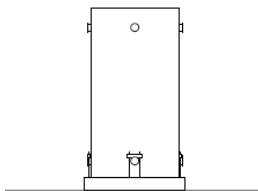
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-3 表 (2/3) Hitz-P24 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	Hitz-P24 型 構成部品	Hitz-P24 型 内雰囲気	Hitz-P24 型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
2-3	<p>・検査架台への移送</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	
2-4	<p>・貯蔵架台上への設置、 下部トラニオンの固定</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	

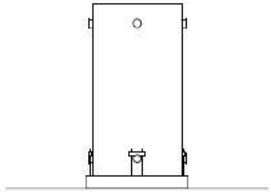
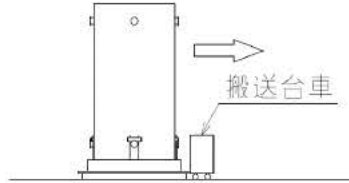
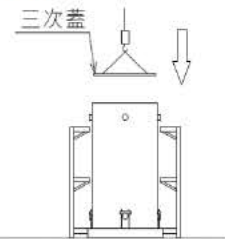
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-3 表 (3/3) Hitz-P24 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	Hitz-P24 型 構成部品	Hitz-P24 型 内雰囲気	Hitz-P24 型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
2-5	<ul style="list-style-type: none"> 三次蓋取外し、 監視装置取付け 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋	不活性ガス	空気	
2-6	<ul style="list-style-type: none"> 容器移動 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋	不活性ガス	空気	
2-7	<ul style="list-style-type: none"> 基礎ボルトによる固定 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋	不活性ガス	空気	

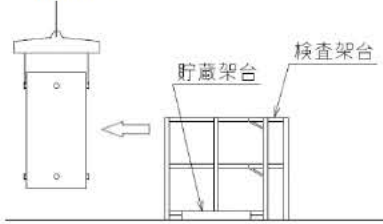
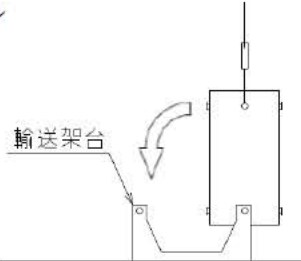
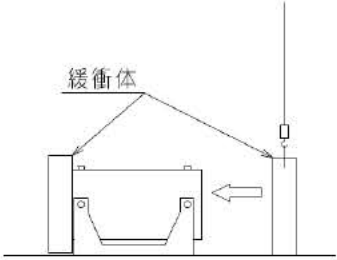
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-4 表 (1/2) Hitz-P24 型の取扱いフロー例 (貯蔵施設における貯蔵～緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-P24 型 構成部品	Hitz-P24 型 内雰囲気	Hitz-P24 型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
3-1	<p>・基礎ボルトの取外し</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋</p>	不活性ガス	空気	
3-2	<p>・容器移動</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋</p>	不活性ガス	空気	
3-3	<p>・監視装置取外し、 三次蓋取付け、 三次蓋密封確認</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	

内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-4 表 (2/2) Hitz-P24 型の取扱いフロー例 (貯蔵施設における貯蔵～緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-P24 型 構成部品	Hitz-P24 型 内雰囲気	Hitz-P24 型 外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
3-4	<p>・容器移動</p> 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋	不活性ガス	空気	
3-5	<p>・横倒し</p> 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋	不活性ガス	空気	
3-6	<p>・緩衝体取付け</p> 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋 緩衝体	不活性ガス	空気	

内は商業機密のため、非公開とします。

排水、注水時のバスケット内の水の流路の設計

(1) 水位の変動が生じ得る事象

Hitz-P24 型の取扱いにおいて、使用済燃料を収納した状態での容器内水の水位の変動が想定されるのは、以下の場合である。

- ・燃料装荷後の排水時
- ・燃料取出し前の注水時

(2) 排水、注水時の水の流路の設計

図 1 に Hitz-P24 型の排水時の水の流れの模式図を示す。Hitz-P24 型のバスケットは、プレートが軸方向に積み重ねた構造をしており、燃料格子は軸方向に貫通している。また、最底部のバスケットプレートの下面側（図 2 断面 D-D 参照）には、燃料格子間及び燃料格子からバスケット外周部につながる溝が設けてあり、ドレンパイプから容器外へ排水される流路となっている。

また、水ギャップ部については、最上部のバスケットプレート及び最下部のバスケットプレートを除く、その間のプレートは軸方向に貫通しており、排水時の水の残留や、注水時の気層の残留が生じない構造としている。また、最上部のバスケットプレートの下面側（図 2 断面 A-A 参照）及び、最底部のバスケットプレートの上面側（図 2 断面 C-C 参照）には、水ギャップから近傍の燃料格子につながる溝が設けてあり、燃料格子内の水と同じ流路で排水される設計となっている。

注水時には、ドレンパイプを通じて、排水時と逆の流れで容器内に注水される。

(3) 排水、注水作業時の取扱い手順と水位差

燃料集合体を収納した状態での注排水時の流量を [] とした場合、燃料集合体を収納した状態でのバスケット全長 [] 分を水で充填する場合におけるバスケット格子内部と水ギャップとの水位差を評価した結果、水位差は 1mm 以下である（補足参照）。

(4) 水位変動時の中性子実効増倍率の影響

排水または注水時に、Hitz-P24 型のバスケット内に生じる水位差は 1mm 以下であり、実効増倍率に有意な影響は生じない。

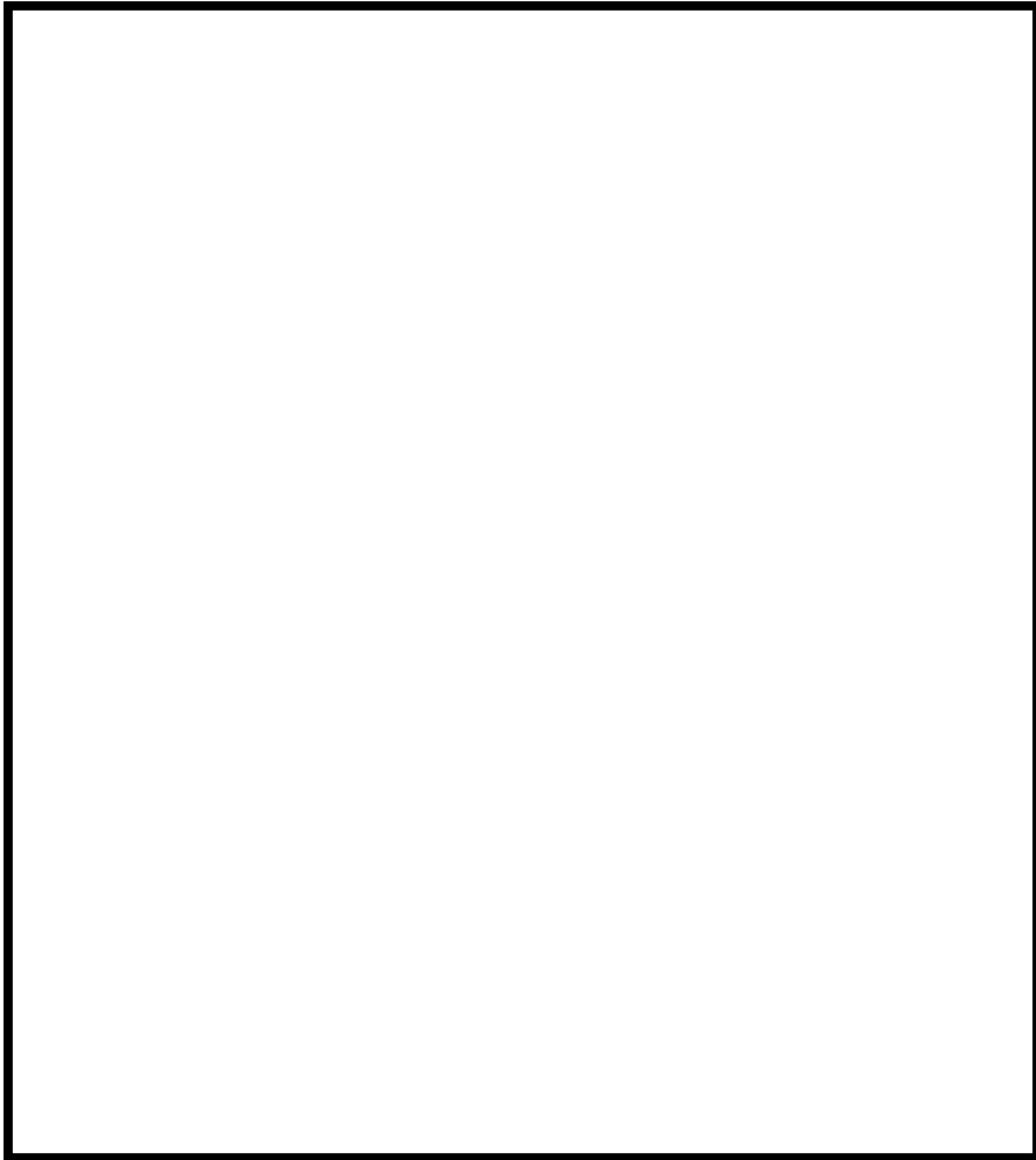
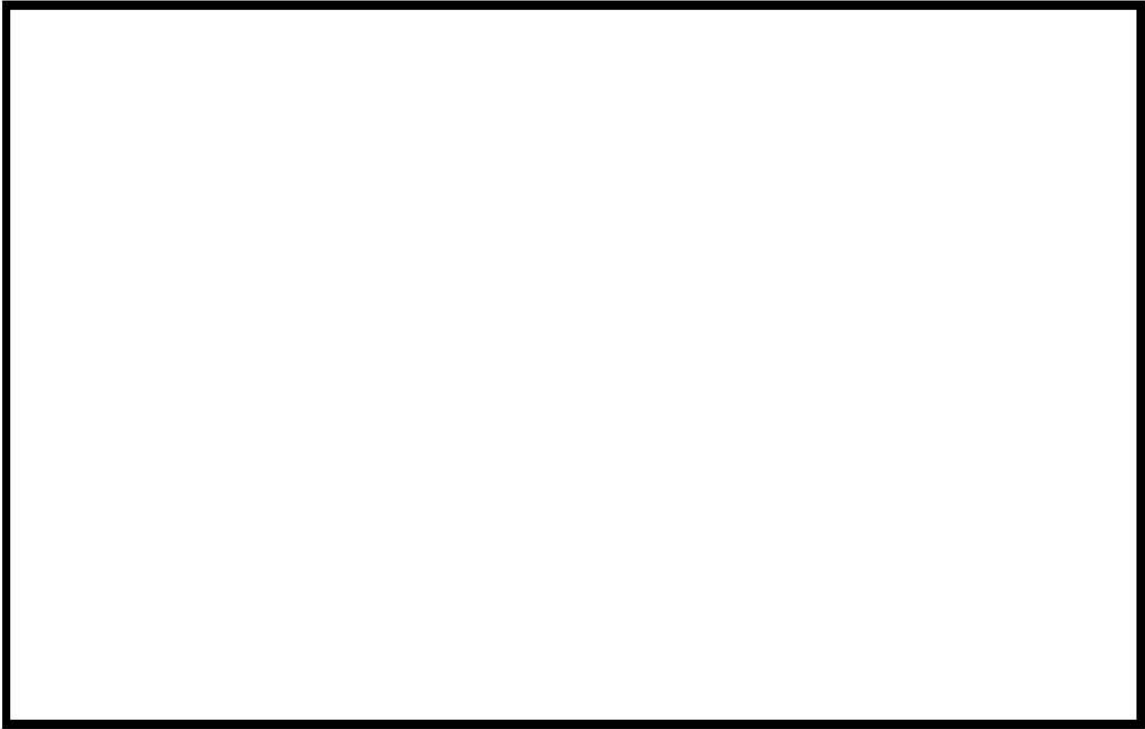


図1 Hitz-P24 型の排水時の流路の模式図



(a) 図 1 の断面 A-A (最上部の下面側)

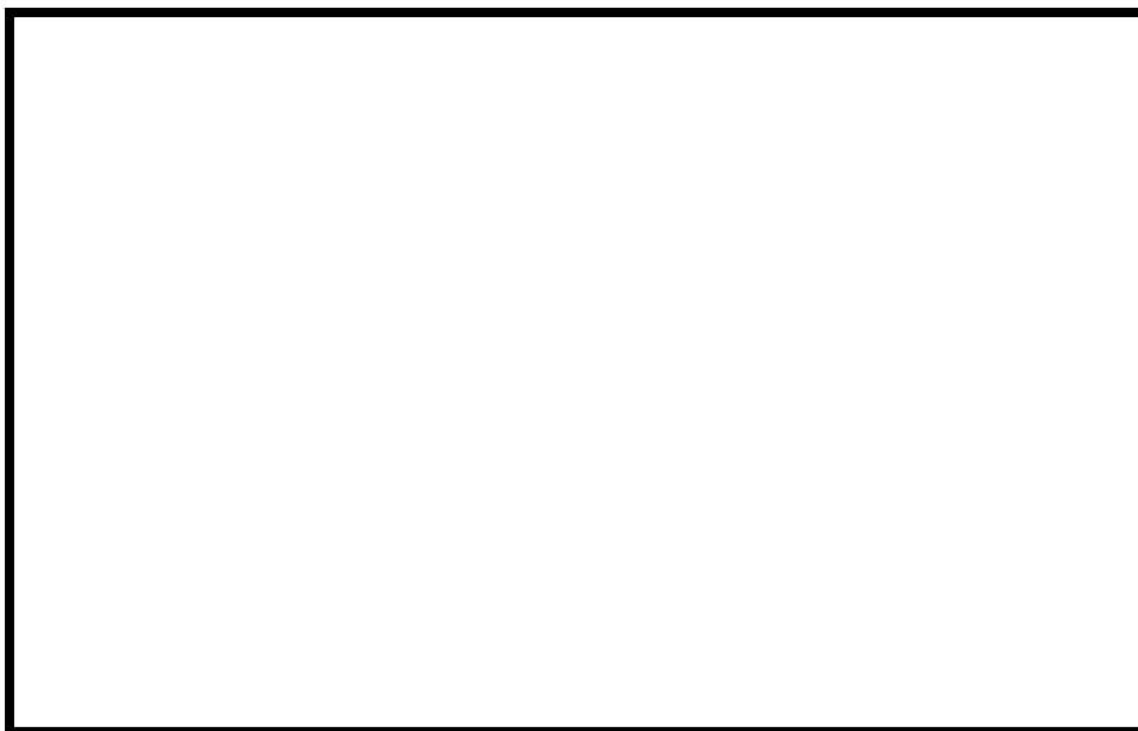


(b) 図 1 の断面 B-B (プレート①)

図 2 Hitz-P24 型バスケット各断面の排水時の流路の模式図



(c) 図 1 の断面 C-C (最下部の上面側)



(d) 図 1 の断面 D-D (最下部の下面側)

図 2 Hitz-P24 型バスケット各断面の排水時の流路の模式図

(補足)

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

燃料集合体を収納した状態での Hitz-P24 型への注水時におけるバスケット格子内部とバスケット格子の中空構造部に生じる水位差の算出を行った。

2. 評価要件

評価条件を以下に示す。

(1)注水流量

注水時の流量を 2.0 m³/hr とする。

3. 評価

評価モデルを図 3 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)

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

l : 管路の長さ

d_h : 水力直径

$$d_h = 4 \times \frac{\text{(流路断面積)}}{\text{(流路断面における周の長さ)}}$$

ζ : 流入口、流出口及び通水孔部の損失係数 (表 1 参照)

v : 管内平均流速

キャビティ内水位平均上昇速度、又は平均下降速度として次式で求める。

$$v = \frac{\text{(注水時の流量)}}{\text{(排水体積)/(キャビティ全長)}}$$

g : 重力加速度

Re : レイノルズ数

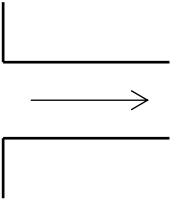
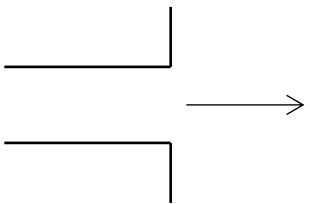
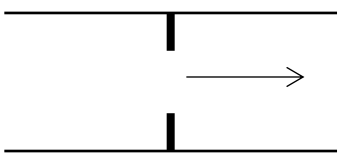
ε : 長方形管の縦横比

損失ヘッド評価条件及び評価結果を表 2 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、バスケット全長を水で充填した段階において 1mm 以下であり、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 DVD-ROM 版、(2014)
- (2)(一社)日本機械学会、技術資料 管路・ダクトの流体抵抗 DVD-ROM 版、管路・ダクトの流体抵抗出版分科会編、(2018)

表 1 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か所) (注1)		4060 (注2)

(注1) 管路全体に 14 箇所の通水孔部が存在

(注2) 水ギャップ部の形状に依存し、最大となる水ギャップ部の数値を記載

表 2 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	4.145
水力直径(d_h)	m	0.047
管内の平均流速(v)	m/s	4.60×10^{-4}
重力加速度(g)	m/s ²	9.80665
長方形管断面の縦横比(ϵ)	—	0.873
レイノルズ数(Re)	—	12.0
損失ヘッド(h)	m	6.19×10^{-4} (0.619mm)

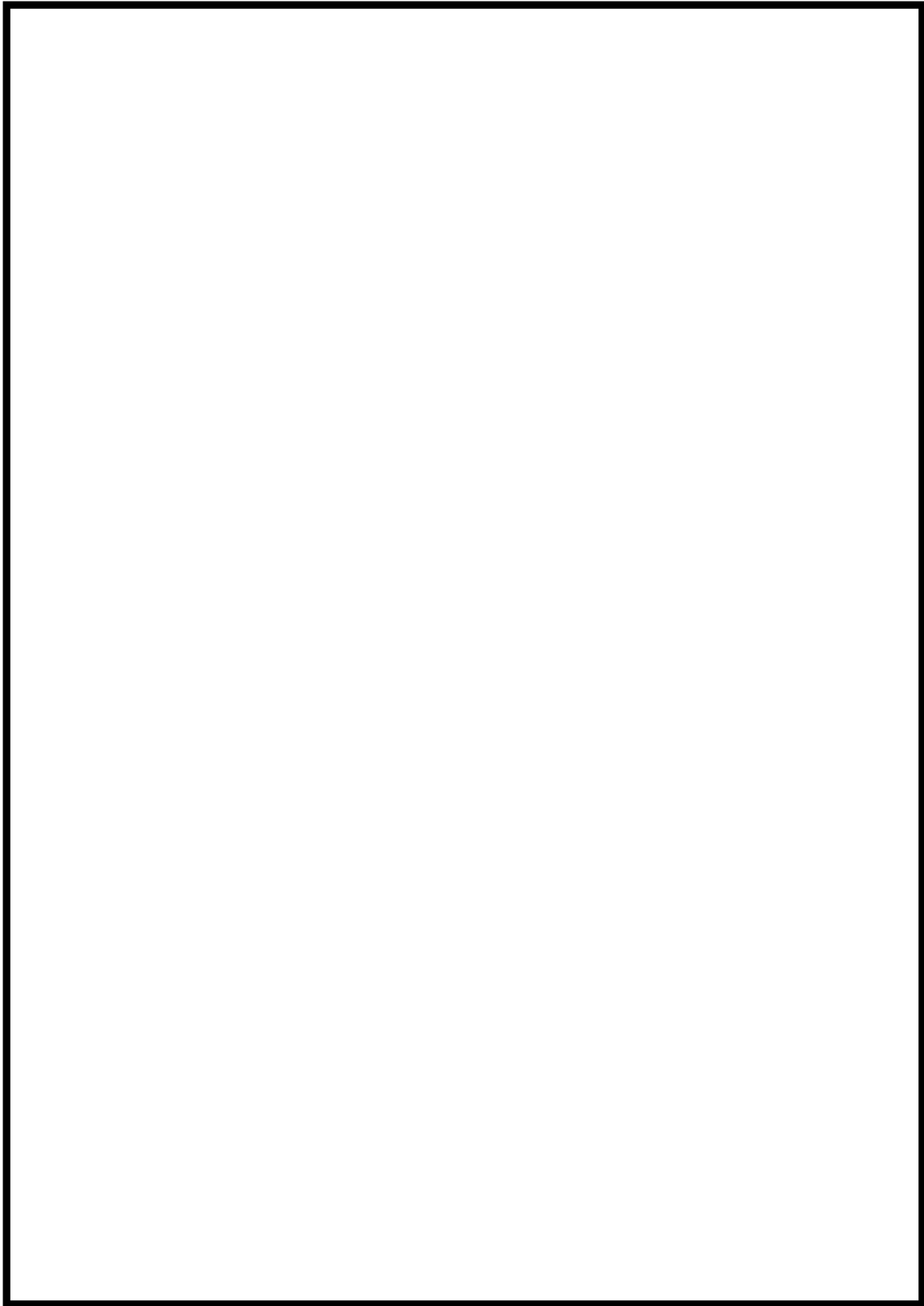


図3 評価モデル