

補足説明資料 16-5

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	32
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 MSF-28P 型の取扱いフロー及び各状態における中性子実効増倍率について	

1. 要求事項

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

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第16条第2項一号ハ

- ・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。

③設置許可基準規則解釈別記4第16条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

MSF-28P 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。

①設置許可基準規則第 16 条第 2 項一号ハ

- ・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 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。

MSF-28P 型は、使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するための断面形状が中空状であるバスケットプレート、及び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を適切な位置に配置することにより、臨界を防止する設計とする（第 1 図参照）。

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、MSF-28P 型の貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及び MSF-28P 型に使用済燃料集合体を収納する際に冠水状態となること等、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 16-4「材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料（L5-95LC216）」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、また、2.(2)審査ガイドへの適合性[確認内容]5)への説明に示すとおり、バスケットプレートの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)への説明に示すとおり、MSF-28P 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、MSF-28P 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には可燃性毒物としてガドリニア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アの存在を無視し、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、すべ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、MSF-28P 型相互の中性子干渉を考慮して、無限に配列した体系（完全反射）としており、MSF-28P 型の滑動等により、複数の特定兼用キャスクが接近することを考慮しても MSF-28P 型は臨界に達するおそれがないため、配置制限は必要ない。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 MSF-28P 型に配置するとともに、バスケットプレート幅、バスケット格子内のり、中性子吸収材板厚等の寸法条件については、製作公差を考慮し、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。

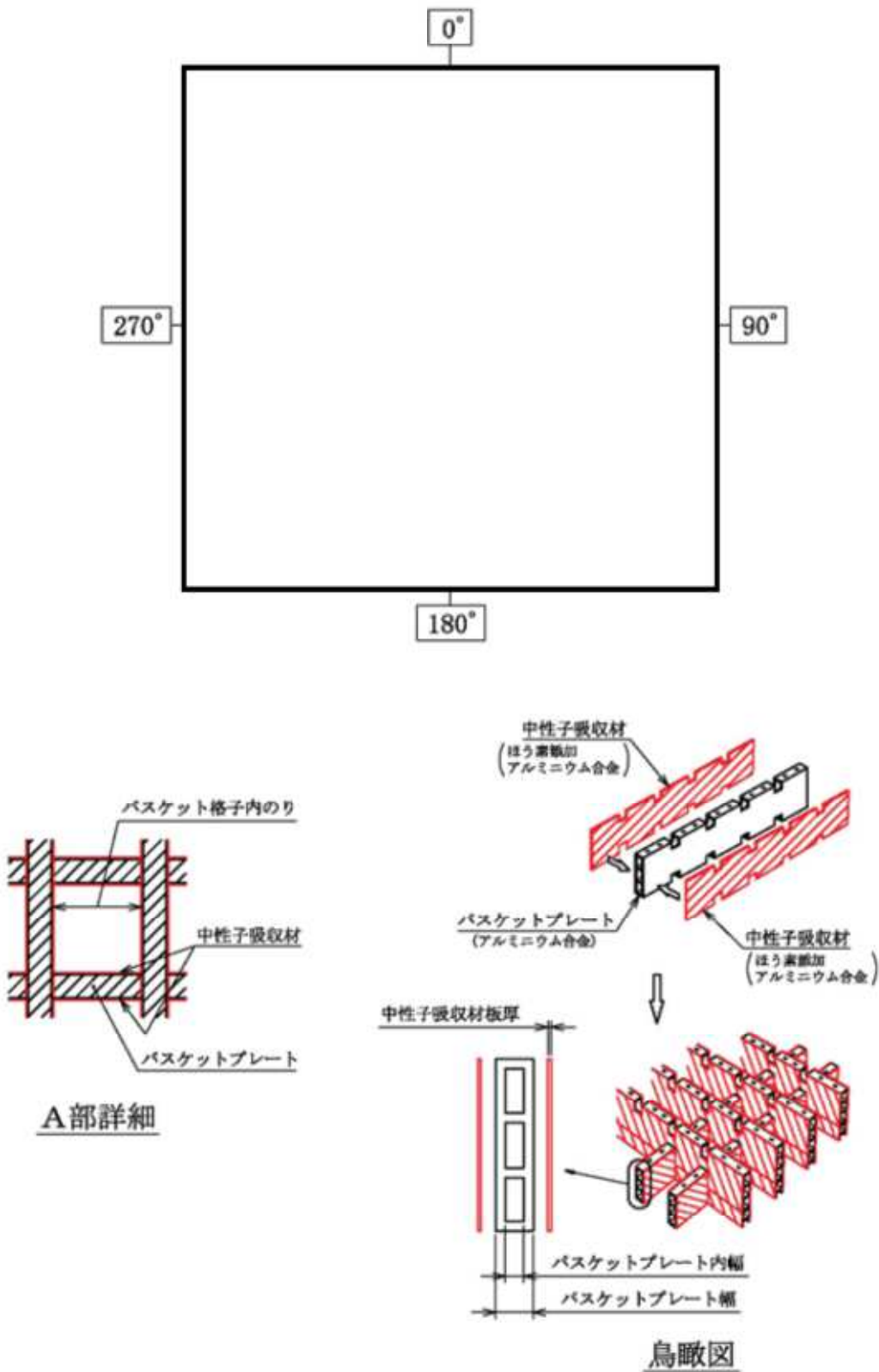
上記条件に基づく解析の結果、中性子実効増倍率（モンテカルロ法による計算の統計誤差（ 3σ ）を加えたもの）は、乾燥状態及び冠水状態において 0.95 以下を満足することを確認した。

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。

③設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条 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。

MSF-28P 型の設計貯蔵期間は 60 年である。また、補足説明資料 16-4 「材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料（L5-95LC216）」に示すとおり、MSF-28P 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維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計である。



第1図 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、MSF-28P 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。

MSF-28P 型の臨界解析フローを第 2 図に示す。臨界解析では、MSF-28P 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（第 3 図から第 6 図参照）、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。

解析条件は第 1 表から第 3 表のとおりとする。臨界解析モデルは、蓋部が金属部へ衝突しない設置方法において取り付けられる貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体を安全側に真空に置換しており、蓋部が金属部へ衝突しない設置方法及び基礎等に固定する設置方法共通の解析条件である。なお、乾燥状態での臨界解析に加え、MSF-28P 型内は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

- －MSF-28P 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 0MWd/t の減損していない新燃料とし、 17×17 燃料はウラン濃縮度 $4.1\pm$ wt%、 15×15 燃料はウラン濃縮度 $4.0\pm$ wt% を保守的に $4.2\text{wt}\%$ 及び $4.1\text{wt}\%$ 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ア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アの存在を無視し、すべて通常のウラン新燃料とする。
- － 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

- － MSF-28P 型が無限に配列した体系（完全反射）とする。これにより、MSF-28P 型の滑動を考慮しても、MSF-28P 型の配置制限は必要なく、MSF-28P 型相互の中性子干渉も包絡する評価となる。
- － 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、乾燥状態では外周部及び中央部の燃料ともに中心偏向配置とし、冠水状態では外周部の燃料は外周に、中央部の燃料は中心偏向配置とする。
- － バスケットプレート及び中性子吸収材は第 4 表に示す通り、製作公差を考慮し、中性子実効増倍率が最も大きくなる寸法とする。
- － 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。
- － 中性子遮蔽材は無視する。
- － 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、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へ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。

第1表 (1/2) MSF-28P 型解析条件の概要 (17×17 燃料収納時)

項目	17×17 燃料		
	キヤスク収納位置制限		
種類	領域 A	領域 B	領域 C
	燃料集合体 1 体の仕様	48,000MWd/t 型 (A 型・B 型)	48,000MWd/t 型 (A 型・B 型)
39,000MWd/t 型 (A 型・B 型)		39,000MWd/t 型 (A 型・B 型)	39,000MWd/t 型 (A 型・B 型)
収納物仕様	≤4.2		
	4.2		
初期濃縮度 (wt%) (注1)	-		
ウラン重量 (kg) (注1)	0		
最高燃焼度 (MWd/t) (注1) (燃料集合体平均)	-		
冷却期間 (年) (注1)	-		
最高燃焼度 (MWd/t)	-		
冷却期間 (年)	-		
配置	[Redacted]		

(注1) 燃料集合体 1 体の仕様は、48,000MWd/t 型の仕様を代表として記載する。

(注2) 赤枠内の格子には、バーナブルポイズン集合体を挿入した燃料集合体を収納可能である。

第1表(2/2) MSF-28P型解析条件の概要(15×15燃料収納時)

項目	15×15燃料		
	キヤスク収納位置制限		
	領域A	領域B	領域C
種類	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型・B型)
燃料集合体1体の仕様	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型)
収納物仕様	39,000MWd/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%) (注1)	≤4.1		
ウラン重量 (kg) (注1)	-		
最高燃焼度 (MWd/t) (注1) (燃料集合体平均)	0		
冷却期間 (年) (注1)	-		
最高燃焼度 (MWd/t)	-		
冷却期間 (年)	-		
配置	[Redacted]		

(注1) 燃料集合体1体の仕様は、48,000MWd/t型の仕様を代表として記載する。

(注2) 赤枠内の格子には、バーナブルポイズン集合体を挿入した燃料集合体を取納可能である。

第2表 臨界解析用の燃料集合体の仕様

項目	単位	仕様	
		17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A型)	15×15 燃料 48,000MWd/t 型 (A型)
燃料集合体の種類	—	17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A型)	15×15 燃料 48,000MWd/t 型 (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	cm		
被覆管肉厚	cm	0.057	0.062 ^(注3)
燃料有効長	cm		
燃料棒配列	—	17×17	15×15
燃料集合体当たりの燃料棒数	本	264	204
燃料棒ピッチ	cm		
燃料集合体の幅	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大きいため、この取扱いは保守的である。

(注2) (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。

(注3) 15×15 燃料B型燃料のペレット直径は cm、被覆管肉厚は0.066cmでありA型燃料と若干異なる。臨界解析ではペレット直径が大きく反応度の高いA型を対象としている。なお、17×17 燃料のA型とB型の表中に示す仕様は同じである。

[補足]燃料集合体の製作について

プレスで成形されたペレットは焼結により密度が95%理論密度となり、焼結されたペレットは研削により所定の寸法となる。その後、ペレットは寸法、密度、濃縮度が検査され、燃料棒の組立て時に濃縮度の均一性、ウラン重量が測定される。

第3表(1/2) 臨界解析条件

項目	内容	
臨界解析の方法	中性子実効増倍率は臨界解析コードを使用して、燃料棒単位セル計算により求まる核定数を用い、MSF-28P型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 ・臨界解析：臨界解析コードKENO-VI(中性子ヒストリー型 <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に基づいて作成された252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	28体
	燃料配置(注1)	17×17燃料：第3図(2/3)及び第5図(2/3)参照 15×15燃料：第4図(2/3)及び第6図(2/3)参照
	寸法条件(注1) (第3図～ 第6図参照)	バスケットプレート幅、バスケットプレート内幅、バスケット格子内のり、中性子吸収材板厚の寸法は公差を考慮、胴内径はバスケットに接するように設定。設定根拠は第4表参照。
	MSF-28P型内 雰囲気(注1)	乾燥状態：真空 冠水状態：水密度1.0g/cm ³ (MSF-28P型内の水密度1.0g/cm ³ とした場合に中性子実効増倍率は最大となる)
	MSF-28P型外 雰囲気(注1)	真空(解析モデルを完全反射境界としてMSF-28P型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MSF-28P型へ戻る)
	MSF-28P型配列	無限配列(MSF-28P型周囲は完全反射境界)
	使用済燃料 集合体構造材	乾燥状態：真空 冠水状態：純水に置換(構造材よりも中性子減速効果の高い純水とする)
	ほう素 添加量(注1)	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。 (¹⁰ B面密度 <input type="text"/> g/cm ²) 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安全側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安全側に無視)
	中性子遮蔽材	側部・蓋部・底部中性子遮蔽材は安全側に真空に置換。
	蓋及び貯蔵用緩 衝体	一次蓋及び二次蓋を考慮。貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体は安全側に真空に置換。

(注1) 燃料配置、寸法条件、MSF-28P型内/外雰囲気、ほう素添加量の感度解析結果を別紙1に示す。

第3表 (2/2) 臨界解析条件

領域		密度 (g/cm ³)	元素	原子個数密度 (10 ²⁴ atoms/cm ³)					
				17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A型)	15×15 燃料 48,000MWd/t 型 (A型)				
燃料 領域	UO ₂		²³⁵ U						
			²³⁸ U						
			O						
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管		Zr ^(注1)						
水			H						
			O						
ほう素添加 アルミニウム合金			¹⁰ B						
			¹¹ B						
			C						
			Al						
炭素鋼		Fe							
ステンレス鋼		Cr							
		Fe							
		Ni							
アルミニウム合金		Al							

(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大きいため、この取扱いは保守的である。

第4表 (1/4) MSF-28P 型臨界界解析モデル寸法条件 (17×17 燃料収納時及び 15×15 燃料収納時共通)

項目	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 (アルミニウム合金)	A-A 断面	最小 <input type="text" value=""/> (cm)	最小 <input type="text" value=""/> (cm)
	B-B 断面 C-C 断面	最小 <input type="text" value=""/> (cm)	最小 <input type="text" value=""/> (cm)
<p>乾燥状態では中性子エネルギーが高く、中性子は構造材及び中性子吸収材を通過しやすい状態であり、隣接する燃料との相互作用が大きい。そのため、隣接する燃料までの距離が短くなるように最小としている。</p> <p>冠水状態では、<input type="text" value=""/>バスケットプレート幅を最小とすることで、<input type="text" value=""/>隣接する燃料との中性子相互作用が大きくなる。</p> <p>一般的な傾向として、隣接する燃料との距離に応じて中性子実効増倍率は単調に変化し極大値を持たないため、隣接する燃料との距離を短くすることで隣接する燃料との中性子相互作用が大きくなるように、乾燥状態、冠水状態共に最小としている。</p>			

第4表 (2/4) MSF-28P 型臨界解析モデル寸法条件 (17×17 燃料収納時及び 15×15 燃料収納時共通)

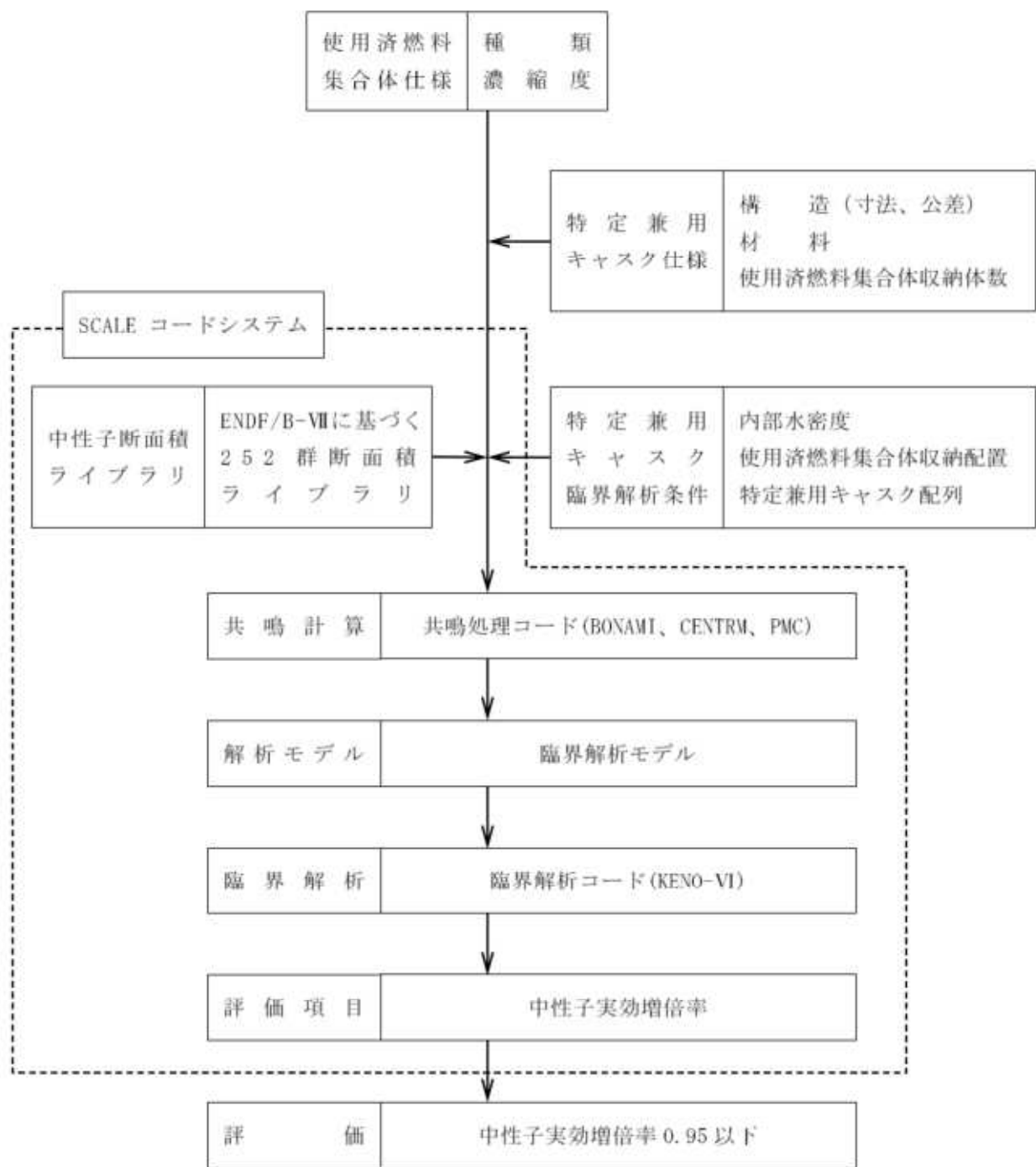
項目	寸法条件		条件設定根拠
	乾燥状態	冠水状態	
A-A 断面	最大 □ (mm)	最小 □ (mm)	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥状態ではバスケットプレート内幅を最大としている。 □ バスケットプレート内幅を最大とすることで 隣接する燃料との中性子相互作用が大きくなる。 □ 冠水状態ではバスケットプレート内幅を最小としている。 □ バスケットプレート内幅を最小とすることで □ 隣接燃料
	B-B 断面 C-C 断面		

第4表 (3/4) MSF-28P 型臨界解析モデル寸法条件 (17×17 燃料収納時及び 15×15 燃料収納時共通)

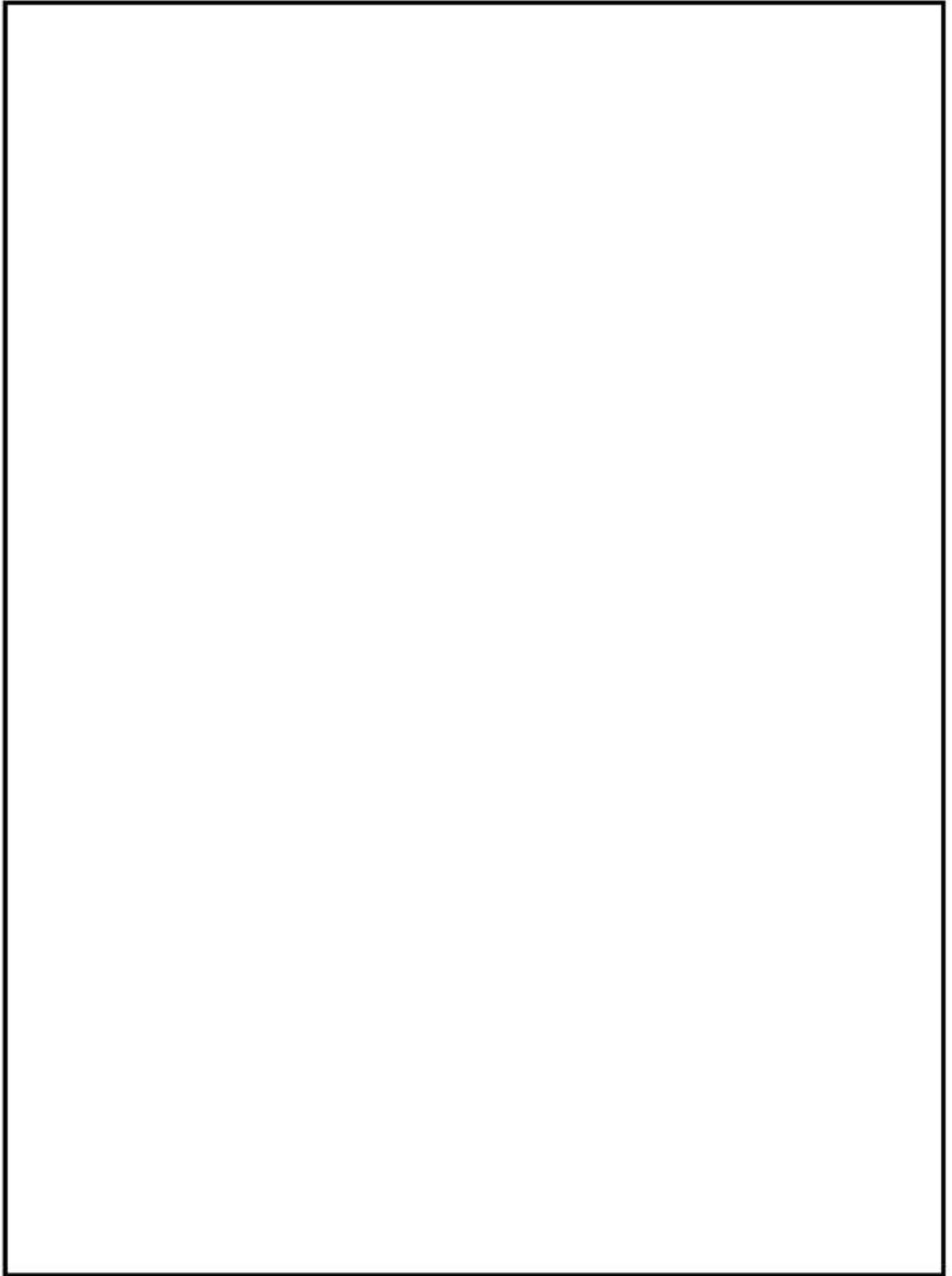
項目	寸法条件		条件設定根拠
	乾燥状態	冠水状態	
バスケット格子内のり	最小 □ cm)	最大 □ cm)	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥状態では中性子エネルギーが高く、中性子は構造材及び中性子吸収材を通過しやすい状態であり、隣接する燃料との相互作用が大きいため、隣接する燃料までの距離が短くなるように最小としている。 冠水状態では燃料領域での熱中性子が増加するようにバスケット格子内を最大としている。本キヤスクはバスケットプレート内幅領域があるため隣接する燃料との距離があり、且つバスケットプレート内幅領域内の水で中性子が減速し、中性子吸収材による中性子吸収効果があるため、冠水状態では隣接する燃料との中性子相互作用は比較的小さい。このため、隣接燃料との相互作用よりも、同一燃料領域内の熱中性子増加による反応度上昇の効果の方が大きくなる。 <p>一般的な傾向として、上記の変化はバスケット格子内のりの変化に伴い、中性子実効増倍率は単調に変化し、極大値を持つことはない。</p>

第4表 (4/4) MSF-28P 型臨界界解析モデル寸法条件 (17×17 燃料取納時及び 15×15 燃料取納時共通)

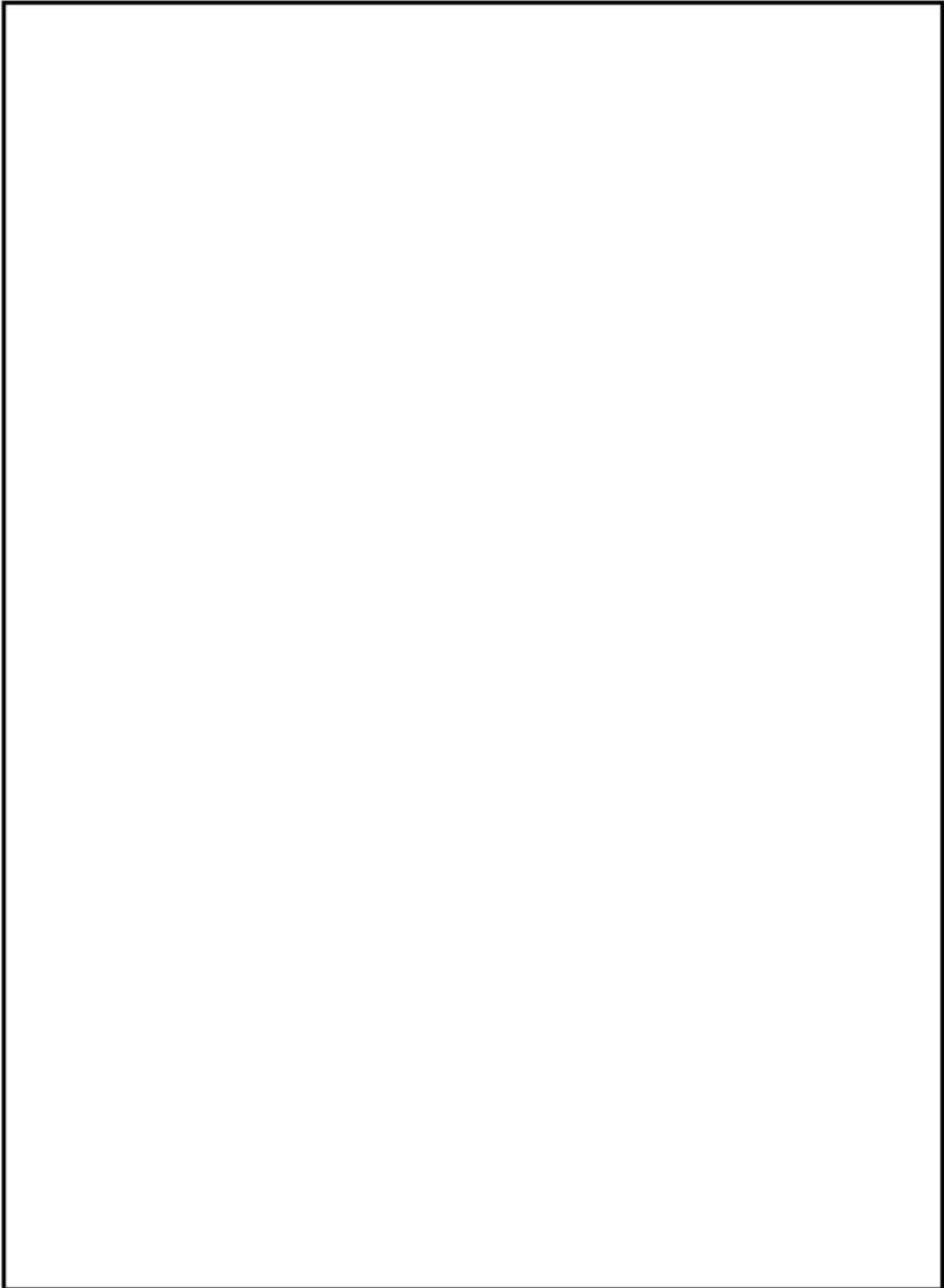
項目	寸法条件		条件設定根拠
	乾燥状態	冠水状態	
中性子吸収材板厚 (ほう素添加アルミニウム合金)	最小 <input type="text" value="3"/> mm	最小 <input type="text" value="3"/> mm	<p>一般的な傾向として、隣接する燃料との距離に応じて中性子実効増倍率は単調に変化し極大値を持たないため、中性子吸収材による中性子吸収効果が小さくなるよう乾燥状態、冠水状態共に中性子吸収材板厚を最小としている。</p> <div style="border: 1px solid black; width: 200px; height: 100px; margin: 10px auto;"></div>



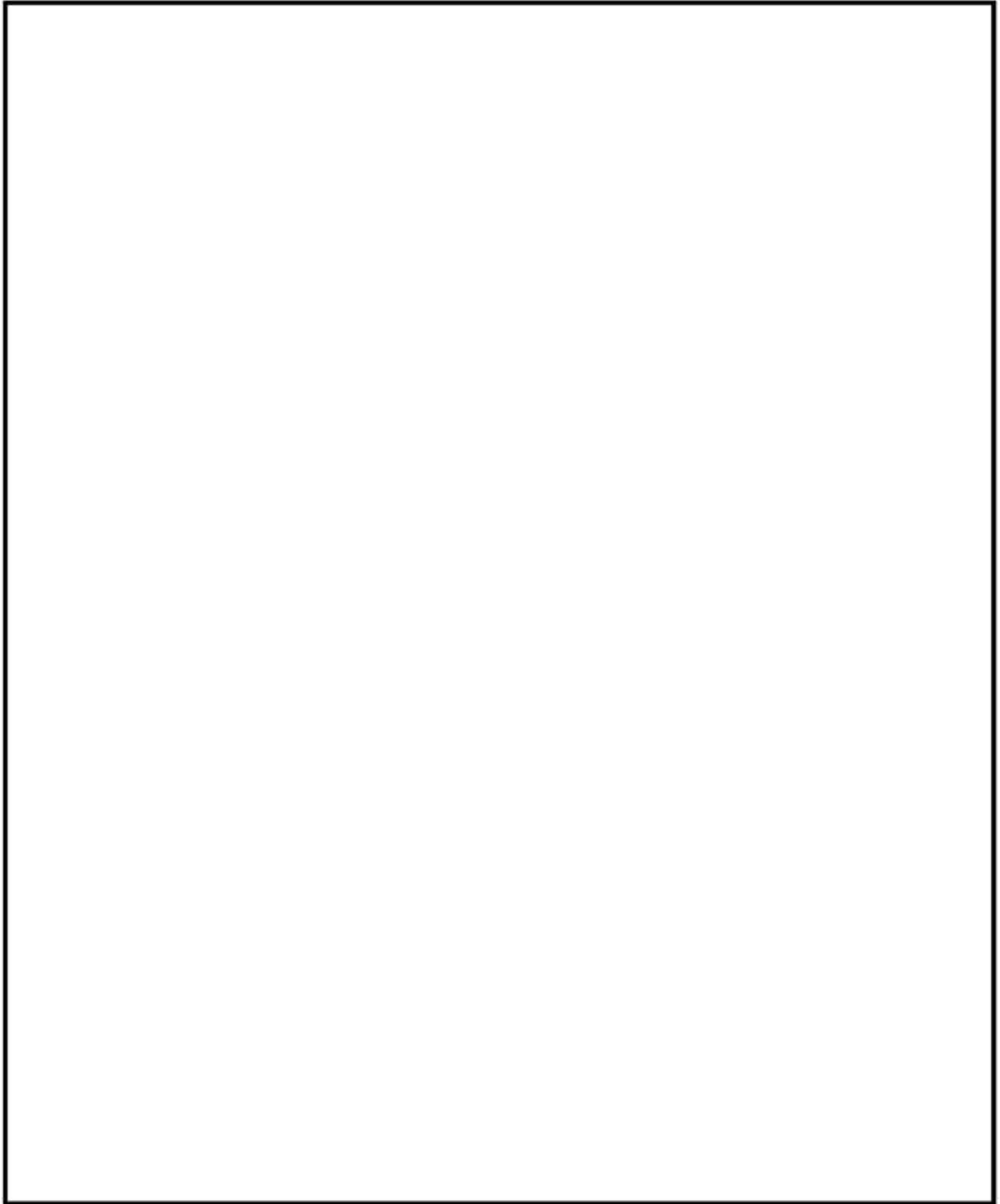
第2図 MSF-28P 型の臨界解析フロー図



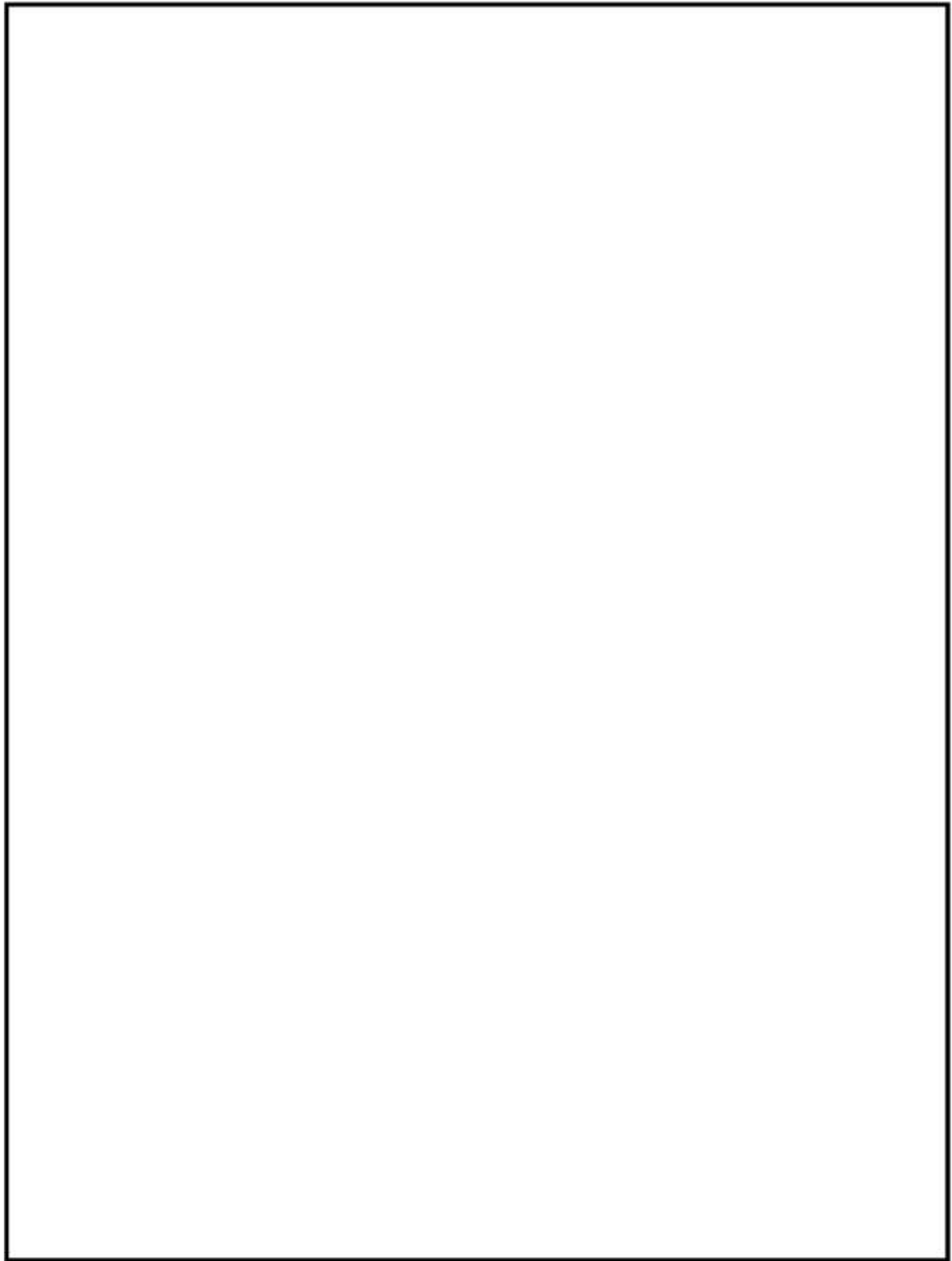
第3図（1/3） 臨界解析モデル（縦断面図）（17×17 燃料収納時）（冠水状態）



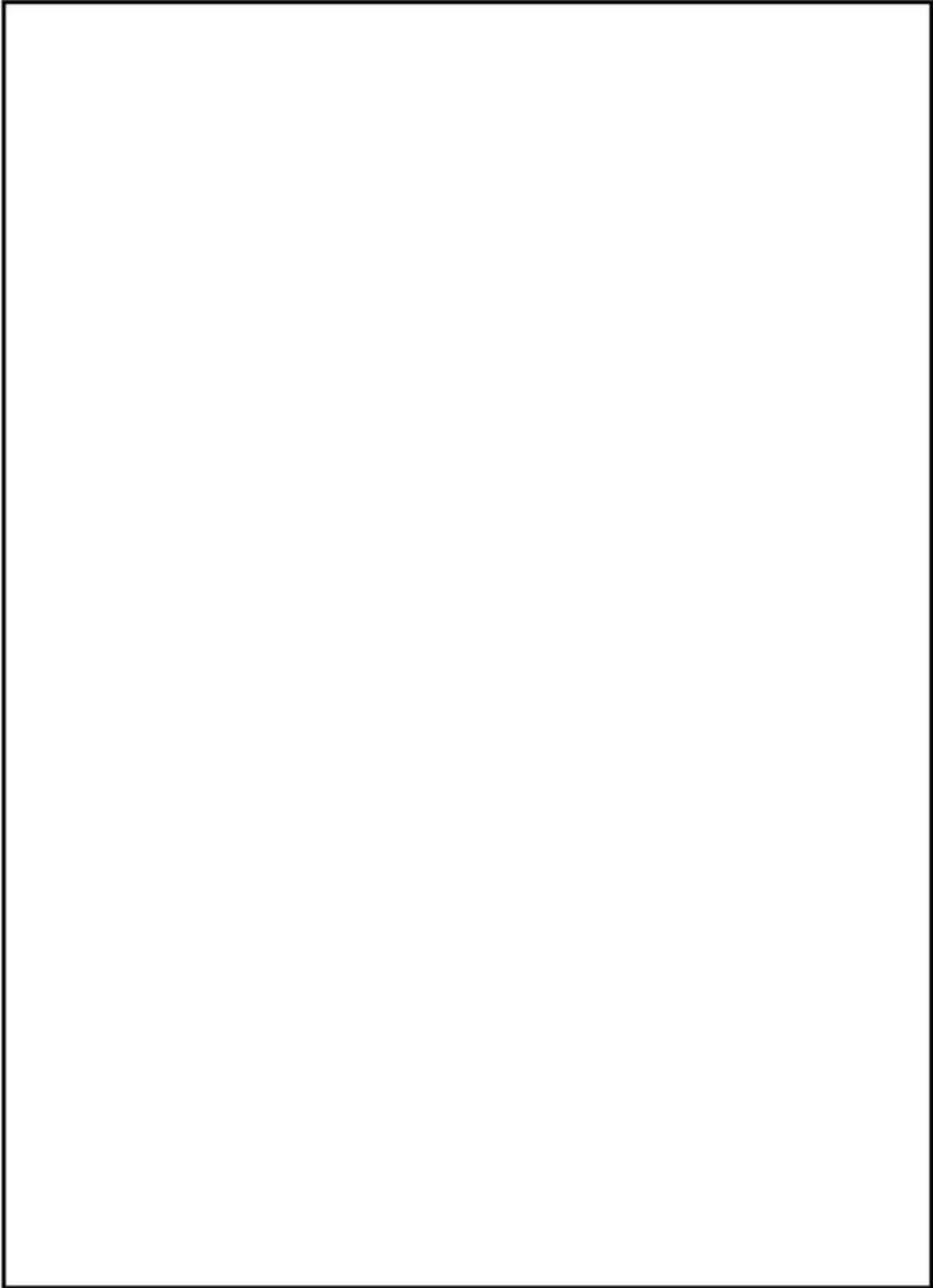
第3図 (2/3) 臨界解析モデル (燃料領域横断面図) (17×17 燃料収納時) (冠水状態)



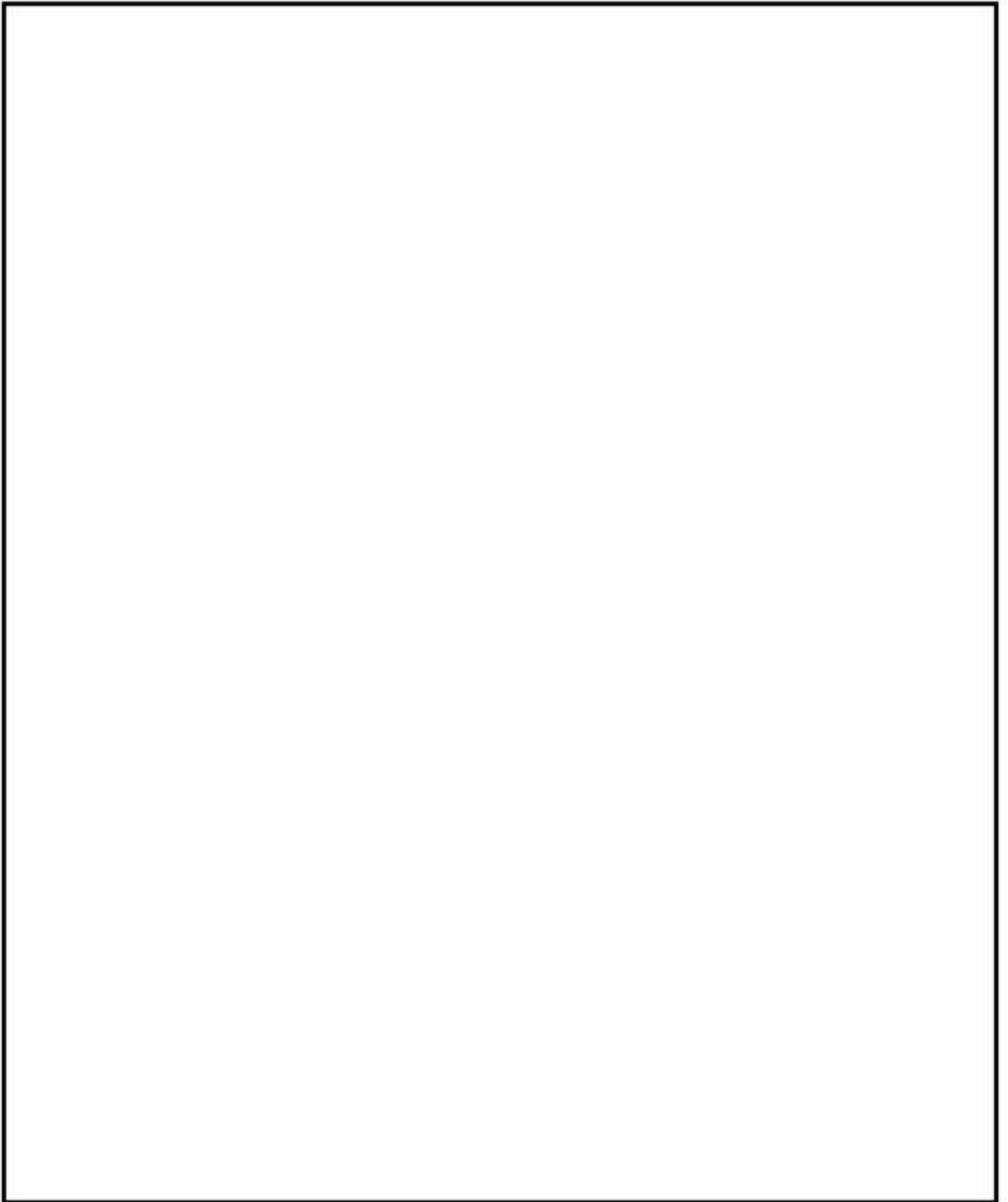
第3図 (3/3) 臨界解析モデル (燃料領域拡大図) (17×17 燃料収納時) (冠水状態)



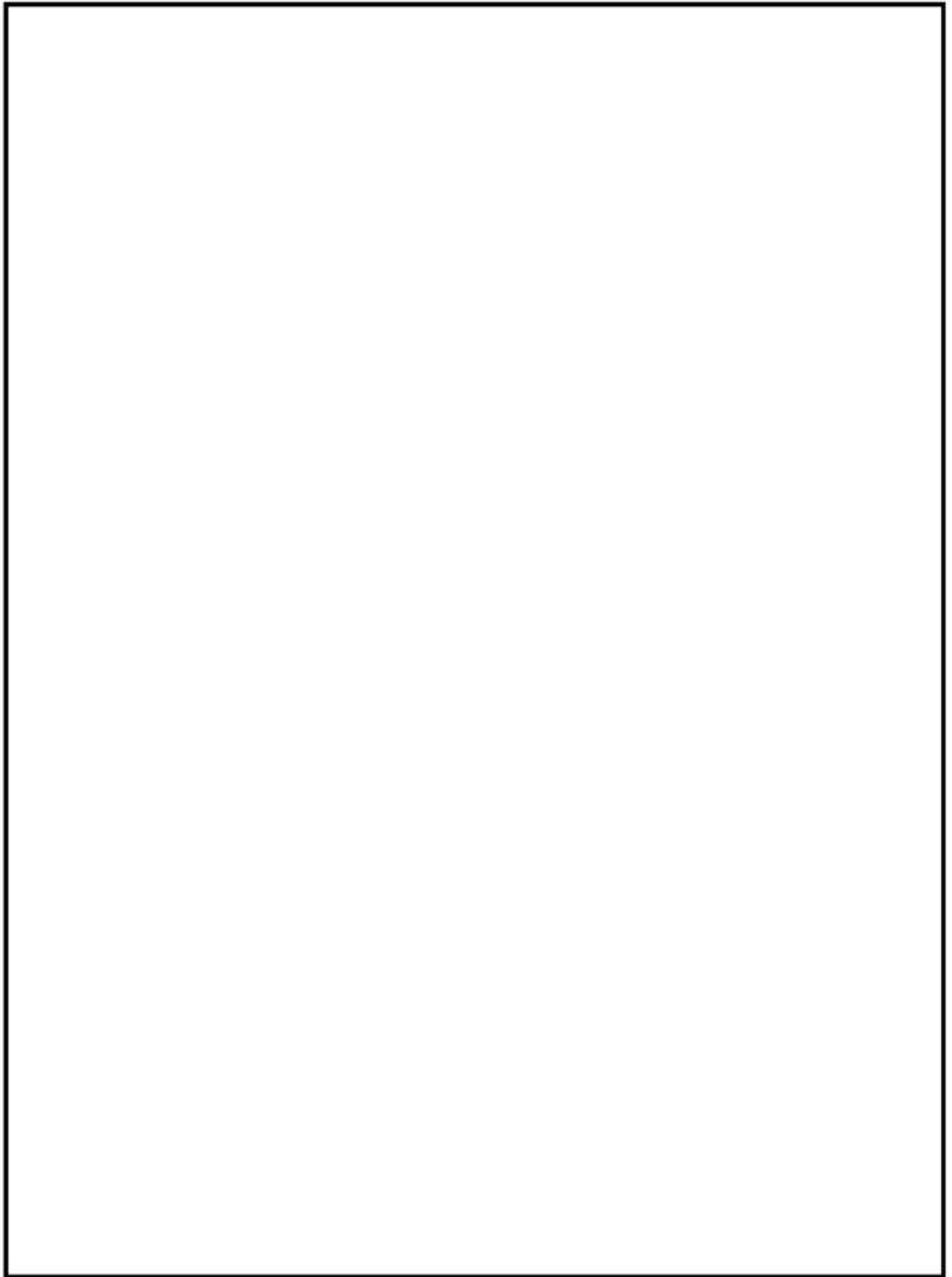
第4図（1/3） 臨界解析モデル（縦断面図）（15×15 燃料収納時）（冠水状態）



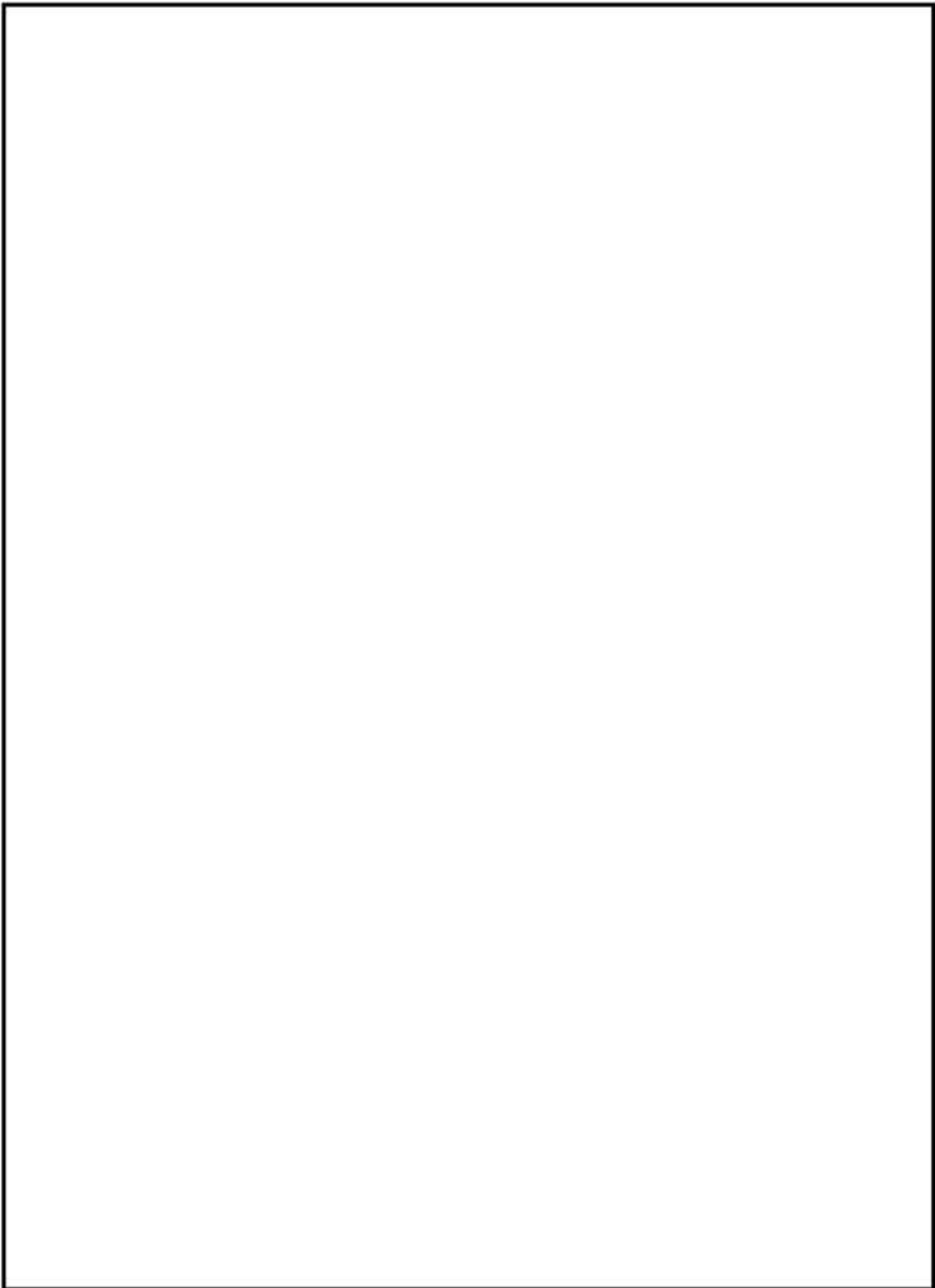
第4図 (2/3) 臨界解析モデル (燃料領域横断面図) (15×15 燃料収納時) (冠水状態)



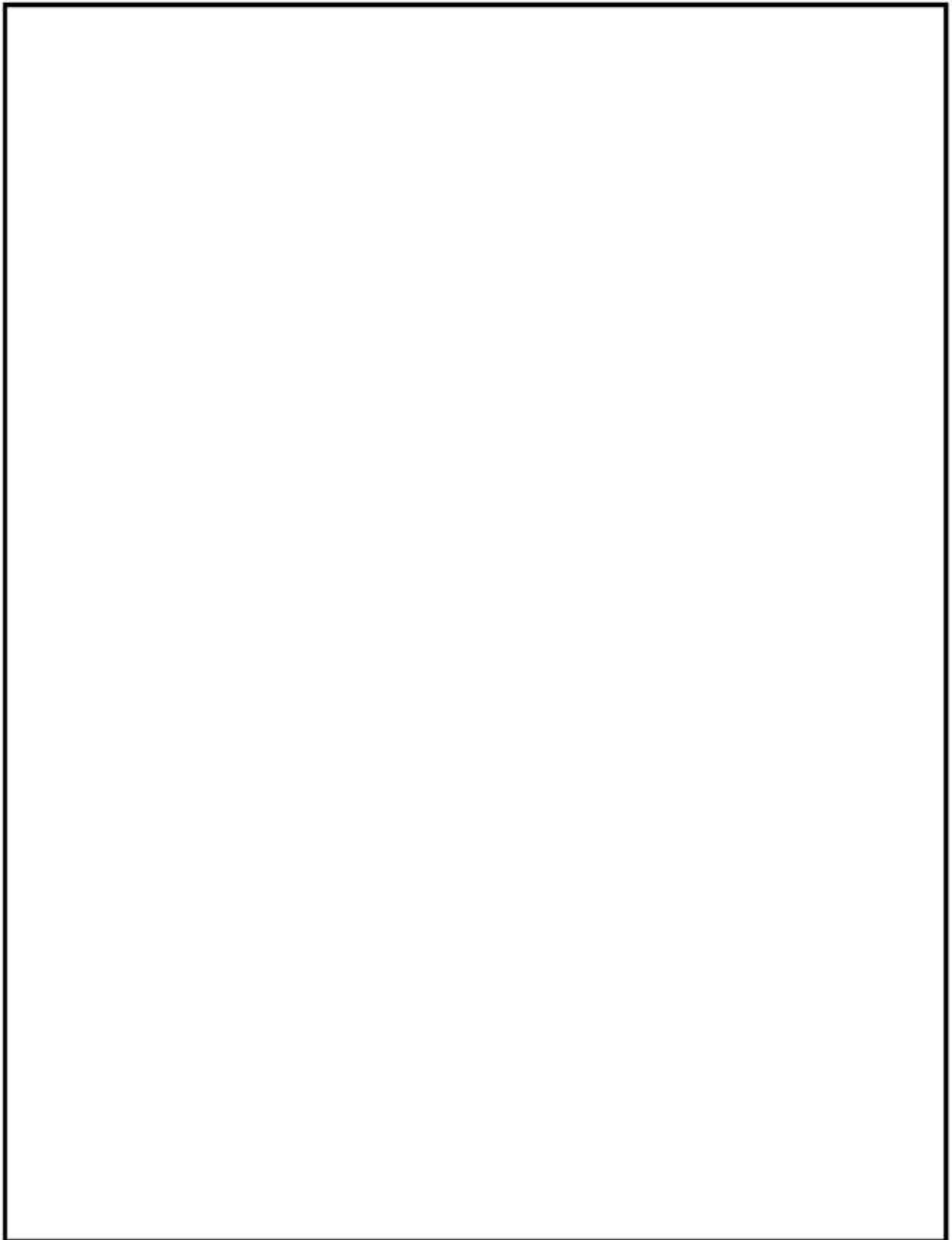
第4図 (3/3) 臨界解析モデル (燃料領域拡大図) (15×15 燃料収納時) (冠水状態)



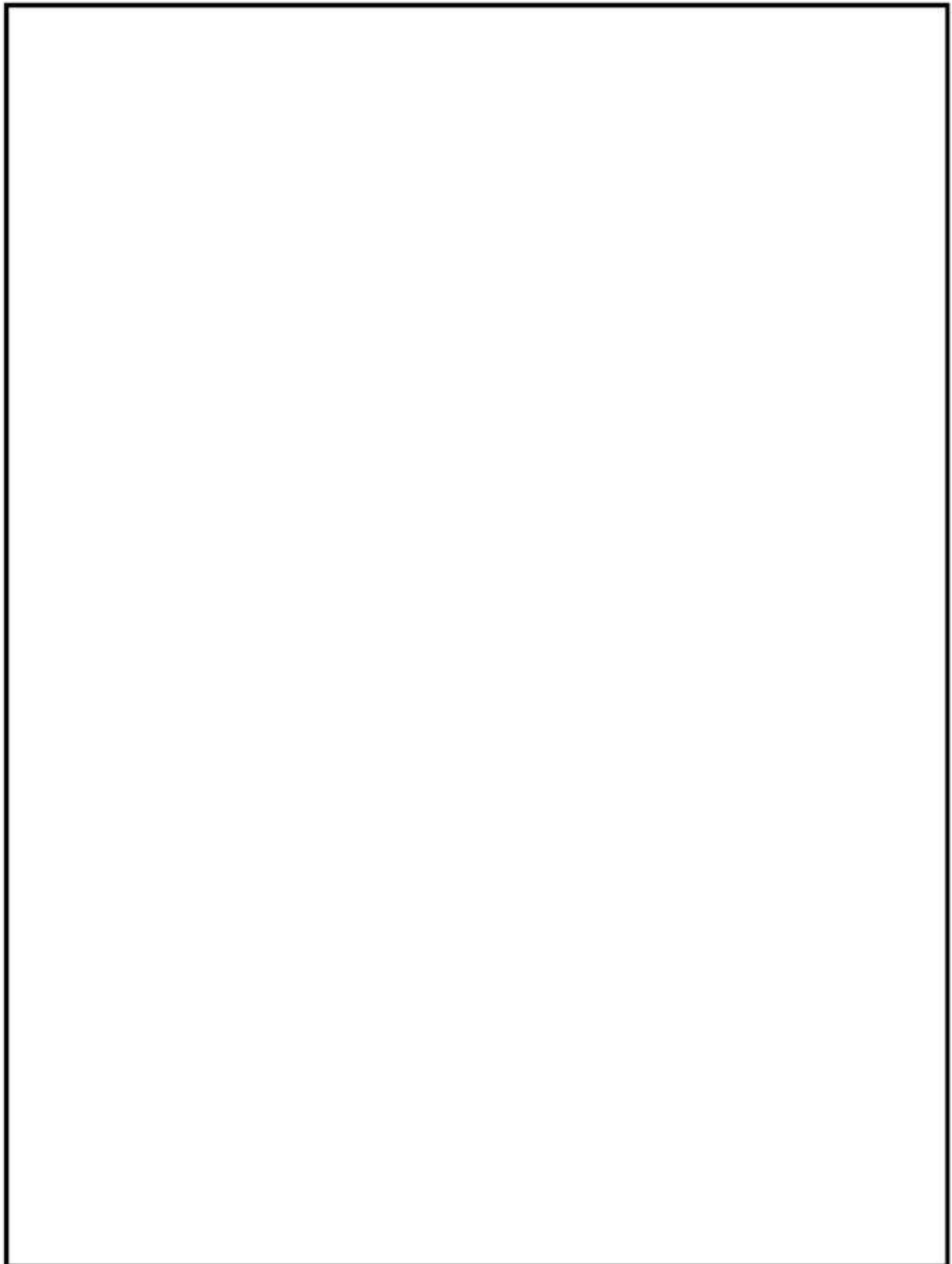
第5図（1/3） 臨界解析モデル（縦断面図）（17×17 燃料収納時）（乾燥状態）



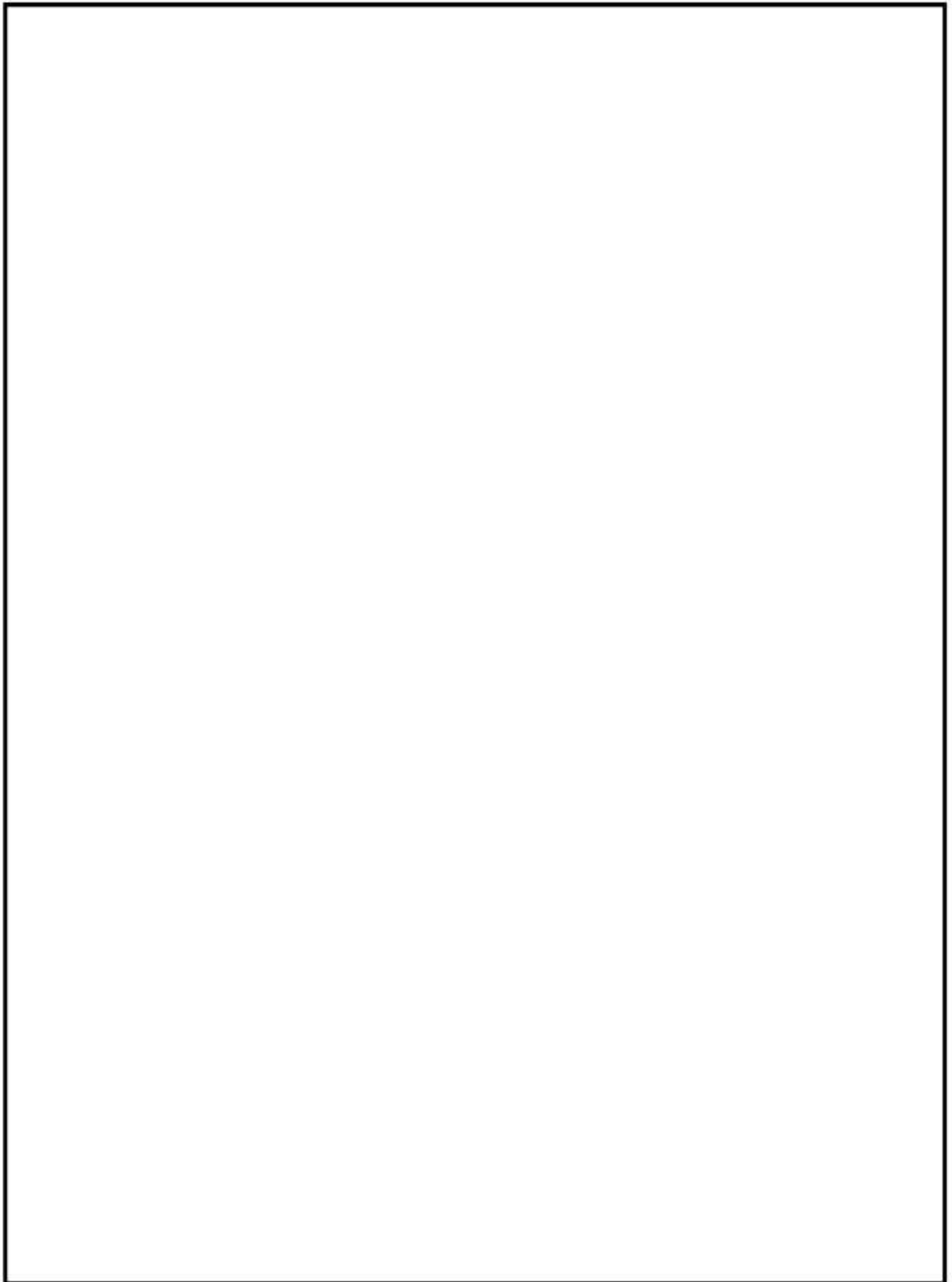
第5図（2/3） 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（17×17 燃料収納時）（乾燥状態）



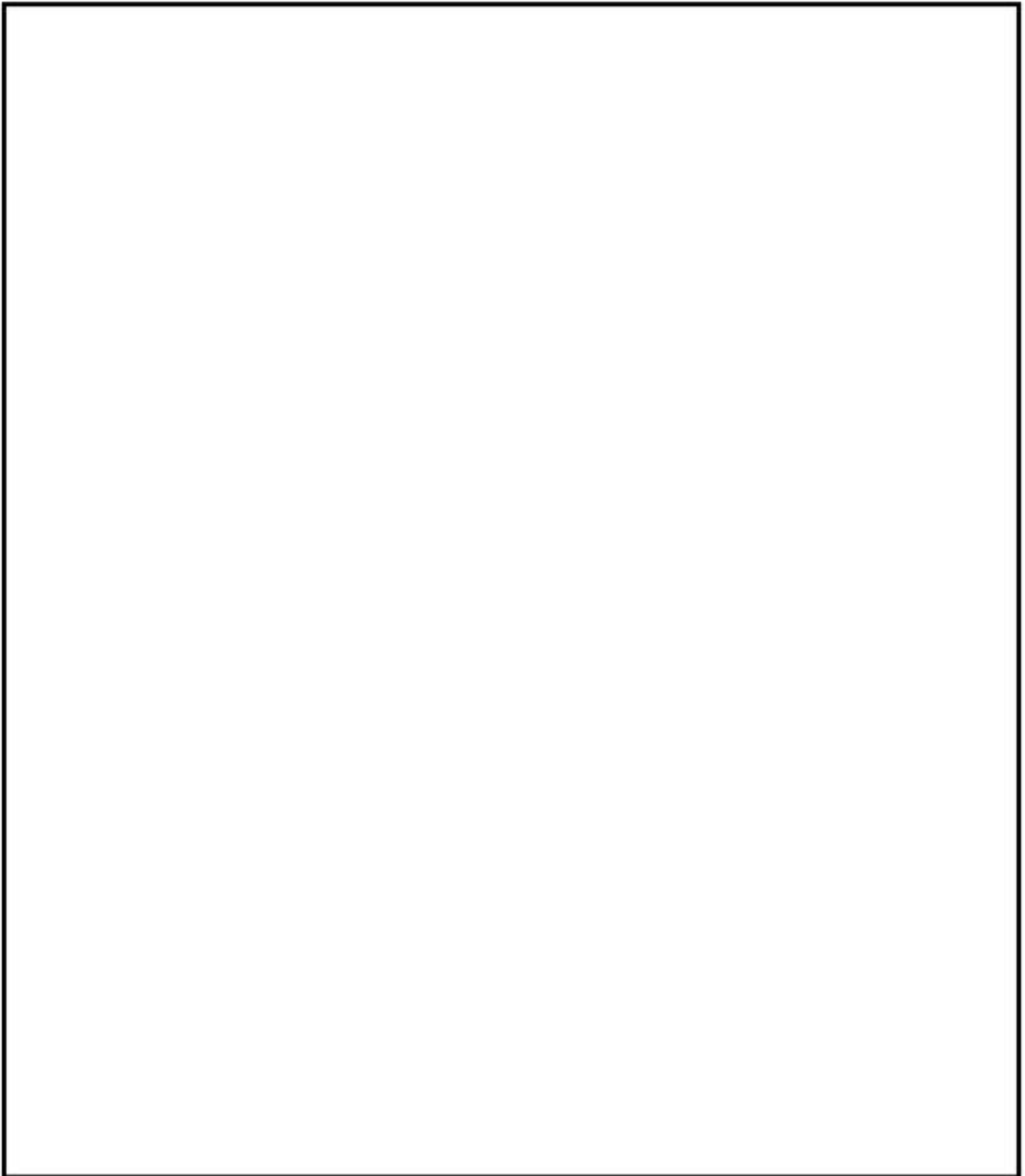
第5図 (3/3) 臨界解析モデル (燃料領域拡大図) (17×17 燃料収納時) (乾燥状態)



第6図（1/3） 臨界解析モデル（縦断面図）（15×15 燃料収納時）（乾燥状態）



第6図（2/3） 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（15×15 燃料収納時）（乾燥状態）



第6図 (3/3) 臨界解析モデル (燃料領域拡大図) (15×15 燃料収納時) (乾燥状態)

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

第5表 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	0.931 (3 σ :0.00129)	0.931 (3 σ :0.00123)	0.95 以下	なお、SCALE コードシステムはモンテカルロ法であり統計誤差を伴うため、本評価結果は統計誤差(σ)の3倍(3 σ)を加味した値である。
	乾燥 状態	0.403 (3 σ :0.00039)	0.397 (3 σ :0.00039)		

(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) また、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以下となることを満足することにより未臨界性を判定できる。」とされている。

[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。

MSF-28P型は、貯蔵時及び貯蔵施設での取扱条件に対して厳しい条件となる設計上考慮すべき自然現象(地震、津波及び竜巻)に対しても、バスケットは弾性状態に留まる設計とする(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(L5-95LC210)」、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(L5-95LC211)」及び補足説明資料6-1「竜巻及びその他外部事象に対する安全機能維持に関する説明資料(L5-95LC212)」参照)。したがって、設計上想定される状態においてバスケットに塑性変形は生じない。

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感度を 17×17 燃料を収納した条件にて確認する。

- ✓ 燃料配置
- ✓ 寸法条件 (バスケットプレート幅・バスケットプレート内幅・バスケット格子内のり・中性子吸収材板厚)
- ✓ MSF-28P 型内/外雰囲気
- ✓ 実条件 を考慮
- ✓ 燃料収納から燃料取出しまでの流れを考慮

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、臨界解析条件が安全側の条件であり、臨界解析条件の設定根拠は妥当である。

別紙1-1 表 感度解析条件及び評価結果 (17×17 燃料収納時)

項目	乾燥状態		感度解析結果 Δk (注3)	冠水状態		感度解析結果 Δk (注3)
	感度解析条件 (注2)			感度解析条件 (注2)		
燃料配置 (別紙1-1 図 参照)	①中心偏向配置		—	①外周燃料外周偏向配置		—
	②バスケット格子内中央配置		-0.0003	②中心偏向配置		-0.0022
	③外周偏向配置		-0.0013	③バスケット格子内中央配置		-0.0018
				④外周偏向配置		-0.0047
バスケット プレート幅	①最小 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm)		-0.0006	①最小 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm)		-0.0007
	②最大 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm)			②最大 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm)		
バスケット プレート内幅	①最大 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm)		-0.0004	①最小 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm)		-0.0036
	②最小 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm)			②最大 (A-A 断面 <input type="text"/> cm) (B-B、C-C 断面 <input type="text"/> cm)		
バスケット 格子内のり	①最小 <input type="text"/> cm		-0.0024	①最大 <input type="text"/> cm		-0.0039
	②最大 <input type="text"/> cm			②最小 <input type="text"/> cm		
中性子吸収材 板厚	①最小 <input type="text"/> cm		-0.0010	①最小 <input type="text"/> cm		-0.0008
	②最大 <input type="text"/> cm			②最大 <input type="text"/> cm		
MSF-28P 型内雰囲気	—		—	水密度 0.0~1.0g/cm ³		別紙1-2 図参照
MSF-28P 型外雰囲気	水密度 0.0~1.0g/cm ³		別紙1-3 図参照	水密度 0.0~1.0g/cm ³		別紙1-4 図参照

(注1) 乾燥状態は第5図を、冠水状態は第3図を参照。

(注2) 申請書記載値の解析条件 (第2表から第4表) から各感度解析条件のみを変更した。各項目の①は申請書記載値での解析条件である。

(注3) 感度解析条件 (②、③及び④) での中性子実効増倍率から申請書記載値での解析条件 (①) での中性子実効増倍率を差し引いた値。

(Δk = (感度解析結果) - (申請書記載値))

別紙 1-2 表 感度解析条件及び評価結果 (17×17 燃料収納時)

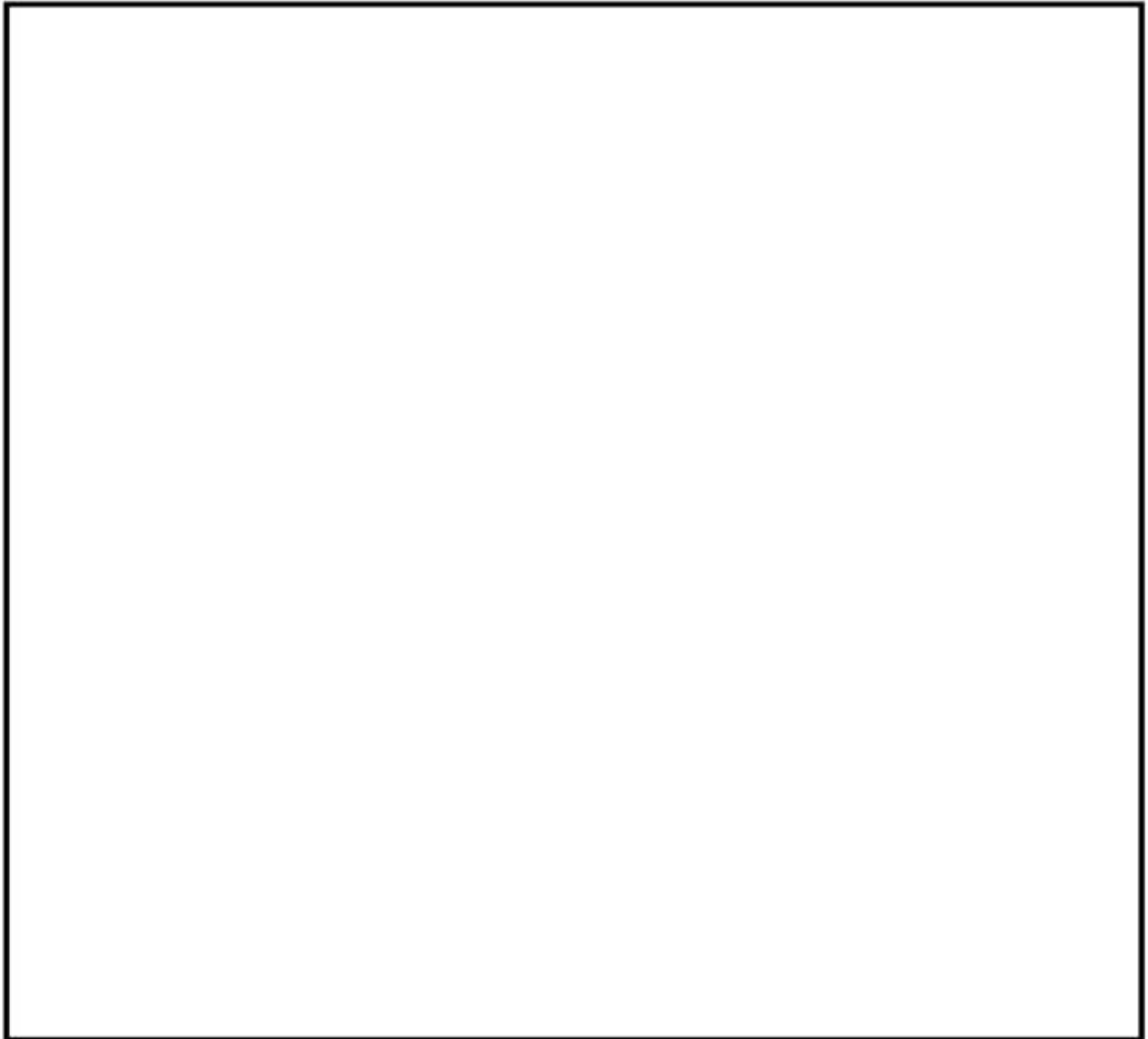
項目	乾燥状態 (注2)		感度解析結果 Δk (注3)	冠水状態 (注2)		感度解析結果 Δk (注3)
	感度解析条件			感度解析条件		
実条件 (注1)	① <input type="text"/> g/cm ²	② <input type="text"/> g/cm ²	別紙 1-5 図参照	① <input type="text"/> g/cm ²	② <input type="text"/> g/cm ²	別紙 1-6 図参照
燃料収納から 燃料取出しまで	別紙 3 参照					

(注1) 乾燥状態は第5図を、冠水状態は第3図を参照。

(注2) 申請書記載値の解析条件 (第2表から第4表) から各感度解析条件のみを変更した。各項目の①は申請書記載値での解析条件である。

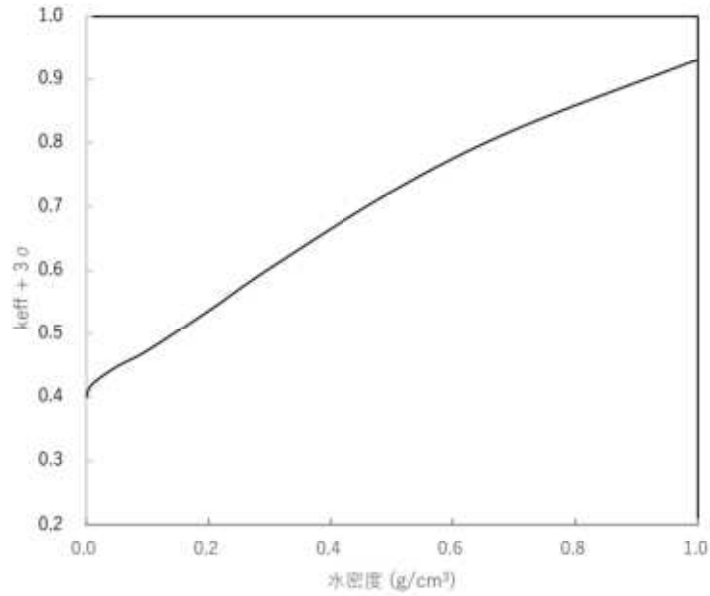
(注3) 感度解析条件 (②) での中性子実効増倍率から申請書記載値での解析条件 (①) での中性子実効増倍率を差し引いた値。

($\Delta k =$ (感度解析結果) - (申請書記載値))



別紙1-1図 燃料配置感度解析条件

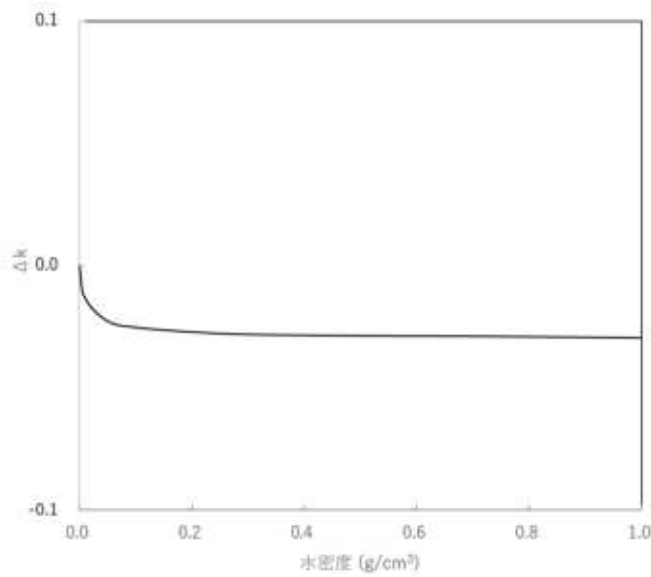
(注) 冠水状態では体系内の中性子が減速され、中性子吸収材の中性子吸収効果が大きい。外周バスケットプレートには中性子吸収材が配置されていないため、冠水状態については外周部に配置された燃料はキャスク外周に寄せて、中央部に配置された燃料はキャスク中心偏向配置とした評価を実施した。



[補足]

水密度が上がるにつれて、中性子の減速効果が強まって熱中性子及び核分裂反応が増えて、中性子実効増倍率が大きくなっている。

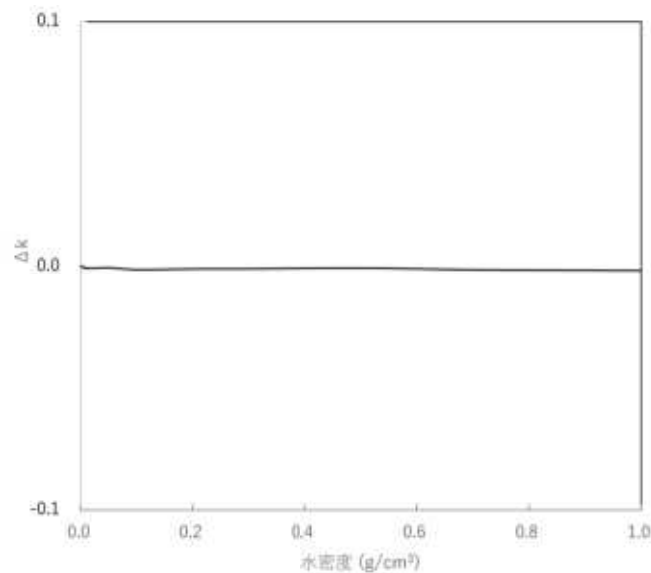
別紙 1 - 2 図 MSF-28P 型内雰囲気評価結果



[補足]

乾燥状態ではキャスク内部での中性子の減速が弱く、キャスク外部に漏れる中性子が存在するため、水密度が上がるにつれて容器間での中性子やり取りの量が減り、中性子実効増倍率が小さくなっている。

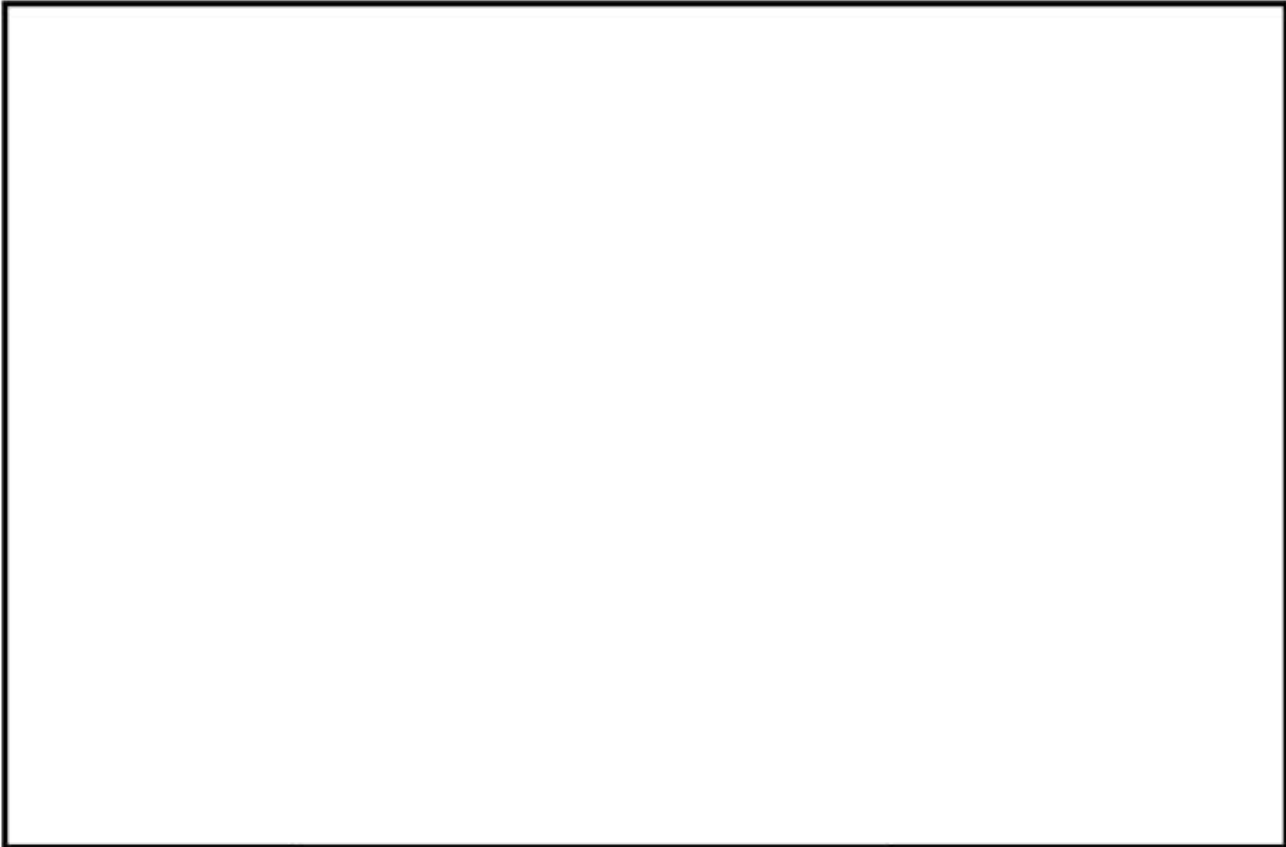
別紙 1 - 3 図 MSF-28P 型外雰囲気評価結果 (乾燥状態)



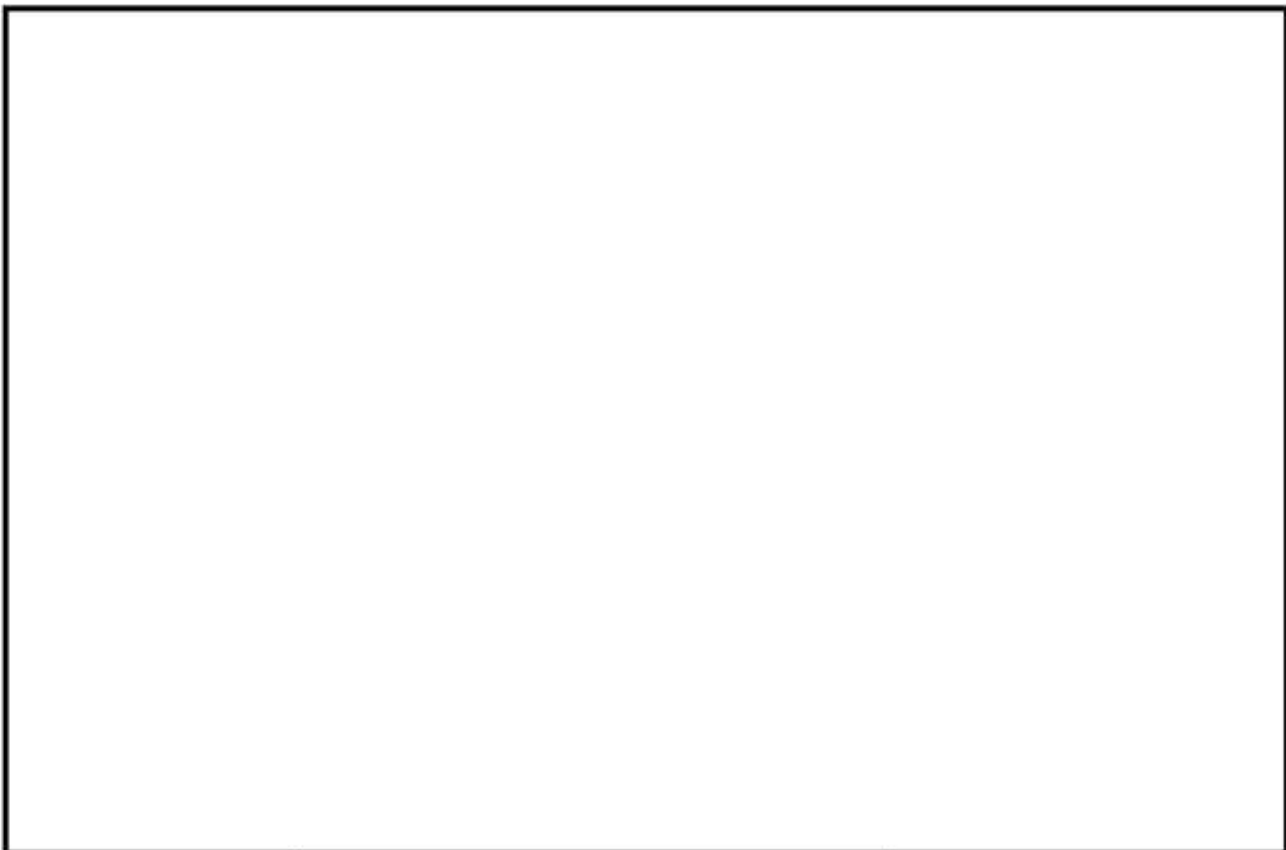
[補足]

冠水状態ではキャスク内部での中性子の減速が強く、キャスク外部に漏れる中性子が少ないため、水密度が上がっても容器間での中性子やり取りの量にはほとんど影響を与えないため、中性子実効増倍率も変わっていない。

別紙 1 - 4 図 MSF-28P 型外雰囲気評価結果 (冠水状態)



別紙 1 - 5 図 の評価結果（乾燥状態）



別紙 1 - 6 図 の評価結果（冠水状態）

臨界解析に使用する解析コードについて

MSF-28P 型の臨界防止設計に用い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。

a. SCALE コードシステム

i 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。

ii 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。

- ・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。
- ・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。

iii 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。

iv 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、兼用キャスクを構成する燃料体および構造物の材質を模擬した多数の臨界実験のベンチマーク解析を実施し、その妥当性を確認している。

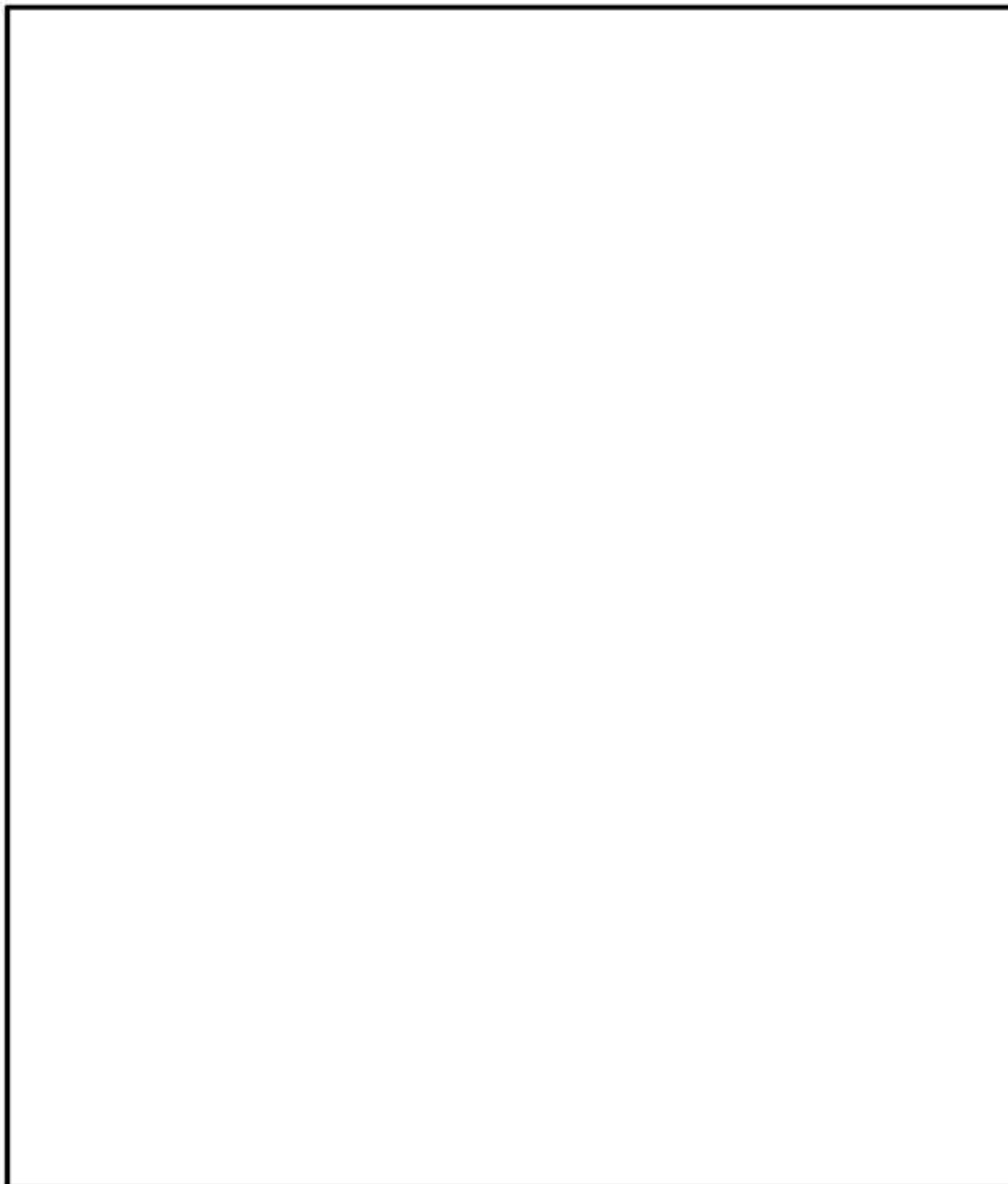
文献(2)に示す実験について、収納物である使用済燃料の仕様並びに下記①～⑥の条件を考慮し、ベンチマーク解析を実施する臨界実験を選定した。別紙 2-1 表に示すとおりベンチマーク解析は実験を良く再現しており、妥当な結果が得られている。

- ①燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合
- ②複数の集合体が近接して配列する場合
- ③この集合体の配列の間に鋼板、中性子吸収材（ほう素）を含む板が存在する場合
- ④集合体に近接して反射体（鋼板、鉛）を配置した場合
- ⑤水中に中性子吸収材（ほう素）が溶解している場合

⑥乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いない場合

また、ベンチマーク解析対象は、次の3つの機関により実施された臨界実験より、合計

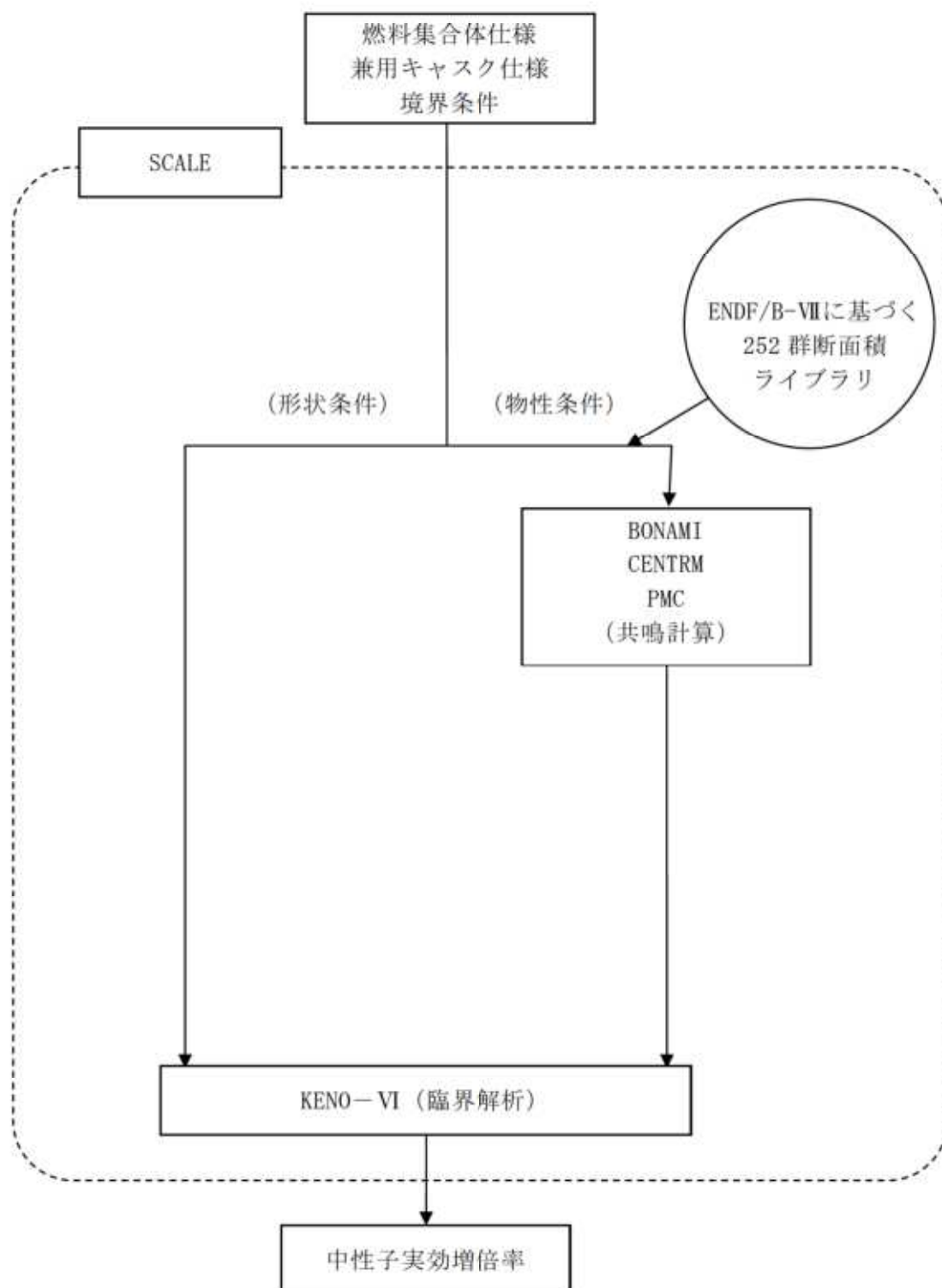
ケースを選定した。



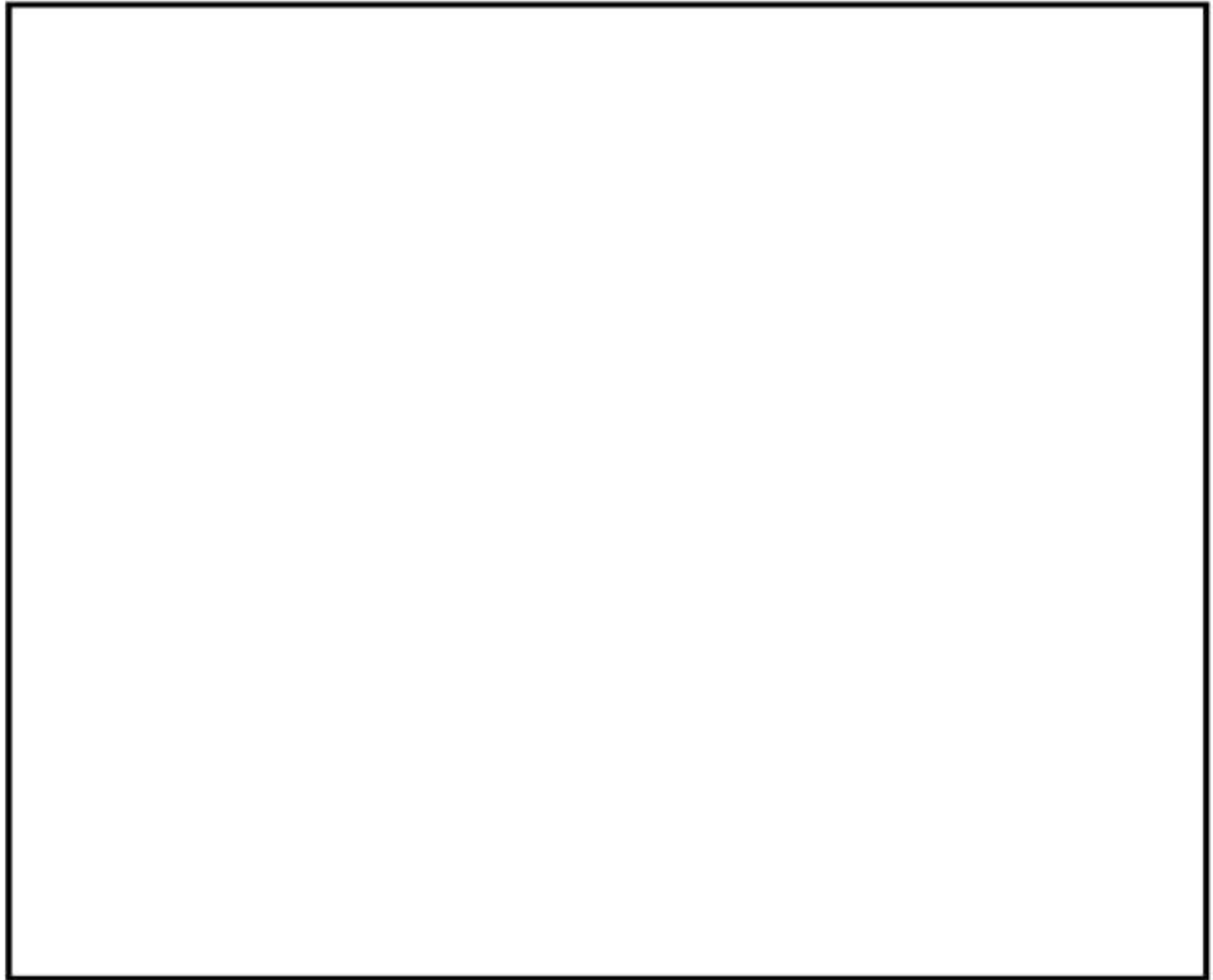
別紙2-1表 ベンチマーク解析結果

	ケース数	平均値	標準偏差 ^(注1)	最大値	最小値
臨界実験 (1)		0.99961	0.00304	1.01172	0.99651
臨界実験 (2)		0.99776	0.00264	1.00055	0.99363
臨界実験 (3)		1.00279	0.00259	1.00452	0.99981
合計		0.99940	0.00309	1.01172	0.99363

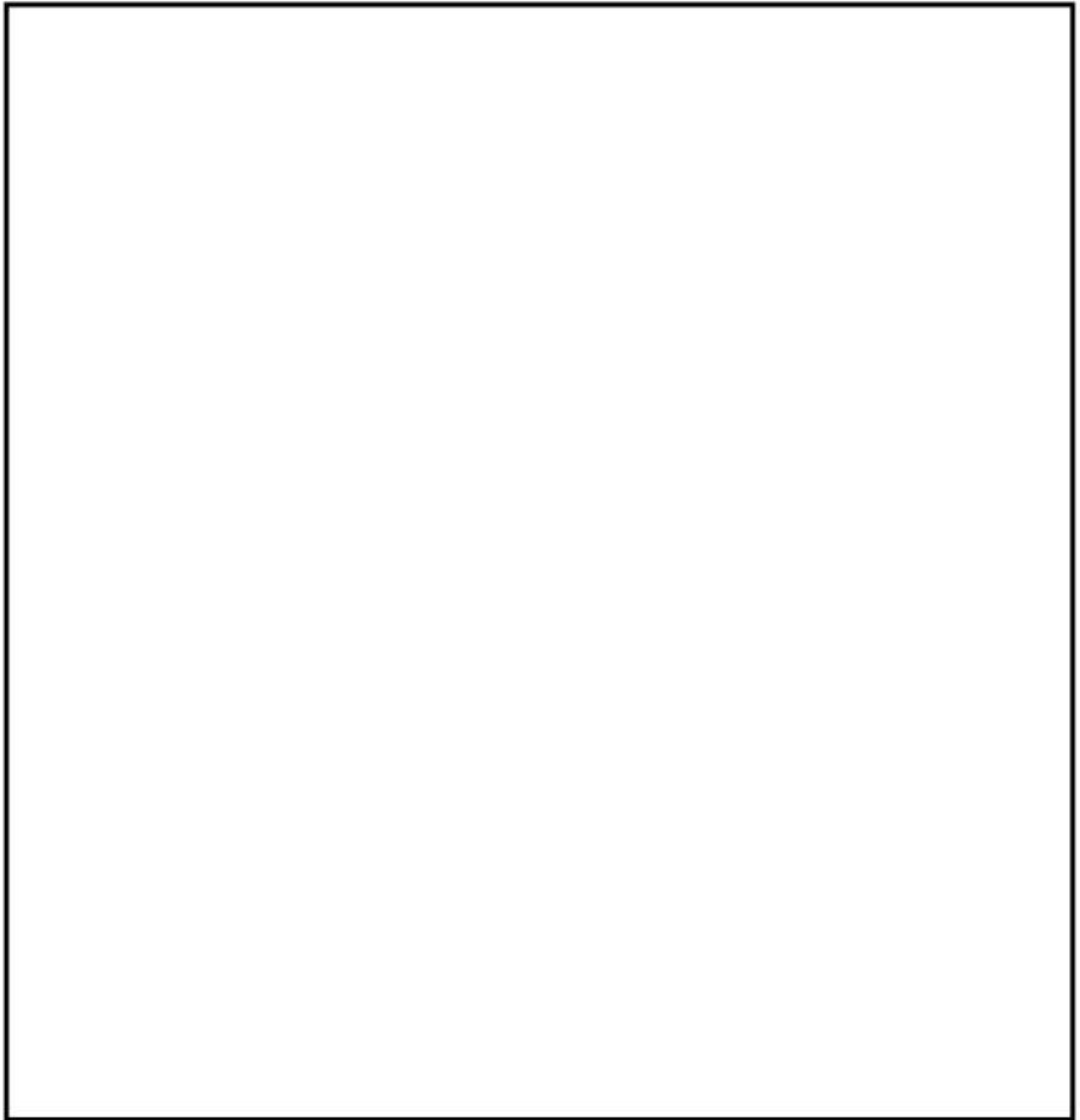
(注1) この標準偏差は各臨界実験での複数のベンチマーク解析結果(中性子実効増倍率)に対する標準偏差である。



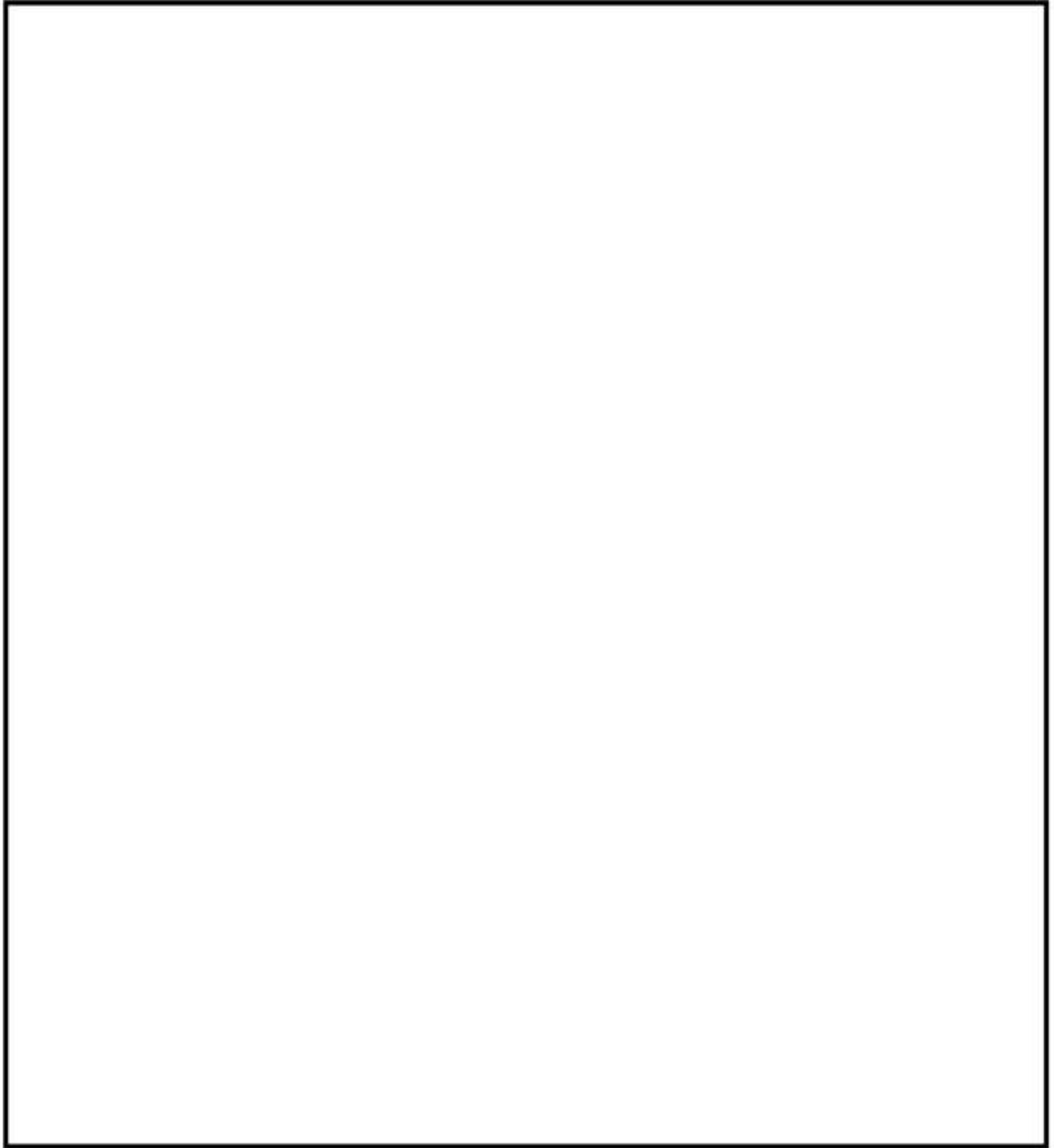
別紙 2 - 1 図 SCALE コードシステムの解析フロー図



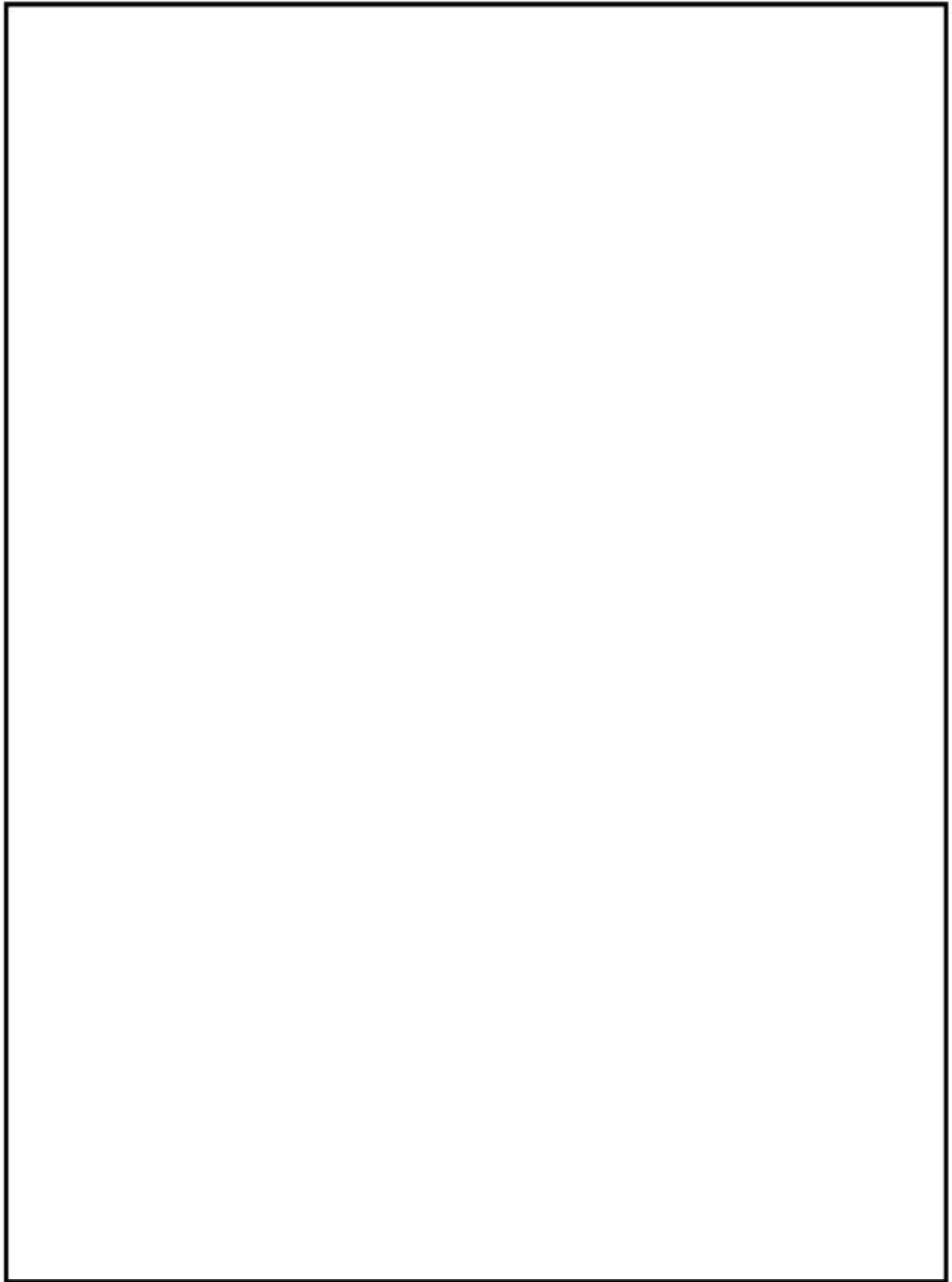
別紙 2 - 2 図  臨界実験に用いた燃料棒



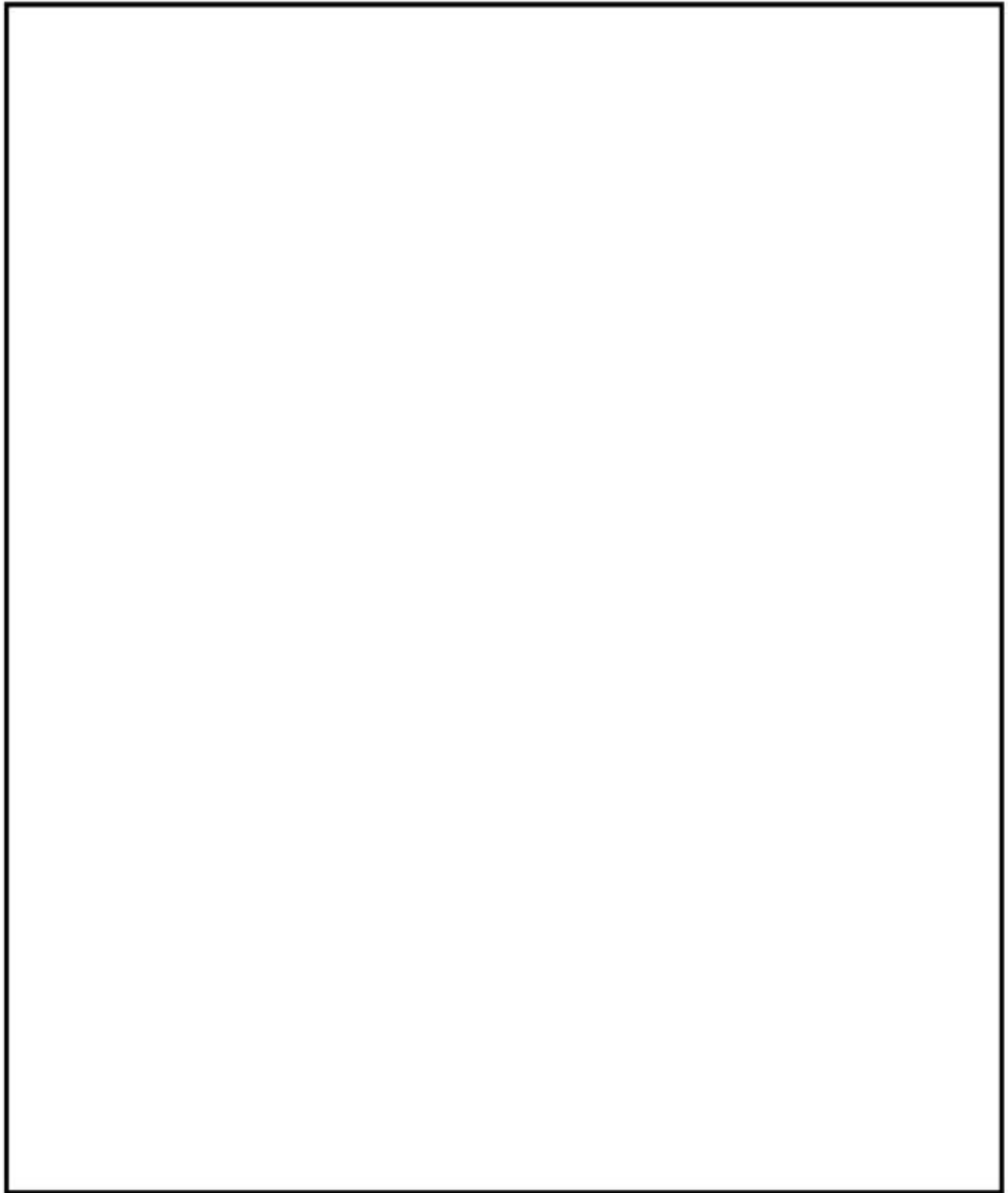
別紙 2 - 3 図 臨界実験体系(1)



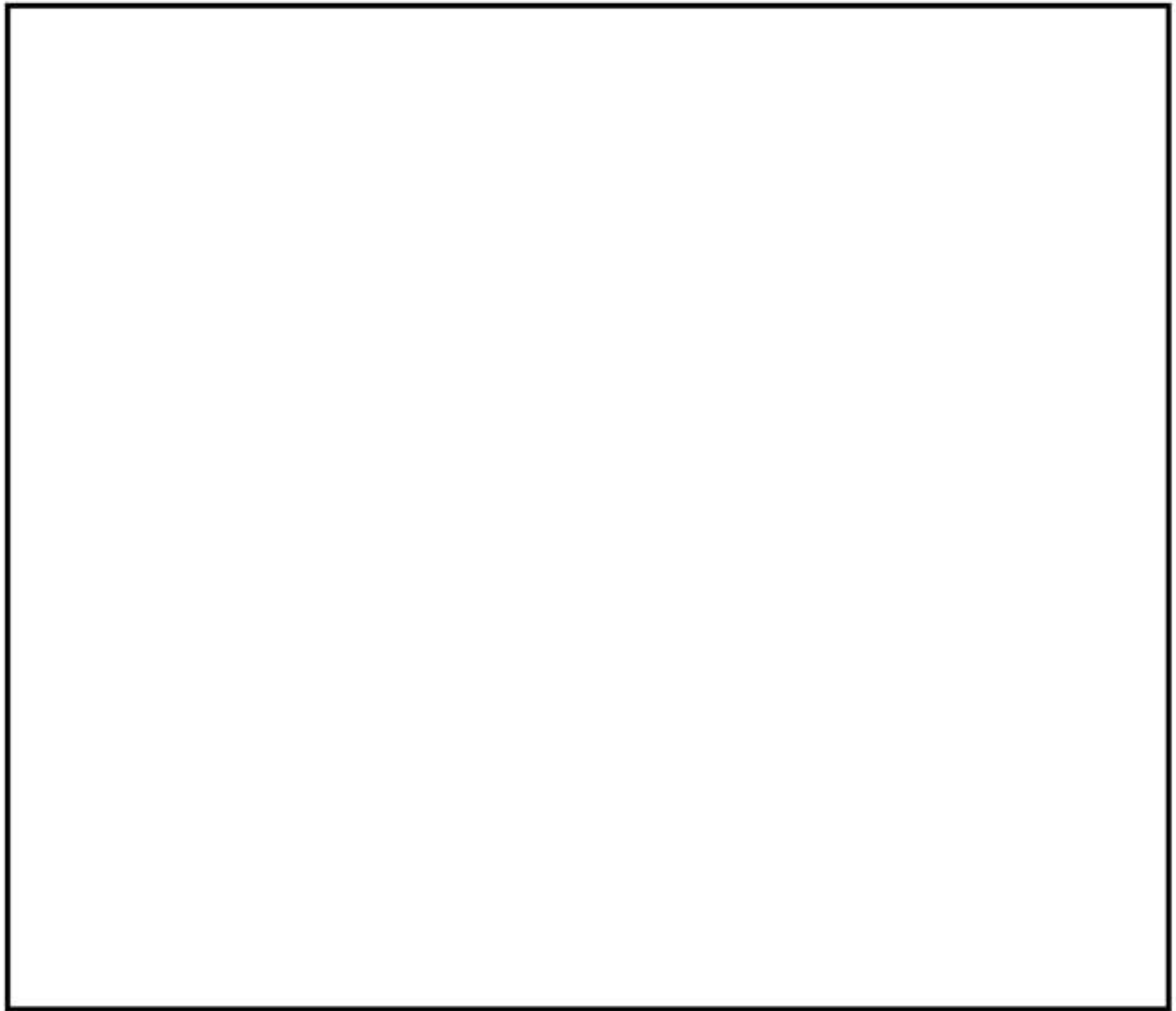
別紙 2 - 4 図 臨界実験体系 (2)



別紙 2 - 5 図 臨界実験体系 (1)



別紙 2 - 6 図 臨界実験体系 (2)



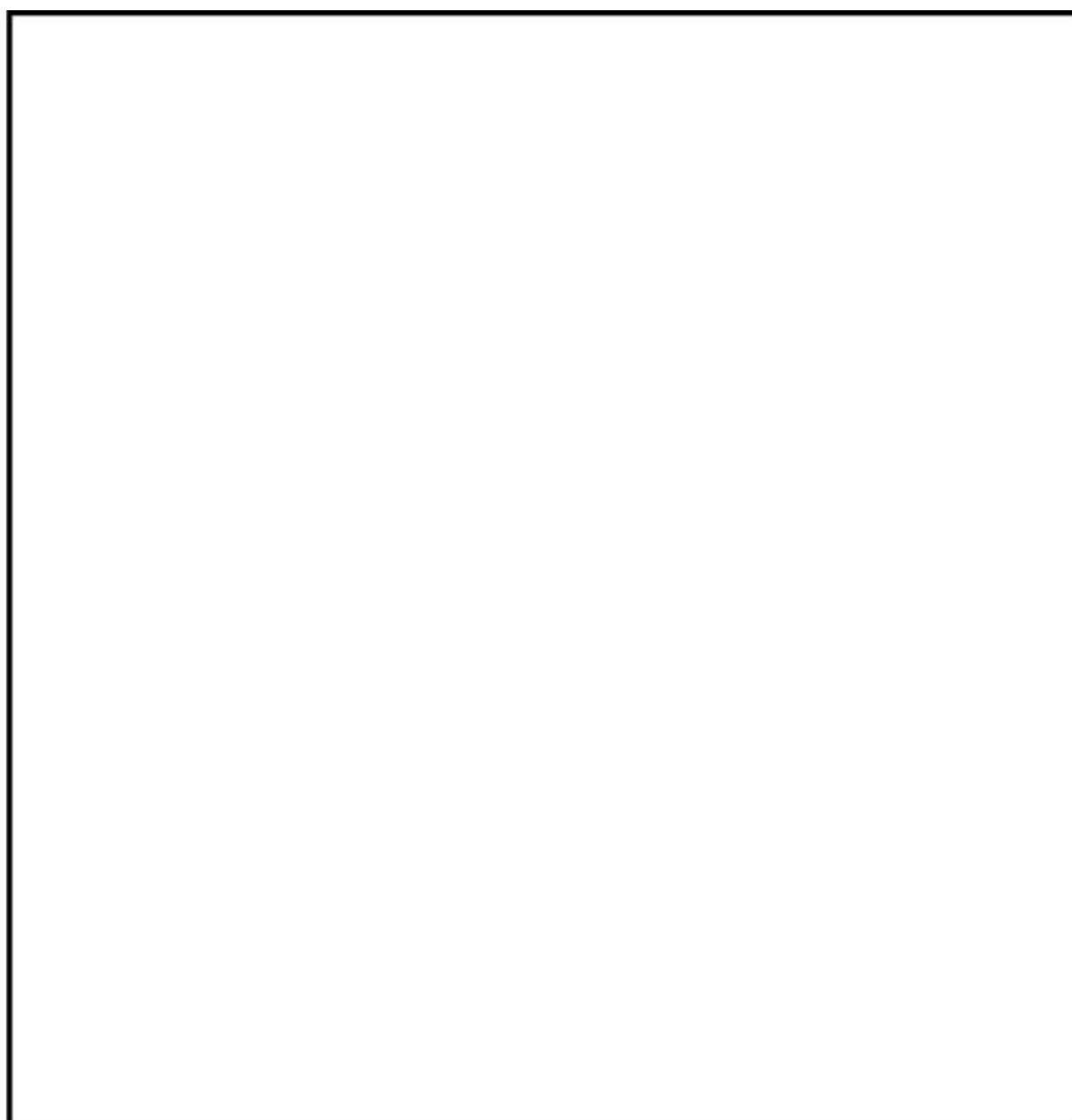
別紙2-7図 臨界実験体系

(参考文献)

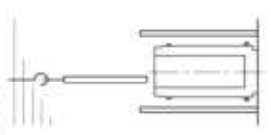
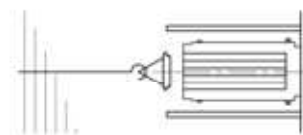
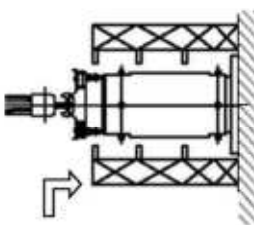
- (1) B. T. Rearden and M. A. Jessee, Eds., "SCALE Code System", ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2016).
- (2) Organisation for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency, "International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments", NEA/NSC/DOC(95)03, (2006).

MSF-28P 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

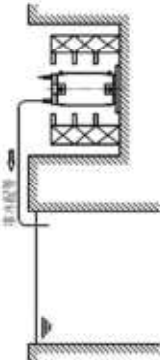
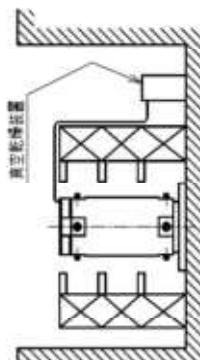
MSF-28P 型に使用済燃料を収納し、貯蔵した後、使用済燃料を MSF-28P 型から取り出すまでの取扱いフロー（蓋部が金属部へ衝突しない設置方法の例。なお、基礎等に固定する設置方法では設置方法が異なるものの、臨界解析条件は共通である。）、及び各状態における MSF-28P 型の構成部品や MSF-28P 型の内外雰囲気の状態及びその際の中性子実効増倍率について別紙 3-1 表に示す。以下のとおり、取扱い時に想定される状態において、本文で示す冠水状態における中性子実効増倍率が最も大きい値である。



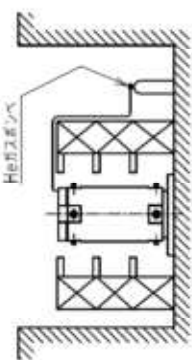
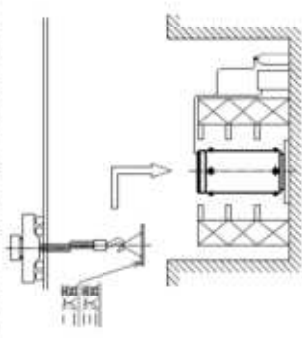
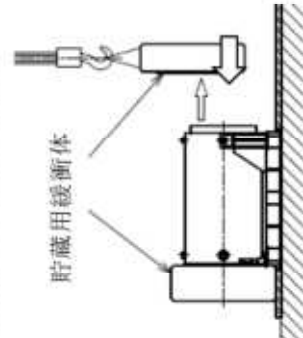
別紙3-1表 MSF-28P型の取扱いフロー（蓋部が金属部へ衝突しない設置方法の例）（1/7）

No.	取扱い手順	MSF-28P型 構成部品	MSF-28P型 内券囲気	MSF-28P型 外券囲気
1-1	使用済燃料装荷 	本体 バスケット		
1-2	一次蓋取付 	本体 バスケット 一次蓋	水	水
1-3	容器吊上げ・移動・吊降し・ 一次蓋ボルト締め付け 	本体 バスケット 一次蓋		空気

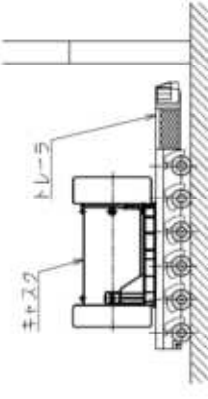
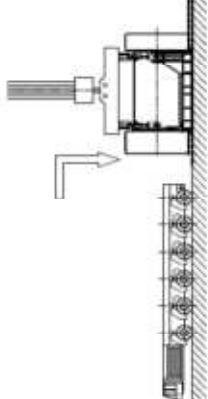

別紙3-1表 MSF-28P型の取扱いフロー（蓋部が金属部へ衝突しない設置方法の例）(2/7)

No.	取扱い手順	MSF-28P型 構成部品	MSF-28P型 内雰囲気	MSF-28P型 外雰囲気
1-4	MSF-28P型内部水の排水 (別紙3-1図参照) 	本体 バスケット 一次蓋	水 空気	MSF-28P型 外雰囲気
1-5	MSF-28P型内部の真空乾燥 	本体 バスケット 一次蓋	真空	空気

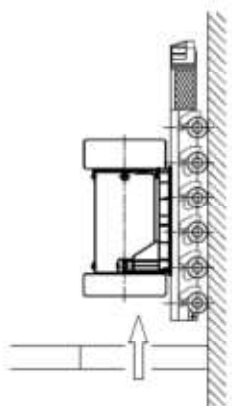
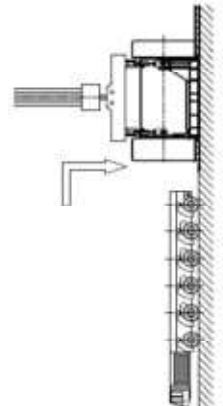
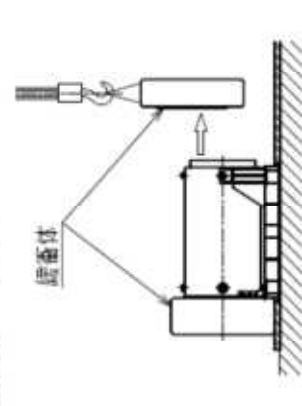
別紙3-1表 MSF-28P型の取扱いフロー（蓋部が金属部へ衝突しない設置方法の例）（3/7）

No.	取扱い手順	MSF-28P型 構成部品	MSF-28P型 内券囲気	MSF-28P型 外券囲気
1-6	MSF-28P型内部への ヘリウムガス充填 	本体 バスケット 一次蓋	MSF-28P型 内券囲気	MSF-28P型 外券囲気
1-7	二次蓋・貯蔵用三次蓋取付け 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用三次蓋	ヘリウム	空気
1-8	貯蔵用緩衝体の取付け 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用三次蓋 貯蔵用緩衝体		

別紙3-1表 MSF-28P型の取扱いフロー（蓋部が金属部へ衝突しない設置方法の例）（4/7）

No.	取扱い手順 トレーラ上への設置・MSF-28P型の貯蔵施設への搬入	MSF-28P型構成部品	MSF-28P型内券囲気	MSF-28P型外券囲気
2-1				
2-2	<p>トレーラからの貯蔵場所への吊り降ろし</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用三次蓋 貯蔵用緩衝体</p>	ヘリウム	空気
2-3	<p>貯蔵</p> 			

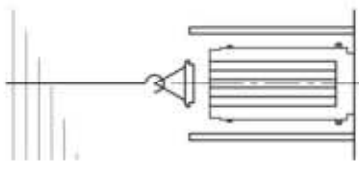
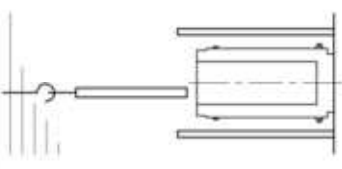
別紙3-1表 MSF-28P型の取扱いフロー（蓋部が金属部へ衝突しない設置方法の例）（5/7）

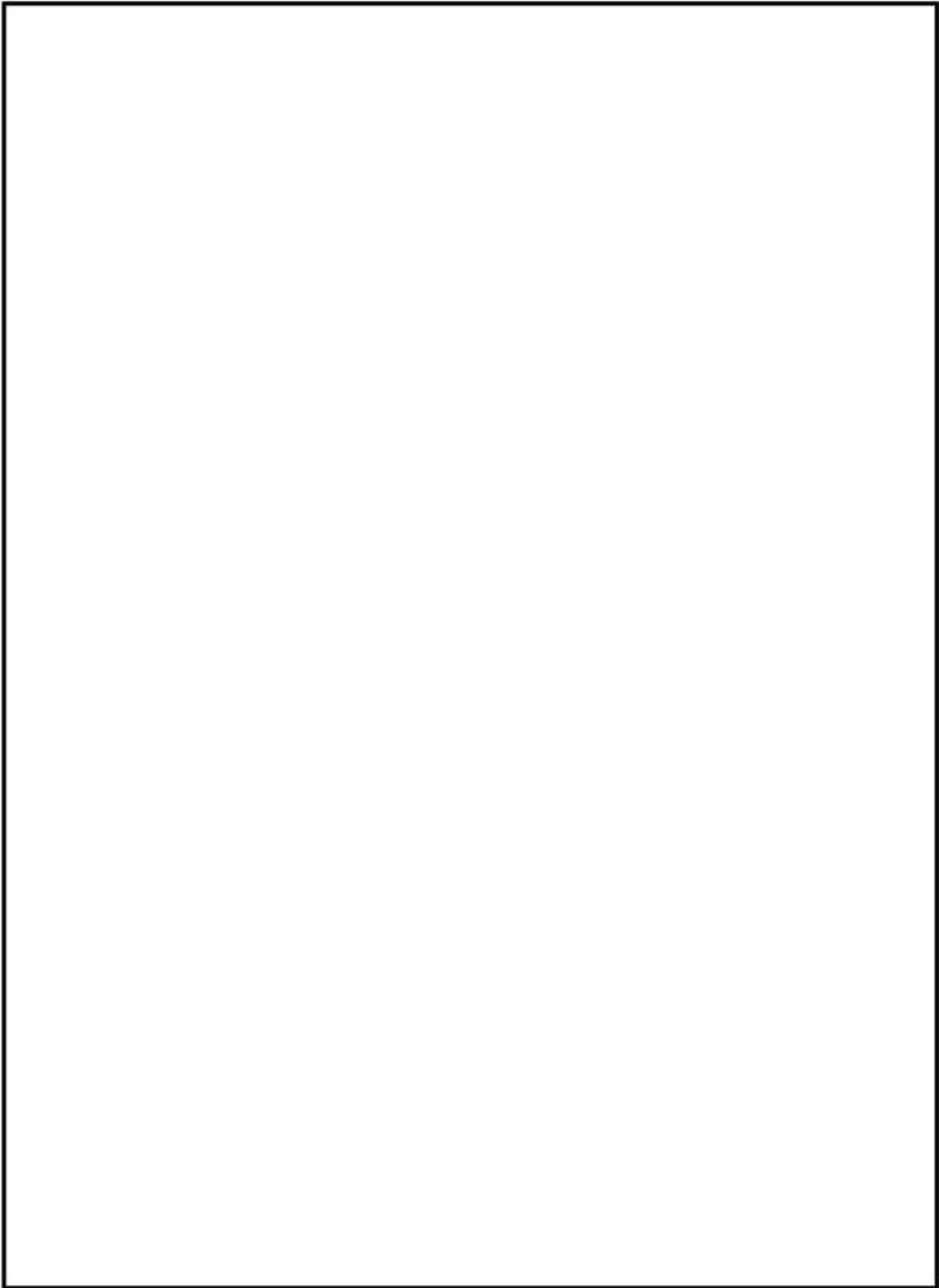
No.	取扱い手順	MSF-28P型 構成部品	MSF-28P型 内券囲気	MSF-28P型 外券囲気
3-1	<p>トレーラ上への設置・MSF-28P型の貯蔵施設からの搬出</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用三次蓋 貯蔵用緩衝体</p>	ヘリウム	空気
3-2	<p>トレーラからの吊り降ろし</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用三次蓋 貯蔵用緩衝体</p>	ヘリウム	空気
3-3	<p>緩衝体の取外し</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用三次蓋</p>	ヘリウム	空気

別紙3-1表 MSF-28P型の取扱いはフロー（蓋部が金属部へ衝突しない設置方法の例）（6/7）

No.	取扱い手順	MSF-28P型 構成部品	MSF-28P型 内券囲気	MSF-28P型 外券囲気
3-4	<p>二次蓋・貯蔵用三次蓋取外し</p>	<p>本体 バスケット 一次蓋</p>	ヘリウム	空気
3-5	<p>MSF-28P型内部への再冠水 （別紙3-1図参照）</p>	<p>本体 バスケット 一次蓋</p>	<p>水 空気</p>	

別紙3-1表 MSF-28P型の取扱いフロー（蓋部が金属部へ衝突しない設置方法の例）（7/7）

No.	取扱い手順	MSF-28P型 構成部品	MSF-28P型 内券囲気	MSF-28P型 外券囲気
3-6	<p>吊上げ・使用済燃料プールの移動・一次蓋取外し</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋</p>	水	水
3-7	<p>使用済燃料の取出し</p> 	<p>本体 バスケット</p>	水	



第 3 - 1 図 MSF-28P 型内部の排水及び再冠水方法