

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	25
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-76B 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	
別紙 4 臨界解析の対象燃料について	

## 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-76B 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。

MSF-76B 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-76B 型の貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及び MSF-76B 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（L5-95LD216）」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-76B 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-76B 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。臨界解析に用いる使用済燃料は最も反応度の高い高燃焼度 8 × 8 燃料とする。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、乾燥状態

の中性子実効増倍率の評価に当たっては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した（燃焼度クレジットは採用しない）。また、冠水状態の解析では、ガドリニアによる燃焼初期の反応度抑制効果を考慮して、濃縮度の異なる2種類の燃料棒を用い、炉心装荷冷温状態での燃料集合体の無限増倍率が1.3となる燃料モデル（モデルバンドル）を仮定する（別紙4参照）。これは、第2図に示すように、一般的なBWR燃料集合体では、ガドリニアは1サイクル照射で燃え尽きるように設計されており<sup>(1)</sup>、燃料集合体としての反応度のピークは、10,000MWd/t程度の燃焼度で現れるが、MSF-76B型は、炉心装荷冷温状態で無限増倍率が1.3を超えることがない使用済燃料を収納することを前提としているためである。

また、MSF-76B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-76B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-76B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-76B型に配置するとともに、バスケットプレート板厚、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 $3\sigma$ ）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。

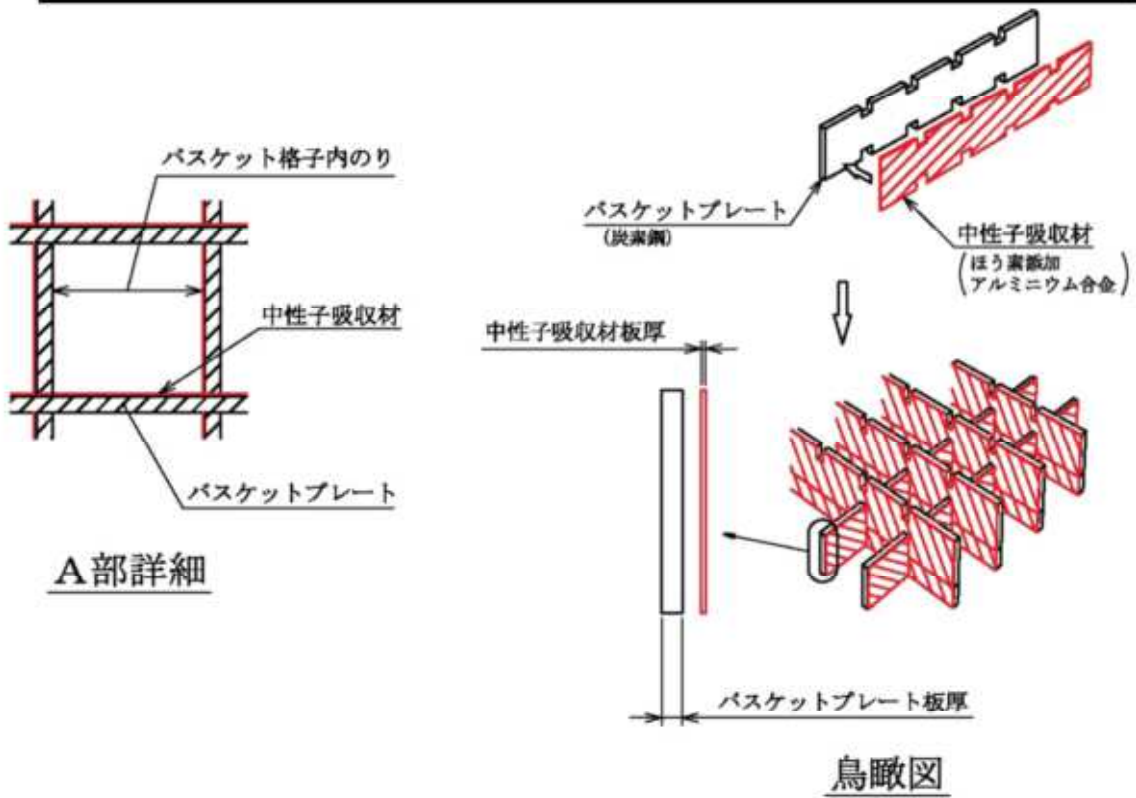
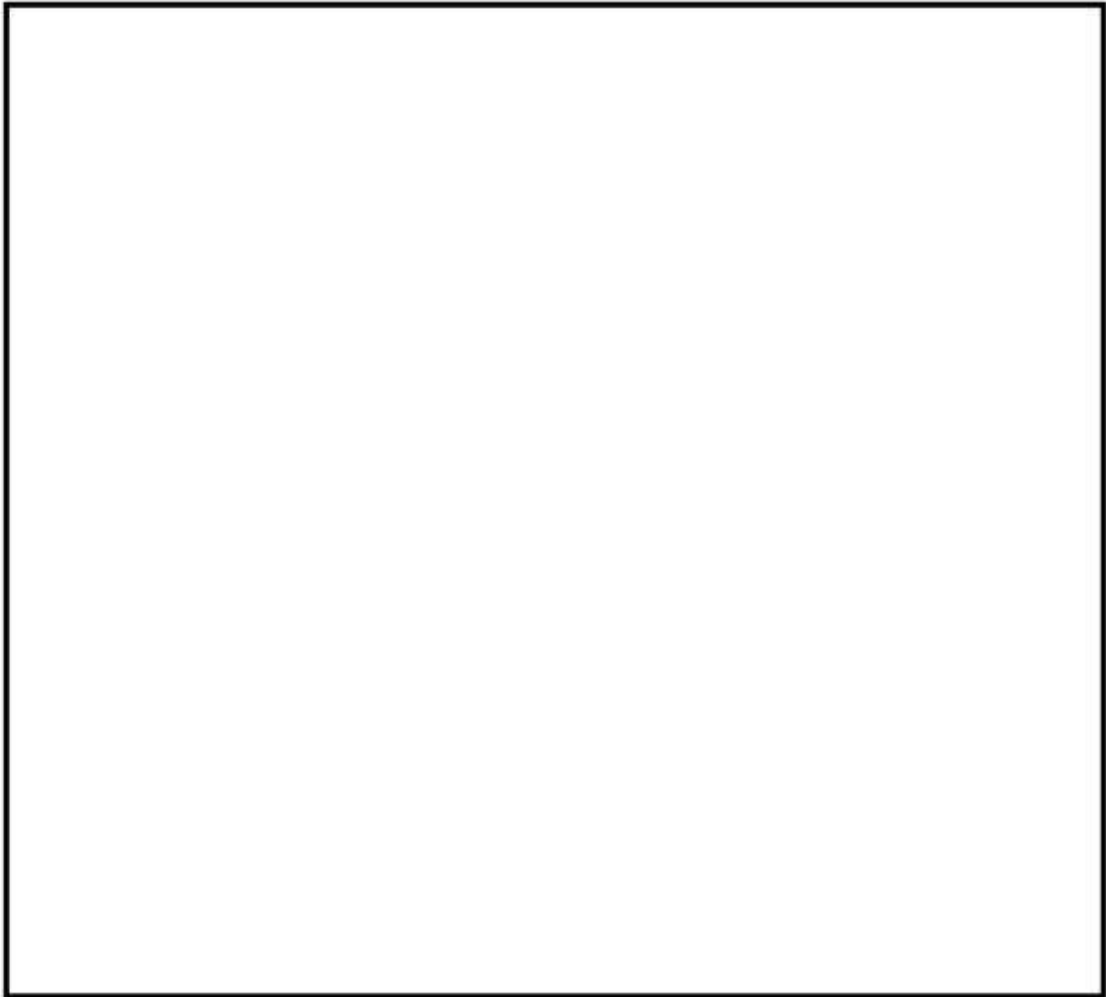
### ③設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

- ・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。

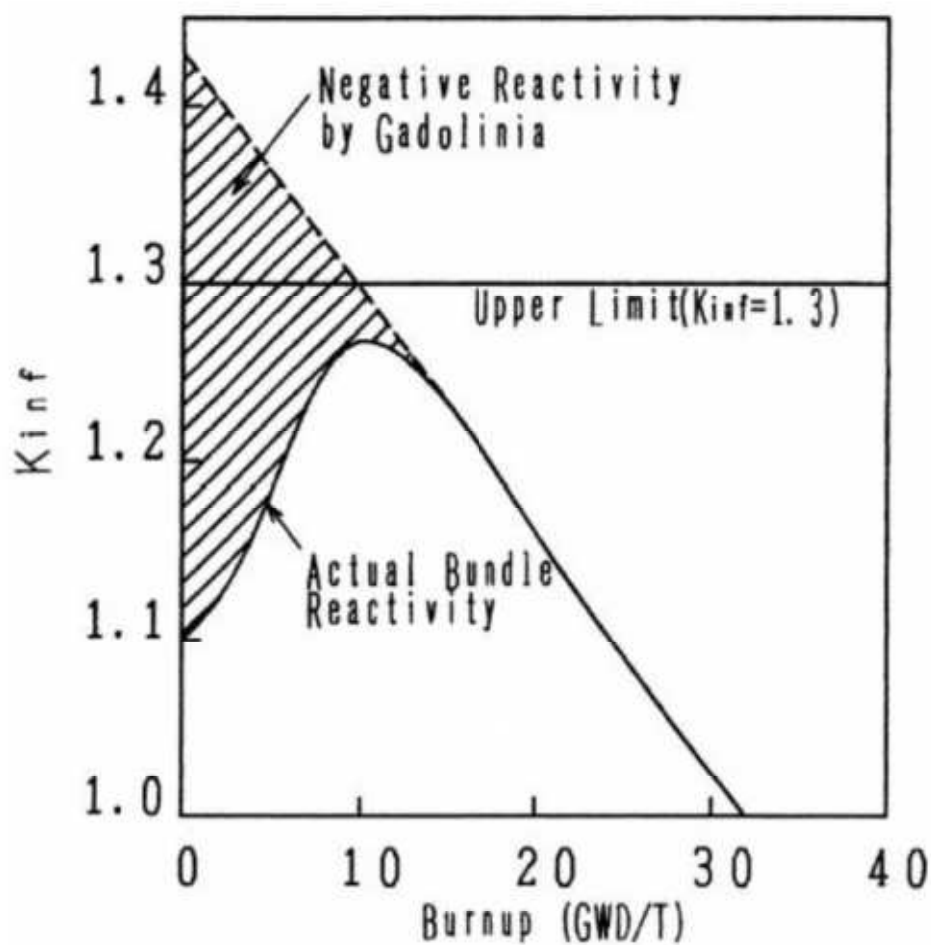
MSF-76B型の設計貯蔵期間は60年である。また、補足説明資料16-4「材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料（L5-95LD216）」に示すとおり、MSF-76B型は、構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持するこ



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



第2図 BWR 燃料集合体の反応度特性<sup>(1)</sup>

## (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-76B 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-76B 型の臨界解析フローを第 3 図に示す。臨界解析では、MSF-76B 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 4 図から第 5 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、貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体を安全側に真空に置換する。なお、乾燥状態での臨界解析に加え、MSF-76B 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  $1.0\text{g/cm}^3$  とした解析を行う。

また、臨界評価では、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-76B 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  $0\text{MWd/t}$  の減損していない新燃料とし、乾燥時は平均初期濃縮度の最大値であるウラン濃縮度  $3.66\text{wt}\%$  とし、冠水時は炉心装荷冷温状態での燃料集合体の無限増倍率が  $1.3$  となる燃料モデル（モデルバンドル）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、乾燥状態の中性子実効増倍率の評価に当たってはガドリニアの存在を無視する。また、冠水状態の解析では、ガドリニアによる燃焼初期の反応度抑制効果を考慮して、濃縮度の異なる2種類の燃料棒を用い、炉心装荷冷温状態での燃料集合体の無限増倍率が1.3となる燃料モデル（モデルバンドル）を仮定する。

・モデル化の保守性

- －MSF-76B型が無限に配列した体系（完全反射）とする。これにより、MSF-76B型の滑動を考慮しても、MSF-76B型の配置制限は必要なく、MSF-76B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、乾燥状態及び冠水状態ともに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 MSF-76B型解析条件の概要 配置(1)

項目	配置(1)		
	領域A	領域B	領域C
種別	新型8×8ジルコニウムラミナ燃料	領域B	領域C
初期濃縮度 (wt%) (注1)	高燃焼度8×8燃料		
ウラン重量 (kg) (注1)	≤3.66		
最高燃焼度 (MWd/t) (注1) (燃料集合体平均)	乾燥状態：3.66 冠水状態：4.9及び2.1		
冷却期間 (年) (注1)	-		
燃料集合体 1体の仕様	[Redacted]		
取納物仕様			
配置(注2)	[Redacted]		

(注1) 燃料集合体1体の仕様は、高燃焼度8×8燃料の仕様を代表として記載する。

(注2) 配置(2)の8×8燃料及び新型8×8燃料を収納する場合は、配置(1)の評価に包絡される。

第2表 臨界解析用の燃料集合体の仕様

項目	単位	仕様	
		乾燥状態	冠水状態
燃料集合体の種類	—	高燃焼度 8 × 8 燃料	
燃料材質	—	二酸化ウラン	
被覆管材質	—	ジルコニウム <sup>(注1)</sup>	
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	0.086	
燃料有効長	cm	□	
燃料棒配列	—	8 × 8	
燃料集合体当たりの燃料棒数	本	60	
燃料棒ピッチ	cm	□	
燃料集合体の幅	cm		
初期濃縮度	wt%	3.66	高濃縮度 4.9
			低濃縮度 2.1
チャンネルボックス材質	—	—	ジルコニウム <sup>(注1)</sup>
チャンネルボックス全幅	cm	—	□
チャンネルボックス厚さ	cm	—	

(注1) 実際の仕様はジルコニウム合金（ジルカロイ-2 又はジルカロイ-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。

第3表（1/3） 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-76B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） ・ 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 に基づいて作成された 252 群断面積ライブラリ



第3表(2/3) 臨界解析条件

項目	内容
収納物	高燃焼度 8 × 8 燃料
濃縮度	乾燥状態：3.66wt% 冠水状態：4.9wt%及び2.1wt%（炉心装荷冷温状態の無限増倍率が1.3となるような仮想的なモデルバンドル）
収納体数	76 体
燃料配置 <sup>(注1)</sup>	第4図(2/2)及び第5図(2/2)参照
寸法条件 <sup>(注1)</sup> (第4図～ 第5図参照)	バスケットプレート板厚、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-76B 型内 雰囲気 <sup>(注1)</sup>	乾燥状態：真空 冠水状態：水密度 1.0g/cm <sup>3</sup> （MSF-76B 型内の水密度 1.0g/cm <sup>3</sup> とした場合に中性子実効増倍率は最大となる）
MSF-76B 型外 雰囲気 <sup>(注1)</sup>	真空（解析モデルを完全反射境界として MSF-76B 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-76B 型へ戻る）
MSF-76B 型配列	無限配列（MSF-76B 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 <sup>(注1)</sup>	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。 （ <sup>10</sup> B 面密度 <input type="text"/> g/cm <sup>2</sup> ） 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 <sup>-5</sup> 程度であり、無視し得るレベルである。
チャンネルボックス <sup>(注1)</sup>	乾燥状態：隣接する使用済燃料集合体までの距離が短くなるよう、チャンネルボックス無しとしている。 冠水状態：チャンネルボックスによる中性子反射効果が大きくなるよう、チャンネルボックス有りとしている。
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-76B 型内/外雰囲気、ほう素添加量、チャンネルボックスの感度解析結果を別紙1に示す。

第3表(3/3) 臨界解析条件



領域		密度 (g/cm <sup>3</sup> )	元素	原子個数密度 (10 <sup>24</sup> atoms/cm <sup>3</sup> )		
				高燃焼度 8 × 8 燃料		
				3.66wt%	4.90wt%	2.10wt%
燃料領域	UO <sub>2</sub>		<sup>235</sup> U			
			<sup>238</sup> U			
	O					
燃料棒被覆管 チャンネルボックス	Zr <sup>(注1)</sup>					
水			H			
			O			
ほう素添加 アルミニウム合金			<sup>10</sup> B			
			<sup>11</sup> 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-2又はジルカロイ-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いため、この取扱いは保守的である。

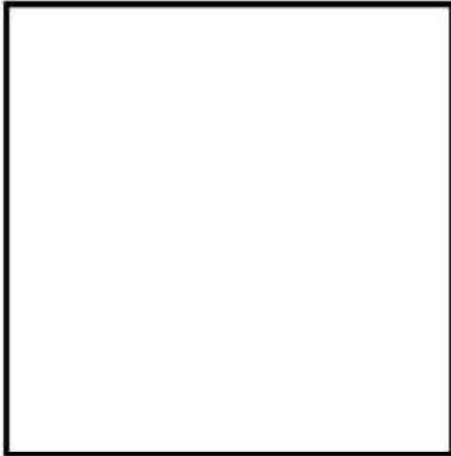
第4表 (1/3) MSF-76B 型臨界解析モデル寸法条件

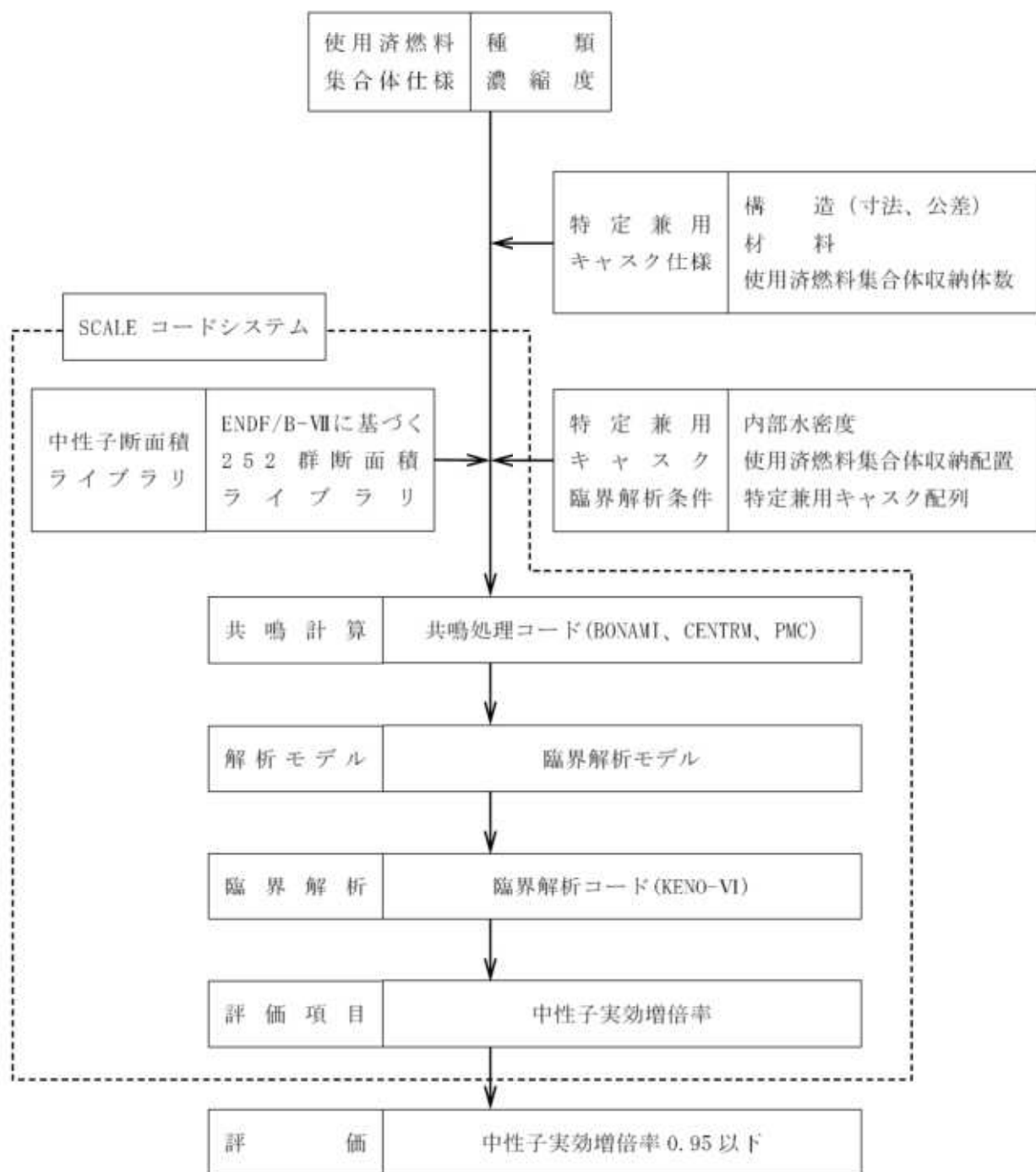
項目	寸法条件		条件設定根拠
	乾燥状態	冠水状態	
バスケットプレート板厚 (炭素鋼)	a 部 b 部	最小 <input type="text"/> (mm) 最大 <input type="text"/> (mm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾燥状態では中性子エネルギーが高く、中性子は構造材及び中性子吸収材を通過しやすい状態であり、隣接する燃料との相互作用が大きいため、隣接する燃料までの距離が短くなるように最小としている。</li> <li>冠水状態では中性子は減速され中性子エネルギーは低いことからバスケットの単位セル内での反応の影響が大きいため、中性子吸収材に達する前に反射させることで中性子反射効果が大きくなるように最大としている。</li> </ul> 一般的な傾向として、上記の変化はバスケットプレート板厚の変化に伴い、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。
	c 部 d 部	最小 <input type="text"/> (mm) 最大 <input type="text"/> (mm)	

第4表 (2/3) MSF-76B 型臨界解析モデル寸法条件

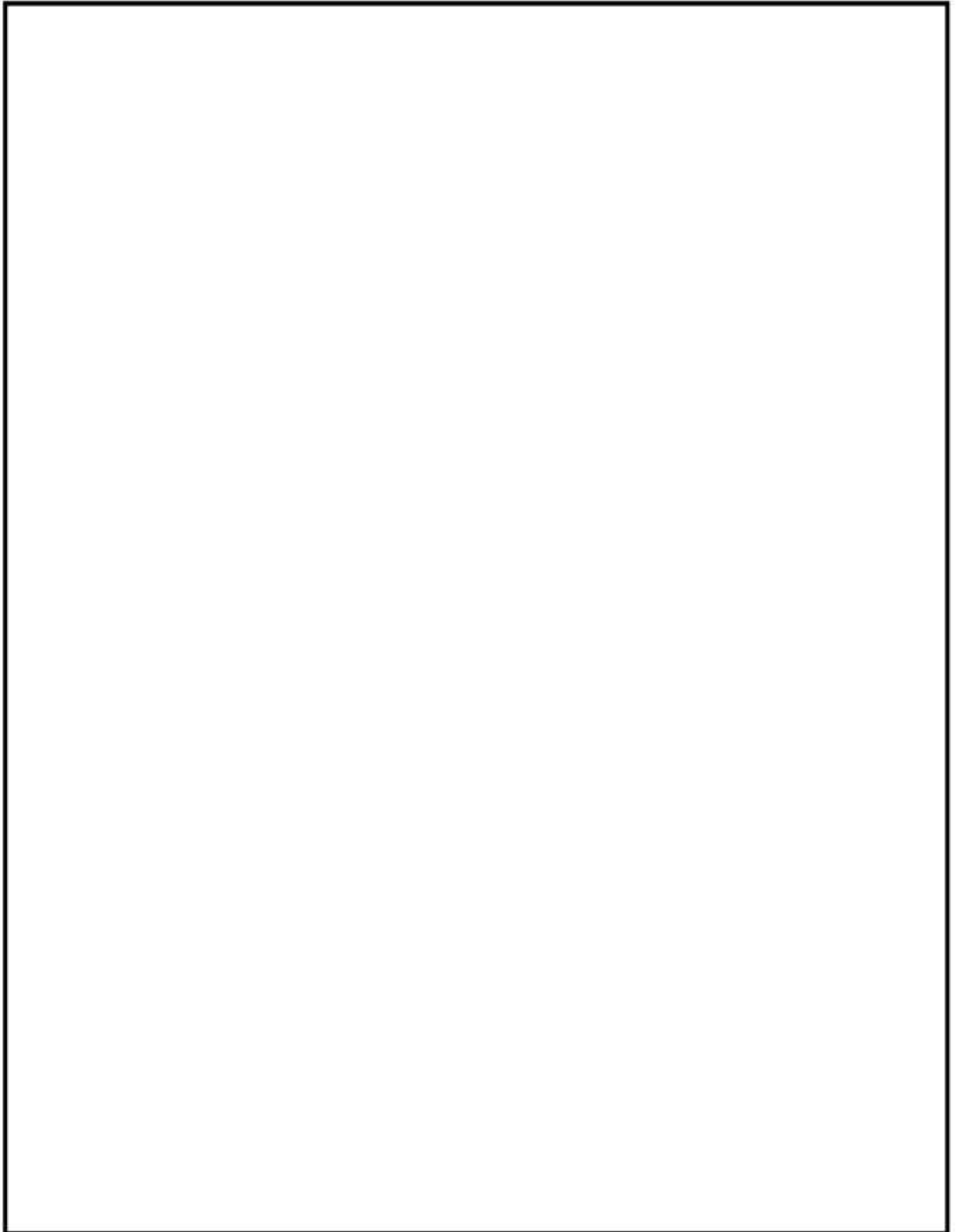
項目	寸法条件		条件設定根拠
	乾燥状態	冠水状態	
バスケット格子内のり	最小  ( ) m	最小  ( ) cm	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾燥状態では中性子エネルギーが高く、中性子は構造材及び中性子吸収材を通過しやすい状態であり、隣接する燃料との相互作用が大きいため、隣接する燃料までの距離が短くなるように最小としている。</li> <li>冠水状態では燃料領域から格子内面までの距離が短くなることで水領域が減るため、減速による熱中性子を少なくし、主に中性子吸収材による中性子吸収効果が小さくなるようにバスケット格子内のを最小としている。</li> <li>一般的な傾向として、上記の変化はバスケット格子内りの変化に伴い、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。</li> </ul>

第4表 (3/3) MSF-76B 型臨界解析モデル寸法条件

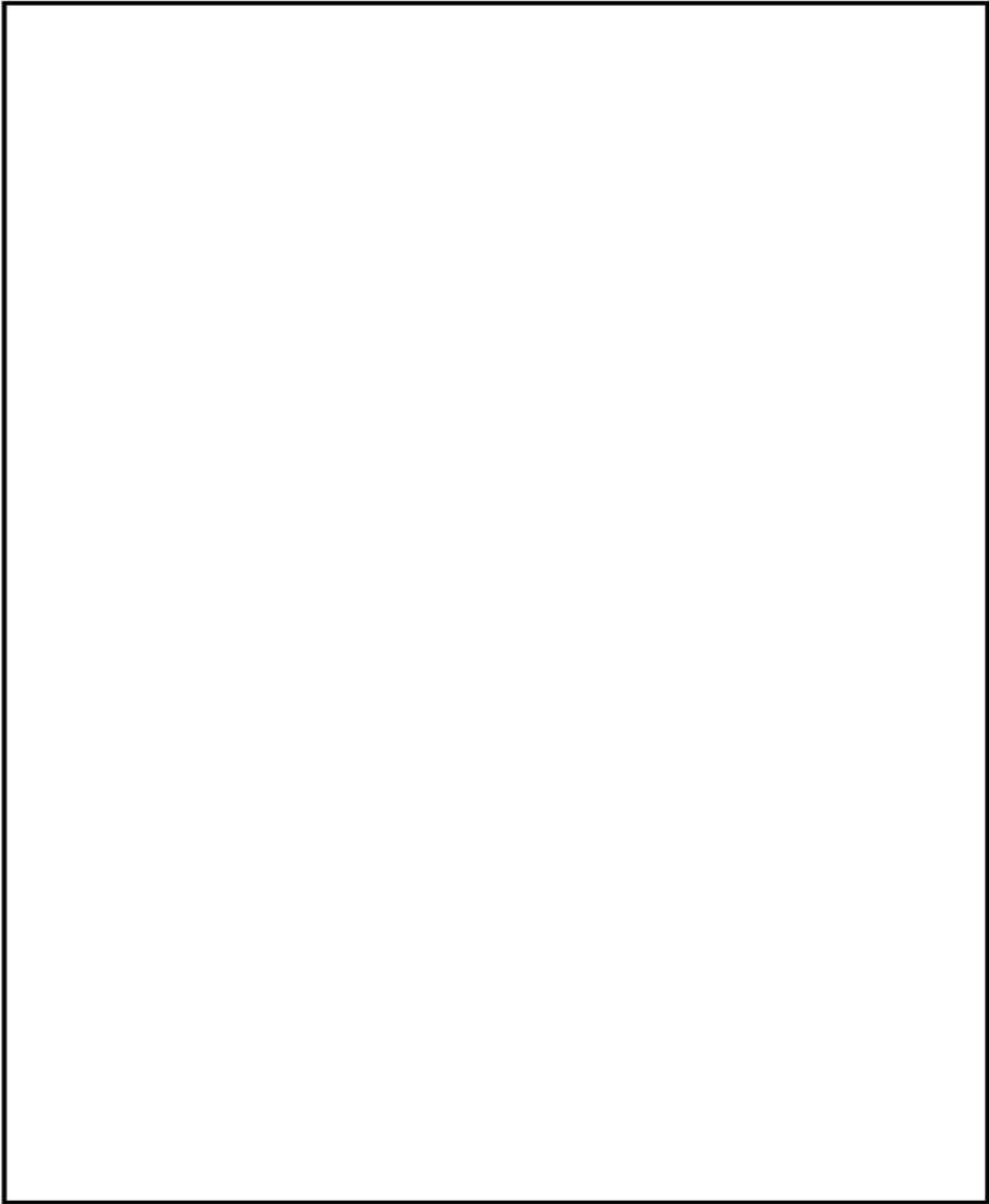
項目	寸法条件		条件設定根拠
	乾燥状態	冠水状態	
中性子吸収材板厚 (ほう素添加アルミニウム合金)	最小 <input type="text" value="3"/> mm	最小 <input type="text" value="3"/> mm	一般的な傾向として、隣接する燃料との距離に応じて中性子実効増倍率は単調に変化し極大値を持たないため、中性子吸収材による中性子吸収効果が小さくなるように乾燥状態、冠水状態共に中性子吸収材板厚を最小としている。  



第3図 MSF-76B 型の臨界解析フロー図

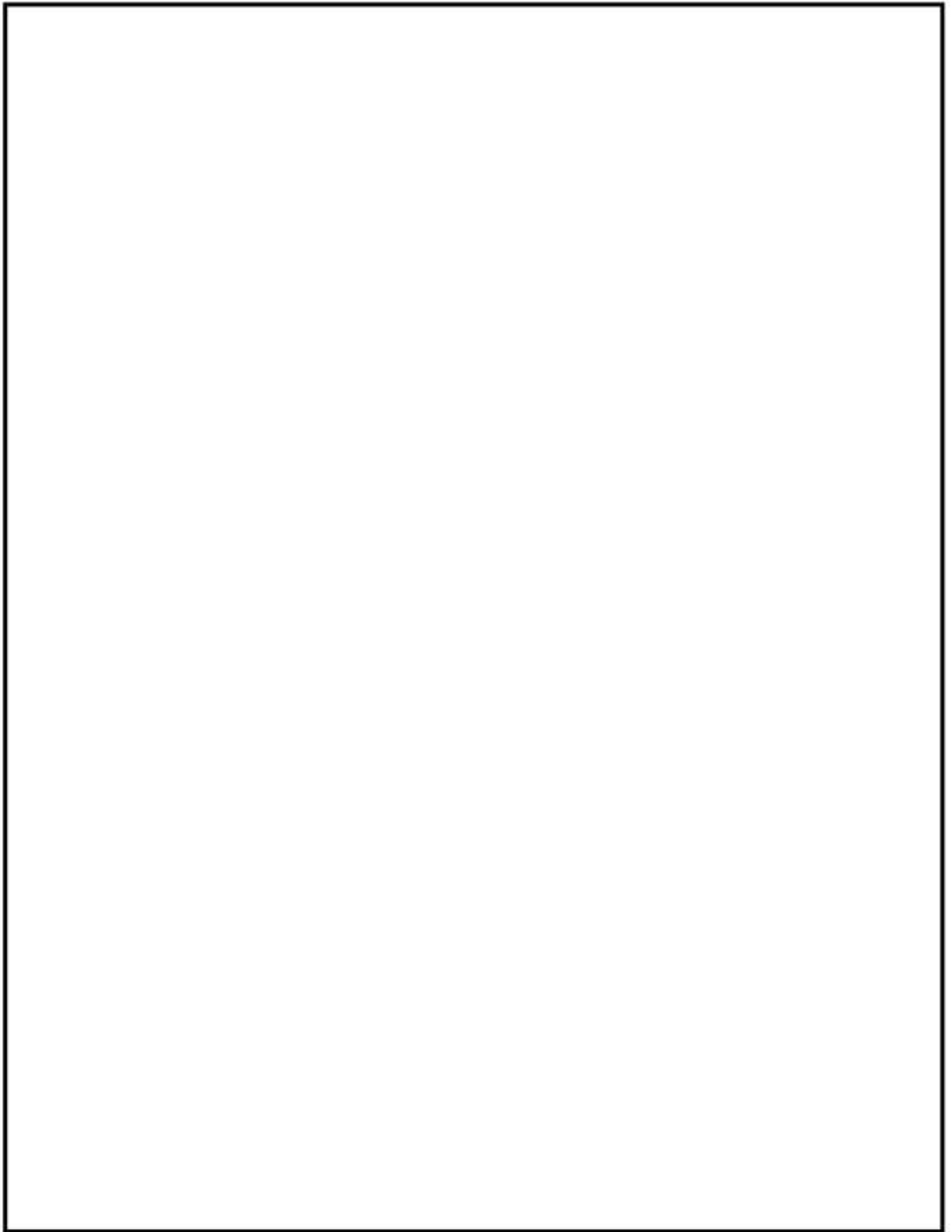


第4図（1/2） 臨界解析モデル（縦断面図）（冠水状態）

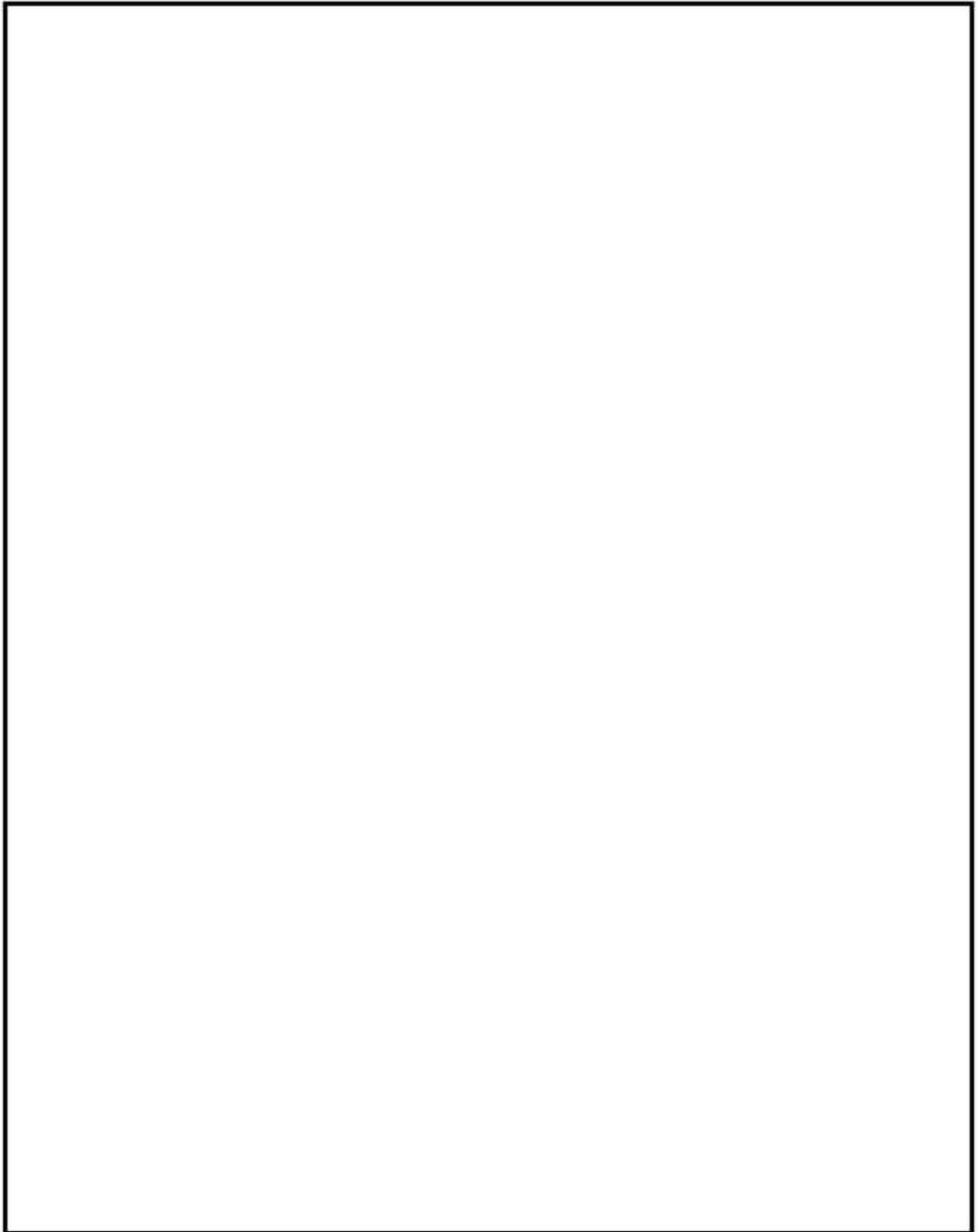


第4図（2/2） 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（冠水状態）





第5図（1/2） 臨界解析モデル（縦断面図）（乾燥状態）



第5図（2/2） 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（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 <sup>(注1)</sup>	評価基準 <sup>(注2)</sup>	備考
中性子 実効 増倍率	冠水 状態	0.816 ( $3\sigma:0.00111$ )	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( $\sigma$ )の3倍( $3\sigma$ )を加味した値である。
	乾燥 状態	0.372 ( $3\sigma:0.00042$ )		

(注1) 評価結果の $3\sigma$ 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: $\sigma$ )を3倍した値である。

(注2) また、文献(2)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-76B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(L5-95LD210)」、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(L5-95LD211)」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(L5-95LD212)」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) K. Kawakami, M. Matsumoto, H. Asano, T. Takakura, T. Matsumoto, T. Mochida, M. Yamaguchi, "The Use of Gadolinia Credit for Criticality Evaluation of a Spent-Fuel Cask", The 11th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM'95), December 3-8, 1995, Las Vegas, USA, (1995).  
 (2) 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高燃焼度 8 × 8 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板厚・バスケット格子内のり・中性子吸収材板厚)
- ✓ MSF-76B 型内/外雰囲気
- ✓ チャンネルボックス
- ✓ 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（高燃焼度8×8燃料収納時）

項目	乾燥状態		冠水状態		感度解析結果 $\Delta k$ (注3)	感度解析結果 $\Delta k$ (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中心偏向配置		-	-
	②バスケット格子内中央配置		②バスケット格子内中央配置		-0.0016	-0.0064
	③外周偏向配置		③外周偏向配置		-0.0042	-0.0273
	④外周燃料外周偏向配置		④外周燃料外周偏向配置		-	-0.0015
バスケット プレート板厚	①最小 (a, b 部 <input type="text"/> cm) (c, d 部 <input type="text"/> cm)	①最大 (a, b 部 <input type="text"/> cm) (c, d 部 <input type="text"/> cm)	①最小 (a, b 部 <input type="text"/> cm) (c, d 部 <input type="text"/> cm)	①最大 (a, b 部 <input type="text"/> cm) (c, d 部 <input type="text"/> cm)	-0.0019	-0.0006
	②最大 (a, b 部 <input type="text"/> cm) (c, d 部 <input type="text"/> cm)	②最小 (a, b 部 <input type="text"/> cm) (c, d 部 <input type="text"/> cm)	②最大 (a, b 部 <input type="text"/> cm) (c, d 部 <input type="text"/> cm)	②最小 (a, b 部 <input type="text"/> cm) (c, d 部 <input type="text"/> cm)	-	-
バスケット 格子内のり	①最小 ( <input type="text"/> cm)	①最小 ( <input type="text"/> cm)	①最小 ( <input type="text"/> cm)	①最小 ( <input type="text"/> cm)	-0.0024	-0.0047
	②最大 ( <input type="text"/> cm)	②最大 ( <input type="text"/> cm)	②最大 ( <input type="text"/> cm)	②最大 ( <input type="text"/> cm)	-	-
中性子吸収材 板厚	①最小 ( <input type="text"/> cm)	①最小 ( <input type="text"/> cm)	①最小 ( <input type="text"/> cm)	①最小 ( <input type="text"/> cm)	-0.0013	-0.0012
	②最大 ( <input type="text"/> cm)	②最大 ( <input type="text"/> cm)	②最大 ( <input type="text"/> cm)	②最大 ( <input type="text"/> cm)	-	-
MSF-76B 型内筒囲気	-	-	水密度 0.0~1.0g/cm <sup>3</sup>		-	別紙1-2 図参照
MSF-76B 型外筒囲気	水密度 0.0~1.0g/cm <sup>3</sup>		水密度 0.0~1.0g/cm <sup>3</sup>		別紙1-3 図参照	別紙1-4 図参照
チャンネルボックス	①なし	①なし	①あり		-0.0074	-0.0065
	②あり	②あり	②なし		-	-

(注1) 乾燥状態は第5図を、冠水状態は第4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。

( $\Delta k$  = (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 (高燃焼度 8 × 8 燃料収納時)

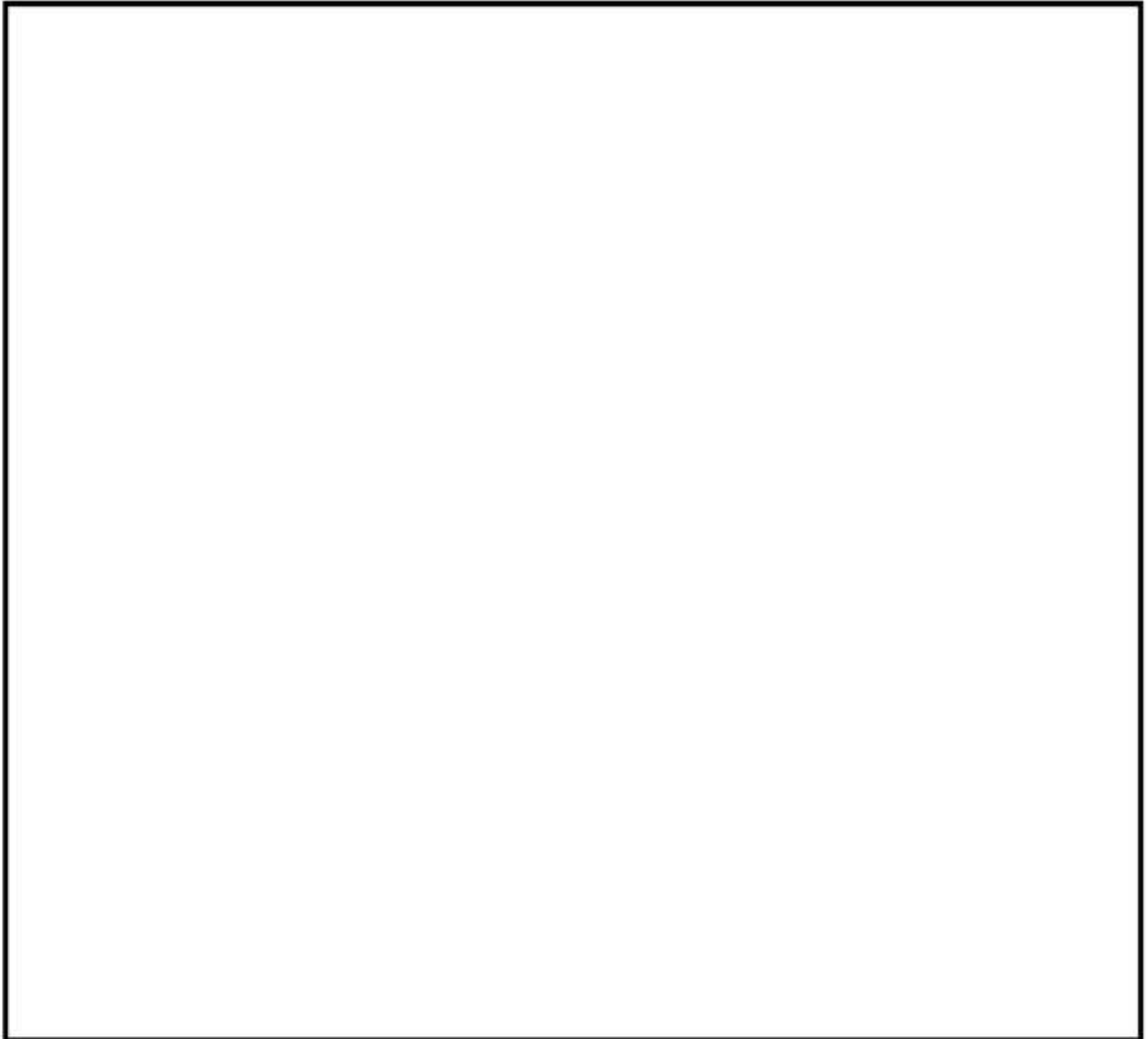
項目	乾燥状態 (注2)		感度解析結果 $\Delta k$ (注3)	冠水状態 (注2)		感度解析結果 $\Delta k$ (注3)
	感度解析条件			感度解析条件		
実条件 (注1)	① <input type="text"/> g/cm <sup>2</sup>	② <input type="text"/> g/cm <sup>2</sup>	別紙 1-5 図参照	① <input type="text"/> g/cm <sup>2</sup>	② <input type="text"/> g/cm <sup>2</sup>	別紙 1-6 図参照
燃料収納から 燃料取出しまで	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

(注1) 乾燥状態は第5図を、冠水状態は第4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。

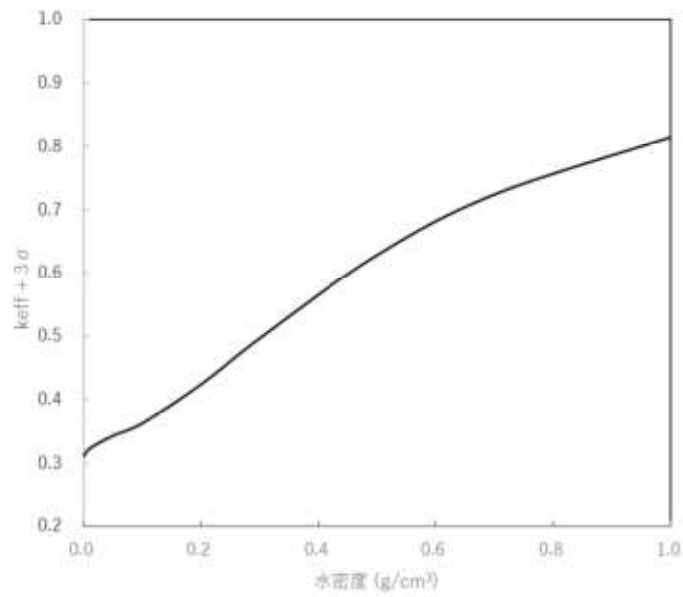
(注3) 感度解析条件 (②) での中性子実効増倍率から申請書記載値での解析条件 (①) での中性子実効増倍率を差し引いた値。

( $\Delta k$  = (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。

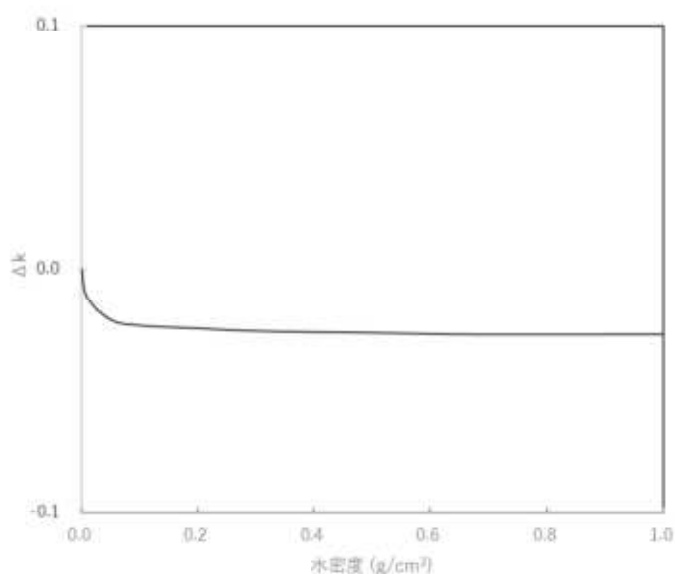


[補足]

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-76B 型内券囲気評価結果

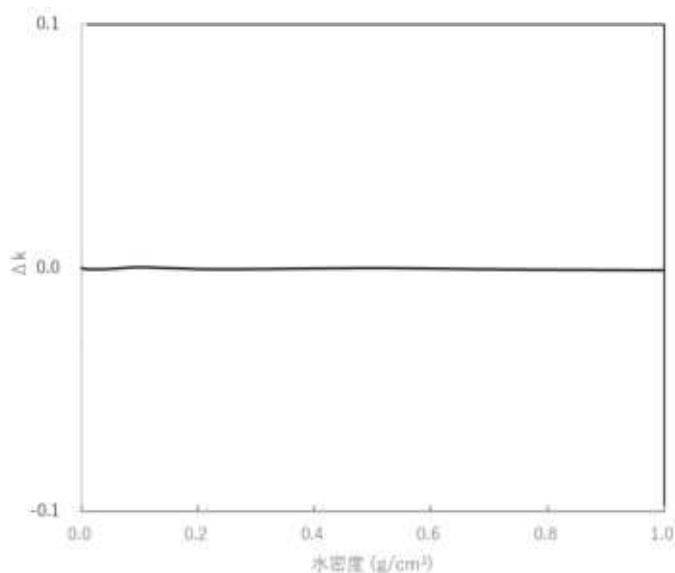




[補足]

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。

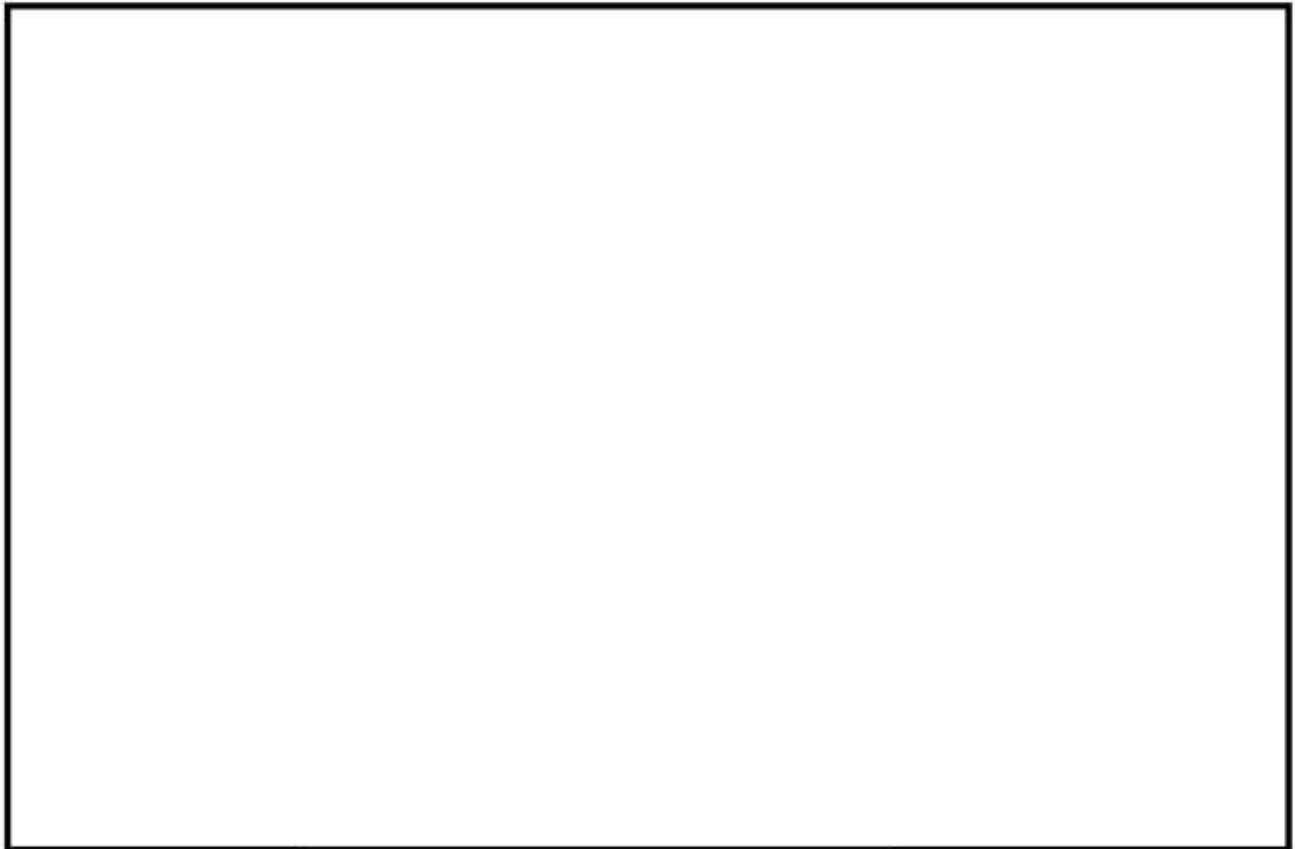
別紙 1 - 3 図 MSF-76B 型外雰囲気評価結果 (乾燥状態)



[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-76B 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-76B 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<sup>(1)</sup>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。

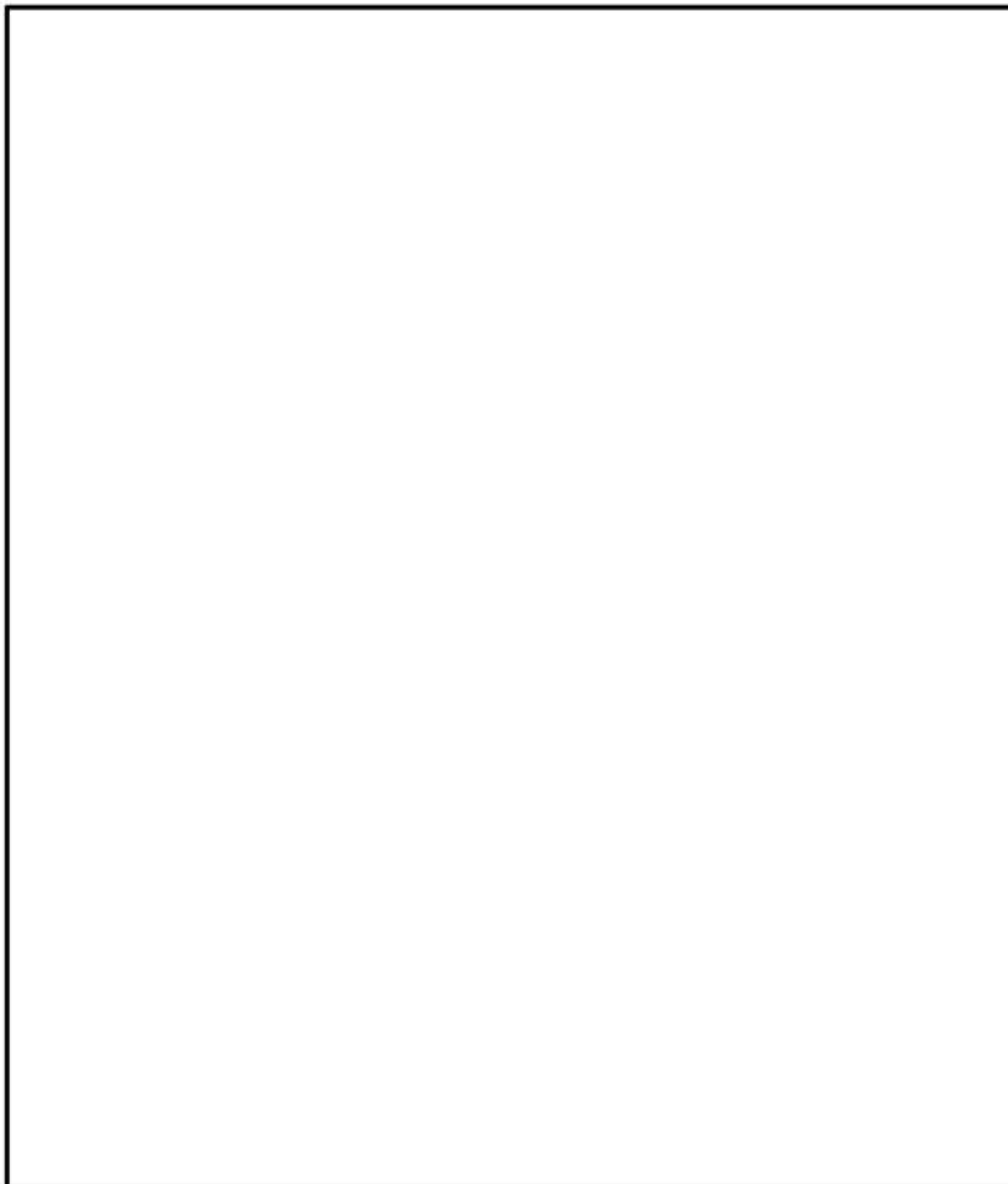
文献(2)に示す実験について、収納物である使用済燃料の仕様並びに下記①～⑥の条件を考慮し、ベンチマーク解析を実施する臨界実験を選定した。別紙 2-1 表に示すとおりベンチマーク解析は実験を良く再現しており、妥当な結果が得られている。

- 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

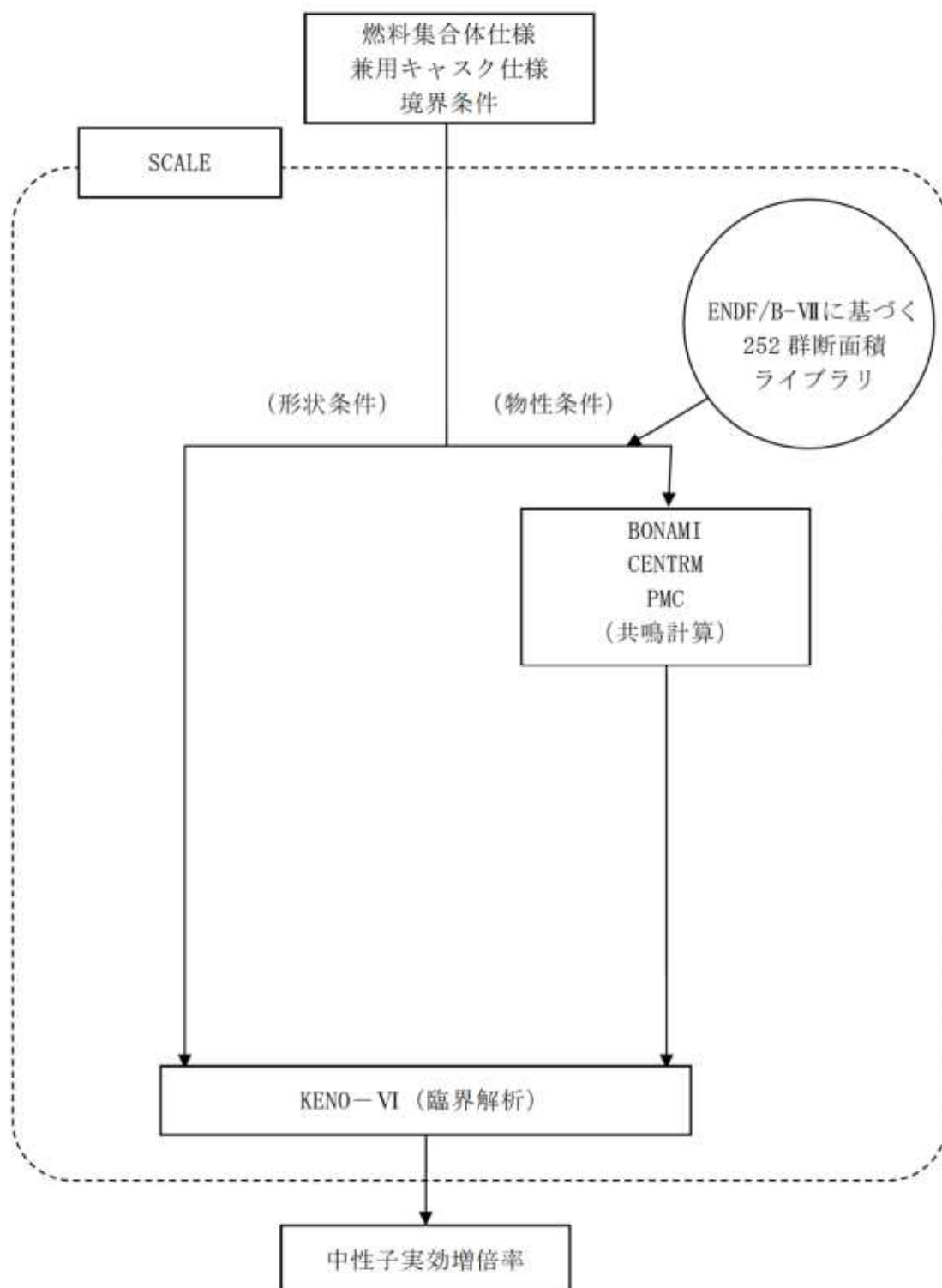
ケースを選定した。



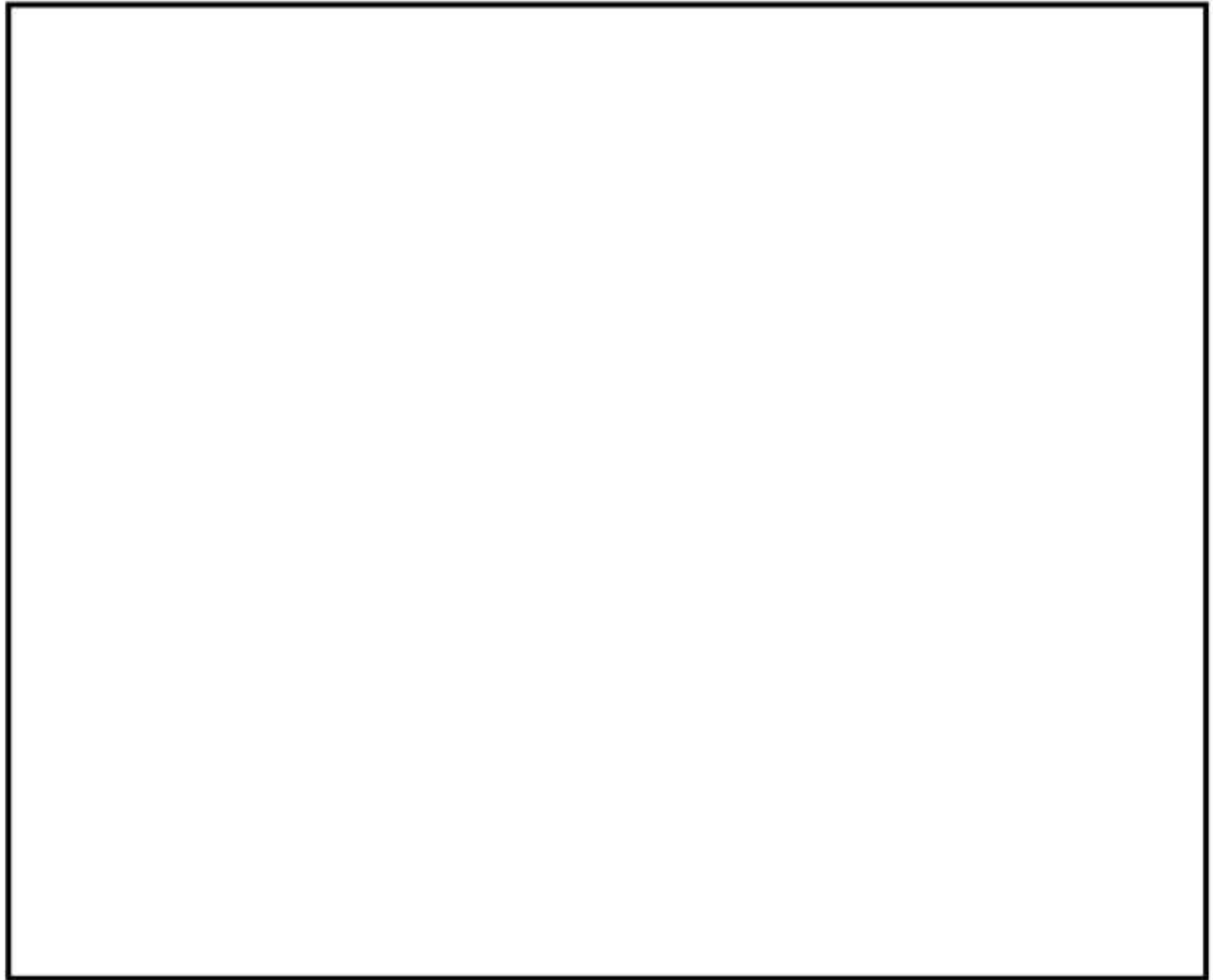
別紙2-1表 ベンチマーク解析結果

	ケース数	平均値	標準偏差 <sup>(注1)</sup>	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

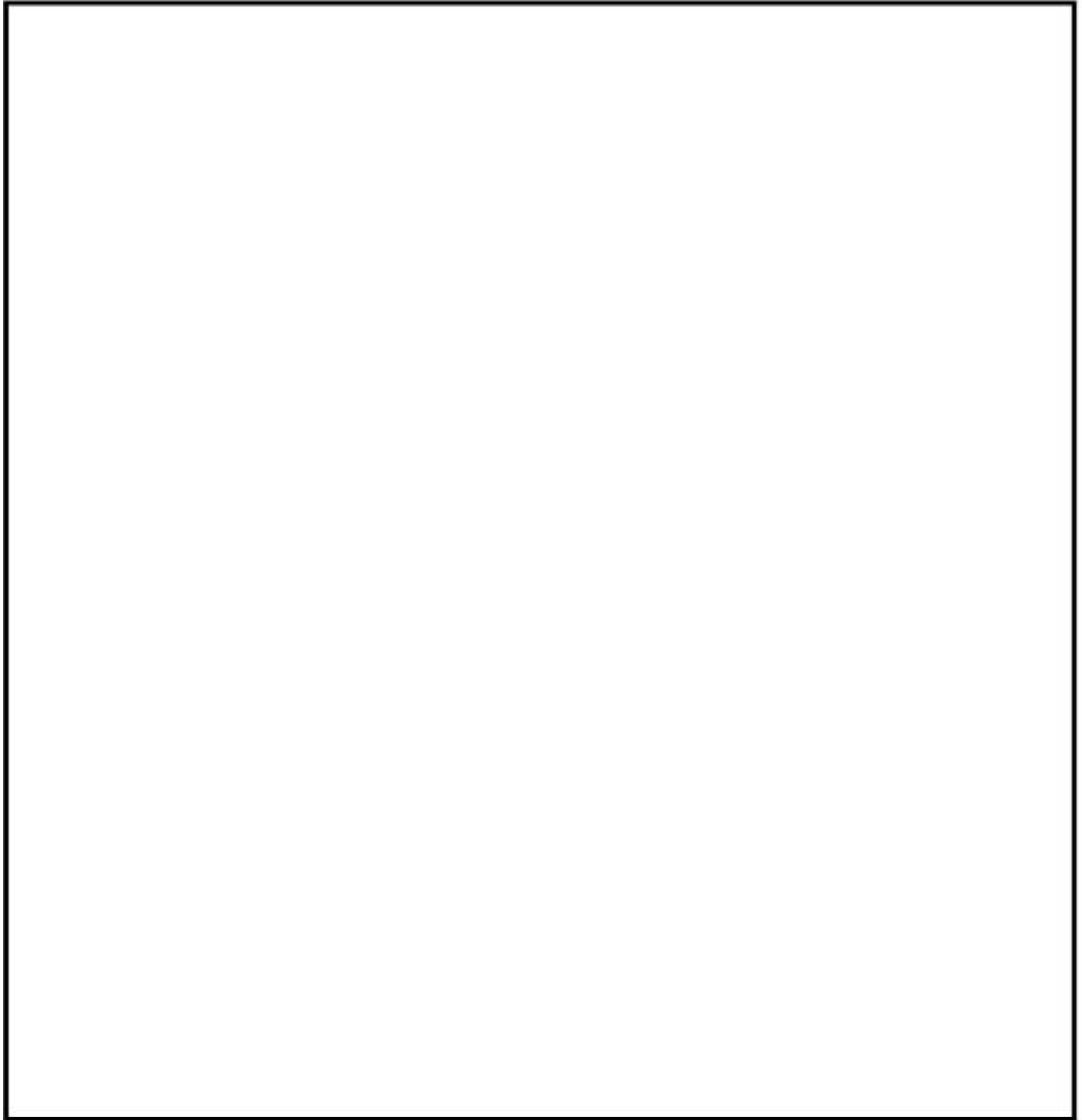
(注1) この標準偏差は各臨界実験での複数のベンチマーク解析結果(中性子実効増倍率)に対する標準偏差である。



別紙 2 - 1 図 SCALE コードシステムの解析フロー図

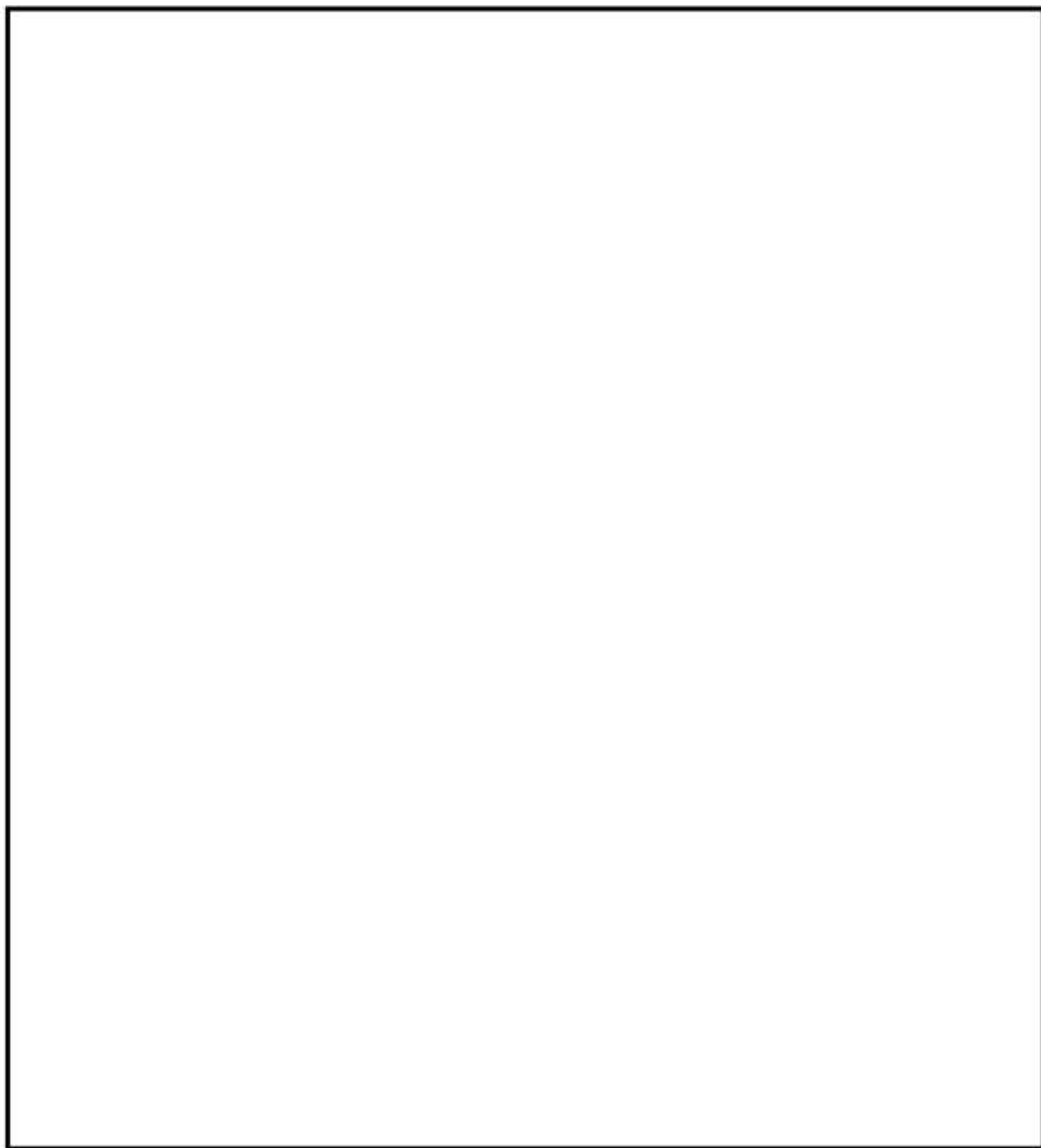


別紙 2 - 2 図  臨界実験に用いた燃料棒

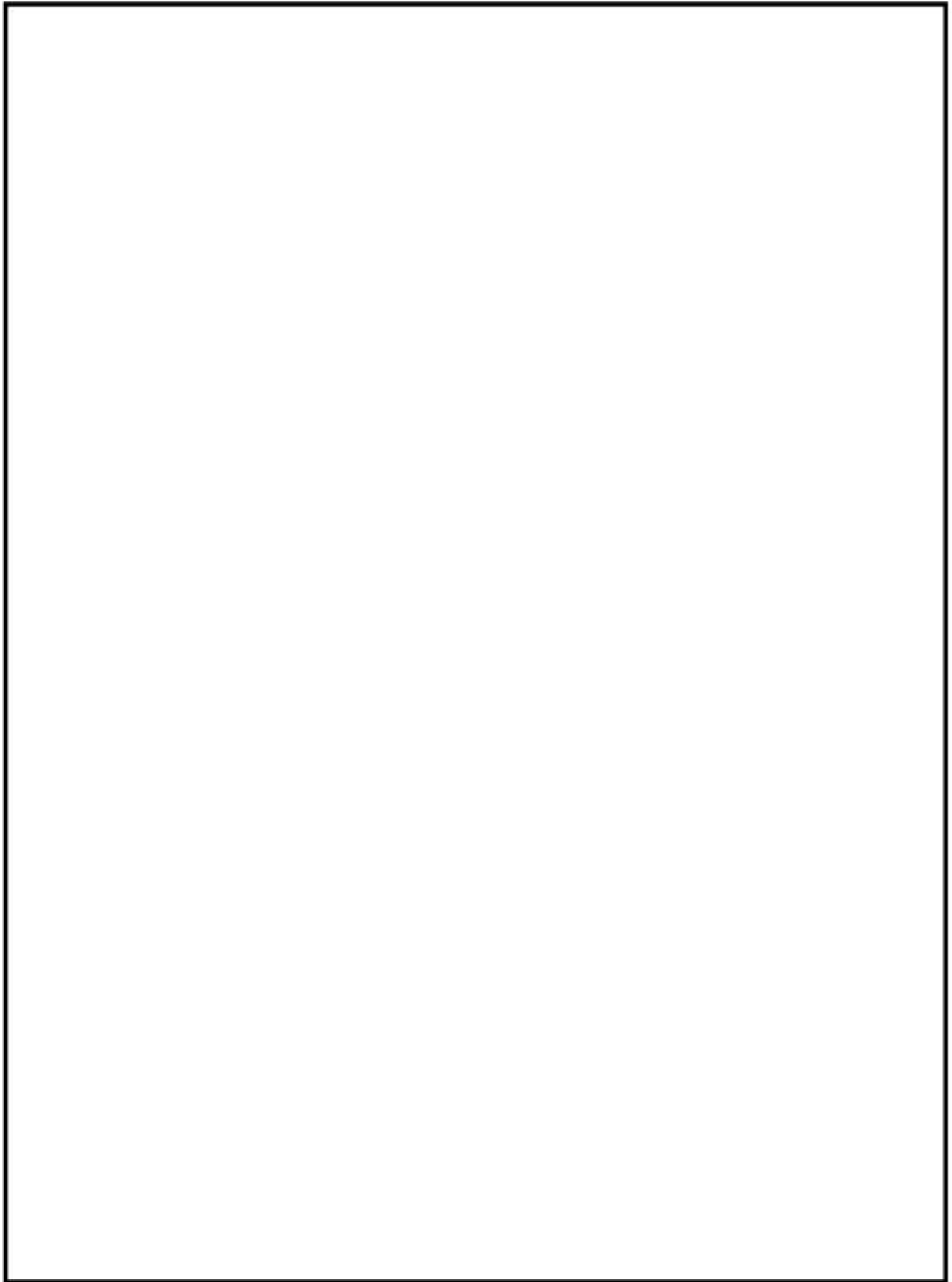


別紙 2 - 3 図  臨界実験体系 (1)

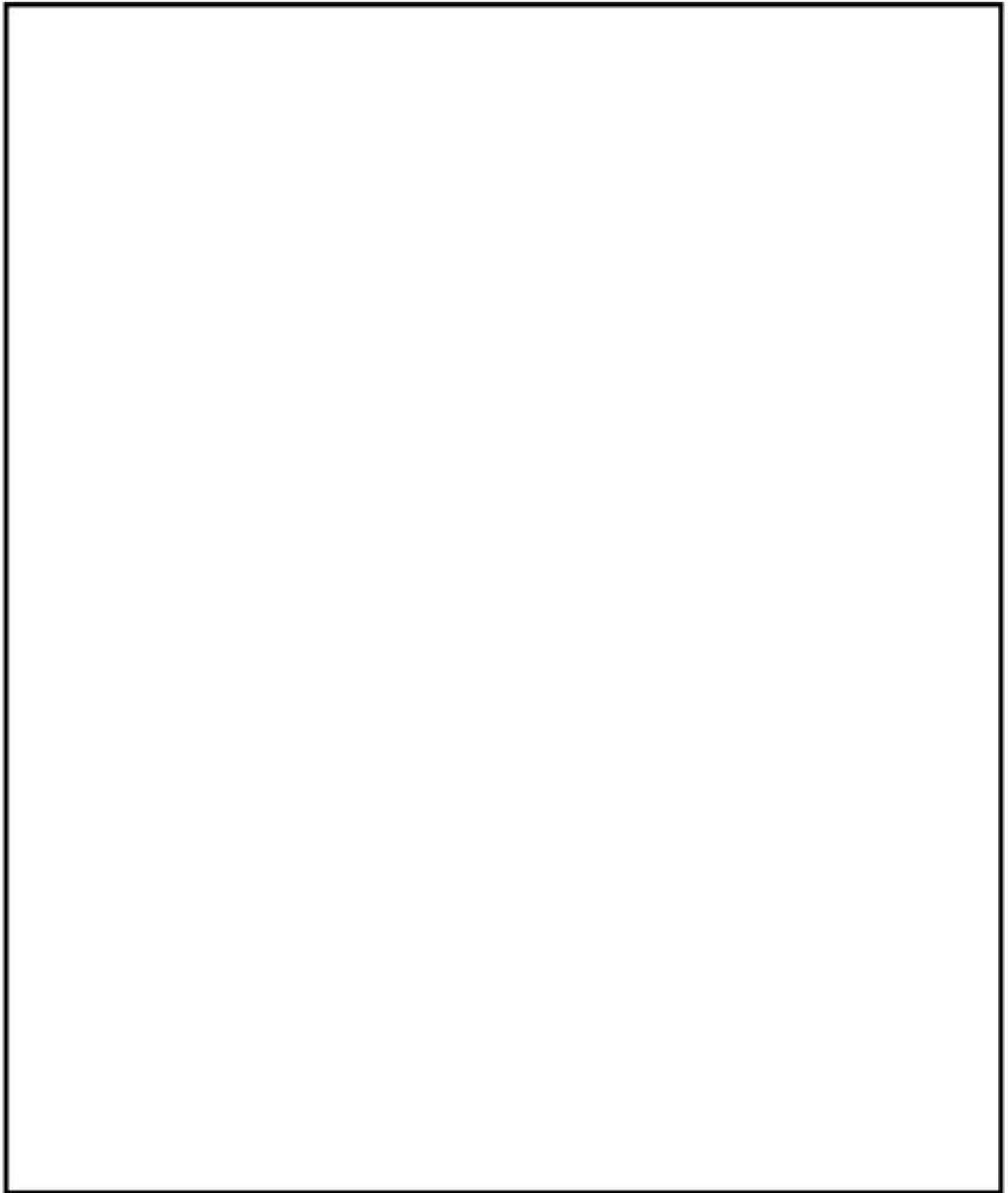




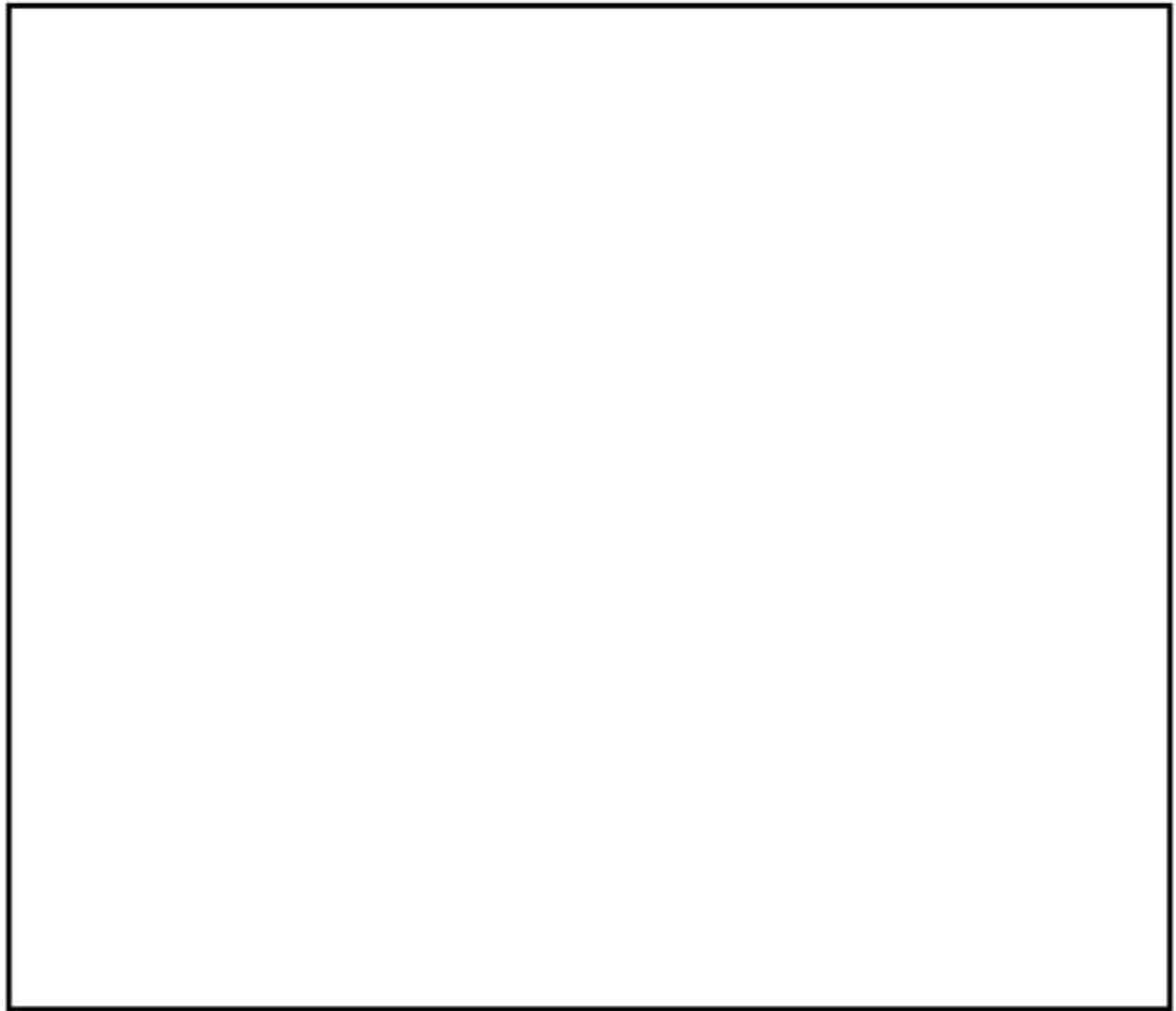
別紙 2 - 4 図  臨界実験体系 (2)



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)

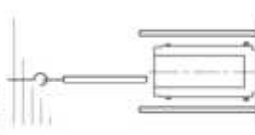
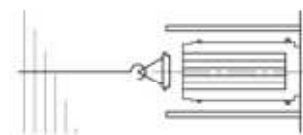
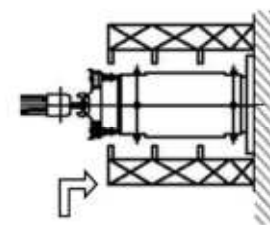
- (1) B. T. Rearden and M. A. Jessee, Eds., "SCALE Code System", ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2016).
- (2) Organisation for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency, "International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark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

MSF-76B 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

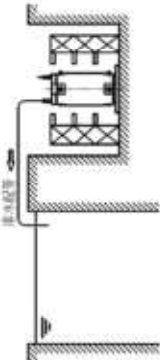
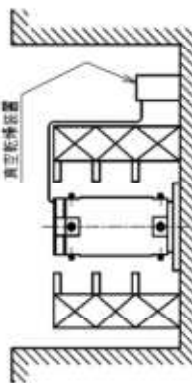
MSF-76B 型に使用済燃料を収納し、貯蔵した後、使用済燃料を MSF-76B 型から取り出すまでの取扱いフロー、及び各状態における MSF-76B 型の構成部品や MSF-76B 型の内外雰囲気の状態及びその際の中性子実効増倍率について別紙 3-1 表に示す。以下のとおり、取扱い時に想定される状態において、本文で示す冠水状態における中性子実効増倍率が最も大きい値である。



別紙3-1表 MSF-76B型の取扱いフロー (1/7)

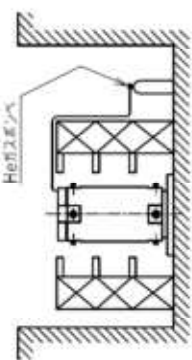
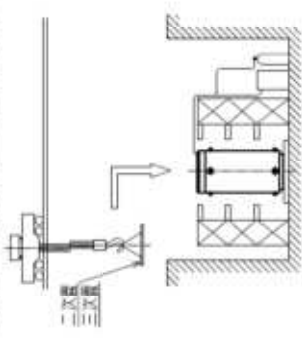
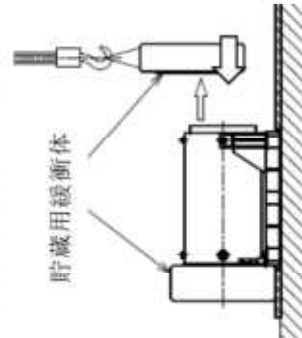
No.	取扱い手順	MSF-76B型 構成部品	MSF-76B型 内雰囲気	MSF-76B型 外雰囲気
1-1	使用済燃料装荷 	本体 バスケット		
1-2	一次蓋取付 	本体 バスケット 一次蓋	水	水
1-3	容器吊上げ・移動・吊降し・ 一次蓋ボルト締め付け 	本体 バスケット 一次蓋		空気

別紙3-1表 MSF-76B型の取扱いフロー (2/7)

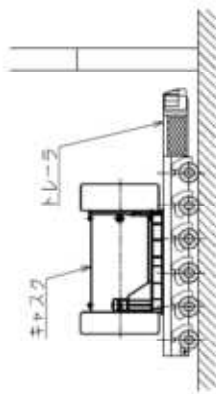
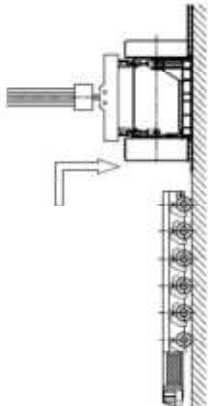

No.	取扱い手順	MSF-76B型 構成部品	MSF-76B型 内雰囲気	MSF-76B型 外雰囲気
1-4	MSF-76B型内部水の排水 (別紙3-1図参照) 	本体 バスケット 一次蓋	水 空気	空気
1-5	MSF-76B型内部の真空乾燥 	本体 バスケット 一次蓋	真空	



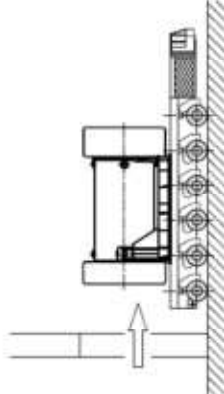
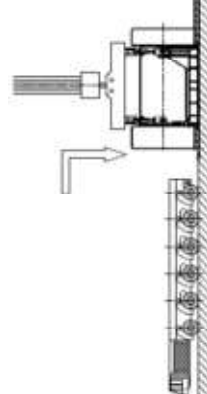
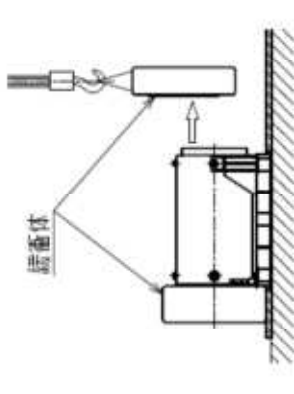
別紙3-1表 MSF-76B型の取扱いフロー (3/7)

No.	取扱い手順	MSF-76B型 構成部品	MSF-76B型 内雰囲気	MSF-76B型 外雰囲気
1-6	MSF-76B型内部への ヘリウムガス充填 	本体 バスケット 一次蓋	ヘリウム	MSF-76B型 外雰囲気
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		

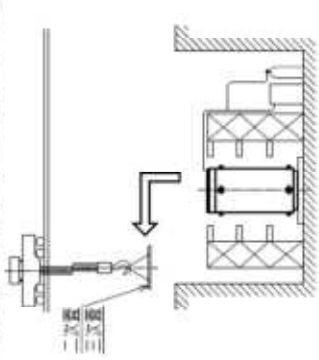
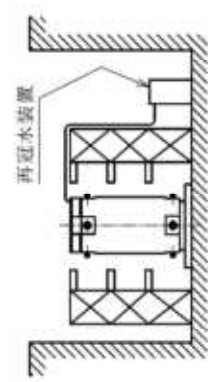
別紙3-1表 MSF-76B型の取扱いフロー (4/7)

No.	取扱い手順	MSF-76B型 構成部品	MSF-76B型 内券囲気	MSF-76B型 外券囲気
2-1	トレーラ上への設置・MSF-76B型の貯蔵施設への搬入 			
2-2	トレーラからの貯蔵場所への吊り降ろし 	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	ヘリウム	空気
2-3	貯蔵 			

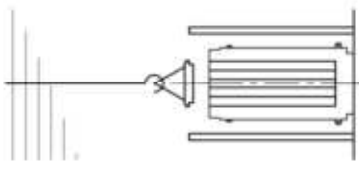
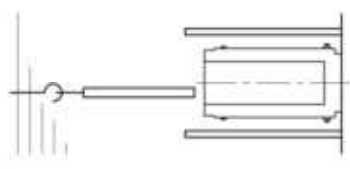
別紙3-1表 MSF-76B型の取扱いフロー (5/7)

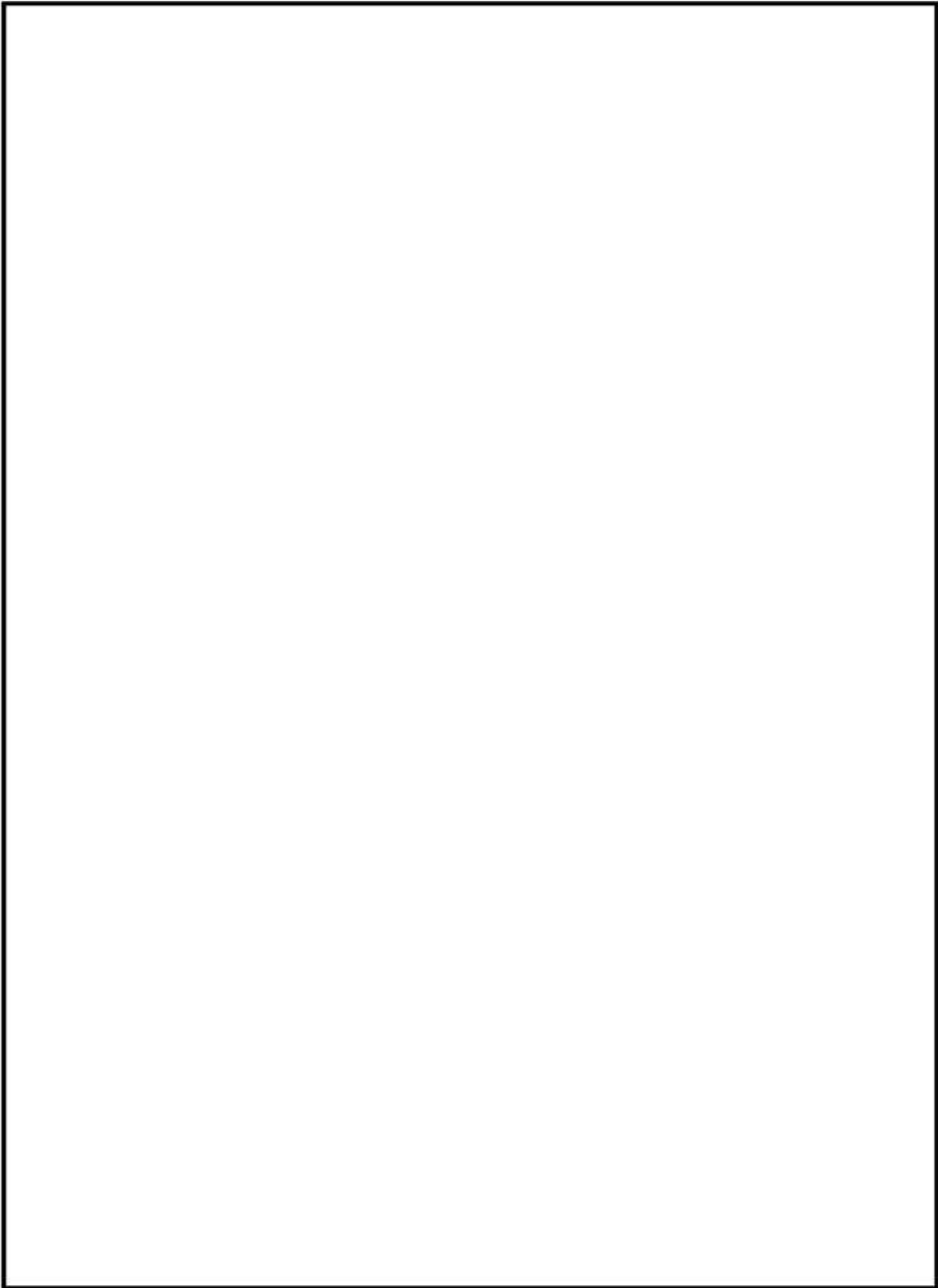
No.	取扱い手順	MSF-76B型 構成部品	MSF-76B型 内雰囲気	MSF-76B型 外雰囲気
3-1	<p>トレーラ上への設置・MSF-76B型の貯蔵施設からの搬出</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用三次蓋 貯蔵用緩衝体</p>	ヘリウム	空気
3-2	<p>トレーラからの吊り降ろし</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用三次蓋 貯蔵用緩衝体</p>	ヘリウム	空気
3-3	<p>緩衝体の取外し</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用三次蓋</p>	ヘリウム	空気

別紙3-1表 MSF-76B型の取扱いフロー (6/7)

No.	取扱い手順	MSF-76B型 構成部品	MSF-76B型 内雰囲気	MSF-76B型 外雰囲気
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	
3-5	<p>MSF-76B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>	<p>空気</p>

別紙 3-1 表 MSF-76B 型の取扱いフロー (7/7)

No.	取扱い手順	MSF-76B 型 構成部品	MSF-76B 型 内券囲気	MSF-76B 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-76B 型内部の排水及び再冠水方法

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

別紙 3-9

内は商業機密のため、非公開とします。

### 臨界解析の対象燃料について

MSF-76B 型には 8 × 8 燃料、新型 8 × 8 燃料、新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8 × 8 燃料が収納されるが、臨界解析の評価条件としては、これらの燃料のうち、初期濃縮度が高く反応度の大きい高燃焼度 8 × 8 燃料を 76 体装荷した条件とする。冠水時臨界解析では、炉心装荷冷温状態での燃料集合体の無限増倍率が 1.3 となる燃料モデル（モデルバンドル）を収納した解析を実施している。モデルバンドルは、別紙 4-1 表に示す通り、MSF-76B 型の収納対象燃料の燃料仕様（濃縮度、燃料棒配置等）に応じて 2 種類あるが、最も反応度の高い高燃焼度 8 × 8 燃料のモデルバンドルを代表としている。新型 8 × 8 燃料及び新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料を対象としたウォータロッドが 2 本のモデルバンドル（別紙 4-1 図参照）を対象とした臨界解析結果は、別紙 4-2 表に示す通りであり、高燃焼度 8 × 8 燃料のモデルバンドル（別紙 4-2 図参照）を収納した場合の方が、中性子実効増倍率が高くなることを確認している。

別紙4-1表 冠水時臨界解析用の使用済燃料集合体の仕様（モデルバンドル）

項目	単位	仕様	
燃料集合体の種類	-	新型8×8燃料及び 新型8×8ジルコニ ウムライナ燃料	高燃焼度 8×8燃料
燃料材質	-	二酸化ウラン	
被覆管材質	-	ジルコニウム <sup>(注1)</sup>	
燃料密度	%理論密度		
燃料棒直径	cm		
燃料ペレット直径	cm		
被覆管肉厚	cm	0.086	
燃料有効長	cm		
燃料棒配列	-	8×8	
使用済燃料集合体 あたりの燃料棒数	本	62	60
燃料棒ピッチ	cm		
使用済燃料集合体の幅	cm	□ <sup>(注2)</sup>	
濃縮度	wt%	高濃縮度 3.9	高濃縮度 4.9
		低濃縮度 1.6	低濃縮度 2.1
チャンネルボックス材質	-	ジルコニウム <sup>(注1)</sup>	
チャンネルボックス全幅	cm		
チャンネルボックス厚さ	cm		
燃料棒配置	-	別紙4-1図参照	別紙4-2図参照

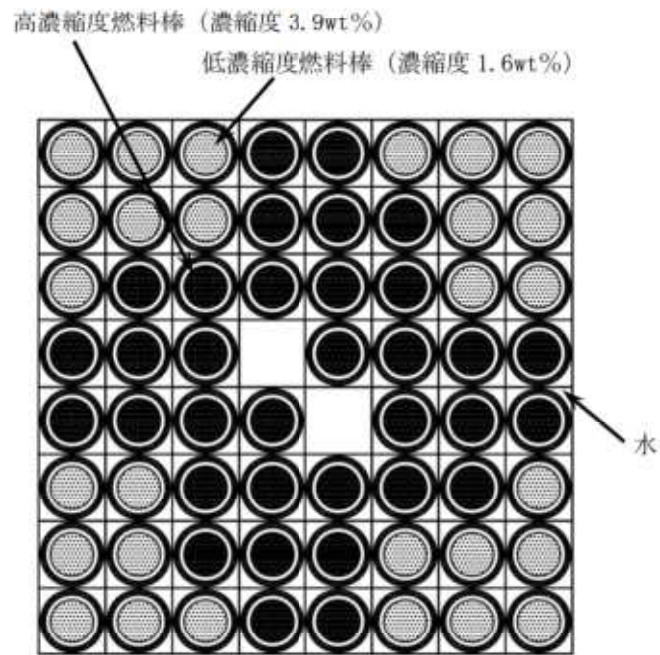
(注1) 実際の仕様はジルコニウム合金（ジルカロイ-2又はジルカロイ-4）であるが、解析上は純度100%のジルコニウムとして扱う。なお、他の合金成分（スズ等）は中性子吸収効果がジルコニウムより大きいため、この取り扱いは保守的である。

(注2) (燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列) を臨界解析上の燃料集合体の幅とする。

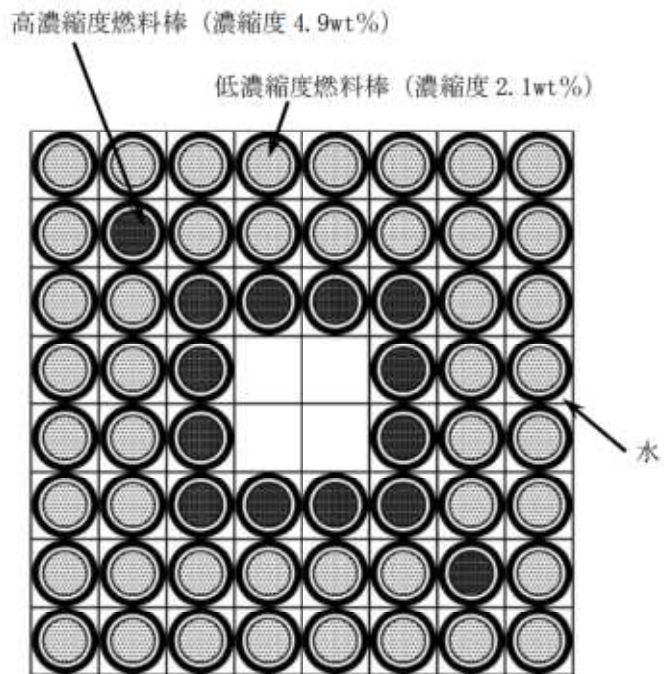


別紙4-2表 燃料種類毎の冠水時臨界解析結果

	冠水時臨界解析結果	
燃料集合体の種類	新型8×8燃料及び 新型8×8ジルコニウム ムライナ燃料	高燃焼度 8×8燃料
中性子実効増倍率 ( $k_{eff}+3\sigma$ )	0.812	0.816



別紙4-1図 冠水時臨界解析における燃料棒配置  
(新型8×8燃料及び新型8×8ジルコニウムライナ燃料モデルバンドル)



別紙4-2図 冠水時臨界解析における燃料棒配置  
(高燃焼度8×8燃料モデルバンドル)