

資料 2 - 2

Doc No. GK04-SC-E01 Rev.1

2022 年 12 月 5 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. Hitz-B69 型の臨界防止機能に関する構造及び評価	10
4. 参考文献	27

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-B69 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

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（以下「キャスク」という。）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

Hitz-B69 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項第一号ハに規定する「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-B69 型は、次の設計方針により、収納する使用済燃料が臨界に達するおそれがない設計とする。

(1) キャスク単体として臨界を防止するための設計方針

Hitz-B69 型は、次の a.から d.により、キャスク単体として、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においても、核燃料物質が臨界に達するおそれのない設計とする。

- a. Hitz-B69 型は、内部に格子状のバスケットを設け、バスケットの格子の中に使用済燃料集合体を収納することにより、使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- b. Hitz-B69 型は、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材料をバスケットの構成部材に使用する設計とする。
- c. Hitz-B69 型のバスケットは、設計貯蔵期間 60 年間の経年変化に対して十分な信頼性を有する材料を選定することで、必要とされる強度及び性能が設計貯蔵期間 60 年間を通じて維持され、臨界防止上有意な変形を起こさず、構造健全性が保たれる設計とする。
- d. Hitz-B69 型の臨界評価において、中性子実効増倍率が 0.95 以下となるように設計する。この際、未臨界性に有意な影響を与える因子については以下のとおりとする。
 - ①乾燥状態及び冠水状態で臨界評価を実施する。
 - ②バスケット格子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配置とする。
 - ③キャスク周囲を完全反射条件（無限配列）とする。
 - ④バスケット格子の板厚、格子内のり等の寸法公差や中性子吸収材の製造公差

を考慮する。

- ⑤使用済燃料の燃焼に伴う反応度低下は考慮しない。なお、冠水状態の解析では、可燃性毒物による反応度抑制効果を考慮し、新燃料及びいかなる燃焼度の燃料を貯蔵しても十分安全側の評価を得るよう、炉心装荷冷温状態での無限増倍率が 1.3 となる燃料モデルを用いる。

(2) キャスク相互の中性子干渉を考慮した臨界防止のための設計方針

Hitz-B69 型は、キャスク相互の中性子干渉を考慮した臨界防止について、中性子実効増倍率が 0.95 以下となるように設計する。上記(1)キャスク単体として臨界を防止するための設計方針において、キャスクの周囲を完全反射条件（無限配列）としていることから、キャスク相互の中性子干渉による影響は考慮され、複数のキャスクが接近する等の技術的に想定されるいかなる場合でも核燃料物質が臨界に達するおそれがない設計となる。

なお、Hitz-B69 型に使用済燃料集合体を収納するに当たっては、キャスクの臨界防止機能に関する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な措置が講じられることについては、設置（変更）許可申請時に別途確認されるものとする。

Hitz-B69 型の臨界防止機能に関する構造及び評価については 3.項に示すとおりであり、Hitz-B69 型に収納する使用済燃料が臨界に達するおそれがないことを確認している。

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-B69 型の設計貯蔵期間は 60 年と明確にしている。

Hitz-B69 型は、安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間 60 年間に於ける温度、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することにより、必要とされる強度及び性能を維持し、使用済燃料の健全性を確保する設計としている。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

料を選定していることについては、申請書 添付書類一 4.7 に示すとおりである。

また、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-B69 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が考慮されている。

〔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。

Hitz-B69 型の臨界解析において、Hitz-B69 型に外接する領域でモデル化して完全反射とすることで、Hitz-B69 型同士が最も近接する状態で無限に配列している体系を評価するため、キャスクの配置については十分な安全裕度を考慮している。なお、Hitz-B69 型は基礎等に固定しない設置方法とするため滑動する可能性があるが、滑動等によりキャスクの配置が変化した場合に対しても、保守的な評価となっている。

Hitz-B69 型のバスケットの寸法公差及びバスケット格子内の使用済燃料集合体の配置について、感度解析により保守的な条件を設定することで適切な安全裕度を考慮している。

Hitz-B69 型は、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については、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を選定することで、構造健全性が維持される。

〔確認内容〕

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

Hitz-B69 型の中性子吸収材の濃度については、熱中性子吸収断面積の大きいほう素（¹⁰B）の面密度が管理されるため、中性子吸収材に規定する面密度の最低保証値（仕様上の下限値）を解析条件とすることで安全裕度を考慮している。非均質性については、中性子吸収材の製作時の品質管理により均質と見なせるとして考慮していない。寸法については、幅は体系内のほう素の量が最小となるよう公差を考慮した最小値とし、厚さ

は感度解析により保守的な条件を設定することで適切な安全裕度を考慮している。

Hitz-B69 型は、中性子吸収に伴うほう素の原子個数密度の減少については、ほう素の減損割合が非常に小さいため無視している。なお、ほう素の減損割合は、申請書 添付書類一 4.7 に示すとおり、保守的に Hitz-B69 型に収納する使用済燃料集合体の全中性子束を用いて評価しても、設計貯蔵期間経過後で 10^{-5} 程度である。

[確認内容]

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。

Hitz-B69 型は、乾燥状態及び冠水状態で臨界評価を実施することで、使用済燃料集合体を Hitz-B69 型に収納する際、使用済燃料集合体が冠水することを考慮している。なお、冠水状態の臨界評価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、新燃料及びいかなる燃焼度の燃料を収納しても十分安全側の評価を得るよう、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）を仮定しており（注）、冠水状態における減速材の影響を適切に考慮している。

注：国内の BWR 原子炉施設における使用済燃料プールの未臨界性の評価において、燃料集合体の炉心内装荷状態での無限増倍率を 1.3 と仮定することで十分安全側の評価が行えるとされている例がある。

[確認内容]

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-B69 型の臨界解析は、中性子実行増倍率の計算を臨界解析コード KENO-V.a で行う SCALE コードシステム（4.4a）を用い、断面積ライブラリには SCALE コードシステムに内蔵の 238 群ライブラリデータを用いる。別紙 2 に示すとおり、ベンチマーク解析によって検証し適用性を確認している。

[確認内容]

5) 設計上、バスケットの塑性変形が想定される場合は、塑性変形したバスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。

Hitz-B69 型のバスケットは、設計上考慮すべき自然現象（地震、津波及び竜巻）によって塑性変形は生じないため、バスケットの塑性変形は考慮しない。（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（GK04-SC-A01）」、補足説明資料

料 5-1「津波に対する安全機能維持に関する説明資料（GK04-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（GK04-SC-A03）」で説明。）また、Hitz-B69 型に収納する使用済燃料集合体の形状の変化も想定しない。

ただし、Hitz-B69 型は兼用キャスクであるため、核燃料輸送物としての評価を行う際は、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下におけるバスケットの塑性変形や使用済燃料集合体の形状の変化を考慮しても未臨界が維持されることを確認する。

3. Hitz-B69 型の臨界防止機能に関する構造及び評価

(1) 臨界防止機能に関する構造

Hitz-B69 型の内部には格子状のバスケットが設けられており、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バスケット格子の構造健全性を保つことにより臨界を防止する。また、バスケットの適切な位置に中性子吸収材を配置することで臨界を防止する。

Hitz-B69 型のバスケットの構造を図 3-1 に示す。Hitz-B69 型のバスケットは、コンパートメントという炭素鋼製の角管状の部材を束ねてバスケット格子を形成する構造であり、コンパートメントの角部に炭素鋼製のスペーサーを挟むことで形成される隙間に長板状の中性子吸収材を配置する構造である。中性子吸収材は、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ほう素添加アルミニウム合金であり、使用済燃料集合体のキャスク軸方向の移動を考慮しても、燃料有効部全長にわたり存在する。

(2) 臨界防止機能に関する評価

Hitz-B69 型の臨界防止機能の評価として、Hitz-B69 型の貯蔵施設への搬入から搬出までを想定した乾燥状態及び使用済燃料をキャスクに収納する際の冠水状態での臨界解析を実施する。

臨界解析フローを図 3-2 に示す。

臨界解析では、Hitz-B69 型及び燃料集合体の実形状を三次元でモデル化し、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 SCALE コードシステム (4.4a) を用いる。また、断面積ライブラリには、SCALE コードシステムに内蔵の 238 群ライブラリデータを用いる。

Hitz-B69 型は、収納する使用済燃料集合体の仕様に応じ、配置(1)～配置(4)の 4 通りの収納位置条件を設けている。臨界解析における収納物条件の概要を表 3-1 に示す。

臨界解析に用いる使用済燃料集合体の仕様を表 3-2 に、臨界解析条件を表 3-3 に示す。臨界解析の対象とする使用済燃料集合体は、初期濃縮度が高く最も反応度の高い高燃焼度 8×8 燃料とする。使用済燃料集合体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ではガドリニアの存在を無視する。冠水状態の評価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。

使用済燃料集合体を Hitz-B69 型に 69 体収納した状態を設定し、Hitz-B69 型相互の中性子干渉を考慮して Hitz-B69 型が無限に配列している体系とする。さらに、バスケット格子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配置するとともに、バスケット格子の板厚、格子内のり等の寸法条件について公差を考慮し、中性子吸収材はほう素添加量を仕様上の下限値とするなど、安全裕度を見込むこととする。な

お、設計貯蔵期間経過後の中性子吸収材中のほう素の減損割合は非常に小さいため、これを無視する。

公差を考慮した寸法条件について、表 3-4 に設定根拠を示す。乾燥状態の解析モデルを図 3-3 に、冠水状態の解析モデルを図 3-4 に示す。また、乾燥状態及び冠水状態の臨界解析における燃料棒配置を、図 3-5 及び図 3-6 にそれぞれ示す。図 3-6 のモデルバンドルを冠水状態の評価に用いることで、図 3-7 に示すような反応度特性の燃料集合体に対して、最も反応度が高くなる燃焼度の条件を包絡した評価とする。

上記条件に基づく解析の結果、臨界解析の結果を表 3-5 に示す。統計誤差として標準偏差の 3 倍を考慮した中性子実効増倍率は 0.95 以下を満足している。

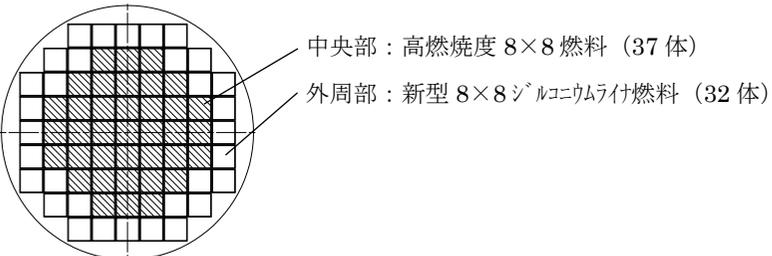
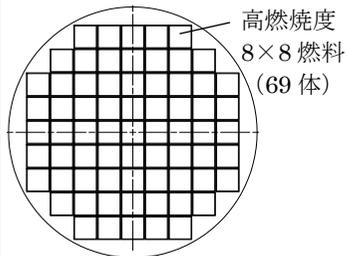
臨界解析条件の設定根拠について別紙 1 に補足する。また、臨界解析で用いた解析コード及び断面積ライブラリの適用性について別紙 2 に示す。

本評価では、以下のように保守性が考慮されている。

- ・ 収納制限に対する解析条件の保守性
 - Hitz-B69 型に濃縮度が高く最も反応度の高い高燃焼度 8×8 燃料が 69 体収納された条件とする。なお、Hitz-B69 型には、収納制限により、高燃焼度 8×8 燃料が 69 体収納されることはない。
 - 乾燥状態の評価では、可燃性毒物として含まれるガドリニアの中性子吸収効果は乾燥状態では期待できないためガドリニアを無視し、Hitz-B69 型に収納する使用済燃料集合体のウラン濃縮度は照射により減損しているが燃焼度 0GWd/t の減損していない新燃料とし、ウラン濃縮度は収納対象とする高燃焼度 8×8 燃料の初期濃縮度の上限である 3.66wt%とする。
 - 冠水状態の評価では、可燃性毒物として含まれるガドリニアによる燃焼初期の反応度抑制効果を考慮し、新燃料及びいかなる燃焼度の燃料を貯蔵しても十分安全側の評価を得るよう、濃縮度の異なる 2 種類の燃料棒を用いて炉心装荷冷温状態での無限増倍率が 1.3 となる燃料モデルを用いる。
- ・ モデル化の保守性
 - Hitz-B69 型が無限に配列した体系（完全反射）とする。これにより、Hitz-B69 型の配置制限は必要なく、Hitz-B69 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。
 - バスケット格子及び中性子吸収材の寸法条件は、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条件とする。
 - 中性子吸収材中のほう素の均質性は製造時の品質管理により担保し、ほう素添加量は最低保証値（仕様上の下限値）とする。

- 中性子遮蔽材は無視し、真空に置換する。
- バスケッ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をモデル化することとし、それ以外の部分は水又は真空に置換する。使用済燃料集合体も同様に燃料有効部のみをモデル化する。

表 3-1 臨界解析における収納物条件の概要

項目		使用済燃料集合体の収納位置条件		解析条件	
		中央部	外周部		
収納物仕様	燃料集合体 1 体の仕様	燃料型式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 新型 8×8 燃料 (配置(1)) ・ 新型 8×8 ジェルコニウムラ付燃料 (配置(2)、配置(3)又は配置(4)) ・ 高燃焼度 8×8 燃料 (配置(3)又は配置(4)) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 8×8 燃料 (配置(1)) ・ 新型 8×8 燃料 (配置(1)又は配置(2)) ・ 新型 8×8 ジェルコニウムラ付燃料 (配置(2)、配置(3)又は配置(4)) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高燃焼度 8×8 燃料
		初期濃縮度※1	3.66 wt%以下 (高燃焼度 8×8 燃料)	3.2 wt%以下 (新型 8×8 ジェルコニウムラ付燃料)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3.66 wt% (乾燥状態) ・ 4.9wt%と 2.1wt%の組合せ (冠水状態) ※3
		ウラン重量※1	 (高燃焼度 8×8 燃料)	 (新型 8×8 ジェルコニウムラ付燃料)	 ※2
		最高燃焼度※1 (燃料集合体平均)	48 GWd/t (高燃焼度 8×8 燃料)	35 GWd/t (新型 8×8 ジェルコニウムラ付燃料)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 0 GWd/t (乾燥状態) ・ 最も反応度が高くなる燃焼度を包絡 (冠水状態) ※3
	冷却期間 (年) ※1	≥ 20 年 (高燃焼度 8×8 燃料)	≥ 30 年 (新型 8×8 ジェルコニウムラ付燃料)	-	
	キャスク 1 基あたりの仕様	平均燃焼度※1 $\left(\begin{array}{l} \leq 39 \text{ GWd/t} \\ \leq 44 \text{ GWd/t (高燃焼度 8×8 燃料)} \\ \leq 33 \text{ GWd/t (新型 8×8 ジェルコニウムラ付燃料)} \end{array} \right)$		<ul style="list-style-type: none"> ・ 0 GWd/t (乾燥状態) ・ 最も反応度が高くなる燃焼度を包絡 (冠水状態) ※3 	
	配置※1	 <p>中央部：高燃焼度 8×8 燃料 (37 体) 外周部：新型 8×8 ジェルコニウムラ付燃料 (32 体)</p>		 <p>高燃焼度 8×8 燃料 (69 体)</p>	

※1：キャスク収納位置制限においては、収納する燃料集合体の初期濃縮度が最も高い組み合わせとなる配置(4)の場合。

※2：(ペレット直径²×π/4)×燃料有効長×燃料棒本数×UO₂密度×U原子量/UO₂式量を解析条件のウラン重量とする。

※3：可燃性毒物 (ガドリニア) による燃焼初期の反応度抑制効果を考慮し、新燃料及びいかなる燃焼度の燃料に対しても十分安全側の評価を得るよう、炉心装荷冷温状態で無限増倍率 1.3 となる燃料モデルとする。

内は商業機密のため、非公開とします。

表 3-2 臨界解析に用いる使用済燃料集合体の仕様

項目	単位	仕様
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	-	ジルカロイ-2 (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	
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本数	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 (注3)

(注1) 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) (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) 冠水状態の評価においては、可燃性毒物 (ガドリニア) による燃焼初期の反応度抑制効果を考慮し、4.9wt%及び 2.1wt%を組み合わせ、炉心装荷冷温状態で無限増倍率 1.3 となる燃料モデルを仮定する。

表 3-3 (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-B69 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 (4.4a) ・ 共鳴計算：BONAMI、NITAWL-II ・ 燃料棒単位セル計算：XSDRNPM ・ 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-V に基づく 238 群の多群断面積ライブラリ		
解析条件	収納物	高燃焼度 8×8 燃料	
	濃縮度	乾燥状態：3.66wt% 冠水状態：高濃縮度 4.9wt%、低濃縮度 2.1wt% (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) とする。)	
	収納体数	69 体	
	燃料配置 (注1)	キャスク中心側に偏向配置	
	寸法条件 (注1) (表 3-4 に根拠を示す。)	バスケット格子寸法、中性子吸収材寸法について公差を考慮。	
		バスケット格子板厚	乾燥状態：公差を考慮して最小値を設定 冠水状態：公差を考慮して最大値を設定
		バスケット格子内のり	公差を考慮して最小値を設定
		中性子吸収材板厚	乾燥状態：公差を考慮して最小値を設定 冠水状態：公差を考慮して最大値を設定
	Hitz-B69 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-B69 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-B69 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-B69 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-B69 型へ戻る)		
Hitz-B69 型配列	無限配列 (Hitz-B69 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 3-3 (2/2) 臨界解析条件

項目		内容
解析条件	使用済燃料 集合体の 上下部構造材	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)
	(注1) チャンネル ボックス	乾燥状態：チャンネルボックスなし (チャンネルボックスに吸収される中性子を無くし、使用済燃料集合体間の距離が短くなる) 冠水状態：チャンネルボックスあり (燃料集合体外部の水を減らし中性子が減速されにくくなることで、中性子吸収材に吸収される熱中性子が減少する)
	ほう素添加量	中性子吸収材に含まれるほう素添加量を仕様上の下限値に設定。 ・ほう素添加アルミニウム合金： ¹⁰ B 面密度 0.030g/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。
	中性子遮蔽材 (樹脂(レジン))	側部、蓋部及び底部全ての中性子遮蔽材は無視し、真空中に置換。
	蓋	一次蓋及び二次蓋を考慮。

(注1) 解析条件に対する感度解析結果を別紙1に示す。

表 3-4 Hitz-B69 型の臨界解析モデル寸法条件と設定根拠

項目	寸法条件		条件設定根拠 (注1)
	乾燥状態	冠水状態	
バスケット格子板厚 (コンパートメント板厚)	最小	最大	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥状態では、燃料集合体間の距離が短くなり、かつ、コンパートメントに吸収される中性子が減少するように最小としている。 ・冠水状態では、感度解析の結果から、コンパートメントによる反射効果により、中性子実効増倍率が大きくなる最大としている。
バスケット格子内のり	最小	最小	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体間の距離が短くなるように最小としている。 ・冠水状態では、中性子吸収材が収まる隙間の水が減少することで、中性子吸収材に含まれるほう素と反応する熱中性子が減少する条件でもある。
中性子吸収材板厚 (注2)	最小	最大	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥状態では、中性子吸収材と反応する中性子が減少するように最小としている。 ・冠水状態では、中性子吸収材が収まる隙間の水が減少することで、感度解析の結果として中性子実効増倍率が大きくなる最大としている。
中性子吸収材幅	最小	最小	<ul style="list-style-type: none"> ・体系内のほう素存在量を最少とし、中性子吸収材に吸収される中性子が減少するように最小としている。
隙間厚さ (スペーサー厚さ)	最小	最小	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体間の距離が短くなるように最小としている。 ・冠水状態では、中性子吸収材が収まる隙間の水が減少することで、中性子吸収材に含まれるほう素と反応する熱中性子が減少する条件でもある。

注1：別紙1に設定根拠の補足として、感度解析結果及び考察を記載。

注2：中性子吸収材に含まれるほう素の量は面密度で規定するため、解析上は体系内に存在するほう素の量は板厚に依存せず最少となるようモデル化する。

表 3-5 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	乾燥 状態	0.396 (3 σ : 0.00096)	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 (3 σ) を加 えている。
	冠水 状態	0.861 (3 σ : 0.00234)		

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

(注2) 参考文献 (1) によると、「十分に検証された臨界安全解析コードシステムを用いる場合には、そのコードシステムによって算出された中性子実効増倍率が 0.95 以下となることにより未臨界性を判定できる」と記載されている。

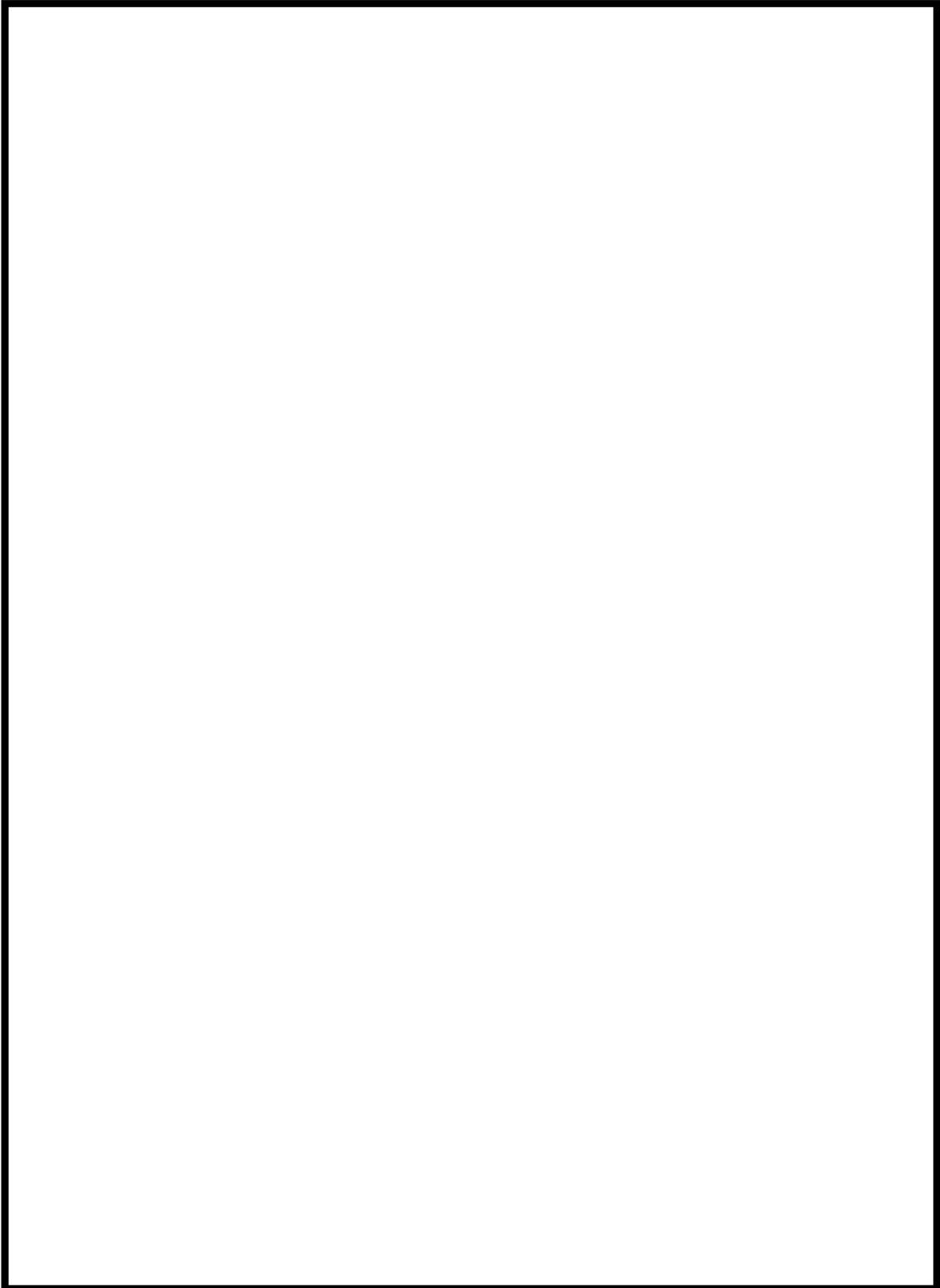


図 3-1 Hitz-B69 型のバスケットの構造

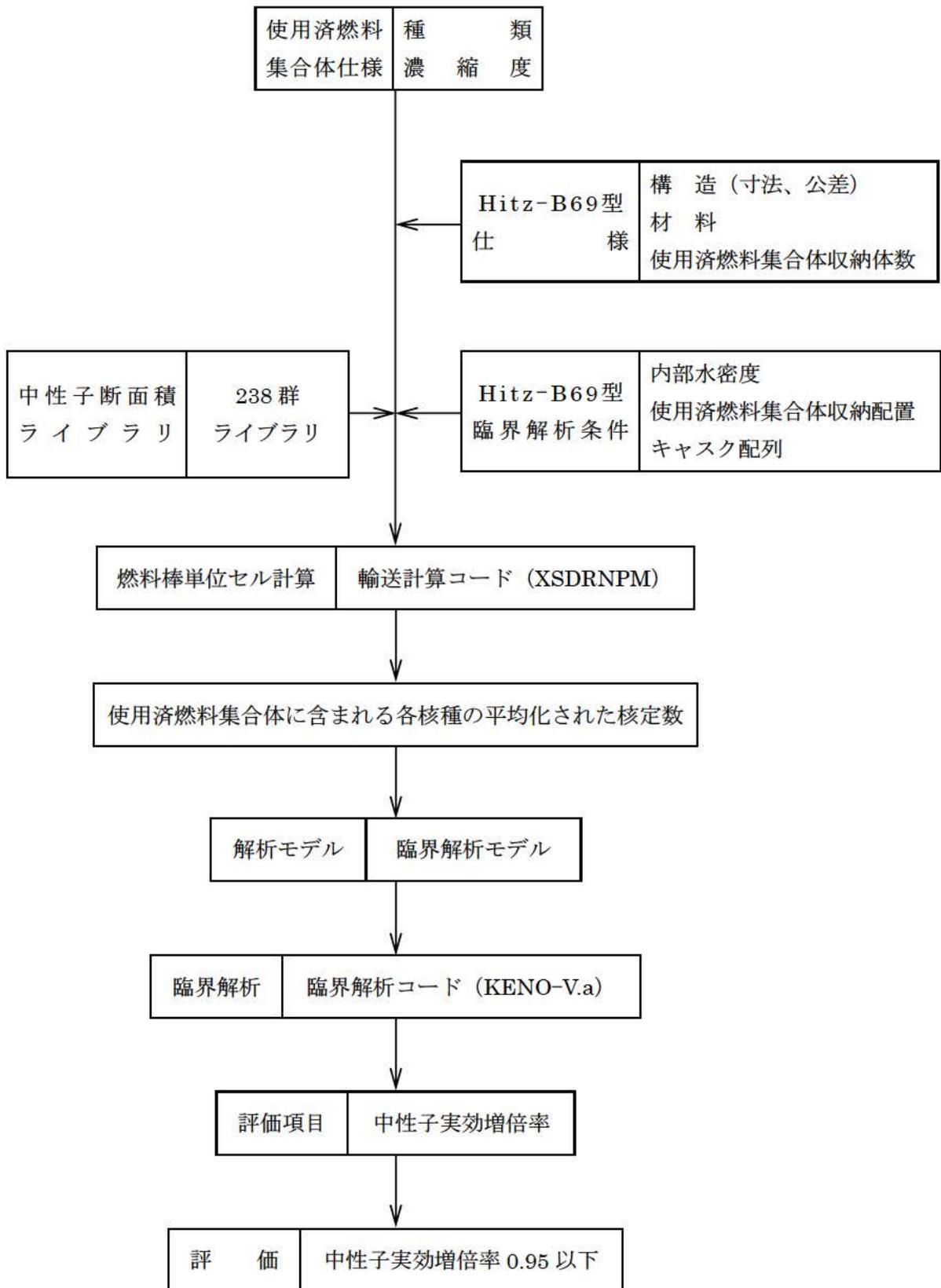


図 3-2 臨界解析フロー図



(単位：cm)

図 3-3 (1/2) 臨界解析モデル (縦断面図) (乾燥状態)

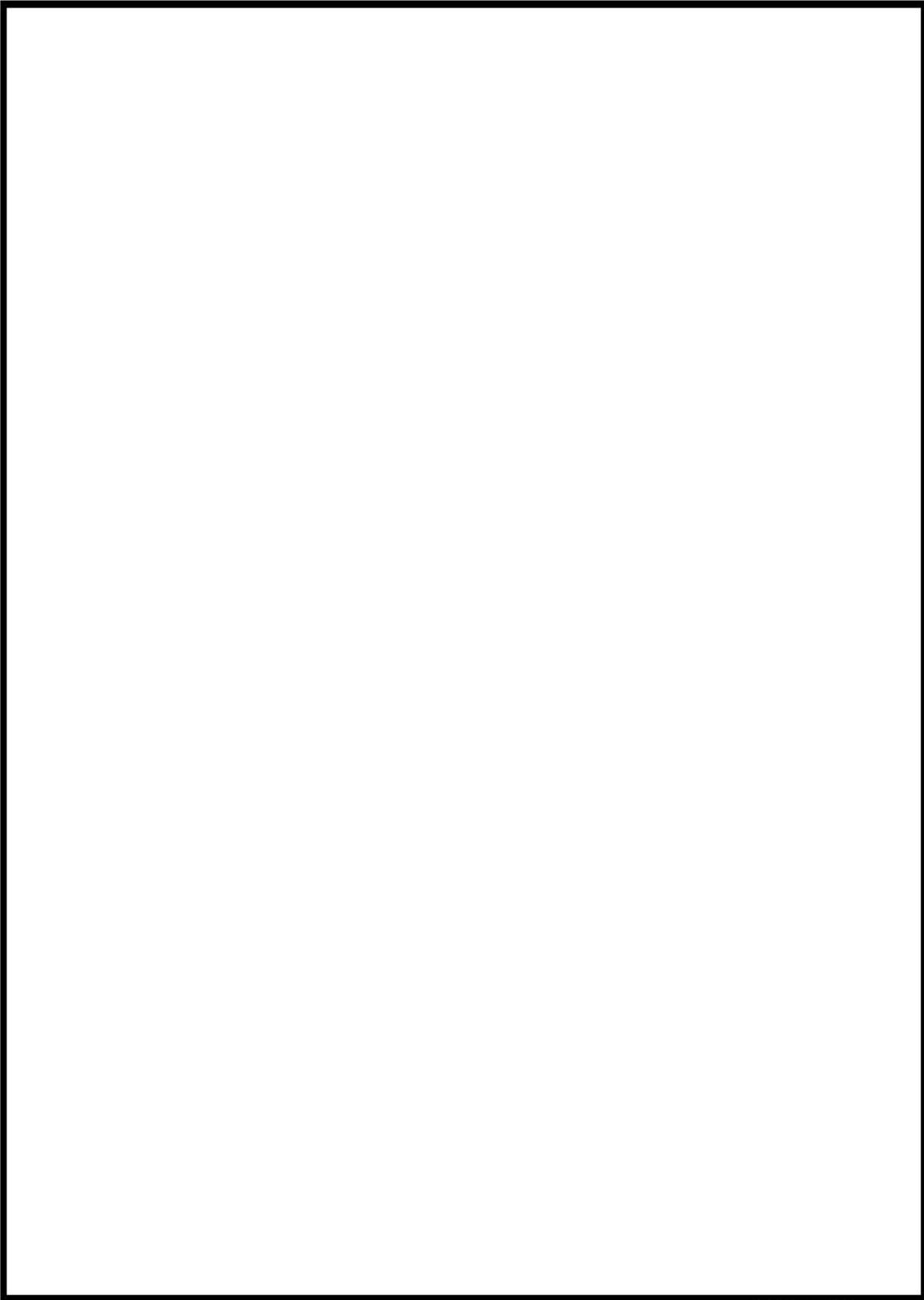
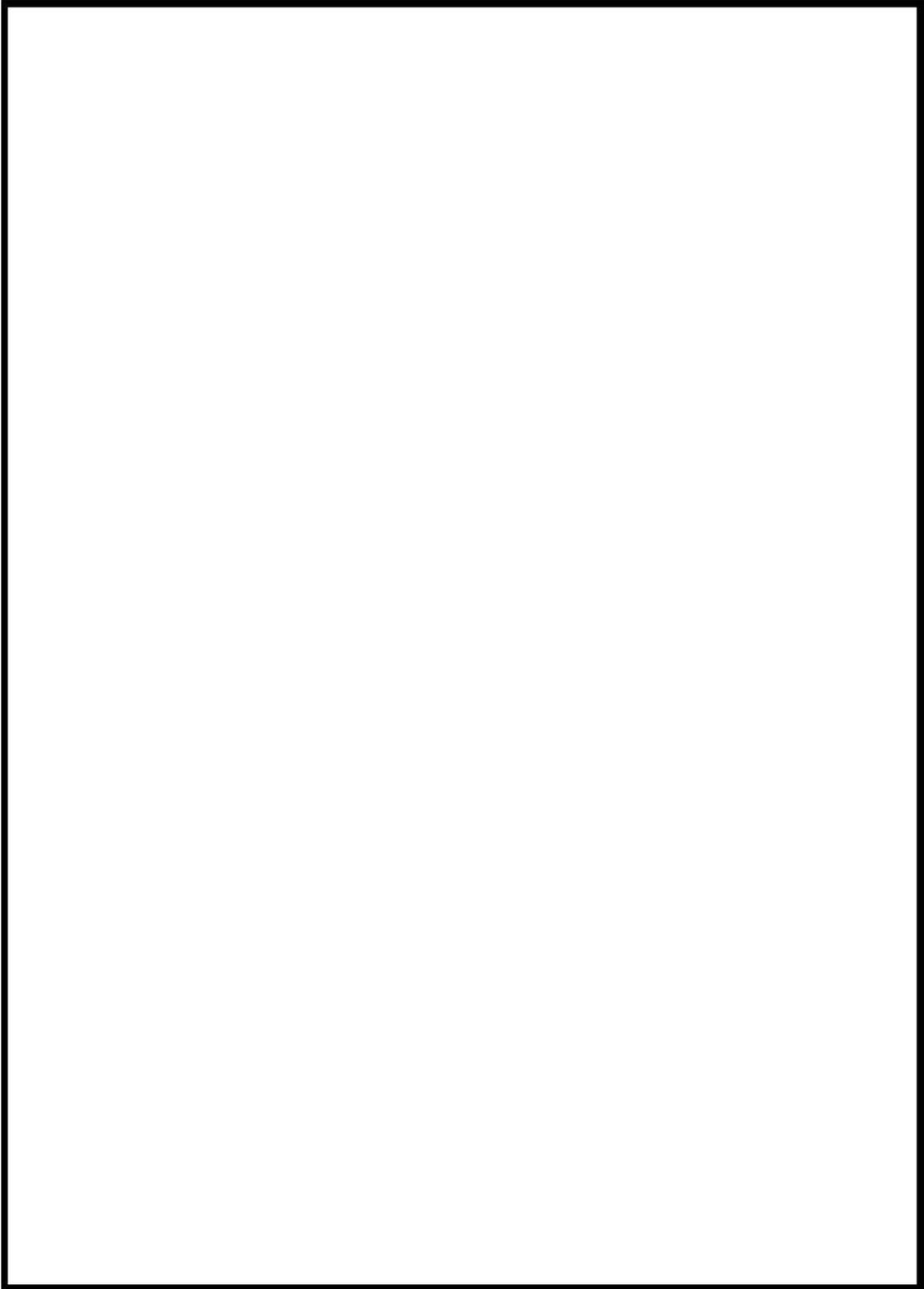
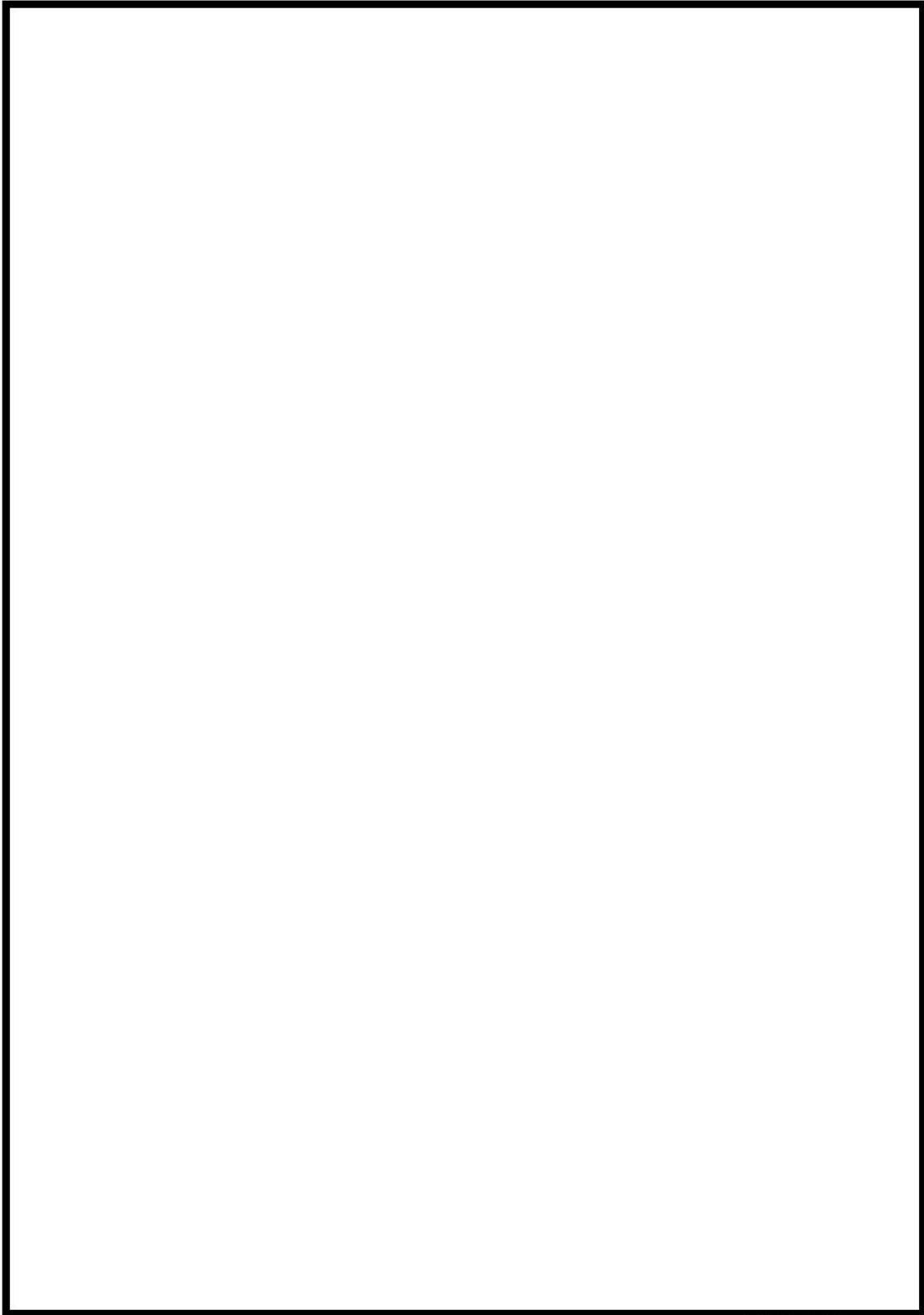


図 3-3 (2/2) 臨界解析モデル (横断面図) (乾燥状態)



(単位：cm)

図 3-4 (1/2) 臨界解析モデル (縦断面図) (冠水状態)



(単位：cm)

図 3-4 (2/2) 臨界解析モデル (横断面図) (冠水状態)

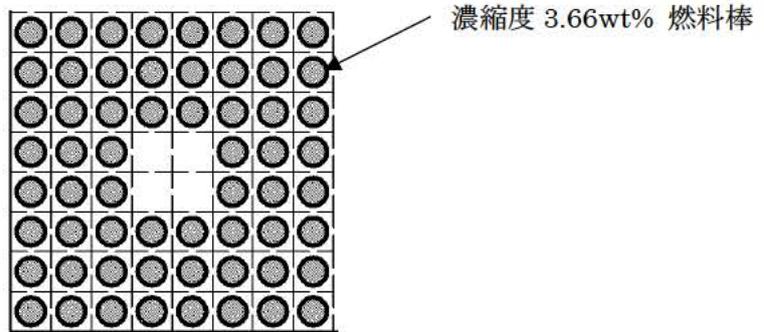


図 3-5 乾燥状態の臨界解析における燃料棒配置 (高燃焼度 8×8 燃料)

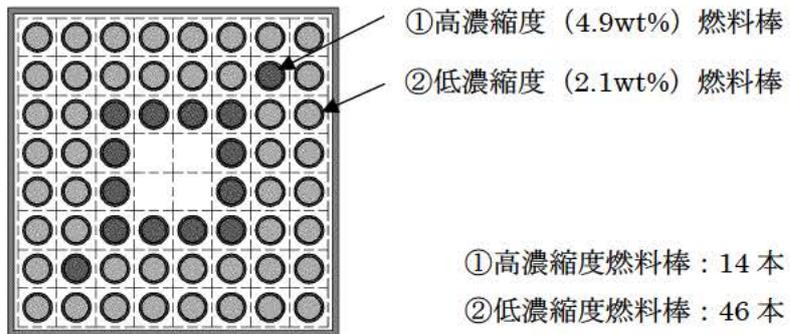


図 3-6 冠水状態の臨界解析における燃料棒配置 (高燃焼度 8×8 燃料モデルバンドル)

注：参考文献 (2) に示される、炉心装荷冷温状態において無限増倍率 1.3 となる燃料モデルである。

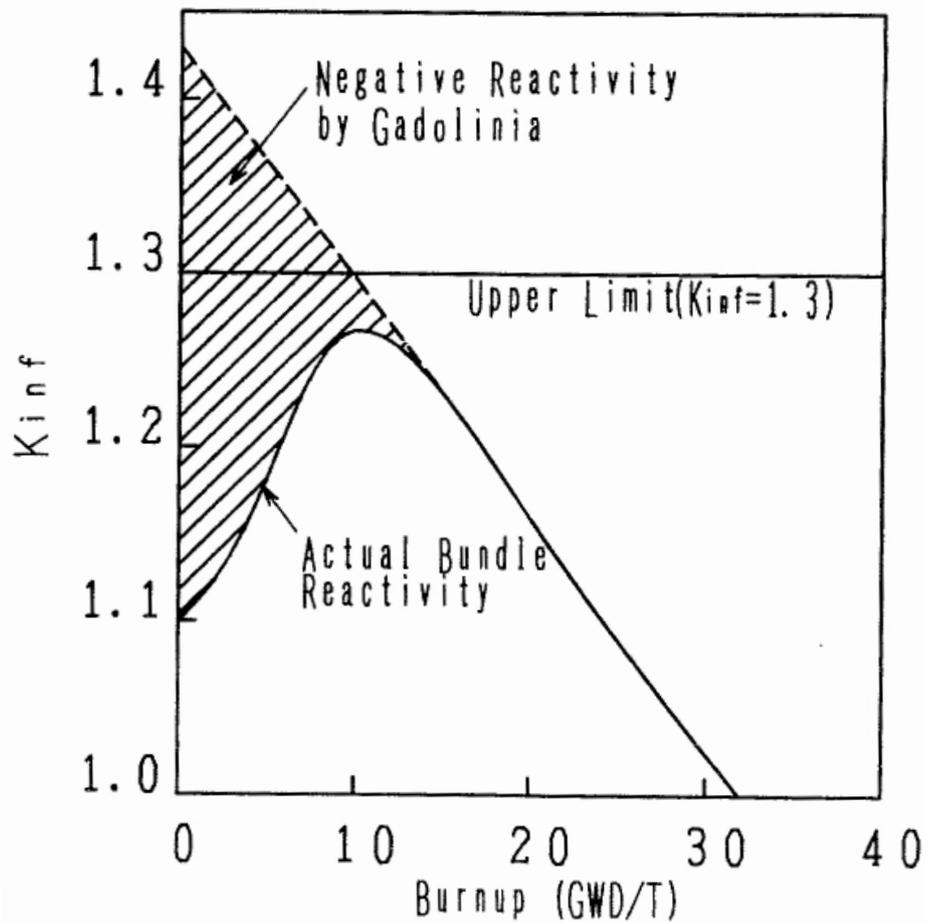


図 3-7 BWR 燃料の反応度特性の例 ⁽²⁾

注：本申請で収納対象とする BWR 用燃料集合体は、上図に示されるように炉心装荷冷温状態における無限増倍率が燃焼期間を通じて 1.3 を超えないように設計されたものである。

4. 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)
- (2) K. Kawakami, M. Matsumoto, H. Asano, T. Tanaka, T. Matsumoto, T. Mochida, M. Yamaguchi, “The Use of Gadolinia Credit for Criticality Evaluation of Spent-Fuel Cask” , The 11th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM’ 95) , December 3-8, Las Vegas, USA (1995)

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
- ・チャンネルボックスの有無
- ・寸法条件（バスケット格子板厚、バスケット格子内のり、中性子吸収材板厚、隙間厚さ）（図 3-1 参照）
- ・キャスク胴内及びキャスク外雰囲気（水密度）

感度解析結果を別紙 1-1 表に示す。

バスケット格子内の燃料配置については、乾燥状態及び冠水状態ともに中心偏向で最も中性子実効増倍率が大きい結果となり、乾燥状態及び冠水状態ともに燃料集合体間の距離が近いほど中性子実効増倍率が大きくなる傾向がある。単純に燃料集合体間の距離が近い条件としては の条件もあるが、感度解析の結果から中心偏向を評価条件とする。

チャンネルボックスの有無については、乾燥状態ではチャンネルボックスなしの条件で中性子実効増倍率が大きく、冠水状態ではチャンネルボックスありの条件で中性子実効増倍率が大きい結果となり、他の感度解析項目と比較して影響が大きい。乾燥状態においてチャンネルボックスありの場合は、チャンネルボックス構成核種による中性子吸収効果及びチャンネルボックスが存在することで燃料集合体間の距離が離れることが影響していると考えられる。冠水状態においてチャンネルボックスなしとする場合、燃料集合体間の距離が近くなることで中性子実効増倍率を増大させる影響よりも、燃料領域の外側の水の比率が増し中性子が減速されやすくなることにより中性子吸収材に含まれる熱中性子吸収断面積が大きいほう素に中性子が多く吸収される（中性子吸収材が機能しやすくなる）ことで中性子実効増倍率を減少させる影響が大きく、結果として中性子実効増倍率を減少させる。

寸法条件については、バスケット格子内のり及び隙間厚さは乾燥状態と冠水状態で同じ傾向であり、これらは小さいほど燃料集合体間の距離が近くなるため、最小において中性子実効増倍率が最大となる。また、冠水状態においてはバスケットの空隙は水で満たされるため、バスケット格子内のり及び隙間厚さが大きいほど燃料領域の外側の水の比率及び中性子吸収材が収まる隙間の水の比率が増し中性子吸収材が機能しやすくなることで中性子実効増倍率を減少させる影響がある。

一方、バスケット格子板厚及び中性子吸収材板厚は乾燥状態と冠水状態で傾向が異なっており、乾燥状態ではいずれも最小の場合に中性子実効増倍率が大きく、冠水状態ではいずれも最大の場合に中性子実効増倍率が大きい結果となった。各状態の違いについては次のように考えられる。

① 乾燥状態

バスケット格子板厚（コンパートメント板厚）については、板厚が小さいほど、コンパートメント構成核種による中性子吸収効果が小さくなるため、及び燃料集合体間の距離が近くなるため、中性子実効増倍率が大きくなる。

中性子吸収材板厚については、板厚が小さいほど、中性子吸収材構成核種のうち、ほう素の量と量論的に結びついていない核種（具体的にはアルミニウム）による中性子吸収効果が小さくなるため、中性子実効増倍率が大きくなる。

② 冠水状態

バスケット格子板厚（コンパートメント板厚）については、板厚が小さい場合に乾燥状態と同様の理由で中性子実効増倍率を大きくする影響があると考えられるが、Hitz-B69型は燃料集合体と中性子吸収材の間にコンパートメント（炭素鋼）が存在する構造であるため、逆にコンパートメントの板厚が大きい場合にも、反射効果によって燃料集合体側の熱中性子束が増加し核分裂反応を起こしやすくなり、同時に中性子吸収材側の熱中性子束が減少し中性子吸収材が機能しにくくなることにより中性子実効増倍率を大きくする影響があると考えられる。これらの影響が兼ね合った結果、Hitz-B69型においてはバスケット格子板厚が大きい場合に中性子実効増倍率がわずかに大きくなる傾向がある。

中性子吸収材板厚については、熱中性子吸収断面積が大きなほう素の量は解析上は板厚に依存しないが、中性子吸収材の板厚が小さいほど、中性子吸収材が収まる隙間内の空隙で水の比率が増し中性子吸収材が機能しやすくなるため、逆に板厚が大きい場合に中性子実効増倍率が大きくなる。

寸法条件については、特に冠水状態において Hitz-B69 型に特有の傾向があるため、寸法条件の組み合わせを網羅した結果を別紙 1-2 表及び別紙 1-5 図に示す。ここで、寸法条件以外の条件は別紙 1-1 表より中性子実効増倍率が高くなる条件とし、燃料配置については乾燥状態及び冠水状態ともに中心偏向、チャンネルボックスについては乾燥状態ではなし、冠水状態ではありとした。

別紙 1-5 図より、乾燥状態ではバスケット格子板厚の影響が最も大きいことが分かり、燃料集合体間の距離に関して変化幅が大きいバスケット格子内のりよりも感度が大きいことから、体系内に存在するコンパートメント構成核種による中性子吸収効果が中性子実効増倍率に最も大きく影響し、次いで燃料集合体間の距離が影響すると考えられる。乾燥状態における中性子吸収材板厚及び隙間厚さは、統計誤差（表 3-5 に示すように、乾燥状態 3σ で 0.0010 程度）と比較して微小なため統計誤差の範囲で結果が逆転することも有り得る水準であるが、傾向は前述の通りであり、いずれも小さい方が中性子実効増倍率が大きくなる傾向である。

同じく別紙 1-5 図より、冠水状態では、バスケット格子内のりの影響が最も大きく、バスケット格子内の水の比率や隣接する燃料集合体間の水の層の厚さが中性子実効増倍率に大きく影響していると考えられる。冠水状態における他の項目はバスケット格子内のりと比較して影響が小さく、統計誤差（表 3-5 に示すように、冠水状態 3σ で 0.0023 程度）と比較して微小なため統計誤差の範囲で結果が逆転することも有り得る水準であるが、傾向は前述の通りであり、バスケット格子板厚及び中性子吸収材板厚は大きい方が、隙間厚さは小さい方が、中性子実効増倍率が大きくなる傾向である。

別紙 1-2 図より、胴内の雰囲気を水密度 $0.0\sim 1.0\text{g/cm}^3$ と変化させると中性子実効増倍率は単調に増加するため、燃料集合体は減速不足の状態である。

別紙 1-3 図より、冠水状態の中性子実効増倍率は外雰囲気の影響は小さく、Hitz-B69 型単体の中で定まっている。また、別紙 1-4 図より、乾燥状態では外雰囲気を水密度 $0.0\sim 1.0\text{g/cm}^3$ と変化させると、低密度の水の存在で中性子実効増倍率は減少し、その後変化しなくなる。したがって、キャスク外に漏れた中性子が外部で減速されてキャスク内に戻り中性子実効増倍率を増大させることは無い。

以上の感度解析結果より、表 3-3 に示した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-B69 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		感度解析条件 (注 1)	感度解析結果 (注 2)	
			乾燥状態 評価結果:0.396	冠水状態 評価結果:0.861
燃料配置 (別紙 1-1 図)		中心偏向	-	-
			-0.00086	-0.00161
			-0.00196	-0.00129
			-0.00339	-0.00948
チャンネルボックス		なし	-	-0.00817
		あり	-0.00716	-
寸法条件	バスケット 格子板厚	最大：公称+  mm	-0.00337	-
		最小：公称-  mm	-	-0.00072
	バスケット 格子内のり	最大：  mm	-0.00169	-0.00281
		最小：  mm	-	-
	中性子(注 3) 吸収材板厚	最大：公称+  mm	-0.00042	-
		最小：公称-  mm	-	-0.00014
	隙間厚さ	最大：公称+  mm	-0.00083	-0.00041
		最小：公称-  mm	-	-
キャスク胴内雰囲気		水密度 0.0~1.0g/cm ³	別紙 1-2 図	
キャスク外雰囲気		水密度 0.0~1.0g/cm ³		

(注 1) 表 3-3 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) 「感度解析条件における中性子実効増倍率 (keff+3σ) - 評価結果 (表 3-5 に示した中性子実効増倍率 (keff+3σ))」を示している。「-」としている箇所の条件は表 3-3 の解析条件 (評価結果の解析条件) である。

(注 3) 中性子吸収材に含まれるほう素の量は面密度で規定するため、解析上は体系内に存在するほう素の量は板厚に依存せず最少となるようモデル化する。

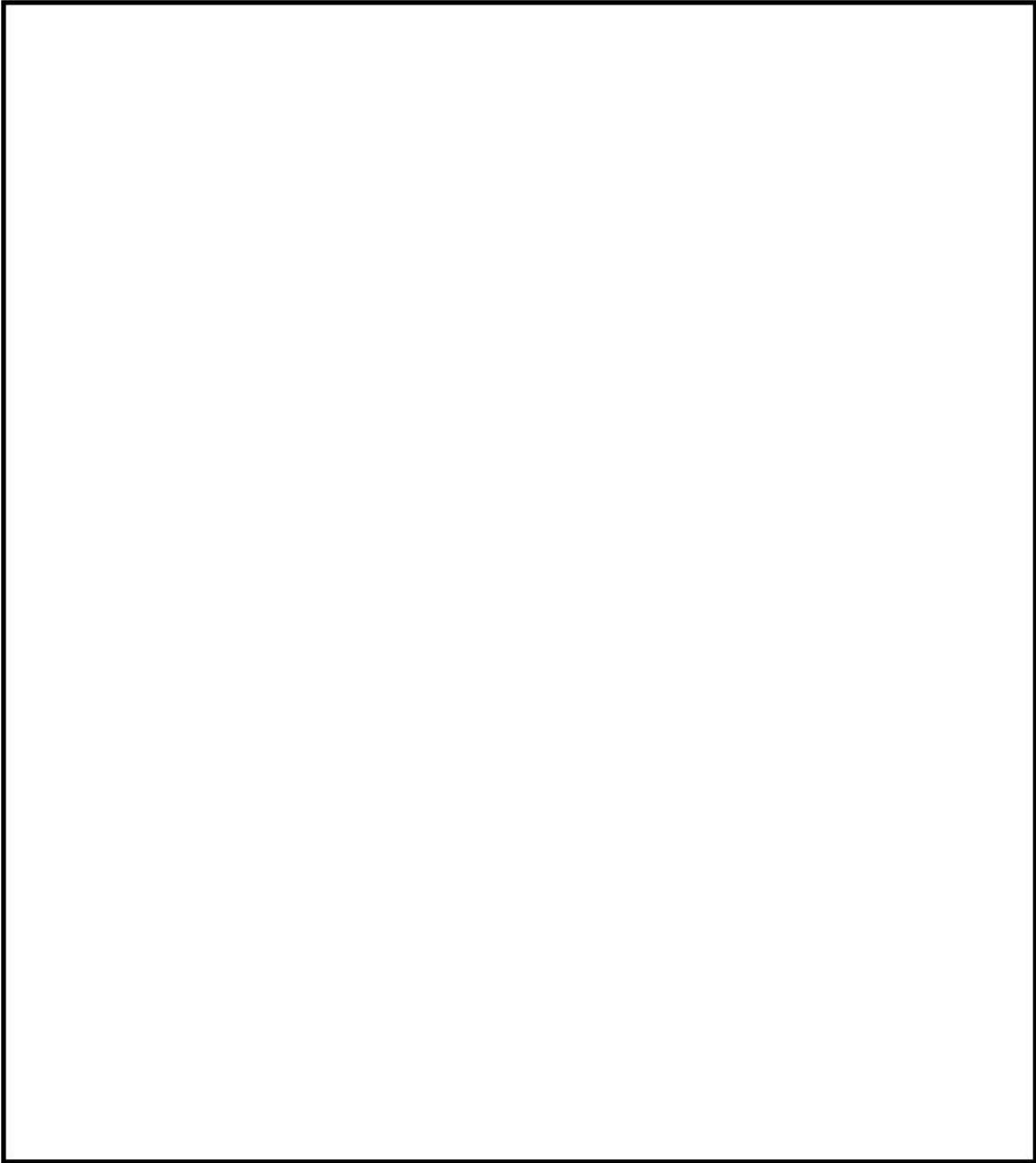
 内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 1-2 表 臨界解析条件の感度解析結果（寸法条件の組み合わせ）

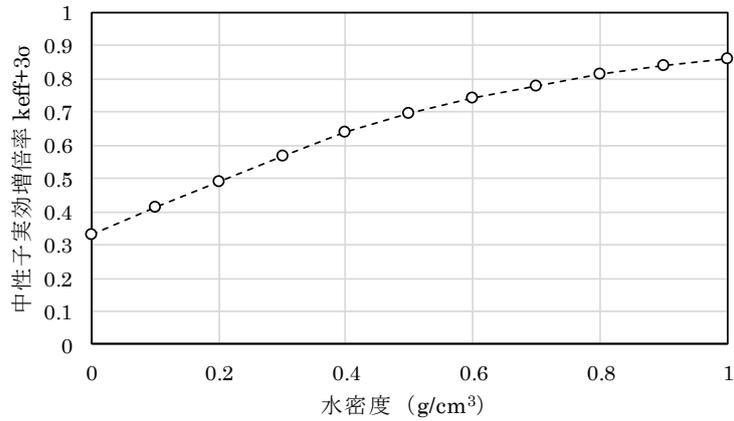
寸法条件（注1）				感度解析結果（注2）			
バスケット 格子板厚	バスケット 格子内のり	中性子 吸収材板厚	隙間厚さ	乾燥状態 評価結果:0.396	冠水状態 評価結果:0.861		
最大	最大	最大	最大				
最大	最大	最大	最小		-0.00281		
最大	最大	最小	最大				
最大	最大	最小	最小				
最大	最小	最大	最大		-0.00041		
最大	最小	最大	最小		-		
最大	最小	最小	最大				
最大	最小	最小	最小	-0.00337	-0.00014		
最小	最大	最大	最大				
最小	最大	最大	最小				
最小	最大	最小	最大				
最小	最大	最小	最小			-0.00169	
最小	最小	最大	最大				
最小	最小	最大	最小			-0.00042	-0.00072
最小	最小	最小	最大			-0.00083	
最小	最小	最小	最小	-			

（注1）各寸法条件の最大及び最小は、別紙 1-1 表の最大及び最小の条件と同様。

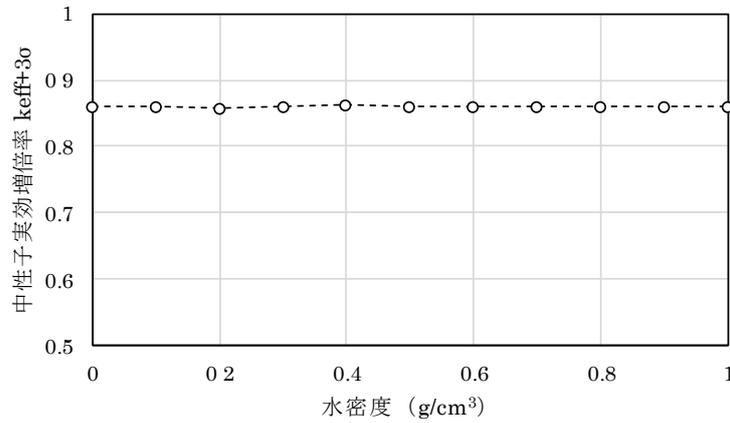
（注2）「感度解析条件における中性子実効増倍率（ $k_{eff}+3\sigma$ ） - 評価結果（表 3-5 に示した中性子実効増倍率（ $k_{eff}+3\sigma$ ）」を示している。「-」としている箇所の条件は表 3-3 の解析条件（評価結果の解析条件）である。



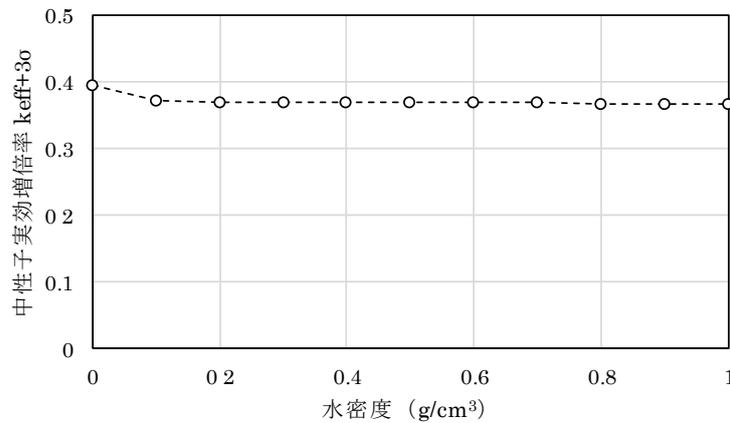
別紙 1-1 図 バスケット格子内燃料配置の感度解析条件



別紙 1-2 図 Hitz-B69 型の胴内雰囲気影響：冠水状態の評価条件において
胴内の水密度を 0.0~1.0g/cm³ の範囲で変化させた場合の中性子実効増倍率



別紙 1-3 図 Hitz-B69 型の外雰囲気影響 (1)：冠水状態の評価条件において
キャスク外雰囲気(水)を密度 0.0~1.0g/cm³ の範囲で変化させた場合の中性子実効増倍率



別紙 1-4 図 Hitz-B69 型の外雰囲気影響 (2)：乾燥状態の評価条件において
キャスク外雰囲気(水)を密度 0.0~1.0g/cm³ の範囲で変化させた場合の中性子実効増倍率

変化項目 及び凡例	乾燥状態 (胴内雰囲気：真空)	冠水状態 (胴内雰囲気：水 1.0g/cm ³)
<p>バスケット 格子板厚</p> <p>①：格子内のり ②：中性子吸収材板厚 ③：隙間厚さ ① - ② - ③ - - 最大-最大-最大 - - 最小-最大-最大 - - 最大-最大-最小 - - 最小-最大-最小 - - 最大-最小-最大 - - 最小-最小-最大 - - 最大-最小-最小 - - 最小-最小-最小</p> <p>①：格子板厚 ②：中性子吸収材板厚 ③：隙間厚さ ① - ② - ③ - - 最大-最大-最大 - - 最大-最大-最小 - - 最大-最小-最大 - - 最大-最小-最小 - - 最小-最大-最大 - - 最小-最大-最小 - - 最小-最小-最大 - - 最小-最小-最小</p> <p>①：格子板厚 ②：格子内のり ③：隙間厚さ ① - ② - ③ - - 最大-最大-最大 - - 最大-最大-最小 - - 最小-最大-最大 - - 最小-最大-最小 - - 最大-最小-最大 - - 最大-最小-最小 - - 最小-最小-最大 - - 最小-最小-最小</p> <p>①：格子板厚 ②：格子内のり ③：中性子吸収材板厚 ① - ② - ③ - - 最大-最大-最大 - - 最大-最大-最小 - - 最小-最大-最大 - - 最小-最大-最小 - - 最大-最小-最大 - - 最大-最小-最小 - - 最小-最小-最大 - - 最小-最小-最小</p>		

注：各欄に示す平均 Δk (最小→最大)は、変化項目の他の条件を同一とした条件毎に求めた「変化項目が最大の条件における中性子実効増倍率 ($k_{eff}+3\sigma$) - 変化項目が最小の条件における中性子実効増倍率 ($k_{eff}+3\sigma$)」の平均値を示している。

別紙 1-5 図 寸法条件の相互影響

臨界解析に使用する解析コードについて

Hitz-B69 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。

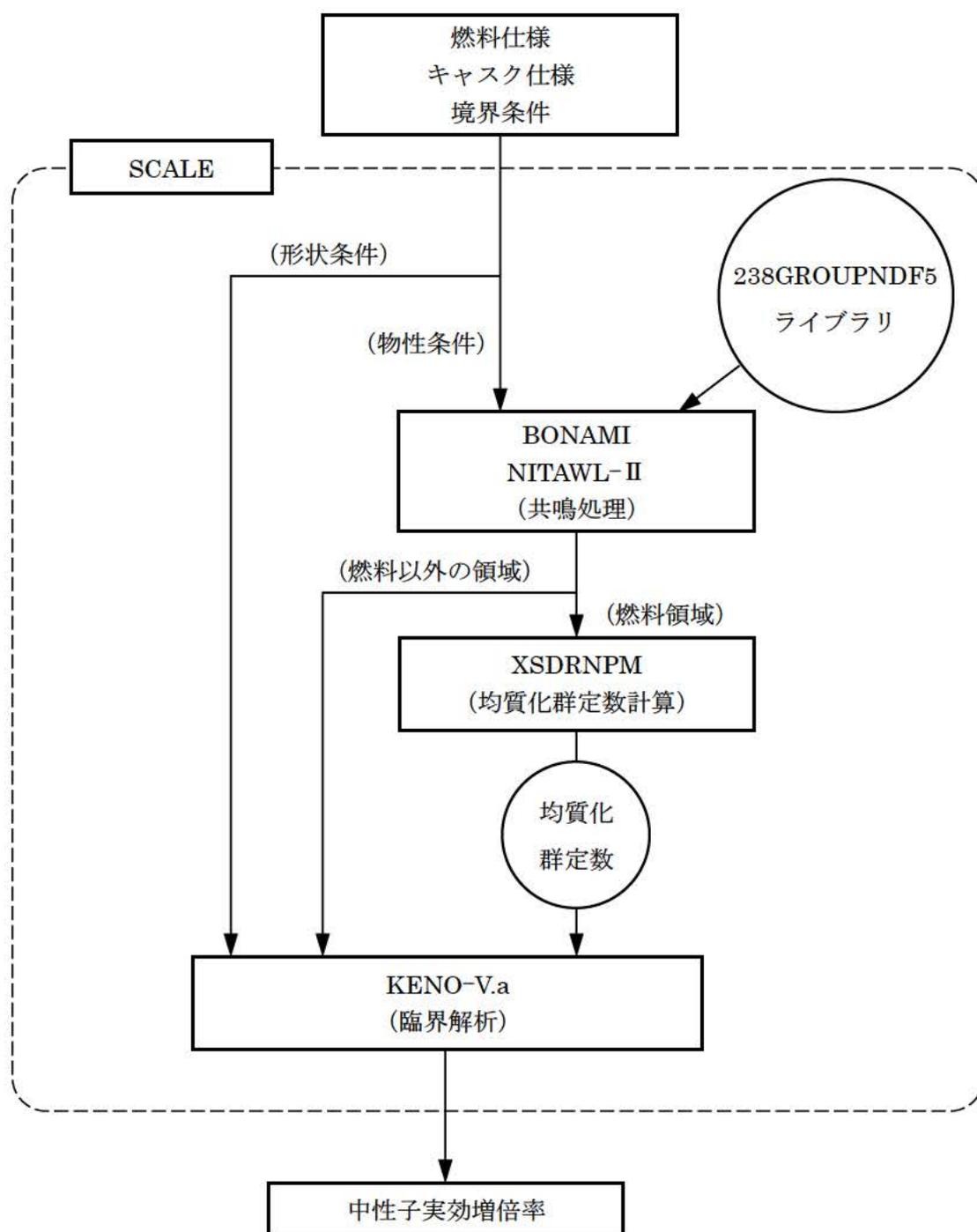
文献⁽²⁾に示す実験について、収納物である使用済燃料の仕様並びに下記の①～⑦の条件を考慮し、ベンチマーク試験解析を実施する臨界実験を選定した。別紙 2-1 表に示すとおりベンチマーク試験解析は実験をよく再現しており、妥当な結果が得られている。

- 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

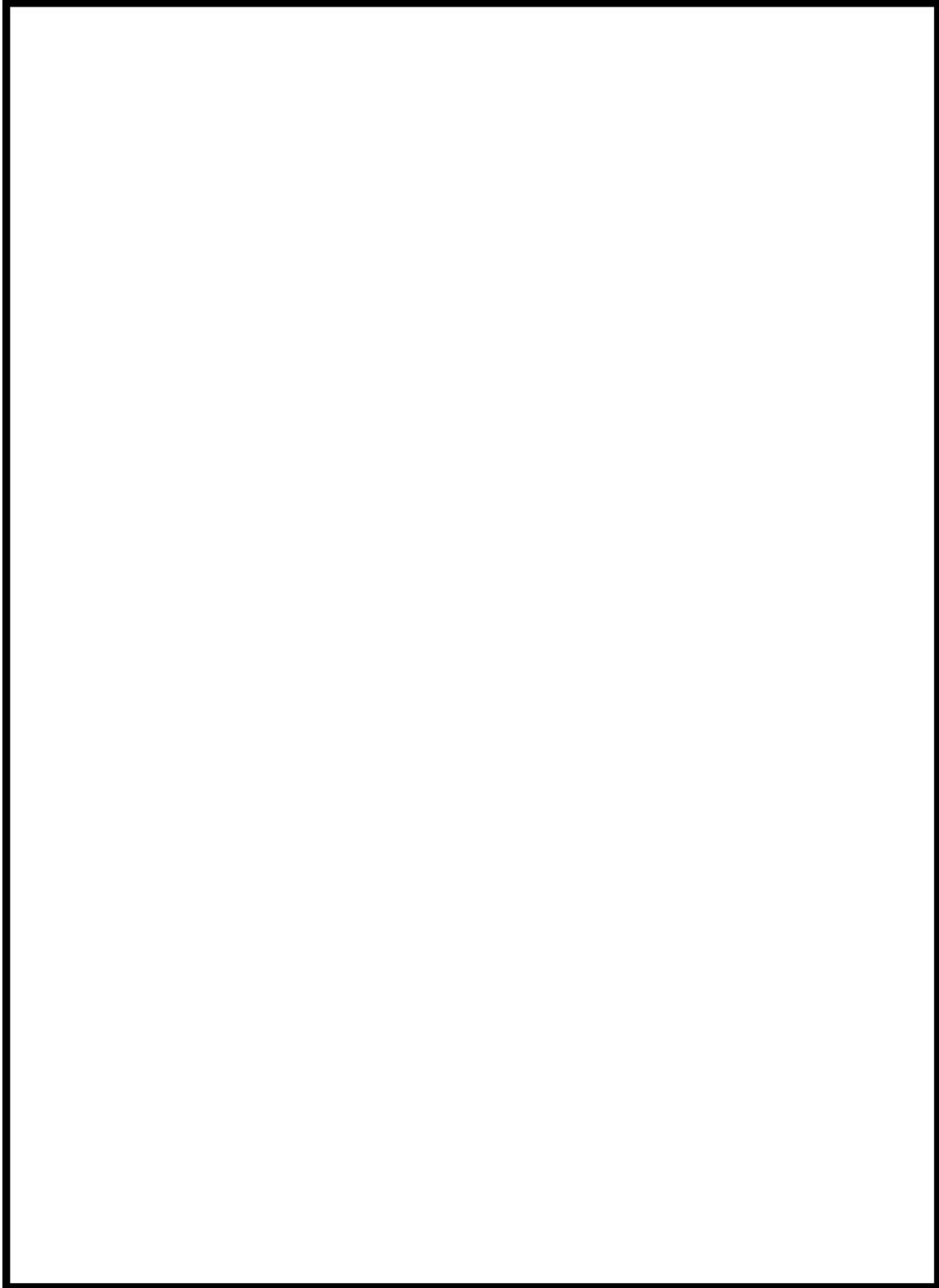
解析ケース	中性子 実効増倍率	統計誤差 σ
	0.99768	0.00096
	0.99774	0.00084
	0.99887	0.00098
	0.99817	0.00083
	0.99745	0.00083
	0.99692	0.00094
	0.99721	0.00089
	0.99658	0.00100
	0.99602	0.00086
	0.99110	0.00089
	0.99382	0.00070
	0.99589	0.00079
	0.99675	0.00091
	0.99647	0.00075
	0.99499	0.00096
	0.99495	0.00093
	0.99841	0.00086
	0.99346	0.00080
	0.99666	0.00084



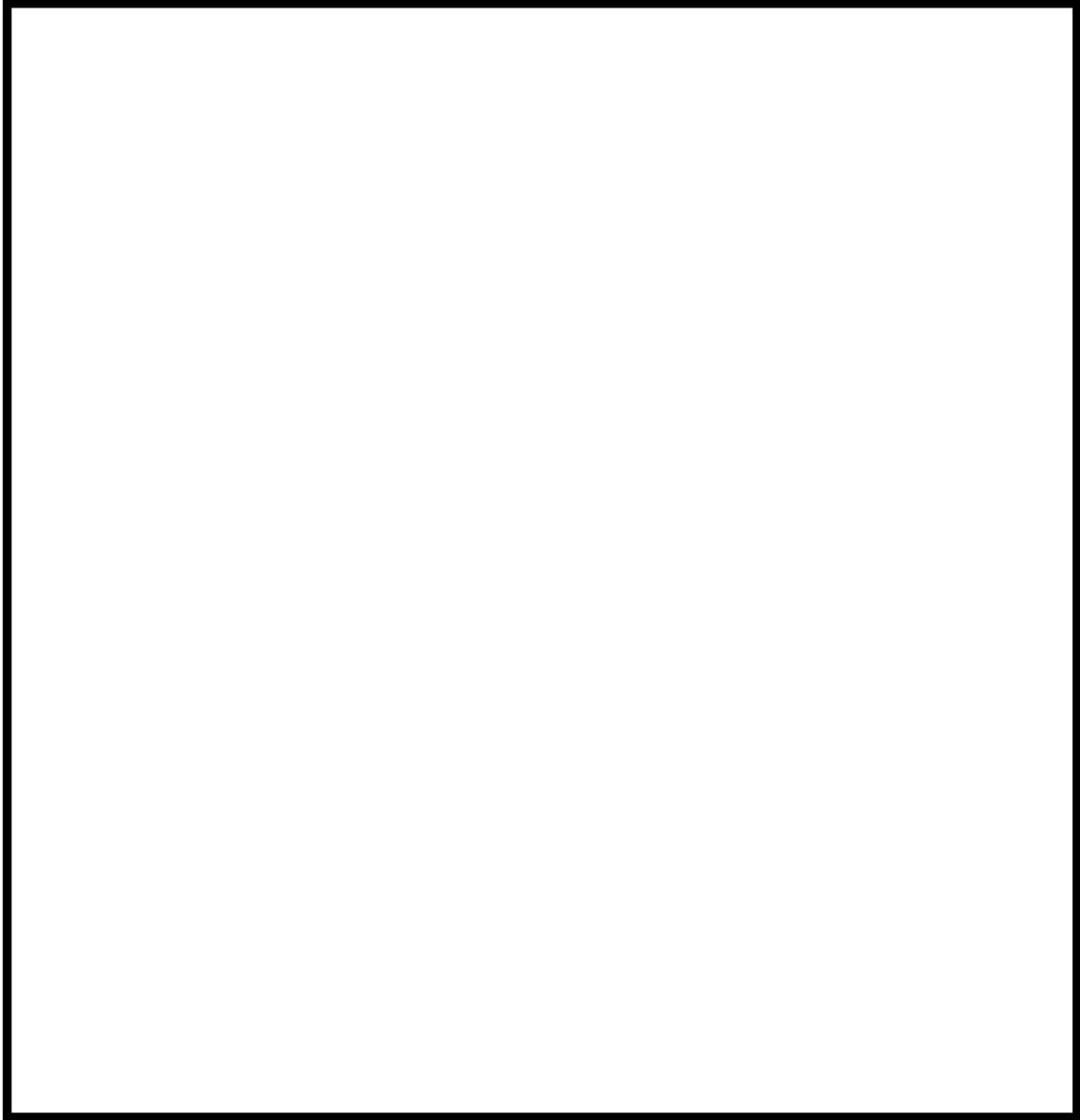
別紙 2-1 図 SCALE コードシステムの解析フロー



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) “SCALE : A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation”, Vols. 1-3, NUREG/CR-0200, U.S. Nuclear Regulatory Commission (originally issued July 1980).
- (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-B69 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-B69 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、原子炉建屋内及び貯蔵施設内における Hitz-B69 型の取扱フローを想定し、各状態における Hitz-B69 型の構成部品や Hitz-B69 型の胴内並びに外雰囲気の状態、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 (GK03-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。

- ・原子炉建屋における燃料装荷～貯蔵用緩衝体取付け (別紙 3-2 表)
- ・貯蔵施設における設置～貯蔵 (別紙 3-3 表)
- ・貯蔵施設における貯蔵～輸送用緩衝体取付け (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-B69 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 3-5 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 3-5 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)

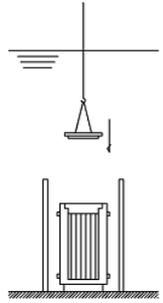
- (1) 日本原子力研究所、「臨界安全ハンドブック 第 2 版」、JAERI 1340、(1999)

別紙 3-1 表 Hitz-B69 型の臨界防止機能の評価条件

No.	取扱いモード	Hitz-B69 型 構成部品	胴内雰囲気	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	

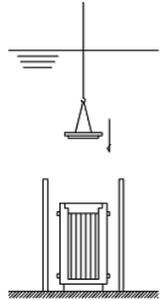
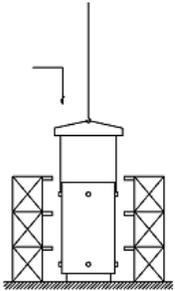
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-2 表 (1/5) Hitz-B69 型の取扱いフロー例 (原子炉建屋における燃料装荷～貯蔵用緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-B69 型 構成部品	胴内雰囲気	外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
1-1a	<p>・燃料装荷 (一次蓋取付前)</p> 	<p>本体 バスケット</p>	<p>水</p>	<p>水</p>	<div style="border: 2px solid black; height: 484px;"></div>

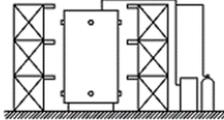
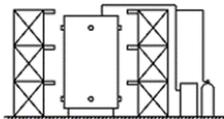
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-2 表 (2/5) Hitz-B69 型の取扱いフロー例 (原子炉建屋における燃料装荷～貯蔵用緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-B69 型 構成部品	胴内雰囲気	外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
1-1b	<p>・一次蓋取付け</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋</p>	<p>水</p>	<p>水</p>	<div style="border: 2px solid black; height: 500px;"></div>
1-2	<p>・容器吊上げ、移動、吊降し</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋</p>	<p>水</p>	<p>空気</p>	

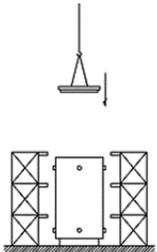
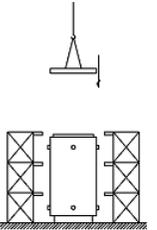
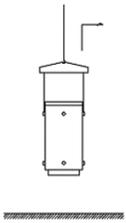
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-2 表 (3/5) Hitz-B69 型の取扱いフロー例 (原子炉建屋における燃料装荷～貯蔵用緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-B69 型 構成部品	胴内雰囲気	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>	

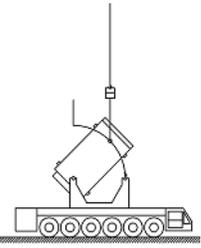
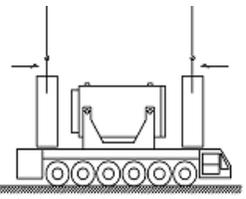
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-2 表 (4/5) Hitz-B69 型の取扱いフロー例 (原子炉建屋における燃料装荷～貯蔵用緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-B69 型 構成部品	内雰囲気	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"> 貯蔵用緩衝体アダプタ取付け 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用緩衝体 アダプタ	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 貯蔵用緩衝体 アダプタ	不活性ガス	空気	

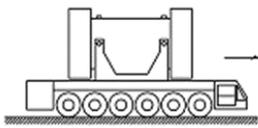
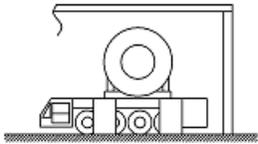
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-2 表 (5/5) Hitz-B69 型の取扱いフロー例 (原子炉建屋における燃料装荷～貯蔵用緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-B69 型 構成部品	胴内雰囲気	外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
1-7	<ul style="list-style-type: none"> 横倒し 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用緩衝体 アダプタ	不活性ガス	空気	
1-8	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵用緩衝体取付け 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用緩衝体 アダプタ 貯蔵用緩衝体	不活性ガス	空気	

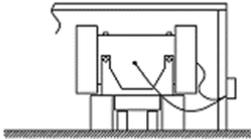
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-3 表 (1/2) Hitz-B69 型の取扱いフロー例 (貯蔵施設における取扱い～貯蔵)

No.	取扱いモード	Hitz-B69 型 構成部品	胴内雰囲気	外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
2-1 ～ 2-3	<ul style="list-style-type: none"> ・トレーラーで搬送 ・一次受け架台へ移送 ・移送装置へ載せ替え 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用緩衝体 アダプタ 貯蔵用緩衝体	不活性ガス	空気	
2-4 ～ 2-5	<ul style="list-style-type: none"> ・移送装置での移送 ・貯蔵架台基礎への設置 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用緩衝体 アダプタ 貯蔵用緩衝体	不活性ガス	空気	

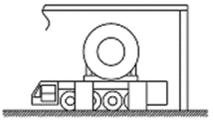
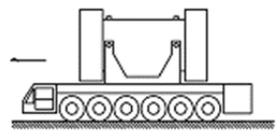
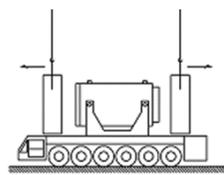
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-3 表 (2/2) Hitz-B69 型の取扱いフロー例 (貯蔵施設における取扱い～貯蔵)

No.	取扱いモード	Hitz-B69 型 構成部品	胴内雰囲気	外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
2-6	<p>・監視装置取り付け</p> 	<p>本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用緩衝体 アダプタ 貯蔵用緩衝体</p>	不活性ガス	空気	

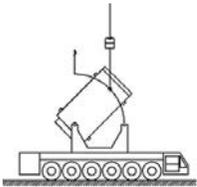
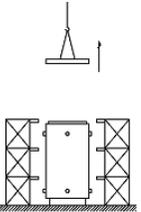
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-4 表 (1/3) Hitz-B69 型の取扱いフロー例 (貯蔵施設における貯蔵～輸送用緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-B69 型 構成部品	胴内雰囲気	外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
3-1 ～ 3-2	<ul style="list-style-type: none"> 監視装置の取外し 貯蔵架台基礎からの移送 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用緩衝体 アダプタ 貯蔵用緩衝体	不活性ガス	空気	
3-3 ～ 3-4	<ul style="list-style-type: none"> 一時受け架台に移送 トレーラーへの載せ替え、保管 建屋に移送 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用緩衝体 アダプタ 貯蔵用緩衝体	不活性ガス	空気	
3-5	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵用緩衝体の取り外し 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用緩衝体 アダプタ	不活性ガス	空気	

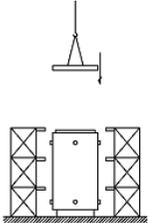
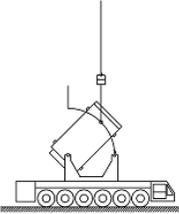
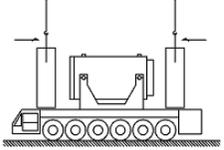
内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 3-4 表 (2/3) Hitz-B69 型の取扱いフロー例 (貯蔵施設における貯蔵～輸送用緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-B69 型 構成部品	胴内雰囲気	外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
3-6 ～ 3-7	<ul style="list-style-type: none"> ・ 立て起こし ・ 容器移動 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 貯蔵用緩衝体 アダプタ	不活性ガス	空気	
3-8	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貯蔵用緩衝体アダプタの取り外し 	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 (3/3) Hitz-B69 型の取扱いフロー例 (貯蔵施設における貯蔵～輸送用緩衝体取付け)

No.	取扱いモード	Hitz-B69 型 構成部品	胴内雰囲気	外雰囲気	臨界防止機能の成立性について
3-9 ～ 3-10	<ul style="list-style-type: none"> ・三次蓋の取り付け、三次蓋密封確認 ・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	
3-11	<ul style="list-style-type: none"> ・横倒し 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋	不活性ガス	空気	
3-12	<ul style="list-style-type: none"> ・輸送用緩衝体取付け、搬出 	本体 バスケット 一次蓋 二次蓋 三次蓋 輸送用緩衝体	不活性ガス	空気	

内は商業機密のため、非公開とします。