

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

(HDP-69BCH(B)型の臨界防止機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法（よこ置き）の場合
5. 緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法(よこ置き)の場合
6. 参考文献

【参考資料】

参考1 輸送時の臨界解析

参考2 内部雰囲気の設定条件

1. 要求事項

HDP-69BCH(B)型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 項一号ハ

- ・燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。

b. 設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条第 1 項

- ・第 16 条第 2 項第 1 号ハに規定する「臨界に達するおそれがない」とは、第 5 項に規定するもののほか、使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（以下「貯蔵事業許可基準規則解釈」という。）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 条第 1 項一号

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。

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第 3 条第 1 項二号

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。

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第 3 条第 1 項三号

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。

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第 3 条第 1 項四号

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、非均等性、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

・貯蔵事業許可基準規則解釈第3条第1項五号

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・貯蔵兼用兼用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優位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安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、非均等性、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. 適合性について

設置（変更）許可に係る審査で確認される兼用キャスクの有する4つの安全機能（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本型式証明申請で確認する。HDP-69BCH(B)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及び審査ガイドの確認内容に適合している。

〔設置許可基準規則〕

- ・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。
- ・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。

〔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安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。

HDP-69BCH(B)型の貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及び HDP-69BCH(B)型に使用済燃料を収納する際の冠水状態において、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とするため、乾式キャスクの判定基準*1である中性子実効増倍率が0.95を上回らないことを基準とする。

HDP-69BCH(B)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格子構造、及びバスケットプレートに添加された中性子吸収材（図 2.4.1-1 のとおり）により、臨界に達することを防止する設計とする。

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保つ設計とする。詳細は、本文 2.5 の「HDP-69BCH(B)型の長期健全性について」に示す。

なお、解析モデルを完全反射境界とすることで、HDP-69BCH(B)型が無限に並ぶ配列と等価な条件で解析しており、滑動等による兼用キャスクの配置が変化しても、解析の条件を超えて中性子実効増倍率が増加することはない。

HDP-69BCH(B)型は、兼用キャスクを基礎等に固定する方法では、通常貯蔵時において、バスケットの塑性変形が想定されない設計とする。一方、緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法では、バスケットの塑性変形が生じても未臨界が維持される設計とする。

注記*1：原子力安全委員会内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について

(平成4年8月27日原子力安全委員会了承)

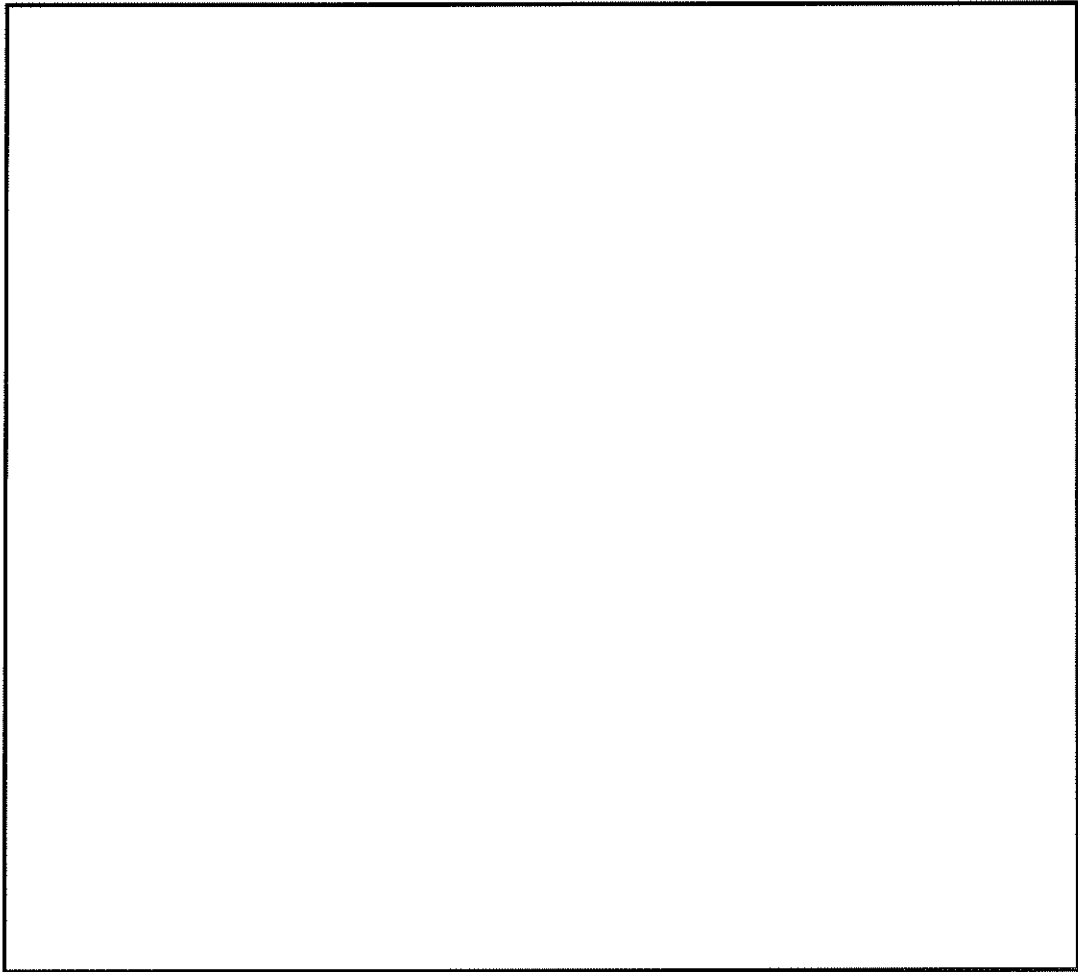


図 2.4.1-1 HDP-69BCH(B)型のバスケット構造

内は商業機密のため、非公開とします。

〔設置許可基準規則〕

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

〔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、非均等性、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。

乾燥時臨界解析用の使用済燃料の燃料仕様を表2.4.1-1に、冠水時臨界解析用の使用済燃料の燃料仕様を表2.4.1-2に、解析条件及び設定根拠を表2.4.1-3に、兼用キャスクの臨界解析フロー図を図2.4.1-2に示す。

表2.4.1-3に示すように、中性子吸収材が添加されたバスケットプレートは製造公差を考慮している。また、本文2.5に示すように、設計貯蔵期間60年におけるバスケットプレートに含まれるほう素の減損割合は無視できるほど小さく、臨界解析ではほう素の減損は考慮しない。

乾燥時の臨界解析モデルを図2.4.1-3及び図2.4.1-4に、BWR燃料の反応度特性を図2.4.1-5に、ガドリニウムの反応断面積の例（JENDL-3.3）を図2.4.1-6に、冠水時の臨界解析モデルを図2.4.1-7及び図2.4.1-8に、兼用キャスク内外の水密度と中性子実効増倍率の関係を図2.4.1-9に示す。

貯蔵施設での貯蔵中において、技術的に想定されるいかなる場合にも臨界に達することを防止する設計とする。なお、乾燥状態の臨界解析に加え、兼用キャスク内は使用済燃料を収納する際に冠水状態となることを考慮し、水密度範囲0.0~1.0 g/cm³で解析した。その結果を図2.4.1-9(1/3)に示す。中性子実効増倍率は水密度1.0g/cm³で最も大きくなる。なお、周囲の水密度を変化させた場合の影響についても解析を実施した。その結果を図2.4.1-9(2/3)、図2.4.1-9(3/3)に示す。中性子実効増倍率は、周囲に水がない条件（水密度0.0 g/cm³）に包絡される。

HDP-69BCH(B)型は、燃料の種類ごとに収納できる燃焼度（燃料集合体1体の平均燃焼度）の上限値を設定し、その上限値以下の燃焼度であれば収納できる条件としている。臨界解析では、HDP-69BCH(B)型に収納できる最高燃焼度以下の燃焼度のうち、最も反応度が高い初期濃縮度の状態（未照射の状態）とし、収納できる燃料タイプのうち最も反応度の高い高燃焼度8×8燃料が69体収納された状態を代表条件として選定する。なお、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（図2.4.1-5）、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。したがって、特定機器を使用することができる発電用原子炉施設の条件として、HDP-69BCH(B)型に収納する使用済燃料の反応度が、本申請の臨界防止機能に関する評価で使用した使用済燃料が有する反応度を超えないことを発電用原子炉施設の設置（変更）許可申請時に別途確認いただく必要がある。

一方、乾燥状態の解析では、HDP-69BCH(B)型の内部雰囲気は、中性子のエネルギーが高い状態である。図2.4.1-6に示すように、ガドリニアに含まれるガドリニウムの中性子吸収断面積は中性子のエネルギーが高い領域では低くなり、中性子吸収効果は期待できない。したがって、乾燥状態の解析は、燃焼度0GWd/tの減損していない新燃料で評価を実施する。

HDP-69BCH(B)型には、使用済燃料の燃焼度が上限値以下であれば収納できる仕様としている。BWR燃料の反応度は、図2.4.1-5に示すように、燃焼度の上限値より小さい燃焼度で反応度のピークが存在する。これを考慮して、除熱機能及び遮蔽機能の観点では、燃焼度が高い条件が保守的となるが、臨界防止機能の観点では、収納対象となる使用済燃料の反応度が最も高くなる条件を包絡できる燃料モデルで臨界解析（燃焼状態を考慮しない）を行い、使用済燃料の燃焼を考慮した臨界解析（燃焼度クレジット）は採用しない。

なお、燃焼度クレジット導入ガイド原案⁽¹⁾の付録1に燃焼度クレジットの国内の輸送体系の臨界安全基準・規制がまとめられている。輸送容器に適用される外運搬規則は、国際原子力機関（以下「IAEA」という。）が定めた「放射性物質安全輸送規則（以下「IAEA輸送規則」）という。」を取り入れて施行されている。外運搬規則には、燃焼度クレジットの採用に関する直接の記述はないが、IAEA輸送規則には、輸送容器設計へ燃焼度クレジットを取り入れるための具体的な要件として、次の条件を満たす核種組成で臨界解析を行う必要があると記載されている。

a. 照射履歴中で最大の中性子増倍を与える核種組成、又は、

b. その輸送物評価における中性子増倍の保守的な想定、照射後であって、しかしながら、運搬に先立って、同位体組成の保守性を確認するための測定が行われなければならない

a. については、詳細な照射履歴が必要となる。また、b. については、運搬前に、臨界解析で用いた同位体組成の保守性を確認するための測定（燃焼度又は未臨界度等）が必要となる。臨界解析については、他の安全機能に比べて、安全管理を厳密に要求されており、ガドリニアの存在を考慮した臨界解析（ガドリニアクレジット）により、HDP-69BCH(B)型の臨界防止機能は十分成立しており、燃焼度クレジットを採用する必要性はない。

臨界解析では、兼用キャスク及び燃料集合体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る。

解析コードがモンテカルロ法であり統計誤差を伴うため、解析コードの精度等を考慮して、中性子実効増倍率（ k_{eff} ）の平均値に統計誤差（ σ ）の3倍（ 3σ ）を加味した値が0.95を上回らない（ $k_{eff} + 3\sigma \leq 0.95$ ）こととする。

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

- 代表として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。兼用キャスク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、乾燥状態の解析では、燃焼度0GWd/tの減損していない新燃料のウラン濃縮度3.66 wt%とする。

- 冠水状態では、保守的に炉心装荷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

- 乾燥状態の解析では、兼用キャスクが無限に配列した体系（完全反射）とする。これにより、兼用キャスクの臨界防止上の配置制限は必要なく、兼用キャスク相互の

中性子干渉を包含する評価となる。また、冠水状態の解析においても、使用済燃料を収納する際に他の兼用キャスクが冠水状態で隣接する状態も想定し、冠水状態の兼用キャスクが無限に配列した体系とする。

- 兼用キャスクの底面及び二次蓋表面部で完全反射する条件とする。緩衝体及び三次蓋を考慮すると、これらの材料による中性子の減速の効果が大きくなり、使用済燃料以外の領域で吸収される中性子が多くなるため、実効増倍率を小さくする方向に寄与することから、緩衝体及び三次蓋を考慮しない。これにより、兼用キャスク設置時の緩衝体及び三次蓋の装着の有無に臨界防止上の制限は必要ない。
- バスケット格子内で使用済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、バスケット内の使用済燃料の配置は実効増倍率が最も大きくなる配置とする。具体的には、外周部及び中心部の使用済燃料共に中心偏向配置とする。これにより、兼用キャスク内の使用済燃料の配置状態に影響する兼用キャスクの設置姿勢（たて置き又はよこ置き）に臨界防止上の制限は必要ない。
- バスケットプレートは表2.4.1-3に示すとおり、ほう素添加量は使用上の下限値とする。
- バスケットプレートは、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又は真空に置換する。
- 兼用キャスク周囲の水の有無の影響については、兼用キャスクの内部と外部の空間（雰囲気）について、水の密度を一様に変化させた時の影響評価を実施した。兼用キャスクの内部の雰囲気について、水の密度を0.0～1.0 g/cm³の範囲で変化させた結果（図2.4.1-9(1/3)）、水密度1.0g/cm³で実効増倍率が最も大きくなる。また、兼用キャスクの外部の雰囲気について、水の密度を0.0～1.0 g/cm³の範囲で変化させた結果（図2.4.1-9(2/3)、図2.4.1-9(3/3)）、兼用キャスク内部雰囲気が乾燥状態の場合、水密度0.0 g/cm³が最も大きくなり、兼用キャスク内部が冠水状態の場合、実効増倍率はほとんど変化しない。したがって、兼用キャスク内部を冠水状態で評価する場合、兼用キャスク内部水密度を1.0 g/cm³、兼用キャスク外部水密度を0.0 g/cm³で評価する。また、兼用キャスク内部を乾燥状態で評価する場合、兼用キャスク内部、外部共に水密度を0.0 g/cm³で評価する。
- 中性子遮蔽材については、兼用キャスク周囲の水の影響の評価（図2.4.1-9(2/3)、図2.4.1-9(3/3)）によって、兼用キャスク周囲での中性子の散乱及び減速の効果は、実効増倍率を低減するように働くことが確認されたため、中性子遮蔽材は、水と同様に中性子の散乱及び減速の効果を持ち、かつ中性子吸収の効果も持つことから、無視することとする。

臨界解析における中性子実効増倍率 k_{eff} に関する設計基準値と申請書記載値の関係を図2.4.1-10に示す。臨界解析では、評価条件、モデル化に保守性を持たせて評価を行

っている。また、モンテカルロ法による不確かさを考慮するため、計算コードから算出される標準偏差の3倍(3 σ)を中性子実効増倍率に加算している。一方、臨界実験体系をモデル化したベンチマーク解析で解析コードの精度を確認し、使用する解析コードの信頼性が十分検証されたもの^{*1}であることを3.章で確認している。

注記*1：臨界安全ハンドブック⁽²⁾では、十分に検証された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増倍率が $k_{eff} \leq 0.95$ 以下であることを満足することにより判定することができるとされている。

表 2.4.1-1 乾燥時臨界解析用の使用済燃料（高燃焼度 8×8 燃料）の仕様

項目	単位	仕様
燃料材質	—	二酸化ウラン
被覆管材質	—	ジルカロイ-2 *1
燃料密度	%理論密度	
燃料棒外径	mm	
燃料ペレット直径	mm	
被覆管肉厚	mm	
燃料有効長	mm	
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	mm	
使用済燃料の幅	mm	
濃縮度	wt%	3.66

注記*1：実際の仕様はジルコニウム合金（被覆管はジルカロイ-2、チャンネルボックスはジルカロイ-4又はジルカロイ-2）であるが、臨界解析上は純度100%のジルコニウムとして扱う。

*2：（燃料棒ピッチ）×（燃料棒配列） = × (8) = mmを臨界解析上の使用済燃料の幅とした。

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.1-2 冠水時臨界解析用の使用済燃料（高燃焼度 8×8 燃料）の仕様

項目	単位	仕様
燃料材質	—	二酸化ウラン
被覆管材質	—	ジルカロイ-2 *1
燃料密度	%理論密度	
燃料棒直径	mm	
燃料ペレット直径	mm	
被覆管肉厚	mm	
燃料有効長	mm	
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	mm	
使用済燃料の幅	mm	
濃縮度	wt%	高濃縮度 4.9
		低濃縮度 2.1
チャンネルボックス材質	—	ジルカロイ *1
チャンネルボックス全幅	mm	
チャンネルボックス厚さ	mm	

注記*1：実際の仕様はジルコニウム合金（被覆管はジルカロイ-2、チャンネルボックスはジルカロイ-4又はジルカロイ-2）であるが、臨界解析上は純度 100%のジルコニウムとして扱う。

*2：(燃料棒ピッチ) × (燃料棒配列) = × (8) = mm を臨界解析上の使用済燃料の幅とした。

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.1-3 (1/2) 臨界解析条件及び設定根拠

項目	乾燥時臨界解析	冠水時臨界解析
収納物	濃縮度が高く、燃料ペレットの理論密度や直径が大きく、反応度が最も高い高燃焼度8×8燃料を対象とした。	
濃縮度	ガドリニアの存在を無視し、平均初期濃縮度の最大値である3.66 wt%とした。	炉心装荷冷温状態における無限増倍率が1.3となるモデルバンドルとした。
燃料配置	中性子実効増倍率が最大となる HDP-69BCH(B)型中心偏向配置とした。	
寸法条件	バスケットプレート板厚：バスケットプレート材に含まれる中性子吸収材（天然ほう素）の量が少なくなり、かつ隣接する使用済燃料までの距離が短くなる板厚最小とした。	
	伝熱プレート板厚：隣接する使用済燃料までの距離が短くなる板厚最小とした。	
	バスケット格子内のり：隣接する使用済燃料までの距離が短くなるバスケット格子内のり最小とした。	
HDP-69BCH(B)型内雰囲気	雰囲気ガスの中性子吸収効果を無視する真空とした。	中性子減速効果が最大となる水密度最大の1.0 g/cm ³ とした。
HDP-69BCH(B)型外雰囲気	HDP-69BCH(B)型の周囲における中性子の散乱や減速の効果は中性子実効増倍率を低減するように働くことから、解析モデルを完全反射境界とし、HDP-69BCH(B)型の外部に漏れ出た中性子が散乱や吸収されることなく反射してHDP-69BCH(B)型へ戻る真空とした。	
中性子遮蔽材領域の条件	上記の周囲の雰囲気条件と同様に、使用済燃料収納領域から漏れ出た中性子が散乱や吸収されることなく反射して使用済燃料収納領域へ戻る真空とした。	
HDP-69BCH(B)型配列	緩衝体等を無視し、解析モデルをHDP-69BCH(B)型に外接する四角柱表面で完全反射とした。（HDP-69BCH(B)型が無限に並ぶ配列と等価）	
ほう素添加量	中性子吸収材に含まれる天然ほう素量は、仕様上の下限値 <input type="text"/> とした（ほう素量の減損は2.5参照）。	

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.1-3 (2/2) 臨界解析条件及び設定根拠

項目	乾燥時臨界解析	冠水時臨界解析
使用済燃料の構造材	ステンレス鋼製の上・下部タイププレート部及びプレナム部は、中性子吸収効果が小さい真空に置換した。	ステンレス鋼製の上・下部タイププレート部及びプレナム部は、中性子減速効果がある水に置換した。
チャンネルボックス	隣接する使用済燃料までの距離が短くなるチャンネルボックスなしとした。	水からチャンネルボックスに置換することで、減速効果及び中性子吸収効果がともに小さくなる。しかし、吸収効果の減少の影響が減速効果の減少の影響より大きいため、チャンネルボックスありとした。
中性子遮蔽材	中性子吸収効果のある側部、蓋部、及び底部中性子遮蔽材は真空とした。	
蓋部	貯蔵中は、一次蓋及び二次蓋により密封されるため蓋部をモデル化した。	

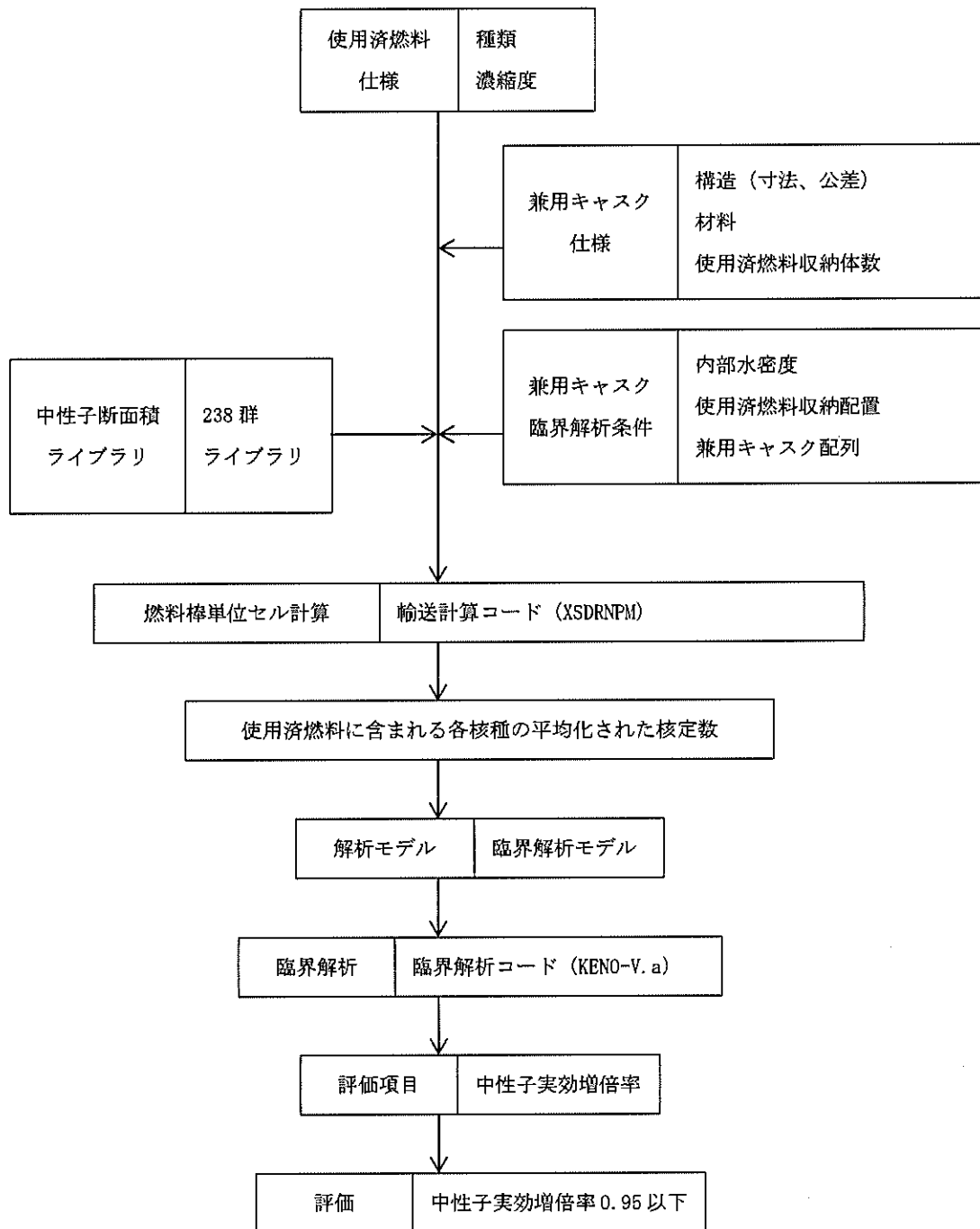
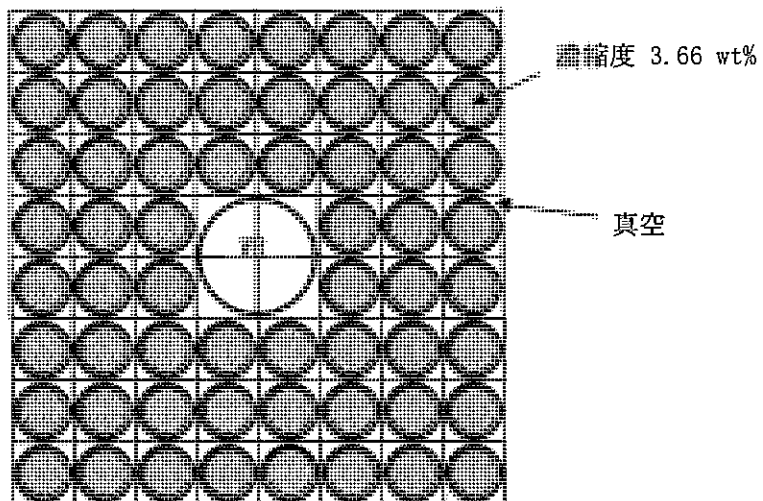


図 2.4.1-2 臨界解析フロー図



W : ウォータロッド

図 2.4.1-3 乾燥時臨界解析における燃料棒配置 (高燃焼度 8×8 燃料)

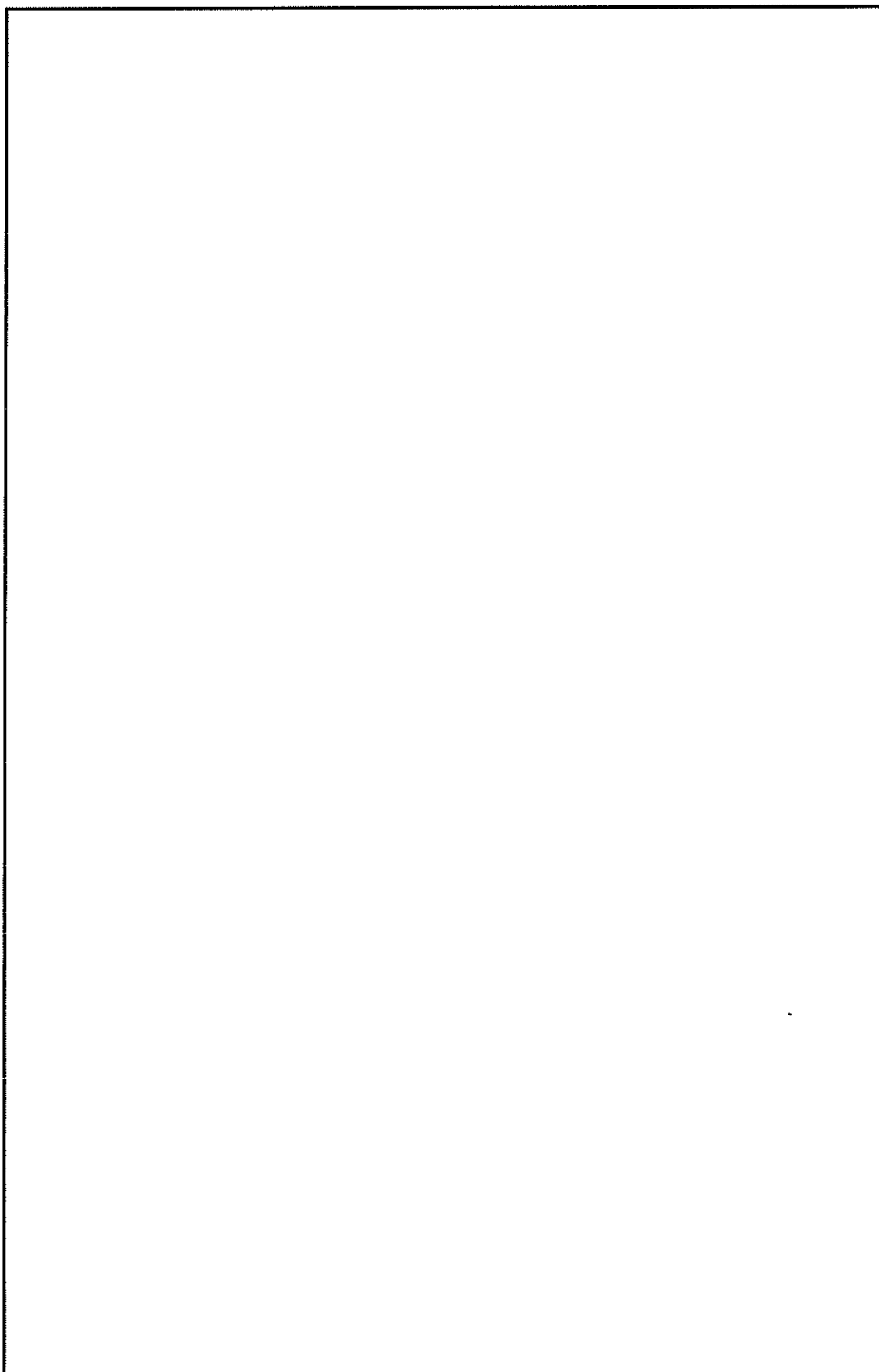


図 2.4.1-4 乾燥時臨界解析モデル

16 条-別添 1 (臨界防止)-18

内は商業機密のため、非公開とします。

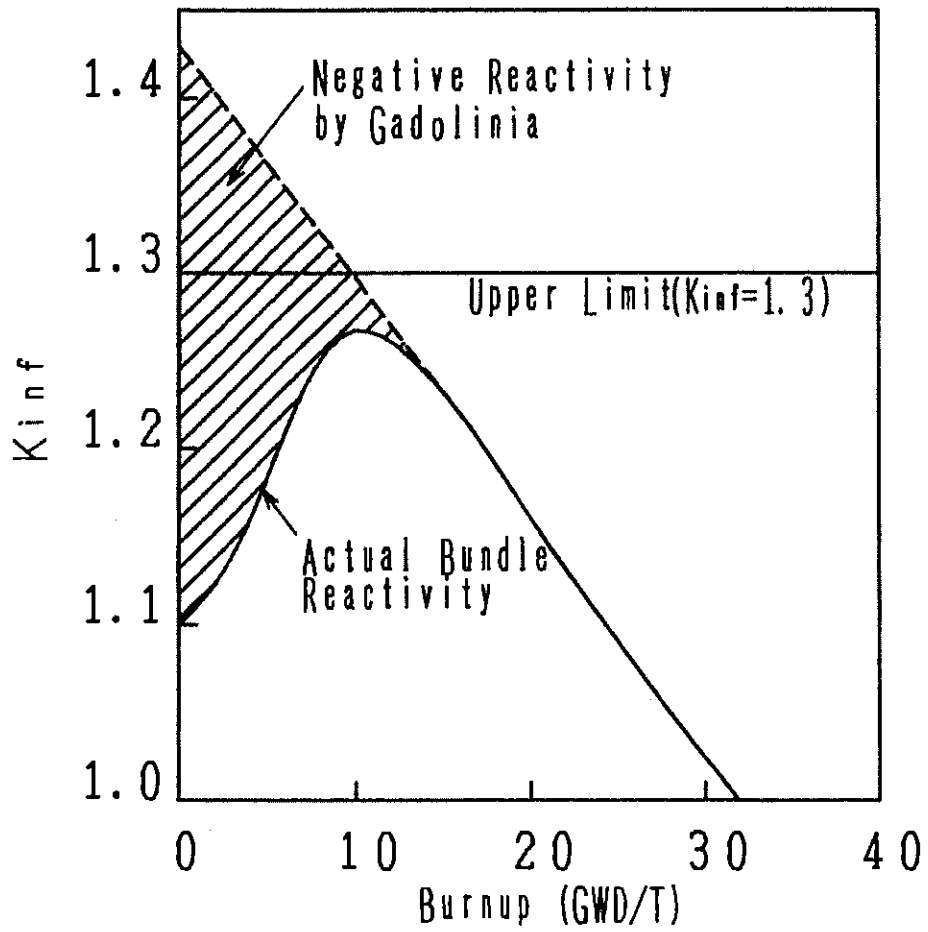
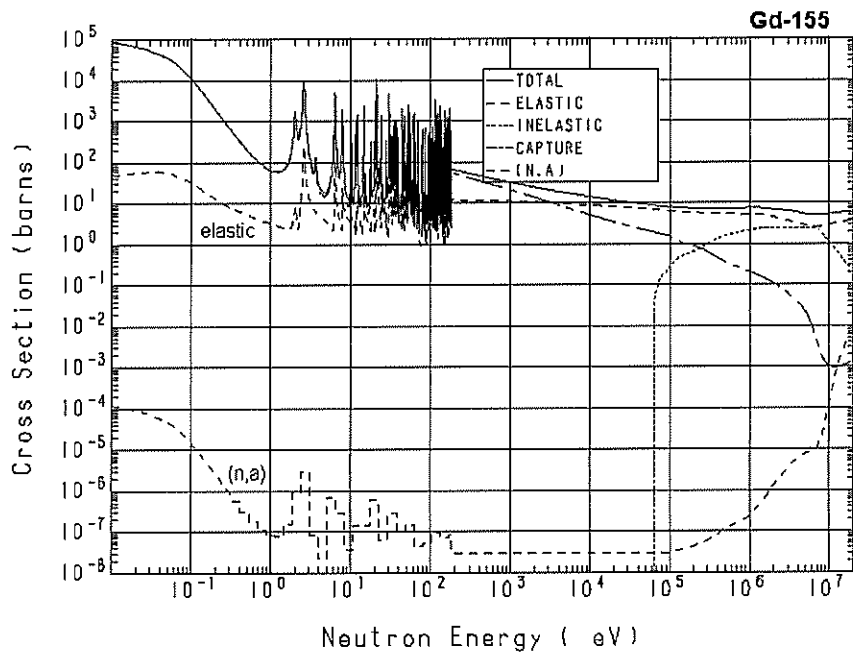
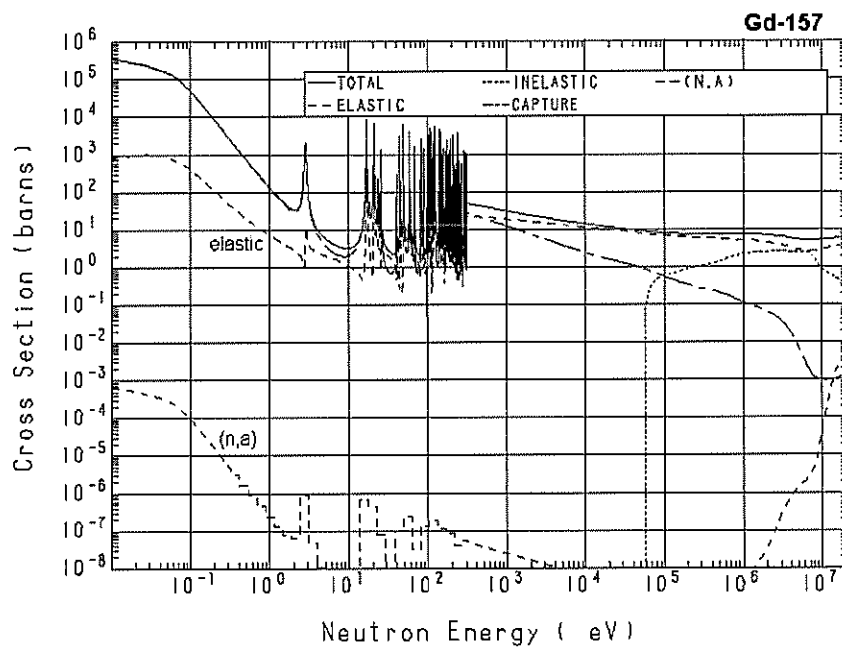


図 2.4.1-5 BWR 燃料の反応度特性⁽³⁾

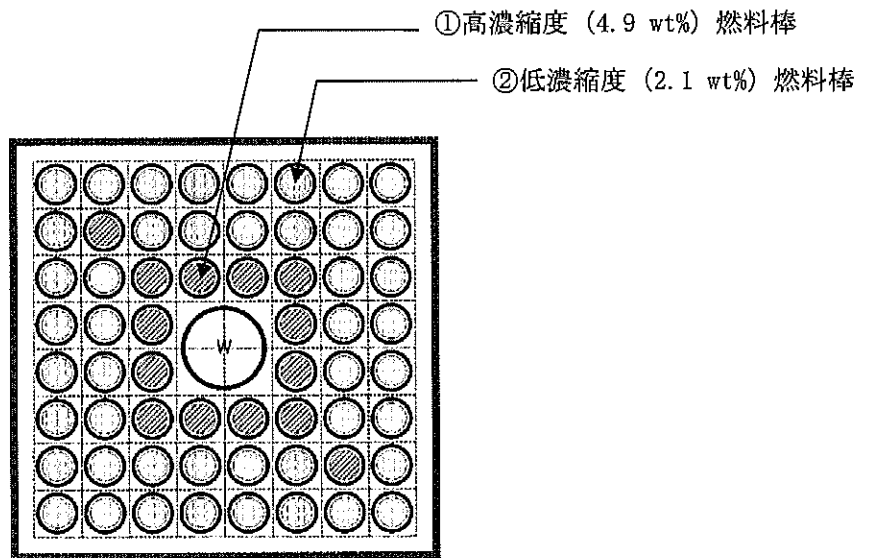


Gd-155 の反応断面積



Gd-157 の反応断面積

図 2.4.1-6 ガドリニウムの反応断面積の例 (JENDL-3.3) ⁽⁴⁾



- ①高濃縮度燃料棒：14 本
- ②低濃縮度燃料棒：46 本
- W：ウォータロッド

図 2.4.1-7 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)

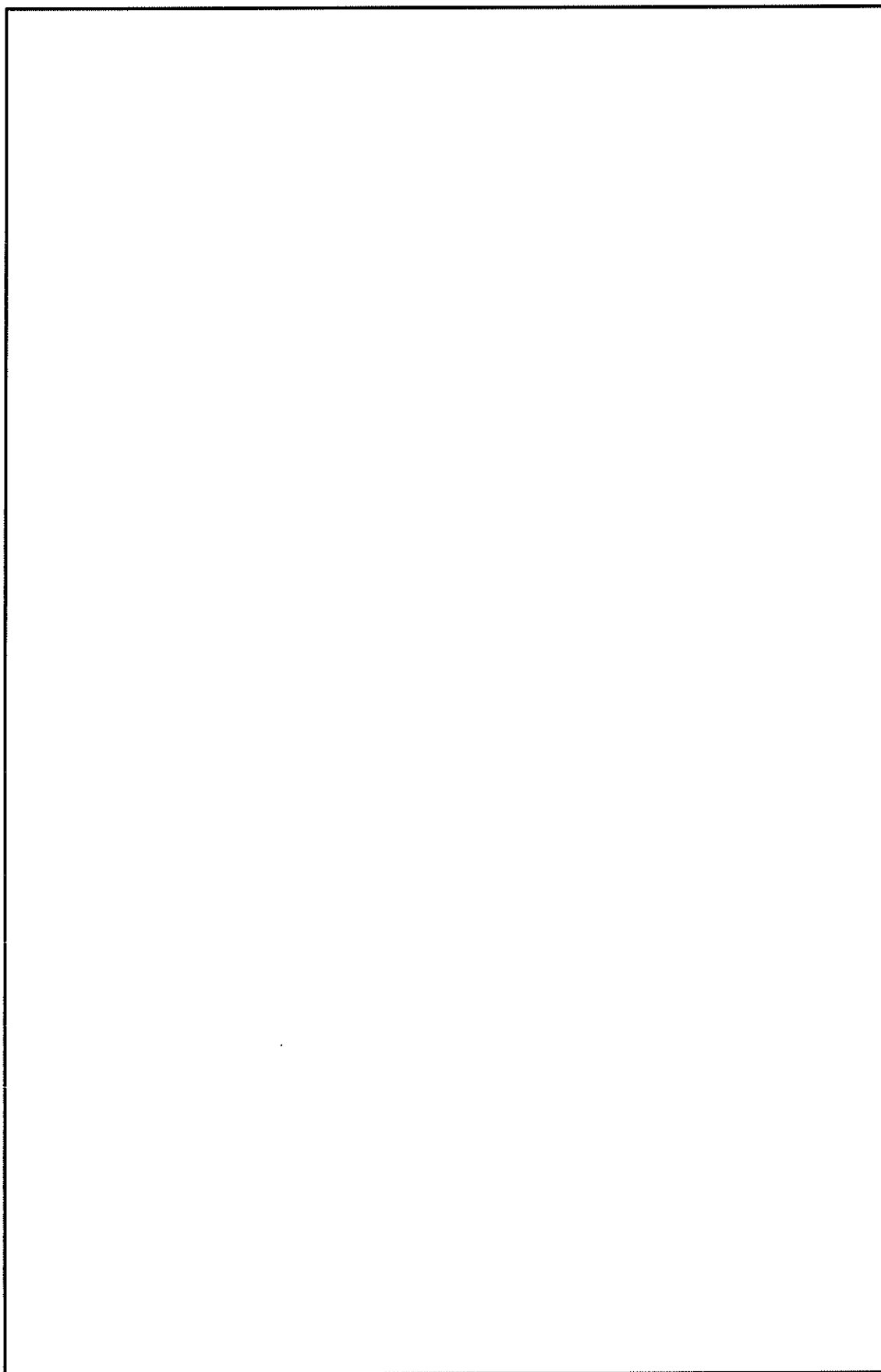
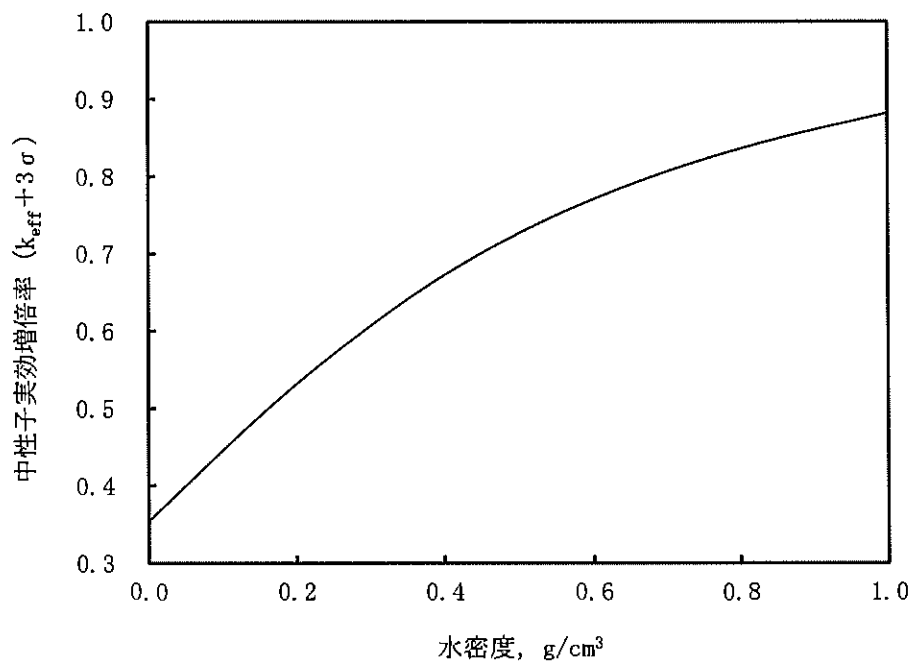


図 2.4.1-8 冠水時臨界解析モデル

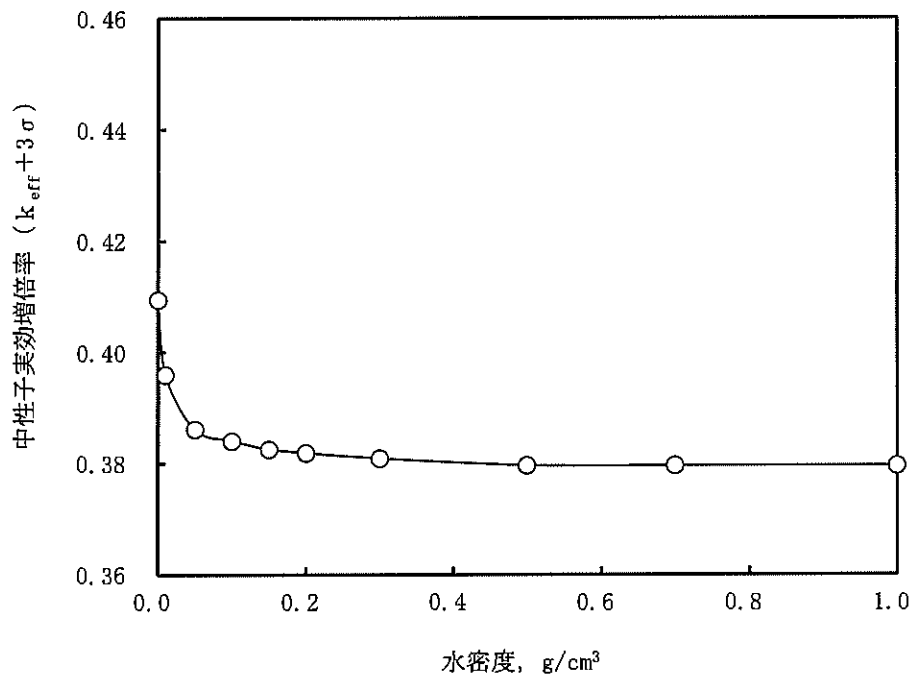
16 条-別添 1 (臨界防止)-22

内は商業機密のため、非公開とします。



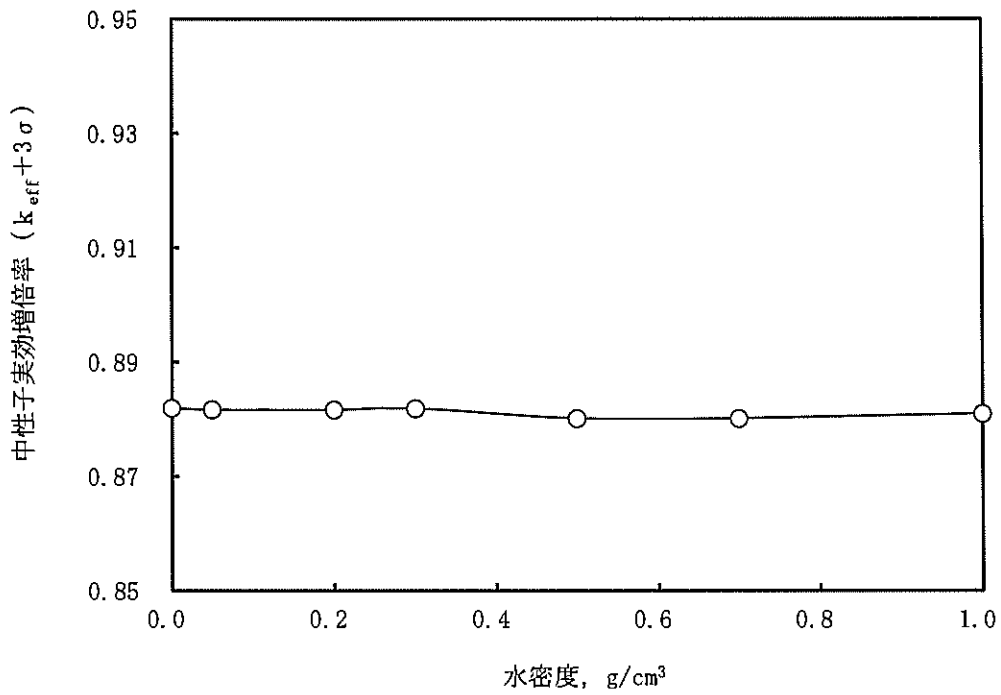
注記*1: 本評価は、兼用キャスク内部の水の影響を確認するために兼用キャスク内部の水の密度を一様に変化させた仮想的な評価であり、燃料モデルは、図 2.4.1-6 を使用。

図 2.4.1-9(1/3) 兼用キャスク内部の水密度と中性子実効増倍率の関係²¹



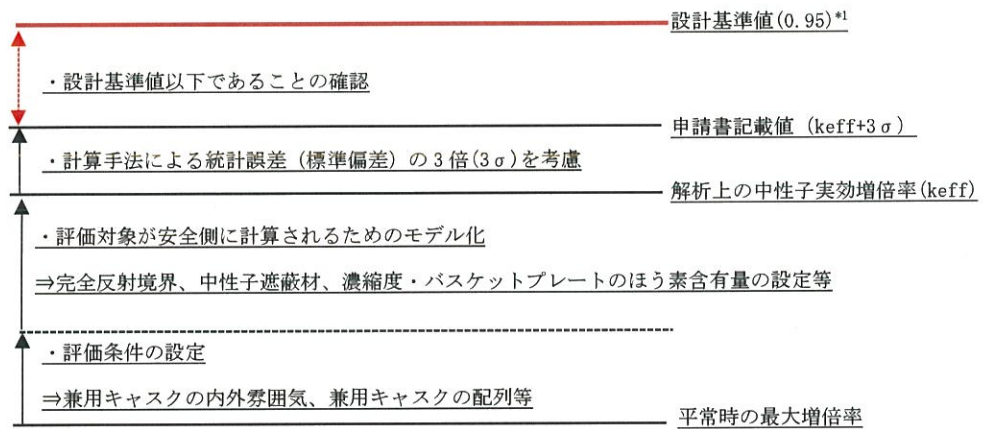
注記*1：燃料モデルは、図 2.4.1-3 を使用。また、兼用キャスク内部は水密度 0.0 g/cm³

図 2.4.1-9(2/3) 兼用キャスク外部の水密度と中性子実効増倍率の関係
(乾燥時臨界解析) *1



注記*1: 燃料モデルは、図 2.4.1-6 を使用。また、兼用キャスク内部は水密度 1.0 g/cm³

図 2.4.1-9(3/3) 兼用キャスク外部の水密度と中性子実効増倍率の関係
(冠水時臨界解析) *1



注記*1：臨界実験体系を模擬したベンチマーク解析結果を行い、解析コードの精度及びその解析コードが十分検証されたものであることを確認した上で設定

図 2.4.1-10 中性子実効増倍率 $keff$ の設計基準値と申請書記載値の関係

技術的に想定されるいかなる場合においても、表 2.4.1-4 に示すとおり、評価基準を満たしている。

評価結果は、HDP-69BCH(B)型を無限に配列した体系（完全反射）で解析した結果であり、貯蔵施設内での兼用キャスクの配置制限は不要である。

表 2.4.1-4 評価結果

項目		評価結果	評価基準	備考
中性子 実効増倍率	乾燥状態	0.410 ^{*1} (σ : <0.001 ^{*3})	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 価結果では解 析コードの精 度等を考慮し て、統計誤差 (σ)の3倍(3 σ)を加味した 値である。
	冠水状態	0.882 ^{*2} (σ : <0.001 ^{*3})		

注記*1 : 図 2.4.1-8(2/3)の水密度 0.0 g/cm³の値

注記*2 : 図 2.4.1-8(1/3)の水密度 1.0 g/cm³の値

注記*3 : 解析コード SCALE コードシステムから算出される統計誤差の値 (計算手法による
誤差)

〔設置許可基準規則〕

- ・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。

〔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。

HDP-69BCH(B)型は、兼用キャスクを基礎等に固定する方法では、通常貯蔵時において、バスケットの塑性変形が想定されない設計とする。一方、緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法では、バスケットの塑性変形が生じて未臨界が維持される設計とする。

なお、以下の内容は、本型式証明の申請範囲外とする。

〔設置許可基準規則〕

- ・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緩衝を考慮し、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。
- ・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. 使用する解析コード

(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 (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) コードシステム^⑤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、輸送及び貯蔵キャスクの臨界解析等に広く用いられている。

(2) 機能

KENO-V. a コードは、臨界解析に関して以下の機能を有している。

- a. 実際に中性子が出会う物理現象は、確率理論を用いて模擬するため、どのような体系にも適用できる。なお、統計的な手法を用いるため、計算結果には統計誤差が付随する。
- b. 3次元の複雑な幾何形状の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

SCALE コードシステムの解析フローを図 2.4.1-11 に示す。

均質化燃料領域以外の領域の群定数計算には共鳴計算処理コード NITAWL-II^⑥を、均質化燃料領域の群定数計算には共鳴処理コード BONAMI^⑥、NITAWL-II 及び一次元輸送計算コード XSDRNP^⑥を用い、核データライブラリは SCALE コードシステムの内蔵ライブラリデータの一つである 238GROUPNDF5 ライブラリデータを用いた。

燃料領域の均質化の方法としては、単位燃料棒の形状を一次元円柱モデルで近似し、XSDRNP コードを用いて 238 群の中性子束分布を求め、それを重みとして燃料の均質化領域の 238 群定数を算出した。この 238 群定数及び KENO-V. a コードを用いて臨界解析を行った。

(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、軽水炉燃料の輸送及び貯蔵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。

米国 PNL で行われた臨界実験^⑥を対象としたベンチマーク解析を実施した。ベンチマーク解析対象とした PNL-3602 臨界実験の体系は、鉄の反射体に挟まれた 3 つのクラスタ (低濃縮ウラン燃料棒を正方格子に配列した体系) の間に中性子吸収材を設置したものであり、中性子吸収材の種類、板厚、水ギャップ幅及び燃料濃縮度等、兼用キャスク等の臨界解析で重要と考えられる要因に関し、数種類の異なる体系で実施されている。臨界実験に用いられる燃料仕様は、ウラン濃縮度は、2.35 wt%及び 4.31 wt%、燃料ペレットは、1.1176 cm 及び 1.2649 cm であり、臨界解析に用いる燃料仕様と同程度である。

実験体系の概要を図 2.4.1-12 に示す。この臨界実験体系は周囲を炭素鋼製の厚い胴に囲まれ、各燃料の間にバスケットのほう素添加ステンレス鋼による中性子吸収材を有する HDP-69BCH(B) 型の臨界解析体系と類似している。

HDP-69BCH(B) 型に収納する使用済燃料の初期濃縮度は、約 3.1~3.7 wt% である。また、HDP-69BCH(B) 型の中性子吸収材は、ほう素添加ステンレス鋼を使用している。これらは、冠水時のベンチマーク体系の初期濃縮度及び中性子吸収材の材質が類似しており、本実験体系を HDP-69BCH(B) 型のベンチマーク体系として適用することは妥当と考えられる。

燃料棒の形状を図 2.4.1-13 に、中性子反射体の形状を図 2.4.1-14 に、中性子吸収材の仕様を図 2.4.1-15 に、実験データを図 2.4.1-16 に、燃料格子モデルを図 2.4.1-17 にそれぞれ示す。中性子吸収板としては、ボロン入りステンレス鋼以外にステンレス鋼、カドミウム等の異なる材質を配置した場合も評価している。

表 2.4.1-4 に示すように、兼用キャスクの乾燥時の臨界解析結果は、0.410 と十分深い未臨界度を有するため、乾燥時の状態では臨界になることはない。参考として、二酸化ウラン燃料による高速中性子の割合が高い乾式のベンチマーク解析として、炭素鋼製の燃料容器に高濃縮度のウラン燃料 (93.15 wt%) を収納し、それらを複数配列した場合⁽⁷⁾⁽⁸⁾も評価している。反射体にはポリエチレンを用いている。

ベンチマーク解析は 238GROUPNDF5 ライブラリを用い SCALE コードシステムで行った。PNL-3602 のベンチマーク臨界計算の結果を表 2.4.1-5 に、乾式のベンチマーク臨界計算の結果を表 2.4.1-7 に示す。ベンチマーク解析の結果、臨界解析に用いた計算コード及び核データは中性子実効増倍率が 1.0 に近い結果が得られており、妥当な結果を与える。

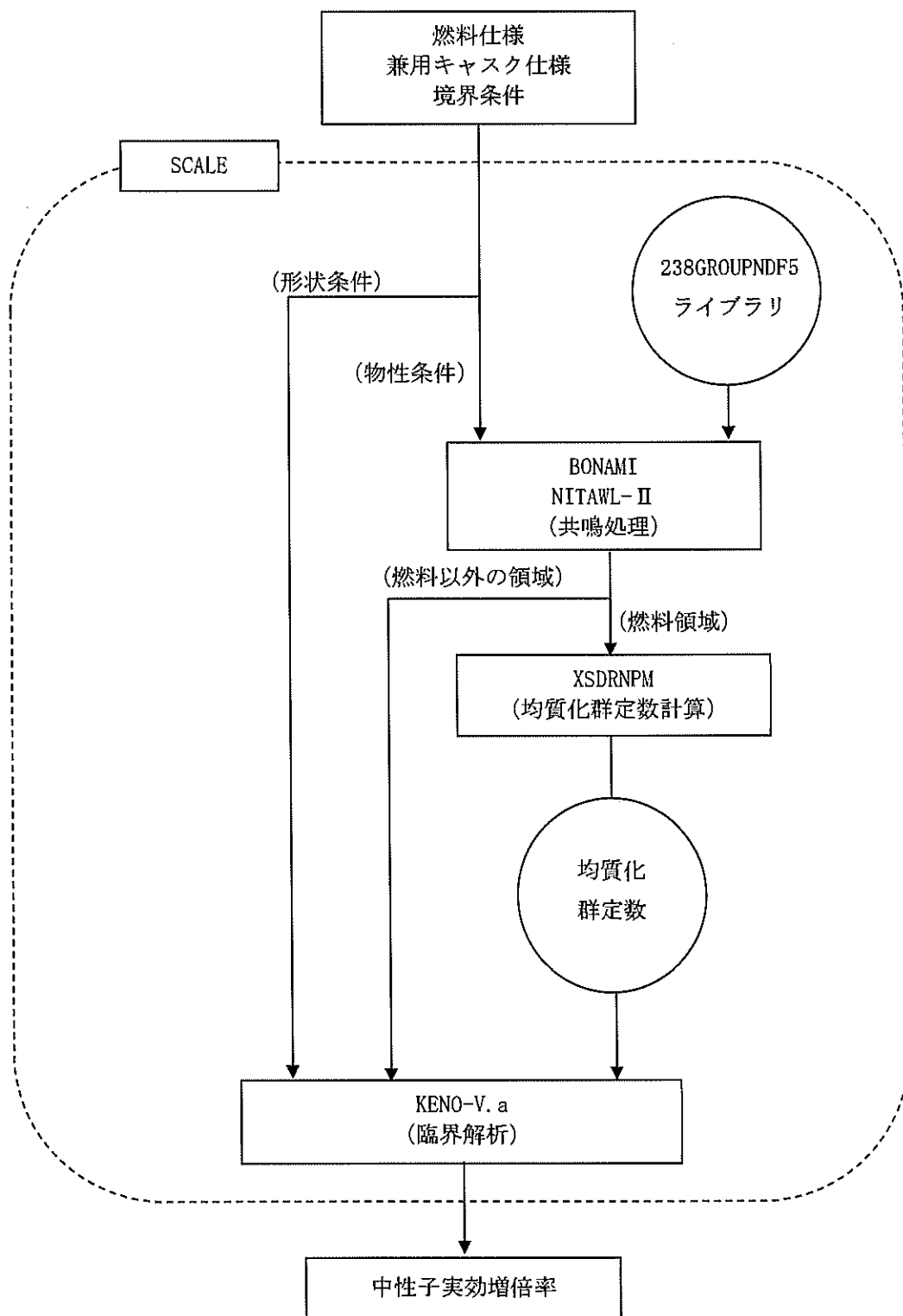


図2.4.1-11 臨界解析フロー

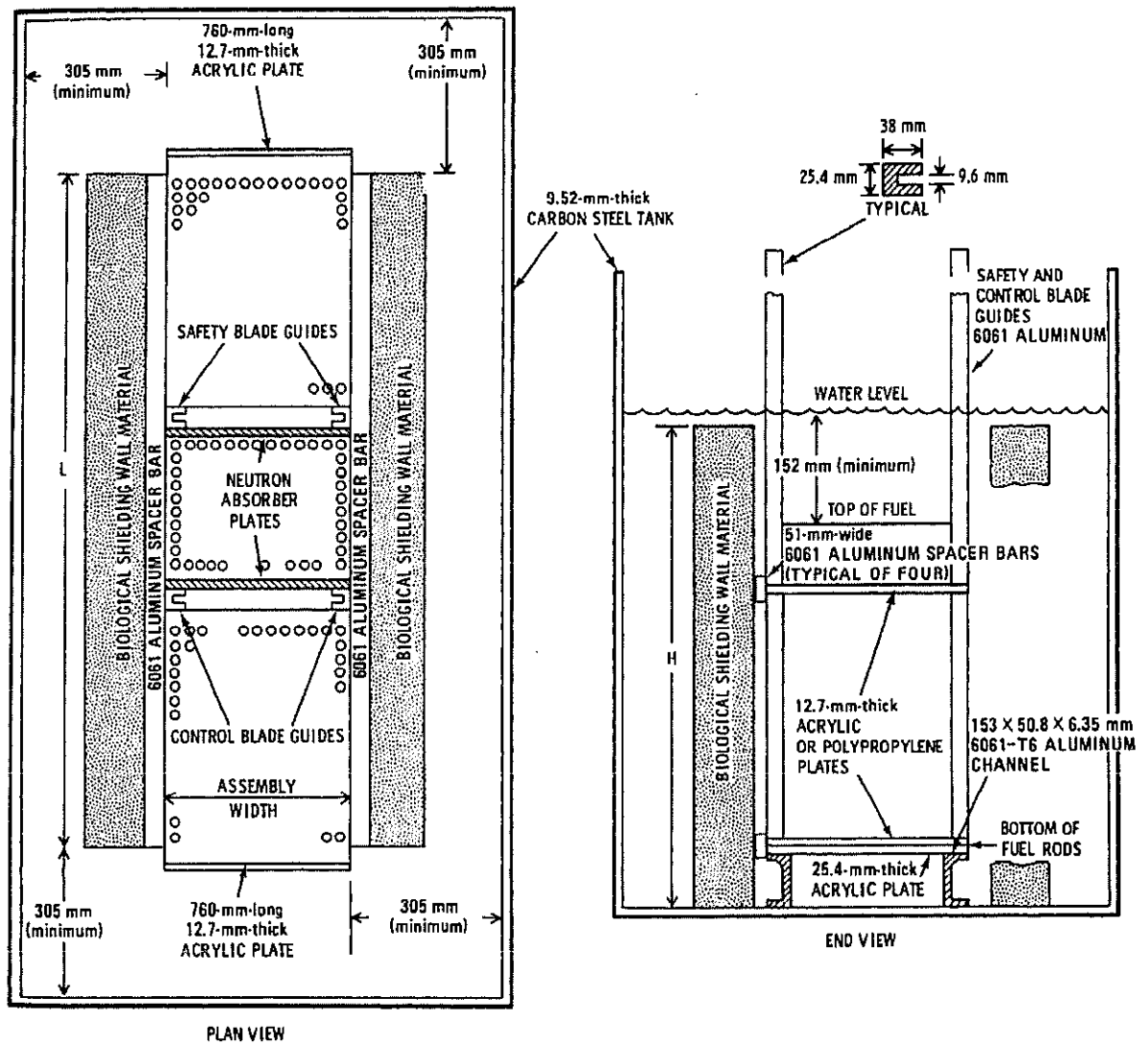
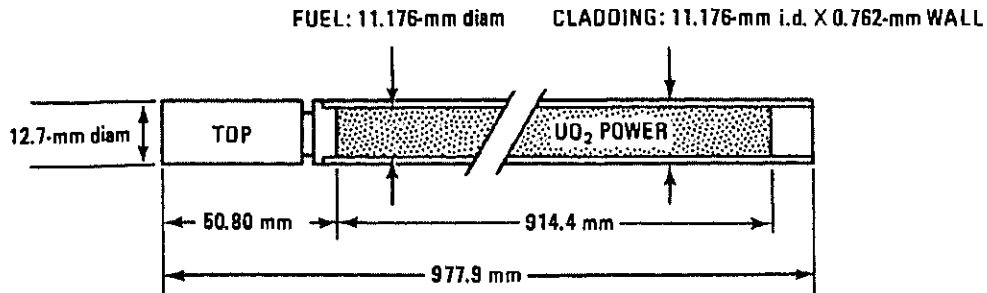


図2.4.1-12 PNL-3602の臨界実験体系^⑥

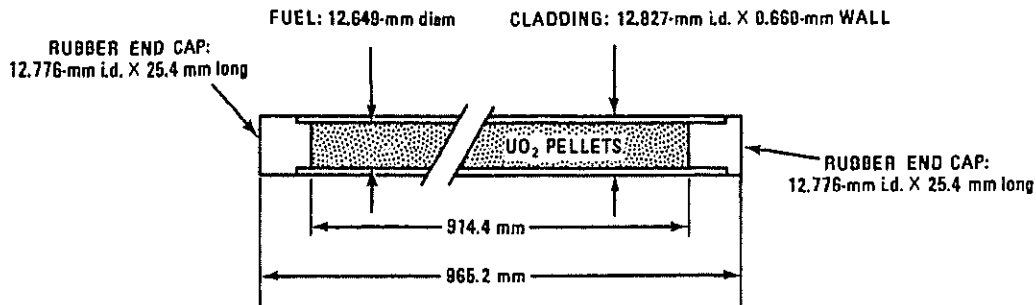


CLADDING: 6061 ALUMINUM TUBING SEAL WELDED WITH A LOWER END PLUG OF 5052-H32 ALUMINUM AND A TOP PLUG OF 1100 ALUMINUM

LOADING:

ENRICHMENT = 2.35 ± 0.05 wt% ^{235}U
 FUEL DENSITY = 9.20 mg/mm^3 (84% THEORETICAL DENSITY)
 URANIUM ASSAY = 88.0 wt%
 UO_2 = 825 g/ROD (AVERAGE)

(a) ウラン濃縮度 2.35 wt%の燃料棒



CLADDING: 6061 ALUMINUM TUBING

LOADING:

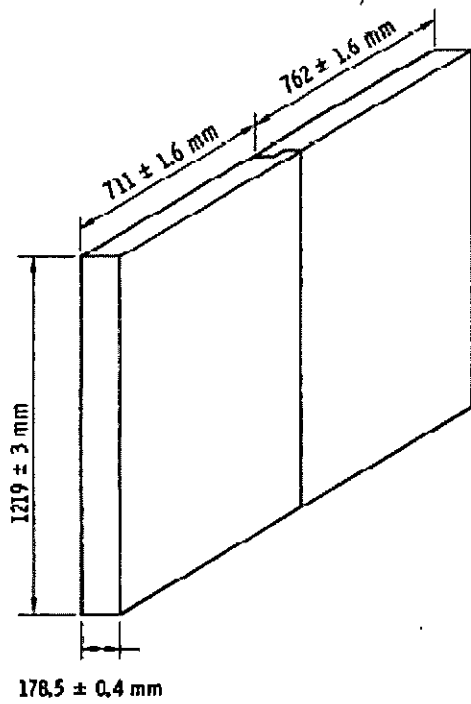
ENRICHMENT = 4.31 ± 0.01 wt% ^{235}U
 FUEL DENSITY = $94.9 \pm 0.55\%$ OF THEORETICAL DENSITY
 URANIUM ASSAY = 88.055 ± 0.261 wt% OF TOTAL FUEL COMPOSITION
 UO_2 = 1203.38 ± 4.12 g/ROD

END CAP:

DENSITY = 1.321 g/cm^3
 COMPOSITION = CARBON: 58 ± 1 wt% SULFUR: 1.7 ± 0.2 wt%
 HYDROGEN: 6.5 ± 0.3 wt% OXYGEN: 22.1 wt% (BALANCE)
 CALCIUM: 11.4 ± 1.8 wt% SILICON: 0.3 ± 0.1 wt%

(b) ウラン濃縮度 4.31 wt%の燃料棒

図 2.4.1-13 燃料棒の形状⁽⁶⁾



TYPE:	SA533 GrB C/1
DENSITY:	7.84 g/cm^3
IRON (wt%):	96.77 ± 0.13
CARBON (wt%):	$0.19 \pm \text{---}$
MANGANESE (wt%):	1.28 ± 0.03
PHOSPHORUS:	$0.004 \pm \text{---}$
SULFUR:	$0.006 \pm \text{---}$
SILICON:	$0.22 \pm \text{---}$
NICKEL:	0.79 ± 0.14
MOLYBDENUM:	0.49 ± 0.05
CHROMIUM:	0.12 ± 0.01
COPPER:	0.13 ± 0.01

図 2.4.1-14 中性子反射体の形状⁽⁶⁾

Element (wt%) ^a	Boral ^b			Copper-Cadmium	Copper	6061 Aluminum	Zircaloy-4	Type 304L Stainless Steel			Cadmium	Boroflex
	Boral A	Boral B	Boral C					No Boron	1.1 wt% Boron	1.6 wt% Boron		
Aluminum	62.39 ± 2.8	61.21 ^c	59.26 ^c	---	---	97.15 ± 0.21	---	---	---	---	---	---
Boron	28.70 ± 0.25	30.36 ^c	31.88 ^c	0.005	---	---	---	---	---	---	---	32.74 ± 0.05
Carbon	7.97 ± 0.41	8.43 ^c	8.86 ^c	0.002	0.340	---	---	---	---	---	---	21.13 ± 0.03
Hydrogen	---	---	---	0.989 ± 0.003	---	---	---	---	---	---	---	2.65 ± 0.31
Cadmium	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	99.7 ± 0.3	---
Calcium	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Chromium	0.05	---	---	---	---	0.21	0.13 ± 0.04	---	18.56 ± 0.10	19.03 ± 0.10	19.60 ± 0.10	0.03 ± 0.02
Copper	0.09	---	---	98.685 ± 0.300	99.60 ± 0.14	0.12	---	---	0.27 ± 0.05	0.28 ± 0.05	0.26 ± 0.05	---
Iron	0.33 ± 0.04	0.02	0.05	0.020	0.004	0.82	0.21 ± 0.03	---	68.24 ± 0.34	68.04 ± 0.34	66.40 ± 0.33	0.05 ± 0.06
Magnesium	0.05	0.01	0.01	---	0.002	---	---	---	---	---	---	---
Manganese	0.05	---	---	0.009	---	0.21	---	---	1.58 ± 0.05	1.58 ± 0.05	1.69 ± 0.05	---
Molybdenum	---	---	---	---	---	---	---	---	0.26 ± 0.05	0.49 ± 0.05	0.31 ± 0.05	---
Sodium	0.02	0.02	0.02	---	0.002	---	---	---	---	---	---	---
Nickel	0.02	---	---	0.010	---	---	---	---	11.09 ± 0.06	9.53 ± 0.05	10.12 ± 0.05	21.01 ± 0.01
Oxygen	---	---	---	0.019	0.030	---	---	---	---	---	---	22.39 ± 0.24
Silicon	0.20	---	0.06	0.004	0.020	0.82	---	---	---	---	---	---
Tin	---	---	---	0.250	---	---	1.50 ± 0.27	---	---	---	---	---
Sulfur	0.03	---	---	---	0.002	0.06	---	---	---	---	---	---
Titanium	---	---	---	---	---	0.61	---	---	---	---	---	---
Zinc	0.10	---	---	0.007	---	---	---	---	---	---	0.3	---
Zirconium	---	---	---	---	---	---	98.16 ± 0.35	---	---	---	---	---
Density (g/cm ³)	2.49	2.50	2.47	8.910	8.913	2.692	6.32	7.930	7.900	7.770	8.650	1.731
Thickness ^d (cm)	0.713 ± 0.011	0.292 ± 0.013	0.231 ± 0.013	0.357 ± 0.008	0.646 ± 0.008	0.625 ± 0.001	0.652 ± 0.008	0.485 ± 0.015	0.298 ± 0.006	0.298 ± 0.006	0.061 ± 0.003	0.226 ± 0.004
	---	---	---	0.337 ± 0.008	---	---	---	0.302 ± 0.013	---	---	---	0.432 ± 0.006

*Error limits where shown are one standard deviation based on multiple chemical analyses. Impurities distribution based on spark source mass spectrographic analyses and represent best estimate of maximum concentration for each element present in significant quantity.

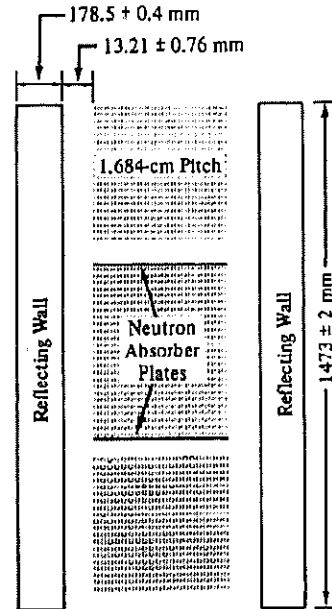
^bComposition of B,C-aluminum core material cladding is aluminum Type 1100.

^cBased on weights of mixture components at time of fabrication.

^dIncludes 0.102, 0.038, and 0.025 cm of Type 1100 aluminum on either side of the Boral A, B, and C core materials, respectively.

図 2.4.1-15 中性子吸収板の仕様⁽⁶⁾

Neutron Absorber ^a		16.84-mm Square Pitch Fuel Clusters ^b	Critical Separation Between Fuel Clusters ^c (mm)
Material	Thickness (mm)		
None	---	1-25 X 18 2-20 X 18	95.1 ± 0.2
Type 304L stainless steel	3.02 ± 0.13	1-25 X 18 2-20 X 18	82.8 ± 0.3
Type 304L stainless steel with 1.1 wt% boron	2.98 ± 0.06	1-25 X 18 2-20 X 18	48.0 ± 0.2
Boral B	2.92 ± 0.13	1-25 X 18 2-20 X 18	26.9 ± 0.3
Boroflex	5.46 ± 0.18 ^d	1-25 X 18 2-20 X 18	29.8 ± 0.8
Cadmium	0.61 ± 0.03	1-25 X 18 2-20 X 18	38.6 ± 0.2
Copper	3.37 ± 0.08	1-25 X 18 2-20 X 18	77.9 ± 0.2
Copper-cadmium	3.57 ± 0.08	1-25 X 18 2-20 X 18	54.3 ± 1.0



^aError limits are one standard deviation.

^bAbsorber plates, 302 mm wide X 915 mm long, each centered on middle fuel cluster at outer cell boundary.

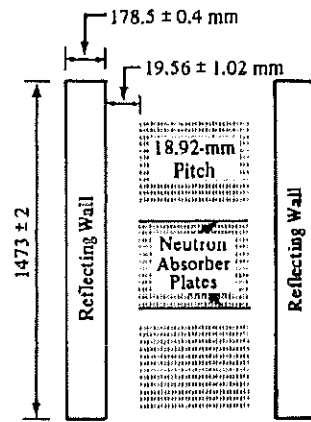
^cNumber and size of fuel rods, rods long X rods wide, aligned in a row.

^dPerpendicular distance between the fuel clusters, rod surface to rod surface.

^eIncludes 1.60-mm-thick Plexiglas on either side of 2.26- ± 0.04-mm-thick Boroflex.

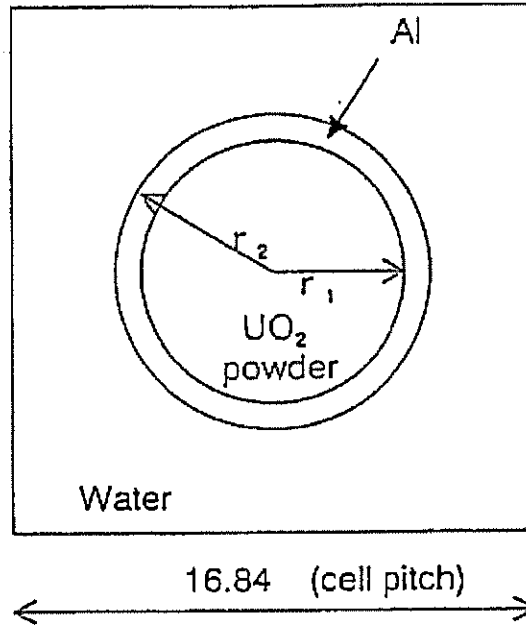
(a) ウラン濃縮度 2.35 wt%の燃料棒

Neutron Absorber ^a		18.92-mm Square Pitch Fuel Clusters ^b	Critical Separation Between Fuel Clusters ^c (mm)
Material	Thickness (mm)		
None	---	3-12 X 16	158.4 ± 0.2
Type 304L stainless steel	3.02 ± 0.13	3-12 X 16	137.5 ± 0.6
Type 304L stainless steel with 1.1 wt% boron	2.98 ± 0.06	3-12 X 16	98.3 ± 0.4
Boral B	2.92 ± 0.13	3-12 X 16	83.0 ± 0.3
Boroflex	5.46 ± 0.18 ^d	3-12 X 16	83.7 ± 0.2
Cadmium	0.61 ± 0.03	3-12 X 16	89.4 ± 0.6
Copper	3.37 ± 0.08	3-12 X 16	134.7 ± 0.4
Copper-cadmium	3.57 ± 0.08	3-12 X 16	105.7 ± 0.2



(b) ウラン濃縮度 4.31 wt%の燃料棒

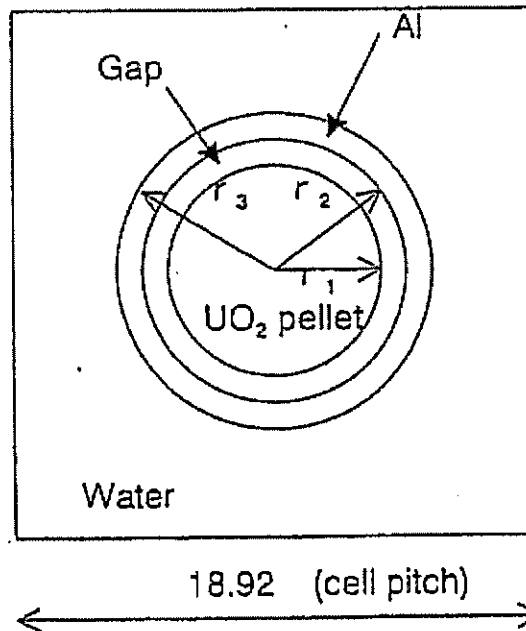
図 2.4.1-16 実験データ⁽⁶⁾



$r_1=5.588$
 $r_2=6.35$

単位 [mm]

(a) 濃縮度 2.35 wt%の燃料棒



$r_1=6.3245$
 $r_2=6.4135$
 $r_3=7.0735$

単位 [mm]

(a) 濃縮度 4.31 wt%の燃料棒

図 2.4.1-17 燃料格子モデル⁽⁶⁾

表 2.4.1-5(1/2) ベンチマーク臨界解析結果(まとめ)

項目	解析結果等
解析ケース数	16
平均値	0.99794
標準偏差*1	0.00191
最小値	0.99470
最大値	1.00105

注記*1: 表 2.4.1-5(2/2) の 16 ケースの keff から算出

表 2.4.1-5(2/2) ベンチマーク臨界解析結果(16 ケースの詳細)

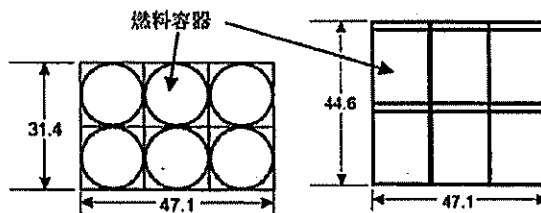
濃縮度 (wt%)	中性子吸収材	keff	σ
2.35	なし	0.99812	0.00092
	ステンレス鋼	0.99470	0.00079
	ボロン入りステンレス鋼	0.99730	0.00092
	BORAL 材	0.99486	0.00077
	BOROFLEX	0.99728	0.00077
	Cd	0.99851	0.00082
	Cu	0.99594	0.00083
	Cu-Cd	0.99599	0.00088
4.31	なし	1.00105	0.00099
	ステンレス鋼	1.00017	0.00081
	ボロン入りステンレス鋼	1.00047	0.00090
	BORAL 材	0.99713	0.00090
	BOROFLEX	0.99881	0.00096
	Cd	0.99884	0.00104
	Cu	0.99924	0.00089
	Cu-Cd	0.99866	0.00093

表 2.4.1-6 乾式ベンチマーク試験装置条件⁽⁷⁾⁽⁸⁾

燃料容器	炭素鋼	$\phi 7.65\text{cm} \times \text{高さ } 21.76\text{cm} \times \text{厚さ } 0.03\text{cm}$
燃料体	UO ₂ 燃料	U-235 濃縮度 : 93.15wt% 装荷量 : 20000g / 燃料容器 燃料密度 : 4.999g/cm ³
反射体	ポリエチレン	厚さ 15.24cm

配置条件 (右図参照)

- No. 5 燃料容器 : 4×4×1 体系、
- No. 6 燃料容器 : 3×2×2 体系、
- No. 7 燃料容器 : 3×3×2 体系、
- 反射体 : 燃料容器の周囲に配置



ベンチマーク試験配置条件 (No. 6 の場合)

図 2.4.1-18 乾式ベンチマーク試験配置条件⁽⁷⁾⁽⁸⁾

表 2.4.1-7 乾式ベンチマーク試験 評価結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾

配置条件	試験体系 keff	解析結果 keff
No. 5	0.9985 ± 0.0056	0.99880 ± 0.00080
No. 6	0.9953 ± 0.0056	0.99346 ± 0.00080
No. 7	0.9997 ± 0.0038	0.99666 ± 0.00084

4. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法（よこ置き）の場合

緩衝体等を装着しないよこ置きの場合、図 2.4.1-4 及び図 2.4.1-8 に示す解析モデルと同じ条件であることから、表 2.4.1-4 に示す評価結果を上回ることではなく、よこ置きの評価はたて置きで代表可能である。

5. 緩衝体等により蓋部が金属部に衝突しない方法（よこ置き）の場合

表 2.4.1-3、図 2.4.1-4 及び図 2.4.1-8 に示す、解析モデル、解析条件及びその保守性は、たて置き、よこ置きの貯蔵姿勢によらない。また、貯蔵用緩衝体等を考慮した場合、中性子は燃料体以外の兼用キャスク各部に吸収されやすくなり、反応度が増加することではなく、表 2.4.1-4 に示す評価結果を上回ることはない。したがって、緩衝体等を装着したよこ置きの評価は緩衝体を装着しないたて置きの評価で代表可能である。

なお、参考 1 の輸送時の臨界解析に示すように、バスケットプレートの塑性変形を仮定しても未臨界を維持することができる。

6. 参考文献

- (1) 日本原子力研究所, 「燃焼度クレジット導入ガイド原案(受託研究)」(2001年7月)
- (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年3月)
- (3) 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).
- (4) 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター核データ研究グループ, 「JENDL-3.3,」 2018.3.29
- (5) "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).
- (6) S. R. Bierman and E. D. Clayton, "Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 Wt% and 4.31 Wt% ²³⁵U Enriched UO₂ Rods in Water with Steel Reflecting Walls," NUREG/CR-1784(PNL-3602), U.S. Nuclear Regulatory Commission (1981).
- (7) 東京電力株式会社, 日本原子力発電株式会社, 「第6回核燃料輸送物の安全性評価に係るご意見を聴く会 安全解析等に関するコメント回答」, p. 臨界-4, 平成22年7月22日
- (8) HEU-COMP-MIXED-001, "Arrays of Cans of Highly Enriched Uranium Dioxide Reflected by Polyethylene"

輸送時の臨界解析

1. 概要

HDP-69BCH(B)型は、輸送時の臨界解析⁽¹⁾でバスケットプレートの塑性変形を考慮しても未臨界を維持できることを確認している。以下に詳細を示す。

2. 収納条件

表 2.4.1-1 と同じ高燃焼度 8×8 燃料を 69 体収納する条件としている。なお、HDP-69BCH(B)型は、輸送時に三次蓋を含めて密封性能を有した複数の蓋を有しており、容器内部に水の浸入はないため、初期濃縮度は 3.66 wt% で評価する。

3. 評価方法

2.と同様に臨界解析には、SCALE コードシステムに含まれる KENO-V.a コードを用いた。

4. 評価条件

輸送時の臨界解析モデルを図 1 に示す。図 2.4.1-4 からの変更点として、9m 落下時のバスケット格子内のり の塑性変形()を仮定し でモデル化している。また、保守的な評価となるように以下の条件を仮定する。

- ・ 胴内には の水が均一に分散していると仮定している。
- ・ 図 2 に示すように、燃料集合体の変形状態を想定し、スペーサ 1 スパン間の燃料棒ピッチを縮小/拡大させている。

5. 評価結果

輸送時の臨界解析結果を表 1 に示す。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。

内は商業機密のため、非公開とします。

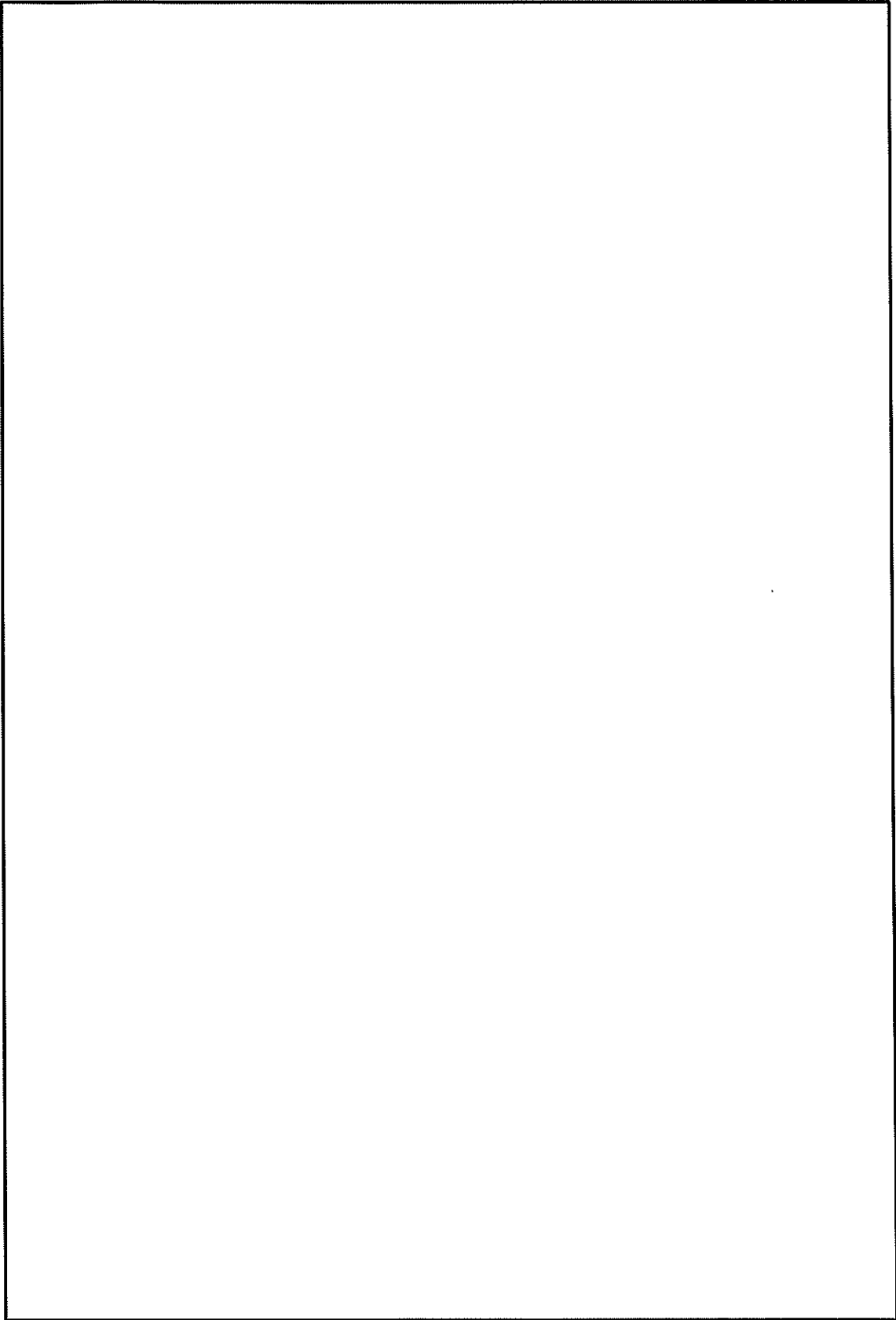


図 1(1/2) 臨界計算モデル (縦断面図)

16 条-別添 1 (臨界防止)-参考 1-2

内は商業機密のため、非公開とします。

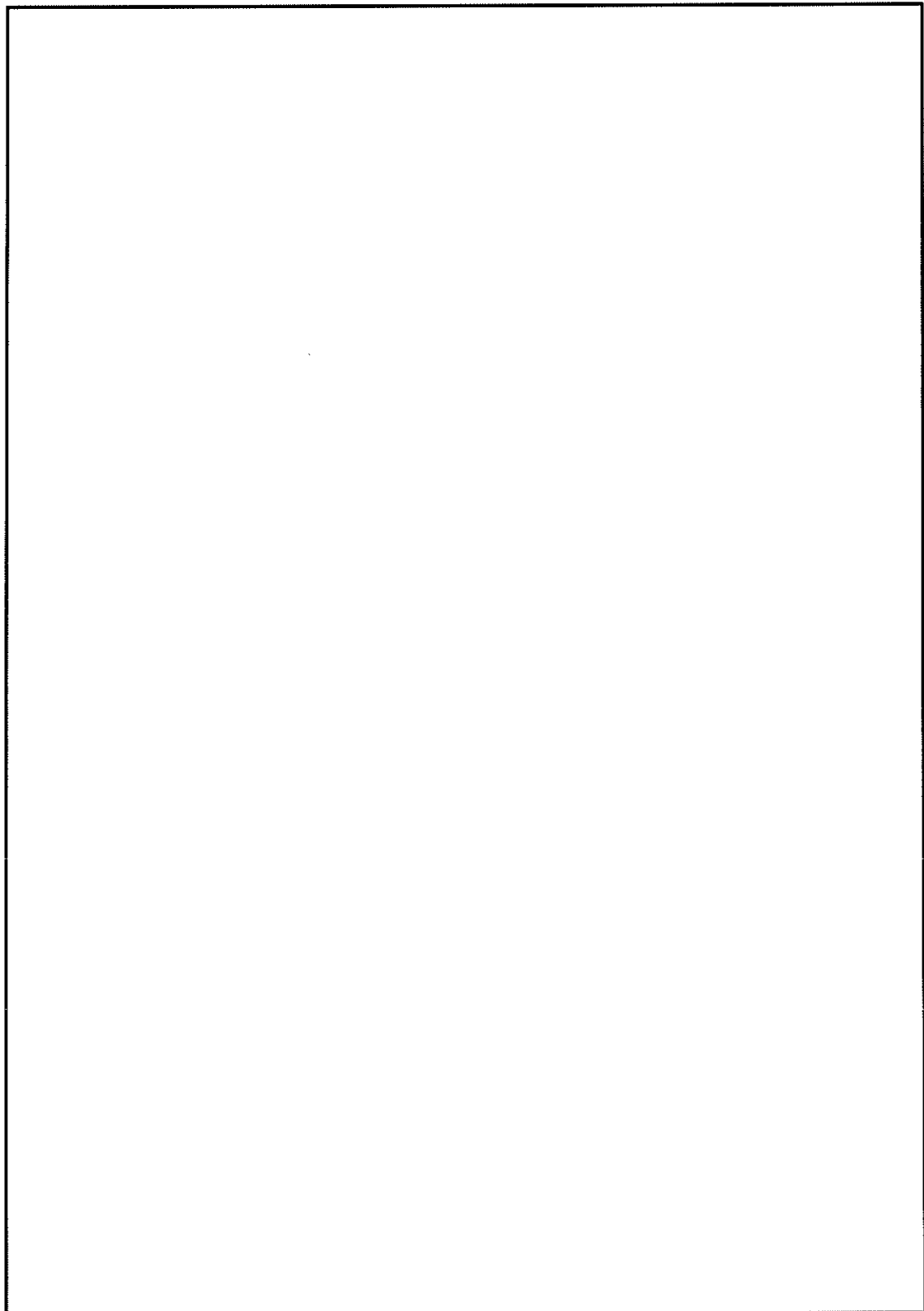
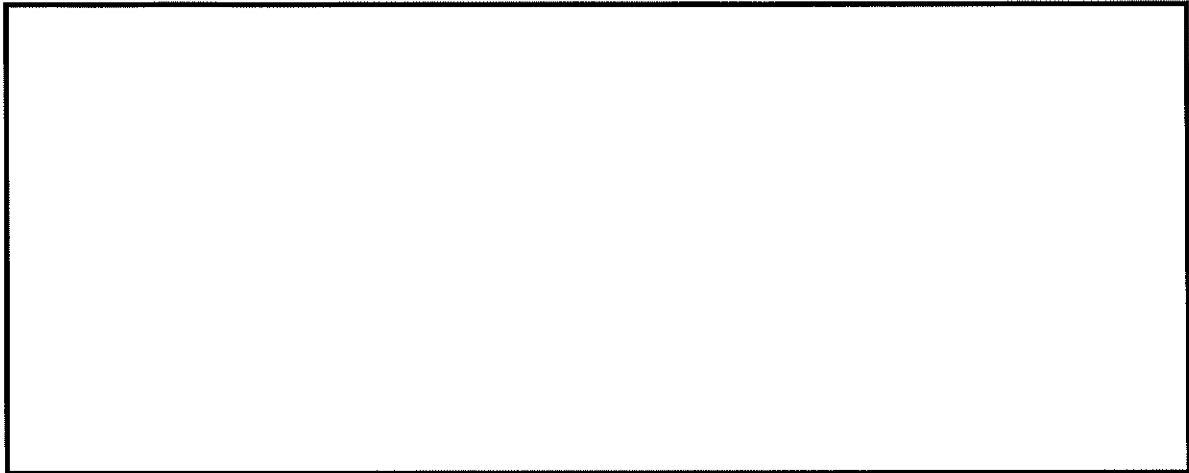


図 1(2/2) 輸送時の臨界解析モデル (燃料領域横断面図)

16 条-別添 1 (臨界防止)-参考 1-3

内は商業機密のため、非公開とします。



燃料棒ピッチ=最小(燃料棒直径) 燃料棒ピッチ=変化なし 燃料棒ピッチ=均一拡大

図2 輸送時の燃料集合体モデル(ピッチ変化部位)

表1 輸送時の臨界解析結果

項 目	解析結果	評価基準
燃料棒ピッチ最小	0.413 (σ : <0.001)	0.95 以下
燃料棒ピッチ変化なし	0.412 (σ : <0.001)	
燃料棒ピッチ均一拡大	0.412 (σ : <0.001)	

内は商業機密のため、非公開とします。

6. 参考文献

- (1) HDP-69BCH 型 設計承認申請書別紙 口章 E

内部雰囲気の設定条件について

1. 概要

HDP-69BCH(B)型の評価では、兼用キャスク内部雰囲気を乾燥状態と冠水状態で評価している。これらの設定条件について、以下に詳細を示す。

2. 取扱手順と臨界防止機能の成立性

HDP-69BCH(B)型の取扱手順と臨界防止機能の成立性を図 1 に、水位を考慮した中性子実効増倍率の評価結果を図 2 に示す。HDP-69BCH(B)型は使用済燃料収納時に兼用キャスク内部が冠水となるため、冠水状態においても未臨界であることを確認する必要がある。また、貯蔵中は水のない乾燥した状態であるため、乾燥状態においても未臨界であることも確認する必要がある。これらの評価は、表 2.4.1-4 に示すように基準値を満足する。一方、図 2.4.1-8(1/3)に示すように、HDP-69BCH(B)型内部の水の密度を一様に変化させる仮想的な評価では、水密度を増加させると、中性子実効増倍率は単調に増加し、水密度 1.0 g/cm³で最も大きくなる。また、兼用キャスク内部を冠水で評価すれば、未臨界であることを確認することができる。

3. 実際の燃焼を考慮した時の影響について

燃焼度の保守性を表 1 に示す。表 1 に示すように、臨界解析では、燃焼度を小さく設定した方が保守的な評価となる。遮蔽解析では、中性子の線源強度を算出する際、体系による中性子増倍の影響を考慮するため、ORIGEN2 コードにより算出した組成を考慮した状態で兼用キャスク内部の雰囲気が乾燥状態の臨界解析を実施し、算出された中性子実効増倍率を用いて、線源強度（中性子源強度）を補正している。ここでは、燃焼を考慮した臨界解析の一例として、乾燥状態と冠水状態の解析結果を示す。貯蔵中の臨界解析条件との比較を表 2 に、評価結果との比較を表 3 にそれぞれ示す。燃焼を考慮することで、中性子実効増倍率は低下することが確認できる。燃焼を考慮した中性子実効増倍率は、燃焼度・初期濃縮度等の諸条件で変化するが、ガドリニアの負の反応度効果を考慮せず、燃焼を考慮しない評価結果を上回ることはない。

内は商業機密のため、非公開とします。

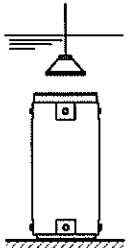
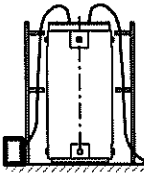
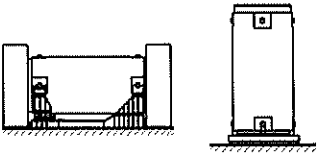
No.	取扱い手順	臨界防止機能の成立性について
1	燃料装荷・一次蓋取付 	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料を収納する際、兼用キャスクを貯蔵プールに沈めて収納するため、冠水時に使用済燃料を69体収納しても臨界に達しないことを確認する必要がある。 ・臨界安全ハンドブック⁽¹⁾では、水の反射体の厚さは、200 mm あれば十分とされている。使用済燃料の燃料有効部から一次蓋の底面までは200 mm 以上あるため、冠水時に蓋部の有無は臨界上影響しないといえる。 ・表 2.4.1-4 から冠水時の臨界解析で基準値を満足する。
2	排水・真空乾燥・不活性ガス充填 	<ul style="list-style-type: none"> ・排水・真空乾燥前の兼用キャスク内部は No. 1、排水・真空乾燥後の兼用キャスク内は No. 3 の状態である。 ・HDP-69BCH(B)型は、排水により、中性子を減速する効果を有する水が徐々に抜けていく。図 2 に示すように、水位が減少しても設計基準値を上回ることはない。
3	貯蔵状態  設置方法② 設置方法⑤ (たて置き)	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵中は兼用キャスク内部には水がない状態である。 ・表 2.4.1-4 から冠水時の臨界解析で基準値を満足する。

図 1 取扱手順と臨界防止機能の成立性

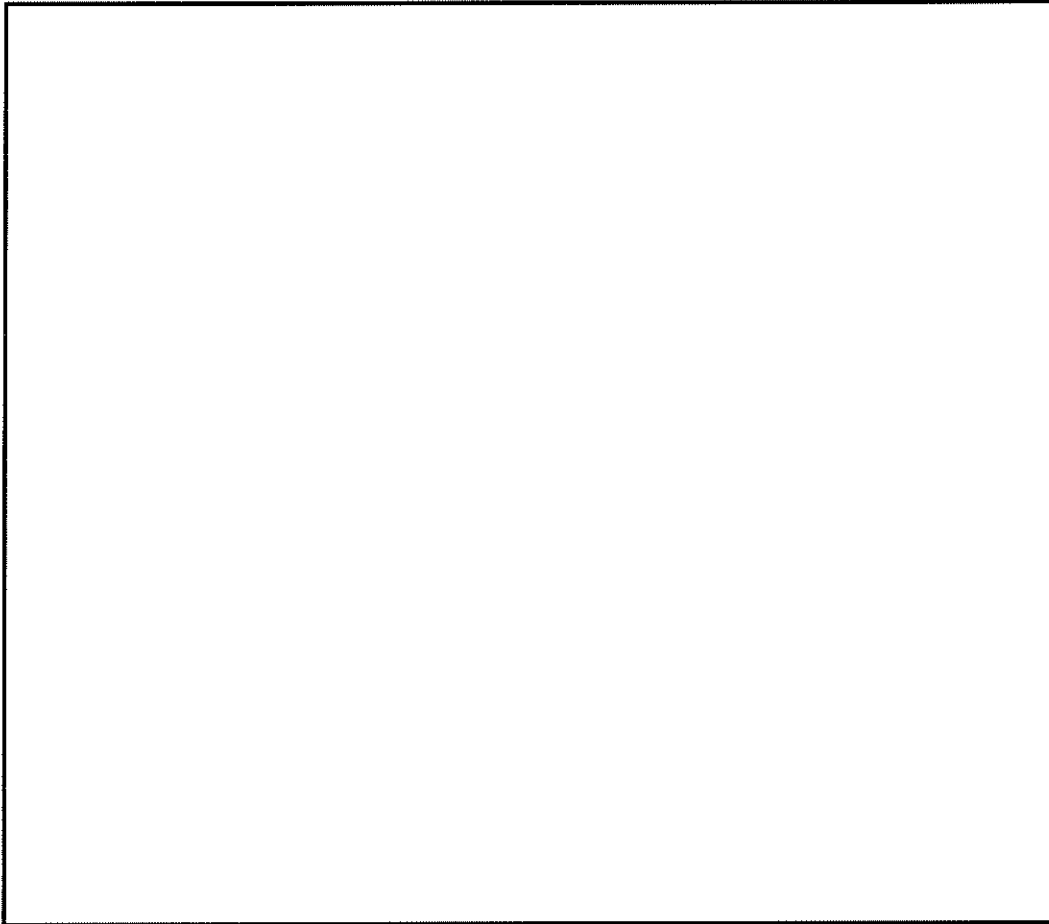


図2 水位を考慮した中性子実効増倍率の評価結果

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

表1 燃焼度の保守性

臨界	遮蔽・除熱
燃焼度を大きくした場合、ウランの減損、中性子を吸収しやすい核分裂生成核種の増加により反応度が小さくなるため、燃焼度を小さく評価した方が保守的となる。	燃焼度を大きくした場合、超ウラン元素、核分裂生成核種、アルファ線放出核種の増加により線源強度、崩壊熱が大きくなるため、燃焼度を大きく評価した方が保守的となる。

表2 臨界解析条件の比較

項目	貯蔵中の臨界解析	燃焼を考慮した解析例
燃焼度	0 GWd/t	34 GWd/t
収納物・濃縮度	濃縮度が大きく、反応度が最も高い高燃焼度8×8燃料(3.66 wt%)を対象とした。	
核分裂生成核種	燃焼度0 GWd/tの条件で評価するため考慮しない	ORIGEN2コードの燃焼計算で得られた燃焼度34 GWd/tの時のウランの減損、中性子吸収の寄与の大きい核分裂生成核種を考慮した組成で評価
燃料配置	HDP-69BCH(B)型中心偏向配置とした。	
寸法条件	バスケットプレート板厚:バスケットプレート材に含まれる中性子吸収材(天然ほう素)の量が少なくなり、かつ隣接する使用済燃料までの距離が短くなる板厚最小とした。	
	伝熱プレート板厚:隣接する使用済燃料までの距離が短くなる板厚最小とした。	
	バスケット格子内のり:隣接する使用済燃料までの距離が短くなるバスケット格子内のり最小とした。	
HDP-69BCH(B)型内雰囲気	雰囲気ガスの中性子吸収効果を見捨てる真空又は冠水とした。	

表3 乾燥状態の臨界解析結果

項目	貯蔵中の臨界解析	燃焼を考慮した解析例
乾燥状態	0.410 (σ : <0.001)	0.272*1 (σ : <0.001)
冠水状態	0.882 (σ : <0.001)	

注記*1: 遮蔽解析では、0.272を切り上げて、0.280を使用。

内は商業機密のため、非公開とします。

3. 参考文献

- (1) 日本原子力研究所, 「臨界安全ハンドブック JAERI 1340」(1999年3月)