

リサイクル燃料備蓄センター設工認
設 2-補-001
2021 年 11 月 29 日

リサイクル燃料備蓄センター  
設計及び工事の計画の変更認可申請書  
(補足説明資料)

使用済燃料の臨界防止について

令和 3 年 1 1 月

リサイクル燃料貯蔵株式会社

## 目次

1. 目的	1
2. ボロン添加ステンレス鋼のボロン濃度の均一性について	1
3. ガドリニアクレジットを考慮した臨界解析モデルバンドルについて	7
4. バスケット格子内の燃料配置等について	19
5. 冠水状態の水密度について	23

## 1. 目的

本資料は、材料物性や使用済燃料集合体配置の影響及び臨界解析のモデルバンドルの考え方について補足し、今回申請する金属キャスクによる臨界防止についてより詳しく説明するものである。

## 2. ボロン添加ステンレス鋼のボロン濃度の均一性について

### 2.1 ステンレス鋼に添加したボロンによる中性子増倍率への影響

ボロンの偏在や均質性に関して、バスケット材料の製造プロセスにおいて管理され、中性子吸収性能の低下を無視できると考えられることから、臨界解析において、ボロンは均等に分布し、かつ、均質であるとして評価を行っている。

第 2-1 表に示すように、バスケット部材のボロン添加ステンレス鋼は、中性子吸収材であるボロン含有量と材料密度を仕様上の下限值から設定したボロンの原子個数密度を解析の入力値として使用している。

また、第 2-2 表に示すように、金属キャスクで使用するボロンを添加したバスケット材料については、ボロン量、ボロンの粒子径や分散性に関して、製造時に製品のボロン量の分析や金属組織観察により確認することから、ストリーミングによる中性子吸収性能の低下を無視できると考えている。

米国の乾式キャスク貯蔵システムの「Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems (NUREG-1536)」(以下、SRP という。)では、臨界解析における固定式中性子吸収材の効果の考慮は、その存在や均一性が確認できる試験が行われない場合は、75%までと規定されている。また、この SRP にも適用される ISG-15「MATERIALS EVALUATION」では、吸収材が非均一な材料の場合、吸収材の粒子の自己遮へい、及び中性子が吸収材の粒子間をストリーミングすることで中性子吸収性能が低下するとしている。

これは、吸収材の粒子がマトリックス材中に不均一に分散あるいは凝集したり、粒子が大きい(例えば、 $B_4C$  の  $80\mu m$  の粒子)のために、同じ量の吸収材を含有する均一な材料に比べて、中性子吸収性能が有意に低下するという Burrus<sup>(1)</sup> と Wells<sup>(2)</sup> の論文を参考に記載している。

一方、独立行政法人原子力安全基盤機構によるボロンクレジットに関する

文献調査<sup>(3)</sup>においては、Stanley E. Turner<sup>(4)</sup>による、分離炭化ボロン粒子間のストリーミングの反応度効果に関して、寸法の小さい粒子（10–25  $\mu\text{m}$ ）を使う吸収体では、ストリーミングによる反応度への影響は無視できるという調査結果が得られている。以下に文献調査の記載を記す。

「湿式又は乾式貯蔵における実際的な利用において、BORAL\*などの  $\text{B}_4\text{C}$  粒子が比較的大きい（110–180  $\mu\text{m}$ ）吸収体では、ストリーミングの影響は  $< 0.0020 \Delta k$  である。一方、金属・セラミック複合体（メタミック）などさらに寸法の小さい粒子（10–25  $\mu\text{m}$ ）を使う吸収体では、基本的には無視できる程度のストリーミングによる反応度への影響が示されている。要するに、透過率では影響があるが、中性子増倍率では影響は無視できると解釈できる。」

\* ボロンを用いた中性子吸収材で、アルミニウム板二枚の間にサンドイッチ状に  $\text{B}_4\text{C}$  とアルミニウム粉末を混合した混合粉末焼結体を挟み込み圧延した板状の成形体。海外では、例えば、ステンレスに接合させて、バスケットとして使用している。

## 2.2 ボロン添加ステンレス鋼の製造及び検査について

BWR用大型キャスク（タイプ2A）で使用するボロンを添加したバスケット材料については、ボロン量、ボロンの粒子径や分散性に関して、バスケット製造時に製品のボロン量分析や金属組織観察により、ボロンが凝集することなく分散し、粒子径が十分小さいことの確認を行うことから、米国SRP等における考え方を適用する必要はないと考える。ボロン添加ステンレス鋼の製造及び検査について、以下に記す。

### ・ボロン添加ステンレス鋼の製造について

BWR用大型キャスク（タイプ2A）は、ボロン添加ステンレス鋼（JSME S FA-CC-004）を用いる。ボロン添加ステンレス鋼の製造方法は、一般的な鋼板の方法と同様である。製造工程フローを第2-1図に示す。ボロンは、溶解時にフェロボロンの形で必要量混合される。溶解の後、造塊工程を経て圧延を行う場合と、連続鋳造で圧延される場合がある。圧延後は、オーステナイト系ステンレス鋼と同様に固溶化熱処理（約1000～1150℃、急冷）を行っている。

### ・ボロン添加ステンレス鋼の検査について

ボロン量、ボロンの粒子径や分散性については、製品のボロン量分析及び金属組織観察により確認する。ボロン添加ステンレス鋼の検査内容を第2-2図に示す。試験片は、同一溶解同一熱処理のロット毎にコイルから切り出す。試験片の採取は、圧延での製造工程を考慮し、圧延条件等に不安定要因が介在しやすいと考えられる圧延開始側と、安定した条件で製造される圧延終了側から採取する。

なお、BWR用大型キャスク（タイプ2A）で使用するボロン添加ステンレス鋼は、使用済燃料ラックや輸送容器用バスケットとして製造実績が多数あり、ボロンが凝集することなく分散し、粒子径が十分小さいことが確認されている<sup>(5)</sup>。

## 2.3 参考文献

- (1) W. R. Burrus, “How Channeling between Chunks Raises Neutron Transmission through Boral”, *Nucleonics*, Vol. 16, No. 1, pp.

91-94 (1958)

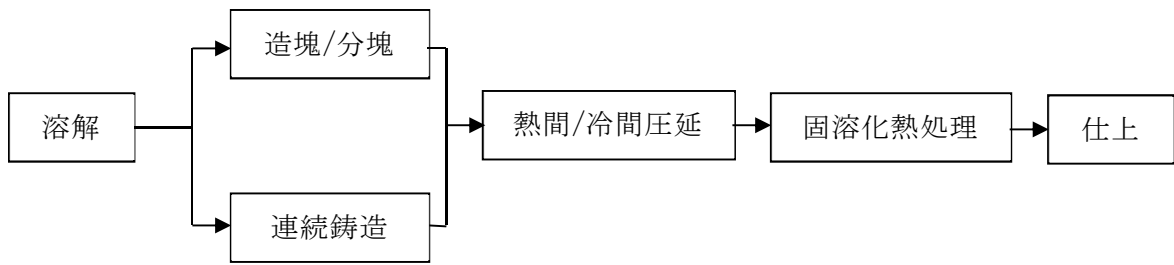
- (2) A. H. Wells, et al, “Criticality Effect of Neutron Channeling Between Boron Carbide Granules in Boral for a Spent Fuel Shipping Cask”, Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 54, pp. 205-206 (1987)
- (3) “平成 20 年度中間貯蔵施設基準体系整備報告書（中間貯蔵施設基準体系整備）”, (独) 原子力安全基盤機構 (平成 22 年 3 月)
- (4) Turner, S. E., “Reactivity Effects of Streaming Between Discrete Boron Carbide Particles in Neutron Absorber Panels for Storage or Transport of Spent Nuclear Fuel”, *Nuclear Science and Engineering*, 151, 344 (2005)
- (5) (株)日立製作所, 「使用済燃料貯蔵ラックの使用材料としてのボロン添加ステンレス鋼について」, HLR-061, (平成 10 年 3 月)

第2-1表 ボロン添加ステンレス鋼のボロン濃度

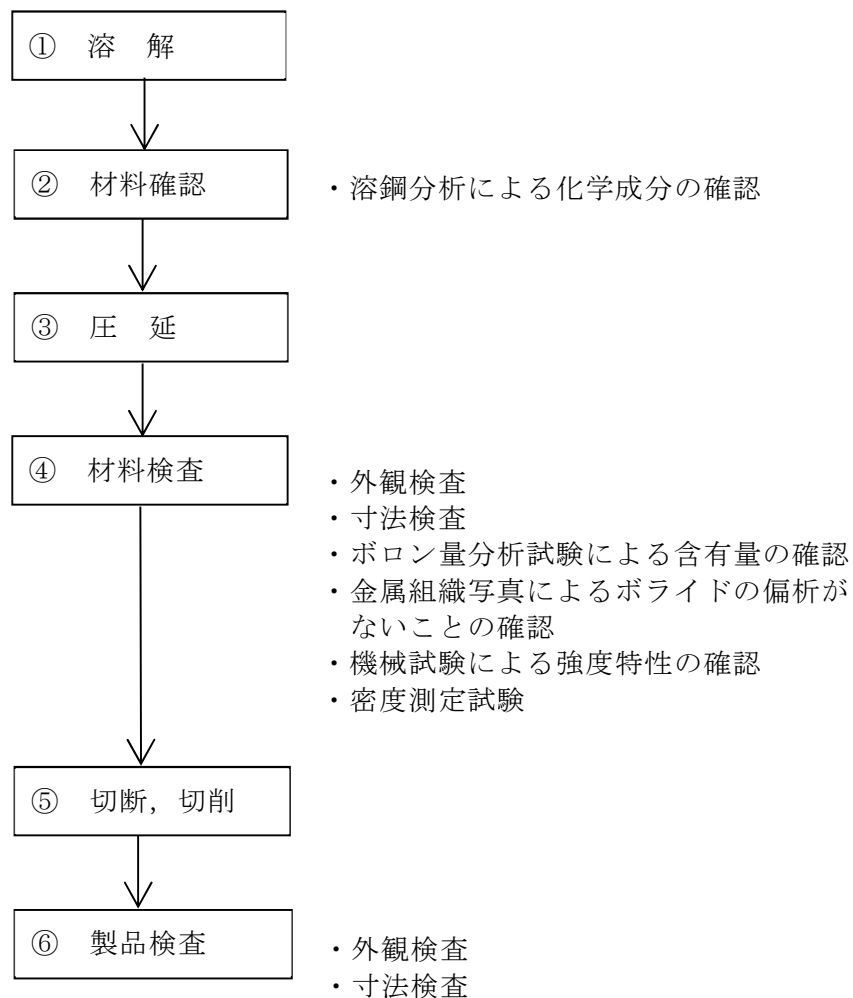
板厚	6 mm ~ <input type="text"/> mm
添加ボロン	天然ボロン ( $^{10}\text{B}$ <input type="text"/> at%)
ボロンの化学形態	ボライド (Cr, Fe) <sub>2</sub> B
ボロン含有量	天然ボロン含有量 1 mass%以上 材料密度 <input type="text"/> g/cm <sup>3</sup> 以上
設定根拠	天然ボロン含有量は材料規格の下限值 (JSME S FA-CC-004) 材料密度は購入仕様下限値

第2-2表 ボロンを添加したバスケット材料の製造管理

$^{10}\text{B}$ 含有量	ボロン含有量 1 mass%以上
(担保方法)	(製品の同一ロット (同一溶鋼, 同一熱処理条件) 毎に複数箇所からボロン量分析を行い, ボロンが所定の重量以上であることを確認)
平均粒子径	約 20 $\mu\text{m}$
(担保方法)	(製品製造実績を有する製造工程管理, 製造時金属組織観察)
分散性	均一
(担保方法)	(製品製造実績を有する製造工程管理, 製造時金属組織観察)
中性子吸収能力	ボロン添加量設計仕様下限値の100%相当
(担保方法)	(ボロン含有量, 平均粒子径及び分散性に係る品質管理により中性子吸収能力を確認)
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ボロンが均一に分散し, かつ平均粒子径が小さいため, 中性子吸収性能への影響はほとんどなく, 所定の未臨界性能を確保</li> <li>・ボロン添加ステンレス鋼は, 使用済燃料ラックや輸送容器用バスケットとして製造実績が多数あり, ボライドが凝集することなく分散し, 粒子径が十分小さいことが確認されている。</li> </ul>



第2-1 図 製造工程フロー



第2-2 図 検査内容



### 3. ガドリニアクレジットを考慮した臨界解析モデルバンドルについて

#### 3.1 モデルバンドルの作成方法

BWR燃料は運転期間中において、出力分布及び余剰反応度の制御を濃縮度と可燃性毒物であるガドリニア設計により行えるようになっており、軸方向断面の燃焼特性は各々異なるが、運転期間中のいずれの断面においても  $k_{\infty}$  が 1.3 を下回るように設計されている。また、燃料集合体は、できるだけ長期かつ高い燃焼度を取り出しながら、局所出力ピークをできるだけ少なく平坦な出力が維持できるように径方向にも濃縮度の違う燃料棒で制御している。このため、実燃料集合体の内側は高い濃縮度の燃料棒、外側には低い濃縮度の燃料棒が配置されている。この実燃料の濃縮度配分を考慮し、かつガドリニアの無い保守的な状態で臨界計算を実施できるように下記のようなモデルバンドルを設定している。なお、モデルバンドルはガドリニアの無い燃料でモデル化しているため、実燃料集合体よりも  $k_{\infty}$  は大きい、平均濃縮度は低くなる特徴がある。

モデルバンドルの作成については、 $k_{\infty}$  が 1.3 となるモデルバンドルは、任意性があって複数考えられるが、 $k_{\infty}$  が 1.3 のモデルバンドルでも  $k_{\text{eff}}$  あるいは平均濃縮度が大きくなるように設定している。参考文献(1)に、このようなガドリニアクレジットモデルバンドル作成の考え方が示されている。

第3-1表に示すように、炉心装荷冷温状態の場合、内側に高濃縮度燃料棒、外側に低濃縮度燃料棒を配置したモデルバンドル (Case1) と、同一濃縮度の燃料棒を配置したモデルバンドル (Case2) は、ともに  $k_{\infty}$  が 1.3 であるが、平均濃縮度に差が生じている。これは、 $k_{\infty}$  の評価では、燃料集合体からの漏えい中性子が強く影響するため、実燃料に近い内側領域の濃縮度を高めた Case1 よりも、Case2 のような低い平均濃縮度でも  $k_{\infty}=1.3$  を達成できる。

一方、キャスク体系においては、第3-2表に示すように、中性子漏えいの大きい同一濃縮度分布の Case2 よりも、内側の濃縮度を高くした Case1 の方が、中性子漏えいが少ないためバスケットの中性子吸収効果が小さく、 $k_{\text{eff}}$  が高くなる。

仮に、高濃縮度と低濃縮度と中間濃縮度の3種類の濃縮度を用いて、内側から高濃縮度、中間濃縮度、低濃縮度の燃料棒を配置して  $k_{\infty}$  が 1.3 のモデル

バンドルを作成した場合には、中間の濃縮度の燃料棒により、Case1 に比べて外側領域の濃縮度が高くなり、内側領域の濃縮度が低くなった状態（低い平均濃縮度、中性子漏えいの大きい状態）で  $k_{\infty}$  は 1.3 となる。キャスク体系においては、バスケットの中性子吸収効果が増えるため 3 種類の濃縮度を用いたモデルバンドルの方が、 $k_{\text{eff}}$  は Case1 より低くなる。したがって、濃縮度を 2 種類としたモデルバンドルに包絡される。

以下にモデルバンドルの設定方法を示す。

- ① まず低濃縮度燃料棒を全体に配置する。
- ② 次に高濃縮度燃料棒を配置していくが、バスケットの中性子吸収効果が小さくなるように、バスケットから距離が離れた中央部から置換していき、 $k_{\infty} \doteq 1.3$  となるまで繰り返す。
- ③ 最外周以外の領域全てに高濃縮度燃料棒を配置してもなお、 $k_{\infty} \doteq 1.3$  を下回る場合（第 3-1 図(a)）には、最外周にも高濃縮度燃料棒を配置する。
- ④ ③により最外周に高濃縮度燃料棒を配置すると  $k_{\infty} \doteq 1.3$  を超える場合（第 3.2-1 図(b)）には、最外周の領域全てに低濃縮度燃料棒を配置し、それ以外の領域全てに高濃縮度燃料棒を配置した状態（第 3-1 図(a)）をベースとして、最外周から 2 列目の高濃縮度燃料棒と最外周の低濃縮度燃料棒を置換することによって  $k_{\infty} \doteq 1.3$  となる配置をサーベイシモデルバンドルを設定する（第 3-1 図(c)）。

### 3.2 BWR用大型キャスク（タイプ2A）の冠水状態における臨界解析に用いたモデルバンドル

第 3-3 表に示す燃料仕様に基づき、「3.1 モデルバンドルの作成方法」の考え方に基づいて設定したモデルバンドルを第 3-2 図に、このモデルバンドルの無限増倍率を第 3-4 表に示す。

モデルバンドルの種類としては、収納する燃料タイプを考慮してモデルバンドルを設定した。BWR用大型キャスク（タイプ2A）として、3種類の燃料集合体を収納するが反応度が最も高くなる高燃焼度  $8 \times 8$  燃料をベースとした STEP-II 燃料モデルバンドルを用いて解析を行っている。なお、モデルバンドルは、燃料仕様を考慮した最高濃縮度と最低濃縮度（公称値）の燃料

棒にて、 $k_{\infty}$ が1.3となる仮想的なモデルバンドルを設定していることから、U-235濃縮度の最高、最低の本数比、実際の平均濃縮度は一致しない。

モデルバンドルは、第3-3図のように、1断面の濃縮度分布から設定しており、燃料有効部の全長にわたって、濃縮度分布は一様として扱っている。実燃料では、運転時の軸方向出力分布の調整のために、濃縮度及びガドリニアは軸方向に分布\*を持たせているが、モデルバンドルでは、実燃料の濃縮度を平均化等の操作をせずに、 $k_{\infty}$ が1.3となる保守的な濃縮度分布を軸方向一様に設定している。実燃料のあらゆる軸方向の断面、運転期間（燃焼度）において、 $k_{\infty}$ は1.3以下であり、軸方向一様に $k_{\infty}$ が1.3となる濃縮度分布を設定することは、実燃料の $k_{\infty}$ を包絡しており、保守的な設定である。

なお、炉心装荷冷温状態での燃料集合体ピッチは、炉心内の最小離隔距離である約152mmとしている。キャスク体系では、厚みが約6mmのほう素が添加されたバスケット内に収納されることから燃料集合体ピッチを炉心装荷状態よりも大きい約  mmとしている。また、燃料集合体の変形は想定していない。

\*：BWR炉心燃料設計の特徴について

BWR炉心は軸方向にボイド率分布を持つことを特徴としている。炉心下部はボイド率が小さく、炉心上部はボイド率が大きいいため、ボイド率の小さい（減速材の多い）炉心下部で出力が高くなり、出力分布が下方へ膨らみ易い傾向にある。炉心燃料設計では、出力が局所的に大きくならないよう、軸方向出力分布の平坦化を目的として、上下に濃縮度差をつけた上下2領域燃料が広く採用されている。また、ガドリニア設計では、運転期間中の炉心余剰反応度を適切かつ一定に保つように調整され、ガドリニア濃度が低いとガドリニアが早く燃え尽きるため $k_{\infty}$ が最大となる燃焼度時期は早くなり、ガドリニア濃度が高いとガドリニアが燃え残るため $k_{\infty}$ が最大となる燃焼度時期は遅くなる。

### 3.3 モデルバンドルの妥当性

本モデルバンドルをキャスク体系に使用することの保守性については、第3-4図に示すようなフローに従い  $k_{\infty}$  が 1.3 となるモデルバンドルについて、事業許可申請書における解析に用いたKENOコードと炉心設計コードを用いた比較検討を実施している。

具体的には、炉心設計コードによる実燃料の炉心装荷冷温状態での無限増倍率 ( $k_{\infty 3}$ ) が 1.3 より小さいことを示し、モデルバンドルの炉心装荷冷温状態での炉心設計コードによる無限増倍率 ( $k_{\infty 2}$ ) とKENOコードによる無限増倍率 ( $k_{\infty 1}$ ) の結果に差がなく、 $k_{\infty 1}$ 、 $k_{\infty 2}$  が  $k_{\infty 3}$  よりも大きくなることを確認する。また、モデルバンドルのキャスク体系でのKENOコードによる実効増倍率 ( $k_{\text{eff}1}$ )、炉心設計コードによる実効増倍率 ( $k_{\text{eff}2}$ ) が、実燃料のキャスク体系での炉心設計コードによる実効増倍率 ( $k_{\text{eff}3}$ ) より大きくなることを確認する。これらの結果を第3-5表、第3-6表に示す。第3-5表に示すとおり、実燃料の炉心装荷冷温状態での無限増倍率が 1.3 を超えない設計となっており ( $1.3 > k_{\infty 3}$ )、モデルバンドルに対して計算コードの違いによる結果に差がなく ( $k_{\infty 1} \doteq k_{\infty 2}$ )、モデルバンドルの炉心冷温状態での無限増倍率が、実燃料の炉心装荷冷温状態での無限増倍率より大きいことを確認している ( $k_{\infty 1} > k_{\infty 3}$ 、 $k_{\infty 2} > k_{\infty 3}$ )。また、キャスク体系においても、実燃料に対して、KENOコードでも炉心設計コードでも、モデルバンドルが保守性を有することを第3-6表に示すとおり確認している ( $k_{\text{eff}1} > k_{\text{eff}3}$ 、 $k_{\text{eff}2} > k_{\text{eff}3}$ )。

以上のように、設定したモデルバンドルによるキャスク体系の  $k_{\text{eff}}$  は、実燃料の場合よりも大きくなり、モデルバンドルは実際の燃料を包絡するとともに、保守性を有することを確認している。

### 3.4 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”, PATRAM’ 95

第3-1表 モデルバンドルの例 (炉心装荷冷温状態の無限増倍率)<sup>(1)</sup>

	Enrichment Distribution	Kinf under Cold Core State																																																																
Case 1	<table border="1"> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td>WR</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> </table> <p>1 : 4.90% (Maximum Pellet Enrichment of STEP-II Reload Fuel)</p> <p>2 : 2.10% (Minimum Pellet Enrichment of STEP-II Reload Fuel)</p> <p>Avg : 2.75%</p>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1		WR	1	2	2	2	2	1			1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1.301 (1.300 by WIMS)
2	2	2	2	2	2	2	2																																																											
2	1	2	2	2	2	2	2																																																											
2	2	1	1	1	1	2	2																																																											
2	2	1		WR	1	2	2																																																											
2	2	1			1	2	2																																																											
2	2	1	1	1	1	2	2																																																											
2	2	2	2	2	2	1	2																																																											
2	2	2	2	2	2	2	2																																																											
Case 2	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td>WR</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table> <p>1 : 2.54%</p>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		WR	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.301
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1		WR	1	1	1																																																											
1	1	1			1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											

第3-2表 モデルバンドルの例 (キャスク体系の実効増倍率\*)<sup>(1)</sup>

	Enrichment Distribution	Kinf in Cask Basket Cell																																																																
Case 1	<p>Basket channel (Boron-Stainless-Steel)</p> <table border="1"> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td>WR</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> </table> <p>1 : 4.90%</p> <p>2 : 2.10%</p> <p>Avg : 2.75%</p>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1		WR	1	2	2	2	2	1			1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.83294
2	2	2	2	2	2	2	2																																																											
2	1	2	2	2	2	2	2																																																											
2	2	1	1	1	1	2	2																																																											
2	2	1		WR	1	2	2																																																											
2	2	1			1	2	2																																																											
2	2	1	1	1	1	2	2																																																											
2	2	2	2	2	2	1	2																																																											
2	2	2	2	2	2	2	2																																																											
Case 2	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td>WR</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table> <p>1 : 2.54%</p>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		WR	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.82791
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1		WR	1	1	1																																																											
1	1	1			1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											

\* : ここでは、代表的な輸送容器の単位格子を無限に配列した状態の評価

第 3-3 表 解析用の使用済燃料集合体（BWR）の仕様

項目	単位	STEP-I 燃料 モデルバンドル (新型 8×8 ジルコ ニウムライナ燃料 ベース)	STEP-II 燃料 モデルバンドル (高燃焼度 8×8 燃料ベース)
燃料材質	-	二酸化ウラン	二酸化ウラン
被覆管材質	-	ジルカロイ-2	ジルカロイ-2
燃料理論密度	%	95	97
燃料ペレット直径	mm	10.3	10.4
被覆管肉厚	mm	0.86	0.86
燃料有効長	mm	3708	3708
燃料棒配列	-	8×8	8×8
集合体あたりの燃料棒 数	本	62	60
燃料棒ピッチ	mm	16.3	16.3
集合体の幅	mm	130.4	130.4
U-235 濃縮度	%	最高 3.9	最高 4.9
		最低 1.6	最低 2.1

第3-4表 解析用モデルバンドルの無限増倍率

種類	濃縮度分布パターン	燃料棒本数 (本)		C/B* 有 無	無限増倍率																																																																	
		高濃縮	低濃縮		$k_{\infty}$	$\sigma$																																																																
STEP-I 燃料モデル バンドル	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center; width: 100px; height: 100px;"> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>WR</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>WR</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> </table> <p>1 : 高濃縮度燃料棒 3.9% 2 : 低濃縮度燃料棒 1.6%</p>	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	WR	1	1	1	1	1	1	1	1	WR	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	34	28	有	1.30107	0.00056
2	2	2	1	1	2	2	2																																																															
2	2	2	1	1	1	2	2																																																															
2	1	1	1	1	1	2	2																																																															
1	1	1	WR	1	1	1	1																																																															
1	1	1	1	WR	1	1	1																																																															
2	2	1	1	1	1	1	2																																																															
2	2	1	1	1	2	2	2																																																															
2	2	2	1	1	2	2	2																																																															
STEP-II 燃料モデル バンドル	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center; width: 100px; height: 100px;"> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td rowspan="2">WR</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> </table> <p>1 : 高濃縮度燃料棒 4.9% 2 : 低濃縮度燃料棒 2.1%</p>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	WR	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	14	46	有	1.30489	0.00051	
2	2	2	2	2	2	2	2																																																															
2	1	2	2	2	2	2	2																																																															
2	2	1	1	1	1	2	2																																																															
2	2	1	WR	1	2	2	2																																																															
2	2	1		1	2	2	2																																																															
2	2	1	1	1	1	2	2																																																															
2	2	2	2	2	2	1	2																																																															
2	2	2	2	2	2	2	2																																																															

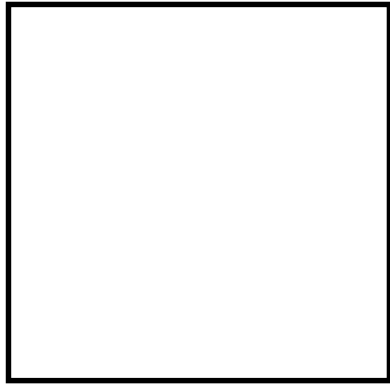
\* : チャンネルボックス

第 3-5 表 炉心装荷冷温状態の無限増倍率に関する臨界解析一覧  
(STEP-I 燃料モデルバンドルの例)

ケース	燃料集合体	体系	計算コード	計算結果	備考
1					
2					
3					

\*1: 燃料集合体を炉心体系で無限配列した状態の評価。

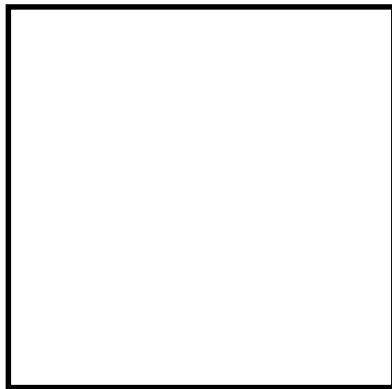




燃料棒本数

$k_{\infty} \pm \sigma =$

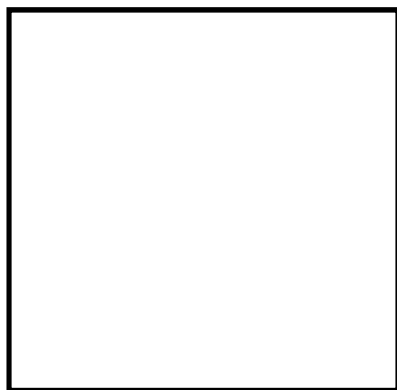
(a) 最外周以外の全てに高濃縮度燃料棒を配置



燃料棒本数

$k_{\infty} \pm \sigma =$

(b) 最外周の一部にも高濃縮度燃料棒を配置

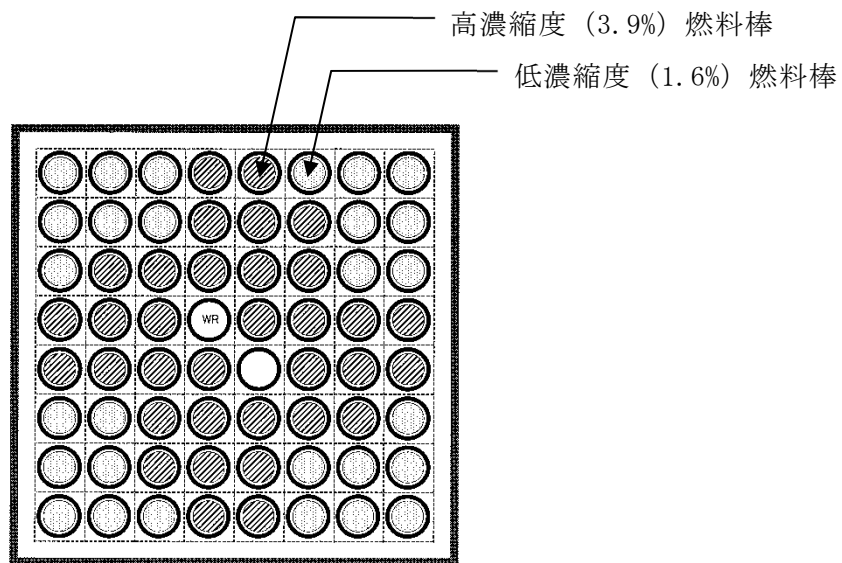


燃料棒本数

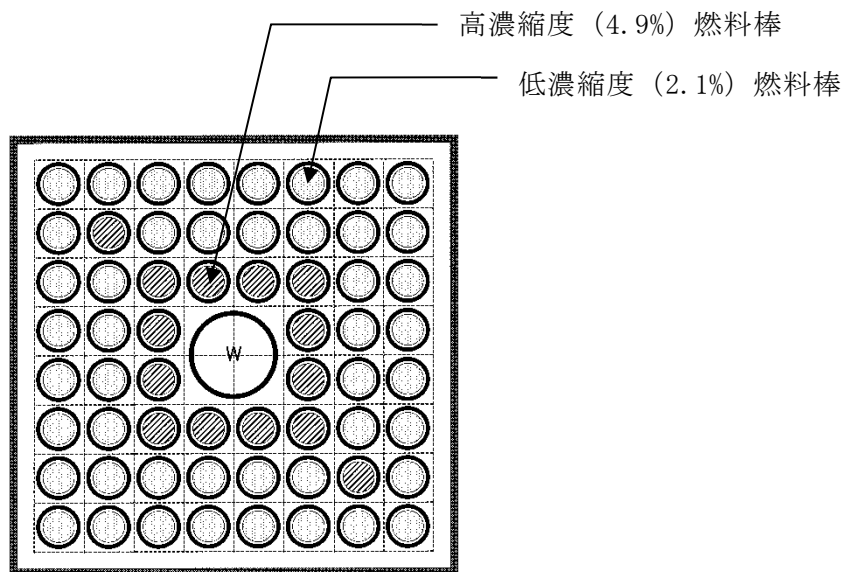
$k_{\infty} \pm \sigma =$

(c) 一部の最外周の低濃縮度燃料棒と最外周から2列目の高濃縮度燃料棒を置換

第3-1図 モデルバンドル試算例

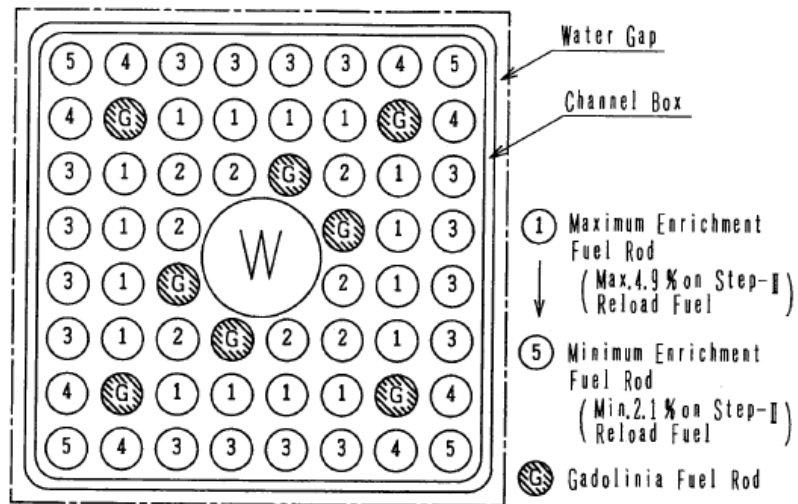


(a) STEP-I 燃料モデルバンドル (新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料ベース)



(b) STEP-II 燃料モデルバンドル (高燃焼度 8 × 8 燃料ベース)

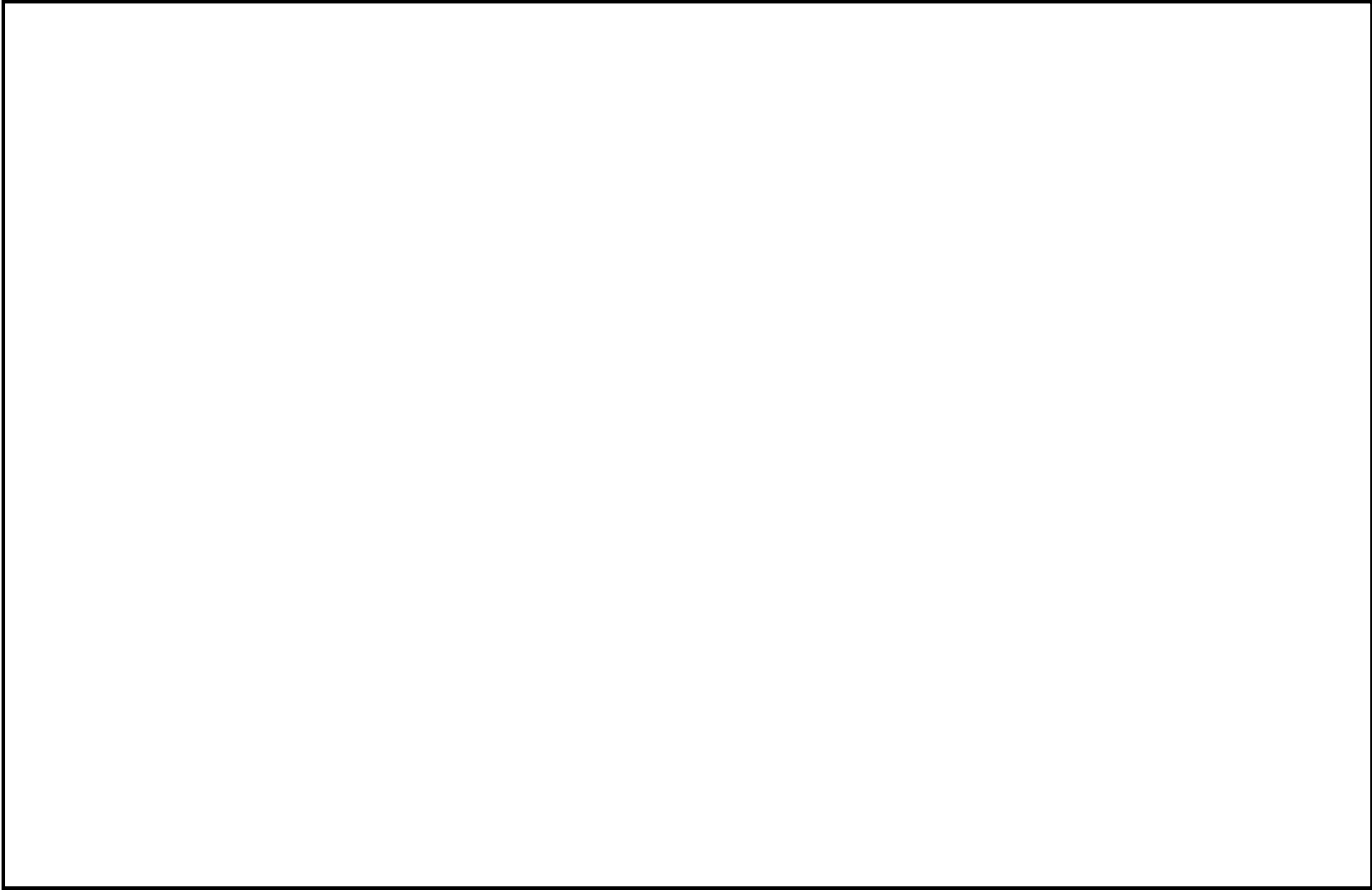
第 3-2 図 解析用モデルバンドル



第 3-3 図 BWR 燃料の濃縮度分布の例<sup>(1)</sup>

(高燃焼度 8 × 8 燃料)

(申請書 添付書類 3 (添付 1-1-1) 別添 3-1 図)



第 3-4 図 モデルバンドル保守性の検証

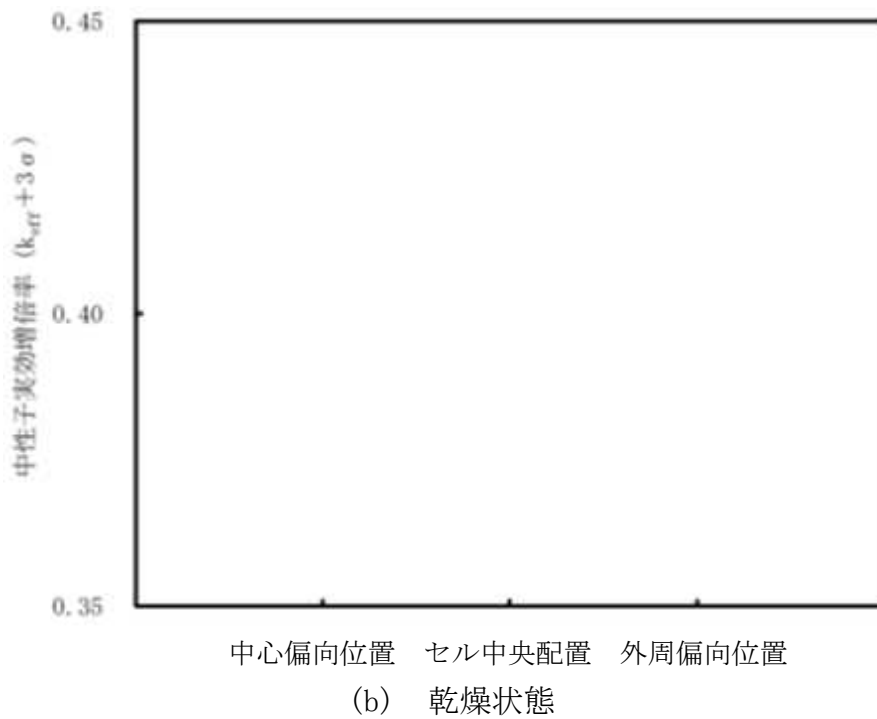
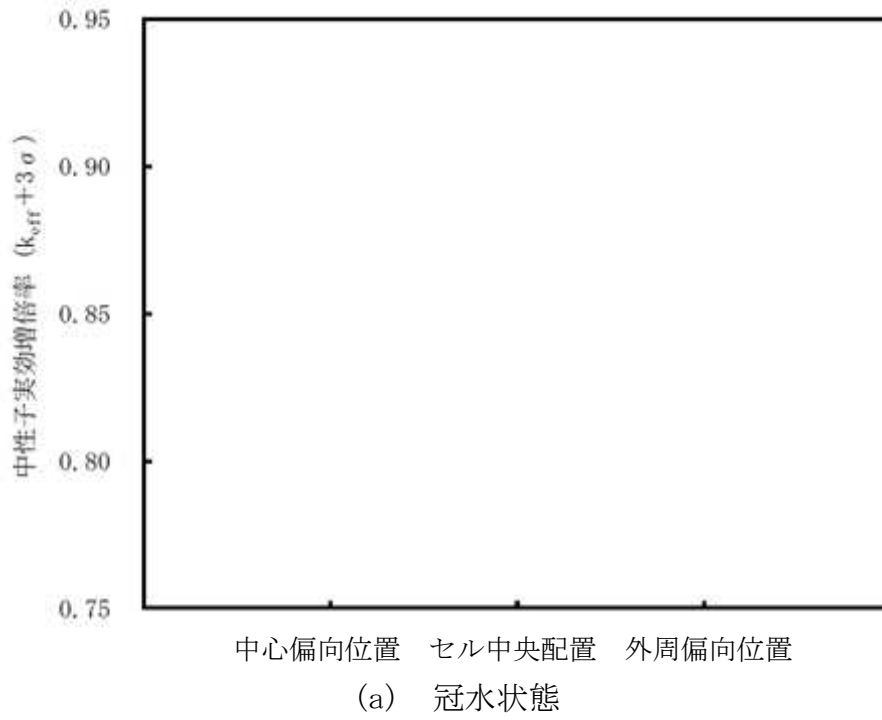
#### 4. バスケット格子内の燃料配置等について

第 4-1 図にバスケット格子内の燃料配置と中性子実効増倍率の関係を示す。第 4-1 図に示すように、使用済燃料集合体のバスケット格子内の配置、チャンネルボックスの有と無をパラメータにして評価を行い、キャスク中心側に偏向した方が、中性子実効増倍率が大きくなることを確認している。これは、使用済燃料集合体をキャスク中心側に偏向させることで、燃料体系が稠密になり中性子密度が増加する影響と考えられる。また、チャンネルボックスの有、無によって、使用済燃料集合体とバスケットの距離が変化するため、チャンネルボックス有、無両方の評価を行い、中性子実効増倍率を確認している。

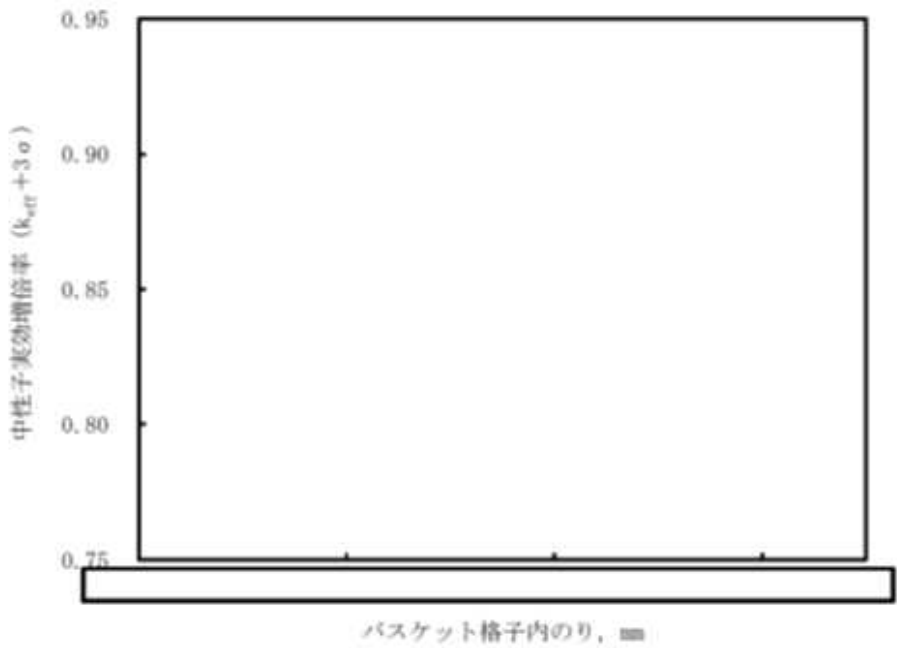
なお、第 4-1 図は格子内のり最小の結果を記載している。これは、BWR 用大型キャスク（タイプ 2 A）では、格子内のり最小のモデルは燃料集合体の離隔距離が最小になり中性子実効増倍率が大きくなるためである。第 4-1 図の乾燥状態と冠水状態のそれぞれで最大の中性子実効増倍率を与える条件において、格子内のりを最小から変化させた結果を第 4-2 図に示す。第 4-2 図に示すように、格子内のりが小さい方が中性子実効増倍率が大きいことを確認している。

以上のように、最適減速条件と中性子実効増倍率の関係は、バスケット材質、燃料集合体のピッチや配置、燃料集合体周囲の水（減速材）の因子の影響により複雑と考えられるため、バスケット格子内の燃料配置、バスケット格子内の公差等をパラメータとして中性子実効増倍率を確認している。

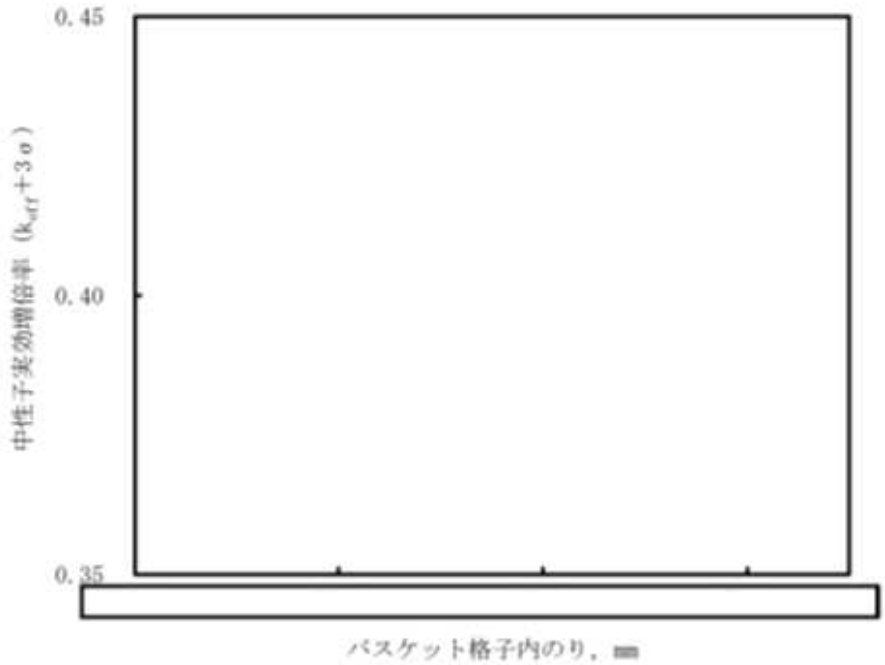
確認結果に基づき、厳しい評価結果を与える条件として、冠水状態は、格子内のり最小、燃料のセル内配置の中心偏向、チャンネルボックス有の条件、乾燥状態は、格子内のり最小、燃料のセル内配置の中心偏向、チャンネルボックス無の条件を採用している。



第4-1図 バスケット格子内の燃料配置と中性子実効増倍率の関係  
(高燃焼度8×8燃料の例)

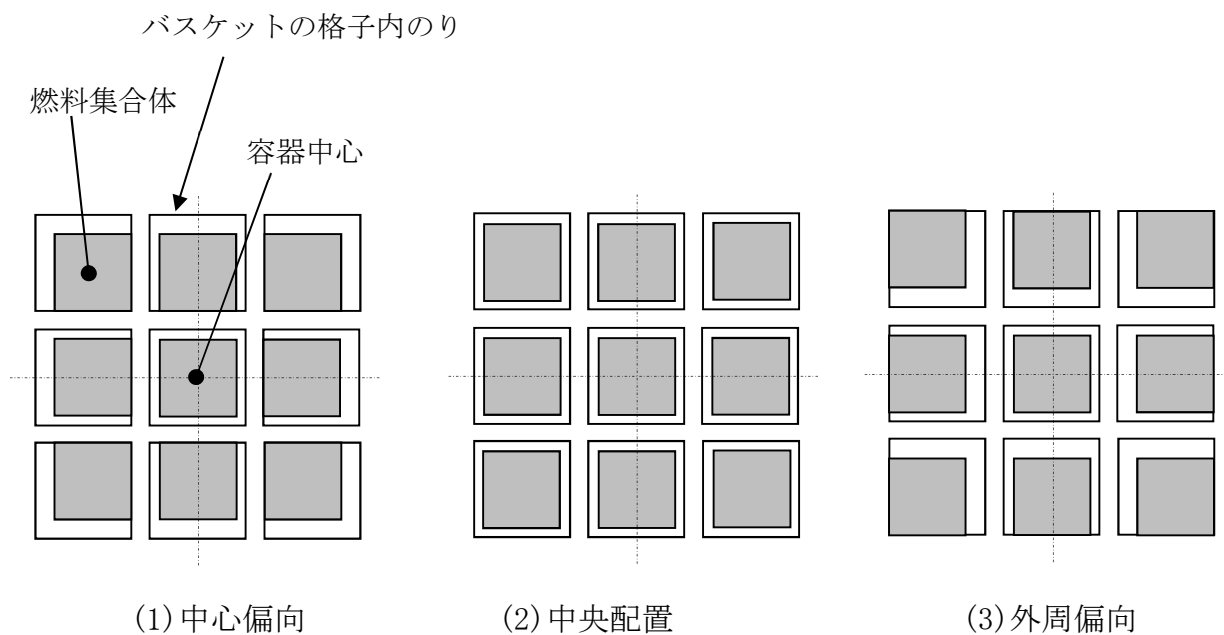


(a) 冠水状態, チャンネルボックス有

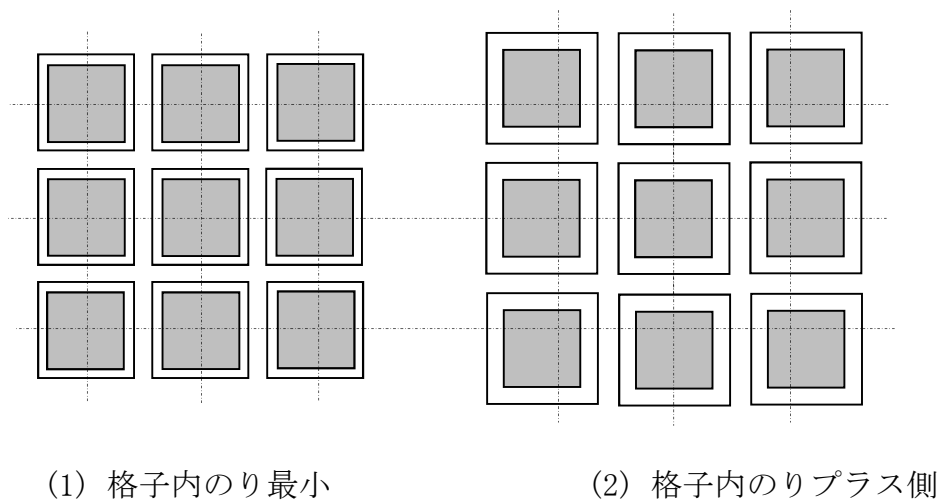


(b) 乾燥状態, チャンネルボックス無

第4-2図 格子内のりと中性子実効増倍率の関係  
(高燃焼度8×8燃料の例)



第4-1 図補足 バスケット格子内の燃料配置の概念図



第4-2 図補足 バスケット格子内のりの概念図



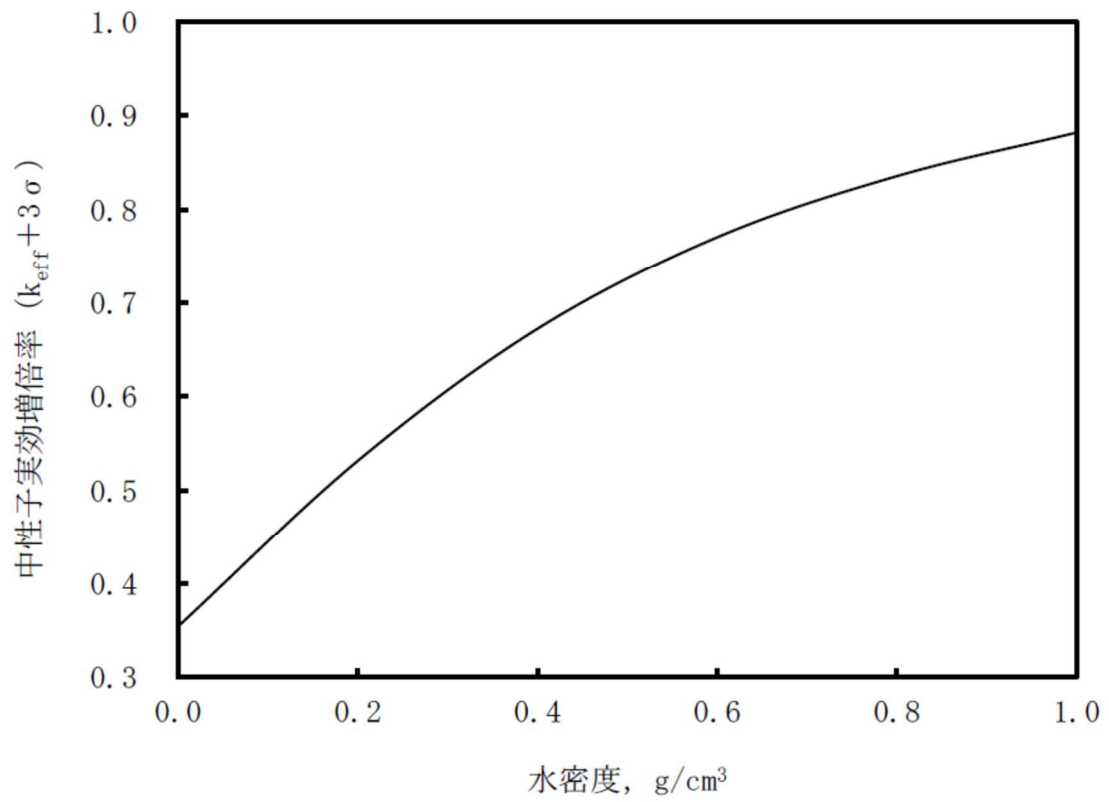
## 5. 冠水状態の水密度について

第5-1図に金属キャスク内の水密度と中性子実効増倍率の関係を示す。第5-1図に示すように、乾燥状態 ( $0.0 \text{ g/cm}^3$ ) から冠水状態 ( $1.0 \text{ g/cm}^3$ ) まで、中性子実効増倍率は単調増加であり、冠水状態が臨界評価上最も厳しい条件である。

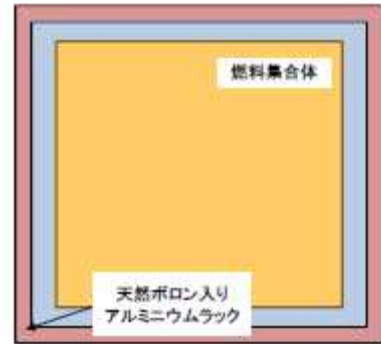
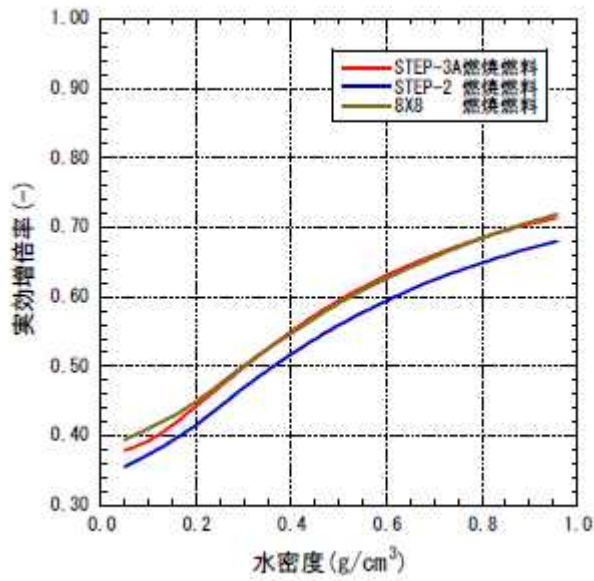
原子力発電所における燃料貯蔵設備においては、中性子吸収材を使用していない新燃料貯蔵庫は、水密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  未満が最適減速条件に、また、中性子吸収材を使用している使用済燃料貯蔵ラックは、水密度最大の  $1.0 \text{ g/cm}^3$  が最適減速条件になっている例がある。

バスケットに中性子吸収材を使用している金属キャスクは、使用済燃料貯蔵ラックと同じ傾向にあり、水密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  が臨界評価上最も厳しい条件となるのは、金属キャスク特有の傾向ではない。

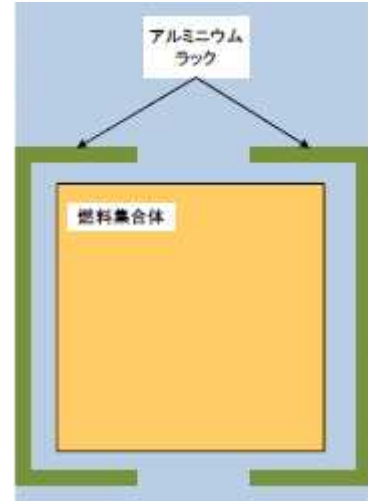
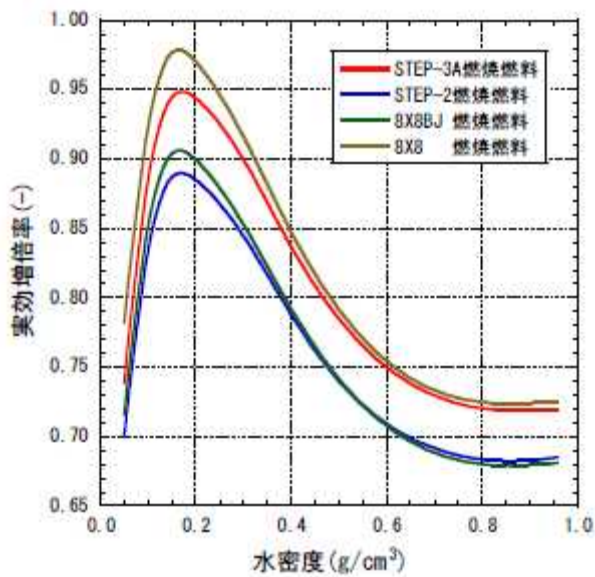
原子力発電所における燃料貯蔵設備の具体的な例として、第4回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会(平成25年10月7日)において、3号機燃料貯蔵ラックに対する中性子実効増倍率の検討結果が示されている。第3.4-2図は、BWR用大型キャスク(タイプ2A)のバスケットと同じように、中性子吸収材である天然ボロンを使用している板材を格子上に組んだもので、中性子吸収材の影響で減速不足状態のために、水密度最大の  $1.0 \text{ g/cm}^3$  が最適減速条件になっている。一方で、第5-3図は、中性子吸収材を使用していないタイプであり、水密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  未満が最適減速条件となっている。



第5-1図 金属キャスク内の水密度と中性子実効増倍率の関係  
(高燃焼度8×8燃料の例)



第5-2図 燃料貯蔵ラックの水密度と中性子実効増倍率の関係\*  
(天然ボロン入りアルミラックの例)



第5-3図 燃料貯蔵ラックの水密度と中性子実効増倍率の関係\*  
(アルミニウムラックの例)

\* : 第4回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会  
(平成25年10月7日) 資料3 3号機使用済燃料貯蔵プール内の臨界  
の可能性について