

本資料のうち、枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

東海第二発電所	工事計画審査資料
資料番号	補足-180-1 改1
提出年月日	平成30年3月27日

工事計画に係る補足説明資料

補足-180-1 【燃料取扱設備，新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書に係る補足説明資料】

平成30年3月

日本原子力発電株式会社

1. 添付書類に係る補足説明資料

「核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設」に係る添付資料(共通資料は除く)の記載内容を補足するための説明資料リストを以下に示す。

工認添付資料	補足説明資料
V-1-3-2 燃料取扱設備, 新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書	1. 小規模漏えい時の沸騰状態における実効増倍率について
	2. 未臨界性評価における燃料体等上下部の計算体系設定の考え方
	3. 大規模漏えい時の未臨界性評価における水密度を一様に変化させることの妥当性
	4. 未臨界性評価の条件
	5. 未臨界性評価における不確定性
	別添1 ラックセル中のボロンの減損割合の評価

2. 別 紙

- (1) 工認添付資料と設置許可まとめ資料との関係【核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設】

別紙 工認添付資料と設置許可まとめ資料との関係【核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設】

工認添付資料		設置許可まとめ資料			引用内容
V-1-3-2	燃料取扱設備，新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書	SA	54-13	使用済燃料プール水沸騰・喪失時の未臨界性評価	資料の記載の一部を引用
		有効性評価	4.1 4.2	使用済燃料プールにおける重大事故に至るおそれがある事故 ・想定事故1 ・想定事故2	実効増倍率の水密度依存性の評価結果を引用

補足説明資料目次

	頁
1. 小規模漏えい時の沸騰状態における実効増倍率について	1-1
2. 未臨界性評価における燃料体等上下部の計算体系設定の考え方	2-1
3. 大規模漏えい時の未臨界性評価における水密度を一様に変化させることの妥当性	3-1
4. 未臨界性評価の条件	4-1
5. 未臨界性評価における不確定性	5-1
別添1	
ラックセル中のボロンの減損割合の評価	別1-1

1. 小規模漏えい時の沸騰状態における実効増倍率について

仮に使用済燃料プール水が沸騰又は喪失状態となった場合には、使用済燃料プールの水密度が減少することにより、ラックセル内で中性子を減速する効果が減少し、実効増倍率を低下させる効果が生じる。一方、ラックセル間では水及びラックセルによる中性子を吸収する効果が減少するため、隣接ラックへの中性子の流れ込みが強くなり、実効増倍率を増加させる効果が生じる。低水密度状態を想定した場合の使用済燃料プールの実効増倍率は上記の2つの効果のバランスにより決定されるため、ラックの材質・ピッチの組合せによっては通常の冠水状態と比較して未臨界性評価結果が厳しくなる可能性がある。

そこで、東海第二発電所の使用済燃料プールにおいて水密度を一様に $1.0 \sim 0.0 \text{ g/cm}^3$ と変化させて実効増倍率を計算したところ、中性子の強吸収体であるラックセル中のボロンの効果により、実効増倍率を増加させる効果がある隣接ラックへの中性子の流れ込みが抑制されることから、水密度の減少に伴い実効増倍率は単調に減少する結果が得られた。ボロンは供用期間中に中性子を吸収し、中性子の吸収体としての効果が低下することが考えられるが、仮に供用期間を60年としても効果の低下はごく僅かであり、供用期間後の使用済燃料搬出までの期間を10年（合計70年間）と仮定しても効果の低下はごく僅かであると考えられる（別添1参照）。このため、水密度が減少する事象が生じた場合でも未臨界は維持されることとなる。

2. 未臨界性評価における燃料体等上下部の計算体系設定の考え方

大規模漏えい時の未臨界性評価における燃料体等上下部の計算体系は、有限の体系とし、以下のとおり設定している。

大規模漏えい時の燃料有効長部分は、上下部も含め全域にわたり低水密度状態となっているが、低水密度状態においても十分な中性子の反射効果が得られる厚さ（中性子の反射効果が飽和する厚さ）となる反射体を仮定して解析を実施している。

具体的には、燃料体等の上下部構造物、ラックの支持脚等及び使用済燃料プール下部コンクリートのライニングはSUS材で構成されており、上記で考慮した反射体と比較して反射効果が小さく、中性子吸収材として働くため、計算体系上は無視している。

その上で、上下部については、臨界安全ハンドブック第2版（JAERI-1340 日本原子力研究所 1999.3）において、200 mm以上の厚さがあれば、十分な反射体厚さ^{※1}であるとされており、これを包絡する値として厚さ300 mmの水反射体としている。

- ※1 ある厚さの反射体を考慮した場合の実効増倍率と厚さ無限大の反射体を考慮した場合の実効増倍率がほぼ同等となる場合の反射体厚さ（実効増倍率が同等となる場合とは、両者の実効増倍率の差が厚さ無限大の反射体を考慮した場合の実効増倍率に対して $10^{-3} \Delta k/k$ 以下となる厚さ）

3. 大規模漏えい時の未臨界性評価における水密度を一様に变化させることの妥当性

大規模漏えい時の未臨界性評価は、使用済燃料プール水が喪失した状態で、可搬型スプレイ設備（使用済燃料プールへのスプレイ）にてラック及び燃料体等を冷却し、臨界とならないよう配慮したラック形状及び燃料配置において、スプレイや蒸気条件においても臨界を防止できることを確認する。このスプレイや蒸気条件の想定として使用済燃料プール全体の水密度を一様に $0.0\sim 1.0\text{ g/cm}^3$ まで变化させることとしている。

大規模漏えい時には、可搬型スプレイ設備により使用済燃料プール全体に注水する手順となっており、燃料体等からの崩壊熱によりラック内外で水密度の濃淡が生じるものの、偏った水密度分布となることは考え難い。また、使用済燃料プール水が喪失していく過程や再冠水過程においてもラック底部からラック内に水が流れ込む構造になっており、ラック内外で著しい水位差は生じない。したがって、スプレイや蒸気条件における未臨界性評価条件として、水密度を一様に $0.0\sim 1.0\text{ g/cm}^3$ まで变化させることは妥当である。

4. 未臨界性評価の条件

4.1 燃料条件

TGBLA/GECLA/NEUTPHYSにて評価した無限増倍率を第4-1～5図に示す。9×9燃料（A型）、9×9燃料（B型）、高燃焼度8×8燃料等の炉心装荷時の無限増倍率は、それぞれ添加されたガドリニアの量によって2種類ずつあるタイプを、それぞれ軸方向2～4領域に分割し、2次元の無限体系にて燃焼を進めて計算している。いずれの燃料においても低Gd燃料上部において無限増倍率が最大となり、運転期間中のガドリニア効果によるピークを考慮しても1.30を超えることはない。したがって、十分大きな保守性をもつモデルバンドルとして、炉心装荷時の無限増倍率が1.30となるよう設定した。中でもピーク時の無限増倍率が高いのは9×9燃料（A型）及び9×9燃料（B型）であるが、値はほぼ同等のため、9×9燃料（A型）をモデルバンドルの想定に用いた。

濃縮度分布は燃料棒を外側から1～複数列ずつ、数種類に分け、実燃料の濃縮度分布を参考に、濃縮度分布を設定した。この濃縮度分布は、ウラン燃料設計の基本的な考え方（燃料集合体の内側と外側での中性子スペクトルの違いをふまえ、濃縮度を外側に向かって低く、コーナー部は最も低濃縮度にする）に基づいている。9×9燃料（A型）の濃縮度分布を参考にし、ガドリニアの燃焼が進んだ状態を想定して無限増倍率が1.30となるように濃縮度分布を変更した結果、平均濃縮度は□wt%となった。また、いずれの燃料においても燃焼が進むと無限増倍率は低下するため、使用済燃料として貯蔵される状態においては、より大きな保守性をもつと言える。モデルバンドルとしては9×9燃料（A型）を用いたが、いずれの燃料を用いてもこの大きな保守性に包絡され、燃料条件としては保守的な設定となる。

4.2 ラック条件

解析使用値としては実効増倍率が最も大きくなる公差の組み合わせの条件を用いる。具体的には、ラックの製作公差において、ラック板厚は吸収材の量が少なくなるよう小さくし、ラックピッチ及び内のは燃料がより接近するよう小さくした。東海第二発電所の使用済燃料プールは減速不足の体系であり、ラックピッチを小さくすることによってさらに減速不足となる影響も考えられるものの、ラックの製作公差は以下のとおり（公称値±公差）であり、最小値、公称値、最大値にて実効増倍率を計算した結果、それぞれ上述の選択によって最も保守的になることを確認した（第4-6～8図）。

ラック板厚 : □ mm ± □ mm

ラックピッチ : □ mm ± □ mm

ラック内のは : □ mm ± □ mm

ボロン濃度は保守的に製造範囲（□ wt%）の下限値を使用した。ラック配

列については、垂直方向は実際の燃料有効長3.71 mの有限体系を模擬し、水平方向は保守的に無限配列とした。さらに、燃料上下に30 cmの水反射体領域を設け、その外側の境界条件を真空とした。

なお、ラックは角管同士を溶接して製造しており、溶接部分には隙間やボロンの減損が生じる可能性があるが、実効増倍率の変化はわずかであり、未臨界性への影響はない。

以上より、ラック条件は保守的な設定となっている。

4.3 プール水条件

使用済燃料プール水条件のうち、水温については4 °Cの時に密度が大きく評価結果が最も厳しくなる。水温を0 °Cから100 °Cまで変化させても、水密度は0.95 g/cm³を下回らない。したがって、水密度について、0 g/cm³, g/cm³, g/cm³, g/cm³, g/cm³, g/cm³, g/cm³, g/cm³, 1.0 g/cm³の9点を評価した。

4.4 その他の条件

(1) チャンネルボックス

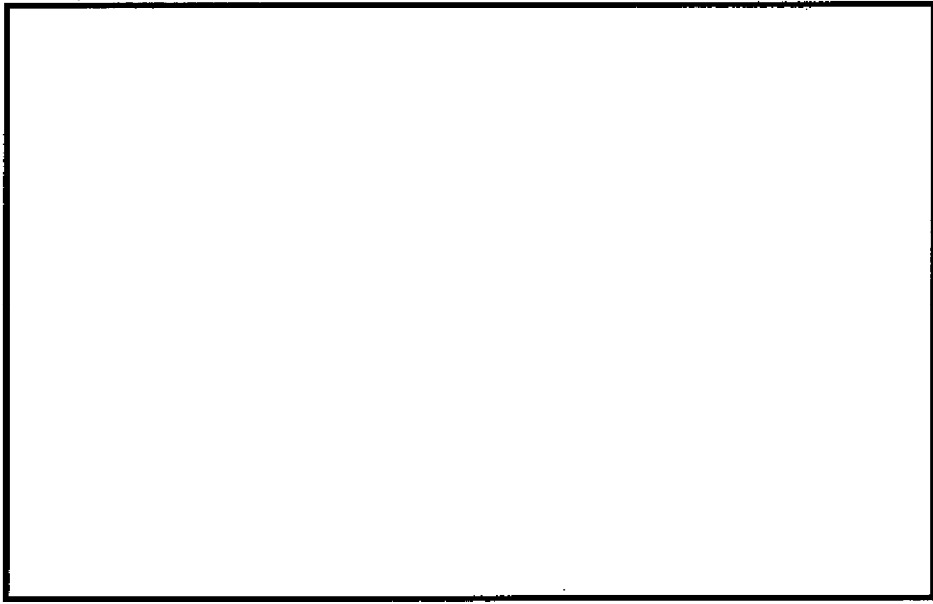
未臨界性評価において、チャンネルボックスは装着した状態を想定している。主要な作用として中性子の減速効果及び吸収効果があるが、チャンネルボックスを考慮することにより、代わりに水が存在する場合よりいずれの作用も小さくなる。減速効果が小さくなれば中性子増倍率は低くなり、中性子吸収効果が小さくなると中性子増倍率は高くなる。チャンネルボックスを装着した状態の吸収効果低減の影響が減速効果低減の影響より大きいため、チャンネルボックスを装着した状態の方が実効増倍率が高くなり、保守的である。

(2) ラック内偏心配置

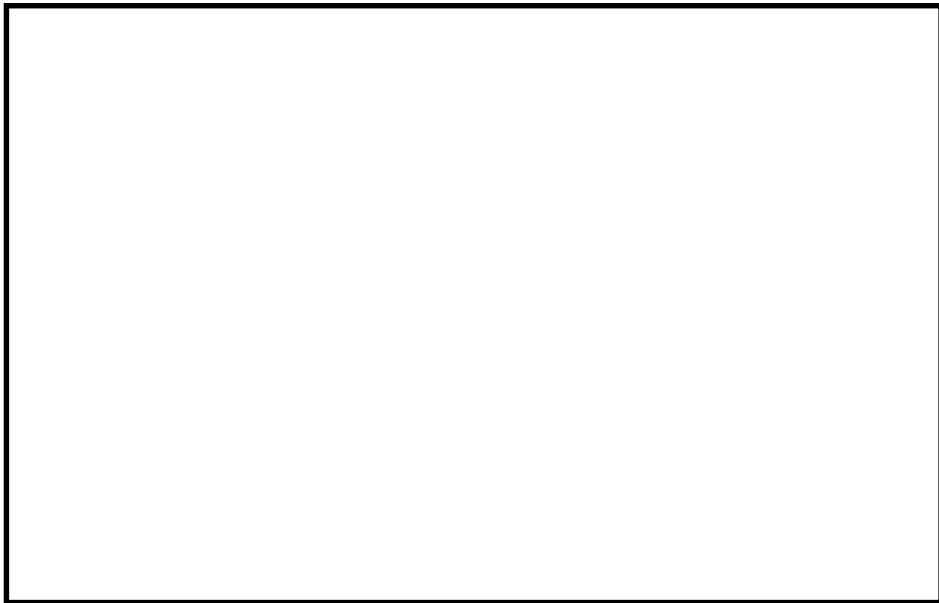
ラック内で燃料が偏心する場合を考慮し、1方向の角に燃料が偏って配置した場合について、中心に配置した場合と比較した結果、中心に配置した場合が最も実効増倍率が高い結果を得た。これは、ラック内で燃料が偏心すると、中性子の強吸収体であるB-SUSに接近することにより、燃料領域の熱中性子が減少するためであり、中心配置とした設定は保守的である。

4.5 燃料及びラック条件の保守性について

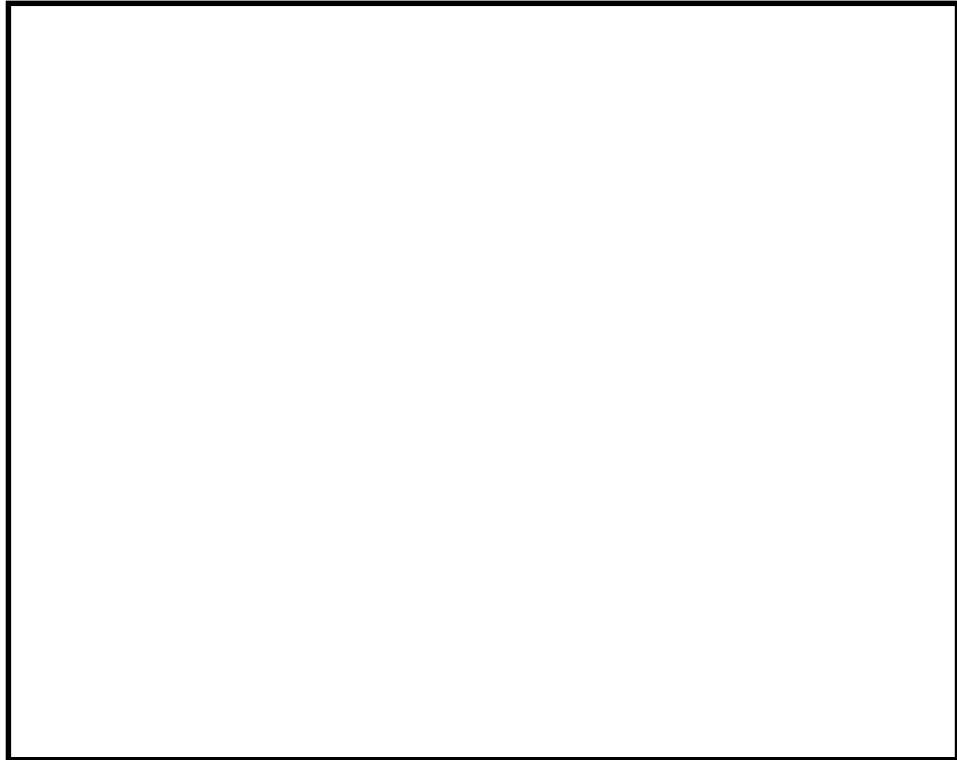
燃料条件、ラック条件及びその他の条件が保守的になるよう、上述のとおり設定し、実効増倍率が最も厳しくなる条件とした。



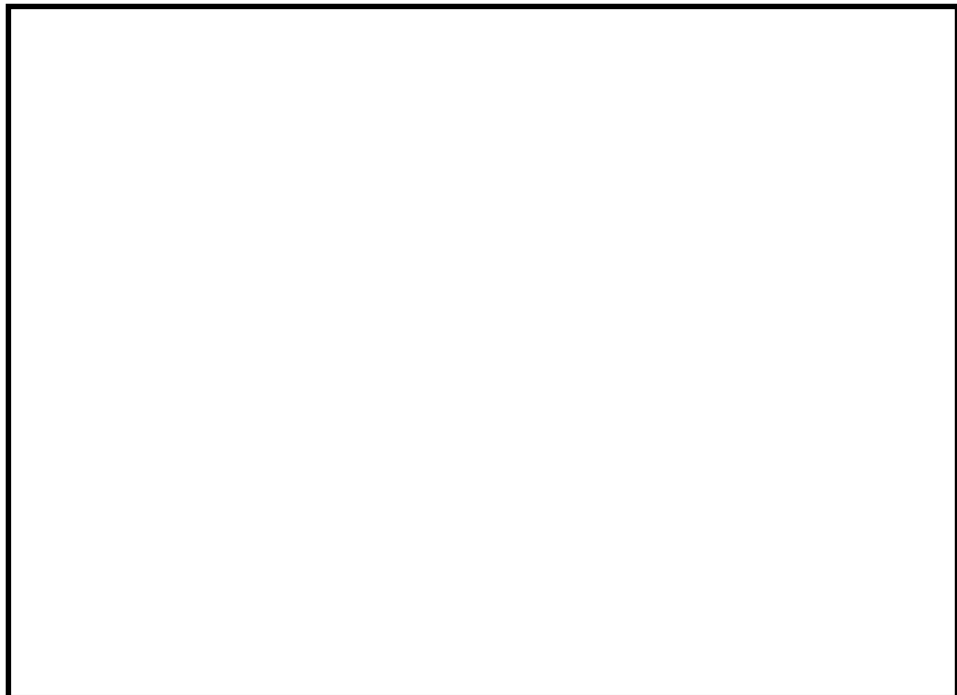
第4-1図 9×9 燃料 (A型) の冷温時無限増倍率



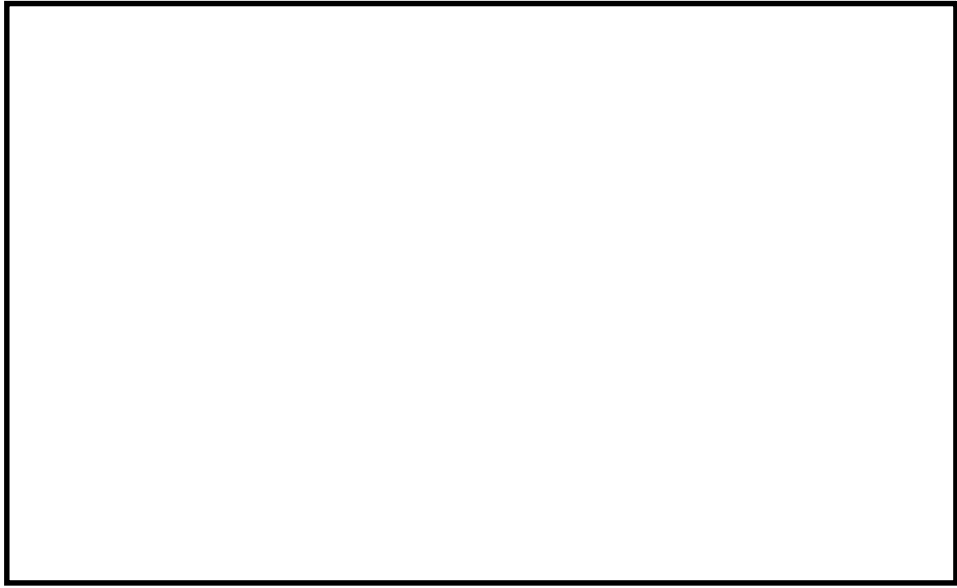
第4-2図 9×9 燃料 (B型) の冷温時無限増倍率



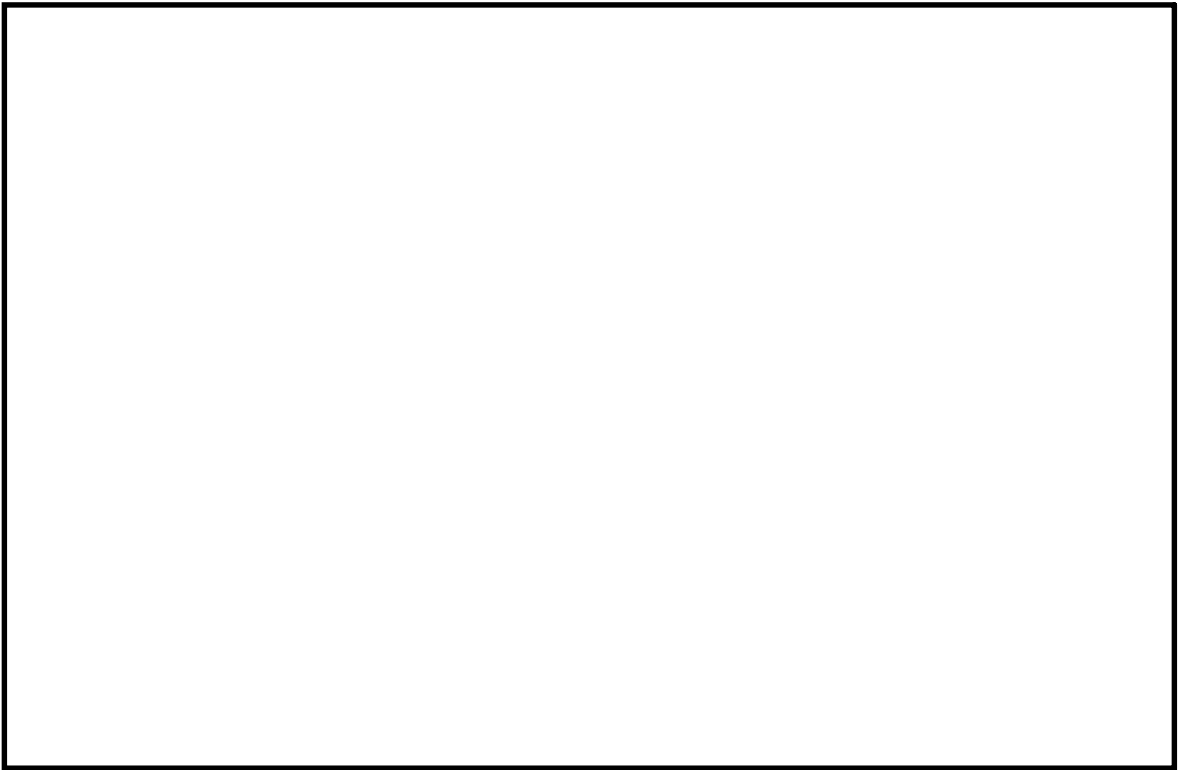
第4-3図 高燃焼度 8 × 8 燃料の冷温時無限増倍率



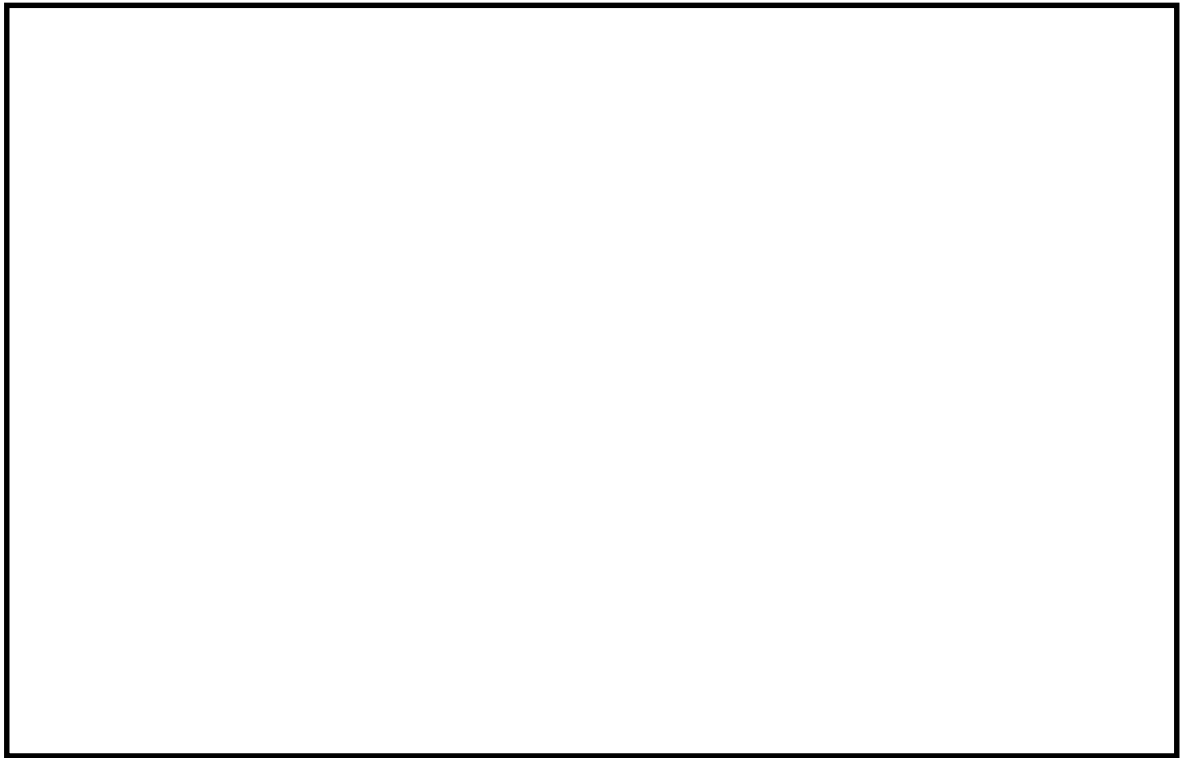
第4-4図 新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料の冷温時無限増倍率



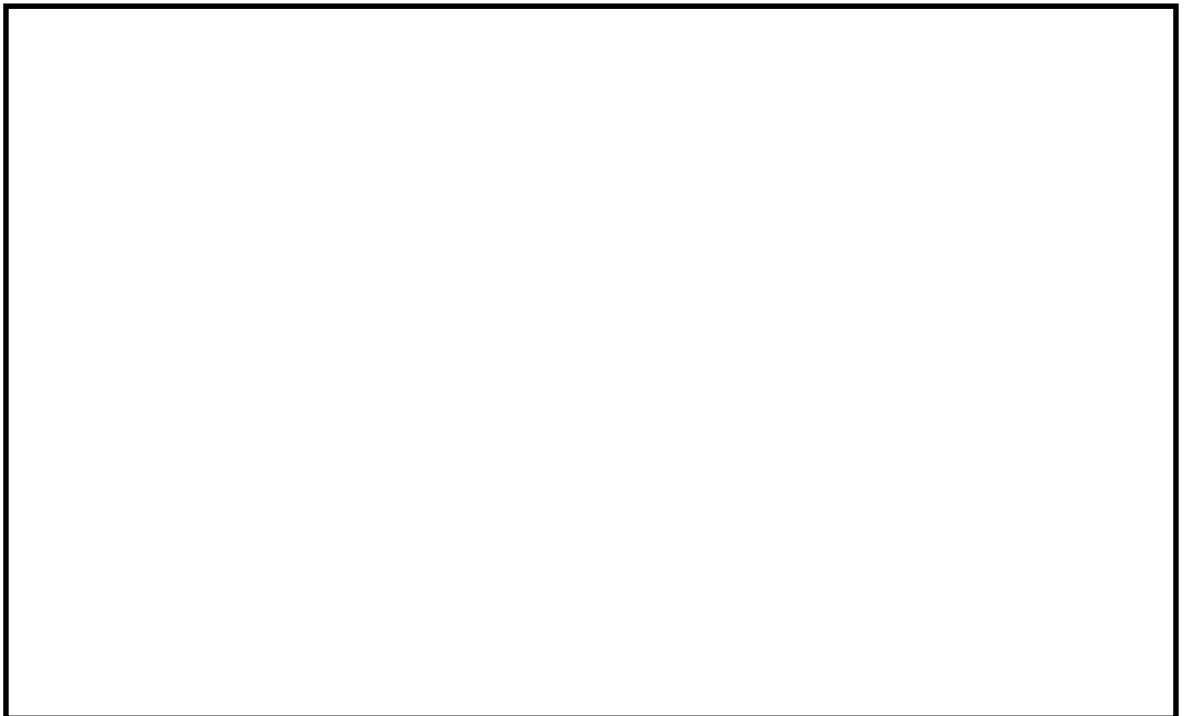
第4-5図 新型 8 × 8 燃料の冷温時無限増倍率



第4-6図 ラック板厚を変化させた場合の k_{eff} の変化



第4-7図 ラックピッチを変化させた場合の k_{eff} の変化



第4-8図 ラック内のりを変化させた場合の k_{eff} の変化

5. 未臨界性評価における不確定性

5.1 計算コード等の不確定性

計算コード等の不確定性は、計算コードの不確定性、燃料及びラック製作公差（ラック配置は実効増倍率が高くなる偏心配置）、統計誤差からなる。計算コードの不確定性は、実験値と計算値の平均的なずれ（平均誤差）が []、分散の95%信頼度から求められる標準偏差の上限に、95%の確率で実験結果が計算値を上回らない条件を考慮した値（95%信頼度×95%確率）が [] である。当該値は、米国PNLで実施されたPNL-3602臨界実験のうち、吸収材の種類や濃縮度等、燃料ラックの臨界解析で重要なパラメータ（第1表）がBWR燃料ラックの条件に近い32ケースを対象としたベンチマーク解析により評価済である。選定した臨界実験は、対象の実験の中ではBWRの使用済燃料プールの体系に近いものであり、サンプル数としても十分と考えられる。製作公差に基づく不確定性（燃料製作公差とラック製作公差（+燃料偏心配置影響））については、実効増倍率が最も高くなる体系を対象に解析を実施していることから、解析結果に含まれている。統計誤差 3σ （実効増倍率 [] に対し、統計誤差 3σ は []）についてもSCALEの解析結果として実効増倍率に加えた値を評価結果としている（第2表）。

5.2 KENO-V.a及びKENO-VIにおける評価モデルの違いと実際の評価結果の違いの影響

PWRではKENO-VIを用いて評価を実施しているが、東海第二ではKENO-V.aを用いている。SCALEを開発したORNLの文献ORNL/TM-2001/110^{註1}があり、それによると、V.aとVIのモデルの違いは、主に幾何形状モデルであるが、臨界計算における解析結果（ $\approx 100\% \Delta k$ ）のバージョン間の差異は $0.1 \sim 0.2\% \Delta k$ と小さく、統計誤差 $0.002 \sim 0.004$ と比較して有意でない。

5.3 評価方法

東海第二の使用済燃料プール未臨界性評価条件としては、ラック製作公差や偏心等の厳しい条件を用いて実効増倍率を計算するのに対し、PWRでは公称値により実効増倍率を計算した結果に、不確定性として、製作公差等それぞれのばらつきに基づく実効増倍率の誤差を未臨界性評価上厳しくなる側に統計的に加算する。

PWRでは公称値に基づく実効増倍率に、不確定性（計算コードの不確定性、燃料及びラック製作公差（燃料材の直径、密度等比較的詳細な項目に及ぶ製作公差。ラック配置は未臨界度が厳しくなる偏心配置）、統計誤差）を考慮し、実効増倍率 0.98 以下で評価している。一方、BWRでは厳しい条件に基づく実効増倍率に、コードの不確定性を含まない等、誤差項目について比較的詳細に扱っていないが、統計誤差については標準偏差の3倍を考慮した上、 0.95 以下で評価している^{註2}。また、「臨界安全ハン

ドブック」^{注3}においては「モンテカルロコードを用いた場合には、計算された平均増倍率に標準偏差の三倍の値を加えた値を推定臨界下限増倍率または0.95と比較し、未臨界を判定する。」とされている。

注1 Validation and Comparison of KENO V.a and KENO-VI

注2 ANSI/ANS-57.2-1983 Design Requirements for LWR SF Storage Facilities at Nuclear Power Plants

注3 「臨界安全ハンドブック第二版」日本原子力研究所, 1999年

第1表 燃料ラックの臨界解析で重要なパラメータ (抜粋)

--

第2表 未臨界性評価における不確定性評価結果

臨界計算上の不確定性評価項目			不確定性
計算コードの不確定性	平均誤差	Δk	<input type="text"/>
	平均値の不確定性	ε_c	<input type="text"/>
製造公差に基づく 不確定性	燃料製作公差	ε_f	—※1
	ラック製作公差 (+燃料偏心配置影響)	ε_r	—※1
	統計誤差※2	3σ	<input type="text"/>

※1：炉心装荷時無限増倍率1.30の保守性の中に含まれると想定

※2：標準偏差の3倍

注) 一般に実効増倍率は $k_{eff+\varepsilon} = k_{eff} + \Delta k + \sqrt{((\varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_f)^2 + (\varepsilon_r)^2 + (3\sigma)^2)}$ と計算できるが、 Δk 及び ε_c は0としている。 k_{eff} の計算の入力に炉心装荷時無限増倍率1.30のほか、ラック製作公差を実効増倍率が保守的になるよう見込み、※2のように標準偏差の3倍を考慮して0.95以下を確認している。

使用済燃料ラックセル中のボロンの減損割合の評価

1. 概要

中性子の強吸収体である使用済燃料ラックセル中のボロン (^{10}B) は供用期間中に中性子を吸収し、中性子の吸収体としての効果が低下することが考えられるが、供用期間及び供用期間後の使用済燃料搬出までの期間を想定した場合における使用済燃料ラックセル中の ^{10}B の減損率を評価する。

2. 評価方法

使用済燃料ラックセル中の ^{10}B の中性子吸収減損率は以下の式により評価される。

$$\begin{aligned} & (^{10}\text{B原子1個あたりの中性子吸収減損率}) \\ & = (\text{中性子照射量}) \times (^{10}\text{Bの吸収反応断面積}) \end{aligned}$$

評価にあたっては、類似の評価事例として、乾式キャスクのバスケット（燃料を収納する部分）における評価事例をもとに以下のとおり評価した。

乾式キャスクにおける60年間の供用期間中に受ける放射線照射量は $10^{14} \sim 10^{16} \text{ n/cm}^2$ と評価されている^{注1}。

ここで、 ^{10}B の減損率を安全側に評価するため、放射線照射は全て熱中性子によるものとし、中性子照射量を $1 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ として評価する。なお、 ^{10}B の吸収反応断面積は3838 barn^{注2}を使用する。

以下のとおり、乾式キャスクにおける供用期間中（60年間）の ^{10}B 原子1個あたりの中性子吸収減損率は約0.004 %とごく僅かである。

$$(1 \times 10^{16}) \times (3838 \times 10^{-24}) = 3.84 \times 10^{-5}$$

また、使用済燃料搬出までの期間を想定し評価期間を仮に70年間とした場合でも以下のとおり、中性子吸収減損率は約0.004 %とごく僅かである。

$$(1 \times 10^{16}) \times (70/60) \times (3838 \times 10^{-24}) = 4.48 \times 10^{-5}$$

3. 評価結果

以上のとおり、乾式キャスクにおいて、評価期間を60年間及び70年間とした場合で評価しても、 ^{10}B の減損率は約0.004 %であり、ごく僅かである。なお、使用済燃料ラックセルでは水による中性子の減速・吸収効果があるため、中性子束は乾式キャスクよりも減少することが見込まれる。

したがって、使用済燃料ラックセルにおいても同様に ^{10}B の中性子吸収体の効果低下は

無視できるほど小さいと考えられる。

注1 リサイクル燃料備蓄センター その他の安全対策について(長期貯蔵に対する考慮),
平成22年2月, 原子力安全・保安院

注2 アイソトープ手帳11版 (公益財団法人日本アイソトープ協会発行)