

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-03-0007_改 1
提出年月日	2021年 4月 1日

VI-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

2021年 4月

東北電力株式会社

目 次

1. 概 要	1
2. 基本方針	1
3. 使用済燃料プール水漏えい時の未臨界性評価	2
3.1 評価の基本方針	2
3.2 計算方法	3
3.2.1 計算体系	3
3.2.2 計算条件	3
3.3 計算結果	3
添付	
未臨界性評価の燃料条件	8

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第 26 条及び第 69 条並びにそれらの「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」（以下「解釈」という。）に基づき、燃料体又は使用済燃料（以下「燃料体等」という。）が臨界に達しないことを説明するものである。

なお、技術基準規則第 26 条の要求事項に変更がないため、技術基準規則第 26 条の要求事項に係る燃料取扱設備、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の説明に関しては、今回の申請において変更は行わない。

今回は、技術基準規則第 69 条の要求事項に基づき、使用済燃料貯蔵設備（以下「使用済燃料プール」という。）の水位が低下した場合において、燃料体等が臨界に達しないことを説明する。

2. 基本方針

使用済燃料プールは、燃料プール冷却浄化系、残留熱除去系の故障等により使用済燃料プールの冷却機能が喪失及び燃料プール補給水系の故障により使用済燃料プールの注水機能が喪失又は使用済燃料プールに接続する配管の破損等により使用済燃料プール水の小規模な漏えいその他要因により当該使用済燃料プールの水位が低下した場合（以下「小規模漏えい時」という。）に、技術基準規則第 69 条第 1 項及び解釈により施設が要求されている燃料プール代替注水系による冷却及び水位確保により使用済燃料プールの機能（燃料体等の冷却、水深の遮蔽能力）を維持するとともに、実効増倍率が最も高くなる冠水状態においても臨界を防止できる設計とする。

また、使用済燃料プールは、使用済燃料プールからの大量の水の漏えいその他の要因により、当該使用済燃料プールの水位が異常に低下した場合（以下「大規模漏えい時」という。）に、技術基準規則第 69 条第 2 項及び解釈により施設が要求されている燃料プールスプレイ系（使用済燃料プールへのスプレイ）にて、使用済燃料貯蔵ラック（以下「ラック」という。）及び燃料体等を冷却し、臨界にならないよう配慮したラック形状において、スプレイや蒸気条件においても臨界を防止できる設計とする。

なお、上記の使用済燃料プールの冷却機能喪失時、小規模漏えい時及び大規模漏えい時においては、燃料プール代替注水系（燃料プールスプレイ系）の他、同等の機能を持つ常設スプレイヘッドも使用する。

このため、小規模漏えい時及び大規模漏えい時の使用済燃料プールの未臨界性評価の評価基準は、使用済燃料プール水温、ラック製造公差、ラックボロン濃度、ラックセル内燃料配置それぞれについての不確定性を考慮し、最も結果が厳しくなる状態で、いかなる一様な水密度であっても実効増倍率が 0.95 以下となる設計とする。

3. 使用済燃料プール水漏えい時の未臨界性評価

3.1 評価の基本方針

使用済燃料プールで小規模漏えいが発生した場合、燃料プール代替注水系（燃料プールのスプレー系）による注水により放射線の遮蔽が維持される水位を確保でき、あわせて燃料有効長頂部の冠水状態を維持できる。また、使用済燃料プールに貯蔵される燃料体等の冷却が可能である。なお、放射線の遮蔽が維持される水位を確保できることについては、添付書類「VI-1-3-5 使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書」にて説明し、燃料体等の冷却が可能であることについては、添付書類「VI-1-3-4 使用済燃料貯蔵槽の冷却能力に関する説明書」にて説明する。

燃料プール代替注水系（燃料プールのスプレー系）による注水により燃料体等を冷却及び放射線の遮蔽が維持される水位を確保することで、使用済燃料プールの機能（燃料体等の冷却、水深の遮蔽能力）が維持される。

放射線の遮蔽が維持される水位が確保された状態で使用済燃料プール水の温度が上昇して沸騰状態となり、水密度が低下した場合、燃料体等は水密度の低下とともに、減速された中性子が燃料領域で核分裂反応に寄与する割合が低下する設計としているため、使用済燃料プール全体の実効増倍率は、水密度が高い冠水時に比べて低下する。このため、小規模漏えい時の使用済燃料プールの未臨界性評価は、実効増倍率が最も高くなる冠水状態で臨界を防止できることを確認する。

また、使用済燃料プールで大規模漏えいが発生した場合、燃料プールのスプレー系（使用済燃料プールへのスプレー）により、使用済燃料プール内の燃料体等の著しい損傷の進行を緩和し、できる限り環境への放射性物質の放出を低減するため、使用済燃料プール全面にスプレーを実施し、ラック及び燃料体等を冷却する。なお、使用済燃料プール全面にスプレーを実施し、ラック及び燃料体等を冷却することについては、添付書類「VI-1-3-4 使用済燃料貯蔵槽の冷却能力に関する説明書」にて説明する。

大規模漏えい時の使用済燃料プールの未臨界性評価は、燃料プールのスプレー系（使用済燃料プールへのスプレー）にて、ラック及び燃料体等を冷却し、臨界にならないよう配慮したラック形状において、スプレー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ため、使用済燃料プール全体の水密度を一様に $0.0\sim 1.0\text{g/cm}^3$ まで変化させた条件で実効増倍率の計算を行う。この水密度の条件により、小規模漏えい時の冠水状態で臨界を防止できることも確認する。

実効増倍率の計算には、3次元モンテカルロ計算コード KENO-V.a を内蔵した SCALE6.1 を使用し、その解析フローチャートを図 3-1 に示す。なお、評価に用いる解析コード SCALE システムの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3.2 計算方法

3.2.1 計算体系

計算体系としては、水平方向及び垂直方向に無限に広がりを持ち、体系からの中性子の漏れがない体系とする。計算体系を図 3-2 に示す。

女川原子力発電所第 2 号機の使用済燃料プールでは、ボロン添加ステンレス鋼（以下「B-SUS」という。）製ラックセルに燃料を貯蔵する。使用済燃料プールには、通常は限られた体数の新燃料と照射済燃料を貯蔵するが、臨界設計では、新燃料及びいかなる燃焼度の照射済燃料を貯蔵しても十分安全側の評価を得るように、炉心装荷時の無限増倍率が 1.30 となる燃料を用いて評価している。また、使用済燃料プール水温、ラック製造公差、ボロン添加率、ラックセル内燃料配置それぞれについて最も結果が厳しくなる状態で評価している。

3.2.2 計算条件

評価の計算条件は以下のとおりであり、詳細を表 3-1 に示す。

- (a) 燃料の平均濃縮度は wt%（炉心装荷時無限増倍率 1.30 となる燃料）とする（添付参照）。
- (b) 水の密度は、 $0.0 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$ とする。
- (c) ボロン濃度の解析使用値は、製造公差下限値の wt% とする。

以下の計算条件は公称値に正負の製造公差を未臨界性評価上厳しくなる側に不確定性として考慮するものである。なお、ラックセル内での燃料配置については、実効増倍率が最も高くなるラック中心に向かう偏心配置とする（図 3-2）。ラック中心に向かう偏心配置の場合に実効増倍率が最も高くなるのは、燃料が全体的にラック中心に向かって偏心することにより燃料同士の距離を最も小さくする配置となるため、核分裂性物質集中による反応度上昇の効果が偏心により核分裂性物質が強吸収体のボロンに接近して反応度が下がる効果より大きいためである。

- (d) ラックピッチ
- (e) ラック厚さ
- (f) ラック内のり

3.3 計算結果

使用済燃料プール水漏えい時の未臨界性評価結果を図 3-3 に示す。統計誤差 3σ (0.001) を加えても実効増倍率は最大で 0.924 となり、0.95 以下を満足している。

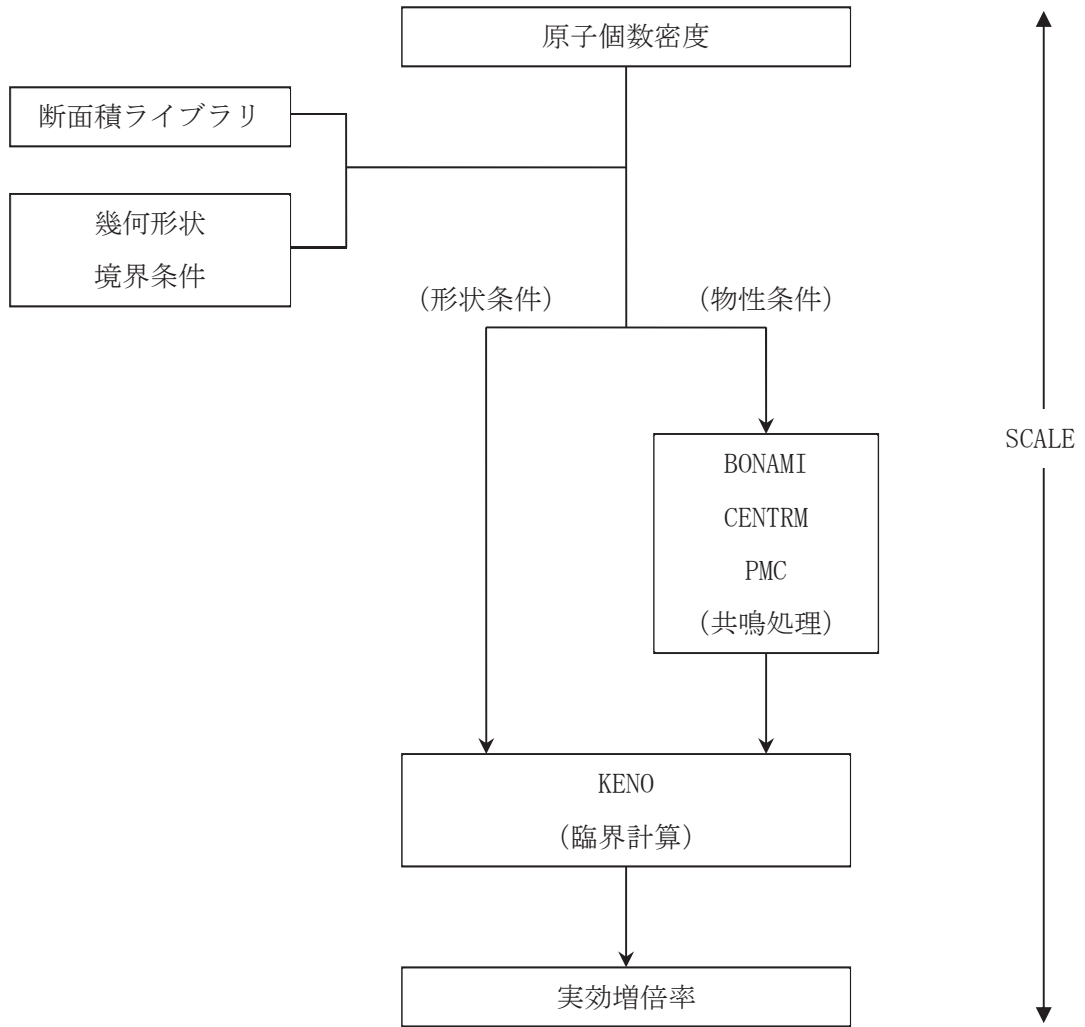


図 3-1 解析フローチャート

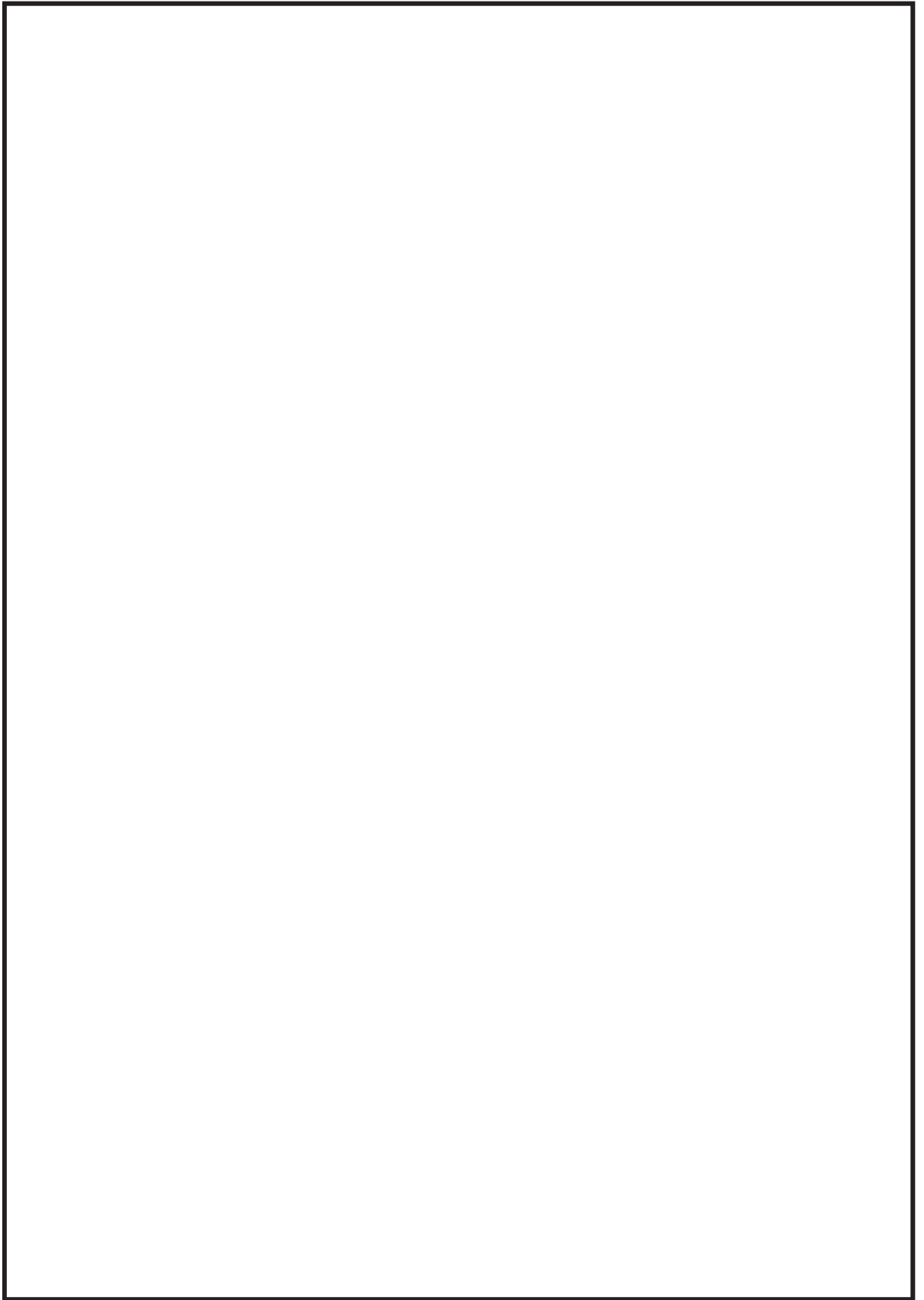


図 3-2 使用済燃料プールの未臨界性評価の計算体系

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 3-1 未臨界性評価の基本計算条件

	項目	仕様
燃料仕様	燃料種類	9×9 燃料 (A 型)
	²³⁵ U 濃縮度	<input type="text"/> wt% *1
	ペレット密度	理論密度の約 97%
	ペレット直径	0.96 cm
	被覆管外径	1.12 cm
	被覆管厚さ	0.71 mm
プール水	水密度	0.0~1.0 g/cm ³
使用済燃料貯蔵ラック	ラックタイプ	角管型
	ラックピッチ (長辺方向)	<input type="text"/> mm
	(短辺方向)	<input type="text"/> mm
	材料	ボロン添加ステンレス鋼
	ボロン濃度	<input type="text"/> wt% *2
	厚さ	<input type="text"/> mm
内のり (長辺方向)	<input type="text"/> mm	
(短辺方向)	<input type="text"/> mm	

注記 *1 : 未臨界性評価用燃料集合体 ($k_{\infty}=1.30$, 未燃焼組成, Gd なし)

*2 : ボロン濃度の解析使用値は, 製造公差下限値とする。

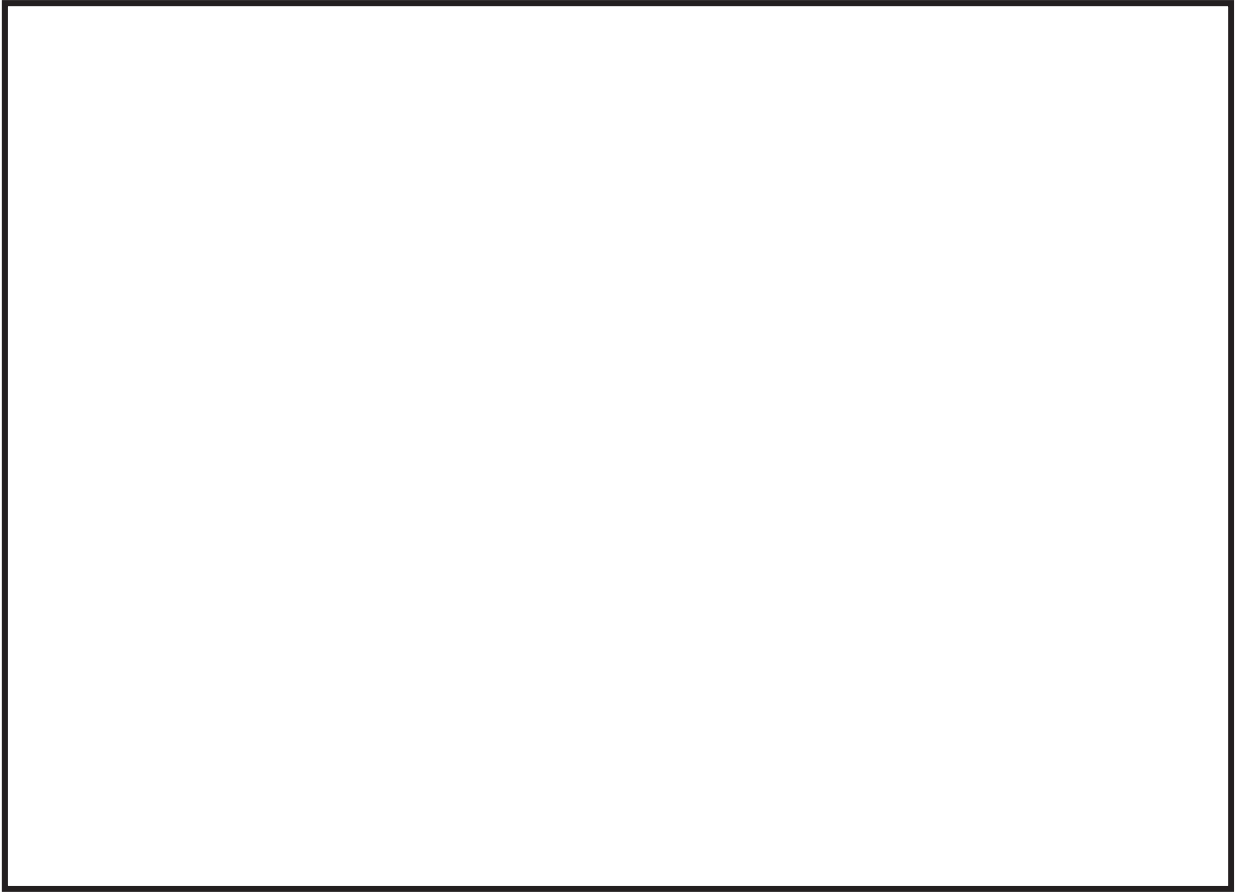


図 3-3 実効増倍率の水密度依存性

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

未臨界性評価の燃料条件

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や燃料製造公差を考慮しても1.30を超えることはない。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ガドリニアの燃焼が進んだ状態から、さらに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、燃料条件は保守的である。