

令和 5 年 6 月 21 日
日本原子力研究開発機構
臨界ホット試験技術部

使用前事業者検査の受検炉心の候補について

STACY の使用前事業者検査の受検炉心の候補検討にあたり、設工認段階の予備解析の結果から、安全板の効果が小さくなった（安全板挿入時の中性子実効増倍率が大きくなった）炉心の評価結果を表 1 に示す。なお、用語の概要について資料末の補足に示す。

予備解析の結果から、おおむね低水位のほうが安全板の効果が小さくなる傾向が示された。一方、臨界水位が許可範囲の下限（40 cm）又は上限（140 cm）に近い炉心は、水位による臨界調整の裕度が小さくなる場合があることから、特に初回炉心での臨界探査には適さず、製作公差、解析誤差、解析精度を考慮した臨界調整のための適切な裕度を加味して臨界水位を設定する必要がある。また、デブリ構造材模擬体の装荷本数については、臨界実験装置が未知炉心に対する検証を目的とする運転を前提としていることを考慮すると、十分な実測データが得られていない段階で、製作する最大数を装荷することは望ましいことではなく、実験検証の一部として段階的に本数を増やしていくべき¹と考えているが、令和 5 年 5 月 31 日の規制庁面談を踏まえると、受検炉心の候補は表 2 のとおりとなる。

まず、受検炉心の固定条件として、

- ・ 格子板の格子間隔について、棒状燃料本数が 400 本以下に限る場合は棒状燃料本数が比較的少なくても済む 1.50cm（最適減速条件）、棒状燃料本数が 400 本超の場合は原子炉停止余裕がより厳しくなる 1.27cm（減速不足条件）の 2 ケースとする。

次に、受検炉心の可変条件として、

- ・ 臨界水位は、水位による臨界調整の反応度補償効果を確保できる範囲とする。（別紙 1 参考資料を参照。）
- ・ 棒状燃料本数については、予備解析において臨界となった棒状燃料本数を参考として定める。実際の本数は、受検前の詳細解析及び臨界近接の結果によって調整する。

これらの受検炉心の候補の中から使用前事業者検査の初回炉心を選定し、設工認添付書類「炉心の核的設計計算書作成基本方針」に示した方針に沿って、保安規定に定めた手順に従い運転開始前に計算解析を行い、運転において炉心核特性が核的制限値内にあること

¹ 平成 30 年 1 月 31 日付け許可を受けた原子力科学研究所原子炉設置変更許可申請書 STACY 編（以下「原子炉設置変更許可書」という。）添付書類八 第 3.3 節 (1)

「実験計画の作成に当たり、事前計算解析の間違ひによる核的制限値からの逸脱を防止するため、未知の炉心構成における条件の変更は、臨界水位にあつては高水位から低水位に、実験用装荷物にあつてはその反応度効果の小さいものから大きなものに変化させていく。」

を実測することで、機器の設計（計測制御系統及び原子炉停止系統等のハード）と当該手順（保安規定に定める実験計画、炉心構成、運転手順等のソフト）があいまって²、試験炉技術基準規則第10条の要件（原子炉の反応度を安全かつ安定的に制御できること）を確認することができる。その後、同様の手順に従い、実験計画で示す計算解析の結果を裏付け又は修正しながら実験運転を進めることで、STACY を安全に運転することができる。現有の棒状燃料 400 本のほか新規に調達する棒状燃料を用いた最大 900 本の炉心においても同様である。

² 使用前事業者検査の確認事項の一つ、原子炉等規制法第28条第2項第1号「工事が設工認に従って行われたものであること」については、棒状燃料や格子板、実験用装荷物等の工事（製作）は個々に材料検査、寸法検査、単体及び系統での機能検査（動作試験）等によって確認する。他方、それら装荷物を組み合わせた炉心構成は「工事」ではなく構造材の「配置」（試験炉保安規定審査基準 p.3 参照）であって、その炉心構成手順が守られていることを品質マネジメントシステム検査で確認する。

もう一つの同条項第2号「技術上の基準に適合するものであること」については、試験炉技術基準規則第10条（原子炉施設の機能）の前段「通常運転時において原子炉の反応度を安全かつ安定的に制御できること」に対し、計測制御系統施設の核計装、反応度制御設備（給水ポンプ、排水弁等による炉心水位制御）、反応度制御回路（インターロック）等及びそれらの警報監視・操作設備（制御室）によって、原子炉が安全かつ安定して運転できることを確認する。また、同条の後段「運転時の異常な過渡変化時においても《中略》原子炉の反応度を制御することにより原子核分裂の連鎖反応を制御できる能力を有すること」については、計測制御系統施設の安全保護回路及び反応度制御設備（排水弁、安全板装置）並びに機能検査（模擬入力による動作試験）により原子炉がスクラムすることを確認する。

表1 安全板挿入時の中性子実効増倍率が最大となった炉心

No.	格子間隔 (cm)	コンクリート 模擬体(本)	鉄 模擬体(本)	配列 パターン	臨界水位 (cm)	棒状燃料 (本)	備考
現有の棒状燃料 400 本以下で臨界となる炉心							
①	1.50	25 [†]	0	1 of 4	40	363	400 本以下 で最大値
②	1.50	0	69	1 of 4	110	363	
許可上の最大棒状燃料 900 本以下で臨界となる炉心							
③	1.27	69	0	4 of 4	70	542	
④	1.27	0	69	1 of 4	70	590	900 本以下 で最大値

†：模擬体本数が最大 69 本とまらない理由について別紙 2 に示す。

表2 受検炉心の選定候補

No.	格子間隔 (cm)	コンクリート 模擬体(本)	鉄 模擬体(本)	配列 パターン	臨界水位 [※] (cm)	棒状燃料 [※] (本)	備考
現有の棒状燃料 400 本以下で臨界となる炉心							
①'	1.50	25	0	1 of 4	40～50	363～311 [*]	
②'	1.50	0	69	1 of 4	90～140	377～346 [*]	
許可上の最大棒状燃料 900 本以下で臨界となる炉心							
③'	1.27	69	0	4 of 4	55～90	592～490 [*]	
④'	1.27	0	69	1 of 4	60～80	637～569 [*]	

※臨界水位及び棒状燃料の装荷本数は可変条件であり、臨界近接の結果により決定する。

* 本数の大小が逆であるのは、臨界水位の大小と合わせたため（臨界水位が増大すると本数は減少する。）。

以上

参考 水位変化による反応度調整幅を確保する考え方

デブリ模擬炉心の臨界調整に係る反応度の調整幅として考慮すべき要素 (1)デブリ構造材模擬体の製作公差、(2)解析誤差の 2 種類を検討した。なお、評価に際しては、実効遅発中性子割合 β_{eff} は 0.007 とし、有効数字 1 桁で検討する。

(1) デブリ構造材模擬体の製作公差

デブリ構造材の模擬体の製作公差については、令和 5 年 3 月 24 日第 478 回審査会合資料 1-3 においてコンクリートの密度及び水分率についての感度解析を実施したところ、最大でも $\pm 0.01 \Delta k/k$ を超えることはなかった。よって、コンクリートのデブリ構造材模擬体の製作公差の調整幅を 3\$ とする。

$$(\pm 0.01 \times 2 \rightarrow 0.02 \rightarrow 0.02/0.007=2.9\$ \rightarrow 3\$)$$

また、鉄のデブリ構造材模擬体はコンクリートに比して不確かさが小さく ± 0.002 程度であるため、調整幅を 1\$ とする。

$$(\pm 0.002 \times 2 \rightarrow 0.004 \rightarrow 0.004/0.007=0.6\$ \rightarrow 1\$)$$

(2) 解析誤差

解析誤差として、モンテカルロ計算に伴う不確かさを考慮する。予備解析の不確かさは 1 標準偏差 (1σ) が最大でも $0.0008 \Delta k$ であった。 3σ を考慮した場合、解析誤差の調整幅は 0.7\$ となる。

$$(\pm 0.0008 \times 2 \times 3 \rightarrow 0.0048 \rightarrow 0.0048/0.007=0.69\$ \rightarrow 0.7\$)$$

デブリ模擬炉心の臨界調整に係る反応度の調整幅の大きさはコンクリート模擬体について $(3\$ + 0.7\$) = 3.7\$ \rightarrow 4\$$ とし、調整幅は $\pm 2\$$ とする。また、鉄模擬体については $(1\$ + 0.7\$) = 1.7\$ = 2\$$ とし、調整幅は $\pm 1\$$ とする。

なお、表 2 の臨界水位の変化幅は、水位反応度係数が修正一群理論に従うものとして上記の調整幅に合わせて設定し³、5 cm 単位に丸めたものである。変化幅の具体的な計算方法を別紙 2 に示す。

³ 令和 5 年 3 月 24 日第 478 回審査会合資料 1-3 表参-2 のうち格子間隔 1.50 cm の基本炉心のパラメータを使用し、同表下部の式を積分して計算。なお、同資料図参-3 のとおり、どの炉心でも水位反応度係数のグラフはほぼ同じである。

参考 資料 ST-17-1 表 2 の臨界水位幅の算出の方法

資料 ST-17-1 表 2 「受検炉心の選定候補」においては、臨界水位に反応度調整のための変化幅を設けている。本資料では、当該変化幅の計算方法を示す。

別紙「参考 水位変化による反応度調整幅を確保する考え方」に示すとおり、反応度の調整幅は、コンクリート模擬体を使用する炉心において $\pm 2\$=4\$$ 幅、鉄模擬体を使用する炉心において $\pm 1\$=2\$$ 幅とする。臨界水位の変化幅は、水位反応度係数が修正一群理論に従うものとして反応度の調整幅に合わせて計算し、5 cm 単位に丸めて設定する。

修正一群理論[1]において水位反応度係数（単位水位変化当たりの反応度効果） $d\rho/dh$ は次の式で表される。ここで、数値フィッティングにより算出される定数 C 及び λ は炉心の種類毎の値であるがどの炉心でも大差はなく、 $d\rho/dh$ はほぼ臨界水位によって定まることが知られている。

$$\frac{d\rho}{dh} = \frac{C}{(h + \lambda)^3} \quad (1)$$

以下では、

ρ : 反応度(\$)

h : 臨界水位(cm)

C: 変換定数 7.7×10^4 (\$\cdot \text{cm}^2\$)

λ : 外挿距離（炉心外挿境界で中性子束がゼロとなる外挿幅）12.1 (cm)

として計算する。

式(1)を臨界水位 h_0 から変更後水位 h_1 まで積分することで、水位変化による反応度効果を計算できる。積分した式を以下に示す。

$$\rho = \frac{C}{2} \left(\frac{1}{(h_0 + \lambda)^2} - \frac{1}{(h_1 + \lambda)^2} \right) \quad (2)$$

式(2)を用いて算出した、反応度幅が 4.0\$ 又は 2.0\$ となる (h_0, h_1) の組合せを次表に示す。なお、基準となる臨界水位 h_0 は表 1 の臨界水位を使用したか、炉心①'においては、許可上の下限水位である 40.0cm を基準としてその上方にのみ変化させた。

表別 2 - 1 水位の変化幅の計算結果

No.	水位 (丸め前) (cm)		反応度幅 (\$)	水位 (丸め後) (cm)	
	h_0	h_1	ρ	h_0	h_1
①'	40.0	49.6	4.0	40	50
②'	91.4	144.3	2.0	90	140
③'	58.4	90.1	4.0	55	90
④'	63.6	78.4	2.0	60	80

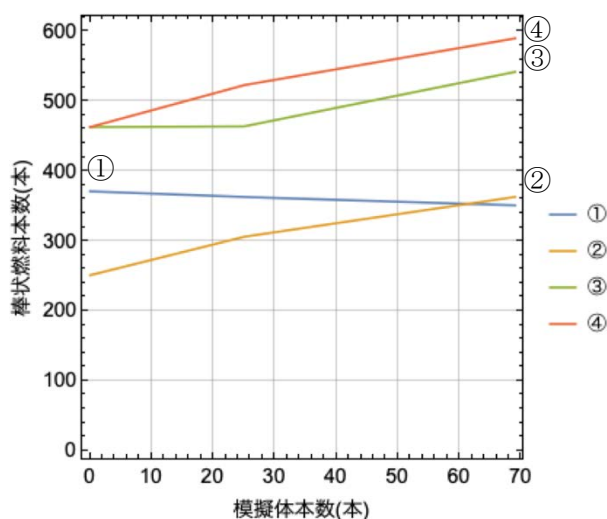
参考文献

- [1] ラマーシュ、「原子炉の初等理論」、吉岡書店、(1974)

参考 棒状燃料 400 本以下で中性子実効増倍率が最大となったコンクリート模擬体 25 本の炉心についての補足

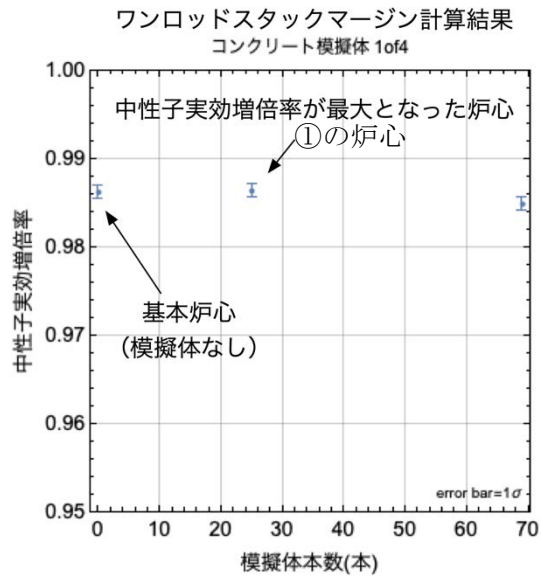
表 1 において中性子実効増倍率が最大となった炉心は、①を除き構造材模擬体本数が最大 (69 本) の炉心であった。この結果は、事前解析により得られている、構造材模擬体の本数が増大し、炉心が大きくなるほど安全板の効果が小さくなる (安全板の大きさと挿入位置が固定のため、炉心が大きくなると安全板による中性子吸収範囲が相対的に小さくなるため。) 傾向⁴と整合したものである。

ただし、下図に示すように、①の条件 (格子間隔 1.50 cm、棒状燃料 400 本以下、コンクリートデブリ構造材模擬体使用) は②～④と傾向が異なり、模擬体本数が増大するほど臨界に要する棒状燃料の本数が減少している。これにより、①の条件においては、中性子吸収と中性子減速に関し、模擬体の本数が増加する効果と、棒状燃料本数が減少する効果が相殺し合うことが考えられる。実際に安全板の効果を計算すると、図別 3-2 に示すように、デブリ構造材模擬体の本数 25 本以下においては安全板の効果は基本炉心 (模擬体を用いない炉心) と違いがない (違いは 0.1 σ 未満)。したがって、①の条件においては、デブリ構造材模擬体の本数を、0～25 本の間で任意に選択して差し支えない。表 2 においては、典型的な挿入本数として選択した 25 本をそのまま使用している。



図別 3-1 模擬体本数と棒状燃料本数の関係

⁴ 資料 ST-13-6 (p.7) 「3.(1)安全板の効果が小さくなる炉心」参照。本資料末の補足情報(1)に抜粋を示す。



図別 3-2 コンクリート模擬体のワンロッドスタックマージン計算結果
(格子間隔 1.50 cm、臨界水位 40 cm、1 of 4 配列)

以上

補足 STACY の炉心構成に係る解析について

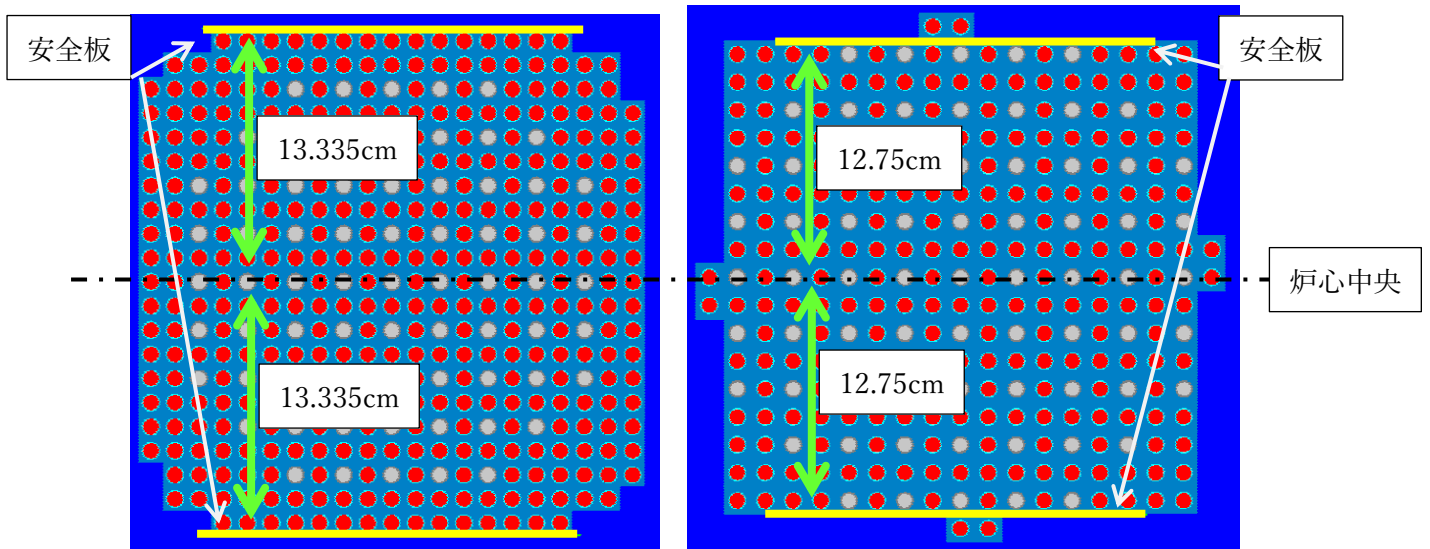
定常臨界実験装置 STACY は棒状燃料を炉心タンクの格子板に配列することによって炉心を構成する。臨界実験装置の特徴として炉心構成の自由度が高いため、実際の運転に先立ち、解析により核特性を確認する手順が保安規定に定められている。デブリ模擬炉心に係る設工認の審査会合（令和 5 年 1 月 30 日及び 3 月 24 日）での指摘に従い、デブリ構造材模擬体を使用した炉心において安全板の効果が小さくなる炉心の探索を行った。解析の主要なパラメータは以下のとおり。

パラメータ	変化範囲	備考
棒状燃料本数	50~900 本	²³⁵ U 濃縮度 5wt%のピンタイプの燃料。外径 0.95 cm。許可上、最大 900 本まで装荷可能だが、現有の燃料は 400 本である。よって、受検炉心は 400 本以下、900 本以下に分けて検討する。
デブリ構造材模擬体（鉄）	0~70 本	本設工認で製作する実験用装荷物。棒状燃料と混ぜて炉心に配列する。外径は棒状燃料と同じである。本解析では、変化傾向（上に凸又は下に凸）を調べるための典型的な本数として、25 本（中間値）及び 69 本（製作数以下で最大の対称炉心）とした。事前解析により、両者を混合して炉心に配列した場合の核特性は、それぞれ単独で配列した炉心のそれに包含されるとみなせることが確認されている ⁵ ため、受検炉心の選定は鉄、コンクリートの模擬体それぞれ単独の炉心を検討している。
デブリ構造材模擬体（コンクリート）	0~70 本	
格子間隔	1.27 ~ 2.54 cm	棒状燃料やデブリ構造材模擬体の配列間隔。これらを配列するために、2 種類の格子板（格子間隔 1.27 cm、1.50 cm）が準備されている。配列間隔は実験計画に応じて種々考えられるが、2.54 cm は 1.27 cm 格子板に 1 本飛ばしで挿入したもので許可上の最大間隔となる。また、格子間隔が 2.54cm にもなると、原

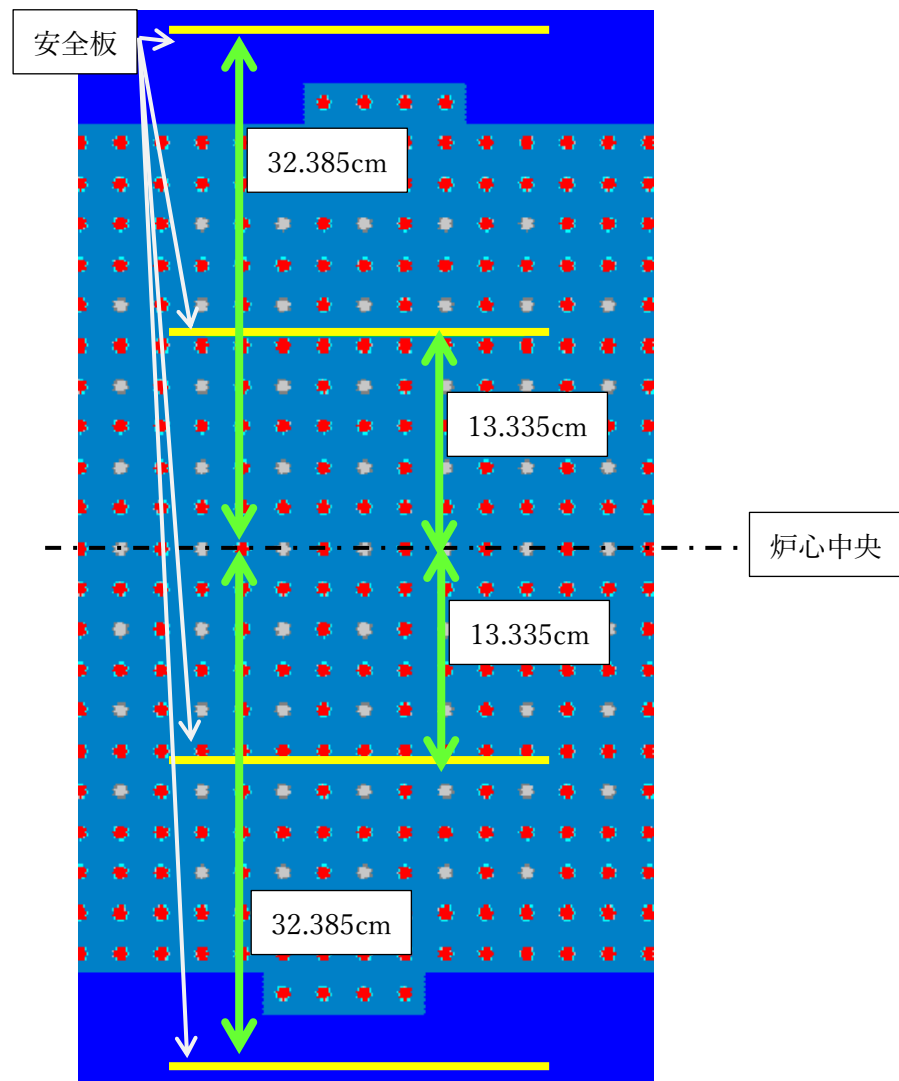
⁵ 資料 ST-13-6 (p.10) 「(2)-2 複数種類のデブリ構造材模擬体の混在の影響」参照。本資料末の補足情報 (2)に抜粋を示す。

		子炉設置変更許可書で制限する減速材対燃料ペレット体積比 (VR) の範囲を超える場合もあるため、そのような炉心は構成しない。
安全板	2 ~ 4 枚	緊急停止時にはカドミウム製の安全板を炉心に自由落下で挿入する。挿入するためのスリットが格子板に設けられている。スリット位置については図補 - 1 参照。
デブリ構造材模擬体の配置	1 of 4, 2 of 4, 4 of 4	棒状燃料やデブリ構造材模擬体の配列は限定されないが、予備解析のために代表的な配列方法を仮定した。1 of 4、2 of 4、4 of 4 については図補 - 2 参照。実験計画に応じてこれら以外の配列も考えることができるが、事前解析により、配列パターンの影響は小さく、炉心形状 (炉心水平方向の大きさ) による影響が大きいとの推測が得られている ⁶ 。なお、原子炉設置変更許可にて制限する核的制限範囲を逸脱する炉心は構成しない。
臨界水位	40~140 cm	臨界としてよい水位は、原子炉設置変更許可書にて上限と下限が定められている。なお、臨界水位が 40cm 近傍の低い炉心では、設計基準事故を超える津波水没時の未臨界性を確保できなくなる場合があることから、そのような炉心は構成しない。

⁶ 資料 ST-13-6 (p.15) 「付録 - 1 炉心形状固定の解析」参照。本資料末の補足情報(3)に抜粋を示す。



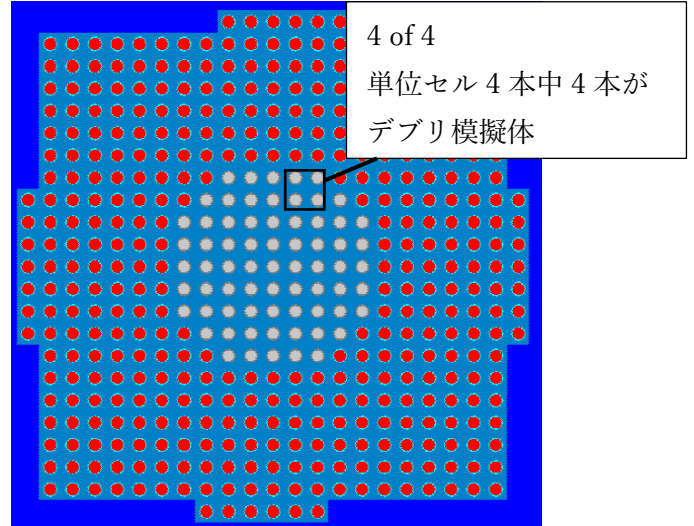
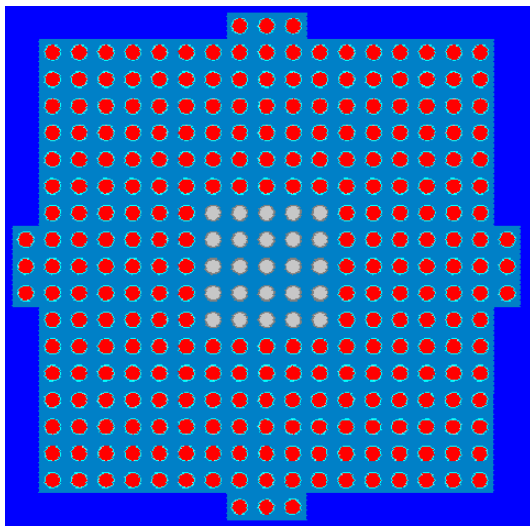
(左) 格子間隔 1.27 cm、(右) 格子間隔 1.50 cm



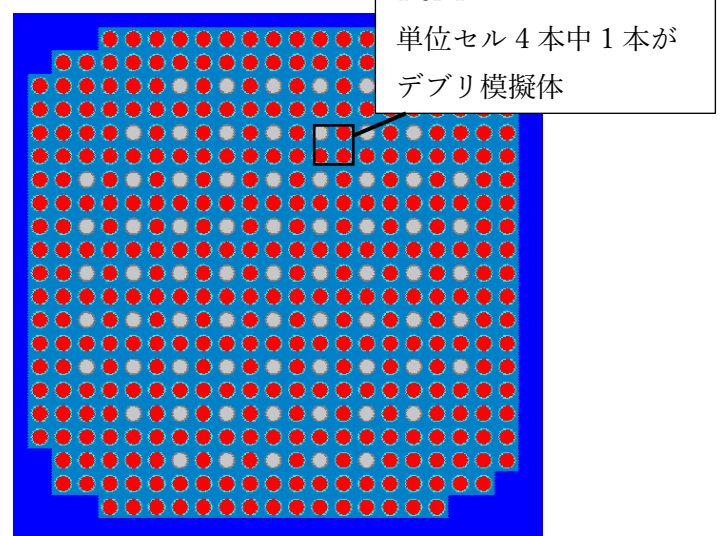
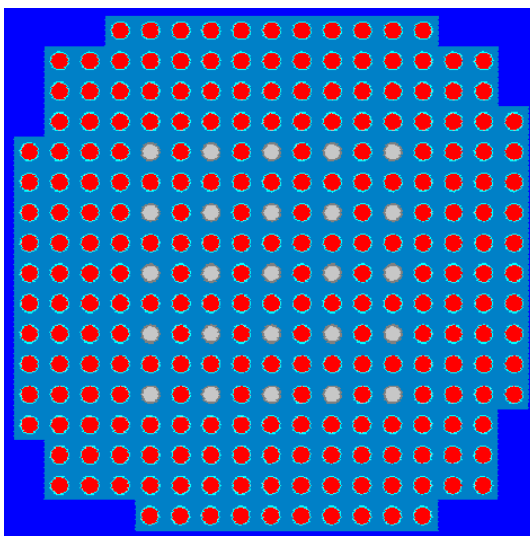
格子間隔 2.54 cm

図補-1 安全板の挿入位置 (例)

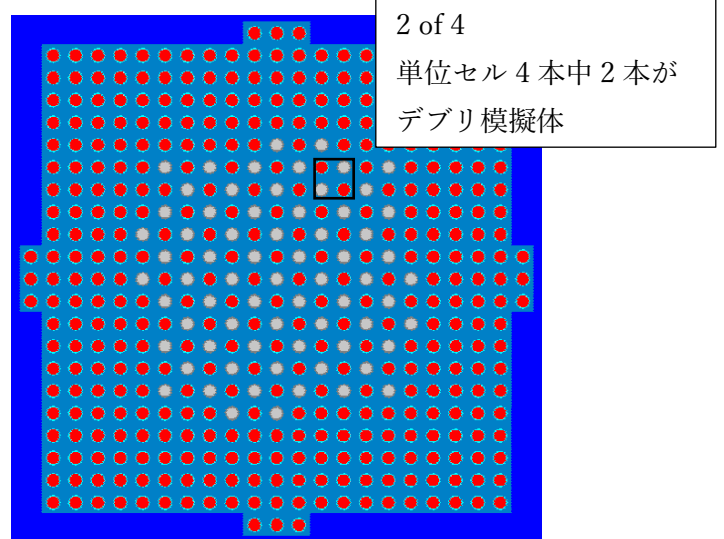
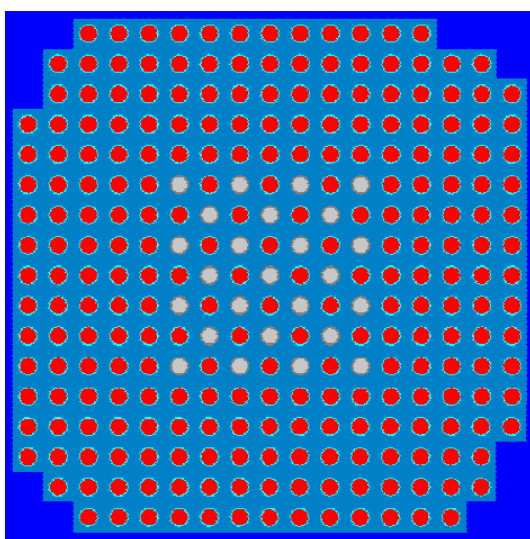
(凡例) ●棒状燃料、○デブリ構造材模擬体



(4 of 4 配列 ; (左) 模擬体 25 本、棒状燃料 276 本、(右) 模擬体 69 本、棒状燃料 398 本)



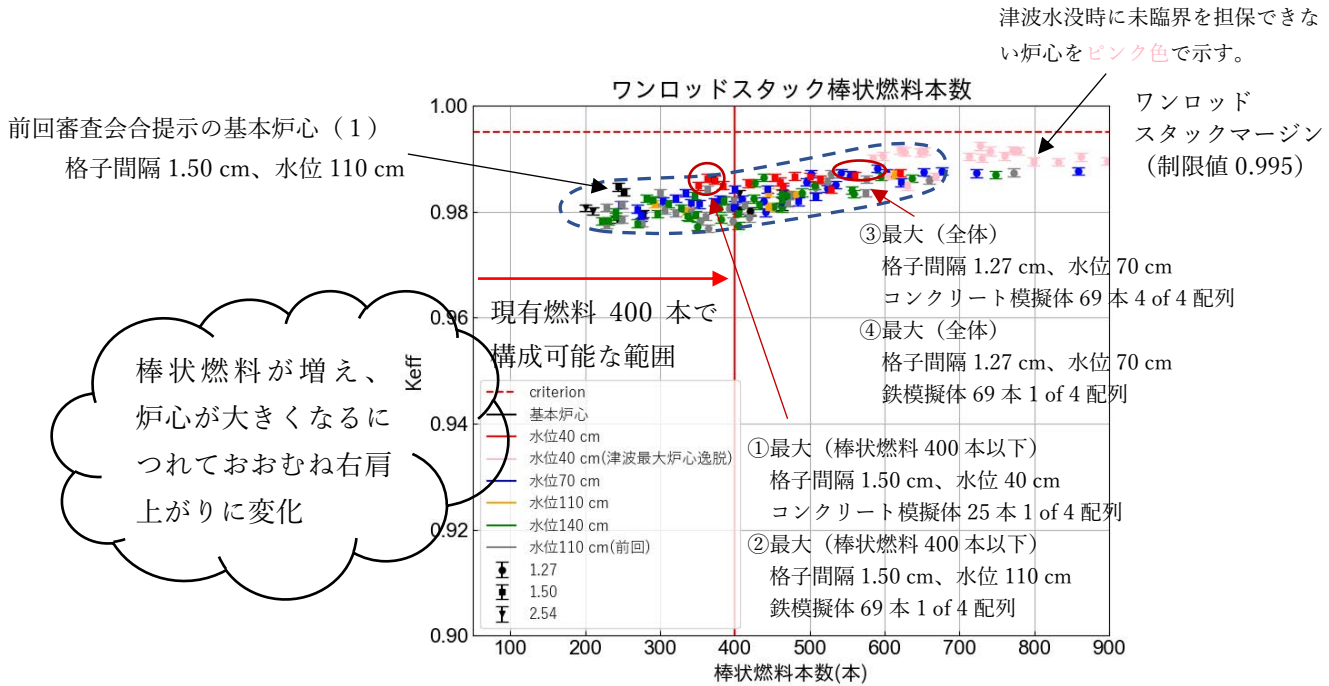
(1 of 4 配列 ; (左) 模擬体 25 本、棒状燃料 241 本、(右) 模擬体 69 本、棒状燃料 354 本)



(2 of 4 配列 ; (左) 模擬体 25 本、棒状燃料 249 本、(右) 模擬体 69 本、棒状燃料 384 本)

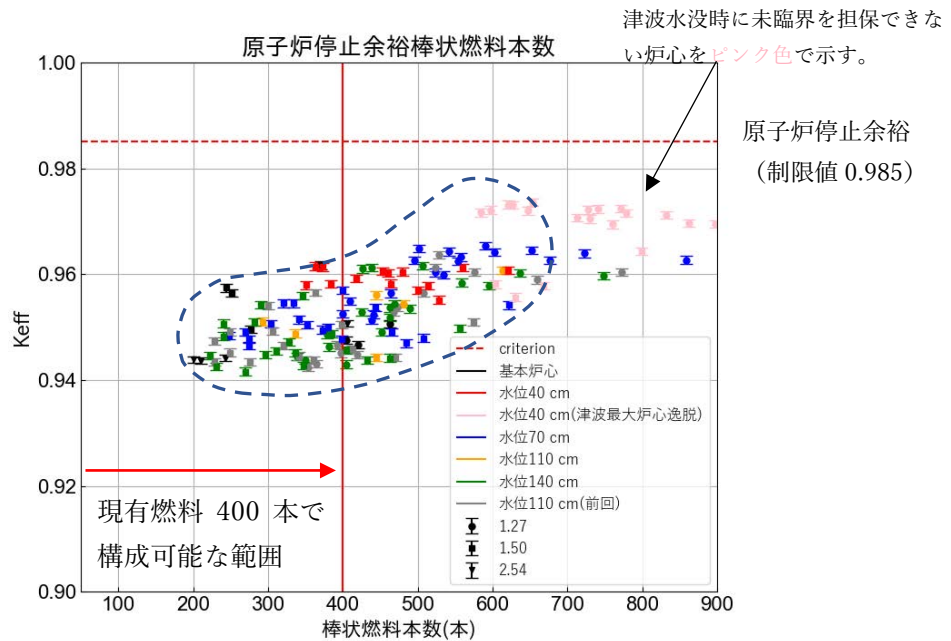
(凡例) ●棒状燃料、○デブリ構造材模擬体

図補-2 デブリ構造材模擬体配列パターン例 (上から 4 of 4、1 of 4、2 of 4)



(a) ワンロッドスタックマージンの評価 (誤差棒=1σ)

(破線は前回 (令和 5 年 3 月 24 日第 478 回) 審査会合にて提示した変化範囲を示す補助線)



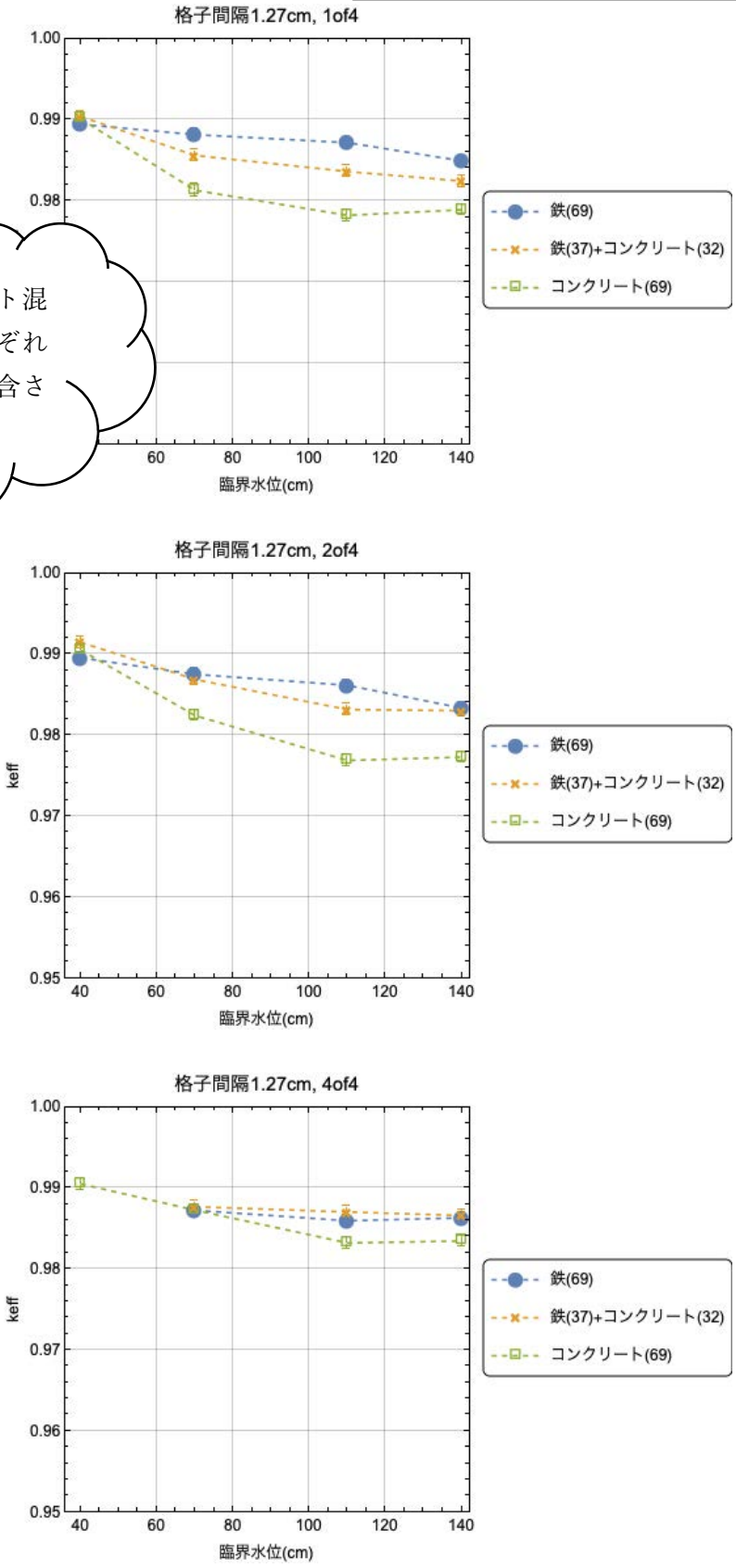
(b) 原子炉停止余裕の評価 (誤差棒=1σ)

(破線は前回 (令和 5 年 3 月 24 日第 478 回) 審査会合にて提示した変化範囲を示す補助線)

図 1 棒状燃料本数と安全板の原子炉停止効果

格子間隔 2.54 cm において減速材対燃料ペレット体積比が炉心構成範囲を超えるものを除いた。

鉄・コンクリート混在炉心は、それぞれの単独炉心に包含される傾向にある。

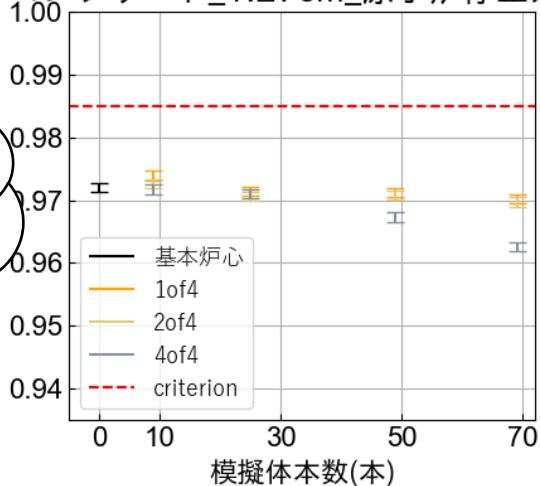


誤差棒=1σ (マーカーと同程度)

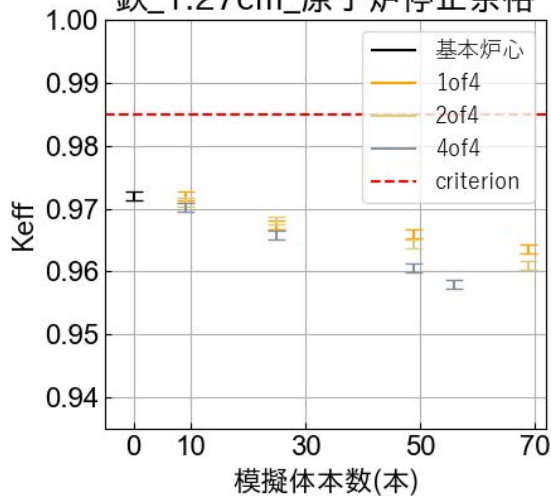
図3 (1/2) デブリ構造材模擬体の混在の効果の比較 (格子間隔 1.27 cm)
ワンロッドスタックマージンの評価結果

炉心形状を固定した場合、模擬体の配列の影響は大きくない。

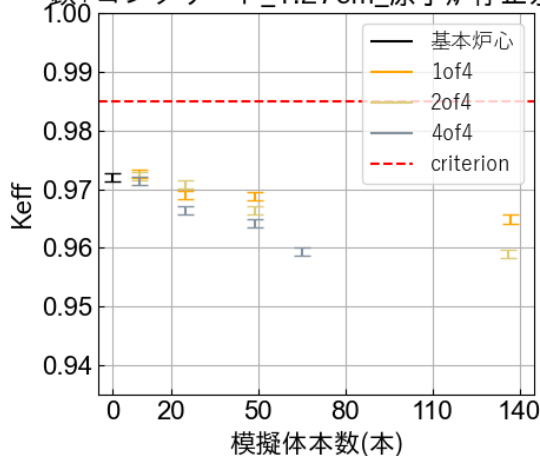
コンクリート_1.27cm_原子炉停止余裕



鉄_1.27cm_原子炉停止余裕



鉄+コンクリート_1.27cm_原子炉停止余裕



図付-1 (1/3) 炉心形状を固定（棒状燃料をデブリ構造材模擬体に置換）し、水位で臨界調整したときの原子炉停止余裕の計算結果（格子間隔 1.27 cm）（誤差棒=1σ）

補足情報(4) 表 1 の補足データ

表 1 の③及び④の炉心について、それぞれ臨界水位 40 cm とした場合の津波水没時の中性子実効増倍率を下表に示す。

No.	格子間隔 (cm)	コンクリート 模擬体(本)	鉄 模擬体(本)	配列 パターン	臨界水位 (cm)	棒状燃料 (本)	津波水没評価 (安全板)※	津波水没評価 (未臨界板)※	備考
③	1.27	69	0	4 of 4	40	760	1.0195	0.9789	
④	1.27	0	69	1 of 4	40	832	1.0255	1.0115	

※ $k_{\text{eff}}+3\sigma$ の計算結果。判定基準は 0.995 未満。

補足情報(5) 表 1 及び表 2 の補足データ

「表 1 安全板挿入時の中性子実効増倍率が最大となった炉心」及び「表 2 受検炉心の選定候補」に掲載した炉心の動特性パラメータを以下に示す。

No.	格子 間隔 (cm)	コンク リート 模擬体 (本)	鉄 模擬体 (本)	配列 パターン	臨界 水位 (cm)	棒状燃料 (本)	α_{TM} ($\Delta k/k/^\circ C$)	α_{TF} ($\Delta k/k/^\circ C$)	α_v ($\Delta k/k/\%$)	$d\rho/dh$ (\$/mm)	β_{eff} (-)	l (s)	備考
①	1.50	25	0	1 of 4	40	363	2.52E-05	-1.88E-05	-1.98E-03	5.46E-02	7.88E-03	3.68E-05	
②	1.50	0	69	1 of 4	110	363	3.18E-05	-1.89E-05	-2.06E-03	4.64E-03	7.55E-03	3.68E-05	
③	1.27	69	0	4 of 4	70	542	1.10E-04	-2.44E-05	-1.96E-03	1.49E-02	7.75E-03	3.89E-05	
④	1.27	0	69	1 of 4	70	590	3.66E-05	-2.64E-05	-2.37E-03	1.46E-02	7.69E-03	2.90E-05	
①'	1.50	25	0	1 of 4	40	363	2.52E-05	-1.88E-05	-1.98E-03	5.46E-02	7.88E-03	3.68E-05	①と同じ
	1.50	25	0	1 of 4	50	311	1.89E-05	-1.91E-05	-2.23E-03	3.32E-02	7.84E-03	3.75E-05	
②'	1.50	0	69	1 of 4	90	377	4.14E-05	-1.90E-05	-1.91E-03	7.53E-03	7.55E-03	3.67E-05	
	1.50	0	69	1 of 4	140	346	3.76E-05	-1.91E-05	-2.06E-03	2.39E-03	7.53E-03	3.68E-05	
③'	1.27	69	0	4 of 4	55	592	1.02E-04	-2.49E-05	-1.78E-03	2.66E-02	7.78E-03	3.76E-05	
	1.27	69	0	4 of 4	90	490	8.74E-05	-2.40E-05	-2.23E-03	7.86E-03	7.74E-03	3.74E-05	
④'	1.27	0	69	1 of 4	60	637	3.14E-05	-2.67E-05	-2.25E-03	2.13E-02	7.70E-03	2.84E-05	
	1.27	0	69	1 of 4	80	569	4.10E-05	-2.65E-05	-2.46E-03	1.09E-02	7.67E-03	2.95E-05	

α_{TM} : 減速材温度反応度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)、 α_{TF} : 棒状燃料温度反応度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)、 α_v : 減速材ボイド反応度係数 ($\Delta k/k/\%$)、 β_{eff} : 実効遅発中性子割合(-)、l: 即発中性子寿命 (s)

「表2 受検炉心の選定候補」に掲載した炉心の安全板評価結果を以下に示す。

No.	格子 間隔 (cm)	コンク リート 模擬体 (本)	鉄 模擬体 (本)	配列パ ターン	臨界 水位 (cm)	棒状 燃料 (本)	原子炉停止余裕	ワンロッドスタック マージン	津波水没 評価※ (安全板)	津波水没 評価※ (未臨界板)
①'	1.50	25	0	1 of 4	40	363	0.9615 ±0.0007	0.9863 ±0.0008	0.9899	0.9224
	1.50	25	0	1 of 4	50	311	0.9558 ±0.0008	0.9838 ±0.0008	0.9536	0.8769
②'	1.50	0	69	1 of 4	90	377	0.9559 ±0.0007	0.9839 ±0.0007	0.9134	0.8721
	1.50	0	69	1 of 4	140	346	0.9560 ±0.0007	0.9830 ±0.0007	0.8993	0.8542
③'	1.27	69	0	4 of 4	55	592	0.9641 ±0.0007	0.9877 ±0.0007	0.9451	0.8920
	1.27	69	0	4 of 4	90	490	0.9560 ±0.0007	0.9833 ±0.0007	0.9219	0.8667
④'	1.27	0	69	1 of 4	60	637	0.9683 ±0.0007	0.9899 ±0.0007	0.9704	0.9452
	1.27	0	69	1 of 4	80	569	0.9643 ±0.0007	0.9883 ±0.0007	0.9456	0.9174

※ $k_{\text{eff}}+3\sigma$ の計算結果。判定基準は0.995未満。