

令和 5 年 3 月 9 日 (改 3)
日本原子力研究開発機構
臨界ホット試験技術部

STACY 設工認に係る審査会合 (令和 5 年 1 月 30 日) での指摘事項対応のための解析結果

1. 概要

デブリ構造材模擬体 (コンクリート) の組成が反応度を与える影響について、ペレット密度及び水分量をパラメータとした感度解析を行った。また、主要な核的制限値として、安全板の原子炉停止余裕及びワンロードスタックマージンの評価を行い、デブリ構造材模擬体のコンクリート密度及び水分量の影響を評価した。その他、デブリ構造材模擬体の種別 (鉄又はコンクリート) と挿入量が水位反応度係数に及ぼす影響並びに鉄製のデブリ構造材模擬体の組成が原子炉停止余裕に及ぼす影響を確認した。以下に解析の結果及び当該結果を受けた設工認申請書の補正方針を示す。

2. 解析結果

2.1 デブリ構造材模擬体 (コンクリート) の組成が反応度を与える影響について

デブリ構造材模擬体 (コンクリート) の組成が反応度を与える影響について、コンクリート密度及び水分量をパラメータとした感度解析を行った。解析対象とした炉心の詳細については本資料末の参考データ参-1 に示す。

① コンクリート密度の感度解析

デブリ模擬炉心のうち、デブリ構造材模擬体本数が現実的に最大に近い 69 本、及び、実験時の代表的な基準水位として狙う臨界水位 90 cm の炉心における安全板の原子炉停止効果についてコンクリート密度を変化させた感度解析を行い、影響を反応度 ($\Delta k/k$) で評価した。密度は、普通コンクリート (臨界安全ハンドブック標準組成、密度 2.3 g/cm^3 、水分率約 9 wt%、末尾の付録表参照) を基本とし、製作上コンクリート材料の公差から想定される密度の振れ幅を十分包含できる範囲として、最大 2 倍から最小 0.5 倍とする構造材模擬体を装荷した炉心を評価した。なお、コンクリートの主要成分 (ケイ素 Si、カルシウム Ca) の感度解析も別途実施した。

コンクリート密度の感度解析の結果を図 1 に示す。なお、密度 0 (すなわち解析上はボイドとなる。) の点は変化傾向を確認するために追加したものである。コンクリート密度の影響は、中性子エネルギースペクトルが過剰減速となる格子間隔 2.54 cm の炉心については最大で $3 \times 10^{-3} \Delta k/k$ 程度であり大きな反応度効果は見られない。一方、格子間隔 1.27 cm (減速不足) 及び 1.50 cm (最適減速) の炉心では、1 of 4 及び 2 of 4 の配列については密度増加に対して正の反応度効果が、4 of 4 配列では負の反応度効果が見られ、

その大きさは約 $7 \times 10^{-3} \Delta k/k$ と見積もられた。これはコンクリート製のデブリ構造材模擬体が、1 of 4 及び 2 of 4 配列では減速材として、4 of 4 炉心では吸収材として働いていることを示している。

また、コンクリートの主要な成分であるケイ素 (Si) 及びカルシウム (Ca) を密度の感度解析の範囲と同様の 0.5 倍、2.0 倍に変化させた感度解析の結果を図 2 に示す。Si 及び Ca の量の感度は、密度のそれに対して小さく、密度変化の感度に包含されることが確認できる。この結果から、コンクリート密度の反応度に対する感度は、Si や Ca 等の主要成分ではなく、水分に由来していることが推測できる。

② 水分量の感度解析

①の推察を確認するため、①と同じ炉心について、コンクリート内部の水分量のみを変化させた感度解析を行い、影響を反応度 ($\Delta k/k$) で評価した。水分量は、普通コンクリート (臨界安全ハンドブック標準組成、密度 2.3 g/cm^3 、水分率約 9 wt%) を基本とし、コンクリート密度と同様の倍率として水分量が 0.5 倍 (水分率約 4.7 wt%) と 2.0 倍 (水分率約 16 wt%)、その他水分 0 (水なし) の炉心の核特性を評価した (組成については末尾の付録表を参照。)。コンクリートの水分量の感度解析結果を図 3 に示す。水分量の変化に対する反応度の応答は、コンクリート密度のそれと傾向、変化量ともにほぼ同じであり、コンクリートの密度変化に対する反応度への影響は水分量が支配的であることが確認できた。

設工認申請書の補正方針： ①及び②の結果を踏まえ、設工認申請書 第 1 編 実験用装荷物のデブリ構造材模擬体 (コンクリート) の設計仕様に水分率を追記するとともに、コンクリートのデブリ構造材模擬体の製作に当たっては、本解析の評価範囲に収まるよう、水分率について最大 16 wt% の制限を設けて製作する方針とし、設工認申請書 第 1 編 実験用装荷物の本文構造図にコンクリートの水分率の上限値を追記する。

2.2 デブリ模擬炉心が核的制限値を満足する見通しについて

④ コンクリート密度及び水分量が安全板の原子炉停止効果に与える影響

コンクリートの密度及び水分量が、炉心の重要な核的制限値である原子炉停止余裕及びワンロッドスタック（最大反応度効果を持つ安全板1枚が挿入不能時）マージンに及ぼす影響を評価するため、①及び②でコンクリート密度及び水分量を変化させた炉心とそれに安全板1枚（安全板4枚挿入時は3枚）を挿入した炉心との反応度差を解析した。このとき、安全板挿入位置は、すべてのケースで炉心中央付近のスリットに統一し、安全板挿入による水位上昇等の考慮は、設工認添付計算書（保安規定に基づく炉心構成解析での手順と同じ。）と同様とした。コンクリート密度及び水分量が安全板の原子炉停止効果に与える影響評価の結果をそれぞれ図4及び図5に示す。図の縦軸は、基準とした普通コンクリート組成の炉心（基準炉心）に安全板を挿入したときの反応度効果と、密度及び水分量を変化させた炉心（変化炉心）において基準炉心と同じ位置に安全板を挿入したときの反応度の差で表し、負の値（図の下側）となる場合は、安全板の原子炉停止効果がより高まった安全側の変化であることを意味する。評価の結果、コンクリート密度及び水分量の変化に対する顕著な応答は見られず、正の値（図の上側）の増分は最大でも $2 \times 10^{-3} \Delta k/k$ （2標準偏差程度）であり、モンテカルロ計算に由来する統計誤差で説明できる範囲である。これらの結果から、2倍までのコンクリート密度及び水分量の変化が安全板の原子炉停止効果に与える影響は小さいことが確認できる。

⑤ デブリ構造材模擬体が原子炉停止余裕に及ぼす影響

デブリ構造材模擬体の挿入本数が安全板の原子炉停止効果に与える影響の傾向を確認するため、デブリ構造材模擬体を挿入した炉心について原子炉停止余裕及びワンロッドスタックマージンの評価を行った。デブリ構造材模擬体の本数は、最大本数70本に近い69本に加え、変化傾向を見るため25本を評価した。安全板枚数は、格子間隔1.27 cm及び1.50 cmの炉心では全数挿入時2枚、ワンロッドスタック時1枚とし、格子間隔2.54 cmの炉心では炉心が大きくなることを考慮して4枚、ワンロッドスタック時3枚とした。安全板の挿入位置の例を図6に示す。また、臨界水位は、現有する400本の棒状燃料で臨界にできる範囲を確保するため110 cmとした。デブリ構造材模擬体の挿入本数が安全板の原子炉停止効果に及ぼす影響の解析結果を、ワンロッドスタックマージンについて図7に、安全板全挿入時の原子炉停止余裕について図8に示す。図には、挿入本数の傾向を見るため、デブリ構造材模擬体挿入本数が0本の基本炉心（1）の結果も示している。

図より、コンクリートのデブリ構造材模擬体を挿入した炉心より、鉄のデブリ構造材模擬体を挿入した炉心のほうが安全板の効果が小さくなる（安全板が利きにくくなる）傾向が見られる。これは、コンクリートよりも鉄のほうが熱中性子の吸収効果が大きく、熱中性子が少なくなることによって、安全板の熱中性子吸収効果が弱まるためである。

図7及び図8に示したすべての炉心ケースについて、棒状燃料本数によって整理した結果を、ワンロッドスタックについて図9-(a)に、安全板を全挿入した原子炉停止余裕について図9-(b)に示す。安全板の原子炉停止効果は棒状燃料本数が増大する(すなわち炉心が大きくなる)に連れて全体として弱まる傾向を見せるが、適切な安全板配置により、デブリ構造材模擬体の種別及び挿入本数に依らず、すべての体系で制限値を満足することができる見通しが得られた。中性子実効増倍率のばらつきは安全板全挿入時のほうが大きい、基本炉心(1)における安全板挿入時の実効増倍率に対し $\pm 0.02 \Delta k$ の範囲である。制限値に対して最も厳しい結果は、安全板全挿入時には制限値との反応度差が $9 \times 10^{-3} \Delta k$ 、ワンロッドスタック時には $7 \times 10^{-3} \Delta k$ であり、ワンロッドスタック時の評価のほうが厳しい結果が得られた。本解析において制限値に対し最も厳しい結果を与える炉心は、図9-(a)中に示したとおり、格子間隔2.54 cmでデブリ構造材模擬体(鉄)を69本挿入した炉心である。また、STACYの初臨界炉心として想定される現有の棒状燃料400本を使用した場合には、格子間隔1.50 cmでデブリ構造材模擬体(鉄)を69本挿入した炉心である。ただし、この場合、基本炉心(1)(デブリ構造材模擬体挿入なし)との反応度差は $6 \times 10^{-4} \Delta k/k$ (1標準偏差程度)であり、ほとんど違いは見られない。

設工認申請書の補正方針： ④及び⑤の結果を踏まえ、実験に当たっては既知炉心である基本炉心(1)に少数本の鉄のデブリ構造材模擬体を挿入した炉心において使用前事業者検査を行い、核的制限値を満足することを確認し、その後、デブリ構造材模擬体の核特性解析値と実測値の差を確かめつつ徐々に実験範囲を拡大する方針とする。また、上記見通しを示す解析結果を設工認申請書 第2編 デブリ模擬炉心(1)の添付書類として追加する。

以上

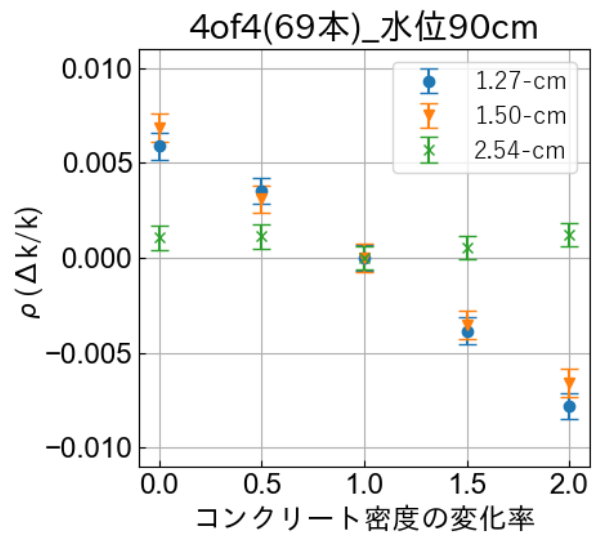
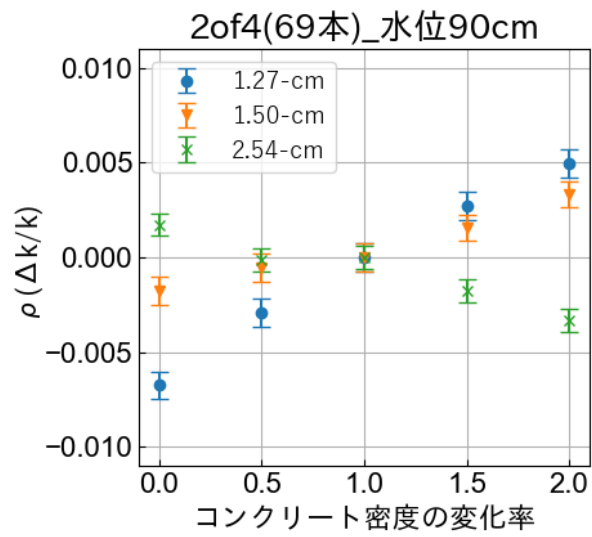
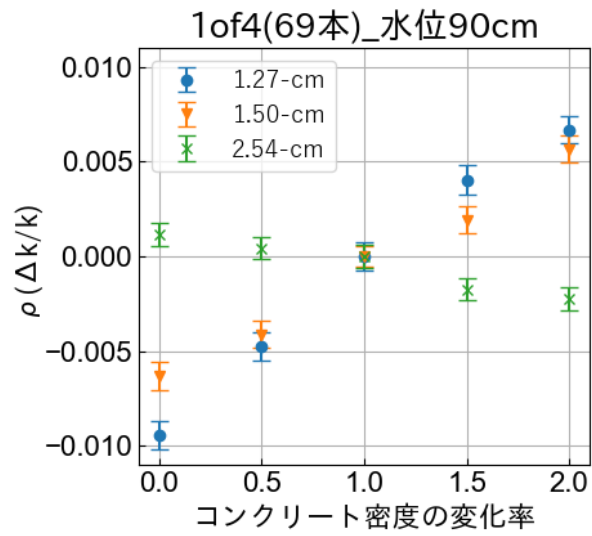


図1 コンクリート密度の感度解析結果 (表参-4)

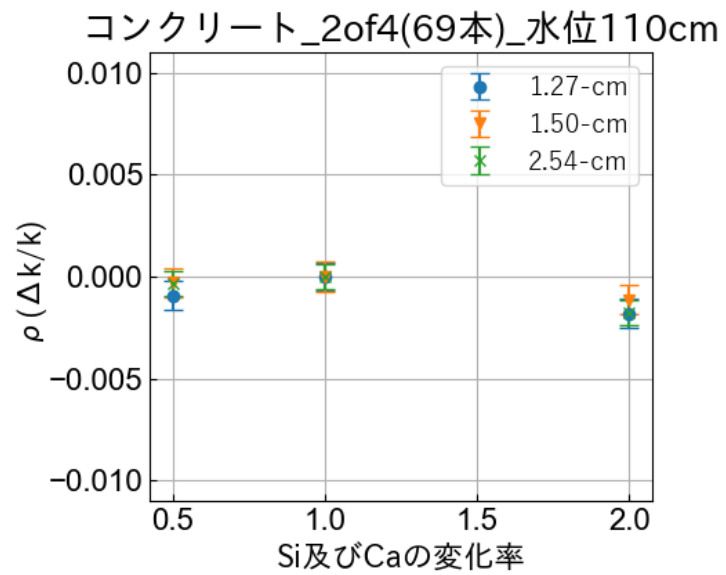


図2 コンクリート主要成分の感度解析結果（表参-5）

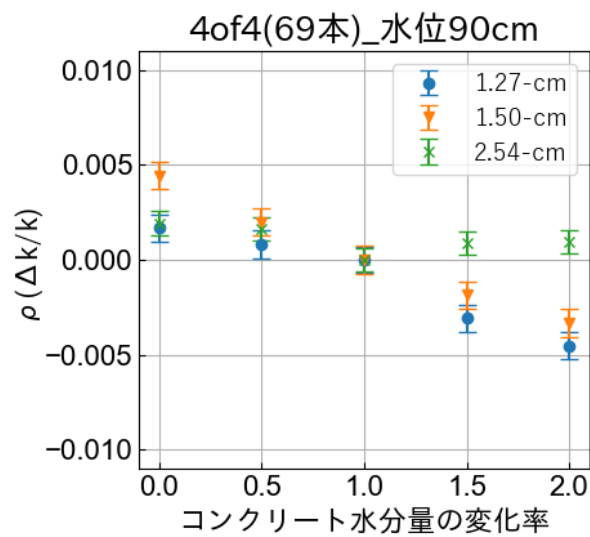
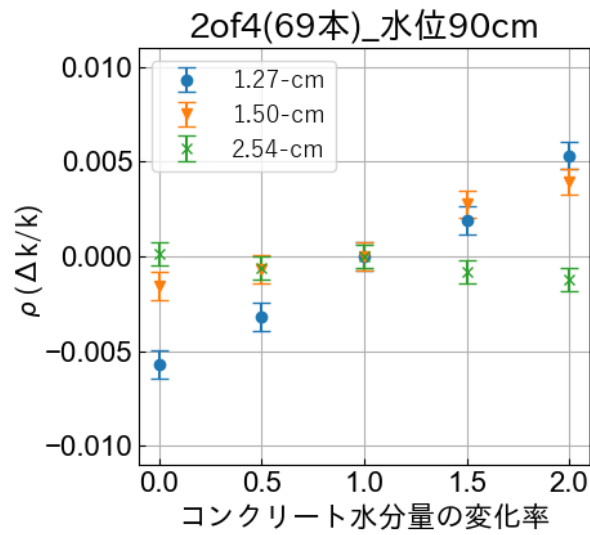
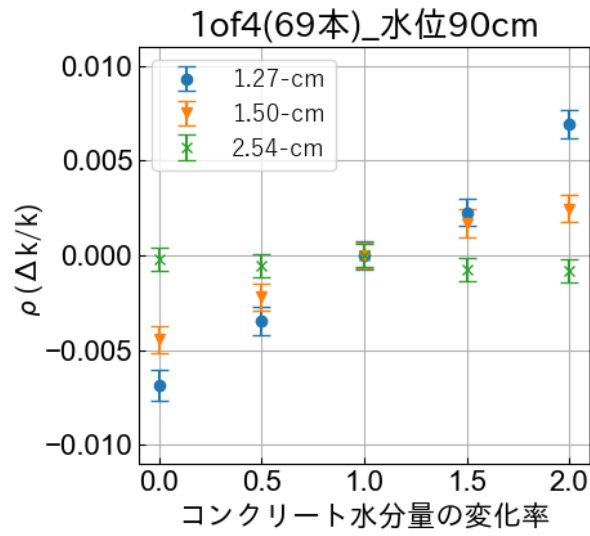


図3 コンクリートの水分量の感度解析結果 (表参-6)

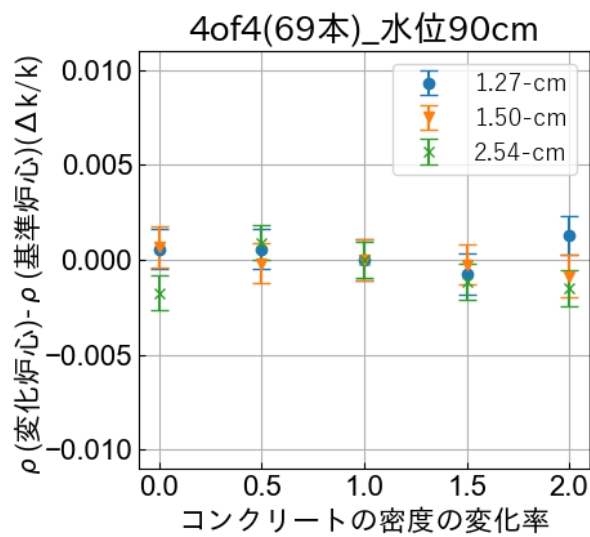
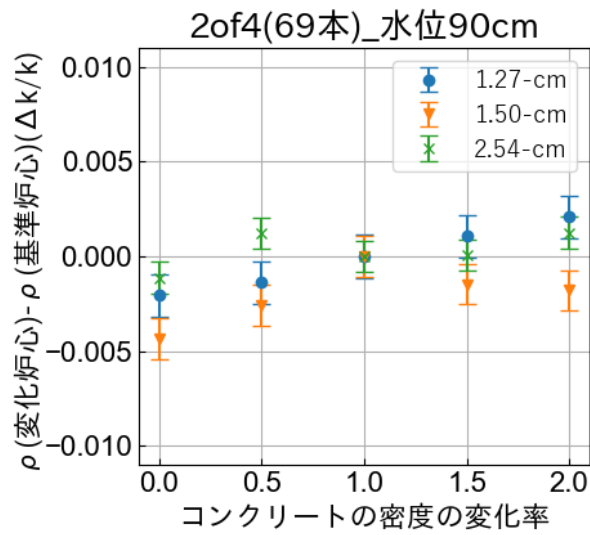
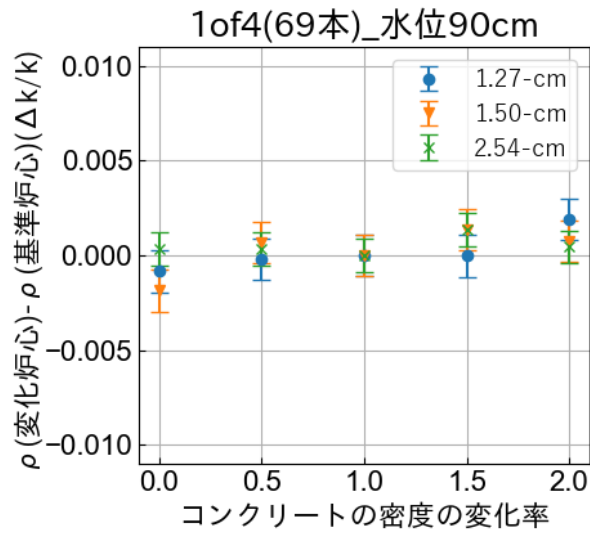


図4 コンクリート密度が安全板の原子炉停止効果に及ぼす影響解析結果

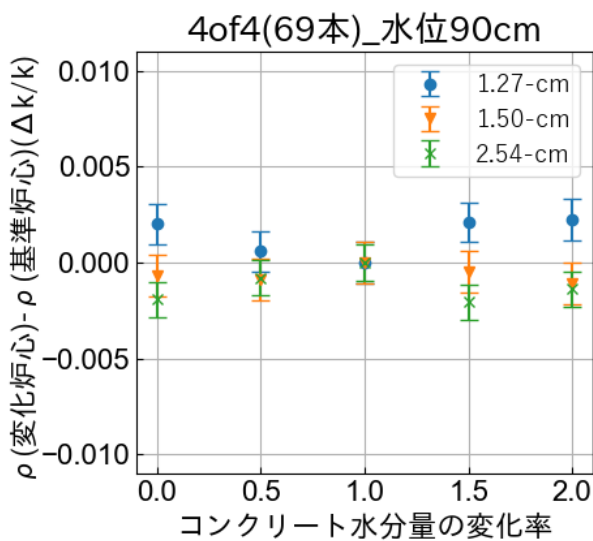
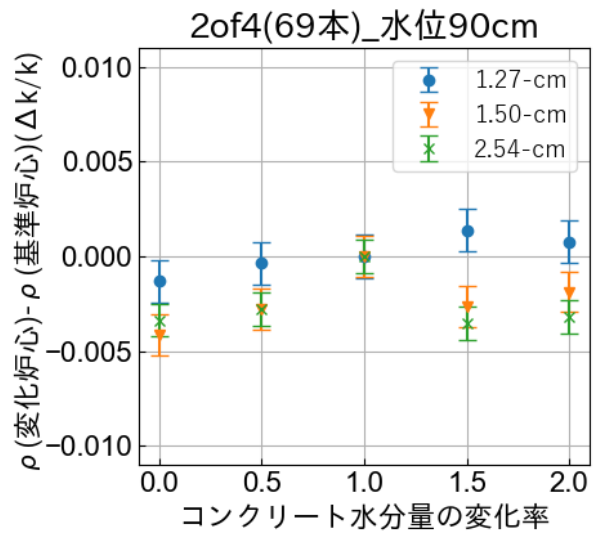
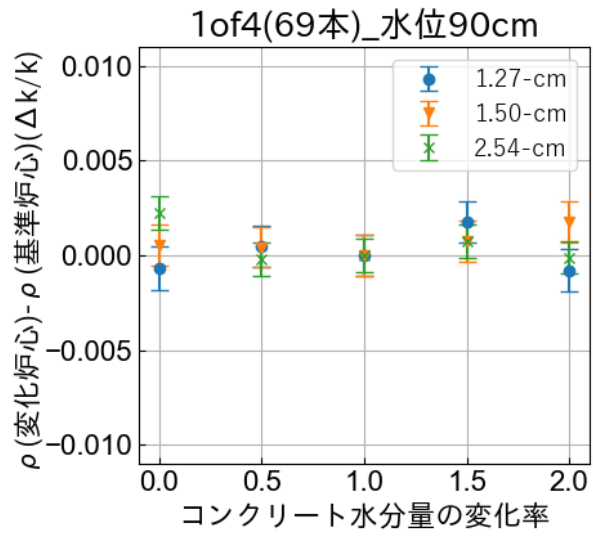
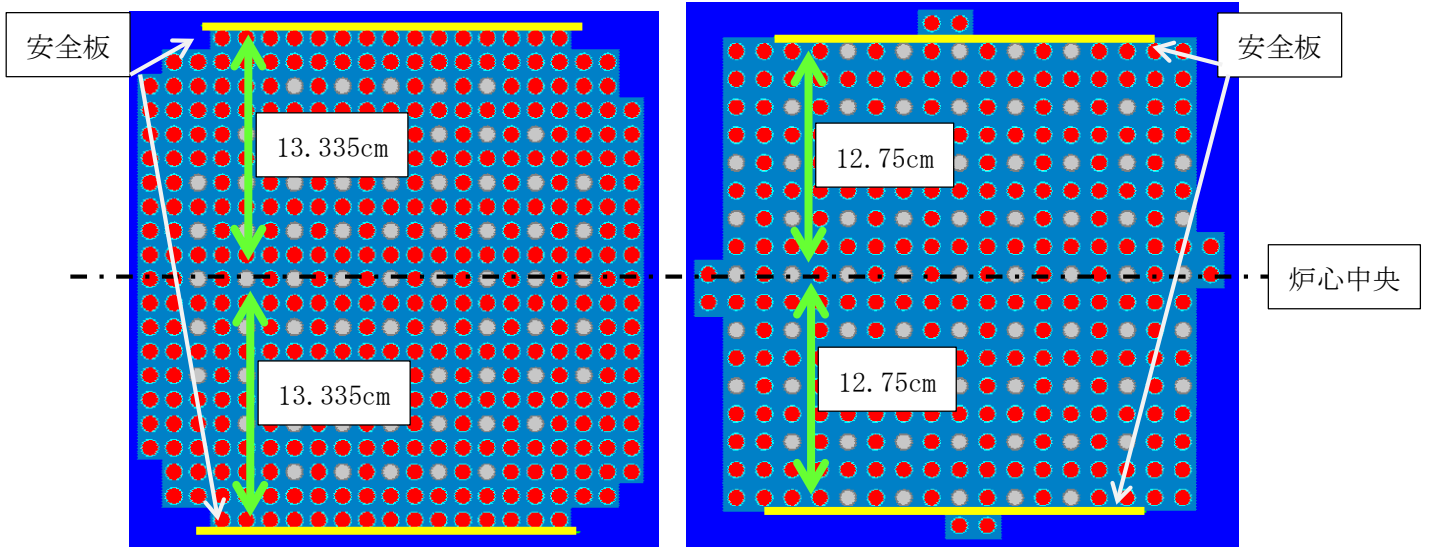
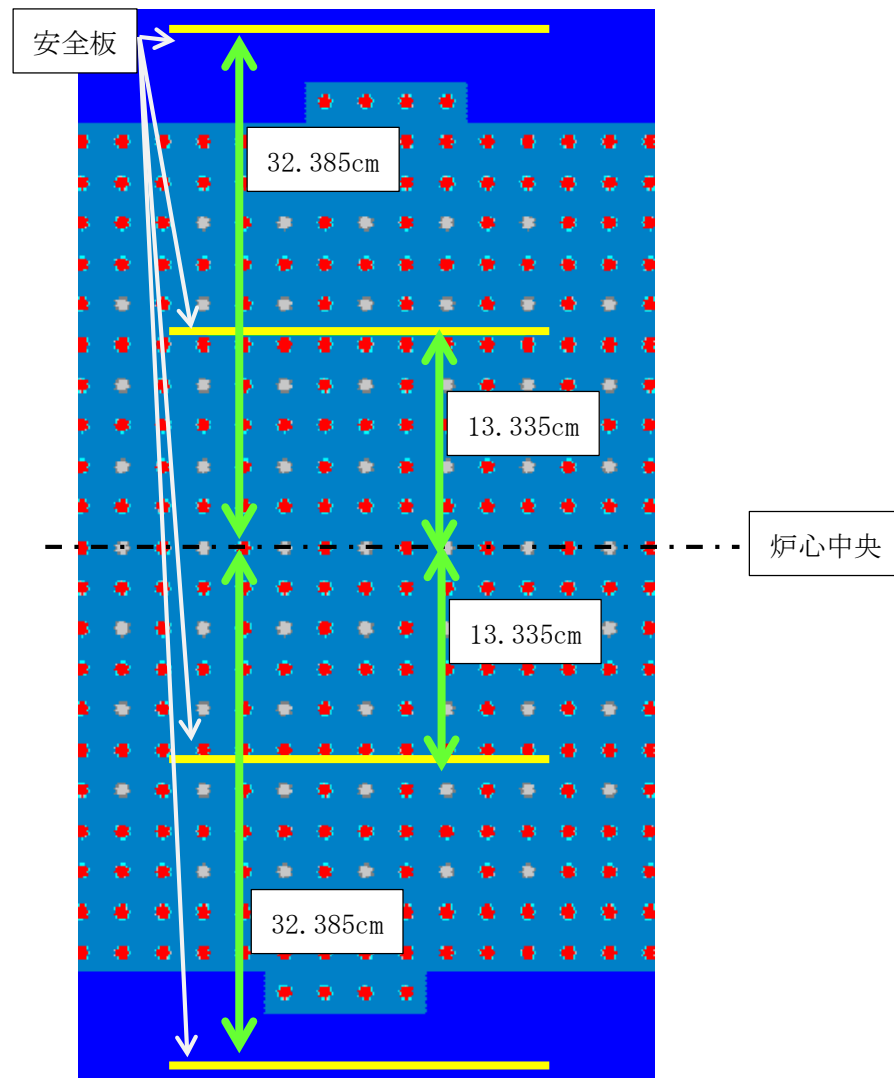


図5 コンクリート水分量が安全板の原子炉停止効果に及ぼす影響解析結果



(左) 格子間隔 1.27 cm、(右) 格子間隔 1.50 cm



格子間隔 2.54 cm

図6 安全板の挿入位置 (例)

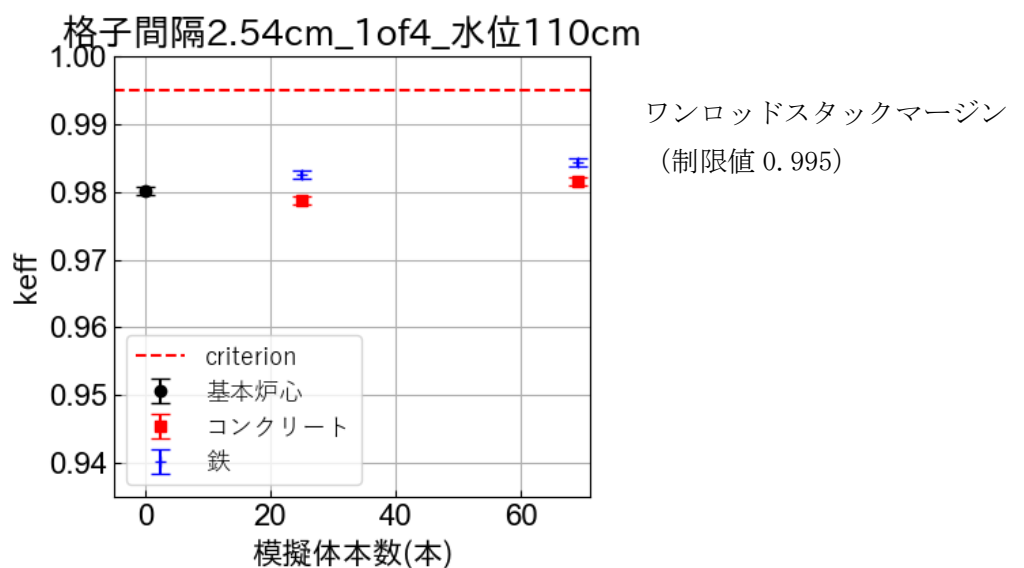
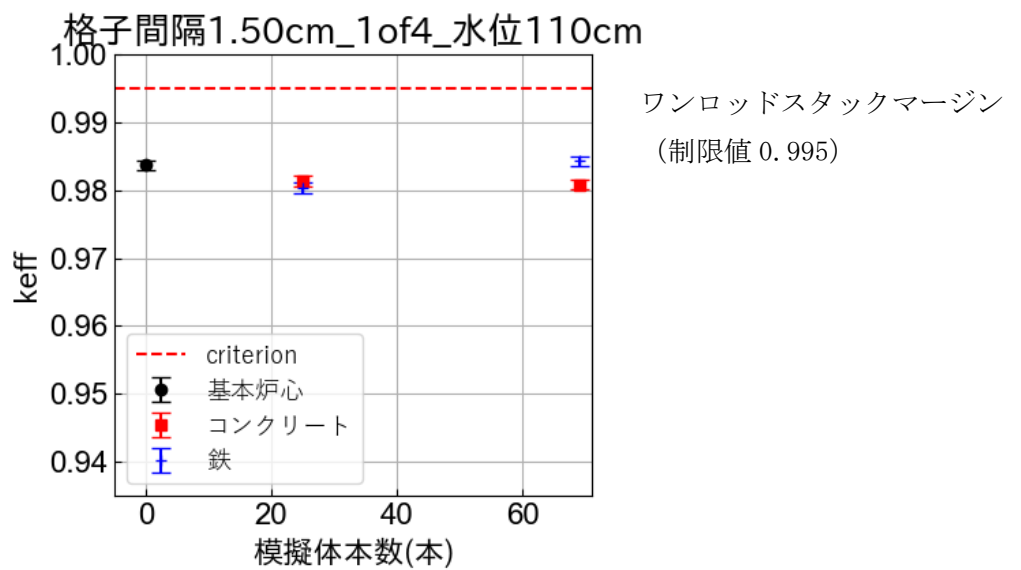
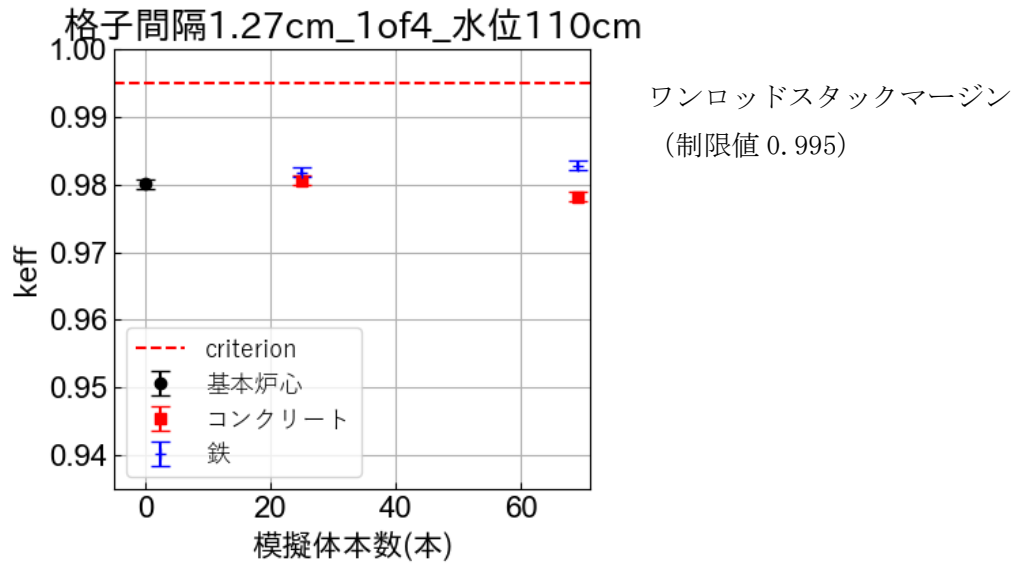


図7 (1/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数がワンロッドスタックマージンに及ぼす影響の評価結果 (1 of 4 配置) (表参-7)

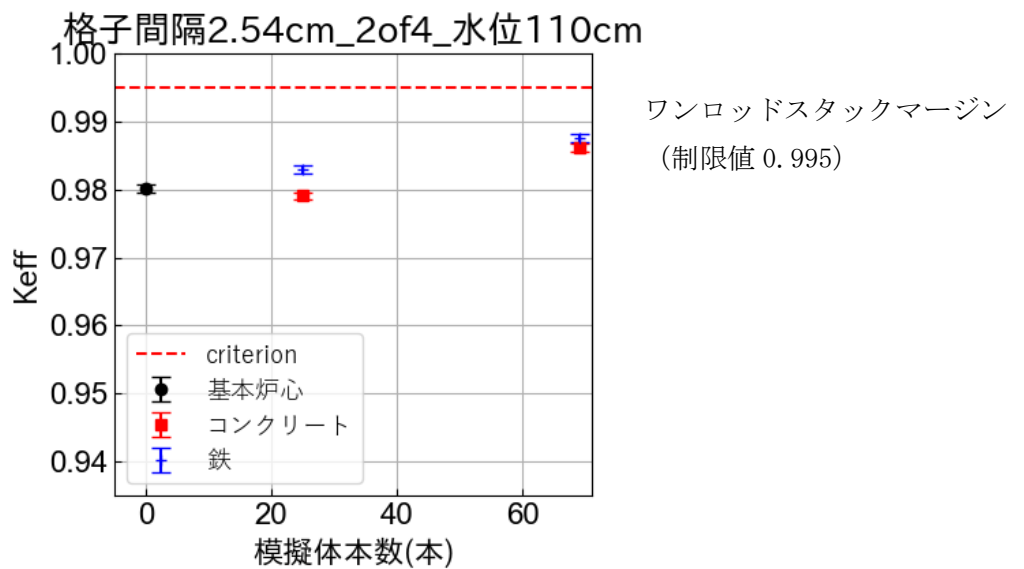
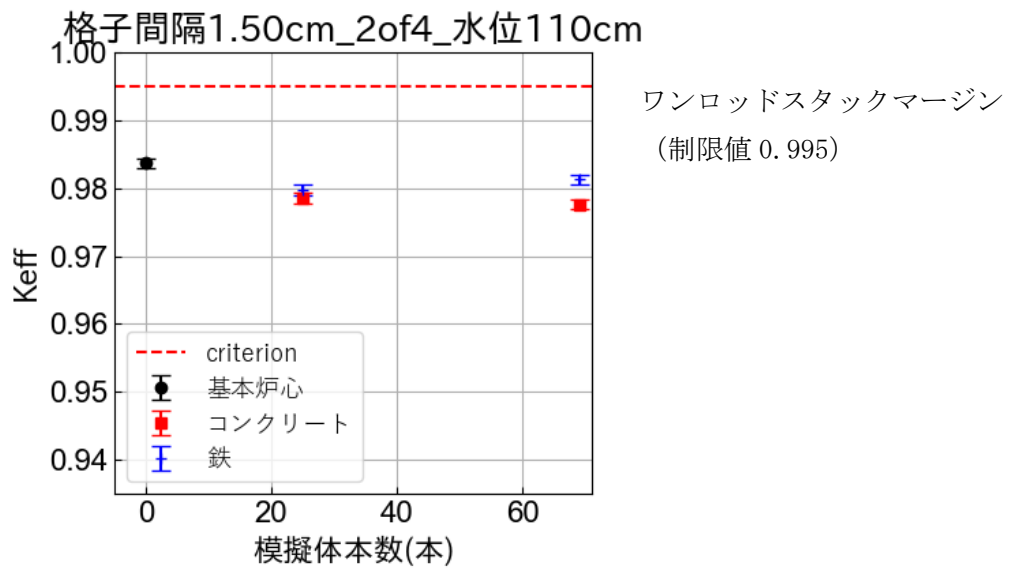
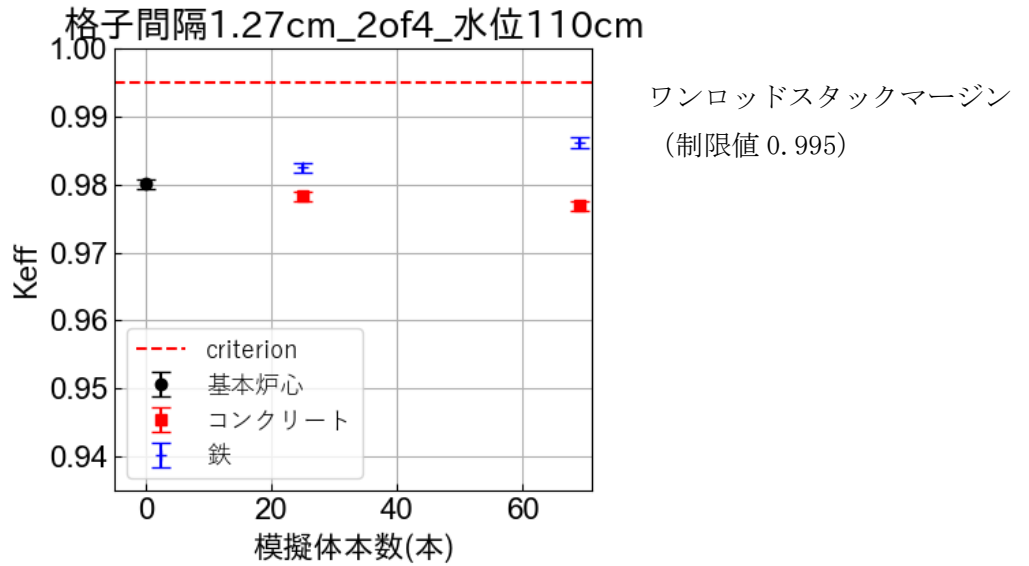


図7 (2/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数がワンロッドスタックマージンに及ぼす影響の評価結果 (続き) (2 of 4 配置) (表参-7)

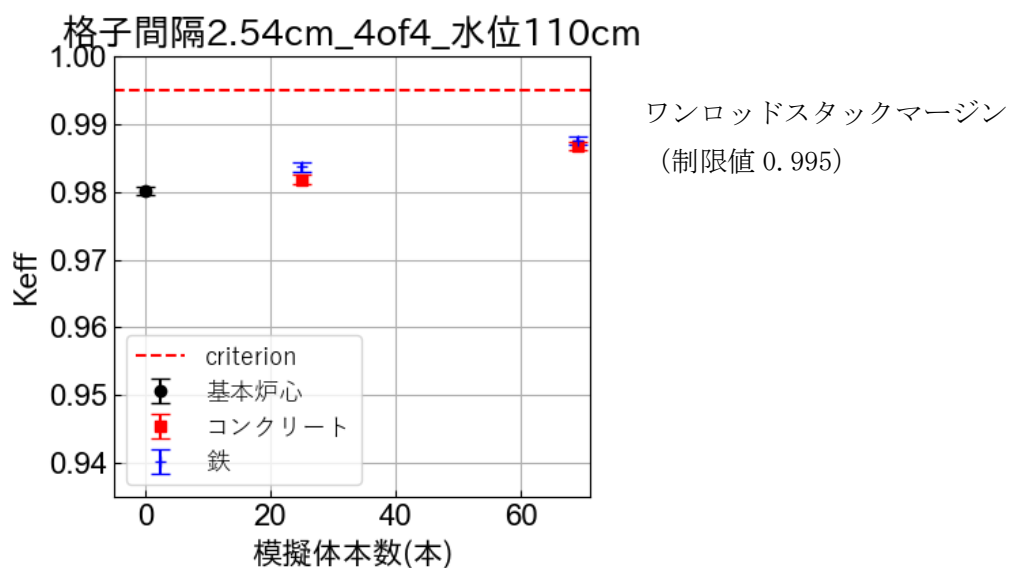
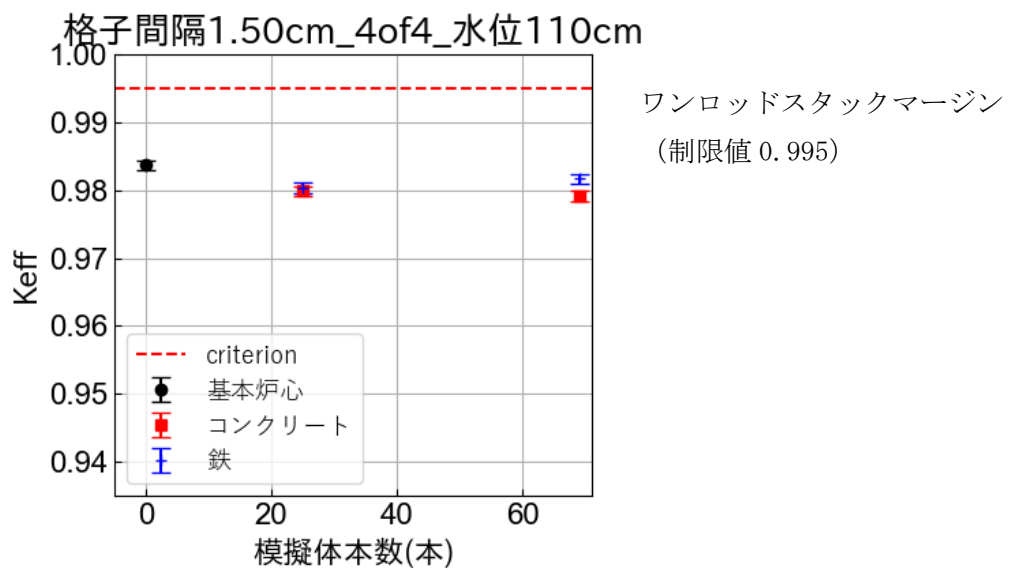
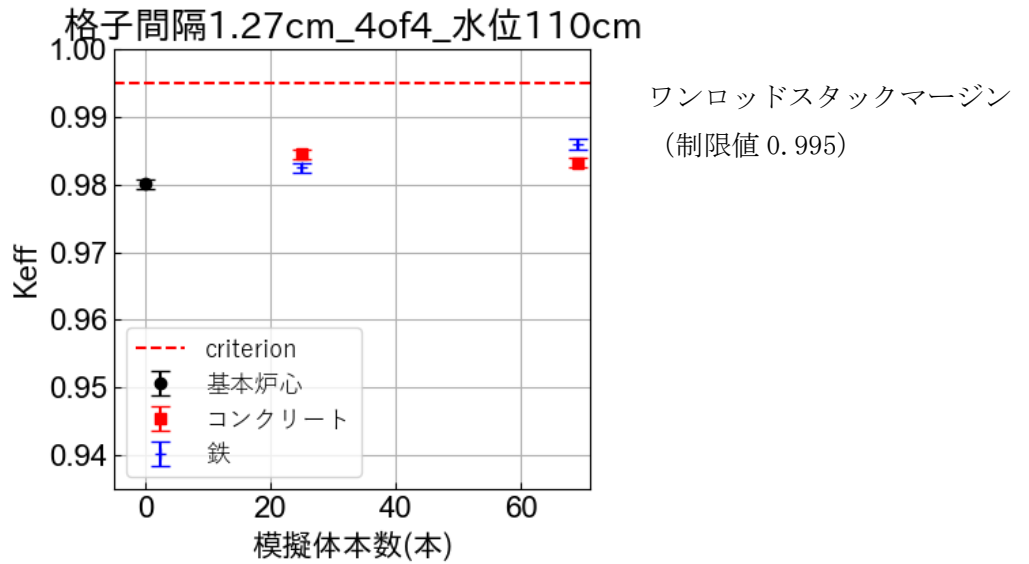


図7 (3/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数がワンロッドスタックマージンに及ぼす影響の評価結果(続き)(4 of 4配置)(表参-7)

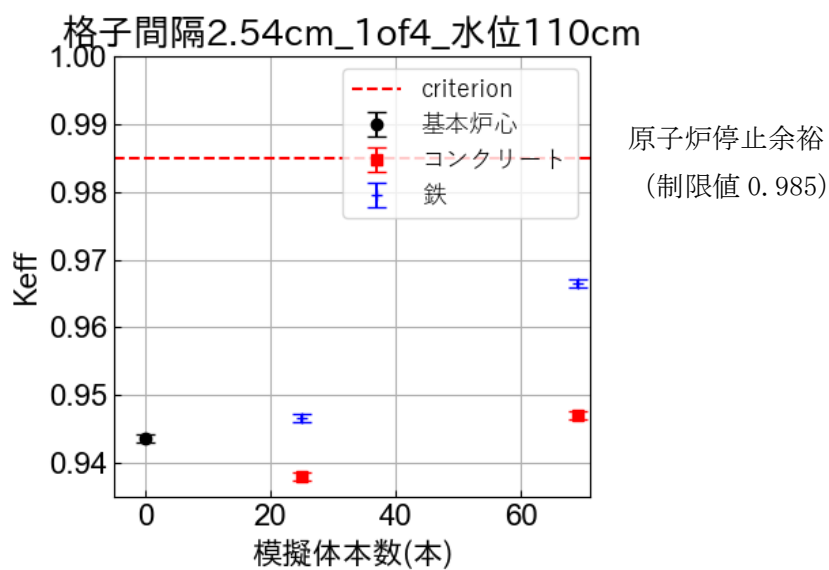
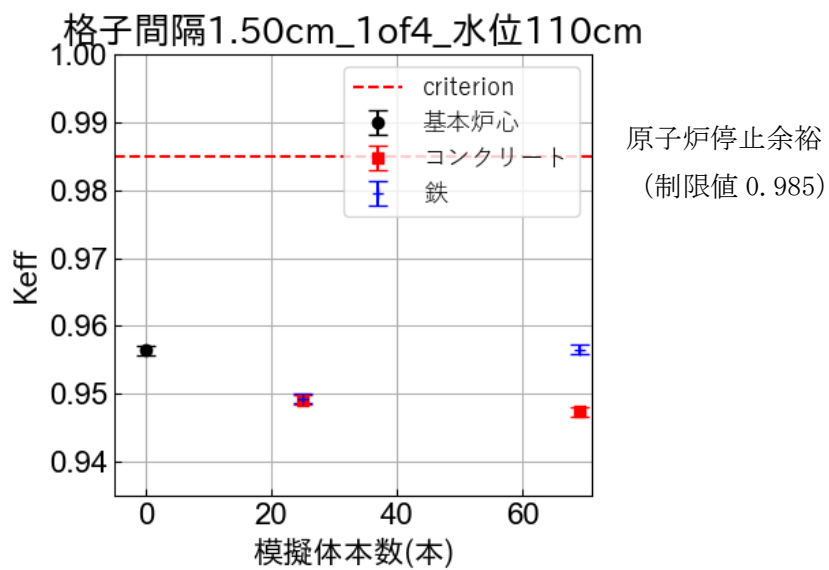
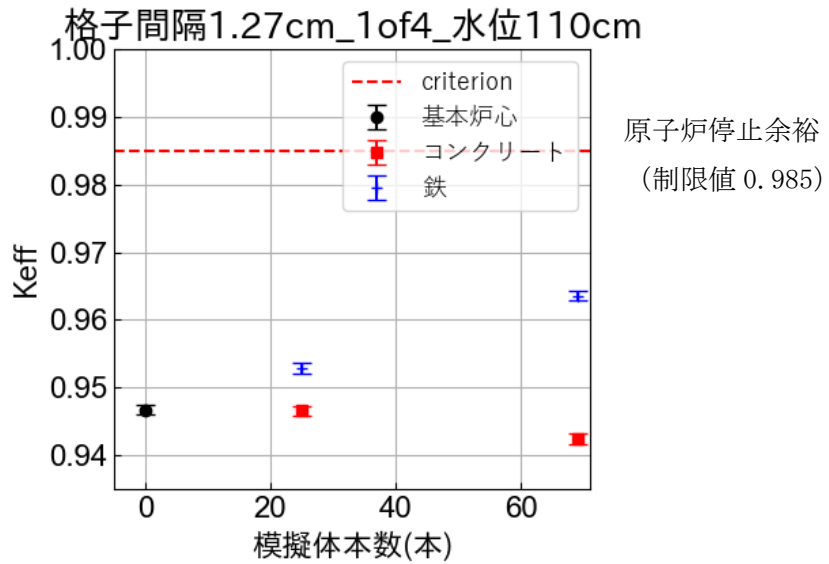


図8 (1/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数が原子炉停止余裕に及ぼす影響の評価結果 (1 of 4 配置) (表参-8)

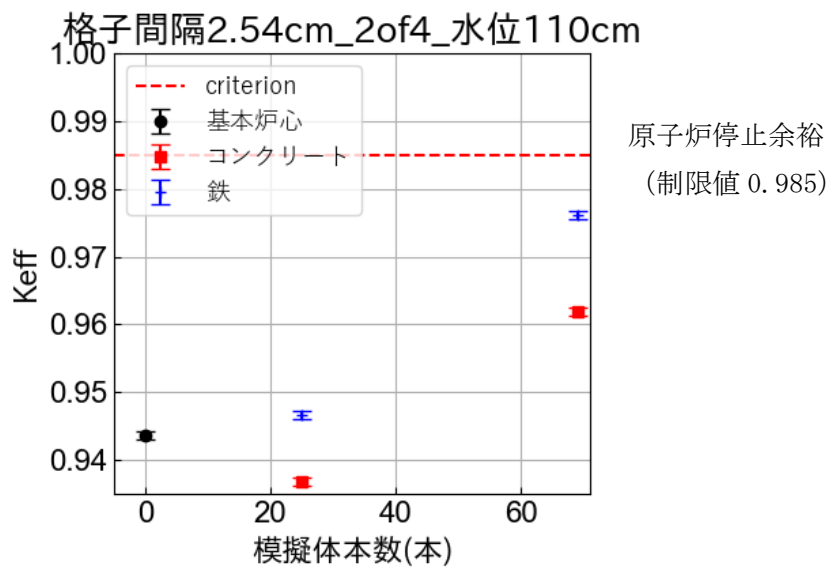
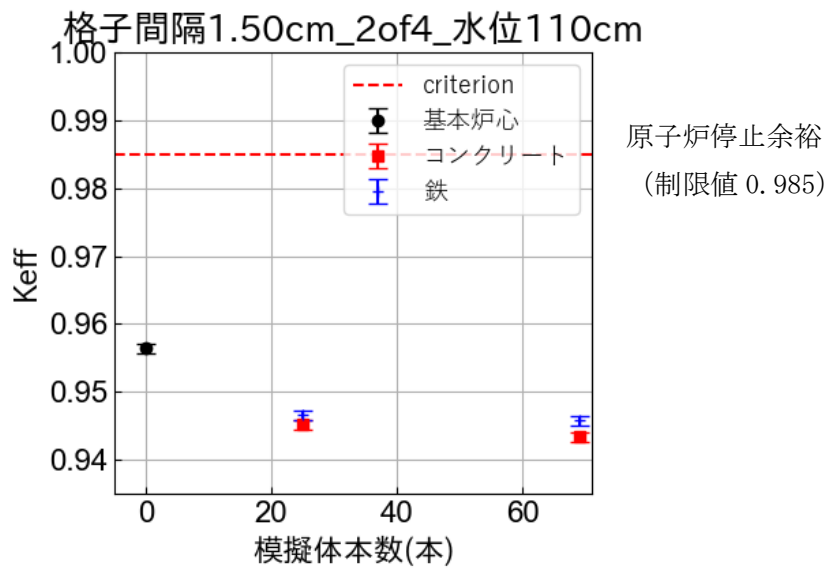
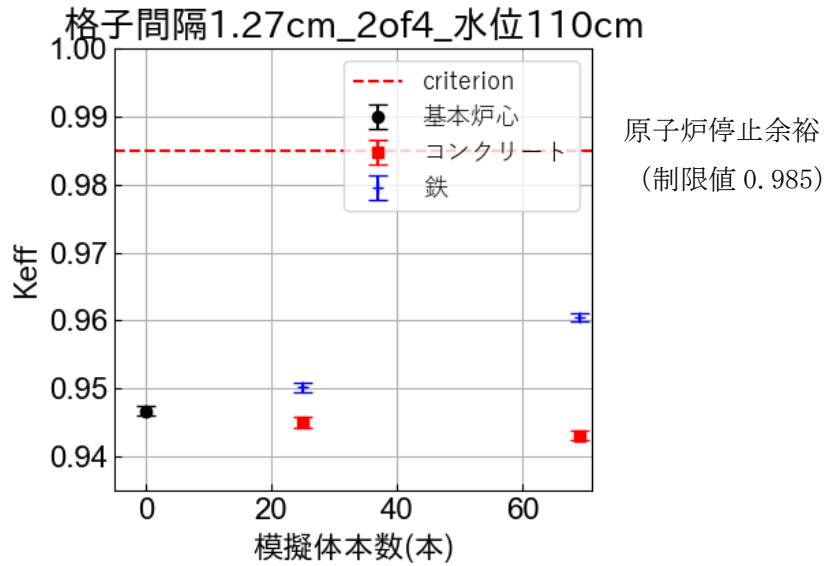


図8 (2/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数が原子炉停止余裕に及ぼす影響の評価結果 (続き) (2 of 4 配置) (表参-8)

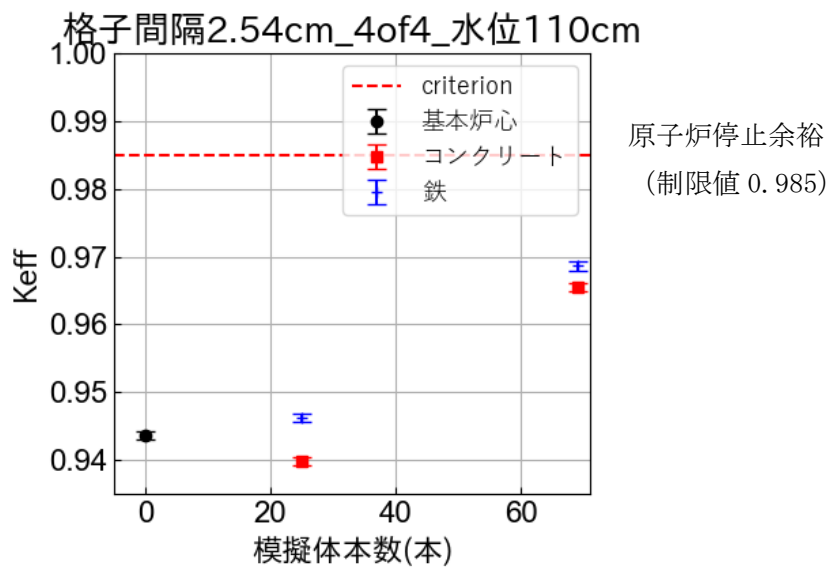
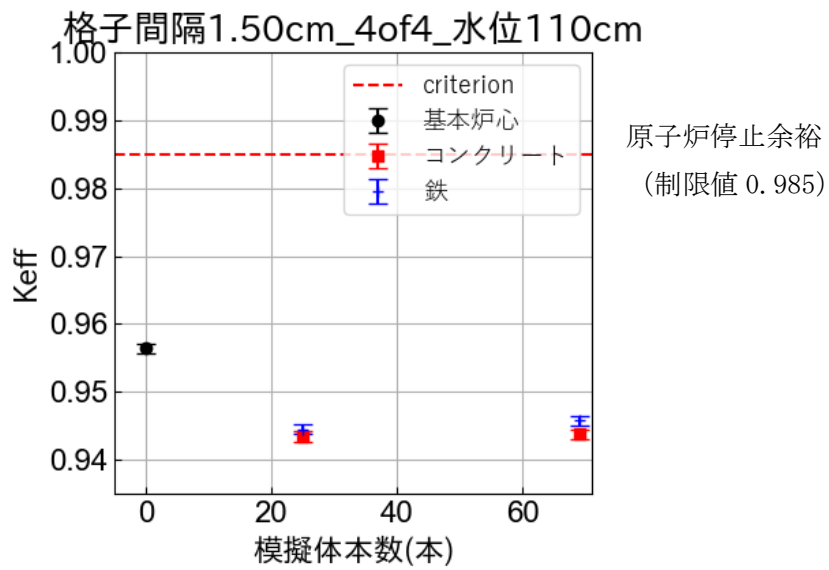
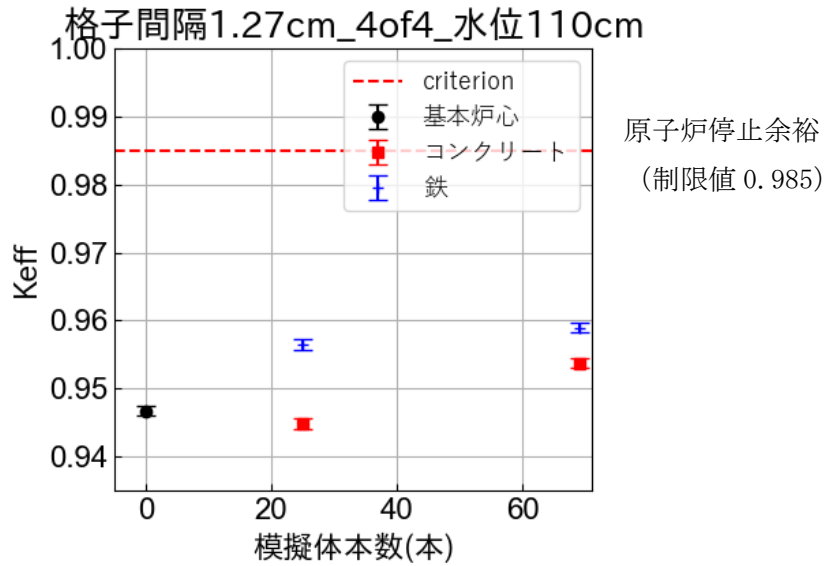
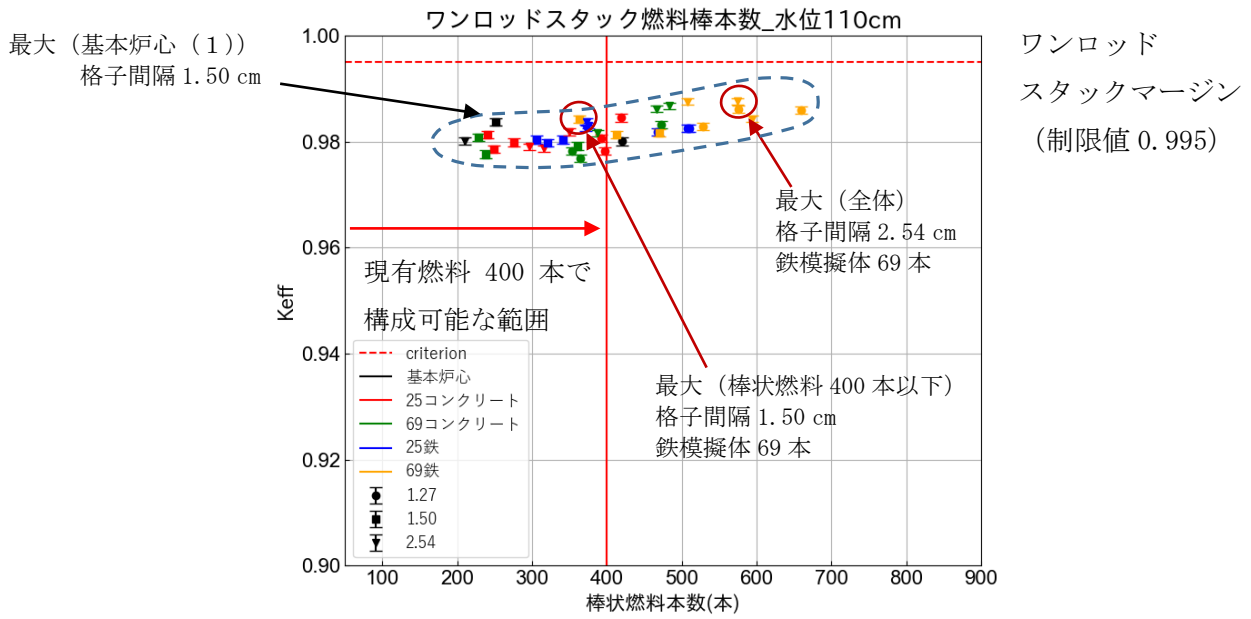
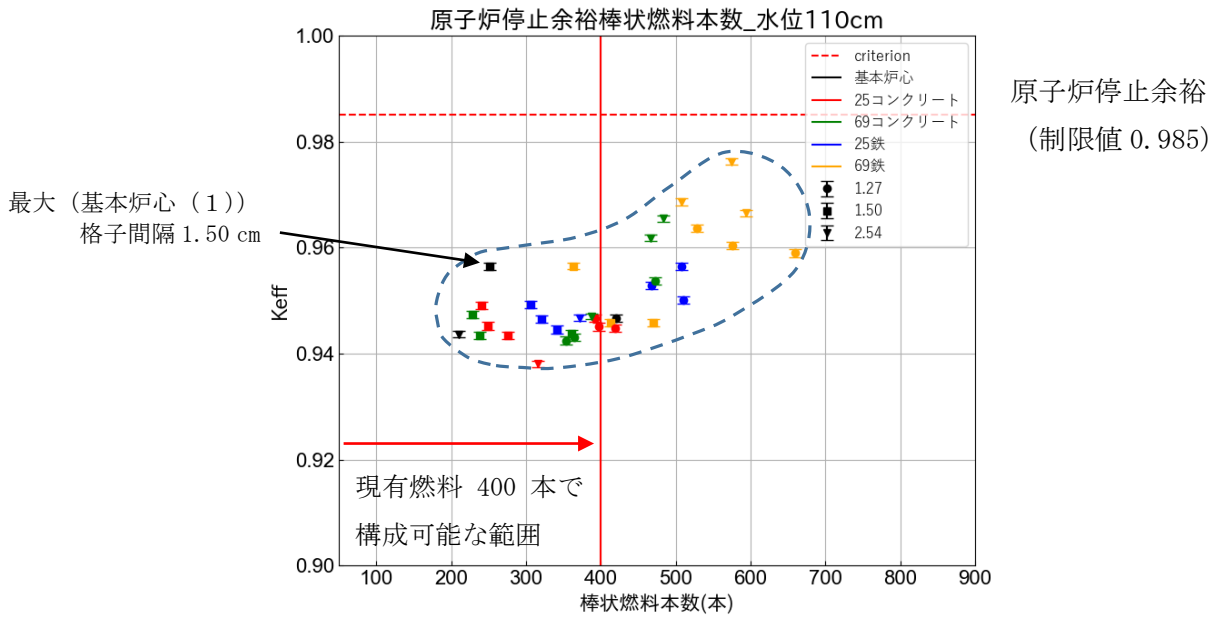


図8 (3/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数が原子炉停止余裕に及ぼす影響の評価結果 (続き) (4 of 4 配置) (表参-8)



(a) ワンロッドスタックマージンの評価



(b) 原子炉停止余裕の評価

図9 棒状燃料本数と安全板の原子炉停止効果

参考データ

以下、参考データとして(1)解析対象とした臨界炉心、(2)主要な核的制限値のひとつである水位反応度係数に係る評価、(3)デブリ構造材模擬体（鉄）の組成の感度解析の結果を示す。また、本文中の図1，2，3，7，8のプロットに用いたデータを表で示す。

参-1 解析対象とした臨界炉心

今回の申請で実際に構成できる最大に近いデブリ構造材模擬体挿入炉心として、今回製作するデブリ構造材模擬体70本のうち69本を挿入した炉心の臨界量(棒状燃料本数)を解析した。また、デブリ構造材模擬体の挿入量に対する炉心核特性の傾向を確認するため、デブリ構造材模擬体25本を装荷した炉心についても検討する。計算コード及び核データライブラリは、設工認添付計算書で使用したものと同一MVP2及びJENDL-3.3を使用した。ヒストリー数も添付計算書と同様(1ヒストリー当たり1万粒子×500バッチ;200スキップバッチで実効300万粒子)である。デブリ構造材模擬体の配列パターンは、想定される典型的な実験炉心パターンとして、炉心中央に隙間なく配列(4 of 4)するほか、棒状燃料3本に対してデブリ構造材模擬体1本(1 of 4)、棒状燃料2本に対してデブリ構造材模擬体2本(2 of 4)の合計3種類とした(図参-1)。炉心水位は、水位反応度係数を評価するため、許可上の臨界水位の下限40 cmから上限140 cmまでの40, 70, 110, 140 cmの4種類とし、格子間隔は、実験に使用する格子板の間隔1.27 cm及び1.50 cmのほか、1.27 cm格子板を1本飛ばしで使用した2本間隔の2.54 cmとした。これらの条件に対し、棒状燃料本数をパラメータとして臨界調整を行った。臨界サーベいの解析範囲を表参-1に示す。

表参-1 臨界サーベいの解析範囲

パラメータ	変化範囲	備考
デブリ構造材模擬体本数	25, 69	
配列パターン	4 of 4、1 of 4、2 of 4	
格子間隔 (cm)	1.27, 1.50, 2.54 (1.27cm 格子板の2本間隔)	
棒状燃料本数	900 本以下	パラメータ。900 本は許可上最大本数。
水位 (cm)	40, 70, 110, 140 cm	コンクリート 69 本の炉心のみ水位 90cm の臨界サーベいも行った。

臨界サーベいの結果を図参-2に示す。図には、使用前事業者検査で使用が想定されている棒状燃料 400 本以下で構成できる炉心の上限を赤い破線で示す。

参-2 水位反応度係数の評価

STACY は、水位反応度係数（臨界近傍における単位水位変化当たりの反応度効果）を許可上の上限値 $6 \phi / \text{mm}$ 以下で運転することとしている。デブリ構造材模擬体の挿入本数及び種別が水位反応度係数に及ぼす影響を確認した。計算コード及び核データライブラリは、設工認添付計算書と同様、DANTSYS 及び JENDL-3.3 を使用した。

挿入本数への依存性を評価するため、デブリ構造材模擬体の配列本数を 2.2 ⑤の評価と同様の 25 本、69 本を配列した条件に加え、デブリ構造材模擬体挿入本数が 0 本の基本炉心（1）の条件及び炉心全面に配列した条件を加えて比較した。このとき、配列パターンは、後述の鉄とコンクリートを同条件で比較するため、1 of 4 配列とした。

次に、種別の依存性を評価するため、25 本の鉄とコンクリートのデブリ構造材模擬体を 1 of 4 パターンで装荷した条件で比較した。

このとき、臨界水位は、設工認申請書添付計算書の解析と同様の 40, 70, 110, 140 cm とした。デブリ構造材模擬体の挿入本数及び種別が水位反応度係数に及ぼす影響評価の結果を図参-3-(a), (b) 及び表参-2 にそれぞれ示す。図参-3-(a) より、挿入本数によって結果に差がわずかにみられるものの、著しい変化を与える要因にはならないことが確認された。

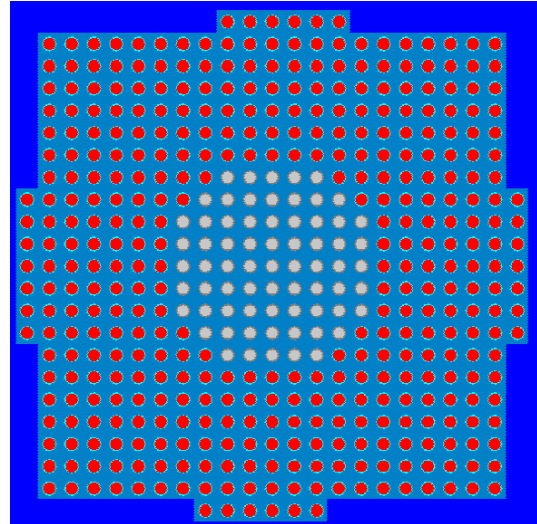
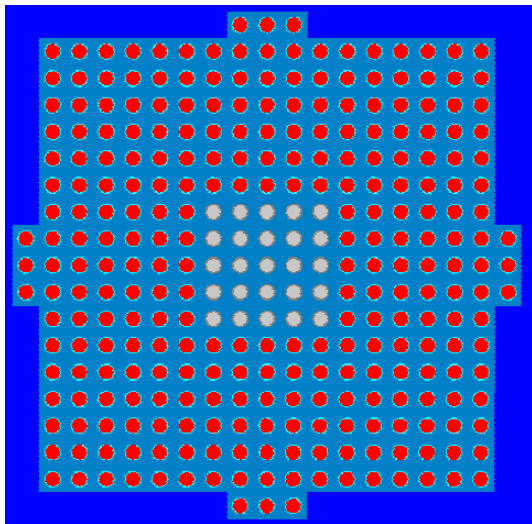
図参-3-(b) より、コンクリートのデブリ構造材模擬体を装荷した場合、水位反応度係数がやや大きくなるような傾向がみられるものの、その効果は基本炉心（1）の水位反応

度係数に対して最大約 5%程度であり、全体傾向から大きく逸脱するような変化がないことが確認された。以上より、水位反応度係数は、デブリ構造材模擬体の種別及び挿入本数を変えても原子炉の運転操作に支障がないと言える。また、水位反応度係数は臨界水位の 3 乗に反比例して低下することから、想定臨界水位を数 cm 程度上げることで、水位反応度係数の上限値 (6 ϕ /mm) 以下に収められる見通しが確認できた。

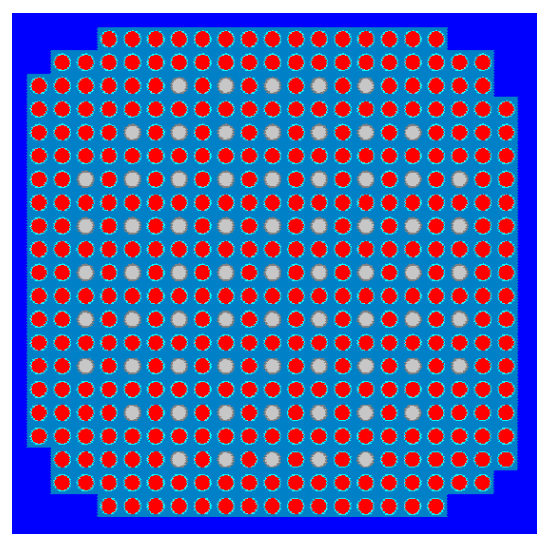
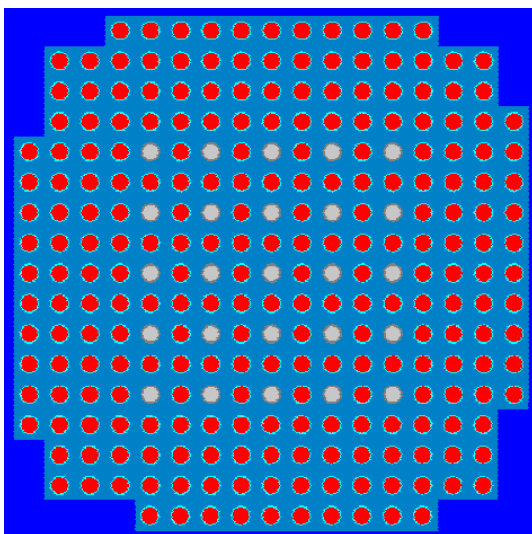
参-3 鉄の感度解析

デブリ構造材模擬体 (鉄) の材料であるステンレス鋼 (SUS304) は JIS 規格の材料を用いるため、想定される組成の変化幅は小さく、その反応度効果は無視し得ると考えられる。確認のため、ステンレス鋼の主要組成である鉄の比率を、規格上最低 (約 66.4 wt%) から最大 (約 70.8 wt%) まで変化させた感度解析を実施した。

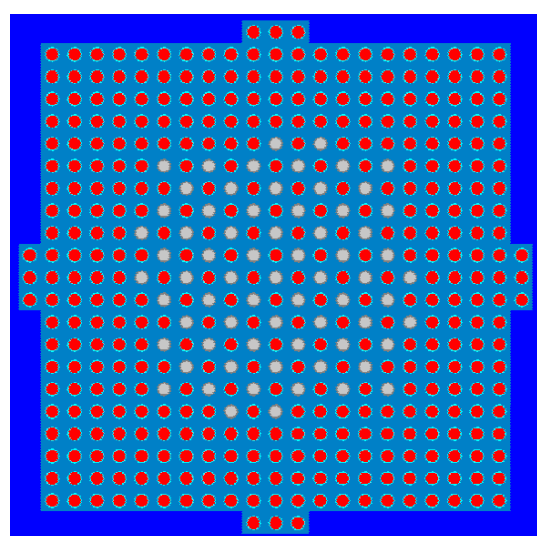
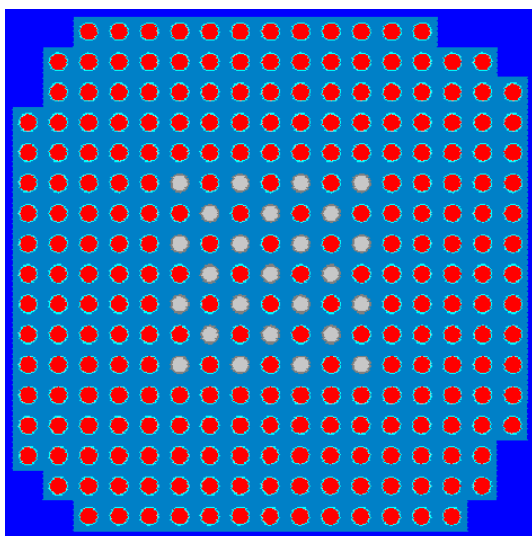
解析結果を図参-4 及び表参-3 にそれぞれ示す。図より、鉄の比率を最低から最大まで変化させた場合、最も反応度効果が大きかった炉心 (格子間隔 2.54 cm、鉄比率約 70.8 wt%) でも、その反応度効果は 1×10^{-3} $\Delta k/k$ 程度 (2 標準偏差程度) であり、無視できることが確認できた。



(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)



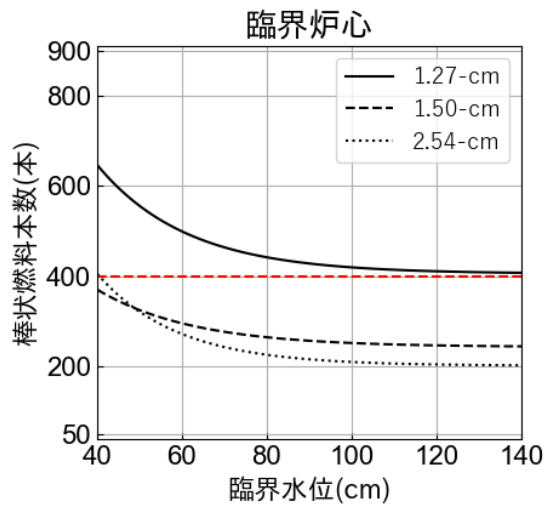
(1 of 4 配列 ; (左) 模擬体 25 本、棒状燃料 241 本、(右) 模擬体 69 本、棒状燃料 354 本)



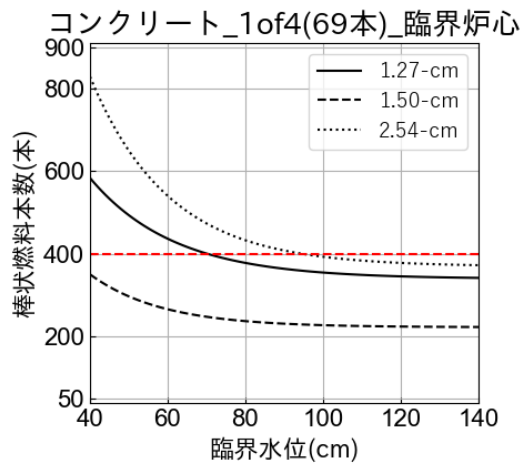
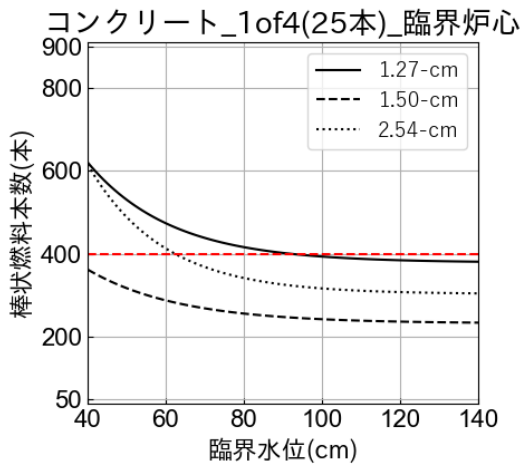
(2 of 4 配列 ; (左) 模擬体 25 本、棒状燃料 249 本、(右) 模擬体 69 本、棒状燃料 384 本)

(凡例) ●棒状燃料、○デブリ構造材模擬体

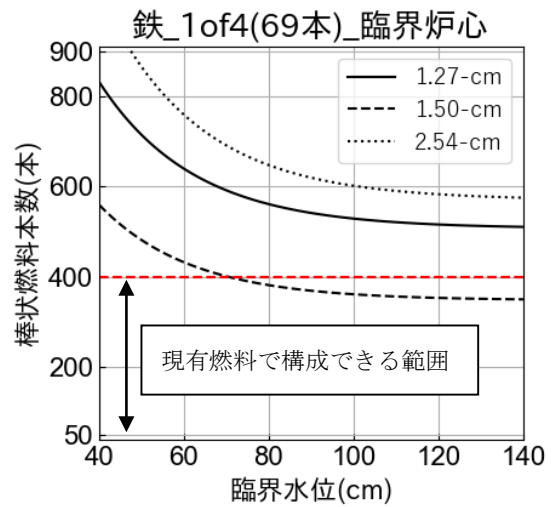
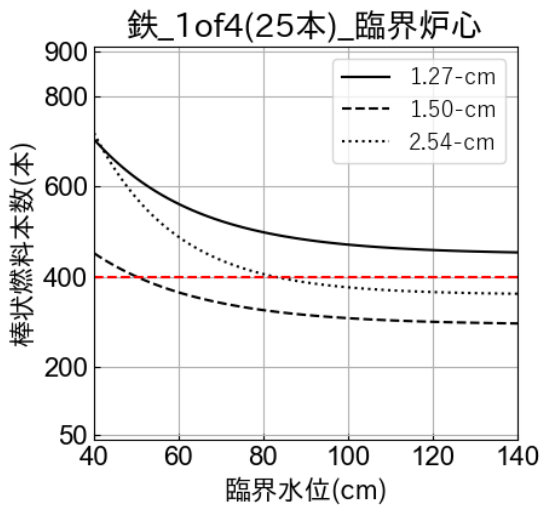
図参ー1 デブリ構造材模擬体配列パターン例 (上から 4 of 4、1 of 4、2 of 4)



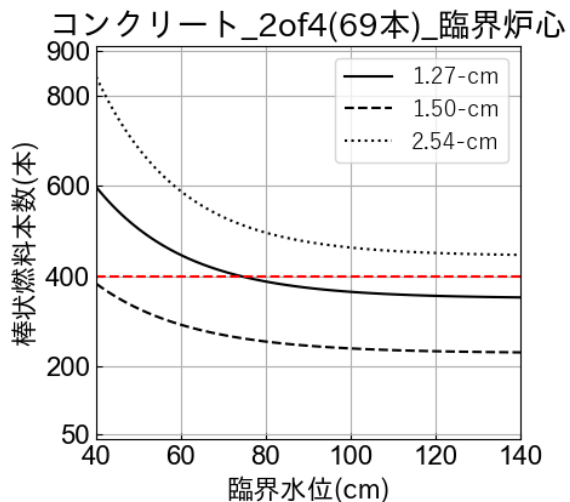
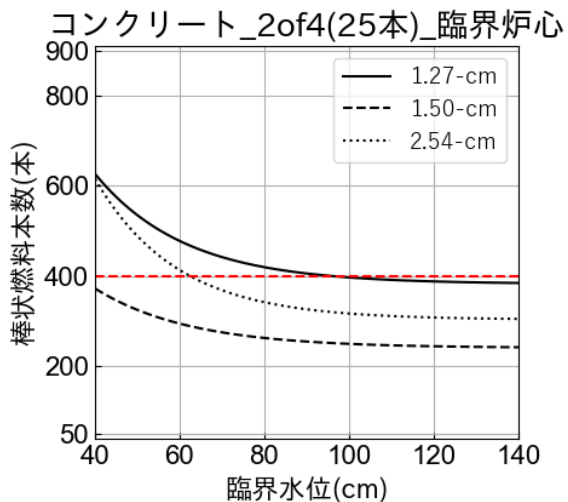
(1) 参考：基本炉心



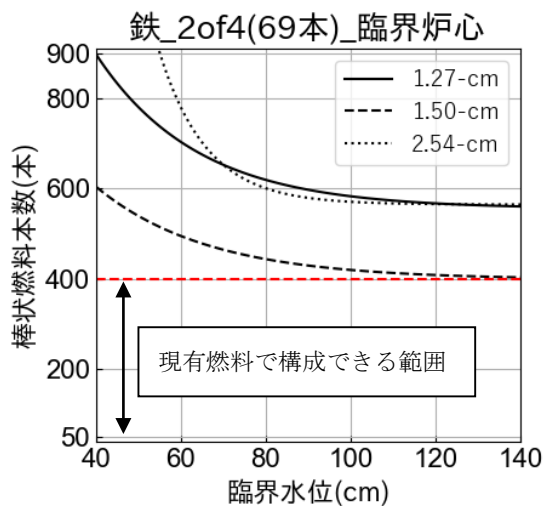
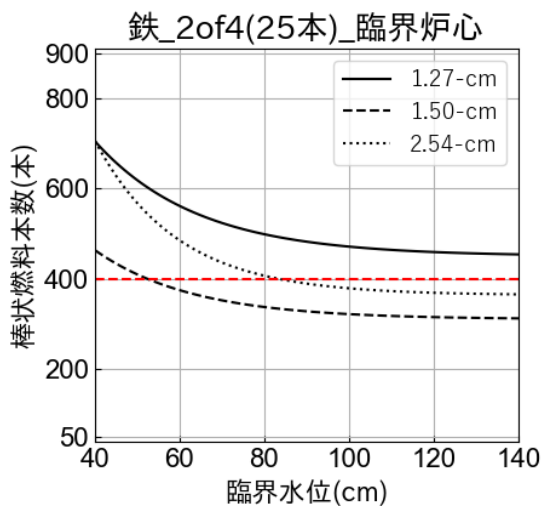
(2) デブリ構造材模擬体（コンクリート）1 of 4 配列（左：25本、右：69本）



(3) デブリ構造材模擬体（鉄）1 of 4 配列（左：25本、右：69本）

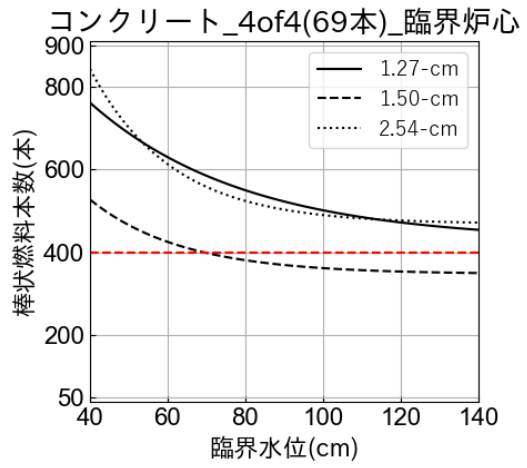
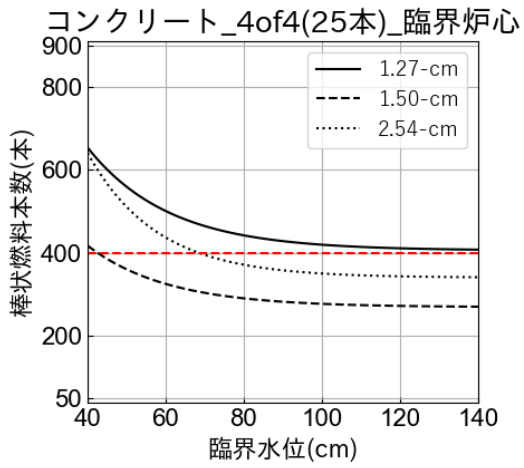


(4) Debris structural material simulation (concrete) 2 of 4 arrangement (left: 25 rods, right: 69 rods)

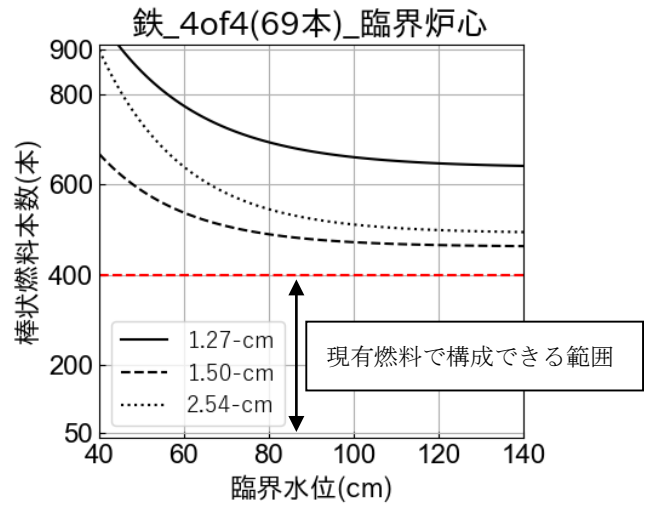
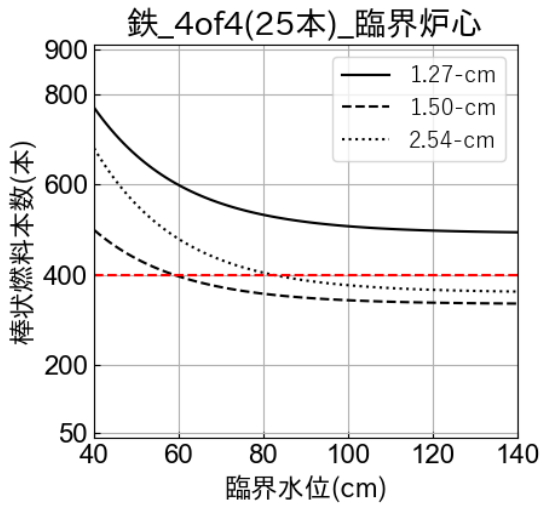


(5) Debris structural material simulation (iron) 2 of 4 arrangement (left: 25 rods, right: 69 rods)

図参-2 (2/3) Critical Survey Results (Continued)

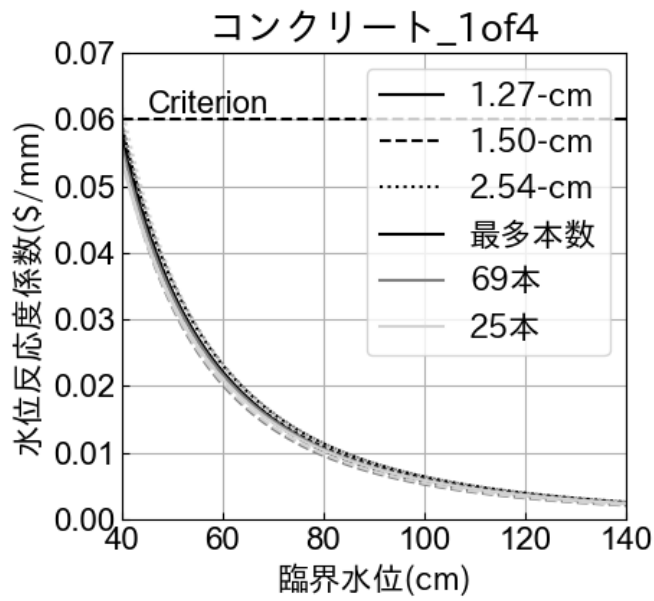


(6) Debris structure simulation (concrete) 4 of 4 arrangement (left: 25 rods, right: 69 rods)

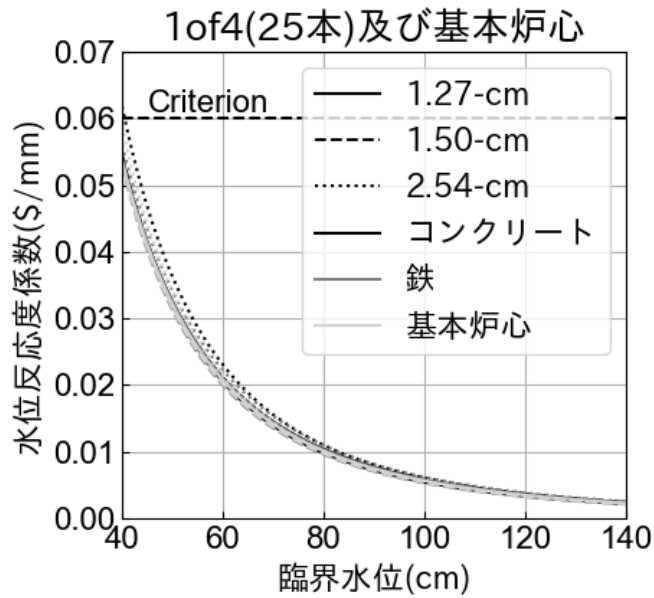


(7) Debris structure simulation (iron) 4 of 4 arrangement (left: 25 rods, right: 69 rods)

図参-2 (3/3) Critical Survey Results (Continued)

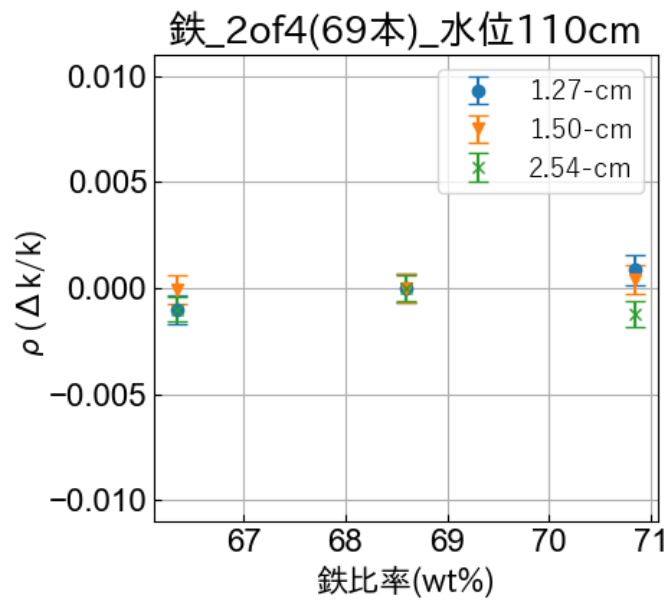


(a) 構造材模擬体挿入本数の比較 (コンクリート)



(b) 構造材模擬体種別の比較

図参-3 デブリ構造材模擬体の挿入本数及び種別が水位反応度係数に及ぼす影響の評価結果



図参－4 鉄の感度解析結果

表参-2 水位反応度係数フィッティングパラメータ (図参-3 関連)

条件	格子間隔 (cm)	変換定数 C ($\$ \cdot \text{cm}^2$)	外挿距離 λ (cm)
コンクリート (最多本数)	1.27	8.97×10^4	14.0
	1.50	7.84×10^4	11.3
	2.54	9.66×10^4	14.7
コンクリート (69 本)	1.27	8.80×10^4	14.0
	1.50	7.14×10^4	10.8
	2.54	9.62×10^4	14.4
コンクリート (25 本)	1.27	8.89×10^4	15.0
	1.50	7.60×10^4	11.8
	2.54	8.40×10^4	11.4
鉄 (25 本)	1.27	8.64×10^4	14.3
	1.50	7.48×10^4	12.1
	2.54	9.57×10^4	15.5
基本炉心	1.27	8.32×10^4	13.7
	1.50	7.70×10^4	12.5
	2.54	7.40×10^4	10.1

フィッティング式： $d\rho/dH=C/(Hc+\lambda)^3$

表参-3 鉄の感度解析結果 (図参-4 関連)

2 of 4(69 本)、水位 110 cm

格子間隔 (cm)	棒状燃料本数 (本)	鉄比率(wt%)	$\rho (\Delta k/k) * \pm 1\sigma$
1.27	576	66.4	-0.0010 ± 0.0007
		68.6	0.0000 ± 0.0007
		70.8	0.0009 ± 0.0007
1.50	413	66.4	-0.0001 ± 0.0007
		68.6	0.0000 ± 0.0007
		70.8	0.0004 ± 0.0007
2.54	574	66.4	-0.0010 ± 0.0006
		68.6	0.0000 ± 0.0006
		70.8	-0.0012 ± 0.0006

* 密度変化前の反応度係数から密度変化後の反応度を引いた値

表参-4 コンクリート密度の感度解析結果 (図1 関連)

1 of 4(69本)、水位 90 cm

格子間隔 (cm)	棒状燃料本数 (本)	コンクリート密度の変化率	$\rho (\Delta k/k) \pm 1\sigma$
1.27	374	0.0	-0.0095±0.0008
		0.5	-0.0048±0.0007
		1.0	0.0000±0.0008
		1.5	0.0040±0.0008
		2.0	0.0067±0.0007
1.50	234	0.0	-0.0063±0.0007
		0.5	-0.0041±0.0007
		1.0	0.0000±0.0005
		1.5	0.0019±0.0007
		2.0	0.0057±0.0007
2.54	410	0.0	0.0011±0.0006
		0.5	0.0004±0.0006
		1.0	0.0000±0.0006
		1.5	-0.0016±0.0006
		2.0	-0.0022±0.0006

2 of 4(69本)、水位 90 cm

格子間隔 (cm)	棒状燃料本数 (本)	コンクリート密度の変化率	$\rho (\Delta k/k) \pm 1\sigma$
1.27	379	0.0	-0.0067±0.0007
		0.5	-0.0029±0.0007
		1.0	0.0000±0.0008
		1.5	0.0027±0.0008
		2.0	0.0049±0.0007
1.50	248	0.0	-0.0017±0.0007
		0.5	-0.0006±0.0007
		1.0	0.0000±0.0007
		1.5	0.0016±0.0007
		2.0	0.0033±0.0007
2.54	485	0.0	0.0017±0.0006
		0.5	-0.0001±0.0006
		1.0	0.0000±0.0006
		1.5	-0.0018±0.0006
		2.0	-0.0033±0.0006

表参-4 コンクリート密度の感度解析結果 (図1 関連) (続き)

4 of 4(69本)、水位 90 cm

格子間隔 (cm)	棒状燃料本数 (本)	コンクリート密度の変化率	$\rho (\Delta k/k) \pm 1\sigma$
1.27	490	0.0	0.0059±0.0007
		0.5	0.0035±0.0007
		1.0	0.0000±0.0007
		1.5	-0.0038±0.0007
		2.0	-0.0078±0.0007
1.50	377	0.0	0.0068±0.0007
		0.5	0.0031±0.0007
		1.0	0.0000±0.0007
		1.5	-0.0035±0.0007
		2.0	-0.0066±0.0007
2.54	504	0.0	0.0011±0.0006
		0.5	0.0011±0.0007
		1.0	0.0000±0.0006
		1.5	0.0005±0.0006
		2.0	0.0012±0.0006

表参-5 コンクリート主要成分の感度解析結果 (図2 関連)

2 of 4(69本)、水位 110 cm

格子間隔 (cm)	棒状燃料本数 (本)	Si 及び Ca の変化率	$\rho (\Delta k/k) \pm 1\sigma$
1.27	365	0.5	-0.0009±0.0007
		1.0	0.0000±0.0007
		2.0	-0.0018±0.0007
1.50	238	0.5	-0.0003±0.0007
		1.0	0.0000±0.0007
		2.0	-0.0011±0.0007
2.54	466	0.5	-0.0003±0.0006
		1.0	0.0000±0.0006
		2.0	-0.0018±0.0006

表参-6 コンクリートの水分量の感度解析結果 (図3 関連)

1 of 4(69本)、水位 90 cm

格子間隔 (cm)	棒状燃料本数 (本)	コンクリート水分量の変化率	$\rho (\Delta k/k) \pm 1\sigma$
1.27	374	0.0	-0.0069±0.0008
		0.5	-0.0035±0.0007
		1.0	0.0000±0.0008
		1.5	0.0023±0.0007
		2.0	0.0069±0.0007
1.50	234	0.0	-0.0044±0.0007
		0.5	-0.0022±0.0007
		1.0	0.0000±0.0007
		1.5	0.0017±0.0007
		2.0	0.0025±0.0007
2.54	410	0.0	-0.0002±0.0006
		0.5	-0.0005±0.0006
		1.0	0.0000±0.0006
		1.5	-0.0008±0.0006
		2.0	-0.0008±0.0006

2 of 4(69本)、水位 90 cm

格子間隔 (cm)	棒状燃料本数 (本)	コンクリート水分量の変化率	$\rho (\Delta k/k) \pm 1\sigma$
1.27	379	0.0	-0.0057±0.0007
		0.5	-0.0032±0.0008
		1.0	0.0000±0.0008
		1.5	0.0019±0.0007
		2.0	0.0053±0.0007
1.50	248	0.0	-0.0016±0.0007
		0.5	-0.0007±0.0007
		1.0	0.0000±0.0007
		1.5	0.0028±0.0007
		2.0	0.0039±0.0007
2.54	485	0.0	0.0001±0.0006
		0.5	-0.0006±0.0006
		1.0	0.0000±0.0006
		1.5	-0.0008±0.0006
		2.0	-0.0012±0.0006

表参-6 コンクリートの水分量の感度解析結果 (図3 関連) (続き)

4 of 4(69本)、水位 90 cm

格子間隔 (cm)	棒状燃料本数 (本)	コンクリート水分量の変化率	$\rho (\Delta k/k) \pm 1\sigma$
1.27	490	0.0	0.0017±0.0007
		0.5	0.0008±0.0007
		1.0	0.0000±0.0007
		1.5	-0.0031±0.0007
		2.0	-0.0045±0.0007
1.50	377	0.0	0.0044±0.0007
		0.5	0.0020±0.0007
		1.0	0.0000±0.0007
		1.5	-0.0019±0.0007
		2.0	-0.0033±0.0007
2.54	504	0.0	0.0019±0.0006
		0.5	0.0017±0.0006
		1.0	0.0000±0.0006
		1.5	0.0009±0.0006
		2.0	0.0010±0.0006

表参-7 (1/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数がワンロッドスタックマージンに及ぼす影響の評価結果 (1 of 4 配置) (図7 関連)

格子間隔 1.27cm、1 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	420	1	0.9800±0.0007
鉄	25	468	1	0.9818±0.0007
	69	528	1	0.9828±0.0007
コンクリート	25	392	1	0.9806±0.0007
	69	354	1	0.9782±0.0007

格子間隔 1.50 cm、1 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	251	1	0.9837±0.0007
鉄	25	306	1	0.9803±0.0007
	69	363	1	0.9843±0.0007
コンクリート	25	241	1	0.9813±0.0008
	69	228	1	0.9808±0.0007

格子間隔 2.54cm、1 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	210	1	0.9801±0.0006
鉄	25	372	3	0.9826±0.0006
	69	594	3	0.9843±0.0006
コンクリート	25	316	3	0.9787±0.0006
	69	388	3	0.9816±0.0006

* 安全板挿入による水位上昇及び最大過剰反応度 80¢ を考慮済みの値

表参-7 (2/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数がワンロッドスタックマージン
に及ぼす影響の評価結果 (2 of 4 配置) (図7 関連)

格子間隔 1.27 cm、2 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	420	1	0.9800±0.0007
鉄	25	510	1	0.9825±0.0007
	69	576	1	0.9861±0.0007
コンクリート	25	397	1	0.9783±0.0007
	69	365	1	0.9769±0.0007

格子間隔 1.50 cm、2 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	251	1	0.9837±0.0007
鉄	25	321	1	0.9797±0.0007
	69	413	1	0.9813±0.0007
コンクリート	25	249	1	0.9786±0.0007
	69	238	1	0.9776±0.0007

格子間隔 2.54cm、2 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	210	1	0.9801±0.0006
鉄	25	376	3	0.9830±0.0006
	69	574	3	0.9876±0.0006
コンクリート	25	296	3	0.9790±0.0006
	69	466	3	0.9862±0.0006

* 安全板挿入による水位上昇及び最大過剰反応度 80¢ を考慮済みの値

表参-7 (3/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数がワンロッドスタックマージンに及ぼす影響の評価結果 (4 of 4 配置) (図7 関連)

格子間隔 1.27 cm、4 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	420	1	0.9800±0.0007
鉄	25	508	1	0.9825±0.0007
	69	660	1	0.9859±0.0007
コンクリート	25	419	1	0.9845±0.0007
	69	472	1	0.9832±0.0007

格子間隔 1.50 cm、4 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	251	1	0.9837±0.0007
鉄	25	342	1	0.9803±0.0007
	69	470	1	0.9817±0.0007
コンクリート	25	276	1	0.9799±0.0007
	69	361	1	0.9791±0.0007

格子間隔 2.54cm、4 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	210	1	0.9801±0.0006
鉄	25	373	3	0.9837±0.0007
	69	508	3	0.9875±0.0006
コンクリート	25	350	3	0.9818±0.0006
	69	484	3	0.9868±0.0006

* 安全板挿入による水位上昇及び最大過剰反応度 80¢ を考慮済みの値

表参-8 (1/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数が原子炉停止余裕
に及ぼす影響の評価結果 (1 of 4 配置) (図8 関連)

格子間隔 1.27 cm、1 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	$k_{eff}^* \pm 1\sigma$
基本炉心 (1)	0	420	2	0.9467±0.0007
鉄	25	468	2	0.9529±0.0007
	69	528	2	0.9636±0.0007
コンクリート	25	392	2	0.9466±0.0007
	69	354	2	0.9424±0.0008

格子間隔 1.50 cm、1 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	$k_{eff}^* \pm 1\sigma$
基本炉心 (1)	0	251	2	0.9564±0.0007
鉄	25	306	2	0.9493±0.0007
	69	363	2	0.9565±0.0007
コンクリート	25	241	2	0.9491±0.0007
	69	228	2	0.9474±0.0007

格子間隔 2.54cm、1 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	$k_{eff}^* \pm 1\sigma$
基本炉心 (1)	0	210	2	0.9437±0.0006
鉄	25	372	4	0.9467±0.0006
	69	594	4	0.9665±0.0006
コンクリート	25	316	4	0.9381±0.0006
	69	388	4	0.9470±0.0006

* 安全板挿入による水位上昇及び最大過剰反応度 80¢ を考慮済みの値

表参-8 (2/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数が原子炉停止余裕
に及ぼす影響の評価結果 (2 of 4 配置) (図8 関連)

格子間隔 1.27 cm、2 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	$k_{eff}^* \pm 1\sigma$
基本炉心 (1)	0	420	2	0.9467±0.0007
鉄	25	510	2	0.9502±0.0007
	69	576	2	0.9605±0.0007
コンクリート	25	397	2	0.9451±0.0008
	69	365	2	0.9431±0.0007

格子間隔 1.50 cm、2 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	$k_{eff}^* \pm 1\sigma$
基本炉心 (1)	0	251	2	0.9564±0.0007
鉄	25	321	2	0.9466±0.0007
	69	413	2	0.9458±0.0007
コンクリート	25	249	2	0.9452±0.0007
	69	238	2	0.9434±0.0007

格子間隔 2.54cm、2 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	$k_{eff}^* \pm 1\sigma$
基本炉心 (1)	0	210	2	0.9437±0.0006
鉄	25	376	4	0.9466±0.0006
	69	574	4	0.9762±0.0006
コンクリート	25	296	4	0.9368±0.0006
	69	466	4	0.9618±0.0006

* 安全板挿入による水位上昇及び最大過剰反応度 80¢ を考慮済みの値

表参-8 (3/3) デブリ構造材模擬体の挿入本数が原子炉停止余裕
に及ぼす影響の評価結果 (4 of 4 配置) (図8 関連)

格子間隔 1.27 cm、4 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	420	2	0.9467±0.0007
鉄	25	508	2	0.9564±0.0008
	69	660	2	0.9589±0.0007
コンクリート	25	419	2	0.9448±0.0007
	69	472	2	0.9537±0.0007

格子間隔 1.50 cm、4 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	251	2	0.9564±0.0007
鉄	25	342	2	0.9445±0.0007
	69	470	2	0.9458±0.0007
コンクリート	25	276	2	0.9434±0.0007
	69	361	2	0.9438±0.0007

格子間隔 2.54cm、4 of 4、水位 110 cm

デブリ構造材模擬体	模擬体挿入 本数 (本)	棒状燃料 本数 (本)	安全板枚数 (枚)	keff* ± 1σ
基本炉心 (1)	0	210	2	0.9437±0.0006
鉄	25	373	4	0.9462±0.0007
	69	508	4	0.9686±0.0006
コンクリート	25	350	4	0.9399±0.0006
	69	484	4	0.9655±0.0006

* 安全板挿入による水位上昇及び最大過剰反応度 80¢ を考慮済みの値

付録表 コンクリートの組成データ

コンクリート (標準組成)			
核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)	核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)
H-1	1.3743×10^{-2}	Al-27	1.7409×10^{-3}
O-16	4.5933×10^{-2}	Si-nat	1.6617×10^{-2}
C-nat	1.1532×10^{-4}	K-nat	4.6054×10^{-4}
Na-nat	9.6397×10^{-4}	Ca-nat	1.5026×10^{-3}
Mg-nat	1.2389×10^{-4}	Fe-nat	3.4507×10^{-4}

コンクリート (密度 0.5 倍)			
核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)	核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)
H-1	6.8715×10^{-3}	Al-27	8.7045×10^{-4}
O-16	2.2967×10^{-3}	Si-nat	8.3085×10^{-3}
C-nat	5.7660×10^{-5}	K-nat	2.3027×10^{-4}
Na-nat	4.8199×10^{-4}	Ca-nat	7.5130×10^{-4}
Mg-nat	6.1945×10^{-5}	Fe-nat	1.7254×10^{-4}

コンクリート (密度 2.0 倍)			
核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)	核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)
H-1	2.7486×10^{-2}	Al-27	3.4818×10^{-3}
O-16	9.1867×10^{-2}	Si-nat	3.3234×10^{-2}
C-nat	2.3064×10^{-4}	K-nat	9.2108×10^{-4}
Na-nat	1.9280×10^{-3}	Ca-nat	3.0052×10^{-3}
Mg-nat	2.4778×10^{-4}	Fe-nat	6.9014×10^{-4}

※ -natは天然核種組成を示す。

付録表 コンクリートの組成データ (続き)

コンクリート(水分量0.5倍) 水分率約4.7 wt%			
核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)	核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)
H-1	6.8715×10^{-3}	Al-27	1.7409×10^{-3}
O-16	4.2497×10^{-2}	Si-nat	1.6617×10^{-2}
C-nat	1.1532×10^{-4}	K-nat	4.6054×10^{-4}
Na-nat	9.6397×10^{-4}	Ca-nat	1.5026×10^{-3}
Mg-nat	1.2389×10^{-4}	Fe-nat	3.4507×10^{-4}

コンクリート(水分量2.0倍) 水分率約16.4 wt%			
核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)	核種	密度 ($10^{24}/\text{cm}^3$)
H-1	2.7486×10^{-2}	Al-27	1.7409×10^{-3}
O-16	5.2805×10^{-2}	Si-nat	1.6617×10^{-2}
C-nat	1.1532×10^{-4}	K-nat	4.6054×10^{-4}
Na-nat	9.6397×10^{-4}	Ca-nat	1.5026×10^{-3}
Mg-nat	1.2389×10^{-4}	Fe-nat	3.4507×10^{-4}

※ -natは天然核種組成を示す。

(参考) コンクリートの水分量

組成	水分量 w (g/cm^3)	水分以外の組成 o (g/cm^3)	水分率 w/(w+o) (wt%)
標準組成	0.206	2.094	9.0
水分量0.5倍	0.103	2.094	4.7
水分量2.0倍	0.412	2.094	16.4