

令和 5 年 2 月 16 日
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

コンクリートの材料検査に係る判定基準を設定するため、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、原子炉停止余裕（ワンロッドスタックマージン）及び水位反応度の評価を行い、コンクリートの密度及び水分量の影響を評価した。加えて、鉄製のデブリ構造材模擬体について、原子炉停止余裕（ワンロッドスタックマージン）及び水位反応度係数に及ぼす影響を確認した。以下に解析の結果を示す。

2. 解析内容

2.1 コンクリートの感度解析

① 臨界サーベイ

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 本を挿入した炉心を解析した。また、デブリ構造材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 本の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、設工認申請に使用したのと同じ MVP2 及び JENDL-3.3 を使用した。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 1）。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。臨界サーベイの解析範囲を表 1 に示す。

表1 臨界サーベイの解析範囲

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 の臨界サーベイも行った。

臨界サーベイの結果のうち、代表的な解析結果として 2 of 4 の結果を図 2 に示す。これらのうち、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。

② コンクリート密度の感度解析

①で解析した炉心のうち、デブリ構造材模擬体本数が現実的に最大に近い 69 本、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/cm³、水分量約 9 wt%）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する。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 3 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 の炉心については大きな効果は見られない。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 配列では負の効果が見られる。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 4 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。

③ 水分量の感度解析

②の推測を確認するため、②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 、水分量約 $9 \text{ wt}\%$ ）を基本とし、密度と同様の倍率として 0.5 倍と 2.0 倍、その他水分 0 （水なし）の炉心の核特性を評価した。コンクリートの水分量の感度解析結果を図5に示す。水分量の変化に対する反応度の応答は、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分かる。

2.2 原子炉停止余裕（ワンロードスタックマージン）に与える影響

④ コンクリート密度及び水分量が原子炉停止余裕に与える影響

コンクリートの密度及び水分量が、重要な核的制限値である原子炉停止余裕（ワンロードスタックマージン）に及ぼす影響の評価を行った。

評価に当たり、②及び③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を挿入した炉心との反応度差から原子炉停止余裕（ワンロードスタックマージン）を計算する。このとき、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。）と同様の調整を行った。コンクリート密度及び水分量が原子炉停止余裕に与える影響評価の結果を図6及び図7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あり、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、正の効果は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原子炉停止余裕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

①で評価した臨界炉心のうち、デブリ構造材模擬体本数が原子炉停止余裕（ワンロードスタックマージン）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（ワンロー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、配列は $2 \text{ of } 4$ 配置とした。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原子炉停

止余裕（ワンロードスタックマージン）に及ぼす影響の解析結果を図 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、格子間隔 1.27 cm、1.50 cm の炉心について、コンクリートのデブリ構造材模擬体を挿入した炉心では安全板の効果が大きく、鉄のデブリ構造材模擬体を挿入した炉心では安全板の効果が小さ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。しかしながら、その効果は、組成及び本数の変化に対して鈍感である。一方、格子間隔 2.54 cm では、その変化が大きくなる。これは、格子間隔の拡大（炉心そのものの拡大）によって安全板の影響範囲が相対的に小さくなり、棒状燃料及びデブリ構造材模擬体と安全板との位置関係による核的効果が加わるためである。棒状燃料及びデブリ構造材模擬体と安全板との位置関係を図 9 に示す。格子間隔 1.27 cm 及び格子間隔 1.5 cm の炉心では、安全板は棒状燃料の領域に挿入される。このような領域では安全板の中性子吸収効果は大きい。一方、格子間隔 2.54 cm の炉心では安全板はデブリ構造材模擬体の領域に挿入される。このような場所では熱中性子束が小さくなり、安全板の中性子吸収効果が小さくなる。上記のような炉心構造材と安全板の位置による核的効果を受けやすい炉心では、安全板の効果が小さくなる領域（デブリ構造材模擬体が多い領域）への挿入を避け、効果が大きくなる領域（棒状燃料が多い領域）に安全板位置を変更したり、安全板の枚数を増やしたりすることで、核的制限値の基準内に収まるように炉心を構成する。

2.3 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 $6 \text{ } \phi / \text{mm}$ 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。

挿入本数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 10-(a),(b)にそれぞれ示す。図 10(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 10-(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、傾向が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基本炉心の水位反応度係数に対して最大約5%の上昇に留まる。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、想定臨界水位を上げることで、水位反応度係数の上限値(6¢/mm)以下に収められる見通しが確認できた。

2.4 鉄の感度解析

デブリ構造材(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11に示す。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 $1 \times 10^{-3} \Delta k/k$ 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。

3. まとめ

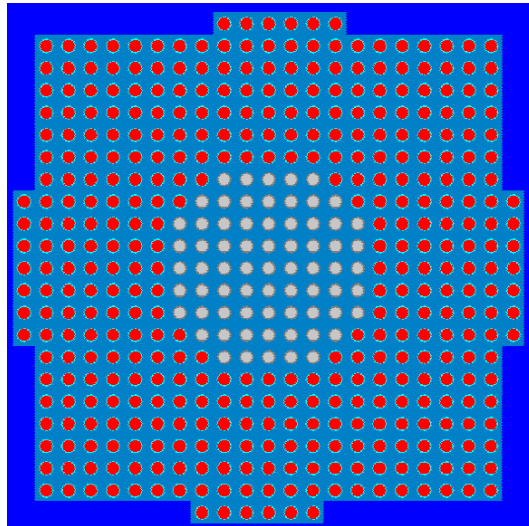
解析により、以下のことが確認できた。

- (1) コンクリートの密度及び主要組成(ケイ素 Si 及びカルシウム Ca)を、製作上の公差を十分に包含し得る範囲として0.5倍から2倍まで変化させた感度解析を実施した。また、水分量については、0倍(水なし)から2倍まで変化させた感度解析を実施した。その結果、反応度に対するコンクリートの組成変化の影響は水分の変化によるものが支配的であることが確認できた。
- (2) 主要な核的制限値である原子炉停止余裕に対するデブリ構造材模擬体の影響を確認するため、コンクリート密度及び水分量の変化の原子炉停止余裕(ワンロッドスタックマージン)に対する感度解析を実施した。解析の結果、コンクリート密度及び水分量が原子炉停止余裕(ワンロッドスタックマージン)に顕著な影響を及ぼすものではないと結論づけられた。
- (3) (2)に加え、デブリ構造材模擬体の挿入本数が原子炉停止余裕に対して及ぼす影響を確認するため、コンクリート及び鉄のデブリ構造材模擬体の挿入本数をパラメータとした解析を実施した。その結果、模擬体の種別及び挿入本数に対してはその変化は鈍感であることが確認できた。また、格子間隔が大きくなる(炉心が大きくなる)と、棒状燃料及びデブリ構造材模擬体と安全板との位置関係によって安全板の効果が弱まる炉心が現れてくるが、その場合は、安全板の効果が大きくなる領域(棒状燃料が多い領域)に安全板位置を変更したり、安全板の枚数を増やしたりすることで、核的制限値の基準内に収まるように炉心を構成する。
- (4) デブリ構造材模擬体の種別及び挿入本数が水位反応度係数に及ぼす影響を確認するため、コンクリート及び鉄のデブリ構造材模擬体の挿入本数をパラメータとした解析を実

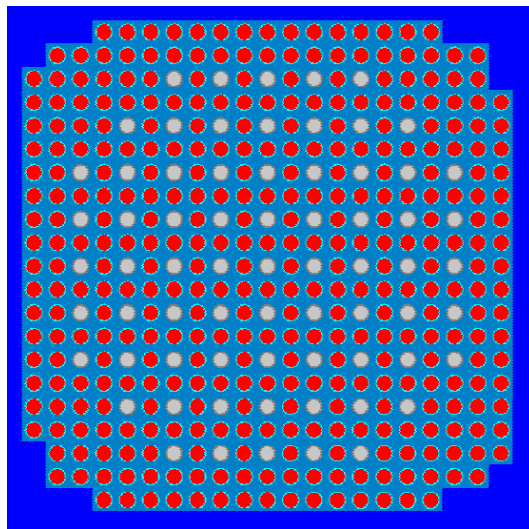
施した。その結果、水位反応度係数は、デブリ構造材模擬体の種別及び挿入本数を変えても基本炉心の水位反応度係数に対して最大約5%の上昇に留まり、水位反応度係数を上限値(6¢/mm)以下で運転できる見通しが得られた。

- (5) 鉄の密度を、JIS規格上想定される最低から最大まで変化させた感度解析を実施した。その結果、反応度に対する鉄の組成変化の影響は最大でも $1 \times 10^{-3} \Delta k/k$ 程度であり無視できることが確認できた。

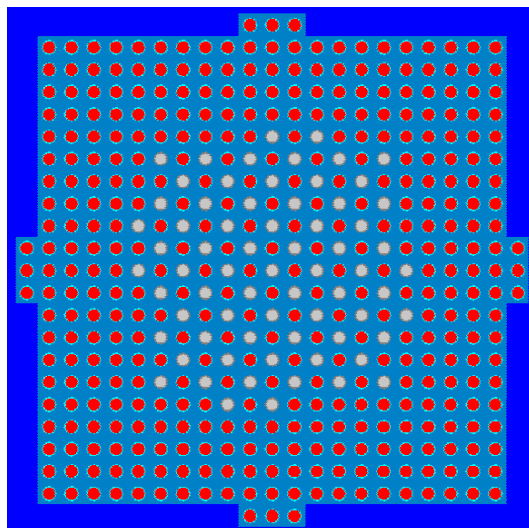
以 上



(4 of 4 配列 ; 棒状燃料 398 本)



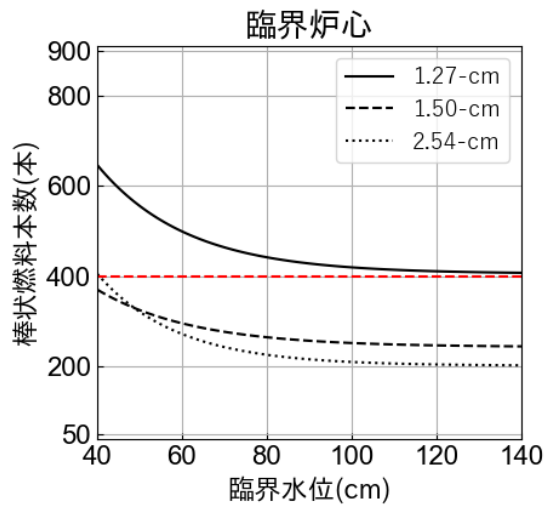
(1 of 4 配列 ; 棒状燃料 354 本)



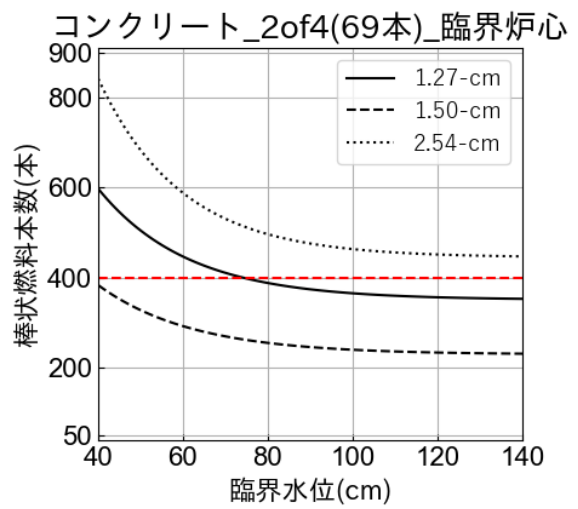
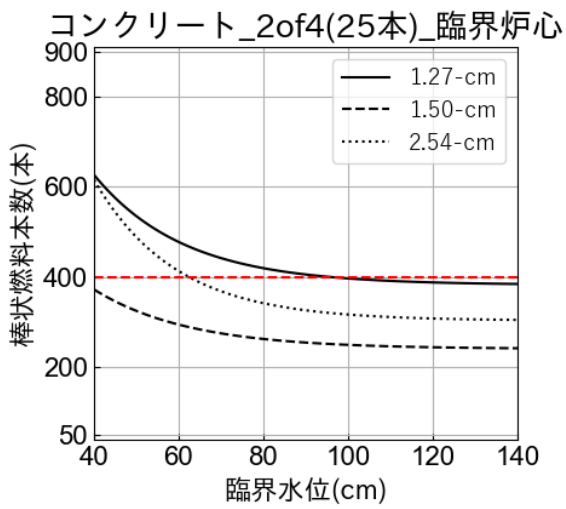
(2 of 4 配列 ; 棒状燃料 384 本)

(凡例) ●棒状燃料、○デブリ構造材模擬体

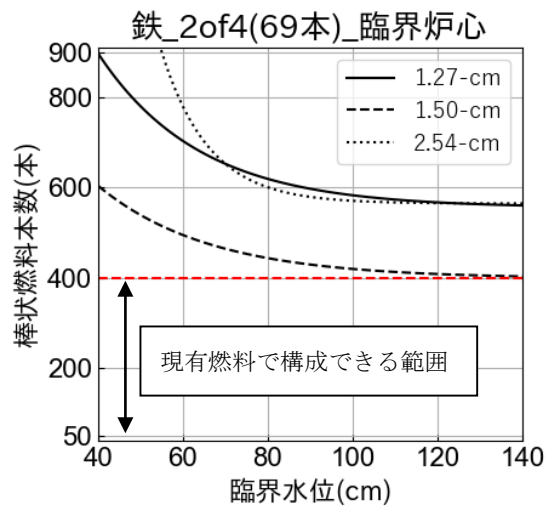
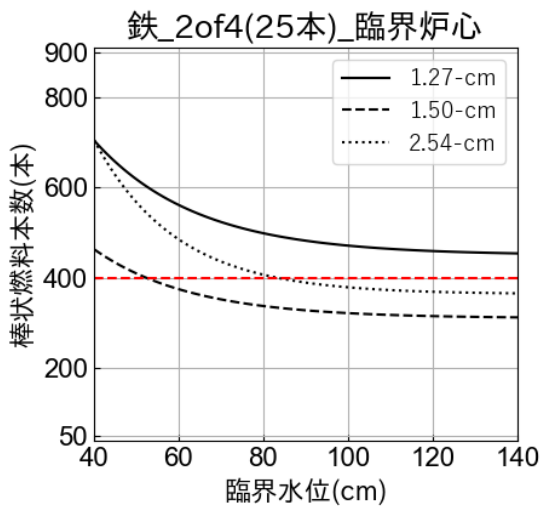
図1 デブリ構造材模擬体配列パターン例 (上から 4 of 4、1 of 4、2 of 4)



(1) 参考：基本炉心



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



(3) デブリ構造材模擬体（鉄）2 of 4 配列（左：25本、右：69本）

図2 臨界サーベイ結果

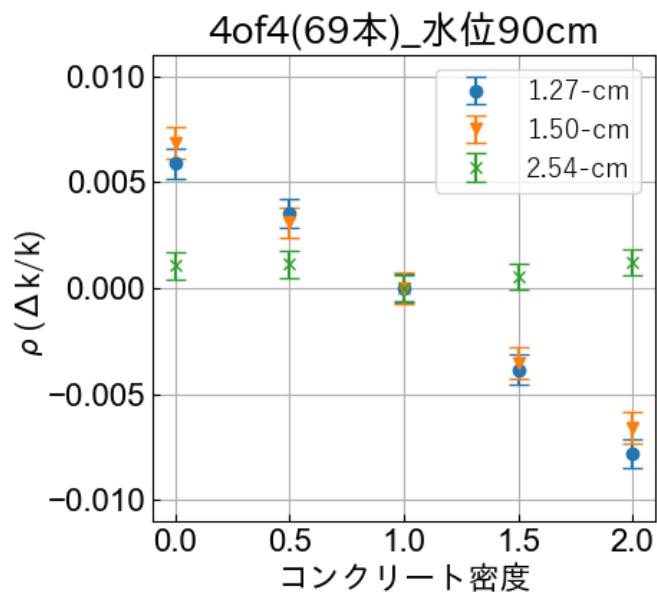
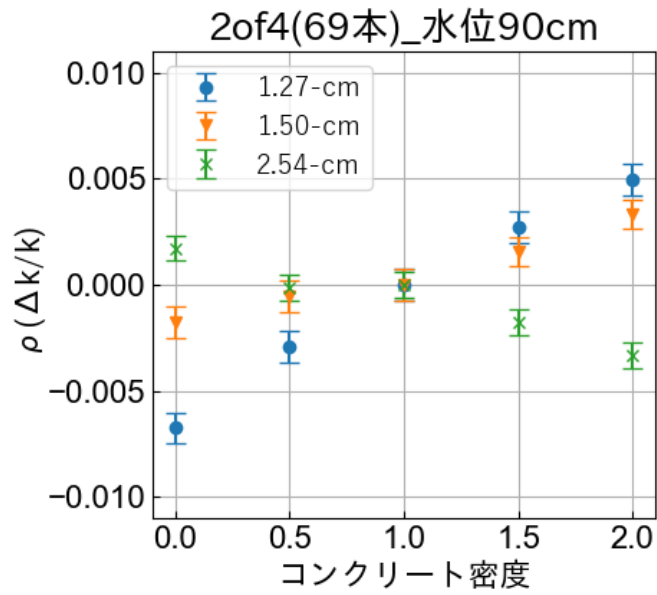
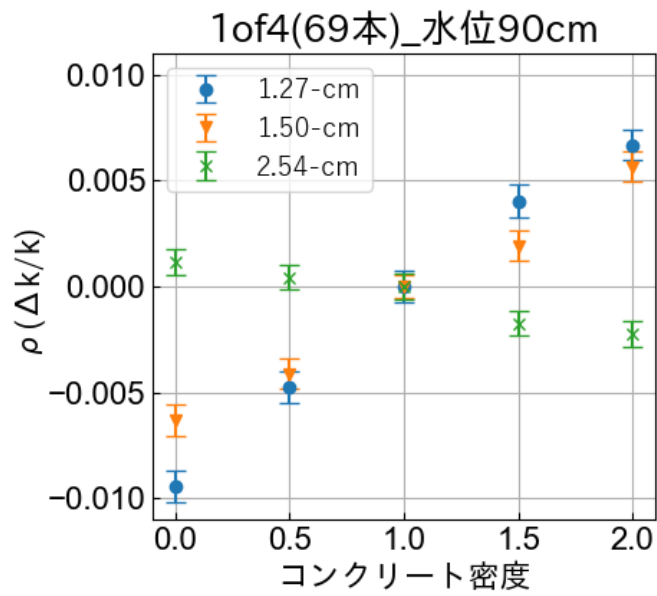


図3 コンクリート密度の感度解析結果

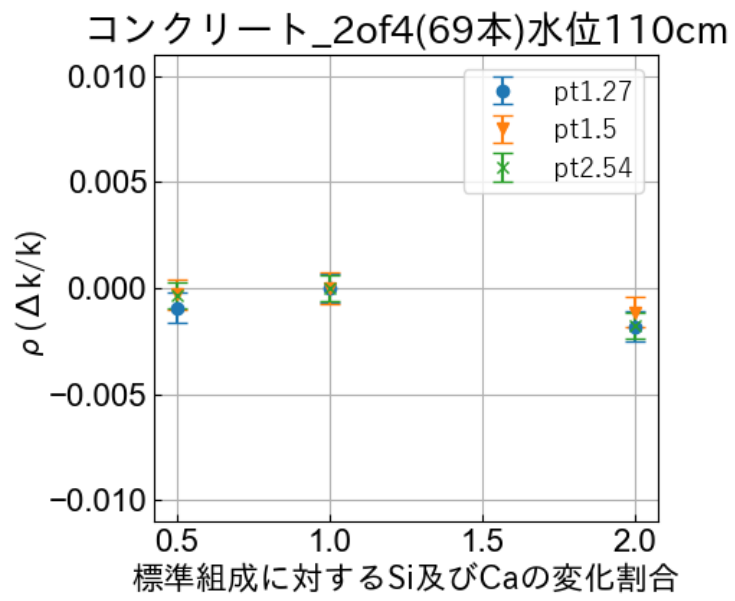


図4 コンクリート主要成分の感度解析結果

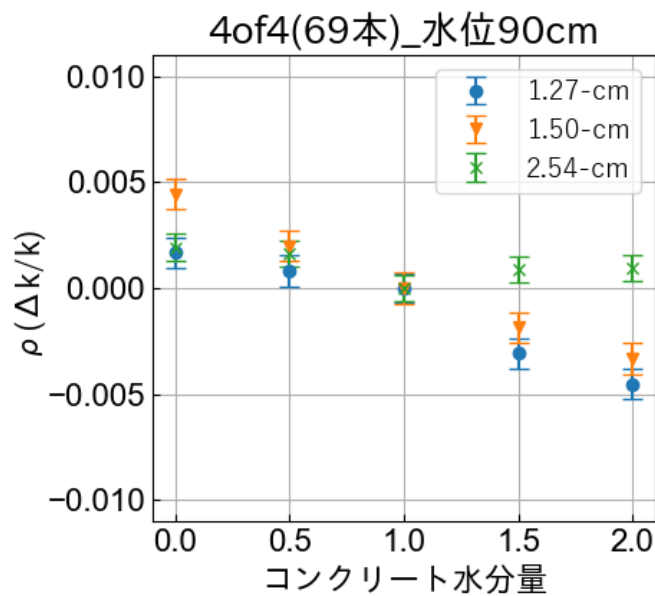
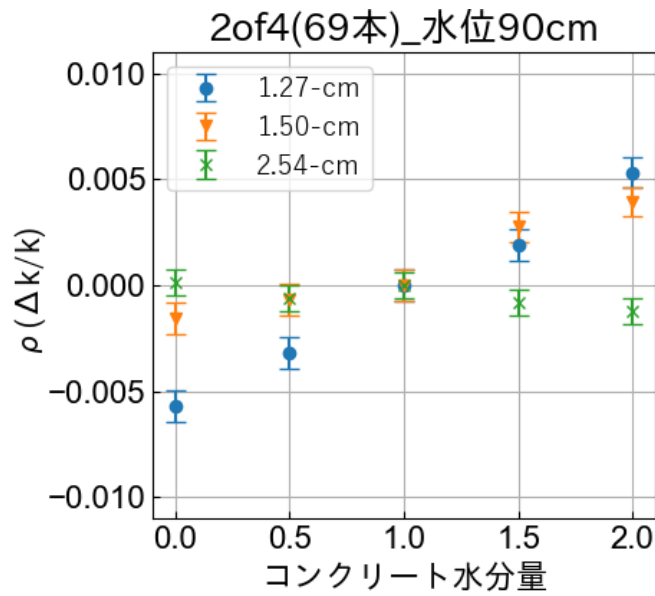
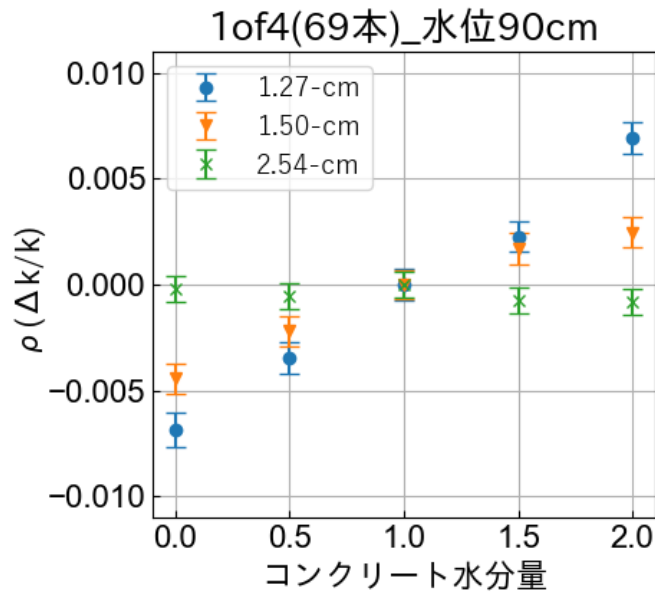


図5 コンクリートの水分量の感度解析結果

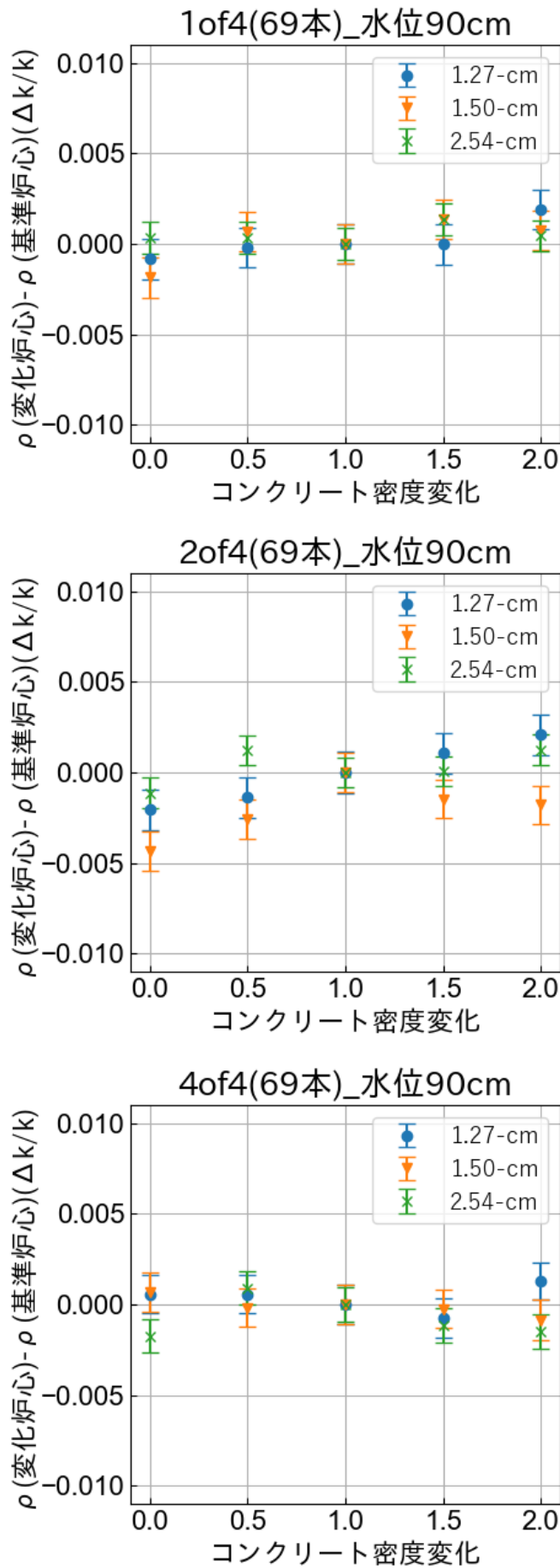


図6 コンクリート密度が原子炉停止余裕に及ぼす影響解析結果

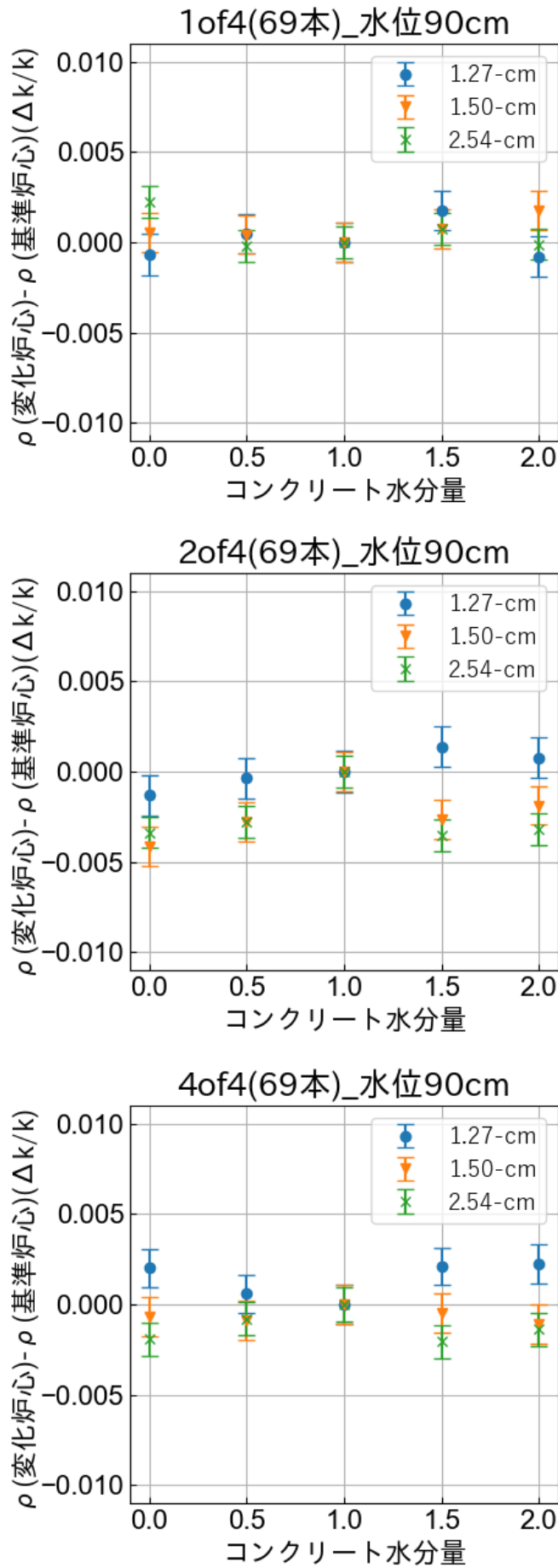


図7 コンクリート水分量が原子炉停止余裕に及ぼす影響解析結果

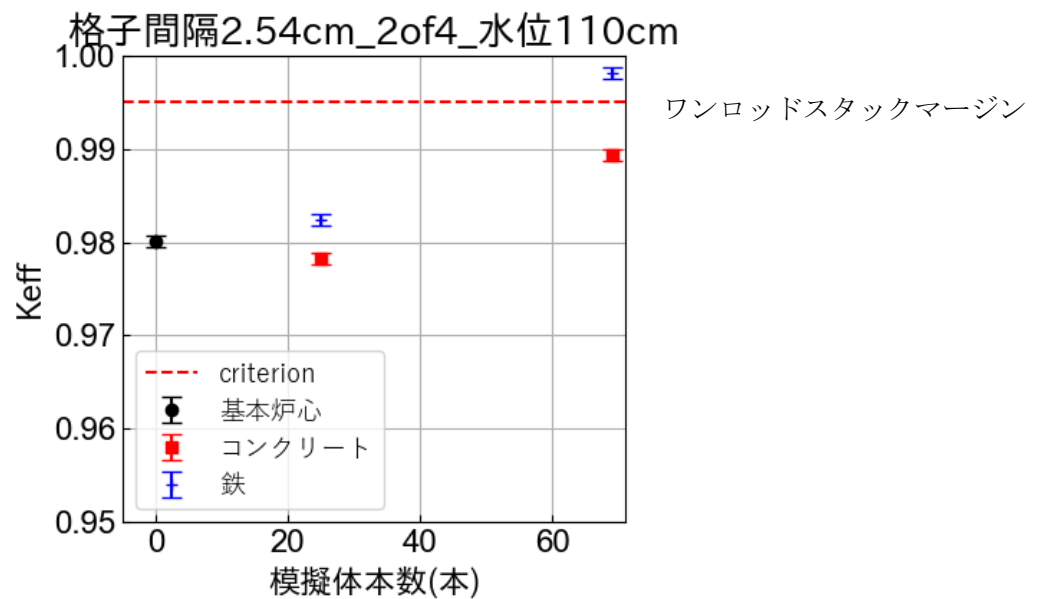
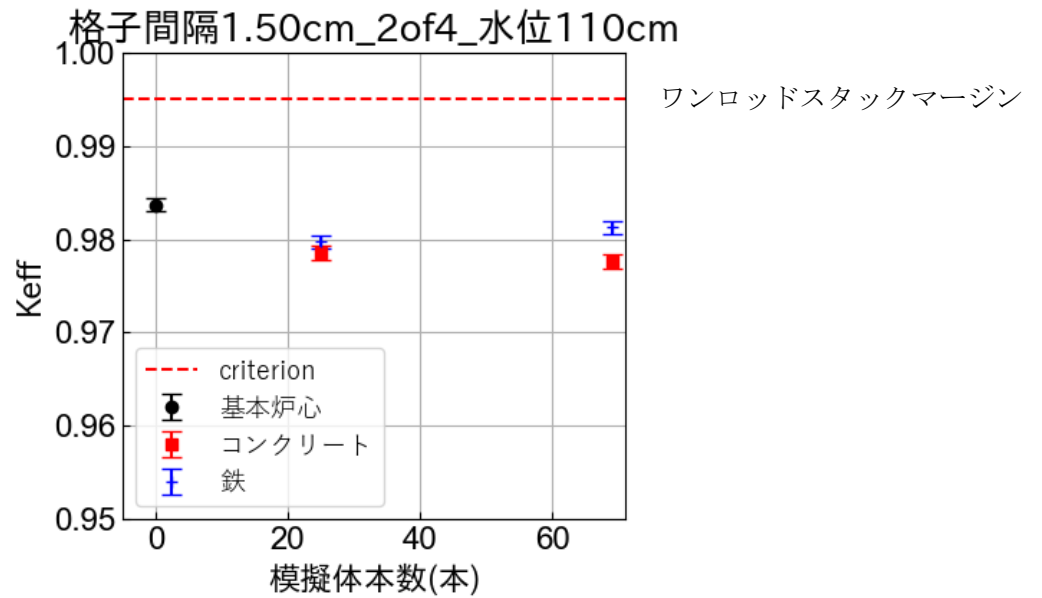
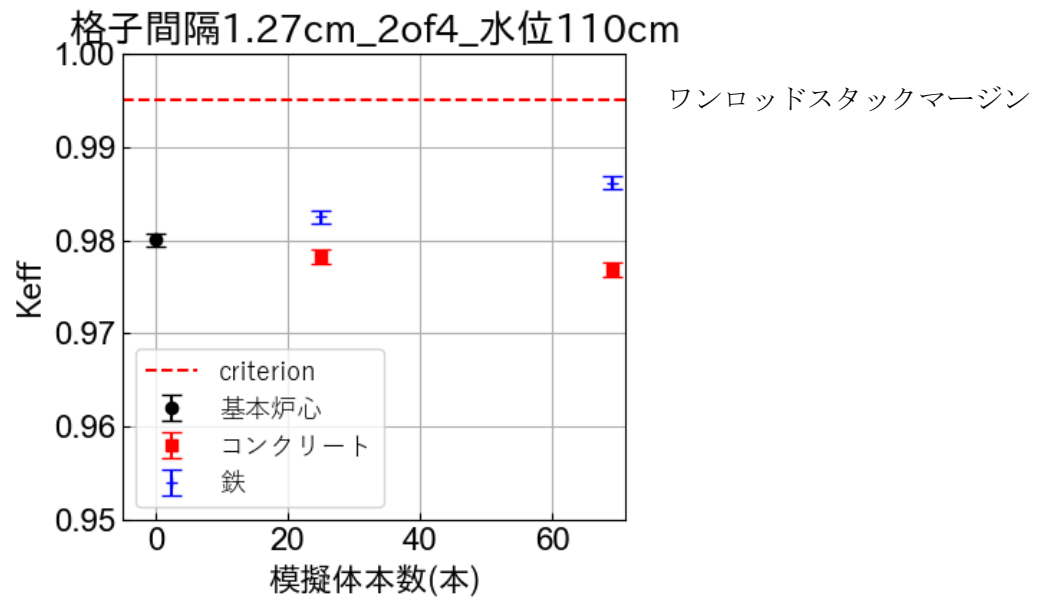
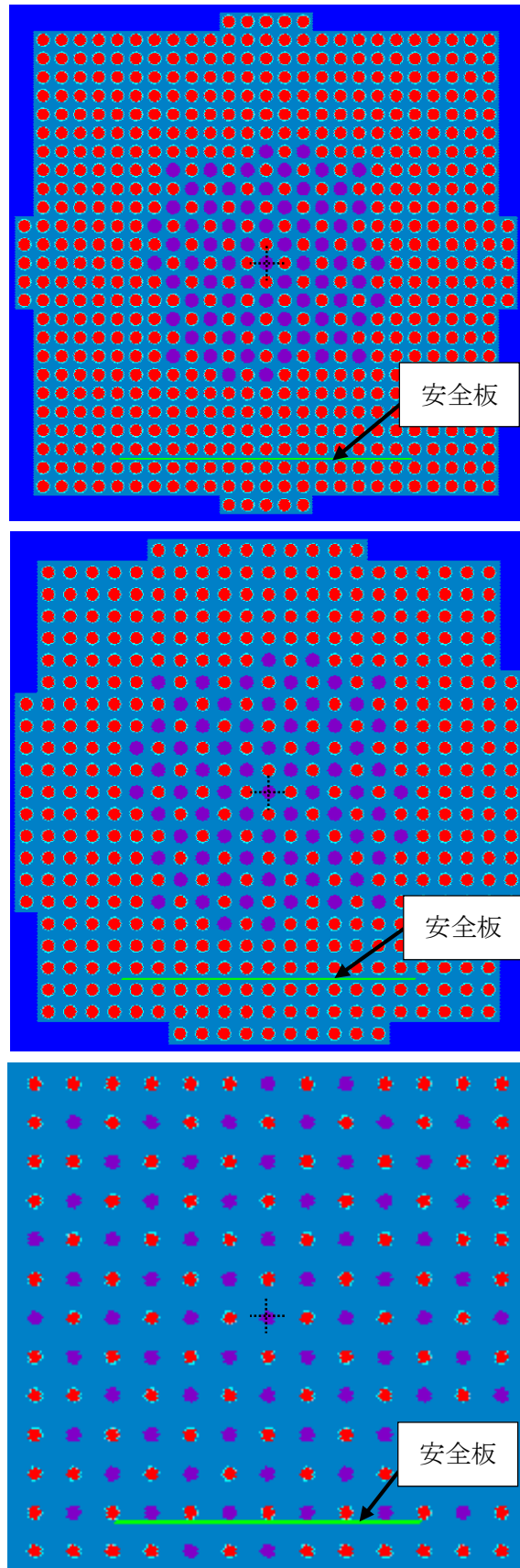


図8 デブリ構造材模擬体の挿入本数が原子炉停止余裕（ワンロードスタックマージン）に及ぼす影響の評価結果



(凡例) ●棒状燃料、●デブリ構造材模擬 (鉄)

図9 棒状燃料及びデブリ構造材模擬体 (鉄) と安全板との位置関係
(2 of 4 配列、上から格子間隔 1.27cm、1.5cm、2.54cm)

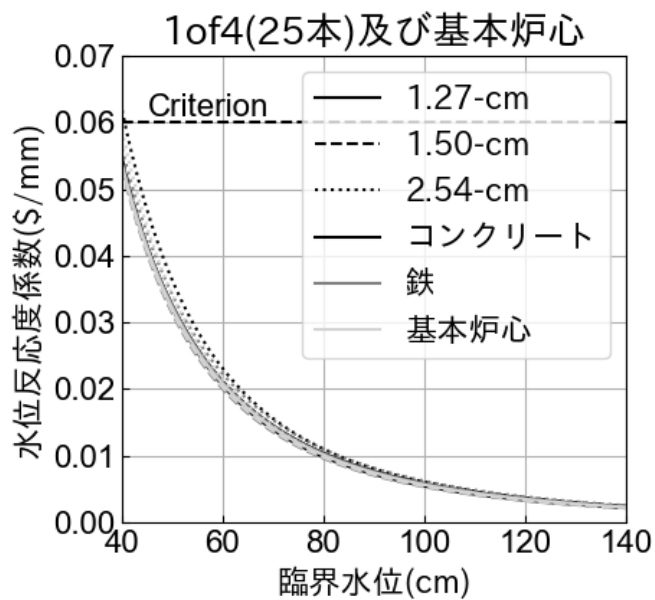
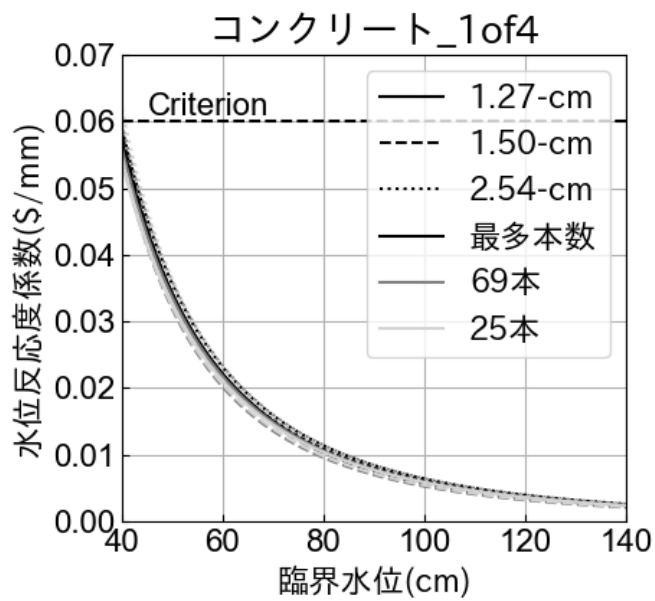


図 10 デブリ構造材模擬体の配列本数及び種別が水位反応度に及ぼす影響の評価結果

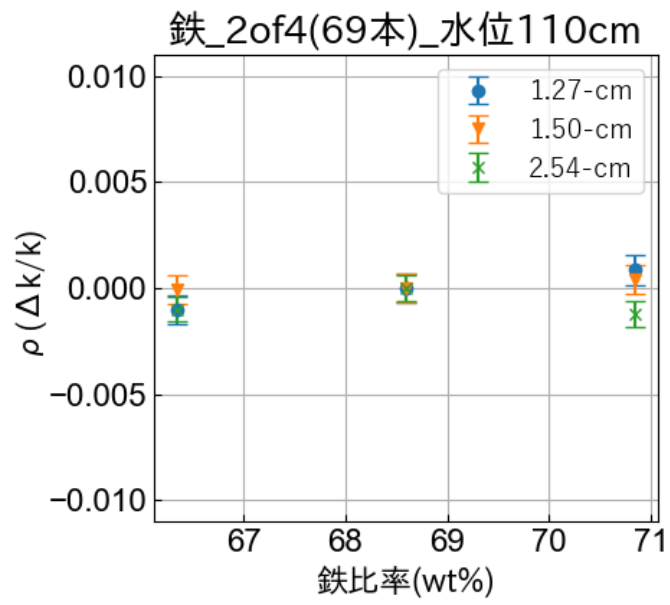


図 11 鉄の感度解析結果