

令和 5 年 ●月●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 3 月 24 日）での指摘事項対応のための解析結果

1. 概要

令和 5 年 3 月 24 日第 478 回審査会合（以下「前回審査会合」という。）での指摘を踏まえ、前回審査会合資料 1-3 の解析⑤「デブリ構造材模擬体が原子炉停止余裕に及ぼす影響」の解析対象範囲を拡大し、主要な核的制限値である原子炉停止余裕及びワンロードスタックマージンが厳しくなる、つまり原子炉停止系である安全板の効果が小さくなる炉心の変化傾向を把握するとともに、炉心構成の範囲全般について見通しを得た。

上記解析における変化傾向の要因を分析するため、炉心形状（炉心水平方向の大きさ）が変わる効果を排除して、デブリ構造材模擬体の種類、装荷本数及び配列パターンが原子炉停止余裕に及ぼす効果を確認するための炉心形状固定の解析も実施した。当該解析については付録－1 に示す。また、燃料試料挿入管及び内挿管の核的な影響についての検討を付録－2 に、デブリ構造材模擬体の放射化が遮蔽計算に及ぼす影響についての検討を付録－3 に示す。

なお、本資料においては、STACY の炉心構成範囲の中で構成することができない「減速材対燃料ペレット体積比が 0.9~11 の範囲に入らない炉心」及び「津波水没時に未臨界を確保できない炉心」については、解析結果から除去又はマーカーをつけることで考慮した。

2. 解析内容

解析範囲を次頁表 1 に示す。前回審査会合における指摘事項を踏まえ、前回審査会合の解析⑤「デブリ構造材模擬体が原子炉停止余裕に及ぼす影響」の解析範囲について、臨界水位（パラメータ F）のケースを増やした。また、デブリ構造材模擬体の配置（パラメータ B）に関し鉄及びコンクリートのデブリ構造材模擬体を混在させた体系としてそれぞれ約 70 本（単独挿入時の最大数）、約 140 本（最大数）のケースを追加した。

表1 解析範囲

	パラメータ	設工認に定める範囲	解析範囲	解析ケース数	備考
A	棒状燃料本数	50~900	50~900	-	変化させるパラメータ
B-1	デブリ構造材模擬体 (鉄)	0~70	0, 25, 69	2 (0 は基本炉心であるためケース数に数えない。以下同じ)	69 は 70 本以下で対称配置できる最大数
B-2	デブリ構造材模擬体 (コンクリート)	0~70	0, 25, 69	2	
B-3	<u>デブリ構造材模擬体 (鉄+コンクリート)</u>	0~140	0, <u>約 70*</u> , <u>約 140*</u>	2	※本数はなるべく対称となるよう調整する
C	格子間隔	1.27 ~ 2.54	1.27, 1.50, 2.54	3	
D	安全板	2 ~ 4	2 ~ 4	-	格子間隔により配置は固定
E	デブリ構造材模擬体の配置		1 of 4, 2 of 4, 4 of 4	3	
F	臨界水位	40~140	<u>40, 70, 110,</u> <u>140</u>	4	
	合計			216	

下線部のパラメータは前回審査会合から追加

3. 解析結果

(1) 安全板の効果が小さくなる炉心

安全板の効果が小さくなる炉心の探索結果を図 1 に示す。これは、前回審査会合資料 1-3 の図 9 にデータを追加したものである。また、前回審査会合にて提示した、臨界水位 110 cm の結果が分布している範囲を示した補助線を図中に破線で示す。なお、減速材対燃料ペレット体積比(VR)が制限範囲 (0.9~11) を逸脱する炉心は構成できないため、図中から削除している (VR については資料末の参考 1 を参照)。また、津波水没時に未臨界を担保できない炉心も構成できないため、「津波最大炉心逸脱」として識別した。

図 1 より、解析範囲を広げたことにより X 軸の正の方向にデータが追加されるもの、Y 軸方向には前回審査会合で提示した範囲に収まっていることが判る。全体として、低水位 (40 cm) が厳しくなる傾向を見せているが、その詳細については次項(2)で示す。解析結果より、鉄及びコンクリートのデブリ構造材模擬体を使用した炉心それぞれについて、中性子実効増倍率が最大となった (安全板の効果が小さくなった) 炉心を表 2 に示す。中性子実効増倍率が最大となったのは、津波水没時に未臨界を担保できない炉心を除いた場合、現有燃料 400 本以下の範囲ではコンクリートのデブリ構造材模擬体を 25 本使用した「格子間隔 1.50 cm、水位 40 cm、棒状燃料本数 363 本の炉心」であり、許可上の最大本数 900 本以下の範囲では鉄のデブリ構造材模擬体を 69 本使用した「格子間隔 1.27 cm、水位 70 cm、棒状燃料本数 590 本の炉心」である。前者の条件においては、前回審査会合資料の結果 (鉄のデブリ構造材を使用した炉心が最大となった) と異なり、鉄ではなくコンクリートのデブリ構造材模擬体を挿入した炉心が最大となった。その理由は、鉄のデブリ構造材模擬体をコンクリートと同数の 25 本挿入した炉心を臨界にするには 400 本超の棒状燃料が必要となるため、集計範囲から外れたことによる。なお、両者の差はワンロードスタックマージンの計算結果にして $8 \times 10^{-5} \Delta k$ であり、モンテカルロ計算に由来する計算結果の不確かさ (1 標準偏差) の 10 分の 1 程度である。また、当該炉心と、前回審査会合で比較対象とした基本炉心 (1) (格子間隔 1.5 cm、臨界水位 110 cm) の炉心の差は約 $3 \times 10^{-3} \Delta k$ 程度 (4 標準偏差程度) である。図 1 に示した計算結果は傾向を示すための例であるが、津波水没時に未臨界を担保できない炉心も含め、すべて原子炉停止余裕又はワンロードスタックマージンの制限値を満足する。

以上の解析より、安全板の効果が小さくなる、つまり原子炉停止余裕を厳しくする炉心の傾向及び範囲に関する情報が拡充され、前回審査会合資料で示した結果を変えることなく、核的制限値を満足しつつ運転できる見通しが得られた。実際の運転においては、これらの知見を参考に実験炉心を構成する。

設工認申請書の補正方針： 本解析の結果を踏まえ、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して補正する。

(2) 安全板の効果の精査

以下、(2)-1では、図1で示したデブリ構造材模擬体の反応度効果を比較検討する。また、(2)-2では、複数種類のデブリ構造材模擬体を混在させた炉心について、それぞれのデブリ構造材模擬体を単独で使用した炉心との解析結果を比較する。これら解析した炉心に関する参考データを別添参考資料に示す。

(2)-1 デブリ構造材模擬体の反応度効果の比較

デブリ構造材模擬体の反応度効果の比較のため、図1のデータのうち、より核的制限値に近い、厳しい結果が得られたワンロッドスタックマージンの計算結果（本解析で最も厳しくなった解析結果を比較すると、ワンロッドスタックマージンは制限値まで $7 \times 10^{-3} \Delta k$ 、原子炉停止余裕は $2 \times 10^{-2} \Delta k$ の余裕である。）を、格子間隔及びデブリ構造材模擬体の配列パターン毎に分解して整理したグラフを図2に示す。同図において、模擬体装荷により減速材対燃料ペレット体積比（VR）が制限範囲0.9~11に収まらず構成できない炉心は、図1同様に除いている。また、津波水没時に未臨界を担保できない炉心には*印を付けて識別している。なお、誤差棒 1σ の大きさはマーカーと同程度である。

図2より、配列パターン（1 of 4、2 of 4、4 of 4）に依らず、水位の上昇とともに、中性子実効増倍率は減少する（安全板の反応度効果が強まる）傾向にある。また、装荷本数が同数であればコンクリートよりも鉄のほうが、また、その本数が増えるほうが、中性子実効増倍率が高めの値（安全板の反応度効果が弱まる）となる。ただし、格子間隔1.5 cmの2 of 4、4 of 4炉心では、中性子減速能の変化により、鉄とコンクリートの最大数を混在させたほうが、鉄単独の最大数よりも中性子実効増倍率が高めの値となる。しかし、この傾向について、格子間隔1.27 cm（減速不足の炉心）では臨界水位が下がるにつれてその差が小さくなり（収斂していき）、かつ、臨界水位40 cmの炉心では、逆転する例が見られる。この理由については今後の研究に委ねることになるが、これらの炉心は津波水没時に未臨界を担保できない炉心であるため構成することはしない。

(2)-2 複数種類のデブリ構造材模擬体の混在の影響

デブリ構造材模擬体は、鉄及びコンクリートの2種類をひとつの炉心に混在させて使用することも想定される。このような場合に、混在させた炉心は、それぞれのデブリ構造材模擬体を単独で使用した炉心の核特性に包含されるかを確認した。

鉄のデブリ構造材模擬体を37本、コンクリートのデブリ構造材模擬体を32本（合計69本）使用した炉心と、それぞれのデブリ構造材模擬体を単独で69本使用した炉心のワンロッドスタックマージンの評価結果を図3に示す。図に示されるように、混在させた炉心はおおむね単独の炉心の評価結果の間に収まっている。逸脱は大きなもの

でも $1 \times 10^{-3} \Delta k$ 程度（格子間隔 1.27 cm、臨界水位 110 cm、4 of 4 配列）で誤差棒（ $\pm 1 \sigma$ ）程度である。したがって、複数種類のデブリ構造材模擬体を混在させた炉心の安全板の効果は、それぞれの模擬体を単独で使用した炉心の評価結果に含まれるとみなして問題ない。

表2 中性子実効増倍率が最大となった炉心

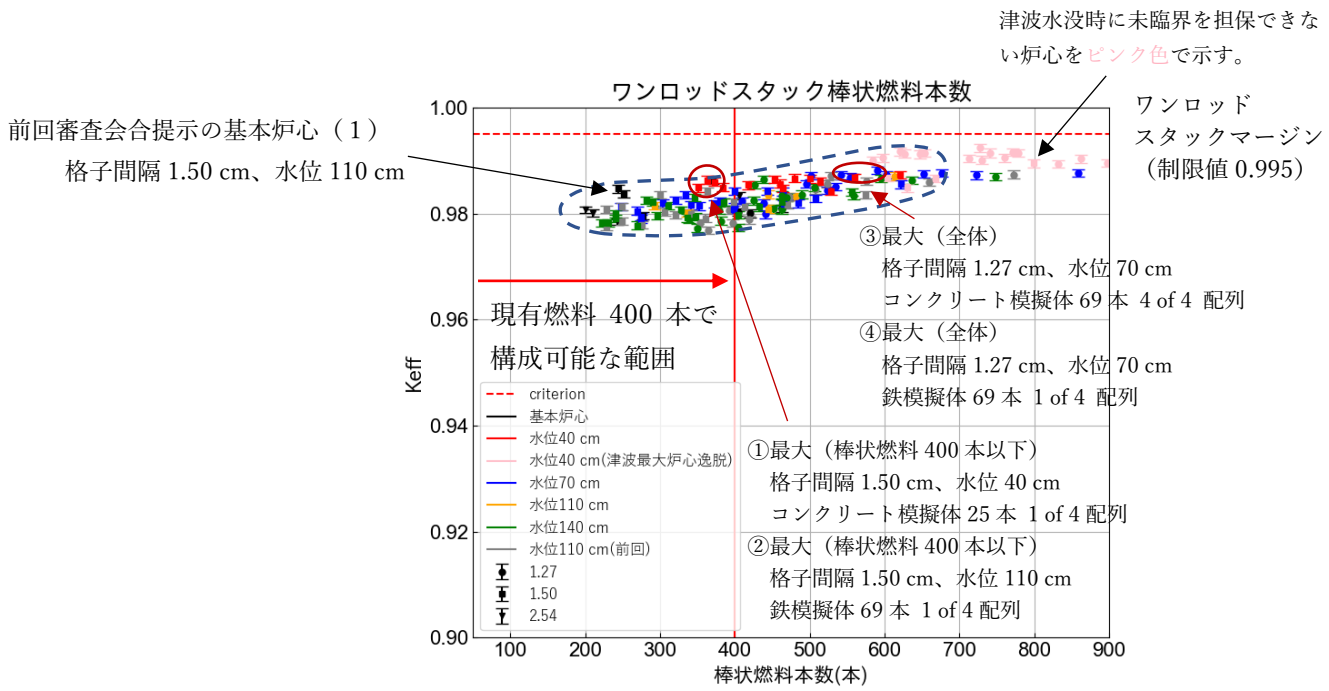
No.	格子 間隔 (cm)	コンクリー ト模擬体 (本)	鉄 模擬体 (本)	配列パター ン	臨界 水位 (cm)	棒状 燃料 (本)	原子炉停止余裕	ワンロッドスタック マージン	津波水没 評価※ (安全板)	津波水没 評価※ (未臨界板)
現在の棒状燃料 400 本以下で臨界となる炉心										
①	1.50	25	0	1 of 4	40	363	0.9615 ±0.0007	<u>0.9863</u> ±0.0008	0.9899	0.9224
②	1.50	0	69	1 of 4	110	363	0.9565 ±0.0007	0.9843 ±0.0007	0.9049	0.8625
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	592	0.9643 ±0.0007	0.9873 ±0.0007	0.9451	0.8920
④	1.27	0	69	1 of 4	70	590	0.9654 ±0.0007	<u>0.9881</u> ±0.0007	0.9546	0.9280

一重下線：棒状燃料 400 本以下で最も厳しくなった（制限値に近づいた）計算結果

二重下線：棒状燃料 900 本以下で最も厳しくなった（制限値に近づいた）計算結果

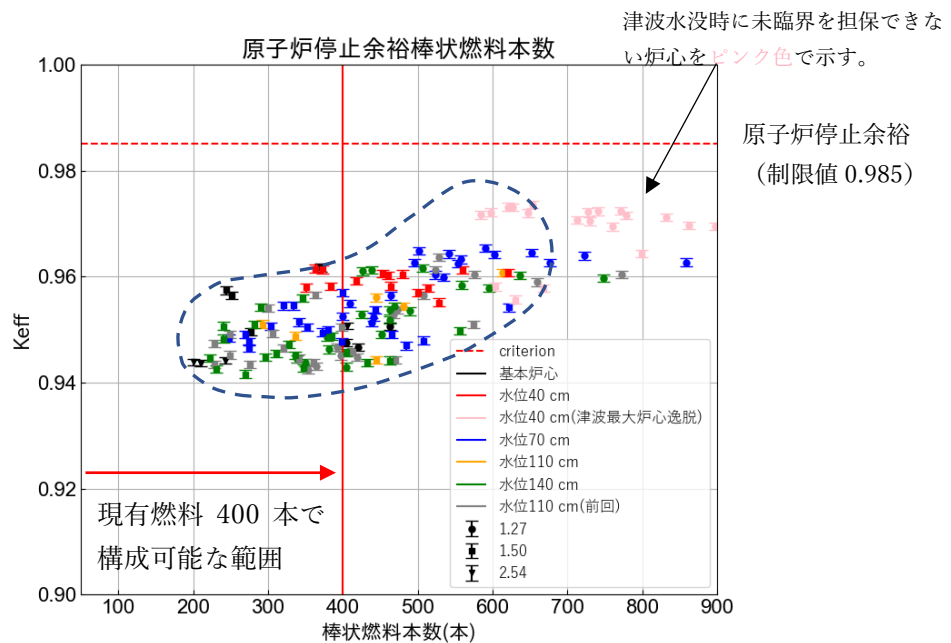
※ $k_{eff}+3\sigma$ の計算結果。判定基準は 0.995 未満。

原子炉停止余裕及びワンロッドスタックマージン以外の動特性パラメータについては参考 2 に示す。



(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)

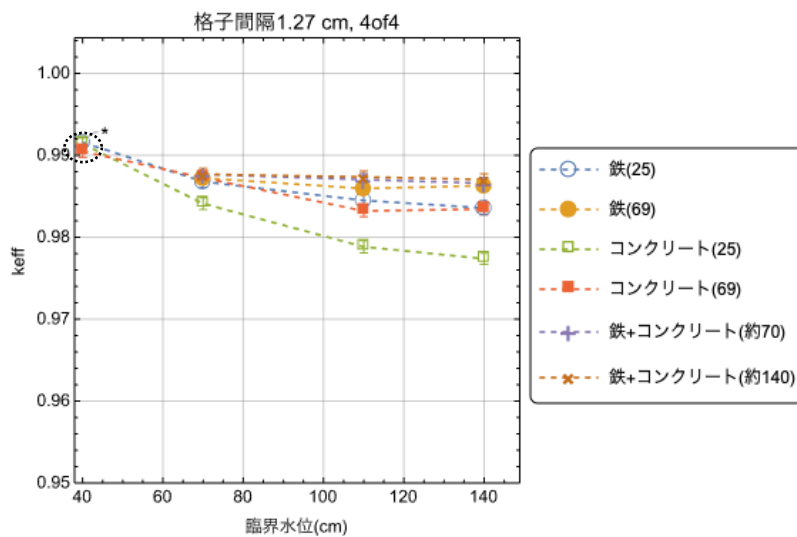
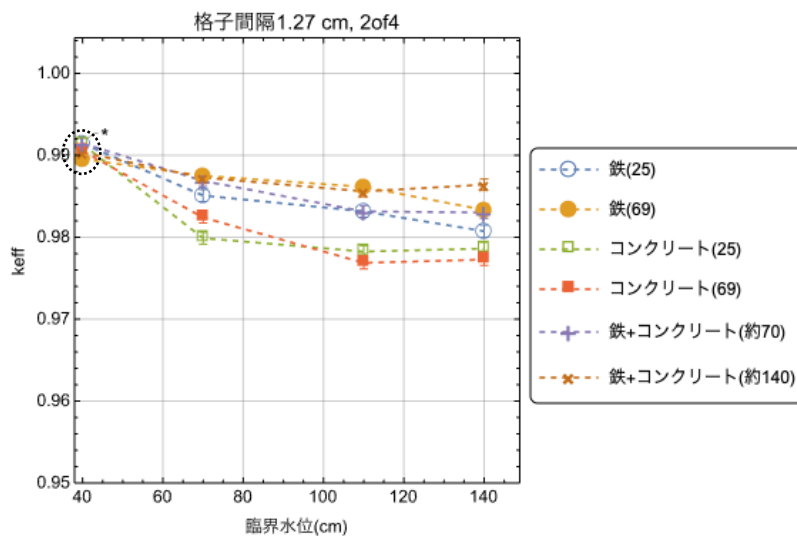
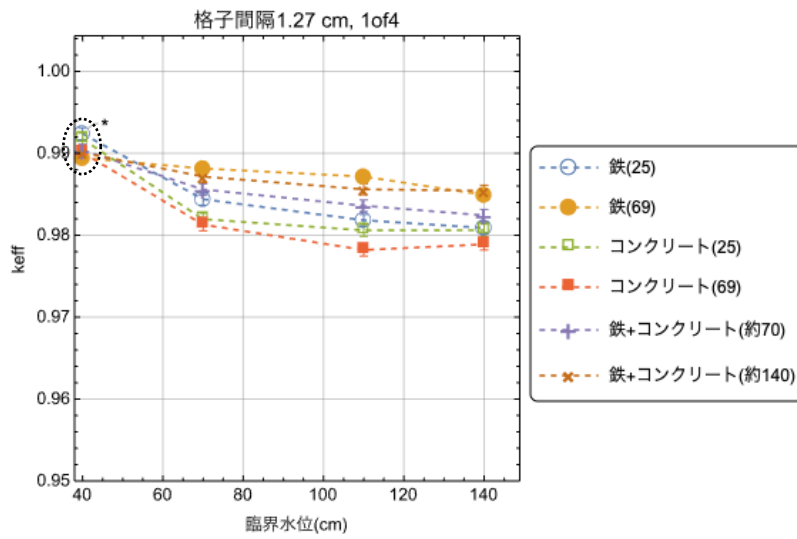


(b) 原子炉停止余裕の評価 (誤差棒=1σ)

(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)

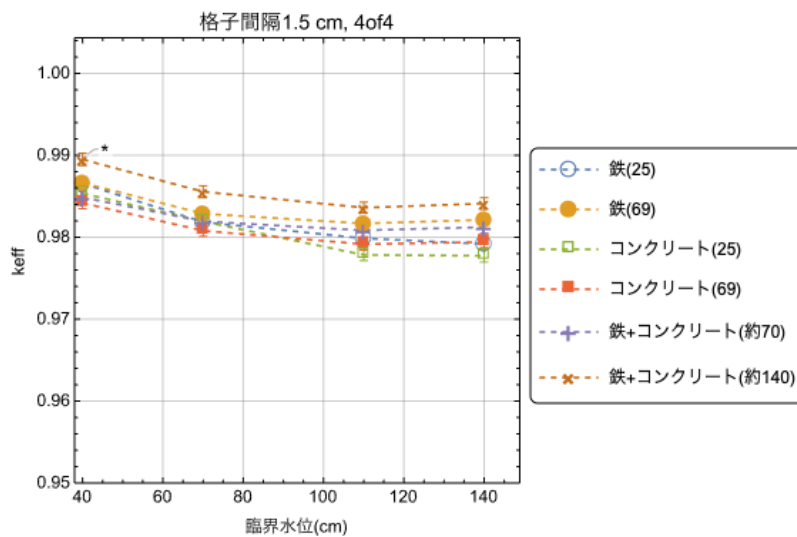
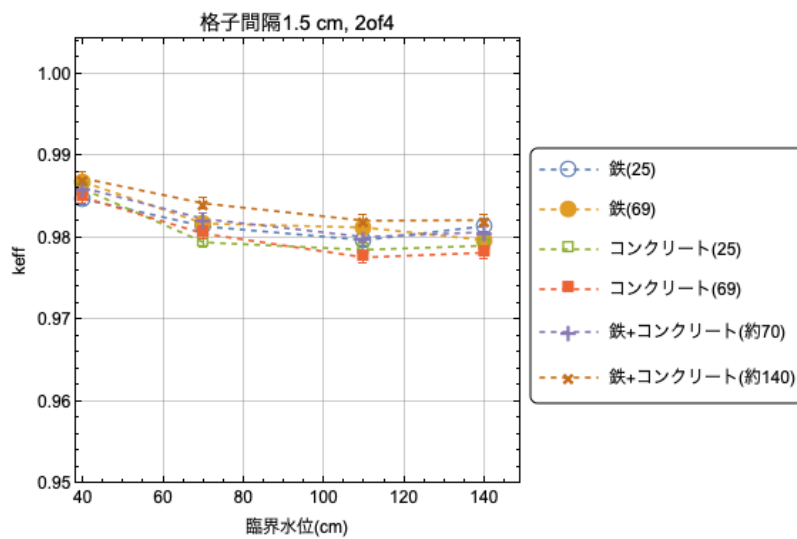
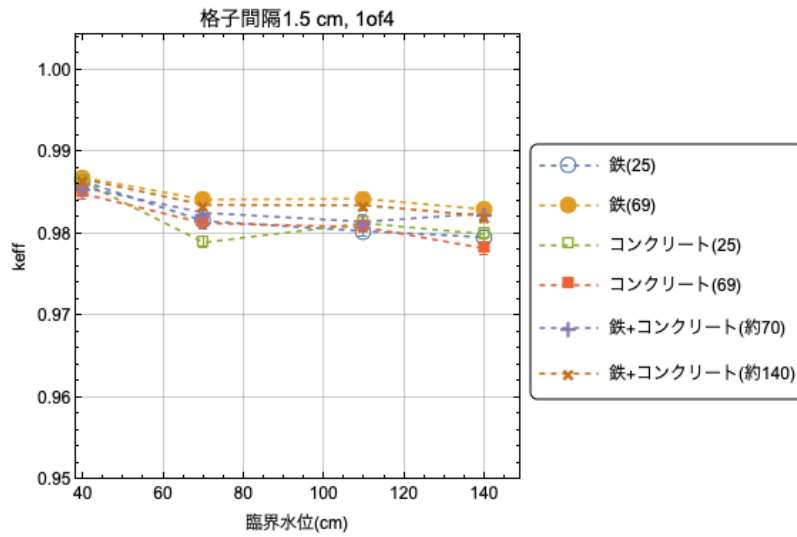
図 1 棒状燃料本数と安全板の原子炉停止効果

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。



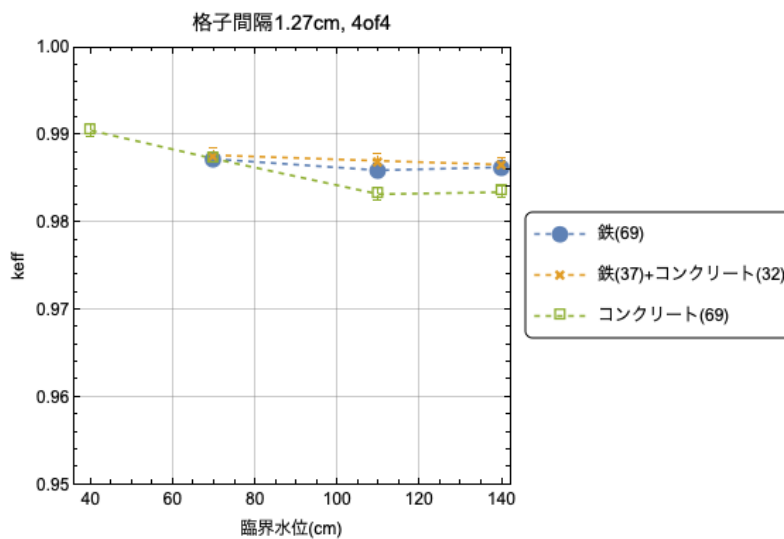
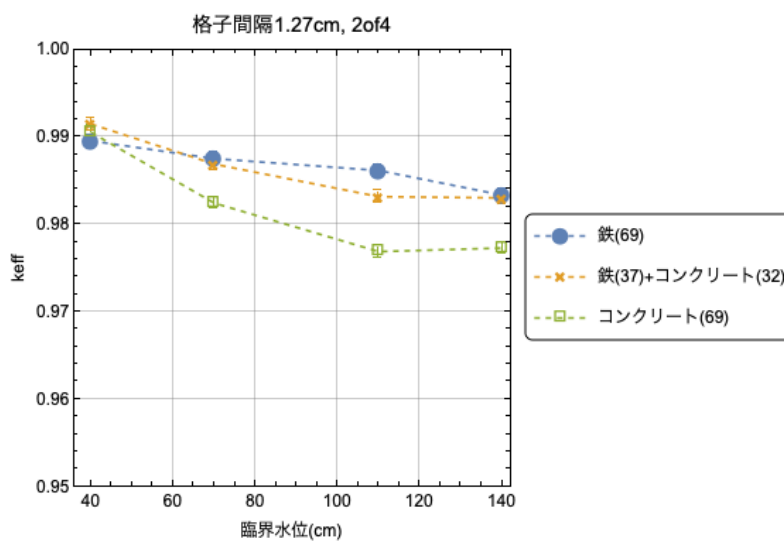
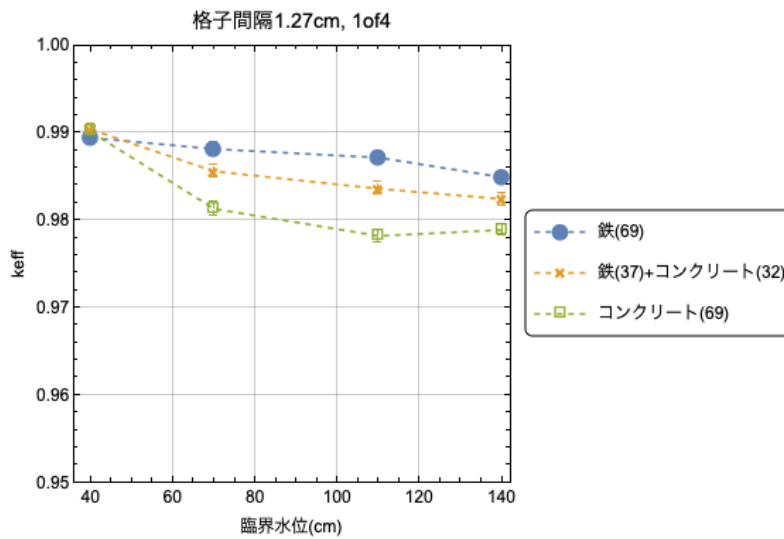
誤差棒=1σ (マーカーと同程度)、* : 津波水没時に未臨界を担保できない炉心

図 2 (1/2) デブリ構造材模擬体の効果の比較 (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



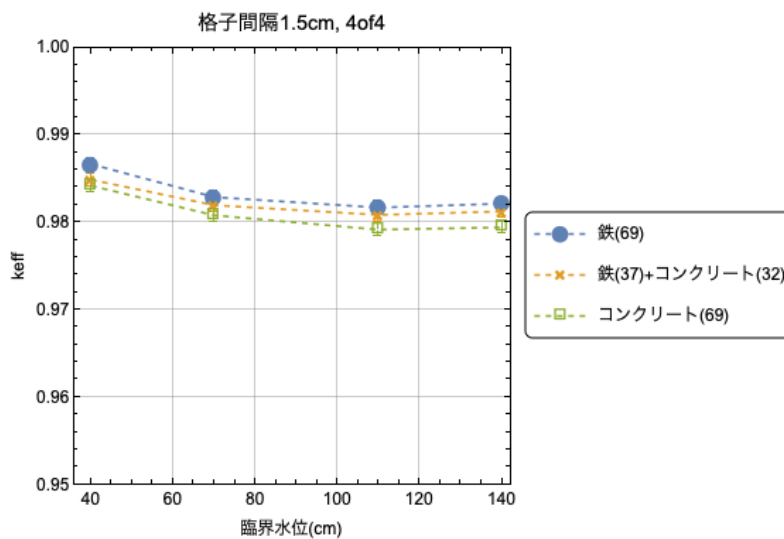
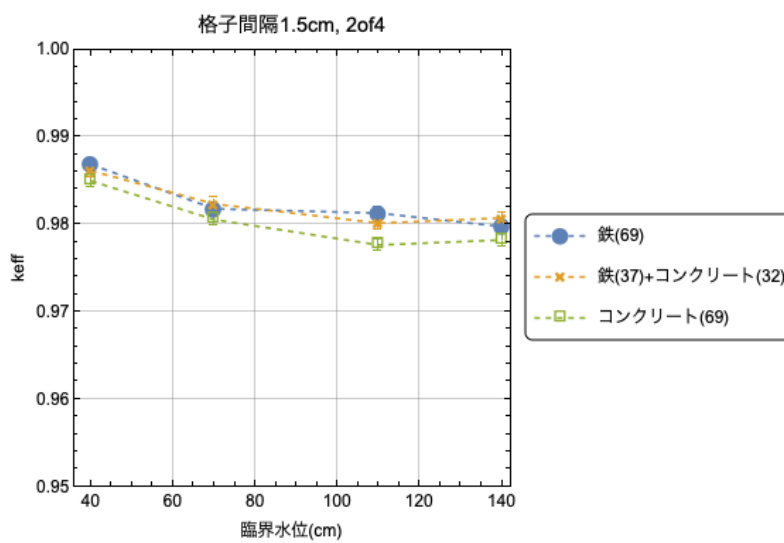
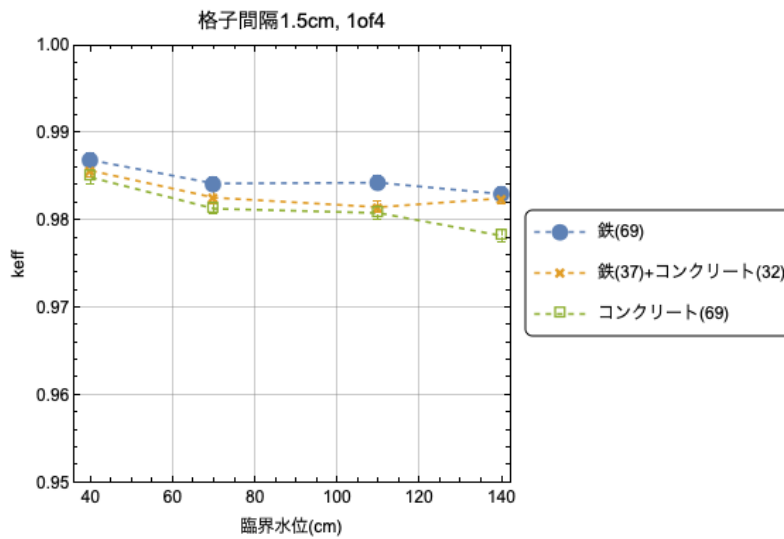
誤差棒=1 σ (マーカーと同程度)、* : 津波水没時に未臨界を担保できない炉心

図 2 (2/2) デブリ構造材模擬体の効果の比較 (格子間隔 1.50 cm)
ワンロッドスタックマージンの評価結果



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



誤差棒=1σ (マーカーと同程度)

図3(2/2) デブリ構造材模擬体の混在の効果の比較 (格子間隔 1.50 cm)
ワンロッドスタックマージンの評価結果

参考1 減速材対燃料ペレット体積比 (VR) の計算方法

減速材対燃料ペレット体積比(VR)の計算式は以下のとおり。

$$VR = \frac{\left(p^2 - \frac{\pi}{4} D_o^2\right) \times (N_f + N_p)}{\left(\frac{\pi}{4} D_i^2 N_f\right)}$$

ただし、

p : 格子間隔(cm)

D_o : 棒状燃料/デブリ構造材模擬体の外径(=0.95 cm)

D_i : 棒状燃料ペレットの外径 (=0.819 cm)

N_f : 棒状燃料本数 (本)

N_p : デブリ構造材模擬体本数 (本)

なお、棒状燃料の寸法は平成 30 年 5 月 30 日付け原規規発第 1805304 号で認可されたウラン棒状燃料の製作に係る設工認、デブリ構造材模擬体の寸法は本申請の設工認の値 (ノミナル値) を用いた。

参考2 「表2 中性子実効増倍率が最大となった炉心」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)

付録－1 炉心形状固定の解析

付-1-1 解析内容

炉心形状（炉心水平方向の大きさ）が変化する効果を排除してデブリ構造材模擬体の種類、装荷本数及び配列パターンが原子炉停止余裕に及ぼす効果を確認するため、基本炉心の臨界水位 40 cm をベースの炉心とし、棒状燃料をデブリ構造材模擬体に置換（挿入した模擬体の本数分だけ棒状燃料を抜く）し、その反応度効果を水位の変化で補償する。解析した臨界炉心についてワンロードスタックマージン及び原子炉停止余裕を解析する。

パラメータ	設工認に定める範囲	解析範囲	解析ケース数	備考
格子間隔(cm)	1.27 ~ 2.54	1.27, 1.50, 2.54	3	
デブリ構造材模擬体	鉄、コンクリート、鉄+コンクリート	鉄、コンクリート、鉄+コンクリート	3	
デブリ構造材模擬体本数	0~最大本数 (鉄、コンクリート：最大 70 本、鉄+コンクリート：最大 140 本。なるべく対称となるよう配置)	0~最大本数※	-	変化させるパラメータ。 ※製作する最大本数もしくは水位 140cm で臨界となる最大数
配列パターン		1of4, 2of4, 4of4	3	
合計			27	

付-1-2 解析結果

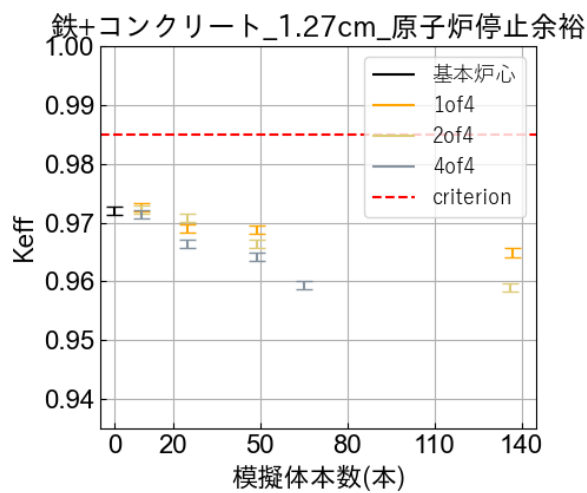
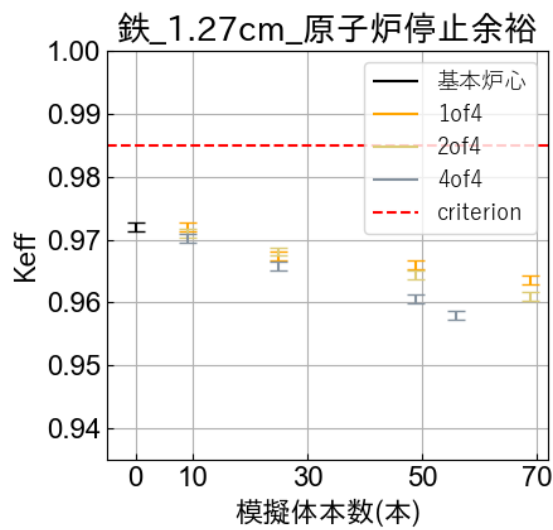
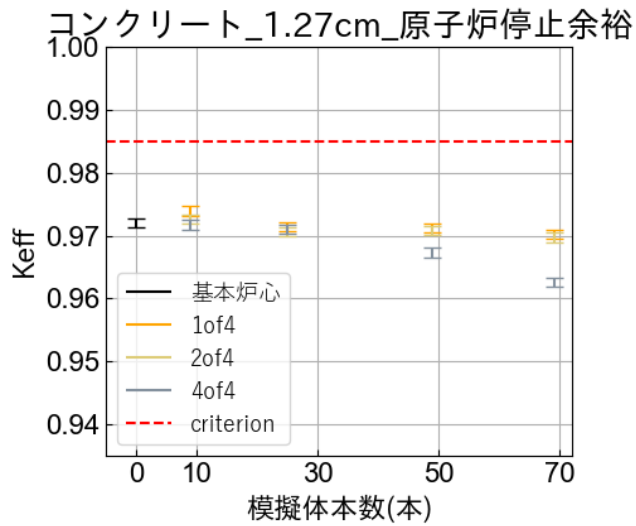
炉心形状（炉心水平方向の大きさ）を固定し、デブリ構造材模擬体本数を増加させた炉心について、原子炉停止余裕の及びワンロッドスタックマージンの解析結果をそれぞれ図付1-1及び図付1-2に示す。図付1-1及び付1-2より、炉心の大きさを固定した場合、原子炉停止余裕及びワンロッドスタックマージンは、模擬体本数が増大、臨界水位が変化するにつれて安全側（中性子実効増倍率が減少する側）に変化する傾向が見られる。

また、配列パターンについては、1 of 4 配列において、他の配列と比べ、模擬体本数の増大による安全側への変化傾向が小さくなる様子が見られるが、その違いは顕著なものではない（例えば、図付-1 (1/3)で格子間隔 1.27 cm、コンクリート模擬体炉心で9本挿入時に基本炉心を上回る位置にプロットされているが、原子炉停止余裕の差は $2 \times 10^{-3} \Delta k$ 程度）。

デブリ構造材模擬体の種類についても、鉄とコンクリートの模擬体を混合させた炉心も含めて顕著な違いはない（例えば、図付1-1 (2/3)で格子間隔 1.50 cm、デブリ構造材模擬体本数 9 本の炉心ではコンクリート模擬体のほうが危険側であるが、原子炉停止余裕の差は $5 \times 10^{-3} \Delta k$ 程度）。

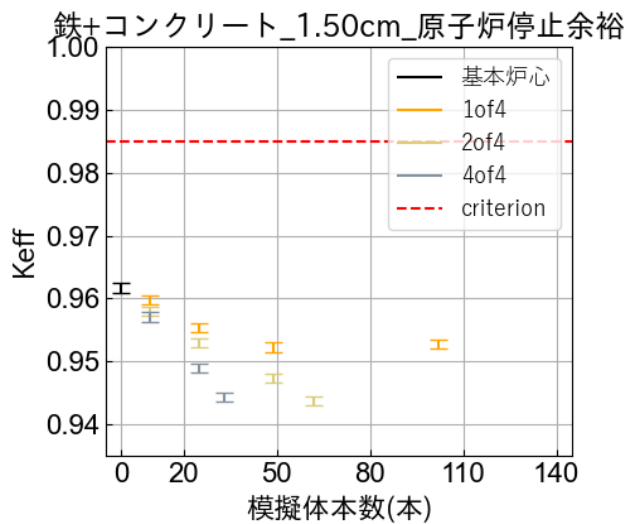
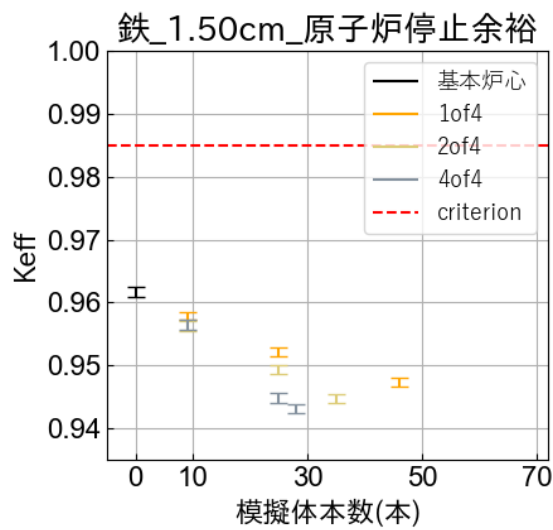
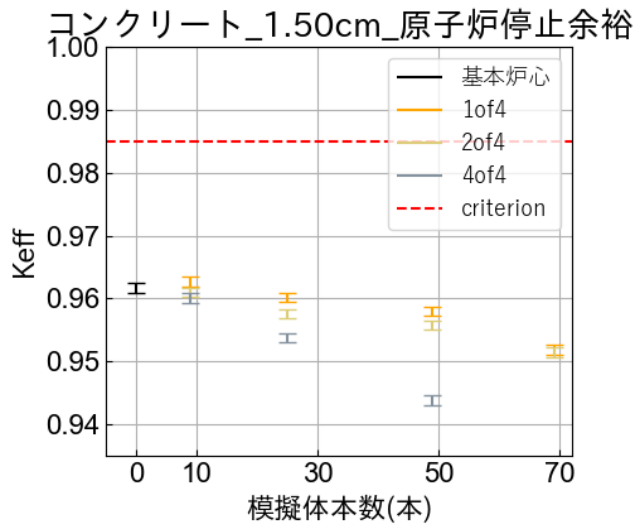
したがって、形状（炉心水平方向の大きさ）を固定した炉心においては、配列パターンや模擬体の種類が原子炉停止余裕及びワンロッドスタックマージンへ与える影響は小さく、また、多くの模擬体が装荷される炉心では、これらの指標は安全側へ変化することが予想される。

これらの結果より、原子炉停止余裕（ワンロッドスタックマージン）への影響は、炉心形状（炉心水平方向の大きさ）による影響が大きいと推測できる。



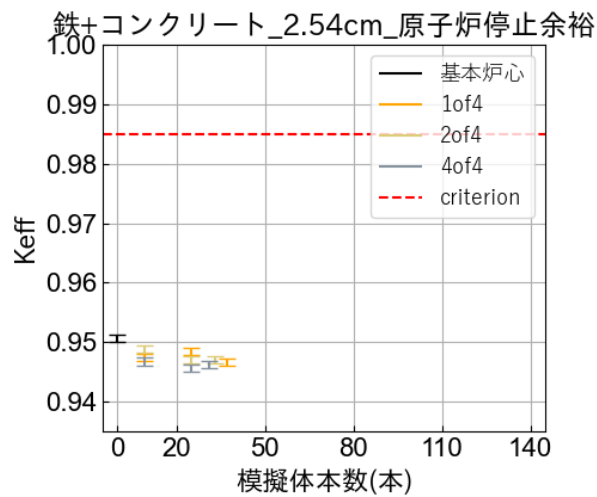
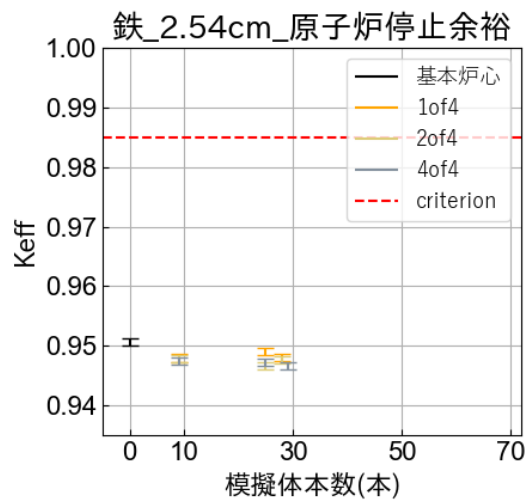
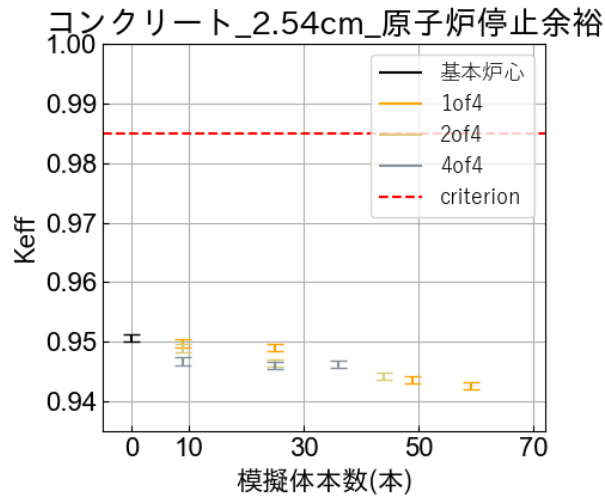
図付 1-1 (1/3) 炉心形状を固定（棒状燃料をデブリ構造材模擬体に置換）し、水位で臨界調整したときの原子炉停止余裕の計算結果（格子間隔 1.27 cm）

（誤差棒=1σ）



図付 1 - 1 (2/3) 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 1.50cm）

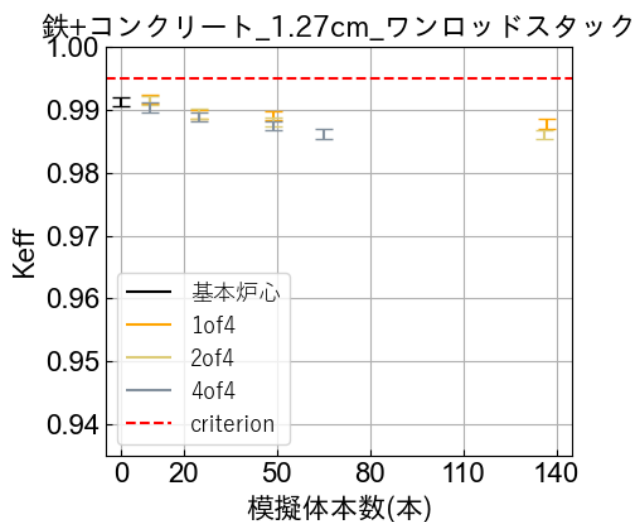
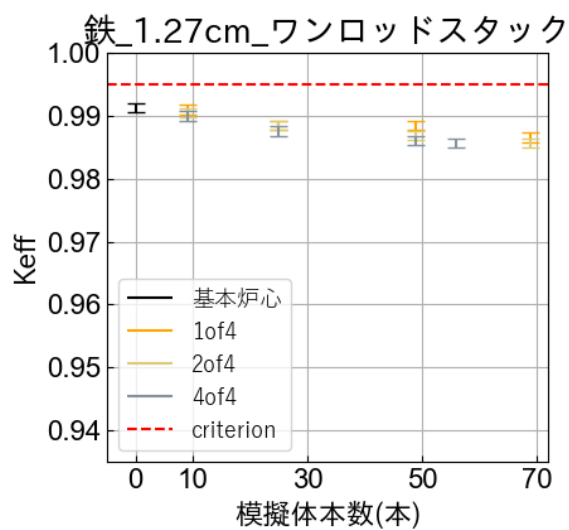
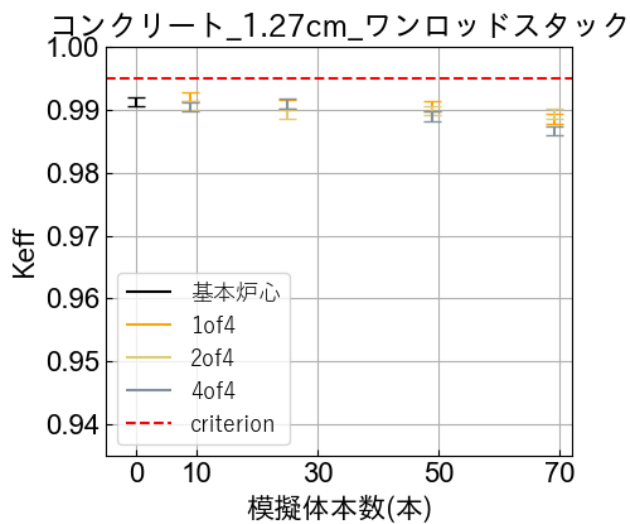
（誤差棒=1σ）



図付 1 - 1 (3/3) 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 2.54 cm）

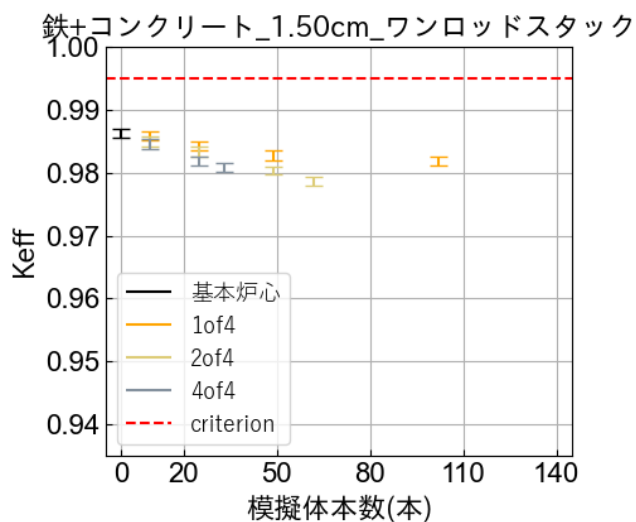
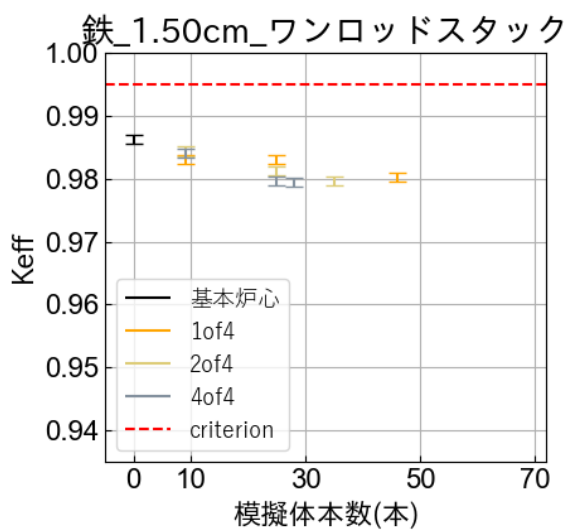
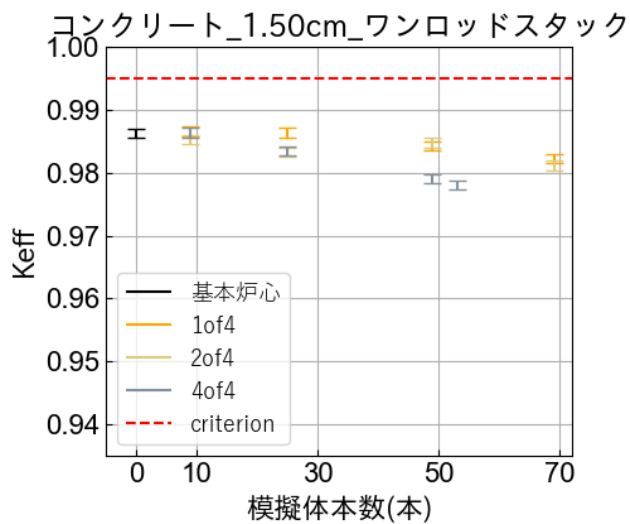
デブリ構造材模擬体 8 本以上を置換した炉心は減速材対燃料ペレット体積比が炉心構成範囲を超えるため参考値

(誤差棒=1σ)



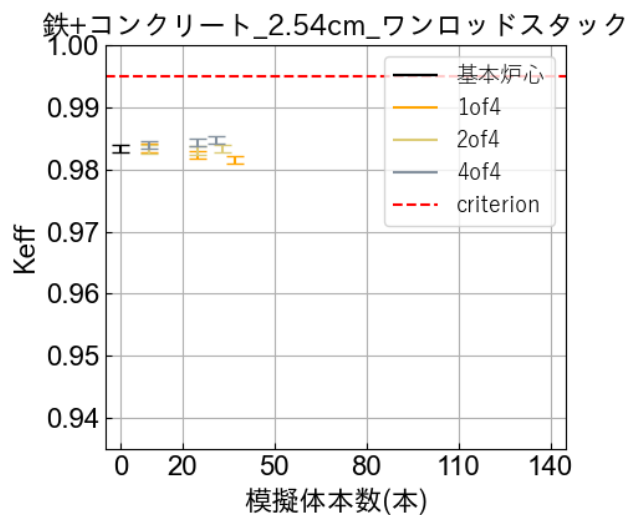
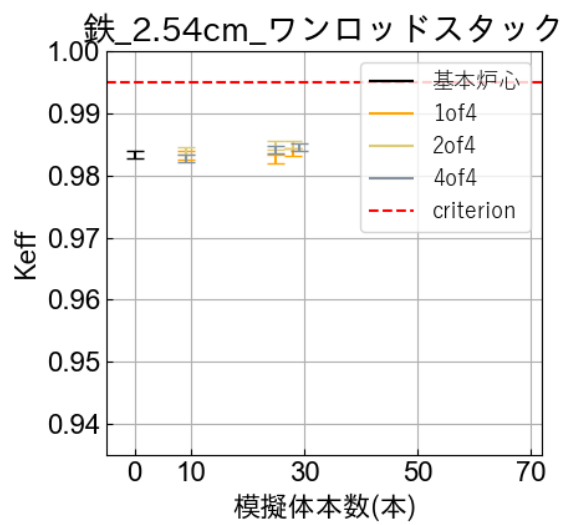
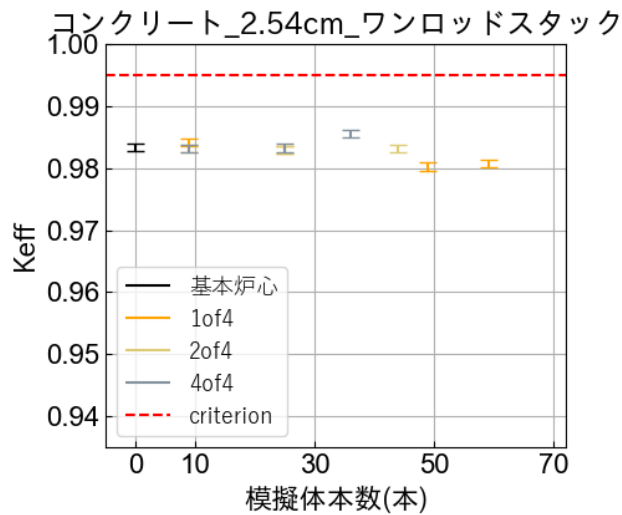
図付 1-2 (1/3) 炉心形状を固定 (棒状燃料をデブリ構造材模擬体に置換) し、水位で臨界調整したときのワンロッドスタックマージンの計算結果 (格子間隔 1.27 cm)

(誤差棒=1σ)



図付 1 - 2 (2/3) 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ワンロッドスタックマージンの計算結果（格子間隔 1.50 cm）

（誤差棒=1σ）



図付 1 - 2 (3/3) 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ワンロッドスタックマージンの計算結果（格子間隔 2.54 cm）

（誤差棒=1σ）

デブリ構造材模擬体 8 本以上を置換した炉心は減速材対燃料ペレット体積比が炉心構成範囲を超えるため参考

付録－２ 燃料試料挿入管及び内挿管の核的影響について

燃料試料挿入管及び内挿管は少量試料を炉心に挿入するものであり、実験試料など核的な影響が小さいものを装荷するのとして、炉心の種類（基本炉心、デブリ模擬炉心）を問わず装荷する計画（令和５年１月３０日審査会合資料２の p.7 参照）であるが、核的な影響について検討する。

(1) 燃料試料挿入管について

燃料試料挿入管は、上部に脱着式端栓を備えた、棒状燃料と同径かつ同等材料でできた被覆管である。本設工認で申請している燃料試料挿入管はジルコニウム合金製であり、核的な影響は無視できる。また、基本炉心及びデブリ模擬炉心で使用する燃料試料挿入管の装荷物には、 ^{235}U 濃縮度 5 wt%以下の二酸化ウランに鉄、コンクリート、ジルコニウム、アルミニウム等の炉心構造材を模擬した構造材模擬材を添加したもの（ペレット成型したもの）を想定している。このため、燃料試料挿入管の核的な影響は、棒状燃料、コンクリートのデブリ構造材模擬体、鉄のデブリ構造材模擬体それぞれに起因する核特性に包含される。これらの核特性が STACY の安全な運転に支障ないことは事前解析によって示されているが、実験運転に当たっては、実験計画に応じて、保安規定に定め設工認添付計算書に示した手順で事前解析を行い、核的安全性を確認する。

(2) 内挿管について

内挿管は、アルミニウム合金、ジルコニウム合金、ステンレス鋼その他の金属製の中空管又はそれらを組み合わせたものであり、検出器を始めとする実験試料等を挿入し、炉心に配列する。本設工認で申請する内挿管はジルコニウム合金製で棒状燃料と同径のもの（以下「細径内挿管」という。）及びアルミニウム合金製で外径が 28.8 mm のもの（以下「太径内挿管」という。）の２種類である。内挿管は基本炉心、デブリ模擬炉心等を問わずに使用されるが、いずれの炉心においても核的制限値として、万一の浸水による置換反応度が合計 0.3 ドル以下となるようにしなければならない。以下では、内挿管が万一浸水した場合でも核的制限値を満足できること、及び、内挿管を挿入した典型的な炉心の安全板挿入時の中性子実効増倍率について示す。

(2)-1 内挿管浸水時の反応度効果

浸水時の水置換反応度効果を評価する対象は、浸水時の反応度効果がより大きい太径内挿管とする。太径内挿管に挿入する代表的な実験試料等として、He-3 検出器を想定する。計算モデルを図付 2-1 に示す。太径内挿管の挿入本数は最大数である 3 本とした。計算コ

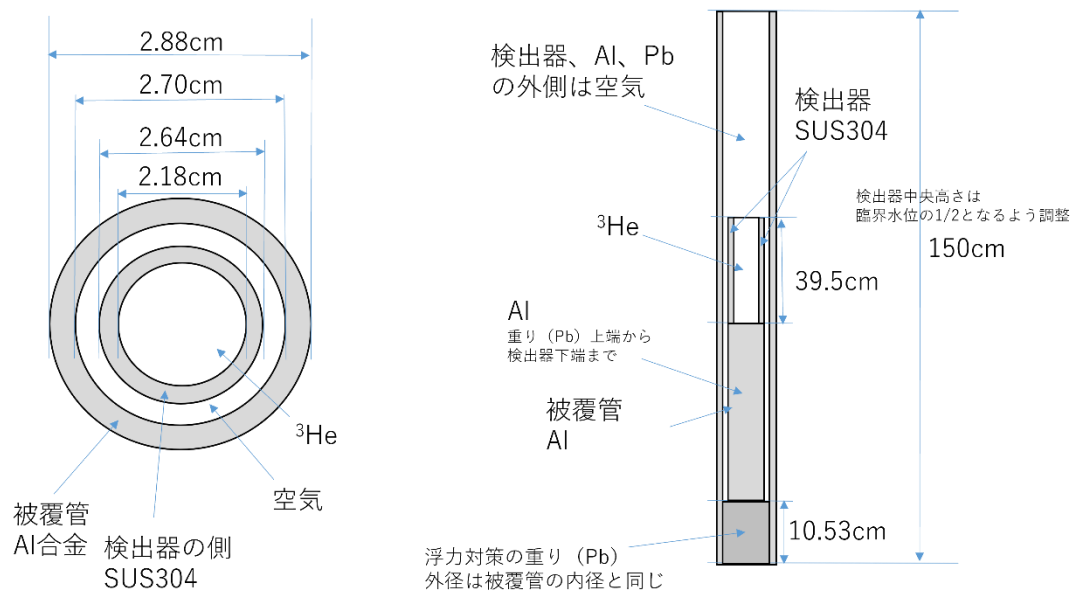
ード及び核データライブラリは、デブリ構造材模擬体の核特性評価に使用したのと同じ、モンテカルロコード MVP2 と JENDL-3.3 を使用した。計算範囲は、格子間隔を 1.27 cm、1.50 cm、2.54 cm とし、水位は 40 cm、70 cm、110 cm、140 cm とした。計算に当たっては、それぞれの条件で棒状燃料本数を変化させて臨界調整し、当該体系と、内挿管内の水面高さ以下の空隙を水に置換した場合の反応度効果を計算した。

計算結果を図付 2-2 に示す。なお、反応度をドル (\$) 単位に換算する際の実効遅発中性子割合は、デブリ構造材模擬体の解析で安全板挿入時の中性子実効増倍率が最大となった炉心の値が $7.5 \times 10^{-3} \sim 7.8 \times 10^{-3}$ であったことから、有効数字 1 桁で切り下げて 7×10^{-3} とした。図より、内挿管の浸水による置換反応度は、いずれもモンテカルロ計算に由来する 3 標準偏差の統計誤差を考慮しても核的制限値を満足することがわかる。なお、実験運転に当たっては、実験計画に応じて、保安規定に定め設工認添付計算書に示した手順で事前解析を行い、核的な安全性を確認する。解析により核的制限値を満足しない可能性が確認された炉心は、「構成してはならない炉心」として識別するか、或いは水による置換を防ぐため、内挿管内の空隙部にアクリル材等の充填材を配置して運転する。

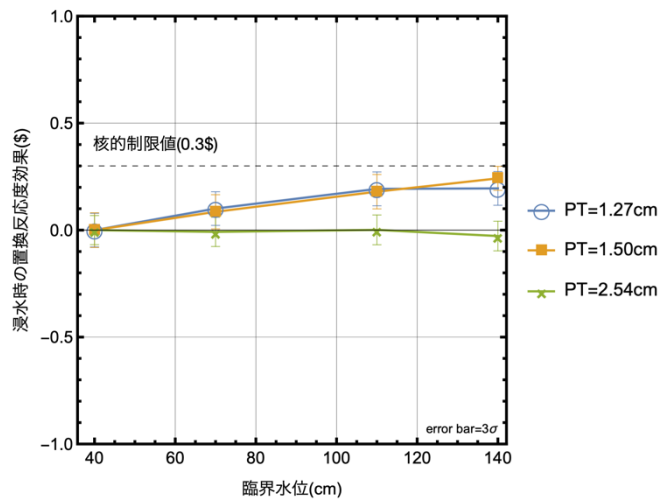
(2)-1 安全板挿入時の中性子実効増倍率

内挿管挿入時にも核的安全性が確保できることを確認するため、内挿管を挿入した炉心の安全板挿入時の中性子実効増倍率（全挿入時及びワンロッドスタック時）を計算した。内挿管は細径又は太径を考慮した。挿入本数は、細径の場合は 1 本、9 本、25 本のほか、製作する 30 本を包含する本数として 49 本とし、太径の場合は 3 本とした。内挿管に挿入する実験試料等は、太径については(1)の解析と同様の H-3 検出器とし、細径については金線とした。なお、反応度効果を大きくするために、金線はカドミウムで被覆し、さらに周囲をアクリルで充填した。細径内挿管の計算モデルを図付 2-3 に、炉心配置マップを図付 2-4 に示す。

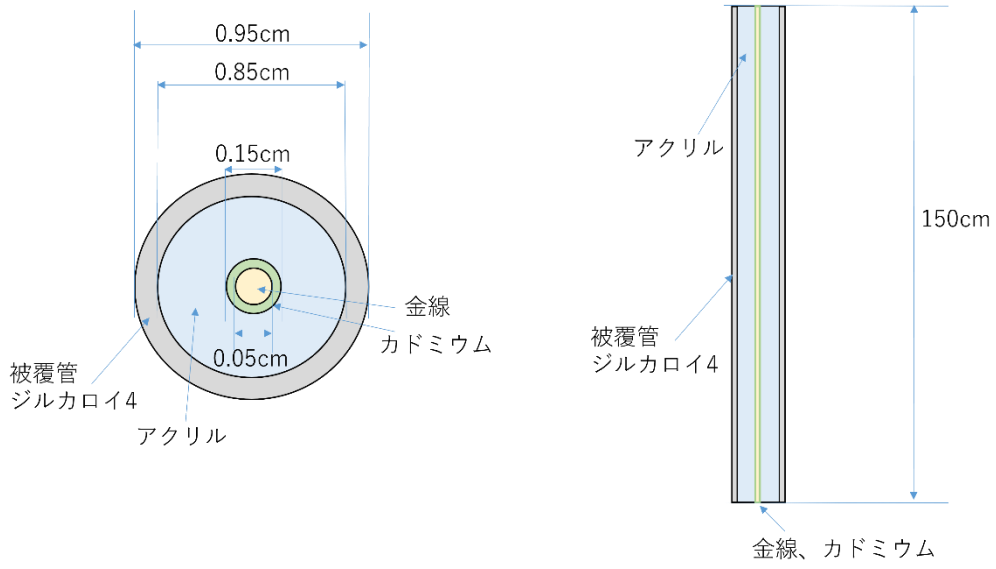
計算結果を図付 2-5 に示す。中性子実効増倍率が最大となったのは太径内挿管を挿入した炉心であるが、デブリ構造材模擬体の解析で中性子実効増倍率が最大となった炉心との差は $7 \times 10^{-4} \Delta k$ (約 0.9σ) とモンテカルロ計算の誤差範囲内であった。デブリ構造材模擬体と同様、実験計画に応じて、保安規定に定め設工認添付計算書に示した手順で事前解析を行い、核的な安全性を確認しつつ運転できることが確認できた。



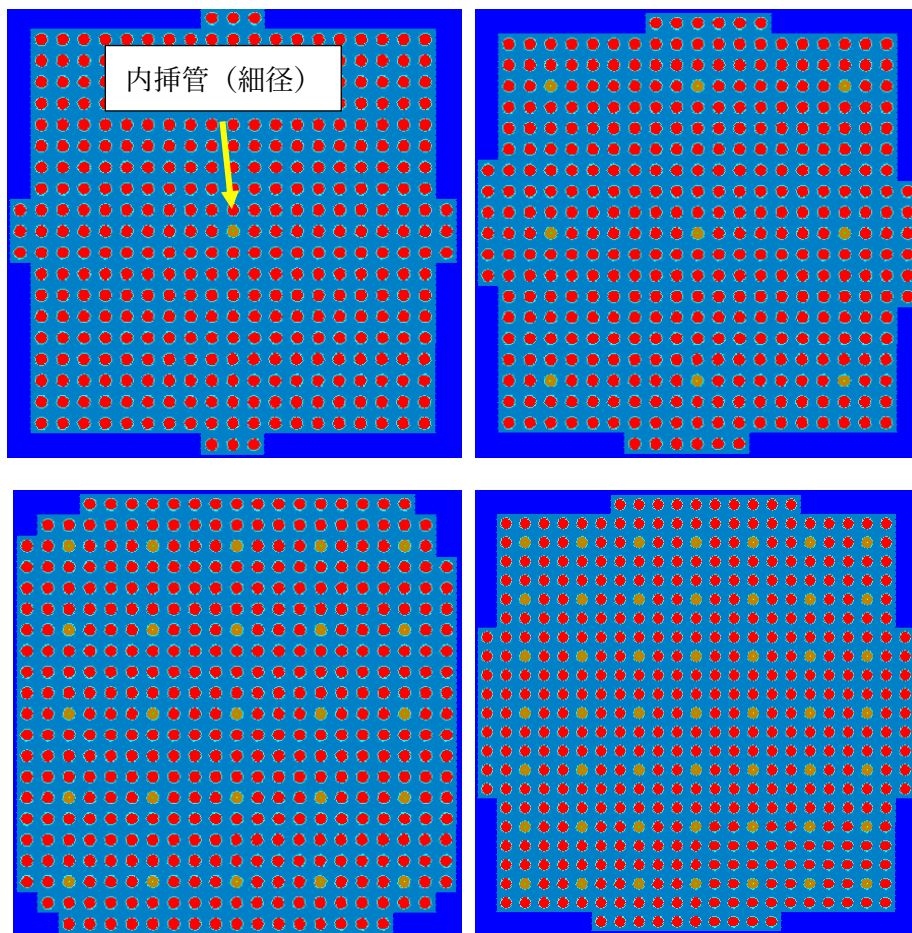
図付 2-1 内挿管（太径）の浸水による置換反応度の計算モデル
（左：上面図、右：立面図）



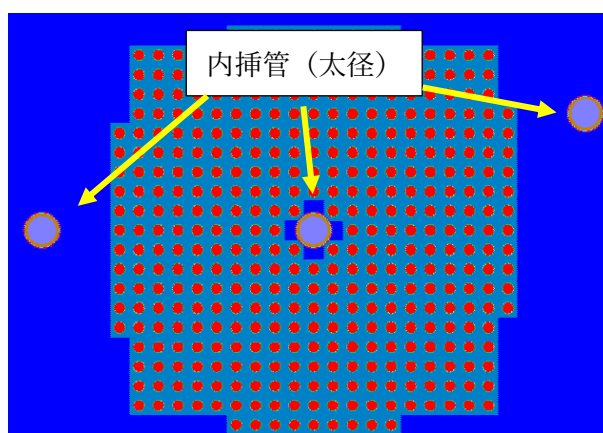
図付 2-2 内挿管（太径内挿管 3 本）の浸水による置換反応度の計算結果



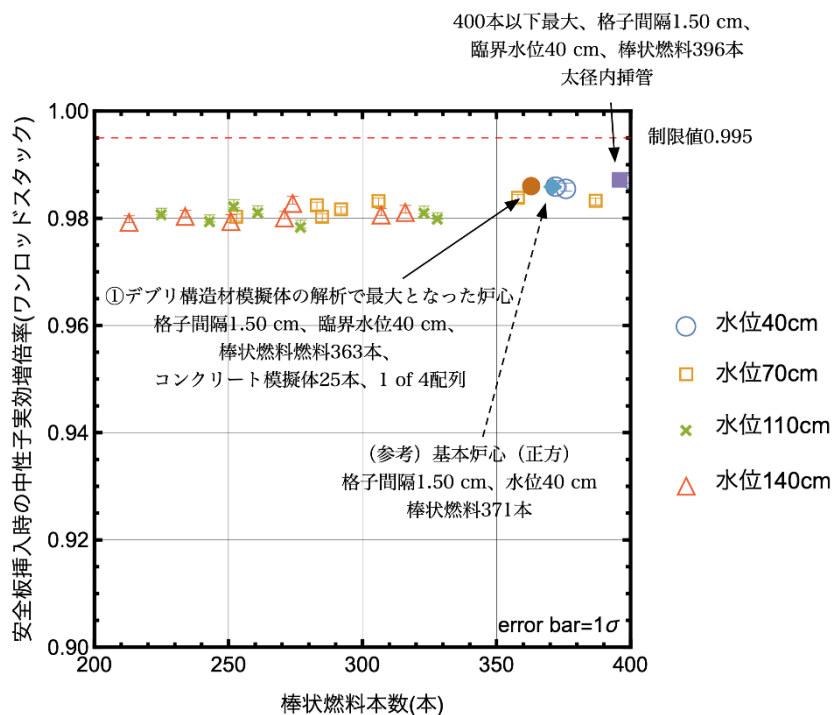
図付 2-3 内挿管（細径）の計算モデル
（左：上面図、右：立面図）



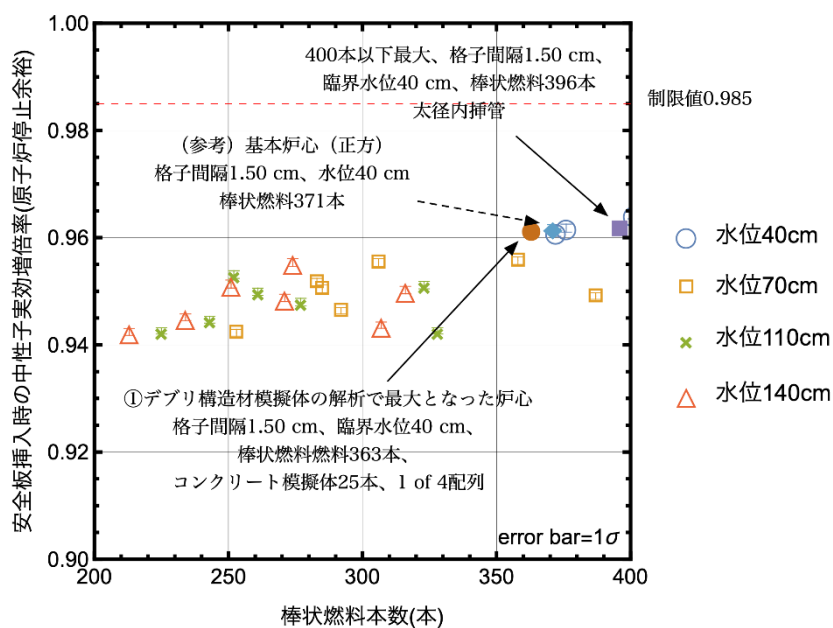
図付 2-4(1) 内挿管挿入時の炉心マップの例
 (左上から右下へ細径 1 本、9 本、25 本、49 本)



図付 2-4(2) 内挿管挿入時の炉心マップの例 (太径 3 本)



図付 2-5(1) 内挿管挿入炉心の安全板挿入時の中性子実効増倍率 (ワンロードスタック)



図付 2-5(2) 内挿管挿入炉心の安全板挿入時の中性子実効増倍率 (原子炉停止余裕)

付録－3 デブリ構造材模擬体が遮蔽計算に及ぼす影響についての検討

デブリ模擬炉心の遮蔽計算について、デブリ構造材模擬体が炉心内で放射化することにより基本炉心より線源が強くなる可能性について、デブリ構造材模擬体（鉄、コンクリート）の放射化物線源強度のオーダーを、以下のとおり評価した。

- (1) 対象核種は、代表的なステンレス鋼の放射化核種[1]である Co-60 と Fe-55 のうち、 γ 線源である Co-60 とする。なお、Fe-55 は軟 X 線源であり、またコンクリートの主要な放射化核種[1]である H-3 は β 線源であるため、遮蔽評価上問題とならない。
- (2) 保守的な評価とするため、STACY が許可上の最大週間積算出力（0.3 kW・h/週）で 20 週連続運転を実施（2 年間の運転に相当）した直後の放射化量を評価する。なお、この設定は、基本炉心の遮蔽計算（令和 2 年 11 月 18 日付け原規規発 2011187 号をもって認可取得）の線源の設定と同様である。
- (3) U-235 の核分裂によって発生する中性子を 1 核分裂当たり 2.5 個[2]とし、核分裂連鎖反応の継続に使用される 1 個を除いた中性子 1.5 個がすべて放射化に寄与するものとする。
- (4) 20 週連続運転期間中の放射化物の減衰は無視する。

上記評価条件より、STACY の 2 年分の運転により発生する中性子数は以下のとおりである。なお、1 核分裂当たりの熱エネルギー発生量は 200 MeV（ $=8.9 \times 10^{-18}$ kW・h）とした。

$$\frac{0.3 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{週} \times 20 \text{ 週}}{8.9 \times 10^{-18} \text{ kW}\cdot\text{h}} \times 1.5 \text{ 個} = 1.0 \times 10^{18} \text{ 個}$$

Co-60 は、崩壊定数 4.2×10^{-9} (1/秒) で崩壊する際に 2 本の γ 線（エネルギー 1.173 MeV, 1.332 MeV）を放出する[3]。上式で評価した中性子がすべて Co-60 を生成したものとした場合、 γ 線の放出率は以下のとおりである。

$$1.0 \times 10^{18} (\text{個}) \times 4.2 \times 10^{-9} (1/\text{秒}) \times 2 (\text{本}) = 8.4 \times 10^9 (\text{本}/\text{秒})$$

上記線源を基本炉心の遮蔽計算で使用した線源と比較すると、核分裂生成物を想定した線源である「運転に使用した燃料」の上限エネルギー 1.66 MeV 及び 1.33 MeV の γ 線に相当する（次頁表の矢印部参照）。これらの放出率はそれぞれ 2.68×10^{12} (本/秒)、 3.69×10^{12} (本/秒) であり、デブリ構造材模擬体の放射化による γ 線は当該線源より 3 桁小さく、放射化物からの放射線は問題とならない。

STACY 第 3 回設工認（令和 2 年 11 月 18 日原規規発第 2011187 号をもって認可取得、令和 4 年 2 月 28 日付け令原機(科臨)017 で記載事項変更届を提出。）の添付書類 III-5-2-(1)「直接線及びスカイシャインガンマ線の線量率計算書」より抜粋。矢印は引用者による。

表 1 STACY 運転により放出されるガンマ線

(出力 200 W、運転に使用した燃料は 20 週連続最大積算出力運転直後)

上限エネルギー (MeV)	放出数 [※] (本/核分裂)	核分裂放出率 (本/秒)	運転に使用した 燃料 [†] 放出率 (本/秒)
10.0	0.020	1.23×10 ¹¹	2.09×10 ⁸
8.0	0.015	9.23×10 ¹⁰	8.06×10 ⁹
6.5	0.03	1.85×10 ¹¹	1.56×10 ¹¹
5.0	0.058	3.64×10 ¹¹	1.53×10 ¹¹
4.0	0.154	9.61×10 ¹¹	8.01×10 ¹¹
3.0	0.162	1.01×10 ¹²	1.05×10 ¹²
2.5	0.285	1.78×10 ¹²	1.64×10 ¹²
2.0	0.320	2.00×10 ¹²	1.66×10 ¹²
1.66	0.509	3.18×10 ¹²	2.68×10 ¹²
1.33	0.892	5.57×10 ¹²	3.69×10 ¹²
1.0	0.615	3.84×10 ¹²	3.61×10 ¹²
0.8	1.011	6.31×10 ¹²	3.84×10 ¹²
0.6	1.143	7.13×10 ¹²	4.10×10 ¹²
0.4	0.571	3.57×10 ¹²	2.11×10 ¹²
0.3	0.571	3.57×10 ¹²	2.03×10 ¹²
0.2	0.571	3.57×10 ¹²	2.12×10 ¹²
0.1	0.286	1.78×10 ¹²	1.30×10 ¹²
0.05	0.286	1.78×10 ¹²	2.75×10 ¹²

※出典 JENDL-3.3 U-235 300K ポイントワイズデータ

†ORIGEN-2.2 及び JENDL-3.3 による評価

添III-5-2-(1)-6

参考文献

- [1] 永田ほか、「JMTR 原子炉施設に残存する放射化汚染物の放射エネルギー評価」、JAEA-Technology 2022-017、
日本原子力研究開発機構、(2022)
- [2] 日本原子力学会炉物理部会、「原子炉の物理」、p.97 (図 5.2)、(2019)
- [3] (公社)日本アイソトープ協会、「アイソトープ手帳 12 版」、(2020)

付録－４ 棒状燃料 400 本とした場合のデブリ模擬炉心及び基本炉心の受検炉心

1. STACY 運転用棒状燃料の調達の見通し

STACY の設工認（第 3 回）で申請し、認可を取得した「基本炉心」並びに実験用装荷物の製作及びデブリ模擬炉心の新設の設工認（実験用装荷物等）で申請中の「デブリ模擬炉心」において、棒状燃料の申請範囲は 50 本～900 本となっているが、当初使用する予定であった 900 本の棒状燃料を調達できる見通しが立っていない。以下では、設工認申請中のデブリ模擬炉心及び認可済みの基本炉心について、当該事態への対応方針を示す。

2. 今後の対応方針

(1) 設工認（実験用装荷物等）について

現在申請中の設工認（実験用装荷物等）のデブリ模擬炉心について、当初想定した棒状燃料 900 本の調達の見通しが立っていないことから、設工認本文「3.2 設計仕様」に記載した使用燃料体の申請範囲を「50 本以上 900 本以下」から「50 本以上 400 本以下」に変更する。なお、設工認添付書類「4. デブリ模擬炉心についての評価書」では、炉心核特性の典型的な変化傾向を示すため「50 本以上 900 本以下」で評価を行っているが、変更後の申請範囲（50 本以上 400 本以下）の評価結果は、現行の申請範囲（50 本以上 900 本以下）の評価結果に含まれることが明らかであり、評価についてはこのままとし、使用燃料体の申請範囲を変更して補正申請を行う。

(2) 設工認（実験用装荷物等）「デブリ模擬炉心」の受検炉心について

変更後の設工認申請範囲（50 本以上 400 本以下）のうち、解析により安全板挿入時の中性子実効増倍率が最大となった炉心（表 1 参照）を参考に受検炉心を設定する。

表1 解析により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
①	1.50	25	0	1 of 4	40	363	
②	1.50	0	69	1 of 4	110	363	

また、表1を参考に受検炉心を設定するに当たり、STACY更新炉は未知炉心での運転を前提とした臨界実験装置であることから、新たな炉心を構成するときは、核的制限値からの逸脱を防止するため、適切な裕度を加味して段階的に模擬体（実験用装荷物）の本数を増やしていきたいと考えている。つまり、表2に示す複数の受検炉心（案）により段階的に表1の炉心構成に近づけ、最終的に表1の炉心に近い炉心条件により使用前事業者検査を受検することとしたい。

表2 デブリ模擬炉心の受検炉心（案）

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
①'	1.50	9	0	1 of 4	約 70	約 280	事前確認
	1.50	25	0	1 of 4	40～50*	363～311*	受検炉心
②'	1.50	0	25	1 of 4	約 70	約 340	事前確認
	1.50	0	69	1 of 4	90～140*	377～346*	受検炉心

※臨界水位及び棒状燃料の装荷本数は可変条件であり、詳細解析、実測データ及び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。）。

(3) 設工認（第3回）の申請範囲について

STACY更新炉は、現在申請中の設工認（実験用装荷物等）の「デブリ模擬炉心」に先立ち、設工認（第3回）で申請した「基本炉心」で初臨界を行う予定である。設工認（第3回）についても同様に、設工認本文「3.2 設計仕様」に記載した使用燃料体の申請範囲を「50本以上 900本以下」から「50本以上 400本以下」に変更する。

なお、この変更は、以下の理由から、試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則の第二条の二（設計及び工事の計画の認可を要しない工事等）で定める「設備又は機器の配置の変更であって、同条第一項又は第二項の認可を受けたところによる放射線遮蔽物の側壁における線量当量率の値を大きくしないものその他試験研究用等原子炉施設の保全上支障のない変更」に該当すると考えるため、変更届にて対応したい。

- 炉心を構成する棒状燃料の本数を減らすことは「炉心構成（機器の配置）の変更」であり、それによって放射線遮蔽物の側壁における線量当量率の値は大きくならない。
- 設工認添付書類「Ⅲ－9－3 反応度制御についての評価書」では、「50本以上 900

本以下」で評価を行っているが、変更後の申請範囲（50 本以上 400 本以下）の評価結果は、現行の申請範囲（50 本以上 900 本以下）の評価結果に含まれ、STACY 施設の保全上支障のない変更である。

(4) 設工認（第 3 回）「基本炉心」の受検炉心について

基本炉心における炉心核特性の典型的な変化傾向を示すための事前解析として、安全板挿入時の中性子実効増倍率（全挿入時及びワンロッドスタック時）を計算した。炉心の格子間隔は 1.50 cm のほか、1.27 cm 格子板を 1 本飛ばしで使用した 2.54 cm（許可上最大）とした。なお、1.27 cm 間隔で配列する炉心は、臨界となる棒状燃料本数が現有の 400 本を超えるため除外した。臨界水位は、許可上の最小である 40 cm から最大である 140 cm のほか、中間の値として 70 cm 及び 110 cm とした。炉心の形状は、円筒形及び正方形とした。計算の結果を本資料末の補足に示す。基本炉心の中性子実効増倍率は、格子間隔については 2.54cm よりも 1.50 cm のほうが、また、炉心形状については円筒形のほうが大きくなる傾向が見られた。ここで、中性子実効増倍率が大きくなる結果が得られた格子間隔 1.50cm の臨界水位については、低水位 40 cm においてその他の水位に比べて中性子実効増倍率が低くなる傾向が得られたが、他方、水位 70 cm 以上の炉心においては有意な違いは見られなかった（補足に示すとおり、水位 70 cm を基準とした場合、水位 110 cm、140 cm の計算結果はそれぞれ±3 標準偏差以内に収まった）。また、1.27 cm 格子板を使用した格子間隔 2.54 cm の炉心では、ワンロッドスタックマージンでは高水位側 140 cm の炉心が、原子炉停止余裕では低水位 40 cm で中性子実効増倍率が大きくなる傾向が見られたが、補足資料に示すとおり低水位のほうがやや大きくなった。

以上の結果から、基本炉心において、格子間隔 1.50 cm の格子板を使用する場合は水位 70 cm 付近の炉心を受検炉心とし、他方、格子間隔 1.27 cm の格子板を使用する場合は水位 70 cm 付近から実験を開始し、デブリ模擬炉心と同様、段階的に使用前事業者検査を受検することとしたい。基本炉心の受検炉心の案を表 3 に示す。

表 3 基本炉心の受検炉心（案）

No.	格子間隔 (cm)	臨界水位* (cm)	棒状燃料* (本)	配列 パターン	備考
①'	1.50	70~90	270~255*	円筒炉心	受検炉心
②'	2.54 [†]	約 70	約 240	円筒炉心	事前確認
	2.54 [†]	40~50	400~300*	円筒炉心	受検炉心

[†] 格子間隔 1.27cm の格子板に棒状燃料を 1 本飛ばしで挿入する。

※臨界水位及び棒状燃料の装荷本数は可変条件であり、詳細解析、実測データ又は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

補足 基本炉心の事前解析

補 1. 評価範囲

基本炉心の事前解析の評価範囲を下表に示す。

パラメータ	変化範囲	備考
棒状燃料本数	50~400 本	
臨界水位	40, 70, 110, 140 cm	
炉心形状 (水平断面)	円筒形、正方形	
格子間隔	1.50, 2.54 cm	1.27 cm は 400 本以上の棒状燃料を要するため除外。

補 2. 評価結果

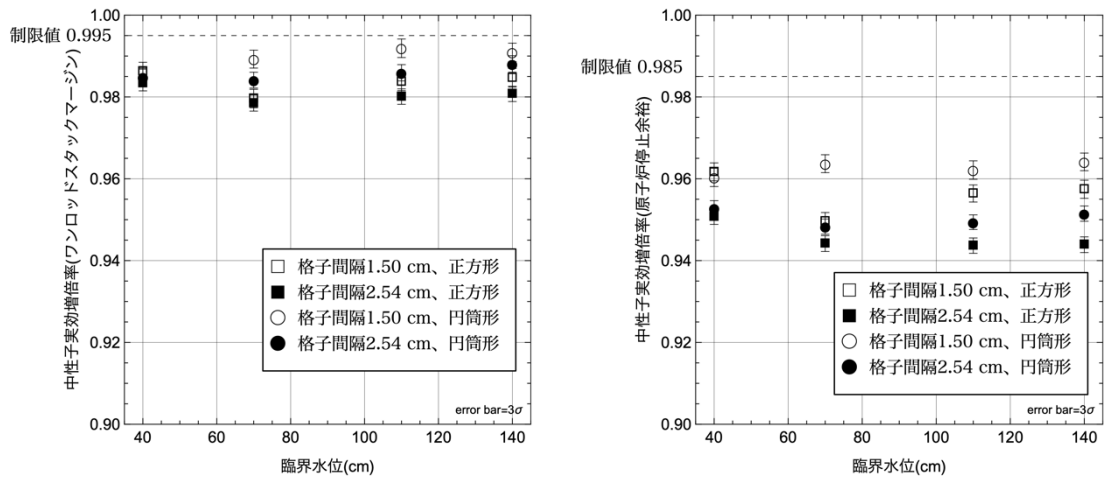
基本炉心の事前解析結果を**図補 1** に示す。図の横軸は臨界水位、縦軸は安全板挿入時の中性子実効増倍率（ワンロッドスタックマージン及び原子炉停止余裕）である。データにはモンテカルロ計算に付随する不確かさを 1σ （約 0.0007）として $\pm 3\sigma$ のエラーバーを付した。

図より、基本炉心の中性子実効増倍率は、格子間隔については 1.50 cm のほうが、炉心形状については円筒形のほうが大きくなる傾向が見られる。臨界水位については、格子間隔 1.50 cm の円筒形炉心の場合、臨界水位 70 cm 以上ではほぼ違いが見られなかった（**表補 1** に示すとおり、差は $\pm 3\sigma$ 以内）。また、格子間隔 1.27 cm の格子板を使用した場合（格子間隔 2.54 cm）では、ワンロッドスタックマージンの結果では高水位側 140 cm の炉心が、原子炉停止余裕の結果では低水位 40 cm の炉心で中性子実効増倍率が大きくなる傾向が見られた。このとき、**表補 2** に示すとおり、臨界水位 70 cm 炉心の結果を基準とした場合、低水位側のほうがやや中性子実効増倍率が大きくなったため、受検炉心としては低水位を提案する。

以上

（評価結果の補足）

図補 1 の横軸を炉心の幅（正方形の炉心では 1 辺の長さ、円筒形の炉心では直径）で整理した結果を図補 2 に示す。図には、各格子板の安全板スリットの間隔を縦線で示した。図より、安全板の間隔と円筒形炉心の直径が一致するとき、中性子実効増倍率が大きくなることがわかる。



図補1 基本炉心の事前解析結果

(左：ワンロッドスタックマージン、右：原子炉停止余裕)

表補1 格子間隔 1.50 cm、円筒炉心の中性子実効増倍率の比較

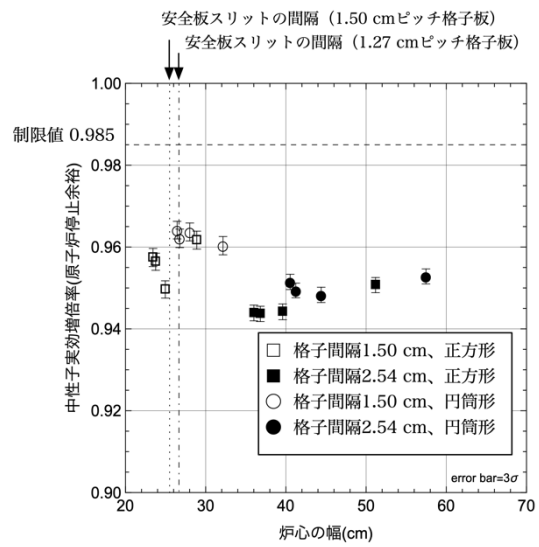
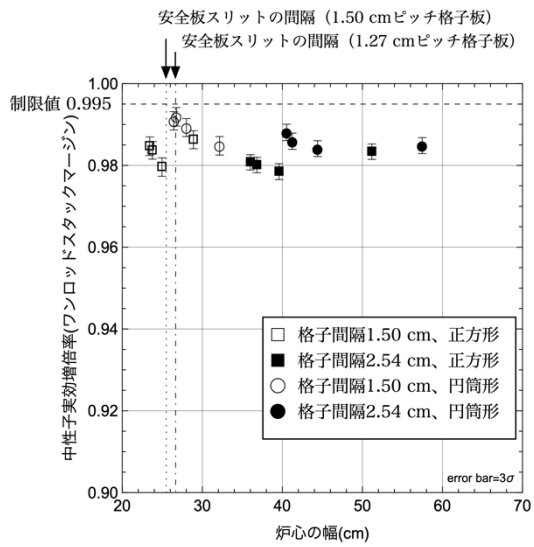
臨界水位 (cm)	棒状燃料本数	ワンロッドスタックマージン		水位 70cm 炉心との差 (σ) [*]	原子炉停止余裕		水位 70cm 炉心との差 (σ) [*]
		k_{eff}	$\pm 1\sigma$		k_{eff}	$\pm 1\sigma$	
40	361	0.9848	0.0008	-4.2	0.9603	0.0007	-3.2
70	274	0.9892	0.0007	—	0.9637	0.0007	—
110	250	0.9919	0.0008	2.5	0.9621	0.0008	-1.5
140	244	0.9909	0.0007	1.6	0.9641	0.0007	0.4

※臨界水位 70 cm の炉心の計算結果を k_0 , σ_0 とした場合、 $(k_{\text{eff}} - k_0) / \sqrt{(\sigma^2 + \sigma_0^2)}$ で計算。

表補2 格子間隔 2.54cm、円筒炉心の中性子実効増倍率の比較

臨界水位 (cm)	棒状燃料本数	ワンロッドスタックマージン		水位 70cm 炉心との差 (σ) [*]	原子炉停止余裕		水位 70cm 炉心との差 (σ) [*]
		k_{eff}	$\pm 1\sigma$		k_{eff}	$\pm 1\sigma$	
40	402	0.9848	0.0007	0.8	0.9528	0.0006	5.2
70	240	0.9841	0.0006	—	0.9483	0.0006	—
110	207	0.9859	0.0007	2.0	0.9494	0.0006	1.3
140	200	0.9881	0.0007	4.3	0.9515	0.0006	3.6

※臨界水位 70 cm の炉心の計算結果を k_0 , σ_0 とした場合、 $(k_{\text{eff}} - k_0) / \sqrt{(\sigma^2 + \sigma_0^2)}$ で計算。



図補2 基本炉心の事前解析結果 (炉心の幅で整理)
 (左:ワンロッドスタックマージン、右:原子炉停止余裕)