

令和 5 年 5 月 31 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と考える。以上のことを考慮して選定した受検炉心の候補を表 2 に示す。

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、
- ・ デブリ構造材模擬体の装荷本数について、鉄単独 25 本、コンクリート単独 25 本（いずれも製作本数の半数程度）の 2 ケース、
- ・ デブリ構造材模擬体の装荷パターンについて、炉心形状を固定した解析（資料 ST-13-6 付録-1 を参照。）では配列パターンの影響は大きくなかったため、多くのケースで原子炉停止余裕がより厳しくなった 1 of 4 を選択する。

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 $\pm 4\%$ 相当（別紙参考資料を参照。）を確保するため、40~70 cm の範囲とする。
- ・ 棒状燃料本数については、予備解析において水位 40 cm 及び 70 cm で臨界となる棒状燃料本数を参考とし、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を

実測することで、機器の設計（ハード）と当該手順（ソフト）があいまって、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。

表 1 中性子実効増倍率が最大となった炉心

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						
1.50	25	0	1 of 4	40	363	400 本以下で最大値
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						
1.27	69	0	4 of 4	70	592	900 本以下で最大値
1.27	0	69	1 of 4	70	590	

表 2 受検炉心の選定候補

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						
1.50	25	0	1 of 4	40~70	363~275*	
1.50	0	25	1 of 4	40~70	453~342*	
許可上の最大棒状燃料 900 本以下で臨界となる炉心						
1.27	25	0	1 of 4	40~70	621~438*	
1.27	0	25	1 of 4	40~70	728~523*	

※棒状燃料の装荷本数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

参考 水位変化による反応度調整幅として±4\$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、(3)解析精度の3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、製作公差の調整幅を3\$とする。

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

(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。3 σ を考慮した場合、解析誤差の調整幅は0.7\$となる。

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

(3) 解析精度

基本炉心(デブリ構造材模擬体を用いない炉心)では、日本原子力研究開発機構の臨界実験装置であるTCAの解析を参考に、臨界と判定する中性子実効増倍率のバイアスを0.997と設定している。したがって解析精度の調整幅を0.4\$とする。

$$(1-0.997=0.003 \rightarrow 0.003/0.007=0.43\$ \rightarrow 0.4\$)$$

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は、未知炉心であるため、上記(1)~(3)の要素の合計の2倍を考慮する。すなわち、大きさは $(3\$ + 0.7\$ + 0.4\$) \times 2 = 8.2\$ \rightarrow 8\$$ とし、調整幅は±4\$とする。

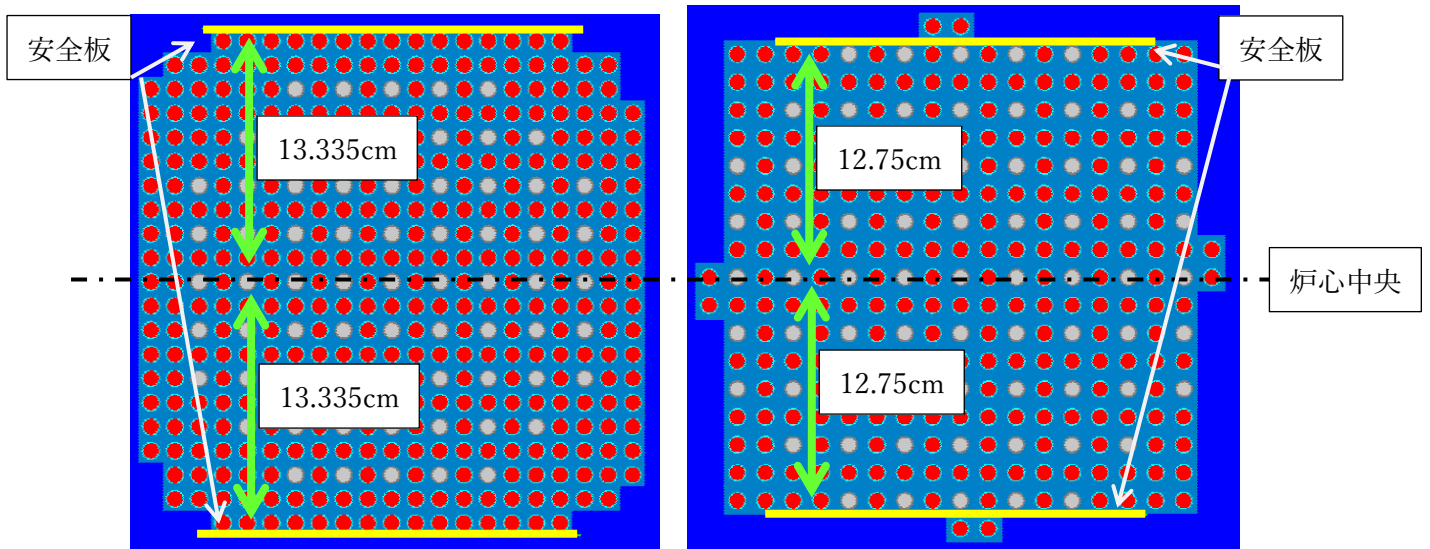
ここで、水位反応度係数が修正一群理論に従うものとした場合、臨界水位40 cm~70 cmの反応度差は約8.3\$、その内訳は40 cm~50 cmで約4.1\$、50 cm~70 cmで約4.2\$である¹。よって、上記の検討と合わせ、臨界水位にして40 cm~70 cmの調整幅を考慮する。

¹ 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1.5cm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。

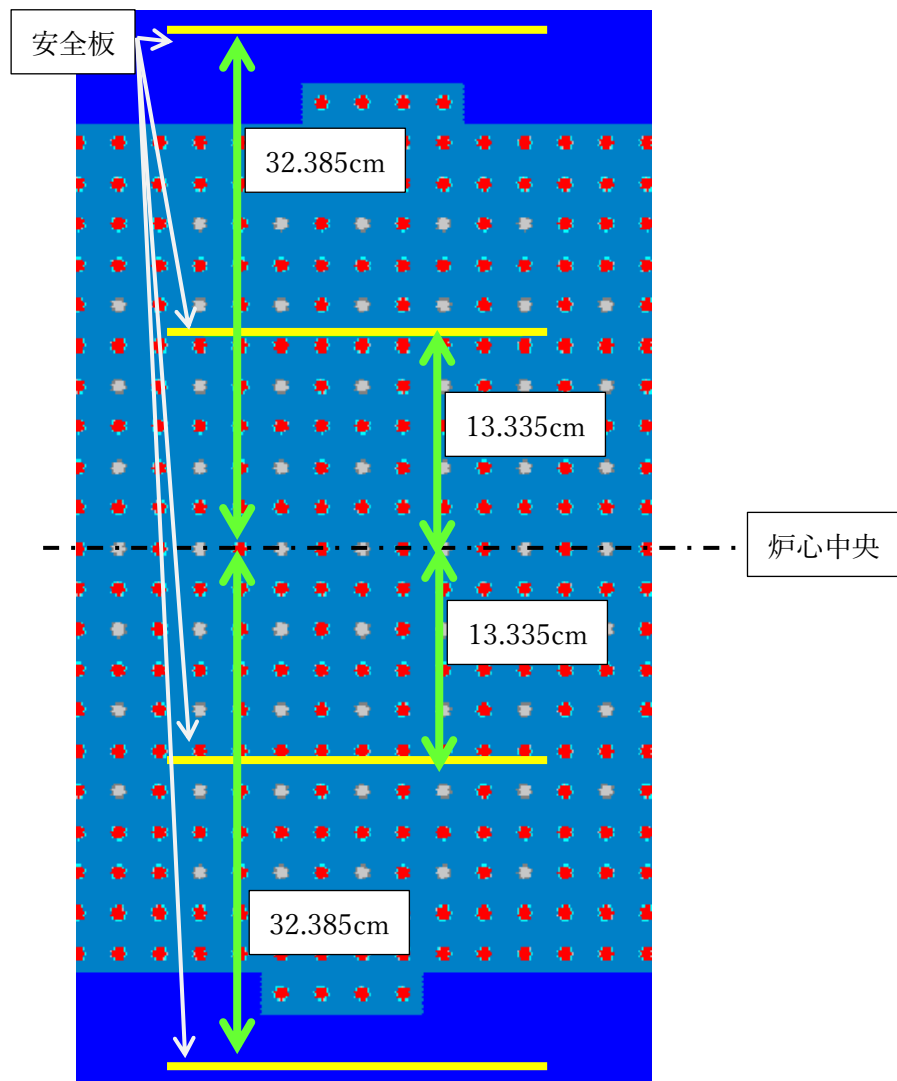
補足 STACY の炉心構成範囲

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。炉心構成の自由度が高いため、事前の解析により核特性を確認する。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	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。
デブリ構造材模擬体 (鉄)	0~70	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。
デブリ構造材模擬体 (コンクリート)	0~70	同上。
格子間隔	1.27 ~ 2.54	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。なお、2.54 cm は 1.27 cm 格子板に 1 本飛ばしで挿入したもの。
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, 3 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、3 of 4 については図補 - 2 参照。
臨界水位	40~140 cm	臨界としてよい水位は設置変更許可にて上限と下限が定められている。



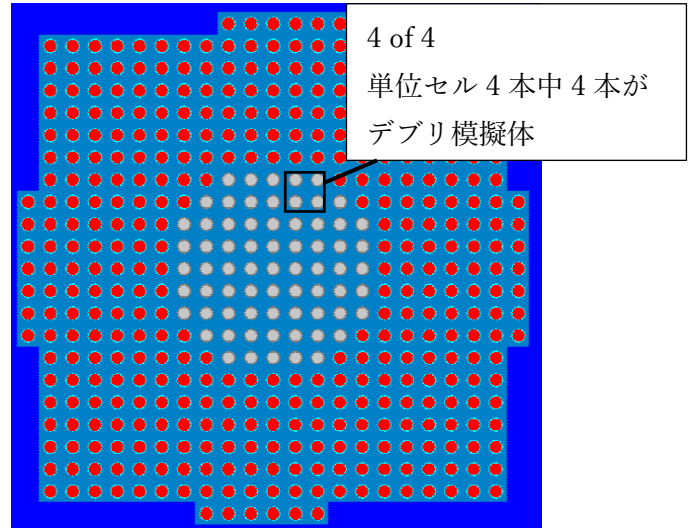
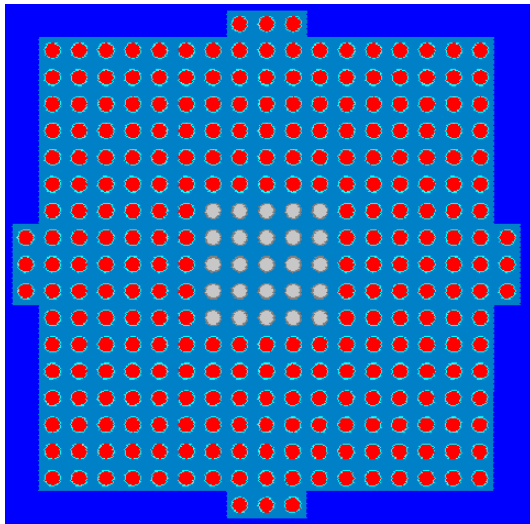
(左) 格子間隔 1.27 cm、(右) 格子間隔 1.50 cm



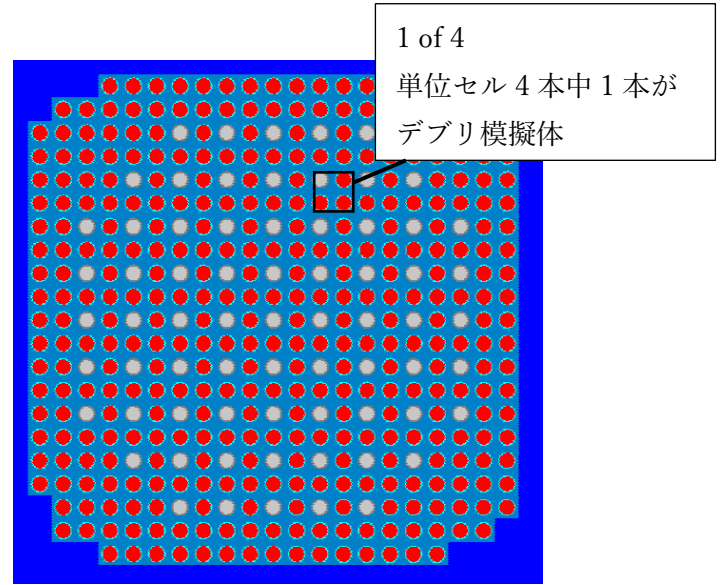
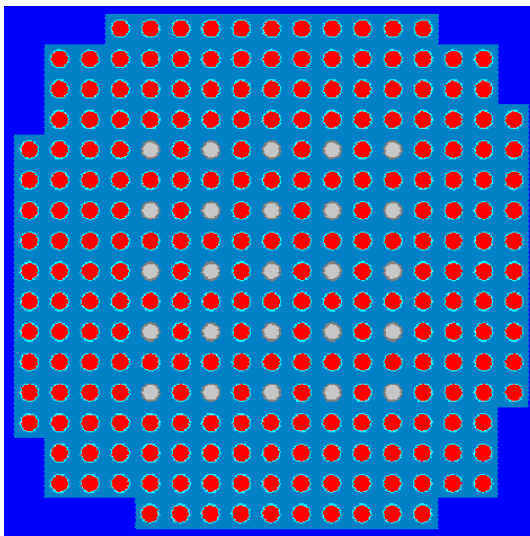
格子間隔 2.54 cm

図補-1 安全板の挿入位置 (例)

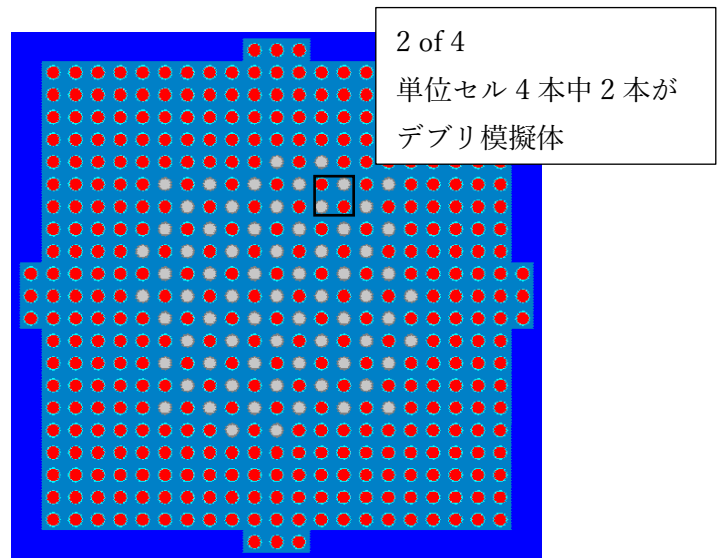
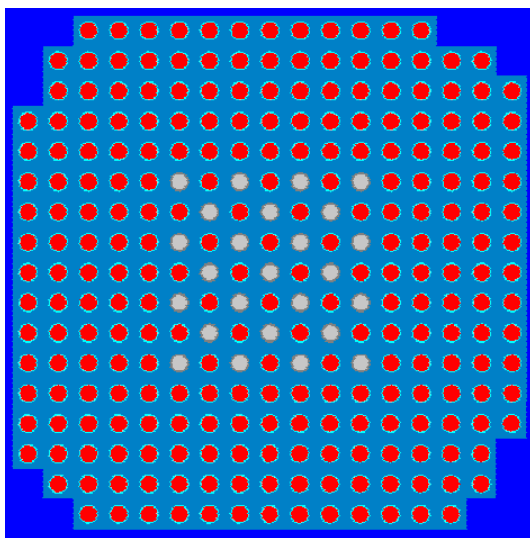
(凡例) ●棒状燃料、○デブリ構造材模擬体



(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)