

令和5年8月9日
日本原子力研究開発機構
臨界ホット試験技術部

STACY の燃料調達状況を踏まえたデブリ模擬炉心及び基本炉心に係る
設工認申請書の見直しと受検炉心について

令和5年6月28日の規制庁面談でのコメントを受け、コメント内容を全て満足した上で STACY の使用前事業者検査を終えるための方針を示す。

1. 規制庁面談（令和5年6月28日）での主なコメント

設工認（第3回）で申請した「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。STACYで900本の棒状燃料を調達できる見通しはどうか。使用前事業者検査において400本を超える受検炉心についてどのように対応するのか。

2. コメントを踏まえた今後の対応方針

(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、設工認第2編本文「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、「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する。

(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）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 | |

安全板挿入時の中性子実効増倍率以外のパラメータについて補足情報(1)に示す。

また、表1を参考に受検炉心を設定するにあたり、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 | 1.50 | 9 | 0 | 1 of 4 | 約 70 | 約 280 | |
| ①'-2 | 1.50 | 25 | 0 | 1 of 4 | 40~50* | 363~311* | 受検炉心 |
| ②'-1 | 1.50 | 0 | 25 | 1 of 4 | 約 70 | 約 340 | |
| ②'-2 | 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、実測データ及び臨界近接の結果により決定する。

*変化幅について別紙1及び2で補足する。また、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。）。

受検炉心の、安全板挿入時の中性子実効増倍率以外のパラメータについて補足情報(1)に、安全板挿入時の中性子実効増倍率について補足情報(2)に示す。

(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、設工認第1編本文「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りません。
- 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

基本炉心においても、デブリ模擬炉心の事前解析の結果を参考に、低水位（40 cm）付近を受検炉心として提案する。また、炉心形状は、おおむね円筒炉心のほうが安全板の効果が小さくなる傾向が見られることから、円筒形とする。このとき、前述(2)の手順と同様に、適切な裕度を加味して段階的に臨界水位を低くしていきたいと考えている。すなわち、初回炉心としては臨界水位範囲の中間値 70 cm 付近で炉心を構成し、段階的に低水位に近づけることとしたい。具体的には表3のとおり。

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 | 2.54 [†] | 約 70 | 約 240 | 円筒炉心 | |
| ①'-2 | 2.54 [†] | 40～50 | 400～300* | 円筒炉心 | 受検炉心 |
| ②'-1 | 1.50 | 約 70 | 約 280 | 円筒炉心 | |
| ②'-2 | 1.50 | 40～50 | 360～310* | 円筒炉心 | 受検炉心 |

[†]1.27cm ピッチ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、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。）。

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¹、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。

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 1.50 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 「表 2 デブリ模擬炉心の受検炉心（案）」の臨界水位幅の算出の方法

受検炉心の選定候補に当たっては、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 1 「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。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 |

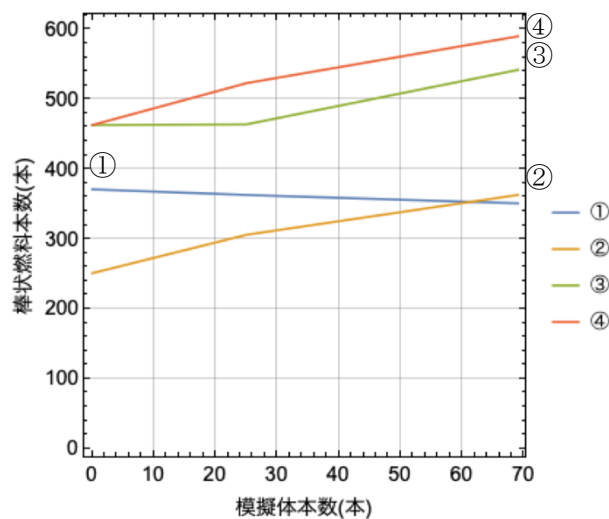
参考文献

- [1] ラマーシュ、「原子炉の初等理論」、吉岡書店、(1974)

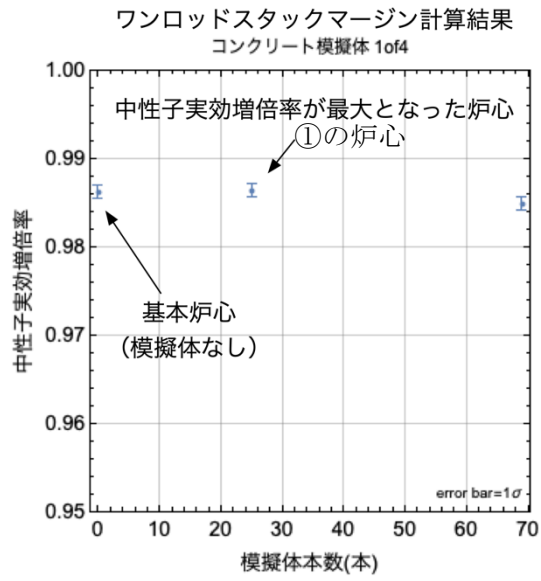
参考 棒状燃料 400 本以下で中性子実効増倍率が最大となったコンクリート模擬体 25 本の炉心についての補足

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



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)

補足情報(1) 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 デブリ模擬炉心の受検炉心 (案)」に
掲載した炉心 (表 2 については受検炉心) 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 | |
| ①'-2 | 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'-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 | |

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)

補足情報(2) 表 2 の補足データ

「表 2 デブリ模擬炉心の受検炉心 (案)」に掲載した受検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'-2 | 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'-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 |

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