

<STACY 運転再開記念>

定常臨界実験装置 STACY の更新改造と運転再開

日本原子力研究開発機構 曾野浩樹

定常臨界実験装置 STACY (Static Experiment Critical Facility) は、「溶液燃料を用いる原子炉」から「棒状燃料及び軽水減速材を用いる原子炉」に更新改造され、2024年8月2日、13年8か月ぶりに運転を再開した。その間、許認可対応8年11か月、更新改造工事3年1か月、原子炉性能に係る使用前事業者検査4か月ほかがあった。以下、STACYの生い立ちから運転再開に至るまでの軌跡を報告する。

(STACYの生い立ち)

STACYは、再処理施設に関する臨界安全データの取得を目的に設置された、溶液燃料(硝酸ウラン)を用いる臨界実験装置(以下「溶液系STACY」という。)である。同じく溶液燃料を用いるパルス運転型の過渡臨界実験装置TRACYとともに日本原子力研究開発機構(JAEA)原子力科学研究所の燃料サイクル安全工学研究施設(NUCEF)に設置された。使用する溶液燃料はNUCEF内附属施設の燃料調製設備でウラン酸化物ペレットを溶解して準備するなど、日本はもとより世界的に見ても特殊な原子炉施設であった。

溶液系STACY(写真1、表1参照)は、1995年2月23日の初臨界以降2010年11月30日までの15年9か月間に644回の運転を行った。得られた臨界データは、国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト<sup>1)</sup>への提供のほか、1999年9月30日に発生したJCO臨界事故の収束及び事故調査<sup>2)</sup>にも役立てられた。



写真1 溶液系STACYの炉心タンク(更新改造前)

(更新改造に係る許認可対応)

建設当初の目的を果たした溶液系STACYでは、新たな研究テーマに「次世代軽水炉開発」を掲げ、「棒状燃料及び軽水減速材を用いる原子炉」(以下「STACY更新炉」という。表1)に改造するための原子炉設置変更許可申請を2011年2月10日に行った。しかし、その1か月後の3月11日に東日本大震災と福島第一原子力発電所事故(以下「1F事故」という。)が起きたため審査は中断され、その後、新規制基準が制定される2013年12月まで2年9か月の間、審査の空白期間があった。そこで、1F事故を踏まえた研究ニーズに即応するため「燃料デブリの臨界評価技術の開発(原子力規制庁受託事業<sup>3)</sup>)」を加える検討を進め、原子炉設置変更許可申請書の補正を2015年3月31日に行った。この補正は、元の次世代軽水炉開発のための炉心構成に、燃料デブリに含まれる鉄やコンクリートを追加できるようにする変更であるが、炉心を容易に変更できる臨界実験装置の基本性能(炉心構成の自由度)を広げることで対応したものである。

表 1 溶液系 STACY と STACY 更新炉の仕様

原子炉	溶液系 STACY	STACY 更新炉
炉型	ウラン・プルトニウム燃料タンク型	濃縮ウラン燃料軽水減速型
炉心 タンク	均質炉心 (溶液燃料) 円筒：直径 60cm、80cm 平板：幅 70cm×厚さ 28cm、35cm 非均質炉心 (溶液燃料+棒状燃料) 円筒：直径 60cm 以上、可変。高さはいずれも 150cm	円筒：直径 180cm、高さ 190cm (固定)
熱出力	【更新前後で変更なし】最大 200W (通常 1W 程度)	
積分出力	【更新前後で変更なし】最大 0.3kW・h /週 【更新前後で変更なし】最大 3kW・h /年	
燃料	ウラン溶液燃料 (硝酸ウラニル) ウラン濃縮度 6wt%、10wt% ウラン棒状燃料 (非均質炉心のみ) ウラン酸化物ペレット ウラン濃縮度 5wt%、 ジルカロイ被覆 (PWR 型短尺)	ウラン棒状燃料 ウラン酸化物ペレット ウラン濃縮度 10wt%以下 (現有 5wt%)、 ジルカロイ被覆 (PWR 型短尺)
体積比	溶液燃料対燃料ペレット 1.9~15 (非均質炉心のみ)	減速材対燃料ペレット 0.9~11
臨界水位	【更新前後で変更なし】40~140cm	
反応度 制御	溶液燃料の液位制御	軽水 (減速材及び反射材) の 水位制御 (図 1 参照)
過剰 反応度	0.2 ドル以下 (通常時)	0.3 ドル以下 (通常時)
	【更新前後で変更なし】0.8 ドル以下 (運転時の異常な過渡変化時)	
可動 装荷物	【更新前後で変更なし】0.3 ドル以下	
反応度 添加率	【更新前後で変更なし】3 セント/s 以下	
緊急停止	安全棒 (B <sub>4</sub> C ペレット) 又は 安全板 (Cd 板) 挿入 (1.5s 以内)	安全板 (Cd 板) 挿入 (1.5s 以内)
	排液弁開 (1s 以内)	排水弁開 (1s 以内)

新規制基準下で初となる原子炉全面改造の審査が規制当局・事業者（JAEA）双方の手探りのなか行われた。特に新規制基準で強化された津波対策に関し、STACY 更新炉は炉心冠水・制御棒駆動型ではなく炉心タンクへの給排水による減速材水位調整で臨界制御するため（図1参照）、JAEAは、原子炉運転中はもとより停止中の炉心構成（棒状燃料の自由配列）作業時でも津波浸水によって炉心が臨界超過とならないよう炉心構成範囲の制限や中性子吸収板の併用装荷の対策を講じることとした。新しい原子炉制御システムのほか原子炉施設全体としての新規制基準適合確認に係る審査が規制当局によって行われ、2018年1月31日にSTACY 更新炉の原子炉設置変更許可を取得した。その後、溶液系STACYの系統分離及び旧原子炉本体機器の解体撤去、原子炉建家の耐震改修、STACY 更新炉の本体改造ほかに関する設計及び工事の計画に係る認可（設工認）の審査が続き、2020年11月18日に最終認可を受け、JAEAは原子炉本体の更新改造工事に着手した。

**（更新改造工事）**

更新改造工事は、NUCEF内の施設管理を継続しつつ、溶液燃料取扱設備等の汚染拡大防止、厳重な核物質防護措置を講じながら進められた。加えて、2020年4月以降、職員及び工事関係者に新型コロナウイルスの感染防止対策も必要であった。溶液系STACYの系統分離（2018年3月～12月）、原子炉建家の耐震改修（2018年7月～12月）及び旧原子炉本体機器の解体撤去（2020年3月～2022年3月）、そして2020年11月から3年1か月間（総人工数約1万人）に及ぶ原子炉本体の更新改造工事を終え、STACY更新炉は2023年12月28日に完成した（写真2～写真5参照）。

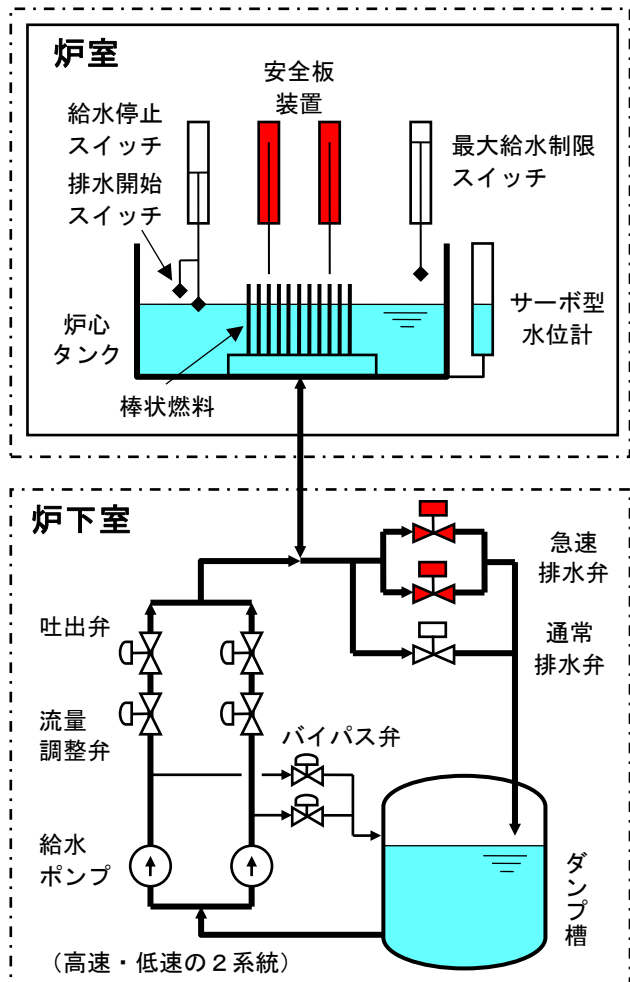


図1 STACY 更新炉の反応度制御系統図  
（赤色の機器は緊急停止時に使用）



写真2 解体撤去された溶液系 STACY (炉心タンク周辺)



写真3 STACY 更新炉の炉心タンク (上下2分割の上側) 設置の様子



写真4 STACY 更新炉のダンプ槽 (軽水減速材貯水槽) 搬入の様子



写真5 完成した STACY 更新炉 (炉心タンク周辺)

### (臨界実験装置の炉心に係る審査・検査)

STACY 更新炉の炉心に係る規制当局による設工認審査は2回行われている。1回目は、棒状燃料と軽水減速材だけで構成する「基本炉心」に係る審査で、2019年3月～2019年12月に行われた。2回目は、1F事故の燃料デブリを模擬する炉心(以下「デブリ模擬炉心」という。)及び基本炉心の棒状燃料本数変更\*1に係る審査で、1回目から2年後の2022年11月～2024年3月に行われた。

1回目の設工認審査では、JAEAは次の臨界実験装置の目的と特徴\*2並びに原子力規制検査の考え方を踏まえて審査に臨み、規制当局から設工認及び保安規定の認可を受けた。

- ・原子炉等規制法施行令第17条にある臨界実験装置の定義に「核特性を測定する用に専ら供する」とあり、これがすなわち、新しい炉型や未知炉心に関する実験検証の目的である。
- ・同定義の「炉心構造を容易に変更」することができる臨界実験装置では、後段規制において、保安規定に「燃料体、減速材、反射材等の配置及び配置替えに伴う炉心特性の算定及

\*1 棒状燃料の最大炉心装荷本数を、原子炉設置変更許可書の最大数900本から現有の400本に変更した。

\*2 旧原子力安全委員会「水冷却型試験研究用原子炉施設の安全評価に関する審査指針」の参考「臨界実験装置の安全評価の考え方」にも、「臨界実験装置の安全評価に当たっては、臨界実験装置の特徴(安全確保上、運転管理に負うところが大きい、ほか)を踏まえて評価を行う必要がある。」と解説されている。



びその結果の承認に関すること」を定め、その手順どおりに運用されていることを原子力規制検査（フリーアクセス等）で確認する。本審査において、STACY 更新炉については、許可を受けた炉心構成範囲内であれば「運転中に反応度異常があっても炉心損傷や燃料破損には至らない」との事故評価がなされていることと合わせ、保安規定に従って炉心核特性を実測しながら実験運転を進めれば（図 2 参照）、当該炉は安全に運転できるという判断がなされたものと理解している。

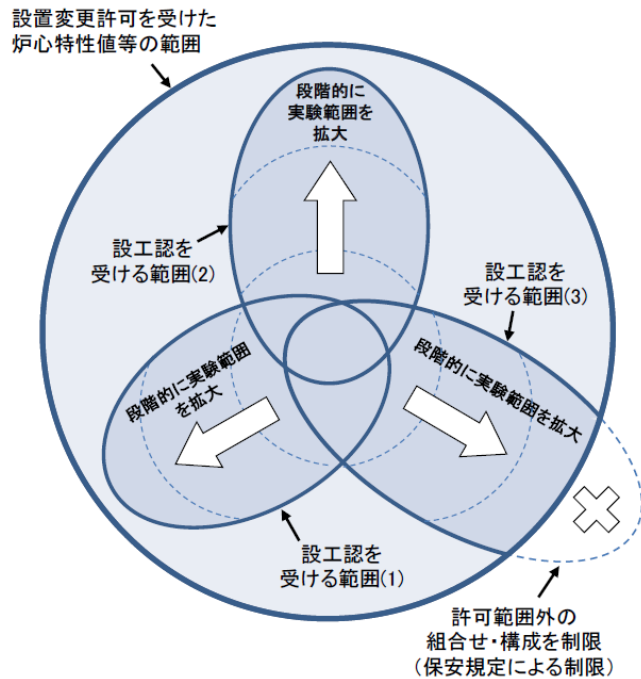


図 2 新しい炉心を構成する際の方針（概念図）

2 回目の設工認審査では、規制当局から、「炉心構成及び運転時の安全上の制限を満足させる方法」に関し、次の 2 つの指摘があった。

- ・当該設工認の範囲内で実験を行おうとする炉心構成を網羅してその解析結果を示し、その範囲のうち核的に厳しい炉心\*3で検査を行うこと\*4。
- ・新規製作した炉心構成物\*5のすべてを炉心に装荷してそれぞれ検査を行うこと。

これを受け JAEA は、大幅な改造後に初めて構成する炉心で臨む原子炉性能検査（初回運転）において、核的に厳しい条件で実施することのリスクも考慮し、炉心核特性に係る安全性を確かめつつ検査を進めることとした。具体的には、格子板 2 種類又は実験用装荷物 2 種類の炉心の組み合わせについて核的に厳しい炉心で受検する前に、事前解析の精度評価用の事前確認炉心を設け、解析精度を確認した上で本番の検査に臨むこととした（付録参照）。

\*3 ここでは、原子炉停止余裕及びワンロードスタックマージンが最も厳しくなる（安全板挿入時の中性子実効増倍率が 1 に近い）炉心を指す。

\*4 これは、図 2 に示す円内（許可範囲）の楕円（設工認範囲）を外側に進めていった「限界」に近い領域の炉心条件で初回検査を行うことを意味する。新しい炉型や未知炉心では、4 時の方向の楕円のように、限界領域では許可範囲を逸脱する場合もあり得る。

\*5 STACY 更新炉では、棒状燃料配列用「格子板」（格子間隔 1.50cm と 1.27cm の 2 種類で減速材対燃料体積比が可変）と、デブリ模擬炉心を構成するための実験用装荷物「デブリ構造材模擬体」（鉄又はコンクリートそれぞれ 70 本）を製作した。なお、それらは個別に材料検査、寸法検査等を受け、炉心に問題なく装荷・機器駆動できることを確認している。

### (使用前事業者検査と運転再開)

2020年4月から施行された「新検査制度」では、従前の規制当局による使用前検査ではなく、事業者内の独立検査組織が使用前事業者検査を行い、その事業者検査が適切に行われたことを規制当局が確認(使用前確認)することとなっている。JAEAの独立検査組織は、前述のSTACY更新炉の完成後、2024年4月から原子炉性能に係る使用前事業者検査に着手した。

STACY更新炉を運転するには、新規製作した原子炉制御機器(炉心タンク、ダンプ槽、反応度制御設備等)だけでなく、核計装など継続使用する機器の取り合い調整も必要になる。それら継続使用する機器は運転再開を見据え定期的に点検を行ってきたが、実際に使用してみると新規製作機器に合わせた再調整が必要であった。このため、未臨界状態までの試運転において核計装の位置決めや電気信号調整を行い、同年4月22日にSTACY更新炉での初臨界を達成した(写真6参照)。その後も微調整及び出力校正を行いつつ性能検査を進め、7月12日に使用前事業者検査合格、7月31日に使用前確認証を受領し、8月2日から運転を再開した。



写真6 初臨界を達成したSTACY更新炉(制御室にて)

### (今後のSTACY利活用)

溶液系STACYの運転停止から13年8か月を経て、2024年8月2日に運転再開したSTACY更新炉は、今スタートに立ったばかりで、これからが成果創出の本番である。燃料デブリを模擬するための実験用装荷物の製作とデブリ模擬炉心に係る使用前事業者検査の合格(2024年12月9日)及び使用前確認証の交付(同月24日)を経て、現在は、当面の目標である「燃料デブリの臨界評価技術の開発(原子力規制庁受託事業※)」に向け、デブリ模擬臨界実験計画を進めているところである。その後は、軽水炉等の安全性向上やそのための原子炉物理・臨界安全に関する研究開発のほか、研究炉の長期停止で衰退しつつある我が国の原子炉の運転や利用技術を復元させるべく教育訓練運転にも供していく予定である。

新規制基準の導入後においてJAEAは、STACY更新炉をはじめJRR-3や原子炉安全研究炉(NSRR)などの研究炉を含む様々な原子力施設の許認可対応等を経験してきた。これらを通じて得られた様々な知見やノウハウ、反省点を活かして、グレーデッドアプローチ<sup>\*6</sup>の考え方に基づいた安全設計や保安活動等を今後の新たな研究炉等に反映できるよう取り組んでいく。

※STACY更新改造は、原子力規制庁「東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備事業(2014年度～2024年度)」の一部として行われた。

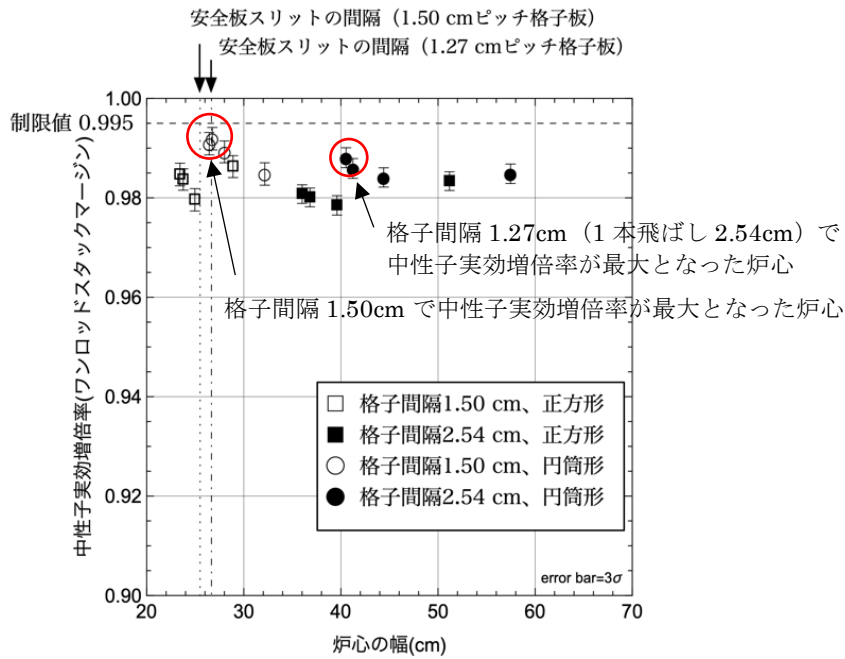
<sup>\*6</sup> 原子力安全に関する基本的な考え方の一つで、「原子力施設の安全確保の方法や規制要求の厳格さが、安全上の重要性と釣り合うこと」を求める概念。

(参考文献)

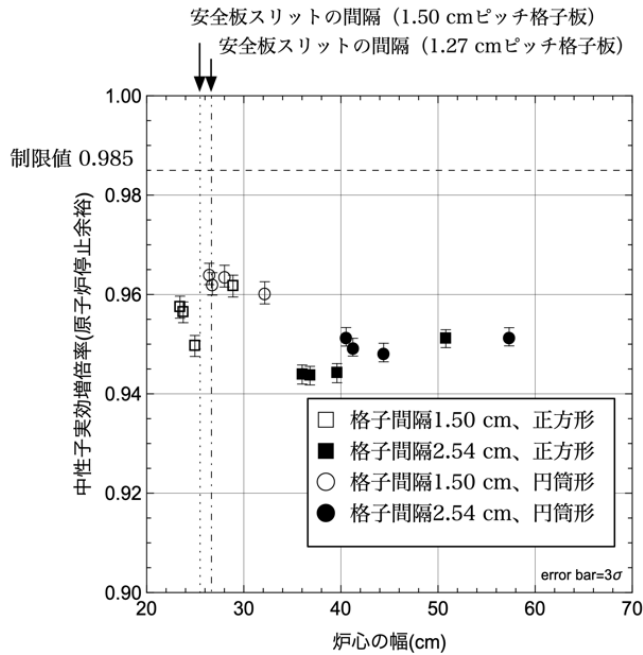
- [1] OECD/NEA, International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project (ICSBEP), [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_24498/international-criticality-safety-benchmark-evaluation-project-icsbep](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_24498/international-criticality-safety-benchmark-evaluation-project-icsbep) (参照 : 2024 年 10 月 1 日).
- [2] JCO 臨界事故調査支援原研タスクグループ, 「JCO 臨界事故における原研の活動」, 日本原子力研究所 JAERI-Tech 2000-074, 2000, 216p.

(付録) 核的に厳しい炉心の探査と受検炉心の選定

基本炉心の炉心構成例 (代表的な 24 パターン) 及びデブリ模擬炉心の炉心構成例 (代表的な 216 パターン) のワンロードスタックマージンと原子炉停止余裕の解析結果 (臨界とならない炉心パターンを除く。) を示し、その中から核的に厳しい (安全板挿入時の中性子実効増倍率が 1 に近い、すなわち安全板の反応度値が最も小さい) ケースを選定した。なお、下図 (設工認申請書の抜粋) は、炉心核特性の変化が鋭敏でないことを示している。



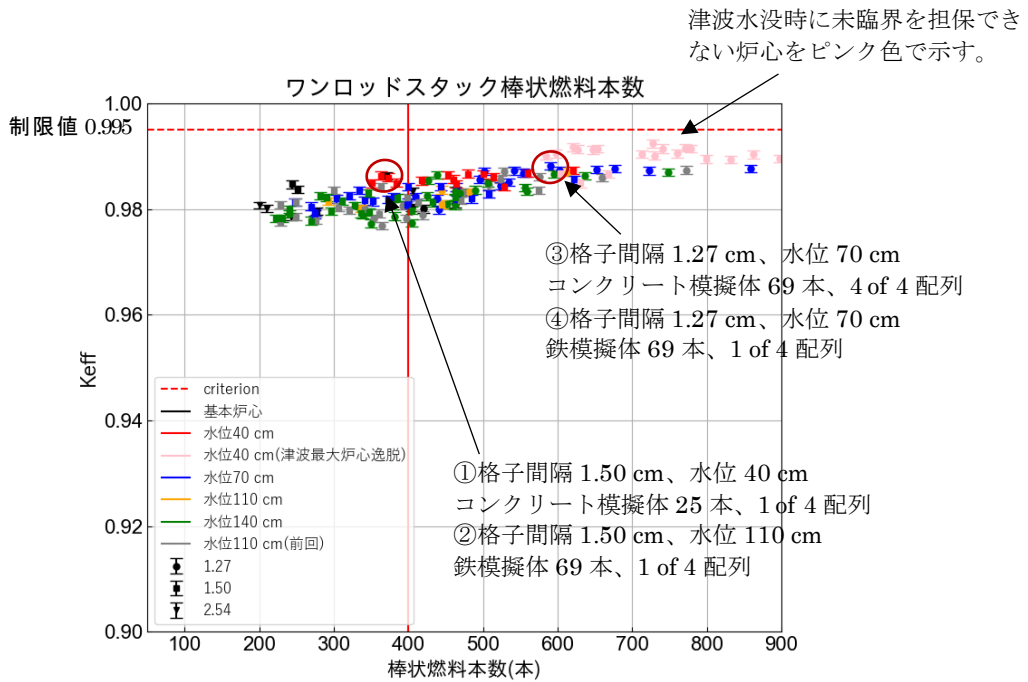
(a) ワンロードスタックマージンの評価



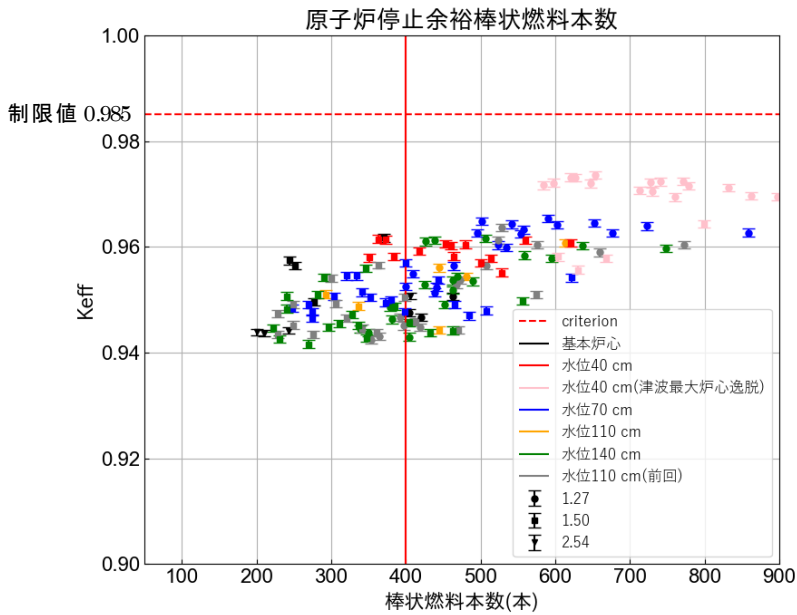
(b) 原子炉停止余裕の評価

付録図 1-1 基本炉心に係る炉心核特性の変化傾向の例





(a) ワンロッドスタックマージンの評価結果



(b) 原子炉停止余裕の評価結果

付録図 1-2 デブリ模擬炉心に係る炉心核特性の変化傾向の例

(注) 図中、棒状燃料本数 400 本の補助線は、棒状燃料の最大炉心装荷本数を、原子炉設置変更許可書の最大数 900 本から現有の 400 本に変更したことを示すために引いたもの。また、「1 of 4 配列」とは、格子セル 2×2 領域=4 本分のうち 1 本を構造材模擬体、残り 3 本を棒状燃料とする配列を表す。

次に、「核的に厳しい炉心（受検炉心）」で使用前事業者検査を受ける前に、事前解析の精度評価用の「事前確認炉心」を設け、解析精度を確認した上で本番での検査に臨むこととした（下表は設工認申請書の抜粋、下図は実際に構成した炉心）。

付録表 1-1 基本炉心に係る使用前事業者検査の受検炉心

格子間隔 (cm)	臨界水位* (cm)	棒状燃料* (本)	配列パターン	備考
1.50	約 70	約 274	円筒炉心	事前確認炉心
1.50	90～140	255～240*	円筒炉心	受検炉心
2.54†	約 70	約 240	円筒炉心	事前確認炉心
2.54†	90～140	215～200*	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 本飛ばして挿入する。

※ 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。）。

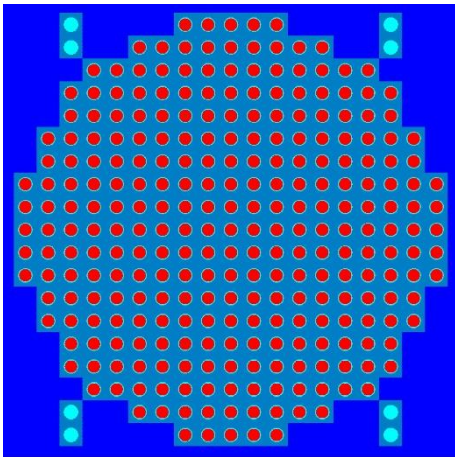
付録表 1-2 デブリ模擬炉心に係る使用前事業者検査の受検炉心

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
1.50	9	0	1 of 4	約 70	約 280	事前確認炉心
1.50	25	0	1 of 4	40～50*	365～314*	受検炉心
1.50	0	25	1 of 4	約 70	約 340	事前確認炉心
1.50	0	69	1 of 4	90～140*	379～346*	受検炉心

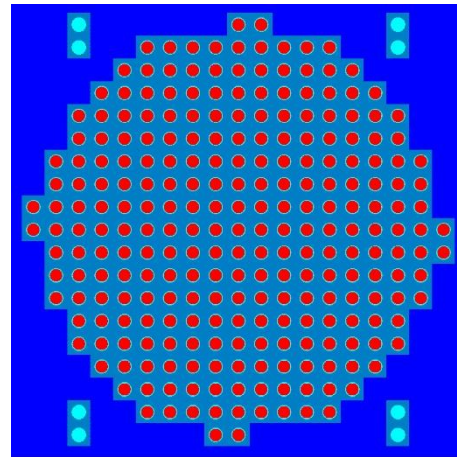
※ 臨界水位及び棒状燃料の装荷本数は可変条件であり、詳細解析、実測データ及び臨界近接の結果により決定する。

\* 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。）。

(注) 表中、「配列パターン 1 of 4」とは、格子セル 2×2 領域=4 本分のうち 1 本を構造材模擬体、残り 3 本を棒状燃料とする配列を表す。

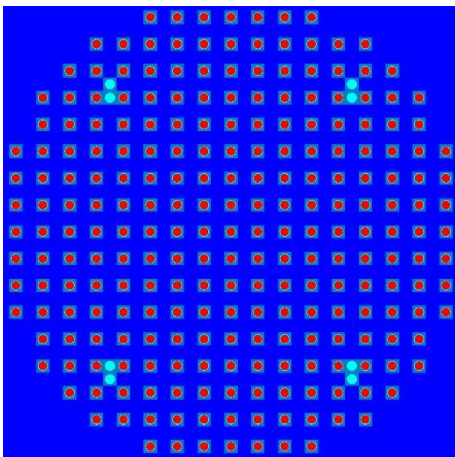


円筒炉心、棒状燃料(●)277本  
安全板ガイドピン(●)8本、水位約70cm

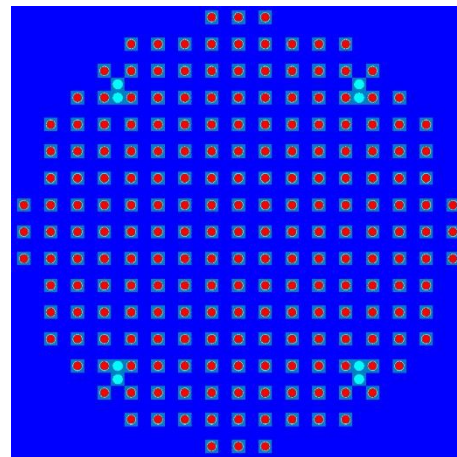


円筒炉心、棒状燃料(●)253本  
安全板ガイドピン(●)8本、水位約110cm

(a) 格子間隔 1.50cm 格子板での事前確認炉心 (左) と受検炉心 (右)



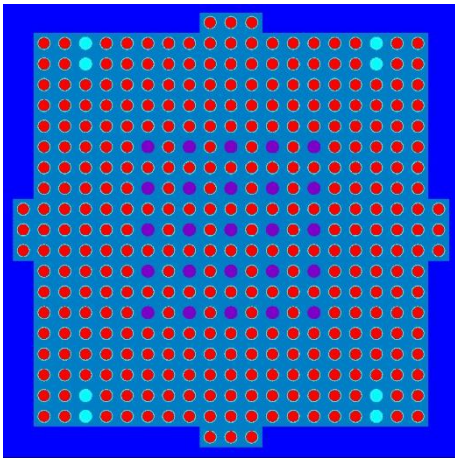
円筒炉心、棒状燃料(●)241本  
安全板ガイドピン(●)8本、水位約70cm



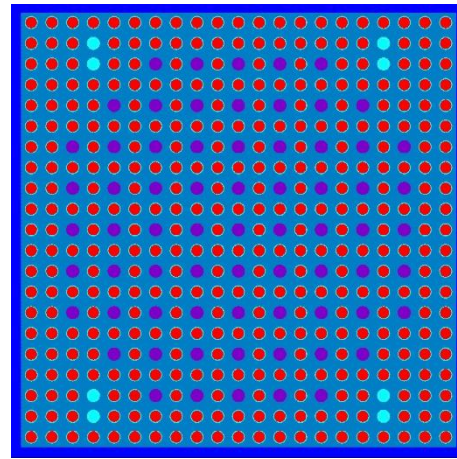
円筒炉心、棒状燃料(●)213本  
安全板ガイドピン(●)8本、水位約110cm

(b) 格子間隔 2.54cm 格子板での事前確認炉心 (左) と受検炉心 (右)

付録図 2-1 基本炉心に係る使用前事業者検査の炉心構成パターン

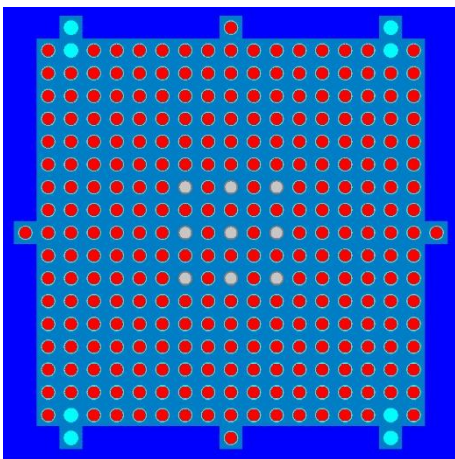


鉄(●)25本、棒状燃料(●)340本  
安全板ガイドピン(●)8本、水位約70cm  
格子間隔1.50cm、構造材模擬体1 of 4配列

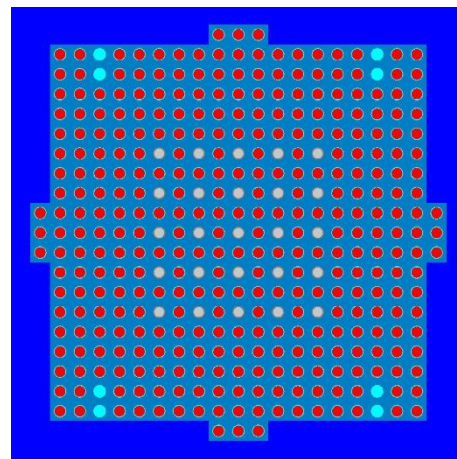


鉄(●)69本、棒状燃料(●)364本  
安全板ガイドピン(●)8本、水位約130cm  
格子間隔1.50cm、構造材模擬体1 of 4配列

(a) 鉄模擬体での事前確認炉心(左)と受検炉心(右)



コンクリート(○)9本、棒状燃料(●)280本  
安全板ガイドピン(●)8本、水位約70cm、  
格子間隔1.50cm、構造材模擬体1 of 4配列



コンクリート(○)25本、棒状燃料(●)340本  
安全板ガイドピン(●)8本、水位約40cm、  
格子間隔1.50cm、構造材模擬体1 of 4配列

(b) コンクリート模擬体での事前確認炉心(左)と受検炉心(右)

付録図 2-2 デブリ模擬炉心に係る使用前事業者検査の炉心構成パターン

(注) 図中、「1 of 4 配列」とは、格子セル  $2 \times 2$  領域=4 本分のうち 1 本を構造材模擬体、残り 3 本を棒状燃料とする配列を表す。