

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

臨界実験装置における核的制限値の担保について（設工認段階以降）

臨界実験装置は、原子炉等規制法施行令において「炉心構造を容易に変更することができる試験研究用等原子炉であって、核燃料物質の臨界量等当該試験研究用等原子炉の核特性を測定する用に専ら供するもの」と定義される。また、旧原子力安全委員会の「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」の中で、「臨界実験装置は、多種多様の燃料及び実験試料が使用され、炉心構成を変えるたびに制御棒価値、反応度フィードバック等の核特性、核計装の応答性等が異なることから、安全確保上、運転管理に負うところが大きい。このため、原子炉の運転出力及び積分出力を極めて低く制限して核分裂生成物の蓄積及び放射線を抑えることにより、炉心の冷却設備や炉心周囲に接した遮蔽体を要しないなどの特徴を有している。したがって、臨界実験装置の安全評価に当たっては、これらの臨界実験装置の特徴を踏まえる必要がある」（以上、要約抜粋・補足加筆）との基本的考え方が示されている。STACYにおいては、上記を踏まえ、保安規定に安全確保のための運転管理の手順が定められている。

この基本的考え方を踏まえ、以下では、設計及び工事の計画に係る認可申請書（以下「設工認申請書」又は単に「設工認」という。）の審査段階以降における「臨界実験装置の核的制限値の担保」の具体的方策について述べる。

(1) 設工認における核的制限値を満足する見通しの確認

設工認段階においては、試験炉技術基準規則第10条（原子炉施設の機能）の前段「通常運転時において原子炉の反応度を安全かつ安定的に制御できること」に対し、本設工認の範囲で構成可能な炉心の組合せ（例）の中から、核的制限値が厳しくなる炉心条件（代表炉心）を把握し、その代表炉心においても核的制限値を満足し、安全かつ安定的に制御できることを示す。具体的には、デブリ構造材模擬体（鉄、コンクリート）及び棒状燃料の装荷本数、それらの配列並びに格子間隔等を変化させた炉心の原子炉停止余裕（安全板全数挿入）及びワンロッドスタックマージン（最大反応度価値を有する安全板1枚が挿入不能）の変化傾向を示す。（資料ST-12-6参照）

なお、臨界実験装置の核的制限値は、事故時の限界仕様（危険な状態）として「制限」しているものではなく、原子炉の運転制御（臨界・出力調整）に支障のない範囲で「設定」しているものであり、それらの範囲を超えたからと言って、すぐに原子炉が危険な状態になるものではない。すなわち、

- ・反応度係数については、炉心物理量の変化があつて初めて原子炉に反応度が添加されるものであり、原子炉運転中に異常な出力上昇（炉周期短、最大熱出力超）を検知したと

きは、安全保護回路により原子炉はスクラム（緊急停止）する。

- ・原子炉停止余裕として示している「安全板の反応度効果」については、原子炉停止の二つの方法のうちの一つであり、これが制限値を逸脱していたとしても、もう一つの停止方法（解析上は無視している。）である「炉心に給水した減速材の排出」により原子炉は確実に停止する。

(2) 使用前事業者検査における代表炉心の確認

設工認で示す工事フローとの関連で、使用前事業者検査段階においては、原子炉等規制法第28条第2項第1号「工事が設工認に従って行われたものであること」に対し、設工認で示した「代表炉心（核的制限値を厳しくする炉心）」と、使用前事業者検査（工事が設工認に従って行われたものであることの確認）の「受検炉心」を同一とすべきとの意見もある。しかし、臨界実験装置の特徴及び運転目的（未知炉心・未知試料に係る核特性の実験検証）を踏まえると、代表炉心を受検炉心とする必要はないと考える。つまり、これから実験拡張して検証していく実験炉心及び実験試料装荷の限界（すなわち代表炉心）の探查は事業者が行う実験計画そのものであり、その実験拡張の際の安全確保は保安規定に定める手順によって行われるからである（図1及び次項参照）。このため、使用前事業者検査の受検炉心は、代表炉心を参考としつつ、製作公差、解析誤差及び事前解析の検証精度を考慮した調整幅を加味して選定する。（このような対応は、今回製作する試料が鉄やコンクリートなど全く未知の試料ではないため可能であるが、例えば核データの検証が十分でないマイナーアクチニドなどの未知試料を多用する炉心構成の場合には避けることが望ましい。）

なお、使用前事業者検査の確認事項の一つ、原子炉等規制法第28条第2項第1号「工事が設工認に従って行われたものであること」については、棒状燃料や格子板、実験用装荷物等の工事（製作）は個々に材料検査、寸法検査、単体及び系統での機能検査（動作試験）等によって確認する。他方、それら装荷物等を組み合わせた炉心構成は「工事」ではなく構造材の「配置」であって、その炉心構成手順が守られていることを品質マネジメントシステム検査で確認する。

もう一つの特条項第2号「技術上の基準に適合するものであること」については、試験炉技術基準規則第10条（原子炉施設の機能）の前段「通常運転時において原子炉の反応度を安全かつ安定的に制御できること」に対し、計測制御系統施設の核計装、反応度制御設備（給水ポンプ、排水弁等による炉心水位制御）、反応度制御回路（インターロック）等及びそれらの警報監視・操作設備（制御室）によって、原子炉が安全かつ安定して運転できることを確認する。また、同条の後段「運転時の異常な過渡変化時においても《中略》原子炉の反応度を制御することにより原子核分裂の連鎖反応を制御できる能力を有すること」については、計測制御系統施設の安全保護回路及び反応度制御設備の機能検査（模擬入力による動作試験）により原子炉がスクラムすることを確認する。

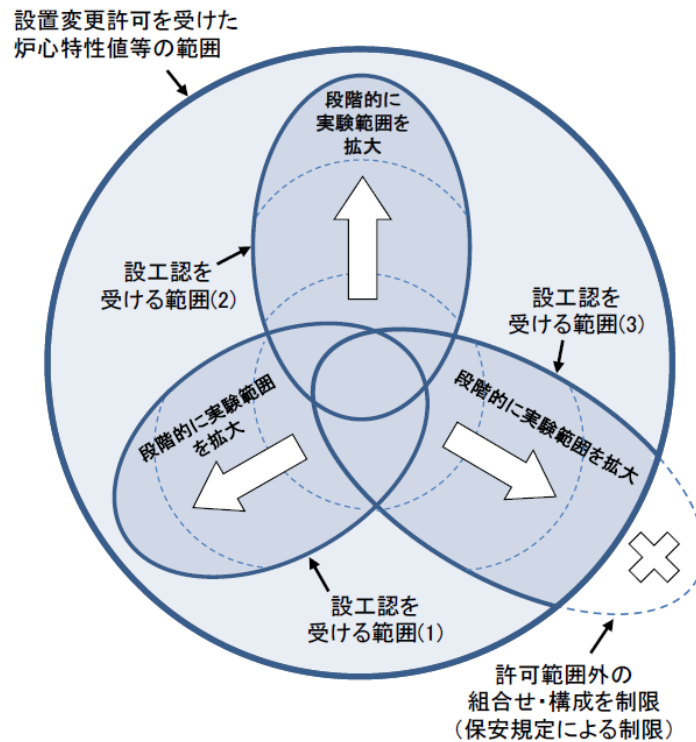


図1 新しい炉心を構成する際の方針（概念図）

(3) 保安規定における炉心核特性の算定とその結果の承認

上記(2)の際、炉心の配置換えに伴う炉心核特性の算定及びその結果の承認に関する手順として、保安規定とその下部要領（原子炉運転手引）に定める「炉心構成書」及び「炉心証明書」の作成と原子炉主任技術者等による確認を行う。

この炉心構成書は、炉心に装荷する燃料及び実験用装荷物の種類、装荷本数や量の範囲、それらの組合せ（すなわち、個別に使用前事業者検査を受けた規格品の配置換え）その他実験条件等を定め、予め解析により、構成する炉心が原子炉設置（変更）許可を受けた炉心核特性の範囲内に収まる見通しを記載する（図2参照）。また、炉心証明書は、その炉心構成範囲の中で初回炉心の配置パターンとその核特性値の解析値を求め、原子炉を運転して炉心核特性値を実測し、核的制限値を満足することを確認する（図3参照）。

その後の実験拡張に当たっても同様に、炉心構成書及び炉心証明書の範囲において、事前解析値と実測値との比較検証により核的制限値を満足する見通しであることを確認しつつ、原子炉を運転する。なお、核的制限値を満足する見通しであることの確認において、解析値が実測値と大きく離れている場合、かつ、実測値が解析値よりも危険側（制限値に近い側）にある場合は、解析値と実測値の偏差基準（C/E値）を調整した上で改めて解析を行い、次の実験拡張における条件設定を慎重に行って再度実測値と比較・検証する。

原子力科学研究所原子炉施設保安規定（第11編）STACYの管理

（炉心構成書）

第5条 臨界ホット試験技術部長は、新炉心を構成しようとするときは、次の各号に掲げる事項を明らかにした炉心構成書を作成し、所長の承認を受けなければならない。これを変更しようとするときも、同様とする。

- (1) 実験の目的
 - (2) 最大熱出力
 - (3) 炉心構成
 - (4) 給水制限
 - (5) 過剰反応度
 - (6) 安全板の反応度（炉心が浸水（海水による全水没）した場合の安全板及び未臨界板の中性子実効増倍率の評価を含む。）
- 2 前項の炉心構成書は、別表第1に掲げる炉心構成の条件を満たすものでなければならない。
- 3 所長は、第1項の承認をしようとするときは、原子炉主任技術者の同意を得なければならない。

(a) 保安規定（令和4年12月23日認可）の該当条文

別添様式第5

STACY炉心構成書

承認	同意	起案		
原子力科学 研究所長	原子炉主任 技術者	臨界ホット 試験技術部長	臨界技術 第1課長	炉心構成書 作成担当者
/ /	/ /	/ /	/ /	/ /

炉心名称	構成書番号	条件
実験目的	作成年月日	
	承認年月日	
項 目		条 件
最大熱出力		W以下 200W以下
炉心構成	格子板	
	種類（格子間隔）	
	アタッチメント	
	蓋（1）	
	蓋（2）	
棒状燃料	種類	
	濃縮度	wt% 10wt%以下
	本数	50本以上900本以下***
	Vm/Vf**	0.9以上11以下
可溶性中性子吸収材		ボロン ppm以下

項 目	条 件	
炉心構成	安全板* 枚	
	実験用装荷物*	
臨界水位	cm 40～140cm	
減速材及び反射材温度	℃以下 70℃以下	
給水制限	高速給水速度（高速給水流量） (mm/s以下 ℓ/min以下)	水位上昇速度： 2.5mm/s以下
	低速給水速度（低速給水流量） (mm/s以下 ℓ/min以下)	水位上昇速度： 1mm/s以下
臨界近傍での反応度添加率	¢/s以下 3¢/s以下	
給水による最大添加反応度	¢以下 0.3¢以下	
最大過剰反応度	¢以下 0.8¢以下	
反応度	安全板の 中性子実効増倍率	全挿入時 以下 0.985以下 「ワコッド」スタック時 以下 0.995以下 海水水没時 以下 0.995以下
	未臨界板の中性子実効増倍率	海水水没時 以下 0.995以下
	可動装荷物	最大添加反応度 ¢以下 0.3¢以下 反応度添加率 ¢/s以下 3¢/s以下
その他必要な事項		

*：炉心構成図（別図）を添付する。 **：減速材対燃料ペレット体積比（炉心平均）
***：1400mm超の給水でも臨界とならない場合は900本以下であること

*：炉心構成図（別図）を添付する。

(b) 運転手引（令和5年3月1日改定）の該当様式

図2 炉心構成書の作成及び承認手順並びに様式

原子力科学研究所原子炉施設保安規定（第11編）STACYの管理

(炉心証明書)

第6条 臨界技術第1課長は、前条の炉心構成書で定められた範囲内において炉心を構成するとき、次の各号に掲げる事項のうち、第1号及び第2号の事項並びに第3号から第5号までの推定値（計算解析により算定。ただし、測定値により推定可能な場合は計算解析を省略することができる。）を記載した炉心証明書を作成し、臨界ホット試験技術部長の承認を受けなければならない。なお、次項の承認を受けた炉心を構成する場合は、この限りでない。

- (1) 最大熱出力
- (2) 炉心構成
 - イ 格子板（格子間隔、アタッチメントの種類、実験用装荷物貫通孔蓋の種類）
 - ロ 棒状燃料（種類、濃縮度、本数、減速材対燃料ペレット体積比、炉心配置）
 - ハ 安全板（枚数、炉心配置）
 - ニ 実験用装荷物（種類、炉心配置。ただし、可溶性中性子吸収材を除く。）
 - ホ 可溶性中性子吸収材（種類）
 - ヘ 減速材及び反射材温度
- (3) 臨界量
- (4) 過剰反応度
- (5) 安全板の反応度
- (6) 炉心構成の変化範囲

- 2 臨界技術第1課長は、前項で承認を受けた炉心において運転を行う場合、前項第3号から第5号までの測定値及び第6号を記載した炉心証明書を作成し、臨界ホット試験技術部長の承認を受けなければならない。なお、前項第6号の炉心構成の変化範囲を記載するに当たり、炉心の核特性が大きく変化する場合（例えば、安全板の炉心配置、可溶性中性子吸収材の種類又はその有無、軽水昇温の有無等を変更する場合は、再度炉心証明書を作成し、臨界ホット試験技術部長の承認を受ける。ただし、炉心の核特性が安全側に変化する場合、この限りでない。
- 3 臨界ホット試験技術部長は、前2項の承認をしようとするときは、原子炉主任技術者の同意を得なければならない。

(a) 保安規定（令和4年12月23日認可）の該当条文

STACY炉心証明書

別記様式第7

炉心構成書番号		炉心構成書承認年月日	
炉心証明書番号		炉心証明書作成年月日	
項目		備考	
最大熱出力		W以下	200W以下であること
炉心構成	種類（格子間隔）		
	アタッチメント		
	蓋（1）		
	蓋（2）		
	蓋（3）		
	種類		
	濃縮度	wt%	10wt%以下であること
	本数	本	50本以上900本以下であること***
	Vm/Vr**		0.9以上11以下であること
	安全板*	枚	2枚以上8枚以下であること
実験用装荷物*			
減速材及び反射材温度		℃	70℃以下
可溶性中性子吸収材			
項目	制限値	推定値（運転前）	測定値（運転後）
臨界量 (棒状燃料の本数及び臨界水位)	50本以上 900本以下 400mm以上 1400mm以下	本 mm	本 mm
高速給水速度	2.5mm/s以下 (高速給水流量： @/min)	mm/s @/min	mm/s @/min

*：炉心配置図（別図）参照のこと。 **：減速材対燃料ペレット体積比（炉心平均）
***：1400mm超の給水でも臨界とならない場合は900本以下であること

項目	制限値	推定値（運転前）	測定値（運転後）
臨界近接の反応度追加率	3%/s以下	\$/s 低連給水速度： mm/s 低連給水流量： @/min	\$/s mm/s mm/s
最大追加反応度	0.3%以下	\$ 給水停止素子の上限位置： mm	\$ mm
最大過剰反応度	0.8%以下	\$ 最大給水制限素子の上限位置： mm	\$ mm
安全板の中性子実効増倍率	全挿入時 0.985以下 ワットスワップ時 0.985以下		
可動装荷物	最大追加反応度 0.3%以下 反応度追加率 3%/s以下	\$ %/s	\$ %/s
炉心構成の変化範囲	格子板 棒状燃料 可溶性中性子吸収材 実験用装荷物 その他		
その他必要な事項			

承認

臨界近接を行うことを承認する。 令和 年 月 日	臨界ホット試験技術部長	原子炉主任技術者 / /
-----------------------------	-------------	-----------------

同意

既知炉心として運転することを承認する。 令和 年 月 日	臨界ホット試験技術部長	原子炉主任技術者 / /
---------------------------------	-------------	-----------------

(b) 運転手引（令和5年3月1日改定）の該当様式

図3 炉心証明書の作成及び承認手順並びに様式

(4) 原子炉運転時の核的制限値の遵守方法（起動前点検及び運転時の確認）

原子炉の運転に当たっては、核的制限値を担保するために、原子炉起動前点検及び運転中の設定値調整等として、

- ① 過剰反応度に係る炉心タンク水位の制限（最大給水制限スイッチ、給水停止スイッチ）
 - ② 反応度添加率に係る水位上昇速度の制限（給水ポンプ流量制限）
 - ③ 原子炉停止余裕に係る安全板の位置及び挿入性（炉心構成点検、安全板挿入点検）
- の確認を行うとともに、段階的な炉心タンクへの給水により予想臨界水位を確かめつつ臨界近接操作※を行う（図4参照）。これら手順の詳細については、運転手引に定める。

《※初回炉心やその後の実験炉心の臨界近接操作（逆増倍率法と呼ばれる一般的な原子炉運転方法）において予想臨界水位が許可範囲（40cm～140cm）を逸脱するおそれがある場合は、原子炉の運転を中止し実験計画を見直すため、原子炉の安全運転に支障はない。》

主要な核的制限値の遵守

Hard	主に設備の設計により担保
Soft	主に保安規定により担保

①過剰反応度

方法：炉心タンクの水位を制限する

- Hard 水位スイッチの性能
- Soft 段階的臨界近接手順
- Hard 炉心形状の特性(垂直方向に一様とみなせる)

②給水による反応度添加率

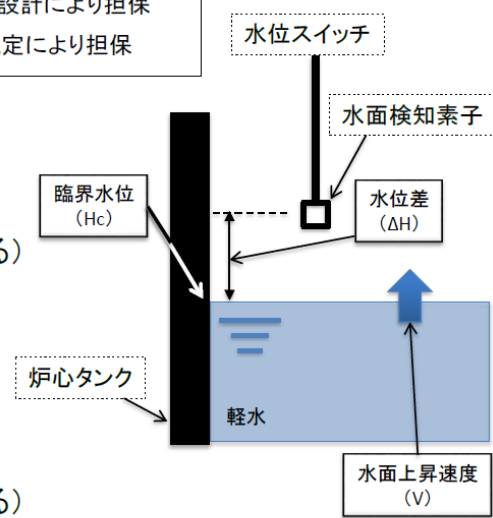
方法：炉心タンクの水位上昇速度を制限する

- Hard 給水ポンプの性能
- Soft 段階的臨界近接手順
- Hard 炉心形状の特性(垂直方向に一様とみなせる)

③原子炉停止余裕

方法：炉心構成に合わせた適切な位置に安全板を配置し、確実に挿入する

- Soft 計算解析による安全板反応度価値評価
- Hard 格子板スリットの形状



過剰反応度 $\rho = \Delta H \times dp/dH$
 反応度添加率 $d\rho/dt = V \times dp/dH$

dp/dH は、炉心が垂直方向に一様とみなせるとき、水平断面に依存せず、以下の式に従う(修正一群理論)。このため、STACYは、炉心の水平方向の形状にかかわらず水位制御に係る核的制限値を満足できる。

$$dp/dH = \frac{C}{(Hc+\lambda)^3} \quad C, \lambda : \text{炉心毎の定数}$$

図4 原子炉運転時の核的制限値の遵守方法

(5) 供用期間中の運転手順の監督及び定期事業者検査での確認

上記(2)～(4)の手順が正しく行われていることを、使用前事業者検査及び定期事業者検査における品質マネジメントシステム検査（保安記録確認検査）により確認する※（図5参照）。

《※前述の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」に示された基本的考え方「臨界実験装置は、(中略)安全確保上、運転管理に負うところが大きい」を踏まえ、従前から保安規定及び運転手引に基づき、原子炉運転に必要な力量を持った運転要員により事前解析及び書類作成がなされ、それらを原子力科学研究所長及び臨界ホット試験技術部長が承認並びに原子炉主任技術者が監督（承認時の同意）することによって、施設の安全が十分に確保されている。》

使用前事業者検査（炉心性能検査）に係る品質マネジメントシステム検査の例（抜粋） （下線は、今回の説明のために引いたもの。）

4.1 工事が設工認申請書に従って行われたものであることの確認に係る検査

4.1.1 品質マネジメントシステム検査

(2) 検査手順

設工認申請書に定められた「原子力科学研究所原子炉施設及び核燃料物質使用施設等品質マネジメント計画書」（以下「品質マネジメント計画書」という。）に基づき、工事及び検査に係る保安活動が行われていることについて、工事の特徴を踏まえ次の項目を確認する。ただし、検査期間が長期にわたる場合は、検査開始前に検査全体を確認した後、内容に変更が生じた項目について、検査期間の終了時まで適宜確認を行う。

①品質マネジメント活動の実施に係る組織

- ・ 作業及び検査に必要な人員（力量）が確保され、関係部署を含めた責任及び権限を明確にした体制が構築されていること。
- ・ 自主検査の実施に当たっては、試験・検査の管理要領等に基づき、独立性が確保されていること。
- ・ 外部発注による調達を実施した場合は、受注者の選定や管理が調達管理要領等に従って実施され、作業に係る役割分担及び責任が明確に定められていること。

②保安活動の計画

- ・ 検査に係る対象設備について、必要な要領等が制定され、全体工程や各工程段階における工程管理により、作業及び検査に関する監視・検証が適切に実施されていること。
- ・ ①の受注者（調達物品や役務を含む。）の管理方法についても作業に関する引合仕様書等に定められていること。

③保安活動の実施

- ・ 検査に係る教育訓練が実施されていること。
- ・ 作業及び検査が②の計画に従って漏れなく実施されていること。
- ・ 検査記録が文書及び記録管理要領等に従って適切に管理されていること。
- ・ 調達物品や役務作業についても、引合仕様書等に従って適切に実施されていること。

④保安活動の評価

- ・ 検査に係る保安活動が、要求事項に適合していることを実証するため、②の計画に従って漏れなく監視、測定及び検査が行われていることを評価していること。また、不適合が発生した場合の処置についても品質マネジメント計画書に従って行われていること。

⑤保安活動の改善

- ・ 未然防止処置又は不適合に対する是正処置等により、品質マネジメント活動の継続的改善が実施されていること。
- ・ CAP（Corrective Action Program：是正処置プログラム）による改善活動が適切に実施されていること。

図5 事業者検査の例

以上