

令和2年9月30日
原子力科学研究所
臨界ホット試験技術部

STACY設工認第3回に係るコメント回答

<質問>

臨界近接や異常な過給水を含めた給排水系による反応度制御の具体的な方法について説明すること。

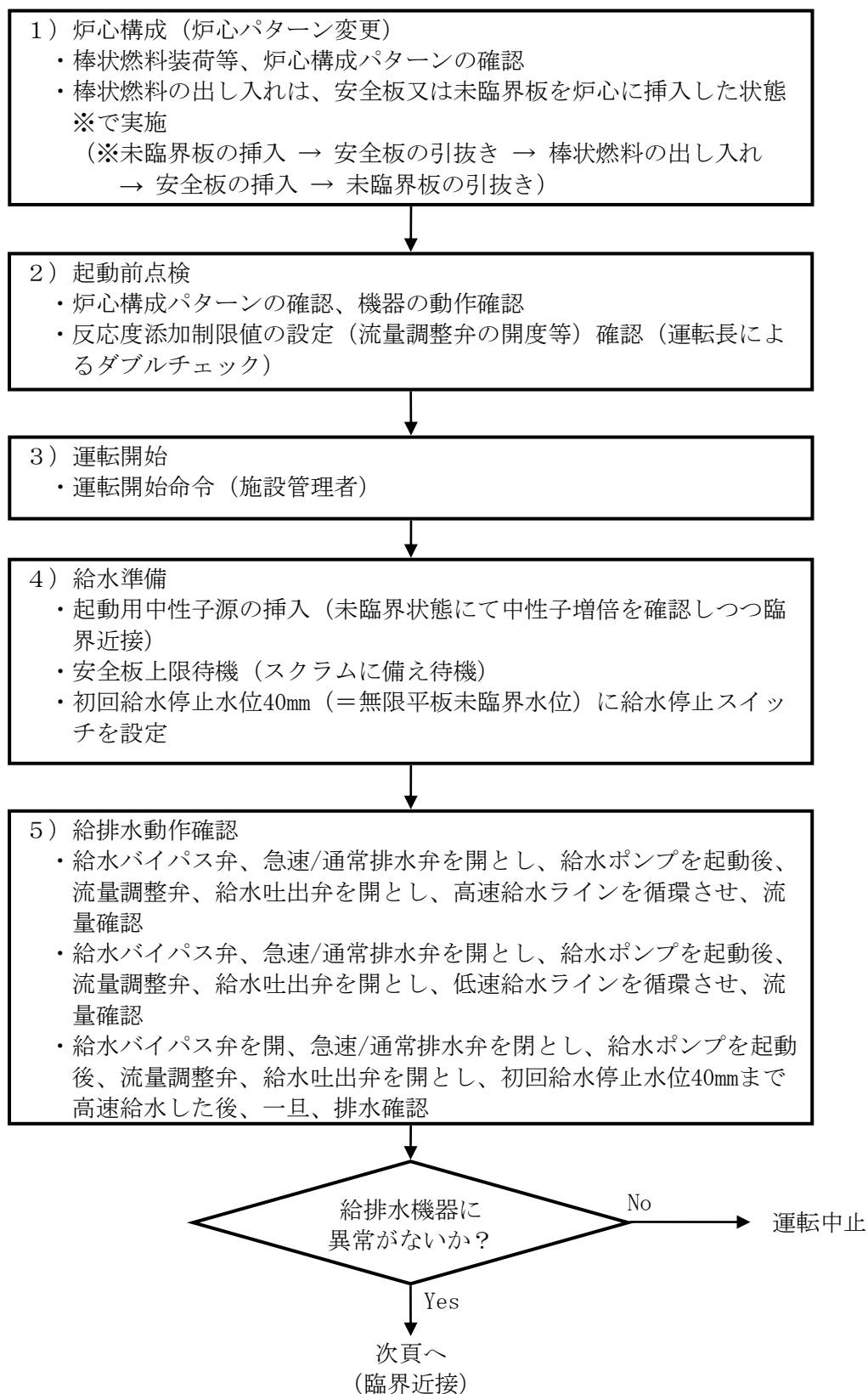
<回答>

STACYの具体的な運転手順（反応度制御方法）を次頁以降に示す。

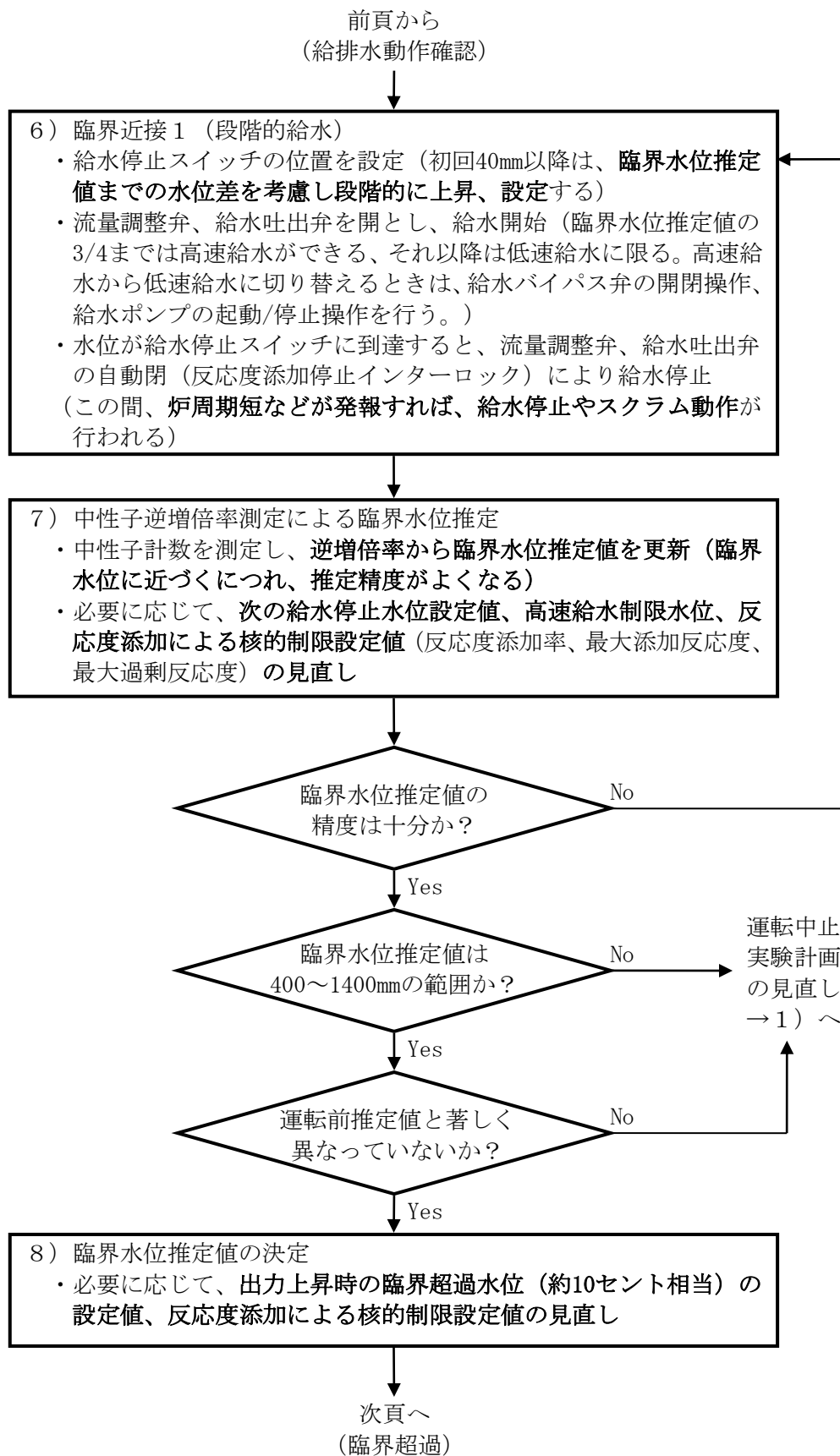
運転中における異常な過給水（※）が発生し、出力上昇が速いときは、運転員の判断で給水を途中で停止する。また、炉周期短などが発報すれば給水停止やスクラム動作が行われる。

（※）ここで「異常な過給水」とは、給水バイパス弁、流量調整弁等の機器の故障又は運転員の誤操作により、炉心タンク内に軽水が誤給水されることにより、過度の反応度が添加されることを想定する。

(1) 運転手順 1 (反応度制御方法)



(1) 運転手順のつづき 2 (反応度制御方法)



(1) 運転手順のつづき 3 (反応度制御方法)

前頁から
(臨界水位推定値の確定)



- 9) 臨界超過 (出力上昇)
- ・ 給水停止スイッチの位置を臨界超過水位 (約10セント相当) に設定
 - ・ 流量調整弁、給水吐出弁を開とし、給水開始 (臨界超過し、出力が緩やかに上昇)
 - ・ 出力上昇確認後、起動用中性子源の引抜き
 - ・ 水位が給水停止スイッチに到達し、流量調整弁、給水吐出弁の自動閉 (反応度添加停止インターロック) により給水停止
(このとき、出力上昇が速いときは、給水を途中で停止する。また、炉周期短などが発報すれば、給水停止やスクラム動作が行われる)
 - ・ 臨界超過水位の測定



- 10) 出力上昇時の反応度測定
- ・ 出力倍増時間 (運転系線型出力系レンジで出力が倍になるまでの時間) を計測し、反応度に換算



- 11) 臨界調整 (臨界水位確定)
- ・ 通常排水弁を開とし、少量排水し、臨界調整 (運転員が炉心水位と出力を監視しながら排水を行い、出力が一定 (出力1W程度) となる水位に調整)
 - ・ 臨界水位の測定

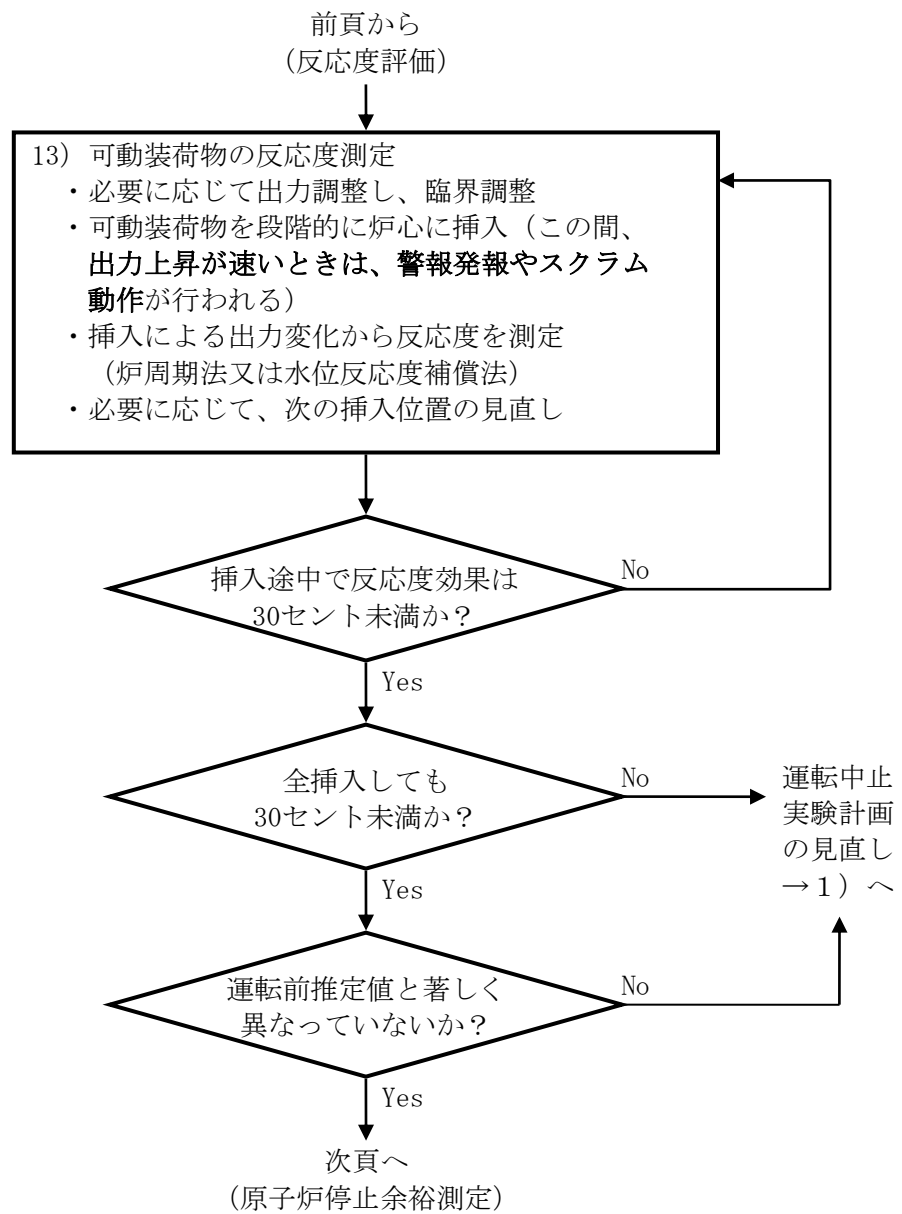


- 12) 反応度評価
- ・ 出力上昇時の反応度 ($d\rho$) を、臨界超過水位と臨界水位の差 (dH) で除し、臨界超過水位1mm当たりの反応度 (水位反応度係数 $d\rho/dH$) を算出
 - ・ 水位反応度係数を基に反応度制限量を設定
 - 反応度添加率 = $(d\rho/dH) \times (\text{水位上昇速度})$
 - 最大添加反応度 = $(d\rho/dH) \times (\text{臨界水位と給水停止スイッチ上限高さとの差} ※)$
 - 最大過剰反応度 = $(d\rho/dH) \times (\text{臨界水位と最大給水制限スイッチ設定高さとの差} ※)$
(※給水停止後1秒間の水位上昇分を含む)

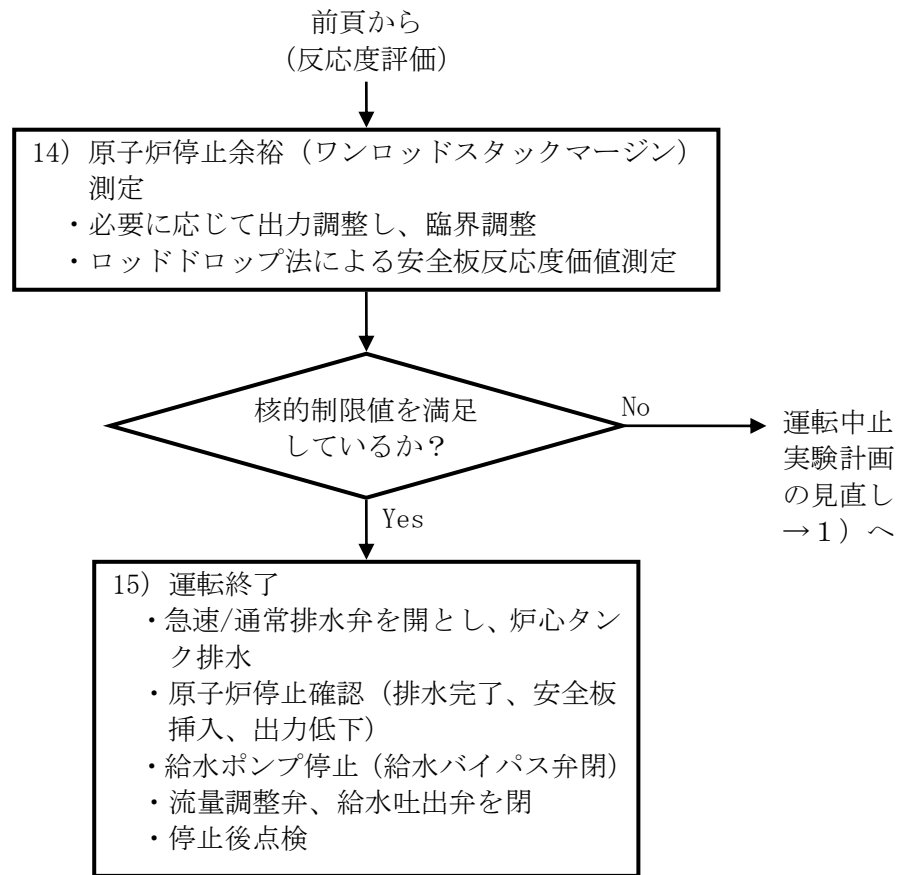


次頁へ
(可動装荷物の反応度効果測定)

(1) 運転手順のつづき 4 (反応度制御方法)



(1) 運転手順のつづき 5 (反応度制御方法)



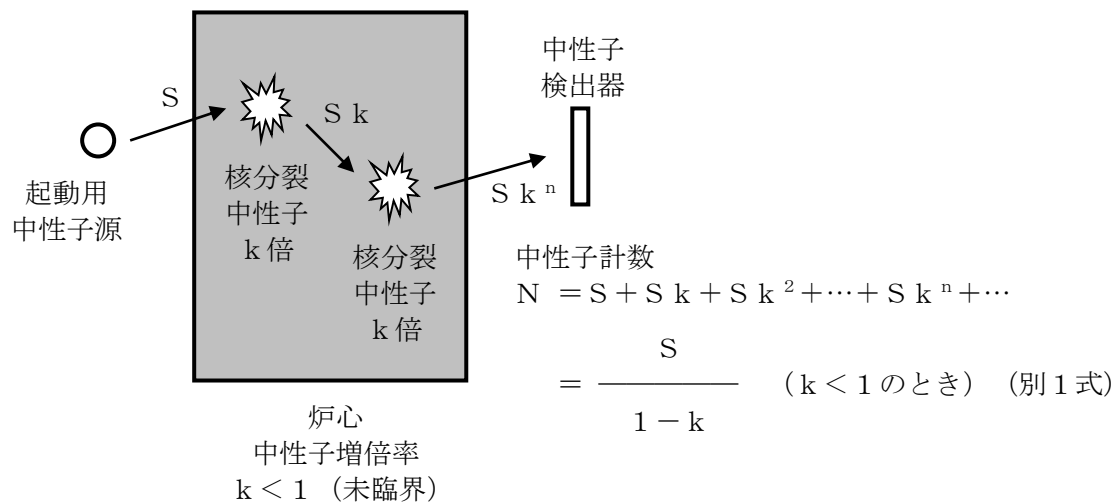
逆増倍率測定による臨界近接手法

1. 逆増倍率測定法の概要

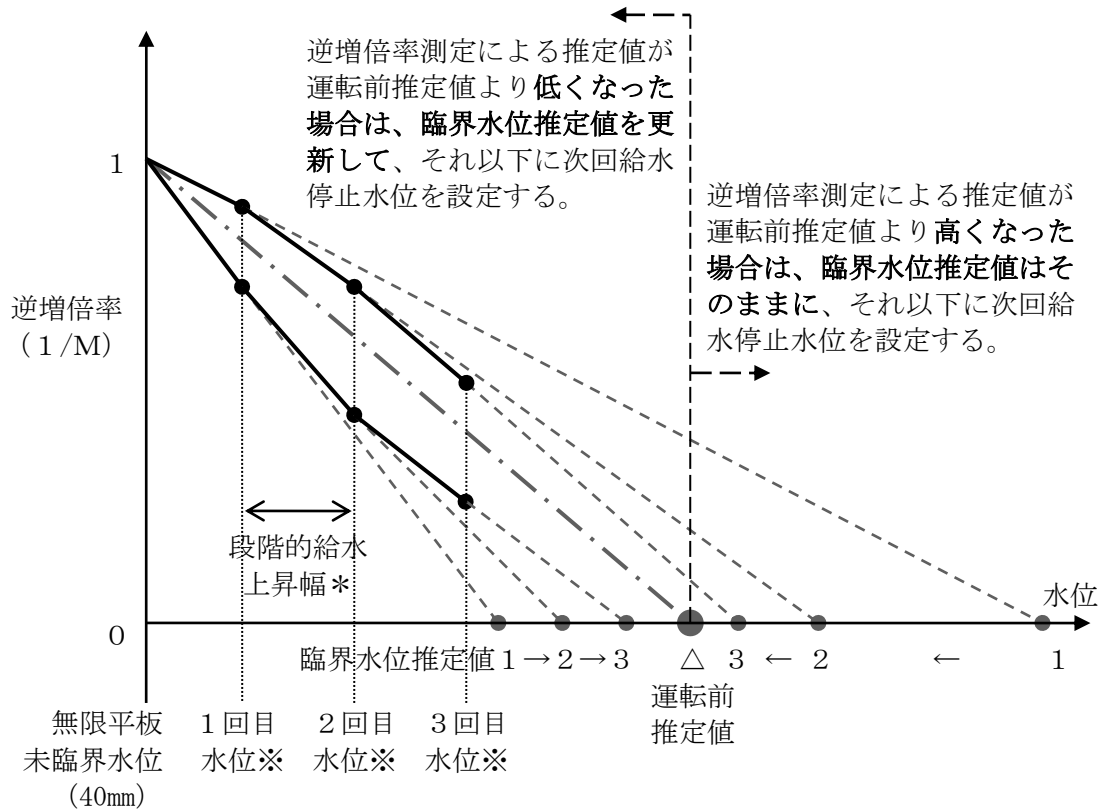
逆増倍率測定は、安全・確実な臨界近接方法として一般的に行われている方法である。未知炉心の臨界近接方法は、未臨界状態にあることを確かめつつ段階的に臨界状態に近接し、そのつど中性子計数（逆増倍率測定）により臨界水位推定値を更新（精度収束）しながら、最終的に臨界水位を高精度で求める手順である。原理的に、臨界水位推定値を誤るおそれはない。

2. 逆増倍率測定の原理と臨界水位の推定

- ① 起動用中性子源から放出された中性子は、炉心による中性子増倍（未臨界 $k < 1$ ）を経て、中性子検出器で計数される。（別図1）
- ② 中性子計数 N は別1式で表され、臨界（ $k = 1$ ）のとき $N \rightarrow \infty$ 、その逆数 $1/N \rightarrow 0$ となる。
- ③ 初回給水停止水位（無限平板未臨界水位 = 40mm）での中性子計数 N_0 と各段階（ X 回目）の給水停止水位での中性子計数 N_x の比（増倍率 M ）の逆数（逆増倍率 $1/M$ ）をプロットし、それを外挿することで、臨界水位を推定することができる。（別図2）
- ④ ③の段階的給水においては、臨界水位が十分な精度で推定されるまでの間、給水停止水位を臨界水位推定値よりも十分低くなるように設定する。



別図1 炉心での中性子増倍の様子



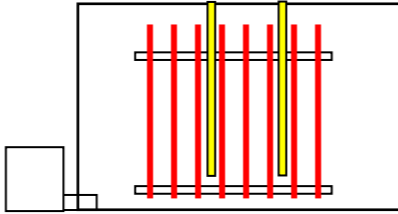
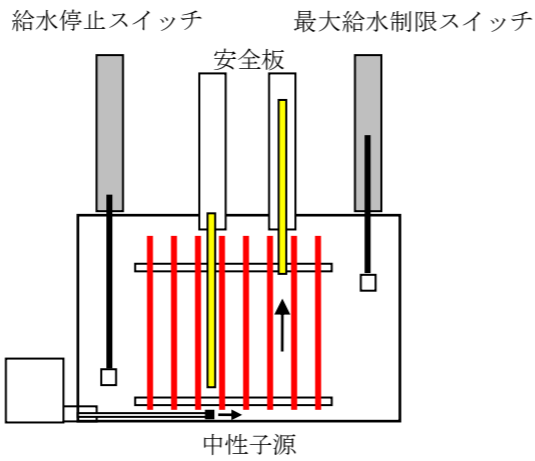
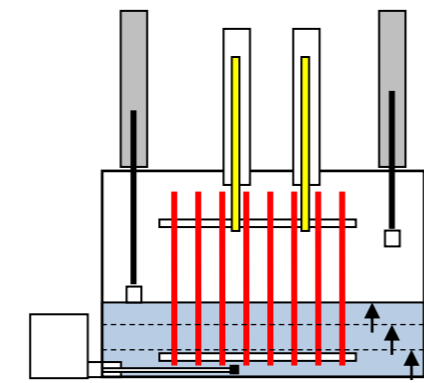

- ※ 給水停止水位は、臨界水位が十分な精度で推定されるまでの間、
前回給水停止時の推定値よりも十分低く設定する。
- * 段階的給水の上昇幅の目安
高速給水段階では、臨界水位推定値の 1/10～2/10 の幅。
低速給水段階では、現在の水位と臨界水位推定値の差の 1/5～1/2 の幅。

別図2 逆増倍率測定と臨界水位の推定

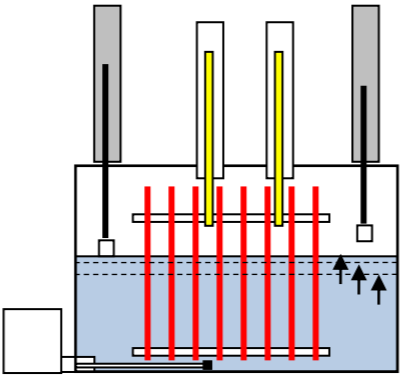
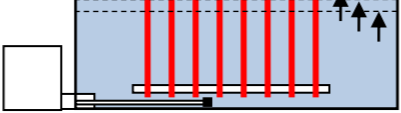
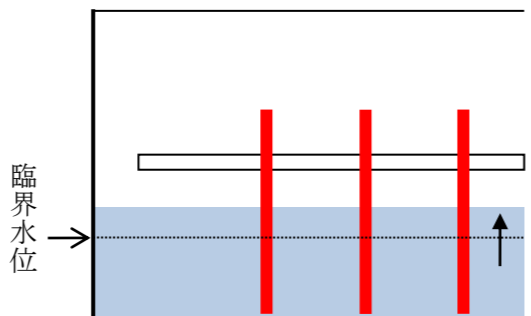
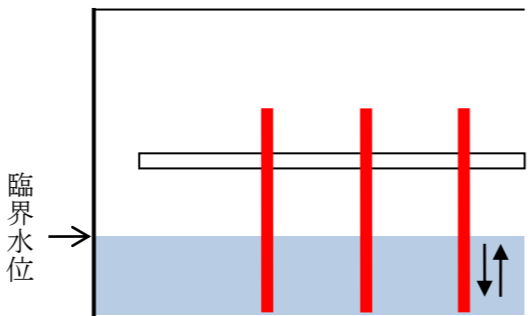
STACYの各段階における核的制限値の逸脱防止対策(1/5)

工程/運転手順	炉心の状態	核的制限値の確認事項		
		設置変更許可申請書	保安規定	運転手引
(1) 実験計画： 研究グループによる実験計画の立案 ①実験計画書の作成 ②実験予備解析 ③核的制限値の確認	—	—	—	○実験計画書 ・実験内容 ・最大熱出力 ・炉心構成 ・反応度添加率 ・最大過剰反応度 ・安全板反応度
(2) 炉心構成： 施設管理者による検証 ①炉心構成書の作成 ②実験予備解析 ③実験計画と著しく異なっていないことの確認	—	別冊10 ハ 原子炉本体の構造及び設備 ・臨界水位：40cm以上140cm以下 ・最大過剰反応度：0.8ドル以下 ・安全板の反応度価値 全挿入時：0.985以下 ワンロッドスタック時：0.995以下 ・最大反応度添加率 制御設備：3セント/s以下 可動装荷物：3セント/s以下 ・可動装荷物の反応度価値 0.3ドル以下 ・減速材及び反射材温度：70℃以下 添付書類八 別1 3.5 核設計 ・給水による添加反応度 0.3ドル以下 ・炉心特性値の変化範囲 ・津波想定全水没時の安全板又は未臨 界板による未臨界確認	○炉心構成書(炉心構成) ・臨界水位：40cm以上140cm以下 ・最大過剰反応度：0.8ドル以下 ・安全板の反応度価値 全挿入時：0.985以下 ワンロッドスタック時：0.995以下 ・最大反応度添加率 制御設備：3セント/s以下 可動装荷物：3セント/s以下 ・可動装荷物の反応度価値 0.3ドル以下 ・給水による添加反応度 0.3ドル以下 ・減速材及び反射材温度：70℃以下 ・炉心特性値が代表炉心パラメータ範 囲にあることの確認 ・津波想定全水没時の安全板又は未臨 界板による未臨界確認 ●確認(承認)者 ・施設管理者 ・原子炉主任技術者 ・施設管理統括者 ・原子力科学研究所長	○炉心構成書 ・臨界水位：40cm以上140cm以下 ・最大過剰反応度：0.8ドル以下 ・安全板の反応度価値 全挿入時：0.985以下 ワンロッドスタック時：0.995以下 ・最大反応度添加率 制御設備：3セント/s以下 可動装荷物：3セント/s以下 ・可動装荷物の反応度価値 0.3ドル以下 ・給水による添加反応度 0.3ドル以下 ・減速材及び反射材温度：70℃以下 ・炉心特性値が代表炉心パラメータ範 囲にあることの確認 ・津波想定全水没時の安全板又は未臨 界板による未臨界確認 ●確認(承認)者 ・施設管理者 ・原子炉主任技術者 ・施設管理統括者 ・原子力科学研究所長
(3)-1 炉心証明(運転前)： ①初回炉心構成の選定 ②初回炉心の予備解析 ③臨界近接を行うことの承認	—	別冊10 ハ 原子炉本体の構造及び設備 ・核的制限値は炉心構成時と同じ	○初回炉心構成の選定 ・核的制限値は炉心構成時と同じ ●確認(承認)者 ・施設管理者 ・原子炉主任技術者 ・施設管理統括者	○初回炉心構成の選定 ・実験計画の臨界水位範囲の中央値を とる炉心 ・その他の核的制限値は炉心構成時と 同じ ●確認(承認)者 ・施設管理者 ・原子炉主任技術者 ・施設管理統括者

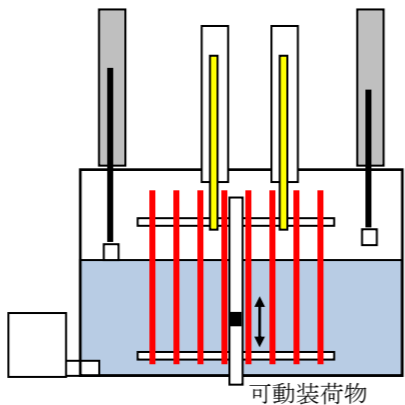
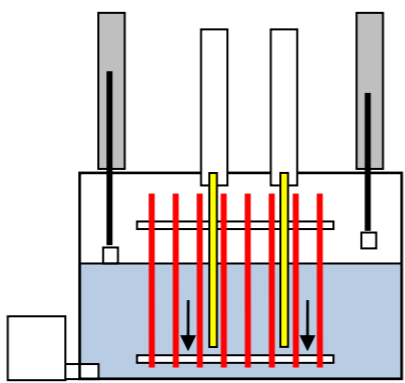
STACYの各段階における核的制限値の逸脱防止対策（2/5）

工程／運転手順	炉心の状態	核的制限値の確認事項		
		設置変更許可申請書	保安規定	運転手引
(3)-2 炉心証明（運転前・炉心構成）： ①炉心構成（炉心パターン変更） ・棒状燃料装荷等、炉心構成パターンの確認	未臨界板 （棒状燃料の出し入れは、安全板 又は安全板と同等の未臨界板を 炉心に挿入した状態で実施） 	添付書類八 12.4 燃料管理 ・棒状燃料の炉心への装荷は、保安規定に定める炉心構成書の計画に従って実施	○燃料の装荷 ・燃料を炉心に装荷しようとするときは、燃料の種類等を確認	○燃料の装荷 ・棒状燃料の出し入れは、安全板又は未臨界板を炉心に挿入した状態で実施 ・未臨界板の挿入→安全板の引抜き→棒状燃料の出し入れ→安全板の挿入→未臨界板の引抜き
(3)-3 炉心証明（運転前点検・給水準備）： ①起動前点検 ・炉心構成の状態確認 ・機器の動作確認 ・反応度添加制限設定値の確認 ②給水準備 ・起動用中性子源の挿入 ・安全板の引上げ ・初回給水停止水位40mm設定 ③給排水作動確認 ・給水流量（高速・低速） ・初回給水停止水位40mmまで高速給水した後、一旦、排水確認	給水停止スイッチ 最大給水制限スイッチ 安全板 中性子源 	添付書類八 別1 3.3 運転手順 ・炉心構成の誤認並びに軽水の誤給水が生じないように、運転に先立ち、多重な検査によって確認	○運転開始前の措置 ・原子炉の運転を開始しようとするときは、巡視及び点検を行い、正常な状態であることを確認	○初回給水設定値 ・無限平板未臨界水位（40mm） ●確認者 ・運転長 ・施設管理者
(4)-1 運転（高速給水による臨界近接）： ①給水停止スイッチの位置の設定（40mm以降は、臨界水位推定値の1/10～2/10の幅にて段階的に上昇、設定する） ②高速給水開始（臨界水位推定値の3/4まで） ③水位が給水停止スイッチに到達すると、自動で給水停止（この間、炉周期短などが発報すれば、給水停止やスクラム動作が行われる） ④給水停止スイッチ及びサーボ型水位計により炉心タンク水位を測定		添付書類八 別1 3.3 運転手順 ・予想臨界水位の3/4（高速給水制限水位）までは高速給水系の使用が可能	-	○高速給水の制限及び段階幅 ・高速給水系の使用は予想臨界水位の3/4まで ・臨界水位推定値の1/10～2/10 ●確認者 ・運転長
(4)-2 運転（高速給水段階の中性子計数）： ①中性子計数を測定 ②中性子逆増倍率から臨界水位を推定し、必要に応じて高速給水制限水位を見直し		添付書類八 別1 3.3 運転手順 ・中性子逆増倍率を測定することにより、より正確な臨界水位を予想し、水位に係る設定値の確認及び必要に応じて再設定を実施 ・中性子逆増倍率測定は、確実に未臨界の水位において少なくとも2回実施し臨界水位を予測	-	○高速給水制限水位の見直し ●確認者 ・運転長

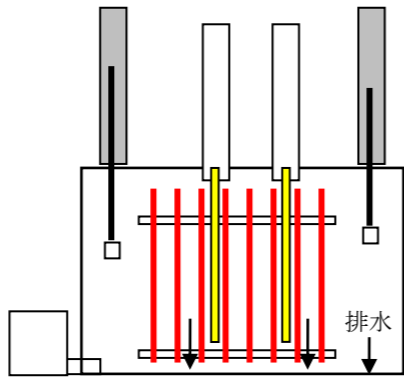
STACYの各段階における核的制限値の逸脱防止対策（3/5）

工程／運転手順	炉心の状態	核的制限値の確認事項		
		設置変更許可申請書	保安規定	運転手引
<p>(4)-3 運転（低速給水による臨界近接）：</p> <p>①臨界水位推定値の3/4以降は低速給水</p> <p>②現在の水位と臨界水位推定値の差の1/5～1/2の幅にて段階的に給水</p> <p>③水位が給水停止スイッチに到達すると、自動で給水停止（この間、炉周期短などが発報すれば、給水停止やスクラム動作が行われる）</p>		<p>添付書類八 別1</p> <p>3.3 運転手順</p> <ul style="list-style-type: none"> 高速給水制限水位を超える水位は低速給水系を使用 	<p>保安規定</p> <p>—</p>	<p>運転手引</p> <ul style="list-style-type: none"> ○高速給水の制限 <ul style="list-style-type: none"> ・予想臨界水位の3/4を超える水位は低速給水系を使用 ○低速給水段階幅 <ul style="list-style-type: none"> ・現在の水位と臨界水位推定値の差の1/5～1/2 ●確認者 ・運転長
<p>(4)-4 運転（低速給水段階の中性子計数）：</p> <p>①中性子係数測定及び中性子逆増倍率による臨界水位の推定</p> <p>②臨界水位推定値の精度を判断し、臨界水位推定値を決定</p> <p>③必要に応じて、出力上昇時の臨界超過水位（約10セント相当）の設定値、反応度添加による核的制限設定値の見直し</p>		<p>別冊10</p> <p>ハ 原子炉本体の構造及び設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・臨界水位：40cm以上140cm以下 <p>添付書類八 別1</p> <p>3.3 運転手順</p> <ul style="list-style-type: none"> ・中性子逆増倍率を測定することにより、より正確な臨界水位を予想し、水位に係る設定値の確認及び必要に応じて再設定を実施 ・中性子逆増倍率測定は、確実に未臨界の水位において少なくとも2回実施し臨界水位を予測 	<p>○臨界水位</p> <ul style="list-style-type: none"> ・40cm以上140cm以下 	<p>○臨界水位</p> <ul style="list-style-type: none"> ・40cm以上140cm以下 ・臨界水位推定値の精度を判断 ○核的制限設定値の見直し ○中性子逆増倍率測定回数：臨界水位を十分な精度で推定できるまでの回数（最低2回） ●確認者 ・運転長
<p>(5) 臨界超過：</p> <p>①給水停止スイッチの位置を臨界超過水位（約10セント相当）に設定</p> <p>②給水開始（臨界超過し、出力が緩やかに上昇）</p> <p>③出力上昇確認後、起動用中性子源の引抜き</p> <p>④水位が給水停止スイッチに到達し、給水停止（出力上昇が速いときは、給水を手動停止）</p> <p>⑤臨界超過水位の測定</p> <p>⑥出力上昇時の反応度測定</p>		<p>添付書類八 別1</p> <p>3.5 核設計</p> <ul style="list-style-type: none"> ・給水による添加反応度0.3ドル以下 	<p>○給水による添加反応度0.3ドル以下</p>	<p>○給水による添加反応度0.3ドル以下</p> <ul style="list-style-type: none"> ●確認者 ・運転長
<p>(6) 臨界調整：</p> <p>①少量排水し、臨界調整（出力が一定（出力1W程度）となる水位に調整）</p> <p>②臨界水位の測定</p>		<p>別冊10</p> <p>ハ 原子炉本体の構造及び設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・臨界水位：40cm以上140cm以下 	<p>○臨界水位</p> <ul style="list-style-type: none"> ・40cm以上140cm以下 	<p>○臨界水位の測定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・臨界水位：40cm以上140cm以下 ●確認者 ・運転長

STACYの各段階における核的制限値の逸脱防止対策（4/5）

工程／運転手順	炉心の状態	核的制限値の確認事項		
		設置変更許可申請書	保安規定	運転手引
<p>(7) 反応度評価：</p> <p>①出力上昇時の反応度（$d\rho$）を、臨界超過水位と臨界水位の差（dH）で除し、臨界超過水位1mm当たりの反応度（水位反応度係数 $d\rho/dH$）を算出</p> <p>②水位反応度係数を基に反応度制限量を設定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・反応度添加率 = $(d\rho/dH) \times$ (水位上昇速度) ・最大添加反応度 = $(d\rho/dH) \times$ (臨界水位と給水停止スイッチ上限高さとの差※) ・最大過剰反応度 = $(d\rho/dH) \times$ (臨界水位と最大給水制限スイッチ設定高さとの差※) <p>(※給水停止後1秒間の水位上昇分を含む)</p>	—	<p>添付書類八 別1</p> <p>3.5 核設計</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水位反応度係数 $d\rho/dH$ $2.0 \times 10^{-3} \sim 6.0 \times 10^{-2}$ ドル/mm ・給水による最大添加反応度 0.3ドル以下 <p>別冊10</p> <p>ハ 原子炉本体の構造及び設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最大反応度添加率：3セント/s以下 ・最大過剰反応度：0.8ドル以下 	<p>○水位反応度</p> <ul style="list-style-type: none"> ・反応度添加率3セント/s以下 ・最大添加反応度：0.3ドル以下 ・最大過剰反応度：0.8ドル以下 	<p>○水位反応度</p> <ul style="list-style-type: none"> ・反応度添加率3セント/s以下 ・最大添加反応度：0.3ドル以下 ・最大過剰反応度：0.8ドル以下 <p>●確認者</p> <ul style="list-style-type: none"> ・運転長
<p>(8) 可動装荷物反応度測定：</p> <p>①必要に応じて出力調整し、臨界調整</p> <p>②可動装荷物を段階的に炉心に挿入（この間、出力上昇が速いときは、警報発報やスクラム動作が行われる）</p> <p>③挿入による出力変化から反応度を測定</p> <p>④必要に応じて、次の挿入位置の見直し</p>	 <p style="text-align: center;">可動装荷物</p>	<p>別冊10</p> <p>ハ 原子炉本体の構造及び設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最大反応度添加率 可動装荷物：3セント/s以下 ・可動装荷物の反応度値 0.3ドル以下 	<p>○可動装荷物の反応度</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最大反応度添加率 可動装荷物：3セント/s以下 ・可動装荷物の反応度値 0.3ドル以下 	<p>○可動装荷物の反応度</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最大反応度添加率 可動装荷物：3セント/s以下 ・可動装荷物の反応度値 0.3ドル以下 <p>●確認者</p> <ul style="list-style-type: none"> ・運転長
<p>(9) 安全板反応度値測定：</p> <p>①必要に応じて出力調整し、臨界調整</p> <p>②ロッドドロップ法による安全板反応度値測定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・全数挿入 ・ワンロッドスタック 		<p>別冊10</p> <p>ハ 原子炉本体の構造及び設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・安全板の反応度値 全挿入時：0.985以下 ワンロッドスタック時：0.995以下 	<p>○安全板の反応度値</p> <ul style="list-style-type: none"> 全挿入時：0.985以下 ワンロッドスタック時：0.995以下 	<p>○安全板の反応度値</p> <ul style="list-style-type: none"> 全挿入時：0.985以下 ワンロッドスタック時：0.995以下 <p>●確認者</p> <ul style="list-style-type: none"> ・運転長

STACYの各段階における核的制限値の逸脱防止対策（5／5）

工程／運転手順	炉心の状態	核的制限値の確認事項		
		設置変更許可申請書	保安規定	運転手引
<p>(10) 運転終了：</p> <ul style="list-style-type: none"> ①炉心タンクから軽水の排水 ②原子炉停止確認（排水完了、安全板挿入、出力低下） ③停止後点検 		<p>添付書類八 別1 3.3 運転手順（運転停止）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・軽水の排水完了 ・安全板の挿入 ・中性子出力の低下 	<ul style="list-style-type: none"> ○原子炉の停止 ・軽水の排水完了 ・安全板の完全挿入 ・中性子出力の正常低下 	<ul style="list-style-type: none"> ○原子炉の停止 ・軽水の排水完了 ・安全板の完全挿入 ・中性子出力の正常低下 ●確認者 ・運転長
<p>(11) 炉心証明書：</p> <ul style="list-style-type: none"> ①運転による測定値の確認 ②運転前推定値と著しく異なっていないことを確認 ③既知炉心（事前解析と実測との比較により炉心核特性が把握された炉心）として運転することを施設管理統括者が承認 	—	<p>別冊10 ハ 原子炉本体の構造及び設備</p> <ul style="list-style-type: none"> ・核的制限値は炉心構成時と同じ 	<ul style="list-style-type: none"> ○炉心証明書 ・核的制限値は炉心構成時と同じ ●確認（承認）者 ・施設管理者 ・原子炉主任技術者 ・施設管理統括者 	<ul style="list-style-type: none"> ○炉心証明書 ・核的制限値の逸脱がないこと ・運転前推定値と実測値が著しく異なっていないこと ●確認（承認）者 ・施設管理者 ・原子炉主任技術者 ・施設管理統括者