

高浜発電所 発電用原子炉設置変更許可申請
(1号及び2号原子炉施設の変更)
【使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更】

審査会合における指摘事項の回答

2021年6月2日

関西電力株式会社

2021年4月15日審査会合における指摘事項

No.	指摘事項	会合日
①	個別のFP核種が実効増倍率に与える影響度合いに応じて核種選定を検討すること。	2021/4/15
②	燃焼計算コードPHOENIX-Pで求められた個々のFP核種の原子個数密度の妥当性を示すこと。	2021/4/15
③	流量設定の根拠となる手順の種別（通常操作またはSA手順）について明記すること。	2021/4/15
④	基本ケース条件の流量はSA手順に基づき設定し、不確かさについては同じ手順内で想定されるものに限定すること。	2021/4/15

【コメントNo.1】 個別のFP核種が実効増倍率に与える影響度合いに応じて核種選定を検討すること

<回答>

- 前回の審査会合において、臨界実験体系内にFP核種が含まれていても、体系の実効増倍率に影響を与えるだけの十分な量がない場合には、当該核種に対するベンチマークが十分にできない可能性があるのでは、とのご指摘があったことから、各臨界実験体系に含まれる個々のFP核種が実効増倍率に与える影響度合いについて検討した。
- 具体的には、臨界実験体系に含まれるFP核種の中から、1核種ずつその核種の存在を考慮しない解析を実施し、実効増倍率への感度を確認した。
- その結果、については、その存在を考慮しないことにより、実効増倍率が2 σ を超えて増加していることから、ベンチマークに十分な量が体系内に存在しているとみなすことができる。
- 一方で、については、その存在を考慮しないことによる実効増倍率の増加が2 σ 以内にとどまっていることから、ベンチマークのために十分な量が体系内に存在しているとみなさず、今回申請においては、未臨界評価にて考慮しないこととする。

【FP核種毎の臨界実験体系に対する影響確認】

多数のFP核種を含む臨界実験（）に対し、実験体系内に存在する核種を1種類ずつ無視し、基準となる全FP核種考慮時の実効増倍率と比較した。

表 FP核種毎の臨界実験体系への影響度
(の例)

無視した核種	Case ID	実効増倍率	σ	実効増倍率差

: 臨界実験体系への寄与が大きい核種（実効増倍率差 > 2 σ であった核種）

<回答>

- PHOENIX-Pは、これまで国内PWRの多数の炉型に対する取替炉心設計に使用されてきたコードであり、炉心設計結果は実測値との比較（炉物理検査）において良好な一致が示されている。また運転中の炉心の反応度を表す臨界ボロン濃度について、本コードを用い計算した設計値と実測値の差が所定の範囲内に収まっている。
- 過去全ての炉心において実炉状態と良好な一致を示したという実績は、すなわち本コードが燃焼に伴う核種組成の変化を適切に評価できていることを示すものであるため、本コードによる計算結果として得られる各FP核種の原子個数密度は妥当である。

【PHOENIX-Pを使用した運転管理の例】

- 炉心の運転管理において、臨界ボロン濃度の設計値と実測値との誤差が、所定の範囲内に収まっていることを確認している。高浜3, 4号炉の至近実績を以下に示す。
- 本コードを用いて炉心設計をした実績は多数あり、そのすべての炉心で臨界ボロン濃度は制限値内に収まっている。

高浜3号炉 第24サイクル

高浜4号炉 第23サイクル

--	--

表 国内PWRにおけるPHOENIX-P炉心設計実績
(2021/5月現在)

炉型	PHOENIX-Pを用いた炉心設計実績
15×15型 3ループ 55GWd/tウラン炉心	2
17×17型 3ループ 55GWd/tウラン炉心	20
17×17型 3ループ 48GWd/tウラン+ MOX炉心	7
17×17型 3ループ 55GWd/t炉心+ MOX炉心	3
17×17型 4ループ 55GWd/t炉心	28
17×17型 4ループ 48GWd/tウラン+ MOX炉心	3
設計数合計	63

図 運転中炉心の臨界ボロン濃度設計値と実測値との誤差推移

<続き>

- コードの燃焼計算結果としての核種組成には誤差が含まれる。一方で、基本ケースにおいて設定する「新燃料と24GWd/t燃焼燃料のチェッカーボード配置」という燃料配置条件下では、体系の実効増倍率は新燃料により支配的に決まるため、本コードの個々の核種の原子個数密度の中の核種組成計算誤差が体系の実効増倍率に与える影響は小さくなると考えられる。
- PHOENIX-P計算結果の誤差がSFP体系への実効増倍率に与える影響を見積もるため、国際的なプログラムにて取得された照射後試験 (PIE) データを踏まえた感度解析を行う。

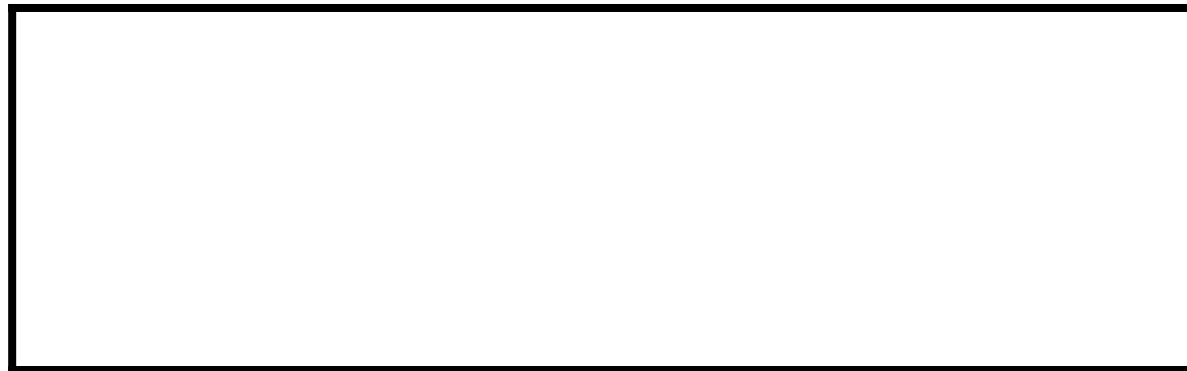
<感度解析>

ARIANE国際プログラムおよびMALIBU国際プログラムにて取得されたFPに関するPIEデータと、PHOENIX-Pによる計算結果の差を確認し、その差をもとに体系の実効増倍率を厳しくする24GWd/t燃焼燃料の核種組成を仮定したうえで、SFP体系下での感度解析を行う。

【PIE比較・整理】

国際プログラムにて取得されたFPに関するPIEデータ (E) と、PHOENIX-Pによる核種組成計算結果 (C) を比較した結果 (C/E) を下表に示す。PHOENIX-Pによる組成計算に際しては、各サンプルの照射履歴を踏まえ実施した。核種毎・サンプルごとのC/Eは、概ね1付近であった。

表 PIE結果*とPHOENIX-P計算結果の比較



※ 測定対象炉心：PWR 15×15型 3ループ炉心

(続き)

【感度解析】(実効増倍率への影響確認)

PIE結果を踏まえ燃焼燃料の反応度を厳しくする24GWd/t燃焼燃料の核種組成を仮定し、当該核種組成の燃焼燃料をSFP内で新燃料とチェッカーボード型に配置とした場合の実効増倍率を評価することで、PHOENIX-Pの核種組成計算誤差がSFP体系下の実効増倍率に与える影響を見積もる。

<解析② 条件>

- 臨界計算コード : SCALE6.0
- 解析体系 : 新燃料と24GWd/t燃焼燃料のチェッカーボード配置
- 燃料内核種の原子個数密度 : ①PHOENIX-Pでの計算結果そのまま
②前項に示すPIE結果とPHOENIX-P計算結果の比 (C/E) のうち、最大の値でPHOENIX-Pの値を除いた値

その他 水密度条件 : 基本ケースと同じ

表 24GWd/t燃焼燃料に対する原子個数密度条件の設定



<結果>

実効増倍率への影響 : LATER

表 核種組成の誤差が実効増倍率へ与える影響

原子個数密度条件				ΔK*
①		②		
実効増倍率 K _{PHNX}	統計誤差 σ _{PHNX}	実効増倍率 K _{MAX}	統計誤差 σ _{MAX}	
LATER	LATER	LATER	LATER	LATER

※

【コメントNo.3】 流量設定の根拠となる手順の種別（通常操作またはSA手順）について明記すること。

【コメントNo.4】 基本ケース条件の流量はSA手順に基づき設定し、不確かさについては同じ手順内で想定されるものに限定すること。

<回答>

- SFPへの注水・放水に係る手順の種別（通常操作向けの手順か事故時対応向けの手順か）について下表に示す。
- 今回未臨界性評価においては、重大事故等対応のため整備しているSFPへの注水・放水に係る手順をもとに流量を設定する。（脱気水ポンプを用いて注水する手順は事故時の手順としては整備していないことから、当該系統からの流量は考慮しない。）

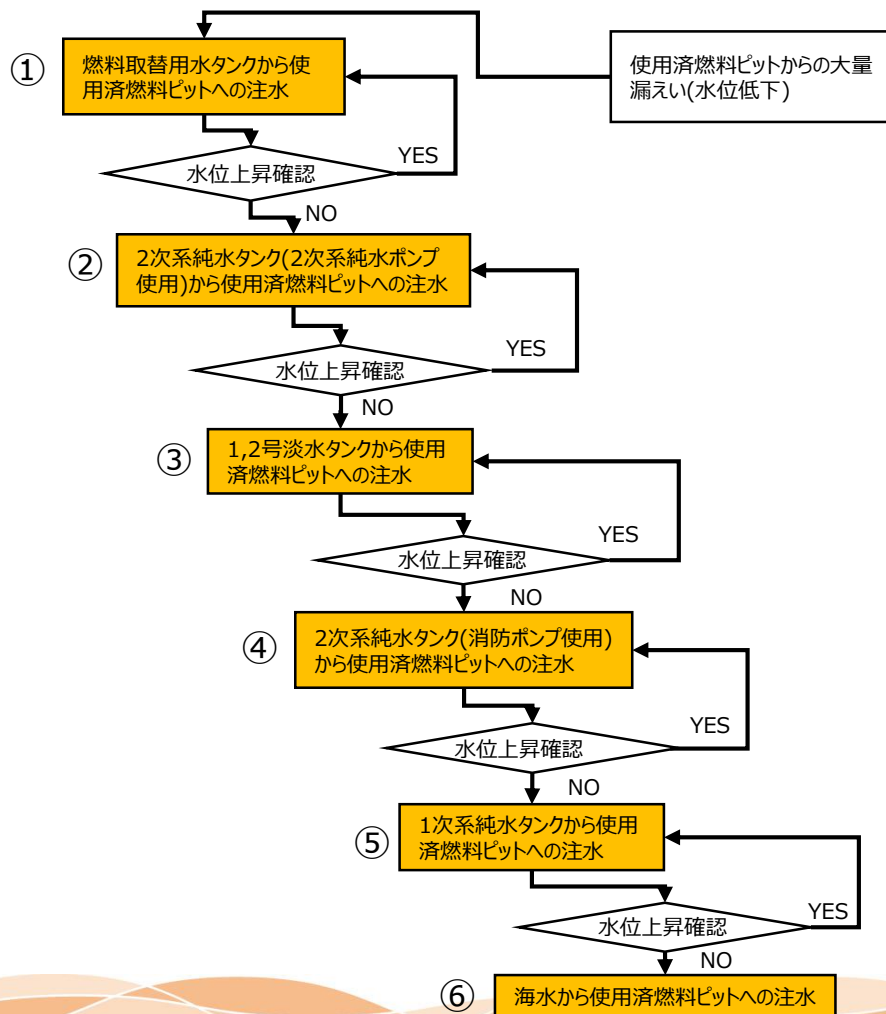


図 SFPへの注水に係る手順の実施フロー

表 SFPへの注水手順を整備している社内標準

注水手順(ポンプ)	手順の種別	整備している社内標準	考慮要否
① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	事故時対応向け	事故時操作所則	要
②-1 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ)	事故時対応向け	事故時操作所則	要
②-2 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ) (脱気塔を経由し、脱気水ポンプを使用)	通常時向け	通常操作所則	不要
③ 1,2号淡水タンク(消防ポンプ-消火栓)	事故時対応向け	SA所達※	要
④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	事故時対応向け	SA所達※	要
⑤ 1次系純水タンク(1次系純水ポンプ)	事故時対応向け	SA所達※	要
⑥ 海水(送水車)	事故時対応向け	SA所達※	要

表 SFPへの放水手順を整備している社内標準

放水手順(ポンプ)	手順の種別	整備している社内標準	考慮要否
送水車によるスプレー	事故時対応向け	SA所達※	要
大容量ポンプによる放水	事故時対応向け	SA所達※	要

※ 高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達

【コメントNo.3】 流量設定の根拠となる手順の種別（通常操作またはSA手順）について明記すること。

【コメントNo.4】 基本ケース条件の流量はSA手順に基づき設定し、不確かさについては同じ手順内で想定されるものに限定すること。

<続き>

- 流量の具体的値は、手順に示される設備・系統構成を前提とし、基本的にはポンプの揚程曲線と当該設備構成を踏まえた水頭差や配管圧損等により評価した損失揚程曲線との交点における流量を設定する。（送水実績がある手順は実測値を使用する。）

【燃料取替用水タンクからSFPへ注水時※1の例】

※1 他の注水手順についても、手順通りのラインナップを実施することにより系統構成が一意に決まるようになっている。

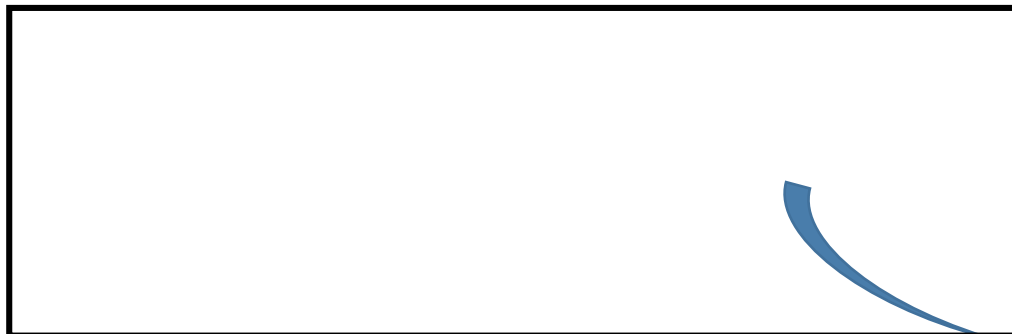
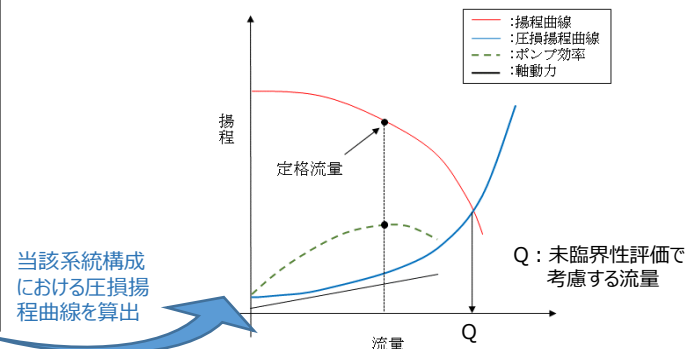


図 整備している手順に基づく系統構成（燃料取替用水タンクからの注水手順）



当該系統構成
における圧損揚
程曲線を算出

図 ポンプ揚程曲線を用いた流量の算出方法概略

【放水砲によるSFPへの放水時の例】

54条2項対応（燃料の著しい損傷の進行緩和を緩和し、放射性物質の放出を低減する）のためSFPへ放水する場合は、
 ・大容量ポンプ（放水砲用）を2台直列に接続すること
 ・SFPへ放水する際の放水砲使用台数は、1台/1SFPとすること※1
 を定めている。

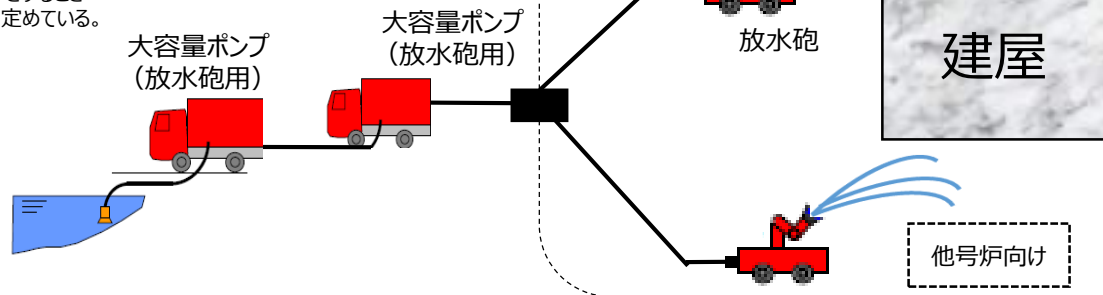


図 整備している手順に基づく系統構成（放水砲による放水手順）

※1 54条2項に向けた対応とは別に、発電所施設への航空機衝突時に発生する航空機燃料火災に対する消火対応においても、放水砲による放水を実施する。その際は、2台目の大容量ポンプ（放水砲用）出口からの分岐はさせず、1台の放水砲へ接続する。



図 大容量ポンプ（放水砲用）の揚程曲線（型式：HS900※2）

※2 高浜発電所に配備している大容量ポンプ（放水砲用）の型式は3種類あり、流量設定においては型式の違いを考慮する。

【コメントNo.3】 流量設定の根拠となる手順の種別（通常操作またはSA手順）について明記すること。

【コメントNo.4】 基本ケース条件の流量はSA手順に基づき設定し、不確かさについては同じ手順内で想定されるものに限定すること。

<続き>

- 事故対応が手順通りに実施されることを前提とした場合の流量の不確かさとして、以下を考慮する。
 - 系統内ポンプの起動台数は、手順上からは1台と読み取れるが、運転ポンプを切り替える場合には一時的に2台分の流量が吐出される可能性があることから、不確かさとして系統内のポンプが全数起動することを考慮する。
 - 大規模火災が発生した際は、大容量ポンプ（放水砲用）により送水された流量を1台の放水砲より吐出し、発電所火災を鎮火する。本内容は54条2項への適合に係る対応として行うものではないが、本対応により吐出された流量がSFPへ流入する可能性があるため、不確かさとして大規模火災鎮火のために放水された流量が、すべて一つのSFPへ流入することを考慮する。
- 流量設定の考え方を踏まえ、基本ケース条件には m³/h を、不確かさを考慮した条件には m³/h を設定する。

表 注水・放水設備による設定流量

手順(ポンプ)	基本ケース流量 (m ³ /h)	不確かさを考慮した流量 (m ³ /h)	根拠
① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	21	21 ※1	ポンプ揚程曲線
②-1 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ)	5	15 ※3	実測値
②-2 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ) (脱気塔を経由し、脱気水ポンプを使用)	—※2	—※2	—※2
③ 1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)	22	132 ※3	実測値
④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	95	95	ポンプ揚程曲線
⑤ 1次系純水タンク(1次系純水ポンプ)	39	42 ※4	ポンプ揚程曲線
⑥ 海水(送水車)	260	260	ポンプ揚程曲線
放水 送水車によるスプレイ	<input type="text"/>	<input type="text"/>	スプレイヘッドの 仕様上限
大容量ポンプ（放水砲用）による放水	<input type="text"/> ※5	<input type="text"/>	ポンプ揚程曲線
合計	<input type="text"/>	<input type="text"/>	—

- ※1 系統上のオリフィスにより大きな圧損が生じるため、ポンプ起動台数を2台に増やしても流量への影響は軽微だった。
 ※2 通常操作の手順であるため考慮しない。
 ※3 系統数を単純倍した。
 ※4 系統途上で手順①と合流するため、合流点以降の圧損が大きく、ポンプ起動台数を2台に増やしても流量への影響は軽微だった。

- ※5 大容量ポンプ（放水砲用）は3種類が配備されており、最も容量の大きいポンプと2番目に容量が大きいポンプの直列を想定。基本ケースでは、律速となる低い方の流量（ m³/h）が各号炉に2等分されるとした。