

【資料3】

高浜1, 2号炉 使用済燃料ピット 未臨界性評価に関する補足説明

<構成>

- (1) SFP への注水・放水流量の設定について
⇒ 通しページ1～32
- (2) 液滴径設定（基本ケース条件: 1.5mm、不確かさを考慮した条件: 1.0mm）の妥当性について
⇒ 通しページ33～50
- (3) 領域管理における燃焼燃料中の AC 核種および FP 核種組成の設定について
⇒ 通しページ51～56
- (4) 核種組成計算結果の誤差影響が、燃焼計算手法有する保守性に包含されることについて
⇒ 通しページ57～64
- (5) 解析コードの説明について
⇒ 通しページ65～94

(1) SFPへの注水・放水流量の設定について

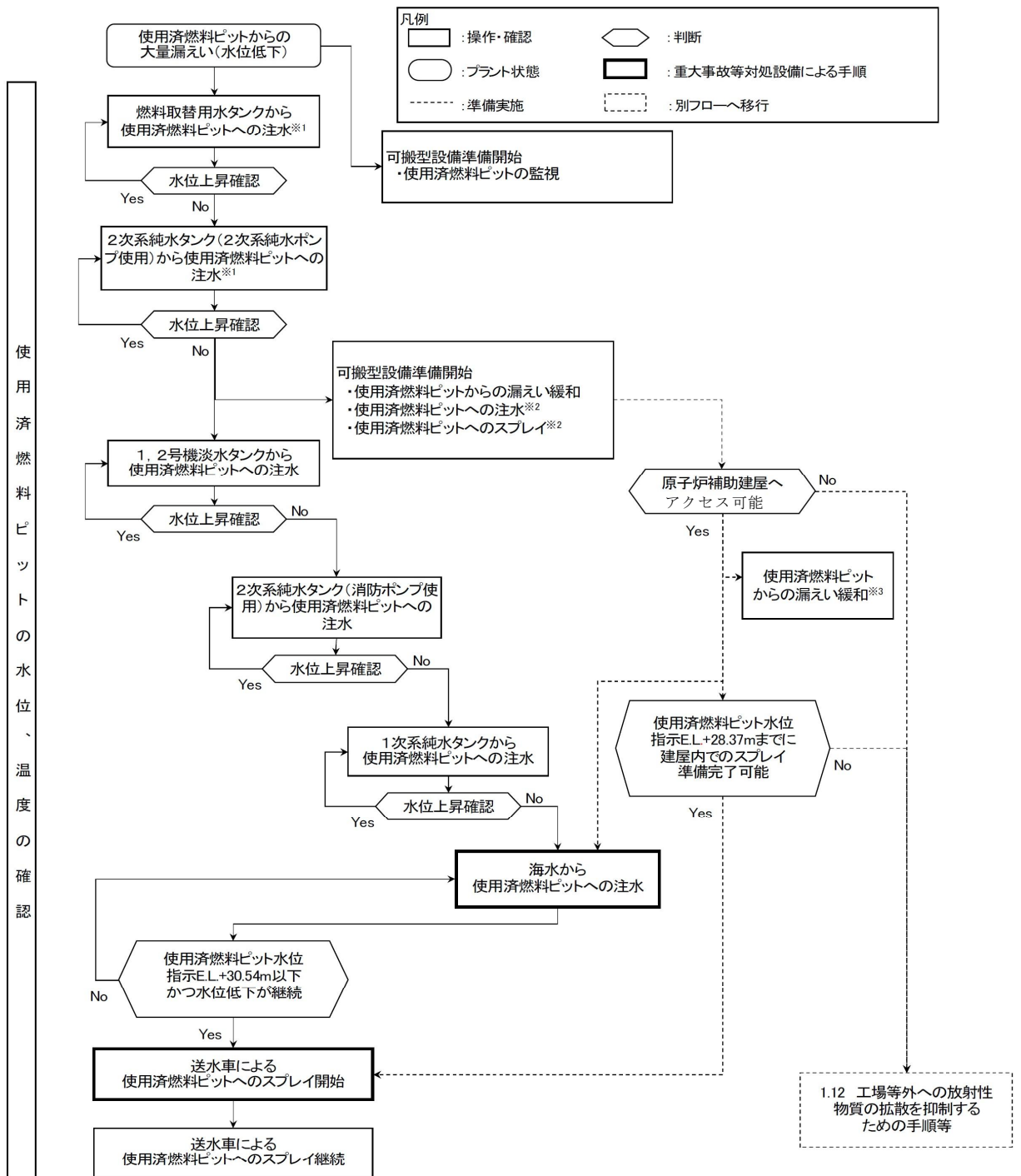
1. はじめに
2. SFPからの大量の水の漏えい時における注水・放水手順および設備保有台数
3. SFP注水手順にて使用する設備の流量設定の考え方
 - 3.1. 各手順における流量設定の考え方
 - 3.1.1. SFP注水手順における流量設定
 - 3.1.2. SFP放水手順における流量設定
 - 3.2. 配管圧損評価について
4. 基本ケース条件の設定について
5. 不確かさを考慮した条件の設定について
6. 系統に複数台設置されるポンプの起動台数の考え方について
7. 全手順同時実施の成立性確認
8. まとめ

1. はじめに

SFPからの大量の水の漏えい時には、整備された手順に基づきSFPへ注水・放水を実施する。本資料では、未臨界性評価条件となるSFPへ流入する流量について、各手順の設備構成、配備台数等を踏まえた、基本ケース条件および不確かさ考慮した条件における条件設定および設定根拠について説明する。なおSFPへ水を供給する行為のうち、直近まで施設された配管等を用いるもの（燃料取替用水ポンプ等）を注水、スプレイヘッドまたは放水砲によるものを放水と呼称する。

2. SFPからの大量の水の漏えい時における注水・放水手順および設備保有台数

SFPへの注水・放水に係る手順の実施判断フローを第 1-1 図に、SFP 注水設備の構成を第 1-2 図に、放水砲による放水時の設備構成を第 1-3 図に、各注水・放水手順における水源、送水ポンプおよびポンプ台数を第 1 表に示す。



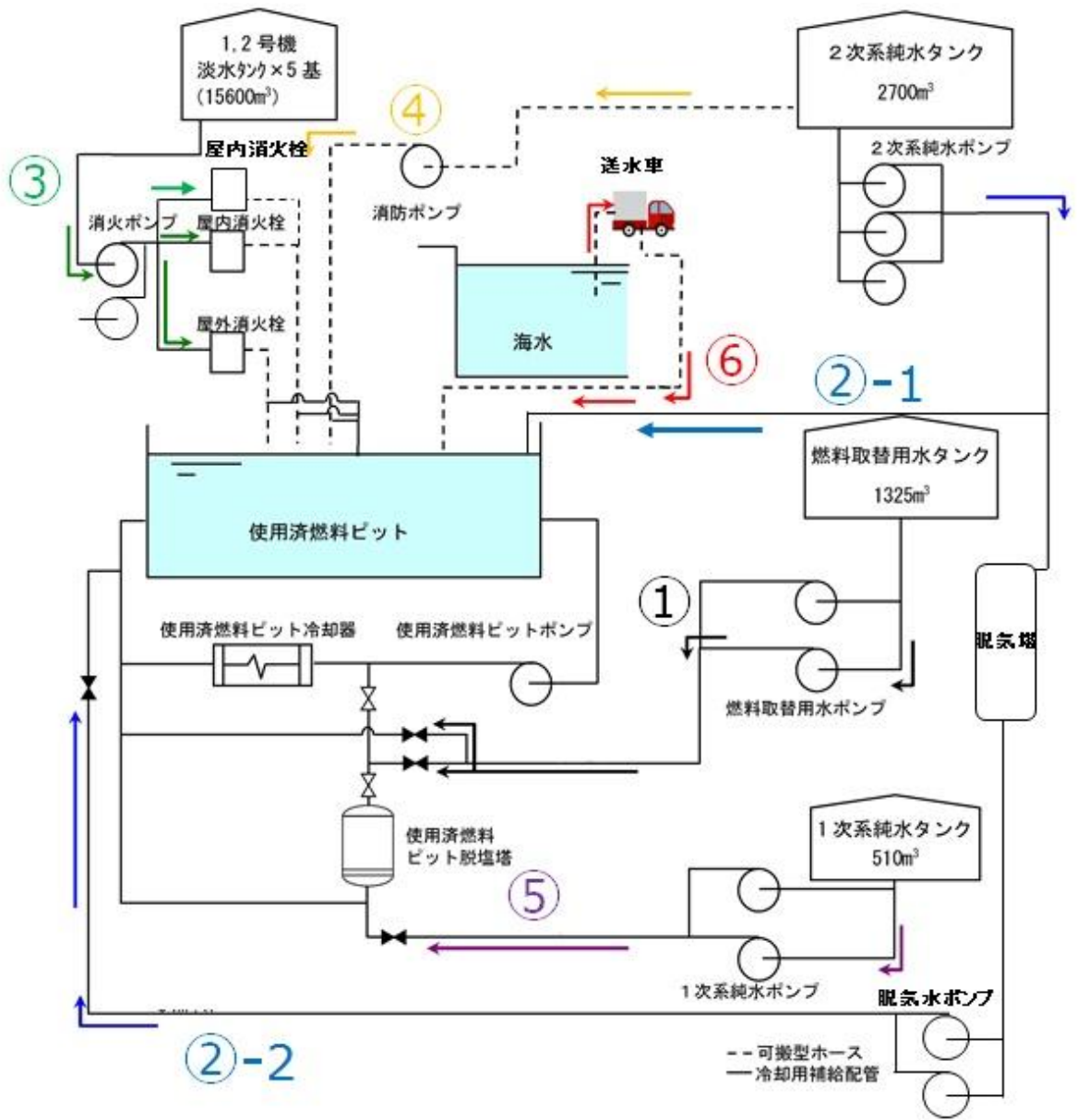
(注1)本フローに記載の注水手段については、複数の手段の準備又は注水を平行して実施することがある。
また、水源の使用可否等に応じて手順を飛ばして対応することがある。

※1: 使用済燃料ピットの注水機能喪失の場合は使用不可

※2: 可搬型設備については、「送水車による使用済燃料ピットへのスプレー」の準備を優先する。

※3: 使用済燃料ピット水位指示E.L.+30.54m以下、かつ水位低下が継続する場合。

第1-1図 SFPへの注水・放水に係る手順の実施判断フロー



第1-2図 SFP注水設備の構成



第1-3図 放水砲による放水時の設備構成

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第1表 SFPへの注水・放水手順における水源、送水ポンプおよびポンプ配備台数

	手順番号	水源	送水ポンプ	ポンプ使用台数	ポンプ配備台数	放水設備		
						設備	使用台数	配備台数
注水手順	①	燃料取替用水タンク	燃料取替用水ポンプ	1台	2台	—		
	②-1	2次系純水タンク	2次系純水ポンプ	1台	3台 ^{※1}			
				1台 ^{※2}				
	③	1,2号淡水タンク	ディーゼル消火ポンプ または電動消火ポンプ	1台	各1台			
	④	2次系純水タンク	消防ポンプ	1台	1台			
	⑤	1次系純水タンク	1次系純水ポンプ	1台	2台			
⑥	海水	送水車	1台	5台 ^{※3}				
放水手順	①	海水	送水車	1台/1SFP	3台 ^{※4}	スプレイヘッド	1機/ 1SFP	3機 ^{※6}
	②	海水	大容量ポンプ (放水砲用)	2台/2SFP	3台 ^{※5}	放水砲	2台/ 2SFP	3台 ^{※6}

※1 脱気水ポンプは2台。 ※2 脱気水ポンプの使用台数。

※3 高浜1号炉用に2台、高浜2号炉用に2台、共用予備1台の計5台を配備。

※4 高浜1号炉用に1台、高浜2号炉用に1台、共用予備1台の計3台を配備（海水注水に使用する送水車の内数）。

※5 高浜1,2号炉共用で2台、共用予備1台の計3台を配備。

※6 高浜1号炉用に1台、高浜2号炉用に1台、共用予備1台の計3台を配備。

3. SFP 注水手順にて使用する設備の流量設定の考え方

各手順でのポンプ使用台数および設備の配備状況を踏まえ、未臨界性評価で使用する流量条件を検討する。

3-1. 各手順における流量設定の考え方

3-1-1. SFP 注水手順における流量設定

SFPへの注水に係る各手順におけるSFPへの流入流量設定における各条件の具体的な考え方は以下の通りである。

(1) 恒設設備を使用する手順

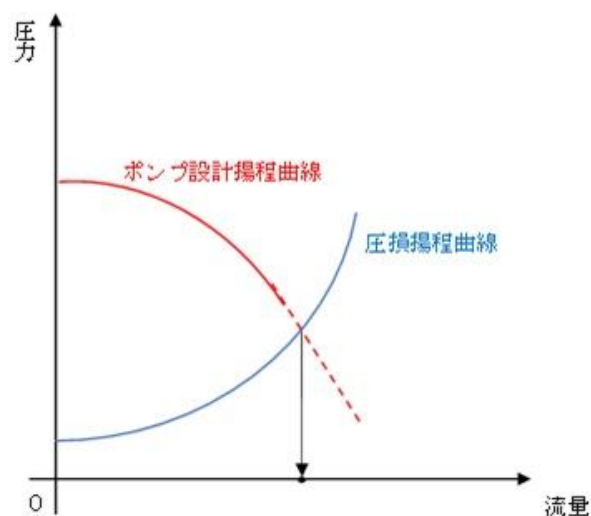
- a. 実際の施設ラインで通水した実測値があるものについては実測値を使用する。
(対象手順：注水手順②-1、③)

- b. 実際のラインで通水した実測値が無いものについては、第2図のようにポンプの揚程曲線と、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の交点における流量を使用する。なお揚程曲線に示される範囲内で損失揚程曲線と交わらない場合は、揚程曲線の上限值における傾きを保存し外挿した直線との交点を使用する。(対象手順：注水手順①、②-2、⑤)

(2) 可搬型設備を使用する手順

ポンプの揚程曲線と、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の交点における流量を使用する。

(対象手順：注水手順④、⑥)



第2図 ポンプ揚程曲線および圧損揚程曲線を用いた流量設定の概要

3-1-2. SFP放水手順における流量設定

SFPへの放水に係る各手順におけるSFPへの流入流量設定の考え方は以下の通り。

(1) スプレイヘッドを用いて放水する手順

放水設備であるスプレイヘッドの仕様上限値を設定する。なお大規模損壊時における対応として、化学消防自動車を用いたスプレイ手順を別途整備しているが、当該手順は送水車が起動できない場合に実施する手順であり、且つスプレイヘッドの配備台数は各号炉に1台であることから、化学消防自動車と送水車によるスプレイを同時に実施することは想定しない。

(対象手順：放水手順①)

(2) 放水砲を用いて放水する手順

放水砲による放水時は第1-3図に示すように、放水砲入口の必要圧力を確保するため、大容量ポンプ（放水砲用）を2台直列に1ライン敷設し、2台目の大容量ポンプ（放水砲用）の出口から分岐管により各号炉向けへ2ラインに分岐させ放水砲を接続する系統構成としている。よって当該手順での流量設定においては、配備されている型式の異なる3種類の大容量ポンプ（放水砲用）のうち、最も容量が大きいポンプと2番目に容量が大きいポンプを直列することを想定し、各号炉へは大容量ポンプ（放水砲用）による流量が2等分された状態で放水されるとして設定する。

(対象手順：放水手順②)

3-2. 配管圧損評価について

圧損揚程曲線の策定に必要となる、取水源から移送先までの配管及び弁類圧損等は、以下に示すダルシーの式に基づき算出する。

$$H = \sum f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g} \quad \dots (1) \quad \text{ここで } f \quad : \text{ 摩擦係数(-)} \quad R e \quad : \text{ レイノルズ数(-)}$$
$$Re = \frac{Dv}{\nu} \quad \dots (2) \quad L/D \quad : \text{ 等価直管長(-)} \quad D \quad : \text{ 配管内径(m)}$$
$$v \quad : \text{ 流速(m/s)} \quad v \quad : \text{ 流速(m/s)}$$
$$g \quad : \text{ 重力加速度(m/s}^2\text{)} \quad \nu \quad : \text{ 動粘性係数(m}^2\text{/s)}$$
$$k \quad : \text{ 抵抗係数(-)} \quad \epsilon \quad : \text{ 絶対粗度(m)}$$

なお系統中にはエルボ、ベンド等が存在するが、それら配管形状抵抗や弁の抵抗については第2表の通り与えられる等価直管長にて考慮する。また抵抗計数kは抵抗の大きさを示す無次元数でありレジューサ（拡大／縮小）部や配管出入口部の配管形状による抵抗を与える。

上式にて算出される配管等の圧損および取水源－移送先間の静水頭差より、圧損揚程曲線を策定する。

第2表 各配管要素の等価直管長*

配管要素	等価直管長 L/D	備考
90° エルボ	20	
45° エルボ	16	
ティー (ラン)	20	流れの方向が変わらない場合
ティー (ブランチ)	60	流れの方向が変わる場合
仕切弁	13	弁メーカーによる設計値を使用
逆止弁	135	弁メーカーによる設計値を使用

※「FLOW OF FLUIDS THROUGH VALVES, FIITINGS, AND PIPE Technical Paper No. 410」(CRANE CO, 1999)

4. 基本ケース条件の設定について

基本ケース条件には原則最確値を設定する観点から、実施手順数および系統内ポンプの使用台数については以下の前提を置く。

a. 実施手順数

SFPからの大量の水の漏えい時において実施する注水・放水手順の組み合わせは多種あり、最確状態を決めがたいことから、基本ケース条件においても未臨界性評価の観点から保守的に、SFPへの注水・放水に係る全手順の同時実施を想定する。なお各手順の設備構成、水源の容量および対応要員数の観点より、全手順を同時に実施することは可能である。

b. 各手順における系統内ポンプの使用台数

最確状態を設定する観点から、1手順当たり1台とする。

上記の前提に基づき、各手順における基本ケース条件の流量を設定する。

【燃料取替用水タンクおよび1次系純水タンクからの注水流量（注水手順①および手順⑤）】

注水手順①および手順⑤については、3-1. (1)b. に示す通り、恒設設備を使用し通水実績が無い手順であるため、圧損揚程曲線を策定のうえ流量を評価する。また、これら手順は第1-2図に示す通り注水ラインを一部共有していることから、同時実施時におけるライン共有部の圧損増加を考慮し評価する。なお、注水手順②-2についても一部ラインを共有しているが、共有部分が限定的であることから、手順②-2は単独で実施された場合の流量を使用する。

・静水頭差等の条件

第3表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第3表 水源と移送先の静水頭差（手順①および⑤）

	手順①	手順⑤	備考
取水源 E. L			タンク100%水位E. L
移送先 E. L			SFP戻り配管放出端
静水頭差(移送先E. L. - 取水源E. L.)	-10.53 m	-0.43 m	—

・評価結果

評価結果を第3-1図および第3-2図に示す。ポンプ揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は、手順①で約43m³/h、手順⑤で約34m³/hであり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。



第3-1図 手順①におけるポンプ揚程および性能曲線との関係

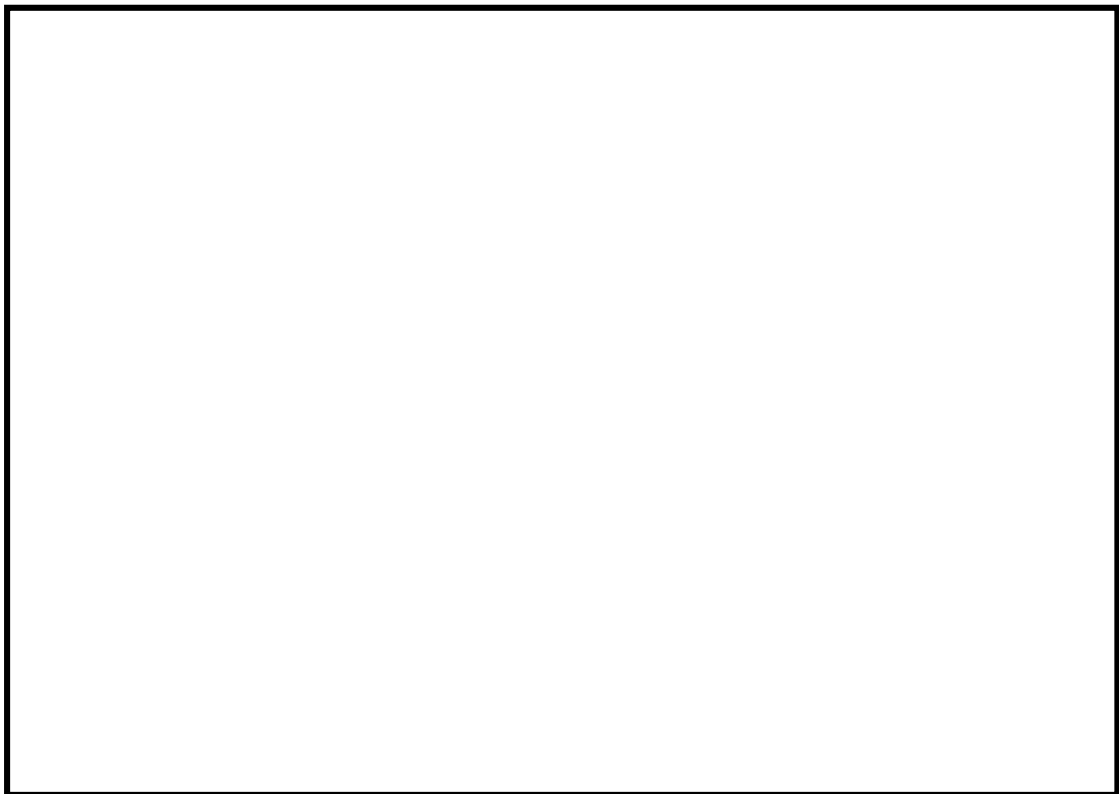
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第3-2図 手順⑤におけるポンプ揚程および性能曲線との関係

【2次系純水タンク（2次系純水ポンプ使用）からの注水流量（注水手順②-1）】

3-1. (1)a. に示す通り恒設設備を使用し通水実績がある手順であるため、通水時の実測値として第4図に示す通り、 $5\text{m}^3/\text{h}$ を使用する。



第4図 2次系純水ポンプ 流量出典（水張ライン使用時の実測値）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【2次系純水タンク（脱気塔経由）からの注水流量（注水手順②-2）】

3-1. (1)b. に示す通り、恒設設備を使用し通水実績が無い手順であるため、圧損揚程曲線を策定のうえ流量を評価する。

・静水頭差等の条件

第5表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第5表 水源と移送先の静水頭差（手順②-2）

	手順②-2	備考
取水源 E. L		タンク100%水位E. L
移送先 E. L		SFP戻り配管放出端
静水頭差(移送先E. L. - 取水源E. L.)	10.41 m	—

また圧損計算に使用した系統内配管等の情報を第6表に示す。

第6表 系統内配管情報

配管仕様 [インチ]	2	3	4
内径 [mm]	52.5	80.7	105.3
総配管長さ [m]	51.2	96.5	5.45
90° エルボ数 [個]	9	10	4
45° エルボ数 [個]	0	6	0

・評価結果

評価結果を第5図に示す。ポンプ揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は約54m³/hであり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

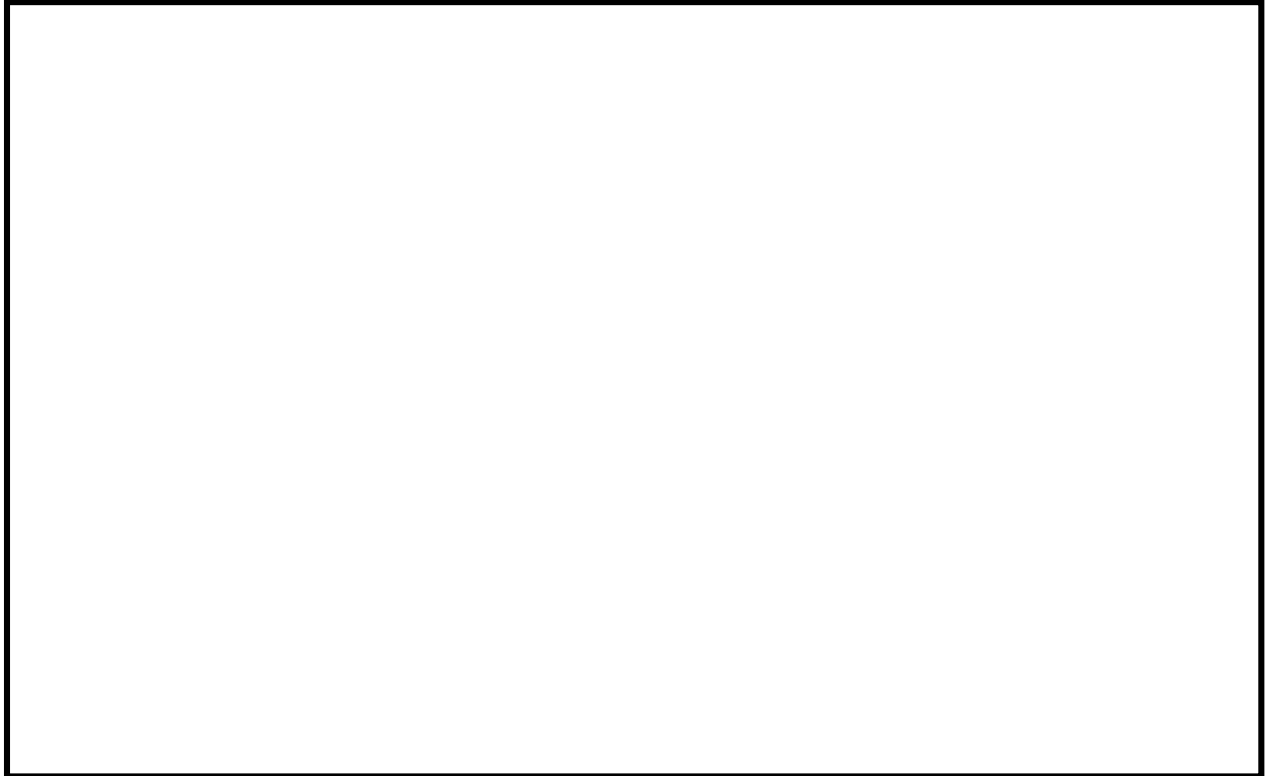


第 5 図 脱気水ポンプ 流量出典

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【1,2号淡水タンクからの注水流量（注水手順③）】

3-1. (1)a. に示す通り恒設設備を使用し通水実績がある手順であるため、通水時の実測値として第6図に示す通り、22m³/hを使用する。



第6図 消火栓を用いた注水 流量出典

【2次系純水タンク（消防ポンプ使用）からの注水流量（注水手順④）】

3-1-1. (2)に示す通り、可搬型設備を使用する手順であるため、ポンプ揚程曲線を用い系統圧損等を踏まえ評価する。

・評価条件

第7表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第7表 水源と移送先の静水頭差（手順④）

	手順④	備考
取水源 E. L		タンク100%水位E. L
移送先 E. L		SFP戻り配管放出端
静水頭差(移送先E. L. - 取水源E. L.)	-14.27 m	—

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

また圧損計算に使用した系統情報を第8表に示す。なおホース敷設長さは、高浜1号および2号炉それぞれへの敷設ルートの最短ルート（1号炉東側シャッターからの敷設ルート）の長さとした。

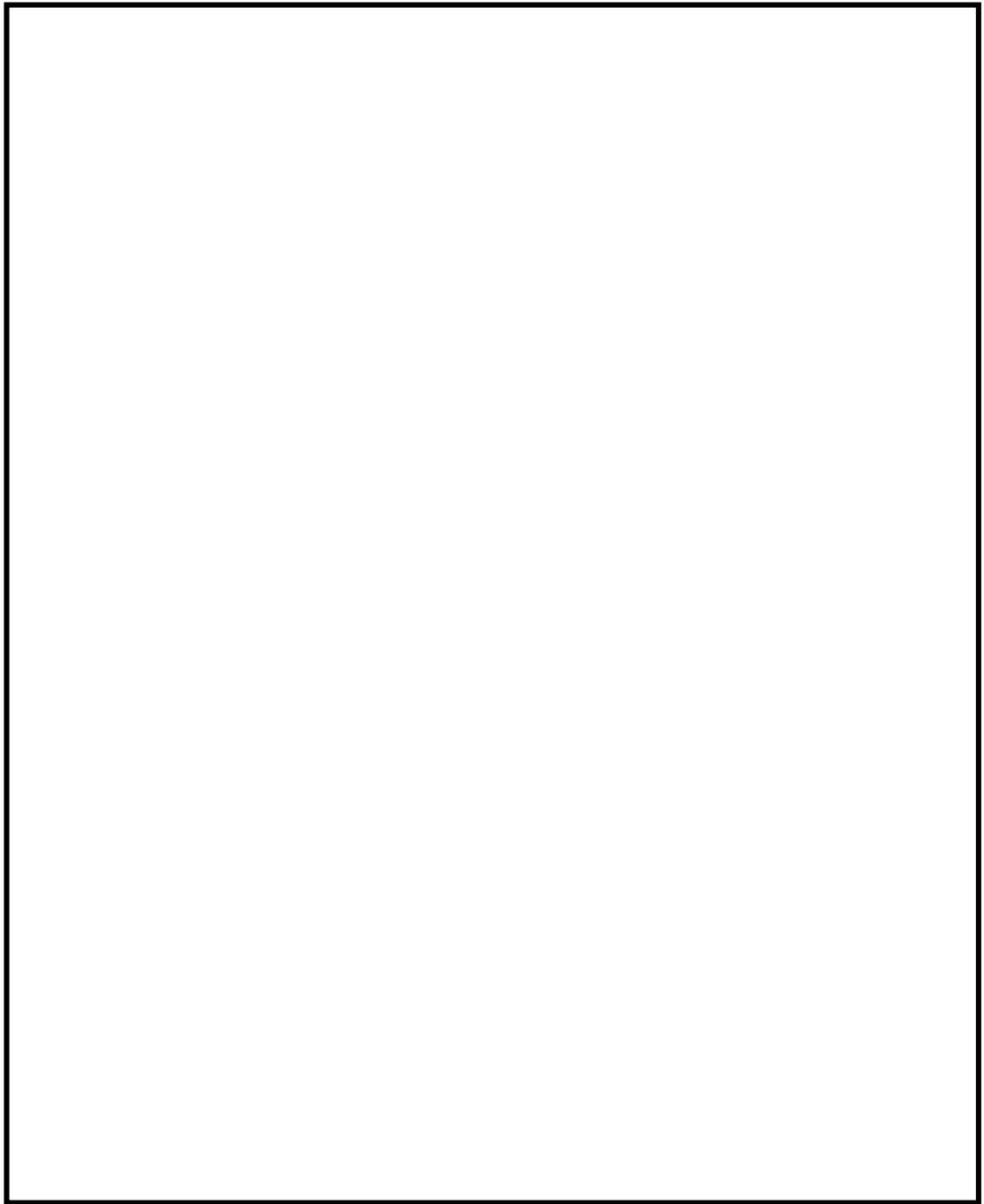
第8表 系統内配管情報

ホース情報		備考
敷設ホース仕様		—
内径 [mm]		当該ホース仕様における省令上の内径上限値
敷設長さ [m]		最短敷設ルートでの敷設長さ

・評価結果

評価結果を第7図に示す。ポンプ設計揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は約95m³/hである。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第7図 消防ポンプ 流量出典

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【海水（送水車使用）からの注水流量（注水手順⑥）】

3-1-1. (2)に示す通り、可搬型設備を使用する手順であるため、圧損揚程曲線を策定のうえ流量を評価する。

・評価条件

第9表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第9表 水源と移送先の静水頭差（注水手順⑥）

	手順⑥	備考
取水源 E. L		タンク100%水位E. L
移送先 E. L		SFP戻り配管放出端
静水頭差(移送先E. L. - 取水源E. L.)	28.8 m	—

本評価における配管圧損は、手順②-2の配管圧損評価と同じとする。計算に使用した系統情報を第10表に示す。なおホース敷設長さは、1号および2号炉それぞれへの敷設ルートの最短ルート（1号炉西側シャッターからの敷設ルート）の長さとした。

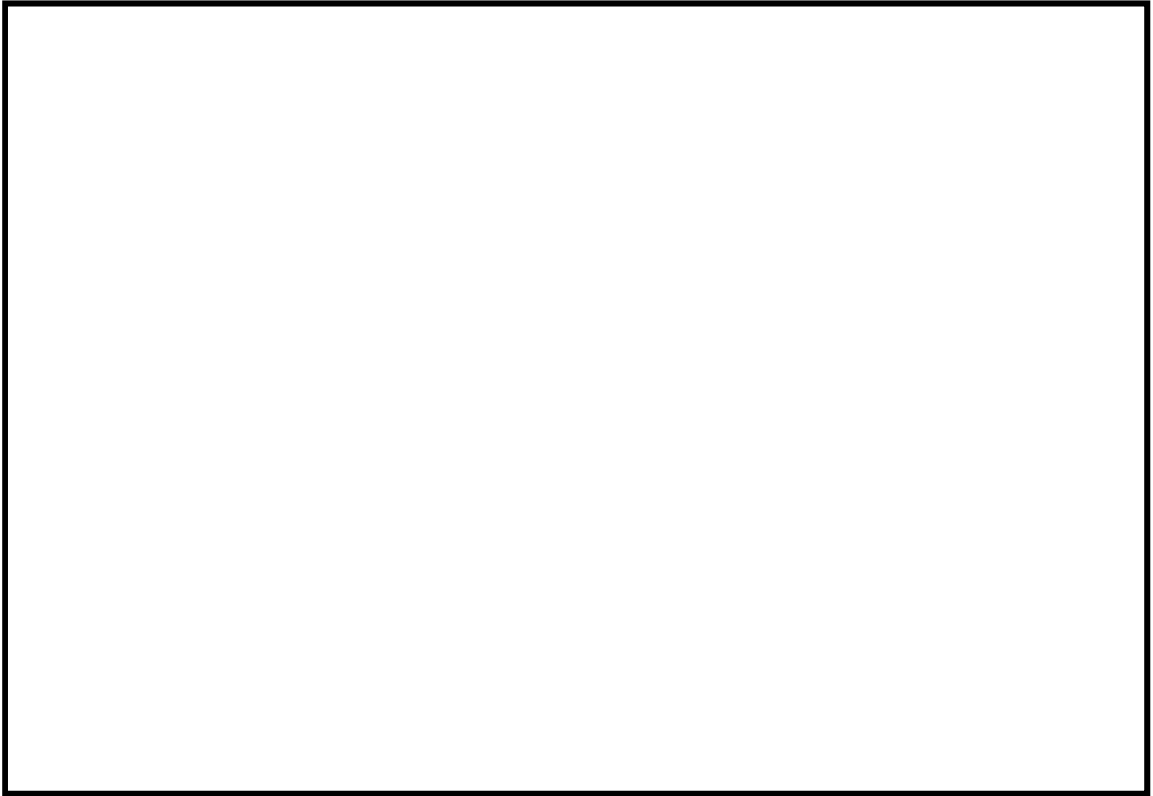
第10表 系統内配管情報（注水手順⑥）

ホース情報		備考
敷設ホース仕様		—
内径 [mm]		当該ホース仕様における省令上の内径上限値
敷設長さ [m]		最短敷設ルートでの敷設長さ

・評価結果

評価結果を第8図に示す。ポンプ設計揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量を踏まえ、基本ケース条件としては260m³/hを使用する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

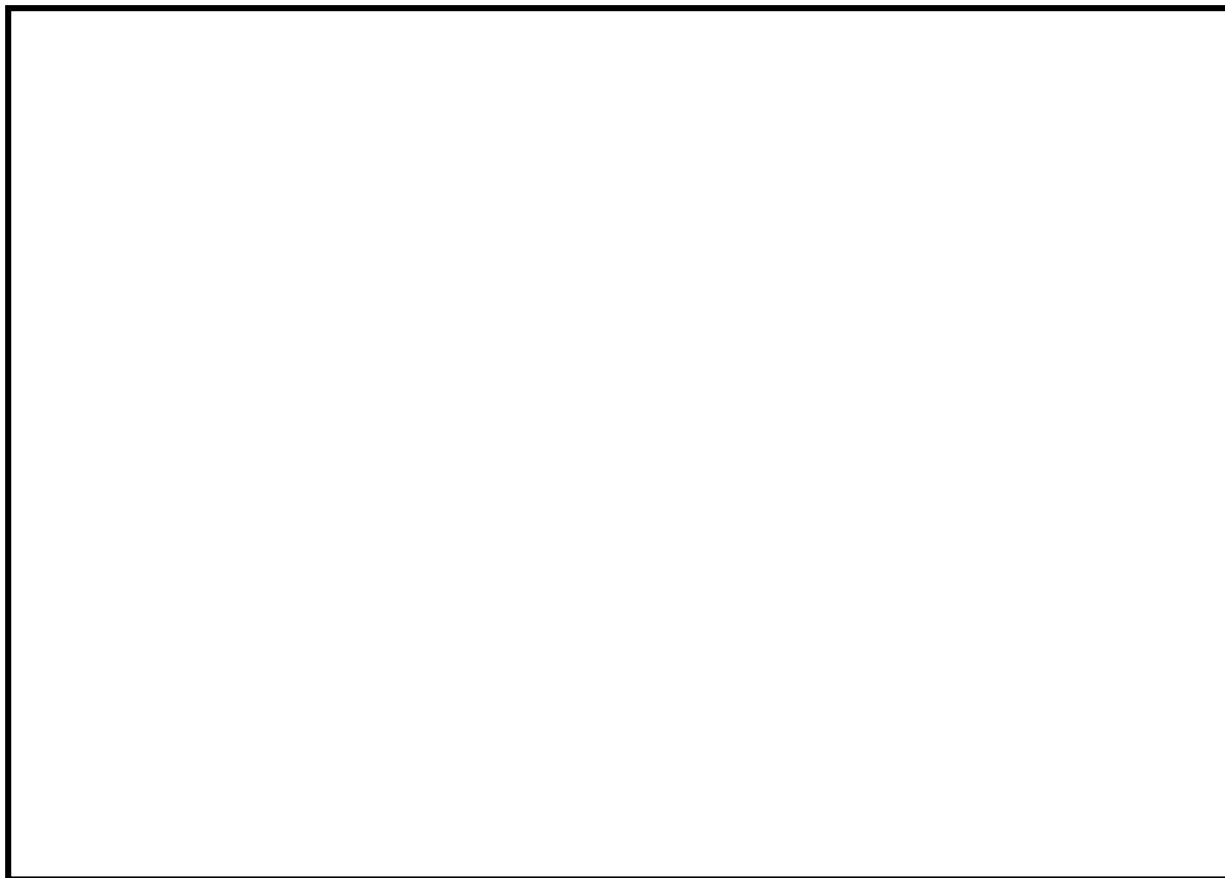


第 8 図 送水車 流量出典

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【送水車を使用したスプレイヘッドによる放水流量（放水手順①）】

3-1-2. (1)に示す通り、第8図に示す放水設備であるスプレイヘッドの仕様上限値として、第9図に示す通り m³/hとする。



第9図 スプレイヘッドを用いた放水手順の流量

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【大容量ポンプ（放水砲用）を使用した放水砲による放水流量（放水手順②）】

放水手順②については、3-1.(4)に示す通り、配備されている大容量ポンプ（放水砲用）の型式および設備構成を踏まえ設定する。

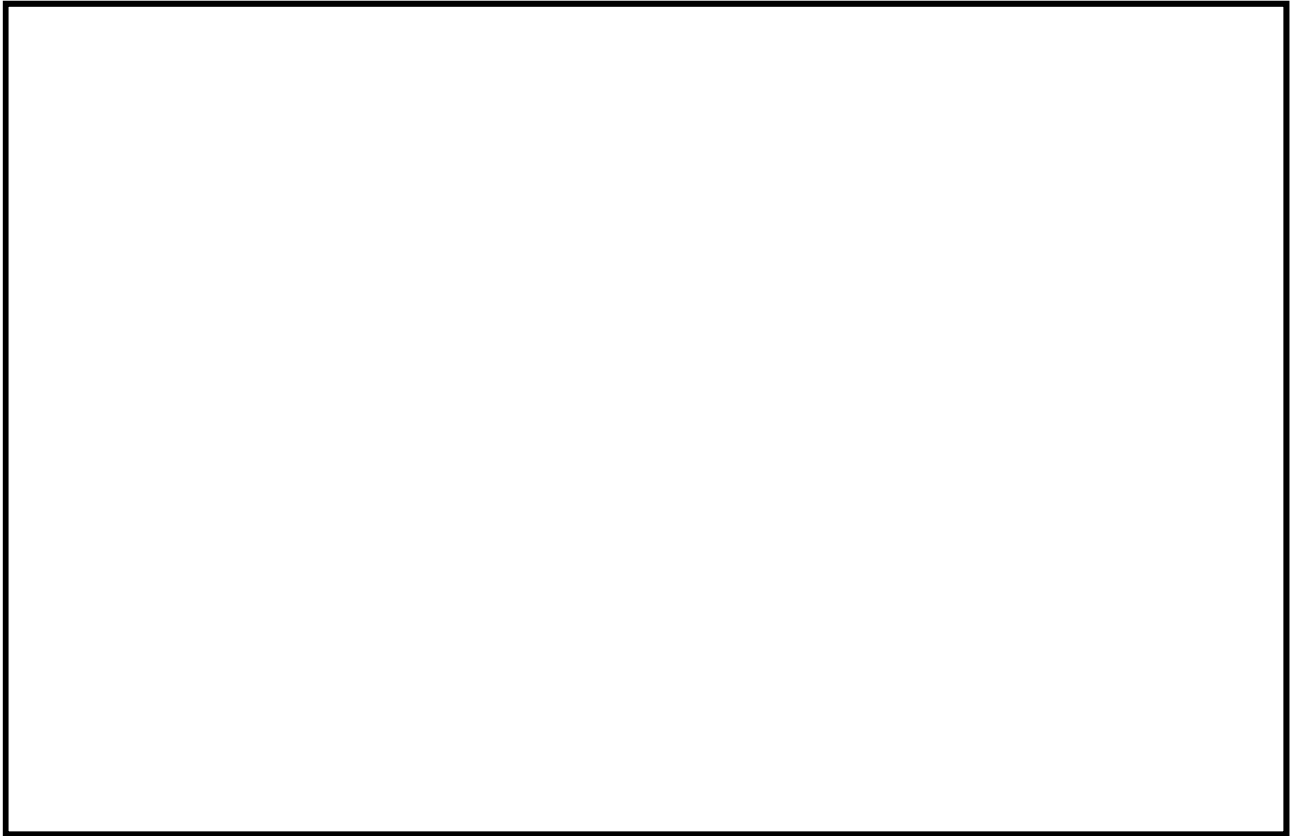
具体的には、高浜発電所に配備されている大容量ポンプ（放水砲用）の型式はそれぞれ第11表に示す3種類があり、各型式の流量最大値は第9-1～3図に示す通りそれぞれ m³/h（型式：HS900）、 m³/h（型式：HS900N）、 m³/h（型式：HS1200）である。これらを直列に2台接続する場合の最大送水量は m³/h（HS900およびHS1200を用いる場合に送水量が最大となる。送水量は、ポンプを2台直列に接続する運用であることから容量の低い方のポンプと同値になる。）となることから、放水砲からの流量は m³/hを2等分した m³/hとなる。

なお大容量ポンプ（放水砲用）にはポンプ入口まで海水を送水する水中ポンプが備わっており、水中ポンプは油圧駆動でポンプインペラを回転させ水を吐出する構造となっている。流量増加の際はインペラへ油圧をかけることになるが、大容量ポンプ（放水砲用）の揚程曲線上の最大送水量において作動油圧上限値に達し、当該上限値以上の油圧が水中ポンプにかかることがない機構となっているため、大容量ポンプ（放水砲用）の流量が当該上限値以上となることはない。

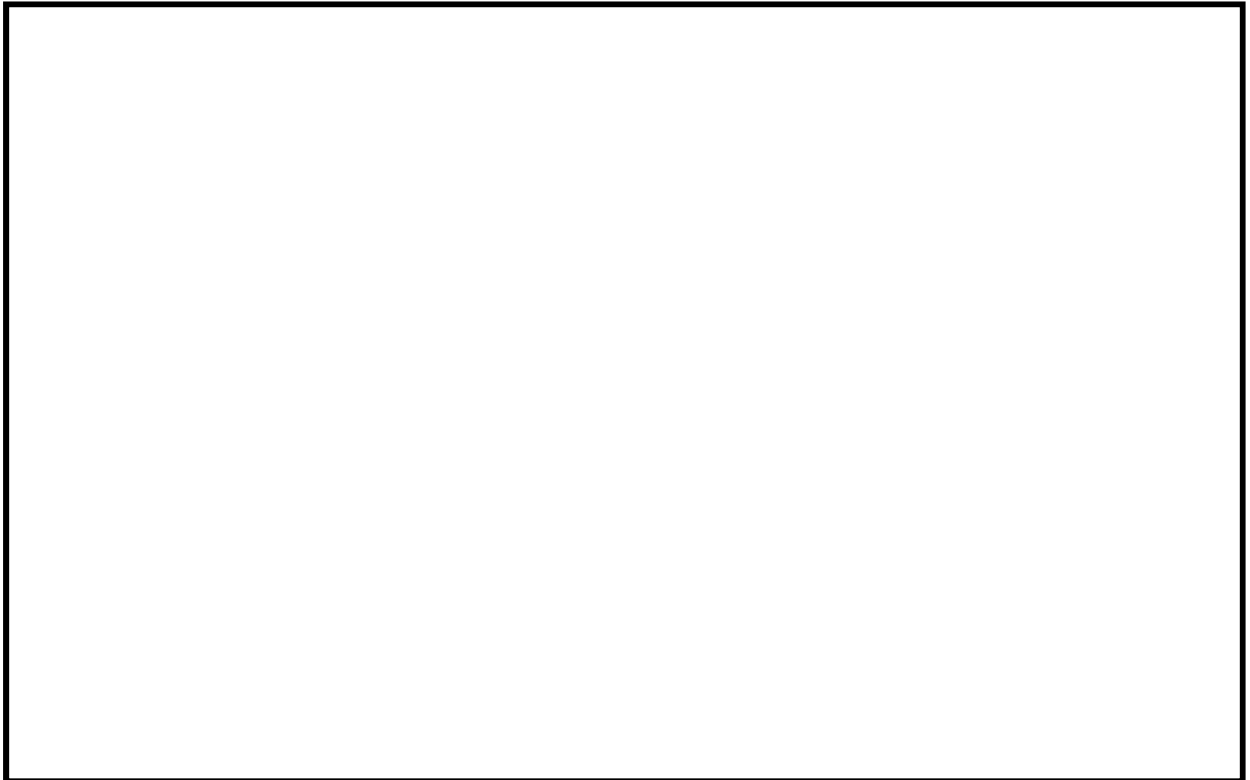
第 11 表 高浜 1, 2 号炉に配備している大容量ポンプ（放水砲用）の型式

型式	HS900 (1, 2 号炉共用)	HS900N (1, 2 号炉共用)	HS1200 (共用予備)
既工認記載値	<input type="text"/> m ³ /h 以上		

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

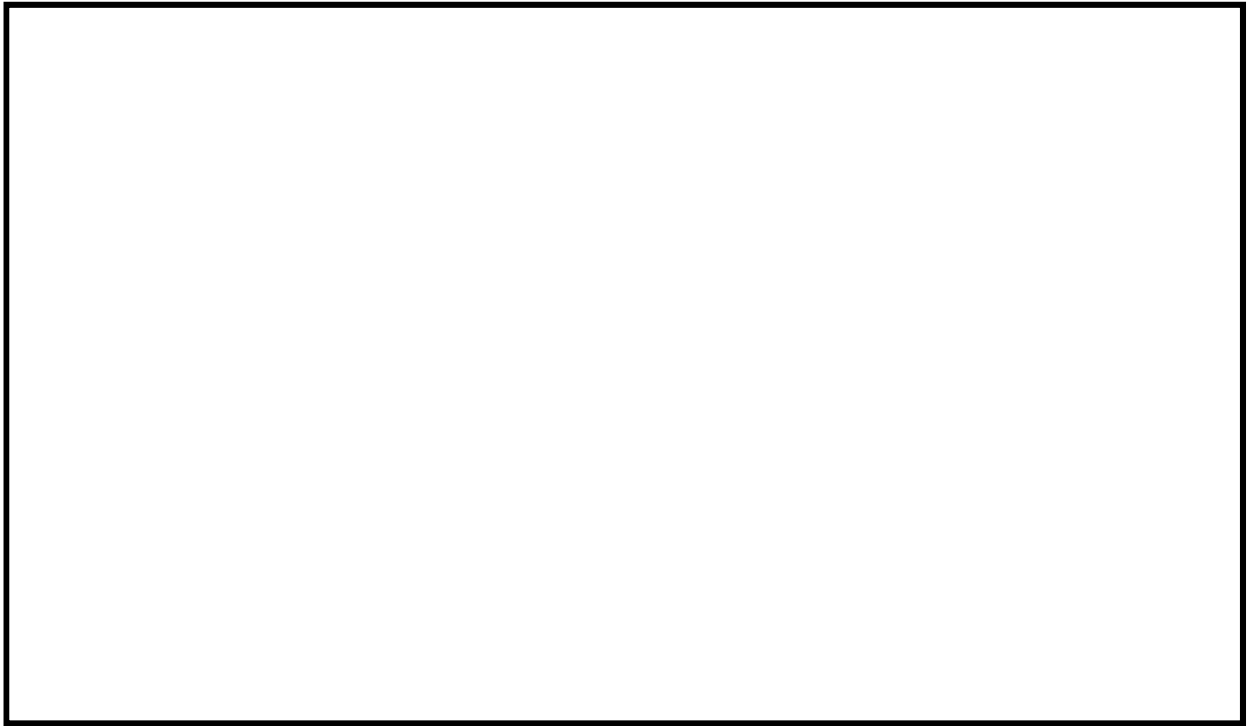


第 9-1 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS900）



第 9-2 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS900N）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 9-3 図 大容量ポンプ（放水砲用）流量出典（HS1200）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

5. 不確かさを考慮した条件の設定について

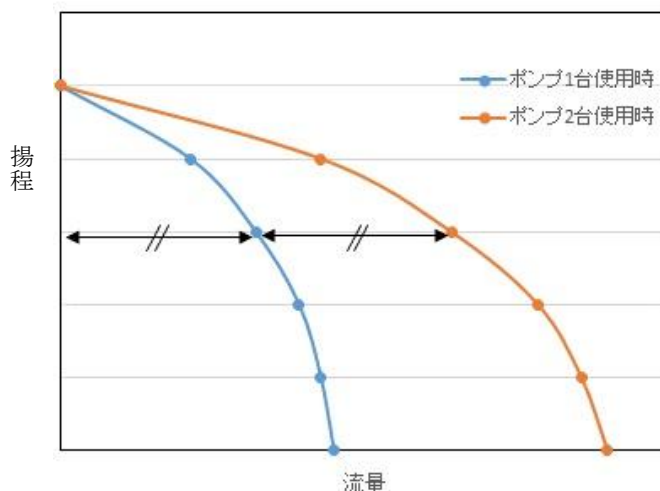
不確かさを考慮した条件の設定に際しては、実施手順数および系統内ポンプの使用台数について以下の前提を置き、基本ケース条件に対する不確かさとして系統内に設置されるポンプの全数起動を想定する。

a. 実施手順数

基本ケース条件と同様にSFPへの注水・放水に係る全手順の同時実施を想定する。

b. 各手順における系統内ポンプの使用台数

系統内に設置されるポンプの全数とする。なおポンプの複数台起動を想定するに当たり、ポンプの設計揚程曲線は第10図に示す通り、ポンプ1台時の設計揚程曲線の流量にポンプ台数を乗じて求められる曲線を使用する。またポンプ1台での通水実績がある手順については、流量増加に伴う配管圧損増加の影響を無視する保守的な設定として、ポンプ1台での通水実績（基本ケース条件）にポンプの系統内設置台数を乗じることで算出する。



第10図 ポンプ複数台使用時の揚程曲線設定（2台起使用時の概要）

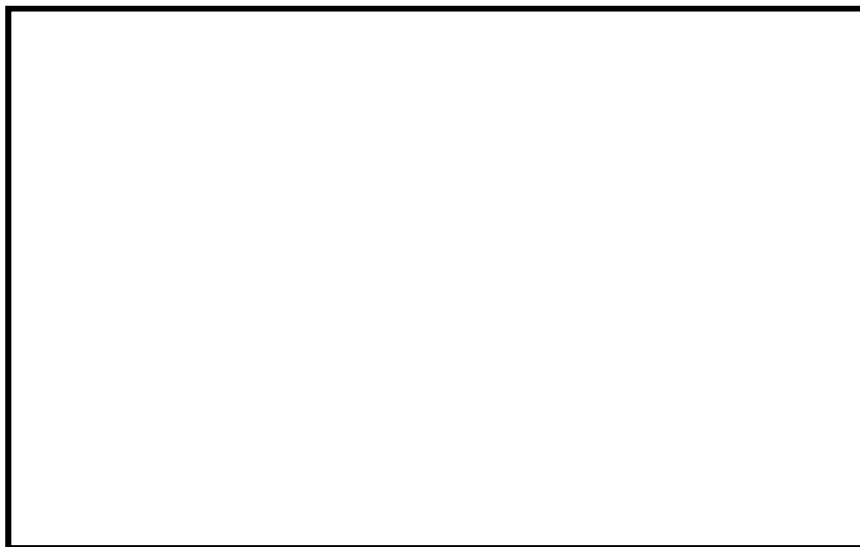
上記の前提および3-1.に示す具体的考え方に基づき、各手順における流量の不確かさを考慮した条件を設定する。なお基本ケース条件からの変更点は使用するポンプ台数のみであり、系統圧損の評価手法および水源-SFPの水頭差は変わらないことから、以降では各手順での評価結果のみを示す。

【燃料取替用水タンクおよび1次系純水タンクからの注水流量（注水手順①および手順⑤）】

評価結果を第11-1, 2図に示す。ポンプ設計揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は、手順①で約52m³/h、手順⑤で約31m³/hであり、不確かさを考慮した条件の設定においては当該流量を使用する。



第11-1図 手順①におけるポンプ揚程および性能曲線との関係



第11-2図 手順⑤におけるポンプ揚程および性能曲線との関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【2次系純水タンク（2次系純水ポンプ使用）からの注水流量（注水手順②－1）】

3-1. (1)a. に示す通り恒設設備を使用し通水実績がある手順であるため、基本ケース条件にポンプ台数を乗じた値として $5\text{m}^3/\text{h} \times 3\text{台} = 15\text{m}^3/\text{h}$ を、不確かさを考慮した条件として使用する。

【2次系純水タンク（脱気塔経由）からの注水流量（注水手順②－2）】

評価結果を第12図に示す。ポンプ設計揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は約 $72\text{m}^3/\text{h}$ であり、不確かさを考慮した条件の設定においては当該流量を使用する。



第 12 図 脱気水ポンプ 複数台起動時

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【1,2号淡水タンクからの注水流量（注水手順③）】

3-1. (1)a. に示す通り恒設設備を使用し通水実績がある手順であるため、基本ケース条件にポンプ台数を乗じることとし、さらに接続消火栓の数（3か所）も乗じた値として、 $22\text{m}^3/\text{h} \times 2\text{台} \times 3\text{か所} = 132\text{m}^3/\text{h}$ を、不確かさを考慮した条件として使用する。

【2次系純水タンク（消防ポンプ使用）からの注水流量（注水手順④）】

系統内設置台数は基本ケース条件と同じであることから、不確かさを考慮した条件は基本ケース条件と同じ $95\text{m}^3/\text{h}$ を使用する。

【海水（送水車使用）からの注水流量（注水手順⑥）】

ポンプの系統内設置台数は基本ケース条件と同じであることから、不確かさを考慮した条件は基本ケース条件と同じ $260\text{m}^3/\text{h}$ を使用する。

【送水車を使用したスプレイヘッドによる放水流量（放水手順①）】

不確かさを考慮した条件は基本ケース条件と同様に、スプレイヘッドの仕様上限値である m^3/h を使用する。なおポンプの系統内設置台数は基本ケース条件から変更はない。

【大容量ポンプ（放水砲用）を使用した放水砲による放水流量（放水手順②）】

不確かさを考慮した条件は基本ケース条件と同様に、ポンプ2台を直列に2台接続する場合の放水砲放水流量として m^3/h を使用する。なおポンプの系統内設置台数は基本ケース条件から変更はない。

6. 系統に複数台設置されるポンプの起動台数の考え方について

流量の基本ケース条件の設定に当たっては原則最確値を設定する観点から、1 手順につき 1 台の起動を想定している。手順よっては系統内に複数台のポンプが設置されているものがあるが、それらは事故時の対応に多重性を持たせるため、あるいは点検や故障等のため使用できない場合におけるバックアップの位置づけである。また第 13 図に実際の事故時に使用する手順書の例を示すが、注水ラインの形成に当たっては片側ラインずつ形成する前提としていることも読み取れることから、1 手順につき 1 台の起動を想定することは妥当と判断している。なお仮に全台を起動させたとしても系統圧力等の観点から設備に悪影響を与えることはない。

一方で、不確かさを考慮した条件には、ポンプを全数起動することを想定した値を設定する。

【空冷式非常用発電装置の起動手順（抜粋）】

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

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

No.	担当	作業要領	確認および注意事項	確認
[空冷式非常用発電装置 現地起動（中央制御室より起動できない場合の処置）]				
1	発電所長	当直課長からの指示により、発電所長は電気保修課長へ、3 A、B空冷式非常用発電装置の現地での起動を指示する。	空冷式非常用発電装置制御盤扉および給油用扉、タンクローリー等の鍵束を準備する。（鍵を保管場所にて準備する）	
2	電気保修課長	電気保修員は、以下の手順により接続状態の健全性の確認を行う。 (1) 中継・接続盤の外観確認を行う。 (2) 中継・接続盤にてケーブルコネクタが正常に接続されていることを確認する。	添付図—1 使用できる状態であること。 赤マーカー赤マークで接続：4箇所 白マーカー白マークで接続：4箇所 青マーカー青マークで接続：4箇所 【3相×2条×2台分】	
3	電気保修課長	電気保修員は、3 A、B空冷式非常用発電装置の起動前点検を行う。 (1) 2台の空冷式非常用発電装置の同期ケーブル接続を確認する。 (2) 2台の空冷式非常用発電装置の車体接地を確認する。 (3) 水漏れ・油漏れ等の確認 (4) ディーゼル発電機制御盤に警報が発信していないこと。	確実に接続されていること。 確実に接続されていること。 異常のないこと。 状態表示灯で「HEAVY FAULT」および「CPU ERROR」が点灯していないこと。	
4	電気保修課長	電気保修員は、3 A (B) 空冷式非常用発電装置を現地にて起動する。 (1) 3号機A、Bのメタクラ負荷の切離しが完了していることを運転員等に確認する。 (2) 空冷式非常用発電装置の制御盤扉を開け、「READ」ボタンを押し、画面を起動する。	長時間操作しない場合には、都度「READ」ボタンを押し、画面を起動する。	

No.	担当	作業要領	確認および注意事項	確認
		(3) キースイッチを「AUTO」から「MANUAL」位置にする。	操作前にキーを挿入する。	
		(4) 「START」ボタンを長押し（1秒以上）、空冷式非常用発電装置を起動する。		
		(5) キースイッチを「MANUAL」から「AUTO」位置にする。	操作後にキーを抜く。	
		(6) 定格電圧600V、定格回転数1800rpmになることを確認する。	空冷式非常用発電装置制御盤にて電圧・周波数等確認。 「FUN」ボタンを1回押すと、定格周波数60Hzを確認でき、5回押すと元の画面に戻る。 起動後に電圧、周波数が確立すれば、出力しゃ断器が自動投入される（「FCB」表示「緑消灯、赤点灯」）。	
		(7) 発電所長の指示により、3 B (A) 空冷式非常用発電装置を(2)から(6)の手順で起動させる。	空冷式非常用発電装置は、2台目同時で自動で1台目との同期をとる。出力しゃ断器が自動投入される。	
5	電気保修課長	電気保修員は、発電所長へ3 A、B空冷式非常用発電装置の起動が完了したことを報告する。 また、当直課長へ連絡する。		
6	電気保修課長	電気保修員は、3 A、B空冷式非常用発電装置の点検を行い、異常のないことを確認する。		
7	当直課長	運転員等は、受電後の負荷の自動起動を防止するため、各負荷の中央制御室で操作スイッチを「切」または「引断」とする。	【事故時操作所則（第2部）（第3部）にて対応】	
8	当直課長	運転員等は、現場の安全補機開閉器において不要なパワーセンタおよびコントロールセンタ負荷の切り離しを行う。	【事故時操作所則（第2部）（第3部）にて対応】	
9	当直課長	運転員等は、3号機安全補機開閉器にて空冷式非常用発電装置受電遮断器を投入し、メタクラの発電を確認する。	【事故時操作所則（第2部）（第3部）にて対応】	

片ラインを起動させることを「A (B)」と記載したうえで、他方のラインも起動させる場合は「B (A)」と記載している。

【SFP への水補給手順（抜粋）】

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

別表

高浜3号機 1次系純水タンクからの水補給のための操作

1. 1次系純水タンクからの注水準備ラインアップ

場所	弁番号	弁名称	状態	注意事項	確認
A/B 17 m	3V-WS-018	3使用済樹脂スルースポンプ出口弁	×		
A/B 17 m	3V-SF-026A	3A使用済燃料ビット脱塩塔入口弁	×		
A/B 17 m	3V-SF-026B	3B使用済燃料ビット脱塩塔入口弁	×		
A/B 10 m	3V-WS-027	3使用済樹脂スルースライン止め弁	○		

2. 1次系純水タンクからの注水操作

順序	確認および注意	注意事項等	確認
1	3号機A(B)使用済燃料ビット脱塩塔樹脂逆洗移送水止め弁(SF-032A(B))を開く。		
2	3号機使用済樹脂スルースライン絞り弁(WS-022)を全開にする。		
3	3号機A(B)1次系補給水ポンプを起動する。		
4	3号機使用済樹脂スルースライン補給水止め弁(WS-017)を開く。		
5	3号機使用済燃料ビットの水位(LI-652)を確認する。		
6	3号機使用済燃料ビットへの水補給が完了すれば、使用済樹脂スルースライン補給水止め弁(WS-017)を閉じる。		
7	3号機使用済樹脂スルースライン絞り弁(WS-022)を調整開にする。		

片ラインのみ起動する
記載となっている。
(B(A)のポンプを起動
する、とは記載してい
ない。)

第13図 事故時の対応（抜粋）

7. 全手順同時実施の成立性確認

流量条件の設定に当たっては、54条2項に係る対応として整備した全手順が同時に実施されることを想定しているが、各手順で使用する水源の容量や手順実施に必要な人員の数および手順毎の所要時間を踏まえ、全手順同時実施の成立性を確認した。なお本項では不確かさを考慮した流量での成立性を確認し、そうすることで基本ケース条件での同時実施成立性の確認を兼ねる。

海水以外を水源とする手順における水源の容量を第12表に示す。またSFPからの大量の水の漏えい発生時における対応フローおよび手順の有効性確認において使用されている各手順の所要時間を踏まえ、各手順を順に実施した場合の想定タイムチャートを第14図に示す。不確かさを考慮した流量で各水源を使用したとしても、放水砲による放水を実施するまで連続で水を補給することが可能である。また、より人員が必要となる放水砲による放水手順を、他手順を実施したのちに実施する想定としており、要員数の観点からも想定タイムチャートは成立しうるものである。

よって、不確かさを考慮した流量による全手順の同時実施は、要員や水源容量を踏まえても成立しうる。

第12表 使用済燃料ピットへの水補給において使用する水源の容量について

水源	容量 (補給可能水量)	不確かさを考慮した流量 での連続補給可能時間 ^{※3}	補給開始から放水砲による放水 までの時間 (第12図より)
燃料取替用水タンク	1325m ³ ^{※1}	約25時間	約9時間
2次系純水タンク	2700m ³ ^{※2}	約15時間 ^{※4}	約9時間
1, 2号機淡水タンク	15600m ³ (3120m ³ ^{※2} × 5基)	約118時間	約6時間
1次系純水タンク	510m ³ ^{※2}	約16時間	約3.5時間

※1: 保安規定値。 ※2: 有効水量として評価した値。 ※3: 容量をSFP内に全量補給可能な水量として計算した値。

※4: DB向けの手順および消防ポンプ使用手順の流量合計を使用し計算した値。

水源		実施要員 (人数)	時間									
			SA設備準備開始					放水砲放水開始				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DB	燃料取替用水タンク	運転員等 (1名)	約40分									
	2次系純水タンク	運転員等 (1名)	約20分									
多様性	1, 2号機淡水タンク	緊急時安全対策要員 (3名)										
	2次系純水タンク (消防ポンプ)	緊急時安全対策要員 (5名)										
	1次系純水タンク	緊急時安全対策要員 (2名)										
SA	海水注水 (送水車使用)	緊急時安全対策要員 (5名)										
	海水スプレー (送水車使用)	緊急時安全対策要員 (5名)										
	海水放水 (大容量ポンプ使用)	緊急時安全対策要員 (12名)										

第14図 全手順同時実施を想定したタイムチャート

8. まとめ

高浜1、2号炉の未臨界性評価条件となるSFPへの流入流量について、各手順の系統構成および設備配備台数等を踏まえ、基本ケース条件および不確かさを考慮した条件を評価した。3.で求めた各手順の流量評価結果を第13-1,2表に纏める。未臨界性評価における流量の基本ケース条件および不確かさを考慮した条件は、注水・放水手順の流量合計値として、それぞれ□m³/h、□m³/hとなる。

なお大規模損壊における柔軟な事故対応を踏まえた流量条件として、片号炉のみの被災を想定し、非被災号炉からの放水砲による流量も流入するとした流量として、不確かさを考慮した流量に更に2台目の放水砲流量□m³/hを加算した□m³/hでの条件を参考ケースにおいて設定する。

第13-1表 SFPへの注水手順の流量評価結果一覧

注水手順(ポンプ)	基本ケース流量	不確かさを考慮した流量	根拠
① 燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	43 m ³ /h	52 m ³ /h	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 m ³ /h	15 m ³ /h	実測値
②-2 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ) (脱気塔経由)	54 m ³ /h	72 m ³ /h	ポンプ揚程曲線
③ 1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)	22 m ³ /h	132 m ³ /h	実測値
④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	95 m ³ /h	95 m ³ /h	ポンプ揚程曲線
⑤ 1次系純水タンク(1次系純水ポンプ)	33 m ³ /h	31 m ³ /h	ポンプ揚程曲線
⑥ 海水(送水車)	260 m ³ /h	260m ³ /h	ポンプ揚程曲線
合計	512m ³ /h	657m ³ /h	—

第13-2表 SFPへの放水手順の流量評価結果一覧

放水手順	基本ケース流量	不確かさを考慮した流量	根拠
①送水車によるスプレイ	□m ³ /h	□m ³ /h	スプレイヘッドの仕様上限
②大容量ポンプ(放水砲用)による放水	□m ³ /h	□m ³ /h	ポンプ揚程曲線
合計	□m ³ /h	□m ³ /h	—

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参 考) 設計基準事故向けに整備している 2 次系純水タンクを水源とした SFP 注水手順について

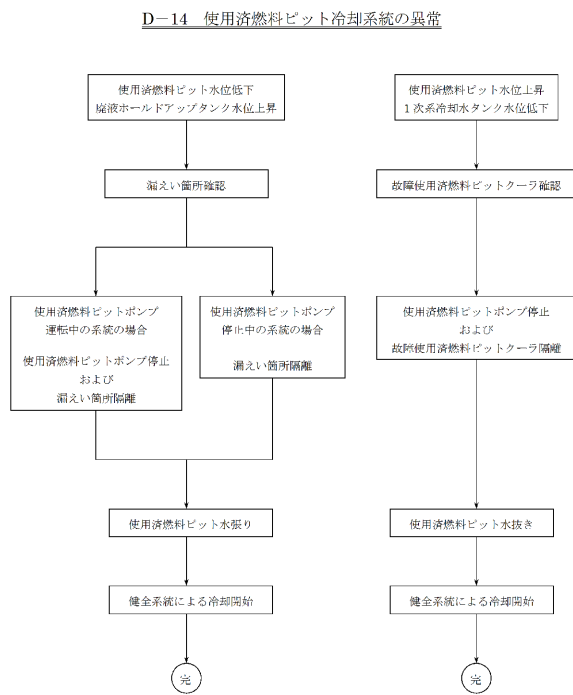
SFP への注水手順のうち手順①および手順②-1、手順②-2 については、設計基準事故事象時の対応（以下 DB 対応）として従来より整備しているものであり、第 1-1 図に示す通り、重大事故等の発生時にはまず DB 対応を試みた後、水位の上昇が確認できない場合には順次フロー下段の多様性拡張設備による対応を実施するとともに重大事故等対処設備による対応の準備を並行して実施する。

このうち手順②は 2 次系純水タンクを水源としており、手順②-1 は 2 次系純水ポンプにより直接 SFP へ注水する手順であり、手順②-2 は 2 次系純水ポンプにより脱気塔へ送水したのち、脱気水ポンプを使用して SFP へ注水する手順である。

SFP における DB 対応は発電所運転員の事故時操作所則および運転操作所則に整備されており、以下の通り洗浄水を使用する手順（注水手順②-1）および脱気水を使用する手順（注水手順②-2）を整備している。

改正 H25.11.8

(抜 粋)



D-14 (1a)

順序	担 当	操 作	確認および注意
2	補機員	破損箇所が、使用済燃料ピットポンプ停止中の系統の場合は、次の操作を行う。	(1) A(B)使用済燃料ピットポンプの運転状態を確認する。
	補機員	(2) 使用済燃料ピットの水位低下により、ポンプ運転継続不能の場合は、A(B)使用済燃料ピットポンプを停止する。	表示灯「赤」→「緑」
	補機員	(3) 破損箇所の隔離を実施する。	
	制御員 補機員		(4) 使用済燃料ピットの水位低下が止まることを確認する。 使用済燃料ピット水位計 LI-651A・651B・652 LQIY-652
	補機員	(6) 使用済燃料ピット水位により、必要があれば通常水位まで水張りを実施する。	a. 使用済燃料ピットのほう素濃度および補給量により、水張りに純水を使用するか、燃料代替用水を使用するか、決定する。 b. 使用済燃料ピット水張りに時間を要する場合は、A(B)使用済燃料ピットポンプ運転可能な水位になれば、次項の操作も並行して実施する。
	補機員	(6) ポンプを停止した場合は、A(B)使用済燃料ピットポンプを再起動する。	a. 表示灯「緑」→「赤」 b. 使用済燃料ピット冷却系統に空気が混入している可能性があるため、使用済燃料ピットポンプ起動時には振動等に注意する。
3	制御員 補機員	使用済燃料ピット水位および温度を監視する。	(1) 使用済燃料ピット水位計 LI-651A・651B・652 LQIY-652 (2) 使用済燃料ピット温度計 TI-651・652A TIA-651 TIY-652

D-14-4 (1a)

参考図 1-1 高浜 1, 2 号炉 事故時操作所則 (抜粋)

(抜 粋)

改正 2019.12.18

改正 2019.12.18

III-31 使用済燃料ピットポンプ

1. 次の各系統が運転中であること。

- (1) 所内電源系統
- (2) 1次系冷却水系統
- (3) 放射線監視装置
- (4) 換気空調系統
- (5) 1次系洗浄水系統
- (6) 1次系補給水系統
- (7) 直流電機系統

2. 主要確認

- (1) 使用済燃料ピット(以下「燃料ピット」と記す。)の水位がEL.31.89m(燃料ピットフロアEL.32.3m 0.41m)にあること。
- (2) 使用済燃料ピットに純水を補給した場合は、循環後必ず使用済燃料ピットのほう素濃度を分析し、2,200ppm以上であること。

3. 注意事項

- (1) 通常、連続運転とする。(I系列運転)
- (2) 使用済燃料ピット脱塩塔は、放射線管理課の連絡により適宜使用する。(使用済燃料ピット水温60℃以上の時は使用しないこと。)
- (3) 1次系冷却水系統Cヘッダ供給温度動向パターン

	温度変化の少ない パターン	昇温効果のある パターン	冷却効果のある パターン
使用中 1次系冷却水クーラ	使用済燃料ピットクーラを切替える場合		
A・B使用中	—————	B→A	A→B
A・C使用中	A→B B→A		
B・C使用中	—————	A→B	B→A
使用中 使用済燃料ピットクーラ	1次系冷却水クーラを切替える場合		
A使用中	A・B→A・C A・C→A・B	B・C→A・C B・C→A・B	A・C→B・C A・B→B・C
B使用中	B・C→A・C A・C→B・C	A・B→A・C A・B→B・C	A・C→A・B B・C→A・B

順序	担当	機 作	確認および注意	関連 画面
[使用済燃料ピット水張り(1次系洗浄水を使用する場合)]				
1	補機	使用済燃料ピット行洗浄水第2弁(V-6130B)を開く。		
2	補機	使用済燃料ピット行洗浄水第1弁(V-6130A)を開く。	手順①-1に該当	
3	制御		使用済燃料ピット水位(L651)で使用済燃料ピット水位が上昇することを確認する。	RF-1
4	補機		使用済燃料ピット水位計(LI-651B)で使用済燃料ピット水位が上昇することを確認する。	
5	補機	使用済燃料ピット水位がNWLになれば、使用済燃料ピット行洗浄水第1弁(V-6130A)を閉じる。		
6	補機	使用済燃料ピット行洗浄水第2弁(V-6130B)を閉じる。	水張り配管からの水が止まることを確認する。	
[使用済燃料ピット水張り(脱気水を使用する場合)]				
1	補機	脱気水装置を起動する。	運転操作所則(タービン関係) 「II-44 純水装置および補給水設備脱塩装置」の項に従う。	
2	補機	使用済燃料ピット1次系補給水供給弁(V-8753)を開く。	手順①-1に該当	
3	補機	脱気水装置脱気水ポンプ出口送水流量調整弁(HCV-3472)を「調整開」にする。	1次系純水タンク補給水流量計(FT-1704)で流量の指示を確認する。	
4	制御		使用済燃料ピット水位(L651)で使用済燃料ピット水位が上昇することを確認する。	RF-1
5	補機		使用済燃料ピット水位計(LI-651B)で使用済燃料ピット水位が上昇することを確認する。	
6	補機	使用済燃料ピット水位がNWLになれば、脱気水装置脱気水ポンプ出口送水流量調整弁(HCV-3472)を閉じる。	1次系純水タンク補給水流量計(FT-1704)の指示が「0m³/h」になることを確認する。	
7	補機	使用済燃料ピット1次系補給水供給弁(V-8753)を閉じる。		
8	補機	脱気水装置を停止する。	運転操作所則(タービン関係) 「II-44 純水装置および補給水設備脱塩装置」の項に従う。	

III-31-1 (1a) [全6頁]

III-31-6/E (1a)

参考図 1-2 高浜 1, 2 号炉 運転操作所則 (抜粋)

(2) 液滴径設定 (基本ケース条件: 1.5mm、不確かさを考慮した条件: 1.0mm) の妥当性について

1. はじめに

SFP未臨界性評価における水分条件である気相部水密度の算出に必要な放水中液滴の落下速度については、スプレーヘッドおよび放水砲による放水の液滴径より計算している。今回評価では、スプレーヘッド実機を使用した試験により取得した液滴データを踏まえた値を、放水砲由来の液滴にも設定することとしている。本資料では、スプレーヘッド実機を用い実施した液滴径計測試験について、および試験結果を踏まえた基本ケース条件および不確かさを考慮した条件の設定について説明する。

2. スプレーヘッド実機を用いた液滴径取得試験

2-1. 試験目的

気相部水密度の算出式($Q/A \cdot V$) [g/cm^3] (Q : 流量 [g/s] A : 面積 [cm^2] V : 液滴下降速度 [cm/s])により評価するが、液滴の下降速度を算出するには放水中の液滴径が必要となることから、スプレーヘッド実機を用いた試験によりスプレー時の液滴径データを取得する。

2-2. 試験方法

第1図に示すように、SFP類似設備にてスプレーヘッドにより放水を行い、燃料ラック頂部高さ相当位置での液滴径を測定した。測定点の配置 (平面図) を第2図に示す。

スプレー時の液滴を、シリコンオイルで満たされた容器に捕獲し、シリコンオイル表面に浮かんだ液滴を画像処理によりサンプリングし、液滴径分布を取得した。液滴捕獲装置の概要を第3図に示す。

流量等の諸条件は、スプレー設備の運用を踏まえ第1表に示す通り設定した。また本試験は計2回行った。

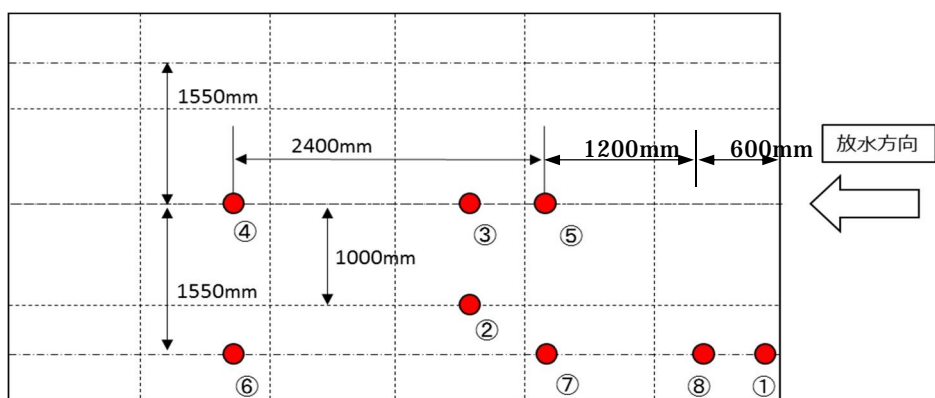
第1表 試験条件

使用設備	スプレーヘッド 可搬型消防ポンプ
流量等	
水	水道水 (常温)

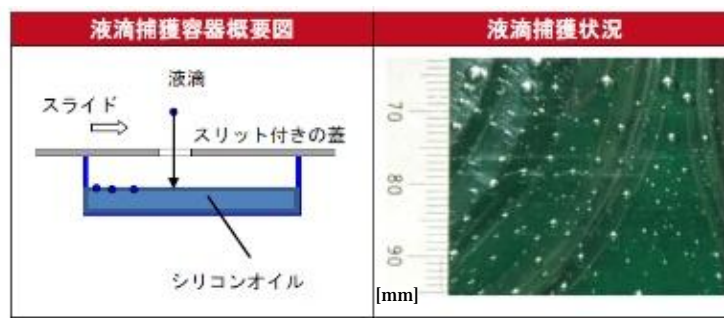
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第1図 液滴径測定試験 試験体系および試験の様子



第2図 液滴径分布測定位置（平面図）



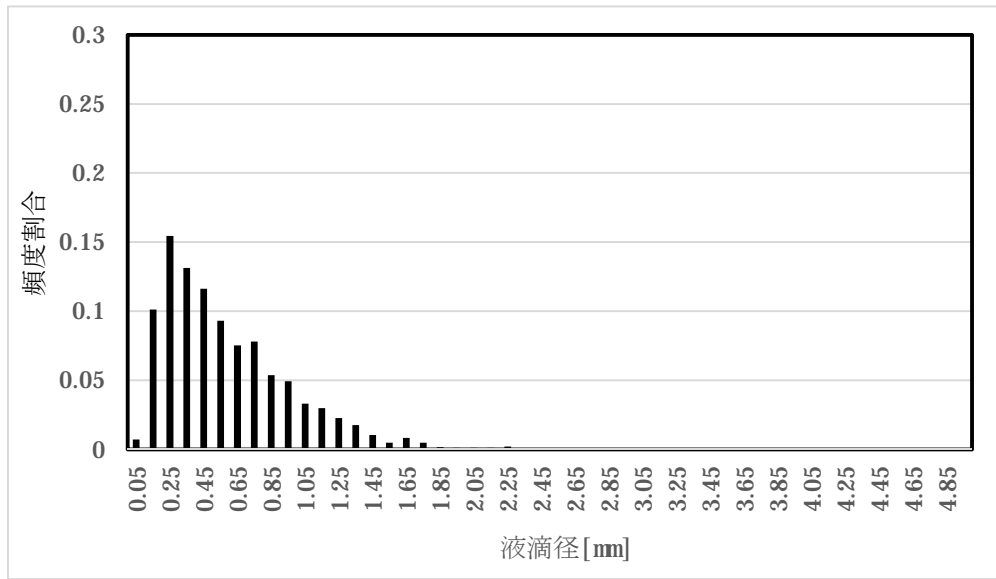
第3図 液滴捕獲装置の概要および取得液滴の様子

3. 試験結果および考察

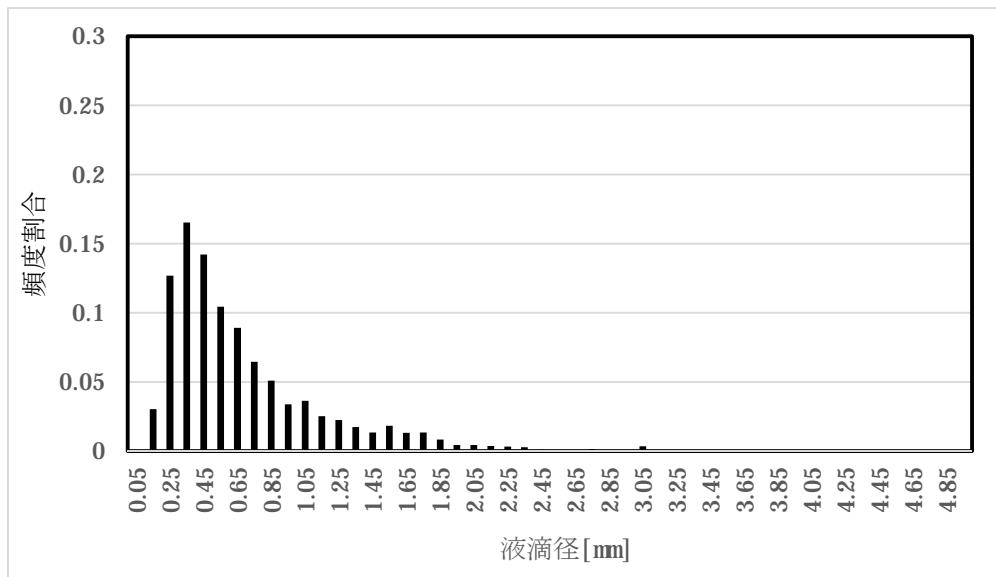
3-1. 試験結果

2回の試験で得られた液滴径毎の個数割合をグラフにしたものを第4-1図および第4-2図に示す。使用済燃料ラック上部におけるスプレイ水は、液滴径**0.2~0.4mm**の液滴が個数としては支配的であり、液滴径が大きくなるにつれ、徐々に個数が減少していく傾向にある。

測定点①

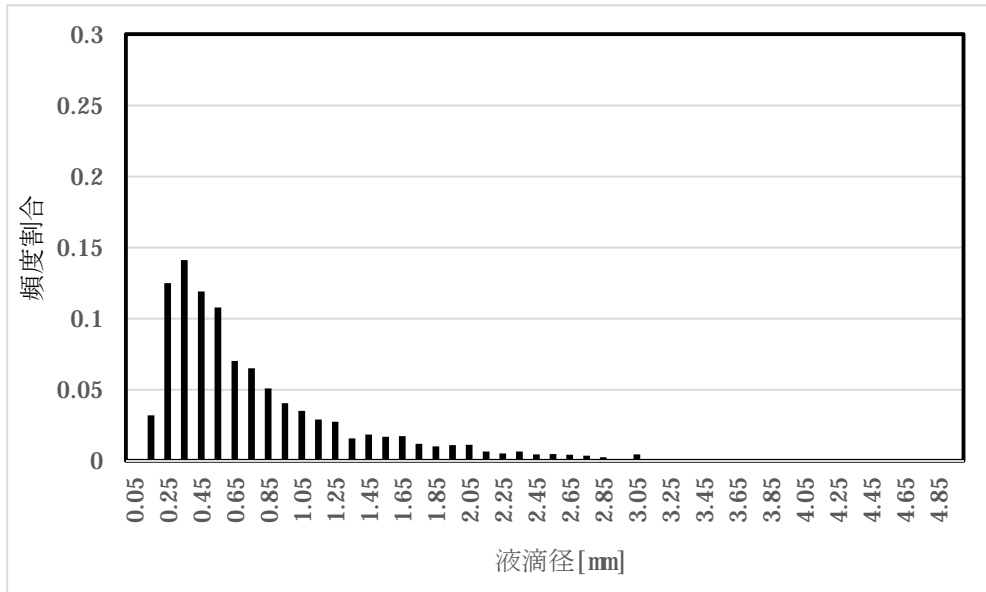


測定点②

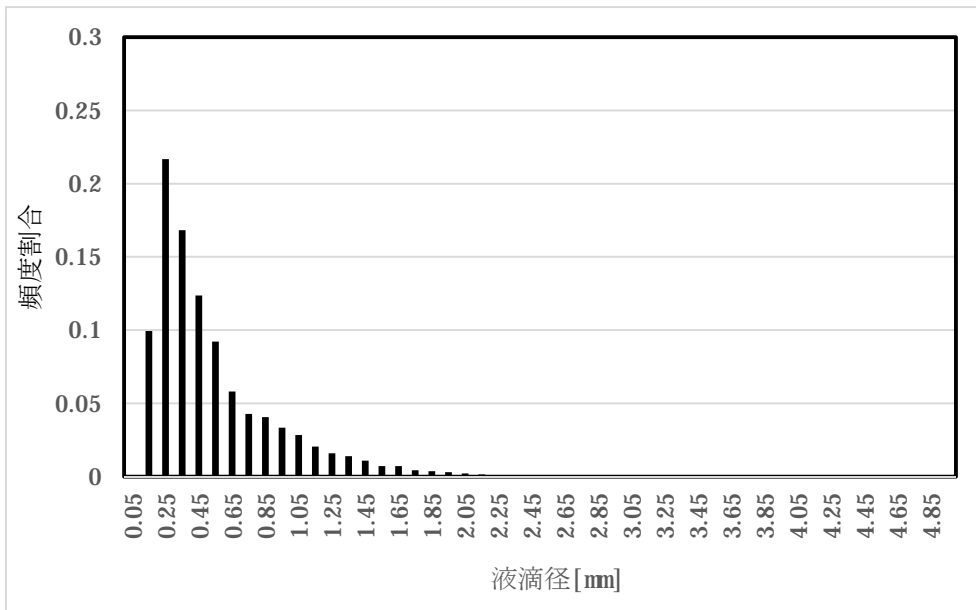


第4-1図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点③

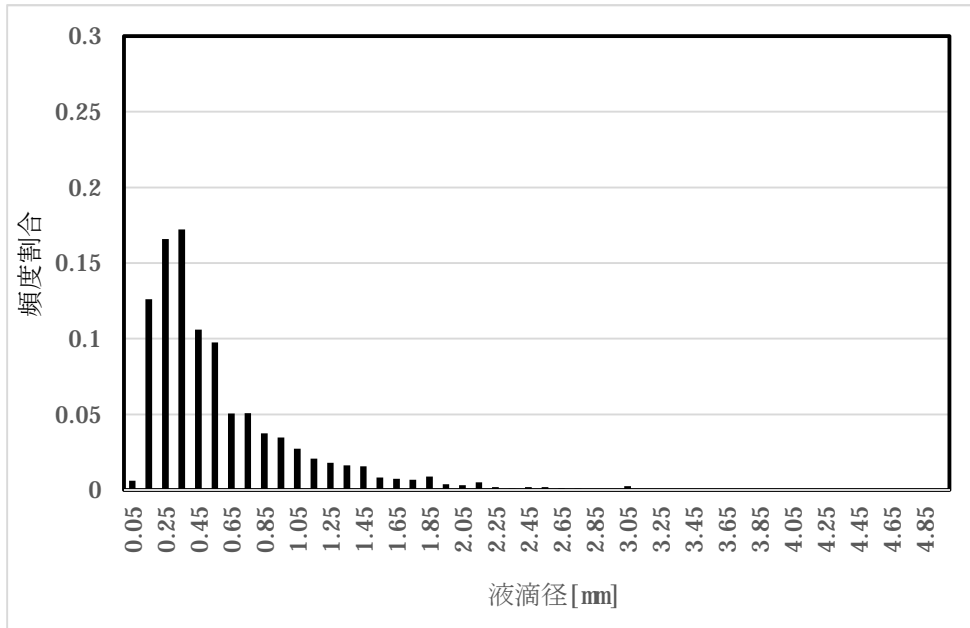


測定点④

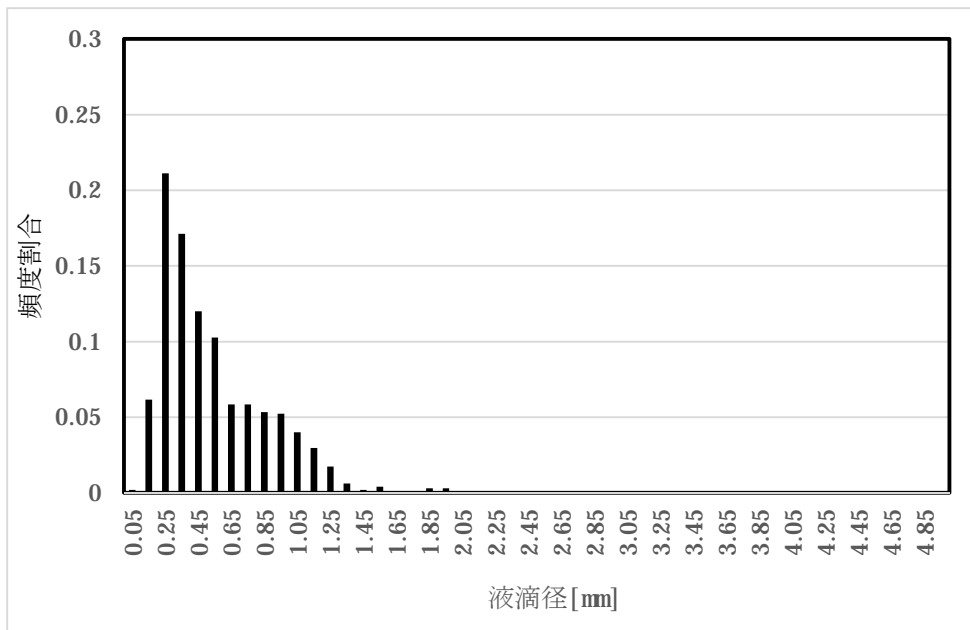


第4-1図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑤

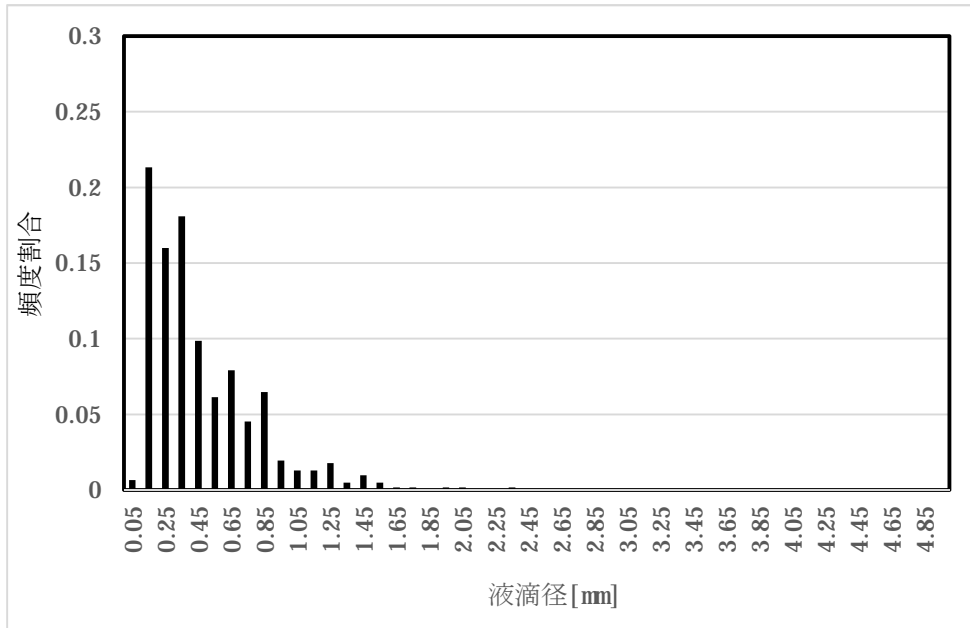


測定点⑥

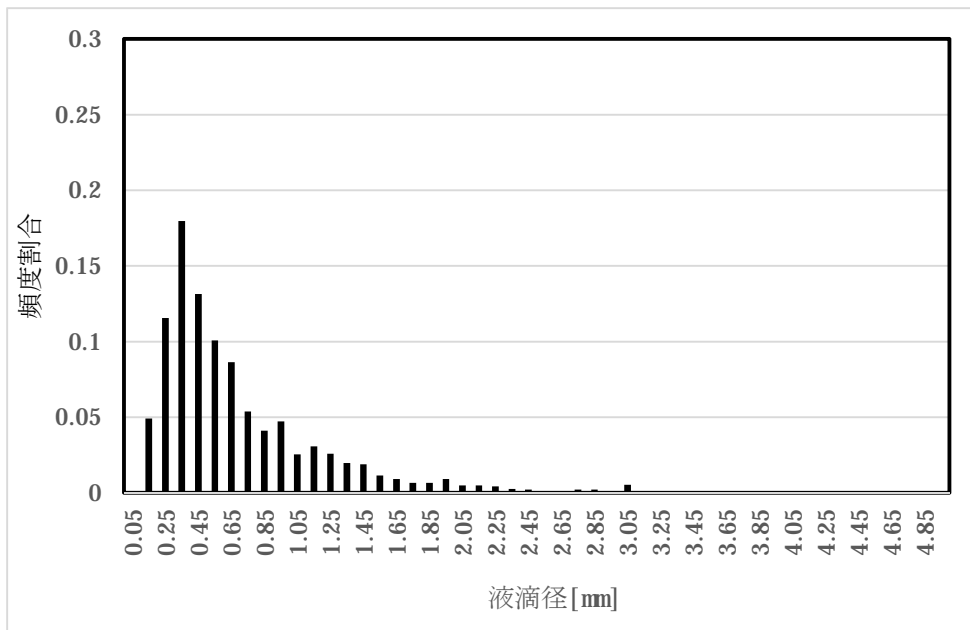


第4-1図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑦

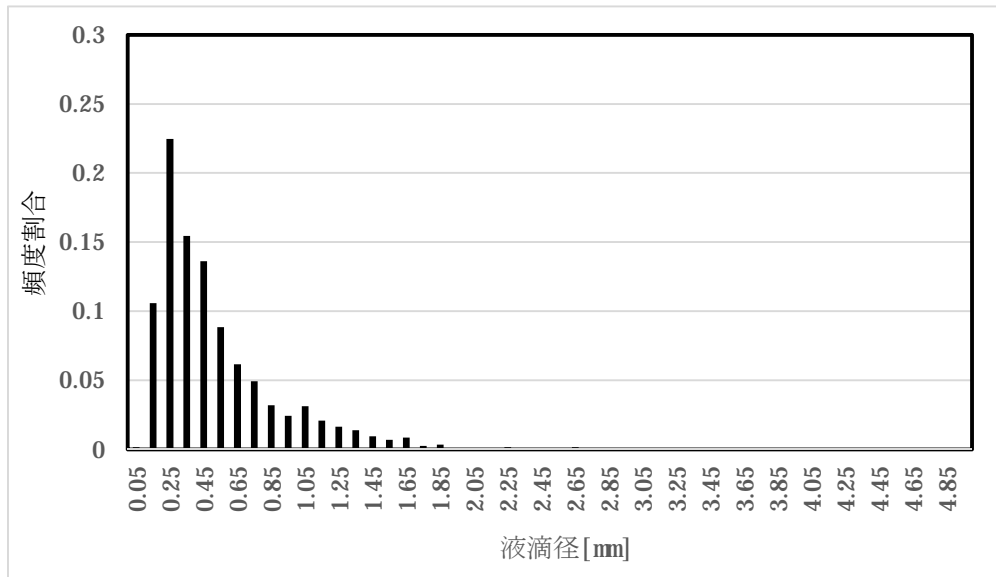


測定点⑧

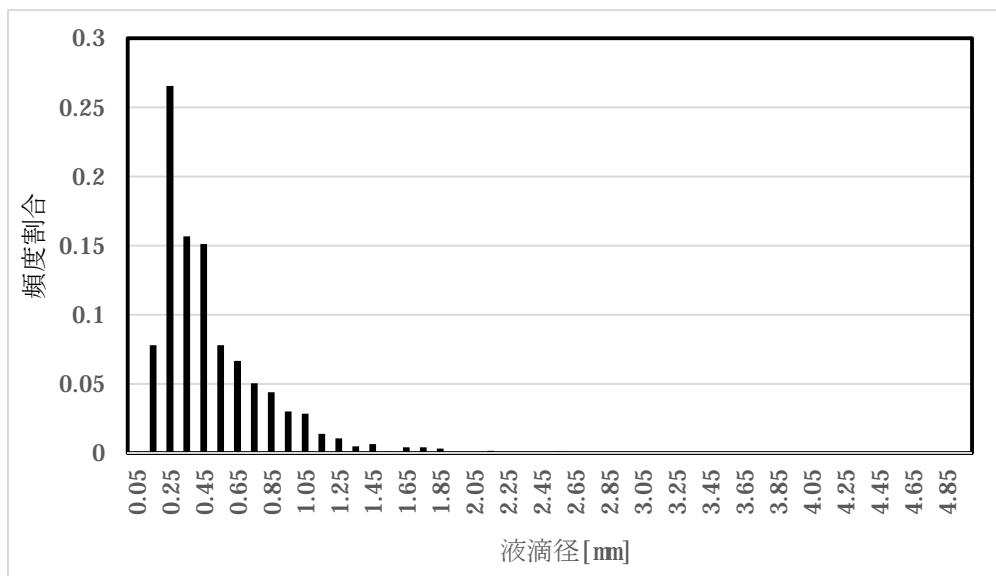


第4-1図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点①

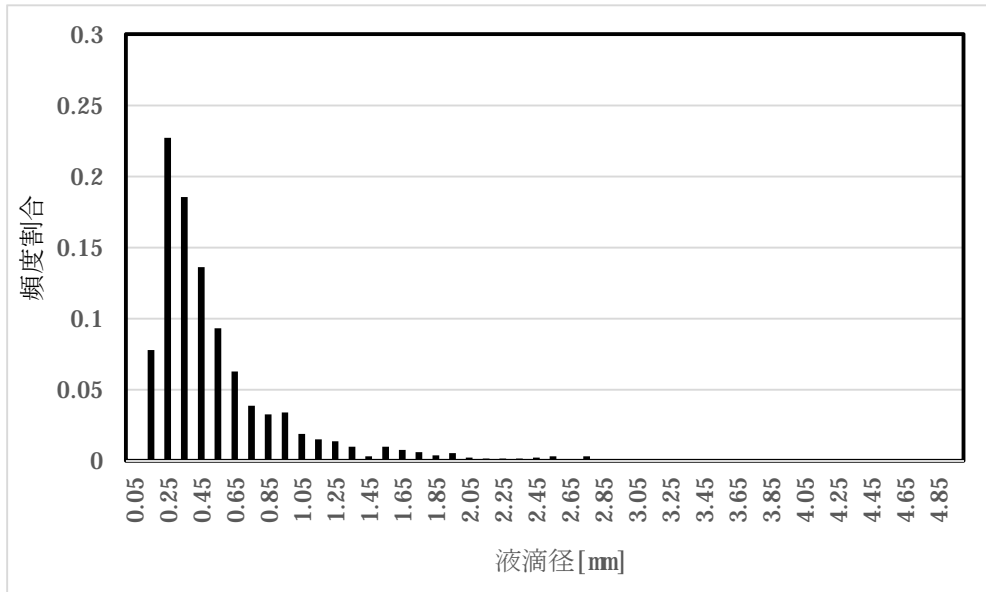


測定点②

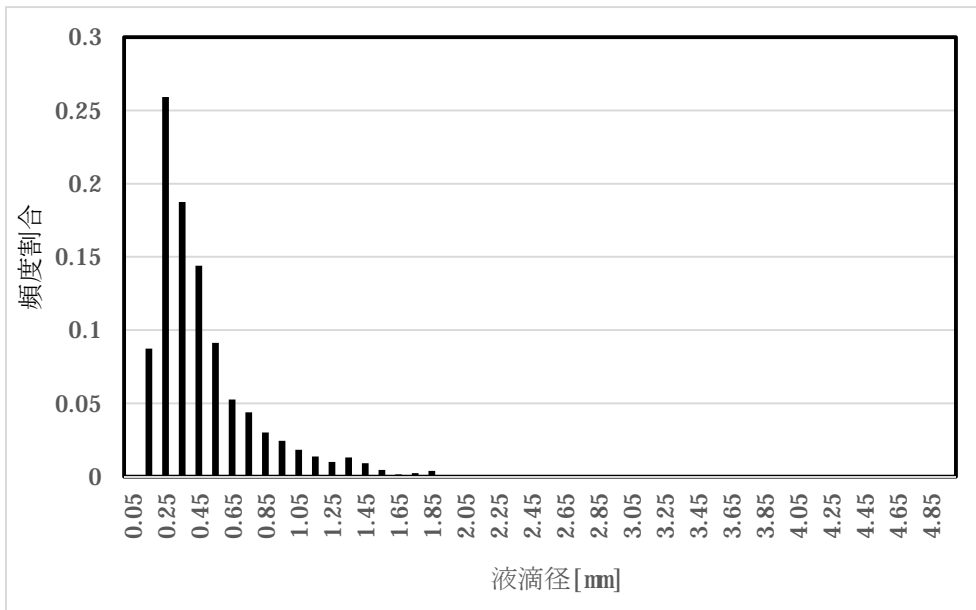


第4-2図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点③

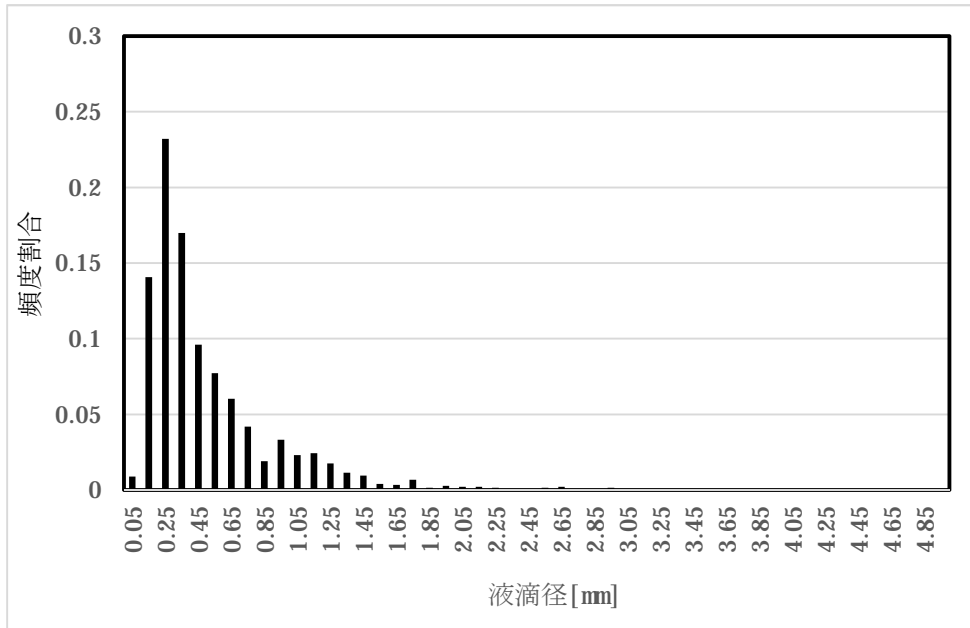


測定点④

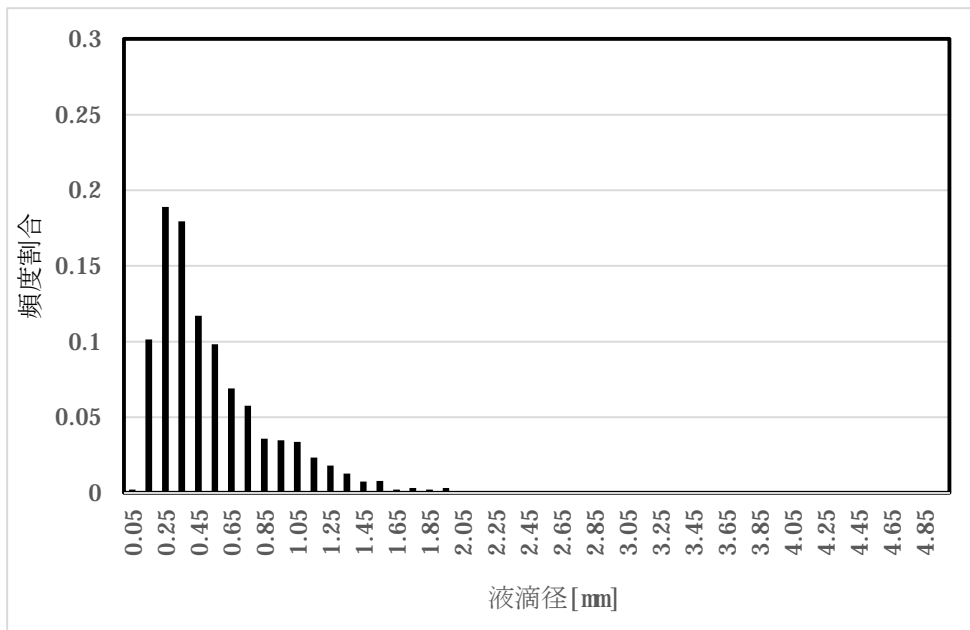


第4-2図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑤

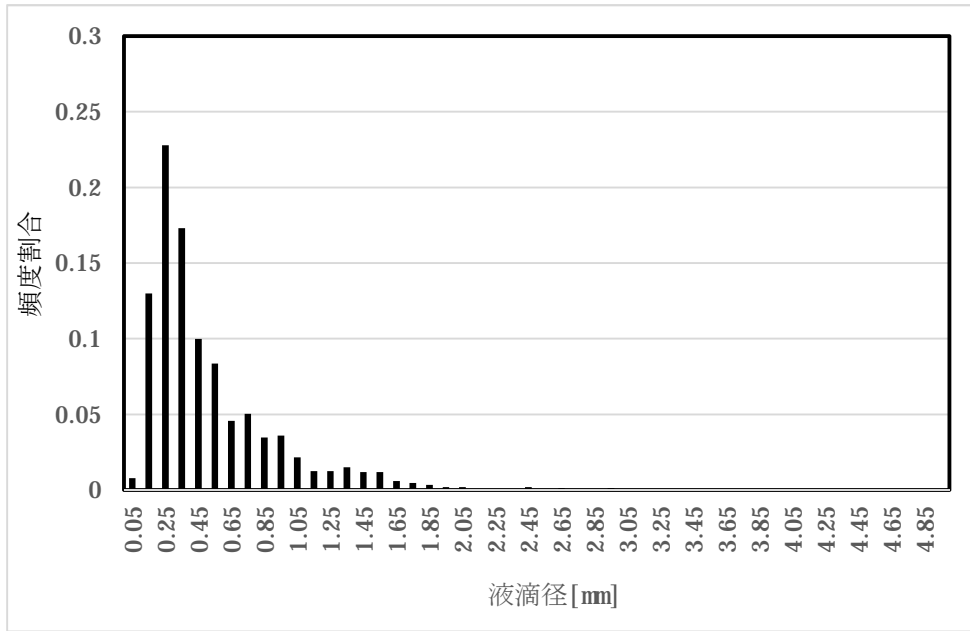


測定点⑥

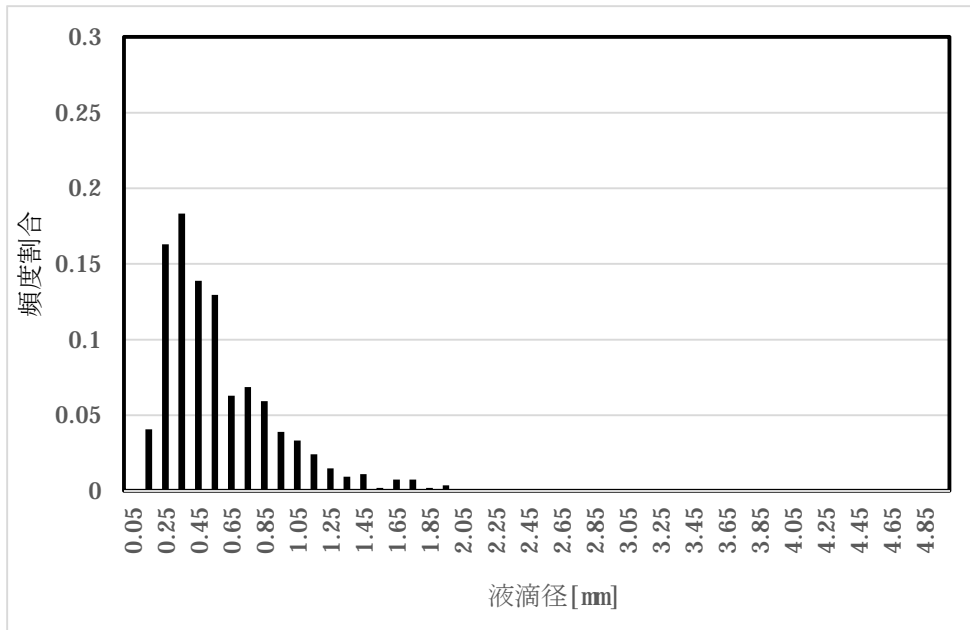


第4-2図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑦



測定点⑧



第4-2図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

3-2. 試験結果の考察

第4-1図及び第4-2図に示す試験データ（第1回目と第2回目）の試験結果より、試験毎に8点計測した全ての計測点において、数百個以上取得された液滴の個数割合分布が0.2～0.4mmで支配的となっていることから、試験回数を増やしたとしても液滴個数割合の分布形状は大きく変わることはなく、また測定点以外の箇所であっても同様の液滴径の分布をとることが推定される。

液滴や周囲の気体の流れは、条件が一定であっても変動を伴うことから、結果として生じる液滴径にはばらつきが生じる。加えて、実際のスプレーでは飛程のなかで衝突/分裂等も生じる可能性があり、これらもばらつきの要因となる。

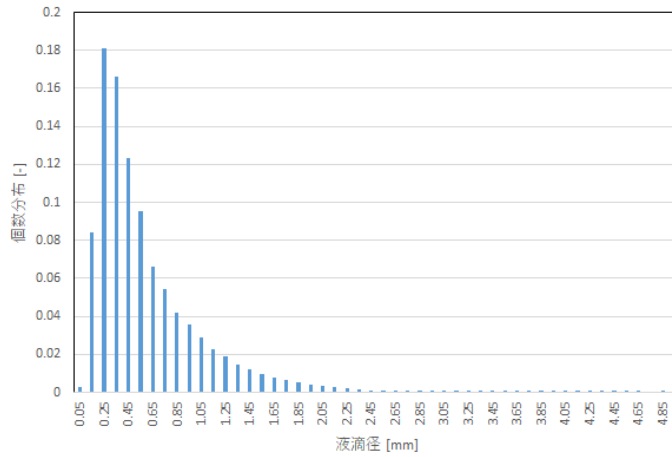
本試験では上記のばらつきの分布を把握できるように各計測点においてそれぞれ数百個以上の液滴を計測した。これら多数のデータについて正規確率プロット（詳細は以下参照）を用いて正規性の確認を行ったところ、各計測点とも対数正規分布に近い液滴径分布を得た。計測結果に正規性があるということは、一般に自然現象としてのばらつきを再現したサンプリングと捉えることができる。

なお既往の研究にて、ノズルから噴出された水が液滴に微粒化するまでの過程を確率的にモデル化した場合の粒径分布が対数正規分布で近似され、実際に測定した粒径分布とも良好に一致すること¹、種々のスプリンクラー・スプレーノズルを用いた試験で取得した粒径分布が対数正規分布で近似されたことが知られて²おり、これらからも、各測定点での個数分布割合が対数正規分布となった今回試験結果は妥当と考えられる。

また、試験データがスプレーヘッドの液滴の特徴を代表した液滴データを取得できているかを確認するため、全測定点のデータを合算したもの（第5図）と、放水方向の直線上に位置する点のうち放水分布図の中心付近に位置し計測点を代表していると考えられる⑤点（第1回試験及び第2回試験）について個数割合取得結果に対する検定を有意水準5%として実施した。検定に当たっては各測定点での個数割合取得結果には対数正規性があることを踏まえ個数割合を対数変換し、F検定により等分散性を確認したうえで、「等分散を仮定したt検定」を実施した。結果を第3表および第4表に示すが、2群間の分散および平均に差が無いとする仮説を棄却しない結果となったことから、試験で取得した液滴個数割合は、スプレーヘッドの液滴の特徴を代表できていると言える。

¹ 松本史朗、高島洋一、スプレーの粒径分布：化学工学第33巻第4号（1969）

² Spray Characteristics of Fire Sprinklers(NIST GCR 02-838)：David Thomas Sheppard, Northwestern University(2002)



第 6 図 液滴径毎の個数分布(全測定点データ合算)

第 3 表 ⑤点と全測定点データ合算値に対する F 検定

帰無仮説 H_0 : 2 群間の分散に差がない (等分散である)

対立仮説 H_1 : 2 群間の分散に差がある (等分散ではない)

検定対象	第 1 回⑤	全測定データ
分散	0.001703	0.001531
自由度	41	48
F 値	1.1123	
P 値 (片側)	0.3594	
F 境界値 (片側)	1.6395	
判定	P > 0.05 より、帰無仮説 H_0 を採択	

検定対象	第 2 回⑤	全測定データ
分散	0.001867	0.001531
自由度	48	48
F 値	1.219	
P 値 (片側)	0.2476	
F 境界値 (片側)	1.615	
判定	P > 0.05 より、帰無仮説 H_0 を採択	

二つのサンプルにおいて、カイ二乗変数に従う変数の比は「F分布」に従う。F値とは二つのサンプルの分散の比であり、F境界値とはF分布において上側確率が優位水準0.05となる数値を示しており、F値<F境界値であれば帰無仮説が棄却されない。

P値は、帰無仮説が正しいという仮定のもと、今回得られた値が偶然ではないとする確率のことであり、F分布におけるF値に対する外側確率である。P値が優位水準0.05よりも小さい場合、得られた値は偶然ではないという確率は小さいと判断される。すなわち、P値が0.05より大きい場合、2群間の分散に差がないという仮説は棄却されない。

第4表 ⑤点と全測定点データ合算値に対するt検定

帰無仮説 H_0 : 2群間の平均に差が無い

対立仮説 H_1 : 2群間の平均に差がある

検定対象	第1回⑤	全測定データ
自由度	89	
t値	0.3846	
P値(両側)	0.7014	
t境界値(両側)	1.9870	
判定	P>0.05より、帰無仮説 H_0 を採択	

検定対象	第2回⑤	全測定データ
自由度	96	
t値	-0.0215	
P値(両側)	0.9829	
t境界値(両側)	1.9850	
判定	P>0.05より、帰無仮説 H_0 を採択	

t値は平均値や自由度に基づく関数である。これは確率密度関数である「t分布」に従うものであり、母平均を推定する問題に使用される。t境界値とはt分布において外側確率が優位水準0.05となるtの値で、自由度によって決定される。すなわち、|t値|<t境界値であれば帰無仮説が棄却されない。

P値はF検定と同様に、t分布におけるt値に対する外側確率であり、P値が優位水準0.05よりも小さい場合、得られた数値が偶然ではないという確率は小さいと判断される。すなわち、P値が0.05より大きい場合、2群間の平均に差が無いという仮説は棄却されない。

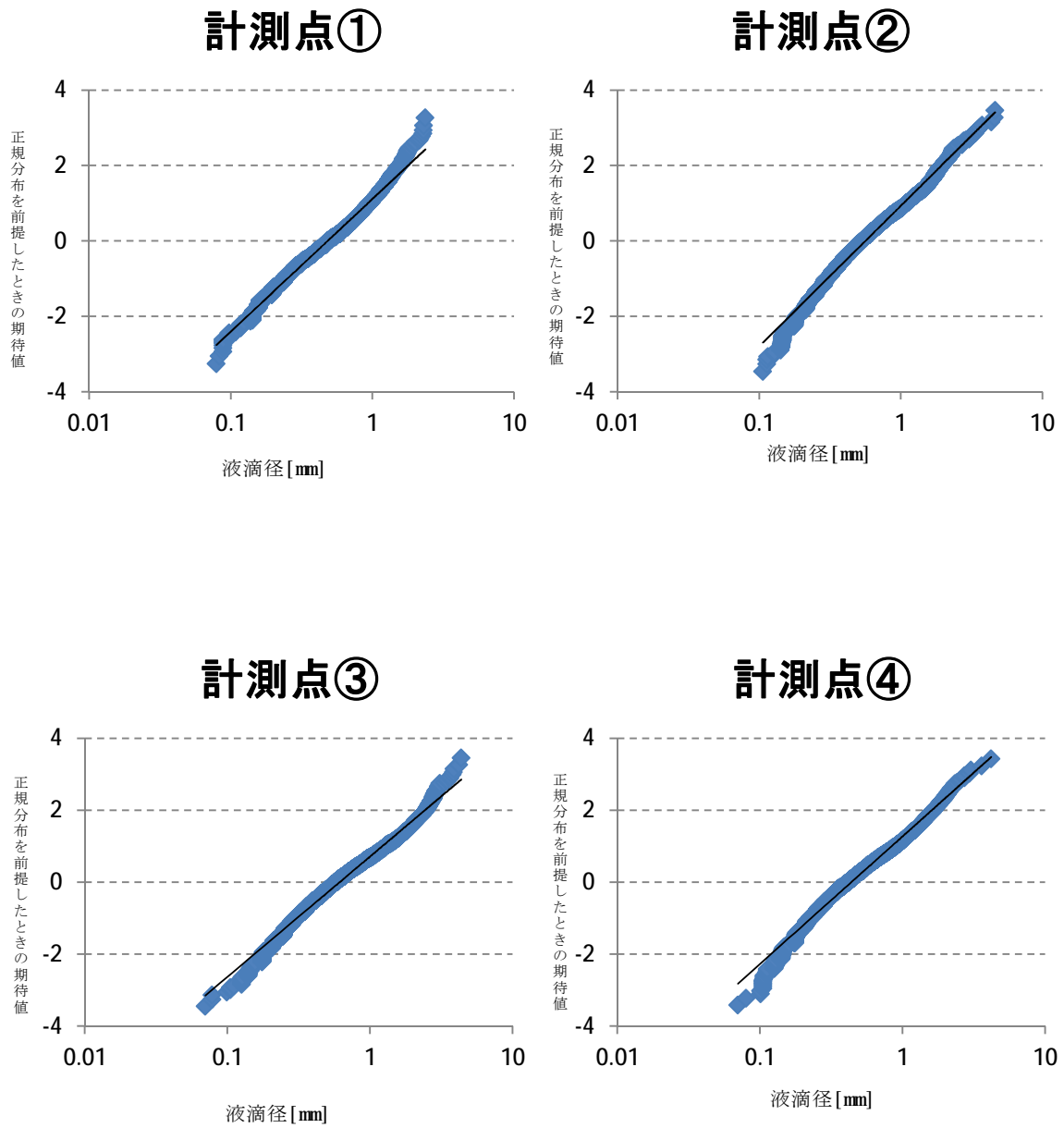
<正規確率プロットについて>

データが正規分布しているかどうかを目視判断するための手法であり、測定値を累積度数分率で整理し、そのプロットが直線状に並べば正規性有りとは判断できる。

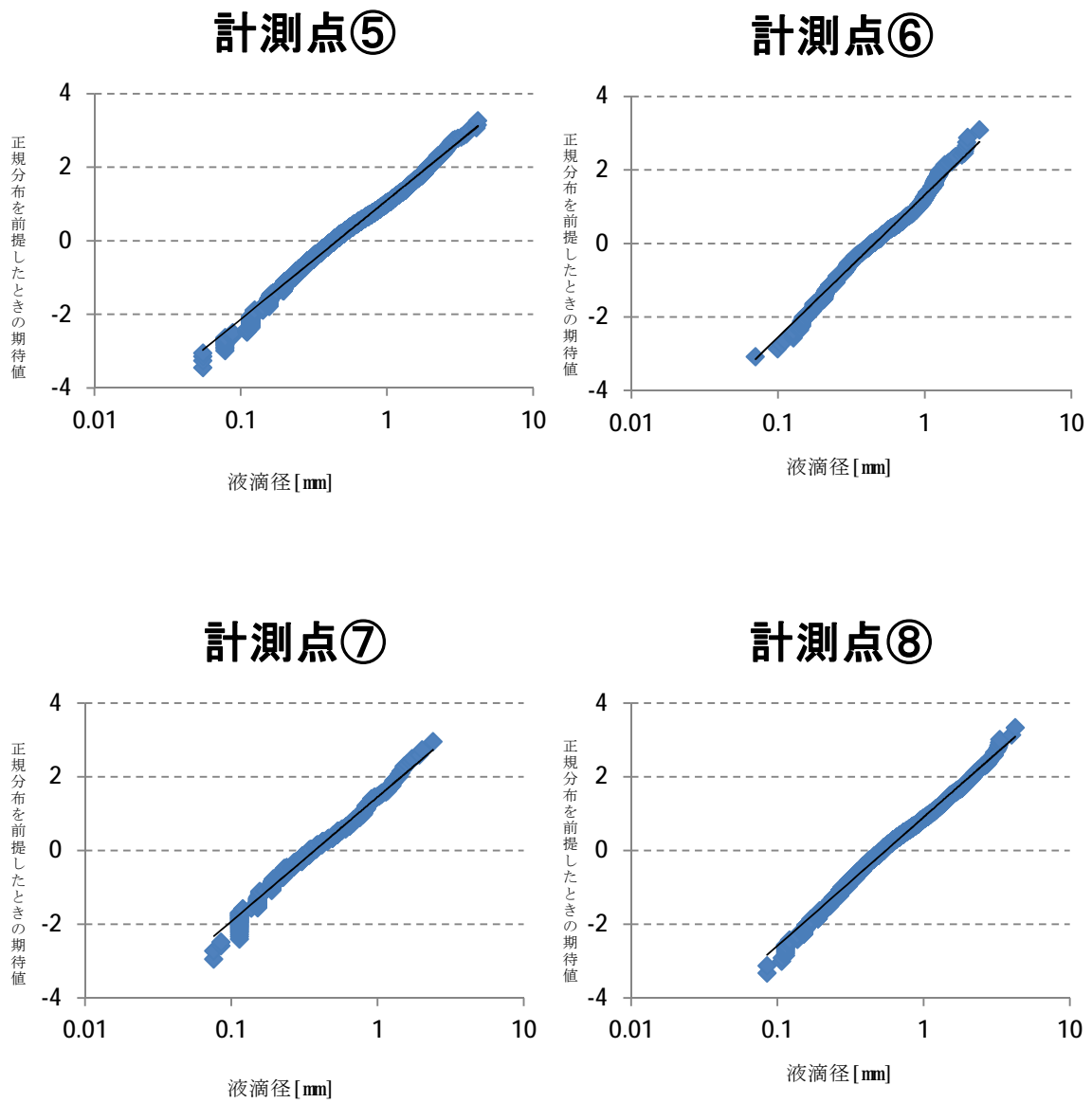
具体的には、取得されたデータについて累積比率（確率 P_i ）を求め、 P_i に対して正規分布の累積分布関数の逆関数を用いて求めた値をプロットし、正規分布なら直線、対数正規分布なら片対数グラフ上の直線に沿うかどうかを判断するものである。

この意味は、標準正規分布に従う x に対応する累積比率（確率 P_i ）を求める関数を逆算しているもので、測定値が正規分布に従うならば散布図を描くと直線状にプロットされることとなる。すなわち、正規性が無い＝正規分布に沿わない＝直線から外れるとして、目視にて正規性の有無を確認できる。

本試験結果の正規確率プロットを第7-1図および第7-2図に示す。横軸に対数をとるとプロット結果は全点で概ね直線状となることから、本計測結果は対数正規分布に従うと判断できる。



第 7-1 図 対数正規確率プロット (第 1 回試験 測定点①~④)

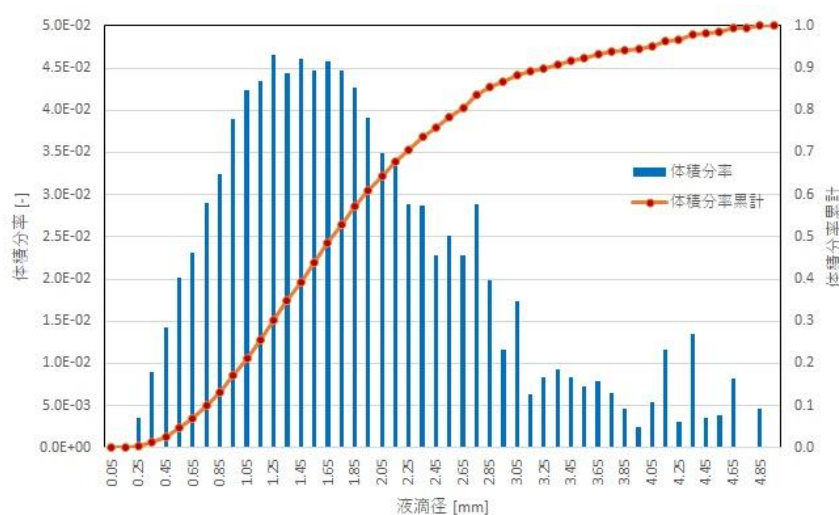


第 7-2 図 対数正規確率プロット (第 1 回試験 測定点⑤~⑧)

4. 液滴径の基本ケース条件の設定

3-2.での検討より、各測定点のデータにおいて自然現象のばらつきを示す正規性を有する分布であることが得られたことから、基本ケース条件の設定に当たっては全測定データを合算することにより液滴径を評価する。全測定点の合算データについては、全計測点を代表していると考えられる放水方向の直線上に位置する点（点⑤）との比較検定において有意な差が見られないことから、スプレイヘッドの特徴を代表するデータであり、基本ケースの条件として妥当であると言える。

第6図にて得られた個数分布に対し液滴径毎の体積を乗じた体積分率で整理した結果、体積分率50%出現値は第8図の通り1.65~1.75mmとなったことから、基本ケース条件は当該結果を踏まえ保守的に1.5mmを設定する。



第8図 液滴径毎の体積分率

5. 液滴径の不確かさを考慮した条件の設定

不確かさを考慮した条件としては、第8図に示す体積分率における両側5%を切り捨てた際の下限值、すなわち体積分率2.5%出現値（0.4mm~0.45mm）を踏まえ、0.4mmを設定する。

なお放水される流量の大部分は、スプレイヘッドではなく放水砲が占めることとなるが、放水砲由来の放水を特徴づける液滴径は2.9mm（文献^{※1}）とされており、スプレイヘッドの液滴径を放水砲由来の液滴に適用することは大幅な保守性を有することになる。

※1：宮下達也、石油タンク火災消火時における大容量放水及び泡放射軌跡の予測モデルの構築（2014）

以上

(3) 領域管理における燃焼燃料中の AC 核種および FP 核種組成の設定について

1. はじめに
2. AC 核種の設定について
3. FP 核種の設定について
4. まとめ

1. はじめに

高浜 1, 2 号炉の未臨界性評価では、燃焼に伴う燃料の反応度低下効果を踏まえた評価を採用しているが、燃焼燃料中に存在する AC 核種および FP 核種の組成は、核種毎の特性および冷却日数の経過等により影響を受ける。

ここでは、未臨界性評価において考慮する AC 核種および FP 核種の選定の考え方およびこれら設定の詳細を説明する。

2. AC核種の設定について

AC 核種組成の設定に当たっては実効増倍率を厳しくする観点から [] を挿入した状態で燃焼計算を行い、さらに表 1 に示すとおり核分裂性物質である Pu の原子個数密度を多くする設定とする。

また AC 核種組成は冷却日数を [] とした値を設定する。第 1 表に AC 核種の半減期を合わせて示すが、これにより本来は時間の経過とともに核分裂性物質（特に、半減期が比較的短い ²⁴¹Pu）が崩壊して反応度が低下する効果を考慮しないことになるため保守的である。

第 1 表 解析時に考慮する AC 核種

AC 核種	半減期	高浜 1/2 号炉	
		新規制基準 適合審査時	今回申請
²³⁵ U	約 7.0×10 ⁸ 年	[]	[]
²³⁸ U	約 4.5×10 ⁹ 年		
²³⁸ Pu	約 87 年		
²³⁹ Pu	約 2.4×10 ⁴ 年		
²⁴⁰ Pu	約 6.5×10 ³ 年		
²⁴¹ Pu	約 14 年		
²⁴² Pu	約 3.7×10 ⁵ 年		
²⁴¹ Am	約 432 年		
²³⁹ Np	約 2.3 日		

[]

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

3. FP核種の設定について

中性子吸収効果を有するFP核種については、燃焼燃料に存在する核種のうち、燃焼期間、プールでの保管中長期間にわたって燃料ペレット内にあり、燃料核種と均一組成をなしているとみなすことができる核種で実効増倍率が大きくなるように設定する。具体的には、核種を選定する。なお選定する核種は臨界計算コード(SCALE 6.0)によるベンチマーク実績がある核種に限定する。選定したFP核種を表2示す。

またFP核種組成は冷却日数をとした値を設定する。FP核種は冷却期間を考慮することで以下の影響を受ける。①については、時間の経過とともに実効増倍率を低下させる要因になる。②については時間の経過とともに実効増倍率を増加させる要因になるが、できる。

<冷却期間がFP核種に与える影響>

- ① 親核種の崩壊により生成され、中性子吸収能力が大きくなる効果。
- ② 核種自体の崩壊により、中性子吸収能力が小さくなる効果。

第2表 解析時に考慮するFP核種

FP核種	半減期	高浜1/2号炉		SCALE 6.0による ベンチマーク実績
		新規制基準 適合審査時	今回申請	
⁸³ Kr	— (安定)			
⁹³ Zr	約 1.5×10 ⁶ 年			
⁹⁵ Mo	— (安定)			
⁹⁹ Tc	約 2.1×10 ⁵ 年			
¹⁰¹ Ru	— (安定)			
¹⁰³ Rh	— (安定)			
¹⁰⁵ Rh	約 35 時間			
¹⁰⁵ Pd	— (安定)			
¹⁰⁸ Pd	— (安定)			
¹⁰⁹ Ag	— (安定)			
¹³³ Cs	— (安定)			
¹³⁴ Cs	約 2.1 年			
¹³⁵ Cs	約 2.3×10 ⁶ 年			
¹³¹ Xe	— (安定)			
¹³⁵ Xe	約 9.1 時間			
¹³⁹ La	— (安定)			
¹⁴¹ Pr	— (安定)			
¹⁴³ Nd	— (安定)			
¹⁴⁵ Nd	— (安定)			
¹⁴⁷ Sm	約 1.1×10 ¹¹ 年			
¹⁴⁹ Sm	約 2.0×10 ¹⁵ 年			
¹⁵⁰ Sm	— (安定)			
¹⁵¹ Sm	約 90 年			
¹⁵² Sm	— (安定)			
¹⁴⁷ Pm	約 2.6 年			
^{148m} Pm	約 41 日			
¹⁴⁹ Pm	約 53 時間			
¹⁵³ Eu	— (安定)			
¹⁵⁴ Eu	約 8.6 年			
¹⁵⁵ Eu	約 4.8 年			
¹⁵⁵ Gd	— (安定)			

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

4. まとめ

燃焼燃料中の **AC** 核種および **FP** 核種について、核種毎の特性を踏まえ実効増倍率を厳しくする
ような組成設定になっていることを確認した。

(参考1) 燃焼燃料中に存在する希ガスを含めた FP 核種を考慮した場合における燃焼燃料集合体反応度について

照射後の冷却期間の長さが反応度に与える影響を下図*に示す。本図は 50GWd/t 燃焼燃料の組成を計算したうえで冷却日数の経過に伴う燃料の反応度を評価したものであり、反応度計算において FP には比較的半減期の短い ^{135}Xe 等の希ガスを含めた 45 核種が考慮されており、実態として燃焼燃料中に存在する FP 核種の 95% 以上の中性子吸収効果を有するとされている。

本図より、半減期が短い FP 核種の存在を考慮した場合は、当該 FP 核種が崩壊することにより、約 1 年後に反応度が最も大きくなっている。

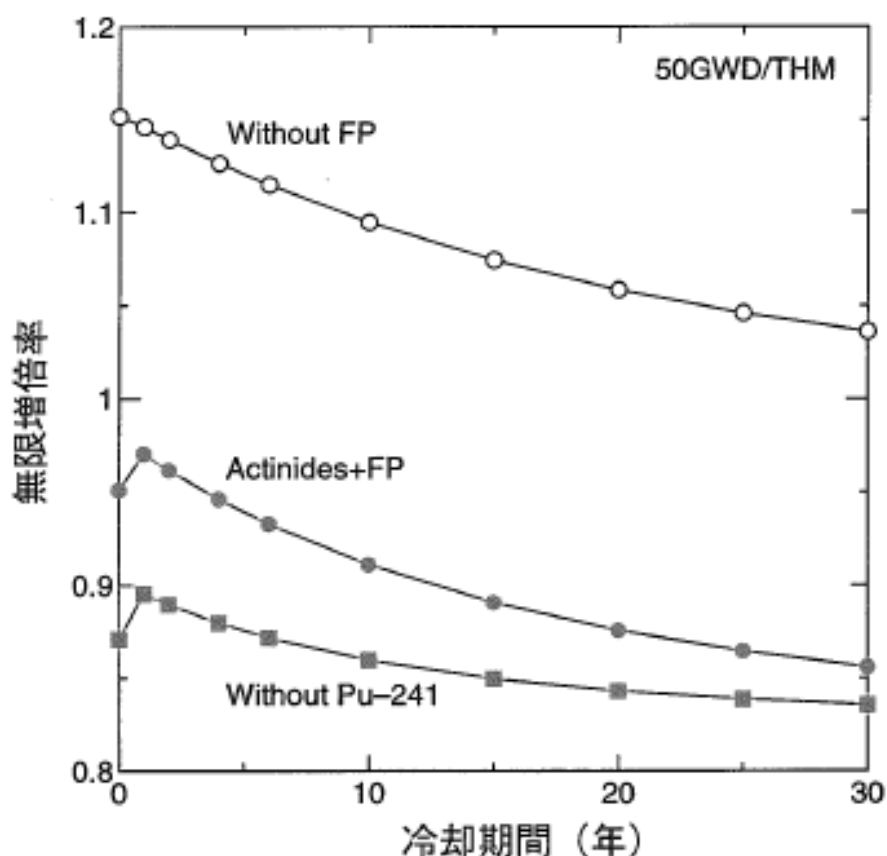


Fig. 3.13 冷却時間に対する無限増倍率の変化 [36]

一方、高浜 1/2 号炉の未臨界性評価においては、

。従って燃料の反応度は上図の「without FP」の曲線を平行移動した状態となり、冷却期間 として状態が最も大きくなる。

※JAERI-Tech2001-055 燃焼度クレジット導入ガイド原案（日本原子力研究所、2001 年 7 月）より抜粋

(4) 核種組成計算結果の誤差影響が、燃焼計算手法有する保守性に包含されることについて

1. はじめに

高浜 1, 2 号炉の未臨界性評価では、燃焼に伴う燃料の反応度低下効果を踏まえた評価している。燃焼燃料組成の計算には、取替炉心設計で広く使用され、妥当性が確認できている PHOENIX-P コード（ライブラリ：ENDF-B/V）を用いている。本コードによる燃焼計算結果としての核種組成には誤差が含まれるものの、その誤差が実効増倍率に与える影響は、燃焼燃料集合体の反応度が高くなる条件で燃焼計算を行うことによる保守性に包含されることから、パラメータ「核定数計算コードと核定数ライブラリ」の不確かさを考慮した条件としては当該誤差の影響を設定していない。

ここでは、PHOENIX-P コードの核種組成計算結果の誤差による実効増倍率への影響評価および燃焼計算手法が有する保守性の定量化について説明する。

2. 核種組成計算結果の誤差による実効増倍率への影響評価

PHOENIX-P コードにより求めた燃焼燃料組成を用いた実効増倍率評価を行うにあたって、PHOENIX-P 以外の燃焼計算コードを用いて得られた燃焼燃料組成と比較し、未臨界性評価結果にどの程度の影響が生じるかを確認することが臨界安全設計の観点から重要となる。ここでは、PHOENIX-P コードと、連続エネルギーモンテカルロ法に基づく燃焼計算コードを用いた核種組成の計算結果を比較し、実効増倍率に与える影響を評価した。

2-1. 燃焼計算コードの違いによる組成計算結果比較

PHOENIX-P コードの比較対象として、MWP-BURN を用いて燃焼計算を行った。また MWP-BURN による計算では断面積ライブラリの違いによる影響を確認するため、3 つの異なる断面積ライブラリを用いた。具体的解析条件は以下の通り。

<解析条件>（核種組成量の精度確認）

解析体系：ピンセル体系

燃料燃焼度：24GWd/t

考慮核種：表 1 に記載の核種

使用コード：PHOENIX-P、MWP-BURN

MWP-BURN の断面積ライブラリ：JENDL4.0、ENDF/B-VII、JEFF3.1

各々の燃焼計算コードにより生成された核種組成を比較したものを第 1 表に示す。

第1表 解析コードとライブラリの違いによる核種生成量比較

核種	PHOENIX-P (ENDF/B-V) を基準とした場合の原子個数密度比 (上段：解析コード、下段：ライブラリ)			核種の特徴	keff が最大となる 原子個数密度比
	PHOENIX-P	M/P-BURN			
	ENDF/B-V	JENDL4.0	ENDF/B-VII		

2-2. 燃焼計算結果の差異による実効増倍率への影響確認について

2-1. にて確認された核種組成計算結果の差異による実効増倍率への影響を確認するため、第1表において実効増倍率が厳しくなるような組成の組み合わせ（核分裂性核種については最大値を、中性子捕獲核種には最小値）を使用した場合と、本来の PHOENIX-P（ライブラリ：ENDF-B/V）で求めた核種組成を使用した場合の実効増倍率を計算した。具体的解析条件を以下に示す。

<解析条件>（核種組成の差異による実効増倍率への影響確認）

使用コード : SCALE 6.0

解析体系 : 24GWd/t 燃焼燃料敷き詰め（無限体系）

水密度条件 : 最適減速（約 0.1g/cm³）

燃料内核種の原子個数密度 : ①PHOENIX-P（ライブラリ：ENDF-B/V）での計算結果そのまま
②M/P-BURN での計算結果から核分裂性物質は最大、中性子捕獲核種は最小の値を選択

評価結果を第2表に示す。実効増倍率への影響は約0.4%であった。

第2表 核種組成の差異による実効増倍率への影響確認結果

原子個数密度条件				ΔK_1^{**}
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}	
□	□	□	□	0.0036

※ □

3. 燃焼計算手法が有する保守性について

今回の申請においては、Puの生成量をより多くする観点から、全ての燃焼燃料に □
□
□として燃焼計算を行っているが、その保守性を確認するため、□
□
□されていない条件で燃焼計算した場合の実効増倍率と比較した。具体的評価条件を以下に示す。

<解析条件> (核種組成量の精度確認)

解析体系 : 無限体系

燃料燃焼度 : 24GWd/t

水分条件 : 純水冠水

PHOENIX-Pでの燃焼計算手法 : ① □
ありで計算
② □
なしで計算

評価結果を第3表に示す。核種組成の計算結果誤差が実効増倍率に与える影響は約0.6%であった。

表3 燃焼計算手法が有する保守性評価結果

燃焼計算手法				ΔK_2^{**}
①		②		
実効増倍率 K_α	統計誤差 σ_α	実効増倍率 K_β	統計誤差 σ_β	
□	□	□	□	0.0057

※ □

4. 燃焼計算手法が有する保守性に核種組成計算結果の差異の影響が包含されることの確認

PHOENIX-Pコードによる核種組成計算結果の誤差がSFP体系での実効増倍率へ与える影響 ΔK_1 (約0.4%)は、今回の燃焼計算手法が有する保守性 ΔK_2 (約0.6%)よりも小さいことから、核種

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

組成計算結果の誤差による実効増倍率への影響は燃焼計算手法が有する保守性に包含される。

5. 燃焼計算手法による影響を保守性と整理することの適切性について

今回の申請においては、体系内に貯蔵される全ての燃焼燃料に対し、
燃焼計算した場合の核種組成を設定することとしている。一方で実態としては既許可において炉心側で使用可能とされている本数に対して、昨今の取替実炉心設計におけるの使用体数は、過去 10 サイクル（燃料取替体数：それぞれ約 500 体）において 1 号炉で 0 体、2 号炉で 8 体である。

<既許可におけるの使用可能本数>

- 初装荷炉心：
- 取替炉心：以下

よって、実炉心設計実績を踏まえれば今回採用する燃焼計算手法のとおり燃焼する燃料は非常に少ないところ、体系内に貯蔵される全ての燃焼燃料に対し
燃焼計算した場合の核種組成を設定していることから、3. に示す ΔK_2 として表せられる実効増倍率の差は保守性として考慮することは適切である。

6. SFP 燃料中に内挿物が実在する効果

今回の未臨界性評価においては SFP 中の内挿物の存在を無視しているが、実際には SFP 内の多くの燃料には内挿物が挿入されている。実際の貯蔵状況を第 4-1 表および第 4-2 表に示す。

第 4-1 表 高浜 1 号炉 SFP 内の燃料および内挿物の貯蔵状況

種類		SFP 内体数	体数合計
燃料	新燃料	56 体	299 体
	照射燃料	243 体	
内挿物	プラグニングデバイス	164 体	286 体
	制御棒クラスタ	114 体	
	バーナブルポイズン	8 体	

第 4-2 表 高浜 2 号炉 SFP 内の燃料および内挿物の貯蔵状況

種類		SFP 内体数	体数合計
燃料	新燃料	44 体	258 体
	照射燃料	214 体	
内挿物	プラグニングデバイス	120 体	249 体
	制御棒クラスタ	113 体	
	バーナブルポイズン	16 体	

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

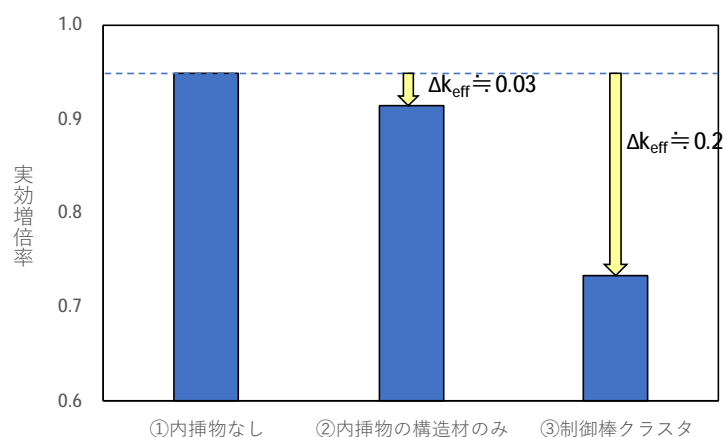
実際の内挿物貯蔵状況を踏まえ、以下の解析により内挿物有り無しによる実効増倍率の影響を比較した。具体的には、①内挿物を考慮しない場合、②内挿物の構造材のみを考慮した場合（制御棒クラスタから中性子吸収材（銀-インジウム-カドミウム）を無視し、構造物のみが挿入された状態を仮定）、③制御棒クラスタが挿入された場合の評価を行った。バーナブルポイズンの中性子吸収効果は可燃性毒物の燃焼と共に低下するため使用状態によって効果が異なることから、使用済の状態を想定して上記②の内挿物の構造材のみを考慮した評価で代表した。なお、プラグデバイスは全長が短く燃料有効長部に掛る部分がないため、未臨界性評価においては内挿物がない状態と同等であり、評価対象外とした。

<解析条件>

- 使用コード : SCALE 6.0
- 解析体系 : 新燃料敷き詰め（無限体系）
- 水密度条件 : 純水冠水
- 挿入する内挿物 : ① 内挿物なし
② 内挿物の構造材のみ
③ 制御棒クラスタ

評価結果は第 1 図に示すとおり、内挿物が挿入されていない状態での実効増倍率が最も高く、制御棒クラスタが挿入されている場合には約 20%、また構造物として内挿物が存在すること自体によっても約 3%の実効増倍率が低減される結果となり、解析の前提条件である「内挿物なし」とすることが保守的であることを確認した。

この結果は、中性子吸収材や可燃性毒物による中性子吸収効果はもとより、内挿物が持つ構造物としての中性子吸収効果および水排除効果により、燃焼集合体全体としての反応度が低くなったためと考えられる。

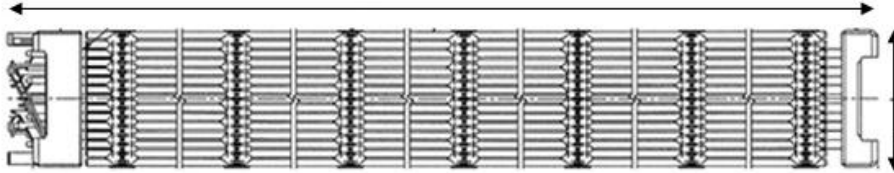

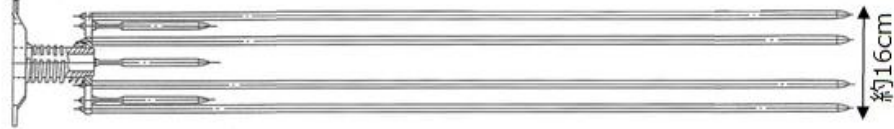
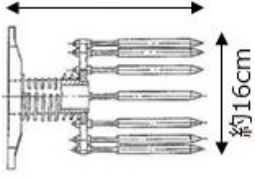


第 1 図 内挿物挿入有無による実効増倍率への影響

5. まとめ

PHOENIX-P コードによる燃焼計算条件を変更した場合の核種組成計算結果の差異や、他の燃焼計算コードにより算出した核種組成計算結果の差異が実効増倍率に与える影響は、燃焼燃料集合体の反応度が高くなる条件で燃焼計算を行うことによる保守性に包含されることを確認した。また、実炉心設計実績を踏まえ、当該燃焼計算手法を用いることによる実効増倍率への影響を保守性として考慮することが適切であることを確認した。さらに、SFP 内の内挿物の存在を無視することの保守性を確認した。

(参考 1) 燃料集合体および内挿物の概要について

燃料集合体	内挿物		
 <p>約4m</p> <p>約21cm</p>	 <p>約4 m</p> <p>約15cm</p> <p>制御棒クラスタ</p>	 <p>約3.9m</p> <p>約16cm</p> <p>バーナブルポイズン</p>	 <p>約27cm</p> <p>約16cm</p> <p>ブラギングデバイス</p>

(参考2) [] における AC 核種、FP 核種生成量の違いについて

24GWd/t 燃焼燃料について、[] それぞれの条件で PHOENIX-P コードによる核種組成計算を行い、それら計算結果の比を取った結果を下表に示す。

核種	組成比※1	半減期

※1 原子個数密度について [] / [] の比。

※2 []

上記結果から、AC 核種については [] 燃焼させることで原子個数密度は多くなっており、特に燃料の反応度に寄与する ^{239}Pu や ^{241}Pu が多くなっていることから、燃料の反応度増加を高める方向に働いていることが分かる。

一方で FP については、[] 燃焼させると中性子スペクトルが固くなることで [] 結果となっている核種もある。

なお燃料集合体としての反応度は、上記影響の総合的な結果として、[]

[] 燃焼計算する方が大きくなる。

[] 枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(5) 解析コードの説明について

1. はじめに
2. 解析コードの概要
 - 2.1. PHOENIX-P Ver. 8
 - 2.2. SCALE Ver. 6.0
 - 2.2.1. SCALE Ver. 6.0 の概要
 - 2.2.2. SCALE Ver. 6.0 の解析手法について
 - (1) 一般事項
 - (2) 解析コードの特徴
 - (3) 断面積ライブラリの特徴
 - (4) 解析手法
 - (5) 解析フローチャート
 - (6) 検証

1. はじめに

本資料は、高浜 1, 2 号炉 設置変更許可申請（使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更）において使用した解析コードについて説明するものである。

2. 解析コードの概要

2.1 PHOENIX-P Ver.8

対象：使用済燃料貯蔵設備

項目 \ コード名	PHOENIX-P
開発機関	米国Westinghouse社及び三菱重工業株式会社
開発時期	1995年
使用したバージョン	Ver. 8
使用目的	使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価
コード概要	2次元多群燃料集合体輸送計算コードであり、炉心計算及び未臨界性評価に必要な核定数あるいは燃焼燃料の核種組成を算出する。核データは、ENDF/B-Vに基づく42群核定数セットを用いている。中性子スペクトル及び中性子束分布は、ノード結合法計算及び S_4 輸送計算により計算している。
検証(Verification)及び 妥当性確認(Validation)	<p>PHOENIX-P Ver.8は、モンテカルロコードを用いた使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価に必要な燃焼燃料の核種組成の計算に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ PHOENIX-Pコード及び、3次元拡散計算コードANCの検証は、MDX炉心及び55Gwd/t燃料導入以前の炉心設計に適用している許認可コードであるLEOPARD/HI DRA/PANDAとのコード間比較を実施して

	<p>いる。具体的には、TCA臨界実験における燃料棒出力解析、及び48GWI/t燃料装荷炉心における4ループ実機炉心解析を実施し、両コードの解析値と測定値の差異が同等であることを確認している。このことより、PHOENIX-P/ANCコードが適切な計算結果を与えることが確認されている。詳細は、「三菱PWRの新核設計手法と信頼性」MAPI-1087改6（平成16年、三菱重工業（株））に示している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ PHOENIX-Pコードは、3次元拡散計算コードANCと共に、国内商業用PWRにMOX燃料及び55GWI/t燃料導入時より取替炉心設計に適用されている。PHOENIX-P/ANCコードを用いることによってウラン炉心、MOX炉心の何れについても臨界ほう素濃度、出力分布、制御棒価値等の核設計値は実測値と良好に一致していることから、PHOENIX-Pコードは燃焼に伴う核種組成の変化を適切に評価できるコードである。詳細は、「三菱PWRの新核設計手法と信頼性」MAPI-1087改6（平成16年、三菱重工業（株））、及び「三菱PWRのPHOENIX-P/ANCによる核設計の信頼性」（平成18年、MHI-NES-1025改2）に示している。 ・ 本設置許可において使用するバージョンは、既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 ・ 本設置許可における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	---

2.2 SCALE Ver. 6.0

2.2.1 SCALE Ver. 6.0 の概要

対象：使用済燃料貯蔵設備

項目	コード名	SCALE
開発機関		米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期		2009年
使用したバージョン		Ver. 6.0
使用目的		使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価
コード概要		米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) により米国原子力規制委員会 (NRC) の原子力関連許認可評価用に作成された公開コードシステムであり、臨界計算コードが整備されている。本解析では臨界計算のCSAS6モジュールを用い、モンテカルロコードとしてKENO-VI、断面積ライブラリはENDF/B-VIIベースの238群ライブラリを使用している。
検証(Verification) 及び 妥当性確認(Validation)		<p>SCALE Ver. 6.0は、モンテカルロコードによる使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ コードに付属のサンプル問題を実行し、解析解があらかじめ準備された参照解を再現することを確認している。 ・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ OECD/NEA によりまとめられた臨界実験のベンチマーク集 (INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS September 2010 Edition (OECD/NEA)) に登録されている臨界実験から、国内PWRの燃料貯蔵設備仕様及び燃料仕様等を考慮して選定した179ケースのベンチマーク解析を実施している。ベンチマーク解析結果と臨界実験の実効増倍率の差は、ほぼ正規分布となることを確認している。また、ベンチマーク解析の実効増倍率が特定のピット仕様や燃料仕様に依存する傾向もない。

	<ul style="list-style-type: none">• ベンチマーク解析において、軽水減速体系の臨界実験データ及びボロン添加ステンレス板を含む体系の臨界実験データ、さらにMX燃料を用いた臨界実験データを使用した解析結果から、臨界計算に考慮すべき平均誤差及びその不確かさを適切に評価している。• 本設置許可において使用するバージョンは、既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。• 本設置許可における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	--

2.2.2 SCALE Ver. 6.0 の解析手法について

(1) 一般事項

SCALE は、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) により米国原子力規制委員会 (NRC) の原子力関連許認可評価用に作成された公開コードシステムであり、臨界計算コードが整備されている。本解析では臨界計算の CSAS6 モジュールを用い、モンテカルロ法に基づく 3 次元輸送計算コードとして KENO-VI、断面積ライブラリは、ENDF/B-VII ベースの 238 群ライブラリを使用している。

(2) 解析コードの特徴

- ・米国 NRC により認証された標準解析コードであり、国内外の臨界解析の分野で幅広く使用されている。
- ・燃料及び構造材の材質組成と幾何形状を与えることにより、断面積作成から実効増倍率評価まで一連の解析を実行できる。
- ・3次元輸送計算コードであり、複雑な幾何形状における臨界計算が可能である。

(3) 断面積ライブラリの特徴

- ・断面積ライブラリは SCALE Ver. 6.0 の内蔵ライブラリデータのうち、ENDF/B-VII ベースの 238 群ライブラリを使用している。
- ・ENDF/B-VII は、米国およびカナダの国立研究所、産業界、および大学が構成する CSEWG (Cross Section Evaluation Working Group、断面積評価ワーキンググループ) により作成された断面積ライブラリであり、ENDF/B-VI を基に IAEA と OECD/NEA によるワーキング委員会である WPEC (Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation) によって開発された H、Li6、B10、Au の断面積データを新たに登録する等の更新がなされている。断面積ライブラリについては、JAEA-Data/Code2017-006 (JENDL 開発のための軽水炉ベンチマークに関するデータ集の整備) の臨界実験データを用いて国内の最新断面積ライブラリである JENDL4 と ENDF-B/VII の比較を行っており、ライブラリ間の計算誤差の差が小さいことを確認している。

(4) 解析手法

本解析で用いた臨界計算の CSAS6 モジュールについて、以下に示す。

a. BONAMI

BONAMI コードは、バックグラウンド断面積と領域の温度から自己遮蔽因子を内挿し、多群実効断面積を作成する。BONAMI コードは、非分離共鳴エネルギー

ギー領域に適用する。作成された多群実効断面積は、**CENTRM** コードにおける中性子スペクトル計算に使用される。

b. **CENTRM**

CENTRM コードは、セル形状をモデル化して、連続エネルギーの中性子スペクトルを求める。**CENTRM** コードは、分離共鳴エネルギー領域に適用する。

c. **PMC**

PMC コードは、**CENTRM** コードにより作成された連続エネルギーの中性子スペクトルを用いて、連続エネルギーの断面積を多群に縮約し、分離共鳴エネルギー領域の多群実効断面積を作成し、**BONAMI** で評価された非分離共鳴エネルギー領域の多群実効断面積と組み合わせる。

d. **KENO-VI**

KENO-VI は **ORNL** で開発された多群モンテカルロ臨界計算コードであり、複雑な体系の中性子増倍率の計算を行うことができる。

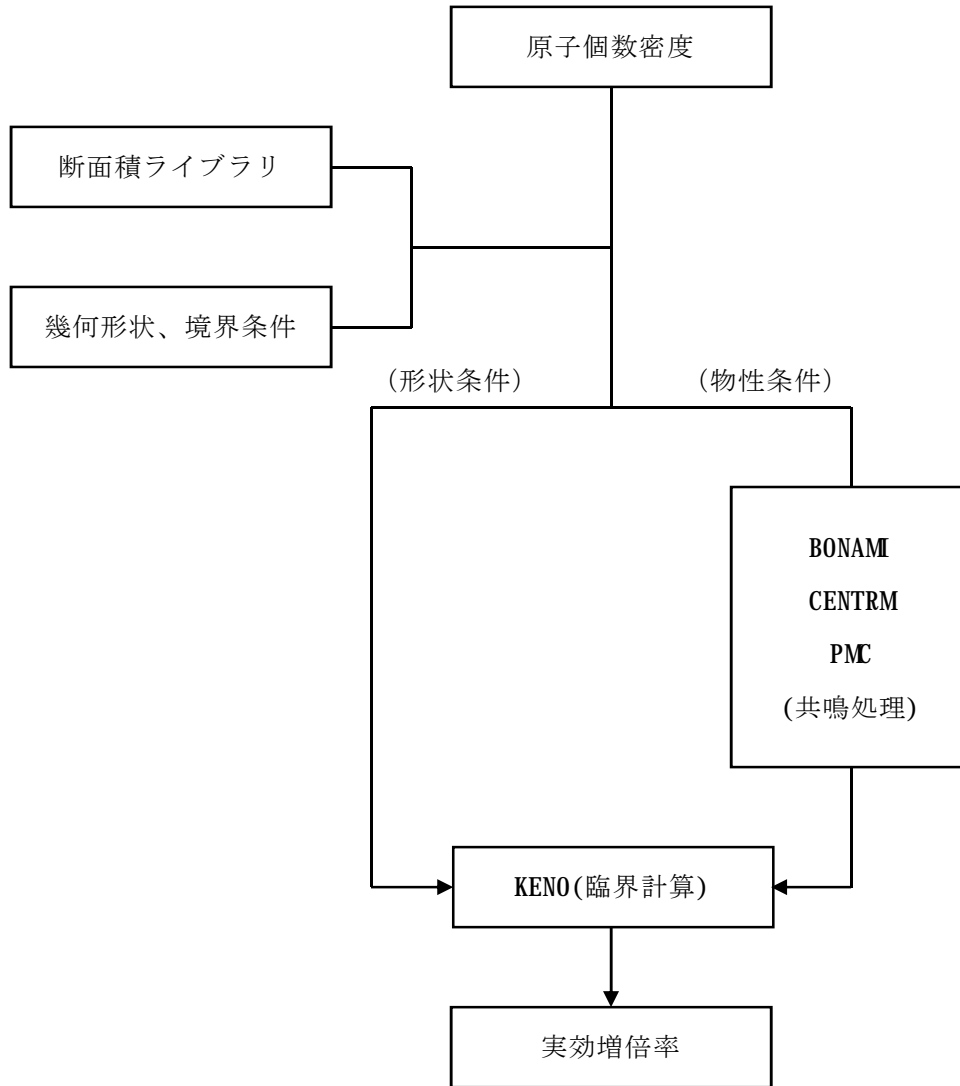
本コードでは、体系内の一つ一つの中性子の振舞いを追跡し、核分裂によって発生する中性子数 **F**、吸収されて消滅する中性子数 **A**、体系から漏えいする中性子数 **L** を評価し、次式により実効増倍率 k_{eff} を算出する。

$$k_{\text{eff}} = \frac{F}{A + L}$$

(5) 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを第1図に示す。

なお、今回の解析で使用するSCALEの機能は、臨界計算であるため、第1図の解析フローチャートは、臨界計算のCSAS6モジュールについて記載している。



第1図 解析フローチャート

(6) 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

OECD/NEA によりまとめられた臨界実験ベンチマーク集とのベンチマーク解析により SCALE コードの適用検証及び妥当性確認を実施し、本解析コードを使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価へ適用することについて評価を行った。

a. 検証(Verification)

コードに付属のサンプル問題を実行し、解析解があらかじめ準備された参照解を再現することを確認した。また、本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認した。

b. 妥当性確認(Validation)

OECD/NEA によりまとめられた臨界実験ベンチマーク集(「INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS」 September 2010 Edition(OECD/NEA))に登録されている臨界実験から選定した 179 ケース (「MDX 燃料を使用 (FP なし) した実験 ケース」 + 「ウラン燃料を使用 (FP なし) した実験 ケース」に加え、今回申請において追加した「FP を含む実験 ケース」 + 「塩素を含む実験 ケース」) のベンチマーク解析 (以下「ベンチマーク解析」という) を実施した。ベンチマーク解析を行うにあたっては、国内 PWR の燃料貯蔵設備及び燃料仕様のパラメータ範囲を包含する範囲を整理し、臨界実験を選定した。臨界実験の選定結果を第 2-1 表に、MDX 燃料 (FP なし) を使用した臨界実験体系を第 2-2 表に、また FP を含んだ体系および塩素を含んだ体系の臨界実験として選定した結果をそれぞれ第 2-3 表、第 2-4 表に示す。

ベンチマーク解析により得られた実効増倍率及び標準偏差並びに各実験の実効増倍率測定値及び実験誤差を用いて、ラック体系の未臨界性評価に用いる SCALE Ver. 6.0 システムの平均誤差($1 - k_c$)及び不確かさ(Δk_c)を導出した結果を第 3 表に示す。なお塩素を含む体系に対するベンチマーク解析は、「C. 使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価への適用性確認」に示す理由により第 3 表には記載していない。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 2-1 表 選定したパラメータ範囲（製作公差を含まない）

項目	単位	燃料貯蔵設備 及び燃料仕様の パラメータ範囲		選定した臨界実験の パラメータ範囲		
		MIN	MAX	MIN	MAX	
燃料	ウラン燃料 ²³⁵ U濃縮度	wt%	1.60	4.80		
	MDX 燃料 Pu含有率	wt%	5.5	10.9		
	燃料材径	mm	8.19	9.29		
	燃料要素径	mm	9.5	10.72		
	被覆材 材質	—	ジルコニウム合金			
	燃料要素ピッチ	mm	12.6	14.3		
	燃料体内の減速材 体積/燃料体積	—	1.88	2.00		
	燃料要素 配列条件	—	正方配列			
	体系条件	—	燃料体配列体系			
減速材	減速材	—	無/軽水			
	減速材密度	g/cm ³	0	約 1.0		
	減速材中の ほう素濃度	ppm	0	4400 以上		
ラック	ラック 材質	—	無/SUS/B-SUS			
	SUS 製ラックの ほう素添加量	wt%	0	1.05		
反射体	反射体 材質	—	軽水 /コンクリート			

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第2-2表 MDX燃料（FPなし）を使用した臨界実験

項目	単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲
燃料	²³⁵ U濃縮度	MIN MAX
	Pu含有率	1.6 4.8
	燃料材径	5.5 10.9
	燃料体内の減速材 体積／燃料体積	8.19 9.29
	被覆管外径	1.88 2.00
	被覆材材質	9.5 10.72
	燃料要素ピッチ	ジルコニウム合金
	燃料要素配列条件	12.6 14.3
	体系条件	正方配列
	減速材	燃料体配列体系
	水位	無／軽水
	反射体	完全喪失／冠水
	反射体材質	軽水／コンクリート
	EALF	eV
実験ケース数	—	—
解析ケース数	—	—
実験施設	—	—

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

項目	<p style="text-align: center;">実験体系</p>	<p>ベンチマーク 解析結果</p> <p>SCALE6.0 による 実効増倍率の平均、σ</p>
----	---	---

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 2-3 表 FP を含む体系の臨界実験

項目	単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲		
燃料	²³⁵ U 濃縮度	WT%	MIN MAX	
	燃料材径	mm	1.6 4.8	
	燃料体内の減速材 体積／燃料体積	—	8.19 9.29	
	被覆管外径	mm	1.88 2.00	
	被覆材材質	—	9.5 10.72	
	燃料要素ピッチ	mm	ジルコニウム合金	
	燃料要素配列条件	—	12.6 14.3	
	体系条件	—	正方配列	
	減速材	—	燃料体配列体系	
	水位	mm	無／軽水	
反射体	反射体材質	—	完全喪失／冠水	
	EALF	eV	軽水／コンクリート 0.2～約 7eV*	

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

項目	単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲	
		MIN	MAX
FP (中性子吸収体) 核種／元素	-	収率曲線に応じた核種	
中性子吸収体性状	-	固体／液体／気体	
解析ケース	実験ケース数	-	
	解析ケース数	-	
	実験施設	-	

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

項目	<p style="text-align: center;">実験体系</p>	<p>ベンチマーク 解析結果</p>	<p>SCALE6.0による 実効増倍率の平均、σ</p>
----	---	------------------------	---

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表 2-4 塩素を含んだ臨界実験に対するベンチマーク結果

項目		単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲	
			MIN	MAX
燃料	²³⁵ U 濃縮度	WT%	1.6	4.8
	燃料材径	mm	8.19	9.29
	燃料体内の減速材 体積／燃料体積	—	1.88	2.00
	被覆管外径	mm	9.5	10.72
	被覆材材質	—	ジルコニウム合金	
	燃料要素ピッチ	mm	12.6	14.3
	燃料要素配列条件	—	正方配列	
	体系条件	—	燃料体配列体系	
減速材	減速材	—	無／軽水	
	水位	mm	完全喪失／冠水	
反射体	反射体材質	—	軽水／コンクリート	
EALF		eV	0.2～約 7eV [※]	
中性子吸収	FP（中性子吸収体） 核種／元素	—	収率曲線に応じた核種	
	中性子吸収体性状	—	固体／液体／気体	
解析ケース	実験ケース数	—	—	
	解析ケース数	—	—	
	実験施設	—	—	

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

項目		
実験体系		
ベンチマーク 解析結果	SCALE6.0 による 実効増倍率の平均、 σ	

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第3表 SCALE Ver. 6.0 システムの平均誤差及び不確かさ

条件	計算コード	SCALE6.0 システム (KENO-VI)			
	断面積ライブラリ	ENDF/B-VII 238群			
	対象燃料	ウラン燃料 (FPなし)	MDX燃料 (FPなし)	ウラン燃料 (FPあり)	ウラン+MDX燃料 (FPあり)
	ベンチマークケース数	□	□	□	□ □
評価 結果	平均誤差(1- k_c)	0.0007	0.0013	0.0001	0.0001
	加重平均実効増倍率 ($\overline{k_{eff}}$)	0.9993	0.9987	0.9999	0.9999
	不確かさ($\Delta k_c = U \times S_p$)	0.0065	0.0104	0.0067	0.0062
	信頼係数(U)* ¹	□	□	□	□
	$\overline{k_{eff}}$ の不確かさ(S_p)	□	□	□	□

*¹ ベンチマーク解析ケース数に対する95%信頼度・95%確率での信頼係数。

c. 使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価への適用性確認

塩素を有する臨界実験以外では、ベンチマーク解析結果と臨界実験の実効増倍率は概ね一致しており、第2図のとおりその差はほぼ正規分布となることを確認している。選定した臨界実験には、冠水状態の実験及び第4表に示す低水密度状態の実験が含まれており、冠水状態及び低水密度状態の実効増倍率の計算値と測定値の差の傾向に大きな差異がないことが確認できる。また、選定した臨界実験には、部分水位で臨界となるケースも含まれており、気相と液相の境界についても適切に取り扱うことができると言える。

臨界実験ベンチマーク解析の対象となる臨界実験の選定において重要なパラメータは、体系に含まれる「物質（燃料、構造材（吸収材含む）、減速材等）」、その「形状」、及び「中性子エネルギー」であり、ベンチマーク解析では第2-1表に示すとおり燃料貯蔵設備仕様及び燃料仕様等を踏まえ臨界実験を選定している。これ

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

らのパラメータのうち、中性子スペクトルの特性を表す指標である EALF (Energy corresponding to the Average neutron Lethargy causing Fission: 核分裂に寄与する中性子平均エネルギー) について、申請評価の高浜発電所 1, 2 号炉の使用済燃料ピットにおける大量の水の漏えい時の EALF は約 0.2~約 7eV となる。塩素を含む体系以外の選定済みの [] ケースの臨界実験、および申請評価での EALF 範囲の最大値近傍における計算精度の確認用に別途選定した [] ケースの臨界実験の C/E (C: 計算値と E: 測定値の比) に対する EALF を第 3 図に示す。[] ケース全ての臨界実験について、C/E は EALF に対して特異な傾向を持たず、1 近傍で安定していることから、SCALE は EALF に対し良好な計算精度を有していると判断できる。また傾向確認のために追加した [] ケースについても、同様に精度良く計算されていると言える。

したがって、本解析コードを減速材密度条件が異なる 2 相モデルに対して使用する場合においても、第 3 表の臨界計算に考慮すべき平均誤差及びその不確かさを適用することは妥当である。また、ベンチマーク解析結果の実効増倍率が、特定のピット仕様や燃料仕様に依存する傾向もないため、本解析コードを使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価に使用することは妥当である。

なお第 3 図に示す通り、塩素を含む体系に対し実施した臨界実験ベンチマークの結果は、他の臨界実験ベンチマーク結果と比較して C/E が比較的高い傾向にあり全てのケースで C/E は 1.01 を超えており、塩素を含んだ体系は 1% (実効増倍率 0.01 に相当) 以上、安全側の評価結果を与えることを確認している。一方、塩素に起因する誤差については、ベンチマーク解析に関連する文献 (Sobes, VALIDATION STUDY FOR CREDITING CHLORINE IN CRITICALITY ANALYSES FOR SPENT NUCLEAR FUEL DISPOSITION (2015), ICNC) において、100pcm (実効増倍率 0.001 に相当) 程度と小さいことが報告されている。以上のことから、塩素が実効増倍率に与える影響は、安全側な実効増倍率となる評価結果が有する裕度に包含されこととなる。

また、第 5-1 表、第 5-2 表に示す通り、統計的検定により母分散および母平均は等しいか確認した結果、これらが等しいとする仮説は棄却された。よって SCALE6.0 の不確かさを算出するに当たっては、塩素を含む体系での臨界実験ベンチマーク結果は考慮せず、第 3 表に示す [] ケースの臨界実験ベンチマークより得られた結果を考慮する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 4 表 低水密度状態の臨界実験リスト

臨界実験	減速材密度	ケース数

第 5-1 表 塩素を含む臨界実験ベンチマーク結果とそれ以外の臨界実験ベンチマーク結果に対する F 検定

帰無仮説 H_0 : 2 群間の分散に差がない (等分散である)

対立仮説 H_1 : 2 群間の分散に差がある (等分散ではない)

--

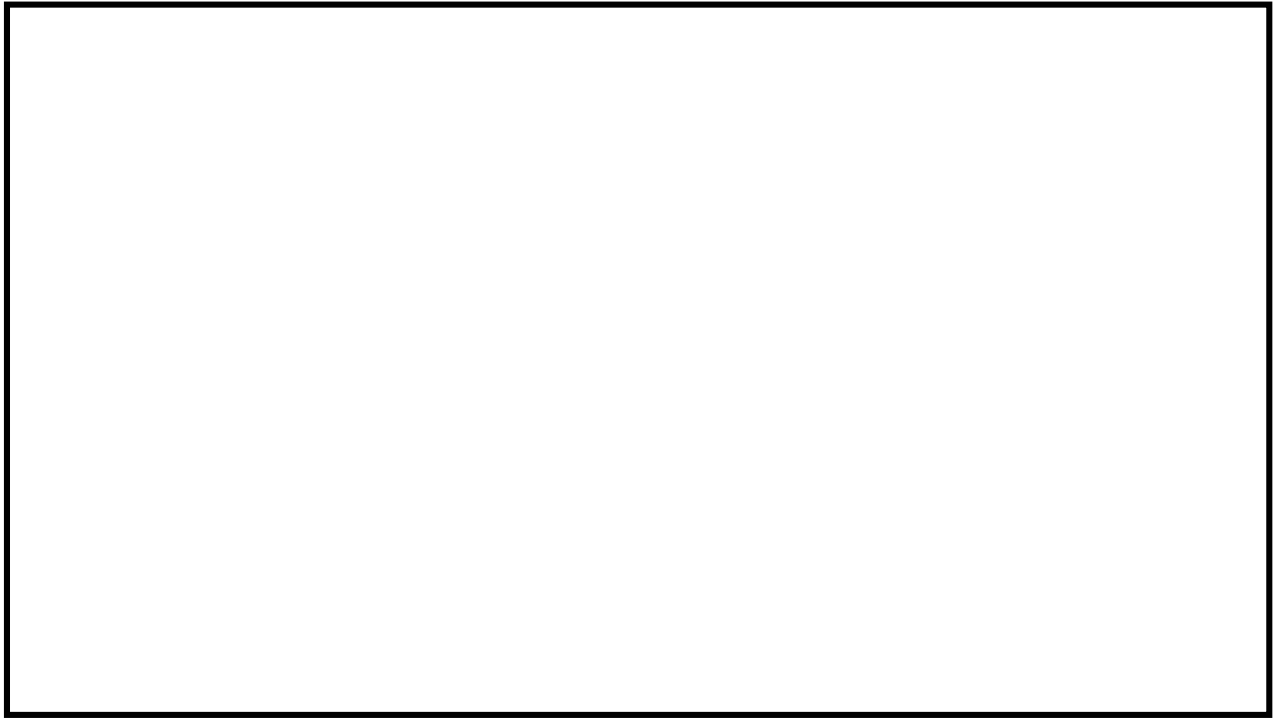
第 5-2 表 塩素を含む臨界実験ベンチマーク結果とそれ以外の臨界実験ベンチマーク結果に対する t 検定

帰無仮説 H_0 : 2 群間の平均に差が無い

対立仮説 H_1 : 2 群間の平均に差がある

--

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第2図 Δk に対するヒストグラム

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 3 図 選定したベンチマーク実験の EALF と C/E の関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考1) 第4表に示す臨界実験の概要を以下に示す。

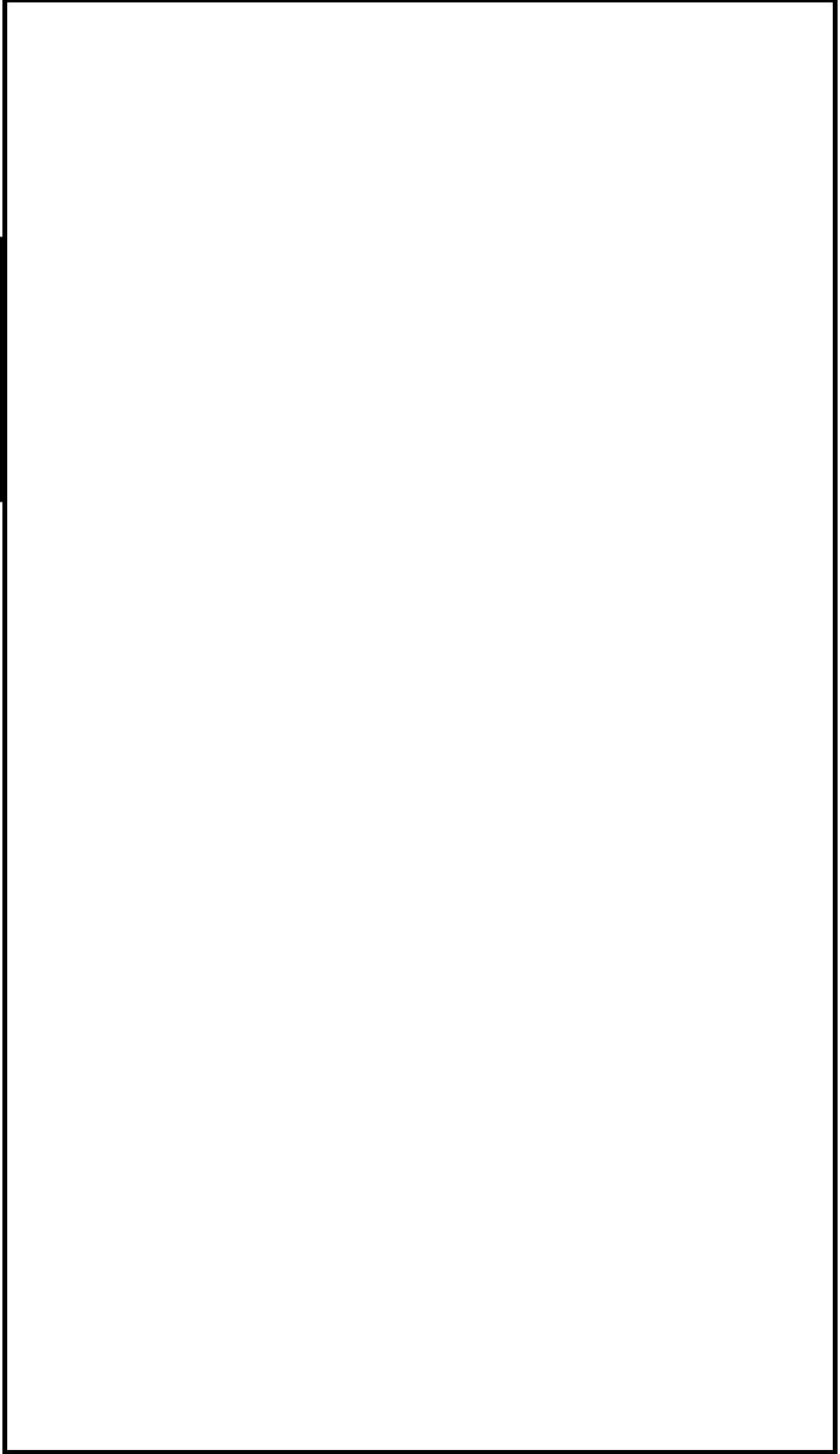


枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考2)

FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析の結果を参考1-1表および第1-2表に示す。

参考1-1表 FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析結果



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

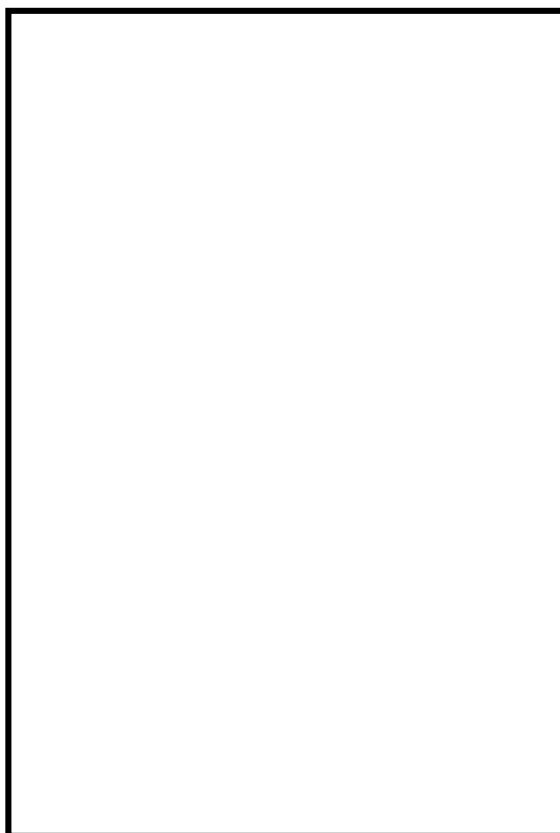
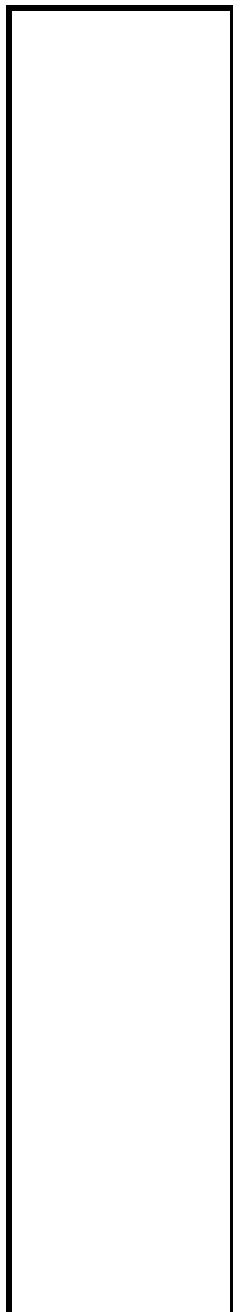
参考 1-2 表 FP を含む体系に対し実施したベンチマーク解析結果



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

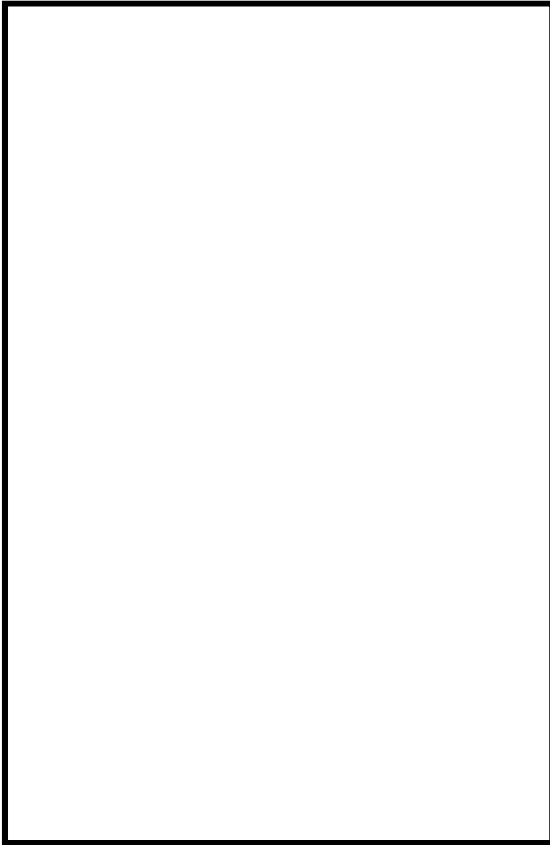
また、参考1表に示す計算結果をFP核種毎に整理したものを参考2表に、C/E評価結果を核種毎でヒストグラムに整理したものを参考図1に示す。

参考2表 FP 毎でのベンチマーク解析結果整理

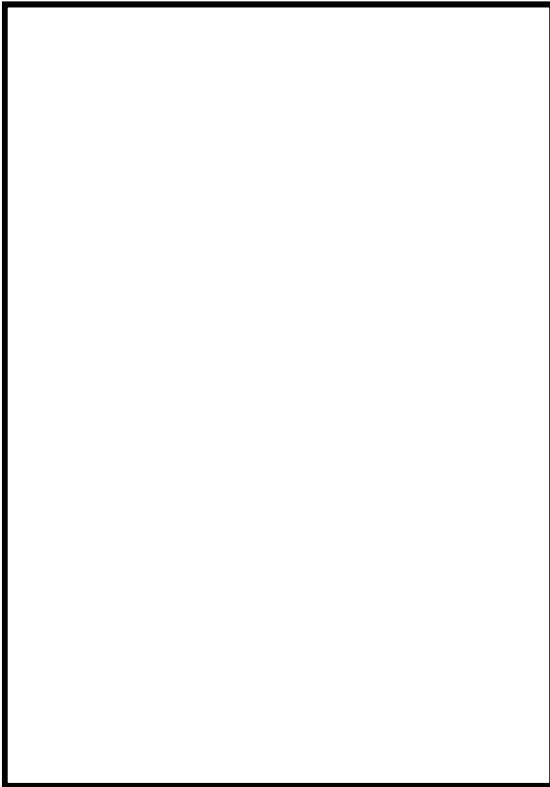


参考図1-1 C/Eの核種毎のヒストグラム

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



参考図 1-2 C/E の核種毎のヒストグラム



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考3)

臨界実験 [] に対し、各 FP 核種を一つずつ無視した場合の感度解析を実施した。解析条件および結果を以下に示す。

【解析条件】

- ・解析対象の実験 : []
- ・対照実験ケース : [] ([] が含まれる実験)
- ・FP 組成 : 実験論文より参考表 1 のとおり。
- ・解析手法 : 同位体の個数密度を 1 種類ずつ無視し、基準となる全核種考慮時の実効増倍率を比較する。

参考表 1 解析対象実験の FP 組成情報

--

[] 枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【解析結果】

断面積が大きい核種である の実効増倍率変化が見られ、その他の核種については明確な感度は見られなかった。

Case ID	keff	σ	$\Delta keff$	考慮しない核種	未臨界性評価で考慮する核種

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

Case	keff	σ	$\Delta keff$	考慮しない核種	未臨界性評価で 考慮する核種

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。