

高浜発電所安全審査資料	
資料番号	2-2
提出年月日	2019年12月17日

## 高浜1号炉及び2号炉

設置許可基準規則等への適合性について  
(使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更)

<補足説明資料>

2019年12月

関西電力株式会社

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	1
2. 設置許可基準規則への適合性 .....	1
3. 評価の基本方針 .....	3
4. 計算方法 .....	3
5. 計算結果 .....	5
別添1 使用済燃料ピット保管時の燃料の管理方法の変更（未臨界性評価の変更）に伴う関係条文の整理表	
別添2 大規模漏えい時の未臨界性評価手法の妥当性について	
別添3 領域管理の設定について	
別添4 大規模漏えい時の未臨界性評価における不確定性評価の考え方	
別紙1 計算機プログラム（解析コード）の概要	
別紙2 実機スプレイ設備を用いた液滴径計測試験について	
別紙3 液滴下降速度の算出について	
別紙4 使用済燃料ピット内におけるスプレイ時の環境条件について	
別紙5 液滴が燃料棒等の表面を流下することによる未臨界性評価への影響について	
別紙6 使用済燃料ピットへの注水・放水設備による流量設定の考え方および根拠について	

## 1. はじめに

### (1) 本設置変更許可申請の目的

本申請は使用済燃料ピットにおける燃料及び内挿物の取扱頻度を大幅に削減することによる安全性向上を目的として、新たに取得した試験データ等を踏まえ、大規模漏えい時における未臨界性評価条件を一部見直し、使用済燃料ピットにおける燃料配置及び中性子吸収体配置の管理を変更する。

### (2) 既許可における領域管理の特徴および変更による効果

高浜 1, 2 号炉の使用済燃料ピットラックはアングル型、ステンレス鋼製であり、大規模漏えい時は、水位の低下により燃料集合体間の中性子の遮蔽効果が低くなることから、未臨界性評価結果が厳しくなる。このため、既許可では臨界を防止するために、燃焼度や中性子吸収体挿入の有無を制限した第1図に示す貯蔵領域を設定（3領域管理）することで実効増倍率が判断基準を満足するようにしているが、3領域管理においては、多くの燃料で中性子吸収体の挿入が必要となる。

この貯蔵領域の設定を、評価条件の一つである水密度条件を見直し、中性子吸収体を考慮しない2領域管理に変更することにより、核分裂生成物を内包する照射燃料の取扱いおよび照射燃料上での内挿物入替の回数を相当量低減でき、安全性向上が図られる。

## 2. 設置許可基準規則への適合性

本設置変更許可申請における関係条文を整理した結果を別添 1 に示す。規則への適合性を示すため、本設置変更許可申請に伴い設計方針を定め、発電用原子炉設置許可変更申請書を以下のとおり修正する。

### ○第七条 発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止

第七条 工場等には、発電用原子炉施設への人の不法な侵入、発電用原子炉施設に不正に爆発性又は易燃性を有する物件その他人に危害を与え、又は他の物件を損傷するおそれがある物件が持ち込まれること及び不正アクセス行為（不正アクセス行為の禁止等に関する法律（平成十一年法律第二百二十八号）第二条第四項に規定する不正アクセス行為をいう。第二十四条第六号において同じ。）を防止するための設備を設けなければならない。

### 規則への適合性

本条文は発電用原子炉施設全般に関係するが、大規模漏えい時の未臨界性評価に係る本申請においては、既存設備の変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止に係る既設置許可の基準適合性確認結果に

影響を与えるものではない。

#### ○第十一条 安全避難通路等

第十一条 発電用原子炉施設には、次に掲げる設備を設けなければならない。

- 一 その位置を明確かつ恒久的に表示することにより容易に識別できる安全避難通路
- 二 照明用の電源が喪失した場合においても機能を損なわない避難用の照明
- 三 設計基準事故が発生した場合に用いる照明（前号の避難用の照明を除く。）及びその専用の電源

#### 規則への適合性

本条文は発電用原子炉施設全般に関係するが、大規模漏えい時の未臨界性評価に係る本申請においては、既存設備の変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、安全避難通路等に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。

#### ○第五十四条 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備

- 1 発電用原子炉施設には、使用済燃料貯蔵槽の冷却機能又は注水機能が喪失し、又は使用済燃料貯蔵槽からの水の漏えいその他の要因により当該使用済燃料貯蔵槽の水位が低下した場合において貯蔵槽内燃料体等を冷却し、放射線を遮蔽し、及び臨界を防止するために必要な設備を設けなければならない。
- 2 発電用原子炉施設には、使用済燃料貯蔵槽からの大量の水の漏えいその他の要因により当該使用済燃料貯蔵槽の水位が異常に低下した場合において貯蔵槽内燃料体等の著しい損傷の進行を緩和し、及び臨界を防止するために必要な設備を設けなければならない。

#### 適合のための設計方針

使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備については、以下のとおり設計する。なお、第五十四条第1項に要求される貯蔵槽内燃料体等の冷却、放射線の遮蔽、及び臨界の防止、また第五十四条第2項に要求される燃料体等の著しい損傷の進行の緩和については、既存設備の変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。

- (1) 使用済燃料ピット水位の異常低下時における使用済燃料ピット内燃料集合体の損傷の進行緩和、臨界防止及び放射性物質の放出低減

使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいが発生し、可搬型代替注水設備においても使用済燃料ピット水位が使用済燃料ピット出口配管下端未満かつ水位低下が継続する場合に、

燃料損傷の進行を緩和し、臨界にならないよう配慮したラック形状及び燃料配置において、スプレーや蒸気条件においても未臨界を維持できることにより臨界を防止する。

### 3. 評価の基本方針

使用済燃料ピットで大規模漏えいが発生した場合、可搬型スプレー設備（使用済燃料ピットへのスプレー）により、使用済燃料ピット内の燃料体等の著しい損傷の進行を緩和し、できる限り環境への放射性物質の放出を低減するため、使用済燃料ピット全面にスプレーを実施し、ラック及び燃料体等を冷却する。

大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価は、可搬型スプレー設備（使用済燃料ピットへのスプレー）にて、ラック及び燃料体等を冷却し、臨界にならないよう配慮したラック形状、燃料配置において、スプレーや蒸気条件においても臨界を防止できることを確認するため、スプレー中の体系をピット内の水が残存している液相部と、水が抜けてスプレーされた領域を気相部とする2つの領域に分け、使用済燃料ピットの水位を純水冠水状態から完全喪失状態まで変化させた条件で評価を行う。評価は、使用済燃料ピット内に燃料体が満たされた状態で行い、大規模漏えい時においても臨界を防止できる燃料配置の成立性を確認する。なお、使用済燃料ピット内の燃料体等の移動に際しては、未臨界が維持できることをあらかじめ確認している条件（初期濃縮度、燃焼度及び配置）に基づき移動することを保安規定に定めて、臨界を防止できるよう管理する。

未臨界性評価手法の妥当性については別添2「大規模漏えい時の未臨界性評価手法の妥当性について」に、使用済燃料ピット内における燃料配置の成立性については別添3「領域管理の設定について」に示す。

また、燃料の燃焼計算には、2次元輸送計算コードPHOENIX-P Ver. 8を使用し、実効増倍率の計算には、3次元モンテカルロ計算コードKENO-VIを内蔵したSCALE Ver. 6.0を使用し、第2図に示す計算フローに従って計算を行う。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙1「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

### 4. 計算方法

#### (1) 計算体系

計算体系は、垂直方向、水平方向ともに有限の体系とする。貯蔵する燃料は、各領域で貯蔵可能な最も反応度の高い燃料を当該領域の全てのラックへ貯蔵することを想定する。また、垂直方向では、上下部の構造物による中性子反射効果を考慮し、燃料有効長上部は低水密度状態においても、十分な中性子の反射効果が得られる厚さ（中性子反射効果が飽和する厚さ）である300mmの水反射と仮定し、燃料有効長下部についても同様に、1,000mmのコンクリートとして評価する。水平方向では、ピット側面の構造物による中性子反射効果を考慮し、垂直

方向上部と同様に300mmの水反射を仮定する。未臨界性評価の計算体系を第3図～第5図に示す。

## (2) 評価条件の検討

評価条件の検討フローを第6図に示す。未臨界性評価は、検討フローに従い各評価条件を設定し評価する。

## (3) 計算条件

評価の計算条件は以下のとおり、貯蔵される燃料仕様の範囲内で未臨界性評価上厳しい結果を与えるように設定している。

- (a) 評価にはより反応度の高い55GWd/tウラン燃料を使用し、その初期濃縮度は、約4.60wt%以下に対して濃縮度公差を見込み  wt%とする。
- (b) 貯蔵する燃料の燃焼度別に使用済燃料ピット内を2つの領域に分けて、それぞれの領域では燃焼度0、20GWd/tの燃料を貯蔵することを想定する。
- (c) 燃料有効長は、公称値3,642mmから延長し、3,660mmとする。
- (d) ラックの厚さは、中性子吸収効果を少なくするため仕様下限値  とする。
- (e) 使用済燃料ピット内の水は純水とし、残存するピット水に含まれる、中性子吸収効果を有するほう素は考慮しない。
- (f) 液相部の水密度は、高水密度範囲において水密度が  $1.0 \text{ g/cm}^3$  から低下するにつれて実効増倍率が低下することから、最も評価結果が厳しくなる水密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  とする。
- (g) 気相部の水密度は、スプレイ流量・放水範囲などを保守的に設定した値である  $0.04 \text{ g/cm}^3$  とする。

また、以下の計算条件は公称値を使用し、正負の製作公差を未臨界性評価上厳しくなる側に不確定性として考慮するもの（以下「製作公差に基づく不確定性として考慮する計算条件」という。）である。なお、製作公差に基づく不確定性として考慮する計算条件には、ラック内での燃料体等が偏る効果を含む。

- (h) ラックの中心間距離
- (i) ラックの内り
- (j) ラック内での燃料体等が偏る効果（ラック内燃料偏心）
- (k) 燃料材の直径及び密度
- (l) 燃料被覆材の内径及び外径
- (m) 燃料要素の中心間隔（燃料体外寸）

本計算における計算条件を第1表に、不確定性評価の考え方について別添4「大規模漏えい

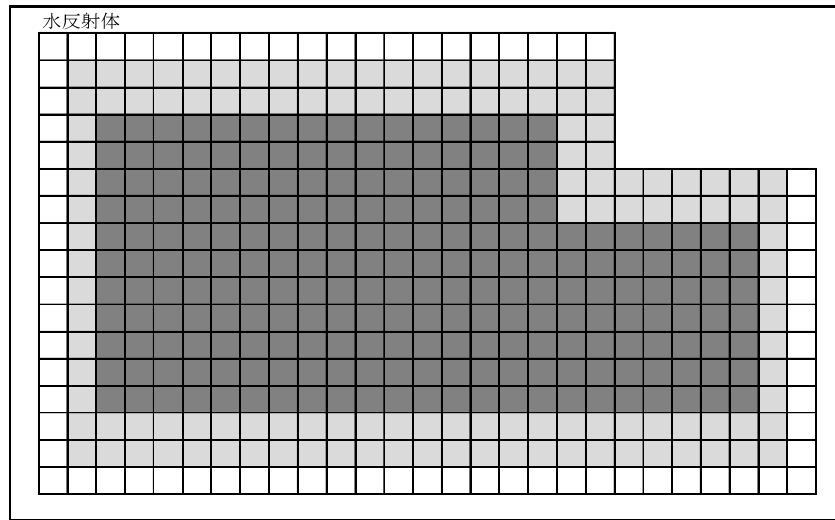
時の未臨界性評価における不確定性評価の考え方」に示す。

#### 5. 計算結果

未臨界性評価結果を第2表に示す。第7図のとおり、純水冠水状態から液相部高さ（水位）の低下に伴い実効増倍率は減少する。このため、実効増倍率は水位が最も高い純水冠水状態において最大で0.944となり、これに不確定性0.0152を考慮しても実効増倍率は0.959<sup>(注)</sup>であり、実効増倍率0.98以下を満足している。

以 上

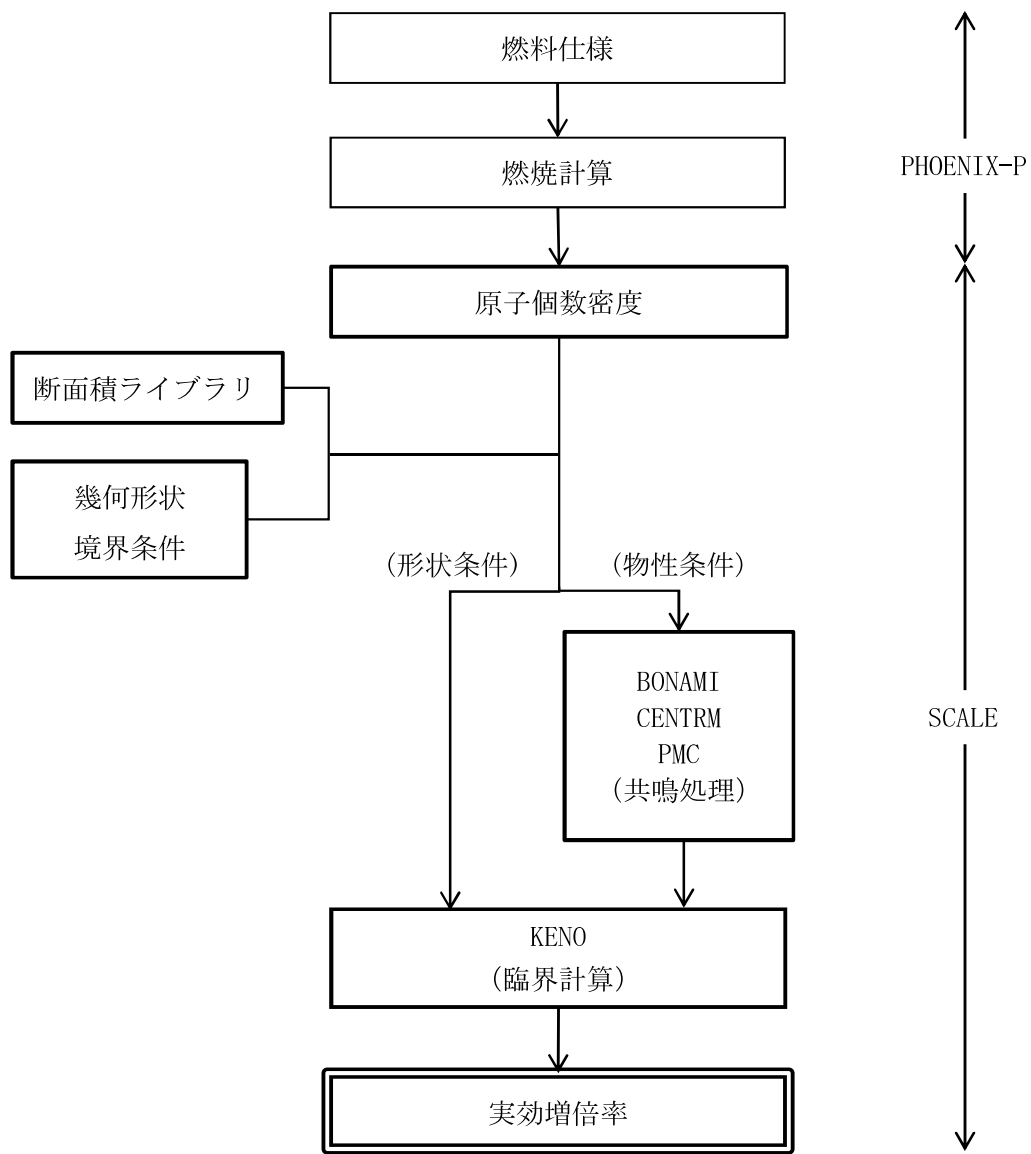
(注) 0.9587 (=0.9435+0.0152) の小数第4位を切り上げた値



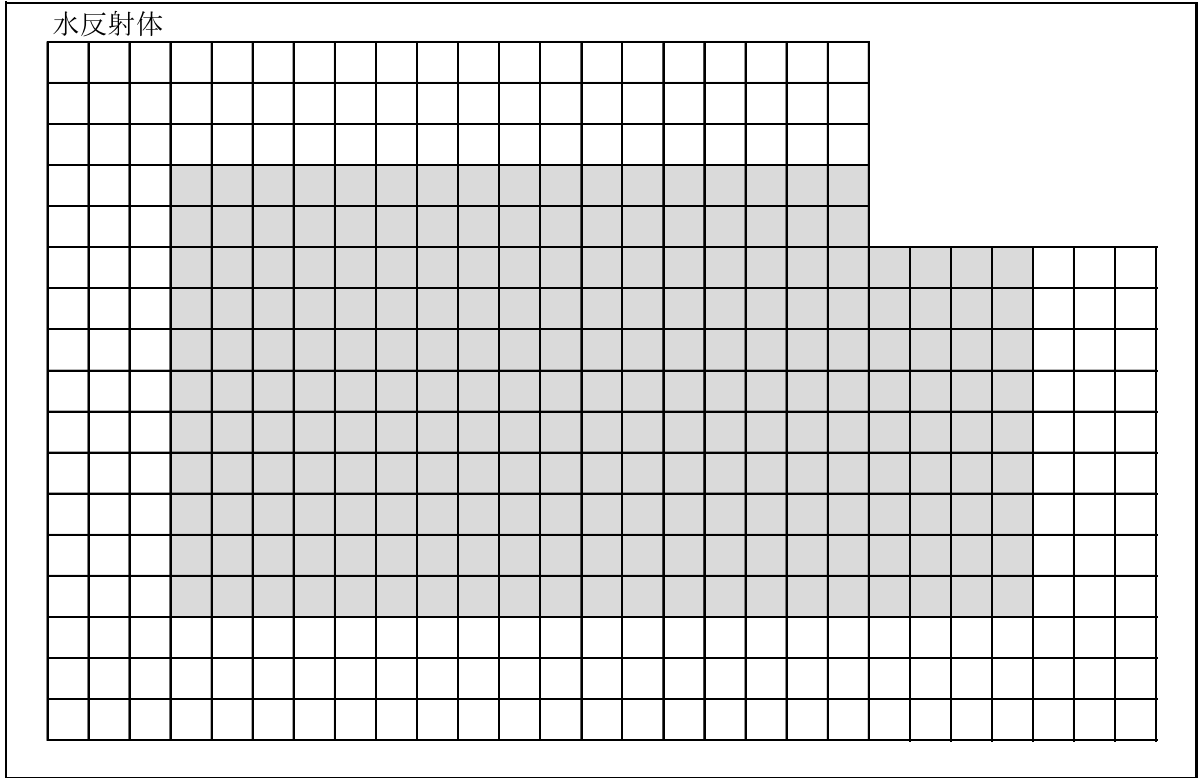
	55GWd/t 燃料 (初期濃縮度約 4.6wt%)		48GWd/t 燃料 (初期濃縮度約 4.0wt%)	
	使用済燃料ピット用 中性子吸収体なし	使用済燃料ピット用 中性子吸収体あり	使用済燃料ピット用 中性子吸収体なし	使用済燃料ピット用 中性子吸収体あり
□領域 A	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上
■領域 B	燃焼度 20GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 15GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上
■領域 C	燃焼度 50GWd/t 以上	燃焼度 15GWd/t 以上	燃焼度 45GWd/t 以上	燃焼度 10GWd/t 以上

第1図 既許可における領域管理



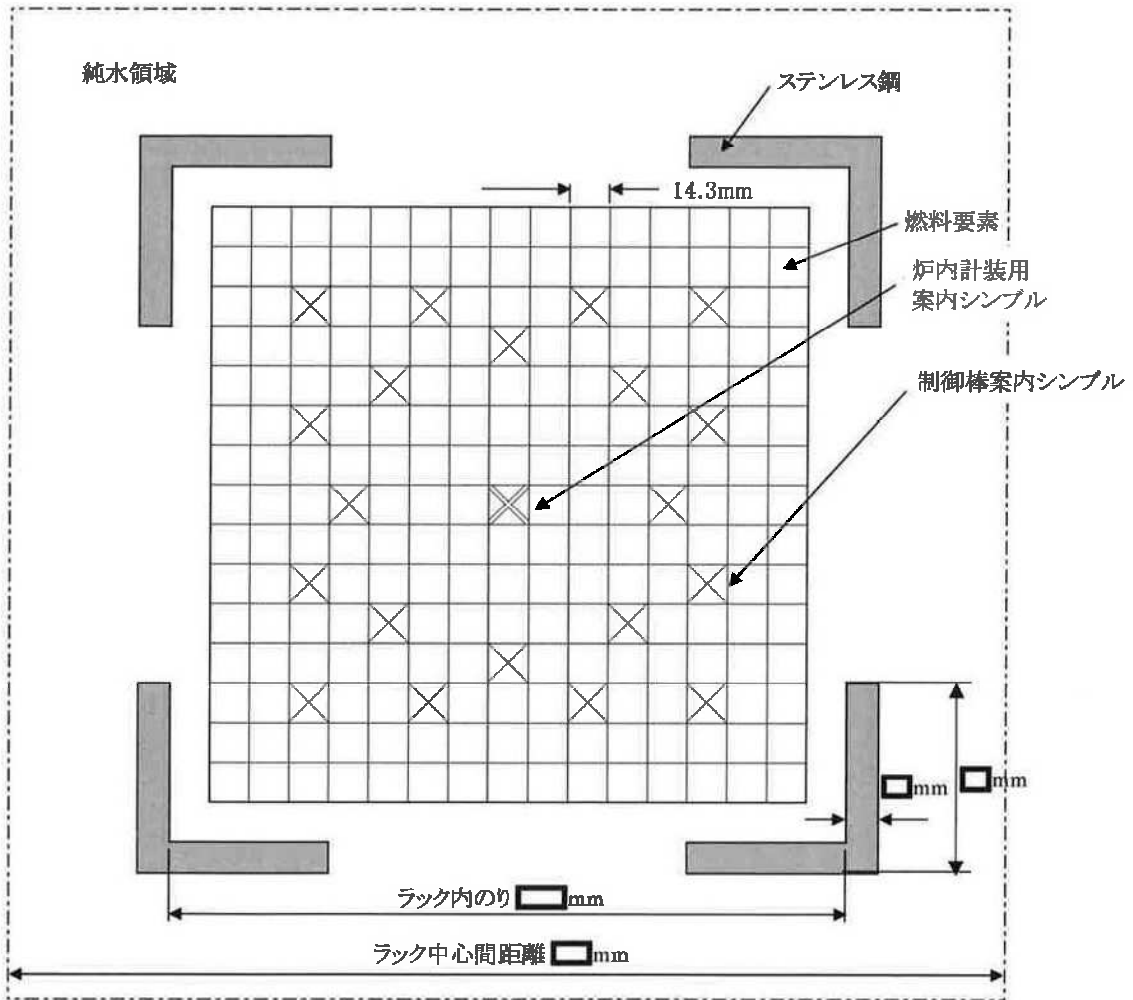


第2図 計算フロー



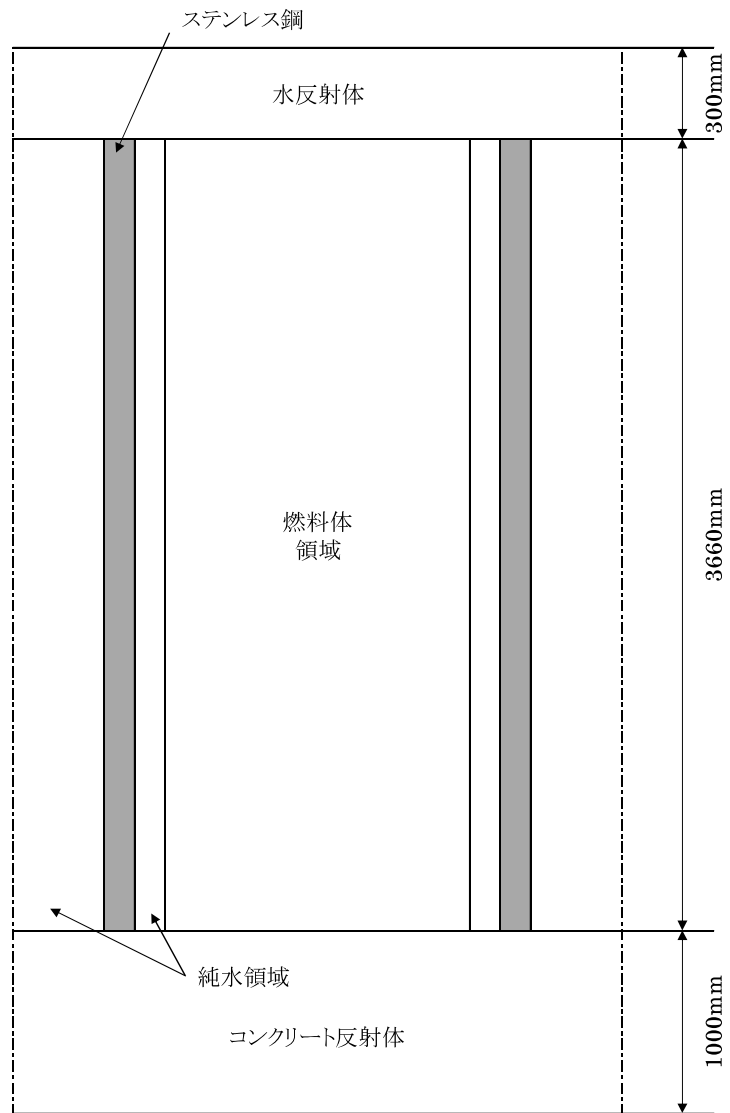
- :領域A（ウラン新燃料（燃焼度 0GWd/t）を貯蔵、貯蔵容量 201 体）
- :領域B（ウラン燃焼燃料（燃焼度 20GWd/t）を貯蔵、貯蔵容量 223 体）

第 3 図 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系（水平方向）



第3図 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系（水平方向）  
（燃料体部拡大図）

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。

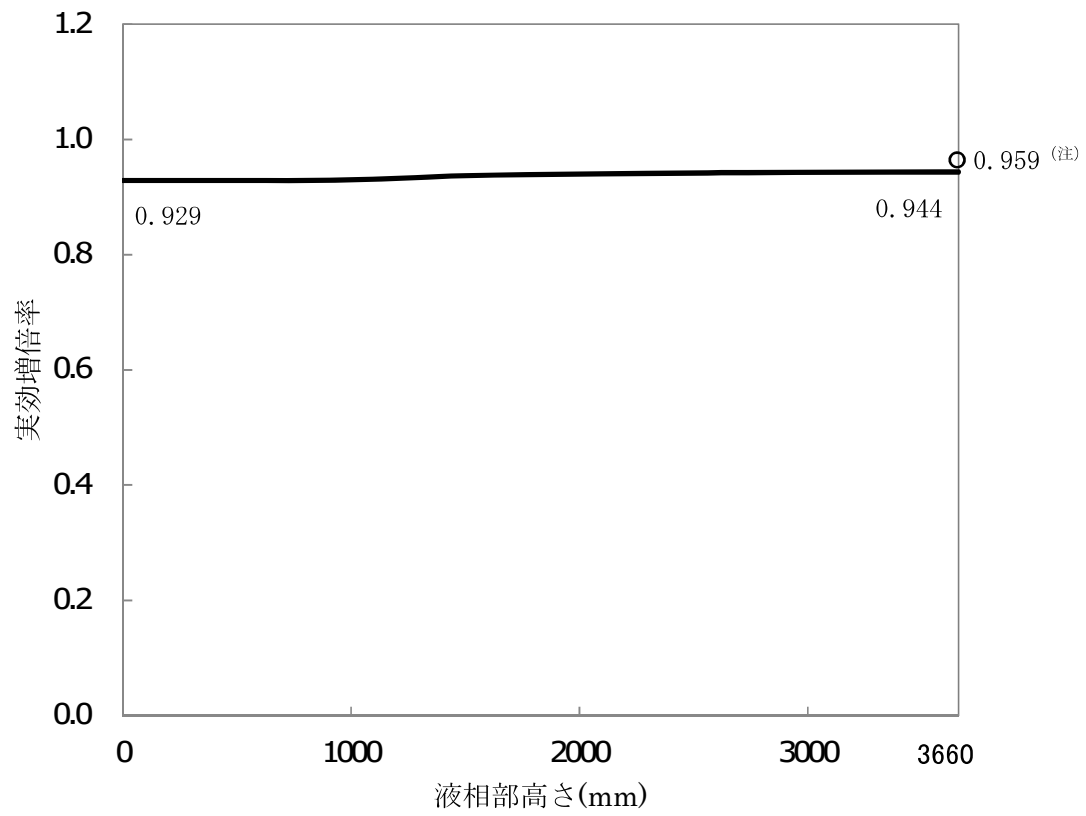


第5図 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系（垂直方向）

### <未臨界性評価の検討フロー>



第6図 未臨界性評価の検討フロー



第7図 実効増倍率評価結果

(注) 0.9587 (=0.9435+0.0152) の小数第4位を切り上げた不確定性を含む値。

第1表 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算条件

		計算条件	備考
(燃料体)		15×15 型ウラン燃料	—
燃料 <sup>235</sup> U 濃縮度		□ wt%	4.60wt%に濃縮度公差を見込んだ値
燃料材密度		理論密度の 97%	(注 1)
燃料材直径		9.29mm	(注 1)
燃料被覆材			
内径		9.48mm	(注 1)
外径		10.72mm	(注 1)
燃料要素中心間隔		14.3mm	(注 1)
燃料有効長		3,660mm	公称値 3,642mm を延長
貯蔵領域	領域 A	燃焼度 0GWd/t の燃料を貯蔵	(注 2)
	領域 B	燃焼度 20GWd/t の燃料を貯蔵	
(ラック)		—	配置は第 3 図参照
ラックタイプ		アングル型	—
ラックの中心間距離		□ mm × □ mm	(注 1)
材 料		ステンレス鋼	—
厚 さ		□ mm	(注 3)
内のり		□ mm × □ mm	(注 1)
(使用済燃料ピット内の水分条件)		純水	残存しているほう素は考慮しない
液相部水密度		1.0 g/cm <sup>3</sup>	(注 4)
気相部水密度		0.04 g/cm <sup>3</sup>	(注 5)

(注 1) 製作公差に基づく不確定性として考慮する計算条件

(注 2) 実運用上、各領域にはより燃焼度が高い燃料が貯蔵されるが、保守的に各領域で貯蔵可能燃料のうち最も燃焼度の低い燃料を選定

(注 3) 中性子吸収効果を少なくするため下限値を使用

(注 4) 液相部の水密度は、高水密度範囲でのうち最も評価結果が厳しくなる値である 1.0 g/cm<sup>3</sup> とする。

(注 5) 気相部の水密度には、スプレー流量・放水範囲などを保守的に設定した値である 0.04 g/cm<sup>3</sup> を適用する。

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2表 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価結果

	評価結果 <sup>(注1)</sup>	判断基準
実効増倍率	0.959 <sup>(注2)</sup> (0.944)	≤0.98

(注1) 不確定性を含む。( )内は不確定性を含まない値。

(注2) 0.9587 (=0.9435+0.0152) の小数第4位を切り上げた値



別添1 使用済燃料ピット保管時の燃料の管理方法の変更（未臨界性評価の変更）に伴う関係条文の整理表

関係条文	○
無関係	×

条文	条文との関係性	備考
第1条 一条 適用範囲	×	適用する基準（法令）についての説明であり、要求事項ではないため、関係条文ではない。
第2条 二条 定義	×	言葉の定義であり、要求事項ではないため、関係条文ではない。
第3条 三条 DB地盤	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、設計基準対象施設の地盤に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第4条 四条 耐震	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、地震による損傷の防止に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第5条 五条 津波防護	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、津波による損傷の防止に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第6条 六条 想定される自然現象	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、外部からの衝撃による損傷の防止に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第6条 六条 竜巻	×	同上
第6条 六条 外部火災	×	同上
第6条 六条 火山	×	同上
第7条 七条 不法な侵入	○	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第8条 八条 内部火災	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、火災による損傷の防止に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第9条 九条 内部漏水	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、漏水による損傷の防止に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第10条 十条 誤操作防止	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、誤操作の防止に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第11条 十一条 安全避難通路	○	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、安全避難通路等に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第12条 十二条 安全施設	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、安全施設に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第13条 十三条 運転時の異常な過渡変化	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第14条 十四条 全交流動力電源喪失対策設備	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、全交流動力電源喪失対策設備に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第15条 十五条 炉心等	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、炉心等に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第16条 十六条 燃料取扱・貯蔵設備	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、燃料取扱・貯蔵設備に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。 なお、本申請は、重大事故等時における使用済燃料貯蔵施設の未臨界性評価の解析条件の変更（水密度の変更等）および設計基準対象設備と兼用しない重大事故等対処設備の削除（中性子吸収体の削除）であり、設計基準対象施設に対する申請書の記載に影響を与えるものではない。
第17条 十七条 RCPB	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、原子炉冷却材圧力バウンダリに係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第18条 十八条 蒸気タービン	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、蒸気タービンに係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第19条 十九条 ECCS	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、非常用炉心冷却設備に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第20条 二十条 RCS補給	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、一次冷却材の減少分を補給する設備に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第21条 二十一条 残留熱除去	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、残留熱を除去することができる設備に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第22条 二十二条 UHS	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第23条 二十三条 計装制御系統施設（SFP監視計器）	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、計装制御系統施設に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第24条 二十四条 安全保護回路	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、安全保護回路に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第25条 二十五条 I & C	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、反応度制御系統及び原子炉停止系統に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第26条 二十六条 原子炉制御室等	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、原子炉制御室等に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第27条 二十七条 廃棄物処理施設	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、放射性廃棄物の処理施設に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第28条 二十八条 廃棄物貯蔵施設	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、放射性廃棄物の貯蔵施設に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第29条 二十九条 直接ガンマ線	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第30条 三十条 放射線防護	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、放射線からの放射線業務従事者の防護に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第31条 三十一条 監視設備（周辺モニタリング）	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、監視設備に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第32条 三十二条 CV	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、原子炉格納施設に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第33条 三十三条 保安電源	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、保安電源設備に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第34条 三十四条 緊急時対策所	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、緊急時対策所に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第35条 三十五条 通信連絡設備	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、通信連絡設備に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第36条 三十六条 補助ボイラ	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、補助ボイラに係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。

	条文	条文との関係性	備考
第37条	三十七条 SA拡大防止	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、重大事故等対処施設に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第38条	三十八条 SA地盤	×	同上
第39条	三十九条 地震 (SA荷重組合せ等を含む)	×	同上
第40条	四十条 津波	×	同上
第41条	四十一条 火災	×	同上
第42条	四十二条 特重	×	同上
	1.0 共通	×	同上
	2. 大規模損壊	×	同上
第43条	四十三条 全般に係る事項	×	同上
第44条	四十四条 緊急停止失敗時の未臨界/ 1.1 緊急停止失敗時の未臨界	×	同上
第45条	四十五条 RCPB高圧時冷却/1.2 RCPB高圧時冷却	×	同上
第46条	四十六条 RCPB減圧/1.3 RCPB減圧 (SGTR発生時の手順・I S L O C A)	×	同上
第47条	四十七条 RCPB低圧時冷却/1.4 RCPB低圧時冷却	×	同上
第48条	四十八条 最終ヒートシンク/1.5 最終ヒートシンク	×	同上
第49条	四十九条 CV内の冷却/1.6 CV 冷却	×	同上
第50条	五十条 CV過圧破損防止/1.7 C V過圧破損防止	×	同上
第51条	五十一条 CV下部冷却/1.8 CV 下部冷却	×	同上
第52条	五十二条 水素爆発CV破損防止/ 1.9 水素爆CV破損防止	×	同上
第53条	五十三条 水素爆発RB等損傷防止/ 1.10 水素爆発RB等損傷防止	×	同上
第54条	五十四条 SFP冷却/1.11 SFP 冷却	○	使用済燃料貯蔵設備における臨界の防止に係る条文であり、設備要求を満足することを確認する必要があることから、本条文は適用対象。
第55条	五十五条 放射性物質の拡散抑制/ 1.12 放射性物質の拡散を抑制	×	本申請は既存設備に変更はなく、及びそれらの運用の変更は伴わないことから、重大事故等対処施設に係る既設置許可の基準適合性確認結果に影響を与えるものではない。
第56条	五十六条 重大事故等の収束に必要と なる水源/ 1.13 重大事故等の収束に必要と なる水源	×	同上
第57条	五十七条 電源設備/1.14 電源	×	同上
第58条	五十八条 計装設備/1.15 計装	×	同上
第59条	【二十六条 原子炉制御室等】 五十九条 原子炉制御室/ 1.16 原子炉制御室の居住性等に関する 手順等	×	同上
第60条	【三十一条 監視設備 (周辺モニタリ ング)】 六十条 監視測定設備/1.17 監視測 定	×	同上
第61条	【三十四条 緊急時対策所】 六十一条 緊急時対策所/1.18 緊急 時対策所	×	同上
第62条	【三十五条 通信連絡設備】 六十二条 通信連絡/1.19 通信連絡 に関する手順等	×	同上

## 別添 2 大規模漏えい時の未臨界性評価手法の妥当性について

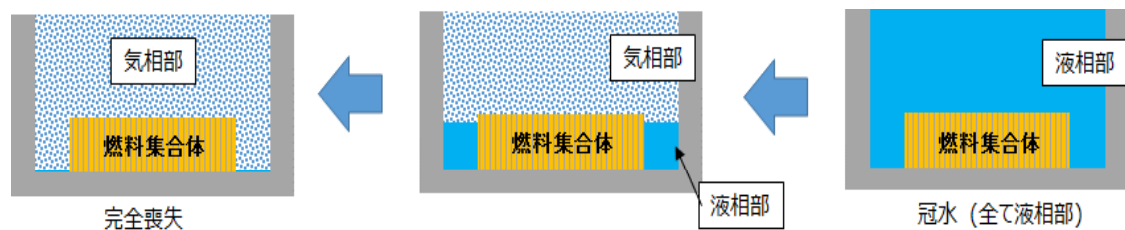
### 1. はじめに

高浜 1, 2 号炉の使用済燃料ピット (SFP) における大規模漏えい時には、SFP の水位が低下するとともに、可搬型スプレイ設備により SFP 全面へのスプレイを実施する。このため、スプレイ中の SFP 雰囲気は、液相部 (ピット水) と気相部 (スプレイ水と蒸気) の 2 相に分かれ、ピット水の漏えいが進むにつれ徐々に液相部水位が低下していく。既許可における大規模漏えい時の未臨界性評価では、SFP 内における水密度状態を包絡する条件として、液相、気相を区別せず、SFP 全体の水密度を一様として水密度範囲  $0.0 \sim 1.0 \text{g/cm}^3$  の条件で評価をしていた (第 2-1 図)。

本申請における大規模漏えい時の未臨界性評価では、実態に則して SFP 雰囲気が液相部と気相部に分かれた状態で水位が低下するという現象に合わせ、残存しているピット水より上部の気相部とピット水のある液相部の 2 相に分けた状態で、液相部水位を変化させて評価を実施する (第 2-2 図)。本資料では、水位変化を踏まえた評価手法の妥当性について説明する。



第 2-1 図 既許可における未臨界性評価体系



第 2-2 図 実態に則した未臨界性評価体系

### 2. 2 相モデルの考え方

大規模漏えい時の現象に合わせ、液相部 (ピット水) と気相部 (スプレイ水と蒸気) の 2 相に分け、それぞれの水密度を実効増倍率が高くなるように保守的な値に固定した条件で、液相部水位をパラメータとして変化させた評価を行う。また、燃料体の上部および体系側面の反射体の設定にあたっては、中性子の漏れが少なくなるように、低水密度の状態であっても上部には保守的に 300mm の水反射体を設定し、下部には 1000mm のコンクリート反射体を設定する。

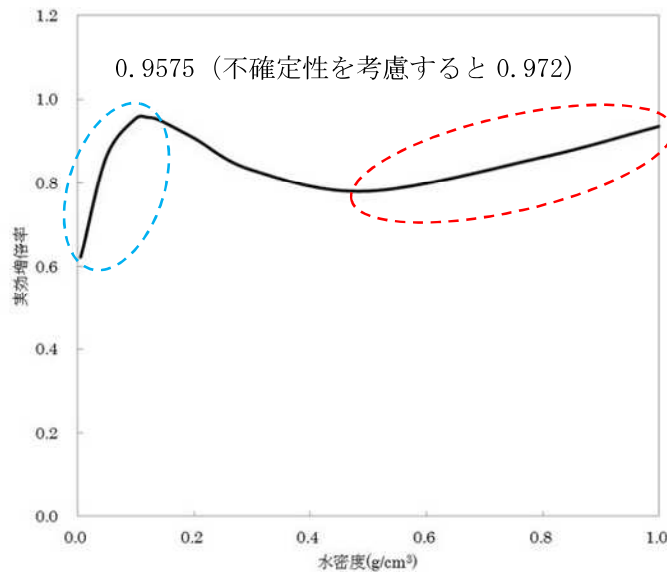
### 3. 水密度設定の考え方

SFP から大量の水が漏れいし、可搬型代替注水設備による給水を行っても SFP 水位が SFP 出口配管下端未満で、かつ水位低下が継続する場合には、可搬型スプレイ設備であるスプレイヘッドにより海水を SFP へスプレイする。

スプレイ中の SFP の水分雰囲気は液相部と気相部に分かれ、液相部は水の漏れいが進むにつれ燃料冠水状態から徐々に水位が低下し、気相部は崩壊熱により液相部から蒸発する水蒸気とスプレイヘッドから放出される液滴が混在した状態になることから、液相部、気相部の水密度を設定し未臨界性評価を実施する。なお、気相部についてはスプレイヘッド使用時の使用条件及び SFP の環境条件を踏まえ、保守的な水密度を設定する。

#### 3.1 液相部水密度の設定について

SFP は大気圧下であることから、崩壊熱によりピット水の沸騰が発生し、液相部の水密度が  $1.0 \text{ g/cm}^3$  から低下すると考えられる。第 2-3 図に既許可の水密度を  $0.0 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$  に変化させた際の未臨界性評価結果を示すが、水密度が高い範囲においては水密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  において実効増倍率が最大値となることから、液相部の水密度は  $1.0 \text{ g/cm}^3$  を設定する。



第 2-3 図 既許可における未臨界性評価結果

### 3.2 気相部水密度の検討

#### (1) 気相部水密度設定の考え方

気相部水密度は、放水されるスプレイ水の状態およびSFP内の環境条件を踏まえ設定する。スプレイされた液滴は、空間中に放出された後、SFP内の重大事故等時における温度や圧力、または崩壊熱によりピット水が蒸発することによる上昇流等、様々な環境条件の影響を受けながら落下していくと考えられる。第2-3図に示すように、水密度が低い気相部領域において、水密度が0.0～約0.1 g/cm<sup>3</sup>での範囲では水密度が大きくなると実効増倍率が大きくなる傾向にあることから、気相部水密度の設定に当たってはこの傾向を踏まえ、実効増倍率が厳しくなるよう保守的に設定する。気相部水密度算出時において考慮すべき事象を抽出するために、第2-4図のとおり気相部水密度に影響を与えうる事象を整理した。気相部水密度算出においては、第2-4図に示した各項目のうち、試験により取得したデータ、保守的に設定した条件等を適切に考慮した上で、余裕を持った値を設定する。また、設定において考慮していない影響因子について、その影響が余裕に含まれることを確認する。

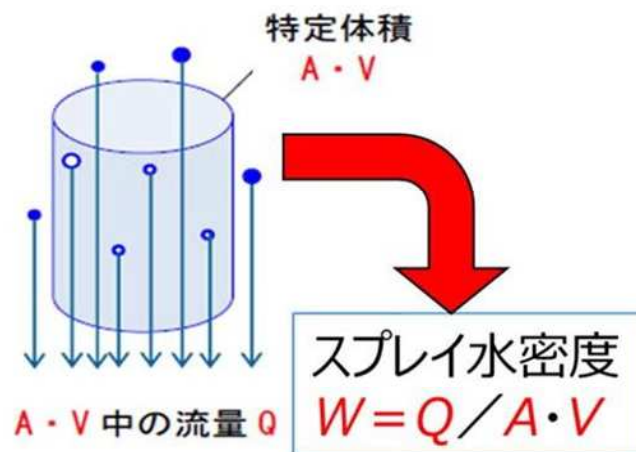


第2-4図 スプレイによる気相部水密度への影響

## (2) 気相部水密度の算出方法

気相部水密度は、スプレーされた液滴が空間を占める割合である水密度(スプレー水密度)に、SFP内の環境条件等による影響を考慮することにより設定する。スプレー水密度は、単位時間に単位面積を通過するスプレー水の空間存在率であり、以下の通り算出する。

断面積  $A[\text{cm}^2]$  当たりのスプレー流量を  $Q[\text{cm}^3/\text{s}]$  とし、スプレー液滴の下降速度を  $V[\text{cm}/\text{s}]$  とする場合、単位時間に断面積  $A[\text{cm}^2]$  を通過するスプレー水が占める空間体積は、 $A \cdot V[\text{cm}^3]$  となる。常温・常圧での水密度は  $1[\text{g}/\text{cm}^3]$  であるため、同体積中に  $Q[\text{cm}^3]=Q[\text{g}]$  の水が存在することとなり、スプレー水密度  $W$  は、 $Q/(A \cdot V)[\text{g}/\text{cm}^3]$  となる。空間体積  $A \cdot V[\text{cm}^3]$  中あたりの流量  $Q[\text{cm}^3]$  の存在率を示す概要図を第 2-5 図に示す。スプレー液滴の下降速度を求めるためには、液滴径を定める必要があるため、試験によりスプレー時の液滴状態を把握し、十分な保守性を考慮することを前提に、試験結果を踏まえ設定する。(液滴径が設定値から変動する可能性はあるが、変動による気相部水密度への影響については、第 2-4 図に示すとおり、未臨界性評価用に設定する気相部水密度が有する余裕に包含されることを確認する。)



第 2-5 図 空間体積  $A \cdot V\text{cm}^3$  中あたりの流量  $Q$  の存在率を示す概要図

また、重大事故等時の SFP 内の環境条件が気相部水密度へ与える影響を加味するため、第 2-1 表に示す SFP 内の上昇流、蒸気の凝縮、飽和蒸気を考慮する。

なお、気相部水密度を算出する際に考慮すべき、使用済燃料ピット内環境条件がスプレー水密度へ与える影響について別紙 4 「使用済燃料ピット内におけるスプレー時の環境条件について」に示す。

第 2-1 表 スプレー水密度への影響を考慮する項目

考慮する項目	計算条件	説明
上昇流	-10cm/s	崩壊熱が高くなるよう燃料取出直後の状態を考慮し、各定検で取り出された燃料が SFP 満杯になるまで貯蔵した場合を想定した熱負荷から求められる上昇流は最大でも約 8.8cm/s である。よって、液滴下降速度が上昇流により 10cm/s 低下するとする。
蒸気の凝縮	×1.2	0℃のスプレー水が 100℃まで達する場合の顕熱と飽和水蒸気が飽和水に凝縮する潜熱を考慮すると、スプレー水が凝縮させ得る飽和蒸気量はスプレー水に対して最大 19%となる。よって、流量を 1.2 倍とする。
飽和蒸気	+0.0006 g/cm <sup>3</sup>	100℃における飽和蒸気密度 0.0006 g/cm <sup>3</sup> を加算する。

(3) 実機スプレー設備放水時の液滴分布（体積分率）測定について

(2)のスプレー水密度算出式  $W=Q/(A \cdot V)$  において、液滴の下降速度  $V$  を設定する必要がある。SFP 上面に設置されたスプレーヘッドから放出された液滴は、自由落下により使用済燃料ラック頂部に達し、燃料領域へ入る。そこで、ラック頂部での下降速度を(2)の  $V$  に設定する。

使用済燃料ラック頂部高さはスプレーヘッドより約 8m 下にあり、スプレーから放出された液滴が小さい場合、終端速度に達すると考えられる。そこで、使用済燃料ラック頂部での液滴径を把握するため、SFP と類似した設備（縦 5m×横 10m×深さ 9m）において、実機スプレー設備を用いた放水を行い、使用済燃料ラック頂部高さ相当位置での液滴径毎の個数割合を取得した。この結果、液滴径は直径 0.2～0.4mm にピークが確認された。また、水密度には水の重量＝体積（大気圧下）が影響することから、個数割合に各液滴径の体積を乗じた体積分率として整理した。この結果、試験により得られた平均液滴径は、全測定点において 1.0mm を上回っていた。液滴径 1mm では約 3～4m で終端速度に達することから、使用済燃料ラック頂部高さ相当位置においては下降速度が終端速度となっている。

液滴下降速度  $V$  が小さいほど水密度が高くなることから、スプレー水密度の設定にあたっては、水密度が高くなるように液滴径を 1.0mm と設定し、その終端速度約 390cm/s を液滴の下降速度  $V$  とした。なお、実施した試験の詳細および液滴下降速度の算出方法については、それぞれ別紙 2「実機スプレー設備を使用した液滴径計測試験について」、別紙 3「液滴下降速度の算出について」に示す。

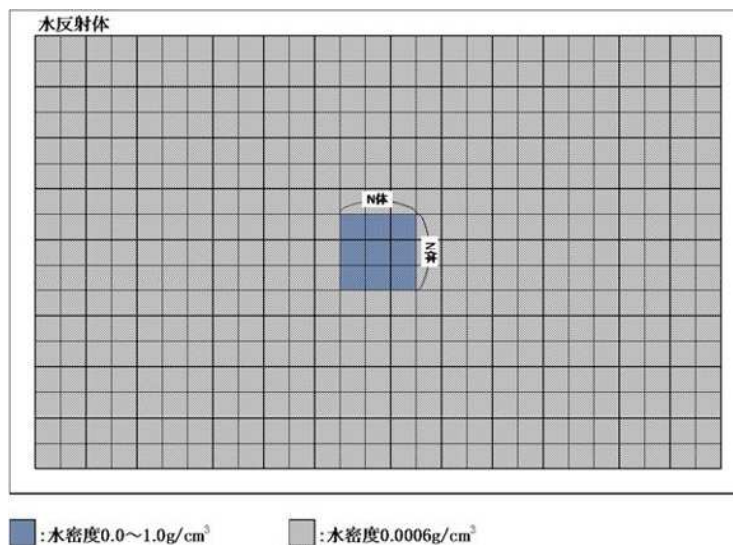
#### (4) スプレー水密度算出時における流量の保守性検討

スプレー水密度には、スプレー時における SFP 内の雰囲気による影響を考慮するとともに、可搬型スプレー設備の流量等の不確定性を包絡するような保守的な値を設定することを目的として、流量に大きな保守性を持たせる。流量の保守性については、スプレーヘッドの定格流量全てがある狭い範囲に集中すると仮定した場合の水密度を、SFP 全面に適用することにより設定する。

ここで、ある狭い範囲については、高浜 1, 2 号炉のラック仕様において N×N ラックに新燃料がある場合の実効増倍率を求め、不確定性を考慮しても未臨界の判断基準を超えない最大の範囲を設定することとした。解析体系を第 2-6 図に、評価条件を第 2-2 表に示す。より狭い範囲を設定すべく、評価条件は申請評価の評価条件と異なり、より実効増倍率を高める条件として 55GWd/t 新燃料のみの配置に加え、水密度についても仮想的に 0.0~1.0g/cm<sup>3</sup> に一様に変化させ、評価結果が厳しくなる条件を設定した。評価の結果、第 2-3 表に示す通り、3×3 ラックは判断基準の 0.98 を下回るが、4×4 ラックでは不確定性を考慮すると判断基準を超えることが確認できた。よって放水範囲として設定する狭い範囲は 3×3 ラックとする。なお、3×3 ラックでは、実効増倍率が水密度 1.0g/cm<sup>3</sup> で最大となっており、3×3 ラック外の水密度をより厳しい 1.0g/cm<sup>3</sup> に変更した場合においても、設計基準における純水冠水状態での評価結果 0.953<sup>\*</sup>(不確定性を含まない値)から、実効増倍率は不確定性を考慮しても 0.98 を超えないため、3×3 ラックでは判断基準を下回るという評価結果に影響しない。

※評価コードを PHOENIX-P/HIDRA、燃料の濃縮度条件を   wt% とし、無限配列体系で評価した結果

3×3 ラックにスプレー水が集中した場合の水密度を SFP 全面に適用するには、424(ラック総数)/9 倍、すなわち約 47 倍の流量によるスプレーが必要であることから、スプレー水密度算出時に設定する流量の保守性を約 47 倍とする。



第 2-6 図 狭い範囲を設定する解析の評価体系

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 ある狭い範囲を求めるための解析条件

	計算条件	備考
燃料仕様・配置	55GWd/t 燃料（新燃料）	実効増倍率を高める反応度の高い新燃料を選定
ラック仕様	ラック構造：アングル型 ラック材質：ステンレス鋼製 ラック配列：27×17 ラック	高浜 1， 2 号炉のラック仕様と同じ。 ただしラック配列は、高浜 1， 2 号炉のラックには切り欠け部があるが、N×N の評価結果 (N の値) への影響が無視できるように、切り欠け部も燃料が貯蔵される条件とした。
N×N ラック内 水密度	評価上厳しくなる値	仮想的に 0.0~1.0g/cm <sup>3</sup> に一様変化させ、実効増倍率を評価
N×N ラック外 水密度	0.0006 g/cm <sup>3</sup>	N×N の評価結果 (N の値) へ影響しない条件
垂直方向 計算体系	燃料領域：3660mm 燃料上部：水反射体 (300mm) 燃料下部：コンクリート 反射体 (1000mm)	申請評価の評価条件と同じ

第 2-3 表 ある狭い範囲を求めるための解析結果

N×N ラック	実効増倍率 (不確定性考慮なし)	備考
3×3 ラック	0.951	水密度 1.0g/cm <sup>3</sup> で最大
4×4 ラック	0.978	水密度 0.18g/cm <sup>3</sup> で最大

(5) 気相部水密度の設定

上記の(1)～(4)を踏まえ、気相部水密度の設定においては、十分保守的に SFP 全面ヘスプレイヘッダ定格の約 47 倍の流量が流入するとし、第 2-4 表の条件を用いて下式の通り計算すると水密度は 0.0043g/cm<sup>3</sup> となるが、液滴径などにも不確定性があることを踏まえ、更に余裕を持った値である 0.04g/cm<sup>3</sup> を未臨界性評価での気相部水密度として設定することとする。

第 2-4 表 気相部水密度の計算条件

	計算条件
流量 Q	$\square \text{ m}^3/\text{h} \times 424 / 9 = \square \text{ cm}^3/\text{s}$
放水面積 A	424 ラック (面積: $\square \text{ cm} \times \square \text{ cm} \times 424 \text{ ラック} = \square \text{ cm}^2$ )
液滴下降速度 V	390cm/s (液滴径 1.0mm の終端速度)
上昇流	-10cm/s
蒸気の凝縮	$\times 1.2$
飽和水蒸気密度	+0.0006 g/cm <sup>3</sup>

$$\text{スプレー水密度 } W = Q / (A \times V) = [\square] / [\square] \times 390 = 0.0030 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{気相部水密度} = [Q / \{A \times (V-10)\}] \times 1.2 + 0.0006 = 0.0043 \text{ g/cm}^3$$

⇒未臨界性評価に用いる気相部水密度 0.04 g/cm<sup>3</sup>

なお、第 2-3 表に示す狭い範囲を検討するために実施した評価において、上記のとおり算出した気相部水密度 0.04g/cm<sup>3</sup> を N×N ラック内水密度として設定し評価しても、未臨界の判断基準は超過しない。また、3×3 ラックを狭い範囲として設定することで流量に約 47 倍の保守性を持たせているが、仮に狭い範囲として 2×2 ラックあるいは 1×1 ラックを設定したとしても、以下のとおりスプレー水密度に環境条件を考慮した水密度は 0.04g/cm<sup>3</sup> 以下である。

- ・ 2×2 ラックを設定する場合 (流量の保守性は 424 ラック/4=106 倍)  
 $\Rightarrow [Q \times (424 / 4) / \{A \times (V-10)\}] \times 1.2 + 0.0006$   
 $= [\square] / [\square \times (390-10)] \times 1.2 + 0.0006 = 0.0089$
- ・ 1×1 ラックを設定する場合 (流量の保守性は 424 ラック/1=424 倍)  
 $\Rightarrow [Q \times (424 / 1) / \{A \times (V-10)\}] \times 1.2 + 0.0006$   
 $= [\square] / [\square \times (390-10)] \times 1.2 + 0.0006 = 0.034$

#### (6) 液滴径の影響確認

水密度算出時における液滴下降速度については、気相部水密度の設定に際して十分な保守性を考慮することを前提に、別紙 2 に示す液滴径計測試験で得られた液滴データを踏まえて設定した液滴径 1.0mm の液滴の下降速度を使用しているが、液滴径は変動する可能性があることから、液滴径が変動した場合に気相部水密度に与える影響を確認する。

液滴径は小さいほど下降速度が小さくなり、水密度が大きくなるため、液滴径の大きさを仮想

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。

的に、別紙2にて示す個数分布において支配的な0.2mm～0.4mmよりさらに小さい0.15mm（液滴の下降速度 $V=45.5\text{cm/s}$ ）での水密度を算出した。計算条件を第2-5表に示す。その結果、気相部水密度は下式のとおり、環境条件を考慮した場合であっても $0.0014\text{ g/cm}^3$ であることから、液滴径の変動は今回未臨界性評価用に設定した $0.04\text{ g/cm}^3$ という気相部水密度が有する余裕に包含されている。

第2-5表 液滴径変動の影響評価条件

	計算条件
流量 Q	$\square\text{ m}^3/\text{h} = \square\text{ cm}^3/\text{s}$
放水面積 A	424 ラック（面積： $\square\text{cm} \times \square\text{cm} \times 424\text{ ラック} = \square\text{ cm}^2$ ）
液滴下降速度 V	$45.5\text{cm/s}$ （液滴径0.15mmの終端速度）
上昇流	$-10\text{cm/s}$
蒸気の凝縮	$\times 1.2$
飽和蒸気密度	$+0.0006\text{ g/cm}^3$

$$\text{スプレー水密度 } W = Q / (A \times V) = \square / \{\square \times 45.5\} = 0.00054\text{ g/cm}^3$$

$$\text{気相部水密度} = [Q / \{A \times (V-10)\}] \times 1.2 + 0.0006 = 0.0014\text{ g/cm}^3$$

参考に、液滴径0.15mmにおいて、気相部水密度設定時の定格の約47倍の流量を適用したとしても、水密度は $0.0397\text{ g/cm}^3$ である。

#### (7) 燃料棒等の表面流下による影響確認

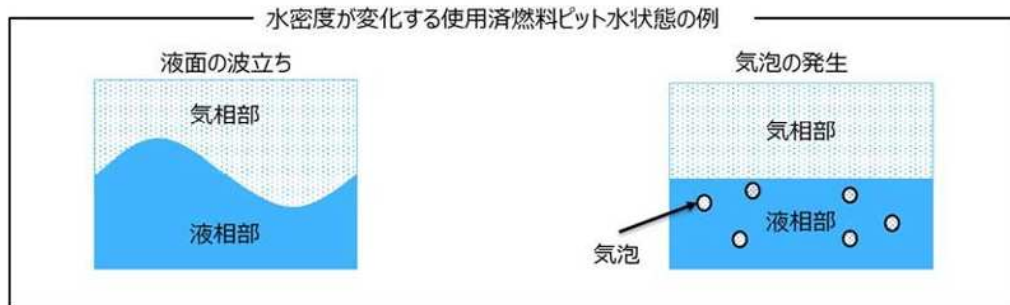
スプレーされた液滴は、自由落下しラック頂部に到達後、ラックや燃料体の上部ノズル等と接触し、ほとんどが液滴としてではなく、燃料棒等の表面を筋状に流下すると考えられる。気相部水密度 $0.04\text{ g/cm}^3$ の設定においては、液滴が筋状に流下し、水密度が低下する効果を考慮していないが、燃料棒周りの筋上の流下は実効増倍率に影響するため、別紙5「液滴が燃料棒等の表面を流下することによる未臨界性評価への影響について」に示すとおり、未臨界性評価への影響を確認した。筋状の流下を燃料棒等全体への一様な液膜とし、液膜厚さを0.2mmに設定して未臨界性評価した結果、完全喪失時の実効増倍率は0.742であり、今回の液相完全喪失時における申請評価結果である0.929（不確定性を含まない値）を十分に下回っており、筋状の流下の影響は今回未臨界性評価用に設定した $0.04\text{ g/cm}^3$ という気相部水密度が有する余裕に包含されていることから、本評価では筋状の流下の影響を考慮していない。

#### 4. 2相モデルおよび水密度設定の妥当性について

本申請の大規模漏えい時における未臨界性評価では、SFPにおける体系内の水密度を気相部と液相部の2相に分け、液相部の水位が低下するとしているが、SFPにおいて大規模漏えいが発生した状況

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。

において、SFP に外乱が与えられることで、第 2-7 図のようにピット水状態が変化することが想定される。



第 2-7 図 水密度が変化する使用済燃料ピット水状態の例

大規模漏えい時において SFP へ与えられる外乱等によりピット水状態が変化した場合に、使用済燃料ピットが未臨界性上厳しい状態になるかを検討し、気相部および液相部の水密度に保守的な値を設定し水位をパラメータとして変化させる評価手法の妥当性について確認する。

(1) 評価上厳しい水密度状態となる可能性について

気相部と液相部それぞれに対し、大規模漏えい時において SFP に外乱等が与えられた際に、未臨界性評価上厳しい水密度（約  $0.1 \text{ g/cm}^3$ ）へ近づく可能性について以下の通り検討した。

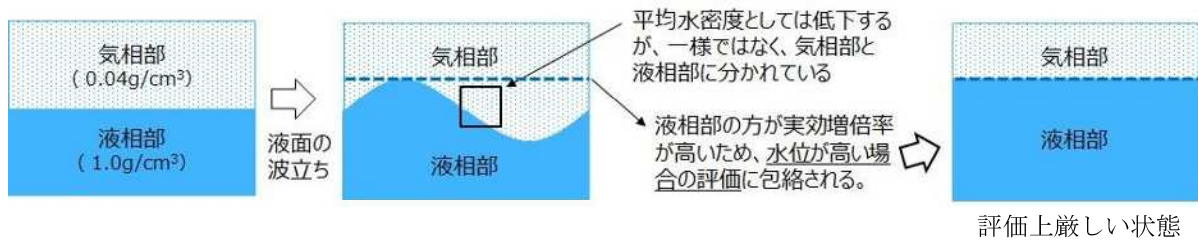
(a) 気相部が  $0.04 \text{ g/cm}^3$  から約  $0.1 \text{ g/cm}^3$  へ変化する可能性

気相部水密度として設定した  $0.04 \text{ g/cm}^3$  は、3. (5) に示すようにスプレ環境下において流量を約 47 倍にして求めたスプレ水密度に対し更に余裕を持った値を設定したものであり、これより高まることはない。

(b) 液相部が  $1.0 \text{ g/cm}^3$  から約  $0.1 \text{ g/cm}^3$  へ変化する可能性

液相部の水密度は液面の波立ちおよび気泡の発生により変化すると考えられる。

外乱による液面の波立ちにより、第 2-8 図のとおり、非常に限られた空間を考えた場合に液相部の水密度の平均は  $1.0 \text{ g/cm}^3$  から低下すると考えられるが、その水密度は一様ではなく、気相部と液相部に分かれた状態となっている。気相部水密度が  $0.04 \text{ g/cm}^3$  である場合には、液相部の方が実効増倍率は高くなることから、液面の波立による影響は水位がより高い場合の評価結果に包含される。



第 2-8 図 液面の波立った場合の使用済燃料ピット水状態

また、外乱や沸騰により液相中に気泡が発生することによっても水密度が低下するが、水密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  の液相が約  $0.1 \text{ g/cm}^3$  の様な水密度に変化するためには、第 2-9 図に示すように約 9 割の水が排除され、排除された空間内に残りの約 1 割の水が様に分散する必要がある。しかし、水密度約  $0.1 \text{ g/cm}^3$  において臨界に必要なウラン量が含まれる空間内の多量の水が、外乱による気泡等の発生により、瞬時に排除された後に様に分散することは現実的に考えられない。なお、3. (4) に示すとおり、新燃料が  $3 \times 3$  ラック (約  $5 \text{ m}^3$ ) に保管された状態で、 $3 \times 3$  ラック内の水密度がどのような値をとっても臨界にはならないことを確認している。



第 2-9 図 液相部が約  $0.1 \text{ g/cm}^3$  となる場合のピット水状態の変化

従って、大規模漏えい時の SFP 状態を考慮しても、臨界となるウラン量を有する体積全体で水密度約  $0.1 \text{ g/cm}^3$  が様に形成されることはないことから、外乱等を想定しても、液相部水密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$ 、気相部水密度  $0.04 \text{ g/cm}^3$  として未臨界性評価を行うことは妥当である。

## (2) 仮想的な水密度の層を設定した評価

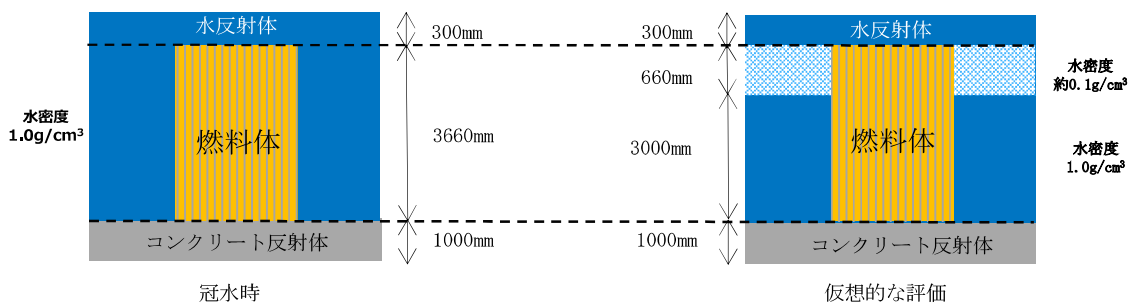
外乱や気泡の発生が想定される大規模漏えい時においても、約  $0.1 \text{ g/cm}^3$  の水密度が、臨界となるウラン量を有する体積全体で様に形成されることはないが、更に仮想的な条件として、SFP の液相部の一部の層が約  $0.1 \text{ g/cm}^3$  になった場合について、実効増倍率を確認した。評価条件を第 2-7 表に、評価結果を第 2-8 表に示す。実効増倍率は、仮想的な条件下においても十分低く、不確定性を考慮しても判断基準である  $0.98$  を下回することは確実であり、大規模漏えい時における外乱等による水密度の変動を考慮しても臨界を防止できることから、今回の気相部および液相部を考慮した評価モデルおよび水密度設定の妥当性を確認できた。

第 2-7 表 仮想的な使用済燃料ピット状態を想定した評価条件

	計算条件	備考
評価体系	無限体系	2 領域管理よりも実効増倍率を高める条件
水密度 (第 2-10 図)	燃料体領域の 0 ~3000mm・・・ 1.0 g/cm <sup>3</sup> 3000~3660mm・・・約 0.1 g/cm <sup>3</sup>	液相部の上部 660mm が約 0.1g/cm <sup>3</sup> となる状態を仮定
評価燃料	55GWd/t 新燃料	2 領域管理より実効増倍率を高める条件
燃料上部反射体	水反射体 (300mm)	申請評価条件に同じ
燃料下部反射体	コンクリート (1000mm)	
ラック仕様	アングル型ステンレス鋼製ラック	

第 2-8 表 仮想的な使用済燃料ピット状態を想定した評価結果

	評価結果
実効増倍率	0.952 (不確定性を含まない値)



第 2-10 図 仮想的な条件における使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系 (垂直方向)

5. 軸方向燃焼度分布設定の妥当性について

3. で設定した液相部および気相部水密度を踏まえて、SFP 内に初期濃縮度および燃焼度による燃料配置条件を設定した。燃料配置条件の詳細は別添 3「領域管理の設定について」に示す。本変更

申請における評価では、領域Bの燃料の燃焼度は軸方向燃焼度分布を考慮せず、燃焼度分布一定の条件を設定している。一方、実際の燃料の燃焼度は、端部の出力の影響等により、燃料上下部の燃焼度分布が歪んでいる。ここでは、軸方向燃焼度分布が実効増倍率に与える影響について評価し、申請評価の設定条件の妥当性について説明する。

(1) 軸方向燃焼度分布の影響確認

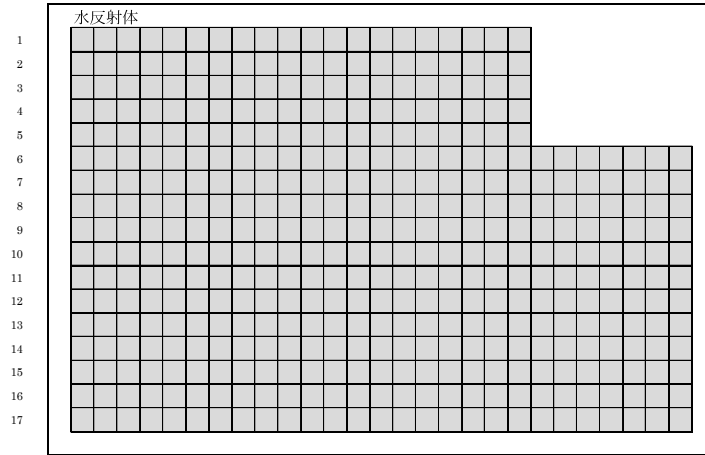
軸方向燃焼度分布の影響を確認するため、第2-9表に示す条件で解析を実施した。軸方向燃焼度分布条件については、燃料端部の燃焼度がより歪んでいる場合において影響が大きくなる傾向にあることから、運転中、 運転することにより軸方向燃焼度分布がより歪むがある燃料の軸方向燃焼度分布に基づいて設定した。また、燃焼度分布のによる実効増倍率への影響を確認するため、燃焼度分布の領域を条件でも評価を行った。

第2-9表 軸方向燃焼度分布の感度解析条件

	計算条件	備考
評価体系	第2-11図	ラック全面に 55GWd/t 燃焼燃料（燃焼度 20GWd/t）を貯蔵
軸方向燃焼度分布	第2-12図	<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃焼度分布一定</li> <li>・燃焼度がより歪む<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 80px; height: 1em; vertical-align: middle;"></span>を考慮した分布を設定</li> <li>・燃焼度の<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 40px; height: 1em; vertical-align: middle;"></span>による影響を確認するため、燃料領域を<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 40px; height: 1em; vertical-align: middle;"></span>分割した分布でも解析</li> </ul>
変動パラメータ	水位	申請評価条件に同じ
気相部水密度	0.04g/cm <sup>3</sup>	
液相部水密度	1.0g/cm <sup>3</sup>	
燃料上部反射体	水反射体 (300mm)	
燃料下部反射体	コンクリート (1000mm)	
ラック仕様	アングル型ステンレス 鋼製ラック	

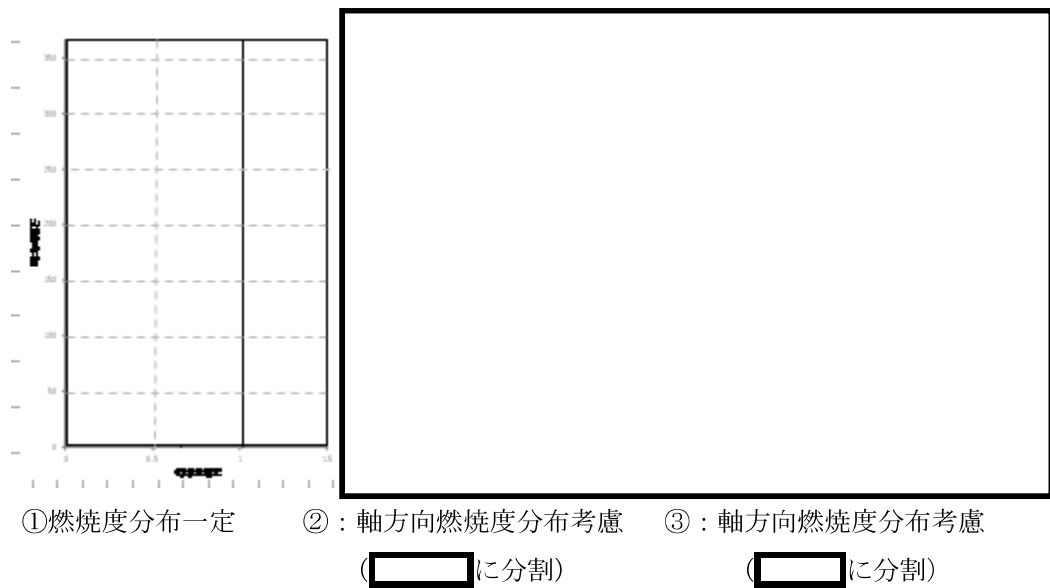
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27



■ : ウラン燃焼燃料 (燃焼度 20Gwd/t) を貯蔵、貯蔵体数 424 体

第 2-11 図 軸方向燃焼度分布の影響評価解析における燃料貯蔵条件



第 2-12 図 燃焼燃料の軸方向燃焼度分布設定条件

評価結果を第 2-13 図に示すが、軸方向燃焼度分布を考慮した場合と燃焼度分布一定とした場合の実効増倍率が同等であることから、軸方向燃焼度分布の影響は小さいと言える。冠水状態では、軸方向燃焼度分布を考慮した場合のほうが、燃焼度分布一定時より体系の実効増倍率はわずかに大きい。これは液相部では水による中性子の減速効果が大きく、中性子の飛程が短いため低燃焼度領域の影響を受けやすいためと考えられる。また、低水位時では、燃焼度分布一定時のほうが、軸方向燃焼度分布を考慮した場合より体系の実効増倍率はわずかに大き

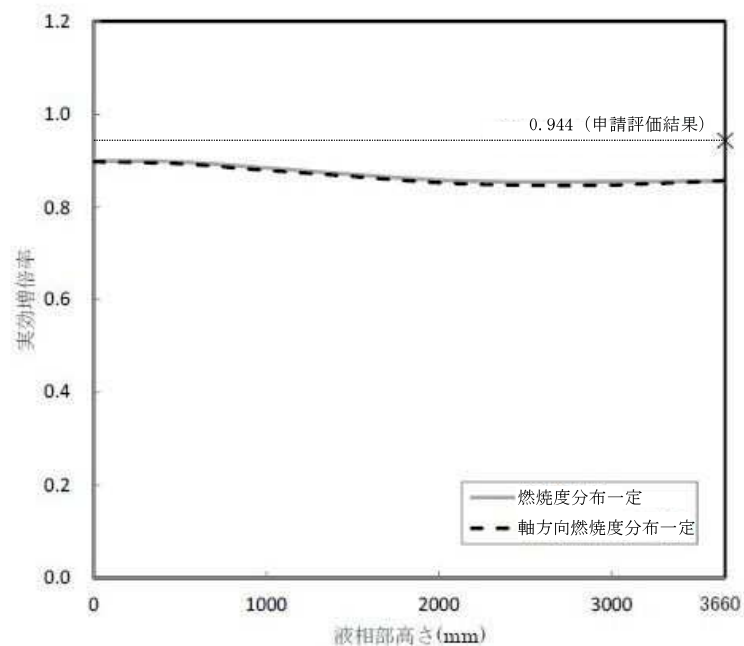
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



い。これは、実効増倍率は体系内で支配的な気相部領域で決定されるためである。気相部では減速材としての水の量が少なく中性子の減速効果が小さいため、中性子の飛程が長くなることから、より広い領域での燃焼度が影響するため、気相部全体の平均燃焼度が小さい燃焼度一定分布条件下で実効増倍率が大きくなったと考えられる。

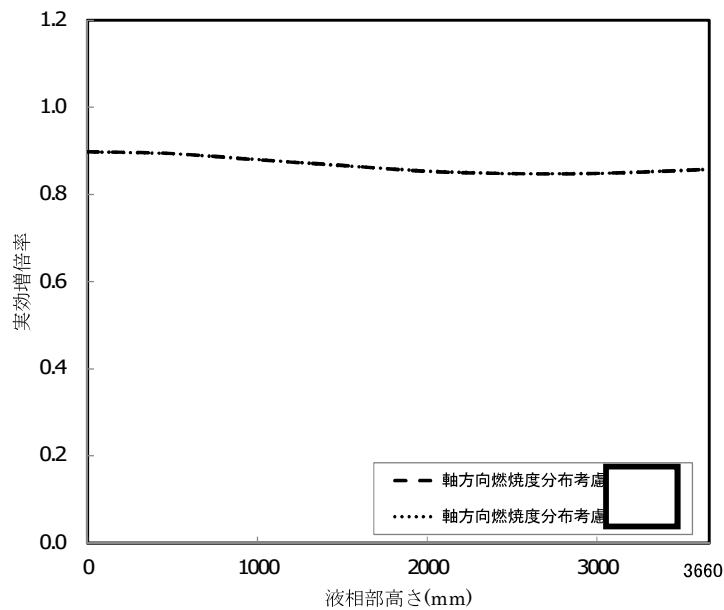
なお、第 2-13 図に示す実効増倍率の評価結果は、2 領域管理条件である申請評価の結果 0.944(不確定性を考慮しない値)と比較すると十分に小さい。これは、上記で述べた通り、液相部では水による中性子の減速効果が大きく中性子の飛程が短いため、2 領域管理条件下では新燃料領域で実効増倍率が支配的になるためと考えられる。

また、軸方向燃焼度分布の [ ] をそれぞれ [ ] に分割した場合の評価結果を第 2-14 図に示すが、評価結果は各水位で同等であった。液相部においては、 [ ] することにより [ ] [ ] した場合の影響はほとんどないと考えられる。また、気相部においては、中性子の飛程が大きく、体系全体での燃焼度が実効増倍率に影響するが、 [ ] 平均燃焼度は大きく変わらないため、 [ ] [ ] 影響はほとんど出なかったと考えられる。



第 2-13 図 ウラン燃焼燃料(燃焼度 20Gwd/t)のみ貯蔵した場合における軸方向燃焼度分布の影響確認結果

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。



第 2-14 図 軸方向燃焼度分布の [ ] による実効増倍率への影響確認結果

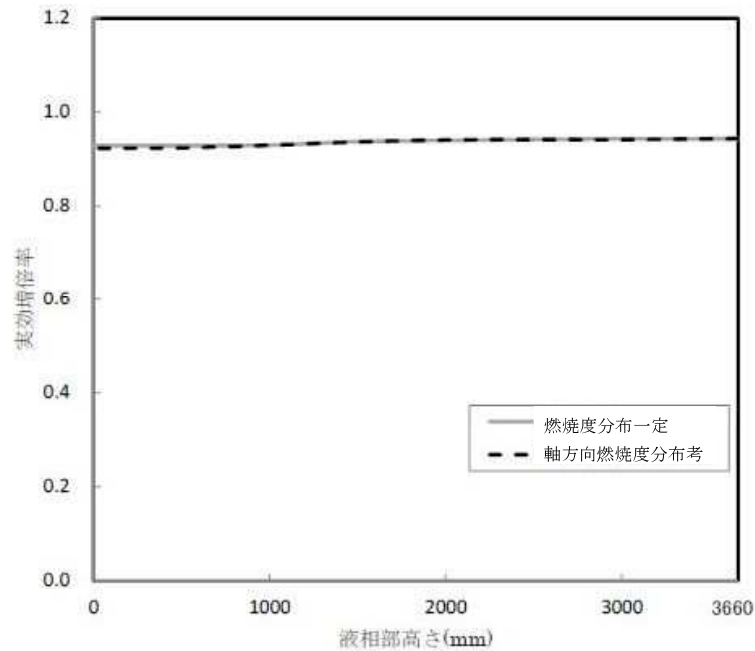
(2) 2 領域管理下における軸方向燃焼度分布の影響確認

申請の 2 領域管理における燃料貯蔵条件において、領域 B の燃料に第 2-12 図②の軸方向燃焼度分布条件を設定することで、2 領域管理下における軸方向燃焼度分布の影響を確認した。本評価では、領域 B の燃焼燃料全てに、 [ ] を考慮した軸方向燃焼度分布を設定しているが、 [ ] であるため、より歪んだ分布を多く考慮した条件である。

評価結果を第 2-15 図に示す。2 領域管理条件下においても実効増倍率は同等である。これは 5. (1) にて示したように、実効増倍率の値が領域 B の燃焼燃料ではなく、領域 A の新燃料部分で支配的になるためである。気相部領域が十分に大きくなる低水位状態では、領域全体の平均燃焼度が小さくなる燃焼度分布一定のほうが実効増倍率は大きくなっている。

以上から、領域 A に新燃料を貯蔵する 2 領域管理条件を踏まえた申請評価においては、軸方向燃焼度分布を考慮せず、燃焼度分布一定とした申請評価の評価条件は妥当な設定である。また、低水位の状態下では燃焼燃料が実効増倍率に与える影響が大きくなるが、2 領域管理条件下において実効増倍率が最大となる純水冠水時、および水位が高い状態においては、実効増倍率は新燃料領域において支配的に決定されるため燃焼燃料の影響は小さいことから、水位が変化する過程で実効増倍率が純水冠水時の結果を上回ることはない。

[ ] 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。



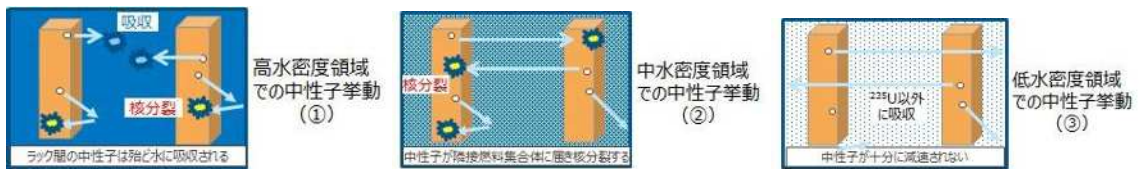
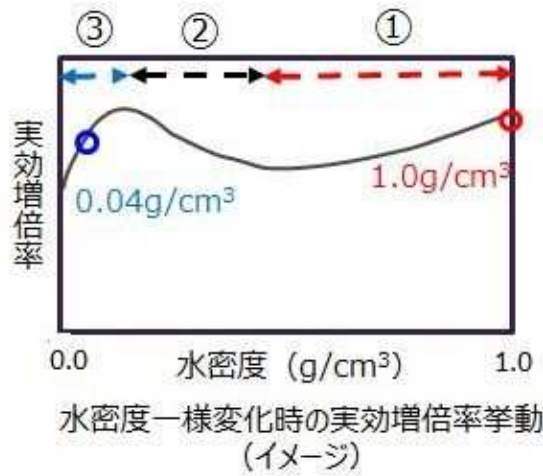
第 2-15 図 2 領域管理条件下における軸方向燃焼度分布の影響確認結果

#### 6. 不均一体系（2 相）における実効増倍率挙動について

今回の評価では、残存しているピット水より上部の気相部とピット水のある液相部の 2 相に分け、液相部、気相部それぞれに 3. で算出した水密度を設定し未臨界性評価を実施した。ここでは、高浜 1, 2 号炉の SFP 体系（アングル型ステンレス鋼製ラック）において、体系を 2 相に分け、液相水位を踏まえた評価と、水密度を  $0.0 \sim 1.0 \text{g/cm}^3$  一様で変化させる評価における実効増倍率挙動の違いについて説明する。

##### (1) 水密度一様変化時における実効増倍率の挙動

水密度を一様に変化させた場合における、各水密度状態での中性子挙動イメージを第 2-16 図に示す。①高水密度領域においては、燃料集合体を飛び出した中性子はラック間の水に吸収されるため、単一集合体内の減速材の影響が支配的となることから、水密度低下にともない実効増倍率は減少する。②中水密度領域においては、中性子が隣接燃料へ到達し、隣接燃料で反応する中性子数が増えるため、水密度低下に伴い実効増倍率は増加する。③低水密度領域においては、減速材密度が低すぎることから、核分裂数が減少する効果が大きくなるため、水密度低下に伴い実効増倍率は減少する。上記のように、水密度が変化することにより中性子挙動の変化が生じることから、実効増倍率は減速・吸収の効果に応じて変化し、約  $0.1 \text{g/cm}^3$  でピークを持つ。

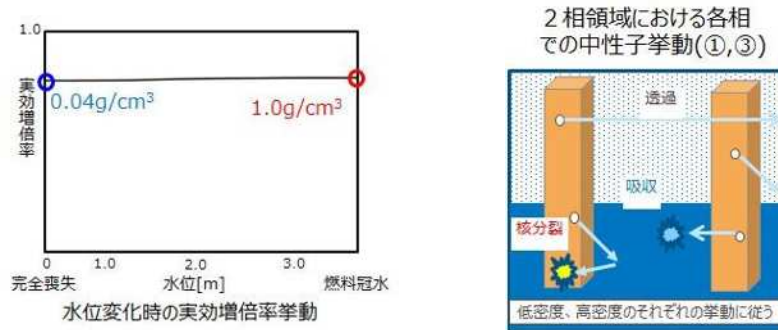


第 2-16 図 水密度一様変化時の中性子挙動

(2) 水位変化を踏まえた評価における実効増倍率の挙動

液相部、気相部の 2 相での水位変化を踏まえた評価における実効増倍率の挙動を第 2-17 図に示す。水位が変化した場合、領域の大きさは変わるものの水密度は固定であるため、液相部、気相部それぞれで第 2-16 図の①高水密度領域、③低水密度領域の挙動を示すことから、②中水密度領域のような、体系全体として核反応が起こりやすい状態にはならない。

よって、水位が変化しても中性子挙動は変化しないことから、実効増倍率はピークを持たず、気相部水密度に  $0.04\text{g/cm}^3$  を設定した今回評価においては、水位の低下に伴い実効増倍率は緩やかに低下する。



第 2-17 図 水密度一様変化時の中性子挙動

## 7. まとめ

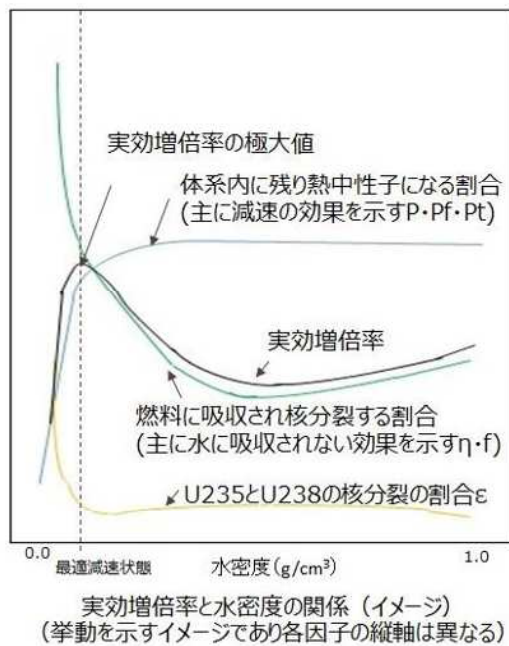
高浜1，2号炉のSFPにおける大規模漏えい時の未臨界性評価について、既許可においては、SFP内における水密度状態を包絡する非常に保守的な条件として、液相、気相を区別せず、SFP全体の水密度を一様として水密度範囲 $0.0\sim 1.0\text{g/cm}^3$ の条件で評価をし、臨界を防止するため、燃焼度や中性子吸収体挿入の有無を制限した3つの貯蔵領域を設定することで実効増倍率を抑制していた。なお、この評価では水密度約 $0.1\text{g/cm}^3$ で実効増倍率が最大となり、この値は記録的豪雨等の水密度に対して約8000倍の余裕を持ち、定格流量でのスプレイ水密度に環境条件を考慮した値に対して約1300倍の余裕を持つ。

本申請における大規模漏えい時の未臨界性評価では、大規模漏えい時にはSFP雰囲気は液相部と気相部に分かれた状態で水位が低下するという現象に合わせ、残存しているピット水より上部の気相部とピット水のある液相部の2相に分け、それぞれの水密度を固定した条件で、液相部水位を変化させて評価を実施することとした。各相の水密度には実効増倍率を保守的に厳しくする観点から、液相部水密度は、液相部で実効増倍率が最大となる $1.0\text{g/cm}^3$ を設定した。また、気相部水密度には、定格流量でSFP全域にスプレイした場合の水密度をベースとして、スプレイ流量に約47倍の保守性を持たせ、SFP内の環境条件も考慮して算出される水密度 $0.0043\text{g/cm}^3$ に、さらに余裕を持たせた $0.04\text{g/cm}^3$ を設定した。なお、この値は記録的豪雨等の水密度に対して約3000倍の余裕を持ち、定格流量でのスプレイ水密度に環境条件を考慮した値に対して約500倍の余裕を持つ。

設定した液相部および気相部の水密度を踏まえてSFP内に初期濃縮度および燃焼度による2つの貯蔵領域を設定し、SFP雰囲気を気相部と液相部の2相に分けて水位を変化させて未臨界性評価を行った結果、中性子吸収体挿入を考慮しないでも臨界を防止できることを確認した。

また、今回見直した評価条件については、設定した気相部水密度は液滴径等の不確定性を包含する余裕を有していること、および液相部と気相部の2相に分けそれぞれの水密度を固定した条件で評価することが大規模漏えい時におけるSFPへの外乱による影響等を踏まえても適用できることを確認した。

(参考1) 水密度を一様に変化させた場合の実効増倍率の挙動について、6因子公式における各因子の水密度に対する傾向による考察を以下に示す。



【参考文献：減速材密度低下に伴う燃料貯蔵施設の臨界性の検討 (1985) 日本原子力研究所】の図をもとに作成

実効増倍率は以下の6因子公式に示すとおり計算できる。  
6因子公式： $k_{eff} = \epsilon \cdot p \cdot \eta \cdot f \cdot P_f \cdot P_t$

- keff：実効増倍率
- $\epsilon$ ：高速中性子核分裂係数
- p：共鳴を逃れる確率
- $\eta$ ：再生率
- f：熱中性子利用率
- $P_f$ ：高速中性子が洩れない確率
- $P_t$ ：熱中性子が洩れない確率

水密度が変化することで、中性子の減速 (P、 $P_f \cdot P_t$ ) と吸収 ( $\eta \cdot f$ ) の二つの効果が影響を受ける。また、U235とU238の核分裂の割合も変化する。

以下に水密度変化による三つの因子の挙動を示す。

- ・水密度が下がっていくほど、中性子と水の衝突による減速がなくなり、減速の効果は下がっていく。
- ・水密度が下がっていくほど、中性子が水に吸収されにくくなるため、吸収されない効果はあがっていく。
- ・水密度が下がっていくほど、中性子と水の衝突による減速がなくなり、U235よりもU238の核分裂の割合があがっていく。

水密度を0～1の範囲で変化させた場合、上記の三つの因子の影響を受けて、実効増倍率は変化する。左図の通り水密度が約0.1g/cm<sup>3</sup>で極大値を示す。

図1 6因子公式による水密度一様変化時の実効増倍率挙動の考察

(参考2) 未臨界性評価条件水密度と豪雨時等の水密度との比較を以下に示す。

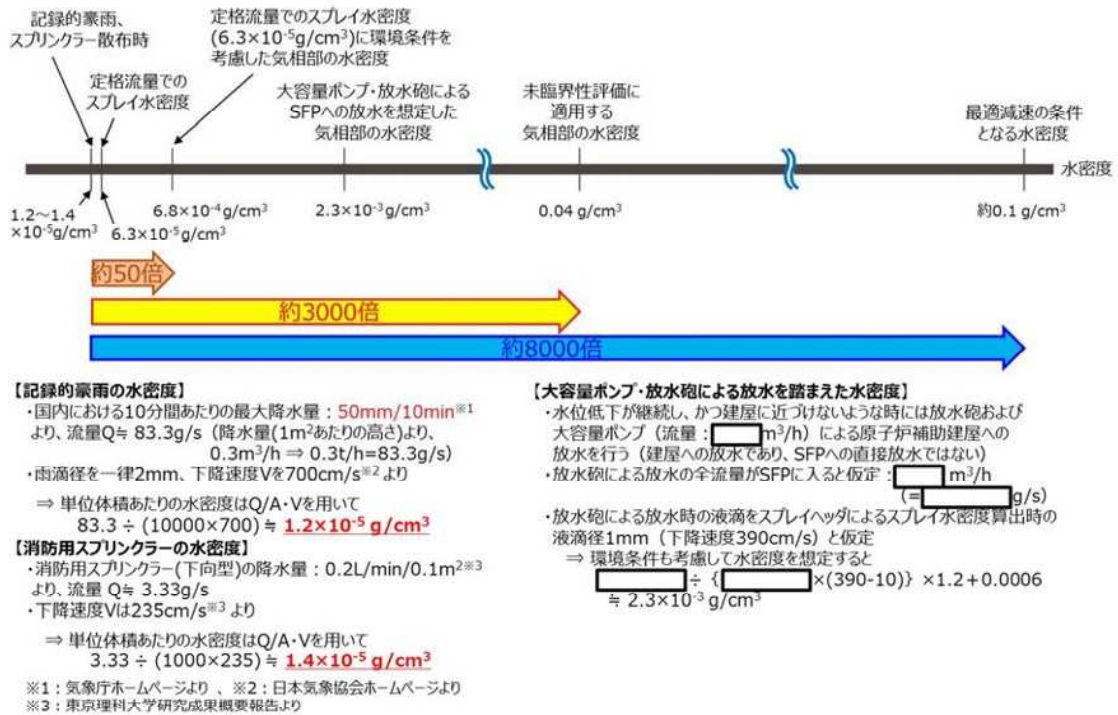
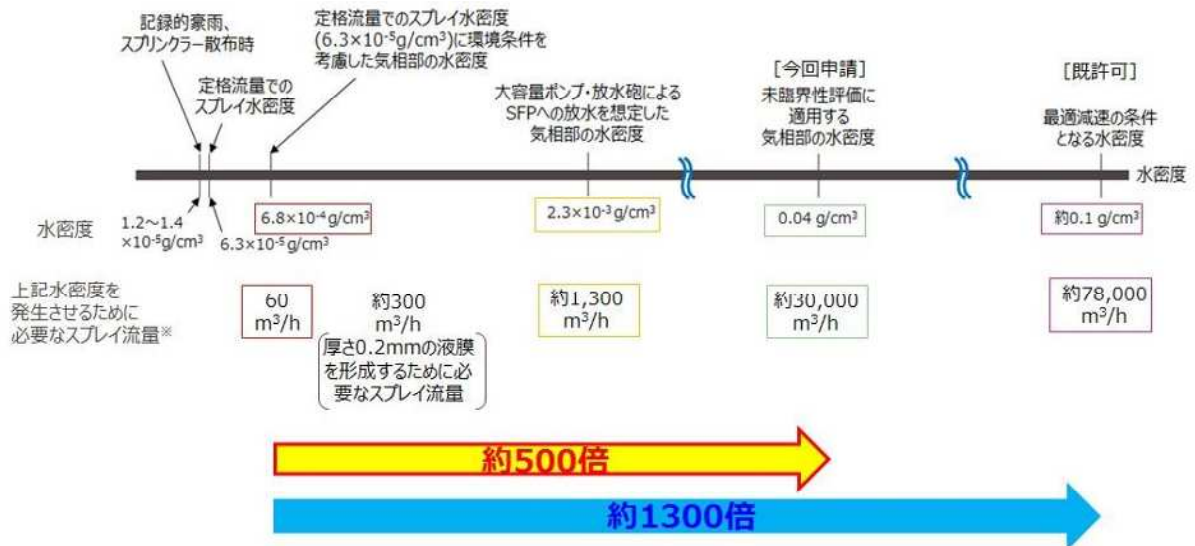


図2 未臨界性評価条件水密度と豪雨時等の水密度

以上

(参考3) 今回申請および既許可の未臨界性評価条件水密度を発生させるために必要なスプレイ流量と定格流量でのスプレイ水密度に環境条件を考慮した水密度を発生させるために必要なスプレイ流量の比較を以下に示す。



※：水密度 = [流量(g/s) / {スプレイ範囲(cm<sup>2</sup>) × (下降速度(cm/s) - 上昇流(cm/s))}] × 凝縮 + 飽和蒸気(g/cm<sup>3</sup>) の関係を用いて算出した流量

図3 今回申請および既許可の未臨界性評価条件水密度を発生させるために必要なスプレイ流量と定格流量でのスプレイ水密度に環境条件を考慮した水密度を発生させるために必要なスプレイ流量の比較

以上



### 別添 3 領域管理の設定について

高浜 1, 2 号炉使用済燃料ピットでは、大規模漏えい時の未臨界性評価に用いた解析体系（以下、「本体系」という。）に基づき設定した領域に従い、初期濃縮度及び燃焼度に応じて貯蔵する燃料を管理することとしている。領域別の貯蔵可能な燃料体条件を第 3-1 図に示す。本資料では、領域設定の考え方、領域管理を行なうことによる評価上の保守性および燃料運用の成立性について説明する。

#### 1. 本体系における領域設定の考え方

大規模漏えいが発生した場合の使用済燃料ピットへのスプレー及び水蒸気の雰囲気を考慮し、スプレー時に生じる液相部および気相部の水密度を考慮した場合でも臨界を防止するために、使用済燃料ピット内に燃焼度による燃料配置条件を設定する。未臨界性評価は、当該領域に貯蔵可能な最も反応度が高い燃料が、当該領域の全てのラックに貯蔵されると想定して実施しており、実運用における燃料貯蔵状態を包絡した評価となる。領域の設定は、使用済燃料ピット内での燃料運用を簡便化することを目的として、以下の方針で検討を実施している。

- ① 領域の数を可能な限り少なくする。
- ② 中性子吸収体が必要な領域を可能な限り少なくする。
- ③ 低燃焼度の燃料を貯蔵する領域は、炉心から取出した燃料が貯蔵できる容量を確保する。

ここでは、燃料運用の一例として 55GWd/t 燃料平衡炉心を対象に領域設定の検討を行った。平衡炉心における取出燃料の燃焼度区分毎の体数は、第 3-1 表のとおりである。

領域設定において、上記①の観点から、領域数は炉心に装荷する燃料を貯蔵する領域 A (0GWd/t 以上) と、一時取出燃料や使用済燃料を貯蔵する領域 B (20GWd/t 以上) の 2 領域とした。また、上記③の観点から領域 A で最低限確保すべき燃料貯蔵体数は 157 体以上（炉心から取り出した燃料体数）となる。また、領域 A および領域 B はいずれも中性子吸収体が不要な領域とした。

本体系では、使用済燃料ピット内での燃料運用幅を可能な限り確保することを目的に、上記で設定した 2 領域のうち、反応度の高い燃料が貯蔵可能な領域 A を使用済燃料ピットの外周に配置することで大規模漏えい時においても臨界を防止している。このとき、燃料貯蔵体数は、領域 A で 201 体となり、領域 A で最低限確保すべき燃料貯蔵体数を満足している。なお、55GWd/t 燃料平衡炉心においてサイクル毎に取り替える新燃料は 44 体であり、次サイクルへ装荷する新燃料と炉心から取出した燃料体数を合わせた 201 体を領域 A に貯蔵することが可能である。残りのラックは領域 B に設定しており、燃料貯蔵体数は 223 体であるため、燃焼の進んだ燃料を貯蔵することが可能である。

既許可の 3 領域管理では、新燃料沈め込みや内挿物の交換時において全体として数百回程度の燃料体等の移動が必要になるが、本体系を採用することにより、既許可の 3 領域管理と比較して、

第 3-2 図および第 3-2 表に示すとおり、核分裂生成物を内包する照射燃料の取扱回数を、燃料配置制限がない場合と同程度にすることができ、また照射燃料上での内挿物入替回数も低減できることから、安全性向上が図られる。更に、燃料や内挿物を取り扱う際は、その種類が変わる毎に専用の取扱工具へ交換する必要があるが、本体系を採用することにより燃料体および内挿物の取扱回数が低減されるため、取扱工具交換の頻度も低減することが可能である。また、中性子吸収体を用いないため、将来の廃棄物発生量が抑制される。

## 2. 領域区分設定の妥当性

本体系の領域設定がもつ余裕について確認するため、ここでは領域 B の燃焼度を 20GWd/t から 5%切り下げて 19GWd/t へ変更した場合の検討を行った。評価結果は、第 3-3 表に示すとおり 0.944（不確定性を含まない値）であり、仮に大規模漏えい時の未臨界性評価モデルに対する不確定性評価結果（0.0152）を考慮しても 0.98 以下を満足する。このことから、領域 B に貯蔵する燃料の燃焼度を 20GWd/t 以上とする運用は、未臨界性の判断基準に対して裕度があるといえる。

## 3. 領域による燃料管理

未臨界性評価では、領域に貯蔵される最も反応度の高い燃料が使用済燃料ピットの全てのラックに貯蔵されていることを想定して、第 3-1 図に示す燃料配置で評価を実施している。実運用では、貯蔵する燃料集合体の反応度が第 3-1 図に示した領域設定の反応度を下回るように領域管理に基づき燃料を貯蔵する。

ここでは、領域 B に貯蔵する燃料を 48GWd/t 燃料とした場合、領域 B にどの程度の燃焼度の燃料が貯蔵可能となるか検討を実施した。評価結果を第 3-4 表に示す。本結果より、各領域のラックに貯蔵可能な燃料条件は第 3-5 表に示すとおりとなり、本表に記載の初期濃縮度、燃焼度及び配置を確認することで、大規模漏えい時においても臨界を防止することができる。

## 4. 領域管理に基づいた使用済燃料ピット燃料運用方針について

実運用においては、本体系で反応度の高い燃料を貯蔵している領域 A は炉心の燃料装荷体数 157 体を上回る 201 体の貯蔵容量があり、炉心へ装荷する燃料（ウラン新燃料及び燃焼度の低い燃焼燃料）は優先的に領域 A へ貯蔵し、炉心への装荷、取出を実施する。また、本体系で反応度の低い燃料を貯蔵している領域 B では、優先的に燃焼の進んだ燃焼燃料を貯蔵する。

なお、実運用においては、燃料体別に付与される燃料番号とともに初期濃縮度および燃焼度を管理し、使用済燃料ピット内での燃料移動及び炉心装荷・取出時においては複数人の作業者が移動手順を確認し、確実に燃料体等の移動履歴を追うことができる運用とすることから、領域管理を行ったとしても燃料配置の変更を問題なく実施することができる。

## 5. 燃料運用方針の実機適用性確認

4. の運用方針に従い、高浜 1, 2 号炉使用済燃料ピットに貯蔵される燃料体数から今後の燃料運用の成立性を確認した。領域 A、B ともに十分な余裕があるため、炉心へ装荷する燃料 (157 体) を貯蔵したうえで、残りの燃料のうち燃焼度が 20GWd/t 未満のものが領域 A の残りの収容体数 (44 体) に収まるので至近サイクルでの燃料運用は実現可能である。

また、空ラックが高浜 1 号炉では 129 体、高浜 2 号炉では 165 体あり、これは、55GWd/t 燃料平衡炉心における燃料取替体数 (44 体) のそれぞれ約 3 サイクル分、約 4 サイクル分に相当し、使用済燃料の搬出がないと仮定しても余裕を持った運用が可能である。

領域管理が有する運用への余裕を確認するため、使用済燃料ピットに貯蔵する燃料の体数を燃焼度別に整理した。高浜 1, 2 号炉使用済燃料ピットの第 28 サイクル装荷前に貯蔵されている燃料について、燃焼度に対する燃料体貯蔵体数の累積値を第 3-3 図にプロットした。ここで、30GWd/t のプロット点は、使用済燃料ピットに貯蔵される燃料体のうち 30GWd/t 以下となる全ての燃料体数を示したものとなる。なお、第 3-3 図の横軸は 55GWd/t 燃料相当の燃焼度を表しており、48GWd/t 燃料については、55GWd/t 燃料よりも初期濃縮度が低く、第 3-4 表の結果より燃焼度換算で 5GWd/t 程度の反応度差があるため貯蔵体数を当該グラフへプロットする際には、燃焼度に 5GWd/t を加算している。

第 3-3 図の赤色の線は使用済燃料ピットに貯蔵できる燃料の上限を表わしており、第 28 サイクル装荷前では、各プロット点がこの赤色の線を下回っているため、領域管理導入時にもすべての燃料が使用済燃料ピットに貯蔵可能と判断できる。

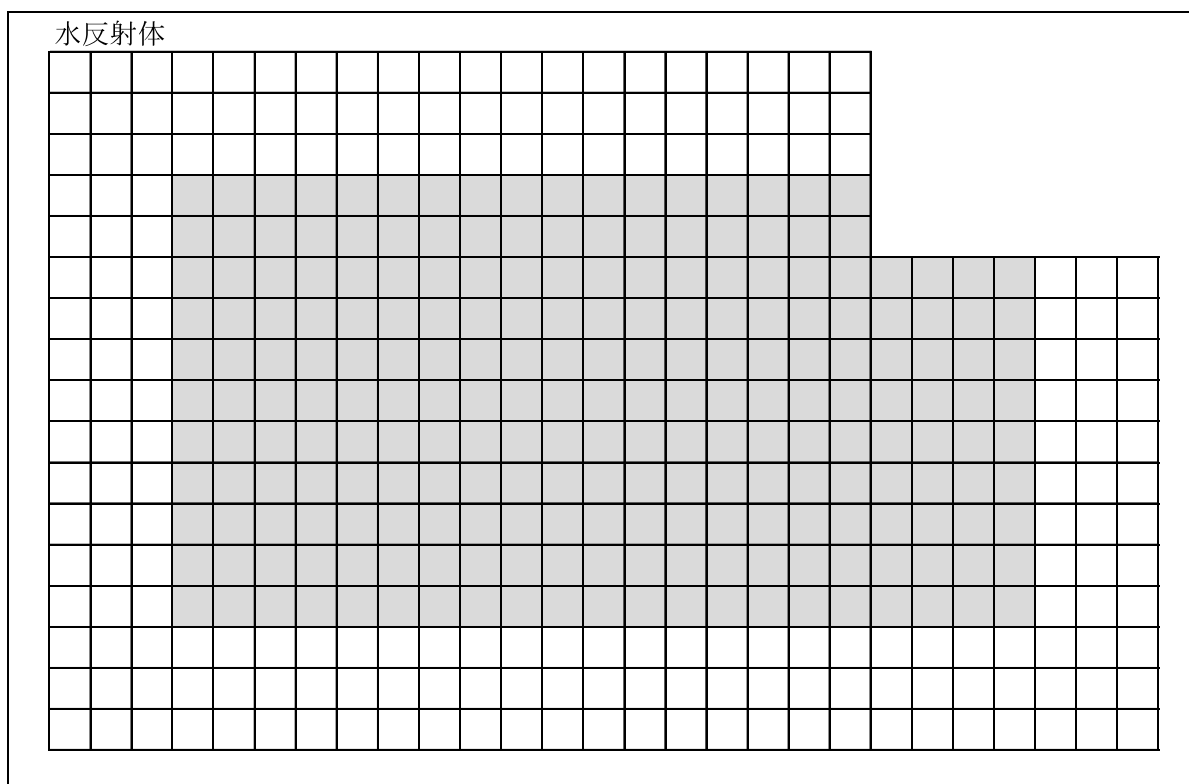
## 6. 貯蔵燃料の領域管理をすることによる未臨界性評価上の保守性について

燃料の初期濃縮度及び燃焼度に応じた領域管理を実施するにあたり、未臨界性評価では、実際に使用済燃料ピットに貯蔵される燃料の燃焼度に余裕を持たせた評価条件を設定している。

実際に各領域に貯蔵される燃料の燃焼度は、通常の燃料運用を想定すると、領域 A には優先的に炉心に装荷する燃料及び燃焼度が 20GWd/t 未満の一時取出燃料を貯蔵するが、未臨界性評価では新燃料として評価し、また、領域 B には優先的に取出燃料を貯蔵し、その燃焼度は 20GWd/t 以上となるが、未臨界性評価では 20GWd/t を使用する。従って、未臨界性評価では実際に貯蔵される燃焼度よりも燃焼度を切り下げて評価しており、実運用と比較して燃焼度の観点から保守的な設定となっている。一例として、高浜 1 号炉第 28 サイクル装荷前の使用済燃料ピットの貯蔵燃料を対象とすると、領域 B に貯蔵される燃料の平均燃焼度は第 3-4 図で示すとおり、本体系における領域 B の燃焼度 (20GWd/t) と比較して燃焼度換算で 2 倍程度高くなる結果となる。

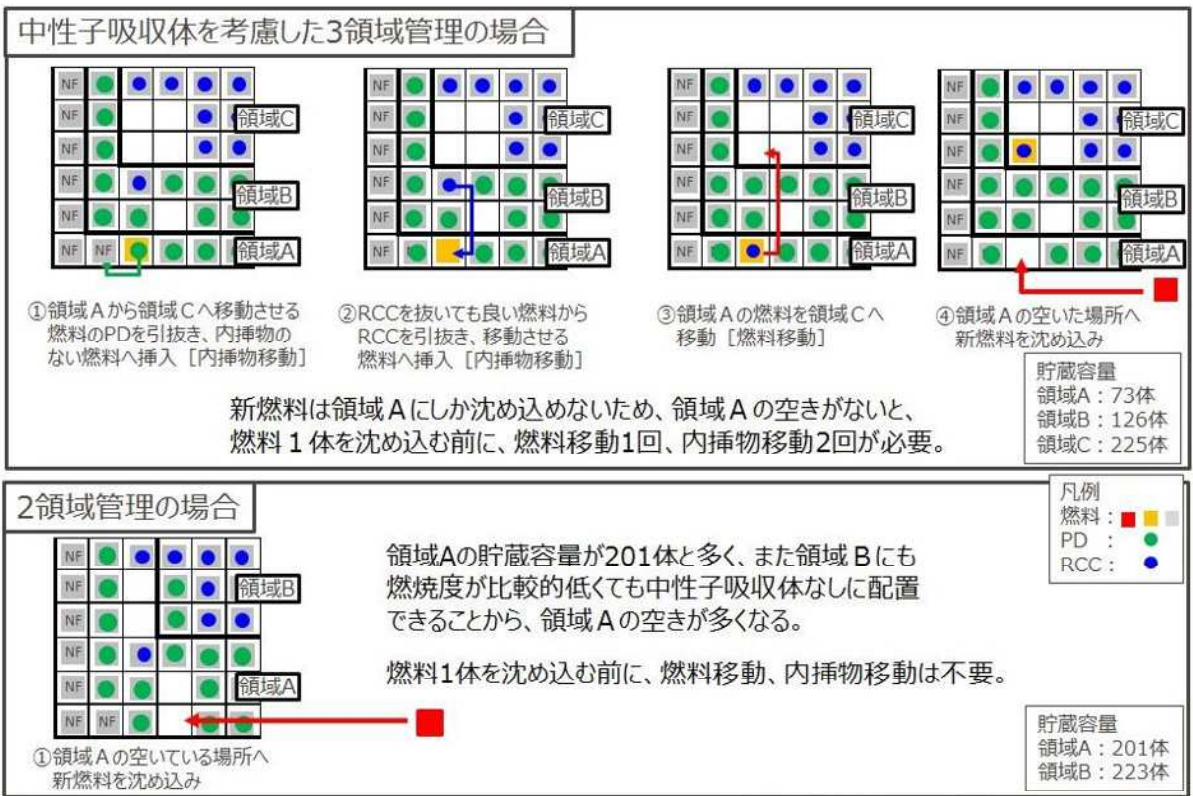
以上より、領域管理を実施することで燃焼度の観点から保守性を持った運用が可能となる。

以 上



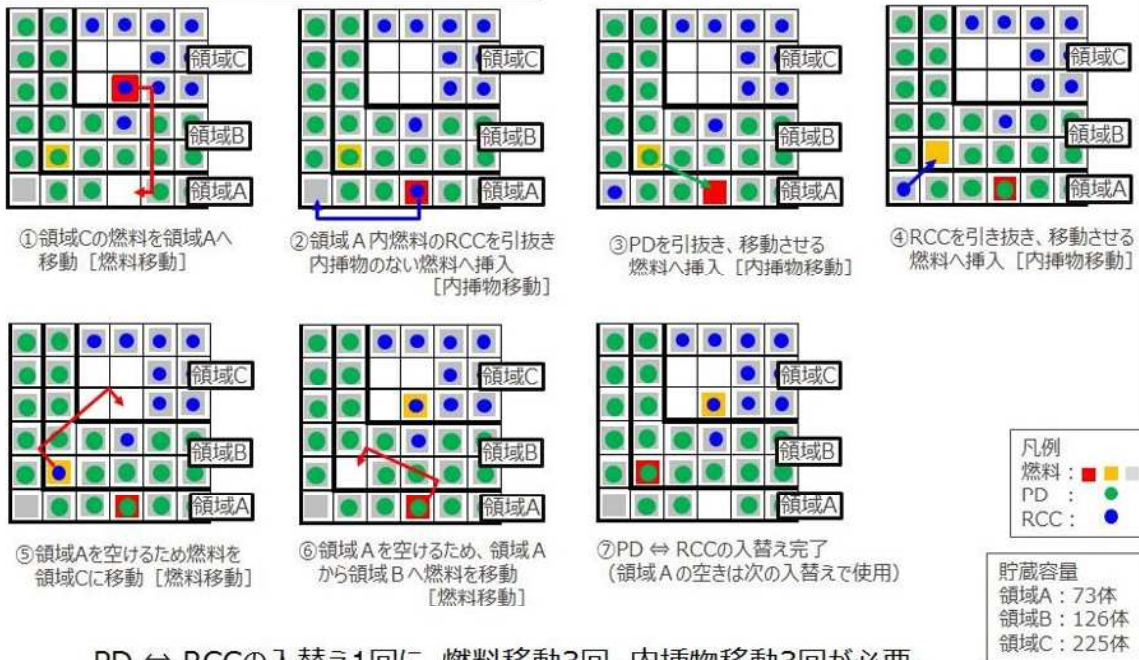
	55GWd/t 燃料 (初期濃縮度約 4.6wt%)	48GWd/t 燃料 (初期濃縮度約 4.0wt%)
□領域 A	燃焼度 0GWd/t 以上	燃焼度 0GWd/t 以上
■領域 B	燃焼度 20GWd/t 以上	燃焼度 15GWd/t 以上

第 3-1 図 領域別の貯蔵可能な燃料体の燃焼度



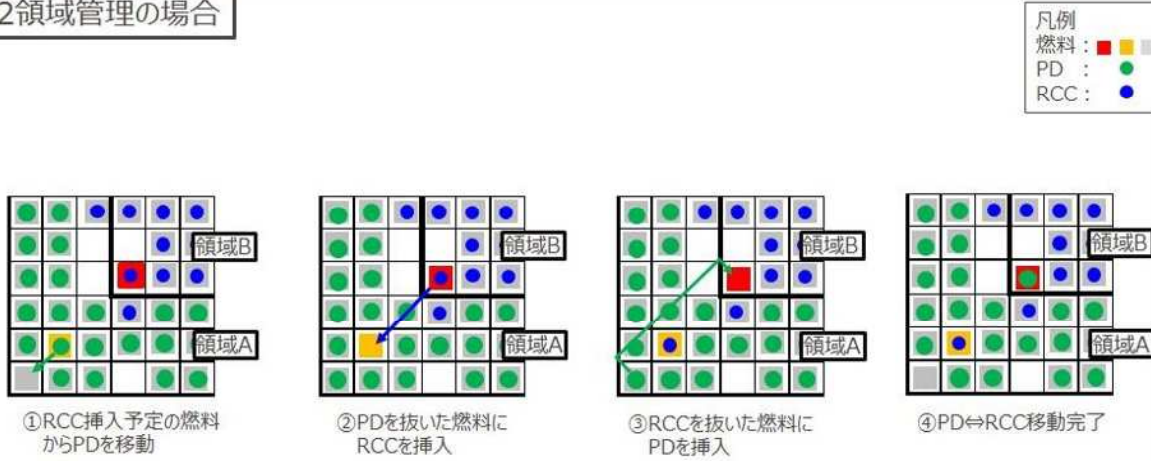
第 3-2 図 (1/2) 燃料体等移動手順の例 (新燃料沈め込み時)

中性子吸収体を考慮した3領域管理の場合



PD ⇔ RCCの入替え1回に、燃料移動3回、内挿物移動3回が必要。

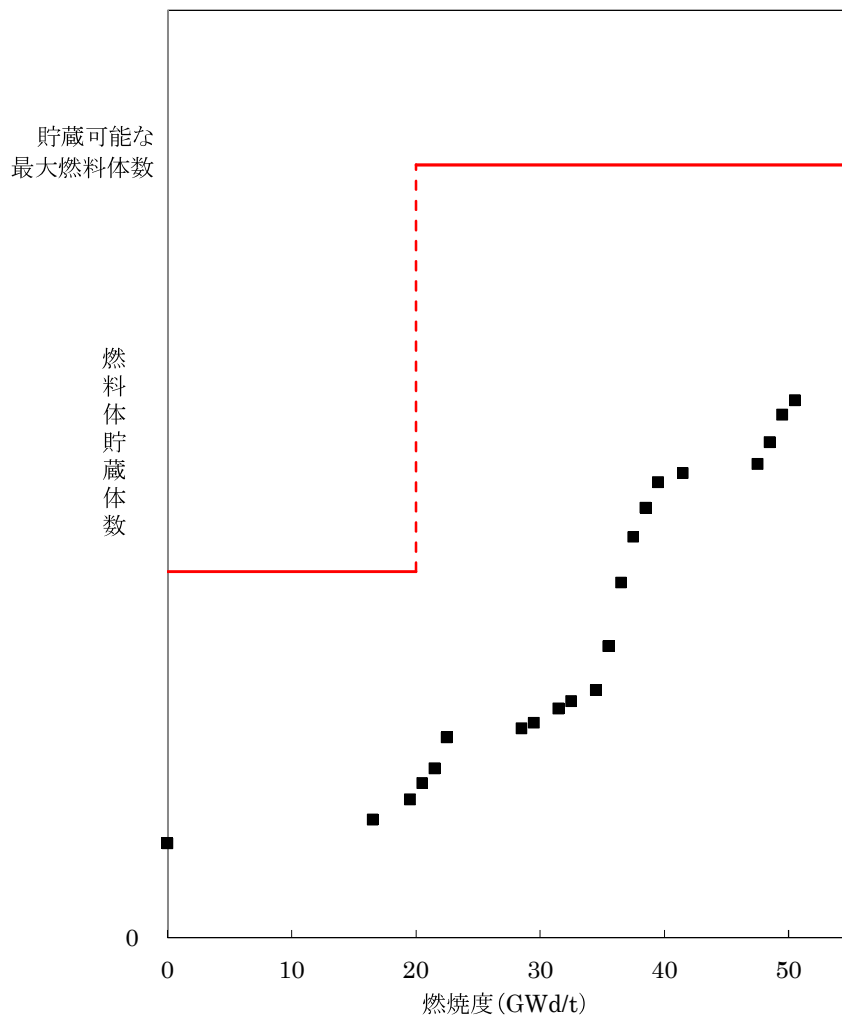
2領域管理の場合



PD ⇔ RCCの入替え1回に、内挿物移動3回のみが必要で、燃料移動は不要。

PD : プラギングデバイス、RCC : 制御棒

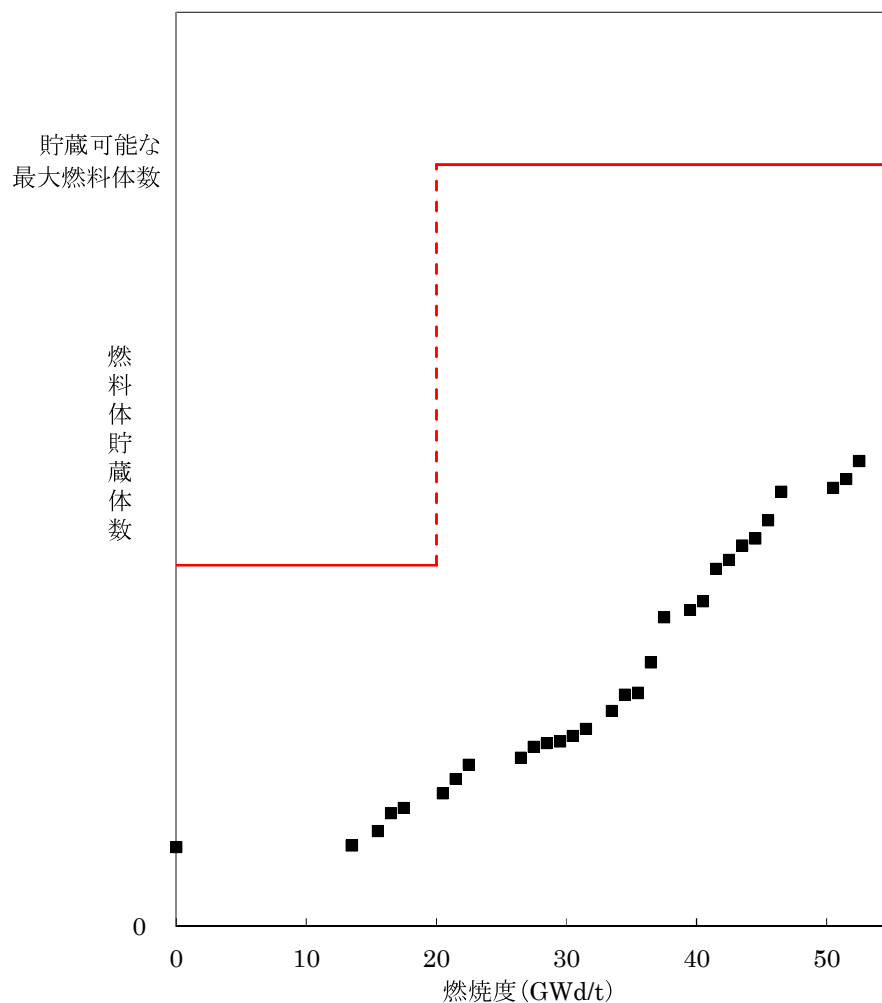
第 3-2 図 (2/2) 燃料体等移動手順の例 (内挿物入替時)



■ : 使用済燃料ピットに貯蔵する燃料体数の累積値 (第 28 サイクル装荷前)  
 — : 使用可能な燃料貯蔵容量の累積値

(注) 48 GWd/t 燃料は、55 GWd/t 燃料の燃焼度と反応度が等価となるよう燃焼度に 5GWd/t を加算してプロットしている。

第 3-3 図 (1/2) 高浜 1 号炉 使用済燃料ピットの貯蔵可能な燃料体数の例

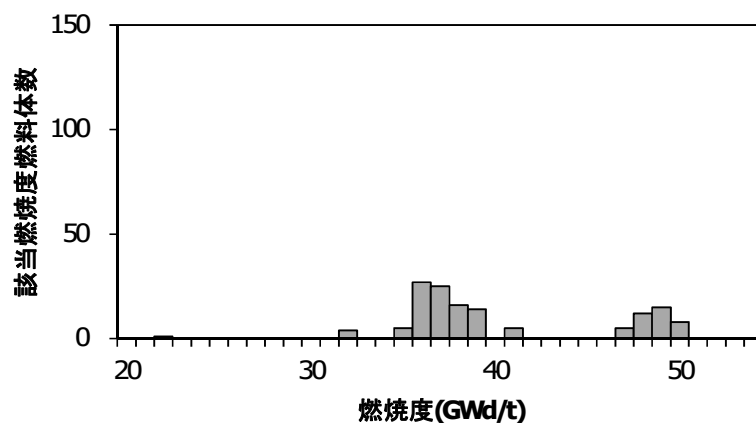


■ : 使用済燃料ピットに貯蔵する燃料体数の累積値 (第 28 サイクル装荷前)  
 — : 使用可能な燃料貯蔵容量の累積値

(注) 48 GWd/t 燃料は、55 GWd/t 燃料の燃焼度と反応度が等価となるよう燃焼度に 5GWd/t を加算してプロットしている。

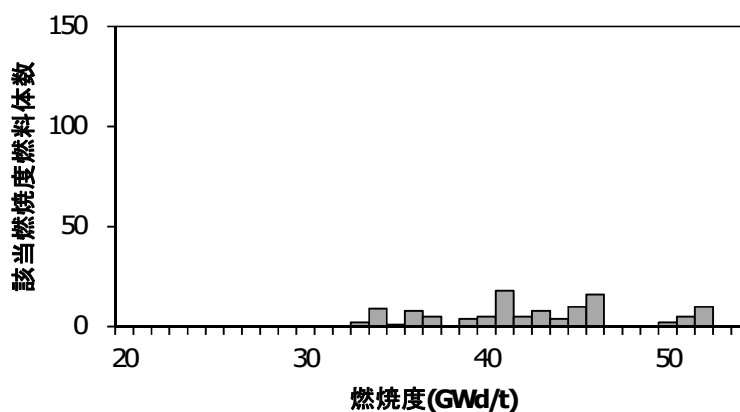
第 3-3 図 (2/2) 高浜 2 号炉 使用済燃料ピットの貯蔵可能な燃料体数の例





(注) 48GWd/t 燃料は、55GWd/t 燃料の燃焼度と反応度が等価となるよう燃焼度に 5GWd/t を加算している。

第 3-4 図 (1/2) 使用済燃料ピットの貯蔵燃料燃焼度による燃料体数ヒストグラム  
(高浜 1 号炉第 28 サイクル装荷前、領域 B 貯蔵燃料体数=137 体、平均燃焼度=40.3GWd/t)



(注) 48GWd/t 燃料は、55GWd/t 燃料の燃焼度と反応度が等価となるよう燃焼度に 5GWd/t を加算している。

第 3-4 図 (2/2) 使用済燃料ピットの貯蔵燃料燃焼度による燃料体数ヒストグラム  
(高浜 2 号炉第 28 サイクル装荷前、領域 B 貯蔵燃料体数=112 体、平均燃焼度=42.5GWd/t)

第 3-1 表 平衡炉心に基づいた燃料運用及び領域設定による貯蔵可能燃料体数

燃焼度 (GWd/t)	0～20	20～30	30～40	40～50	50～	計
55GWd/t 燃料平衡炉心 燃料取出時	44 体	28 体	24 体	36 体	25 体	157 体
領域 A で貯蔵可能な 体数	201 体					

第 3-2 表 2 領域管理への変更による燃料体等取扱数の差異

	3 領域管理 (中性子吸収体の考慮必要)	2 領域管理 (中性子吸収体の考慮不要)
①新燃料 1 体の SFP への 沈め込み作業	燃料体移動：2 体 内挿物入替：2 体	燃料体移動：1 体 内挿物入替：0 体
②燃料に挿入するプラグ ングデバイスと制御棒 の入替え作業	燃料体移動：3 体 内挿物入替：3 体	燃料体移動：0 体 内挿物入替：3 体

第 3-3 表 領域設定におけるより厳しい条件の検討結果

	55GWd/t 燃料 <sup>(注1)</sup> 〔初期濃縮度〕 約 4.6wt%	55GWd/t 燃料 〔初期濃縮度〕 約 4.6wt%
領域 A	燃焼度 0GWd/t	燃焼度 0GWd/t
領域 B	燃焼度 20GWd/t	燃焼度 19GWd/t <sup>(注2)</sup>
実効増倍率	0.944	0.944

(注 1) 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系。

(注 2) 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系における  
領域 B に貯蔵される燃料の燃焼度に 5%の余裕をとった燃焼度。

第 3-4 表 貯蔵燃料の違いによる影響評価（評価結果）

	大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系	評価ケース（網掛け部のみ大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系から条件を変更）
領域 A	燃焼度 0Gwd/t	燃焼度 0Gwd/t
領域 B	55Gwd/t 燃料 燃焼度 20Gwd/t	48Gwd/t 燃料 燃焼度 15Gwd/t
実効増倍率	0.944	0.944

第 3-5 表 領域別の貯蔵可能な燃料の燃焼度

	55Gwd/t 燃料 <sup>(注1)(注2)</sup> 〔 初期濃縮度約 4.6wt% 〕	48Gwd/t 燃料 <sup>(注3)(注4)</sup> 〔 初期濃縮度約 4.0wt% 〕
領域 A	燃焼度 0Gwd/t 以上	燃焼度 0Gwd/t 以上
領域 B	燃焼度 20Gwd/t 以上	燃焼度 15Gwd/t 以上

(注 1) 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価の計算体系

(注 2) 初期濃縮度が約 4.0wt%を超え、且つ約 4.6wt%未満の燃料に対しては本条件を適用する。

(注 3) 未臨界性評価条件については、初期濃縮度(約 4.0wt%に濃縮度公差を見込み   wt%)及びペレット密度(48Gwd/t 燃料：95% T.D.) 以外は 55Gwd/t 燃料に同じ。

(注 4) 初期濃縮度が約 4.0wt%未満の燃料に対しては本条件を適用する。

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。

(参考) 高浜 1, 2 号炉および大飯 3, 4 号炉の領域管理条件の違いについて下表に示す。

表 高浜 1, 2 号炉および大飯 3, 4 号炉の領域管理条件の違い

	高浜 1、2号炉 (既許可)	高浜 1、2号炉 (今回申請)	大飯 3、4号炉 Aエリア	大飯 3、4号炉 Bエリア																																								
燃料貯蔵領域図																																												
配置条件	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3"></th> <th colspan="2">貯蔵可能な燃焼度 55GWd/t燃料</th> </tr> <tr> <th>中性子 吸収体なし</th> <th>中性子 吸収体あり</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>□領域A</td> <td>0GWd/t 以上</td> <td>0GWd/t 以上</td> </tr> <tr> <td>▨領域B</td> <td>20GWd/t 以上</td> <td>0GWd/t 以上</td> </tr> <tr> <td>■領域C</td> <td>50GWd/t 以上</td> <td>15GWd/t 以上</td> </tr> </tbody> </table> <small>※55GWd/t燃料のみ記載</small>		貯蔵可能な燃焼度 55GWd/t燃料		中性子 吸収体なし	中性子 吸収体あり	□領域A	0GWd/t 以上	0GWd/t 以上	▨領域B	20GWd/t 以上	0GWd/t 以上	■領域C	50GWd/t 以上	15GWd/t 以上	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3"></th> <th colspan="2">貯蔵可能な燃焼度</th> </tr> <tr> <th>55GWd/t 燃料</th> <th>48GWd/t 燃料</th> </tr> <tr> <th colspan="2">中性子吸収体なし</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>□領域A</td> <td>0GWd/t 以上</td> <td>0GWd/t 以上</td> </tr> <tr> <td>▨領域B</td> <td>20GWd/t 以上</td> <td>15GWd/t 以上</td> </tr> </tbody> </table>		貯蔵可能な燃焼度		55GWd/t 燃料	48GWd/t 燃料	中性子吸収体なし		□領域A	0GWd/t 以上	0GWd/t 以上	▨領域B	20GWd/t 以上	15GWd/t 以上	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3"></th> <th colspan="2">貯蔵可能な燃焼度</th> </tr> <tr> <th>55GWd/t 燃料</th> <th>48GWd/t 燃料</th> </tr> <tr> <th colspan="2">中性子吸収体なし</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>□領域A</td> <td>0GWd/t 以上</td> <td>0GWd/t 以上</td> </tr> <tr> <td>▨領域B</td> <td>20GWd/t 以上</td> <td>15GWd/t 以上</td> </tr> </tbody> </table>		貯蔵可能な燃焼度		55GWd/t 燃料	48GWd/t 燃料	中性子吸収体なし		□領域A	0GWd/t 以上	0GWd/t 以上	▨領域B	20GWd/t 以上	15GWd/t 以上	なし
	貯蔵可能な燃焼度 55GWd/t燃料																																											
	中性子 吸収体なし		中性子 吸収体あり																																									
	□領域A	0GWd/t 以上	0GWd/t 以上																																									
▨領域B	20GWd/t 以上	0GWd/t 以上																																										
■領域C	50GWd/t 以上	15GWd/t 以上																																										
	貯蔵可能な燃焼度																																											
	55GWd/t 燃料	48GWd/t 燃料																																										
	中性子吸収体なし																																											
□領域A	0GWd/t 以上	0GWd/t 以上																																										
▨領域B	20GWd/t 以上	15GWd/t 以上																																										
	貯蔵可能な燃焼度																																											
	55GWd/t 燃料	48GWd/t 燃料																																										
	中性子吸収体なし																																											
□領域A	0GWd/t 以上	0GWd/t 以上																																										
▨領域B	20GWd/t 以上	15GWd/t 以上																																										

#### 別添 4 大規模漏えい時の未臨界性評価における不確定性評価の考え方

高浜 1, 2 号炉の使用済燃料ピットで、大規模漏えい時の未臨界性評価において考慮すべき不確定性として考えられるのは、以下のとおりである。

- ① 大規模漏えいを想定した解析モデルに係る不確定性
- ② 臨界計算上の不確定性（計算コードに係る不確定性）
- ③ 製作公差に基づく不確定性（ラック内での燃料体等が偏る効果を含む。）

上記のうち、「①大規模漏えいを想定した解析モデルに係る不確定性」として考える項目は、使用済燃料ピット内の水分雰囲気、ほう素濃度条件及び使用済燃料ピットの構造物条件が挙げられる。

使用済燃料ピット内の水分雰囲気については、スプレイや蒸気条件の想定として、液相部と気相部の水密度をそれぞれ保守的に設定しており、使用済燃料ピット内の水は純水として評価し、残存しているほう素は考慮しない。また、上下部の構造物による中性子反射効果を考慮し、燃料有効長上部は低水密度状態においても、十分な中性子反射効果が得られる厚さ（中性子反射効果が飽和する厚さ）である 300mm の水反射と仮定し、燃料有効長下部についても同様に、1,000mm のコンクリートとして評価する。以上より、①に係る不確定性については、全て使用済燃料ピットで大規模漏えいを想定した際に現実的に生じうる状態を十分に包含できる設定としている。

一方で、「②臨界計算上の不確定性（計算コードに係る不確定性）」については、別紙 1 「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示されるとおり、使用済燃料ピット仕様及び燃料仕様等を考慮して選定した臨界実験に対して、ベンチマーク解析を実施し、臨界計算に考慮すべき平均誤差及び標準偏差を適切に評価し、不確定性として考慮する。

また「③製作公差に基づく不確定性（ラック内での燃料体等が偏る効果を含む。）」については、燃料体等及びラックが健全であるという前提では、低水密度状態においても、平成 24 年 3 月 29 日付け平成 24・02・07 原第 10 号及び 11 号にて認可された工事計画の参考資料 6 「既存設備への影響に関する説明書」において考慮している項目を同様に考慮することで網羅的に評価される。

上記より、高浜 1, 2 号炉の使用済燃料ピットで、大規模漏えい時に考慮すべき不確定性は②、③に係る不確定性であり、これら进行评估した結果、不確定性の合計は第 4-1 表に示すとおり 0.0152 となる。

以上

第 4-1 表 高浜 1, 2 号炉 大規模漏えい時の未臨界性評価における不確定性評価結果  
(純水冠水時)

臨界計算上の不確定性評価項目				不確定性	
計算コード の不確定性	平均誤差		$\delta k$	0. 0013 <sup>(注1)</sup>	
	95%信頼度×95%確率		$\epsilon_c$	0. 0104 <sup>(注2)</sup>	
				不確定性	入力値 <sup>(注3)</sup>
製作公差に 基づく不確 定性	計算体系を第 4- 1 図に示す。 <sup>(注 4)</sup>	ラックの内り公差	$\epsilon_w$	0. 0023	<input type="text"/>
		燃料製作公差	$\epsilon_r$	0. 0061	—
		—燃料材直径	$\epsilon_d$	(0. 0014)	<input type="text"/>
		—燃料材密度	$\epsilon_l$	(0. 0038)	<input type="text"/>
		—被覆材内径	$\epsilon_{cr}$	(0. 0014)	<input type="text"/>
		—被覆材外径	$\epsilon_{cd}$	(0. 0032)	<input type="text"/>
		—燃料体外寸	$\epsilon_a$	(0. 0029)	<input type="text"/>
	計算体系を第 4- 2 図に示す。	ラックの中心間距離公差	$\epsilon_p$	0. 0036 <sup>(注5)</sup>	<input type="text"/>
		ラック内燃料偏心	$\epsilon_f$	0. 0052 <sup>(注6)</sup>	—
統計誤差			$\sigma$	0. 0005	
不確定性合計 <sup>(注7)</sup>			$\epsilon$	0. 0152	

(注 1) 国際的に臨界実験データを評価収集している OECD/NEA による INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS に登録されている MOX 燃料（燃焼燃料を含む体系の評価においては、ウラン燃料または燃焼燃料と同様にプルトニウムを含む MOX 燃料に対する不確定性のうち、評価結果が厳しくなる MOX 燃料に対する不確定性を使用する。）に係る臨界実験を対象に SCALE6.0 システムのベンチマーク解析を実施して得られる加重平均実効増倍率の平均誤差。

(注 2) 上記の臨界実験を対象に SCALE6.0 システムのベンチマーク解析を実施して得られる加重平均実効増倍率の不確かさ（95%信頼度×95%確率での信頼係数を考慮）。

(注 3) 正負の製作公差のうち未臨界性評価上厳しくなる側の値を入力値とした。

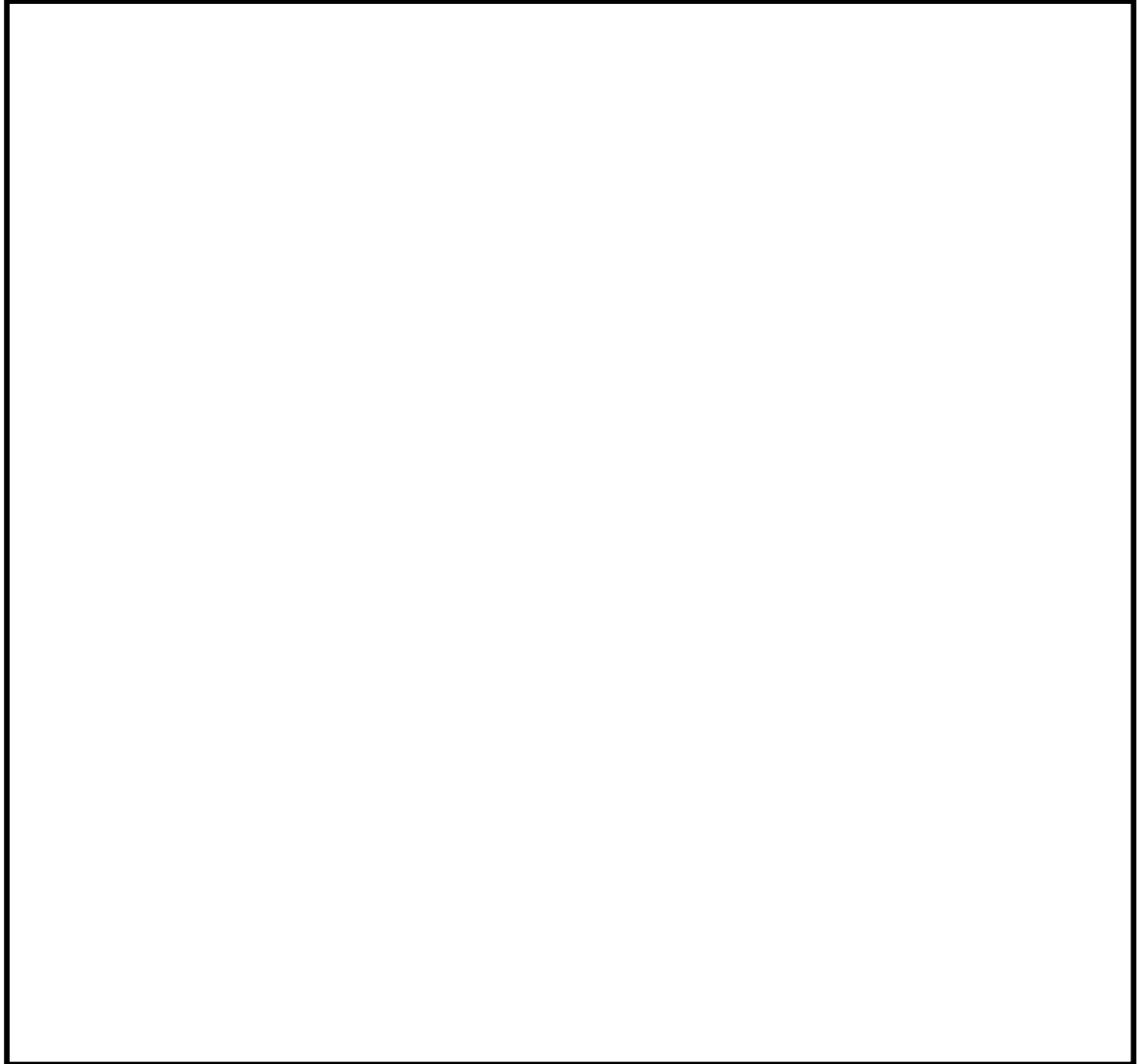
(注 4)

(注 5) 未臨界性評価にはラック間隔が  を使用する。

(注 6)

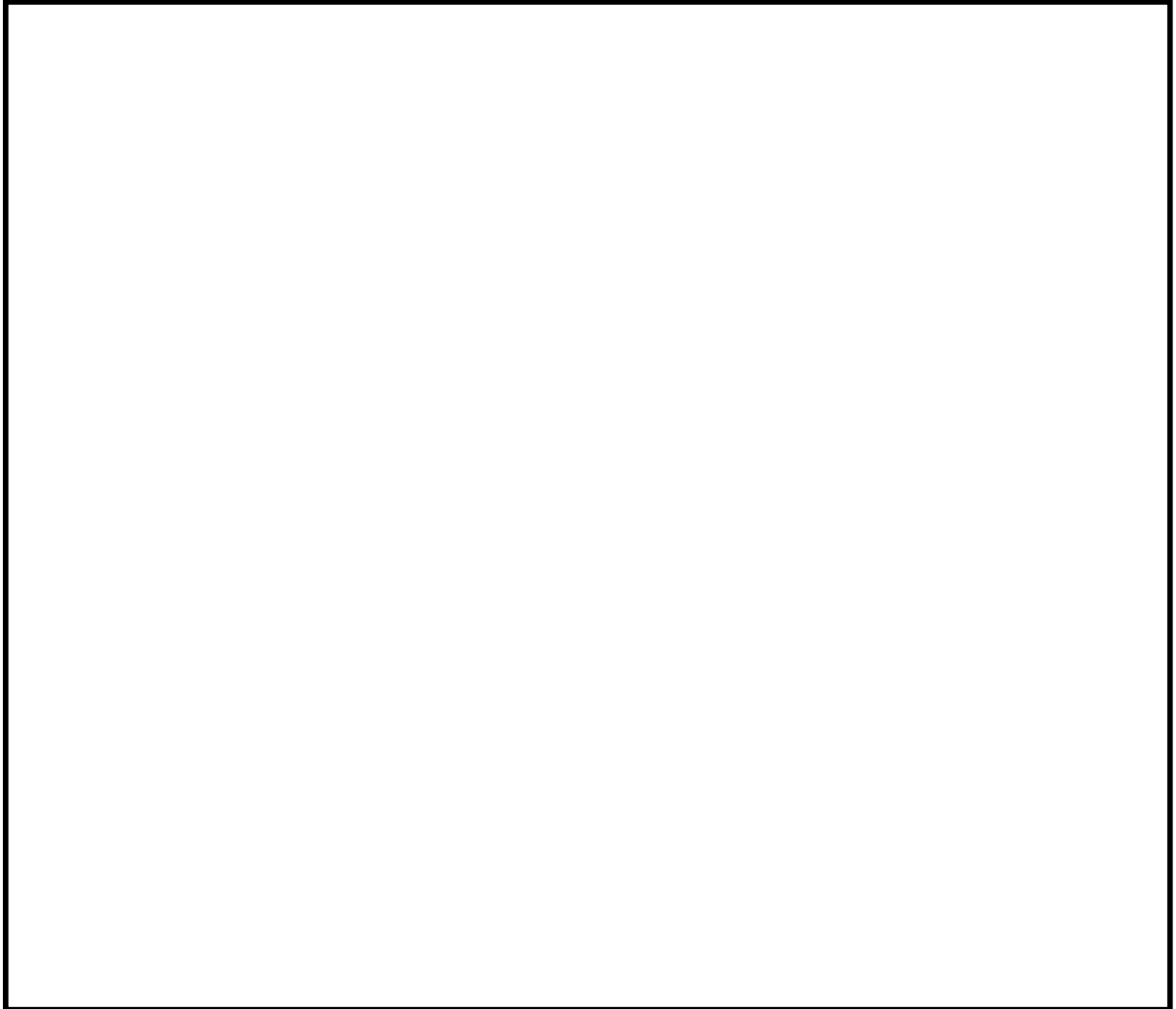
(注 7)

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 4-1 図 製作公差に基づく不確定性評価の計算体系

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 4-2 図 製作公差に基づく不確定性評価の計算体系

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。



計算機プログラム（解析コード）の概要

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	別紙 1-1
2. 解析コードの概要 .....	別紙 1-2
2.1 PHOENIX-P Ver. 8 .....	別紙 1-2
2.2 SCALE Ver. 6.0 .....	別紙 1-4

1. はじめに

本資料は、「⑤-1 設置許可基準規則等への適合性について（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 <sub>4</sub> 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><b>【検証(Verification)】</b></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"> <li>・ 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。</li> <li>・ 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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b></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"> <li>・ PHOENIX-Pコード及び、3次元拡散計算コードANCの検証は、MOX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/HIDRA/PANDAとのコード間比較を実施している。具体的には、TCA臨界実験における燃料棒出力解析、及び48Gwd/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</li> </ul>

	<p>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"><li>・ 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55GWd/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。</li><li>・ 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。</li><li>・ 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。</li></ul>
--	---

## 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><b>【検証 (Verification)】</b></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"> <li>・ 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。</li> <li>・ 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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></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"> <li>・ 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147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。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>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MOX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。</li><li>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。</li><li>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。</li></ul>
--	---

## 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。

また、今回の解析における本解析コードのバージョン、件名、使用要素及び評価内容を第 1 表に示す。

第 1 表 使用件名

バージョン	件名	使用要素	評価内容
Ver. 6.0	使用済燃料ピット	—	未臨界性評価

### (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、最新である 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。



- ・ 2018 年 2 月に、CIELO (Collaborative International Evaluation Library Organization) プロジェクトによって評価された H、016、Fe56、U235、U238、Pu239 の断面積データを登録した、最新の ENDF/B-VIII がリリースされているが、本設置許可申請に用いた断面積ライブラリは、計算コードの妥当性が確認され、かつ既許可において使用しているものと同じである。

#### (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。

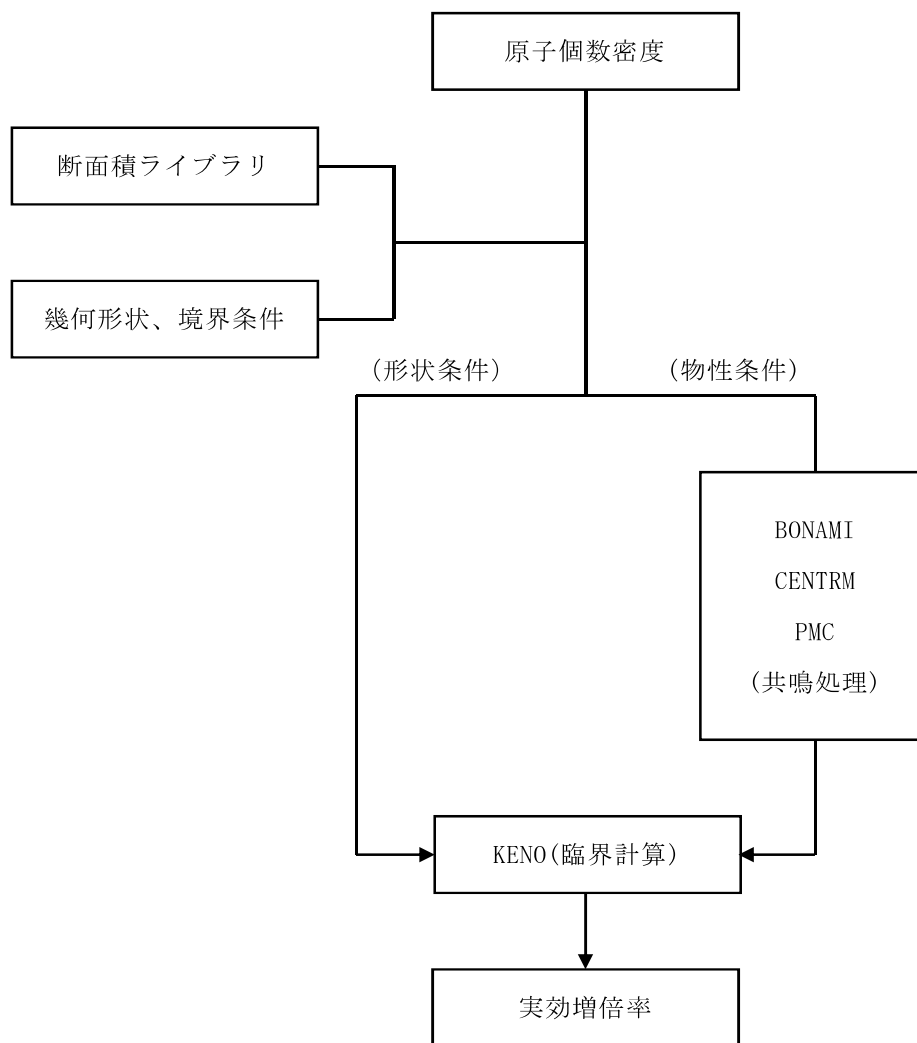
本コードでは、体系内の一つ一つの中性子の振舞いを追跡し、核分裂によって発生する中性子数  $F$ 、吸収されて消滅する中性子数  $A$ 、体系から漏えいする中性子数  $L$  を評価し、次式により実効増倍率  $k_{\text{eff}}$  を算出する。

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

(4) 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

(5) 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 147 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。選定した結果を第 2 表に示す。

ベンチマーク解析の結果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( $\Delta k_c$ )を、ウラン燃料を対象とした場合と、MOX 燃料を対象とした場合のそれぞれについて導出した結果を第 3 表に示す。表に示すとおり、ウラン燃料を対象とした場合の SCALE Ver. 6.0 システムの平均誤差は 0.0007、不確かさは 0.0065 であり、MOX 燃料を対象とした場合の SCALE Ver. 6.0 システムの平均誤差は 0.0013、不確かさは 0.0104 となった。

第2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 <sup>235</sup> U濃縮度	wt%	1.60	4.80	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	MOX燃料 Pu含有率	wt%	5.5	10.9	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	燃料材径	mm	8.19	9.29	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	燃料要素径	mm	9.5	10.72	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	被覆材 材質	—	ジルコニウム合金		<input type="text"/>	
	燃料要素ピッチ	mm	12.6	14.3	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	燃料体内の減速材 体積/燃料体積	—	1.88	2.00	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	燃料要素 配列条件	—	正方配列		<input type="text"/>	
	体系条件	—	燃料体配列体系		<input type="text"/>	
減速材	減速材	—	無/軽水		<input type="text"/>	
	減速材密度	g/cm <sup>3</sup>	0	約1.0	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	減速材中の ほう素濃度	ppm	0	4400以上	<input type="text"/>	<input type="text"/>
ラック	ラック 材質	—	無/SUS/B-SUS		<input type="text"/>	
	SUS製ラックの ほう素添加量	wt%	0	1.05	<input type="text"/>	<input type="text"/>
反射体	反射体 材質	—	軽水 /コンクリート		<input type="text"/>	

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	MOX 燃料
	ベンチマークケース数	<input type="text"/>	<input type="text"/>
評価 結果	平均誤差 ( $1-k_c$ )	0.0007	0.0013
	加重平均実効増倍率 ( $\overline{k_{eff}}$ )	0.9993	0.9987
	不確かさ ( $\Delta k_c = U \times S_p$ )	0.0065	0.0104
	信頼係数 ( $U$ )* <sup>1</sup>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	$\overline{k_{eff}}$ の不確かさ ( $S_p$ )	<input type="text"/>	<input type="text"/>

\*<sup>1</sup> 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. 評価結果

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 図のとおりに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。なお、各相の中性子スペクトルは、液相部では水による中性子減速効果によりスペクトルが柔らかく（熱中性子が相対的に多い）なり、液相中の各位置においてもスペクトル形状に大きな差はないと予想される。また、気相部では水密度が非常に低いことから、スペクトルは硬く（高速中性子が相対的に多い）なり、液相部及び上部反射体との境界面では境界部の水による減速効果により、スペクトルがやや柔らかくなると考えられる。この中性子スペクトルの傾向を確認するため、MVP コードを用いて、第 3 図に示すウラン新燃料のみを貯蔵した無限配列体系を対象に液相領域・気相領域の中性子スペクトルを比較した結果を第 4 図、第 5 図に示すが、中性子スペ

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。

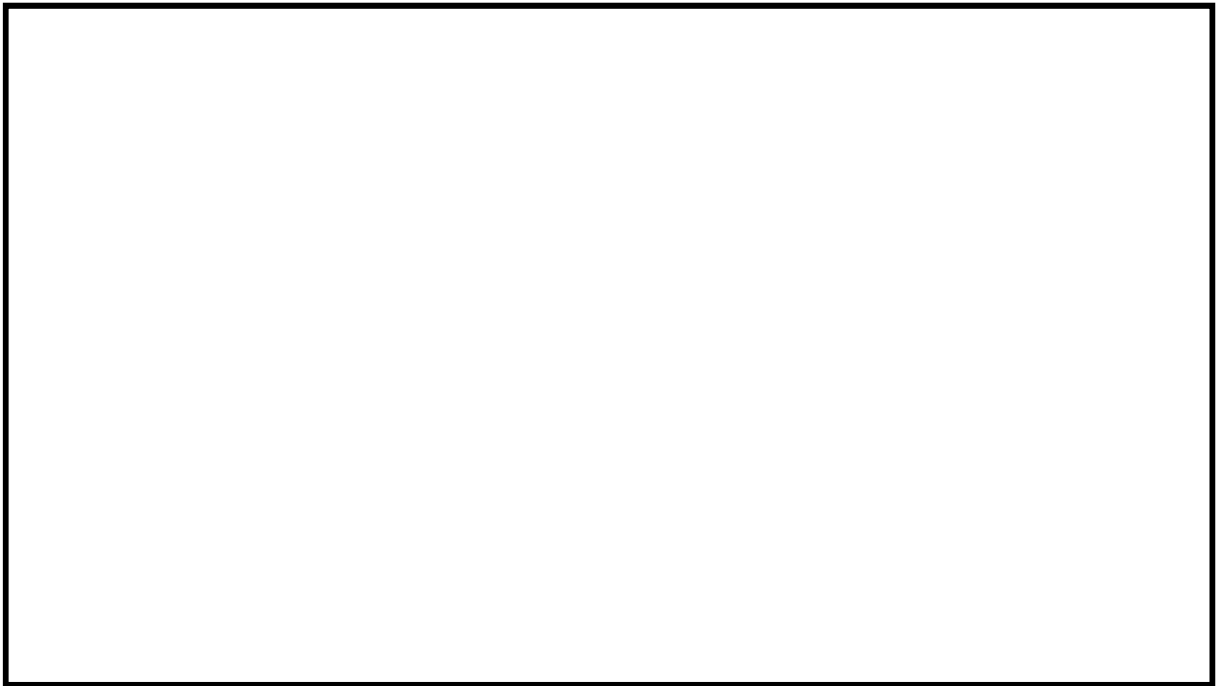
クトルは上記の予想と同様の傾向を示していることから、液相部、気相部それぞれが適切に評価されていると判断できる。さらに、ベンチマーク解析では臨界実験における燃料、減速材、コンクリート、構造材などの各境界を適切に取り扱うことができていると言える。

なお、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 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、申請評価の体系 (2 領域管理条件) での評価結果を第 6 図に示す。第 6 図より、申請評価の EALF は約 0.2~約 6.5eV となる。選定済みの 147 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 3 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 7 図に示す。147 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 3 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。

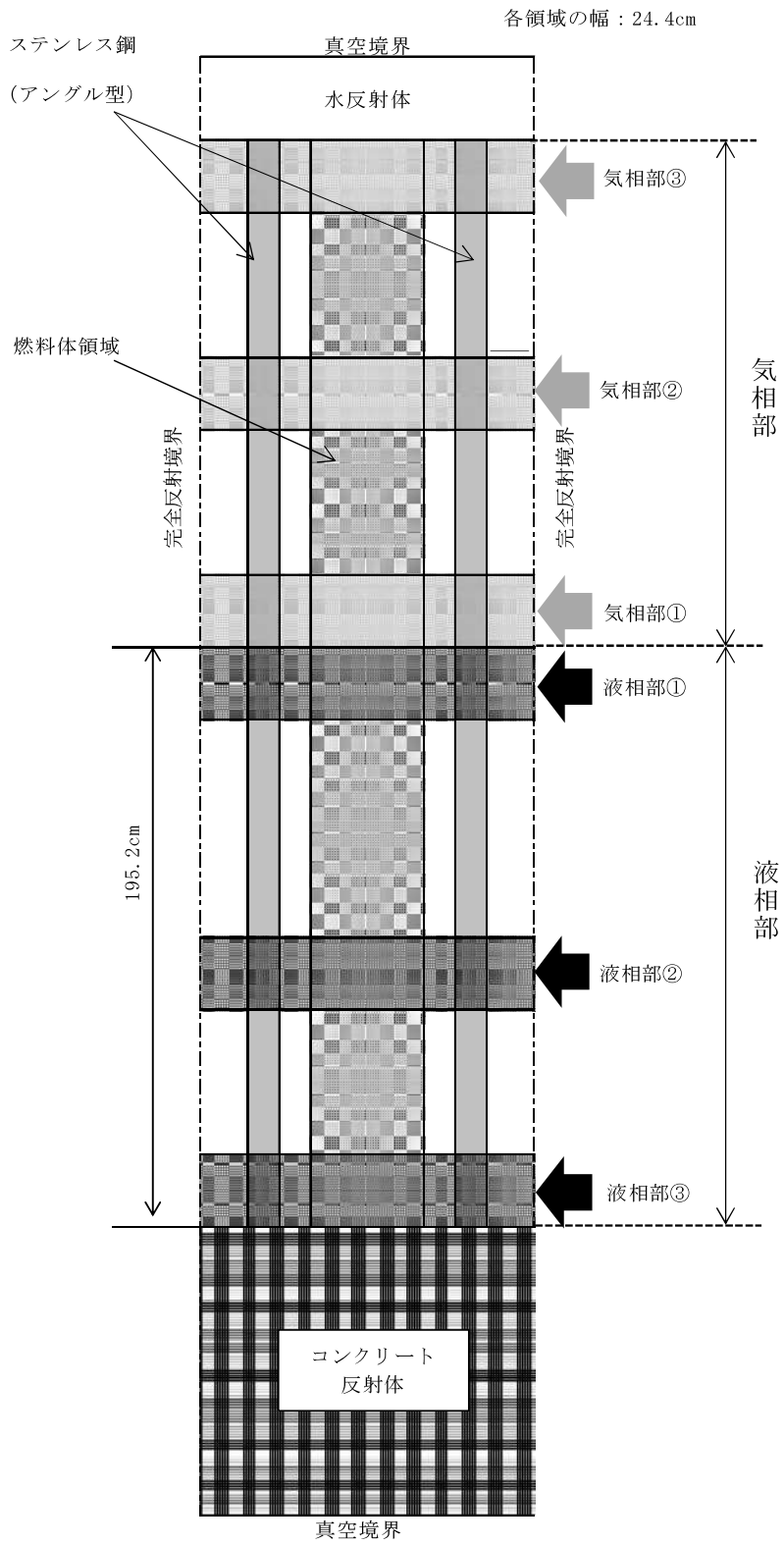
第4表 低水密度状態の臨界実験リスト

臨界実験	減速材密度	ケース数



第2図  $\Delta k$  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。

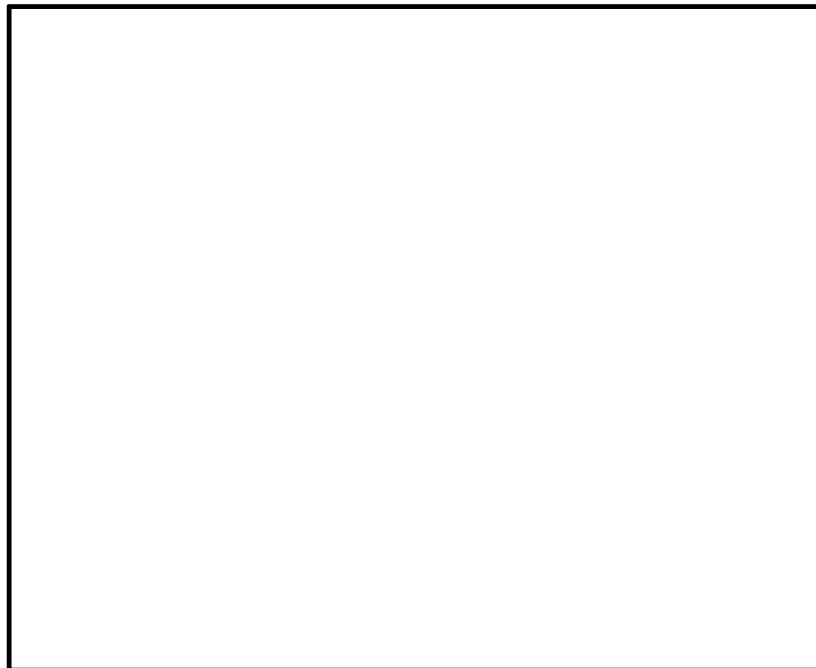


第3図 境界における中性子スペクトルの評価体系（軸方向）



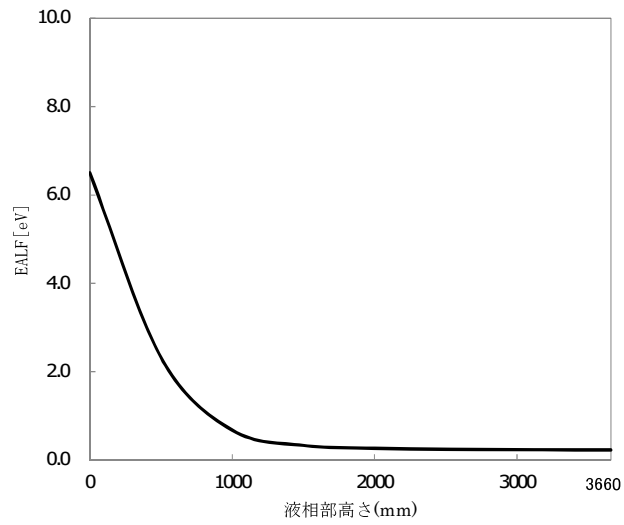


第4図 液相部における中性子スペクトル評価結果

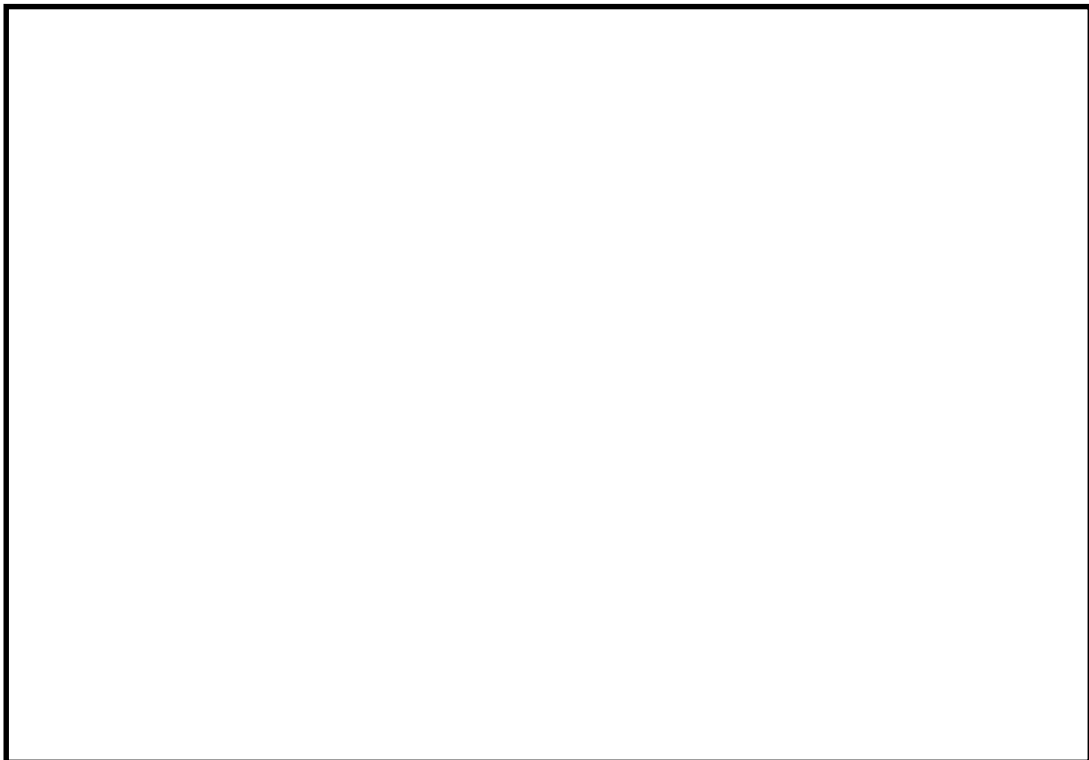


第5図 気相部の中性子スペクトル評価結果

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。



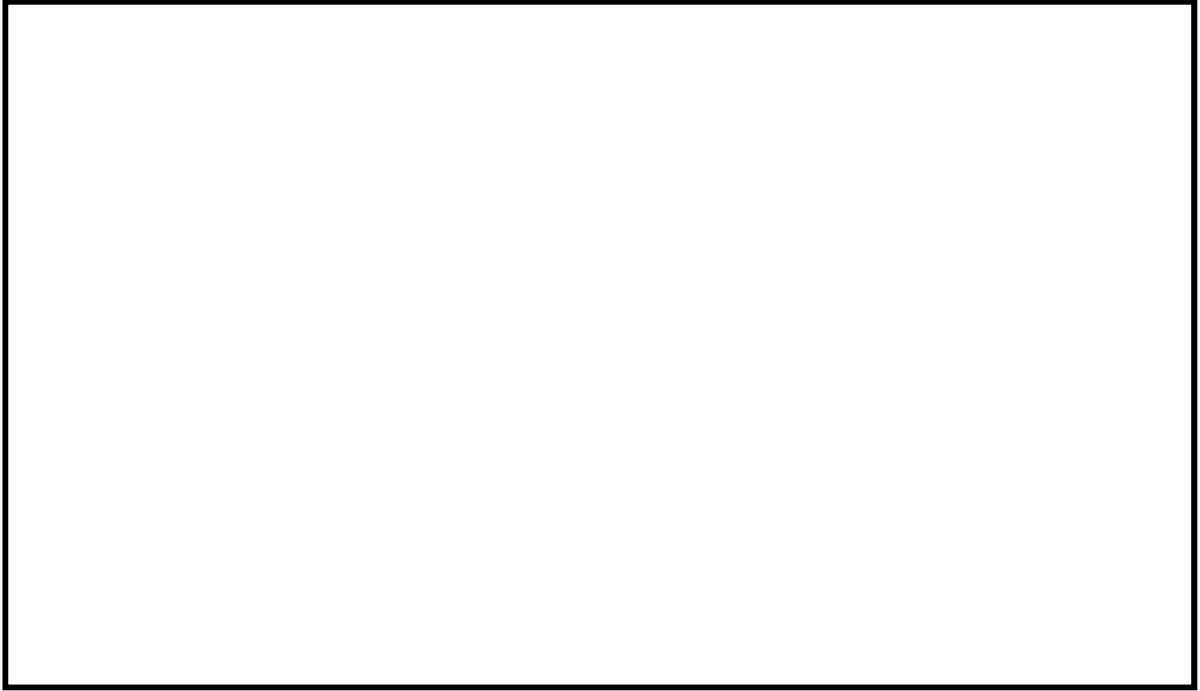
第 6 図 申請評価体系（2 領域管理条件）における EALF 評価結果



第 7 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) 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。

実機スプレイ設備を使用した液滴径計測試験について

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	別紙2-1
2. 試験条件の考え方 .....	別紙2-1
3. 試験方法 .....	別紙2-5
4. 試験結果及び考察 .....	別紙2-6
5. 試験結果を踏まえた液滴径設定の妥当性について .....	別紙2-31

## 1. はじめに

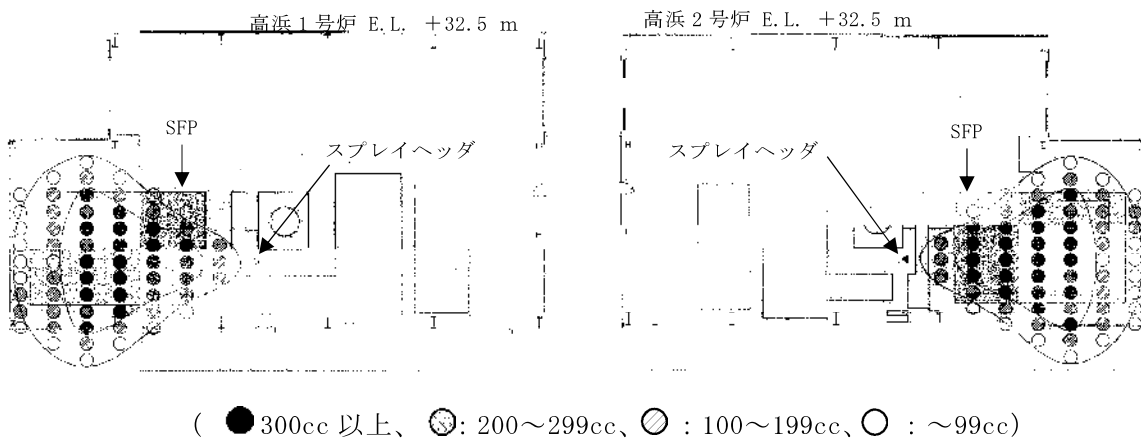
設置許可基準規則第五十四条第2項において、使用済燃料ピット（以下、SFPという。）の大規模漏えいにより水位が異常に低下した場合には、燃料の著しい損傷の進行を緩和し臨界を防止するために可搬型スプレー設備によるSFPへのスプレーが要求されている。

スプレー時における SFP 内の水密度については、未臨界性評価上重要なパラメータである。評価に用いる気相部水密度を設定するにあたり、スプレーにより生じるスプレー水密度を定める上で、下降速度を設定するために液滴径を液滴径計測試験を踏まえて設定している。本資料では、実機スプレー設備を用い実施した液滴径計測試験について説明する。

なお、液滴径計測試験を踏まえ設定した液滴径は、変動しスプレー水密度に影響を与える可能性があることから、流量に十分な保守性を考慮しスプレー水密度を設定し、気相部水密度を設定する際には、さらに余裕のある値を設定している。液滴径の変動による影響については、別添2「大規模漏えい時の未臨界性評価手法の妥当性について」において評価し、液滴径の変動を踏まえても気相部水密度の設定が十分保守的であることを確認している。

## 2. 試験条件の考え方

大規模漏えい時に使用するスプレー設備は、旋回角度を $\pm 20^\circ$ として首振りできる状態で、流量 $\square$   $\text{m}^3/\text{h}$ 、圧力 $\square$  MPaで放水することにより、SFP全面にスプレーできることをメーカーのスプレー試験により確認していることから、実際の使用時においても、第1図に示すSFP近傍位置にスプレー設備を設置し、SFP全面にスプレーする。



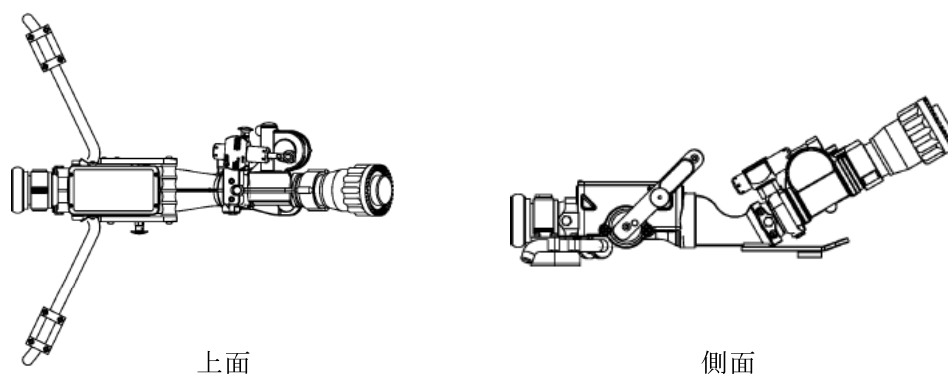
第1図 高浜1,2号炉 SFPにおけるスプレー設備設置位置とスプレー分布(1分当たり)

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。

液滴径計測試験を行うに当たっては、スプレー設備の運用を踏まえ以下のとおり検討し、第1表の通り試験条件を設定した。

・使用設備について

スプレー放水用に重大事故等対処設備として美浜、高浜、大飯各発電所に配備されている可搬型スプレーは第2図のものであり、すべて同一仕様のものを配備している。試験では、発電所に配備されている実機を供した。



第2図 スプレー設備 構造図

・使用条件について

試験時の流量及び圧力については、第1図のとおり首振りすることでSFP全面にスプレーが可能な条件として、それぞれ  $\square$  m<sup>3</sup>/h、 $\square$  MPaとした。なお、実際の使用時には首振りをするが、試験ではより水密度が大きくなる状況下での液滴データを取得するため、首振りモードを解除し、散水の広がり抑制した。

また、スプレー時は8m程度下のSFP保管燃料頂部へ散水することから、第3図に示すとおり試験ではSFPに類似した設備(縦5m×横10m×深さ9m)を用いて、燃料ラック頂部高さ相当位置を計測位置とした。計測点については、液滴径分布を網羅的に測定できるように設定した。

・使用環境について

重大事故等時にスプレーする際には海水を使用するが、試験では水道水を使用した。計測される液滴径に着目すると、液滴周囲から受ける抵抗力と、流体の表面張力によって液滴径が決まる。液滴周囲から受ける抵抗力は環境依存であり、スプレー水の種類に依らない。一方、表面張力については、第2表に示すとおり海水の方が水に比べて2%程度大きいことから、他の条件が同等であれば液滴径は大きくなる傾向となる。このため、水道水で代替することは、液滴径が小さくなり、液滴落下速度を低下させて水密度を大きくすると

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。

いう観点から保守的な取扱いとなる。

また、SFP内は保管燃料の崩壊熱により高温環境になると考えられるが、試験では常温で実施した。水密度算出式( $Q/A \cdot V$ ) [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] ( $Q$ : 流量 [ $\text{g}/\text{s}$ ]  $A$ : 面積 [ $\text{cm}^2$ ]  $V$ : 液滴下降速度 [ $\text{cm}/\text{s}$ ])のうち、下降速度 $V$ が小さいほど水密度は大きくなるが、別紙3に示すように、液滴の温度が低いほど下降速度は小さくなる。また、高温状況下では液滴が蒸発しやすくなるが、分子の $Q$ は液滴径に対して3乗で比例し、分母の $V$ については、別紙3に示す液滴下降速度の計算式より、液滴径の1/2乗に比例する。よって、水密度に対しては、液滴径の変化は5/2乗で影響する。すなわち、常温で試験を実施することで、より水密度が高くなる条件下でのデータを取得できるという観点から、本条件を設定した。



第1表 試験条件設定根拠及び試験実施方法

項目	実運用	試験運用		試験実施方法
		試験条件	設定根拠	
使用設備	可搬型スプレイ設備	実機を利用	—	—
使用条件	送水車	可搬型消防ポンプ	SFP 全面にスプレイ可能な条件 ( $\square$ m <sup>3</sup> /h、 $\square$ MPa) を達成できるため	ポンプ起動後、圧力計/流量計の値がそれぞれ $\square$ m <sup>3</sup> /h/ $\square$ MPa で安定したことを確認後、計測を開始
	SFP 保管燃料頂部への散水	燃料ラック頂部高さ相当位置	実機体系と整合させるため	SFP の類似設備 (縦 5m × 横 10m × 深さ 9m) にて散水
	首振りモード (±20° で往復)	計測エリアの中央部、端部等で流量/液滴径を計測	計測エリアにおけるスプレイ水の液滴径分布を網羅的に測定するため	計測エリアの中央部及び端部含め、網羅的に測定できる位置を設定
使用環境	海水	首振りなし	より水密度が大きくなる状況下での液滴データを取得するため	重大事故等時にはより広い範囲へ散水するが、試験では首振りモードを解除して固定することで散水の広がり抑制
	海水の温度 (上限 40℃)	水 常温 (20℃程度)	表面張力が小さく、液滴径が小さくなり、保守側になるため 下降速度は小さくなり、保守側になるため	大型貯水槽に貯めた水道水 (常温) を用いて可搬型ポンプでスプレイ設備に接続

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表 水と海水の物性値比較

物性値	常温 (20℃)	100℃
密度 [kg/cm <sup>3</sup> ]	水 : $1.00 \times 10^{-3}$ 海水 : $1.03 \times 10^{-3}$	水 : $0.96 \times 10^{-3}$ 海水 : $0.98 \times 10^{-3}$
粘性係数 [Pa・s]	水 : $1.00 \times 10^{-3}$ 海水 : $1.08 \times 10^{-3}$	水 : $2.82 \times 10^{-4}$ 海水 : $3.08 \times 10^{-4}$
動粘性係数 [m <sup>2</sup> /s]	水 : $1.00 \times 10^{-6}$ 海水 : $1.05 \times 10^{-6}$	水 : $2.94 \times 10^{-7}$ 海水 : $3.14 \times 10^{-7}$
表面張力 [N/m]	水 : $7.28 \times 10^{-2}$ 海水 : $7.38 \times 10^{-2}$	水 : $5.89 \times 10^{-2}$ 海水 : $6.01 \times 10^{-2}$



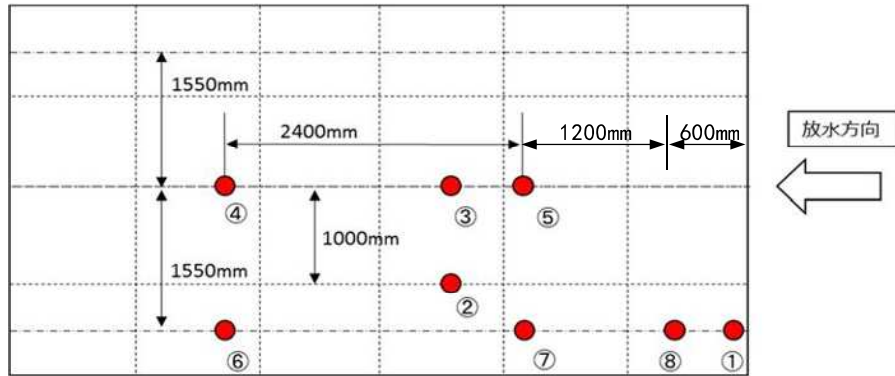
第3図 液滴径測定試験 試験体系および試験の様子

### 3. 試験方法

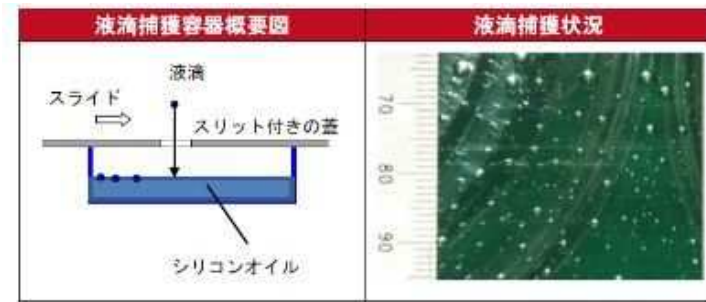
第3図に示すように、SFP類似設備にてスプレイヘッダにより放水を行い、燃料ラック頂部高さ相当位置での液滴径を測定した。測定エリアにおける測定点の配置を第4図に示す。

スプレイ時の液滴は、シリコンオイルで満たされた槽の上に開口窓を備えたスライド板を置いた捕獲容器を用い、スプレイ放水時にスライド板を水平移動させることにより、開口部を通過した液滴をシリコンオイル槽に捕獲した。取得した液滴を画像処理によりサンプリングし、捕獲容器毎の液滴径分布を取得した。液滴捕獲装置の概要を第5図に示す。

なお、本試験に対する再現性確認試験の位置づけで、同等条件で異なる時期に再現試験を行った。



第4図 液滴径分布測定位置



第5図 液滴捕獲装置の概要および取得液滴の様子

#### 4. 試験結果および考察

##### (1) 試験結果

2回の試験で得られた液滴径について、液滴径毎の個数割合を0.1mm刻みで整理した結果を第6-1図および第6-2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。

なお、水密度を算出する上では、空間内における液滴の体積が必要となることから、液滴径毎の個数に液滴径体積を乗じて体積分率を算出し、整理した結果を第7-1図および第7-2図に示す。また、体積分率累計値が0.5となる平均液滴径を第3表に示す。微小な液滴径については体積が小さいため体積分率も小さいが、液滴径が大きくなるにつれ、液滴径の3乗で体積が大きくなり、体積分率もその影響を受ける。第3表に示すとおり、平均液滴径は、全ての測定点において1.0mmを上回っていることを確認した。

未臨界性評価に用いる水密度を算出する際においては、下降速度が小さいほうが保守側であるため、試験結果を踏まえ、液滴径1.0mmの液滴の下降速度を使用する。

なお、別紙3に示すように、測定された液滴が全て終端速度に達していると仮定し、液滴径毎の終端速度に第7-1図および第7-2図により得られた体積分率を乗じることで重み平均を取ることにより平均下降速度を求めることができるが、全測定点における平均下降速度は上記の平均液滴径の下降速度よりも大きいことを確認している。

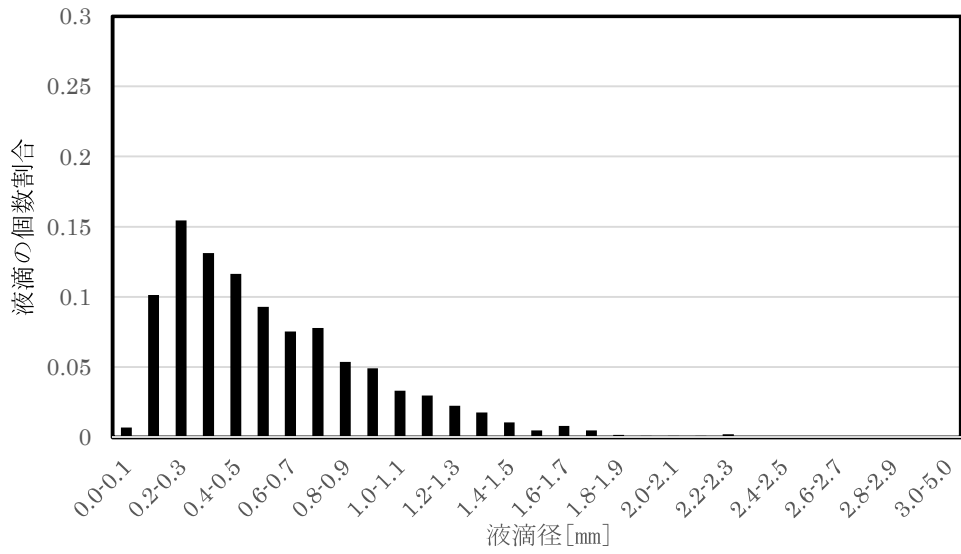
第3表 液滴径計測試験結果（平均液滴径）

	第1回目	第2回目
測定点①	1.15 ～ 1.25	1.35 ～ 1.45
測定点②	1.65 ～ 1.75	1.05 ～ 1.15
測定点③	1.95 ～ 2.05	1.85 ～ 1.95
測定点④	1.35 ～ 1.45	1.15 ～ 1.25
測定点⑤	1.75 ～ 1.85	2.45 ～ 2.55
測定点⑥	1.00 ～ 1.05	1.05 ～ 1.15
測定点⑦	1.05 ～ 1.15	1.55 ～ 1.65
測定点⑧	1.85 ～ 1.95	1.05 ～ 1.15

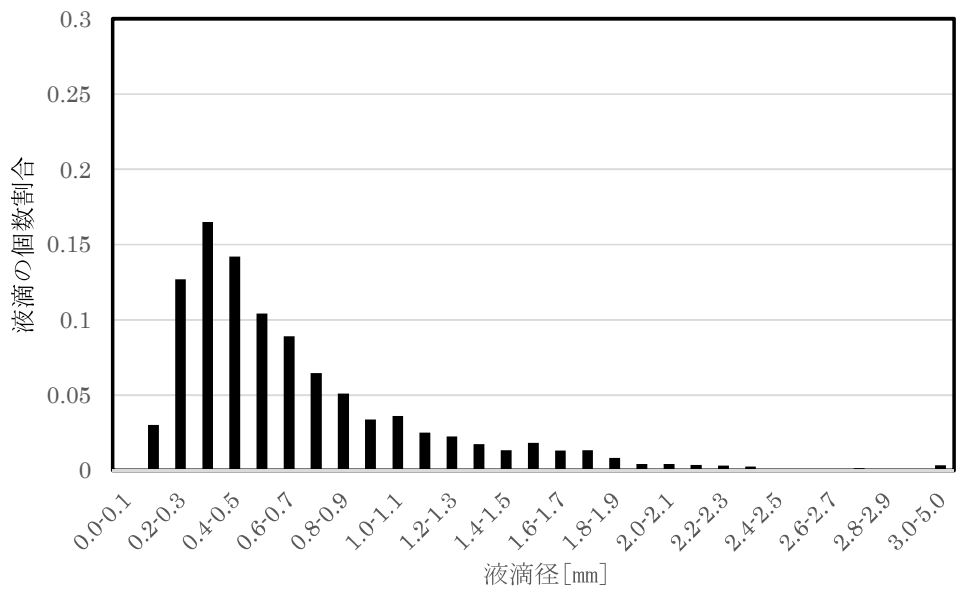
(単位：mm)

上記液滴径の大きさの範囲内で体積分率累計値が0.5となる。

測定点①

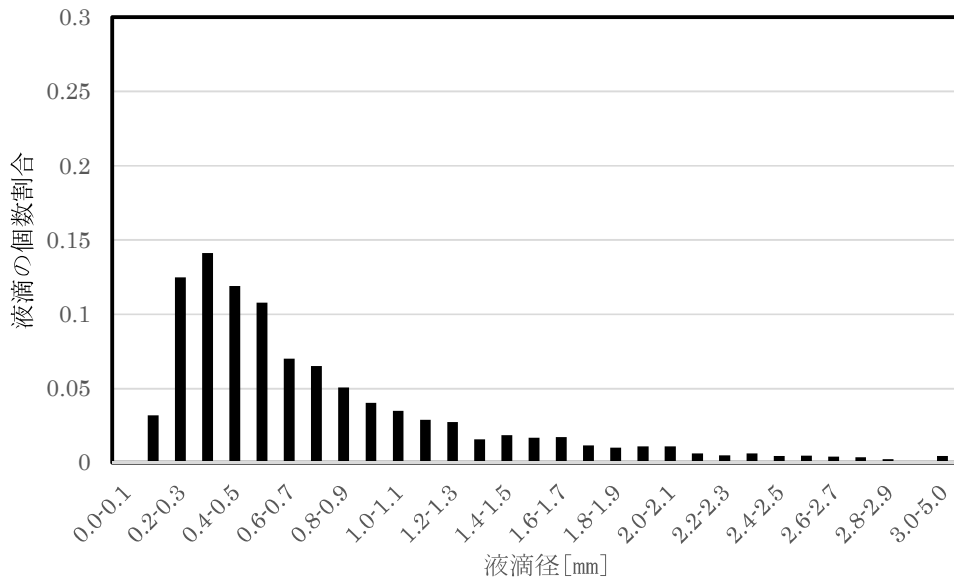


測定点②

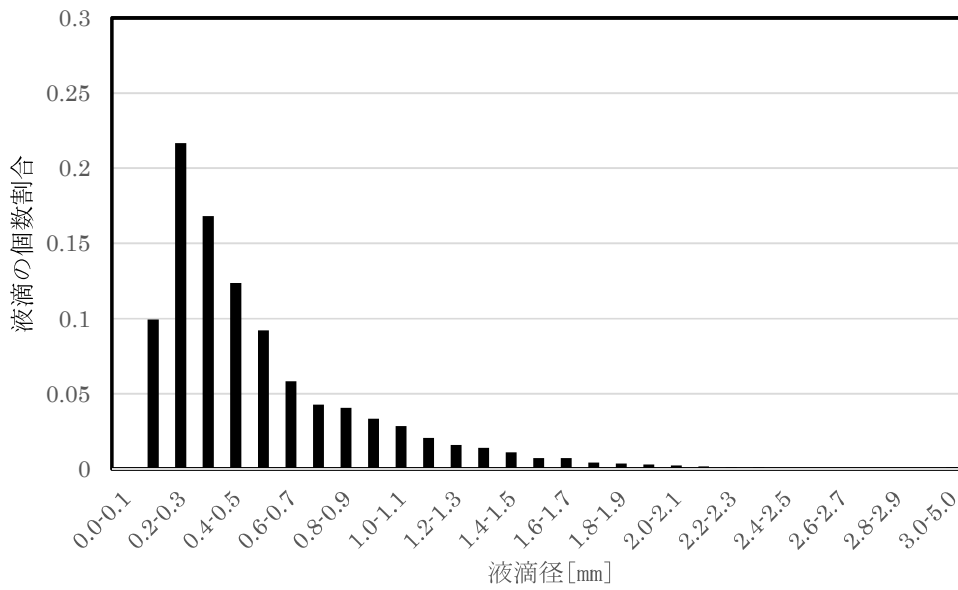


第6-1図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点③

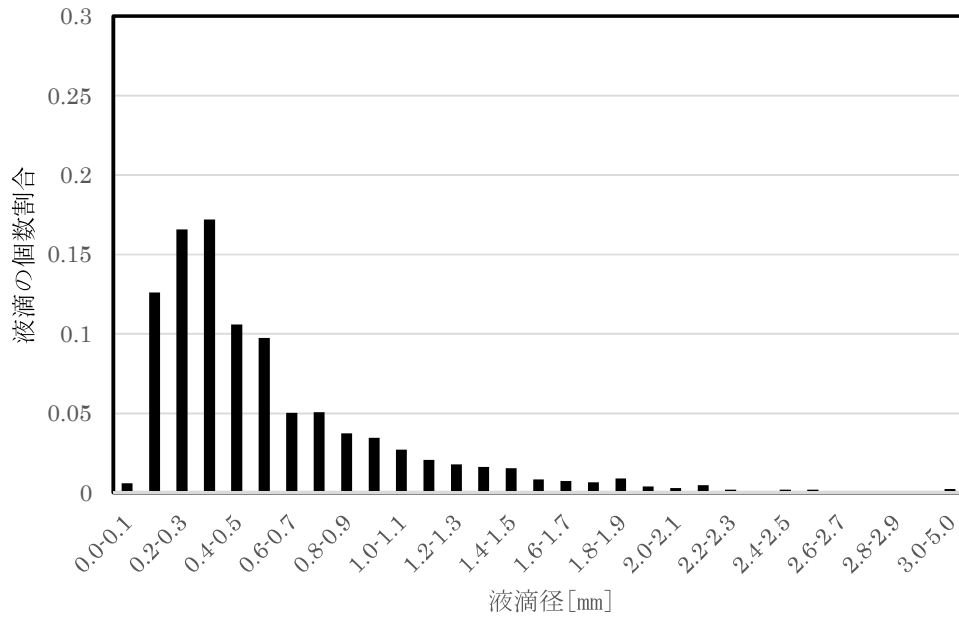


測定点④

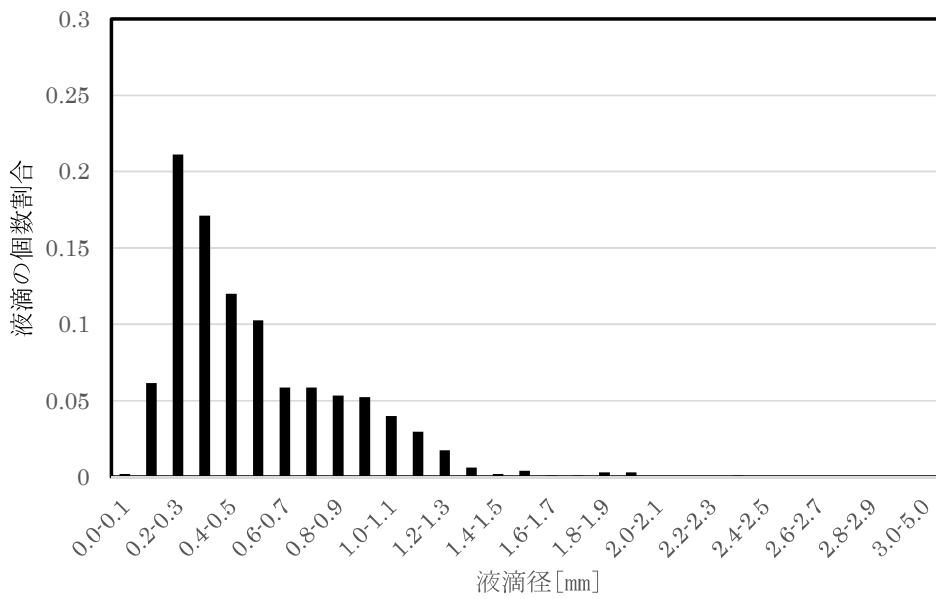


第6-1図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑤

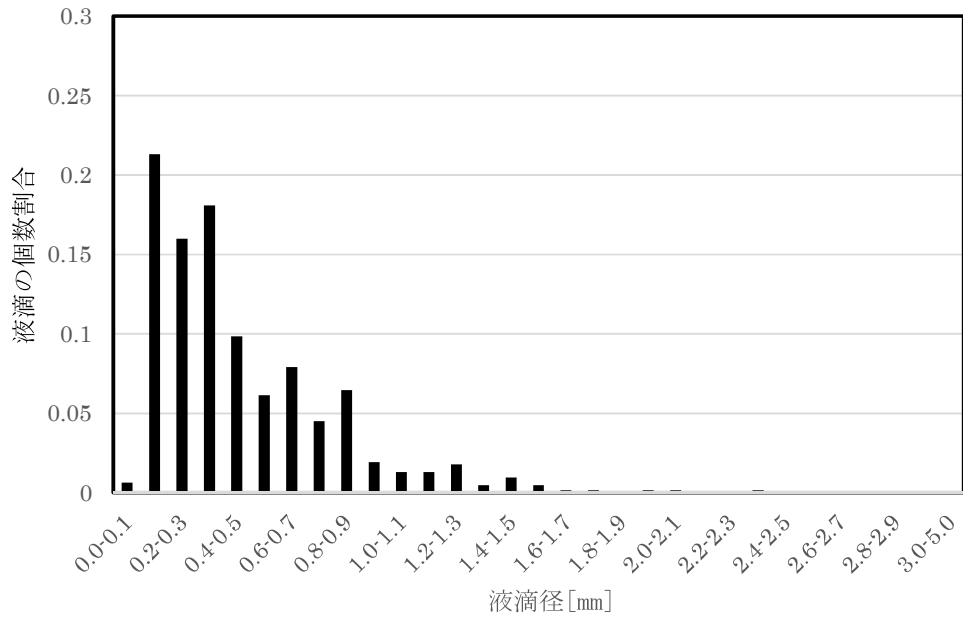


測定点⑥

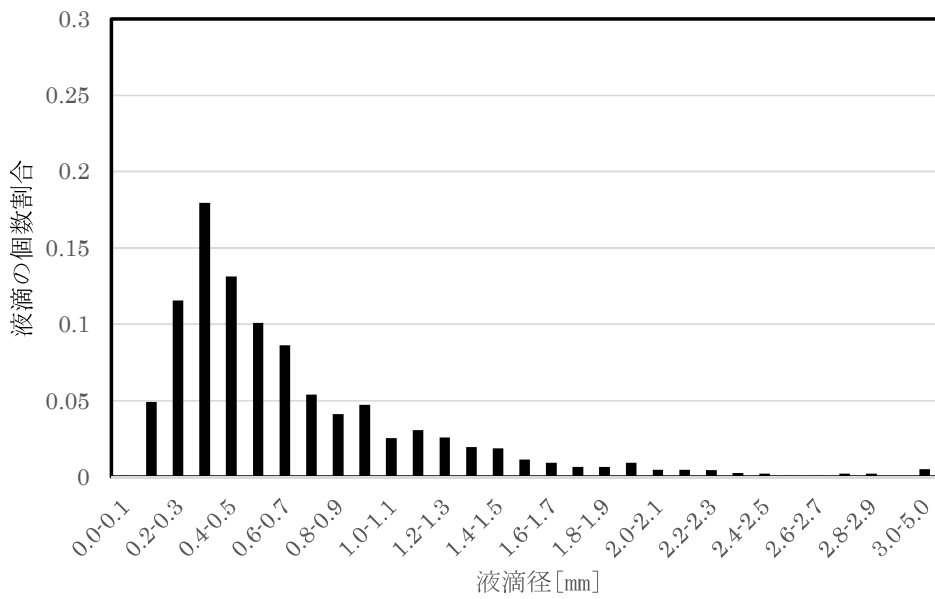


第6-1図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑦



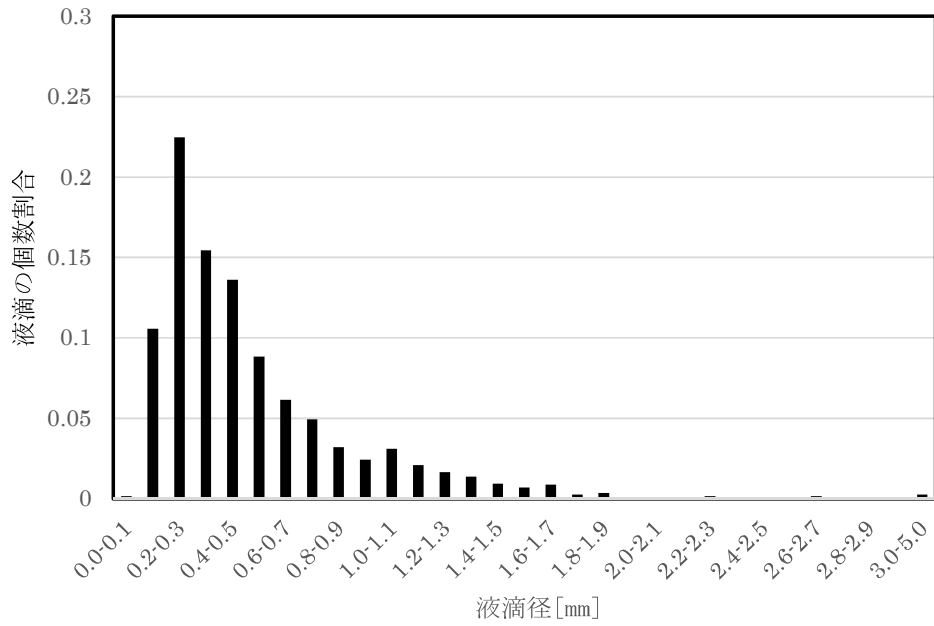
測定点⑧



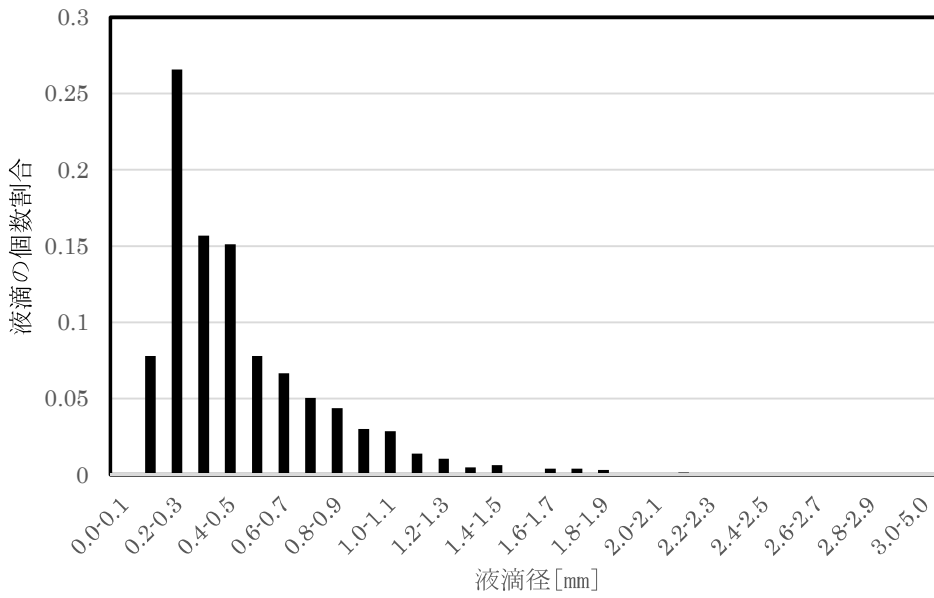
第6-1図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)



測定点①

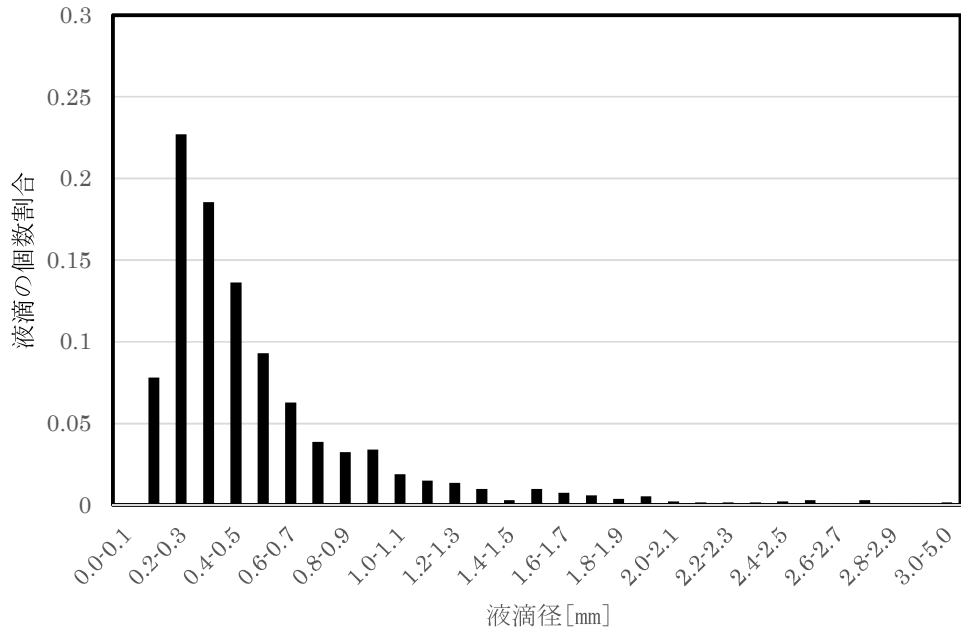


測定点②

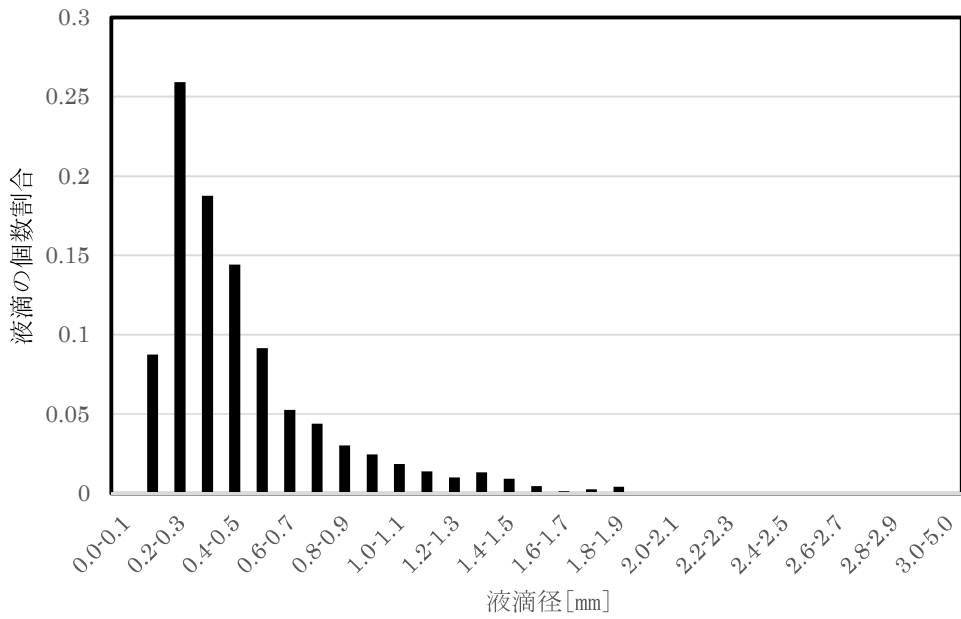


第6-2図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点③

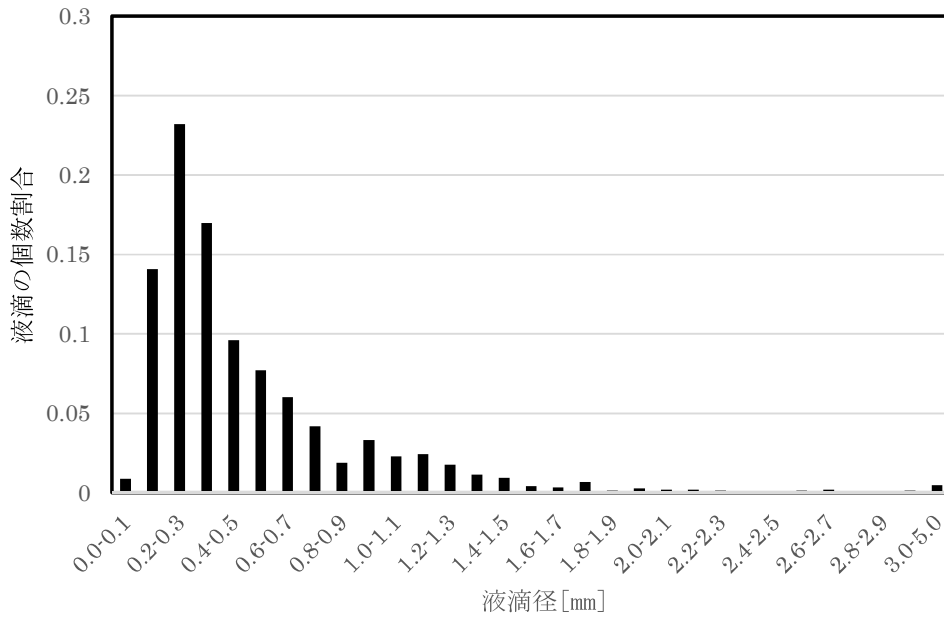


測定点④

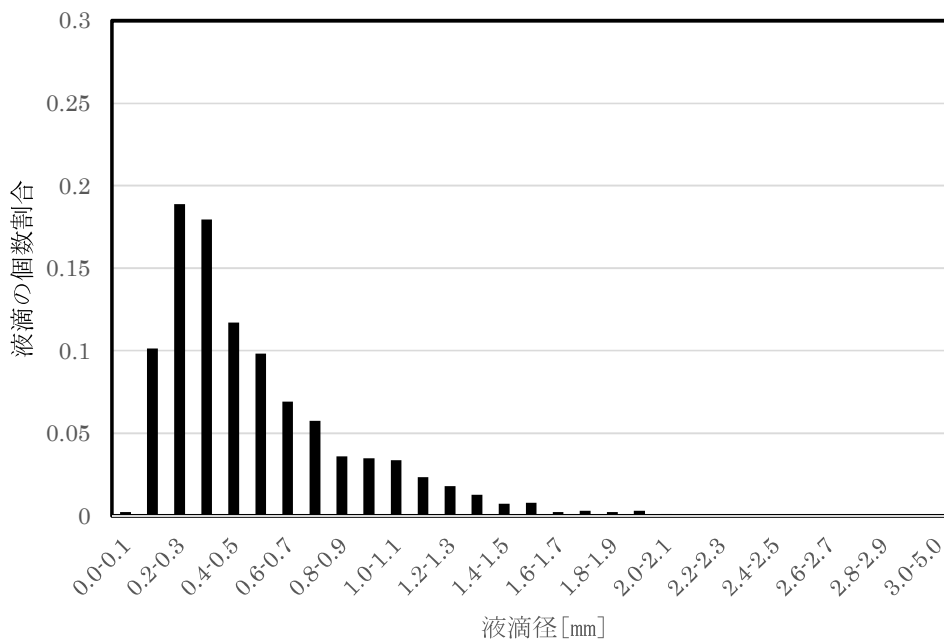


第6-2図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑤

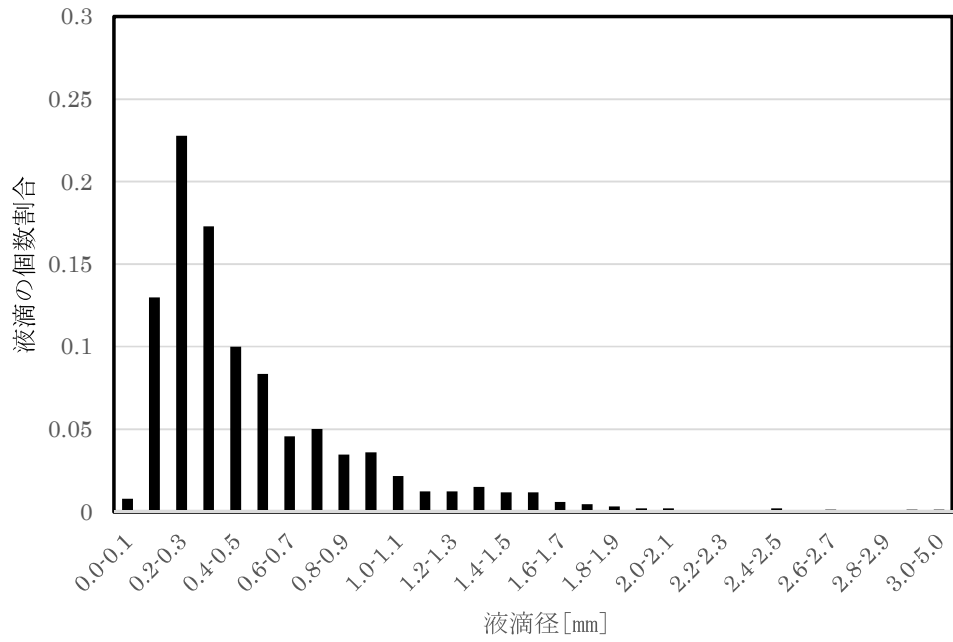


測定点⑥

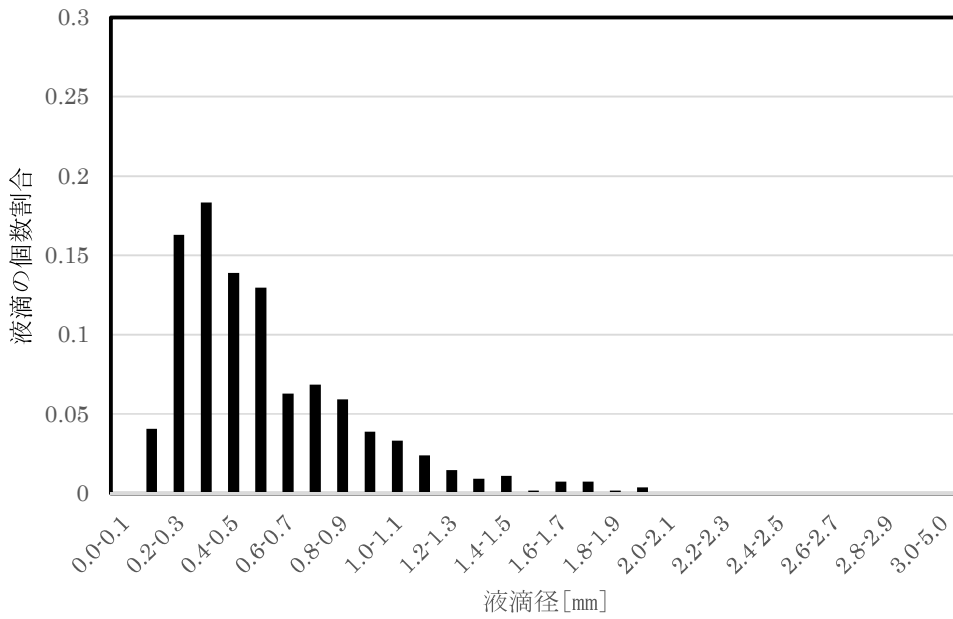


第6-2図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

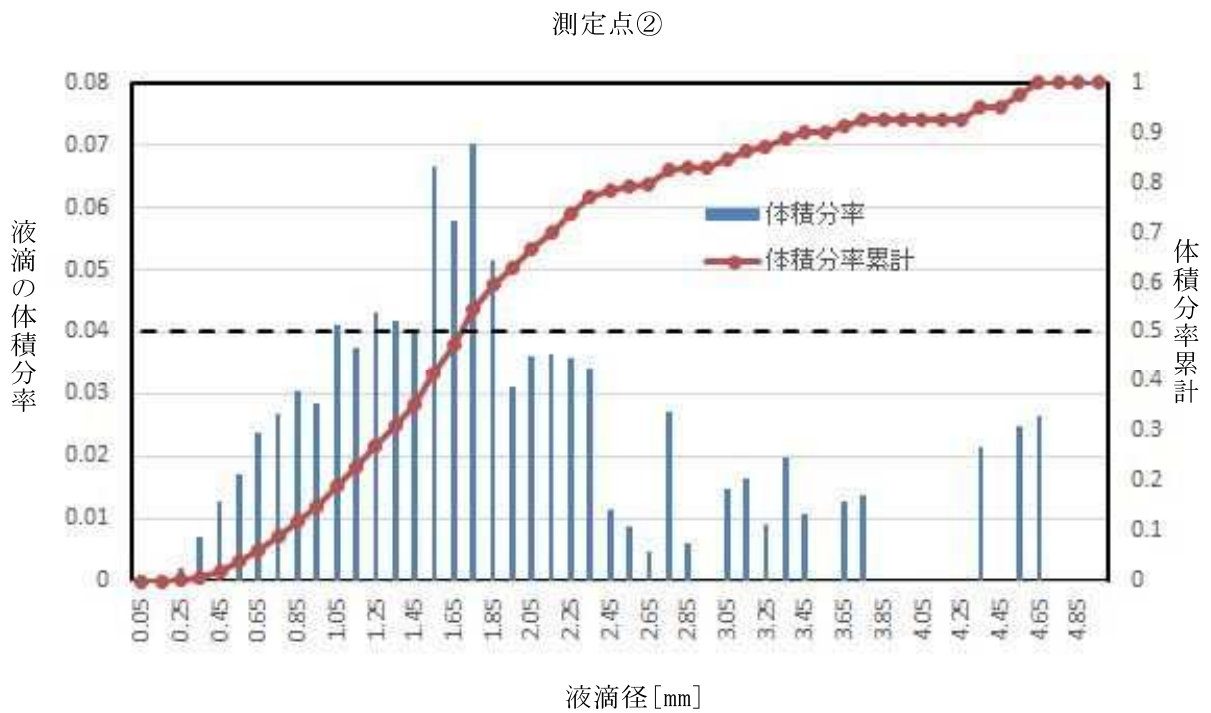
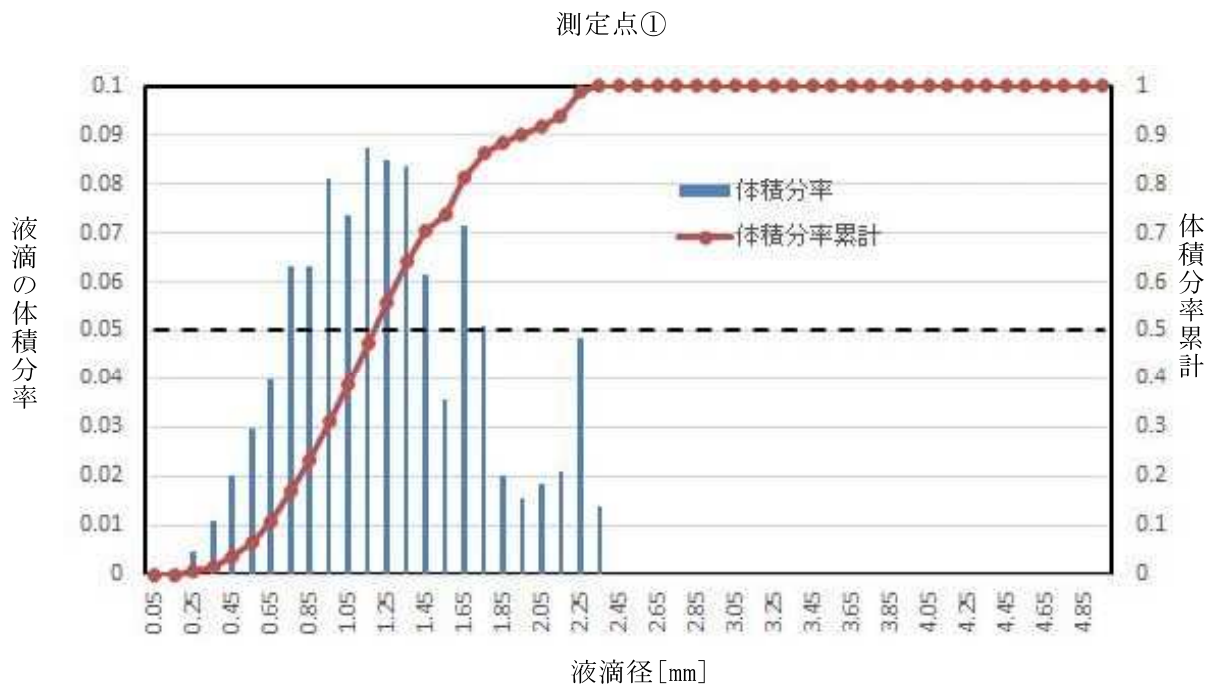
測定点⑦



測定点⑧

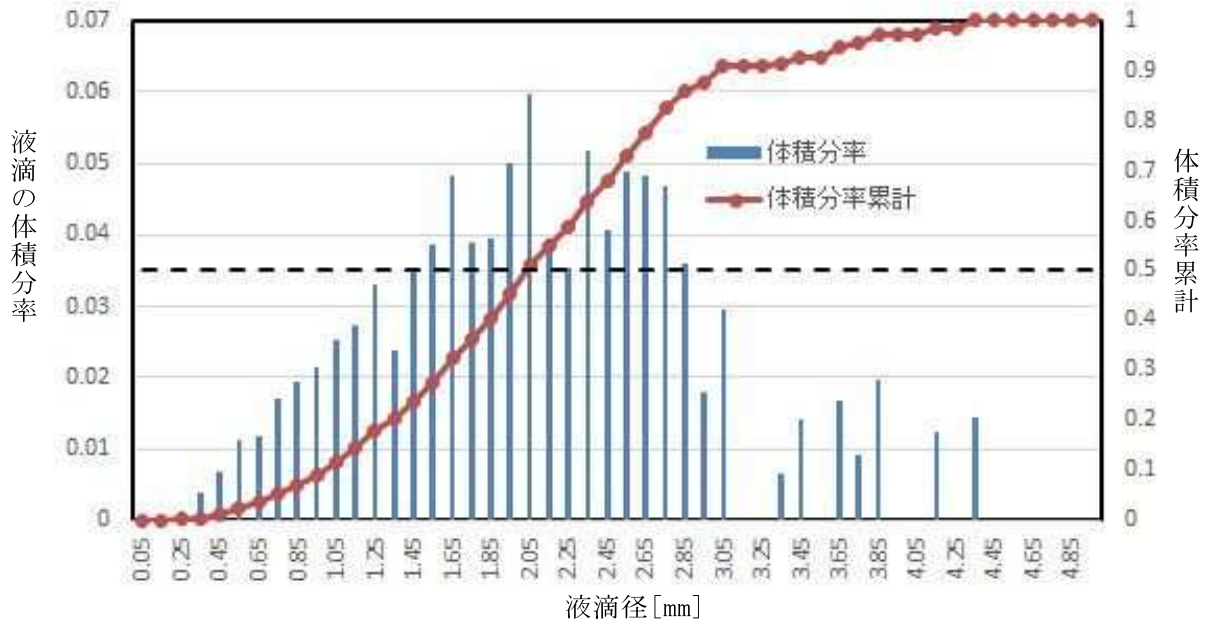


第6-2図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

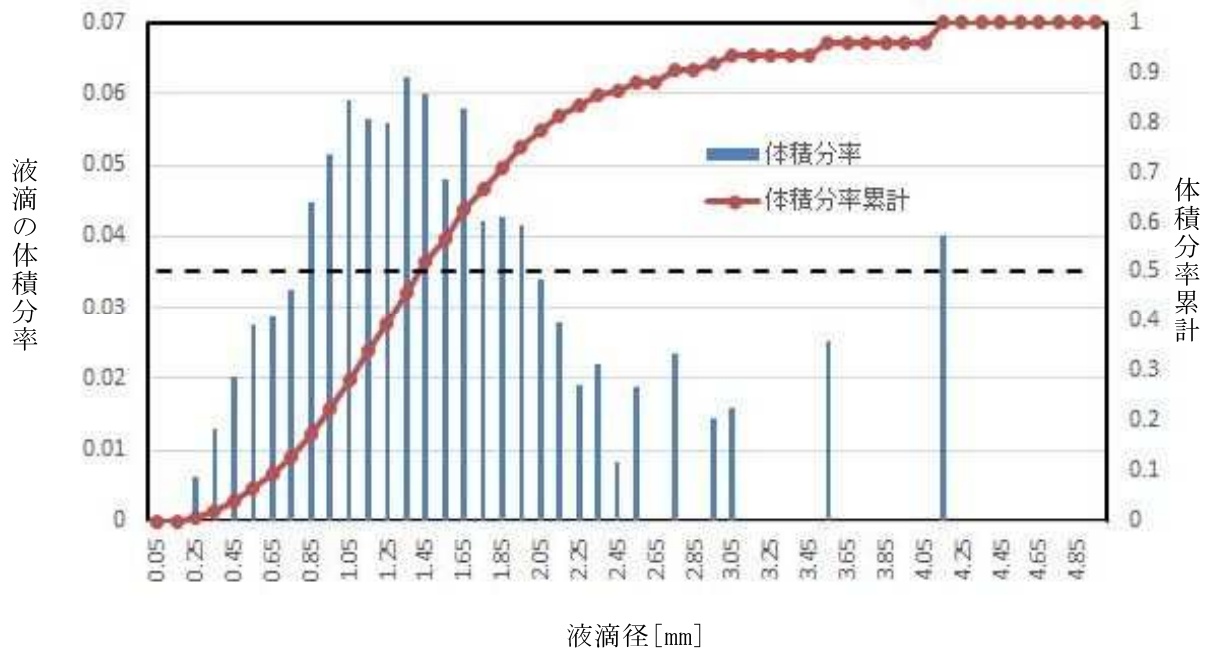


第7-1図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点③

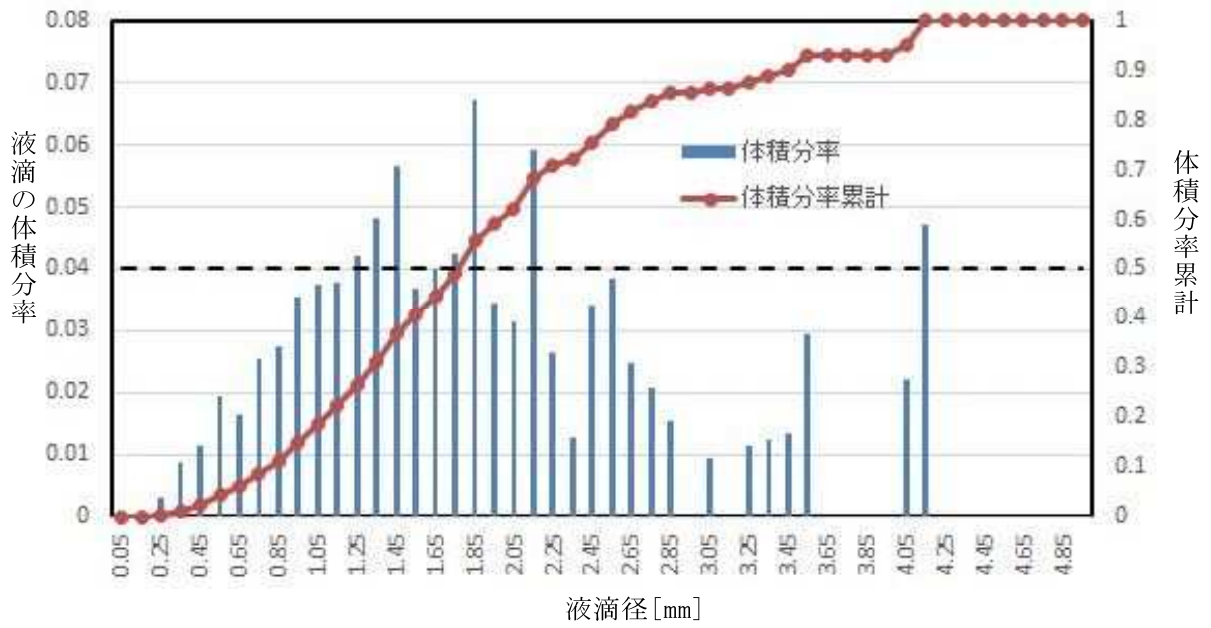


測定点④

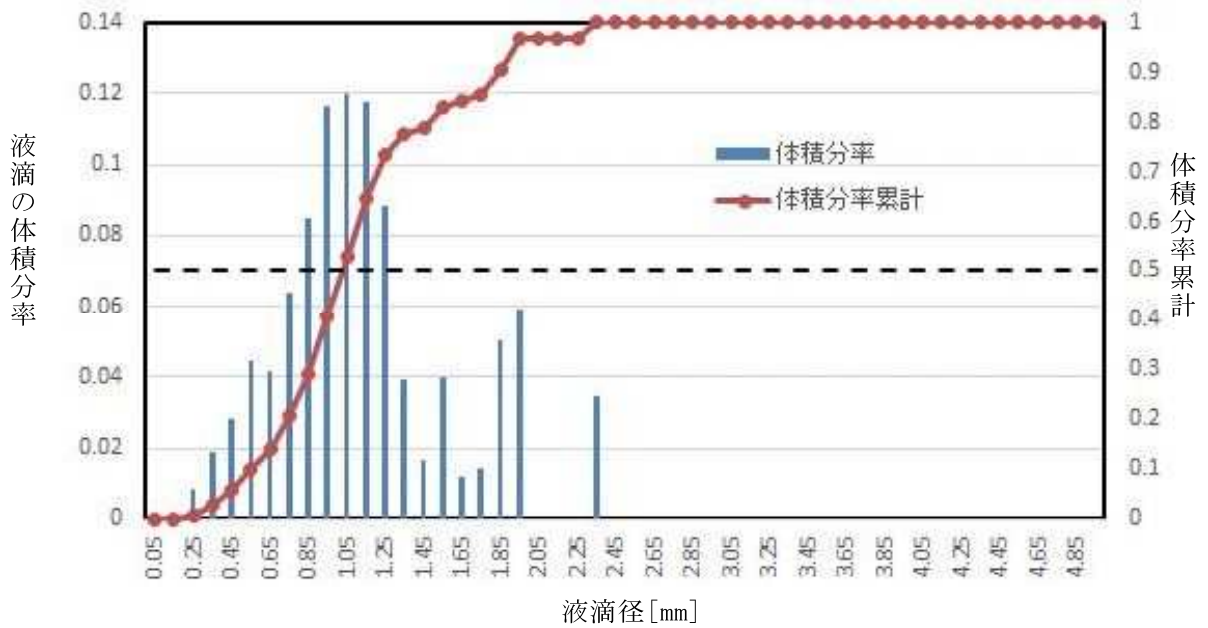


第7-1図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

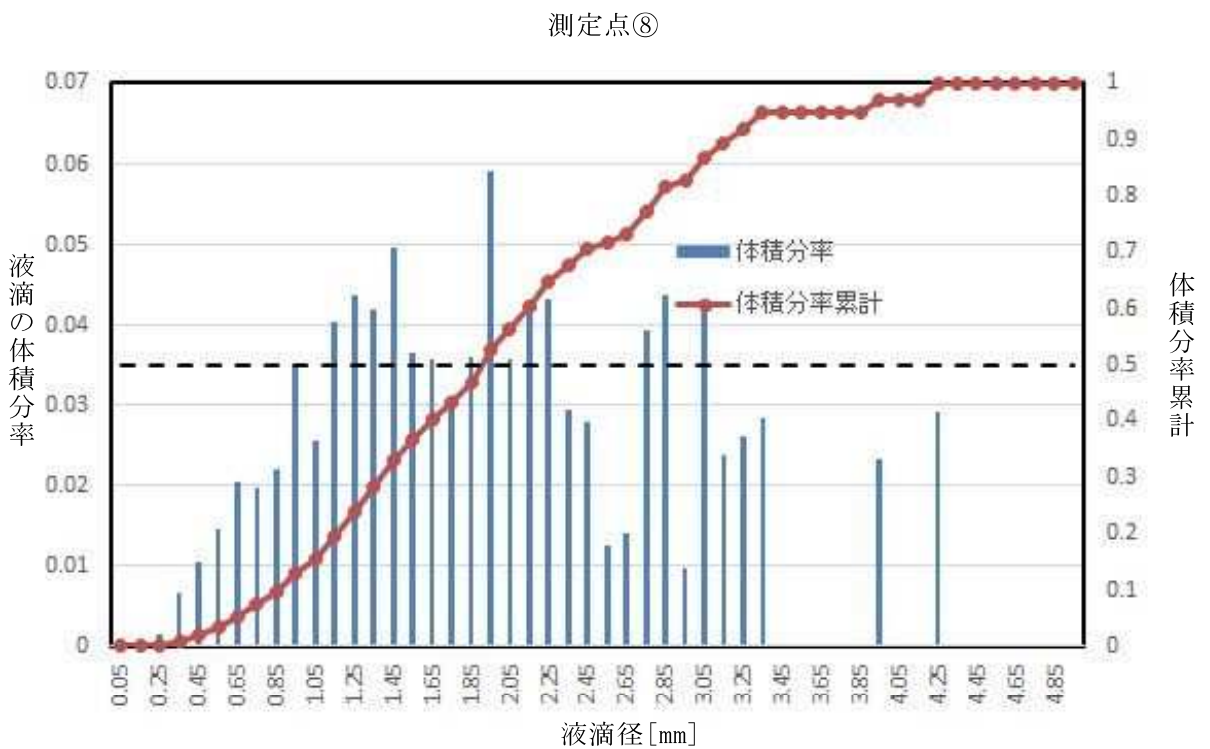
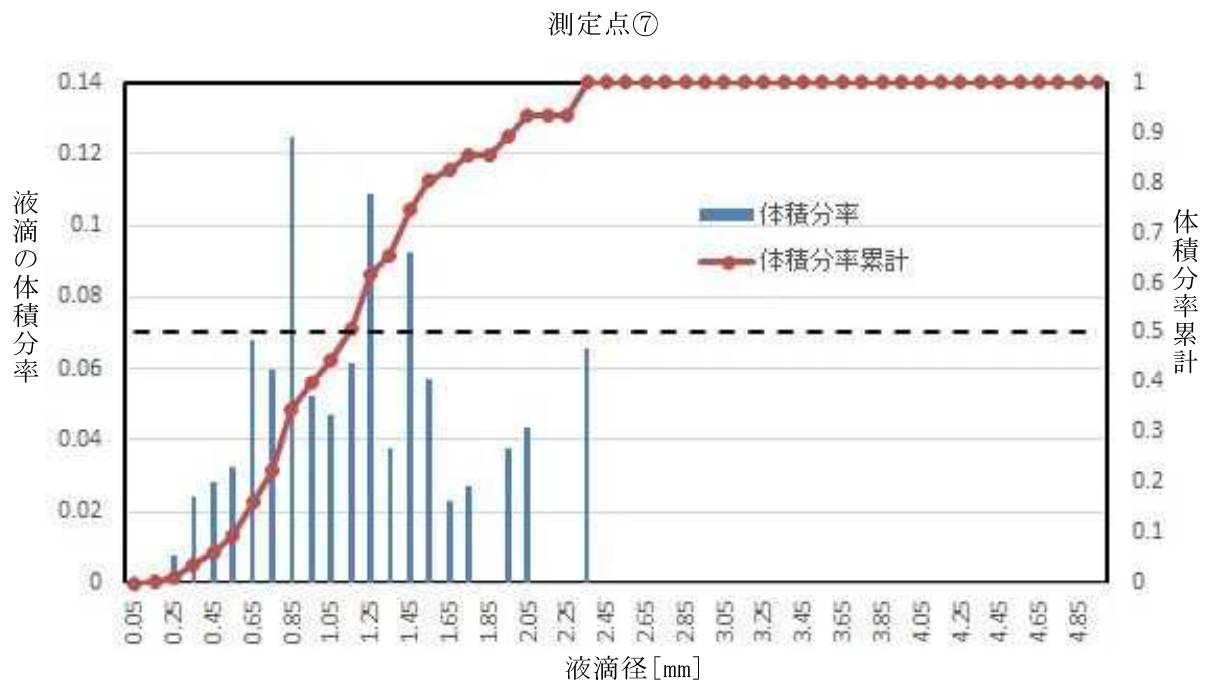
測定点⑤



測定点⑥

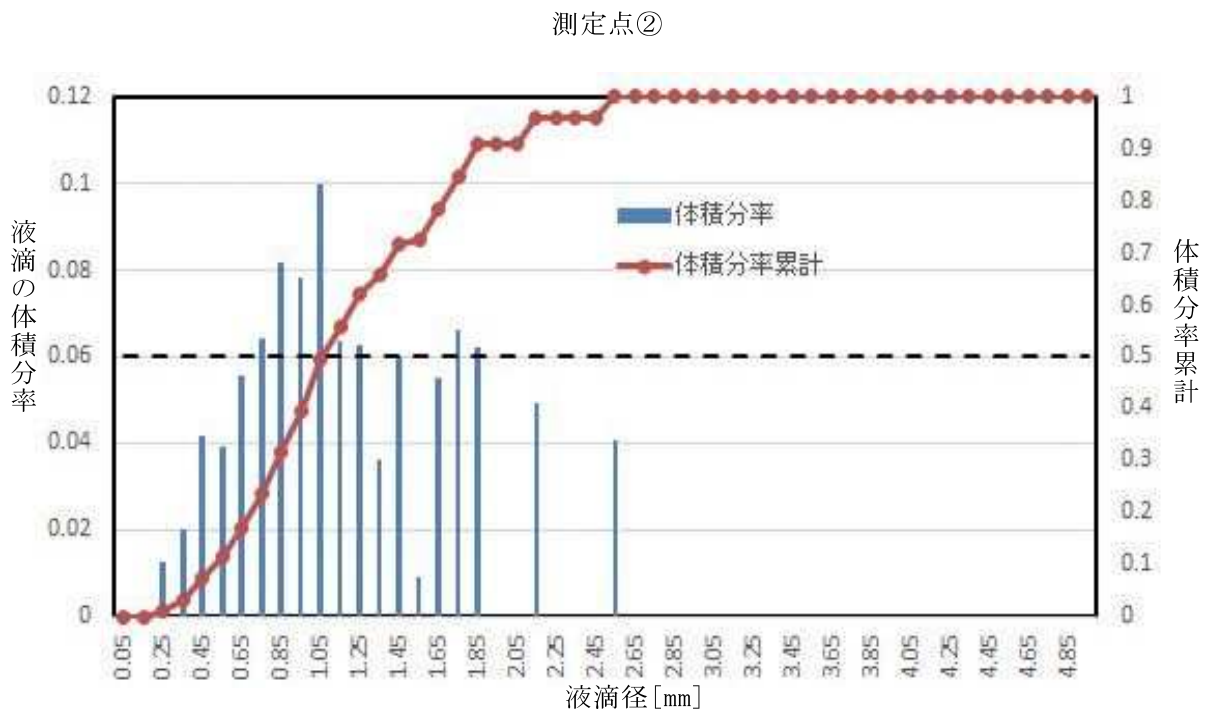
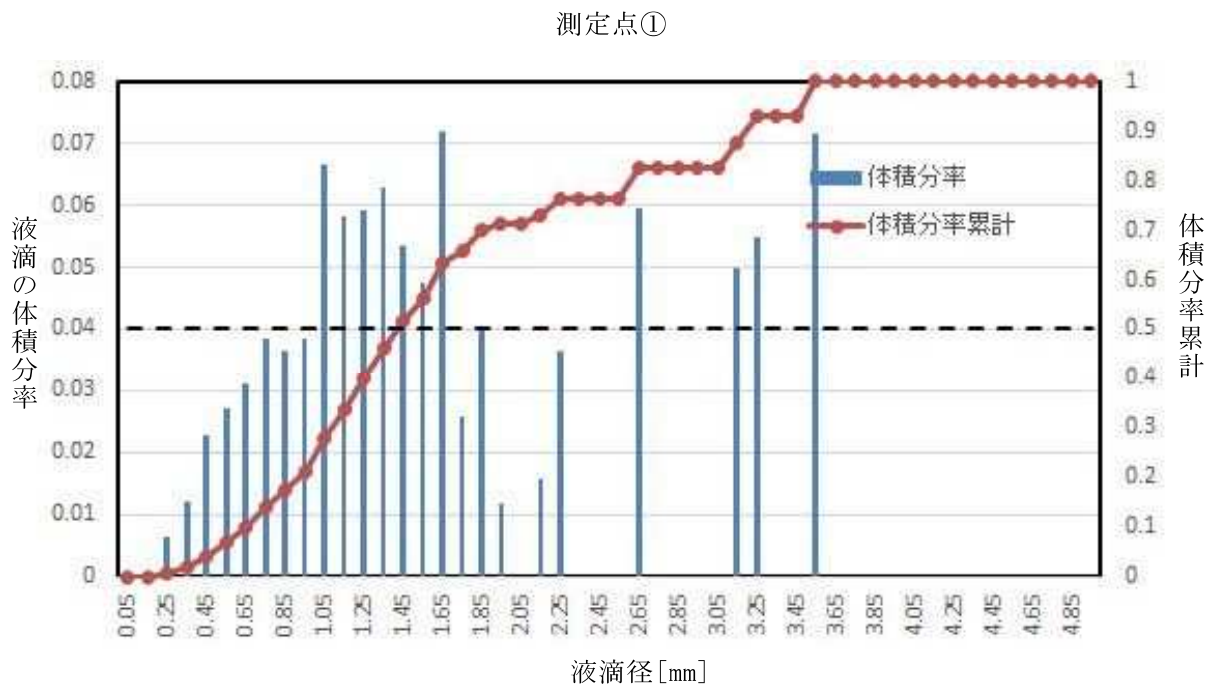


第7-1図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)



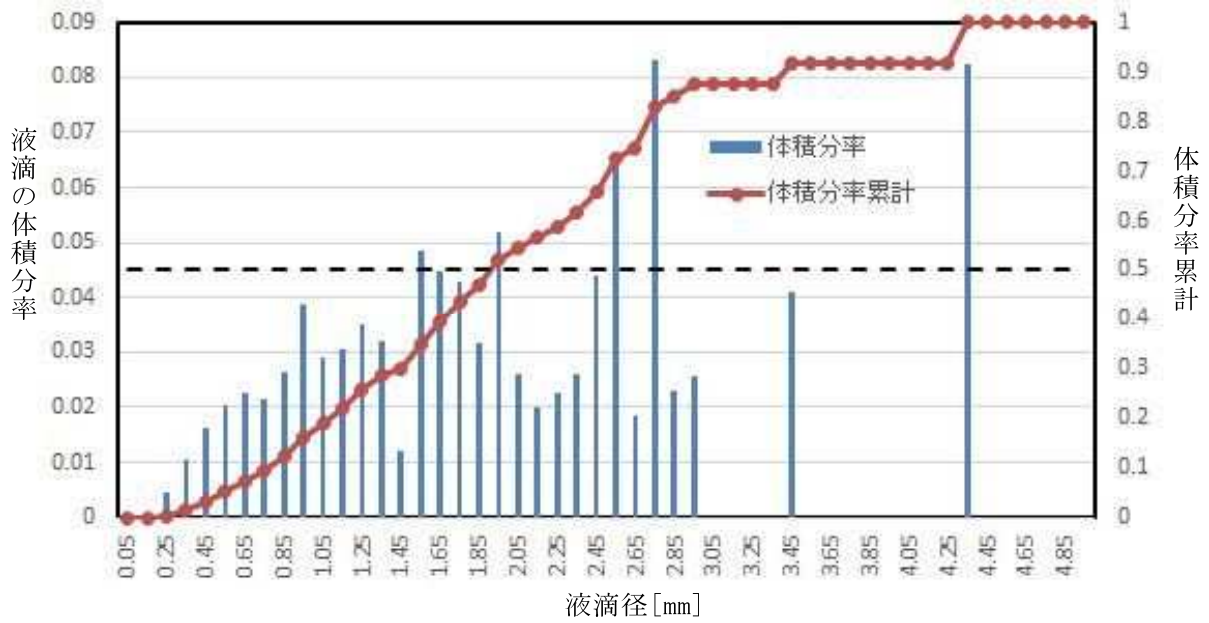
第7-1図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)



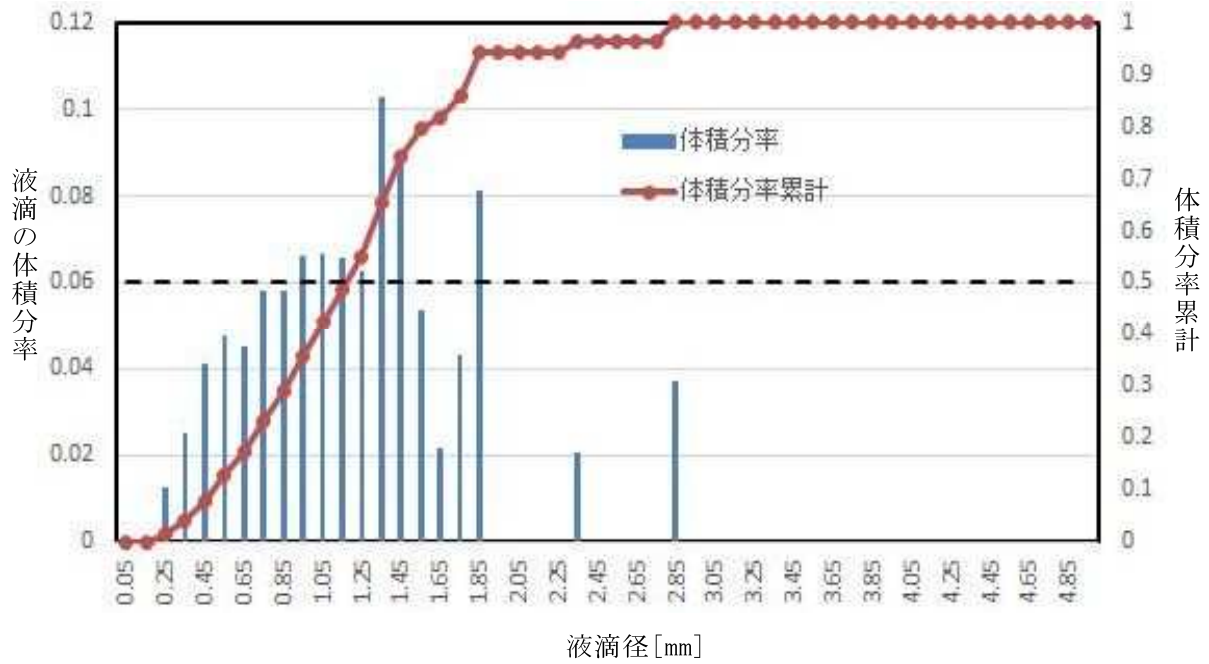


第7-2図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点③

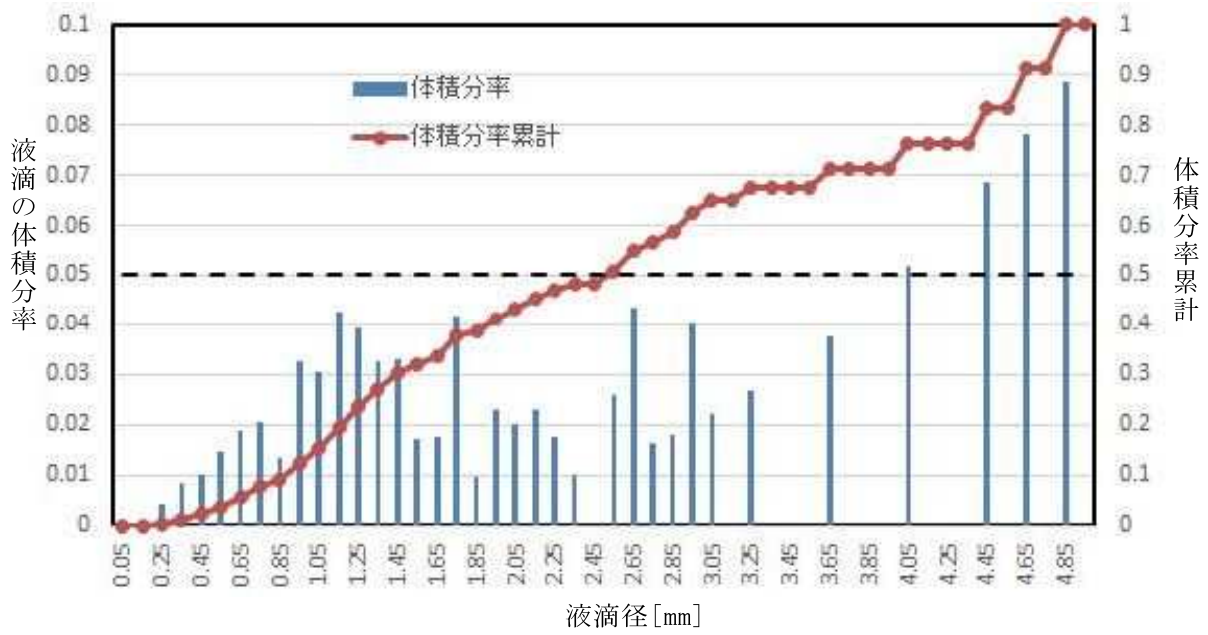


測定点④

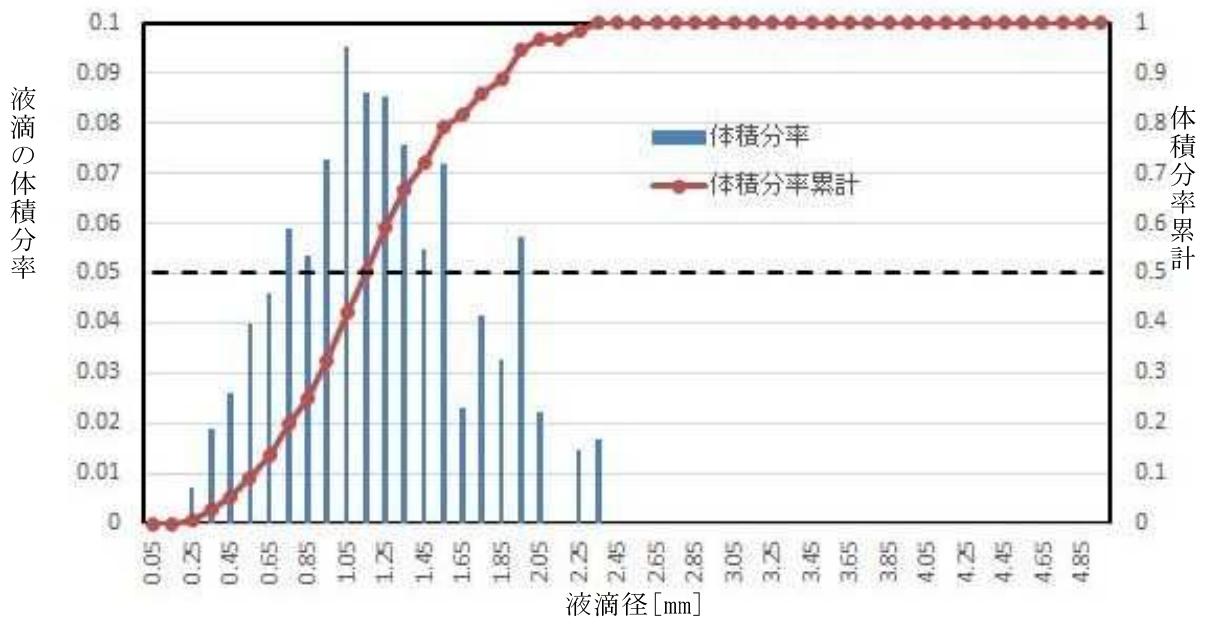


第7-2図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑤

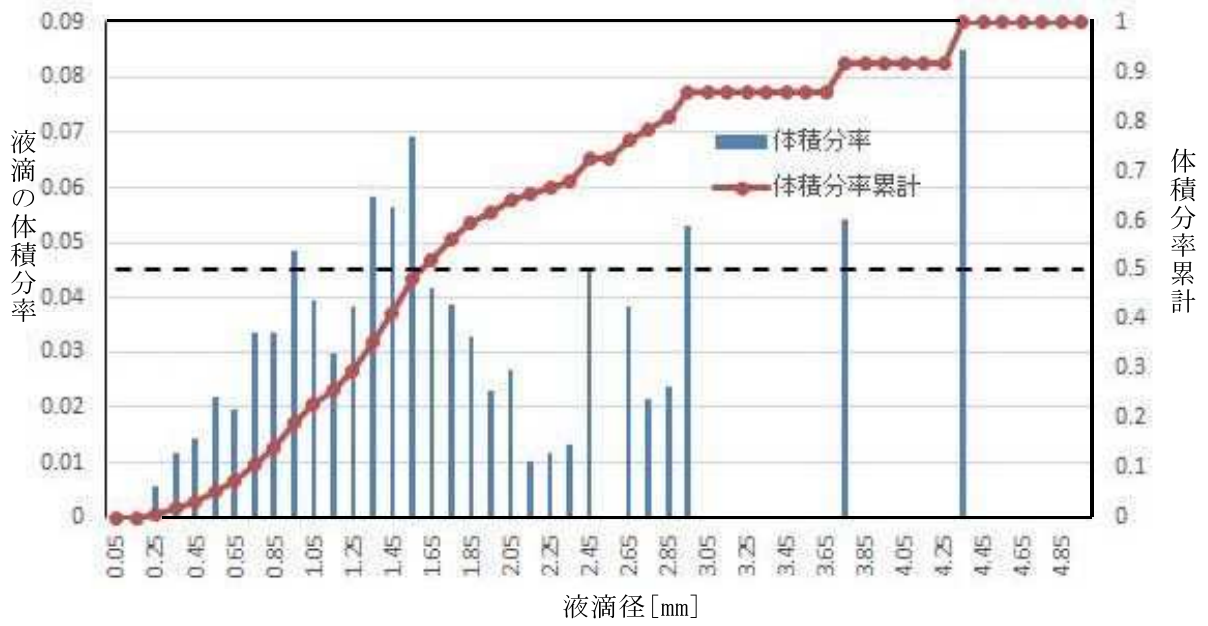


測定点⑥

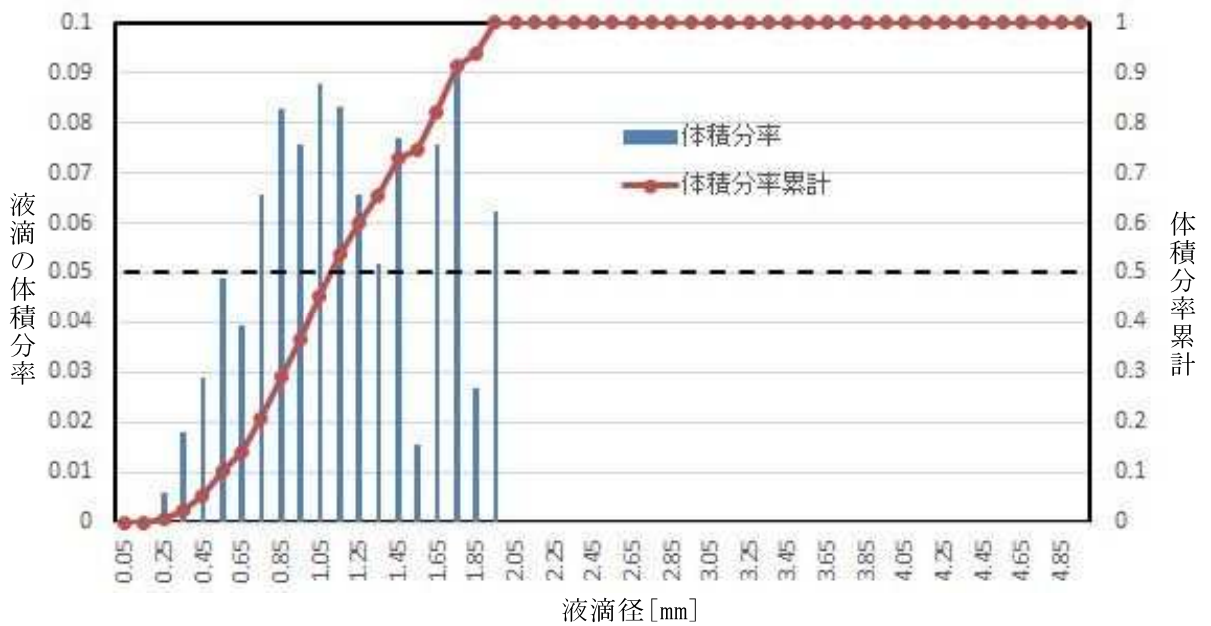


第7-2図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑦



測定点⑧



第7-2図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

## (2) 試験結果の考察

第6-1図及び第6-2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。

スプレーによる液滴生成のメカニズムは一般的に以下の2段階であることが知られている<sup>1</sup>。液滴の分裂過程の模式図を第8図に示す。図中の1次分裂及び2次分裂が、以下の①及び②にそれぞれ対応する。

- ① ノズルの1つの孔から流れ出た水は、一般に液柱状となり、周囲の空気と水が接する界面にじょう乱（波立ち）が生じて不安定となり分裂する
- ② 上記①で生じた液滴は、周囲の空気との間に作用する力（せん断力）または変形などによってさらに分裂する

①の段階で生じる平均液滴径はレイノルズ数 (Re数) とウェーバー数 (We数) の関数であり、②の段階で生じる平均液滴径はWe数の関数である。それぞれの平均液滴径の関連式を以下に示す。液滴と気相が接触する表面積が液滴分裂に関係するせん断力に影響するため、スプレー液滴の分裂挙動に対する一般的な指標の一つとして、ザウター平均径（以下、SMDと称す）が用いられる（x, yは試験条件によって定まる定数）。

$$\text{①の平均径} : \text{SMD} \propto (\text{Re} \times \sqrt{\text{We}})^{-x} \times t_s$$

$$\text{②の平均径} : \text{SMD} \propto \text{We}^{-y} \times t_s$$

$$\text{ここで、} \quad \text{Re} = (\rho_L \cdot U_L \cdot t_s) / \mu_L$$

$$\text{We} = (\rho_A \cdot U_R^2 \cdot t_s) / \sigma$$

$t_s$  : 代表寸法

$\rho_L$  : 液体の密度

$\rho_A$  : 空気の密度

$U_L$  : 液の絶対速度

$U_R$  : 相対速度

$\mu_L$  : 液体の粘性

$\sigma$  : 表面張力

---

<sup>1</sup> ATOMIZATION AND SPRAYS : Arthur H. Lefebvre (1989 by Hemisphere Publishing Corporation)

レイノルズ数は慣性力と粘性力との比で定義される無次元量であり、流れの中でのこれら2つの力の相対的な重要性を定量しており、ウェーバー数は、慣性力と表面張力の比を表す無次元量であり、液滴の挙動を定量している。また、平均液滴径はSMDとして扱う。ここでSMDは、液滴の体積の総和と表面積の総和の比で表される液滴径と定義される。上記より、液滴径を支配するパラメータは、代表寸法（ノズル形状）、密度、速度、粘性、表面張力であることから、試験条件により定まる。試験条件は実際の運用を考慮し設定しており、実際の使用時に大きく条件が変わることはない。ただし、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。

上記の通り、多数の液滴径データを取得していることから、計測は1回で十分と考えるが、別途2回目の試験を実施して両試験による液滴分布の傾向を比較したところ、第9図のとおり両者は良い再現性を示している。

重大事故等時に使用するスプレー設備には、流量が変動した際、設備内部の送水圧力によりバッファ（弁棒）が可動して内部の流路幅を調整することによって、吐出圧を一定に保つオートマチック機能が搭載されている。概念図を第10図に示す。これにより、流量が変動しても定格条件と同等の吐出圧が発生することから、スプレー水の噴出速度はほぼ同等になると考えられる。すなわち、前述のSMDの式から、液滴径分布は流量条件によらずほぼ同等の傾向を示すと予測される。

そこで、運用上は低流量で放水することはないものの、定格流量の液滴径測定試験を実施するのに先立ち、予備試験として実施した定格流量の半分（ $\frac{1}{2}$ ）の条件（以下、低流量条件と称す）における液滴径データを定格流量条件での試験結果と比較して第11図に示す。液滴径分布の傾向は流量が半減した場合においても、よく一致している。

以上より、気相部水密度の設定に際して十分な保守性を考慮することを前提に、定格流量条件での液滴径計測試験で得られた液滴データを踏まえてスプレー水密度を設定することは適切と判断している。

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。

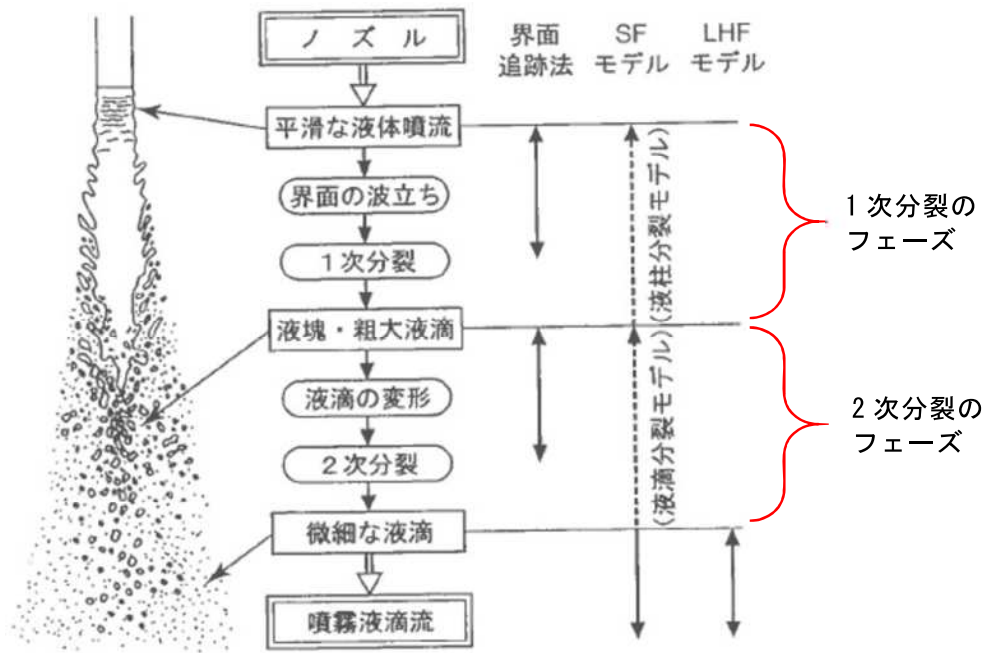
#### <正規確率プロットについて>

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、測定値を累積度数率で整理し、そのプロットが直線状に並べば正規性有り判断できる。

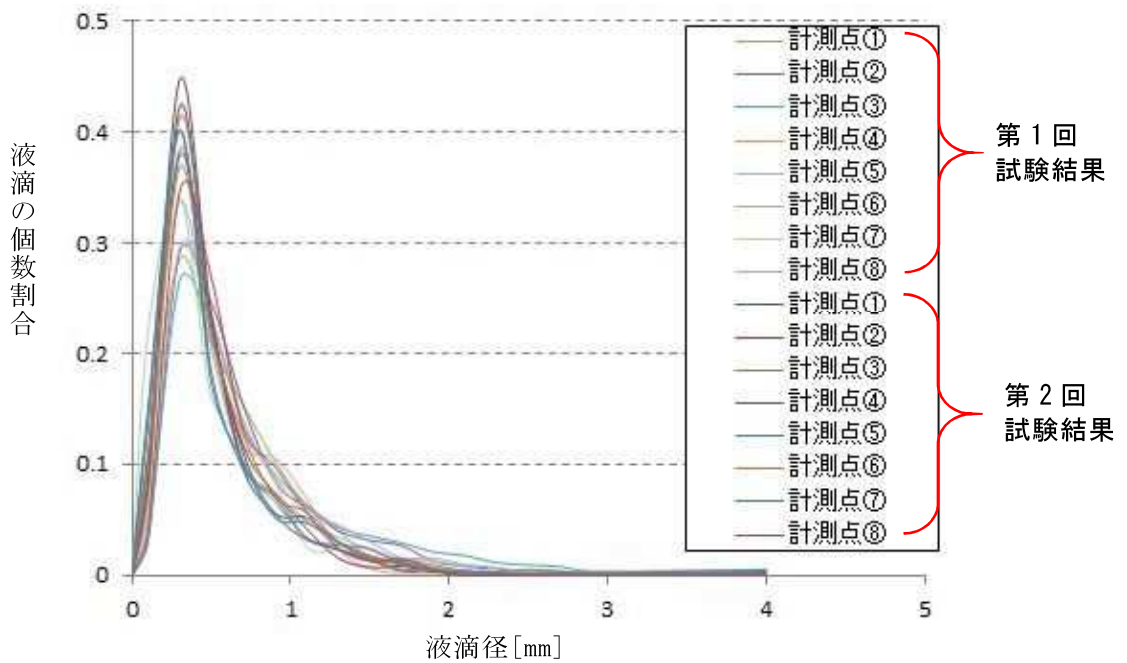
具体的には、取得されたデータについて累積比率（確率 $P_i$ ）を求め、 $P_i$ に対して正規分布の累積分布関数の逆関数を用いて求めた値をプロットし、正規分布なら直線、対数正規分布なら片対数グラフ上の直線に沿うかどうかを判断するものである。

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12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 8 図 液滴の分裂過程の模式図<sup>2</sup>



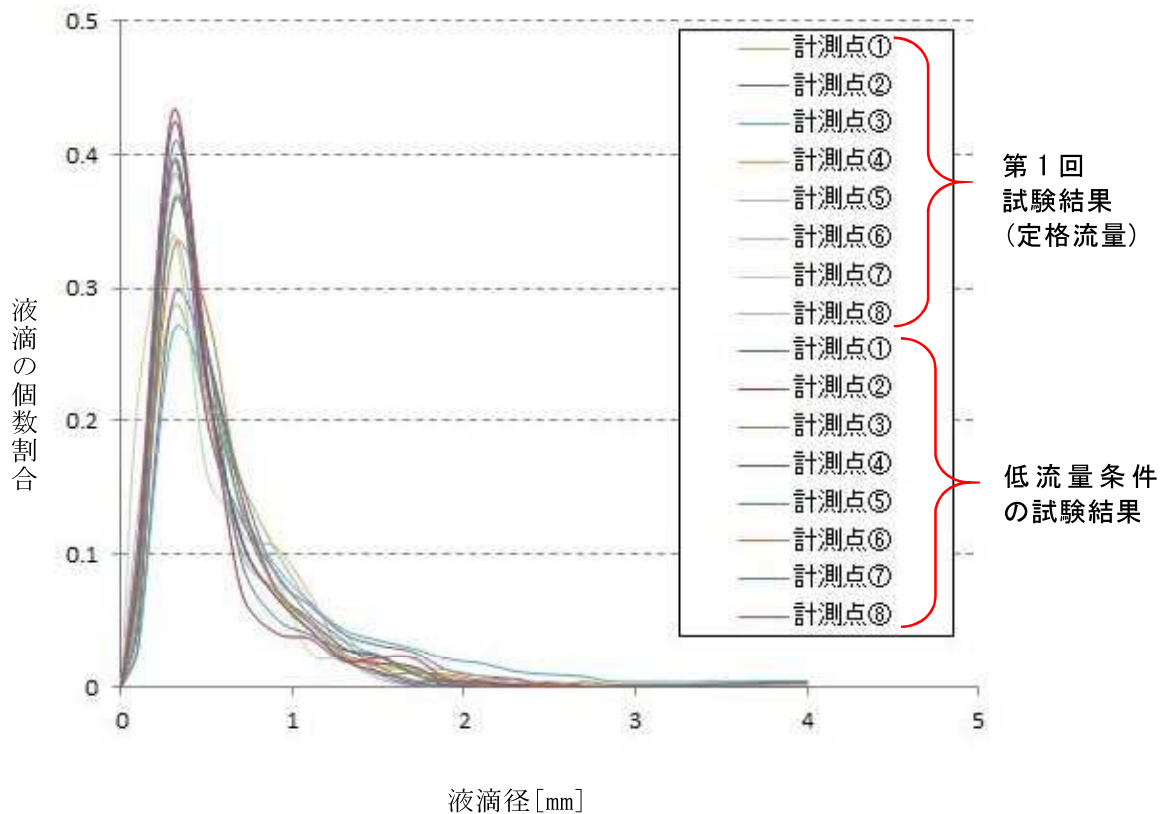
第 9 図 液滴個数割合の試験結果（第 1 回および第 2 回試験）

<sup>2</sup> アトマイゼーション・テクノロジー：日本液体微粒化学会編（森北出版株式会社）



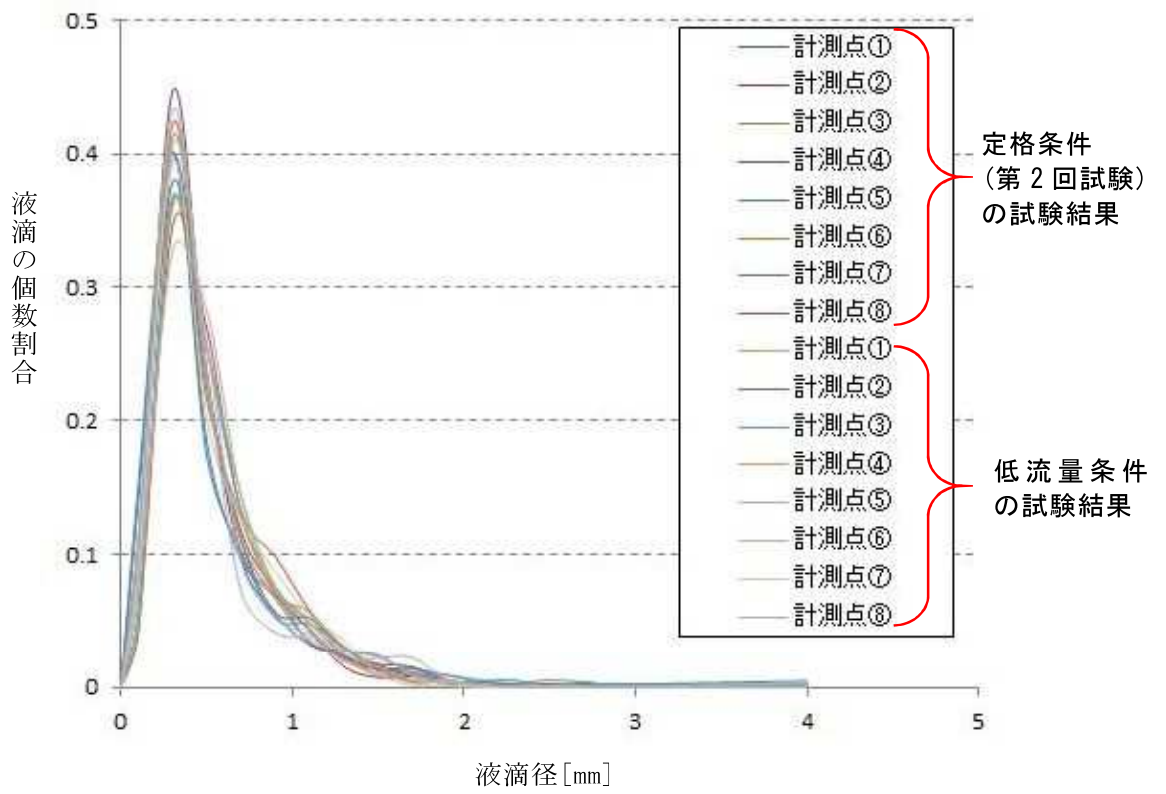


第 10 図 スpray 吐出圧の調整機構イメージ図

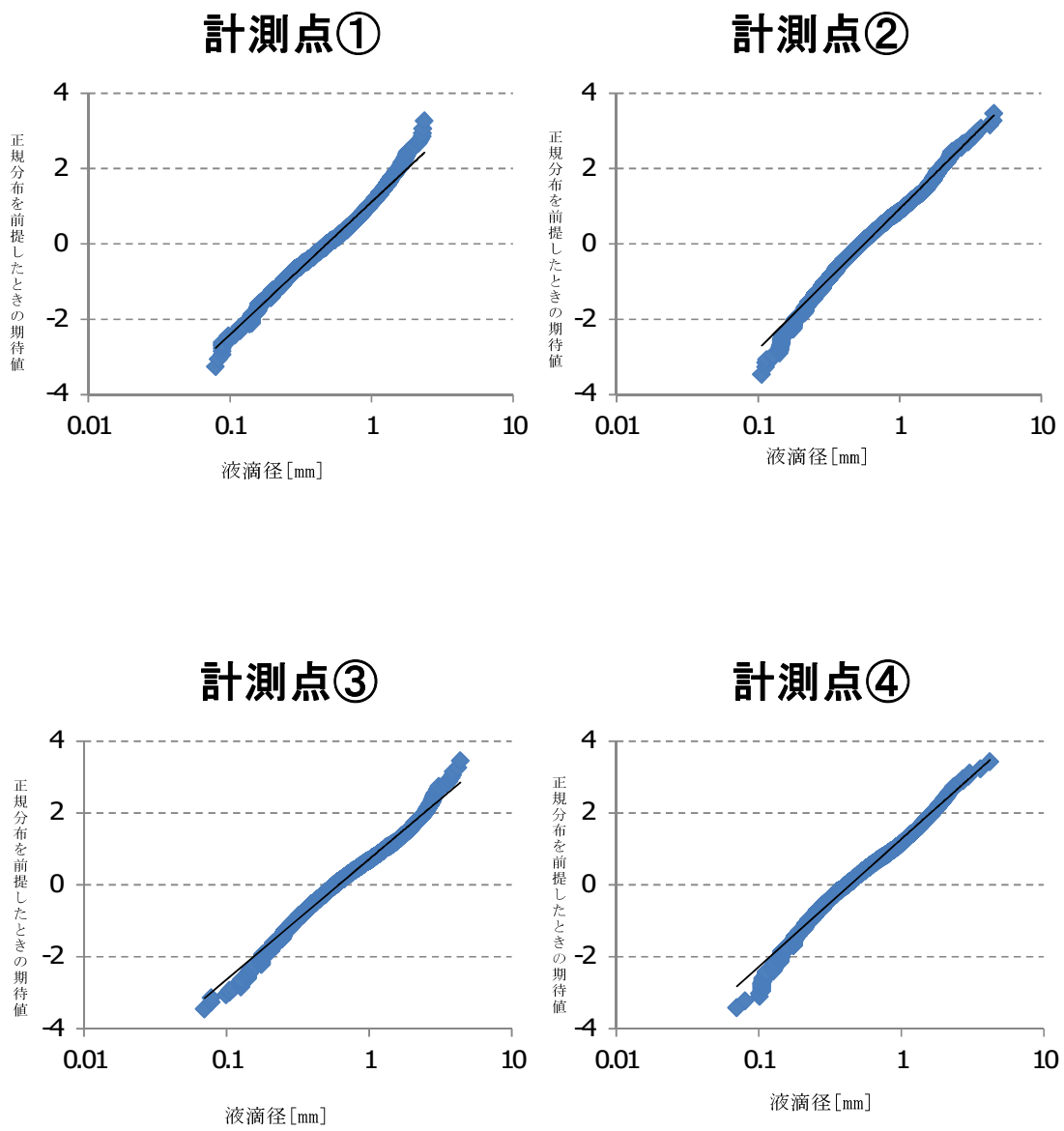


第 11 図 (1/2) 定格流量条件(1 回目)と低流量条件での液滴径分布比較

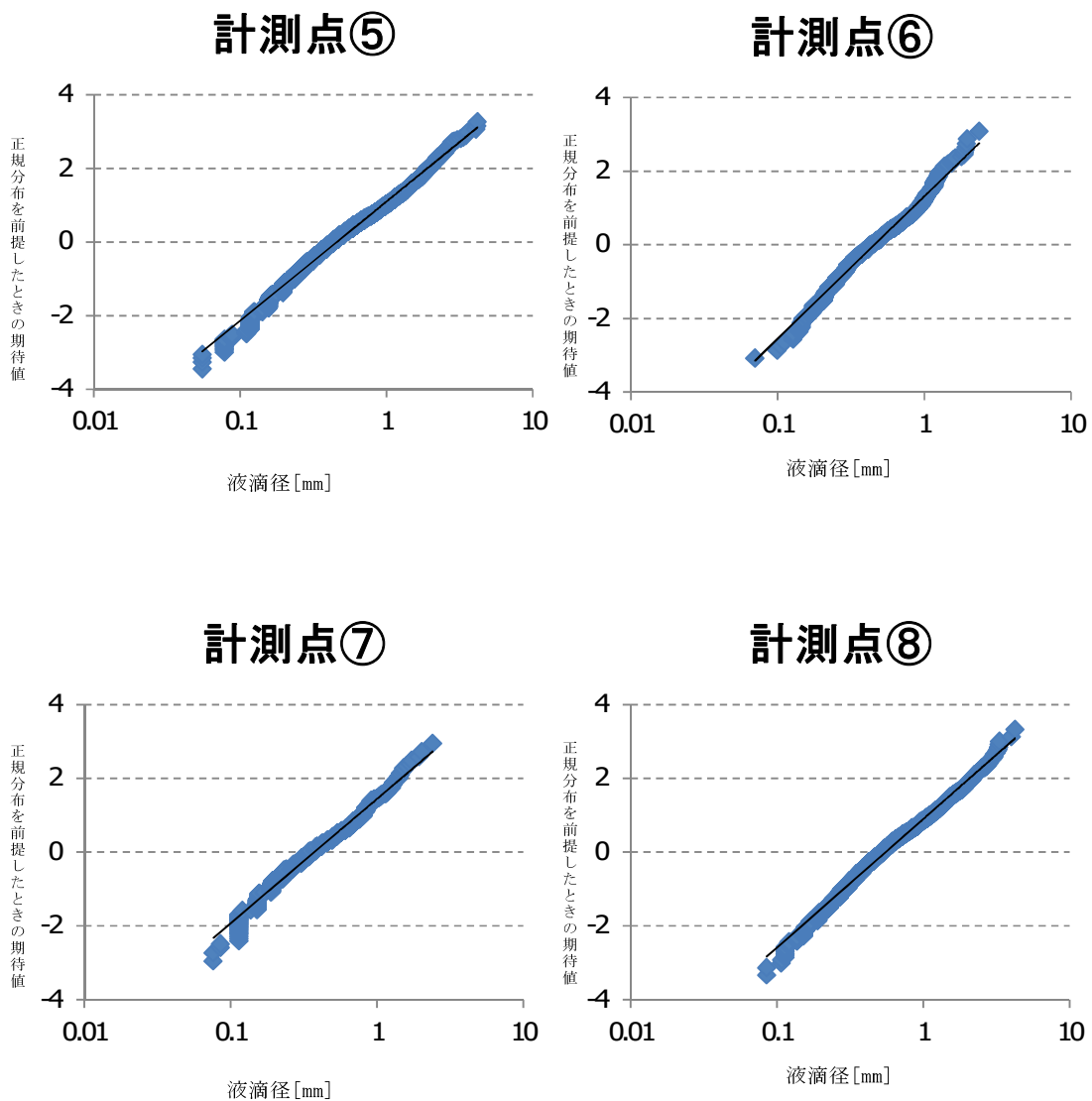
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 11 図 (2/2) 定格流量条件 (2 回目) と低流量条件での液滴径分布比較



第 12 図 対数正規確率プロット (第 1 回試験 測定点①～④)



第 12 図 対数正規確率プロット (第 1 回試験 測定点⑤~⑧)

## 5. 試験結果を踏まえた液滴径設定の妥当性について

4. (2)にて検討したように、液滴径の分布は測定点以外でも0.2mm～0.4mmで個数割合が支配的となり、且つその分布は対数正規性があり自然現象としてのばらつきを再現したサンプリングが出来ていることから、試験により得られた液滴径分布より算出した体積分率により求められる平均液滴径は、試験回数を増やし測定データを増やしたとしても1.0mmを大きく下回ることはないと判断できる。よって、気相部水密度算出時の液滴径として液滴径1.0mmを用いることは妥当である。

なお、液滴径についてはスプレー水密度を求めるに当たり、十分な保守性を考慮することを前提に、定格流量条件での液滴径計測試験で得られた液滴データを踏まえ設定したものである。申請評価に用いる気相部水密度には、スプレー流量に大きな保守性を持たせたいうえで重大事故等時の使用済燃料ピット内の環境状態を考慮し算出した保守的な水密度（0.0043g/cm<sup>3</sup>）に、更に大きな値である0.04g/cm<sup>3</sup>を設定しており、仮に平均液滴径が変動し、個数割合として支配的な0.2mm～0.4mmよりさらに小さい0.15mmとなった場合を仮定しても、その影響は設定した気相部水密度0.04g/cm<sup>3</sup>が有する余裕の中に十分包含されることを確認している。

液滴下降速度の算出について

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	別紙3-1
2. 液滴下降速度の算出方法 .....	別紙3-1
3. 液滴下降速度算出結果 .....	別紙3-3
4. 平均下降速度との比較 .....	別紙3-3

## 1. はじめに

設置許可基準規則第五十四条第2項において、使用済燃料ピット（以下、SFPという。）の大規模漏えいにより水位が異常に低下した場合には、燃料の著しい損傷の進行を緩和し臨界を防止するために可搬型スプレー設備によるSFPへのスプレーが要求されている。

スプレー時の液滴径については、SFPラック頂部高さ相当位置での液滴径の体積分率を取得したが、その体積分率による平均液滴径は、全ての測定点において1.0mm以上であったことから、未臨界性評価における気相部の水密度算出時においては、保守的に液滴径1.0mmでの下降速度を算出することとした。

本資料では、液滴径を1.0mmとした場合の下降速度算出方法の詳細について述べる。

## 2. 液滴下降速度の算出

スプレー水の液滴下降速度  $v$  は、燃料ラック上面を通過する液滴について、SFPラック頂部高さ相当位置まで落下していることから個々の液滴が終端速度に達していると仮定し、液滴径により決まる終端速度を算出する。

自由落下する液滴の終端速度  $v_i$  は重力と空気抵抗が釣り合う速度として式(1)により求められる。

$$\begin{cases} (\rho_{water} - \rho_{air})gV_i = C_d \rho_{air} \frac{1}{2} v_i^2 A_i \\ V_i = \frac{\pi}{6} d_i^3 & A_i = \frac{\pi}{4} d_i^2 \end{cases} \quad (1)$$
$$\therefore v_i = \sqrt{\frac{4(\rho_{water} - \rho_{air})gd_i}{3\rho_{air}C_d}}$$

上記の式におけるパラメータの定義は以下の通りである。

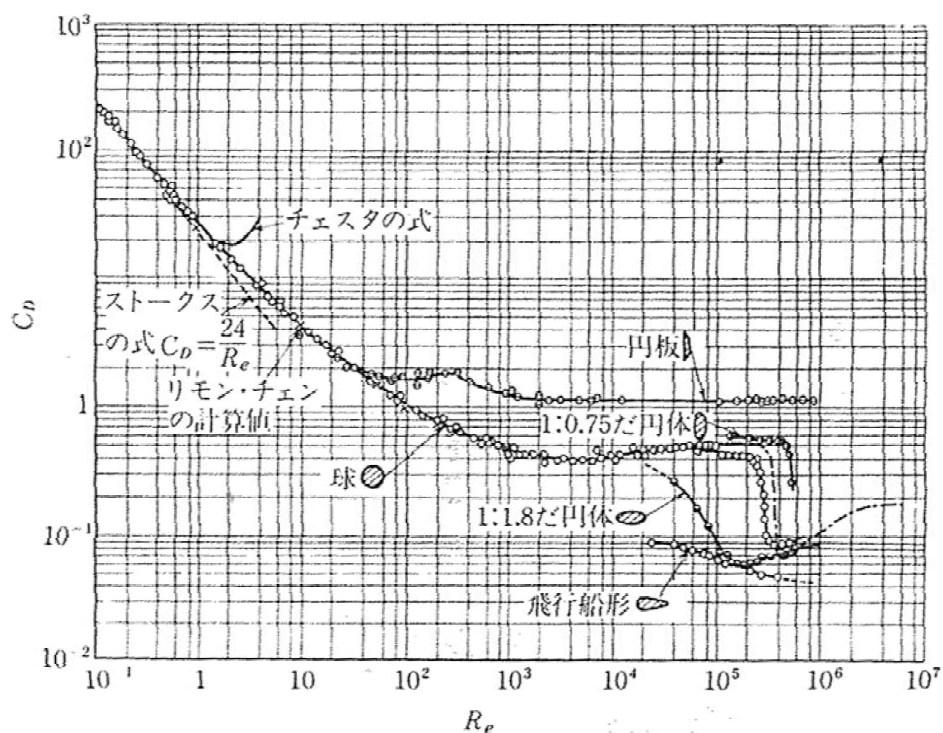
$v_i$	:	液滴の終端速度 (m/s)
$\rho_{water}$	:	液滴の密度 (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{air}$	:	空気密度 (kg/m <sup>3</sup> )
$V_i$	:	液滴体積 (m <sup>3</sup> )
$A_i$	:	液滴断面積 (m <sup>2</sup> )
$g$	:	重力加速度 (m/s <sup>2</sup> )
$d_i$	:	液滴径 (m)
$C_d$	:	抗力係数 (—)



$C_d$ は、第1図に示す球体に対する実験結果から求められる経験式として式(2)で与えられる。

$$\begin{cases} C_d = \frac{24}{Re} & (Re < 1) \\ C_d = \left(0.55 + \frac{4.8}{\sqrt{Re}}\right)^2 & (1 < Re < 500) \\ C_d = 0.44 & (500 < Re < 10^5) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、レイノルズ数は空気の動粘性係数  $\nu$  を用いて  $Re = v_i d_i / \nu$  で表される。抗力係数はレイノルズ数が小さい領域で、レイノルズ数すなわち終端速度に依存することから、式(1)の式において抗力係数の導出に用いる速度が計算結果の終端速度と一致するよう繰り返し計算を行う。



第1図 球体に対する抗力係数<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 機械工学便覧 A5 流体工学 (新版)

### 3. 液滴下降速度算出結果

液滴径が1.0mmである場合の液滴下降速度を算出する。各物性値及び算出結果を第1表に示す。算出の結果、液滴下降速度は約390cm/sとなった。

第1表 下降速度算出条件及び算出結果

$\rho_{water}$	998.2 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{air}$	1.166 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	$1.56 \times 10^{-5}$ [m <sup>2</sup> /s]
$g$	9.807 [m/s <sup>2</sup> ]
$d_i$	$1.0 \times 10^{-3}$ [m]
$C_d$	0.7279 [-]
液滴 (1.0mm) の 下降速度	3.92 [m/s] 390 [cm/s]

なお、実際のスプレー時におけるSFP内環境は高温条件下であると考え、第1表中の物性値は常温 (20℃) の値を用いている。第1表の物性値のうち、温度の影響を受けるものは  $\nu$ 、 $\rho_{water}$  および  $\rho_{air}$  であるが、(1)式より下降速度への温度影響が大きい  $\nu$ 、 $\rho_{air}$  については、温度が高いほど値は小さくなる傾向をもつ。 $\nu$ 、 $\rho_{air}$  のどちらも値が小さいほど液滴下降速度が大きくなる。また、スプレー時には高温であるSFP内に低温の液滴が落下することから、空気は高温状態、液滴は低温状態となるが、その状態を考慮し物性値を設定した場合、(1)式より物性値の変化は下降速度をより大きくする方向である。

以上より、水密度を大きく算出するという観点から常温 (20℃) の物性値を用いることは妥当である。

また、実際のスプレー時は海水を用いるが、下降速度算出の際は水の物性値を使用している。第1表の物性値のうち、液体の種類により変化する物性値は  $\rho_{water}$  であるが、別紙2 第2表に示すとおり  $\rho_{water}$  は水のほうが小さいことから、より下降速度を小さくし水密度を高く算出する観点から水の物性値を使用している。

### 4. 平均下降速度との比較

液滴径が定まると(1)および(2)式により、液滴の終端速度を求めることができる。測定された液滴が全て終端速度に到達していると仮定し、液滴径毎の下降速度に別紙2に示す試験により得られた液滴径毎の体積分率を乗じることで重み平均を取ることにより、下式の通り平均下降速度を算出することができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{体積分率： } V_F = \frac{V_i}{V} \\ \text{平均下降速度： } \bar{v} = \sum_i (V_F \times v_i) \end{array} \right. \quad (3)$$

上記の式におけるパラメータの定義は以下の通りである。

- $V$  : 測定液滴の合計体積 (m<sup>3</sup>)
- $V_i$  : 液滴径  $d_i$  の液滴体積 (m<sup>3</sup>)
- $v_i$  : 液滴径  $d_i$  の終端速度 (m/s)

測定点毎における平均下降速度の算出結果を第2表に示す。全ての測定点において、評価結果は430cm/s以上であり、液滴径1mmの液滴の下降速度390cm/sよりも大きい。

よって、気相部水密度の算出においては、下降速度が小さいほうが保守側であるため、液滴径1mmの液滴の下降速度390cm/sを適用することとする。

第2表 平均下降速度算出結果[cm/s]

	第1回目	第2回目
測定点①	480	570
測定点②	640	450
測定点③	690	660
測定点④	560	460
測定点⑤	640	740
測定点⑥	430	460
測定点⑦	450	630
測定点⑧	660	450

以 上

使用済燃料ピット内におけるスプレイ時の環境条件について

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	別紙4-1
2. 気相部水密度に影響する環境条件 .....	別紙4-1

## 1. はじめに

設置許可基準規則第五十四条第2項において、使用済燃料ピット（SFP）の大規模漏えいにより水位が異常に低下した場合には、燃料の著しい損傷の進行を緩和し臨界を防止するために可搬型スプレー設備によるSFPへのスプレーが要求されている。

本資料では、未臨界性評価において設定する気相部水密度を算出する際に考慮すべき、SFP内環境条件がスプレー水密度へ与える影響を評価する。

## 2. 気相部水密度に影響する環境条件

重大事故等時における可搬型スプレー設備使用時においては、崩壊熱による蒸散量を上回る量のスプレー水を、SFP全体をカバーするようスプレーすることから、使用済燃料ピット内は飽和蒸気で満たされた状態となる。そのような状況下において、スプレー水密度を変化させる項目としては、飽和蒸気、スプレー水による蒸気の液化、崩壊熱により発生する上昇流が考えられるため、その影響を検討した。

### (1) 飽和蒸気密度

スプレーの実施および崩壊熱による蒸発により、SFPは水蒸気で満たされていることから、気相部にはその水密度を考慮する。SFP雰囲気は大気圧下において、保守的に100℃の飽和蒸気とし、その水密度は0.0006g/cm<sup>3</sup>であることから、気相部水密度を算出するに当たっては、飽和蒸気による水密度として0.0006g/cm<sup>3</sup>を加算する。

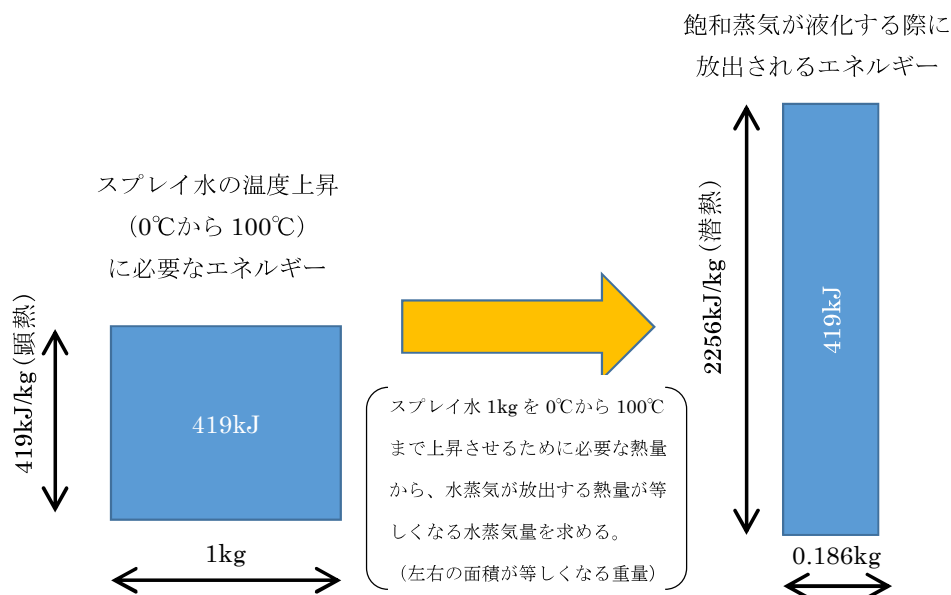
### (2) 飽和蒸気の凝縮による液化

飽和蒸気で満たされているSFPへスプレーを継続的に行なうことから、飽和蒸気が冷却されることで凝縮し、液化することが考えられる。この凝縮過程により、空間内に存在する水の量が増加することから、スプレー水が凝縮させうる飽和蒸気量を算出することで、気相部水密度へ与える影響を以下の通り評価した。

スプレー水による水蒸気の凝縮の過程では、凝縮時に放出される熱量（潜熱=2256kJ/kg）がスプレー水の温度上昇（顕熱=419kJ/kg）に使われる。スプレー水1kgが凝縮させ得る水蒸気の最大の質量は、スプレー水が常温から飽和温度まで温度上昇するときの顕熱と凝縮時に発生する熱量（潜熱×水蒸気の質量）が釣り合うときの水蒸気の質量である。ここで、スプレー水の温度上昇が最大となるよう0℃で放水した水が100℃に達すると仮定した場合の顕熱は419kJ/kgであることから、スプレー水1kgが凝縮させ得る飽和蒸気は第1図に示すとおり0.186kgとなる。

以上より、スプレー水により凝縮される飽和蒸気量はスプレー流量の18.6%であることから、気相部水密度を算出するに当たっては、飽和蒸気の凝縮による液化を考慮し、スプレー水密

度を1.2倍する。



第 1 図 スプレー水が凝縮させ得る飽和蒸気量

### (3) 上昇流の発生

SFP内に貯蔵されている燃料体から発生する崩壊熱等により、SFP内で上昇流が発生することが考えられる。スプレー時にSFP内に流入する液滴は、その上昇流による影響を受け落下速度が低下する。この落下速度の低下は、液滴の滞空時間を増加させ、スプレー水密度を増加させる要因となることから、SFP内に生じる上昇流が水密度に及ぼす影響について検討した。

#### (a) 蒸気化に伴う上昇流

SFPに貯蔵されている燃料体より発生する崩壊熱により、スプレー水やピット水が蒸発することで、上昇流が発生すると考えられる。

ピット水の蒸散量は以下の式により求められる。なお、SFPの熱負荷としては、崩壊熱が高くなるよう燃料取出直後の状態を考慮し、各定検で取り出された燃料がSFP満杯になるまで貯蔵した場合を想定した熱負荷を考慮する。使用したSFP熱負荷を第1表に示す。

$$Q_{FA} = \frac{q}{N \cdot \rho \cdot h} = \frac{\boxed{\phantom{0000}}}{424 \times 0.598 \times 2257} = \boxed{\phantom{000}} (m^3/s)$$

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。

ここで、 $Q_{FA}$ : 蒸散量 ( $m^3/s$ )

$q$ : SFP 保管燃料の崩壊熱 (  kW)

$\rho$ : 1 気圧の飽和蒸気密度 ( $0.598 \text{ kg}/m^3$ )

$h$ : 1 気圧の水の蒸発潜熱 ( $2,257 \text{ kJ}/kg$ )

$N$ : ピット内保管燃料体数 (424 体)

第1表 高浜1/2号炉 使用済燃料ピット熱負荷

取出燃料	高浜1(2)号機からの発生分		
	冷却期間	燃料数	崩壊熱(MW)*
6サイクル冷式済燃料	6×(13ヶ月-30日)18.5日	6	<input type="text"/>
5サイクル冷式済燃料	5×(13ヶ月-30日)18.5日	1/3炉心	
4サイクル冷式済燃料	4×(13ヶ月-30日)18.5日	1/3炉心	
3サイクル冷式済燃料	3×(13ヶ月-30日)18.5日	1/3炉心	
2サイクル冷式済燃料	2×(13ヶ月-30日)+8.5日	1/3炉心	
1サイクル冷式済燃料	1×(13ヶ月-30日)18.5日	1/3炉心	
定検時取出燃料3	8.5日	1/3炉心	
定検時取出燃料2	8.5日	1/3炉心	
定検時取出燃料1	8.5日	1/3炉心	
小計			
崩壊熱合計 (MW)	崩壊熱: <input type="text"/> MW (燃料体数: 424体)		

\*: 崩壊熱の合計は、口積互入の関係で個々の崩壊熱の合計とは必ずしも一致しない。

注1: 高浜1、2号機55,000MWd/燃料使用等に伴う原子炉設備変更許可申請(平成20年3月申請)安全審査におけるSFP冷却設備の評価条件

注2: 高浜1(2)号機のSFPの燃料保管容量は424体

上記で得られた蒸気流量 $Q_{FA}$ を流路面積で除し、上昇流速 $V_S$ を下式により求める。使用済燃料ラックの形状を第2図に示す。

$$V_S = \frac{Q_{FA}}{A_{RP} - A_{FA} - A_R} = \frac{\text{}}{\text{} - 0.0216 - \text{}} = 0.088 \approx 0.1(m/s)$$

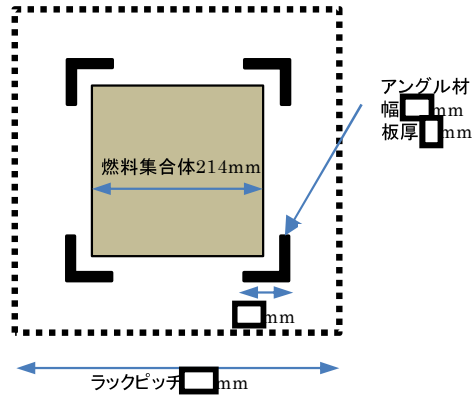
ここで、 $A_{RP}$ : ラックピッチ内面積 (   $m^2$  )

$A_{FA}$ : 燃料集合体閉塞面積 ( $0.0216 \text{ m}^2$ )

$A_R$ : ラック閉塞面積 (   $m^2$  )

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 高浜1,2号炉 使用済燃料ラック (アングル型)

(b) スプレイ水が SFP 内に流入することにより生じる対流

スプレイが上方部より流入する場合、スプレイ水が散布される領域での下降流により SFP 内に対流が誘起され、スプレイ水が希薄な領域で上昇流が生じる可能性があるが、上昇流はスプレイ水が希薄な領域 (スプレイ水密度が小さい領域) に限定されるため、スプレイ水密度最大値への影響は軽微である。

以上より、SFP内に生じる上昇流として、スプレイ水およびピット水が蒸気化することによる上昇流10cm/sを考慮し、気相部水密度を算出するに当たっては、試験により得られた液滴データを踏まえて設定した液滴径1mmの下降速度より、10cm/sを減じることとする。

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。

液滴が燃料棒等の表面を流下することによる未臨界性評価への影響について

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	別紙5-1
2. 液膜の筋状流下を踏まえた未臨界性評価 .....	別紙5-1

## 1. はじめに

設置許可基準規則第五十四条第2項において、使用済燃料ピット（以下、SFPという。）の大規模漏えいにより水位が異常に低下した場合には、燃料の著しい損傷の進行を緩和し臨界を防止するために可搬型スプレー設備によるSFPへのスプレーが要求されている。

スプレーされた液滴は、自由落下しラック頂部に到達した後、ラックや上部ノズルと接触することから、ほとんどが液滴としてではなく、燃料棒、ラック等の表面を筋状に流下すると考えられる。

本資料では、スプレーされた液滴が燃料棒等の表面を筋状に流下することによる未臨界性評価への影響について説明する。

## 2. 液膜の筋状流下を踏まえた未臨界性評価

スプレーされた液滴は、上部ノズル等でまとまり、燃料棒、制御棒案内シンプル等の表面を筋状に流下すると考えられるが、未臨界性評価に当たっては、燃料集合体全数の燃料棒等全体へ一様に液膜が形成されるものとして、理論式による算出結果を踏まえて液膜厚さを設定する。

また、燃料領域内の気相部については、液滴がほとんどないと考えられるが、実機スプレー設備によりSFP全面へスプレーされた場合における水密度を踏まえて、評価時の水密度を保守的に設定する。

### (1) 理論式による液膜厚さの算出について

液滴が燃料棒等に接触し形成された液膜の厚さは、流量、粘性、構造物表面の摩擦によるせん断力の影響を受ける。このうち、流量と粘性による理論式から液膜厚さを求めることができる。なお、せん断力の影響については、SFP内の構造物およびその表面状態の影響を受けると考えられる。

液膜厚さに対する理論式として、層流流下液膜に対する NUSSELT<sup>1</sup> の式がある。これは、液膜流量と粘性係数から決まる液膜レイノルズ数と、平均液膜厚さの無次元数を関係づけるものであり、(a)式で与えられる。

$$y_i^* = \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{1}{3}} Re_f^{1/3} \quad (a)$$

ここで、 $y_i^*$ は平均液膜厚さの無次元数であり、平均液膜厚さとの関係は以下で示される。

$$y_i^* = y_i \left(\frac{g}{\nu^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (b)$$

ここで、 $y_i$ は平均液膜厚さ、 $g$ は重力加速度、 $\nu$ は動粘性係数である。また、 $Re_f$ は液膜レイノルズ数であり、(c)式で与えられる。

<sup>1</sup> 上田辰洋、気液二相流—流れと熱伝達—、(1981)、131-132、養賢堂

$$Re_f = \frac{4\Gamma}{\mu_l} \quad (c)$$

ここで $\Gamma$ は壁面の単位幅あたりの液膜流量であり、 $\mu_l$ は液膜の粘性係数である。

実機スプレイにより  $\square$  m<sup>3</sup>/h の流量がラック全面に一様に放水され、ラック 1 体当たり  
に流入したスプレイ量が、保守的に全て燃料集合体内に入り、燃料棒等の表面に液膜を形  
成すると仮定する。また、液膜厚さの算出では制御棒案内シムブル等も簡易的に燃料棒と  
同じ直径として評価する。第 1 表の計算条件を用いて計算すると、下式の通り  $Re_f = \square$   
となり、この場合の平均液膜厚さは約 0.1mm となる。なお未臨界性評価では、NUSSELT の式  
が経験式であることを踏まえ、液膜厚さを保守的に 0.2mm とした。

$$\text{単位幅あたりの液膜流量 } \Gamma = F / (t \times 225) = \square \text{ [kg/(s} \cdot \text{m)]}$$

$$\text{液膜レイノルズ数 } Re_f = \frac{4\Gamma}{\mu_l} = 4 \times \square / 1.002 \times 10^{-3} = \square$$

$$\begin{aligned} \text{平均液膜厚さ } y_i &= \left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} y_i^* = \left(\frac{3\nu^2}{4g}\right)^{\frac{1}{3}} Re_f^{\frac{1}{3}} = \left[3 \times (1.003 \times 10^{-6})^2 \times \square / 4 \times 9.807\right]^{1/3} \\ &= \square \text{ [mm]} \end{aligned}$$

第 1 表 液膜厚さの計算条件

	物性値	備考
流量 $F$ [kg/s]	$\square$	$\square$ m <sup>3</sup> /h がラック全面 (424 ラック) に放 水された場合の 1 ラック当たり流量
粘性係数 $\mu_l$ [Pa · s]	$1.002 \times 10^{-3}$	常温 (20℃) の値
動粘性係数 $\nu$ [m <sup>2</sup> · s]	$1.003 \times 10^{-6}$	常温 (20℃) の値
燃料棒等の周長 $t$ [m]	0.0337	燃料棒外径 (10.72mm) × $\pi$
重力加速度 $g$ [m/s <sup>2</sup> ]	9.807	

なお、実際に液膜が形成された場合、液膜自体も自由流下していくことから、液膜が形成  
され続けるには、自由流下していく流量と同等量のスプレイを継続的に実施する必要があ  
る。本評価にて設定する 0.2mm の液膜が形成され続ける場合の自由落下流量は、下式の通  
り求めることができる。

$$Q_{rod} = \frac{\pi \cdot g \cdot D_{rod} (\rho_l - \rho_g) \cdot y_i^3}{3 \mu_l} \quad (4)$$

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。

ここで、 $Q_{rod}$ は棒1本当たりの自由流下する液膜流量、 $D_{rod}$ は棒の直径、 $\rho_l$ 、 $\rho_g$ はそれぞれ水および空気の密度である。常温（20℃）での値として $\rho_l$ 、 $\rho_g$ をそれぞれ 998.2 kg/m<sup>3</sup>、1.166 kg/m<sup>3</sup> とし、0.2 mm の液膜が形成される場合の自由落下流量は、下式の通り 0.00315m<sup>3</sup>/h と算出される。

$$Q_{rod} = \frac{\pi}{3} \times \frac{9.807 \times 10.72 \times 10^{-3} \times (998.2 - 1.166) \times (0.2 \times 10^{-3})^3}{1.002 \times 10^{-3}}$$

$$= 8.76 \times 10^{-7} [m^3/s]$$

$$= 3.15 \times 10^{-3} [m^3/h]$$

上式の流量は燃料棒1本当たりであることから、集合体当たり（棒本数 225 本）に換算し、それが SFP 内の全ての燃料（424 体）に形成し続けられるとした場合の総自由流下流量は、下式の通り  $3.01 \times 10^2 [m^3/h]$  となる。この流量は、実機スプレイの定格流量  $\square m^3/h$  の約 5 倍に相当する。

$$Q = 3.15 \times 10^{-3} \times 225 \times 424 = 3.01 \times 10^2 [m^3/h]$$

(2) 液膜を SFP 全面に適用した計算体系および気相部水密度について

計算体系は今回の申請における未臨界性評価と同様とし、燃料棒等の周りには一律 0.2mm の液膜形成を考慮し、液相は完全喪失状態とする。また、グリッド部ではスプレイ水が保持されることを考慮する。気相部水密度については、スプレイを SFP 全面に実施した第 2 表の条件で求められる水密度を上回る 0.00085g/cm<sup>3</sup> を SFP 全面に適用する。

$$\text{気相部水密度} = [ \square / \{ \square \times (390-10) \} ] \times 1.2 + 0.0006 = 0.00068 [g/cm^3]$$

第 2 表 SFP 全面へのスプレイ時の気相部水密度計算条件

項目	計算条件
流量 Q	$\square m^3/h = \square cm^3/s$ (定格)
放水面積 A	SFP 全面 ( $\square cm \times \square cm \times 424$ ラック = $\square cm^2$ )
液滴下降速度 V	390cm/s (液滴径 1.0mm の終端速度)
上昇流	-10cm/s
蒸気の液化	×1.2
飽和蒸気密度	+0.0006g/cm <sup>3</sup>

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。

なお、本評価にて設定している気相部水密度  $0.00085\text{g/cm}^3$  は、定格の約 3 倍の流量にて SFP 全面にスプレーした場合の気相部水密度に相当する（第 2 表に示す計算条件のうち、流量  $Q$  を定格の 3 倍（ $\square\text{ m}^3/\text{h} = \square\text{ cm}^3/\text{s}$ ）とし、環境条件を同様に考慮した場合の気相部水密度は、下式の通り  $0.000833\text{ g/cm}^3$  となる。）。

$$\text{気相部水密度} = \left[ \square / \{ \square \times (390 - 10) \} \right] \times 1.2 + 0.0006 = 0.000833\text{g/cm}^3$$

よって、本評価にて設定する(1)で示した液膜条件および本項で示した気相部水密度条件を同時に発生させるためには、定格の約 8 倍の流量にてスプレーすることになる。

### (3) 評価結果および検討

液膜形成を考慮した未臨界性評価結果と気相部水密度を  $0.04\text{g/cm}^3$  とした未臨界性評価結果を第 3 表に示す。液膜形成を考慮した場合の実効増倍率は完全喪失時において 0.742 であり、今回の液相完全喪失時における申請評価結果である 0.929（不確定性を含まない値）を十分に下回っていることから、液膜の形成による影響は、今回未臨界性評価用に設定した  $0.04\text{ g/cm}^3$  という気相部水密度が有する余裕に包含されている。

第 3 表 液膜形成を考慮した未臨界性評価結果

	気相部水密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	液相	液膜の考慮	実効増倍率 (不確定性を含まず)
液膜形成を 考慮した評価	0.00085 (定格流量の約 3 倍に相当)	完全喪失	一律 0.2mm (定格流量 の約 5 倍に 相当)	0.742
気相部水密度 $0.04\text{g/cm}^3$ での評価	0.04 (定格流量の約 508 倍に相当)	完全喪失	無し	0.929

### (4) 感度解析

液膜の実効増倍率に対する感度を確認するため、液膜厚さが 0.1mm、0.3mm および 0.4mm の場合についても未臨界性評価を行なった。評価結果を第 4 表に示す。液膜厚さが増えるにつれて実効増倍率が増加する傾向であることを確認した。また、液膜がついた状態にお

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。

ける気相部水密度の実効増倍率に対する感度を確認するため、気相部水密度が 0.003 g/cm<sup>3</sup>、0.005 g/cm<sup>3</sup>、0.01 g/cm<sup>3</sup>および 0.02 g/cm<sup>3</sup>の場合についても未臨界性評価を行なった。評価結果を第 5 表に示す。気相部水密度が増えるにつれて実効増倍率が増加する傾向であることを確認した。いずれの結果も、今回未臨界性評価用に設定した「液膜なし、気相部水密度 0.04 g/cm<sup>3</sup>」という評価条件が有する余裕に包含されている。

第 4 表 液膜の実効増倍率に対する感度を確認した未臨界性評価結果

	気相部水密度 (g/cm <sup>3</sup> )	液相	液膜の考慮	実効増倍率 (不確定性を含まず)
液膜の感度を確認 した評価	0.00085 (定格流量の約 3 倍に相当)	完全喪失	一律 0.1mm (定格流量の約 0.6 倍 <sup>*</sup> に相 当)	0.694
			一律 0.2mm (定格流量の約 5 倍 <sup>*</sup> に相当)	0.742
			一律 0.3mm (定格流量の約 17 倍 <sup>*</sup> に相当)	0.773
			一律 0.4mm (定格流量の約 40 倍 <sup>*</sup> に相当)	0.814

※：スプレイ水が全て液膜になると仮定し、棒 1 本当たりの自由流下する液膜流量を求め  
る(4)式を用いて換算した値



第5表 液膜がついた状態における気相部水密度の実効増倍率に対する  
感度を確認した未臨界性評価結果

	気相部水密度 (g/cm <sup>3</sup> )	液相	液膜の考慮	実効増倍率 (不確定性を含まず)
気相部水密度の感 度を確認した評価	0.00085 (定格流量の約 3倍に相当)	完全喪失	一律 0.2mm (定格流量の約 5倍に相当)	0.742
	0.003 (定格流量の約 31倍に相当)			0.747
	0.005 (定格流量の約 57倍に相当)			0.759
	0.01 (定格流量の約 121倍に相当)			0.792
	0.02 (定格流量の約 250倍に相当)			0.860

以上

使用済燃料ピットへの注水・放水設備による流量設定の考え方および根拠について

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	別紙6-1
2. SFP注水手順にて使用する設備の流量設定の考え方および根拠 .....	別紙6-1
3. SFP放水手順にて使用する設備の流量設定の考え方および根拠 .....	別紙6-8

## 1. はじめに

使用済燃料ピット（以下、SFPという。）の大規模漏えいにより水位が異常に低下した場合には、燃料の著しい損傷の進行を緩和し臨界を防止するため、SFPへの注水設備による注水を試みたうえで、水位上昇が確認できない場合は可搬型スプレー設備等によるSFPへの放水を実施する。

本資料ではSFP大規模漏えい時にSFPに流入しうる水（海水含む）の最大流量を検討するに当たり必要となる、各注水・放水手順において使用する設備での流量およびその根拠（出典）について説明する。なおスプレーヘッドまたは放水砲によりSFPへ水を供給する行為を放水と呼称する。

## 2. SFP注水手順にて使用する設備の流量設定の考え方および根拠

SFPからの大量の水の漏えいが発生した際に実施する、SFPへの注水に係る手順の実施判断フローを第1図に、各注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。

各手順における放水によるSFPへの流入流量設定の考え方は以下の通り。（手順番号は第1表の番号と整合）

### （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にポンプ台数を乗じた値とする。また消火栓を使用する手順については、消火栓の数も乗じた値とする。

（対象手順：②-1、③）

- b. 実際の施設ラインで通水した実測値がないものについては、流量を過大に評価するため、定格流量に台数を乗じた値（配管の圧損は考慮しない）とした。

（対象手順：①、⑤）

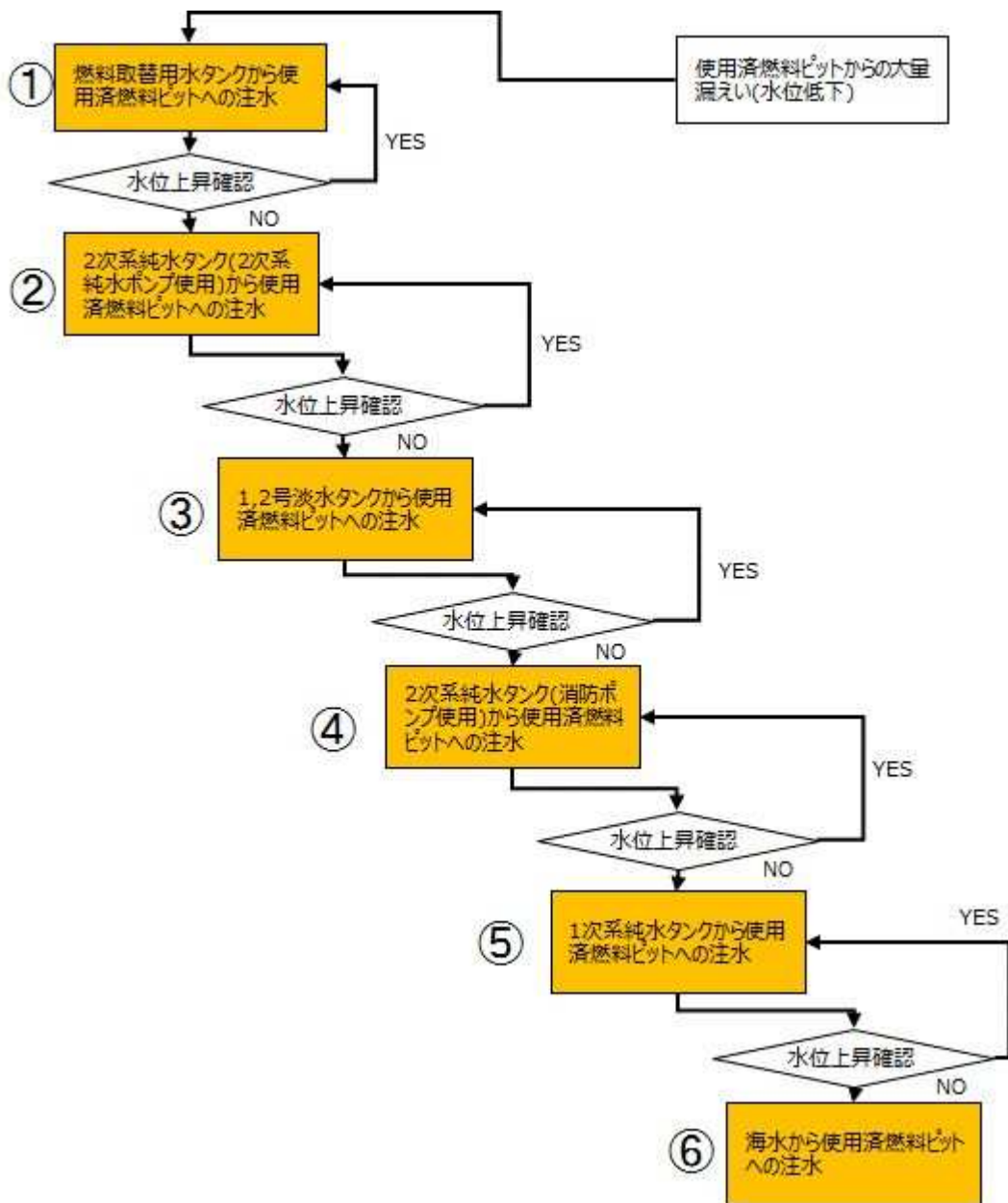
- c. 後段に容量の小さいポンプがあるものは、後段のポンプの定格流量に台数を乗じた値（配管の圧損は考慮しない）とした。

（対象手順：②-2）

### （2）可搬型設備を使用する手順

ポンプの揚程曲線から得られる最大値（ホースの圧損は考慮しない）とした。

（対象手順：②-1、③）



第1図 SFP大規模漏えい発生時の手順判断フロー（SFPへの注水）

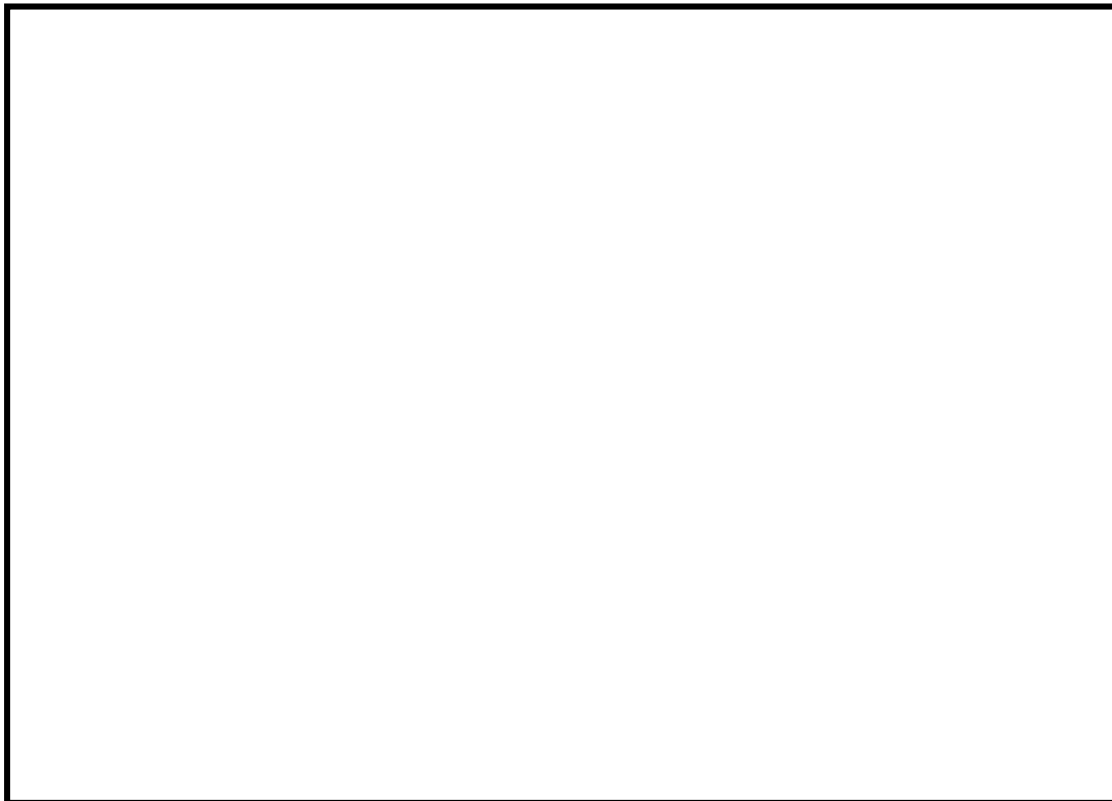
第1表 SFPへの注水手順における水源、送水ポンプ、台数および流量根拠

	手順番号 (第1図の 番号に同じ)	水源	送水ポンプ	ポンプ 台数	送水ポンプ 1台当たりの流量	流量根拠
注 水 手 順	①	燃料取替用水タンク	燃料取替用水ポンプ	2台	30m <sup>3</sup> /h	定格流量 (第2図参照)
	②-1	2次系純水タンク	2次系純水ポンプ	3台 <sup>※1</sup>	5m <sup>3</sup> /h	実測値 (第3-1図参照)
	②-2				30m <sup>3</sup> /h (脱気塔経由)	脱気水ポンプの定格流量 (第3-2図参照)
	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	各1台	22m <sup>3</sup> /h <sup>※2</sup>	実測値 (第4図参照)
	④	2次系純水タンク	消防ポンプ	1台	96m <sup>3</sup> /h	定格流量 (第5図参照)
	⑤	1次系純水タンク	1次系純水ポンプ	2台	40m <sup>3</sup> /h	定格流量 (第6図参照)
	⑥	海水	送水車	1台 <sup>※3</sup>	270m <sup>3</sup> /h	揚程曲線 (第7図参照)

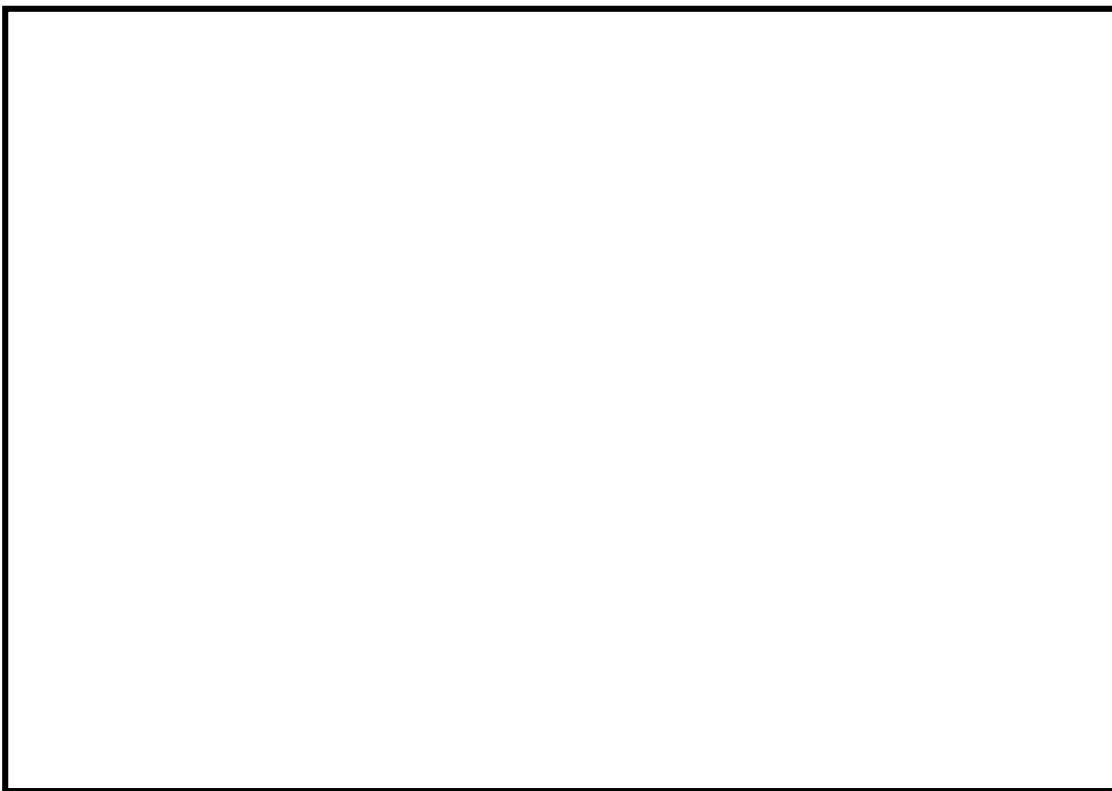
※1 脱気水ポンプは2台

※2 使用する消火栓（屋内消火栓：2箇所、屋外消火栓：1箇所）のうち、流量が大きい屋外消火栓の値

※3 注水時の必要台数を記載。配備台数は1プラント当たり2台



第2図 燃料取替用水ポンプ 流量出典

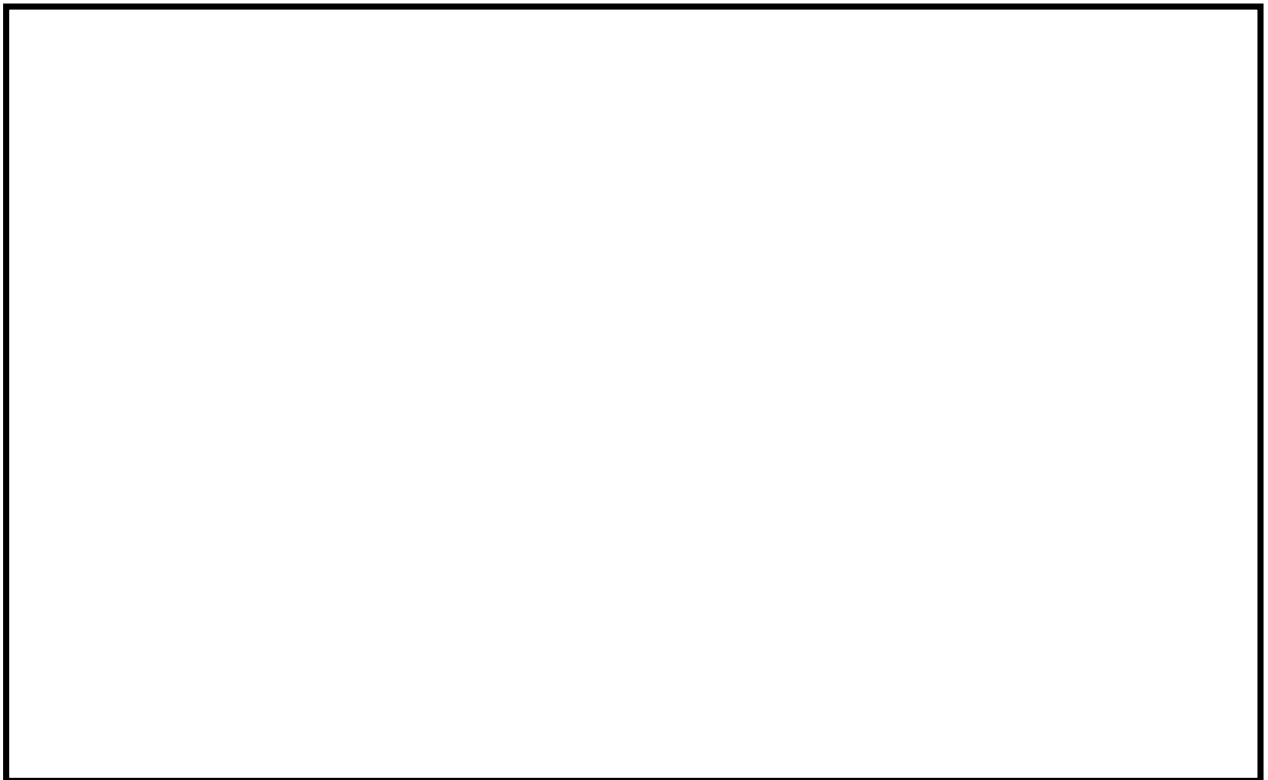


第3-1図 2次系純水ポンプ 流量出典（水張ライン使用時の実測値）

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。



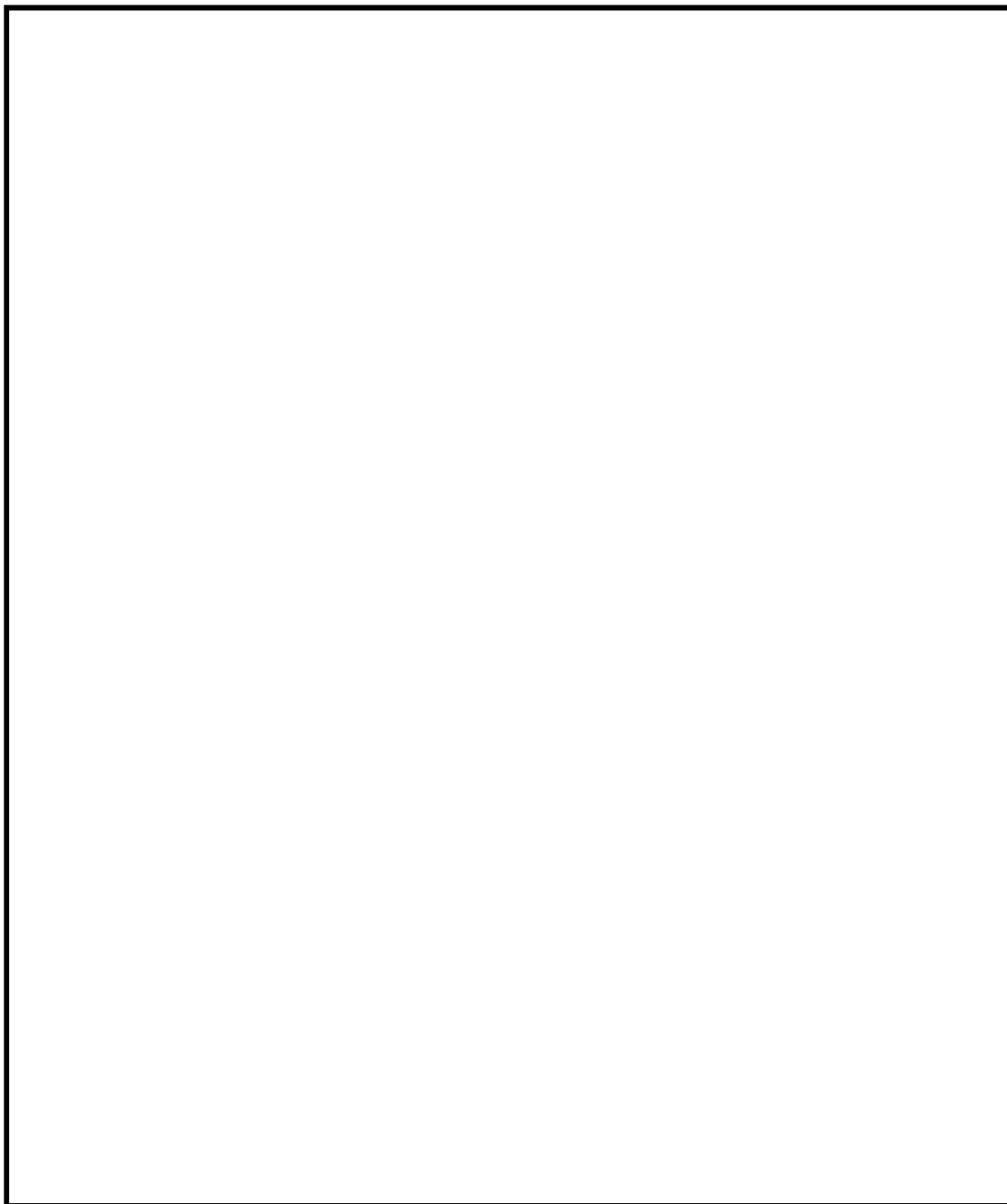
第 3-2 図 脱気水ポンプ 流量出典



第 4 図 消火栓を用いた注水 流量出典

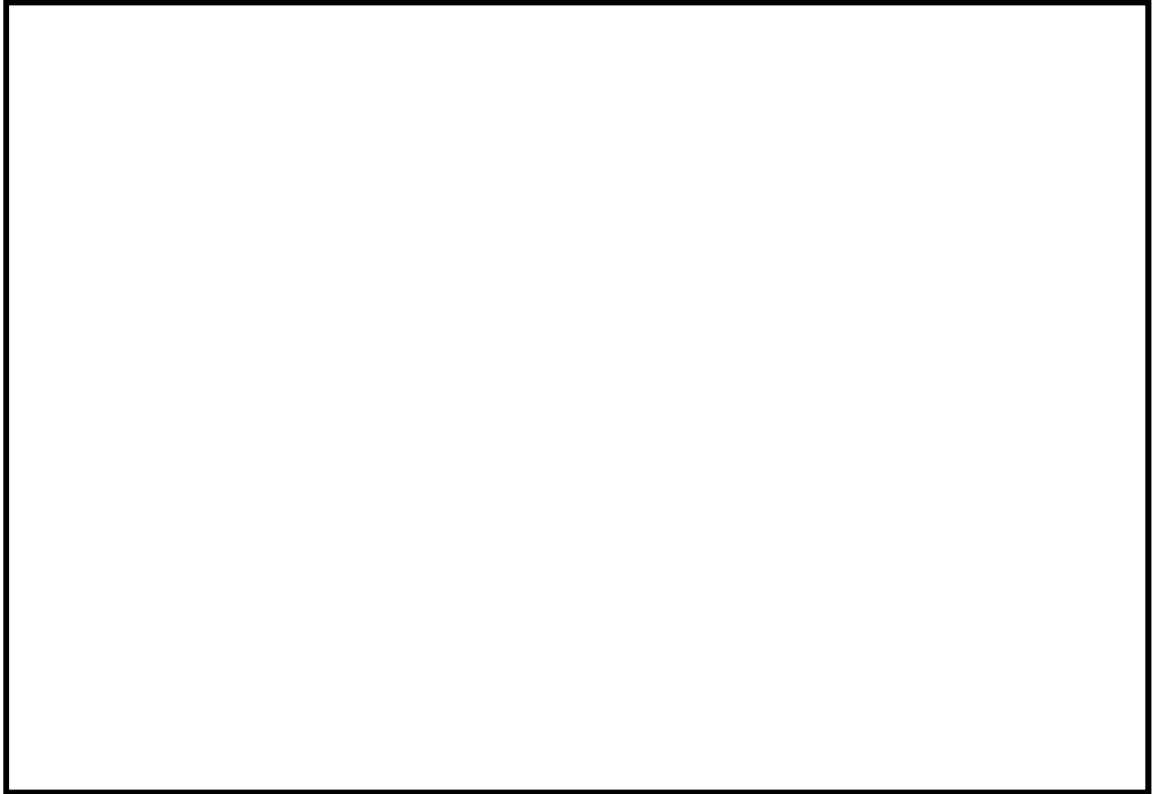
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



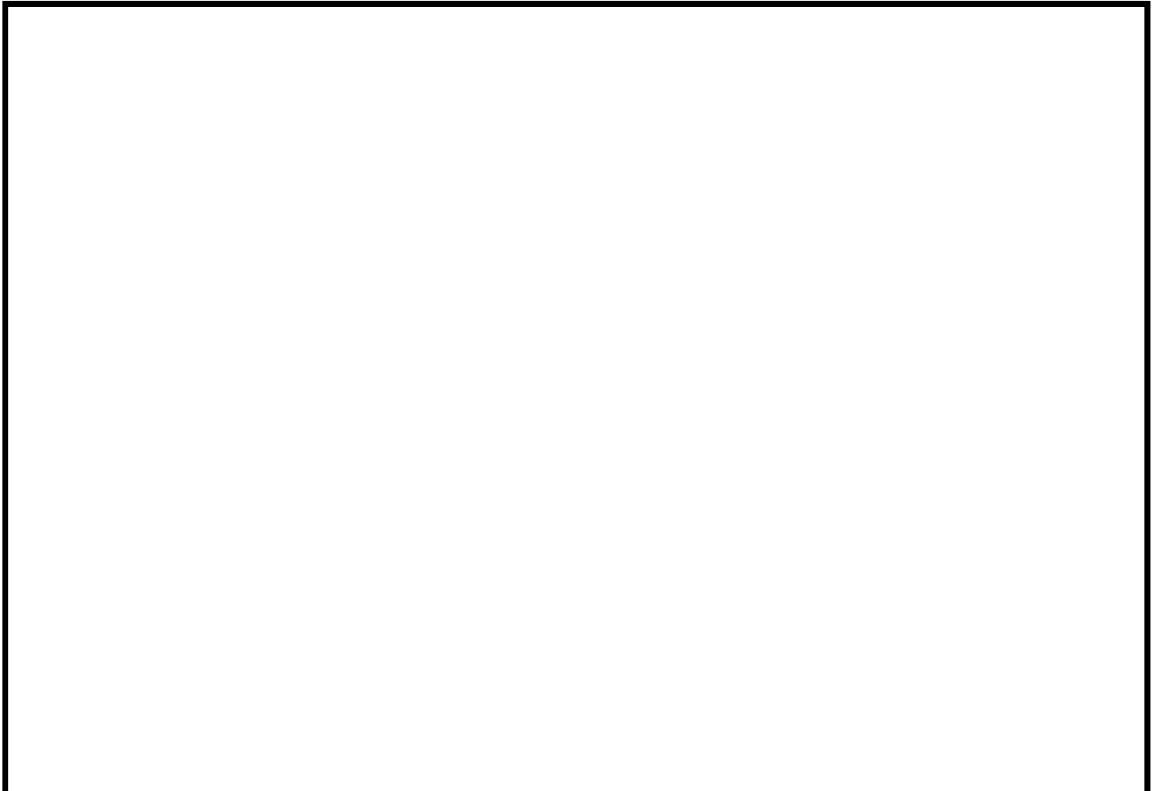


第 5 図 消防ポンプ 流量出典

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。



第 6 図 1 次系純水ポンプ 流量出典



第 7 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。

### 3. SFP 放水手順にて使用する設備の流量設定の考え方および根拠

SFP からの大量の水の漏えいが発生した際に実施する、SFP への放水に係る手順の実施判断フローを第 8 図に、各放水手順における水源、送水ポンプおよび放水設備を第 2 表に示す。

各手順における放水による SFP への流量設定の考え方は以下の通り。（手順番号は第 2 表の番号と整合）

#### a. スプレイヘッドを用いて放水する手順

化学消防自動車によるスプレイ手順は送水車が起動できない場合の手順であり、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こととし、最大流量はスプレイヘッドの仕様上限値である  $\square$  m<sup>3</sup>/h とした。

（スプレイヘッドで放水する際は評価上  $\square$  m<sup>3</sup>/h 以上で実施することとしており、設備影響が出る仕様上限の  $\square$  m<sup>3</sup>/h で放水することは考え難い。）

（対象手順：手順①or②）

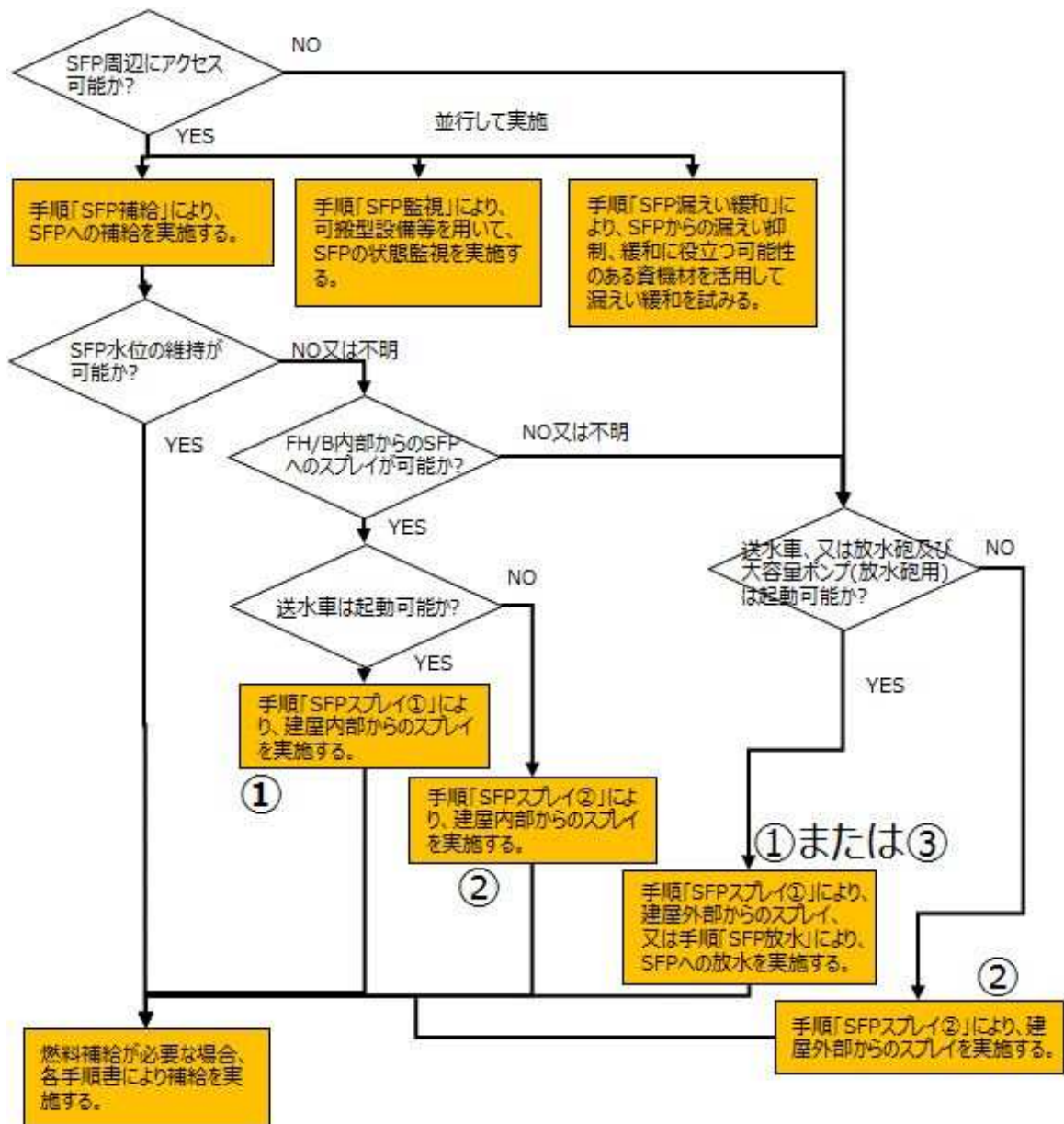
#### b. 放水砲を用いて放水する手順

大容量ポンプ（放水砲用）による放水は、大容量ポンプを 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。最大流量としては保守的に、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た。また、容量は各種類のポンプの揚程曲線上の最大値を想定する。

具体的には、大容量ポンプ（放水砲）の各型式の最大流量は揚程曲線よりそれぞれ  $\square$  m<sup>3</sup>/h（型式：HS900）、 $\square$  m<sup>3</sup>/h（型式：HS900N）、 $\square$  m<sup>3</sup>/h（型式：HS1200）であり、これらを直列に 2 台接続する場合の最大送水量は  $\square$  m<sup>3</sup>/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  $\square$  m<sup>3</sup>/h を 2 等分した  $\square$  m<sup>3</sup>/h となる。

（対象手順：手順③）

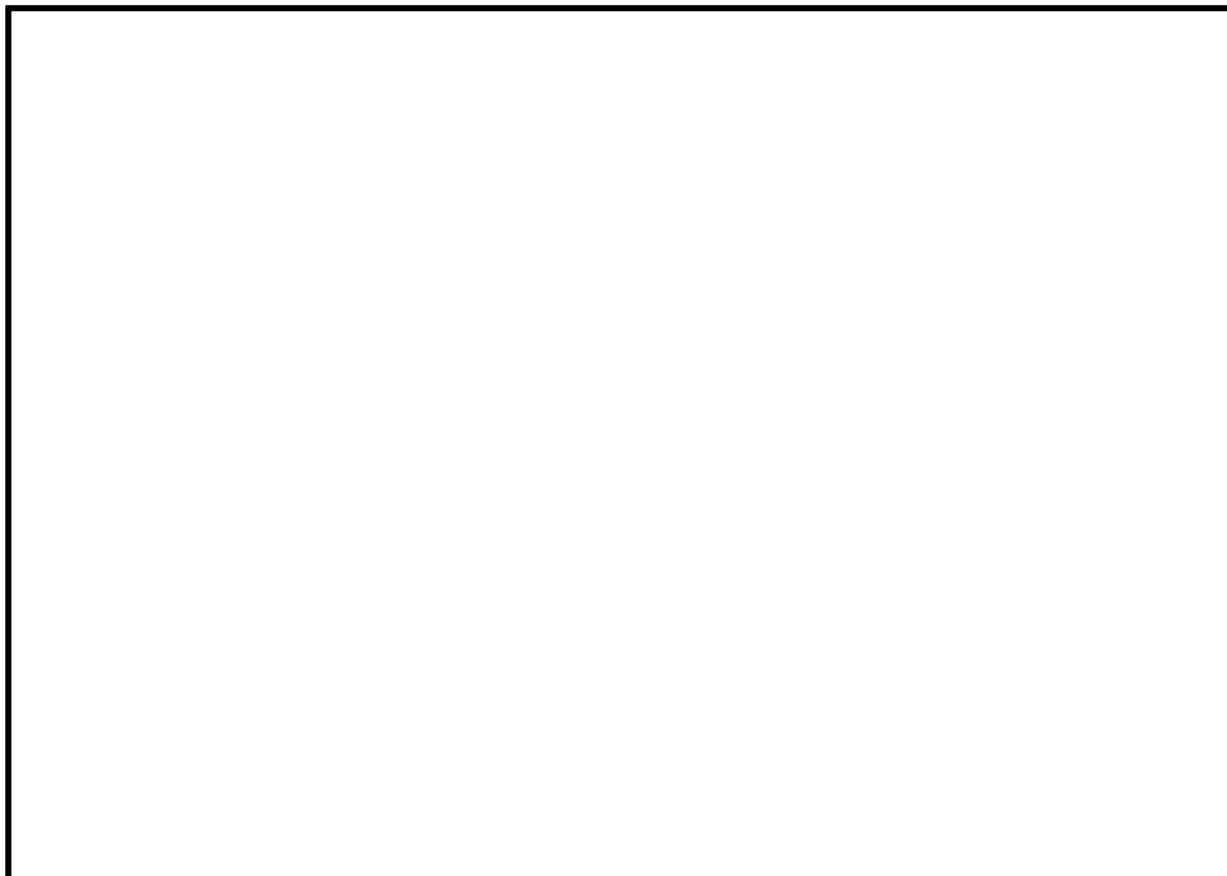
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第8図 SFP大規模漏えい発生時の手順実施判断フロー（SFPへの放水）

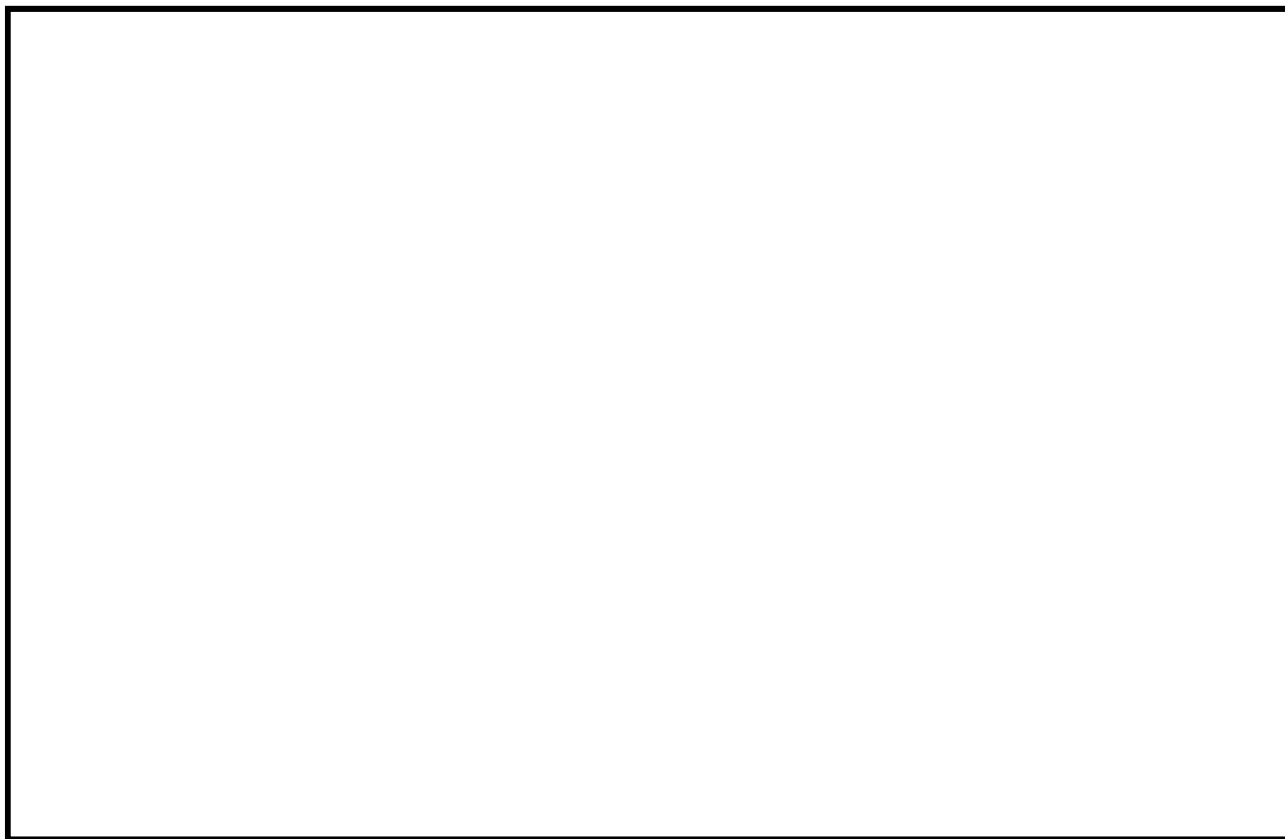
第2表 SFPへの放水手順における水源、送水ポンプ、放水設備および流量根拠

	手順番号 (第8図の 番号に同じ)	水源	送水ポンプ	ポンプ 使用台数	放水設備	流量根拠
放水 手順	①	海水	送水車	1台	スプレイヘッド	スプレイヘッド 仕様上限 (第9図参照)
	②		化学消防自動車	1台		
	③		大容量ポンプ(放水砲用)	2台	放水砲	揚程曲線 (第10-1図～ 第10-3図参照)

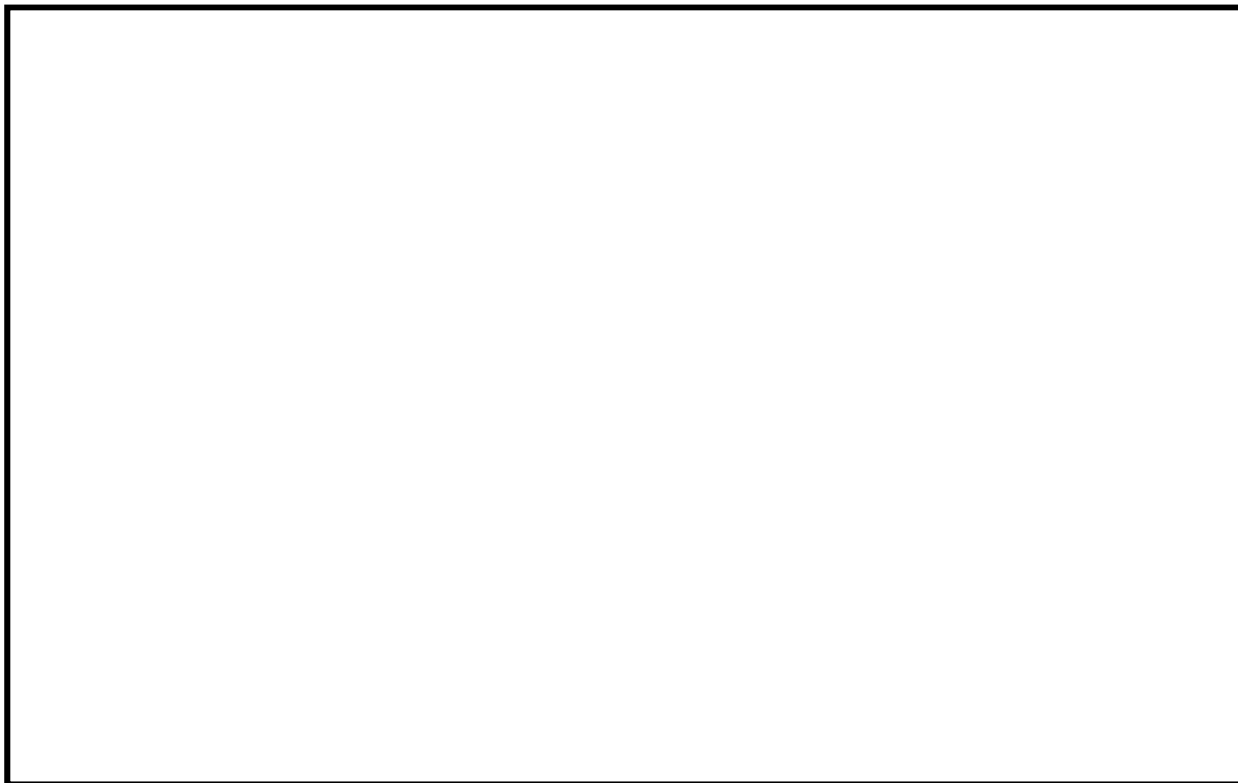


第9図 スprayヘッド使用時の流量上限

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 10-1 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS900）



第 10-2 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 10-3 図 大容量ポンプ（放水砲用）流量出典（HS1200）

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。