

高浜発電所第1, 2号機審査資料	
資料番号	2 改6
提出年月日	2023年8月25日

高浜発電所1, 2号機  
使用済燃料ピットの未臨界性評価の変更に係る  
設計及び工事計画認可申請

補足説明資料

関西電力株式会社

2023年8月

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。

## 目 次

	頁
1. 設計及び工事計画認可申請書の概要について .....	1
2. 設計及び工事の計画における適用条文の整理について .....	8
3. 設計及び工事の計画における添付資料の整理について .....	12
4. 「工事の方法」の該当箇所について .....	17
5. 技術基準規則、基本設計方針、資料 2 臨界に達しないことに関する説明書の 関連箇所の整理について .....	21

### (別添)

- 別添 1. 大規模漏えい時の未臨界性評価手法について
- 別添 2. 解析結果の妥当性確認について
- 別添 3. SFPへの注水・放水流量の設定について
- 別添 4. 実機スプレイ設備を用いた液滴径計測試験及び液滴条件設定について
- 別添 5. 液滴下降速度の算出について
- 別添 6. 流量条件に対する使用済燃料ピットの未臨界性上の頑健性について
- 別添 7. 計算機プログラム（解析コード）の解析手法等について
- 別添 8. 申請書記載内容に関する補足説明
- 別添 9. 水位低下時における不確定性に関する補足説明

### (参考資料)

- 参考資料 1 領域管理を取り除くことによる効果
- 参考資料 2 内挿物の保管状況及び概要
- 参考資料 3 使用済燃料ピット用中性子吸収体に係る既工事計画申請時の記載及び考え方の整理

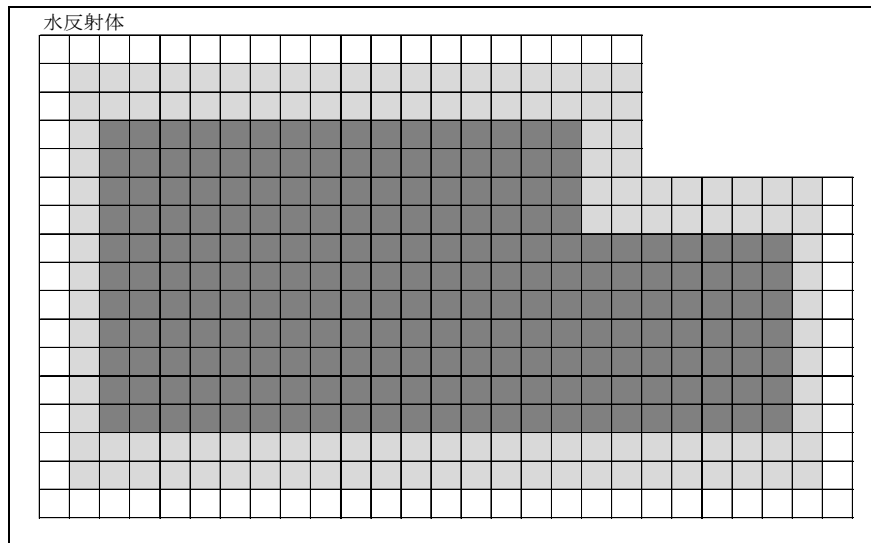
1. 設計及び工事計画認可申請書の概要について

1.1 本設計及び工事計画認可申請の目的

使用済燃料ピット（以下、SFP）の未臨界維持に係る燃料の初期濃縮度、燃焼度及びSFP用中性子吸収体の有無の条件による貯蔵領域の設定の廃止により、SFPにおける燃料及び内挿物の取扱頻度を大幅に削減し、運用面の安全性向上を図る。

1.2 既工事計画の特徴

高浜1，2号機のSFPラックはアングル型の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。そのため、既工事計画では臨界を防止するために、燃料の燃焼度やSFP用中性子吸収体（制御棒クラスタまたはSFP用中性子吸収棒集合体）挿入の有無に応じた第1図に示す貯蔵領域を設定（3領域管理）することで臨界を防止する設計としているが、3領域管理においては、多くの燃料でSFP用中性子吸収体の挿入が必要となる。この貯蔵領域管理のために使用される制御棒クラスタ及びSFP用中性子吸収棒集合体は重大事故等対処施設と位置付けており、それぞれ最大424体を使用する。現時点で、制御棒クラスタは計測制御系統施設としての設計基準対象施設及び重大事故等対処施設と兼用している48体の他、兼用していないものが1号機では66体、2号機では65体保有しており、合計数は1号機114体、2号機113体である。なお、SFP用中性子吸収棒集合体は保有していない。



	55GWd/t 燃料 (初期濃縮度約4.6wt%)		48GWd/t 燃料 (初期濃縮度約4.0wt%)	
	SFP用 中性子吸収体なし	SFP用 中性子吸収体あり	SFP用 中性子吸収体なし	SFP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 既工事計画における領域管理

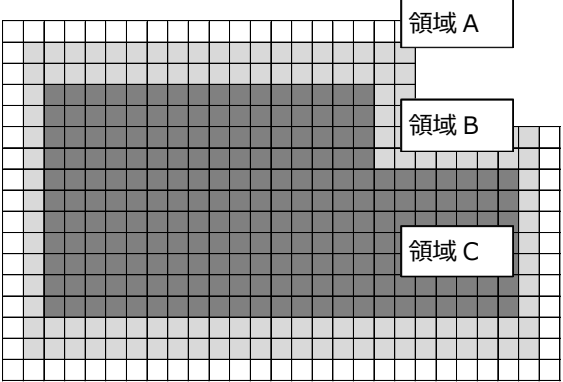
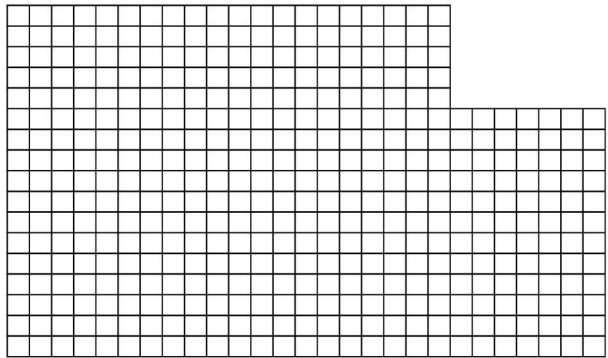
### 1.3 今回申請の概要

今回申請では、第1表に示すとおり、重大事故等対応向けに整備している SFP への注水・放水手順において用いる設備の特徴や、放水された水の状態等を踏まえた、より実態に則した SFP 内の水分条件を設定し、燃焼度や SFP 用中性子吸収体の有無を考慮せずに、技術基準規則第 69 条第 2 項の要求事項に基づき SFP からの大量の水の漏えい時において臨界を防止する設計へ、以下の通り変更する。

- (1) 未臨界維持に係る燃料の初期濃縮度、燃焼度及び SFP 用中性子吸収体の有無の条件による貯蔵領域の設定の廃止
- (2) SFP 用中性子吸収体の技術基準規則上の位置付けの見直し
  - ・ 計測制御系統施設と兼用している制御棒クラスタは、核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設（以下、「核燃施設」という。）の重大事故等対処設備としての機能に期待しない（廃止する）こととするが、計測制御系統施設としての設計に変更はなく、引き続き計測制御系統施設として使用する。
  - ・ 計測制御系統施設と兼用していない制御棒クラスタは、核燃施設の重大事故等対処設備としての機能に期待しない（廃止する）こととする。なお、設置変更許可申請書の本文九号の『ロ. 放射性廃棄物の廃棄に関する事項（4）固体廃棄物の保管管理』の中で、「使用済制御棒等の放射化された機器が発生することがある。これらは、使用済燃料ピットに貯蔵し、放射能の減衰を図ることとする。」と記載しており、これに基づき貯蔵する。
  - ・ SFP 用中性子吸収棒集合体は、核燃施設の重大事故等対処設備としての機能に期待しない（廃止する）こととする。

上記を踏まえて、既認可の設工認申請書及び今回の申請書上の記載状況を第2表に示す。

第1表 SFP 大規模漏えい時の未臨界性評価の変更概要

		変更前 (既認可)	変更後	
69条2項に係る臨界を防止できることを確認する評価	評価手法	保守的手法 (大きな保守性を有する評価ケースを一つ設定し、当該評価ケースが未臨界性上の判定基準を満足することを確認)	重大事故等対策として実施される注水・放水手順において用いる設備の特徴や、放水された水の状態等を踏まえた、事故時の実態により則した評価手法 (基本ケースにおいて不確定性を含めた実効増倍率が 0.98 以下で臨界を防止できることを確認し、感度解析ケースにおいても基本ケースと同様に中性子最適減速状態は発現せず、特異な傾向がないことを確認)	
	評価条件	水分条件	気相、液相は区別せず、水密度を 0~1g/cm <sup>3</sup> で変化させて評価	気相、液相に分け、水位を冠水から完全喪失まで変化させて評価。液膜の存在を考慮。
		燃料配置	55GWd/t 燃料を燃焼度に応じて 3 領域に配置  領域 A 領域 B 領域 C 領域 A：新燃料を貯蔵 領域 B：20GWd/t 燃焼燃料を貯蔵 領域 C：50GWd/t 燃焼燃料を貯蔵	55GWd/t 新燃料を敷き詰め  新燃料を貯蔵
SFP 用中性子吸収体の存在	存在の有無を考慮して上記の燃料配置での反応度を下回る燃焼度及び燃料の組み合わせを確認 (確認結果は、1.2 第1図参照)	考慮しない		

第2表 申請書（本文）上の記載状況

		既工認申請		今回申請		備考 (今回申請後の扱い)		
		計測制御系統施設	核燃施設	計測制御系統施設	核燃施設			
運用	臨界防止の管理（領域管理）		—	○ (基本設計方針に記載)	—	— (基本設計方針から削除)	運用の廃止	
設備	SFP用中性子吸収体	制御棒 クラスタ※	計測制御系統施設と兼用	○ (要目表に核燃施設と兼用と注記)	○ (基本設計方針に記載)	○ (要目表から兼用の注記を削除)	— (基本設計方針から削除)	計測制御系統施設として引き続き使用
			上記以外	—	○ (基本設計方針に記載)	—	— (基本設計方針から削除)	SFP内で保管
		SFP用中性子吸収棒集合体	—	○ (基本設計方針に記載)	—	— (基本設計方針から削除)	未製造であり、今後も使用しない	

○：記載あり

—：記載なし

※：既工認申請時点で1号機：114体、2号機：113体

#### 1.4 工事計画変更による効果

本申請においては、新たに取得した試験データや、事故時に使用する設備の仕様、及びその運用を踏まえ評価条件を見直し、SFP用中性子吸収体の効果を考慮せず未臨界性評価を行うことで、未臨界性に係る燃料運用制限を取り除くことができる。これにより、核分裂生成物を内包する照射燃料の取扱い及び照射燃料上での内挿物入替の回数を相当量低減でき、運用管理面の安全性向上が図られる。

#### 1.5 未臨界性評価変更に伴う設備への影響

今回の変更に伴う新規設備の設置はなく、設備の撤去を含め現場工事は発生しない。

#### 1.6 制御棒クラスターの記載に係る申請書への反映について

以下のとおり、補正申請する。

- (1) 核燃施設「6 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の基本設計方針、適用基準及び適用規格」の項の冒頭の記載で変更内容が分かるよう記載を明確化する。(別紙1参照)
- (2) 「Ⅲ. 工事工程表」の関連箇所について上記内容を反映する。(別紙2参照)

その他、関連する添付資料(資料2: 臨界に達しないことに関する説明書)についても、上記内容を反映する。

表 本設計及び工事の計画の申請のうち核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設 補正申請書 抜粋

2022年12月23日 申請時の記載	補正申請書（下線部が変更箇所）
<p>核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設</p> <p>加圧水型発電用原子炉施設に係るものにあつては、次の事項</p> <p>6 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の基本設計方針、適用基準及び適用規格</p> <p>制御棒は、既存の計測制御系統施設のうち制御材（核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設のうち使用済燃料貯蔵設備と兼用）であり、本設計及び工事の計画で核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設のうち使用済燃料貯蔵設備を削除し、計測制御系統施設のうち制御材とすることとし、「表 2 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の兼用設備リスト」を削除する。</p> <p style="text-align: center;">（～略～）</p>	<p>核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設</p> <p>加圧水型発電用原子炉施設に係るものにあつては、次の事項</p> <p>6 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の基本設計方針、適用基準及び適用規格</p> <p><u>核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設のうち制御棒は、計測制御系統施設のうち制御材と兼用しているものと兼用していないものがあり、兼用しているものについては、本設計及び工事の計画で計測制御系統施設のうち制御材との兼用を廃止することとし、「表 2 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の兼用設備リスト」を削除するとともに、兼用していないものについては廃止することとする。</u></p> <p style="text-align: center;">（～略～）</p>

9



表 本設計及び工事の計画の申請のうち「Ⅲ. 工事工程表」 補正申請書 抜粋

2022年12月23日 申請時の記載	補正申請書（下線部が変更箇所）
<p>Ⅲ. 工事工程表</p> <p>今回の設計及び工事の計画は、使用済燃料ピットの臨界評価方法等を変更するものであり、制御棒及び使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体の核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設としての要求はなくなるが、制御棒は使用済燃料ピット内に継続保管すること、使用済燃料ピット用中性子吸収棒集合体は作成していないことから、現地工事は伴わない。</p> <p style="text-align: center;">（～略～）</p>	<p>Ⅲ. 工事工程表</p> <p>今回の設計及び工事の計画は、使用済燃料ピットの臨界評価方法等を変更するものであり、<u>新規設備の設置等の</u>現地工事は伴わない。</p> <p style="text-align: center;">（～略～）</p>

## 2. 設計及び工事の計画における適用条文の整理について

高浜発電所1，2号機のSFPの未臨界性評価の変更に係る設工認について、「技術基準規則」の各条文のうち申請対象が適用を受ける条文とそれらのうち適合性の確認が必要となる条文の整理を行う。

本申請設備は以下の通り。申請対象が適用を受ける条文整理を第3表に示す。なお、本申請設備は設計基準対処設備としての機能を持たないため、技術基準規則の第二章 設計基準対象施設に係る条文の適用は受けないことは明らかであることから記載を省略する。また、本工事計画に伴い制御棒クラスタ（計測制御系統施設のうち制御材と兼用しているもの及び兼用していないもの）及びSFP用中性子吸収棒集合体は、核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設における重大事故等対処設備としての機能はなくなるが、制御棒クラスタ（計測制御系統施設のうち制御材と兼用しているもの）については計測制御系統施設としての設計基準対処施設及び重大事故等対処施設における要求およびその機能に変更はなく、引き続き計測制御系統施設として使用する。また、制御棒クラスタ（計測制御系統施設と兼用していないもの）については引き続きSFP内で保管し、SFP用中性子吸収棒集合体については未製造であり、今後も使用しない。

なお、上述の通り、本申請により重大事故等対処設備としての機能要求がなくなる計測制御系統施設と兼用していない制御棒クラスタについても継続して使用済燃料ピットに保管するが、制御棒クラスタが燃料体等の冷却性、使用済燃料ピットラック及び使用済燃料ピットクレーンの耐震性並びに使用済燃料ピットへ悪影響を及ぼさない設計となっていることは既工事計画にて確認済みである。

### ●申請設備

別表第二 分類	設備
○核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	
基本設計方針対象設備	臨界防止の管理

第3表 適用条文の整理結果 (1/3)

技術基準規則	適用 条文※	審査 対象※	理由
○第三章 重大事故等対処施設			
第49条 重大事故等対処施設の地盤	○	×	重大事故等対処施設であることから適用条文であるが、本申請は重大事故等時のSFP臨界評価に関する評価手法及び運用の変更に関する申請であり、既存設備の仕様変更及び新設設備の設置は行わず、審査対象条文とならない。
第50条 地震による損傷の防止	○	×	重大事故等対処施設であることから適用条文であるが、本申請は重大事故等時のSFP臨界評価に関する評価手法及び運用の変更に関する申請であり、既存設備の仕様変更及び新設設備の設置は行わず、審査対象条文とならない。
第51条 津波による損傷の防止	○	×	重大事故等対処施設であることから適用条文であるが、本申請は重大事故等時のSFP臨界評価に関する評価手法及び運用の変更に関する申請であり、既存設備の仕様変更及び新設設備の設置は行わず、審査対象条文とならない。
第52条 火災による損傷の防止	○	×	重大事故等対処施設であることから適用条文であるが、本申請は重大事故等時のSFP臨界評価に関する評価手法及び運用の変更に関する申請であり、既存設備の仕様変更及び新設設備の設置は行わず、審査対象条文とならない。
第53条 特定重大事故等対処施設	×	×	本申請設備は、特定重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文とならない。
第54条 重大事故等対処設備	○	×	重大事故等対処施設であることから適用条文であるが、本申請は重大事故等時のSFP臨界評価に関する評価手法及び運用の変更に関する申請であり、既存設備の仕様変更及び新設設備の設置は行わず、審査対象条文とならない。 なお、本申請により重大事故等対処設備としての機能要求がなくなる計測制御系統施設と兼用していない制御棒クラスタについても継続して使用済燃料ピットに保管するが、制御棒クラスタが燃料体等の冷却性、使用済燃料ピットラック及び使用済燃料ピットクレーンの耐震性並びに使用済燃料ピットへ悪影響を及ぼさない設計となっていることは既工事計画にて確認済みである。
第55条 材料及び構造	×	×	本申請設備に容器、管、ポンプ及び弁は含まれないため、適用条文とならない。
第56条 使用中の亀裂等による破壊の防止	×	×	本申請設備に容器、管、ポンプ及び弁は含まれないため、適用条文とならない。
第57条 安全弁等	×	×	本申請設備に安全弁等が含まれないため、適用条文とならない。

※○：該当、×：非該当

第3表 適用条文の整理結果 (2/3)

技術基準規則	適用 条文※	審査 対象※	理由
○第三章 重大事故等対処施設 (続き)			
第58条 耐圧試験等	×	×	本申請設備に容器、管、ポンプ及び弁は含まれないため、適用条文とならない。
第59条 緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第60条 原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第61条 原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第62条 原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第63条 最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第64条 原子炉格納容器内の冷却等のための設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第65条 原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第66条 原子炉格納容器下部の熔融炉心を冷却するための設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。

※○：該当、×：非該当

第3表 適用条文の整理結果 (3/3)

技術基準規則	適用 条文※	審査 対象※	理由
○第三章 重大事故等対処施設 (続き)			
第67条 水素爆発による原子炉格納 容器の破損を防止するた めの設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第68条 水素爆発による原子炉建屋 等の損傷を防止するた めの設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第69条 使用済燃料貯蔵槽の冷却等 のための設備	○	○	本申請は重大事故等時の使用済燃料ピットの臨界評価に関する評価手法及び運用の変更に関する申請であり、従来の燃焼度及び使用済燃料ピット用中性子吸収体を考慮した領域管理によらず、重大事故等時の実態により則した条件において臨界を防止する設計とすることから、審査対象条文となる。
第70条 工場等外への放射性物質の 拡散を抑制するための設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第71条 重大事故等の収束に必要と なる水の供給設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第72条 電源設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第73条 計装設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第74条 原子炉制御室	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第75条 監視測定設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第76条 緊急時対策所	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第77条 通信連絡を行うために必要 な設備	×	×	本申請設備に本条文の対象設備は含まれないため、適用条文とならない。
第78条 準用	×	×	本申請設備に火力設備等に関連する設備は含まれないため、適用条文とならない。

※○：該当、×：非該当

3. 設計及び工事の計画における添付資料の整理について

「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」に基づき、高浜発電所1，2号機のSFP未臨界性評価の変更に係る設計及び工事計画申請書に添付する書類については、第4表に整理する。

第4表 本申請に添付する書類の整理結果(1/5)

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類	添付の要否 (○・×)	理由
○各発電用原子炉施設に共通		
送電関係一覧図	×	本申請に関係するものではないことから不要。
急傾斜地崩壊危険区域内において行う制限 工事に係る場合は、当該区域内の急傾斜地 の崩壊の防止措置に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
工場又は事業所の概要を明示した地形図	×	本申請に関係するものではないことから不要。
主要設備の配置の状況を明示した平面図及 び断面図	×	本申請に関係するものではないことから不要。
単線結線図	×	本申請に関係するものではないことから不要。
新技術の内容を十分に説明した書類	×	本申請に関係するものではないことから不要。
発電用原子炉施設の熱精算図	×	本申請に関係するものではないことから不要。
熱出力計算書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
発電用原子炉の設置の許可との整合性に関 する説明書	○	設置変更許可の変更内容と本申請内容との整 合性を示す必要があるため添付する。
排気中及び排水中の放射性物質の濃度に関 する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
人が常時勤務し、又は頻繁に出入する工場 又は事業所内の場所における線量に関する 説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
発電用原子炉施設の自然現象等による損傷 の防止に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
放射性物質により汚染するおそれがある管 理区域並びにその地下に施設する排水路並 びに当該排水路に施設する排水監視設備及 び放射性物質を含む排水を安全に処理する 設備の配置の概要を明示した図面	×	本申請に関係するものではないことから不要。

第4表 本申請に添付する書類の整理結果 (2/5)

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二 添付書類	添付の要否 (○・×)	理由
○各発電用原子炉施設に共通 (続き)		
放射性物質により汚染するおそれがある管理区域並びにその地下に施設する排水路並びに当該排水路に施設する排水監視設備及び放射性物質を含む排水を安全に処理する設備の配置の概要を明示した図面	×	本申請に関係するものではないことから不要。
取水口及び放水口に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
設備別記載事項の設定根拠に関する説明書	×	本申請に関連するものではないことから不要。
環境測定装置（放射線管理用計測装置に係るものを除く。）の構造図及び取付箇所を明示した図面	×	本申請に関係するものではないことから不要。
クラス1 機器及び炉心支持構造物の応力腐食割れ対策に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
発電用原子炉施設の蒸気タービン、ポンプ等の損壊に伴う飛散物による損傷防護に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
通信連絡設備に関する説明書及び取付箇所を明示した図面	×	本申請に関係するものではないことから不要。
安全避難通路に関する説明書及び安全避難通路を明示した図面	×	本申請に関係するものではないことから不要。
非常用照明に関する説明書及び取付箇所を明示した図面	×	本申請に関係するものではないことから不要。

第4表 本申請に添付する書類の整理結果 (3/5)

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類	添付の可否 (○・×)	理由
○核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設		
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設に係る機器の配置を明示した図面及び系統図	×	本申請に関係するものではないことから不要。
耐震性に関する説明書（支持構造物を含めて記載すること。）	×	本申請に関係するものではないことから不要。
強度に関する説明書（支持構造物を含めて記載すること。）	×	本申請に関係するものではないことから不要。
構造図	×	本申請に関係するものではないことから不要。
使用済燃料貯蔵槽の温度、水位及び漏えいを監視する装置の構成に関する説明書、検出器の取付箇所を明示した図面並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要
使用済燃料貯蔵用容器の密封性を監視する装置の構成に関する説明書、検出器の取付箇所を明示した図面並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
燃料取扱設備、新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書	○	使用済燃料ピット水大量漏えい時の未臨界性評価の手法及び条件を変更するため、技術基準規則第69条への適合性を説明する。
燃料体等又は重量物の落下による使用済燃料貯蔵槽内の燃料体等の破損の防止及び使用済燃料貯蔵槽の機能損失の防止に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。



第4表 本申請に添付する書類の整理結果 (4/5)

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類	添付の要否 (○・×)	理由
○核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設 (続き)		
使用済燃料運搬用容器、使用済燃料貯蔵槽及び使用済燃料貯蔵用容器の冷却能力に関する説明	×	本申請に関係するものではないことから不要。
使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
使用済燃料運搬用容器の放射線遮蔽材及び使用済燃料貯蔵用容器の放射線遮蔽及び熱除去についての計算書	×	本申請に関係するものではないことから不要。
兼用キャスクにあつては、外運搬規則第二十一条第二項の規定による容器の設計に関する原子力規制委員会の承認を受けたことに関する説明書	×	本申請に関係するものではないことから不要

第4表 本申請に添付する書類の整理結果 (5/5)

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類	添付の要否 (○・×)	理由
○「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」(第九条)		
設計及び工事に係る品質マネジメント システムに関する説明書	○	本申請に伴う品質管理の方法等のプロセス確認のため、添付する。

4. 「工事の方法」の該当箇所について

項目	対象要否	該当箇所の補足説明
1. 工事の手順		
図1（工事の手順と使用前事業者検査のフロー（燃料体を除く））	○	<p>今回の未臨界性評価の変更については、設備工事を伴わないことから、製作工場における検査等は実施せず、全ての検査は発電所で実施する検査となる。</p> <p>今回の申請内容に関して、技術基準に適合しているか確認するため、「構造、強度又は漏えいに係る検査」に定める「状態確認検査」を実施する。</p> <p>「機能又は性能に係る検査」は、「構造、強度又は漏えいに係る検査」にて確認するため対象外。</p> <p>「基本設計方針検査」は、「構造、強度又は漏えいに係る検査」にて確認するため対象外。</p>
図2（主要な耐圧部の溶接部に係る工事の手順と使用前事業者検査フロー）	—	耐圧部の溶接に係る工事が発生しないため対象外。
図3（工事の手順と使用前事業者検査のフロー（燃料体））	—	燃料体加工を伴わないため対象外。
2. 使用前事業者検査の方法		
2.1.1 構造、強度又は漏えいに係る検査		
材料検査	—	設備の新規供用が発生しないため対象外。
寸法検査	—	
外観検査	—	
組立て及び据付け状態を確認する検査（据付検査）	—	
状態確認検査	○	評価条件が設工認のとおりであることを確認するため、当該検査を実施する。
耐圧検査	—	耐圧、漏えいに係る対象が存在しないため対象外。
漏えい検査	—	
原子炉格納施設が直接設置される基盤の状態を確認する検査	—	原子炉格納施設を設置する工事ではないため対象外。

項目	対象要否	該当箇所の補足説明
建物・構築物の構造を確認する検査	—	建物・構築物を設置する工事ではないため対象外。
2.1.2 主要な耐圧部の溶接部に係る検査	—	耐圧部の溶接に係る工事が発生しないため対象外。
2.1.3 燃料体に係る検査	—	燃料体加工を伴わないため対象外。
2.2 機能又は性能に係る検査		
2.2.1 燃料体を挿入できる段階の検査	—	「構造、強度又は漏えいに係る検査」ができるようになった段階で実施するため対象外。
2.2.2 臨界反応操作を開始できる段階の検査	—	
2.2.3 工事完了時の検査	—	
2.3 基本設計方針検査	—	
2.4 品質マネジメントシステムに係る検査	○	今回の設工認に示すプロセス通り実施していることを確認するため、「品質マネジメントシステムに係る検査」を実施する。
3. 工事上の留意事項		
3.1 設置又は変更の工事に係る工事上の留意事項		
a. 設置又は変更の工事を行う発電用原子炉施設の機器等について、周辺資機材、他の発電用原子炉施設及び環境条件からの悪影響や劣化等を受けないよう、隔離、作業環境維持、異物侵入防止対策等の必要な措置を講じる。	—	今回の設工認は、現場工事を伴わないため、該当しない。
b. 工事にあたっては、既設の安全上重要な機器等へ悪影響を与えないよう、現場状況、作業環境及び作業条件を把握し、作業に潜在する危険性又は有害性や工事用資機材から想定される影響を確認するとともに、隔離、火災防護、溢水防護、異物侵入防止対策、作業管理等の必要な措置を講じる。	—	

※○：対象、—：対象外

項目	対象要否	該当箇所の補足説明
c. 設置又は変更の工事を行う発電用原子炉施設の機器等について、必要に応じて、供用後の施設管理のための重要なデータを採取する。	—	今回の設工認は、現場工事を伴わないため、該当しない。
d. プラントの状況に応じて、検査・試験、試運転等の各段階における工程を管理する。	—	
e. 設置又は変更の工事を行う発電用原子炉施設の機器等について、供用開始後に必要な機能性能を発揮できるよう製造から供用開始までの間、維持する。	—	
f. 放射性廃棄物の発生量低減に努めるとともに、その種類に応じて保管及び処理を行う。	—	
g. 現場状況、作業環境及び作業条件を把握し、放射線業務従事者に対して防護具の着用や作業時間管理等適切な被ばく低減措置と、被ばく線量管理を行う。また、公衆の放射線防護のため、気体及び液体廃棄物の放出管理については、周辺監視区域外の空气中・水中の放射性物質濃度が「線量限度等を定める告示」に定める値を超えないようにするとともに、放出管理目標値を超えないように努める。	—	

※○：対象、—：対象外

項目	対象要否	該当箇所の補足説明
<p>h. 修理の方法は、基本的に「図1 工事の手順と使用前事業者検査のフロー（燃料体を除く）」の手順により行うこととし、機器等の全部又は一部について、撤去、切断、切削又は取外しを行い、据付、溶接又は取付け、若しくは同等の方法により、同等仕様又は性能・強度が改善されたものに取り替を行う等、機器等の機能維持又は回復を行う。また、機器等の一部撤去、一部撤去の既設端部について閉止板の取付け、蒸気発生器、熱交換器又は冷却器の伝熱管への閉止栓取付け若しくは同等の方法により適切な処置を実施する。</p>	—	今回の設工認は、現場工事を伴わないため、該当しない。
<p>i. 特別な工法を採用する場合の施工方法は、技術基準に適合するよう、安全性及び信頼性について必要に応じ検証等により十分確認された方法により実施する。</p>	—	
<p>3.2 燃料体の加工に係る工事上の留意事項</p>	—	燃料体の加工に係る作業がないため、該当しない。

※○：対象、—：対象外

5. 技術基準規則、基本設計方針、資料2 臨界に達しないことに関する説明書の関連箇所の整理について

実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則	基本設計方針 (2023年6月の補正申請書に記載適正化案を反映したもの)	資料2 臨界に達しないことに関する説明書 (2023年6月の補正申請書に記載適正化案を反映したもの)	備考
<p>(使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備)</p> <p>第六十九条</p> <p>(～略～)</p> <p>2 発電用原子炉施設には、<u>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施設しなければならない。</u></p> <p>【解釈】</p> <p>3 第2項に規定する「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」とは、以下に掲げる措置又はこれらと同等以上の効果を有する措置を行うための設備をいう。</p> <p>a) <u>スプレイ設備として、可搬型スプレイ設備(スプレイヘッド、スプレイライン及びポンプ車等)を配備すること。</u></p> <p>b) <u>スプレイ設備は、代替注水設備によって使用済燃料貯蔵槽の水位が維持できない場合でも、燃料損傷を緩和できるものであること。</u></p> <p>c) <u>燃料損傷時に、できる限り環境への放射性物質の放出を低減するための設備を整備すること。</u></p>	<p>第2章 個別項目</p> <p>2. 燃料貯蔵設備</p> <p>(～略～)</p> <p>また、<u>使用済燃料ピットからの大量の水の漏えいにより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、可搬型スプレイ設備にて、使用済燃料ピット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及び燃料配置において、使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための手順等で想定される注水、スプレイ及び蒸気条件のもと、制御棒クラスタ等の中性子吸収効果を考慮せずに臨界を防止できる設計とする。</u></p> <p>未臨界性の確認における条件の設定に際しては、設計値等の現実的な条件を基本としつつ、原則、実効増倍率に対して余裕が小さくなるような設定とする。また、解析条件の不確かさ影響を考慮する必要がある場合には、影響評価において感度解析を行う。</p>	<p>2. 大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価</p> <p>(1) 評価の基本方針</p> <p><u>使用済燃料ピット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ピットの水位が異常に低下した場合(以下「大規模漏えい時」という。)、可搬型スプレイ設備(使用済燃料ピットへのスプレイ)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イを実施し、使用済燃料ピットラック(以下「ラック」という。)及び燃料体等を冷却する。また、可搬型放水設備(使用済燃料ピットへの放水)により、燃料損傷の進行を緩和し、燃料損傷時に原子炉補助建屋に大量の水を放水することによりできる限り環境への放射性物質の放出を低減し、また、一部の水が使用済燃料ピットに注水されることで、ラック及び燃料体等を冷却する。</u>なお、使用済燃料ピット全面にスプレイを実施し、ラック及び燃料体等を冷却することについては既工事計画から変更はない。</p> <p><u>大規模漏えい時の使用済燃料ピットの未臨界性評価は、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、使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための手順等で想定される注水、スプレイ及び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、体系を液相部(使用済燃料ピット水位より下部)と気相部(使用済燃料ピット水位より上部)の2相に分け、使用済燃料ピットの水位を冠水状態から完全喪失状態まで変化させて評価を行う。具体的な解析コードの適用範囲は、今回の解析コードの妥当性確認範囲である冠水から水位200mmまでの範囲とする。</u></p> <p>(～略～)</p> <p>(3) 計算結果</p> <p>b. 評価結果</p> <p>未臨界性評価結果を第4表に示す。第6図のとおり、<b>(A)</b>解析コードの妥当性確認範囲である冠水から水位200mmの範囲において、基本ケース及び感度解析ケースの全ケースにおいて、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し、純水冠水状態において最大0.947となった。これに不確定性0.0115を考慮しても実効増倍率は0.959であり、実効増倍率0.98以下を満足している。<b>(B)</b>なお、水位200mmから完全喪失状態までの極低水位の範囲については、今回の水分条件において中性子最適減速状態は発現せず、実効増倍率は水位の低下とともに連続的に単調に減少する傾向を示し、未臨界を維持することを解析結果等から確認することができ、臨界のおそれはないことを確認している。</p>	<p>&lt;二重線に係る説明&gt;</p> <p>今回申請では、使用済燃料ピット内の水分状態に対し、重大事故等対応向けに整備している使用済燃料ピットへの注水・放水手順において用いる設備の特徴や、放水された水の状態等を踏まえ、既工事計画より実態に則した条件を設定し評価している。具体的には左記の二重下線で示す設備に加えて、使用済燃料ピットポンプや消防ポンプ、大容量ポンプ等の重大事故等対応向けに整備している使用済燃料ピットへの注水・放水手順に登場する設備も含めて現実的な評価条件となるよう設定している。(詳細は別添3参照)</p> <p>&lt;一重線に係る説明&gt;</p> <p>今回の申請では、上記の前提条件において臨界を防止できることを確認している。具体的には、左記の評価結果に記載のとおり、使用済燃料ピットの水位が<b>冠水～水位200mmの範囲(A)</b>、及び<b>水位200mm～水位0mmの範囲(B)</b>それぞれについて確認することで、冠水状態から完全喪失状態まで低下した場合において臨界を防止できる設計となっていることを確認しており、それを以って技術基準に適合していると判断している。</p>

大規模漏えい時の未臨界性評価手法について



## 目 次

	頁
1. はじめに .....	別添1-1
2. 評価モデルの考え方 .....	別添1-1
3. 未臨界性評価の評価手法 .....	別添1-2
4. SCALE Ver. 6.0へのインプット条件とパラメータの関係性 .....	別添1-2
4.1 燃料条件 .....	別添1-2
4.2 水分条件 .....	別添1-3
5. 気相部水分条件の計算方法 .....	別添1-6
5.1 気相部水密度の算出方法 .....	別添1-6
5.2 液膜厚さの算出方法 .....	別添1-7
6. 基本ケース条件の設定方針 .....	別添1-7
7. 基本ケース条件に対する不確かさ要因の考慮要否判定 .....	別添1-7
8. 各パラメータの基本ケース条件及び不確かさを考慮した条件の設定 .....	別添1-8
8.1 燃料条件の設定 .....	別添1-8
8.1.1 「燃料配置」の設定 .....	別添1-8
8.2 水分条件の設定 .....	別添1-10
8.2.1 「流量」の設定 .....	別添1-10
8.2.2 「流入範囲・流量分布」の設定 .....	別添1-12
8.2.3 「燃料集合体内への流入割合」の設定 .....	別添1-18
8.2.4 「液膜となる流量の割合」の設定 .....	別添1-22
8.2.5 「液膜厚さ評価式」の設定 .....	別添1-24
8.2.6 「放水の液滴径」の設定 .....	別添1-29
8.2.7 「海水中の塩素濃度」の設定 .....	別添1-31
9. 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果 .....	別添1-32

10. 重畳させる不確かさの検討 .....	別添1-36
11. 基本ケース及び感度解析ケース条件一覧 .....	別添1-36

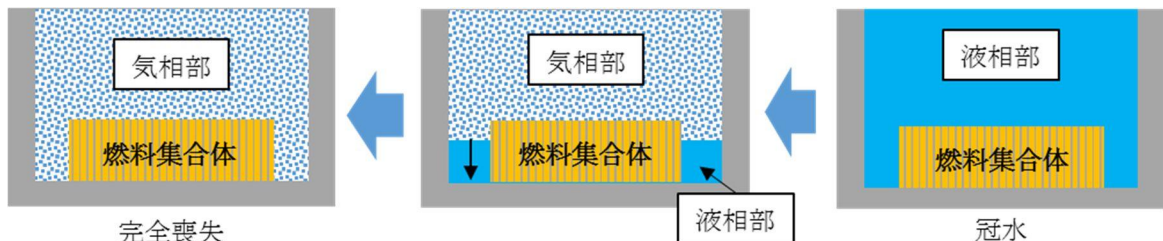
## 1. はじめに

高浜1、2号機の使用済燃料ピット（以下「SFP」という。）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、事故時向けに整備される手順に基づく注水及び放水を実施する。このため、注水・放水時のSFP雰囲気は、液相部（SFP水位より下部）と気相部（SFP水位より上部）の2相に分かれ、SFP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。既工事計画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1-1図）。

本申請における大規模漏えい時の未臨界性評価では、実態により則して、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SFP水位より上部の気相部とSFP水位より下部の液相部の2相に分け、気相部には流入する注水・放水による水の性状等を踏まえた条件を設定し、液相部水位を変化させて評価する（第1-2図）。さらに、今回評価が重大事故等対策に係る評価であることに鑑みた評価を実施する。本資料では、評価手法及び設定条件について説明する。



第1-1図 既工事計画における未臨界性評価体系



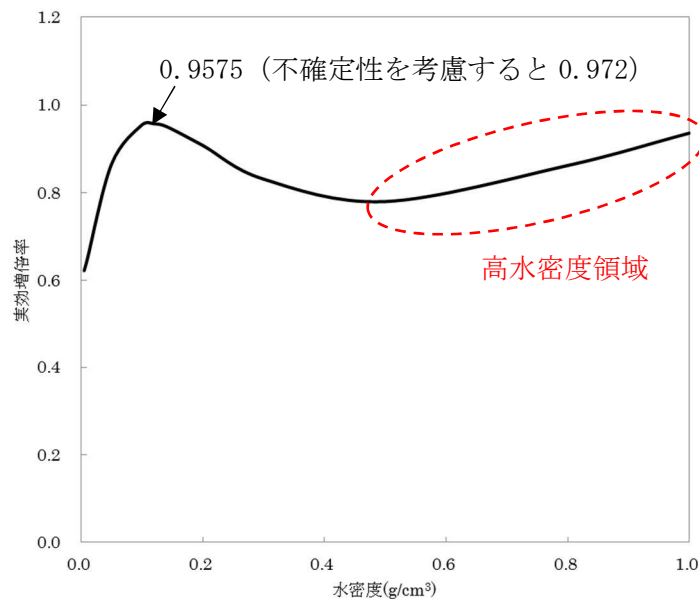
第1-2図 実態により則した未臨界性評価体系

## 2. 評価モデルの考え方

大規模漏えい時の実態により則した状態として、液相部と気相部の2相に分け、それぞれに適切な水分条件を設定したうえで、液相部水位を変化させた評価を行う。また、燃料体の上部及び体系側面の反射体の設定に当たっては、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保守的に300mmの水反射体を設定し、下部には1,000mmのコンクリート反射体を設定する。

なお、液相部について、SFPは大気圧下であることから、実態としては崩壊熱によりSFP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1-3図に既工事計画の水密度を $0.0\sim 1.0\text{g/cm}^3$ 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（赤点線枠の

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、液相部の水密度については $1.0\text{g/cm}^3$ を設定する。



第1-3図 既工事計画における未臨界性評価結果

### 3. 未臨界性評価の評価手法

今回評価が重大事故等対策に係る評価であることに鑑みた評価手法を採用することとし、重大事故等対策として実施される注水・放水手順において用いる設備の特徴や、放水された水の状態等を踏まえた、事故時の実態により則した状態（以下「基本ケース」という。）を設定する。基本ケースで設定する条件に対し実効増倍率を厳しくする不確かさがある場合には、当該不確かさが発生した場合の影響を考慮したケース（以下「感度解析ケース」という。）を設定し、その未臨界性を評価する。

なお、感度解析ケースの設定に当たっては、各不確かさの従属性・独立性を踏まえ、重畳させるべき不確かさを検討する。

### 4. SCALE Ver. 6.0へのインプット条件とパラメータの関係性

重大事故等対策として実施される注水・放水手順において用いる設備の特徴等を踏まえた各パラメータより臨界計算コード（SCALE Ver. 6.0）へのインプット条件を算出する。燃料条件、及び気相部への流入水による水分条件に関する各パラメータの状態は以下のとおり。

#### 4.1 燃料条件

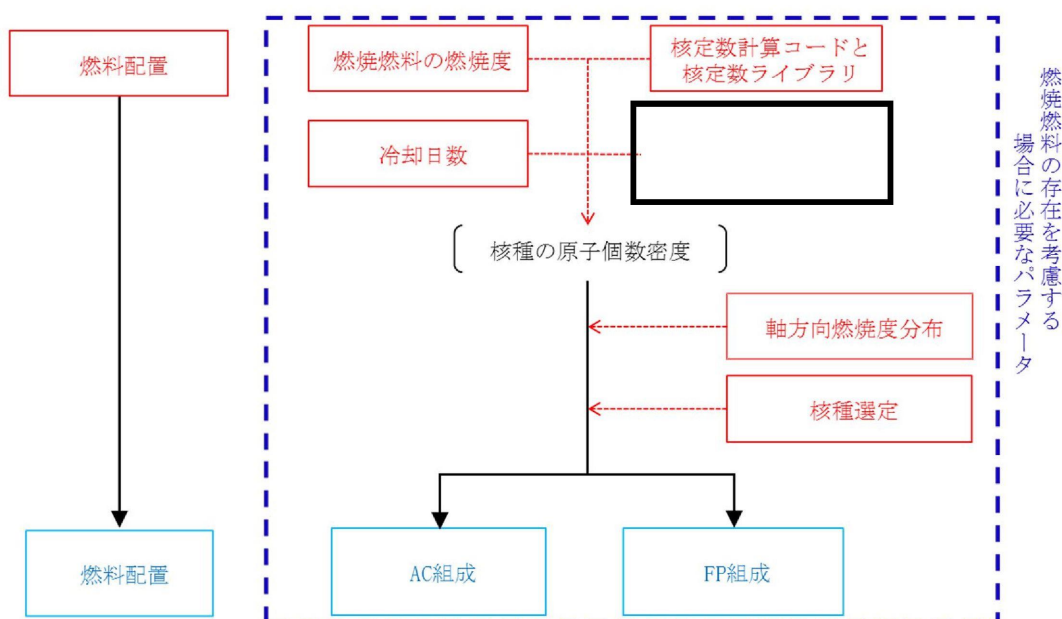
SFP内には基本的に、燃料取替の都度、次サイクルに装荷する新燃料（燃焼度 $0\text{GWd/t}$ ）を沈めこむ運用としており、その他の燃料は燃焼燃料である。燃料集合体が燃焼することにより、

燃料集合体内のAC組成、FP組成等の条件が変化することから、SCALE Ver. 6.0へのインプット条件として燃焼燃料の存在を考慮する場合は、当該インプット条件の算出に使用するパラメータによる影響の有無を確認することとなる。燃料条件について、インプット条件とインプット条件算出に当たり設定するパラメータとの関係を第1-4図に示す。

なお、貯蔵燃料として燃焼燃料の存在を考慮しない（貯蔵される燃料はすべて新燃料とする）場合は、第1-4図の青点線枠に示す燃焼に係るパラメータは考慮不要となる。

【燃料条件に関するパラメータの関係性】

赤字：インプット算出に当たり設定するパラメータ  
青字：臨界計算コードへのインプット条件



第1-4図 インプット条件とインプット条件算出に当たり設定するパラメータの関係（燃料条件）

4.2 水分条件

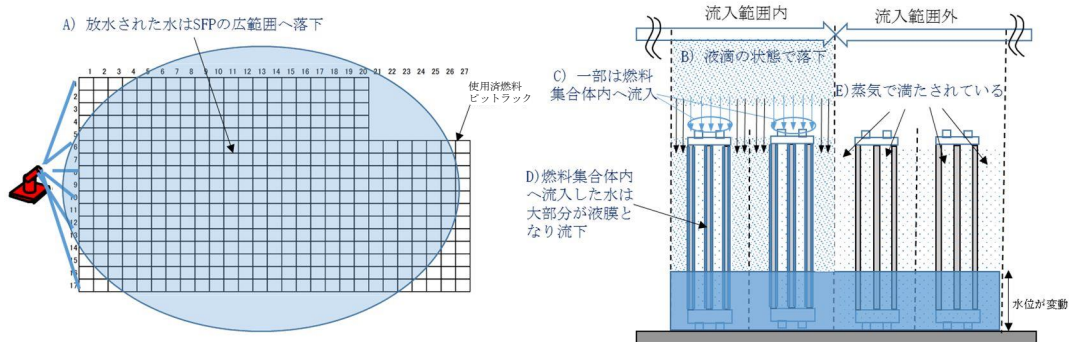
水分条件は、主に重大事故等対策として実施される注水・放水手順において用いる設備の流量や放水形状等の影響を受けるが、SFPへの流入流量が大きい放水設備を用いた場合の現実的な気相部の状態は以下A)～E)のようになると考えられる。放水設備を用いた場合の重大事故等時の実態に則した状態の概略を第1-5図に示す。

- A) 放水された水は、SFP内の使用済燃料ピットラック（以下「ラック」という。）上の広範囲に落下する。
- B) 放水された水は、落下の過程で分裂し、液滴となってSFP内へ流下する。
- C) SFP内に流入した液滴は、一部は燃料集合体内に流入し、残りは燃料集合体間を液滴として落下する。
- D) 燃料集合体内に流入する水は、上部構造物と接触することにより、大部分が液膜となっ

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。

て燃料棒を流下する。

E)放水された水の流入範囲外は、崩壊熱によるSFP水の蒸散等に伴い発生する蒸気で満たされている。



第1-5図 放水設備を用いた場合の重大事故等時の実態により則した状態 概略

よってSCALE Ver. 6.0のインプットとしては、A) ~E)に示すような、重大事故等対策時における実態により則した状態にて解析するために、第1-6図に示す「液膜厚さ」、「燃料集合体内気相部水密度」、「燃料集合体外気相部水密度」、「流入範囲外気相部水密度」を設定する。

上記の水分条件に関するインプット条件は第1-7図にも示すように、以下のとおり求める。なお、「」はインプット条件を算出するに当たり設定するパラメータ、[ ]はそれらパラメータを用いた計算の途中過程において算出される値を示す。また、海水由来の流量については、保守的に塩素の存在を考慮しない。

#### I. 液膜厚さ

- ・設備からの「流量」、水の「流入範囲・分布」から[ラックピッチ当たりの流量]を求め、当該流量に「燃料集合体内への流入割合」を乗じることで[燃料集合体内に流入する流量]を求める。
- ・燃料集合体内に流入する流量に「液膜となる流量の割合」を乗じ、[液膜になる流量]を求め、「液膜厚さ評価式」により流量(液膜レイノルズ数)を液膜厚さへ換算する。

#### II. 燃料集合体内気相部水密度

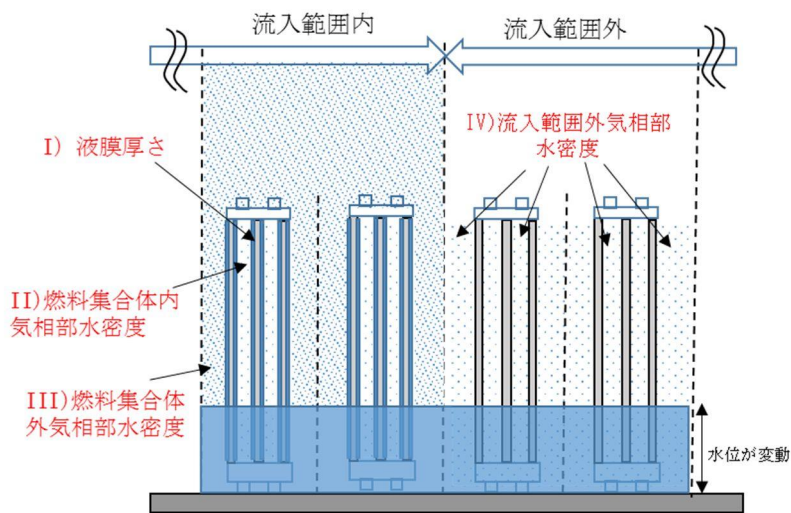
- ・[燃料集合体内に流入する流量]から、[液膜になる流量]を減じることで、燃料集合体内を[液滴のまま落下する流量]を求める。
- ・落下する「液滴の径」より求まる液滴の下降速度、及び液滴流量等を用い燃料集合体内気相部水密度を求める。

### III. 燃料集合体外気相部水密度

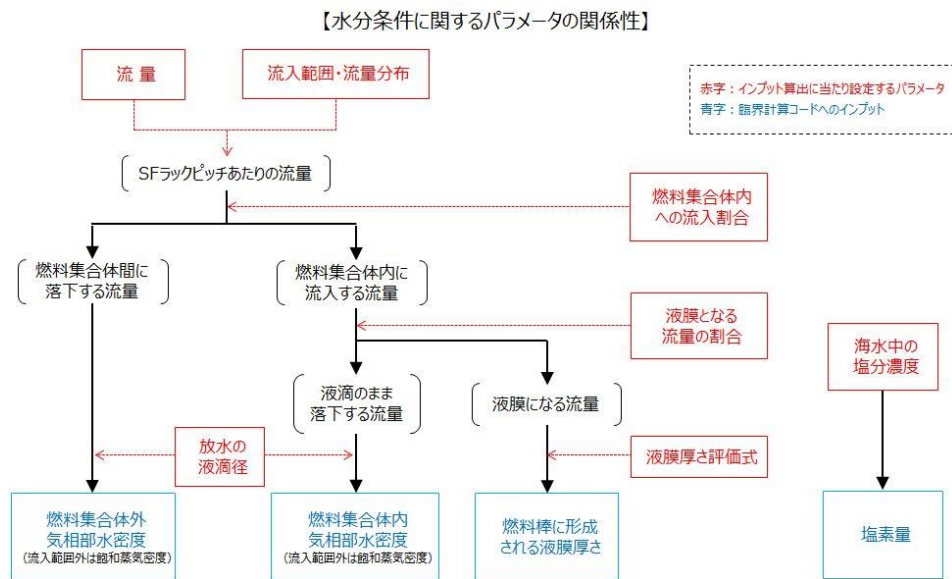
- ・ [ラックピッチ当たりの流量] から、 [燃料集合体内に流入する流量] を減じることで、燃料集合体間を落下する流量を求める。
- ・ 落下する「液滴の径」より求まる液滴の下降速度、及び液滴流量等を用い燃料集合体外気相部水密度を求める。

### IV. 流入範囲外気相部水密度

- ・ 流入範囲外には設備由来の水は流入しないことから、飽和蒸気 (100°C、1atmの飽和蒸気密度0.0006g/cm<sup>3</sup>) とする。



第1-6図 SCALE Ver. 6.0へインプットする気相部水分条件の概要



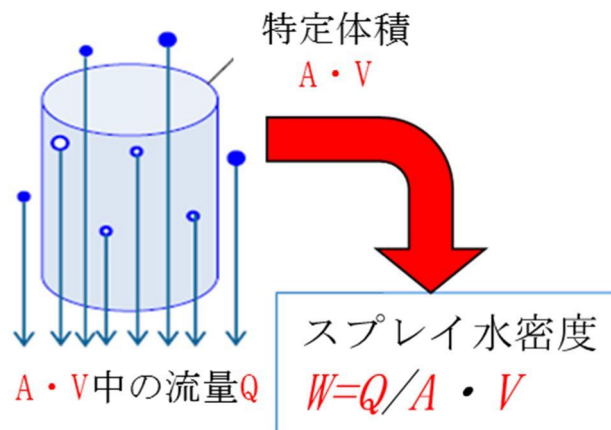
第1-7図 インプット条件とインプット条件算出に当たり設定するパラメータの関係 (水分条件)

## 5. 気相部水分条件の計算方法

インプット条件のうち液膜厚さについては、燃料集合体内に流入する水の流量のうち、液膜となって流下する流量から算定し、また、各箇所を設定する気相部水密度は、単位面積当たりに流入する液滴の流量及び流入液滴の径より求まる液滴平均下降速度より算出する。ここでは、気相部水密度及び液膜厚さの算出方法を示す。

### 5.1 気相部水密度の算出方法

気相部水密度は、SFPへ流入する液滴が空間を占める割合として算出する。断面積 $A[\text{cm}^2]$ 当たりの流入流量を $Q[\text{cm}^3/\text{s}]$ とし、液滴の平均下降速度を $V[\text{cm}/\text{s}]$ とする場合、単位時間に断面積 $A[\text{cm}^2]$ を通過する液滴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、水密度 $W$ は、 $Q/(A \cdot V)[\text{g}/\text{cm}^3]$ となる。空間体積 $A \cdot V[\text{cm}^3]$ 当たりの流量 $Q[\text{cm}^3]$ の存在率を示す概要図を第1-8図に示す。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、事故時にSFPへ注水・放水を行うため使用する設備のうち、流入液滴の径が一番小さくなるスプレー設備を用いた試験により液滴データを取得した。試験の概要を別紙3に、液滴径を用いた液滴下降速度の算出方法を別紙4に示す。



第1-8図 空間体積 $A \cdot V[\text{cm}^3]$ 中当たりの流量 $Q$ の存在率を示す概要図

また、重大事故等時のSFPにおける実際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、SFP内の上昇流、蒸気の凝縮、飽和蒸気を考慮する。



## 5.2 液膜厚さの算出方法

燃料集合体の上部より流入してくる液滴は、ほとんどが上部ノズル等と接触し、燃料棒等の構造物を伝って流下する。流入水が燃料棒に対して均一な液膜を形成するとした場合、その厚さは流下流量や構造物表面の摩擦によるせん断力の影響を受けることとなり、これら諸元により液膜厚さを求める評価式として種々の実験式が提唱されている。提唱されている液膜厚さ評価式の例を第1-1表に示す。

第1-1表 液膜厚さ評価式の例 (実験式)

基本式	式の種類	A	B
$N_T = A(4Re)^B$	Nusselt	0.909	1/3
	Kapitza	0.843	1/3
	brotz	0.0682	2/3
	Zhivaikin	0.141	7/12
	Brouer	0.208	8/15
	Feind	0.266	1/2

$N_T$ ,  $Re$ はそれぞれ無次元液膜厚さ[-]、液膜レイノルズ数[-]であり、以下の式で表される。

$$N_T = (g/\nu^2)^{1/3} \bar{b} \quad , \quad Re = \Gamma/\nu$$

ここで、 $g$ は重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $\Gamma$ は単位幅当たり液膜流量[m<sup>2</sup>/s]、 $\nu$ は流体の動粘度[m<sup>2</sup>/s]である。

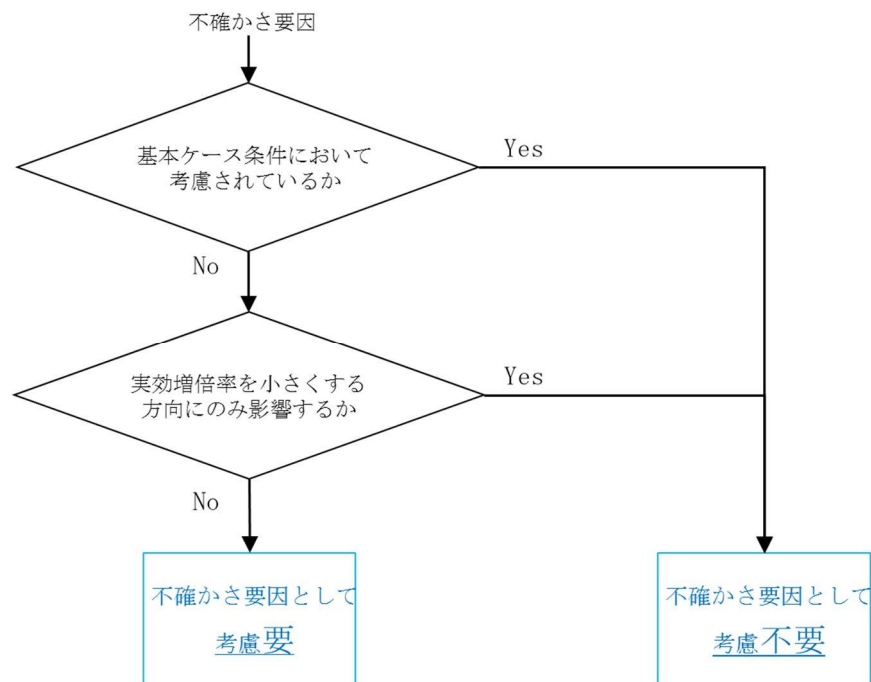
燃料集合体内に流入する流量より液膜レイノルズ数を求めたうえで、適切な評価式を用い無次元厚さを求め、最終的に平均液膜厚さを求める。

## 6. 基本ケース条件の設定方針

基本ケース条件を設定するに当たっては、設計値等の現実的な条件を基本としつつ、原則、実効増倍率に対して余裕が小さくなるような設定とする。

## 7. 基本ケース条件に対する不確かさ要因の考慮要否判定

基本ケース条件は種々の不確かさ要因に影響を受け、その値が変化する。今回の未臨界性評価においては、各パラメータの値を変動させる不確かさ要因を抽出したうえで、第1-9図に示すフロー図に基づき、不確かさ要因の考慮要否を判定する。



第1-9図 基本ケース条件に対する不確かさ要因の考慮要否判定フロー

## 8. 各パラメータの基本ケース条件及び不確かさを考慮した条件の設定

解析の条件設定については、設計値等の現実的な条件を基本としつつ、原則、実効増倍率に対して余裕が小さくなるような設定とする。また、解析条件の不確かさ影響を考慮する必要がある場合には、影響評価において感度解析を行う。

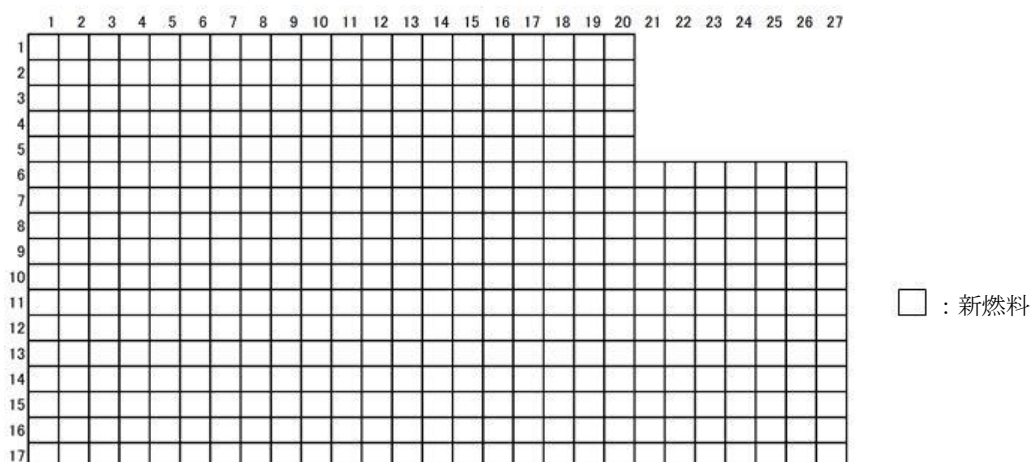
### 8.1 燃料条件の設定

#### 8.1.1 「燃料配置」の設定

##### (a) 基本ケース条件の設定

実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、濃縮度が最も高い取替燃料が新燃料としてすべてのラックに貯蔵された状態を設定する。

当該燃料配置条件を第1-10図に、実運用下と基本ケース条件での燃料貯蔵体数の比較を第1-2表に示すが、実運用に対して基本ケース条件が十分に保守的であることが分かる。



第1-10図 「燃料配置」 基本ケース条件

第1-2表 燃料集合体の貯蔵体数比較 (3ループ55GWd/t平衡炉心での運用を仮定)

燃焼度 (BU) 区分 (GWd/t)	BU<10	10 ≤ BU<20	20 ≤ BU<25	25 ≤ BU<30	30 ≤ BU<40	40 ≤ BU	計
実運用下 (ラック 満杯想定) ※	44体	44体	8体	20体	24体	17+267体	424体
	炉心に装荷する 157 体						
基本ケース 条件	424体	0体	0体	0体	0体	0体	424体

※貯蔵される燃料集合体は、1炉心分の取り出し燃料157体（燃焼度別体数は55GWd/t燃料平衡炉心ベース）と使用済燃料267体とした。

(b) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「燃料配置」に対する不確かさ、及び当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下のとおり記載する。

(i) 貯蔵燃料燃焼度の多様性

基本ケースでは新燃料のみを貯蔵する仮定としているが、実運用においては0～55GWd/tの種々の燃焼度である燃料が貯蔵される。燃焼の進んだ燃料は新燃料と比較し、核分裂性物質の減損等により反応度が低下する。よって当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

(ii) 燃料貯蔵体数

基本ケースではすべてのラックに燃料が貯蔵されることを仮定しているが、実運用における燃料貯蔵体数はラック容量以下となる。燃料貯蔵体数が減ると、体系内に存在する核分裂性物質の量が減ることとなる。よって当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因はすべて、基本ケース条件に対し実効増倍率を低下させる方向にのみ影響するものであるため、不確かさを考慮した条件の設定は不要である。

## 8.2 水分条件の設定

### 8.2.1 「流量」の設定

(a) 基本ケース条件の設定

放水設備による放水は、注水設備によってSFPの水位が維持できない場合に実施する想定としていることから、整備している注水手順をすべて同時に実施している状況は現実的な条件と捉えることができ、各手順で使用する設備及びそれらの仕様を用いることにより手順ごとの流量を求めることが出来る。よって「流量」については以下の条件に基づき算出した現実的な条件となるよう、  m<sup>3</sup>/hを設定する。

- ・重大事故等対策用に整備しているSFPへの注水・放水に係る手順をすべて同時に実施すると想定する。
- ・系統内に複数のポンプが存在する場合、ポンプ起動台数は1手順につき1台とする。
- ・各手順の流量には、基本的にポンプ揚程曲線を用い系統圧損等を踏まえ評価した値（実測値があるものは実測値）を使用する。

なお、流量設定の詳細は別紙2に示す。

(b) 不確かさ要因の抽出

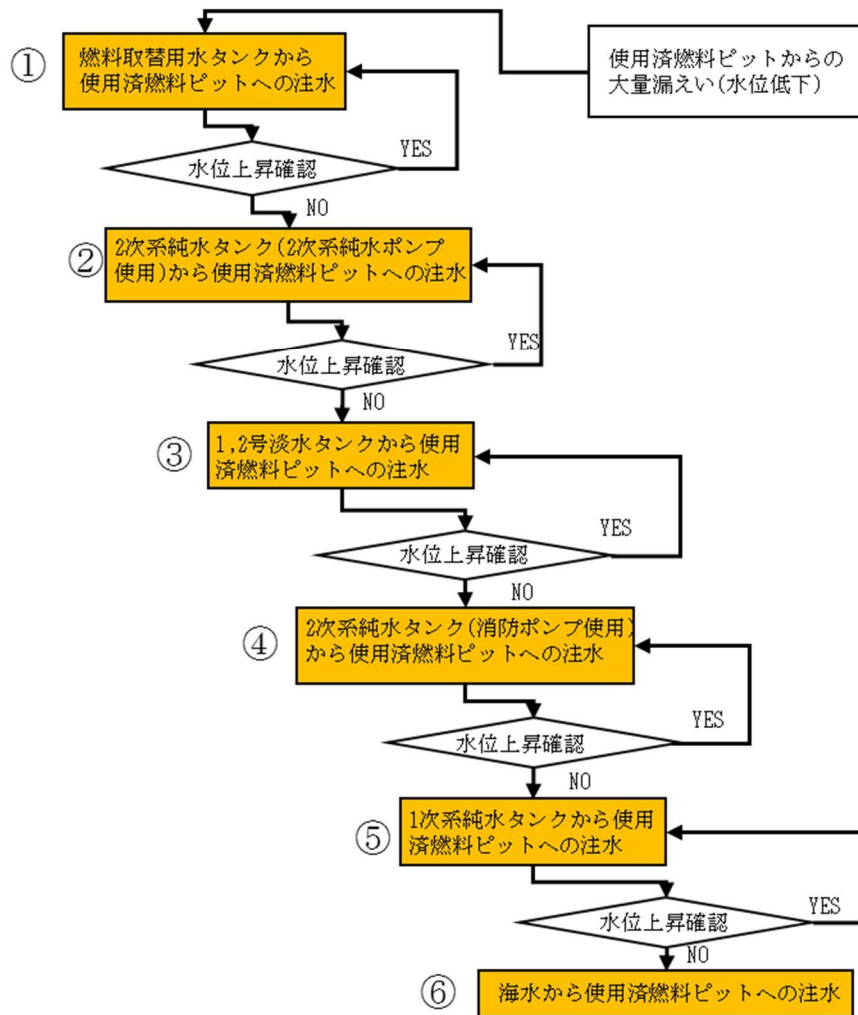
パラメータ「流量」に対する不確かさ、及び当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下のとおり記載する。

(i) 注水・放水手段の組み合わせ

基本ケース条件では重大事故等対策用に整備しているSFPへの注水・放水に係る手順をすべて同時に実施するとして値を設定している。実際の重大事故等時においては、第1-11図のフローに基づき各手順の対応を実施することとなり、重大事故等時

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

の状況によっては使用できない手順も発生しうるため注水・放水手段の組み合わせは変化するが、この場合SFPへの流入流量は、すべての手順を同時に実施するとした基本ケース条件よりも小さくなる。流量が小さくなると、体系内に流入する減速材として寄与する水の量が減ることとなるため、当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。



第1-11図 SFPへの注水に係る手順の実施フロー

(ii) 1手順当たりのポンプ台数

基本ケース条件ではポンプ起動台数を1手順につき1台としている。手順どおりに対応を実施した場合、ポンプ起動台数は1台となるものの、運転ポンプを切替える際には一時的に系統内に設置されるポンプ複数台分の流量が吐出される可能性がある。

ポンプの起動台数が増えると当該手順における流量が増加することになるため、当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を増加させる方向へ影響する。

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因のうち、実効増倍率を増加させる方向へ影響する不確かさである「1手順当たりのポンプ台数」を考慮した条件として、 m<sup>3</sup>/hを設定する。なお、流量設定の詳細は別紙2に示す。

8.2.2 「流入範囲・流量分布」の設定

(a) 基本ケース条件の設定

注水設備由来の流入水については手順ごとでSFPへの流入位置が異なるため流入範囲、流量分布を求め難いが、流量の大部分を占める放水設備由来の流入水については、使用時の流量や設備仕様より流入範囲・流量分布を類推することが可能である。よって「流入範囲・流量分布」の基本ケース条件については、現実的な条件となるよう、放水設備由来の流入形態をベースに、全流量がラック面積に対し一様に流入する（流入範囲はSFP全面、流量分布は全流量をSFラック面積で割った値を用いる）として設定する。本条件は以下のとおり、単独の放水設備による放水時の流入範囲・流量分布を上回る条件設定となっている。

<放水砲>

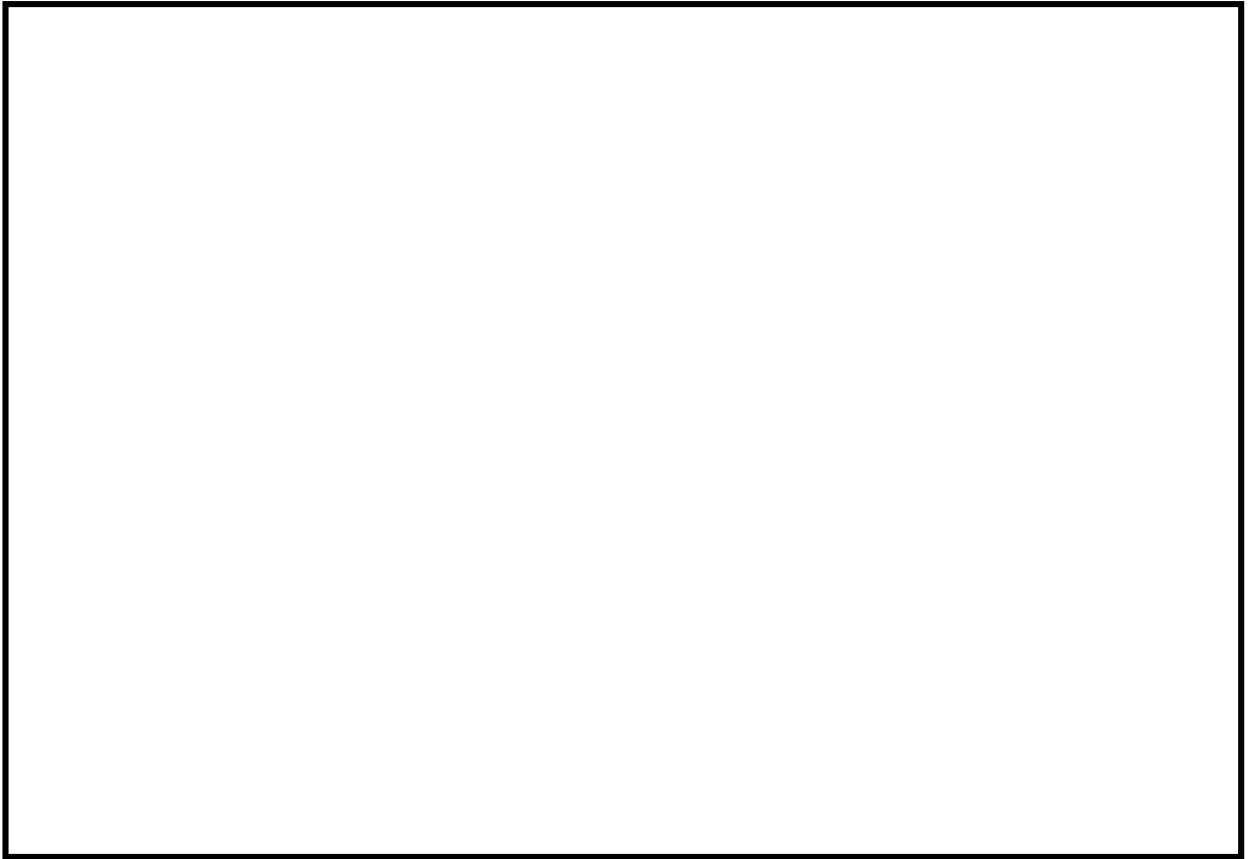
着水範囲に関する条件は放水砲メーカー作成の性能曲線を設定したうえで、着水範囲内の流量分布は文献（石油タンク火災消火時における大容量放水及び泡放射軌跡の予測モデルの構築、宮下達也（2014））を参考に、放水方向（射程方向）にはRosin-Rammer分布を、放水の直交方向（射幅方向）には正規分布を用いて規格化した。得られた流量分布を第1-12図に示すが、ピーク流量（単位面積当たり）は以下のとおり約 m<sup>3</sup>/(h・m<sup>2</sup>)であった。

$$\text{ m}^3/\text{h} \times 0.25 \times 0.30 \div 16\text{m}^2 = \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$$

一方で、燃料貯蔵設備であるSFラックは放水砲による流入範囲よりも小さく、全流量がSFラック上へ一様に流入すると想定した場合の流量（単位面積当たり）は、以下のとおり約11m<sup>3</sup>/(h・m<sup>2</sup>)であり、放水時の流量分布におけるピーク流量を上回る。

$$\text{ m}^3/\text{h} \div (\text{ m} \times \text{ m} \times 424) \div 11\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$$

**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。**

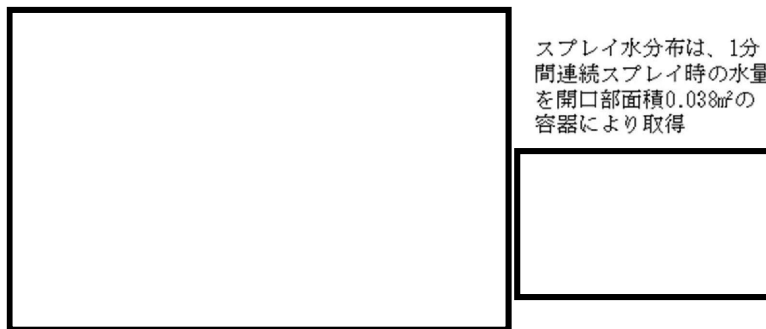


第1-12図 放水砲による流量分布

<スプレイヘッダ>

第1-13図に示すメーカー試験結果を元に、「300cc以上」を「500cc」と大きく仮定すると、ピーク流量は以下のとおり $0.79\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ と求まる。

$$500\text{cm}^3/\text{min} \times 60 \times 10^{-6} \div 0.038\text{m}^2 = 0.79\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$$



第1-13図 スプレイヘッダによる放水分布 メーカー試験結果

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。

一方で、全流量がSFラック上へ一様に流入すると想定した場合の流量（単位面積当たり）は以下のとおり $0.88\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ と求まり、放水時の流量分布におけるピーク流量を上回る。

$$\square \text{ m}^3/\text{h}^* \div (\square \text{ m} \times \square \text{ m} \times 424) = 0.88\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$$

※ 流量には定格値を使用

(b) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「流入範囲・流量分布」に対する不確かさ要因、及び当該不確かさ要因が実効増倍率へ与える影響の方向について以下のとおり記載する。

(i) 注水・放水手段の組み合わせ、及び1手順当たりのポンプ台数

放水時の着水面積については、設備からの吐出流量により変動することになる。よってパラメータ「流量」の不確かさ要因である、注水・放水手段の組み合わせ、及び1手順当たりのポンプ台数が、「流入範囲・流量分布」に対する不確かさ要因となる。

設備からの吐出流量が増加する場合、吐出された水の着水面積（流入範囲）は広がることとなり、すなわちSFラック内に流入しない流量が増えることとなる。従って本不確かさ要因は、流入範囲を広範囲化し体系内の水分量が少なくなる方向、すなわち実効増倍率を低下させる方向にのみ発生する。

(ii) 放水分布のばらつき

実機放水砲による放水は、第1-12図に示すような流量分布を有するため、SFラックごとに単位面積当たりの流量が異なることになるが、基本ケース条件としては実態に則した流量分布に基づくピーク流量を包含するような条件として、放水砲による全流量がSFラック上に一様に流入したとして、放水砲流量をSFラック面積で割った値を使用している。

よって分布のばらつきを考慮する場合、全ラックにおいて単位面積当たりの流入流量が低下することになるため、本不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

(iii) スプレイ分布のばらつき

実機スプレイヘッドによる放水は、第1-13図に示すような流量分布を有するため、SFラックごとに単位面積当たりの流量が異なることになるが、基本ケース条件としては実態に則した流量分布に基づくピーク流量を包含するような条件として、スプレイヘッドによる全流量がSFラック上に一様に流入するとし、スプレイ流量をSFラ

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。



ック面積で割った値を使用している。

よって分布のばらつきを考慮する場合、全ラックにおいて単位面積当たりの流入流量が低下することになるため、本不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

(iv) 風の影響①

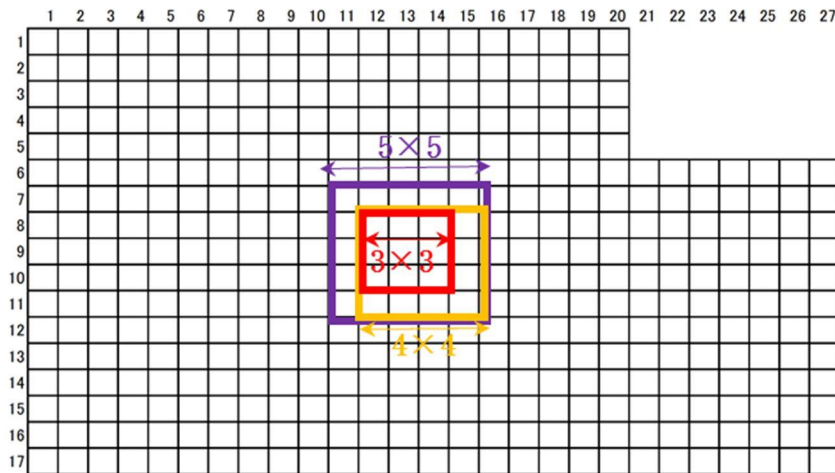
落下する液滴に対し風により力が加わり水平方向の移動が促進されることで、流入範囲・流量分布は影響を受けることとなり、風向きや放水方向によっては放水範囲は狭まりうる。風向きや放水方向等による組み合わせは無数にあることから、風の影響により流入範囲がどこまで狭まるかは定め難い。

流入範囲が狭まることにより、放水範囲内に含まれる燃料集合体の数(ウラン量)が減ることで実効増倍率が低下する効果と、燃料集合体1体当たりに入流する水量(減速材)が増え実効増倍率が増加する効果を持つ。よって当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を増加させる方向に影響しうる。

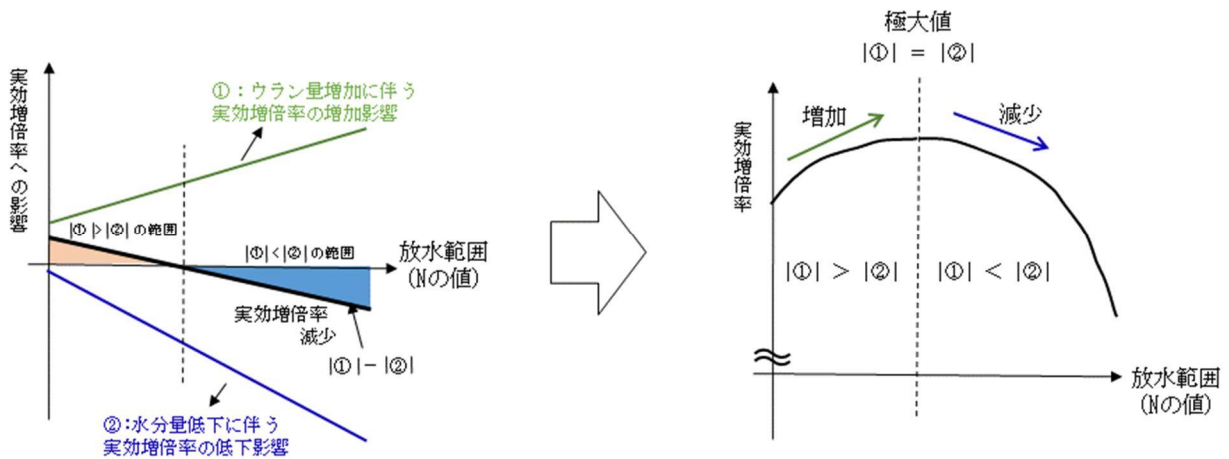
(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因のうち、実効増倍率を増加させる方向へ影響しうる不確かさである「風の影響①」を考慮した条件として、全流量がSFPの局所領域に集中するとした条件を設定する。

実効増倍率を高くするため、局所領域はSFP中心部に設定する。また、(b)に示すように、流入範囲の変化は実効増倍率を増加あるいは低下させる、相反する効果を持つことから、局所領域がどの程度の広がりを持った場合に実効増倍率が最大になるかを確認するため、第1-14図に示すとおり、水が集中する範囲(N×N)を順次広げていき、局所範囲外の気相部水密度は飽和蒸気密度として解析を行う。放水範囲の変化に伴う実効増倍率挙動の概念図を第1-15図に示す。



第1-14図 局所領域の設定

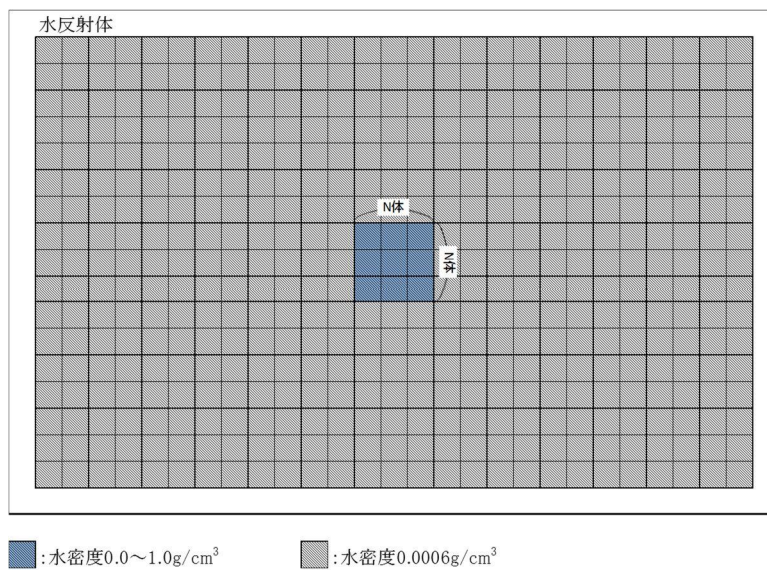


第1-15図 放水範囲 (Nの値) の変化に伴う実効増倍率挙動 概念図

ここで、体系が臨界となるにはある一定量以上のウラン量が必要となることを踏まえ、Nの値としては、いかなる一様な水密度でも臨界にならない<sup>\*</sup>ことを確認している。N=3から増やしていき、実効増倍率の低下傾向が把握できるまで解析を行う。

※高浜1、2号機のラック仕様で新燃料を敷き詰めた体系において、N×Nラック内の水密度を一様に0~1g/cm<sup>3</sup>で変化させて実効増倍率を求め、製造公差や計算コード等の不確実性を考慮しても未臨界の判断基準を超えない範囲を確認した。解析体系を第1-16図に、評価条件を第1-3表に示す。

評価の結果、第1-4表に示すとおり、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を確認した。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(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である。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。



第1-16図 未臨界の判断基準を超えない範囲を確認する解析の評価体系

第1-3表 未臨界の判断基準を超えない範囲を確認する解析の条件

	計算条件
燃料仕様・配置	55GWd/t燃料(新燃料)
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
N×Nラック内水密度	0.0~1.0g/cm <sup>3</sup> で一様変化
N×Nラック外水密度	0.0006g/cm <sup>3</sup>
垂直方向 計算体系	燃料領域: 3,660mm 燃料上部: 水反射体(300mm) 燃料下部: コンクリート反射体(1,000mm)

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

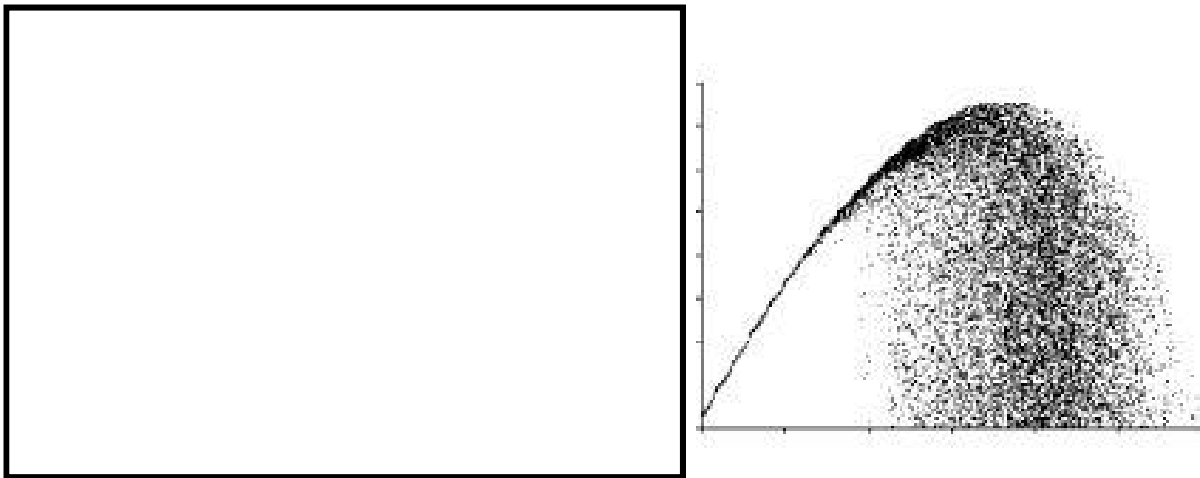
第1-4表 ある狭い範囲を求めるための解析結果

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

### 8.2.3 「燃料集合体内への流入割合」の設定

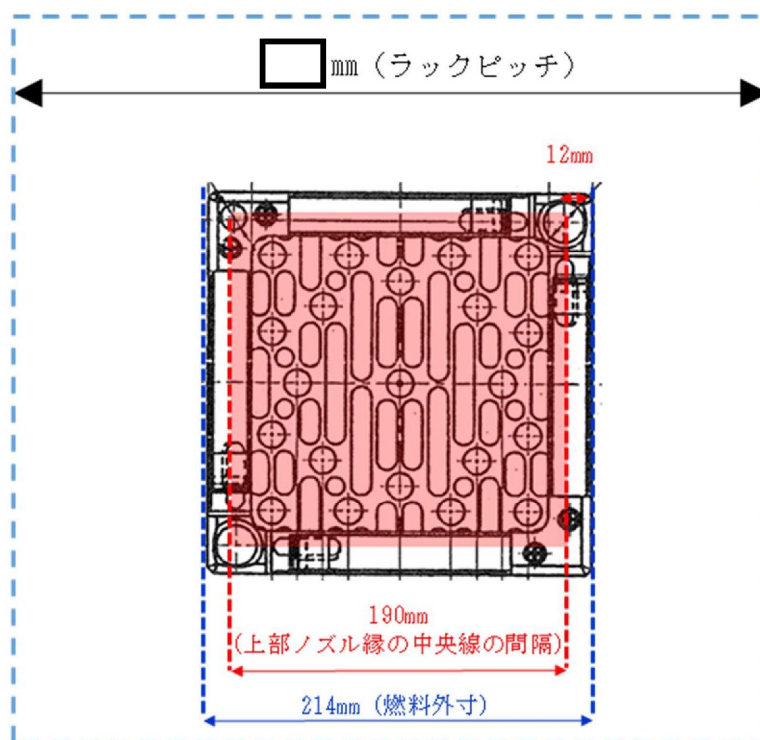
#### (a) 基本ケース条件の設定

第1-17図に示す放水砲の放水軌跡（無風時）より、放水された水はSFPにほぼ垂直に流入すると想定できる。この場合、SFP内に流入した水量のうち燃料集合体内に流入する水量の割合は、ラックピッチと燃料集合体の幾何形状により現実的な値を求めることができる。なお、第1-18図に示すとおり、上部ノズル縁を真上から見た場合、燃料棒に通じる流路孔がほぼないことから、上部ノズル縁寸法の半分より外側の部分に落下した水は燃料集合体外へ弾かれると想定される。よって本パラメータの基本ケース条件は、現実的な条件となるよう、ラックピッチ面積に対する赤色部面積の比として、 $190 \times 190 \div (\square \times \square) \doteq 23\%$ と設定する。



第1-17図 放水砲の放水軌跡（無風時）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第1-18図 燃料集合体に流入する流量割合 (イメージ)

(b) 不確かさ要因の抽出

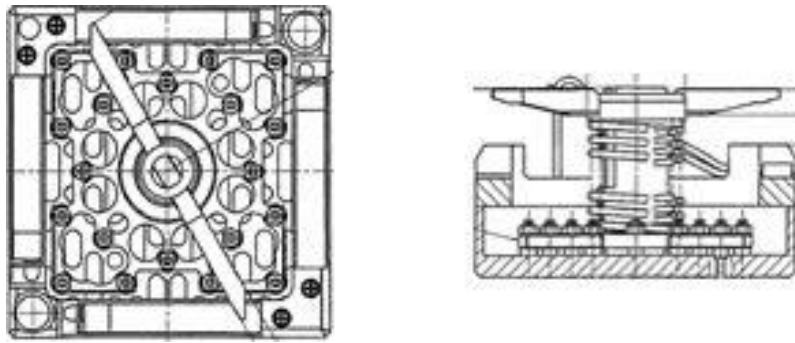
パラメータ「燃料集合体内への流入割合」に対する不確かさ、及び当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下のとおり記載する。

(i) 内挿物の存在

実機では、第1-19図に示すようにSFPに貯蔵されている燃料の多くに内挿物が挿入されている。挿入された内挿物は燃料集合体の一部を覆うことから、内挿物が挿入されている場合、内挿物により燃料集合体外へ弾かれる流量が多くなる。燃料集合体外へ弾かれる流量が多くなるということは、燃料棒からのせん断力の作用を受けず落下する流量が増え、体系内に保持される水分が減ることとなるため、実効増倍率は低下する。

基本ケース条件は、内挿物の存在を考慮せず設定した条件であるため、当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

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1-19図 内挿物（プラグインデバイス）が挿入された燃料集合体の上面

(ii) 風の影響②

基本ケース条件としては無風時の放水軌跡を踏まえ液滴が垂直に落下する設定としたが、風の影響を受けることで水平方向の力が働き、燃料集合体に斜め方向から液滴が流入することが想定される。この場合、燃料集合体内に流入する水量が増える、すなわち燃料棒からのせん断力の作用を受ける水量が増え、体系中に保持される水分が増えることとなるため、当該不確かさは基本ケース条件に対し実効増倍率を増加させる方向に働く。

なお、パラメータ「流入範囲・流量分布」の不確かさ要因としても風の影響があるが、流入範囲を局所化する風が吹く場合、流量が集中して落下することになるため、斜め方向で液滴が落下することは考え難い。また、液滴を斜め方向から落下させるような風が吹く場合、放水範囲をより広げることになるため流量が局所化することは考え難い。よって「流入範囲を狭める風の影響」（風の影響①）と「流入範囲を広げる風の影響」（風の影響②）は、別々の不確かさ要因として取り扱う。

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因のうち、実効増倍率を増加させる方向へ影響する不確かさである「風の影響②」を考慮した条件として、斜め方向から液滴が流入してくることを想定し、以下のとおり燃料集合体の幾何形状及び放水の流入方向等を踏まえ46%とする。

- ・ ラックに対する流入方向を、流入割合への影響が最大となるように45°とした場合、SFラックの構造を踏まえた液滴流入面積は、第1-20図に示す黄色部面積で表され、ラックピッチ面積に対する液滴流入面積の比は下式のとおり45.2%となる。

流入方向45° の場合の液滴流入面積 ⇒

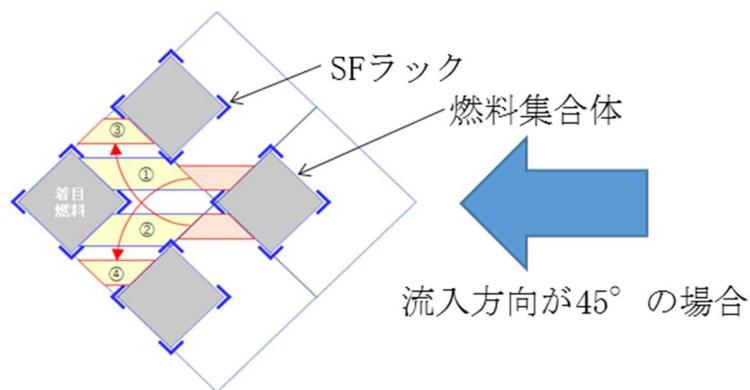
$$\left( \boxed{\phantom{000}} \text{ mm}^2 \right) \div \left( \boxed{\phantom{00}} \text{ mm} \times \boxed{\phantom{00}} \text{ mm} \right) \times 100 \doteq 45.2\%$$

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。

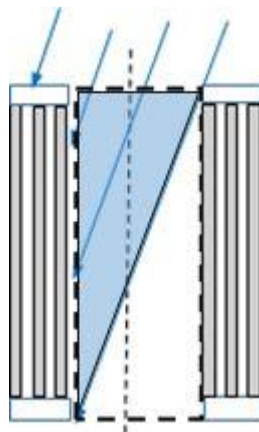
- また、斜めに落下してくるという液滴の流入形態を踏まえれば、流入割合への影響は第1-21図に示すように、面積に高さを乗じた体積の半分と見積もることができる。よって横風により斜めから液滴が流入してくる影響は、下式のとおり約23%となる。

$$\text{横風による流入割合への影響} \Rightarrow 45.2\% \div 2 = 22.6\% \Rightarrow 23\%$$

- よって不確かさを考慮した「燃料集合体内への流入割合」として、基本ケース条件である23%に、横風の影響として23%を加算した値である46%を設定する。



第1-20図 流入方向45°における液滴流入面積



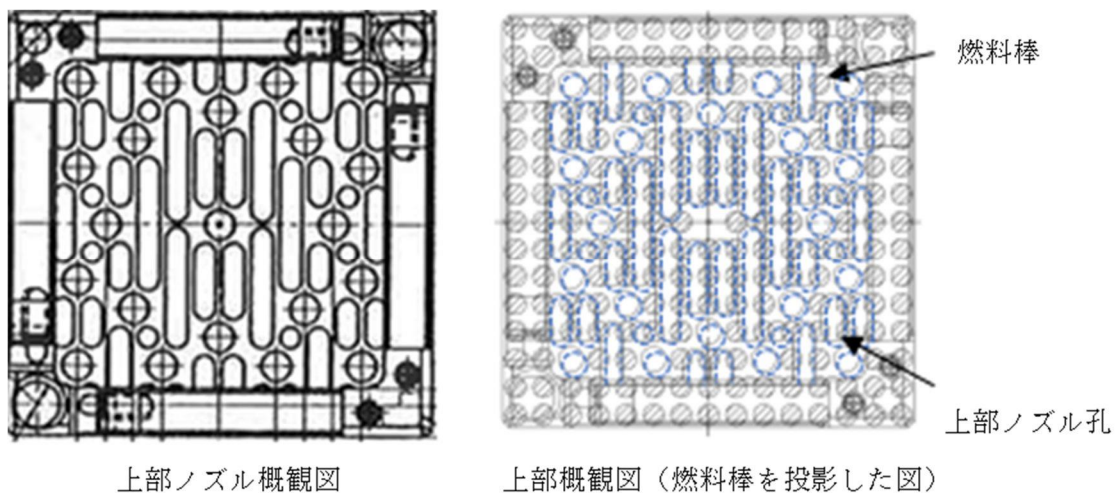
第1-21図 流入形態を踏まえた流入割合影響

## 8.2.4 「液膜となる流量の割合」の設定

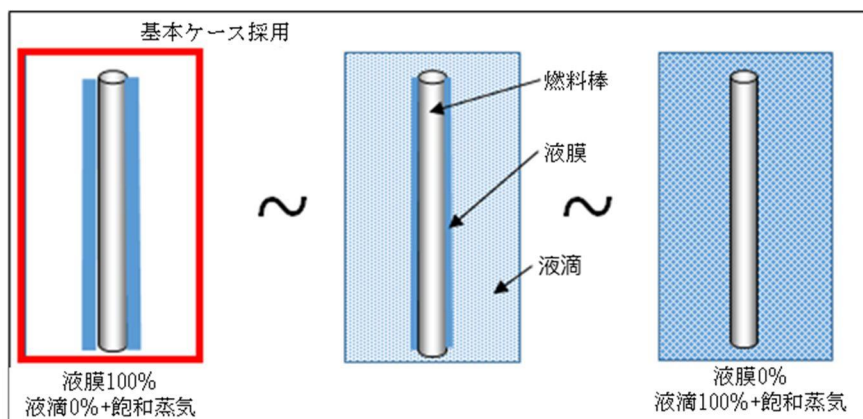
### (a) 基本ケース条件の設定

第1-22図に示すとおり燃料集合体内への主要な流路となる上部ノズルの構造は複雑であり、大部分の液滴は構造物に接触し、構造物表面を流下すると考えられるものの、燃料集合体内への流入水の内部流動を現実的に設定することは困難である。一方で、参考を示すように、燃料集合体に流入するすべての水が液膜となり、燃料棒全周に液膜を形成すると想定したほうが、燃料棒から作用するせん断力の合計値が大きくなって体系中に保持される水分量が多くなり、実効増倍率が厳しくなる。

よって内部挙動に関する本パラメータの基本ケース条件は、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう、100% (燃料集合体内に流入する水はすべて液膜となる) とする。液滴と液膜の流量割合に関するイメージを第1-23図に示す。



第1-22図 燃料集合体上部の概観図



第1-23図 液膜と液滴の割合 (イメージ図)



(b) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「液膜となる流量の割合」に対する不確かさ、及び当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下のとおり記載する。

(i) 一部の流量が液滴として落下

第1-22図に示す上部ノズル開口部の一部には、構造物に遮られず燃料集合体下端まで通ずる開口部があることから、燃料集合体内に流入する水の一部は液滴のまま落下すると考えられる。液滴のまま落下する流量が増えると、燃料棒からのせん断力の作用を受けず落下する流量が増え、体系内に保持される水分が減ることとなるため、実効増倍率は低下する。

基本ケース条件は、燃料集合体内に流入した水がすべて液膜になるとする条件であるため、当該不確かさは基本ケース条件に対し、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因は、基本ケース条件に対し実効増倍率を低下させる方向にのみ影響するものであるため、不確かさを考慮した条件の設定は不要である。

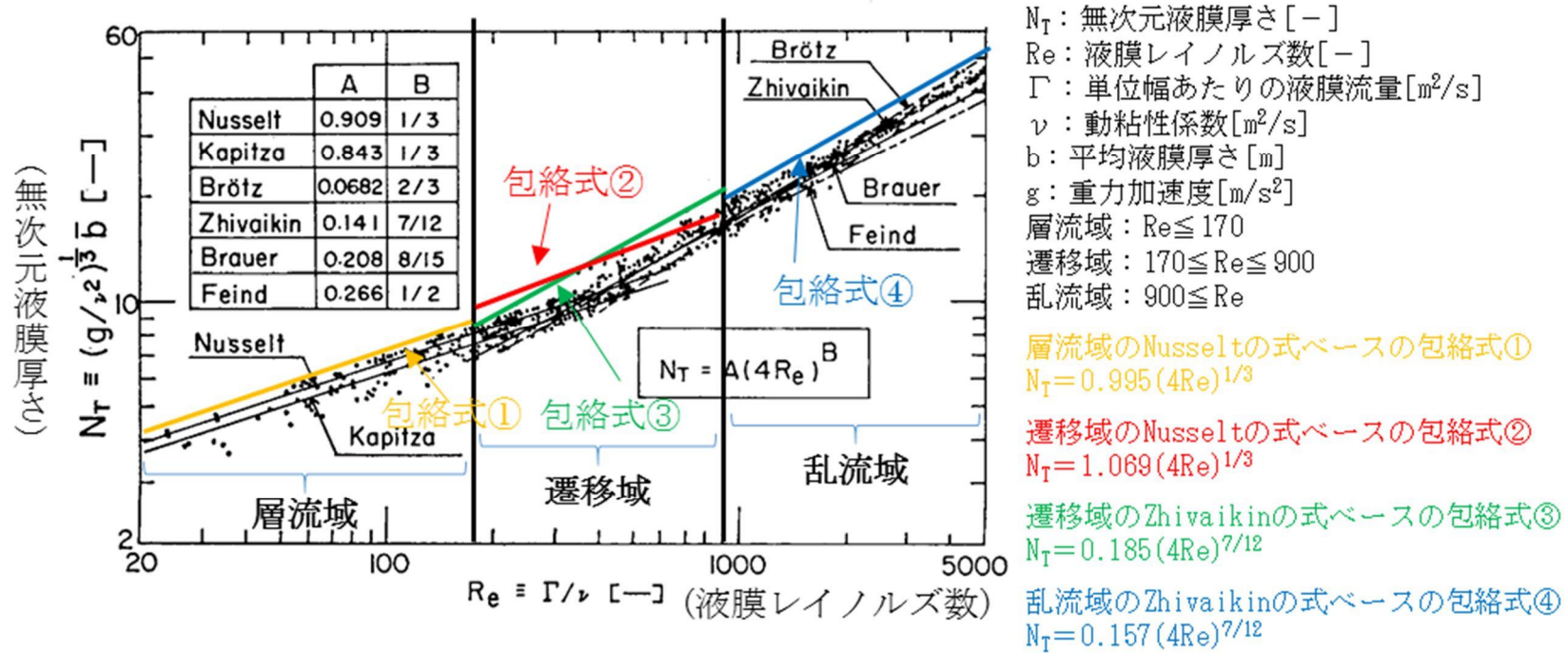
## 8.2.5 「液膜厚さ評価式」の設定

### (a) 基本ケース条件の設定

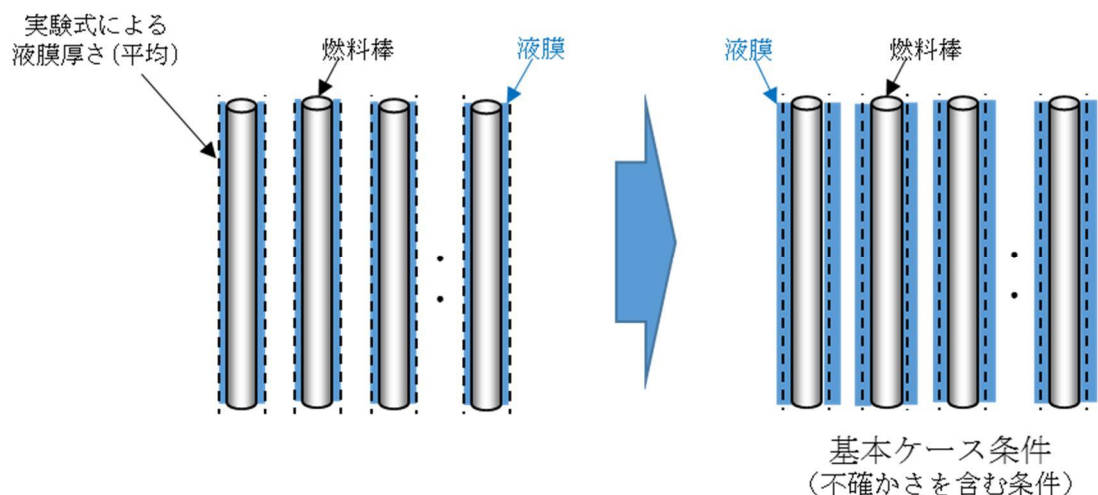
燃料集合体を真上から見たとき、第1-22図のとおり燃料集合体下端までの経路はほとんど、上部ノズルや燃料棒等の構造物に遮られていることから、大部分の液滴は構造物に付着してまとまり、燃料棒を含む構造物表面を筋状に流下すると考えられる。しかし、筋状流下のような流動現象は非線形な挙動を示すため複雑であり、内部流動を現実的に設定することは困難である。よって内部流動に関する本パラメータの基本ケース条件は、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう設定する。流下形態としては、筋状流下時よりも燃料棒から作用するせん断力の合計値が大きくなる状態として液膜流下を想定し、液膜厚さの評価式としては第1-1表に示すとおり種々の実験式が提示されているが、液膜が厚くなり燃料集合体内の水分量が多いほど実効増倍率が高くなるため、基本ケース条件の設定に当たっては第1-24図に示すように、文献※に記載の実験データの全計測値を包含する評価式（包絡式）を設定する。具体的には、代表的な実験式であるNusseltの式及びZhivaikinの式の傾き（第1-24図のBの値）を保存し、各領域内の最も大きい計測値を通る線を包絡式とする。

各計測値にはばらつきがあるが、本包絡式はそれらをカバーするよう設定されているため、実験データに着目した場合、液膜評価の上限として扱うことが出来る。加えて、本包絡式を全燃料棒に適用することで、更に大幅な保守性を考慮する。本条件設定のイメージを第1-25図に示す。

※新垣勉他、垂直流下液膜における流動および波動特性、(1985)、化学工学論文集



第1-24図 包絡式の設定



第1-25図 液膜厚さ評価式の条件設定 (イメージ)

(b) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「液膜厚さの評価式」に対する不確かさ、及び当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下のとおり記載する。

(i) 風の影響②

包絡式のベースとなっている実験式は、静的な実験室環境下で取得された実験データより策定されたものであるが、実機の状態を踏まえた場合、風の影響により液滴に水平方向の力が作用することにより、斜めから液滴が流入してくる状況が想定される。この場合、燃料棒表面に存在する液膜界面に波立ちが発生する、あるいは液滴が液膜を弾き飛ばす等の外乱が発生することとなるが、これらは液膜を薄くする方向に作用する。液膜厚さの低下は減速材として大きく寄与する水量が減り実効増倍率が低下することとなるので、当該不確かさは基本ケース条件に対し実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

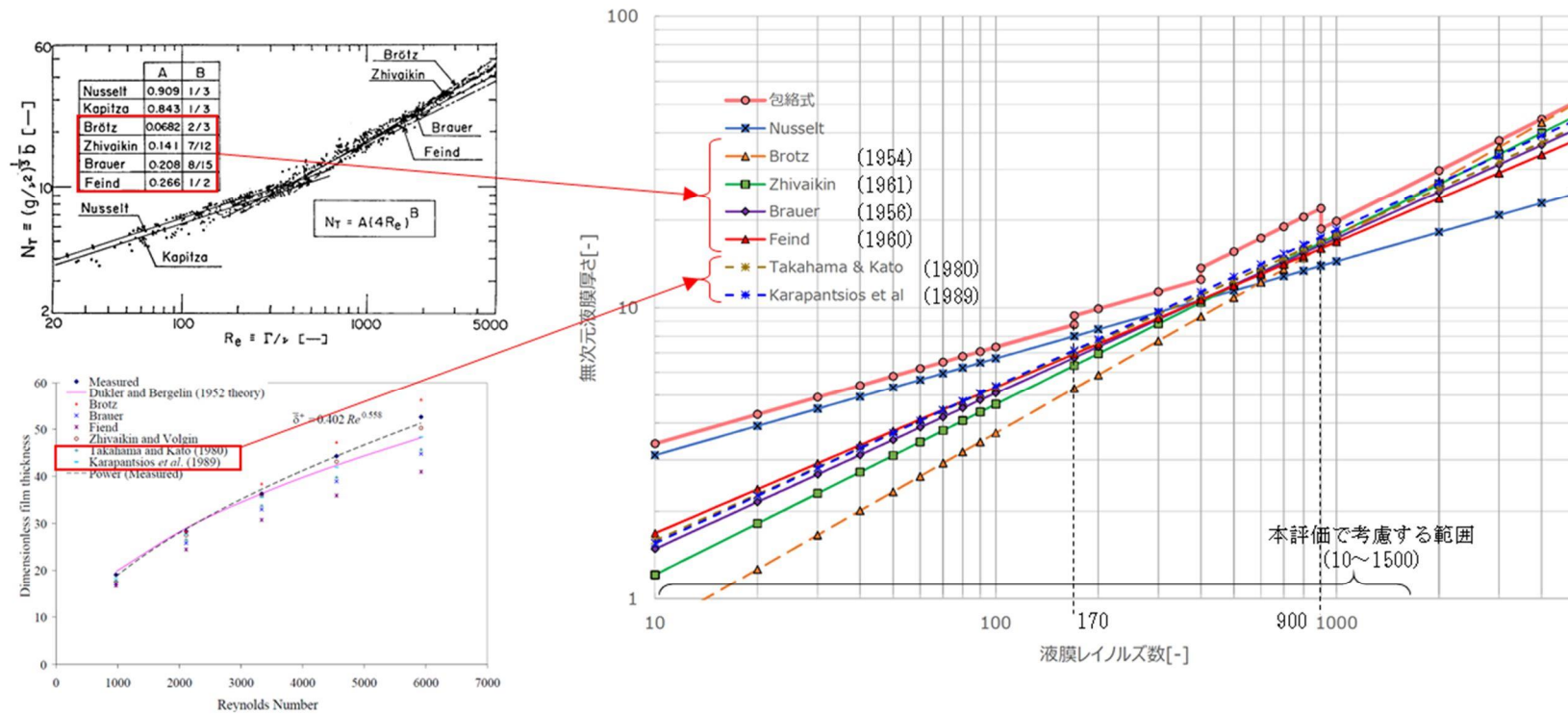
(ii) 多種ある実験式の存在

包絡式の設定に当たっては、代表的な実験式であるNusseltの式及びZhivaikinの式をベースに設定したが、これら実験式が策定されて以降も種々の実験式が設定されている。実験式ごとの液膜厚さの大小は液膜レイノルズ数に応じ異なるが、第1-5表及び第1-26図に示すとおり、今回設定する包絡式は各解析における液膜レイノルズ数の範囲(10~1,500以下)において、比較的新しいTakahama and Kato及びKarapantsiosらの液膜算出式を包絡している。よって種々の実験式により液膜厚さを算出する場合、液膜厚さは包絡式を用いた場合よりも薄くなるため、本不確かさは基本ケースに対し実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

第1-5表 各解析ケースにおける液膜レイノルズ数

	流入流量[m <sup>3</sup> /h]	流入範囲[-]	流入割合[%]	液膜レイノルズ数[-]
基本ケース条件	<input type="text"/>	SFP全面（424ラック）	23	23
感度解析ケース①	<input type="text"/>	SFP全面（424ラック）	23	25
感度解析ケース②	<input type="text"/>	局所（3×3ラック～）	23	～1,074

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。



Anand Padmanaban, Film Thickness Measurements in Falling Annular Films  
(2006年)、University of Saskatchewan

第1-26図 液膜レイノルズ数に応じた各種算定式による液膜厚さ

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因は、基本ケース条件に対し実効増倍率を低下させる方向にのみ影響するものであるため、不確かさを考慮した条件の設定は不要である。

## 8.2.6 「放水の液滴径」の設定

(a) 基本ケース条件の設定

放水された水は液滴の状態となって落下するが、流量の大部分を占める放水砲由来の液滴径については、流量の小さいスプレイヘッド由来の液滴径よりは大きいと考えられるものの、その現実的な値を実験的に得ることは困難である。よって本パラメータの基本ケース条件は、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう設定する。

今回の未臨界性評価では重大事故等対策向けに整備している全手順の同時実施を想定しているため、放水中には、スプレイヘッドに由来する液滴と、放水砲等に由来する液滴が混在することとなる。放水砲等に由来する液滴径の最確値は定め難いものの、その値はスプレイヘッド由来の液滴の径よりも大きい。ここで、液滴径は小さい方が液滴の落下速度が低下し、体系内にとどまる水量が増え実効増倍率が増加することから、保守性を有した条件として、すべての液滴をスプレイヘッド由来の液滴であるとし、実機スプレイヘッドを用いた液滴径データ取得試験の結果を踏まえ、1.5mmを設定する。なお、液滴径データ取得試験の詳細、及び試験結果を踏まえた液滴径設定の詳細について別紙3に示す。

(b) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「放水の液滴径」に対する不確かさ、及び当該不確かさが実効増倍率へ与える影響の方向について以下のとおり記載する。

(i) 注水・放水手段の組み合わせ、1手順当たりのポンプ台数

設備からの吐出流量が変化することに伴い液滴径の大きさも変化する。よってパラメータ「流量」の不確かさ要因である、注水・放水手段の組み合わせ、及び1手順当たりのポンプ台数が、「放水砲の液滴径」に対する不確かさ要因となる。

流量が増加する場合には液滴径も大きくなるが、液滴径が大きくなると液滴の下降速度が大きくなり体系内に水分が保持されにくくなることで実効増倍率が低下する。よって流量を増加させる本不確かさは、基本ケースに対し実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

(ii) 放水設備の違い

放水設備として使用するスプレイヘッドと放水砲は、それぞれ使用時の条件や放

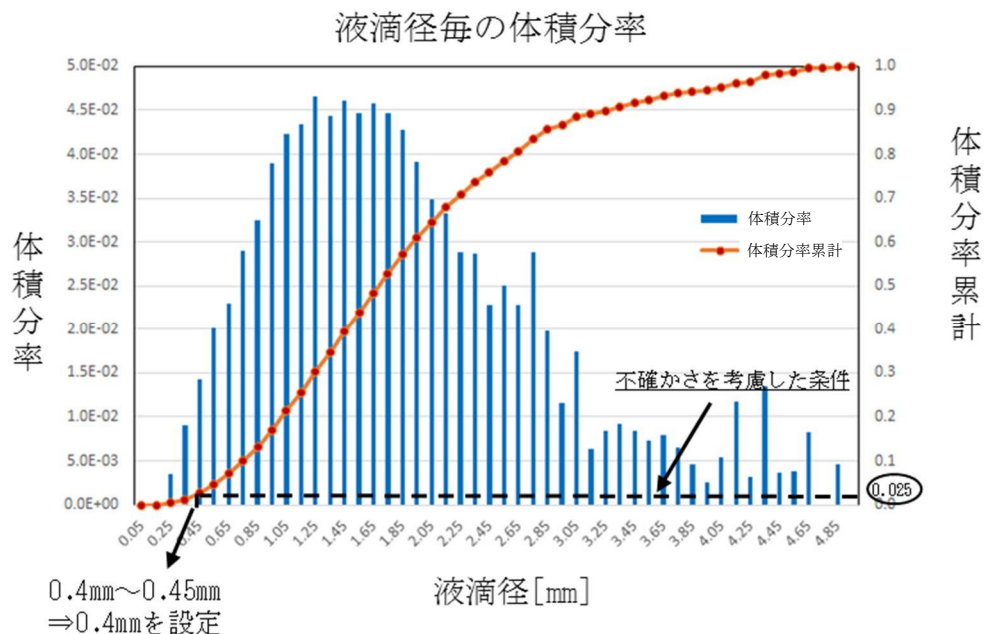
水機構が異なるため平均液滴径が異なる。基本ケース条件ではすべての液滴についてスプレーヘッド由来の液滴径を用いることとしているため、本不確かさは基本ケースに対し液滴径を大きくする方向、すなわち実効増倍率を低下させる方向に働く。

(iii) スプレー試験における測定箇所ごとの結果の差異

液滴データ取得試験の結果、別紙3に示すとおり測定位置によっては基本ケース条件よりも小さい平均液滴径が取得されている。液滴径が小さくなる場合、液滴の下降速度が小さくなり実効増倍率が大きくなることから、本不確かさは基本ケースに対し実効増倍率を増加させる方向にのみ影響する。

(c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因のうち、実効増倍率を増加させる方向へ発生しうる不確かさである「スプレー試験における測定箇所ごとの結果の差異」を考慮した条件として、第1-27図に示す、各測定点で取得された全測定データを合算し得られる液滴分布において、有意水準5%とする場合の下限基準値となる、全取得液滴を用いた体積分率における2.5%出現値（0.4mm～0.45mm）を保守側に切り下げた0.4mmとする。



第1-27図 全液滴径の統合データ



## 8.2.7 「海水中の塩素濃度」の設定

### (a) 基本ケース条件の設定

事故時に実施する放水・注水手順によっては海水を用いる手順があり、海水中には中性子吸収能力を有する塩素が含まれる。日本海域の塩素濃度は文献(岩波理化学辞典第5版 岩波書店、化学大辞典2共立出版)より3.3～3.8%とされているが、この範囲における高浜発電所の塩分濃度最確値は定め難い。

本パラメータの基本ケース条件は、実効増倍率に対して余裕が小さくなるよう保守的に、海水由来の流入水内に含まれる塩素の中性子吸収効果は考慮しない。なお、標準海水中塩分の塩類組成は第1-6表に示すとおりである。

第1-6表 海水の塩分濃度及び塩類組成

		文献値	基本ケース条件
海水の塩分濃度		3.3%～3.8%	—
海水（標準海水） の塩類組成	NaCl	77.758%	—
	MgCl <sub>2</sub>	10.878%	—
	MgSO <sub>4</sub>	4.737%	—
	CaSO <sub>4</sub>	3.600%	—
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.465%	—

### (b) 不確かさ要因の抽出

パラメータ「海水中の塩素濃度」に対する不確かさ要因、及び当該不確かさ要因が実効増倍率へ与える影響の方向について以下のとおり記載する。

#### (i) 海流の変化

日本海において300mより浅い部分の塩分濃度は、海流の影響により3.38%～3.43%（気象庁HPより）程度の範囲でばらつきが生じるとされている。

一方で、基本ケース条件は塩素の中性子吸収効果は考慮しないことから、本不確かさ要因は、実効増倍率を低下させる方向にのみ影響する。

### (c) 不確かさを考慮した条件について

不確かさ要因は、基本ケース条件に対し実効増倍率を低下させる方向にのみ影響す

るものであるため、不確かさを考慮した条件の設定は不要である。

9. 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果

8. で設定した基本ケース条件と不確かさの整理結果について第1-7表に示す。

第1-7表 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果 (1/3)

パラメータ		基本ケース条件		基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が厳しくなる方向	考慮要否
		具体的条件	条件の説明	不確かさが生じる要因	不確かさが生じる方向		
燃料条件	燃料配置	SFPは新燃料で満杯	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 燃焼条件及び燃料貯蔵体数を、実効増倍率を高めるよう、また将来の実配置を包絡するよう条件を設定</li> </ul>	貯蔵燃料燃焼度の違い 【基本ケース条件で考慮済み】	燃焼度が高い燃料が貯蔵される	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 燃焼度が低い燃料を貯蔵</li> <li>・ 貯蔵体数が増加</li> </ul>	不要
				燃料貯蔵体数 【基本ケース条件で考慮済み】	SFP満杯以下		不要

第1-7表 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果 (2/3)

パラメータ	基本ケース条件		基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が 厳しくなる方向	考慮 要否	
	具体的条件	条件の説明	不確かさが生じる要因	不確かさが生じる方向			
流量	□ m <sup>3</sup> /h	<ul style="list-style-type: none"> <li>・重大事故等対策用に整備している SFP への注水・放水に係る手順を、すべて同時に実施</li> <li>・1 手順につきポンプ 1 台起動</li> <li>・各手順の流量には、基本的にポンプ揚程曲線を用い系統圧損等を踏まえ評価した値（実測値があるものは実測値）を使用</li> </ul>	注水・放水手段の組合せ 【基本ケース条件で考慮済み】	流量低下	流量増加	不要	
			1 手順当たりのポンプ台数	流量増加		要	
SFPへの流入範囲、流量分布	流入範囲：SFP 全面 流量分布：一様	<ul style="list-style-type: none"> <li>・放水設備からの全流量が、SF ラック全面に一様分布で流入する（単位面積当たりの流量は、放水設備による実際のものよりも大きい保守的な条件を設定）</li> </ul>	注水・放水手段の組合せ	広範囲化	流入範囲：局所化 流量分布：単位面積当たりの流量増加	不要	
			1 手順当たりのポンプ台数			単位面積当たりの流量低下	不要
			放水分布のばらつき 【基本ケース条件で考慮済み】	単位面積当たりの流量低下			不要
			スプレイ分布のばらつき 【基本ケース条件で考慮済み】				要 <sup>※1</sup>
燃料集合体内への流入割合	23%	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ラックピッチと燃料集合体の幾何形状より求まる面積比</li> <li>・燃料集合体上部へ流入する水の一部は上部ノズル構造等により弾かれる</li> <li>・無風を仮定（斜めからの液滴の流入は考慮しない）</li> </ul>	内挿物の存在 【基本ケース条件で考慮済み】	流入割合低下	流入割合増加	不要	
			風の影響② （斜め方向の液滴落下による効果）	流入割合増加		要	
液膜となる流量の割合	100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>・液滴のまま落下するより、液膜となったほうが、体系内の水分量が多くなり実効増倍率が厳しくなる</li> </ul>	一部の流量が液滴のまま落下 【基本ケース条件で考慮済み】	液膜となる流量が減る	液膜となる流量が増える	不要	

共通するパラメータとして、流量に由来するものは赤ハッチング、風に由来するものは青ハッチングで示す。

※1: 流入範囲を局所化するような風が吹く場合、流量が集中して落下することになるため、斜め方向で液滴が落下することは考え難い。また液滴を斜め方向から落下させるような風が吹く場合、放水範囲をより広げることになるため流量が局所化することは考え難い。よって「流入範囲を狭める風の影響」（風の影響①）と「流入範囲を広げる風の影響」（風の影響②）は、別々の不確かさ要因として取り扱う。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第1-7表 各パラメータの基本ケース条件と不確かさの整理結果 (3/3)

パラメータ		基本ケース条件		基本ケース条件に対する不確かさ		実効増倍率が 厳しくなる方向	考慮 要否
		具体的条件	条件の説明	不確かさが生じる要因	不確かさが生じる方向		
水分条件	液膜厚さ評価式	包絡式	・適用される Re 数範囲において、 多種ある実験式を包絡する保 守的な条件を設定	風の影響② (斜め方向の液滴落下に よる波立ち等の外乱)	液膜が薄くなる	液膜を 厚くする	不要
				多種ある実験式の存在 【基本ケース条件で考慮済み】	液膜が薄くなる		不要
	放水の液滴径	一律1.5mm	・スプレイヘッドの実放水試験に て取得した平均液滴径 (体積分率の 50%出現値)	注水・放水手段の組合せ 1 手順当たりのポンプ台数	液滴径を大きくする	液滴径を 小さくする	不要
				放水設備の違い (放水砲orスプレイヘッド) 【基本ケース条件で考慮済み】	液滴径を大きくする		不要
				スプレイ試験における測定箇所 ごとの結果の差異	液滴径を大きくする or 小さくする		要
海水中の 塩分濃度	-	・塩素の中性子吸収効果は考慮し ない	海流の変化 【基本ケース条件で考慮済み】	塩素濃度増加	塩素濃度低下	不要	

共通するパラメータとして、流量に由来するものは赤ハッチング、風に由来するものは青ハッチングで示す。

#### 10. 重畳させる不確かさの検討

第1-7表で考慮「要」となった不確かさ要因を第1-8表に示す。これらの不確かさは、相互に因果関係はなく（いずれかの不確かさの発生に起因して、他の不確かさが発生することはない）、すべて独立であることから、重畳は考慮しない。

第1-8表 パラメータごとに考慮「要」と抽出された不確かさ要因

パラメータ	不確かさ要因
流量	1手順当たりのポンプ台数
SFPへの流入範囲、 流量分布	流入範囲を狭める風の影響（風の影響①）
燃料集合体内への 流入割合	流入範囲を広げる風の影響（風の影響②）
放水の液滴径	スプレイ試験における測定箇所ごとの結果の差異

#### 11. 基本ケース及び感度解析ケース条件一覧

9. ままで算定したパラメータ、及び10. で整理した不確かさの取り扱いを踏まえ、基本ケース及び不確かさを考慮した感度解析ケースを第1-9表のとおり設定する。また、これらパラメータの条件を踏まえ算定される臨界計算コードへのインプット条件を第1-10表に示す。

第1-9表 基本ケース及び感度解析ケースの解析条件

評価条件		事故時の実態により則したケース (基本ケース)	1手順当たりのポンプ台数による感度を確 認する解析 (ケース①)	風の影響① (流入範囲を 狭める風の影響) による 感度を確認する解析 (ケース②)	風の影響② (斜め方向に 液滴を落下させ燃料集合 体内への流入割合に影響 を与える風の影響) によ る感度を確認する解析 (ケース③)	スプレー試験における 液滴径測定箇所ごとの 結果の差異による感度 を確認する解析 (ケース④)		
燃料条件	燃料配置	新燃料のみで満杯	←	←	←	←		
	燃料種類	通常ウラン燃料 (Gd入り燃料の存在は 考慮しない)	←	←	←	←		
水分条件	流量		□ (m <sup>3</sup> /h)	□ (m <sup>3</sup> /h)	□ (m <sup>3</sup> /h)	←	←	
	SFPへの流入範囲、 流量分布	流入範囲	SFP全面	←	局所 (3×3から始め、低下傾 向が確認できるまで)	SFP全面	←	
		流量分布	一様	←	←	←	←	
	燃料集合体内への流入割合		23 (%)	←	←	46 (%)	23 (%)	
	液膜厚さ	燃料集合体内へ流入した流量 のうち液膜となる流量割合	100 (%)	←	←	←	←	
		液膜厚さ評価式	包絡式	←	←	←	←	
	気相部 水密度 (放水の 液滴径等)	流入 範囲内	燃料集合体内へ流入した流量のうち 液滴のまま落下する流量割合	0 (%)	←	←	←	←
			燃料集合体内	飽和蒸気密度 0.0006 (g/cm <sup>3</sup> )	←	←	←	←
		燃料集合体外	液滴径1.5mmを用いた 水密度	←	←	←	液滴径0.4mmを用いた 水密度	
		流入範囲外	—	—	0.0006 (g/cm <sup>3</sup> )	—	—	
海水中の塩分濃度		—	—	—	—	—		

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第1-10表 各ケースにおける臨界計算コードへのインプット

		基本ケース	ケース① (1手順当たりのポンプ台数による感度を 確認する解析)	ケース② (「流入範囲を狭める風の影響」による感度を 確認する解析)	ケース③ (「斜め方向に液滴を落下させ燃料集合体内への流入割合に影響を与える風の影響」による感度を 確認する解析)	ケース④ (スプレイ試験における液滴径測定箇所ごとの結果の差異による感度を 確認する解析)
燃料条件	燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP有限体系)				
	燃料種類	15×15型 通常ウラン燃料				
水分条件	液膜厚さ [mm]					
	燃料集合体内 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]					
	燃料集合体外※ 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]					
	流入範囲外 気相部水密度 [g/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。



(参考) 燃料集合体内の内部流動に係る条件設定について

1. はじめに

燃料集合体内における内部流動に係る条件（燃料棒全周への液膜形成）が、保守的な設定となっていることについて説明する。

2. 大容量放水時の燃料集合体内の挙動

SFPへスプレイヘッドによるスプレイを実施した場合、燃料集合体内へ流入した水は液滴としてではなく、ほとんどが燃料棒と接しながら筋状流下するという知見を得ている<sup>※</sup>。放水砲を用いて大流量が燃料集合体内に流入する場合、スプレイヘッドでの放水を想定した小流量放水時の実験知見と比較して、燃料棒を流下する水は図1に示すように、以下の挙動を示すと考えられる。

- 流下する筋の本数が増える。
- 流下する筋の幅、厚さ（高さ）が広がる。

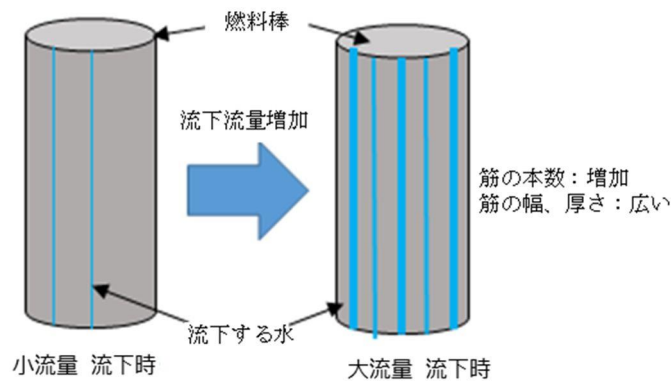


図1 燃料棒を流下する流量が増加した場合の内部流動変化（イメージ）

しかし、筋状に流下するような挙動は複雑であり、また、放水砲のような大流量放水設備により放水した場合の内部流動は実験的にも確認し難いため、内部流動の最確状態は設定し難い。よって内部流動に係る条件については未臨界性上保守的な条件を設定する。

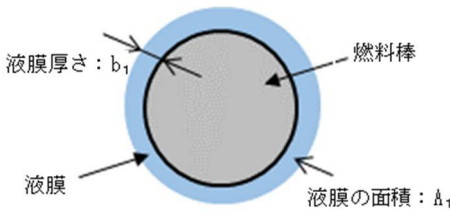
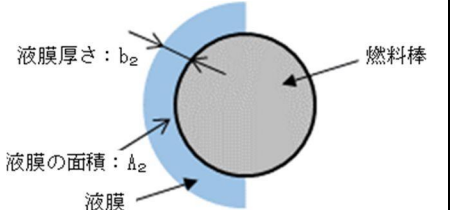
※「可搬型スプレイ放水時の燃料集合体内部流動に関する研究」、日本原子力学会 2017年秋の大会、関西電力(株)、三菱重工業(株)

3. 保守性を有する内部流動条件の設定

厚い液膜となって燃料棒の一部を流下する場合より、薄い液膜が燃料棒表面に一様に付着する場合のほうが、表1に示す簡易評価のとおり、燃料棒から作用するせん断力の合計値が大きくなるため流下流速が相対的に小さくなり、体系中に保持される水分量は多くなる。

体系中に保持される水分量が多い方が、中性子の減速に主に寄与する水量が増え実効増倍率は厳しくなるため、今回未臨界性評価における内部流動の設定として、燃料棒の全周に液膜が形成される条件を採用する。

表1 流下挙動の違いに対する体系中の水分量の違い

想定する状態	周方向全面に液膜となって流下する場合 	周方向の半分にのみ流下する場合 
液膜レイノルズ数[-]	$Re_1=50$	$Re_2=100$ ( $\Gamma$ が2倍になるため)
無次元液膜厚さ[-] (Nusseltの式を仮定)	$NT_2=0.909 \times (4Re_1)^{1/3}$ =5.3	$NT_2=0.909 \times (4Re_2)^{1/3}$ =6.7
液膜厚さ[mm]	$b_1=NT_1 / (g / \nu^2)^{1/3}=0.25$	$b_2=NT_2 / (g / \nu^2)^{1/3}=0.31$
水が占める面積[mm <sup>2</sup> ]	$A_1 = \{ (10.72+2b_1)^2 - 10.72^2 \} / 4$ =8.6	$A_2 = \{ (10.72+2b_2)^2 - 10.72^2 \} / 8$ =5.4

<計算の前提>

- ・ 全面に液膜が形成される場合の液膜 Re 数を 50 と想定 (基本ケースでの Re 数は 50 以下)  
⇒周方向の半分にのみ流下する場合の  
液膜 Re 数は 100  
( $Re=\Gamma/\nu$ 、 $\Gamma$ ：周方向長さ当たりの流量)
- ・ 液膜厚さ評価式には Nusselt の式を使用  
( $NT=0.909 \times (4Re)^{1/3}$ )

<計算諸元>

燃料棒外径：10.72[mm]  
重力加速度：9.8 [m/s<sup>2</sup>]  
動粘度：10<sup>-6</sup> [m<sup>2</sup>/s]

以 上

解析結果の妥当性確認について

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	別添2-1
2. 解析に用いたコードの特徴 .....	別添2-4
3. 解析結果の妥当性確認 .....	別添2-4
3.1 類似解析との比較 .....	別添2-4
3.1.1 評価条件及び結果 .....	別添2-4
3.1.2 妥当性確認 .....	別添2-8
3.1.2.1 燃料冠水時の実効増倍率 .....	別添2-8
3.1.2.2 水位0cmでの実効増倍率 .....	別添2-8
3.2 修正1群拡散理論に基づく近似式により求まる実効増倍率挙動との 相似性 .....	別添2-10
3.2.1 前提条件 .....	別添2-10
3.2.2 妥当性確認 .....	別添2-12
4. 解析に適用した品証プロセスの確認 .....	別添2-13
5. まとめ .....	別添2-17

## 1. はじめに

今回の未臨界性評価では、設計値等の現実的な条件を基本としつつ、原則、実効増倍率に対して余裕が小さくなるような条件を各パラメータに設定した基本ケースと、不確かさ影響を確認する感度解析ケースについて解析を実施した。各ケースにおける臨界計算コード（以下「SCALEコード」という。）へのインプット条件を第2-1表に、実効増倍率評価結果を第2-1-1図及び第2-1-2図に示す。

今回の評価条件は、既工認での解析と異なり、以下のとおり空間中の水分状態を非均質に設定している点で特徴がある。

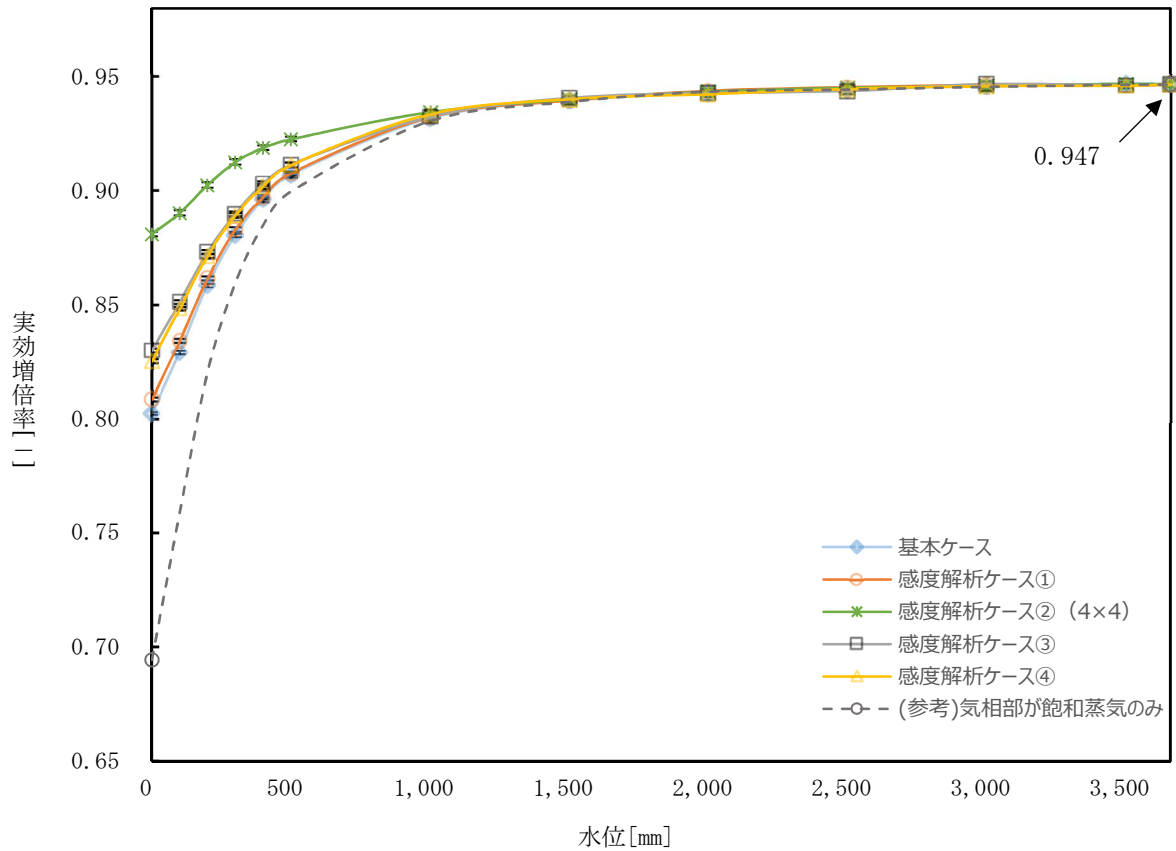
- ・ 体系を軸方向に気相部と液相部に大きく分割
- ・ 気相部においては、燃料集合体の中と外で異なる水分状態を設定するとともに、燃料棒周りに液膜が形成されることを考慮

本資料では、上記のような特徴を有し、水位が低下するにつれ単調減少した実効増倍率解析結果の妥当性について確認するとともに、今回解析業務を実施するに当たり適用した品証プロセスを踏まえて解析結果の適切性を説明する。

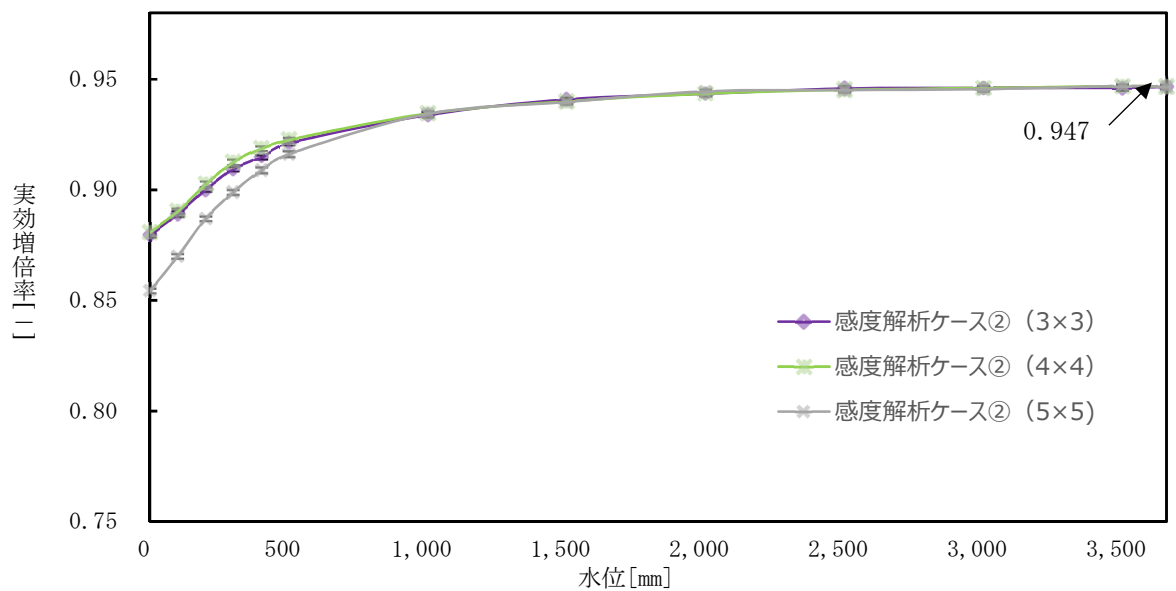
第2-1表 各ケースにおける臨界計算コードへのインプット

		基本ケース	感度解析ケース			
			ケース① (1手順当たりのポンプ台数による感度を確認する解析)	ケース② (「流入範囲を狭める風の影響」による感度を確認する解析)	ケース③ (「斜め方向に液滴を落下させ燃料集合体内への流入割合に影響を与える風の影響」による感度を確認する解析)	ケース④ (スプレー試験における液滴径測定箇所ごとの結果の差異による感度を確認する解析)
燃料条件	燃料配置	新燃料敷き詰め (SFP有限体系)				
	燃料種類	15×15型 通常ウラン燃料				
水分条件	液膜厚さ [mm]					
	燃料集合体内 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.0006 (飽和蒸気密度)				
	燃料集合体外※ 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]					
	流入範囲外 気相部水密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	—	—	0.0006 (飽和蒸気密度)	—	—

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第2-1-1図 実効増倍率評価結果<sup>※1,2</sup> (基本ケース、感度解析ケース)



第2-1-2図 実効増倍率評価結果<sup>※1,2</sup> (感度解析ケース②詳細)

※1 エラーバーはモンテカルロ計算における標準偏差  $\sigma$  の2倍 ( $\pm 2\sigma$ )

※2 製造公差、計算コード等による不確定性を含まない値

## 2. 解析に用いたコードの特徴

解析に用いたSCALEコードは、燃料及び構造材の材料組成と幾何形状を与える（形状情報を設定し、形状ごとに物質の原子個数密度を設定する）ことにより解析を行う3次元輸送計算コードである。今回解析においてSCALEコードへ入力する液膜の幾何形状は円環、物質は軽水であるが、ベンチマーク解析においては核燃料物質と減速材が存在する非均質な管群体系での臨界実験及び軽水を減速材とする臨界実験に対し、ベンチマーク解析結果と臨界実験の実効増倍率が精度よく一致することをもって妥当性確認している。既許認可での解析においても同じコードを用い、円柱形状の燃料材等が存在する管群体系下において軽水が存在する状態に対し解析を実施している。またベンチマーク解析用に選定した臨界実験には、気相部に水分がほとんど存在しない状態で部分水位により臨界を達成しているものもあり、当該臨界実験に対してもSCALEコードは精度よく評価できることを確認している。

このことよりSCALEコードは、「核燃料物質と減速材が存在する非均質な管群体系」、「軽水が存在する体系」及び「水分がほとんど存在しない気相部を伴った部分水位の体系」を評価できるコードであると言える。

## 3. 解析結果の妥当性確認

実効増倍率が冠水時で最大となり水位低下に伴い単調減少した各ケースでの解析結果の妥当性について、以下の2つの観点で確認した。

①類似解析との比較

②修正1群拡散理論に基づく近似式により求まる実効増倍率挙動との相似性

### 3.1 類似解析との比較

基本ケース解析結果について、妥当性が確認された既許認可解析にて考慮していた燃料・水分条件を採用した類似解析の結果との比較を行い、条件の差異に対して実効増倍率の増減の方向が適切であることを確認する。

#### 3.1.1 評価条件及び結果

基本ケース及び類似解析の燃料・水分条件と実効増倍率評価結果を第2-2表に示す。類似解析には、既許認可解析で採用した実績がある燃料条件（新燃料敷き詰め、又は3領域管理）と水分条件（冠水又は水密度 $0\sim 1\text{g}/\text{cm}^3$ で一様変化）を持つものを選定した。

ここで、類似解析では体系全体に一様な水密度を設定するのに対し、基本ケースでは、使用済燃料ピットラック（以下「ラック」という。）ピッチ当たりの水分状態を全424ラックに等しく設定する点では類似解析と同じであるものの、気相部において



燃料集合体の内側と外側で異なる水密度を設定していることから、両者の解析結果の比較を行うに当たり、気相部の水分量を評価する共通の指標を用いることとする。低水密度においては中性子が隣接燃料以遠まで到達し核分裂反応を起こしている（基本ケースにおける中性子の平均自由行程は、冠水時で0.57cm、水位0cm時で5.3cm）と考えられ、移動する間の減速は体系内に保持される水の総量に主に依存すると考えられることから、気相部の水分量を評価する共通の指標として、空間平均水密度\*を用い解析結果を整理する。

基本ケースと類似解析の実効増倍率を空間平均水密度を横軸にプロットしたものを第2-2図に示す。

※空間平均水密度：気相部の「液膜+燃料集合体外気相部水密度」という非均質な水分状態について、体系中の水分量を保存した状態で一様水密度へ換算したもの。

<空間平均水密度  $\rho$  の算出方法>

$$\rho = \rho_x + \rho_y + \text{飽和蒸気密度}$$

$\rho_x$ ：燃料集合体外気相部水密度による空間平均水密度への寄与分

$\rho_y$ ：液膜による空間平均水密度への寄与分

$$\rho_x = (\text{燃料集合体外気相部水密度} - \text{飽和蒸気密度}) \times \frac{(\text{ラックピッチ面積} - \text{燃料集合体外寸面積})}{S}$$

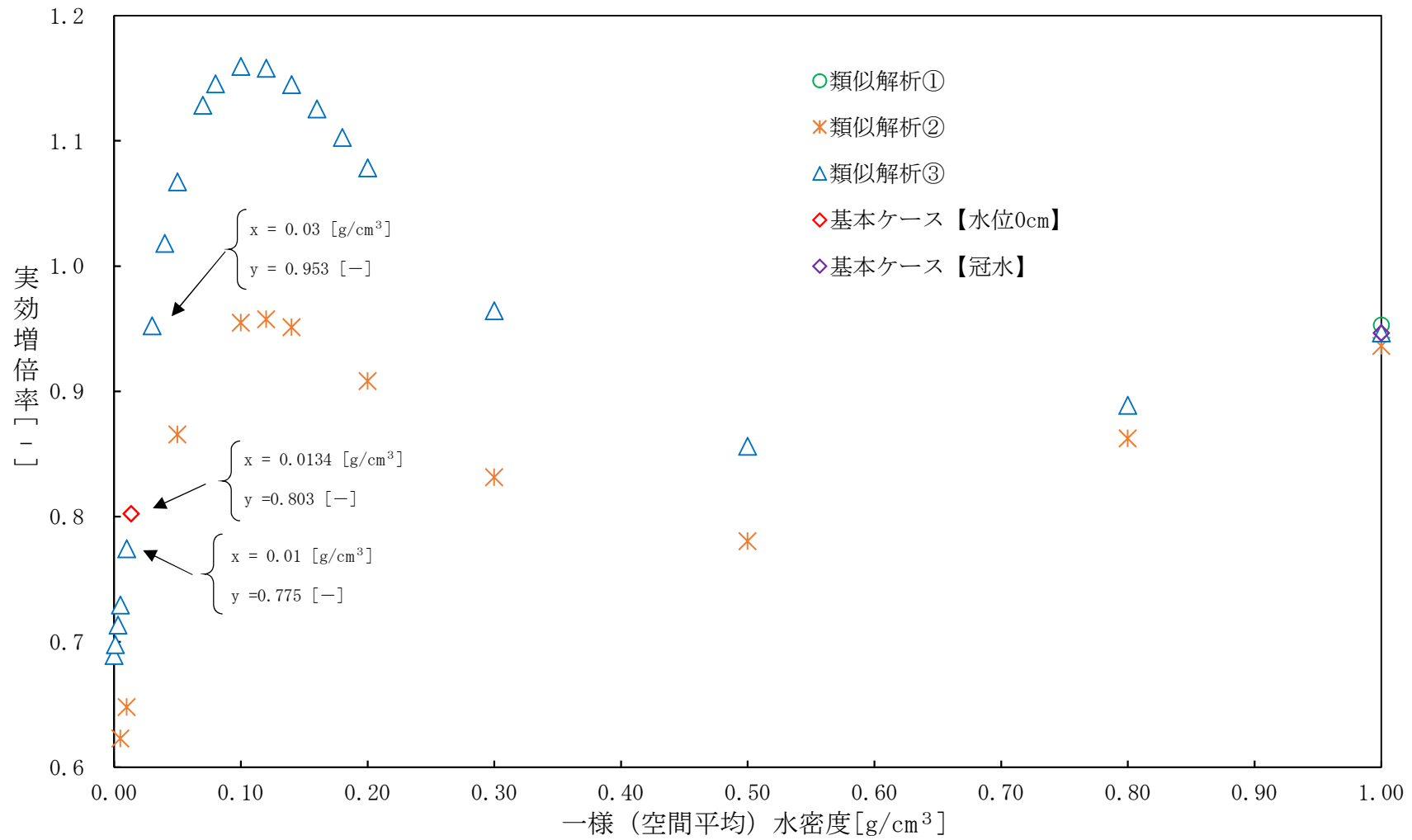
$$\rho_y = \frac{S_m}{S} \times 1[\text{g/cm}^3]$$

( $S_m$ ：ラックピッチ当たりの液膜占有面積、 $S$ ：ラックピッチ当たりの間隙面積)

第2-2表 基本ケース、類似解析の解析条件及び結果

	基本ケース条件	類似解析① (既工事計画での26条及び69条1項に係る評価)	類似解析② (既工事計画での69条2項に係る評価)	類似解析③
燃料配置	ウラン新燃料 敷き詰め	ウラン新燃料 敷き詰め	3領域管理 (0、20、50GWd/t)	ウラン新燃料 敷き詰め
ウラン濃縮度	<input type="text"/> wt%	<input type="text"/> wt%	<input type="text"/> wt%	<input type="text"/> wt%
液膜厚さ	<input type="text"/> mm	—	—	—
燃料集合体内 気相部水密度	0.0006g/cm <sup>3</sup>	1.0g/cm <sup>3</sup>	0～1.0g/cm <sup>3</sup> で一様変化	0～1.0g/cm <sup>3</sup> で一様変化
燃料集合体外 気相部水密度	<input type="text"/>			
液相部条件	純水 (水密度1.0g/cm <sup>3</sup> )	—	—	—
変動 パラメータ	水位	なし	水密度	水密度
実効増倍率 評価結果	第2-2図参照			

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図 基本ケース及び類似解析の評価結果\*

\*製造公差、計算コード等による不確定性を含まない値

### 3.1.2 妥当性確認

#### 3.1.2.1 燃料冠水時の実効増倍率

解析結果は、類似解析②【0.937】<基本ケース【0.947】<類似解析①【0.953】の順となっている。なお【】内は実効増倍率である。

これは、この3つの水分状態が冠水状態で共通しており、実効増倍率の差異は燃料条件に依存すること、燃料条件（燃焼度、濃縮度）は、類似解析②<基本ケース<類似解析①の順に厳しくなることから妥当である。

#### 3.1.2.2 水位0cmでの実効増倍率

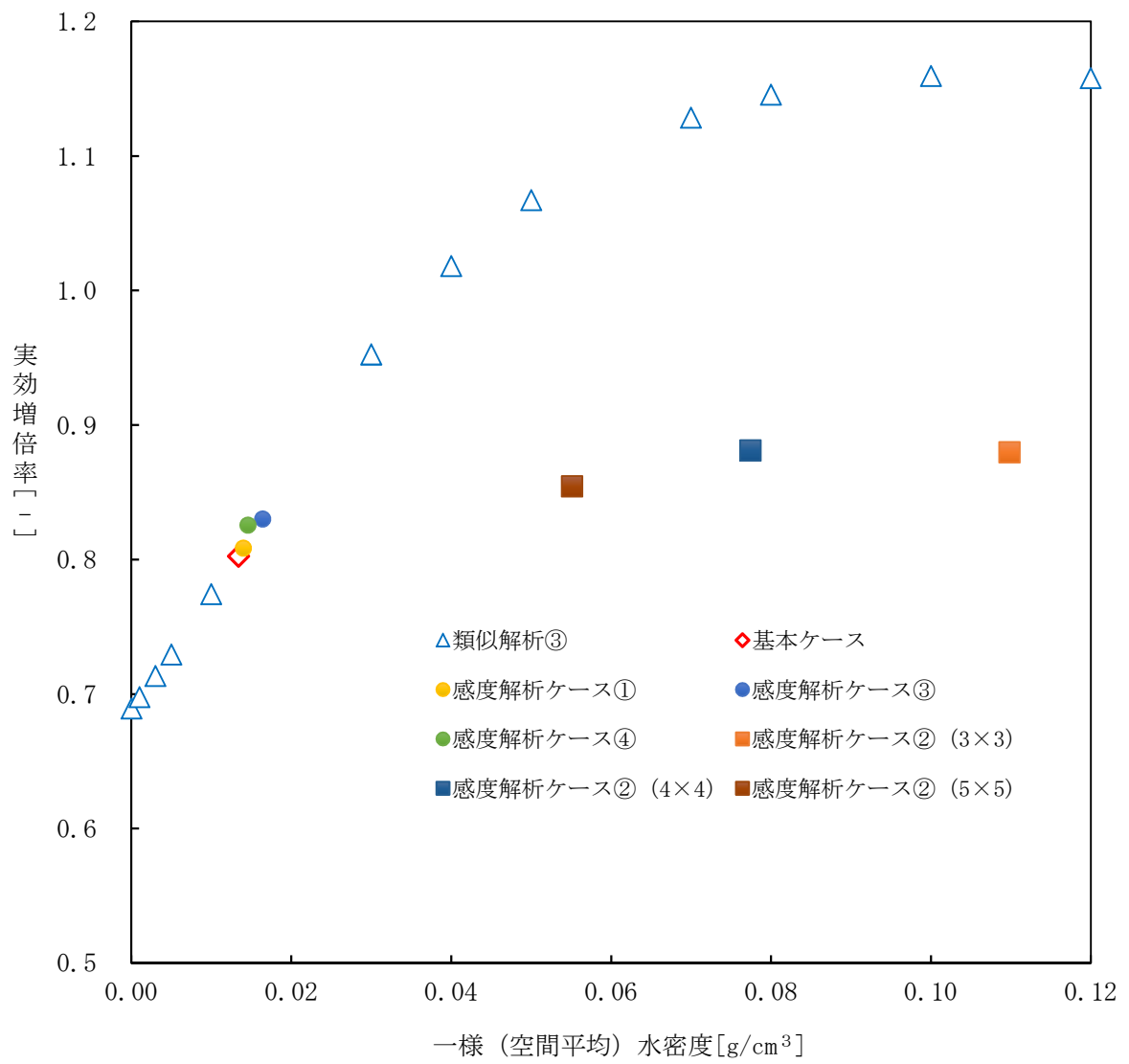
類似解析③は基本ケースと燃料条件が等しく、また軸方向の燃料有効長全域にわたり一様な水密度を設定し解析している（すなわち気相・液相の分かれ目がない）ため、今回の未臨界評価手法における水位が0cmである状態（すべて気相部、ただし液膜が無い条件）に相当する状態と捉えることが出来る。第2-2図に示されるとおり実効増倍率は、類似解析③（水密度0.01g/cm<sup>3</sup>）【0.775】<基本ケース（水位0cm）【0.803】<類似解析③（水密度0.03g/cm<sup>3</sup>）【0.953】となっている。なお【】内は実効増倍率である。

これは、参考2に示すように、空間平均水密度が0g/cm<sup>3</sup>から約0.1g/cm<sup>3</sup>の範囲においては、空間平均水密度が大きくなるほど実効増倍率が高くなること、及び基本ケース（水位0cm）の空間平均水密度（0.0134g/cm<sup>3</sup>）が、0.01g/cm<sup>3</sup>と0.03g/cm<sup>3</sup>の間にあることから妥当である。

ここで、感度解析ケース①～④における水位0cmでの実効増倍率についても、気相部の水量を空間平均水密度に換算し、基本ケース及び類似解析③の結果と併せ第2-3図に示す。

感度解析ケース①、③、④の実効増倍率は概ね、類似解析③のプロットを結んだ線上に位置している。感度解析ケース①、③、④はラックピッチ当たりの水分量が全424ラックで同じであり、また液膜厚さも基本ケースと同等であることから、これらは基本ケースと類似の水分状態にあると言え、類似解析③に対する実効増倍率の傾向も基本ケースと同様（類似解析③プロットの線上に概ね乗る）になったものである。

一方で感度解析ケース②の解析結果は他ケースと傾向が異なり、同等の空間平均水密度における類似解析③の結果より小さくなっている。これは、感度解析ケース②は局所に水分が集中することを想定しており、局所領域内は最適減速に近い水分状態となるものの領域内のウラン量（燃料集合体の数）が少なく、領域内から水平方向へ漏れる中性子量が多くなり、核分裂に寄与しない中性子が増えるためである。



第2-3図 基本ケース、感度解析ケース（水位0cm）及び類似解析③の実効増倍率（ケース②での空間平均水密度は、局所範囲内において一様水密度に換算した値）

### 3.2 修正1群拡散理論に基づく近似式により求まる実効増倍率挙動との相似性

SCALEコードでの解析結果は、水位低下に伴い単調減少する傾向を示した。本傾向の妥当性を確認するため、気相部を飽和蒸気としてSCALEコードで計算した水位低下による実効増倍率の単調減少傾向と、修正1群拡散理論に基づく近似式により求まる水位低下時の実効増倍率傾向が相似であるかを確認する。

#### 3.2.1 前提条件

- 修正1群拡散理論から導かれる近似式を①式に示す。

$$k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1+M^2B^2} \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで、 $k_{\infty}$ は液相部の無限増倍率、 $M^2$ は移動面積、 $B^2$ は液相部のバックリングである。

- SFP冠水時の実効増倍率は、体系が十分に大きいことから有限体系でも無限体系でも大きな差は無いため、液相部の無限増倍率（中性子の体系外への漏れがないとした増倍率）は、今回基本ケース冠水時の実効増倍率を保守側に切り上げ $k_{\infty} = 0.95$ とする。
- バックリングの算出には、直方体の体系における一般的な導出式である下式を用いる。XとYはSFPの水平方向寸法であり固定値とし、Zは液相部の高さとする。

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{X+2\delta_x}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Y+2\delta_y}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Z+2\delta_z}\right)^2 \quad \dots \textcircled{2}$$

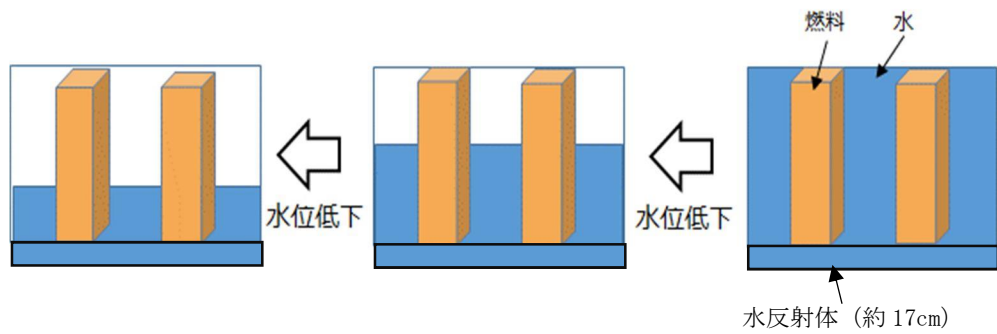
ここで、 $\delta$ は外挿距離である。

- 実効増倍率の算出に必要な移動面積 $M^2$ 及び外挿距離 $\delta$ は、文献（軽水減速 $UO_2$ および $PuO_2-UO_2$ 燃料炉心の臨界量、JAERI 1254、鶴田晴通ら(1977)）に示されるTCA（軽水減速のタンク型臨界集合体）での試験データを元に、以下のとおり設定する。これらの導出過程を参考1に示す。

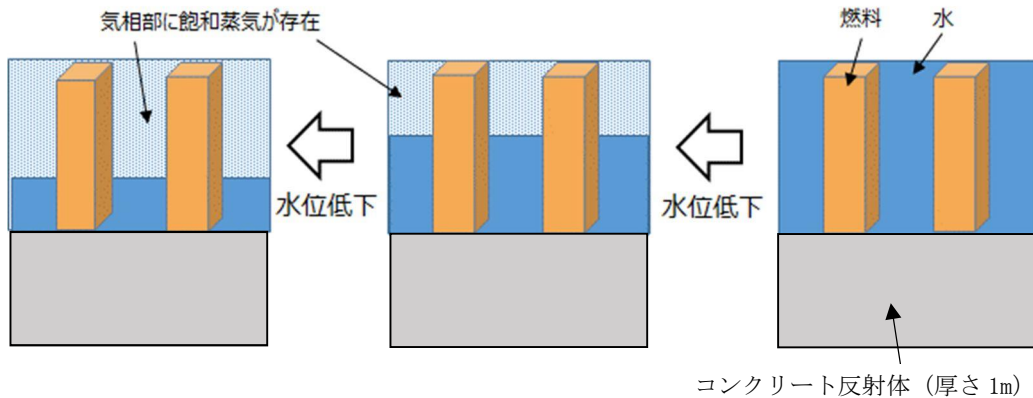
$$M^2 = 37.7, \delta_x = \delta_y = 8.5, \delta_z = 6.3$$

水位（液相高さZ）の低下に伴い、②式のバックリングが単調増加し、結果として①式の実効増倍率が単調減少する。

TCA（軽水減速のタンク型臨界集合体）の体系概念図を第2-4-1図に、気相部を飽和蒸気としたSFP体系（SCALEコードで計算した体系）の概念図を第2-4-2図に示す。



第2-4-1図 TCA（軽水減速のタンク型臨界集合体）の体系概念図  
（燃料領域+下部反射体）



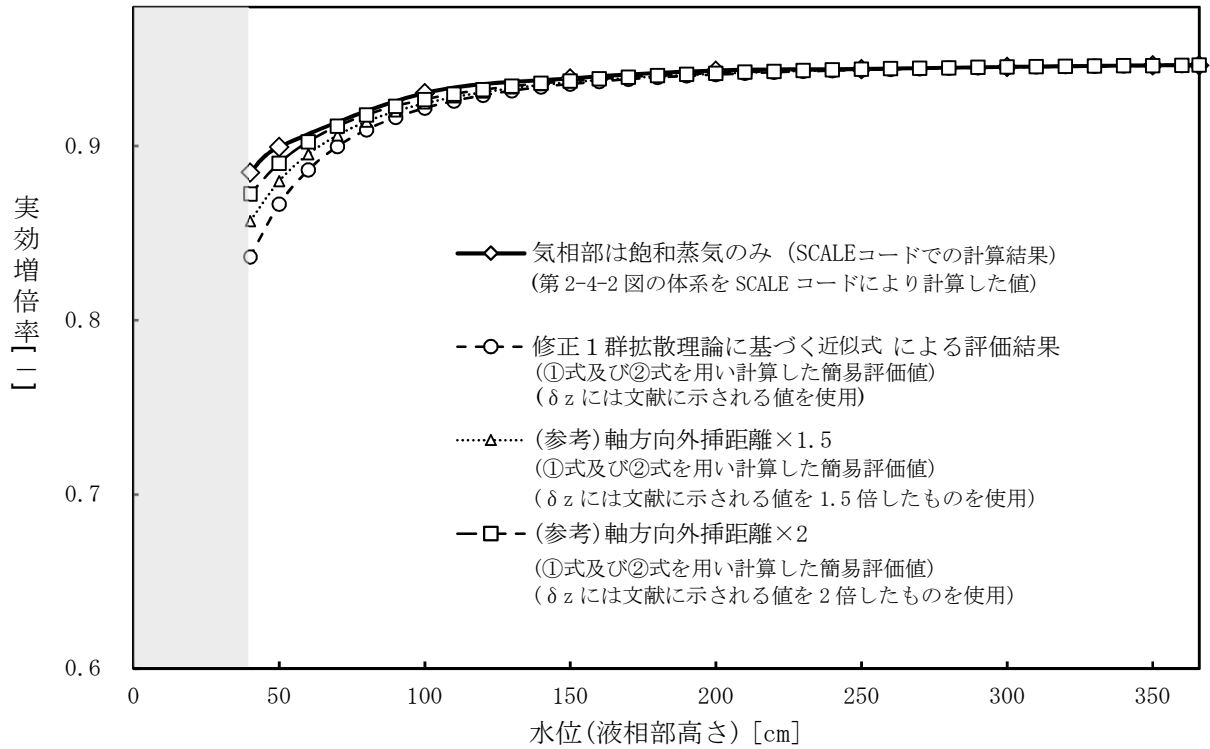
第2-4-2図 気相部を飽和蒸気としたSFP体系の概念図  
（燃料領域+下部反射体）

ここで、体系が小さくなり中性子の漏れが極端に多くなる場合には、②式において体系寸法に対して定数である外挿距離の影響が大きくなるため、水位変化に対する実効増倍率変化挙動を①式にて確認するに当たっては、ある程度の水位以上で適用できることに注意が必要となる。文献では臨界状態を達成するために炉心水位40cm以上にて測定が実施されていることから、バックリングを踏まえた今回の妥当性確認においては、水位40cm以上を確認対象とする。

またSFP体系では下部反射体として厚さ1mのコンクリートを設定する等、TCAと比較して軸方向外挿距離が大きくなる要因が存在することから、軸方向外挿距離が変化した際の実効増倍率への影響度合いを傾向として把握するため、参考として文献に示される軸方向外挿距離を1.5倍又は2倍とし、①及び②式を用い評価した実効増倍率もあわせて確認する。

### 3.2.2 妥当性確認

液相高さを変化させた場合の実効増倍率を第2-5図に示す。SCALEコードで計算した実効増倍率と、①式及び②式により評価した実効増倍率はどちらも水位低下に伴い単調減少しており相似であることから、SCALEコードを使用した部分水位変化による実効増倍率の単調減少傾向は妥当である。



第2-5図 修正1群拡散理論に基づく近似式より求まる実効増倍率



#### 4. 解析に適用した品証プロセスの確認

今回の未臨界性評価に係る解析の実施に当たっては、「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」（以下「本ガイドライン」という。）に則った品質管理を実施している。本ガイドラインでは、解析結果の検証を含め解析業務全般に対する審査を実施することが要求されており、今回解析業務の発注者である当社は、検証を含む審査を受注者が適切に行っていることを確認することでもって解析結果の適切性を確認している。

本ガイドライン規定項目のうち、解析コードの取り扱いや解析結果の確認に関する規定項目を抜粋のうえ、各項目に対する具体的実施事項を第2-3表に示す。なお、「解析結果の審査、検証」について、本ガイドラインに記載される<解説、事例等>に沿って記載している。

第2-3表 「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」の適用確認 (1/3)

項目 (原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン)			実施事項	確認結果 (○：実施 ×：未実施)
番号	項目	規定内容		
4.2.2	計算機プログラムの検証 ※1	<p><b>【発注者（事業者）】</b></p> <p>(1) 発注者は、受注者によって使用する計算機プログラムが適正であることが検証され、その検証方法及び登録方法を明確にして管理されていることを確認すること。</p> <p><b>【受注者（解析者）】</b></p> <p>(1) 受注者は使用する計算機プログラムが適正であることを検証するための検証方法や、適切に管理するための登録方法(登録リストによる管理方法等)を明確にすること。</p> <p>(2) 受注者は(1)の方法に基づき、計算機プログラムが適正なものであることを事前に検証し、受注者の組織が定めた登録リストにて管理すること。登録管理を行わない計算機プログラムを使用する場合には、その都度、検証を行うこと。</p> <p>(3) その登録リストには、検証された計算機プログラム名称及びバージョンを明記すること。また、計算機プログラム名称が同じであってもバージョンが相違する計算機プログラムを使用する場合は、改めて検証を行うこと。</p>	<p><b>【発注者】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ SCALEコードが適正なものであることが以下のとおり事前に検証されていることを確認した。(①既工事計画時点、②既工事計画時点と今回)</li> <li>①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した。</li> <li>②解析業務調達時におけるSCALEコードの運用環境について、開発機関(ORNL)から提示された要件を満足している。</li> </ul> <p><b>【受注者】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ SCALEコードの検証方法及び検証結果(ベンチマーク解析等によりコードとしてのV&amp;Vを実施済みであることを確認する等)を図書に纏めている。またSCAELコードはソフトウェアリストに登録し管理している。</li> <li>➢ 解析実施前に、SCALEコードの動作環境が適切であること、SFP未臨界性評価に用いるための妥当性確認済みのプログラムであること等を確認している。</li> <li>➢ 登録リストにはプログラム名称及びバージョンを明記している。</li> </ul>	○
4.2.3	入力根拠の明確化	<p><b>【発注者（事業者）】</b></p> <p>(1) 発注者は、受注者が解析ごとの入力根拠を明確にしていることを確認すること。</p> <p><b>【受注者（解析者）】</b></p> <p>(1) 受注者は、業務計画書等に基づき解析ごとの入力根拠を明確にした文書を作成すること。</p>	<p><b>【発注者】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 今回解析に係る業務計画書に基づき受注者が作成する、入力条件を取り纏めた図書において、以下のとおり入力根拠が明確になっていることを確認した。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・液膜厚さ、気相部水密度等の水分条件が当社指定の条件どおりであること。</li> <li>・燃料仕様やラック仕様の詳細(燃料材の径、被覆管内外厚さ、ラック内のり等)について、設備図書に基づき設定されていること、又は既許認可での設定条件と同じであること。</li> </ul> </li> </ul> <p><b>【受注者】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 入力条件の根拠を取り纏めた図書を作成した。</li> </ul>	○
4.2.4	入力結果の確認	<p><b>【発注者（事業者）】</b></p> <p>(1) 発注者は、受注者が計算機プログラムへの入力が正確に実施されたことを確認していることを確認すること。</p> <p><b>【受注者（解析者）】</b></p> <p>(1) 受注者は、計算機プログラムへの入力が正確に実施されたことの確認を行うこと。</p>	<p><b>【発注者】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ エコーバック※2されたデータにより、図書で定めたとおり適切に入力がなされたことをチェックしていることを確認した。</li> </ul> <p><b>【受注者】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 150px; height: 1.2em; vertical-align: middle;"></span></li> </ul>	○

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第2-3表 「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」の適用確認 (2/3)

項 目 (原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン)			実施事項	確認結果 ( ○：実施 ×：未実施)
番号	項目	規定内容		
4.3	解析結果の審査 <sup>※3</sup> ，検証	<p><b>【発注者（事業者）】</b></p> <p>(1) 発注者は、受注者が解析結果の検証項目と内容を明確にし、検証を含む審査状況を確認すること。</p> <p>&lt;解説、事例等&gt;                      発注者は、受注者が解析結果を、以下の観点で審査していることを、添付1「解析業務の業務フローチャートの例」に示すように、受注者の作業工程の中で適宜確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・入力根拠を明確にしており、計算機プログラムへの入力を正確に実施しているか。</li> <li>・汎用表計算ソフトウェアを使用していることを明確にしており、必要な管理をしているか。</li> <li>・解析結果が適切であることを確認しているか。</li> </ul> <p><b>【受注者（解析者）】</b></p> <p>(1) 受注者は、あらかじめ策定した業務計画書に従って解析結果の検証を含む審査を行うこと。また、検証の結果を客観的な証拠によって示せるようにすること。</p> <p>(2) 受注者は、審査する者の活動内容を明確にして審査を行うこと。</p> <p>&lt;解説、事例等&gt;                      (1)-① 解析結果は、以下の観点で審査を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・入力根拠を明確にしており、計算機プログラムへの入力を正確に実施しているか。また、過去に実績のある入力データを流用している場合は、根拠を明確にしているか確認する。</li> <li>・汎用表計算ソフトウェアの使用を明確にしており、入力した計算式を事前に検証して登録しているか。また、登録していない場合には、その都度、検証しているか。</li> <li>・解析結果が受容できるものであることを次の例に示す方法で確認しているか。                             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. 類似解析結果との比較（適切な比較対象を選定すること。）</li> <li>b. 物理的又は工学的整合性の確認（解析結果を理論値や経験値と比較）</li> </ol> </li> </ul>	<p><b>【発注者】</b></p> <p>➤ 原解析者以外の、適切な力量を有した検証者（兼、審査者）が、以下のとおり解析結果を審査していることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・原解析者は、入力根拠を図書として整備し明確にしている。また原解析者により、エコーバックされた入力がチェックされており、SCALEコードへの入力が正確に実施されている。</li> <li>・解析業務において汎用計算ソフトウェアは使用していない。</li> <li>・解析結果が適切である。</li> </ul> <p><b>【受注者】</b></p> <p>➤ 解析結果が受容できるものであることについて、                      [ ]                      を確認した。</p>	○

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第2-3表 「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」の適用確認 (3/3)

項 目 (原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン)			実施事項	確認結果 ( ○：実施 ×：未実施)
番号	項目	規定内容		
4.3	解析結果の審査 <sup>※3</sup> ，検証	<p>(1)-② 許認可申請用の解析に変更又は新規性が認められる場合には，デザインレビュー等により適切か確認する。例として，以下のものがある。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・新設計の燃料，炉心，系統・設備等を採用した場合</li> <li>・新しい解析手順又は計算機プログラムを適用した場合</li> </ul> <p>(1)-③ 新たに解析を行わずに過去の検証済みの解析結果をそのまま使用する場合には，適用する設計インプットが同等であることを個々の使用ごとに検証する。また，過去の検証済みの解析結果に適用された検証方法・内容程度が(1)-①，②に記載する最新の手順と同等でない場合には，最新の手順に従って改めて検証を行うか，又は不足分に対する追加の検証を行う。</p>	<p>➤ <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 200px; height: 20px;"></span></p> <p>➤ <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 200px; height: 20px;"></span></p> <p>➤ <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 200px; height: 20px;"></span></p> <p>➤ 液膜を考慮した解析は今回新たに実施している。</p>	○
4.5	解析業務の変更管理	<p><b>【発注者（事業者）】</b></p> <p>(1) 発注者は，解析結果に影響がある変更が発生した場合，受注者に対して変更内容を確実に伝え，解析業務の変更管理を行わせること。</p> <p>(2) 発注者は，受注者が解析業務における変更を管理していることを確認すること。</p> <p><b>【受注者（解析者）】</b></p> <p>(1) 受注者は，解析業務に変更が生じた場合は変更内容を文書化し，解析業務の各段階においてその変更内容を反映すること。</p>	<p><b>【発注者】</b></p> <p>➤ 解析条件変更の都度，変更内容を受注者へ伝えている。</p> <p>➤ 受注者にて変更管理が行なわれていることを確認している。</p> <p><b>【受注者】</b></p> <p>➤ 発注者より変更連絡があった都度，変更内容を文書化し，解析業務の各段階においてその変更内容を反映している。</p>	○

※1 本ガイドラインにおいては，計算機プログラム並びに解析結果の適切性を確認する行為を指す。

※2 計算機が読み込んだ入力データを出力として書き出したもの。

※3 本ガイドラインにおいては，検証を含め解析業務全般を広い視点で確認する行為を指す。

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。

## 5. まとめ

今回解析結果について、以下に示す観点により、その妥当性を確認した。

- ・既許認可において妥当性が確認されている類似解析結果と基本ケース解析結果を比較した結果、条件の差異に対して実効増倍率の増減の方向は適切であった。
- ・SCALEコードを使用した実効増倍率は水位低下に伴い単調減少しており、修正1群拡散理論に基づく近似式により求まる水位変化時の実効増倍率挙動と相似であった。

また、今回解析業務において適用した品証プロセスの適切性を確認した。

以 上

(参考1) JAERI-1254掲載値からの核定数算出について

1. はじめに

基本ケースの解析結果については、修正1群拡散理論に基づく近似式により求まる実効増倍率の傾向と整合していることを確認している。実効増倍率の算出に使用した核定数は、JAERI-1254(以下「文献」という。)で示される実験データより算出した。

ここでは、文献の実験データを用いた核定数の算出過程を示す。

2. 算出過程

- TABLE2に掲載のある実験結果のうち、高浜1、2号機の15×15型燃料集合体のピンセル領域のH/U(=4.8)に近い1.50U格子を今回の数値算出対象とした。

TABLE 2 Name of lattice

Lattice name	H/U or H/Pu	Lattice pitch (cm)
1.50U	4.33	1.849
1.83U	5.28	1.956
2.48U	7.16	2.150
3.00U	8.65	2.293
2.42P U	402	1.825
2.98P U	494	1.956
4.24P U	703	2.225
5.55P U	921	2.474

- TABLE10に、実験結果を内挿等して算出した臨界バックリングの値が掲載されている。1.50U格子の場合 $0.00833\text{cm}^{-2}$ である。

TABLE 10 Critical bucklings,  $B_c^2$

Lattice name	$B_c^2 (\times 10^{-2} \text{cm}^{-2})$	Note
1.50U	$0.833 \pm 0.010$	pattern=28 =24 =20 =18
1.83U	$0.943 \pm 0.013$	
2.48U	$0.983 \pm 0.008$	
3.00U	$0.952 \pm 0.014$	
2.42P U	$0.808 \pm 0.004$	on 1972-4-1
2.98P U	$0.828 \pm 0.004$	
4.24P U	$0.779 \pm 0.003$	
5.55P U	$0.651 \pm 0.002$	

- ここで、実効増倍率は以下の式が成り立ち、TABLE10は臨界バックリングの値であるので $k_{eff} = 1$ が成り立つことから、下式が得られる。

$$k_{eff} = \frac{k_{\infty}}{1 + M^2 B^2}$$

$$k_{\infty} = 1 + M^2 B_c^2 \quad \dots \textcircled{1}$$

・ TABLE7には $M^2/k_\infty$ の値が掲載されている。

TABLE 7 Ratios between migration area,  $M^2$ , and infinite multiplication factor,  $k_\infty$

Lattice name	$M^2/k_\infty$ (cm <sup>2</sup> )
1.50U	28.7±0.4
1.83U	28.8±0.3
2.48U	28.7±0.4
3.00U	27.9±0.2
2.42P U	28.9±1.1
2.98P U	28.8±1.3
4.24P U	30.2±0.9
5.55P U	32.0±0.5

この $M^2/k_\infty = A$ とおくと、 $k_\infty = M^2/A$ となるので①式に代入すると

$$\frac{M^2}{A} = 1 + M^2 B_c^2$$

となり、整理すると下式が得られる。

$$M^2 = \frac{A}{1 - A \times B_c^2}$$

従って、 $A$ の値をTABLE7から、 $B_c^2$ の値をTABLE10から適用すると、1.50U格子の移動面積 $M^2$ は以下のように求められる。

$$M^2 = \frac{28.7}{1 - 28.7 \times 0.00833} \approx 37.7$$

・ 軸方向、水平方向の反射体節約（両側の値）数値がTABLE6により与えられている。外挿距離が反射体節約の片側、すなわちTABLE6記載値の半分に等しいとして、1.50U格子の外挿距離は、軸方向で $\delta_v = 12.6/2 = 6.3$ 、水平方向で $\delta_H = 17.0/2 = 8.5$ となる。

TABLE 6 Reflector savings

Lattice name	Vertical (cm)	Horizontal (cm)
1.50U	12.6±0.3	17.0±0.8
1.83U	12.2±0.3	13.9±0.8
2.48U	11.3±0.2	13.7±0.5
3.00U	11.1±0.5	14.0±0.8
2.42P U	12.5±0.2	14.6±0.3
2.98P U	12.0±0.2	14.1±0.3
4.24P U	11.6±0.2	13.4±0.2
5.55P U	11.3±0.2	13.1±0.2

以 上

(参考2) 水分条件変化時の実効増倍率への影響評価

1. はじめに

今回解析では、既工事計画の水分条件と異なり、燃料集合体の内側と外側それぞれに異なる水分条件を設定している。これらの水分条件が変化した場合の実効増倍率影響に関する基礎データを得るために、燃料集合体の内側、若しくは外側のどちらか一方の水分状態を変化させた場合の実効増倍率への影響を確認するパラメータスタディを実施した。

2. 燃料集合体の内側の水分状態のみを変化させた場合

燃料集合体の内側の水分状態、すなわち液膜厚さのみを変化させた解析を行った。解析条件を図1に、解析結果を図2に示す。図2に示すとおり、液膜が厚くなるほど実効増倍率は高くなった。これは、核燃料の近くに減速材が多く存在するほうが実効増倍率は上がりやすいためである。

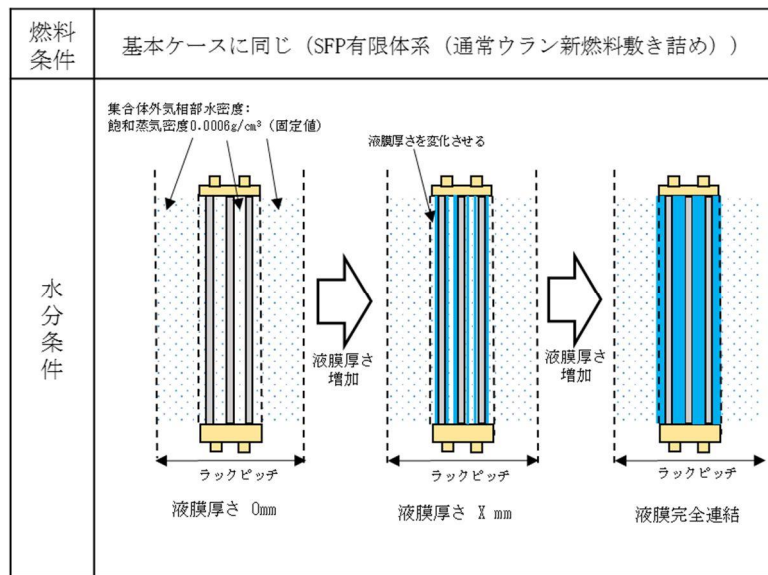


図1 燃料集合体の中の水密度のみを変化させるパラメータスタディ 評価条件

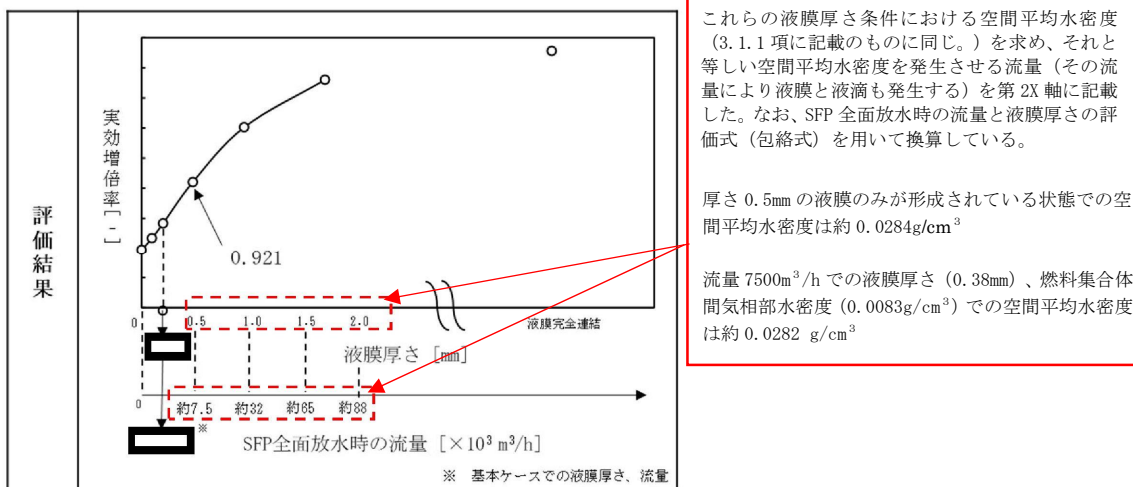


図2 燃料集合体の中のみを変化させるパラメータスタディ 評価結果

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。



(1) 燃料集合体の外側の水密度のみを変化させた場合

燃料集合体の外側の水分状態、すなわち燃料集合体外気相部水密度のみを変化させた解析を実施した。解析条件を図3に、解析結果を図4に示す。図4に示すとおり実効増倍率は、燃料集合体間の気相部水密度が $0\text{g/cm}^3$ から約 $0.1\text{g/cm}^3$ に上昇するにつれて増加し、その後減少に転じるが、水密度 $1\text{g/cm}^3$ に向けて再度上昇しない点が既工事計画とは異なっている。本パラメータスタディでは、集合体間の水密度のみを変化させていることから、燃料集合体間の水密度が約 $0.1\text{g/cm}^3$ より大きくなる（中性子が隣接燃料へ到達するまでに燃料集合体間の水分子に吸収されやすくなる）一方で、燃料集合体単体の反応度は増加することがないため、実効増倍率は単調に減少したものである。

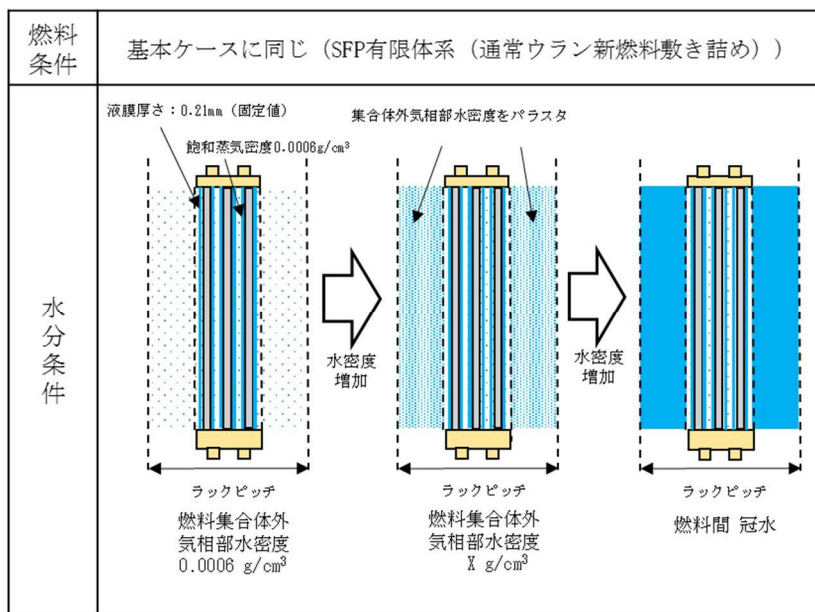


図3 燃料集合体の外の水密度のみを変化させるパラメータスタディ 評価条件

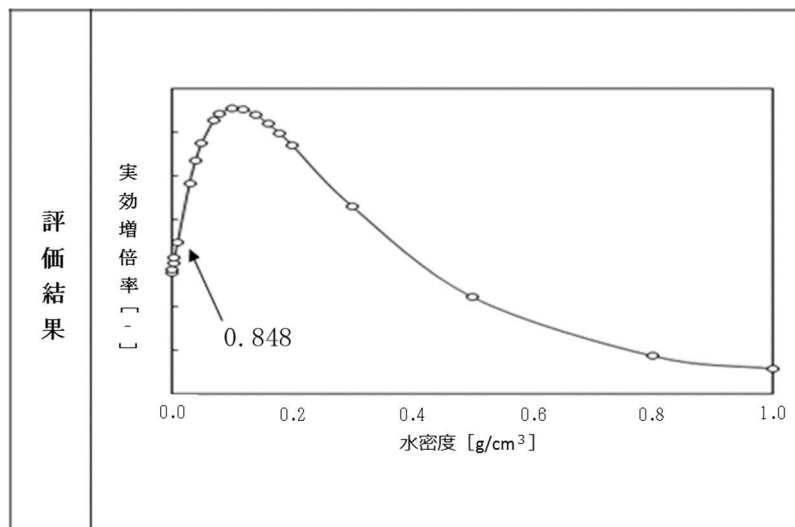


図4 燃料集合体の外のみを変化させるパラメータスタディ 評価結果

### 3. まとめ

図2及び図4の結果より、今回の評価体系においては、液膜厚さや燃料集合体外気相部水密度が変化した場合、実効増倍率は以下の挙動を示すことを確認した。

- ・液膜厚さが厚くなるほど、実効増倍率は大きくなる。
- ・燃料集合体間の気相部水密度が0～約 $0.1\text{g/cm}^3$ の範囲では、水密度が大きいほど実効増倍率は増加する。

SFPへの注水・放水流量の設定について

## 目 次

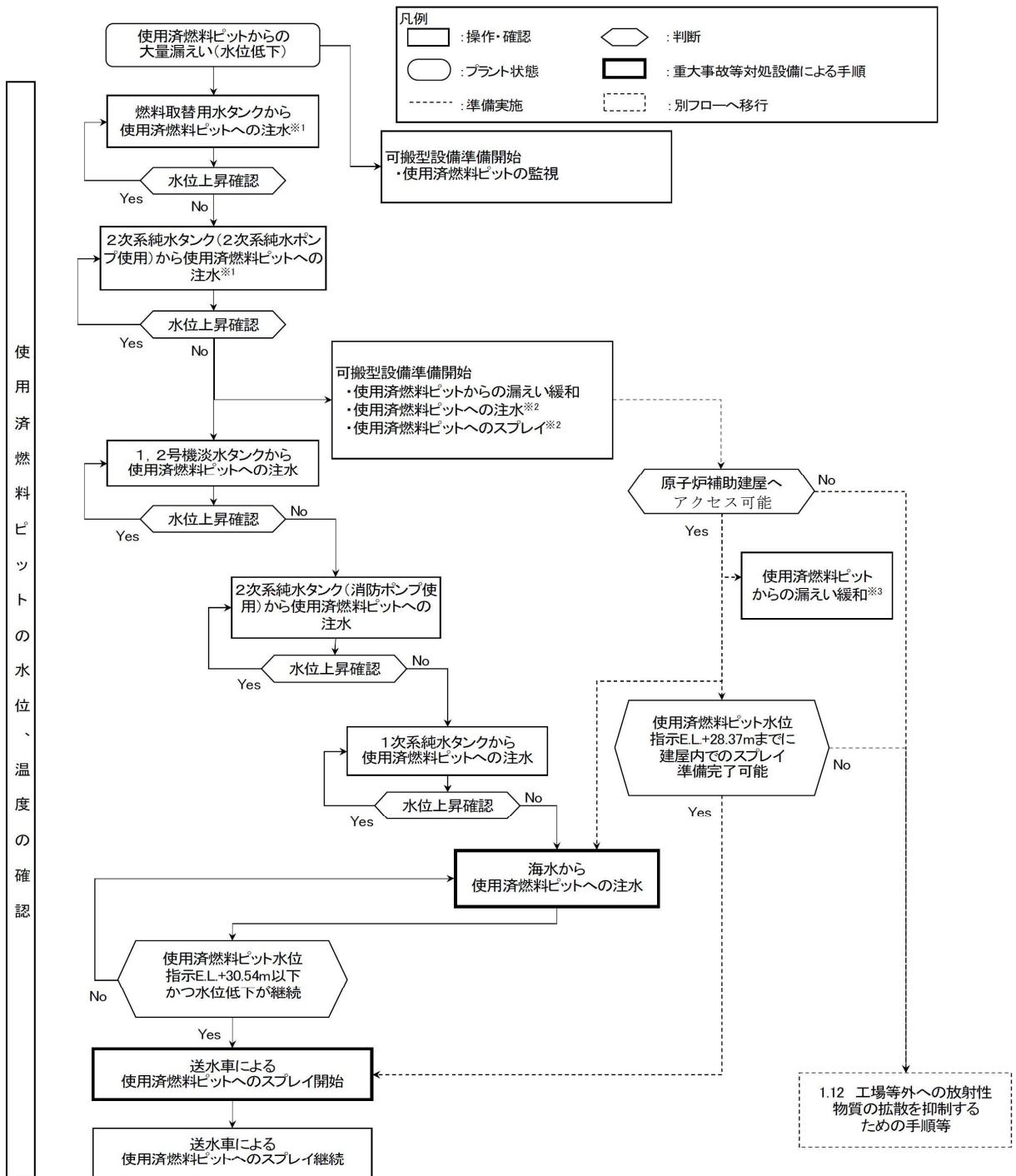
	頁
1. はじめに .....	別添3-1
2. SFPからの大量の水の漏えい時における注水・放水手順及び 設備保有台数 .....	別添3-1
3. 各手順における流量条件設定 .....	別添3-6
3.1 流量設定の考え方 .....	別添3-6
3.1.1 SFP注水手順の流量 .....	別添3-6
3.1.2 SFP放水手順の流量 .....	別添3-7
3.2 配管圧損評価について .....	別添3-7
4. 基本ケース条件の設定について .....	別添3-8
5. 不確かさを考慮した条件の設定について .....	別添3-26
6. 系統に複数台設置されるポンプの起動台数の考え方について .....	別添3-29
7. 全手順同時実施の成立性確認 .....	別添3-31
8. 評価条件として考慮した設備の管理について .....	別添3-32
9. まとめ .....	別添3-34

## 1. はじめに

使用済燃料ピット（以下「SFP」という。）からの大量の水の漏えい時には、重大事故等への対応に向け整備された手順に基づきSFPへ注水・放水を実施することとなっている。本資料では、未臨界性評価条件であるSFPへの流量について、各手順の設備構成、配備台数等を踏まえた、基本ケース条件及び不確かさを考慮した条件における条件設定及び設定根拠について説明する。なお、SFPへ水を供給する行為のうち、直近まで施設された配管等を用いるもの（燃料取替用水ポンプ等）を注水、スプレイヘッド又は放水砲によるものを放水と呼称する。

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

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



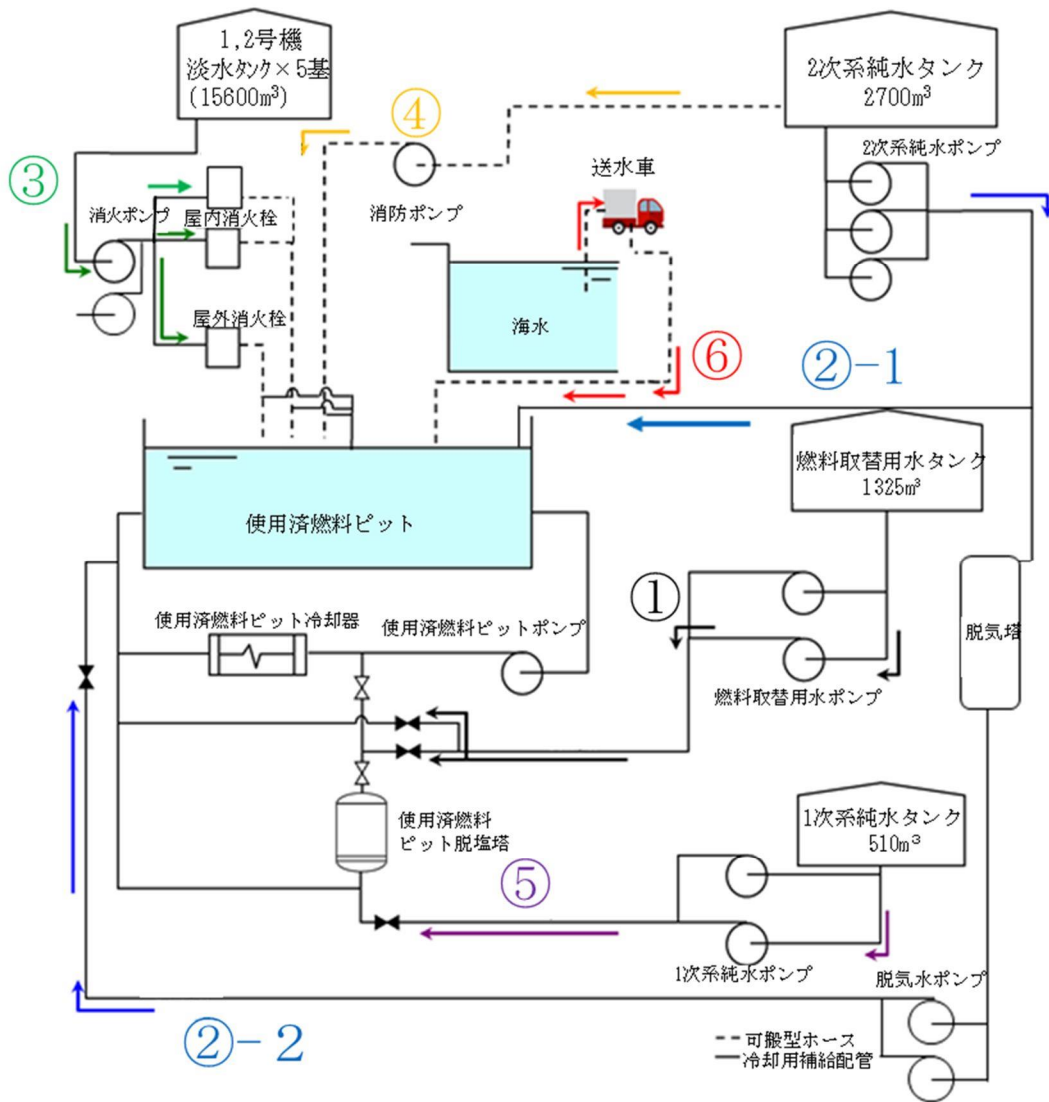
(注1)本フローに記載の注水手段については、複数の手段の準備又は注水を平行して実施することがある。また、水源の使用可否等に応じて手順を飛ばして対応することがある。

※1: 使用済燃料ピットの注水機能喪失の場合は使用不可

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

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

第1-1図 SFPへの注水・放水に係る手順の実施判断フロー



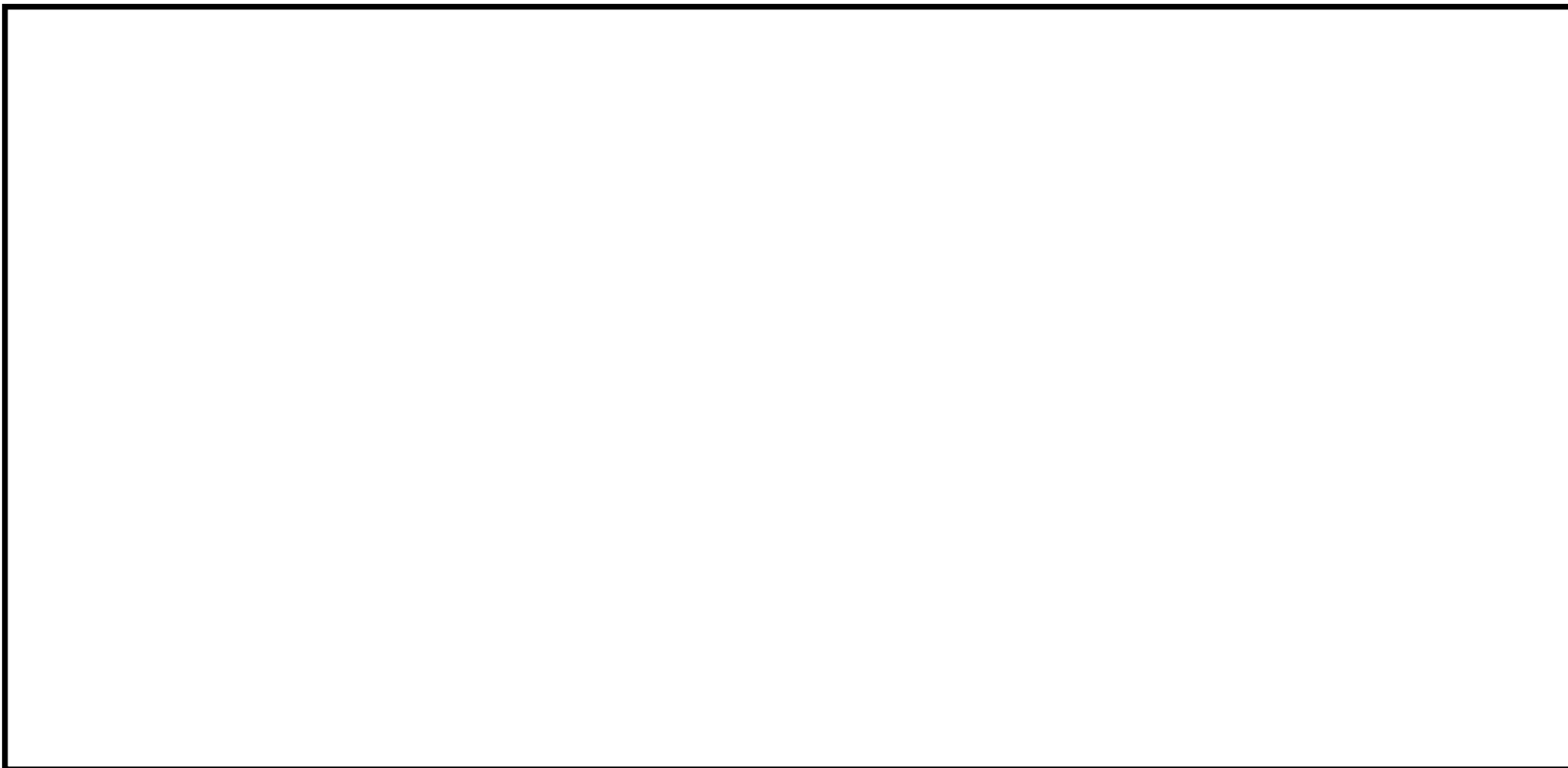
第1-2図 SFP注水設備の構成

今回の未臨界性評価においては、重大事故等対策のため整備しているSFPへの注水・放水に係る手順をもとに流量を設定する。

プラント通常運転時においてもSFP水は大気中へ自然蒸散するため、恒常的にSFP水位を監視し定期的にSFP水を補給しているが、当該補給時は手順②-1を用いて実施しており、手順②-2にて実施した実績は無い。

事故発生時は事故時向けに整備する手順書を用いて対応に当たること、手順②-2は恒常的に実施している手順でもないことから、今回未臨界性評価条件の流量条件を設定するに当たっては、手順②-2による流量は考慮しないこととする。

第1-3図 放水砲による放水時の設備構成



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第1表 SFPへの注水・放水手順における水源、送水ポンプ及びポンプ配備台数

	手順番号	整備する社内標準	水源	送水ポンプ	ポンプ使用台数	ポンプ配備台数	放水設備		
							設備	使用台数	配備台数
注水手順	①	事故時操作所則	燃料取替用水タンク	燃料取替用水ポンプ	1台	2台	—		
	②-1	通常時操作所則 <sup>※1</sup> 事故時操作所則 <sup>※1</sup>	2次系純水タンク	2次系純水ポンプ	1台	3台			
	②-2	通常時操作所則		脱気水ポンプ <sup>※2</sup>	1台 <sup>※2</sup>	2台 <sup>※2</sup>			
	③	SA所達 <sup>※3</sup>	1,2号淡水タンク	ディーゼル消火ポンプ 又は電動消火ポンプ	1台	各1台			
	④	SA所達 <sup>※3</sup>	2次系純水タンク	消防ポンプ	1台	1台			
	⑤	SA所達 <sup>※3</sup>	1次系純水タンク	1次系純水ポンプ	1台	2台			
	⑥	SA所達 <sup>※3</sup>	海水	送水車	1台	5台 <sup>※4</sup>			
放水手順	①	SA所達 <sup>※3</sup>	海水	送水車	1台/1SFP	3台 <sup>※5</sup>	スプレイ ヘッダ	1台/1SFP	3台 <sup>※7</sup>
	②	SA所達 <sup>※3</sup>	海水	大容量ポンプ (放水砲用)	2台/2SFP	3台 <sup>※6</sup>	放水砲	2台/2SFP	3台 <sup>※7</sup>

※1 通常時操作、事故時操作どちらにも整備している手順であり、注水時の系統構成は同じ。

※2 通常操作の手順であるため、流量設定条件として考慮しない。

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

※4 高浜1号機用に2台、高浜2号機用に2台、共用予備1台の計5台を配備。

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

※6 高浜1・2号機共用で2台、共用予備1台の計3台を配備。

※7 高浜1号機用に1台、高浜2号機用に1台、共用予備1台の計3台を配備。

### 3. 各手順における流量条件設定

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

#### 3.1 流量設定の考え方

##### 3.1.1 SFP注水手順の流量

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

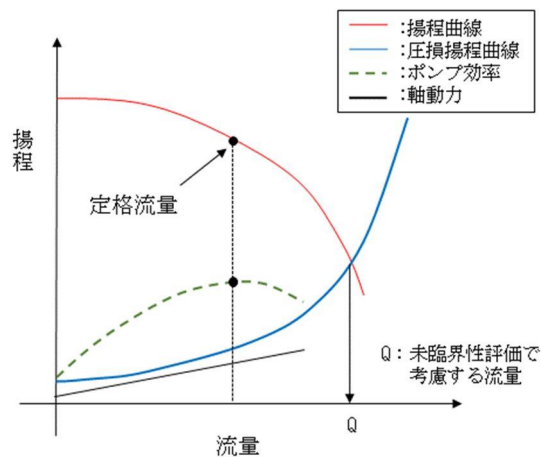
#### (1) 恒設設備を使用する手順

##### a. 実際の施設ラインで通水した実測値があるもの

実測値を使用する。（対象手順：注水手順②、③）

##### b. 実際のラインで通水した実測値が無いもの（対象手順：注水手順①、⑤）

第2図に示すとおり、ポンプの揚程曲線と、高浜発電所でのSFP注水手順において整備している注水時の具体的な設備・系統構成を踏まえた水頭差や配管圧損等により評価した損失揚程曲線の交点における流量を使用する。



第2図 揚程曲線を用いた流量設定の概要

#### (2) 可搬型設備を使用する手順

ポンプの揚程曲線と、設備構成を踏まえた水頭差や配管圧損等により評価した損失揚程曲線の交点における流量を使用する。

（対象手順：注水手順④、⑥）

### 3.1.2 SFP放水手順の流量

SFPへの放水に係る各手順によるSFPへの流入流量設定の考え方は以下のとおり。

#### (1) スプレイヘッドを用いて放水する手順

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

(対象手順：放水手順①)

#### (2) 放水砲を用いて放水する手順

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

(対象手順：放水手順②)

### 3.2 配管圧損評価について

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

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

なお、系統中にはエルボ、バンド等が存在するが、それら配管形状抵抗や弁の抵抗については等価直管長（L/D）にて考慮する。また、レジューサ（拡大／縮小）部や配管出入口部の配管形状による抵抗は、抵抗係数kにて考慮する。各配管要素の等価直管長さの代表例を第2表に、抵抗係数の代表例を第3表に示す。

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

第2表 各配管要素の等価直管長\*

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

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

第3表 各配管要素の抵抗係数\*

配管要素	抵抗係数 k	備考
配管入口	0.5	形状が平面接続型の場合
配管出口	1.0	
レジューサ (拡大)	$\left(1 - \frac{D_{OUT}^2}{D_{IN}^2}\right)^2$	D <sub>IN</sub> : 入口配管内径 D <sub>OUT</sub> : 出口配管内径
レジューサ (縮小)	$0.5 \times \left(1 - \frac{D_{OUT}^2}{D_{IN}^2}\right)$	D <sub>IN</sub> : 入口配管内径 D <sub>OUT</sub> : 出口配管内径

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

#### 4. 基本ケース条件の設定について

基本ケース条件には原則、実態により則した条件を設定する観点から、重大事故等への対応に向け整備された手順に基づき設定するものとし、実施手順数及び系統内ポンプの使用台数については以下の前提を置く。

##### a. 実施手順数

SFPへの注水・放水に係る全手順の同時実施を想定する。なお各手順の設備構成、水源の容量及び対応要員数の観点より、全手順を同時に実施することは可能である。

##### b. 各手順における系統内ポンプの使用台数

1手順当たり1台とする。

上記の前提に基づき、各手順における基本ケース条件の流量を設定する。

(1) 燃料取替用水タンクからの注水流量（注水手順①）

注水手順①については、3.1.1.(1)b.に示すとおり、恒設設備を使用し、実測値が無い手順であるため、圧損揚程曲線を策定のうえ流量を評価する。なお、本手順は第1-2図に示すとおり手順⑤と注水ラインを一部共有していることから、同時実施時におけるライン共有部の圧損増加を考慮し評価する。

・ 静水頭差等の条件

第4表に取水源及び移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

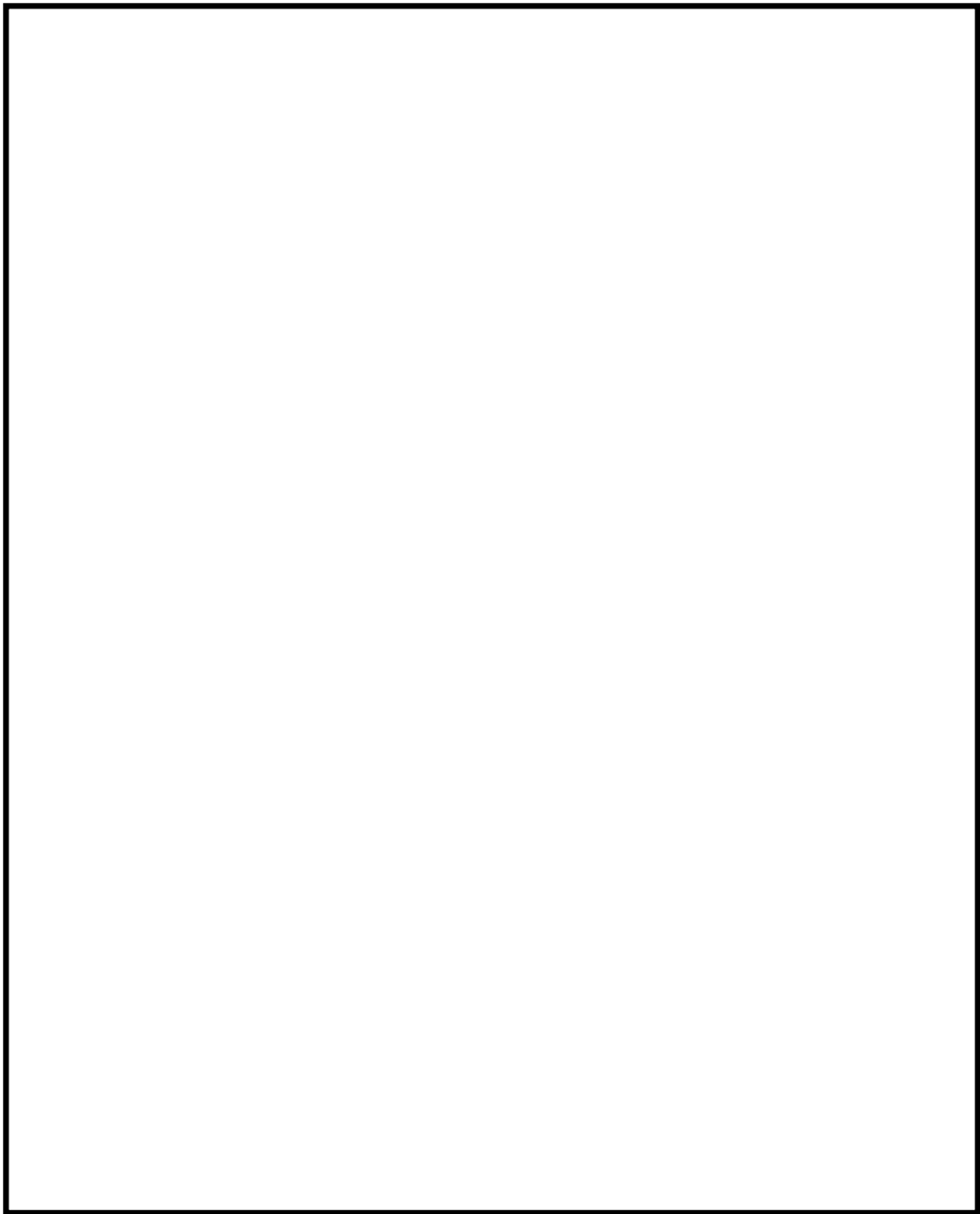
第4表 水源と移送先の静水頭差（手順①）

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

・ 注水時の系統構成

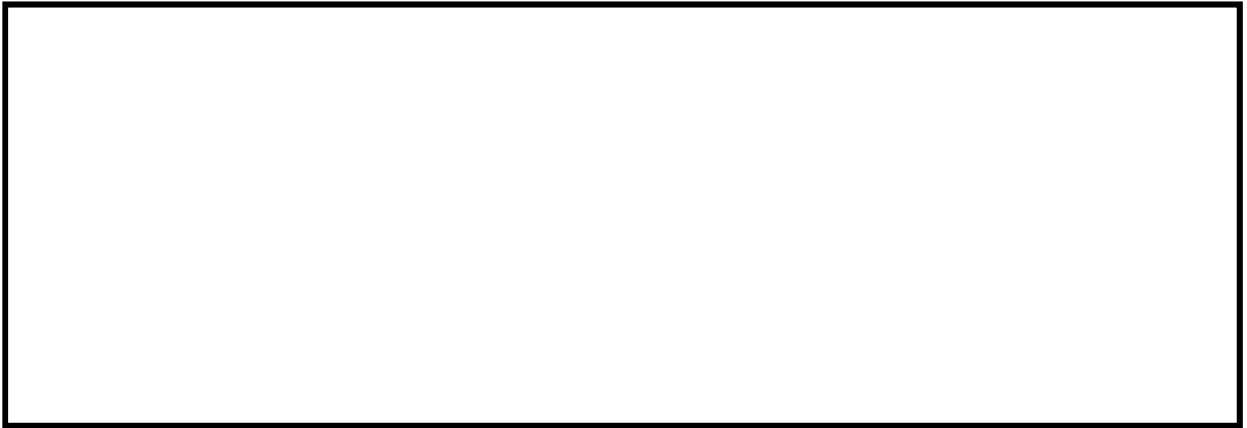
注水時の具体的手順を第3図に、手順に示される対応により構成される系統の概要を第4図に示す。手順では、赤で示す系統上のオリフィスを通して注水されることとなる。オリフィス通水時に発生する圧損は、オリフィス口径と配管内径より算出される断面積比に対し抵抗係数を算出し、ダルシーの式より求める。系統上オリフィスの概要を第5図に、圧損計算に使用した系統情報を第5表に示す。

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。

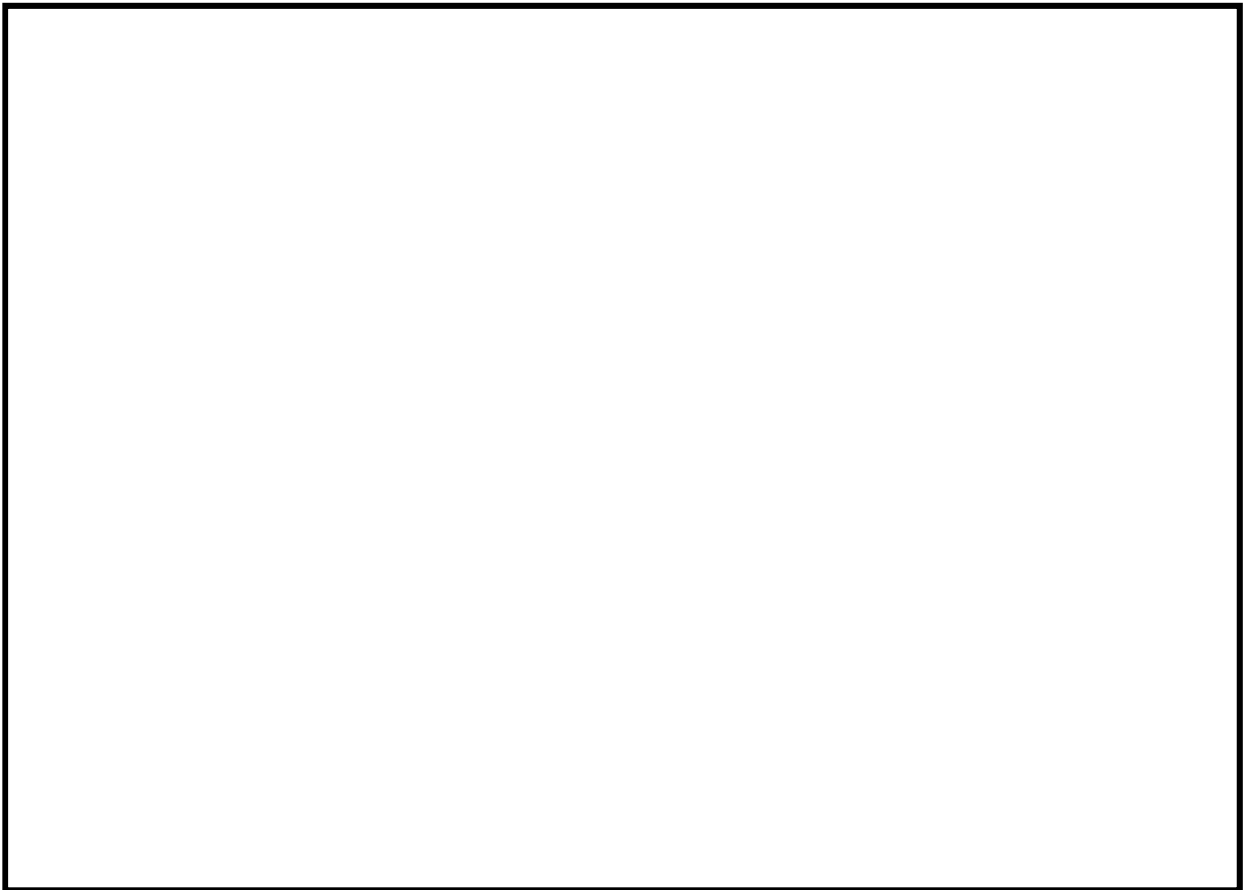


第3図 燃料取替用水ポンプを用いたSFPへの注水における具体的実施手順  
(高浜発電所1号機 事故時操作所則抜粋)

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図 燃料取替用水ポンプを用いてSFPへ注水する際の系統構成概要



第5図 系統上オリフィスの概要

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表 系統内配管情報（燃料取替用水ポンプからの注水手順）

配管仕様 [インチ]	2	3	4	8
内径 [mm]				
総配管長さ [m]	1.1	86.0	0.8	14.6
90° エルボ数 [個]	2	29	—	3
45° エルボ数 [個]	—	6	1	—
ティー（ラン） [個]	—	—	—	—
ティー（ブランチ） [個]	—	5	1	—
仕切弁 [個]	—	7	—	1
逆止弁 [個]	—	1	—	—
レデューサ（2×3） [個]	2	—	—	—
レデューサ（3×2） [個]	1	—	—	—
配管入口 [個]	—	1	—	—
配管出口 [個]	—	—	1	—

・評価結果

評価結果を第6図に示す。ポンプ揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は、約21m<sup>3</sup>/hであり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。



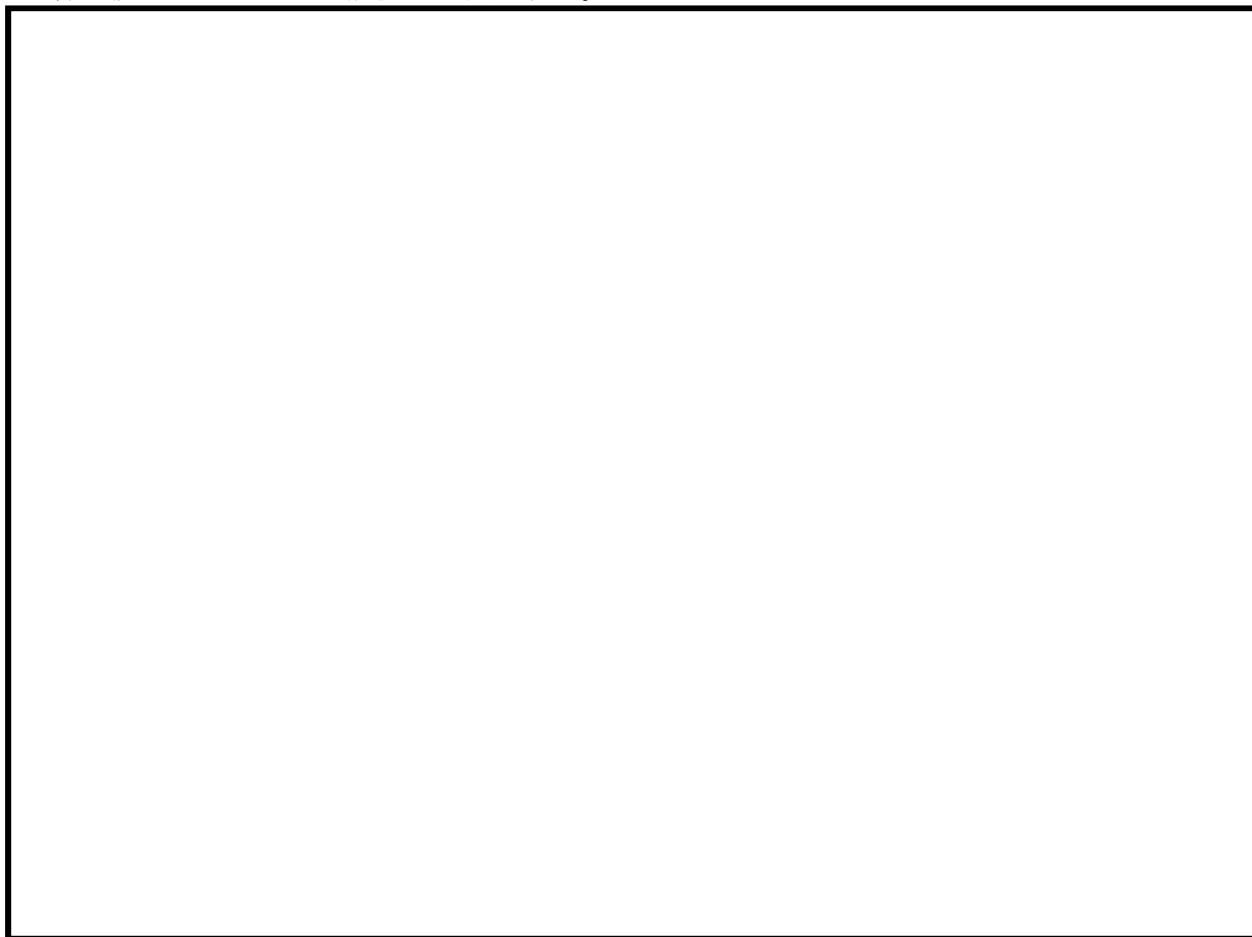
第6図 手順①におけるポンプ揚程及び性能曲線との関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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

注水手順②については、3.1.1(1)a. に示すとおり恒設設備を使用し、実測値がある手順であるため、実測値を使用する。実測値は第7図に示すとおり、約 $5\text{m}^3/\text{h}$ であり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。

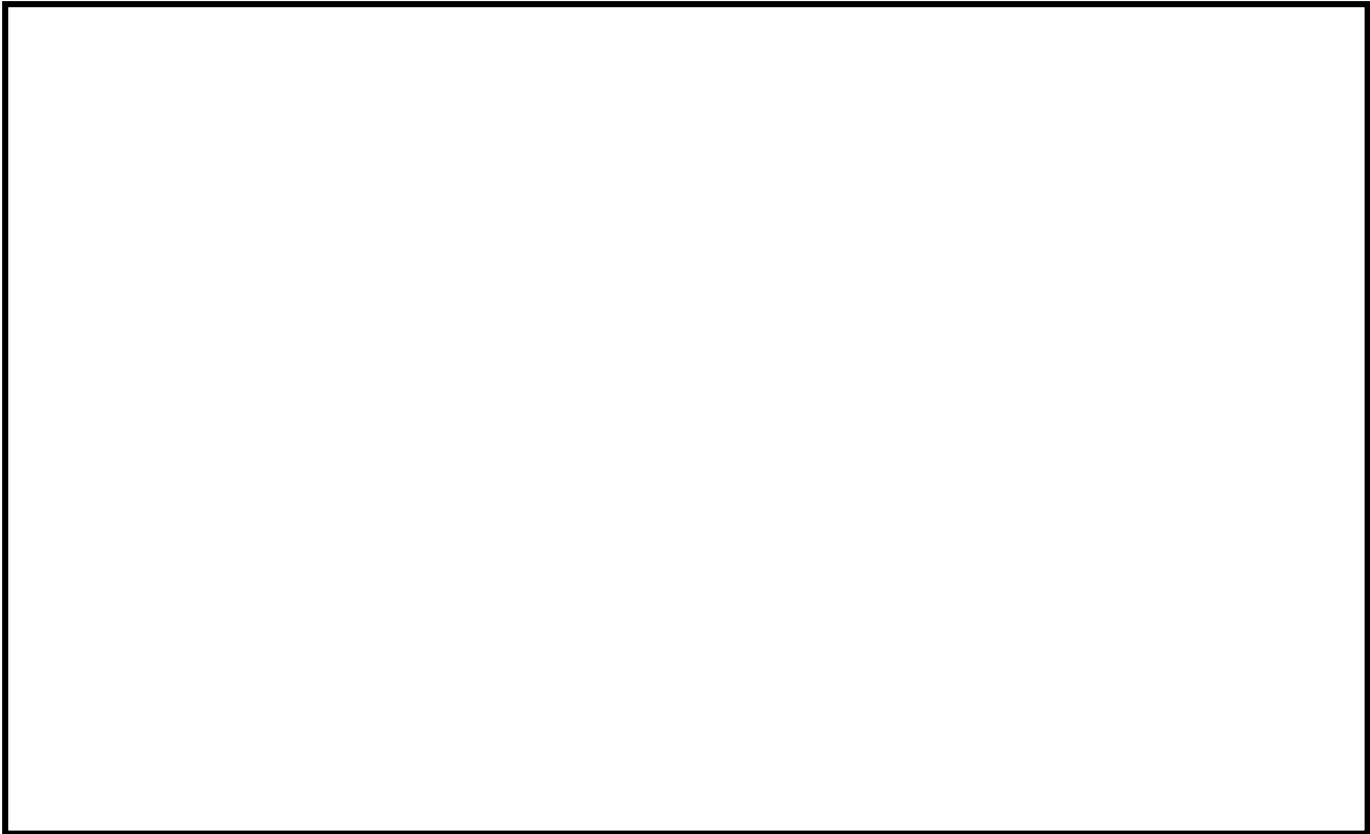


第7図 2次系純水ポンプ 流量出典（水張ライン使用時の実測値）

(3) 1,2号淡水タンクからの注水流量（注水手順③）

注水手順③については、3.1.1(1)a. に示すとおり恒設設備を使用し、実測値がある手順であるため、実測値を使用する。実測値は第8図に示すとおり、約 $22\text{m}^3/\text{h}$ であり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第8図 消火栓を用いた注水 流量出典

(4) 2次系純水タンク（消防ポンプ使用）からの注水流量（注水手順④）

注水手順④については、3.1.1(2)に示すとおり、可搬型設備を使用する手順であるため、ポンプ揚程曲線を用い系統圧損等を踏まえ評価する。

・評価条件

第6表に取水源及び移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第6表 水源と移送先の静水頭差（手順④）

	手順④	備考
取水源 E. L.		タンク100%水位E. L.
移送先 E. L.		SFPフロアE. L.
静水頭差(移送先E. L. - 取水源E. L.)	-14.27m	—

また、圧損計算に使用した系統情報を第7表に示す。なお、ホース敷設長さは、高浜1号及び2号機それぞれへの敷設ルートの最短ルート（1号機東側シャッターからの敷設ルート）の長さとした。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

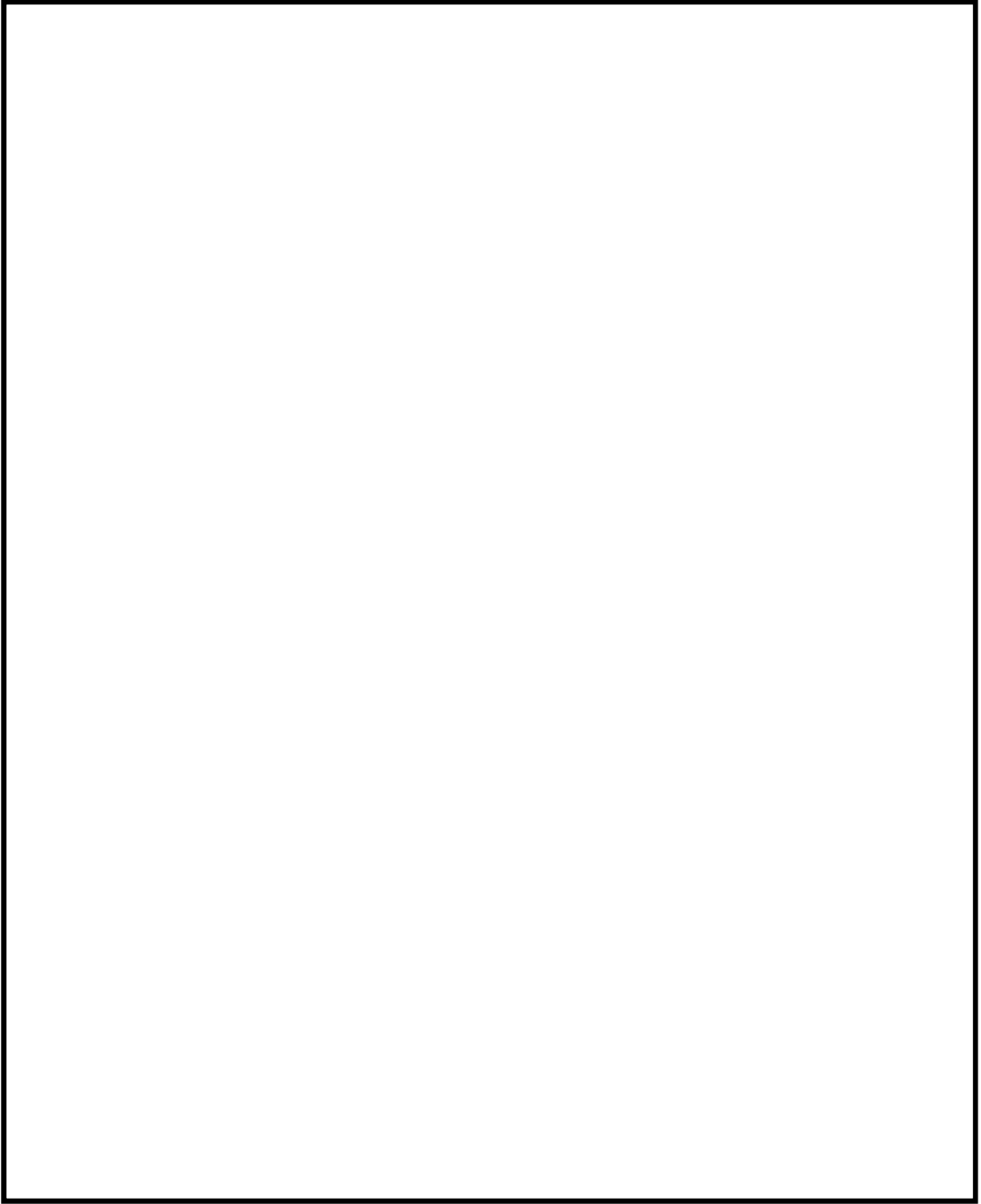
第7表 系統内配管情報

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

・評価結果

評価結果を第9図に示す。ポンプ揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は約 $95\text{m}^3/\text{h}$ であり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第9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。

(5) 1次系純水タンクからの注水流量（注水手順⑤）

注水手順⑤については、3.1.1(1)b.に示すとおり、恒設設備を使用し、実測値が無い手順であるため、圧損揚程曲線を策定のうえ流量を評価する。なお、本手順は第1-2図に示すとおり手順①と注水ラインを一部共有していることから、同時実施時におけるライン共有部の圧損増加を考慮し評価する。

・ 静水頭差等の条件

第8表に取水源及び移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

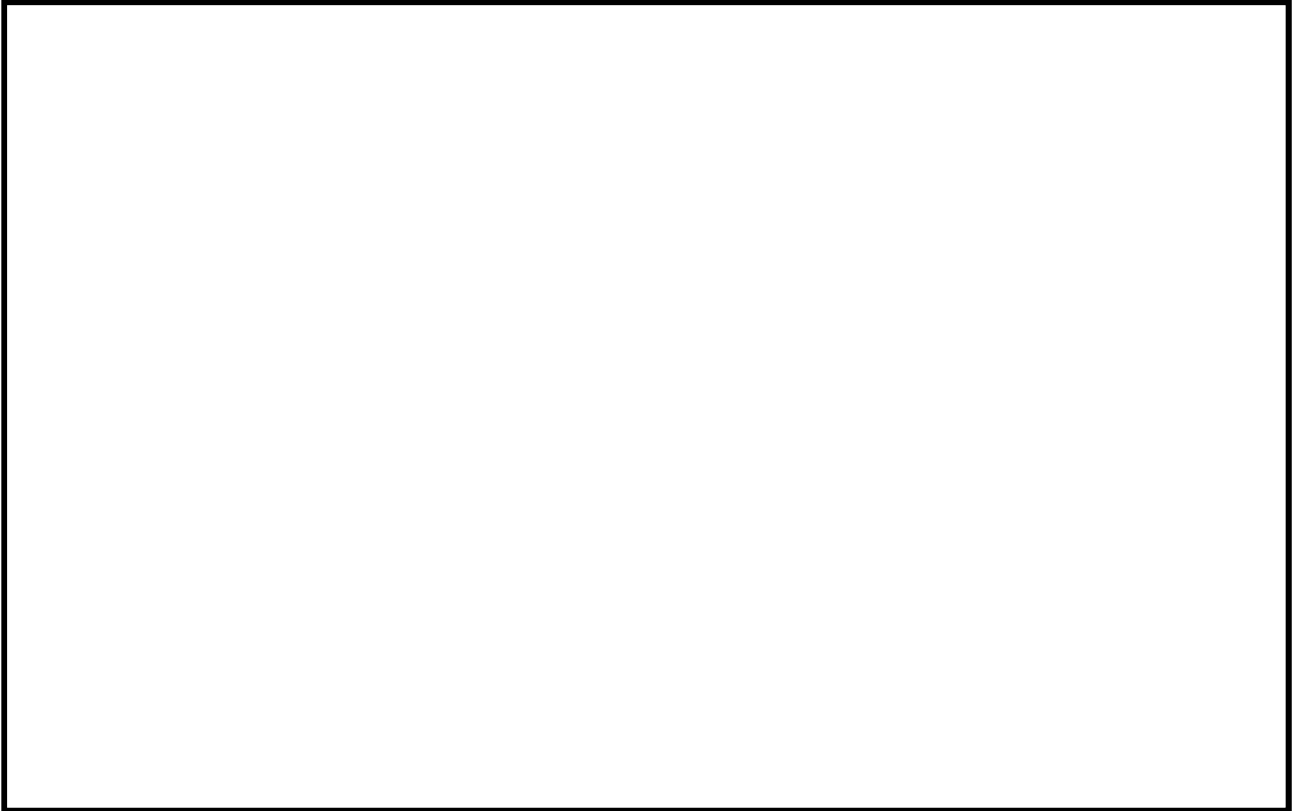
第8表 水源と移送先の静水頭差（手順⑤）

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

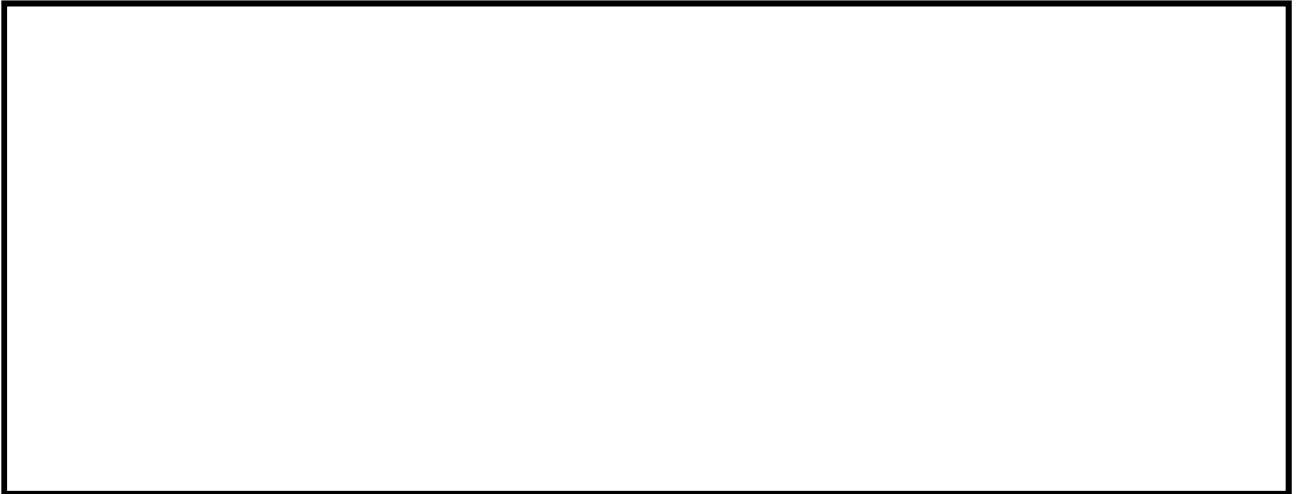
・ 注水時の系統構成

注水時の具体的実施手順を第10図に、手順に示される対応により構成される系統のラインナップを第11図に、圧損計算に使用した系統情報を第9表に示す。

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。



第10図 1次系純水ポンプを用いたSFPへの注水における具体的実施手順



第11図 1次系純水ポンプを用いてSFPへ注水する際の系統構成概要

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第9表 系統内配管情報（手順⑤）

配管仕様 [インチ]	2	3	4	8
内径 [mm]				
総配管長さ [m]	33.0	58.7	50.3	14.6
90° エルボ数 [個]	8	19	12	3
45° エルボ数 [個]	—	2	3	—
ティー（ラン） [個]	—	—	—	—
ティー（ブランチ） [個]	3	3	4	—
仕切弁 [個]	1	5	3	1
逆止弁 [個]	1	—	2	—
レデューサ（2×3） [個]	2	—	—	—
レデューサ（2×4） [個]	1	—	—	—
レデューサ（3×2） [個]	2	—	—	—
レデューサ（4×3） [個]	—	2	—	—
配管入口 [個]	—	—	1	—
配管出口 [個]	—	—	1	—

・評価結果

評価結果を第12図に示す。ポンプ揚程曲線と圧損揚程曲線より求まる流量は、約39m<sup>3</sup>/hであり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。



第12図 手順⑤におけるポンプ揚程及び性能曲線との関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(6) 海水（送水車使用）からの注水流量（注水手順⑥）

注水手順⑥については、3.1.1(2)に示すとおり、可搬型設備を使用する手順であるため、ポンプ揚程曲線を用い系統圧損等を踏まえ評価する。

・評価条件

第10表に取水源及び移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第10表 水源と移送先の静水頭差（注水手順⑥）

	手順⑥	備考
取水源 E. L.		タンク100%水位E. L.
移送先 E. L.		SFPフロアE. L.
静水頭差(移送先E. L. - 取水源E. L.)	28.8m	—

計算に使用した系統情報を第11表に示す。なお、ホース敷設長さは、1号及び2号機それぞれへの敷設ルートの最短ルート（1号機西側シャッターからの敷設ルート）の長さとした。

第11表 系統内配管情報（注水手順⑥）

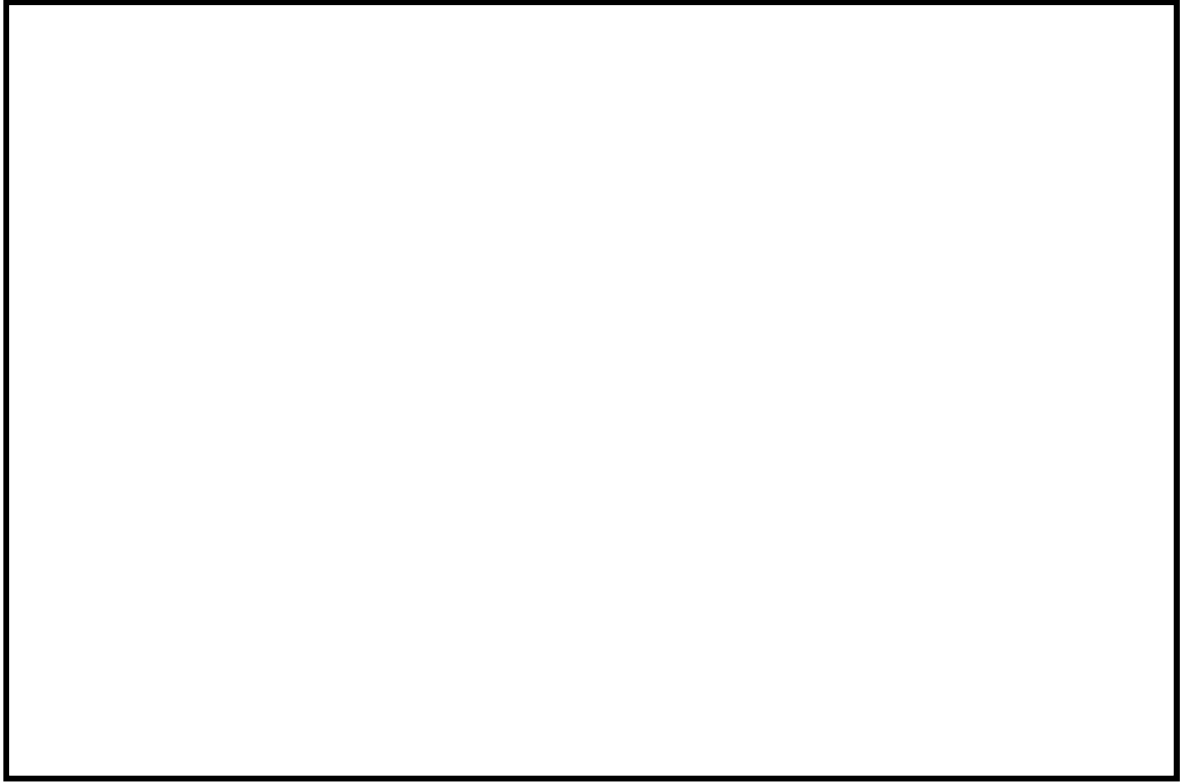
ホース情報		備考
敷設ホース仕様		—
内径[mm]		当該ホース仕様における省令上の内径上限値
敷設長さ[m]		最短敷設ルートでの敷設長さ

・評価結果

評価結果を第13図に示す。ポンプ揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は約260m<sup>3</sup>/hであり、基本ケース条件の設定においては当該流量を使用する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



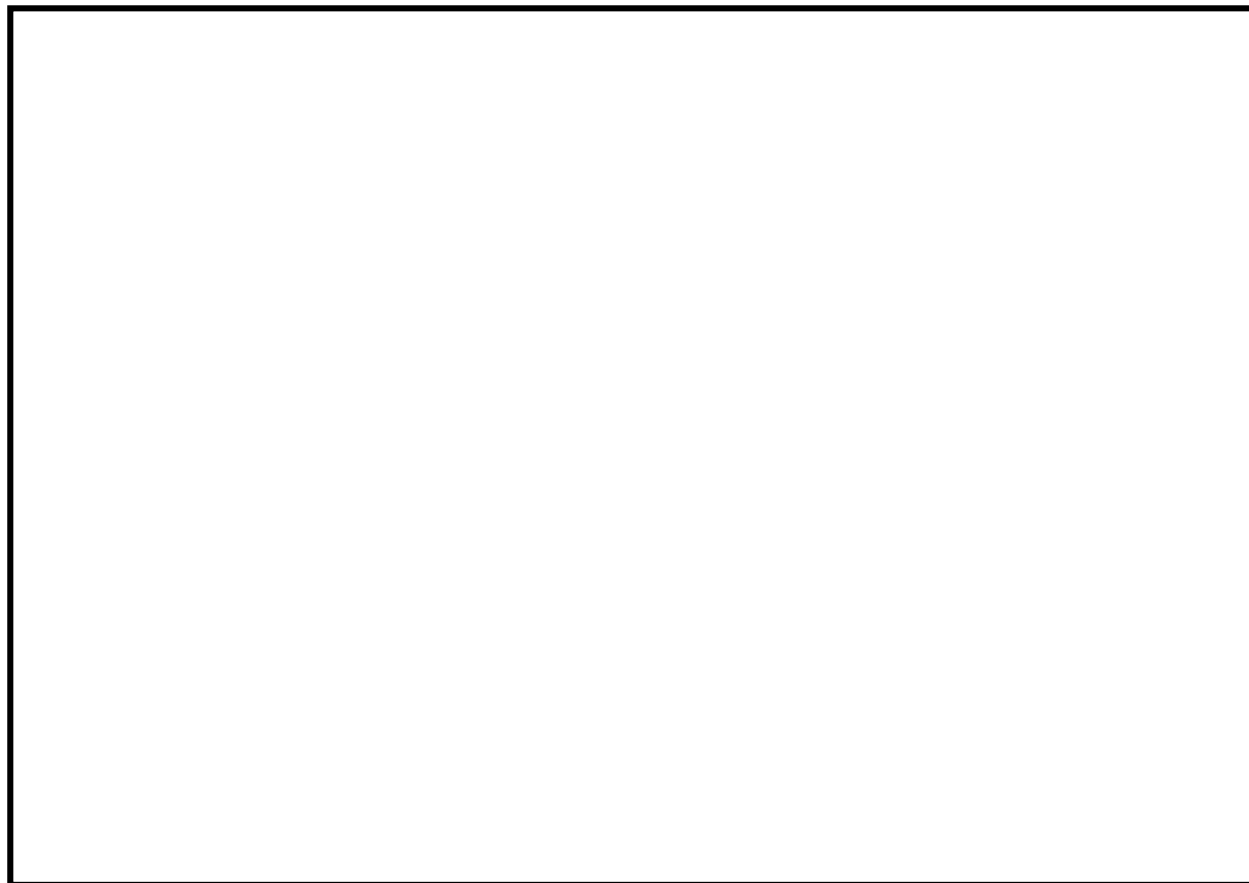


第13図 送水車 流量出典

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。

(7) 送水車を使用したスプレイヘッドによる放水流量（放水手順①）

放水手順①については、3.1.2(1)に示すとおり、放水設備であるスプレイヘッドの仕様上限値として、第14図に示すとおり約  m<sup>3</sup>/hとする。



第14図 スプレイヘッドを用いた放水手順の流量

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(8) 大容量ポンプ（放水砲用）を使用した放水砲による放水流量（放水手順②）

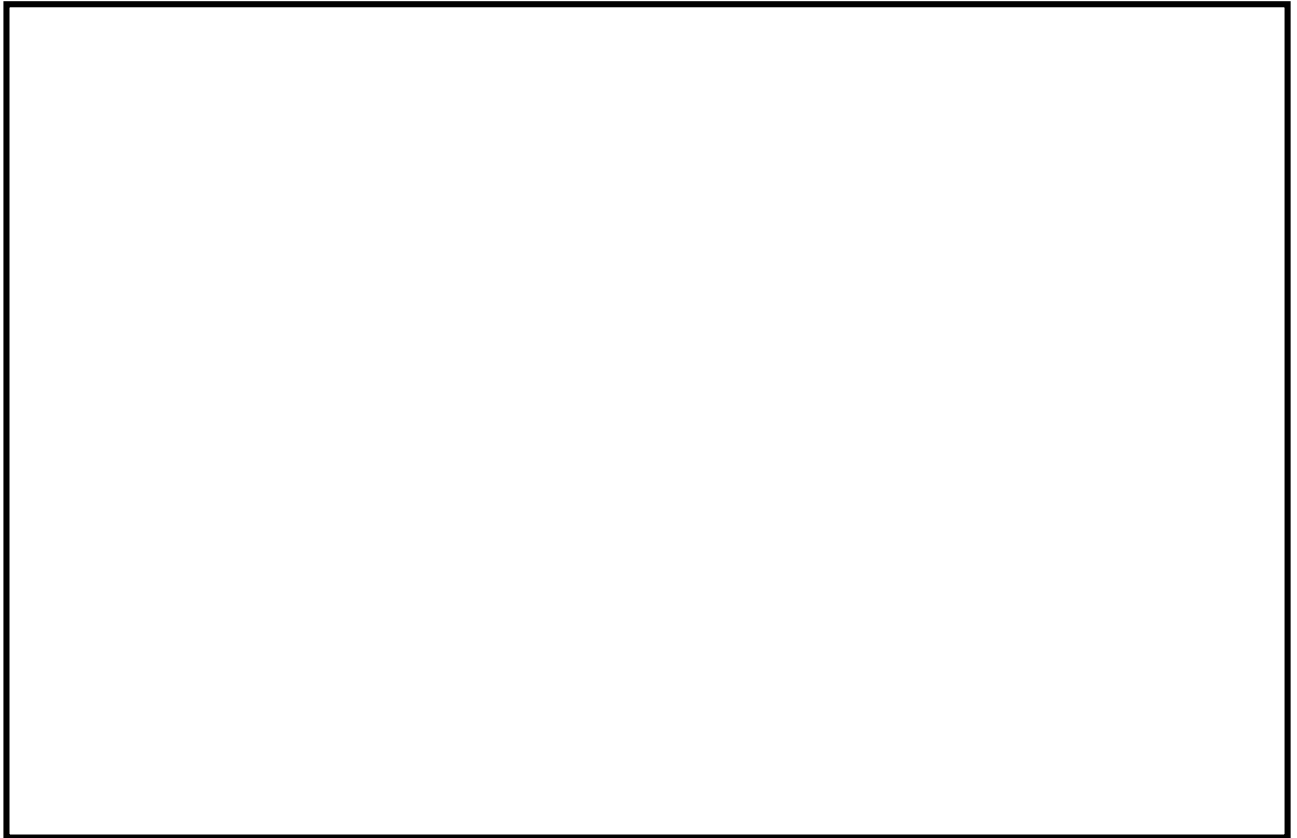
放水手順②については、3.1.2(2)に示すとおり、配備されている大容量ポンプ（放水砲用）の型式及び設備構成を踏まえ設定する。なお、大容量ポンプ（放水砲用）にはポンプ入口まで海水を送水する水中ポンプが備わっており、水中ポンプは油圧駆動でポンプインペラを回転させ水を吐出する構造となっている。流量増加の際はインペラへ油圧をかけることになるが、大容量ポンプ（放水砲用）の揚程曲線上の最大送水量において作動油圧上限値に達し、当該上限値以上の油圧が水中ポンプにかかることがない機構となっているため、大容量ポンプ（放水砲用）の流量が当該上限値以上となることはない。

具体的には、高浜発電所に配備されている大容量ポンプ（放水砲用）の型式はそれぞれ第12表に示す3種類があり、各型式の流量送水量は第15-1図～第15-3図に示すとおりそれぞれ1 [ ] m<sup>3</sup>/h（型式：HS900）、 [ ] m<sup>3</sup>/h（型式：HS900N）、 [ ] m<sup>3</sup>/h（型式：HS1200）である。これらを直列に2台接続する場合の最大送水量は [ ] m<sup>3</sup>/h（HS900及び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 [ ] m<sup>3</sup>/hを2等分した [ ] m<sup>3</sup>/hとなる。

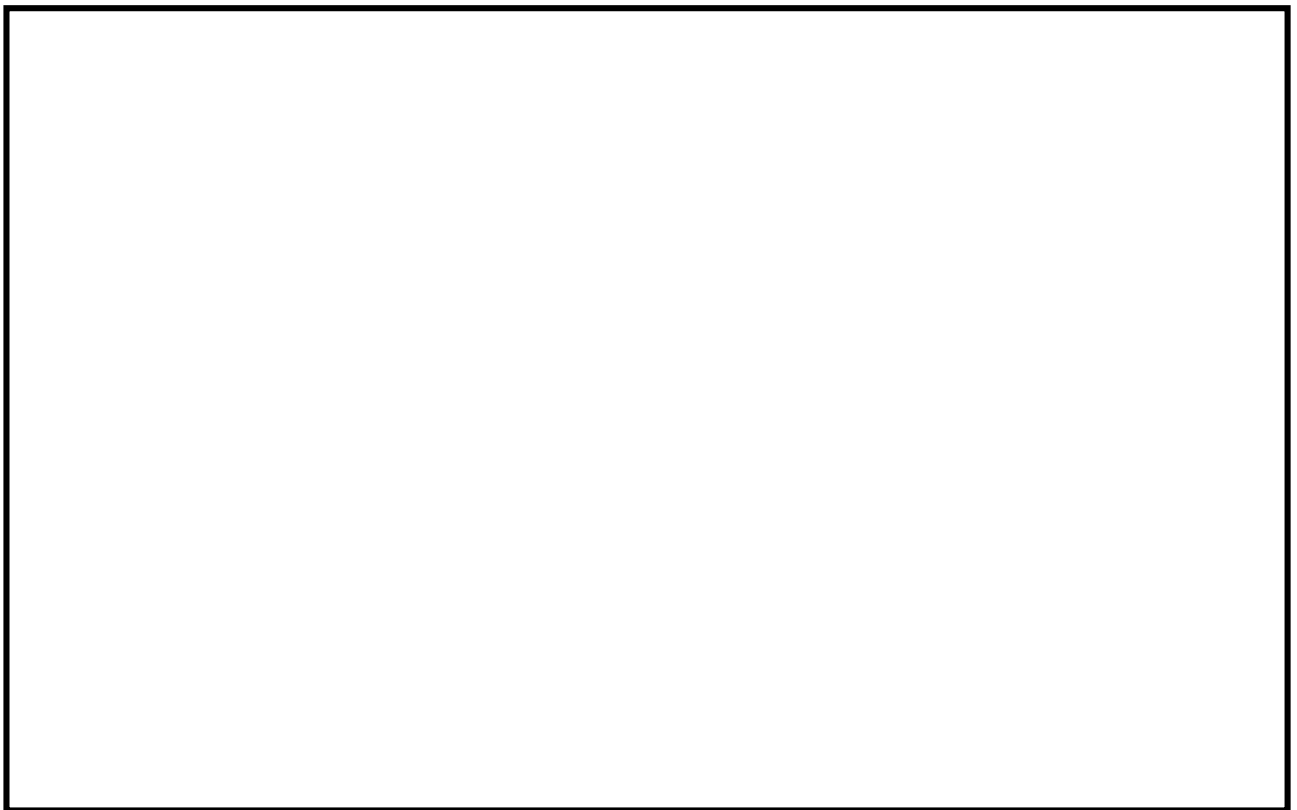
第12表 高浜1・2号機に配備している大容量ポンプ（放水砲用）の型式

型式	HS900 (1, 2号機共用)	HS900N (1, 2号機共用)	HS1200 (共用予備)
既工事計画記載値	[ ] m <sup>3</sup> /h以上		

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

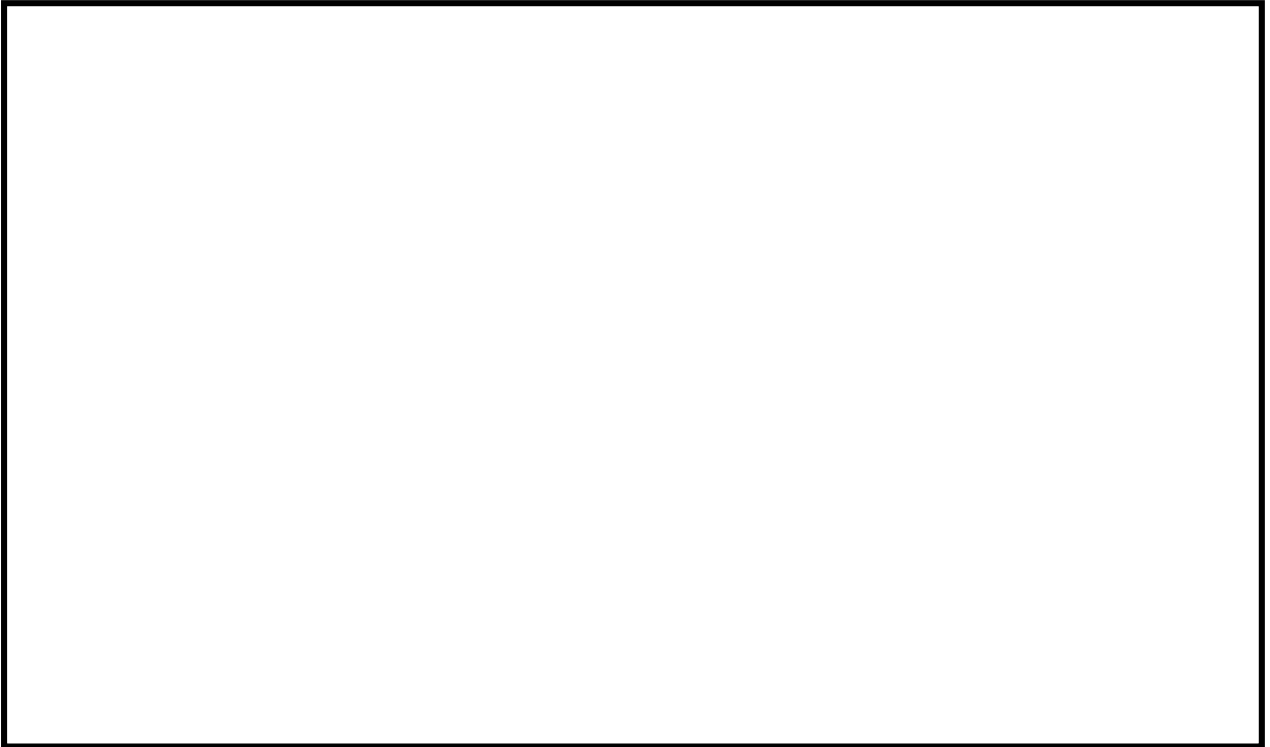


第15-1図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS900）



第15-2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15-3図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS1200）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

5. 不確かさを考慮した条件の設定について

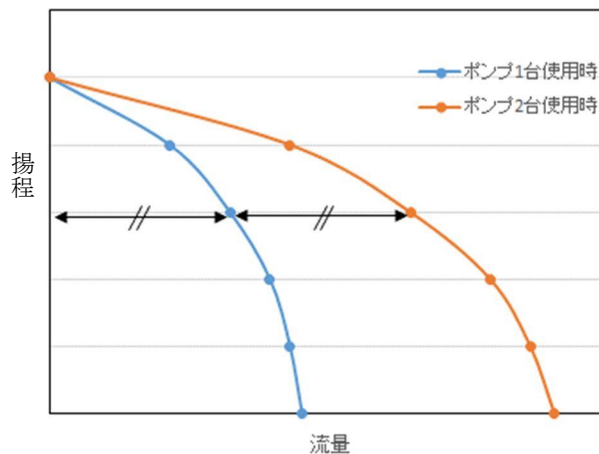
不確かさを考慮した条件の設定に際しては、重大事故等への対応に向け整備された手順に示される具体的記載事項を踏まえ、以下の考え方にに基づき設定する。

a. 実施手順数

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

b. 各手順における系統内ポンプの使用台数

系統内ポンプの使用台数は、手順上からは1台と読み取れるが、運転ポンプを切替える場合には一時的に複数台分の流量が吐出される可能性があることから、不確かさとして系統内に設置されるポンプが全数起動することを考慮する。なお、ポンプの複数台起動を想定するに当たり、ポンプの設計揚程曲線は第16図に示すとおり、ポンプ1台時の設計揚程曲線の流量にポンプ台数を乗じて求められる曲線を使用する。また、ポンプ1台での通水時の実測値がある手順については、流量増加に伴う配管圧損増加の影響を無視する保守的な設定として、ポンプ1台での通水実績（基本ケース条件）にポンプの系統内設置台数を乗じることで算出する。



第16図 ポンプ複数台使用時の揚程曲線設定（2台使用時の概要）

上記の前提及び3.1に示す具体的考え方にに基づき、各手順における流量の不確かさを考慮した条件を設定する。なお、基本ケース条件からの変更点は、使用するポンプ台数の増加であり、系統圧損の評価手法及び水源－SFPの水頭差は変わらないことから、以降では①での系統構成及び各手順での評価結果のみを示す。

(1) 燃料取替用水タンク及び1次系純水タンクからの注水流量（注水手順①及び手順⑤）

評価する手順①での系統概要を第17図に、ポンプの起動台数を全数とした評価結果を第18-1及び第18-2図に示す。ポンプの揚程曲線と圧損揚程曲線が交わる流量は、手順①で約 $21\text{m}^3/\text{h}$ 、手順⑤で約 $42\text{m}^3/\text{h}$ であり、不確かさを考慮した条件の設定においては当該流量を使用する。



第17図 手順①における不確かさを考慮した流量を計算する際の系統構成概要



第18-1図 手順①におけるポンプ揚程及び性能曲線との関係



第18-2図 手順⑤におけるポンプ揚程及び性能曲線との関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

3.1.1(1)a. に示すとおり恒設設備を使用し、実測値がある手順であるため、基本ケース条件にポンプ台数を乗じた値として $5\text{m}^3/\text{h} \times 3\text{台} = 15\text{m}^3/\text{h}$ を、不確かさを考慮した条件として使用する。

(3) 1,2号淡水タンクからの注水流量（注水手順③）

3.1.1(1)a. に示すとおり恒設設備を使用し、実測値がある手順であるため、基本ケース条件にポンプ台数を乗じることとし、さらに接続消火栓の数（3箇所）も乗じた値として、 $22\text{m}^3/\text{h} \times 2\text{台} \times 3\text{箇所} = 132\text{m}^3/\text{h}$ を、不確かさを考慮した条件として使用する。

(4) 2次系純水タンク（消防ポンプ使用）からの注水流量（注水手順④）

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

(5) 海水（送水車使用）からの注水流量（注水手順⑥）

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

(6) 送水車を使用したスプレイヘッドによる放水流量（放水手順①）

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

(7) 大容量ポンプ（放水砲用）を使用した放水砲による放水流量（放水手順②）

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

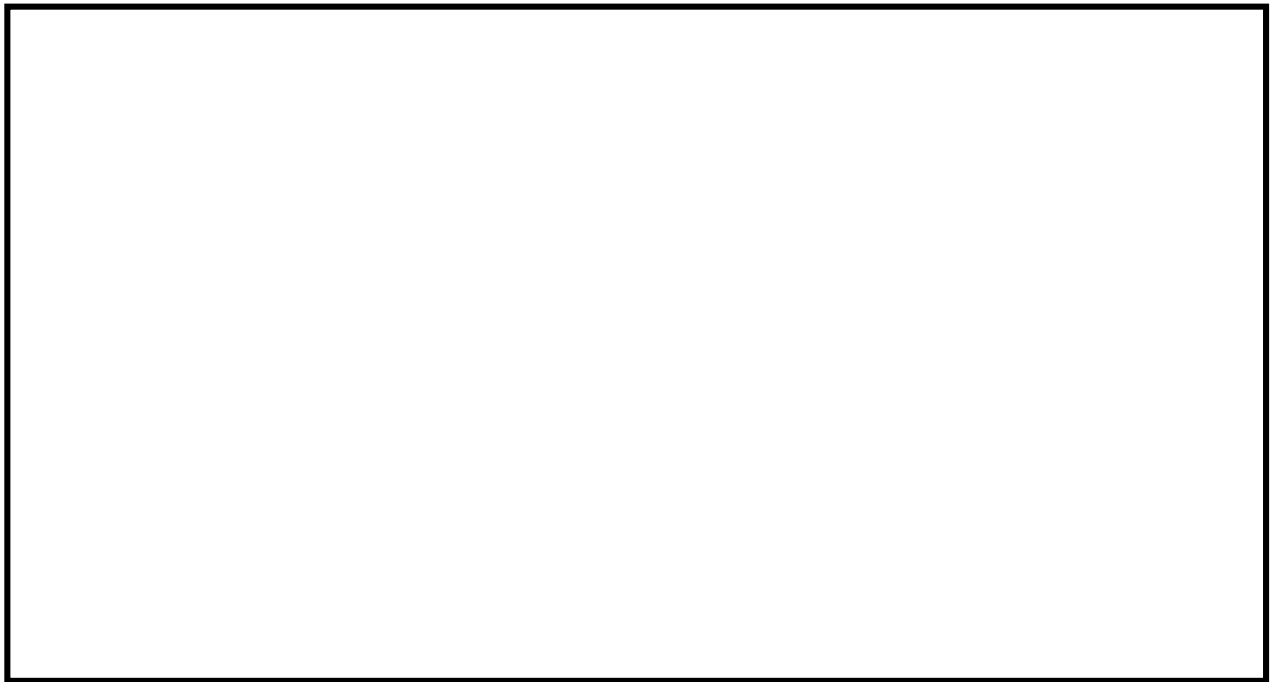
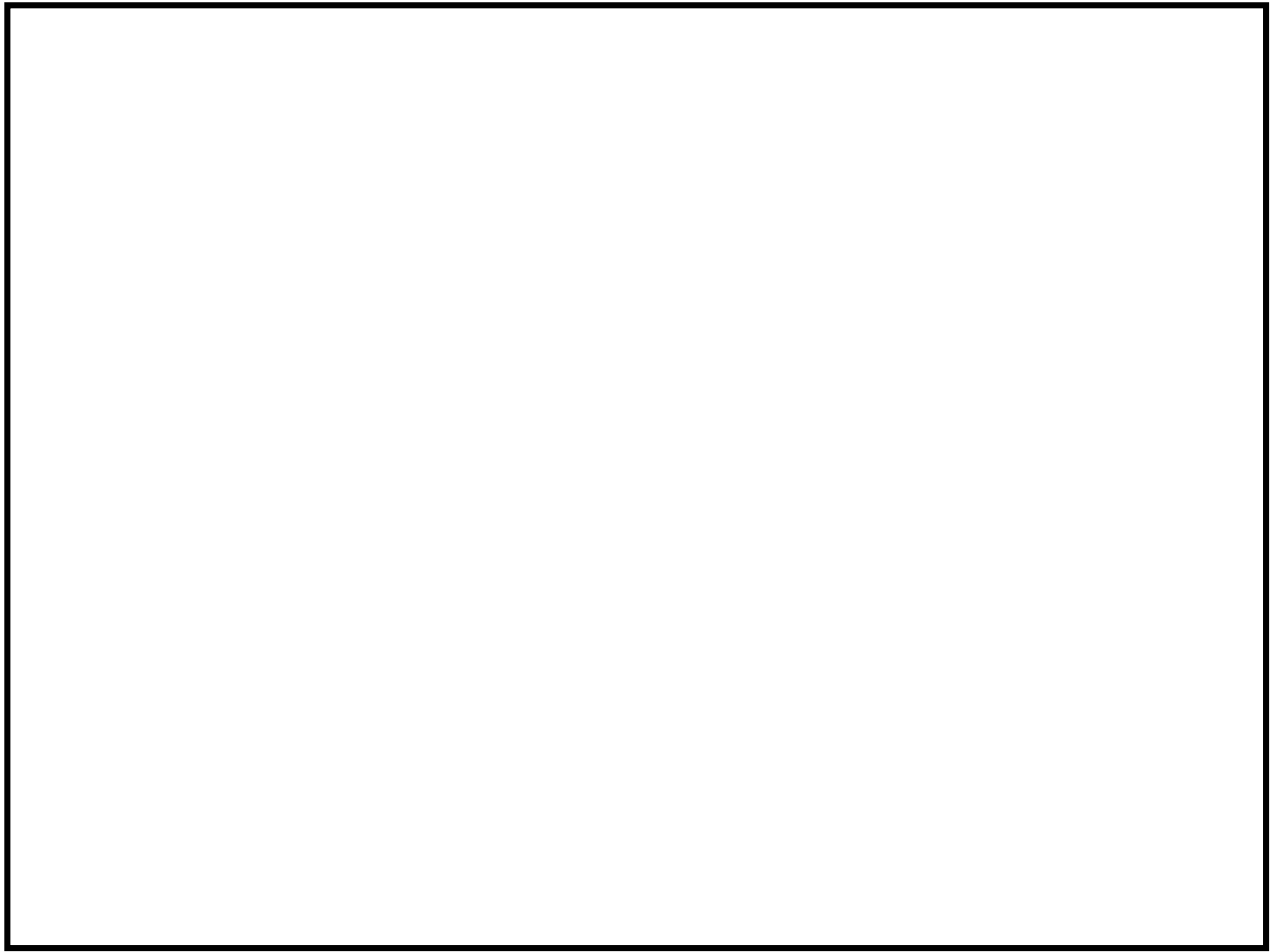


#### 6. 系統に複数台設置されるポンプの起動台数の考え方について

流量の基本ケース条件の設定に当たっては、原則最確値を設定する観点から、1手順につき1台の起動を想定している。手順によっては系統内に複数台のポンプが設置されているものがあるが、それらは事故時の対応に多重性を持たせるため、あるいは点検や故障等のため使用できない場合におけるバックアップの位置づけである。また、第19図に実際の事故時に使用する手順書の例を示すが、注水ラインの形成に当たっては片側ラインずつ形成する前提としていることも読み取れることから、1手順につき1台の起動を想定することは妥当と判断している。

一方で、不確かさを考慮した条件の設定に当たっては、運転ポンプを切替える場合に一時的に複数台分の流量が吐出される可能性を考慮し、ポンプを全数起動することを想定した値を設定する。

なお、仮に全数を起動させたとしても系統圧力等の観点から設備に悪影響を与えることはない。



第19図 事故時の対応（抜粋）

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。

## 7. 全手順同時実施の成立性確認

流量条件の設定に当たっては、重大事故等への対応に向け整備した全手順が同時に実施されることを想定しているが、各手順で使用する水源の容量や手順実施に必要な人員の数及び手順ごとの所要時間を踏まえ、全手順同時実施の成立性を確認した。なお、本項では不確かさを考慮した流量での成立性を確認し、そうすることで基本ケース条件での同時実施成立性の確認を兼ねる。

海水以外を水源とする手順における水源の容量を第13表に示す。また、SFPからの大量の水の漏えい発生時における対応フロー及び手順の有効性確認において使用されている各手順の所要時間を踏まえ、各手順を順に実施した場合の想定タイムチャートを第20図に示す。不確かさを考慮した流量で各水源を使用したとしても、放水砲による放水を実施するまで連続で水を補給することが可能である。また、より人員が必要となる放水砲による放水手順を、他手順を実施したのちに実施する想定としており、要員数の観点からも想定タイムチャートは成立しうるものである。

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

第13表 使用済燃料ピットへの水補給において使用する水源の容量について

水源	容量 (補給可能水量)	不確かさを考慮した流量 での連続補給可能時間 <sup>※3</sup>	補給開始から放水砲による放水 までの時間 (第20図より)
燃料取替用水タンク	1,325m <sup>3</sup> <sup>※1</sup>	約63時間	約9時間
2次系純水タンク	2,700m <sup>3</sup> <sup>※2</sup>	約25時間 <sup>※4</sup>	約4時間
1, 2号機淡水タンク	15,600m <sup>3</sup> (3,120m <sup>3</sup> <sup>※2</sup> × 5基)	約118時間	約6時間
1次系純水タンク	510m <sup>3</sup> <sup>※2</sup>	約12時間	約3.5時間

※1:保安規定値。

※2:有効水量として評価した値。

※3:容量をSFP内に全量補給可能な水量として計算した値。

※4:2次系純水ポンプ及び消防ポンプ使用手順の流量合計を使用し計算した値。

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

第20図 全手順同時実施を想定したタイムチャート

## 8. 評価条件として考慮した設備の管理について

2. で示した注水・放水手順及び各手順で使用する設備からSFPへの流入流量を評価していることから、これらの系統構成及び設備仕様（通水流路に存在するエルボ・弁等の配管要素を含む）が変更となった場合、未臨界性評価結果に影響を与える可能性がある。

第14表に本評価条件として考慮した設備と影響発生要因を纏める。本評価に用いた圧損等を考慮した計算値及び実通水結果に基づく流入流量は、経年変化等の要因により変動する可能性はあるが、流量が低下した場合は気相部の水密度が低下するため実効増倍率は低下すること、また、別添6に示した頑健性の評価結果より基本ケースの設定流量を現在の数倍程度まで流量が増加した場合においても未臨界が維持されることは確認しており、運用中に未臨界の維持に影響は生じない。

また、設備工事が発生した場合においても、既設の設備と同一仕様品に取替を行った場合においては流入流量の大きな変動が生じることはないが、系統構成及び設備仕様に変更が生じた場合においては想定外の流量変動が生じる可能性があることから社内ルールに基づき変更管理を行い、未臨界の維持に影響がないことを確認する。

第14表 評価条件として考慮した設備と流量の変動要因

注水/放水手順		水源	ポンプ	通水経路 (配管等)	流量の変化要因	実効増倍率が 厳しくなる方向	基本ケース 設定流量 (m <sup>3</sup> /h)	流量設定根拠
注水 手順	①	燃料取替用水 タンク	燃料取替用水ポンプ	第1-2図参照	A) ポンプの仕様変更 B) 通水経路(配管の口径、取り回し等)の変更 C) スプレイヘッドの変更(放水手順①のみ)	A) ポンプの送水流量の増加 B) 配管圧損等の減少(流量の増加) C) スプレイヘッドの放水流量の増加	21	ポンプ揚程曲線に基づく計算値
	②	2次系純水 タンク	2次系純水ポンプ				5	実測値
	③	1,2号淡水 タンク	ディーゼル消火ポンプ 又は電動消火ポンプ				22	実測値
	④	2次系純水 タンク	消防ポンプ				95	ポンプ揚程曲線に基づく計算値
	⑤	1次系純水 タンク	1次系純水ポンプ				39	ポンプ揚程曲線に基づく計算値
	⑥	海水	送水車				260	ポンプ揚程曲線に基づく計算値
放水 手順	①	海水	送水車	<ul style="list-style-type: none"> <li>送水車送水用 [ ] ホース</li> <li>送水車送水用 [ ] ホース</li> <li>スプレイヘッド</li> </ul>		[ ]	スプレイヘッドの仕様上限	
	②	海水	大容量ポンプ (放水砲用)	<ul style="list-style-type: none"> <li>大容量ポンプ入口ライン放水砲用 [ ] ホース(1・2号機共用)</li> <li>大容量ポンプ出口ライン放水砲用 [ ] ホース(1・2号機共用)</li> <li>放水砲(1・2号機共用)</li> </ul>		[ ]	大容量ポンプ(放水砲用)の仕様上限	
合計		—	—	—	—	—	[ ]	—

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。

9. まとめ

高浜1、2号機の未臨界性評価条件となるSFPへの流入流量について、各手順の系統構成及び設備配備台数等を踏まえ、基本ケース条件及び不確かさを考慮した条件を評価した。3.で示した流量設定の考え方に基づき、4.及び5.で求めた各手順の流量評価結果を第15-1,2表に纏める。

未臨界性評価における流量の基本ケース条件及び不確かさを考慮した条件は、注水・放水手順の流量合計値として、それぞれ  m<sup>3</sup>/h、 m<sup>3</sup>/hとなる。

第15-1表 SFPへの注水手順の流量評価結果一覧

注水手順(ポンプ)	基本ケース流量	不確かさを考慮した流量	根拠
①燃料取替用水タンク(燃料取替用水ポンプ)	21m <sup>3</sup> /h	21m <sup>3</sup> /h	ポンプ揚程曲線
②2次系純水タンク(2次系純水ポンプ)	5m <sup>3</sup> /h	15m <sup>3</sup> /h	実測値
③1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)	22m <sup>3</sup> /h	132m <sup>3</sup> /h	実測値
④2次系純水タンク(消防ポンプ)	95m <sup>3</sup> /h	95m <sup>3</sup> /h	ポンプ揚程曲線
⑤1次系純水タンク(1次系純水ポンプ)	39m <sup>3</sup> /h	42m <sup>3</sup> /h	ポンプ揚程曲線
⑥海水(送水車)	260m <sup>3</sup> /h	260m <sup>3</sup> /h	ポンプ揚程曲線
合計	442m <sup>3</sup> /h	565m <sup>3</sup> /h	—

第15-2表 SFPへの放水手順の流量評価結果一覧

放水手順	基本ケース流量	不確かさを考慮した流量	根拠
①送水車によるスプレー	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	スプレーヘッドの仕様上限
②大容量ポンプ(放水砲用)による放水	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	大容量ポンプ(放水砲用)の仕様上限
合計	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	<input type="text"/> m <sup>3</sup> /h	—

(参考1) 系統圧損を考慮した流量算出方法に関する補足説明

今回未臨界性評価の流量条件を設定するに当たり、基本ケースの流量については系統内ポンプ1台を起動した場合の流量とし、不確かさを考慮した流量については系統内ポンプの全数を起動した場合の流量としている。系統内に複数台のポンプが設置される場合の系統概要を図1に示すが、ポンプ入口分岐部からポンプ出口合流部までの各ポンプの配管長さ等が異なる場合、これらの違いを踏まえ流量が保守的に算出される手法で評価している。以下に、複数台ポンプ起動時の流量算出方法に関して補足する。

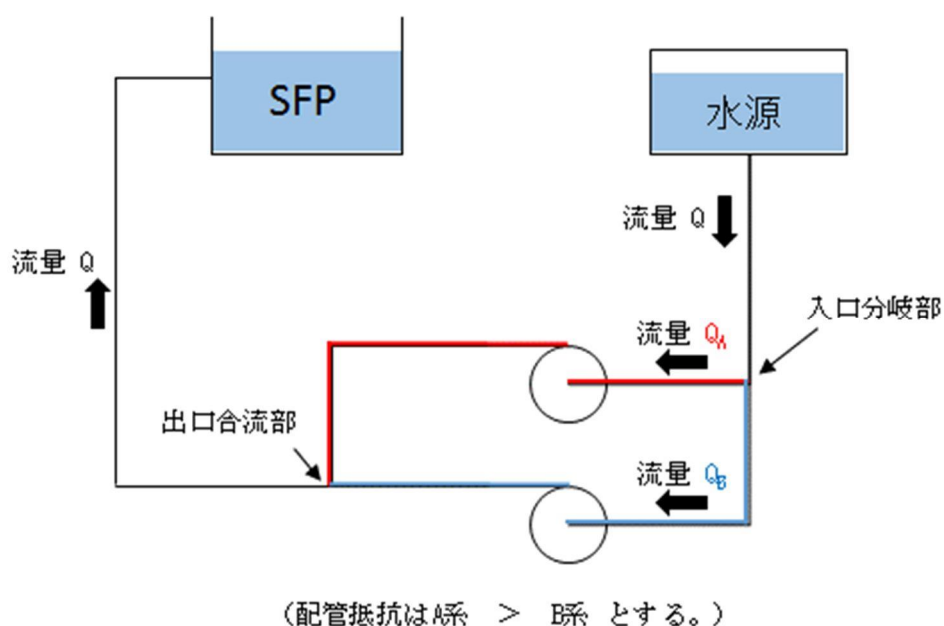


図1 ポンプが複数台設置される系統の概要

【ポンプ1台起動の場合の流量】

ポンプ起動台数を1台とする基本ケースの流量を求める際は、各ラインの等価直管長を算出したうえで、流量が大きくなるように、配管抵抗（等価配管長、配管径及び流量により求まる）が小さいラインでの流量を算出している。例えば図1において配管抵抗がA系>B系の場合、ポンプ1台起動時の圧損揚程曲線は図2のようになり、より多くの流量が流れる $Q_B$ を用いることとしている。

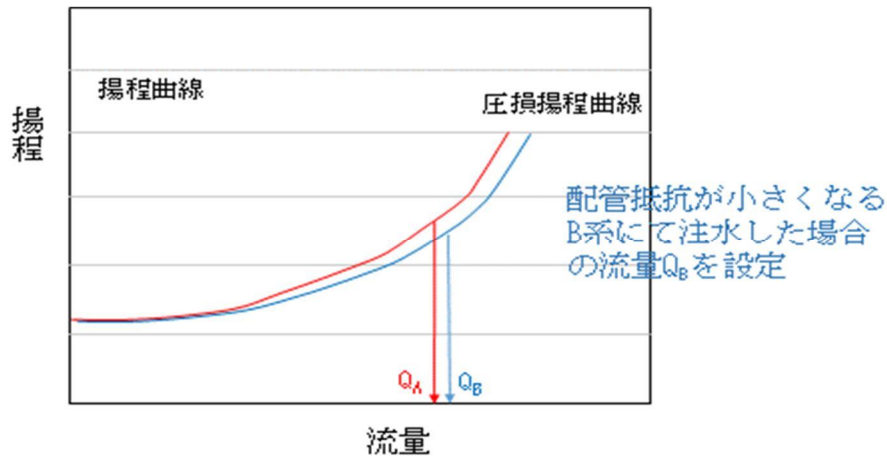


図2 基本ケースの流量（ポンプ起動台数は1台）の算出手法概要

【ポンプの複数台起動を想定した流量】

ポンプ起動台数を全数とする、不確かさを考慮した流量を求める際は、ポンプ入口分岐部からポンプ出口合流部までの長さを、配管抵抗が小さい方のラインにそろえる仮定としている。また、上述の仮定を置くことに伴い、ポンプ揚程曲線として、ポンプ1台時の設計揚程曲線の流量にポンプ台数を乗じて求められる曲線を使用することとした（これにより、図1に示す系統において2台のポンプを同時に起動した場合の流量 $Q$ は、 $Q=2Q_A=2Q_B$ となる）。

不確かさを考慮した流量の評価概要を図3に示す。ポンプ1台時の揚程曲線の流量にポンプ台数を乗じて求めた揚程曲線と、系統圧損との交点 $Q'$ を用いることとした。なお、実際の両ライン配管抵抗の合計値は、等価配管長等の差分の分だけ大きくなる場所、両ライン共に配管抵抗が小さい側であると仮定する本手法は、配管抵抗を小さく見積もる、すなわち流量を大きくする設定となっている。

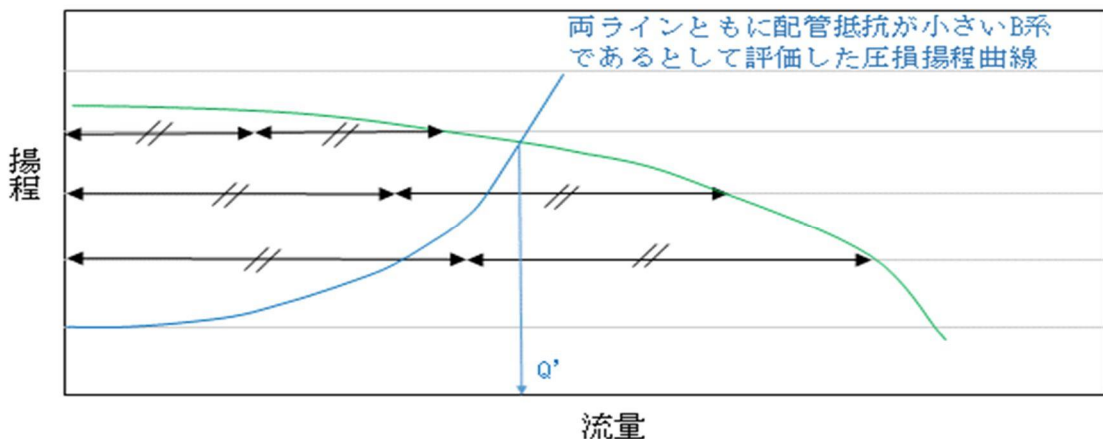


図3 不確かさを考慮した流量（ポンプ起動台数は全数）の算出手法概要

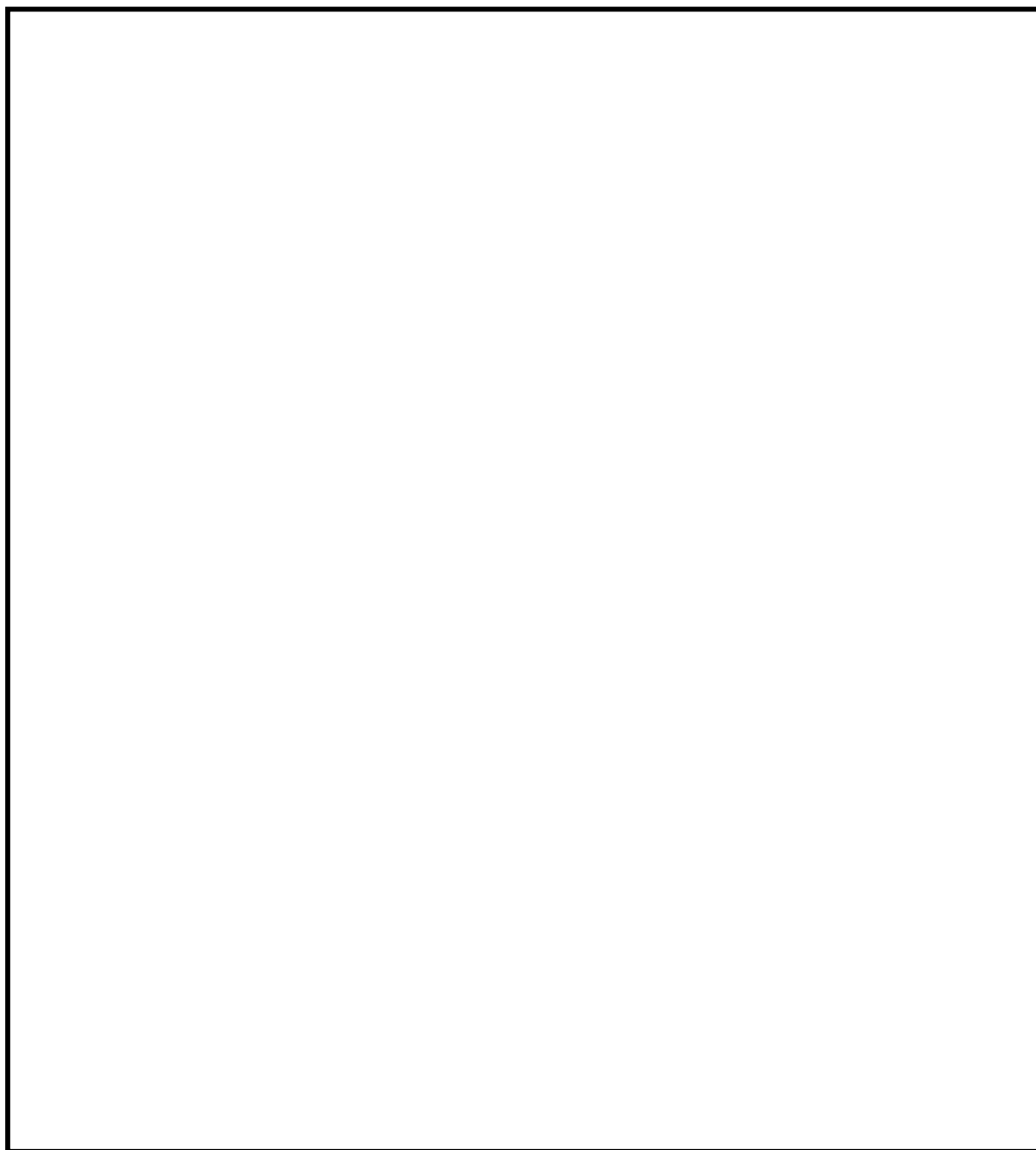


なお、上述のとおり、入口分岐部から各ポンプ入口まで、及びポンプ出口から出口合流部までの配管長さ等が異なる場合があることを踏まえた保守的な流量算出方法を採用しているが、実際には各ポンプは近接した箇所に配置されており、A系及びB系の等価配管長にほとんど差はなく、それに起因する圧損差は、水源からSFPまでの全揚程に対して小さい。

よって、今回の手法を用い算出した結果は、各系列の配管長さ等を正確に考慮した場合の流量算出結果をよく近似できていると言える。

(参考2) 実測値があるSFPへの注水手順を整備した社内標準 (抜粋)

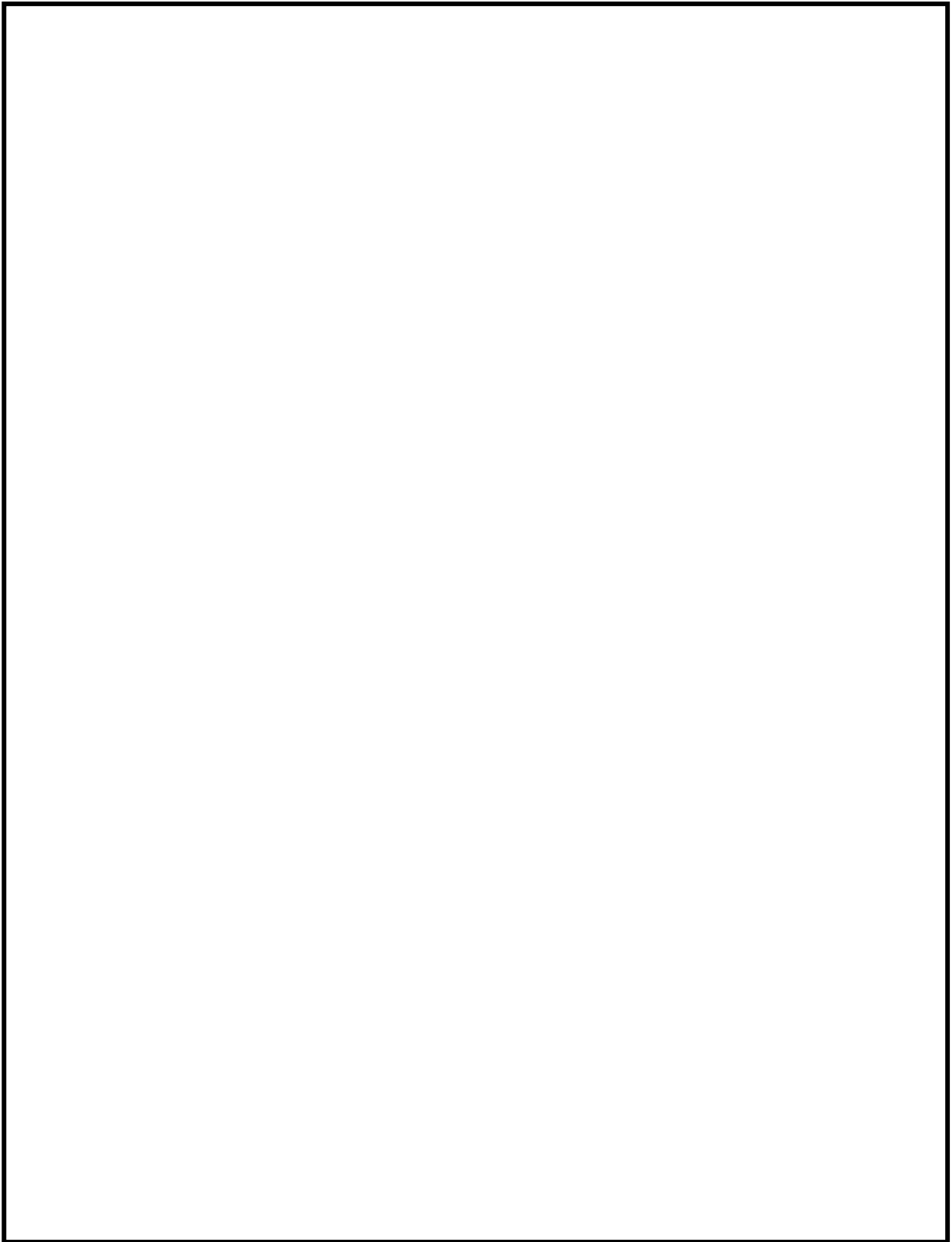
【2次系純水タンク (2次系純水ポンプ使用) からの注水 (注水手順②)】



高浜発電所 事故時操作所則 (抜粋)

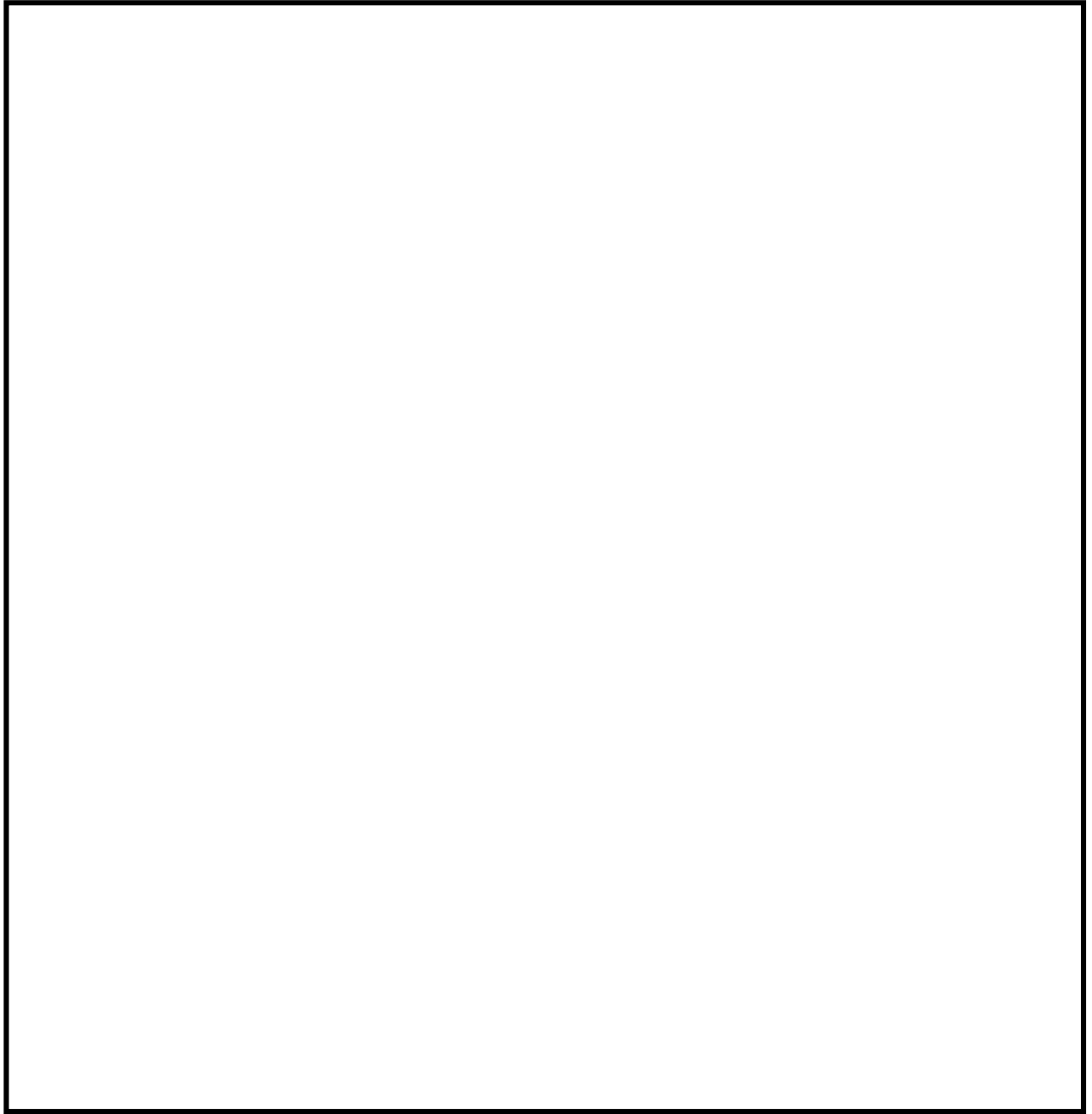
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【1,2号淡水タンクからの注水（注水手順③）】



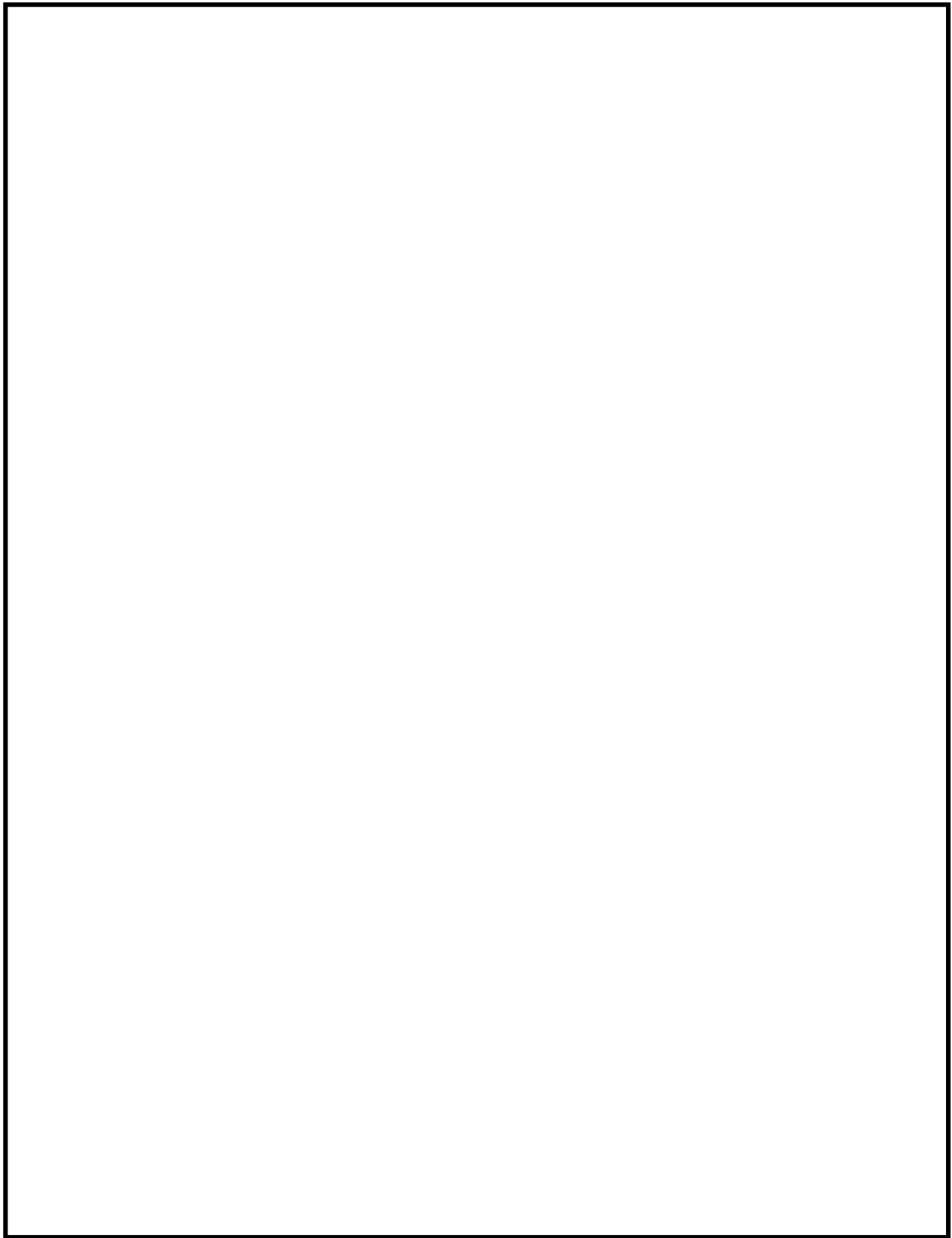
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



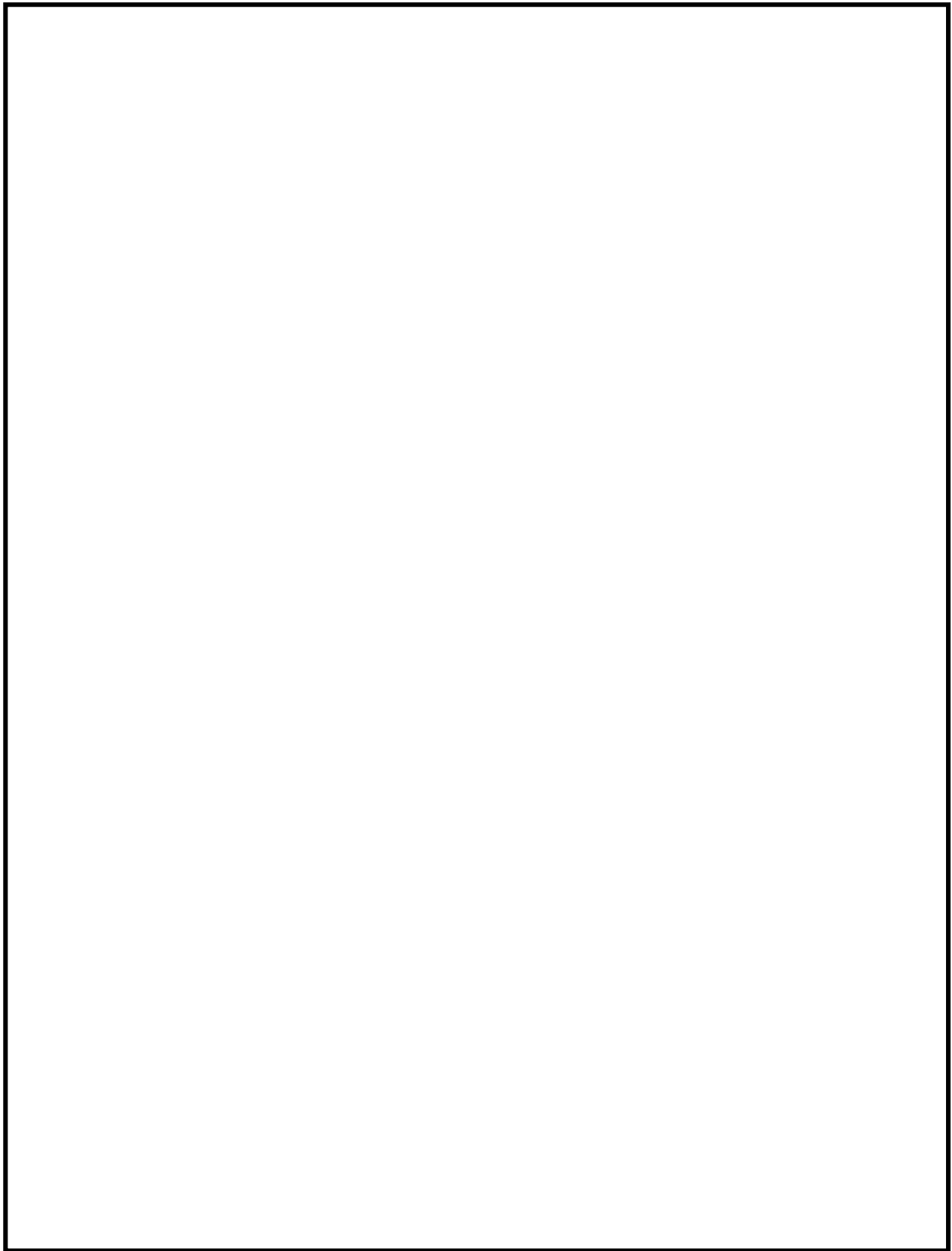
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



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

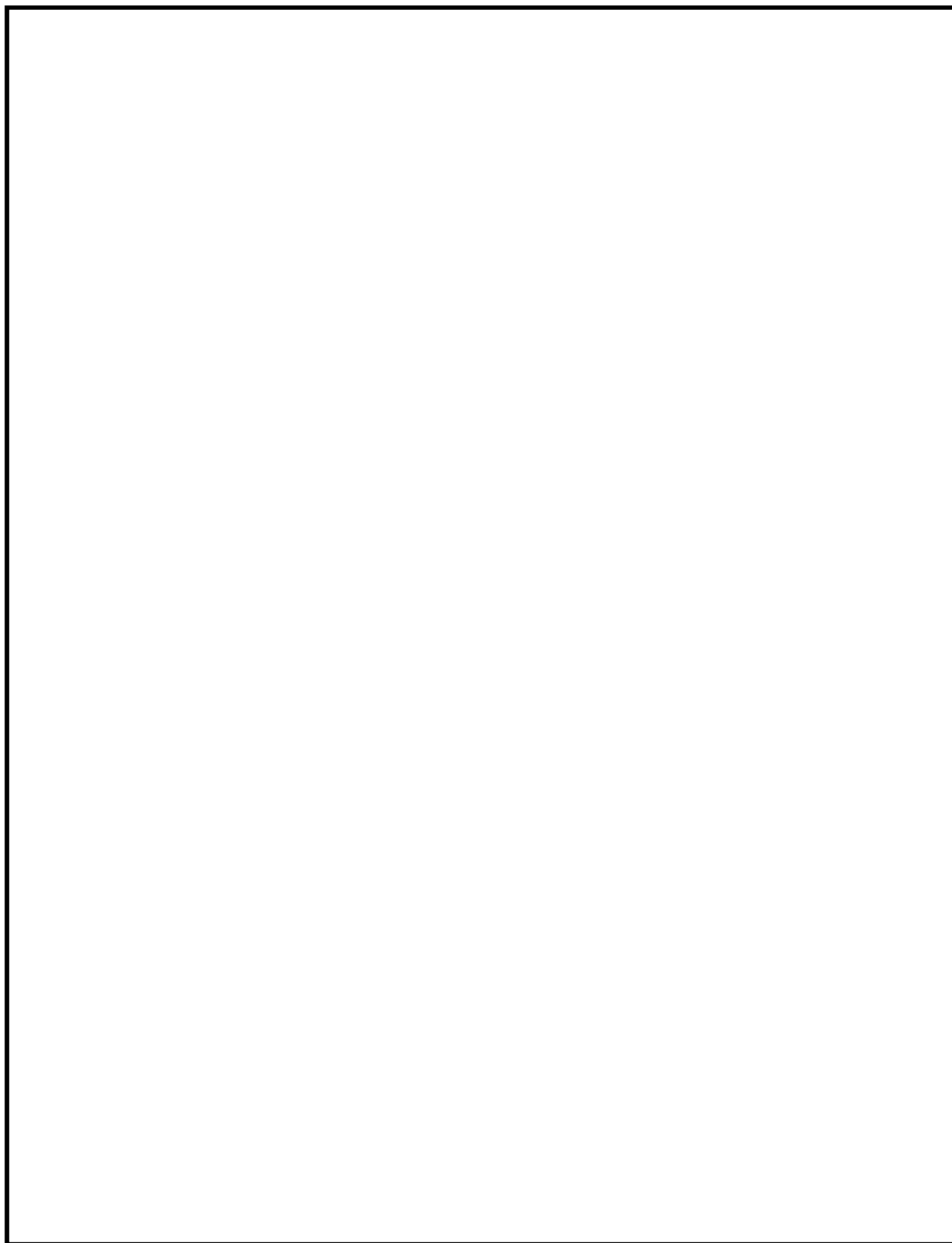
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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

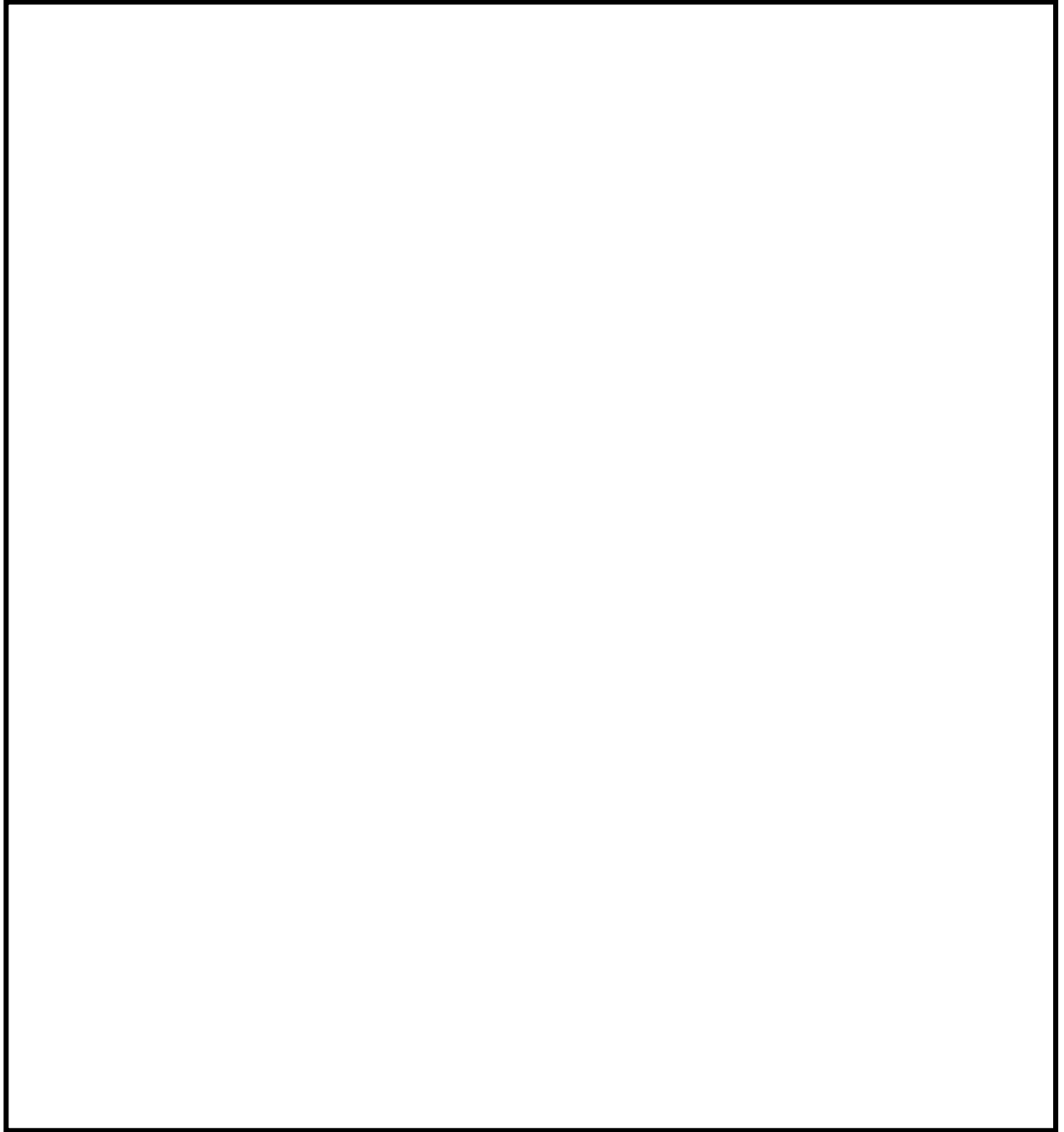
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【2次系純水タンク（消防ポンプ使用）からの注水（注水手順④）】



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

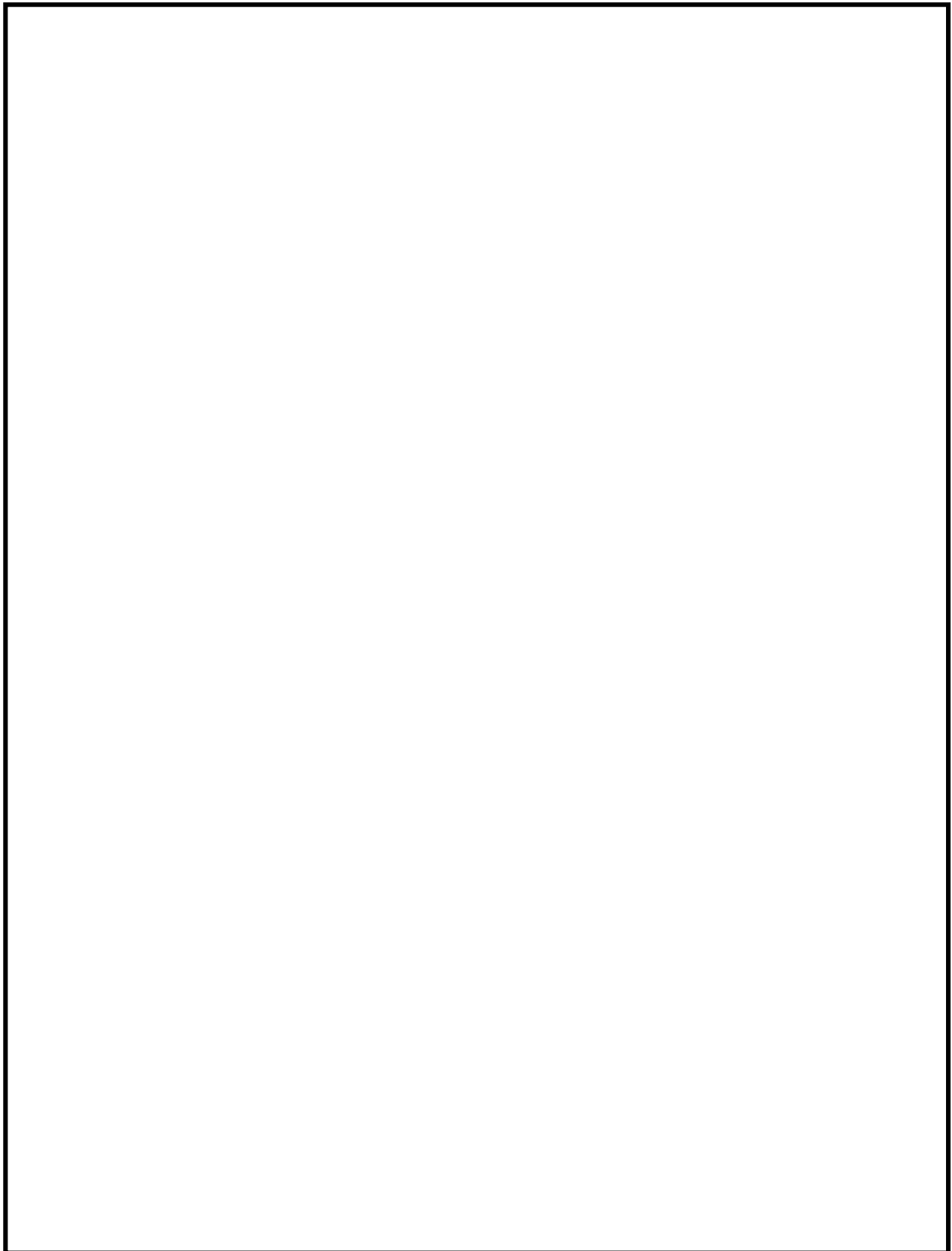
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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

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。



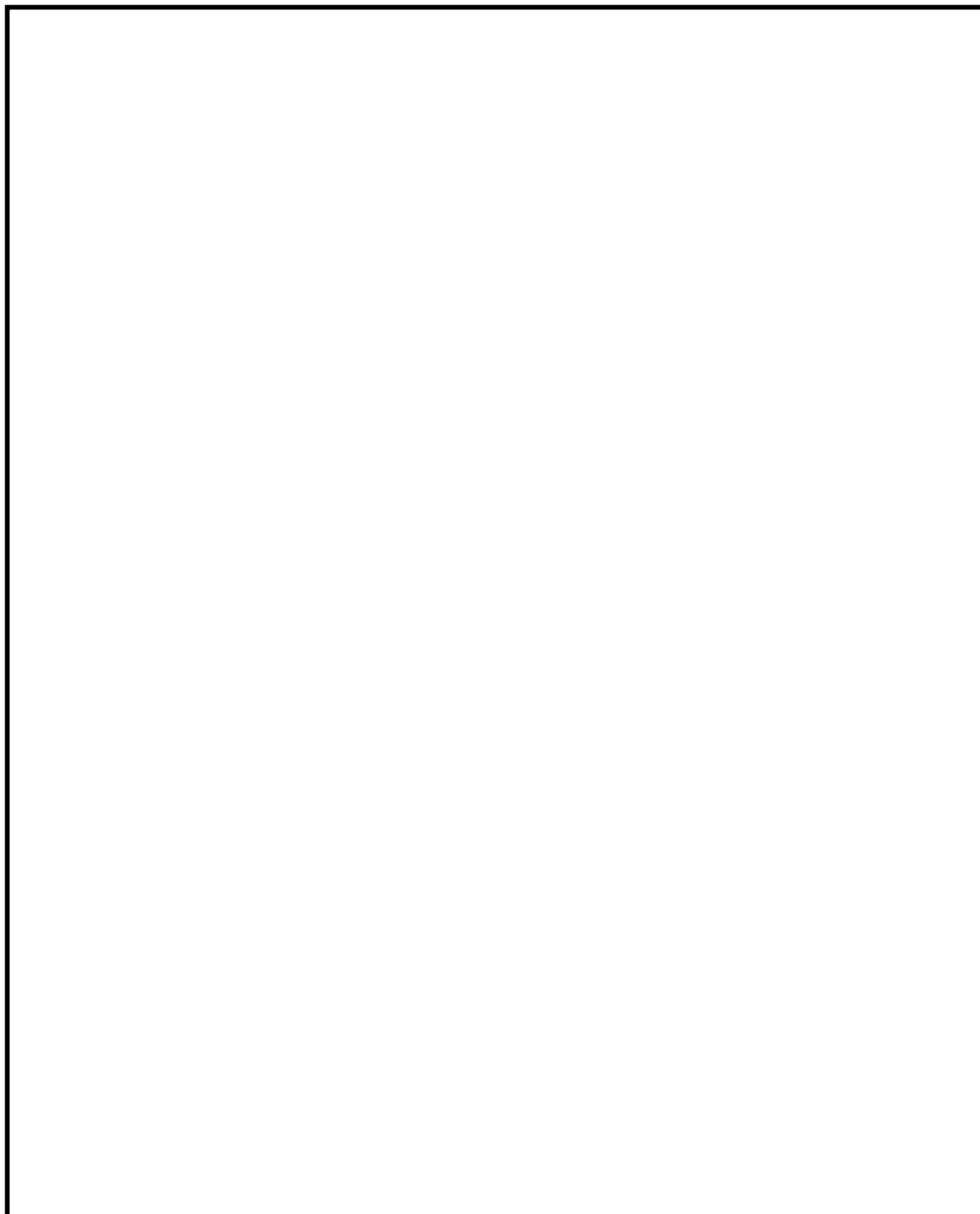


高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

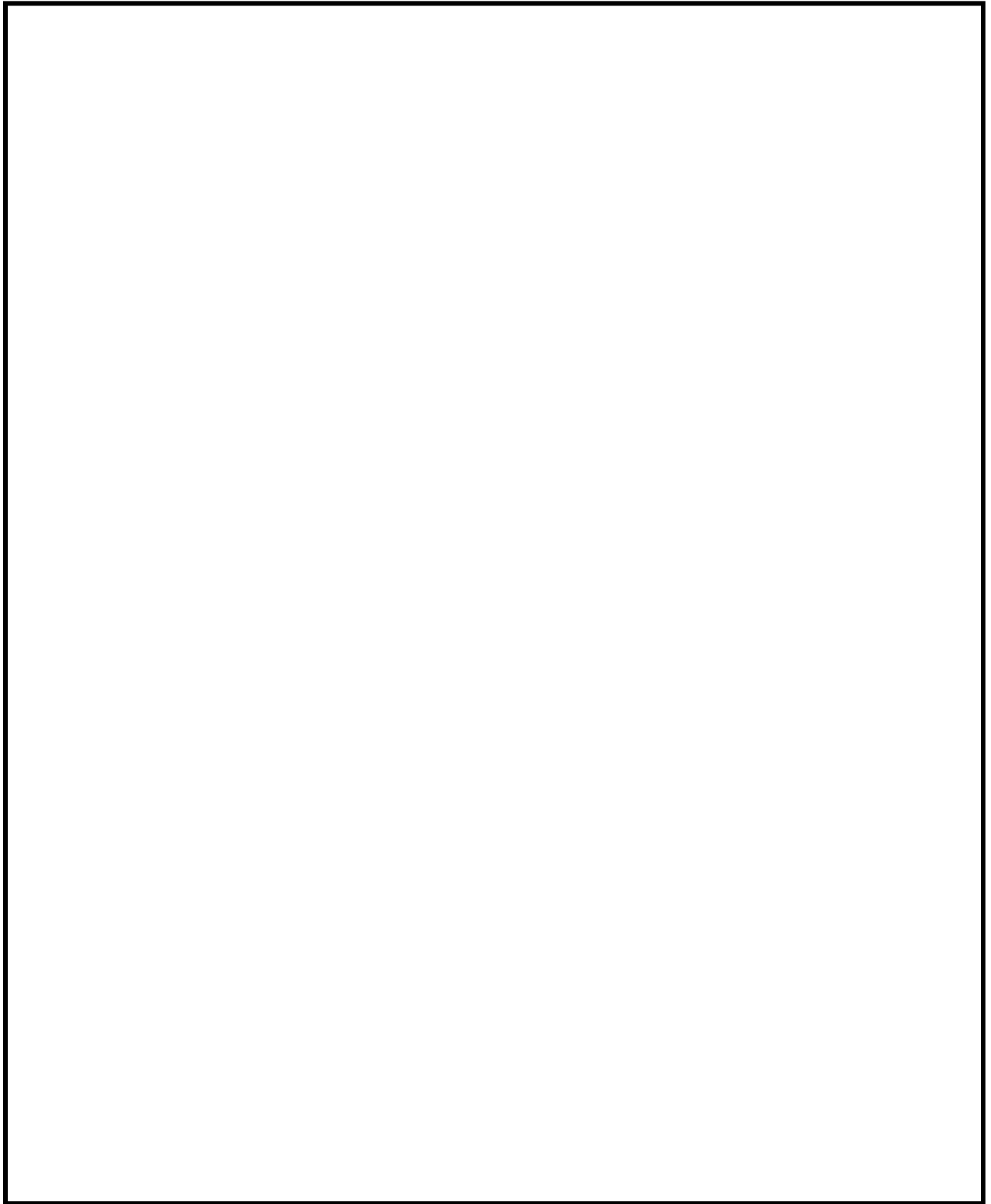
(参考3) 大容量ポンプ（放水砲用）による放水手順を整理した社内標準（抜粋）

【大容量ポンプ（放水砲用）による放水手順】



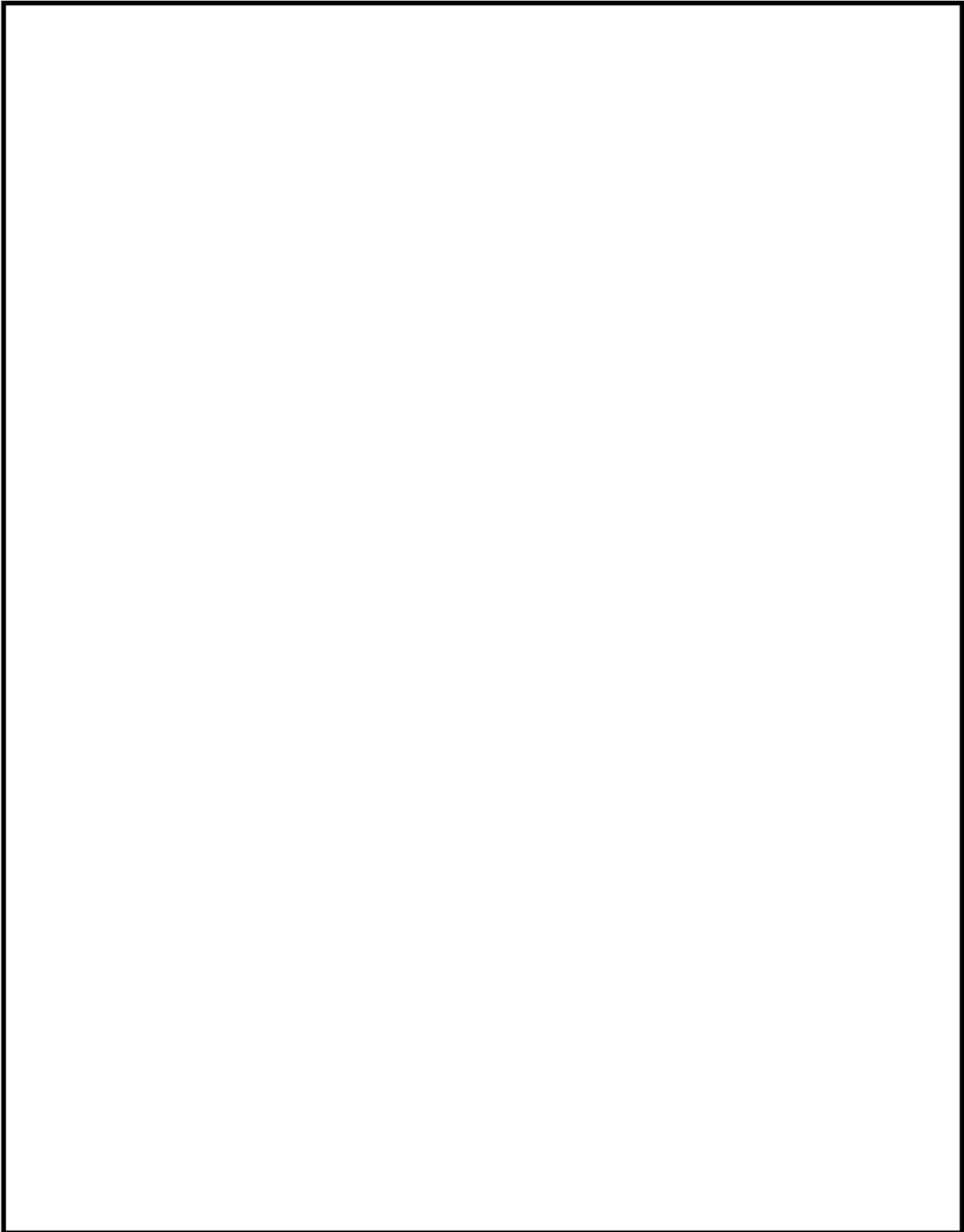
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



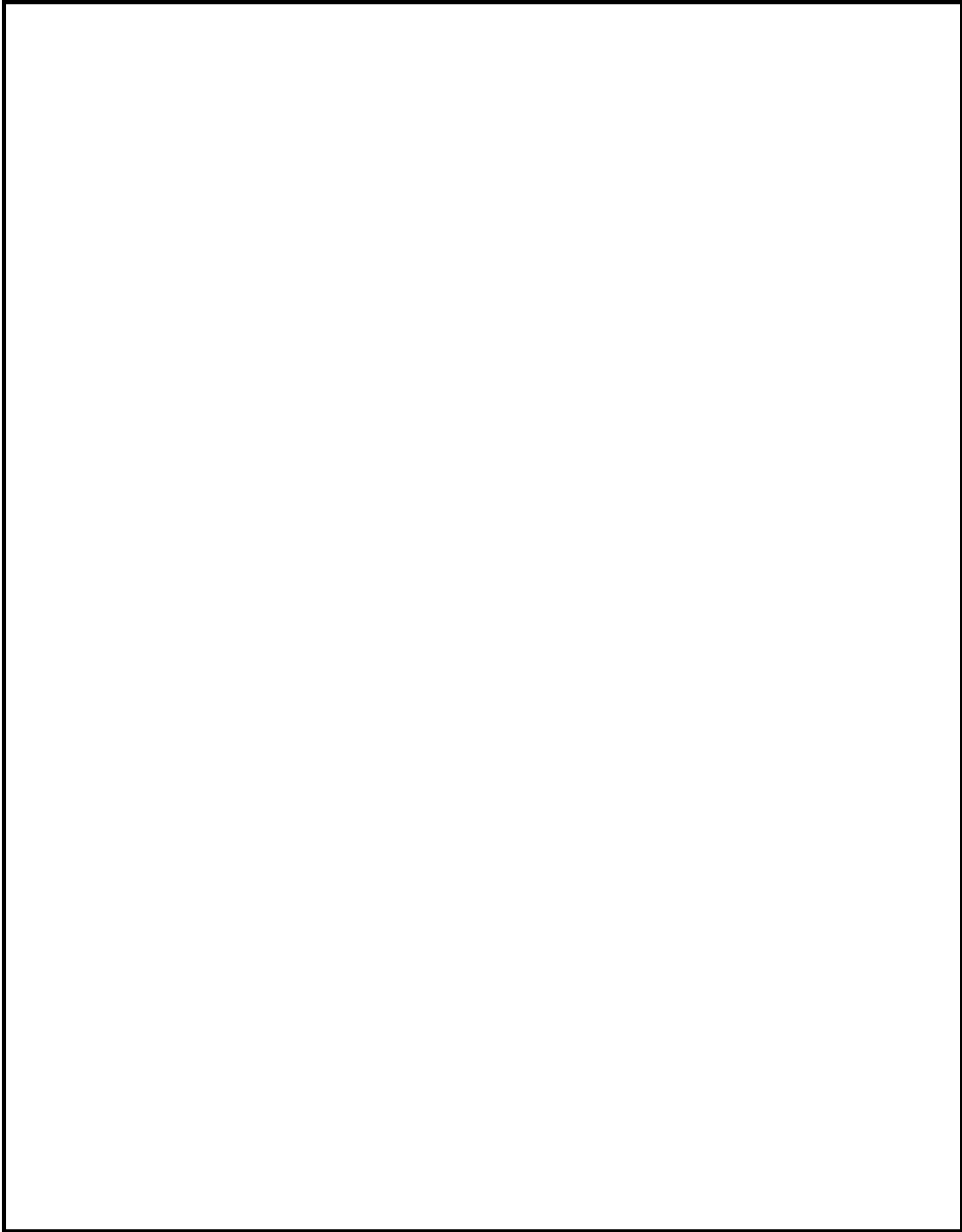
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



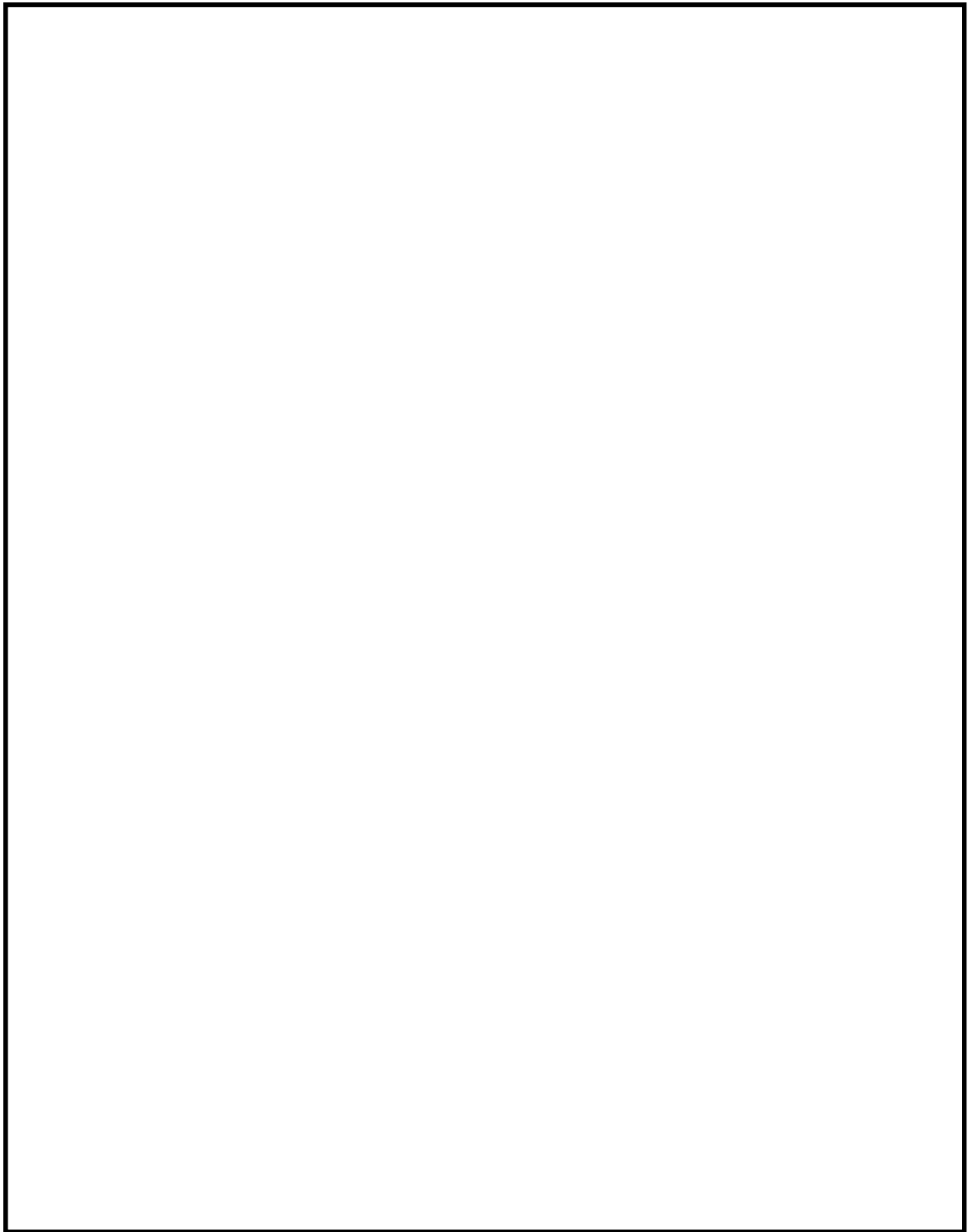
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



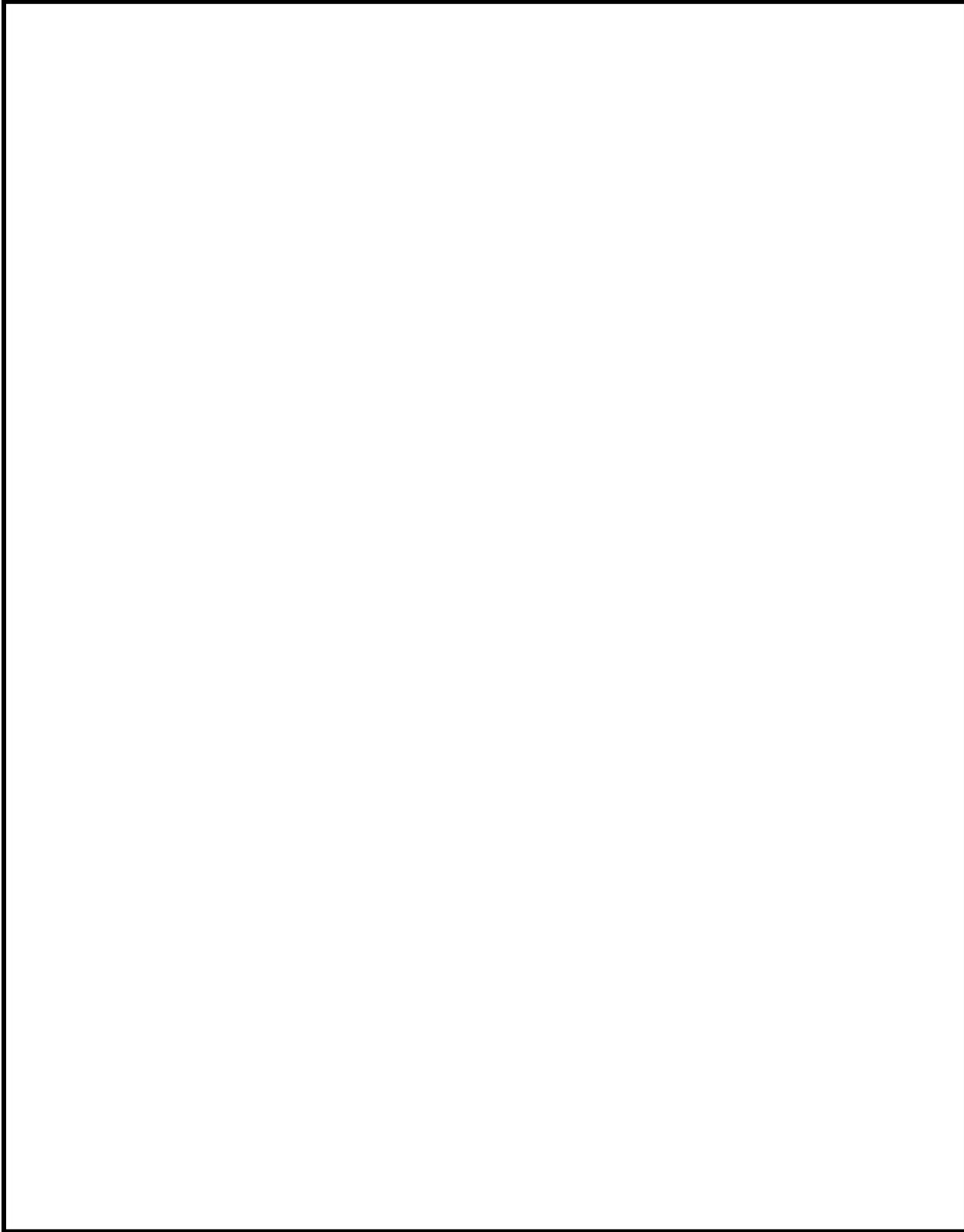
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



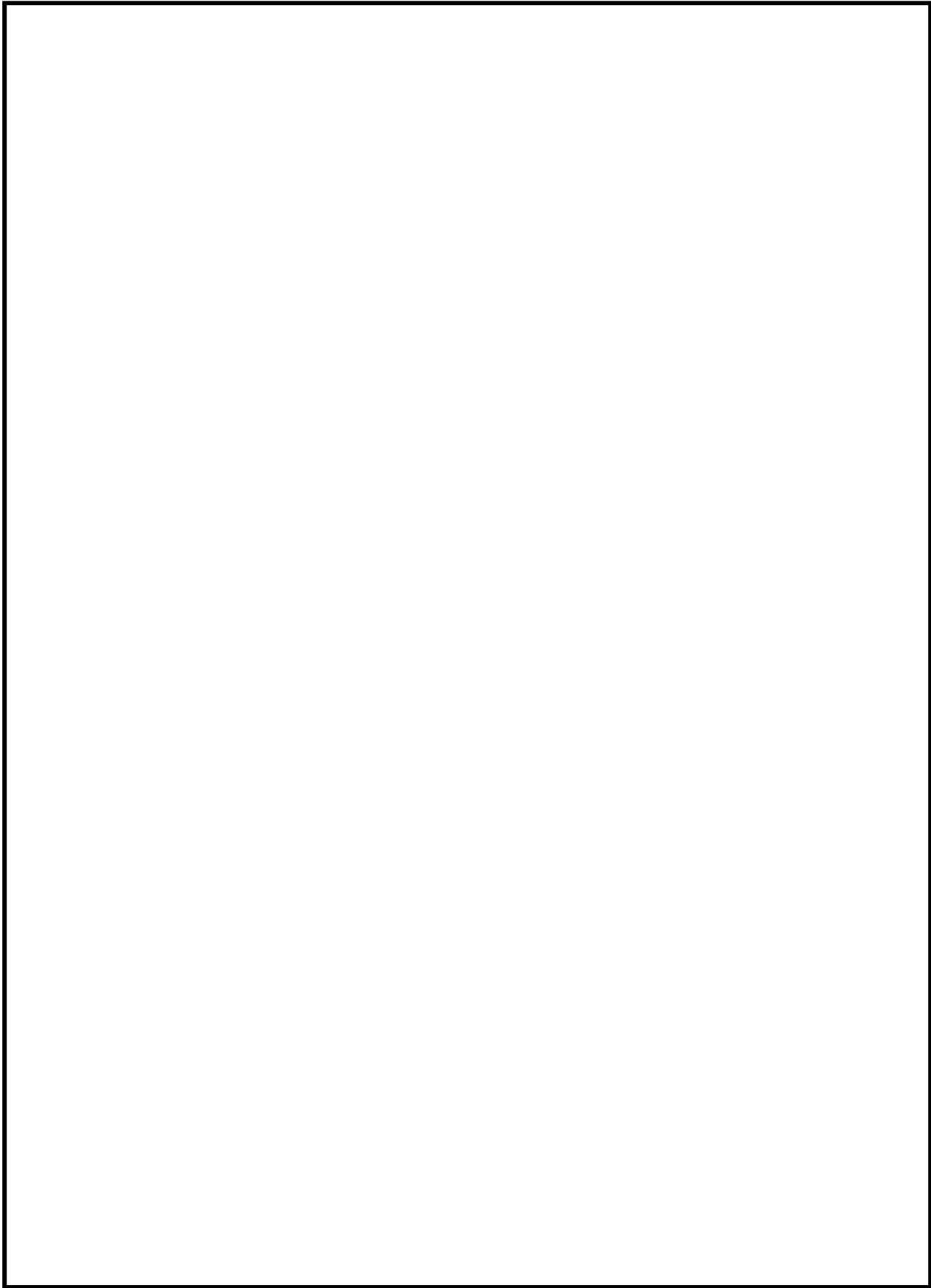
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



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

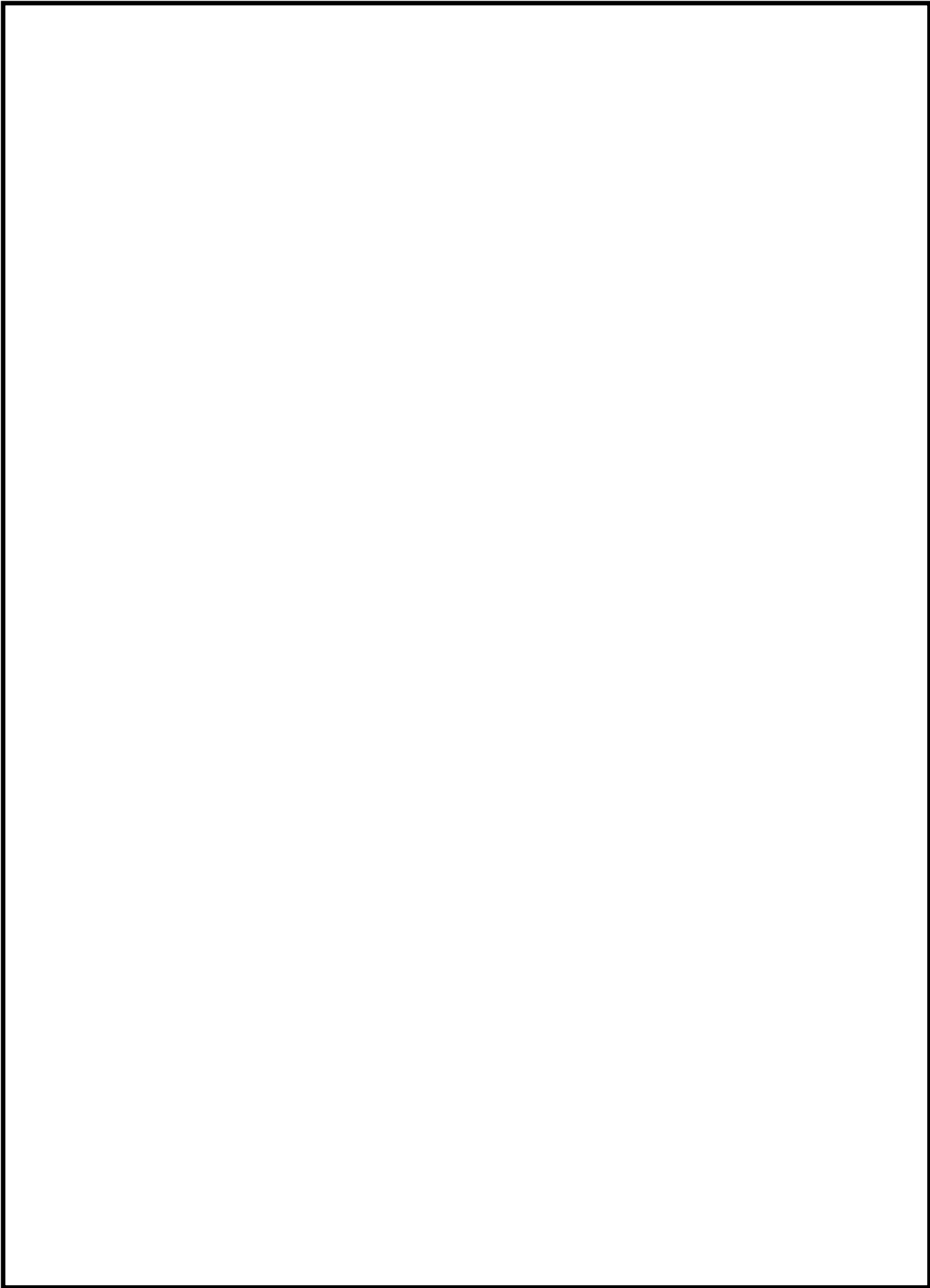
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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

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。



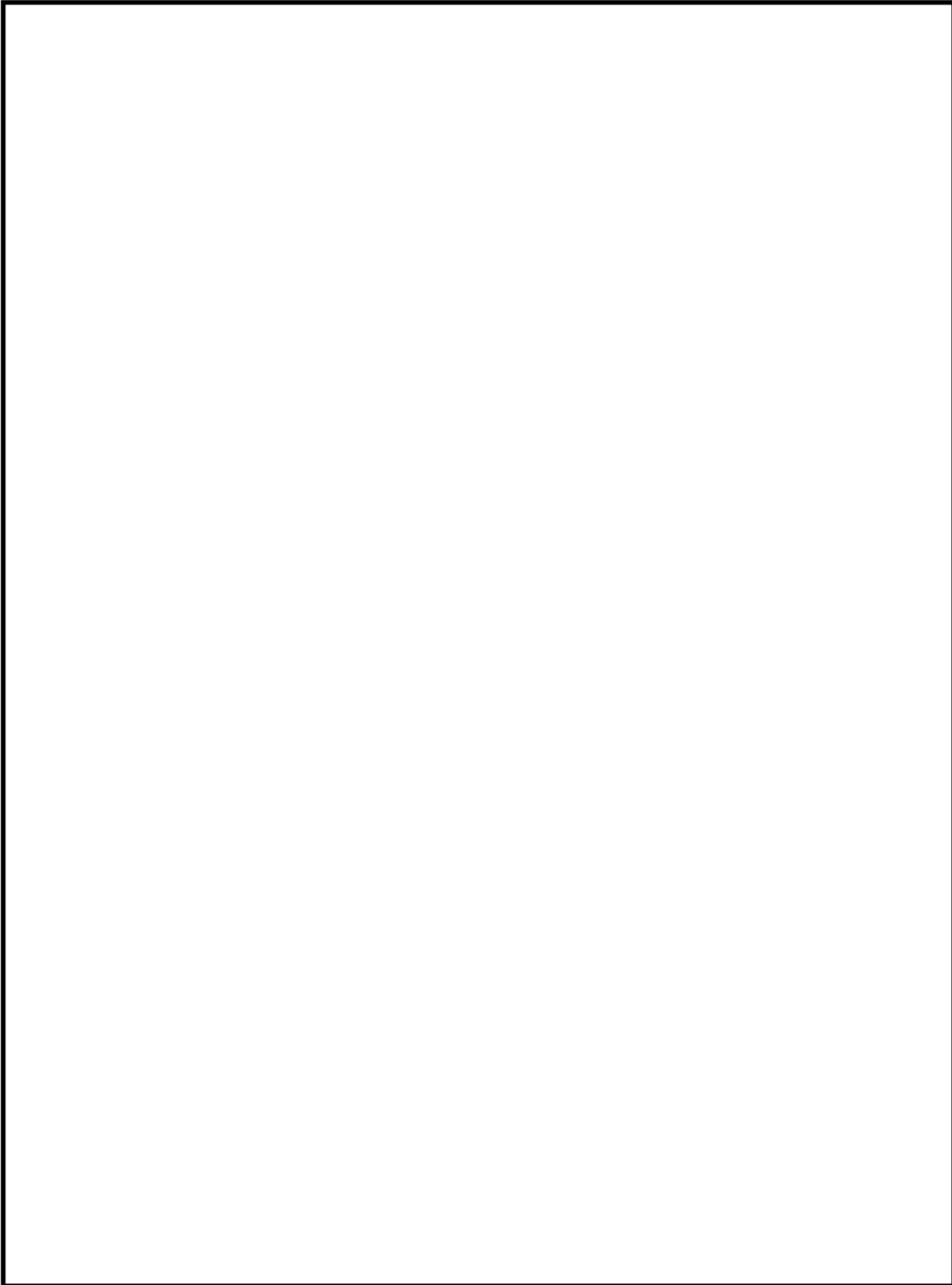


高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。

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

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。



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

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。