

高浜 1, 2 号炉 使用済燃料ピット 未臨界性評価に関する補足説明

<構成>

- (1) SFP への注水・放水流量の設定について
⇒ 通しページ 1 ~ 7 7

- (2) 液滴径設定（基本ケース条件: 1.5mm、不確かさを考慮した条件: 0.4mm）の
妥当性について
⇒ 通しページ 7 8 ~ 9 8

- (3) SFP 内に保管中の燃料集合体に内挿物が実在する効果について
⇒ 通しページ 9 9 ~ 1 0 2

- (4) 解析コードの説明について
⇒ 通しページ 1 0 3 ~ 1 3 6

(1) SFPへの注水・放水流量の設定について

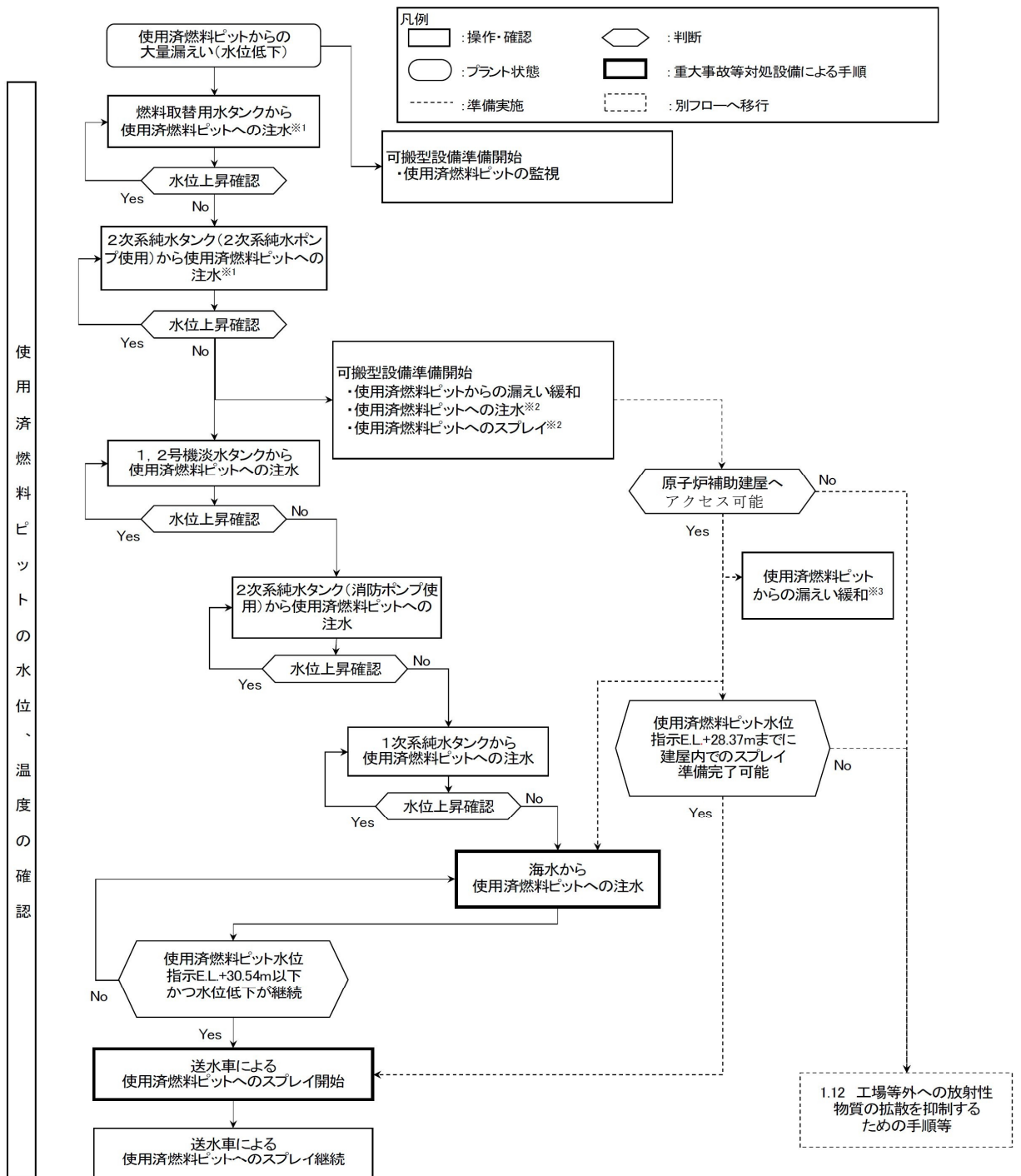
1. はじめに
2. SFPからの大量の水の漏えい時における注水・放水手順および設備保有台数
3. SFP注水手順にて使用する設備の流量設定の考え方
 - 3.1. 各手順における流量設定の考え方
 - 3.1.1. SFP注水手順の流量設定
 - 3.1.2. SFP放水手順の流量設定
 - 3.2. 配管圧損評価について
4. 基本ケース条件の設定について
5. 不確かさを考慮した条件の設定について
6. 系統に複数台設置されるポンプの起動台数の考え方について
7. 全手順同時実施の成立性確認
8. まとめ

1. はじめに

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

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

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



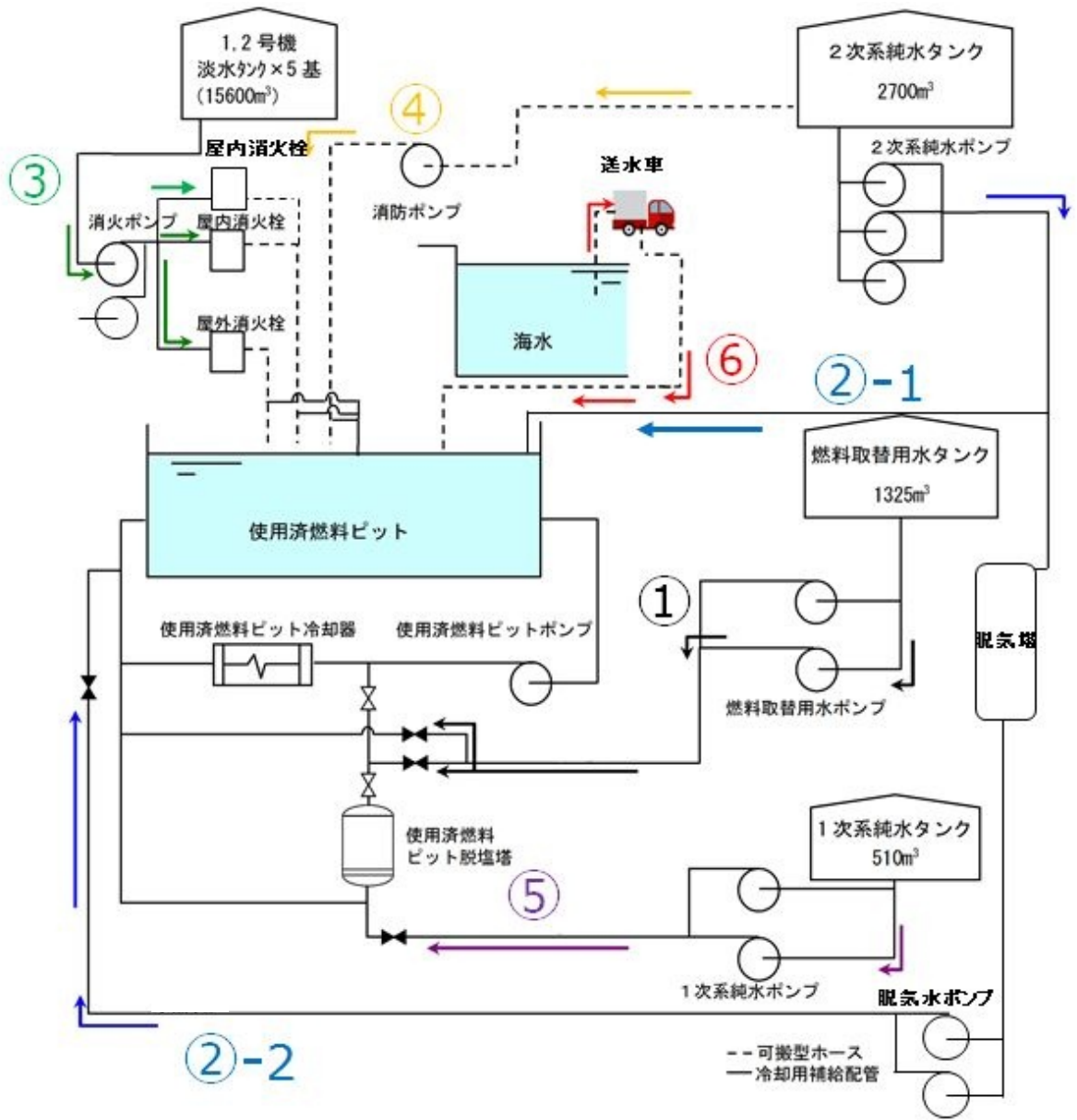
(注1)本フローに記載の注水手段については、複数の手段の準備又は注水を平行して実施することがある。
また、水源の使用可否等に応じて手順を飛ばして対応することがある。

※1: 使用済燃料ピットの注水機能喪失の場合は使用不可

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

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

第1-1図 SFPへの注水・放水に係る手順の実施判断フロー

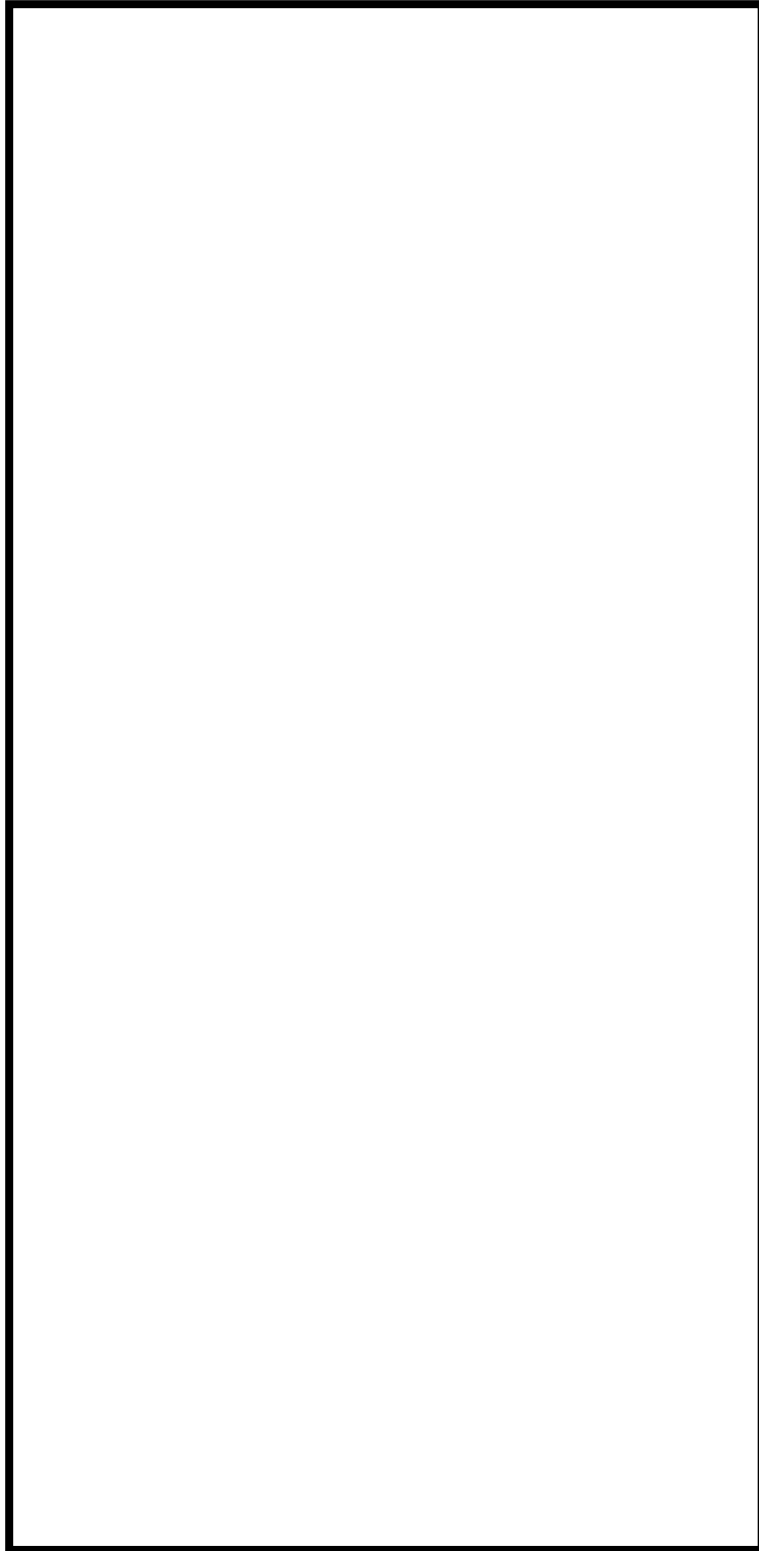


第1-2図 SFP注水設備の構成

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

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、送水ポンプおよびポンプ配備台数

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	燃料取替用水タンク	燃料取替用水ポンプ	1台	2台			
	②—1	2次系純水タンク	2次系純水ポンプ	1台	3台			
			脱気水ポンプ ^{※2}	1台 ^{※2}	2台 ^{※2}			
	③	SA所達 ^{※3}	1,2号淡水タンク	ディーゼル消火ポンプ または電動消火ポンプ	1台	各1台		—
	④	SA所達 ^{※3}	2次系純水タンク	消防ポンプ	1台	1台		
	⑤	SA所達 ^{※3}	1次系純水タンク	1次系純水ポンプ	1台	2台		
⑥	SA所達 ^{※3}	海水	送水車	1台	5台 ^{※4}			
放水 手順	①	海水	送水車	1台/1SFP	3台 ^{※5}	スプレイ ヘッド	1台/1SFP	3台 ^{※7}
	②	海水	大容量ポンプ (放水砲用)	2台/2SFP	3台 ^{※6}	放水砲	2台/2SFP	3台 ^{※7}

※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号炉用に2台、高浜2号炉用に2台、共用予備1台の計5台を配備

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

※6 高浜1, 2号炉共用で2台、共用予備1台の計3台を配備

※7 高浜1号炉用に1台、高浜2号炉用に1台、共用予備1台の計3台を配備

3. SFP 注水手順にて使用する設備の流量設定の考え方

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

3.1. 各手順における流量設定の考え方

3.1.1. SFP 注水手順の流量設定

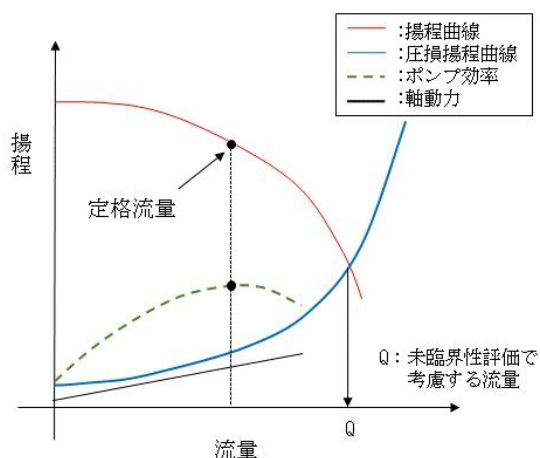
SFPへの注水に係る各手順によるSFPへの流入流量設定における各条件の具体的な考え方は以下の通りである。

(1) 恒設設備を使用する手順

a. 実際の施設ラインで通水した実測値があるもの
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図に示す通り、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放水手順の流量設定

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通り。

(1) スプレイヘッドを用いて放水する手順

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

(対象手順：放水手順①)

(2) 放水砲を用いて放水する手順

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

(対象手順：放水手順②)

3.2. 配管圧損評価について

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

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

なお系統中にはエルボ、ベンド等が存在するが、それら配管形状抵抗や弁の抵抗については等価直管長（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、抵抗計数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、抵抗計数の代表例を第3表に示す。

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

第2表 各配管要素の等価直管長※

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

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

第3表 各配管要素の抵抗計数※

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)	$\left(1 - \frac{D_{in}^2}{D_{out}^2}\right)^2$	D _{in} : 入口配管内径 D _{out} : 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 _{in} : 入口配管内径 D _{out} : 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最確値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、実施手順数および系統内ポンプの使用台数については以下の前提を置く。

a. 実施手順数

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

b. 各手順における系統内ポンプの使用台数

最確値を設定する観点から、1手順当たり1台とする。

上記の前提に基づき、各手順における基本ケース条件の流量を設定する。

(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.に示す通り、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図に示す通り手順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表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

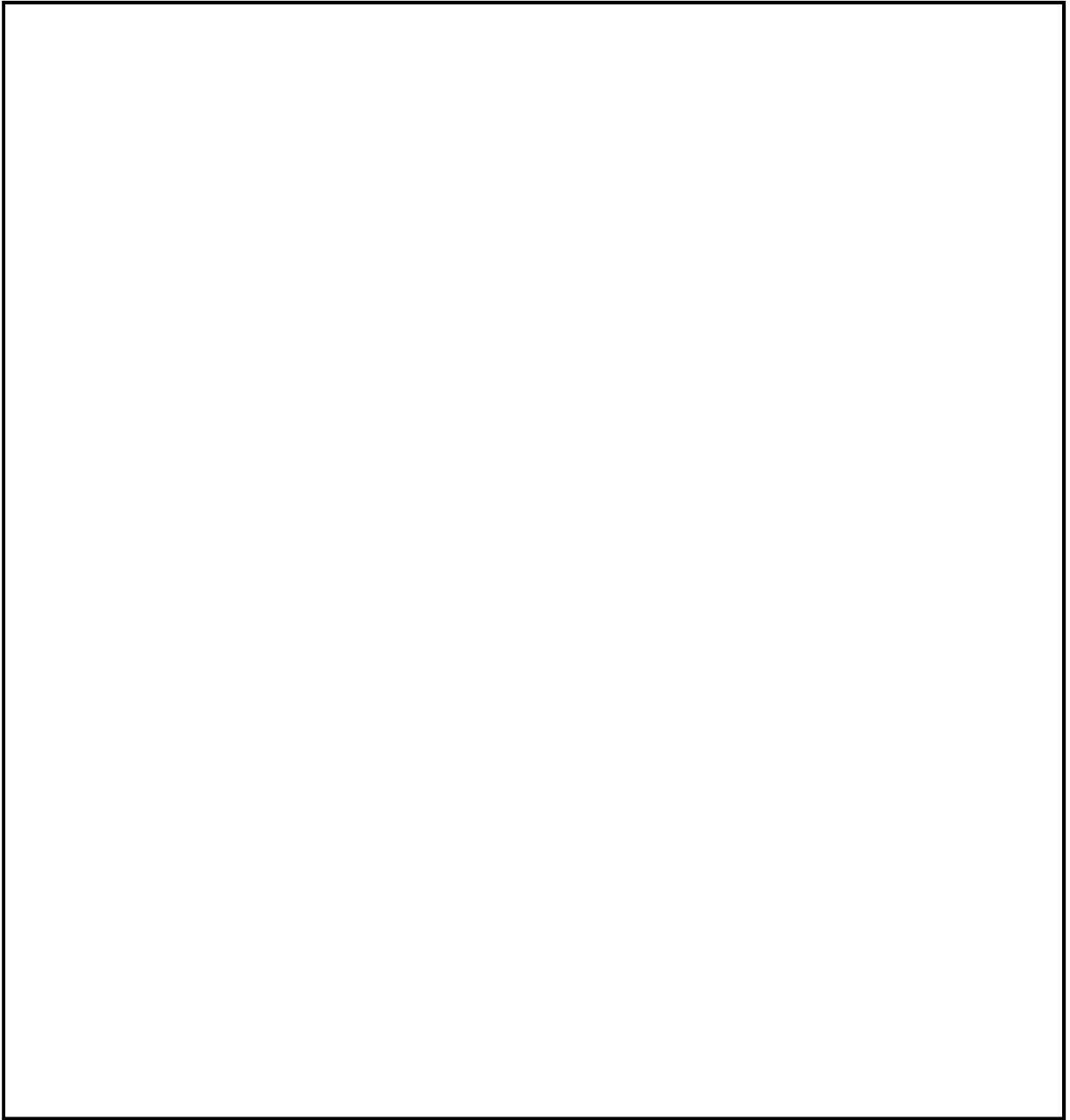
第4表 水源と移送先の静水頭差（手順①）

	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.)	-10.53 m	—

・注水時の系統構成

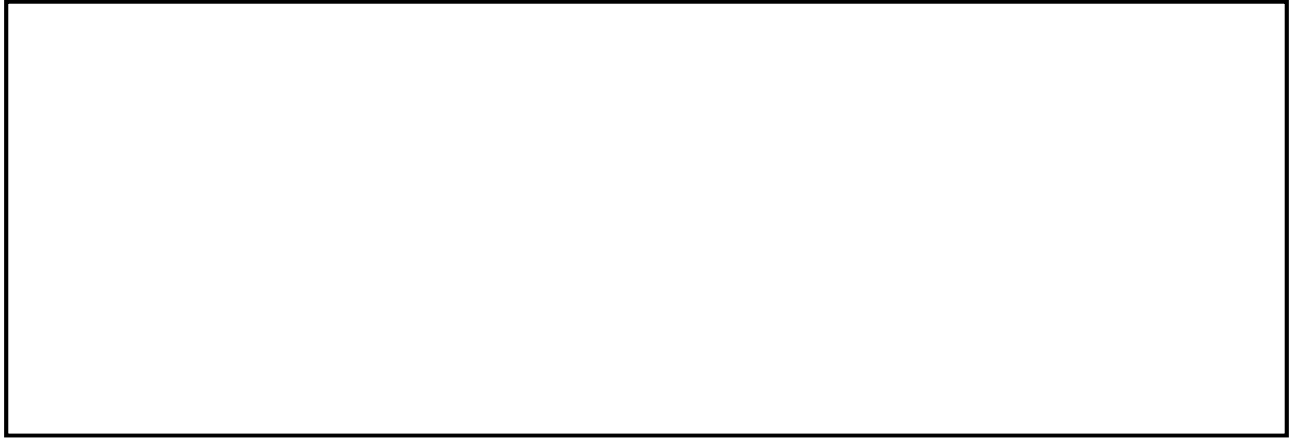
注水時の具体的手順を第3図に、手順に示される対応により構成される系統の概要を第4図に示す。手順では、赤で示す系統上のオリフィスを通して注水されることとなる。オリフィス通水時に発生する圧損は、オリフィス口径と配管内径より算出される断面積比に対し抵抗計数を算出し、ダルシーの式より求める。系統上オリフィスの概要を第5図に、圧損計算に使用した系統情報を第5表に示す。

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。

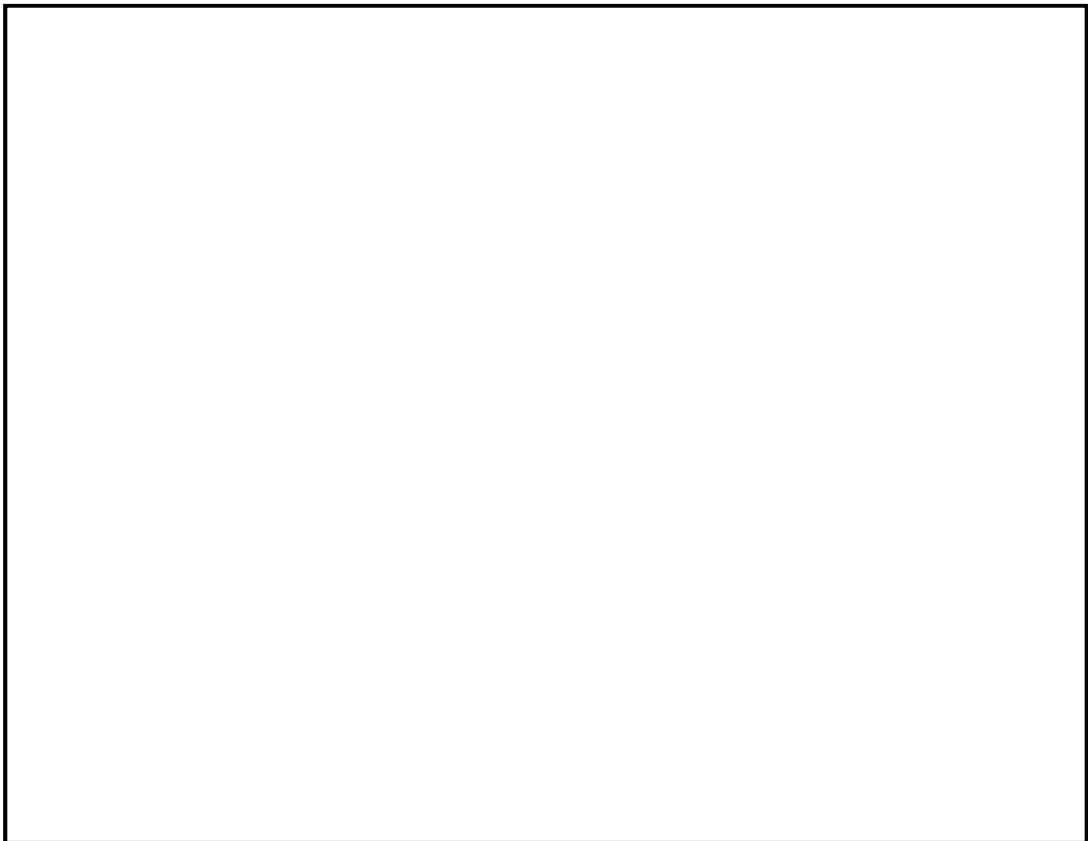


第3図 燃料取替用水ポンプを用いたSFPへの注水における具体的実施手順
(高浜発電所1号機 事故時操作所則抜粋)

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

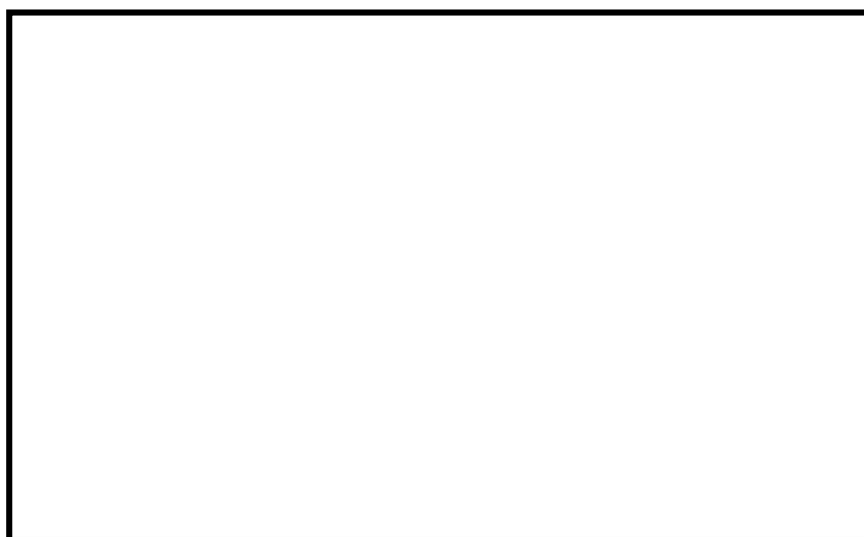
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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21m³/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および性能曲線との関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2)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.に示す通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図に示す通り、約5m³/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.に示す通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図に示す通り、約22m³/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)に示す通り、可搬型設備を使用する手順であるため、ポンプ揚程曲線を用い系統圧損等を踏まえ評価する。

・評価条件

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

第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.)	-14.27 m	—

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号および2号炉それぞれへの敷設ルートの最短ルート（1号炉東側シャッターからの敷設ルート）

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。

の長さとした。

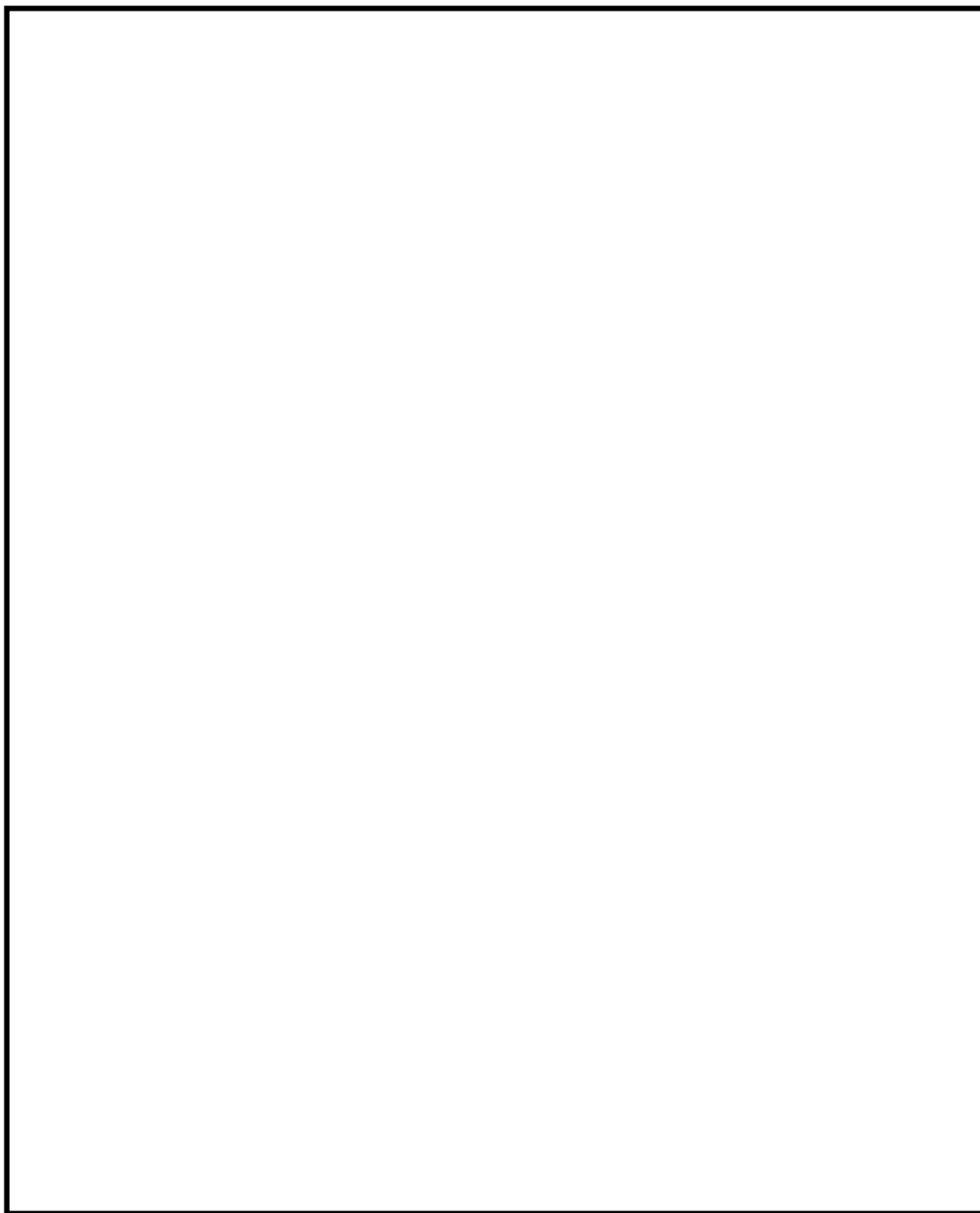
第7表 系統内配管情報

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95m³/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.に示す通り、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図に示す通り手順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表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

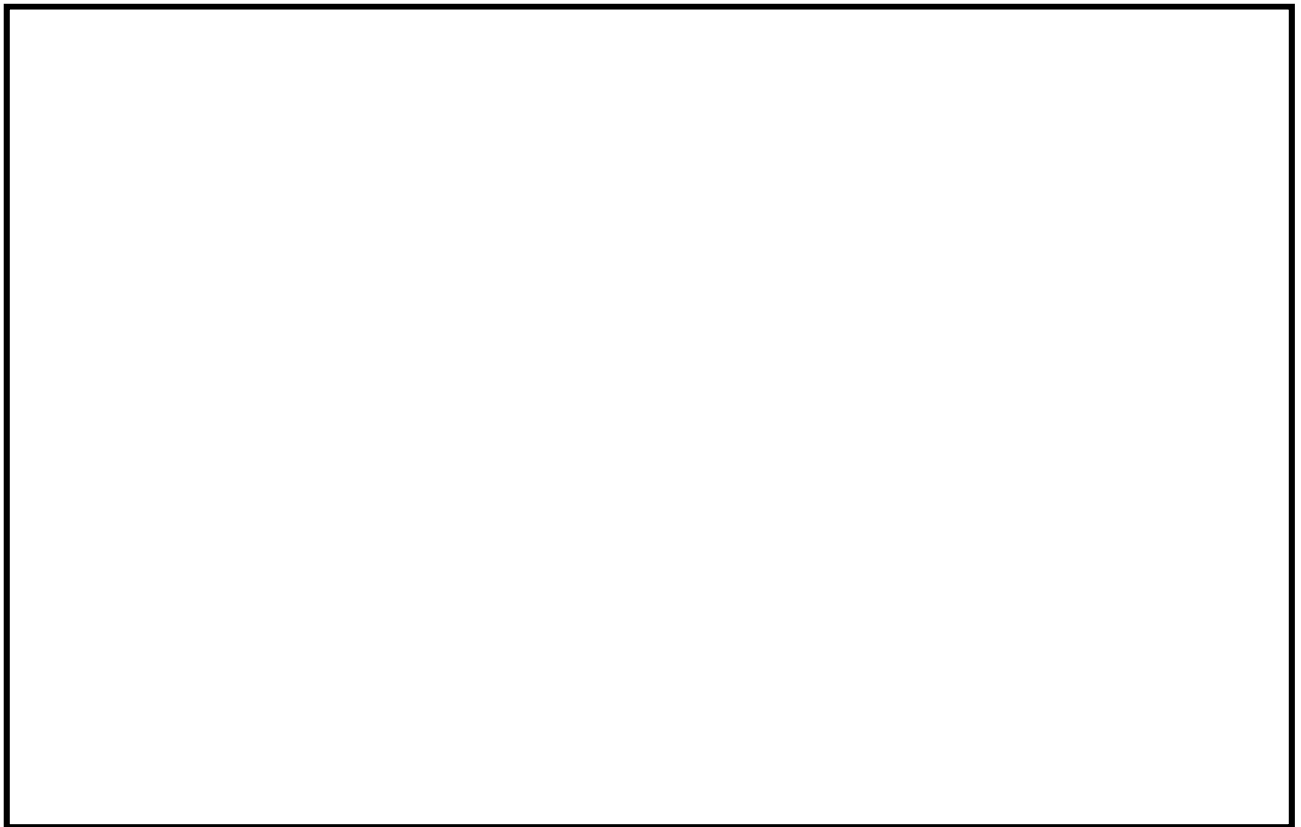
第8表 水源と移送先の静水頭差（手順⑤）

	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.)	-0.43 m	—

・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39m³/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および性能曲線との関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

・評価条件

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

第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.)	28.8 m	—

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号および2号炉それぞれへの敷設ルートの最短ルート（1号炉西側シャッターからの敷設ルート）の長さとした。

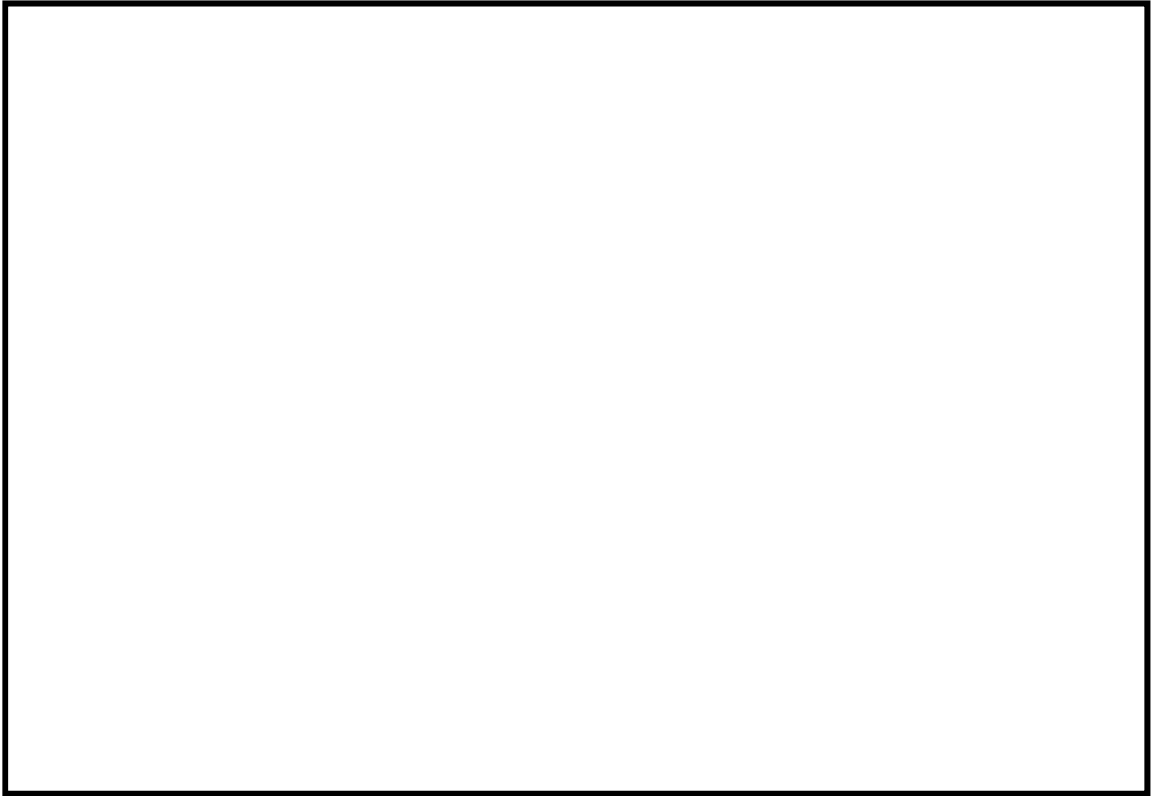
第11表 系統内配管情報（注水手順⑥）

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260m³/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。

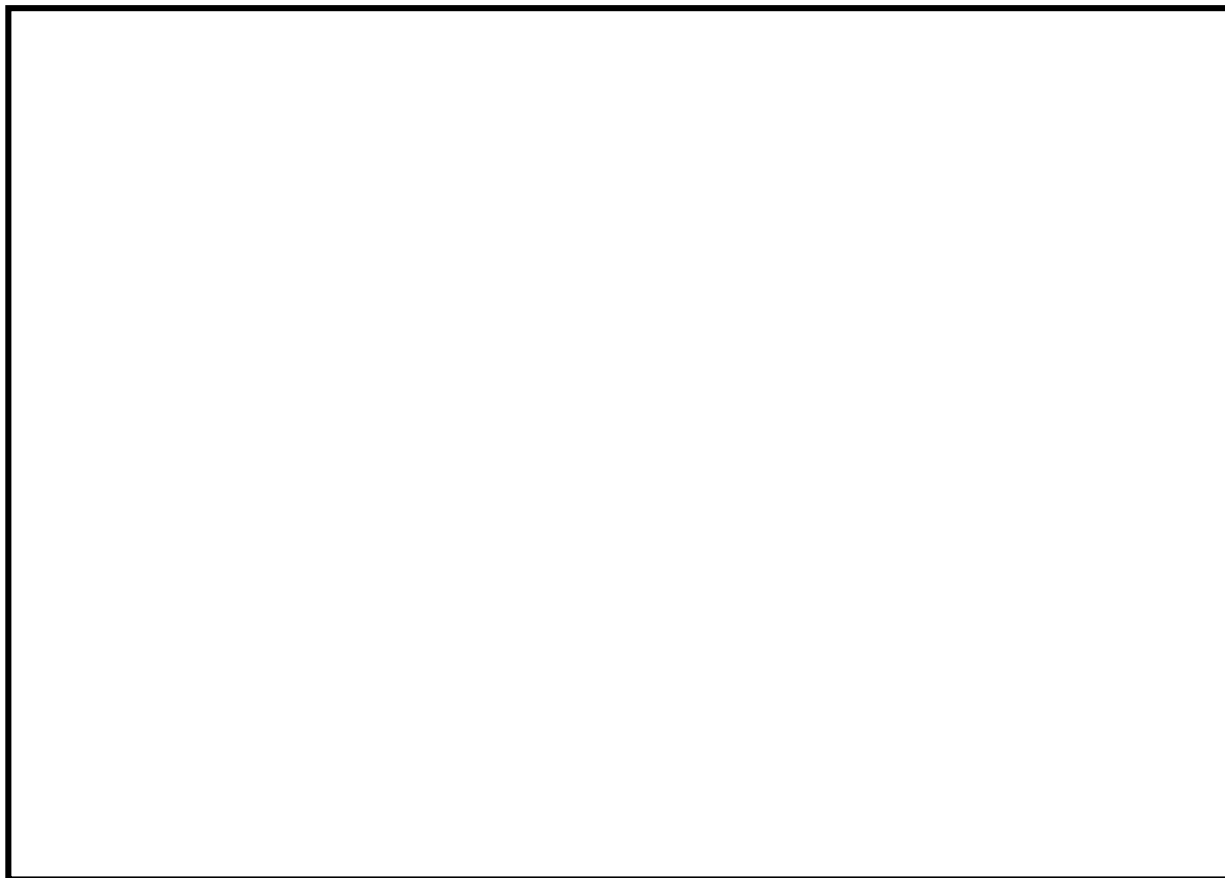


第 13 図 送水車 流量出典

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)に示す通り、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図に示す通り m³/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。

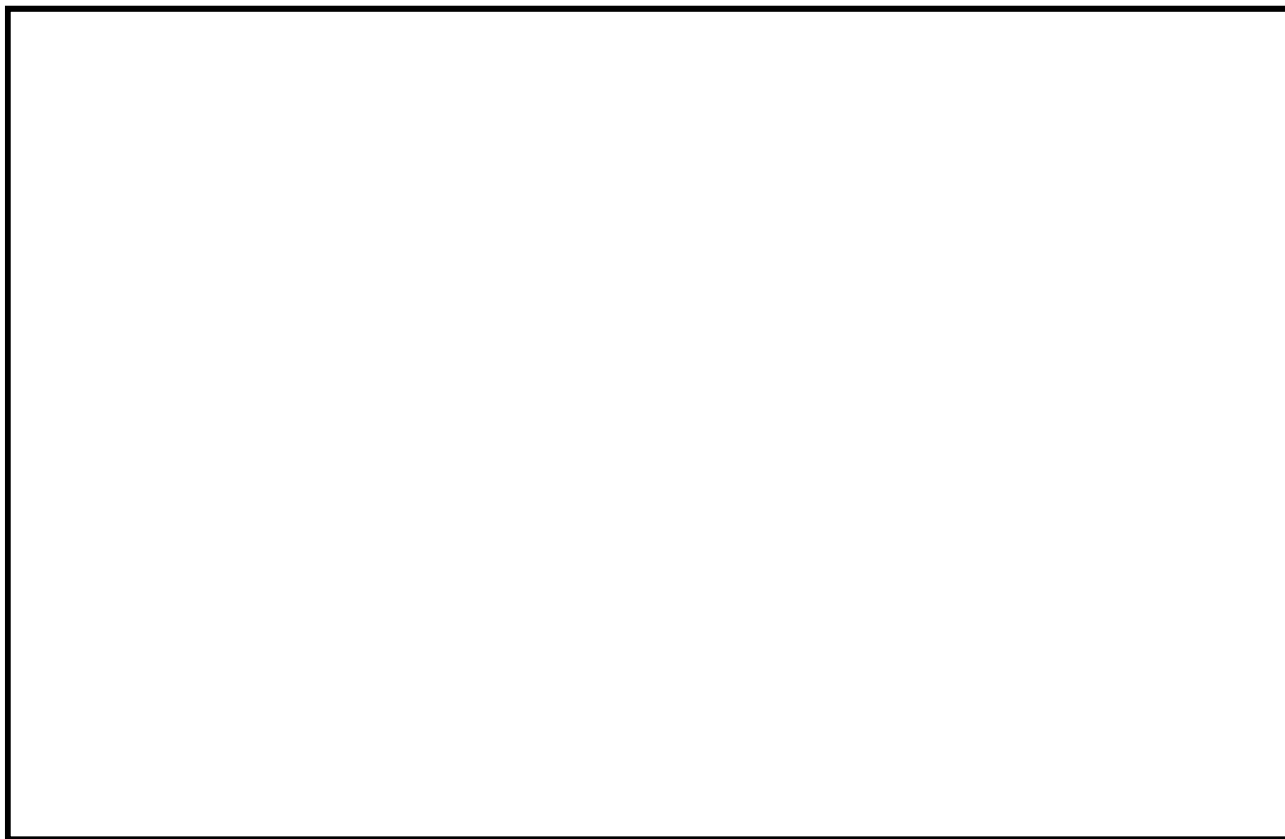
(8) 大容量ポンプ（放水砲用）を使用した放水砲による放水流量（放水手順②）

放水手順②については、3.1.2.(2)に示す通り、配備されている大容量ポンプ（放水砲用）の型式および設備構成を踏まえ設定する。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15-1～3図に示す通りそれぞれ \square m^3/h （型式：HS900）、 \square m^3/h （型式：HS900N）、 \square m^3/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 \square m^3/h （HS900およびHS1200を用いる場合に送水量が最大となる。送水量は、ポンプを2台直列に接続する運用であることから容量の低い方のポンプと同値になる。）となることから、放水砲からの流量は \square m^3/h を2等分した \square m^3/h となる。

第12表 高浜1, 2号炉に配備している大容量ポンプ（放水砲用）の型式

型式	HS900 (1, 2号炉共用)	HS900N (1, 2号炉共用)	HS1200 (共用予備)
既工認記載値	\square m^3/h 以上		

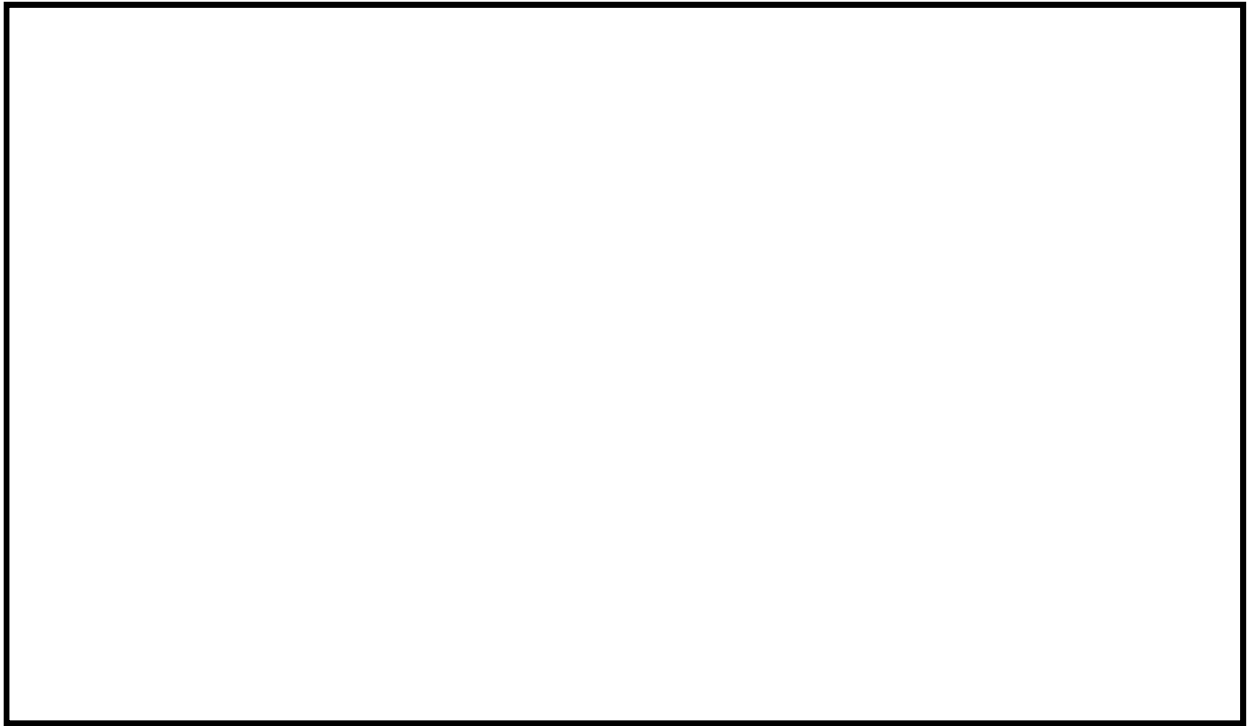


第 15-1 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS900）



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

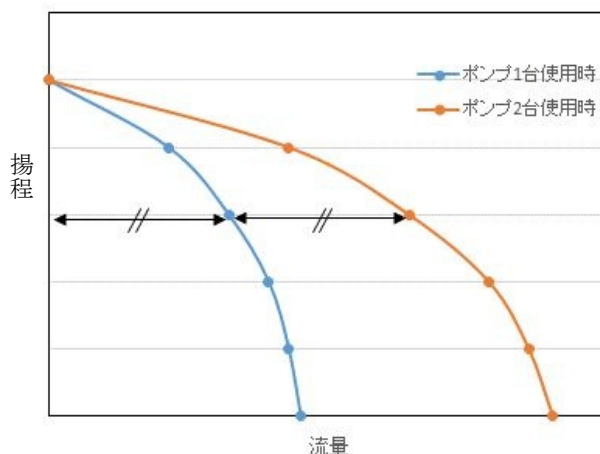
不確かさを考慮した条件の設定に際しては、重大事故等への対応に向け整備された手順に示される具体的記載事項を踏まえ、以下の考え方にに基づき設定する。

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、運転ポンプを切り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図に示す通り、ポンプ1台時の設計揚程曲線の流量にポンプ台数を乗じて求められる曲線を使用する。またポンプ1台での通水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。

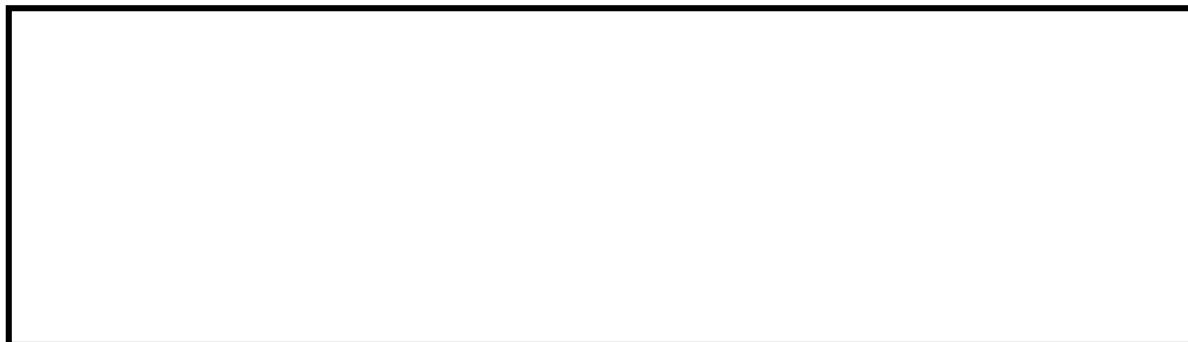


第16図 ポンプ複数台使用時の揚程曲線設定（2台起使用時の概要）

上記の前提および3.1.に示す具体的考え方にに基づき、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および水源-SFPの水頭差は変わらないことから、以降では①での系統構成およ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および1次系純水タンクからの注水流量（注水手順①および手順⑤）

評価する手順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, 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21m³/h、手順⑤で約42m³/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およ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および性能曲線との関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2) 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. に示す通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. に示す通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か所）も乗じた値として、 $22\text{m}^3/\text{h} \times 2\text{台} \times 3\text{か所} = 132\text{m}^3/\text{h}$ を、不確かさを考慮した条件として使用する。

(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。

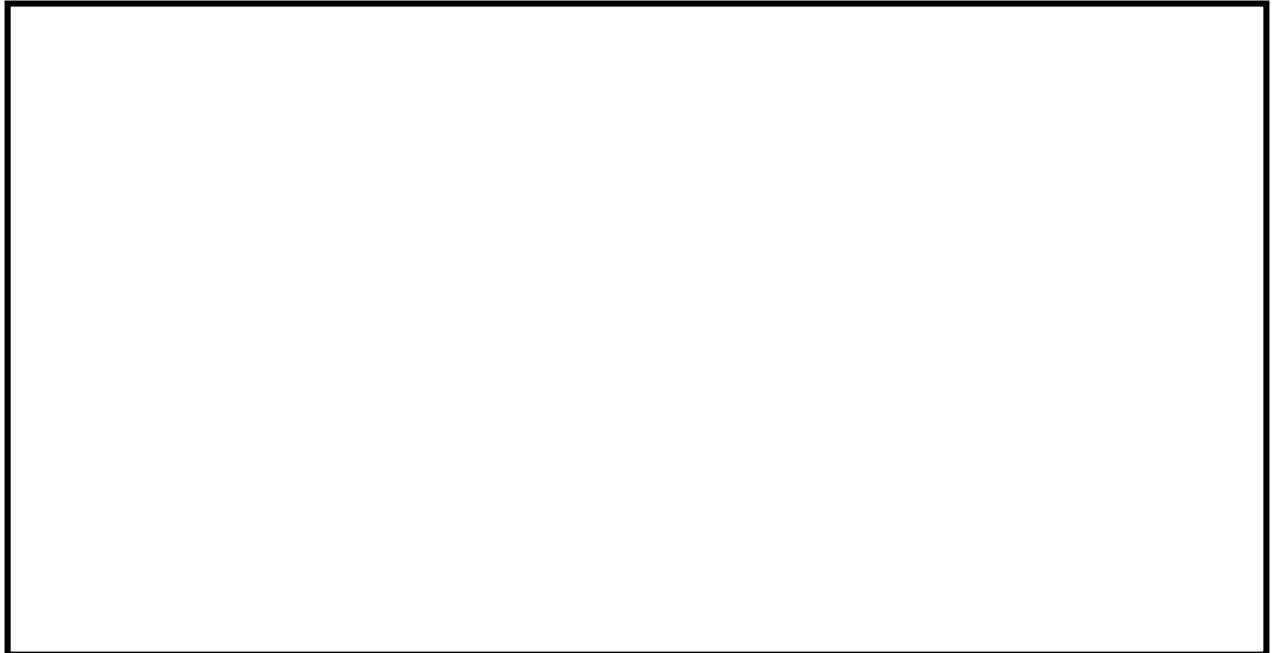
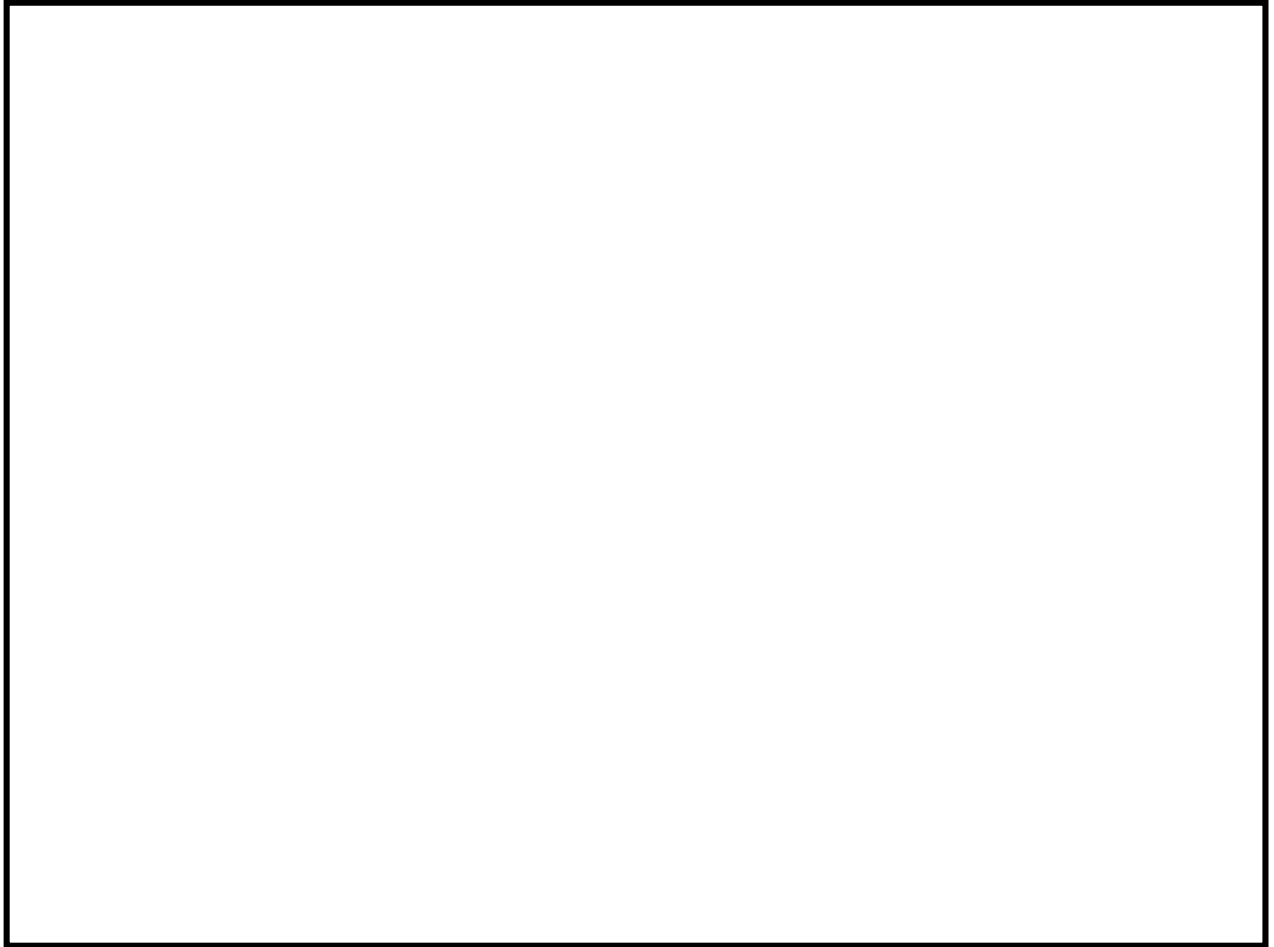
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

海水以外を水源とする手順における水源の容量を第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および手順の有効性確認において使用されている各手順の所要時間を踏まえ、各手順を順に実施した場合の想定タイムチャートを第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 ^{※3}	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	1325m ³ ^{※1}	約63時間	約9時間
2次系純水タンク	2700m ³ ^{※2}	約25時間 ^{※4}	約9時間
1, 2号機淡水タンク	15600m ³ (3120m ³ ^{※2} × 5基)	約118時間	約6時間
1次系純水タンク	510m ³ ^{※2}	約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次系純水ポンプおよび消防ポンプ使用手順の流量合計を使用し計算した値。

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

第20図 全手順同時実施を想定したタイムチャート

8. まとめ

高浜1, 2号炉の未臨界性評価条件となるSFPへの流入流量について、各手順の系統構成および設備配備台数等を踏まえ、基本ケース条件および不確かさを考慮した条件を評価した。3. で示した流量設定の考え方に基づき、4. および5. で求めた各手順の流量評価結果を第14-1, 2表に纏める。

未臨界性評価における流量の基本ケース条件および不確かさを考慮した条件は、注水・放水手順の流量合計値として、それぞれ m³/h、 m³/hとなる。

第14-1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)	21 m ³ /h	21 m ³ /h	ポンプ揚程曲線
② 2次系純水タンク(2次系純水ポンプ)	5 m ³ /h	15 m ³ /h	実測値
③ 1,2号淡水タンク(消火ポンプ-消火栓)	22 m ³ /h	132 m ³ /h	実測値
④ 2次系純水タンク(消防ポンプ)	95 m ³ /h	95 m ³ /h	ポンプ揚程曲線
⑤ 1次系純水タンク(1次系純水ポンプ)	39 m ³ /h	42 m ³ /h	ポンプ揚程曲線
⑥ 海水(送水車)	260 m ³ /h	260 m ³ /h	ポンプ揚程曲線
合計	442 m ³ /h	565 m ³ /h	—

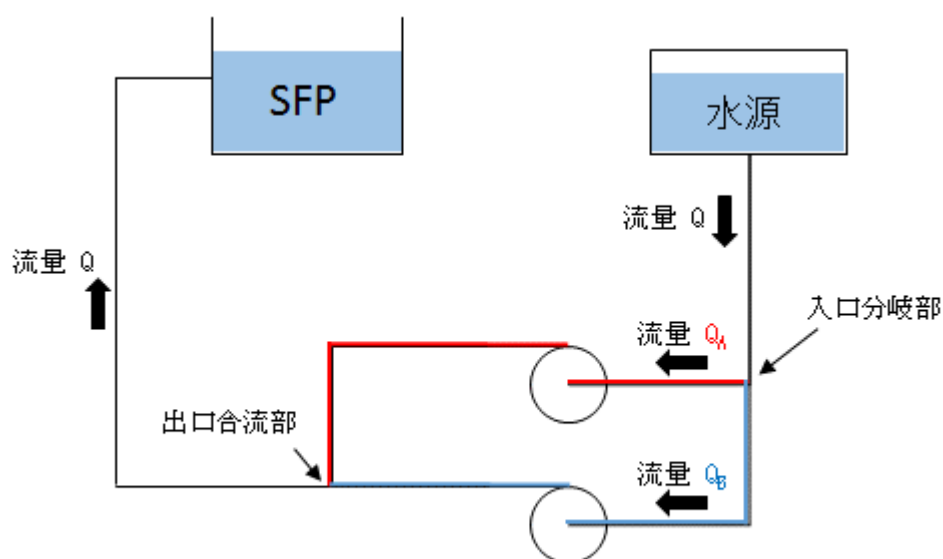
第14-2表 SFPへの放水手順の流量評価結果一覧

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 ³ /h	<input type="text"/> m ³ /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 ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	大容量ポンプ(放水砲用)の仕様上限
合計	<input type="text"/> m ³ /h	<input type="text"/> m ³ /h	—

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考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参考図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。

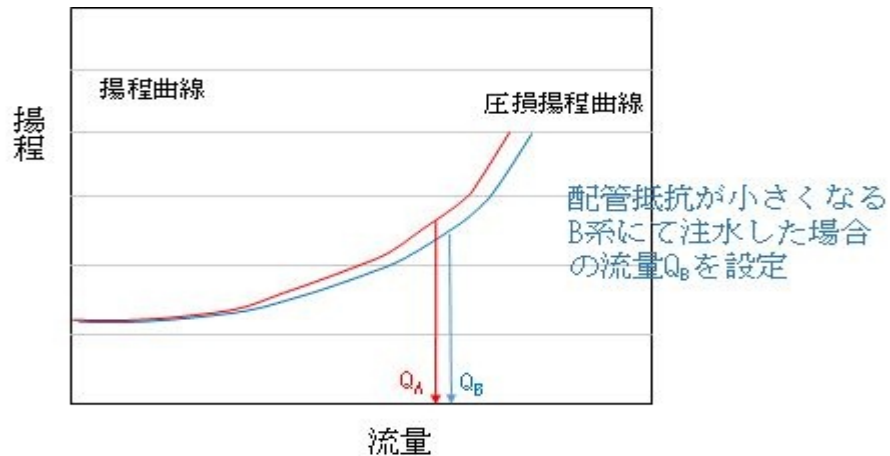


(配管抵抗はA系 > B系 とする。)

参考図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、配管径およ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。例えば参考図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参考図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。

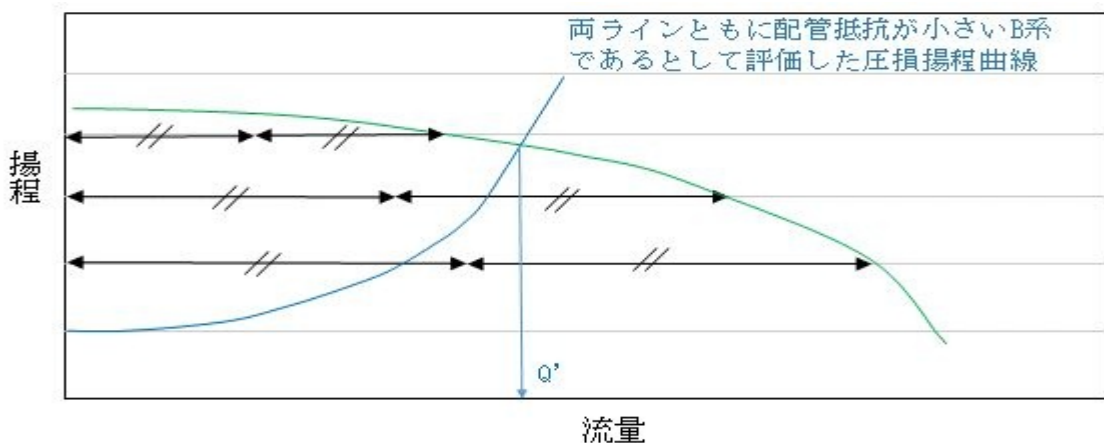


参考図2 基本ケースの流量（ポンプ起動台数は1台）の算出手法概要

【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参考図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どころ、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。



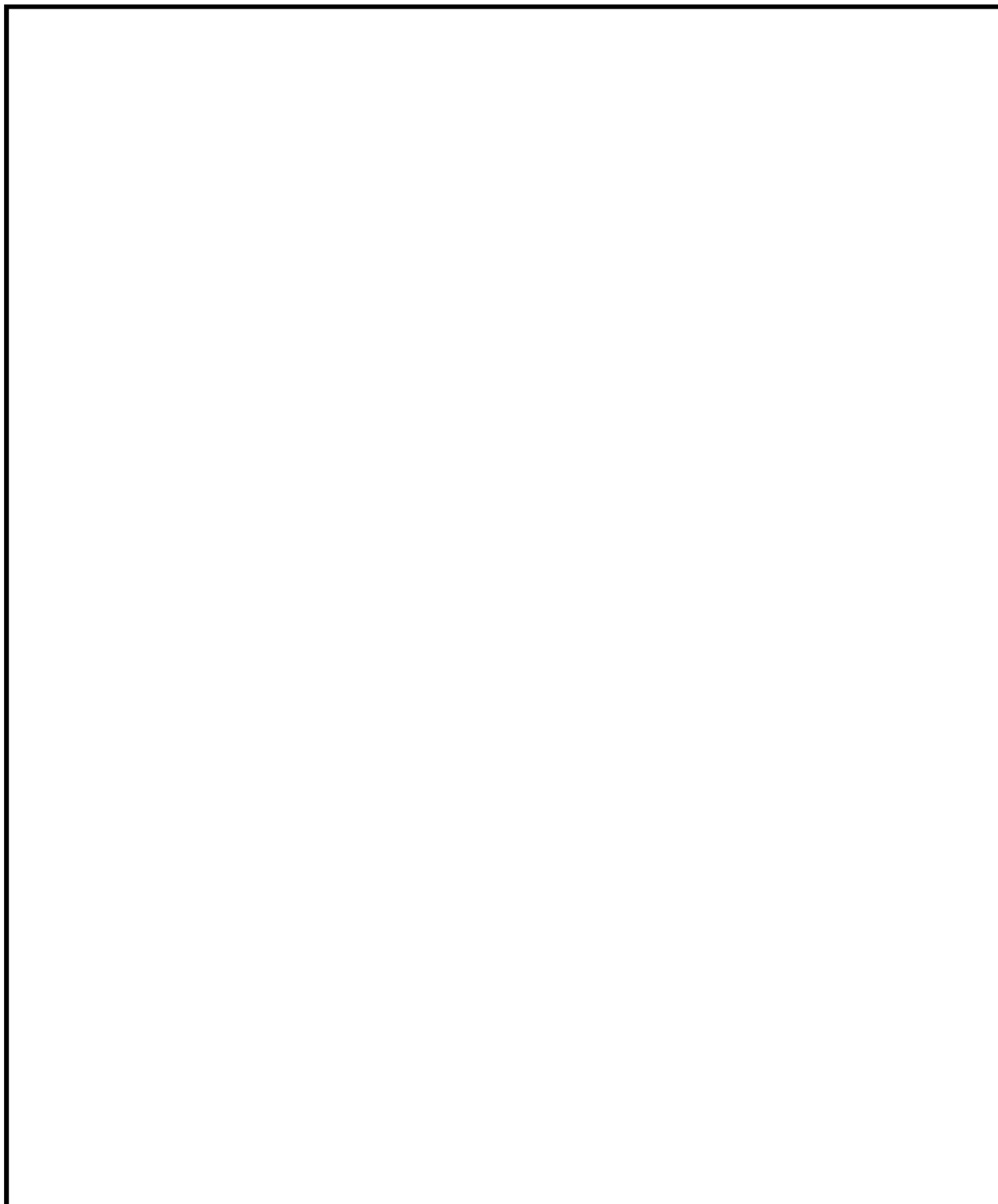
参考図3 不確かさを考慮した流量（ポンプ起動台数は全数）の算出手法概要

なお上述の通り、入口分岐部から各ポンプ入口まで、およ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**および**B系**の等価配管長にほとんど差はなく、それ起因する圧損差は、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。

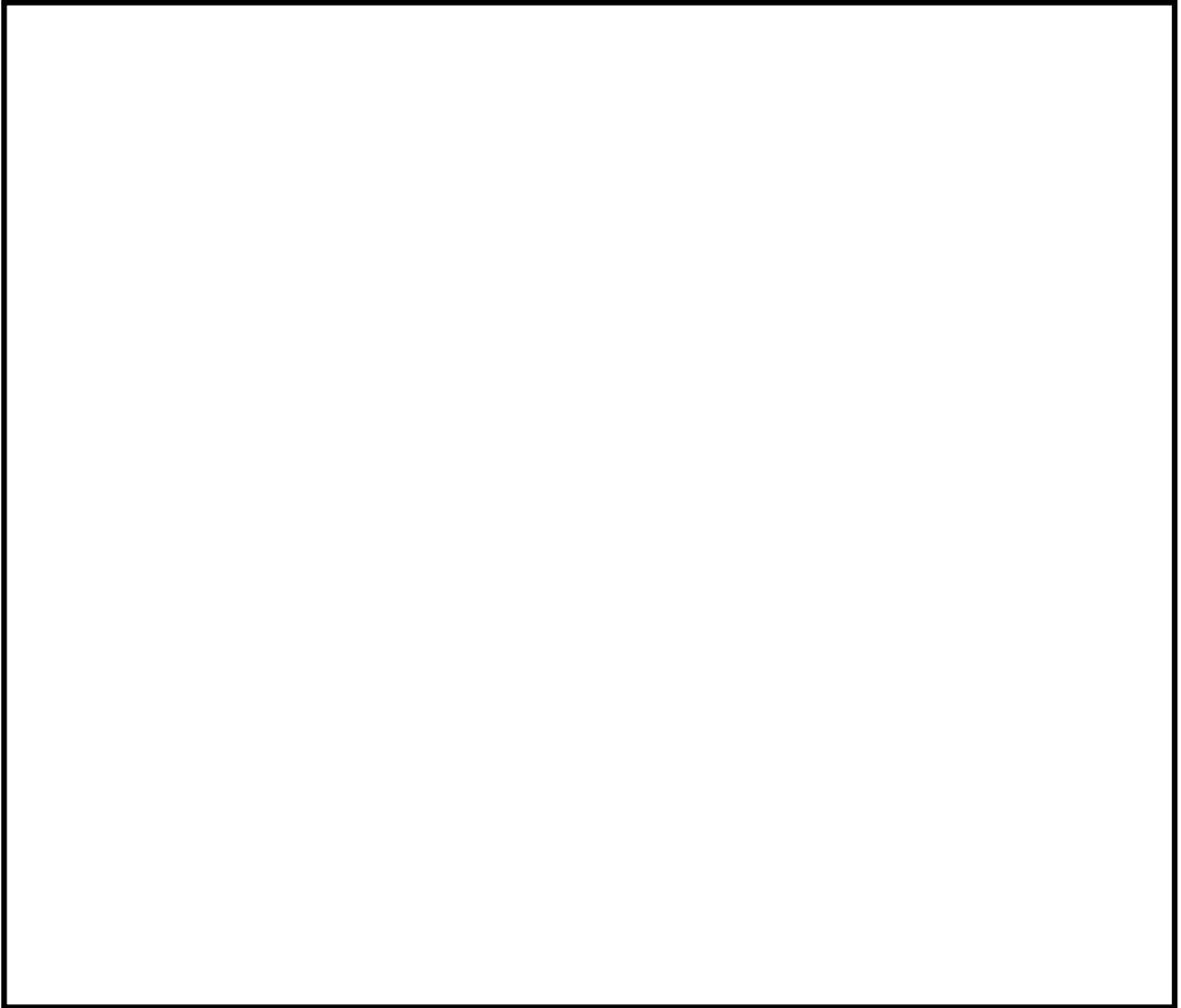
(参考2) 事故時等対応に向けSFPへの注水および放水手順を整備した社内標準

【燃料取替用水タンクからの注水（注水手順①）】



高浜発電所1号機 事故時操作所則（抜粋）

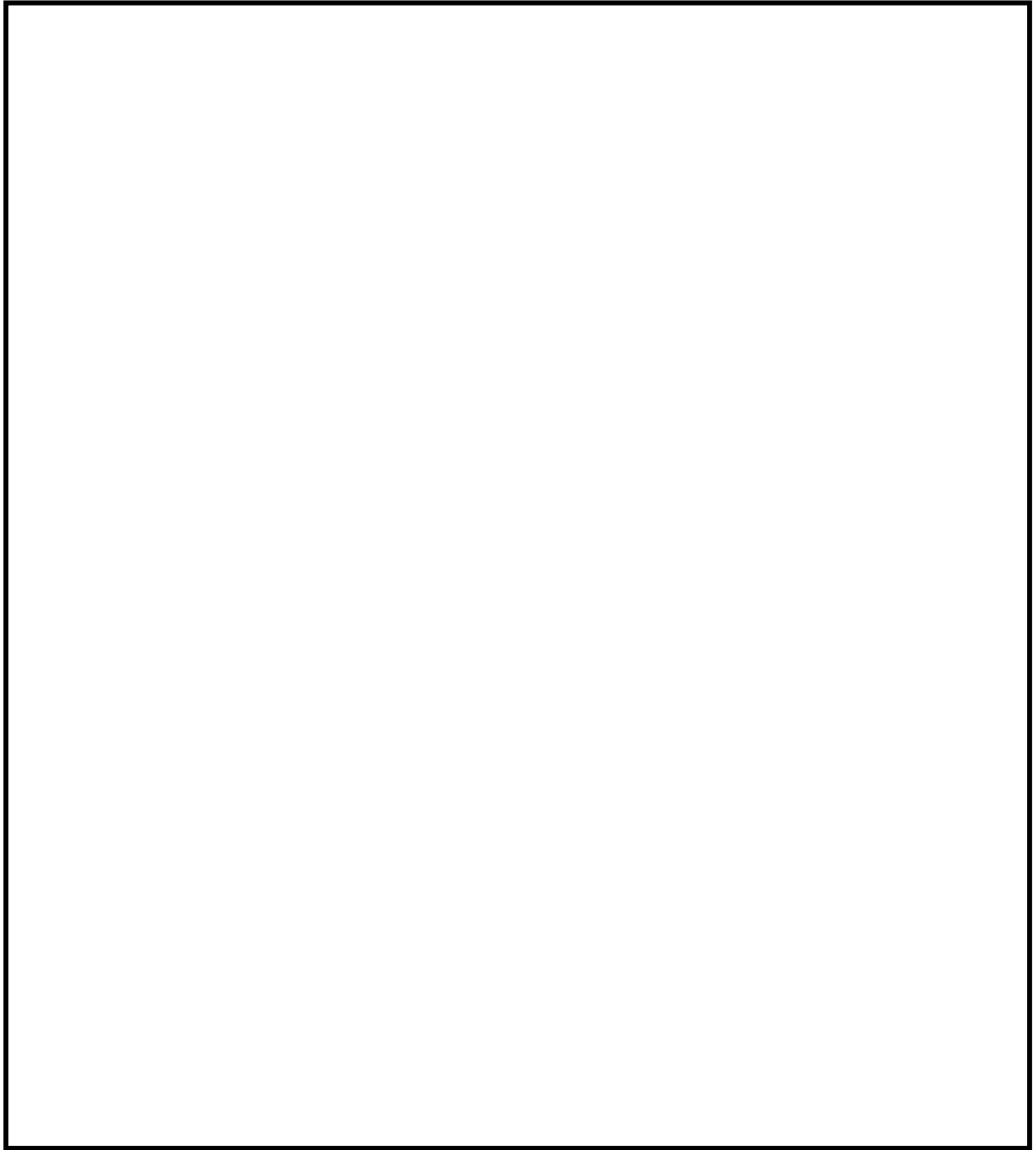
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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。

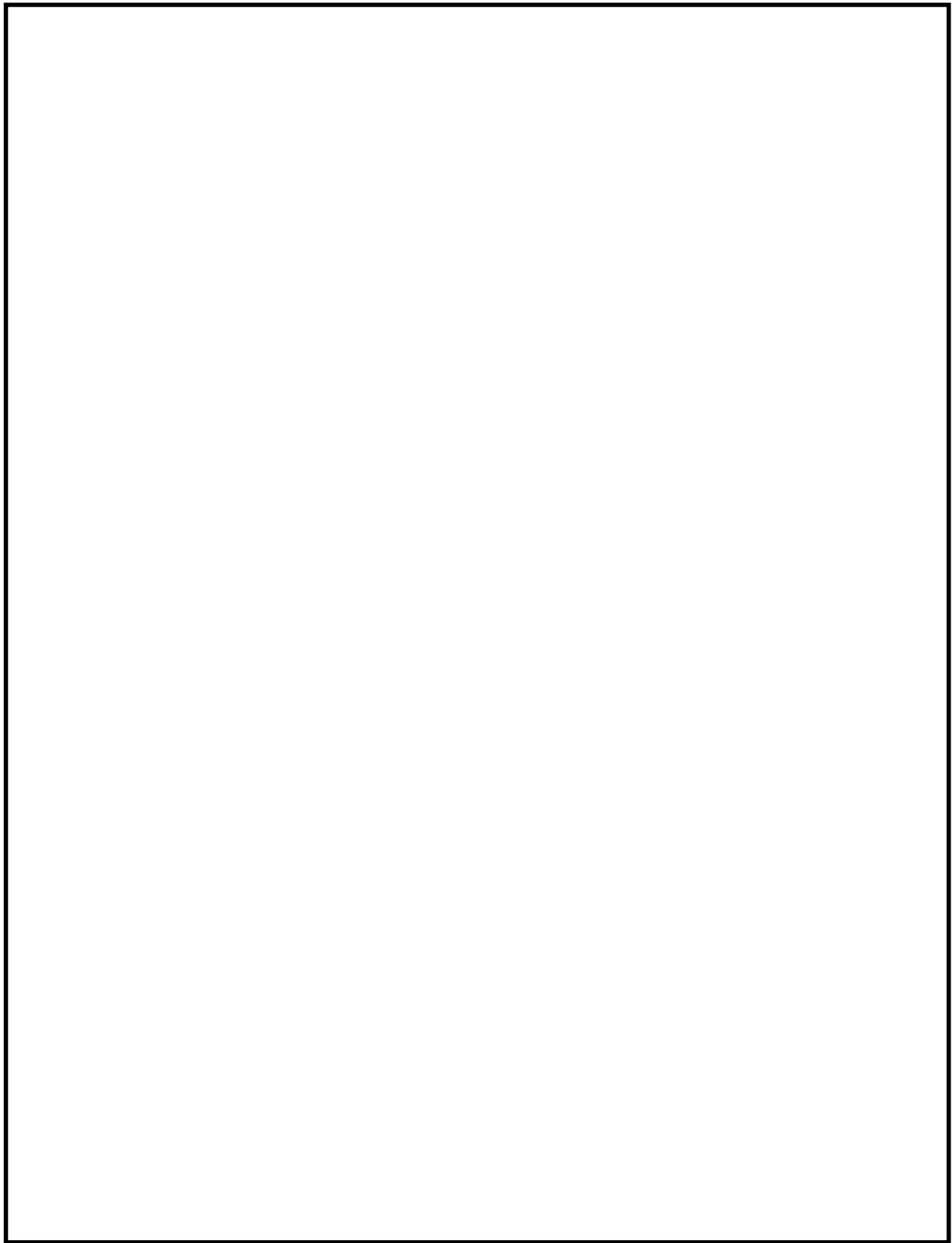
【2次系純水タンク（2次系純水ポンプ使用）からの注水（注水手順②）】



高浜発電所1号機 事故時操作所則（抜粋）

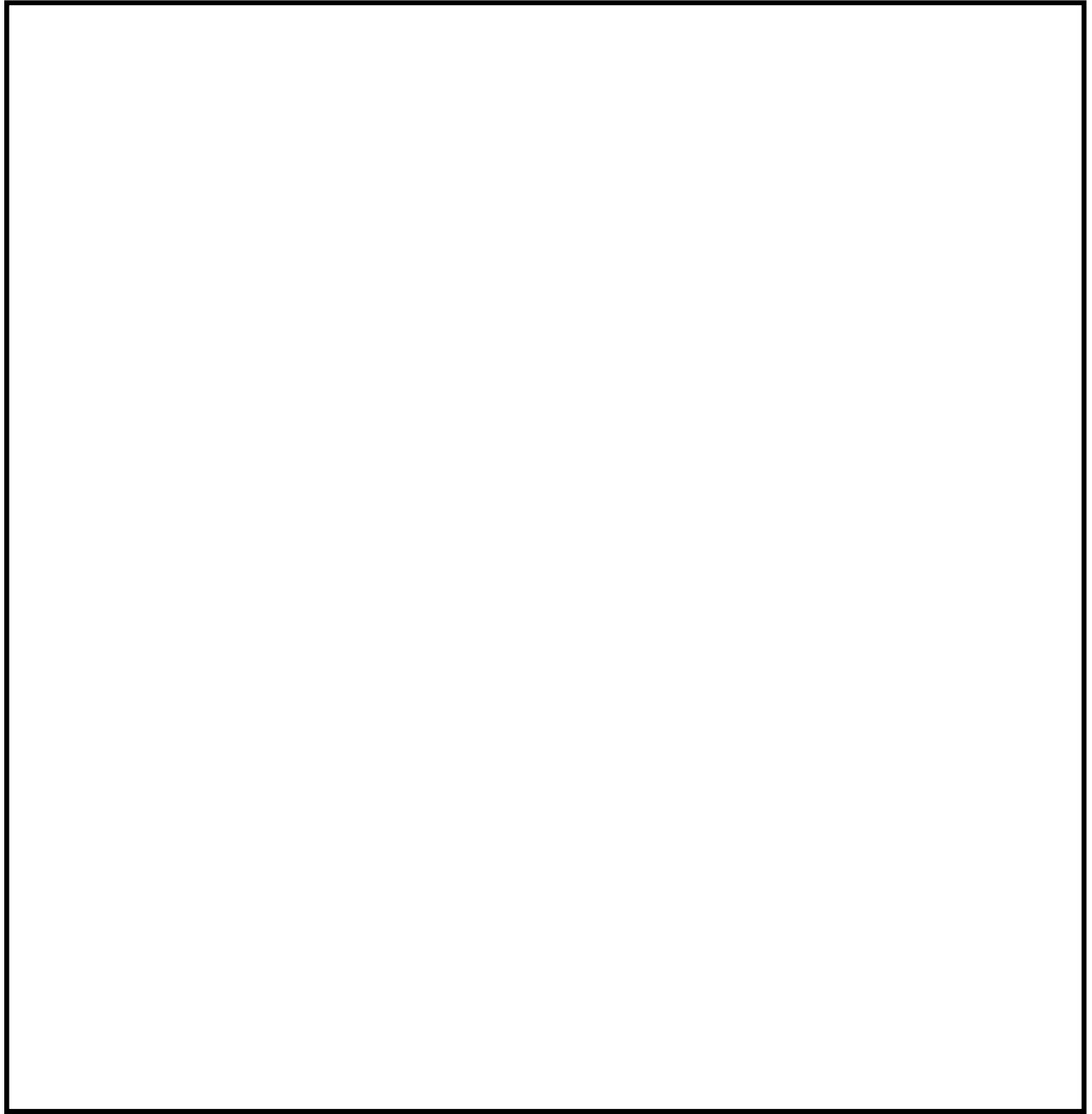
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【1,2号淡水タンクからの注水（注水手順③）】



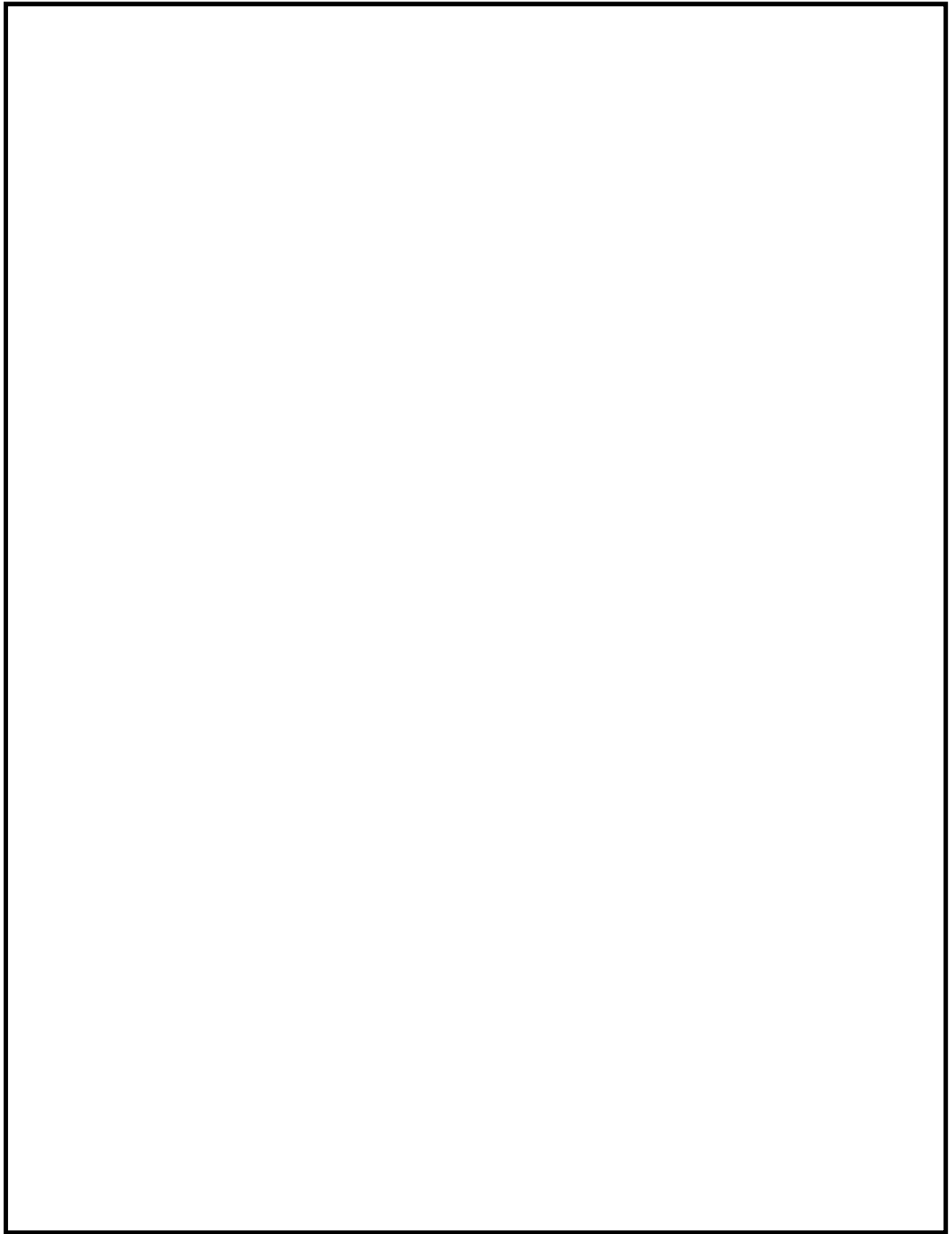
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



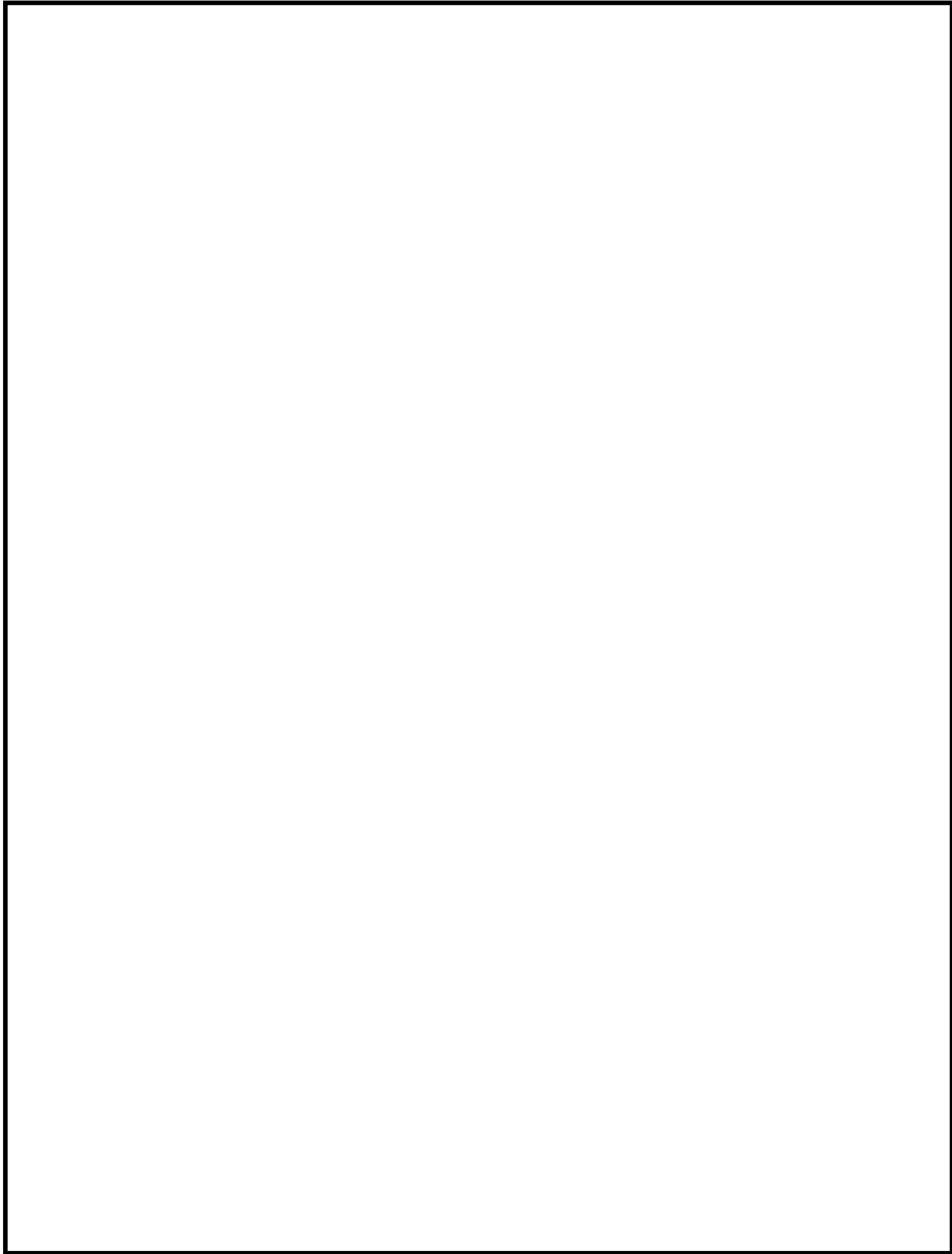
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



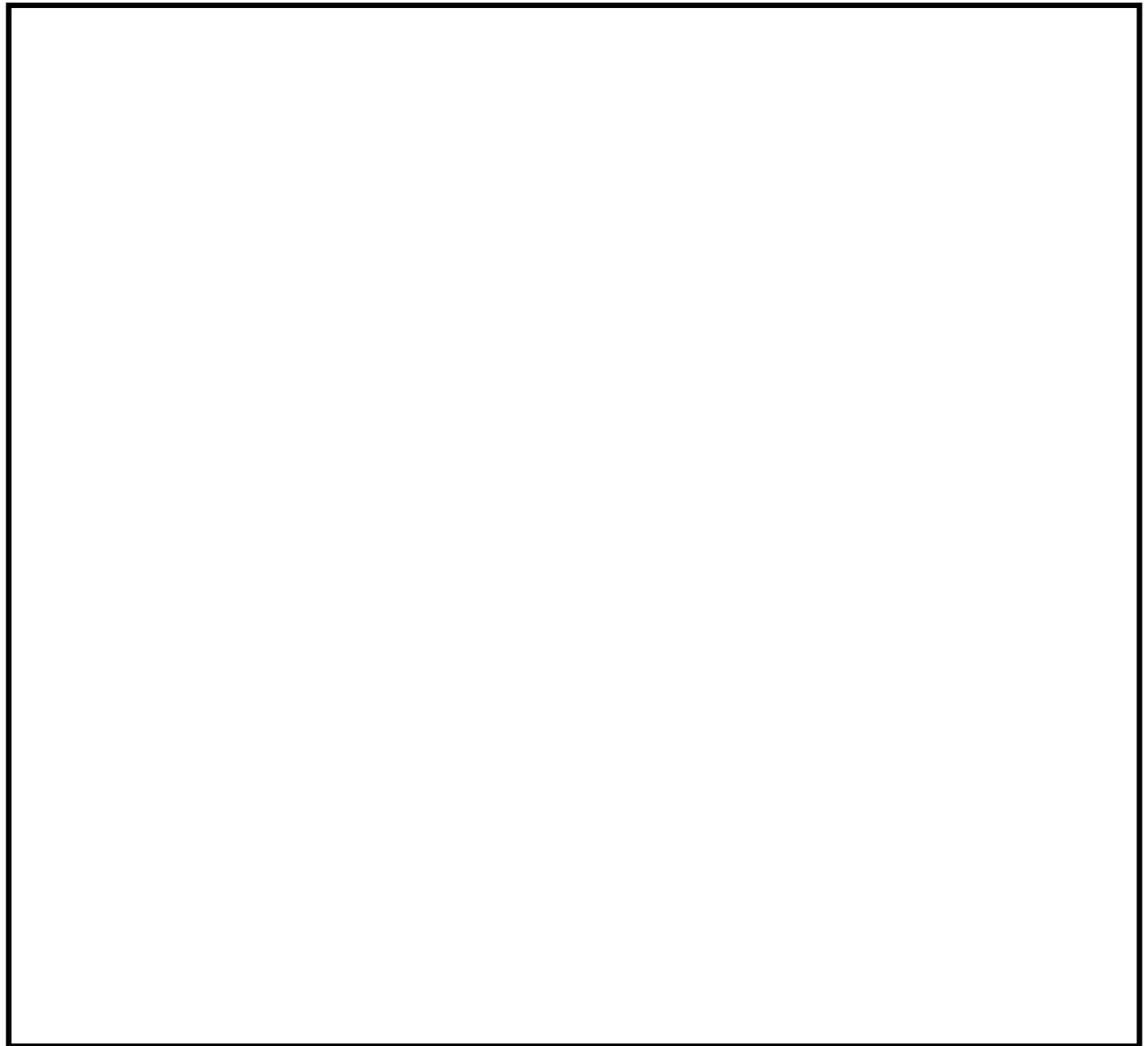
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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）

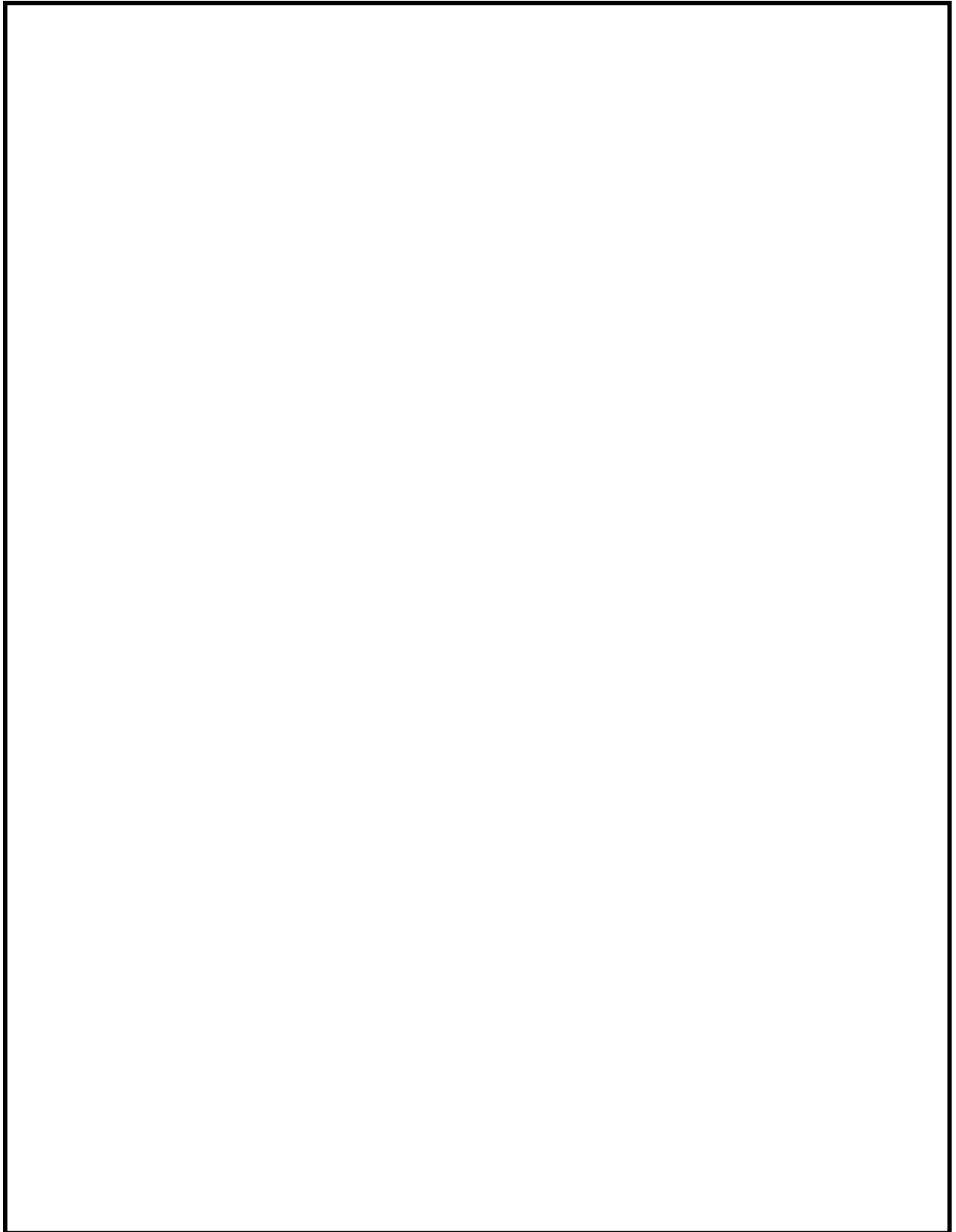
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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）

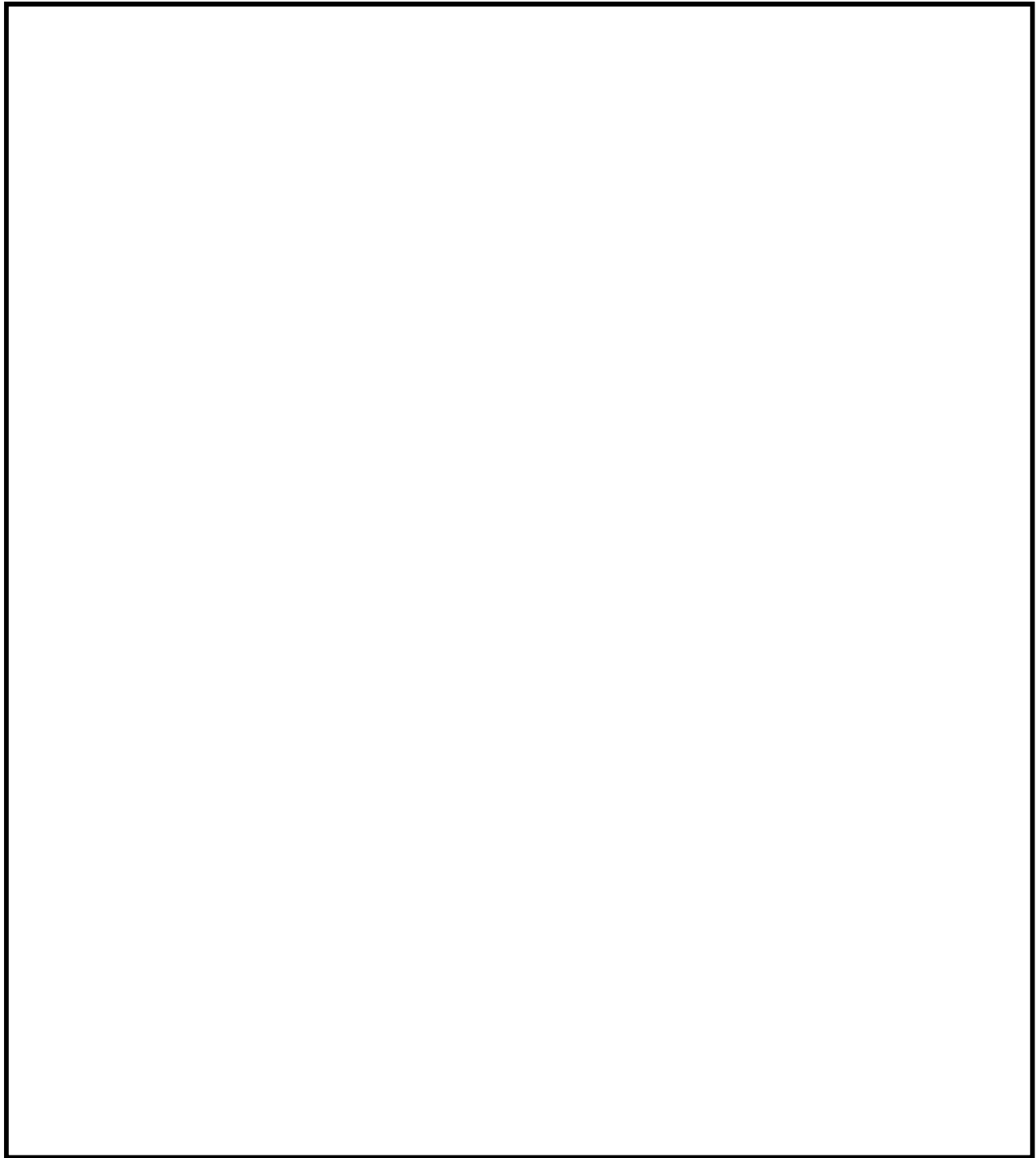
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【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）】



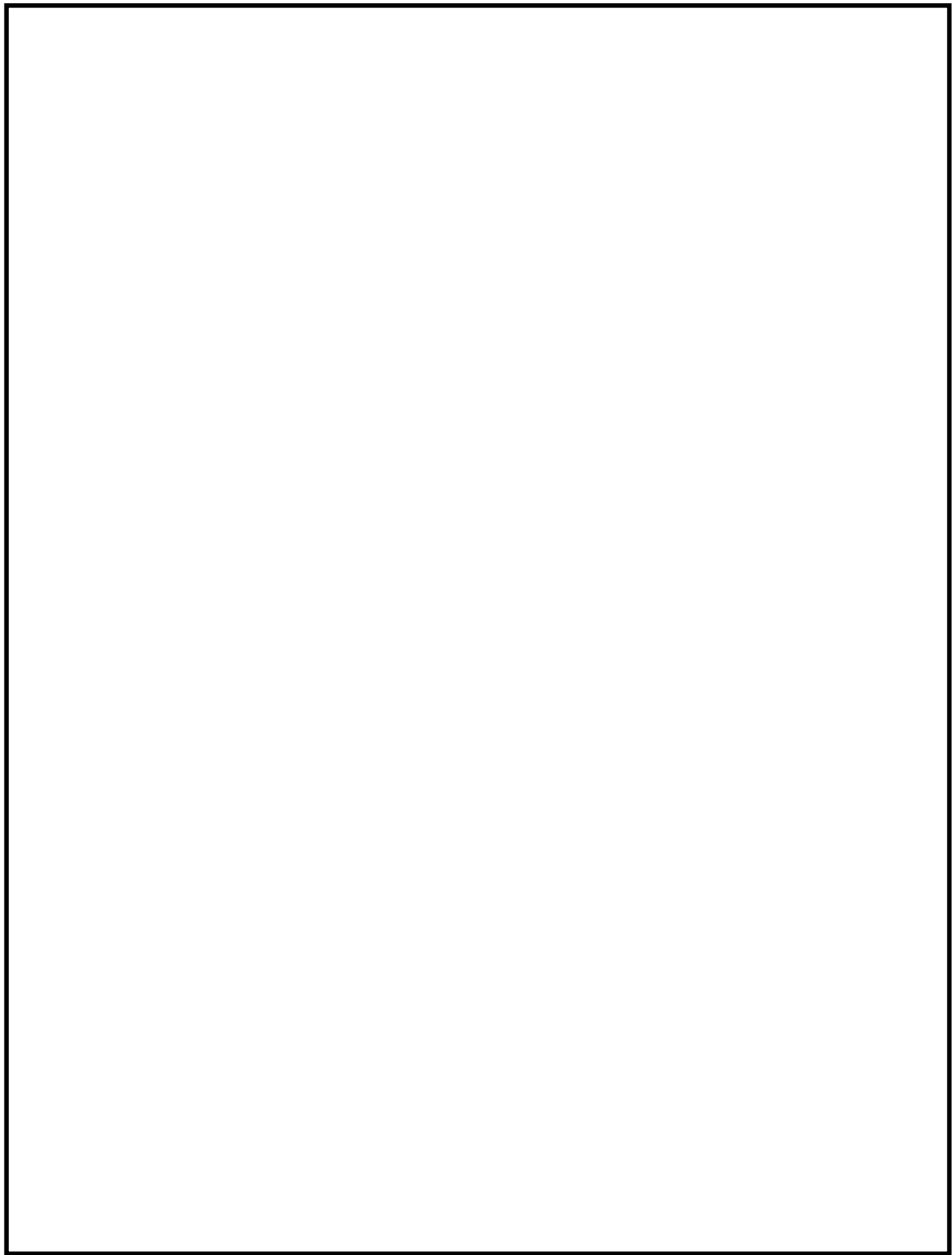
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



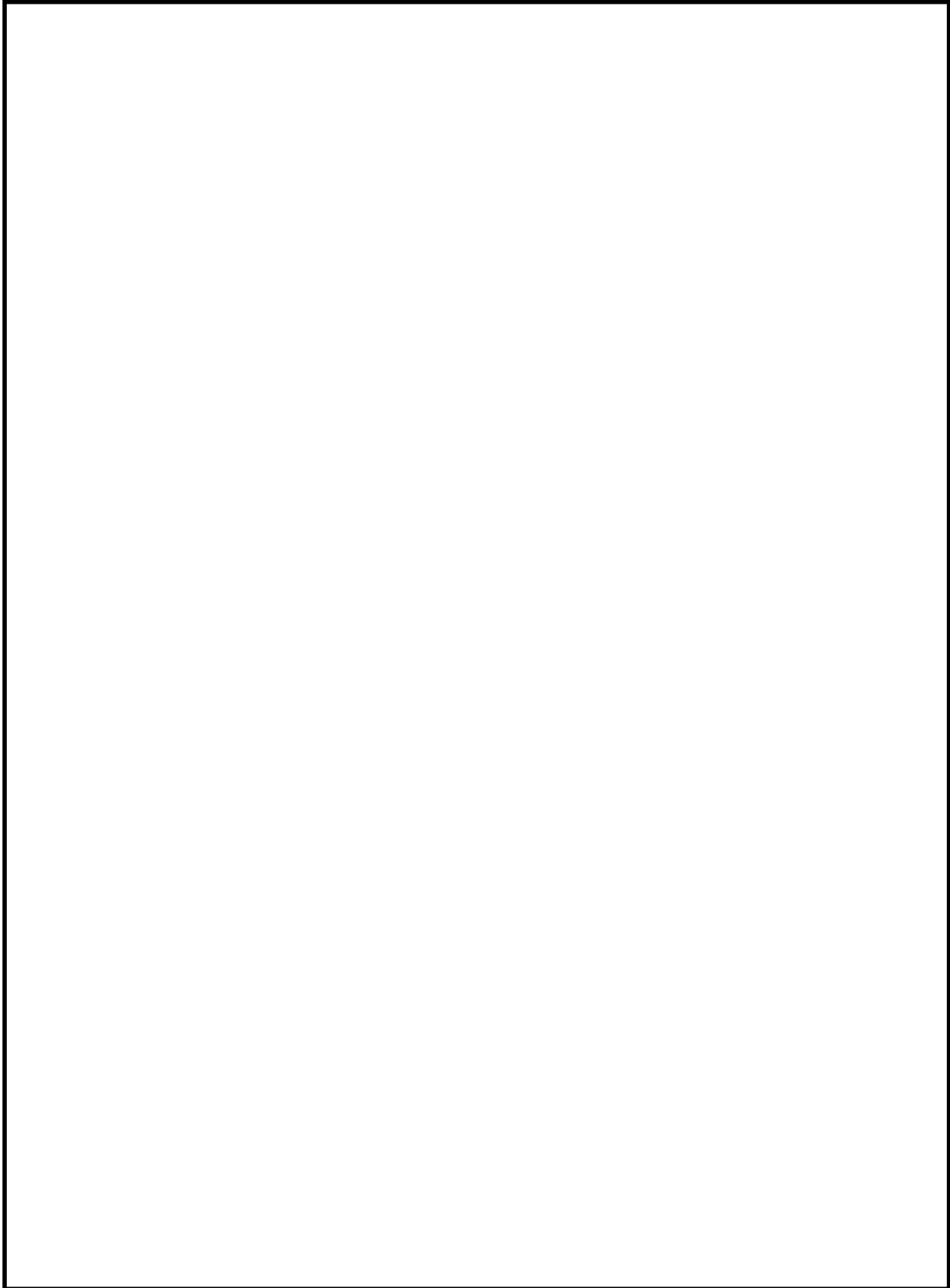
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



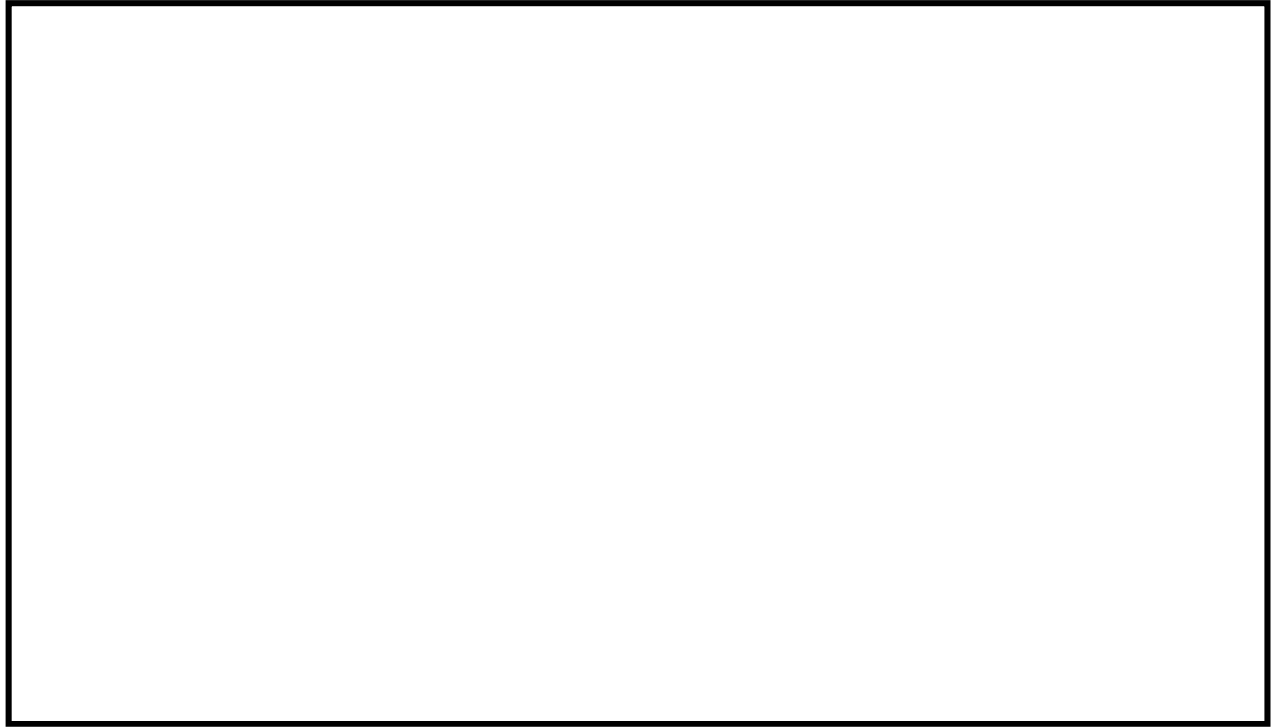
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



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）

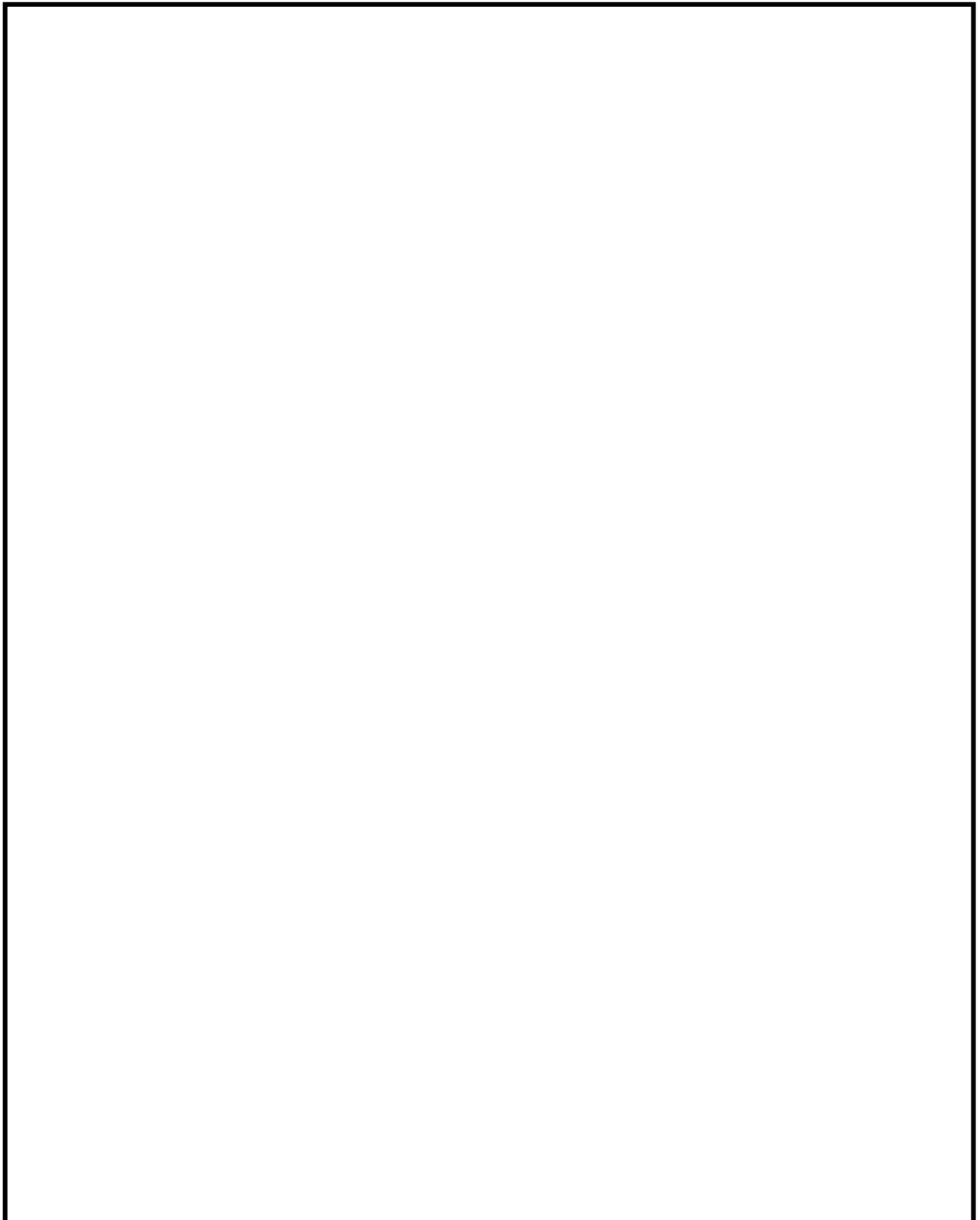
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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）

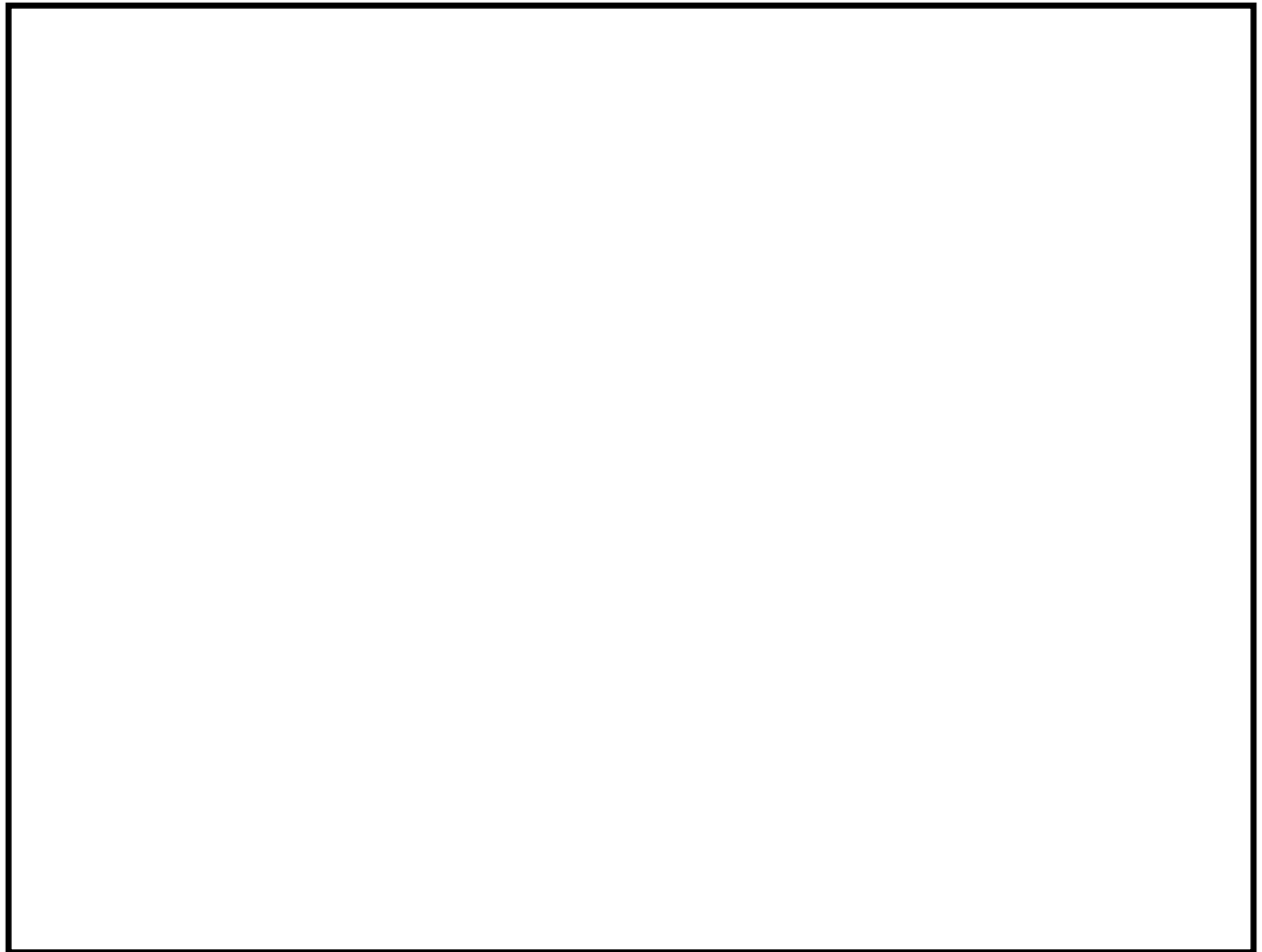
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【1次系純水タンク（1次系純水ポンプ使用）からの注水（注水手順⑤）】



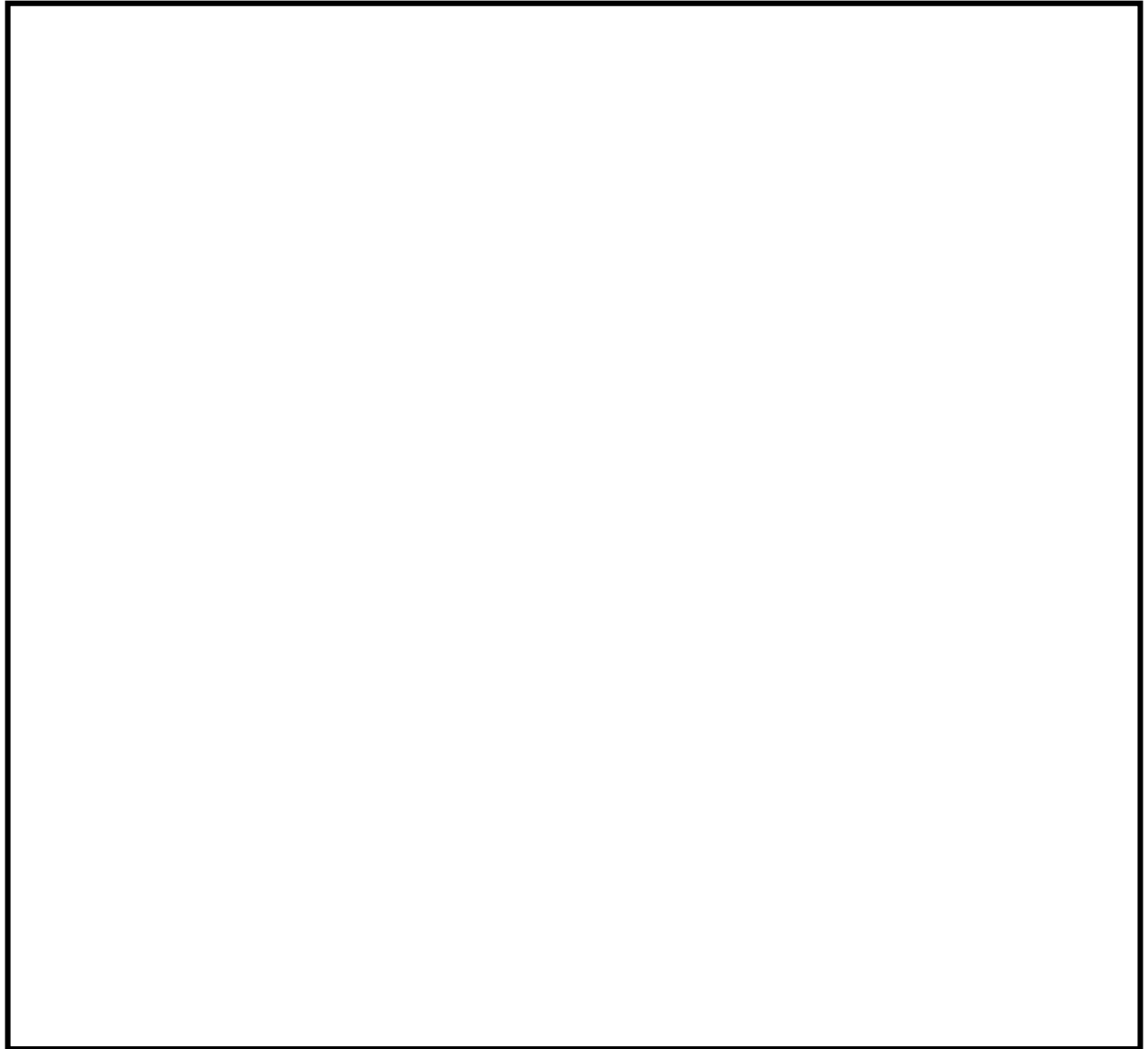
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



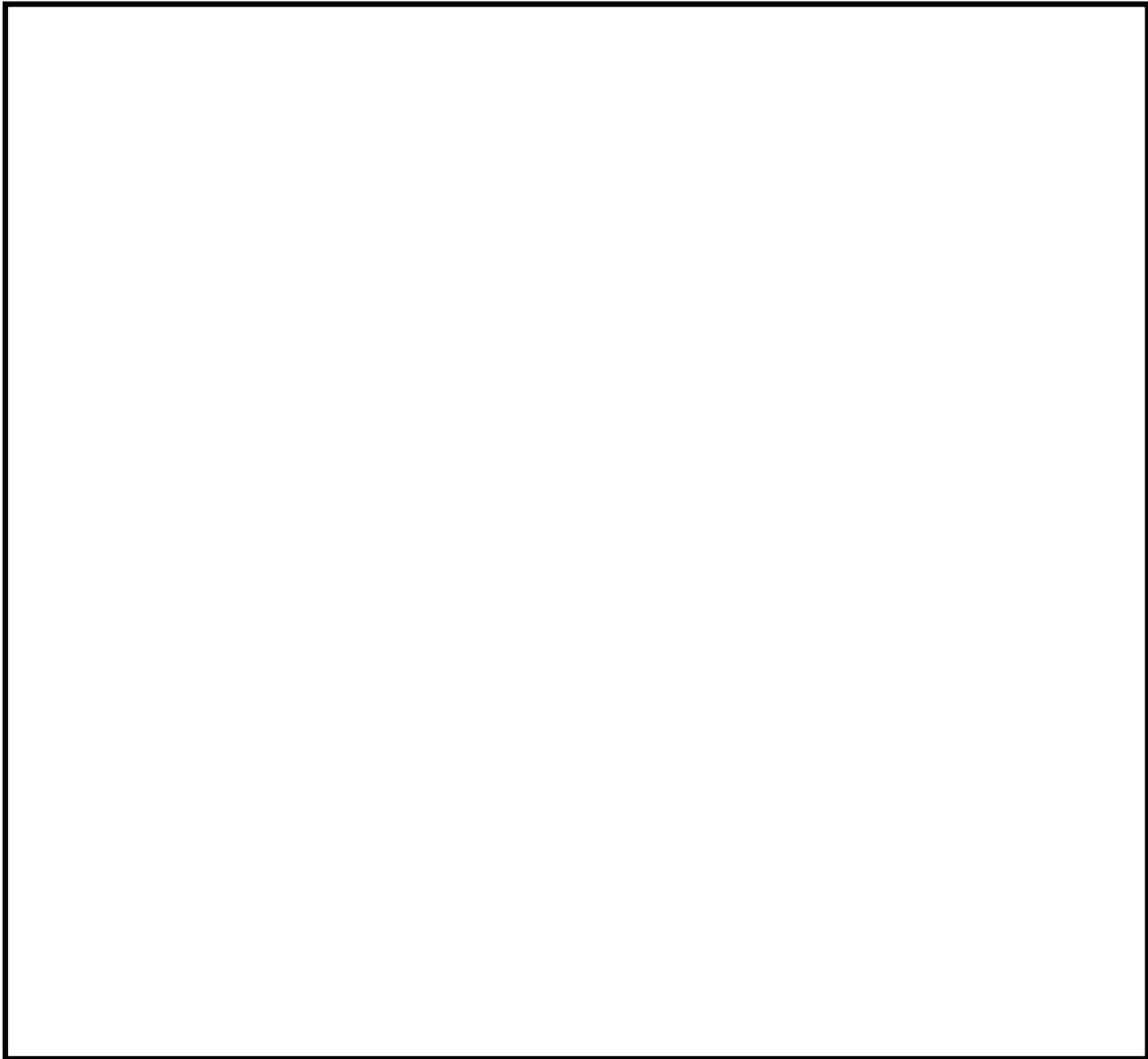
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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）

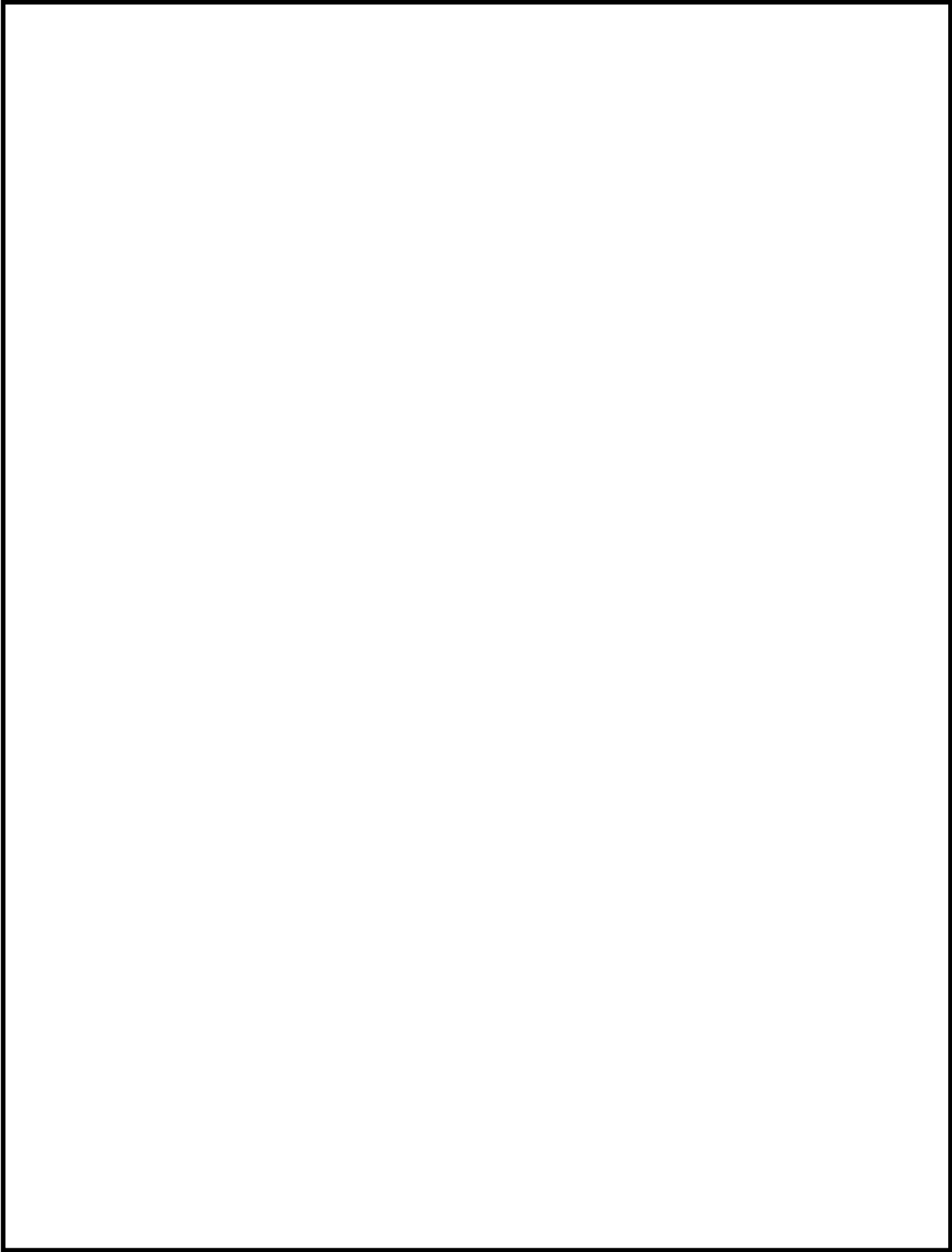
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【海水（送水車使用）からの注水（注水手順⑥）】



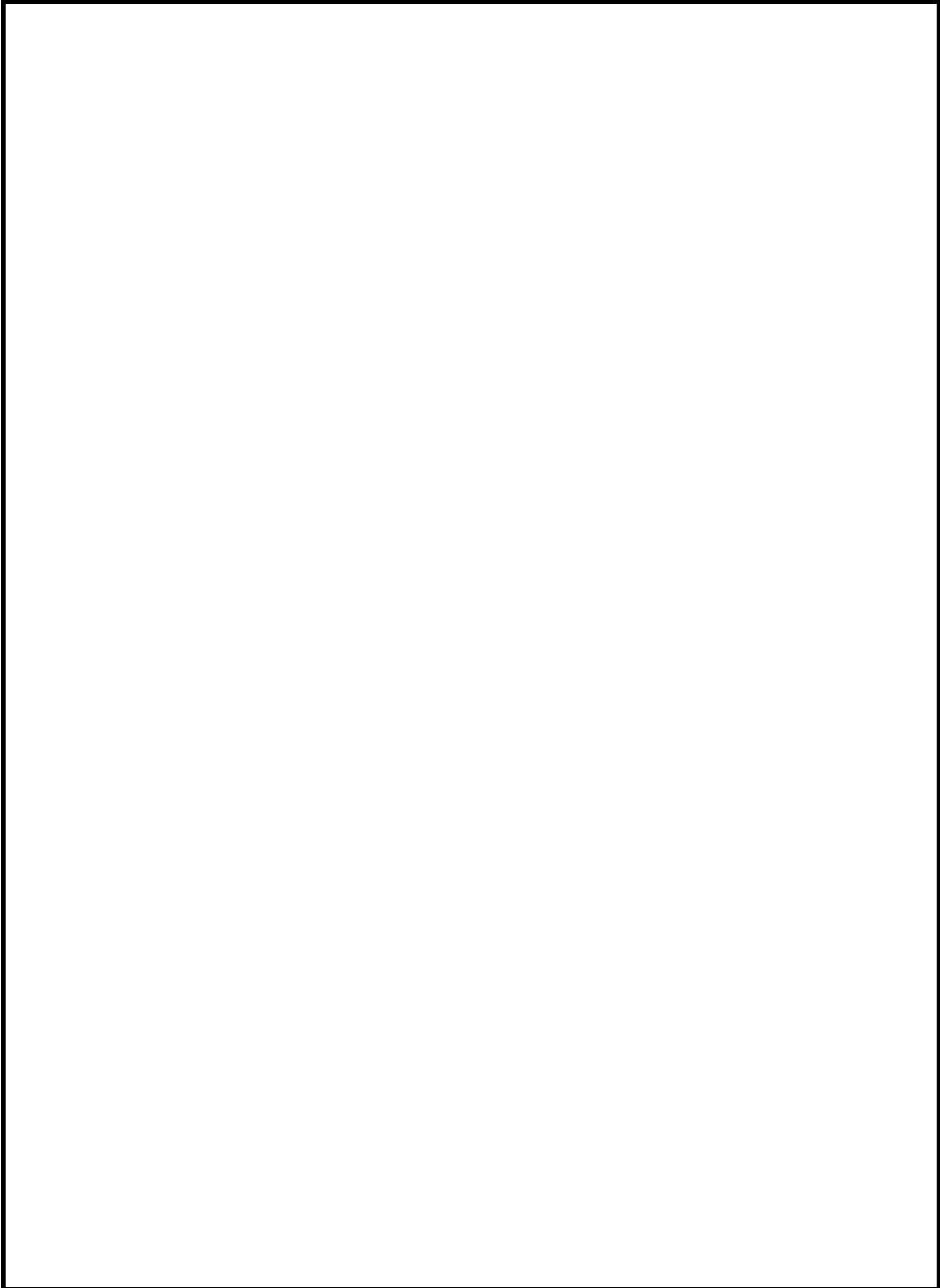
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



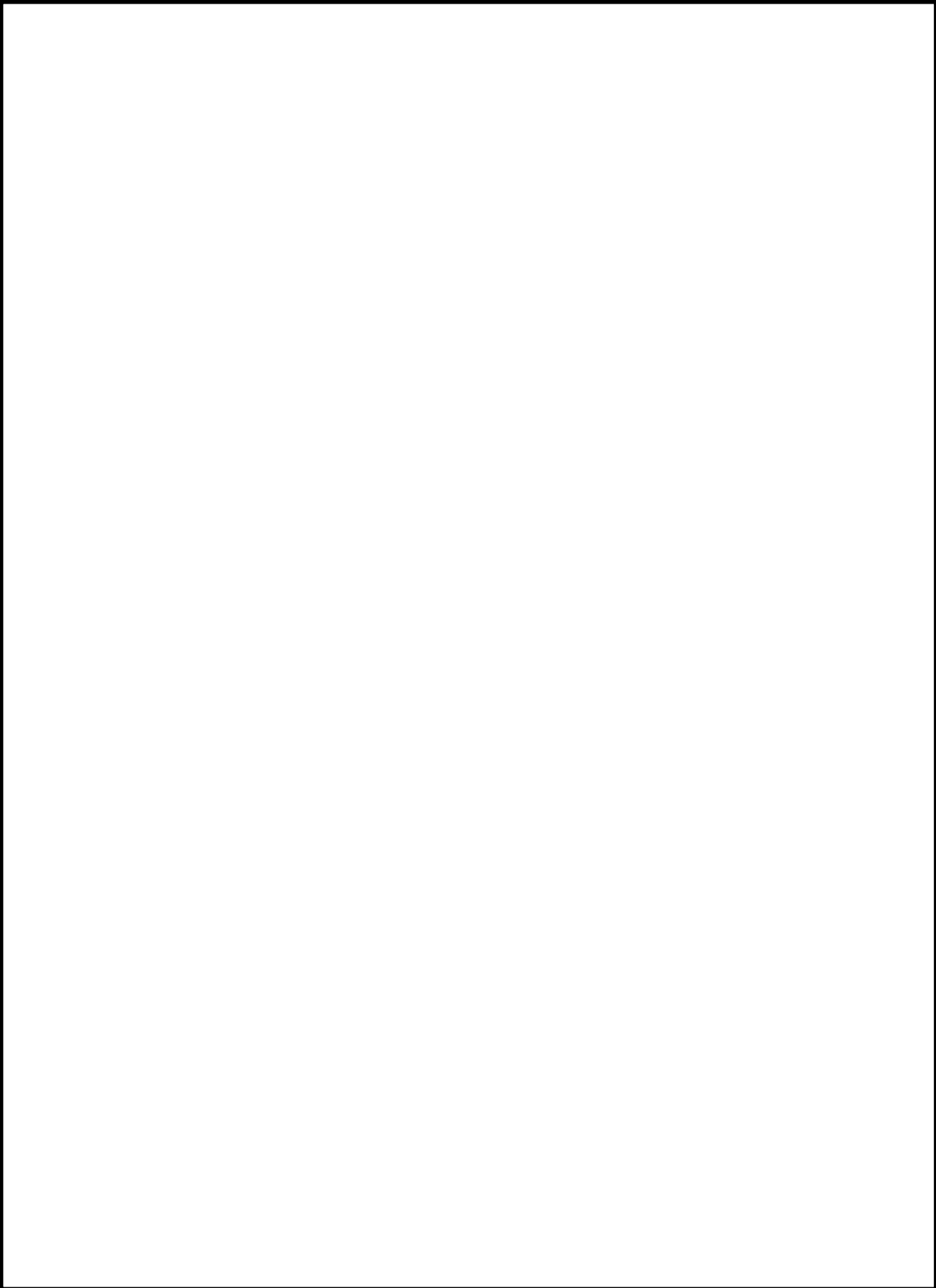
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



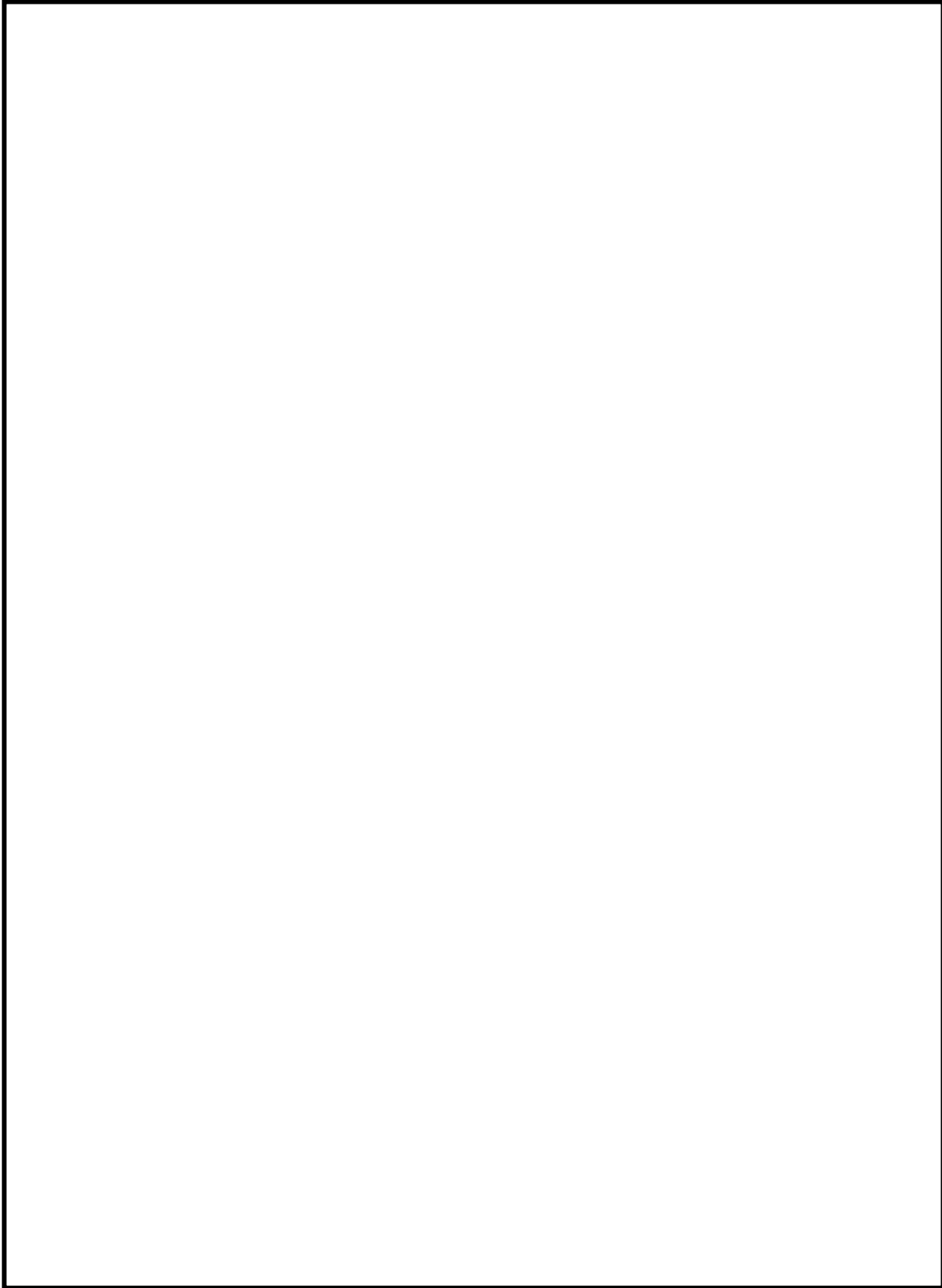
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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）

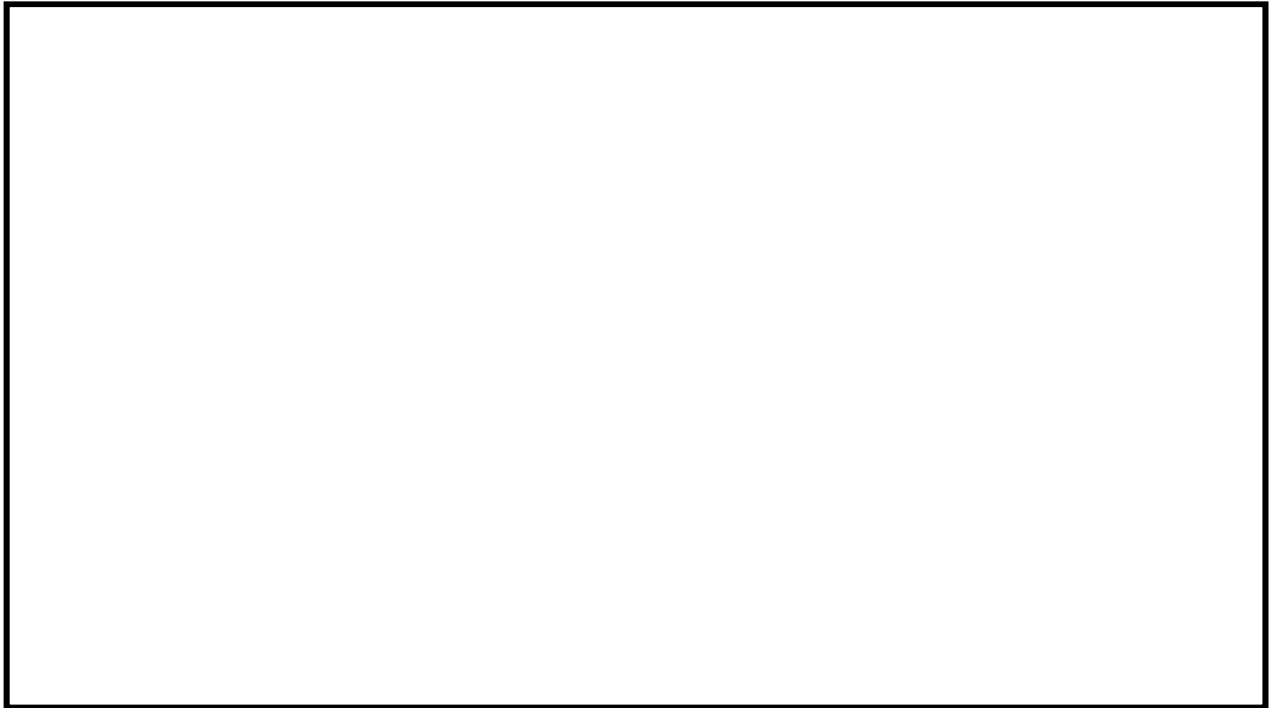
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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）

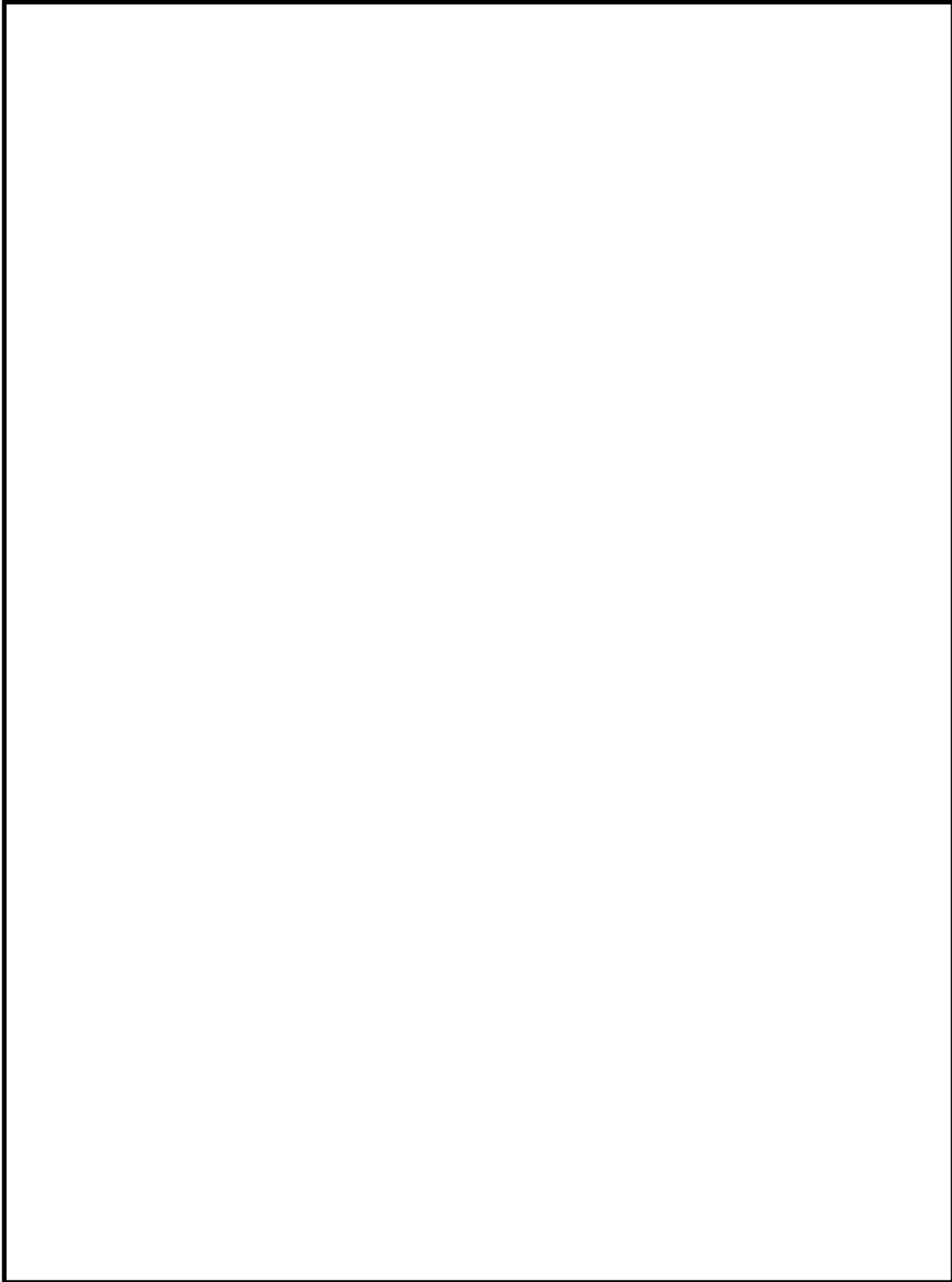
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【送水車によるスプレイ手順】



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。

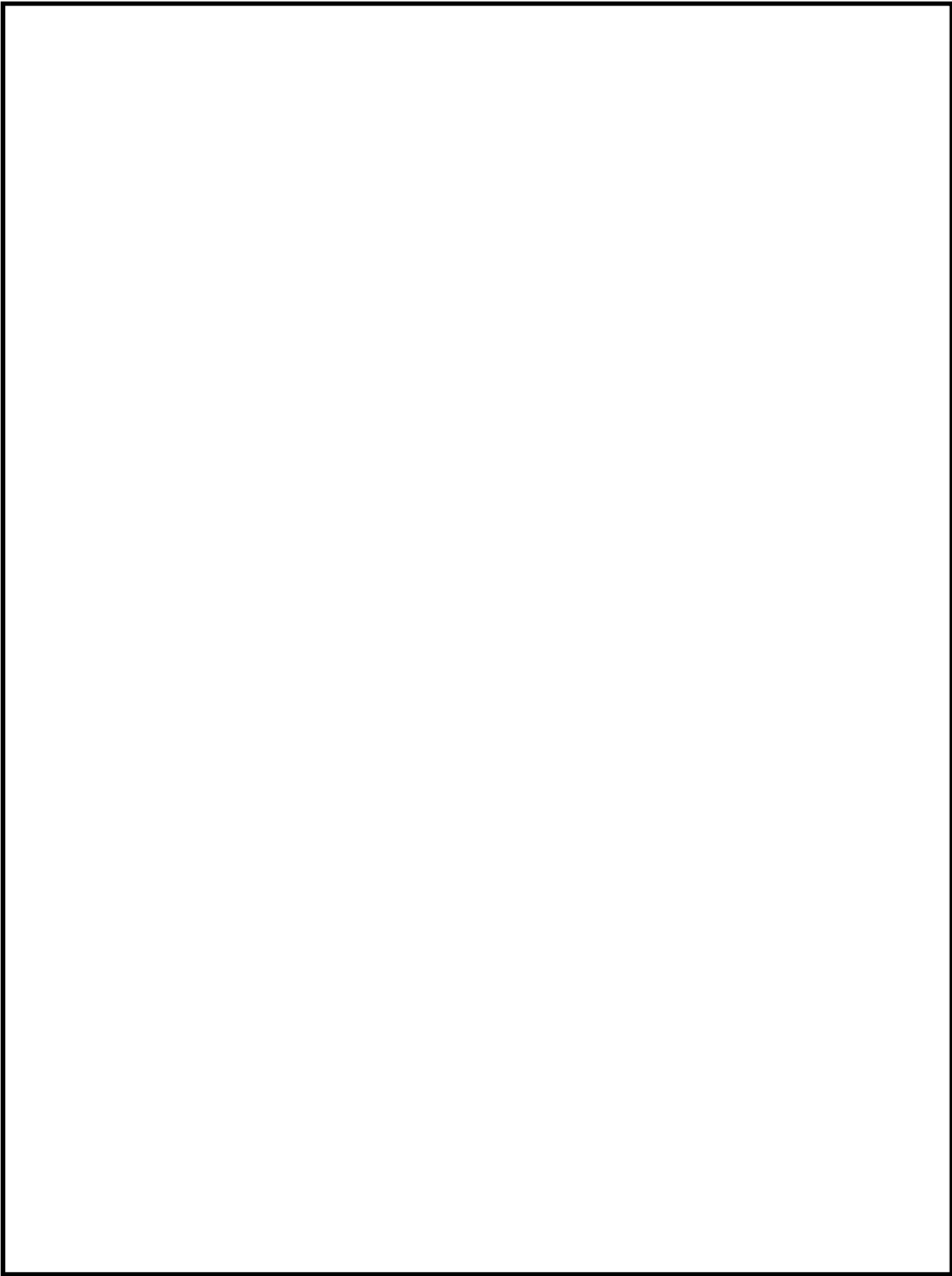


高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。

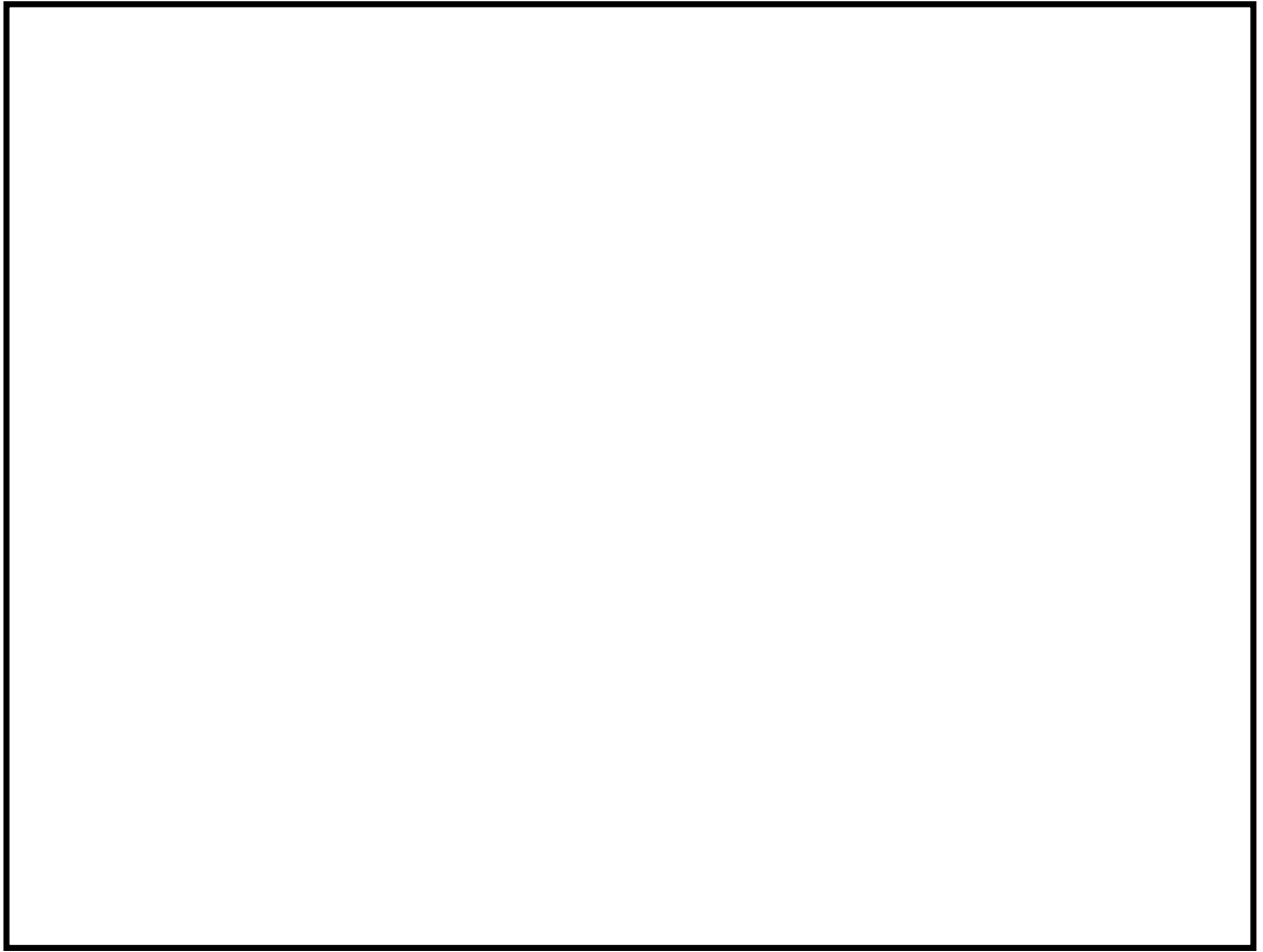
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



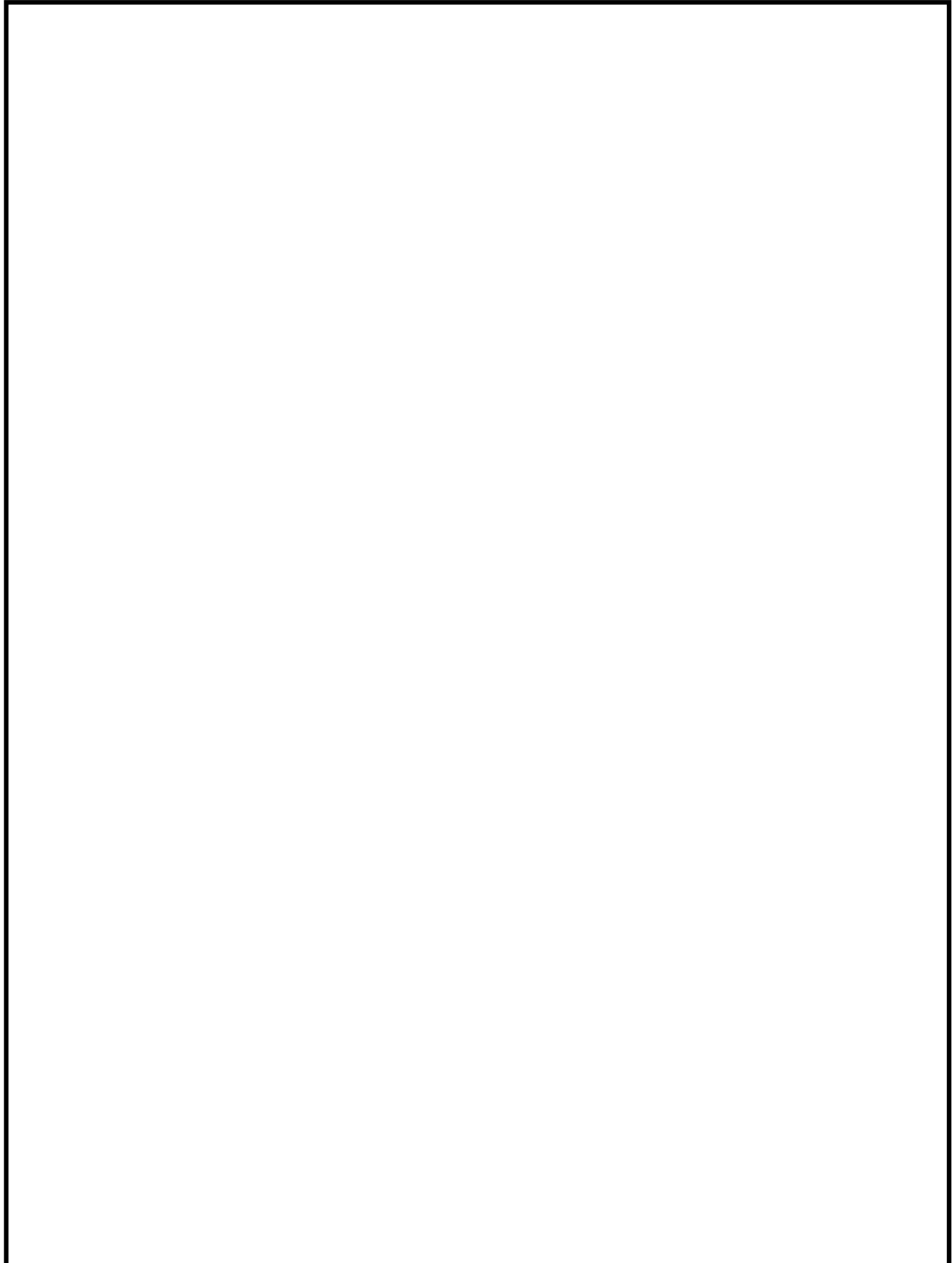
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



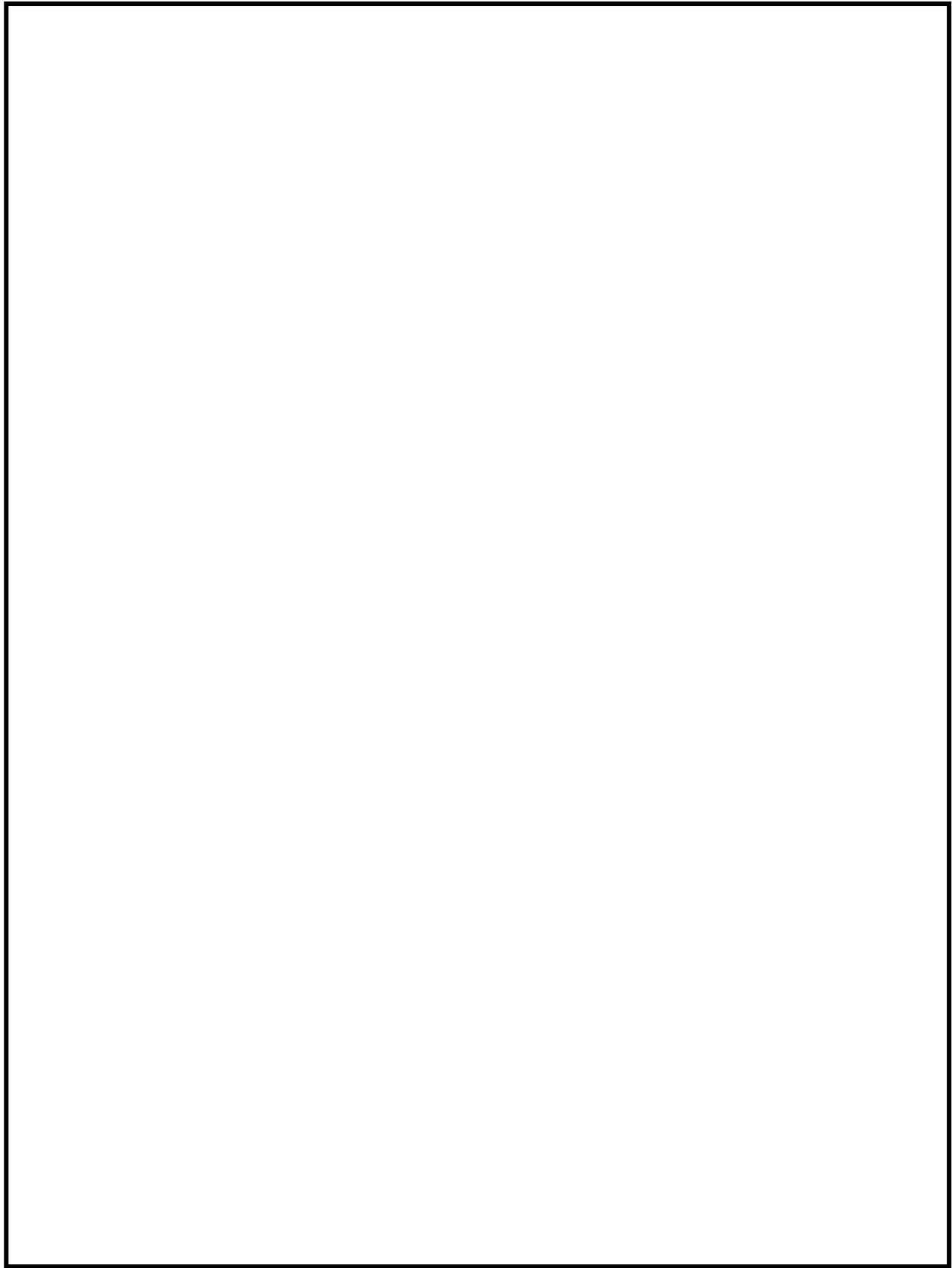
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



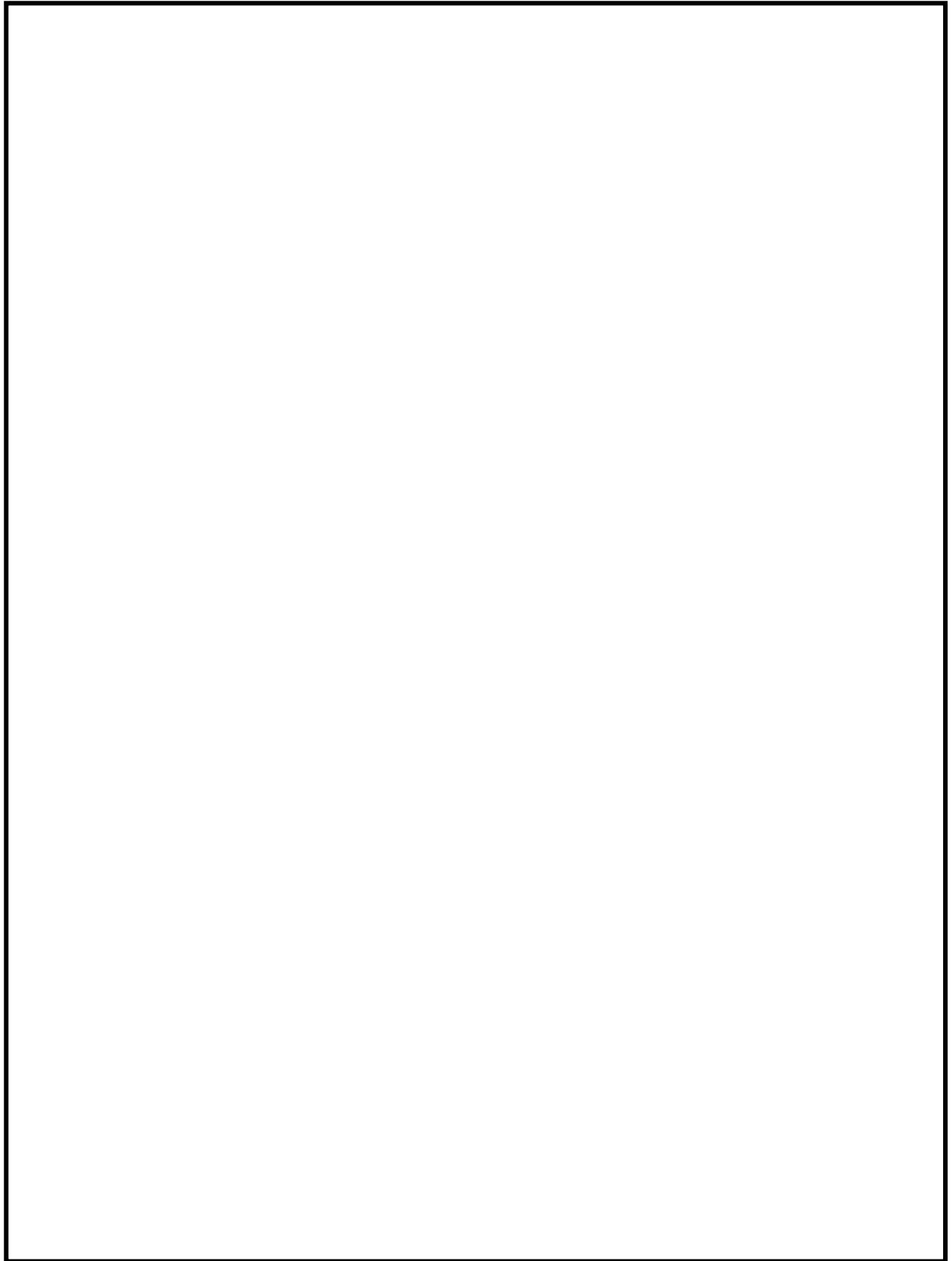
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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）

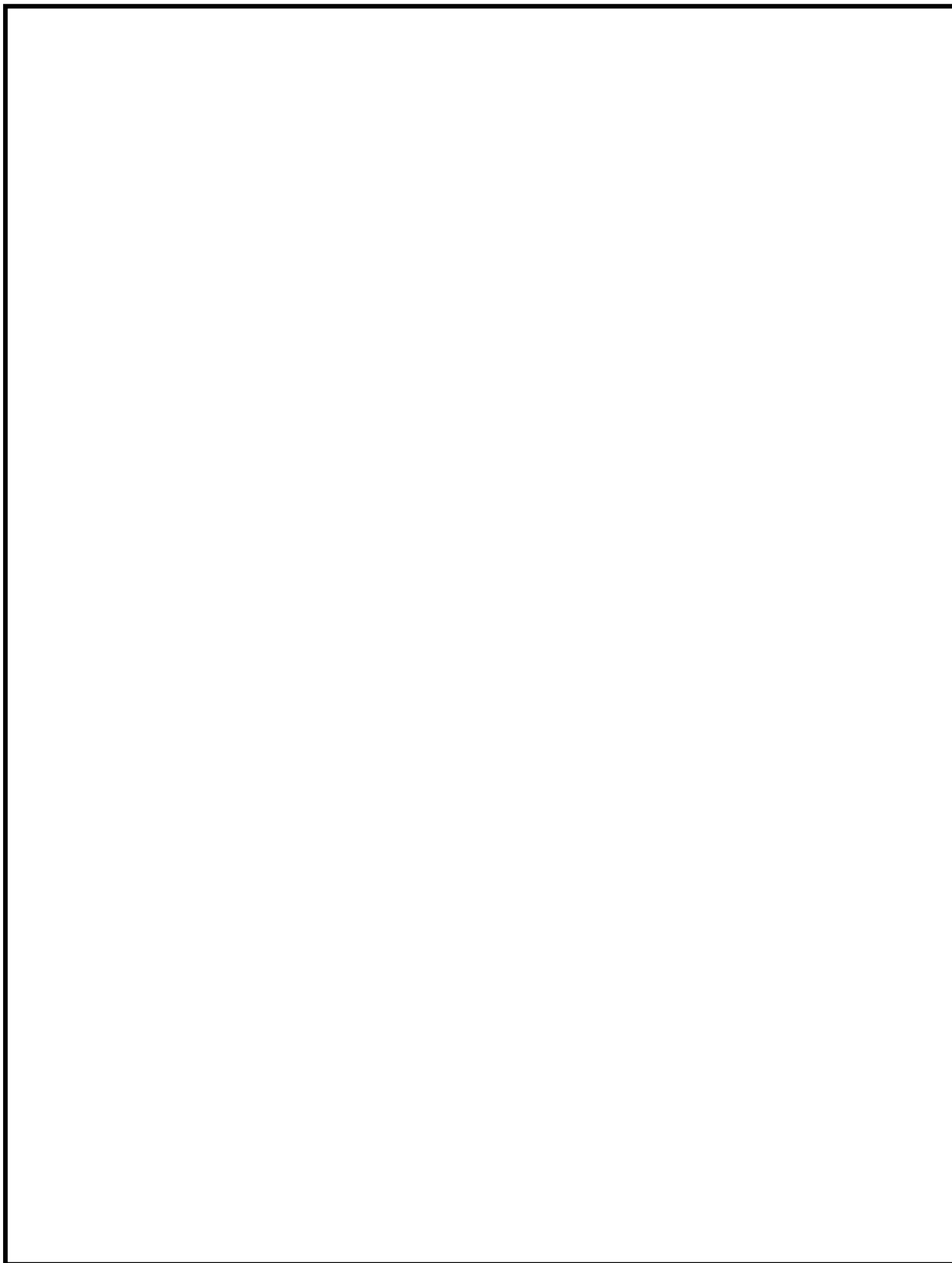
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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）

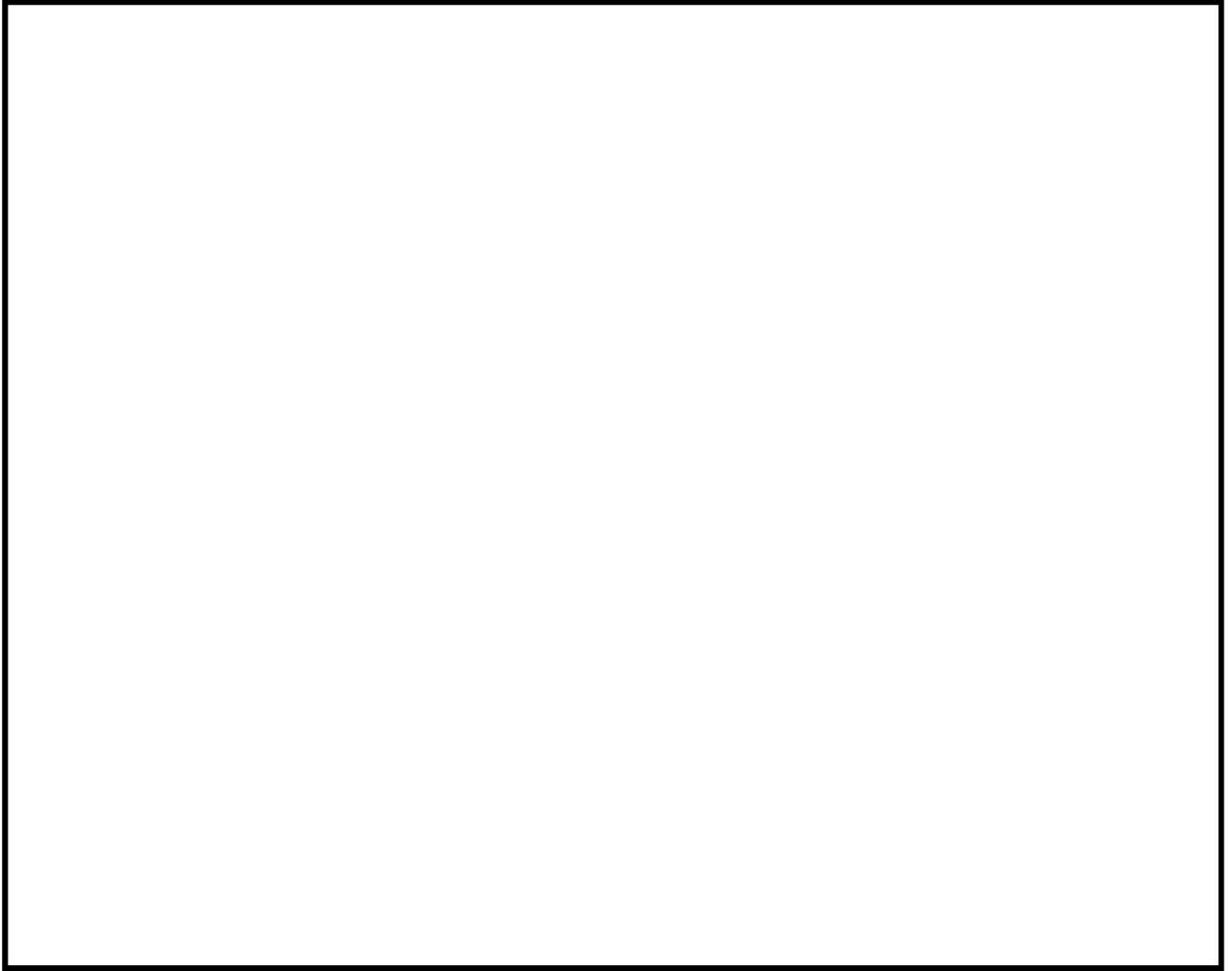
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【大容量ポンプによる放水手順】



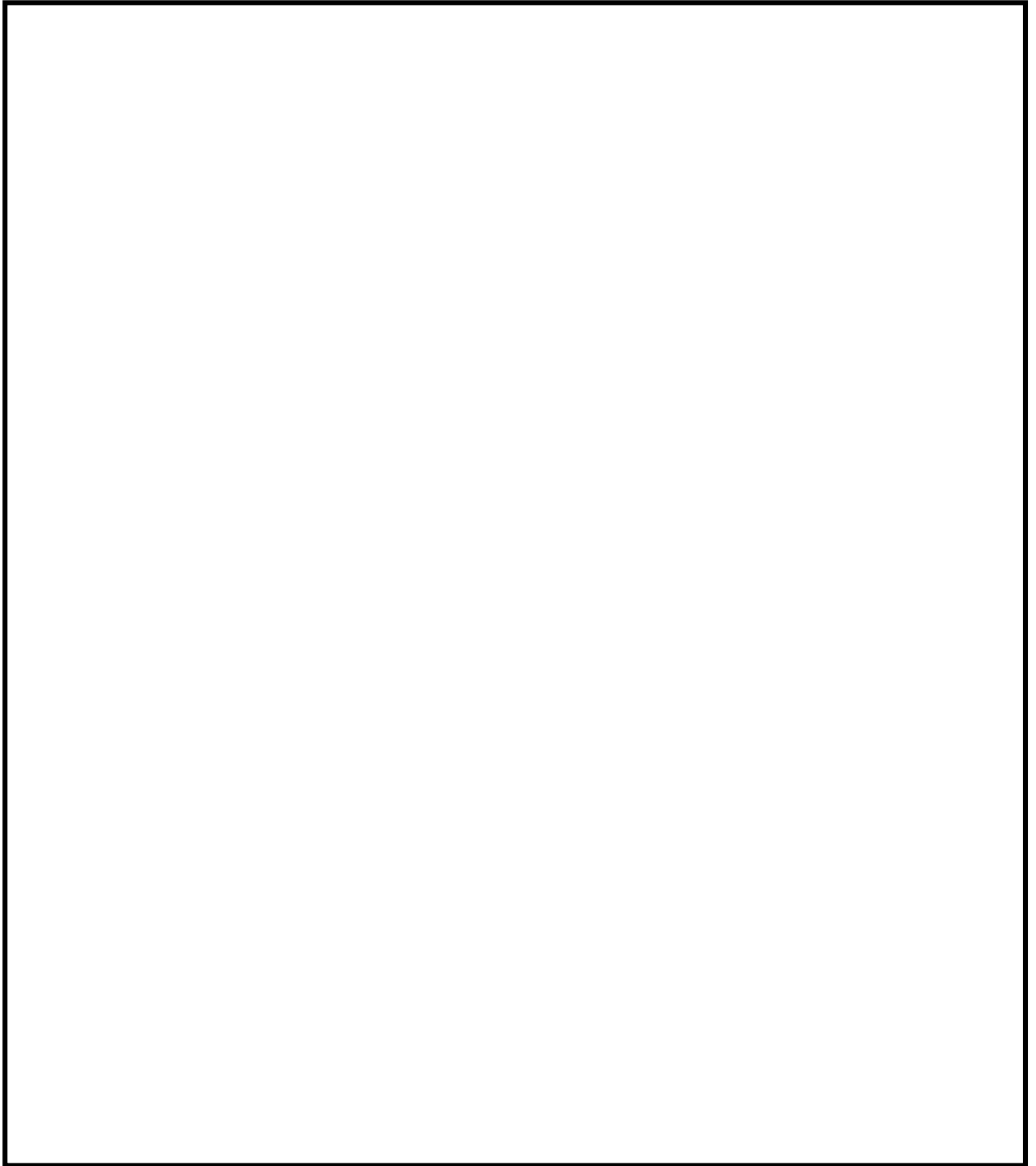
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



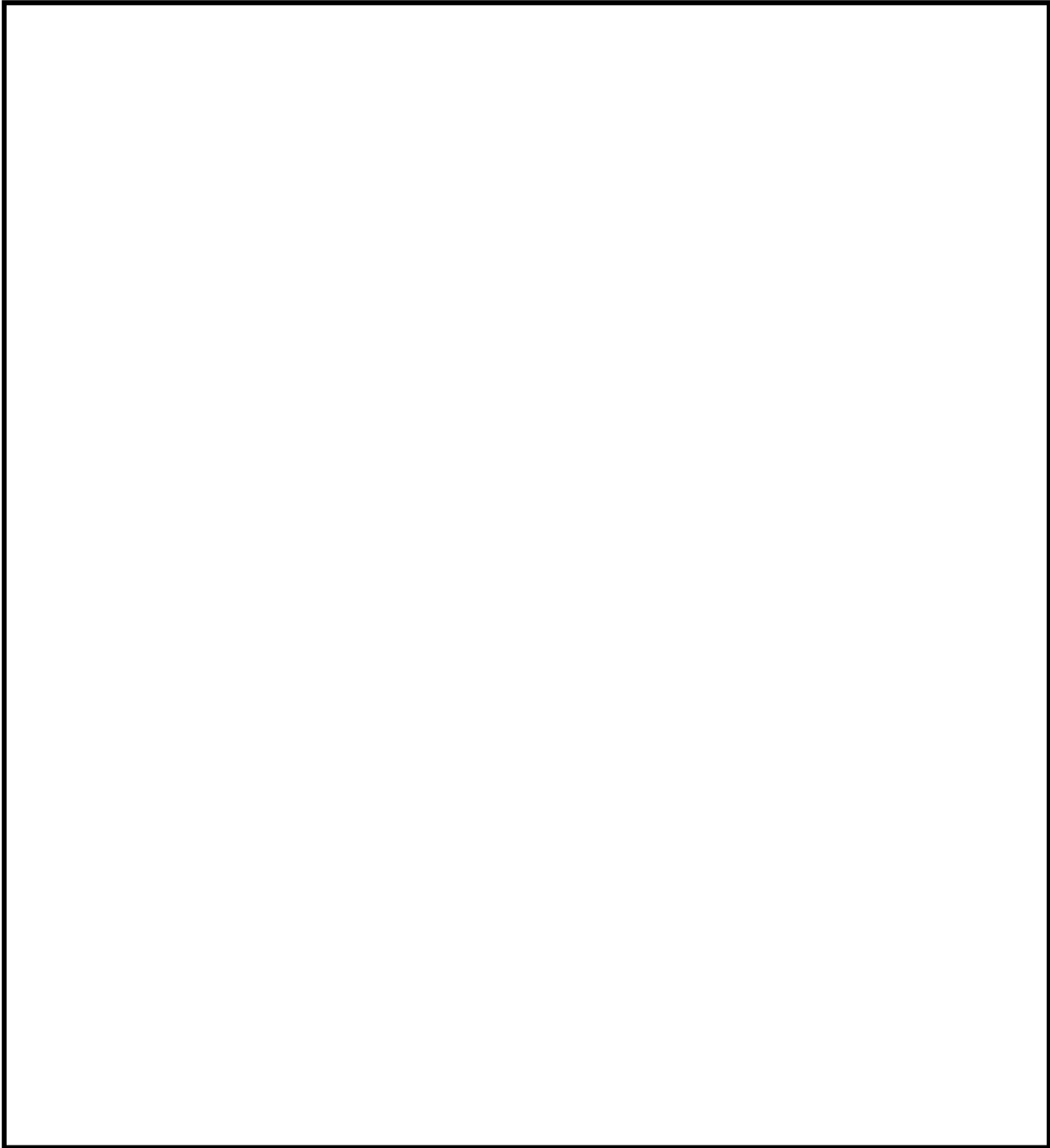
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



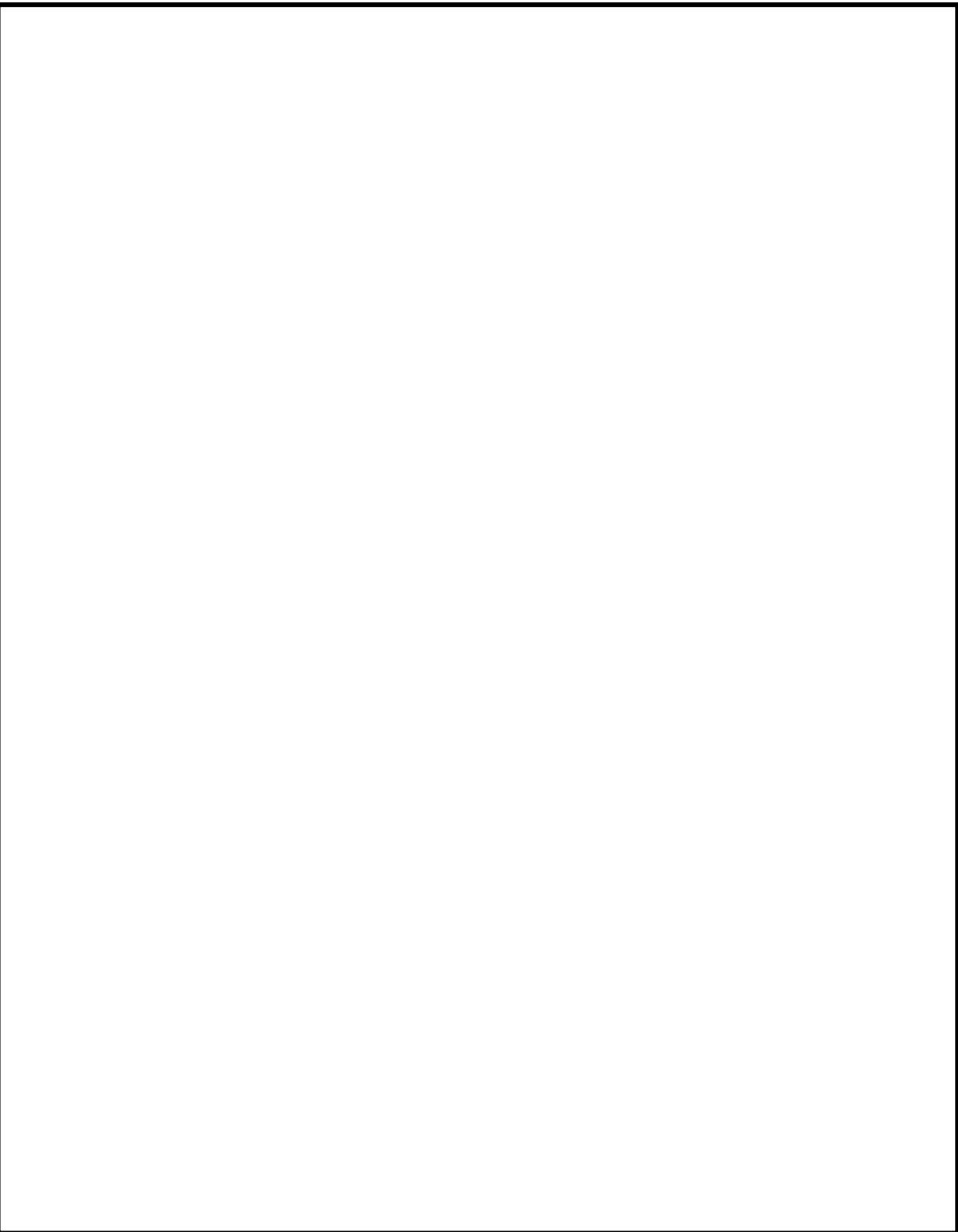
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



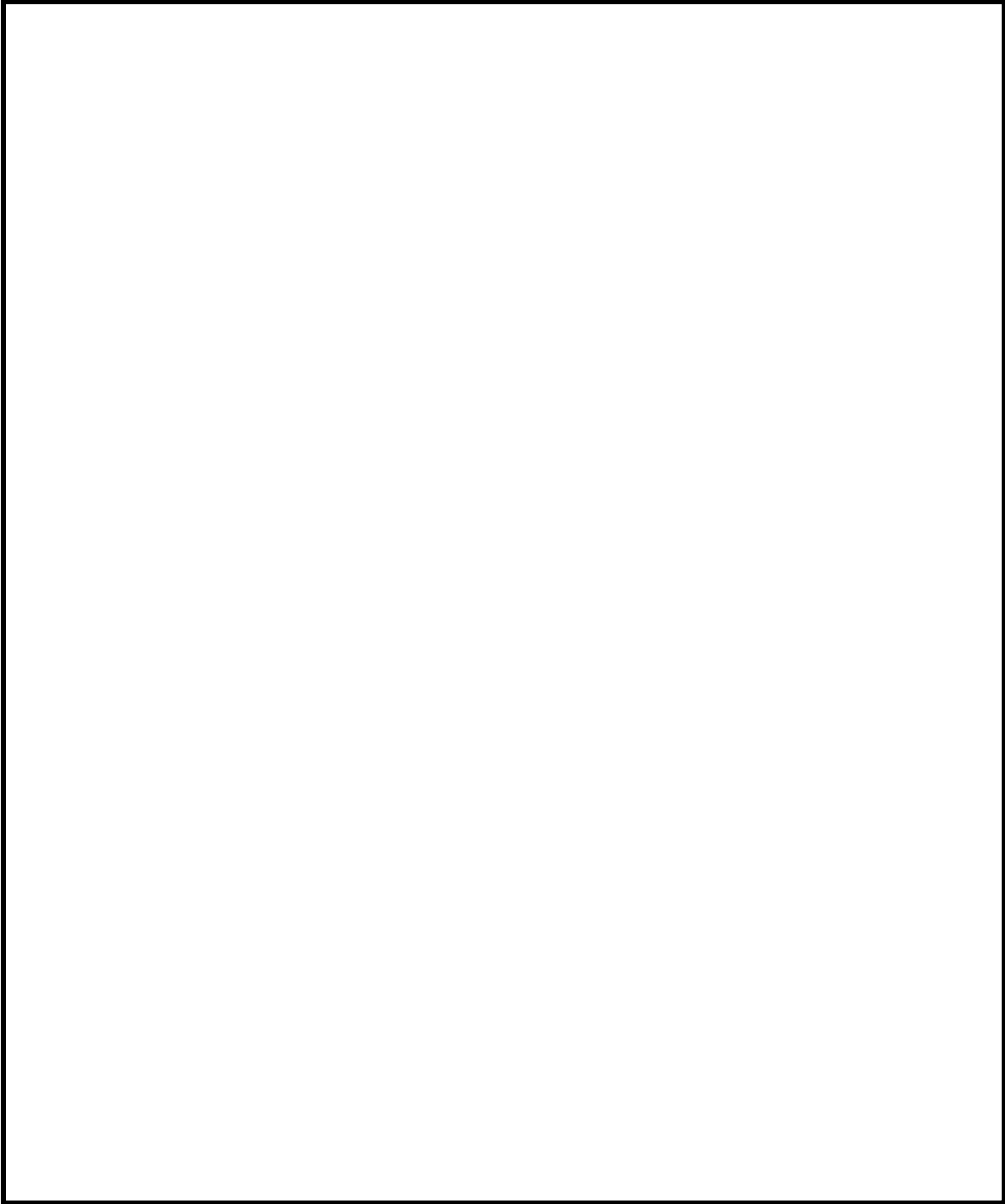
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



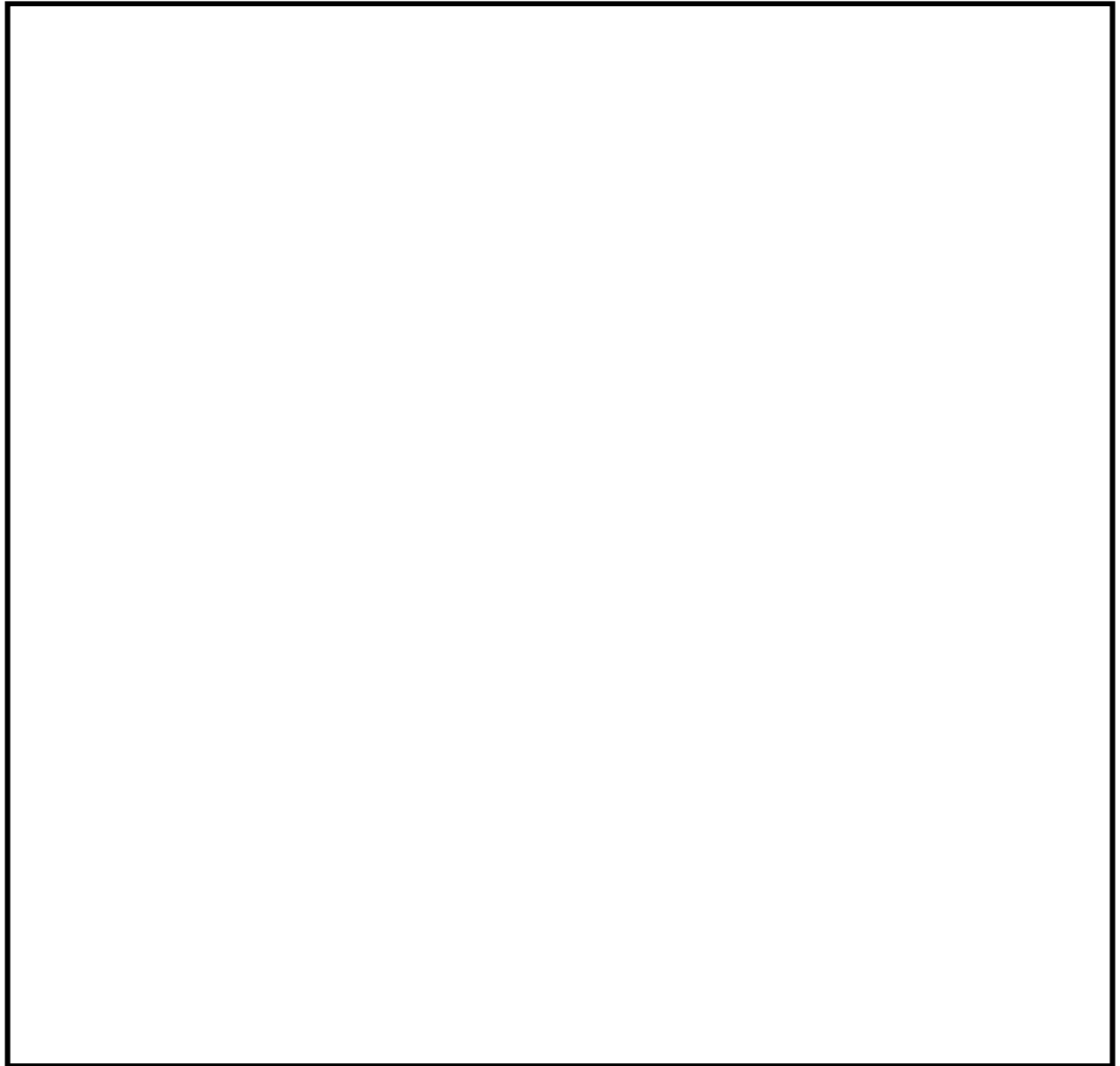
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



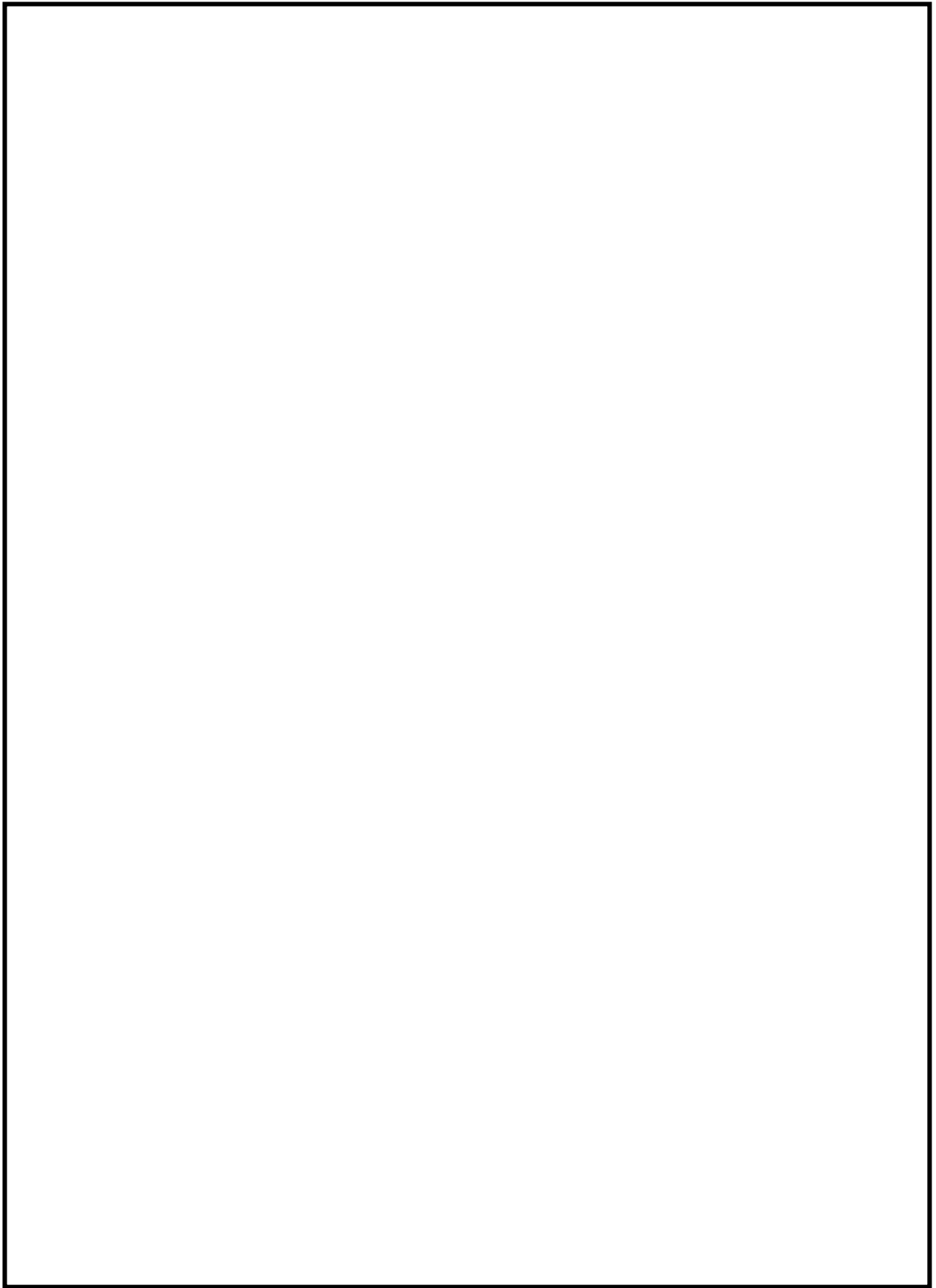
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



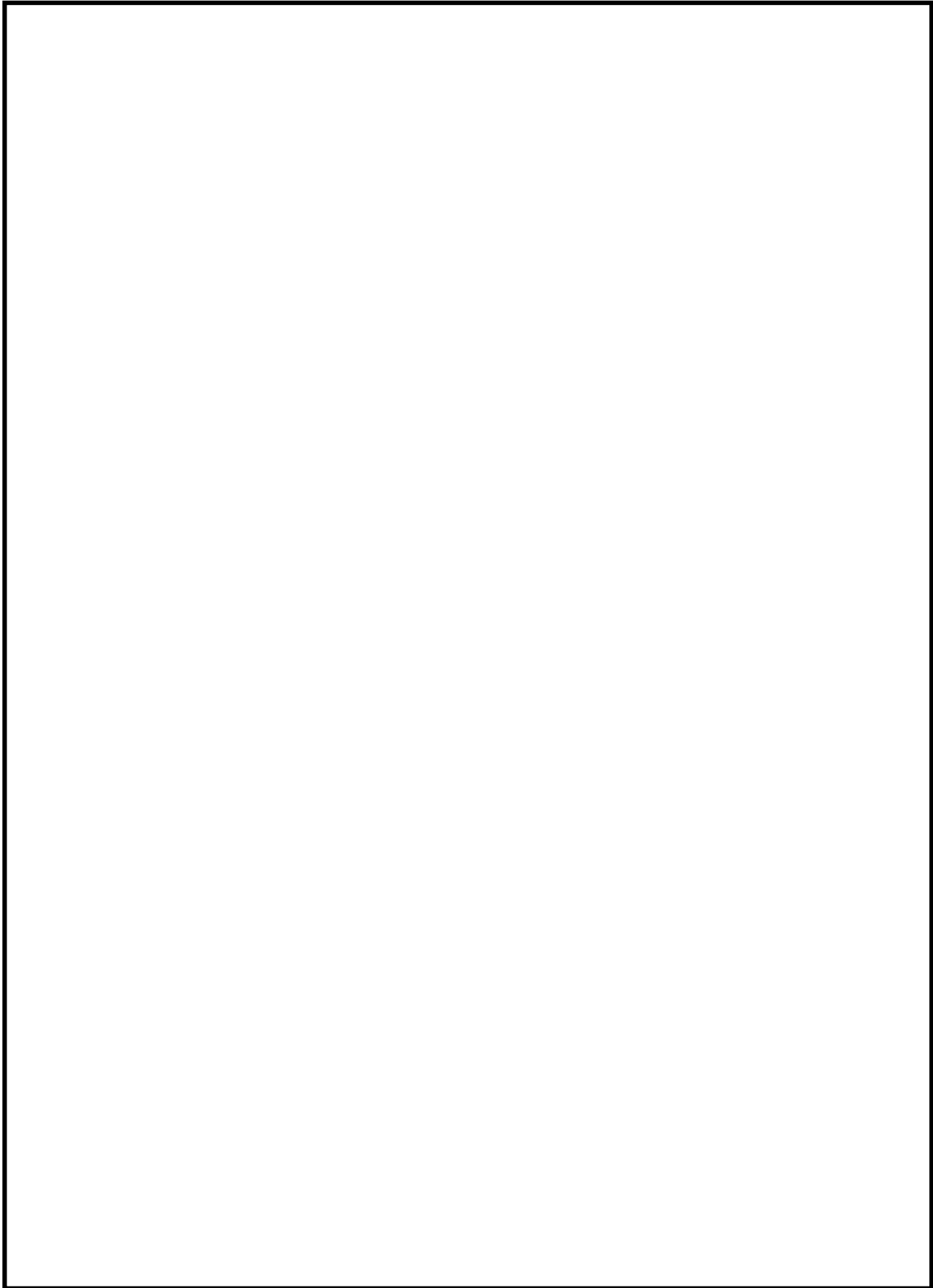
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



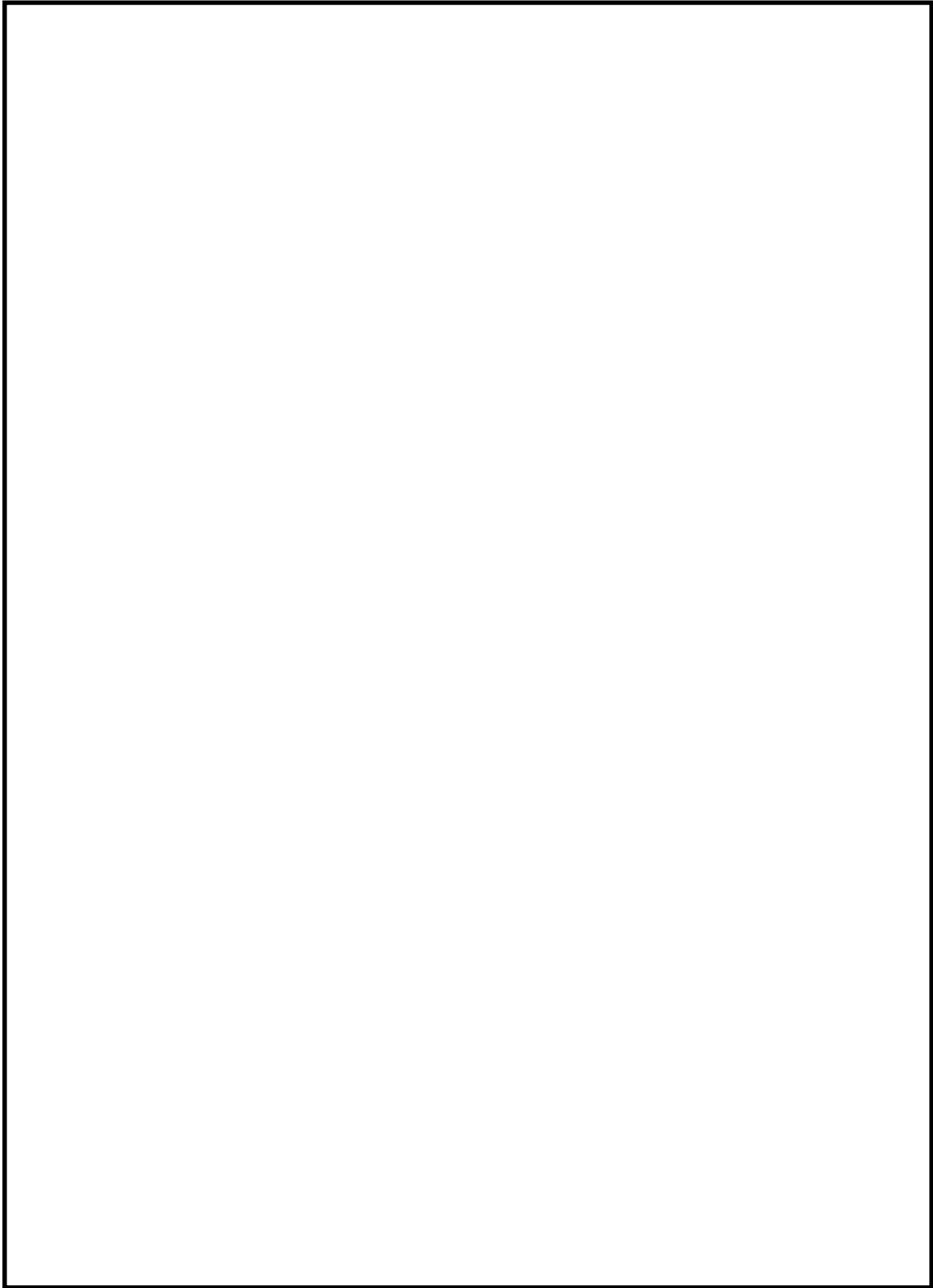
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



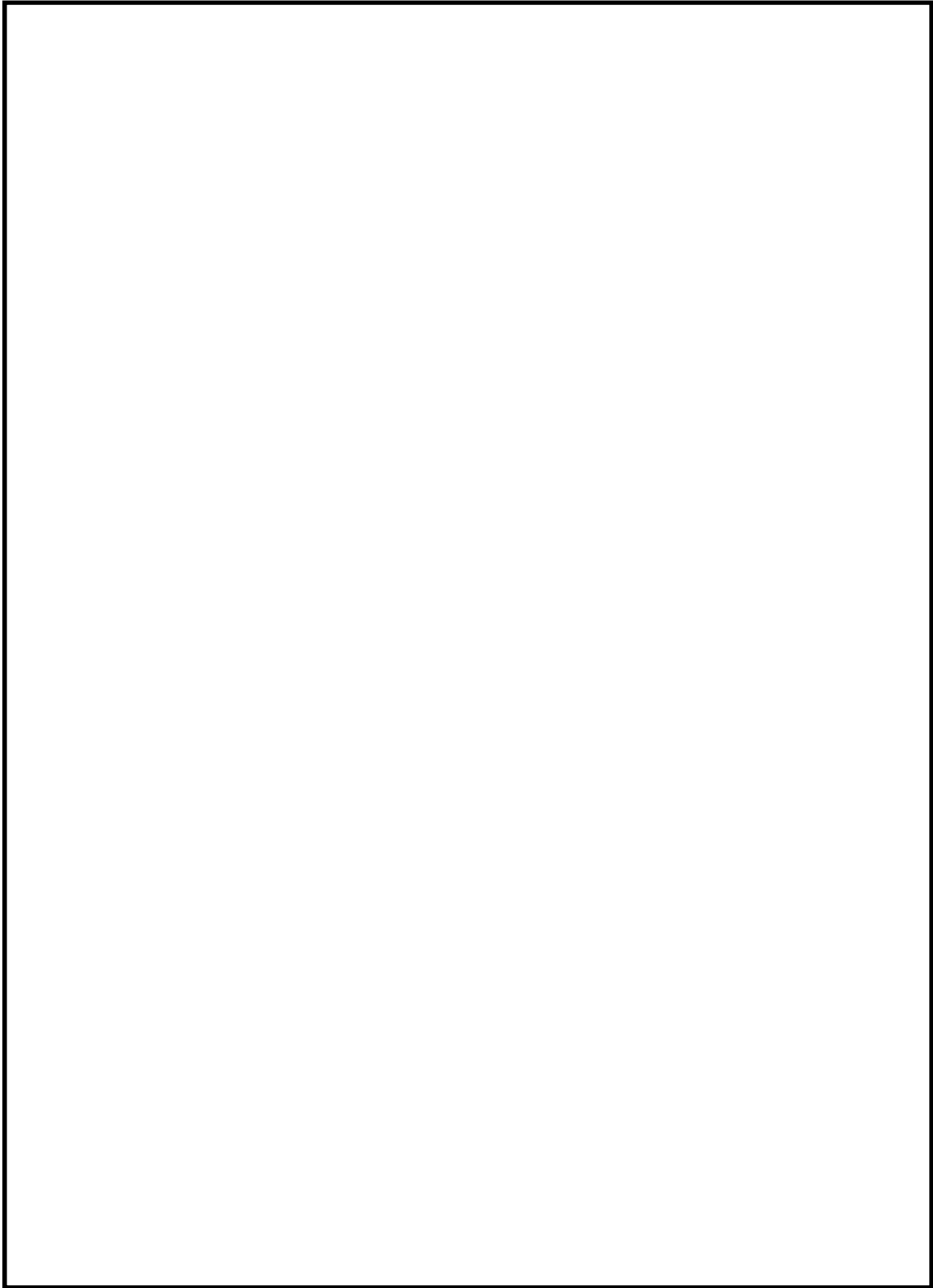
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



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) 液滴径設定 (基本ケース条件:1.5mm、不確かさを考慮した条件:0.4mm) の妥当性について

1. はじめに
2. スprayヘッド実機を用いた液滴径取得試験
 - 2.1. 試験目的
 - 2.2. 試験方法
3. 試験結果および考察
 - 3.1. 試験結果
 - 3.2. 試験結果の考察
4. 液滴径の基本ケース条件の設定
5. 液滴径の不確かさを考慮した条件の設定

1. はじめに

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

2. スプレーヘッド実機を用いた液滴径取得試験

2.1. 試験目的

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

2.2. 試験方法

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

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

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

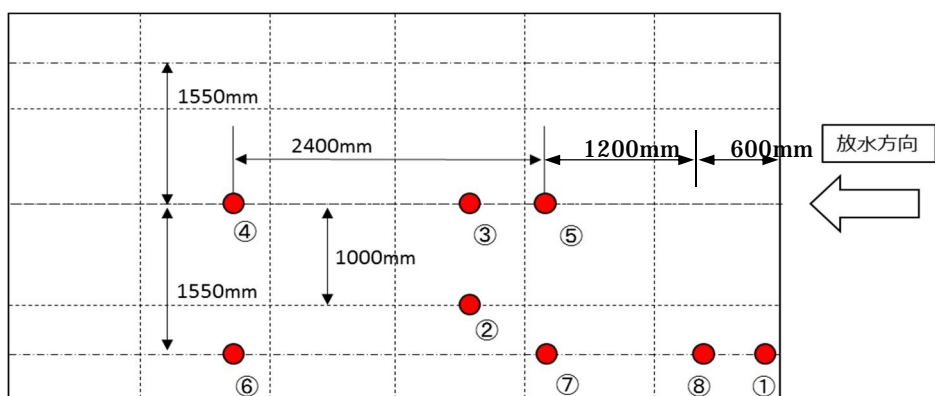
第1表 試験条件

使用設備	スプレーヘッド 可搬型消防ポンプ
流量等	
水	水道水（常温）

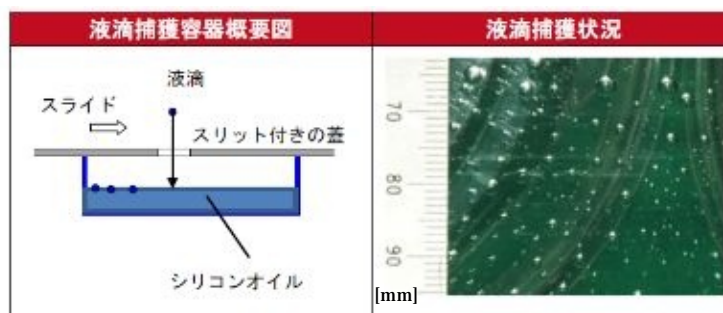
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第1図 液滴径測定試験 試験体系および試験の様子



第2図 液滴径分布測定位置（平面図）



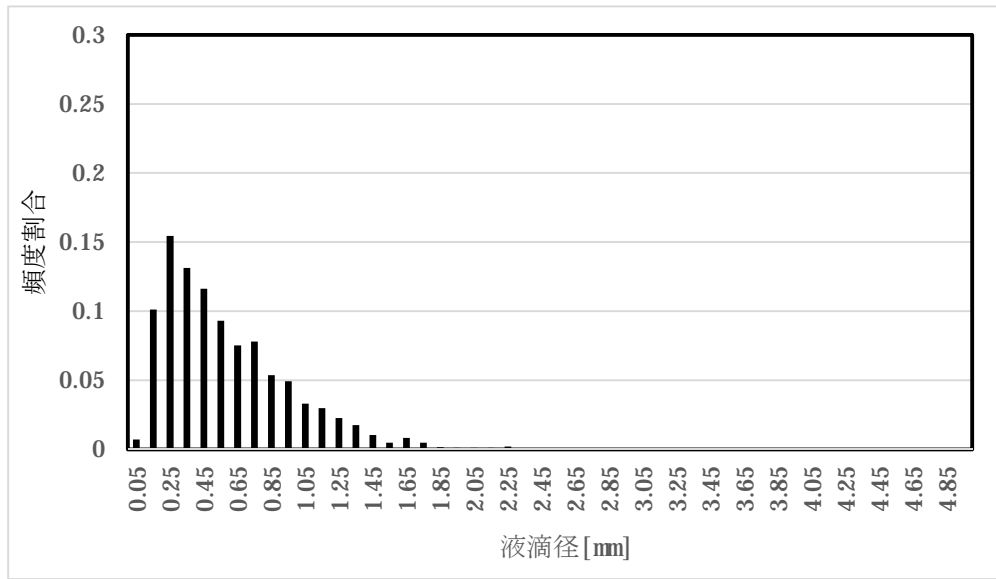
第3図 液滴捕獲装置の概要および取得液滴の様子

3. 試験結果および考察

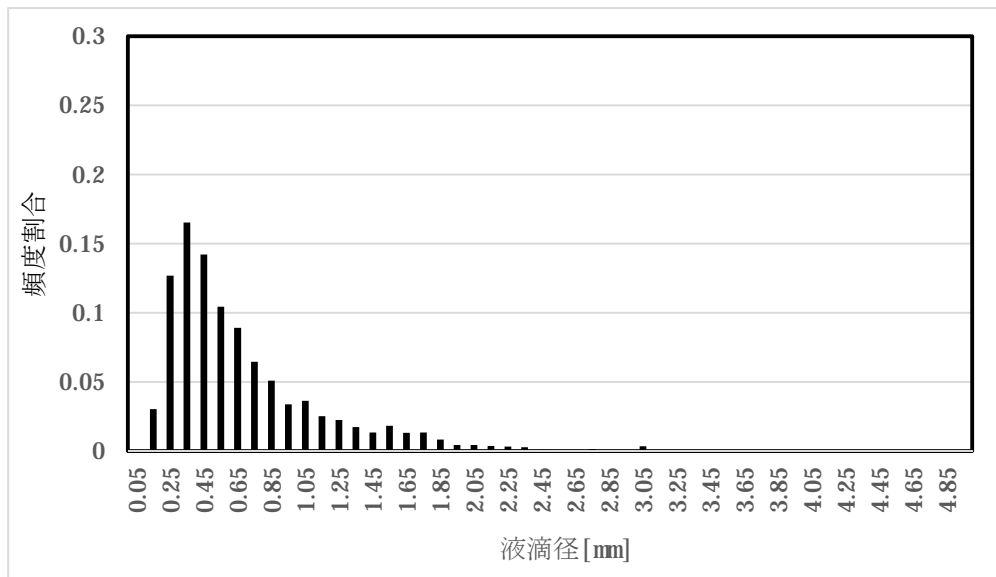
3.1. 試験結果

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

測定点①

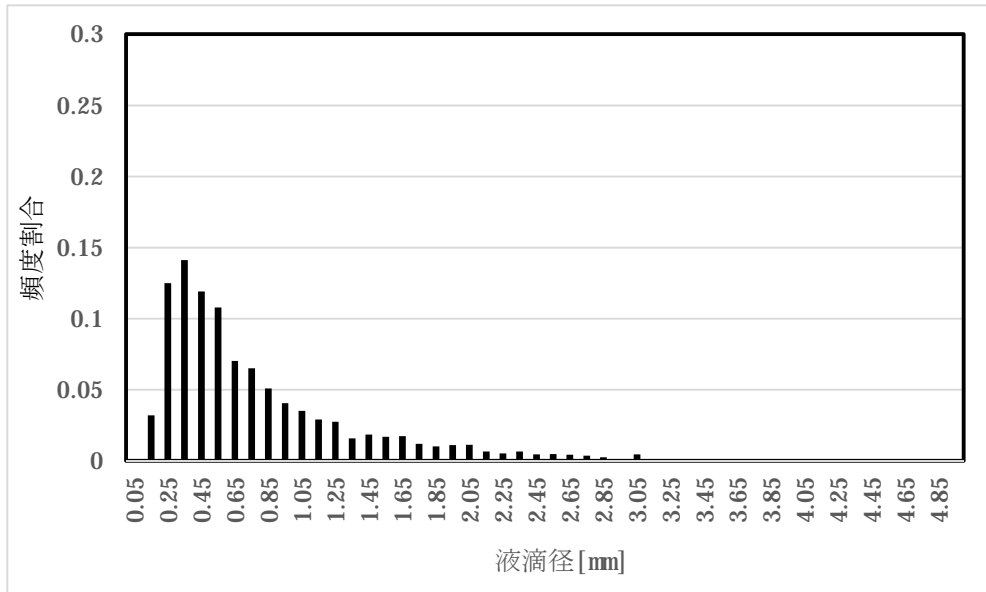


測定点②

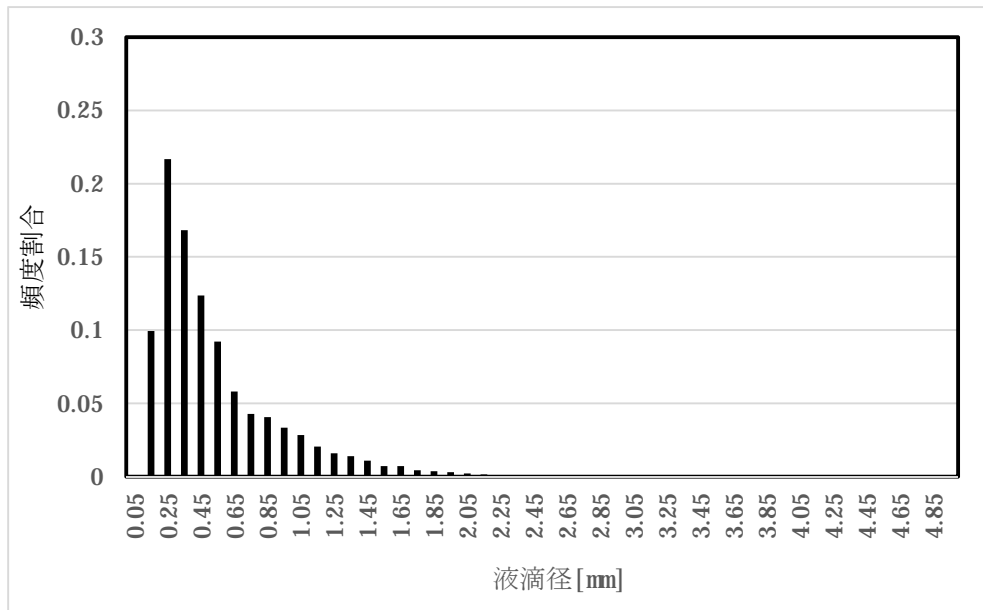


第4-1図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点③

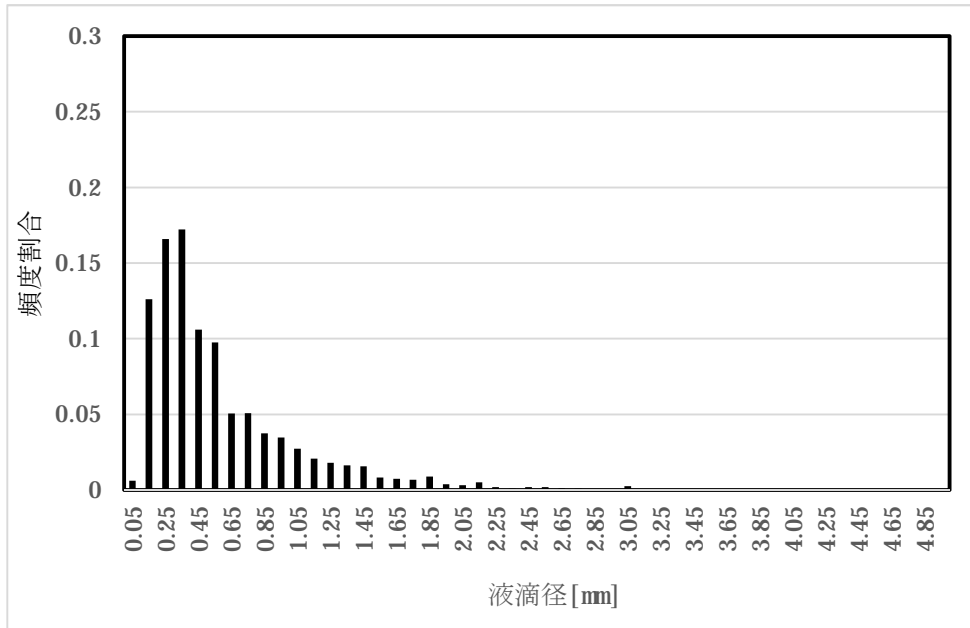


測定点④

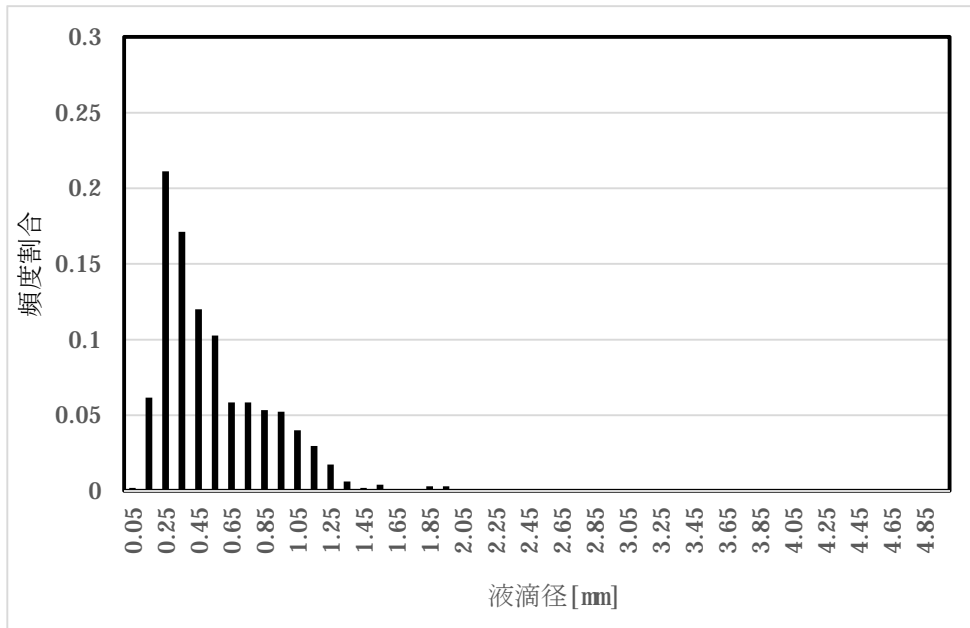


第4-1図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑤

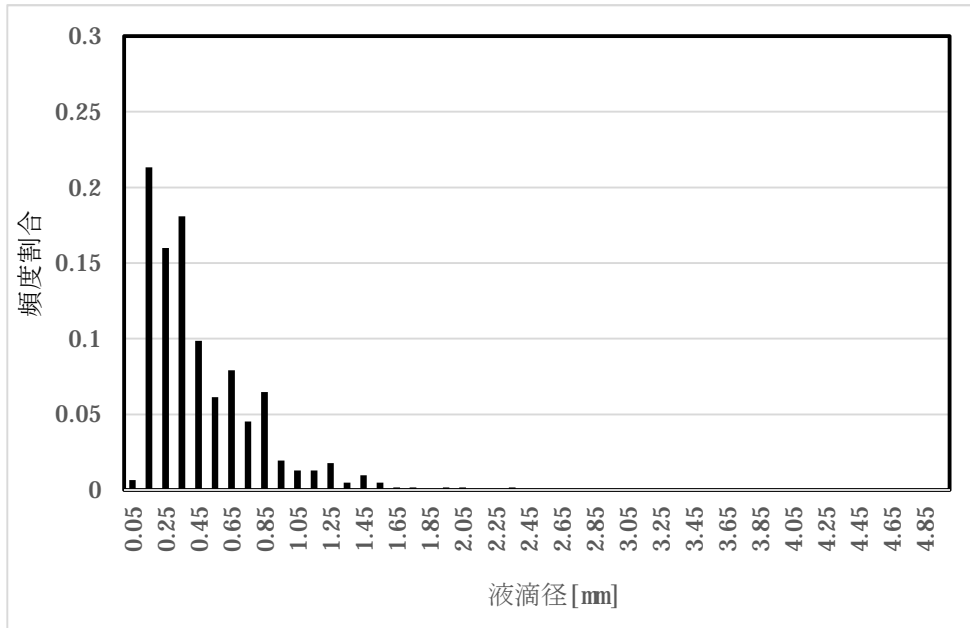


測定点⑥

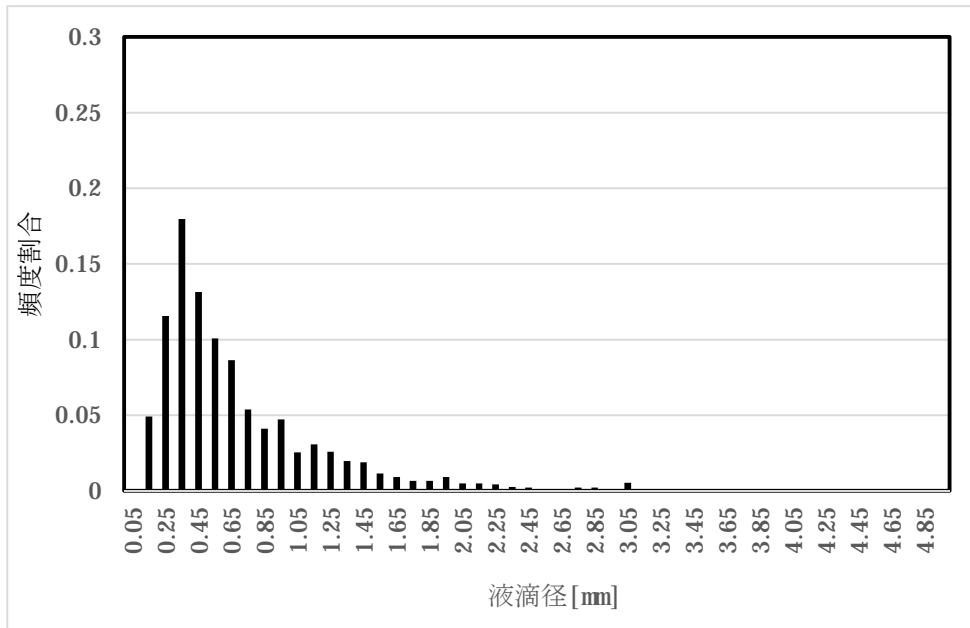


第4-1図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑦

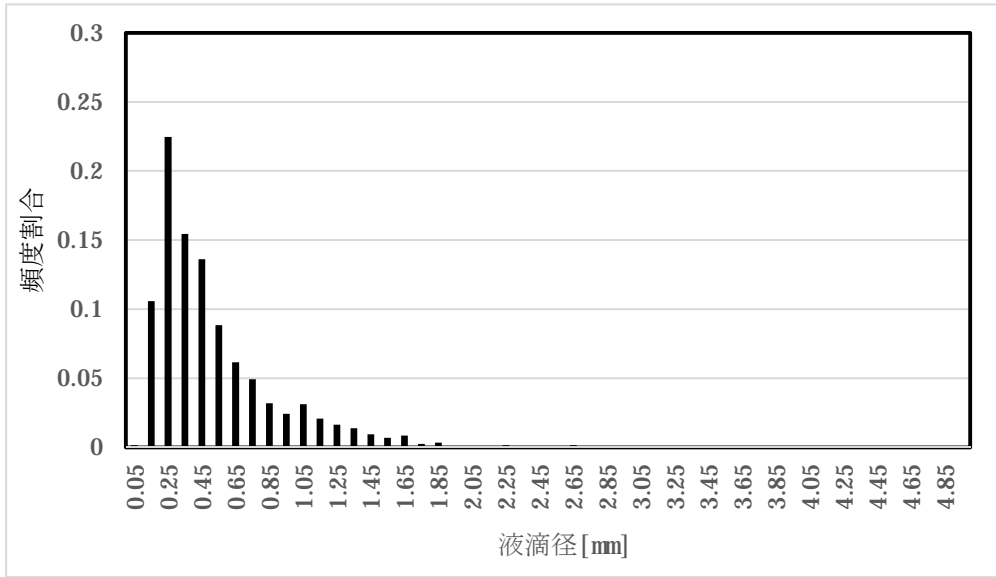


測定点⑧

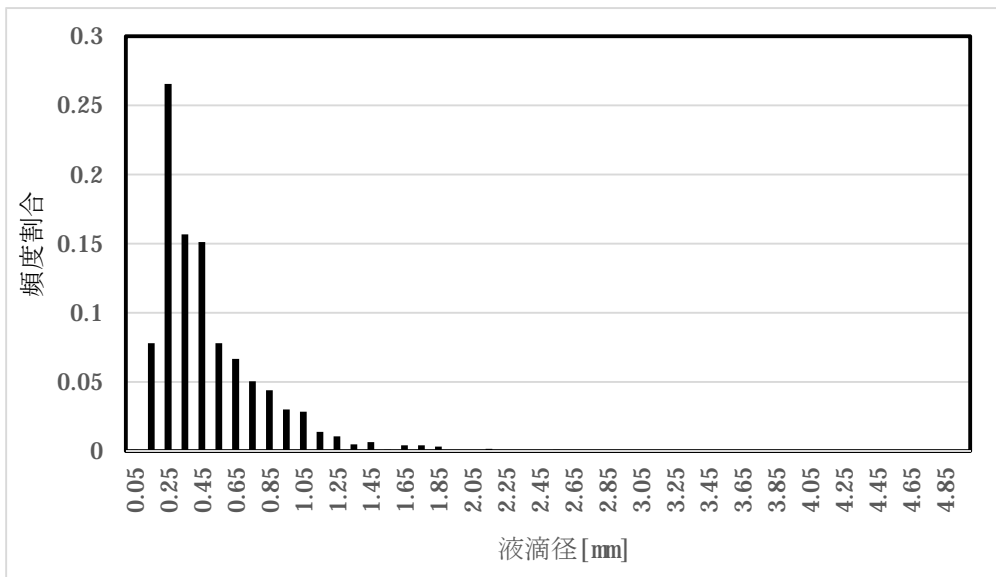


第4-1図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点①

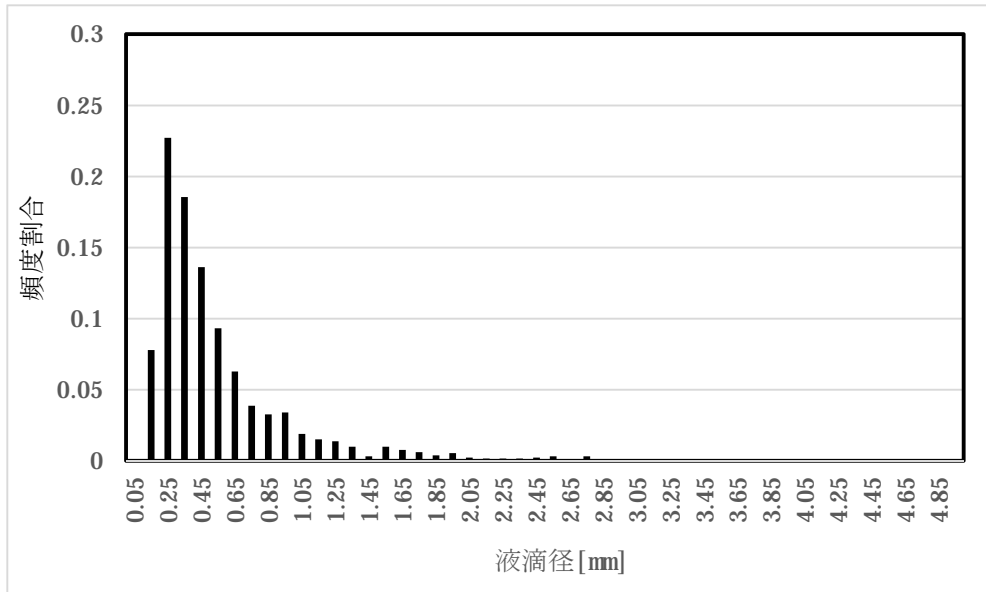


測定点②

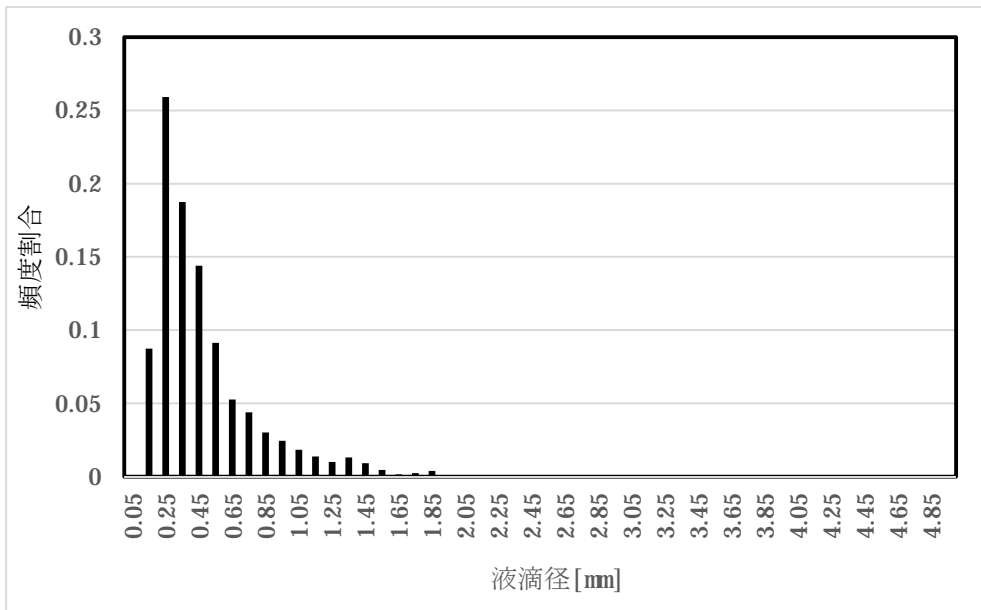


第4-2図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点③

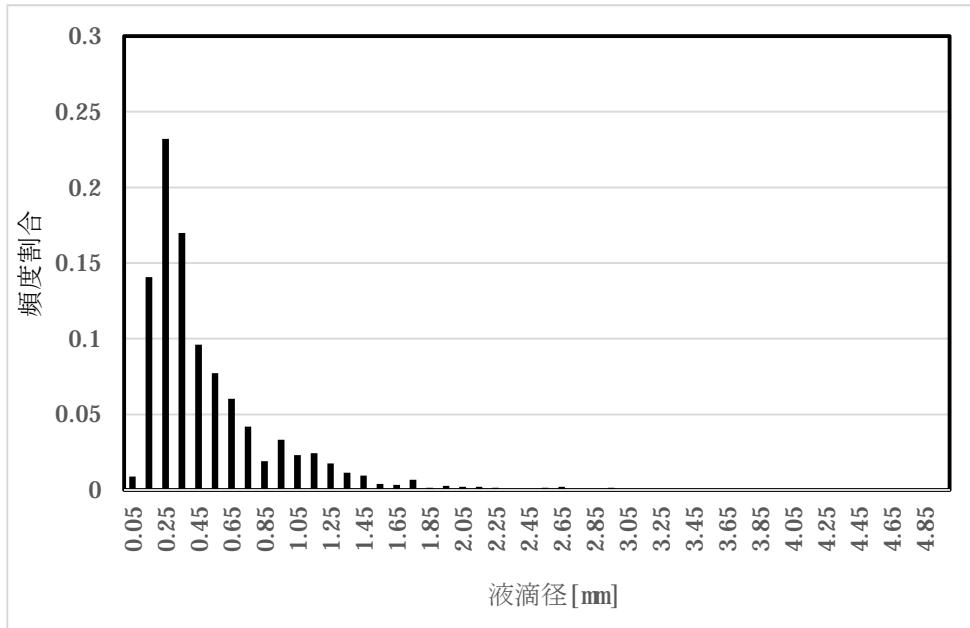


測定点④

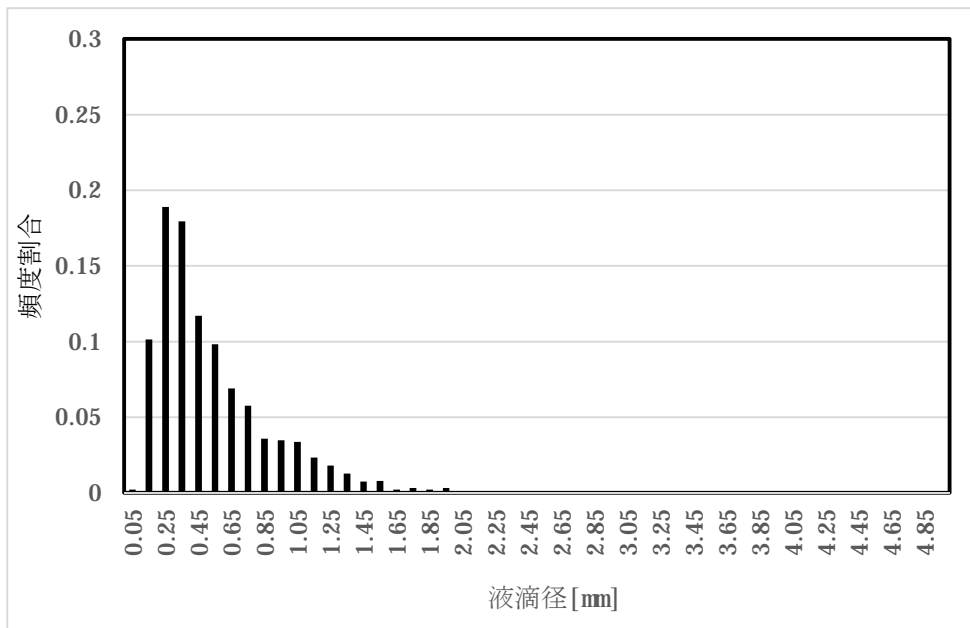


第4-2図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑤

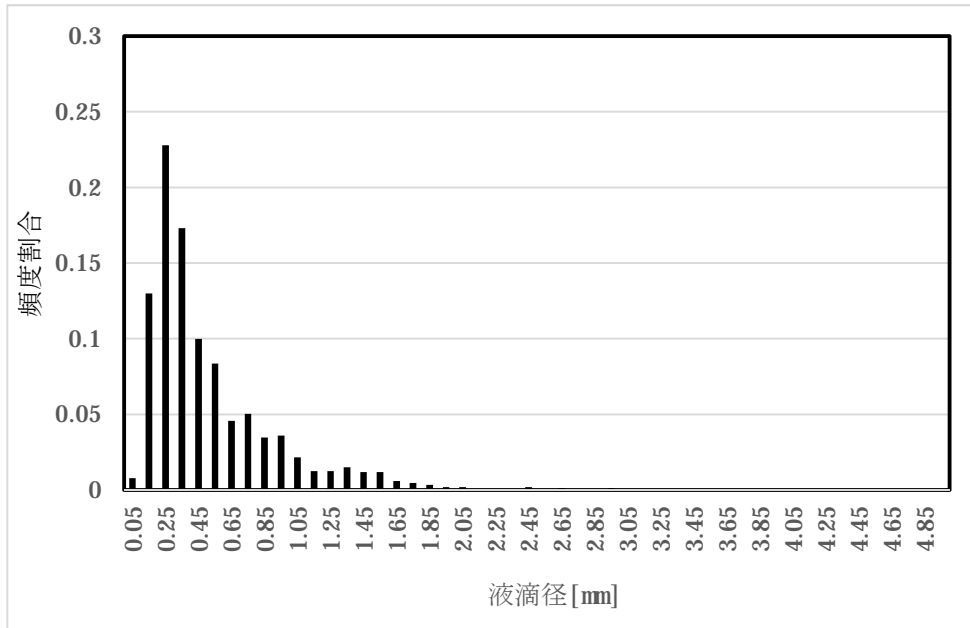


測定点⑥

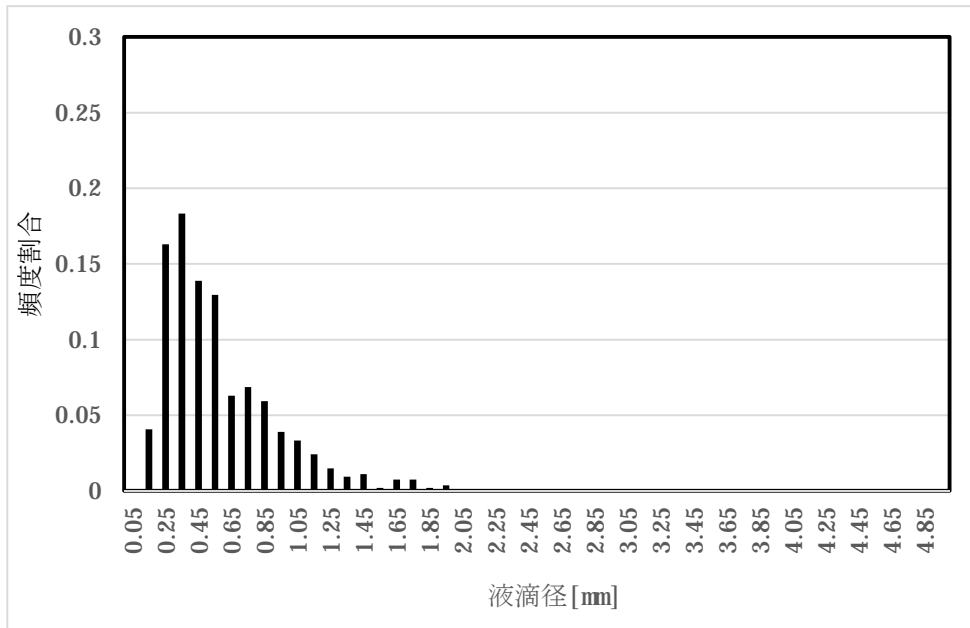


第4-2図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑦



測定点⑧



第4-2図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

3.2. 試験結果の考察

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

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

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

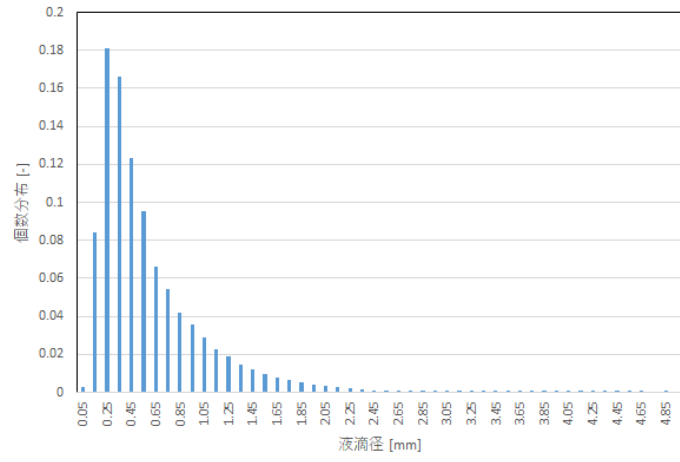
なお既往の研究にて、ノズルから噴出された水が液滴に微粒化するまでの過程を確率的にモデル化した場合の粒径分布が対数正規分布で近似され、実際に測定した粒径分布とも良好に一致すること¹、種々のスプリンクラーノズルを用いた試験で取得した粒径分布が対数正規分布で近似されたことが知られて²おり、これらからも、各測定点での個数分布割合が対数正規性を有していた今回試験結果は妥当と考えられる。

また、試験データがスプレーヘッドの液滴の特徴を代表した液滴データを取得できているかを確認するため、全測定点のデータを合算したもの（第5図）と、放水方向の直線上に位置する点のうち放水分布図の中心付近に位置し計測点を代表していると考えられる⑤点（第1回試験及び第2回試験）について個数割合取得結果に対する検定を有意水準5%として実施した。検定に当たっては各測定点での個数分布割合には対数正規性があることを踏まえ、個数割合を対数変換し、F検定により等分散性を確認したうえで、「等分散を仮定したt検定」を実施した。

結果を第2表および第3表に示すが、2群間の分散および平均に差が無いとする仮説を棄却しない結果となった。つまり、全測定点のデータを合算し得られる液滴個数分布は95%の確率でスプレーヘッド実機によるスプレー時の液滴個数分布に等しいと言える。よって、試験で取得した液滴個数割合は、スプレーヘッドの液滴の特徴を代表できていると言える。

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

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



第 5 図 液滴径毎の個数分布(全測定点データ合算)

第 2 表 ⑤点と全測定点データ合算値に対する F 検定

帰無仮説 H_0 : 2 群間の分散に差がない (等分散である)

対立仮説 H_1 : 2 群間の分散に差がある (等分散ではない)

検定対象	第 1 回⑤	全測定データ
分散	0.001703	0.001531
自由度	41	48
F 値	1.1123	
P 値	0.3594	
棄却域の境界値	1.6395	
判定	P > 0.05 より、帰無仮説 H_0 は棄却されない	

検定対象	第 2 回⑤	全測定データ
分散	0.001867	0.001531
自由度	48	48
F 値	1.219	
P 値	0.2476	
棄却域の境界値	1.615	
判定	P 値 > 0.05 より、帰無仮説 H_0 は棄却されない	

< 第 2 表に関する説明 >

二つのサンプルにおいてカイ二乗変数に従う変数の比は「F 分布」に従う。F 値とは二つのサンプルの分散の比であり、F 検定では F 値を、F 分布において上側確率が有意水準 0.05 となる数値 (棄却域との境界値。以下、 $F_{0.05}$ 値) と比較する。F 値 > $F_{0.05}$ 値である場合、F 値は棄却域に入るため有意水準 5% で有意であり、帰無仮説を棄却して対立仮説を採択する。反対に F 値 < $F_{0.05}$ 値であれば、帰無仮説は棄却されない。

P 値は、帰無仮説が正しいという仮定のもと、今回得られた値が偶然ではないとする確率のことであり、F 分布における $F_{0.05}$ 値に対する外側確率である。P 値が有意水準 0.05 よりも小さい場合、得られた値は偶然ではないという確率は小さいと判断し、帰無仮説を棄却し対立仮説を採択する。反対に P 値が 0.05 より大きい場合、帰無仮説は棄却されない。

今回検定の結果、F 値 < $F_{0.05}$ 値 (P 値 > 0.05) であったため、全測定点のデータを合算し得られる個数割合の分布 (第 5 図) と、計測点を代表していると考えられる⑤点での個数割合の分布

という 2 群のデータについて、F 値は棄却域に入らないことから、それぞれの分散に差があるとは言えない、という結果となった。

第 3 表 ⑤点と全測定点データ合算値に対する t 検定

帰無仮説 H_0 : 2 群間の平均に差が無い

対立仮説 H_1 : 2 群間の平均に差がある

検定対象	第 1 回⑤	全測定データ
自由度	89	
t 値	0.3846	
P 値 (両側)	0.7014	
棄却域の境界値 (両側)	1.9870	
判定	P > 0.05 より、帰無仮説 H_0 は棄却されない	

検定対象	第 2 回⑤	全測定データ
自由度	96	
t 値	-0.0215	
P 値 (両側)	0.9829	
棄却域の境界値 (両側)	1.9850	
判定	P > 0.05 より、帰無仮説 H_0 は棄却されない	

< 第 3 表に関する説明 >

t 値は平均値や自由度に基づく関数である。これは確率密度関数である「t 分布」に従うものであり、t 検定では t 値を、t 分布において外側確率が有意水準 0.05 となる t の値 (棄却域の境界値。以下、 $t_{0.05}$ 値) と比較する。|t 値| > $t_{0.05}$ である場合、t 値は棄却域に入るため有意水準 5% で有意であり、帰無仮説を棄却し対立仮説を採択する。反対に、|t 値| < $t_{0.05}$ である場合、帰無仮説は棄却されない。

P 値は F 検定と同様に、t 分布における t 値に対する外側確率である。P 値が有意水準 0.05 よりも小さい場合、得られた値は偶然ではないという確率は小さいと判断し、帰無仮説を棄却し対立仮説を採択する。反対に P 値が 0.05 より大きい場合、帰無仮説は棄却されない。

今回検定の結果、 $|t \text{ 値}| < t_{0.05}$ ($P \text{ 値} > 0.05$)であったため、全測定点のデータを合算し得られる個数割合の分布（第 5 図）と、計測点を代表していると考えられる⑤点での個数割合の分布という 2 群のデータについて、 t 値は棄却域に入らないことから、それぞれの平均に差があるとは言えない、という結果となった。

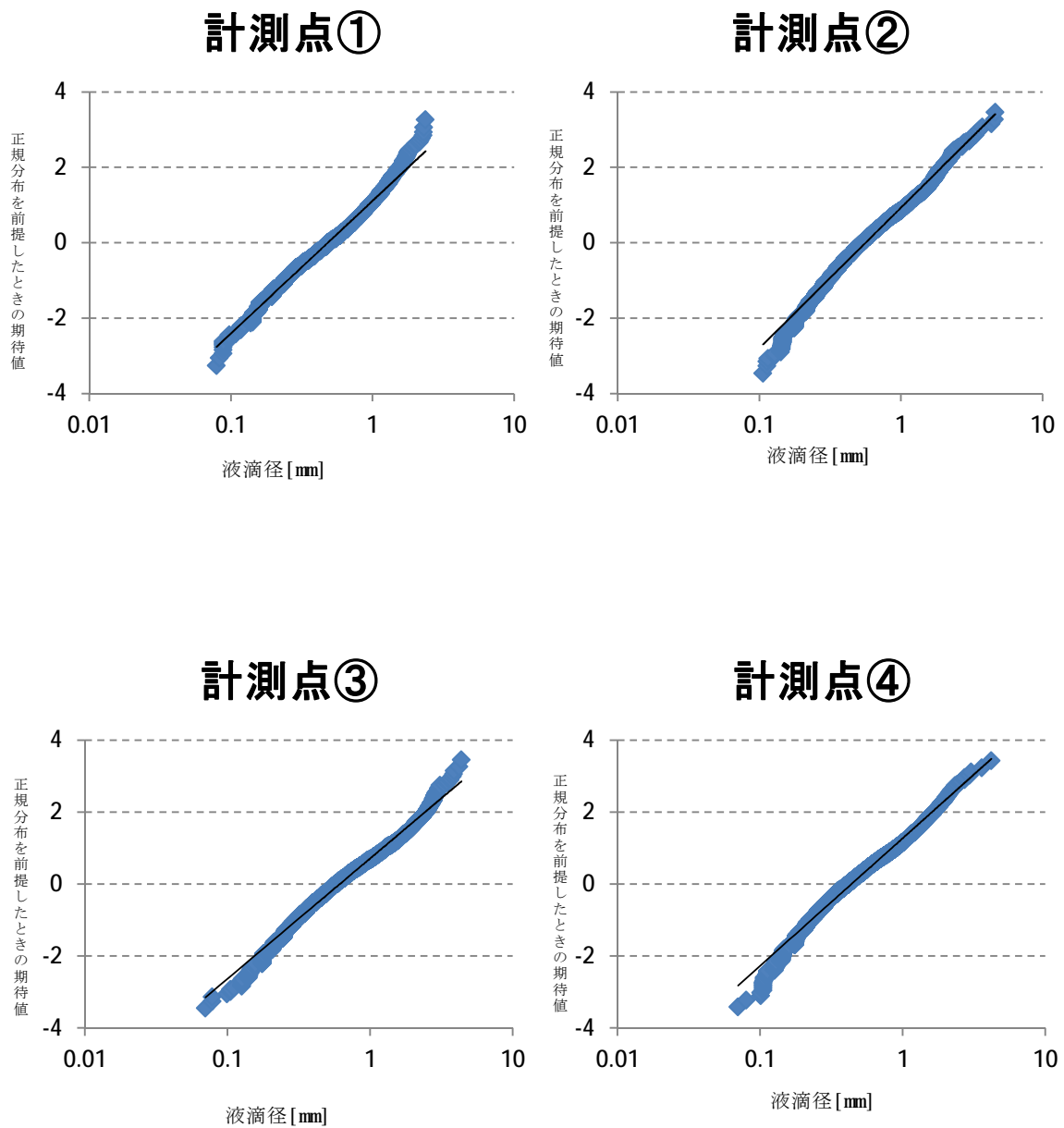
<正規確率プロットについて>

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

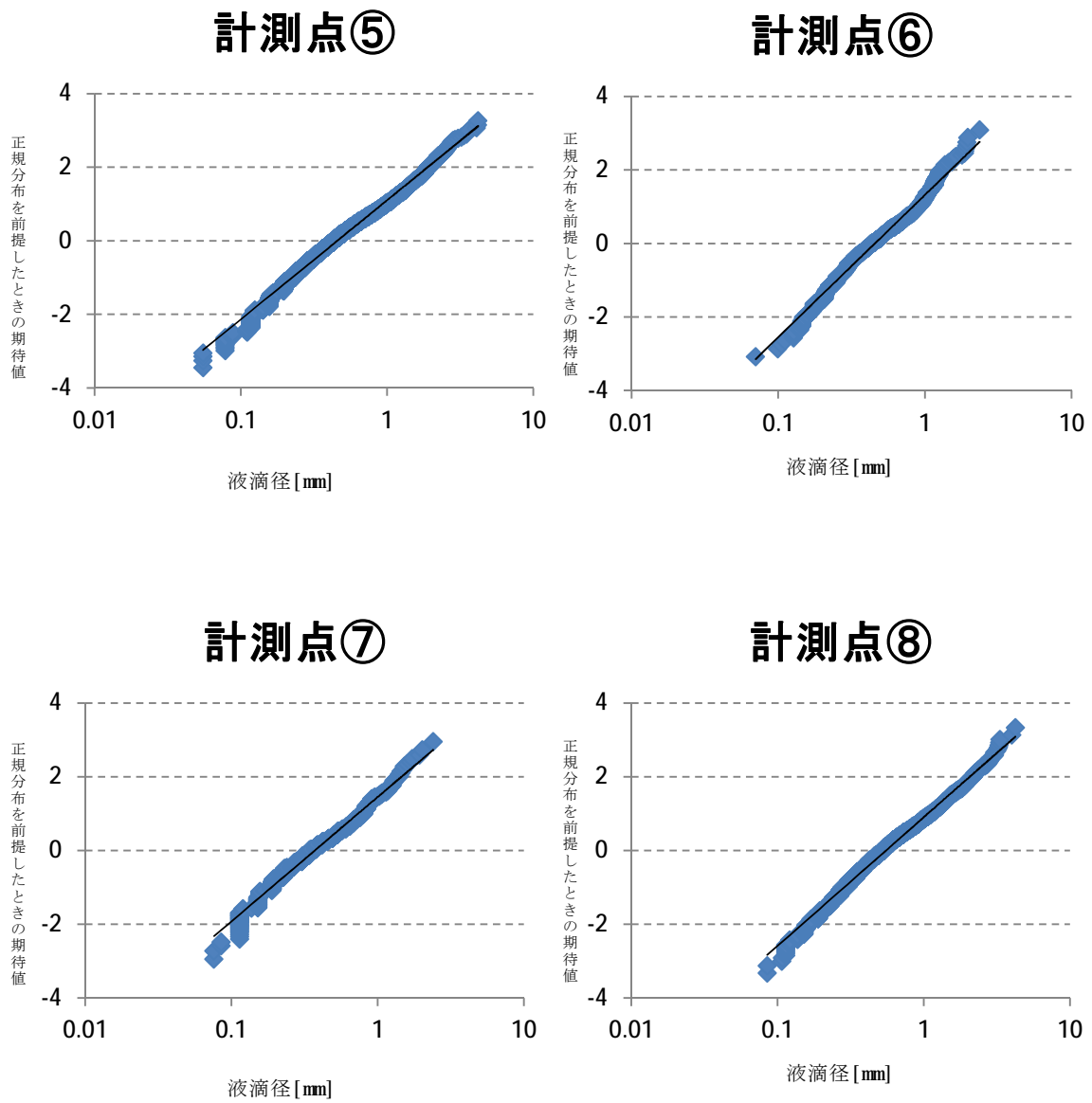
具体的には、取得されたデータについて累積比率（確率 P_i ）を求め、 P_i に対して正規分布の累積分布関数の逆関数を用いて求めた値をプロットし、正規分布なら直線、対数正規分布なら片対数グラフ上の直線に沿うかどうかを判断するものである。

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

本試験結果の正規確率プロットを第6-1図および第6-2図に示す。横軸に対数をとるとプロット結果は全点で概ね直線状となることから、本計測結果は対数正規分布に従うと判断できる。



第 6-1 図 対数正規確率プロット (第 1 回試験 測定点①~④)

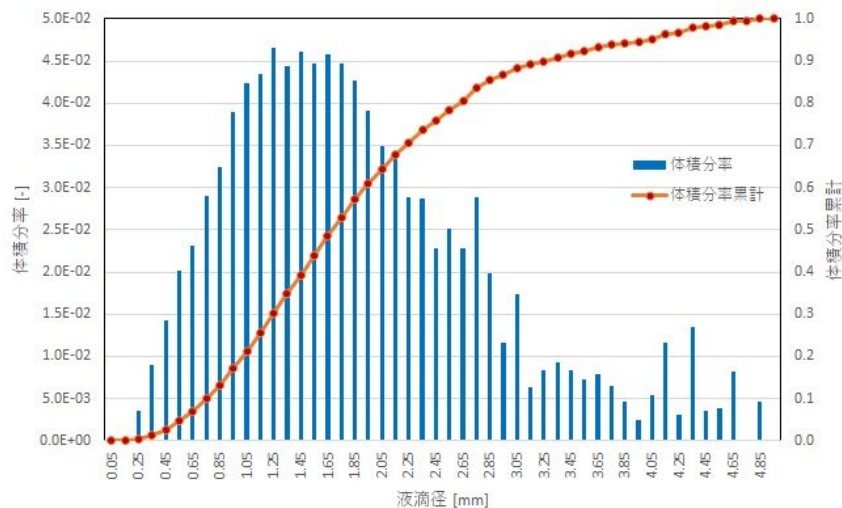


第 6-2 図 対数正規確率プロット (第 1 回試験 測定点⑤~⑧)

4. 液滴径の基本ケース条件の設定

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

第5図にて得られた個数分布に対し液滴径毎の体積を乗じた体積分率で整理した結果、体積分率50%出現値は第7図の通り1.65~1.75mmとなった。液滴径が小さいほうが、液滴下降速度が小さく気中に液滴が滞在する時間は長くなり、気相部水密度は大きくなることから、基本ケース条件はより小さい液滴径1.5mmを設定する。



第7図 液滴径毎の体積分率

5. 液滴径の不確かさを考慮した条件の設定

不確かさを考慮した条件としては、第7図に示す体積分率における両側5%を切り捨てた際の下限值、すなわち体積分率2.5%出現値(0.4mm~0.45mm)を踏まえ、0.4mmを設定する。

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

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

以上

(3) SFP 内に保管中の燃料集合体に内挿物が実在する効果について

1. はじめに
2. SFP 内に保管中の燃料集合体に内挿物が実在する効果について
3. まとめ

1. はじめに

高浜 1, 2 号炉の未臨界性評価では、SFP 内の燃料集合体内に多数挿入されている実在の内挿物を無視している。ここでは、内挿物が実在することによる実効増倍率への効果を評価し、評価の前提となっている「内挿物なし」が保守的な条件になっていることを確認する。

2. SFP内に保管中の燃料集合体に内挿物が実在する効果について

SFP 体系での未臨界性評価においては、貯蔵中の燃料集合体に挿入されている内挿物の存在を無視している。これは内挿物が持つ構造物としての中性子吸収効果および水排除効果を無視し、実効増倍率を厳しくする保守的な設定となるが、実際には SFP 内の多くの燃料には内挿物が挿入されている。実際の貯蔵状況を第 1-1 表および第 1-2 表に示す。

第 1-1 表 高浜 1 号炉 SFP 内の燃料および内挿物の貯蔵状況 (2021 年 3 月時点)

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

第 1-2 表 高浜 2 号炉 SFP 内の燃料および内挿物の貯蔵状況 (2021 年 3 月時点)

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

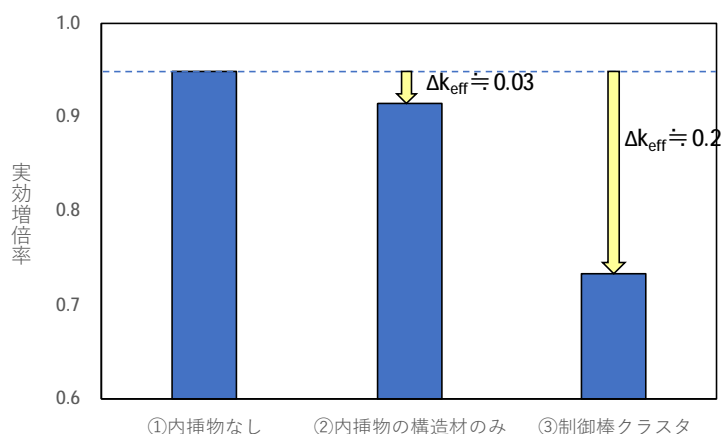
実際の内挿物貯蔵状況を踏まえ、以下の解析により内挿物有り無しによる実効増倍率の影響を比較した。具体的には、①内挿物を考慮しない場合、②内挿物の構造材のみを考慮した場合（制御棒クラスタから中性子吸収材（銀-インジウム-カドミウム）を無視し、構造物のみが挿入された状態を仮定）、③制御棒クラスタが挿入された場合の評価を行った。バーナブルポイズンの中性子吸収効果は可燃性毒物の燃焼と共に低下するため使用状態によって効果が異なることから、使用済の状態を想定して上記②の内挿物の構造材のみを考慮した評価で代表した。なお、プラグングデバイスは全長が短く燃料有効長部に掛る部分がないため、未臨界性評価においては内挿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

<解析条件>

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

評価結果は第 1 図に示すとおり、内挿物が挿入されていない状態での実効増倍率が最も高く、制御棒クラスタが挿入されている場合には 0.2、また構造物として内挿物が存在すること自体によっても 0.03 ほど実効増倍率が低減される結果となり、解析の前提条件である「内挿物なし」とすることが保守的であることを確認した。

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

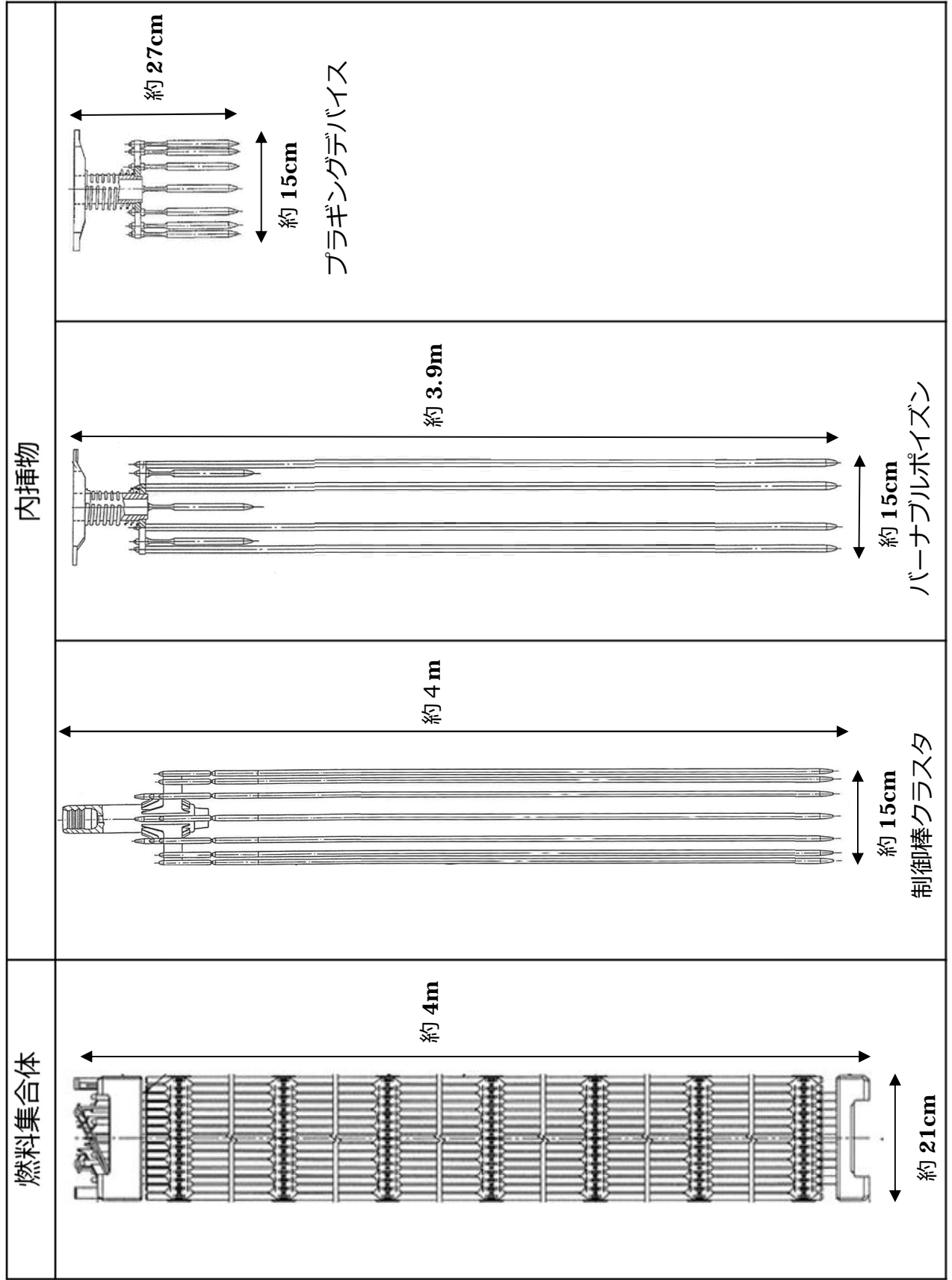


第 1 図 内挿物挿入有無による実効増倍率への影響

3. まとめ

未臨界性評価においては SFP 内の燃料集合体内に挿入される内挿物の存在を無視しているが、その存在を考慮した場合には、内挿物が持つ構造物としての中性子吸収効果および水排除効果により、燃焼集合体全体としての反応度が低くなり実効増倍率が低減される結果となり、評価の前提条件である「内挿物なし」とすることが保守的であることを確認した。

(参考) 燃料集合体および内挿物の概要



(4) 解析コードの説明について

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

1. はじめに

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

2. 解析コードの概要

2.1 PHOENIX-P Ver.8

対象：使用済燃料貯蔵設備

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

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

2.2 SCALE Ver. 6.0

2.2.1 SCALE Ver. 6.0 の概要

対象：使用済燃料貯蔵設備

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

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

2.2.2 SCALE Ver. 6.0 の解析手法について

(1) 一般事項

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

(2) 解析コードの特徴

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

(3) 断面積ライブラリの特徴

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

(4) 解析手法

本解析で用いた臨界計算の CSAS6 モジュールについて、以下に示す。

a. BONAMI

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

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

b. **CENTRM**

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

c. **PMC**

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

d. **KENO-VI**

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

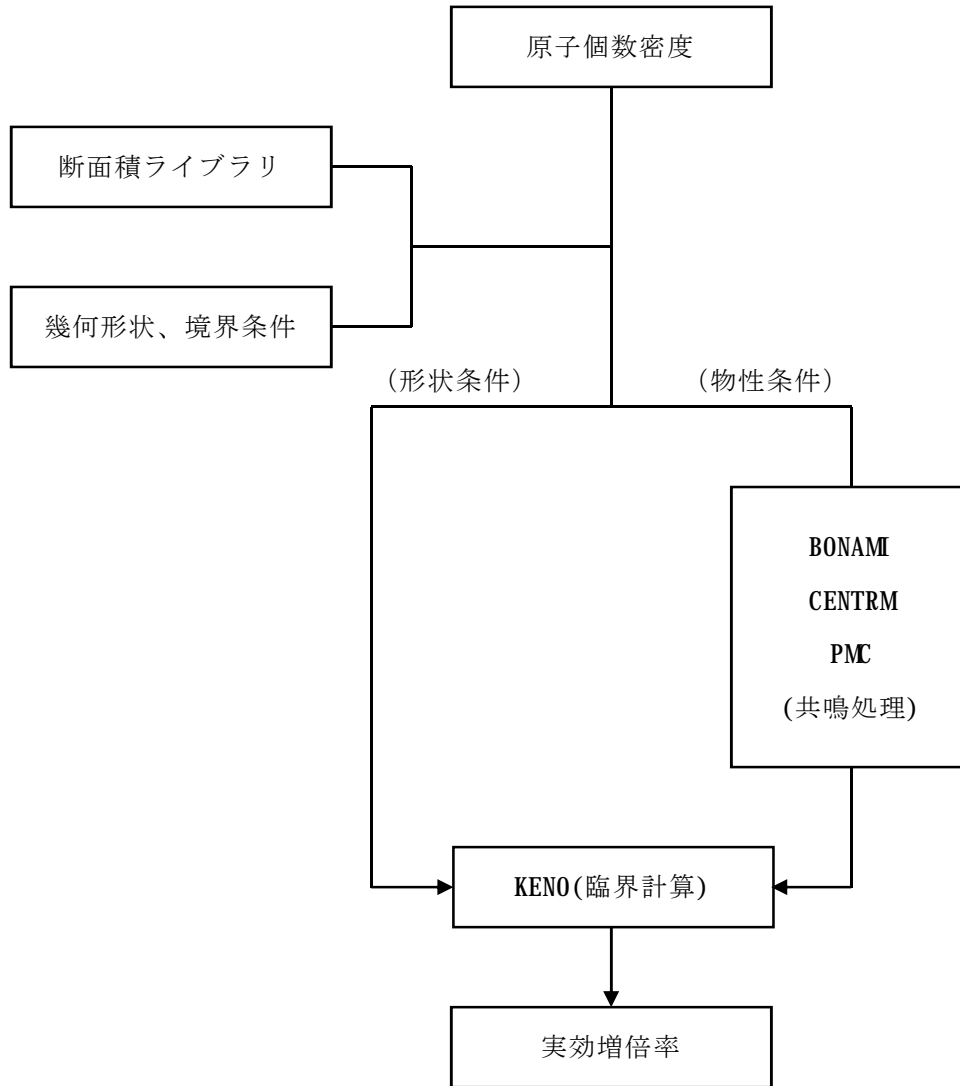
本コードでは、体系内の一つ一つの中性子の振舞いを追跡し、核分裂によって発生する中性子数 **F**、吸収されて消滅する中性子数 **A**、体系から漏えいする中性子数 **L** を評価し、次式により実効増倍率 k_{eff} を算出する。

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

(5) 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを第 1 図に示す。

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



第 1 図 解析フローチャート

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

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

a. 検証(Verification)

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

b. 妥当性確認(Validation)

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

ベンチマーク解析により得られた実効増倍率及び標準偏差並びに各実験の実効増倍率測定値及び実験誤差を用いて、ラック体系の未臨界性評価に用いるSCALE Ver. 6.0システムの平均誤差($1-k_c$)及び不確かさ(Δk_c)を導出した結果を第3表に示す。なお塩素を含む体系に対するベンチマーク解析は、「C. 使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価への適用性確認」に示す理由により第2表には記載していない。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 1-1 表 選定したパラメータ範囲（製作公差を含まない）

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 1-2 表 MDX 燃料 (FP なし) を使用した臨界実験

項目	単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様のパラメータ範囲	
燃料	²³⁵ U 濃縮度	MIN MAX	
	Pu 含有率	1.6 4.8	
	燃料材径	5.5 10.9	
	燃料体内の減速材体積／燃料体積	8.19 9.29	
	被覆管外径	1.88 2.00	
	被覆材材質	9.5 10.72	
	燃料要素ピッチ	ジルコニウム合金	
	燃料要素配列条件	12.6 14.3	
	体系条件	正方配列	
	減速材	燃料体配列体系	
	水位	無／軽水	
	反射体	完全喪失／冠水	
	減速	反射体材質	軽水／コンクリート
		EALF	0.2～約 7eV*
実験ケース数		—	
解析ケース数		—	
反射体	実験施設	—	

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはありません。

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

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 1-3 表 FP を含む体系の臨界実験

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表 1-4 塩素を含んだ臨界実験に対するベンチマーク結果

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

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 2 表 SCALE Ver. 6. 0 システムの平均誤差及び不確かさ

条件	計算コード	SCALE6. 0 システム (KENO-VI)			
	断面積ライブラリ	ENDF/B-VII 238 群			
	対象燃料	ウラン燃料 (FP なし)	MDX 燃料 (FP なし)	ウラン燃料 (FP あり)	ウラン+MDX 燃料 (FP あり)
	ベンチマークケース数				
評価 結果	平均誤差(1- k_c)	0. 0007	0. 0013	0. 0001	0. 0001
	加重平均実効増倍率 ($\overline{k_{eff}}$)	0. 9993	0. 9987	0. 9999	0. 9999
	不確かさ ($\Delta k_c = U \times S_p$)	0. 0065	0. 0104	0. 0067	0. 0062
	信頼係数 (U) * ¹				
	$\overline{k_{eff}}$ の不確かさ (S_p)				

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

c. 使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価への適用性確認

塩素を有する臨界実験以外では、ベンチマーク解析結果と臨界実験の実効増倍率は概ね一致しており、第 2 図のとおりその差はほぼ正規分布となることを確認している。選定した臨界実験には、冠水状態の実験及び第 3 表に示す低水密度状態の実験が含まれており、冠水状態及び低水密度状態の実効増倍率の計算値と測定値の差の傾向に大きな差異がないことが確認できる。また、選定した臨界実験には、部分水位で臨界となるケースも含まれており、気相と液相の境界についても適切に取り扱うことができると言える。

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

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

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

また、第 4-1 表、第 4-2 表に示す通り、統計的検定により母分散および母平均が等しいかを有意水準 5%とした検定により確認した結果、これらが等しいとする仮説は棄却された。つまり SCALE6.0 にとって塩素を含む臨界実験は、95%の確率で塩素を含まない体系の臨界実験とは母集団が異なると言える。よって塩素を含む体系に対しよって SCALE6.0 の不確かさを算出するに当たっては、塩素を含む体系での臨界実験ベンチマーク結果は考慮せず、第 2 表に示す [] ケースの臨界実験ベンチマークより得られた結果を考慮する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第3表 低水密度状態の臨界実験リスト

臨界実験	減速材密度	ケース数

第4-1表 塩素を含む臨界実験ベンチマーク結果とそれ以外の臨界実験ベンチマーク結果に対するF検定

帰無仮説 H_0 : 2群間の分散に差がない (等分散である)

対立仮説 H_1 : 2群間の分散に差がある (等分散ではない)

--

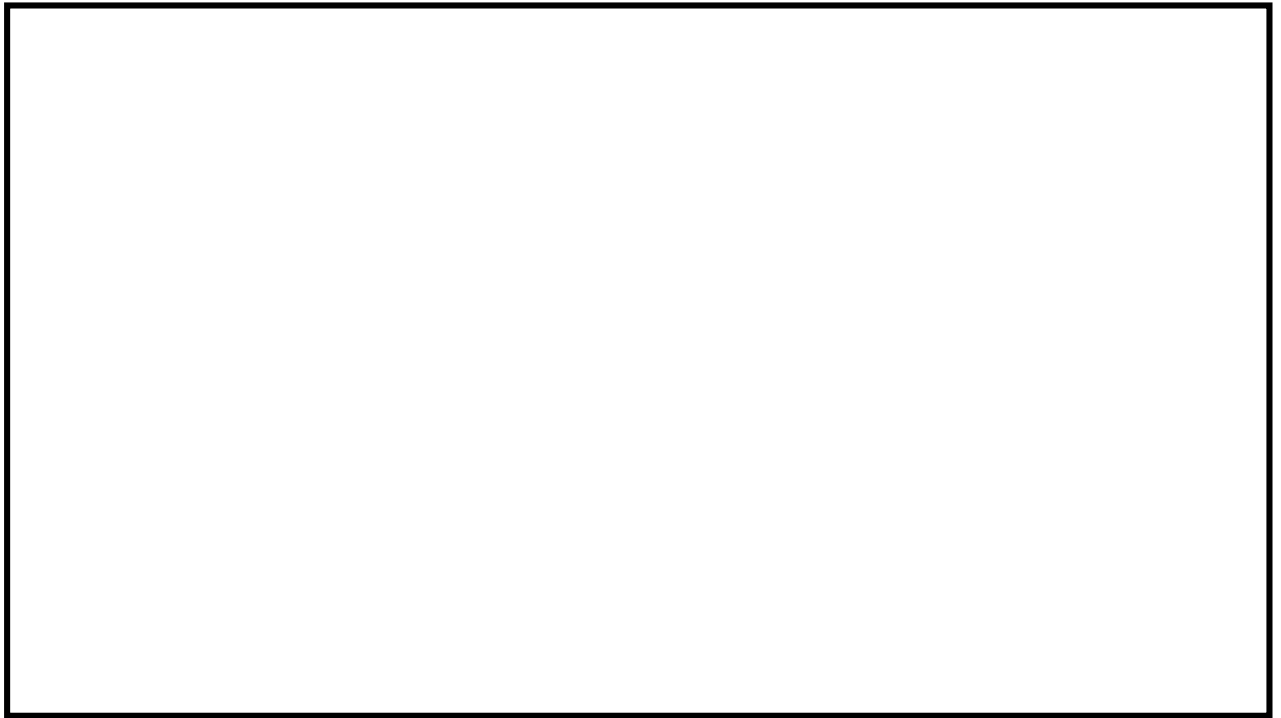
第4-2表 塩素を含む臨界実験ベンチマーク結果とそれ以外の臨界実験ベンチマーク結果に対するt検定

帰無仮説 H_0 : 2群間の平均に差が無い

対立仮説 H_1 : 2群間の平均に差がある

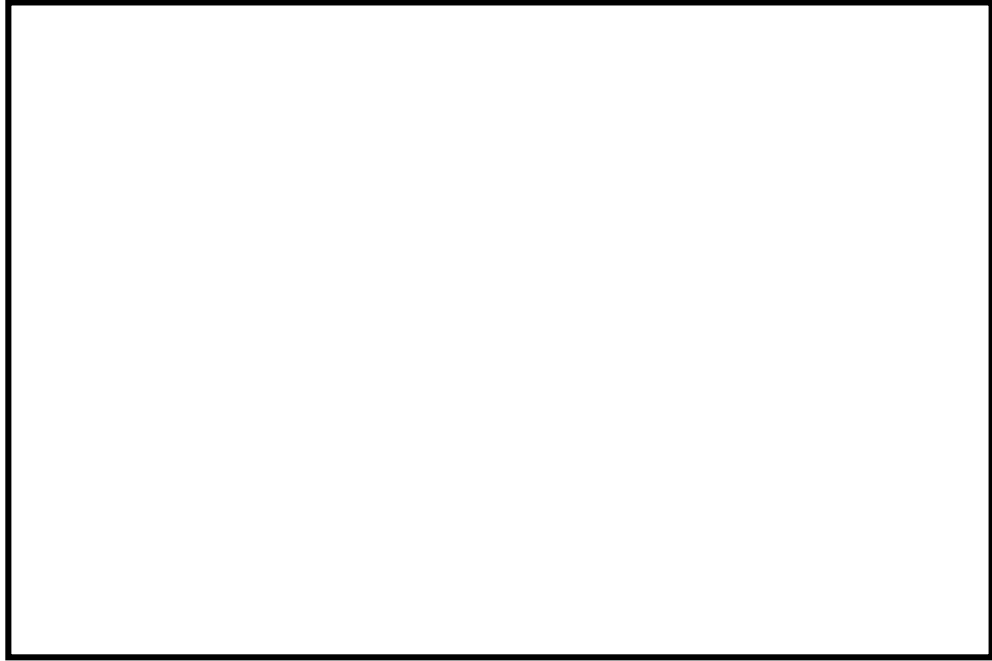
--

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第2図 Δk に対するヒストグラム

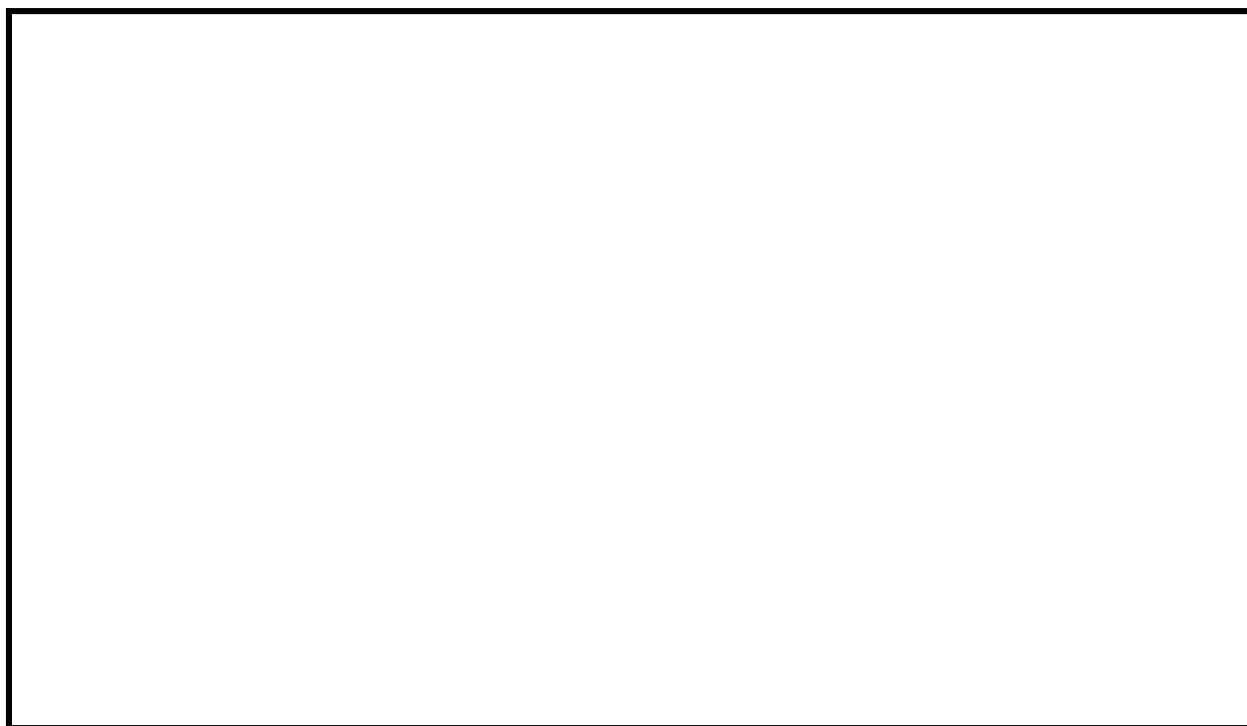
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第3図 選定したベンチマーク実験の EALF と C/E の関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

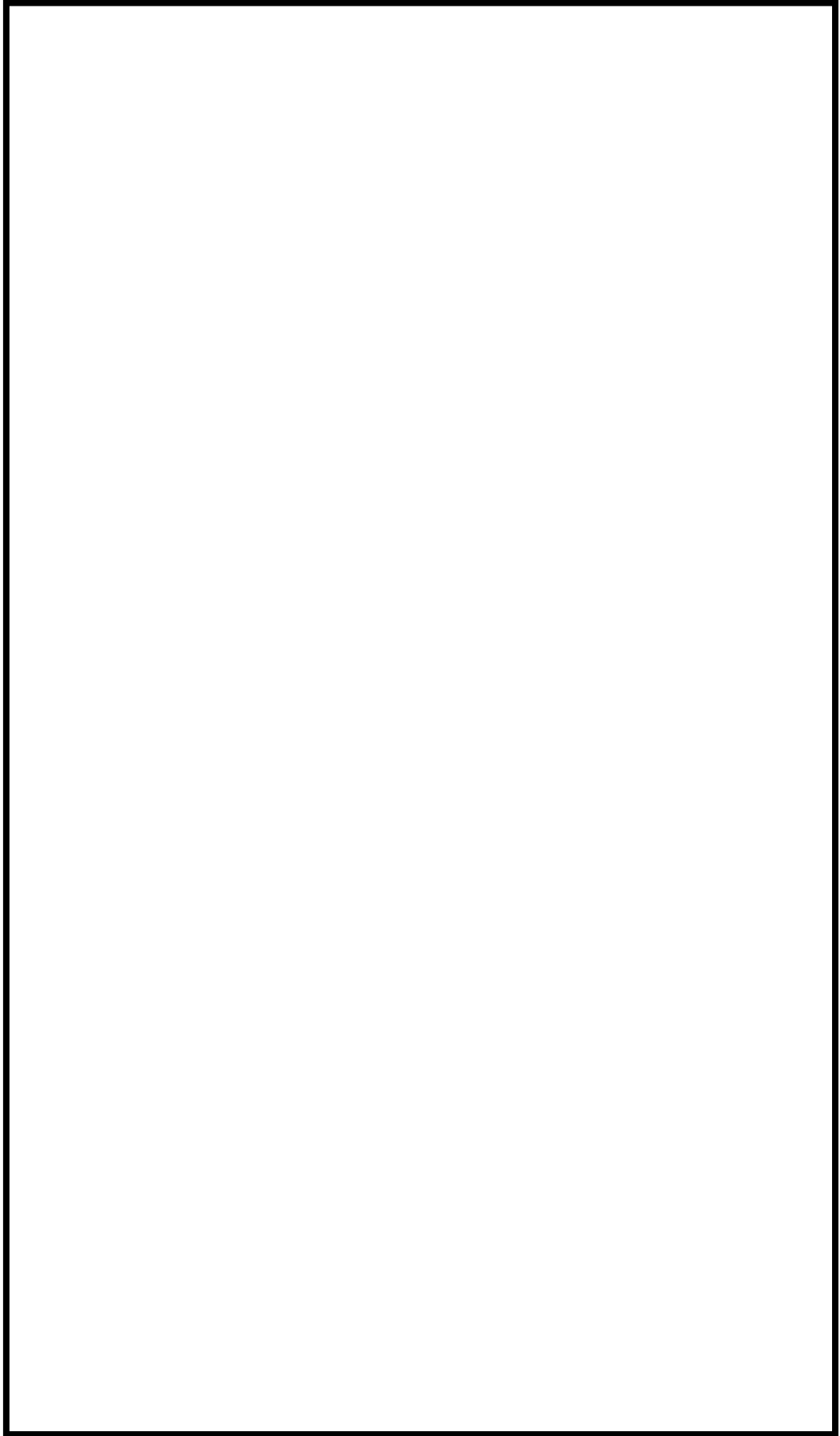
(参考1) 第3表に示す臨界実験の概要



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。

(参考2) FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析の結果

参考1表 FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析結果



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

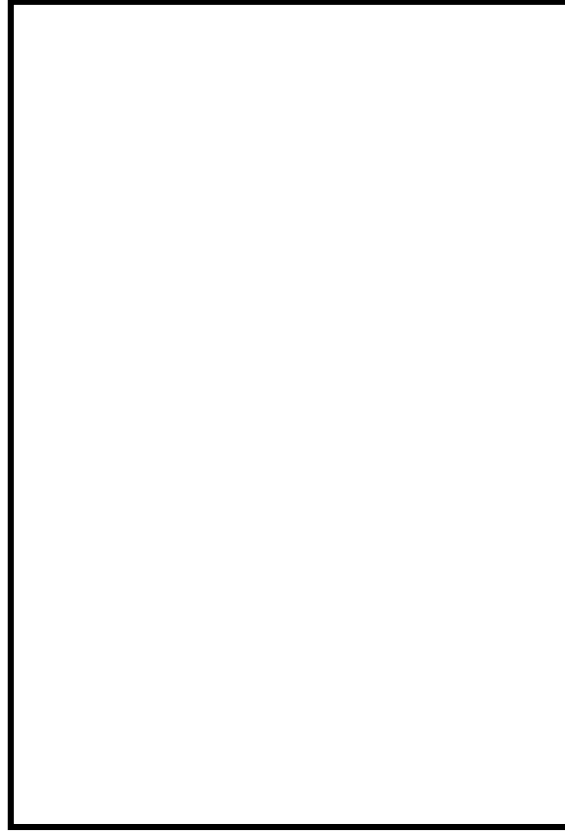
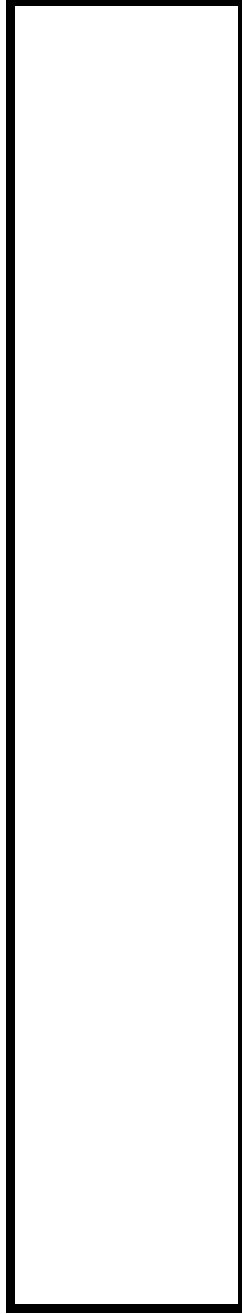
参考1表 FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析結果（続き）



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

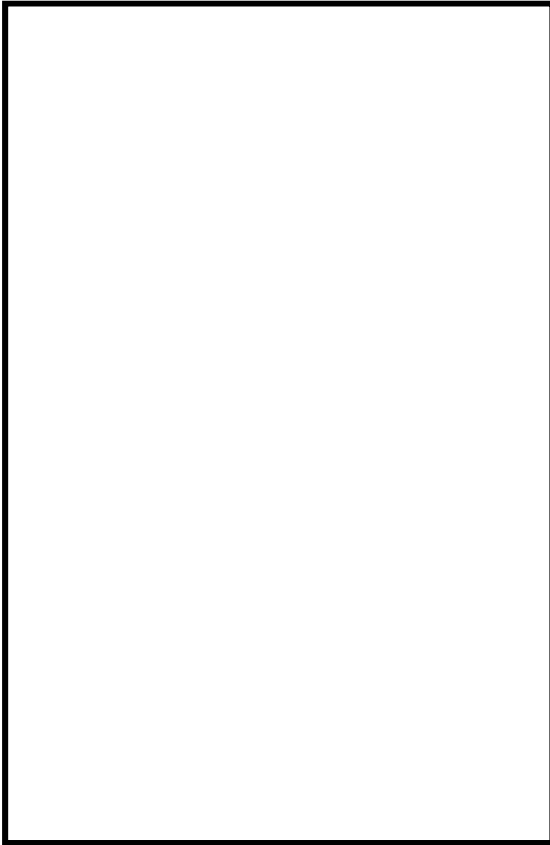
また、参考 1 表に示す計算結果を FP 核種毎に整理したものを参考 2 表に、C/E 評価結果を核種毎でヒストグラムに整理したものを参考 図 1 に示す。

参考 2 表 FP 毎でのベンチマーク解析結果整理

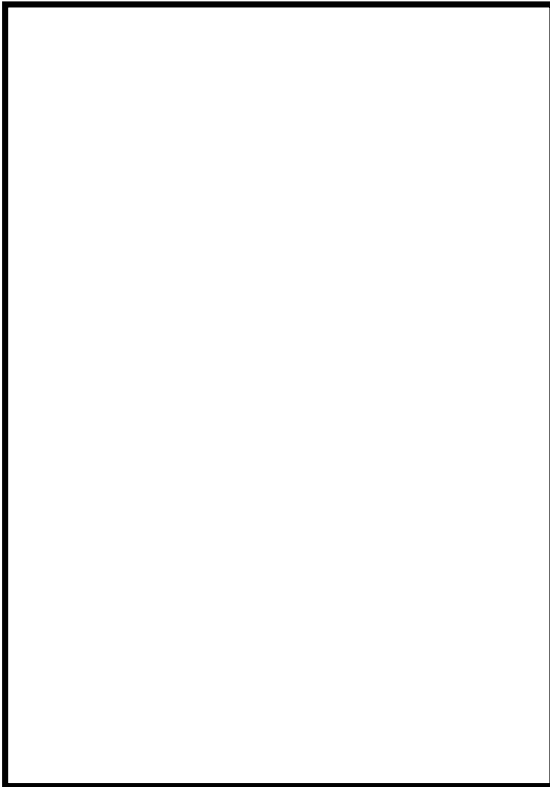


参考図 1-1 C/E の核種毎のヒストグラム

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



参考図1-2 C/Eの核種毎のヒストグラム



枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考3)

臨界実験の各 FP 核種を無視した場合の感度解析

【解析条件】

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

参考表 1 解析対象実験の FP 組成情報

--

[] 枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【解析結果】

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

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

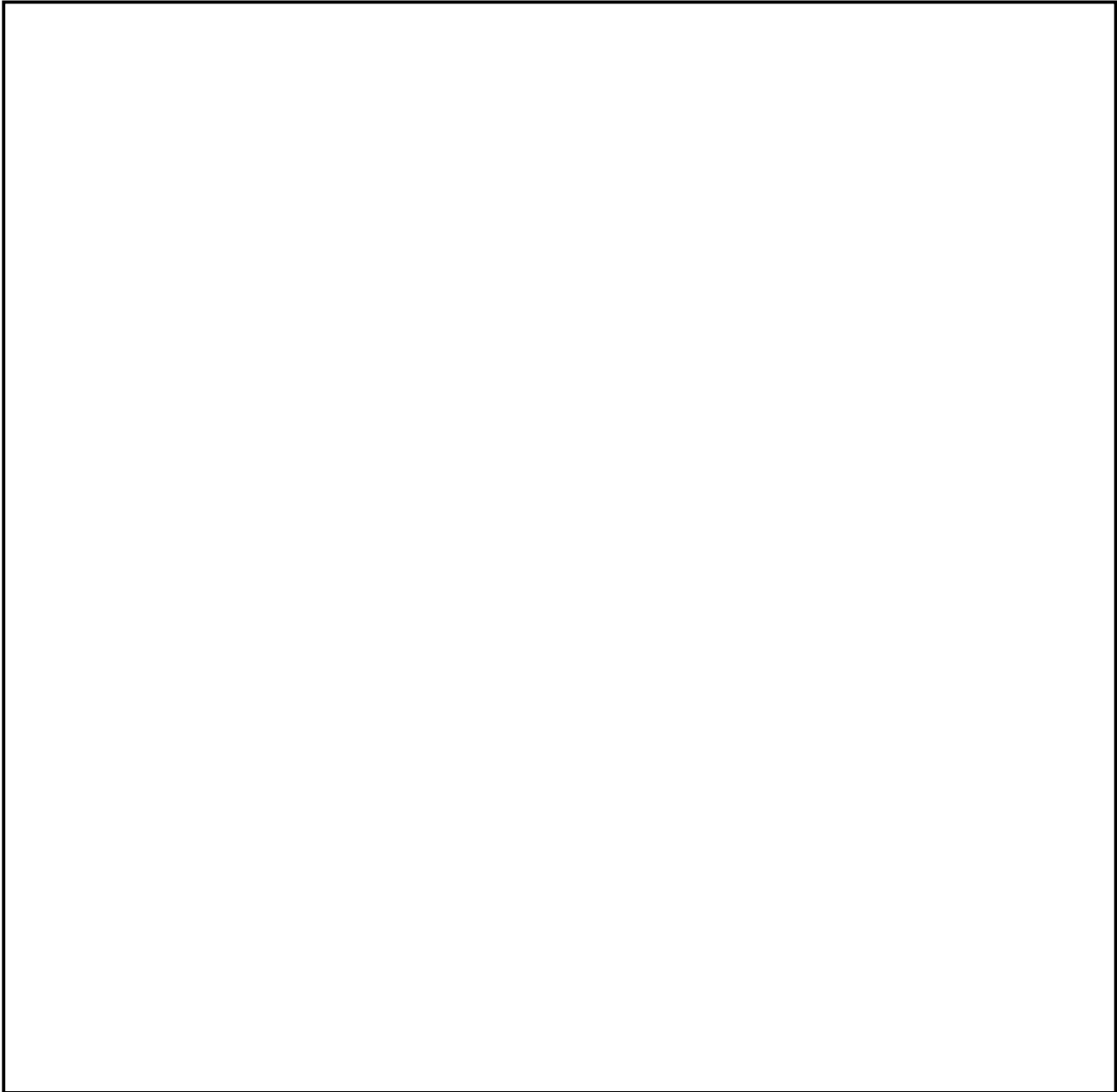
Case	keff	σ	$\Delta keff$	考慮しない核種	未臨界性評価で 考慮する核種

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(参考4) 計算コードの不確かさの算出方法について



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。



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。

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。

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。