

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1～77

(2) 解析コードの説明について

⇒ 通しページ78～109

(1) SFPへの注水・放水流量の設定について

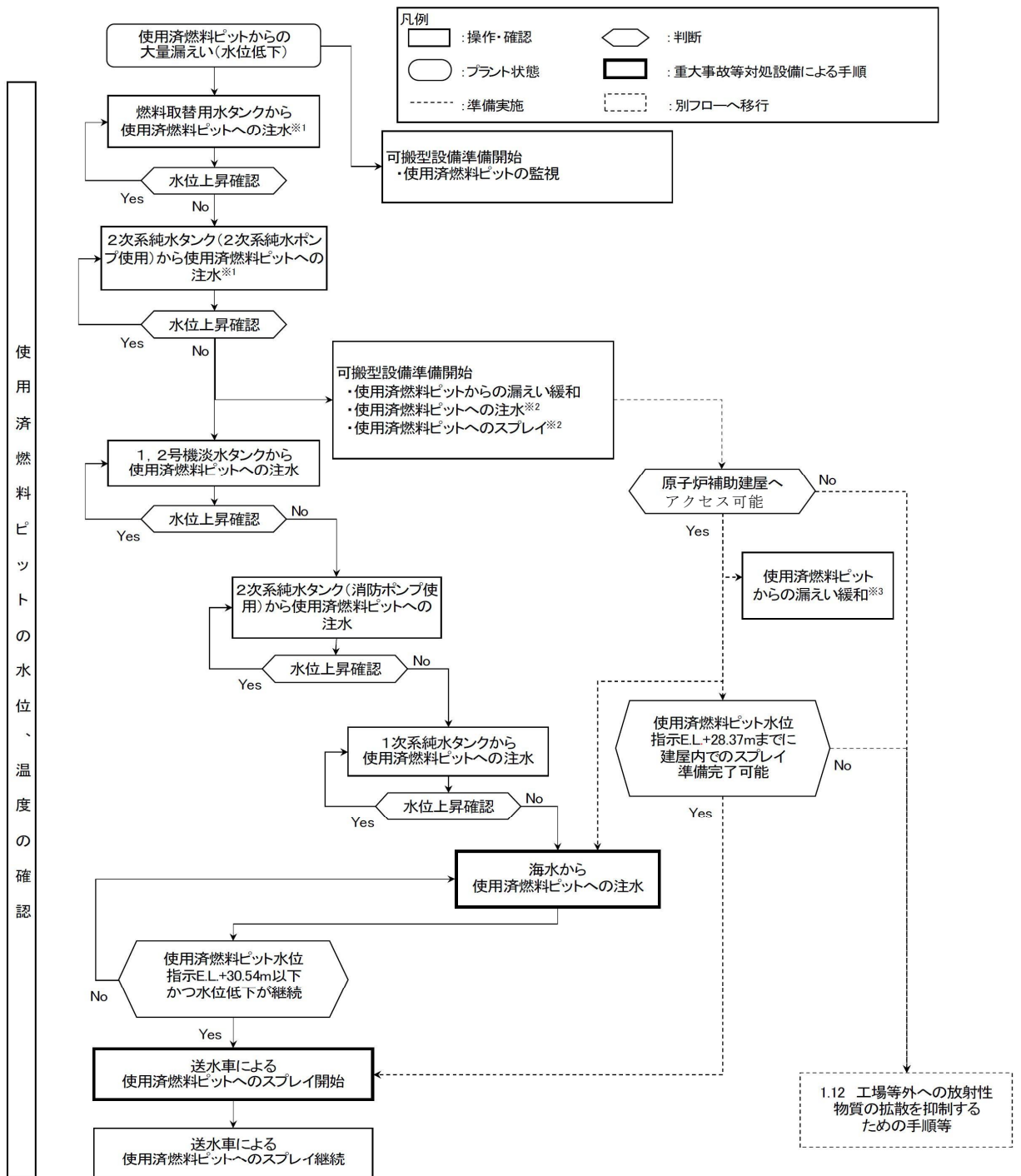
1. はじめに
2. SFPからの大量の水の漏えい時における注水・放水手順および設備保有台数
3. SFP注水手順にて使用する設備の流量設定の考え方
 - 3.1. 各手順における流量設定の考え方
 - 3.1.1. SFP注水手順の流量設定
 - 3.1.2. SFP放水手順の流量設定
 - 3.2. 配管圧損評価について
4. 基本ケース条件の設定について
5. 不確かさを考慮した条件の設定について
6. 系統に複数台設置されるポンプの起動台数の考え方について
7. 全手順同時実施の成立性確認
8. まとめ

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。



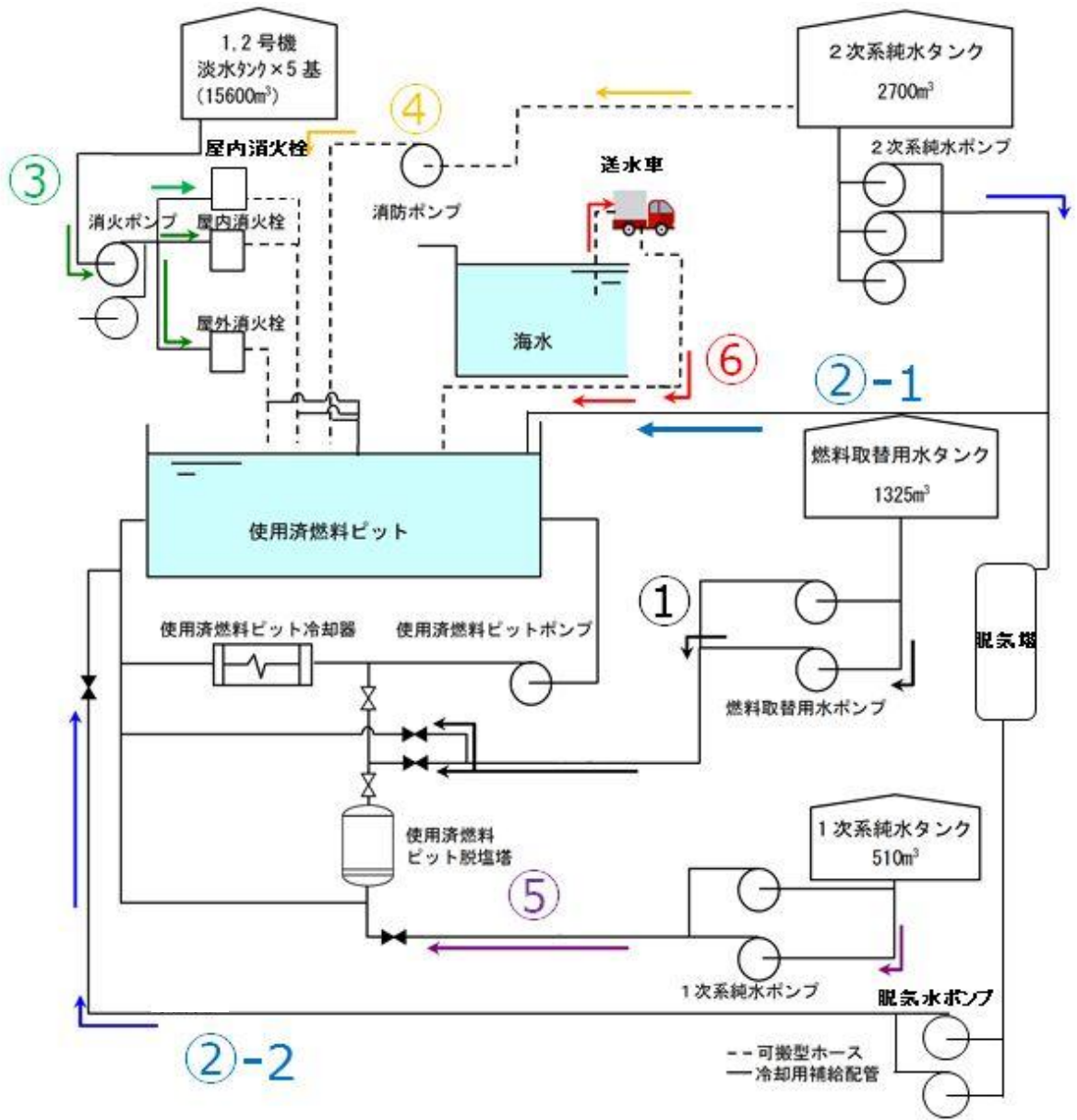
(注1)本フローに記載の注水手段については、複数の手段の準備又は注水を平行して実施することがある。
また、水源の使用可否等に応じて手順を飛ばして対応することがある。

※1: 使用済燃料ピットの注水機能喪失の場合は使用不可

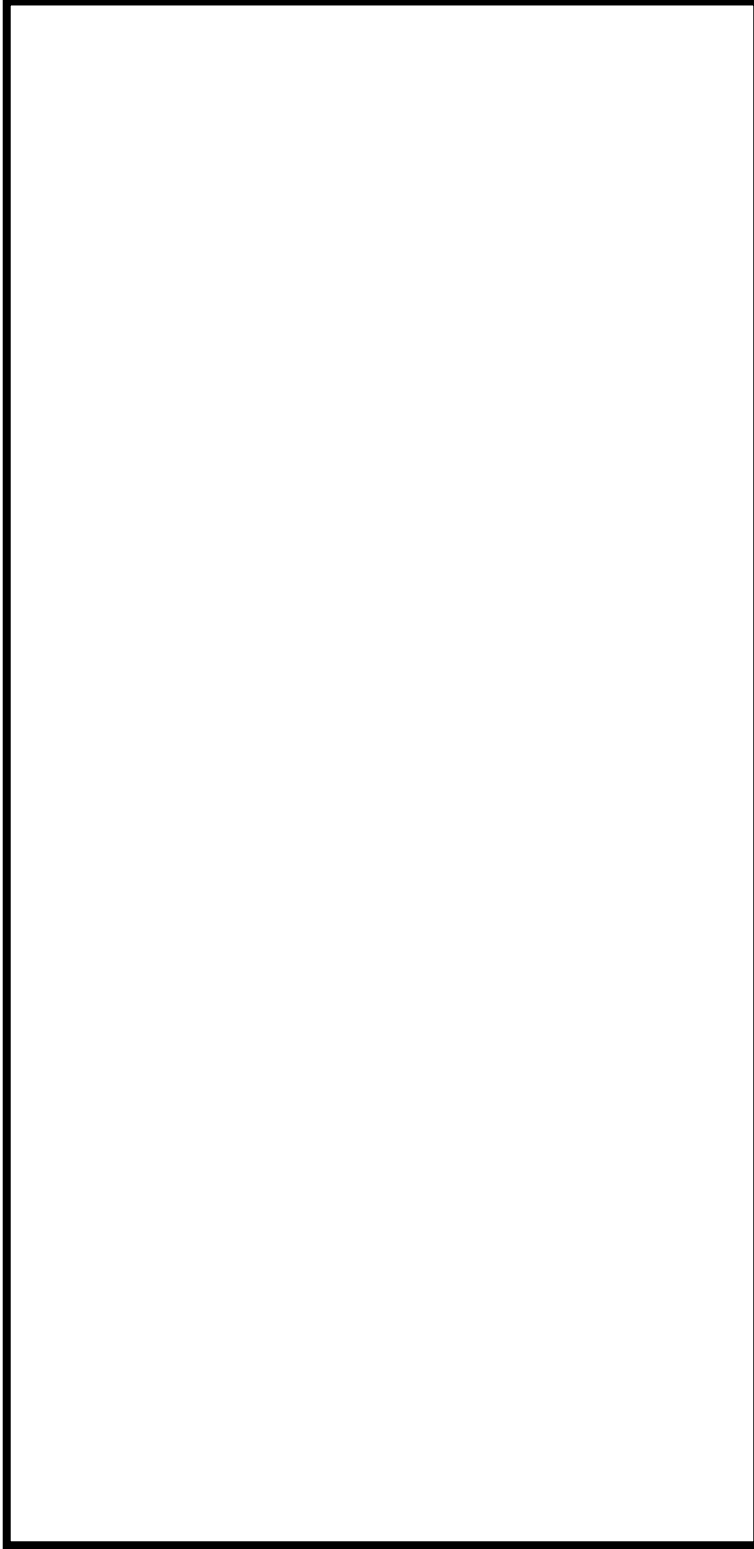
※2: 可搬型設備については、「送水車」による使用済燃料ピットへのスプレー」の準備を優先する。

※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



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

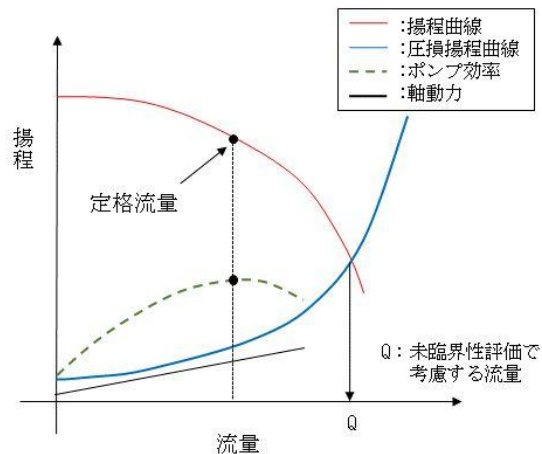
実測値を使用する。(対象手順：注水手順②、③)

なおSFP水はプラント通常運転時においても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。当該の通常操作としての手順として、第1表に示す手順のうち2次系純水タンクを水源とする手順②-1と手順②-2を整備しているが、手順②-1は常時運転している2次系純水ポンプにより、手のひらサイズの出口弁を開くことで、少ない所要時間にて直接SFPへ注水でき、自然蒸散による低下分は本手順で十分賄うことができる。一方、手順②-2は脱気塔の起動や注水ラインナップに相当の時間を要すこととなり、実績としてもSFP水の自然蒸散分を補給する際は、手順②-1のみを実施しており、手順②-2を実施した実績はない。

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。

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。

$$H = \sum f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g} \quad \dots (1) \quad \text{ここで } f \quad : \text{ 摩擦係数(-)} \quad R e \quad : \text{ レイノルズ数(-)}$$

L/D : 等価直管長(-) D : 配管内径(m)

v : 流速(m/s) v : 流速(m/s)

$$R e = \frac{Dv}{\nu} \quad \dots (2) \quad g \quad : \text{ 重力加速度 (m/s}^2\text{)} \quad \nu \quad : \text{ 動粘性係数 (m}^2\text{/s)}$$

k : 抵抗係数(-) ε : 絶対粗度(m)

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

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

第2表 各配管要素の等価直管長※

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

※「FLOW OF FLUIDS THROUGH VALVES, 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、最確状態を決めがたいことから、基本ケース条件においても未臨界性評価の観点から保守的に、SFPへの注水・放水に係る全手順の同時実施を想定する。なお各手順の設備構成、水源の容量および対応要員数の観点より、全手順を同時に実施することは可能である。

b. 各手順における系統内ポンプの使用台数

最確状態を設定する観点から、1手順当たり1台とする。

上記の前提に基づき、各手順における基本ケース条件の流量を設定する。

(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、恒設設備を使用し通水実績が無い手順であるため、圧損揚程曲線を策定のうえ流量を評価する。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3表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

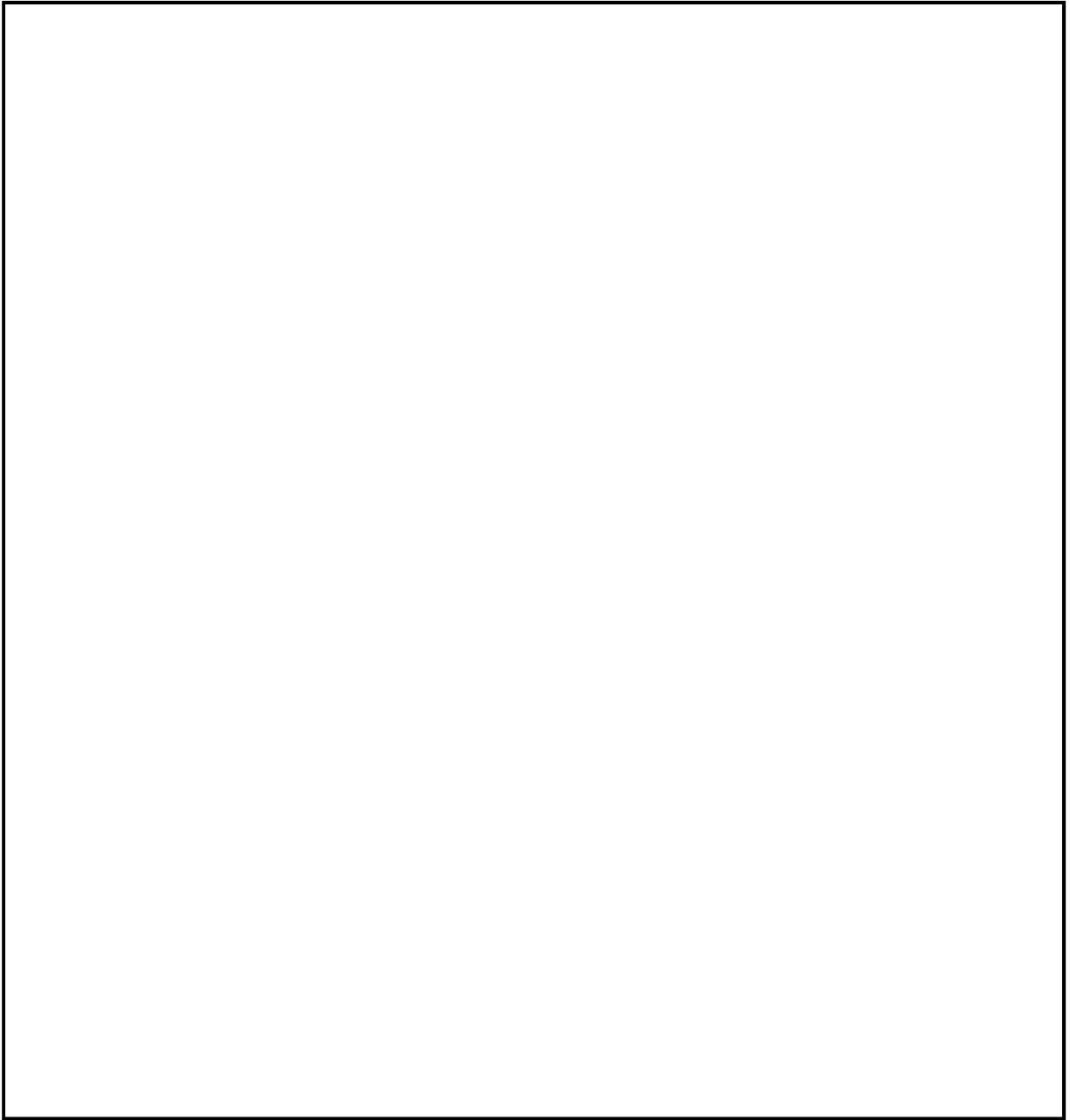
第3表 水源と移送先の静水頭差（手順①）

	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。

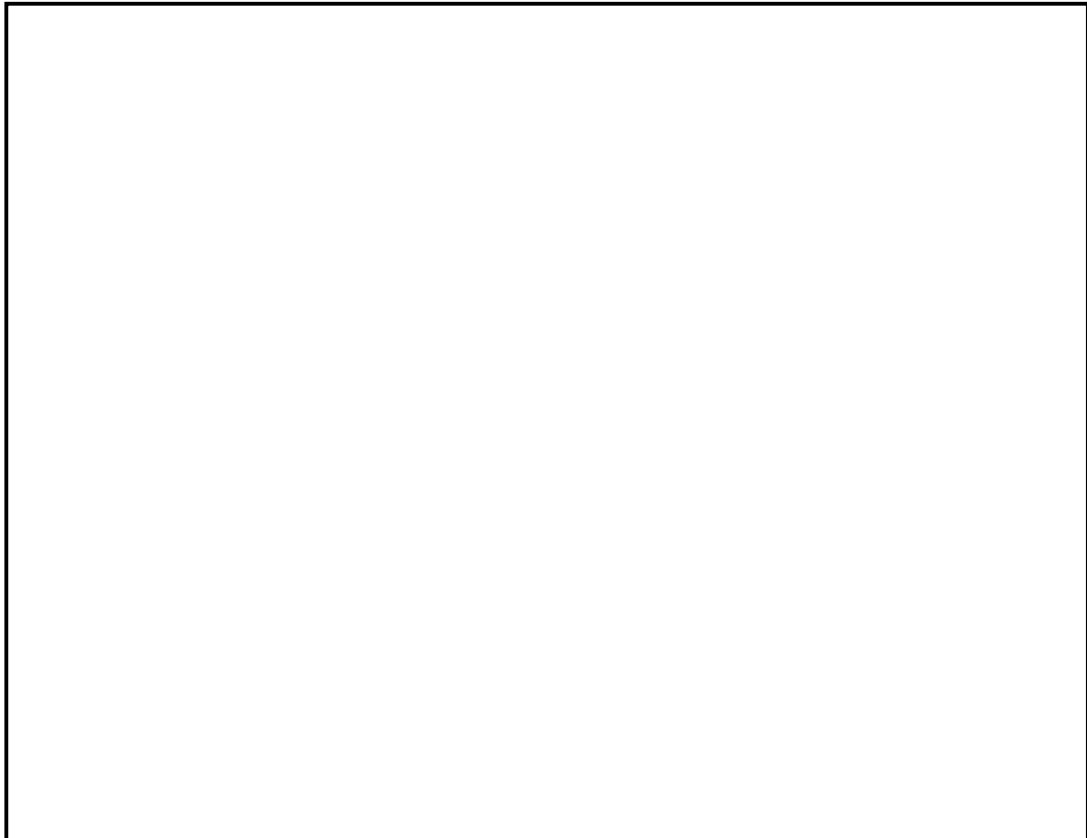


第3図 燃料取替用水ポンプを用いたSFPへの注水における具体的実施手順
(高浜発電所1号機 事故時操作所則抜粋)

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

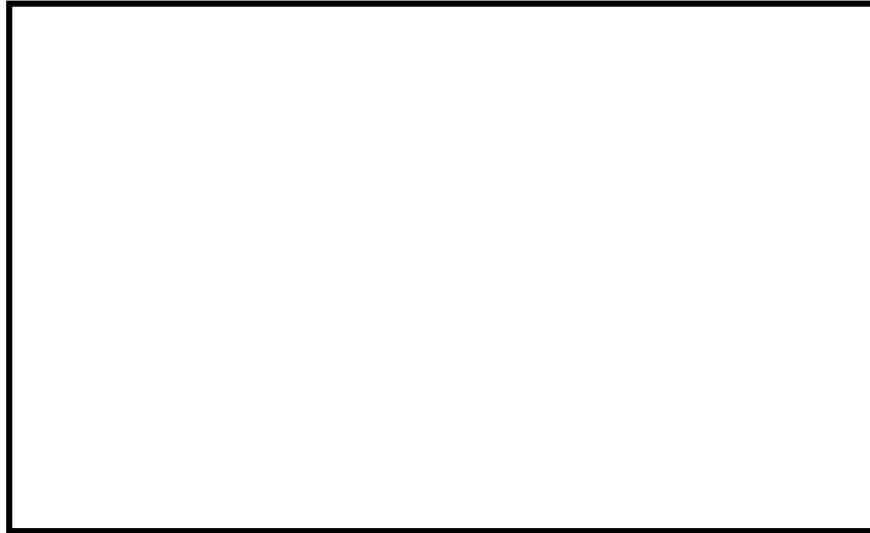


第5図 系統上オリフィスの概要

・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 $21\text{m}^3/\text{h}$ 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。

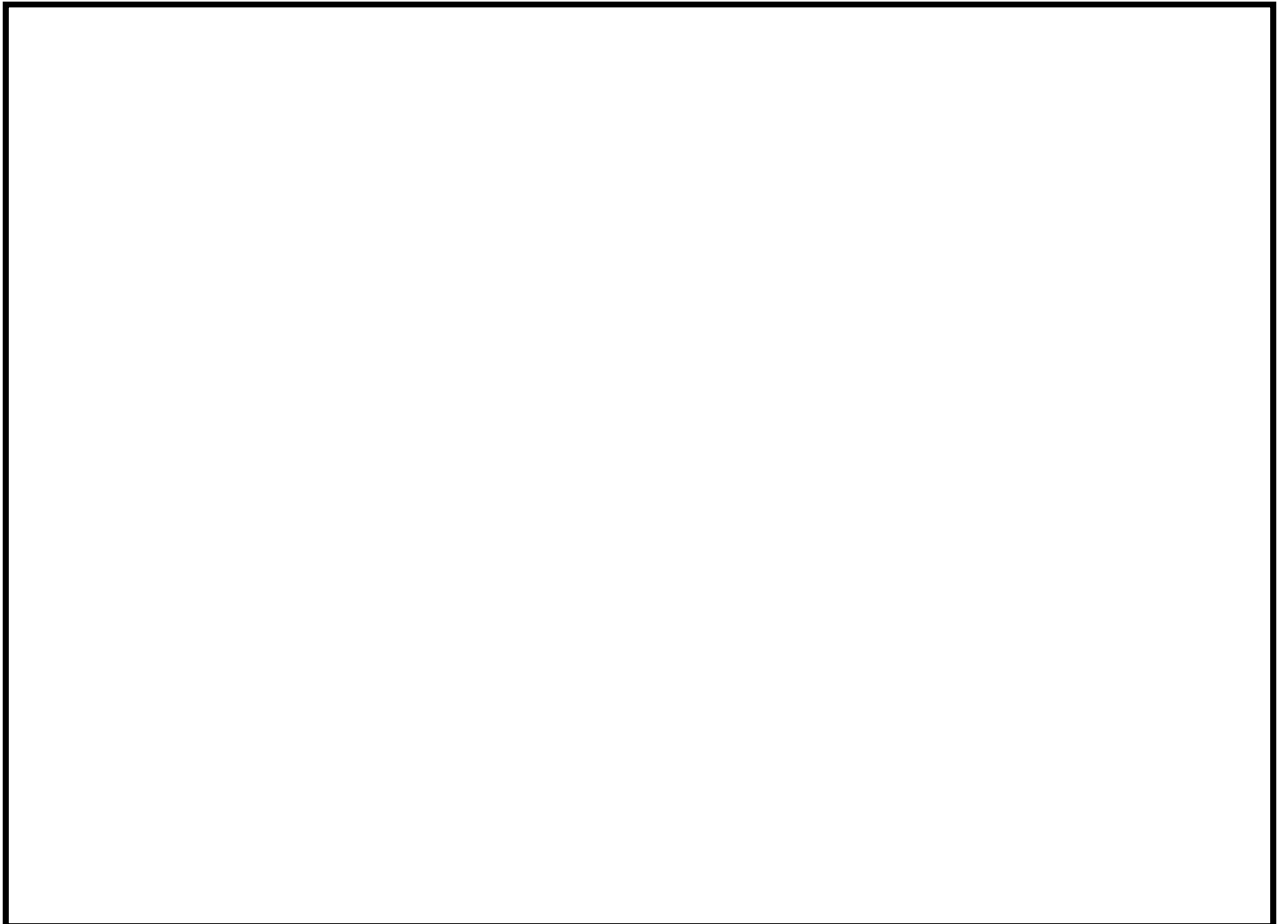
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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

(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通水実績がある手順であるため、通水時の実測値を使用する。実測値は第7図に示す通り、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。

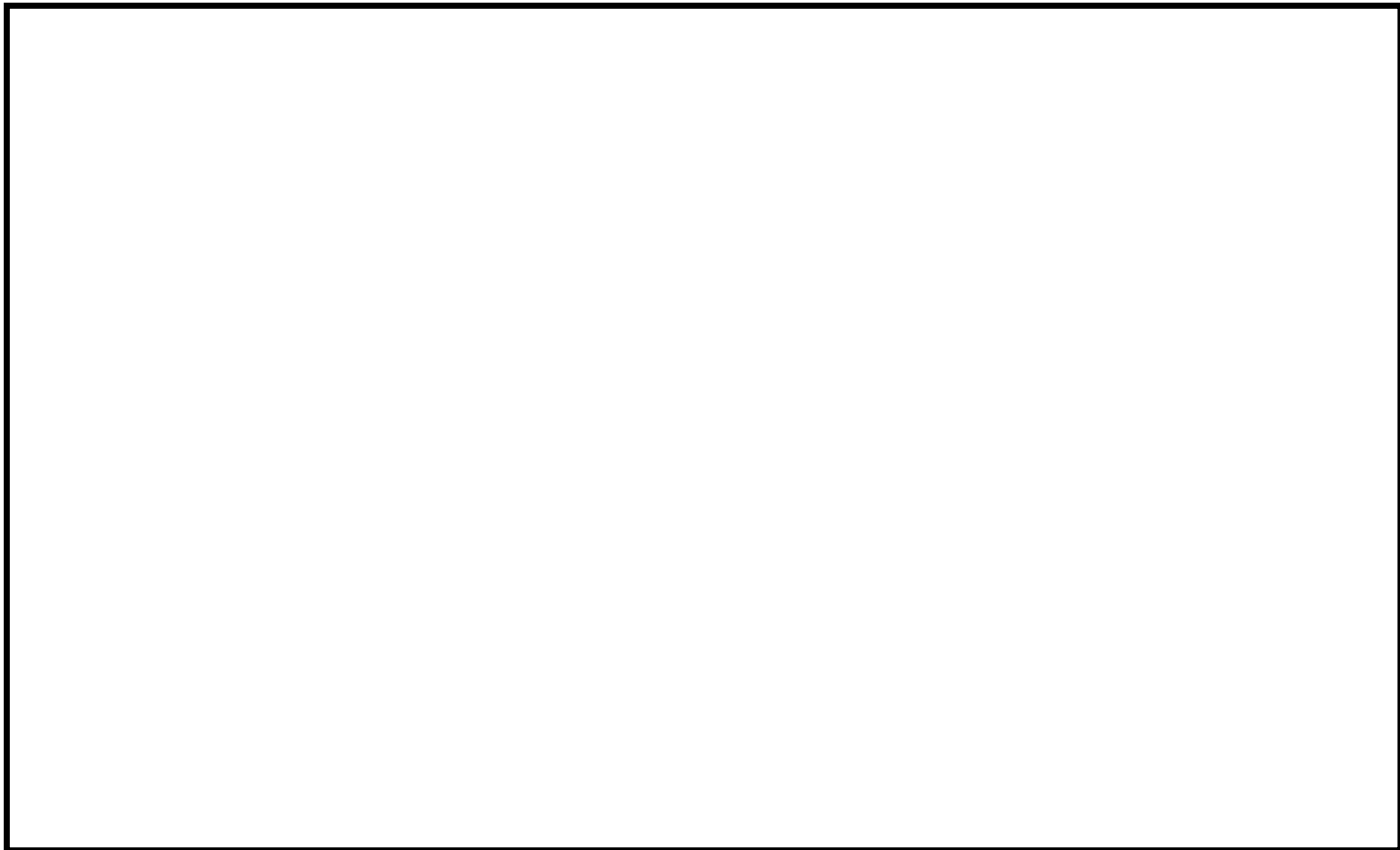


第7図 2次系純水ポンプ 流量出典（水張ライン使用時の実測値）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(3) 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通水実績がある手順であるため、通水時の実測値を使用する。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。



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	—

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

また圧損計算に使用した系統情報を第5表に示す。なおホース敷設長さは、高浜1号および2号炉それぞれへの敷設ルートの最短ルート（1号炉東側シャッターからの敷設ルート）の長さとした。

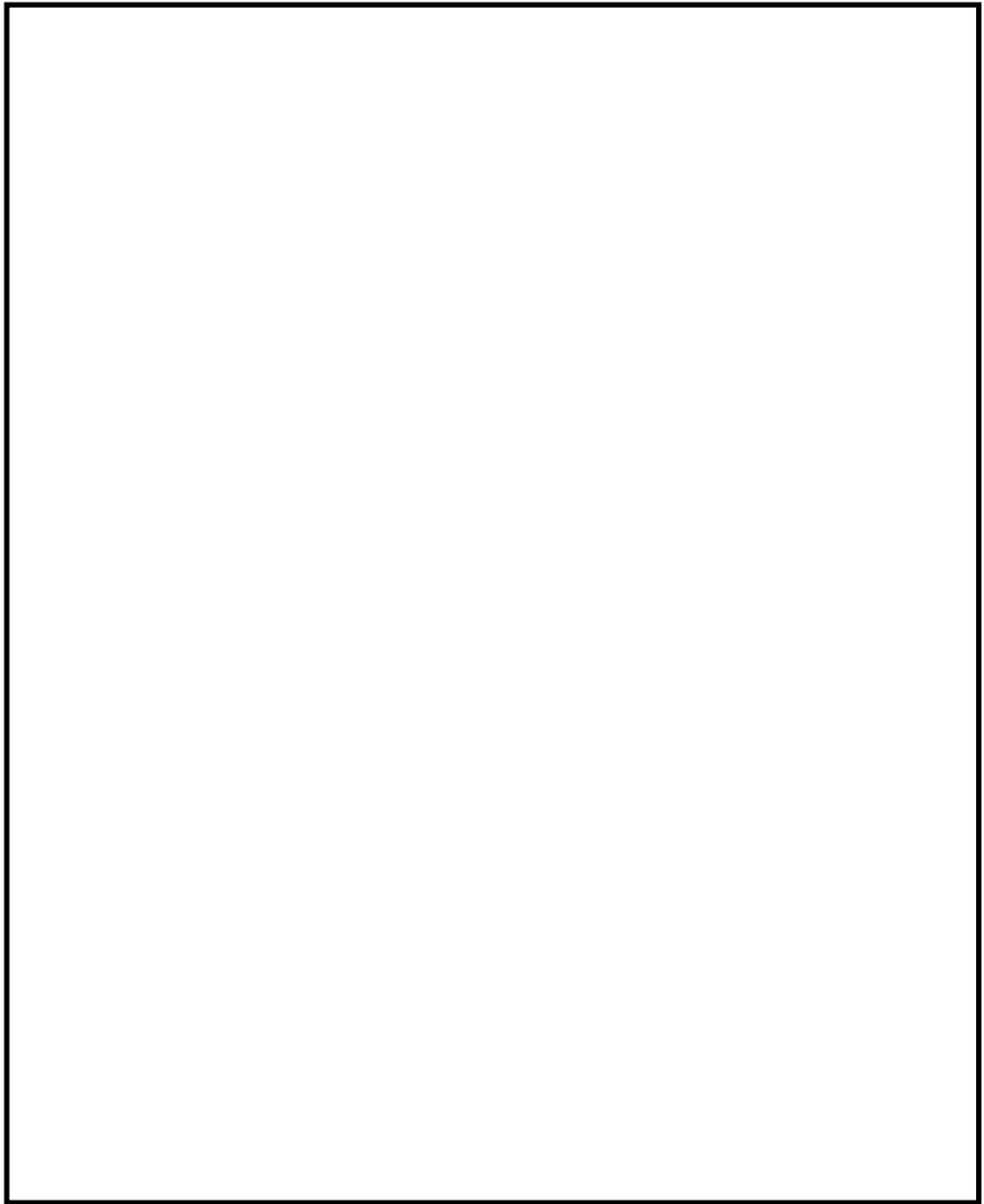
第5表 系統内配管情報

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、恒設設備を使用し通水実績が無い手順であるため、圧損揚程曲線を策定のうえ流量を評価する。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。

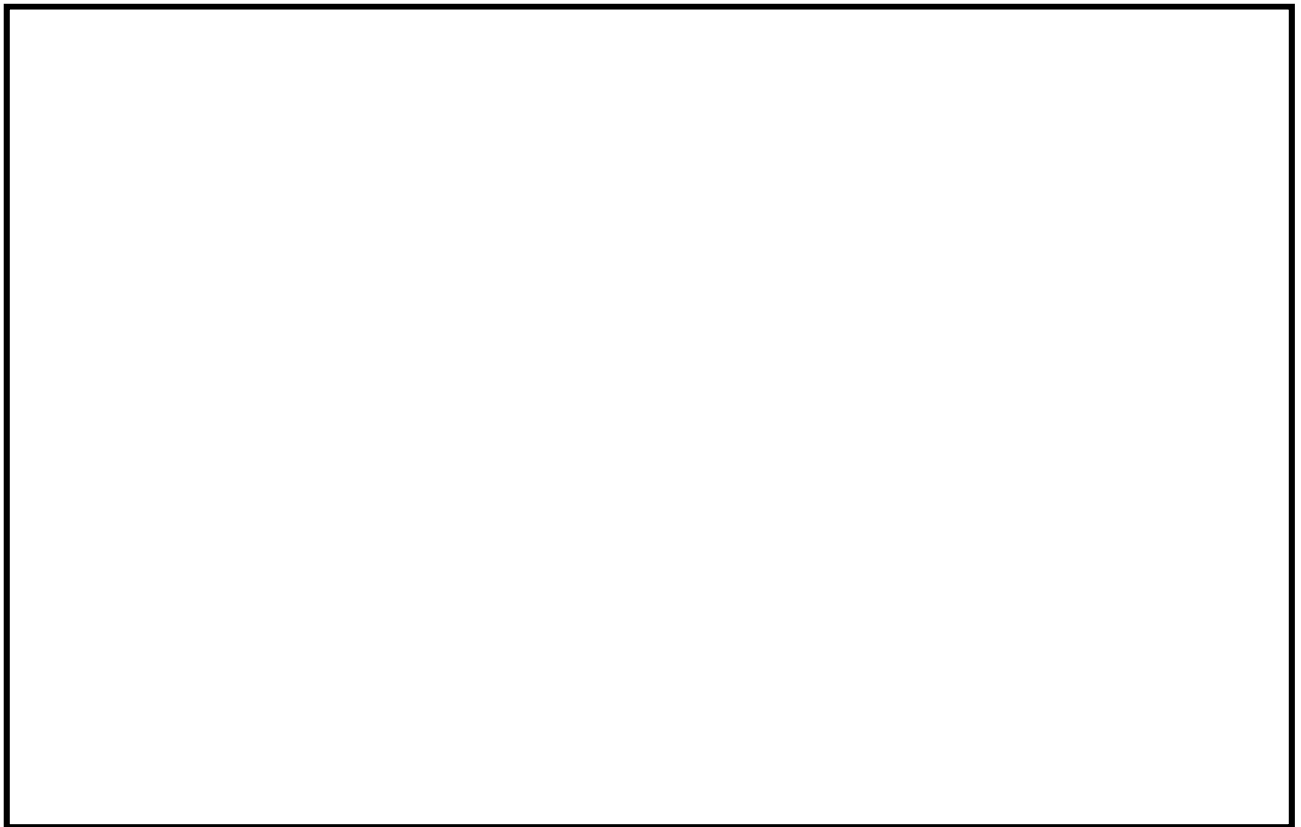
第6表 水源と移送先の静水頭差（手順⑤）

	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

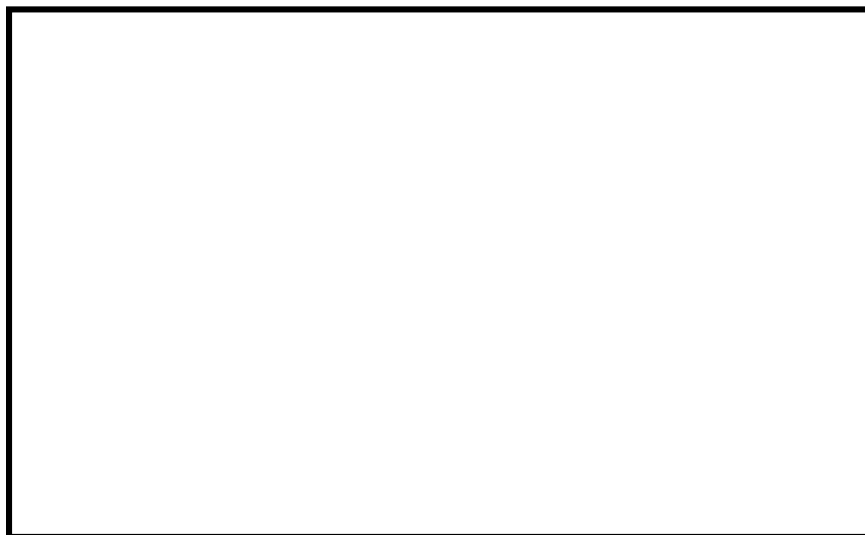


第11図 1次系純水ポンプを用いて SFP へ注水する際の系統構成概要

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。

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

第7表 水源と移送先の静水頭差（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8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。

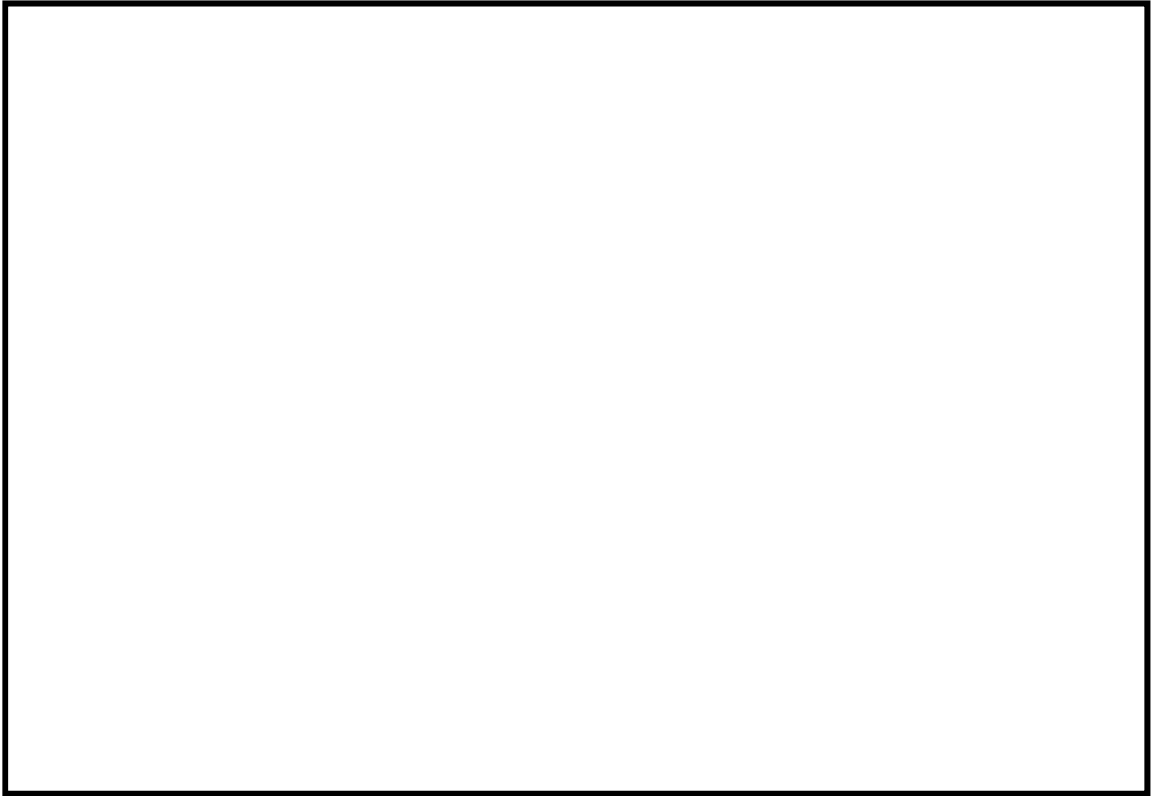
第8表 系統内配管情報（注水手順⑥）

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。

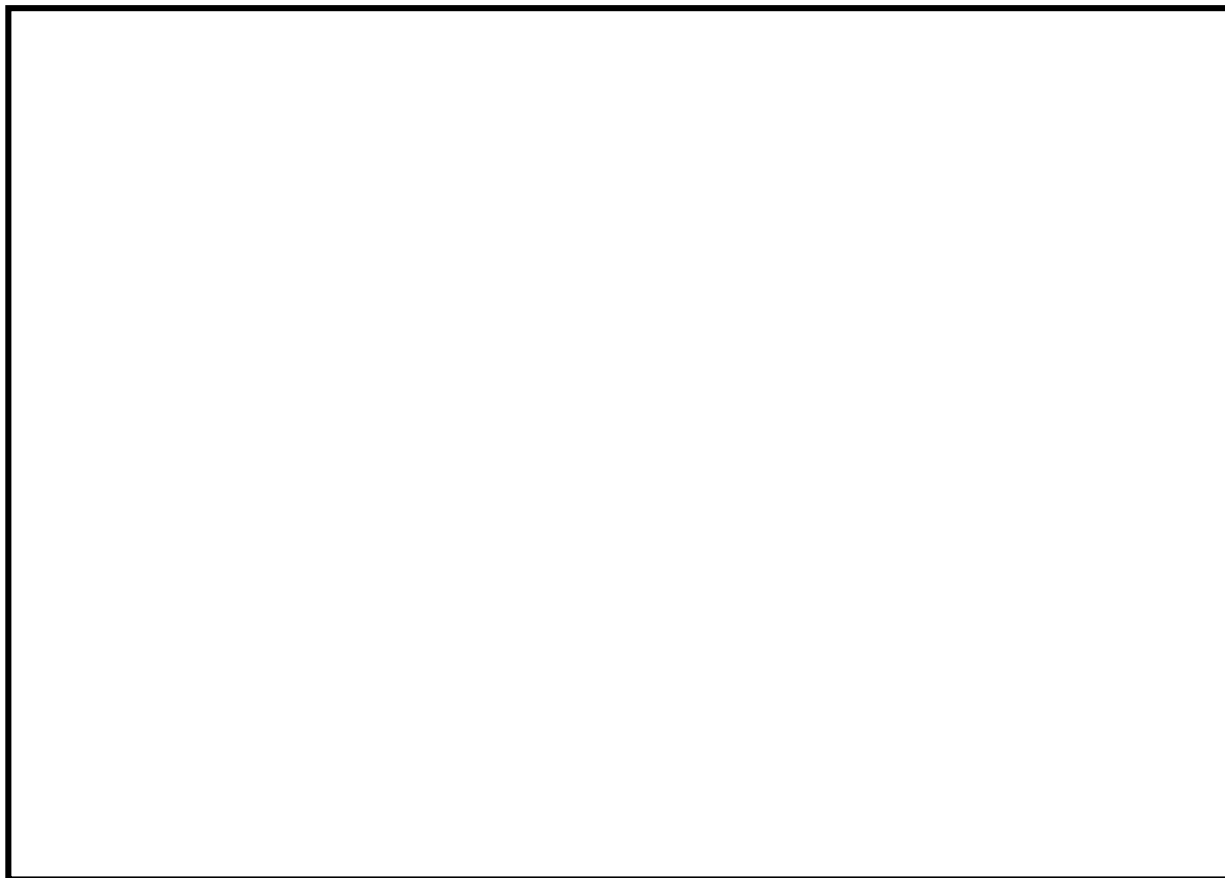


第 13 図 送水車 流量出典

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。

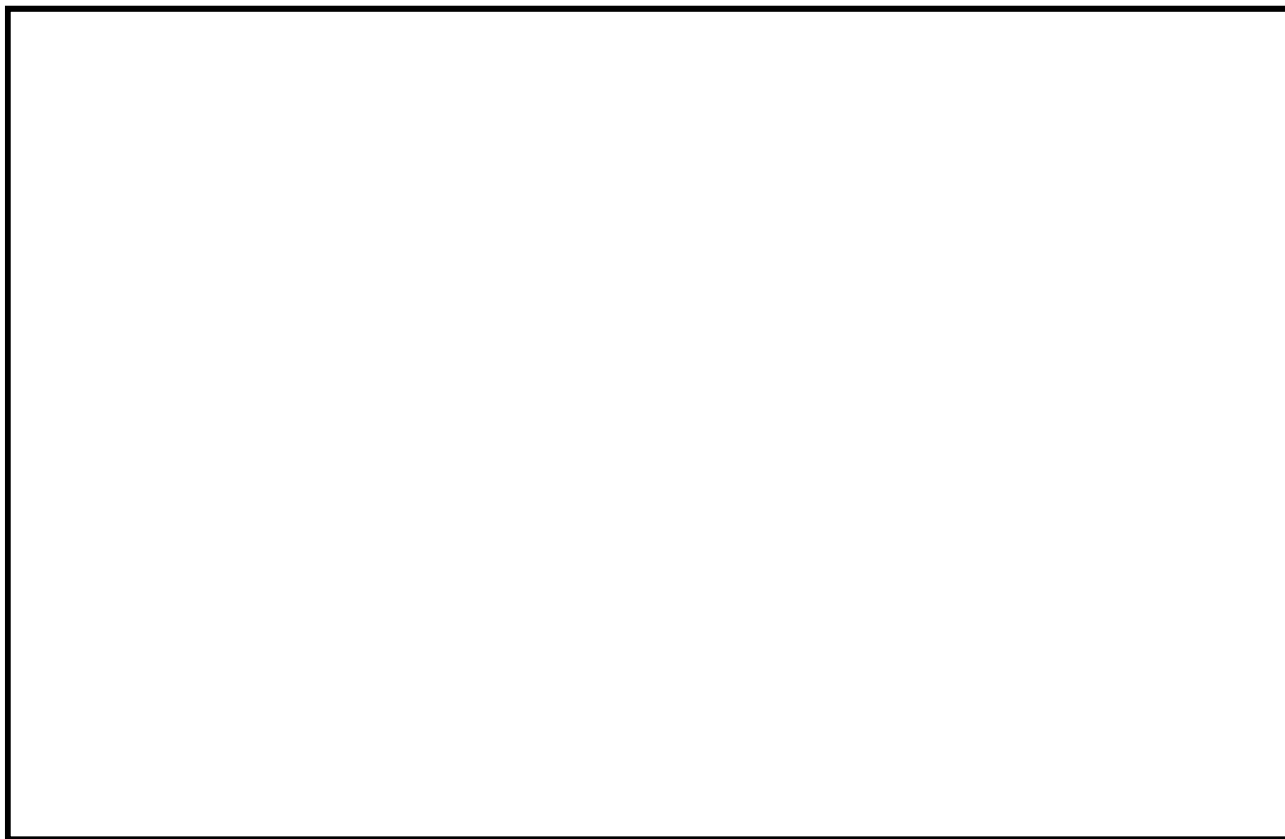
具体的には、高浜発電所に配備されている大容量ポンプ（放水砲用）の型式はそれぞれ第9表に示す3種類があり、各型式の流量最大値は第15-1～3図に示す通りそれぞれ \square m³/h（型式：HS900）、 \square m³/h（型式：HS900N）、 \square m³/h（型式：HS1200）である。これらを直列に2台接続する場合の最大送水量は \square m³/h（HS900およびHS1200を用いる場合に送水量が最大となる。送水量は、ポンプを2台直列に接続する運用であることから容量の低い方のポンプと同値になる。）となることから、放水砲からの流量は \square m³/hを2等分した \square m³/hとなる。

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

第9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		

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。

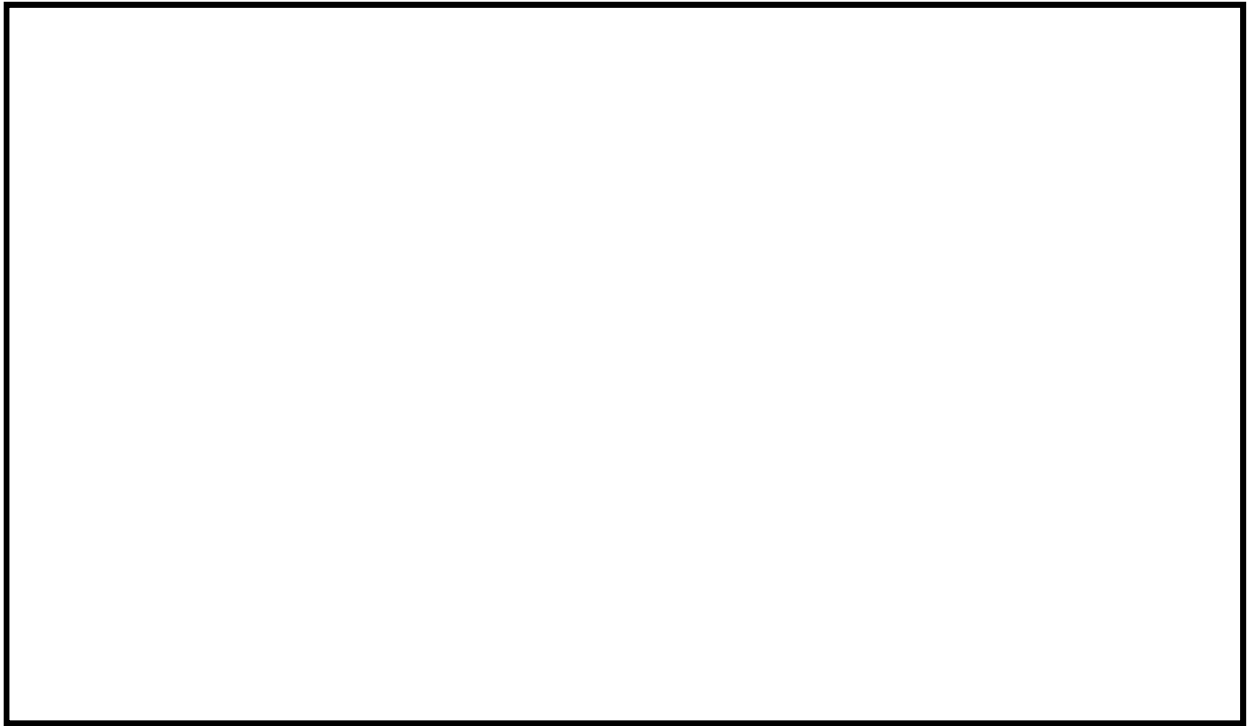


第 15-1 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS900）



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

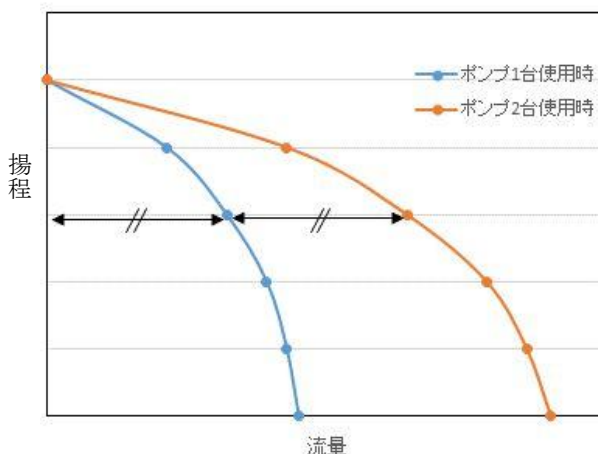
不確かさを考慮した条件の設定に際しては、重大事故等への対応に向け整備された手順に示される具体的記載事項を踏まえ、以下の考え方に基づき設定する。

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台での通水実績がある手順については、流量増加に伴う配管圧損増加の影響を無視する保守的な設定として、ポンプ1台での通水実績（基本ケース条件）にポンプの系統内設置台数を乗じることで算出する。



第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）

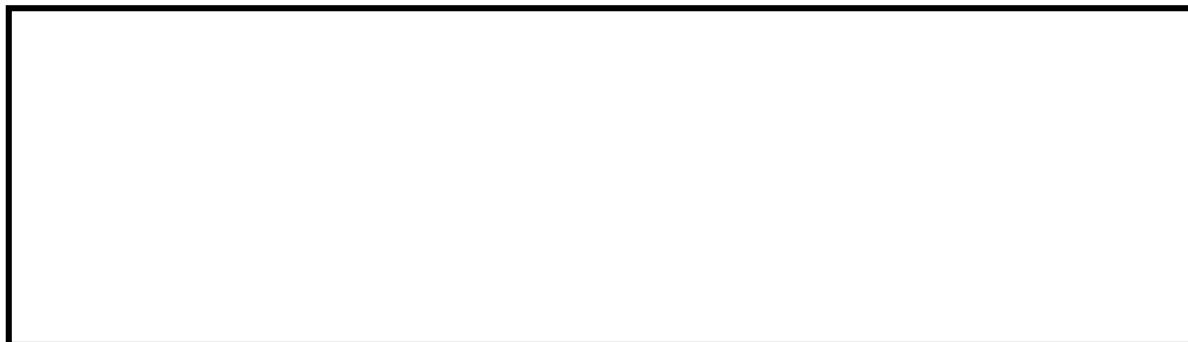
c. 放水砲の運用

放水砲は、故意による大型航空機の衝突による大規模な航空機燃料火災が発生した場合の消火活動においても使用し、本対応では、2台直列に繋いだ大容量ポンプ（放水砲用）出口からの分岐はさせず、1台の放水砲へ接続する。よって不確かさを考慮した流量の算出においては、大規模な航空機燃料火災が発生した場合に放水砲より吐出される流量を考慮することとし、それは大容量ポンプ（放水砲用）による流量の全量となる。

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通水実績がある手順であるため、基本ケース条件にポンプ台数を乗じた値として $5\text{m}^3/\text{h} \times 3\text{台} = 15\text{m}^3/\text{h}$ を、不確かさを考慮した条件として使用する。

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

(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。

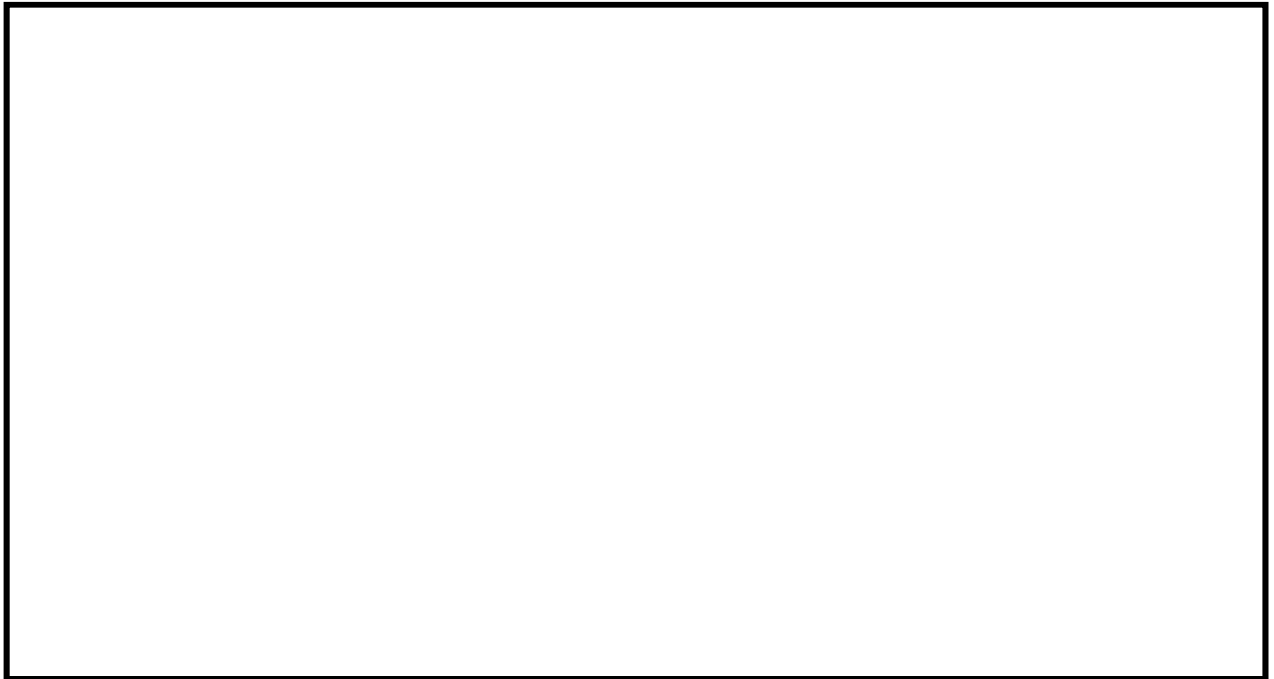
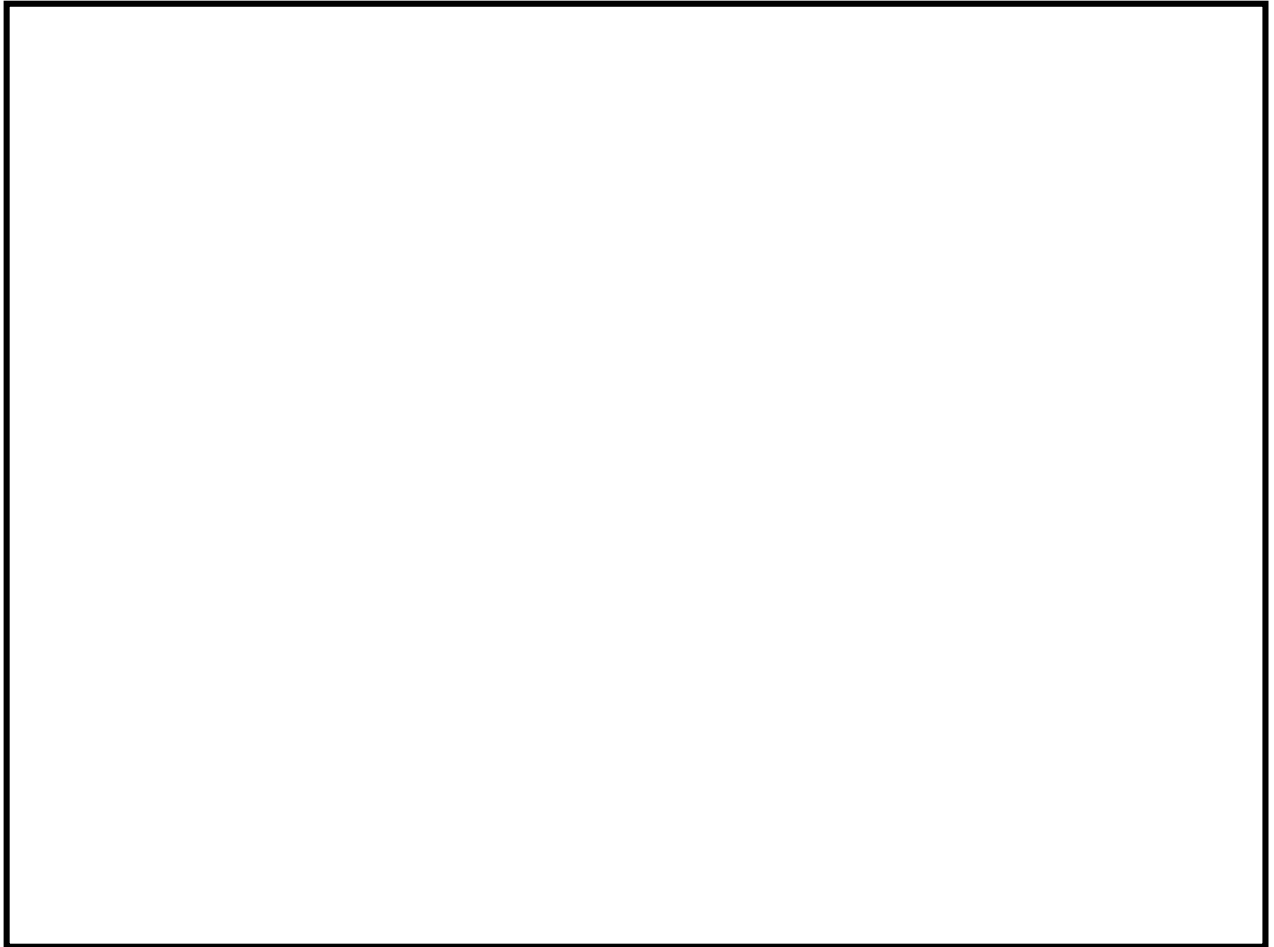
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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10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10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11-1, 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11-1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	—

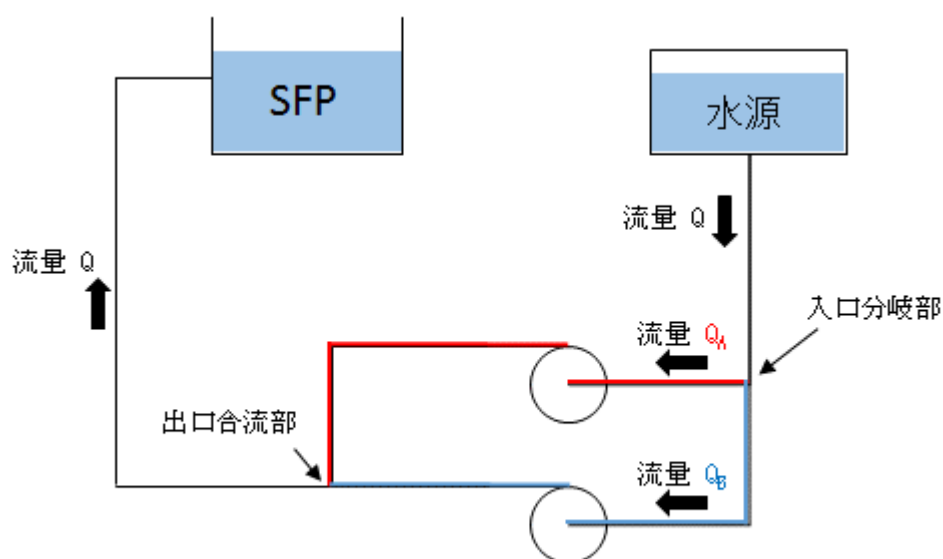
第11-2表 SFPへの放水手順の流量評価結果一覧

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	ポンプ揚程曲線
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。

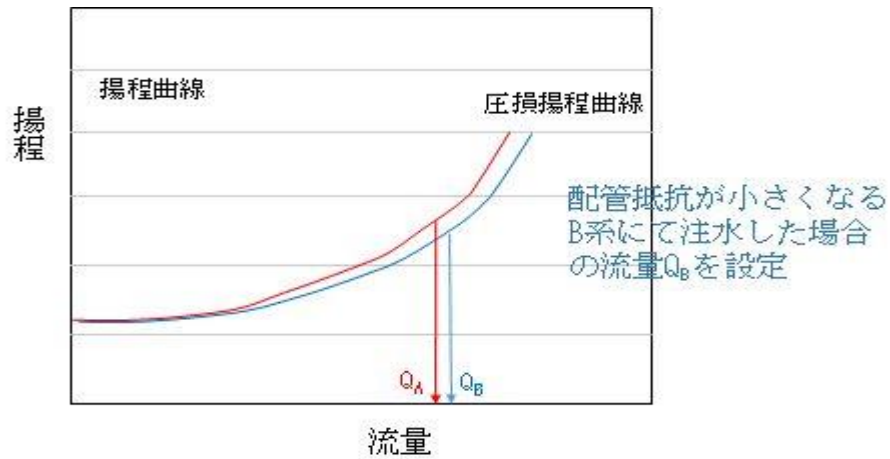


(配管抵抗はA系 > B系 とする。)

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。

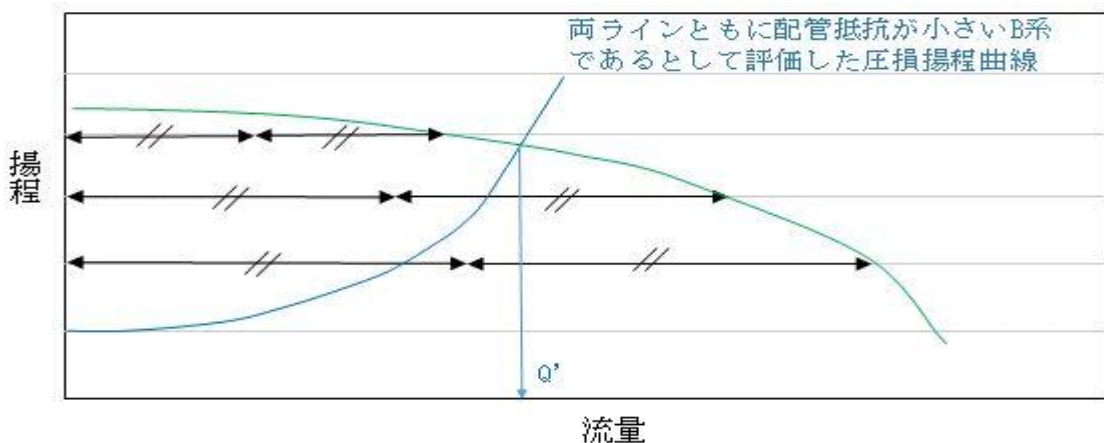


参考図2 基本ケースの流量（ポンプ起動台数は1台）の算出手法概要

【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。



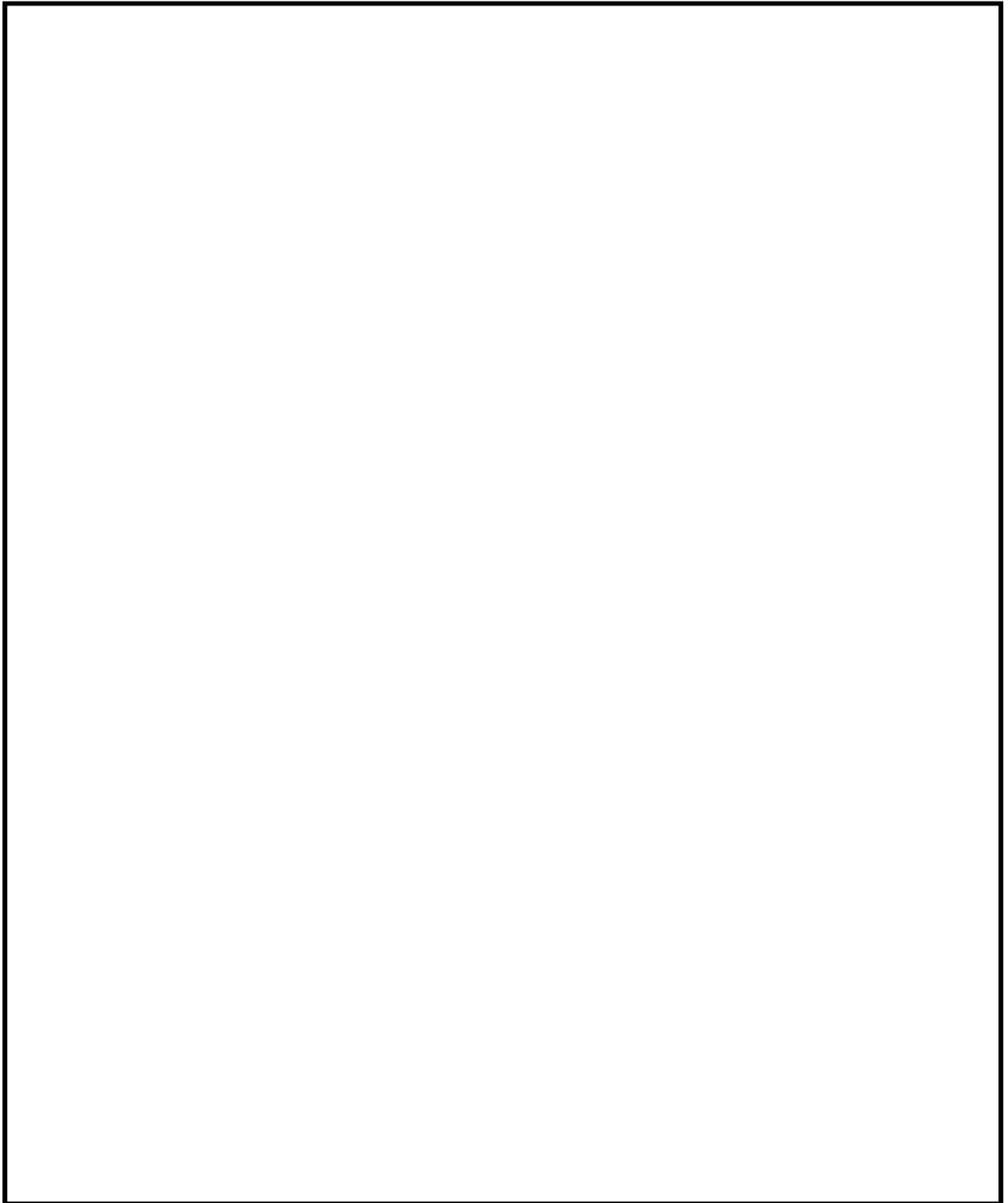
参考図3 不確かさを考慮した流量（ポンプ起動台数は全数）の算出手法概要

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。

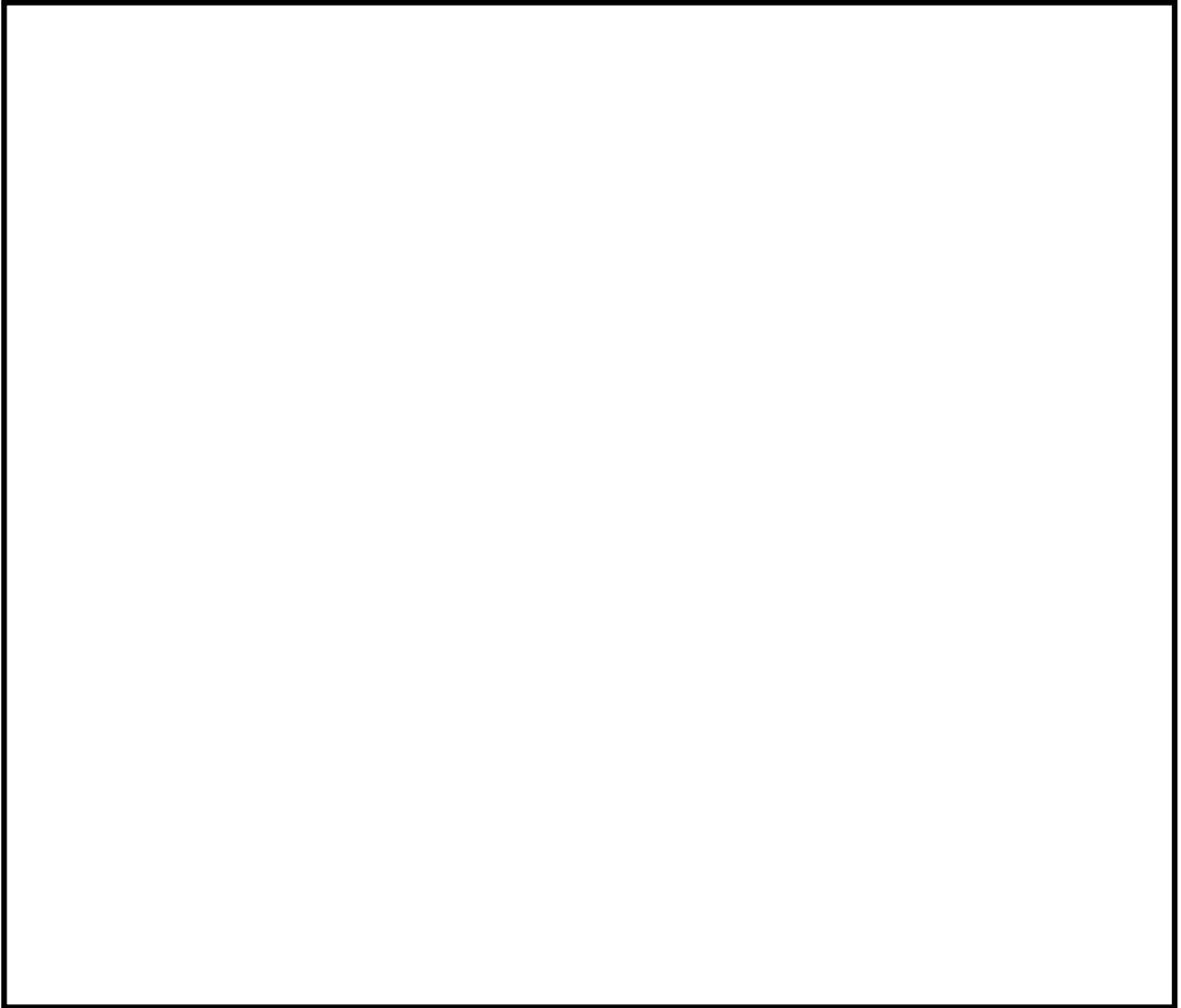
(参考2) 事故時等対応に向けSFPへの注水および放水手順を整備した社内標準

【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）

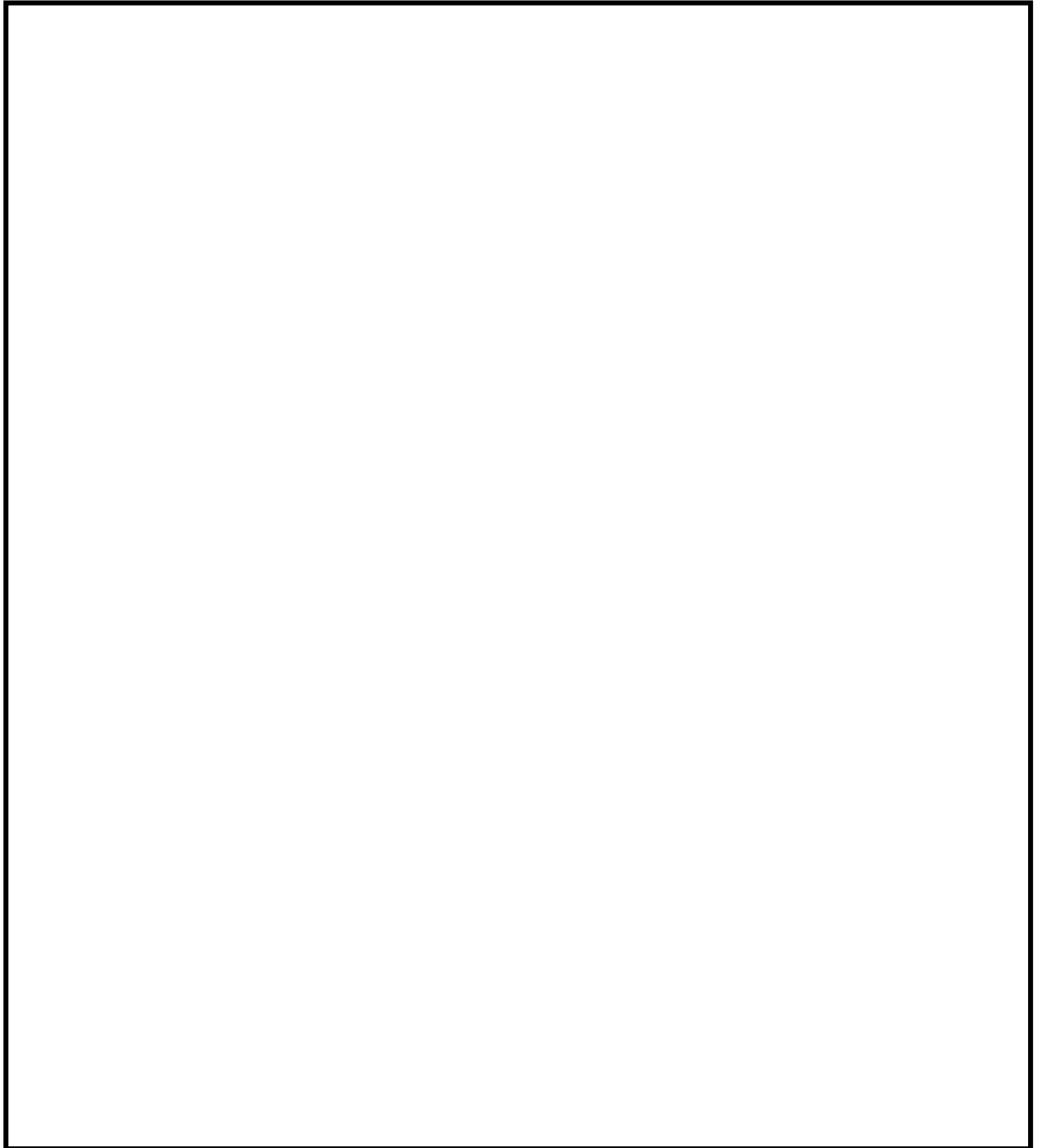
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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。

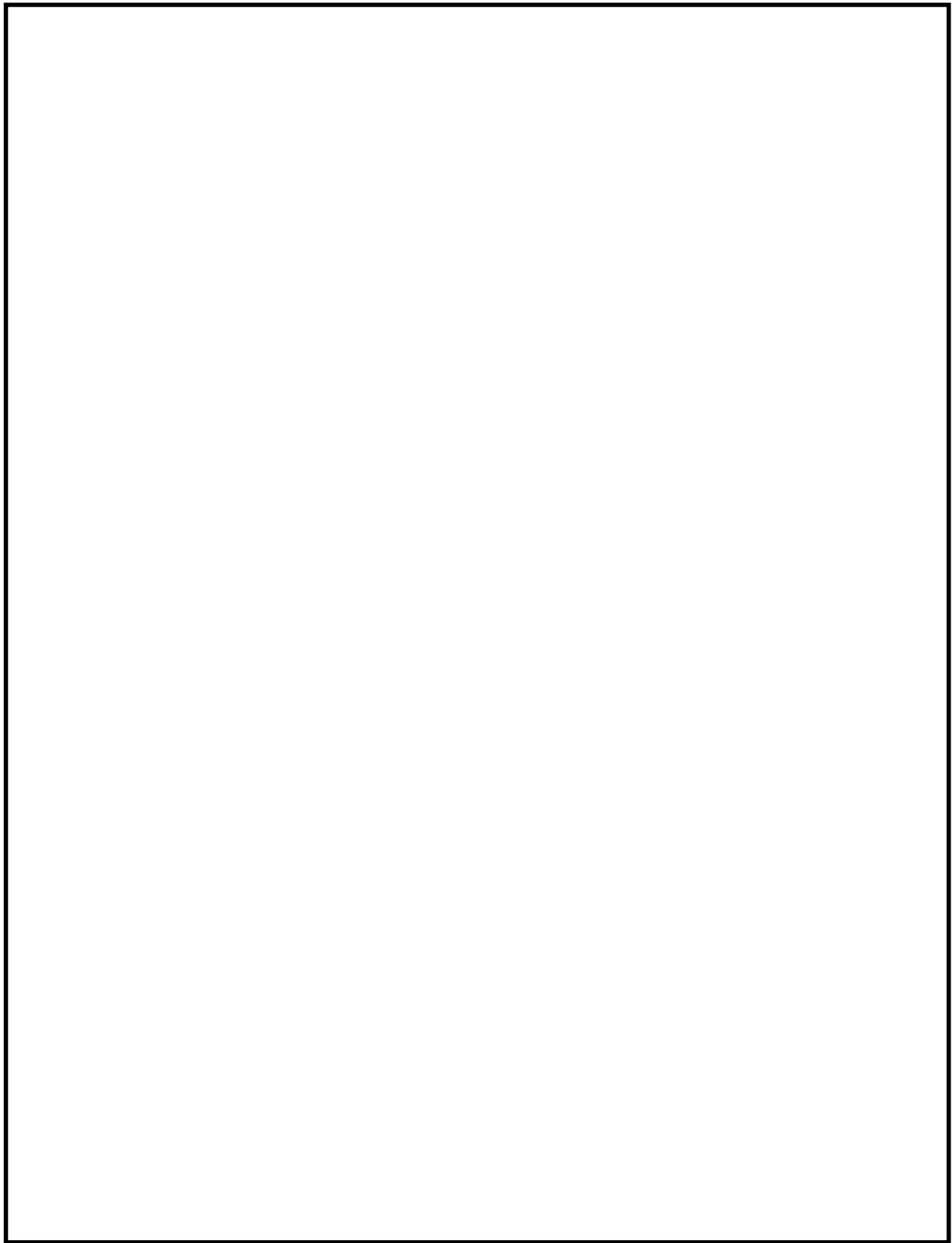
【2次系純水タンク（2次系純水ポンプ使用）からの注水（注水手順②）】



高浜発電所1号機 事故時操作所則（抜粋）

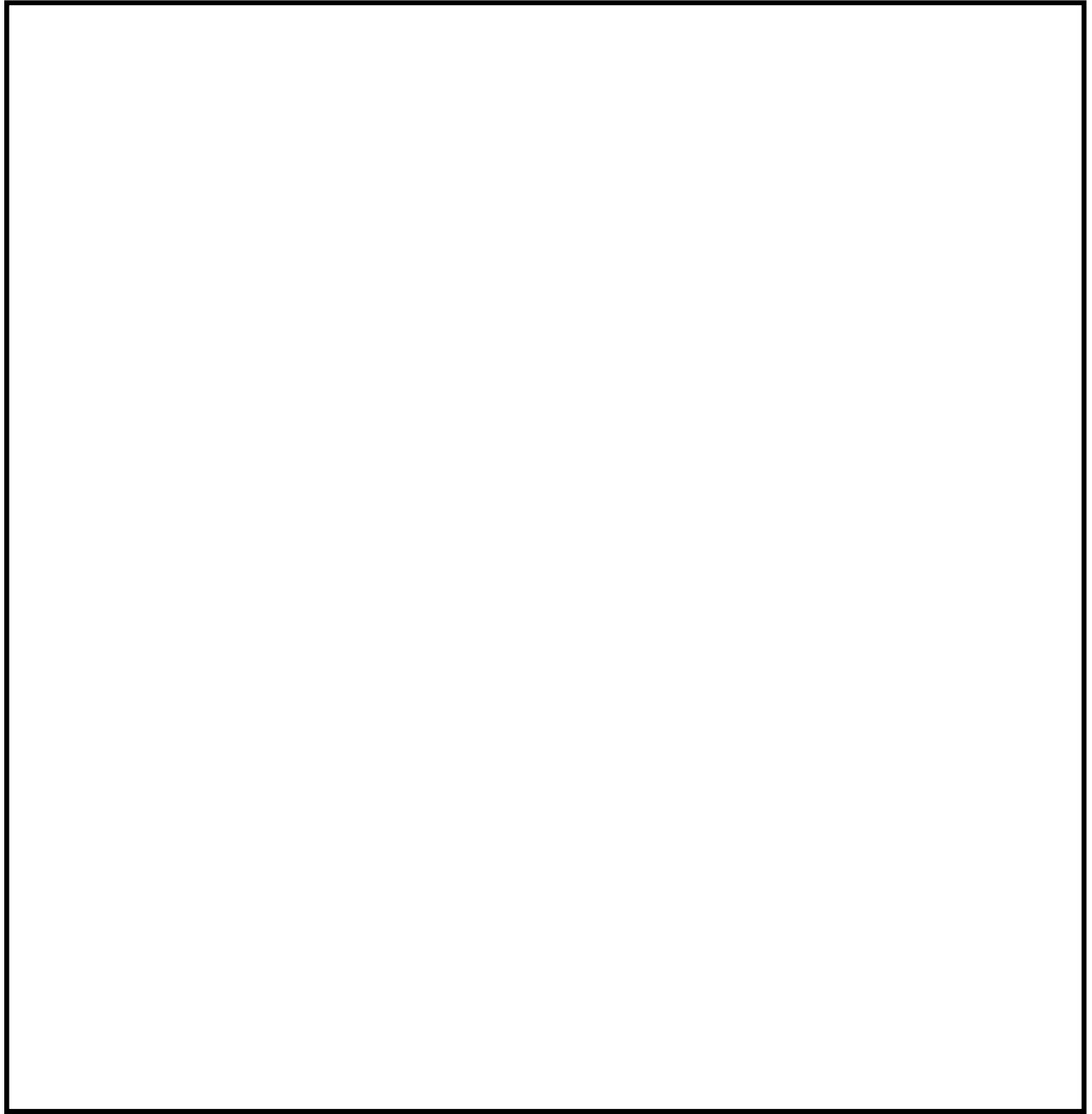
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【1,2号淡水タンクからの注水（注水手順③）】



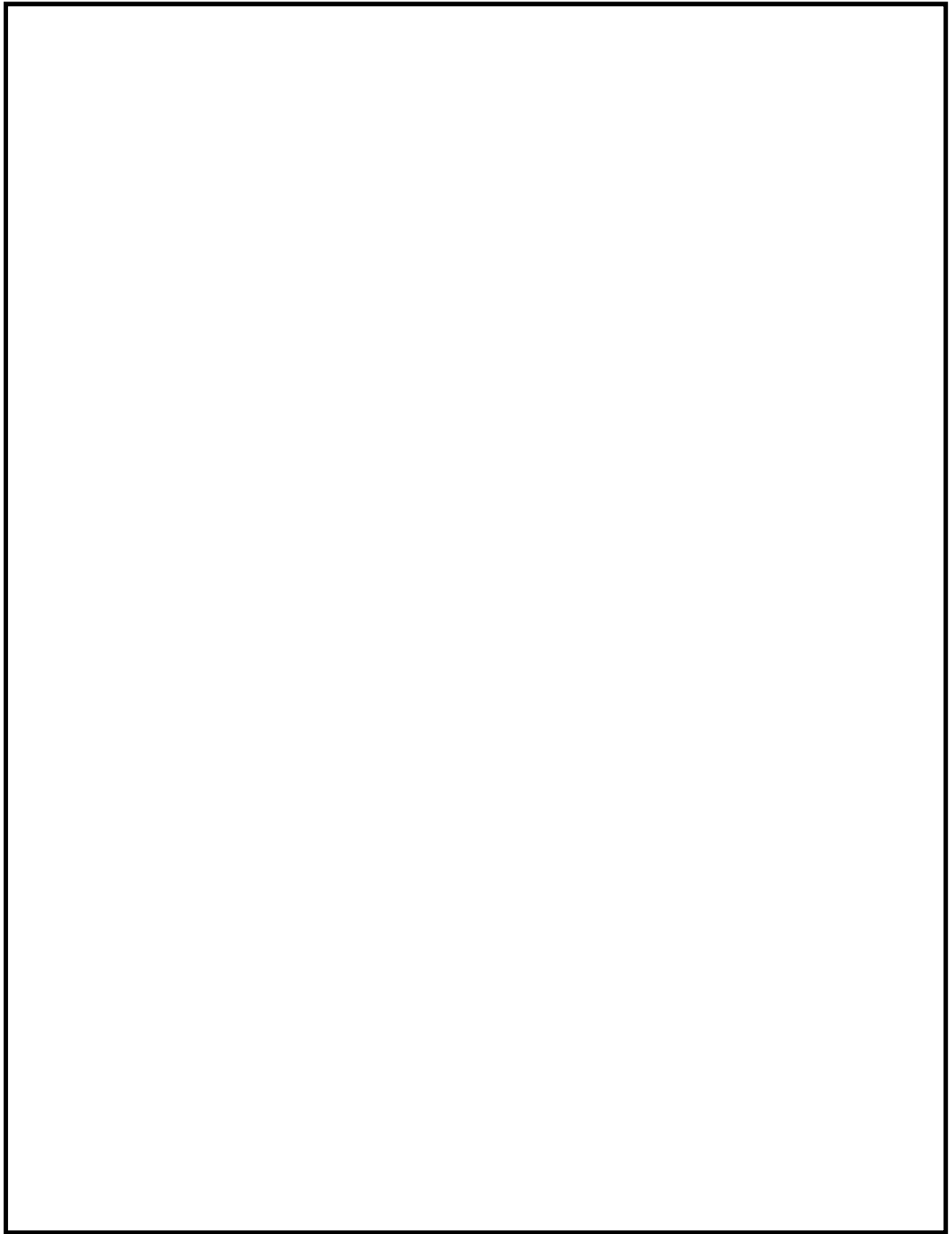
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



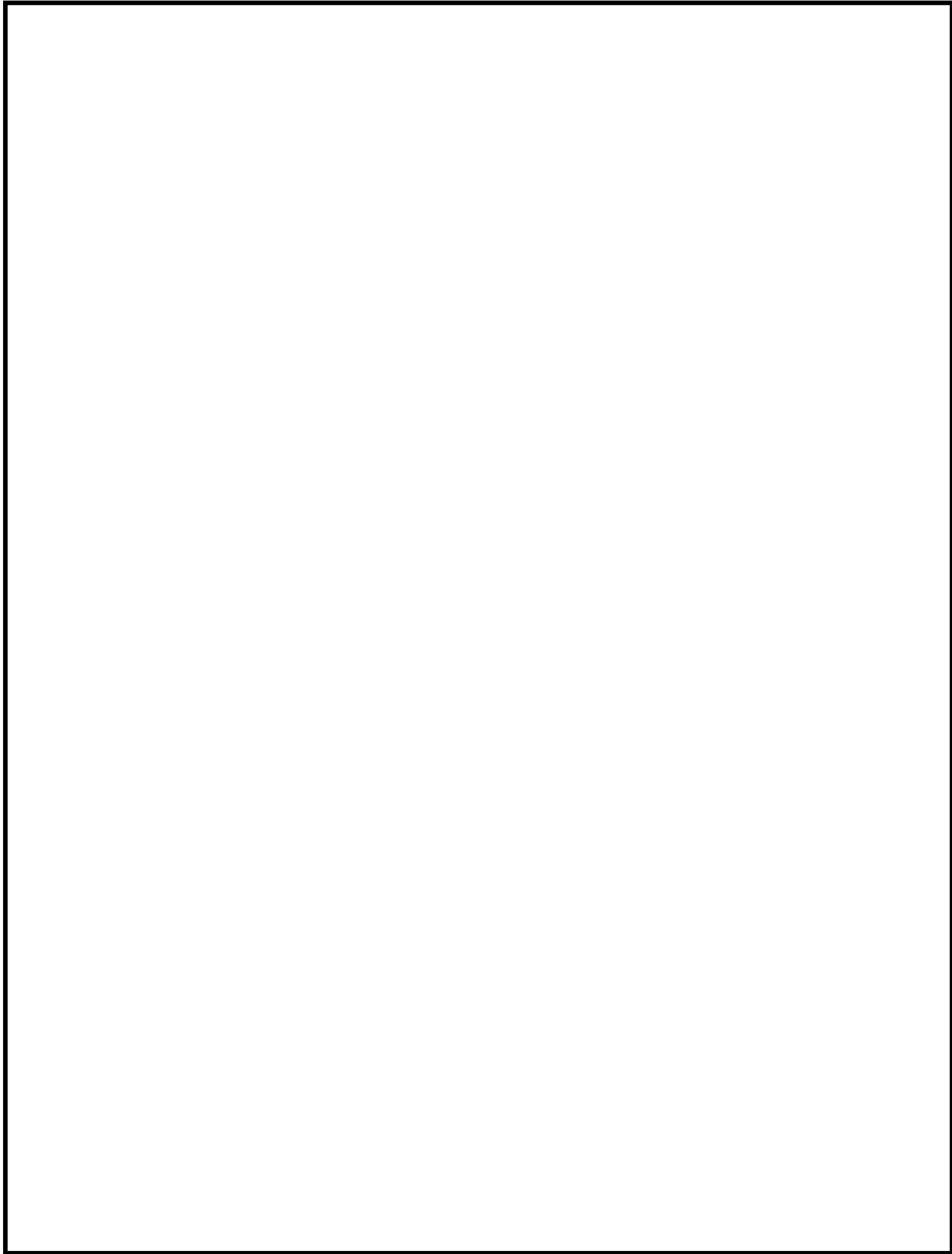
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



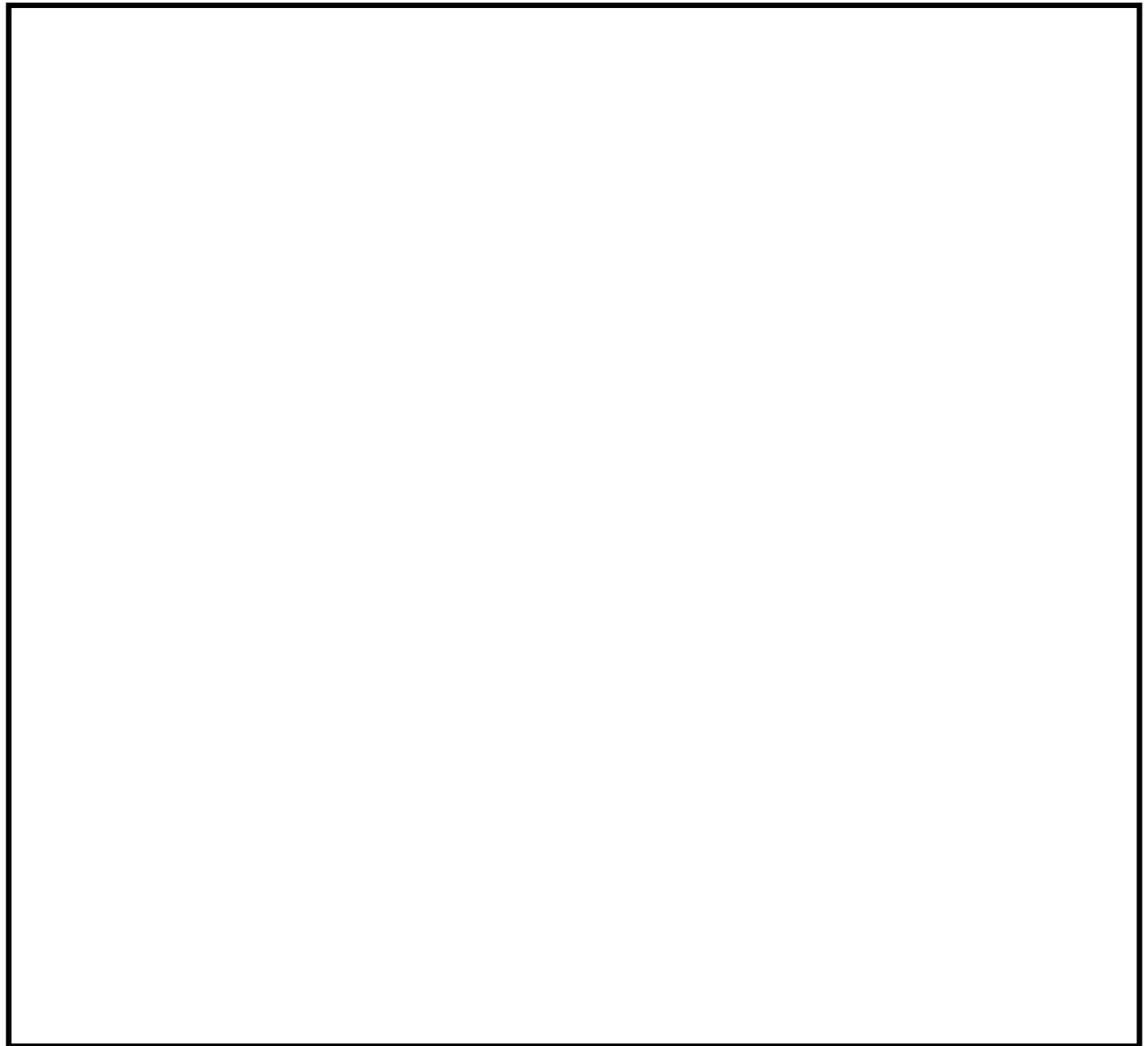
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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）

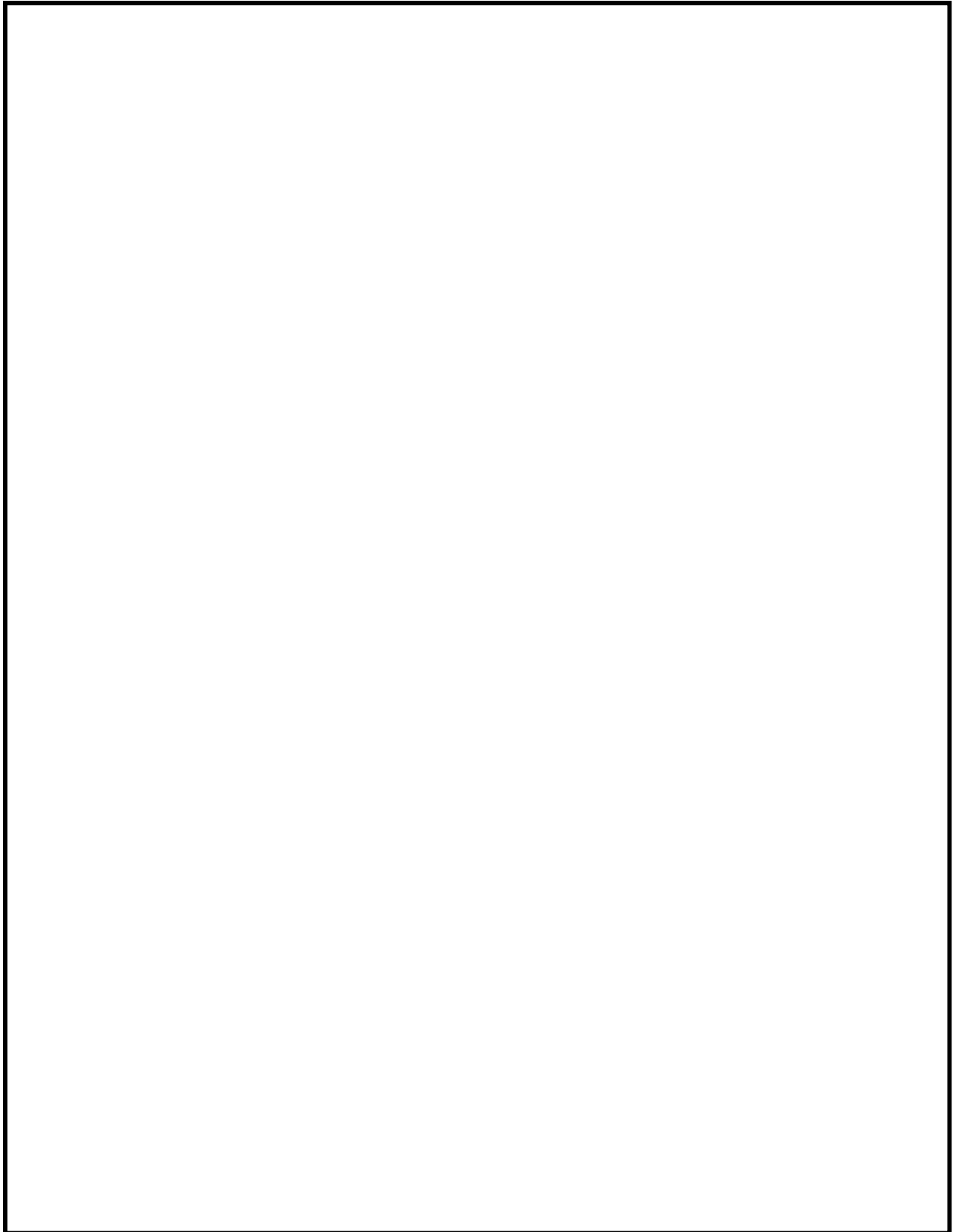
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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）

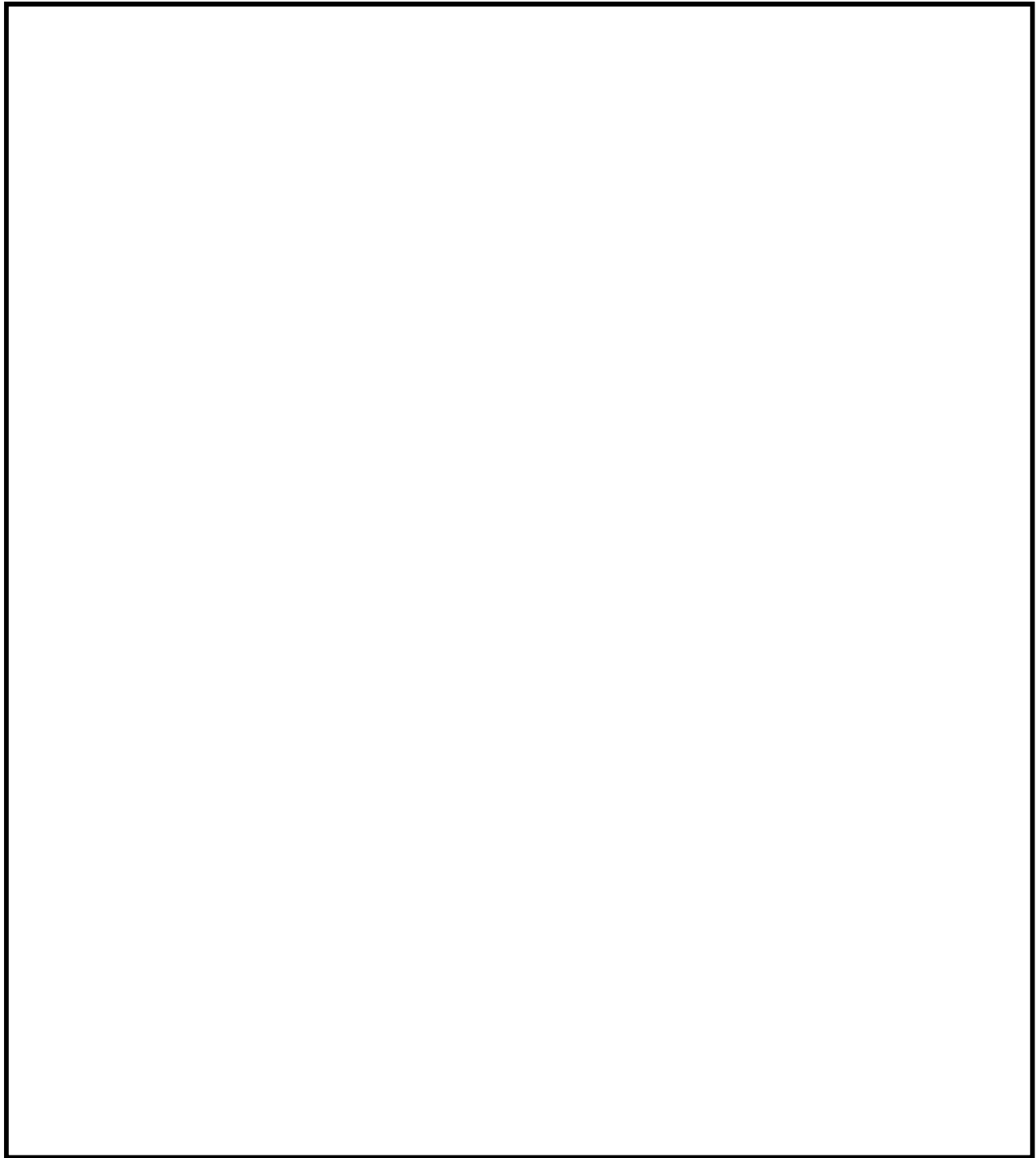
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【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）】



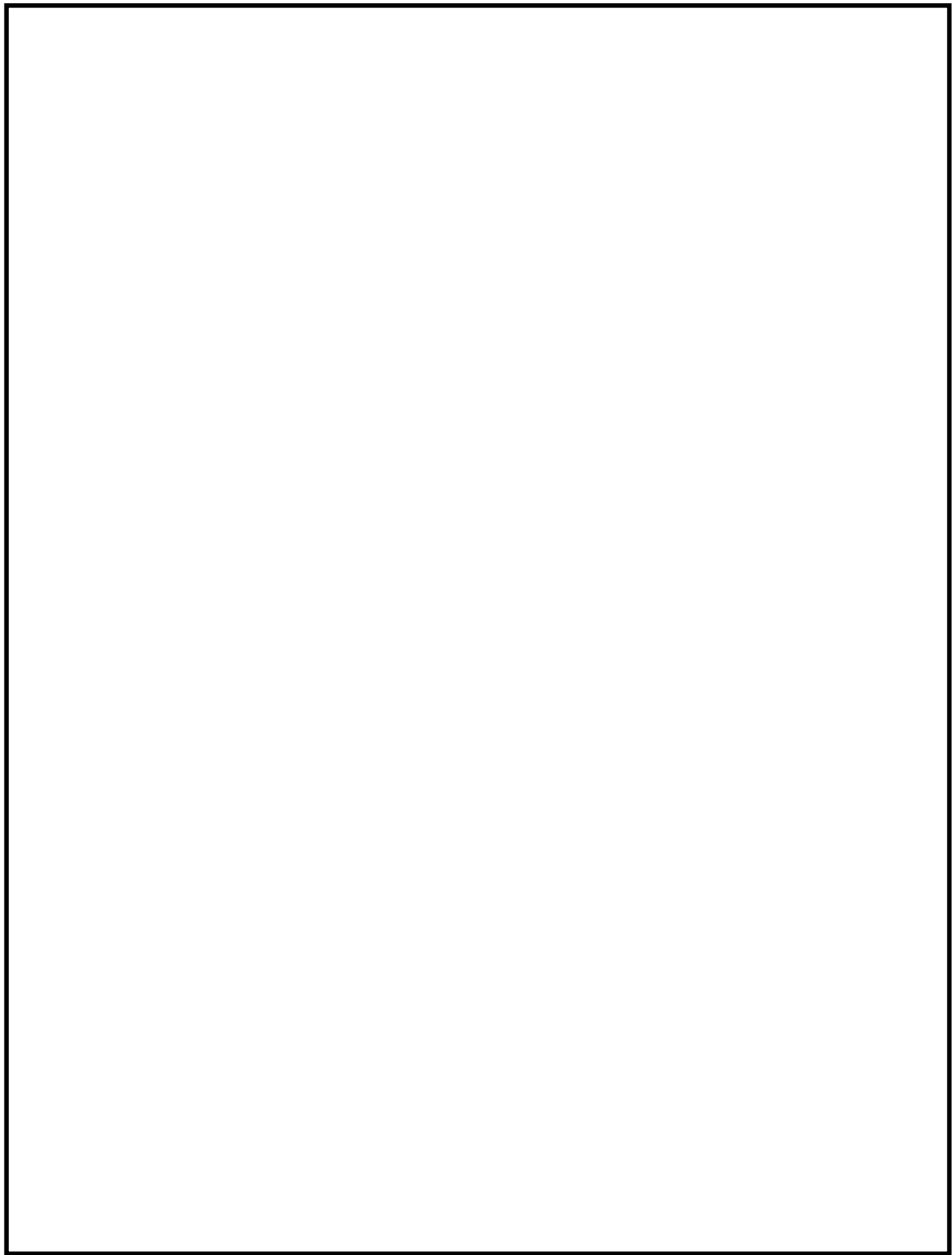
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



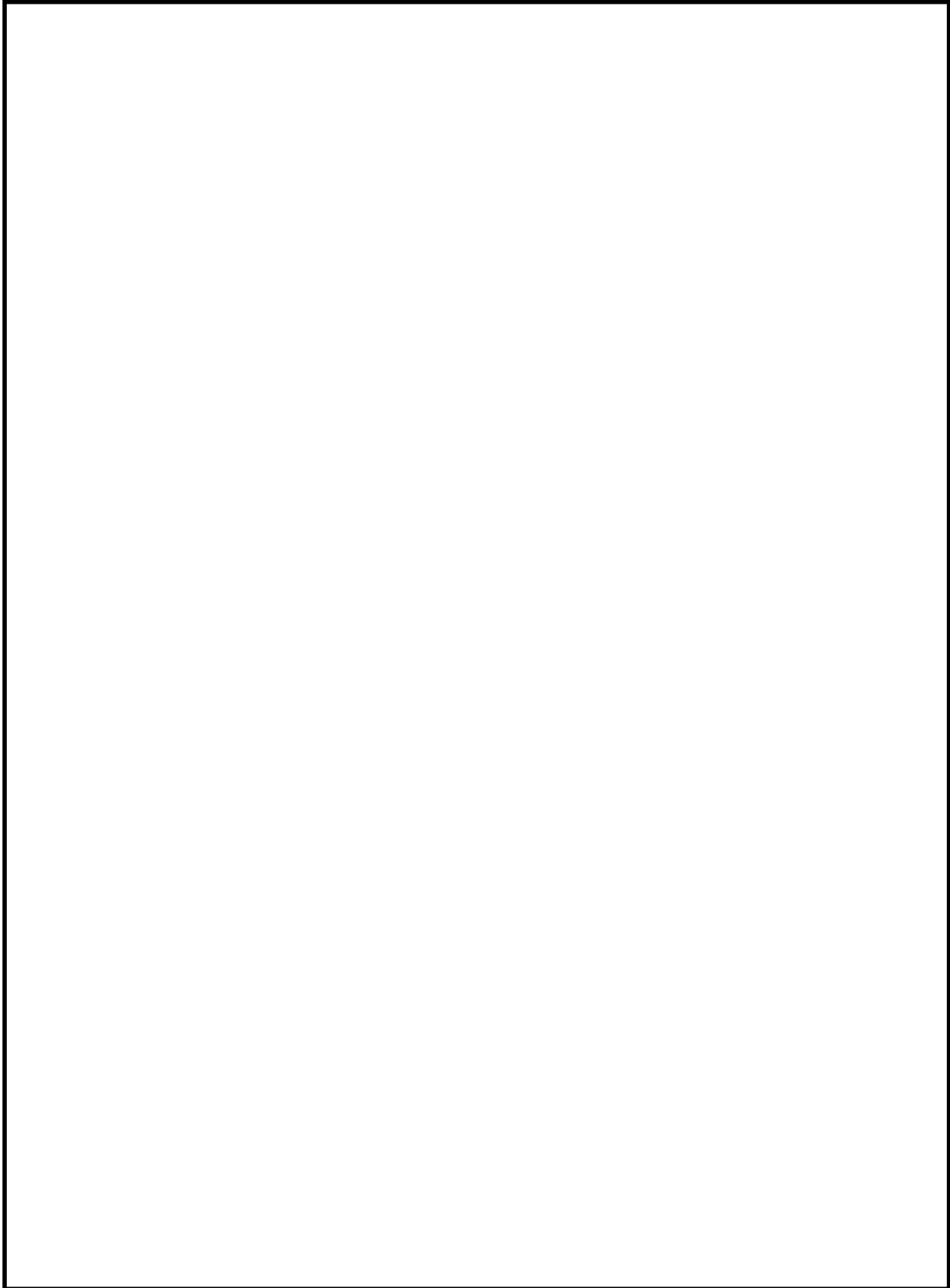
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



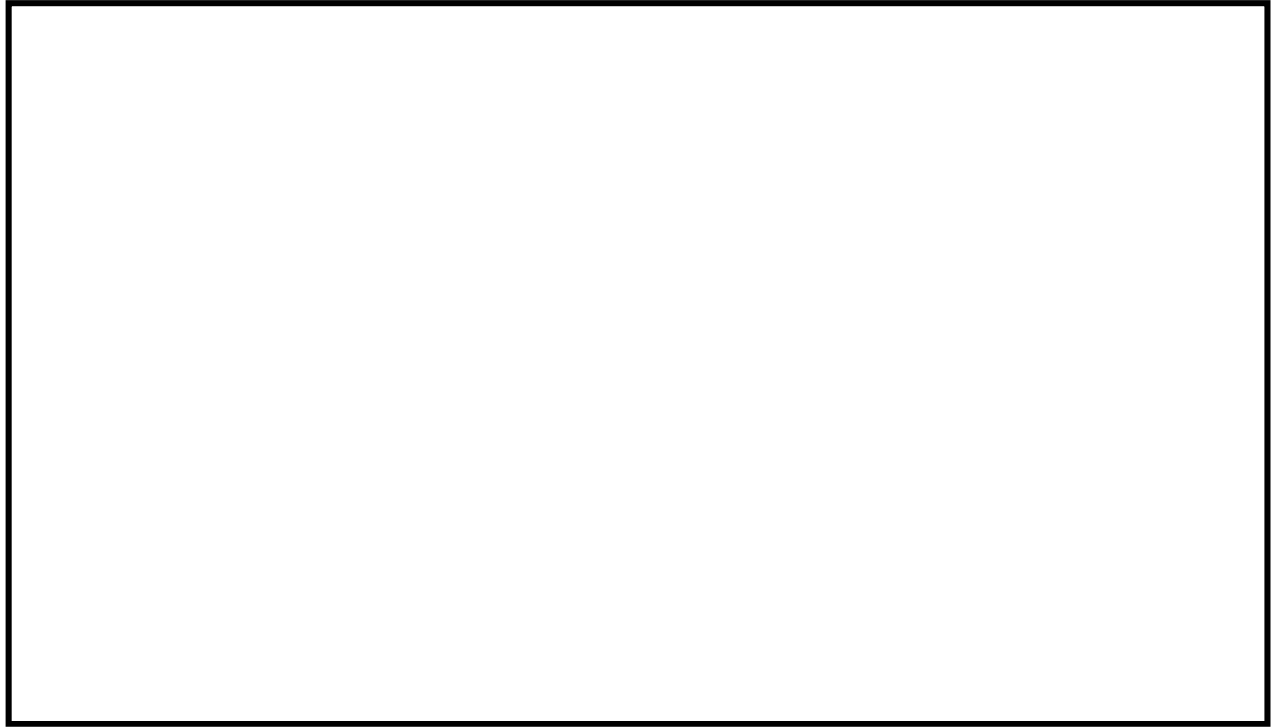
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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）

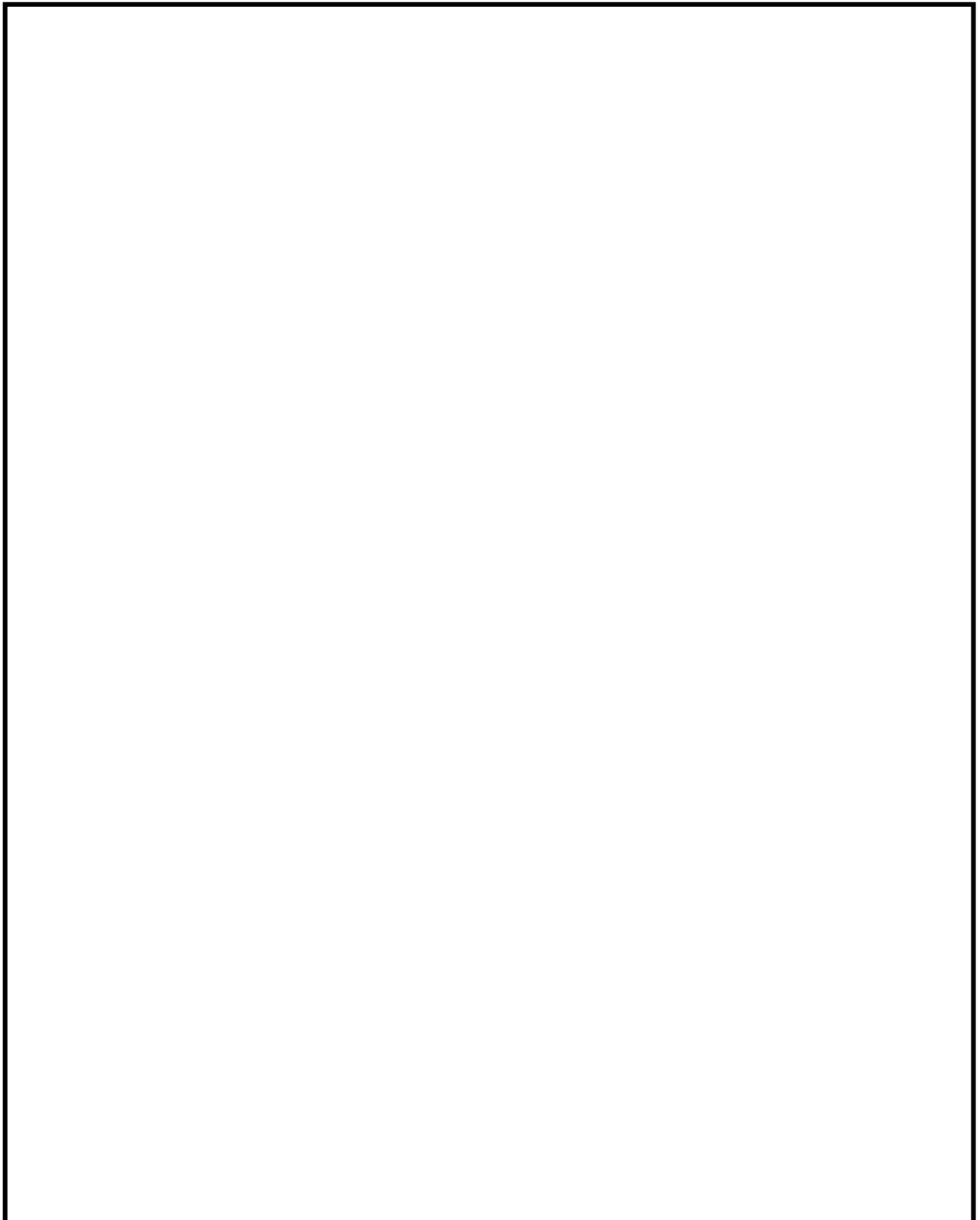
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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）

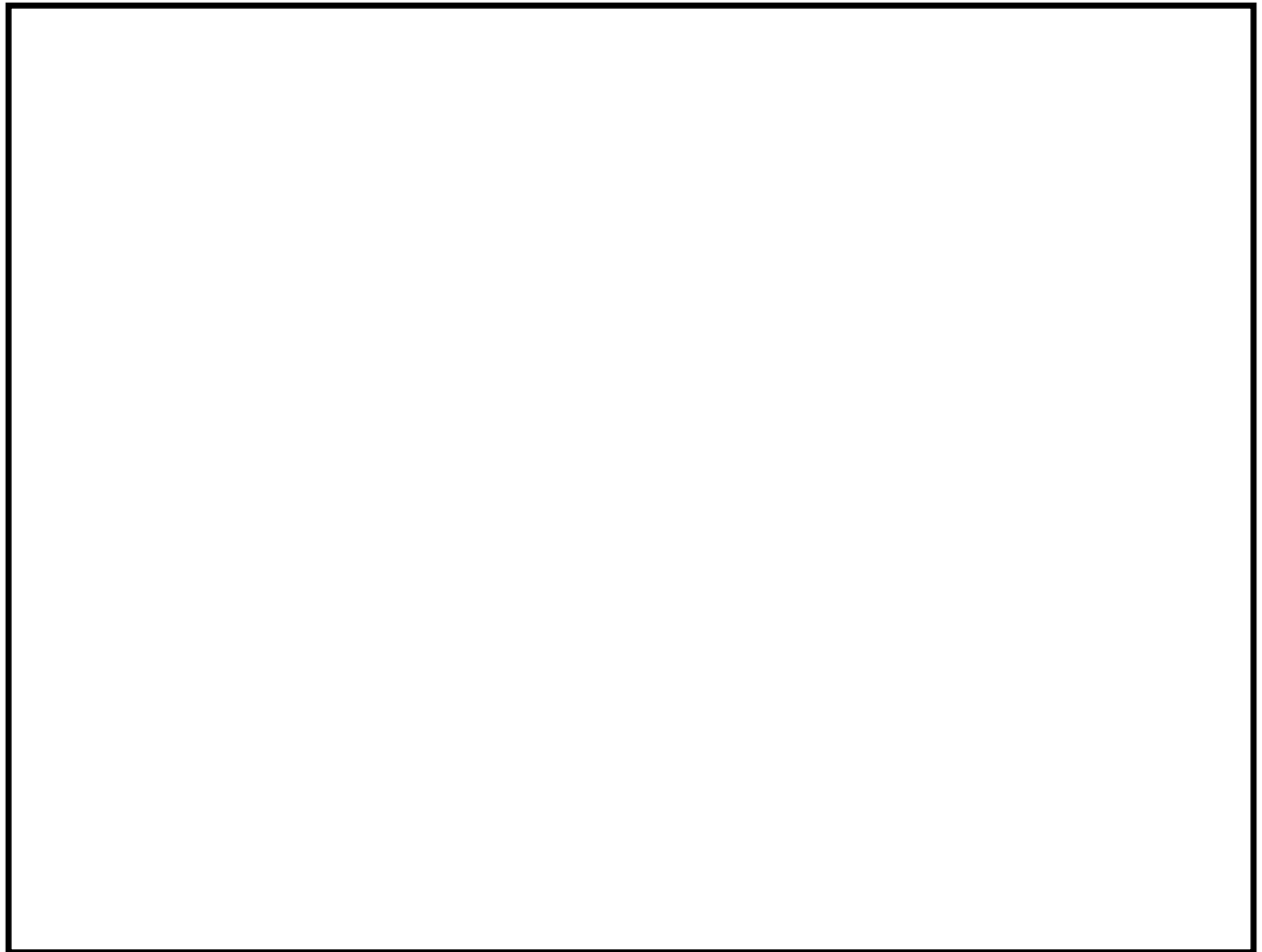
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【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）】



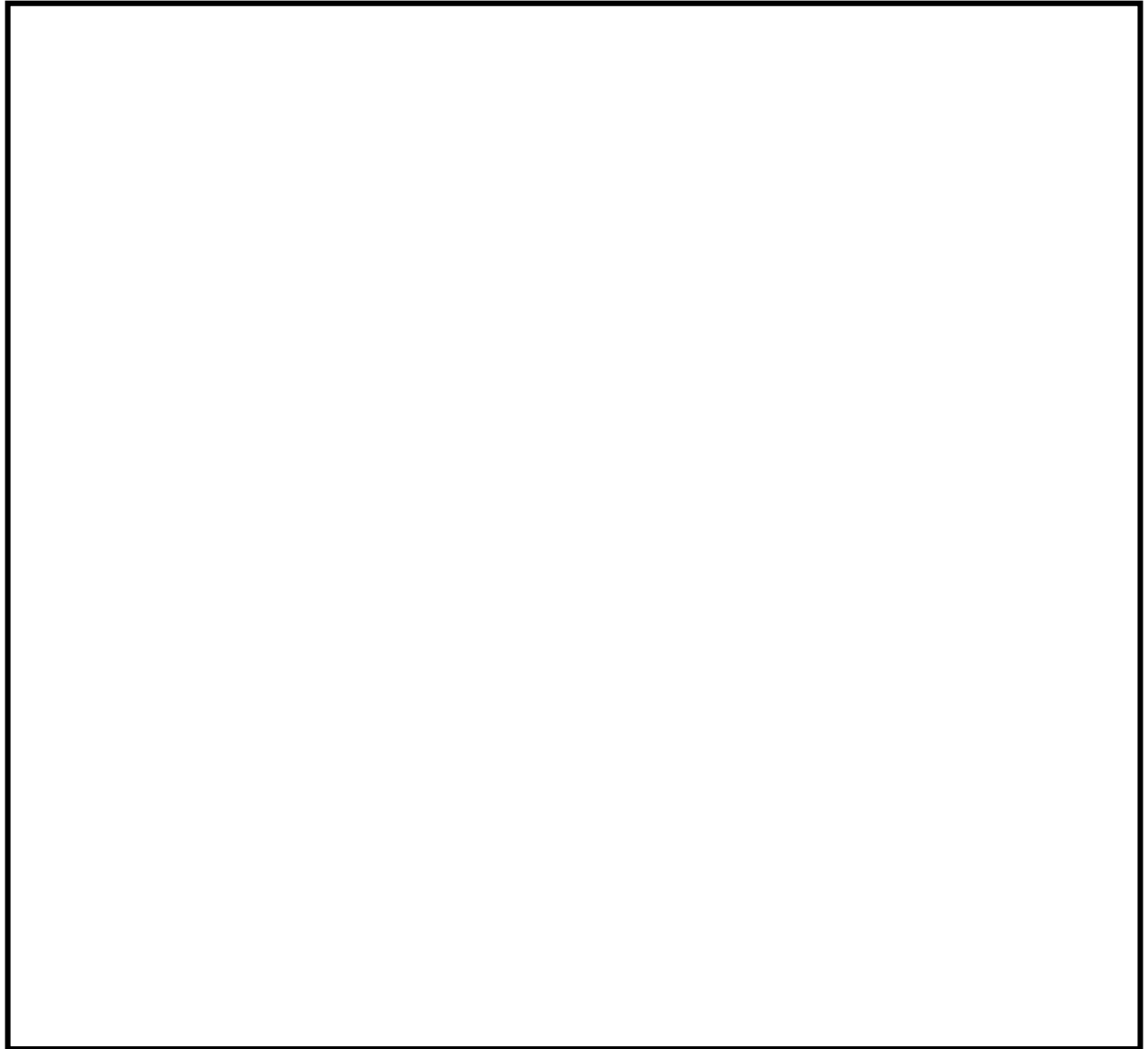
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



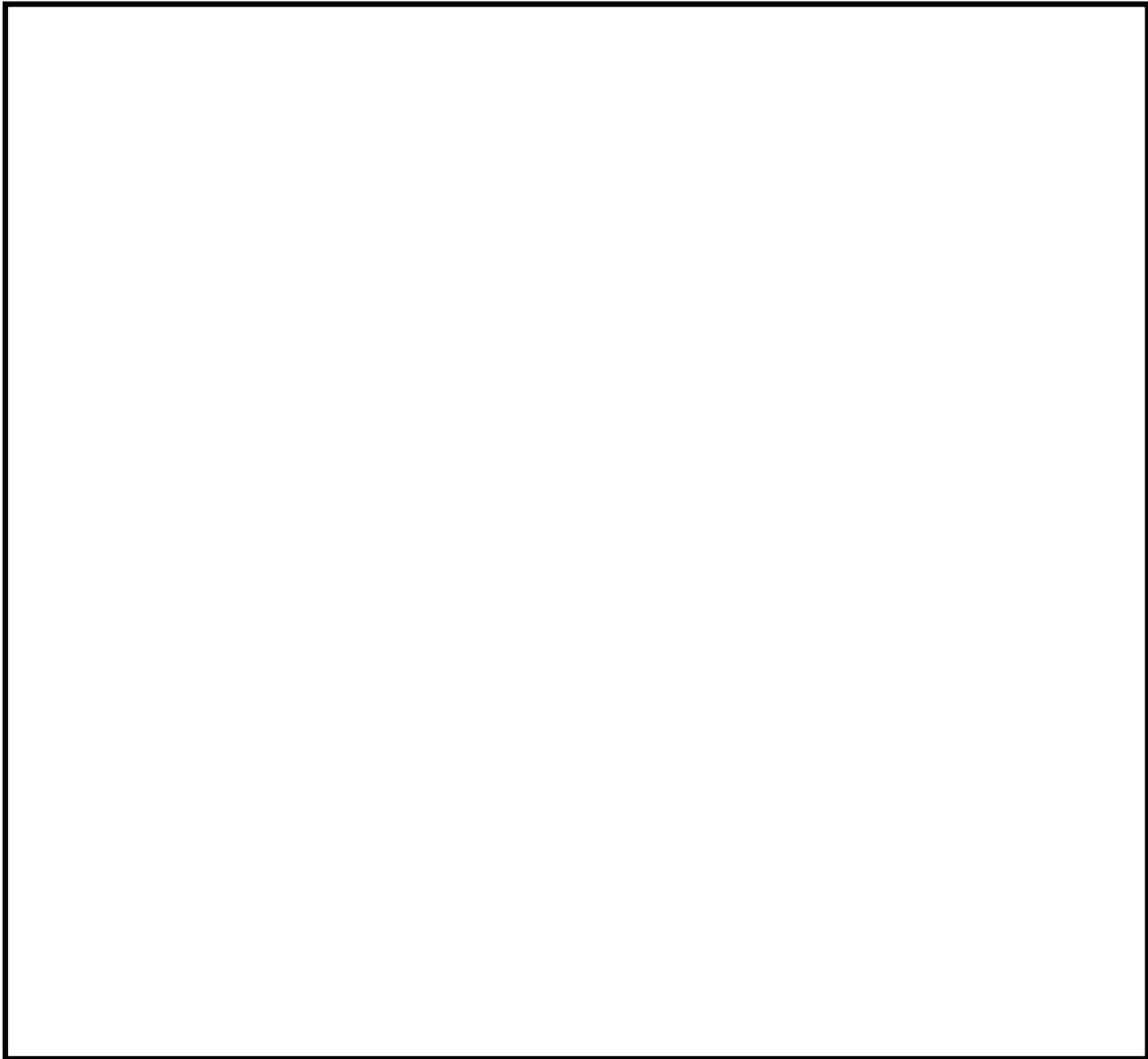
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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）

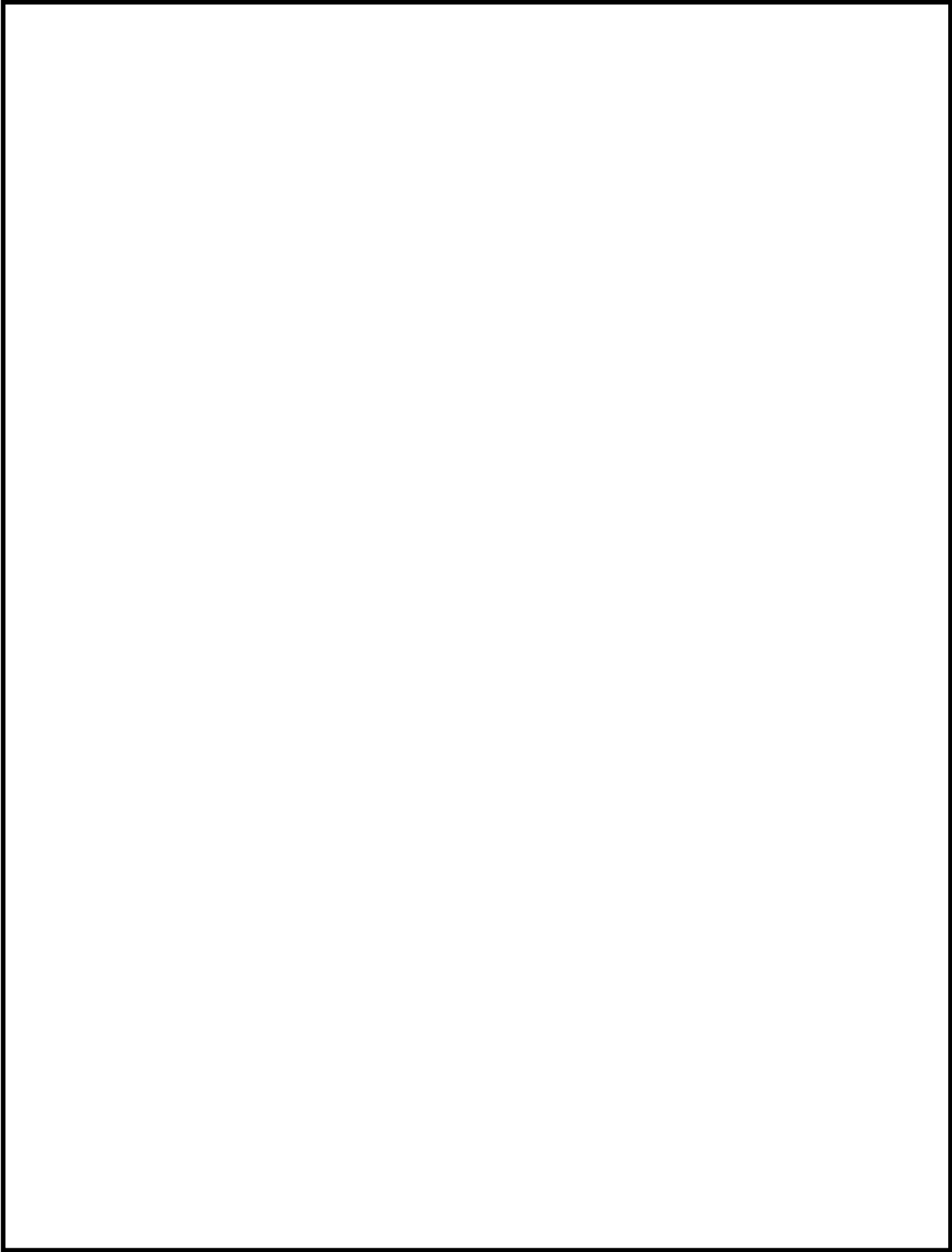
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【海水（送水車使用）からの注水（注水手順⑥）】



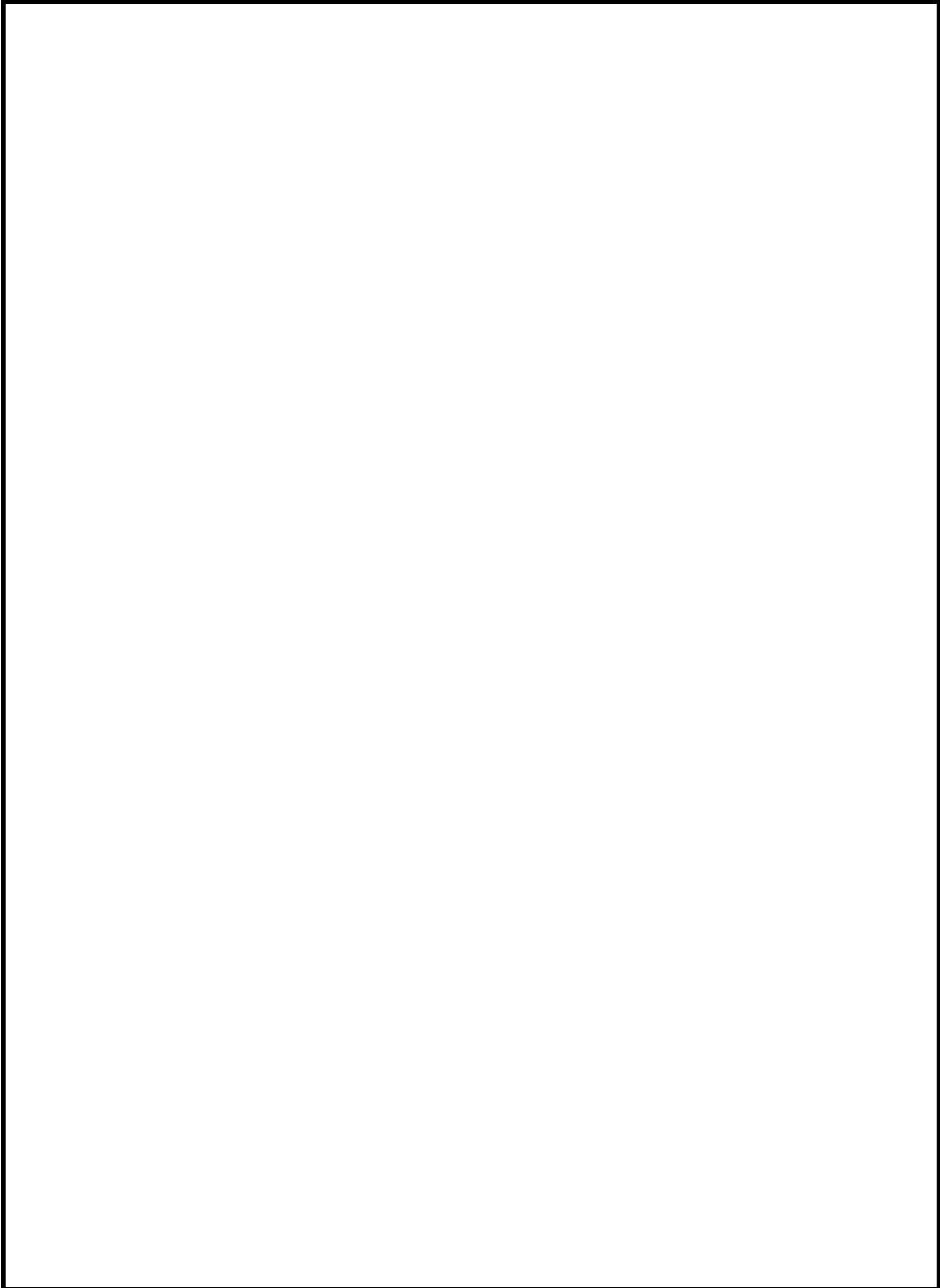
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



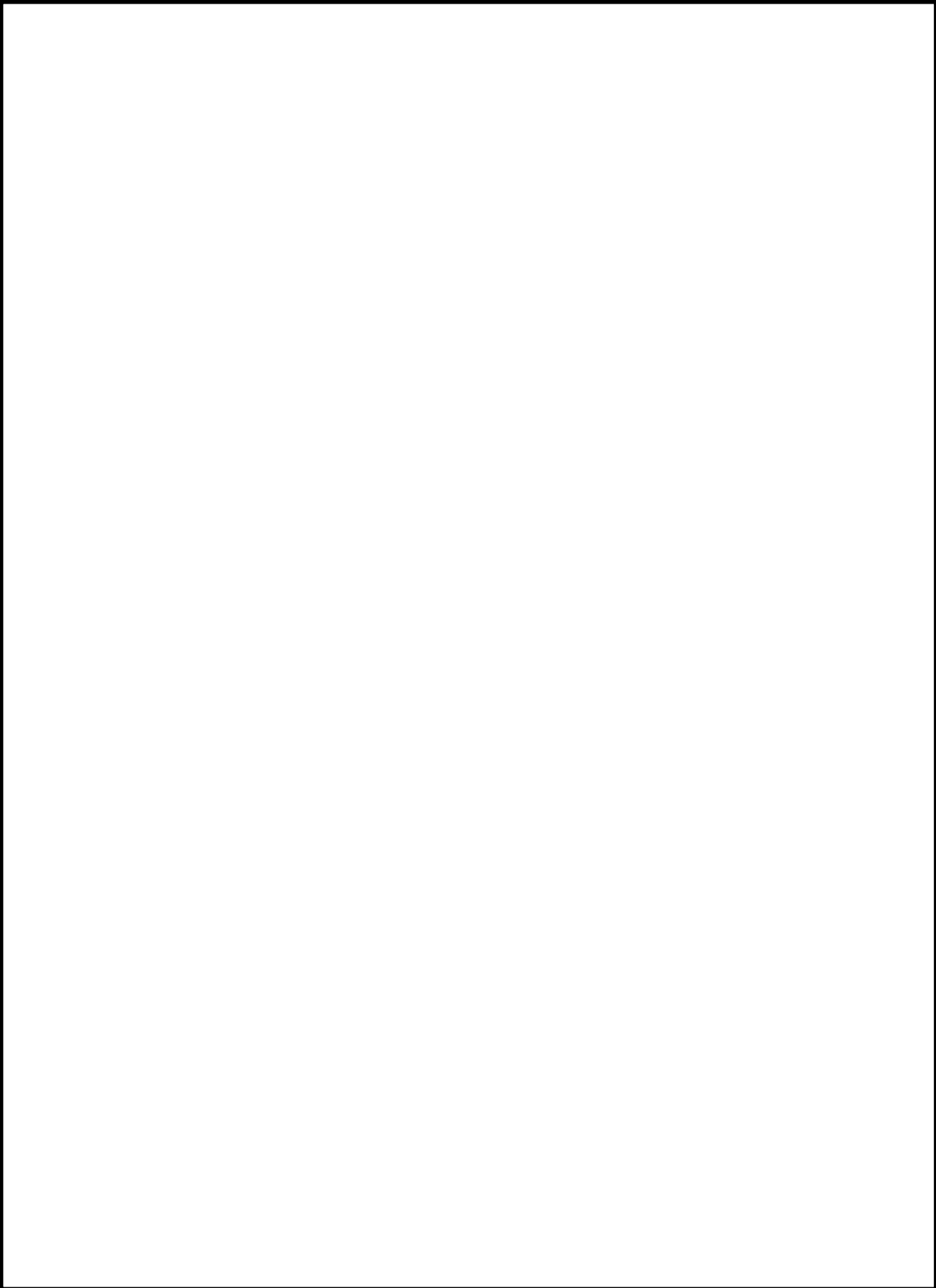
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



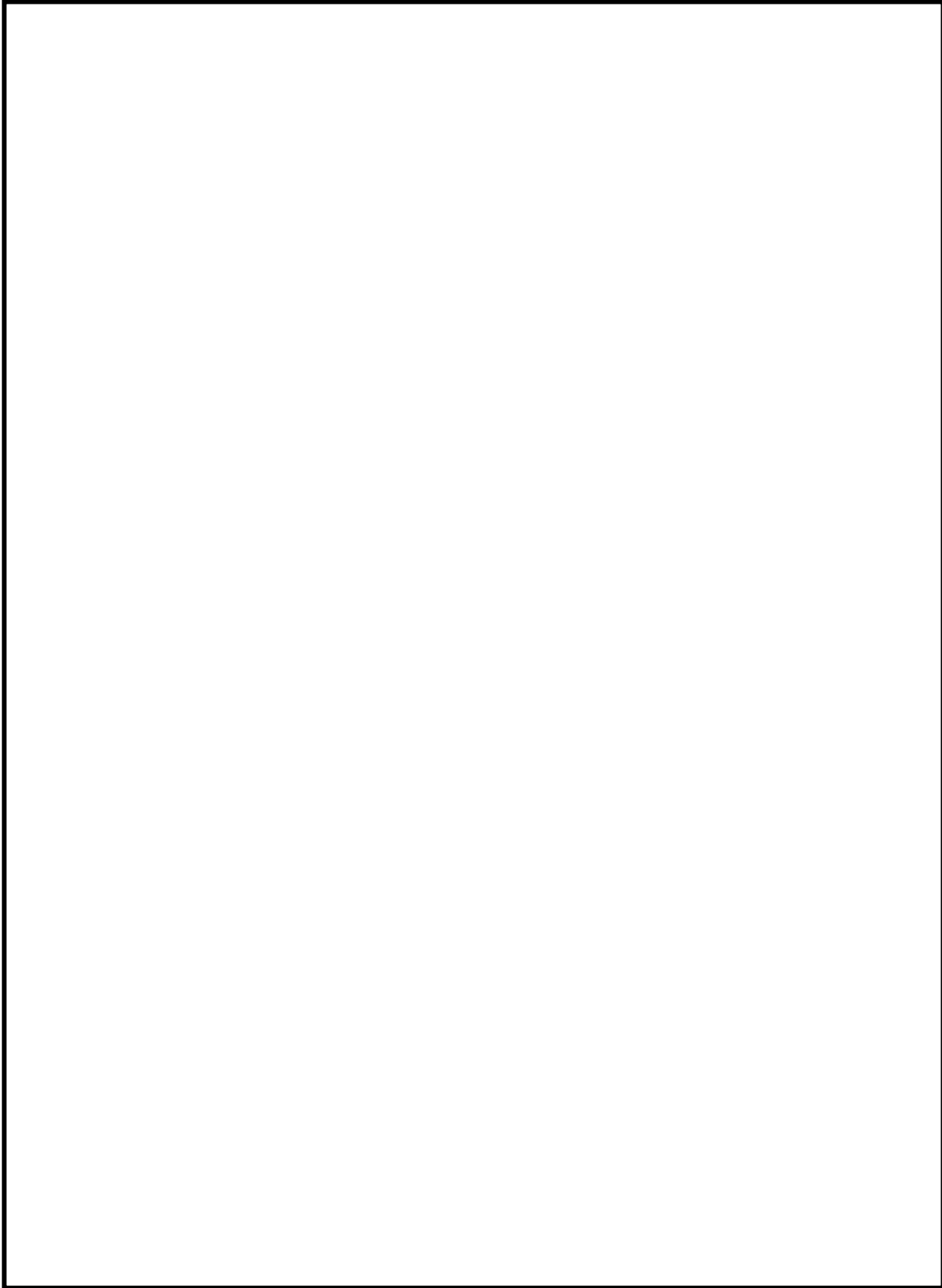
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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）

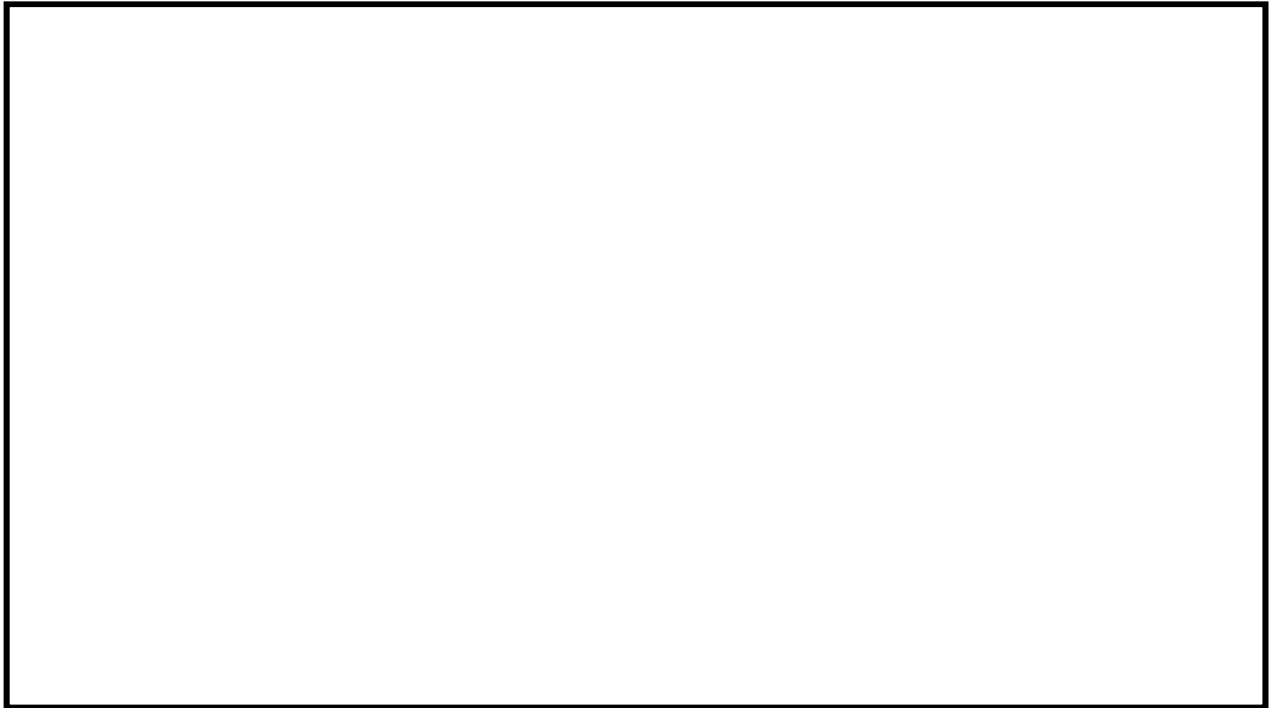
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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）

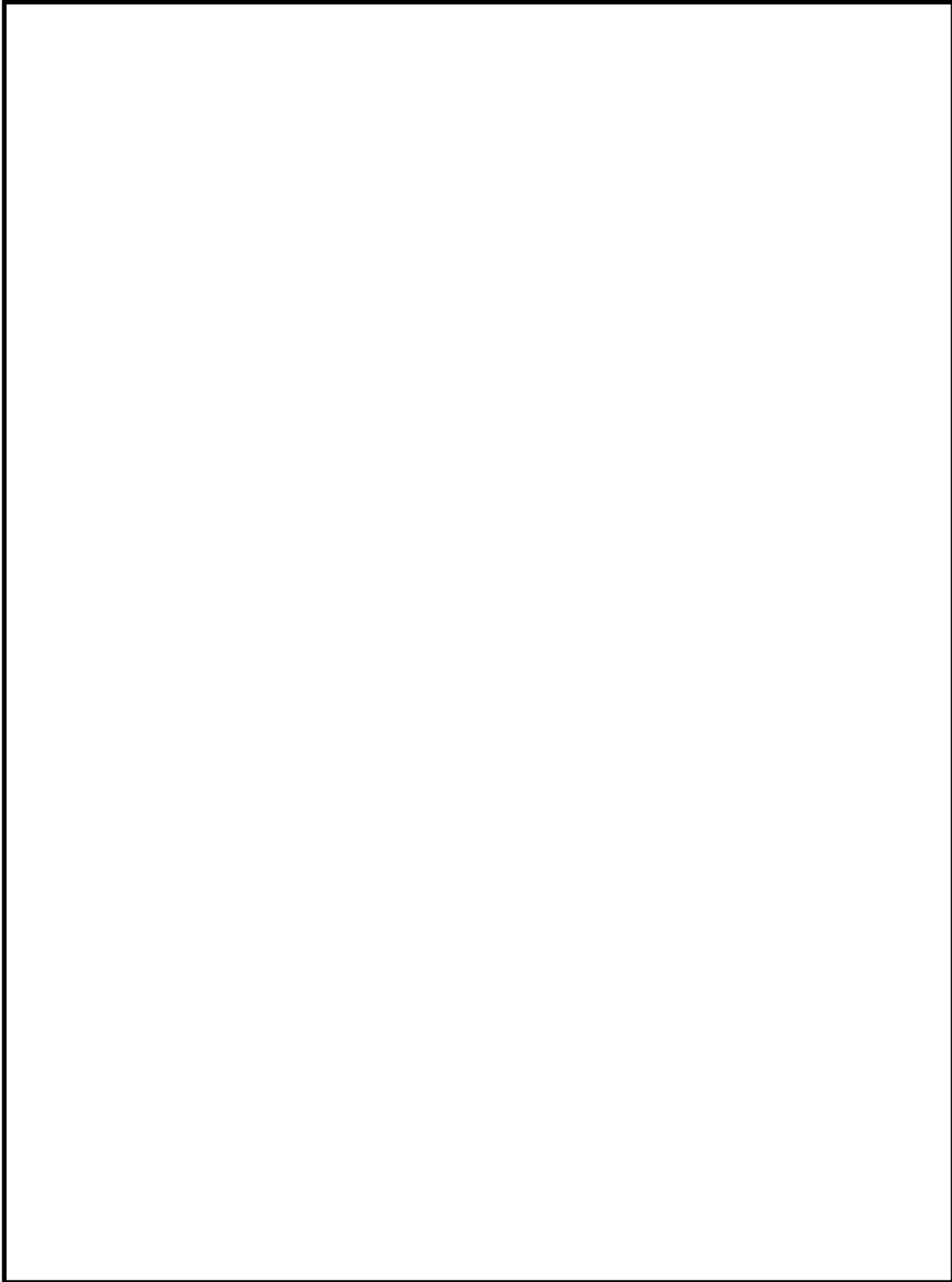
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【送水車によるスプレー手順】



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。

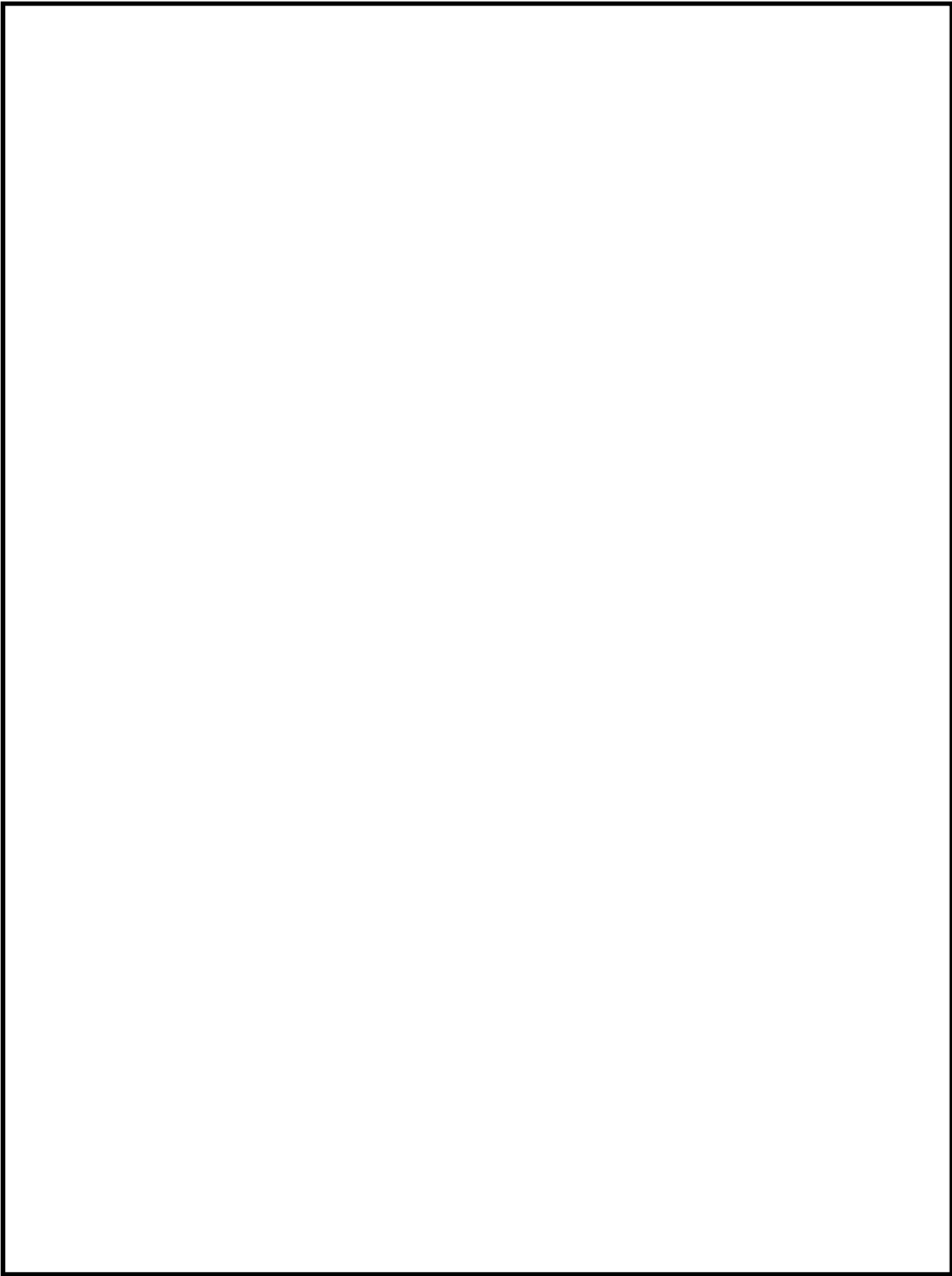


高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。

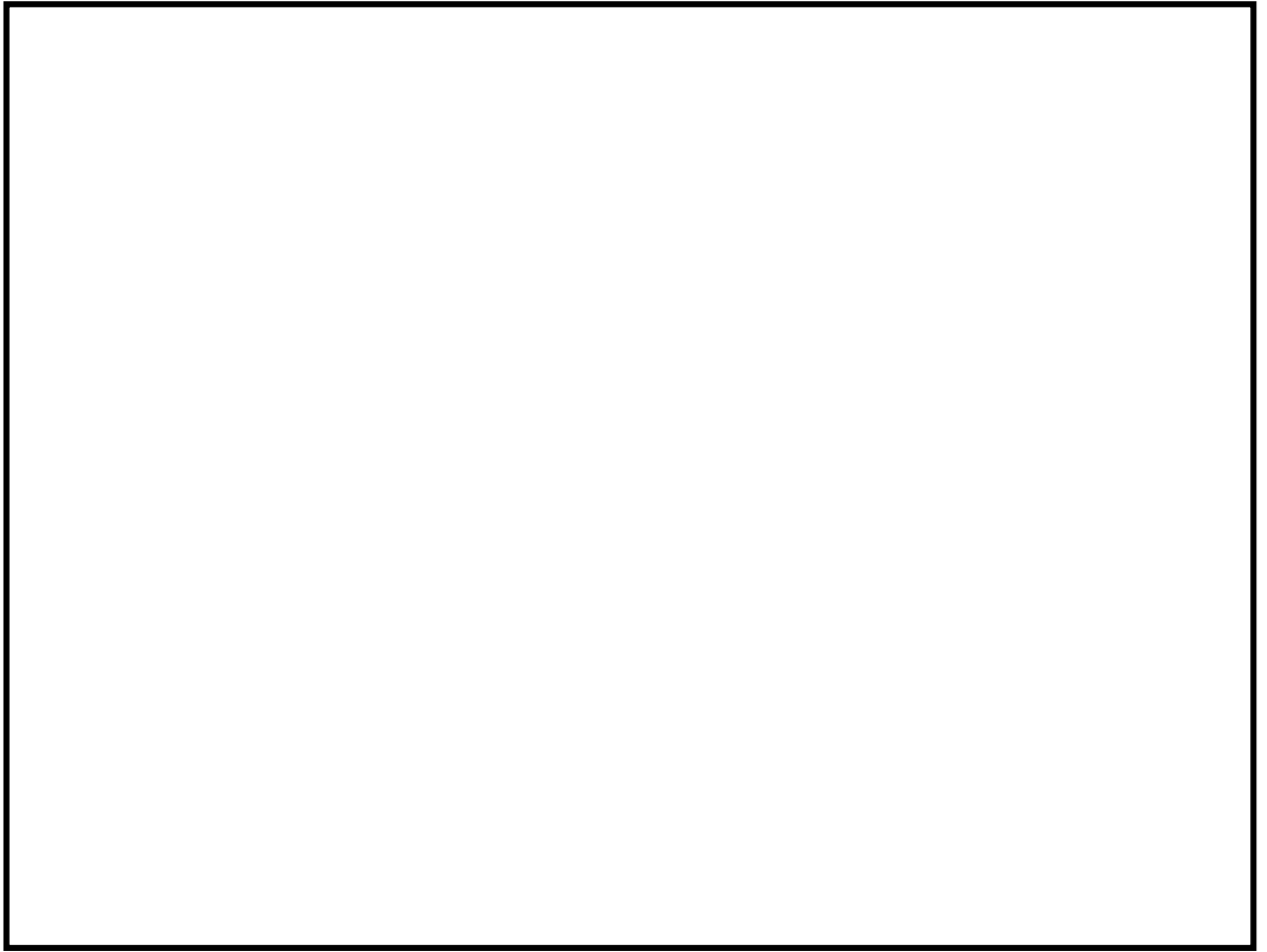
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



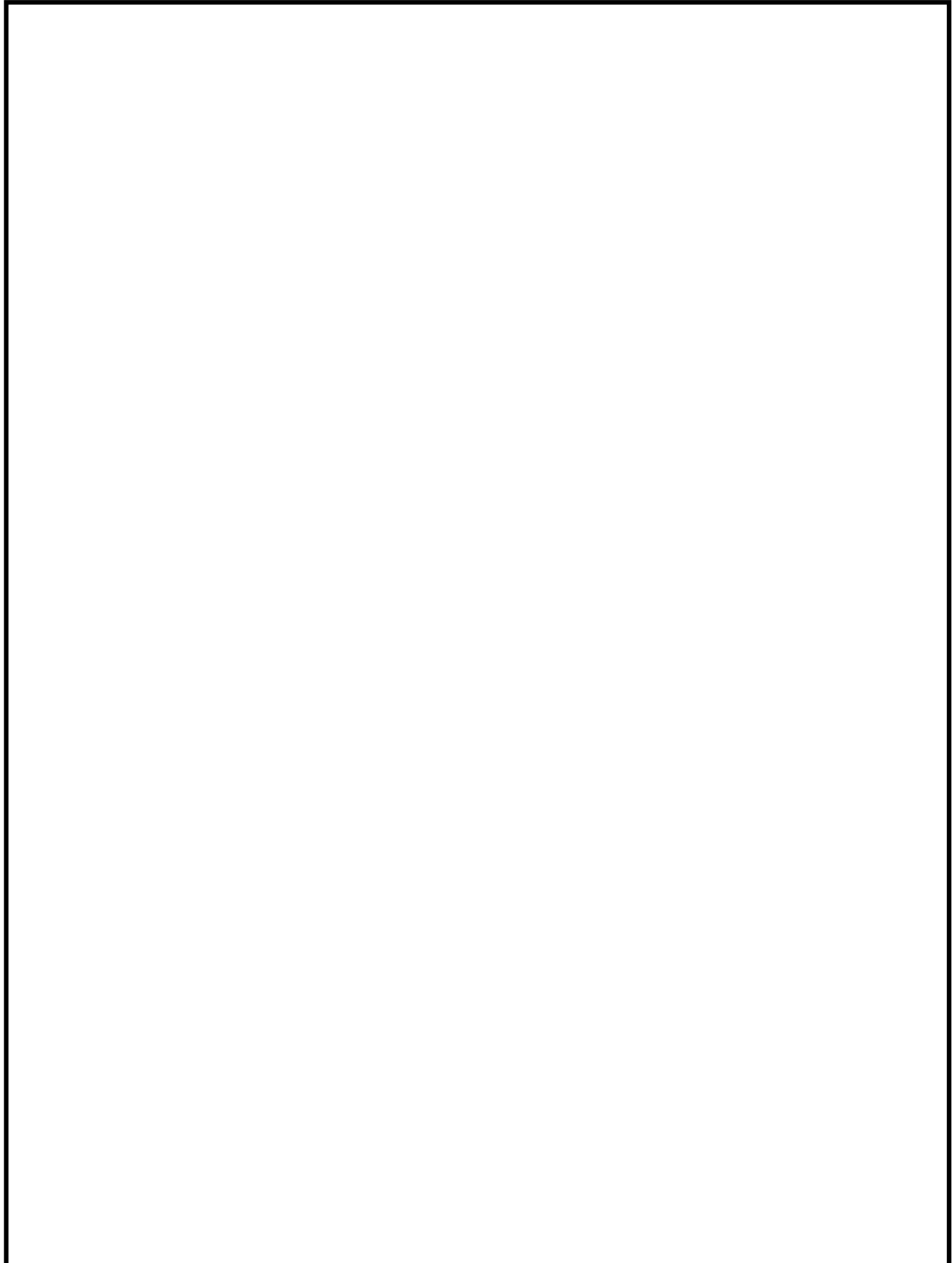
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



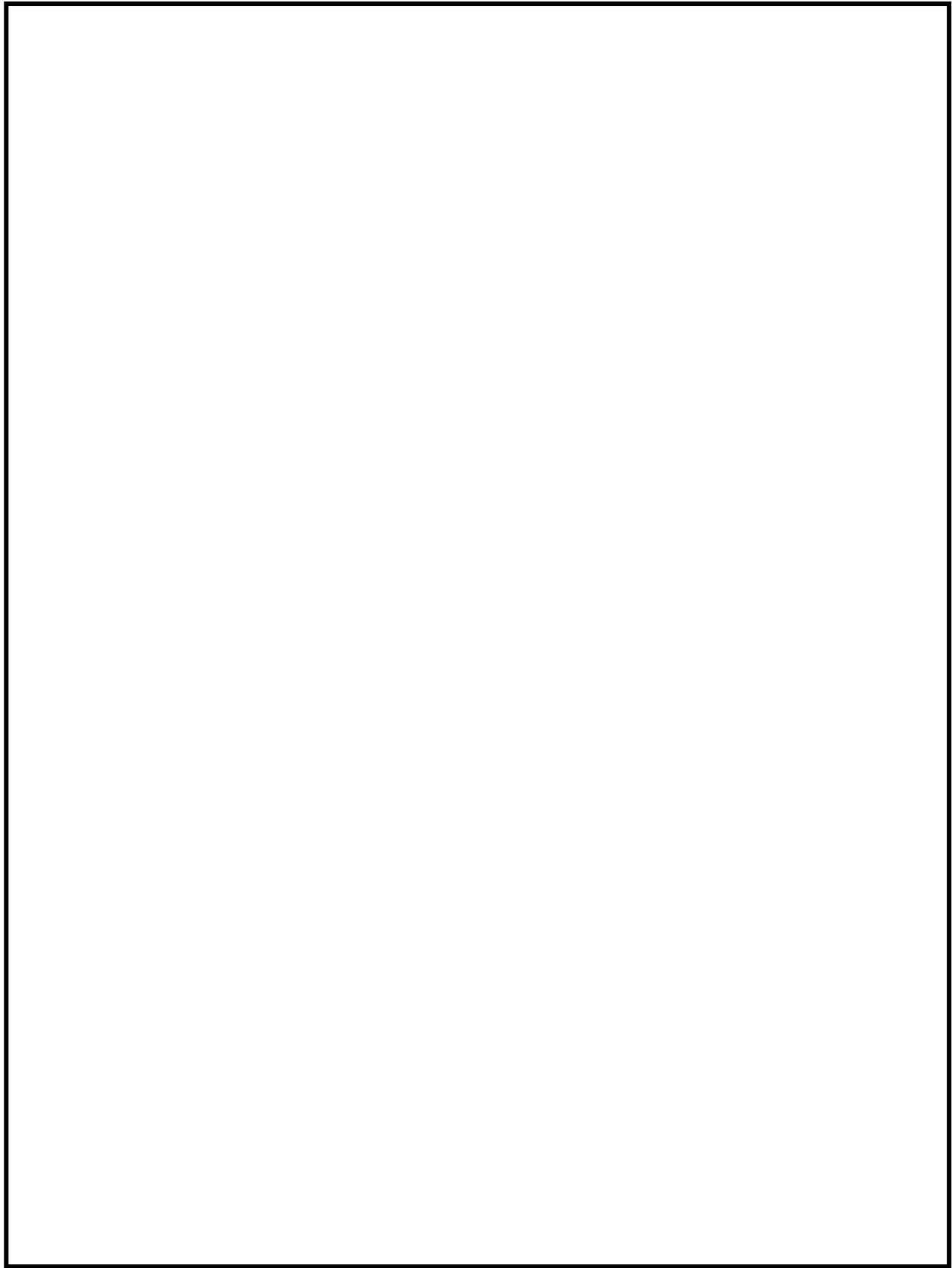
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



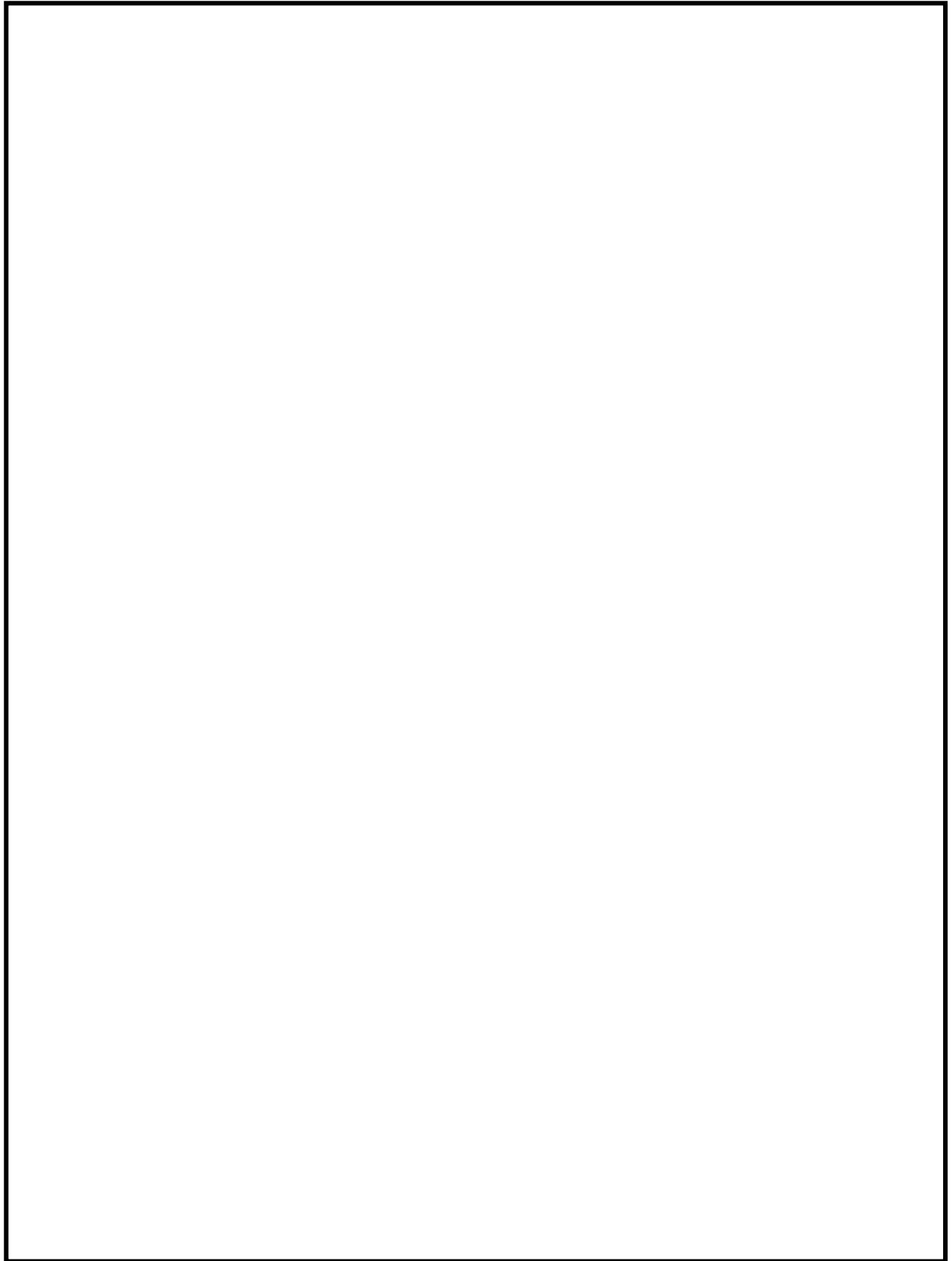
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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）

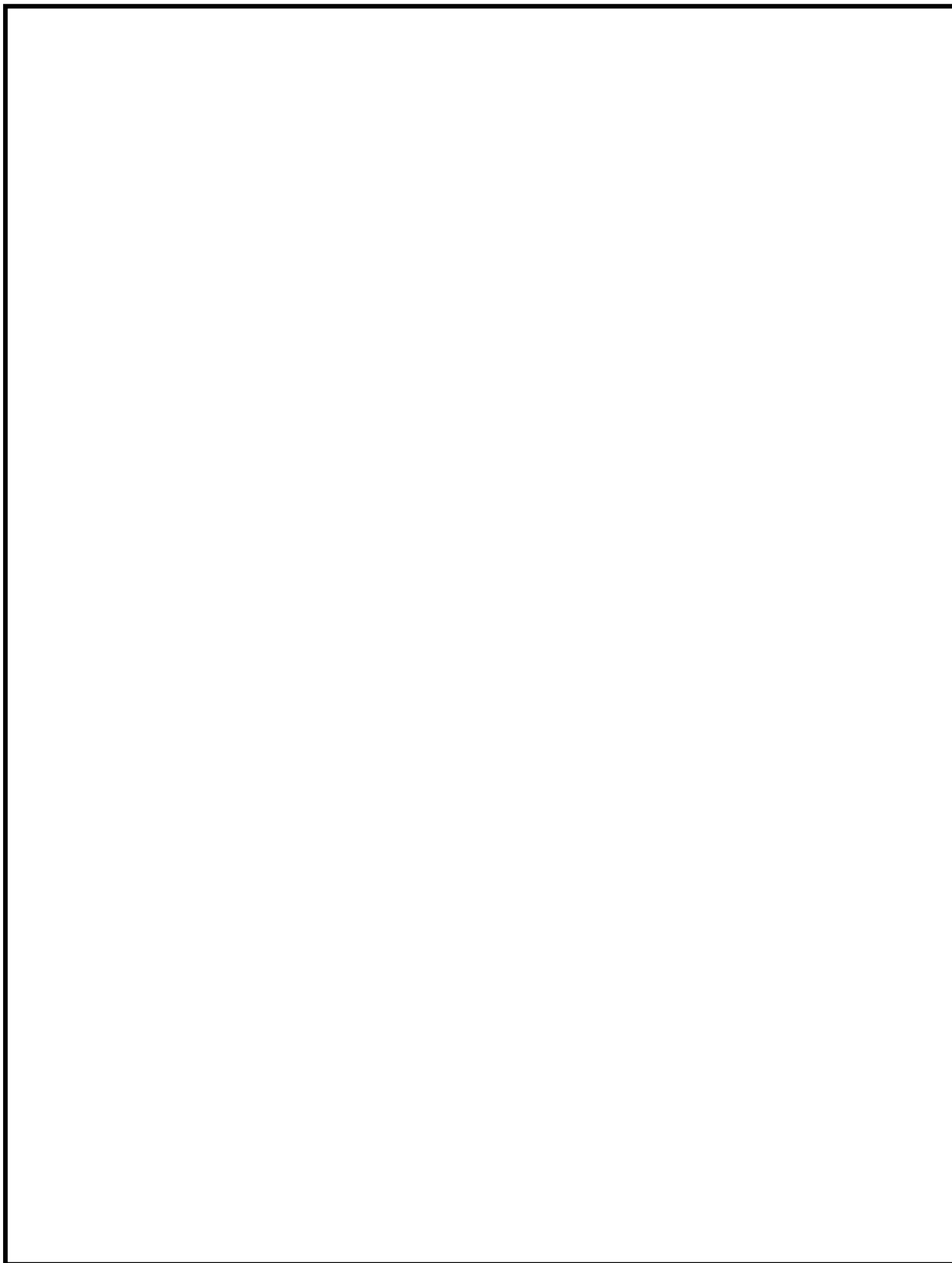
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



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）

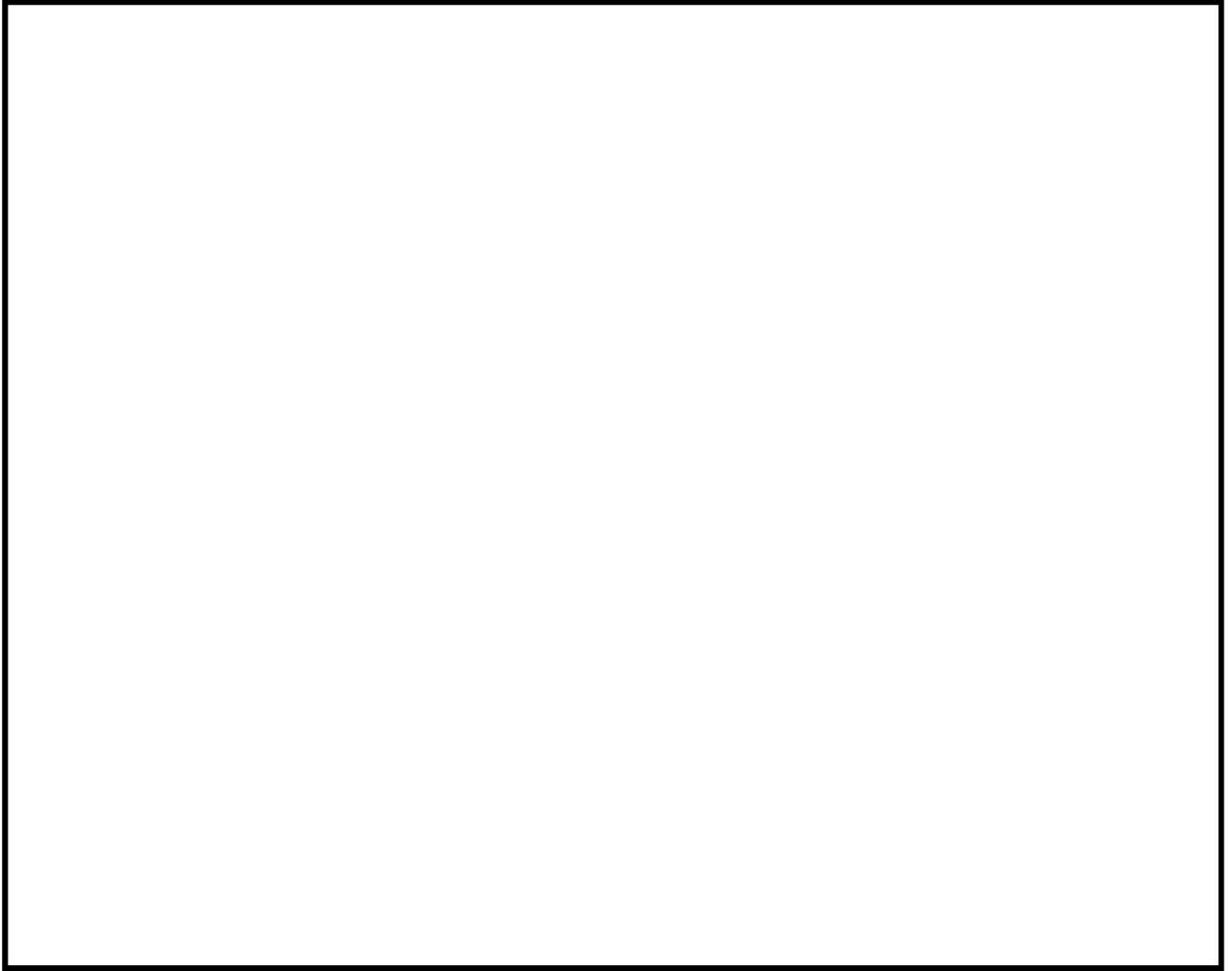
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【大容量ポンプによる放水手順】



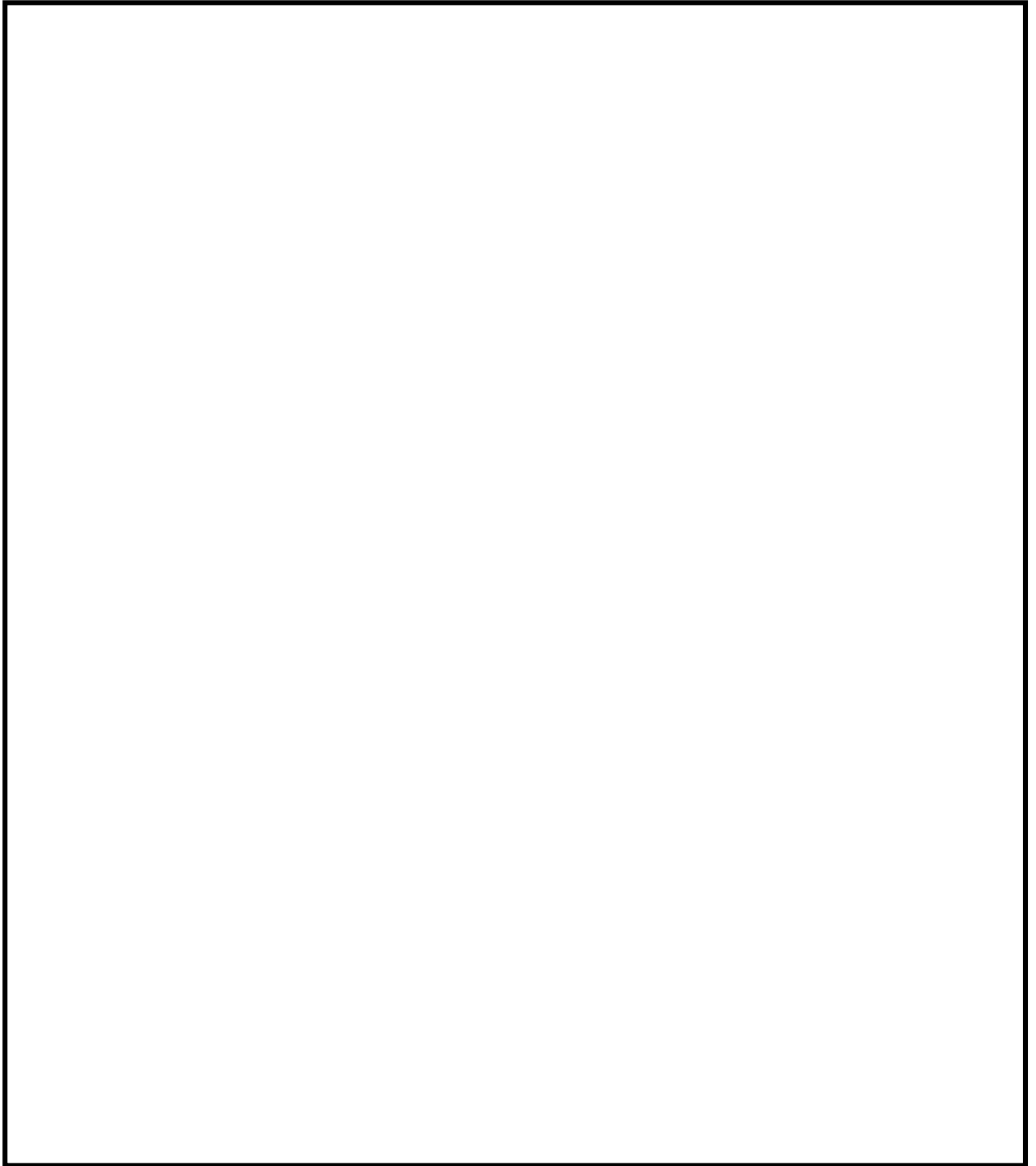
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



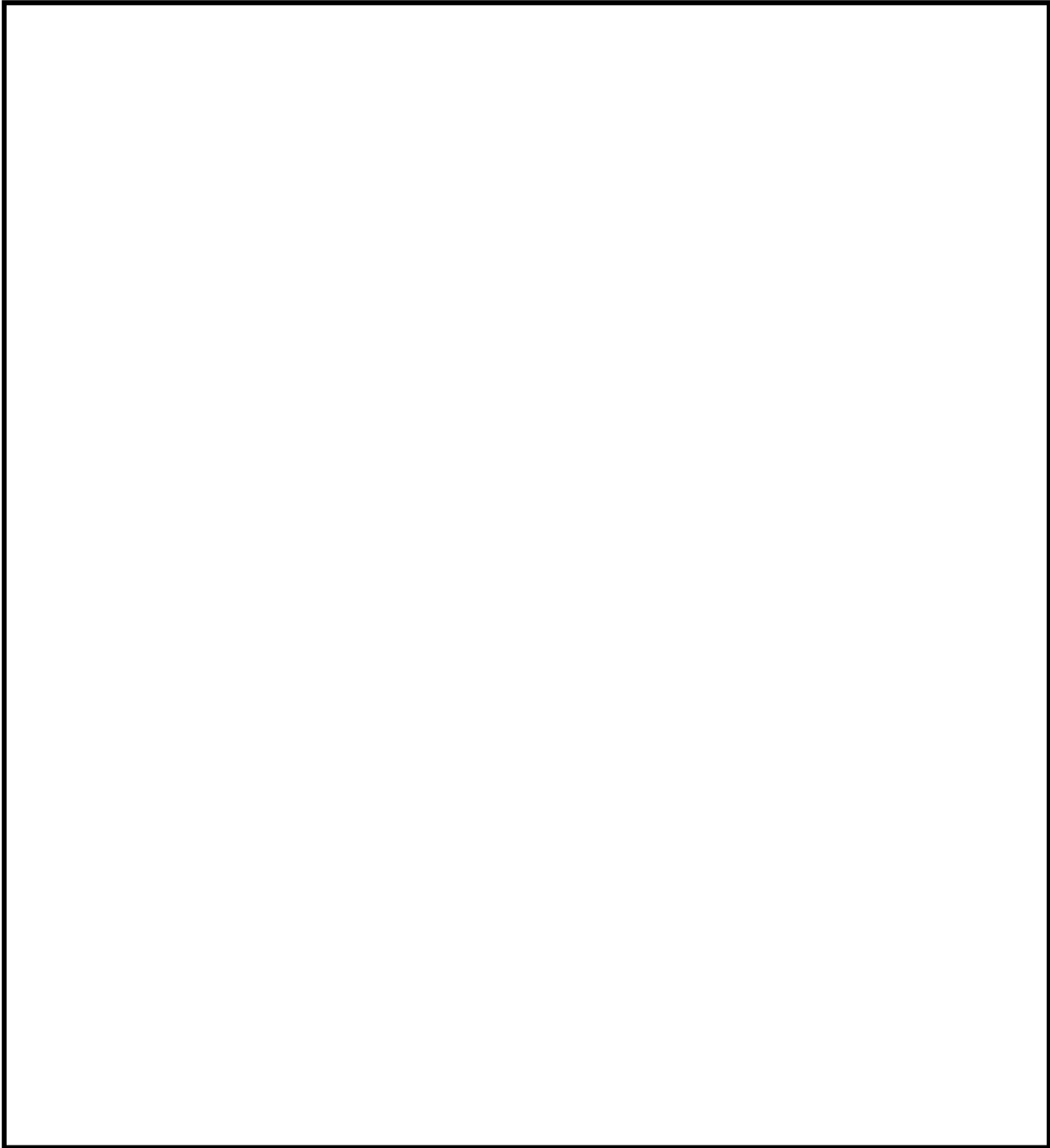
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



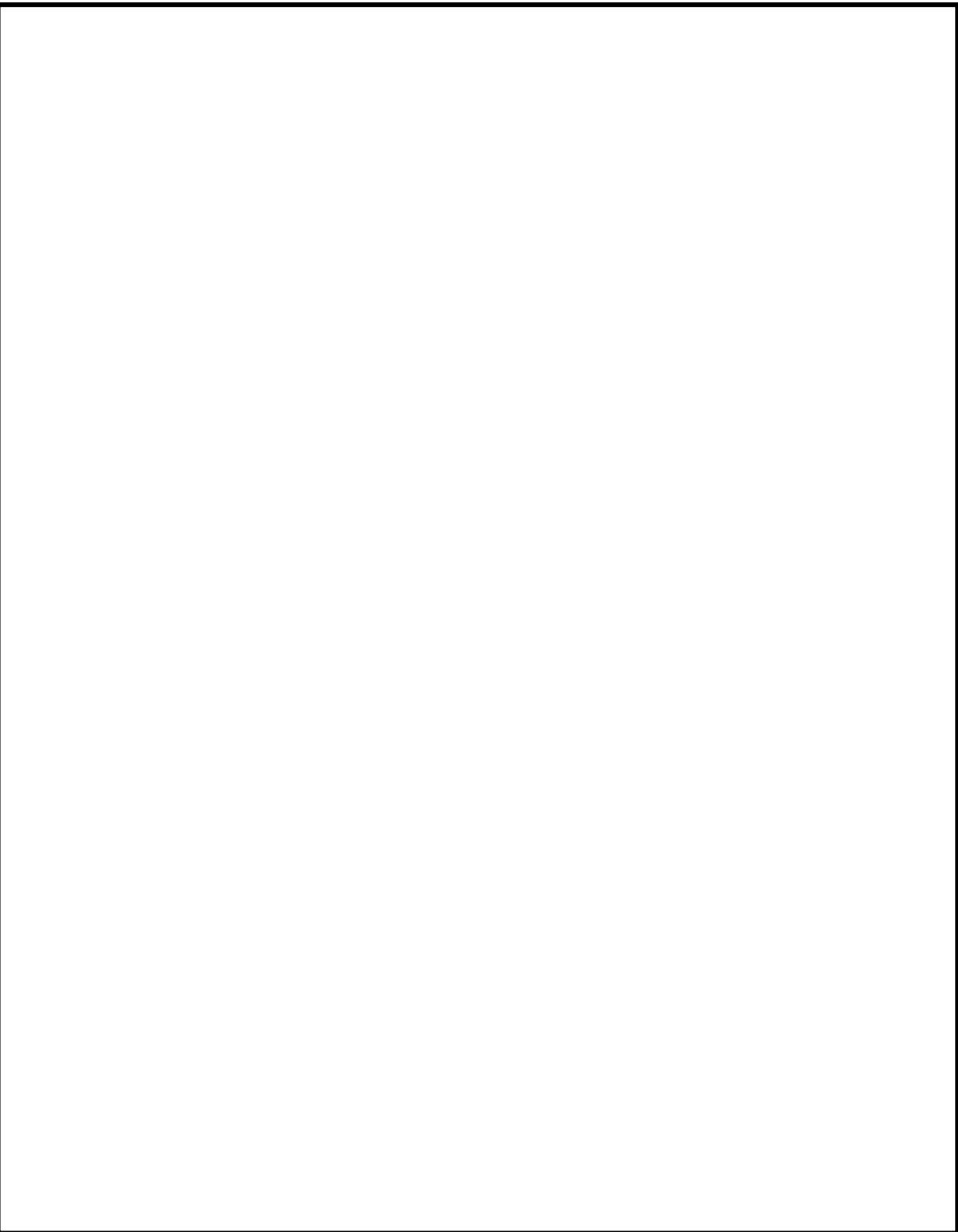
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



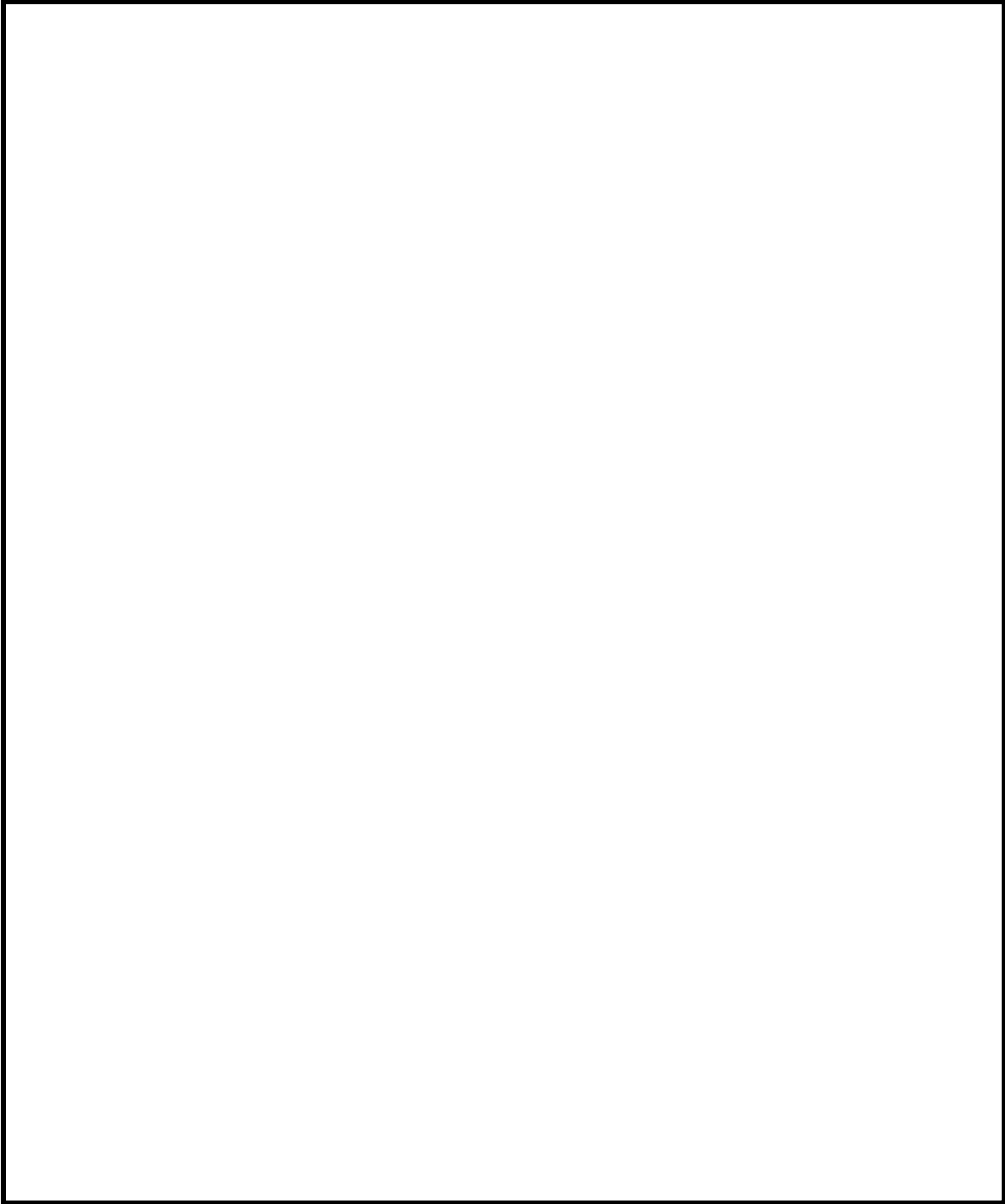
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



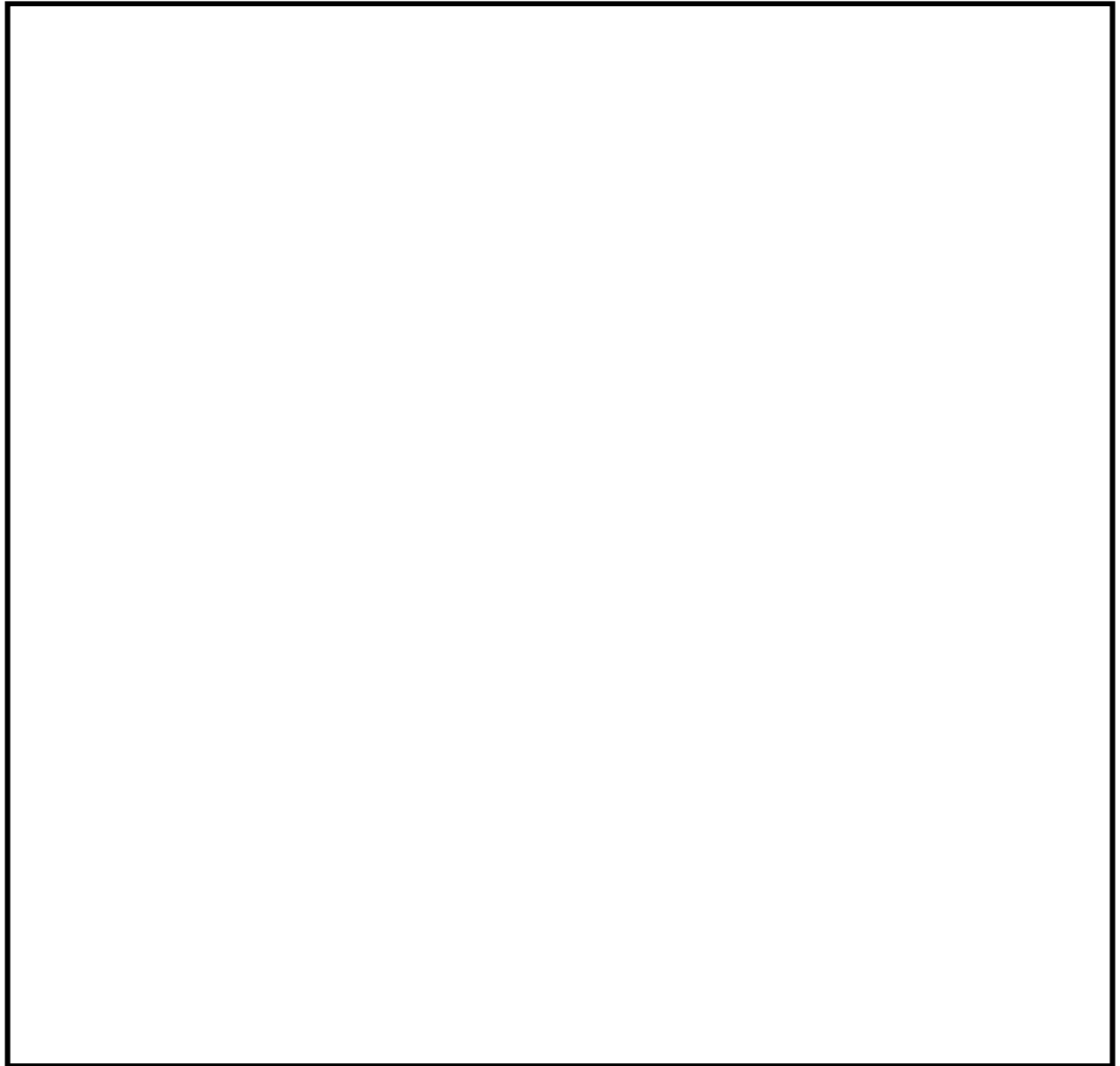
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



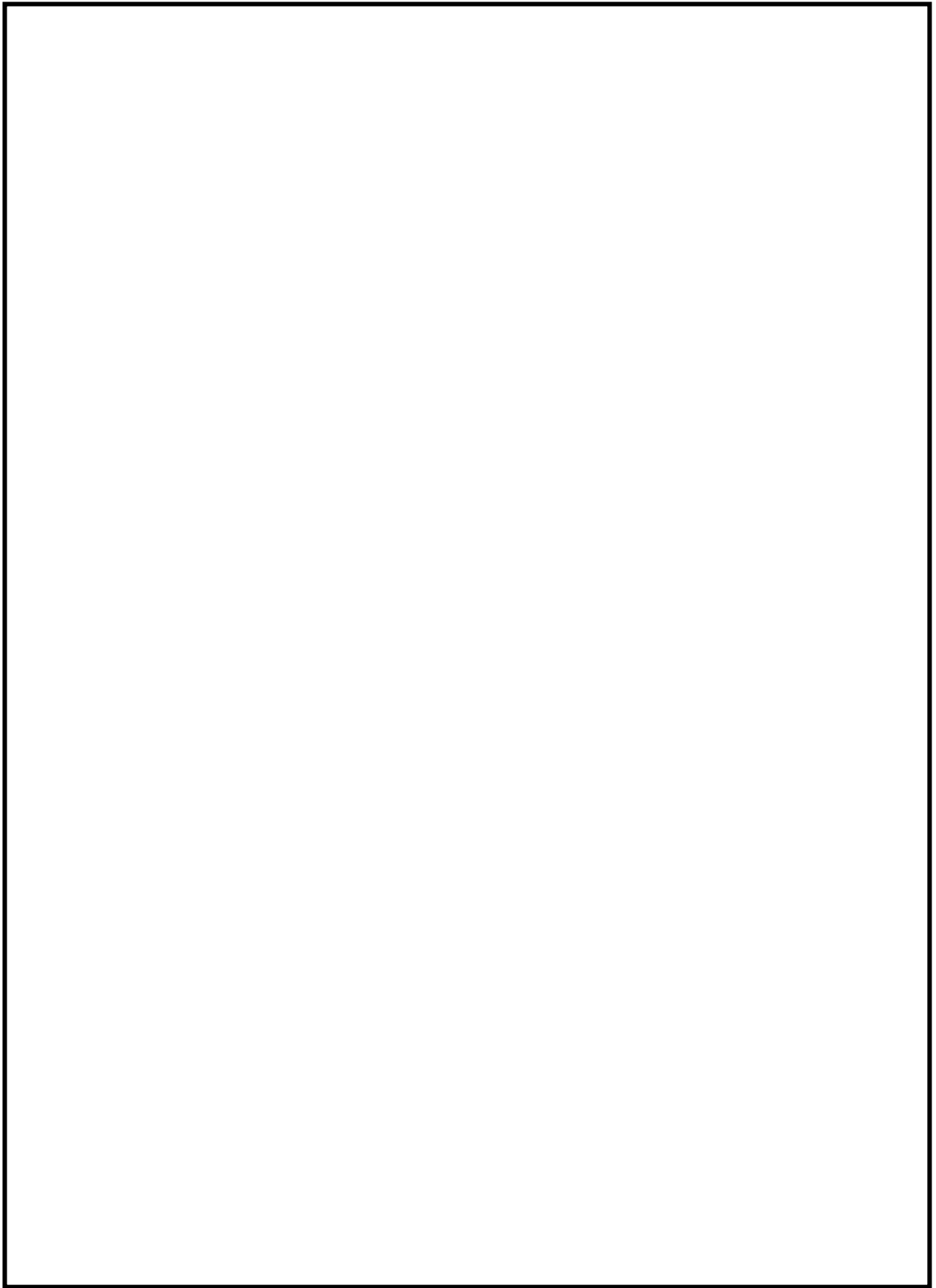
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



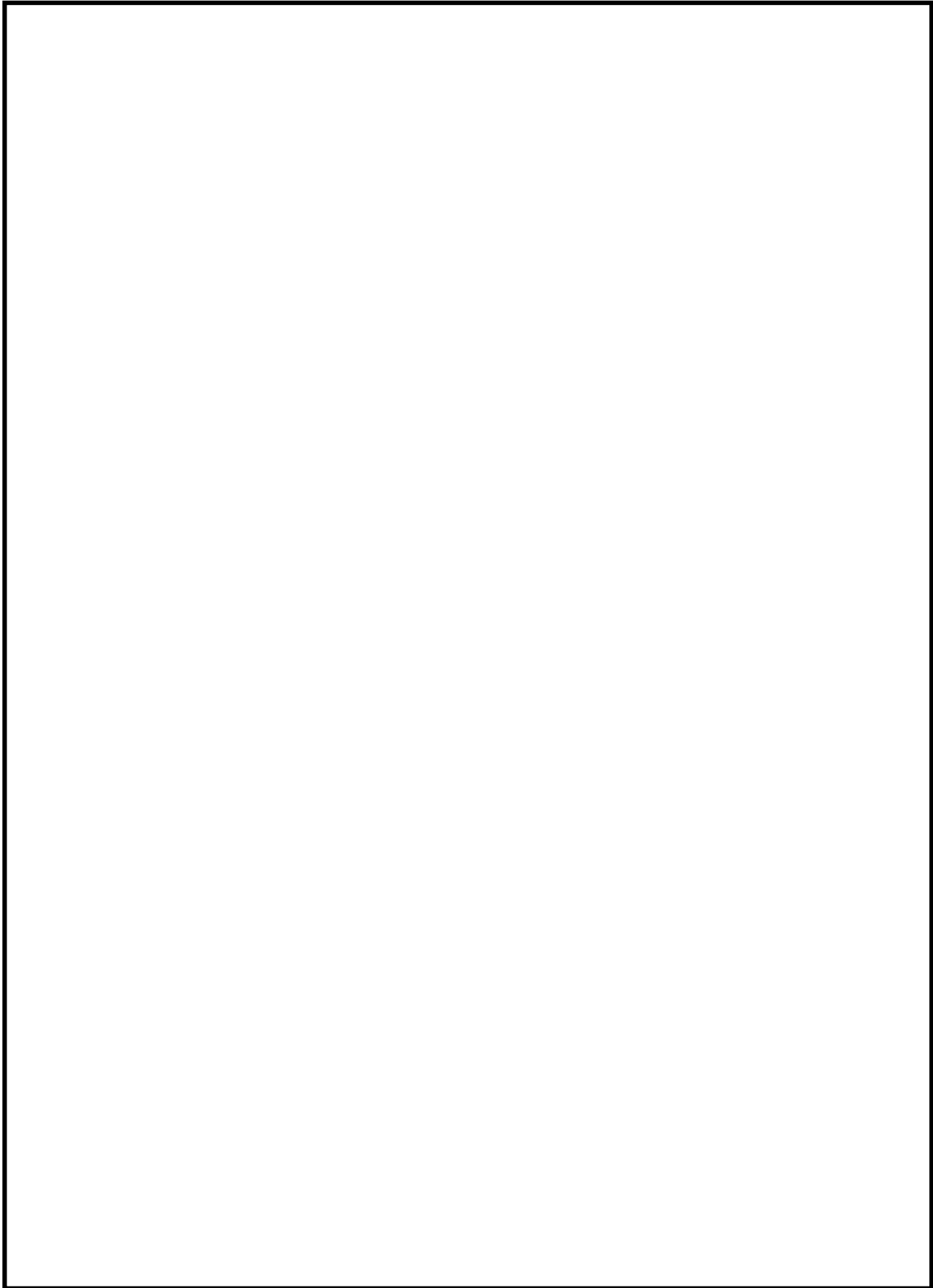
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



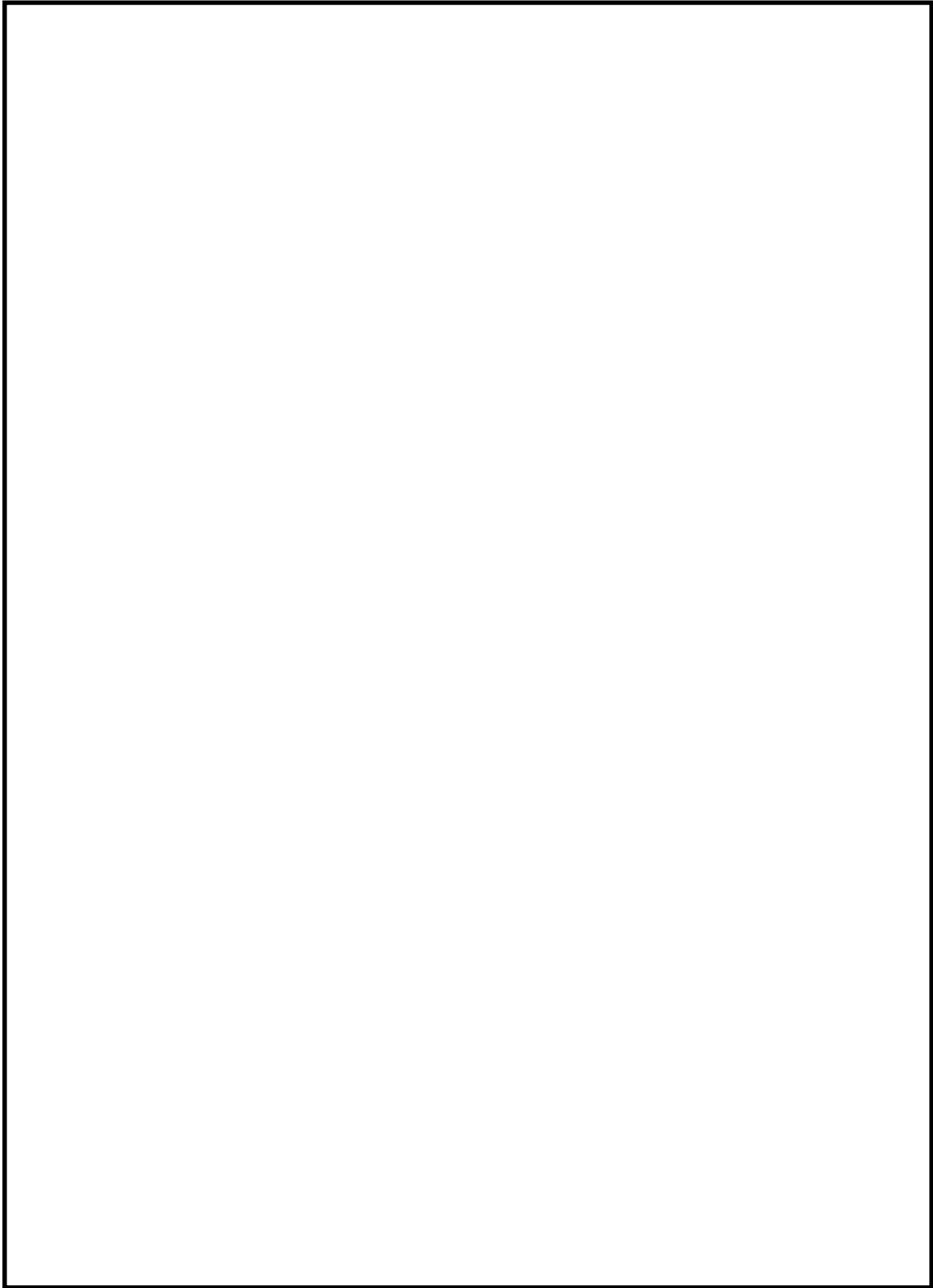
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。



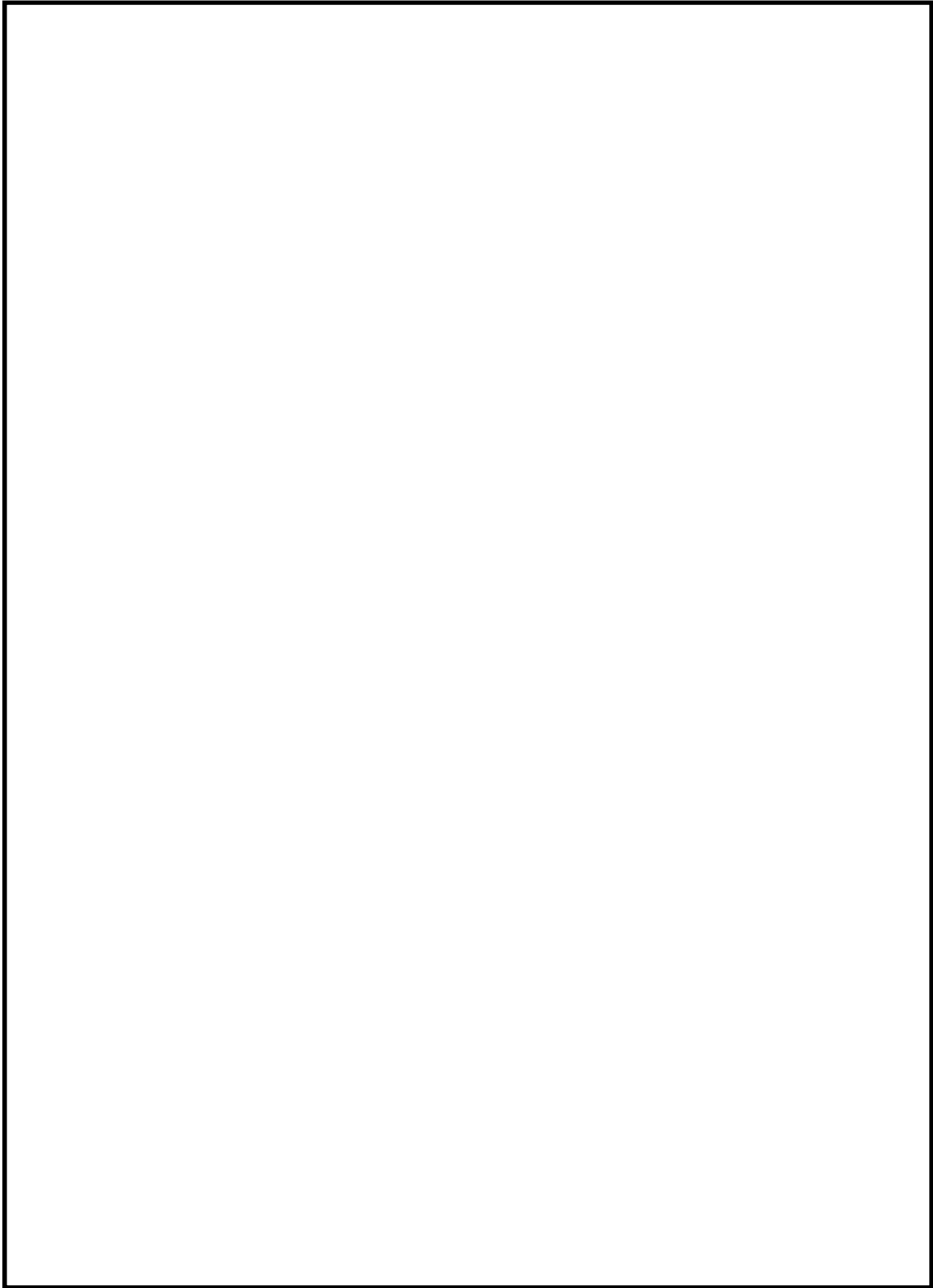
高浜発電所 重大事故等発生時における原子炉施設の保全のための活動に関する所達（抜粋）

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。

(5) 解析コードの説明について

1. はじめに
2. 解析コードの概要
 - 2.1. SCALE Ver. 6.0
 - 2.1.1. SCALE Ver. 6.0 の概要
 - 2.1.2. 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 SCALE Ver. 6.0

2.1.1 SCALE Ver. 6.0 の概要

対象：使用済燃料貯蔵設備

項目 \ コード名	SCALE
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	2009年
使用したバージョン	Ver. 6.0
使用目的	使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価
コード概要	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) により米国原子力規制委員会 (NRC) の原子力関連許認可評価用に作成された公開コードシステムであり、臨界計算コードが整備されている。本解析では臨界計算のCSAS6モジュールを用い、モンテカルロコードとしてKENO-VI、断面積ライブラリはENDF/B-VIIベースの238群ライブラリを使用している。
検証(Verification) 及び 妥当性確認(Validation)	<p>SCALE Ver. 6.0は、モンテカルロコードによる使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> コードに付属のサンプル問題を実行し、解析解があらかじめ準備された参照解を再現することを確認している。 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> OECD/NEA によりまとめられた臨界実験のベンチマーク集 (INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS September 2010 Edition (OECD/NEA)) に登

	<p>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。</p> <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MDX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。
--	---

2.1.2 SCALE Ver. 6.0 の解析手法について

(1) 一般事項

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

(2) 解析コードの特徴

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

(3) 断面積ライブラリの特徴

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

(4) 解析手法

本解析で用いた臨界計算の CSAS6 モジュールについて、以下に示す。

a. BONAMI

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

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

b. **CENTRM**

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

c. **PMC**

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

d. **KENO-VI**

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

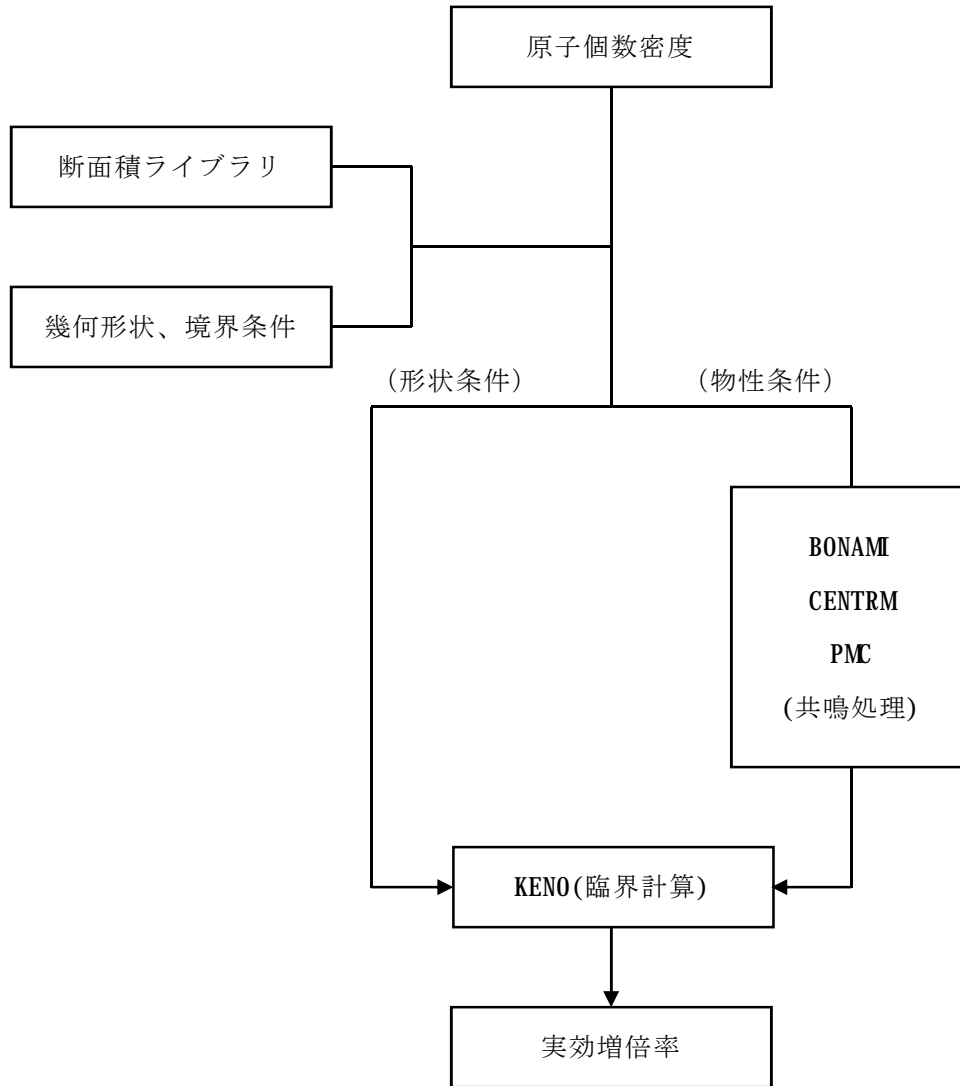
本コードでは、体系内の一つ一つの中性子の振舞いを追跡し、核分裂によって発生する中性子数 **F**、吸収されて消滅する中性子数 **A**、体系から漏えいする中性子数 **L** を評価し、次式により実効増倍率 k_{eff} を算出する。

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

(5) 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを第1図に示す。

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



第1図 解析フローチャート

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

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

a. 検証(Verification)

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

b. 妥当性確認(Validation)

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

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 2-1 表 選定したパラメータ範囲（製作公差を含まない）

項目	単位	燃料貯蔵設備 及び燃料仕様の パラメータ範囲		選定した臨界実験の パラメータ範囲	
		MIN	MAX	MIN	MAX
燃料	ウラン燃料 ²³⁵ U 濃縮度	wt%	1.60	4.80	
	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2-2表 MDX燃料（FPなし）を使用した臨界実験

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 2-3 表 FP を含む体系の臨界実験

項目	単位	燃料貯蔵設備及び燃料仕様の パラメータ範囲
燃料	²³⁵ U 濃縮度	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。

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

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表 2-4 塩素を含んだ臨界実験に対するベンチマーク結果

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

※ SFP に流入した水が局所に集中した体系での EALF

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第 3 表 SCALE Ver. 6. 0 システムの平均誤差及び不確かさ

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

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

c. 使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価への適用性確認

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

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

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

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

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

また、第 5-1 表、第 5-2 表に示す通り、統計的検定により母分散および母平均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 3 表に示す [] ケースの臨界実験ベンチマークより得られた結果を考慮する。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第4表 低水密度状態の臨界実験リスト

臨界実験	減速材密度	ケース数

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

帰無仮説 H_0 : 2群間の分散に差がない (等分散である)

対立仮説 H_1 : 2群間の分散に差がある (等分散ではない)

--

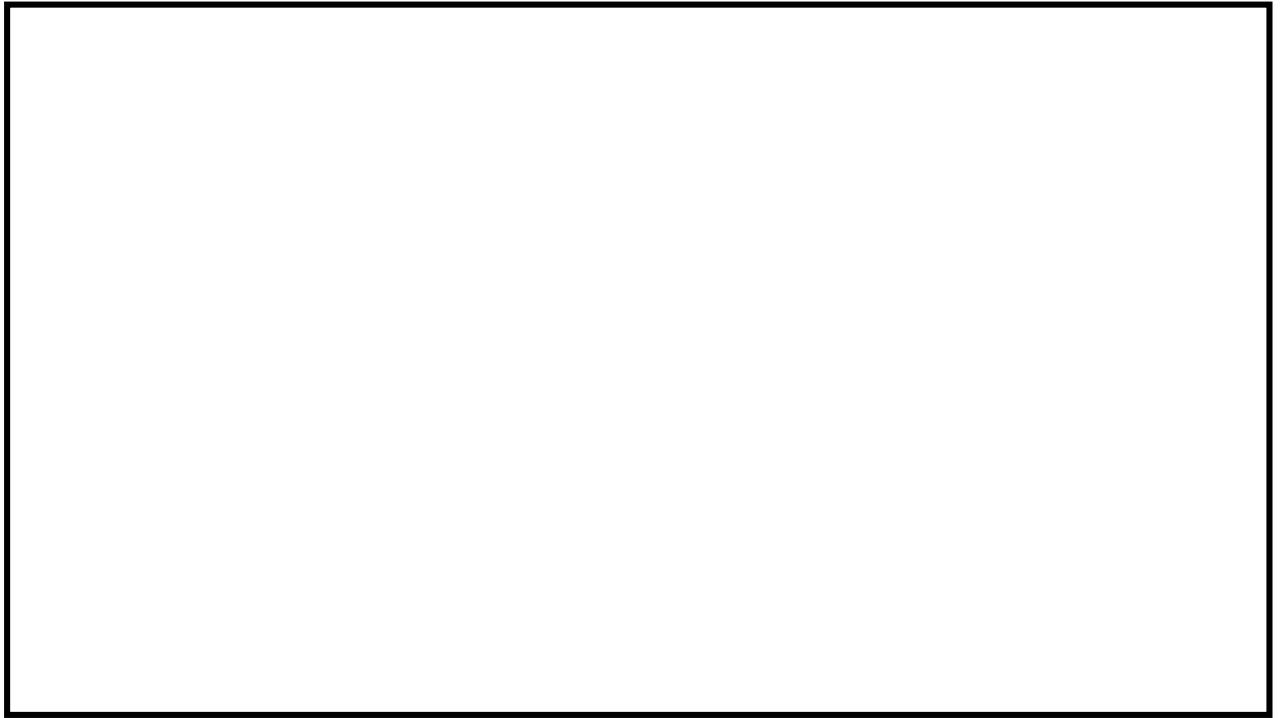
第5-2表 塩素を含む臨界実験ベンチマーク結果とそれ以外の臨界実験ベンチマーク結果に対するt検定

帰無仮説 H_0 : 2群間の平均に差が無い

対立仮説 H_1 : 2群間の平均に差がある

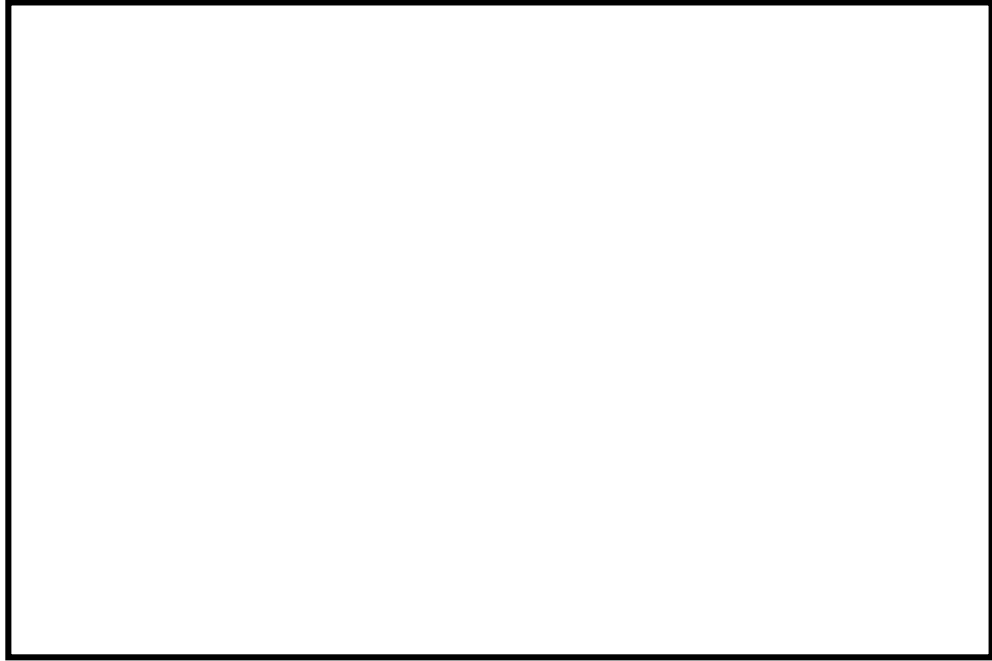
--

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第2図 Δk に対するヒストグラム

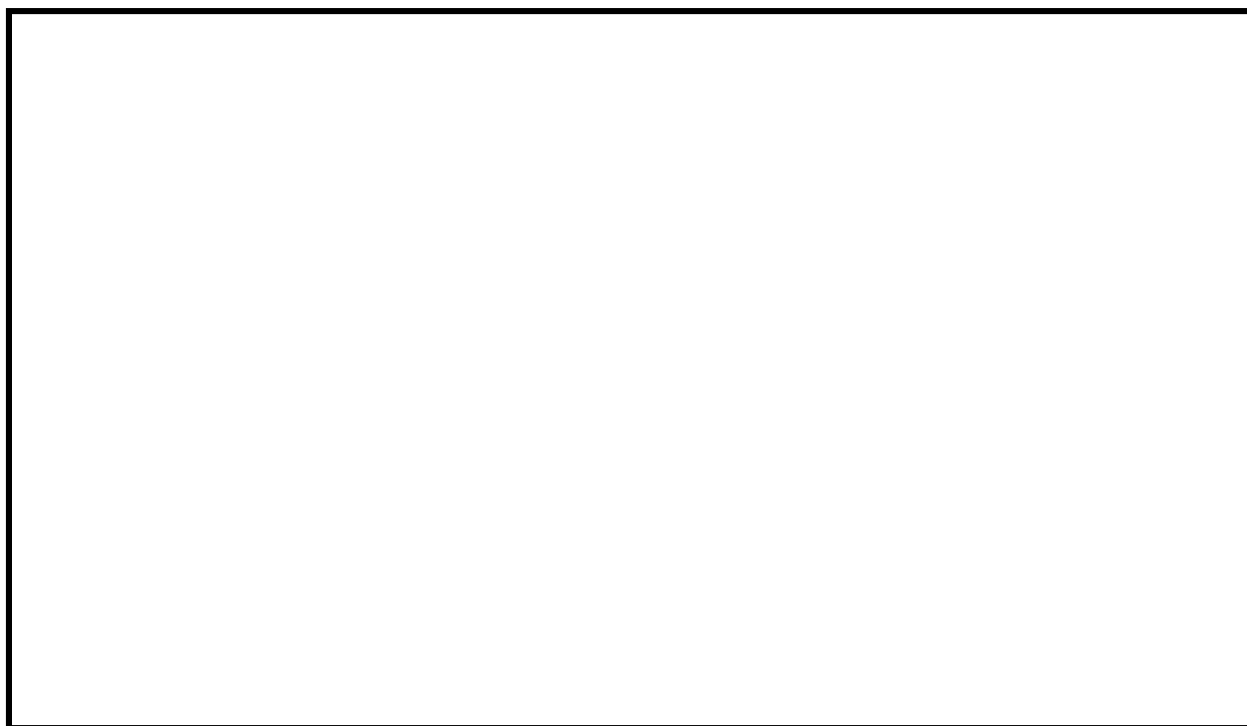
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第3図 選定したベンチマーク実験の EALF と C/E の関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

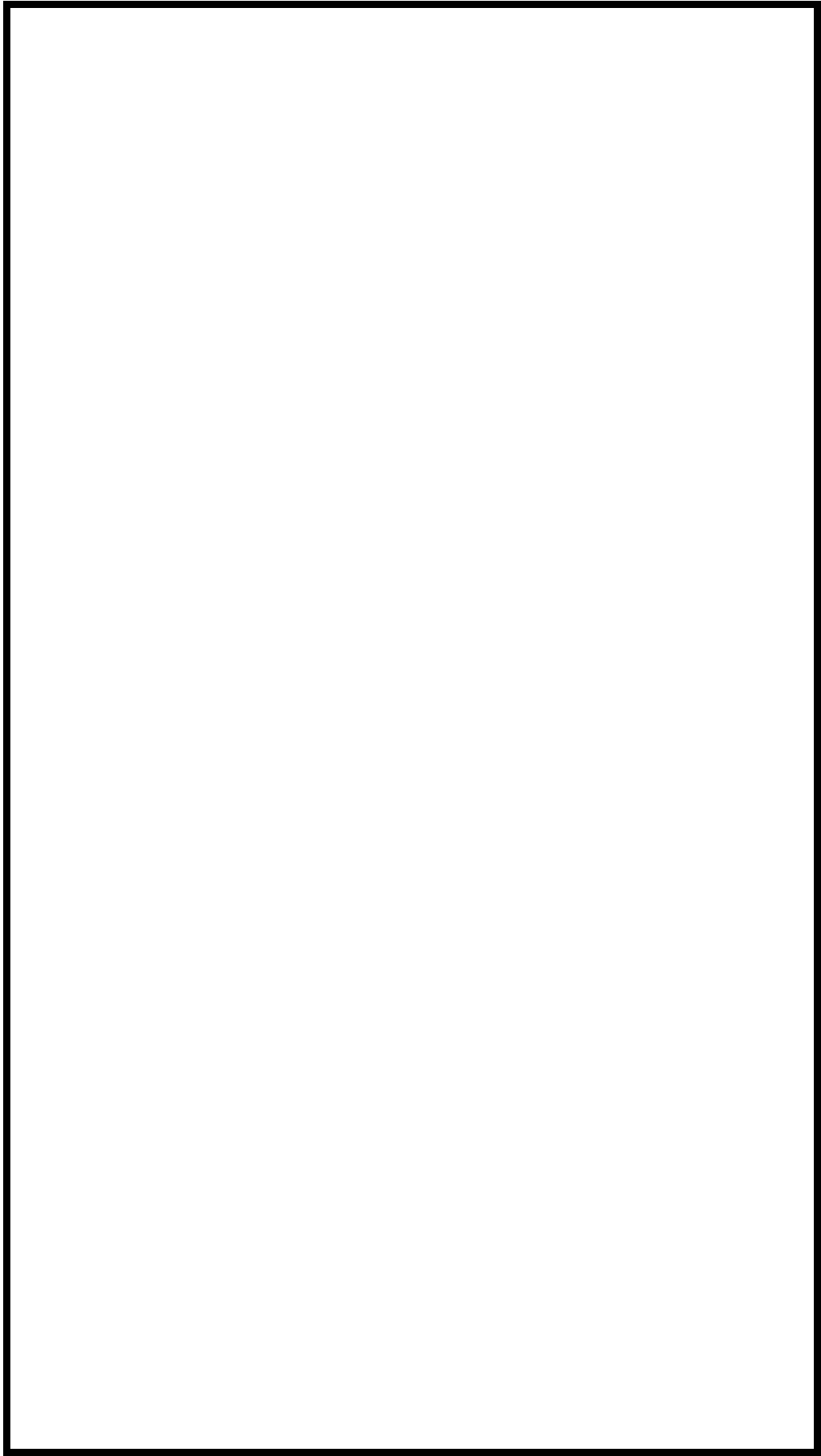
(参考1) 第4表に示す臨界実験の概要



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。

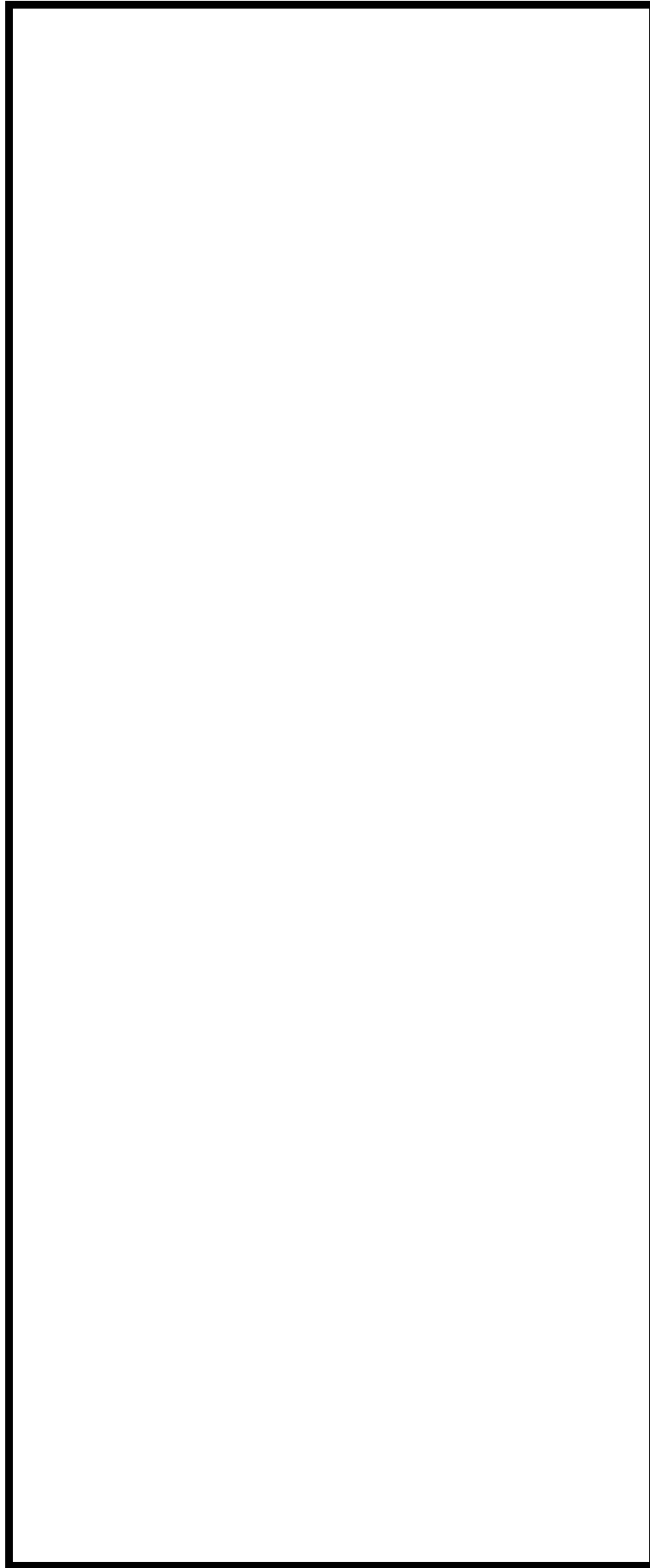
(参考2) FP を含む体系に対し実施したベンチマーク解析の結果

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。

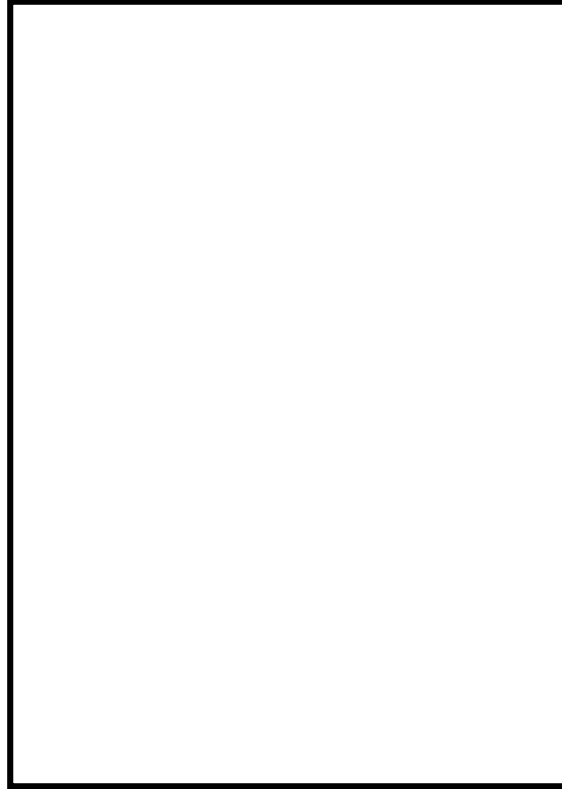
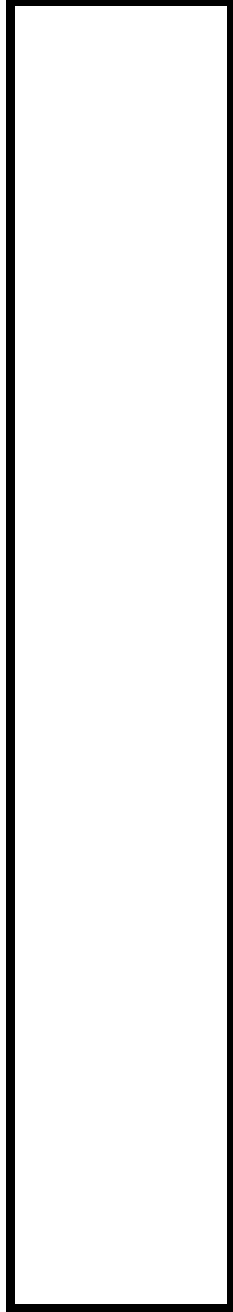
参考1表 FPを含む体系に対し実施したベンチマーク解析結果（続き）



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。

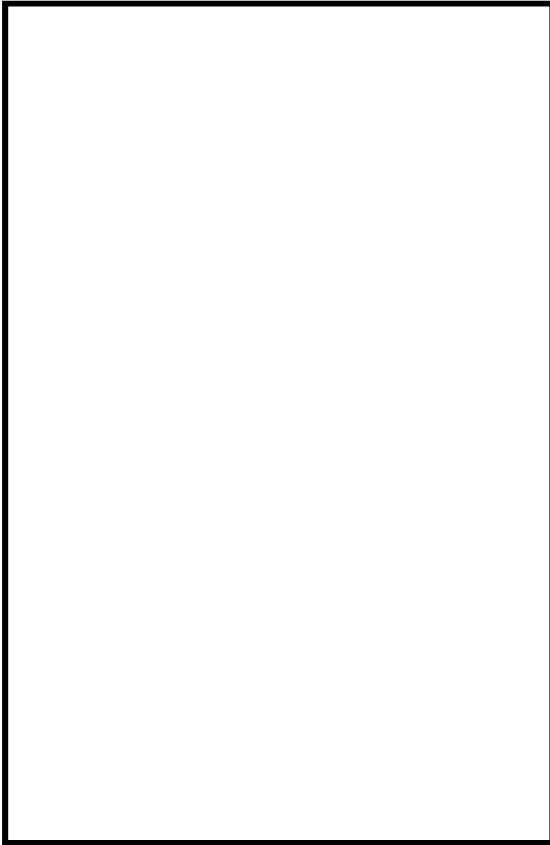
また、参考1表に示す計算結果をFP核種毎に整理したものを参考2表に、C/E評価結果を核種毎でヒストグラムに整理したものを参考図1に示す。

参考2表 FP 毎でのベンチマーク解析結果整理



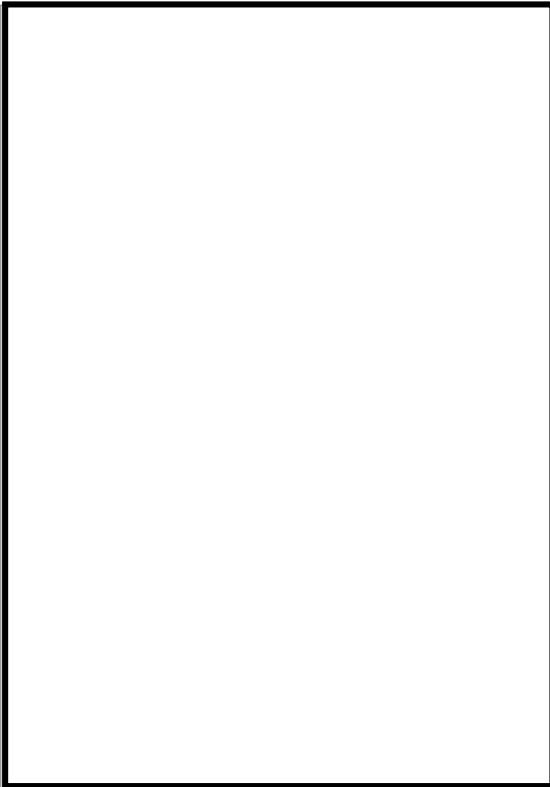
参考図1-1 C/Eの核種毎のヒストグラム

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。



C/Eの核種毎のヒストグラム

参考図1-2



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。

(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。

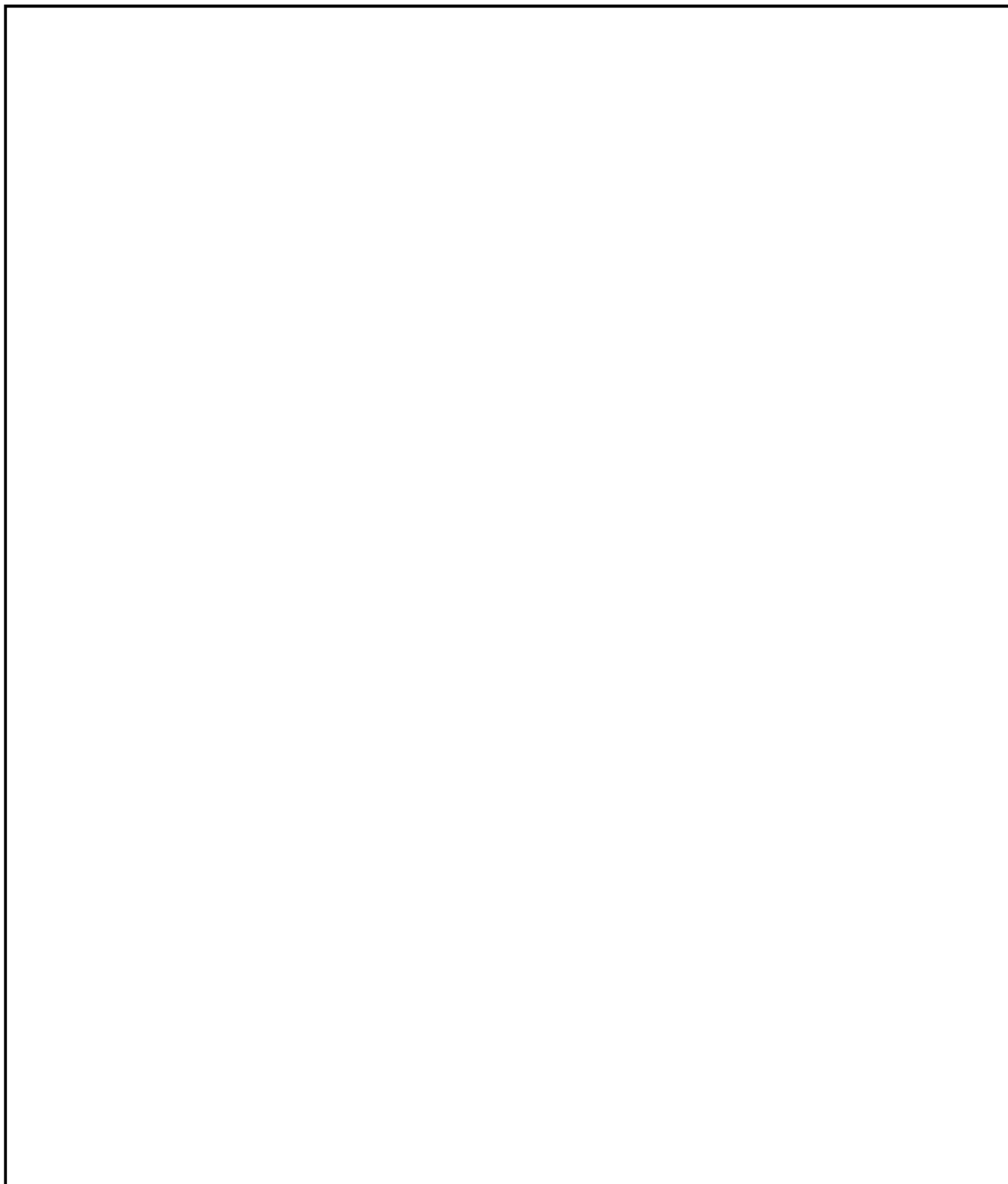
Case ID	keff	σ	$\Delta keff$	考慮しない核種	未臨界性評価で考慮する核種

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。

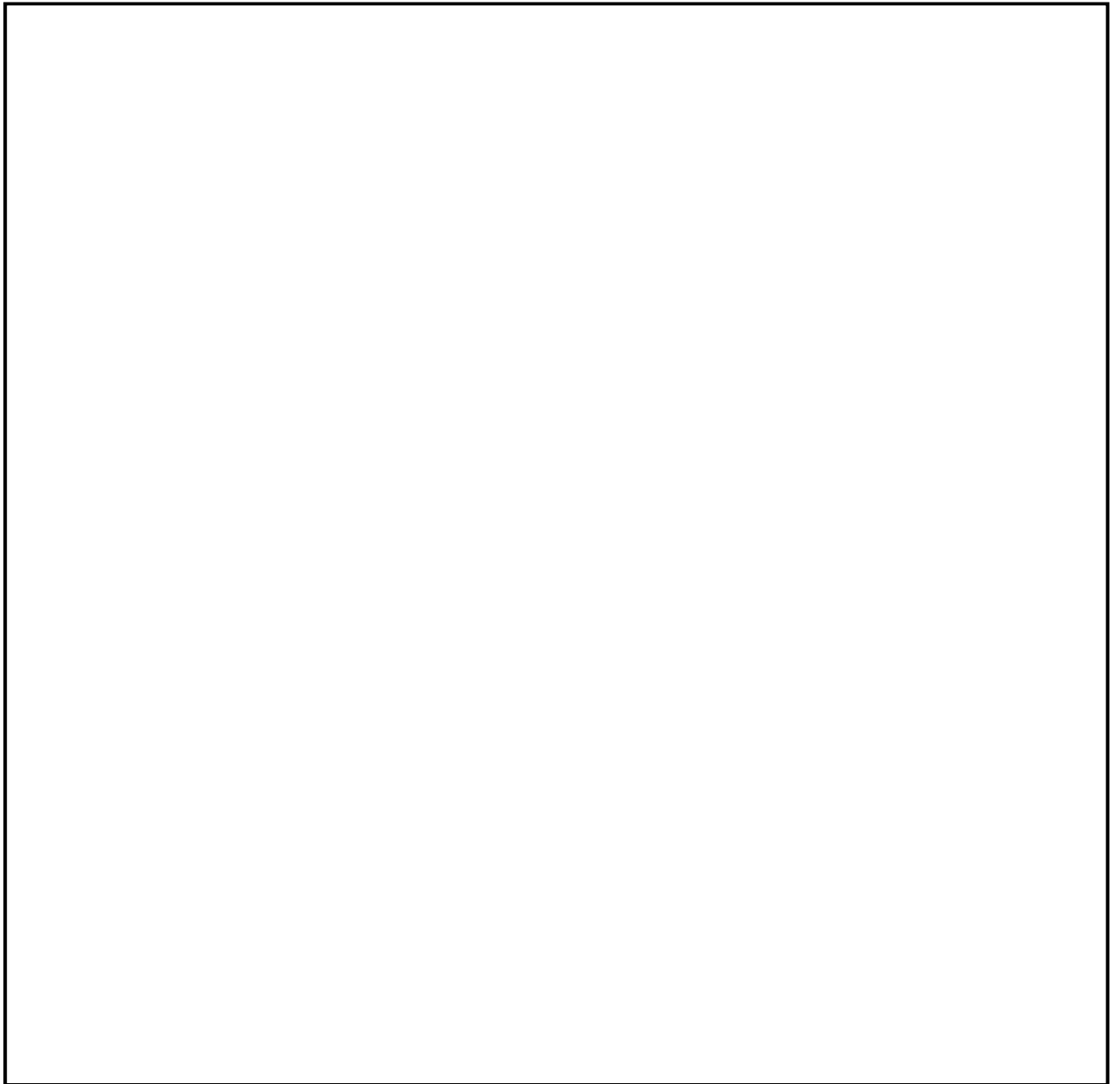
Case	keff	σ	$\Delta keff$	考慮しない核種	未臨界性評価で 考慮する核種

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。