

大飯発電所第3,4号機  
火災感知器増設に係る  
設計及び工事計画認可申請

補足説明資料  
(抜粋)

2022年6月  
関西電力株式会社

<目次>

1. 火災感知器の性能に係るもの
  - 1-1 アナログ式の煙感知器、アナログ式の熱感知器、アナログ式でない炎感知器及びアナログ式でない熱感知器について
  - 1-2 アナログ式でない防爆型の炎感知器について
  - 1-3 熱を感知できる光ファイバケーブルについて
  - 1-4 熱サーモカメラ、アナログ式でない防水型の炎感知器について
  - 1-5 感知器と同等の機能を有する機器の環境性能について
  
2. 火災感知器の配置に係るもの
  - 2-1 火災区域又は火災区画の火災感知器の設置個数について
  - 2-2 火災区域又は火災区画の火災感知器の配置図について
  - 2-3 火災感知器の配置設計における消防設備士の確認項目について
  - 2-4 火災感知器の配置設計における関西電力と協力会社の責任分担及び消防設備士関与の品質プロセスについて
  
3. 消防法施行規則の設置条件と異なる感知設計に係るもの
  - 3-1 火災区域・区画の特性に応じた感知設計について
  - 3-2 原子炉格納容器の火災感知器設計について**
  - 3-3 海水管トンネルエリアの火災感知器設計について
  - 3-4 燃料油貯蔵タンク及び重油タンクエリアの火災感知器設計について
  - 3-5 固体廃棄物貯蔵庫の火災感知器設計について
  - 3-6 放射線量が高い場所を含むエリアの火災感知器設計について
  - 3-7 海水ポンプエリアの火災感知器設計について
  - 3-8 空冷式非常用発電装置エリアの火災感知器設計について
  - 3-9 使用済燃料ピットエリア及び新燃料貯蔵庫エリアの火災感知器設計について
  - 3-10 燃料取替用水ピットエリア及び復水ピットエリアの火災感知器設計について
  - 3-11 放射線量が高い場所を含むエリアの火災感知器設計に関する実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則への適合性について
  - 3-12 水蒸気が多量に滞留するエリアの火災感知器設計について
  
4. 火災受信機盤に係るもの
  - 4-1 火災受信機盤の機能について
  - 4-2 消火設備用感知器の流用について

## 5. その他

5-1 本設計及び工事計画の申請範囲について

5-2 条文整理表について

5-3 設計及び工事計画認可申請書に添付する書類の整理について

5-4 火災感知設備増設における「工事の方法」の該当箇所について

5-5 火災感知設備の耐震性について

参考資料-1 火災感知設備の技術基準規則上の整理について

参考資料-2 感知区画の定義について

参考資料-3 火災区画と管理区域の設定範囲について

### 3-2 原子炉格納容器の火災感知器設計について

本資料は、原子炉格納容器に設置する火災感知器の設計について説明する。

火災防護審査基準における火災区域、区画の設定において、大飯3号機及び大飯4号機の原子炉格納容器はそれぞれ1つの火災区画として設定している。

今回、原子炉格納容器の火災感知器の設計にあたっては、原子炉格納容器内の環境条件を考慮し、この火災区画を分割し、エリア毎に設計する。

#### 3-2-1 原子炉格納容器内のエリア、フロアの概要

原子炉格納容器は、その容器内に原子炉容器、加圧器、蒸気発生器、1次冷却材ポンプやそれらを接続する配管等の機器を収納している。原子炉格納容器内の環境条件を考慮すると、第3-2-1図に示す原子炉格納容器の概略図のとおり、3つのエリアに分類することができる。

##### ①一般エリア

原子炉格納容器内のうち下階層の周回通路沿いのエリア

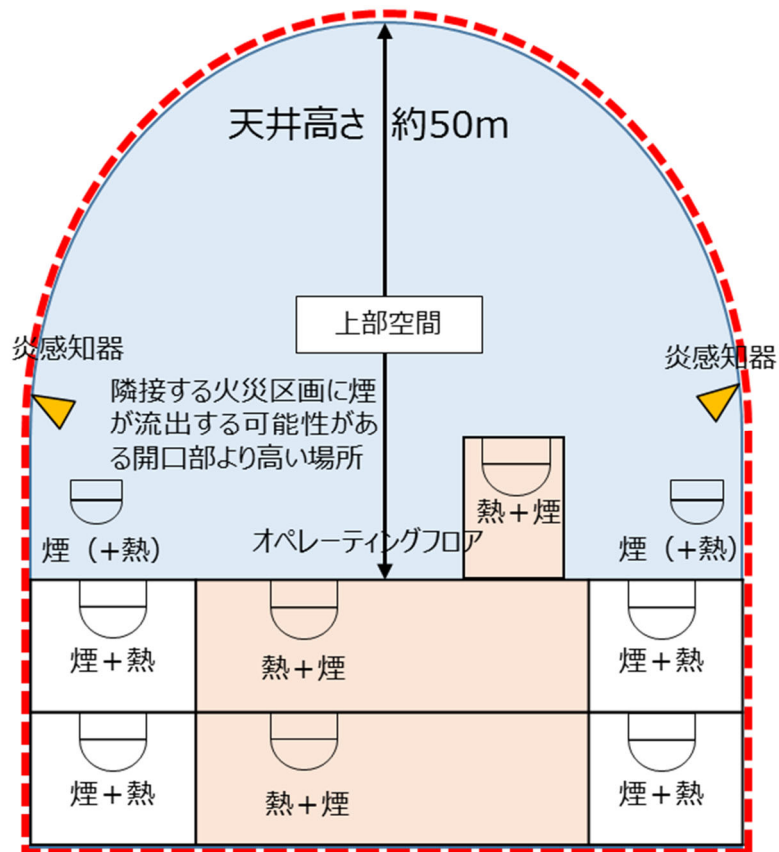
##### ②放射線量が高い場所を含むエリア

運転中において線量当量率が最も高い区分3のエリア（原子炉格納容器ループ室、加圧器室、再生熱交換器室、炉内計装用シンプル配管室）

##### ③高天井エリア

原子炉格納容器内最上部でオペレーティングフロアから上部のエリア（キャビティを含む。）

- : 一般エリア
- : 放射線量が高い場所を含むエリア
- : 高天井エリア
- (赤点線) : 火災区画



第 3-2-1 図 原子炉格納容器の概略図

### 3-2-2 原子炉格納容器内の換気空調設備による空気の流れについて

プラント運転時及び停止時における原子炉格納容器内の換気空調設備による空気の流れを以下に示す。

#### (1) プラント運転時

プラント運転時は、格納容器再循環ファン、蒸気発生器室給気ファン及び加圧器室給気ファン等により構成される格納容器再循環系統により、原子炉格納容器内の空気を取り込み、原子炉格納容器内に排出することで、原子炉格納容器内で空気を循環させる設計としている。各ファンのプラント運転時における運転台数及び設計流量を第 3-2-1 表に示す。

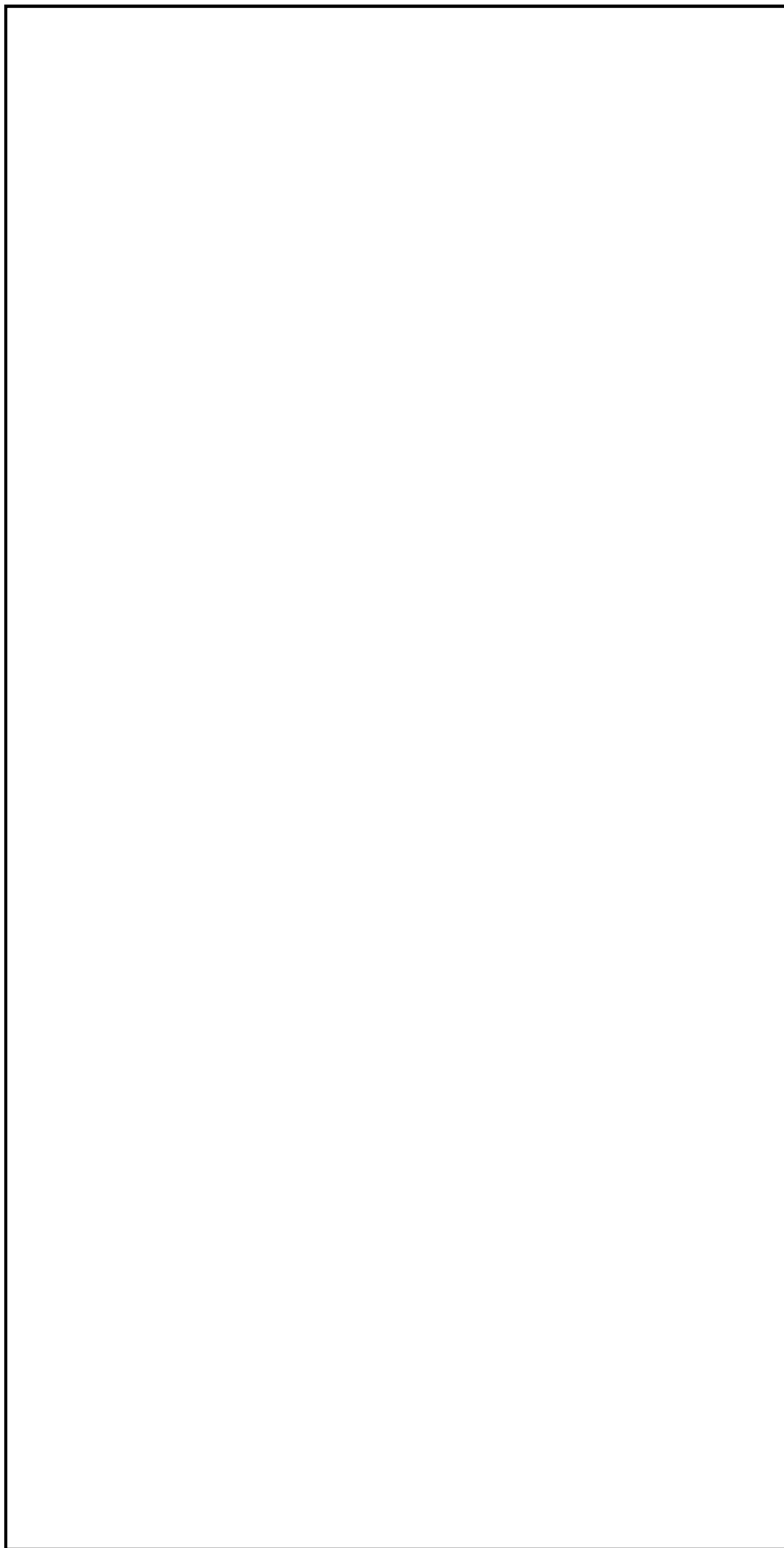
第 3-2-1 表 プラント運転時における格納容器再循環系統について

ファン名称	運転台数	設計流量	計測風量
格納容器再循環ファン	3 台		
蒸気発生器給気ファン	2 台		
加圧器室給気ファン	1 台		

プラント運転時における格納容器再循環系統の設計総流量は約 [ ] m<sup>3</sup>/min である。原子炉格納容器の自由体積が約 [ ] m<sup>3</sup> であることから、5 分未満で原子炉格納容器の自由体積分の空気を循環させる流量をもっており、格納容器再循環系統により原子炉格納容器内全体の空気を循環させることが可能である。

プラント運転時における原子炉格納容器内の格納容器再循環系統の空気の流れを、第 3-2-2 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3-2-2 図 プラント運転中における格納容器再循環系統の空気の流れ

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。

(2) プラント停止時

プラント停止時は、格納容器再循環系統は停止状態となるが、格納容器給気ファン及び格納容器排気ファン等により構成される格納容器空調系統により、原子炉格納容器外の新鮮な空気を原子炉格納容器内に給気し、排気筒を通じて格納容器外に排出することで、原子炉格納容器内の空気を換気及び浄化させる設計としている。各ファンのプラント停止時における運転台数及び設計流量を第 3・2・2 表に示す。

第 3・2・2 表 プラント停止時における格納容器空調系統について

ファン名称	運転台数	設計流量	計測風量
格納容器給気ファン	2 台		
格納容器排気ファン	2 台		

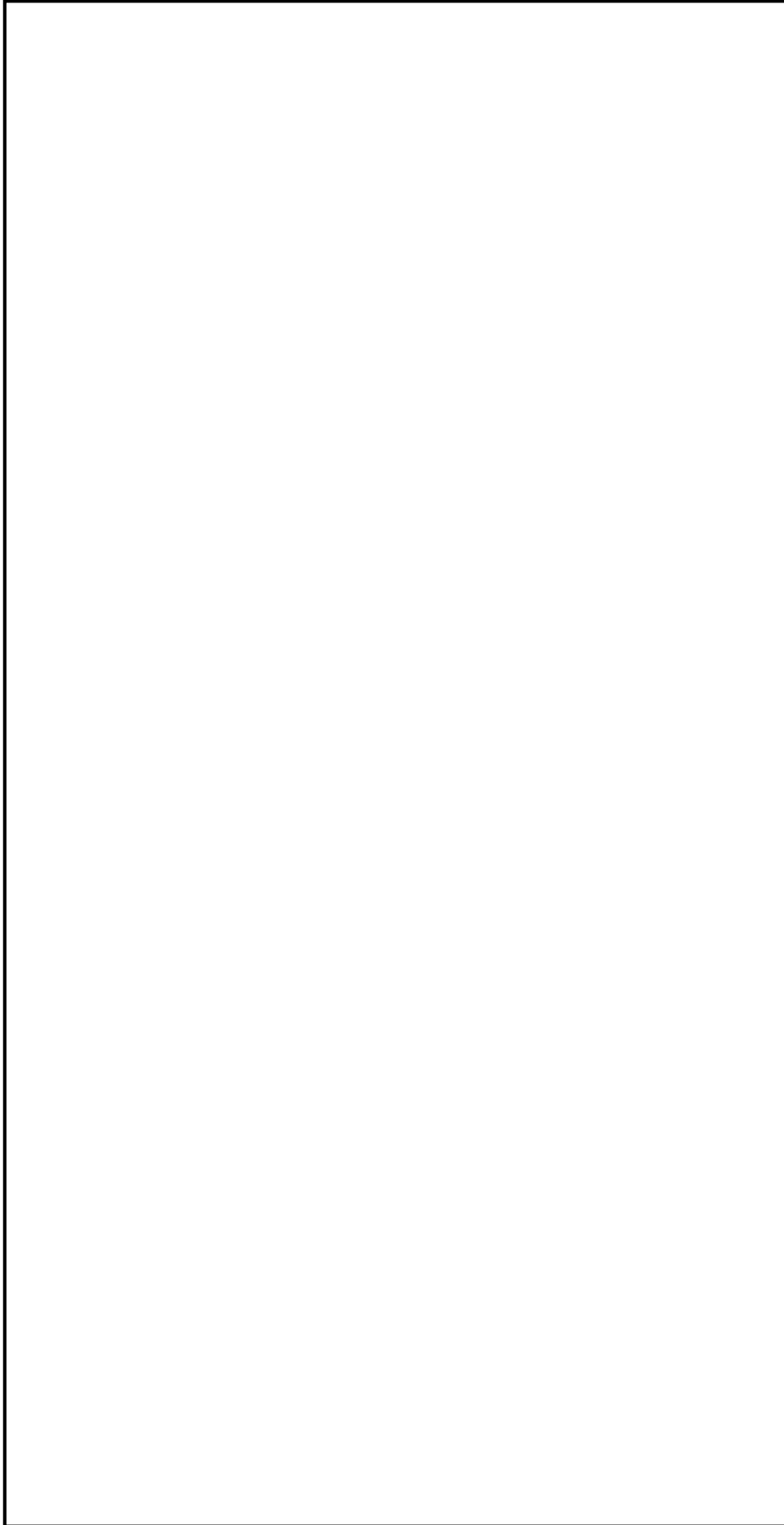
プラント停止時における格納容器空調系統の総給気流量及び総排気流量はそれぞれ約  m<sup>3</sup>/min である。原子炉格納容器の自由体積が約  m<sup>3</sup> であることから、30 分未満で原子炉格納容器の自由体積分の空気を換気及び浄化させる流量をもっており、格納容器空調系統により原子炉格納容器内全体の空気を換気及び浄化させることが可能である。

プラント停止時における原子炉格納容器内の格納容器空調系統の空気の流れを、第 3・2・3 図及び第 3・2・4 図に示す。格納容器給気ファンより給気された空気は、原子炉格納容器内で攪拌及び希釈され、均一となり、排気ダクトを通過して排気筒より排気される。



第 3・2・3 図 プラント停止中における格納容器空調系統の空気の流れ（平面図）





第3-2-4 図 プラント停止中における格納容器空調系統の空気の流れ（系統図）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

### 3・2・3 原子炉格納容器の火災感知器設計

3・2・1 項で分類した①～③のそれぞれのエリアについて、そのエリア内の環境条件等をもとにそれぞれの火災感知器の選定、設計の考え方について説明する。

#### (1) 一般エリア

原子炉格納容器内のうち下層階の周回通路沿いのエリアであり、ループ室内の主要機器からの配管、隔離弁等が設置されているが、高天井エリアや放射線量が高い場所を含むエリアにも該当しないため、アナログ式の煙感知器とアナログ式の熱感知器の異なる 2 種類を選定し設置する設計とする。

#### (2) 放射線量が高い場所を含むエリア

保安規定及びその下部規定の放射線・化学管理業務要綱にて管理区域内の各エリアを線量当量率が低い方から区分 1～3 の 3 段階で区分し、プラント運転中において線量当量率が最も高い区分 3 のエリアであり、原子炉格納容器ループ室、加圧器室、再生熱交換器室及び炉内計装用シンプル配管室が該当する。

当該エリアの火災感知器設計については、補足説明資料 3・6「放射線量が高い場所を含むエリアの火災感知器設計について」に示す。

#### (3) 高天井エリアにおける火災感知器設計

原子炉格納容器内最上部でオペレーティングフロアから上部のエリアであり、天井高さが床面から 20m 以上のエリアである。

一般エリア及び放射線量が高い場所を含むエリアには機器、配管、弁が設置されているが、このエリアはそのような主要な機器類はなく、巨大な空間のエリアである。

#### イ. 火災感知器の選定

高天井エリアの環境条件等を踏まえた火災感知器の選定結果を第 3・2・3 表に示す。第 3・2・1 表のとおり、高天井エリアにおいては、様々な火災感知器が使用可能であるが、オペレーティングフロアの現場施工性を考慮して、1 種類目はアナログ式でない炎感知器を選定し、2 種類目はアナログ式の煙感知器を選定する設計とする。

第3-2-3表 原子炉格納容器オペレーティングフロアにおける感知器の選定

感知方式	熱感知方式				煙感知方式				炎感知方式	
	アナログ式の熱感知器 (スポット型)	アナログ式でない熱感知器 (スポット型)	光ファイバーケーブル	差動分布型熱感知器 (熱電対式、空気管式)	熱サーモカメラ	アナログ式の熱感知器 (スポット型)	アナログ式でない熱感知器 (スポット型)	空気吸引式の煙感知器		光電分離型煙感知器 (非蓄積型)
設置適合性 (消防施設主任技師の選定(注1)による)	取付面の考慮 (故障の防止)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	環境条件の考慮 (温度、湿度、空気清浄性の考慮 (感知性能の確保))	△	△	△	△	○	△	△	△	○
設置項目	試作機の防止	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	信頼性の確保	○	○	○	○	○	○	○	○	○
評価	電圧の確保	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	監視	○	○	○	○	○	○	○	○	○
設置項目 (信頼性の確保に必要など 施工の成否性)	現場施工性 (信頼性の確保に必要など 施工の成否性)	○	○	△	△	△	△	△	△	△
	各感知方式で使用する火災感知器	△ (熱が滞留する場合に限る)	△ (熱が滞留する場合に限る)	△ (熱が滞留する場合に限る)	△ (熱が滞留する場合に限る)	△ (熱が滞留する場合に限る)	△ (熱が滞留する場合に限る)	△ (煙が滞留する場合に限る)	△ (煙が滞留する場合に限る)	△ (煙が滞留する場合に限る)

○：選定可能 △：条件付きで選定可能 ×：選定することが適切でない

※・環境条件及び現場施工性を考慮して、アナログ式の熱感知器を他の熱感知器を他の熱感知器方式の火災感知器より優先使用  
 環境条件及び現場施工性を考慮して、アナログ式の煙感知器を他の煙感知器を他の煙感知器方式の火災感知器より優先使用

## ロ. 火災感知器の選定理由及び設置方法

オペレーティングフロアは天井高さが床面から 20m 以上のエリアであり、炎感知器の設置は可能であるが、煙感知器と熱感知器は取付面の高さが消防法施行規則で規定される高さ以上であり、消防法施行規則第 23 条第 4 項第一号イにより設置することが適切ではないため、火災防護審査基準 2.2.1(1)②に定められた方法又は保安水準①を確保できる方法で設置することが困難である。

従って、アナログ式でない炎感知器は、オペレーティングフロアの床面上方に一部グレーチング床  が設置されていることを考慮し、グレーチングの上部と下部の床面をそれぞれ監視できるように火災防護審査基準 2.2.1(1)②に定められた方法により設置する設計とする。炎感知器の監視範囲を第 3-2-5 図に示す。

また、アナログ式の煙感知器については、プラント運転中は原子炉容器室冷却ファン、蒸気発生器室給気ファン（以下「各給気ファン」という。）及び原子炉格納容器再循環ファン（以下「再循環ファン」という。）の運転により原子炉格納容器内で空気が循環する設計となっていること、並びに、プラント停止中に原子炉内に燃料がある状態でこれらのファンを停止する運用となっていることを踏まえ、以下に記載するファンの運転状況と空気の流れを考慮して隣接する火災区画に煙が流出する可能性がある開口部より高い場所に設置する設計とする。

- ・各給気ファン及び再循環ファンの運転時においては、オペレーティングフロアの火災により発生した熱及び煙、あるいは原子炉格納容器ループ室の火災により流れ込む熱及び煙は、各給気ファンの運転により原子炉格納容器ループ室を通過してオペレーティングフロアに抜ける空気の流れに乗って上昇し、再循環ファンにより原子炉格納容器内で循環する設計となっていることから、火災の継続とともに原子炉格納容器内の空気温度及び煙濃度が全体的に均一になりながら高まっていく。
- ・各給気ファン及び再循環ファンの停止時においては、火災により発生した熱により上昇気流が発生すること及び格納容器給気ファン及び格納容器排気ファンが運転を継続していることから、オペレーティングフロアの火災により発生した熱及び煙、あるいは原子炉格納容器ループ室の火災により流れ込む熱及び煙は、格納容器給気ファンによって取り込まれる外気で攪拌されながらオペレーティングフロア内を対流し、格納容器排気ファンにより排出される。各給気ファン及び再循環ファンの停止時における火災による熱及び煙の流れを第 3-2-6 図に示す。

以上より、各給気ファン及び再循環ファンの運転時及び停止時において、発炎段階の火災は消防法施行規則どおりに設置する炎感知器により早期に感知し、発熱量の少ないくん焼段階の火災は発火源となり得る設備の直上及び火災により発生した煙の流路、並びに、隣接する火災区画に煙が流出する可能性がある開口部より高い場所に設置するアナログ式の煙感知器により感知することで保安水準②を確保する設計と

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

する。火災により発生した煙の流路である原子炉格納容器ループ室上部のSG側のグレーチング面への設置方法は、原子炉格納容器ループ室における設置方法に準じた設計とする。(補足説明資料 3-11 参照。)また、各給気ファン及び再循環ファンの停止時において、原子炉格納容器ループ室及び加圧器室上部の火災により流れ込む煙についても、隣接火災区画に流出する可能性がある開口部より高い場所に設置するアナログ式の煙感知器により感知する設計とする。

なお、発火源となり得る設備は、火花を発生する可能性のある設備及び高温の設備に該当する電気盤とし、アナログ式の熱感知器及びアナログ式の煙感知器を第 3-2-7 図のように電気盤の直上に支持鋼材(グレーチングのような開口部はない)を使用して設置する設計とする。アナログ式の熱感知器は、保安水準②の確保に必須ではないが、より早期に火災を感知できるよう自主設置する設計とする。

発火源となり得る設備の直上に設置するアナログ式の熱感知器及びアナログ式の煙感知器を第 3-2-8 図に示し、原子炉格納容器内の開口部の位置を第 3-2-9 図に示す。

#### ハ. 各給気ファン及び再循環ファン停止時における火災発生時の原子炉格納容器のコンクリートへの熱影響の評価

原子炉格納容器のコンクリートへの熱影響については、大飯 3 号機 高経年化技術評価書の「コンクリート構造物および鉄骨構造物の技術評価書[運転を断続的に行うことを前提とした評価]」2.3.1 (1) a.に記載しており、日本建築学会「原子炉建屋構造設計指針・同解釈」(1988)では局所で90℃、一般部分で65℃という温度制限が定められているが、長尾らの実験によれば、長期加熱時のコンクリートの圧縮強度は65℃、90℃及び110℃で3.5年間加熱した場合でも、強度低下は見られないとされているため、コンクリート温度が110℃を下回っていれば熱によるコンクリートの強度低下は長期健全性評価上問題とならないと評価して、認可をいただいている。

また、日本コンクリート学会「コンクリートの診断技術'16」によれば、一般的にコンクリートが加熱されても温度が300℃を超えない場合は、加熱後の冷却期間中に強度が回復するため、問題とならないとの記載がある。

上記の事実並びに既工認における大飯 3 号機の原子炉格納容器の要目表に最高使用温度144℃との記載があることを踏まえ、原子炉格納容器の放射性物質の閉じ込め機能が影響を受ける温度の閾値を144℃とし、以下のとおり原子炉格納容器内オペレーティングフロアの火災によるコンクリートに対する影響を評価した。

##### a. 米国NRCが検査官向けに公開している評価ツールを用いた評価

まず、格納容器オペフロにおける火災時の原子炉格納容器頂部の温度及び煙層の厚さを評価するため、米国NRCが検査官向けに公開している評価ツールであるFDTsを用いて、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」の表6.2で燃料率が最

も大きい火災荷重**908,095kJ/m<sup>2</sup>**、等価時間**1.0時間**（平均燃焼率**252kW/m<sup>2</sup>**）の火災による発熱量、原子炉格納容器相当の空間体積等を入力した結果、頂部の高温ガス層温度は約**80℃**程度であった。

一方、自然換気状態で頂部から蓄積される煙層の評価を行ったところ、頂部から下方**20m**（実機のポーラクレーン付近 [ ] に相当）及び頂部から下方**30m**（実機のグレーチング上部 [ ] 付近に相当）まで煙層は降下するという結果が得られた。

評価ツールを用いた評価結果を別紙**1・1**に示す。

#### b. 原子炉格納容器オペレーティングフロアにおける火災時の空気の流れの解析

次に、実際の原子炉格納容器内オペレーティングフロアの形状及び大きさを模擬し、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」の表**6.2**で燃料率が最も大きい火災荷重**908,095kJ/m<sup>2</sup>**、等価時間**1.0時間**（平均燃焼率**252kW/m<sup>2</sup>**）並びに火災荷重が最も大きい**5,675,596kJ/m<sup>2</sup>**、等価時間**9.0時間**（平均燃焼率**175kW/m<sup>2</sup>**）の2通りの火災を想定し、それぞれの火災が時間無制限に継続した場合の原子炉格納容器頂部の温度を定量的に評価した。その結果、頂部のコンクリート温度は**86℃**となり、原子炉格納容器の最高使用温度である**144℃**を十分に下回ることを確認した。さらに、煙が頂部からポーラクレーン付近 [ ] 及びグレーチング上部 [ ] に下降するまでの時間差を評価するため、発熱量が小さい火災を想定して熱流動解析を実施した。

解析条件として、オペレーティングフロアを床面とした原子炉格納容器円筒部及びドーム部を模擬し、その面積及び高さは大飯4号機を参考にした模擬空間を設定し、火源としては、オペレーティングフロアの中央に一般的な火災を想定し、直径**2m**、温度**800℃**及び**1200℃**の火源を設定した。また、原子炉格納容器壁面は、火災により発生する高温ガスに対してヒートシンクとして働くことから、原子炉格納容器壁面であるコンクリートの熱抵抗及び表面での熱伝達を加味し、原子炉格納容器外の外気への放熱を考慮している。

解析の結果、火災により発生した高温ガスは、上昇気流となって原子炉格納容器上部に到達し、その後外気に接するコンクリート壁で冷却され、自然対流によって壁面に沿って下降する結果となった。上昇気流の速度は**1.5m/s**～**1.8m/s**程度、下降する気流の速度は**0.3m/s**程度で、煙は原子炉格納容器頂部に到達後、約**3分**でポーラクレーン付近 ([ ] )、約**4分**でグレーチング上部 ([ ] 付近) に到達することを確認した。

なお、本解析においては原子炉格納容器頂部の高温ガス温度は約**46℃**となった。解析の詳細については別紙**1・2**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。

上記のa.及びb.の温度評価及び空気の流れの解析結果から、火災感知器を格納容器頂部 [ ]、ポーラクレーン付近 [ ] 及びグレーチング上部 ( [ ] ) のいずれに設置しても感知可能であること、また、感知時間の差は数分程度であり、その間における原子炉格納容器頂部の温度は最高使用温度144℃を十分に下回っていることから、火災による格納容器の放射性物質の閉じ込め機能への悪影響はないと考える。

## 二. 火災感知器の設置場所について

原子炉格納容器オペレーティングフロアの感知器設計のうち、火災により発生した煙の流路、並びに、隣接する火災区画に煙が流出する可能性がある開口部より高い場所に設置する設計としているアナログ式の煙感知器について、ハ. で評価及び解析した原子炉格納容器頂部の温度及び火災発生時の空気の流れを踏まえ、その設置場所について検討した。また、空気吸引式の煙感知器及び光電分離式の煙感知器についても同様に検討した。

検討にあたって、「原子炉格納容器コンクリート壁の健全性確保」、「火災の感知性能及び網羅性の確保」、「設置の成立性」、「保守点検の成立性」及び「感知器の耐震性の確保及び波及的影響野防止」の5つの項目について検討し、保安水準②を確保する上で最も適切な場所に設置することとする。

### a. 原子炉格納容器コンクリート壁の健全性確保

ハ. において評価したとおり、火災の発生を想定しても原子炉格納容器頂部のコンクリート表面温度は86℃となり、原子炉格納容器の最高使用温度である144℃を下回ることから、保安水準②を適用して煙感知器を設置する場所によらず、原子炉格納容器のもつ放射性物質の閉じ込め機能に悪影響を与えることはない。従って、保安水準②を適用し煙感知器を原子炉格納容器内オペレーティングフロアのいずれの場所に設置したとしても、原子炉格納容器コンクリート壁の健全性は確保することは可能である。

### b. 火災の感知性能及び網羅性の確保

感知性能及び網羅性の確保のため、火災により発生した煙をもれなく確実に感知できるように、格納容器再循環ファン等の停止時における原子炉格納容器オペレーティングフロア内の無炎火災について、「①煙が原子炉格納容器の頂部まで上昇しない場合」と「②煙が上昇し原子炉格納容器の頂部に溜まる場合」を想定し、それぞれの場合においても有効に感知できるように設置場所を検討する。

①煙が原子炉格納容器の頂部まで上昇しない場合は、火災により発生する煙が原子炉格納容器の頂部まで上昇せずに、オペレーティングフロアに流れ込むことが想

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

定されることから、その煙の流路及び煙の流れ込む場所に設置することが適切である。

②煙が上昇し原子炉格納容器の頂部に溜まる場合は、火災により発生する煙が原子炉格納容器の頂部まで上昇し、自然対流によって溜まった煙が原子炉格納容器の壁面に沿って下降することで原子炉格納容器オペレーティングフロアに到達することが想定されることから、その煙の流路及び煙の流れ込む場所又は煙が溜まる場所に設置することが適切である。

c. 設置の成立性

設置の成立性として、設置に係る現場施工に影響を与える干渉物の有無や溶接施工が可能であること等を確認し、問題なく設置できることを確認する。また、労働安全上の懸念についても考慮して検討する。

d. 保守点検の成立性

保守点検の成立性として、保守点検に係る現場施工に影響を与える干渉物の有無や不具合が生じた場合の対応に係る期間等を確認し、問題なく保守点検できることを確認する。また、労働安全上の懸念についても考慮して検討する。

e. 感知器の耐震性の確保及び波及的影響防止

感知器について、耐震性を確保し、波及的影響を防止できる設置が可能かを確認する。

上記の 5 つの観点を踏まえ、火災により発生した煙の流路、並びに、隣接する火災区画に煙が流出する可能性がある開口部より高い場所に設置するアナログ式の煙感知器は、火災によって発生した煙が格納容器頂部まで上昇しない場合と格納容器頂部まで上昇し溜まる場合のいずれの場合でも、原子炉格納容器オペレーティングフロアの火災により発生する煙をもれなく確実に感知でき、かつ、感知器の設置又は保守点検作業において労働安全上の懸念がない場所にアナログ式の煙感知器を設置するという方針で検討した。

その結果、グレーチング上部  が設置場所として最適であると判断した。

第 3-2-4 表に検討内容の詳細、第 3-2-10 図に原子炉格納容器上部の機器設置状況、第 3-2-11 図に原子炉格納容器全体の感知器設計概要を示す。

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3-2-4表(1/2) CV再循環ファン等の停止時におけるCVオペフロ内の無炎火災(煙がCVトップまで上昇しない想定)を有効に感知できる煙感知器設置場所の比較検討結果

設置場所 検討項目	案1 感知区画10-1,10-2の グレーチング面上部及び 加圧器室の天井面上部に 煙感知器(スポット型)を設置	案2 ポーラクレーン付近で人が寄り付き、 感知器の設置及び 保守点検が可能なCV壁面に 煙感知器(スポット型)を設置	案3-1 CVトップドーム部に 煙感知器(スポット型)を設置	案3-2 必要な期間、CVトップドーム部で 火災を感知できるように 煙感知器(スポット型)を仮設	案3-3 CVトップドーム部に 空気吸引式の煙感知器を設置	案3-4 CVトップドーム部に 光電分離式の煙感知器を設置
感知器の設置高さ	E.L. <input type="text"/> 程度	E.L. <input type="text"/> 程度	E.L. <input type="text"/> 程度	E.L. <input type="text"/> 程度	E.L. <input type="text"/> 程度	E.L. <input type="text"/> 程度
CVの健全性	「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」で燃焼率が最大の252kW/m <sup>2</sup> の火災を想定しても、CVトップの温度は86℃程度であり、CVの健全性に問題はない。(CVの最高使用温度は144℃)					
火災の感知性能及び 網羅性の確保	○ 火災により発生する煙がCVトップまで上昇 せずに自然対流によって流れてくる場所であ り、感知可能である。	△ 火災により発生する煙がCVトップまで上昇 せずに、自然対流によって流れてくる場所であ り、感知可能である。ただし、発生する煙がポ ーラクレーンの高さまで上昇する必要がある。	× 煙がCVトップまで上昇しないため 感知できない可能性がある。	× 煙がCVトップまで上昇しないため 感知できない可能性がある。	× 煙がCVトップまで上昇しないため 感知できない可能性がある。	× 煙がCVトップまで上昇しないため 感知できない可能性がある。
設置の成立性	○ 他の計器等も設置されている場所で、通常 時にも作業している場所であり、 <b>問題なく設 置可能</b> である。	△ ポーラクレーン上部はクレーン則に基づく年次 点検時(モータ、ワイヤー点検等)にのみ作 業を想定している場所であり、ポーラクレー ンを足場として他の設備を設置する作業は想 定しておらず、感知器を設置する場合、CV 壁面に身を乗り出して作業する必要があるこ とから、 <b>労働安全上の懸念</b> がある。	△ ポーラクレーン上部はクレーン則に基づく年次 点検時(モータ、ワイヤー点検等)にのみ作 業を想定している場所であり、ポーラクレー ン上部に高層となる足場を組み、CVトップに 感知器を設置し、CV壁面にケーブルを敷 設する必要があるため、 <b>労働安全上の懸念</b> がある。	○ CVトップにA種CV-LRT時の温度測定用 に設置されている吊ピース及び滑車を活用 し、感知器を吊り上げることで、比較的容易 に仮設が可能である。	△ ポーラクレーン上部はクレーン則に基づく年次 点検時(モータ、ワイヤー点検等)にのみ作 業を想定している場所であり、ポーラクレー ン上部に高層となる足場を組み、CVトップに 空気吸引配管を設置し、CV壁面にも敷設 する必要があるため、 <b>労働安全上の懸念</b> が ある。	△ ポーラクレーン上部はクレーン則に基づく年次 点検時(モータ、ワイヤー点検等)にのみ作 業を想定している場所であり、ポーラクレー ン上部に高層となる足場を組み、CVトップに 感知器を設置し、CV壁面にケーブルを敷設 する必要があるため、 <b>労働安全上の懸念</b> が ある。
保守点検の成立性	○ 感知器故障時の対応及び定期取替(数年 に1回)を実施する必要があるが、設置時 と同様に <b>問題なく実施可能</b> である。	△ 感知器故障時の対応及び定期取替(数年 に1回)を実施する必要があるが、設置時 と同様に <b>労働安全上の懸念</b> がある。	× 感知器故障時の対応及び定期取替(数年 に1回)を実施する必要があるが、設置時 と同様に <b>労働安全上の懸念</b> がある。また、感 知器が故障した場合は取替作業に1か月 以上要するため、火災を監視できない状態が 長期間に及ぶ可能性がある。	○ 仮設前に感知器の点検が可能であり、仮設 運用中に感知器が故障した場合も速やかに 対応できるため、保守点検について問題はない。	× 感知器故障時の対応及び定期点検(動作 試験)を実施する必要があるが、設置時と 同様に <b>労働安全上の懸念</b> がある。また、空 気吸引配管に不具合が生じた場合は取替 作業に1か月以上要するため、火災を監視 できない状態が長期間に及ぶ可能性がある。	× 感知器故障時の対応及び定期取替(数年 に1回)を実施する必要があるが、設置時 と同様に <b>労働安全上の懸念</b> がある。また、感 知器が故障した場合は取替作業に1か月 以上要するため、火災を監視できない状態が 長期間に及ぶ可能性がある。
感知器の耐震性の確 保及び波及的影響の 防止	○ 耐震性の確保及び 波及的影響の防止は可能である。	○ 耐震性の確保及び 波及的影響の防止は可能である。	○ 耐震性の確保及び 波及的影響の防止は可能である。	× 耐震性の確保が困難である。	○ 耐震性の確保及び 波及的影響の防止は可能である。	○ 耐震性の確保及び 波及的影響の防止は可能である。
評価	○ 火災を有効に感知できる。	△ 火災を有効に感知できない場合がある。	× 火災を有効に感知できない。	× 火災を有効に感知できない。	× 火災を有効に感知できない。	× 火災を有効に感知できない。

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 3-2-4 表(2/2) CV再循環ファン等の停止時におけるCVオペフロ内の無炎火災（煙が上昇しCV上部に溜まる想定）を有効に感知できる煙感知器設置場所の比較検討結果

設置場所 検討項目	案 1 感知区画 10-1,10-2 の グレーチング面上部及び 加圧器室の天井面上部に 煙感知器（スポット型）を設置	案 2 ポーラクレーン付近で人が寄り付き、 感知器の設置及び 保守点検が可能な CV 壁面に 煙感知器（スポット型）を設置	案 3-1 CV トップドーム部に 煙感知器（スポット型）を設置	案 3-2 必要な期間、CV トップドーム部で 火災を感知できるように 煙感知器（スポット型）を仮設	案 3-3 CV トップドーム部に 空気吸引式の煙感知器を設置	案 3-4 CV トップドーム部に 光電分離式の煙感知器を設置
感知器の設置高さ	E.L. <input type="text"/> 程度	E.L. <input type="text"/> 程度	E.L. <input type="text"/> 程度	E.L. <input type="text"/> 程度	E.L. <input type="text"/> 程度	E.L. <input type="text"/> 程度
CV の健全性	「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」で燃焼率が最大の 252kW/m <sup>2</sup> の火災を想定しても、CV トップの温度は 86℃程度であり、CV の健全性に問題はない。（CV の最高使用温度は 144℃）					
火災の感知性能及び 網羅性の確保	○ （煙が CV 頂部に到達後 4 分程度で感知） 火災により発生する煙が上昇、自然対流する流れの場所であり、感知可能である。ただし、煙層の熱量が小さく自然対流の流れがほとんどない場合、煙が沈降し感知するまでに時間を要するがその間熱による CV への悪影響はない。	○ （煙が CV 頂部に到達後 3 分程度で感知） 火災により発生する煙が上昇、自然対流する流れの場所であり、感知可能である。ただし、煙層の熱量が小さく自然対流の流れがほとんどない場合、煙が沈降し感知するまでに時間を要するが、その間熱による CV への悪影響はない。	○ （煙が CV 頂部に到達後即座に感知） 火災により発生する煙が溜まる可能性がある場所であり、早期感知が期待できる。	○ 火災により発生する煙が溜まる可能性がある場所であり、早期感知が期待できる。	○ 火災により発生する煙が溜まる可能性がある場所であり、早期感知が期待できる。	○ 火災により発生する煙が溜まる可能性がある場所であり、早期感知が期待できる。
設置の成立性	○ 他の計器等も設置されている場所で、通常時にも作業している場所であり、 <b>問題なく設置可能</b> である。	△ ポーラクレーン上部はクレーン則に基づく年次点検時（モータ、ワイヤー点検等）にのみ作業を想定している場所であり、ポーラクレーンを足場として他の設備を設置する作業は想定しておらず、感知器を設置する場合、CV 壁面に身を乗り出して作業する必要があることから、 <b>労働安全上の懸念</b> がある。	△ ポーラクレーン上部はクレーン則に基づく年次点検時（モータ、ワイヤー点検等）にのみ作業を想定している場所であり、ポーラクレーン上部に高層となる足場を組み、CV トップに感知器を設置し、CV 壁面にケーブルを敷設する必要があるため、 <b>労働安全上の懸念</b> がある。	○ CV トップに A 種 CV-LRT 時の温度測定用に設置されている吊りピース及び滑車を活用し、感知器を吊り上げることで、比較的容易に仮設が可能である。	△ ポーラクレーン上部はクレーン則に基づく年次点検時（モータ、ワイヤー点検等）にのみ作業を想定している場所であり、ポーラクレーン上部に高層となる足場を組み、CV トップに空気吸引配管を設置し、CV 壁面にも敷設する必要があるため、 <b>労働安全上の懸念</b> がある。	△ ポーラクレーン上部はクレーン則に基づく年次点検時（モータ、ワイヤー点検等）にのみ作業を想定している場所であり、ポーラクレーン上部に高層となる足場を組み、CV トップに感知器を設置し、CV 壁面にケーブルを敷設する必要があるため、 <b>労働安全上の懸念</b> がある。
保守点検の成立性	○ 感知器故障時の対応及び定期取替（数年に 1 回）を実施する必要があるが、設置時と同様に <b>問題なく実施可能</b> である。	△ 感知器故障時の対応及び定期取替（数年に 1 回）を実施する必要があるが、設置時と同様に <b>労働安全上の懸念</b> がある。	× 感知器故障時の対応及び定期取替（数年に 1 回）を実施する必要があるが、設置時と同様に <b>労働安全上の懸念</b> がある。また、感知器が故障した場合は取替作業に 1 か月以上要するため、火災を監視できない状態が長期間に及ぶ可能性がある。	○ 仮設前に感知器の点検が可能であり、仮設運用中に感知器が故障した場合も速やかに対応できるため、保守点検について問題はない。	× 感知器故障時の対応及び定期点検（動作試験）を実施する必要があるが、設置時と同様に <b>労働安全上の懸念</b> がある。また、空気吸引配管に不具合が生じた場合は取替作業に 1 か月以上要するため、火災を監視できない状態が長期間に及ぶ可能性がある。	× 感知器故障時の対応及び定期取替（数年に 1 回）を実施する必要があるが、設置時と同様に <b>労働安全上の懸念</b> がある。また、感知器が故障した場合は取替作業に 1 か月以上要するため、火災を監視できない状態が長期間に及ぶ可能性がある。
感知器の耐震性の確保及び波及的影響の防止	○ 耐震性の確保及び波及的影響の防止は可能である。	○ 耐震性の確保及び波及的影響の防止は可能である。	○ 耐震性の確保及び波及的影響の防止は可能である。	× 耐震性の確保が困難である。	○ 耐震性の確保及び波及的影響の防止は可能である。	○ 耐震性の確保及び波及的影響の防止は可能である。
評価	○ 火災を有効に感知できる。	△ 火災を有効に感知できるが、 <b>労働安全上の懸念</b> がある。	× <b>労働安全上の懸念</b> があり、故障時の即応性がない。	× 火災を有効に感知できるが、 <b>耐震性の確保</b> が困難である。	× 保守点検が容易でなく、故障時の即応性がない。	× 保守点検が容易でなく、故障時の即応性がない。

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。

## ニ. 保安水準が確保できる理屈

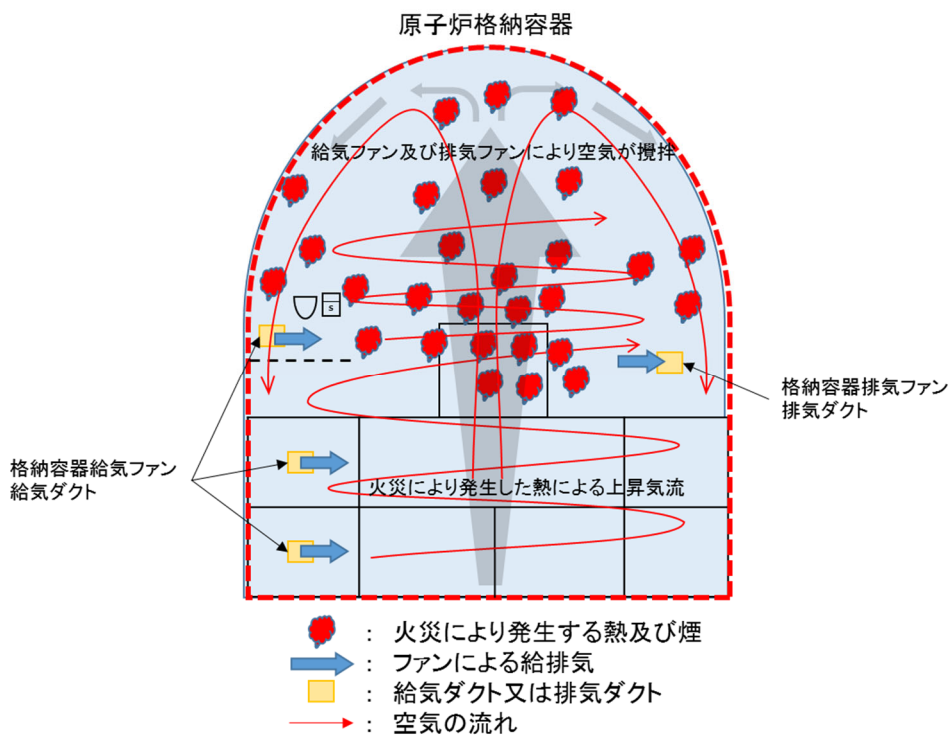
原子炉格納容器内のオペレーティングフロアを含む火災区画には、原子炉の安全停止に必要な機器等、放射性物質を貯蔵する機器等及び重大事故等対処施設が設置されているが、原子炉の安全停止に必要な機器等は、原子炉格納容器内において既許可から変更のない離隔距離 **6m** 以上の確保による系統分離が実施されており、また、原子炉格納容器内の動的機器がすべて火災の影響により運転停止し、かつ、原子炉格納容器内の弁の遠隔操作ができなくなることを仮定しても、運転員の操作により原子炉の安全停止が可能であり、放射性物質を貯蔵する機器等は、原子炉格納容器内で火災が発生し、広範囲な火災又は原子炉格納容器内に進入できないと判断した場合には、保安規定に定められた手順に基づき、プラントを停止するとともに原子炉格納容器スプレイ設備を使用した消火を行う運用としていることから、放射性物質が漏えいした場合でも、放射性物質の閉じ込め機能をもつ原子炉格納容器により管理区域外への放射性物質の放出を防止することが可能である。また、重大事故等対処施設は、原子炉の安全停止に必要な機器等と兼用する設備については、既許可から変更のない離隔距離 **6m** 以上の確保による系統分離対策が実施されており、また、原子炉格納容器内の動的機器がすべて火災の影響により運転停止し、かつ、原子炉格納容器内の弁の遠隔操作ができなくなることを仮定しても、運転員の操作により原子炉の安全停止が可能であることを踏まえ、原子炉格納容器内で火災が発生し、広範囲な火災又は格納容器内に進入できないと判断した場合には、保安規定に定められた手順に基づき、プラントを停止するとともに原子炉格納容器スプレイ設備を使用した消火を行う運用としていること、並びに設置許可基準規則第 37 条第 4 項に規定されている運転停止中原子炉内の燃料損傷防止に必要な重大事故等対処設備については、同様の機能を有する設備（計装設備においては他チャンネル又は代替パラメータ）が既許可に準じて各設備間で離隔距離が **6m** 以上確保されているか、又は、1 時間耐火能力を有する隔壁等で分離されており、同一火災区画内において原子炉の安全停止に必要な機器等の系統分離対策に支障を及ぼすことなく、重大事故等の対処に必要な機能が確保できることを確認している。

上記を踏まえ、当該エリアで発生した火災を同一火災区画内に設置する感知器でもれなく確実に感知することにより、既工認から設計に変更のない初期消火活動に繋げ、同一火災区画内に火災の影響を限定することで、同一火災区画外の設計基準対象施設の安全性及び重大事故等対処施設の重大事故等に対処するために必要な機能が火災により損なわれないようにするとともに、同一火災区画内において設計基準対象施設の安全性及び重大事故等対処施設の重大事故等に対処するために必要な機能が火災により損なわれないようにすることができるため、保安水準②を確保できると評価する。なお、保安水準②の確保に必須ではないが、発火源となり得る設備の

直上にアナログ式の熱感知器を設置する設計については、オペレーティングフロアで発生する火災をより早期に感知する効果が期待できる。

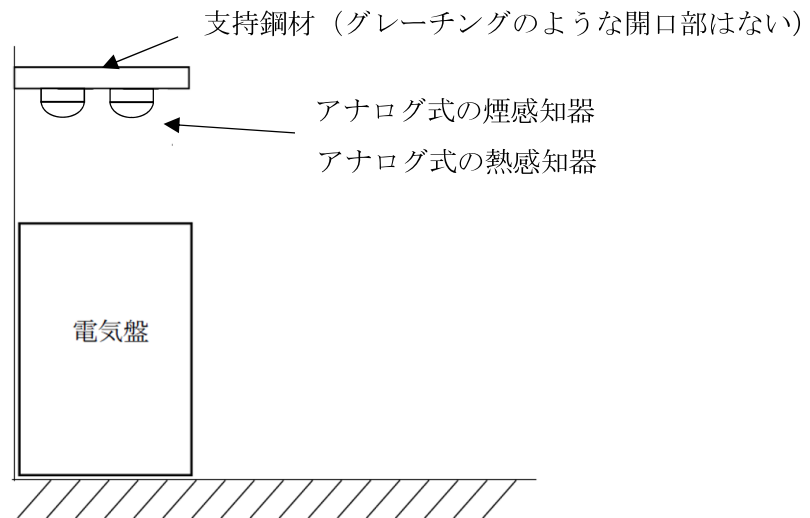


第 3-2-5 図 高天井エリアの感知器監視範囲図（大飯発電所 3 号機）

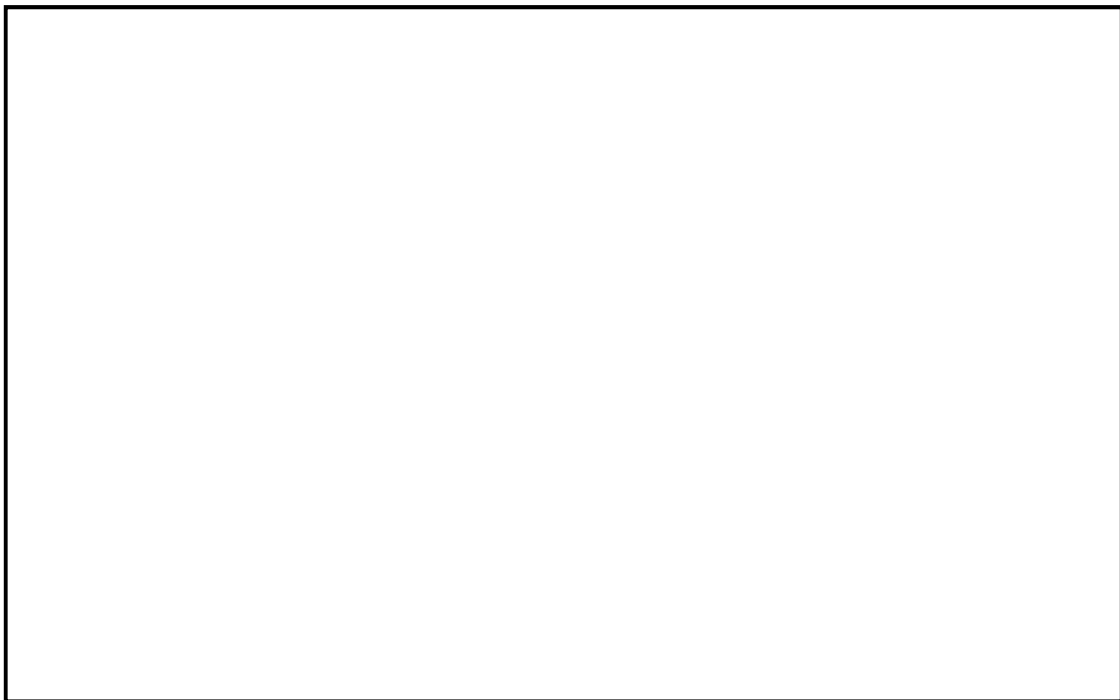


第 3-2-6 図 各給気ファン及び再循環ファンの停止時（格納容器給気・排気ファンは運転）における火災による熱及び煙の流れ

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。

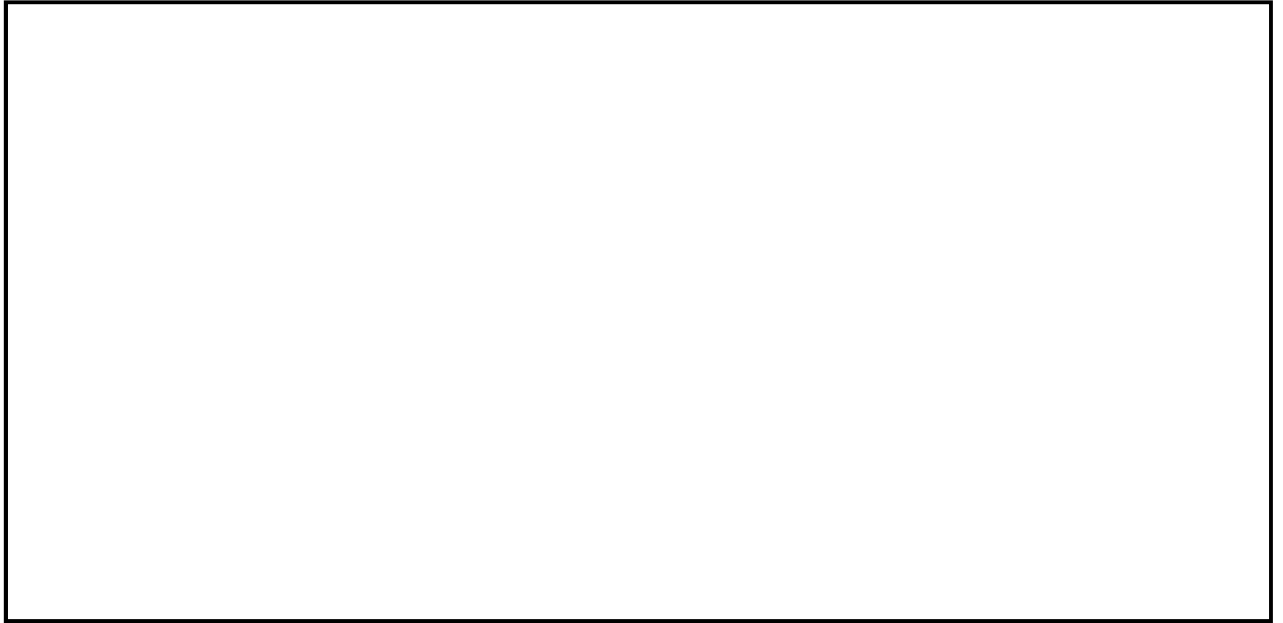


第 3-2-7 図 感知器設置イメージ

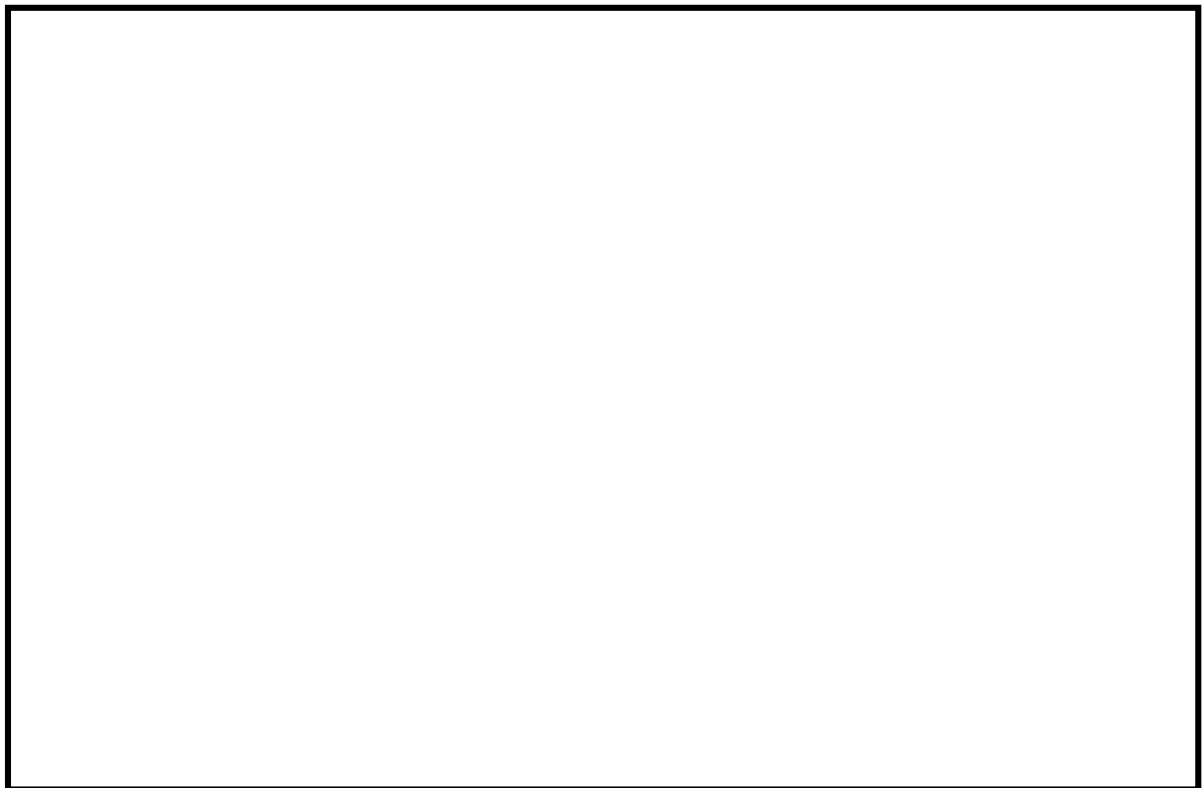


第 3-2-8 図 オペレーティングフロアに設置するアナログ式の熱感知器及びアナログ式の煙感知器の配置図（平面図）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

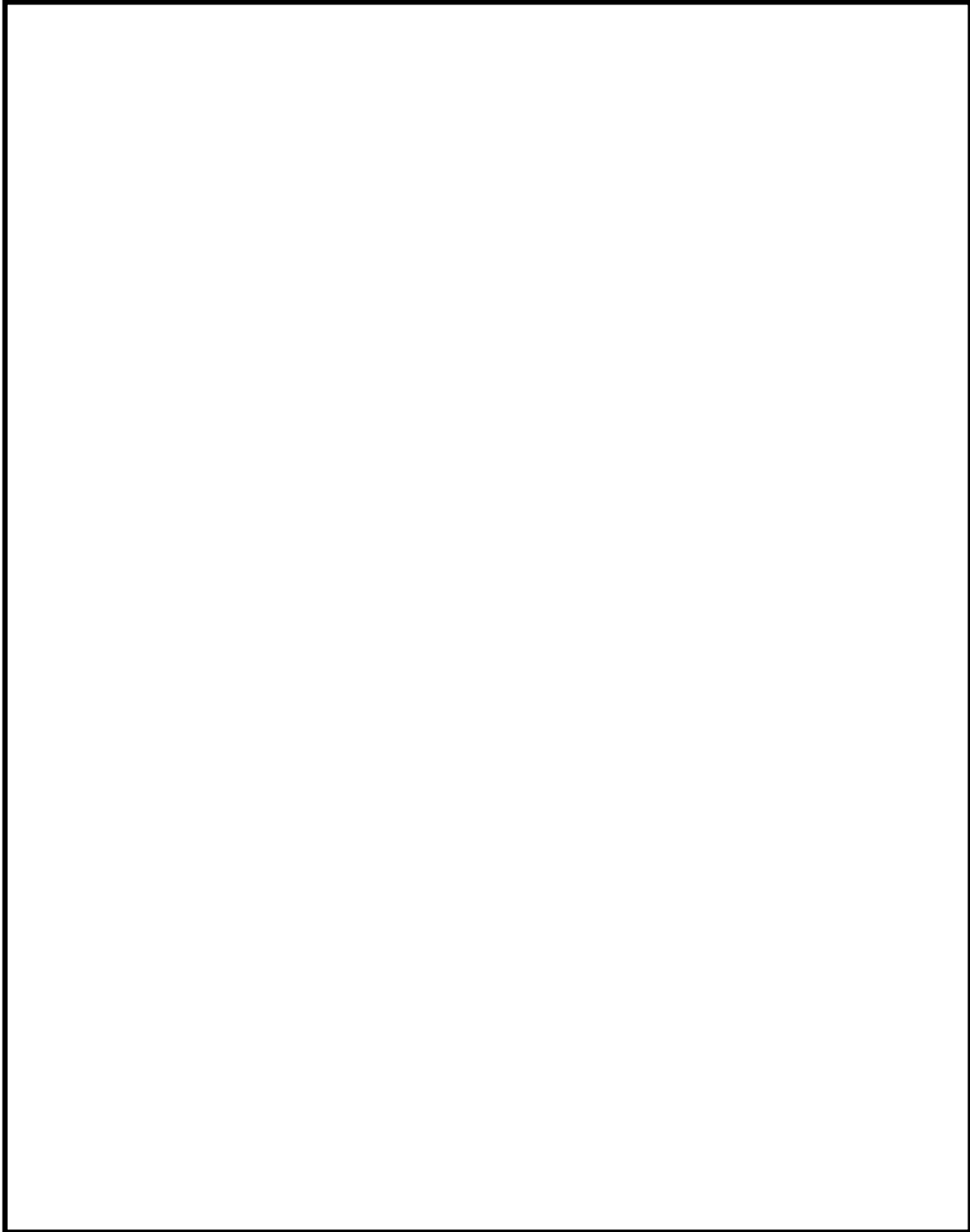


第 3-2-9 図 原子炉格納容器内の開口部の配置図（断面図）



第 3-2-10 図 原子炉格納容器上部の設備設置状況

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 3-2-11 図 原子炉格納容器の各床面における感知器設置概要

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。

### 3-2-4 火災による原子炉格納容器及び消火設備への影響について

原子炉格納容器内で火災が発生した場合に原子炉格納容器と火災発生時に消火設備として使用する原子炉格納容器スプレイ設備への影響を以下に示す。

#### (1) 原子炉格納容器

原子炉格納容器内で火災が発生した場合、火災により発生した熱及び煙は火災の進展及び空気の流れにより、徐々に原子炉格納容器上部に滞留することが考えられる。

大飯3, 4号機の原子炉格納容器はプレストレストコンクリート製であり、プレストレストコンクリートに耐圧機能と遮へい機能、コンクリートに内張された鋼製ライナプレートに放射性物質の漏えい防止機能を持たせている。

既工認においては、外部遮へいについての熱除去の評価を行った結果、コンクリートのガンマ線遮へい能力に対する温度制限値として設定した 170℃以下となることから遮へい機能上問題がないものとして評価している。

格納容器再循環ファン等の停止中に格納容器内のオペレーティングフロアで発生する発炎段階の火災は、消防法施行規則どおりに設置する炎感知器により早期に感知できるため、既工認から変更のない消火活動により原子炉格納容器のコンクリート温度が上昇する前に消火することが可能である。また、原子炉格納容器ループ室及び加圧器室上部で発生する発炎段階の火災については、それぞれのエリア内に設置するアナログ式でない熱感知器によって感知することで、格納容器内のオペレーティングフロアに熱が流れ込み、原子炉格納容器のコンクリート温度が上昇する前に消火活動に移行することができる。くん焼火災については、発熱量が小さいことから、原子炉格納容器のコンクリート温度の上昇に影響を与えるものではない。

なお、格納容器再循環ファン等の停止中においても、格納容器給気ファン及び格納容器排気ファンが運転しており、格納容器内のオペレーティングフロアに大量の熱が流れ込むような状況を想定した場合においても、格納容器内のオペレーティングフロアで熱が攪拌され、排気筒より排出されることから、原子炉格納容器ドーム部のコンクリート温度が 170℃以上となることはない。

また、FDTs を用いて、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」の表 6.2 で燃料率が最も大きい火災荷重 908,095kJ/m<sup>2</sup>、等価時間 1.0 時間（平均燃焼率 252kW/m<sup>2</sup>）の火災による発熱量、原子炉格納容器相当の空間体積等を入力した結果、頂部の高温ガス層温度は約 80℃程度であった。

上記を踏まえると、原子炉格納容器の持つ放射性物質の閉じ込め機能は、原子炉格納容器内で発生する火災により影響を受けることはないといえる。

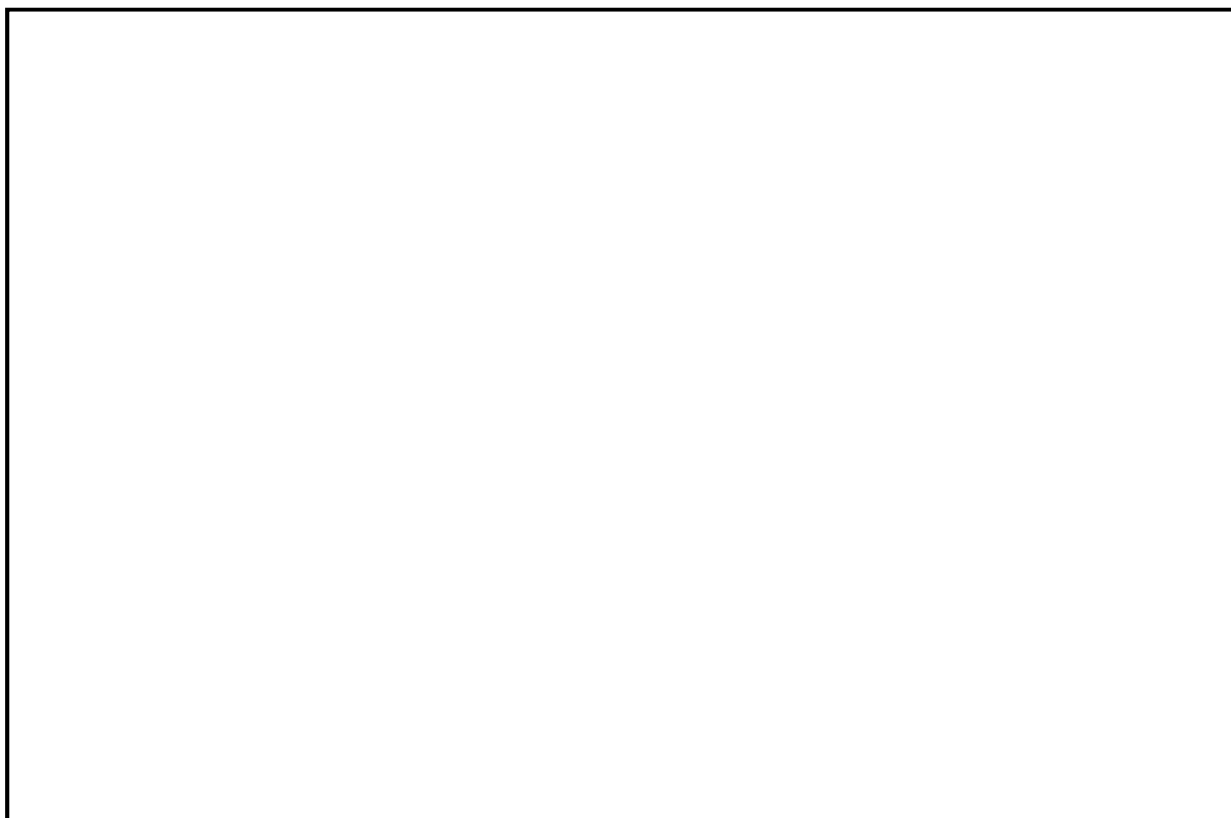


(2) 原子炉格納容器スプレイ設備

原子炉格納容器スプレイ設備の系統図を第 3-2-12 図に示す。

原子炉格納容器スプレイ設備を構成する設備のうち、主要な設備である格納容器スプレイポンプ及びモータ、格納容器スプレイ冷却器、よう素除去薬品タンク及び燃料取替用水ピットは格納容器外に設置されている。このことから、(1)で確認したとおり、格納容器内で発生した火災の影響を火災区画内に限定することができおり、格納容器外に設置しているこれらの機器が火災による影響を受けることはない。

原子炉格納容器スプレイ設備を構成する設備のうち、原子炉格納容器内には頂部にスプレイヘッドが設置されているが、金属製のスプレイリング、スプレイノズル及び逆止弁により構成されていることから、火災により発生する煙及び熱の影響は受けることはない。



第 3-2-12 図 系統図（原子炉格納容器スプレイ系統）

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。



CHAPTER 2. PREDICTING HOT GAS LAYER TEMPERATURE  
AND SMOKE LAYER HEIGHT IN A ROOM FIRE  
WITH NATURAL VENTILATION

COMPARTMENT WITH THERMALLY THICK/THIN BOUNDARIES

The following calculations estimate the hot gas layer temperature and smoke layer height in enclosure fire.

Parameters in YELLOW CELLS are Entered by the User.

Parameters in GREEN CELLS are Automatically Selected from the DROP DOWN MENU for the Material Selected.

All subsequent output values are calculated by the spreadsheet and based on values specified in the input parameters. This spreadsheet is protected and secure to avoid errors due to a wrong entry in a cell(s). The chapter in the NUREG should be read before an analysis is made.

Project / Inspection  
Title:

大飯3号機CV内 電気盤1面火災(垂直キャビネット:HRR252kW)

INPUT PARAMETERS

COMPARTMENT INFORMATION

Compartment Width ( $w_c$ )	30.00	m
Compartment Length ( $l_c$ )	30.00	m
Compartment Height ( $h_c$ )	40.00	m
Vent Width ( $w_v$ )	0.60	m
Vent Height ( $h_v$ )	2.00	m
Top of Vent from Floor ( $V_T$ )	2.00	m
Interior Lining Thickness ( $\delta$ )	15.00	cm

AMBIENT CONDITIONS

Ambient Air Temperature ( $T_a$ )	40.00	°C
Specific Heat of Air ( $c_a$ )	1.00	kJ/kg-K
Ambient Air Density ( $\rho_a$ )	1.13	kg/m <sup>3</sup>

Note: Ambient Air Density ( $\rho_a$ ) will automatically correct with Ambient Air Temperature ( $T_a$ ) Input

THERMAL PROPERTIES OF COMPARTMENT ENCLOSING SURFACES FOR

Interior Lining Thermal Inertia ( $k\rho c$ )	2.9	(kW/m <sup>2</sup> -K) <sup>2</sup> -sec
Interior Lining Thermal Conductivity (k)	0.0016	kW/m-K
Interior Lining Specific Heat ( $c_p$ )	0.75	kJ/kg-K
Interior Lining Density ( $\rho$ )	2400	kg/m <sup>3</sup>



**CHAPTER 2. PREDICTING HOT GAS LAYER TEMPERATURE  
AND SMOKE LAYER HEIGHT IN A ROOM FIRE  
WITH NATURAL VENTILATION**

Version 1805.1  
(SI Units)

**THERMAL PROPERTIES FOR COMMON INTERIOR LINING MATERIALS**

Material	kpc (kW/m <sup>2</sup> -K) <sup>2</sup> -sec	k (kW/m-K)	c (kJ/kg-K)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	Select Material
					Concrete
Aluminum (pure)	500	0.206	0.895	2710	Scroll to desired material Click the selection
Steel (0.5% Carbon)	197	0.054	0.465	7850	
Concrete	2.9	0.0016	0.75	2400	
Brick	1.7	0.0008	0.8	2600	
Glass, Plate	1.6	0.00076	0.8	2710	
Brick/Concrete Block	1.2	0.00073	0.84	1900	
Gypsum Board	0.18	0.00017	1.1	960	
Plywood	0.16	0.00012	2.5	540	
Fiber Insulation Board	0.16	0.00053	1.25	240	
Chipboard	0.15	0.00015	1.25	800	
Aerated Concrete	0.12	0.00026	0.96	500	
Plasterboard	0.12	0.00016	0.84	950	
Calcium Silicate Board	0.098	0.00013	1.12	700	
Alumina Silicate Block	0.036	0.00014	1	260	
Glass Fiber Insulation	0.0018	0.000037	0.8	60	
Expanded Polystyrene	0.001	0.000034	1.5	20	
User Specified Value	Enter Value	Enter Value	Enter Value	Enter Value	

*Reference: Klote, J., J. Milke, Principles of Smoke Management, 2002, Page 270.*

**FIRE SPECIFICATIONS**

Fire Heat Release Rate (Q)

252.00 kW

**Calculate**



## CHAPTER 2. PREDICTING HOT GAS LAYER TEMPERATURE AND SMOKE LAYER HEIGHT IN A ROOM FIRE WITH NATURAL VENTILATION

Version 1805.1  
(SI Units)

### METHOD OF McCAFFREY, QUINTIERE, AND HARKLEROAD (MQH)

Reference: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3<sup>rd</sup> Edition, 2002, Page 3-175.

$$\Delta T_g = 6.85 [Q^2 / ((A_v (h_v)^{1/2}) (A_T h_k))]^{1/3}$$

Where,

$\Delta T_g = T_g - T_a$  = upper layer gas temperature rise above ambient (K)

Q = heat release rate of the fire (kW)

$A_v$  = area of ventilation opening ( $m^2$ )

$h_v$  = height of ventilation opening (m)

$h_k$  = convective heat transfer coefficient ( $kW/m^2-K$ )

$A_T$  = total area of the compartment enclosing surface

boundaries excluding area of vent openings ( $m^2$ )

#### Area of Ventilation Opening Calculation

$$A_v = (w_v) (h_v)$$

Where,

$A_v$  = area of ventilation

opening ( $m^2$ )

$w_v$  = vent width (m)

$h_v$  = vent height (m)

$$A_v = \quad \quad \quad 1.20 \quad \quad \quad m^2$$

#### Thermal Penetration Time Calculation

$$t_p = (\rho c_p / k) (\delta / 2)^2$$

Where,

$t_p$  = thermal penetration time (sec)

$\rho$  = interior lining density ( $kg/m^3$ )

$c_p$  = interior lining specific heat ( $kJ/kg-K$ )

$k$  = interior lining thermal conductivity ( $kW/m-K$ )

$\delta$  = interior lining thickness (m)

$$t_p = \quad \quad \quad 6328.13 \quad \quad \quad sec$$



## CHAPTER 2. PREDICTING HOT GAS LAYER TEMPERATURE AND SMOKE LAYER HEIGHT IN A ROOM FIRE WITH NATURAL VENTILATION

Version 1805.1  
(SI Units)

### Heat Transfer Coefficient Calculation

$$h_k = \sqrt{(k\rho c/t)} \text{ for } t < t_p \quad \text{or} \quad (k/\delta) \text{ for } t > t_p$$

Where,

$h_k$  = heat transfer

coefficient (kW/m<sup>2</sup>-K)

$k\rho c$  = interior construction thermal inertia (kW/m<sup>2</sup>-K)<sup>2</sup>-sec  
(a thermal property of material responsible for the rate of temperature rise)

$t$  = time after ignition  
(sec)

[See table below for results \(column 3\)](#)

### Area of Compartment Enclosing Surface Boundaries

$$A_T = [2(w_c \times l_c) + 2(h_c \times w_c) + 2(h_c \times l_c)] - A_v$$

Where,

$A_T$  = total area of the compartment enclosing surface boundaries excluding area of vent openings (m<sup>2</sup>)

$w_c$  = compartment width (m)

$l_c$  = compartment length (m)

$h_c$  = compartment height (m)

$A_v$  = area of ventilation opening (m<sup>2</sup>)

$$A_T = \quad 6598.80 \quad m^2$$



CHAPTER 2. PREDICTING HOT GAS LAYER TEMPERATURE  
AND SMOKE LAYER HEIGHT IN A ROOM FIRE  
WITH NATURAL VENTILATION

Version 1805.1  
(SI Units)

**COMPARTMENT HOT GAS LAYER TEMPERATURE WITH NATURAL**

$$\Delta T_g = 6.85 [Q^2 / ((A_v(h_v)^{1/2}) (A_T h_k))]^{1/3}$$

$$\Delta T_g = T_g - T_a$$

$$T_g = \Delta T_g + T_a$$

Results	Time After Ignition (t)		h <sub>k</sub> (kW/m <sup>2</sup> -K)	ΔT <sub>g</sub> (°K)	T <sub>g</sub> (°K)	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>g</sub> (°F)
	(min)	(sec)					
	0	0.00	-	-	313.00	40.00	104.00
	1	60	0.22	20.24	333.24	60.24	140.43
	2	120	0.16	22.72	335.72	62.72	144.89
	3	180	0.13	24.31	337.31	64.31	147.75
	4	240	0.11	25.50	338.50	65.50	149.90
	5	300	0.10	26.47	339.47	66.47	151.64
	10	600	0.07	29.71	342.71	69.71	157.47
	15	900	0.06	31.78	344.78	71.78	161.21
	20	1200	0.05	33.35	346.35	73.35	164.02
	25	1500	0.04	34.61	347.61	74.61	166.30
	30	1800	0.04	35.68	348.68	75.68	168.22
	35	2100	0.04	36.61	349.61	76.61	169.89
	40	2400	0.03	37.43	350.43	77.43	171.37
	45	2700	0.03	38.17	351.17	78.17	172.71
	50	3000	0.03	38.85	351.85	78.85	173.92
	55	3300	0.03	39.47	352.47	79.47	175.04
	60	3600	0.03	40.05	353.05	80.05	176.08



## CHAPTER 2. PREDICTING HOT GAS LAYER TEMPERATURE AND SMOKE LAYER HEIGHT IN A ROOM FIRE WITH NATURAL VENTILATION

Version 1805.1  
(SI Units)

### ESTIMATING SMOKE LAYER HEIGHT METHOD OF YAMANA AND TANAKA

$$z = ((2kQ^{1/3}t/(3A_c)) + (1/h_c^{2/3}))^{-3/2}$$

Where,

$z$  = smoke layer height (m)

$Q$  = heat release rate of the fire (kW)

$t$  = time after ignition (sec)

$h_c$  = compartment height (m)

$A_c$  = compartment floor area (m<sup>2</sup>)

$k$  =  $k$  = a constant given by  $k = 0.076/\rho_g$

$\rho_g$  = hot gas layer density (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_g$  is given by  $\rho_g = 353/T_g$

$T_g$  = hot gas layer temperature (K)

#### Compartment Area Calculation

$$A_c = (w_c) (l_c)$$

Where,

$A_c$  = compartment floor  
area (m<sup>2</sup>)

$w_c$  = compartment width  
(m)

$l_c$  = compartment length  
(m)

$$A_c = \quad \quad \quad 900.00 \quad \quad \quad m^2$$

#### Hot Gas Layer Density Calculation

$$\rho_g = 353/T_g$$

#### Calculation for Constant $k$

$$k = 0.076/\rho_g$$



CHAPTER 2. PREDICTING HOT GAS LAYER TEMPERATURE  
AND SMOKE LAYER HEIGHT IN A ROOM FIRE  
WITH NATURAL VENTILATION

Version 1805.1  
(SI Units)

**SMOKE GAS LAYER HEIGHT WITH NATURAL VENTILATION**

$$z = [(2kQ^{1/3}t/(3A_c)] + (1/h_c^{2/3})^{-3/2}$$

**Results** Caution! The smoke layer height is a conservative estimate and is only intended to provide an indication where the hot gas layer is located. Calculated smoke layer height below the vent height are not creditable since the calculation is not accounting for the smoke exiting the vent.

Time (min)	$\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	Constant (k) (kW/m-K)	Smoke Layer Height z (m)	Smoke Layer Height z (ft)
0	1.13	0.067	40.00	131.23
1	1.06	0.072	29.12	95.55
2	1.05	0.072	22.34	73.28
3	1.05	0.073	17.80	58.41
4	1.04	0.073	14.61	47.93
5	1.04	0.073	12.26	40.22
10	1.03	0.074	6.32	20.73
15	1.02	0.074	3.98	13.06
20	1.02	0.075	2.79	9.17
25	1.02	0.075	2.10	6.87
30	1.01	0.075	2.00	6.56
35	1.01	0.075	2.00	6.56
40	1.01	0.075	2.00	6.56
45	1.01	0.076	2.00	6.56
50	1.00	0.076	2.00	6.56
55	1.00	0.076	2.00	6.56
60	1.00	0.076	2.00	6.56

CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT

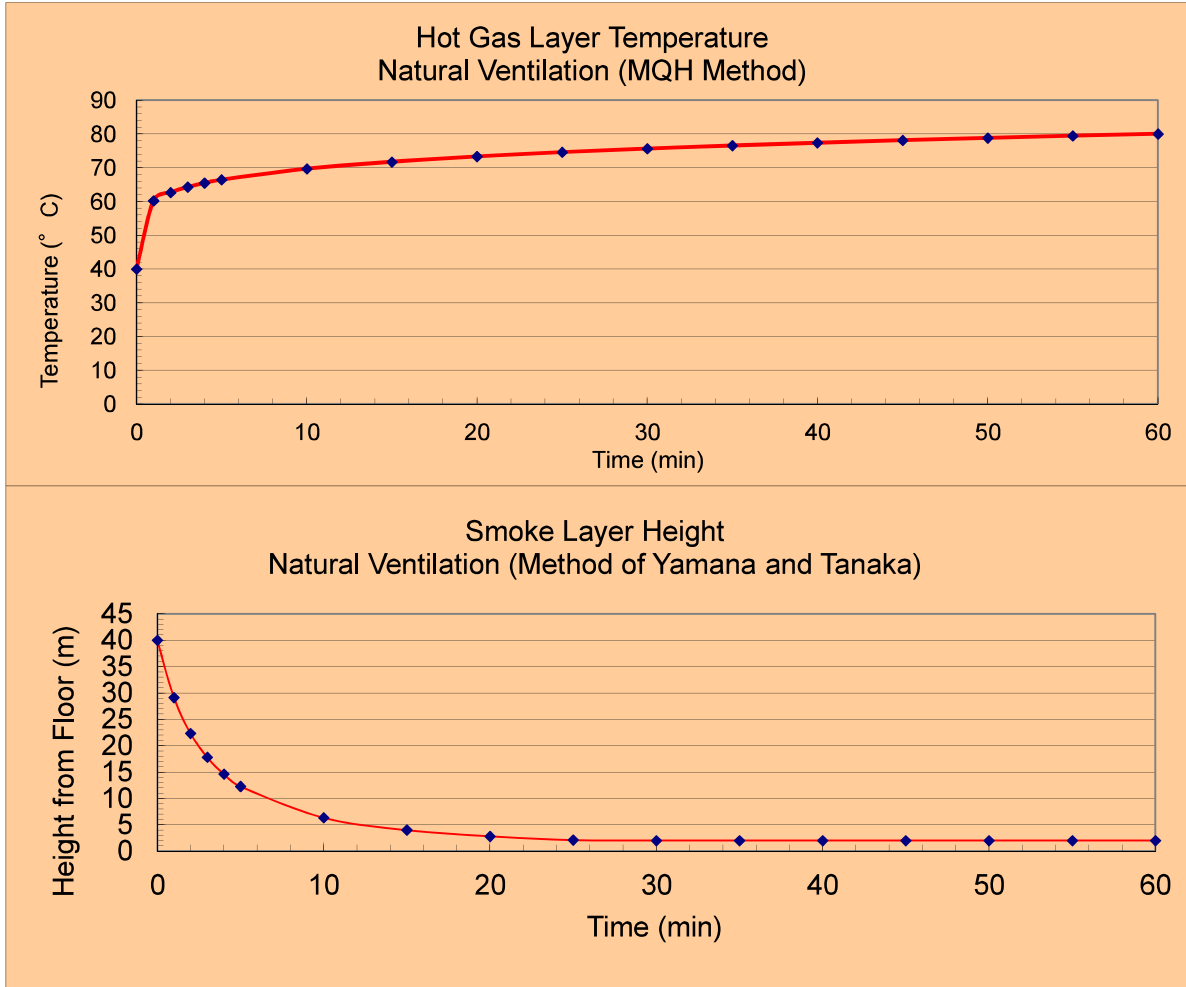




## CHAPTER 2. PREDICTING HOT GAS LAYER TEMPERATURE AND SMOKE LAYER HEIGHT IN A ROOM FIRE WITH NATURAL VENTILATION

Version 1805.1  
(SI Units)

### Summary of Results



**NOTE:** The above calculations are based on principles developed in the SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, 2002. Calculations are based on certain assumptions and have inherent limitations. The results of such calculations may or may not have reasonable predictive capabilities for a given situation and should only be interpreted by an informed user. Although each calculation in the spreadsheet has been verified with the results of hand calculation, there is no absolute guarantee of the accuracy of these calculations. Any questions, comments, concerns, and suggestions, or to report an error(s) in the spreadsheet, please send an email to [David.Stroup@nrc.gov](mailto:David.Stroup@nrc.gov) or [Naeem.Iqbal@nrc.gov](mailto:Naeem.Iqbal@nrc.gov).

Prepared by:  Date:  Organization:

Checked by:  Date:  Organization:

Additional Information:

「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」の規定内容を踏まえた  
CV オペフロ火災時の CV 頂部温度の評価について

火災影響評価ガイドの表6.2が意味するところを、引用元のNFPA(National Fire Protection Association)ハンドブックの記載に基づき、以下のとおり標準火災曲線上に反映した。

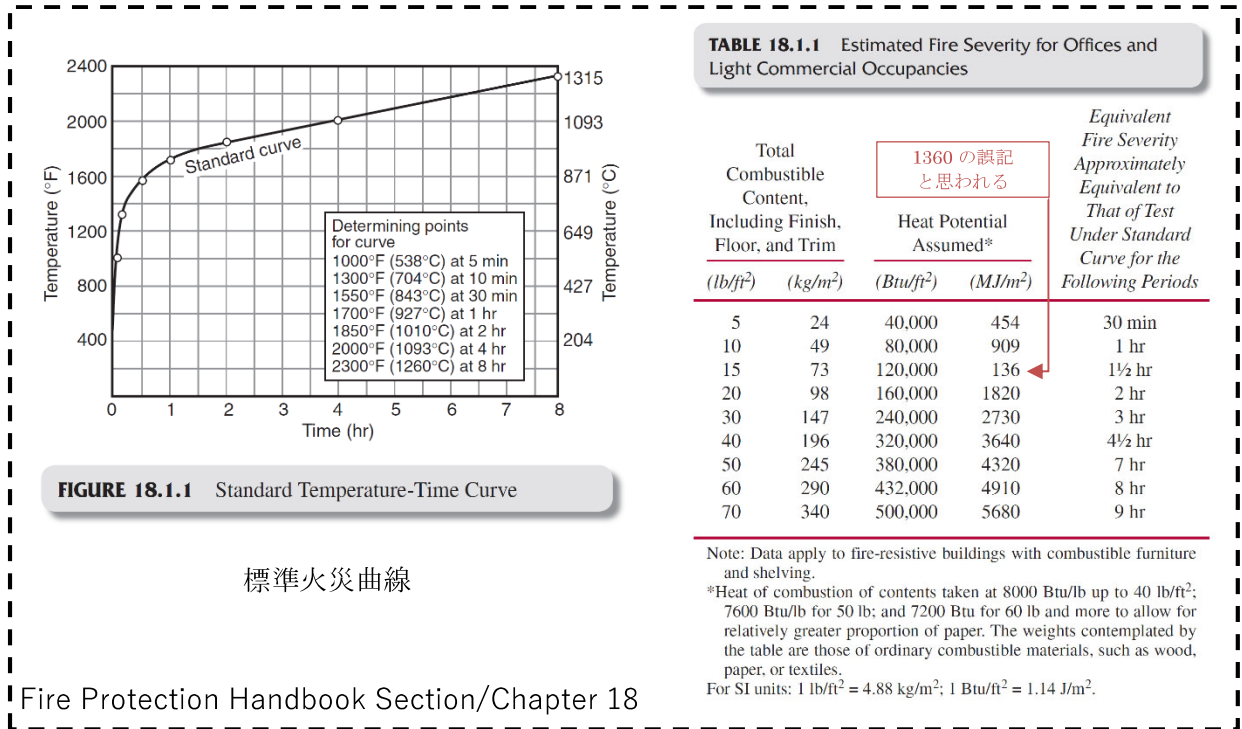
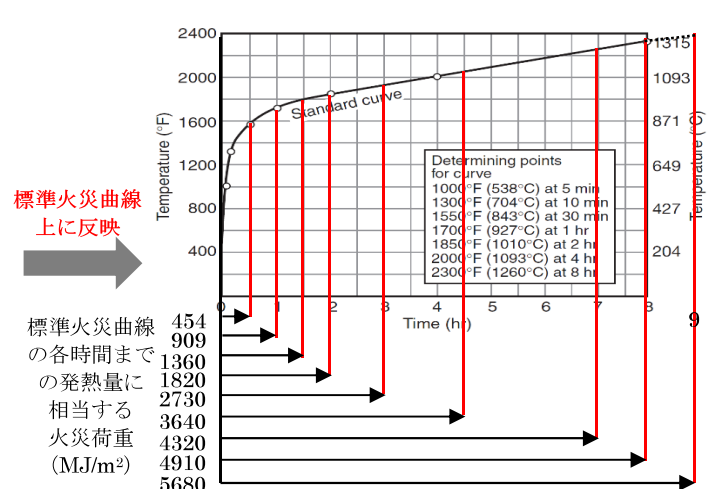


表 6.2 火災荷重と等価時間<sup>(5)</sup>

火災荷重 (kJ/m <sup>2</sup> )	等価時間 (h)
454, 048	0.5
908, 095	1.0
1, 362, 143	1.5
1, 816, 191	2.0
2, 724, 286	3.0
3, 611, 461	4.5
4, 313, 453	7.0
4, 903, 732	8.0
5, 675, 596	9.0

原子力発電所の内部火災影響評価ガイド



CV オペフロ火災時の CV 頂部温度を保守的に評価するため、CV オペフロ上の床面  $1\text{m}^2$  の火源設定においては、標準火災曲線上で平均燃焼率が最も大きい  $908,095[\text{kJ}/\text{m}^2]$ 、等価時間  $1.0$  時間、平均燃焼率  $252[\text{kW}/\text{m}^2]$  及び火災荷重が最も大きい  $5,675,596[\text{kJ}/\text{m}^2]$ 、等価時間  $9.0$  時間、平均燃焼率  $175[\text{kW}/\text{m}^2]$  の 2 通りの火災を想定し、それぞれの火災が時間無制限に継続した場合の CV 頂部温度を定量的に評価した。評価結果を以下に示す。

## 火災荷重の火源を想定した場合での格納容器頂部の温度評価

### 1. 定常状態における CV 頂部の温度評価

#### (1) 評価方法

オペフロ床面で発生した火災の熱が、オペフロより上部の CV 壁面を介して外気に放熱し、発熱と放熱がバランスして一定温度に落ち着くと仮定すると以下となる。

$$Sq = UA(T_w - T_a)$$

ここで、記号の意味は以下である。

q : 火災時の発熱密度[W/m<sup>2</sup>]

S : 火災の発生する面積[m<sup>2</sup>]

U : CV 内壁から外気に対する熱貫流率[W/m<sup>2</sup>K]。

熱貫流率 U は、CV 壁の熱伝導率λ[W/mK]、CV 壁厚みδ[m]、CV 外面での熱伝達率α[W/m<sup>2</sup>K]を用いて以下で表される。

$$U = \frac{1}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}}$$

A : 放熱する CV 表面積[m<sup>2</sup>]

T<sub>a</sub> : 外気温度[°C]

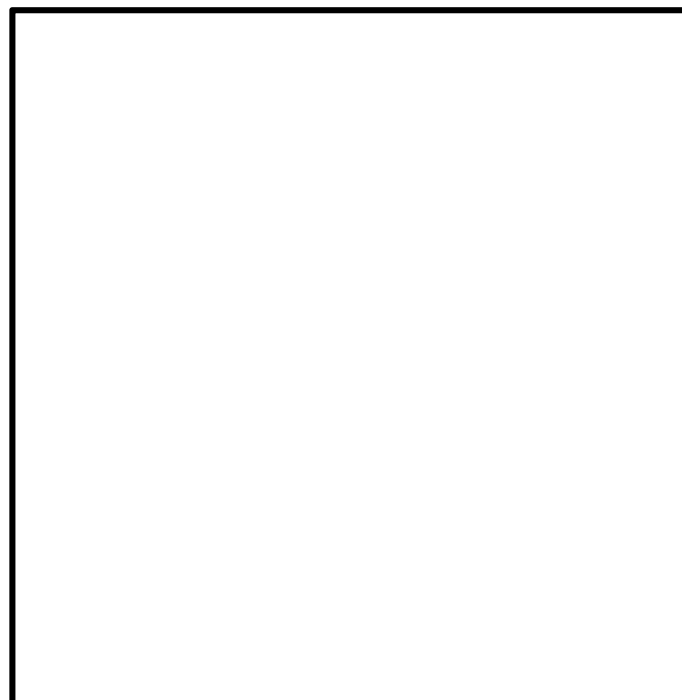
このことから、CV 内面の温度は以下で表される。

$$T_w = T_a + \frac{Sq}{UA}$$

各部寸法（直径、高さ）、CV 厚み、CV 熱伝導率（コンクリート）、外面熱伝達率については、単純化して入力しているため、厳密ではない。ただし、おおよその概算としては適切な数値になっているため、この値で評価する。

(2) 評価結果

ドーム部直径	m	
円筒部 Bottom	m	
円筒部 Top	m	
円筒部面積	m <sup>2</sup>	
ドーム部面積	m <sup>2</sup>	
表面積 A	m <sup>2</sup>	
CV 厚み $\delta$	m	
CV 熱伝導率 $\lambda$	W/mK	
外面熱伝達率 $\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	
熱貫流率 U	W/m <sup>2</sup> K	



		条件 1	条件 2
発熱密度 q	kJ/m <sup>2</sup> /h	908,095	630,622
火災面積 S	m <sup>2</sup>	1.0	1.0
発熱量 Q (= S q)	W	2.52E+05	1.75E+05
外気温度 Ta	°C	40	40
CV 内面温度 Tw	°C	86.0	72.0

(3) まとめ

火源の面積を 1m<sup>2</sup> と仮定すると、CV 内面（コンクリート表面）の温度は、条件 1 及び条件 2 の発熱量（燃焼率）で、それぞれ 86°C 及び 72°C となる。

また、その際の CV 頂部気体の最高温度は、CFD 解析での温度傾向からみて、条件 1 及び条件 2 で、それぞれ 89°C 及び 75°C 程度となると推定できる。

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。

## 2. 非定常状態（高温ガス到達直後）における CV 頂部の温度評価

火災発生後に高温のガスが上昇し、その高温ガスが CV 壁に接触した瞬間に、CV 壁が高温になることが懸念される。しかし、CV 壁は熱容量が大きく、加熱源は内部空気であるため、低温の CV 頂部と高温ガスが接触した時点で CV 頂部の温度が急激に上昇することはない。温度の異なる二つの物質が接触した場合、その瞬間の境界温度  $T_i$  は、それぞれの物質の密度×比熱×熱伝導率の 1/2 乗の加重平均で表すことができる。

$$T_i = \frac{\sqrt{(\rho c \lambda)_c} T_c + \sqrt{(\rho c \lambda)_a} T_a}{\sqrt{(\rho c \lambda)_c} + \sqrt{(\rho c \lambda)_a}}$$

添字  $c$  及び  $a$  は、それぞれコンクリート及び気体（空気）を表す。

条件 1 を参考に、天井に到達する時点の高温ガス温度を  $89^\circ\text{C}$  とすると、境界温度は約  $47^\circ\text{C}$  程度と、コンクリート温度の上昇は抑えられる。CV 壁は熱容量が大きく、加熱源は内部空気であるため、温度上昇過程で温度がオーバーシュートすることは無いと考えられる。

これらをまとめると、CV 頂部の温度挙動は図 1 のようになると推定される。

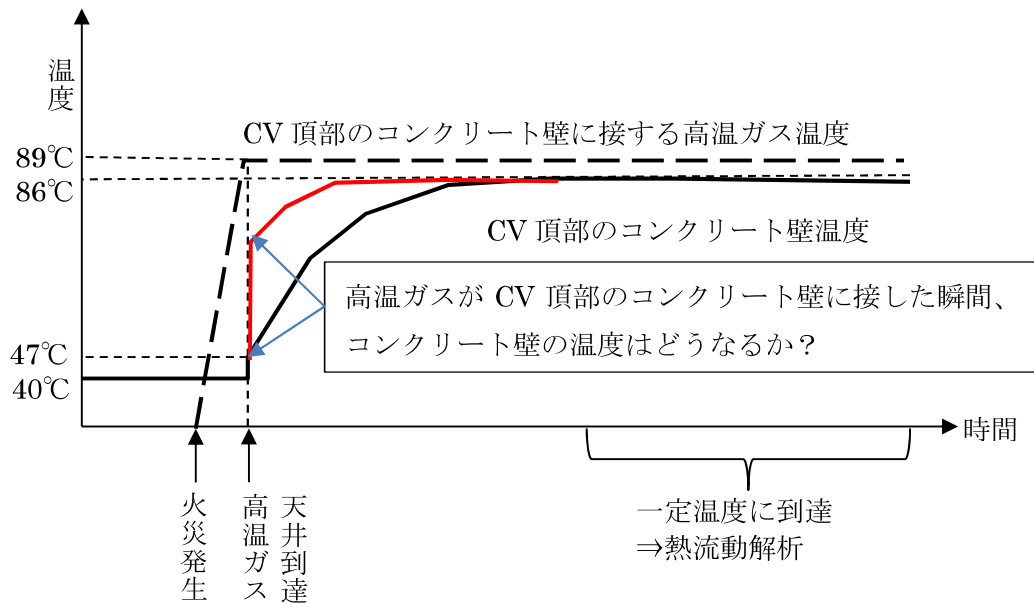


図 1 CV 頂部の温度挙動

定常状態に至る前の非定常状態において、火災により発生する高温のガスが上昇して CV 壁に接触した瞬間、CV 壁が高温になることが懸念される。しかし、CV 壁は熱容量\*が大きく、加熱源の空気の熱容量\*は非常に小さいため、低温の CV 頂部壁面と高温ガスが接触しても図 2 に示すとおり CV 頂部の温度が急激に上昇することはない、コンクリート壁の温度がオーバーシュートすることはない。(100℃の水に接すると火傷するが、100℃のサウナでは火傷しない原理と同じ)

※：熱容量とは物体の温度を 1℃高めるのに要する熱量のことであり、温度変化のしにくさを示す値である。

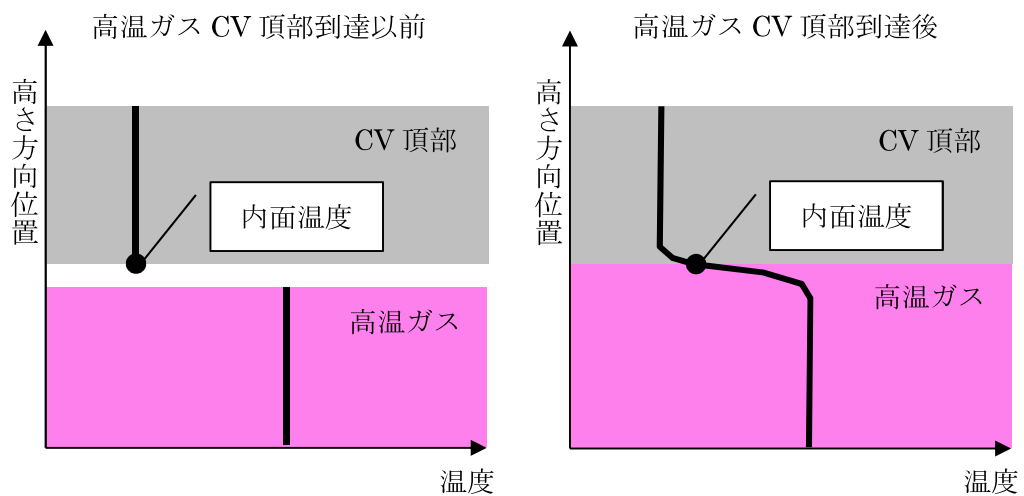


図 2 CV 頂部コンクリート壁の温度

以 上

## 大飯34感知器BF 格納容器オペフロでの火災による空気流の解析について

### 1. はじめに

格納容器再循環ファン等の停止時において、格納容器オペフロでの火災における感知器の有効性を評価するため、火災時のオペフロ上部（CV ドーム空間）の空気の流れを簡易モデルによる解析により確認する。

### 2. 解析条件

オペフロ  を床面として、加圧器室、SG室等の構築物は模擬せず、CV 円筒部及び CV ドーム部のみを模擬して解析を行った。オペフロの面積、CV の高さは大飯4号機を参考に定めている。

火源として、オペフロの中央に火源（直径2m、温度800℃/1200℃）を想定した。

（オペフロ中央に直径2m円状の熱源（ヒータ）を置き、連続して発熱させたイメージ）

また、CV壁は火災により発生する高温ガスには、ヒートシンクとして働くことから、CV壁（コンクリート）の熱抵抗、及び表面での熱伝達を考慮して、CV外の外気への放熱を考慮している。

### 3. 解析結果

火災により発生した高温ガスは、上昇気流となってCV上部に到達し、その後、冷却されたガスがCV壁に沿って下降することで、CV全体を循環する自然対流が発生することが確認できた。これにより、オペフロ上部  に設置する感知器により火災感知は可能であることが確認できた。

高温ガスの上昇気流の速度は1.5m/s～1.8m/sであり、CV上部から下降するガス流の速度は0.3m/s程度となる。これより、オペフロ上部  に設置する感知器へ高温ガスが到達する時間は、火災発生より約4分（212～253秒）であり、ポーラクレーン近傍  に設置した場合と比較して、約1分（49～60秒）の時間遅れが生じることが分かった。

また、CV頂部に到達時の高温ガス温度は約47℃（44.1℃～46.6℃）であり、コンクリート表面温度は約46℃（43.6℃～45.9℃）となることが確認できた。

評価結果を以下に示す。



## 火災感知器BF対応 オペフロ上の流動解析結果

### 1. 本評価の目的

火災による高温ガスがCV内を上昇し、その上昇した高温ガスはCV壁面で冷却され下降流が生じ、結果としてCV全体で自然循環流が生まれることを示す。その結果、火災で発生した煙はCV全体に拡がり、現在、想定している煙感知器設置位置で煙検知が可能であることを示す。

### 2. 解析対象

オペフロよりも上部のCVドーム部とする。

加圧器室、SG室などの構造物は模擬せず、の平らな床面とCV円筒部及び上部ドーム部を、円筒及び半球とみなす。オペフロの大きさ、高さは大飯4号機を参考に定める。

### 3. 解析対象のモデル化

#### ①熱源

火災を局所的に床面に高温の領域が存在しているとして模擬する。その領域から上昇気流が生まれる。高温領域は中央に位置し、以下の条件とする。

表1 熱源の条件

直径	2m
温度	800℃、1200℃

#### ②CV壁

CV壁は高温のCV内ガスにとってはヒートシンクとして働く。CV壁の熱抵抗及び表面での熱伝達を考慮して、CV外の外気に対して放熱するように下表のように設定した。

表2 境界条件

物理量	数値	根拠
外気温度	40℃	夏場の外気温度
熱貫流率 U	1 W/m <sup>2</sup> K	$\frac{1}{U} = \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}$ <p>コンクリート厚さ <math>\delta = 1.3\text{m}</math> コンクリート熱伝導率 <math>\lambda = 1.2\text{W/mK}</math> 外面熱伝達率 <math>\alpha = 10\text{ W/m}^2\text{K}</math> の評価結果を丸めて設定</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。

#### 4. 解析条件

解析コードの設定や各種条件を以下にまとめる。

表3 解析条件

解析コード	FLUENT v20.1(2020r1)	
乱流モデル	Realizable k-ε モデル	
運動量離散化手法	Second Order Upwind	
基準圧力	101325 [Pa]	
物性値	空気の物性値を用いる。密度は理想気体とし算出。	
壁面境界	高温領域(直径 2m)	800℃、1200℃
	床面(EL33.6m)	断熱
	側面と上部壁面	熱伝達率： 1 [W/m <sup>2</sup> K]、外気温度： 40 [℃]



図1 解析領域のモデル図 (単位は mm)

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

図 1 に示す解析領域を、図 2 に示すように解析メッシュに分割した。この時の解析メッシュ数は約 130 万である。

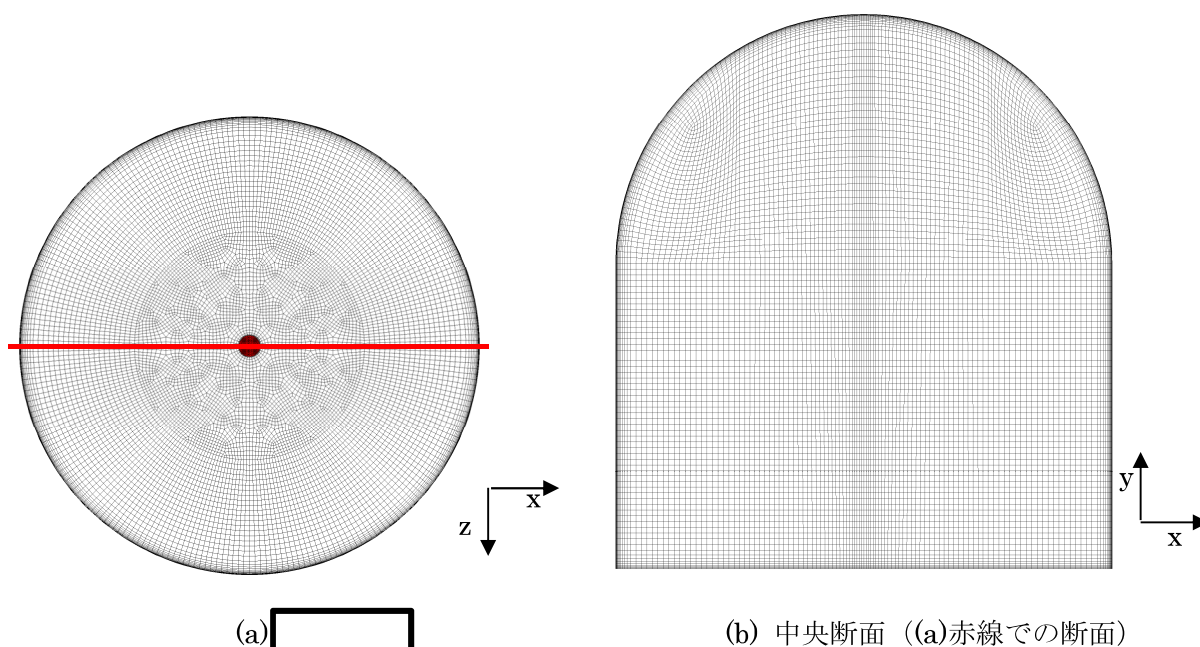


図 2 解析メッシュ図

## 5. 解析結果

図 3～図 4 に、中央断面における流速のベクトル線図を示す。図 3 は、流速ベクトルの方向がわかりやすいように、それぞれのベクトルの大きさは全て同じとして、大きさを色で表している。図 4 は、ベクトルの大きさが流速の大きさに対応するものとなっている。

熱源から上昇気流が発生し、CV 頂部にぶつかり、CV ドーム部に沿ってオペフロまで下降し、CV 全体を循環する自然対流が発生していることがわかる。上昇気流の速度は、熱源 800℃、1200℃の場合で、それぞれ 1.5m/s、1.8m/s 程度である。ドーム天井にぶつかる所では約 1m/s 程度まで流速が下がり、内壁を沿って流れるときには 0.3m/s 程度まで減速している。

図 5 に、温度コンタ図を示す。CV 内の温度分布がわかりやすいように 40℃～50℃の範囲でコンタ図を記載した。高温熱源の近傍は高温になっているものの、CV 天井に到達する時点では、47℃程度まで低下（熱源 1200℃の場合）していることがわかる。

今回の解析で計算結果として得られた発熱量は表 4 に示す通りである。φ2m の領域で発熱していると考えて、燃焼率[kJ/m<sup>2</sup>/h]を算出した。その際の CV 頂部気体の最高温度及び CV 内部から外気への熱導通率から評価されたコンクリート表面の温度を示す。

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。

表 4 各発熱量における CV 頂部気体温度とコンクリート表面温度

高温領域	発熱量 [kW]	燃焼率 [kJ/m <sup>2</sup> /h]	CV 頂部気体の最高温度 [°C]	コンクリートの表面温度 [°C]
800°C	15.6	1.79×10 <sup>4</sup>	44.1	43.6
1200°C	26.2	3.00×10 <sup>4</sup>	46.6	45.9

図 6 に熱源から上昇する流体粒子を追跡した流線図を示す。熱源から上昇した流体粒子が上昇後、壁に沿って流下して、CV 全体を循環していることがわかる。

加熱源からの流体粒子の飛翔時間を図 7 に示す。火災検知器が設置されている [ ] 及び [ ] には、およそ 160 秒から 250 秒程度で到達することから、この程度の時間で火災検知が可能であると考えられる。

なお、高温ガスがオペフログレーチングの上部 [ ] の感知器に到達するまでの時間は、ポーラクレーン近傍 [ ] に設置した場合と比較して、約 1 分 (49~60 秒) の時間遅れが生じる。

表 5 加熱源から評価位置まで流体粒子が飛翔する時間 (代表した 96 個の平均値)

高温領域	[ ] への到達時間[秒]	[ ] への到達時間[秒]
800°C	193	253
1200°C	163	212

## 6. まとめ

火災による高温ガスが CV 内を上昇し、その上昇した高温ガスは CV 壁面で冷却され下降流が生じ、結果として CV 全体で自然循環流が生まれることを示すために、オペフロ中央に高温熱源を置いた条件で、熱流動解析を実施した。

その結果、高温熱源から発生した上昇気流は、天井にぶつかり、CV ドーム部や側壁を流下し、CV 全体の自然対流が発生することが分かった。

このことから、火災で発生した煙は CV 全体に拡がり、現在想定している煙検知器設置位置 [ ] での火災感知が可能であることが確認できた。

[ ]  
 枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

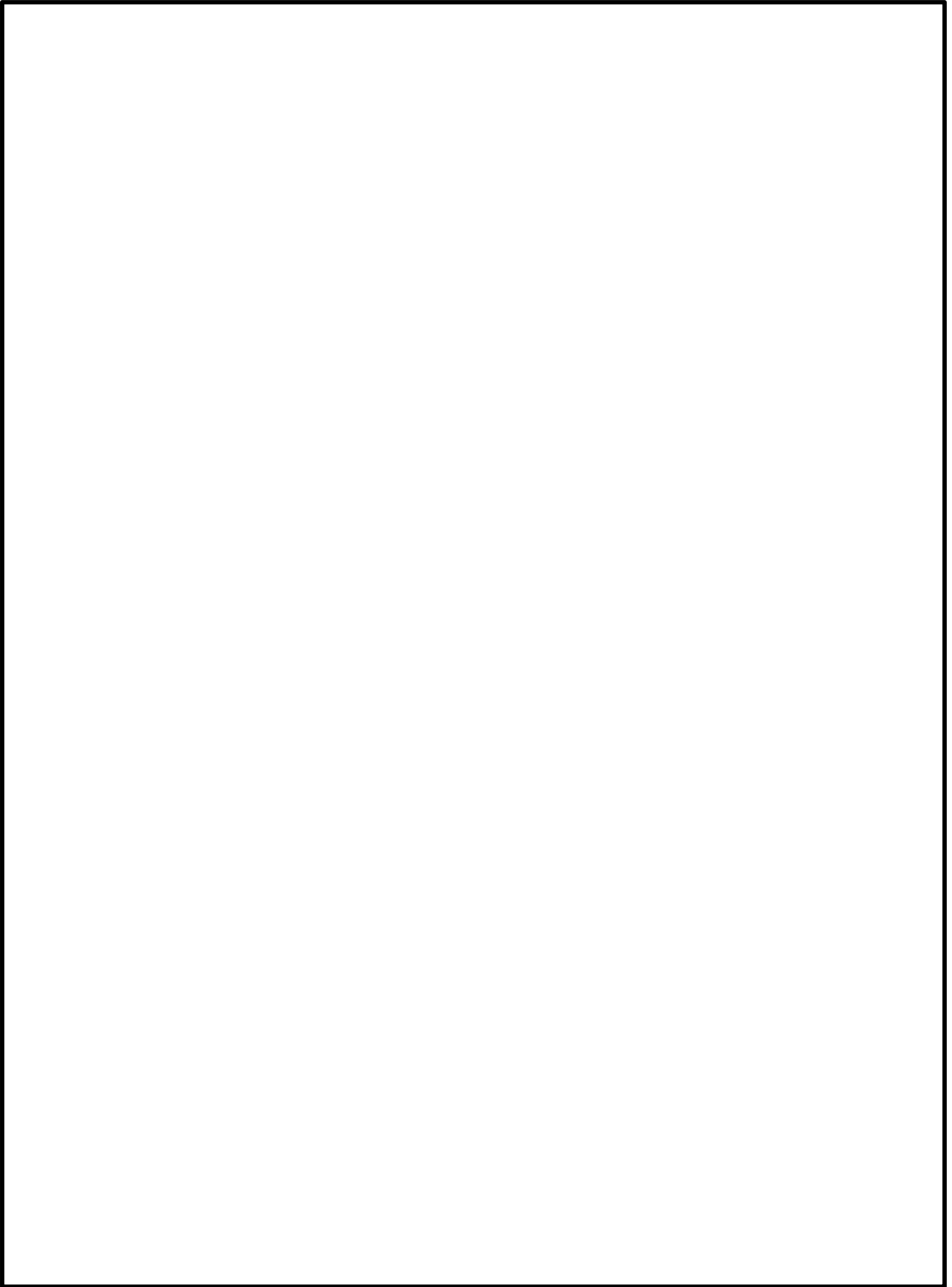


図3 垂直断面での流速ベクトル図(ベクトル長固定)

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

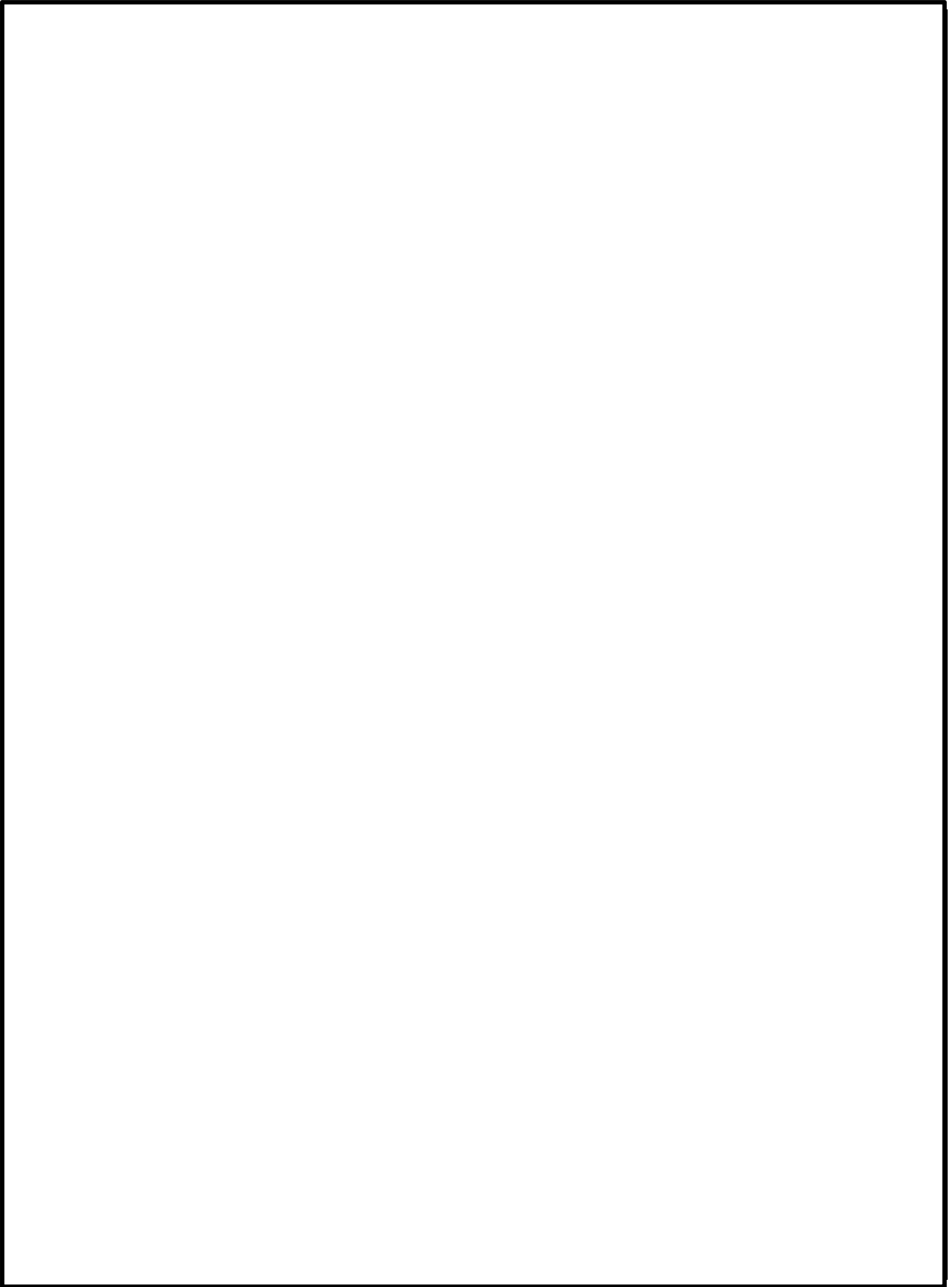


図4 垂直断面での流速ベクトル図(ベクトル長を大きさに応じて可変)

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

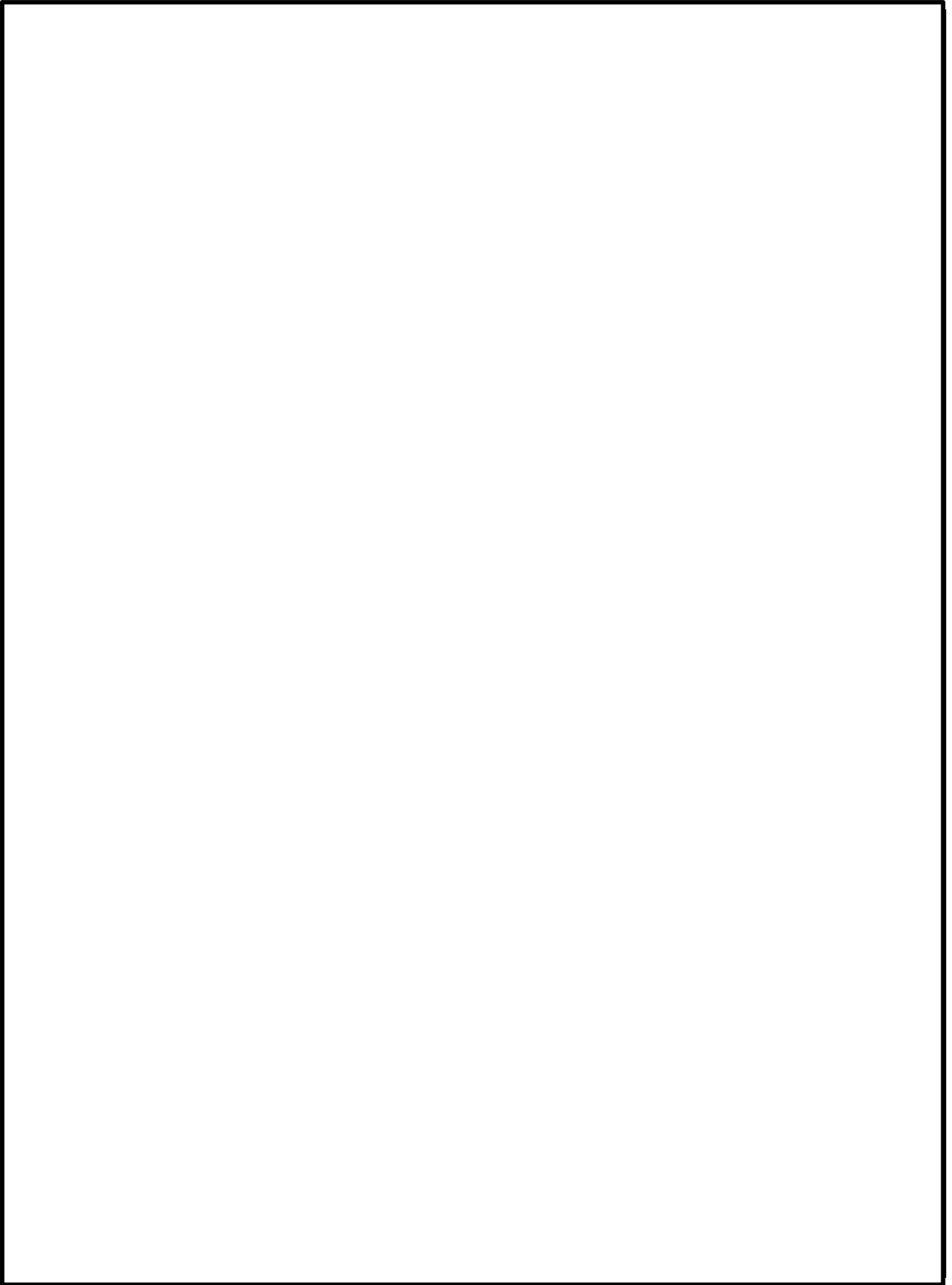


図5 垂直断面での温度分布

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

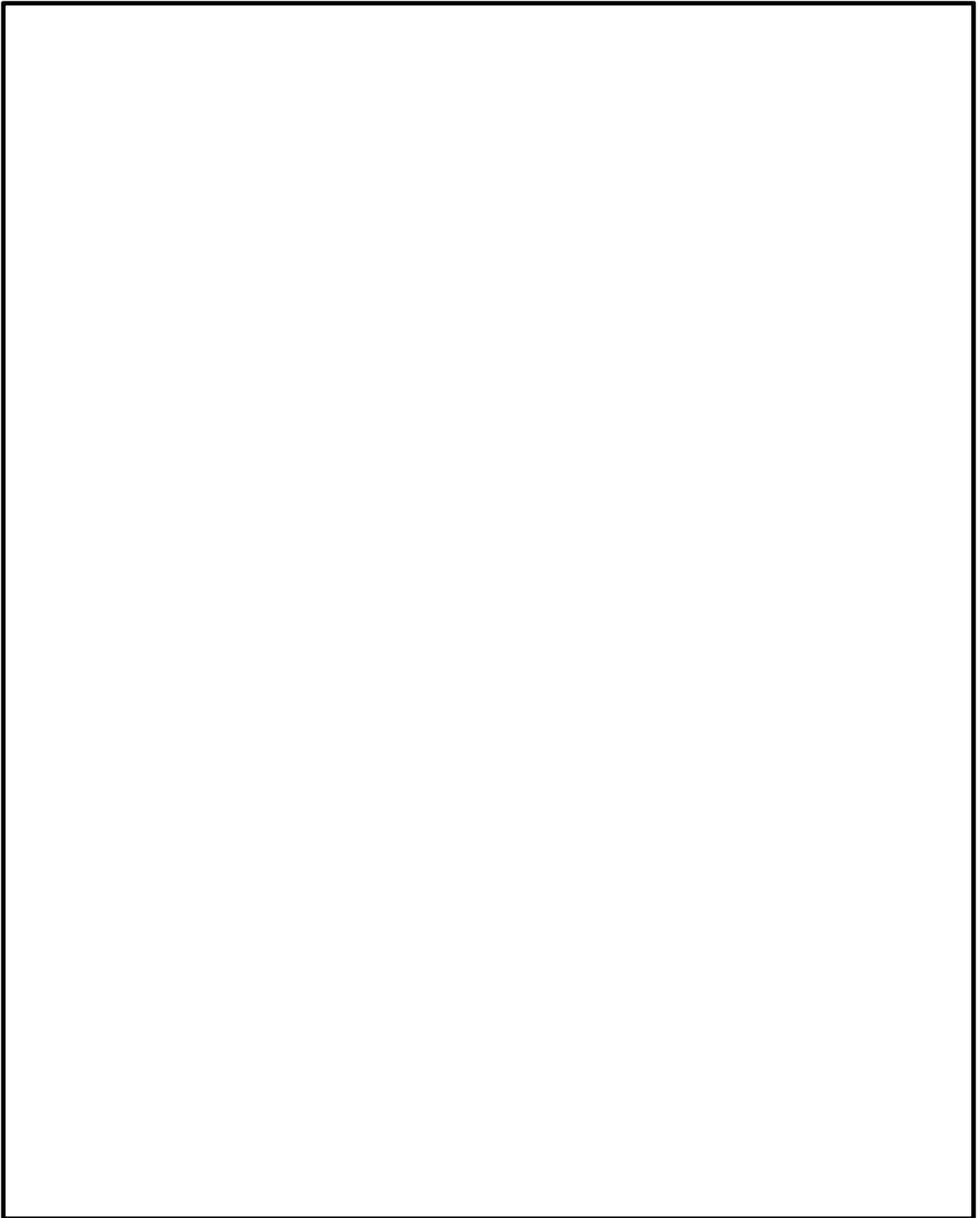


図6 流線図（色は粒子の違いを表す）

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。



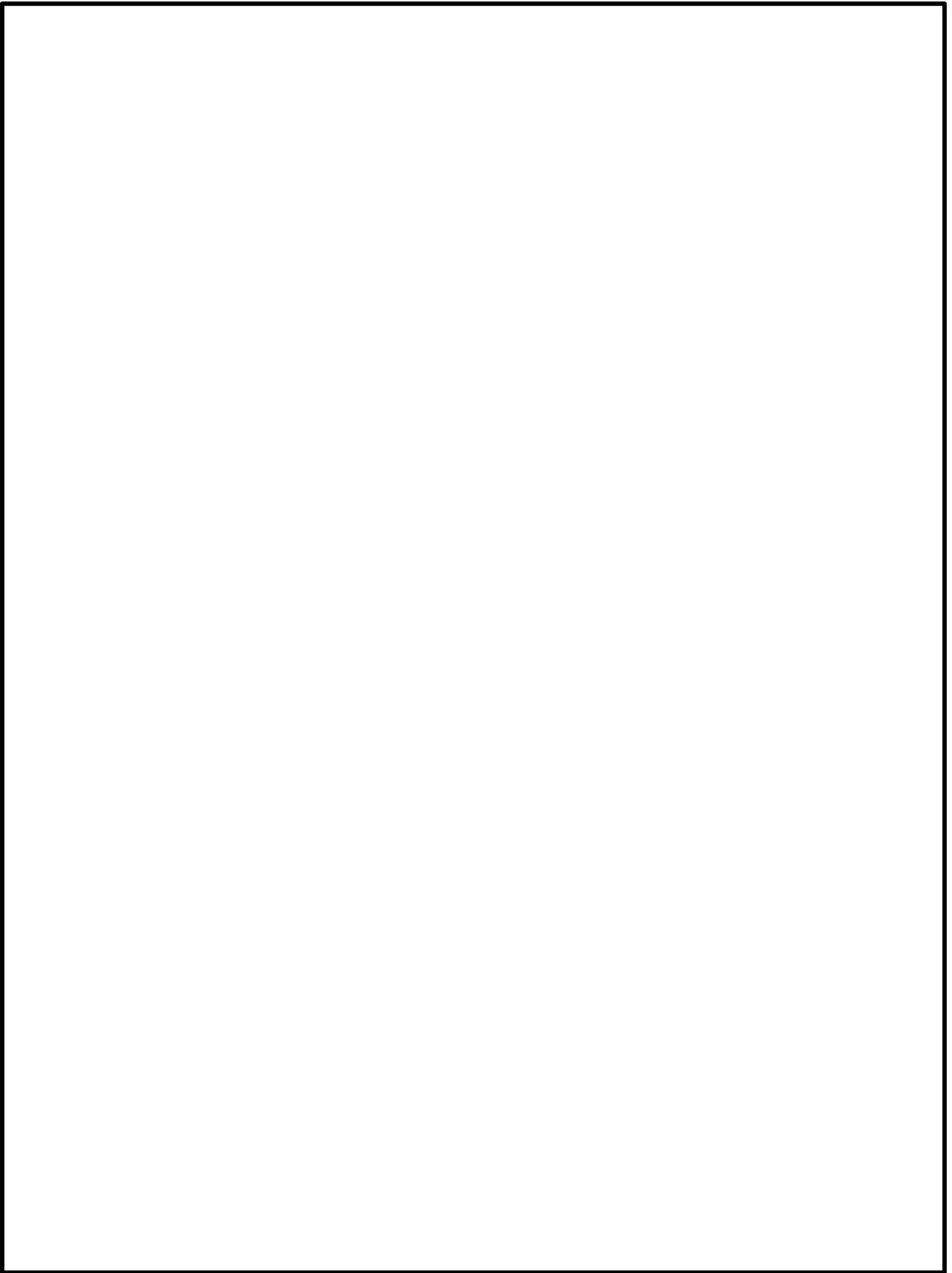


図 7 流線図（色は粒子の飛翔時間を表す）

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。