

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

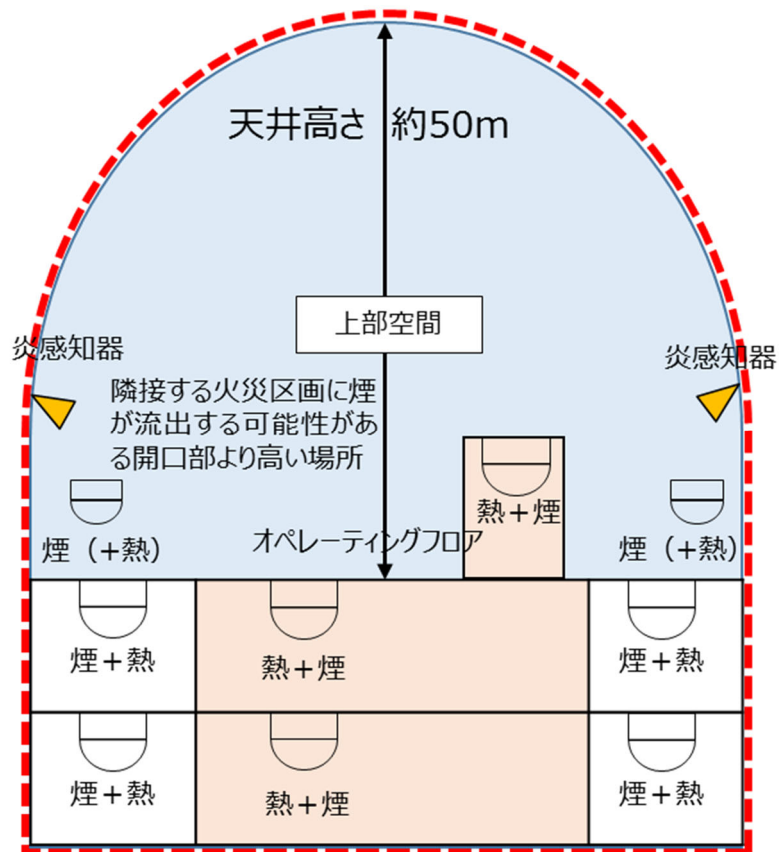
#### ②放射線量が高い場所を含むエリア

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
- : 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。

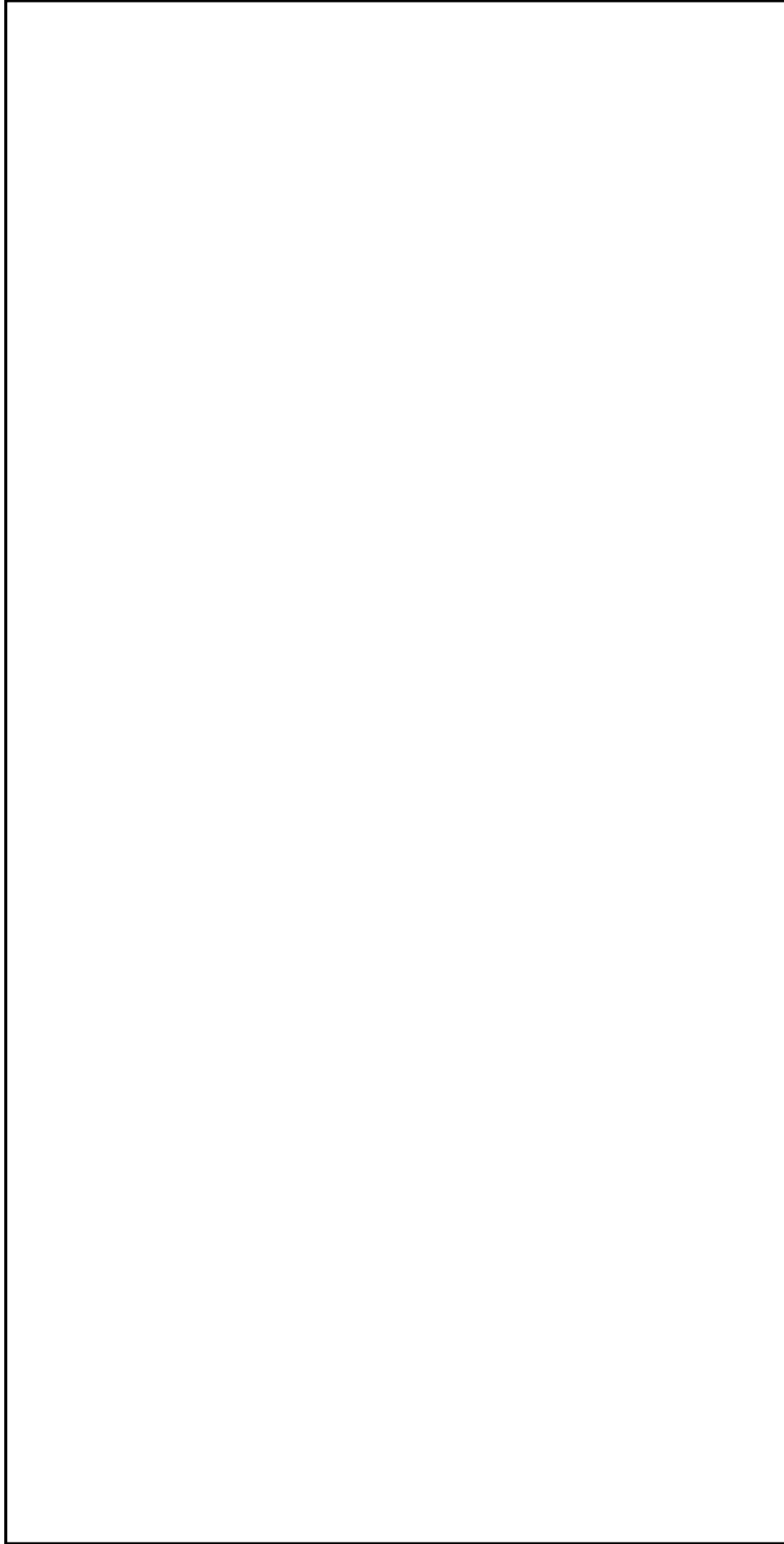
第 3-2-1 表 プラント運転時における格納容器再循環系統について

| 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  |      |      |

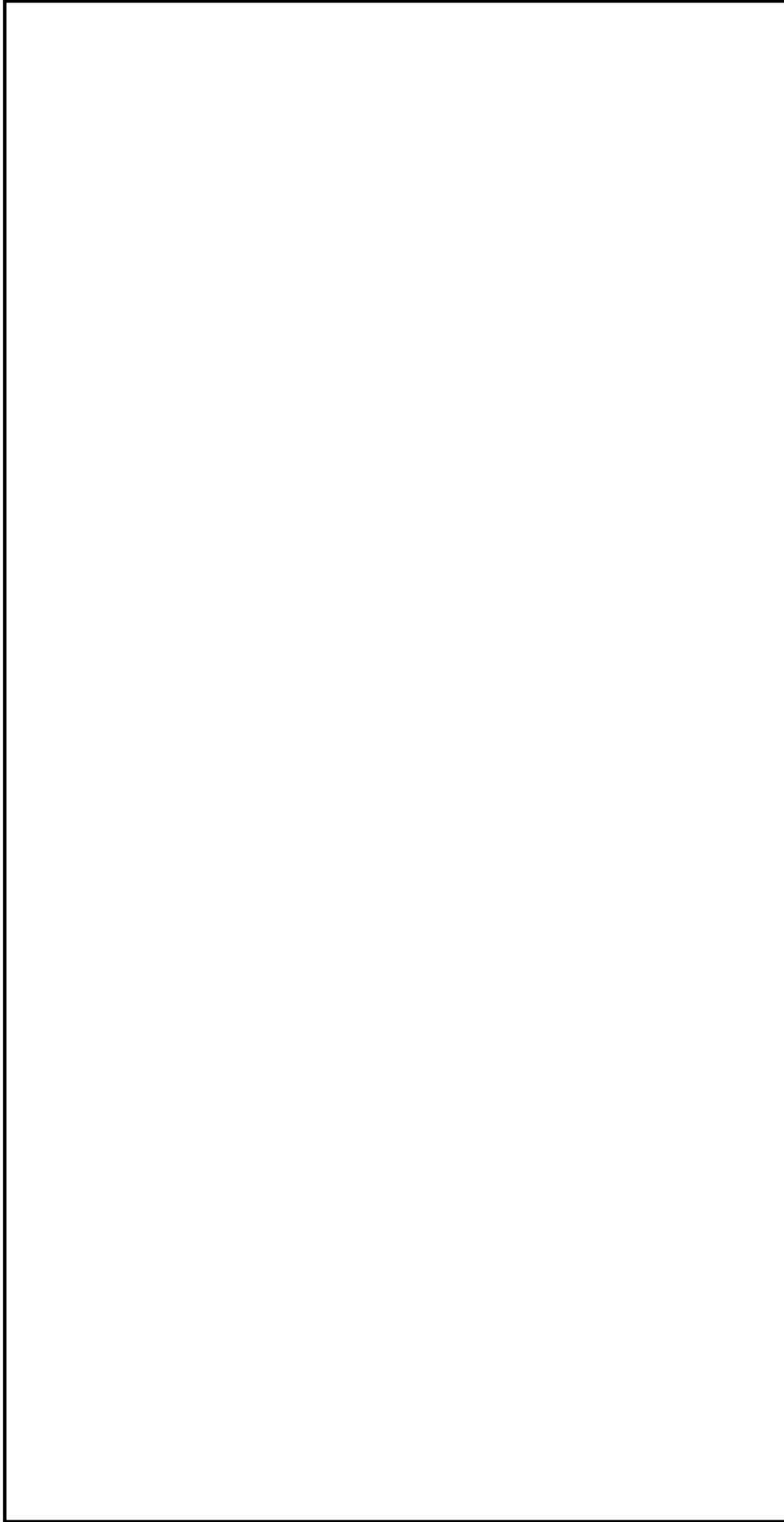
プラント停止時における格納容器空調系統の総給気流量及び総排気流量はそれぞれ約  m<sup>3</sup>/min である。原子炉格納容器の自由体積が約  m<sup>3</sup> であることから、30 分未満で原子炉格納容器の自由体積分の空気を換気及び浄化させる流量をもっており、格納容器空調系統により原子炉格納容器内全体の空気を換気及び浄化させることが可能である。

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、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 3-2-3 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) |
| 火災感知器種類                | 放射線の守護 (故障の防止)                 | ○                    | ○          | ○                     | ○       | ○                  | ○                    | ○          | ○     | ○                |
|                        | 取付面高さ、遮塵、遮塵、空気清浄等の考慮 (感知性能の確保) | △                    | △          | △                     | △       | ○                  | △                    | △          | △     | ○                |
| 設置適合性 (消防法施行規則(火災感知器)) | ○                              | ○                    | ○          | ○                     | ○       | ○                  | ○                    | ○          | ○     | ○                |
| 設置項目                   | 現場施工性 (検測性能の確保に必要な施工の確立性)      | ○                    | ○          | △                     | △       | ○                  | △                    | △          | △     | △                |
|                        | 各感知方式で使用する火災感知器                | △                    | △          | △                     | △       | △                  | △                    | △          | △     | △                |

○：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**設計目標①**を**満足**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**設計目標②**を**満足**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。

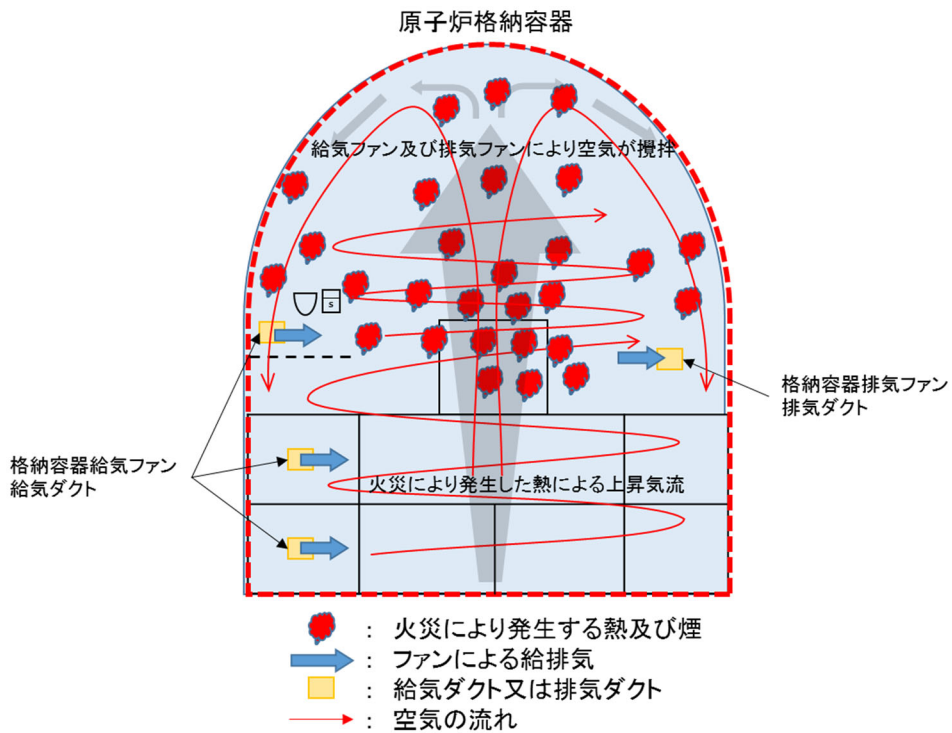
なお、発火源となり得る設備は、火花を発生する可能性のある設備及び高温の設備に該当する電気盤とし、アナログ式の熱感知器及びアナログ式の煙感知器を第 3-2-7 図のように電気盤の直上に支持鋼材（グレーチングのような開口部はない）を使用して設置する設計とする。アナログ式の熱感知器は、設計目標②の満足するために必須ではないが、より早期に火災を感知できるよう自主設置する設計とする。

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、原子炉格納容器上部の設備設置状況を第 3-2-10 図に示す。

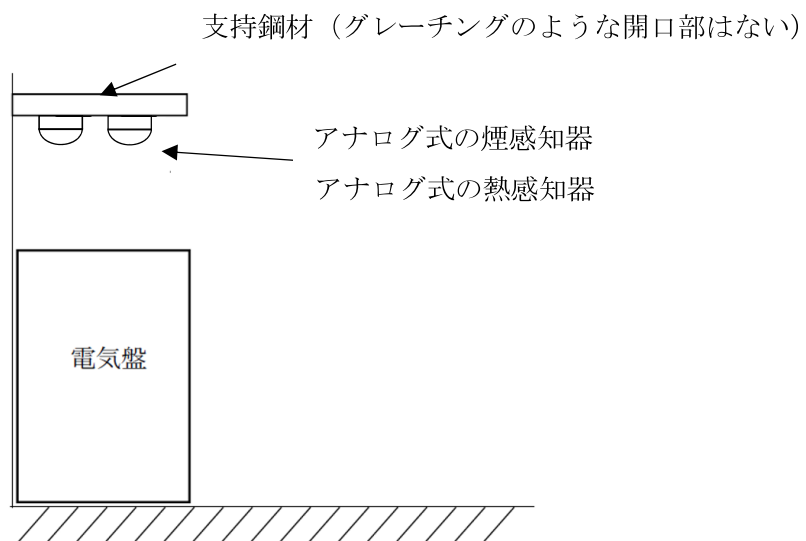


第 3-2-5 図 高天井エリアの感知器監視範囲図（大飯発電所 3 号機）

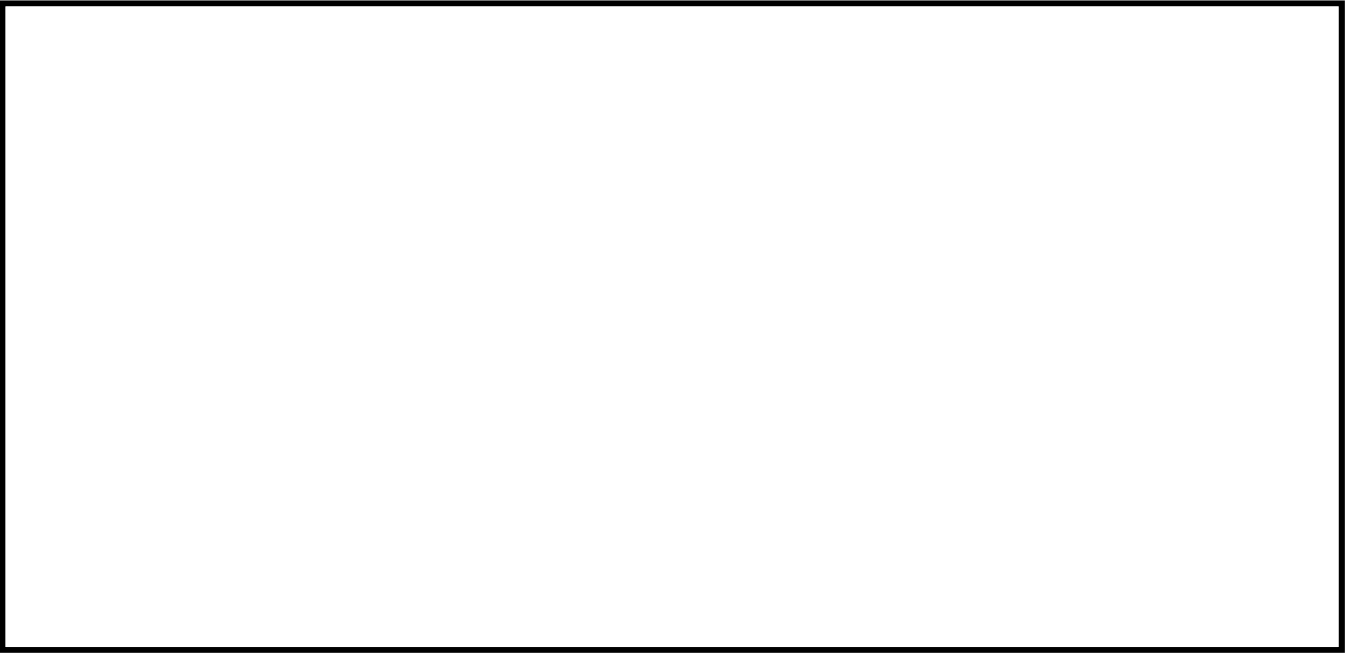
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



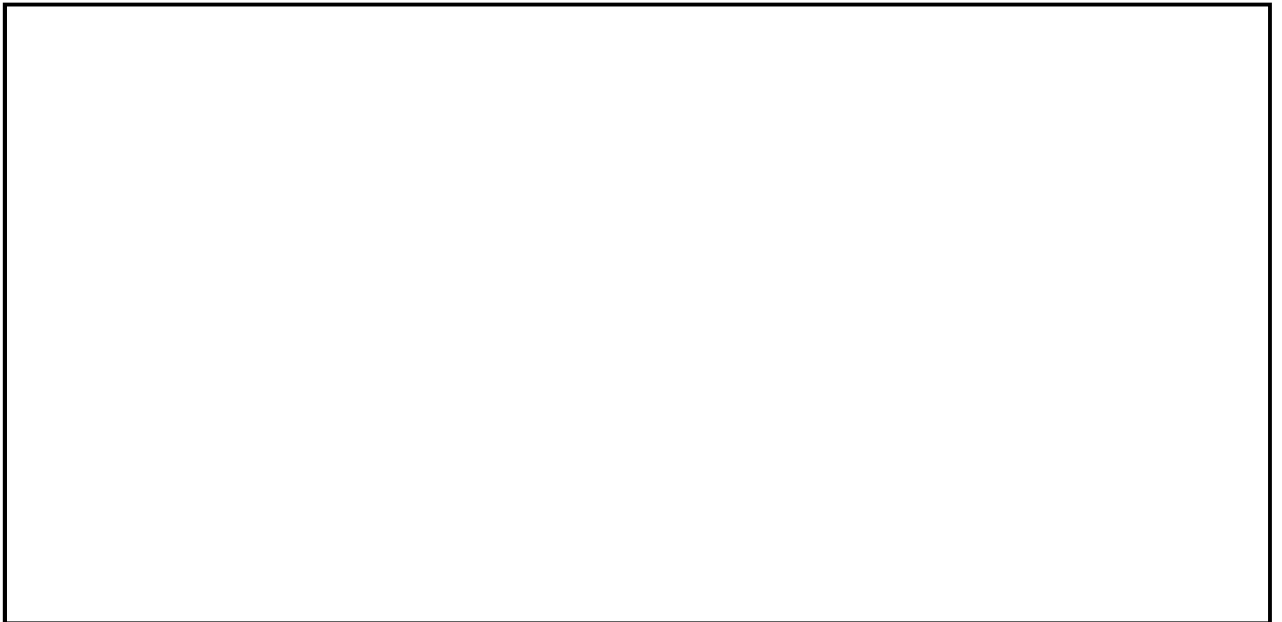
第 3-2-6 図 各給気ファン及び再循環ファンの停止時（格納容器給気・排気ファンは運転）  
における火災による熱及び煙の流れ



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）



第 3-2-9 図 原子炉格納容器内の開口部の配置図（断面図）

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3-2-10図 原子炉格納容器上部の設備設置状況

ハ. 各給気ファン及び再循環ファン停止時における原子炉格納容器内オペレーティングフロアの火災発生時の設計

a. 原子炉格納容器内オペレーティングフロアの火災発生時の空気の流れと火災規模の定義

(a) 空気の流れによる火災規模の定義

各給気ファン及び再循環ファン停止時における原子炉格納容器内オペレーティングフロアで発生する火災の規模を煙の現象論を踏まえて大・中・小の3段階に分けて整理する。各火災規模を以下のとおり定義するとともに、第3-2-11図に各火災規模のイメージを示す。

#### 火災規模の定義

大：発熱量が大きく、熱の気流に乗ってC/V頂部まで上昇した煙が、コンクリート内壁に接触しながら冷却され、周囲の空気との密度差により生じる自然対流で煙が下降に転じるといった流れが継続する大規模火災

中：発熱量が中程度で、熱の気流に乗ってC/V頂部まで上昇した煙がC/V頂部で平衡状態となり下降せず、溜まり続ける中規模火災

小：発熱量が小さく、熱の気流に乗って煙が上昇する過程で、周囲の空気に熱を奪われ、上昇力を失い、C/V内の低い層で煙が水平方向に拡散する流れの方が優位となる小規模火災

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。





火災規模 小

中

大

第3・2・11図 各火災規模のイメージ図 (■ が煙の流れ)

(b) 火災規模毎の発熱速度

(a) で定義した火災規模毎に想定する発熱速度を以下のとおり設定する。

- ・火災規模「大」：C/V内において最大規模の火災源を想定する。具体的には、既許認可の実績として、大飯3,4号機の再稼働審査のまとめ資料で用いている「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」の「表8.1 火災源のスクリーニング用発熱速度 (HRR)」のうち、電気盤1面火災相当の211kWを適用し、熱流動により対流が生じる場合を想定する。
- ・火災規模「中」：C/V内における中規模の火災源として、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」の「表8.1 火災源のスクリーニング用発熱速度 (HRR)」のうち、最小値であるモータ1台相当の69kWを適用し、熱流動が起こらず煙が格納容器頂部に溜まっていく場合を想定する。
- ・火災規模「小」：「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」に基づく発熱速度の設定がないことから、火災規模「大」及び「中」と比較して、より小さい発熱速度を想定する。

(c) 小括

各給気ファン及び再循環ファン停止時における原子炉格納容器内オペレーティングフロアで発生する火災の規模を大・中・小の3段階に分けて整理した。この整理を踏まえ、次項以降で火災感知器の感知性及び原子炉格納容器の健全性について解析結果を踏まえ評価する。

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。

## b. 火災感知器の感知性

火災感知器の感知性について、定義した火災規模毎に確認する。

### (a) 解析条件

格納容器内オペレーティングフロアにおける火災時の火災感知器の感知性を確認するために、火災規模「大」及び火災規模「中」を用いて煙層高さの評価を実施した。なお、FDTs評価は、熱流動を考慮した評価ではないことから、念のため熱流動解析についても実施し、火災により発生する煙の挙動を確認した。

#### ① FDTsを用いた煙層高さ評価

原子炉格納容器内オペレーティングフロアにおける火災時の原子炉格納容器頂部からの煙層高さの評価するため、米国NRCが公開している評価ツールであるFDTsを用いて評価した。火源の条件設定として、想定する火災規模のうち、最も発熱量の大きい火災規模「大」及び煙が溜まるまでに時間を要する火災規模「中」の火源を用いて換気のない条件下で評価した。また、空間体積として、原子炉格納容器オペレーティングフロアより上部相当の空間体積を設定して評価した。

#### ② 原子炉格納容器オペレーティングフロアにおける熱流動解析

各給気ファン及び再循環ファンの停止時において、煙の挙動を熱流動解析により評価した。解析は、気体流動の解析に一般的に用いられる解析コード「FLUENTv20.1」を用いて実施した。

解析条件として、実機の構造を模擬するため、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（大きさは大飯4号機のCVを参照）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の温度を想定し、直径2m、温度800℃及び1200℃の火源を設定した。また、原子炉格納容器の壁面は、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考慮し、原子炉格納容器外の外気へ放熱する条件とした。

なお、解析にあたっては、実機環境（1気圧、40℃）より、乱流モデル「Realizable $k-\epsilon$ モデル」、および運動量分散化手法「Second Order Upwind」を用いた。なお、乱流モデルはCV内の旋回・渦流を再現するのに適したモデルとして、また、運動量分散化手法は計算値の誤差が小さいものを選定した。

(b) 火災規模「大」

火災規模「大」の場合、発熱量が大きく、その熱による上昇気流に乗ってC/V頂部まで上昇した煙が、コンクリート壁に接触することで冷却され、周囲の空気との密度差により生じる自然対流により下降に転じるといった煙の流れが継続する。このような煙の流路となる場所に火災感知器を設置することで火災を感知可能である。

なお、この煙が頂部に溜まっていく過程についてはFDTsを用いて火災規模「大」の場合の煙層厚さを確認したところ、火災発生後7分程度で煙層はC/V頂部より30m程度下に到達する。また、煙の挙動を熱流動解析により確認したところ、オペレーションフロアから上昇した煙は、C/Vのコンクリート壁に沿って数分程度で35m程度下に降下してくることから、でも感知可能である。

評価ツールを用いた評価結果を別紙1・1、解析の詳細については別紙1・2に示す。

(c) 火災規模「中」

火災規模「中」の場合、発熱量が中程度であり、その熱による上昇気流に乗ってC/V頂部まで上昇した煙が下降せず、C/V頂部に溜まり続ける。このような火災が継続した場合、煙はC/V頂部に溜まっていき、煙層が厚くなっていくことから、時間の経過とともに感知可能である。

なお、この煙が頂部に溜まっていく過程における煙層厚さについて、FDTsを用いて評価したところ、火災発生後10分程度で煙層はC/V頂部より30m程度下に到達することから、でも感知可能である。

評価ツールを用いた評価結果を別紙1・1に示す。

(d) 火災規模「小」

火災規模「小」の場合、発熱量が小さく、熱気流に乗って煙が上昇する過程で、周囲の空気に熱を奪われC/V頂部に到達する前に上昇力を失い、水平方向に拡散する流れの方が優位となる。このような火災が継続した場合、煙はオペレーティングフロアの床面付近で広がることから、オペレーティングフロア上の感知器にて感知可能である。

(e) 小括

煙の感知に最も時間を要する火災規模「中」の火災であっても、10分程度で感知可能である。

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。

### c. 原子炉格納容器の健全性

火災発生時の原子炉格納容器の健全性について以下のとおり確認する。

#### (a) 解析条件

火災発生時の原子炉格納容器の健全性を確認するために、火災規模「大」を用いて温度評価を実施した。

##### ①FDTsを用いた原子炉格納容器頂部の温度評価

原子炉格納容器内オペレーティングフロアにおける火災時の原子炉格納容器頂部の温度を評価するため、米国NRCが公開している評価ツールであるFDTsを用いて評価した。保守的な火源の条件設定として、想定する火災規模のうち最も発熱量の大きい火災規模「大」の火源を用いて換気のない条件下で評価した。また、空間体積として、原子炉格納容器オペレーティングフロアより上部相当の空間体積を設定して評価した。

#### (b) 原子炉格納容器の温度制限値

設計基準において発生する火災により、発電用原子炉施設の安全性が損なわれないようにするため、設計基準対象施設に対して必要な機能を有することが求められている。設計基準事故時の原子炉格納容器の最高使用温度が144℃であることを踏まえ、火災発生時の原子炉格納容器頂部の温度制限値を144℃と設定する。

なお、温度制限値の妥当性について以下に示す。

原子炉格納容器バウンダリとして、原子炉格納容器頂部にはライナ部及びコンクリート部があることから、これらへの熱影響について評価を行う。

ライナ部及びコンクリート部については、設計基準事故時の条件において変形が弾性域に収まっていることを確認している。また、クリープ現象については、融点の半分程度以上の高温で長時間かけて生じるものであるが、評価対象の鋼材はいずれも炭素鋼であり、一般的な炭素鋼の融点は1000℃以上であることから、クリープ現象を考慮する必要はない。

さらに、コンクリート本体については、日本機械学会「発電用原子力設備規格コンクリート製原子炉格納容器規格2003年版(JSME S NE1-2003)」において、コンクリートの物性への影響を踏まえた温度制限値が定められており、非定常状態(24時間未満の短時間継続する状態)では175℃とされているが、今回設定した温度制限値である144℃の方が温度制限値として保守的な値である。

以上より火災発生時の原子炉格納容器頂部の温度制限値を144℃と設定することは妥当である。

### (c) 解析結果を踏まえた原子炉格納容器の健全性評価

原子炉格納容器内オペレーティングフロアにおける火災時の原子炉格納容器頂部の温度を評価するため、米国 NRC が公開している評価ツールである FDTs を用いて評価した結果、想定する火災規模のうち最も発熱量の大きい火災規模「大」の火源を用いた場合、原子炉格納容器頂部の高温ガス層温度は火災発生から 1 時間で 75.7℃程度となった。評価ツールを用いた評価結果を別紙 1-1 に示す。

火災発生時の原子炉格納容器頂部の温度が、原子炉格納容器頂部の温度制限値を超過しないことから、原子炉格納容器バウンダリの健全性が維持されることを確認した。

### (d) 小括

火災規模「大」の火源を用い、換気のない条件を想定しても、原子炉格納容器頂部の温度は温度制限値である 144℃を超過せず、原子炉格納容器バウンダリの健全性が維持されることを確認した。

## d. 大括

各給気ファン及び再循環ファン停止時における原子炉格納容器内オペレーティングフロアの空気の流れを踏まえ、火災の規模を煙の現象論に基づき大・中・小の3段階に分けて整理し、解析及び評価した結果、最も厳しい条件でも原子炉格納容器頂部の温度は75.7℃程度であった。また、感知までに最も時間がかかる場合でも10分程度で感知することが可能である。

また、原子炉格納容器頂部の温度は、設計基準事故時の原子炉格納容器の最高使用温度を基に設定した温度制限値である144℃を超過しないことから、原子炉格納容器バウンダリの健全性は維持される。

## 二. 火災感知器の設置場所について

### a. 煙感知器の感知性能及び網羅性に係る比較検討

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、原子炉格納容器内オペレーティングフロアにおける煙感知器設置場所について、煙感知器の感知性能及び網羅性の観点で比較検討を実施した。検討結果を第3-2-4表に示す。

第 3-2-4 表 煙感知器の感知性能及び網羅性に係る比較検討結果

凡例 ○：もれなく確実に感知可能、×：感知不可

| 設置場所<br>及び<br>最大設置高さ | 案 1   | 案 2  | 案 3-1  | 案 3-2  | 案 3-3   | 案 3-4   |
|----------------------|---|--|--|--|---|---|
|                      | 感知区画<br>10-1 のグ<br>レーチング面<br>上部及び加<br>圧器室の天<br>井面上部に<br>煙感知器<br>(スポット<br>型) を設置 | ポーラクレ<br>ーン付近で<br>人が寄り付<br>き、感知器<br>の設置及び<br>保守点検が<br>可能な CV 壁<br>面に煙感知<br>器 (スポッ<br>ト型) を設<br>置 | CV トップ<br>トップド<br>ーム部に煙感<br>知器 (スポ<br>ット型) を<br>設置 | CV トップ<br>トップド<br>ーム部の火災<br>を必要な期<br>間、感知で<br>きるように<br>煙感知器<br>(スポット<br>型) を仮設 | CV トップ<br>トップド<br>ーム部に<br>空気吸引式<br>の煙感知器<br>を設置 | CV トップ<br>トップド<br>ーム部に<br>光電分離式<br>の煙感知器<br>を設置 |
| 火災規模                 | E. L. <input type="text"/><br>程度  | E. L. <input type="text"/><br>程度   | E. L. <input type="text"/><br>程度                   | E. L. <input type="text"/><br>程度   | E. L. <input type="text"/><br>程度                | E. L. <input type="text"/><br>程度                |
| 小 <sup>※1</sup>      | ○   | ○  | ○  | ○  | ○   | ○   |
| 中 <sup>※2</sup>      | ○   | ○  | ○  | ○  | ○   | ○   |
| 大 <sup>※2</sup>      | ○   | ○  | ○  | ○  | ○   | ○   |

※1：案1～案3のいずれにおいても、火災規模「小」の感知は原子炉格納容器内オペレーティングフロア下層（感知区画 8-1, 8-2, 8-3, 9-1, 9-2, 10-1）の煙感知器に期待しており、感知性能及び網羅性に差異はない。

※2：案1～案3は感知までの時間に10分程度の差はあるが、もれなく確実に感知できる。なお、感知時間の違いについては、米国 NRC の FDTs 評価ツール及び熱流動解析による評価結果から、最も厳しい条件でも 75.7℃程度と温度制限値 144℃を十分に下回っているため、火災による原子炉格納容器の健全性への影響はなく、問題とはならない。

検討の結果、上記の案において、いずれの場所に煙感知器を設置しても、感知性能及び網羅性に問題はないと評価できる。

#### b. 煙感知器の設置に係る比較検討

案1、案2及び案3のいずれの場所に煙感知器を設置しても、感知性能及び網羅性に問題がないことを確認したため、次にそれぞれの案について、感知器設置の成立性、保守点検（定期点検及び定期取替）の成立性、偶発的な故障の対応及び耐震性の確保の観点、並びに発電所運営上の懸念事項を踏まえ、総合的評価を行い、その結果を第 3-2-5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 3-2-5 表 煙感知器の設置に係る比較検討結果

凡例 ○：成立性に問題なし、×：成立性に問題あり

| 設置場所<br>及び<br>最大設置高さ |                | 案 1  | 案 2  | 案 3-1                             | 案 3-2                                      | 案 3-3                             | 案 3-4                             |
|----------------------|----------------|--|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                      |                | 感知区画 10-1 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              | ポーラクレール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 | CV トップドーム部に煙感知器（スポット型）を設置         | CV トップドーム部の火災を必要な期間、感知できるように煙感知器（スポット型）を仮設 | CV トップドーム部に空気吸引式の煙感知器を設置          | CV トップドーム部に光電分離式の煙感知器を設置          |
| 検討項目                 |                | 程度   | 程度   | 程度                                | 程度   | 程度                                | 程度                                |
| 設置の成立性               |                | ○  | ○  | ○                                 | ○  | ○                                 | ○                                 |
| 保守点検<br>の成立性         | 定期点検<br>※1     | 直接目視点検可<br>遠隔試験可   | 直接目視点検可<br>遠隔試験可                                       | 双眼鏡で点検可<br>遠隔試験可                  | 外観点検・作動<br>試験後に仮設                          | 双眼鏡で点検可<br>現地試験可                  | 双眼鏡で点検可<br>遠隔試験可                  |
|                      | 定期<br>取替<br>※2 | ○  | ○  | ○                                 | ○  | ○                                 | ○                                 |
| 偶発的な故障の<br>対応        |                | ○  | ○  | ○                                 | ○  | ○                                 | ○                                 |
| 耐震性の確保               |                | ○  | ○  | ○                                 | ×  | ○                                 | ○                                 |
| 評価                   |                | 懸念事項<br>なし   | 保守点検作業時に高所作業を行う必要があり、作業員の労働安全リスクあり                     | 保守点検作業時に足場設置が必要であり、長期間（30 日以上）要する | 地震時の波及的影響の懸念あり                             | 保守点検作業時に足場設置が必要であり、長期間（30 日以上）要する | 保守点検作業時に足場設置が必要であり、長期間（30 日以上）要する |
| 総合評価                 |                | いずれの案でも感知性及び原子炉格納容器バウンダリの健全性に問題がないことから、最も懸念の少ない案 1 が最適と判断する。 |  |                                   |  |                                   |                                   |

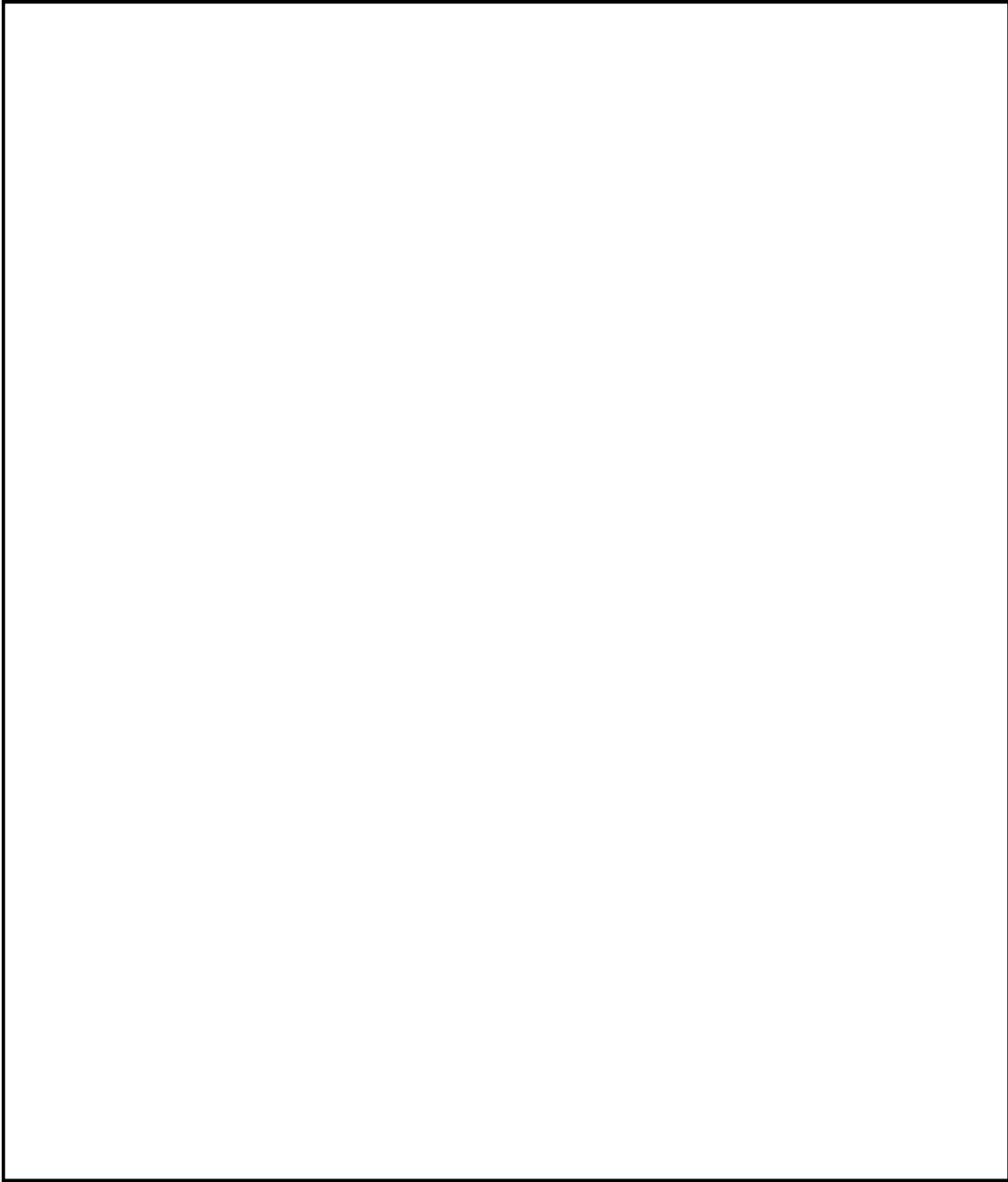
※1：消防法に基づき、定期的な点検（外観点検、作動試験）が必要である。

※2：感知器は一般産業品のため、劣化による故障を想定し、定期取替の実施が必要である。

上記の検討結果より、案 1 を煙感知器の最適な設置場所と判断し、感知区画 10-1 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）を設置する設計とする。

案 1 において期待する煙感知器及び原子炉格納容器の感知器設計概要について、第 3-2-12 図に示す。また、参考として、案 2 において期待する煙感知器について、第 3-2-13 図に示す。

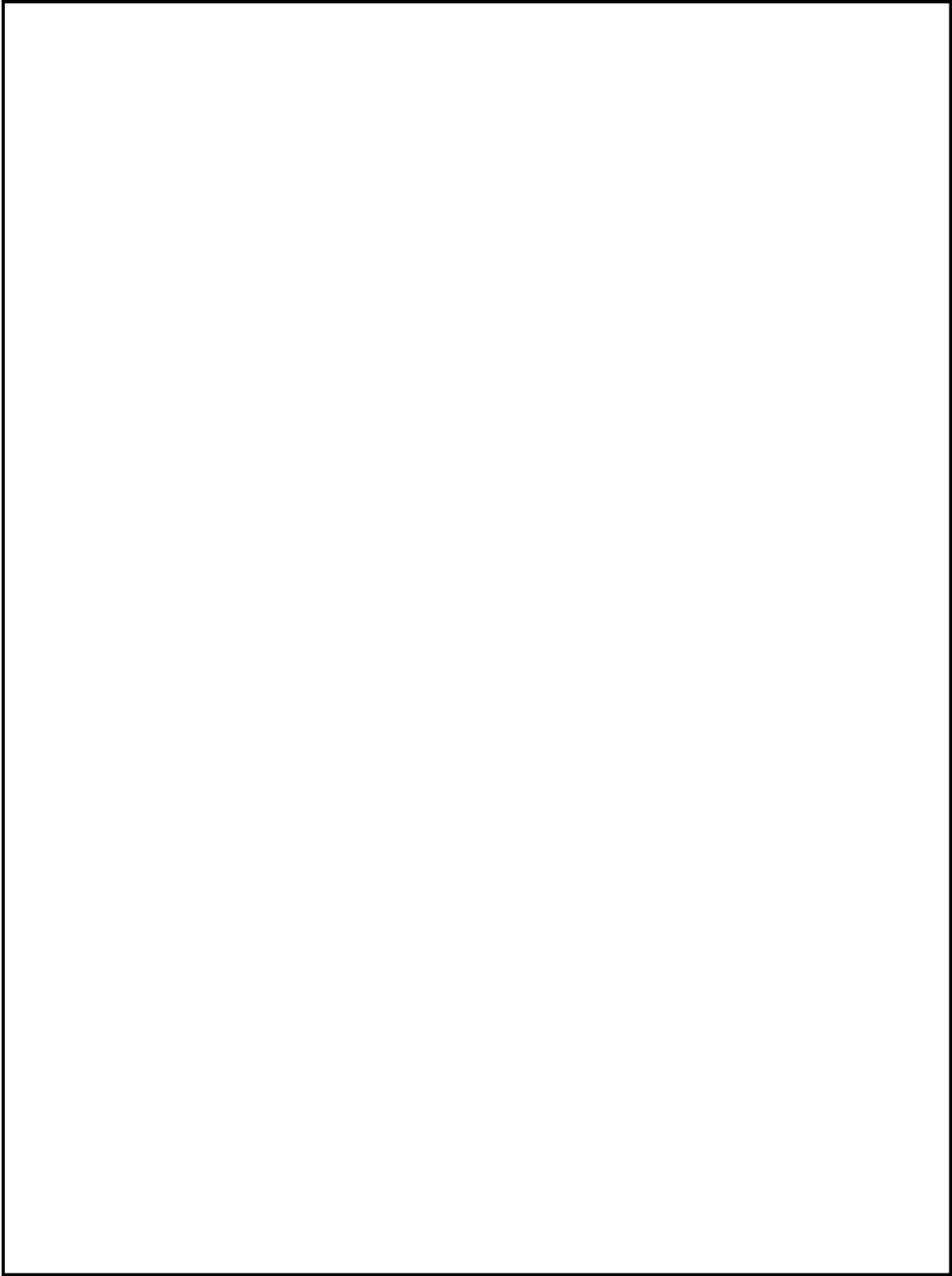
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 3・2・12 図 案 1 で期待する煙感知器及び原子炉格納容器の感知器設計概要

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 3-2-13 図 案 2 で期待する煙感知器

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

ホ. **設計目標を満足**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る。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、**設計目標②を満足**すると評価する。なお、**設計目標②を満足するため**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。

#### 3-2-4 火災による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 3-2-14 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 3-2-14 図 系統図（原子炉格納容器スプレイ系統）

枠囲みの範囲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:HRR211kW)

INPUT PARAMETERS

COMPARTMENT INFORMATION

|  |       |    |
|--|-------|----|
| Compartment Width ( $w_c$ )            | 29.80 | m  |
| Compartment Length ( $l_c$ )           | 29.80 | 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<br>(kW/m <sup>2</sup> -K) <sup>2</sup> -sec | k<br>(kW/m-K) | c<br>(kJ/kg-K) | ρ<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Select Material                                   |
|------------------------|---|---------------|----------------|---------------------------|---|
|                        |   |               |                |                           | Concrete  |
| Aluminum (pure)        | 500   | 0.206         | 0.895          | 2710                      | Scroll to desired material<br>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)

211.00 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>)

$$A_T = \quad 6542.88 \quad m^2$$



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) |       | $h_k$<br>(kW/m <sup>2</sup> -K) | $\Delta T_g$<br>(°K) | $T_g$<br>(°K) | $T_g$<br>(°C) | $T_g$<br>(°F) |
|---------|-------------------------|-------|---------------------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
|         | (min)                   | (sec) |                                 |                      |               |               |               |
|         | 0                       | 0.00  | -                               | -                    | 313.00        | 40.00         | 104.00        |
|         | 1                       | 60    | 0.22                            | 18.03                | 331.03        | 58.03         | 136.46        |
|         | 2                       | 120   | 0.16                            | 20.24                | 333.24        | 60.24         | 140.43        |
|         | 3                       | 180   | 0.13                            | 21.65                | 334.65        | 61.65         | 142.98        |
|         | 4                       | 240   | 0.11                            | 22.72                | 335.72        | 62.72         | 144.89        |
|         | 5                       | 300   | 0.10                            | 23.58                | 336.58        | 63.58         | 146.44        |
|         | 10                      | 600   | 0.07                            | 26.47                | 339.47        | 66.47         | 151.64        |
|         | 15                      | 900   | 0.06                            | 28.32                | 341.32        | 68.32         | 154.97        |
|         | 20                      | 1200  | 0.05                            | 29.71                | 342.71        | 69.71         | 157.47        |
|         | 25                      | 1500  | 0.04                            | 30.83                | 343.83        | 70.83         | 159.50        |
|         | 30                      | 1800  | 0.04                            | 31.78                | 344.78        | 71.78         | 161.21        |
|         | 35                      | 2100  | 0.04                            | 32.61                | 345.61        | 72.61         | 162.70        |
|         | 40                      | 2400  | 0.03                            | 33.34                | 346.34        | 73.34         | 164.02        |
|         | 45                      | 2700  | 0.03                            | 34.01                | 347.01        | 74.01         | 165.21        |
|         | 50                      | 3000  | 0.03                            | 34.61                | 347.61        | 74.61         | 166.29        |
|         | 55                      | 3300  | 0.03                            | 35.16                | 348.16        | 75.16         | 167.29        |
|         | 60                      | 3600  | 0.03                            | 35.68                | 348.68        | 75.68         | 168.22        |





## 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)

$$A_c = \quad \quad \quad 888.04 \quad \quad \quad m^2$$

#### 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          | 1.07                          | 0.071                 | 29.56                    | 96.97                     |
| 2          | 1.06                          | 0.072                 | 22.91                    | 75.16                     |
| 3          | 1.05                          | 0.072                 | 18.40                    | 60.38                     |
| 4          | 1.05                          | 0.072                 | 15.19                    | 49.84                     |
| 5          | 1.05                          | 0.072                 | 12.81                    | 42.03                     |
| 10         | 1.04                          | 0.073                 | 6.70                     | 21.97                     |
| 15         | 1.03                          | 0.073                 | 4.25                     | 13.95                     |
| 20         | 1.03                          | 0.074                 | 3.00                     | 9.83                      |
| 25         | 1.03                          | 0.074                 | 2.25                     | 7.39                      |
| 30         | 1.02                          | 0.074                 | 2.00                     | 6.56                      |
| 35         | 1.02                          | 0.074                 | 2.00                     | 6.56                      |
| 40         | 1.02                          | 0.075                 | 2.00                     | 6.56                      |
| 45         | 1.02                          | 0.075                 | 2.00                     | 6.56                      |
| 50         | 1.02                          | 0.075                 | 2.00                     | 6.56                      |
| 55         | 1.01                          | 0.075                 | 2.00                     | 6.56                      |
| 60         | 1.01                          | 0.075                 | 2.00                     | 6.56                      |

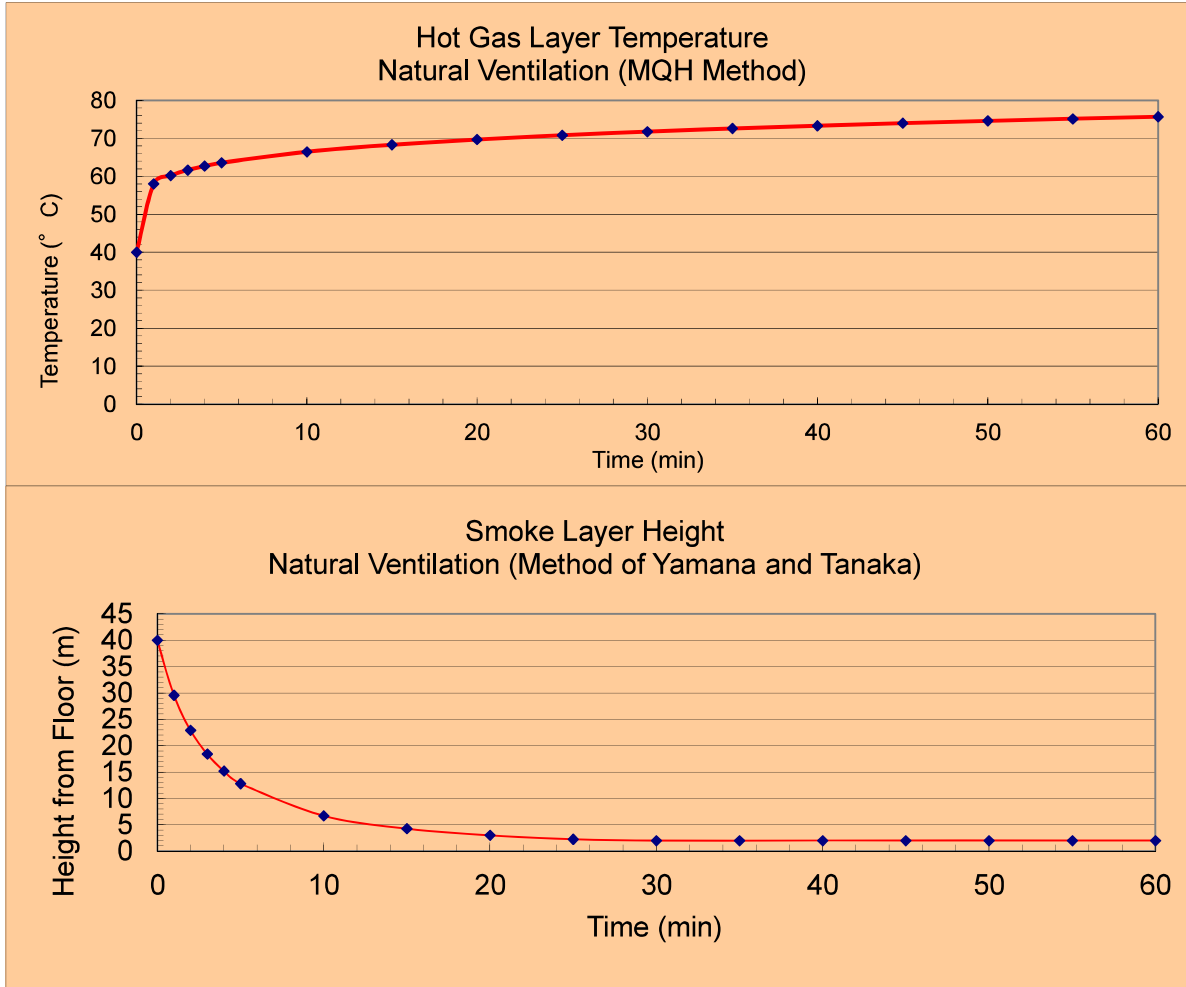
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT



## 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:



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

Version 1805.1  
(SI Units)

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 モータ1台火災 (モータ:HRR69kW)

INPUT PARAMETERS

COMPARTMENT INFORMATION

|  |       |    |
|--|-------|----|
| Compartment Width ( $w_c$ )            | 29.80 | m  |
| Compartment Length ( $l_c$ )           | 29.80 | 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<br>(kW/m <sup>2</sup> -K) <sup>2</sup> -sec | k<br>(kW/m-K) | c<br>(kJ/kg-K) | ρ<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Select Material                                   |
|------------------------|---|---------------|----------------|---------------------------|---|
|                        |   |               |                |                           | Concrete  |
| Aluminum (pure)        | 500   | 0.206         | 0.895          | 2710                      | Scroll to desired material<br>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)

69.00 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>)

$$A_T = \quad 6542.88 \quad m^2$$



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) |       | $h_k$<br>(kW/m <sup>2</sup> -K) | $\Delta T_g$<br>(°K) | $T_g$<br>(°K) | $T_g$<br>(°C) | $T_g$<br>(°F) |
|---------|-------------------------|-------|---------------------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
|         | (min)                   | (sec) |                                 |                      |               |               |               |
|         | 0                       | 0.00  | -                               | -                    | 313.00        | 40.00         | 104.00        |
|         | 1                       | 60    | 0.22                            | 8.56                 | 321.56        | 48.56         | 119.41        |
|         | 2                       | 120   | 0.16                            | 9.61                 | 322.61        | 49.61         | 121.29        |
|         | 3                       | 180   | 0.13                            | 10.28                | 323.28        | 50.28         | 122.50        |
|         | 4                       | 240   | 0.11                            | 10.78                | 323.78        | 50.78         | 123.41        |
|         | 5                       | 300   | 0.10                            | 11.19                | 324.19        | 51.19         | 124.14        |
|         | 10                      | 600   | 0.07                            | 12.56                | 325.56        | 52.56         | 126.61        |
|         | 15                      | 900   | 0.06                            | 13.44                | 326.44        | 53.44         | 128.19        |
|         | 20                      | 1200  | 0.05                            | 14.10                | 327.10        | 54.10         | 129.38        |
|         | 25                      | 1500  | 0.04                            | 14.63                | 327.63        | 54.63         | 130.34        |
|         | 30                      | 1800  | 0.04                            | 15.09                | 328.09        | 55.09         | 131.16        |
|         | 35                      | 2100  | 0.04                            | 15.48                | 328.48        | 55.48         | 131.86        |
|         | 40                      | 2400  | 0.03                            | 15.83                | 328.83        | 55.83         | 132.49        |
|         | 45                      | 2700  | 0.03                            | 16.14                | 329.14        | 56.14         | 133.05        |
|         | 50                      | 3000  | 0.03                            | 16.43                | 329.43        | 56.43         | 133.57        |
|         | 55                      | 3300  | 0.03                            | 16.69                | 329.69        | 56.69         | 134.04        |
|         | 60                      | 3600  | 0.03                            | 16.93                | 329.93        | 56.93         | 134.48        |





## 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)

$$A_c = \quad \quad \quad 888.04 \quad \quad \quad m^2$$

#### 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          | 1.10                          | 0.069                 | 32.45                    | 106.47                    |
| 2          | 1.09                          | 0.069                 | 26.98                    | 88.52                     |
| 3          | 1.09                          | 0.070                 | 22.88                    | 75.07                     |
| 4          | 1.09                          | 0.070                 | 19.72                    | 64.69                     |
| 5          | 1.09                          | 0.070                 | 17.22                    | 56.49                     |
| 10         | 1.08                          | 0.070                 | 10.03                    | 32.91                     |
| 15         | 1.08                          | 0.070                 | 6.74                     | 22.11                     |
| 20         | 1.08                          | 0.070                 | 4.92                     | 16.14                     |
| 25         | 1.08                          | 0.071                 | 3.79                     | 12.44                     |
| 30         | 1.08                          | 0.071                 | 3.04                     | 9.96                      |
| 35         | 1.07                          | 0.071                 | 2.50                     | 8.20                      |
| 40         | 1.07                          | 0.071                 | 2.11                     | 6.91                      |
| 45         | 1.07                          | 0.071                 | 2.00                     | 6.56                      |
| 50         | 1.07                          | 0.071                 | 2.00                     | 6.56                      |
| 55         | 1.07                          | 0.071                 | 2.00                     | 6.56                      |
| 60         | 1.07                          | 0.071                 | 2.00                     | 6.56                      |

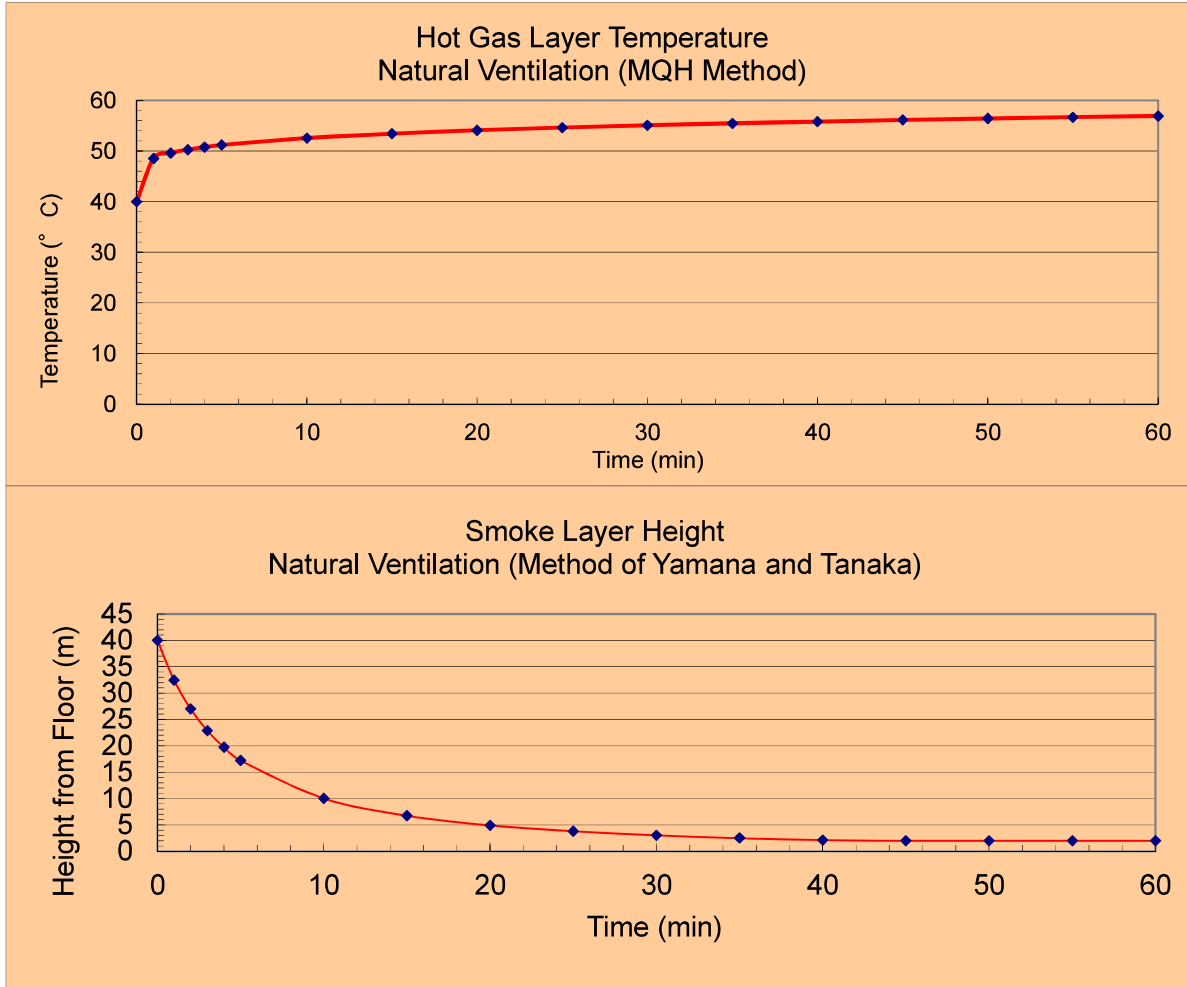
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT  
CAUTION: SMOKE IS EXITING OUT VENT



**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:

## 大飯 3 4 感知器 B F 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。

[ ] 枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

## 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><br/>コンクリート熱伝導率 <math>\lambda = 1.2\text{W/mK}</math><br/>外面熱伝達率 <math>\alpha = 10\text{ W/m}^2\text{K}</math><br/>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 [℃] |

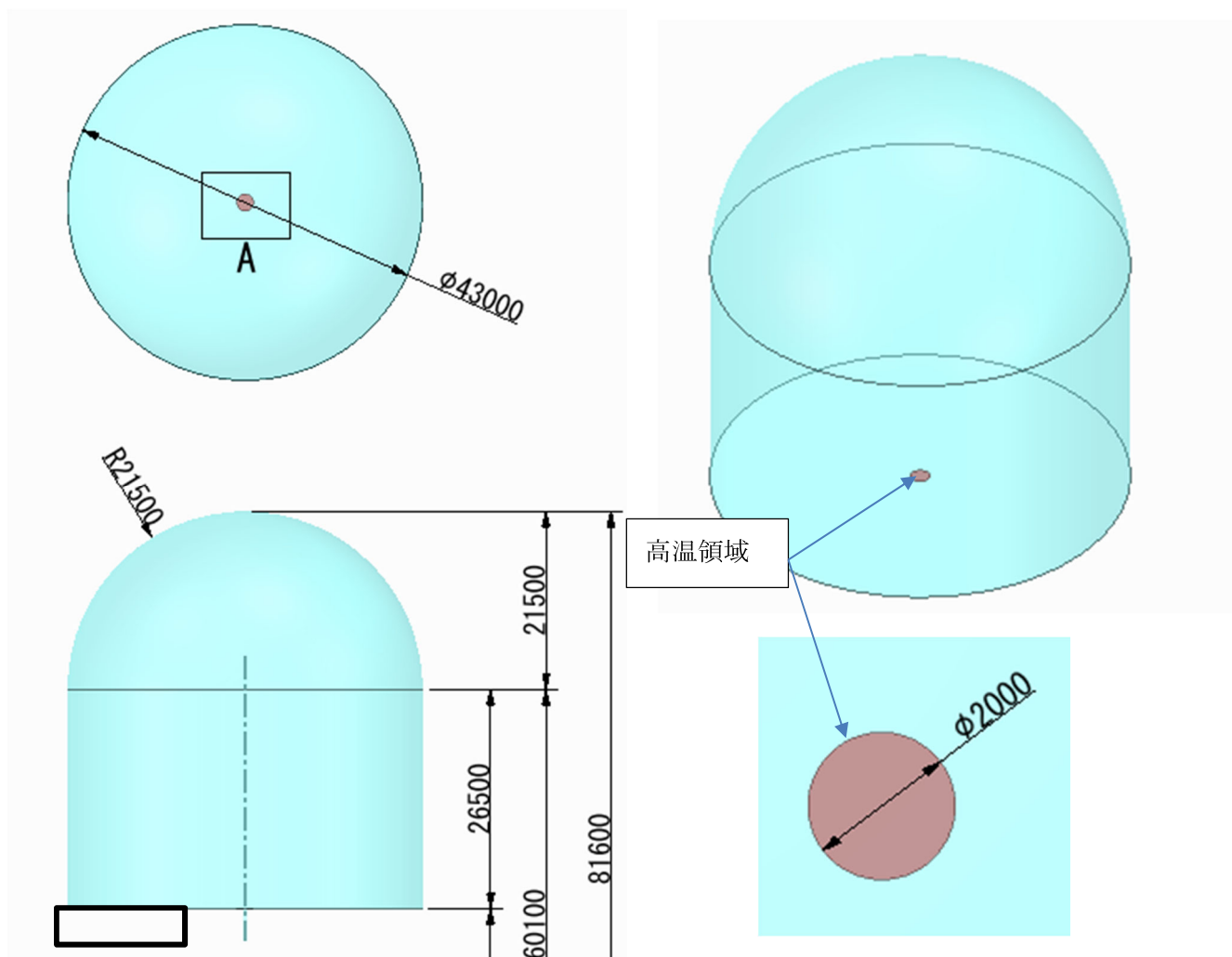


図1 解析領域のモデル図 (単位は mm)

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。

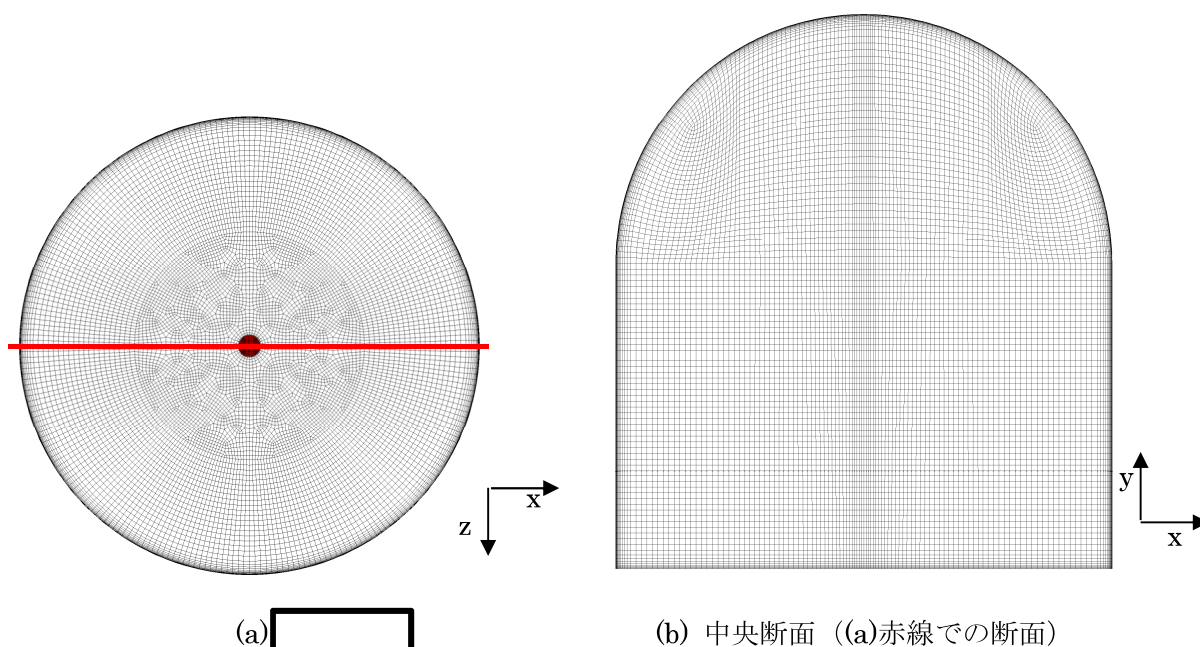


図 2 解析メッシュ図

## 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。



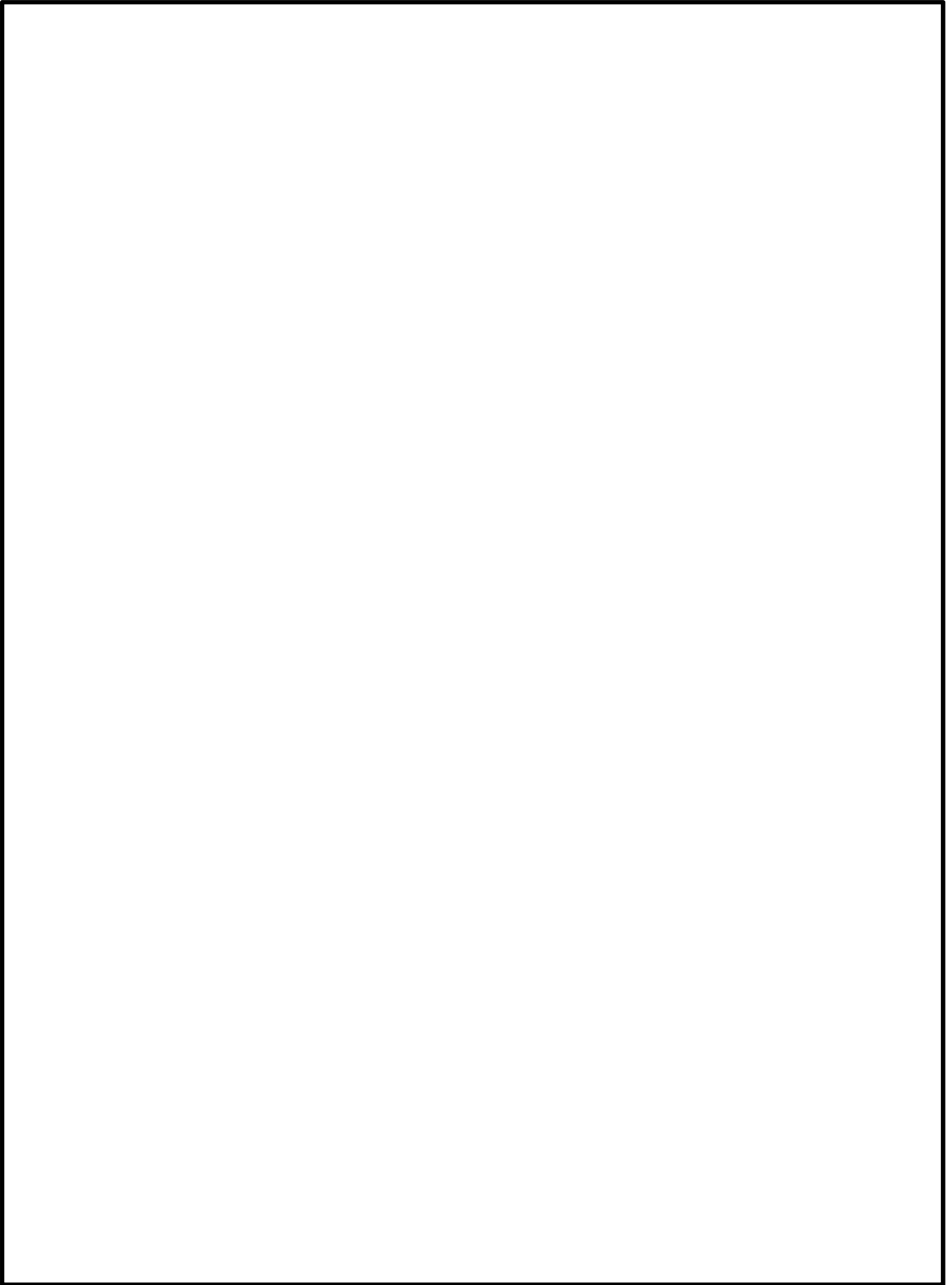


図3 垂直断面での流速ベクトル図(ベクトル長固定)

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。

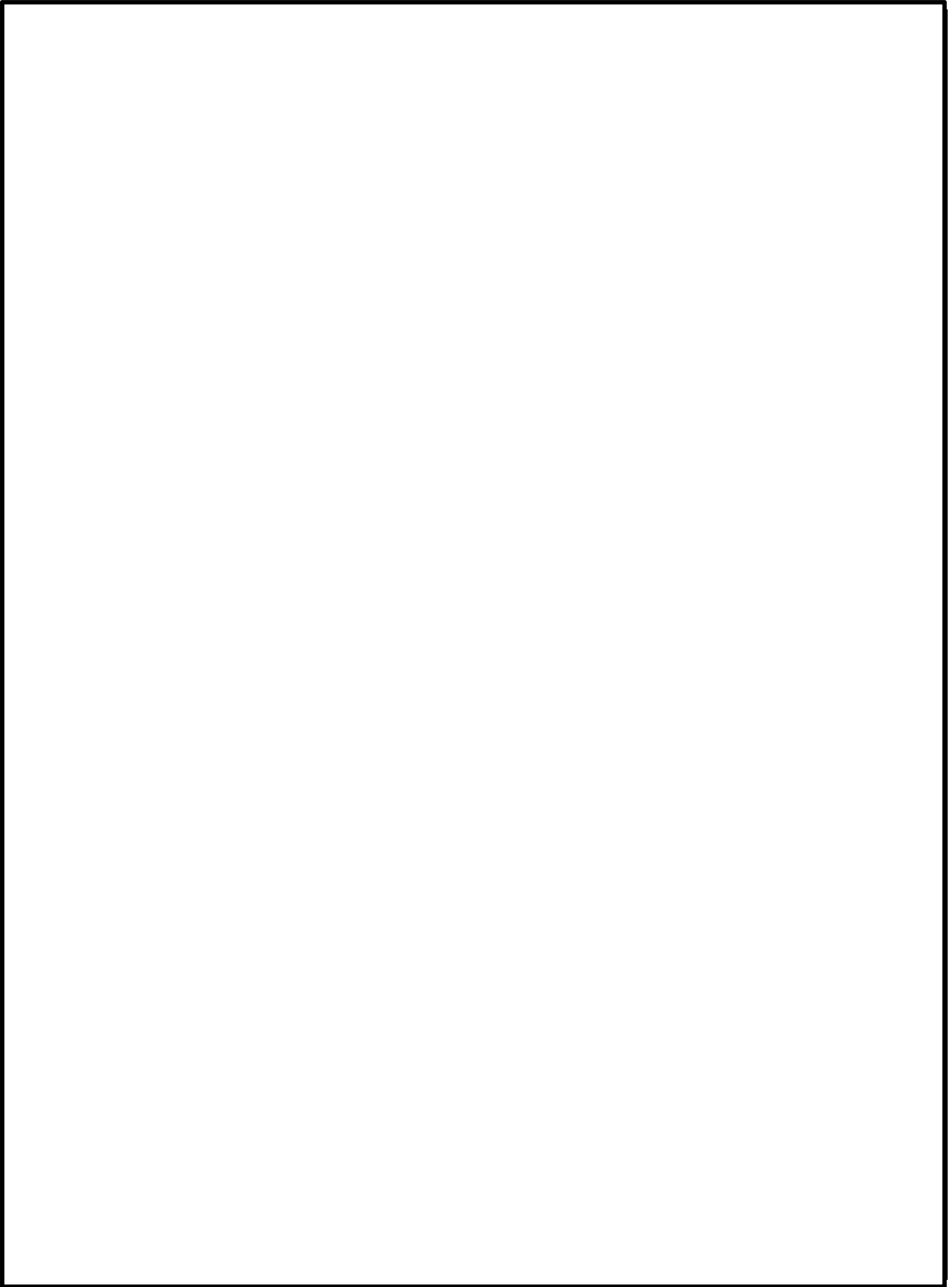


図4 垂直断面での流速ベクトル図(ベクトル長を大きさに応じて可変)

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。

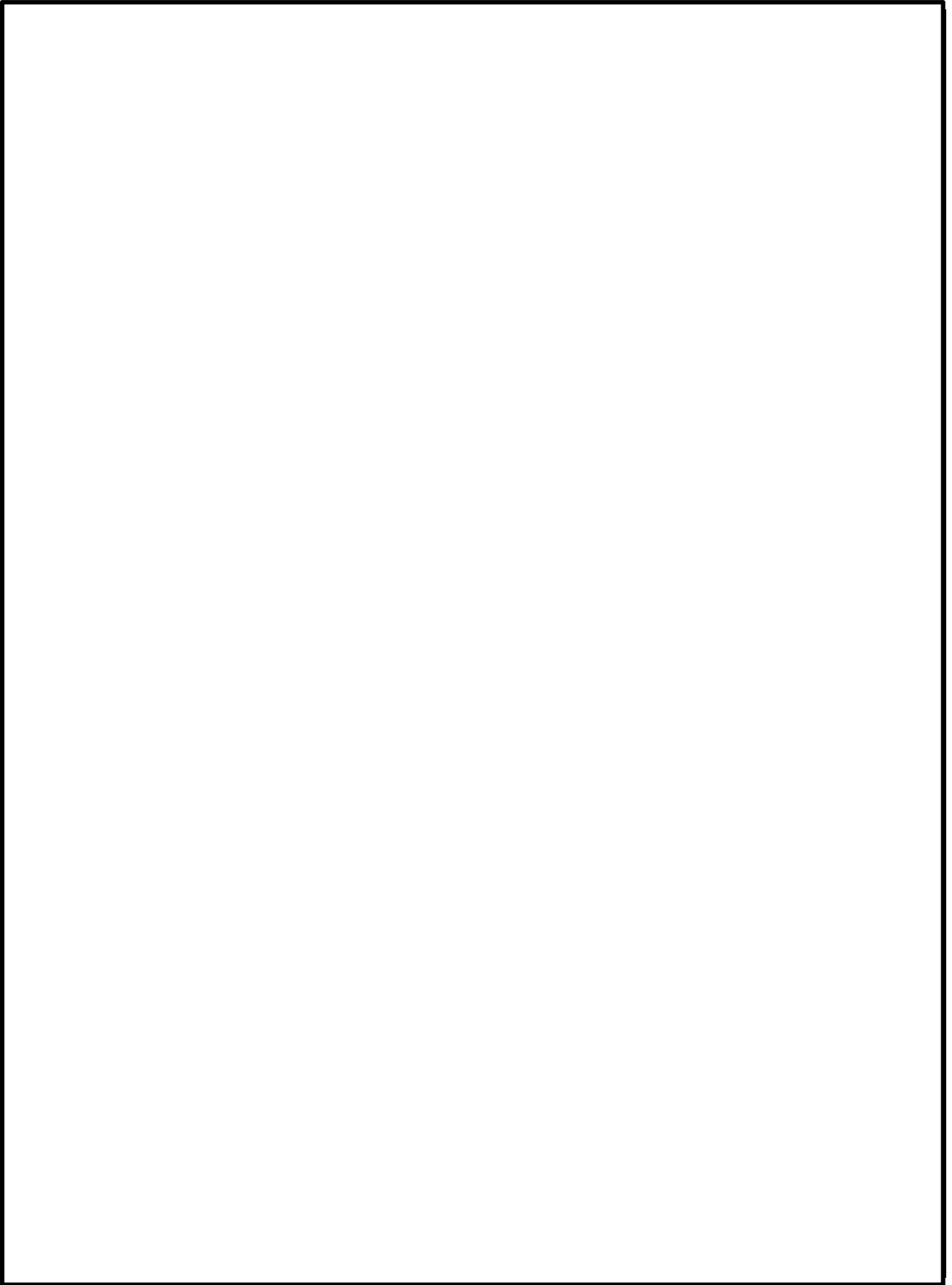


図5 垂直断面での温度分布

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。

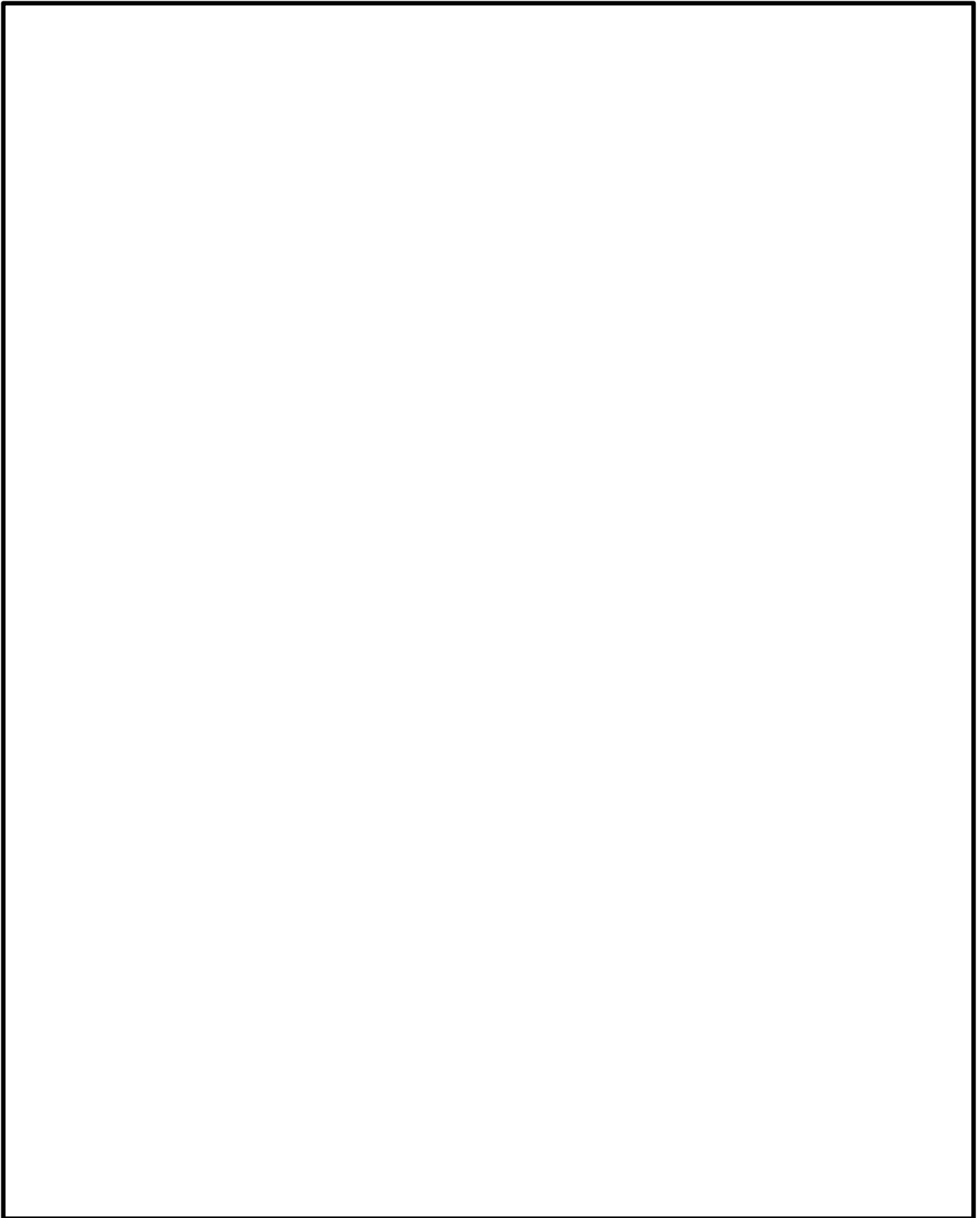


図6 流線図（色は粒子の違いを表す）

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。

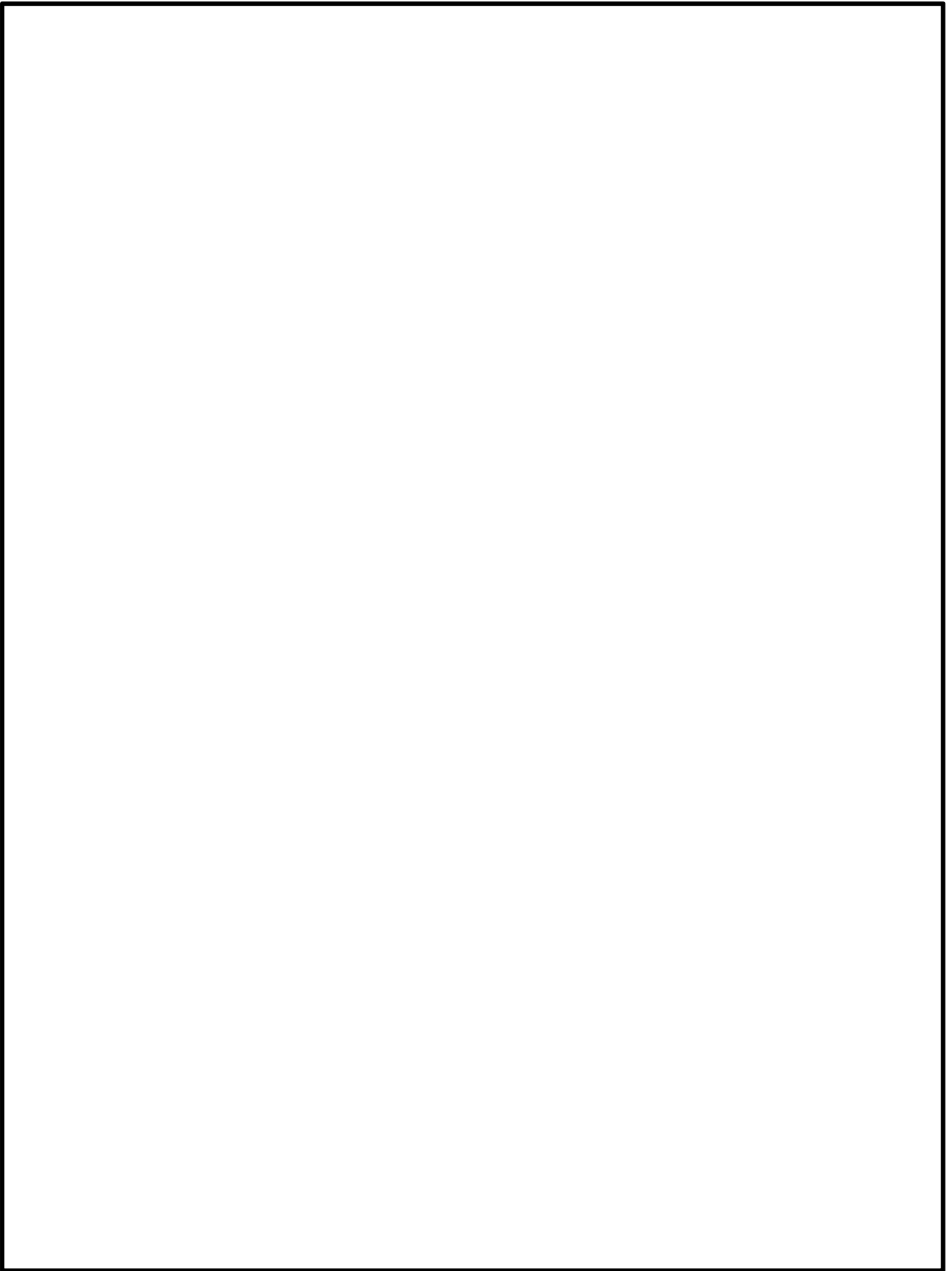


図 7 流線図（色は粒子の飛翔時間を表す）

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。