

## 同時多発火災リスク評価手法の研究

三友 信夫\*、岡崎 忠胤\*\*、松岡 猛\*

### Research on the fire risk assessment for multiple and simultaneous fires

by

Nobuo MITOMO, Tadatsugi OKAZAKI and Takeshi MATSUOKA

#### Abstract

In Japan, frequent earthquakes occur. Actually, we had a very big earthquake “Hanshin Kobe Daishinsai” in 1995, at that time, many people lived there were also struck by secondary disasters, fires, which were caused by this big earthquake. It cannot be ignored that the possibility of accident of a nuclear reactor caused by the loss of safety functions, even if the earthquake is not so strong as surpassing the tolerance of equipment. Then it is necessary to establish the assessment method for the risk of fires caused by earthquakes. The purpose of this research is to establish the assessment method for the fire risk caused by earthquakes by using the ideas of Probabilistic Safety Assessment (PSA). For this purpose, we have set four tasks. In Task 1, we obtained detailed, necessary and sufficient information about earthquakes and fires for the fire risk assessment, because scenario is very important. In Task 2 and 3, two codes, a ignition code and a fire progress analysis code, were developed. The ignition code is the code that assesses equipment damages by earthquakes and its possibility of catching fire. On the other hand, the fire progress analysis code simulates the fire started by this ignition. Especially, we made experiments for the fire progress analysis code. These experiments were good use of verification for parameters. In Task 4, we examined these methods developed in this study with the assessment of a sample plant.

The results of this study will be useful not only for the assessment of nuclear power plants but also for chemical plants, traffic systems etc.

---

\* 海上安全研究領域

\*\* 輸送高度化研究領域

原稿受付 平成17年 1月25日

審査済 平成17年 4月 1日

## 目 次

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 1. はじめに                                          | 40 |
| 1.1 概要                                           | 40 |
| 2. 火災リスク評価手法                                     | 41 |
| 2.1 従来の火災リスク評価手法                                 | 41 |
| 2.2 同時多発火災リスク評価手法                                | 43 |
| 3. 地震時機器損傷評価コード                                  | 43 |
| 3.1 概要                                           | 43 |
| 3.2 使用方法                                         | 43 |
| 3.3 判定方法                                         | 44 |
| 3.4 使用例                                          | 45 |
| 4. 火災進展解析コードの開発                                  | 47 |
| 4.1 火災進展解析コード                                    | 47 |
| 4.2 火災実験 1                                       | 48 |
| 4.2.1 実験概要                                       | 48 |
| 4.2.2 解析コードの検討                                   | 48 |
| 4.3 火災実験 2                                       | 49 |
| 4.3.1 実験概要                                       | 49 |
| 4.3.2 解析コードの検討                                   | 50 |
| 4.4 火災実験 3                                       | 51 |
| 4.4.1 実験概要                                       | 51 |
| 4.4.2 解析コードの検討                                   | 51 |
| 5. サンプルプラント評価                                    | 64 |
| 5.1 シナリオ                                         | 65 |
| 5.1.1 地震事例から                                     | 65 |
| 5.1.2 火災事例                                       | 65 |
| 5.1.3 火災防護指針より                                   | 68 |
| 5.1.4 EPRI Nuclear-Power-Plant Fire-Loss Data より | 69 |
| 5.1.5 解析対象シナリオ                                   | 69 |
| 5.2 イベント・ツリーの作成                                  | 70 |
| 5.3 消火活動について                                     | 70 |
| 5.4 解析                                           | 84 |
| 5.4.1 解析条件                                       | 84 |
| 5.4.2 解析結果                                       | 85 |
| 5.4.3 炉心損傷頻度の算出                                  | 86 |
| 5.5 同時多発火災への対応                                   | 87 |
| 6. まとめ                                           | 87 |
| 6.1 得られた知見                                       | 87 |
| 6.2 今後の検討                                        | 88 |
| 参考文献                                             | 88 |

## 1. はじめに

原子力プラント等の大規模システムには高度の信頼性・安全性が求められるとともに、より一層進ん

だ安全評価技術も必要となっている。この評価方法として確率論的安全評価手法（PSA）が原子力の分野に導入され、プラント設計、安全審査等において重要な役割を果たし始めている。PSAとしては内的事象に起因するリスク以外に地震、火災等の外的事象に起因するリスク<sup>1)</sup>も評価され始めており、内的事象と同等あるいはそれ以上のリスクをもたらすと評価された例もある。また、兵庫県南部地震の例に見られる様に地震によって引き起こされた火災による二次的災害でも大きな被害がもたらされている。機器耐力を大幅には上回らない、発生頻度の比較的大きな小地震でも、火災が各所に発生し安全系統の機能喪失に至ると原子炉事故に発展する可能性も無視できないと考えられる。それゆえ、地震等により誘起される同時多発火災リスク評価手法を確立する必要がある。

本研究では、地震時の火災発生シナリオの検討、地震時火災損傷評価手法の開発、サンプルプラントを対象とした評価を実施し、地震誘起による同時多発火災リスク評価手法の開発・整備を行う。将来的には、具体的プラントについての地震誘起火災リスクの評価を実施し、プラントの安全性確認・安全性向上に寄与することが可能となる。

この評価手法は、今後、陸上発電炉のみならず、種々の原子力施設あるいは船舶の衝突時の火災リスク評価にも適用可能となる重要な手法と言える。

## 1.1 概要

本研究は、従来から海上技術安全研究所において開発・整備してきたシステム信頼性解析手法GO-FLOW<sup>2)</sup>、火災リスク評価の経験<sup>1)</sup>、火災進展解析コード（COMPBRN）の使用経験<sup>1), 3)</sup>等を活用し、平成 8 年度に原子力施設等安全研究年次計画として提案し、平成 11 年度より国立機関原子力試験研究費として研究を行ったものである。研究は、以下の 4 項目を設定し 5 ヶ年計画で実施した。その概要を図-1.1 に示す。

## (1) 火災発生シナリオの検討(Task 1)

地震時に火災発生が考えられる個所を検討し、火災が発生した場合どのような事故進展があり得るかを定性的に調べ上げる。その際、既存の PSA の結果等を参照する。このようにして地震時の火災事故シナリオをリストアップし、その中で問題となりそうなシナリオにおける起因事象を選定する。

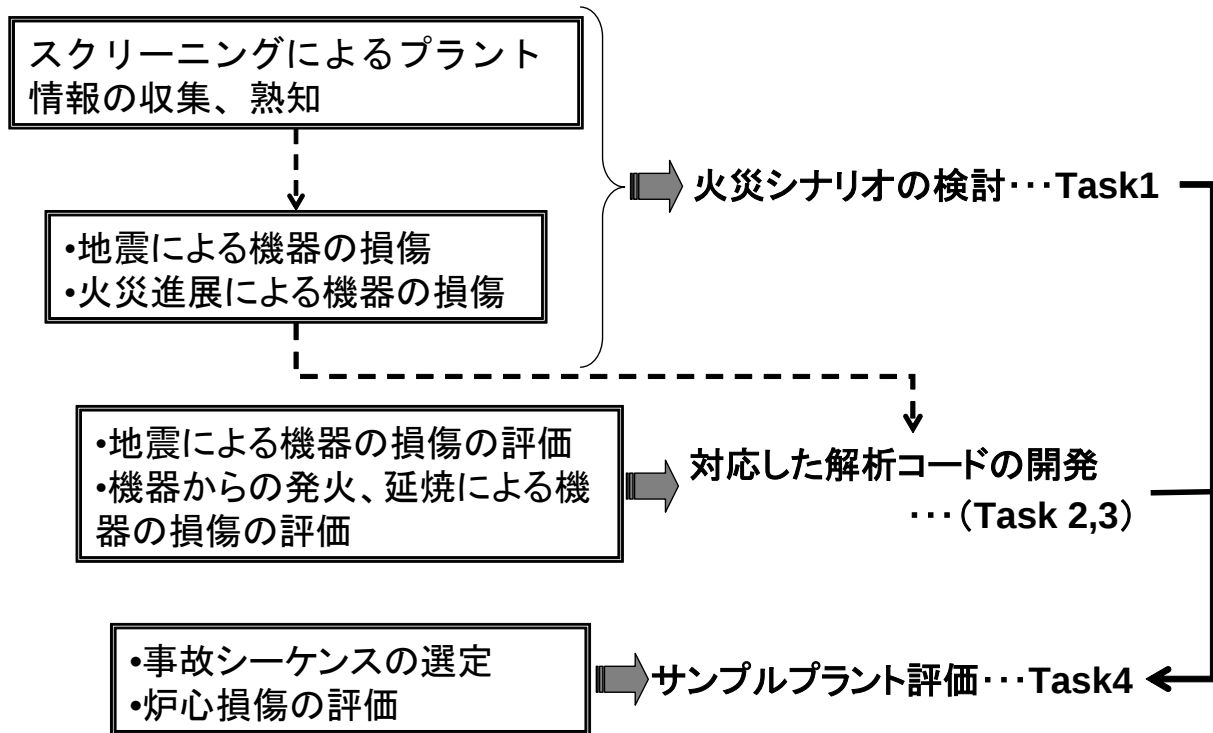


図-1.1 本研究の概要

## (2) 地震時火災損傷評価手法の開発(Task 2)

地震時機器損傷評価コードの整備を行い、起因事象の発生頻度算出を可能とする。このコードでは地震動の結果、火災発生、発火事象をもたらす確率を評価できる様にする。対象機器としては、油タンクの損傷、電線ケーブルの損傷・ショート、電気部品の発火、構造物の破損を取り上げる。また、起因事象からどのような火災進展が起こるかを現実的に評価できる解析コードの開発を行う。この解析コードにより複数の区画を対象とした区画間の火災伝播解析を可能とし、火災事象をより現実的なモデルで解析できるようにする。

## (3) 火災実験による火災進展解析コードの検証(Task 3)

火災発生後における機器類の損傷を現実的に評価できる火災進展解析コードの、実験に基づいた検討・改良を行う。

## (4) サンプルプラント評価(Task 4)

サンプルプラント評価においては、各タスクの成果をもとに、イベント・ツリー手法、GO-FLOW 手法を用いて炉心損傷頻度評価の算出を行う。

本研究においては、地震 PSA 手法に関するものはすでに日本原子力研究所<sup>4)</sup>等で行われているためそれらを利用することとして、Task 2 と Task 3 に重

点を置いて研究を実施した。本報告書では、Task 2 と Task 3 については、3. 地震時機器損傷評価コード、4. 火災進展解析コードの開発として報告する。

## 2. 火災リスク評価手法

## 2.1 従来の火災リスク評価手法

海上技術安全研究所（研究当時：船舶技術研究所）では日本原子力研究所よりの受託研究として、平成3年度からの2年間に渡り「火災リスク評価手法の検討」<sup>1)</sup>の研究を実施し、国内のプラントに適合した火災リスク評価手法の確立につながる成果を得た。同研究では、PSA 手法に基づき、図-2.1に示す手順により解析を実施した。以下に、同手法による火災リスク評価の一例を示す。

## 1) 解析対象区画の設定

原子力プラント火災事故時の炉心損傷頻度算出の対象プラントとして、BWR(Type-5、MARK II)を選定。ただし、特定のプラント情報を入手することが困難であるため、原子力安全研究協会の「軽水炉発電のあらまし」<sup>5)</sup>の記載事項を主要情報源として一般的なプラントを想定し、プラント内すべての区画について検討を行い、火災区画の候補を選び出し、それらに対しスクリーニングを行い、

解析対象区画の1つとして非常用発電機室を選定。

## 2) 火災発生頻度の推定

サンディア国立研究所でまとめた火災事象データベース<sup>6)</sup>によると沸騰水型原子力プラントにおける運転中の火災事例は、非常用発電機建屋内で12件であった(運転延べ時間328時間)。ここで、稼働率51%、発電機室が3室あるとすると非常用発電機室内の火災発生頻度は $2.4 \times 10^{-2}$ /区画・年となる。

- ・発生火災の種類同定：可燃性液体による火災と設定。(安全側の評価とするため、非常用発電機室で発熱量が一番大きい火災を設定)

- ・大火災源、小火災源の割合推定：火災源の大きさが小に属する割合を2/3、大に属する割合を1/3と推定。(BWRの場合、火災継続時間が30分以下の火災が全体の62.5%であった。このデータを基に火災継続時間により火災源の大きさを推定)

## 3) 火災進展解析

損傷範囲を同定するため、非常用発電機室内の機器の損傷温度を調査。最も火災に弱い機器は発電機のコイル巻線および潤滑油ポンプの巻線で損傷温度は130℃であった。火災進展解析コードCOMPBRN<sup>7)</sup>にて、機器損傷をもたらす火災範囲の推定を実施。

- ・小火災源の場合、発火位置によらずコイル巻線の損傷温度130℃に至らない。

- ・大火災源の場合、安全側に評価するためコイルに近い位置を発火源とすると、火災発生後23分で発電機が損傷に至る。

## 4) 機器損傷をもたらす火災発生頻度の推定

大火災源のみを対象とするため、機器損傷を引き起こす火災発生頻度は、

$$2.4 \times 10^{-2} \times 1/3 = 8.0 \times 10^{-3} / \text{区画} \cdot \text{年}$$

となる。

## 5) 消火成功確率の推定

所内要員が消火活動に対処できると仮定した場合、Siu&Apostlakis<sup>8)</sup>のモデル(このモデルについては、「5.3 消火活動について」を参照されたい)より、23分以内の消火成功確率は0.61。

## 6) 火災原因起因事象の同定

非常用発電機室の機器は待機系であるため運転には直接影響はなく、また、制御室から離れているため運転員がどのように対応するかは一概には言えないが、原子炉手動停止の起因事象が発生すると設定。

## 7) イベント・ツリー作成

手動停止の各起因事象に対するイベント・ツリーを作成。

## 8) 事故シーケンスの選定

事故シーケンス選定の際の打ち切り値として、米

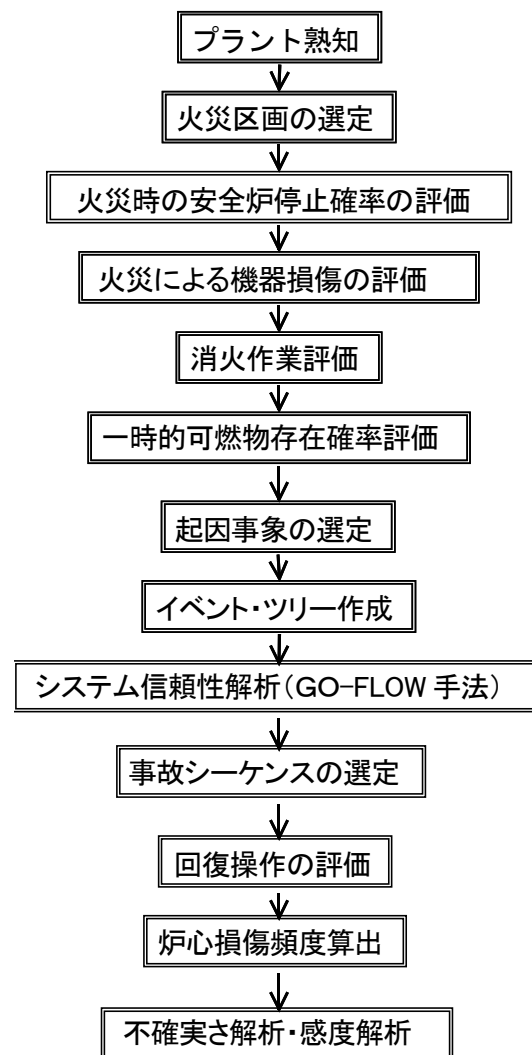


図-2.1 解析実施手順

国原子力規制委員会(NRC)がシビアアクシデントのリスクについて取りまとめを行った報告書であるNUREG-1150<sup>9)</sup>の値 $1 \times 10^{-8}$ /炉・年を目安とし、この値を、非常用発電機室での火災発生頻度 $\times$ 消火失敗確率の値 $3.9 \times 10^{-3}$ /区画・年で割り、 $2.55 \times 10^{-6}$ を本解析の事故シーケンス選定の打ち切り値とした。イベント・ツリー中、この打ち切り値以上の発生確率のシーケンスを取り出し、各事故シーケンスが炉心損傷に至るかどうかを判断したところ、外部からの電源受電と非常用発電機Ⅱが動作しない場合、および給水系、原子炉隔離時冷却、高圧炉心スプレー、手動減圧の全てが動作しない場合の2つのシーケンスが炉心損傷に至る事故シーケンスとして選定された。それぞれの

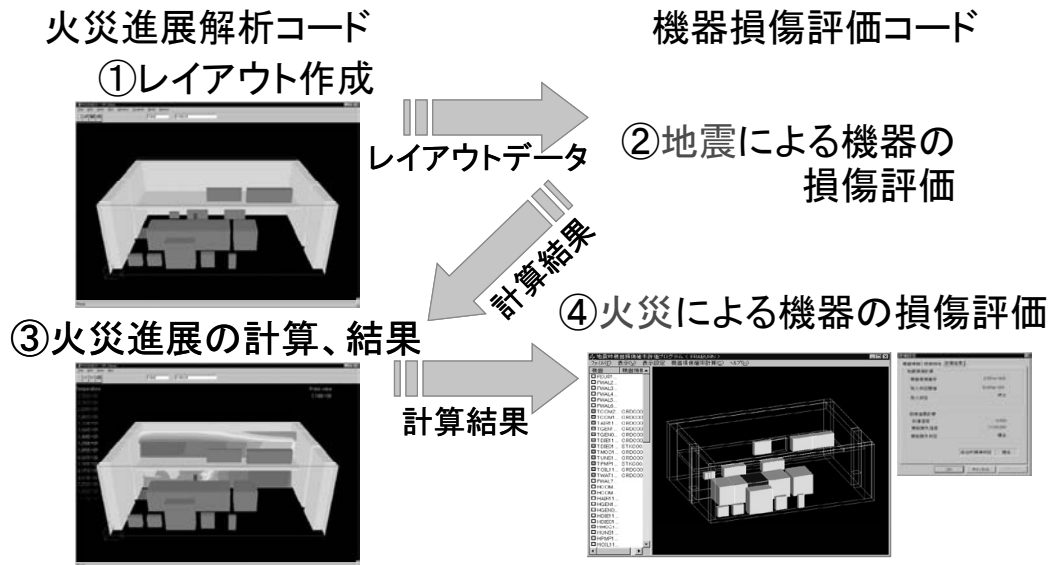


図-2.2 地震時機器損傷評価コードの概念

発生確率は  $3.7 \times 10^{-6}$ 、 $2.6 \times 10^{-7}$  であった。

#### 9) 炉心損傷頻度の算出

非常用発電機室内で大火災源の火災が発生した場合に炉心損傷に至る頻度は、火災発生頻度×消火失敗確率×Σ事故シーケンス発生確率＝ $1.2 \times 10^{-8}$ ／区画・年と算出された。

### 2.2 同時多発火災リスク評価手法

本研究においては、地震により誘起される同時多発火災を対象としているため、従来の火災リスク評価手法に、いくつかの新しい改良点を加える必要がある。先の図-2.1 に示した「火災区画の選定」および「火災による機器損傷の評価」の項目において、地震により損傷した場合にプラントに影響を及ぼす機器の選定、地震による機器の損傷、機器からの発火、延焼による機器の損傷を新たに考慮する必要がある。

そこで、地震時機器損傷評価コードと火災進展解析コードをリンクさせた地震時火災損傷評価コードを整備することとした。地震時機器損傷評価コードの概念は図-2.2 に示すとおりである。本コードでは、①火災進展解析コードの機能を用いて対象エリアなどのレイアウトの作成を行う。②このデータを用いて地震時機器損傷評価コードにより地震による機器の損傷・発火評価を行う。③この機器の損傷・発火評価の結果から発火源となる機器が決められ、この発火源に対して火災進展解析コードを用いて解析を行う。④この火災進展解析の結果から、地震時機器損傷評価コードにより火災による機器の損傷評価を行う。

### 3. 地震時機器損傷評価コード

本研究で開発した地震時機器損傷評価コードについて述べる。

#### 3.1 概要

これまでに述べたように、本研究は地震誘起による火災によるリスク評価を行うものである。この場合、①地震による機器の損傷および ②地震による機器の発火の2点を評価する必要がある、この観点から地震時機器損傷評価コードの開発を行った<sup>10)</sup>。

まず①の損傷確率の評価について検討した結果、地震による機器の損傷確率を評価する解析コードとして、日本原子力研究所で開発した SECOM-2 コード<sup>11)</sup>があり、このコードを参考に開発を行った。SECOM-2 コードは、機器の各地震動レベルでの現実的応答と耐力の確率分布から、現実的応答が耐力を上回る確率として損傷確率を評価するものである。②の機器の発火については、今回の研究では特定の方法に決めることができず、幾つかの方法を提案、解析コードに設定するにとどまった。以下、本解析コードの使用方法、判定方法、使用例について述べる。

#### 3.2 使用方法

本コードを使用する際には、あらかじめ下記の5つのファイルを用意する<sup>12)</sup>。各ファイルの概要についてまとめたものを表-3.1 に示す。

- ・ Q1 ファイル（レイアウト情報）
- ・ 材料データベース

- ・ Props ファイル（物性値データ）
- ・ 地震動データベース
- ・ 機器耐力応答データベース

Q1 ファイルは、火災進展解析コードのレイアウト作成機能を用いて作成する。他のファイルについてはテキストエディタ等を用いて作成する。5 つのファイルを作成した後、これらを本コードに読み込む。Q1 ファイル等を読み込むことによって、本コードの画面に 3 次元の機器等のレイアウトが表示される。この画面において、損傷確率を評価する機器を選択し詳細情報ダイアログを表示させ、地震時の機器損傷確率評価に必要なパラメータの設定を行う。または、同ダイアログを用いて火災進展解析コード（CHAM 社の 3 次元汎用熱流体解析ソフト PHOENICS）の入力データとなる燃焼に関するデータ（材料データベースおよび Props ファイルに記述されている）の設定を確認する。全ての機器についてこの設定を行った後、地震時機器損傷評価を行う。損傷確率計算結果は、詳細情報表示ダイアログで確認することができる。損傷確率計算結果を用いて発火判定をし、燃焼計算用に発火情報をテキスト形式で保存することが可能である。これは、火災進展解析コードで入力データとなる。また、火災進展計算結果（PHOENICS 計算結果）を読み込み、温度履歴の

表示、燃焼後の損傷判定を行い、結果を表示することができる。

以上の処理の流れを図-3.1 に示す。また、2 つのコード間の入出力データの概要について表-3.1 に示す。

### 3.3 判定方法

本解析コードは、地震による機器の損傷、発火および火災による機器の損傷の 2 つの判定を行うものである。これらの判定方法については以下に示すような方法を選択できる。

機器の発火判定については、前述したように、特定の方法に決めることができず、次に示す方法を選択できるものとした。

- ・ 機器損傷確率があるレベルを超えたら火災が発生
- ・ 地震により機器が損傷する場合、損傷した機器自体ではなく、関連する別の機器が発火することが考えられる。例えば、モーターとモーターによって駆動する機器を考えた場合、駆動機器が故障したことにより正常なモーターに過負荷が生じ発火する等が考えられる。そこで、自らの損傷確率のしきい値設定の他に、関連した機器の損傷確率がしきい値以上損傷した場合に発火することも考える。

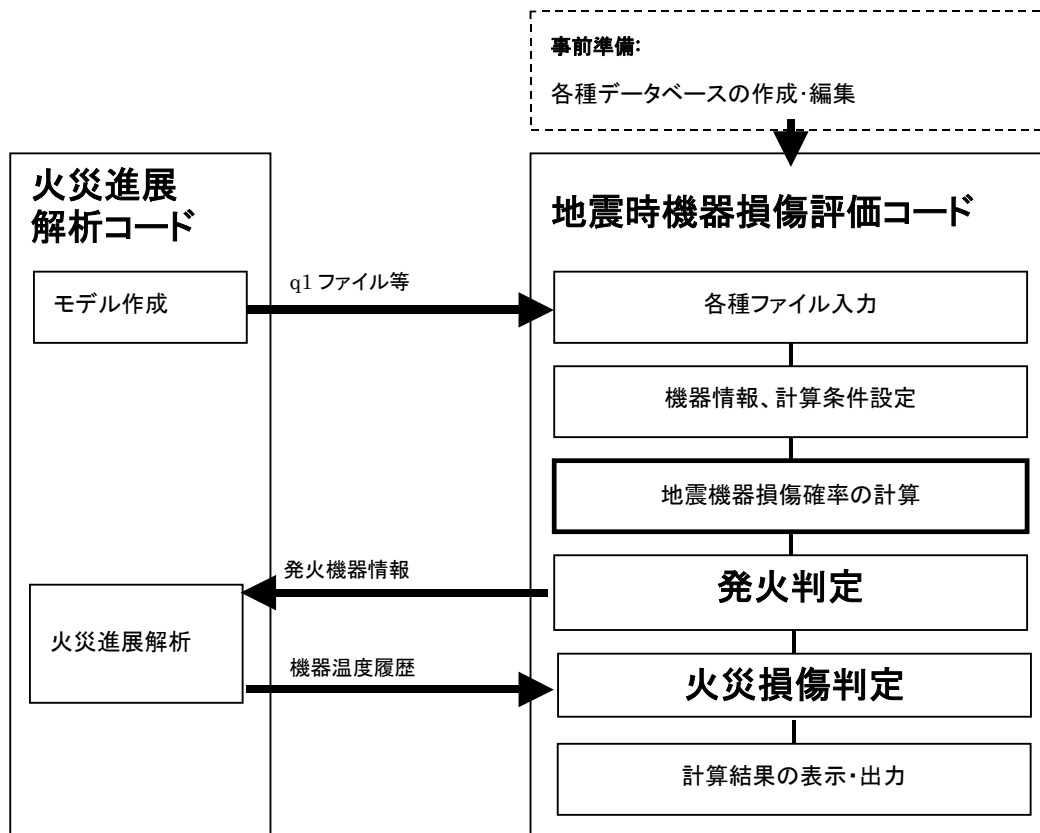


図-3.1 処理の流れ

表-3.1 入出力データの概要

| 入出力データ                   | 概 要                                                                                                              |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Q1 ファイル                  | 火災進展解析コードのレイアウト作成機能を用いて作成・出力される。レイアウト(機器等の位置ならびに形状データ)情報を格納する。<br>BLOCKAGE 形状のみを取り扱う。<br>ファイル名は"q1"または"*.q1"とする。 |
| Props ファイル               | PHOENICS 標準の物性値データベース。火災進展解析コードで使用するデータを格納する。ファイル名は"Props"とする。                                                   |
| 材料ファイル                   | PHOENICS においてユーザーサブルーチン使用時に用いるデータベース。火災進展解析コードで使用するデータを格納する。ファイル名は"mat.dat"または"*.mpr"とする。                        |
| 機器・機器情報対応ファイル            | 機器名と機器情報名の定義を格納する。<br>ファイル名は"q2r"とする。                                                                            |
| 地震動 DB ファイル              | 震度に係る情報データを格納する。SESOM II コードに準ずる形式とする。<br>ファイル名は"*.sei"とする。                                                      |
| 耐力・応答 DB ファイル            | 機器の機器耐力応答データを格納する。SESOM II コードに準ずる形式とする。<br>ファイル名は"*.res"とする。                                                    |
| 発火情報ファイル<br>(火災進展解析コード用) | 地震時機器損傷評価計算に用いられた入力データならびに計算結果としての機器損傷確率、さらに火災源の情報を含む。<br>ファイル名は"*.out"とする。                                      |
| 火災進展解析結果                 | PHOENICS で計算された機器の温度履歴を含む。<br>ファイル名は"*.phr"とする。                                                                  |
| 計算結果                     | 地震時機器損傷評価計算に用いられた入力データならびに計算結果としての機器損傷確率、さらに火災源の情報を含む。<br>ファイル名は利用者が任意に設定できるが、拡張子として".txt"が自動的に付加される。            |

火災による機器の損傷評価については、次に示す方法が選択できる<sup>12)</sup>。

- ・ 最高温度のしきい値による評価（ある温度を超えた時点で、機器損傷に至ると仮定）
- ・ 平均温度のしきい値による評価
- ・ しきい値に到達しない低い温度でも、その温度がある時間継続した場合に損傷するとした積算温度による評価

また評価対象となる機器により、評価されるべき脆弱な個所は異なる。そこで、対象機器内のどの部分を評価点とするかを任意に設定できるものとした。

### 3.4 使用例

- ① 解析コードを起動すると、図-3.2 に示す「モデル新規作成」画面が表示される。この画面において、新規モデル名を入力し、Q1 ファイルを選択する。なお、材料 DB ファイル(mat.dat)および Props ファイル(props)については、Q1 ファイルと同じディレクトリにあるファイルが読み込まれる。
- ② Q1 ファイルから、機器レイアウトが読み込まれ、図-3.3 に示すような図が表示される。
- ③ コンポーネント情報と耐力・応答データの関連付けを行う。図-3.4 に示すように、左側のリストを選択し、コンポーネントを選択した状態で



図-3.2 「モデル新規作成」画面

- 「表示」メニューの「詳細設定」を選択して「詳細設定」ダイアログを開く。
- ④ 「詳細設定」ダイアログの「機器情報名」リストから、対応する耐力・応答機器情報名を選択する。以上をすべてのコンポーネントについて繰り返す。(図-3.5)

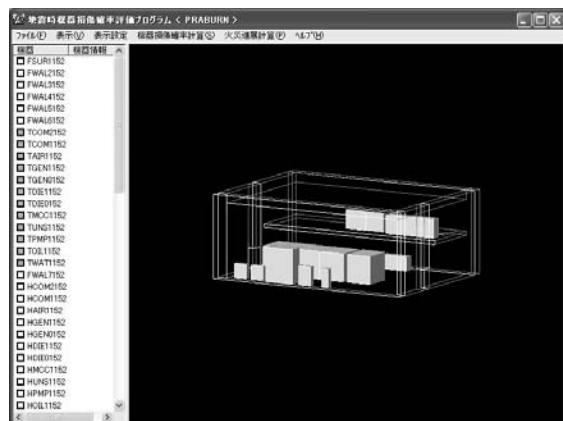


図-3.3 レイアウト画面

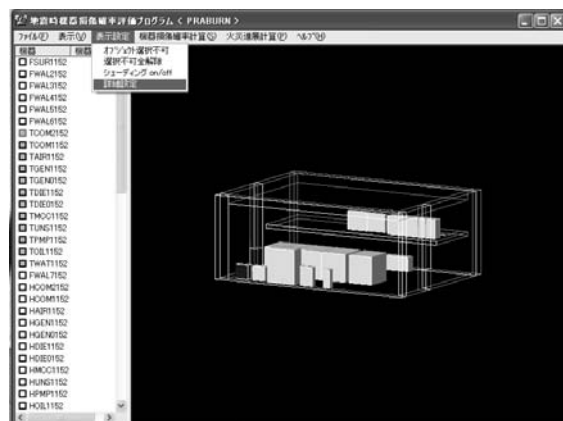


図-3.4 詳細設定

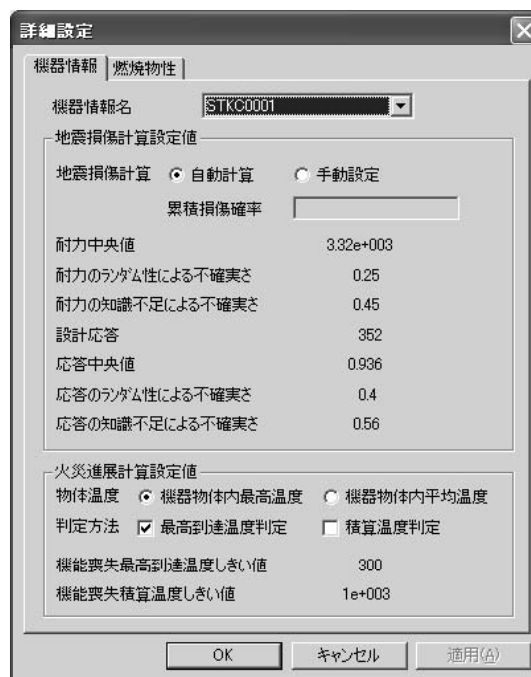


図-3.5 詳細設定画面

- ⑤ 解析地震動レベルを設定する。「機器損傷確率計算」メニューの「地震レベルの設定」を選択し、「地震動レベル設定」ダイアログを開く。地震動レベルのリストを選択して設定する。(図-3.6)
- ⑥ 損傷確率計算を実施する。「機器損傷確率計算」メニューの「実行」を選択し、損傷確率計算を実施する。(図-3.7)
- ⑦ 機器損傷確率計算実施後に、コンポーネントの詳細設定を見ると、「計算結果」タブが追加され、機器損傷確率が表示される。(図-3.8)
- ⑧ 機器全体の損傷確率を出力するには、「火災進展計算」メニューの「計算結果を保存」を選択して、計算結果をファイルに保存する。(図-3.9)
- ⑨ プロジェクト情報を保存するには、「ファイル」メニューの「名前を付けて保存」を選択し、プロジェクトファイル(\*.pbn ファイル)を保存する。
- ⑩ プロジェクト情報ファイルが火災進展解析コードで利用され、評価が行われる。この火災進展解析結果は、「火災進展解析」ダイアログから、「火災進展解析計算結果を開く」を選択することにより表示される。



図-3.6 地震動レベル設定画面成」画面

- ⑪ プロジェクト情報を読み込むには、Praburn.exe を起動し、「モデル新規作成」ダイアログはキャンセルし、「ファイル」メニューの「開く」から、プロジェクトファイル (\*.pbn ファイル) を選択すると、プロジェクト情報が読み込まれる。



図-3.7 実行画面



図-3.8 解析結果表示画面

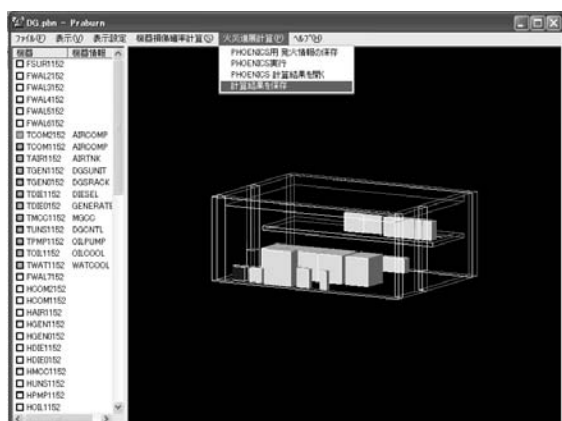


図-3.9 解析結果保存

#### 4. 火災進展解析コードの開発

火災の成長・発展、火災の影響範囲を物理的なモデルに基づき解析する計算コードとしてCOMPBRNⅢが開発されており、原子力の分野におけるPSAでは広く採用されている。このコードによれば、想定している火災が室内の機器にどの程度の損傷を発火後何分でもたすかが評価でき、現実的な仮定のもとに火災事故解析が行える。しかしながら、COMPBRNⅢを、本研究の対象である多区画における同時多発火災の解析へ適用するには以下の問題点が残る。

- ・ 複数区画の火災伝搬や区画内の同時多発火災に対する考慮がなされていない。
- ・ 解析モデルのデータファイル作成時、機器の寸法、座標を数値で入力する方式なので多区画のモデルを作成する場合、効率および配置が理解しにくい。

そこで、本研究においては、複数区画の火災伝搬や区画内の同時多発火災に対応可能な上、3次元CADシステム(VR Editor)により解析モデルのデータファイル作成が可能で汎用熱流体解析コードPHOENICSおよびその外部関数機能を基に、火災進展解析コードの開発を実施した。なお、VR Editorにより作成されるデータファイルは、3章で記述した地震時機器損傷評価コードと共通のものとなっている。

本章においては、本研究で開発した火災進展コードの検証のために実施した火災実験と火災実験の結果を受けて火災進展解析コードに加えた改良について記述する。

##### 4.1 火災進展解析コード

本研究で開発した火災進展解析コードの熱流動解析モデルには、換気系を境界条件とし、質量、運動量、熱量、乱流エネルギーの保存則を解析するフィールドモデルを用い、燃焼過程モデルには、化学反応モデルと反応速度無限大モデルを用い、輻射解析モデルには、Immersolモデルを用いている。これにより、局所的な現象までシミュレートすることが可能であり、例えば壁の温度分布を調べ最高温度や平均温度を求めることもできるようになる。しかしながら、計算負荷が大きいため、解析モデル作成時の計算格子の設定には、計算時間を考慮した設定が必要となる。そこで、本研究においては、数十時間の計算時間を目標に計算格子を設定した解析を行うこととし、この条件のもと火災実験の結果を踏まえた各種パラメータチューニングを実施した。

#### 4.2 火災実験 1

火災実験 1 においては、火災進展解析コードにより算出される温度分布の検証を目的とし、単一区画内での火災実験を実施した。なお、実験回数等が限られているため、実験対象区画に非常用発電機室を設定し実験を行うこととした。対象区画での起こり得る火災は、文献<sup>1)</sup>では以下の項目が選定されている。

- (1) 非常用ディーゼル機関燃料管から燃料が霧状に噴出し着火する（燃料ジェット火災）。
- (2) 非常用ディーゼル機関から燃料が漏れて床上に滞留し着火する（燃料プール火災）。
- (3) 潤滑油ポンプあるいは潤滑油冷却器から潤滑油が漏れて床上に滞留し着火する（潤滑油プール火災）。
- (4) 発電機制御盤から出火する（配電盤火災）。

ここで、燃料ジェット火災、燃料プール火災および潤滑油プール火災では、火炎が直接、側壁あるいは中二階のデッキの下面を加熱することが想定される。また、潤滑油は一般にディーゼル燃料よりも発火・着火し難いこと、および潤滑油ポンプあるいは潤滑油冷却器からの潤滑油の漏れは非常用ディーゼル機関からの燃料の漏れと同等か少ないと考えられるため、潤滑油プール火災は燃料プール火災によってカバーできると考えられるので、想定火災(3)は本実験の対称から外す。配電盤火災では、火炎は中二階の側壁および天井に当たることが考えられる。この火災における燃焼物は主に、電線ケーブルおよび配電電気器具であり、その燃焼は燃料油の燃焼よりも緩やかであると考えられる。

以上のことから、燃料ジェット火災と燃料プール火災を検討の対象とし、これらを模擬する実験を実施することとした。さらに、室内全体が火炎に包まれる盛火期におけるコンクリート壁およびデッキの耐火性を検証するための火災試験も実施することとした。

##### 4.2.1 実験概要

検討対象として図-4.1 に示すような非常用発電機室を設定した。寸法は、幅 13.7m、奥行き 20.8m、天井高さ 8.05m、容積（内部の機器および仕切り壁・床を含む）約 2294m<sup>3</sup>である。この寸法の部屋を用意して火災実験を実施すれば、非常用発電機室の火災性状を精度よく把握できるが、実際にはそのようなことは不可能である。そこで、燃焼発熱量を測定することも勘案して、図-4.2 に示す ISO 9705 の室内火災試験の設備を利用して、模擬火災実験を実施することとした。この火災試験室の内法寸法は、幅

2.4m、奥行き 3.6m、天井高さ 2.4m、内容積 20.74m<sup>3</sup>である。非常用発電機室の火災を模擬するために、実験室内には中二階デッキを模擬したコンクリート製デッキを設置し、壁面には実プラントに用いているコンクリートのデータから模擬した壁を取り付け、図-4.3 に示すような位置に内部温度を測定するための熱伝対を 10 個、埋め込んだ。

実験は、図-4.3 に示す位置に燃料として軽油を満たした 0.5m 角のオイルパンを置き、燃料が燃え尽きるまで（約 10 分）行った燃料プール火災を模擬したものと、燃焼発熱量 200kW を目標とした 0.17m 角のプロパンガスバーナーを同様の場所に置いて 30 分実験を続けた燃料ジェット火災を模擬したものをを行った。また、この火災実験室の開口から 0.50m 入った位置の床面から 0.5m、1m、1.5m、1.75m、2m における室内温度の上昇も同時に測定した。

##### 4.2.2 解析コードの検討

###### 1) 解析条件

火災実験との比較のため、図-4.4 に示す火災実験区画の解析モデルを作成し、各部の温度と実験結果の比較を実施した。解析範囲の大きさは火災実験室の内寸 3.6m×2.4m×2.4m とし、出入口の大きさも火災実験時と同様に 0.75m×1.8m とする。発火源は、燃料ジェット火災を模擬したプロパンガスバーナーとし、その横には火災評価対象物である板が設置してあり、さらに部屋内部にはデッキも設置している。部屋の壁はそれぞれ 0.15m とし、部屋の外側は温度固定とする。なお、地面は断熱条件とする。また、計算時間の短縮を目指し格子数を 27×29×22=17,226 個とした。実験では図-4.5 に示すように発熱量が分かっており、約 210kW であったため、本解析でも一定値、210kW を入力値とする。また、発火時間が 30 分であったため、計算時間を 30 分とした。この計算の計算時間は IntelPentium-4、2.0GHz で約 24 時間であった。

###### 2) 計算結果と考察

図-4.6 はデッキ部の温度時系列、図-4.7 は火炎近傍の板の温度時系列、図-4.8 は出入口付近の温度時系列である。図-4.9,10,11 は各々の計測点の位置を示したものである。

まず、デッキ部の温度時系列では計算開始後約 19 分までは約 1.3K の温度上昇までで、実験と計算はよく一致しているが、それ以降においては計算では線形的に上昇しているが、実験では指数的に上昇していると言った相違点が見られた。また、火炎近傍の板の温度においても実験では指数的に

上昇しているのに対し、計算結果の上昇率は逆に減少していた。出入り口付近の空気については実験結果では最初急激に温度上昇した後、徐々に上昇しているのに対し、計算結果では初期の温度上昇は急激でその後の温度上昇は無く、定常状態になった。また、0.5mの位置の温度は実験値では最終的に100K近く上昇しているのに対し、計算結果ではほとんど上昇せず、外気と同じ値であった。これは計算の方で計測している点付近では外気が直接流れ込んできているため温度上昇がないと考えられる。以上のように幾つかの相違点が見られたが以下にこれらの原因およびその解決法を述べる。

まず、固体部分の計算結果では温度上昇が少なかった。この原因としては本解析では計算時間の制約上、格子数を増やすことは好ましくなく、壁への伝熱が不正確になっている可能性が挙げられる。格子の数を増やさずに改善するためには壁と流体の熱伝導係数を調整することにより改善できる可能性がある。また、内部空気と壁の間の熱伝達係数を実験式などにより与える方法もある。温度上昇率の違いについては入力したコンクリートの熱容量の精度が悪い可能性があり、実際の状態を再度確認する必要がある。この問題点については、隣室への温度影響を検討する火災実験2において検討することとした。

次に、出入り口付近の温度は全体として計算結果の方が低い温度が得られた。この原因としてはいくつか考えられ、最も単純な考え方としては格子数が足りないために出入り口の圧力損失が過小評価されている可能性である。この場合、急拡大、急縮小に関する圧力損失係数を与えて計算を行うことにより、この問題を解消することができる可能性がある。また、本解析で用いている近似法では、温度差が大きい場合には密度差を無視することはできなくなり、さらに、自然循環を促す駆動力を過大評価している可能性がある。すなわち、循環量が増え、室内空気の温度が低く計算される可能性がある。この場合、理想気体の状態方程式を用い、密度の変化を計算する方法が望ましい。そこで、室内空気の温度に関する改良を行うこととした。

### 3) 解析コードの改良

本項では出入り口に空気抵抗を仮定した抵抗を与える改良を行い、次に、理想気体の状態方程式を使う計算を行い、これら2つのケースと基本ケースと実験結果との比較を行い、室内空気の温度に与える影響を考察した。

図-4.12 に出入り口に抵抗を与えた場合と理想気体の状態方程式を使った場合の出入り口付近の温度時系列を示す。出入り口に抵抗を与えた場合、最高温度上昇は200Kを超え、実験結果と近い値となった。しかしながら、下から0.5m、1mの場所では実

験結果では図-4.8に示すように温度上昇が100Kを超えているが、このケースでは50K未満であり、実験結果との相違が見られた。次に、理想気体の状態方程式を使った場合の最大温度上昇は300Kを超えている（図-4.12(b)）。

以上より、出入り口の抵抗を考慮した場合よりも理想気体の状態方程式を用いた場合の方が火災実験1の結果と一致する傾向にあることがわかり、各種パラメータ、火災モデル等を再検討し、本解析コードに反映した結果、十分実験値と整合性のとれた結果を得ることができたと考える。

本項で改良を加えた火災進展解析コードと、従来火災進展解析コードとして用いられてきたCOMPBRNとの比較を行った<sup>12)</sup>。検討対象として非常用発電機室における火災を取り上げた。この結果の例として、非常用ディーゼル発電機制御盤の計算結果を図-4.13に示す。計算結果としては良い一致を示しており、本項の改良が有効であったことが確認できた。

## 4.3 火災実験2

火災実験2においては、隣室への温度影響の検証を目的として、多区画での火災を模擬した実験を実施した。

### 4.3.1 実験概要

火災実験2においては、下記に示すような多区画のモデルについて実験を行った（図-4.14）。

- ・ 外寸：高さ2.2m×幅3.4m×奥行き1.7m
- ・ 区画内寸法  
壁厚さ：0.1m、奥行き：1.5m  
高さ：1m、幅：1m  
階数：2階建て、区画数：1階3区画、2階3区画
- ・ 区画開口：2階の区画＝なし（内圧を逃がす小穴あり）、1階の区画＝幅0.4m、高さ0.6m（開口高さは試験ごとに調整する）
- ・ バーナ：LPGを燃料とするトーチバーナ10個、設置位置は1階の区画の床面（幅1.5m、長さ3m）
- ・ 壁面内の温度測定：1階の中央の区画の左右側面および天井面のコンクリートパネル
- ・ 埋め込み深さ：0m（表面）、0.025m、0.05m、0.075m、および0.1m（裏面）
- ・ 埋め込み位置：高さおよび幅の中心線上 前から0.3mおよび0.7m
- ・ 区画内の温度測定：各区画内の高さ0m、0.25m、0.5m、0.75mおよび1m（平面内の位置は、2階の区画では約中央、1階の区画内では加熱バーナを避けて区画の奥から約

0.3m 左右の中央とした)。

火災実験 2 の様子は図-4.15 に示すとおりである。この火災実験から得られた結果の一例として 1 階中央の部屋に発火源を設置した場合 (燃焼時間 30 分) の温度上昇時系列を 0.25, 0.5, 0.75m の各点について測定した結果を図-4.16 に示す。図-4.16(a)より、発火源の部屋では、温度が 500K 付近まで上昇していることがわかる。しかしながら、それ以外の部屋では図-4.16(b)に示すように、わずかな温度上昇しか起こらなかった。特に、発火源を設定した部屋の斜め上方になる部屋については、ほとんど温度上昇は認められなかった。

#### 4.3.2 解析コードの検討

##### 1) 解析条件

火災実験との比較のため、図-4.17 に示す多区画の解析モデルを作成し、各区画の温度と実験結果の比較を実施した。発火源は、前項の実験と同様に 1 階中央の部屋に設置し、発熱量は

$$50\ell/\text{min} \times 2400\text{kcal}/\text{m}^3 \times 10 \text{ 本} \\ = 50 \times 0.001 + 60 \times 2400 \times 4.18605 \times 10 = 83.721\text{kW}$$

とする。大きさは  $0.1\text{m} \times 0.4\text{m}$  なので入力値は  $2.09\text{E}+06\text{W}/\text{m}^2$  となる。なお、火災実験 1 で問題となった壁への伝熱を検討するために、図-4.17 に示す 4 枚の壁を温度評価対象オブジェクトとして計算を実施することとした。

##### 2) 解析結果と考察

前項の解析条件のもと、火災進展解析コードを用いて解析を行った結果を以下に示す。1 階中央の発火源のある部屋の温度時系列を図-4.18(a)に示す。計算開始直後温度は大きく振動している。これは温度変化が激しいため、計算をより正確に行うためには時間刻み幅の調節が必要であると考えられるが、本解析の場合、着火後数秒の時間変化に関する精度は要求しないため、以下に各温度が安定してからを考察する。温度が安定後、温度上昇は 300 K から 400 K の間に落ち着く。図-4.18(b)に発火源のある 1 階中央の部屋の隣部屋である 1 階左側の温度時系列、発火源のある部屋の上の部屋である 2 階中央の温度時系列を示す。いずれも 30 分間で 1K 未満の温度上昇であった。

前項で示した実験結果と比較すると、発火源の設定された部屋の上昇温度が実験値よりかなり高く、また周囲の部屋の温度上昇は逆に小さな結果となった。この点について検討した結果、壁への熱伝達が問題となった。壁近傍の格子数や壁内部の格子数の設定により改善できる可能性はあるが、格子数を増やすことになり、計算時間が長くなる。これは本解

析コードがリスク評価に用いるという目的であるため、計算時間は短いほうが好ましい。そこで、①コンクリート部分の熱容量などを決定する物性値を変更してその影響を調べることを試み、②熱伝達率を直接指定して解析することを試みることとした。

#### 3) 解析コードの改良

##### ①コンクリートの物性値の変更

従来の計算では、コンクリートの物性値を密度：4711(kg/m<sup>3</sup>)、比熱：679.1(J/kg/K)、熱伝導率：35.6(W/m/K)を用いていたが、実験状態と同じコンクリートの物性値に近いと思われる珪岩質骨材コンクリート(293K)、密度：2400(kg/m<sup>3</sup>)、比熱：950(J/kg/K)、熱伝導率 1.5(W/m/K) (伝熱工学資料<sup>13)</sup>)を用いて計算を実施した。しかし、1 階中央の部屋の温度上昇が、実験結果では 30 分後の温度上昇は 300 K から 500 K であるのに対し、700 K から 800 K 以上の温度上昇が見られ、温度が上昇しすぎることが分かった。また、2 階中央の部屋の中央の温度上昇は、1 K 未満の温度上昇率しかなく、実験値の最高 6 K 程度の上昇は得られなかった。一階中央の壁は、前項の解析結果より温度が上昇したが、実験値のように最大で 100 K 以上の温度上昇はなかった。以上の結果より、コンクリートの物性値の変更は有効な対策でないことが明らかとなった。

##### ②熱伝達率の設定

本項では熱伝達率を直接指定して解析することを試みる。用いた熱伝達率  $\alpha$  は以下の式で与えられる。

$$\alpha = \frac{\lambda N_u}{l}$$

ここで、 $\lambda$  は流体の熱伝導率、 $Nu$  はヌセルト数、 $l$  は壁の長さとする。壁と空気の温度差は、実験結果と解析結果の差を比較、検討した結果、本解析では 200K の差がある場合を想定した自然対流の熱伝達率を用いることとした。解析中、温度差が 200K となる時点の絶対温度を 300K から 500K と想定し、その平均温度である 400K 時の物性値を用いた。グラスノフ数およびプラントル数は、それぞれ  $Gr=3.43 \times 10^9$ ,  $Pr=7.15 \times 10^{-1}$  となり、伝熱工学資料<sup>13)</sup>より、 $Nu=173$  (垂直平板)、 $Nu=188$  (水平平板) となるので、その平均値の  $\alpha=5.97$  を考慮して、 $\alpha=6$  (W/m<sup>2</sup>/K) をすべての部屋を仕切る壁に用いた。

上述の改良のもと、計算を実施したところ、一階中央の部屋の温度上昇率は 600K から 700K となり、①のケースより低下し、二階中央の部屋の温度も 4 度程度上昇し、実験値に近づき、本改良

が有効であることが確認できた。

なお、本実験では、発熱量は計測値ではなく推定値であるため、発熱量の推定誤差が大きい可能性があった。そこで、発火源の発熱量の見直しと熱伝達率 $\alpha$ の微調整を行うことにより、図-4.19に示すようにより実験値に近づいた良好な解析結果を得ることができた。ここで微調整を行った熱伝達率の値を他の解析へ適用することにより、より精度の良い解析が可能となった。

#### 4.4 火災実験 3

火災実験3においては、プラント内での火災を模擬し、ケーブルや電子機器への影響を調査した。

##### 4.4.1 実験概要

プラント内での火災を模擬するために、火災実験1と同様に、ISO 9705の室内火災試験の設備を利用して、火災試験室に図-4.20に示すようなケーブルおよびケーブルトレイを配備し火災実験を行った。ケーブルは入手した資料をもとに、古いタイプと思われるが実プラントに用いられているものと同タイプのものを入手し、実験に用いた。また、プラント内に配置された測定器、電子機器を模擬したCPUも実験に供した。また実験時にはケーブルの健全性を調べるために、ケーブル両端に電圧を加えその変化をPCに取り込み測定した。CPUについては、実験終了後マザーボードに設定しその起動状況を調べ、健全性を確認した。ケーブルは、温度測定のための熱電対の埋め込みやケーブルの設定作業等の複雑さから、実験ごとに取り替えることができなかった。そのため、一度の火災実験が終了後そのまま次の実験に供した。実験は燃焼時間を30分とし、発火源の位置をケーブルラックから遠い壁際に設置した場合から始め、実験室中央そしてケーブルラック際の計3回行った。

- ・ 内寸：幅 2.4m、奥行き 3.6m、天井高さ 2.4m、内容積 20.74m<sup>3</sup>
- ・ 区画開口：幅 0.5m、高さ 0.75m（開口高さは試験ごとに調整する）
- ・ バーナ：0.17m 角のプロパンガスバーナー、設置位置はケーブルトレイ中央真横においてケーブルトレイからの距離を変え3箇所
- ・ 温度測定：ケーブル、ケーブル近傍およびケーブルトレイ、中央壁面（埋め込み深さ：0.025m、0.05m、0.075m、埋め込み位置：高さおよび幅の中心線上 前面から 0.3m および 0.7m）、室内の温度測定（入り口付近の高さ 0m、0.25m、0.5m、

0.75m および 1m)

実験の様子を図-4.21に、また得られた結果の例として、ケーブルトレイ中央部に配置されたケーブルの、入り口側、中央、壁側の3点の温度変化を図-4.22の中で実線で示す。この図より、壁付近のケーブル近傍では実験開始30分後には200K程度上昇していることがわかる。また、ここに示してはいないが室内温度は500K程度上昇した。ケーブルについては、発火源が一番遠い壁際の場合でさえ、実験開始後25分の段階で電圧の変化（断線）が発生した。ケーブルトレイ脇に発火源を設置した実験後のケーブルの状態は、被覆が熔け中の殆ど全てのケーブルが短絡していた。CPUについては、全ての実験の中でケーブルトレイ脇に発火源が置かれた場合のみ、発火源に一番近いCPUが損傷した(表-4.1)<sup>14)</sup>。

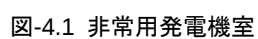
##### 4.4.2 解析コードの検討

###### 1) 解析条件

火災実験3の解析モデルとして図-4.20に示すモデルを作成した。実験室内に配置されるケーブルの温度変化を検討対象としており、ケーブルラックがコンパートメント内に配置されている。計算モデルではケーブルラックの形状を矩形を用いて近似し、ケーブルラックの厚みは計算格子の都合上 0.005m とした。コンパートメントは厚み 0.015m のコンクリートで覆われているとし（火災実験1のモデルと同じ）、ケーブルラックと空気の間は熱伝達として熱伝達率 18W/m/K（火災実験2のモデルと同じ）を設定した。計算ケースは発火源を部屋の中央に設置したケースを対象とし、計算を行った。なお、境界条件は、コンパートメントの底面は断熱とし、側面および上面は 279K 固定とした。また、コンパートメントの出入り口は自由流入出条件（圧力固定）とし、流入の場合には 279K の空気が流入するものとした。

###### 2) 解析結果と考察

上述の解析条件にて、火災進展解析コードを用いて解析を実施した。ケーブルトレイ中央部のケーブルについて得られた計算結果は図-4.22に点線で示してある。この結果から、温度上昇のおおよその傾向は一致しているものの、入り口付近と壁側の温度の関係が実験値と異なる。これは、実験時には実験室内奥、つまりケーブルトレイの壁側付近において高温層が発生していたものと思われるが、計算ではこれが発生していない。したがって、測定点と温度関係が正しく得られていない



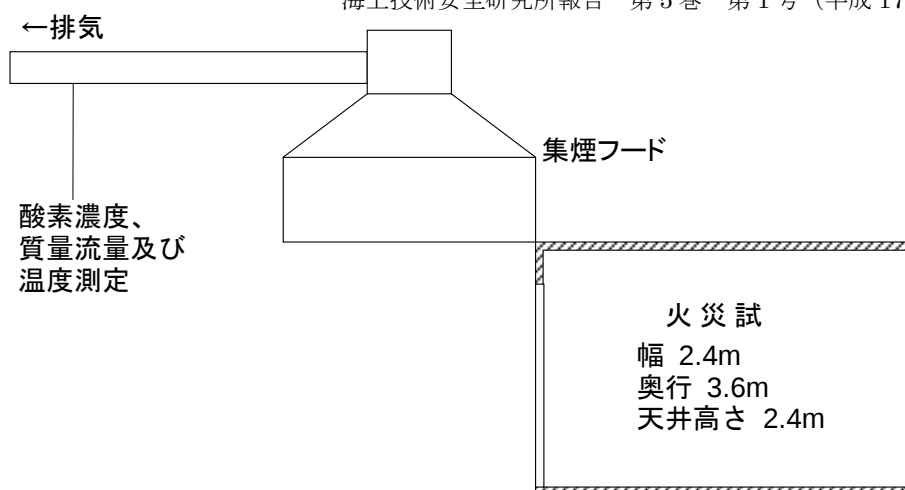


図-4.2 ISO9705 室内火災試験設備

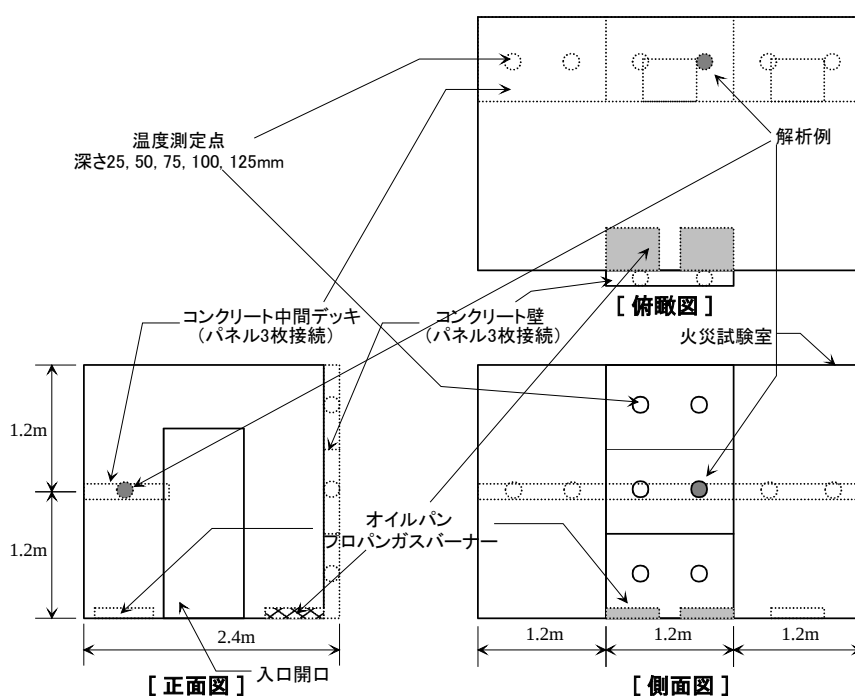


図-4.3 火災実験室試験設備

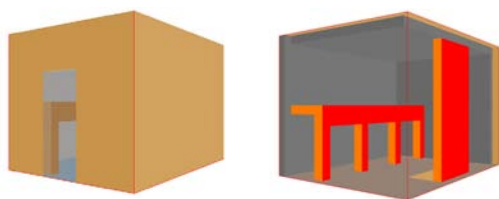


図-4.4 火災実験用解析モデル概要

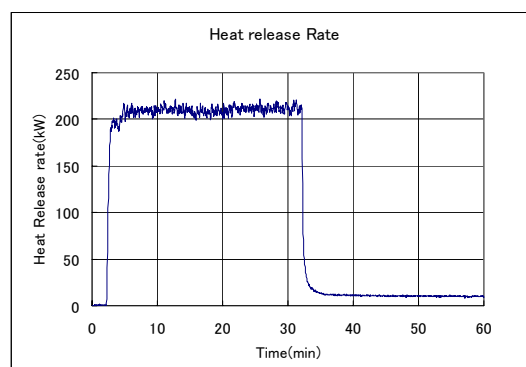


図-4.5 火災実験の発熱量

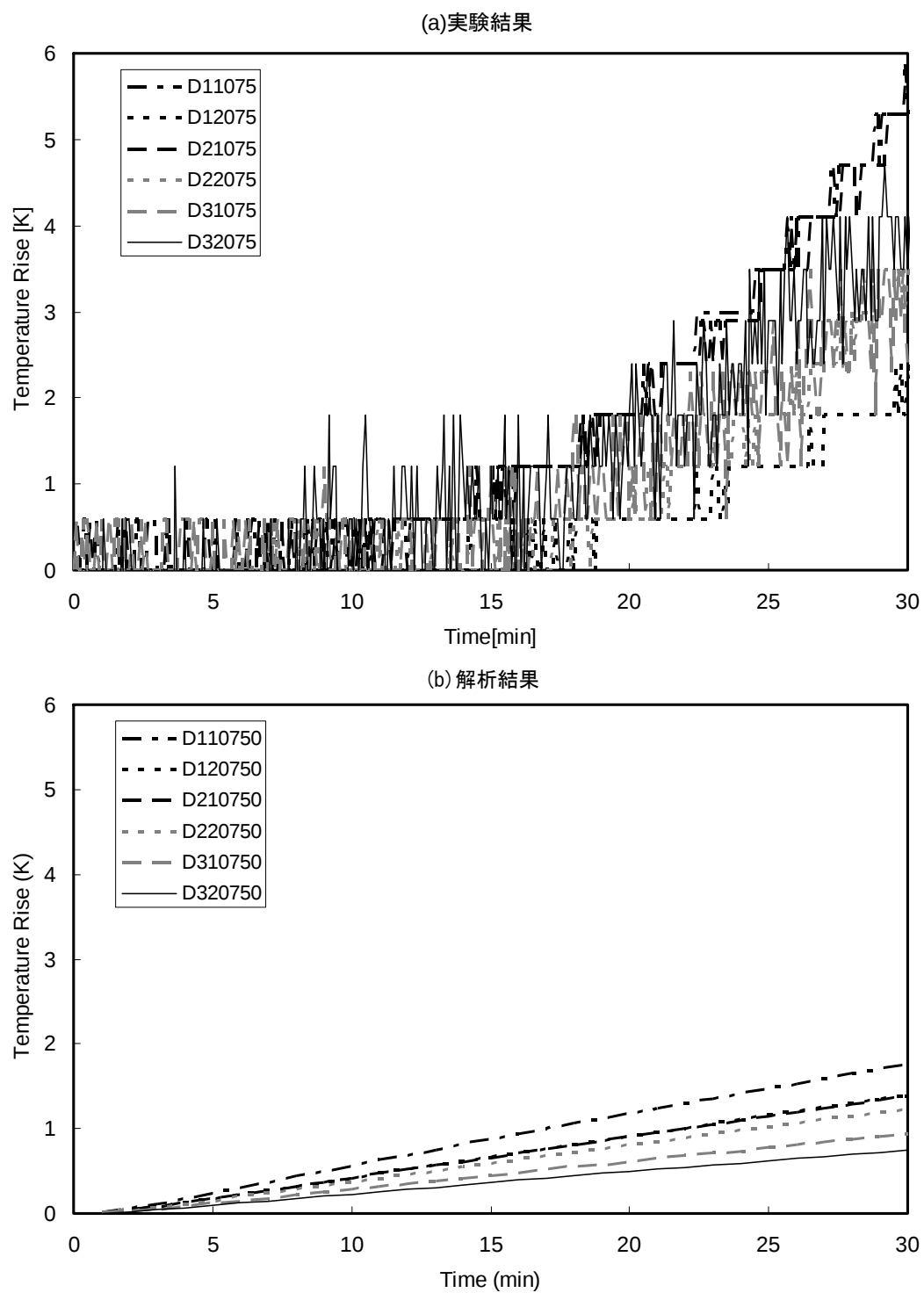


図-4.6 デッキ部温度時系列

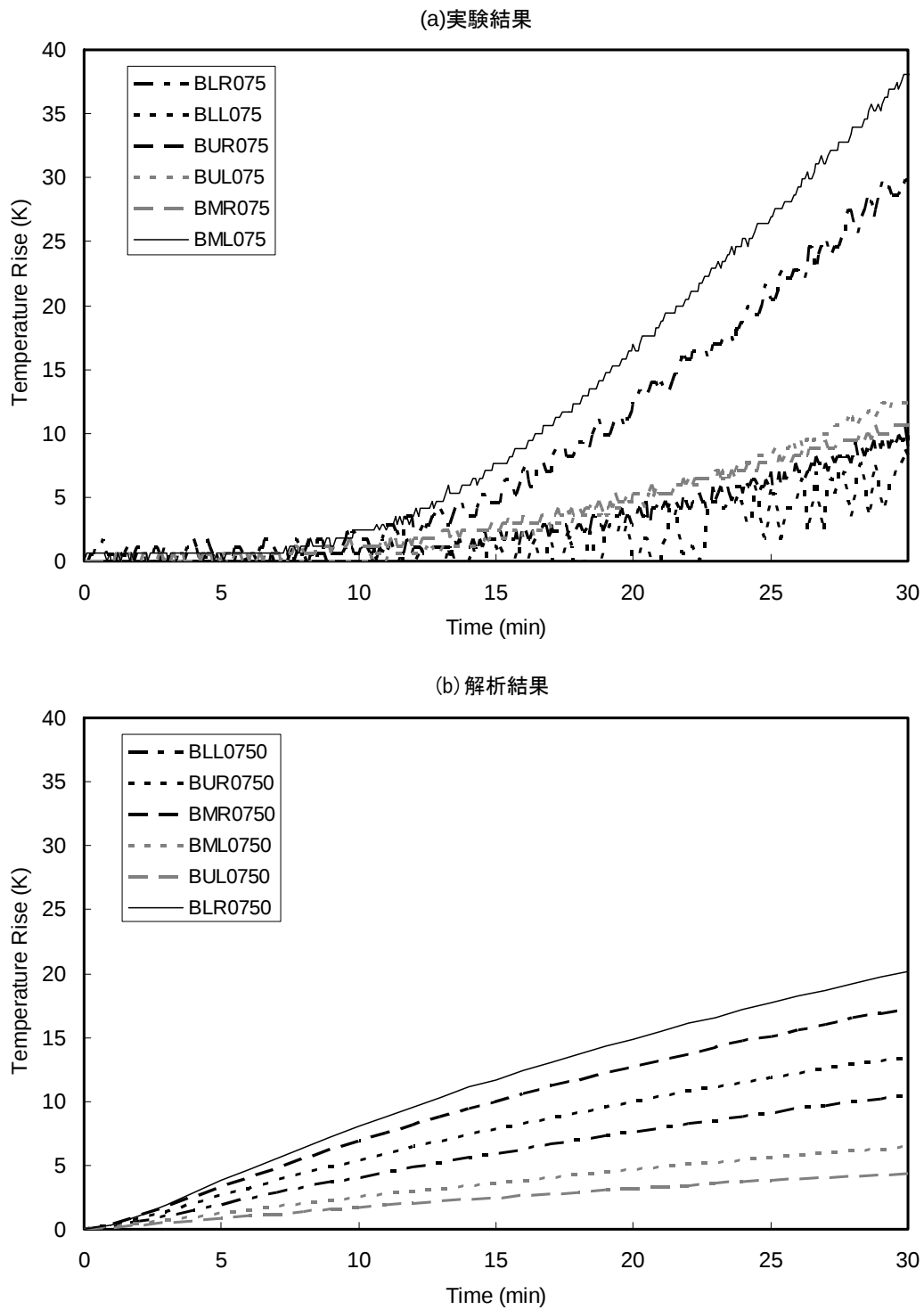


図-4.7 火炎近傍板の温度時系列

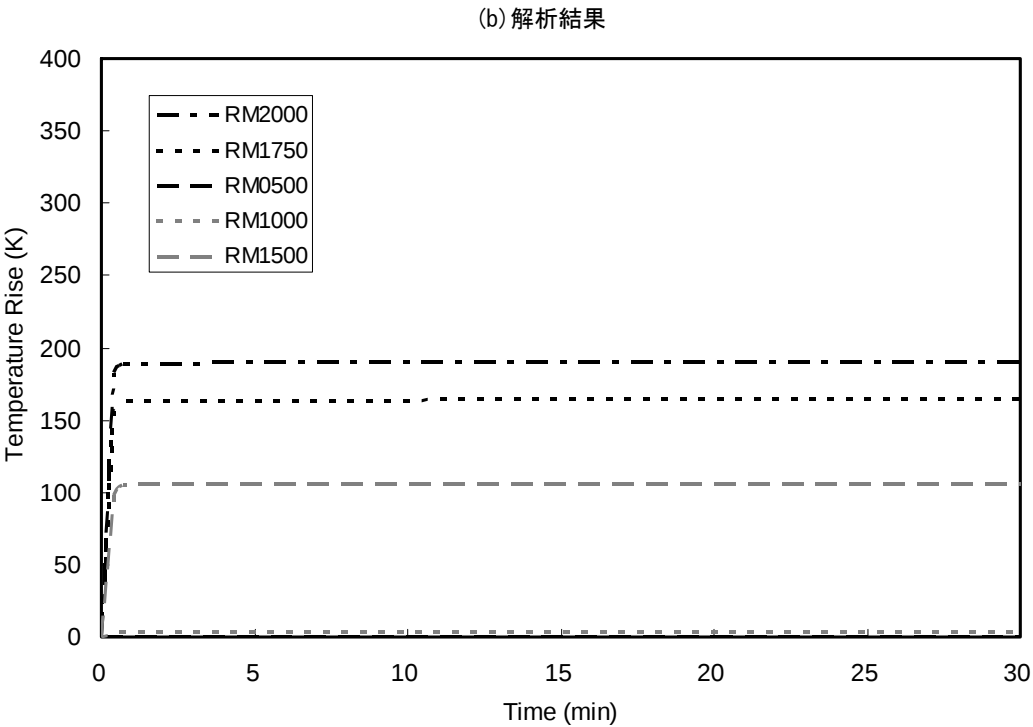
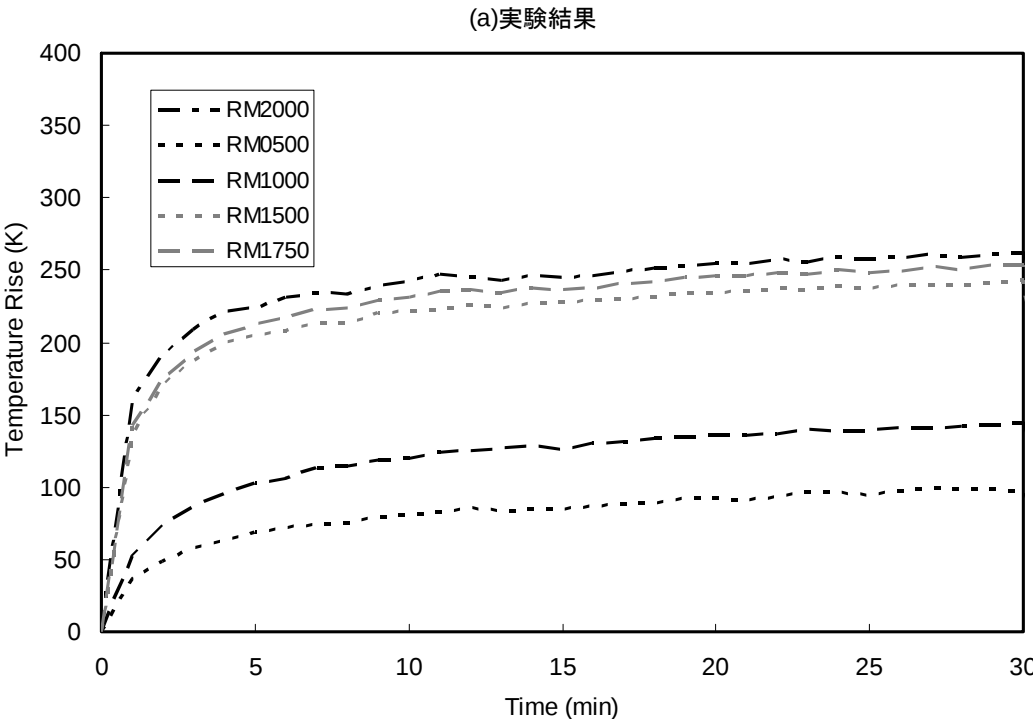


図-4.8 出入り口付近温度時系列

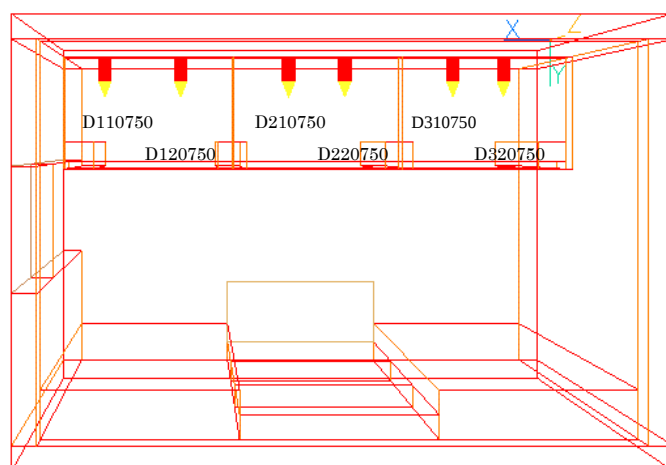


図-4.9 デッキ部計測点

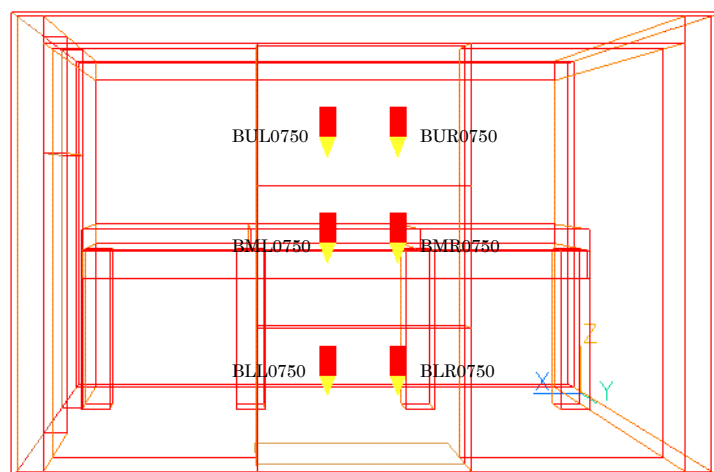


図-4.10 火炎近傍板の計測点

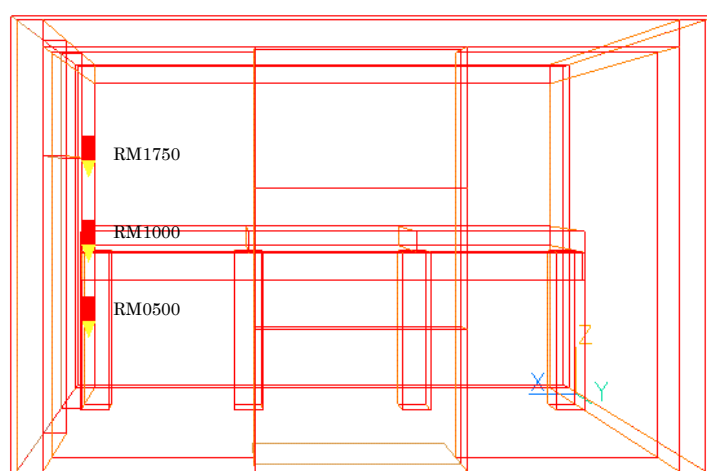


図-4.11 出入り口付近計測点

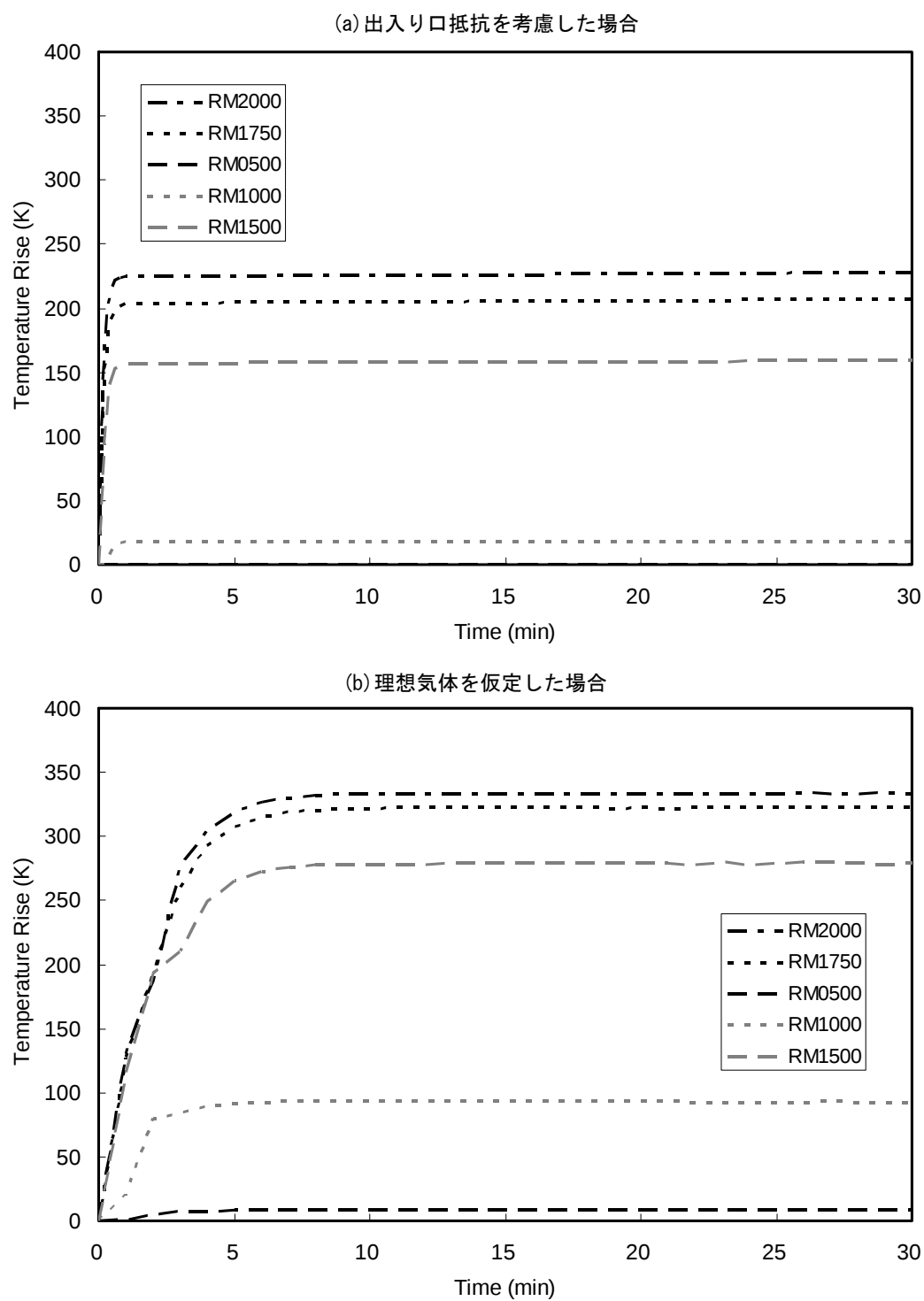


図-4.12 出入り口付近温度時系列

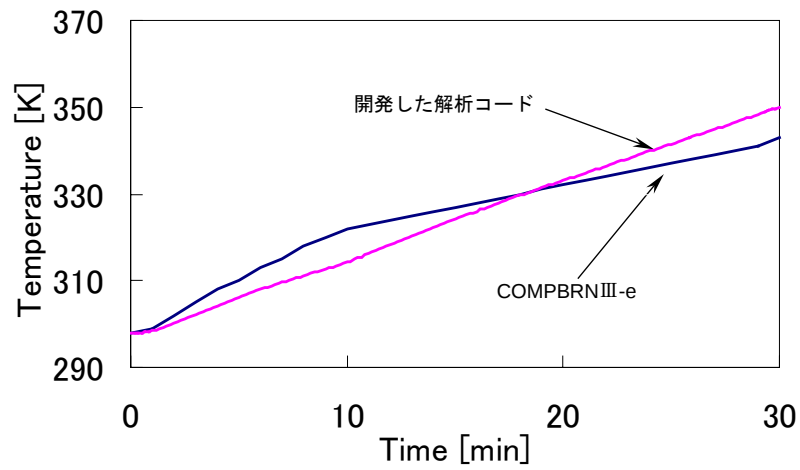


図-4.13 開発コードと COMPBRN の比較

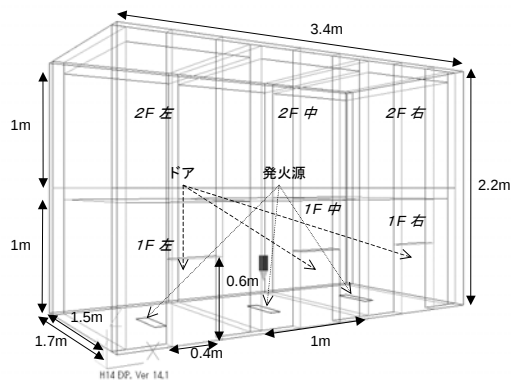


図-4.14 火災実験室レイアウト

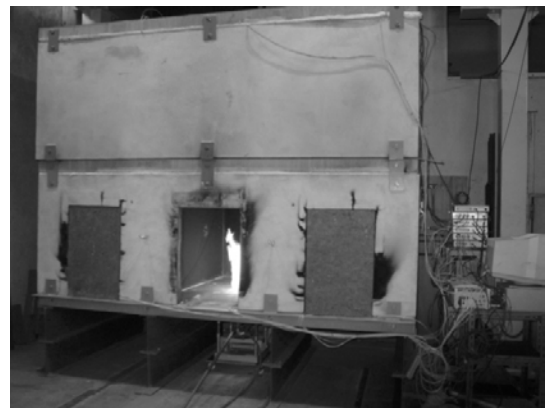


図-4.15 火災実験の様子

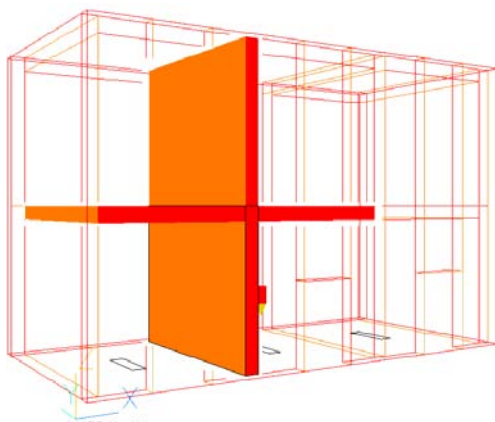


図-4.17 解析モデル



図-4.21 火災実験の様子

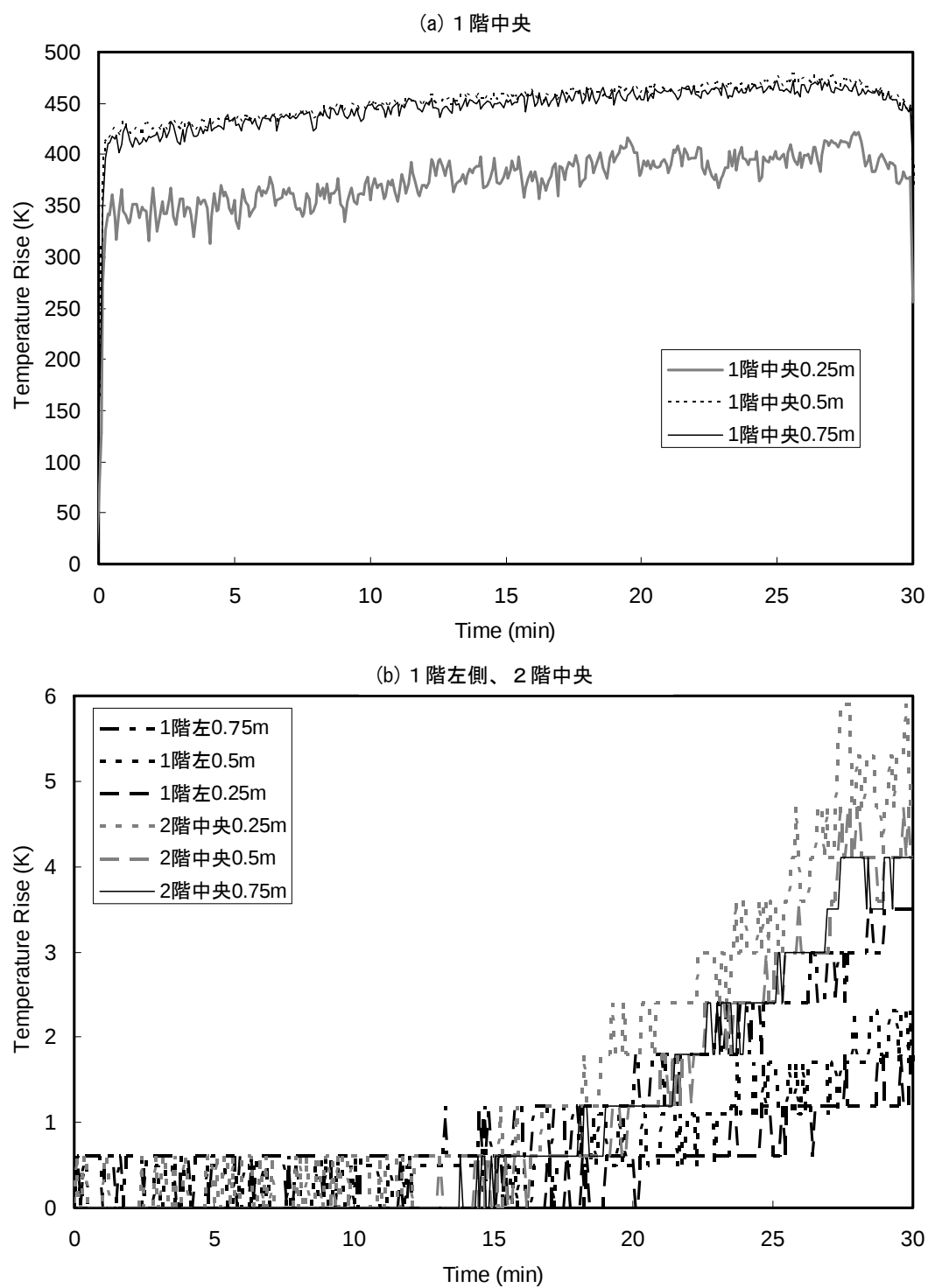


図-4.16 実験結果の温度時系列

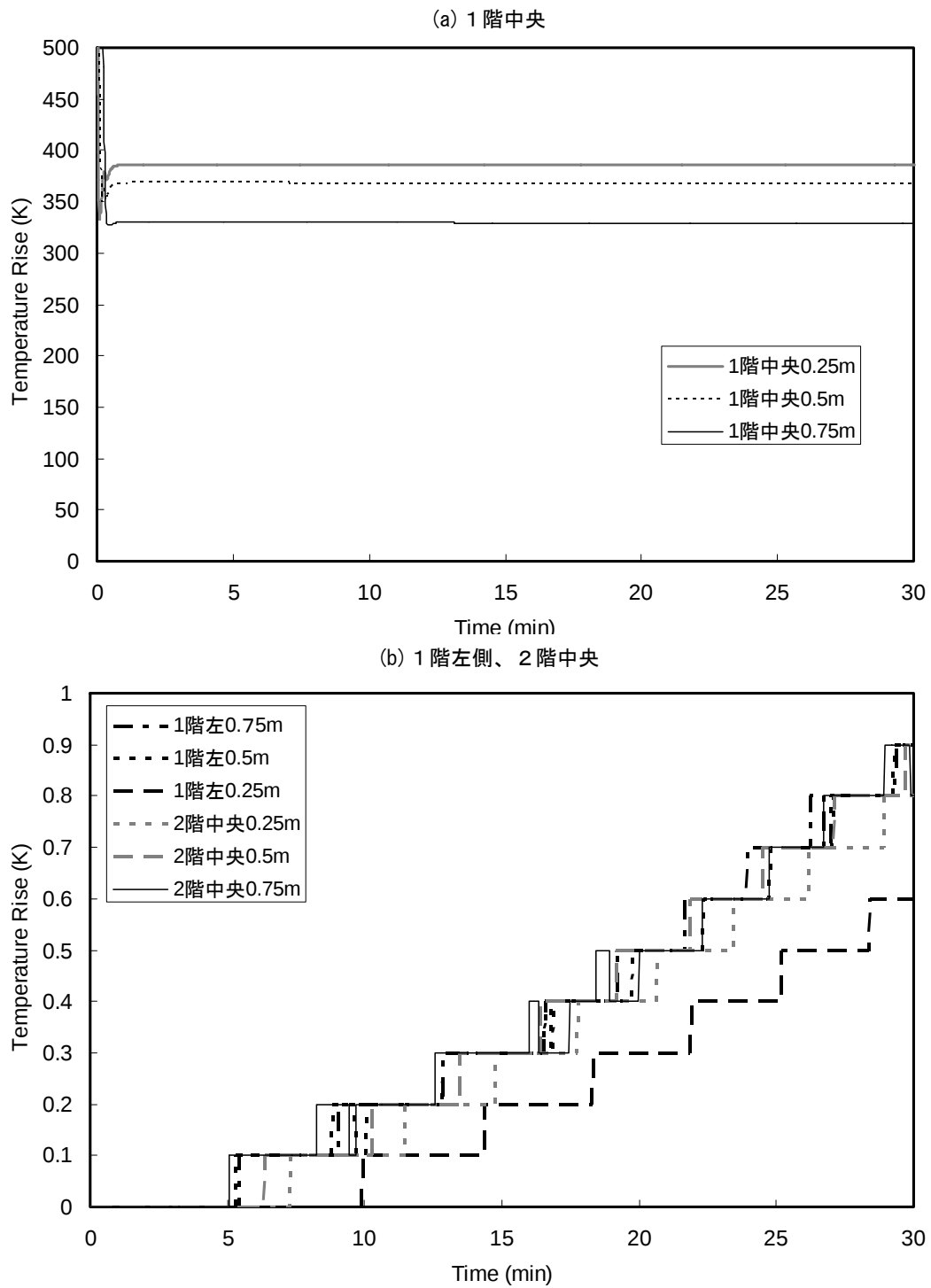


図-4.18 熱伝達率を調整した解析結果の温度時系列

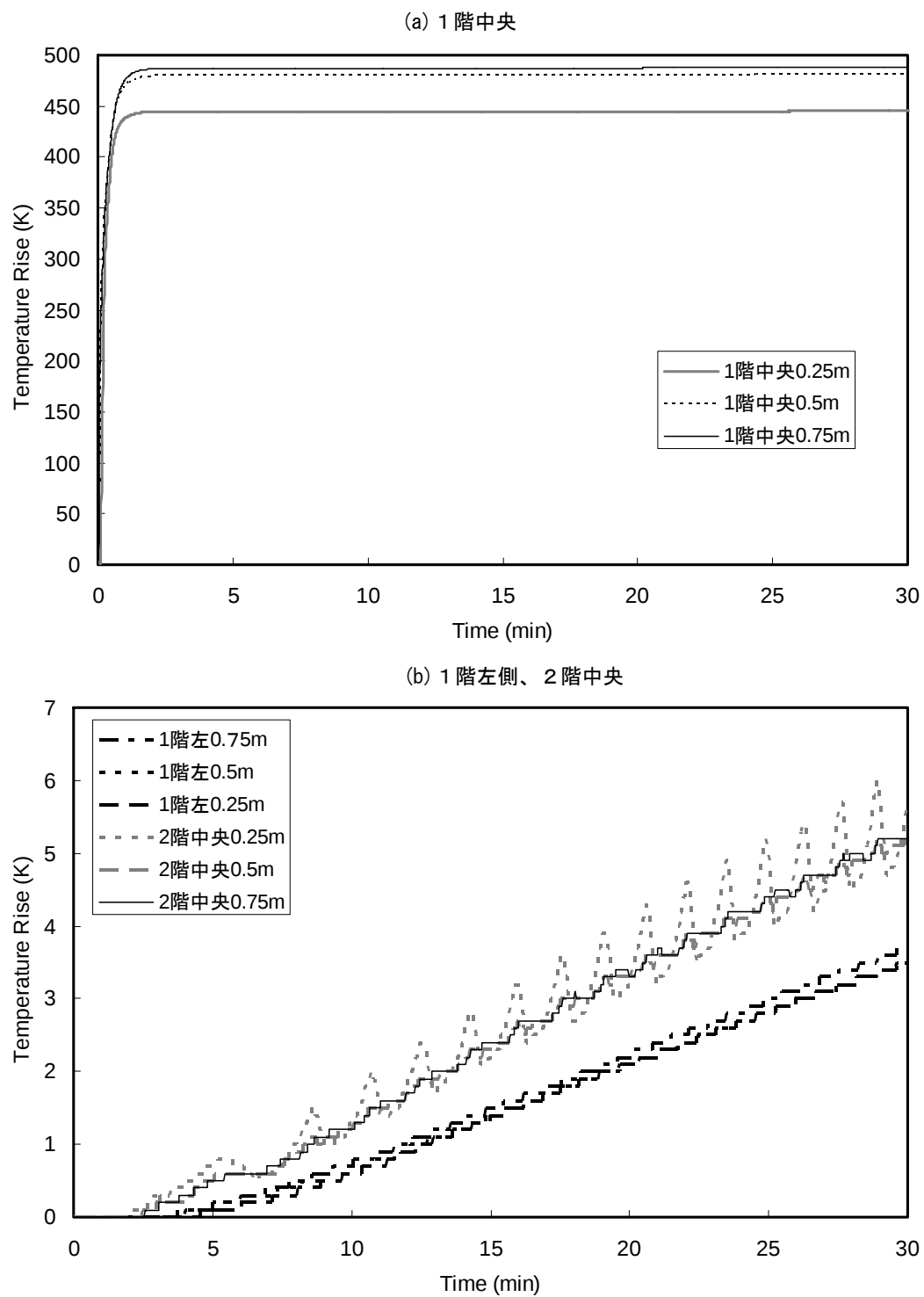


図-4.19 発熱量を再検討し熱伝達率を調整した解析結果の温度時系列

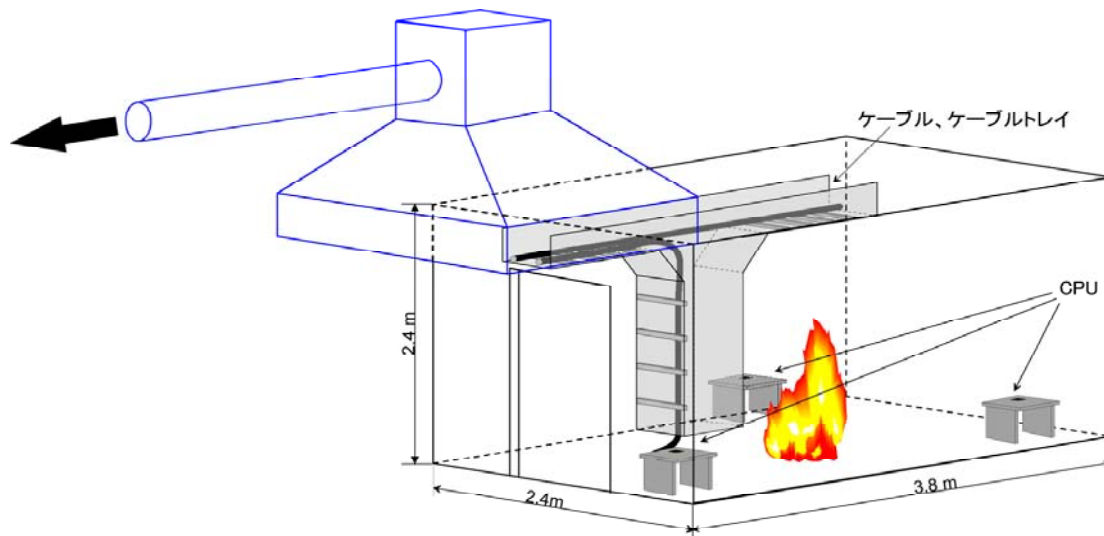


図-4.20 火災実験室のレイアウト

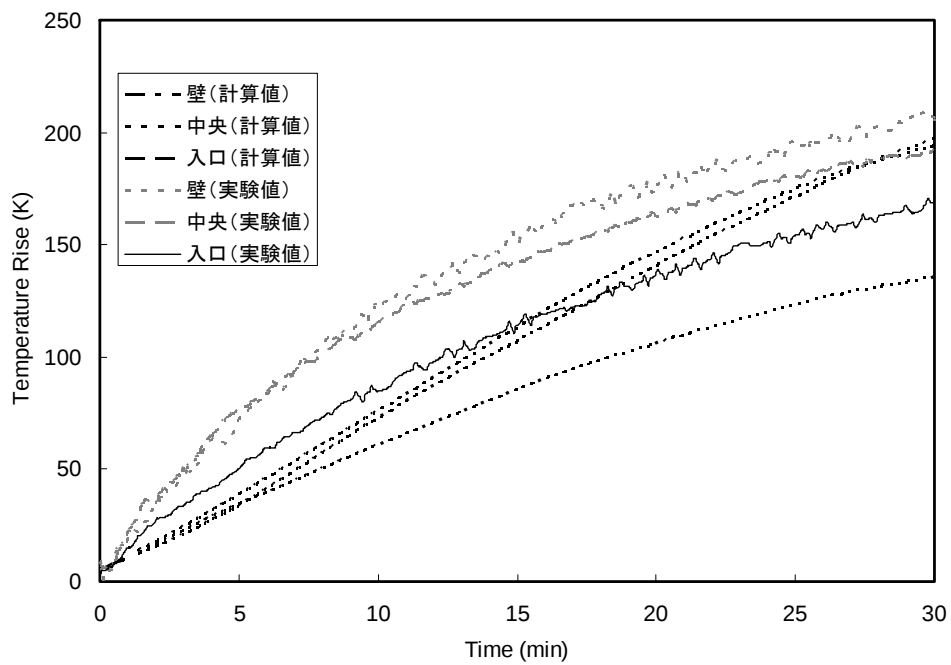


図-4.22 実験および計算結果の例

表-4.1 火災実験時のケーブルとCPUの損傷結果(周囲の最高温度)

| 実験No.  | 1          | 2          | 3          |
|--------|------------|------------|------------|
| ケーブル 1 | ショート(513K) | N/A(527K)  | N/A (569K) |
| ケーブル 2 | ショート(513K) | N/A(527K)  | N/A (569K) |
| ケーブル 3 | ショート(513K) | N/A(527K)  | N/A (569K) |
| ケーブル 4 | 異常なし(463K) | 異常なし(463K) | ショート(508K) |
| ケーブル 5 | 異常なし(463K) | 異常なし(463K) | ショート(508K) |
| ケーブル 6 | 異常なし(463K) | 異常なし(463K) | ショート(508K) |
| CPU 1  | 異常なし(365K) | 異常なし(367K) | 異常なし(366K) |
| CPU 2  | 異常なし(372K) | 異常なし(373K) | 異常なし(387K) |
| CPU 3  | 異常なし(391K) | 異常なし(383K) | 損傷(543K)   |

ものと考えられる。この点の改善には、拡散係数の見直し等が必要と考えているが、現在のところ有効な対策をたてることができなかった。

一方、ケーブルトレイ表面およびその近傍、またケーブルトレイに接しているケーブルの温度変化が実験値より小さく算出された。これは、計算格子の都合上、ケーブルトレイ自体が実際の厚さより厚いため温度上昇が小さく、それ故ケーブルトレイに接しているケーブルも温度上昇が小さくなったと考えられる。しかし、ケーブルトレイを実際の厚み（数 mm 程度）で設定するとメッシュの数が膨大な量となり、それに従い計算時間も 100 時間を越えるものとなってしまい、現状では有効な対策を立てることができなかった。

## 5. サンプルプラント評価

これまでに開発した解析コードの評価のために、サンプルプラントを用いて同時多発火災リスクに関する評価を行った。評価を行う対象プラントとして、BWR(Type-5、Mark II)を選定した。これは、日本原子力研究所で実施された「国内軽水炉モデルプラ

ント PSA」<sup>4)</sup>において解析対象となっており、プラント情報の入手がある程度可能であること、および、同研究所において実施された内的事象解析において作成されたイベント・ツリーが火災リスク評価にもそのまま適用できるためである。イベント・ツリーのヘッディングを構成する各種システムの一部分の機能が火災発生により喪失した場合には、GO-FLOW 手法によりシステム動作成功確率を評価することとなるが、今回の評価では、設定火災全てについては考慮対象システムの機能が確率 1.0 で失われることとなったため、GO-FLOW 解析は不要であった。

地震および火災リスク評価においては、原子力プラントの系統図とともに建物・機器の配置図、区画の構造、扉、貫通孔、電力線の位置、制御用配線の位置が重要な情報となる。これらの情報は、プラント個々により微妙に異なってくるが、本研究においては特定のプラントを対象としてはいたため、原子力安全研究協会の「軽水炉発電のあらまし」<sup>5)</sup>の記載事項を主要情報源としたプラントを想定する。

表-5.1 我が国で地震により発生した原子炉停止事例（2004 年 5 月 14 日まで）<sup>14)</sup>

| 発生年月日            | サイトおよびプラント名         | 事 例 内 容                                      |
|------------------|---------------------|----------------------------------------------|
| 1983 年 7 月 2 日   | 福島第一原子力発電所 3,6 号    | 地震発生に伴う「タービン振動大」の信号により、タービンが自動停止し、原子炉も自動停止   |
| 1985 年 11 月 27 日 | 大飯発電所 1 号炉          | 地震に伴いタービン油圧系の水銀スイッチの誤動作によりタービントリップし、原子炉も自動停止 |
| 1987 年 4 月 23 日  | 福島第一原子力発電所 1,3,5 号炉 | 地震により原子炉の安全装置が作動し、原子炉が自動停止                   |
| 1993 年 11 月 27 日 | 女川原子力発電所 1 号炉       | 地震に伴い「中性子束高高」により原子炉も自動停止                     |

### 5.1 シナリオ

サンプルプラント評価を行うにあたり、解析シナリオの設定が必要となる。まず実際に起こったトラブル例について検討を行うこととする。地震による原子力プラントのトラブルについては表-5.1に示すような原子炉の停止に関する報告があるが、これ以外の機器の損傷等の報告例は無く、またそこから火災が発生した報告も無い。そこで本研究の目的である、地震誘起の火災についての検討を行うために、過去に報告された地震および火災の事例、火災に関する文献、データベース等調査から潜在的な可能性の調査・検討を行うこととする。

#### 5.1.1 地震事例から

まず地震による事故事例から、火災には至らなかったものの火災の発生源となる潜在的な可能性について検討した。そこで阪神神戸大震災時の火力発電所の事故調査報告書（関西電力）<sup>16)</sup>を調査した結果、下記のような報告が見つけた。

##### (1) 主タービン軸受

###### 被害状況

主タービン軸受点検の結果、表-5.2のとおり軸受下半メタルに異物の噛み込み傷が発生していた。混入した異物を分析した結果、鉄錆と判明し、これは地震によるロッキングによって潤滑油戻り管内面に長年にわたって徐々に付着した鉄錆が剥離・脱落し、主油タンク入口ストレーナを通過し、給油側に回り込み軸受に噛み込んだものと考えられる。

##### (2) 給水ポンプ基礎

###### 被害状況

尼東 P/S2 号給水ポンプにおいて、定格運転時の振動値が兵庫県南部地震以降、漸増傾向にあり、警報値近傍にある。基礎部の構造が図-5.1のとおり中空であり超音波による空洞測定結果およびシュミットハンマーによる硬度測定結果より、基礎強度が低下している。

##### (3) 発電機軸受

###### 被害状況

前項、主タービン軸受と同様の考え方で点検した結果、表-5.3の被害が発生していた。状況は、異物の噛み込み傷が軸受下半メタルに見られた。混入した異物は成分分析の結果、鉄錆と判明し、これは地震によるロッキングによって潤滑油戻り配管内面に長年にわたって徐々に付着した鉄錆が剥離・脱落し主油タンク、入口ストレーナを通過し給油側へ回り込み軸受に噛み込んだと考えられる。

#### 5.1.2 火災事例

原子力関連施設で昭和46年～平成11年の間に起こった火災例を表-5.4に示す<sup>15)</sup>。

これにより、報告されている火災例だけでもかなり多いことがわかった。また、火災の原因としては、メンテナンス等の作業中に使用機器から発生した火花によるものが多い。この火花の発生の他にも、断線などによる電気関連の原因も見られる。火花の発生、断線といった現象は、地震発生時にも予想されるものであり、火災の発生の可能性は十分にあると考えられる。

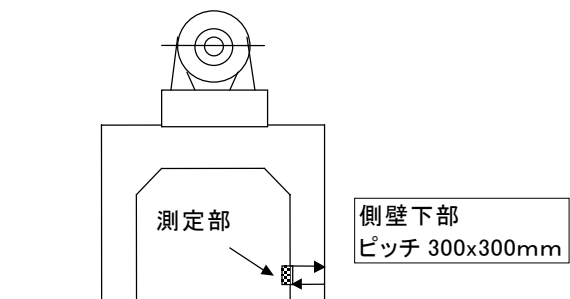


図-5.1 地震損傷事例

表-5.2 主タービン軸受被害状況調査結果

| 所 別<br>状 況 | 尼 東 P/S                     |                            | 尼 三 P/S                       |                               |     |
|------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----|
|            | 1 号                         | 2 号                        | 1 号                           | 2 号                           | 3 号 |
| 異物噛み込み傷    | #4 軸受<br>下半メタル<br>深さ 0.03mm | #1 軸受<br>下半メタル<br>深さ 0.2mm | #3,4 軸受<br>下半メタル<br>深さ 0.05mm | #3,4 軸受<br>下半メタル<br>深さ 0.17mm | ——— |

表-5.3 発電機軸受被害状況調査結果

| 所 別<br>部 位 | 尼 東 P/S      |      | 尼 三 P/S |                  |      | 備 考   |
|------------|--------------|------|---------|------------------|------|-------|
|            | 1 号          | 2 号  | 1 号     | 2 号              | 3 号  |       |
| 異物噛み込み傷    | #5, #6<br>軸受 | 異常なし | 異常なし    | #5, #6, #7<br>軸受 | 異常なし | 下半メタル |

表-5.4 原子力関連施設における火災事例

| 年月日       | 施設名                    | 場所                    | 出火原因                    | 火災状況                                                                                       | 備考 |
|-----------|------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| S42-11-18 | 日本原子力発電東海              | 原子炉冷却設備<br>(2号ガス循環機室) | 潤滑油ストレーナ切り替えハンドルの操作ミス   | フィルター掃除点検中に噴出油に引火                                                                          |    |
| S46-5-17  | 岩崎電気(株)第4工場A棟          | 作業所                   | ダクト内汚物の異常燃焼と推定          | 30 m <sup>2</sup>                                                                          |    |
| S51-4-2   | 東京電力福島第1原子力発電所2号機      | タービン建屋                | 溶接機の火花                  | 部分焼・焼損物品: ケーブル線 (フレキシブルコソジェット)                                                             | ①  |
| S52-3-25  | 東京電力福島第1原子力発電所1号機      | 原子炉建屋                 | アセチレン溶断の火花              | ぼや・焼損物品: 吸排気管・計器・ホース等                                                                      | ①  |
| S54-3-13  | 安全管理棟 (作業所)            | 東海事業所                 | 分析試料を加熱中、試料に着火          | なし                                                                                         | ③  |
| S60-3-15  | 東京電力福島第1原子力発電所5号機      | タービン建屋                | プロパンガスバーナーの使用を誤る        | 部分焼・焼損物品: 作業服                                                                              | ①  |
| S60-8-31  | 東京電力福島第1原子力発電所1号機      | タービン建屋                | アーク放電                   | 部分焼・焼損物品・建屋内送電キュービクルケーブル                                                                   | ①  |
| S60-9-27  | 東京電力福島第1原子力発電所5号機      | タービン建屋                | 過酸化水素水の漏洩により化学反応を起こし発火  | ぼや・焼損物品: 過酸化水素水とダンボール等                                                                     | ④  |
| S60-10-16 | 核燃料サイクルふげん発電所          | 原子炉主建屋                | 電工ドラム                   | 1 m <sup>2</sup>                                                                           | ①  |
| S61-1-17  | 東京電力福島第1原子力発電所2号機原子力建屋 | 地下2階タービン建屋            | アセチレン溶接の火花              | ぼや・焼損物品: ポリ袋・ガスバーナー・ホース等                                                                   | ①  |
| S63-1-13  | 東京電力福島第1原子力発電所6号機      | タービン建屋                | 自然発火と推定                 | 部分焼・焼損物品: エアーバグフィルター・コイル等                                                                  |    |
| H3-11-26  | 東京電力福島第1原子力発電所3号機      | タービン建屋                | 溶接の接続コネクタ不良のため          | 部分焼・焼損物品: キャブタイヤ・ウエス・足場板                                                                   | ②  |
| H4-11-19  | 石津製薬(株)西宮工場 危険物貯蔵庫     | 工場                    | 危険物貯蔵庫の取り扱い不良           | 危険物屋内貯蔵所 (延べ62m <sup>2</sup> ) の内壁・床および貯蔵していた硝酸、硫酸ならびに過酸化水素を焦燥したもの (焼損表面積7m <sup>2</sup> ) |    |
| H5-2-13   | 東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所1号機   | 水処理建屋                 | 遮断機内部の結露による絶縁低下、アーク放電   | 440V級断路器                                                                                   |    |
| H5-3-18   | 東京電力福島第1原子力発電所2号機      | 原子炉建屋                 | アセチレンガス溶断の火花            | 部分焼・焼損物品: 配管の内張りゴムライニング等                                                                   | ①  |
| H6-1-10   | アイソトープ総合センター箱崎地区実験室1階  | 実験研究、学内共同施設           | ホットプレートの異常加熱            | ホットプレートより発火、無菌ボックスドラフトチャンバーに延焼                                                             | ③  |
| H7-3-24   | 泊発電所                   | 放射性廃棄物処理建屋1階          | 照明用ライトの熱が気化した洗浄剤に引火したもの | ぼや (アスファルト固化装置復水タンク内で発火)                                                                   |    |
| H7-11-27  | 中部電力(株)浜岡原子力発電所3号機     | タービン建屋地上3階            | ケーブルの半断線による発熱           | ケーブルおよび工事用ビニールハウス                                                                          | ②  |

| 年月日       | 施設名                  | 場所              | 出火原因                                                           | 火災状況                          | 備考 |
|-----------|----------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|----|
| H7-12-8   | 核燃料サイクル機構もんじゅ発電所     | 原子炉補助建屋2次冷却系配管室 | Na配管より漏洩したNaが空気と反応                                             | 焼損床面積：4 m <sup>2</sup>        |    |
| H8-1-20   | 中部電力(株)浜岡原子力発電所3号機   | タービン建屋地下1階      | 過酸化水素水ウエスの酸化発熱反応                                               | 可燃物を入れたポリ袋                    |    |
| H8-6-13   | 東京電力福島第1原子力発電所4号機    | 原子炉建屋           | アセチレンガス溶断の火花                                                   | 部分焼・焼損物品：補助ボイラ保温材             | ①  |
| H8-9-7    | 中部電力(株)浜岡原子力発電所3号機   | 原子炉建屋地上1階       | 絶縁ホルダーに付着した塵埃が導体間スパーク                                          | 電源盤バスダクト                      | ⑤  |
| H8-10-23  | 東京電力福島第1原子力発電所1号機    | タービン建屋1階        | アセチレンガス溶断の火花                                                   | ぼや・焼損物品：出入口バリアの養生ビニールシート天井部分  | ①  |
| H9-1-17   | 東京電力福島第2原子力発電所2号機    | 原子炉建屋1階         | 使用後の高温器具から垂鉛メッキ塗料に引火                                           | ぼや・焼損物品：布製工具袋および2号機原子力建屋溶着器具箱 | ③  |
| H9-1-19   | 東京電力福島第2原子力発電所第3・4号機 | 廃棄物処理建屋         | 空気余熱器低部が溶融し燃焼                                                  | ぼや・焼損物品：空気予熱器低部が廃棄物処理建屋溶融し燃焼  |    |
| H9-1-22   | 放射線医学総合研究所R1棟屋上      | 研究施設            | 屋外引きこみケーブルの半断線による短絡                                            | 空調設備の屋外機1機焼損                  | ⑥  |
| H9-3-11   | 東海事業所                | アスファルト固化処理施設    | アスファルト加工機から排出したアスファルト混合体の温度が高めであったため、ドラム缶内で蓄熱し塩とアスファルトの反応により出火 | アスファルト充填室内アスファルト固化体の焼損        |    |
| H9-11-20  | 日本原子力研究所ウラン濃縮棟       | 研究施設            | 不明                                                             | 焼損部：2m <sup>2</sup>           |    |
| H10-1-9   | 東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所5号機 | 原子炉建屋地下3階通路     | ガソリンを使って油冷却管掃除中、可燃性蒸気にガストーチの火が引火                               | ウエスおよび養生用ビニールシート              | ①  |
| H10-2-23  | 放射線医学総合研究所アルファ線棟屋上   | 研究施設            | 解体工事中のアセチレン切断火花                                                | 空調設備の屋外機1機焼損                  | ①  |
| H10-10-9  | 東京電力福島第1原子力発電所2号機    | 原子炉建屋1階         | アセチレンガス溶断の火花                                                   | ぼや・焼損物品：養生シート                 | ①  |
| H10-11-20 | 東海発電所ホットワークショップ1階    | 発電所             | 溶断作業時に火花がフィルターに引火                                              | 仮設の局所排風機フィルターの延焼              | ①  |
| H10-11-30 | 東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所1号機 | 原子炉建屋格納容器内地下3階  | 溶接の火花が床を養生するビニールシートに落下                                         | 養生用ビニールシート2.2 m <sup>2</sup>  | ①  |
| H10-12-7  | 東京電力福島第1原子力発電所       | 集中環境施設高温焼却炉建屋   | 引火性ガスに電動レンチの火花が発生して引火                                          | ぼや・焼損物品：引火性ガス                 | ①  |
| H11-1-19  | 東京電力福島第2原子力発電所       | 廃棄物処理建屋         | 空気予熱器の誤信号による誤動作                                                | 空気予熱器                         |    |
| H11-1-25  | 東京電力福島第2原子力発電所1号機    | タービン建屋2階        | 照明用の白熱灯が割れて火花が発生し発火                                            | ぼや・焼損物品：シンナー・補修用ガラス繊維         | ⑦  |
| H11-3-21  | 日本原子力研究所第3研究棟地下1階    | 研究施設            | 溶接の火花                                                          | 0.5x0.5m焼損                    | ①  |
| H11-7-29  | 日本原子力研究所JFT-2建屋1階    | 研究施設            | 端子部の接触不良のまま連続運転したため、接触抵抗が増大、温度が上昇した                            | サーキットブレーカーの焼損                 | ⑧  |

| 年月日       | 施設名                  | 場所           | 出火原因                             | 火災状況              | 備考 |
|-----------|----------------------|--------------|----------------------------------|-------------------|----|
| H11-9-20  | 東京電力（株）柏崎刈羽原子力発電所5号機 | 原子炉建屋1階      | インバータ回路に異常電流が発生し、抵抗器が加熱、コンデンサが発火 | 固化系インバータ盤内インバータ1個 | ⑨  |
| H11-11-13 | 日本原子力研究所むつ事業所        | 機材排水管理棟1階倉庫  | 調査中                              | 出入管理装置1台焼損        |    |
| H12-2-9   | 東北電力（株）女川発電所2号       | 原子炉建屋        | 調査中                              | エチレン酢酸ビニールシート約30㎡ |    |
| H12-6-19  | 東京電力（株）柏崎刈羽原子力発電所1号機 | 海水熱交換機建屋（外壁） | サブドレンポンプ制御盤内の過電流                 | 変圧器               |    |

表-5.5 場所・区域ごとの火災事例

| 場所、区域    | 件数 |
|----------|----|
| 原子力発電所   |    |
| タービン建屋   | 11 |
| 海水熱交換機建屋 | 1  |
| 原子炉建屋    | 12 |
| その他      | 7  |
| その他関連施設  | 11 |

表-5.4 を火災発生場所毎に整理したものが表-5.5 である。タービン建屋と原子炉建屋が多いが、これらは点検中の事故が多いことによるものと考えられる。

表-5.4 中の備考欄で分類した①～⑨について、各火災事例が地震により発生し得るかについて検討を行う。

- ① については、点検、補修などの作業中の火花等によるもので、そのための工具等が発火源と考えられるため、今回は除外する。
- ② 断線等の電気系統の不具合が原因として考えられ、対象とする。(a)
- ③ についても、実験中という特別な環境であり除外する。
- ④ については、過酸化水素水が空気中では発火してしまう。地震により、これを保管するタンクが破損し火災の発生となることは考え得ることである。(b)
- ⑤ については、地震時の何らかの異物混入による原因で起こり得る現象である。(c)
- ⑥ について、半断線による短絡が火災原因だが、

断線等は地震時には発生し易いもののひとつであり、②と同じに扱う。(a)

⑦ については、地震時の照明機器の破損は十分に考え得ることである。(d)

⑧ については、地震により電気器具等の接触不良は起こり得ることである。(c)

⑨ については、地震の発生により電気機器の制御機能に異常が発生するというようなことは考えられる。(e)

したがって、図-5.2 に示すようなシナリオが考え得る。表中の実例以外にも、例えば(b)のタイプとして、地震により非常用発電機室のディーゼル発電機とデイトン付近からの燃料漏れの発生が考えられる。

### 5.1.3 火災防護指針より

原子力発電所の火災防護指針 JEAG 4607-1999（社団法人 日本電気協会 原子力専門部会）<sup>17)</sup>によれば火災を起こす可能性のある液体を幾つか掲載しているが、過去の火災事例の検討への追加という点から検討した結果、ここでは次に示す燃料油類について示す。

発火性または引火性液体として、プラント内には燃料油等が存在する。油を内包する機器としては、

- ・ ディーゼル発電機
- ・ ディーゼル発電機デイトン
- ・ ディーゼル発電機油貯蔵タンク（または軽油

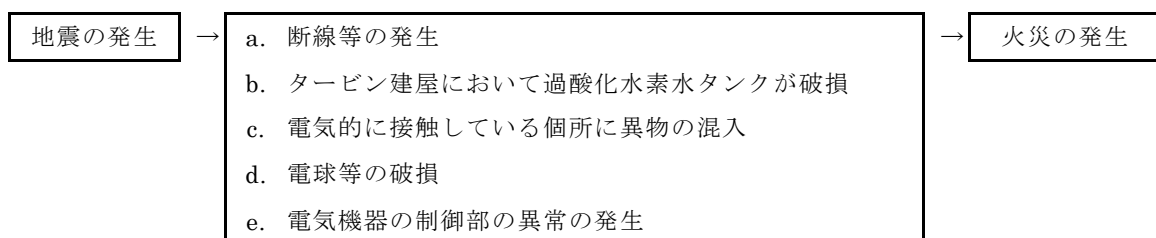


図-5.2 火災事例から想定されたシナリオ

- タンク)
- ・ タービン発電機
  - ・ タービン主油タンク
  - ・ 油清浄機
  - ・ 油計量タンク（または油貯蔵タンク）
  - ・ 給水ポンプタービン主油タンク
  - ・ 補助ボイラ燃料タンク（または重油タンク）
  - ・ 屋外変圧器
  - ・ 発電機密封油処理装置
  - ・ EHC 制御油圧ユニット
  - ・ 充てん／高圧注入ポンプ（PWR のみ）
  - ・ 一次冷却材ポンプモーター（PWR のみ）
  - ・ 再循環ポンプ MG セット（BWR のみ）
  - ・ 給水ポンプタービン油清浄機
  - ・ 主給水ポンプ（または給水ポンプ）
  - ・ タービン駆動補助給水ポンプ（またはタービン駆動給水ポンプ）
  - ・ ボイラ
  - ・ 制御用空気圧縮機

等がある。これらの液体から発火した場合には大規模火災になる可能性が高いものが含まれている。さらにこれらの検討結果から、同指針では、BWR の想定火災のエリアとしては下記のエリアを指定している。

#### ① 油

ディーゼル発電機エリア  
 ディタンク・エリア  
 タービン発電機エリア  
 主油タンクエリア  
 油貯蔵タンクエリア  
 給水ポンプエリア  
 発電機水素ガス密封装置エリア  
 主変圧器エリア  
 所内変圧器エリア  
 補助ボイラ燃料タンク（または重油タンク）  
 起動用変圧器エリア  
 補助変圧器エリア  
 再循環ポンプ MG セットエリア

#### ② 水素

発電機冷却用水素ガス供給設備エリア  
 発電機エリア  
 空気抽出器排ガス系エリア

蓄電池エリア

#### ③ 電気火災

ケーブルトレイ

以上の機器、エリア等についてはシナリオの検討の際に参考とする。

#### 5.1.4 EPRI Nuclear-Power-Plant Fire-Loss Data より<sup>18)</sup>

EPRI(Electric Power Research Institute, 米国の電力研究所)の Nuclear-Power-Plant Fire-Loss Data では、火災事例の報告の中でモーター、ディーゼル発電機の事例がある。原因は、潤滑油切れと軸のずれの重畳効果による摺動部からの発熱によるものや、漏れたオイルがポンプ等の高温部に接触したことによる事例がある。

#### 5.1.5 解析対象シナリオ

これまでに述べた事例等から、解析対象とする区画、シナリオについて検討する。

まず地震の事例（5.1.1）から検討する対象として、地震により何らかの理由で摺動部に異物が混入、これにより発熱、発火してしまうケースが考えられる。実際、このような摺動部が原因となる火災報告は EPRI の報告（5.1.4）にもある。このような対象区画としては、設計強度が低い海水熱交換器室のポンプが考えられる（f）。

火災事例（5.1.2）からは、すでに述べたように a～e のシナリオが考えられる。これらの中で、b の過酸化水素水は火災防護指針（5.1.3）でも指摘されている液体である。また同様の可燃物が原因となるシナリオ例として、ディーゼル発電機とディタンクからの燃料漏れが検討事項として考えられ、燃料漏れによる火災は大規模火災になることが予想されることから検討シナリオとして追加する（g）。

以上の検討結果から、f, g として図-5.3 のシナリオを追加する。

これまでの検討から、解析対象となるシナリオの設定を行った。次に解析を行うにあたり、各対象区画、データ等の情報が入手できることが重要であるが、調査の結果、サンプルプラント評価として利用できる情報が得られた評価対象区画とし

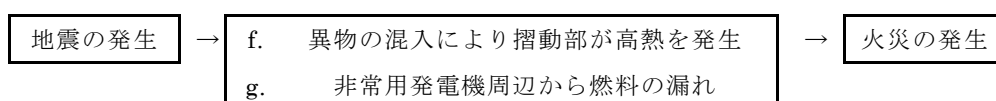


図-5.3 追加されたシナリオ

ては、スイッチ・ギア室、非常用発電機室、海水熱交換機室、操作室であり、これらを対象とするシナリオとしては c, d, e, f, g である。各区画のレイアウトおよび物性等は参考文献等を参考とした。図-4.1 に示した非常用発電機室のレイアウトがそれらの一例である。

5.2 イベント・ツリーの作成

本評価に用いる火災発生に伴う起因事象に対するイベント・ツリーを作成する。このイベント・ツリーは松岡らの報告書<sup>1)</sup>と同様、内的事象解析におけるイベント・ツリー<sup>19)</sup>を考慮し、火災による境界条件を内的事象のイベント・ツリーに加えることにより火災時におけるイベント・ツリーを作成した。図-5.4~16 に本解析に用いたイベント・ツリーの例を示す。これらのイベント・ツリーの詳細については渡辺らの報告書<sup>19)</sup>等を参照されたい。

これらのイベント・ツリーの右端には、起因事象が発生した場合における各シーケンスの発生確率値

を与えてある。実際のシーケンスの発生頻度を求める際には、起因事象の発生頻度とここにあげた各シーケンスの発生確率の積を取ればよい。

以上のイベント・ツリーは本研究所で開発したイベント・ツリー解析支援システム MSET(Maritime Safety Event Tree Analysis)<sup>20)</sup>を用いて作成した。また、本解析における複数システム間の共通原因故障の従属性、およびヘディング間の従属性については松岡らの報告書<sup>1)</sup>と同様にした。

これらイベント・ツリーにおいて、地震および火災により損傷した機器の関係するヘディングの分岐確率を修正し各シーケンスの発生頻度を求め、さらにこれらを整理することにより最終的に炉心損傷頻度への影響を評価することができる。

5.3 消火活動について

消火成功確率を求める方法としては、消火活動にあてられる時間と消火成功確率との関係として、

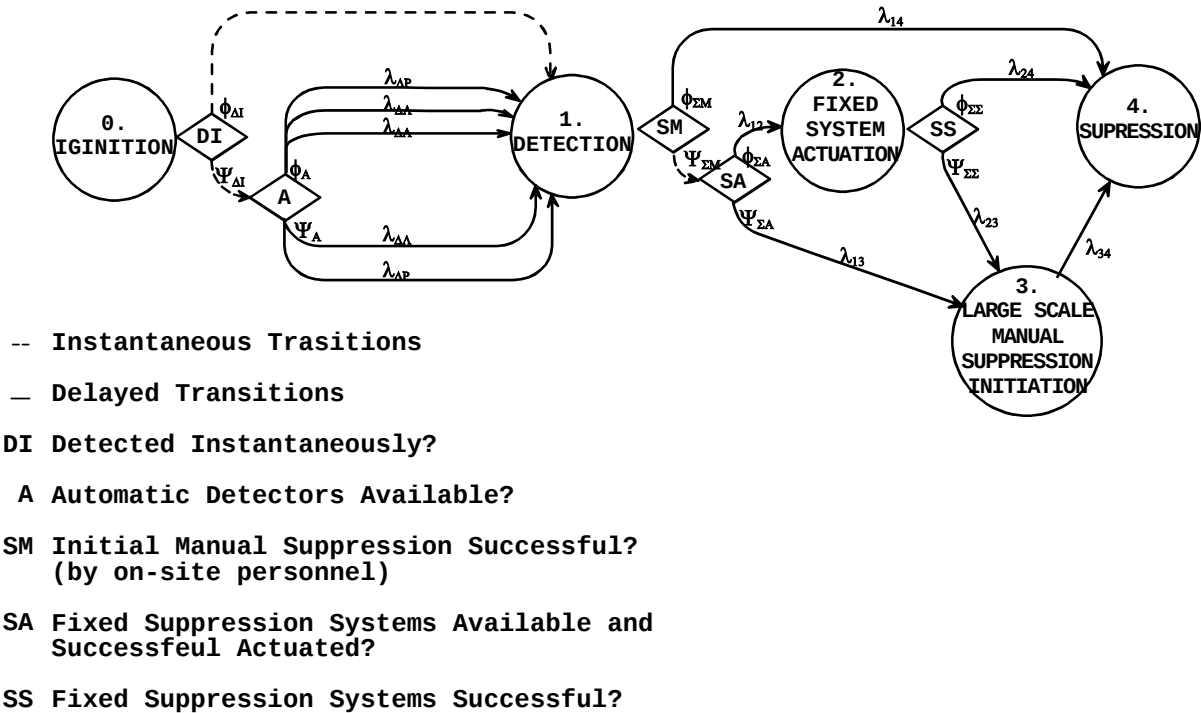


図-5.17 消火作業のモデル

表-5.5 消火成功確率

| 火 災 区 画  | 損 傷 機 器  | 損傷までの時間 | 消火成功確率   |        |
|----------|----------|---------|----------|--------|
|          |          |         | 経路 1-3-4 | 経路 1-4 |
| スイッチ・ギア室 | 分電盤      | 5 分     | 0.0      | 0.04   |
| 非常用発電機室  | 発電機コイル巻線 | 30 分    | 0.025    | 0.61   |
| 海水熱交換器室  | RHRS ポンプ | 35 分    | 0.09     | 0.84   |
| 制御室      | 主制御盤     | 1 分     | 0.0      | 0.04   |

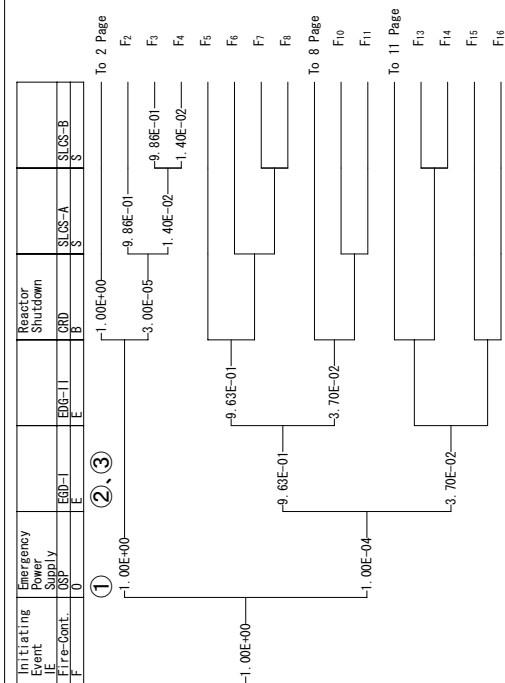


図-5.4 解析に用いたイベント・ツリー①

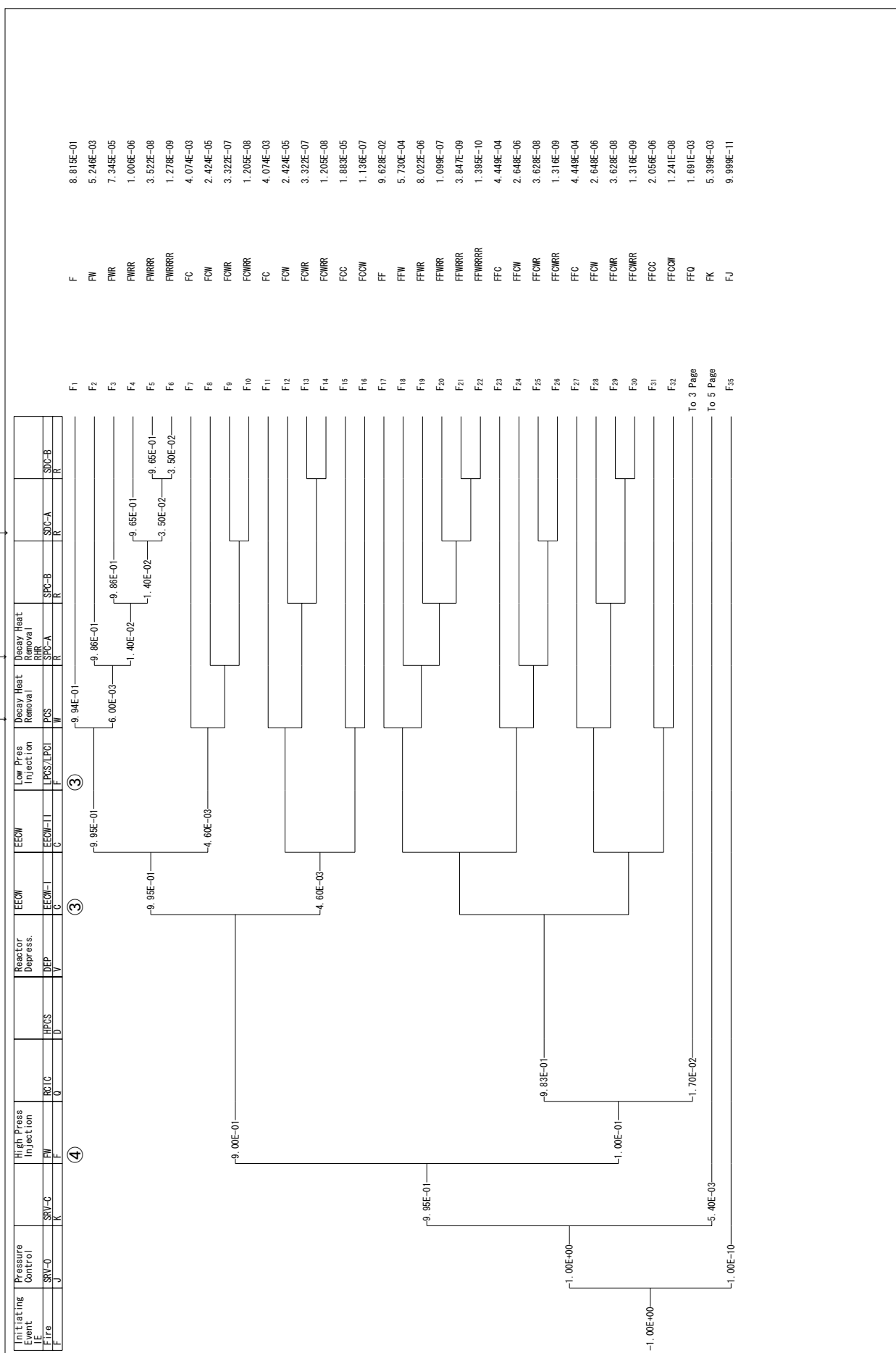


図-5.5 解析に用いたイベント・ツリー②



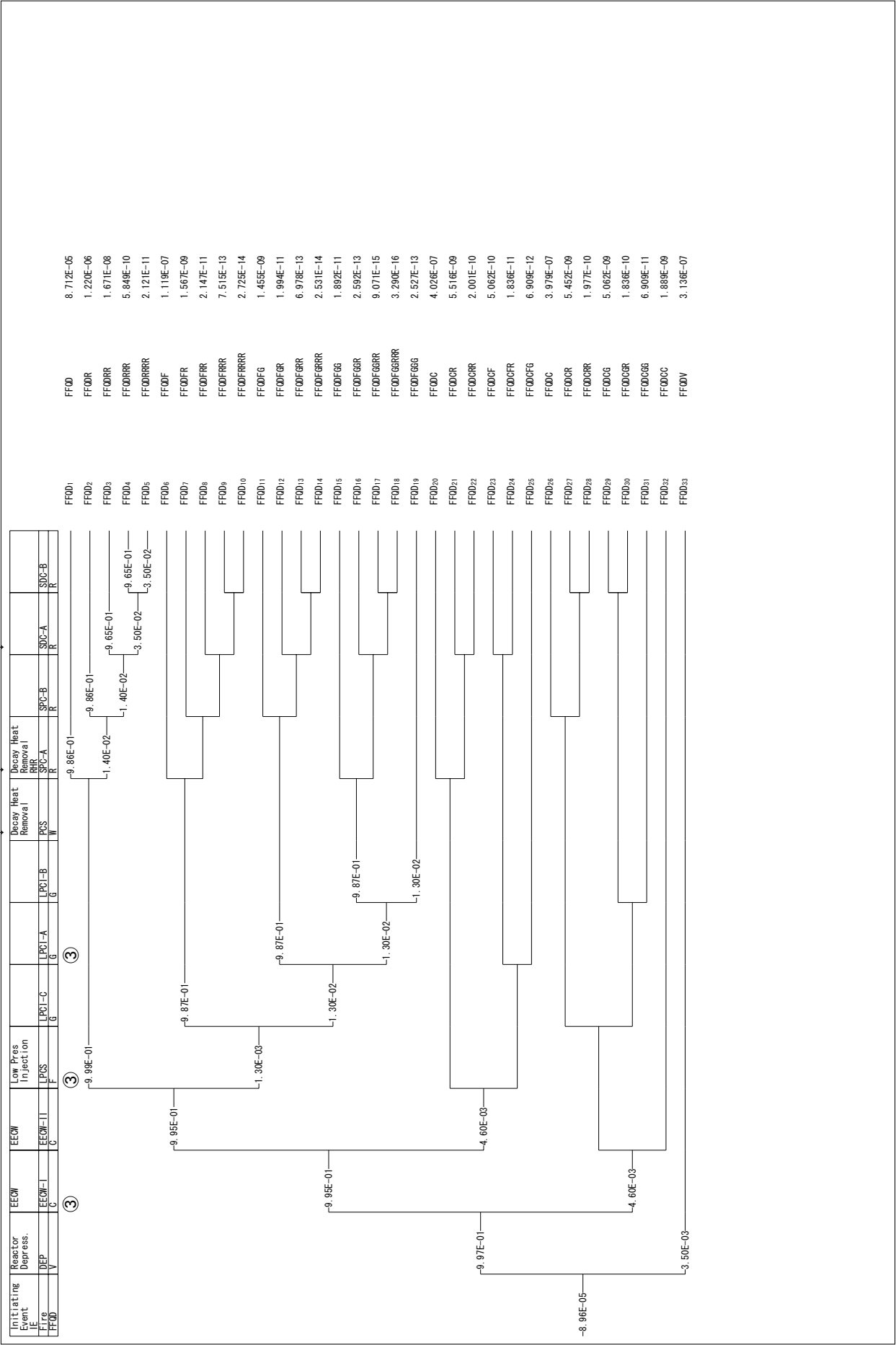


図-5.7 解析に用いたイベント・ツリー④

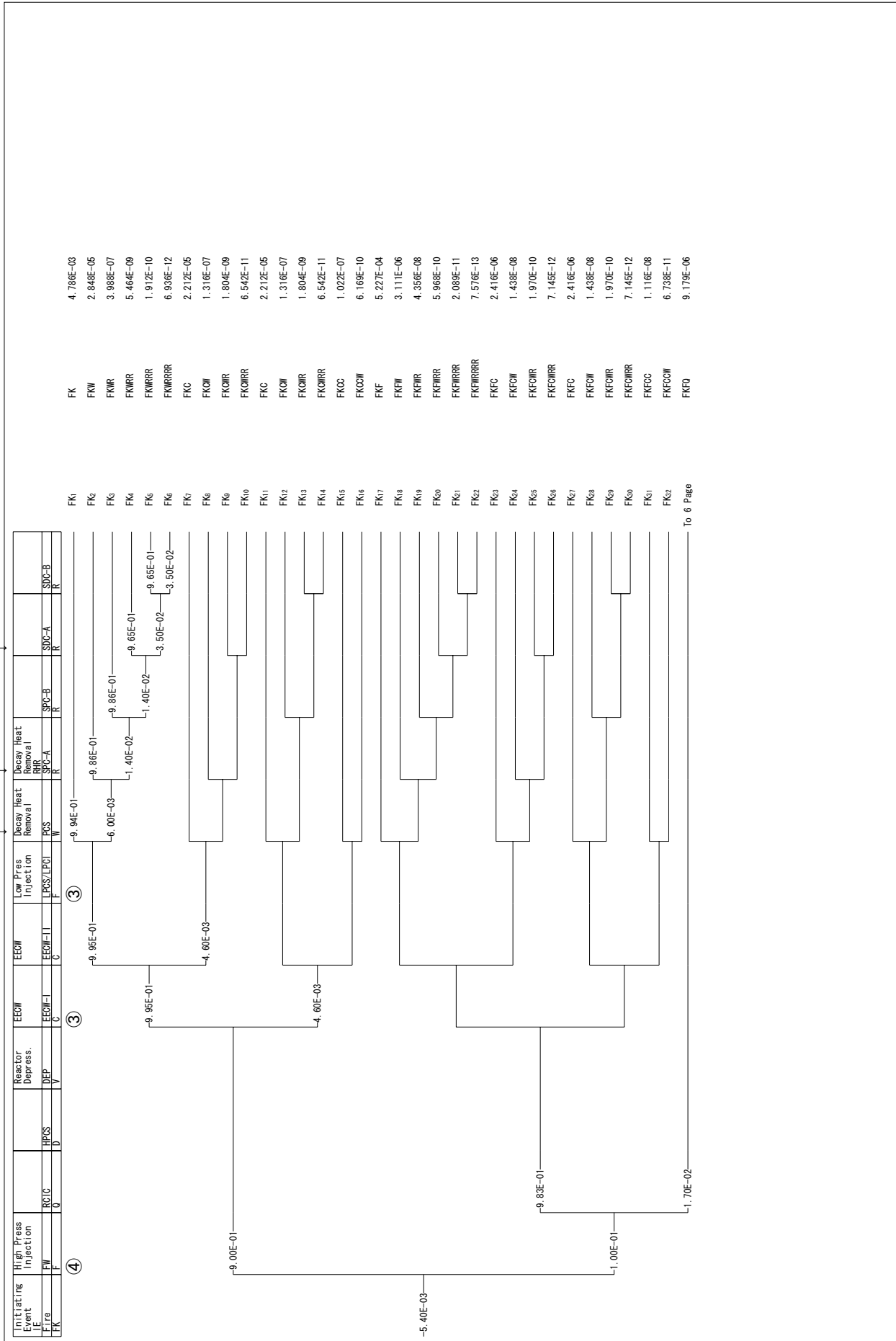


図-5.8 解析に用いたイベント・ツリー⑤

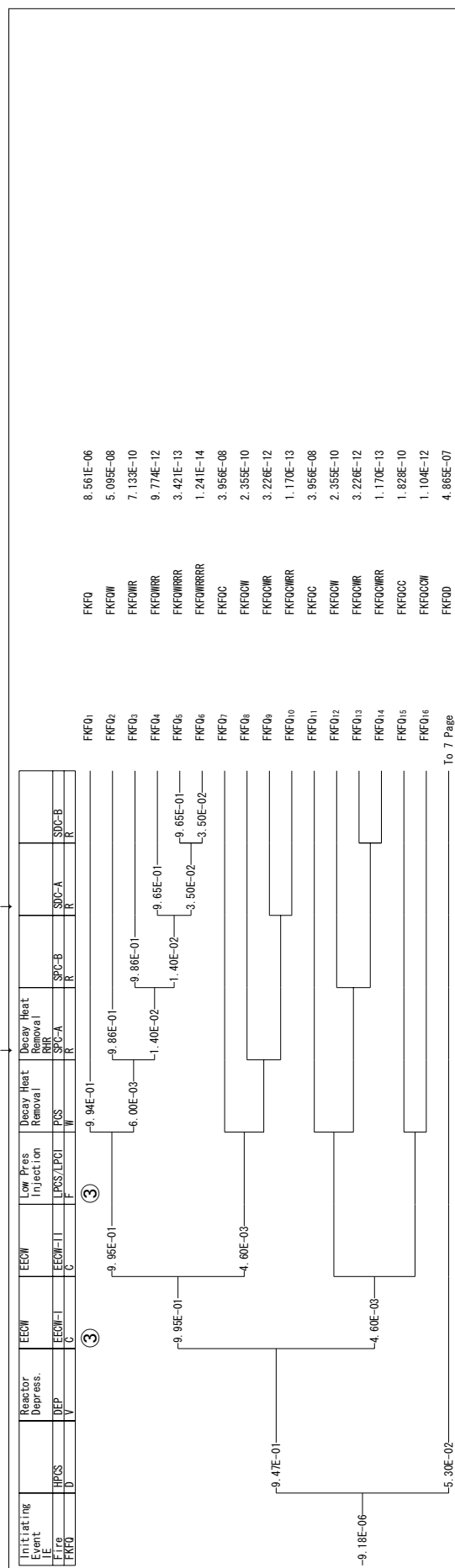


図-5.9 解析に用いたイベント・ツリー⑥

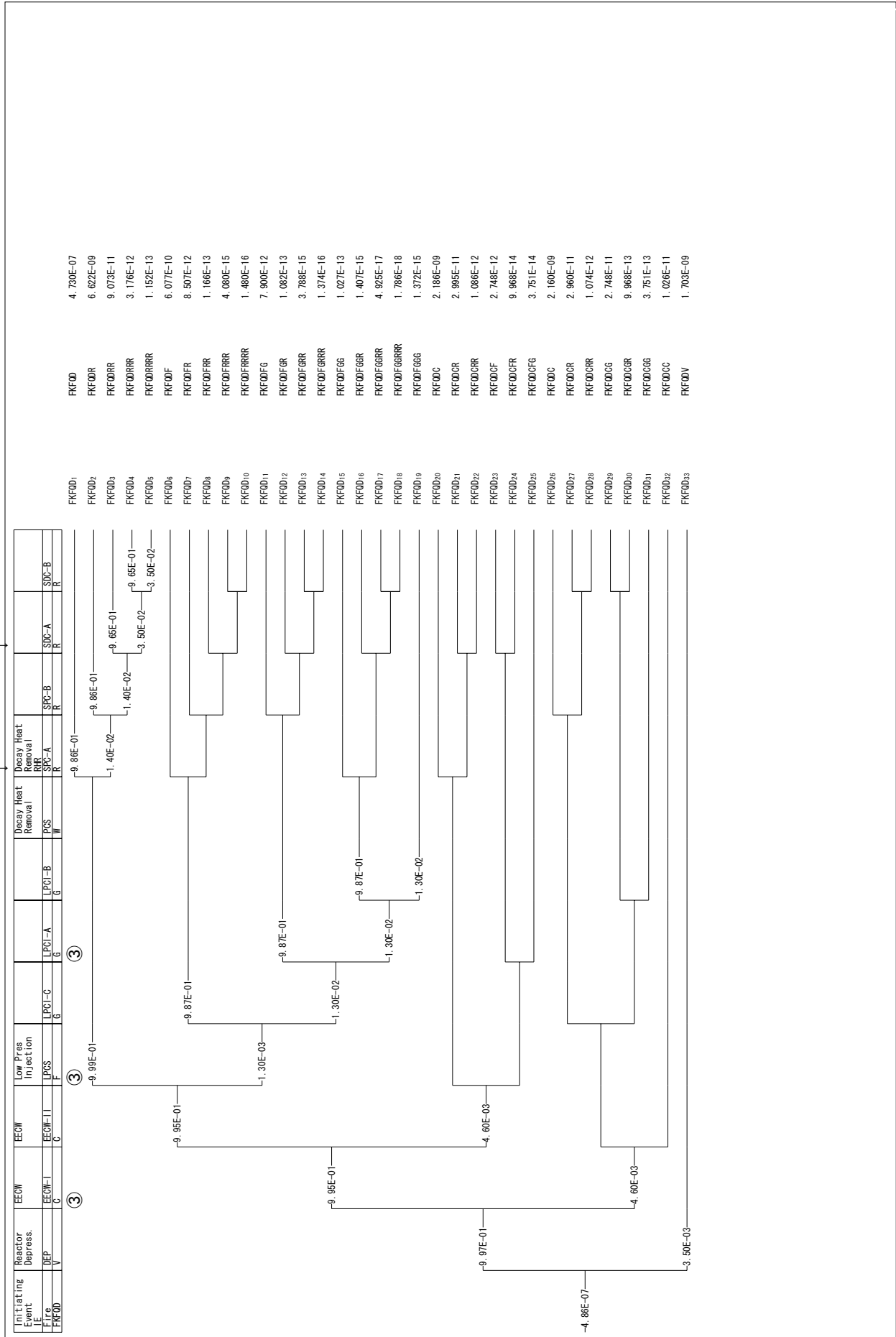


図-5.10 解析に用いたイベント・ツリー⑦

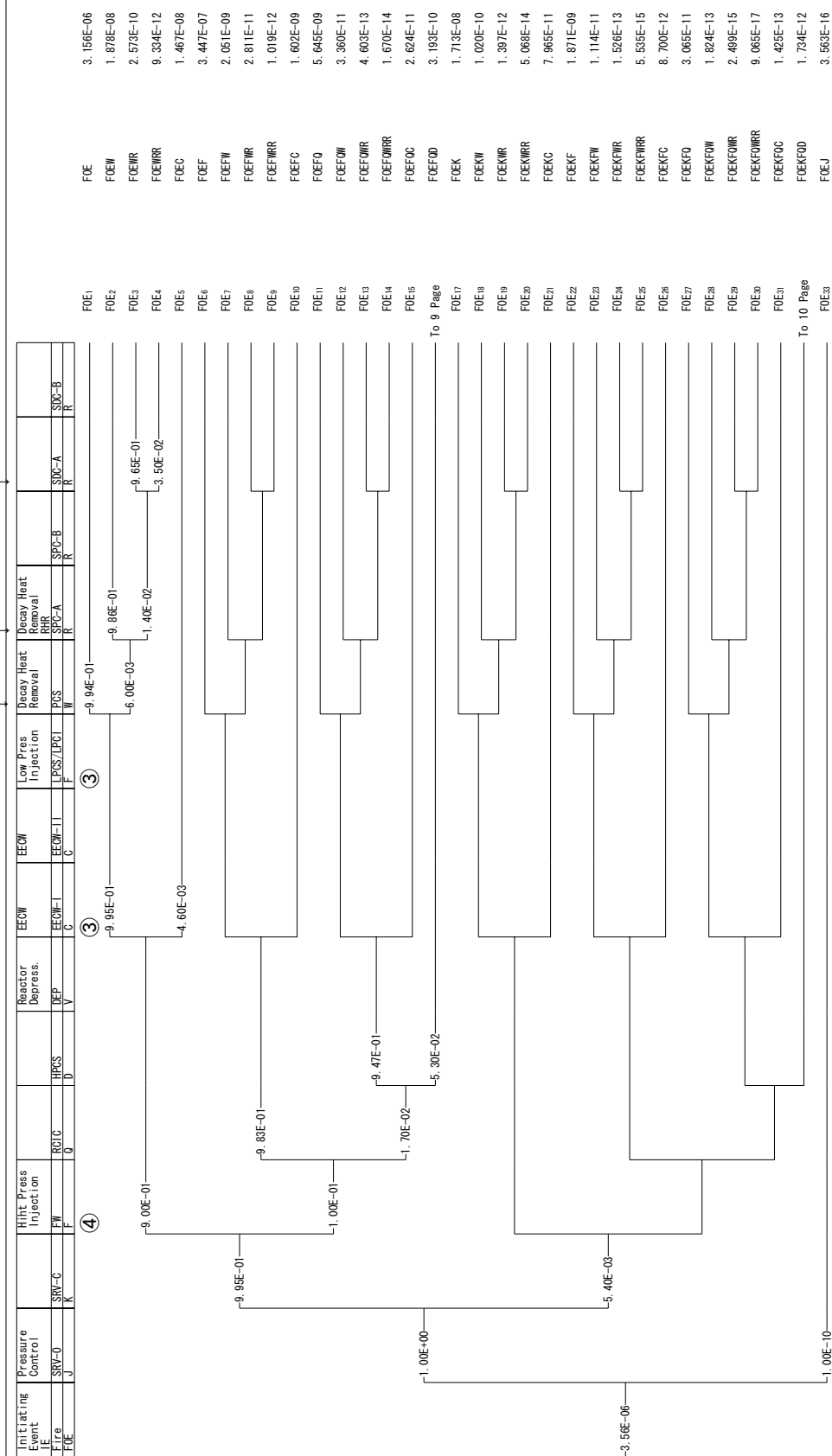


図-5.11 解析に用いたイベント・ツリー⑧

③

③

④

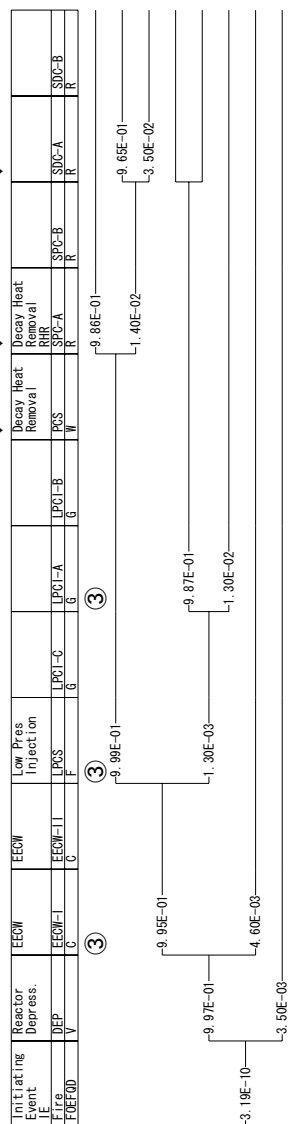


図-5.12 解析に用いたイベント・ツリー⑨



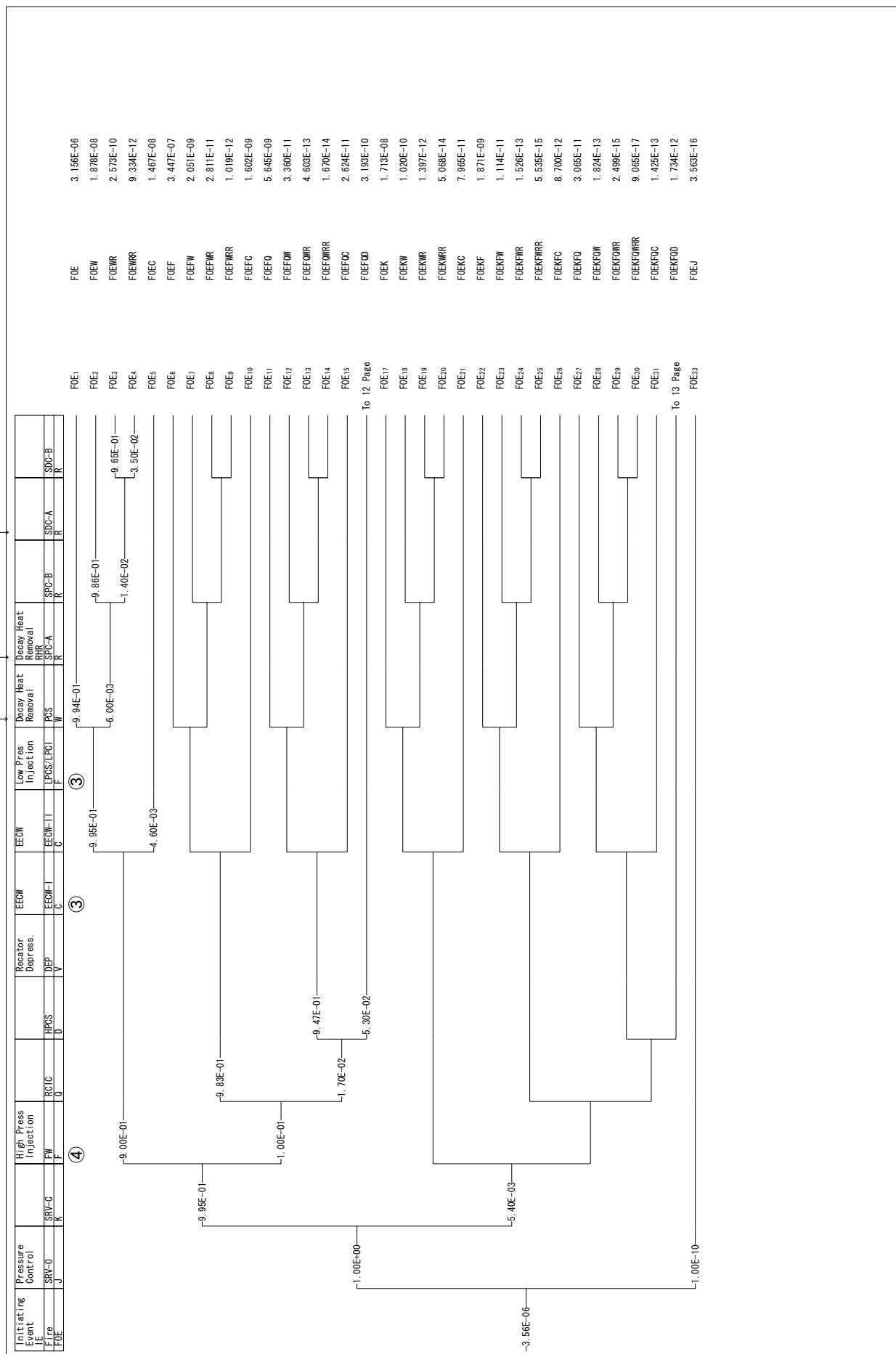


図-5.14 解析に用いたイベント・ツリー⑪

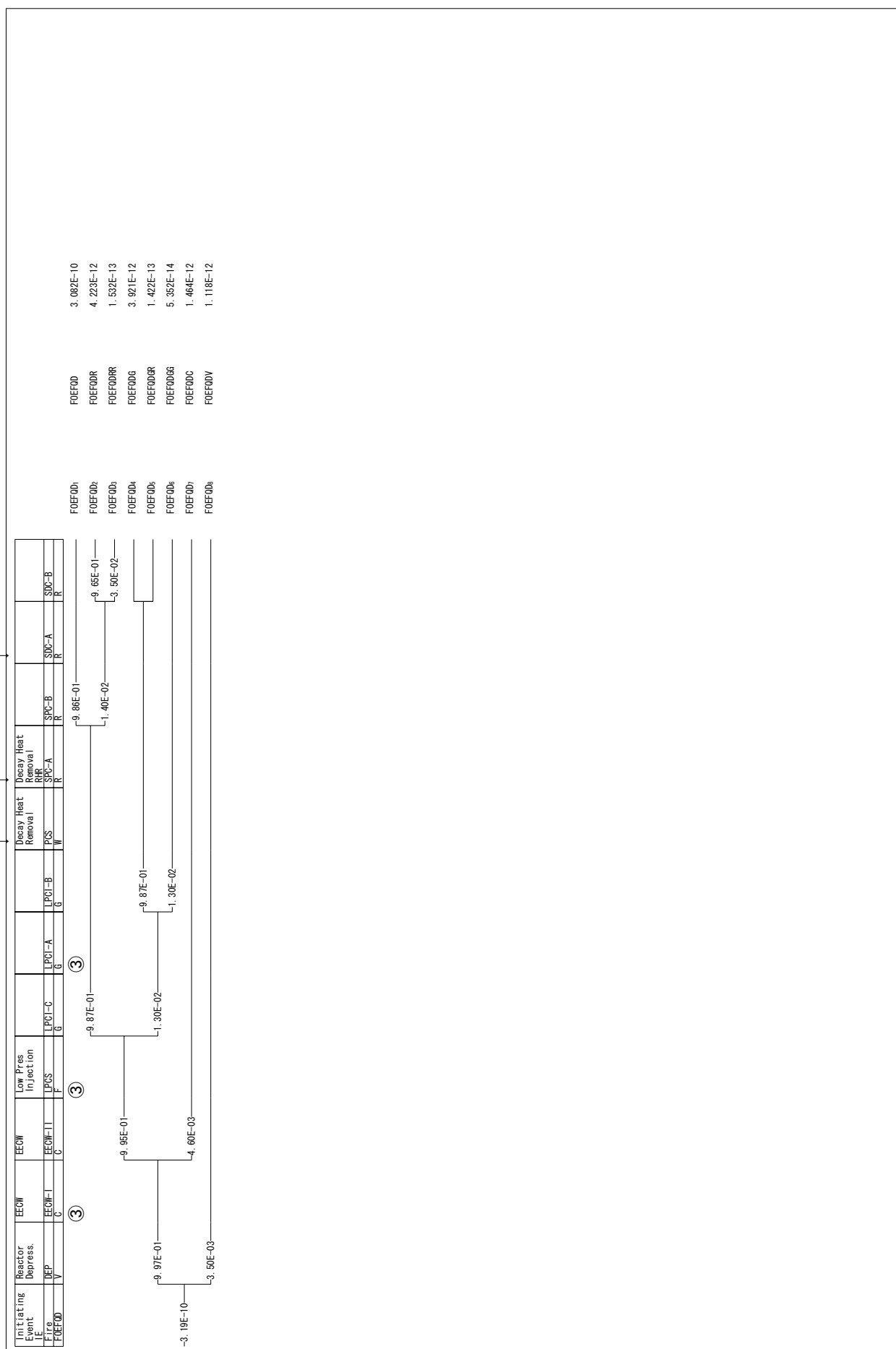


図-5.15 解析に用いたイベント・ツリー⑫



過去のデータから求めたグラフ・相関式を用いる方法もあるが<sup>21, 22)</sup>、ここでは **Siu&Apostolakis<sup>8)</sup>** のモデルを用いることとする。このモデルでは消火作業を図-5.17 の様にまとめ、各状態間の遷移時間として推定値を与えている。今回の対象区画についてこのモデルを用いて計算した結果<sup>1)</sup>を表-5.5 に示す。

5.4 解析

5.4.1 解析条件

解析条件としては、今回の解析の目的が開発したコードの有効性の確認であることを踏まえ、以下のように設定した。

- ・ 仮想的モデルプラントにおける出力運転時のレベル 1PSA。
- ・ 各種物性値等のデータは松岡らの報告書<sup>1)</sup>、および軽水炉モデルプラント地震 PSA 報告書<sup>4)</sup>を参考とする。
- ・ 外的起因事象は地震および地震による火災。
- ・ 火災の消火活動は考慮、これ以外の人的因子は考慮しない。
- ・ 今回のサンプルプラント評価においては、その目的を本研究で開発した解析コードの試計算としているため解析結果についての議論をする必要性はないと考える。
- ・ 地震加速度については **SECOM-2** コードのデータにある各機器の耐力の中央値が最小のもので 650Gal 程度であることから、開発したコードの設定値の一つである約 1/2 の 330Gal とする。これにより、あまりに大きな地震加速度では地震そのものの影響による機器の損傷が起これ、解析対象として複雑になってしまうことを避けることができ、地震誘起による火災の損傷による評価のみを扱うことができる。

- ・ 対象区画としては、スイッチ・ギア室、非常用発電機室、海水熱交換機室、制御室とする。
- ・ 地震時機器損傷評価コードの評価方法としては最高温度と、対象物の中心部での評価を基本とする。
- ・ 海水熱交換器室では、モーターの摺動部から発火する。また、この発火確率は 1、つまり故障の発生すなわち発火と考える。
- ・ 非常用発電機室では、デイトンクと発電機の間から燃料が漏れるような故障が発生すると仮定する。この場合にも、故障の発生=発火と仮定する。
- ・ 制御室では、地震により操作盤内に異物による接点不良が発生すると仮定する。これは、故障の発生 10 回に対して 1 回の発火頻度とする。
- ・ スイッチ・ギア室は、地震により分電盤内に異物による接点不良が発生すると仮定する。これは、故障の発生 10 回に対して 1 回の発火頻度とする。

各区画の発火対象機器およびその地震による機器の損傷に対する発火頻度をまとめたものを表-5.6 に示す。

以上の仮定において、開発した解析コードを用い計算を行った。計算結果の例として非常用発電機室の火災進展例について図-5-18 に示す。この

表-5.6 機器の損傷による発火頻度

| 火 災 区 画  | 損 傷 機 器  | 発火頻度 |
|----------|----------|------|
| スイッチ・ギア室 | 分電盤      | 0.1  |
| 非常用発電機室  | 発電機      | 1    |
| 海水熱交換器室  | RHRS ポンプ | 1    |
| 制御室      | 主制御盤     | 0.1  |

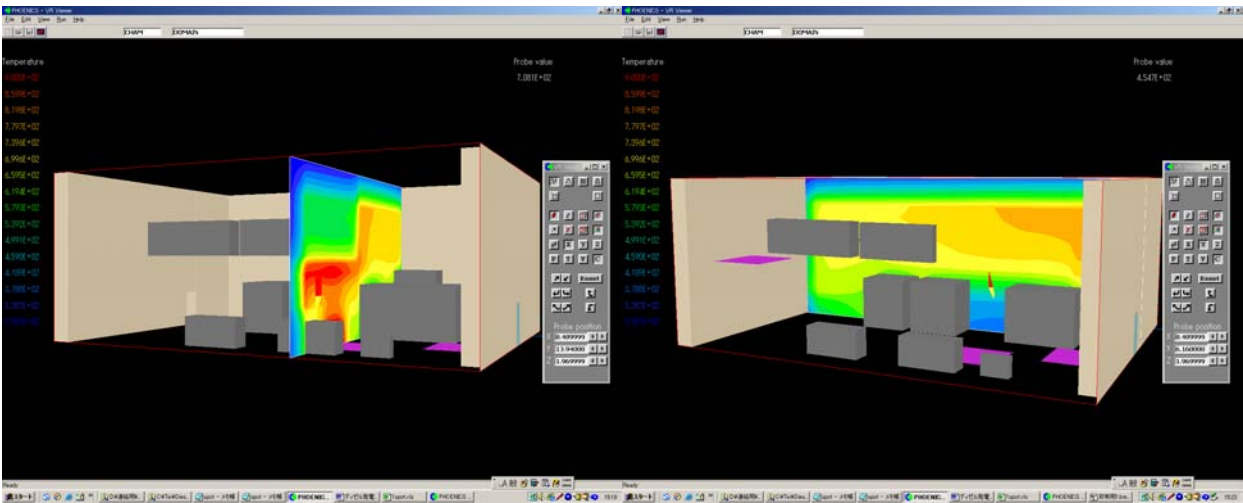


図-5.18 火災進展解析結果例

図は温度分布を示したものであり、区画の凡その温度分布を知ることができる。特にこの温度分布の図から、2階部分にあたる区画の温度上昇が認められ、発火源のある区画から他の区画への熱の移動があったことがわかる。

事故シーケンス選定の際の打ち切り値としては NUREG-1150 の値  $1 \times 10^{-8}$ /炉・年を目安とし、計算した結果から、前述のイベント・ツリー上の分岐確率を修正することにより事故シーケンスの発生確率を求めた。打ち切り値としては今回の場合、

打ち切り値 =  $1 \times 10^{-8}$  / (火災発生頻度 × 消火失敗確率)

として各ケースの場合に適用した。各区画の解析結果に対してイベント・ツリーを修正し、前述の打ち切り値より小さいシーケンスを無視して事故シーケンスを整理、集計した。

#### 5.4.2 解析結果

##### ①スイッチ・ギア室

地震により分電盤に異物が混入しこれが原因となり火災が発生する。この火災による分電盤内の温度上昇の計算結果は、発火5分後には400K付近まで温度が上昇し、その後は緩やかな温度上昇を示し30分で430K程度となる。これは、4.4火災実験3で行った火災進展解析コードのための実験の場合と比較すると、温度上昇幅は小さい(200K→150K)が高温の持続時間は明らかに長い(温度上昇中→25分)。この結果から検討すると、実験時の状況と比べケーブル近傍の温度は低いが400Kを超える高温であり、この温度の持続時間は実験時と比べむしろ長い。ケーブルが受けた熱量を単純に時間と温度の関係で考えた場合には実験時以上のものと考えられ、ケーブルは損傷していると判断すべきである。したがって、5分以降30分以内に分電盤内のケーブルは損傷したとする。これにより、外部電源供給システムの機能が失われると評価されたため、図-5.5のイベント・ツリー中の Emergency Power Supply (非常用電源) の成功分岐を削除、つまりヘディング①の分岐確率を1へと変更して解析した。

##### ②非常用発電機室

地震によりデイトンクと発電機の間から燃料が漏れるような故障が発生、発火する。この場合には、約30分で非常用発電機が設定した損傷温度に到達する結果となった。この区画内における火災の場合には、起回事象は"原子炉手動停止"となる<sup>1)</sup>。火災によりEGD(非常用発電機)1台の機能が失われ、イベント・ツリー中 EGD-I の成功分岐を削除。つまり、

ヘディング②の分岐確率を1へと変更して解析する(図-5.5~17中②のヘディング)。また、これをサポート系としている High Press Injection (高圧注水設備)、EECW(非常用機器冷却系)-I, LPCI (低圧注入設備)-C, SDC (停止時冷却モード)-A, SPC (サプレッションプール冷却モード)-A は、非常用発電機 I の機能が失われても外部電源の存在により作動可能であるため修正は不要である。

##### ③ 海水熱交換機室

地震により RHRS (残留熱除去系) ポンプ内の摺動部に異物が混入し、ポンプ自体が高温となり火災が発生する。この場合には、ポンプそのものが高温となり約35分後に損傷温度(403K)にいたる。この区画内における火災の場合にも、起回事象は"原子炉手動停止"となる。区画内にある2台の RHRS ポンプがともに機能を失い、この結果として EECW-I の機能喪失となる。これにより EGD-I (非常用発電機) も停止する。これらの2つの機能停止の結果、それぞれをサポート系としている、SDC-A, SPC-A, LPCI-A, LPCS (低圧炉心スプレー系) /LPCI の機能が失われる。イベント・ツリー中において、これらの成功分岐を削除し(図-5.5~17中③)、計算を実施した。

##### ④ 制御室

この区画においては、制御盤が何らかの意味で火災により損傷した時、それに接続されている機器類の機能がどのような影響を受けるかが問題となる。本解析では、松岡らの報告<sup>1)</sup>と同様に、以下の様に考えた。

- ・ 制御盤が火災により損傷した場合でも、種々の保護回路等があるため、この盤に接続した現に稼働中の機器がすぐに停止、機能喪失するとは考えられないので、そのまま機能を保持する。
- ・ 一方、待機中の機器の場合は起動するが、制御盤に損傷が発生したときは起動不可能と判断(別の場所にバックアップ用制御盤がある場合、現場での起動が可能な場合等種々のケースが考えられる。特に、即座に対応する必要のない系統、例えば崩壊熱除去系の様なものは系統自体に故障が起きていないので、ほぼ100%起動が可能と考えられる。本解析では、これらの要素は除外して評価。)
- ・ 電気火災の場合は、制御盤そのものから発火するため、発火直後から盤に影響があらわれ、関係する系統は機能喪失を起こす。

- ・ 火災源の大小によらず盤全体に影響が及ぶ。

以上のような仮定を置き、今回は主制御盤内に地震により異物が混入し発火原因となるとする。この場合は通常運転に支障をきたす主制御盤での火災損傷であるが、まず問題となるのは原子炉停止である。制御棒駆動系はアクチュレータの水圧により制御棒駆動水圧系のピストンを動かす。通常時励磁のソレノイド弁の保持電源が喪失すると自動的に水圧が働きスクラムが行われる。また、制御棒駆動系に対しては別の制御盤も用意されている。それ故、主制御盤の火災による損傷時にも制御棒駆動系は働くと仮定する。但し、この盤の損傷のため給水・復水系(FW, W)は機能しないと仮定する。その他の非常用冷却系、ほう酸水注入系等は別パネルであるので作動可能であるとした。

発火後の温度は 400K にも至らなかったが、スイッチ・ギア室の場合と同様高い温度が持続したことにより制御盤内のケーブルが損傷する場合が考えられる。また 4.4 火災実験 3 で行った火災進展解析コードのための実験で得られた知見としての CPU の損傷も考えられる。これは制御盤内に CPU が存在した場合、メーカーの保障する安定した作動温度を超える場合や制御盤内部で炎に触れ CPU が損傷してしまうことが考えられる。以上の点から、この場合にも主制御盤が損傷すると考える。この結果を反映したイベント・ツリーを作成するために図-5.5~17 中の④のヘディングの分岐確率を 1 に修正、成功分岐を取れないようにし、計算を行った。

以上の解析上の仮定の下にイベント・ツリーを用いた解析を行い、事故シーケンスの選定を行った。この結果から次節で炉心損傷頻度の算出（今回の場合には 1 回の地震発生時の火災による炉心損傷確率となる）を行う。

5.4.3 炉心損傷頻度の算出

以上の各節の評価結果をもとに炉心損傷頻度を算出する。炉心損傷頻度  $\phi_{cm}$  は次の式で表される<sup>23)</sup>。

$$\Phi_{cm} = \sum_i \lambda_i \cdot (r_L \cdot r_{DL} \cdot (1 - P_{SL}) + r_S \cdot r_{DS} \cdot (1 - P_{SS})) \cdot P(IE/i) \cdot \sum_j P(F_j) \cdot P_{Rj}$$

ここで

- $\lambda_i$ : 区画  $i$  内での検討対象火災発生頻度 (/区画・年)
- $r_L \cdot r_S$ : 発火源規模の大小(L, S)の割合
- $r_D$ : 機器の損傷をもたらす火災の割合
- $P_S$ : 火災の消火成功確率
- $P(IE/i)$ : 区画  $i$  内火災時における起因事象発生確率
- $P(F_j)$ : 火災原因の起因事象における炉心損傷に至るシーケンス  $j$  の発生確率
- $P_{Rj}$ : シーケンス  $j$  における回復操作失敗確率

を意味している。今回もこの式を用いて炉心損傷頻度を求めるが、今回の場合、発火源規模の大小の割合 ( $r_L, r_S$ ) については規模が一種類のため無視できる。

起因事象の発生確率は、本解析では各区画の発火条件を考慮した頻度となる。また、各事故シーケンスにおける回復操作成功確率は考慮せず評価することにした。

以上のことから、炉心損傷頻度を求めると表-5.7 の様になる。今回の結果では、操作室の結果において打ち切り値の値がシーケンス総和より多少大きな値となっているが、有効数字の関係等からこのシーケンスも評価の対象とした。また、非常用発電機室に関しては対象シーケンスは全て打

表-5.7 解析結果

| 対象区画                                  | 対象機器 | 発火確率<br>(故障確率) | 打ち切り値    | シーケンス総和  | 1 回の地震あたりの<br>炉心損傷確率 |
|---------------------------------------|------|----------------|----------|----------|----------------------|
| スイッチ・ギア室<br>非常用発電機室<br>海水熱交換器室<br>操作室 | 分電盤  | 4.00E-05       | 2.60E-04 | 1.20E-03 | 4.61E-08             |
|                                       | 発電機  | 1.47E-03       | 1.74E-05 | 9.45E-07 | 2.61E-17             |
|                                       | RHRS | 3.24E-02       | 1.93E-06 | 4.10E-05 | 2.13E-07             |
|                                       | 主制御盤 | 4.13E-04       | 2.48E-05 | 2.07E-05 | 8.35E-08             |

地震加速度 330 Gal

表-5.8 同時多発解析例

|         | 発火確率<br>(故障確率) | 打ち切り値    | シーケンス総和  | 1 回の地震あたりの<br>炉心損傷確率 |
|---------|----------------|----------|----------|----------------------|
| 操作室     | 4.13E-04       | 2.50E-05 | 5.07E-03 | 2.03E-05             |
| 海水熱交換器室 | 3.24E-02       |          |          |                      |

地震加速度 330Gal

ち切り値以下となってしまった。そのため、参考として、発生頻度上位10シーケンスの和を取り、表中に示した。これらの場合、地震加速度が大となればいずれも値は大きくなり、打ち切り値よりも大きな値となる。試算という立場からこの結果については評価できないが、解析ツールとしては有効であることがわかった。特に、今回開発した解析コード以外にも、当研究所で開発したイベント・ツリー解析ツールであるMSETが有効であった。

これらの求めた炉心損傷頻度は点推定値であるので、さらに不確実さ解析が必要となるが、今回のサンプルプラント評価の目的が前述したように開発コードの確認であるため、ここでは行わないこととする。しかしながら、地震の発生頻度、地震による火災発生頻度、火災消火確率、火災進展解析、ランダム故障によるシステム故障確率、火災障壁の損傷確率、回復操作、これらいずれにも不確実さにともなう確率分布が考えられ、これらの積で与えられている火災による炉心損傷頻度には個々の不確実さに起因する不確実さが存在している。その結果、炉心損傷頻度も一般的には確率分布で表現されることとなると考えられる。

## 5.5 同時多発火災への対応

これまでの結果から、1つの特定の機器が損傷した場合の炉心損傷確率を求めることはできた。そこで、同時多発火災、また大規模地震などの場合の多数の機器が損傷した場合の例について検討する。この場合には、プラント全体で挙げた候補の発火場所の全ての組み合わせについて開発したコードを用いて解析を行い、その結果である損傷機器の情報からイベント・ツリー解析を行うことにより対応し得ると考えられる。

今回の解析において簡単な例を検討する。5.4で得られた結果を用いて、操作室と海水熱交換器室で同時に対象機器が損傷した場合について検討する。この場合には、5.4で得られた結果からイベント・ツリーを修正するだけで対応できる。つまり、両方の結果を反映した分岐の整理を行い、対象シーケンスを整理すれば良い。具体的には図-5.5~17中の、③と④のヘディングの分岐を整理した。その結果を示したのが表-5.8である。この場合には、打ち切り値の計算等には発生確率の低い操作室の値を用いている。また、消火成功確率としては両方が成功する場合のみを想定することにより、安全性を評価するためのより厳しい条件で解析を行った。その結果、炉心損傷の確率としてはそれぞれの単独の場合よりかなり大きな値となり、今回の目的は試算ではあるが、単純に比較したとしても同時多発火災のリス

クの重要性が明らかになった。また、今回行った手法により同時多発火災リスクの評価に対応できる。

## 6. まとめ

本研究で行った地震誘起による火災のリスク評価を行うための解析手法のまとめを本章において行う。

### 6.1 得られた知見

本研究で得られた知見としては、次のものがあげられる。

- ① プラント情報の収集については、解析実施のため実プラントを訪問し必要な情報の収集を行った。また、文献等からも情報収集を行った。このような情報収集には、過去の経験が役立ち、今後の新たなプラントを対象とした解析を実施する際にも有効であると考えられる。
- ② 地震誘起火災リスク解析の手法については、従来の手法を拡張し、機器の損傷を火災のみの影響から、地震による機器の損傷、また地震の影響による機器の発火、さらに発生した火災による機器の損傷の評価を行う方法を検討した。この手法により、地震誘起火災リスクの解析は実施可能であると思われる。
- ③ 地震と火災発生、進展を統合した解析コードを開発した。2つの解析コードを共通のインターフェースとなるよう留意して開発した。この共通のインターフェースによって、サンプルプラント評価の解析作業もスムーズに行うことができ、その有効性が示された。
- ④ 地震時機器損傷評価コードについては、この分野における経験が無いため、既存の日本原子力研究所の開発したSECOMコードを利用した。これにより、地震時の機器の損傷評価の機能が開発でき、サンプルプラント評価でも有効に活用できた。
- ⑤ 火災進展解析コードについては、汎用の流体解析コードを用いることにより、従来のデータシート形式から、視覚的な情報によりレイアウト、計算結果を理解することができるものが開発できた。また、サンプルプラント評価でも有効に活用できた。
- ⑥ 火災進展解析コードの開発のための火災実験では、実験と計算との比較、検討を行うことにより熱伝達係数等のパラメータの設定、見直しができ、実験の有効性が認められた。

- ⑦ 同時多発の火災に対する解析方法としては、プラント全体で挙がった候補の発火場所について全ての組み合わせの検討を行うことにより対応し得ると考えられる。この際に開発したコードを有効に用いることができると考えられる。今回は、参考として2箇所の場合について検討したが、この結果からも解析方法としては問題がないと考えられ、開発した解析コードも有効であった。また、同時多発火災の検討の重要性を示す結果となった。

## 6.2 今後の検討課題

今後の検討課題として、主なものは以下のようなものである。

- ① 開発した火災進展解析コードについては、リスク評価に用いるためには計算時間が長く、改善の余地がある。
- ② 地震により損傷した機器が発火する場合、損傷と発火の関係は依然として検討の余地があり、この関係を正確に捉え、また定量化することが望ましい。
- ③ 火災進展解析コードの実験については、今回はプラントをスケールダウンしたモデルを用いたが、より実プラントに近い実験の実施が望ましい。また、配備するケーブル等も実プラントと同じものが望ましい。
- ④ 解析作業を行う場合、各種機器の損傷確率等のデータが十分に整備されてはいない。解析に必要な各種データの整備が望まれる。
- ⑤ 火災リスク評価の観点から、消火作業の評価手法は確立されていない。今回用いた消火作業も幾つか提案されている手法の一つにすぎない。消火作業の評価手法の確立が望まれる。

## 謝辞

本研究は、文部科学省国立機関原子力試験研究費により平成11年度より5年間に渡り行われたものである。

## 参考文献

- 1) 松岡 猛他：火災リスク評価手法に関する検討 (I)～(II)、運輸省船舶技術研究所成果報告書(受託研究報告書)、(1992,1993)
- 2) 松岡 猛：確率論的安全評価のためのシステム信頼性解析手法 GO-FLOW、(株)CRC 総合研究所 (1996年)
- 3) 三友 信夫他：確率論的安全評価における火災リスク評価手法(7)-COMPBRNを用いた壁面塗料の火災挙動(2)、日本原子力学会 1994 年秋の大会予稿集、B2 (1994)
- 4) 日本原子力研究所リスク評価解析研究室：軽水炉モデルプラント地震 PSA 報告書、JAERI-RESEARCH 99-035 (1999)
- 5) 原子力安全研究協会：軽水炉発電所のあらまし 原子力安全研究協会 (1984)
- 6) NUREG/CR4586 SAND86-0300, User's Guide for a Personal Computer Based Nuclear Power Plant Fire Data Base (1988)
- 7) NUREG/CR-4566 ORNL/TM-1005, COMPBRN III- A Computer Code for Modeling Compartment Fires (1986)
- 8) Nathan Siu and George Apostlakis: A Methodology for Analyzing the Detection and Suppression of Fires in Nuclear Power Plant, Nuclear Science and Engineering, Vol.94 (1988) pp.213-226
- 9) NUREG-1150 Severe Accident Risks: An Assessment of Five U.S. Nuclear Power Plant (1989,1990)
- 10) N.MITOMO etc.: Development of Fire Risk Assessment Method Caused by Earthquake (I), Proceedings of International Topical Meeting, PSAM-V (2000) pp.2105-2109
- 11) T. Oikawa, etc: Development of Systems Reliability Analysis Code SECOM-2 for Seismic PSA, Reliability Engineering and System Safety, Vol.62, No.3 (1998) pp.251-271
- 12) N.MITOMO etc: Development of Fire Risk Assessment Method Caused by Earthquake (II), Proceedings of International Topical Meeting PSAM-VI (2002)
- 13) 日本機会学会：伝熱工学資料 (改訂第4版)、日本機会学会、1986 pp.322
- 14) N.MITOMO etc.: Development of Fire Risk Assessment Method Caused by Earthquake (III), Proceedings of International Topical Meeting, PSAM-VII (2004) pp.1239-1244
- 15) <http://www.nucia.jp>
- 16) 関西電力(株)神戸支店：兵庫県南部地震 設備被害記録、1996
- 17) 社団法人 日本電気協会 原子力専門部会：原子力発電所の火災防護指針 JEAG 4607-1999 (1999)
- 18) Nuclear-Power-Plant Fire-Loss Data, EPRI
- 19) 渡辺 憲夫他：BWRにおける外部電源喪失起因のイベントツリー解析 JAERI-M-89-025 (1989)
- 20) T. MASTUOKA etc.: Event Tree Analysis of Ship Collision Accident, Proceeding of PSA2002 (2002) pp.135-139
- 21) Severe Accident Risk Assessment Limerick Generating Station, Philadelphia Electric Company (1983)
- 22) NUREG/CR-5088 SAND88-0177, Fire Risk Scoping Study: Investigation of Nuclear Power Plant Fire Risk, Including Previously Unaddressed Issues (1989)
- 23) 松岡 猛他：火災リスク評価手法に関する検討 (I)、運輸省船舶技術研究所成果報告書(受託研究報告書)、(1992) pp.47