

RREP-2021-1002

# 安全研究成果報告

S/NRA/R Research Report

## 火災防護に係る影響評価に関する研究

Research on Fire Hazard Analysis for Protection of Nuclear Power Stations

梶島 一 加藤 敬輝 松田 航輔 笠原 文雄

KABASHIMA Hajime, KATO Takaki, MATSUDA Kosuke, and KASAHARA Fumio

システム安全研究部門

Division of Research for Reactor System Safety

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,

Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

令和3年6月

June 2021

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究プロジェクトの活動内容・成果をとりまとめたものです。

なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ システム安全研究部門  
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル  
電 話：03-5114-2223  
ファックス：03-5114-2233

## 火災防護に係る影響評価に関する研究

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ  
システム安全研究部門

梶島 一 加藤 敬輝 松田 航輔 笠原 文雄

### 要 旨

火災は共通原因故障を引き起こす起因事象の中でも重要な事象の一つであることから、様々な火災リスクの一層の低減を図るための研究を継続的に行うことが重要である。平成 23 年度から平成 28 年度にかけて実施した先行の研究プロジェクトでは、リスクを評価する手法の整備、評価に必要なデータを取得するための試験等を実施するとともに、東北電力女川原子力発電所 1 号機の高圧電源盤で発生したような高エネルギーアーク損傷（以下「HEAF」という。）時のアーク放電に起因する火災の延焼メカニズムの解明を行うなどして、火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法を整備した。

本研究プロジェクトでは、上記の先行研究の成果を踏まえ、原子炉施設に対する火災防護規制の高度化への反映を目的に、「HEAF の影響評価」、「電気ケーブルの熱劣化評価」及び「火災影響評価手法・解析コード等の整備」を行った。

HEAF の影響評価については、HEAF の爆発圧力に初期のスパイク的な圧力とその後の安定的な圧力の 2 種類が存在すること、また、そのメカニズムとして前者は空気の熱膨張、後者は金属ヒュームの発生によるものであることが示唆された。

電気ケーブルの熱劣化評価においては、試験の方法を検討するとともに原子力発電所で使用されているいくつかの電気ケーブルについて試験を行った。その結果、電気ケーブルは、火災時の熱による絶縁体の損傷により絶縁抵抗が急激に低下すること、また、損傷速度はアレニウスの式で整理できることが確認された。

火災影響評価手法・解析コード等の整備においては、現状、解析モデルの妥当性が十分に確認されていないケーブル束のモデル化を検討した。また、実機解析への適用を目的とした HEAF に関する爆発のモデル化を進めるとともに、爆発現象に対応する解析コードの改良・整備を新たに開始し、試験結果と解析結果の差異の要因について見通しを得た。

以上の知見は原子炉施設に対する火災防護規制の高度化に資するための有益な情報になることが期待される。なお本研究の一部は、国立大学法人筑波大学、国立大学法人山口大学及び国立大学法人金沢大学への委託研究事業により行われた。また、HEAF 試験の一部は、米国 NRC との研究協力の下で米国 KEMA 試験場において実施された。

## **Research on Fire Hazard Analysis for Protection of Nuclear Power Stations**

KABASHIMA Hajime, KATO Takaki, MATSUDA Kosuke, and KASAHARA Fumio  
Division of Research for Reactor System Safety,  
Regulatory Standard and Research Department,  
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

### Abstract

Continuous safety research on fire protection helps minimize fire risks because fire is a serious initiating event that results in common cause failures. In the preceding fire research project in the fiscal years from 2011 to 2016, quantitative methods were developed to evaluate the effectiveness of fire protection measures. Specifically, fire risk evaluation methods were developed and experiments were conducted to obtain necessary data. Further, the fire propagation mechanism caused by high energy arcing fault (HEAF) events that occurred in the high-voltage (6900 V) metal clad switchgears at unit 1 of Onagawa Nuclear Power Station (NPS) was investigated.

In this project, to enhance the fire safety regulations on NPS, experimental and analytical studies have been performed for evaluating HEAF, for thermal deterioration of electrical cables and for developing fire hazard analysis methods and computer codes.

In the HEAF evaluation, it was found that there are two kinds of pressure source, i.e., initial pressure spike followed by the stable pressure. These pressure behaviors might be caused by the thermal expansion of air and generation of metallic fumes.

In the thermal deterioration of electrical cables, the experiments were performed using several cables used in the NPS. The results showed that the insulation resistance of cable was steeply deteriorated by the failure of insulant due to the radiation heat from fire, and the rate of degradation is expressed by the Arrhenius equation.

In the development of fire hazard analysis methods and computer codes, a model has been developed for burning cable bundles on the trays. The model development has also been initiated for the HEAF explosive phenomena and the first results of comparison between the analyses and the experiments showed some insights on the phenomena.

These findings of this study could be expected to give effective information for enhancing the fire safety regulations on NPS.

Part of these studies were conducted by University of Tsukuba, Yamaguchi University and

Kanazawa University under the auspices of the Nuclear Regulation Authority. Also, part of HEAF tests were conducted in collaboration with U.S. NRC at KEMA in U.S.

## 目次

目次	IV
1. 序論	1
1. 1 背景	1
1. 2 目的	3
1. 3 全体行程	3
2. 本論	5
2. 1 研究の概要	5
2. 2 高エネルギーアーク損傷 (HEAF) の影響評価	6
2. 2. 1 HEAF の概要	6
2. 2. 2 HEAF 試験	7
2. 2. 3 試験結果	10
2. 2. 4 HEAF の爆発メカニズムと影響範囲	12
2. 3 電気ケーブルの熱劣化評価	13
2. 3. 1 電気ケーブルの熱劣化の概要	13
2. 3. 2 電気ケーブルの熱劣化試験	14
2. 3. 3 電気ケーブルの熱劣化試験結果	15
2. 3. 4 電気ケーブルの熱劣化メカニズムと絶縁低下	18
2. 4 火災影響評価手法・解析コード等の整備	19
2. 4. 1 マルチルーム火災試験解析	19
2. 4. 2 ケーブルトレイ火災試験解析	20
2. 4. 3 FDS における電気ケーブル燃焼モデル検討	23
2. 4. 4 可燃性液体の液面燃焼時における燃焼挙動評価	25
2. 4. 5 HEAF の爆発現象モデルの検討	27
2. 4. 6 HEAF の爆発現象モデルの整備・改良	28
3. 結論	30

3. 1 成果の要点 .....	30
3. 2 目的の達成状況.....	30
3. 3 成果の公表 .....	30
3. 3. 1 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表 .....	30
3. 3. 2 委託先等による公表.....	31
3. 4 成果の活用等 .....	31
3. 5 今後の課題等 .....	31
執筆者一覧 .....	36

## 表 目 次

表 2.2.2.1 HEAF 試験の計測項目一覧 .....	9
--------------------------------	---

## 目 次

図 1.3.1	本研究の全体行程図	4
図 2.2.2.1	標準サイズの試験体	7
図 2.2.3.1	HEAF 試験の一例	10
図 2.2.3.2	HEAF の爆発圧力の一例	10
図 2.2.3.3	図 2.2.3.2 の各圧力(a~f)における高速度ビデオカメラの映像	11
図 2.2.4.1	HEAF の爆発現象における影響範囲の一例	12
図 2.3.1.1	電気ケーブル熱劣化試験装置	14
図 2.3.1.2	電気ケーブル熱劣化試験の一例	14
図 2.3.3.1	制御ケーブルの熱劣化試験結果の一例	15
図 2.3.3.2	図 2.3.3.1 のアレニウスプロット	15
図 2.3.3.3	新品と経年化を模擬した電気ケーブルの燃焼試験	16
図 2.3.3.4	新品と経年化を模擬した電気ケーブルの昇温時の絶縁抵抗測定	17
図 2.4.1.1	FDS におけるマルチルーム火災解析モデル	19
図 2.4.1.2	解析開始 80 秒後の煙の流動状況	19
図 2.4.1.3	解析開始 80 秒後の室内温度分布	20
図 2.4.2.1	FDS における多段ケーブルトレイ火災試験解析モデル	21
図 2.4.2.2	発熱速度の時間変化	21
図 2.4.2.3	各ケーブルトレイ中心の温度の時間変化	22
図 2.4.2.4	3 段目ケーブルトレイの x 方向の各測定点における温度の時間変化	22
図 2.4.2.5	解析開始後 350 秒におけるケーブルトレイ周辺の速度場	22
図 2.4.2.6	各開放率における発熱速度の時間変化	23
図 2.4.2.7	開放率 50%とした場合の解析開始後 350 秒におけるケーブルトレイ周辺の速度場	23
図 2.4.3.1	未劣化及び経年劣化処理を施した電気ケーブル構成材の示差熱・熱重量分析結果	24
図 2.4.4.1	液面燃焼試験体系及び PIV 測定体系	25
図 2.4.4.2	ガラス容器における液面燃焼時の速度場の時間変化	26

図 2.4.4.3	ステンレス容器における液面燃焼時の速度場の時間変化.....	26
図 2.4.5.1	アーク放電モデル.....	27
図 2.4.5.2	金属電極の蒸発量に係る解析結果.....	28
図 2.4.6.1	モデル体系の略図.....	28
図 2.4.6.2	爆発圧力における実測値と解析値の比較例.....	29

## 略 語 表

AUTODYN	ANSYS AUTODYN	衝撃解析コード
FARSITE	Fire Area Simulator	森林火災解析コード
FDS	Fire Dynamics Simulator	火災解析コード
HEAF	High Energy Arcing Faults	高エネルギーアーク損傷
HRR	Heat Release Rate	発熱速度
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	米国電気電子学会
NRC	Nuclear Regulatory Commission	米国原子力規制委員会
NUREG/IA	NUREG-Series Publications, International Agreements	NRC 技術報告
OECD/NEA	Organization for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency	経済協力開発機構/原子力機関
OECD/NEA FIRE	OECD/NEA Fire Incidents Records Exchange Project	OECD/NEA 原子炉施設の火災事例情報交換プロジェクト
OECD/NEA HEAF	OECD/NEA High Energy Arcing Fault Events Project	OECD/NEA 高エネルギーアーク損傷試験プロジェクト
OECD/NEA PRISME	OECD/NEA Propagation d'un Incendie pour des Scénarios Multilocaux Elémentaires or Spread of a Fire for Multi room elementary Scenarios	OECD/NEA マルチルーム火災試験プロジェクト
kp	kp Factor	空気加熱割合
PIV	Particle Image Velocimetry	粒子画像流速測定
ZOI	Zone of Influence	影響範囲

## 用語の定義

高エネルギーアーク 損傷	遮断器や開閉器などの通電された導体間、または通電された部品とアースの間に大電流のアーク放電が発生し、熱、光、金属の蒸発及び圧力上昇を伴って、急激なエネルギーの放出が起こる事象として特徴付けられる爆発性の電気故障。
米国 KEMA 試験場	米国ペンシルベニア州にある電気関連の試験場。OECD/NEA HEAF プロジェクト試験も本試験場で実施されている。
金属ヒューム	金属蒸気及び金属蒸気の凝集物
短絡	電線同士が負荷を経由せずにつながってしまうこと（「ショート」ともいう。）。酷いヤケドを伴う危険や機器の損傷（焼損）をもたらす場合がある。
地絡	電気が本来流れるところを通らず大地に流れてしまうこと。感電による心停止や通信障害をもたらす場合がある。
ホットショート	通電された導体と別の通電されていない導体間で短絡(ショート)すること。経路の抵抗のため短絡ほどの高電流は発生しない。
電気ケーブルの熱劣化	電気ケーブルが熱により劣化する現象。熱劣化すると絶縁体の絶縁抵抗が低下する。計装・制御ケーブルの熱劣化の場合には、誤信号を発信する可能性がある。熱劣化が進むと短絡・地絡・ホットショートするおそれがある。
コーンカロリメータ	試料の燃焼時の発熱量などを測定するための装置。国際基準の燃焼試験装置であり、実際の火災性状を模擬した試験を行うことが可能。
アレニウスの式	ある温度での化学反応速度を予測する式。
アレニウスプロット	反応モデルがアレニウス式で表され、反応速度式の頻度因子と活性化エネルギーを見積もるために実験データをプロットしたもの。
粒子画像流速測定法	流体中に混入したトレーサー粒子の粒子画像により、2次元平面内の速度及び方向を、非接触で求めることができる流体計測手法。気流・水流の動きを可視化し、解析を行うことができる。

## 1. 序論

### 1. 1 背景

火災は共通原因故障の起因事象の中でも重要な事象の一つであることから、様々な火災事象（火災起因の事象も含む）について一層のリスク低減を図るための研究を継続的に行う必要がある。

先行の研究プロジェクトである「火災防護対策の高度化に係わる調査・試験」<sup>1</sup>では、平成23年度から平成28年度にかけて原子炉施設に対する火災防護規制の高度化を目的に、「火災試験データベースの整備」、「火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法（以下「火災影響評価」という。）の高度化研究」等を行った。火災試験データベースの整備においては、従来米国等で収集・整備された可燃物データを用いていたことから、リスク評価の精度向上のために国内の原子力発電所で使用されている可燃物の発熱速度、輻射熱、発火温度等の火災試験データ等を整備した。また、火災影響評価手法の高度化研究においては、火災影響評価ガイド類の評価ツールである火災解析コード(FDS)及び森林火災解析コード(FARSITE)の妥当性確認を行うとともに、東北電力女川原子力発電所1号機の高圧電源盤で発生したような高エネルギーアーク損傷（以下「HEAF」という。）時のアーク放電に起因する火災の延焼メカニズムの解明等を行うことにより、火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法及びリスク評価手法を高度化した。特に HEAF 試験の一部は、米国 NRC との研究協力の下で米国 KEMA 試験場において実施し、アーク放電に起因する火災に対して、火災が発生するアークエネルギーのしきい値の存在を明らかにした。先行安全研究プロジェクトの成果は、「実用発電用原子炉及びその付属施設の火災防護に係る審査基準」<sup>2</sup>、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」<sup>3</sup>、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」<sup>4</sup>及び「高エネルギーアーク損傷（HEAF）に係る電気盤の設計に関する審査ガイド（以下「HEAF 審査ガイド」という。）」<sup>5</sup>の作成に活用された。

本研究プロジェクトでは、先行研究の成果を踏まえ、課題を整理するとともに、上記ガイド類の見直しの要否の検討に向けた研究として、「HEAF の影響評価」、「電気ケーブルの熱劣化評価」及び「火災影響評価手法・解析コード等の整備」を行った。本研究で実施した具体的な研究項目の背景は、以下のとおりである。

#### （1）HEAF の影響評価

国際的な火災事象を取りまとめている OECD/NEA/FIRE データベースプロジェクトでは、炉心損傷に至る可能性の高い火災事象の一つとして、HEAF を抽出している<sup>6</sup>。HEAF は、その現象の複雑さ及び影響の重大さから国際的に注目されており、OECD/NEA では国際共同研究プロジェクトが進行中である。HEAF には第一段階における爆発現象と第二段階におけるアーク火災がある<sup>7-12</sup>。第二段階におけるアーク火災への対応については、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ及び OECD/NEA プロジェクトの試験研究によりその発生メカニズムの解明等が進み、平成29年度第25回原子力規制委員会（平成29年7月19日）

において、高エネルギーアーク損傷に係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等の改正と審査ガイドの新規制定が決定された（同年 8 月 8 日付けで公布・施行<sup>13)</sup>。一方、アーク放電初期に発生する爆発現象に関しては、「今後、更なる知見の蓄積により、より広範囲への考慮が必要とされた場合に、さらなる規制基準等の見直しを行うものとする。」とされている<sup>13)</sup>。したがって、まだ十分な知見が得られていない爆発の影響範囲に係る知見を拡充するため試験研究を実施することが重要である。

### （2）電気ケーブルの熱劣化評価

これまでの電気ケーブルの火災試験では、主に発火した電気ケーブル又は隣接ケーブルへの延焼性の確認等を行ってきた<sup>1)</sup>。一方、火災源近傍又は高温ガス中に存在する電気ケーブルの絶縁体では、その熱により絶縁抵抗が急激に低下し<sup>14)</sup>、特に計装・制御ケーブルの場合には誤信号を発信する可能性がある。また、電気ケーブルの熱劣化（損傷）により絶縁体の絶縁抵抗は更に低下し<sup>14)</sup>、短絡・地絡・ホットショートするおそれがある。さらに、熱が加え続けられると電気ケーブル自体が難燃性であっても発火し火災源になり得る。以上から、電気ケーブル火災に至る前までのケーブルの熱劣化に伴う挙動は、原子炉施設の安全にとって脅威の一つと成り得るため、電気ケーブルの熱劣化に係る評価手法を整備することが重要である。

### （3）火災影響評価手法・解析コード等の整備

火災影響評価手法・解析コード等を利用することにより、火災防護対策の有効性に関する情報が得られる。特に原子力発電所での火災事象に対しては、事象進展の分析・把握による火災防護対策の検討、火災リスクの高い区域（区画）での火災影響（火災防護対象機器の損傷可能性等）の詳細解析等に有効なツールになると考えられる。また、HEAF の第一段階の爆発現象の詳細解析にも有用である。

## 1. 2 目的

これまでの火災防護に係る安全研究の成果を活用し制定された「実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準」<sup>2</sup>、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」<sup>3</sup>、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」<sup>4</sup>及び「HEAF 審査ガイド」<sup>5</sup>の見直しの要否の検討に必要な知見を取得することが本研究の目的である。本研究で実施した具体的な研究項目ごとの目的は、以下のとおりである。

### (1) HEAF の影響評価

HEAF の爆発現象に係る試験データ、知見等を拡充する。

### (2) 電気ケーブルの熱劣化評価

加熱による計装・制御ケーブルの誤信号及び電気ケーブルの絶縁体が損傷することによる短絡・地絡・ホットショート等に係る電気ケーブルの熱劣化に関する試験データ、知見等を拡充する。

### (3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備

今後の火災防護に係る規制の高度化等に資する火災影響評価手法・解析コード等を整備する。

## 1. 3 全体行程

本研究は平成 29 年度から令和 2 年度にかけて、以下の項目について試験・解析等を実施した。

### (1) HEAF の影響評価

HEAF の影響評価については、爆発現象の最大圧力・圧力上昇速度の把握のため、平成 29 年度には試験体の内容積等を変えた HEAF 試験を実施した。また、平成 30 年度には試験体の開口部（閉じ込め性）等を変えた HEAF 試験を、令和元年度には試験体の開口位置等を変えた HEAF 試験をそれぞれ実施し、爆発現象に係る知見を拡充した。令和 2 年度には、HEAF 試験で取得したデータの分析を行い、成果を取りまとめた。なお、HEAF 試験の一部は、米国 NRC との研究協力の下で米国 KEMA 試験場において実施した。

### (2) 電気ケーブルの熱劣化評価

電気ケーブルの火災時の熱劣化評価については、電気ケーブルの絶縁体が損傷することによる短絡・地絡・ホットショート等の把握のために熱劣化試験を国立大学法人筑波大学への委託研究事業で実施した。平成 29 年度には原子炉施設で使用される電気ケーブルの種類を変えた熱劣化試験を、平成 30 年度にはトレイ内での電気ケーブルの配置を考慮した熱劣化試験を、令和元年度には新品と経年化を模擬した電気ケーブルの熱劣化評価試験を、令和 2 年度には経年度合いを変えた電気ケーブルの熱劣化試験をそれぞれ実施し、火災時熱劣化評価のための知見を拡充した。令和 2 年度には、電気ケーブルの熱劣化試験で取得したデータの分析を行い、成果を取りまとめた。

(3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備

火災影響評価手法・解析コード等の整備については、平成 29 年度から令和 2 年度にかけて国際的な火災研究プロジェクトの試験及び電気盤の火災試験結果により、解析モデルの検証と妥当性確認を実施した<sup>15, 16</sup>。また、可燃性液体の燃焼挙動を把握するために令和元年度から令和 2 年度にかけて、国立大学法人山口大学への委託研究事業において可燃性液体の火災試験を実施した。さらに HEAF の評価手法を整備するために平成 29 年度に HEAF 爆発解析モデルを検討し<sup>17</sup>、平成 30 年度に HEAF 爆発解析モデルの検証と妥当性確認を行い、令和元年度及び令和 2 年度に HEAF 爆発解析モデルの改良・整備を実施した。なお HEAF 爆発解析モデルの検討の一部は国立大学法人金沢大学への委託研究事業において行われた。

実施行程表				
	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度
(1) HEAF の影響評価	▽学会発表 HEAF 試験の実施 (爆発現象の圧力 把握、筐体内容積 の影響)	▽学会発表、 HEAF 試験の実施 (爆発現象の圧力 把握、筐体開口部 (閉じ込め性) の 影響)	▽論文投稿 HEAF 試験の実施 (爆発現象の圧力 把握、筐体開口位 置の影響)	▽論文投稿等 HEAF 試験の実施 (爆発現象の圧力 把握、母線材質等 の影響) 取得データから得 られた知見を取り まとめる
				▽論文投稿等
(2) 電気ケーブル の熱劣化評価 (筑波大学委託 研究事業)	電気ケーブルの種 類を変えた熱劣化 試験の実施 (絶縁抵抗測定)	トレイ内での電気 ケーブルの配置を 考慮した熱劣化試 験の実施 (絶縁抵抗測定)	新品と経年化した 電気ケーブルの熱 劣化評価試験 (絶縁抵抗測定)	経年度合いを変え た電気ケーブルの 熱劣化評価試験 (絶縁抵抗測定)
	電気ケーブルの熱 劣化特性等の調査	電気ケーブルの絶 縁低下予測式等の 整備	電気ケーブルの絶 縁低下予測式等の 高度化	電気ケーブルの熱 劣化に係る評価手 法の整備
(3) 火災影響評価 手法・解析コード 等の整備		▽学会発表		▽論文投稿等
	火災試験プロジェ クトの試験による 煙濃度評価モデル の検証と妥当性確 認	火災試験プロジェ クトの試験による ケーブル延焼モデ ルの検証と妥当性 確認	火災試験プロジェ クトの試験による ケーブル延焼モデ ルの検証と妥当性 確認 (一部は山口大学 委託研究事業)	火災試験プロジェ クト試験等による ケーブル延焼モデ ルの検証と妥当性 確認 (一部は山口大学 委託研究事業)
	HEAF 爆発解析モ デルの検討 (一部は金沢大学 委託研究事業)	HEAF 爆発解析モ デルの検証と妥当 性確認 (一部は金沢大学 委託研究事業)	HEAF 爆発解析モ デルの改良・整備 (一部は金沢大学 委託研究事業)	火災影響評価手法 の整備 HEAF 爆発解析モ デルの改良・整備

図 1.3.1 本研究の全体行程図

Fig.1.3.1 Overall process of this research

## 2. 本論

### 2. 1 研究の概要

本研究では、原子炉施設に対する火災防護規制の高度化への反映を目的に、HEAF の影響評価、電気ケーブルの熱劣化評価及び火災影響評価手法・解析コード等の整備を行った。

HEAF の影響評価については、2. 2 に示す実電源盤を模擬した試験体の内容積、開口部面積、開口位置等を変えることにより、HEAF の爆発メカニズムと影響範囲に関する知見等を取得した。

電気ケーブルの熱劣化評価については、2. 3 に示すコーンカロリメータ試験装置を改良した試験装置を用い、電気ケーブルの熱劣化試験の方法を検討するとともに原子力発電所で使用されているいくつかの電気ケーブルについて試験を行い、電気ケーブルの熱劣化に関する基礎的なデータとして、熱劣化温度、絶縁低下速度等を取得するとともに、火災時を模擬した熱影響下での絶縁体の損傷による絶縁抵抗を、電気ケーブルの種類（新品と経年化模擬材）、トレイ内での配置等をパラメータとして測定した<sup>18-21</sup>。また、これらのデータに基づき、電気ケーブルの熱劣化メカニズムと絶縁低下の関係について整理した。

火災影響評価手法・解析コード等の整備については、実機解析に必須な技術ではあるが、現状、OECD/NEA の国際プロジェクト等で解析モデルの妥当性が十分に確認されていないマルチルーム火災やケーブル束のモデル化を独自に検討した。マルチルーム火災では、換気口位置や複数火災源を配置した試験データを対象として解析を実施した。また、水平多段ケーブルトレイ火災試験等を対象にケーブル束モデルを適用し、ケーブル束の空隙率、伝熱面積、伝熱モデル等のパラメータを組み合わせて、その感度を把握した。さらに可燃性液体の液面燃焼時の燃焼挙動を評価した<sup>22,23</sup>。HEAF に関しては、実機解析への適用を目的とした HEAF に関する爆発のモデル化<sup>24-26</sup>を進めるとともに、爆発現象に対応する解析コードの改良・整備を新たに開始し、試験結果と解析結果の差異について検討した。

## 2. 2 高エネルギーアーク損傷 (HEAF) の影響評価

### 2. 2. 1 HEAF の概要

HEAF とは High Energy Arcing Faults の略称である。また、HEAF とは、遮断器や開閉器などの通電された導体間、又は通電された部品とアースの間に大電流のアーク放電が発生し、熱、光、金属の蒸発及び圧力上昇を伴って、急激なエネルギーの放出が起こる事象として特徴付けられる爆発性の電気故障である<sup>7-12</sup>。HEAF の第一段階では、爆発により機器の破壊、変形、給電機器のトリップ等が起こることに加え、破壊された部品の飛び散りなどが発生する場合がある。HEAF の第二段階では、アーク放電に起因する熱の影響により機器等が高温になり火災が発生する場合がある。火災が発生した場合には、電気ケーブルや機器への損傷が拡大し、機器の停止・誤作動・制御不能などをもたらす可能性がある。

国際的な火災事象を取りまとめている OECD/NEA/FIRE プロジェクトでは、原子炉施設での炉心損傷に至る可能性の高い火災事象の一つとして、HEAF を抽出している<sup>6</sup>。同プロジェクトの FIRE データベースによれば、1975～2016 年の間に原子炉施設で発生した火災 491 件中 62 件 (12.6%) が HEAF による火災であったとしている。HEAF は、その現象の複雑さ及び影響の重大さから国際的に注目されており、現在、OECD/NEA では国際共同研究として HEAF (フェーズ 2) プロジェクトを推進している。

HEAF の第二段階におけるアーク火災への対応については、前述のとおり、平成 29 年度第 25 回原子力規制委員会において、高エネルギーアーク損傷に係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等が改正されるとともに、HEAF 審査ガイド<sup>5</sup>が新規に制定された<sup>13</sup>。一方、アーク放電初期に発生する爆発現象に関しては、十分な知見が得られていない爆発のメカニズムと影響範囲に係る知見を拡充するため試験研究を実施し知見を拡充することとした。

## 2. 2. 2 HEAF 試験

HEAF 試験は米国 KEMA 試験場で実施した。HEAF 試験の電源としては、KEMA G1(1000MVA、16kV、60Hz)及び KEMA G2(2250MVA、16 kV、可変周波数)の発電機を用いた。本試験は爆発現象に係る知見を取得する要素試験であるため、実電源盤を模擬した筐体を試験体として用いた。

### (1) 試験体

標準サイズとした試験体の模式図を図 2.2.2.1 に示す。試験体は難燃性のプレート（外側：難燃樹脂板、内側：セメント板）を用いて作製した。試験体にはアーク放電を発生させるための銅/アルミニウム製母線を取り付けた。また、標準的な母線ダクトを模擬したベントを取り付けた。なお、過去に HEAF 試験を行った高圧電源盤の遮断器一次側の内容積を標準サイズとしたため試験体の内容積を  $583,200 \text{ cm}^3$  とした。

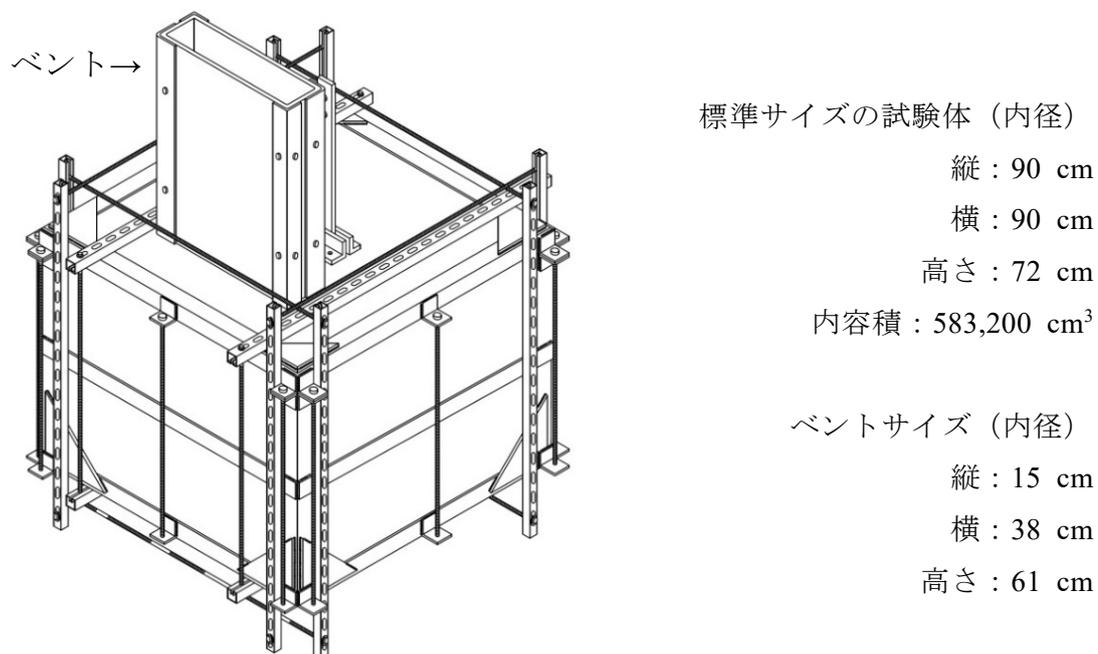


図 2.2.2.1 標準サイズの試験体

Fig. 2.2.2.1 Reference size test box

### (2) 短絡電流の目標値

HEAF 試験時に試験体にアーク放電を発生させる電流の目標値として、短絡電流を設定する必要がある。短絡電流値は原子力発電所の電気系統の設計時に設定されるものであり、各電気盤の上流側の変圧器のインピーダンスと変圧器の二次側定格電流によって算出される。以下に、短絡電流値の算出方法を記す。

まず、変圧器二次側の定格電流  $I_0$  は、三相電力  $W$  及び定格電圧  $V_0$  から以下の式で求まる。

$$I_0 = W / (\sqrt{3} \times V_0) \quad \dots \dots \dots (2.2.2.1)$$

また、計算上最大の三相の短絡電流  $I_b$  は、短絡インピーダンス（又は変圧器の銘板パーセントインピーダンス） $Z$  及び定格電流  $I_0$  を使用して以下の式で求まる。

$$I_b = I_0 \times 100 / Z \quad \dots \dots \dots (2.2.2.2)$$

ここで、短絡インピーダンス  $Z$  とは、変圧器の二次側を短絡させた状態で一次側に電圧を印加した場合、二次側の電流が定格電流になった時の一次側の電圧と二次側の定格電圧との割合を百分率で表したもので、短絡電流の計算に使用される。

高圧電源盤（M/C）については、三相電力  $W$  が 26000kVA、定格電圧が 6900V である。また、高圧電源盤の上流に存在する変圧器の  $Z$  は、9.5%であることから、式 2.2.2.1 及び式 2.2.2.2 より、短絡電流  $I_{b\_M/C}$  は、以下のように求められる。

$$I_{0\_M/C} = 26000 / (\sqrt{3}/6900) = 2.17 \text{ kA}$$

$$I_{b\_M/C} = 2.1 \text{ kA} \times 100/0.095 = 22.9 \text{ kA}$$

したがって、短絡電流の目標値は 23 kA に設定した。

### （3）アーク放電の継続時間の設定値

HEAF 試験におけるアーク放電の継続時間すなわち短絡時間の設定値は、東北電力女川原子力発電所 1 号機での遮断器における過電流継電器の設定値を参考に 2.0 秒を基準とした。

### （4）アークエネルギーの計算

HEAF 試験におけるアーク放電のエネルギー値 (J) は、試験体よりも上流側（発電機側）で測定したアーク放電発生時の電圧値 (V) と電流値 (A) を乗じたアークパワー (W) にアーク放電の継続時間 (s) を掛けた三相合計の積算値とした。なお、本 HEAF 試験におけるアーク放電の発生方法は、米国電気電子学会 (IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers。以下「IEEE」という。) C37.20.7-2007<sup>27</sup>に基づいており母線に導電性針金をワイヤリングした状態で、大電流を流すことによりアーク放電を発生させた。

### （5）計測項目

HEAF 事象とその影響を評価するために必要と考えられる測定項目は、アークパワー及びアークエネルギーを知るためのアーク放電の電圧電流波形、爆発現象に係る圧力に関する

る知見を得るためのアーク放電時の圧力、並びに周囲への影響に関する知見を得るための試験体周囲の熱流束である。

HEAF 試験における計測項目を表 2.2.2.1 に示す。アーク放電のパワー及びエネルギー量は、電圧、電流及びアーク放電の継続時間の実測値より計算した。電気盤内部の圧力は、圧電空気圧トランスデューサで測定した。また、電気盤周囲における熱流束の測定は、スラグカロリメータを用いた。

表 2.2.2.1 において熱流束測定位置の設定根拠として参照している NUREG/CR-6850<sup>28</sup> では、米国の原子力発電所における火災事象の経験に基づいて影響範囲（ZOI：Zone of Influence。以下「ZOI」という。）を設定しており、本 HEAF 試験においてもそれを参考に測定位置を決定した。

表 2.2.2.1 HEAF 試験の計測項目一覧

Table 2.2.2.1 Measuring items of HEAF tests

測定項目	測定目的	方法
1. 電圧電流波形	アークパワー及びアークエネルギーを算出する。	電圧及び電流の波形を記録し分析する。
2. 試験体内圧力	爆発現象に係る圧力に関する知見を得る。	圧電空気圧トランスデューサを用いて試験体内部の圧力を測定する。
3. 試験体周囲の熱流束	試験体内部で発生したアーク放電の外部への影響に関する知見を得る。	スラグカロリメータを NUREG/CR-6850 で規定される ZOI の境界線上に設置して熱流束を測定する。

この他に高解像度カメラ、高速度カメラ及び赤外線カメラによる動画撮影を行った。

## 2. 2. 3 試験結果

### (1) 標準サイズの試験体を用いた HEAF 試験

標準サイズの試験体を用いた HEAF 試験の一例を図 2.2.3.1 に示す。HEAF 試験では、試験体内の圧力が急峻に上昇し、開口部（ベント）から空気、金属ヒューム等が噴出するが、圧力や熱によって試験体が破壊されることはなかった。試験体を用いる HEAF 試験ではアーク放電が発生している間の試験体内の圧力を連続的に測定して HEAF の爆発現象を評価した。



図 2.2.3.1 HEAF 試験の一例  
Fig. 2.2.3.1 One example of HEAF test

標準サイズの試験体を用いてアーク放電が発生させた場合の、経過時間に対する試験体内の圧力変化の一例を図 2.2.3.2 に示す。図に示すように HEAF の爆発圧力には初期のスパイク的な圧力上昇(b~e)とその後の安定的な圧力(f)の 2 種類が存在することが分かった。

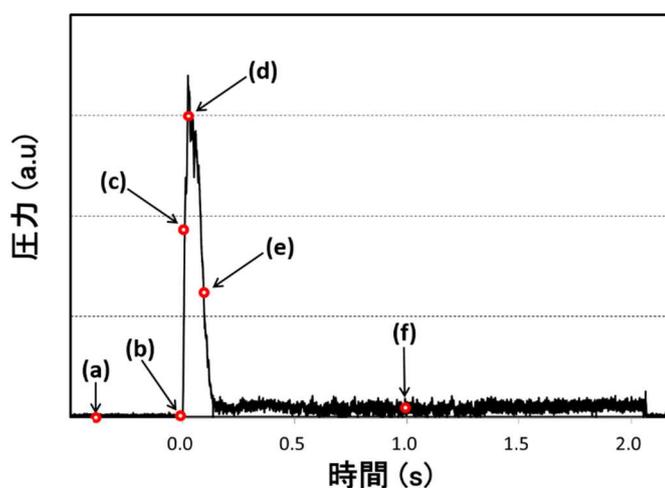


図 2.2.3.2 HEAF の爆発圧力の一例  
Fig. 2.2.3.2 One example of HEAF explosion pressure

図 2.2.3.3 には、図 2.2.3.2 の各圧力(a~f)における高速度ビデオカメラの映像を示す。同図中の(a)は試験前、(b)は 0.000 秒、(c)は 0.009 秒の映像である。図 2.2.3.2 の(c)では急峻に圧力が上昇しているが、まだ金属ヒュームの噴出は認められない。ここでの急峻な圧力上昇は、試験体内の空気がアーク放電の熱によって急激に熱膨張したためと考えられる。図 2.2.3.2 の(d)では最大圧力値付近に達しているが金属ヒュームの噴出は少ない。(d)では試験体内に残存している空気の熱膨張とともに金属ヒュームの生成が圧力上昇の原因になっていると考えられる。最大圧力値付近に到達した後の(e)では大量の金属ヒュームの噴出が認められるが、試験体内の空気がすでに放出されているため圧力が下降しているものと考えられる。(f)では金属ヒュームの噴出が認められるが圧力は低い値で安定している。(f)での圧力は試験体内での金属ヒュームの生成時に生ずる圧力と平衡になっているものと考えられる。したがって、図 2.2.3.2 の初期のスパイク的な圧力上昇は空気の熱膨張、その後の安定的な圧力は金属ヒュームの発生によるものであることが映像解析の結果から示唆された。

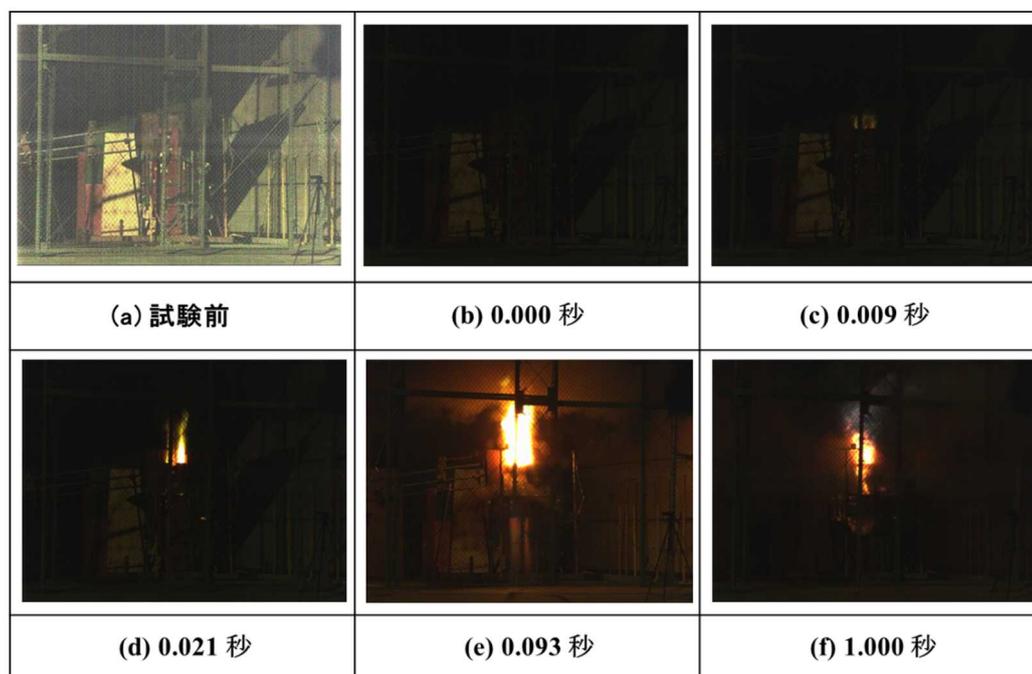


図 2.2.3.3 図 2.2.3.2 の各圧力(a~f)における高速度ビデオカメラの映像  
 Fig. 2.2.3.3 High-speed video camera images at each pressure (a~f) in the Fig. 2.2.3.2

## (2) 試験体の内容積を変えた HEAF 試験

標準サイズの試験体の内容積を 1 として、内容積を 0.25~2 倍に変えた HEAF 試験を行った。内容積以外が同一条件の場合は、内容積が小さいほど初期のスパイク的な圧力上昇値は大きくなる傾向が認められた。これは試験体内の空気量が少ないほど空気の温度上昇が急峻になるためであると考えられる。一方、初期のスパイク的な圧力上昇曲線の半値幅は、内容積が大きいほどその値は大きくなる傾向が認められた。

### (3) 試験体の開口部（閉じ込め性）を変えた HEAF 試験

標準サイズの試験体を用いて、ベントの開口面積を標準のサイズの1～3倍、開口数を1～3個の範囲で変化させた HEAF 試験を行った。開口部以外が同一条件の場合は、開口面積が大きいほど初期のスパイク的な圧力上昇値は小さくなる傾向が認められた。これは試験体内の空気は開口面積が大きいほど噴出しやすいためであると考えられる。また、同一面積において開口数を1～3個の範囲で変化させた場合には、開口数を増やした方が初期のスパイク的な圧力上昇値が小さくなる傾向が認められた。

### (4) 試験体の開口位置を変えた HEAF 試験

開口位置の異なる標準サイズの試験体を用いて HEAF 試験を行った。開口部と母線の位置関係を垂直から水平に変えた場合に初期のスパイク的な圧力上昇値が小さくなる傾向が認められた。

## 2. 2. 4 HEAF の爆発メカニズムと影響範囲

図 2.2.3.2 に示すように HEAF の爆発圧力には、初期のスパイク的な圧力上昇とその後の安定的な圧力の2種類が存在することが分かった。試験で取得した圧力、温度、金属ヒュームの発生量等のデータ及び高速度ビデオカメラ・赤外線サーモグラフィカメラの動画を解析した結果、初期のスパイク的な圧力上昇は空気の熱膨張、その後の安定的な圧力は金属ヒュームの発生によるものであることが示唆された。そのため HEAF の爆発の影響範囲を評価するためには、初期のスパイク的な圧力上昇の原因である空気の熱膨張とその後の圧力の原因である金属ヒュームの発生について、図 2.2.4.1 に示すようにそれぞれの影響範囲を評価する必要があると考えられる。また、それぞれの圧力の原因に対する熱的な関係も整理する必要があると考えられる。初期スパイク圧発生熱的要因については、本報告書の 2.4.6 で検討している。



図 2.2.4.1 HEAF の爆発現象における影響範囲の一例

Fig. 2.2.4.1 One example of the zone of influence (ZOI) in the HEAF explosion phenomena

## 2. 3 電気ケーブルの熱劣化評価

### 2. 3. 1 電気ケーブルの熱劣化の概要

長期間原子力施設内のケーブルトレイに設置された電気ケーブルは通常運転状態であっても熱による劣化を生じることが知られており、経年化した電気ケーブルでは強度的あるいは電氣的な特性に劣化が見られる。また、火災源近傍又は高温ガス中に存在する電気ケーブルは、その熱により絶縁体の絶縁抵抗が急激に低下し、特に計装・制御ケーブルの場合には誤信号を発信する可能性がある<sup>14</sup>。また、熱が加え続けられると熱劣化が進み、それにより絶縁体の絶縁抵抗は更に低下し、短絡・地絡・ホットショートするおそれがある<sup>14</sup>。このように電気ケーブルの熱劣化に係る事象は、原子炉施設の安全にとって脅威の一つと成り得る。

実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準<sup>2</sup>には、火災時にも安全停止（高温停止、低温停止）の機能が確保されるようにすることの要求がある。また、原子力発電所の内部火災影響評価ガイド<sup>3</sup>にも、火災時の安全停止に必要な設備の機能が確保されることを示すようにとの記載があり、安全停止の維持に必要な構築物、系統及び機器を特定する手順及び火災影響を評価する手法の例が示されている。しかしながら、これらのガイド類は、電気ケーブル自身の火災による延焼等に対応したものとなっており、火災時における電気ケーブルの熱劣化やそれに伴う絶縁低下などの電氣的特性の不具合等に関しては記載されていない。このような回路の故障に関しては、その影響を確認するために必要となる回路解析について、火災影響評価ガイドへの反映要否を含めて検討を行うこととされている（技術情報検討会、要対応技術情報 Y2015-12-01）<sup>29</sup>。したがって、これらガイド類における記載の充実や見直しの要否の検討に向けた準備のため、電気ケーブルの熱劣化試験データを取得すること及びその評価手法を整備することは重要である。このために、電気ケーブルの熱劣化試験を「コンポーネント火災時熱劣化評価試験事業」と題して、平成29年度から令和2年度にかけて国立大学法人筑波大学に委託し、実施した<sup>18-21</sup>。

### 2. 3. 2 電気ケーブルの熱劣化試験

以下に試験装置及び試験の概要を記す<sup>20</sup>。なお、経年化を模擬した試験ケーブルについては、90℃～130℃の恒温槽内で一定時間保持し熱劣化を促進することにより、経年劣化処理を施した。

本研究で使用した電気ケーブル熱劣化試験装置を図 2.3.2.1 に示す。電気ケーブル熱劣化試験装置は、コーンカロリメータ試験装置を改良して作製した。本試験装置では、ケーブルトレイに敷設した状態で電気ケーブルの熱劣化試験を行うことができる。



図 2.3.2.1 電気ケーブル熱劣化試験装置<sup>20</sup>

Fig. 2.3.2.1 Thermal deterioration test equipment for electric cables

図 2.3.2.2 に電気ケーブルの熱劣化試験の一例を示す。本試験装置のコーン型ヒータは直径 200mm であり、ヒータ中心部から長さ方向 150mm の範囲内であれば加熱温度を一定にすることができる。また、ヒータの温度は 800℃まで上昇させることができる。本試験では、電気ケーブル試験片の温度をレーザー温度計で計測し、試験条件の温度と一致するようヒータ温度を調整した後に絶縁抵抗を計測した。

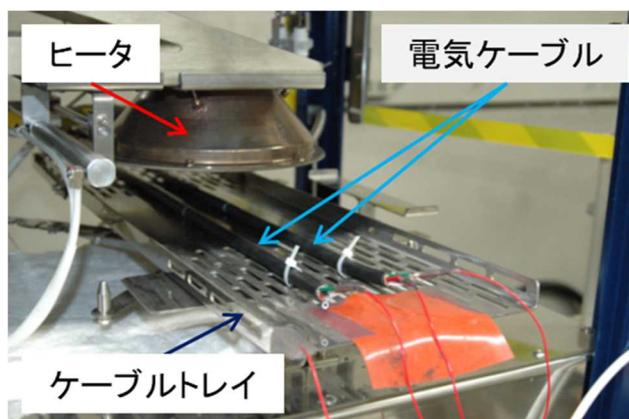


図 2.3.2.2 電気ケーブル熱劣化試験の一例<sup>20</sup>

Fig. 2.3.2.2 One example of the thermal deterioration test of electric cables

火災による高温環境下を模擬した電気ケーブルの熱劣化試験として以下の試験を実施した。

- ・電気ケーブルの絶縁低下試験

電気ケーブルについてコーンカロリヒーター試験を実施し、発熱速度、電気特性（絶縁特性）の時間変化等を測定した。また、電気ケーブルが燃焼する際の可燃ガスの分析を示差熱・熱重量分析測定等によって実施した。

- ・トレイ内での電気ケーブルの配置を考慮した燃焼特性試験

短絡して過熱した電気ケーブルの発熱による隣接ケーブルへの影響を評価するため、ケーブルトレイを模擬した試験トレイに敷設された電気ケーブルに対して、電気ケーブルと同程度の直径を有するカートリッジヒーターによって過電流が通電した電気ケーブルを再現し、高温一定の条件下での近傍ケーブルの限界性能(発火特性、電気特性)を評価する試験を実施した。

- ・新品と経年化を模擬した電気ケーブルの熱劣化評価試験

新品（未劣化）及び経年化処理（130℃以下の温度で一定時間維持して熱劣化を模擬した加速試験で、腐食、照射等の影響は含まない。）を施した電気ケーブルについて、コーンカロリメータ試験を実施し、発熱速度、総発熱量、絶縁抵抗等を測定する試験を実施した。

### 2. 3. 3 電気ケーブルの熱劣化試験結果

#### (1) 電気ケーブルの絶縁低下に及ぼす熱劣化温度の影響

制御ケーブルの熱劣化試験結果の一例を図 2.3.3.1 に示す。熱劣化温度を 200℃～550℃の範囲で変化させた結果、熱劣化温度の上昇に伴って絶縁低下が起こりやすくなることが確認された。また、220℃以上の熱劣化温度では 80 分までに絶縁抵抗がゼロになった。一方、200℃では 120 分まで絶縁抵抗がゼロになることはなかった。

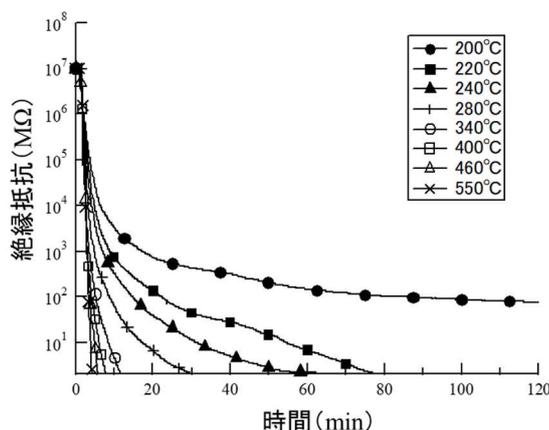


図 2.3.3.1 制御ケーブルの熱劣化試験結果の一例<sup>20</sup>

Fig. 2.3.3.1 One example of the thermal deterioration test results of the control cable

## (2) 絶縁低下速度の評価

図 2.3.3.1 に示す熱劣化試験結果のアレニウスプロットを図 2.3.3.2 に示す。図に示すように絶縁低下速度の対数と温度の逆数の関係が直線であることから、電気ケーブルの熱による絶縁低下は、アレニウスの式で整理できることが確認された。

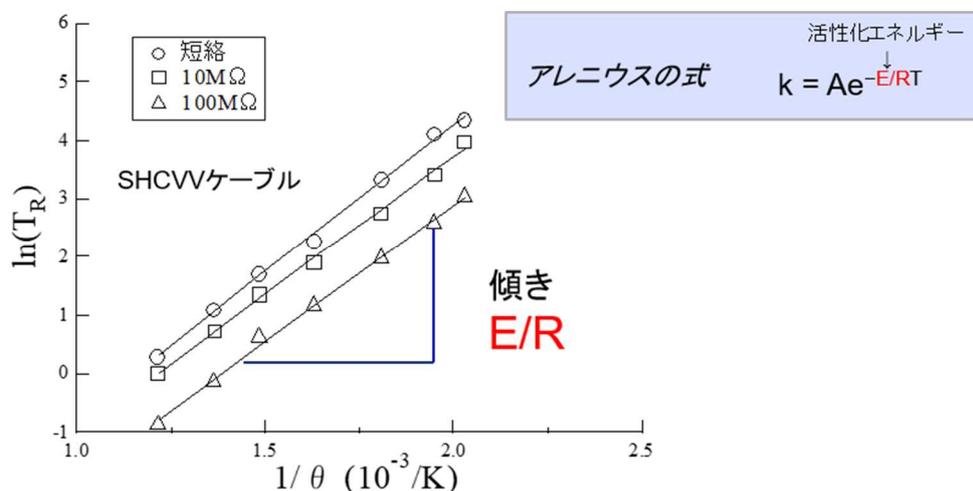


図 2.3.3.2 図 2.3.3.1 のアレニウスプロット<sup>20</sup>

Fig. 2.3.3.2 Arrhenius plots of the figure 2.3.3.1

## (3) 電気ケーブルの種類を変えた熱劣化試験

図 2.3.3.1 に示す熱劣化試験に用いた電気ケーブルの他に原子炉施設で用いられている 3 種類の制御ケーブルについて熱劣化試験を行った結果、いずれの制御ケーブルにおいても熱劣化温度の上昇に伴って絶縁低下が起こりやすくなることが確認された。また、いずれの制御ケーブルにおいても熱による絶縁低下はアレニウスの式で整理できることが確認された。

## (4) トレイ内での電気ケーブルの配置を考慮した熱劣化試験

トレイ内での電気ケーブルの配置を考慮した熱劣化試験を行った。熱劣化はトレイ内での配置の影響を受けにくいことが分かった。このことは熱劣化が燃焼を伴わない現象であるため、酸素が熱劣化に関与しがたいためと考察された。熱劣化は単純に電気ケーブルへの入力熱で整理できた。

## (5) 新品と経年化を模擬した電気ケーブルの熱劣化評価試験

新品及び経年化を模擬した電気ケーブルに対して、コーンカロリメータを用いた燃焼試験を実施し、熱劣化に係る経年化の影響を評価した。新品と経年化を模擬した電気ケーブルの燃焼試験を図 2.3.3.3 に示す。経年化を模擬した電気ケーブルについては新品のものと比較して、発熱速度及び総発熱量が小さくなることが確認された。このことは、経年化を模擬した電気ケーブルでは可燃物の量自体が減少していることを示している。この原因と

しては、可燃物の酸化や分解による可燃物の減少が考えられる。実際、経年化を模擬した電気ケーブルでは新品に比べ重量が減少していることが確認されている。

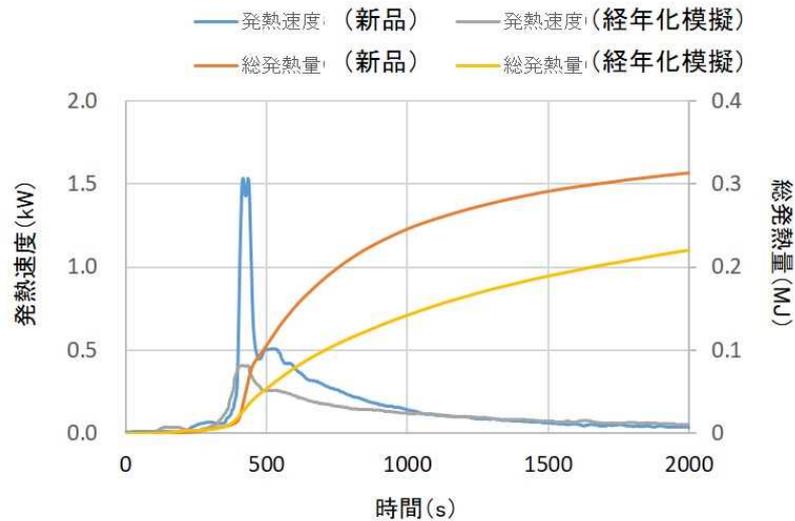


図 2.3.3.3 新品と経年化を模擬した電気ケーブルの燃焼試験<sup>21</sup>  
 Fig. 2.3.3.3 Combustion test results for new and aged electrical cables

図 2.3.3.3 の試験における新品及び経年化を模擬した電気ケーブルの昇温時の絶縁抵抗の測定結果を図 2.3.3.4 に示す。経年化を模擬した電気ケーブルについては新品と比較して絶縁抵抗の低下開始時間が早くなることが確認された。このことは、絶縁抵抗が低下する温度が低くなったことを意味しており、経年化、特に絶縁体の熱劣化によって電気ケーブルの絶縁抵抗に係る性能がさらに低下することを示唆している。

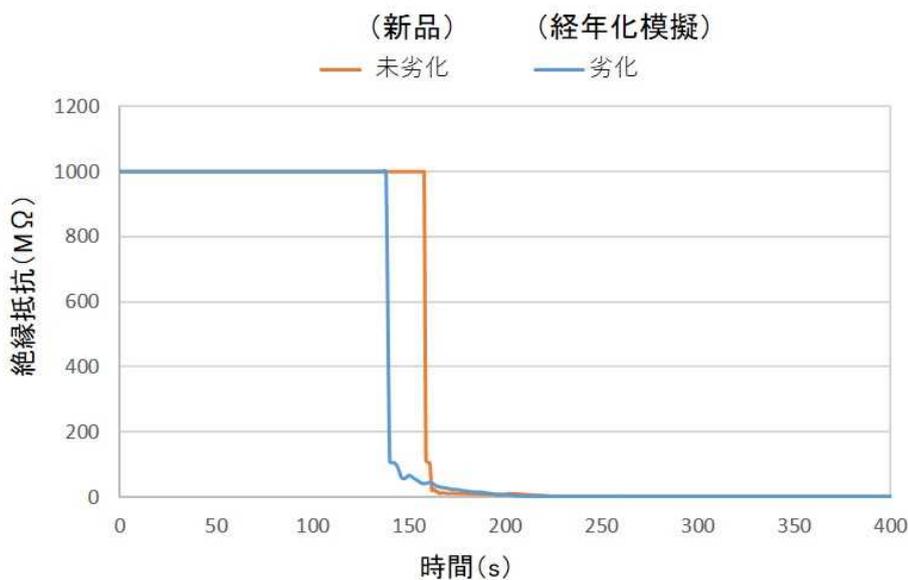


図 2.3.3.4 新品と経年化を模擬した電気ケーブルの昇温時の絶縁抵抗測定<sup>21</sup>  
 Fig. 2.3.3.4 Insulation resistance measurement results for new and aged electrical cables at elevated temperature

#### (6) 経年度合いを変えた電気ケーブルの熱劣化評価試験

恒温槽に長期間保持し劣化させることにより、様々な経年度合いの電気ケーブルを調製し、熱劣化評価試験を行った。経年により絶縁抵抗の低下開始時間が早くなることが確認された。

### 2. 3. 4 電気ケーブルの熱劣化メカニズムと絶縁低下

前述のように試験に用いた電気ケーブルは火災時の加熱により絶縁抵抗が急激に低下する。電気ケーブルの絶縁体は難燃性のポリエチレンやゴム類などの有機物であり、加熱によって熱分解や炭化が進行する。このため電気ケーブルの絶縁低下は、絶縁体の構造が熱分解・燃焼によって損傷及び炭化することによって起こると考えられる。

電気ケーブルの熱劣化試験中に電気ケーブル近傍のガスを採取し、そのガスを分析したところ、プロピオンアルデヒド ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHO}$ ) のような可燃性のガス類が高い濃度で検出された。図 2.3.3.4 に示すように昇温時の絶縁抵抗測定において 150 秒前後において絶縁低下が認められたことから、熱分解による有機物の分解が絶縁体性能低下に関係することが示唆された。また、電気ケーブルの熱劣化試験後に絶縁体が炭化していたことから、絶縁体の炭化によって絶縁抵抗が低下していることが示唆された。

## 2. 4 火災影響評価手法・解析コード等の整備

### 2. 4. 1 マルチルーム火災試験解析

OECD/NEA PRISME プロジェクト<sup>30</sup>等にて実施されている、換気条件下にある複数区画の火災試験を解析対象として、火災解析コード（FDS）にてマルチルーム火災解析を実施した。図 2.4.1.1 に複数区画の火災試験を FDS にてモデル化した一例を示す。試験では、左右の部屋にそれぞれ可燃性液体を配置し、それらを燃焼させることにより、隣接する部屋における煙の流動や温度変化を計測している。図 2.4.1.2 には、解析開始後 80 秒における FDS による煙の流動状況を、また、図 2.4.1.3 には、解析開始後 80 秒における  $y$  が 3.0 m における  $xz$  平面の温度分布の計算結果を示す。実際の火災試験では、可燃性液体が燃焼するにつれて煙が発生し、高温空気と共に隣接する部屋へ開口部を通して流入する挙動が観測されており、解析結果においても同様の挙動が模擬できている。以上から FDS を用いて、煙の流動評価等を含めた屋内における可燃性液体火災への適用性の見通しが得られた。煙の発生量、室内の温度変化等については、火災源である可燃性液体の燃焼挙動に大きく依存することが考えられるため、今後屋内火災のモデリングに加えて、可燃性液体の燃焼挙動評価試験を実施し、FDS を用いた可燃性液体火災評価の検証、妥当性確認を進めることとした。

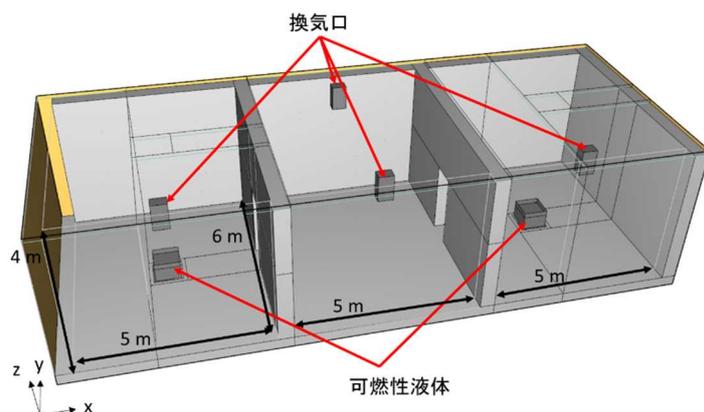


図 2.4.1.1 FDS におけるマルチルーム火災解析モデル

Fig. 2.4.1.1 Modelling of multiple room fire test in FDS

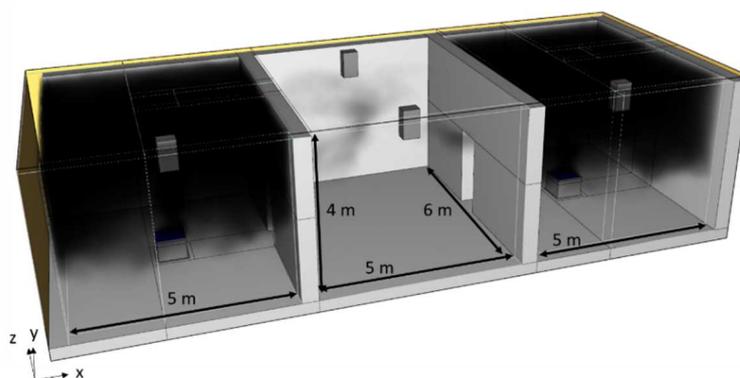


図 2.4.1.2 解析開始 80 秒後の煙の流動状況

Fig. 2.4.1.2 Smoke propagation at 80 s

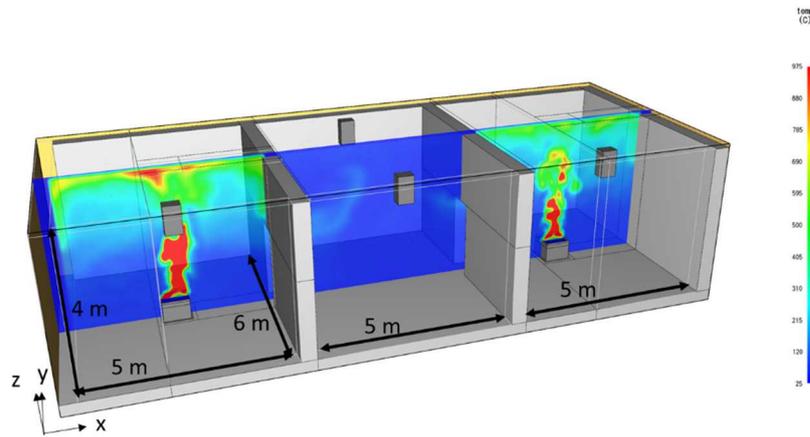


図 2.4.1.3 解析開始 80 秒後の室内温度分布

Fig. 2.4.1.3 Temperature distribution at 80 s in multi-room

## 2. 4. 2 ケーブルトレイ火災試験解析

多数の電気ケーブル（以下「ケーブル束」という。）を多段のケーブルトレイに敷設したケーブルトレイを模擬した火災試験を解析対象とし、FDSにて解析を実施した。図 2.4.2.1 にケーブル束を直方体で模擬したモデルを示す。また、最下段を 1 段目とし、最上段を 5 段目とする。1 段目のトレイの中心下部に熱源を配置し、ケーブル束を発火させその後の燃焼挙動の時間・空間変化を解析により取得した。図 2.4.2.2 に発熱速度（HRR: Heat Release Rate）の時間変化を示す。試験開始後 200 秒付近までは比較的 HRR が低い値で推移し、その後急激に上昇している。図 2.4.2.3 に各ケーブルトレイの中心付近の空気温度の時間変化を示す。HRR が上昇する 200 秒以降では、初めに 5 段目の温度が上昇し、最大となり、その後、時間経過に伴い 1 段目、2 段目と順に温度が上昇していき、その後 3 段目及び 4 段目の温度が上昇している。図 2.4.2.4 に 3 段目ケーブルトレイの中心からそれぞれ x 方向に 0 mm、±500mm、±1000mm におけるケーブルトレイの時間変化を示す。HRR が上昇する 350 秒以降では時間経過に伴いケーブルトレイの外側±1000mm において、時間経過に伴い周囲から中心に向けてガス温度が上昇している。この挙動は、実際に敷設されているケーブル束には隙間が存在し、その隙間から高温空気がケーブルトレイ鉛直方向へ流動すると考えられる一方で、図 2.4.2.1 に示すモデルでは隙間等を設けていないため鉛直方向の高温空気の流れが模擬できず、図 2.4.2.5 に示すように高温空気がケーブルトレイ両端から流れ込んだことが原因だと考えられる。以上から、ケーブルトレイ火災時の燃焼挙動を模擬するためには燃焼時の高温空気の流れの模擬が重要となることが分かった。

上記の考察の下、直方体のモデルに空隙を設けた場合の結果を図 2.4.2.6 に示す。空隙の大きさについては、電気ケーブルが整列しておらずケーブル間に空隙があることから、トレイ底面積の 10%を基準（開放率 100%に相当）と仮定して、開放率による影響の感度解析を実施した。その結果、空隙を設けない場合と比較して、HRR の立ち上がりが早くなっている。また、開放率を変化させることで HRR の立ち上がり時間、燃焼時間が変化する。図 2.4.2.7 に開放率 50%の 350 秒における xy 平面の高温空気の流れを示す。空隙を設けな

い場合と比べて、空隙を通過してケーブルトレイ鉛直方向にも高温空気が流動している。以上の結果から、FDSにてケーブル束を模擬する場合、その模擬方法を変更することにより大きく燃焼挙動が変化することが分かったが、一方で解析対象とした試験結果（プロジェクトの協定により、現状、公開できないため掲載していない。）の HRR を比較すると、定量的な一致は十分ではない。今後は、ケーブルトレイの積載率に対して、どの程度の開放率を設定すれば良いかを実際の火災試験結果を用いて検討を進め、最適なケーブル束の模擬方法の検討を進める。

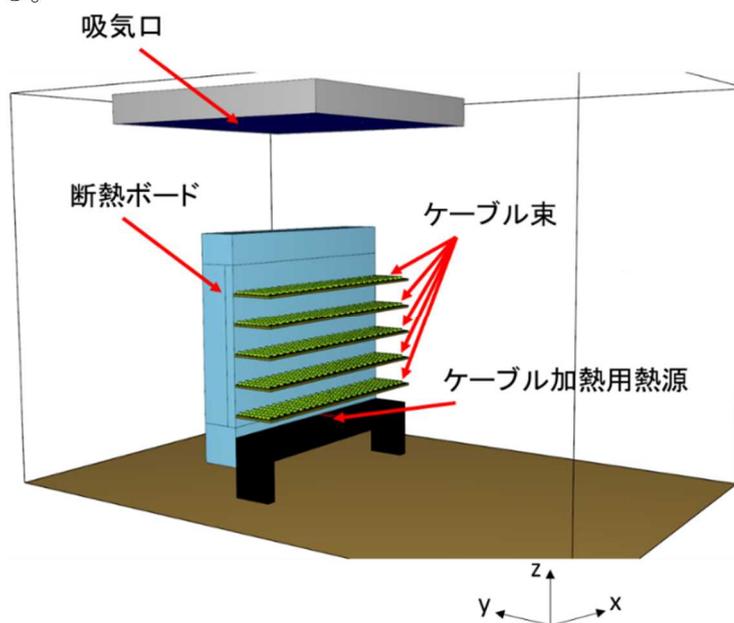


図 2.4.2.1 FDS における多段ケーブルトレイ火災試験解析モデル

Fig. 2.4.2.1 Modelling of multiple cable tray fire test in FDS

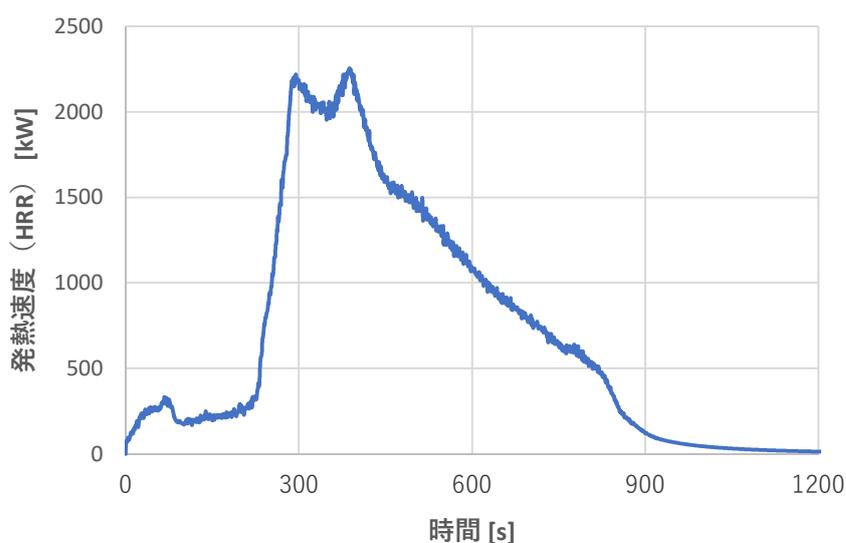


図 2.4.2.2 発熱速度の時間変化

Fig. 2.4.2.2 Heat release rate as a function of time

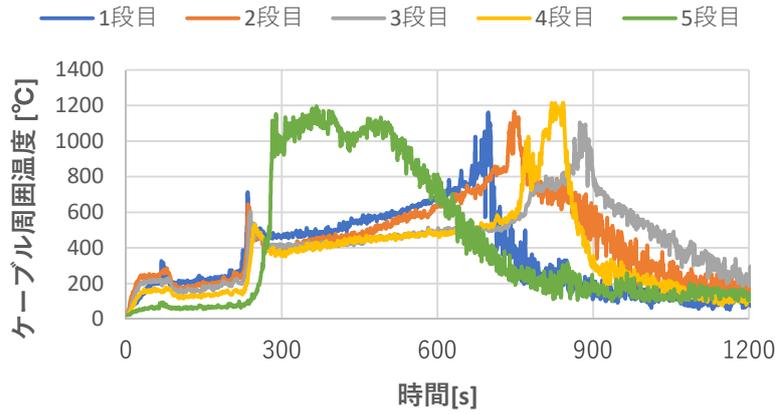


図 2.4.2.3 各ケーブルトレイ中心の温度の時間変化

Fig. 2.4.2.3 Temperature as a function of time at center of individual cable tray

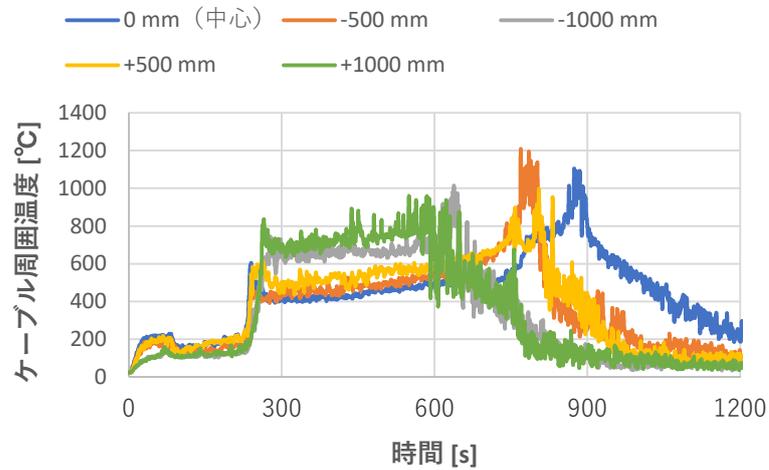


図 2.4.2.4 3 段目ケーブルトレイの x 方向の各測定点における温度の時間変化

Fig. 2.4.2.4 Temperature as a function of time at individual measurement point to x direction in 3<sup>rd</sup> cable tray

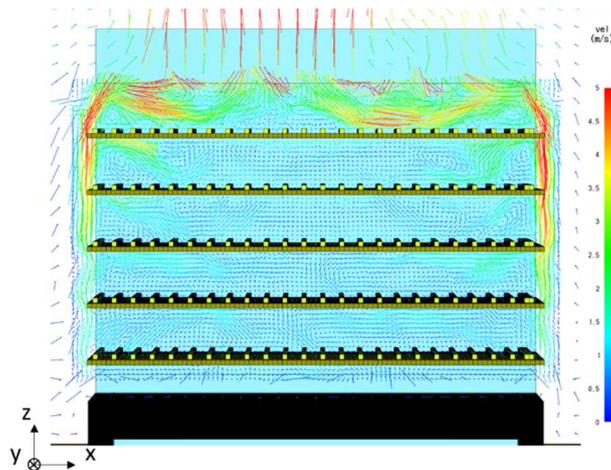


図 2.4.2.5 解析開始後 350 秒におけるケーブルトレイ周辺の速度場

Fig. 2.4.2.5 Velocity field around cable tray at 350 s

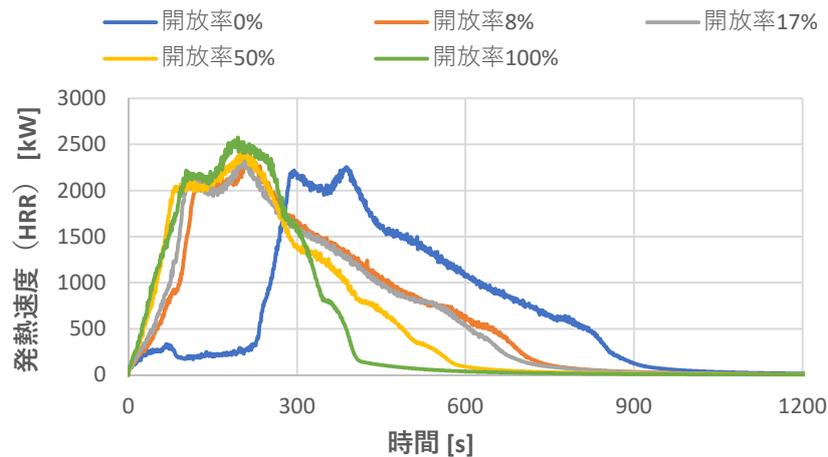


図 2.4.2.6 各開放率における発熱速度の時間変化

Fig. 2.4.2.6 Heat release rate as a function of time in each opening ratio

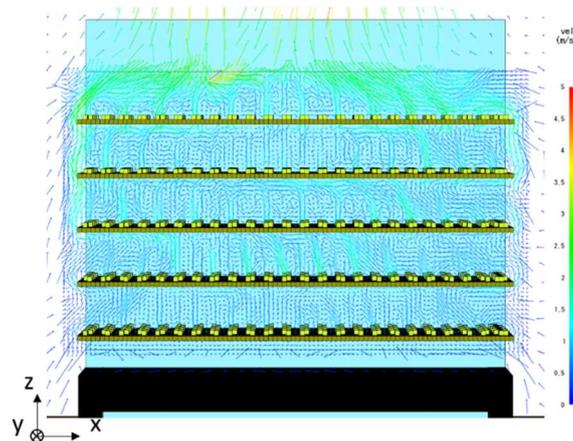


図 2.4.2.7 開放率 50%とした場合の解析開始後 350 秒におけるケーブルトレイ周辺の速度場

Fig. 2.4.2.7 Velocity field around cable tray at 350 s in case of opening ratio of 50%

### 2. 4. 3 FDS における電気ケーブル燃焼モデル検討

FDS の電気ケーブルの燃焼モデルの検討を行った。同モデルは電気ケーブルの熱分解反応に基づく燃焼モデルであることから、未劣化及び恒温槽による経年劣化処理を施した電気ケーブルの構成材である絶縁体の熱分解特性を取得した。図 2.4.3.1 に示差熱・熱重量分析計による熱分解特性の結果を示す。450 °C 付近に発熱ピークがあり、反応範囲としては 400 °C から 500 °C 程度となっている。また、経年劣化処理による発熱ピーク温度及び反応範囲に対する影響は見られない。これらのデータは、電気ケーブルの劣化特性を反映するモデルの基礎データとなるため、今後は以上の結果等を用いて燃焼モデルを構築し、コー

ンカロリメータ試験を模擬した小規模解析を実施し、構築した燃焼モデルの妥当性確認を進める。

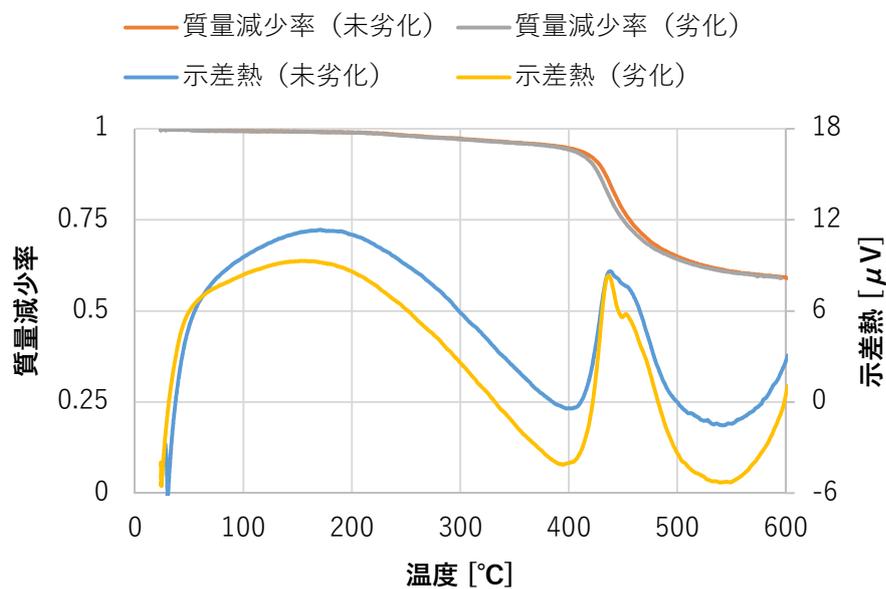


図 2.4.3.1 未劣化及び経年劣化処理を施した電気ケーブル構成材の示差熱・熱重量分析結果

Fig. 2.4.3.1 TG/DTA analysis results in component of undeteriorated and deteriorated electrical cable

#### 2. 4. 4 可燃性液体の液面燃焼時における燃焼挙動評価

可燃性液体の液面燃焼時の燃焼挙動を評価するために粒子画像流速測定法 (PIV) を用いて高温空気の流動計測を「可燃性液体火災における燃焼挙動評価」と題して、令和元年度から令和2年度にかけて国立大学法人山口大学に委託し、実施した<sup>22,23</sup>。図 2.4.4.1 に液面燃焼試験体系及び PIV 測定体系を示す。液面について垂直にレーザーシート光を入射し、容器下部よりトレーサー粒子を供給することで、トレーサー粒子からの散乱光を高速度カメラで撮影した。短時間内で撮影した2枚の画像における粒子の変位を見積り、速度場を算出した。また燃焼試験については、容器材質の違いによる流動への影響を評価するために、ガラス容器、ステンレス容器の2つの材質で試験を実施した。図 2.4.4.2 にガラス容器における液面燃焼時の高温空気流動を PIV により測定した結果を示す。燃焼容器を中心として左右対象にそれぞれ渦 (図 2.4.4.2 中の A 及び B 付近) が発生しており、また時間経過に伴い渦は上部へ移動している。図 2.4.4.3 にステンレス容器における液面燃焼時の高温空気流動を PIV により測定した結果を示す。燃焼容器を中心として左右非対称の渦 (図 2.4.4.3 中の A 及び B 付近) が発生しており、また時間経過に伴い渦は上部へ移動している。以上のことから、容器材質の違いといった燃焼環境の違いにより高温空気の流動が異なり、燃焼挙動が変化することが確認された。今後は、可燃性液体の種類、燃焼環境等を変更することで燃焼挙動にどのような影響があるか評価を行い、併せて高温空気の流動計測だけでなく、温度分布や輻射熱の測定も行うことで燃焼挙動の評価手法の検討を進めることとした。



図 2.4.4.1 液面燃焼試験体系及び PIV 測定体系<sup>22</sup>

Fig. 2.4.4.1 Schematic view of liquid surface combustion test and PIV measurement system

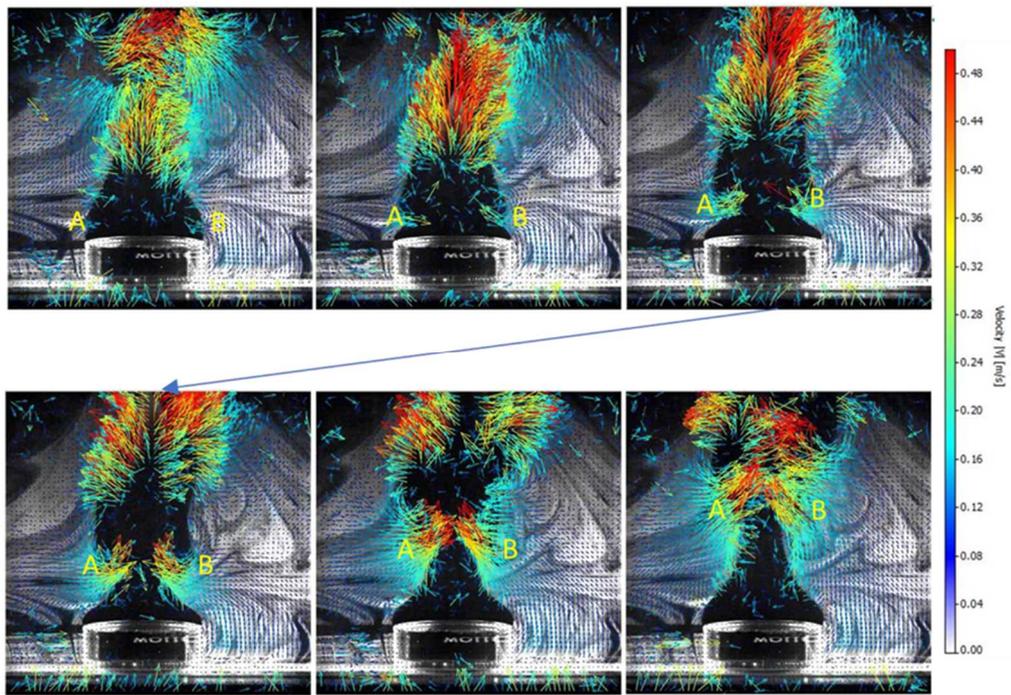


図 2.4.4.2 ガラス容器における液面燃焼時の速度場の時間変化<sup>23</sup>

Fig. 2.4.4.2 Time variation of velocity field on liquid surface burning in case of glass pan

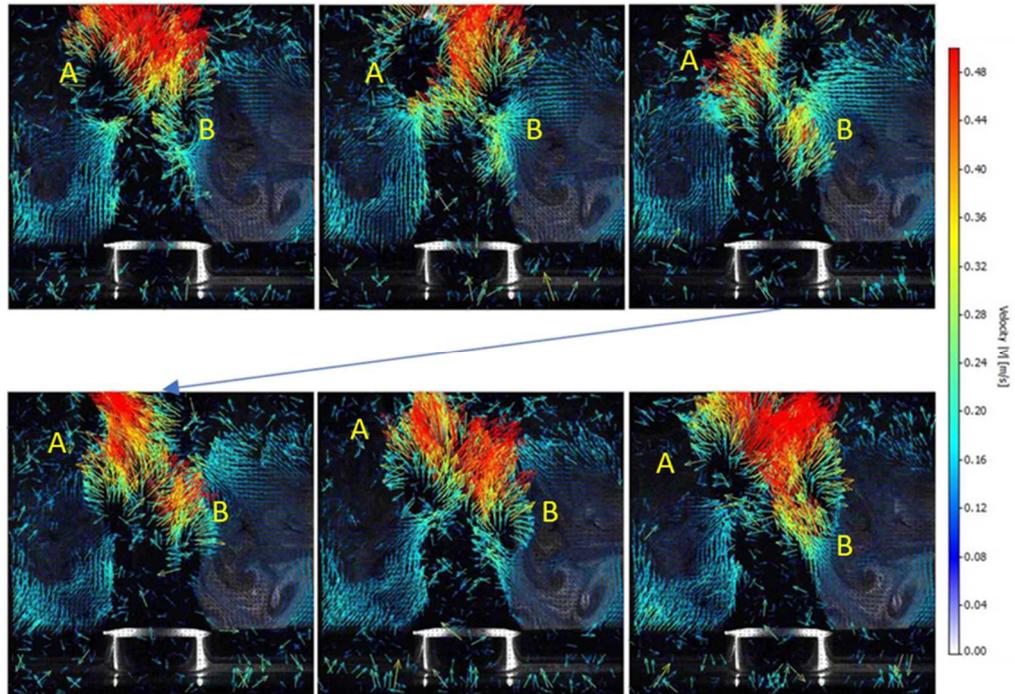


図 2.4.4.3 ステンレス容器における液面燃焼時の速度場の時間変化<sup>23</sup>

Fig. 2.4.4.3 Time variation of velocity field on liquid surface burning in case of stainless pan

## 2. 4. 5 HEAF の爆発現象モデルの検討

HEAF における爆発現象では、短絡箇所に数十 MJ もの高エネルギーが放出されるために閃光、熱及び瞬間的な圧力上昇が発生する。このような現象が周囲に及ぼす影響を定量的に評価するには、アーク放電の詳細挙動の解明と極短時間のエネルギー変化を取り扱える解析モデルの作成が必要である。

HEAF の詳細挙動を解明するためには、HEAF と同規模となる大電流のアーク放電における基礎特性（温度、エネルギー放出量、アークプラズマの流速・断面積、挙動等）を理論的に明らかにする必要がある。このために、アークプラズマを電磁熱流体として取り扱った電磁気熱流体解析モデルを整備するとともに、その妥当性を確認するためのアーク放電の試験を「アーク放電に関わる電気火災モデル整備」と題して、平成 29 年度から平成 31 年度にかけて国立大学法人金沢大学に委託し、実施した<sup>24-26</sup>。

アーク放電におけるプラズマは、通常、金属電極間で生成されることから、金属蒸気が混入した状態となっている。その温度は 10,000K から 20,000K に達すると考えられている<sup>31</sup>。この状態下では、粒子間の衝突が十分に多いため、局所熱平衡状態と呼ばれる電子温度及びガス温度が等しく、かつ各粒子間も反応平衡状態となる。

大電流アーク放電のモデル化に当たっては、アークプラズマが電磁気熱流体の一つであると考えられること及びアークプラズマが電磁場との相互作用を生じることから、図 2.4.5.1 に示す様な電磁熱流体モデルを考案した<sup>26, 32, 33</sup>。

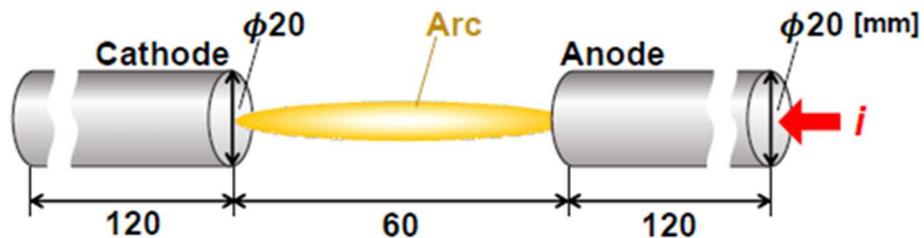


図 2.4.5.1 アーク放電モデル<sup>26,32,33</sup>

Fig. 2.4.5.1 Arc discharge model

金属蒸気混入したアークプラズマの数値解析に当たっては、高温空気及び金属蒸気 (Fe, Cu, Al) が混入した高温空気における粒子組成、熱力学特性（比熱、比エンタルピー等）、輸送特性（導電率、熱伝導率等）及び放射パワーを圧力・温度・金属蒸気混入量だけでなく高温空気に混入する金属蒸気の種類を変えて計算した。1 種類の金属電極を想定した電磁熱流体解析モデルでは、図 2.4.5.2 に示す様に電極に用いる金属材料に関係なく陽極蒸発量は、陰極蒸発量と比較して多いことが分かった。また、金属電極の蒸発量は、 $\text{Cu} < \text{Fe} < \text{Al}$  の順に大きくなった。金属電極の蒸発量の解析結果から、原子炉施設で HEAF が発生した場合には、Cu の母線を使用している電気設備に比べて、Al の母線を使用している電気設備の方が金属ヒュームの発生量が多くなることが予想される。

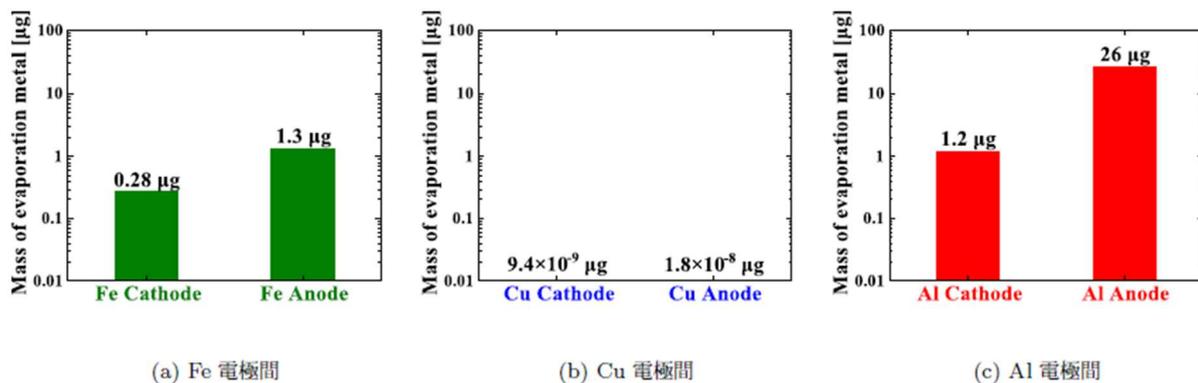


図 2.4.5.2 金属電極の蒸発量に係る解析結果の一例<sup>26</sup>

Fig. 2.4.5.2 One of the analysis results related to the amount of evaporation of metal electrodes

## 2. 4. 6 HEAF の爆発現象モデルの整備・改良

電気盤内で HEAF が発生した場合には、爆発により機器の破壊、変形等が起こることに加え、破壊された部品の飛び散りなどが発生する場合がある<sup>7-12</sup>。このため電気盤内で HEAF が発生した場合を念頭に、アークエネルギーが爆発現象の圧力上昇に与える影響について検討した。この検討にあたり、電気盤を模擬した HEAF 試験体モデルを衝撃解析コード AUTODYN で構築し、HEAF の爆発現象モデルを整備・改良した<sup>17</sup>。

解析に用いたモデル体系を図 2.4.5.3 に示す。試験体は管体とベントで構成されており、実試験（図 2.2.2.1）と同じ寸法である。モデルへ注入するアークパワーは、実試験で取得したアークパワー履歴を用い、圧力の上昇から下降までの一連の挙動を確認するためにアーク放電開始 0 秒から最大 0.2 秒まで評価した。感度解析として、空気加熱割合  $kp$  に対する解析を実施した。

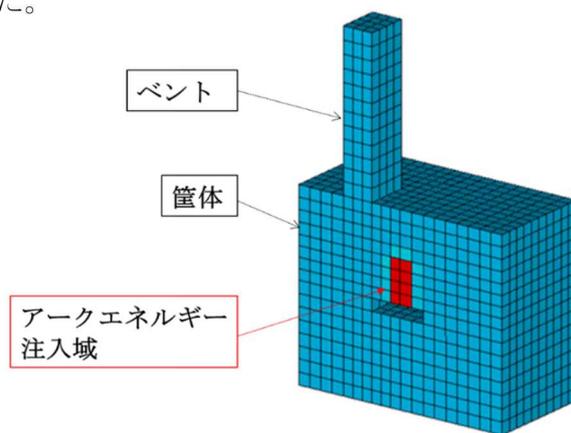


図 2.4.6.1 モデル体系の略図

Fig. 2.4.6.1 Simple diagram of the model system

管体内の圧力上昇に関する HEAF 試験の実測値と解析結果を図 2.4.5.4 に示す。アーク放電の  $kp$  値を 0.5 で一定とする感度解析における圧力挙動は、圧力の上昇までは実測値と同

様な傾向が認められたが、それ以降では大きく乖離した。これは管体内の空気がベントから流出することで空気分子数が減少し、アークエネルギーによる加熱を受け難くなるためであると考えられる。時間経過に伴い管体内の空気が希薄となるにもかかわらず  $k_p$  値が一定である場合、空気加熱で消費されるエネルギーが過大に計算され、実測値とは乖離する過剰な圧力が出力されると考えられる。したがって、 $k_p$  値を時間とともに小さくする必要があると考えられる。 $k_p$  値が 0~1 の範囲で変化すると仮定した場合（図 2.4.5.4 の黒実線）、今回の解析値（図 2.4.5.4 の青実線）は全解析時間にわたり実測値と同様な圧力挙動を示した。本モデル体系では管体体積当たりの空気質量に応じて  $k_p$  値を変化させる必要があると考えられる。今後も HEAF 試験条件と  $k_p$  値との相関を検討する予定である。

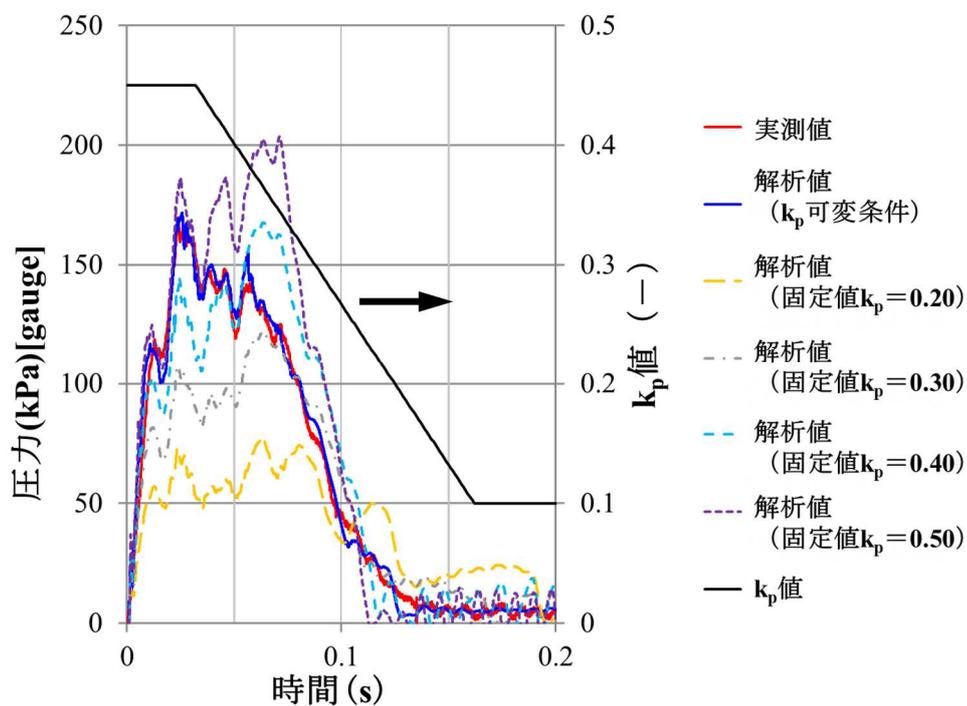


図 2.4.6.2 爆発圧力における実測値と解析値の比較例

Fig. 2.4.6.2 Comparison example of measured values and analysis values on explosive pressure

### 3. 結論

#### 3. 1 成果の要点

HEAF の影響評価については、要素試験により HEAF の爆発現象のメカニズムに関する知見を得た。HEAF の爆発圧力には初期のスパイク的な圧力上昇とその後の安定的な圧力の2種類が存在することが分かった。また、初期のスパイク的な圧力上昇は空気の熱膨張、その後の安定的な圧力は金属ヒュームの発生によるものであることが示唆された。

電気ケーブルの熱劣化評価については熱劣化に関する基礎的な知見を得た。電気ケーブルは、加熱による絶縁体の損傷により絶縁抵抗が急激に低下することが確認された。また、絶縁体の損傷速度はアレニウスの式で整理できることが確認された<sup>20,21</sup>。

火災影響評価手法・解析コード等の整備については、実機解析に必須な技術ではあるが、現状、解析モデルの妥当性が十分に確認されていないケーブル束のモデル化を検討した。また、電気ケーブルの燃焼過程のモデル化も重要となるため、電気ケーブルの熱分解特性等電気ケーブル燃焼モデル構築に必要となるデータに関する知見を取得した。HEAF に関しては、実機解析への適用を目的とした HEAF に関する爆発のモデル化を進めるとともに、爆発現象に対応する解析コードの改良・整備を新たに開始し、試験結果と解析結果の差異について確認した。

#### 3. 2 目的の達成状況

本研究における①HEAF の影響評価については、HEAF の爆発現象に係る影響範囲を評価にするための有用となる爆発メカニズムに関する知見等を得たことから、当初の目標を達成した。②電気ケーブルの熱劣化評価については、絶縁低下速度など熱劣化に関する基礎的な知見等を得たことから、当初の目標を達成した。③火災影響評価手法・解析コード等の整備については、電気ケーブルの熱分解特性等化学反応に基づいた電気ケーブル燃焼モデル構築に必要となるデータに関する知見を取得した。また、HEAF の爆発現象に関する解析コードの改良・整備を新たに開始し、試験結果と解析結果の差異について確認した。これらの知見は、今後実火災及び長期間使用環境下での熱劣化挙動を評価にするための有益な情報になることが期待されることから、当初の目標を達成した。

#### 3. 3 成果の公表

##### 3. 3. 1 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

###### (1) NRA 技術報告

なし

###### (2) 論文 (査読付)

- ① 松田昭博ほか、「原子力発電所用電力・制御ケーブルの火災時燃焼特性の実験的評価」、日本原子力学会誌「アトモス」、60 巻 7 号, pp15-19, 平成 30 年.

- ② H. Kabashima, et al, “Experimental Study of High Energy Arcing Faults Using Medium Voltage Metalclad Switchgears”, Nuclear Technology, Vol. 205, pp. 694-707 (2019).
- ③ H. Kabashima, et al, “Nuclear Regulatory Authority Experimental Program to Characterize and Understand High Energy Arcing Fault (HEAF) Phenomena”, NUREG/IA-0470 Volume 2, under submitted.

(3) 国際会議のプロシーディング (査読付)

- ① H. Kabashima, “FIRE SAFETY REGULATION ON HIGH ENERGY ARCING FAULTS (HEAF)”, Proceedings of the Technical and Scientific Support Organizations (TSOs) in Enhancing Nuclear Safety and Security: Ensuring Effective and Sustainable Expertise Challenges Faced by Technical and Scientific Support Organizations Conference 2018, Brussels, Belgium, Paper ID No. 93, (2018).

(4) 表彰・受賞

なし

### 3. 3. 2 委託先等による公表

(1) 論文 (査読付)

- ① Toru Takeshima, et al, “Numerical Thermofluid Simulation of High Current Air Arcs at Fault Point Contaminated with Metal Vapor from Evaporation of Metal Electrode in Open Air”, IEEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.14, Issue11, 2018
- ② Toru Takeshima, et al, “Numerical Thermofluid Simulation 10kA-class High Current Fault Arcs in Air Contaminated with Metal Vapor from Evaporation of Metal Electrodes in Open Air”, 2019 5<sup>th</sup> International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), 2019.

### 3. 4 成果の活用等

本研究及び後継研究の成果をもとに、「実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準」<sup>2</sup>、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」<sup>3</sup>、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」<sup>4</sup>及び「HEAF 審査ガイド」<sup>5</sup>の見直しの要否の検討を行うことを予定している。本研究成果は、火災防護に係る審査及び検査に関する技術基盤として活用できる。

### 3. 5 今後の課題等

HEAF の影響評価では、要素試験により HEAF 初期の爆発現象のメカニズムに関する知見を取得したが、HEAF の影響範囲が明確でないという課題が残っている。

電気ケーブルの熱劣化評価では、火災時の計装・制御ケーブルの熱劣化による誤信号発生等の可能性に着目し、いくつかの電気ケーブルについて試験を行い、熱劣化に関する知見が得られた。しかし、実火災及び長期間使用環境下での熱劣化挙動の知見が不足している。

火災影響評価手法・解析コード等の整備では、これまで火災・HEAF等の試験解析による解析モデルの妥当性に関する知見を拡充してきた。しかし、実機解析への適用性の検討が不足していることから、原子炉施設の実火災による影響を評価するための試験データの取得及び事象進展評価モデルの構築等を進め、実機解析へ適用可能となる火災影響評価手法等を整備する必要がある。

上記の課題等に関しては、令和3年度開始の新規安全研究プロジェクトである「火災防護に係る影響評価に関する研究（フェーズ2）（R3～R6（2021～2024））」において取り組む予定である。

## 参考文献一覧

- 1 原子力規制委員会、“火災防護対策の高度化に係わる調査・試験”、安全研究成果報告、RREP-2018-1002、平成 30 年 11 月。
- 2 原子力規制委員会、“実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準”、原規技発第 1306195 号、制定 平成 25 年 6 月 19 日。
- 3 原子力規制委員会、“原子力発電所の内部火災影響評価ガイド”、原規技発第 1707195 号、制定 平成 29 年 7 月 19 日。
- 4 原子力規制委員会、“原子力発電所の外部火災影響評価ガイド”、原規技発第 13061912 号、制定 平成 25 年 6 月 19 日。
- 5 原子力規制委員会、“高エネルギーアーク損傷（HEAF）に係る電気盤の設計に関する審査ガイド”、原規技発第 1707196 号、制定 平成 29 年 7 月 19 日。
- 6 OECD FIRE Project - TOPICAL REPORT No. 1, “Analysis of High Energy Arcing Fault (HEAF) Fire Events”, NEA/CSNI/R(2013)6, 2013.  
(<https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2013/csni-r2013-6.pdf>)
- 7 OECD FIRE Project - TOPICAL REPORT No. 3, “Event Combinations of Fires and Other Events,” NEA/CSNI/R(2016)7, 2016.  
(<https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2016/csni-r2016-7.pdf>)
- 8 原子力規制庁、NRA 技術報告、原子力発電所における高エネルギーアーク損傷（HEAF）に関する分析、NTEC-2016-1002、2016。
- 9 S. Tsuchino, H. Kabashima, S. Turner, S. Mehta, D. Stroup, N. Melly, G. Taylor and F. Gonzalez, NUREG/IA-0470 Volume 1, 2016。
- 10 OECD HEAF Project, “Report on the Testing Phase (2014-2016) of the High Energy Arcing Fault Events (HEAF) Project”, NEA/CSNI/R(2017)7, 2017.  
(<https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2017/csni-r2017-7.pdf>)
- 11 H. Kabashima, “Fire Safety Research on High Energy Arcing Fault (HEAF)”, EUROSAFE Forum Newsletter, April, 2017。
- 12 H. Kabashima and F. Kasahara, “Experimental Study of High Energy Arcing Faults Using Medium Voltage Metalclad Switchgears”, Nuclear Technology, Vol. 205, pp. 694-707, 2019。
- 13 第 25 回原子力規制委員会（平成 29 年 7 月 19 日）資料 1 資高エネルギーアーク損傷に係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等の一部改正等について（案）”、2016。  
(<https://www.nsr.go.jp/data/000196619.pdf>)

- 14 松田昭博、栴島 一、石橋 隆、笠原文雄、“原子力発電所用電力・制御ケーブルの火災時燃焼特性の実験的評価”、日本原子力学会誌「アトモス」、60 巻 7 号 p.15-19, 2018.
- 15 加藤 敬輝、栴島 一、笠原 文雄、“火災伝播及び影響評価手法の高度化、(4) FDS を用いた複数区画における火災影響解析”、日本原子力学会 2018 年秋の大会、2018.
- 16 加藤 敬輝、栴島 一、笠原 文雄、“火災伝播及び影響評価手法の高度化、(5) FDS を用いたケーブルトレイ火災解析モデルの検討”、日本原子力学会 2019 年秋春の大会、2019.
- 17 松田 航輔、笠原 文雄、栴島 一、宮崎 利行、“高エネルギーアーク損傷(HEAF)の爆発現象に係る数値解析、(1) AUTODYN による電気盤モデルの圧力上昇評価の検討”、日本原子力学会 2020 年秋春の大会、2020.
- 18 国立大学法人筑波大学、“平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費（コンポーネント火災時熱劣化評価試験）事業成果報告書”、2018.
- 19 国立大学法人筑波大学、“平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費（コンポーネント火災時熱劣化評価試験）事業成果報告書”、2019.
- 20 国立大学法人筑波大学、“令和元年度原子力施設等防災対策等委託費（コンポーネント火災時熱劣化評価試験）事業成果報告書”、2020.
- 21 国立大学法人筑波大学、“令和 2 年度原子力施設等防災対策等委託費（コンポーネント火災時熱劣化評価試験）事業成果報告書”、2021.
- 22 国立大学法人山口大学、“令和元年度原子力施設等防災対策等委託費（可燃性液体火災における燃焼挙動評価）事業成果報告書”、2020.
- 23 国立大学法人山口大学、“令和 2 年度原子力施設等防災対策等委託費（可燃性液体火災における燃焼挙動評価）事業成果報告書”、2021.
- 24 国立大学法人金沢大学、“平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費（アーク放電に関わる電気火災モデル整備）事業成果報告書”、2018.
- 25 国立大学法人金沢大学、“平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費（アーク放電に関わる電気火災モデル整備）事業成果報告書”、2019.
- 26 国立大学法人金沢大学、“令和元年度原子力施設等防災対策等委託費（アーク放電に関わる電気火災モデル整備）事業成果報告書”、2020.
- 27 IEEE Standard for Type Test of Class Ie Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations.  
(<https://ieeexplore.ieee.org/document/20977/>)
- 28 NUREG/CR-6850, “EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities, Final Report (NUREG/CR-6850, EPRI 1011989)”, May 2016.  
(<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6850/index.html>.)

- 29 原子力規制庁、第 43 回技術情報検討会（令和 2 年 10 月 29 日）資料 43-2-1-3 令規制対応する準備を進めている情報（要対応技術情報）リスト（案）”、2020.
- 30 OECD PRISME Project, “Investigating Heat and Smoke Propagation Mechanisms in Multi-Compartment Fire Scenarios”, NEA/CSNI/R(2017)14, August 2017.
- 31 平岡 和雄、塩飽 孝至、黄地 尚義、“各種分光法によるアークプラズマの温度評価”、溶接学会誌論文集、第 14 巻第 4 号、pp.641-648、1996.
- 32 Toru Takeshima, Yasunori Tanaka, Yoshihiko Uesugi, Tashuo Ishijima, “Numerical Thermofluid Simulation of High Current Air Arcs at Fault Point Contaminated with Metal Vapor from Evaporation of Metal Electrode in Open Air”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.14, Issue11, 2018.
- 33 Toru Takeshima, Yasunori Tanaka, Yusuke Nakano, Yoshihiko Uesugi, Tatsuo Ishijima, “Numerical Thermofluid Simulation 10kA-class High Current Fault Arcs in Air Contaminated with Metal Vapor from Evaporation of Metal Electrodes in Open Air”, 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), 2019.

## 執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ システム安全研究部門

椋島 一 主任技術研究調査官

加藤 敬輝 技術研究調査官

松田 航輔 技術研究調査官

笠原 文雄 技術参与