

安全研究成果報告

火災防護対策の高度化に係わる 調査・試験

Safety Research on Fire Protection Measures
for Nuclear Power Plants

梶島一 笠原文雄 石橋隆 加藤敬輝 畑孝也

Hajime Kabashima, Fumio Kasahara, Takashi Ishibashi, Takaki Kato, Takaya Hata

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)

平成30年11月

November 2018

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。

本レポート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

火災防護対策の高度化に係わる調査・試験

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 笠原文雄 石橋隆 加藤敬輝 畑孝也

要旨

本プロジェクトでは、原子力施設に対する火災防護規制の高度化への反映を目的に、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の高度化、国際共同研究プロジェクト等への参画を行った。火災試験データベースについては、原子力施設で使用されている可燃物の発熱速度、輻射熱、発火温度等のデータを整備した。これらのデータは火災影響評価の基礎データとして活用されている。火災影響評価手法については、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高度化し、今後の活用への基盤を構築した。特にアーク放電に起因する火災については、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。この成果は、火災の発生防止に係る HEAF(高エネルギーアーク損傷)の規制基準に活用された。

Safety Research on Fire Protection Measures
for Nuclear Power Plants

Hajime Kabashima, Fumio Kasahara, Takashi Ishibashi, Takaki Kato,
and Takaya Hata

Division of Research for Reactor System Safety

Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority(S/NRA/R)

Abstract

In this project, with the aim of improving the fire safety regulations on nuclear facilities, experimental and analytical studies have been performed for development of a fire test database, improvement of evaluation methods to quantify the effectiveness of fire protection measures, and participation in the international projects. For the fire test database, data on heat release rate, radiant heat, and ignition temperature of flammable materials used in nuclear facilities were measured and organized. These data have been used as the base data for fire influence assessment methods. As for the improvement of these methods, validation activities have been conducted on the fire analysis code (FDS) and the forest fire analysis code (FARSITE), in addition the mechanism has been ascertained of the fire that took place after the explosion phenomena caused by arc discharge of the metal-clad switchgears at Tohoku EPCO's Onagawa Nuclear Power Station (NPS) unit 1. Thus, these activities could be the basis to qualify the evaluation methods for enhancing the effectiveness of fire protection measures. In particular, regarding the fire caused by arc discharge, a threshold of arc energy at which fire occurs has been clarified, which has been used as a regulation standard of fire prevention caused by HEAF (High Energy Arcing Faults).

目 次

1. 研究概要	1
2. 研究期間を通じた主要成果	3
2.1 火災試験データベースの整備	3
2.1.1 ケーブル火災試験	3
2.1.2 ケーブル火災における着火メカニズムの解明等	7
2.1.3 油火災試験	8
2.1.4 フィルタ火災試験	11
2.1.5 有機溶媒火災試験	12
2.1.6 HEAF 試験	13
2.2 火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法の高度化	21
2.2.1 OECD/NEA PRISME/PRISME2 プロジェクト試験の結果を用いた火災解析 コード(FDS コード)の妥当性確認	21
2.2.2 東北電力女川原子力発電所で発生したような電源盤アーク火災の 延焼メカニズムの解明	25
2.2.3 森林火災の火災解析コード(FARSITE コード)による解析	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 成果の活用等	30
3.3.1 火災防護に係る審査のための基準類の整備	30
3.3.2 原子力発電所の火災防護に係る審査基準等	31
3.3.3 原子力発電所の外部火災影響評価ガイド	32
3.3.4 核燃料施設の火災防護に係わる審査基準等	32
3.3.5 HEAF に係る電気盤の設計に関する審査ガイドの整備	33
3.4 今後の課題等	33

表 目 次

表 2.1.3-1	コーンカロリメータ試験結果	9
表 2.1.3-2	プール火災試験結果	10
表 2.1.6-1	電気盤の特徴及び試験後の外観	18

目 次

図 2.1.1-1	コーンカロリメータ試験	4
図 2.1.1-2	代表的な計装ケーブル	4
図 2.1.1-3	コーンカロリメータ試験結果	5
図 2.1.1-4	ペンライト試験	5
図 2.1.1-5	ペンライト試験パラメータの計測方法	6
図 2.1.1-6	THIEF モデルによる絶縁破壊温度の予測	7
図 2.1.3-1	コーンカロリメータ試験	8
図 2.1.3-2	プール火災試験	8
図 2.1.3-3	ルームコーナー試験	9
図 2.1.4-1	フィルタ火災試験	11
図 2.1.6-1	東北電力女川 1 号機の高圧電源盤の HEAF による損傷状況	13
図 2.1.6-2	HEAF 試験の概要	14
図 2.1.6-3	高圧電源盤の HEAF 試験	15
図 2.1.6-4	配電盤の HEAF 試験	16
図 2.1.6-5	モータコントロールセンタの HEAF 試験	17
図 2.1.6-6	アーク火災の発生条件	19
図 2.1.6-7	HEAF におけるアーク火災の発生防止対策	20
図 2.2.1-1	施設の FDS コードによるモデル化	21
図 2.2.1-2	FDS コードの空調モデル図	22
図 2.2.1-3	火災源の発熱速度	22
図 2.2.1-4	計算結果と試験結果との比較	23
図 2.2.2-1	試験前の高圧電源盤	25
図 2.2.2-2	高圧電源盤の延焼試験	25
図 2.2.2-3	Ra F=0.6 での熱放出分布図	26
図 2.2.2-4	東北電力女川 1 号機の火災事象のシミュレーション	27
図 2.2.3-1	東京電力福島第一原子力発電所周辺の解析モデル	28
図 2.2.3-2	解析結果の鳥瞰写真	28
図 3.3.1-1	従来の規制基準と新規規制基準の比較	31
図 3.3.3-1	外部火災影響評価の手順	32

略号表

ASTM	American Society for Testing and Materials	米国試験材料協会
DP	Distribution Panel	配電盤
FARSITE	Fire Area Simulator	森林火災解析コード
FDS	Fire Dynamics Simulator	火災解析コード
FIRE	Fire Incidents Records Exchange Project	原子力施設の火災事例情報プロジェクト
HEAF	High Energy Arcing Faults	高エネルギーアーク損傷
HEPA	High Efficiency Particulate Air Filter	高性能エアフィルタ
HOC	Heat of Combustion	燃焼熱
HRR	Heat Release Rate	熱発生速度
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	米国電気電子学会
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire	仏国放射線防護・原子力安全研究所
ISO	International Organization for Standardization	国際標準化機構
JIS	Japanese Industrial Standards	日本工業規格
M/C	Metal-Clad switchgear	高圧電源盤
MCC	Motor Control Center	モータコントロールセンタ
MLR	Mass Loss Rate	質量減少率
NRC	Nuclear Regulatory Commission	米国原子力規制委員会
SGTR	Steam Generator Tube Rupture	蒸気発生器伝熱管破損
NUREG/IA	NUREG-Series Publications, International Agreements	NRC 技術報告
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development	経済協力開発機構
PRISME	Propagation d'un Incendie pour des Scénarios Multilocaux Elémentaires or Spread of a Fire for Multi room elementary Scenarios	マルチルーム火災試験プロジェクト
Ra F	Radiative Factor	火炎の熱が周囲の物体に伝わる割合を示す定数
TBP	Tributyl Phosphate	リン酸トリブチル
THIEF	Thermally-Induced Electrical Failure	熱的電気故障

THR

Total Heat Released

全発熱量

UL

Underwriters Laboratories Inc.

米国保険業者安全試験

1. 研究概要

本プロジェクトでは、原子力施設に対する火災防護規制の高度化への反映を目的に、火災試験データベースの整備及び火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法の高度化並びに東北電力女川原子力発電所の高圧電源盤で発生したようなアーク放電に起因する火災（以下「アーク火災」という。）の延焼メカニズムの解明等を行った。また、国内外の火災防護情報の収集・分析による最新知見や火災影響評価手法の高度化等の研究成果を新規制基準等の作成に活用した。なお、本プロジェクトは、平成23年度から平成28年度にかけて実施したものであり、以下に示す区分で研究等を推進した。

① 火災試験データベースの整備

原子力施設で使用されている可燃物（ケーブル、油類、フィルタ等）の発熱速度、輻射熱、想定シナリオに基づく火災影響等のデータ、高エネルギーアーク損傷(High Energy Arcing Faults : HEAF)における電気盤（配電盤、モーターコントロールセンタ及び高圧電源盤）のアーク火災等に関する試験を行いデータを整備した。HEAF 試験の結果については、NRA 技術報告(NTEC-2016-1002) ^(参1) 及びNUREG/IA-0470 Volume 1 ^(参2) として公表した。

② 火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法の高度化

OECD (Organization for Economic Co-operation and Development : 経済協力開発機構) / NEA (Nuclear Energy Agency : 原子力機関) のマルチルーム火災試験 (PRISME/PRISME2) を対象に、火災解析コードFDS (Fire Dynamics Simulator) の妥当性確認を行うなどして、火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法を高度化した。また、高圧電源盤アーク火災で確認されたアーク放電に引き続く火災の延焼メカニズムを解明するために、高圧電源盤の延焼試験を実施するとともに、FDS コードによる火災の評価モデルを検討した。さらに森林火災解析コード(Fire Area Simulator : FARSITE) で森林火災の規模及び延焼についてシミュレーションを実施するとともにその防護に必要な防火帯幅を決定する評価手法を構築した。

③ 国際共同研究プロジェクト等への参画

OECD/NEA の火災に関連する各プロジェクトに参画し、国際的な原子力施設の火災事例情報(FIRE プロジェクト)、高エネルギーアーク損傷(HEAF プロジェクト)及びマルチルーム火災 (PRISME/PRISME2 プロジェクト) に関する試験計画の作成や試験データの評価に加わるとともに関連するデータを入手した。また、仏国 IRSN 及び米国 NRC と定期的なワークショップを開催し、両国の火災防護規制に係る最新情報を入手し、本プロジェクトや適合性審査に活用した。

④ 成果の活用

本プロジェクトで実施した成果を以下の基準類の整備に活用した。

- 火災試験データベースの整備では、平成 28 年度までに実施した HEAF に係る安全研究の成果を活用して、「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」の案及び関連するガイドの改正案を作成した。これらの HEAF に係るガイド類は平成 29 年 8 月に施行された。
- 火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法の整備では、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」及び「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」の案を作成し、平成 25 年 7 月にそれらが新たに制定された。
- 国際共同研究プロジェクト等への参画では、OECD/NEA の火災に関連する 3 つのプロジェクト等で得られた情報を活用して、「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」の案を作成し、平成 25 年 7 月にその基準が新たに制定された。

2. 研究期間を通じた主要成果

2. 1 火災試験データベースの整備

新規制基準に基づく火災防護に係る火災影響評価においては、深層防護の観点から、最も厳しい火災シナリオに基づく火災の発生を想定した評価が要求されている。同シナリオに基づく火災影響評価を精度よく実施するためには、2.2 に示す評価手法の整備とともに評価用データを整備する必要がある。現行の火災影響評価ガイドでは、米国等で収集・整備された可燃物データを評価用データとして例示しているが、同データは国内の原子力発電所で使用されている可燃物（ケーブル、油、フィルタ等）とは異なる仕様や材料で製造された可燃物で試験されたデータであることから、国内の原子力発電所で使用されている可燃物を使用した火災試験を実施して海外データとの同等性あるいは差異を確認し、国内プラント用のデータを整備する必要がある。そこで、本プロジェクトでは国内の原子力発電所で使用されている可燃物を対象にしたケーブル火災試験、油火災試験を実施して可燃物の発熱速度、発火温度、ケーブル損傷温度、延焼速度等のデータを取得した。

2. 1. 1 ケーブル火災試験

本プロジェクトでは、ケーブル火災試験として火災源の発熱速度データ取得のためにコーンカロリメータ（ケーブルの燃焼性状を調べる装置）試験及びケーブルの絶縁破壊温度を評価するためのペンライト（管状炉で加熱する装置）試験を実施した。

コーンカロリメータ試験（図 2.1.1-1）では、米国試験材料協会（ASTM）が定めた標準試験法^{（参3）}に基づいて、計装ケーブル、制御ケーブル及び動力ケーブルの火災試験を実施し、発火温度、発熱速度（HRR）等を測定した。代表的な非難燃性計装ケーブルである SPVV 及び難燃性計装ケーブルである FR-STP を図 2.1.1-2 に、それらのコーンカロリメータ試験結果を図 2.1.1-3 にそれぞれ示す。図 2.1.1-3 に示すように非難燃性ケーブルは難燃性ケーブルと比較して、発火時間が短く（発火温度が低く）、さらに発熱速度が大きい。このような傾向は制御ケーブル及び動力ケーブルにおいても認められた。したがって、原子力施設におけるケーブル火災のリスクを低減するためには、難燃性が確認されたケーブルを使用する必要がある。

難燃性ケーブルの外皮には熱硬化性及び熱可塑性のものがある。熱硬化性の難燃性ケーブルであれば異なる仕様や材質であってもその燃焼特性は海外データと同等であることが確認された。



図 2.1.1-1 コーンカロリメータ試験 (参4)

Fig. 2.1.1-1 Cone calorimeter test

<p style="text-align: center;">非難燃性ケーブル</p> <p style="text-align: center;">SPVV (計装ケーブル)、直径:9 mm</p>	<p style="text-align: center;">難燃性ケーブル</p> <p style="text-align: center;">FR-STP (計装ケーブル)、直径:10.5 mm</p>
	
<p>シース: ビニル PVC ファーストラッピング: なし シールド: 編組銅 セカンドラッピング: 薄手透明セロハン様プラスチック 充てん材: ポリマーストランド2本 (黒、非導体) 絶縁体: ビニル PVC (青と白)</p>	<p>シース: 難燃性低塩酸耐熱ビニル PVC ファーストラッピング: 白色布 シールド: 編組すずめっき銅 セカンドラッピング: 白色布 充てん材: ジュート 絶縁体: 耐熱性ビニル PVC</p>

図 2.1.1-2 代表的な計装ケーブル (参5)

Fig. 2.1.1-2 Representative instrumentation cables

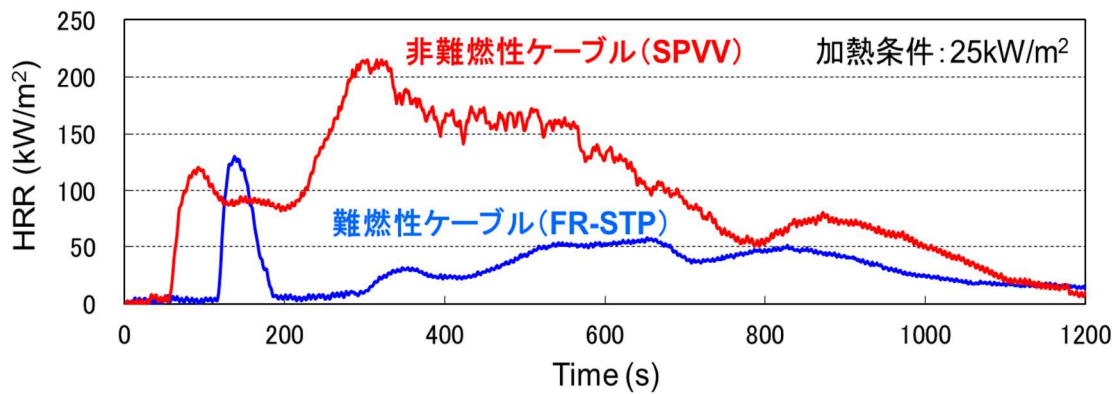


図 2. 1. 1-3 コーンカロリメータ試験結果^(参5)

Fig. 2. 1. 1-3 Cone calorimeter test results

図 2. 1. 1-4 に示すペンライト試験は、管状の電気加熱炉内にケーブルトレイを配置し、トレイ上に敷設したケーブルをヒーターで加熱し、図 2. 1. 1-5 に示すケーブル内部・表面に取り付けた熱電対及び絶縁抵抗測定装置により絶縁破壊する限界温度を計測するものである。ケーブル長さ方向に比べ半径方向長さが非常に短いケーブルのような形状では、ケーブル断面内での熱移動は大部分半径方向であることから、THIEF (Thermally-Induced Electrical Failure) モデル^(参5)ではケーブル組成は一樣、熱特性(熱伝導率、比熱、密度)は温度に依存せず一定とし、加熱中のケーブルの分解反応や発火・燃焼は考慮しないと仮定する半径方向 1 次元熱伝導方程式に基づく温度評価式により温度変化を予測できることを確認した(図 2. 1. 1-6)。同図において、赤の実線は図 2. 1. 1-5 に示すケーブル表面の熱電対温度 TC3、青の破線は THIEF モデルによる予測結果(温度)、灰色の実線は加熱部(シュラウド)の温度であり、黒の実線は絶縁抵抗測定装置の計測値で 1021~1025 秒で急激に抵抗を失い絶縁破壊していることを示す。なお、高温時にケーブル温度が 950~1350s で急激に上昇して予則カーブから外れているのは、ケーブルの発火によるものである。



図 2.1.1-4 ペンライト試験^(参5)

Fig. 2.1.1-4 Cable penlight test

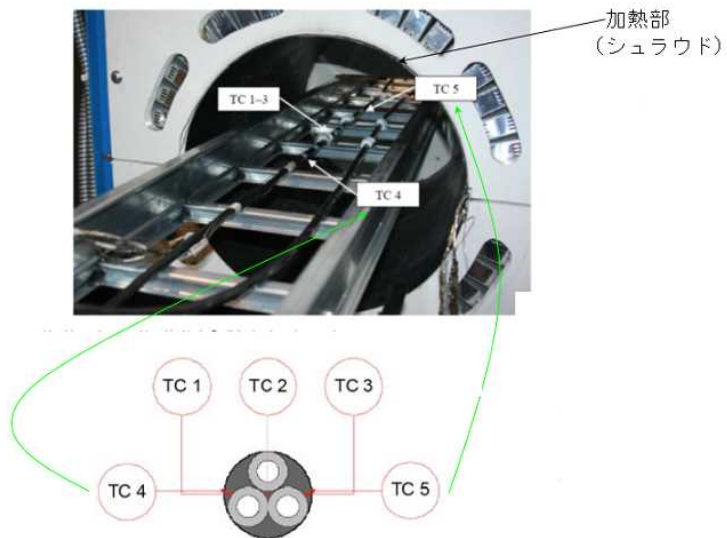


図 2.1.1-5 ペンライト試験パラメータの計測方法^(参5)

Fig. 2.1.1-5 Measurement of Penlight test parameters

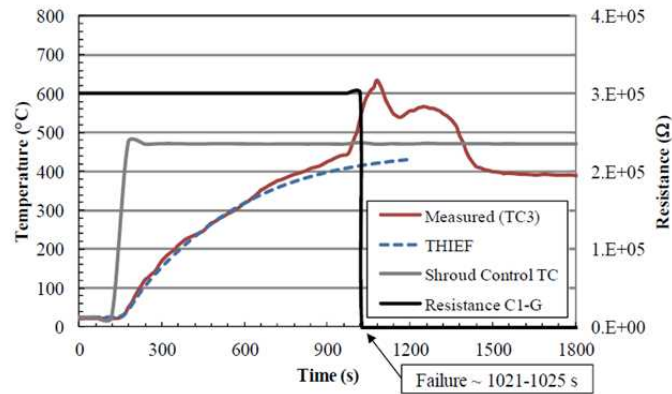


図 2.1.1-6 THIEF モデルによる絶縁破壊温度の予測^(参5)

Fig. 2.1.1-6 THIEF model predictions for the breakdown temperature

ケーブル評価試験において試験条件が試験結果に与える影響を確認することを目的として、国立大学法人豊橋技術科学大学にケーブルの IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 試験を委託した^(参6)。本試験では、原子力発電所で用いられるケーブルの難燃性を評価する方法の一つである IEEE Std 383-1974^(参7) による垂直トレイ燃焼試験に着目し、同試験に準拠した試験条件（ケーブル量及び火源強度）が規定の条件と異なる場合にケーブルの難燃性の判断指標である延焼距離（ケーブル線路に沿って燃え広がる距離）に影響を与えるかどうかについて実証試験を行った。その結果、3 種類の代表的な難燃性ケーブル（難燃性耐火ケーブル[外径 9.1mm]、NH-CE [外径 12.8mm]及び F-CVV [外径 10.1mm]）では、ケーブル量及び火源強度をそれぞれ IEEE Std 383-1974 で定められた試験条件の 2 倍まで変化させても、延焼距離には大きな影響を与えないことを確認した。

2. 1. 2 ケーブル火災における着火メカニズムの解明等^(参8)

ケーブル火災における着火メカニズムの解明に係る試験を国立大学法人筑波大学に委託し実施した。複数のケーブル試験片中に棒状ヒーターを置き加熱する試験を行った結果から、ケーブルは高温物体に近接していると、その近傍で熱せられたケーブルから可燃性ガスが発生し、そのガスが着火することによってケーブルの燃焼が始まることが分かった。また、JIS C 3005 の燃焼試験（傾斜試験）をクリアするエコマテリアルケーブル及び「JIS C 3521」、「IEEE std. 383」などの垂直トレイ燃焼試験をクリアするノンハロゲン高難燃ケーブルに対して複数のケーブル試験片中に棒状ヒーターを置き加熱する試験を実施した結果、両ケーブルともにヒーター温度 650°C では発火は確認できなかったが、ヒーター温度 850°C では発火を確認した。したがって、過電流によって発熱するケーブルの温度が 650°C 以下の場合には、隣接するケーブルにおいて発火が誘発される可能性は低いものと考えられる。

2. 1. 3 油火災試験

実プラントで使用されている燃料油、潤滑油、冷却用油等の可燃物は火災源の一つとして、発熱量、質量減少率等のデータが火災荷重、発熱速度等の評価に必要である。また、ばい煙により影響を受ける感知器、ケーブル等は、ばい煙による高温層の成長速度のデータが火災の感知やケーブル損傷等のタイミング等、火災影響評価に必要である。本プロジェクトでは、2種類のタービン油を対象として、コーンカロリメータ試験(図2.1.3-1)、プール火災試験(図2.1.3-2)及びルームコーナー火災試験(図2.1.3-3)を実施した。



図 2. 1. 3-1 コーンカロリメータ試験 (参5)

Fig. 2. 1. 3-1 Cone calorimeter test



図 2. 1. 3-2 プール火災試験 (参4)

Fig. 2. 1. 3-2 Pool fire test

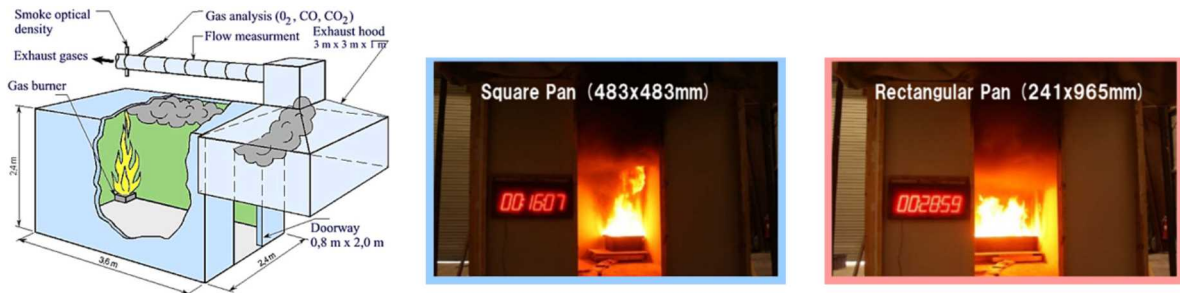


図 2.1.3-3 ルームコーナー試験^(参5)

Fig. 2.1.3-3 Room corner test

コーンカロリメータ試験では ASTM E 1354^(参9) に従い試験を実施し、発熱速度、質量減少率、ばい煙発生率、油の温度、熱流束等を測定した。これらのデータは火災源の基礎データとして必要である。プール火災試験では、ASTM E 2067^(参10) に従い、米国保険業者安全試験(UL) 711 1B で規定されるオイルパンを用いて試験を実施し、開放条件でのタービン油の燃焼性状(発熱速度、質量減少率、ばい煙発生率)を測定した。表 2.1.3-1 にコーンカロリメータ試験の、また表 2.1.3-2 にプール火災試験の結果を示す。

表 2.1.3-1 コーンカロリメータ試験結果^(参5)

Table 2.1.3-1 Cone calorimeter test results

	Heptane (150-600 s)			Oil #32 (600-2400 s)			Oil #56 (600-2400 s)		
	MLR (g/m ² ·s)	HRR (kW/m ²)	HOC (MJ/kg)	MLR (g/m ² ·s)	HRR (kW/m ²)	HOC (MJ/kg)	MLR (g/m ² ·s)	HRR (kW/m ²)	HOC (MJ/kg)
Run 1	12.88	589	45.7	4.88	190	39.0	4.50	174	38.7
Run 2	13.21	604	45.7	4.97	191	38.4	4.50	174	38.6
Run 3	13.66	616	45.1	4.84	186	38.5	4.78	185	38.7
Mean	13.25	603	45.5	4.90	189	38.6	4.60	178	38.7

MLR : Mass loss rate 質量減少率

HRR : Heat release rate 発熱速度

HOC : Heat of combustion :燃焼熱

開放条件でのプール火災試験では既知のプール面積の基で十分な酸素の供給がある場合のデータが得られるが、原子炉施設の建屋内での油火災は換気系のある閉空間での油の漏洩に起因するものであり、酸素の供給が制限されるため、開放条件よりも発熱速度が低下する。プール火災試験データは換気率等から閉空間における発熱速度を評価するための基

礎データとなる。ルームコーナー試験では国際標準化機構(ISO) 9705 で規定されるルームコーナー試験装置 (幅 2.4×奥行 3.6×高さ 2.4m) の開口部をカロリメーターの直下に配置することにより、発熱速度及びばい煙発生率を測定し、また試験装置内に熱電対を取り付け、温度を測定するもので、建屋内における火災発生位置による火炎性状や燃焼特性の相違を把握するための試験である。

表 2.1.3-2 プール火災試験結果^(参5)

Table 2.1.3-2 Pool fire test results

Fuel Type	Test #	Quantity (kg)	Starter (kg)	THR _{max} (MJ)	THR (MJ)	Combustion Efficiency
Heptane	1	7.970	--	363.4	346.3	0.95
	2	7.901	--	360.3	341.6	0.95
	3	7.921	--	361.2	340.9	0.94
	Mean	7.931	--	361.6	342.9	0.95
Oil #32	1	9.938	1.853	383.6	368.4	0.96
	2	9.928	1.867	383.2	371.8	0.97
	3	9.929	1.873	383.3	380.5	0.99
	Mean	9.932	1.864	383.4	373.6	0.97
Oil #56	1	9.824	1.899	380.2	373.2	0.98
	2	9.897	1.870	383.0	359.1	0.94
	3	9.930	1.866	384.3	369.2	0.96
	Mean	9.884	1.878	382.5	367.1	0.96

Quantity : 油の質量

Starter : ヘプタンの質量

THR : (Total Heat Released)max

= 質量×燃焼熱 (最大)

THR : 実測値

Combustion efficiency : THR/THR max

以上のように、原子力発電所の主要設備に関わる油 2 種類とヘプタンについて、火災影響評価に必要な発熱速度、質量減少率、ばい煙発生率、油の温度、熱流束等を取得した。また、油 2 種類の燃焼性状は、ほぼ同じ性状を示すことを確認した。

2. 1. 4 フィルタ火災試験

HEPA(High Efficiency Particulate Air Filter)フィルタを火炎で炙る試験(図2.1.4-1)を実施した。試験では、別途試験にて煤煙の付着(数十g程度から最大1kg程度)のフィルタを使用した。HEPA フィルタ本体は難燃性のガラス繊維素材であり、燃えることはなかったが、ガスケットなどの一部の部品が燃焼した。使用済のHEPA フィルタでは使用条件によってはフィルタに捕集されている埃、有機物等の可燃物が蓄積する可能性があり、それらの発火事例もあることから、使用状況に応じ使用済 HEPA フィルタの可燃物としての取り扱いについての注意が必要である。



図2.1.4-1 フィルタ火災試験^(参5)

Fig.2.1.4-1 Filter fire test

2. 1. 5 有機溶媒火災試験^(参11)

再処理施設での重大事故の一つとして取り上げられているセル内有機溶媒火災の影響を定量的に評価する手法の高度化に資することを目的に有機溶媒火災試験を国立研究開発法人日本原子力研究開発機構に委託し実施した。

本試験は、小型の試験装置及び実機サイズの HEPA フィルタが設置可能な大型の試験装置にて実施した。実施設では有機溶媒として、30%リン酸トリブチル (TBP) -70%ドデカンが使用されているが、本試験では施設規模の効果や TBP の濃度による効果を確認するため体積比を変更するとともにドデカン単体でも実施した。フィルタの透過風量は実機サイズの場合は定格風量 (50m³/min) とするなど各サイズの定格風量で風量一定で実施した。試験の結果、有機溶媒においてドデカンの燃焼が終了した燃焼晩期以降においてフィルタ前後の差圧の上昇が見られた。また、大型の試験装置の方が差圧の上昇傾向は小さかった。さらに燃焼後期では煤煙等の粒子径も増加が見られた。この増加の理由は液滴に関わる効果と考えられている。

2. 1. 6 HEAF 試験

HEAF とは、電気設備の故障（地震等による接続不良、環境条件及び導電性異物（保全作業中に使用された金属レンチ、ドライバー等）による短絡等）に起因して発生するアーク放電に伴う爆発的なエネルギー放出により、アーク放電発生箇所の圧力・温度が急激に上昇し、深刻な機器損傷を引き起こす事象である。また、爆発的なエネルギー放出により機器の破壊・変形、扉の開放、給電機器のトリップ等が起こることに加え、アーク放電に起因する火災の発生により周辺のケーブル等に影響を及ぼす場合がある。

HEAF 事象は国内外の原子力発電所で発生している。OECD/NEA 火災事象情報交換（FIRE : Fire Incident Records Exchange）プロジェクトの報告書^(参12)によれば、1975 年から 2012 年までに原子力発電所で発生した火災 415 件中 48 件（11.5%）が HEAF 事象に起因するものであったとしている。

国内の原子力発電所では、これまでに 4 件の火災を伴う HEAF が発生している。その一例として、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震で発生した東北電力女川原子力発電所 1 号機（以下「女川 1 号機」という。）の高圧電源盤火災による損傷状況を図 2.1.6-1 に示す。女川 1 号機では、異なる 2 台の高圧電源盤でアーク放電が発生し、連結する 10 台の高圧電源盤にケーブルダクトを通じて損傷が広がった。この損傷及びその後のアーク火災によって安全系の残留熱除去系ポンプが一時停止するという二次的な事象も発生した。このように、アーク放電に起因する火災が発生した場合には、原子力発電所の安全に影響を及ぼす可能性がある。このため、HEAF に係るアークエネルギー発生量、アーク放電の影響範囲、火災発生条件等について、検討を行う必要がある。

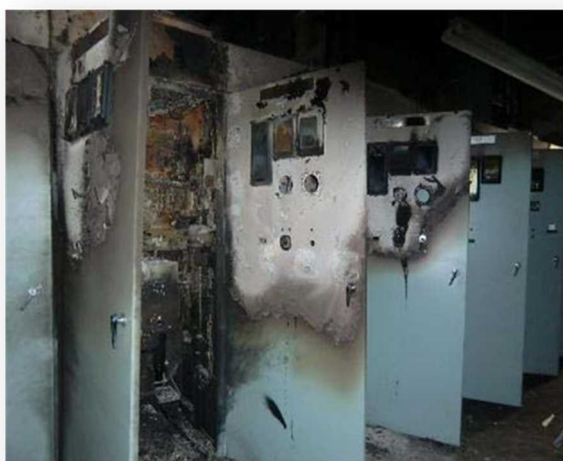


図 2.1.6-1 女川 1 号機の高圧電源盤の HEAF による損傷状況^(参13)

Fig. 2.1.6-1 Damage of metal-clad switchgears caused by HEAF event at Tohoku EPCO's Onagawa NPS unit 1

HEAF 試験の概要を図 2.1.6-2 に示す。HEAF 事象把握試験として比較的低電圧 (480V) の配電盤及びモーターコントロールセンタを用いた。一方、女川 1 号機で発生した HEAF 事象を再現し電気盤の延焼メカニズムを解明する試験として、5 連の高圧電源盤 (約 7000~7100V) を用いた。

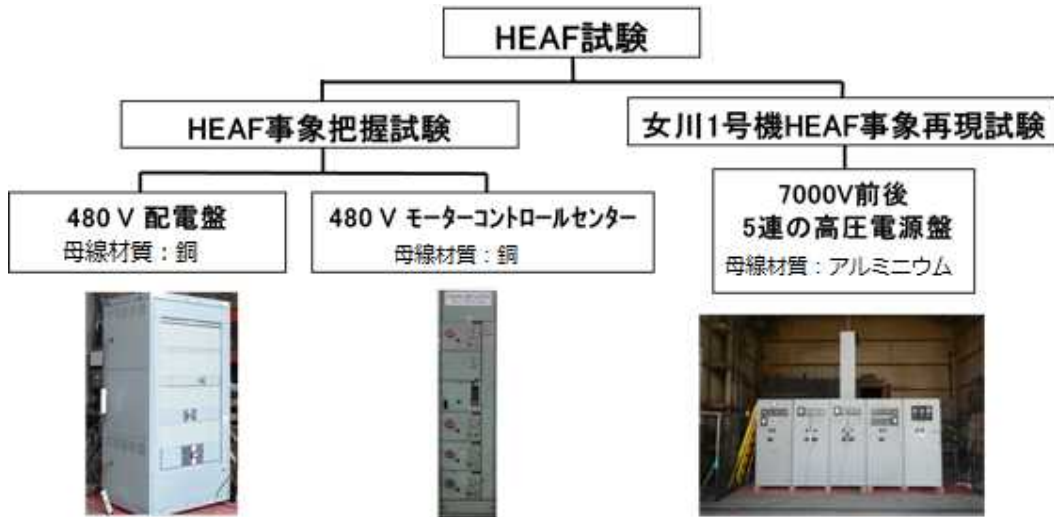


図 2.1.6-2 HEAF 試験の概要^(参14)

Fig. 2.1.6-2 Outline of HEAF tests

(1) 高圧電源盤の HEAF 試験結果

母線材質がアルミニウムの 5 連の高圧電源盤を用いて、電圧値約 7000~7100V、短絡電流値 22.6~25kA 及び 4 種類の短絡時間(1, 2, 2.5, 3 秒)をアーク放電発生条件として電気盤の上流にある変圧器のインピーダンスを考慮して設定し、6 回の HEAF 試験を実施した。短絡時間が 3 秒の高圧電源盤の HEAF 試験の一例を図 2.1.6-3 に示す。

①は試験前、②はアーク放電発生の瞬間 (約 0.2 秒後)、③はアーク放電・金属ヒューム等の発生 (約 2 秒後) 及び④はアーク火災 (約 10 分後) の写真であり、事象の進展順に並べてある。②では、アーク放電・金属ヒューム等が盤内に収まりきれず一部が上部開口から盤外へ漏えいしていることが分かる。③では、金属ヒューム等が大量に発生していることが分かる。アーク火災はアーク発生から 5~7 分後に発生し、隣接する高圧電源盤及び垂直トレイ内ケーブルの二次火災を引き起こした。高圧電源盤の試験では、このように二次火災を引き起こす場合もあるが、図 2.1.6-6 に示すように 6 回のうちアーク継続時間が短くアークエネルギーが小さい 2 ケースでは、短絡時間が短いため二次火災は発生しなかった。

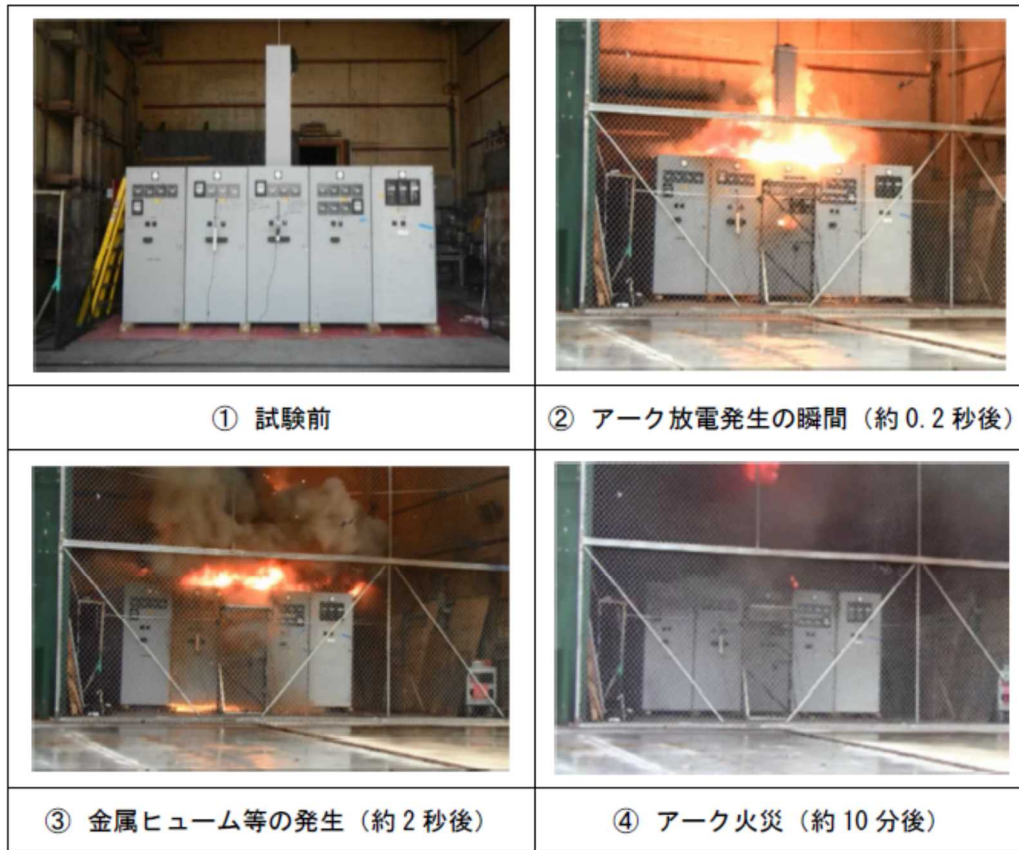


図 2.1.6-3 高圧電源盤の HEAF 試験^(参1)

Fig. 2.1.6-3 HEAF test of metal-clad switchgears

(2) 配電盤の HEAF 試験結果

母線材質が銅の配電盤を用いて、電圧値 480V、短絡電流値 52.3kA 及び短絡時間 2.0 秒をアーク放電発生条件として設定し、同条件下で 3 回の HEAF 試験を実施した。配電盤の HEAF 試験の一例を図 2.1.6-4 に示す。

①は試験前、②はアーク放電発生の瞬間 (約 0.1 秒後)、③はアーク放電及びアーク放電の熱で発生した金属ヒューム等の発生 (約 1 秒後) 及び④はアーク火災 (約 10 分後) の写真である。②及び③では、金属ヒューム等が盤内に収まりきれず、一部は盤外へ漏えいしていることが分かる。アーク火災は、アーク放電発生から数分後に発生し、約 20 分間継続した。また、アーク火災時には、同時に大量のばい煙も発生した。

配電盤の試験では、図 2.1.6-6 に示すように 3 回の試験のうち、2 回で二次火災が発生し、それよりもアークエネルギーの小さい試験では二次火災は発生しなかった。



図 2.1.6-4 配電盤の HEAF 試験^(参1)

Fig. 2.1.6-4 HEAF test of distribution panel

(3) モータコントロールセンタの HEAF 試験結果

母線材質が銅のモータコントロールセンタを用いて、電圧値 480V、短絡電流値 63.5kA 及び短絡時間 2.0 秒をアーク放電発生条件として設定し、同条件下で 4 回の HEAF 試験を実施した。モータコントロールセンタの HEAF 試験の一例を図 2.1.6-5 に示す。

①は試験前、②はアーク放電発生の瞬間 (約 0.2 秒後)、③はアーク放電・金属ヒューム等の噴出 (約 0.5 秒後) 及び④は金属粉塵等の発生 (約 2 秒後) の写真である。③では、モータコントロールセンタの筐体が破損し、大量の金属ヒューム等が噴出していることが分かる。④では、大量の金属粉塵等が、試験セル内 (横幅 5.5m × 高さ 7.0m) の全域に広がったことが分かる。

4 回試験を実施したが、アーク火災は一度も発生しなかった。火災が発生しなかった原因としては、筐体の破損によってアーク放電を継続することが出来なかったため (4 回ともアーク放電の継続時間は 0.9 秒以下)、そのアークエネルギーによる発熱自体が小さかったこと、及び筐体の破損箇所から、発生した熱エネルギーのほとんどが盤外へ放出されたことで、火災が発生するほど盤内の温度が高くならなかったこと等が考えられる。



図 2.1.6-5 モータコントロールセンタの HEAF 試験^(参1)

Fig. 2.1.6-5 HEAF test of motor control center

(4) HEAF 試験後の電気盤の変形等

表 2.1.6-1 に、試験で用いた 3 種類の電気盤についての特徴及び HEAF 試験後の変形等を示す。各電気盤の内部容積、筐体強度及び閉じ込め性については、相対比較を行った。

アーク放電発生時に測定した盤内の最大圧力については、モータコントロールセンタが最も高く、次いで配電盤、高圧電源盤の順になった。




モータコントロールセンタは、内部容積が“小”及び閉じ込め性が“高”であるために盤内の最大圧力が 3 種類の電気盤の中で最も高くなったものと考えられる。また、盤内の最大圧力が高いことに加え、筐体の強度が“低”のため、筐体に変形及び破損が認められた。

配電盤は、内部容積が“中”及び閉じ込め性が“中”であるために盤内の最大圧力が 3 種類の電気盤の中で二番目になったものと考えられる。また、筐体の強度が“中”であっても筐体に変形が認められた。

高圧電源盤は、内部容積が“大”及び閉じ込め性が“中”であるために盤内の最大圧力が3種類の電気盤の中で最も低くなったものと考えられる。また、筐体の強度が“高”であるため筐体に大きな変形は認められなかった。

表 2.1.6-1 電気盤の特徴及び試験後の外観^(参1)

Table 2.1.6-1 Characteristic features of the electrical cabinets and their photos taken after tests

電気盤 項目	配電盤 (DP HEAF Test 1)	モータコントロールセンタ (MCC HEAF Test 2)	高圧電源盤 (M/C HEAF Test 2)
HEAF試験後の 電気盤外観			
内部容積	中	小	大
筐体強度	中	低	高
閉じ込め性	中	高	中
盤内の最大圧力	26.9±2.8kPa	41.4±1.4kPa	10.3±3.4kPa
筐体の変形等	筐体に変形が認められた。	筐体に変形が認められた。 筐体に破損が認められた。	筐体に大きな変形は認められなかった。

(5) 女川1号機と本 HEAF 試験結果における高圧電源盤の損傷状況の比較

HEAF 試験終了後の高圧電源盤の損傷の状況(表 2.1.6-1)は、女川1号機の高圧電源盤ほど過酷ではなかった。さらに遮断器や高圧電源盤の後方に取り付けたサンプルケーブルについても、女川1号機の高圧電源盤ほど激しい損傷は認められなかった。

女川1号機の事例では損傷状況の分析から、アーク放電は異なる高圧電源盤で2回発生したとされている。一方、本 HEAF 試験における高圧電源盤のアーク放電は1回である。したがって、損傷状況に差異が生じた理由は、女川1号機の場合より本 HEAF 試験はアークエネルギーが小さかったためと考えられる。また、女川1号機の事例では、アルミニウム製母線の焼損(酸化)が本 HEAF 試験結果より過大であり、アルミニウムの酸化によって膨大な熱エネルギーが放出することにより、盤内がより高温になった影響で更に大きな被害が発生したのと考えられる。

(6) アーク火災の発生とアークエネルギーの関係

図 2.1.6-6 に HEAF 試験時に発生したアークエネルギーとアーク放電の継続時間との関係にアーク火災が発生した試験を赤塗りして示した。

図に示すように各電気盤において、アーク放電の継続時間とアークエネルギーとの間に比例関係が認められた。また、アーク火災の発生に関し、本試験で用いた配電盤及び高圧

電源盤に対して、あるアークエネルギーレベルにその発生条件が存在することが示唆された。

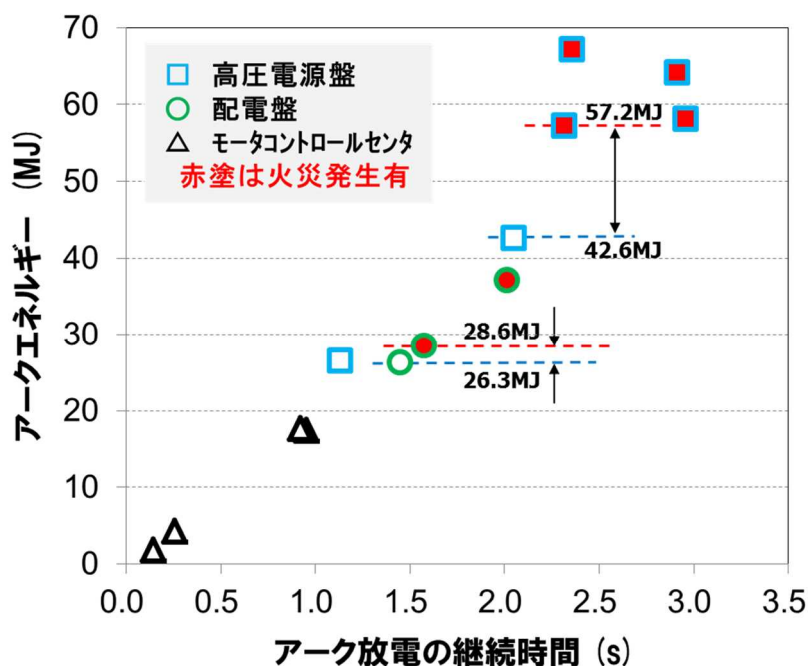


図 2.1.6-6 アーク火災の発生条件 (参1)

Fig. 2.1.6-6 Conditions of arcing fire

これらの試験結果から、アーク放電の継続時間を短くしアークエネルギーを小さくすることで、アーク火災の発生を抑制できる可能性があると考えられる。一方、電気盤の種類により内部の空間容積や閉じ込め性に相違があることから、これらもアーク火災の発生条件に影響すると考えられる。

(7) HEAF におけるアーク火災の発生防止対策

試験の結果から導かれる HEAF におけるアーク火災の発生防止対策を図 2.1.6-7 に示す。HEAF の第1段階では、アーク放電による爆発により機器の損壊、変形等の故障が発生する。また、アーク放電に起因する熱の影響により、機器等が高温になる場合、第2段階として、アーク火災が発生する。さらにアーク放電が継続するとアルミニウム母線の発熱・爆発を誘発する場合がある。これらのことから、電気盤の遮断器の遮断時間の調整等を行い、アーク放電の継続時間を短縮すれば、アーク放電による爆発の影響を減少させるとともに、電気盤の発熱を抑制し、アーク火災の発生を防止することが可能である。

したがって、HEAF におけるアーク火災の発生防止対策としては、過電流継電器の整定値をアーク火災が発生するアークエネルギー（アーク継続時間）のしきい値以下に設定して、アーク放電を早く止めることが有効である。

これらの新知見を基に「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」の案及び関連するガイドの改正案を作成した。これらの HEAF に係る技術基準及びガイド類は平成 29 年 8 月に施行された。

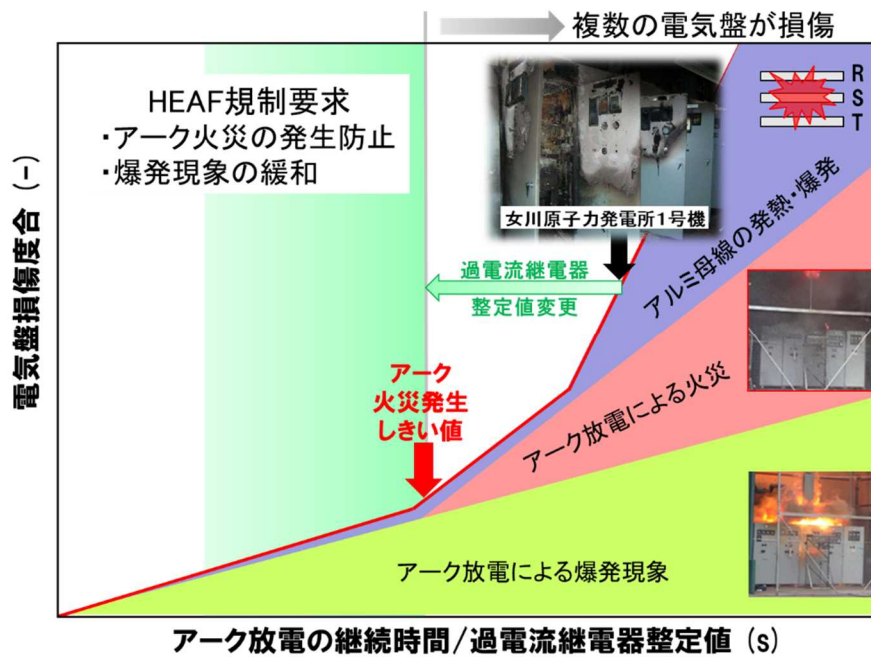


図 2.1.6-7 HEAF におけるアーク火災の発生防止対策 (参5)

Fig.2.1.6-7 Approach and concept of requirement against HEAF

2. 2 火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法の高度化

2. 2. 1 OECD/NEA PRISME/PRISME2 プロジェクト試験の結果を用いた火災解析コード (FDS コード) の妥当性確認

OECD/NEA のマルチルーム火災試験 PRISME/PRISME2 の結果を用い FDS コードの妥当性確認を行い、火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法を高度化した。妥当性確認に用いる試験としては、換気空調系と開口部でつながった複数の部屋をモデル化した試験設備での、電気盤を火災源とした試験を選定した。図 2. 2. 1-1 に示すように 3 つの部屋と通路からなる試験体系を計算格子幅 10cm でモデル化した。計算格子数は全部で約 70 万である。通路 (Corridor) と Room01 に入口が一つずつ、Room03 に出口が一つ設置されている換気空調系は FDS コードの空調モデルで模擬した (図 2. 2. 1-2)。また、試験体系から外部への漏洩もモデル化した。FDS コードの入力とした発熱速度 (HRR) は火災源である電気盤 (Cabinet) の前面部に設定した (図 2. 2. 1-3)。

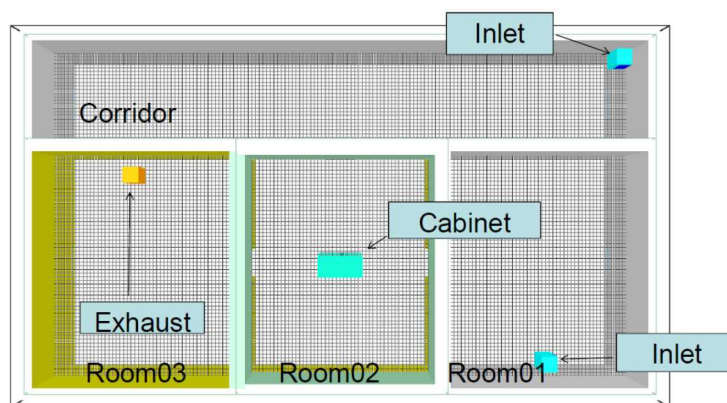


図 2. 2. 1-1 施設の FDS コードによるモデル化 ^(参5)

Fig. 2. 2. 1-1 Modeling of facilities for FDS

計算結果と試験結果との比較として、燃焼室 (図 2. 2. 1-1 中の Room02) の雰囲気圧力、温度及び酸素濃度の時間変化と、燃焼室と隣接室 (図 2. 2. 1-1 中の Room01) の間のドアを流れるガス流速の垂直分布 (燃焼開始後 300、900、1500 秒後、正值は隣接室から燃焼室へ流れることを意味する) を図 2. 2. 1-4 にそれぞれ示す。

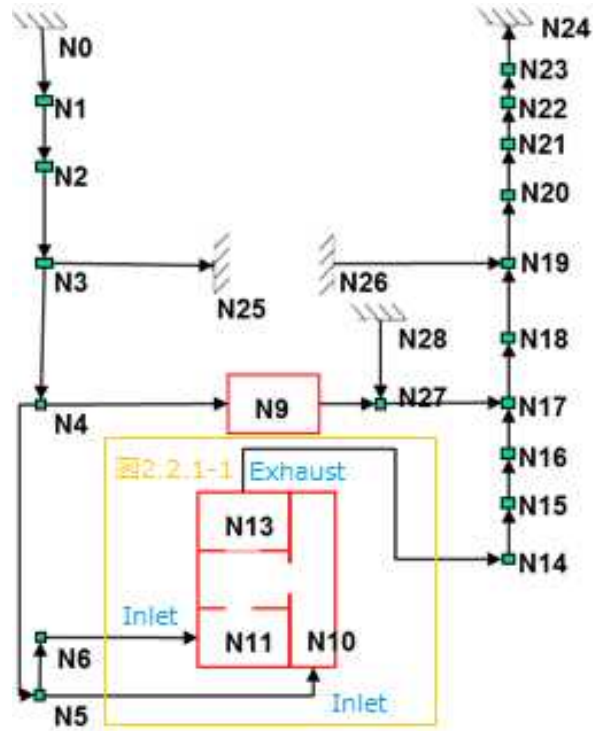


図 2.2.1-2 FDS コードの空調モデル図 (参5)

Fig.2.2.1-2 Air conditioning model of FDS

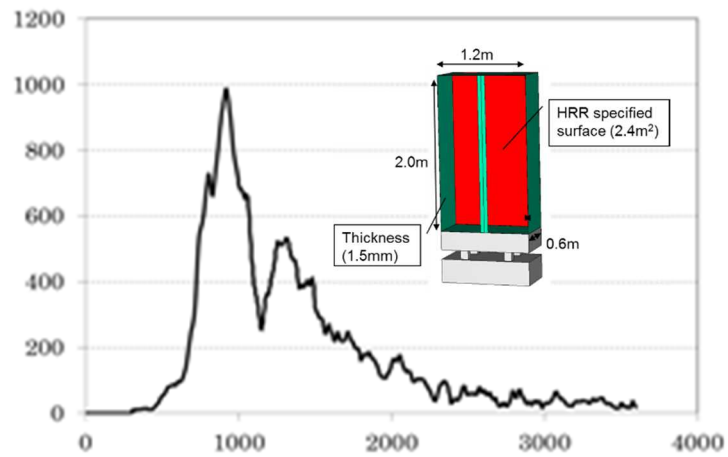


図 2.2.1-3 火災源の発熱速度 (参5)

Fig.2.2.1-3 Heat release rate of fire

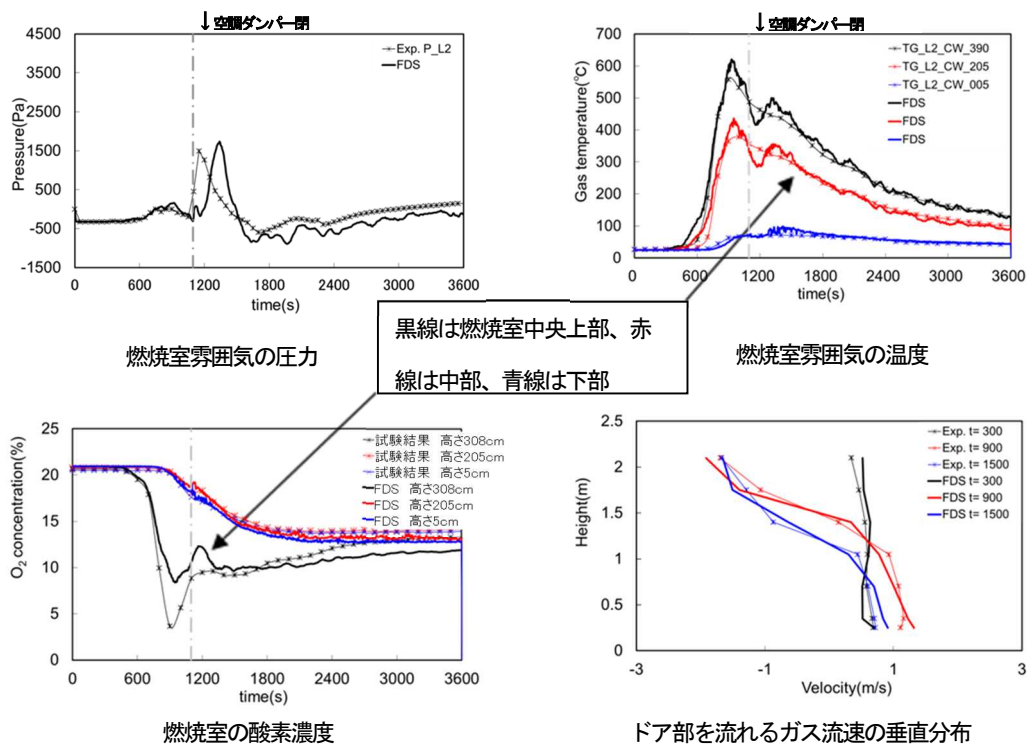


図 2. 2. 1-4 計算結果と試験結果との比較 (参5)

Fig. 2. 2. 1-4 Comparison between calculation results and tests

まず、空調ダンパー閉止後の圧力上昇を含めた燃焼室圧力挙動、次に、燃焼室の上部、中部及び下部の雰囲気温度挙動においてはやや相違はみられるものの火災防護対策の有効性を考える上でこれらの差異の影響は十分に小さく、計算結果は試験結果と良く一致していることが分かる。燃焼室の酸素濃度に関しては部屋上部の酸素濃度の減少速度がやや過小評価ではあるが、それ以外の濃度は良く一致している。最後に開口部でのガス流速分布は、開口部上方で負（高温の燃焼ガスが燃焼室から隣接室へ）、下方で正（低温の隣接室雰囲気ガスが隣接室から燃焼室へ）となっており、流速分布と良く一致している。以上、換気空調系と開口部でつながった4つの部屋の一つで発生した電気盤火災の影響として、各部屋の圧力挙動、及び雰囲気温度分布、酸素濃度分布及び開口部でのガスの流れといった3次元的な挙動をFDSコードは良く再現しており、コードの妥当性が確認された(参5)。

これまで国内外で実施された数多くの火災試験解析でHRRが計算結果に最も大きな影響を与えることが分かっており、今回の計算では試験で得られた電気盤火災のHRRを解析コードの入力とした。しかしながらHRRは同じ火災源でも部屋の形状や換気空調系の運転状況などに強く影響を受けるため、実機プラントでの火災解析に必要なHRRは必ずしも事前

に与えられるわけではない。したがって、入力データとしてのHRRを必要としない燃焼モデルの構築を今後検討する必要がある。

また、FDSを含む火災解析に使用される解析コード全般については、適用対象とする建屋内の構造、火源、評価対象とする物理現象（炎、煙等）等に応じて、解析コードのモデルの限界と不確かさを評価している報告書^(参15)があり、本プロジェクトにおいてもそれを踏まえて研究を進めている。今後は OECD/NEA の PRISME3 計画等の実機評価を踏まえたベンチマークの成果等をガイド等に反映していく。

2. 2. 2 東北電力女川原子力発電所で発生したような電源盤アーク火災の 延焼メカニズムの解明

女川1号機で発生した高圧電源盤火災の延焼状況を模擬するために、ロケット燃料(固体の燃料と酸化剤を混練した燃料)を用いてアークエネルギーの発生を模擬した5連の高圧電源盤の延焼試験を実施した。

図2.2.2-1には試験前の高圧電源盤を、図2.2.2-2には試験中の高圧電源盤を、それぞれ示す。試験結果から、高圧電源盤内の気密性が高まるほど、隣接する高圧電源盤への延焼が激しくなることがわかった。また、火災の発熱量、輻射熱量、電源盤内外の温度、ケーブルの延焼範囲等を測定し、評価用データとして取りまとめた。



図 2. 2. 2-1 試験前の高圧電源盤 (参5)

Fig. 2. 2. 2-1 Metal-clad switchgears before burned test



図 2. 2. 2-2 高圧電源盤の延焼試験 (参5)

Fig. 2. 2. 2-2 Burned test status of metal-clad switchgears

高圧電源盤の延焼試験結果を FDS コードで解析し、高圧電源盤の延焼状況を評価する手法を改良した。アーク放電で発生するエネルギーは①電源盤内の圧力や温度上昇、②電極の溶融・気化、③放射損失で消費され、④気化した電極の酸化反応に伴うエネルギーが生成されるが、アーク試験では④を含めてアークエネルギーとして模擬している。また、解析コードでは②がモデル化されていない。そこで、③をパラメータとして高圧電源盤のアーク現象のモデル化が可能かどうかの検討を行った。

アーク試験における HRR の測定データでは、3 秒間で 58.2MJ のエネルギーが得られている。FDS コードの解析パラメータである Radiative ファクタ (Ra F: 火炎の熱が周囲の物体に伝わる割合を示す定数) を 0.6 とした場合、全ての高圧電源盤内のケーブルが燃焼する結果が得られ、アーク試験で得られた高圧電源盤内のケーブル燃焼状態がおおむね模擬できた (図 2.2.2-3)。これは現状の FDS のモデルの制約条件の下で、熱源から周囲の物体への伝熱モデルの不確かさを RaF に集約したモデルであり、熱源が同レベルであれば他の電気盤でも RaF が 0.6 に近い値で模擬が可能になることが考えられるが、メカニズムの把握にはさらなる検討が必要である。

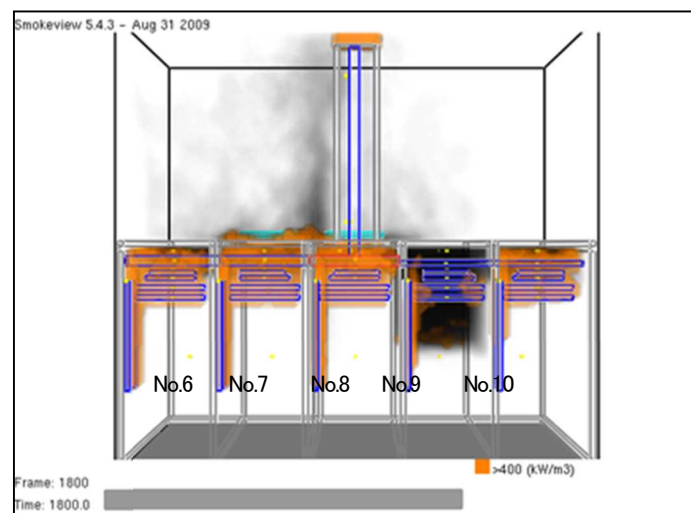


図 2.2.2-3 Ra F=0.6 での熱放出分布図 (参5)

Fig. 2.2.2-3 Heat release distribution at Ra F=0.6

上記解析モデルを用いて女川 1 号機で発生した高圧電源盤アーク火災のシミュレーション解析を実施した (図 2.2.2-4)。その結果、女川 1 号機で発生した高圧電源盤のアーク火災の延焼状況等が部分的に模擬でき、女川 1 号機では二次的火災により大規模なケーブル損傷が発生していたことが解析結果より示唆された。本プロジェクトでは、アーク放電に起因する二次的火災を評価する際の FDS コードのモデル化及びシミュレーション解析で実機評価する際の知見を数多く得ることができた。

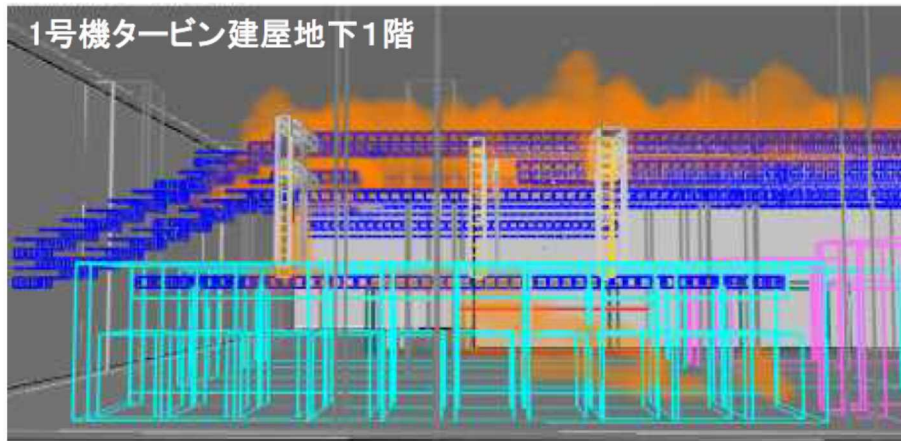


図 2.2.2-4 東北電力女川1号の火災事象のシミュレーション^(参5)

Fig. 2.2.2-4 Simulation of the Tohoku EPCO's Onagawa NPS unit 1 fire event

2. 2. 3 森林火災の火災解析コード(FARSITE コード)による解析

東京電力福島第一原子力発電所事故直後、20km 圏内警戒区域では田畑で草が伸び通常より森林火災発生の可能性が高い状況が危惧されていた。係る状況を踏まえて、警戒区域及び計画的避難区域内での森林火災の規模及び延焼について森林火災解析コード(Fire Area Simulator:FARSITE)を用いシミュレーションを実施するとともにその防護に必要な防火帯幅の検討を含めて評価を実施した。

福島第一原子力発電所立地地域の植生、地形データを入力し、FARSITE コードを使用し解析した結果を図 2. 2. 3-1 に示す。また、解析結果を基に出火点からの福島第一原子力発電所までの火災到達経路の鳥瞰写真を図 2. 2. 3-2 に示す。

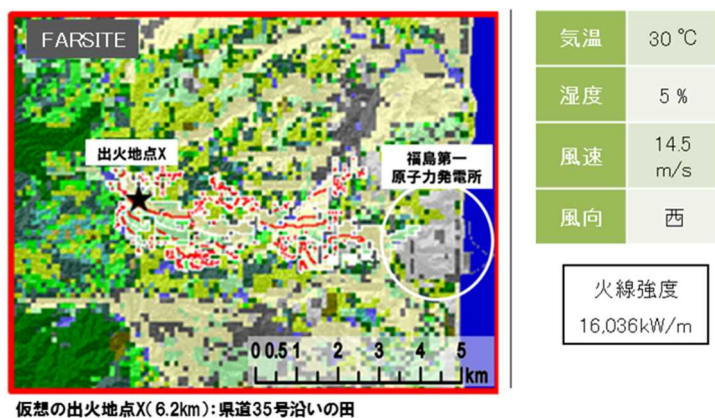


図 2. 2. 3-1 東京電力福島第一原子力発電所周辺の解析モデル (参16)

Fig. 2. 2. 3-1 Analysis model around the TEPCO Fukushima-daiichi NPS



図 2. 2. 3-2 解析結果の鳥瞰写真 (参5)

Fig. 2. 2. 3-2 Bird's-eye photo of the analysis result

FARSITE コードによる解析を行った結果、両図に示すように想定した出火点からの福島第一原子力発電所までの到達時間、火災の規模等についての傾向を把握した。これらの結果は、福島第一原子力発電所事故に伴う避難指示区域における緊急消防援助隊消防活動研修会等を通じて、福島県双葉消防本部及び近隣の公設消防に提供された。

また、FARSITE コードによる国内原子力発電所周辺の森林火災の解析結果及び国内外の森林火災に関する知見を総合的に分析し、森林火災の最大火線強度からその防護に必要な防火帯幅を決定する評価手法等を構築した。これらの成果は原子力発電所の外部火災影響評価ガイドの附属書 A：「森林火災の原子力発電所への影響評価について」に活用された。

3. 結論

3. 1 成果の要点

本プロジェクトでは、原子力施設に対する火災防護規制の高度化への反映を目的に、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の高度化、国際共同研究プロジェクト等への参画を行った。

火災試験データベースについては、原子力施設で使用されている可燃物の発熱速度、輻射熱、想定シナリオに基づく火災影響等のデータ、HEAF による電気盤のアーク火災に関するデータ等を整備した。

火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法については、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、女川原 1 号の高圧電源盤で発生したような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高度化した。

国際共同研究プロジェクト等への参画については、OECD/NEA の火災に関連する各プロジェクトに参画し、国際的な原子力施設の火災事例情報(FIRE プロジェクト)、高エネルギーアーク損傷(HEAF プロジェクト)及びマルチルーム火災 (PRISME/PRISME2 プロジェクト) に関する試験計画の作成や試験データの評価に加わるとともに関連するデータを入手した。また、他国の規制機関等と定期的なワークショップ等を開催し、火災防護規制に係る最新情報を入手した。

3. 2 目的の達成状況

火災試験データベースの整備については、火災影響評価の基礎データ等として活用されていることなどから、当初計画した目的を達成した。

火災防護対策の有効性を定量的に評価する手法の高度化については、それらの成果が火災防護に係るガイド類に活用されていることなどから、当初計画した目的を達成した。

国際共同研究プロジェクト等への参画による最新情報の入手については、入手した情報等が火災防護に係るガイド類に活用されていることなどから、当初計画した目的を達成した。

3. 3 成果の活用等

3. 3. 1 火災防護に係る審査のための基準類の整備

実用発電用原子炉に係る新規制基準が平成 25 年 7 月に施行された。図 2. 4-1 に従来の規制基準と新規制基準の比較を示す。新規制基準では、火災に対する考慮が大幅に強化されるとともに森林火災等の外部火災への対応が新設された。本プロジェクトでは、平成 23 年から平成 28 年にかけて原子力施設における火災防護規制の高度化への反映を目的として、安全研究を推進するとともに関連する基準類を整備した。

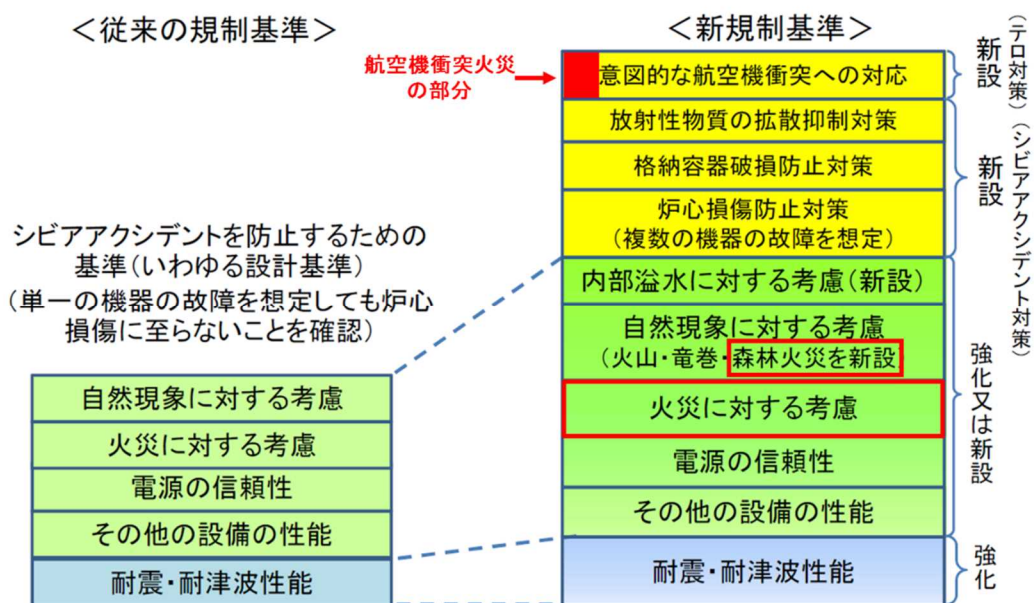


図 3.3.1-1 従来の規制基準と新規制基準の比較 (参5)

Fig.3.3.1-1 Comparison of the old and the new regulation

3.3.2 原子力発電所の火災防護に係る審査基準等

原子力発電所の火災防護に係る規制に関しては、新規制基準の施行前は、火災の発生防止、火災の感知・消火及び火災の影響の軽減の3方策を組み合わせた火災防護対策が求められていた。新規制基準等では、従来の火災防護対策に加え、新たに“(原子炉を)止める、冷やす、閉じ込める”機能(以下「安全機能」という。)を維持するための上記3方策の火災防護対策をそれぞれ独立に事業者に求めるように改定された。本プロジェクトでは、「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」(以下「審査基準」という。)、 「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」及び「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」の案を平成24年度までに実施してきた国内外の基準類の調査・検討及び安全研究の成果を活用して作成した。

上記基準類を用いた適合性審査では、審査基準に基づく内部火災への対応として、難燃性が確認されたケーブルの使用、安全上重要な機器・ケーブル等の系統分離及びそれを考慮した感知・消火設備の独立性、感知方法の異なる複数の火災感知器や自動消火設備の増設等が行われることとなった。また、内部火災影響評価ガイドに基づき、原子炉の高温停止及び低温停止機能の達成・維持の火災影響評価による確認等の審査が実施された。一方、外部火災への対応として、森林火災等の延焼を防止するため、原子力発電所の敷地境界付近に新たに防火帯等が設置された。

3. 3. 3 原子力発電所の外部火災影響評価ガイド

IAEA ガイド等を参考に原子力発電所の施設外のハザードを抽出し、それらの火災ハザードに対応した影響評価手法をもとに原子力発電所の外部火災影響評価ガイドの案を作成した。外部火災としては、原子力発電所の敷地外の火災及び敷地内であっても内部火災影響評価ガイドに包括されない敷地内タンク火災等を対象にした。原子力発電所の外部火災としては、主に、森林火災、近隣の産業施設（石油コンビナート等）、発電所敷地への航空機の墜落及び敷地内のタンク火災がある。これらの火災の影響を具体的に評価できるように、外部火災影響評価ガイドの附属書として、「附属書 A：森林火災の原子力発電所への影響評価について」、「附属書 B：石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」及び「附属書 C：原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の評価について」を新規に作成した。

図 3. 1. 3-1 に外部火災影響評価手法を示す。森林火災、近隣の産業施設、発電所敷地への航空機の墜落等に対して、原子炉施設の耐火性能、十分な離隔距離、二次的影響に対する防護対策が考慮されているか等の評価が示されている。このように本評価ガイド及び附属書は、外部火災が原子炉施設へ迫った場合でも安全機能を有する構築物、系統及び機器を内包する原子炉施設に影響を及ぼさないように、適切な防護対策が施されているか否かの評価を定量的に行うことができるものである。

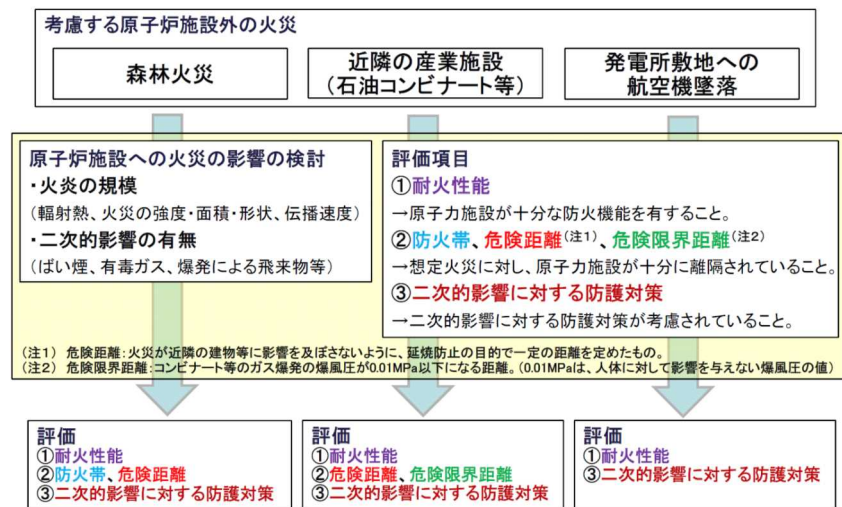


図 3. 3. 3-1 外部火災影響評価の手順 (参5)

Fig. 3. 3. 3-1 Procedure of external fire hazard

3. 3. 4 核燃料施設の火災防護に係わる審査基準等

核燃料施設の火災防護に係わる基準類については、平成 24 年度に「核燃料施設火災防護体制の充実に向けて-核燃料施設火災防護ガイドラインの取りまとめ-」(参17)の公表後、新規基準の策定時に「核燃料施設における内部火災の影響評価」、「核燃料施設における火災防護の検査手順」及び「再処理施設における火災防護の計画手順」について検討した。

しかしながら、核燃料施設に関しては、施設数も限られており、特徴も異なることから、個々の審査で個別に対応することとなった。原子力発電所と核燃料施設について共通する一般火災については、原子力発電所の火災防護に係る審査基準及び内部・外部火災影響評価ガイドが核燃料施設の適合性審査において準用されているが、公表済みの「核燃料施設火災防護体制の充実に向けて-核燃料施設火災防護ガイドラインの取りまとめ-」^(参 17)の考え方等も適合性審査にて活用されている。

3. 3. 5 HEAFに係る電気盤の設計に関する審査ガイドの整備

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第 45 条第 3 項 1 号では、保安電源設備について、電線路、発電用原子炉施設において常時使用される発電機及び非常用電源設備から安全施設への電力の供給が停止することがないように、短絡等による電気盤の損壊の拡大を防止するため必要な措置を講じることを求めている。また、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」では、HEAF は火災源の一つとして記載されている。

本プロジェクトで実施した平成 28 年度までの HEAF 試験の結果から、電気盤の遮断器の遮断時間の調整等を行い、アーク放電の継続時間を短縮すれば、アーク放電による爆発の影響を減少させるとともに、電気盤の発熱を抑制し、アーク火災の発生を防止することが可能であることを明らかにした。これらの新知見を基に「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」の案及び関連するガイドの改正案を作成した。これらの HEAF に係る技術基準及びガイド類は平成 29 年 8 月に施行された。

3. 4 今後の課題等

研究成果は、評価ガイド等の作成に反映されている。また、安全性向上に係る評価等で活用が期待されている。なお、火災防護対策の更なる高度化には、実機における火災影響を精度よく予測できることが重要で、そのために解析モデルの改良を含め、実験による妥当性確認を行うなど評価精度の向上を図る必要がある。これらの研究は、今後の後継プロジェクトにおいて実施予定である。

文 献

- (参 1) 椛島一、土野進、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, 平成 28 年 3 月.
(<https://www.nsr.go.jp/data/000145383.pdf>)
- (参 2) S. Tsuchino and H. Kabashima, Nuclear Regulatory Authority Experimental Program to Characterize and Understand the High Energy Arcing Fault (HEAF), NUREG/IA-0470, Volume 1, August 2016.
- (参 3) ASTM D6113, “Standard Test Method for Using a Cone Calorimeter to Determine Fire-Test-Response Characteristics of Insulating Materials Contained in Electrical or Optical Fiber Cables”, Book of Standards Volume: 10.02, November 2016.
- (参 4) 独立行政法人原子力安全基盤機構, 安全研究年報 (平成 23 年度), JNES-RE-2012-0001-Rev. 2, 2012 年 8 月.
- (参 5) 椛島一、笠原文雄、畑孝也、“火災防護対策の高度化に係わる調査・研究”、第 6 回プラント安全技術評価検討会 資料 2 平成 28 年度事後評価調査票、平成 29 年 10 月 5 日.
- (参 6) 国立大学法人豊橋技術科学大学: 平成 26 年度原子力施設等防災対策等委託費 (火災時電気設備に関わる燃焼モデル整備) 事業報告書 (代表: 中村祐二)、2015.
- (参 7) 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/>)
- (参 8) 国立大学法人筑波大学: 平成 27 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) 事業報告書 (代表: 松田昭博)、2016.
- (参 9) ASTM E1354, Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter.
(<https://www.astm.org/Standards/E1354.htm>)
- (参 10) ASTM E2067, Standard Practice for Full-Scale Oxygen Consumption Calorimetry Fire Tests.
(<https://www.astm.org/Standards/E2067.htm>)
- (参 11) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構: 平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費 (再処理施設における火災事故時影響評価試験) 事業報告書 (代表: 阿部仁)、2016.

- (参 12) Analysis of High Energy Arcing Fault (HEAF) Fire Events: OECD Fire Project - Topical Report No. 1, NEA/CSNI/R(2013)6, June 2013.
(<https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2013/csni-r2013-6.pdf#search=%27NEA%2FCSNI%2FR%282013%296%27>)
- (参 13) Event Combinations of Fire and Other Events: The Fire Incidents Records Exchange Project Topical Report No. 3, NEA/CSNI/R(2016)7, July 2016.
(<https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2016/csni-r2016-7.pdf>)
- (参 14) 独立行政法人原子力安全基盤機構, 安全研究年報 (平成 24 年度), JNES-RE-2013-0001-Rev. 2, 2013 年 8 月.
- (参 15) Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, N NUREG-1824, July 2016.
(<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1824/>)
- (参 16) 独立行政法人原子力安全基盤機構, 福島第一原子力発電所への林野火災に関する影響評価, JNES-RC-Report Series JNES-RC-2012-0002, 2012 年 6 月.
- (参 17) 独立行政法人原子力安全基盤機構, 核燃料施設火災防護体制の充実に向けて-核燃料施設火災防護ガイドラインの取りまとめ-, JNES-RC-Report Series JNES-RC-2012-0001, 2012 年 4 月.

「火災防護対策の高度化に係わる調査・試験」の（主な）執筆者

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

椛島 一 主任技術研究調査官

笠原文雄 技術参与

石橋 隆 技術参与

加藤敬輝 技術研究調査官

畑 孝也 統括技術研究調査官