

共同研究成果報告書

原子力発電所における火災評価モデル に関する基礎的研究

原子力規制委員会 原子力規制庁

共同研究相手先 国立大学法人筑波大学

令和5年3月

1. 研究目的

Fire Dynamics Simulator (以下「FDS」という。)は、原子力発電所の火災影響評価を行うために用いられている火災解析コードの一つである。FDSは、熱発生速度(Heat Release Rate (以下「HRR」という。))を発熱源として与えることで火災事象を良好に再現できるが、そのためには、火災シナリオごとに火災試験を実施してHRRを取得する必要がある。しかし、火災シナリオの数だけ火災試験を実施してHRRを取得する方法は、経済的及び作業負荷の観点から現実的でない。そこで、FDSにおいて特定の火災試験データに依存しない汎用的な火災影響評価を実現するために、化学反応モデルに基づく燃焼モデルを考慮した火災評価モデルを構築する方法を検討する。

2. 研究内容

本研究では、電気ケーブル(以下「ケーブル」という。)の化学反応モデルに基づく燃焼モデルについて2つの考え方を検討した。1つは、ケーブルを構成材(導体、シース、絶縁体及び介在物)に分解し、熱分解試験から得られる熱分解特性(重量減少、吸熱・発熱特性)を組み合わせたモデルである。もう1つは、ガス分析により同定・定量された可燃性ガスの発生速度がケーブルの温度勾配に依存すると仮定したモデルである。これらを検討するために、構成材ごとに熱重量・示差熱同時測定及びガス分析試験を実施した。さらに、ケーブルに対する燃焼試験を実施した。試験結果からケーブル及び構成材の特性に関する考察を行い、2つの燃焼モデルを比較することでそれぞれのモデルについて詳細解析のための適用性を検討した。

3. 実施方法

3.1 電気ケーブル燃焼モデル構築に用いる熱分解特性等の取得

熱重量示差熱分析

熱重量示差熱分析には、島津製作所製の示差熱・熱重量同時測定装置(DTG-60)を用いた。本測定では、ケーブル構成材ごとの熱分解特性データを取得するために、ケーブルを構成材ごとに分解し、それぞれを1mgの試料とした。また、装置内の昇温条件は、燃焼が継続する前段階に当たる可燃性ガスの放出に係る熱分解を捉えるために、窒素雰囲気下で室温から500℃まで10℃/minで昇温した。

ガス分析

ケーブルの熱分解等で生じる可燃性ガス等の分析には、島津製作所製のガスクロマトグラフ質量分析計(GCMS-QP2020)を用いた。本分析では、熱分解等に伴うガスの種類と濃度のデータを取得するために、後述の燃焼試験で生成される排気雰囲気を対象としてガスクロマトグラフィー質量分析を実施した。

燃焼試験

ケーブルの燃焼試験には、東洋精機製のコーンカロリメータ装置を用いた。本試験では、

ケーブル燃焼時の HRR を取得するために、ケーブルに対して ISO5660 に基づく燃焼試験を実施した。試料表面に与えるコーンヒータ温度及び輻射熱は、予備試験の結果から 750℃、約 40 kW/m²とした。燃焼対象は、ケーブルを長さ 50 mm で切断したケーブル 5 本をアルミニウムの薄板で作成したトレイ（縦幅 50 mm×横幅 50 mm×厚さ 10 mm）に並べた試験体とした。

3.2 原子力発電所における火災評価モデルの構築

火災評価モデルの構築に際して、2つの燃焼モデルを比較検討し、FDS に組み込めるか否か検討した。さらに、本研究で実施した燃焼試験を模擬した再現解析を実施することで、当該モデルの妥当性を検討した。また、実際の原子力発電所の複数区画を模擬したモデルを作成し、検討した燃焼モデルを用いてケーブル火災を解析した。さらに、解析結果からケーブルの延焼性等に注目した。

4. 研究実施分担

| 項目 ◎：主担当、○：副担当 | 原子力 規制庁 | 筑波大学 |
|-------------------------------|------------|------|
| (1)電気ケーブル燃焼モデル構築に用いる熱分解特性等の取得 | | |
| 試験用電気ケーブルの調達 | ◎ | ○ |
| 試験の実施 | ○ | ◎ |
| 試験結果の整理及び考察 | ○ | ○ |
| (2)原子力発電所における火災影響評価モデルの構築 | | |
| 電気ケーブル燃焼モデルの構築 | ◎ | ○ |
| 原子力発電所における火災解析 | ○ | ◎ |
| 解析結果の整理及び考察 | ○ | ○ |

※甲乙共に○のみの記載となっている項目については双方で等しい分担率で実施する。

5. 共同研究参加者

| 所属 | 氏名 |
|---|--|
| 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 技術研究調査官 技術研究調査官 統括技術研究調査官 | 加藤 敬輝（令和3年1月まで参加） 松田 航輔（令和3年1月から参加） 椛島 一 |
| 国立大学法人筑波大学 システム情報系構 造エネルギー工学域 准教授 | 松田 昭博 |

（実施期間：令和元年8月～令和4年3月）

6. 研究実施工程

| 項目 | 年度 | | 令和元年度 | | | | 令和2年度 | | | | 令和3年度 | | | |
|-------------------------------|----|---|-------|---|----------------------|---|-------|---|---|----------------|-------|---|---|-------------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| (1)電気ケーブル燃焼モデル構築に用いる熱分解特性等の取得 | | | | | 試験用電気ケーブルの調達、試験片の作成等 | | | | | | | | | |
| | | | | | 試験の実施 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 試験結果の整理及び考察 | | | | |
| (2)原子力発電所における火災影響評価モデルの構築 | | | | | | | | | | 電気ケーブル燃焼モデルの構築 | | | | |
| | | | | | | | | | | 原子力発電所における火災解析 | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | 解析結果の整理及び考察 |

7. 成果概要

電力用ケーブルである NH-CE/F-2.0 における熱重量示差熱分析の結果から各構成材が重量減少を伴った正の示差熱（発熱反応）を示す温度範囲は 250℃から 500℃の間であった。一方、燃焼試験の結果からケーブルの燃焼開始温度は 550℃であった。このことから、各構成材はケーブルより低い温度で燃焼することが示唆された。構成材ごとの吸熱・発熱反応を組み合わせることで電気ケーブルの燃焼モデルを構築し、FDS を用いて火災影響評価を実施した場合は、実際の電気ケーブルより低い温度で燃焼が始まることになり、HRR 等の解析結果が過度に保守的になると考えられる。したがって、詳細解析に当たって構成材ごとの吸熱・発熱反応を組み合わせることで燃焼モデルを構築する方法は適当でなく、ケーブル内部の構成材温度勾配を適切に評価する燃焼モデルを考慮する必要があることが示唆された。そのため、ガス分析により同定・定量された可燃性ガスの発生速度がケーブルの温度勾配に依存すると仮定した燃焼モデルについて、FDS を用いて燃焼試験を模擬したモデルを構築し、解析した。FDS では熱伝導を一次元で計算されるためケーブルの軸方向（入熱方向に対して垂直方向）への熱移動が計算されていないことから、解析結果は燃焼試験の結果と乖離したことが分かった。これを解決するために、熱バランスの因子（加熱源による入熱、燃焼の輻射熱による入熱、高温物体の輻射熱による放熱及び金属導体による放熱）を組み込んだ燃焼モデルを考慮した火災評価モデルを構築した。

また、本研究で構築した火災評価モデルを用いて、原子力発電所の複数区画で発生するケーブル火災の試解析を行った。解析対象とする複数区画は、米国の火災解析に関するガイドライン(NUREG-1934)に記載されている BWR 型原子力発電所内のスイッチギア室とした。解析開始後 1000 秒以降、火災源が設定された区画の互いに接触するケーブルトレイ間で火災が伝播するものの、隣接区画に設置されるケーブルトレイに火災が伝播しないことを確認した。このように、FDS で作成した燃焼モデルを用いて原子力発電所内の複数区画における火災解析を実施し、HRR 等の推移について評価できることを確認した。

8. 公表成果一覧

1. Shintaro Tanaka, Akihiro Matsuda, Numerical study on electric cable fire considering thermal degradation in nuclear power plants using FDS, *3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2020)*, MS03-4-05, pp. 236-239, Kobe, Japan (2020.12).
2. 田中 慎太郎, 松田 昭博, FDS を用いた原子力発電所のケーブル火災の安全評価に関する研究, 日本原子力学会 2020 年春の年会予稿集, No. 2K01, 総ページ数 1 (2020.3).