

安全研究成果報告（案）

説明資料

火災防護に係る影響評価に関する研究

事後評価 説明資料

令和3年4月

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

目次

1. 研究概要・目的(実施期間:平成29年度～令和2年度)
2. 研究期間を通じた主要成果
 - 2.1 高エネルギーアーク損傷(HEAF)の影響評価
 - 2.2 電気ケーブルの熱劣化評価
 - 2.3 火災影響評価手法・解析コード等の整備
3. まとめ
4. 成果の活用について
5. 成果の公表等
6. 成果目標に対する達成状況
7. 今後の展開

1. 研究概要・目的

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**事象について更なるリスク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。

先行研究プロジェクト(H23年度～H28年度)では、東日本大震災時に東北電力株式会社女川原子力発電所で発生したアーク**火災**に着目した高エネルギーアーク損傷(以下、HEAFという。)試験を実施し、対策の検討に向けたデータを取得するとともに、電気ケーブル等の可燃物について**火災**データの取得と解析コードの整備を行った。

本研究プロジェクト(H29年度～R2年度)では、先行研究プロジェクトの知見を踏まえ、実機を模擬したHEAFの**爆発**現象に係る要素試験・解析、電気ケーブルの**熱劣化**に係る試験・解析及び**火災**影響評価手法・解析コード等の整備を行った。

1.研究概要・目的

先行研究プロジェクトの成果の活用により作成され、制定された「实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」、「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」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」の見直しの要否の検討に必要な技術的知見を取得する。

(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。

2. 研究期間を通じた主要成果

- 2.1 高エネルギーアーク損傷(HEAF)の影響評価
- 2.2 電気ケーブルの熱劣化評価
- 2.3 火災影響評価手法・解析コード等の整備

2.1 HEAFの影響評価①

1. 実施内容



第一段階

アーク放電に起因する**爆発**

第二段階

アーク放電に起因する**火災**

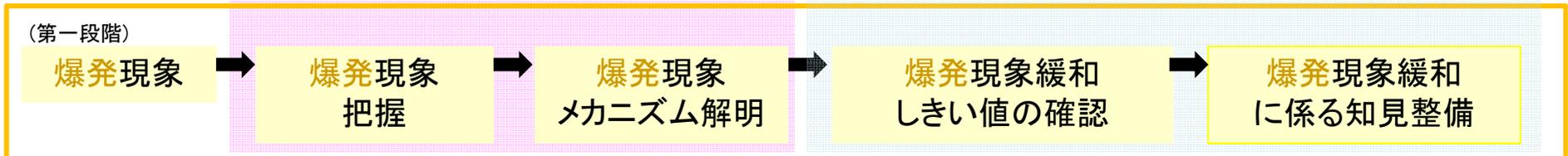
図1 先行研究プロジェクトにおける高圧電源盤を用いたHEAF試験（東北電力女川発電所HEAF事象の再現実験）

先行研究プロジェクト「火災防護対策の高度化に係わる調査・試験」(H23-H28)で実施済



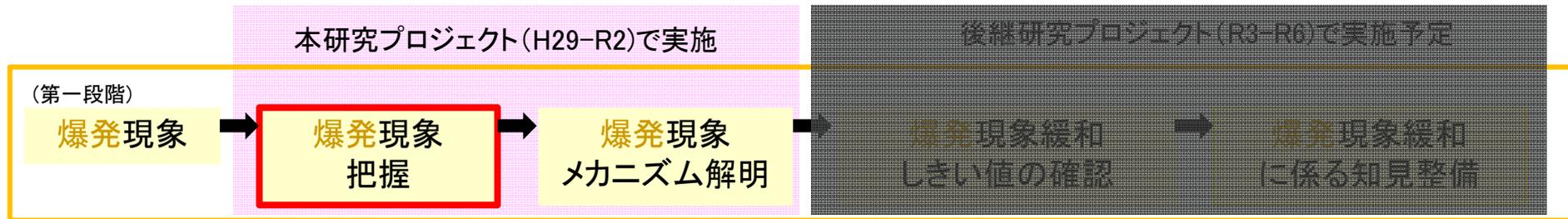
本研究プロジェクト(H29-R2)で実施

後継研究プロジェクト(R3-R6)で実施予定



2.1 HEAFの影響評価②

2. 主要成果①



NRAが実施したHEAF試験



図2 電源盤を用いたHEAF試験



図3 筐体(試験体)を用いたHEAF試験

筐体(試験体(図3))を用いたHEAF試験の要素試験を行い、爆発現象の進展を確認した。

2.1 HEAFの影響評価③

2. 主要成果②

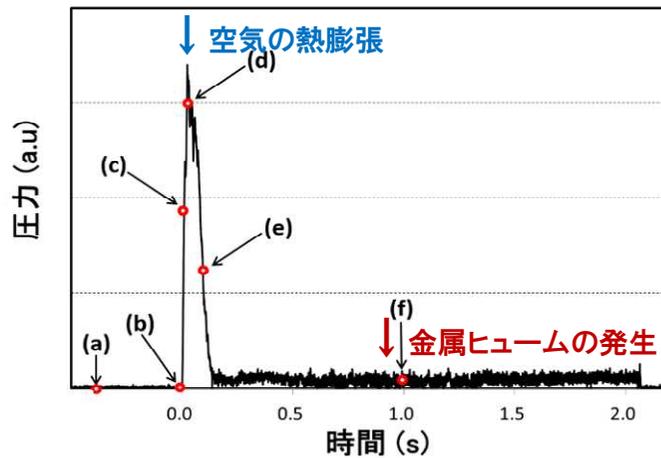
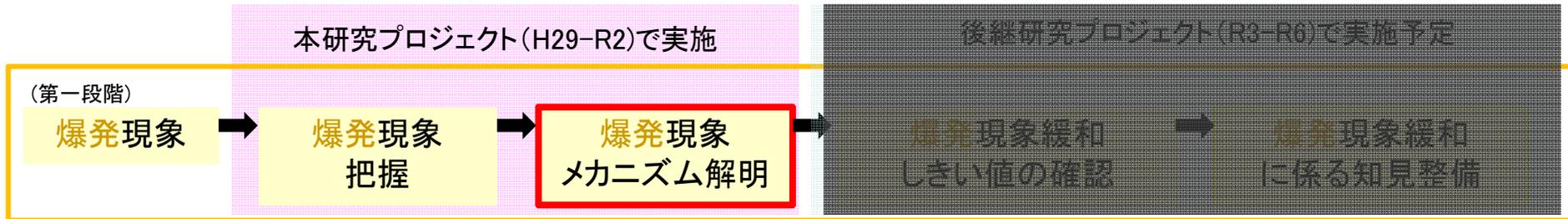


図4 爆発圧力とアーク放電時間の一例



図5 高速度ビデオカメラを用いたHEAF事象解析の一例

・HEAFの爆発圧力は2種類存在する(図4)。初期のスパイク的な圧力上昇は空気熱膨張、その後の安定的な圧力は金属ヒュームの発生に因るものであることが示唆された(図4、図5)。

HEAFの爆発現象のメカニズムを明らかにした。

2. 研究期間を通じた主要成果

- 2.1 高エネルギーアーク損傷(HEAF)の影響評価
- 2.2 電気ケーブルの熱劣化評価
- 2.3 火災影響評価手法・解析コード等の整備

2.2 電気ケーブルの熱劣化評価①

1. 実施内容

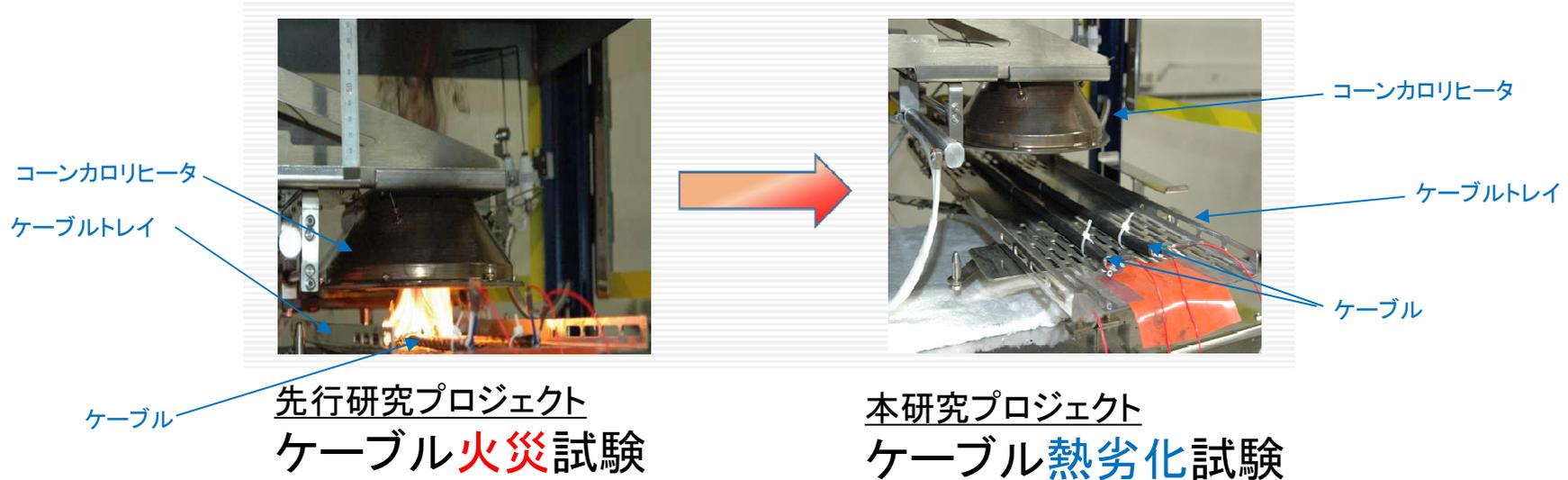
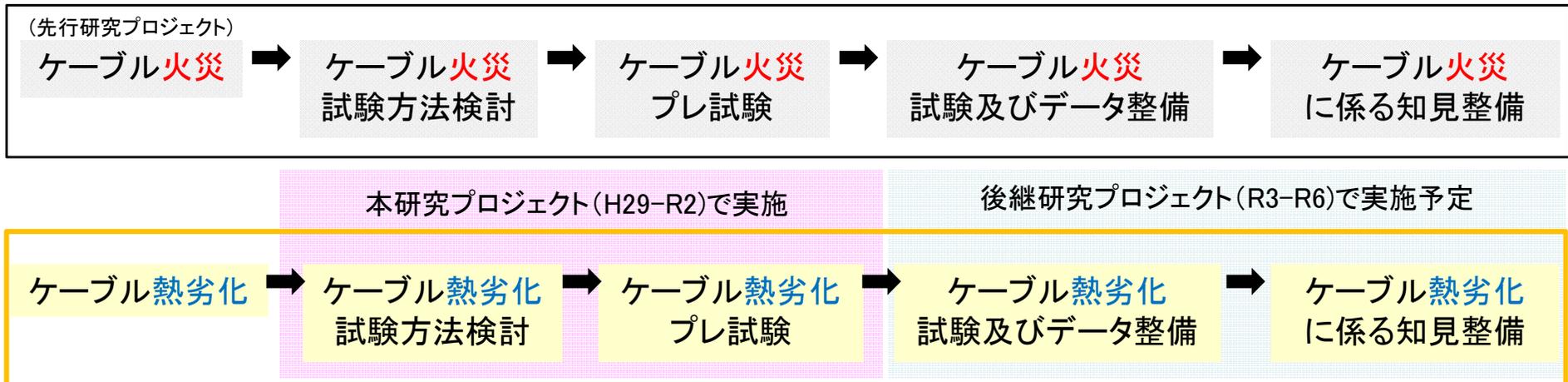


図6 コーンカロリメータによるケーブル試験の一例

先行研究プロジェクト「火災防護対策の高度化に係わる調査・試験」(H23-H28)で実施済



2.2 電気ケーブルの熱劣化評価②

2. 主要成果①

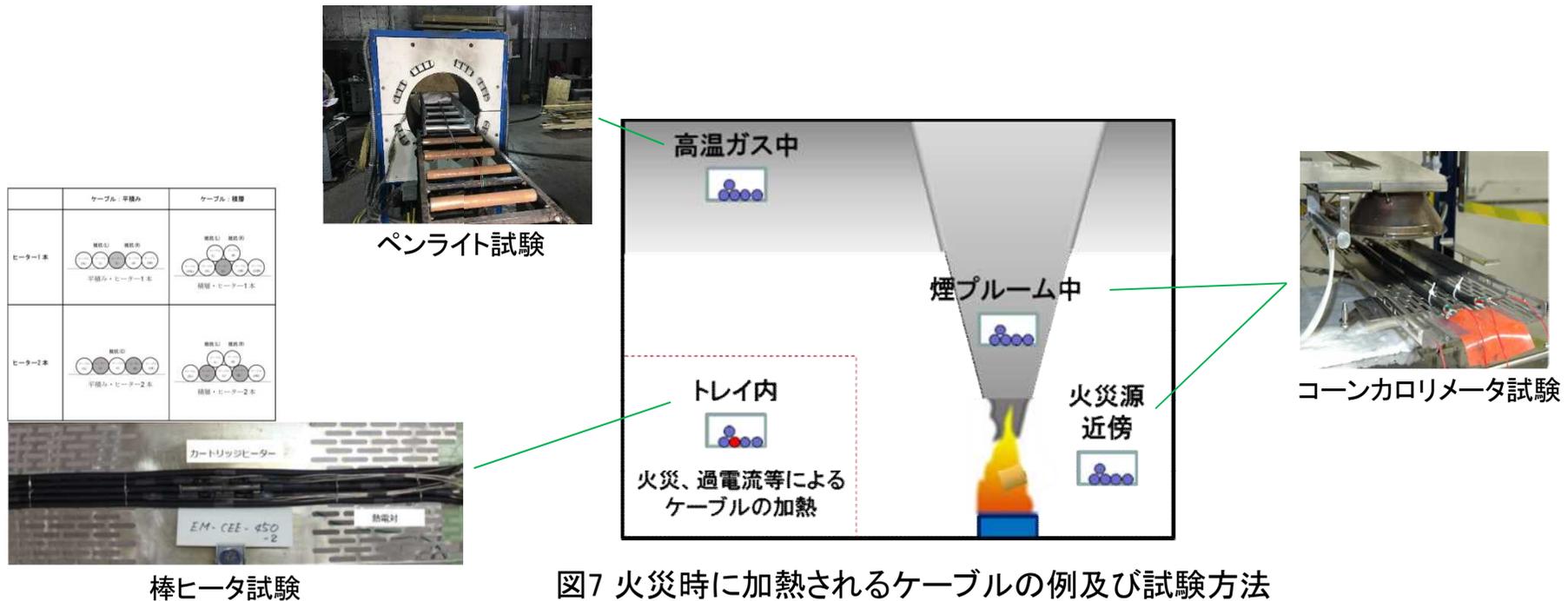
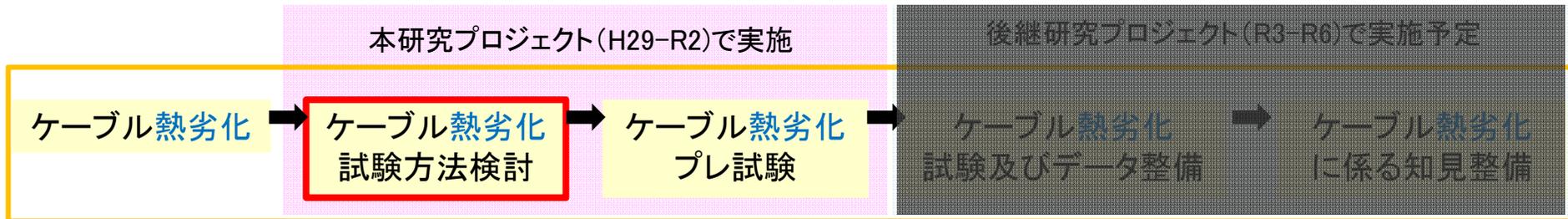


図7 火災時に加熱されるケーブルの例及び試験方法

火災時に加熱されるケーブル(図7)を想定した種々のケーブル熱劣化試験方法を策定した。

2.2 電気ケーブルの熱劣化評価③

2. 主要成果②

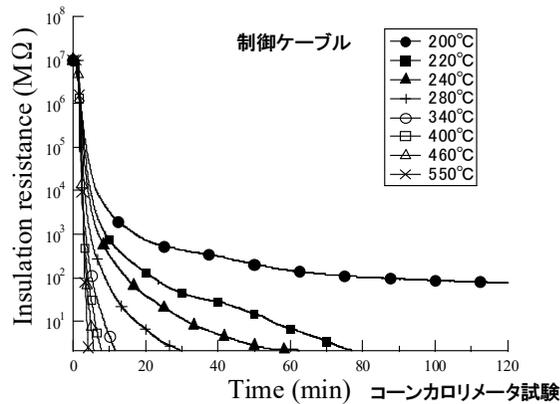


図8 絶縁抵抗と加熱時間の一例

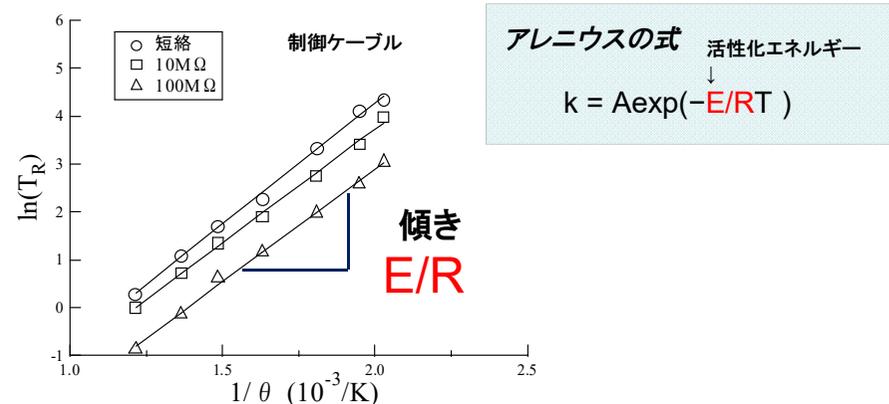


図9 絶縁抵抗低下に係るアレニウスプロットの一例

- ・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(図8)。
- ・ケーブルの熱による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(図9)。

ケーブルの熱劣化に係る活性化エネルギーに関する知見を取得した。

2.2 電気ケーブルの熱劣化評価③

2. 主要成果③

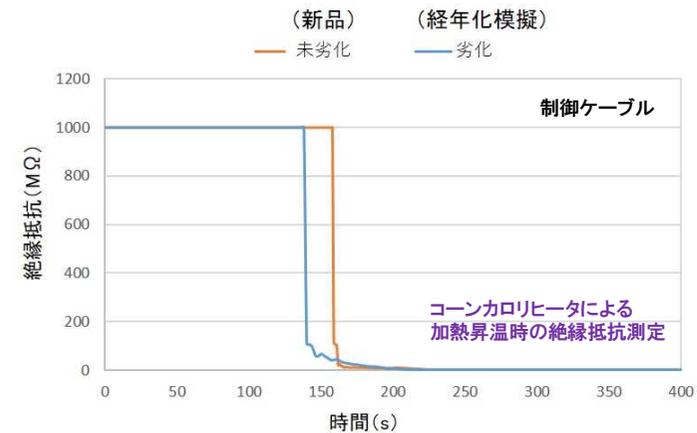
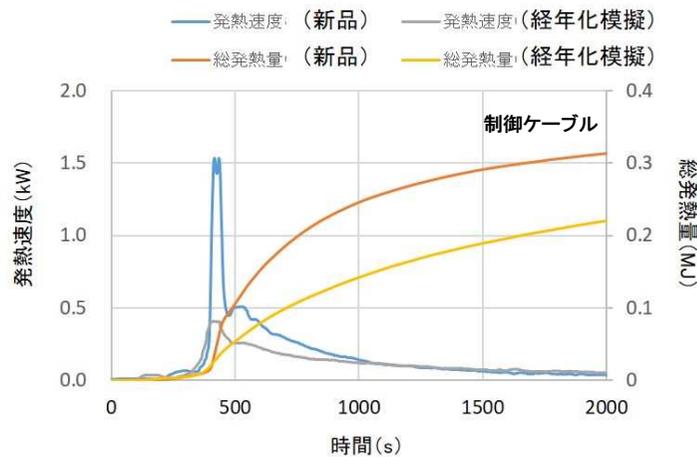
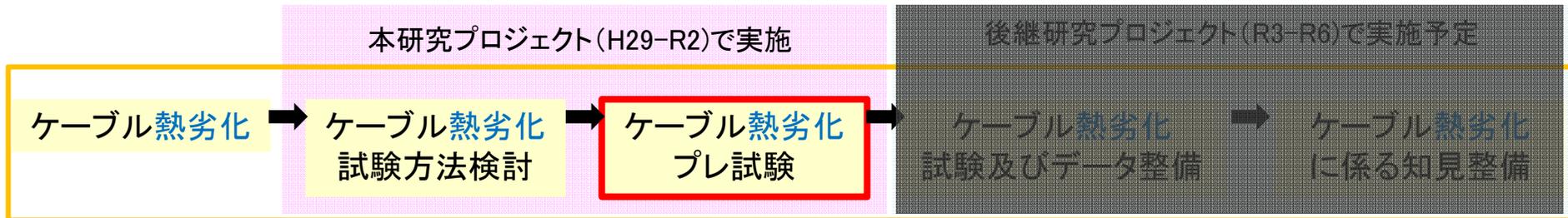


図10 新品と経年化を模擬したケーブル燃焼試験の一例 図11 新品と経年化を模擬したケーブルの絶縁抵抗測定の一例

- ・経年劣化を模擬したケーブルは、新品のケーブルに比べ、発熱速度及び総発熱量が小さいことが確認された(図10)。
- ・経年劣化を模擬したケーブルは、新品のケーブルに比べ、絶縁抵抗の低下する温度が低いことが確認された(図11)。

経年劣化を模擬したケーブルに係る熱劣化に関する知見を取得した。

2. 研究期間を通じた主要成果

- 2.1 高エネルギーアーク損傷(HEAF)の影響評価
- 2.2 電気ケーブルの熱劣化評価
- 2.3 火災影響評価手法・解析コード等の整備

2.3 火災影響評価手法・解析コード等の整備 ①

1. 主要成果①

ケーブルトレイ火災試験解析

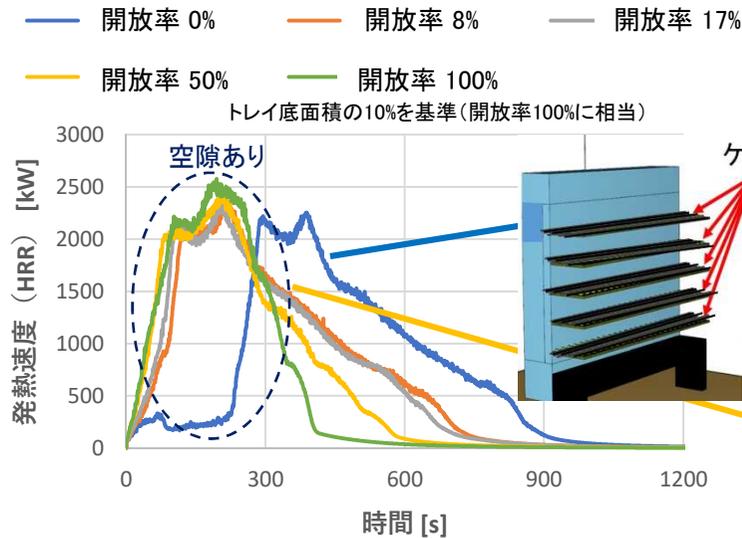


図14 開放率をパラメータした場合のHRRの時間変化

・ケーブル束を直方体で模擬したモデル(図12)と直方体に空隙を設けたモデル(図13)では、高温空気の流動挙動が大きく異なり、後者の燃焼挙動がより実験結果に近いことが分かった。

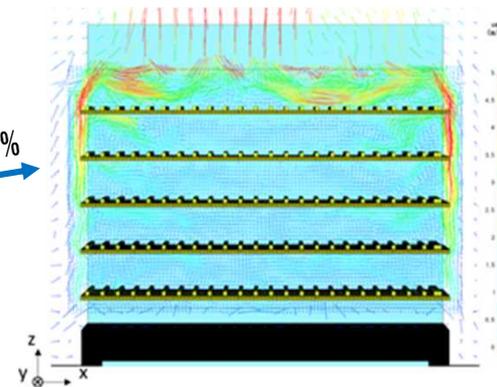


図12 ケーブル束を直方体で模擬したモデル

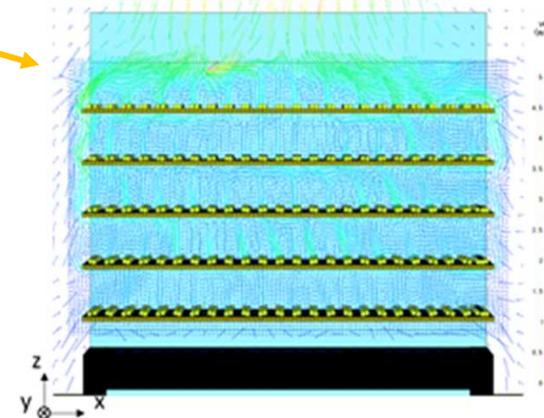


図13 直方体のモデルに空隙を設けたモデル

ケーブルトレイ火災時の燃焼挙動に係るケーブル束モデル化に関する知見を得た。

2.3 火災影響評価手法・解析コード等の整備 ②

1. 主要成果②

HEAFに係る爆発解析モデルの改良・整備

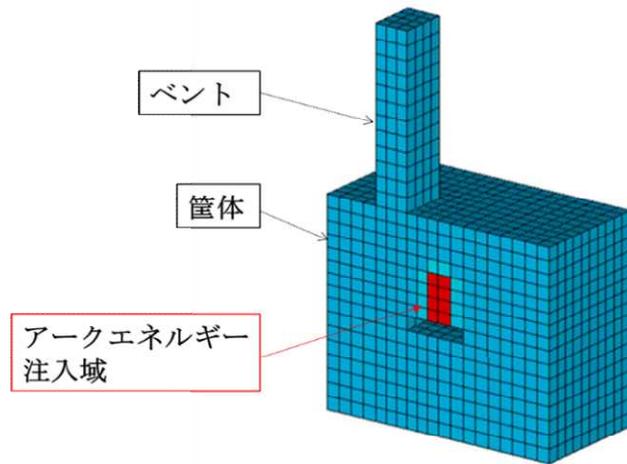


図15 モデル体系の略図

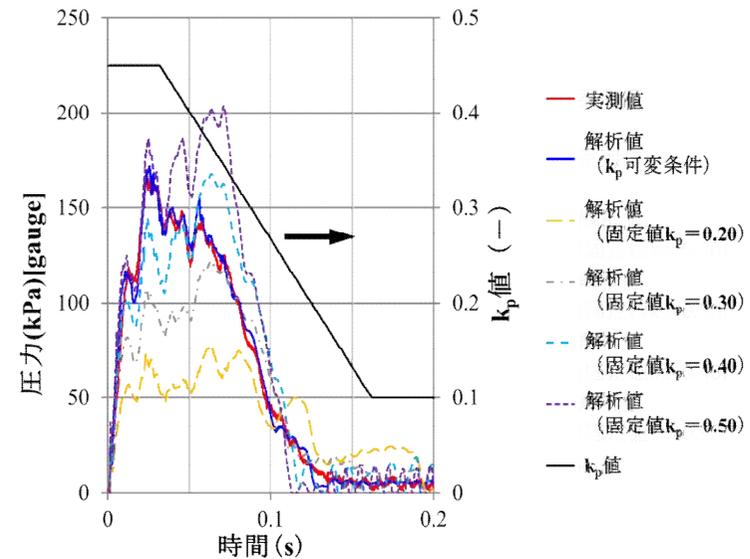


図16 爆発圧力における実測値と解析値の比較例

・アーク放電の空気加熱割合 k_p 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。(図14)。 k_p 値を時間とともに小さくする必要があることが分かった。

空気の爆発現象として空気膨張モデルの検証を行い、その妥当性は空気加熱割合に依存することを確認した。今後加熱割合のモデル化を進める。

3. まとめ①

- ・HEAFの影響評価については、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。

3. まとめ②

・**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、HEAFに関しては、実機解析への適用を目的とした**爆発**のモデル化を進めた。特に空気の爆発現象として空気膨張モデルの検証を行い、その妥当性は空気加熱割合に依存することを確認した。

4. 成果の活用について①

プロジェクト期間内

■ HEAFの影響評価に係る知見が、HEAF(DG系統)に係る適合性審査

(HEAF爆発評価の妥当性)への技術支援に活用された。

- ・大飯発電所3,4号機、高浜発電所3,4号機に係る審査会合(R2 3/5)

■ 電気ケーブルの熱劣化評価に係る知見が、火災防護に係るチーム検査試行

(電気ケーブルの系統分離対策の確認等)への技術支援に活用された。

- ・大飯発電所3号機でのチーム検査試行(R1 9/9-13, R1 9/24-27)
- ・川内発電所2号機でのチーム検査試行(R2 2/10-14)
- ・ATENAとの面談(R1 7/19)
- ・事業者との面談(関電:R1 10/28, R1 12/19, R2 1/29, R2 2/19、九電:R2 3/16)
- ・検査官会議(R1 6/20, R1 9/2, R1 10/17, R1 12/10, R2 1/20, R2 2/4)

4. 成果の活用について②

今後の見通し

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
- ・ 原子力発電所の内部**火災**影響評価ガイド
- ・ 原子力発電所の外部**火災**影響評価ガイド
- ・ 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。

5. 成果の公表等①

5.1 NRA技術報告

なし

5.2 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.

5.3 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).

5.4 表彰・受賞

なし

5. 成果の公表等②

5.5 委託先等による公表

- 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”, IEEJ 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 5th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE–ST), 2019.

5.6 その他

- ① H. Kabashima, “Fire Safety Research on High Energy Arcing Fault (HEAF) ”, EUROSAFE Forum Newsletter, April 2017. (<https://www.eurosafe-forum.org/node/357>)
- ② H. Kabashima, et al, “Experimental Study on High Energy Arcing Faults (HEAF) to Assist Fire Safety Regulation”, Proceedings of the 24th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 24) –15th International Post-Conference Seminar on “FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANTS AND INSTALLATIONS“, Bruges, Belgium, Paper No. 03. HEAF (Special Issue) 2017.

5. 成果の公表等③

- ③ 加藤敬輝ほか、「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年秋の大会予稿集.
- ④ 加藤敬輝ほか、「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年秋春大会予稿集.
- ⑤ 松田 航輔ほか、「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年秋春の大会予稿集.
- ⑥ H. Kabashima, “Status of NPP Safety Review and New Regulation on Inspection and HEAF”, IRSN –JAEA– S/NRA/R Fire Workshop 2017, Cadarache, France, November 2017.
- ⑦ F. Kasahara, “Safety review for the fire protection measures on the NPPs with non-fire retardant cables”, IRSN –JAEA– S/NRA/R Fire Workshop 2017, Cadarache, France, November 2017.
- ⑧ T. Kato, “Simulation on cable fire using FDS”, IRSN –JAEA– S/NRA/R Fire Workshop 2017, Cadarache, France, November 2017.
- ⑨ F. Kasahara, “Discussion on the potential experiments of wrapped cable tray complex fire for NPP in Japan using CISCCO device (Response to action 2018–4)”, IRSN –JAEA– S/NRA/R Fire Workshop 2018, Cadarache, France, November 2018.

5. 成果の公表等④

- ⑩ H. Kabashima, “Status of NPP Safety Review, Re-start Operation and New Regulation on Inspection”, IRSN –JAEA– S/NRA/R Fire Workshop 2018, Cadarache, France, November 2018.
- ⑪ T. Kato, “Analytical investigation on pyrolysis model on pool fire by FDS”, IRSN –JAEA– S/NRA/R Fire Workshop 2018, Cadarache, France, November 2018.
- ⑫ H. Kabashima, “Status of NPP Safety Review, New Regulation and Inspection”, IRSN –S/NRA/R Fire Workshop 2018, Aix-en-Provence, France, November 2019.

6. 成果目標に対する達成状況

本研究におけるHEAF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に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。

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。

火災影響評価手法・解析コード等の整備については、ケーブルトレイ火災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・整備を行った。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。

7. 今後の展開

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))」において取り組んでいく。