

令和3年度
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門
合同研究成果報告会

原子力規制庁システム安全研究部門の研究概要 及び

高エネルギーアーク損傷(HEAF) の爆発現象に係る数値解析

令和3年11月2日

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ

松田 航輔

本資料で示した内容は著者等の見解であり、
原子力規制委員会の見解を示したものではありません



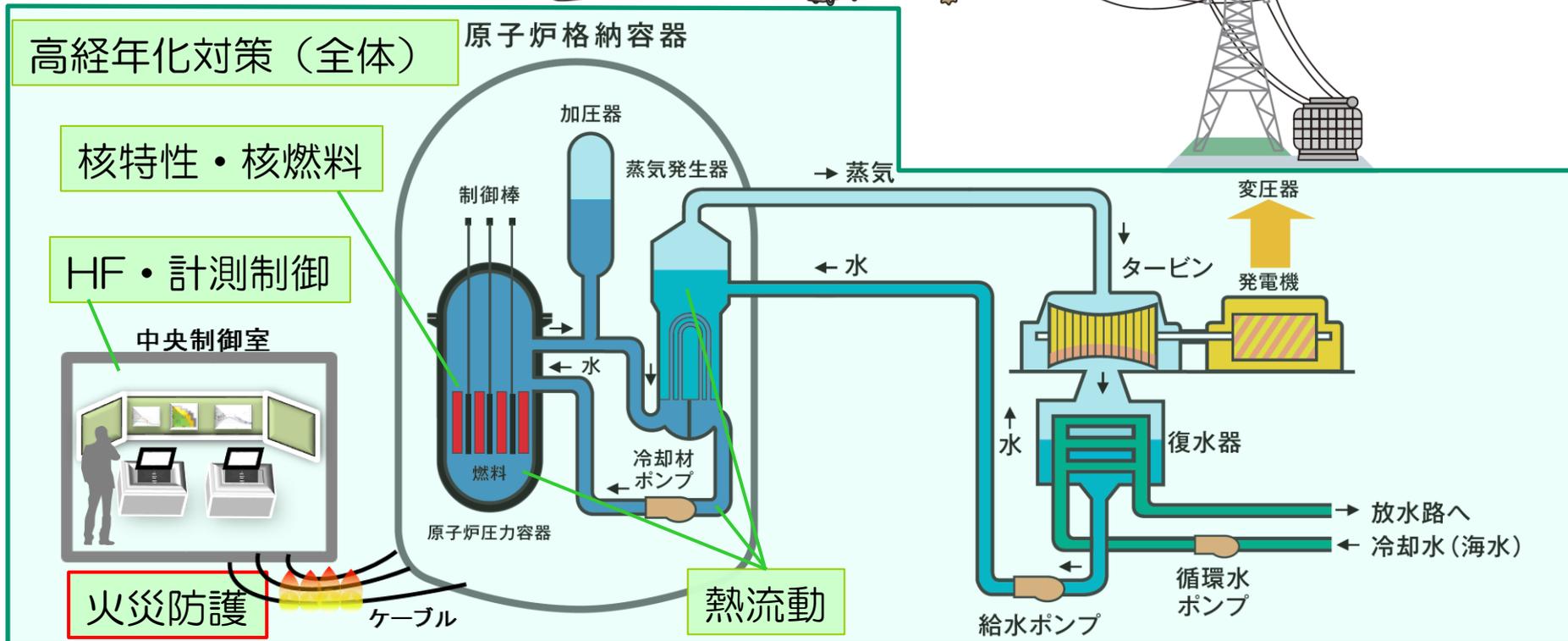
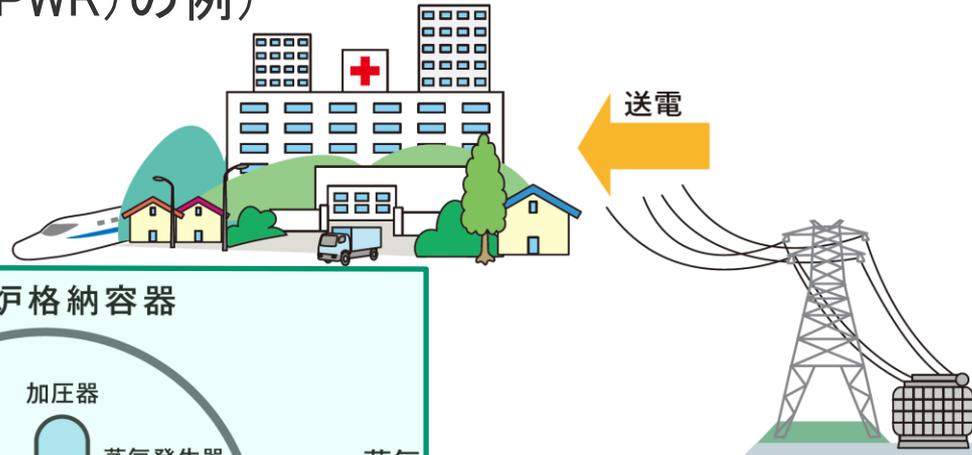
目次

1. システム安全研究部門の業務
2. 火災防護分野の安全研究
3. HEAFの爆発現象に係る数値解析



1. システム安全研究部門の業務①

原子力発電所の全体系統とシステム安全研究部門の主な所掌範囲
(加圧水型原子力発電所(PWR)の例)





1. システム安全研究部門の業務②

原子力発電所等原子力システムの安全性(シビアアクシデントに係るものを除く。)に関する調査及び研究を所掌する。

技術分野	主要概要
熱流動	<ul style="list-style-type: none">・軽水炉の熱流動に係る安全研究、評価手法の整備・軽水炉の熱流動に係る規制支援、規制基準類の整備
火災防護	<ul style="list-style-type: none">・火災防護に係る安全研究、規制基準類の整備
核特性	<ul style="list-style-type: none">・原子炉の核特性、炉心動特性、燃料デブリ取出し時の核特性評価手法の整備・規制基準類の整備、情報収集・分析
核燃料	<ul style="list-style-type: none">・核燃料に係る安全研究・評価手法の整備・規制基準類の整備、情報収集・分析
高経年化対策 (材料・プラント技術 評価)	<ul style="list-style-type: none">・高経年化・材料健全性に係る安全研究、規制基準類の整備・高経年化技術評価及び運転期間延長認可の審査支援・学協会規格の技術評価支援
新型炉	<ul style="list-style-type: none">・高速炉に関する安全研究、評価手法の整備・高速炉の安全規制支援、規制基準類の整備
人的要因(HF)・ 計測制御	<ul style="list-style-type: none">・安全文化の育成と維持に係る情報収集・分析、規制基準類の整備、検査支援・デジタル式安全保護装置の共通原因故障対策に係る情報収集・分析・原子炉制御室等の人間工学設計評価に係る安全研究



2. 火災防護分野の安全研究

(1) HEAFの影響評価

高エネルギーアーク損傷 (HEAF: High Energy Arcing Faults) 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

電気ケーブルが加熱されることで絶縁性が低下して、電氣的に損傷すること(短絡・地絡・ホットショート等)に係る試験データ、技術的知見等を拡充する。

(3) 火災影響評価手法・解析コード等の整備

火災防護対策の妥当性評価のための火災影響評価手法・解析コード等を整備する。

実施例:

- ◆ HEAFの影響評価手法
 - ・爆発による衝撃解析
 - ・アーク放電の電磁熱流体モデル構築
- ◆ 電気ケーブルの熱劣化モデルの整備
- ◆ 原子力施設における火災影響評価手法
 - ・内部火災(可燃性液体及び電気ケーブル)



3. HEAFの爆発現象に係る数値解析

3. 1 背景・目的

- 2011年3月11日の女川原子力発電所1号機における高圧電源盤のHEAF事象の発生を受けて、原子力規制庁技術基盤グループではHEAFに関する安全研究を実施している。
- HEAFの爆発現象による衝撃解析に係る影響評価手法を整備するにあたり、HEAF発生時の圧力上昇について解析コード(AUTODYN)を用いてHEAF試験を再現解析する。また、HEAF現象の解析において、空気加熱割合 k_p ※を一定値とする従来解析方法について、 k_p に対する感度解析を実施し、 k_p が筐体内の圧力上昇に与える影響を検討する。

※空気加熱割合 k_p

ここでは、「全アークエネルギーに対して空気加熱に要したエネルギーの割合」を空気加熱割合 k_p と呼称する。



3. HEAFの爆発現象に係る数値解析

3. 2 HEAFについて

- 通電導体間(遮断器や開閉器)、又は通電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

現象進展



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 実機を用いたHEAF試験



3. HEAFの爆発現象に係る数値解析

3.3 HEAF試験の再現解析及び感度解析の条件

- HEAF爆発時の急激な圧力上昇の要因である筐体に内蔵された空気の圧力上昇に着目
- 解析モデルは形状対称性を仮定、1/2体系で作成(図3)
- 筐体内の空気は理想気体と仮定、オイラーモデルを利用
- 試験での圧力発生から0.2秒までを解析
- アーク条件は、HEAF試験で投入した電力履歴を利用



図2 H29年度HEAF試験の試験体

AUTODYNによる
モデル作成

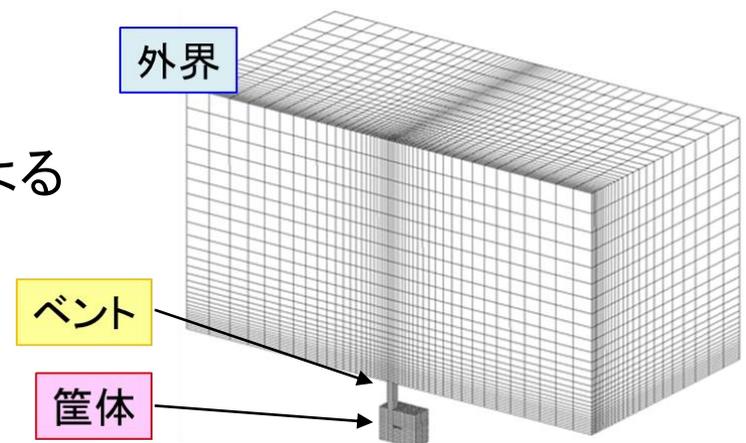


図3 AUTODYNによるモデル作成例



3. HEAFの爆発現象に係る数値解析

3.4 HEAF試験の感度解析結果

- 空気加熱割合 k_p を全解析時間で一定(従来の解析方法)
(0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7及び0.8)とする感度解析を実施
- 圧力最大近傍((1)の時点)まで試験値を再現($k_p=0.5$)
- (1)の時点以降の圧力上昇は、

k_p が小さい場合 ➡ 試験値を良好に再現

k_p が大きい場合 ➡ 圧力上昇・下降の傾向が大きく乖離

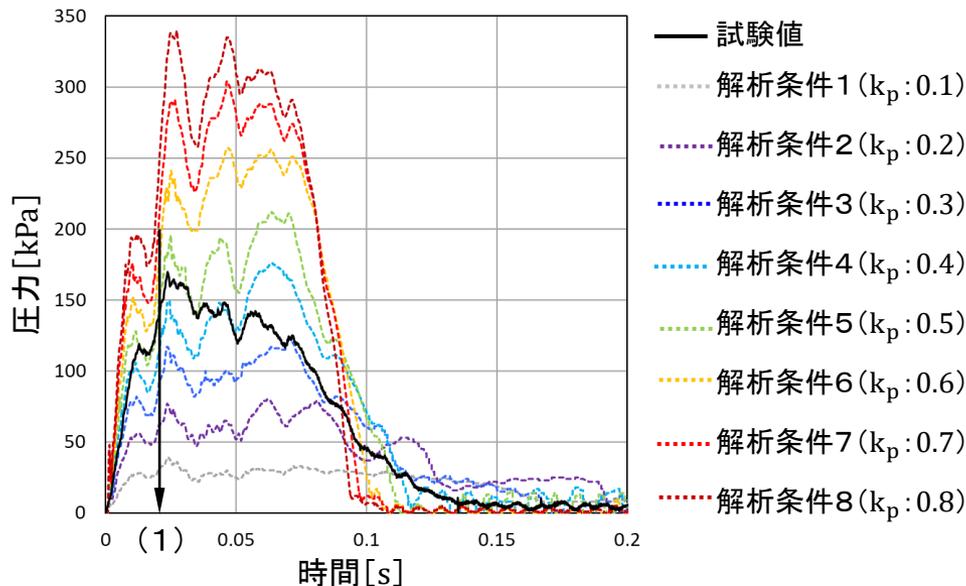


図4 空気加熱割合 k_p (0.1~0.8)における圧力挙動の解析値と試験値との比較

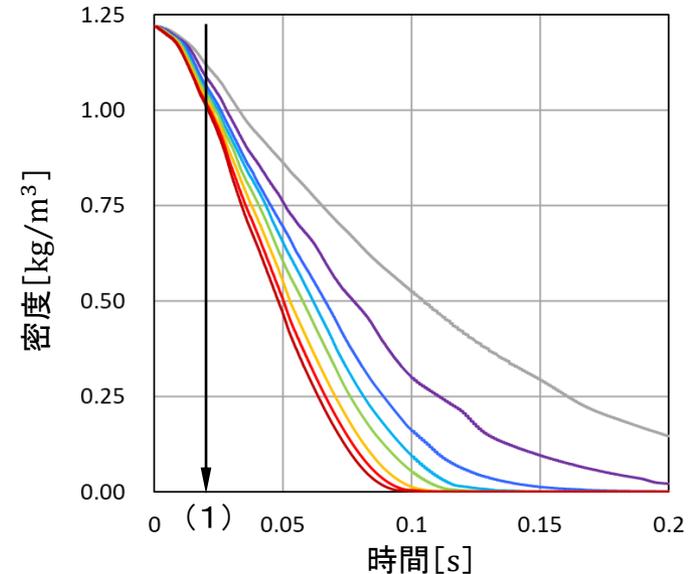


図5 空気加熱割合 k_p (0.1~0.8)における筐体内空気密度の解析値



3.5 HEAF試験の再現解析結果

- 空気加熱割合 k_p を試験値の圧力最大値まで(0.032秒)は、一定 $k_p = 0.45$ とし、0.162秒まで、一次関数的に減少するように与えた場合(感度解析の結果から得られた解析方法)

➤ 全解析時間にわたって試験値の圧力変化を再現

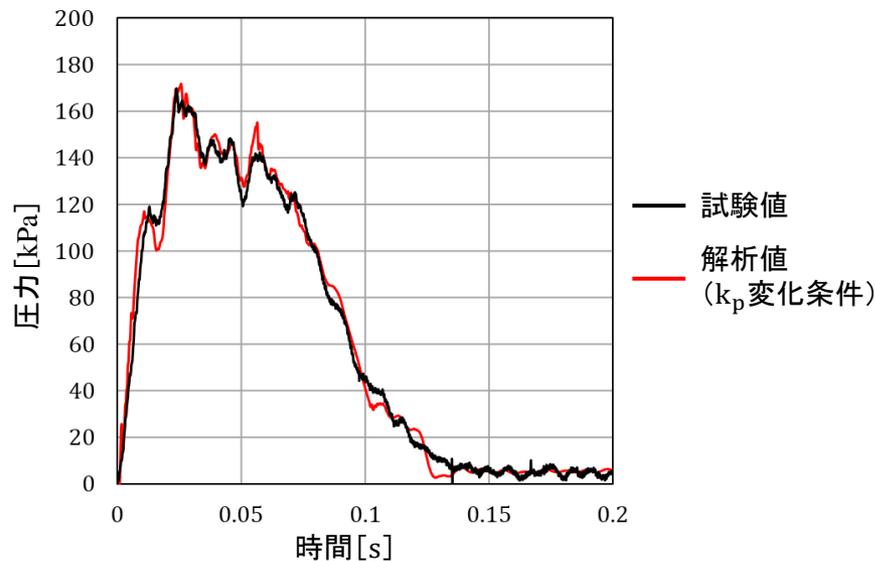


図6 空気加熱割合 k_p 変化条件における圧力挙動の解析値と試験値との比較

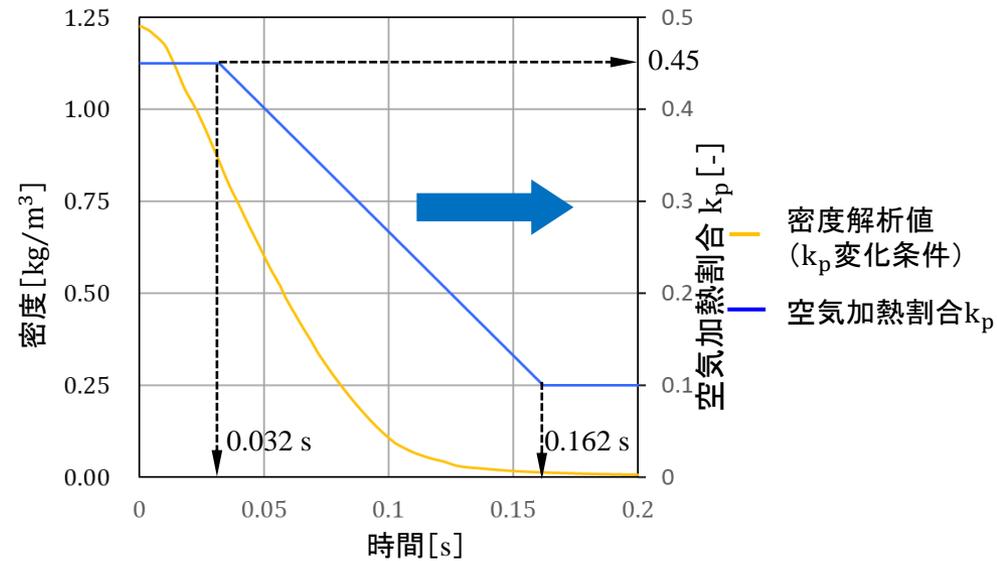


図7 空気加熱割合 k_p 変化条件における筐体内密度と k_p の変化



3.6 まとめ

考察

- 感度解析の結果、 k_p が一定とすると、空気加熱で消費されるエネルギーが過大になったことから、時間経過とともに筐体内の空気密度が減少するにつれて、空気分子が加熱を受けにくくなると推定された。
- 今回の評価モデルでは筐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。

結論

- k_p を一定とする従来解析方法では、試験値の圧力最大近傍までは再現できるが、一方で解析時間にわたり k_p 値を変化させた場合、試験結果を再現でき、影響評価手法において有効であることが示唆できた。

今後の対応

- 他の試験ケースを再現解析し、本評価モデルにおける k_p の取り得る値についてその傾向を把握する予定



3. HEAFの爆発現象に係る数値解析

3.7 参考文献

- “安全研究成果報告「火災防護に係る影響評価に関する研究」”，原子力規制庁，2021年6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，“事後評価説明資料(火災防護に係る影響評価に関する研究)”，原子力規制庁，2021年4月
- 松田航輔他、“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”，原子力学会，2021年3月