

重点課題 - リスクの最適マネジメントの確立

原子力施設における火災現象評価技術の確立

背景・目的

国は現行の原子力施設の火災防護指針の見直しを進めており、加えて、火災ハザード評価の早期導入を求めている。既存の火災評価手法は昭和50年代の火災実証試験等に基づいているため、近年の海外データの分析や、許認可に耐える火災ハザード解析手法の検証を急ぐ必要がある。

本課題では、既存の許認可用火災評価手法の高度化のための技術データの追加整備や、海外で先行する許認可用解析コードの国内施設への適用性を評価するとともに、東日本大震災で顕在化した喫緊の課題（アーク火災等）に対する安全性向上策を提示し、原子力発電の安全性向上に寄与する。

主な成果

1 火災モデルFDSを用いた火災影響評価解析の適用性評価

火災影響評価においては、安全上重要な機器等の損傷時間（損傷に至るまでの時間）や発火時間を算定する必要がある。代表的な火災モデルの一つであるFDS（Fire Dynamics Simulator）は、複雑な形状で構成された区画を対象とする場合や火災事象の詳細な評価が必要な場合に適しているが、その解析結果

は条件設定に大きく依存する。火災上昇流試験、単一区画・複数区画の火災試験を対象に、感度解析および試験再現解析（図1）を実施し、格子解像度や火源モデルの設定方法を明らかにした〔N12019〕。これにより、想定火災に対する機器等の損傷時間を適切に算定でき、合理的な火災防護計画の策定が可能となる。

2 液体可燃物による換気制限条件区画内火源特性の評価

火災影響評価解析の精度に大きく影響を与える火源モデルの設定においては、火災を伴う熱輸送過程（プルーム構造）、火炎近傍の酸素の巻き込み挙動、プルームの形成に伴い輸送される熱や煤煙の挙動を精度良く再現することが必要である。そのため、換

気条件を調整可能な単一火災区画試験装置を用いて、液体可燃物（エタノール）を対象に、火皿面積や酸素供給量をパラメータとした燃焼試験*1を実施し、火炎近傍の酸素量と火源の発熱速度の相関に関する基礎データを取得した（図2）。

3 実物大高圧スイッチギアの内部アークによる火災現象の評価

東日本大震災の際に女川原子力発電所で発生した高圧スイッチギア*2の大規模アークによる火災の被害状況を踏まえ、非耐震・アーク未対策の実物大高圧スイッチギアを用いた内部アーク試験を行い、アークエネルギーの発生量やアーク発生後の火災への進展の有無を評価した（図3）。さらに、高圧ス

イッチギア内に発生する圧力や筐体の破損に伴う高温ガスの放出状況を追跡する機能を既存のCFDコード（数値流体力学コード）に追加し、内圧による筐体の破損形態や周辺への熱的な影響を評価できることを確認した（図4）。

*1 東京理科大学との共同研究として実施。

*2 電力系統を保護・制御するためのしゃ断器等の保護継電器と高圧の母線と一緒に金属製筐体に収めたもの。

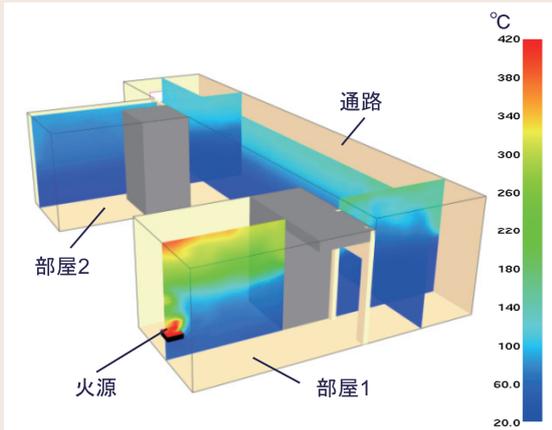


図1 火災モデルFDSによる複数区画火災の解析例

火災区画内における火災影響評価においては、火災影響範囲を適切に設定し、安全上重要な機器等への損傷時間や発火時間を算定する必要があり、合理的な火災モデルの適用が必要である。火災モデルFDS[※]では、温度・流速・酸素濃度等の空間分布およびその時間的な変化が得られる。火災上昇流の温度の乱れ強さに対して、格子解像度の影響評価を行った結果、格子間隔が火災特性長さ(発熱速度を基に定められる長さスケール)の1/20以下であれば、解析結果は格子間隔に依存しないことを明らかにした。

※米国NIST(National Institute of Standards and Technology)により開発された、火災時の熱流動や物質輸送等を主な対象とするCFDモデル。計算負荷は比較的高いが、空気温度の空間分布等の評価が可能である。

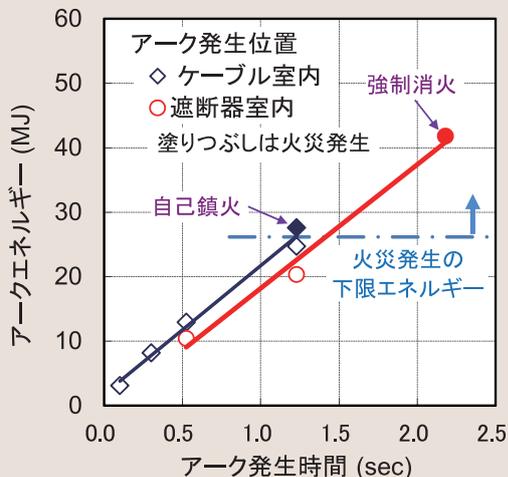
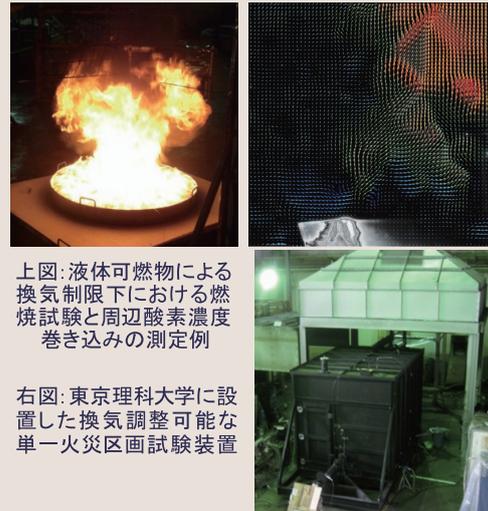


図3 高圧スイッチギア内部アーク試験で測定されたアークエネルギーと火災の発生条件

高圧スイッチギア(電圧7.2kV、三相三線式、定格短時間電流:40kA×2秒)を用いて、アーク発生時間をパラメータ(0.1~2.2秒)として、実回路構成に基づく三相短絡電流条件(18.9kA)におけるアーク放電時(母線材質:銅)に発生するエネルギー量[※]を測定した。アークエネルギーが25MJを超えると火災が発生し、遮断器室内でアークを発生させた場合、通電時間が2.0秒を超えると消火作業が必要な火災事象が発生した。

※アーク放電エネルギーにより盤内の空気が加熱され、その高温空気が盤外あるいは隣接する電気盤内へ噴出し、隣接機器へ熱的影響を及ぼす可能性がある。



上図:液体可燃物による換気制限下における燃焼試験と周辺酸素濃度巻き込みの測定例

右図:東京理科大学に設置した換気調整可能な単一火災区画試験装置

図2 換気制限下における火源の特性評価

単一火災区画を想定した耐火室(幅2.4m×奥行3.6m×高さ2.4m)を製作し、換気流量を調整可能なブロアユニットを経由して、東京理科大学の所有する排気フードに連結し、エタノールを火源とする燃焼試験を実施した。試験パラメータは、火皿の面積(直径30、45、60cm)や位置(中央)、換気流量(0~100m³/h)とし、空間温度や内圧、壁や天井への熱流束、換気流量、可燃物質量減少速度、O₂・CO₂・CO濃度を測定した。火災の発達に伴い形成されるプルーム構造を計測し、火災近傍の酸素量と火源の発熱速度の相関性に関する基礎データを取得した。

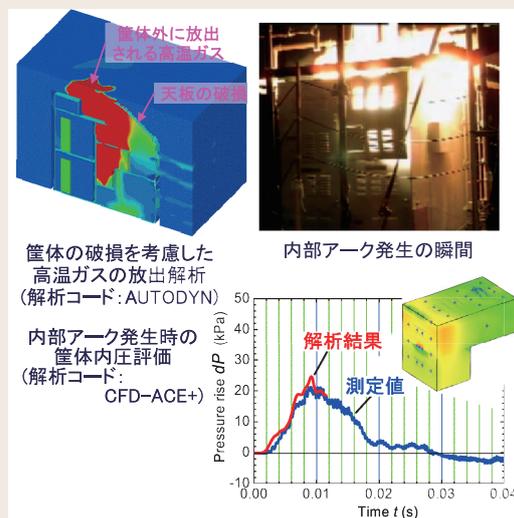


図4 内部アーク発生時の内圧と筐体の破損を考慮した高温ガスの放出解析

高圧スイッチギアの上部ケーブル室内で発生させたアークは、筐体内部の気体を加熱することにより圧力上昇が発生する。CFDコードCFD-ACE+を用いて、アークエネルギーの測定値のうち、53%を圧力上昇に寄与するエネルギーとして解析した結果、圧力上昇の経時変化を精度よく再現した。さらに、衝撃・爆発解析コードAUTODYNを用いて、圧力上昇に寄与するエネルギーと等価なエネルギーを有する圧縮気体を発火源とする衝撃解析を行い、内圧による筐体の破壊と高温ガスの伝播状況を再現できることを確認した。