

ナトリウム冷却高速炉における格納容器破損防止対策の有効性評価技術の開発

(受託者) 国立大学法人福井大学

(研究代表者) 宇埜正美 附属国際原子力工学研究所

(再委託先) 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

(研究期間) 平成 25 年度～28 年度

1. 研究開発の背景とねらい

東京電力福島第一原子力発電所の事故を受けて、原子力規制委員会が改正した原子炉等規制法（改正炉規法）では、福島第一原子力発電所で発生したような重大事故の規制要件化がうたわれており、重大事故時の炉心の著しい損傷を防止する対策に加えて、格納容器の破損を防止する対策も同時に講じることを求めている。本研究ではそのために、まず、

(1)格納容器の破損モードに関する評価手法の開発として、高速炉の重大事故時に格納容器の構造健全性に脅威を与える可能性のある以下の破損モードにつき、現象解明のための実験を基にした事故事象に係る評価手法の開発を行う。

①ナトリウムの漏えい・燃焼

②ナトリウムおよび熔融炉心物質とコンクリートとの相互作用に伴う水素発生とコンクリート浸食

③水素ガスの燃焼・爆発

次に、(2)格納容器の構造健全性に関する評価手法の開発として、格納容器を構成する主要構造物の中で相対的に耐圧強度の低い構造物である配管貫通部等のベローズや中間熱交換器のカバーガスベローズおよび下部鏡について、上記の格納容器破損モードに対する構造健全性を評価するため、圧力負荷時の座屈およびバウンダリ破損に至るまでの構造応答挙動とバウンダリ破損時の漏えい率について、実験、解析を行い、座屈後からバウンダリ破損までの耐圧裕度とバウンダリ破損時の開口量、漏えい率に関する評価法を開発する。

2. 4年間の研究成果

(1)格納容器の破損モードに関する評価手法の開発

①ナトリウム燃焼時の熱影響詳細評価手法の開発

格納容器破損防止対策をはじめとする高速炉プラントの重大事故対策の評価検討に活用できる多次元ナトリウム燃焼解析手法を構築するため、原子力機構が有する多次元ナトリウム燃焼解析コードの改良と、改良したコードの妥当性確認を行う。初年度は格納容器破損時に支配的となるスプレイ状漏えい現象について、格納容器内で想定される上向きナトリウム噴出事象を含む多様なナトリウム漏えいモードへの適用を可能とした。2、3年目に熱移行挙動に関わるモデル改良として、熱乱流場における乱流モデルの改良や、燃焼液滴からのふく射熱移行モデルの導入を実施し、個別の妥当性の確認を行った。最終年度は本事業で行った改良の総合的な妥当性確認として、上向き噴出ナトリウムスプレイ実験のベンチマーク解析を実施した。その結果、図1に示すように、改良モデルによる解析（Turb+Rad）では試験結果を良好に再現し、評価手法の妥当性を確認した

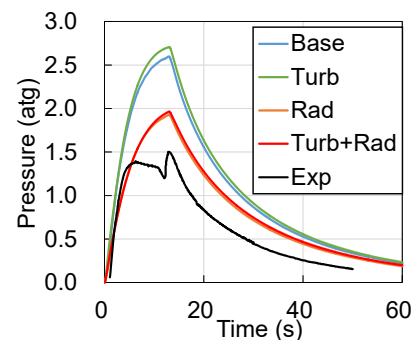


図1 上向き噴出ナトリウムスプレイ実験解析の圧力履歴

解析モデルの高度化では、ナトリウム燃焼の基礎となる液滴の燃焼現象に関して、着火に至るまでの低温での表面反応と着火後の高温での蒸気相反応を二段階で表現する解析モデルを構築し、実験解析により、液滴の温度上昇挙動、外部空気流の影響等が良好に再現できることを明らかにした。また、検証した解析モデルは、今後の応用に資するため、任意の流体解析コードへの導入や任意形状の流路解析への適用が可能な形式として整備した。

②炉心溶融物/ナトリウムとコンクリート構造物との反応挙動

高温ナトリウムが構造コンクリートと接触すると、ナトリウムとコンクリートの構成成分 (H_2O や SiO_2 等) が化学反応し、比較的短時間で水素が格納容器内で発生し、構造コンクリートは侵食される。そのため、ナトリウムとコンクリートとの反応は過酷事故事象の評価で重要である。同反応が長期間に渡って推移すると、格納容器への負荷が大きくなるため、本公募では反応停止機構に着目して実験研究を進めた。同反応停止機構の解明に向けて、ナトリウム等の反応物(Na)、反応生成物等の非反応物 (Na_4SiO_4 等) が反応時間と共にどのように変化するか、反応時間毎に強制冷却する小規模実験を考案して、実験データを採取した。図 2 は反応時間に対する反応界面 (reaction front)、ナトリウムプール (pool) での主要成分の濃度変化を示す。反応時間の経過に伴い、特に反応界面でのナトリウム濃度は減少し、反応が緩和していることが推察される。また反応が終息した約 3 時間後以降で、反応界面には Na と Si 濃度は約 20wt.% となった。熱力学計算により、この濃度では Na_2SiO_3 - $Na_2Si_2O_5$ の反応生成物が安定となるため、反応界面には反応生成物が主に分布し、ナトリウムが欠乏していることが分かった。また反応生成物の物性値を測定して、例えば約 850 ~ 940°C で融解することや熱伝導率はケイ酸ナトリウム程度となることが分かった。

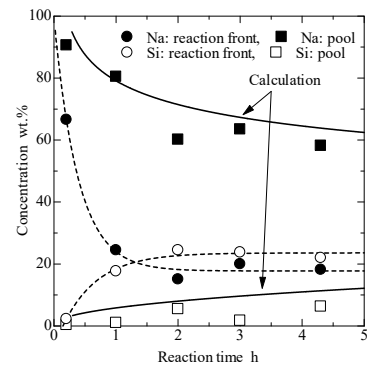


図 2 反応時間に伴う主成分 (Na・Si) の濃度変化

また、熱力学計算によるナトリウム存在下でのデブリの化学状態の評価と、 UO_2 と Na 化合物の反応試験により得られたいくつかの化合物の物性測定より、上記ナトリウム/コンクリート反応に及ぼす燃料デブリの影響を評価した。

また、熱力学計算によるナトリウム存在下でのデブリの化学状態の評価と、 UO_2 と Na 化合物の反応試験により得られたいくつかの化合物の物性測定より、上記ナトリウム/コンクリート反応に及ぼす燃料デブリの影響を評価した。

③ナトリウム環境下における水素燃焼挙動評価手法の開発

ナトリウム冷却高速炉のシビアアクシデントにおいて、ナトリウム蒸気/ミストを含んだ水素ガスの燃焼挙動を評価するため、不活性雰囲気から酸素雰囲気へ噴出する際に生じる拡散燃焼を対象とした燃焼試験及び数値計算を行い、当該燃焼現象の着火機構を検討した。燃焼試験では、金属ナトリウムを使用して水素濃度 (15vol%以下) 及び酸素濃度条件 (3-21vol%) に対する着火有無を確認した。その結果、ナトリウム火炎形成後に水素火炎が形成される着火現象推移を観測するとともに、可燃性混合気の昇温に伴う燃焼下限界の低濃度化等により着火特性を概ね解釈可能であることがわかった。また高ナトリウム濃度条件 ($30g/m^3$) では、従来の拡散燃焼閾値 (実線) や蓄積燃焼閾値 (点線) よりも

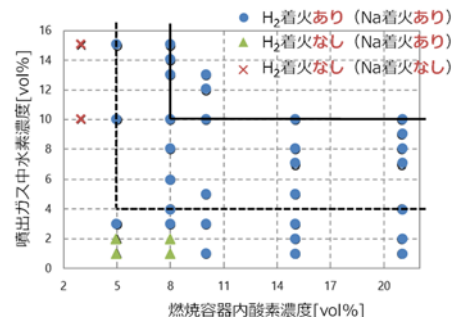


図 3 Na 混在水素拡散燃焼における着火濃度特性

また高ナトリウム濃度条件 ($30g/m^3$) では、従来の拡散燃焼閾値 (実線) や蓄積燃焼閾値 (点線) よりも

着火濃度閾値が低下する可能性が示唆された。(図3) 数値計算では、ナトリウム、水素、酸素が関与する素反応機構を構築し、ナトリウム有無による水素-酸素混合気の着火反応を計算した(図4)。その結果、ナトリウムを含まない水素-酸素混合気が自己着火しない温度域において、ナトリウム混在条件ではナトリウムの自己着火(①)による水素-酸素混合気の着火(②)を確認し、この着火反応で主要な素反応($\text{Na} + \text{O}_2 = \text{NaO} + \text{O}$)を抽出することができた。また酸素濃度に応じたナトリウム着火時の温度上昇や、水素濃度に応じた体系温度上昇の違いは燃焼現象の定性的な傾向を捉えており、反応速度論的手法によりナトリウムを着火源とした水素ガスの着火現象を評価することができた。

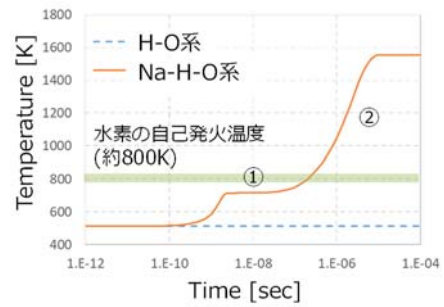


図4 Na混在有無による水素の着火推移(例)

また、Volume-of-fluid法に基づく火炎面追跡法を用いた3次元数値解析によって高速炉格納容器内における水素燃焼挙動の評価を行った。床面からの水素流入量をパラメータとした数値解析結果において、水素燃焼による格納容器壁面の温度上昇はほとんど生じず、水素燃焼の影響は限定的であることを示した。

(2) 格納容器の構造健全性に関する評価手法の開発

① ベローズ、鏡構造の座屈後挙動解析

ベローズおよび鏡構造の限界圧力試験(2)②の試験体をモデル化し、圧力負荷による座屈解析およびその後の変形挙動解析を有限要素法により実施した。ベローズ解析に関しては、境界条件を変化させた陰解法、又は陽解法により、試験で確認された破損前のベローズ形状を模擬することができた(図5)。解析結果に3軸応力場の延性破損クライテリアを適用する限界圧力評価法を考案した。これが試験結果による限界圧力を保守的に評価するとともに、設計座屈圧力に対して大きな余裕があることを示した(図6)。鏡板に関しては、限界圧力試験で見られた非軸対称変形挙動を3次元形状測定に基づく解析モデルを用いた解析により再現することができた。限界圧力試験により明らかとなった破損様式に基づき、解析に基づく局所最大ひずみを参照した限界圧力評価法を考案した(図7)。



限界圧力 陽解法による

図5 ベローズの破損前変形の解析

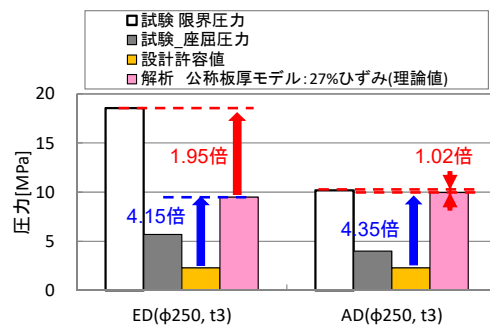


図7 鏡板の限界圧力評価法

(ED、ADは曲線部の形状に依存するJIS B 8265で定められた鏡板の形式。ADの方が実際の鏡板に近いが、汎用品でないため、実験ではEDも使用)

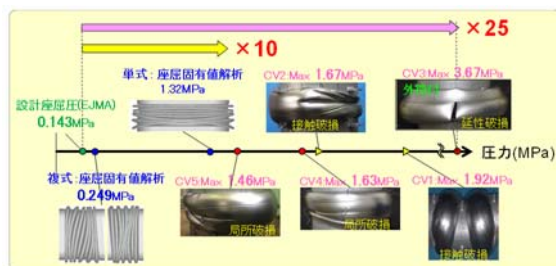


図6 ベローズの限界圧力

②ベローズ、鏡構造の耐圧強度試験

ベローズ試験は11体の限界圧力試験を実施し、すべての試験においてベローズは内圧により、スクワームと呼ばれるベローズ特有の座屈変形を生じた後、初期形状を完全に喪失し大きく膨らみ破損に至った。ベローズは、座屈挙動を経て蛇腹部が大きく張り出すような変形に至るまでバウンダリ機能を維持し破損せず、最終的には蛇腹部の剛性等に応じて、延性破損、もしくは局所破損によりバウンダリ機能を喪失することが示された。鏡板試験は、7体の限界圧力試験を実施した。すべての試験において鏡板は中高面が完全に反転し、変形が円筒部にまで達した後、反転境界付近の周方向亀裂により破損に至った。また要素試験により反転境界付近の曲げによる亀裂発生条件(最大ひずみ)を特定し、これに基づいて限界圧力評価法を策定した。

3. 今後の展望

(1) 格納容器の破損モードに関する評価手法の開発

① ナトリウム燃焼時の熱影響詳細評価手法の開発

開発した評価手法は今後、高速炉プラントの重大事故対策の精緻な評価検討へ活用可能である。また開発したふく射モデルでは低エアロゾル濃度時における伝熱流動の詳細化、高精度予測が可能であり、多様な場における燃焼評価に適用する予定である。解析モデルの高度化に関しては、開発した燃焼解析モデルを多くの実験解析に応用することにより、解析精度を高めるとともにナトリウム燃焼現象の理解がより一層進むことが期待される。

② 炉心溶融物/ナトリウムとコンクリート構造物との反応挙動

本研究結果の実用化に向けて、ナトリウム-コンクリート反応、デブリ-コンクリート相互作用の全体を解く解析コードを開発する。また妥当性の検証等にあって3者(ナトリウム、デブリ、コンクリート)が共存する実験データを採取する。

③ ナトリウム環境下における水素燃焼挙動評価手法の開発

炉外事象進展評価の着火閾値を示すためには、より広範な試験条件(低ナトリウム濃度条件等)の試験データ拡充が必要である。また、開発した3次元水素燃焼解析手法は拡散燃焼挙動の高精度数値解析手法として大きな可能性を有しているが、手法の妥当性確認のための検証解析が必要。

(2) 格納容器の健全性に関する評価手法の開発

提案評価手法によりベローズおよび鏡構造が、最大設計圧力を超えた条件に対してバウンダリ機能が維持可能な圧力について評価が可能と考えられる。ただし、本研究で対象とした試験体条件以外の製品仕様のベローズや鏡構造に対する適用性を検証するためにはさらに試験体の条件を変えた試験や解析が必要と考えられる。なお、本研究で得られた知見を基に、今後は原子炉格納容器の破損防止対策の有効性評価技術の高度化として、重大事故時の温度条件等を考慮した提案評価手法の妥当性検討やバウンダリ機器が破損した場合の内部流体の漏えい量の評価に係る検討などに展開することが重要であると考えられる。

本研究の最終目標である「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」に基づいて、選定された重要事故シーケンスと格納容器破損モードに対して防止対策が有効に機能することを解析等で評価するためには、本公募研究の成果に加えて、ナトリウム冷却高速炉の重大事故時に環境に放出される放射性物質の種類と量(ソースターム)とその影響を評価する技術を、高速炉特有の重大事故現象や固有の安全性に関する事項を考慮しつつ開発する必要がある。このため、本公募研究に引き続いて新たな競争的資金の獲得を目指したい。