

# 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

(研究機関) 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、先ず、

(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. これまでの研究成果

(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。まず、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。次に、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（図 1）、燃焼液滴からのふく射熱移行モデルの導入を実施し、妥当性の確認を行った。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解析の解析体系を構築するとともに、試解析によって妥当性

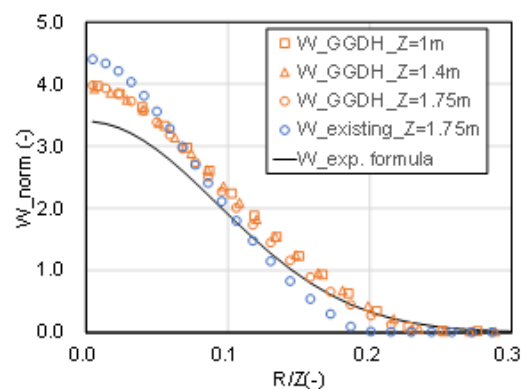


図 1 加熱噴流場での上昇流速  $W$  の水平方向分布 (GGDH: 改良後)

評価が実施可能なことを確認した。

解析モデルの高度化では、ナトリウムスプレイ燃焼の基礎となる単一液滴の燃焼実験について、Ansys Fluent コードを用いた数値シミュレーションによる実験解析を実施した。化学反応速度論に基づく表面反応速度を、ユーザー定義関数機能によりエネルギー保存式に導入した結果、着火に至るまでの液滴の温度上昇を良好に再現できることがわかった。さらに、液滴内外の流れ場を検討し、これまで知られていなかった液滴内部の温度分布及び渦を伴う流れの形成を明らかにした。

### ②炉心溶融物/ナトリウムとコンクリートと構造物のとの反応挙動

高温ナトリウムとコンクリートの反応について、ナトリウム試験によりナトリウム/コンクリートの濃度分布、反応界面の濃度変化を測定した (図 2 左)。反応界面でのナトリウム濃度の挙動から、ナトリウム-コンクリート反応の停止機構は反応界面での化学反応の緩和が主な原因と考えられる。Na プール内の濃度分布は、水試験の物質交換係数を用いた計算により比較的良く説明された。反応生成物の分布は、反応界面からの水素の発生速度と反応生成物の重力沈降の兼ね合いによって、おおよそ評価されることが分かった。同様に、ナトリウム試験及び過去の文献等からナトリウム-コンクリート反応による水素の発生量を整理した (図 2 右)。単位面積あたりの水素の発生量は、コンクリートの大きさに余り依存しない結果となった。水素の発生量は、コンクリートの温度分布から計算した脱水量により比較的良く説明されたため、コンクリートの温度分布/脱水量を評価することにより、水素の発生量は

おおよそ推定されることが分かった。

加えて、炉心溶融物からの崩壊熱の影響を考えるために、ナトリウム-コンクリート反応生成物の融点を測定した。反応生成物の融点は約 940℃であり、純粋なナトリウムの沸点より高い温度であることが分かった。そのため反応生成物が溶融する前にナトリウムが蒸発する可能性が高いと考えられる。

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を評価した結果、酸素ポテンシャルが高くなるに従い  $\text{Na}_3\text{UO}_4$ 、 $\text{NaUO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{UO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$  の順に生成しやすいことがわかった。また、 $\text{UO}_2$  と Na 化合物の反応試験により、ほぼ純粋な  $\text{Na}_4\text{UO}_4$ 、 $\text{NaUO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Na}_2\text{UO}_4$  の合成に成功し、そのうちのいくつかについて物性を測定した。

### 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時における水素燃焼挙動の影響を評価するため、水素燃焼解析手法の開発および基礎検証を実施している。本手法では、高速炉格納容器内の複雑な構造

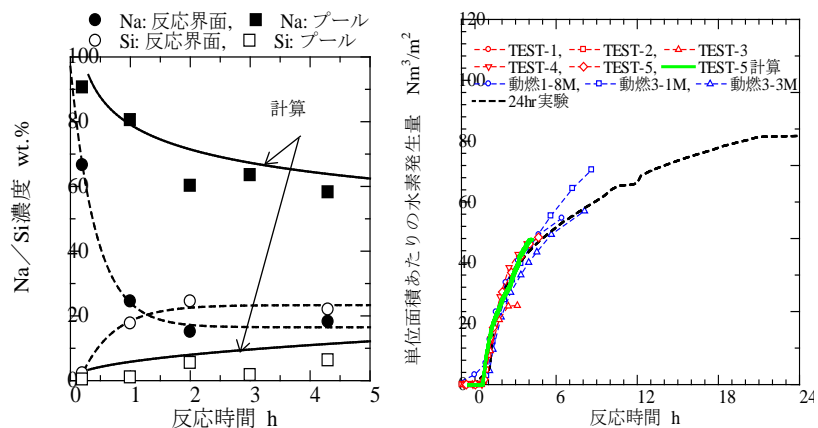


図 2 ナトリウム試験の主な結果  
(左：濃度、右：単位面積あたりの水素発生量)

物形状を正確に模擬することを考え、物体形状模擬性に優れる非構造格子系における解析モデル開発を行い、流体の運動方程式（Navier-Stokes 方程式）とエネルギー保存式に加えて、Volume-of-fluid 法の式（流体率の輸送方程式）と化学種の輸送方程式を計算している。Volume-of-fluid 法を用いることで火炎面の位置と形状を陽に表すことができるため、比較的粗い格子分割の解析体系においても、燃焼反応を精度良く計算することができる。

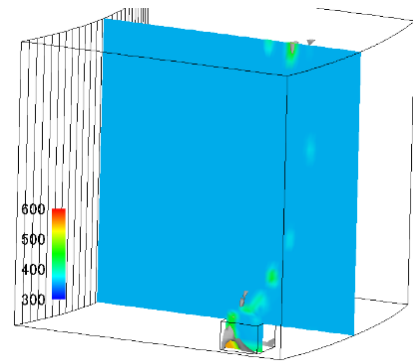


図3 格納容器内の水素燃焼挙動解析結果

開発した解析手法の実機体系への適用性を確認するため、高速炉格納容器床上雰囲気において水素燃焼の影響が大きいと予想される部分を対象とした3次元数値解析モデルを構築し、解析モデルの境界面（床面や外部壁面など）に対して、機構において過去に実施した予備解析の結果を参照して適切な境界条件設定を行い、解析を実施した。その結果、図3に示すとおり、通気口から流入する水素ガスが塊となって燃焼しながら上昇していく挙動が得られた。

またナトリウム混在の水素拡散燃焼試験では、これまで知見の無かった水素・酸素の低濃度条件まで拡張した試験条件範囲（水素（1-15vol%）、酸素濃度（8, 10, 15, 21vol%））で燃焼試験を行い、低濃度条件においても水素燃焼が生じることを確認した。また各酸素濃度における水素の着火閾値データを取得した。

## (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

ベローズ構造および鏡板の限界圧力試験((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ることにより、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4)。この解析結果の整理ならびに試験との対比により、解析に基づく限界圧力の評価法を検討している。鏡板に関しては、限界圧力に影響すると考えられる試験中の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(図5)。これにより、鏡板の破損モードに及ぼす非軸対称変形の影響及びその発生条件を検討中である。

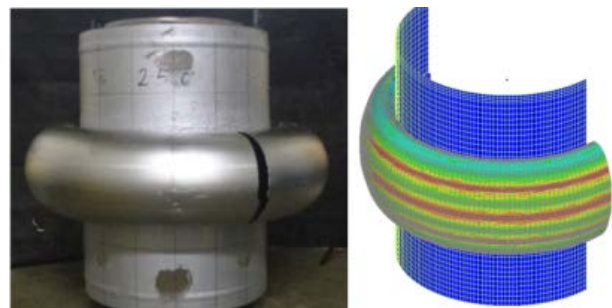


図4 ベローズの破損前変形の解析による再現

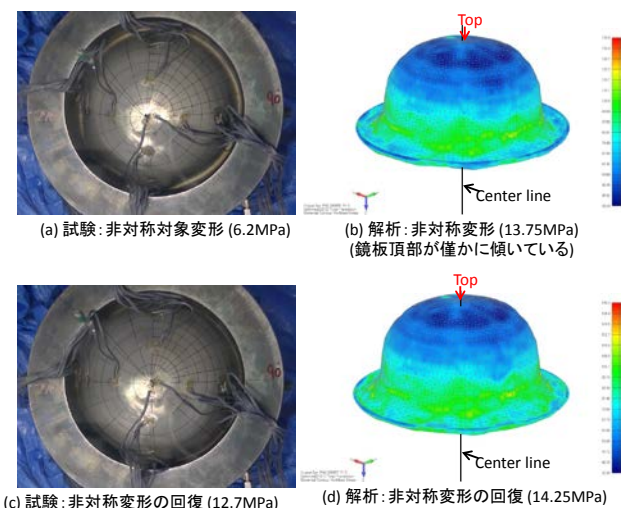


図5 鏡板非軸対称変形の解析による再現

### ②ベローズ、鏡構造の耐圧強度試験

ベローズ試験は 10 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。破損は「近傍構造物との干渉」「局所破損」「延性破損」の大きく3種類の破損モードにより発生していると考えられた。今後、解析検討とあわせて3種類の破損モードと試験および試験体に関する諸元の関係について整理する。鏡板試験は、7体の限界圧力試験を実施し、今年度実施の試験体について、試験後のき裂発生状況等について調査中である。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て破損に至った。破損は「反転境界付近に周方向き裂が生じるもの」、「非軸対称変形により局所にピンホールが生じるもの」の大きく2種類の破損モードにより発生していると考えられた。また周方向き裂の発生原因を検討するため板材による曲げ戻し負荷試験を実施し、き裂発生条件を特定した。

### 3. 今後の研究

#### (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

これまで実施した改良に対する総合的な妥当性確認として、格納容器破損時に想定される上向きスプレイ燃焼を模擬した実験の数値解析を実施し、解析結果と実験結果とを対比することで、構築した手法の適用性を評価する。解析モデルの高度化に関しては、着火後の蒸気相反応を表現するモデルを検討し、表面反応モデルと合わせて、液滴の燃焼過程を一貫して再現することが可能な燃焼モデルの開発を行う。

##### 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

さらなるナトリウム試験として、ナトリウム-コンクリート反応に外部加熱の影響を把握する実験を行う。生成された反応生成物層の状態及び物理特性を分析する。以上の実験データを整理すると共に、外部加熱を含む体系での反応の停止機構について評価・検討を行う。また、化学計算により評価したNa存在下での燃料デブリの高温挙動と模擬反応試験により測定した化合物の物性より、燃料デブリのナトリウムとコンクリート反応に及ぼす影響を議論する。

##### 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

水素燃焼挙動の3次元数値解析手法の開発では、高速炉格納容器内の床上雰囲気を対象とした解析において、通気口から流入する水素ガスの流速等の影響評価を行う。水素誘導拡散燃焼における着火機構の評価・解釈では、ナトリウム混在下の試験データを拡充するとともに、解析評価と合わせて着火機構の解明を行う。

#### (2) 格納容器の健全性に関する評価手法の開発

##### ① ベローズ、鏡板の座屈後挙動解析

一連の試験結果と比較して、ベローズおよび鏡板の破損を適切に表現できる解析手法および破損クライテリアを定め、格納容器のバウンダリ機能健全性に関する評価手法の開発を行う。

##### ② ベローズ、鏡板の耐圧強度試験

一連の試験結果および解析結果を俯瞰し、破損様式の検証ならびに破損クライテリアを定めるために必要となる試験データを試験後の試験体から取得するなど、格納容器のバウンダリ機能健全性に関する評価手法の開発に資するデータの取得を行う。