

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、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. 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

多次元ナトリウム燃焼解析手法の開発では、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整備を行う。そのために、現在までにナトリウム燃焼現象と熱移行挙動に関する数値解析手法及び実験データの調査整理や、解析コードの改良を進めている。まず、ナトリウム燃焼挙動で支配的となるスプレイ状漏えいモードに関して、スプレイ液滴群の運動挙動

に関わる解析モデルの改良を実施し、図1に示す任意方向への漏えいナトリウム噴出など、より多様な漏えい事象への適用が可能となった。また、熱移行挙動に関わるモデル改良のために、等温強制対流場や自然対流場における噴流挙動を対象とした解析を通じて、解析コードに組み込まれ

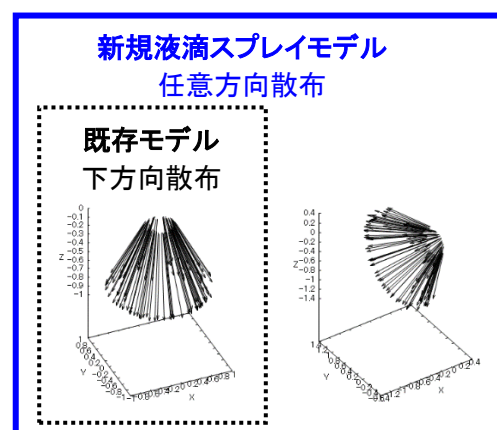


図1 液滴スプレイモデルの改良

ている既存の乱流モデルの基礎検証を実施している。

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落下挙動について、Ansys Fluent コードにより 3 次元数値シミュレーションを実施した。その結果、燃焼を伴わない落下条件において、液滴形状を安定に保つためには、表面張力を適切に考慮しなければならないことがわかった。また、シミュレーション結果のメッシュサイズ依存性、水とナトリウムの物性の差による落下挙動の違いについて検討し、落下開始後 0.2 秒以降、落下距離にして 0.2m 以上において、空気抵抗の影響が現れること、併せて、水とナトリウムの密度差に起因する落下距離及び落下速度の差が表れてくることが明らかになった。

②炉心溶融物/ナトリウムとコンクリートと構造物との反応挙動

高温ナトリウムとコンクリートの反応について、反応停止機構の把握及び機構論的なモデル構築のために、反応時間をパラメータとしたナトリウム試験を実施した。

水素発生挙動については、試験体の大きさに依存しない放出曲線（図 2）を得た。コンクリート中の水分は、コンクリート中の温度分布に支配されて反応界面が移行し、ナトリウムと反応することで水素として放出されるため、今後温度分布と水素の放出曲線について整理する。

コンクリート侵食挙動については、本試験では約 10mm の侵食を確認することができ、粗骨材の無いモルタルは、粗骨材を含むコンクリートより侵食しやすい傾向を確認した。また試験後の断面観察（図 3）によって侵食面上方に反応生成物の塊が観察され、侵食されたコンクリート成分が反応生成物の塊となり反応を阻害したものと推察される。反応停止機構として、反応界面近傍でのコンクリート成分の濃度が高くなることで反応生成物が堆積しやすくなるため、濃度/温度と反応生成物の挙動が重要であると考えられる。

また、計算化学では燃料デブリ中で Na と反応する化合物を整理し、模擬反応試験では $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$ の熱伝導度が UO_2 より低い事などが見いだされている。

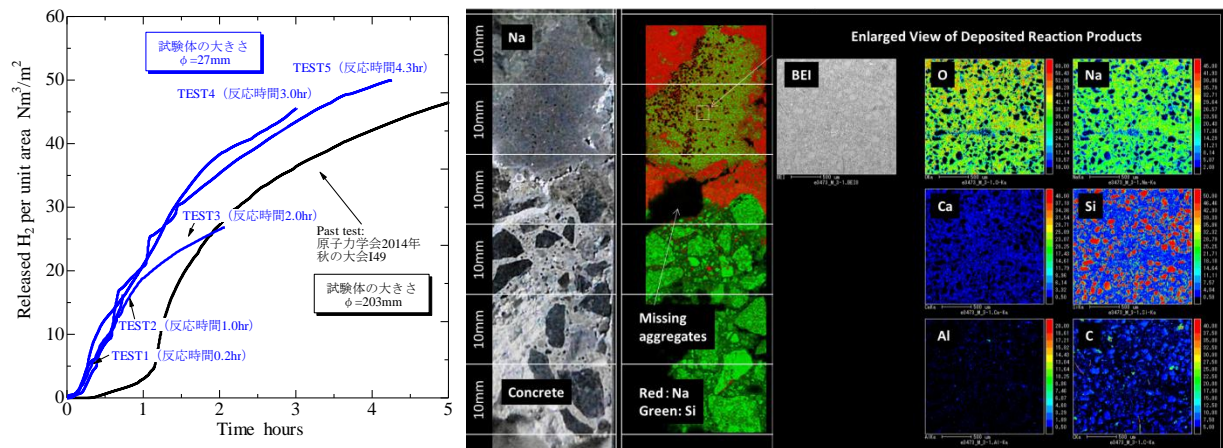


図 2 水素発生挙

図 3 Na-コンクリート反応後の反応断面

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は、水素ガス中に混在したナトリウムの蒸気やミストの着火に起因した高速炉特有の水素誘導拡散燃焼により水素を緩慢に燃焼消費させ得ると考えられている。水素誘導拡散燃焼における着火機構の解明では、昨年度製作した試験装置に対してガス濃度や温度の制御性能を確認した。また点火器を使用したナトリウム非混在の水素拡散燃焼試験により着火特性評価を実施中である。

水素燃焼挙動の3次元数値解析手法の開発では、文献調査の結果に基づいて数値解析手法の方向性を決定し、燃焼（火炎面）モデルの構築と基礎検証を行った。本研究では、原子炉格納容器内の大規模領域を解析対象とするため、粗い格子においても燃焼反応を精度良く計算できるモデルが必須となる。そのため、界面追跡法（Volume-of-fluid 法）に基づく火炎面追跡を行う手法を開発した。すなわち、流体率（計算セル中の水素ガスの体積分率）に基づいて火炎面の伝播と再構築を行うことにより、粗い格子においても火炎面の拡散を抑制して高精度の燃焼計算を可能とした。基礎検証解析により、火炎面伝播や燃焼反応が正しく計算できていることを確認し、また、水素ガス Jet 流れを対象とした解析により、実際の燃焼挙動と近い現象を評価できることを確認した（図 4）。ナトリウム雰囲気における着火モデルに関しては、実験データに基づくモデル式の導入を行った。

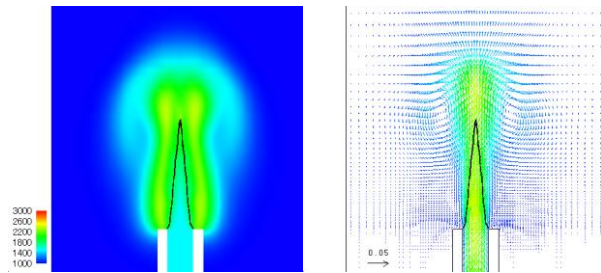


図 4 水素ガス Jet 流れの解析結果
（左：温度分布、右：速度分布）

(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。試験および解析の結果比較を図 5 に示す。ベローズ解析に関しては、座屈挙動およびベローズの山同士が接触に至るまで解析結果を得ることができた。鏡板の解析に関しては、初期の座屈挙動を経て鏡板が反転するまでの解析結果を得ることができ、破損部位に高い応力が発生する状況が確認できたことから、解析により得られる非弾性ひずみにより破

ベローズ		鏡板	
試験前試験体	試験後試験体	試験前試験体	試験後試験体
解析モデル (1/2 モデル)	解析結果	解析モデル (軸対称モデル)	解析結果

図 5 平成 26 年度構造物試験及び解析結果

損を予測する手法について検討中である。

ベローズ構造では解析限界となる圧力は下記の(2)②で得られる圧力よりも小さく解析限界をクライテリアとすると破損圧力を保守的に評価可能であること、ならびにベローズの座屈評価で用いられるEJMA式は、破損圧力に対して1/10程度となることが明らかとなった。

②ベローズ、鏡構造の耐圧強度試験

ベローズおよび鏡板の限界圧力試験を実施した。図5に示すように、ベローズ試験では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、さらに変形が進行し、初期形状を完全に喪失し大きく膨らみ近傍構造物との干渉に至り貫通破損を生じた。鏡板試験では、中高面に圧力を負荷された鏡板は、まず頂部付近が座屈により陥没し、その後、反転範囲が拡大した後にやがて鏡板がほぼ全て反転して、反転領域が鏡板のナックル部と円筒部の境界付近(R開始部)に至ったところでバウンダリが破損した。

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

多次元ナトリウム燃焼解析手法構築では、既存の試験データ等との対比によって乱流やふく射熱移行に関わる解析モデルの検証及び必要なモデル改良を実施する予定である。解析モデルの高度化に関しては、解析領域の大きさや境界条件の影響を明確にするとともに、解析パラメータと計算時間の関係についての確認を行い、適切な燃焼モデルについての検討を進める予定である。

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

実施してきたナトリウム試験の結果について、温度分布及び水素放出曲線の関係、並びに反応生成物の挙動に着目して試験データの拡充及び整理を行うと共に、計算と実験との比較/考察を行い、評価手法の開発を行う。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

水素誘導拡散燃焼における着火機構の評価・解釈では、素反応モデルを構築して水素の燃焼に対するナトリウムの影響を把握する。またナトリウム非混在/混在の水素拡散燃焼試験を実施し、着火特性を把握する。

水素燃焼挙動の3次元数値解析手法の開発では、誘導拡散燃焼の実験を対象とした解析を行い、現象再現性について確認するとともに、原子炉格納容器内における燃焼解析を実施し、格納容器壁面温度等に対する影響を評価する。

(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、鏡構造の座屈後挙動解析

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、鏡構造の耐圧強度試験

一連の試験結果を俯瞰し、破損様式および解析との対比検討のために必要な要素試験を立案し、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。