

## ナノ粒子分散ナトリウムの高速炉への適用化技術の開発

研究代表者 荒 邦章 独立行政法人日本原子力研究開発機構次世代原子力システム研究開発部門  
 参画機関 独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人北海道大学、三菱重工業株式会社、  
 三菱 FBR システムズ株式会社  
 研究開発期間 平成 22 年度～24 年度

### 1. 研究開発の背景とねらい

次世代原子炉システムのナトリウム冷却型高速増殖炉（Fast Breeder Reactor 以下、FBR と記す）の冷却材である液体金属ナトリウムは、伝熱特性、材料との共存性に優れ、核的性質も良好であるといった利点を有する一方で、化学的に活性であるため、空気雰囲気への漏えいや蒸気発生器の伝熱管破損時における水や蒸気との接触により、「急激な化学反応」を生じ、プラントの安全性及び補修性に影響を及ぼす可能性があるという欠点を有している。現在は、これらナトリウムの化学的活性度に起因する弱点を回避するために「急激な化学反応」の存在を前提にして、安全対策設備や冷却系機器の設計を工夫するなどの対応により実用性のあるプラント概念を構築している。このような状況を考えると、新たな技術によってナトリウム固有の高い化学的活性度を抑制制御することができれば、懸念される水反応や漏えい火災などに対する設計上の制約が緩和され、より高い安全性と経済性を実現しうる革新概念の提案が可能となる。この観点において、報告者らは、ナノテクノロジーを応用した新たな概念として、ナノスケール領域で生じる原子間相互作用に着目した流体の機能制御に関する研究を液体金属ナトリウムへ適用することにより化学的活性度を抑制するという従来にない全く新しい概念を提案した。これまでの研究により、ナノ粒子分散による反応抑制効果の確認および実炉への適用の可能性を明らかにするとともに、ナノ粒子分散ナトリウム(ナノ流体と記す)の実現にかかわる製造等の基盤技術を整備してきた。

本事業では、FBR への適用化技術の開発として、プラント環境を考慮した反応抑制や適用性の試験と評価に基づきナノ流体の適用性を確認し、実用化のためのナノ流体の製造技術を実証するとともに、FBR への適用方策を提示することを狙いとしている。

【ナノ流体の概念と特徴】 研究開発成果の報告に先立ち、革新性に富むナノ流体の概念について簡単に説明する。本概念は、液体ナトリウム中にナノメートルサイズの金属超微細粒子(ナノ粒子)を分散させることを基本としており、アルカリ金属であるナトリウムと電気陰性度の高い金属ナノ粒子を組合せることによって生じるナノ粒子の表層原子と周囲のナトリウム原子との原子間相互作用（原子間結合力と電荷移行）を利用している。原子間結合力は、表面張力や蒸発速度などの物性を変え反応速度を緩和する。電荷の移行は、ナノ粒子表層で電荷の偏りを生みだし、粒子の安定分散維持に必要な静電的斥力をもたらすことに加え、反応における活性化エネルギーの変化、すなわち反応熱量の低減に寄与する。この概念の特徴は、ナノ粒子の微細化により比表面積を大きくすれば、相対的に分散量を制限しても効果が得られることにある。

### 2. 研究開発成果

#### 2.1 ナノ流体の反応抑制効果<sup>(1)</sup>

FBR プラントにおいて、冷却材ナトリウムの化学的活性度に起因して安全対策が施されるのは、主としてナトリウムの漏えい燃焼火災と蒸気発生器の伝熱管破損によるナトリウム-水反応である。このうち、24 年度は、ナトリウム-水反応を対象に研究開発を実施したので、以下に、その成果を報告する。

### (1) 評価対象事象と着眼点

蒸気発生器の伝熱管破損時に生じるナトリウム-水反応の特徴は、破損孔からの高温高压水がジェット状にナトリウム中に噴出することにより、エントレンされたナトリウム小液滴が蒸気と反応して高温となり、反応ジェットを形成して周囲の伝熱管を高温に晒し、反応生成物によるエロージョンを生じさせる。この反応ジェットは、蒸気発生器伝熱管破損時のような特殊な条件で生じる様相であり、極めて早い反応であることに加えて反応温度が高温になることが特徴である。

また、ナノ流体を高速炉に適用するためには、反応抑制効果の評価とともに、冷却材として適用性を確認することが重要であり、設計から運転・保守に及ぶ広範な視点から懸念事項を挙げて適用性の検討を行ってきた。本年は、これまで未評価であったプラント計装機器への影響ならびに運転保守上必要となる取扱要件として洗浄および消火への影響を評価した。

### (2) 蒸気発生器伝熱管破損時のナトリウム-水反応様相の模擬による反応抑制知見の取得

小規模装置を製作、使用してナトリウムおよびナノ流体中への水蒸気ジェット注入実験を行い、安定した反応ジェット<sup>\*1</sup>を実現し、ジェット状態での反応温度を初めて測定できた(図1)。この結果、反応ジェットの温度上昇は、ナトリウムの約100°C(500→600°C)に対し、ナノ流体では約40°C(500→540°C)とナノ流体の明瞭な反応温度低減効果が確認できた。なお、実験で得られたナトリウムの場合の温度上昇は、大型実験での約500°C(500→1000°C)に比べて小さいが、これは実験装置が小さく、水蒸気の一部が未反応のまま系外に流出してしまうこと等によるものであり、本事業では、前述のようにナトリウム-水反応抑制効果の評価として蒸気発生器伝熱管破損時における特徴的な反応様相であるジェット状反応を再現することが重要である

ことに鑑みてジェット状態を作り出し反応温度を測定した。<sup>\*1</sup>水中へのArガス注入予備実験により目視で、また反応実験では安定した軸方向温度分布で確認している。

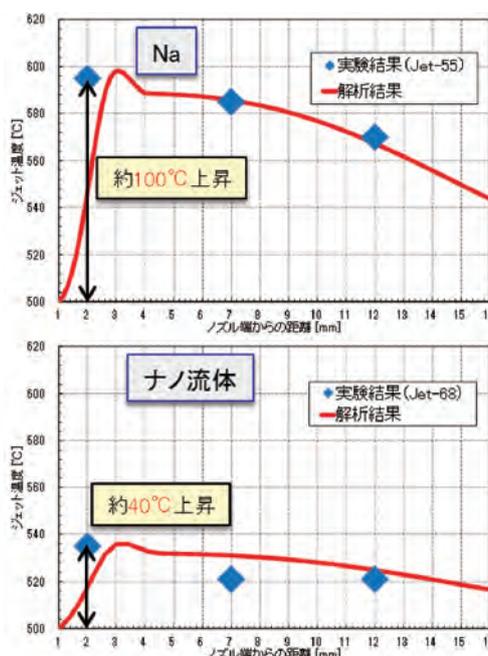
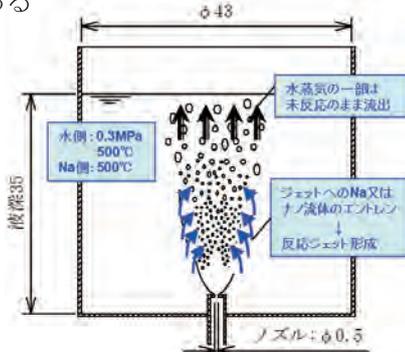


図1 水蒸気ジェット注入実験と解析

以上の結果は、これまでに実施したナノ流体の基礎物性測定や特性把握の成果に基づく、次のような予測を裏付けている。

①ナノ粒子分散による原子間相互作用に起因して表面長力が增大することにより、エントレンによる生成液滴径が大きくなり、②蒸気圧の低下によって液滴から蒸発するナトリウムの蒸発速度が低下する、に加えて③ナノ粒子分散による凝集エネルギーに起因する反応熱量の低下、の相乗により説明される。

### (3) 冷却材としての適用性評価<sup>(2)</sup>

ナノ粒子分散による計装機器への影響として、ナトリウム冷却炉に適用される電磁気および音響を原理とする計測機器に対する影響を実験的に確認した。その結果、電

磁誘導現象に有意な変化は認められず、超音波伝搬における音速の変化や音圧の減衰も認められなかった。

また、ナトリウム冷却系機器のメンテナンスに必要な取扱作業として、ナトリウム洗浄に対する影響を実験により確認した。その結果、水、蒸気、アルコール等の種々の洗浄手法においてナトリウムと同一のプロセスで作業可能であることが明らかになった。この他、ナトリウム消火に対する影響として、窒息消火について実験により確認した結果、ナノ流体は、ナトリウムに比べて高い窒息消火効果が認められた。これは、これまで確認したナノ流体の酸化燃焼反応における酸素に対する感度の低下ならびに自己終息効果を裏付けるものである。

## 2.2 ナノ流体のFBRへの適用効果

### (1) 実機のナトリウム-水反応における抑制効果の評価<sup>(3)</sup>

ナノ流体に適用するための反応ジェット温度解析モデルを整備して、2.1 (2) で取得した実験データを使って、実機の蒸気発生器伝熱管破損時のナトリウム-水反応における反応ジェット温度解析、更には破損伝播解析を行った(図 2)。その結果、ナノ流体の反応ジェットの最高温度はナトリウムの場合に比べて、現状の反応抑制性能でも数百℃低減

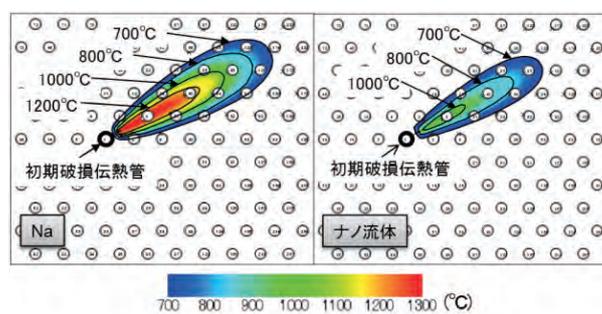


図 2 伝熱管損傷解析例

し、高温ラプチャやウェステージによる破損伝播

及び損傷範囲は大幅に抑制可能であるとの見通しが得られた。これより、実用炉で想定している2重管蒸気発生器から単管蒸気発生器(簡素化概念)へと、水反应对策設備を大幅に軽減できると予測評価した。これらにより、ナノ流体適用により水反応に対する安全性、信頼性を大幅に向上できる見込みを得た。

### (2) 実機の漏えい燃焼火災における抑制効果の評価

実機にナノ流体を適用した場合の漏えい対策設備軽減の効果を実験結果やそれらからの予測を踏まえて評価した結果、ライナ設備の大幅な軽減の他、緊急ドレン要求の削除、窒素注入設備の削除等、対策設備の大幅な簡素化が可能な見通しが得られた。また、対策設備設計の要求・制約条件が緩和され設計の自由度が増大するメリットが得られることが明らかになった。

### (3) 冷却材としての適用性の評価

これまでに実施した実験および机上検討の結果を基に適用性を評価した。伝熱・流動等に関する基礎試験の結果に加え、構造材との共存性確認、純度管理及び洗浄等の新たな実験的知見を基に、その適用性を評価した結果(図 3)、多くの懸念事項が適用上問題のないとの見通しを得た。

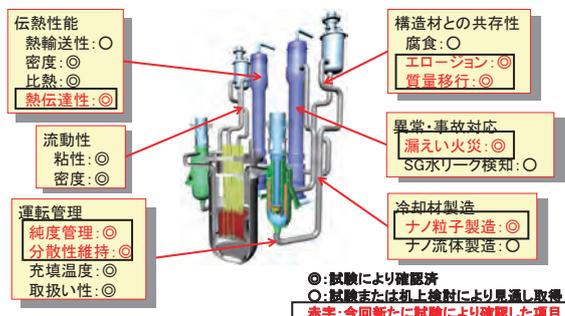


図 3 冷却材適用上の課題の評価

また、ナノ粒子のコストは、ナノ流体適用に伴う設備削減(例えば、蒸気発生器の単管化)のコスト低減分で賄える見通しであり、適用上クリティカルな問題ではない。実用化段階では、量産化により、更なるコスト低減を目標にできる。

## 2.3 ナノ流体製造技術の開発

ナトリウムに適合するナノ粒子の生成手法として金属蒸気凝縮による粒子生成および粒子径制御の実証を目指して金属蒸気凝縮による粒子生成手法の基礎となる核生成挙動ならびに核の成長挙動(粒子径成長)を把握し、制御因子と現象との関係を把握して装置化に必要な知見を取得した。また、実機適用環境下におけるナノ流体の安定性について評価した。

### (1) ナノ粒子生成過程における核生成および粒子径制御技術の開発

金属蒸気の凝縮による核の生成現象の影響因子は、温度場および流れ場(圧力)の安定性にあることから、流動と伝熱の連成解析に加えて可視化実験を行い現象を把握した。その結果、核生成の安定化に影響を及ぼす主要因は金属蒸気冷却部でのキャリアガスの流れの乱れによる核生成の不均一ならびに不均一による先行生成核と周辺の蒸気や生成核どおしの衝突凝集にあることを突き止め、ガス流れの制御による緩和可能な構造を導出し、粒子製造試験を行って効果(核生成の均一化)を検証した。

また、生成した核の成長の支配因子は冷却条件と粒子間の凝集抑制にあり、粒子成長過程における冷却履歴と粒子生成径の関係を調べた結果、冷却速度と粒子平均粒径に明確な相関があることを見出し、冷却速度を変えることによりで粒子径を制御できることを明らかにした(図4)。

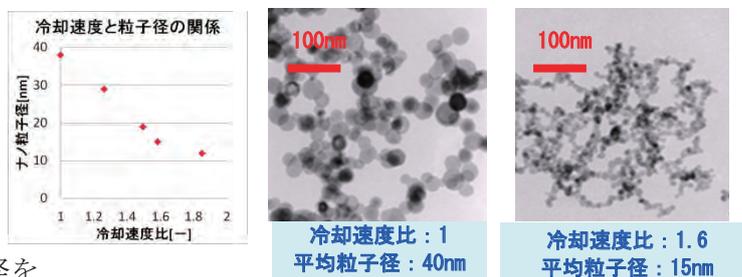


図4 粒子径制御の実証

### (2) ナトリウム中におけるナノ粒子分散の安定性の評価

ナノ粒子分散性に及ぼす影響の大きい温度や流れの変化について実機環境を模擬した高速流場および相変化を含む温度変化場での分散安定性を評価した。分散濃度変化率、分散粒子径変化率及び反応抑制効果を用いた評価により、高流速場、相変化を伴う温度変化場において分子分散の安定性を確認し、ナノ流体の実機環境への適用が可能であることを確認した。

## 3. 今後の展望

液体金属ナトリウムにナノ粒子を分散させることにより原子間相互作用を産み出し、物性を変え反応を抑制できることを明らかにしてきた。その技術は、粒子を微細化することによりナトリウムが有する優れた伝熱流動性を損なわずに、僅か1~2vol.%の分散量で高速炉に役立つ反応抑制効果が得られる可能性を有する。また、燃焼反応の自己終息効果やアルカリ金属に起因する特殊な腐食(熔融塩型腐食)速度の緩和など、原子間相互作用に相乗する副次的効果も認められていることから、ナノ流体は、その概念創出当初に想定した反応抑制効果を超えたポテンシャルを備えることが明らかになってきた。今後、過酷事故等に対応する厳しい安全確保要求に対して、この高い安全ポテンシャルを有するナノ流体を活用し、より一層の安全強化の実現を図りたい。

## 4. 参考文献

- (1) 永井桂一、他；日本原子力学会、2013年春の年会、G16、近畿大学、3月26日
- (2) 斉藤淳一、他；日本原子力学会、2013年春の年会、G14、近畿大学、3月26日
- (3) 神田大徳、他；日本原子力学会、2013年春の年会、G15、近畿大学、3月26日