

# 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

(受託者)独立行政法人日本原子力研究開発機構

(研究代表者)荒 邦章 次世代原子力システム研究開発部門

(再委託先)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、ナノメートルサイズの金属超微細粒子 (ナノ粒子と記す) 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。本事業は 3 カ年での実施を計画しており、2 年目である 23 年度は、ナノ流体のプラント環境下における反応抑制効果の評価、ナノ流体のプラントへの適用性評価およびナノ流体製造技術の開発を行った。

**【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。この原子間相互作用によって、ナトリウム中に分散したナノ粒子は周囲のナトリウム原子と比較的安定なクラスターを形成する。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、前述の反応抑制効果がナトリウム原子とナノ粒子との原子間相互作用、つまり接触面積の大きさに依存することから、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。従って、元来液体ナトリウムの利点である優れた伝熱・流動特性を損なうことなく、化学的活性度

を抑制制御しうることが特徴であり、これまでの研究で概念の成立性を明らかにした。

## 2. 研究開発成果

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。23年度は、漏えい燃焼火災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。

### 2. 1 ナノ流体の反応抑制効果

#### (1) 評価対象事象と着眼点

はじめに、実炉で想定されるナトリウムの漏えい燃焼火災現象について説明する。冷却系の配管や容器からナトリウムが漏えいした場合を想定すると、空気雰囲気においては、漏出したナトリウムは雰囲気中の酸素と反応しながら落下し、鋼製の床面に堆積して燃焼する。燃焼反応の進行に伴って温度が上昇し、周囲の構造物等へ熱的な負荷を与える。同時に、雰囲気中の温度を上昇させ、反応生成物であるエアロゾルが放出される。一方、現行設計におけるナトリウム漏えい燃焼火災への対応は、漏えいの検知による炉の停止とナトリウムのドレン、酸素との反応が生じた場合の雰囲気や構造物への熱的負荷対策、窒息消火などの諸対策により安全が確保されている。かかる背景を踏まえて、ナノ流体の適用による反応抑制効果、構造物等への影響の緩和ならびに対策設備の軽減の可能性などについて検討した。

#### (2) 燃焼による熱的影響の緩和効果

まず、漏えいにより床面に堆積したナトリウムの燃焼挙動に着目する。ナノ流体の燃焼現象は、ナトリウムのそれと比較して顕著な反応温度の低下を示し、未反応のナトリウムを残して燃焼が停止することが実験で確認されている。これは、ナノ粒子の分散によって生じる原子間相互作用に基づく反応抑制効果(反応速度や反応熱量の低減)ならびに、ナノ粒子が介在する燃焼反応生成物による反応界面でのナトリウム蒸発の阻害によるものである。ナノ流体の適用により、床ライナーなどの構造物等への熱的影響が有意に緩和される。図1に、容器にナトリウムとナノ流体を入れて、FBRの運転温度500℃で燃焼させた場合の容器底部(実炉では床面)温度と燃焼面の様子を調べた結果を示す。

次に、ナトリウムの燃焼挙動の影響因子を挙げて、実炉で想定される環境条件を当てはめた場合の燃焼特性について検討した。酸素との反応における最も重要な因子は、酸素濃度であり、雰囲気中の酸素濃度に対するナノ流体の反応進展の感度を調べた。図2に、酸素濃度の燃焼温度(最大ピーク温度)との関係を示す。ナノ流体は、ナトリウムに比べて、明らかに酸素濃度に対する抑制に対する感度が高い。

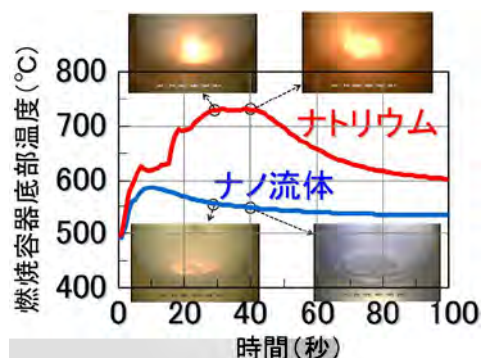


図1 ナノ粒子分散による燃焼抑制の効果例 (図中の写真は、当該時間における燃焼面の写真、ナノ流体の場合には反応途中で終息)

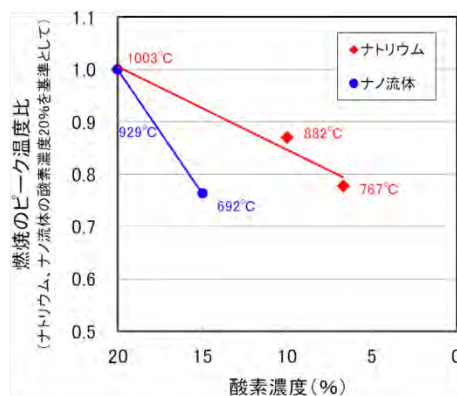


図2 ナノ流体とナトリウムの燃焼温度に対する酸素濃度の依存性

このことは、窒息消火のために当該室の換気を遮断したり（閉め切ったり）、窒素ガスの注入による積極的な酸素濃度低下措置などに対して、ナトリウムの場合以上に極めて有効に作用することを示している。自らの燃焼反応によって反応場の酸素を消費すれば、より反応が緩和するという相乗的な抑制効果と言える。

### (3) 燃焼反応生成物の影響の緩和効果

熱的影響の他に、ナトリウムの燃焼反応に特徴的な反応生成物の挙動に着目し、プラントに及ぼす影響について検討した。反応生成物は、燃焼によって発生し、雰囲気中に放出される。その反応生成物(エアロゾル)の量の差異を実験を行って調べたところ、ナノ流体の場合の発生量は、ナトリウムに比べて顕著に低減することが確認されている。エアロゾル発生総量は、反応温度とその継続時間に依存するので、前述のように、ナノ流体では、燃焼温度や反応継続時間の低減が顕著であるので、相対的に反応生成物の発生量は抑制されることになる。

次に、特殊な環境条件でおきる可能性のある反応生成物に起因した腐食挙動について検討した。極めて高湿分な雰囲気条件を想定した場合、落下堆積したナトリウムの反応生成物(水酸化ナトリウム中に過酸化物が存在)が及ぼす腐食挙動への影響を調べた。ナノ流体を適用した場合の腐食速度はナトリウムのそれに比べて顕著に低減(約1/10)することが確認された。これは、鋼材(鉄)の腐食源となる過酸化イオンが、ナトリウム中に存在するナノ粒子により捕獲されることによるものである。

## 2. 2 ナノ流体のFBRへの適用効果

前節で報告したナノ流体の反応抑制効果を基に、実炉における適用効果および対策設備の合理化の可能性を検討した。実炉の環境条件を考慮したナノ流体の特性把握から明らかになったことは次のように整理される。

- ① 燃焼によって発生する熱の低減により、雰囲気や周囲の構造物に及ぼす熱的影響が大幅に緩和される。このため、当該室の断熱条件、鋼材仕様、圧力制御などの設計制約条件の緩和が期待で

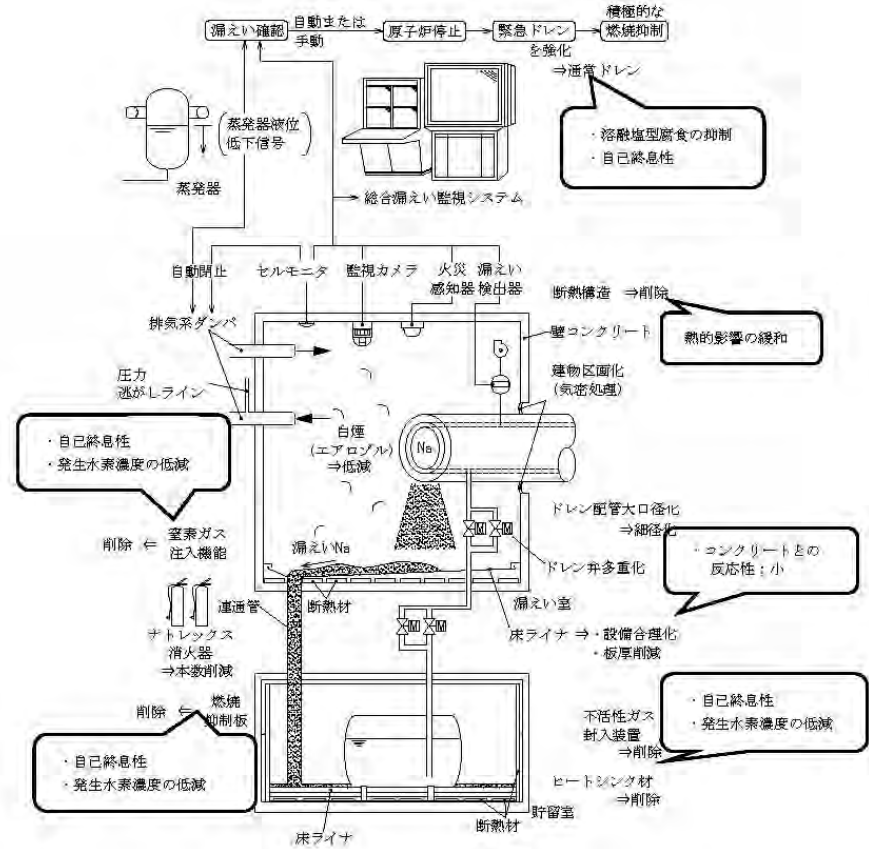


図3 ナトリウム漏えい燃焼火災に対す対策設備の設計例とナノ流体の適用による設備軽減の可能性の検討例

きる。

②燃焼の自己終息性により、上記①への寄与に加えて、消火方法や漏えいしたナトリウムの窒息（貯留）方法の軽減が期待できる。

③上記①および②の両者により、漏えい事故発生から火災の終息までの時間が短くなることに加えて、周囲の機器設備に及ぼす影響、被害が軽減されることになり、事故終息から復旧に至る運用の緩和が期待できる。

以上を基に、代表的な設計をレファレンスとして、対策設備毎に、具体的な合理化の可能性を検討した。図3に、現行設計におけるナトリウム漏えい燃焼火災事故の対策設備とナノ流体を適用した場合に予測される軽減の可能性を示す。その結果、壁及び天井の断熱材、床ライナー板厚、緊急ドレン要求、吸熱材（アルミナ）、窒素ガス注入設備および貯留室の燃焼抑制板などの漏えい燃焼対策設備の軽減或いは削除の可能性が予測される。今後、この予測を基に検討を進め、適用効果を評価するとともにナノ流体の特性を活かした概念の検討、提示を行うこととしている。

### 2. 3 ナノ流体製造技術の開発

ナノ流体の反応抑制効果ならびに実炉への適用効果が明らかになってきたが、ナノ流体を実現するために必須の基盤技術として、ナノ粒子の製造および分散技術開発を行っている。FBRに適合するナノ粒子の要件は、遷移金属元素から成る金属ナノ粒子であり、ナトリウムと組み合わせるために必要となる粒子表面の無酸化、伝熱流動性を維持しながら反応抑制効果を生み出すための粒子の微細化と粒子径の均一化制御などに取り組んできた。これらの要件に適合する製造技術として、金属を蒸発させそれを冷却固化させてナノ粒子を製造する技術の開発を進め、反応試験に供しながら、その結果を反映した製造知見の蓄積を図っている。当該年度では、粒子径の制御を重点に、ナノ粒子生成場における金属蒸気の冷却条件の適性化について検討を進め、ナノ流体の試作と供試による反応抑制効果の向上を図りながら、実用のための装置化設計知見を把握した。これまでの技術開発により、要件に適合する粒子径の制御が可能となっている。図4にその一例を示す。

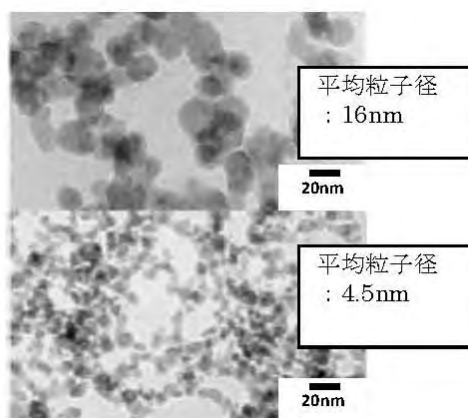


図4 ナノ粒子製造における粒子径制御技術の実証例（Ti ナノ粒子製造の例）

### 3. 今後の展望

ナノ流体の反応抑制効果およびそのメカニズムの把握が進み、伝熱流動性の維持と化学的活性度の抑制制御の同時満足の実現性が明らかになってきた。また、実炉へ適用した場合の効果や対策設備の軽減など、シンプルで高い安全性を有するプラント概念の構築の可能性が示されつつある。今後、反応抑制効果の評価に加えて、冷却材としての適用性の評価を進め、ナノ流体の適用方策を提案する予定である。また、ナトリウムが有する潜在的危険性の低減という革新的技術がもたらすブレークスルーによって、安全性に優れた社会受容性の高い炉の実現を目指して研究を推進したい。