

## 学位論文題名

液体ナトリウム中の単一円管に対する衝突噴流構造とその  
エロージョン特性に関する研究(Study on Structure of Impinging Jets and their Erosion Characteristics  
on a Single Tube in Liquid Sodium)

## 学位論文内容の要旨

ナトリウム冷却高速増殖炉は、発電と共に消費した以上の核燃料を生産（増殖）するのでできる次世代型原子炉で、エネルギー資源を持たない我が国にとって重要な電源となることが期待される。また、過熱蒸気サイクルでの運転が可能のため、発電効率が現行の軽水炉より1割程度高いことや、使用済み燃料に含まれるマイナーアクチニドを燃焼し、放射性廃棄物を低減させることなどのメリットもある。一方で、冷却材に科学的活性の強い液体ナトリウムを用いるため、独自の安全評価が必要である。

蒸気発生器において伝熱管に破損が生じた場合、伝熱管内部から高圧の水あるいは水蒸気がナトリウム側へ噴出し、ナトリウム-水反応が発生する。この反応ジェットが隣接伝熱管まで到達すると、エロージョンやコロージョンによる伝熱管の損耗（ウェステージ）や、反応熱の高温環境下で強度が低下した伝熱管の内圧による破裂（高温ラプチャ）によって、二次破損を引き起こす可能性がある。従来の安全設計では、ナトリウムの特性により現象解明が困難であったことから、実機を模擬した大規模実証試験を積み上げ、試験データを包括するように伝熱管二次破損の可能性や破損伝播の規模を評価してきた。しかしながら、将来炉蒸気発生器では、大型化や水、蒸気系の高温、高圧化、ナトリウム系の高温化などが指向されており、これらの実験結果に基づき異なる伝熱管配置や運転条件に対して、実現象の予測を行うことは難しく、一般に多大な費用がかかる。そのため、数値解析コードを用いた機構論的な現象評価によって、様々な設計オプションに対して汎用性、信頼性の高い安全評価手法の構築が求められている。本研究の目的は、ナトリウム-水反応の安全評価の根拠となる実験事実を取得することである。

ナトリウム-水反応を理解するには、漏えいした水蒸気が液体ナトリウム中にどのように噴出し、隣接管周りでどのように流動するかを把握する必要がある。水、蒸気系とナトリウム系の圧力差が大きいために、漏えいした水は減圧沸騰により蒸発し、超音速の不足膨張噴流が形成される。液体ナトリウムは高表面張力、低密度という通常流体や他の液体金属と異なった性質を持つことから、液体ナトリウム中の不足膨張噴流について実験的な検討が必要であるが、化学的活性の強さに起因した実験技術の不足から、詳細な研究は報告されていない。また、衝突噴流に関しても水中での観察結果が報告されているのみで、その内部構造に言及した例はない。したがって、ナトリウムと水の化学反応に起因した事象とは別に、流れ場の特殊性に起因した現象解明を行う必要がある。また、ウェステージ評価については実証試験による経験的な安全評価から、科学的根拠に基づいた安全評価へと信頼性を向上させることが求められており、エロージョンとコロージョンのそれぞれについて詳細な実験事実を得る必要がある。本研究では、液体ナトリウム中の気液二相挙動を解明するための各種実験技術を開発し、液体ナトリウム中に噴出する不活性ガス不足膨張噴流が単一円筒に衝突する体系において、その構造を実験的に明らかにする。また、ウェステージの要因の一つであるエロージョンについて、理論モデルに基づいた実験相関式を構築する。

本論文は以下の6章より構成されている。

第一章では、研究の背景を述べ、本研究の目的について明らかにする。

第二章では、関連する従来研究について概説し、本研究の位置付けを明確にする。

第三章では、液体ナトリウム中不活性ガス噴流の可視化試験について述べる。本研究で、隣接管を模擬したガラス管の内部に内視鏡を挿入し、液体ナトリウム中の気液二相流挙動を直接観察する手法を開発した。まず、亜音速噴流を用いて、噴流中にエントレインされる液体ナトリウム滴を観察し、噴流と液相との界面積濃度評価やエロージョン量の見積りに必要な、液滴の平均粒径および粒径分布を検討した。その結果、液体ナトリウム滴の平均粒径が、Epstein らが水実験によって求めたエントレイン液滴平均粒径の実験相関式と整合することを確認し、粒径分布が抜山-棚沢分布関数に従うことを見出した。次いで、円筒に衝突する不足膨張噴流を観察し、円筒前面での噴流の衝突構造と流動様式について検討した。その結果、ノズル-円筒間距離が近い場合には、噴流衝突領域とその周囲の液膜流領域が存在することを明らかにした。また、ノズル-円筒間距離が遠い場合には、円筒全体が気泡流に覆われることを確認した。

第四章では、単一円筒周りの局所ボイド率分布について検討を行う。ボイド率分布は数値解析コードの妥当性検証に有益であるとともに、エントレインされる液体ナトリウム滴の円筒周りでの特性を知る上で重要である。本研究では、導電プローブによるボイド率計測法を液体ナトリウム用に改良し、円筒表面近傍のボイド率分布を計測する。まず、予備試験として亜音速噴流を用い、液体金属特有の固体表面に濡れにくい性質が円筒周りの気液二相流にどのように影響するかについて検討した。その結果、円筒表面の濡れ性の違いが、主に円筒背面の流れ場に影響を与えることが明らかとなった。また、実機高温条件では濡れ条件となるが、プローブ検知部では非濡れ条件が必要であることを勘案し、円筒表面にニッケルメッキを施すことで比較的低温条件で実機環境を模擬する実験方法を開発した。次いで、円筒に衝突する不足膨張噴流について、ノズル-円筒間距離やノズル径を変更し、ボイド率分布を計測した。その結果、第三章で行った可視化結果との対応を確認し、各流動様式に対するボイド率分布の定量評価を行った。さらに、液滴エントレインメント領域の存在を明らかにし、ノズル-円筒間距離やノズル径に関してエロージョンの最も起こりやすい領域を特定した。

第五章では、液体ナトリウム中不足膨張衝突噴流のエロージョン特性について検討を行う。エロージョン特性は衝突噴流の構造と密接に関連しており、エロージョン特性を独立に評価することで、コロージョンとの複合現象であるウェステージ相関式の構築に寄与することができる。可視化試験によって特定した液滴エントレインメント領域が円筒に衝突する体系において、硬さの異なる試験片に噴流を衝突させ、エロージョンによる体積減少量を計測した。エロージョン試験によって得られた減肉形状を詳細に観察することで、液中不足膨張衝突噴流によるエロージョンが液滴衝突エロージョンであることを明らかにした。また、単位時間当たりの体積減少量であるエロージョン速度について、Sanchez によって提案された理論モデルを基に、エロージョン速度相関式を構築した。

第六章では、第一章から第五章までで得られた結論を総括し、本研究の目的に対して十分な結果が得られたことを結論付ける。

以上、本研究では新たなナトリウム実験技術を開発し、液体ナトリウム中に噴出する不足膨張噴流の円筒に対する衝突構造を明らかにした。さらに、水実験による従来知見のナトリウムへの適用性を確認し、衝突噴流によるエロージョン速度相関式を構築した。本研究結果は、ナトリウム-水反応現象の評価モデルとして適用できるほか、安全評価手法の根拠となる試験データとして、ナトリウム冷却高速炉の実用化に対して広く貢献することが期待できる。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	奈良林	直
副査	教授	森	治嗣
副査	教授	村井	祐一
副査	教授	渡辺	精一

## 学位論文題名

### 液体ナトリウム中の単一円管に対する衝突噴流構造とそのエロージョン特性に関する研究

(Study on Structure of Impinging Jets and their Erosion Characteristics on a Single Tube in Liquid Sodium)

ナトリウム冷却高速増殖炉は、発電と共に消費した以上の核燃料を生産(増殖)することのできる次世代型原子炉で、2000年にわたり人類のエネルギー源となる。発電効率が現行の軽水炉より1割程度高く、放射性廃棄物を低減させることなどのメリットもある。一方で、冷却材に化学的活性の強い液体金属ナトリウムを用いるため、蒸気発生器において伝熱管に破損が生じた場合、ナトリウム-水反応が発生する。この反応ジェットが隣接伝熱管まで到達すると、エロージョンやコロージョンによる伝熱管の損耗(ウェステージ)や、伝熱管の二次破損を引き起こす可能性がある。

従来は実機を模擬した大規模実証試験で、伝熱管二次破損の可能性や破損伝播の規模を評価してきた。しかしながら、試験コストがかかり開発期間も長くなるため、数値解析コードを用いた機構論的な現象評価による信頼性の高い安全評価手法の構築が求められている。本研究の目的は、ナトリウム-水反応の安全評価の根拠となる実験事実を取得することである。

ナトリウム-水反応を理解するには、漏えいした水蒸気が液体ナトリウム中にどのように噴出し、隣接管周りでどのように流動するかを把握する必要がある。液体ナトリウムは高表面張力、低密度という通常流体や他の液体金属と異なった性質を持つことから、液体ナトリウム中の不足膨張噴流について実験的な検討が必要であるが、実験が困難で詳細な研究は報告されていない。また、衝突噴流に関しても水中での観察結果が報告されているのみで、その内部構造に言及した例はない。

本研究では、液体ナトリウム中の気液二相流挙動を解明するための各種実験技術を開発し、液体ナトリウム中に噴出する不活性ガス不足膨張噴流が単一円筒に衝突する体系において、その構造を実験的に明らかにする。また、ウェステージの要因の一つであるエロージョンについて、理論モデルに基づく実験相関式を用いた評価手法を構築した。

本論文は以下の6章より構成される。

第1章では、研究の背景を述べ、本研究の目的について述べた。

第2章では、関連する従来研究について概説し、本研究の位置付けを明確にした。

第3章では、液体ナトリウム中不活性ガス噴流の可視化試験について述べる。本研究で、隣接管を模擬したガラス管の内部に内視鏡を挿入し、液体ナトリウム中の気液二相流挙動を直接観察する手法を開発した。まず、亜音速噴流を用いて、噴流中にエントレインされるナトリウム液滴を観察し、噴流と液相との界面積濃度評価やエロージョン量の見積りに必要な、液滴の平均粒径および粒径分布を検討した。その結果、ナトリウム液滴の平均粒径が Epstein らが水実験によって求めたエントレイン液滴平均粒径の実験相関式と整合することを確認し、粒径分布が抜山-棚沢分布関数に従うことを見出した。次いで、円筒に衝突する不足膨張噴流を観察し、ノズル-円筒間距離が近い場合には、噴流衝突領域とその周囲の液膜流領域が存在し、ノズル-円筒間距離が遠い場合には、円筒全体が気泡流に覆われることを確認した。

第4章では、単一円筒に衝突する不足膨張噴流について、ノズル-円筒間距離やノズル径を変更し、ボイド率分布を計測した。その結果、液滴流領域の存在を明らかにし、ノズル-円筒間距離やノズル径に関してエロージョンの最も起こりやすい領域を特定した。

第5章では、液体ナトリウム中不足膨張衝突噴流のエロージョン特性について検討を行った。可視化試験によって特定した液滴流領域が円筒に衝突する体系において、硬さの異なる試験片に噴流を衝突させ、エロージョンによる体積減少量を計測した。エロージョン試験によって得られた減肉形状を詳細に観察することで、液中不足膨張衝突噴流によるエロージョンが液滴衝突エロージョンであることを明らかにした。また、Sanchez によって提案された理論モデルを基に、ナトリウム液滴によるエロージョン速度相関式を構築した。

第6章では、第1章から第5章までで得られた結論を総括し、本研究の目的に対して十分な成果が得られたことを結論付けた。

以上、本研究では新たなナトリウム実験技術を開発し、液体ナトリウム中に噴出する不足膨張噴流の円筒に対する衝突構造を明らかにした。さらに、衝突噴流によるエロージョン速度予測手法を構築した。本研究結果は、ナトリウム-水反応現象の評価モデルとして適用でき、ナトリウム冷却高速炉の実用化に対して広く貢献することが期待できる。

これらの新知見は、原子力工学の発展に貢献するところ大なるものがあり、優れた学位論文である。依って、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。