

度場計測用観測窓の設計有効径を30mmにした。

また、流動場計測手法の原理を検証するため、波長同定(157.7nm)に係わる予備試験の結果を踏まえ、VUV光に対する吸収断面積が大きい追跡元素(シリコン微粒子)を300℃以下の液体ナトリウム中に拡散して、2準位系誘導放出蛍光(3P-1Po)の強度を実験的に評価し、5mm径の観測領域における輝点の2次元画像計測結果を用いた速度場の解析を行った。その結果、概ね電磁ポンプの特性曲線から推定した制御駆動流速相当の値を得ることが出来た。しかしながら、迷光(励起波長)成分の寄与は予測していたが、誘導放射信号強度が検出限界(ICCDの量子効率12%)近傍であったことから、評価精度を改善し、実用性の向上をはかるためには、より攪拌性が高いと予想される炭素微粒子を追跡元素とした1次(146nm)または2次(139nm)の反ストークス誘導ラマン成分(ともに光源強度は低くなる)を用いた3準位系誘導放出光を用いた試験が必要(本事業の目的である原理検証には出力が最も大きい波長157nmの励起光に対するシリコンの誘導放出蛍光を利用)であると考えられる。

さらに、以上の結果をもとに、外部電磁場の印加による流動分布制御や液体金属を対象とした渦の生成消滅過程に係わる動力学研究基盤の創成を目的とした試験を展開した。本研究では、LES(大規模渦模擬計算)を用いた電磁流体の乱流数値解析を先行実施することによって試験体の構造を決定し、毎秒1.5mの速度で駆動される液体ナトリウムの流れと垂直な面内で、直交する最大0.8Tの磁場(2箇所)と150Vの電圧(4箇所)を印加して、ローレンツ力によるナトリウム流動の挙動変化を観測した。その結果、数値解析による予測どおり、電磁場を空間的に連続する複数の箇所に分割して印加する方が明確な応答性を得られることが分かった。また、速度場の計測結果をもとに外部電磁場の強度を帰還制御する試験(速度一定制御のもとで電磁ポンプの電圧変化に対する磁場コイル電流指令値の応答を観測)では、流速の増減に応じて制御信号の出力電圧(指令値)が変動することを定性的に検証した(出力電圧は終端抵抗の値と制御ゲインによって変動)。これは、高速炉における冷却材流動場の能動的構造制御に発展するものである。

【研究開発項目(2) ガス巻き込み評価手法のナトリウムに対する検証】

[得られた成果]

経済性を向上させた革新的なナトリウム冷却高速炉で出力変動の要因となるガス巻き込み現象に対して、流体の物性の影響評価により、既存のガス巻き込み評価手法のナトリウムへの適用性を検証した。本研究では、ナトリウム試験の比較参照用として、ナトリウム試験に先立って同一の構造寸法を持つ水試験装置を製作し、これを用いて気液界面形状とこれを形作る流速場などガス巻き込み評価手法の検証に適用するデータを取得した。また、水試験で得られた結果を基にナトリウム試験の試験条件および評価手法の検証解析の境界条件の設定に反映した。

ナトリウム中でのくぼみ渦によるガス巻き込み現象について、自由液面の可視化画像と巻き込まれたガス検出を基にガス巻き込み状態を判定し、水流動試験と比較することによって、物性の違いによるガス巻き込み現象への影響を評価した。その結果、比較的流速の小さい条件(入口流速0.15m/s以下)では、表面張力の大きいナトリウムの方が水に比べて、ガス巻き込みが発生しにくいことを明らかにした。また、流速が大きい場合(入口流速0.2m/s以上)は、液面の乱れにより相対的に表面張力の影響が低下するために、水とナトリウムでほぼ同じガス巻き込み発生条件を有することを初めて明らかにすることができた。すなわち、その発生を防止する必要があるガス巻き込み現象について、水流動試験により、ナトリウム体系でのガス巻き込みを安全側(水で発生する条件にナトリウム中で発生する条件が必ず含まれる)に評価できること

がわかった。また、前項目である「ナトリウム流動場の可視化計測技術の評価」により有効性を確認したナトリウム流動の可視化技術を用いて、ガス巻き込み現象の可視化実証を行った。その結果、カメラによるビーム径100mmの画像観測ではデータを得られず、レーザー出力はパワーメータの検出限界以下(0.025mJ未満)であった。

既存のガス巻き込み評価手法における熱流動解析を水流動試験およびナトリウム試験に適用し、渦を含む速度場の時間変動挙動を調べた。その結果、本手法による熱流動解析で、渦の形成位置、渦の回転方向などが再現できることを明らかにした。この数値解析結果に基づいてガス巻き込み評価手法を適用した結果、水流動試験については、試験結果と比較して、流入流速及び吸込流速の増加に伴って予測されるガスコア長さが吸込配管と液面の距離より長くなり、ガス巻き込みが発生しやすい(保守的に評価する)結果が得られた。また、ナトリウム体系については、検証試験でのガス巻き込み発生条件と比較して、ガスコア長さから求めたガス巻き込み発生条件を過大(発生しやすく)評価することがわかった。さらに、水流動試験とナトリウム試験結果ではガス巻き込み発生条件がほぼ同じだったのに対し、ガス巻き込み評価手法におけるナトリウム試験体系でのガスコア長さは、水流動試験体系の評価結果よりも大きくなった。これは、現在のガス巻き込み評価手法では、物性値として動粘性係数のみを考慮する渦モデルを用いていることが一つの原因となっていると考えられ、今後のガス巻き込み評価手法の開発内容として、動粘性係数に加えて表面張力や液面の取扱いを含む検討を行うべきことが明らかになった。以上の結果から、ガス巻き込み評価手法をナトリウム中に適用した場合、ガスコア長さを過大に評価するものの、安全側に評価する(ガス巻き込みを発生しやすく予測する)結果となることがわかった。

【事業全体】を通して

これまで明らかにされていなかった真空紫外(VUV)領域におけるナトリウムの光学特性に注目して、可視光に対して鏡面となるナトリウムが真空紫外(VUV)域の光に対して透明であることを実証し、レーザー励起された粒子の発光画像を用いた速度計測法で液体ナトリウムの速度場計測が可能であることを初めて示した。また、電磁場との相互作用による導電性流体の動力学に踏み込む研究を展開し、高速炉研究の新領域を開拓した。

ガス巻き込み評価手法のナトリウムに対する適用性については、作動流体として水とナトリウムを用いた比較試験により、ガス巻き込み現象を保守的に評価できることを明らかにした。これは、ナトリウム冷却高速炉の開発に向けて非常に重要な成果である。また、時間的に発達・消滅を繰り返す渦み渦に対して同形状の水とナトリウム試験を比較した例はなく、数値解析の検証と適用性の検討を行う上での貴重な実験データベースを構築することができた。

【論文・特許等】

- ・ 福田武司, 高田孝, 上出英樹, 木村暢之, 江連俊樹, 内堀昭寛, 林謙二, 「真空紫外域非線形波長変換レーザーを用いた液体ナトリウム流の動力学的研究(1)液体金属流動場の可視化に向けた分光学的研究」, 第45回日本伝熱シンポジウム, 筑波, 2008年5月21-23日。
- ・ 上出英樹, 木村暢之, 江連俊樹, 内堀昭寛, 林謙二, 福田武司, 高田孝, 「真空紫外域非線形波長変換レーザーを用いた液体ナトリウム流の動力学的研究(2)自由液面でのガス巻き込み現象とナトリウムへの適用」, 第45回日本伝熱シンポジウム, 筑波, 2008年5月21-23日。
- ・ N. Kimura, T. Ezure, H. Miyakoshi, H. Kamide and T. Fukuda, 'Experimental Study on Gas Entrainment due to Non-stationary Vortex in a Sodium Cooled Fast Reactor-Comparison of Onset Conditions between Sodium and Water-',

	<p>ICONE17, Brussels, July 12-19, 2009.</p> <ul style="list-style-type: none"> 江連俊樹, 木村暢之, 上出英樹, 宮越博幸, 林謙二, 福田武司, 「自由液面からのガス巻き込み現象に対する流体物性値の影響-(1)水試験による流動場の把握-」, 日本原子力学会春の年会, J46, 東京工業大学, 2009年3月23-25日. 木村暢之, 江連俊樹, 上出英樹, 宮越博幸, 林謙二, 福田武司, 「自由液面からのガス巻き込み現象に対する流体物性値の影響-(2)水とナトリウムのガス巻き込み発生条件の比較-」, 日本原子力学会春の年会, J47, 東京工業大学, 2009年3月23-25日. N. Kimura, T. Ezure, H. Miyakoshi, H. Kamide and T. Fukuda, 'Experimental Study on Gas Entrainment due to Non-stationary Vortex in a Sodium Cooled Fast Reactor-Comparison of Onset Conditions between Sodium and Water-', ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power (to be published).
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> 実施計画の進捗 革新的なブレイクスルー 成果及び発展性 	<p>【実施計画の進捗】</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究開発項目（1）「ナトリウム流動場の可視化計測技術の評価」については、実証可能性については検討されてはいるものの、当初目的に見合ったレベルでの実証には至っておらず、当初計画の期待度からすると物足りない。研究開発項目（2）「ガス巻き込み評価手法のナトリウムに対する検証」については、研究開発計画（1）の手法が生かされていないことを除くと、有益な研究成果が報告されており、部分的には計画通りの成果が得られたと判断する。 <p>【革新的なブレイクスルー】</p> <ul style="list-style-type: none"> 光学的手段によってナトリウムの流速分布、表面での速度分布などの可視化または測定が実用化すれば、極めて画期的な技術として認められるが、今回は原理の実証に留まっており、ナトリウム流動場観測への適用には不十分な性能のため、研究開発項目（2）の研究成果にほとんど反映されていなかった。 <p>【成果及び発展性】</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究開発項目(2)で得られた知見は、ナトリウム流動評価技術に大きな貢献が見込まれる。 測定技術の開発段階で生まれた観測窓材の活用先を探してもらいたい。ナトリウムの漏えい診断や検査の分野で期待される。 実用化に向けては、本可視化技術の課題を分析することが必要であると思われる。
<p>4. その他</p>	<ul style="list-style-type: none"> これまで非常に難しいと考えられていた光学的技術を、ナトリウム流動速度場に適用し、技術検証のみにとどまらず、具体的にガス巻き込み現象評価法の検証までも行うとした計画に無理があったのではないかとと思われる。しかしながら、ナトリウム流動の可視化は極めてチャレンジングであり、こうした研究が継続されることが望まれる。 ナトリウム可視化技術の実証については、ナトリウムを用いたより小回りの効く小規模要素試験の実施に重点を置いたアプローチも考えられたのではないかとと思われる。