

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：35504

研究種目：若手研究(A)

研究期間：平成 21 年度～平成 23 年度

課題番号：21686086

研究課題名（和文）

電磁力のポジティブ応用による高速炉熱流動問題の包括的解決技術の実証

研究課題名（英文）

Comprehensive solution of thermal hydraulic issues in fast reactors by utilizing electromagnetic force with active flow control magnet

研究代表者

結城和久(Yuki, Kazuhisa) 山口東京理科大学工学部機械工学科・准教授

研究者番号：90302182

研究成果の概要（和文）：

本研究は、導電性流体に対して通常はネガティブに作用することの多い電磁力をナトリウム高速炉における高サイクル熱疲労などの様々な熱流動問題の包括的制御技術として積極的に活用する新しい保全技術を実験により実証するものである。そのため、科学研究費補助事業の助成により、液体金属であるガリウムをナトリウムのシミュラントとして活用する液体金属流動ループを国内で初めて建設し、助成期間内に健全なガリウム・オペレーションを達成した。

研究成果の概要（英文）：

This study aims to prove the effect of portable type of active flow control magnet which would comprehensively solve thermal hydraulic issues in a sodium-cooled fast reactor. This technology utilizes electromagnetic force that negatively affects for conducting fluid in general. During the support by Grants-in-Aid for Scientific Research, a flow test loop, which is the firstly introduced loop in Japan, were newly constructed utilizing liquid gallium as the simulant of sodium, and confirmed its safety operation with many handling techniques of the gallium flow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
22 年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
23 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	16,200,000	4,860,000	21,060,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：原子力学

キーワード：高速炉保全技術, 流体力学, 熱工学, 電磁力

1. 研究開始当初の背景

恒久的かつ環境に調和した基幹エネルギーの確保が社会的に強く求められるなか、現在、原子力政策大綱の基本方針に則り、高速炉の実用化戦略が急速に進んでいる。しかしながら、2025 年の実証炉運転開始を目指

した現在の設計では、物量削減による配管系の簡素化に伴い、冷却材である液体ナトリウムの流量が格段に増加しており、これにより、エルボや配管合流部などの配管要素内で、非定常性の強い剥離・再付着現象、複雑流体混合、流体中高速渦、などの形成が予想され、

軽水炉にて経験した高サイクル熱疲労、流動加速型腐食、流力振動、キャビテーションが顕在化することが懸念される。これらの現象は、ナトリウム高速炉のメリットでもある配管の薄肉化を破綻させるとともに、国内での保守的な検査体制を更に複雑化し検査期間の長期化を招くため、高速炉の健全性と経済性に直結する重要かつ緊急に解決すべき R&D 項目である。国内におけるナトリウム高速炉熱流動研究の動向として、熱疲労、流力振動、キャビテーションなどの複雑流動現象に対する研究が大学、研究機関で実施され、詳細な流動構造に対する理解が急速に進んでいるが、積極的な対策と緩和技術に関しては確立されていないのが現状である。

一方、研究代表者は高速炉における熱疲労や流力振動に代表される熱流動問題だけでなく、核融合炉液体ブランケットで使用される液体金属や高温溶融塩に関する研究も長年進めている。特に、電磁力（外部磁場を印加することで発生）のネガティブ作用による圧力損失増大や乱流熱伝達低減に関する緩和方策の基礎研究を進めている。印加磁場により導電性流体中の乱流変動が減衰し層流化に至ることは周知の事実であるが、印加磁場を更に増大させると上記の熱流動問題に多大に影響するより低周波のカルマン渦のような大規模な非定常渦も定在化し、最終的に消滅することを先行して実施した数値計算により明らかにしている。この事実は、低曲率エルボや流体混合部で発生するカルマン・ライク渦によって発生する流力振動や熱疲労の緩和技術としてはポジティブな知見である。すなわち、導電性流体の流れに対して通常はネガティブに作用する電磁力が、高速炉の保全技術の観点では、配管系の諸問題に対して包括的にポジティブに作用し、積極的な制御技術として実用化できる可能性を有している。以上の数値計算によって得られた知見をナトリウム高速炉の熱流動保全技術として展開するためには、先ず実験によりその原理を実証・一般化し、制御された新たな技術として格段に発展させ実用化への指針を得ることが急務の課題である。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、新たに提案する電磁力を用いた複雑流動制御の原理実証と具体的な工学応用に関する見通しを、液体ガリウムを作動流体とする流動実験により評価することである。更に、Large Eddy Simulation（以降、単に LES）による数値計算を援用し、局所的に印加された磁場条件が内部流動構造に与える影響について明らかにする。本研究の目的を以下にまとめる。

(1) 低融点金属であるガリウム（以降、単に

Ga）をナトリウムのシミュラントとする流動ループを製作する。

- (2) 国内初となる Ga 液体金属の取扱い、および流動試験実施に関する工学的知見を得る。
- (3) 正方形管内に発熱角柱を設置して二次元的性の強い大構造渦を発生させ、流れに対して垂直磁場および平行磁場を永久磁石により印加する。これにより本技術の詳細な原理実証を得る。
- (4) LES により、流動構造変化に対する印加磁場の影響について評価する。

以上、全てのデータを総括し、他の熱流動問題への適用性と実用化に向けた課題、更に今後の研究展開の指針を明らかにする。

3. 研究の方法

液体 Ga を作動流体とする流動試験に関する詳細な知見、取り扱い技術が国内外を問わず存在しないため、先ず、実際に液体 Ga を循環可能な試験装置を作製し、これにより取り扱いに関する多くの具体的な知見を得る。特に懸念される点は、液体金属固有の酸化と濡れ性の問題であり、実際のオペレーションのみによって検証が可能である。更に、ガリウムの様々な特性（例えば溶融時の熱膨張や保温手法など）を反映した健全にオペレーションが可能な流動試験装置を建設する必要がある。

次に、建設した試験装置を用いて電磁力（印加磁場）による液体ナトリウム複雑流動の制御の原理を実証し、一般化する必要がある。そのため、熱疲労に多大に影響する低周波（15Hz 程度以下）の大規模非定常渦に関する制御特性を評価し、磁場制御による安定化チャートを作成する。並行して LES により実験体系での詳細な流動構造を評価し、流動制御に適した印加磁場条件について検討する。全てのデータを総括して、他の熱流動問題への本技術の適用性ならびに実用化と製品化に向けた課題と研究指針を明示する。

4. 研究成果

本研究では、科学研究費助成期間内にガリウムの酸化問題の解決に殆どの時間を費やした。この理由として、液体時のガリウムの酸化問題が、研究当初予測された以上のものであることが最大の理由として挙げられる。しかしながら一方で、多くのトライアンドエラー試験から、最終的に国内初となる液体 Ga 流動試験装置の製作と液体 Ga 取扱い技術に関する多くの知見を得ることができた。この知見を踏まえ、液体 Ga 流動試験装置の健全性向上に取り組み、酸化を極力抑制するための知見と、それを反映した流動試験装置を最終年度内に建設することが出来た。以下に

科学研究費助成によって得られた液体 Ga 取り扱いに関する知見と建設された流動試験装置の詳細について報告する。

① ガリウムの物理特性および Na シミュラントとしての妥当性

ガリウムは融点が 29.8 度の低融点金属であり、液体時の比重は 6.09 である。熱流動特性で重要な熱伝導率はステンレスと同程度であり、蒸気圧が低いため非常に取り扱い安い低融点液体金属である。懸念される腐食性に関し、Ga はガラス、塩化ビニル、テフロン、アクリル、セラミックスとは相性が良い。しかしながら、テフロンやセラミックスとの濡れ性が非常に悪く、この理由から伝熱試験部の材料として使用することはできない。一方、金属に関しては、高温下での腐食が特に問題になるようであるが、常温下において銅、ハステロイ、ステンレスに対する腐食性は問題とならない。本研究期間内においても目視レベルでステンレスとの顕著な腐食は確認されていないが、長期的な使用に関するデータがないため、現在も継続してデータを取得中である。なお、液体 Ga はアルミを強く腐食するため、アルミやアルミ合金を試験装置の材料として使うことができない。また、安全性に関して MSDS シートを参照すると、Ga は基本的に無毒であり産業上暴露による有害性の報告は無い、と報告されている。経口摂取された Ga は不溶性化合物となるため体内に吸収されない。また Ga は大気中でも安定である。

次に、液体 Ga のナトリウムに対するシミュラントとしての適応性について報告する。それぞれの動粘性係数に大きな差は無く、従ってポンプによって同じ流速で循環できればほぼ同じ Re 数を達成することができる。一方、Ga のプラント数はナトリウムの 4 倍程度であり十分に議論可能な範疇である。次に、MHD シミュラントとしての適用性に注目する。それぞれの電気伝導率は殆ど同じであるが、Ga の密度が高いため、MHD 流体として重要なパラメータである Ha 数についてはナトリウムの方が高い。しかしながらこの事実は、Ga での MHD 制御の成功がナトリウムでの成功を暗に示唆するものである。例えば磁場を印加する領域長さを 0.03m と仮定し、磁束密度 0.5T の永久磁石を用いる場合、Ha 数は 10 の 3 乗オーダーと非常に高く、高 Ha 数条件を達成することができる。一方、流れと磁場の相互作用を考える上で非常に重要なインタラクションパラメータに注目する。カルマン渦の制御予測によれば、Re 数が 10^3 以下の領域ではカルマン渦の定在化を示す臨界 N は Re 数の上昇とともに増加する。しかしながら、その値は 1 以下である。更に高い Re 数条件では臨界 N も増加すると考えられるが、Re 数が

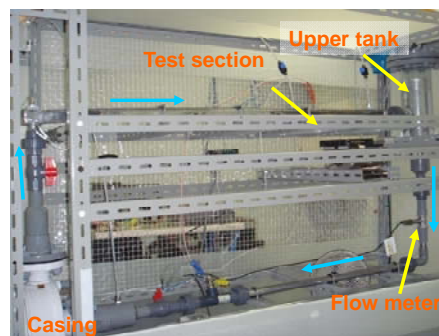
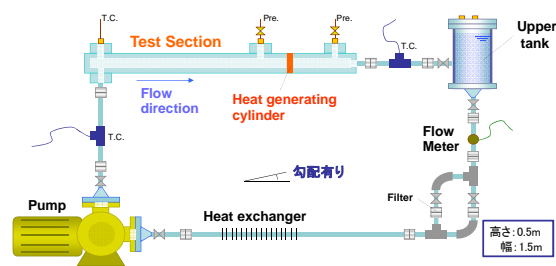


図 1 実験装置および概観写真

10^4 オーダまでであればインタラクションパラメータも十分に高く、渦制御は可能であると考えられる。

以上総括すると、ガリウムは大学の実験室レベルでの試験に適しており、材料の選定によって健全な流動試験が実施できる。

② 液体 Ga 流動試験装置の建設

(1) 実験装置の詳細

図 1 は液体 Ga 流動試験装置の概要と外観写真を表している。装置は、循環ポンプ、試験部、アッパータンク、流量計測部、熱交換部、ドレインタンク、によって構成されている。腐食を防止するため、また目視によって液体 Ga 流れの状態を監視するため（特に壁面における濡れ性の確認）、管材の大部分は透明塩ビパイプおよび塩ビ継ぎ手類で製作されている。主配管の内径は 21mm である。ループは大きさが約 L1.5m×H0.5m の鉛直ループであり、ガリウムの内容積は約 4 リットルである。

使用する循環ポンプは水銀の循環で経験のあるキャンドポンプであり、ケーシングやインペラーを含め、全てステンレス材 (SUS316L) で製作されている。ポンプの全揚程は 10m、最大流量は 150L/min である。キャンドポンプのケーシング部は 2 重構造になっており、外側容器にチラーで温度制御された冷却水を循環させることで液体 Ga の温度が一定になるよう調整される。アッパータンクは主として液の充填確認、脱気、Ar ガスパージの役割を担っている。流量は羽根車式の流量計により計測されるが、低流量時の精度を確保するため、図 2 に示すような電磁流量

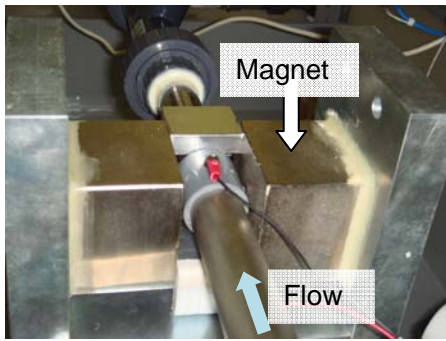


図 2 電磁流量計

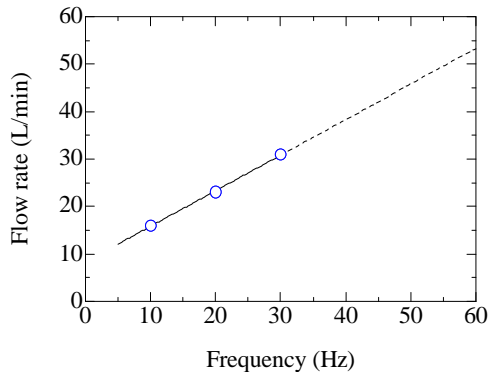


図 3 流量計測の結果

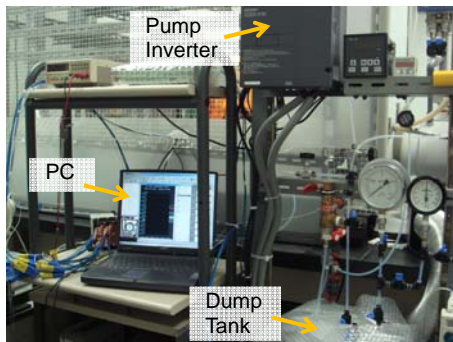


図 4 監視およびデータ計測系

計を磁気回路を独自に設計して製作した。図 3 は流量の計測結果である。試験部の取り付け区間長さは 1500mm であり、十分な助走距離を介して発達した流れが磁場制御部に流入する。以上、説明された装置の配管、キャンドポンプ、アッパータンク、試験部、等の全てコンポーネントには熱電対が取り付けられており、図 4 に示されるデータ計測部にて一括して計測、監視される。なお、磁場印加部における温度変動データは、高精度温度変動計測装置によって別途計測される。計測速度は最大 3000Hz である。

(2) 運転手順

運転前に、全ての配管・装置コンポーネントの温度を 35℃以上に保持する。保温方法に

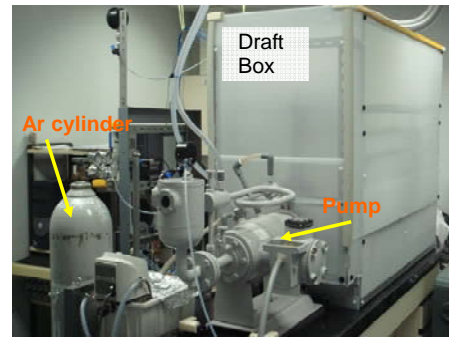


図 5 保温用システム

関しては、次節について詳説する。次いで、数回にわたってループ系統内へ Ar ガスをパージする。その後、再度、各配管要素とポンプ・ケーシングの温度が 35℃以上であることを確認する。ドレインタンクに巻かれているバンドヒータによって貯蔵されている固体のガリウムを溶融させ、ドレインタンク内を加圧し、液体ガリウムをループ内に充填する。充填確認は、アッパータンクの液位ならびにタンクに設置された熱電対の温度変化から確認され、その後、ポンプ・インバータの周波数を調整して徐々に流量を増加し、内部に残ったガスを除去する。その後、所定の流量で液体ガリウムは循環される。

(3) 液体 Ga 取り扱い技術と流動試験装置の健全性向上

(a) 配管系統および装置コンポーネントの保温

研究開始当初、流動試験装置の配管系統やアッパータンク等の関連コンポーネントはロープヒータで加熱・保温されていたが、各配管部位の熱容量差により温度の均一化が困難であった。そこで装置を、ポンプを除いて図 5 に示すような断熱パネルで製作された簡易ドラフトによって囲い、その内部にドラフト内全体の雰囲気温度を上昇させるためのセラミックヒータと室内温度を均一にするため混合ファンを設置した。これによりドラフト内の各コンポーネントの温度を 35~50℃の範囲で±1℃以内で一定に維持することが可能となった。更に、この改良により、緊急時の配管へのアクセスや補修が極めて簡便化された。

(b) 緊急時のドレイン対策

先述の様に、液体 Ga は通常ドレインタンク内に保持されており、実験時にドレインタンク内を加圧することで液体 Ga を装置内に充填する。一方、地震やリーク時等の緊急時に全てのガリウムをドレインタンク内に直ちに回収できるよう、ループの

水平配管は若干傾斜しており、ドレインタンクもループよりも低い位置に設置されている。これにより、ドレインタンクの圧力をベントすることにより、配管系統内の全てのガリウムを重力効果のみにより回収することができる。なお、液体 Ga 回収時の系統内 Ar 雰囲気を維持するため、アッパータンクに Ar は常にパージされている。

(c) 濡れ性の改善技術

液体 Ga の壁面との濡れ性促進は本技術の原理を実証する上で不可欠である。固体壁面上の汚れが固液の濡れ性を阻害するため、先ずエタノール（もしくはアセトン、塩酸エタノール）をループ内に充填・循環して内部を十分に洗浄する。この作業は、特に液体 Ga と塩ビ配管の濡れ性を促進させるために重要である。なお、ステンレス配管を使用する場合は濡れ性が格段に向上することを確認している。液体 Ga を充填後、時間をかけて装置内で循環させる。これにより液体 Ga と壁面の濡れ性が促進される。更に本装置では、加圧による濡れ性促進効果を得るため、アッパータンクの Ga 液位を高くし、また状況に応じて加圧できるようにになっている。

(d) 熔融時の体積膨張による破損防止

本装置の配管系統内でガリウムが固化した場合、再熔融時の膨張により配管が破損する可能性がある。これを防ぐため、前述の様に全ての液体はドレインタンクに回収する必要がある。一方、ドレインタンクからの充填配管およびドレイン配管内に液体金属が残る場合、同様に、再熔融時に当該配管が破損する可能性があるため、充填およびドレイン用の配管はドレインタンクのフランジを介してタンク内へ導入される。

(e) 酸化対策

実験開始当初、液体 Ga の循環中にアッパータンクのガリウム自由表面に酸化物が急激に生成、堆積することを確認した（図 6 参照）。理想的には Ar ガス純化装置を導入すべきであるが、本研究では先ず、自由液面の流動による酸素の巻き込みを極力抑えるため、アッパータンクの改良を実施した。具体的には、アッパータンクに流入した流れがタンク内で大きな渦を形成して酸化を促進している可能性があるため、循環渦を抑制するためのバッフルプレートおよびアッパータンクへの配管流入部にエルボを設置して液面の揺動・流動を抑制した。これにより酸化を比較的抑制することができたが、本研究で要求される長

時間の運転において、Ga 酸化物が自由液面に堆積し、かつ一部は固形物として流動に追従することを確認した。これらの Ga 酸化物は凝集して流量計に影響することはもちろんのこと、管内流動ならびに磁場による流動制御にも多大に影響すると考えられる。そこで第 2 の対策として、Ar ガス雰囲気での実験が実施できるよう、アッパータンクに高純度 Ar ガスを常時パージするガス配管系を整備した。ならびに酸化して浮遊した酸化物を除去するためのフィルターを設置した。これらの改修後、循環運転を実施したが、長時間の循環運転で Ga 酸化物が浮遊しており、精度の高いデータの取得が困難な状況にあることを確認した。理由としてダンプタンクに保持された液体 Ga 自体が既に酸素を吸い込んでいる可能性が挙げられる。そこで第 3 の酸化防止対策として、ダンプタンクでの液体 Ga の酸素の吸い込みを極力抑えるため、循環前にダンプタンク内を真空ポンプにより真空引きした後、Ar ガスを十分に吸い込ませる作業を行った。これにより Ga 酸化物の生成を大幅に低減することができた。並行して酸化の原因について調査し、塩ビなどの樹脂系の配管部材を利用した際、酸素が配管を透過して液体金属と反応し、酸化に結びつく可能性がある事を見つけるに至った。現在、上記の様々な酸化対策によって、ようやく塩ビ配管で流動試験を実施できる状態に至り、本試験を始める準備をしている。また併せて試験部以外の全ての配管・コンポーネントをステンレス材で製作している最中であり、引き続き実験データの取得に努め、当初の予定成果について本年度中に纏める予定である。



図 6 酸化物の生成

④ まとめ

本研究では、ナトリウムを代表とする液体金属冷却高速炉の健全性を向上させるため、電磁力を応用した新しい熱流動制御技術 AFCOM を提案し、液体 Ga をナトリウムの MHD シミュラントとする流動試験装置を建設した。酸化対策ならびに様々な装置改修に多大

な時間を費やしたため、磁場効果による温度変動減衰に関する知見を得るまでに至らなかったが、一方で国内初となる液体 Ga 流動試験装置ならびに液体 Ga 取り扱いに関する多くの工学的知見を得ることが出来た。なお、科学研究費助成期間内に健全に稼働可能な液体 Ga 流動試験装置を建設できたため、本年度中に電磁力を用いた温度変動減衰に関する実験を実施し、温度変動抑制データを取得する予定である。なお、LES を用いた数値計算についても、現在、ベンチマーク試験を実施している状況であり、終了後、磁場による渦抑制効果のメカニズムについて評価する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

- ・ 結城和久, 山野秀将, 電磁力を用いた高速炉熱流動問題の包括的解決; ポータブル型流動制御マグネットによる熱疲労の緩和 (1), 日本原子力学会春の大会, 2010 年 3 月, 茨城.
- ・ Kazuhisa Yuki, Comprehensive solution of thermal hydraulic issues in a sodium-cooled fast reactor by using electromagnetic force: Suppression of thermal fatigue by a portable flow control magnet, 18th International Conference on Nuclear Engineering, 2010, April, China.
- ・ 結城和久, ポータブル型フローコントロールマグネットによるナトリウム高速炉の熱流動制御, 日本原子力学会中国四国支部第 5 回研究発表会, 2011 年 9 月, 広島.
- ・ Kazuhisa Yuki, Suppression And Control Of Thermal Fatigue By An Active Flow Control Magnet (AFCOM); Construction Of MHD Simulant Flow Loop Using Liquid-Gallium, Proceedings of the 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics, NURETH-14, 2011, Sept., Canada.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :

種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計◇件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<http://www.yama.tus.ac.jp/departments/teacher/t-yuuki.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

結城和久 (山口東京理科大学工学部機械工学科・准教授)

研究者番号 : 90302182

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :