

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22246129

研究課題名(和文)液体金属流動場の可視化計測と動力学的制御に関する高度化研究

研究課題名(英文)Extended research related to the direct observation and control of liquid metal flow dynamics

研究代表者

福田 武司(Fukuda, Takeshi)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50354585

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,600,000円、(間接経費) 5,880,000円

研究成果の概要(和文)：液体ナトリウムの分光透過率に関する予備的な知見に基づき、液体ナトリウム中に真空紫外光を効率的に分散する追跡元素を添加して、誘導放射光の2次元輝度分布画像を観測することにより、液体ナトリウム内部における2次元の流れ場を高分解能で可視化する技術の開発を実施した。従来の誘導ラマン光源よりも極めて大きな放射スペクトル輝度が得られるアルゴンのエキシマ分子を電子ビームで励起する方式の光源を採用するとともに、トロイダル形状を持つ回折格子型2次元イメージング分光計測装置で追跡元素であるグラファイト粒子のスペクトル計測を行った。その結果、液体ナトリウムの高精度速度場計測実現に係わる展望を得ることが出来た。

研究成果の概要(英文)：As a bona fide extension of the exploratory work, where direct observation and active control of sodium flow dynamics have first been proposed using coherent VUV radiation, we have further extended its engineering capability to demonstrate that the proven proposition of 'transparent sodium' is practically applicable to reactor-relevant conditions, and spatial resolution of the velocity field measurement could also be improved sufficiently for comparison with large-scale simulation results. The ab-initio calculations have also been carried out. As a replacement of the emission from the induced Raman scatter ring, an electron-beam excited Ar excimer source has been employed, which has substantially increased the signal intensity. In addition, an imaging spectrometer has been introduced to identify the optical components from the trace graphite particles. Consequently, it was shown that the 2D liquid sodium flow velocity field could be resolved within the resolution of a few μm .

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：高速増殖炉 熱流動工学 液体ナトリウム 粒子画像速度計 可視化計測 真空紫外光 ローレンツカ
流れ場の制御

1. 研究開始当初の背景

(1)原子力発電は電力供給の中核を担うに至っており、格段に高い安全性が要求されている。また、将来のエネルギー戦略上、高速増殖炉の開発は必須の要件であり、もんじゅの運転再開に際して、万全を期した機能試験が精力的に進められている。しかるに、1995年のナトリウム漏洩事故や2004年の美浜発電所における配管破損事故は、ともに原子炉の安全工学基盤が盤石でなく、流れの動力学に係わる基礎研究のさらなる充実が必要とされる証左である。また、高速増殖炉の小型高出力化や構成機器の機能統合に関する検討が近年重点的に進められているが、構造の複雑化と冷却材流速の増大に伴う流れ場の複雑化が同時に危惧されている。

(2)高速増殖炉の冷却材として有力なナトリウムの基礎光学物性は、1930-60年代に詳しく調べられたが、反射率が顕著に低減するプラズマ端波長以下の真空紫外領域では報告例がないが、消衰係数が低く抑制される結果、液体ナトリウムが半透明になると予想される。また、PIV法を組み合わせることにより、気液界面現象の透視画像観測のみならず、過去に例を見ない液体ナトリウム内部の速度場計測までもが実現可能になると考えられる。さらに、直交する電磁場の印加による流れ場(ハルトマン流)の応答特性に関する研究は、国内外の当該分野における今後の展開に大きく寄与するものと考えられる。

2. 研究の目的

従来より、導電性の高効率熱伝達媒質である液体金属は、重要な機能材料として注目されている。本研究では、人間の目には美しい鏡面に見える液体ナトリウムが真空紫外の目には半透明であることを利用し、真空紫外光を効率的に散乱する追跡元素を添加して、輝度分布の2次元画像を高速カメラで観測することにより、液体ナトリウム内部における流れ場の高精度可視化を実現する。また、機械的な外部摂動に対する応答特性や渦の構造形成に係わる動力学的な挙動を詳細に解析して、流体エネルギーの散逸過程を明らかにするとともに、大規模渦模擬計算の結果との比較検討を行うことによって、従来の理論モデルを検証する。さらに、導電性の作動流体であることを鑑みて、電磁場(ローレンツ力)による流れの構造制御に踏み込んだ基礎研究を展開し、原子力を含む幅広い分野における技術開発に資する学術基盤の構築を目的とする。

3. 研究の方法

本研究で用いた液体ナトリウム試験装置の外観を図1に示す。流路の長さは15mに及び、水平流動試験部と鉛直流動試験部に各々真空紫外用観測窓が設置されている。図1右上に配置されているのが、20L/sの駆動能力を持つ電磁ポンプと追跡元素分散装置である。高圧水素ラマン・セルから射出された真空紫外光は、分光器による波長同定の後、ナトリウム内部を透過し、その2次元像が画像変換撮像素子(高速カメラ)で観測される。水平部に関しては、図1左側に見える電磁コイルと電圧印加用電極が流路を取り囲んでいる。また、光源となるF₂レーザーとNd:YAGレーザーは各々図1左側上部に配置されており、液体ナトリウムの充填は、中央部下側のガス制御部で高純度アルゴンガスを用いた差圧を設定することによって行う。液体ナトリウムの充填は125°C、実験は200-250°Cで実施した。平成24年度にはイメージング分光器を用いた追跡元素のスペクトル計測を重点的に進めた。また、誘導散乱光の強度が不足していたことから、平成25年度以降は後述の電子ビーム励起アルゴンエキシマ光源に変更した。



図1. 液体ナトリウム流動試験装置の外観

4. 研究成果

(1)分光透過率の検証試験

波長157nmの真空紫外光に対する液体ナトリウムの消衰係数は $(4.1 \pm 1.5) \times 10^{-8}$ であり、試験用いたF₂レーザーの出力30mJと検出器の感度(量子効率12%)から予測される最大実証規模は(0.18-0.20)mである。この結果を検証するため、密度汎関数法を用いた第一原理計算に基づく複素誘電率 $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ の計算を行った。屈折率 n と消衰係数 κ は各々

$$n^2 = \epsilon \{ [1 + (\epsilon''/\epsilon')^2]^{1/2} + 1 \} / 2, \quad [1]$$

$$\kappa^2 = \epsilon \{ [1 + (\epsilon''/\epsilon')^2]^{1/2} - 1 \} / 2, \quad [2]$$

と表され、減衰率 $\alpha [\text{cm}^{-1}]$ は光源波長を λ として $\alpha = 4\pi\kappa/\lambda$ から求められる。また、誘電率 ϵ は

$$\langle P_x \rangle = \langle Nqx(t) \rangle = Nq \int \Psi^* x \Psi dx, \quad [3]$$

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = \phi_0(\mathbf{r}) \exp(-i\omega_0 t) + \sum c_j(t) \phi_j(\mathbf{r}) \exp(-i\omega_j t), \quad [4]$$

$$P_x = \chi_{xx}(\omega) \epsilon_0 \quad [5]$$

から評価した。ここで、 N と q は双極子密度と電荷量、 χ_{xx} は電気感受率テンソルである。しかしながら、計算結果は定量的に測定値を説明するに至らなかった。これを鑑みて原子力機構（関西光科学研究所）と同（敦賀レーザー共同研究所）でレーザープラズマ光源と標準光源を用いた確認試験を実施した。その結果、双方の実験において F_2 レーザーのラマン散乱光源を用いた場合に概ね一致する結果（図 2）を得ることができた。この結果をもとにナトリウム中の機器監視装置を考案し、プレス発表を実施するとともに、特許を申請した（特許第 5521152 号）。ウェブジャーナルに発表した記事は月間のアクセスランキング 1 位となった。

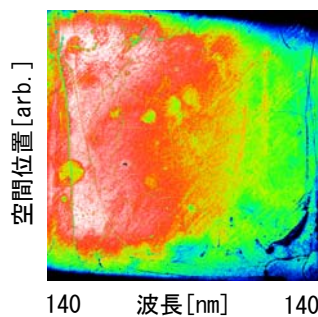


図 2. 銅板を Nd:YAG レーザーで照射したレーザープラズマ光源とイメージング分光器を用いた 3mm 厚のナトリウム分光透過率の測定結果（図の左側で透過率は >90%）

(2) 速度場計測用追跡元素の選定

本研究では、ナトリウム中に真空紫外光を効率的に散乱する追跡元素を添加して、透過光の 2 次元輝度分布画像を高速 CCD カメラで観測することにより、液体ナトリウム内部における流れ場を PIV 法による高精度で可視化することを目的としている。当初（平成 22 年度）は、ナトリウムの透過率が高くなる短波長側が有利だと考え、 F_2 レーザーの高次反ストークス成分を用いた速度場計測を検討していた。しかしながら、ラマン散乱の効率が極めて低いことから F_2 レーザーの発振波長である 157nm に切り替え、原子分子データを基に中性原子の励起エネルギー準位に近い Si を追跡元素とした誘導散乱光の捕捉を目的とした実験を実施していた。また、この過程でラマン・セルの攪拌による波長変換効率工場を試みたが、約 3 割の改善に留まった。さらにスペクトル強度の高い真空光源の採用を前提に、前項と同様の Nd:YAG レーザープラズマ光源を用いた候補追跡元素の誘導

放射スペクトルをトロイダル形状を持つ回折格子型 2 次元イメージング分光装置で計測した。その結果、図 3 に示すように Si に比べグラファイト粒子を用いた方が約 1 桁高い散乱光強度が得られることが分かったので、平成 24 年度以降の実験では追跡元素を Si から C に変更した。広いスペクトル幅を持つ銅に関する高い分光強度が期待できるが、酸化還元電位が極めて (+) 側に高く、 MgF_2 と CaF_2 を比較した平成 19 年度の実験結果（高温ナトリウム浸漬試験）を踏まえナトリウム耐性が危惧されるので採用を見送った。

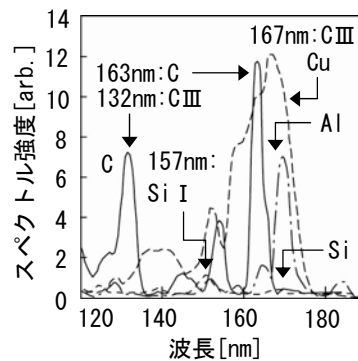


図 3. レーザープラズマ光源を用いた候補追跡元素の誘導放射スペクトル特性

(3) 電子ビーム励起アルゴンエキシマ光源を用いた試験結果

速度場の計測精度向上に関しては、アルゴンのエキシマ分子を電子ビームで励起する方式の光源をエクサイテック社（ドイツ）から調達し、不純物含有量の少ない（分光透過率の高い）試料を用いた実験を行った。真空伝搬による計測では、ライマンアルファ線に近い波長 126nm で 3J を越える従来放射スペクトル輝度を確認した。これは、フッ素分子エキシマ・レーザーを用いた誘導ラマン光源に比べて数千倍以上になる。追跡元素からの散乱光を用いた速度場計測を前に液体ナトリウム中に浸漬した SUS 材の画像計測を行った。その結果を図 4 に示す。固体の観測に関しては数 mm 以下の分解能が得られており、速度場の評価に関しても原理的には撮像素子の性能が決定要素となる。時間分解能は、CCD 本来の読出時間で規定されており <10ms 程度である。フーリエ解析に必要とされる高い時間分解能を実現（1-2mm の空間分解能を維持したまま数ミリ秒以下で 2 次元画像を観測）するには至らなかったが、10mm 厚のナトリウムを対象とした追跡元素の誘導放射光画像の取得に成功した。およそその空間分解能は数 mm 程度であるが、2013 年度後半に整備した光源を用いた実験は未だ初期的な段階にあり、追跡元素の分散濃度調整など実

施することにより、速度場のさらなる評価精度向上が期待される。一方、LESの結果との比較検討も同時に進めており、解析作業が進行中である。

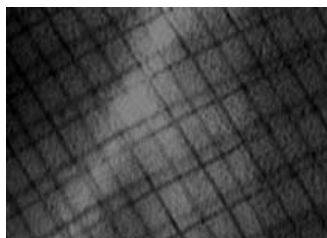


図 4. 液体ナトリウム中に浸漬した動く SUS304 メッシュの画像

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① H. Daido, Y. Suzuki, T. Kawachi, T. Fukuda, T. Nakagiri, M. Kaku, and S. Kubodera, Demonstration of clear transmission images through thick metallic sodium in the vacuum ultraviolet spectral range, *Opt. Express*, 21巻, 2013, 28182-28188, DOI : 10.1364/OE.21.028182
- ② T. Fukuda, K. Asai, T. Kyuno, T. Takata, H. Horiike, N. Kimura, H. Kamide, T. Kawachi, H. Daido, Direct observation and control of eddy formation dynamics and behavior of vortices in the interior of liquid sodium flow under ExB field, *proc. ICON19*, May 16-19, 2011, Chiba
- ③ N. Kimura, T. Ezure, H. Miyakoshi, H. Kamide, 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-, *J. Eng. Gas Turbines and Power*, 132 巻, 2010 年, 102908
- ④ T. Fukuda, T. Takata, H. Horiike, H. Kamide and N. Kimura, Direct observation and control of liquid sodium flow dynamics using VUV-LIF-PIV technique under EXB Lorentz force, *ICON18-29671*, May 20, 2010, Xi'an
- ⑤ T. Takata, T. Fukuda, A. Yamaguchi, A. Uchibori, N. Kimura and H. Kamide, Numerical study on passive control of thermal striping phenomenon using Lorentz force in fast reactor, *ICON18-30188*, May 20, 2010, Xi'an

[学会発表] (計 6 件)

- ① H. Daido, Y. Suzuki, T. Kawachi, T.

Fukuda, T. Nakagiri, M. Kaku, and S. Kubodera, Transmission imaging of sodium in the vacuum ultra-violet spectral range: new application for an intense VUV source, *Proc. SPIE optics and photonics*, 25-29 August 2013, San Diego

- ② H. Daido, Y. Suzuki, T. Kawachi, T. Fukuda, T. Nakagiri, M. Kaku, S. Kubodera, Transmission property of sodium in the vacuum ultra-violet range and its applications, *Proc. OPIC 2013*, 23-26 April 2013, Yokohama
- ③ 大道 博行、鈴木 庸司、河内 哲哉、福田 武司、中桐 俊男、加来 昌典、窪寺 昌一、紫外線のナトリウム透過イメージング、原子力学会2013年秋の大会、2013年9月3-5日、八戸
- ④ 大道 博行、鈴木 庸司、河内 哲哉、福田 武司、中桐 俊男、加来 昌典、窪寺 昌一、紫外線のナトリウム透過特性の測定と可視化装置への展望、原子力学会年会、2013年3月26-28日、大阪
- ⑤ 大道 博行、鈴木 庸司、河内 哲哉、福田 武司、中桐 俊男、加来 昌典、窪寺 昌一、真空紫外線のナトリウム透過特性の測定、平成24年度レーザー励起X線源とその応用研究会、2012年12月6-7日、宮崎
- ⑥ 福田 武司、久野 貴大、浅井 克彦、高田 孝、堀池 寛、木村 暢之、上出 英之、河内 哲哉、大道 博行、ナトリウム流動・気液界面観測技術の研究、宮崎大学光科学研究会、2011年6月20日、宮崎

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：原子力研究開発機構

発明者：福田 武司、大道 博行、村松 壽晴、田川 明広、中桐 俊男、河内 哲哉

権利者：同上

種類：特許

番号：特許願 2011-045494 号

出願年月日：平成 23 年 3 月 2 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 1 件)

名称：原子力研究開発機構

発明者：福田 武司、大道 博行、村松 壽晴、田川 明広、中桐 俊男、河内 哲哉

権利者：同上

種類：特許

番号：特許第 5521152 号
取得年月日：平成 26 年 4 月 18 日
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seeeb/seeeb/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 武司 (FUKUDA, Takeshi)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：5 0 3 5 4 5 8 5

(2) 研究分担者

堀池 寛 (HORIIKE, Hiroshi)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：2 0 2 5 2 6 1 1

高田 孝 (TAKATA, Takashi)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：4 0 4 2 3 2 0 6

鈴木 幸子 (Suzuki, Sachiko)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：2 0 4 0 3 1 5 7

(3) 連携研究者

上出 英樹 (KAMIDE, Hideki)
原子力研究開発機構・グループリーダー
研究者番号：4 0 4 2 1 5 7 3

木村 暢之 (KIMURA, Nobuyuki)
日本原子力研究開発機構・研究員
研究者番号：6 0 4 2 1 5 7 5
(平成 24 年度末まで)