

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 22 日現在

機関番号：63902

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630475

研究課題名(和文) JxB駆動循環型液体金属ダイバーター概念の原理検証実験

研究課題名(英文) Proof-of-principle experiments on the JxB-forced convection liquid metal divertor concept

研究代表者

廣岡 慶彦 (Hirooka, Yoshihiko)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：60311213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：磁気閉じ込め実証炉では、ITERより更にプラズマ加熱パワーが増大することが予測され、最近のSOL幅スケールリングによると、益々ダイバーターに於ける熱集中が起こる傾向になることが予測され、タングステンを熱シンク材に融着させた固体ダイバーターでは、到底除熱できないと推測される。このような問題点を解決する方策として過去10年に渡って本研究代表者は、液体金属をダイバーターに用いる事を提案してきた。最近の結果から、液体を強制流動させる事が熱除去だけでなく粒子制御にも有効であることが分かって来た。本研究課題では、液体金属強制流動の手段として電磁力JxBを用いる事を提案し、その原理検証実験を行った。

研究成果の概要(英文)： Power and particle handling by plasma-facing components (PFCs) such as divertor will be one of the most critical issues, affecting the successful operation of a fusion power reactor. Heat fluxes onto the divertor predicted by the most recent scaling law will be far more than those that can be handled by the current design based on a tungsten target brazed on a copper alloy heat sink. As a possible solution, the use of liquid metals has been proposed over the past decade or so, and most recently liquid convection has been found effective not only heat removal but particle removal. In the present work, electromagnetic forced convection is proposed and its proof-of-principle experiments have been conducted successfully.

研究分野：核融合工学

キーワード：プラズマ-壁相互作用 プラズマ対向機器 水素リサイクリング 液体金属 電磁力

### 1. 研究開始当初の背景

磁気閉じ込め実証炉では、現行 ITER より更にプラズマ電流・加熱パワーが増大すると考えられる。ところが、最近の SOL 幅スケールリングによると、益々、ダイバーターに於ける熱集中が起こる傾向になることが予測されるので、タングステン熱シンク材に融着させた現行設計の固体ダイバーターでは、到底除熱できないと推測される。

このような問題点を解決する方策として過去 10 年に渡って本研究代表者は、液体金属をダイバーター表面材料として用いる事を提案してきた。最近の結果から、液体を強制流動させる事が熱除去だけでなく粒子制御にも有効であることが分かって来た。

### 2. 研究の目的

本研究代表者は、自身の最近の研究結果 (Yoshi Hirooka et al. Fusion Eng. Des. 89(2014)2833-2837) から液体金属に機械的に強制対流を与えることで定常プラズマ照射下での粒子リサイクリングを低減できることを実験的に見出した。

本研究課題では、環状閉じ込め装置のトロイダル磁場を用いる事を念頭に置いて、液体金属強制流動の手段として電磁力  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  を用いる事を提案し、その原理検証実験を行う事を主たる目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、核融合科学研究所に於いて既に稼働中の直線型定常プラズマ - 壁相互作用実験装置: VEHICLE-1 (図-1 参照) を用いてプラズマ照射を行った。この装置では、プラズマ密度:  $10^{10} \text{cm}^{-3}$ 、電子温度:  $3 \sim 5 \text{eV}$ 、プラズマ照射イオン束:  $10^{16} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  のオーダーである。イオンの液体金属ターゲットへの衝撃エネルギーは、直流バイアスを掛ける事で調整した。

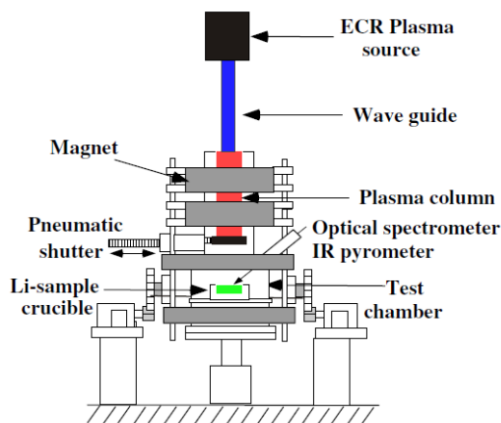


図-1 直線型定常プラズマ-壁相互作用実験装置: VEHICLE-1 (Y. Hirooka et al. J. Nucl. Mater. 337-339(2005)585-589)。

### 4. 研究成果

前記の様にプラズマ照射下での液体金属 (リチウム) からの粒子リサイクリングは、「掻き混ぜ棒」で機械的に強制攪拌すると低減される事を実験的に発見した。

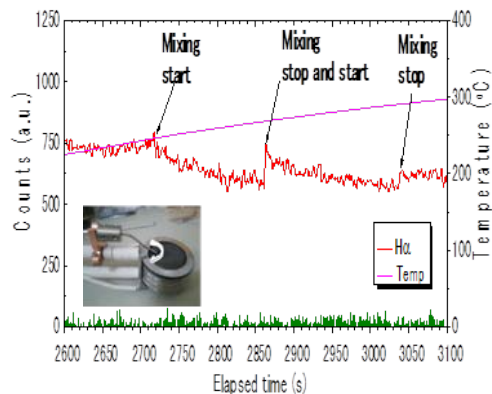


図-2 機械的強制攪拌による液体リチウムからの水素リサイクリング低減 (Y. Hirooka et al., Fusion Eng. Des. 89(2014)2833)。

ただし、このような機械的攪拌方法は、実際の核融合炉では不可能であるので、トロイダル方向の閉じ込め磁場を利用し、液体金属内に電極を設置する事で以下のような  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  電磁力を誘起し攪拌する新概念を提案した (Michiya Shimada and Yoshi Hirooka, Nucl. Fusion 54(2014)122002(7pp))。本研究課題は、この概念の原理検証実験を行う事である。なお、Shimada (嶋田) は、本研究課題の研究分担者である。

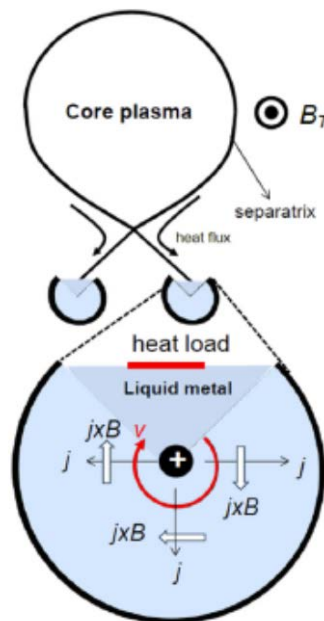


図-3 電磁力攪拌液体金属ダイバーター概念。ここで、 $\mathbf{B}$  は、環状閉じ込め用の磁場である (通常、数テスラ)。

この概念の原理検証実験セットアップを以下に示した (Yoshi Hirooka et al. Fusion Eng. Des. 117(2017)140-144.)。これには、上下に 800 ガウスの永久磁石がはめ込まれ、中心軸と液体金属カップとの間の半径方向に電流が流れ  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  力を誘起し液体金属を流動させる。なお、この研究課題の実験では、取扱い安全性を考慮し、主として GaInSn 共晶合金 (常温で液体) を用いた。



図-4 電磁力攪拌液体金属ダイバーター概念の原理検証実験セットアップ。

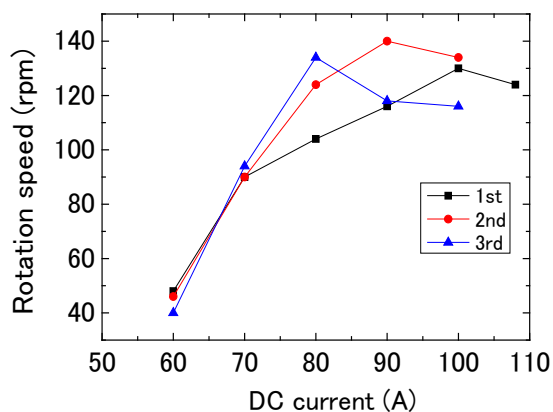


図-5 前記実験セットアップの電流と液体金属 GaInSn の流動回転速度の関係。

この実験セットアップを前述のプラズマ装置 VEHICLE-1 内に設置しプラズマ照射を実行し、水素リサイクリング挙動を観測した結果を以下に示す。ただし、ここでは、 $\text{H-}\alpha$  線強度を液体から再放出される重水素分子量の目安とした。この実験中、液体金属成分: Ga, In, Sn の励起輻射強度も同時にモニターされた。なお、この時の電磁力誘起の磁場は、プラズマ装置の磁場約 400 ガウス、電流は、65A とした。イオン衝撃エネルギーは、直流バイアスにより 50eV とした。

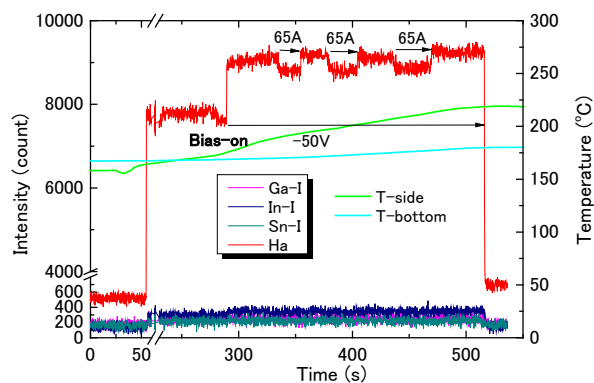


図-6 電磁力攪拌により低減された水素リサイクリング (65A と書かれた部分が凹んでいる)。Yoshi Hirooka et al. Nucl. Mater. Energy (2017) in press)。

GaInSn 金属それぞれの成分は、水素化物を形成する事が知られているが、共晶合金が複合化合物を形成するかは、不明であるが、再現性よく水素リサイクリングが低減されたことは、画期的発見であると言える。実際、プラズマ照射実験後の熱脱離測定から重水素の吸蔵量が  $10^{15} \text{cm}^{-1}$  であることが分かった。

なお、同様な結果が不活性ガスプラズマ照射下の粒子リサイクリングについても発見された (本課題終了以降の実験)。従って、このリサイクリング率低減は、液体金属の「渦巻込効果」とも考えられる。現在、その詳細を検討中である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① “Steady state hydrogen, deuterium, helium and argon plasma interactions with a liquid metal: Ga67In20.5 Sn12.5 convected by Lorentz force”  
Yoshi Hirooka et al.  
Nucl. Mater. Energy (2017) in press.
- ② “A study on hydrogen isotopes transport in a liquid metal GaInSn by the plasma-driven permeation method”  
Hailin Bi, Yoshi Hirooka, Juro Yagi, Yue Xu  
Nucl. Mater. Energy (2017) in press.
- ③ “Deuterium transport in a liquid metal GaInSn with natural convection under steady state plasma bombardment”  
Hailin Bi and Yoshi Hirooka  
Fusion Eng. Des. (2017) in press.

- ④ “Hydrogen and helium recycling from a JxB-force convected liquid metal Ga67In20.5In12.5 under steady state plasma bombardment”  
Yoshi Hirooka et al.  
Fusion Eng. Des. **117**(2017)140-144.
- ⑤ “Conference report on the 4<sup>th</sup> international symposium on lithium applications”  
F. L. Tabares, Y. Hirooka et al.  
Nucl. Fusion **56**(2016)127002(8pp).
- ⑥ “A study on hydrogen transport in liquid metals under steady state plasma bombardment”  
Hailin BI, Yoshi HIROOKA et al.  
Plasma Fusion Res. **11**(2016)2405026.
- ⑦ “Conference report on the 3rd international symposium on lithium application for fusion devices”  
G. Mazzitelli, Y. Hirooka et al.  
Nucl. Fusion **56**(2015)027001(9pp).
- ⑧ “A review of the present status and future prospects of the application of liquid metals for plasma-facing components in magnetic fusion devices”  
Y. Hirooka et al.  
Fusion Sci. Technol. **68**(2015)477-483.

〔学会発表〕（計 5 件）

- ① 平成 28 年度プラズマ核融合学会年会  
11 月 28 日～12 月 2 日 東北大学(宮城県仙台市)  
「電磁力流動液体金属による周辺プラズマ粒子制御の実験的研究」  
廣岡慶彦 他。
- ② 平成 27 年度プラズマ核融合学会年会  
11 月 24～27 日 名古屋大学(愛知県名古屋市)  
「プラズマ対向表面としての JxB 力による強制対流金属による周辺粒子制御」  
廣岡慶彦 他。
- ③ 第 4 回「液体金属の核融合への応用」国際シンポジウム グラナダ (スペイン)  
平成 27 年 9 月 28-30 日  
“Laboratory experiments on the JxB-force convected liquid metal plasma-facing component concept”  
Yoshi Hirooka and Hailin Bi
- ④ 平成 26 年度プラズマ核融合学会年会  
11 月 18-21 日 朱鷺メッセ新潟 (新潟

県新潟市)  
「液体金属の核融合装置プラズマ対向壁への応用に関するレビュー」  
廣岡慶彦 他。

- ⑤ 平成 26 年 11 月 9 日～14 日  
米国原子力学会 TOFE-会議  
アナハイム (アメリカ)  
“The present status and future prospects of the application of liquid metals for plasma-facing components in magnetic fusion Devices”  
Yoshi Hirooka et al.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等なし。

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
廣岡 慶彦 (Hirooka, Yoshihiko)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：60311213

(2) 研究分担者  
嶋田 道也 (Shimada, Michiya)  
量子科学技術研究開発機構・核融合エネルギー研究開発部門・嘱託研究員  
研究者番号：90725764

(3) 連携研究者  
なし

(4) 研究協力者  
なし