

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360387

研究課題名(和文) 流動液体金属プラズマ対向機器による周辺粒子制御の実験的研究

研究課題名(英文) A laboratory study on particle control by liquid metal plasma-facing components

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) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：リチウム温度が融点に達すると水素リサイクルが顕著に減少する事が観測された。これは、打ち込み深さ付近で水素が飽和してリチウム水素化物(LiH)が析出し、液体中を高速拡散した結果、実効的に飽和状態が解消されるためプラズマ対向面からのリサイクル減少したものと説明できる。また、水素リサイクルが飽和した段階で液体を攪拌するとリサイクルが更に減少することが分かった。これらの結果から、液体金属リチウムをプラズマ対向面材料として用いる場合、一旦、水素飽和した表面であっても強制流動させると粒子リサイクル制御機能が復活する事が期待される。

研究成果の概要(英文)： It has been found that hydrogen recycling from molten lithium is reduced, relative to that from solid lithium. This is believed to be because of Einstein-Stokes diffusion of lithium hydride (LiH) particles precipitated in the implantation range. However, if the liquid is stirred, the reduction in hydrogen recycling is significantly enhanced, presumably because of the disaturation effect. This means that liquid metal PFC concepts need to incorporate some forced convection effect to maintain reduced recycling in the edge region of a magnetic fusion device.

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 水素リサイクル 液体金属 リチウム

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合炉の周辺プラズマに於ける閉じ込めロス熱・粒子束は、それぞれ $20\text{MW}/\text{m}^2$ 、 $10^{19}\text{ions}/\text{cm}^2/\text{s}$ 台に達する。現行の ITER のプラズマ対向機器 (Plasma-Facing Components: 以降 PFC) は、タングステン表面材料を銅合金熱シンク材に融着させて、辛うじてこれら高熱・高粒子束を 400 秒パルス運転で受け止めることが出来る設計である。

ところが、ITER の後に建設される実証炉では、完全定常運転が要求される上に中性子照射による材料の放射化を低減するため銅合金の代わりにフェライト系鉄合金が使われる設計例が多い。これらの鉄合金は、銅合金に比べて熱伝導度が約 3 分の 1 程度であるため、上記の熱流束を受け止める事が出来ないであろう。つまり、現状では、実証炉に使える PFC の具体的な設計例はないのが現状である。

2. 研究の目的

報告者は、過去約 15 年に渡って PFC を含めた磁場核融合炉プラズマ対向壁の新概念に関する基礎研究を展開してきた。上記熱流束の問題だけでなく、エネルギーバランスの観点から熱エネルギー化して PFC から放出される粒子がコアプラズマにリサイクルされるのは、好ましくない事は、逆に、壁リサイクリングを制御することで飛躍的にコア閉じ込め性能を改善した TFTR のスーパーショット等によって証明されている。

このような観点から本研究課題では、水素化物生成金属であるリチウムを熔融状態で PFC 表面材料として用いる液体金属 PFC 概念を提唱し、それと定常水素・ヘリウムプラズマとの相互作用、特に、流動する液体金属からのプラズマ粒子のリサイクリング挙動についての実験的研究を行う事を目的とする。

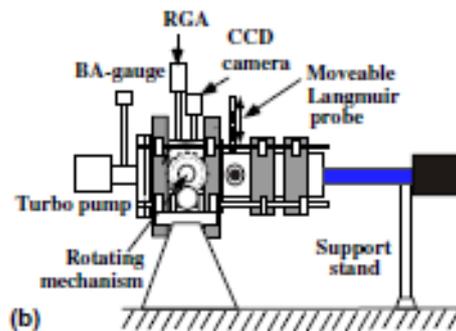


図-1 定常プラズマ壁相互作用実験装置 (VEHICLE-1) の模式図 : (a) 垂直姿勢、(b) 水平姿勢。

3. 研究の方法

本課題研究では、図-1 に示した定常プラズマ壁実験装置 (VEHICLE-1) を用いて、流動液体金属によるプラズマ照射下に於ける粒子リサイクリングに関する実験を行った。同装置には、1kW-ECR プラズマ源が取り付けられており、電子温度 数 eV、密度 10^{10}cm^{-3} 台の定常水素・ヘリウムプラズマ生成が可能である。ターゲット試料には、プラズマとほぼ同電位の真空チェンバーにバイアス電圧をかけることでイオンのターゲットに対する実効的な衝撃エネルギーを制御することが出来る。

本研究に用いるリチウム試料は、図-2 に示したような手動式液体攪拌機・抵抗加熱機能付きの直径約 5 cm のカップに装填され、水素・ヘリウムプラズマに照射される。

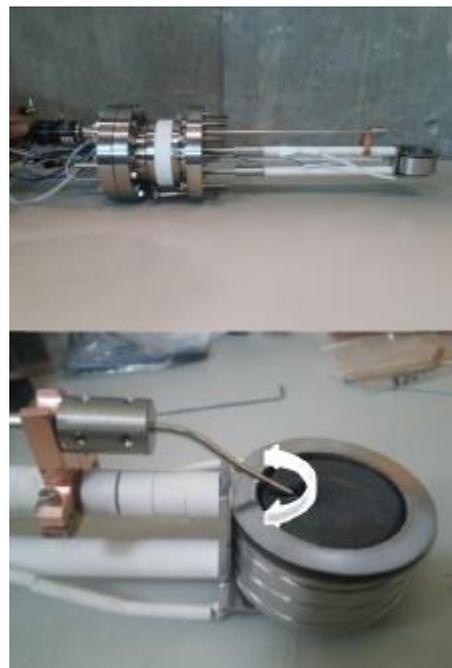
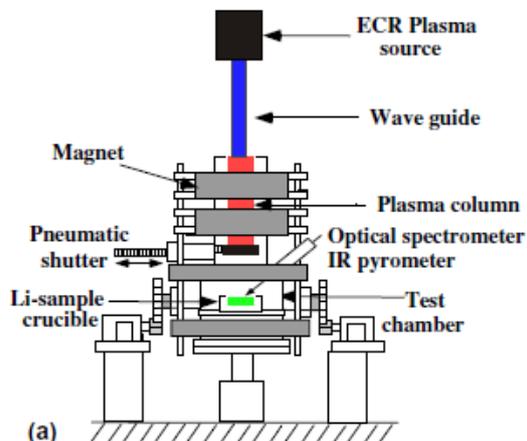


図-2 手動式液体金属攪拌セットアップ。

4. 研究成果

図-3に水素リサイクリング挙動測定結果の一例を示した。この時のDCバイアスは約100ボルトである。

水素プラズマ照射下でリチウムの温度をゆっくり上げて行くと、固液2相状態を示す温度プラトーを経て次第に全体が溶解する状態が温度上昇挙動から読み取れる。その間、水素プラズマ粒子リサイクリングを H_{α} 分光で、また、リチウムの蒸発挙動を Li-I 分光で同時に追跡測定した。

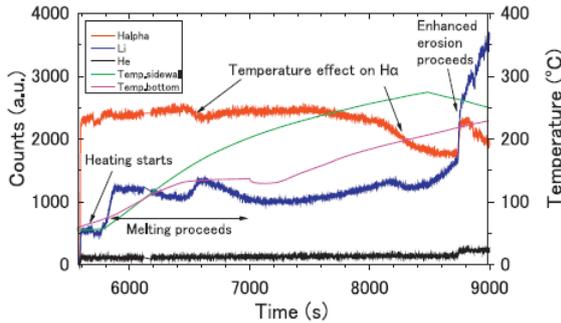


図-3 水素プラズマ照射中の昇温過程でのリチウムからの水素リサイクリング挙動。

リチウム温度が融点に達すると直ぐにリサイクリングが顕著に減少する事が観測された。リチウム中への水素溶解は、発熱反応であるので（即ち、昇温と共に溶解度が減少する）、昇温と共に水素のリサイクリングが増加することが予想されるが、逆に、リサイクリングが減少するのは、打ち込み深さ付近で水素が飽和してリチウム水素化物 (LiH) が析出し、液体中を Einstein-Stokes 型の高速拡散した結果、実効的に飽和状態が解消されるためプラズマ対向面からのリサイクリング減少したものと説明できる。

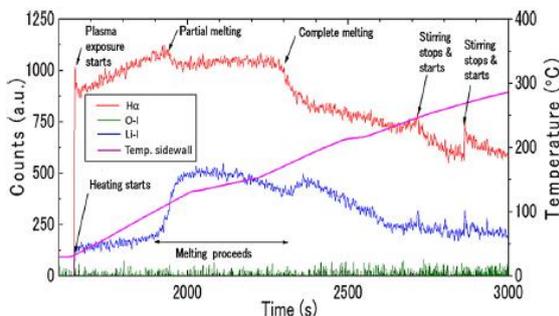


図-4 液体リチウム攪拌の水素リサイクリングへの影響。

同様の実験を行い、今度は、水素リサイクリングが一定化（定常状態）した段階で液体を攪拌するとリサイクリングが更に減少することが分かった。また、その結果を図-

4に示した。

これらの結果から、液体金属リチウムをプラズマ対向面材料として用いる場合、一旦、水素飽和した表面であっても強制流動（対流）させれば、周辺粒子制御機能が復活する事が期待される。

一方、同様に定常ヘリウムプラズマ照射下での粒子リサイクリング挙動に関しては、図-5に示したように、水素リサイクリングと全く逆の傾向を示した。これは、ヘリウムのリチウム中への溶解が吸熱反応であり、攪拌によって表面の温度が下がるためその分だけ溶解度が減少し、それに伴ってヘリウムが放出されるものと説明される。

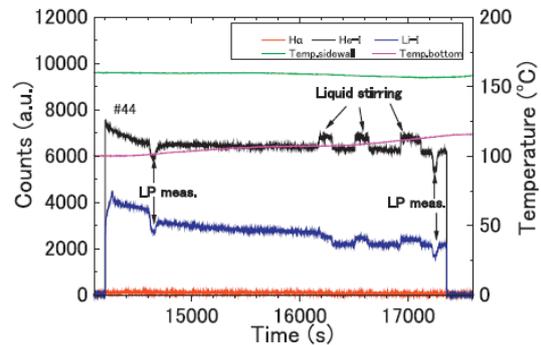


図-5 液体リチウム攪拌のヘリウムプラズマ照射下粒子リサイクリング挙動への影響。

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1件）

Yoshi Hirooka, Haishan Zhou, Masa Ono
“Hydrogen and helium recycling from stirred liquid lithium under steady state plasma bombardment”
Fusion Eng. Des. **89**(2014)2833.
査読有。

〔学会発表〕（計1件）

上記論文招待講演
Yoshi Hirooka, Haishan Zhou, Masa Ono
“Hydrogen and helium recycling from stirred liquid lithium under steady state plasma bombardment”
Int. Symp. Lithium Appl. Fusion Devices,
Oct. 26-29th, 2013, Frascati, Italy.

6. 研究組織

(1) 研究代表者
廣岡 慶彦 (Hirooka Yoshihiko)
自然科学研究機構 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

芦川 直子 (助教)

自然科学研究機構 核融合科学研究所へリ
カル研究部 助教

研究者番号：00353441

(3)連携研究者

()

研究者番号：