

平成 21 年 4 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360446  
 研究課題名（和文）定常核融合炉に於ける固体・液体プラズマ対向機器による粒子制御の包括的方法論  
 研究課題名（英文）Particle control in steady state magnetic fusion reactors by solid and liquid plasma-facing-components  
 研究代表者：廣岡 慶彦（HIROOKA YOSHIHIKO）  
 核融合科学研究所・連携研究推進センター・教授  
 研究者番号：60311213

研究成果の概要：1980年代後半の米国 TFTR でのスーパーショット以来、周辺プラズマ密度の制御、つまり、壁からのリサイクリングを制御することでコア・プラズマの性能が向上することが、磁気閉じ込めコミュニティーの常識となった。ところが、壁コンデションニング法によるリサイクリング制御には、壁材料表面の粒子飽和による有限の寿命があるため定常運転磁気核融合炉に適用できない。そこで、本課題では、この定常炉に於ける粒子制御に適用できる新しい壁概念「移動表面式プラズマ対向機器」を提唱し、その表面材料として固体及び液体リチウムを用いて粒子リサイクリングが実験室系装置内の定常水素・ヘリウム混合プラズマ照射下で水素・ヘリウムそれぞれ 100%より小の状態でも維持できることを原理検証し、その結果に基づいて小型・球状トカマクに於ける能動的周辺制御実験を行いコア・プラズマ性能の向上を実証した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,100,000	0	6,100,000
2007年度	5,700,000	1,710,000	7,930,000
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	2,610,000	17,930,000

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：燃料・ヘリウム灰

## 1. 研究開始当初の背景

前記の如く、定常磁気核融合炉内の周辺プラズマ密度制御のため新壁概念「移動表面式プラズマ対向機器」が提唱され、本課題に先立つ基盤研究（C：課題番号：13680574）に於いては、実験室系装置内の定常水素プラズマ照射下の水素リサイクリング率を 100%以下に低減することに成功していた。

## 2. 研究の目的

- ① 移動固体リチウム表面によるヘリウム粒子リサイクリング低減・維持の原理検証。
- ② 静止・流動液体リチウム表面による水素・ヘリウム粒子リサイクリング低減・維持の原理検証。

- ③ 水素 (DT)・ヘリウム灰粒子の核融合炉内粒子バランス解析。
- ④ リチウムを用いた低リサイクリング・プラズマ対向機器の閉じ込め装置 (球状トカマク) への応用とコア・プラズマ性能向上の原理検証。

### 3. 研究の方法

- ① 研究代表者等は、本課題に先立つ研究課題 (基盤研究 (C) : 課題番号: 13680574) の一貫として、実験室系プラズマ装置内に回転ドラム型プラズマ対向機器テストユニットを設置し、水素プラズマ照射中にリチウム等の水素化物生成金属の被膜をドラムに連続的に塗布し水素化物の生成によりリサイクリングの定常的低減を実証していた。本課題では、この概念を延長し、同装置内のヘリウム単独プラズマ及び水素+ヘリウム混合プラズマ粒子リサイクリング率を測定した。
- ② 近年、流動する液体リチウムをプラズマ対向機器表面とする「液体滝」概念が提唱された。しかし、静止リチウムでも一定量以上であれば、十分にプラズマ対向機器として十分に機能すると考えられる。しかし、流動-静止を問わず、液体リチウムプラズマ対向機器概念の原理検証実験は、行われていない。本課題では、これら概念の原理検証を①で述べた実験室系プラズマ装置を用いて行った。
- ③ 上記①②で行われる実験から固体・液体リチウムをプラズマ対向表面として用いた場合の水素・ヘリウム粒子のリサイクリング率が測定される。これらのデータを基準に従来LHDやTRIAM-1M等の粒子バランス解析に用いられてきたゼロ次元 (4 系統: コア・周辺・ガス・材料) モデルを拡張適用して粒子制御の観点からこれらの壁概念が炉に適用できるか否かを検討した。
- ④ 実験室系装置で粒子制御能力が実証された回転ドラム型ユニットを改造し、九大・応力研の球状トカマク: CPD 装置にリミターとして取り付け、実際にリチウムを連続蒸着した場合のリサイクリングの減少とそれに伴うコア・プラズマ性能への影響を種々のコア・周辺プラズマ診断装置を用いて観測し、③で用いた粒子バランスモデルを用いて実験データの解析を行った。

### 4. 研究成果

- ① 実験室系プラズマ装置: VEHICLE-1 (図-1) を用いて密度  $10^{11}\text{cm}^{-3}$  台・電子温度約 5eV の水素・ヘリウム混合定常プラズマを生成し回転ドラムにリチウムを連続蒸着した場合、図-2 に示したように、水素もヘリウムもそのリサイクリングが顕著に低減・維持されることが分かった。水素・ヘリウム・リチウムの固体内元素比は: H/Li~1, He/Li~0.01 であった。

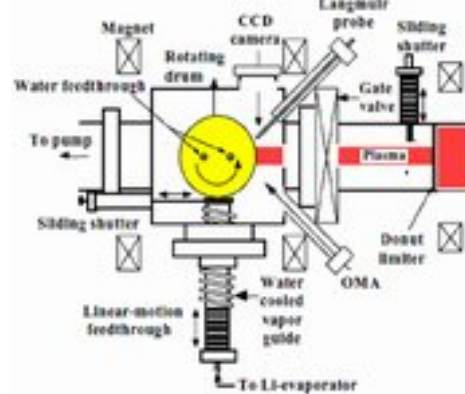


図-1 プラズマ装置: VEHICLE-1 の模式図。

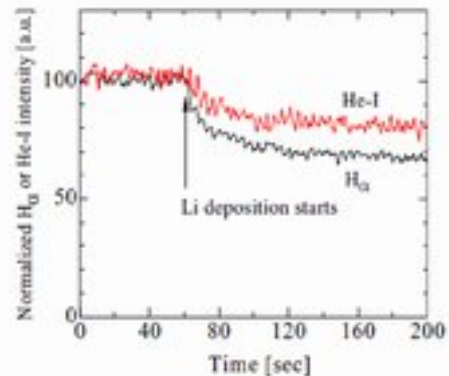


図-2. 水素・ヘリウムリサイクリング率。

- ② 上記装置: VEHICLE-1 は、水平・垂直姿勢可変型に改造され、液体リチウムを用いた水素・ヘリウムリサイクリング実験は、図-3 に示す垂直姿勢で行われた。

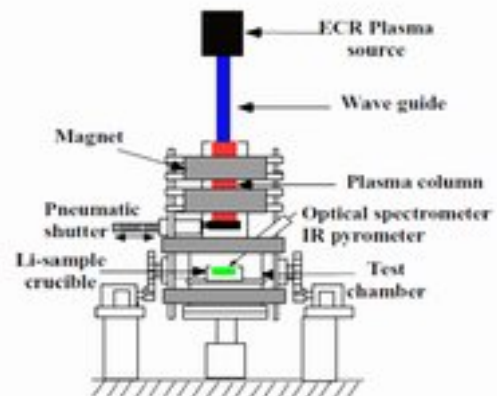


図-3 垂直姿勢の VEHICLE-1 実験装置。

同様の定常水素・ヘリウム単体プラズマを液体リチウムに照射しリサイクリング挙動を測定した結果を図-4、5に示す。以下のような興味深い結果が得られた：

(1) 水素は、液体リチウムに照射した場合の方が定常リサイクリング率が約30%低い。これは、液体リチウム中で析出した水素化物粒子が高速拡散して表面近傍を不飽和状態に保ったためであると考えられる。

(2) ヘリウムは、逆に、固体リチウムに照射した方が定常リサイクリング率が約20%低い。これは、固体中に発生した照射欠陥にヘリウム粒子が捕獲されたためであると考えられる。

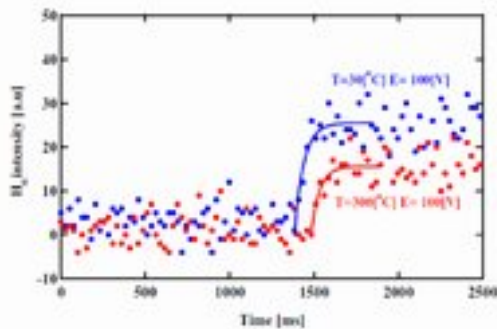


図-4 固体（常温）・液体（300℃）リチウムからの水素リサイクリング挙動。ただし、照射エネルギーは、100eV。

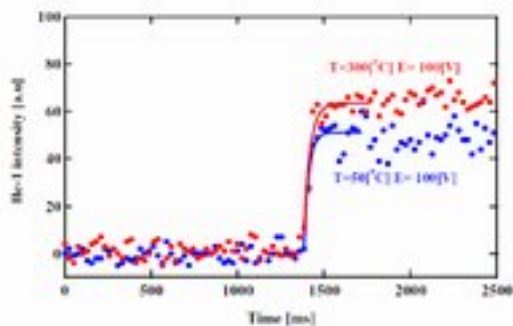


図-5 固体（常温）・液体（300℃）リチウムからのヘリウムリサイクリング挙動。ただし、照射エネルギーは、100eV。

③ 上記の水素・ヘリウムリサイクリング測定結果をインプットデータに用いて、2粒子系（DT, He）・4系統粒子バランスモデル解析が行われた。1GW出力の核融合炉を仮定し、そのパラメータとしては、パルス長：1000秒、プラズマ体積：800m<sup>3</sup>、コア温度20keV等とした。また、燃料流入法としては、効率：0.1、0.5とする連続的なガスパフとペレット入射を仮定しコア・周辺・ガス・材料中の水素とヘリウム粒子インベントリーの時間変化を追跡した。その結果の1例を図-6に示した。

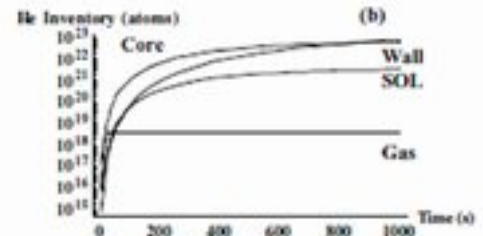
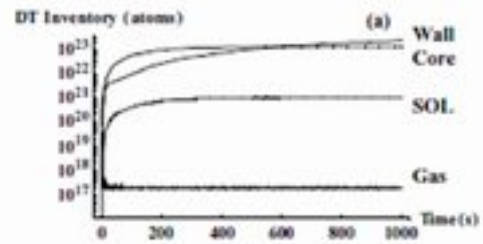


図-6 ペレット入射による燃料注入仮想核融合炉内のDTとヘリウムの粒子バランスモデル計算結果。ただし、壁による連続的粒子ポンプ効果を仮定。

特に、ヘリウム灰の壁（リチウム等の新概念プラズマ対向機器）の粒子排気能力をパラメータとしてヘリウム灰蓄積挙動を計算すると図-7のようになり連続的共堆積による壁ポンプ効果があることが分かった。

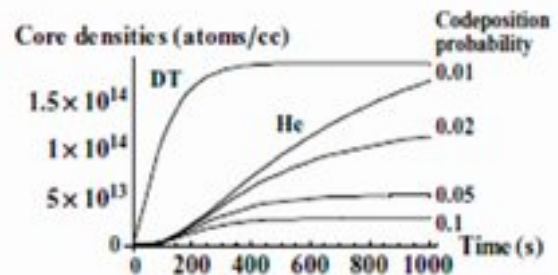


図-7 共堆積によるヘリウムの壁ポンプ効果をパラメータとした場合のコア・プラズマ中のヘリウム灰蓄積挙動。

④ 実験室系測定・粒子バランス・モデリング解析の集大成として、実際のプラズマ閉じ込め装置（球状トカマク：CPD装置 R=30cm, a=20cm）に図-8に示されたような回転ドラム型ユニットをリミターとして装着し、各種診断装置を用いてコア・プラズマ特性の変化を追跡測定した。



図-8 CPD装置の回転ドラム型リミター。

図-9, 10にそれぞれ回転ドラムリミターにリチウムを蒸着した場合としない場合の50kW-RF電流駆動-放電波形をしめした。ほぼ同じ中心密度 ( $n_e L$ )を持つような2つの放電波形の比較から以下の結果が得られた:

(1) リチウム蒸着によってリサイクリング率が顕著に減少した (H)。

(2) 酸素不純物が減少した (O-II)。

(3) トロイダル電流が倍増した ( $I_p$ )。なお、(3)については、中心の電子温度が7eVから20eVに増加したこと相関性があると考えられる。

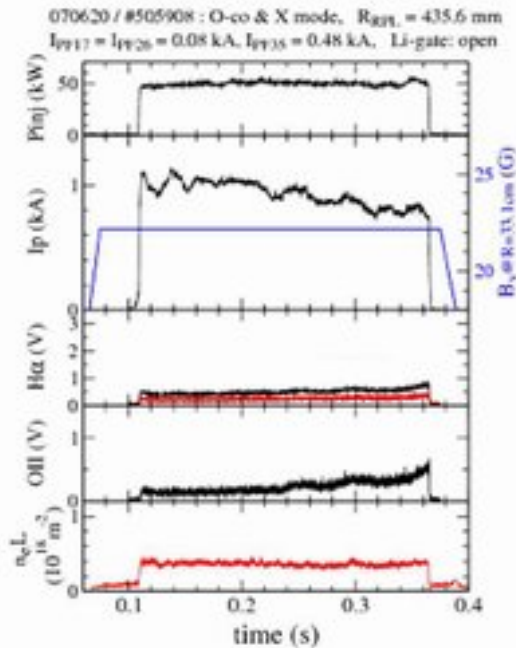


図-9 リチウム蒸着中のCPD放電波形。

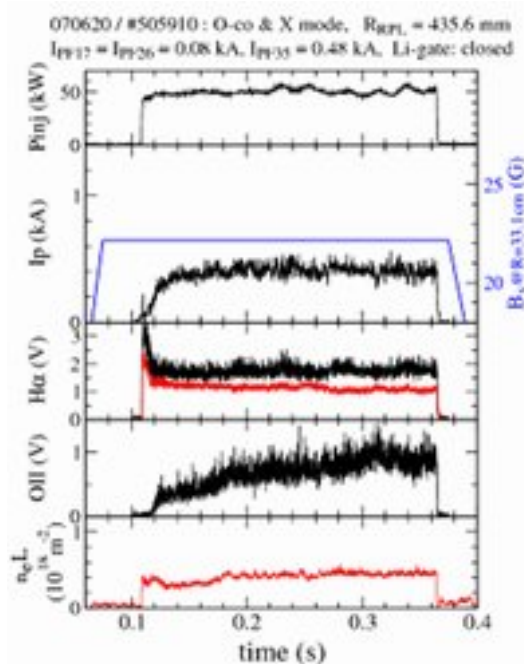


図-9 リチウム蒸着なしのCPD放電波形。

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4件)

1. Y. Hirooka, H. Zushi et al.  
 oActive particle control in the CPD compact spherical tokamak by a lithium-gettered rotating drum limiterö  
 J. Nucl. Mater. in press (2009).
2. Y. Hirooka  
 oParticle balance in steady state DT fusion reactors with helium ash removal by wall pumpingö  
 Fusion Sci. & Technol. 52(2007)1040-1044.
3. Y. Hirooka, H. Ohgaki, S. Hosaka, M. Nishiura, and H. Zushi  
 oHelium ash removal by moving-surface plasma-facing componentsö  
 J. Nucl. Mater. 363-365(2007)775-780.
4. Y. Hirooka, S. Hosaka, M. Nishiura, Y. Ohtsuka and M. Nishikawa  
 oParticle control in steady state magnetic fusion reactors by solid and liquid lithium plasma-facing componentsö  
 Nucl. Fusion 46(2006)S56-S61.

[学会発表] (国内3件・国外2件 計5件)

1. 廣岡慶彦、図子秀樹、他  
 「回転ドラム型リミターによる能動的周辺制御実験と粒子バランスモデリング」  
 第25回プラズマ核融合学会、2008年12月2日-12月5日 (於: 栃木県総合文化センター)。
2. Y. Hirooka, H. Zushi, et al.  
 oActive particle control in the CPD compact spherical tokamak by a lithium-gettered rotating drum limiterö  
 Presented at the 18<sup>th</sup> Int. Conf. on Plasma-Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Toledo, Spain, May 26<sup>th</sup>-30<sup>th</sup>, 2008.
3. 廣岡慶彦、図子秀樹、他  
 「移動表面式プラズマ対向機器による球状トカマク:CPDに於ける能動的粒子制御の基礎実験」  
 第24回プラズマ核融合学会、2007年11月27日-11月30日 (於: イーグレ姫路)。

4. 廣岡慶彦、保坂宗一郎、大塚雄介、西川雅弘  
「移動表面式プラズマ対向機器による定常運転 DT-燃料及び He-灰粒子制御」  
第 23 回プラズマ核融合学会、2006 年 11 月 28 日 - 12 月 1 日（於：筑波大学大学会館）。

5. Y. Hirooka, S. Hosaka, M. Nishikawa, et al.  
 $\alpha$ Helium ash removal by moving surface plasma-facing components in steady state fusion devices  
Presented at the 17<sup>th</sup> Int. Conf. on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Hefei, China, May 22<sup>nd</sup> -26<sup>th</sup>, 2006.

## 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・連携研究推進センター・教授

### (2)研究分担者 (2006・2007 年度)

松岡 啓介 (MATSUOKA KEISUKE)  
核融合科学研究所・連携研究推進センター・教授

大藪 修義 (OHYABU NOBUYOSHU)  
核融合科学研究所・LHD 研究部・教授

相良 明男 (SGARA AKIO)  
核融合科学研究所・炉工学センター・教授

冨子 秀樹 (ZUSHI HIDEKI)  
九州大学・応用力学研究所・教授

吉田 直亮 (YOSHIDA NAOAKI)  
九州大学・特任教授

岩切 宏友 (IWAKIRI HIROTOMO)  
琉球大学・教育学部・准教授

西川 雅弘 (NISHIKAWA MASAHIRO)  
大阪大学・特任教授

大塚 裕介 (OHTSUKA YUSUKE)  
大阪大学・工学研究科・助教

中村 博雄 (NAKAMURA HIROO)  
日本原子力研究開発機構・主任研究員

### (3)連携研究者 (2008 年度)

松岡 啓介 (MATSUOKA KEISUKE)  
核融合科学研究所・連携研究推進センター・教授

大藪 修義 (OHYABU NOBUYOSHU)  
核融合科学研究所・LHD 研究部・教授

相良 明男 (SGARA AKIO)  
核融合科学研究所・炉工学センター・教授

冨子 秀樹 (ZUSHI HIDEKI)  
九州大学・応用力学研究所・教授

吉田 直亮 (YOSHIDA NAOAKI)  
九州大学・特任教授

岩切 宏友 (IWAKIRI HIROTOMO)  
琉球大学・教育学部・准教授

西川 雅弘 (NISHIKAWA MASAHIRO)  
大阪大学・特任教授

大塚 裕介 (OHTSUKA YUSUKE)  
大阪大学・工学研究科・助教

中村 博雄 (NAKAMURA HIROO)  
日本原子力研究開発機構・主任研究員