

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(B)  
 研究期間： 2007 ～ 2009  
 課題番号： 19360413  
 研究課題名(和文) トロイダルダイバータ模擬プラズマを用いた非接触プラズマ物理の解明  
 研究課題名(英文) Investigation of Detached Plasmas with Toroidal Divertor Plasma Simulator

## 研究代表者

大野 哲靖 (OHNO Noriyasu)  
 名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号： 60203890

## 研究成果の概要(和文)：

トロイダルダイバータ模擬試験装置において非接触重水素プラズマの生成を確認した。分光計測により重水素の三体再結合に伴う高励起準位からのバルマー系列の発光を確認した。このスペクトル線より、ボルツマンプロット法とシュタルク広がり幅より非接触プラズマの電子温度(0.1-0.4 eV)及び密度( $\sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ )を決定した。また、プラズマ非接触現象における電子イオン再結合(EIR)と分子活性化再結合(MAR)による体積再結合の役割を明らかにした。さらに、非接触重水素プラズマ中で炭素照射実験を行ったところ、電子-イオン再結合により生成された中性粒子が炭素の化学スパッタリングによる損耗に大きな影響を与えていることが明らかになった。

## 研究成果の概要(英文)：

Detached deuterium recombining plasma has been generated in the toroidal divertor simulator. The electron temperature (0.1-0.4 eV) and density ( $\sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ) in the detached plasmas were evaluated with a spectroscopic method using a series of deuterium Balmer line emission from highly excited levels and the Stark broadening of D(2-12). We have investigated the role of volume plasma recombination through Electron-Ion Recombination (EIR) and Molecular Activated Recombination (MAR) processes. Moreover, the carbon erosion in the detached deuterium plasma has been studied with a weight-loss method. It is found that deuterium neutrals generated by EIR process could have a strong influence on the carbon chemical erosion.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	11,900,000	3,570,000	15,470,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：核融合，境界プラズマ，ダイバータ，プラズマ壁相互作用，熱流制御，非接触プラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

現在磁場閉じ込め核融合研究は、定常高性能プラズマ維持を目的として研究が進めら

れている。定常磁場閉じ込め核融合炉の実現にとって、高性能な炉心プラズマを維持しつつ、炉壁が熱的に十分耐えられ、損耗が少な

くかつヘリウム灰や燃料などの粒子制御が確保されなければならない。特に、炉心プラズマから周辺に流出する膨大な粒子流および熱流を制御し、プラズマ対向材(ダイバータ板)の損傷を低減することが重要である。

プラズマデタッチメント現象は、プラズマ-ガス相互作用により放射および荷電効果過程でプラズマを冷却し、プラズマを低温高密度状態にし、最終的には電子イオン再結合過程(放射+3体再結合過程)によりプラズマを気相中で消失させるというものであり、ダイバータ領域での粒子・熱流制御法の切り札と考えられている。この時生成されるプラズマを非接触プラズマという。本手法の原理実証は、直線型ダイバータプラズマ模擬試験装置(L-DPS)、トカマク、ヘリカル装置などで行われた。ITERのダイバータにおいては最も熱・粒子負荷が大きいストライク点付近を非接触化させる部分非接触プラズマが採用されている。しかし未解決の課題も多く存在し、プラズマデタッチメントは完全に信頼に足りうる粒子・熱流制御法としては確立されていない。一方で装置の大型化、炉心プラズマ性能の向上にともないダイバータ板への粒子・熱負荷の大きさは対向材としての許容限界に達しており、閉じ込め方式を問わず磁場閉じ込め定常核融合炉の実現のためには非接触プラズマを用いた粒子・熱流制御の確立は不可欠な課題である。

## 2. 研究の目的

トロイダルダイバータ模擬試験装置を用いて下記課題を明らかにする。

- (1)非接触重水素プラズマ中での粒子バランスと分子活性化再結合の寄与の大きさを明らかにする。
- (2)輻射輸送(輻射捕獲)を考慮した非接触プラズマ中での放射損失過程の解明と非接触プラズマ生成への影響を明らかにする。
- (3)非接触重水素プラズマ中での炭素材料の化学スパッタリング率の定量評価を行う。
- (4)接触・非接触プラズマ中での ELM 様フィラメント構造の径方向輸送の解明を行う。
- (5)ELM 様熱パルスとの相互作用に伴う非接触プラズマの動的応答、非接触状態の崩壊と復帰過程の解明、さらに ELM 様熱パルス制御のための適切な放射源となる不純物粒子の選定を行う。

## 3. 研究の方法

実験にはトロイダルダイバータ模擬試験装置 NAGDIS-T 及び直線型ダイバータ模擬試験装置 NAGDIS-II を用いた。図 1 に NAGDIS-T の鳥瞰図、図 2 に上面図を示す。本装置はトロイダル磁場  $B_T$  と垂直磁場  $B_V$  の組み合わせによるトーラス螺旋状の曲率を持った磁力線を有する。NAGDIS-T では、ト

ロイダル装置特有の長い磁力線に沿ったプラズマの輸送過程や磁力線の曲率や勾配に起因する磁力線を横切る間欠的なプラズマ輸送現象等の研究が可能である。磁場強度は最大でそれぞれ  $B_T: 0.1 \text{ T}$ ,  $B_V: 0.3 \times 10^{-3} \text{ T}$  であり、その比率を変えることで磁力線接続長及びターゲット板への入射角度を変化させることができる。また、真空容器は大半径 34 cm で、矩形断面(28×18 cm)を持つ。この磁場配位の下、加熱特性を向上させた直熱型  $\text{LaB}_6$  製熱陰極を用いた直流放電方式により、電子密度  $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 2 eV の定常高密度重水素プラズマの生成に成功した。

計測装置はプローブ測定、分光測定のための計測系を使用している。高速掃引プローブと分光計測用の光ファイバーを同一ポートに設置することで、計測した結果を比較検討できるようになっている。

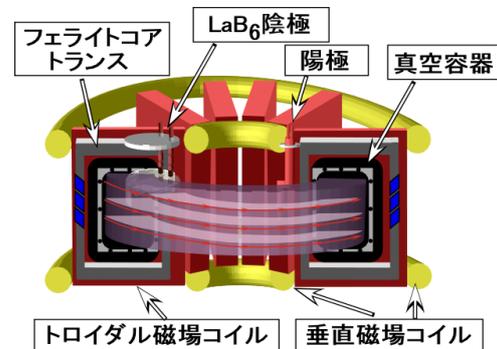


図 1 トロイダルダイバータ模擬試験装置 NAGDIS-T

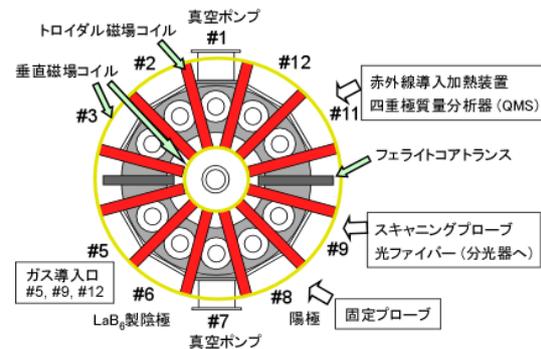


図 2 NAGDIS-T 上面図

改良した放電システムを用いて、シート状高密度重水素プラズマを発生させる。マスフローコントローラにより重水素ガス導入量を増加し、非接触重水素プラズマを生成する。高速掃引プローブによりプラズマパラメータの 2 次元分布を計測する。また可視分光器を用いて、非接触プラズマからの電子・イオン再結合に伴うバルマー系列の発光を観測し、ボルツマンプロット法もしくは連続スペクトル解析より、電子密度、電子温度の評価

を行う。

電子・イオン再結合が主な非接触プラズマ状態から、放電電流を下げプラズマ密度を減少させ(もしくは、垂直磁場を強めて磁力線の接続長を短くし)、分子活性化再結合が主な非接触状態に遷移させる。バルマー系列の詳細計測を行うとともに、D $\alpha$ とD(10)の発光強度比を電子・イオン再結合から分子活性化再結合への遷移の指標として整理する。

真空紫外分光器を用いてL $\beta$ 光、可視分光器を用いH $\alpha$ 光の計測を真空容器の上部から下部全体対して行い、輻射捕獲の影響を明らかにする。

非接触プラズマ発生によりダイバータ板へのイオン粒子束は減少し、物理スパッタリングによるダイバータ板の損耗は減少する。しかし、ダイバータ板周辺には再結合過程に伴う多数の励起重水素原子が存在するため、化学スパッタリングの影響が重要となる。本実験では、ターゲット板上に炭素材を設置し、接触・非接触重水素プラズマを長時間照射し、損耗量の変化を材料の重量変化より明らかにする。

さらに非接触プラズマ中の非拡散的輸送現象を高速カメラ及びプローブ計測により調べ、非接触プラズマでの熱負荷・粒子負荷低減への寄与を調べる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 重水素非接触プラズマの生成

NAGDIS-Tにおける重水素プラズマの高密度化実験の際に図3に示すような発光の変化が見られた。二周目以降のプラズマの発光が一周目のピンク色から青色へ変化していることがわかる。この時、 $B_t = 4.2 \times 10^{-2}$  T,  $B_v = 1.5 \times 10^{-3}$  T, 放電電力 1.5 kW, ガス圧 0.81 Paである。二周目のプラズマにおいて分光測定を行った結果を図4に示す。一周目では観測されなかった重水素の高励起準位からの発光が二周目では明瞭に観測されている。プラズマソースは上部陰極のみなので二周目プラズマで高励起準位の原子が生成されるのは電子-イオン再結合が起こっているためであると考えられる。励起準位 23 あたりからスペクトル線の区別がつかなくなっており、これは Inglis-Teller 限界を示している。

再結合プラズマにおいて、ある主量子数  $n_{cr}$  以上の準位では、衝突過程に対して放射過程が無視でき、それら高励起準位の電子は連続状態の電子(自由電子)と熱平衡にある。このような状態を部分的局所熱平衡(Partial Local Thermodynamic Equilibrium: PLTE)と呼び、 $n_{cr}$  以上の準位の電子の占有密度分布に対してサハー-ボルツマン方程式が成り立つ。図5に統計的重率で割られた各励起準位の占有密度 ( $n_n/g_n$ ) を基底準位からの励起エネルギー  $E_n$  の関数として示す。この結果は、図5

の線スペクトルを用いている。 $n_n/g_n$ ,  $E_n$  そして  $T_e$  の間の関係は、ボルツマン分布則より、

$$\ln\left(\frac{n_n}{g_n}\right) = -\frac{E_n}{kT_e} + const.$$

と与えられることから、図5において直線の傾きの逆数より、電子温度は  $T_e \sim 0.11$  eV と求められ、体積再結合が起こるのに最適な低温プラズマとなっていることが示された。



図3 プラズマからの発光 (#9ポート)

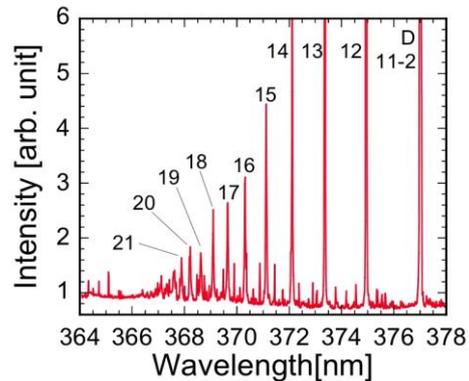


図4 2周目の分光計測結果

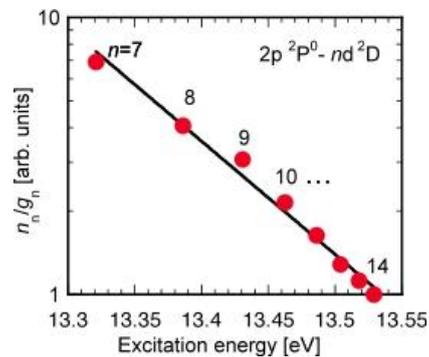


図5 ボルツマンプロット

電子密度  $n_e$  は、重水素バルマー系列遷移 D $_{12}(n = 12-2)$  のシュタルク揺らぎから評価した。電子密度はシュタルク揺らぎ幅  $\sim 0.038$  nm より、 $n_e \sim 3.3 \times 10^{18}$  m $^{-3}$  と評価される。ただし、ド

ップラー拡がり (0.1 eV の温度で ~0.006 nm) 及び、ゼーマン分裂による拡がり (0.1 T の磁場強度で ~0.0012 nm) は無視した。

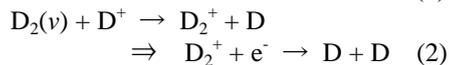
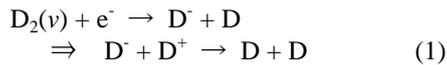
接触プラズマ、非接触プラズマそれぞれの一周目から二周目へのプラズマ圧力の減衰を比較することで非接触プラズマの効果を議論する。それぞれのプラズマ圧力の1周目と2周目の比は以下ようになった。

- ・接触プラズマ：  $2.0 \times 10^{-1}$
- ・非接触プラズマ：  $3.6 \times 10^{-2}$

また、他の条件の実験の結果においても一周目から二周目へのプラズマ圧力の減衰比は同程度となった。以上より、非接触プラズマ現象では接触プラズマの場合よりも、プラズマ圧力の下がり方が 10 倍程度大きいことが分かった。

### (2) 重水素分子活性化再結合の実験的検証

励起状態にある水素分子が関与した分子活性化再結合 (MAR) という再結合過程が理論的に予測されている。分子活性化再結合は振動励起状態 (振動量子数:  $\nu \geq 4$ ) の水素分子  $H_2(\nu)$  が主イオンの再結合を促進するというもので、二つの反応過程から成る。



これら(1), (2)の反応により最終的に生成される原子の励起状態は (1)の反応の場合には、水素原子の一つは基底状態にあるが、もう一つの水素原子は量子準位 2-4 の励起状態にある。(2)の反応の場合にも、水素原子の一つは量子準位 2-4 の励起状態にある。このような励起状態の水素は電離しやすいため留意しなければならない。

比較的ガス圧の低い場合や投入電力の小さい場合において、電子-イオン再結合による発光が確認できないにもかかわらず、プラズマの消失が観測された (図 6 (a))。

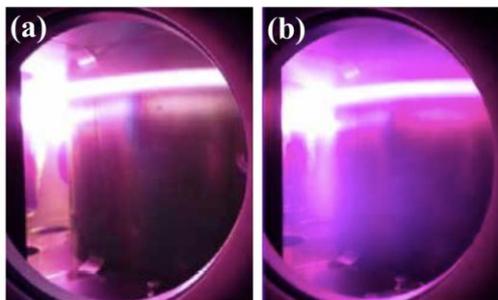


図 6 2周目以降が消失しているプラズマの放電電力による違い(a)1.1kW, (b)1.7kW

図7(a)に 1 周目プラズマの電子密度に対する D(2-12)の発光強度と  $D\alpha(2-3)$ に対する D(2-7)の発光強度比の依存性を示す。 $n_e(1st \text{ loop})$  が高い場合はほぼ一定となっているが~

$5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 周辺から下がると急激に発光強度が低下している。即ち、高励起順位からの発光が減り三体再結合が抑制されている。同時に、 $D(2-7)/D\alpha$ においても  $\sim 5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 周辺で急激に低下している。これは、分子活性化再結合が  $n_e(1st \text{ loop}) < 5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  で三体再結合に対して支配的となり、 $n=3$  の占有密度が上昇した可能性がある。また、図7(b)にプラズマが 1 周した時のイオン飽和電流の減衰比の電子密度依存性を示す。イオン飽和電流の減衰比は 0.1 程度であり、1 周目の電子密度に対して単調減少の傾向にある。しかし、この減衰比を同様の条件において接触プラズマ ( $8.4 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ )状態 で測定したところ約0.6であった。接触プラズマにおいては拡散過程がプラズマ粒子損失の主である。そのため、 $n_e(1st \text{ loop}) < 5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ において三体再結合にかわる粒子損失過程が存在すると考えられる。以上の結果から、 $n_e(1st \text{ loop}) < 5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ では分子活性化再結合が主な再結合 プラズマの生成によりプラズマが消失され、分子活性化再結合による粒子損失 は三体再結合と同程度であると考えられる。

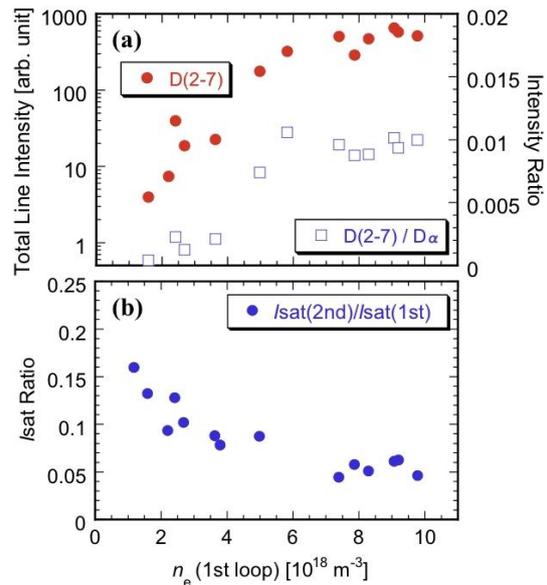


図 7 プラズマ生成部における電子密度に対する (a)D(2-7)の発光強度及び発光強度比  $D(2-7)/D\alpha$ , (b)イオン飽和電流減衰比の依存性

### (3) 非接触重水素プラズマ照射下の炭素材料損耗評価

非接触プラズマ生成によりダイバータ領域へ流入するプラズマの電子温度の大幅な低下からダイバータへの熱負荷の軽減が期待できることが示された。しかしながら、ダイバータ候補材の一つである炭素材は非接触プラズマ生成による材料損耗量が減少するかどうか懸念されている。非接触プラズマ中では入射イオンエネルギーが非常になくなるため、炭素の物理スパッタリングによ

る損耗は抑えられる。しかし、再結合過程により生成される原子による化学スパッタリング損耗量が増加する可能性がある。そのため、本章では非接触重水素プラズマと炭素系材料との相互作用による損耗過程の研究を行った。

図8はプラズマ照射実験における試料の配置(左)と非接触重水素プラズマ照射時の写真(右)である。照射には等方性黒鉛を用いている。

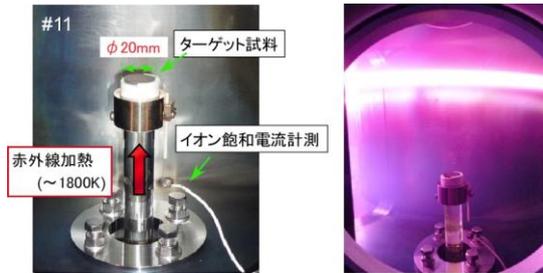


図8 プラズマ照射実験の試料配置(左), 照射時写真(右)

非接触重水素プラズマ照射による炭素材の損耗量の表面温度依存性を図3に示す。試料温度は赤外線温度計で測定し、赤外線加熱装置を用いてコントロールした。ターゲット試料を浮遊電位にして  $T_e \sim 0.12$  eV のプラズマ照射を行っており、この時イオン入射エネルギーはシース電圧により決定され0.4 eV程度の低エネルギーである。浮遊電位での重水素プラズマ照射における損耗量を●で示している。また、重水素原子による黒鉛の損耗量を評価するために、ターゲット炭素に30Vの正バイアスを印加し、イオンの入射を除去した場合を■として示す。600 K – 800 Kにおいて、重水素原子による損耗量はイオン入射の効果も含む浮遊電位での損耗量と比較して50%以上であることを確認した。

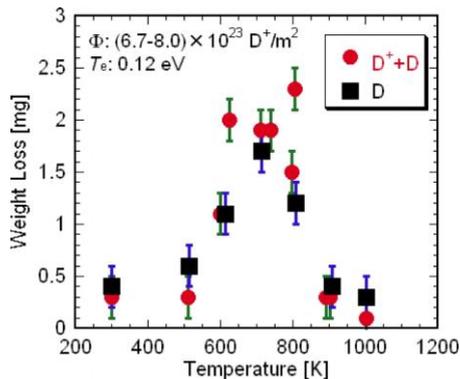


図9 非接触重水素プラズマ照射における損耗量の温度依存性

##### 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 6件)

1. H.Tanaka, N.Ohno, Y.Tsuji, S. Kajita, “2D Statistical Analysis of Non-Diffusive Transport under Attached and Detached Plasma Conditions of the Linear Divertor Simulator” Contrib. Plasma Phys., Vol.50, pp.256-266, 2010 査読有り
  2. K.Yada, N.Matsui, N.Ohno, S.Kajita, S.Takamura, M.Takagi, “Investigation of detached recombining deuterium plasma and carbon chemical erosion in the toroidal divertor simulator NAGDIS-T”, Journal of Nuclear Materials, Vol.390-391, pp.290-294, 2009 査読有り
  3. N.Ohno, M.Yoshimi, M.Tokitani, S. Takamura, K.Tokunaga, N.Yoshida “Spherical cauliflower-like carbon dust formed by interaction between deuterium plasma and graphite target and its internal structure”, Journal of Nuclear Materials, Vol.390-391, pp.61-64, 2009 査読有り
  4. N.Ohno, S.Kajita, M.Takagi, S.Takamura,” Development of Divertor Plasma Simulators with High Heat Flux Plasmas and its Application to Nuclear Fusion Study: A Review”, TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, Vol.3, pp.476-487, 2009 査読有り
  5. N.Matsunami, N.Ohno, M.Tokitani, “Deuterium retention in Tungsten Oxyside under low-voltage  $D_2^+$  plasma exposure”, Journal of Nuclear Materials, Vol.390-391, pp.693-695, 2009 査読有り
  6. M. Nagase, H. Masuda, N.Ohno, S.Takamura and M.Takagi, “High density plasma generation by RF ohmic discharge in toroidal divertor simulator NAGDIS-T”, Journal of Nuclear Materials, Vol.363-365, 611-615, 2007査読有り
- [学会発表] (計 18件)

1. H.Nakamura, A.Ito, A.Takayama, S.Saito, N.Ohno and S.Kajita, “Molecular Dynamics Simulation of Hydrogen Injection onto Diamond and Diamond Like Carbon Surfaces”, 2nd International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, 2010.3.7, 名城大学 (愛知県)
2. A.Ito, A.Takayama, S.Saito, N.Ohno, S.Kajita, H.Nakamura, “Molecular Dynamics Simulation of Chemical Sputtering and Chemical Vapor Deposition on Carbon Materials”, 2nd International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, 2010.3.7, 名城大学 (愛知県)
3. H.Nakamura, A.Ito, S.Saito, Y.Tamura, S. Fujiwara, N.Ohno, S.Kajita, “Dependence of

saturation temperature on diamond surfaces adsorbing hydrogen”, 19th International Toki Conference (ITC19), 2009.12.8, セラトピア土岐 (岐阜県)

4. 西脇敏弘, 梶田信, 高木誠, 大野哲靖  
「重水素非接触プラズマ中の分光学的原子密度評価」第26回プラズマ核融合学会年会, 2009.12.2, 京都市国際交流会館 (京都府)

5. A.Ito, N.Ohno, S.Kajita, H.Nakamura,  
“Chemical Vapor Deposition on Diamond Surfaces by Molecular Dynamics”, The 7<sup>th</sup> General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association(APFA2009) and the Asia-Pacific Plasma Theory Conference(APPTC2009), October 27, 2009, Festival City アウガ (青森県)

6. 西脇敏弘, 梶田信, 高木誠, 大野哲靖  
「接触・非接触重水素プラズマ中での炭素損耗過程に関する研究」電気系関係学会東海支部連合大会, 2009.9.11, 愛知工業大学 (愛知県)

7. N. Ohno, H.Tanaka, Y.Tsuji and S.Kajita,  
"2D Statistical Analysis of Non-Diffusive Transport in Detached Plasma Conditions of the Linear Divertor Simulator", 12th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, September 2, 2009, Rostov State Historical Museum, Rostov Veliky, Russia.

8. 矢田賢吾, 田中宏彦, 大野哲靖, 梶田信, 高木誠「非接触重水素プラズマ照射下における炭素材損耗評価」第25回プラズマ・核融合学会年会, 2008.12.2, 栃木県総合文化センター (栃木県)

9. 大野哲靖「直線型ダイバータ模擬装置における素過程の解明」日本物理学会2008年秋季大会, 2008.9.20, 岩手大学 (岩手県)

10. 西脇敏弘, 田中宏彦, 矢田賢吾, 梶田信, 高木誠, 大野哲靖「高速カメラ及び静電プローブによる接触・非接触プラズマ中の静電揺動に関する研究」平成20年度電気関係学会東海支部連合大会, 2008.9.18, 愛知県立大学 (愛知県)

11. 横地貴紀, 山際正人, 大野哲靖, 松波紀明, 増崎貴, 時谷政行, 芦川直子「ヘリウムプラズマ照射によるステンレス鋼SUS316の水素吸蔵量変化」平成20年度電気関係学会東海支部連合大会, 2008.9.18, 愛知県立大学 (愛知県)

12. 矢田賢吾, 松井紀暁, 田中宏彦, 大野哲靖, 高木誠「トロイダルダイバータプラズマ模擬装置 NAGDIS-T を用いた非接触再結合重水素プラズマ物性に関する研究」第7回核融合エネルギー連合講演会, 2008.6.19, 青森市民ホール (青森

県)

13. K.Yada, N.Matsui, N.Ohno, S.Takamura, M.Takagi, “Investigation of Detached Recombining Deuterium Plasma and Carbon Chemical Erosion in the Toroidal Divertor Simulator NAGDIS-T”, 18<sup>th</sup> PSI Conference, 2008.5.26, Toledo, Spain

14. 矢田賢吾, 松井紀暁, 大野哲靖, 高木誠  
「トロイダルダイバータ模擬装置を用いた非接触再結合重水素プラズマ物性に関する研究」電気学会全国大会, 2008.3.19, 福岡工業大学 (福岡県)

15. 松井紀暁, 山田隆, 矢田賢吾, 大野哲靖, 高木誠, 高村秀一「高密度重水素直流放電を用いた非接触再結合プラズマに関する研究」第24回プラズマ・核融合学会年会, 2007.11.27, イーグレひめじ (兵庫県)

16. N.Matsui, K.Yada, T.Yamada, N.Ohno, M.Takagi, “Study of Detached Recombining Deuterium Plasmas in the NAGDIS-T”, Int. Symp. on EcoTopia Science, 2007.11.23, 名古屋大学 (愛知県)

17. 矢田賢吾, 松井紀暁, 山田隆, 大野哲靖, 高木誠「トロイダルダイバータ模擬プラズマを用いた非接触再結合重水素プラズマの研究」電気関係学会東海支部連合大会, 2007.9.27, 信州大学 (長野県)

18. 松井紀暁, 矢田賢吾, 山田隆, 大野哲靖, 高木誠「NAGDIS-T における非接触再結合重水素プラズマに関する研究」電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2007.8.27, 大阪大学 (大阪府)

6. 研究組織

(1)研究代表者

大野 哲靖 ( OHNO NORIYASU)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60203890

(2)研究分担者

梶田 信 (KAJITA SHIN)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・講師

研究者番号: 00455297

(3)連携研究者

高村 秀一 (TAKAMURA SHUICHI)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号: 40023254

富田 幸博 (TOMITA YUKIHIRO)

核融合科学研究所・理論・シミュレーションセンター・准教授

研究者番号: 40115605

澤田 圭司 (SAWADA KEIJI)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号: 40262688

江角 直道 (EZUMI NAOMICHI)

長野工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号: 20321432