

平成21年 4月 24日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17340177
 研究課題名 (和文) 不純物多価イオンの磁気双極子禁制線を利用したプラズマ分光計測の新展開と可能性
 研究課題名 (英文) Development of plasma spectroscopy using magnetic dipole forbidden lines of highly ionized impurities and its feasibility
 研究代表者
 森田 繁 (MORITA SHIGERU)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授
 研究者番号：80174423

研究成果の概要：大型ヘリカル装置を用いて不純物多価イオンから放出される磁気双極子禁制線が可視域で強く発光していることを発見した。従来では真空紫外領域でしかできなかったプラズマコア部での不純物計測を可視域に拡張することに成功し、これを用いて不純物の定量化、空間分布、イオン温度計測及び磁気面計測等幅広いプラズマ診断応用に道を開いた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	3,700,000	0	3,700,000
2006年度	2,900,000	0	2,900,000
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
総計	9,900,000	990,000	10,890,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ計測，プラズマ分光，磁気双極子禁制線，不純物，核融合プラズマ

1. 研究開始当初の背景

(1) 磁気双極子禁制線は太陽コロナで初めて観測され、その後プリンストン大学PLTトカマクでもFe多価イオンの可視域禁制線が30年前に発見された。

(2) ここ5-10年の間にCCD検出器が飛躍的に発展し、微弱光の直接検出が可能となり、可視からX線までの分光計測に大きな発展をもたらした。

(3) 10年前にLHDが稼動し始め、ディスプレイの無いヘリカル特有の特性は比較的少量の高Z不純物を含む放電を容易に生成

することを可能にした。

(4) ITERでMoやW等の高Z材料を第一壁に使用する計画が浮上した。しかし、そのスペクトル構造は不明である。また、燃焼プラズマを支える α 粒子計測法の確立が急務となっている。

2. 研究の目的

(1) LHDと既存の計測設備を使用して高Zイオンの磁気双極子禁制線を可視及び真空紫外域で観測し、そのスペクトル構造を解明する。特にAr, Mo, Wに着目する。

(2) 可視域磁気双極子禁制線を解析し、CRモデルを構築することによりその放射機構を明らかにする。特に密度依存性や高エネルギー粒子衝突影響に着目する。

(3) 高Z元素をLHDに入射するための不純物ペレットの開発を行う。入射の最適化を計るためにその溶発過程も研究する。

(3) 禁制線を利用したプラズマ計測応用を展開する。

① 可視域禁制線を利用してコアプラズマに存在する多価不純物イオンの空間構造を計測する。

② 禁制線を利用して分光器の絶対較正に利用する。

③ MoやWの多価イオンが可視域禁制線を利用して計測できることを実証する。

④ 禁制線を用いたプラズマ加熱用(NBI)水素イオンや核燃焼生成物である α 粒子のような高エネルギーイオン計測の可能性を探求する。

3. 研究の方法

(1) LHDに高Z不純物ペレットを良好に入射するためには不純物量を少なくする必要がある。そのため2層構造を持ったペレットを試作開発し、それをLHDに入射し、高Zイオン発光源とする。

(2) ガスパフ装置を利用してAr, Kr, Xe等の希ガスを入射する。

(3) 禁制線の観測

① LHD既設の50cm及び1.3m可視分光器を用いて可視域禁制線(2500-8000Å)を観測する。

② LHD既設の3m直入射真空分光器を用いて真空紫外域禁制線(300-2500Å)を観測する。

③ LHD既設のEUV分光器をの分解能を改善し、EUV域の禁制線(10-300Å)を観測する。

(4) 禁制線の放射機構を解明するためCRモデルを用いた計算コードを開発し、実験データに適用する。

4. 研究成果

(1) 高Z元素入射用不純物ペレットの開発
LHDに高Z不純物を入射し安定な放電を維持させるためには、計測可能な範囲でできるだけ入射量を少なくする必要がある。そこで、炭素ペレットの外側に高Z材料をコーティングする方法と高Z細線を埋め込む方法の2種類を考案した。図1はそれぞれの場合の高Z材料入射量と密度上昇を示す。形状は円筒を

仮定している。

円筒： $0.5^\phi \times 0.5\text{mm}^L$
細線： $0.2^\phi \times 0.5\text{mm}^L$
コーティング： $10\mu\text{m}$

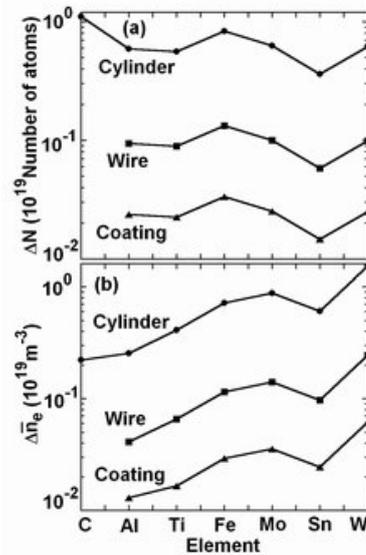


図1 高Z元素による密度上昇

作製したペレットの外形写真を図2に示す。Wワイヤーについては図を見て理解しやすいように長さを切断前の状態として示す。これら製作したペレットをLHDに入射してその特性を調べた。結果を図3及び4に示す。プラズマは崩壊することなく安定で、両者とも十分使用可能であることを確認した。

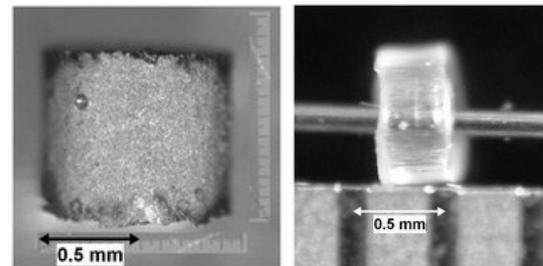


図2 左：Snコーティング 右：Wワイヤー

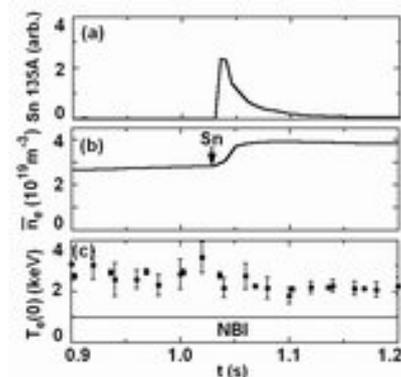


図3 Snコーティングペレット入射

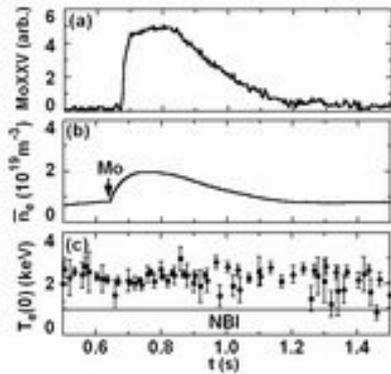


図4 Wヤイヤーペレット入射

(2) 不純物ペレットの溶発過程

不純物ペレット入射の放電に対する最適化を行うため、ペレット溶発プラズマの特性を研究した。不純物ペレットには炭素を用いた。CII スペクトルを観測し、そのシュタルク広がりから密度を計測した。おおよそ 10^{23} m^{-3} 付近にあり、溶発プラズマの容量は 10^{-5} m^{-3} 程度であることがわかった。入射したペレットはプラズマ途中で完全に溶発し、溶発した高Zイオンのほぼ全量が発光に寄与していることが判明した。

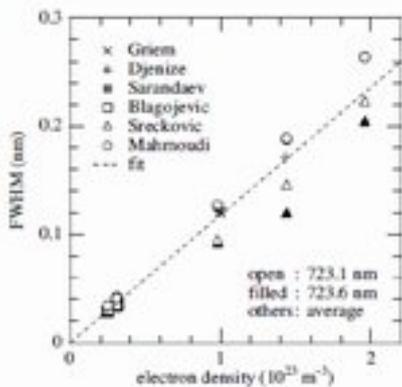


図5 炭素ペレット溶発プラズマ密度

(3) 分光器の改良と性能改善

可視域禁制線を精度よく観測するために可視分光器の結像イメージの改善を行った。収差補正のための入口ミラーに改良を加え調整したことにより、図6に示すような全てのファイバー像でほぼ円に近い結像を得ることができた。

次に、VUV 領域を精度よく観測するために 3 m 直入射分光器のミラー光学系と入口スリット位置の最適化を行った。その結果、図7に示すように高精度波長分解能と空間分解能が両立したシステムが完成した。

最後に EUV 分光器の波長精度向上と反射率の改善を行った。当初機械切り回折格子を使用していたが短波長側で回折格子の反射率が劣るため、ホログラフィック回折格子に変更した。結果として 50 \AA 程度までほぼ平坦な

反射率を得ることができた。

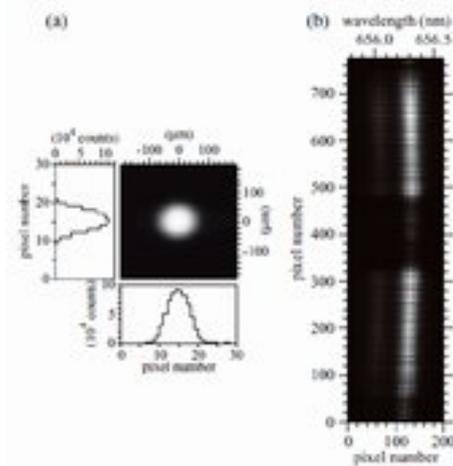


図6 (a)ファイバー像 (b)空間分布像

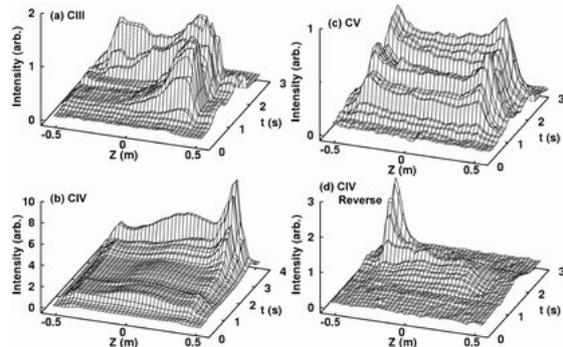


図7 3 m直入射真空分光器による空間分布計測 (a) CIII (977 Å), CIV (1548 Å), (c) CV (2270 Å), (d) CIII (磁場反転)

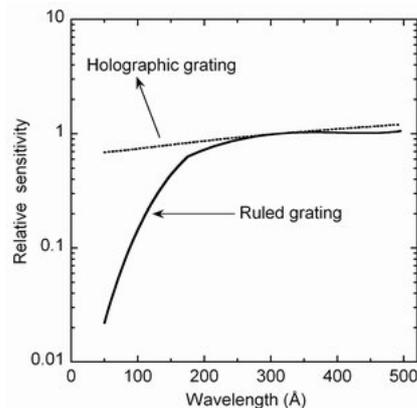


図8 ホログラフィック及び機械切り回折格子の反射率の比較

(4) Ar イオン禁制線のスペクトル観測

磁気双極子禁制線を可視から EUV 領域にかけて調べた。まず、Ar 放電を LHD で行い禁制線を観測した。多くの禁制線が LHD でも強く発光していることを確認した。実験室プラズマで Ar の禁制線を観測したのは初めてのこ

とである。これら同定したスペクトルが多価に電離されたArイオンの禁制線であるかどうかを確認するために、スペクトルのドップラー広がりからイオン温度を観測した。その結果得られた禁制線のイオン温度はその電離エネルギーと良い一致を示した。すなわち今回得た結果はArの禁制線に相違ないことが確実となった。確認したAr禁制線の一覧を表1にまとめる。理論的に予測されていた値とも良い一致を示している。

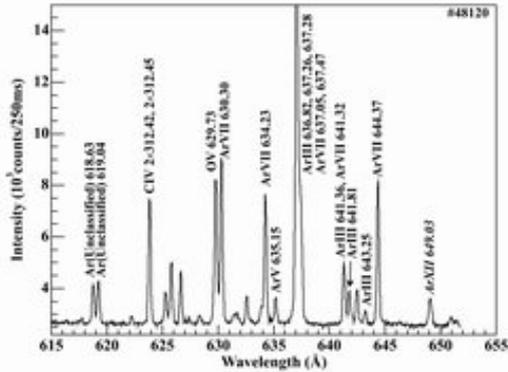


図9 ArXII禁制線（イタリック）の一例

表1 LHDで観測されたAr禁制線

Species	Transition	Theoretical wavelength (Å)	Observed	Estimated wavelength (Å)
ArXII ⁹	3d ² 3p ² 3s _{1/2} - 3p _{1/2}	648.63(6)	648.63	648.63 (0)
ArX ¹⁷	3d ² 3p ² 3s _{1/2} - 3p _{1/2}	648.63(6)	648.63(6)	648.63 (0)
ArXII ⁹	3d ² 3p ² 3s _{1/2} - 3p _{1/2}	648.63(6)	648.63(6)	648.63 (0)
ArXII ⁹	3d ² 3p ² 3s _{1/2} - 3p _{1/2}	648.63(6)	648.63(6)	648.63 (0)
ArXII ⁹	3d ² 3p ² 3s _{1/2} - 3p _{1/2}	648.63(6)	648.63(6)	648.63 (0)

(5) 高Zイオン禁制線のスペクトル観測

禁制線の波長も通常の（電気双極子遷移）スペクトルと同様、原子番号が大きくなると波長は短くなる。その様子を図10に示す。Si様イオンがその典型である。しかしながら、Ti様のイオンであれば全ての原子番号を有する禁制線が可視領域で観測可能である。そこで、この2種類のイオン系（Si及びTi様）に的を絞って研究を進めることとした。

不純物ペレット入射とガスパフを利用して高Zイオンを発光させ、そのスペクトル線を観測した。首尾よくKr, Mo, Xeからの禁制線を観測することができた。図11にはその一例を示す。KrXXIII, MoXXIX, XeXXXIIIと明示してあるスペクトルが禁制線である。他のスペクトルと比較すると明らかにスペクトル幅が広いことに気がつく。Wも入射したが、WLIIIの観測には残念ながらより高い電子温度が必要であり（Te=4keV程度必要）、観測することができなかった。しかしながら、今回の研究よりWにおいても十分なスペクトル線強度を持って可視域禁制線が観測できる確証を得た。ITERではTe=5-10keV程度が想定されており、Wの多価イオンが発光することは間違いなく、真空紫外分光器に頼るこ

となく、可視分光を用いてW挙動の診断が可能となることを実証した。

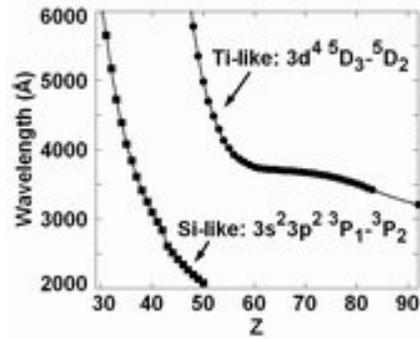


図10 禁制線波長の原子番号依存性

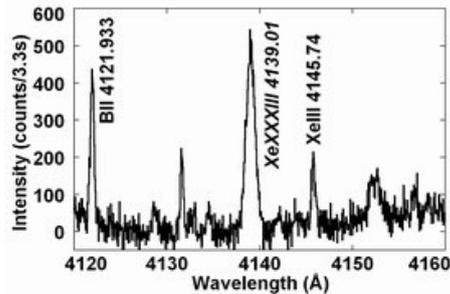
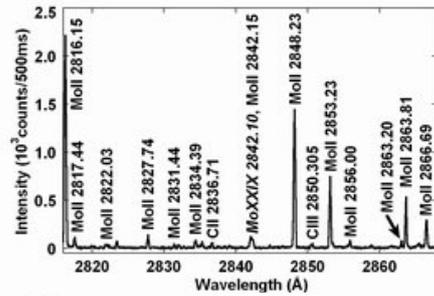
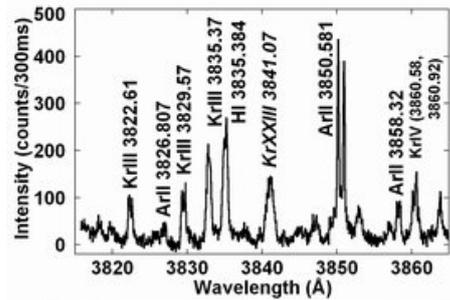


図11 高Z元素の禁制線（イタリック）

得られた高Zイオンからの禁制線を表2にまとめる。Kr (Z=36) 及び Mo (Z=42) についてはSi様禁制線, Xe (Z=54) についてはTi様禁制線を整理した。前述したようにTi様禁制線のWLIIIは観測することができなかったが、大事なスペクトルなので表示した。詳細に波長を調べた結果、今回決定した実験値はこれまでの理論計算値とは大きく異なっていることが判明した。これまで原子衝突実験で得られていた実験波長と比較してもLHDで観測された高Zイオンの波長精度ははるか

に高いことがわかる。これら誤差は禁制線のスペクトル強度に大きく依存しており、高温プラズマからの発光線強度が非常に明るいことを示している。本研究の実験結果は高Zイオンの原子構造の理論計算の修正に大きなヒントを与えるものと確信する。

表2 Si及びTi様高Zイオン禁制線

Spectra	Transition	Observed (Å)		Calculated (Å)	
		This work	Others	Others	Others
KrXXIII	$3s^2 3p^2$	3463.75±0.03	3464.5±0.6 [28]	3466.33 [1]	
(Kr ²⁷⁺)	$^3D_2 - ^3D_1$		3464 [9]	3438±2 [30]	
$E_p=990eV$			3466.5±0.2 [29]		
KrXXIII	$3s^2 3p^2$	3841.01±0.03	3840.9±0.3 [1,13,32]	3843.4099 [36]	
(Kr ²⁷⁺)	$^3P_1 - ^3P_2$		3840.8±2 [3]	3832±40 [3]	
$E_p=915eV$			3842.5 [33]	3845 [34]	
			3843.4±0.2 [33]	3837.9±0.5 [35]	
			3840.5±0.9 [14]		
			3842.5±0.2 [29]		
			3843±2 [34]		
			3843.346±0.002 [33]		
MnXXIX	$3s^2 3p^2$	2842.16±0.05	2843.5±0.2 [1,33]	2712.1531 [36]	
(Mn ²⁵⁺)	$^3P_1 - ^3P_2$		2846±2 [3]	2834±40 [3]	
$E_p=1590eV$					
KrXXIII	$3d^2 3d_2 - 3d_1$	4139.01±0.02	4139.4±2.0 [3]	3952.5 [2]	
(Kr ²⁷⁺)			4136±0.2 [30]	4130 [40]	
$E_p=1920eV$			4138.7 [33]	4079.3 [6]	
			4138.8±0.7 [14]	4036.59 [30]	
			4136±2 [34]	4052 [1,34]	
				4155.3 [34]	
				4156.44 [35]	
				4125.9 [38]	
				4138.3 [39]	
WLVII	$3d^2 3d_2 - 3d_1$		3626±2 [13]	3546.1 [2]	
(W ²³⁺)			3626.3±0.3 [14]	3524 [4]	
$E_p=6925eV$			3627.13±0.10 [12,20]	3608.3 [9]	
				3624.7 [34]	
				3625.68 [35]	
				3606.8 [38]	
				3627.2 [39]	

(6) 禁制線を利用した空間分布計測

禁制線を利用したプラズマ計測応用(イオン温度・空間分布計測等)の一例として可視域で観測した Ar 多価イオン径方向分布を図12に示す。真空紫外分光器で分布計測を行うよりはるかに利便性が高い。今後、より高Z材料が核融合研究に用いられることになればこの手法は大いに役立つ。

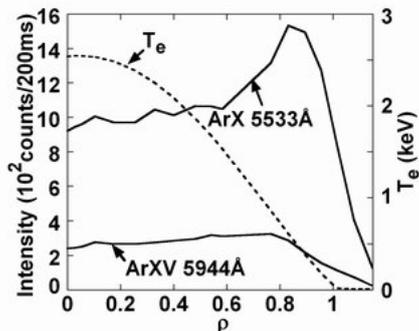


図12 可視域禁制線を利用したAr空間分布

(7) F様禁制線(ArX, TiXIV)強度の解析と高エネルギーイオン衝突の影響

ArXの部分エネルギーダイアグラムを図13に示す。禁制線5533Åの放射遷移確率が非常に小さいため、許容線165Åとの強度比は

電子密度の関数となる。CRモデルを構築し、実験データと比較した(図14参照)。絶対値はお互い少し異なっているが電子密度依存性ははっきりと現れている。禁制線は励起エネルギーが小さいためエネルギーの大きなところでイオン励起が電子励起よりも支配的となる(図15参照)。そこでNBIで励起される割合を実験値と比較した。もう少し低密度運転ができれば結果はよりはっきりしたと思われるが、禁制線を利用した高エネルギーイオンの計測に道を開いたものと確信する。

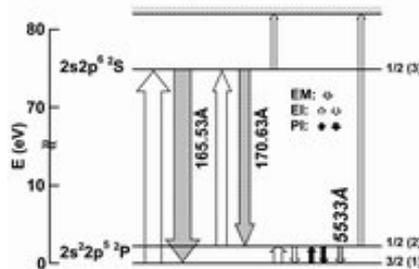


図13 F様ArXのエネルギーダイアグラム

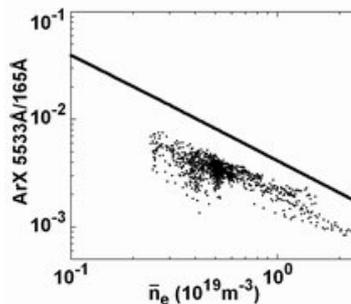


図14 ArX禁制線/許容線強度比の密度依存性

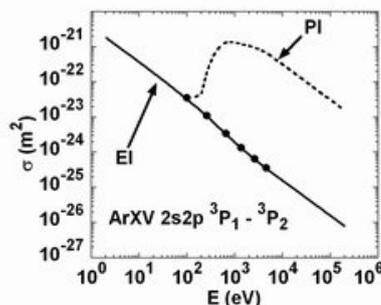


図15 ArXV電子及びプロトン衝突励起断面積

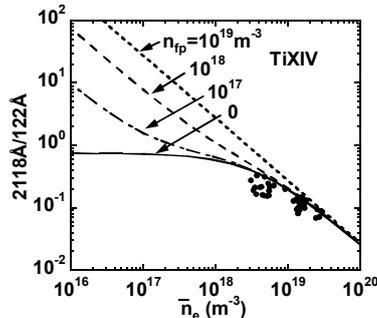


図16 TiXIV高エネルギーイオン励起影響

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 34 件)

① M.B.Chowdhuri, S.Morita, M.Kobayashi, M.Goto, H.Y.Zhou, S.Masuzaki, T.Morisaki, K.Narihara, I.Yamada, Y.Feng,

Experimental study of impurity screening in the edge ergodic layer of the large helical device using carbon emissions of CIII to CVI, Physics of Plasmas, 16, 掲載確定, 2009, 査読有

② M.B.Chowdhuri, S.Morita, M.Goto, Characteristics of an absolutely calibrated flat-field extreme ultraviolet spectrometer in the 10-30Å range for fusion plasma diagnostics, Applied Optics, 47, 2008, 135-146, 査読有

③ R.Katai, S.Morita, M.Goto, Identification and intensity analysis on forbidden magnetic dipole emission lines of highly charged Al, Ar, Ti and Fe ions in LHD, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 107, 2007, 120-140, 査読有

④ R.Katai, S.Morita, M.Goto, Observation of visible and near-UV M1 transitions from highly charged Kr, Mo and Xe ions in LHD and its prospect to impurity spectroscopy for D-T burning plasmas, Plasma Fusion Research, 2, 2007, 006-1-4, 査読有

⑤ A.Iwamae, A.Atake, A.Sakaue, R.Katai, M.Goto, S.Morita, Polarization separated Zeeman spectra from magnetic dipole transitions in highly charged argon in the large helical device, Physics of Plasmas, 14, 2007, 042504-1-8, 査読有

⑥ R.Katai, S.Morita, M.Goto, Observation of forbidden magnetic dipole transitions emitted from highly charged argon in LHD discharges, Journal of Plasma Fusion Research SERIES, 7, 2006, 9-13, 査読有

[学会発表] (計 32 件)

① 董春鳳, Radial profile measurement of impurity line emissions using EUV spectroscopy in LHD, 日本物理学会 2009 年春季大会, 2009 年 3 月 30 日, 立教大学・池袋キャンパス

② 森田繁, LHD における水素ペレット入射後の不純物の振舞い, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 23 日, 岩手大学・上田キャンパス

③ 森田繁, 燃焼プラズマにおける磁気双極子禁制線を用いた不純物及び α 粒子計測の可能性, 日本物理学会 2007 年秋季大会, 2007 年 9 月 21 日, 北海道大学・札幌キャンパス

④ 片井隆志, LHD における高 Z イオンの禁制磁気双極子 (M1) 遷移に関する分光学的研究, 日本物理学会 2007 年春季大会, 2007 年 3 月 19 日, 鹿児島大学

⑤ 片井隆志, LHD での高速陽子衝突を考慮した禁制磁気双極子 (M1) 遷移発光線の研究, 日本物理学会 2006 年春季大会, 2006 年 3 月 30 日, 愛媛大学

⑥ 片井隆志, LHD におけるアルゴン多価イオン禁制磁気双極子 (M1) 発光線強度の解析, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 2005 年 9 月 19 日, 同志社大学・田辺キャンパス

[図書] (計 1 件)

① 森田繁, コロナ社, プラズマ診断の基礎と応用, 2006, 319-326

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 繁 (MORITA SHIGERU)
核融合科学研究所・
大型ヘリカル研究部・教授
研究者番号: 80174423

(2) 研究分担者

後藤 基志 (GOTO MOTOSHI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・
助教
研究者番号: 00290916

武藤 貞嗣 (MUTO SADATSUGU)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・
助教
研究者番号: 40260054

(3) 連携研究者