〔研究〕

逆磁場ピンチ型プラズマ閉じ込め装置TPE-RXに設置した多点発光観測システムによるプラズマ壁相互作用の研究

Plasma Wall Interaction of a Reversed Field Pinch MachineTPE-RX Measured by a Multipoint Photoemission Monitering System

長壁　健　T. OSAKABE
関根重幸　S. SEKINE
小口治久　H. KOGUCHI
榊田　創　H. SAKAKITA
八木康之　Y. YAGI
平野洋一　Y. HIRANO
島田寿男　T. SHIMADA
高橋　努　T. TAKAHASHI
野木靖之　Y. NOGI

A multipoint photoemission monitoring system was constructed for a plasma confinement machine TPE-RX. Thirteen ports distributed for the inboard side of the torus were used to measure UV and visible emission of impurities. The time evolution of the line emission of iron and molybdenum was observed. The ununiform distribution of the impurity emission inside the torus was apparent. The interacting position between plasma and vacuum vessel was different for shot by shot. In some cases, the position rotated along toroidal direction, or otherwise fixed, on a certain position.

§１　.はじめに

電総研では，制御熱核融合を目指したプラズマ閉じ込め研究のために逆磁場ピンチ（reversed field pinch: RFP）型装置を用いた実験を行っている[1)]。1997年末にTPE-RX装置が完成し，1998年春よりプラズマ実験[2)]を開始した。TPE-RX装置では，以下の２つの観点から不純物の発生，および拡散のメカニズムを調べるための分光システムを整備している。第一には，プラズマによって装置の真空容器内壁面に局所的なプラズマの接触が起きていないか調べ真空容器の損傷を防止することを目的とした金属原子の観測，および，第二に，不純物が多く混入すると，プラズマの温度が上がらなくなるなどの害があるので，混入した不純物の挙動を把握し，プラズマ閉じ込め性能の向上を目指すための炭素，酸素および金属不純物の観測を目的としている。

プラズマ中の不純物のほとんどは，真空容器壁の材料そのもの，容器内壁表面の酸化物や炭化物などに由来する酸素，炭素，あるいは，プラズマ点火前に容器壁面に吸着している水分や有機物などである。これらの不純物はプラズマ点火後に，プラズマ壁相互作用（PWI）により放出され，プラズマ内に拡散する。不純物がプラズマ容器内のどの位置で放出され，どのような経路で，どのくらいのタイムスケールでイオン化，拡散していくかを調べるためには，不純物の発光スペクトルを観測することが有力な計測方法である。この場合，トーラスのトロイダル方向[3)]のいくつかの点において発光強度の時間変化を記録して，それぞれの位置での強度変化から発生場所，拡散経路を推定する。局所的にプラズマが壁に接触するなどの異常が見つかった場合には，閉じ込め磁場をつくるコイルに流す電流などを制御して，真空容器内壁の損耗を防ぐことが必要である。

ところで，従来我々が保有していた分光器の台数は少なく，十分な位置依存の情報を得る実験を行うには不十分であった。通常，原子の発光スペクトルの観測に使われるような分光器は非常に高価であり，台数を多く設置するのが困難である。そこで，我々は最近液体クロマトグラフィーの検出器に利用されるような小型で安価な分光器に着目した。これらの分光器は従来用いていたものに比べて波長分解能が悪く，迷光も多いが，予備実験で

KEY WORDS : 核融合プラズマ，逆磁場ピンチ，発光スペクトル，不純物，TPE-RX

不純物モニターとして十分利用できることがわかった。本論文では，TPE-RX装置と多点発光観測システムの概要と，分光器４台を用いた予備実験の結果を報告する。

§２　実　験

２.１　TPE-RX装置の概要

図１にTPE-RX装置の写真を示す。写真撮影時には装置周辺の真空排気システムおよび計測システムはまだ設置されていない。**図２**にTPE-RX装置のプラズマ形状を示す。プラズマは大半径が1715mm，小半径が450mmのドーナツ型である。本実験においてTPE-RXで生成されるプラズマは，最大プラズマ電流が約250kAになるようにコイル系電源の充電電圧を設定した。この時の放電持続時間は50-70msであった。放電ガスには水素または重水素を用いた。

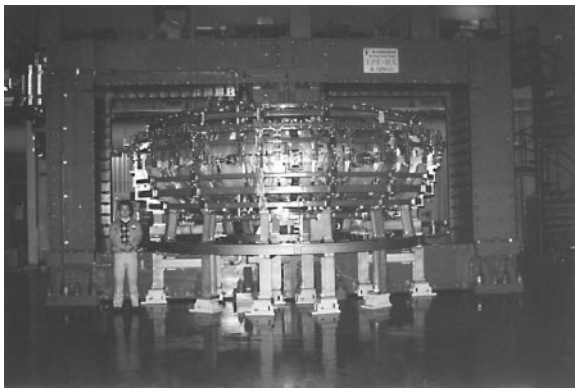

図１　TPE-RX装置の写真。青の部分が鉄心，茶色の部分がオーミックヒーティング用などのコイル，コイル内側のアルミ製の部分が厚肉シェルで，シェルの内側に真空容器が設置されている。

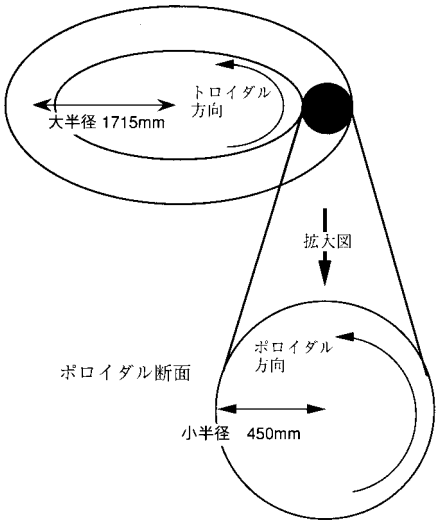

図２　逆磁場ピンチ装置TPE-RXのプラズマ形状の概略。プラズマはドーナツのような形状をしており，これをトーラス型と呼ぶ。ドーナツの輪に沿った方向をトロイダル方向と呼ぶ。

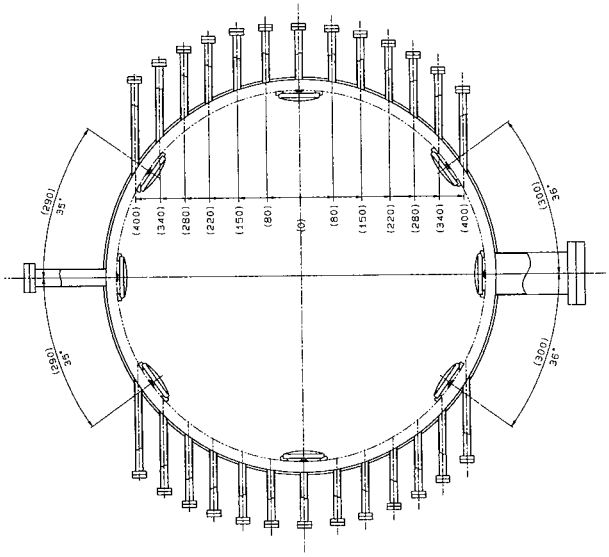

図３　セクション２のポロイダル断面図。ポートとリミターの配置を示す。ポート接続部とリミタ設置位置はトロイダル方向にずらされている。左側がインボード側。

TPE-RX装置のトロイダルコイルとオーミックヒーティングコイルにどのようなタイミングで何アンペアの電流を流すかによって生成されるプラズマの状態が変わる。とくにトロイダル逆転磁場の強度を変化させてＲＦＰプラズマのピンチパラメータを変えることにより生成されるプラズマに大きな違いが現れる。また，垂直磁場をかけることで，プラズマの大半径を縮める位置制御ができるので，プラズマをインボード側に寄せることが可能である。これにより，壁との接触がインボード側で起こりやすいか，アウトボード側で起こりやすいかを制御できる。

真空容器は炭素含有量の少ない非磁性ステンレス鋼（SUS316L）でできており，全体が１６のセクションに分割されている[4]。各セクションはベローズ部と単管部からなり，単管部にポートが接続されている。トーラス内側赤道面（インボード側）１５ケ所とトーラス外側赤道面（アウトボード側）１６ケ所に水平ポートが接続されており，外側ポートのうち５本は真空排気用に使われている。その他に，赤道面上でトーラスのトロイダルの接線方向を観測するための接線ポートが６ケ所，真空容器の上下側に垂直ポートが６５本ずつ配置されている。垂直ポートは各セクションによって本数および太さが異なるが，例えば真空容器の第２セクションにおいては上下にそれぞれ１３ケ所設置されていて，分光トモグラフィ実験ができるようにデザインされている。第２セクションのポート配置を**図３**に示す。フランジサイズはア

ウトボード側がICF152，インボード側および接線ポートがICF70，垂直ポートがICF34である。

TPE-RXでは，プラズマから真空容器内壁を保護するためにモリブデン製のリミタが設置されている[5]。１セクションあたりのリミタ設置個数は１４個，プラズマがもっとも真空容器と接触すると考えられるシェルギャップセクションでは３４個，真空容器全体で合計２４４個設置されている。前実験装置のTPE-1RM20[6]に於いてもモリブデン製リミタが使われていたが，通常放電中でもモリブデンの発光スペクトルが観測されることから，TPE-RXではリミタ表面での発光を観測しないように，各ポートの視線方向にはリミタを設置していない。リミタの配置例を図３に示した。図ではわからないが，ポートの接続位置とリミタ設置位置はトロイダル方向にずらしてある。

２.２多点発光観測システム

TPE-RX装置で生成されたプラズマに含まれる代表的な不純物として，真空容器（ステンレス鋼製）およびリミタ（モリブデン製）からスパッタリングによって放出される金属元素，大気開放時に容器内に混入する水分や有機物が考えられる。また，大気開放時には容器内壁面に金属酸化膜が生成されることで酸素を取り込むことも予期される。**表１**には，多くの実験装置で観測された実績のある紫外，可視領域の不純物スペクトル線を示す。

表１　TPE-RXのプラズマ中で発光すると考えられる不純物のスペクトル線の波長

モリブデン原子	Mo	313.2 nm (in vacuum)
モリブデン１価イオン	Mo^{+}	281.6
鉄原子	Fe	302.2
鉄１価イオン	Fe^{+}	260.0
クロム原子	Cr	276.3, 276.5
クロム１価イオン	Cr^{+}	267.8, 276.7
炭素原子	C	247.9
炭素１価イオン	C^{+}	227.0
炭素２価イオン	C^{2+}	229.7
炭素３価イオン	C^{3+}	252.4
炭素４価イオン	C^{4+}	227.1
酸素原子	O	615.8
酸素１価イオン	O^{+}	441.6
酸素２価イオン	O^{2+}	326.4
酸素５価イオン	O^{5+}	381.2
ホウ素１価イオン	B^{+}	412.2
ホウ３価素イオン	B^{3+}	282.2

表２　個々の装置の性能

分光器	形式	FastieEbert in-line type
	焦点距離	74 mm
	ブレーズ波長	250 nm
	F値	3.9
	波長範囲	200 - 800 nm
	グレーティング	1800 /mm　20 mm square
	逆分散	7.41 nm/mm
	スリット	入射 50 μm x 4 mm
		出射 50 μm x 4 mm
光ファイバー	コア径600 μm、７本バンドル　または	
	コア径230 μm、19本バンドル	
	波長範囲	190 - 800 nm
フォトマルチプライヤー	浜松ホトニクス	R955
	光電面	マルチアルカリ
	波長範囲	160 - 900 nm
	磁気シールド	パーマロイ　t=0.8 mm
プリアンプ	浜松ホトニクス	C1556
	周波数レンジ	DC-10kHz

本研究で用いた多点発光観測システムは複数台の分光器を用いてプラズマのいくつかの異なる場所で同時に発光スペクトルを観測するシステムであり，真空容器に設置されているどのポートにも手軽に設置できる点を特長としている。このために分光部，光検出部，プリアンプを一つにまとめ，電源部もプラスチック製の小箱に入れて小型軽量化し，装置周辺で他の計測システムの障害とならずに設置できるようにした。また，表１より紫外域に観測したいスペクトル線が多いので，とくに紫外域で充分な性能を発揮できる光ファイバ，分光器，フォトマルを選択した。**図４**にシステムの分光部の概略を示す。１枚のアルミ板上にファイバー取り付け具，回折格子分光器（Optometrics社製DMC1-02）とフォトマルホルダが固定されている。フォトマルチプライヤ（浜松ホトニクス社製R955）は160-900nmの領域で有効な感度を持っている。フォトマルホルダにはソケットと一体型のプリアンプ（浜松ホトニクス社製C1556）が内蔵されている。プラズマ閉じ込めのための磁場の影響を避けるため磁気シールドカバー（浜松ホトニクス社製E989）をフォトマルフォルダ内に設置した。それぞれの仕様を**表２**に示す。UVグレード光ファイバはコア径230μmで19本バンドルのものとコア径が600μmで7本バンドルのものを用いた。**図５**に示すように，ファイバのプラズマ側の末端では，円形集光レンズの焦点の光を取り込むためにコア線が円状に配列されており，分光器側ではスリット形状

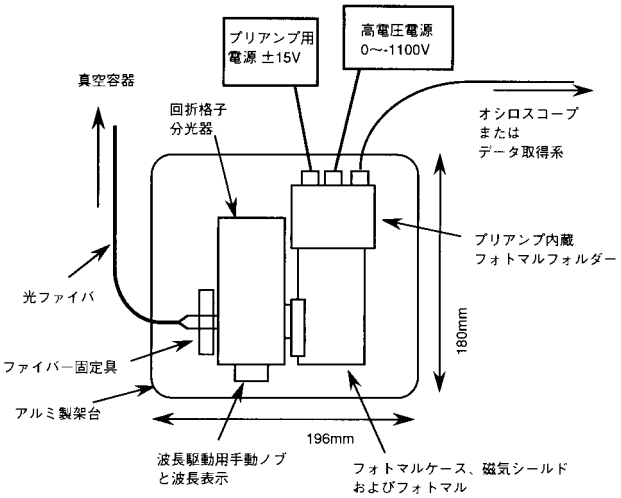

図４　分光部の概略。

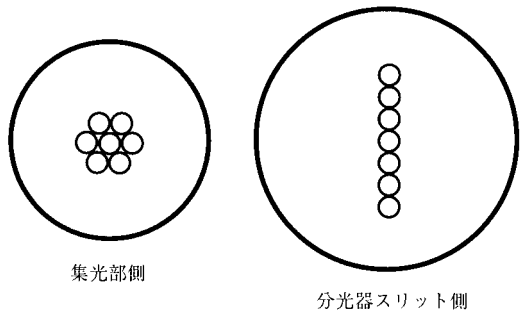

図５　光ファイバー両端のコアの配置。７本バンドルのものを例示する。19本バンドルでは，集光部側で外側にもう一周するようにコア線が配置される。

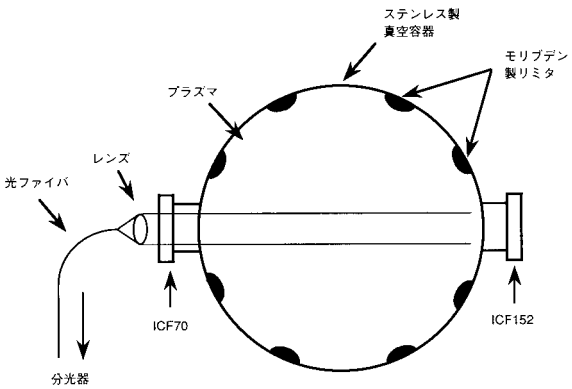

図６　真空容器のポートに設置した集光部による集光の様子。

に合わせて一列に並べてある。

真空容器のインボードサイドの１３ケ所には，装置組立時よりガラス窓，集光レンズとＵＶグレード光ファイバが設置してあり，任意のファイバを引き出して分光器に接続することができる。また，上下の垂直ポート，アウトボードサイドのポートおよび接線ポートの数ケ所にガラス窓が取り付けてあるので，必要に応じてレンズの付いた光ファイバ取付具を用いて光ファイバを接続できる。この予備実験に用いた分光器は合計で４台あり，観測ポートを選んで取り付け実験を行った。**図６**に集光光学系の配置を示す。図では見やすくするためにポート部分を拡大して描いた。ポートには合成石英製の窓を取付け，その外側に合成石英の光学レンズ（f=60mm）およびＵＶグレードの光ファイバを接続する治具を設けて，プラズマの発光を分光部に導いた。真空容器窓の外側に設置したレンズの焦点位置に光ファイバーの端面が設置してあるので，レンズの光軸に平行に入射した光のみを分光器に導く。

He-Neレーザー(656.2nm)を用いて分光器の波長分解能を調べたところ，半値全幅(FWHM)は分光器によりばらつきがあるものの１nm以下であった。また，時間分解能はプリアンプの周波数特性より100μsである。データ取得のサンプリングタイムは10μsに設定した。

§３　実験結果と考察

真空容器内で，局所的なプラズマと壁との相互作用(PWI)を調べるために，各セクションのインボード側ポートに順次分光器を接続して約250kAの電流値の標準的な条件で放電を行いモリブデン原子の発光観測を行った。その結果，特定の場所に集中したPWIが全てのショットで起こるセクションはないことが確認された。このことは，放電容器各所に取り付けられた熱電対のデータからも確認された。高周回電流の実験を行うときにはその都度本実験と同様の測定を行う予定である。

真空容器の損耗の推定，および，プラズマへの不純物の放出量の予測の観点から，PWIがある特定の場所で生じた場合，それが起こりはじめた位置で放電持続時間中ずっと継続するのか，別の場所へと移動していくのかを調べる必要がある。これは，プラズマ中の磁場揺動のロックトモードと関連してプラズマ閉じ込め特性を向上させる上で重要な情報となる。

放電条件を変化させることにより，PWIの様相が変わることは十分に予想されるので，トロイダル周上の４分割点であるセクション（以下S）1，4，8および12の赤道面内側ポートからの発光を数週間定常的にモニターした。この結果，PWIがほとんど起こらない放電は少なく，特定のセクションで単発的にPWIが起こる場合，PWIが起こっている位置がトロイダル周回上を移動している場合などが観測された。

図７には，放電の持続時間中に渡って強いPWIが無かった場合（shot No.4875）のMo^{+}イオンの発光スペクトルの

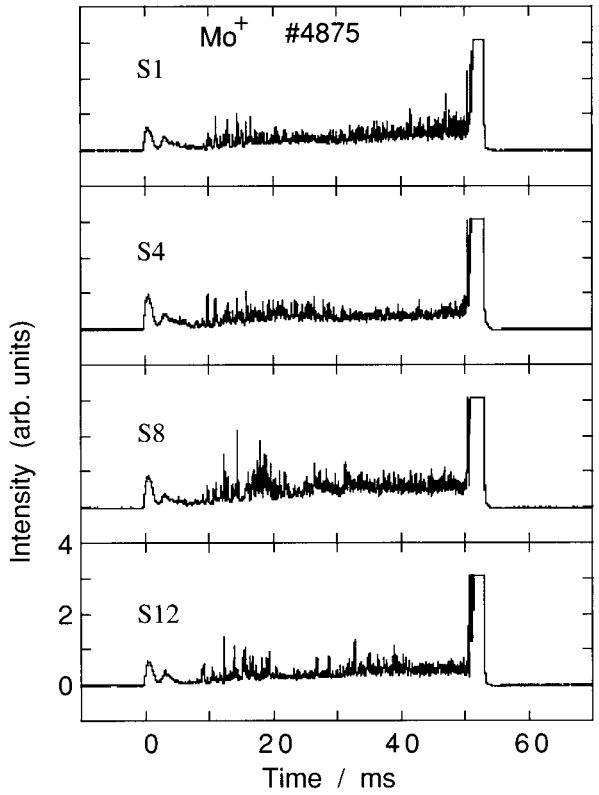

図７　shot No. 4875の放電のモリブデンイオン（Mo^+，281nm）発光の時間変化。

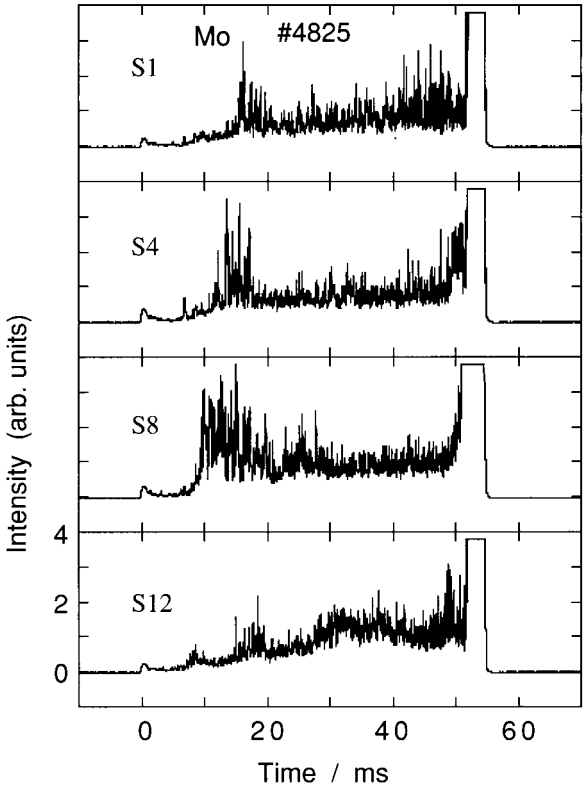

図９　shot No. 4825の放電のモリブデン原子（Mo，313nm）発光の時間変化。

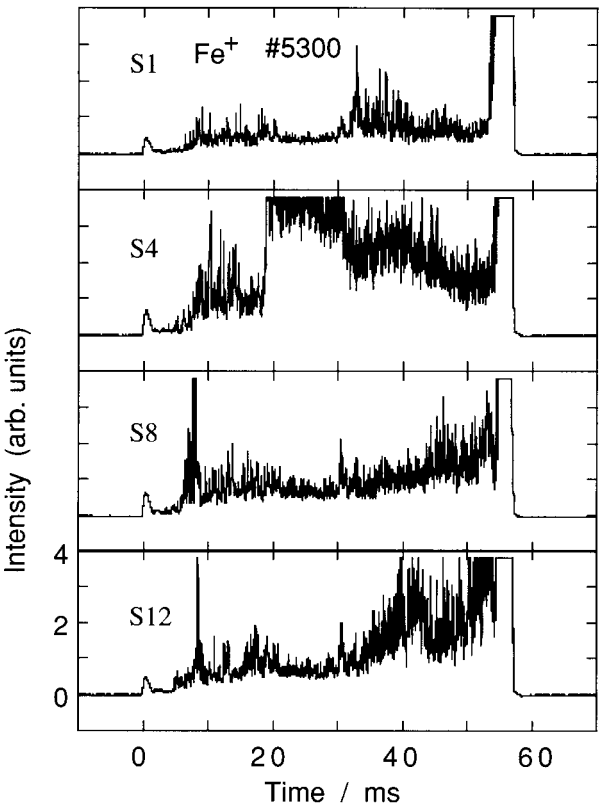

図８　shot No. 5300の放電の鉄イオン（Fe^+，260nm）発光の時間変化。

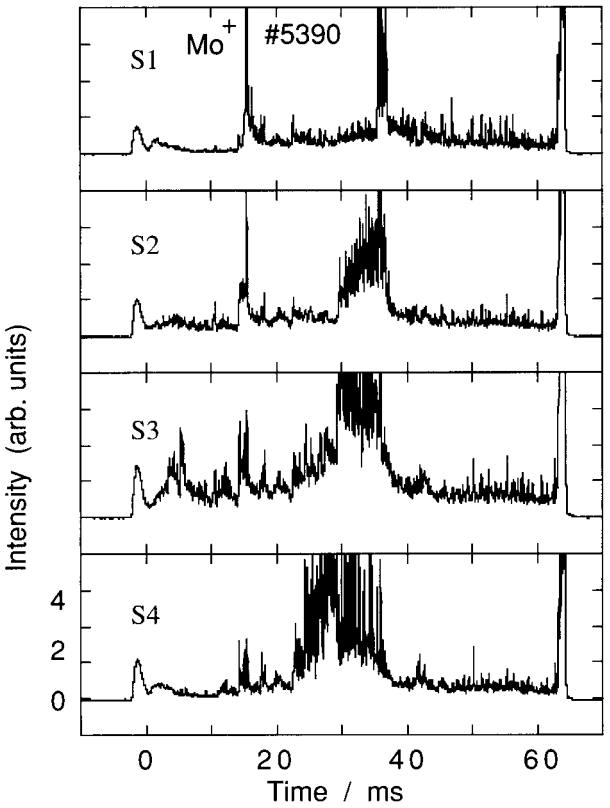

図10　shot No. 5390の放電のモリブデンイオン（Mo^+，281nm）発光の時間変化。

時間変化を示す。放電開始直後のピークは可視領域で最も強く光っている重水素原子の発光の迷光による。その次に見られる小さなピークは，観測しているMo^{+}イオンの発光線に近い波長領域にあるC^{2+}，C^{3+}，O^{2+}あるいはO^{3+}などのイオンによるものと推定されるが，同定はできていない。その後10ｍｓ付近から生じるショットノイズ的なピークを含んだ信号がMo^{+}イオンの発光である。そして，放電終了時の大きなピークは，プラズマが消滅時に制御不能になり壁に接触して壁材料がまとめて放出され生じているものと考えられる。この例も含めて，全ての放電で，量の多少はあるものの，必ず壁面あるいはリミタ材料の金属原子およびイオンのスペクトルが観測された。

図８に示した放電（shot No.5300）では鉄イオン(Fe^{+})のスペクトル線をモニターした。Ｓ４で特に強いＰＷＩがt=20ms頃から起こり，約12ms間続いた。この間，他のセクションでは発光が弱くなっているのが明瞭に観測された。これは，S4付近のPWIによりプラズマが冷却されたことにより，他のセクションでのＰＷＩが弱まったと考えられる。

図９にはshot No.4825の放電のモリブデン原子の発光スペクトルの時間変化を示す。このショットではS8付近で放電開始10ms頃に生じたPWIがトロイダル周上をS4，S1方向へ移動している様子がとらえられた。放電容器のベローズ部のアウトボード側の温度モニターによるとＳ８付近での温度上昇が他の位置より高かったことが観測されており，PWIと温度上昇の相関が確認された。

図１０に示した例（shot No.5390）では，分光器のモニター位置をS1，S2，S3およびS4とした。このMo^{+}イオンの観測では，発光が強い時間帯がS4（t=25-35 ms）からS1（t=～33ms）方向に移動しており，S4での発光強度の増加の持続時間（約15ms）よりS1での持続時間が明らかに短いことがわかる。もし，S4付近でのPWIによって放出された不純物が拡散して行くなら，観測結果とは異なり下流側に行くほど長時間に渡って不純物量の増加が観測されるはずである。観測結果からS1でのシャープな発光強度増加（t=33ms付近）が読みとれるので，PWIを起こしている位置が移動していることがわかる。

以上の例で見たように，TPE-RXプラズマ内には，壁面から放出された金属原子が混入し，イオン化していることが確認された。金属不純物の発生は，容器内で一様に起こるのではなく，特定の場所に集中することがわかった。しかし，発生場所はショットごとに異なり，また，発生部位がショット中固定する場合と移動する場合があることが見いだされた。今後，それぞれの現象が起こる場合の放電条件との相関や，あるセクションで発生した場合，ポロイダル断面のどの位置（容器の内側，外側，上側あるいは下側）なのか，ベローズ部に集中しているのかなどを明らかにして将来の高周回電流放電実験の実現に向けてプラズマ壁相互作用による容器損耗の対策方針を固める必要がある。

§４　まとめ

焦点距離74ｍｍの小型分光器を，プラズマ内不純物のモニター用に活用できることがわかった。観測した真空容器材料に由来する不純物のスペクトル線強度の時間変化から，不純物が容器内で一様に発生するのではなく，局所的に放出されていることがわかった。放出場所はショットごとに異なり，放電持続時間中同じ場所で放出される場合と移動する場合があることがわかった。今後，分光器の台数を増やして高電流領域の実験に向けてモニターシステムを充実させる計画をすすめる。

また，多点発光計測システムは，TPE-RXの第２セクション（図３）に設置してある紫外可視域の発光のトモグラフィーポートを利用して，プラズマ内の発光強度の断面解析にも利用する予定である。

参　考　文　献

1) Y. Hirano *et al.*, "Improved Confinement in a High Pinch Parameter Region of the Reversed Field Pinch Plasma", Nucl. Fusion **36** (1996)721-733.
2) Y. Hirano, *et al.*, "Reversed Field Pinch Experiment on a New Large Machine, TPE-RX", *Proc. 17th IAEA Fusion Energy Conference*, IAEA-CN-69/EX4/4, to be published.
3) 図２参照.
4) 関根重幸他，" 電総研次期RFP型プラズマ閉じこめ装置TPE-RXの真空システム",真空**40** (1997)152-155.
5) 関根重幸他，" 逆磁場ピンチ型プラズマ閉じ込め装置TPE-RXのリミタデザイン", 電総研彙報**61**(1997) 449-452.
6) S. Sekine *et al.*, "Energy Distribution of Deuterium Atoms Recycling on Molybdenum Limiter Surface", J. Nucl. Mater. **220-222** (1995) 1135-1139.

(1999. 2.17受付)

著　者　紹　介

長　壁　　健
Takeshi OSAKABE
日本大学大学院理工学研究科物理学専攻
核融合プラズマの計測の研究に従事。

関　根　重　幸
Shigeyuki SEKINE
エネルギー基礎部　逆磁場ピンチラボ
E-mail: sekine@etl.go.jp
分子科学，真空科学，核融合プラズマの研究に従事。

小　口　治　久
Haruhisa KOGUCHI
エネルギー基礎部　逆磁場ピンチラボ
E-mail: koguchi@etl.go.jp
磁場閉じ込めプラズマの研究，プラズマ計測の研究に従事。

榊　田　　創
Hajime SAKAKITA
エネルギー基礎部　逆磁場ピンチラボ
E-mail: sakakita@etl.go.jp
磁場閉じ込め，核融合プラズマの特性診断の研究に従事。

八　木　康　之
Yasuyuki YAGI
エネルギー基礎部　逆磁場ピンチラボ
E-mail: yagi@etl.go.jp
高効率磁場閉じ込め，核融合プラズマの研究。特に逆磁場ピンチプラズマの閉じ込め特性の研究に従事。

平　野　洋　一
Yoichi HIRANO
エネルギー基礎部　逆磁場ピンチラボ
E-mail: yhirano@etl.go.jp
核融合研究，磁場による高温プラズマの閉じ込め，炉心プラズマの生成・制御逆磁場ピンチの研究に従事。

島　田　寿　男
Toshio SHIMADA
エネルギー基礎部　逆磁場ピンチラボ
核融合研究，軟X 線計測による高温プラズマの閉じ込め，逆磁場ピンチの研究に従事。

高　橋　　努
Tsutomu TAKAHASHI
日本大学理工学部物理学科　核融合研究室
磁場反転配位プラズマの閉じ込め，コンピュータートモグラフィーの研究に従事。

野　木　靖　之
Yasuyuki NOGI
日本大学理工学部物理学科　核融合研究室
E-mail: nogi@pyxis.cst.nihon-u.ac.jp
磁場反転配位プラズマの閉じ込め，高楕円率スフェリカルトカマクの研究に従事。