

小特集 マルチスケールでのプラズマ・壁相互作用の理解の現状

2. マクロスケールのプラズマ・壁相互作用

坂本 瑞樹

九州大学応用力学研究所

(原稿受付：2008年9月19日)

プラズマ・壁相互作用(PWI)の制御は、プラズマの長時間定常運転のための重要な課題のひとつである。このためには、材料のミクロスケールな現象からプラズマ制御に関わるマクロスケールな現象まで総合的に理解することが必要となる。ここでは、マクロスケールの観点から特に水素リサイクリングおよび材料の損耗と損耗後の不純物の輸送、再堆積に注目して、PWI研究の現状、課題を紹介する。また、PWIを考える上で重要なプラズマ放電後の壁の状態変化についても紹介する。

Keywords:

plasma-wall interaction, particle balance, erosion, deposition, co-deposition, wall inventory, hydrogen retention

2.1 はじめに

プラズマ・壁相互作用(PWI)に関する現象をマクロスケールな観点で考えるに先立ち、水素原子の視点でその振る舞いを概念的に見てみる。まず、水素原子はボンベの中から狭い配管やバルブを通り、広い真空容器内に飛び出し、スクレブオフ層(SOL)へと進入していく。そこには猛スピード(数eV~数十eV程度)で飛び交う水素イオンと電子が存在し、それらとの衝突によって結合していたもうひとつの水素原子と解離させられてしまう。この解離により数eVの運動エネルギーを得るが、数十cm程度も進んだところで、やはり衝突等によって電子を失いイオン化し、磁力線の回りを螺旋運動するようになる。一部の水素イオンは輸送等により磁力線を横切りコアプラズマまで到達する。コアプラズマの水素は外部からの加熱により高温状態となっている。このコアプラズマまで到達した水素イオンは荷電交換反応により高速の中性粒子となって第一壁へと衝突、またはコアプラズマからの拡散等によりダイバータやリミターへと衝突する。この第一壁、リミター、ダイバータでは、衝突した水素の一部は反射してプラズマへ戻り、残りは材料中に吸蔵される。材料中に吸蔵された水素の一部はミクロスケールのトラッピングサイトに長期間捕捉され、一部は拡散により材料表面まで到達し、他の水素と再結合して真空容器内に戻り、再びプラズマとなる。このようなプラズマとプラズマ対向壁(第一壁、リミター、ダイバータ)との水素の循環が水素リサイクリングと呼ばれるものである。

高速の荷電交換中性粒子や水素イオンとの衝突により、プラズマ対向壁の材料原子はスパッタリングされ不純物原子として真空容器内に放出される。この不純物原子は、真空層、SOL、コアプラズマ内を移動し、プラズマ対向壁のどこかに再堆積する。この不純物原子が水素を巻き込んで

再堆積する場合には、壁表面での水素吸蔵は放電時間とともに増加し続けることになる。

水素リサイクリングに伴う壁の水素吸蔵・放出は、コアプラズマの密度制御ならびに核融合炉でのトリチウムインベントリと密接に関係しており、プラズマ対向壁の損耗はプラズマ対向機器の寿命を左右する現象である。本章では、マクロスケールの観点から、水素リサイクリングおよび材料の損耗と損耗後の不純物の輸送、再堆積について説明する。また、プラズマ・壁相互作用を考える上で忘れられがちなプラズマ放電後の壁の状態変化についても紹介する。

2.2 マクロスケールの水素粒子バランス

前節で述べた水素の振る舞いを、真空容器内の巨視的粒子バランスの観点から考えると図1のような概略図として書くことができる。また、これを粒子バランスの式で書くと

$$\frac{dN_H^0}{dt} + \frac{dN_H^p}{dt} = \Gamma_{\text{fuel}} - \Gamma_{\text{pump}} - \Gamma_{\text{wall}} \quad (1)$$

のようになる。ここで、 N_H^0 、 N_H^p はそれぞれ真空容器内の中性およびイオンの水素原子数を表している。 Γ_{fuel} は外部から単位時間に真空容器内に供給された水素原子数であり、ガスバフ、ペレット入射、中性粒子入射(NBI)等により供給される。 Γ_{pump} は外部排気装置(ターボ分子ポンプ、クライオポンプ等)により単位時間に真空容器外部に取り除かれた水素原子数である。 Γ_{wall} は壁排気速度(wall pumping rate)と呼ばれ、壁が単位時間に吸蔵した水素原子数を意味するが、正確には

$$\Gamma_{\text{wall}} = \int (\gamma_{\text{ab}} - \gamma_{\text{re}}) ds \quad (2)$$

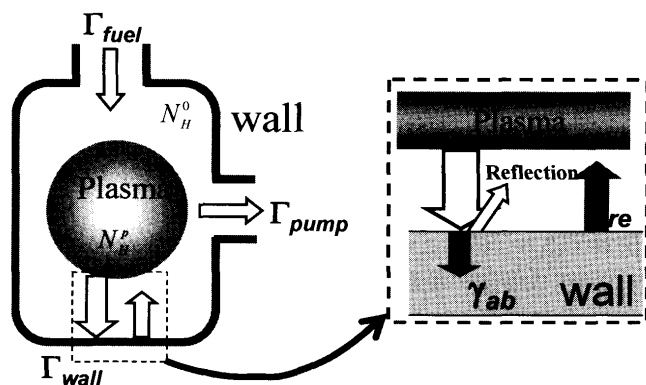


図1 真空容器内の水素粒子バランスの概念図。

と書かれ、局所的な壁の水素吸蔵率 (γ_{ab}) と水素放出率 (γ_{re}) のバランスを真空容器内構造物の全表面積で積分したものである。すなわち、 Γ_{wall} が正の時には壁は巨視的に水素を吸蔵し (sink), 負の時には放出すること (source) を意味する。ここで、注意しなければならないことは、壁が全体として水素を放出したり吸蔵したりしているわけではなく、壁表面のどこかでは水素を吸蔵し、どこかでは水素を放出していて、その積分量を Γ_{wall} という壁排気速度として我々が評価しているということである。また、この壁排気速度を時間で積分することで、壁インベントリーを評価することができる。このような粒子バランスの研究においては、真空容器内のどこが sink となり、どこが source となっているかを理解すること、水素吸蔵、放出のメカニズムを理解すること、ダストがどの程度壁排気速度に寄与しているかを理解すること等が重要である。このためには、次章以降で説明されるメソスケール、ミクロスケールでの PWI の理解が必要不可欠となってくる。

さて、長時間プラズマ中の壁の水素吸蔵の一例として、図2に Tore Supra の6分放電と TRIAM-1M の5時間16分放電での壁インベントリーの時間変化を示す[1, 2]。TRIAM-1M のプラズマ対向材はステンレスとモリブデンの高Z材、Tore Supra はステンレスとカーボンだが、両者ともに放電中の壁インベントリーが時間とともにほぼ線形に増加していくことに気がつく。両装置の共通点はもうひとつあり、図2に示すような壁インベントリーの線形増加はプラズマ対向壁の温度上昇を抑制した結果によっているということである。Tore Supra においては、CIEL プロジェクトによりほとんどすべてのプラズマ対向壁が強制冷却され、放電中の温度上昇の抑制に成功した[3]。TRIAM-1M では、冷却能力に優れた可動リミターを用いてプラズマの熱負荷を可動リミターに集中させ、放電中の真空容器温度が60℃以下に抑制された[2, 4]。すなわち、式(2)での γ_{re} を抑制することにより、 $\Gamma_{wall} > 0$ となっているわけである。Tore Supra, TRIAM-1M においても、それぞれ、CIEL プロジェクト前、可動リミター使用前の長時間放電において壁飽和現象が観測され、長時間放電中に密度制御不能となっている[5, 6]。このような壁飽和現象は、JT-60U[7]、LHD[8] の長時間放電においても観測されており、いずれもプラズマ対向壁の局所的な温度上昇による水素放出が原

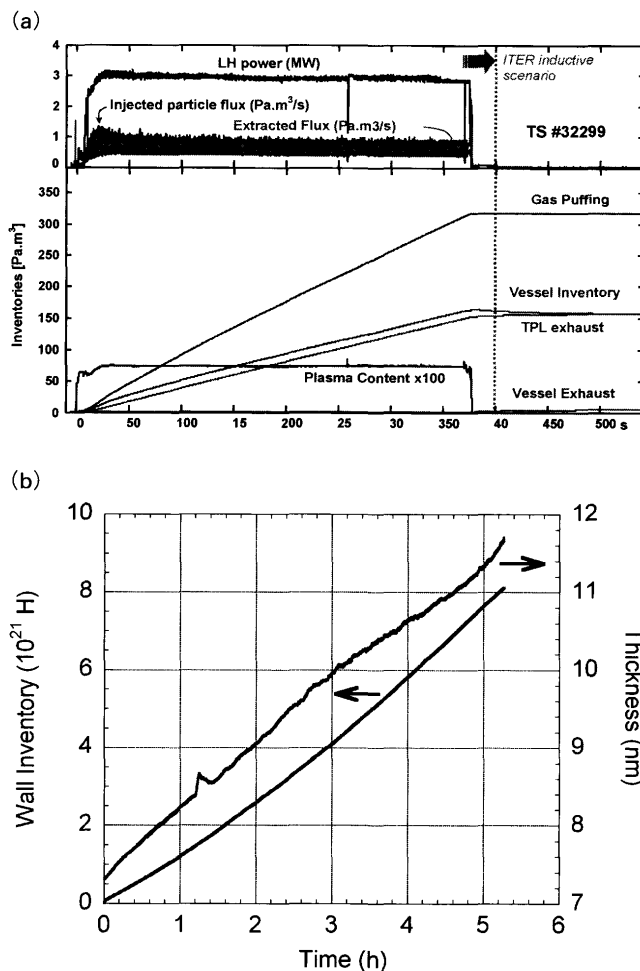


図2 (a)Tore Supra[1]と(b)TRIAM-1M[2]における壁の水素インベントリーの時間変化。

因と考えられている。LHDではダイバータのストライクポイントの位置を制御することで、ダイバータへの熱負荷を軽減して壁飽和を抑制し、30分以上のプラズマ維持に成功している[9]。このように、プラズマ対向壁の温度制御が定常粒子制御の鍵を握っていることがわかる。ただし、ここで注意しなければならないことは、低温壁により定常粒子制御が達成されたとしても Γ_{wall} は正であるから、Tore Supra や TRIAM-1M での長時間放電の例のように、壁インベントリーが時間とともに増加していくこととなり、トリチウムインベントリーの観点から将来の核融合炉には適用できないということである。この観点から、高温壁における粒子制御の研究が重要になると考えられる。

プラズマ対向壁での水素保持特性は材料表面の物理化学的条件に支配され大変複雑だが、水素リサイクリングを考える上では、動的リテンション (dynamic retention) と静的リテンション (static retention) とに大別することができる。動的リテンションはプラズマからの水素粒子フラックスに起因して材料中に水素が保持されるもので、水素原子は材料中で可動性があり、プラズマ消滅後はアウトガスとして壁から真空容器に再放出される。一方、材料に入射した水素原子の一部は、材料中の原子空孔、ボイド、転移ループや結晶粒界でのポテンシャルに捕捉されたり、材料と水素化物を形成するなどして材料中に保持される (第4

章参照)。このような水素保持形態において、材料中に保持され続けるものを静的リテンションと呼ぶ。プラズマ生成中の熱負荷によりプラズマ対向壁の温度が上昇している場合やディスラプションによるプラズマ消滅の場合には、本来静的リテンションで保持されていた水素も壁から放出されることになる。図2(a)に示す Tore Supra の壁インベントリーは、プラズマ消滅後もほとんど変化していないので、プラズマ放電中に壁に吸蔵された水素の大部分は静的リテンションにより保持されていることがわかる。静的リテンションによる水素保持の重要なメカニズムのひとつに共堆積がある。これはスパッタリング等でプラズマ対向壁から飛び出した不純物原子が水素を巻き込んで再堆積する現象のことで、プラズマ生成とともに水素捕捉サイトが形成されるので、放電時間とともに壁インベントリーが増加し続けることになる。TRIAM-1M においても、長時間プラズマ放電時の再堆積層の厚さは放電時間とともにほぼ線形に増加しており(図2(b))、共堆積による連続した水素吸蔵を示唆している。実際に TRIAM-1M の長時間プラズマに晒された材料試料の表面解析の結果は、共堆積による水素の吸蔵を裏づけている[9, 10]。Tore Supra ではトロイダルリミター中に保持されている水素量の材料学的事後解析が行われ、その全水素保持量の90%が共堆積に起因していることが報告されている[11]。このような共堆積層の形成に見られるように、プラズマ対向壁の表面状態はプラズマ放電中に時々刻々と変化し続けている。このプラズマ対向壁の表面改質と水素リサイクリングとの関係について、粒子バランスといったマクロスケールの解析とともに、壁表面の微細組織等のミクロスケールの解析と合わせてアプローチしていくことが今後さらに重要となってくる。

2.3 プラズマ対向壁材料の損耗・輸送・再堆積

プラズマ対向壁材料は、プラズマからのイオンや高速中性粒子による衝突によって原子がはじき出される物理スパッタリング、または材料と水素との化学反応により引き起こされる化学スパッタリングによって損耗する。この損耗により飛び出した不純物原子は、イオン化されプラズマ中を輸送される。SOL 中で不純物イオンに磁力線方向に働く力としては、①不純物の圧力勾配に起因する力、② SOL を流れる水素イオンとの摩擦力、③静電力、④電子温度勾配に起因する力、⑤イオン温度勾配に起因する力が考えられる[12]。このような力を受けながら SOL 中を輸送した不純物原子は、真空容器内のどこかに再堆積することになる。材料の損耗・再堆積などに関するプラズマ・壁相互作用に関しては、本紙小特集[13-15]にも詳しく記載されているので参考にしていただきたい。

材料の損耗は、プラズマ対向機器の寿命と直結した重要な課題である。しかし、通常行われているプラズマ閉じ込め実験からでは、このことを実感することはまずないのである。それは、通常のプラズマ生成実験が短パルス放電で行われていてプラズマ生成時間の積算もそれほど長くないからだと思われる。例えば、トーラス実験装置での1年間の実験キャンペーンにおいて、10秒のプラズマ

を1日50ショット(10分周期で8時間相当)、トータル半年間実験したとしても、年間の積算プラズマ生成時間はたかだか0.7日程度にしかならない。これはかなり歩留まりのよい設定なので、実際にはその半分程度といったところではないかと予想される。実際に JET の実験では、1998年から2001年の実験期間でのプラズマ生成時間の積算は 1.63×10^5 秒であり[16]、これは約1.9日に相当している。このプラズマ生成時間の積算が意味するところは、実験キャンペーン後に観測されたダイバータ等の損耗量は、1年間の定常プラズマをつけた場合には、約1000倍して考えなくてはいけないということである。すなわち、観測された $10 \mu\text{m}$ の損耗は、1年間の連続プラズマ生成時には約1cmの損耗に相当することになる。実際の短パルス放電の繰り返しの場合には、その都度プラズマの生成・終了(ディスラプションも含む)の効果が入るので、正確な評価のためにはこれらの効果を考慮しなければならないが、プラズマ生成実験後の検査において肉眼では判別困難なミクロな損耗でも、定常プラズマ運転の観点からはプラズマ対向材の寿命を決定づける重大な現象であることは確かである。

長期間のプラズマ実験後の損耗・堆積の例として、JET と JT-60U の結果を図3に示す[17-19]。JET の例では1999年から2001年の3年間の運転期間後にマイクロメーターにより直接ダイバータの損耗・堆積量を測定した結果が示されており、JT-60U の例では1997年から2002年の6年間のW型ダイバータの損耗・再堆積の測定結果が示されている。他の多くのダイバータ装置においても観測されているように、外側ダイバータが主に損耗領域、内側ダイバータが主に堆積領域となっていることがわかる。また、図3の結果は、内側ダイバータに堆積した量は、外側ダイバータで損耗した量を上回っていることを示しており、第一壁での損耗とその損耗された不純物の SOL を通した内側ダイバータへの輸送を示唆しており、JT-60U の場合にはダイバータに堆積した炭素の約40%が第一壁を起源としていると考えられている[18, 19]。このように外側ダイバータまたは第一壁を起源とする不純物原子は、周辺プラズマ中を真空容器サイズの空間スケールで内側ダイバータまで輸送されているわけである。

上記の損耗や堆積の事後解析結果に加えて、可動マッハプローブなどを用いた SOL とダイバータのプラズマ流の計測も行われ、多くの装置で低磁場側から高磁場側へのコアプラズマを周回する SOL プラズマ流が観測されている。この SOL プラズマ流と不純物との摩擦力により、損耗された不純物が内側ダイバータ領域に輸送されるものと考えられている[20, 21]。また、プライベート領域での低磁場側から高磁場側への不純物輸送も指摘されている[22-25]。

このような周辺プラズマ中の不純物輸送に関して、 ^{13}C をトレーサーとして用いる実験がいくつかのトカマク装置で行われている[25-32]。この実験では、実験キャンペーン終了直前のプラズマ放電中に $^{13}\text{CH}_4$ ガスパフを行い、キャンペーン終了後の大気開放時に真空容器内からプラズマ対向材を取り出し、タイルの表面分析を行うことで ^{13}C の堆積量を同定し、第一壁またはダイバータを起源とする炭素

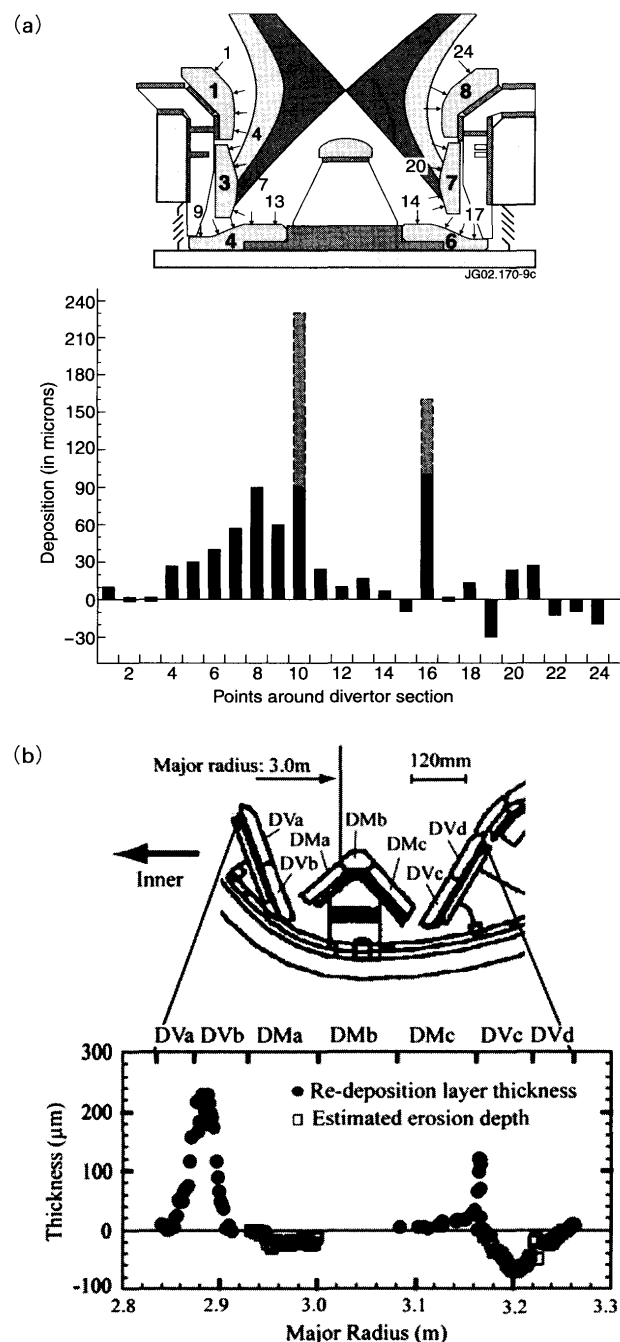


図3 (a)JET[17]と(b)JT60-U[18, 19]におけるダイバータでの損耗、再堆積。JETは1999～2001年の実験後のダイバータ板をマイクロメーターで測定している。グレイで示された厚さは、柔らかい堆積層で測定毎に厚さが短くなった。JT60-Uでは1997～2002年の実験後にダイヤルゲージにて測定した。

不純物が真空容器内にどのように分布して堆積するかを調べている。この方法は、実験条件を固定して実施することができ、図3で示すような実験期間中の様々な実験条件の効果が積分された長期物質輸送の結果と対比させて、周辺プラズマ中の不純物輸送を理解する上でメリットがある。図4にJET[27, 28]、DIII-D[30]、ASDEX-Upgrade[31]での $^{13}\text{CH}_4$ ガスパフ実験での結果がまとめられている[33]。JETのオーミック放電とDIII-DのLモード放電への真空容器上部からの $^{13}\text{CH}_4$ ガスパフでは、入射した ^{13}C の総量の約

50%かそれ以下の量が表面解析で観測されており、観測された大部分が内側ストライクポイントの内側に堆積している。この結果は図3に示す長期間不純物堆積の結果と同様である。一方、JETでの外側ダイバータからの $^{13}\text{CH}_4$ ガスパフでは、外側ダイバータでの ^{13}C の堆積は内側ダイバータの約1.3倍であり、長期間不純物堆積の結果とは一致していない。また、図4(c)に示すASDEX-Upgradeでの ^{13}C 分布では、6Aタイルの位置に ^{13}C の高いピークがあり、SOLを通した外側から内側への炭素輸送を示しているが、この分布は長期間不純物堆積の結果とは一致していない[30]。この不一致は、不純物が1回だけの輸送で堆積するだけでなく、長期間にわたる局所的な再損耗と再堆積の繰り返しにより引き起こされていると考えられている。また、ここで紹介した $^{13}\text{CH}_4$ ガスパフでの実験結果は、炭素をガスソースとして導入したものであり、PWIによりスパッタリングされた炭素の輸送との差異については今後さらに研究を進める必要がある。

このようなプラズマ対向壁材料での損耗・輸送・再堆積は、プラズマ対向機器の寿命に関係するばかりではなく、共堆積効果によってトリチウムインベントリとも密接に関係した課題である。水素の粒子バランスと同様に不純物の粒子バランス（損耗量と堆積量の収支とそれらの空間分布）を定量的に理解することが必要である。このために精度の高いモデリングとシミュレーションコードの開発および損耗・再堆積の実時間計測法の開発が今後ますます重要になる。

2.4 プラズマ放電後のプラズマ対向壁の状態変化

これまで見てきたPWI現象は主にプラズマ生成時のものだが、プラズマ放電終了後もプラズマ対向壁はその状態を変化させていることを考慮に入れることが重要である。ここでは一例として、TRIAM-1Mでの長時間放電の繰り返し時の酸素不純物挙動を紹介する。図5はTRIAM-1Mにおけるプラズマ放電開始時の線平均電子密度で規格化されたOII線発光強度とその放電までの空き時間（放電前のプラズマを生成していない時間）との関係を示している[34]。放電までの空き時間が長くなるにつれて規格化OII線発光強度（プラズマ対向壁からの酸素不純物流入量に対応していると考えられる）が高くなっていることがわかる。プラズマ生成直後に高くなったOII線発光強度は、放電時間とともに40秒程度の時定数で減少するが、次のプラズマ生成時には放電までの空き時間に応じてOII線発光強度が増加してしまうわけである。これは、プラズマを生成していない間にプラズマ対向壁表面に酸素（水分子）が付着していることを示唆している。この実験は実験キャンペーン初期に得られたもので、放電の繰り返しにより最終的にはOII線発光強度は低レベルまで減少するので、微少リークのような原因は考えられない。

ラングミュアの吸着等温式[35]を用いてプラズマ対向壁表面の吸着水分子の被覆率の時間変化を評価したところ、図5の破線で示すように実験データをよくフィッティングすることができ、増加の時定数は約5500秒となった。この

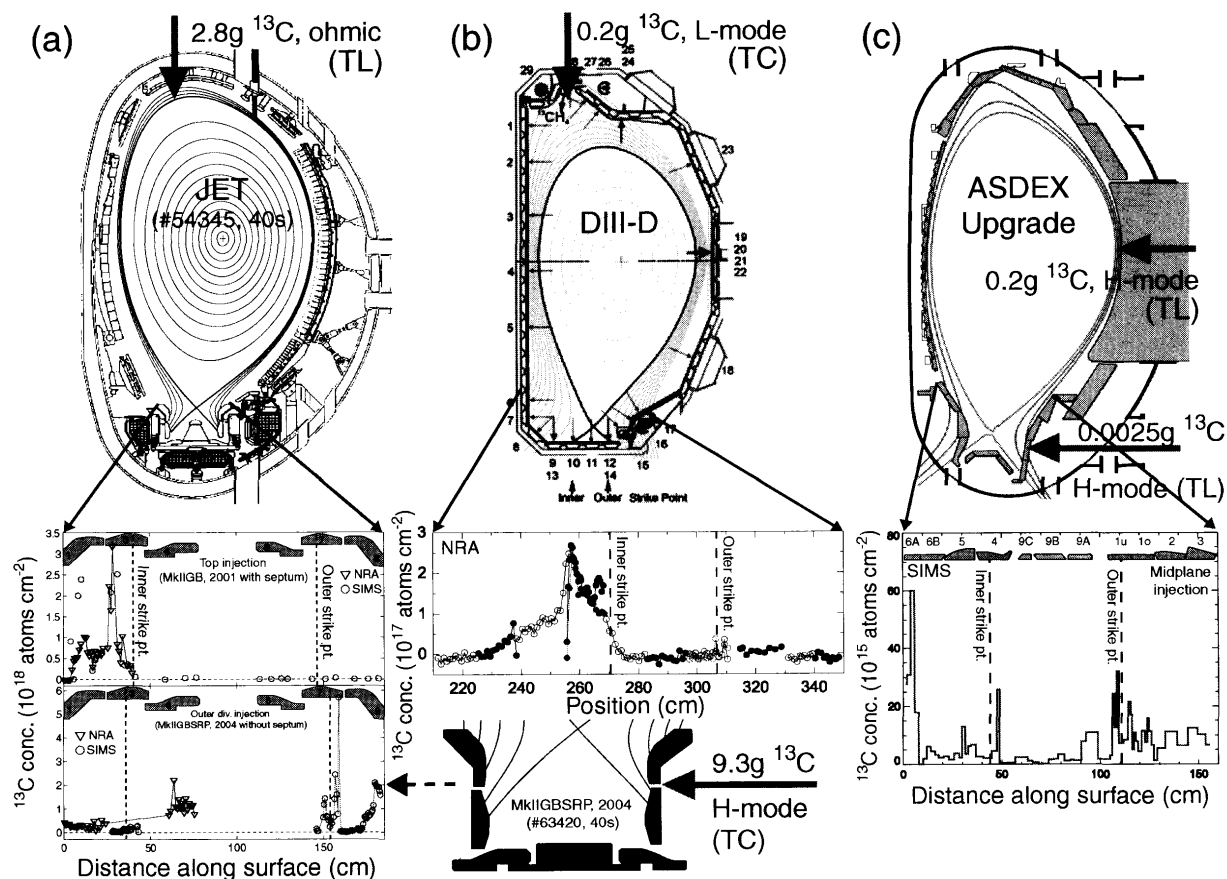


図4 (a) JET, (b) DIII-D, (c) ASDEX-Upgrade における $^{13}\text{CH}_4$ ガスパフ実験結果の比較. 矢印は $^{13}\text{CH}_4$ ガスパフの位置を示し, TCはトロイダル方向に一樣なガスパフ, TLは局所的なガスパフ意味している[33].

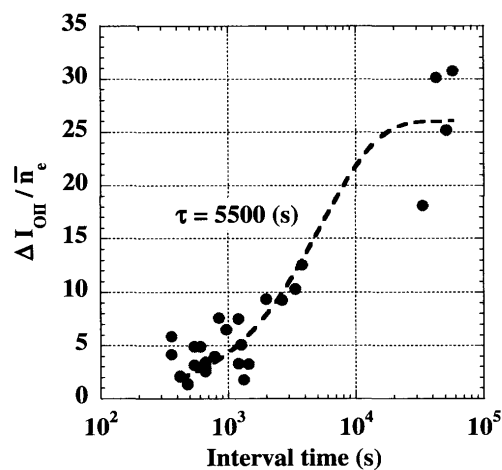


図5 TRIAM-1Mにおける線平均電子密度で規格化されたOII線強度と放電と放電の空き時間との関係. 破線はラングミュアの吸着等温式を用いてフィッティングしている[34].

現象は、プラズマから遠く離れた延長ポート等の室温部分に残留していた水分子の被覆率と、プラズマ対向壁とが長い時定数で平衡状態になることにより起きたものと考えられている。この結果は、プラズマ対向壁とは一見無関係な部分がプラズマ放電終了後にプラズマ対向壁の表面状態に影響を与えていることを定量的に示した一例である。この他にもプラズマ放電終了後に壁インベントリーが長い時間をかけて減少することなど[6, 36], PWI現象の研究におい

ては、プラズマ放電中だけでなく、放電後の壁の状態も含めてグローバルに見ていくことがとても大切な課題である。

2.5 おわりに

プラズマ・壁相互作用に関する現象をマクロスケールの観点から概観した。今回説明した内容は、特に水素と不純物の振る舞いに注目したが、核融合炉でのPWIでは、中性子損傷などの効果も加わり、状況はさらに複雑になる。これらの複合的な環境下において、プラズマ性能を維持しつつ、プラズマ・壁相互作用を制御するためには、次章以降のメソスケール、ミクロスケールでの微視的な現象の理解に立脚する必要に迫られる。ここで説明したマクロスケールでの視点が、今後さらに各スケールで行われている研究を相互に連携させ、また研究面での相互作用を活発にさせ、プラズマ・壁相互作用の総理解に繋がっていく一助となれば幸いである。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、貴重な議論とコメントを賜りました九州大学の田辺哲朗教授に感謝致します。また、核融合科学研究所の時谷政行助教とは有益な議論をさせていただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] J. Bucalossi *et al.*, *Proc. 32nd EPS on Plasma Phys. ECA* Vol. 29C, O-4.005 (2005).
- [2] M. Sakamoto *et al.*, *Proc. 21st IAEA Fusion Energy Conference*, EX/P4-25 (2006).
- [3] J. Jacquinot, *Nucl. Fusion*, **43**, 1583 (2003).
- [4] H. Zushi *et al.*, *Nucl. Fusion*, **45**, S142 (2005).
- [5] F. Saint-Laurent, *Nucl. Fusion*, **40**, 1047 (2000).
- [6] M. Sakamoto *et al.*, *Nucl. Fusion*, **44**, 693 (2004).
- [7] T. Nakano *et al.*, *Nucl. Fusion*, **46**, 626 (2006).
- [8] Kumazawa *et al.*, *Nucl. Fusion*, **46**, S13 (2006).
- [9] M. Miyamoto *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **337-339**, 436 (2005).
- [10] M. Tokitani *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **367-370**, 1487 (2007).
- [11] E. Tsitrone *et al.*, *Proc. 22nd Fusion Energy Conference*, EX /9-1 (2008).
- [12] P.C. Stangeby, *The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices* (Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2000).
- [13] 相良明男: *J. Plasma Fusion Res.* **77**, 857 (2001).
- [14] 上田良夫: *J. Plasma Fusion Res.* **80**, 217 (2004).
- [15] 田辺哲朗: *J. Plasma Fusion Res.* **82**, 196 (2006).
- [16] J.P. Coad *et al.*, *Nucl. Fusion*, **46**, 350 (2006).
- [17] J.P. Coad *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **313-316**, 419 (2003).
- [18] Y. Gotoh *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **313-316**, 370 (2003).
- [19] K. Masaki *et al.*, *Nucl. Fusion*, **47**, 1577 (2007).
- [20] 朝倉伸幸: *J. Plasma Fusion Res.* **80**, 190 (2004) and references therein.
- [21] 朝倉伸幸: *J. Plasma Fusion Res.* **83**, 501 (2007) and references therein.
- [22] J.A. Boedo *et al.*, *Phy. Plasmas*, **7**, 1075 (2000).
- [23] G.D. Porter *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **313-316**, 1085 (2003).
- [24] Y. Gotoh *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **357**, 138 (2006).
- [25] U. Ueda *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **363-365**, 66 (2007).
- [26] P. Wienhold *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **290-293**, 362 (2001).
- [27] J. Likonen *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **66-68**, 219 (2003).
- [28] M.J. Rubel *et al.*, *Proc. 32nd EPS on Plasma Phys. ECA* Vol. 29C, P-2.004 (2005).
- [29] S.L. Allen *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **337-339**, 30 (2005).
- [30] W.R. Wampler *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **337-339**, 134 (2005).
- [31] E. Vainonen-Ahlgren *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **337-339**, 55 (2005).
- [32] M. Groth *et al.*, *Phy. Plasmas*, **14**, 056120 (2007).
- [33] R.A. Pitts *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **47**, B303 (2005).
- [34] M. Ogawa *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **363-365**, 1364 (2007).
- [35] 赤石憲也: *J. Plasma Fusion Res.* **79**, 518 (2003).
- [36] T. Nakano *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **363-365**, 1315 (2007).