

QUEST壁モデルによるPWI件究

花田, 和明
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/1660014>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 149, pp.30-35, 2015-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :

QUEST 壁モデルによる PWI 研究

花田 和明*

(2015 年 8 月 31 日受理)

PWI research with the QUEST wall model

Kazuaki HANADA

Email of corresponding author: hanada@triam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

QUEST which was constructed as plasma boundary device in Kyushu University is aimed to actively control plasma wall interaction (PWI) related issues such as particle off-balance that is the main reason to collapse the longest time-duration tokamak discharge of 5 h 16 m established in the superconducting tokamak, TRIAM-1M. In this report, I will describe the PWI-related research activities addressing on QUEST.

Key words: *plasma wall interaction (PWI), particle balance, recycling rate*

1. 序文

磁場核融合炉において高温プラズマを定常に維持し続けることは重要な課題である。超伝導トカマク TRIAM-1M では 5 時間 16 分の長時間運転の世界記録が 2003 年に達成された[1,2]が、突然のプラズマ停止の主原因と考えられるのがプラズマ・壁相互作用 (PWI) による粒子バランスの喪失である。高温プラズマのプラズマ対向壁では荷電交換反応によって生じた高速の中性粒子や高速イオンが頻繁に衝突するため壁表面が大きく改質する。この改質が系全体の粒子バランスを大きく変化させる。この表面改質は壁材・入射粒子エネルギー・壁温度・入射粒子種等で大きく異なるため、実験室で比較的簡単に作成可能な低温プラズマでは再現できない現象も多く、この表面改質の系全体への効果を調べるために欧州共同体の大型トカマク装置 JET では国際熱核融合実験炉 ITER のプラズマ対向壁 (タングステン (W) +ベリリウム (Be)) を模擬した ITER-like wall (ILW) 実験を精力的に実施している[3, 4]。ILW 実験の主要な検証項目としてトリチウム吸蔵量の評価がある。ILW 以前に炭素壁で行われた実験の結果、炭素と水素同位体の親和性と炭素のポーラス構造、低エネルギーの水素原子 (イオン) による高いスパッタリング率等

から壁表面で莫大な量のトリチウム吸蔵が予想され、ITER の実験期間を著しく制限することが懸念されていたためである。ILW 実験ではトリチウム吸蔵量が調べられ、実際に問題ない程度まで吸蔵量が減少することが確認された[3]。一方、この結果は放電中に供給された燃料水素が放電中もしくは放電直後に放出されたことを意味しているため、系全体の主要な粒子バランス機構が静的リテンションから動的反リテンションに質的に変化したことを示している。JET の炭素壁放電では放電中に容器内に入射された燃料粒子である水素同位体が壁に吸蔵され放電後長期間にわたり放出されていなかったが、ILW では放電中に容器内に入射された粒子の 80%が放電後の 700 秒間で放出されている[4]。このことは金属壁装置では普遍的な現象であり、金属壁装置での長時間放電でのプラズマ停止の原因解明には動的反リテンション特性を評価し制御する必要性に迫られていることを意味している。

動的反リテンションと静的リテンションを実験的に明確に区別する方法は今のところないが、動的反リテンションは材料中に入射された水素同位体が拡散過程によって材料表面に運ばれて表面再結合過程を経て水素同位体分子として放出される現象であり、静的リテンションは材料中に存在する捕捉サイトに水素同位体が捕捉される現象で、捕捉サイトのトラップエネルギーが壁温の

*応用力学研究所 高温プラズマ力学研究センター

熱エネルギーよりも十分に高い場合には捕捉サイトに捕捉された水素同位体は捕捉状態から抜け出すことができず、長時間材料中に蓄積されることとなる。一方、トラップエネルギーが熱エネルギー程度以下であれば、水素同位体は容易に拡散過程を経て材料外に放出される。この場合には動的リテンションと実験的に区別することは困難であるが、再結合過程が律速する動的リテンションと同じと考えてほとんど問題ない。材料中の捕捉サイト密度やスパタリング粒子等が堆積して表面再結合過程を大きく変化させる高エネルギー粒子の衝突は、静的リテンション、動的リテンション共に大きな影響を与える。このため実機での粒子バランスを考察するためには、プラズマの状況だけではなくプラズマ対向壁で起こっていることを把握することが不可欠である。プラズマ暴露試料の微視的な分析並びに基礎実験でのプラズマ暴露材料の表面改質の観測等様々な試みがなされていて、理解の深化に大きく貢献している。これらの観測をグローバルな粒子バランスに適応し系全体を理解するためには、微視的観測から主要な要素を取り出した壁のモデル化が不可欠であると考えている。QUEST を題材として微視的な観測により“QUEST 壁モデル”を構築し、実機実験を通じて粒子のグローバルな粒子バランスの予測を行う準備を行ってきたので報告する。

QUEST では科学研究費補助金基盤研究 S “多階層複雑・開放系における粒子循環の物理とマクロ制御” (代表 関子秀樹 平成 24 年度～平成 28 年度) の支援の下で壁温制御による粒子バランス制御実験を行っている。これは実機そのものを使って動的リテンションを制御する試みであり、プラズマ制御と壁制御の両輪によりプラズマの定常運転を達成しようとする世界でも初めての計画である。計画では、QUEST 壁モデルを用いたリサイクリング制御について試験する。可能であればこれまで受動的にしか扱えなかった壁を放電中に制御することが可能となり、高温プラズマの長時間維持にとって重要なマイルストーンとなるであろう。なお、本報告では範囲を逸脱するため記述を割愛するが、プラズマからの粒子束計測のためにプラズマ誘導透過 (PDP) プロブの実験的研究が QUEST でなされており[5]、アクチュエータとしての高温壁とセンサーとして PDP プロブの開発が同時に進められていることを申し添える。

2. QUEST プラズマ暴露試料の微視的観測

QUEST では PWI が研究の一つの柱と位置づけられていたので実験開始当初から壁の変遷については詳細に調べられてきた。結果の詳細は、本号の別途報告[6]に記載があるので参照されたい。本報告で注目している粒子バランスにとって、最も重要な微視的観測からの知見

はプラズマ暴露試料に重水素分子イオンを入射して得られた熱脱離スペクトル (TDS) である。データを Fig.1 に示す[7]。この TDS データは 2012 年の春夏実験期間後に赤道面に取り付けられた試料から回収されたモリブデン基板試料で入射エネルギーが 1keV、フルエンス 2×10^{22} D (D は重水素) を照射した後に得られたものである。この試料は FIB(Focused Ion Beam)で切断され、トンネル型走査顕微鏡(TEM)で観測され、表面に厚み 20-30nm 程度の再堆積層を持つことがわかっている (Fig.2: Top)。静岡大学の研究グループにより Glow discharge optical emission spectrometry (GD-OES) 観測が行われ (Fig.2)、再堆積層の成分は鉄、タングステン等の金属に加えてどこからか飛来した炭素が含まれていることがわかっている (Fig.2:Bottom)。この試料は多くの分析結果から考えて、長時間運転に成功した実験期間の QUEST 壁で最も標準的と考えられるものである[6]。この結果を解析するにあたり、この試料に関するモデルを立てることとした。モデルには、再堆積層への水素原子侵入、拡散、捕捉、熱脱捕捉、熱脱離が含まれている。もっとも重要な仮説は、水素の動的リテンションを決めているのは再堆積層であり再堆積層の吸蔵された水素は再堆積層内にとどまるということである。この仮説は、同様の観測をステンレス板に対して行った結果と、わずか数 10nm の再堆積層が付着したことによる TDS の結果の極端な違いに根拠がある。QUEST ではイオン温度は 100eV 以下と考えられる。今回の再堆積層の分析結果を SRIM コードで計算した結果、100eV で水素の侵入深さは数 nm 程度となる。

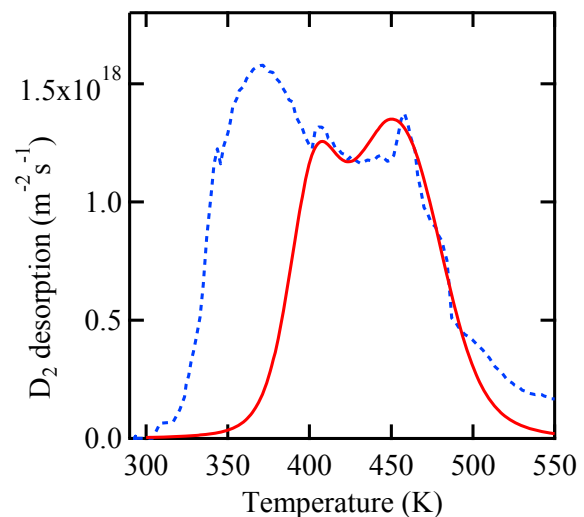


Fig.1 TDS spectrum of D_2^+ ions of 1keV, 1×10^{22} implanted on a plasma-exposed specimen during all the experimental campaign (dotted lines), and a calculation curve with the proposed model (solid line) with A type (peak at 410K) and B type (peak at 460K). [6]

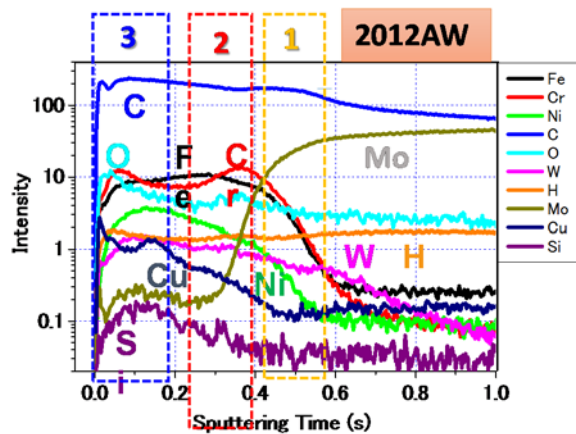
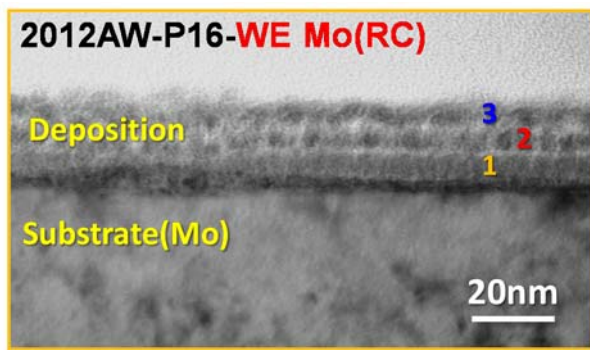


Fig.2 Top : Cross-sectional photo of QUEST plasma exposed Molybdenum specimen measured with TEM in 2012 autumn/winter campaign(provided by N.Yoshida). Deposited layer of 20-30nm is observed. Bottom:Components of the deposited layer measured with GD-OES. Fe Cr (stainless metal) and W (limiter and divertor) and C are detected. The reason of Carbon commingling is not clear.

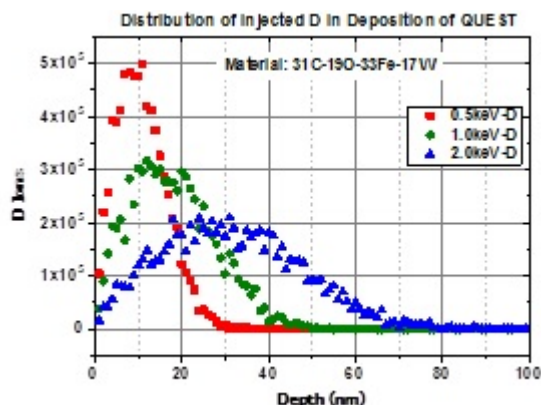


Fig.3 Deposition depth profile calculated with SRIM code in QUEST exposed deposition layer. (■ :500eV, ● :1keV, ▲:2keV) D_2^+ ions of 1keV corresponds to 500 eV D^+ ion.

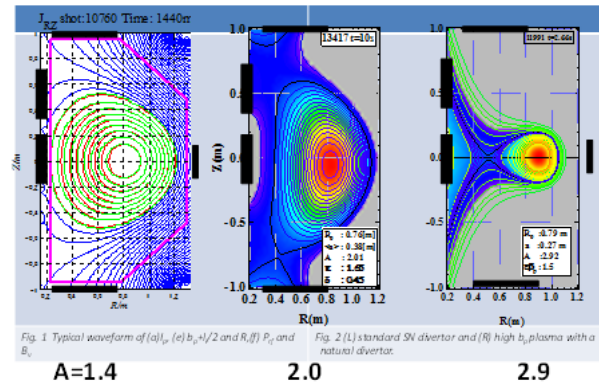


Fig. 1 Typical waveform of (a) I_p , (e) b_p , (f) P_p and (g) high b_p plasma with a natural divertor.

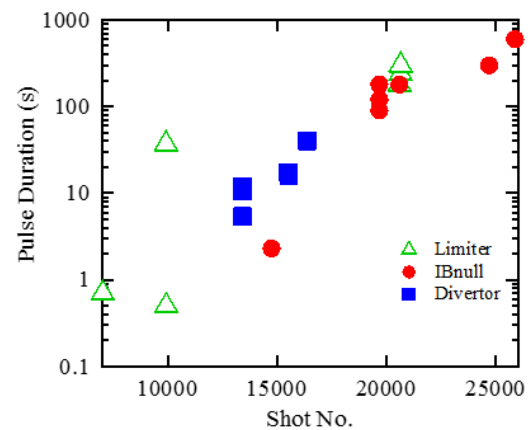


Fig.4 Top : Various types of magnetic flux surface contour in QUEST experiments. (Left: inner limiter, Cente: lower single null, Right: inner null) Bottom:Historical progress towards steady state operation of QUEST noted by their shot number.(△: inner limite, ■: single null divertor, ● inner null)

このため壁に衝突した水素原子は最初再堆積層内に一旦吸蔵され、その後拡散によって再堆積層内に広がっていくが、再堆積層と母材の化学ポテンシャルの差によって再堆積層内の水素同位体は母材にはほとんど侵入しない。このことは150℃に加温した再堆積層付きの SUS 板の表面に重水素プラズマを照射し、照射面反対側から透過してくる重水素束が計測限界 ($3.0 \times 10^{14} \text{ atoms} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 以下であったことで確認している。本来は再堆積層の化学ポテンシャルを測定できればより明確となるが計測は困難であり今後の課題である。

以上の仮定に基づいてモデルを式(1)のように定式化した[5]。ここで、 C_w , C_{TA} , C_{TB} はそれぞれ溶解している水素同位体濃度分布、A、B 種の捕獲サイトに捕獲されている水素同位体濃度分布である。また、 C_{TA}^0 , C_{TB}^0 は捕獲サイトに捕獲される水素同位体の上限値を示しており、このモデルでは空間で一様としている。

$$\begin{aligned}
\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial C_w}{\partial t} &= D_f(T) \frac{\partial C_w}{\partial x} + G(x, t) - \frac{\partial C_{TA}}{\partial t} - \frac{\partial C_{TB}}{\partial t} - k_A C_{TA}(x, t) G(x, t) - k_B C_{TB}(x, t) G(x, t) \\ \frac{\partial C_{TA}}{\partial t} &= \beta_A C_w(x, t) F_A(x, t) - k_A C_{TA}(x, t) G(x, t) - \beta_{TA}(T) C_{TA}(x, t) F_A(x, t) \\ \frac{\partial C_{TB}}{\partial t} &= \beta_B C_w(x, t) F_B(x, t) - k_B C_{TB}(x, t) G(x, t) - \beta_{TB}(T) C_{TB}(x, t) F_B(x, t) \end{aligned} \right. \\
\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial C_w}{\partial x} \right\}_{x=0} &= k(T) C_w^0(0, t) \\ \frac{\partial C_w}{\partial x} \right\}_{x=x_w} &= 0 \\ G(x, t) &= G_0 e^{-x^2/2x_D^2} f_0(t) \\ F_A(x, t) &= \begin{cases} 1 - \frac{C_{TA}(x, t)}{C_{TA}^0} & C_{TA}(x, t) < C_{TA}^0 \\ 0 & C_{TA}(x, t) \geq C_{TA}^0 \end{cases} \\ F_B(x, t) &= \begin{cases} 1 - \frac{C_{TB}(x, t)}{C_{TB}^0} & C_{TB}(x, t) < C_{TB}^0 \\ 0 & C_{TB}(x, t) \geq C_{TB}^0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)
\end{aligned}$$

$D_f(T)$ と $k(T)$ は再堆積層の拡散係数と再結合係数の温度依存性、 $k_A, k_B, \beta_{TA}, \beta_{TB}, \beta_A$ と β_B は A 種、B 種のプラズマ誘導放出率、熱放出率、捕獲率である。膜厚が薄いため一般的な金属や炭素の拡散係数を用いても結果はほとんど変化しないため、再堆積層の拡散係数を決定することは困難ではあることがわかっている。この計算ではタングステンの拡散係数[7]を用いている。このモデルをイオン照射実験に適用する。照射時間は 10 時間、照射率 $G_0=5.7 \times 10^{16}$ D/m²/s、侵入深さは SRIM コードの計算 (Fig. 3) によりピーク深さ $x_D=10$ nm、半値幅 $x_W=5$ nm のガウス形状とした。10 時間の照射後の C_w, C_{TA}, C_{TB} を計算し、その後 1 時間半は室温での保管期間とし、その後 1 K/秒での TDS を計算にて実施した。TDS 結果と計算結果が合うように $C_{TA}^0, C_{TB}^0, k(T), k_A, k_B, \beta_{TA}, \beta_{TB}, \beta_A, \beta_B$ を決定した。この決定された係数を含む式 (1) を “QUEST 壁モデル” とした。この QUEST モデルは京都大学で核反応分析 (NRA) を用いた検証も行われている [8]。結果については別途報告がなされる予定である。

3. QUEST 実機実験での粒子バランス

QUEST 装置は 2008 年の本格実験開始から 7 年目に入っている。その間定常運転を目指した多くの試みがなされ、その結果として Fig. 4 にあるように様々な磁場配位での長時間放電に成功している [9]。この図にある放電時間の伸長は主に熱バランスの制御 (局所的な熱負荷を丁寧に見極め、必要なところに冷却能力の優れたプラズマ対向材を設置する。) によるものである。放電時間が 10 分を過ぎたあたりから状況の質的变化が起こり始めた。QUEST では長時間運転の際に、単位時間当たりイオン化量を制御するため、H α 線 (バルマー系列の $n=3$ から 2 への遷移時の発光線) を一定に保つように制御する。これは定常状態では壁への水素イオン粒子束と一致する。また、QUEST の温度、密度領域では荷電交換反応による高速中性粒子の粒子負荷もほぼ H α 線強度に比例していることがわかっている [10] ため、全体としての

壁への水素原子束が H α 線強度にほぼ比例していることとなり、H α 線強度制御は壁への水素原子束一定制御と見なすことができる。放電時間が数分になると H α 線強度を一定に保つために必要な水素供給量が徐々に減り、10 分を過ぎるとやがてほとんど供給の必要がなくなる。これは TRIAM-1M の長時間放電でも確認されたりサイクリング率 1 の状態でのプラズマ生成に至ったことを意味している。15 分間の放電維持を狙った放電では、13 分 30 秒で放電停止に至った。ここで初めて QUEST で粒子バランスの喪失による放電停止に至ったこととなる。この放電での壁吸蔵粒子数の時間変化は QUEST 壁モデルとよく合うことが確認されている。

放電中の壁の状況を確認するためには壁でのリサイクリング率を評価することが重要であり、外部から与える供給粒子を一定に制御して行う長時間運転も実施した。以下に粒子バランスの観点から供給粒子を一定に制御して行う長時間運転時における粒子バランスの表式についての検討を示す。

粒子バランスを真空容器への水素入射束、 Γ_{in} と排気された水素束、 Γ_{out} と壁単位面積当たりの吸蔵水素束 Γ_w で記述すると

$$S \Gamma_w = \Gamma_{in} - \Gamma_{out} = \Gamma_{in} (1 - R_g) \quad (2)$$

となる。ここで S は粒子吸蔵に関与する壁面積である。また、 R_g を Global Recycling rate と定義する。一方、壁単位面積当たりの吸蔵水素原子束は壁への入射水素原子束、 Γ_{in}^w と脱離水素原子束、 Γ_{out}^w により

$$S \Gamma_w = 0.5 [(1-r) S \Gamma_{in}^w - S \Gamma_{out}^w] = 0.5 S \Gamma_{in}^w (1-r) (1-R_{rec}) \quad (3)$$

と書ける。ここで r は壁での反射率で R_{rec} は壁のリサイクリング率である。ここで壁のリサイクリング率は、

$$R_{rec} = \frac{\Gamma_{out}^w}{(1-r) \Gamma_{in}^w}$$

で定義している。壁への入射粒子束は、プラズマ粒子数、 N_P に対する式

$$\frac{\partial N_P}{\partial t} = \frac{N_n}{\tau_{ion}} - \frac{N_P}{\tau_P}$$

で、プラズマ粒子数が時間的に変化しない定常状態を考え

$$\frac{N_P}{\tau_P} = \frac{N_n}{\tau_{ion}}$$

となる。ここで N_n は中性水素原子数、プラズマ閉じ込め時間、 τ_P 、イオン化時間、 τ_{ion} である。これがイオンの壁への入射水素原子束で荷電交換による入射水素原子束を加えると、全壁表面の向かう水素原子束は、

$$SI_{in}^W = \frac{N_p}{\tau_p} + \frac{N_n}{\tau_{cx}} = \frac{N_n}{\tau_{ion}} + \frac{N_n}{\tau_{cx}} = \frac{N_n}{\tau} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{ion}} + \frac{1}{\tau_{cx}}$$

と表記される。ここで τ_{cx} はプラズマ密度や温度の関数である。さてここで (2)、(3)、(4) 式により

$$\Gamma_{in}(1-R_g) = 0.5S[(1-r)\Gamma_{in}^W - \Gamma_{out}^W] = (1-r)\frac{0.5N_n}{\tau}(1-R_{rec})$$

を得る。この式から

$$1-R_g = (1-r)\frac{N_{H_2}}{\tau\Gamma_{in}}(1-R_{rec}) \quad (5)$$

を得る。ここで N_{H_2} は水素分子数で、この結果は、 τ や N_n 、 Γ_{in} が一定なら、Global recycling rate、 R_g と壁の recycling rate、 R_{rec} が対応していることを示している。一般的に Global recycling rate は測定が容易であるが、壁の recycling rate を測定することは困難なので Γ_{in} 一定の放電を行って R_{rec} の変化を観測することを行った。結果を Fig.5 に示す。

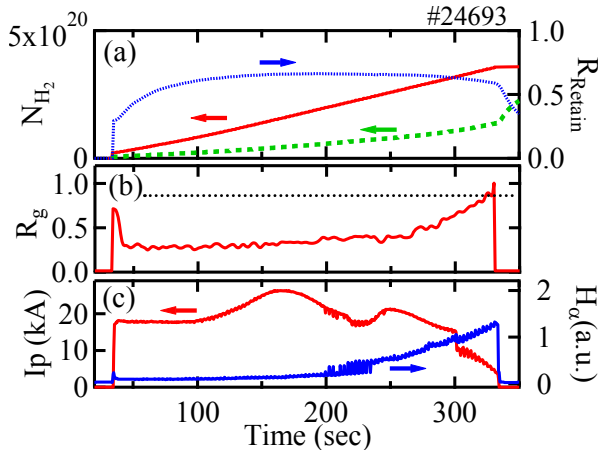


Fig.5 Time evolutions of (a) the number of injected (solid), evacuated H_2 (dashed), and ratio of retained H to injected H in the vessel, R_{Retain} (dotted), (b) global recycling ratio, R_g (solid) and indicator of unity (dotted), (c) I_p (dotted) and H_α (solid) are plotted.[6]

放電開始から 100 秒間を除いて放電後半では壁にほぼ 80% 分の供給水素が吸蔵されていることを示しており、壁排気が粒子バランスの主要な要素であることを示している。一方、 R_g は徐々に上昇を始め、放電後半では急激に上昇している。この結果は、放電の後半では H_α 線強度が上昇していることから式 (5) の比例係数が変化していることに起因している可能性もあるため 200 秒までを用いて QUEST 壁モデルとの比較を行った。結果を Fig. 6 に示す。

太い実線が Fig.5 の実験結果 R_g に式 (5) を適応して

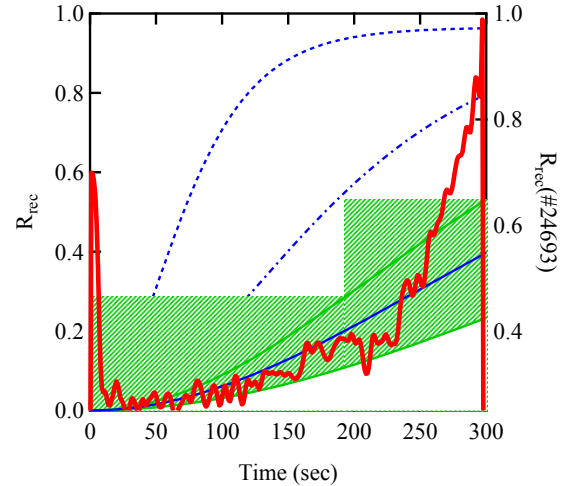


Fig. 6 Time evolutions of R_{rec} (thick solid line) is derived from R_g in the figure 5 and the equation (4) in the text. The solid, dotted, and dashed-dotted lines correspond to the calculation results based on the QUEST wall model of 100, 50, and 20 nm at H flux = $2 \times 10^{17} H/m^2/s$. The hatched area shows the region of H flux from 1 to $3 \times 10^{17} H/m^2$ in the case of 100 nm.[6]

評価した実験的に求めた R_{rec} であり、式 (5) から分かるように反射率分のオフセットが存在する。評価された反射率 r は 0.25 程度で、これは SRIM の計算と同程度である。放電開始から 200 秒までの実験結果は QUEST 壁モデルで計算した再堆積層膜厚 100nm の結果と良い一致を示した。計算で用いた粒子束の精度による影響を調べるため、異なる 3 種類の粒子束での計算結果の幅をハッチした領域で示しておく。実験的に確認された粒子束の範囲では結果に大きな差は生じないことがわかる。本計算で得られた QUEST の再堆積層膜厚は 100nm となったが、実際の QUEST の膜厚分布測定は色測定を用いて実施中である。初期的な結果として数 nm から 100nm 程度であり、本計算よりは少し薄い。現在のモデルでは真空容器壁は一樣な再堆積層に覆われて同じ粒子束を受けていると仮定している。この仮定の精度や複数の物理定数を持つ壁の効果を取り入れる等の精度の向上が今後の課題である。

謝辞

QUEST の設計・建設を推進する際に、関子秀樹氏と『これからはプラズマだけではなくプラズマ・壁相互作用の研究をしていこう』と決心して自分の全く専門外であるプラズマ・壁相互作用の研究を始めることとしました。研究のきっかけを与えてくださり、その後も継続的にご支援いただきました関子秀樹氏に深く感謝の意を表します。全くの素人である私にとって吉田直亮氏、田辺哲朗氏のご指導・ご支援は何よりでした。また、京都大学の高木郁二氏、静岡大学の矢大恭

久氏、島根大学の宮本光貴氏、慶応大学の畑山明聖氏、大阪大学の上田良夫氏、名古屋大学の大野哲靖氏、核融合科学研究所の時谷政行氏、笠原寛史氏にも多くのことを教えていただきました。この研究のために九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センターの関係者、共同利用研究者の皆様に変にお世話になりました。また、この研究は科学研究費補助金基盤研究 S（課題番号 S24226020、研究代表者 岡子秀樹、平成 24 年度～平成 28 年度）で推進されたものです。また、QUEST 装置及び関連機器は核融合科学研究所双方向型共同研究（2006 年度 課題番号 NIFS05KUTR014）によって整備されたものです。研究費の一部は科学研究費助成事業（課題番号 24656559、研究代表者 花田和明）、核融合科学研究所双方向型共同研究（課題番号 NIFS13KUTR085, NIFS15KUTR109, NIFS13KUTR093, NIFS13KUTR093, NIFS09KUTR047）、応用力学共同研究拠点事業（国際化推進共同研究 2014 年度 No.3, 4, 5, 6）によって支援されました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] H.Zushi, *et al.*, Nucl. Fusion, Vol. 45, No. 10 (2005) S142-S156.
- [2] K. Hanada, T. Sugata, *et al.*, Fusion Engineering and Design, 81 (2006) 2257.
- [3] S.Brezinsek *et al.*, Nucl. Fusion 53 (2013) 083023.
- [4] V. Philipps *et al.*, J. Nucl. Matr. 438 (2013) S1067–1071.
- [5] N.Yoshida, RIAM Reports, 149 号
- [6] K.Hanada, *et al.*, J. Nucl. Materials, 463 (2015), 1084-1086
- [7] T.Tanabe, Phys. Scr. T159 (2014) 014044.
- [8] T.Hirata, 京都大学工学部特別研究報告書
- [9] K. Hanada *et al.*, Plasma Science and Technology, 13 (2011), 307
- [10] T. Honda, 九州大学総合理工学府修士論文