国際連携による核融合炉実現を目指した プラズマ対向炉材料寿命評価コードの開発

大宅　薫[1]，キルシュナー アンドレアス[2]

International Cooperative Code Development of Lifetime of Plasma Facing Materials for Fusion Reactor

by
Kaoru OHYA, Andreas KIRSCHNER

A $^{13}CH_4$ injection experiment with a test limiter in TEXTOR is modeled by EDDY and ERO for the purpose of code-code benchmarking. The 2D patterns of CH emission of both codes agree with the experiment. The ^{13}C deposition patterns on the limiter surface are reproduced assuming negligible effective sticking (S=0) for returning hydrocarbons. The ^{13}C deposition efficiency decreases with increasing injection time, and it reaches a steady state value accompanied by a depth profile of ^{13}C. The measured ^{13}C deposition efficiency (~0.1%) is reproduced, assuming negligible sticking of returning hydrocarbons and high re-erosion yield of redeposited carbons (of the order of 10 times larger than graphite). The sticking probability and re-erosion yield are still unknown parameters, which determine erosion and deposition of plasma facing materials.

Key words: nuclear fusion, plasma wall interaction, erosion, deposition, Monte Carlo modeling, TEXTOR, $^{13}CH_4$, sticking probability, re-erosion, EDDY, ERO

1．　まえがき

核融合炉のダイバータや第一壁のスパッタリングによる損耗は、入射イオンのエネルギーや入射角度に幅広い分布があることや、燃料粒子である水素同位体以外に炭素などの不純物イオンが入射イオンに含まれるなど、単一エネルギーの一種類のイオンを決まった角度で入射する場合より複雑である。すでに、20 年前に開発されたシミュレーションコードで様々なイオン、エネルギー、入射角度に対する物理スパッタリングによる損耗が評価できる。最近は、プラズマ照射中の材料表面近傍の組成変化を考慮したシミュレーションコードが開発され、複合材や不純物イオン注入によるプラズマ対向壁の変化やその損耗への影響が精力的に調べられている(1)。

しかし、実際のプラズマ対向壁の損耗を評価するには、単に対向壁を構成する原子が失われる損耗のみの計算では不十分で、対向壁への再堆積も合わせて考える必要がある。損耗直後にイオン化し、ラーモア運動によって放出位置の近傍に再堆積する過程は、プロンプト・リデポジションと呼ばれ、シミュレーションで予測され、後に実験で検証された現象である。最近、対向壁の表面汚染や材料混合、フレーキングやダスト、トリチウム・リテンションといった問題と関連して、イオン化した壁材料原子や分子がプラズマ中を輸送され、遠く離れた、異なった壁に再堆積する過程が活発に議論されている。特に、現在建設されている国際熱核融

１徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部エネルギーシステム部門
Department of Energy System, Institute of Technology and Science, The University of Tokushima
２ユーリッヒ研究機構エネルギー・プラズマ物理研究所
Institut für Energieforschung-Plasmaphysik, Forschungszentrum Jülich
*連絡先：〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1　徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部

合実験炉 ITER において、高熱高粒子束負荷に晒されるダイバータ板の損耗・再堆積には、デタッチダイバータ条件で物理スパッタリングの寄与は小さく、化学スパッタリングで放出された炭化水素分子の複雑な解離・イオン化過程を経た再堆積が重要となる。このため、炭素同位体の ^{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精力的に行われている。ユーリッヒ研究機構（ドイツ）の TEXTOR トカマク装置でも、プラズマ放電中にテストリミタと呼ばれる‘かまぼこ形’あるいは‘くさび形’の 10 cm 程度の小さな材料片から $^{13}CH_4$ などの炭化水素ガスを放出し、数回～数十回の放電後取り出し、表面分析を行うことで、炭素不純物がどのように分布して堆積するかを調べている。

筆者の一人（大宅）が開発しているプラズマ・壁相互作用シミュレーションコード EDDY は[2]、プラズマイオン照射による壁材料の物理スパッタリングや化学スパッタリング損耗と、損耗された粒子のプラズマ中の原子・分子過程を含む輸送、さらには壁への再付着あるいは反射を考慮して、プラズマ対向壁の損耗と再堆積量を評価することができる。一方、欧州では、先行して開発された ERO と呼ばれる[3]、不純物輸送コードが一般的に使用され、現在これを用いて ITER の炉内炭素堆積分布やトリチウム蓄積分布などの予測が行われている。

本報告では、TEXTOR 装置で‘くさび形’テストリミタを用いて行われた $^{13}CH_4$ ガス放出実験を両コードで解析し、実験条件を詳細に検討しながらコード間ベンチマークを行った結果について紹介する。それぞれのコードのモデル等については、本内容を発表した Physica Scripta 誌[4] に詳しく述べたので、これを参照されたい。

2．$^{13}CH_4$ 実験の概要と計算条件

Fig. 1 に、TEXTOR 装置の上部から周辺プラズマ（重水素 : D）に挿入された‘くさび形’テストリミタ（グラファイト製）の概略を示す。トロイダル磁界 B は 2.25 [T] で、リミタ周辺のプラズマの電子温度 T_e とイオン温度 T_i、プラズマ密度 n_e については、ヘリウムイオンビームを用いて測定されたそれらのプラズマ半径 r 方向の分布を、指数関数でフィッティングしてシミュレーションに用いた。r=46 cm で、T_e=54 [eV]、T_i=81 [eV]、$n_e=1.9\times10^{12}$ [cm^{-3}]。それらの r 方向の減衰距離は、それぞれ、$\lambda_{Te}=\lambda_{Ti}$=4 [cm]、$\lambda_{ne}$=2.2 [cm]である。r=46 cm にある主リミタ（グラファイト製で、図には

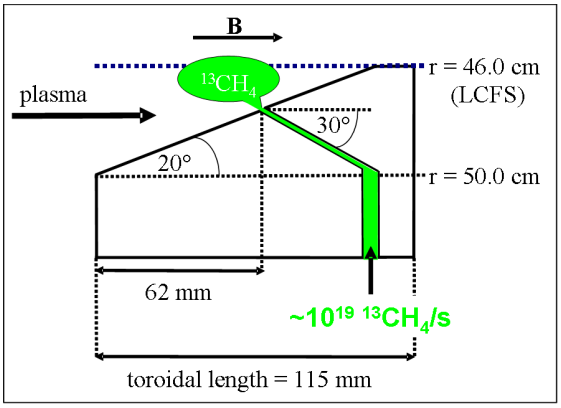

Fig. 1 Test limiter exposed to edge plasma of TEXTOR

示されていない）から損耗された炭素 ^{12}C がプラズマ中の不純物として存在するため、その濃度を 3% と仮定した。

プラズマ放電中に、テストリミタ中央付近から $^{13}CH_4$ ガスを約 10^{19} [molecules/s] の割合で 5.88 [s] 間放出し、テストリミタ近傍のプラズマ中での CH（解離生成物）の二次元発光強度分布を観測するとともに、十数回の放電の後取り出して、表面分析を行った。同定された ^{13}C の堆積量から推定されるテストリミタへの再堆積率は非常に小さく(0.11%～0.17%)、放出されたほとんどすべての ^{13}C はプラズマ中を輸送されて装置内のどこかへいったことになる。

プラズマ中に放出された $^{13}CH_4$ ガス分子は解離、イオン化、再結合などの原子・分子過程を経て様々な炭化水素分子種や炭素原子となる。これら過程の衝突断面積（あるいはレート係数）はデータベースとしてまとめられている。イオン化するとラーモア運動だけでなく、プラズマからの摩擦力や熱的な力を受け、磁力線に垂直な方向にも拡散し、さらにテストリミタ付近ではシース電界によって表面に向かって加速される。これらの効果は EDDY、ERO 両コードとも導入されている。しかし、テストリミタ表面へ戻ってきた炭化水素分子や炭素原子がそこに付着するか、反射して再びプラズマ中を輸送されるかについては実験データが少なく、付着する割合、すなわち再付着率 S は表面条件や入射粒子種に大きく依存する。一方、再堆積した ^{13}C もプラズマに照射されて再びスパッタリングによって損耗する。その際の再損耗率はもともとの材料（グラファイト）と異なり、これまでの他実験によると 10 倍も大きいと推定されている。最近、筆者らは、プラズマ対向壁に形成される再堆積層や混合層の

スパッタリングや反射などのプラズマ・壁相互作用を分子動力学シミュレーションによって評価することを提案し、現在計算を進めている。しかし、本研究では、これらの値を仮定して得られたシミュレーション結果と実験との比較によって、それらの値の妥当性を議論することとした。

3．計算結果および実験との比較

3．1　プラズマ中の二次元 CH 発光分布

Fig. 2(a) は、$^{13}CH_4$ ガス放出中に観測された解離生成物 (CH) の二次元発光強度分布である。放出位置 (r=47.3 [cm]) から少し離れた位置 (r=46 [cm]) に強い発光が見え、この分布を ERO (Fig. 2(b))、EDDY (Fig. 2(c)) 両コードとも再現していることが分かる。EDDY による発光分布が幾分 r 方向に広がっているのは、EDDY コードにプラズマ中の r 方向電界（図中、下方向）が入っていないためである。

この計算では、リミタ表面に戻った炭化水素分子の再付着率 S をゼロと仮定したが、これら分布は S の値にあまり依存しない。しかし、反射する炭化水素分子のエネルギー分布によって変化する。図は入射粒子と同じエネルギーで反射されると仮定した場合で、テストリミタから材料温度 (1000℃程度の熱エネルギー分布で、化学スパッタリングに相当）で再放出されると仮定すると、発光分布は表面付近に局在し、観測された分布とは異なることが分かっている。

炭素原子の再付着率や反射エネルギーは、EDDY では二体衝突近似モデルによるモンテカルロ計算によってシミュレーションコード内で計算しているが、ERO コードでは同じモデルの TRIM コードで作られたデータベースを使用している。

3．2　テストリミタ上の ^{13}C の堆積分布

Fig. 3(a) は、２０回程度のプラズマ放電で、積算して 108 [s] 放出した後のテストリミタの写真である。Fig. 3(b) には、投射光の干渉縞を利用して測定した（カラリメトリ法）炭素堆積膜厚分布を示す。$^{13}CH_4$ ガスの放出孔（直径 2 mm）の近傍に堆積していることがわかる。また、トロイダル磁界方向（リミタの長辺の方向）よりやや傾いた方向に伸びている。

この分布と比較するため、まず、炭化水素分子の再付着率を S=0.5、再損耗率をグラファイトの化学スパッタリング率（ここでは Y_{chem}=0.03 とした）と仮定して計算した。EDDY、ERO 両コードとも 50% を超える再堆積率を示し、堆積分布は Fig. 3 に比べ、遥かに

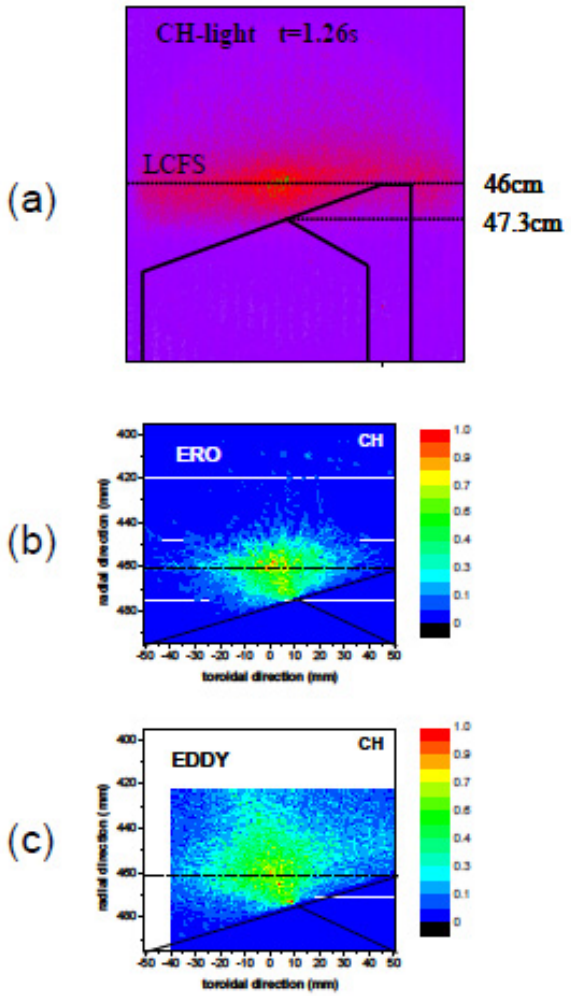

Fig. 2 Two-dimensional patterns of the CH emission light during $^{13}CH_4$ through a hole in the test limiter surface in TEXTOR[4]: (a) experimental, (b) ERO simulation and (c) EDDY simulation. All hydrocarbon species returning to the surface are assumed to be reflected from the surface with the energy of incidence: the sticking probability S=0. Reproduced from ref. (4)

放出孔近傍に局在する。次に、再損耗率を 10 倍、すなわち $Y_{enh}=10Y_{chem}=0.3$ と仮定して同様な計算を行っても、再堆積率は、EDDY で 33%、ERO で 32%であり、堆積分布も広がらないことが分かった。

Fig. 4 は、S=0 と Y_{enh}=0.3 を仮定して計算したテストリミタ表面全域の ^{13}C の堆積分布である。EDDY、ERO とも観測された堆積分布（Fig. 3）にほぼ近い分布となる。リミタから放出された $^{13}CH_4$ ガス分子は、プラズマ中で電子やイオンとの衝突によって解離、イオン化、再結合などの衝突過程を繰り返す。イオン化された粒子はトロイダル磁界の方向（Fig. 4 中の横方向）に移動するが、その際、表面近傍で、シース電界

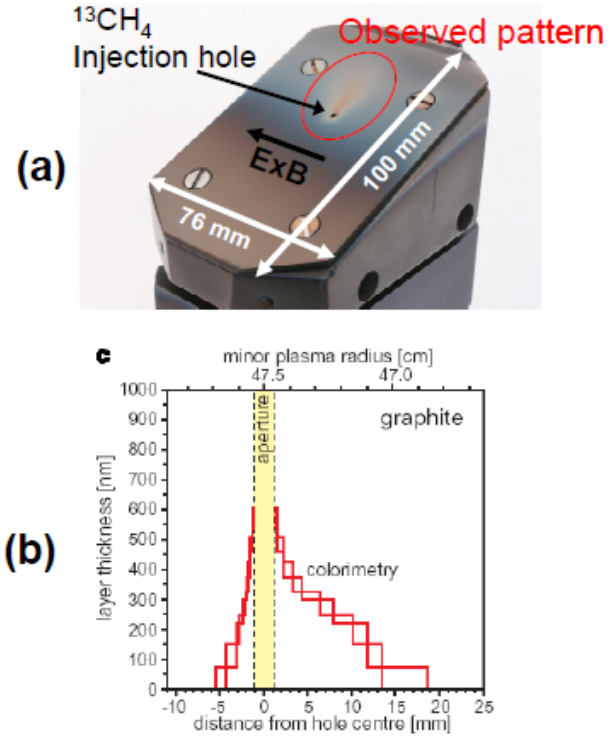

Fig. 3 (a) Observed ^{13}C deposition patterns on the test limiter surface after injection of $^{13}CH_4$. (b) Carbon thickness profile of the limiter surface measured by colorimetry. Reproduced from ref. (5)

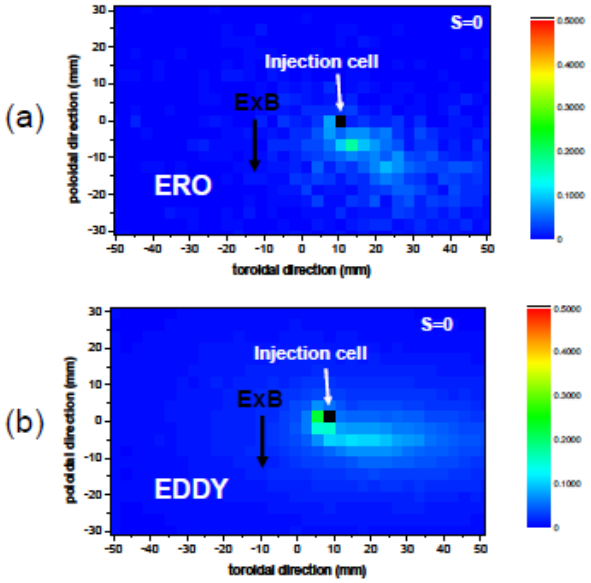

Fig. 4 Calculated ^{13}C deposition patterns on the test limiter surface after injection of $^{13}CH_4$[4]: (a) ERO simulation and (c) EDDY simulation assuming S=0 and Y_{enh}=0.3. Reproduced from ref. (4)

の影響も受け、磁界と電界の両方向に垂直な方向（図下方向）にドリフト（E×B ドリフトという）しながら移動する。その結果、Fig. 3 に見られるように、トロイダル磁界と少し傾いた方向に堆積分布の広がりが生じる。プラズマ中の r 方向電界も考慮した ERO コードでは、その効果がより顕著に現れている。

Fig. 3 の再堆積分布は放出孔周辺が最大となっているが、堆積が最大となる位置は使用するプラズマの条件によって変化する。以前、行われた実験では放出孔から 2~3 cm 離れた位置に最大堆積が観測されており[6]、実験条件（主に、プラズマ温度と密度、プラズマ中の不純物炭素濃度）との関係をさらに詳細に調べる必要がある。また、シミュレーションでは放出孔が最大の堆積となるが（Fig. 4 で黒く示した）、実験後取り出したテストリミタの放出孔内部には堆積した炭素が観測されていないことなどもシミュレーションコードの更なる改良を必要とする問題である。

3．3　テストリミタ表面近傍の ^{13}C 深さ分布

リミタ表面でのテストリミタを構成する炭素（^{12}C）、さらにはプラズマ中の不純物炭素イオンの堆積による炭素（^{12}C）との ^{13}C の混合は ^{13}C の再堆積に大きな影響を与える。実験後取り出したリミタ表面の ^{13}C と ^{12}C の割合、$^{13}C/C=^{13}C/(^{13}C+^{12}C)$、は 0.5 程度でほぼ一定であった。しかし、Fig. 5(a) のように、EDDY では、放出した $^{13}CH_4$ 分子およびその解離生成物（炭素原子を除く）の再付着率を小さく（S=0.1）した場合でも、$^{13}CH_4$ ガス放出によって早い段階で放出孔付近で堆積した ^{13}C が表面を覆い（$^{13}C/C$ =1）、以後 ^{13}C 堆積層が成長し続ける結果となる。S=0 とした計算でようやく表面の $^{13}C/C$ が 1 以下で飽和する（Fig. 5(b)）。放出時間に対する ^{13}C 堆積層の増加も遥かに小さくなり、Fig. 3(b) で観測された堆積厚さと矛盾しない。これらの $^{13}C/C$ の飽和と堆積層厚さの減少は、堆積した ^{13}C の再損耗がその理由である。^{13}C の堆積が少ないとき、堆積初期段階（t<0.29 s）において、表面に存在する多くの炭素はもともとのリミタ材の ^{12}C か、プラズマ不純物が堆積した ^{12}C であり、その ^{12}C が主として損耗（あるいは再損耗）されるため、^{13}C はあまり再損耗されることなく堆積する。しかし、表面付近の $^{13}C/C$ が大きくなると逆に ^{13}C が主として再損耗されるようになり、^{13}C の堆積は抑制される。このように、堆積と再損耗が平衡することによって $^{13}C/C$ が飽和し、堆積量も大きく増加し続けることはない。ただ、計算による飽和 $^{13}C/C$ の値は 0.8~0.9 で、実験で観測されている値より大きい。以前の ERO コードの計算では、

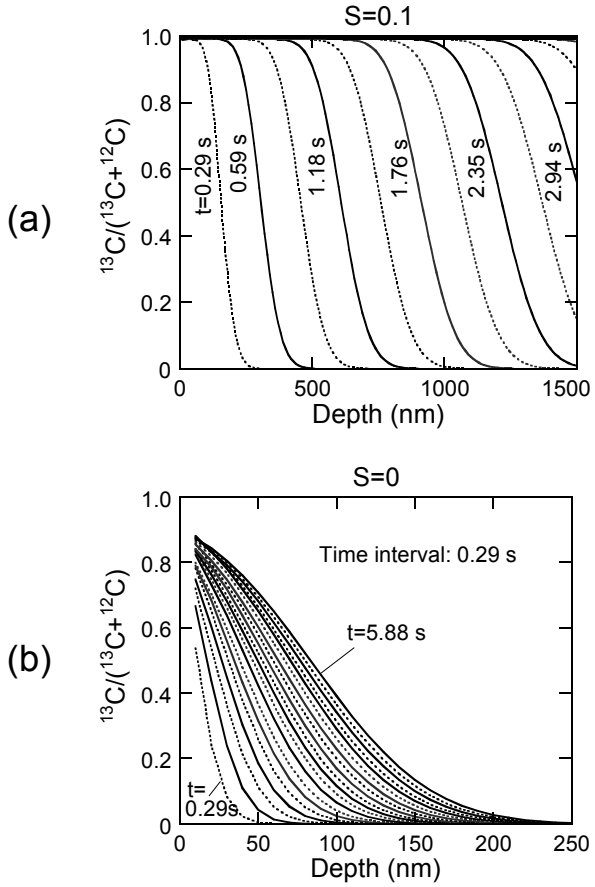

Fig. 5 Depth profiles of redeposited ^{13}C atoms at the location of the $^{13}CH_4$ injection hole on the limiter calculated by EDDY, assuming (a) S=0.1 and (b) S=0. Reproduced from ref. (4)

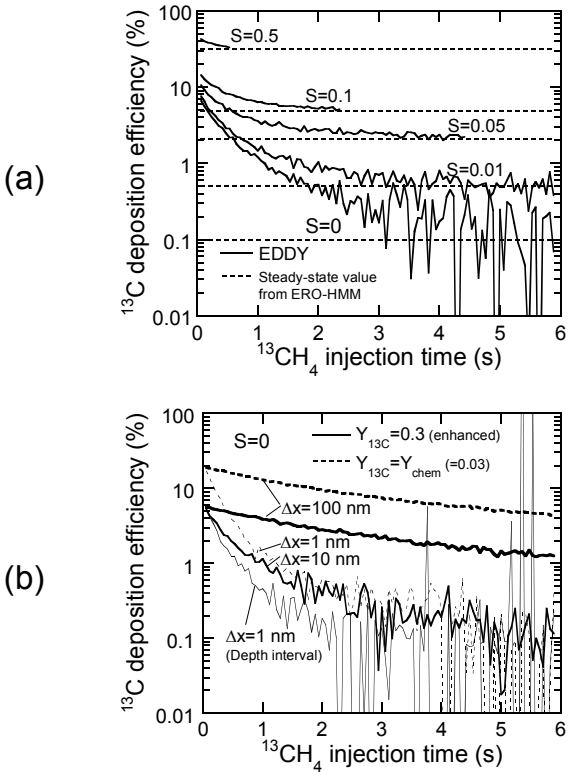

Fig. 6 Dynamic changes of ^{13}C deposition efficiency on the test limiter as a function of the $^{13}CH_4$ injection time, calculated by EDDY with (a) different sticking probabilities (S) of hydrocarbons and (b) different depth intervals (Δx) used for simulation and chemical sputtering yield of redeposited ^{13}C atoms assuming S=0. The dotted lines in (a) correspond to the steady-state values of the deposition efficiency calculated by ERO. Reproduced from ref. (4)

Y_{chem}=0.015、Y_{enh}=0.08、プラズマ中の不純物炭素イオンの濃度を 3.6% として $^{13}C/C$～0.5 に飽和しており、プラズマ中の不純物炭素イオンの平均電荷数が 4 程度と高く、シース電界によって数 100 [eV] 程度に加速されて表面を衝撃することから、プラズマ中の炭素などの不純物イオンの濃度も $^{13}C/C$ の飽和値を決定する重要なパラメータであることがわかる。

３．４　テストリミタへの ^{13}C の堆積率

前節で述べた ^{13}C の堆積とその再損耗によっておこる $^{13}CH_4$ ガス放出中の $^{13}C/C$ の振る舞いは、^{13}C の再堆積率（＝^{13}C 堆積量／$^{13}CH_4$ 放出量）の時間的な変化の原因となる。Fig. 6(a) のように、$^{13}CH_4$ ガスを放出し始めた時間で、テストリミタへの ^{13}C の再堆積率は最大である。図は Y_{chem}=0.3 として炭化水素の再付着率 S を S=0.5 から S=0 まで変化した結果である。S=0 の場合でも、始めは 7% を超える再堆積率で ^{13}C が堆積するが、時間とともに急激に再堆積率が低下し、一回の $^{13}CH_4$ ガス放出時間 (5.88 s) 内に 0.1 程度の値に近づく。0.1 の値に近づくに従い、計算における誤差の影響で再堆積率が大きく振動するようになる。これを小さくするのは可能であるが、それにはより多くの計算時間を必要とする。一方、S=0.05 より大きい場合、$^{13}CH_4$ ガス放出時間内に $^{13}C/C$=1 に達し、^{13}C の堆積によってリミタ表面層の厚さが急増する。したがって、この厚さが計算可能な限界を超えるところで計算をストップした。いずれの S 値に対しても、再堆積率の平衡値は、ERO コードで計算された値とよく一致していることが分かる。さらに、S=0 とした場合も一回の $^{13}CH_4$ ガス放出実験中に平衡値に達しており、その値は、実験によって見積もられた 0.11%～0.17% とよく一致している。一方、EDDY の計算において、平衡値に達するまでに要する時間は、150 層に分割した表面付近の分割厚さ幅に依存する（Fig.

6(b))。

4．まとめ

本報告では、ユーリッヒ研究機構（ドイツ）のTEXTOR トカマク装置実験を EDDY コードと ERO コードで解析し、コード間ベンチマークを行った平成20 年度の成果について紹介した。

プラズマ放電中にテストリミタと呼ばれる‘くさび’形の小さな材料片から $^{13}CH_4$ ガスを放出して観測したプラズマ中の不純物発光特性、テストリミタ上の ^{13}C の再堆積分布と再堆積率について解析を行った。その結果、両コードは $^{13}CH_4$ ガス放出中に観測した CH（解離生成物）の二次元発光分布を再現したが、観測された ^{13}C のテストリミタへの再堆積率が非常に小さく、これを両コードで再現するには、プラズマ中で解離したすべての炭化水素分子のテストリミタ表面への再付着率 S をほとんどゼロ、すなわち炭素原子のみが付着するとし、さらに再堆積した炭素（^{13}C および ^{12}C）の再損耗率を通常のグラファイトの 10 倍にとる必要があった。これら仮定によって、テストリミタ上の ^{13}C の堆積分布を再現できた。

現在、テストリミタをプラズマから少し離れた場所に配置し、堆積した ^{13}C の再損耗が無視できる条件で再堆積量のその場計測を行うことによって、一回の $^{13}CH_4$ ガス放出ごとの再堆積量を評価し、対応するシミュレーション計算を継続している。一方で、実験的評価が困難な再堆積層の損耗率については、分子動力学シミュレーションコードを使って模擬的な再堆積層を作成し、水素や不純物（炭素）イオンを照射して、核融合炉の複雑環境を想定した計算による評価を行っている。シミュレーション計算の基礎となる素過程データをさらにシミュレーションでつくることで、様々な条件でのシミュレーションが可能となるかもしれない。実験データとのクロスチェックは欠かせないが、今後のプラズマ・壁相互作用研究の一つの方向として期待している。

謝　辞

本報告は、平成 20 年度に採択された本課題のソシオテクノサイエンス研究部研究プロジェクトにおける成果の概要を纏めたものである。本研究の遂行において、筆者の一人（大宅）が共同研究においていつもお世話になっている、ユーリッヒ研究機構プラズマ物理研究所長 U. Samm 教授をはじめ、V. Philipps 博士、A. Pospieszczyk 博士、M. Rubel 博士、P. Wienhold 博士、A. Kreter 博士、および TEXTOR チームの多くの皆様には、特に実験データの提供と、シミュレーションのための実験条件など懇切な議論を頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 大宅薫, 相良明男 : 壁の表面で何が起きているか, 日本原子力学会　連載講座「今，核融合炉の壁が熱い！－数値モデリングでチャレンジー」, Vol. 50, No. 8, pp. 511~515 (2008).
2) K. Ohya: Physica Scripta, Vol. T124, pp. 70~75 (2006).
3) A. Kirschner, et al.: Nuclear Fusion, Vol. 40, pp. 989~101 (2000).
4) K. Ohya, A. Kirschner: Physica Scripta, Vol. T138, 014010 (7pp) (2009).
5) A. Kreter et al.: Journal of Nuclear Materials, Vol. 363-365, pp. 179~183 (2007).
6) P. Wienhold et al.: Journal of Nuclear Materials, Vol. 290-293, pp. 362~366 (2001).