

## 小特集 重相構造プラズマの形成をもたらすベーパーシールド効果

# 5. ベーパーシールドにおける 重相構造プラズマの PIC シミュレーション

## 5. PIC Simulation of Plasma with Multi-Phase Matters at the Vapor Shielding

伊庭野健造, 滝塚知典

IBANO Kenzo and TAKIZUKA Tomonori

大阪大学

(原稿受付: 2017年5月20日)

PIC シミュレーションを用いて重相構造プラズマをシミュレーションすることで, シース・プレシースの影響を始めとした各種プラズマ-壁相互作用の影響を取り入れることが可能となる. 本章では PIC シミュレーションを用いたベーパーシールド研究の例として, ベリリウム蒸気とタングステン蒸気の比較によるシース効果の評価, プラズマガン実験との比較, ELM を模擬した非定常熱負荷のシミュレーションを紹介する.

### Keywords:

vapor shielding, particle-In-Cell, sheath, radiation cooling, beryllium, tungsten, ELM

### 5.1 重相構造プラズマにおける PIC シミュレーションの重要性

固相・液相・気相とプラズマが相互作用する重相構造プラズマのシミュレーションについては, 4章で紹介されたように MHD 流体モデル[1,2]をベースにした手法が先行し研究されてきた. 近年では, 壁近傍プラズマにおける様々な現象を運動論効果まで含めて調べるために, 粒子の個々の運動を追跡する Particle-In-Cell (PIC) 法によるシミュレーション研究[3]が進められている. 流体モデルでは自己無撞着に模擬することが難しい壁近傍に形成されるシース・プレシースは, 壁面へのプラズマエネルギー伝達係数や壁材不純物スパッタリングに係るイオン入射エネルギーを決定するだけでなく, その電場は壁材不純物粒子の再堆積等の振る舞いに大きく影響する. さらに壁面からの2次電子放出や, 入射イオンの反射, リサイクリングなどのプラズマ-壁相互作用がシースの状態を変化させる. また, 壁面からの不純物粒子放出は, 放出エネルギーの小さい蒸発粒子だけでなく, 弾き出しによる放出エネルギーの大きいスパッタリング粒子も存在する. 放出エネルギーは電離平均自由行程を直接増減し, 壁面近傍における不純物による放射領域の体積を変動させ, プラズマ冷却に大きく影響する. プラズマ冷却は壁面へのエネルギー流入および電子温度とシース電位を減らし, その結果壁材蒸発およびスパッタリングが減少する. PIC 法を用いることで, 重相構造プラズマで重要なこれらのプラズマ-壁相互作用を自己無撞着に取り込むことが可能となる.

以上のように, PIC 法による重相構造プラズマシミュレーションの重要性は知られていた. しかし, 重相構造プ

ラズマでは, 壁面の蒸発・アブレーションに伴う急激な密度変化が起こるため, 計算で取り扱う粒子数の増加に伴う計算コストの増大が懸念されていた. PIC 法では現実のプラズマ粒子を全て計算するのではなく, ある一定の粒子数毎に超粒子としてまとめ, それら超粒子の振る舞いを計算する. 著者らは, 超粒子がそれぞれ異なる重み(超粒子が含む粒子数)を持つ“重み付き PIC 法”を用いることで, 計算コストの拡大を防ぎ, 多種不純物を取り扱える重相構造プラズマシミュレーションを実現している[3,4].

本章では, PIC 法による重相構造プラズマシミュレーションの概要を記述後, ベリリウム (Be) 蒸気とタングステン (W) 蒸気の壁面からの離脱距離とプラズマ冷却効果の評価, プラズマガンによるベーパーシールド実験との比較, および ELM 時の非定常熱負荷のシミュレーションについて紹介する.

### 5.2 計算モデル

PIC 法は, 個々の粒子の運動とそれらの密度を基にした系全体の電場の計算を, 有限幅の空間メッシュと有限間隔の時間ステップで繰り返し進めることにより, 互いに矛盾のないシミュレーションを行っている. PIC 法については[5-8]などに詳しく説明されている. 本研究で使用した PIC コード[3,4]は1次元空間3次元速度(1d3v)を取り扱う. イオンだけでなく電子についても旋回中心近似を行わず, 3次元速度を取り扱う. また中性粒子も荷電数  $Z=0$  のイオンと同様に扱う. ただし, 用いる電子の質量は水素質量の  $1/300$  程度とし, 現実より重い電子を取り扱うことで, 時間ステップ~(プラズマ周波数)<sup>-1</sup>と空間メッ

シム幅～デバイ長の計算条件を緩和する。

図1に、壁に挟まれた1次元シミュレーションにおける重相構造プラズマ計算モデルを示す。目的の温度・密度を達成するように、系中央付近の加熱領域 (Langevin heat bath [9]) に電子とイオンを配置する。加熱領域に供給された粒子は左右の壁に向かって流出する。そして壁境界に到達すると、その粒子エネルギーがそれぞれの壁面への熱流束として計算される。壁面に到達した粒子は、情報を初期化し、再び加熱領域に供給することで、系全体の粒子数を保存することができる。また、放出不純物や過渡的ELMプラズマ粒子については、それぞれの粒子数制御を行うことができる。粒子の電離・再結合過程はOPEN-ADASの断面積ライブラリ [10] を用いてモンテカルロ法によって模擬している。また不純物超粒子からの放射発光パワーも同ライブラリを使用して計算している。それぞれの過程に伴って必要となるエネルギーは、同一セル内の電子を減速冷却することで清算している。

既に述べたように、壁面に到達した粒子のエネルギー流量から壁面への熱流束が決定される。この熱流束を境界条件とし、1次元の伝熱計算をすることで、壁面内の深さ方向温度分布が計算できる (図1の左端モデル)。伝熱計算における空間メッシュの大きさにもよるが、PICの計算ステップより短い時間メッシュが必要になる場合は各PIC計算ステップに対して複数回の伝熱計算ループを行うことで、安定した解を得ることができる。

伝熱計算の結果を基に、PIC計算において蒸発量に対応した不純物超粒子を作成し、壁面からの放出させることで、壁面からのフィードバックを取り入れた重相構造プラズマシミュレーションとなる。ここで、蒸発放出される不純物粒子の量が時々刻々大きく変化することを考えると、超粒子の重みを均一に設定して不純物粒子を取り扱うことは困難であると分かる。重みが大きい場合、蒸発初期には時間ステップ当たり放出量が重みを下回って超粒子の放出ができなくなる。一方重みが小さい場合、蒸発量が増えた際に膨大な数の超粒子を放出せざるを得なくなり計算が破綻する。そこで我々は、全ての超粒子が異なる重みを持つような“重み付PIC法”を採用して、蒸発量に応じた重みを持つ不純物超粒子を放出するようにした。どの段階の蒸発過程においても、不純物によるプラズマ密度上昇や放射冷却等の影響を矛盾無くフィードバックできる重相構造プラズマシミュレーションが可能となった。

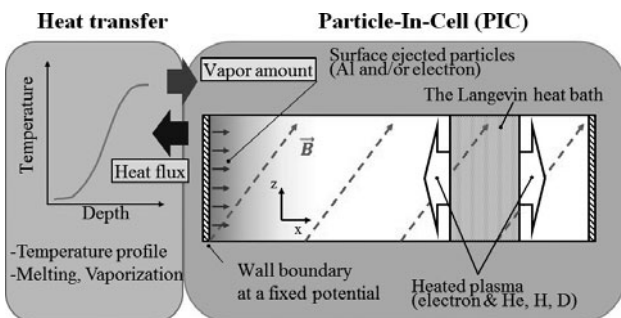


図1 重相構造プラズマの計算モデル概略図。

不純物粒子の荷電数は、周囲のプラズマ条件 (電子密度、電子温度等) に従い、中性  $Z=0$  から完全電離  $Z=Z_Z$  まで変化する。その電離・再結合過程で起きる電子の生成消滅について、“均等重みPIC法”では超電子を直接的に生成消滅させる必要がある。“重み付PIC法”では、電子生成消滅に応じて近傍の超電子の重みを増減させられるので、例えばstick-and-snatch法 [4] やslit-and-merge法 [11] を用いて、超電子の数を大きく変動させずにシミュレーションを実行することができる。

### 5.3 シースによる蒸発粒子の再堆積効果

シース・プレシースによる特に顕著な影響の1つとして、壁由来不純物粒子の再堆積効果が挙げられる。これは、壁面から放出された不純物中性粒子が電離しイオンになると、シース電場の影響で壁面に引き戻される現象である。そこでシース・プレシース効果について、1価電離断面積が大きく変わらないBeとWの粒子を比較しつつ、実験とPICシミュレーションで調べた。トカマク装置のように、磁場がダイバータ板面に対して傾いている系においては、ラーマ運動による再堆積効果も重要である。電離平均自由行程がラーマ半径より短いとき、シース効果なしでも、壁から放出される不純物粒子のほぼ半数が再堆積される [4]。

直線プラズマ装置PISCES-BにおけるBe, W試料に対する蒸気-プラズマ相互作用の観察実験 [3] では、電子温度  $T_e=6.5$  eV, 電子密度  $n_e=2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  の定常Heプラズマ照射中の試料にパルスNd:YAGレーザーを照射することで蒸気を発生させ、プラズマへの冷却効果を調べた。この系では磁場は試料面に垂直であり、ラーマ半径効果は無視できる。この実験において、Be試料のとき顕著な電子温度低下が観察されたが、W試料のときは冷却効果が観察されなかった。

このPISCES-B実験と同様な条件でPICシミュレーションを行った。Be蒸気とW蒸気の壁面からの放出は、実験に相当する蒸発量を仮想的に与えた。仮想的な蒸気量を用いるため、先に述べた壁 (試料) 内の伝熱計算を行っていない。図2にシミュレーションの結果を示す。Be蒸気が壁から1 cm程度まで離れた領域の電子温度を顕著に低下 ( $T_e=3-4$  eV) させているのに対し、W蒸気では温度の低下は限定的であった。これは、シース・プレシースの電場により電離されたあとの粒子の引き戻しが強影響を持っていると考えられる。BeとWは1価電離断面積に大きな違いはないが、その質量が大きく異なるため ( $m_W/m_{Be}=184/9$ )、放出エネルギーが同じならば電離平均自由行程は軽いBeのほうが重いWに比べ $\sqrt{20}$ 倍ほど長く、シースの影響を受けにくい。図に示すように、Beでは中性粒子密度の減衰長に比べイオンを含む全粒子密度の減衰長が長くなっているのに対して、Wでは全粒子密度減衰長が中性粒子密度減衰長より短くなっている。W粒子にはシース電場引き戻しの影響が大きいことがわかる。プラズマの冷却には、放射発光に寄与する粒子雲の量 (体積×密度) が重要である。電離平均自由行程が長くシースの影響を受けにくいBeは粒子雲量が大きく電子温度低下をもた

らしている一方、シースの影響を受け易いWの粒子雲量は少なくプラズマ冷却はほとんど起きていない。またBeでは、一度放射発光が大きくなりプラズマが冷却されて電子温度が下がると、電離断面積が小さくなり電離平均自由行程が延びるので、ますます放射発光粒子雲が増える。このPICシミュレーションにより、PISCES-B実験結果を概ね説明できた[3]。

### 5.4 プラズマガン実験結果との比較

2章で紹介されたプラズマガンを用いたELMパルス熱負荷模擬実験では、Wダイバータに堆積したBeを模擬するためにAl被覆W試料を用いた実験が行われている。前節に引き続き、本PICコードを用いて、同実験についてシミュレーションを行った[12]。仮想的に低温低密度の背景定常Heプラズマを設置した状態で、電子温度  $T_e = 30$  eV、電子密度  $n_e = 10^{21} \text{ m}^{-3}$  のパルスHeプラズマを200  $\mu\text{s}$  間、3  $\mu\text{m}$  Al被覆付き50  $\mu\text{m}$  厚W試料に照射した。比較のために、Al被覆の無いW試料のシミュレーションも行った。試料内の伝熱計算は裏面を断熱境界とし、Alの蒸気圧が

1 kPaを超える2000 Kに達するとAlは全て蒸発すると仮定した。プラズマ放電条件から、試料には1 MJ/m<sup>2</sup>の熱入量と5 GW/m<sup>2</sup>の熱負荷が予想され、シミュレーションもほぼその値になっている。

図3に、Al被覆のある場合と無い場合の計算結果を示す。Al被覆試料(Al/W)では、5 GW/m<sup>2</sup>を超える熱負荷により多量のAl蒸気が生成し、その結果プラズマが冷却されて、照射開始から100  $\mu\text{s}$ 程度で電子による熱負荷が急激に低下している。一方Al被覆の無いW試料については顕著な熱負荷の変動は見られない。試料裏面温度を比べてみても、Al被覆試料はW試料よりも低温で温度上昇が飽和し、最終的な温度も800K程度低くなっていることがわかる(図3下)。このシミュレーション結果は実験の観測結果とよく一致している。

### 5.5 ELM時の熱負荷軽減効果

バーバースィールドングの効果が期待されるのは、トカマク等の核融合プラズマにおけるディスラプションなどの巨大な熱負荷が起こった際であるが、type IなどのELM時の中規模熱負荷においても炭素壁やBe壁、もしくはBeが表面に付着したW壁などには熱負荷軽減効果が期待できる。ELM時に形成される重相構造プラズマの挙動をよく理解するために、定常背景プラズマ粒子とELMプラズマ粒子および生成不純物粒子を、それぞれ分別してシミュ

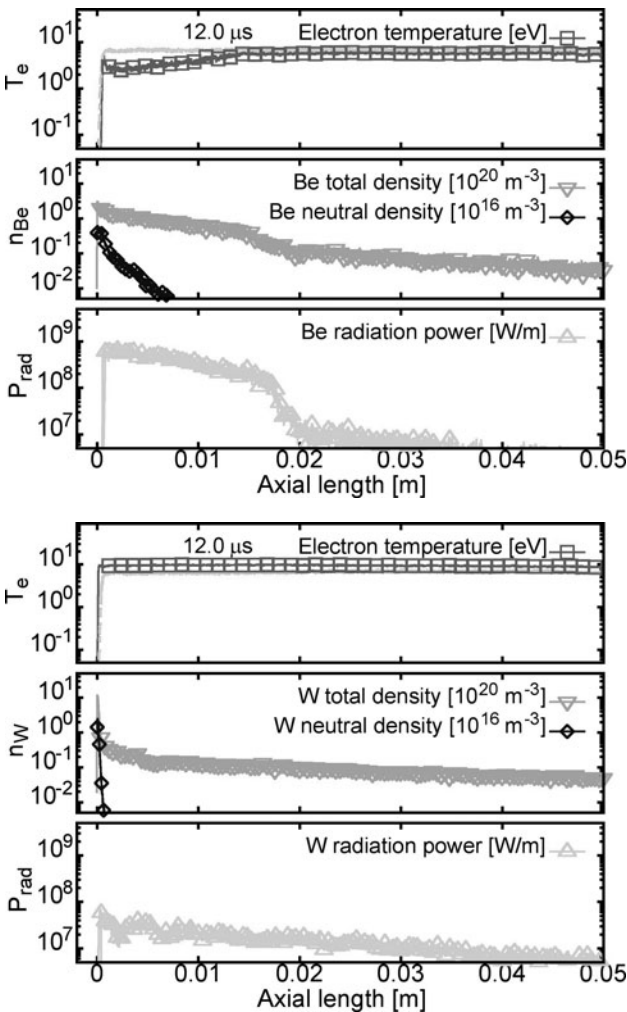


図2 定常Heプラズマ中に壁面からBe蒸気(上)、W蒸気(下)を $2 \times 10^{23} \text{ atoms/m}^2\text{s}$ 放出してから12  $\mu\text{s}$ 後の電子温度  $T_e$ 、不純物密度  $n_{\text{Be}}$ 、 $n_{\text{W}}$ (全密度と中性粒子密度)、放射パワー  $P_{\text{rad}}$ の空間分布の計算結果。(参考文献[3]の図8を引用)。

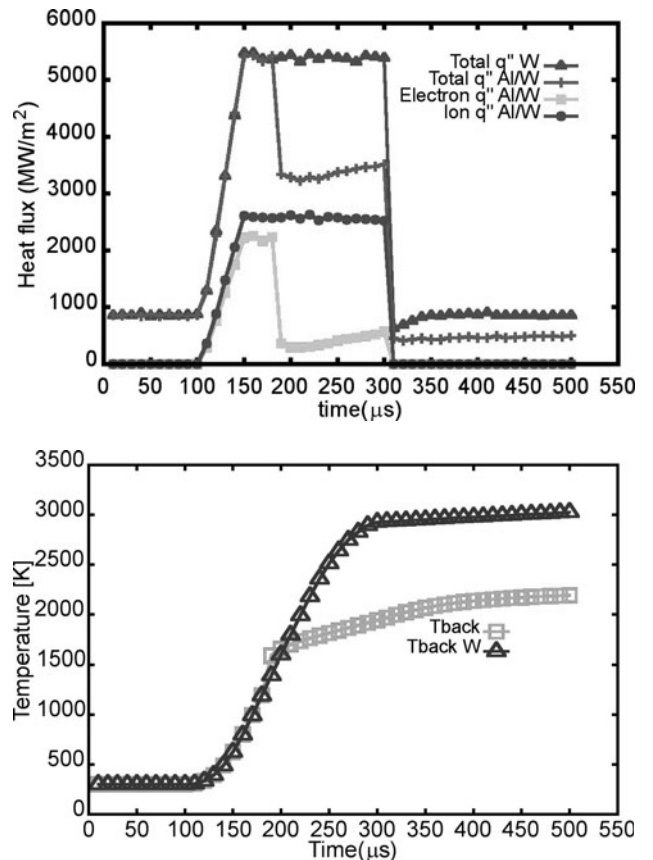


図3 プラズマガン装置における1 MJ/m<sup>2</sup>、200  $\mu\text{s}$ パルスHeプラズマ照射時の50  $\mu\text{m}$ 厚さW試料と3  $\mu\text{m}$ Al被覆付きW試料における熱負荷変化(上)と試料裏面温度変化(下)の計算結果。

レーションすることが肝要である。本PICシミュレーションにおいては背景プラズマとELMプラズマを別々の2成分プラズマとして取り扱う。電子についても、上記2プラズマそれぞれに属するものとして分別して取り扱っている。電離や放射過程において、1つの不純物超粒子に対して背景プラズマ電子とELMプラズマ電子それぞれ別にエネルギー平均し、それぞれの衝突断面積を計算する。電場の計算においては勿論、場の電荷密度に全ての粒子の情報を統合して計算する[13]。

電子温度  $T_e \sim 30$  eV, 電子密度  $n_e \sim 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  の背景プラズマに対して電子温度  $T_{e,ELM} \sim 1$  keV, 電子密度  $n_{e,ELM} \sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$  のELMプラズマが200  $\mu\text{s}$  間流入する場合についてシミュレーションを行った[12]。磁場については傾きの効果を取り入れるため  $B_x/B_z = 0.2 \text{ T}/2.0 \text{ T}$  とし、ダイバータ板面への入射角  $6^\circ$  程度の系を想定した。壁面材料は0.2 mm厚さのBe保護壁が冷却管付きの銅モノブロックに溶接されている対向材を想定した。図4に示すように、背景プラズマのみのときは10 MW/m<sup>2</sup>程度の壁面への熱負荷が、ELMプラズマによって3000 MW/m<sup>2</sup>まで上昇することがシミュレーションされている。比較のために壁からの蒸気がないと仮定した場合の計算結果もプロットしている。Be蒸気が発生する計算については壁面の温度が上昇し、蒸気が発生することで、約100  $\mu\text{s}$  後から熱負荷が軽減していく様子が、前節図3と同様に観察できる。さらに熱負荷の内訳を詳しく見ると、不純物放射による冷却は電子の冷却であり、ELMイオンによる熱負荷は高いままであった。電子・イオン間のエネルギー交換は質量比が大きいため、ほとんど起きていなかった。

現シミュレーションではELMイオンが冷却されなかったが、その冷却がなければ壁の熱負荷・スパッタリングなどを十分に抑制することができない。ELMイオンに対して不純物蒸気が冷却効果を持つかどうかを明らかにするためには、放射冷却以外の寄与を検討しシミュレーションモ

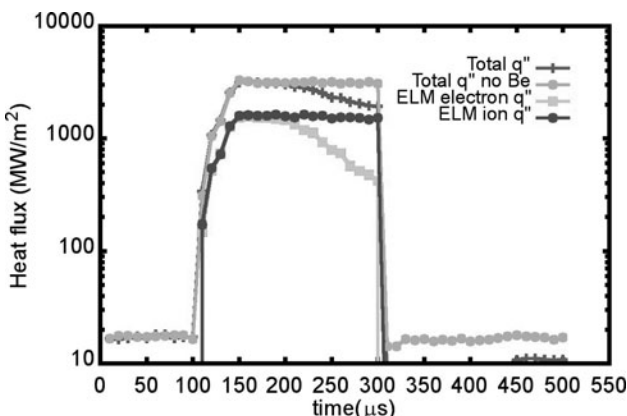


図4 PICシミュレーションで計算されたBe/Cu対向材に対するELMによる流入熱負荷の時間推移。

デルに取り入れる必要がある。例えばイオン・不純物中性粒子間の弾性衝突は100 eV以上の領域においてもエネルギー散逸効果が期待できる。入射イオンと不純物中性粒子の質量が近い場合には、衝突あたりのエネルギー移動が大きくなり、効率的なエネルギー散逸が期待できる。今後は弾性衝突による背景イオンのエネルギー散逸効果についてもシミュレーションに取り入れることが課題となっている。

## 5.6 まとめ

重相構造プラズマによるベーパーシールド効果についてのPICシミュレーション研究について紹介した。まだ始まって間もない研究ではあるが、線形プラズマ装置やプラズマガン装置における実験と整合性を図りながら進められている。多くの課題も残されているが、一つ一つの物理を明示的に取り入れ、それらの結果への影響を判断しながらシミュレーションモデルとコードの開発していくことが重要である。この研究が進展し、より現実に即した状況をシミュレーションすることで、核融合装置におけるELM/ディスラプション時のプラズマ対向機器の損耗について、さらに正確な予測が可能になることが期待される。

## 参考文献

- [1] A. Hassanein and I. Konkashbaev, J. Nucl. Mater. **273**, 326 (1999).
- [2] A. Hassanein, Fusion Eng. Des. **60**, 527 (2002).
- [3] K. Imano *et al.*, Nucl. Mater. Energy, *in press*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nme.2017.01.016>
- [4] K. Imano *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **56**, 705 (2016).
- [5] 内藤裕志, 佐竹真介: プラズマ・核融合学会誌 **89**, 245 (2013).
- [6] C.K. Birdsall, IEEE Trans. Plasma Sci. **19**, 65 (1991).
- [7] J.P. Verboncoeur, Plasma Phys. Control. Fusion **47**, A231 (2005).
- [8] T. Takizuka, Plasma Phys. Control. Fusion **59**, 034008 (2017).
- [9] A. Froese *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **50**, 273 (2010).
- [10] H.P. Summers and M.G. O'Mullane, Atomic data and modelling for fusion: The ADAS Project, AIP Conf. Proc. **1344**, 179-187 (2011), <http://open.adas.ac.uk/>
- [11] M. Pfeiffer *et al.*, Comput. Phys. Comm. **191**, 9 (2015).
- [12] K. Imano *et al.*, PIC simulations of vapor shielding at plasma gun device and ELM, 24th ITPA SOL-div meeting (York, UK, 2017), in preparation for submission.
- [13] K. Imano *et al.*, Particle simulation of plasma heat-flux dissipation by evaporated wall materials, 26th Fusion Energy Conf., TH/P6-27 (Kyoto, Japan, 2016).