

プラズマ対向材の数値モデリング

砂原 淳

Center for Materials Under eXtreme Environment (CMUXE),
School of Nuclear Engineering, Purdue University

はじめに

核融合炉においてプラズマ対向材は最も重要なコンポーネントの一つである。国際熱核融合炉(ITER)においてはプラズマを長時間安定して制御する技術確立が求められているが、炉心プラズマと並んで第一壁やダイバータ板など、プラズマ対向材の課題克服が重要になっている。第一壁やダイバータ板などのプラズマ対向材は炉心プラズマからの輻射や粒子に晒され内部損傷や特性変化が生じる。その結果、プラズマ対向材の特性変化は自身の特性劣化のみならず、輻射再放射や粒子の放出という形で他のプラズマ対向材や炉心プラズマにも影響を与え得る。同様の課題はレーザー核融合炉のプラズマ対向材にも言える。レーザー核融合炉心プラズマからの輻射は壁表面を加熱し、希薄気体の光電離を励起する。炉心の核反応で生じるアルファ粒子の入射は壁表面の欠陥生成、融解を引き起こす。プラズマデブリの入射は壁からの気体放出と合わせ、核融合炉内部環境に大きな影響を与え得る。さらにレーザー核融合炉では 10Hz 程度のパルス運転が想定されており、炉内環境は爆縮後、次の爆縮に備えて速やか(~100ms)に真空等の条件回復がなされなければならないが、この条件を保証するためには炉心プラズマとプラズマ対向材を含む炉内環境の時間発展を正確に理解する必要がある。そのため、これらの諸過程を統一的に扱う数値シミュレーションの開発はレーザー核融合炉研究開発に必須である。また、このような過程を模擬するシミュレーションコードはレーザー核融合炉設計に留まらず、プラズマデブリ等を扱うプラズマ科学、産業応用において、重要なツールとなり得る。現象の複雑さに起因して、未だ実用コードの構築、現象の定量的理解は十分でないが、本共同研究でシミュレーションコードの開発を進めていく計画である。

本共同研究者等はこれまでレーザー生成プラズマ、EUV プラズマ、壁研究等を通じ、核融合プラズマと第一壁を含む系をマクロに取り扱うために一次元及び二次元の輻射流体シミュレーションコードを開発

してきた。また、アルファ粒子に入射に伴う壁内部の点欠陥生成という、ミクロ現象については分子動力学コードを開発してモデリングを進めてきた。本研究はこれらの研究を継続しつつより俯瞰した立場で解析環境を開発し、素過程間の関係性を意識するモデリングをすることで、より広い物性研究に資することを目指している。

光電離を生じさせる輻射環境

高温炉心プラズマから放射される輻射は周囲のガスを光電離する可能性がある。核融合炉内においては核融合燃料に DT が使われることに起因して、水素ガス雰囲気は支配的であると考え、高温炉心プラズマからの輻射が周辺の水素を光電離することが容易に想像される。同様の環境が次世代半導体リソグラフィ用光源として期待される極端紫外(EUV)光源においても見られる。EUV 光源ではスズ液滴にレーザーを照射してプラズマを生成し、そこからの EUV(13.5nm)放射を得るものであるが、Mo/Si 反射ミラーを用いて放射された EUV 光を集光点へと集める。Mo/Si ミラーはレーザー生成スズプラズマや EUV 放射等、さまざまな要因で損傷するため、Mo/Si 反射ミラーの保護を目的に、真空容器内に水素ガスを導入し、レーザー生成プラズマによる Mo/Si ミラーへの直接的作用を抑制することが考えられている。しかしながら、水素ガス自体も 13.5nm を中心とする EUV 光を受けることで光電離し、発生する電子およびイオンが Mo/Si ミラーに影響を及ぼす。水素 H₂ の光電離断面積は単一光子光電離過程を考えると EUV 光 13.5nm(92eV)に対し、 $6.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ である。また、電離閾値 (H₂ のイオン化エネルギー) に至るまで断面積は入射 photon のエネルギーが小さくなるほど増加する。ここで H₂ に入射する EUV の強度を I_0 、吸収強度を ΔI 、H₂ ガスの密度を n_{H_2} 、単一光子光電離断面積を $\sigma(E)$ 、 E は入射する光のエネルギー、 d を相互作用長さとする。また、入射する EUV 光は 13.5nm を中心にスペクトルの広がりを持つため、光子エネルギーによる輻射強度への寄与の重みの違いを $f(E)$ にて表す。この $f(E)$ は波長積分すると 1 になるよう規格化されている。それらの変数は次の関係式を満たす。

$$\Delta I = I_0 \left\{ 1 - \exp \left(-n_{H_2} d_{H_2} \int_0^\infty \sigma_{ph}(E) f(E) dE \right) \right\} \approx I_0 n_{H_2} d_{H_2} \int_0^\infty \sigma_{ph}(E) f(E) dE \quad (1)$$

ここでは光学的に薄いとした。

実際の EUV 光源では、スズの液滴にレーザーを照射し、入射レーザーの 30-60%が輻射として放射される。輻射流体シミュレーションコード STAR2D[1]で計算される典型的な時間積分された輻射エネルギースペクトルは図 1 のようになる。

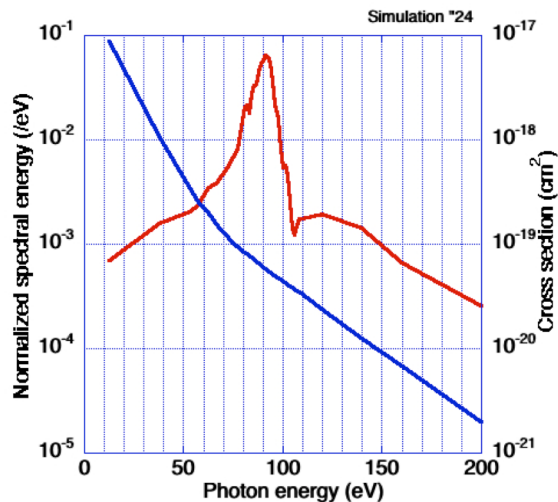


図 1 STAR2D で計算された時間積分輻射エネルギースペクトル（全エネルギーで規格化されている）及び光電離断面積。

図 1 より EUV13.5nm の 92eV を中心としたエネルギースペクトルとなる。同時に水素の光電離断面積を図 1 に示すと、高エネルギー側に向かって減少する曲線となる。両者を掛け合わせると図 2 のようにな

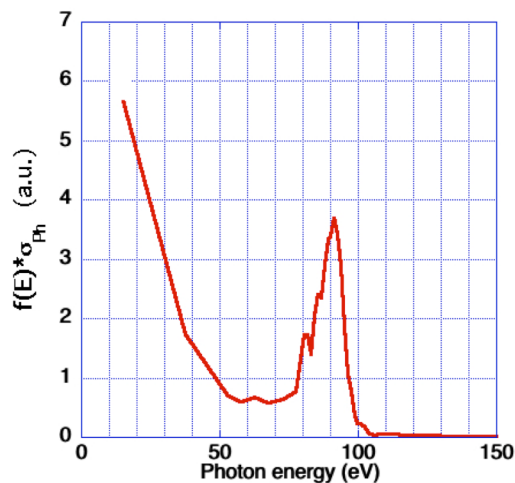


図 2 $f(E) \times \sigma_{ph}(E)$ の曲線。

り、92eV のピークに加え、光電離断面積が大きくなる低エネルギー側にもピークを持つことがわかる。このことから光電離に寄与する光子エネルギーは EUV の中心波長 13.5nm に相当する 92eV まわりだけでなく低エネルギー成分の寄与もあることがわかる。また輻射の規格化エネルギースペクトルで重み付けされた光電離断面積 σ_{eff}

$$\sigma_{eff} = \int_0^\infty \sigma_{ph}(E) f(E) dE \quad (2)$$

は $\sigma_{eff} = 2.6 \times 10^{-19} \text{ (cm}^2\text{)}$ と計算された。温度 300Kelvin で水素ガスの圧力を 1(Pa)と仮定すると、 $n_{H_2}=2.45 \times 10^{14} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ であるから、実効的な輻射の平均自由行程 $\lambda_{mfp} = 1/(n_{H_2} \sigma_{eff})$ は $\lambda_{mfp} = 1.6 \times 10^4 \text{ (cm)}$ となり、室温で水素ガスの圧力を 100(mTorr)と仮定すると、 $n_{H_2}=3.21 \times 10^{16} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ であるから、実効的な輻射の平均自由行程 $\lambda_{mfp} = 1/(n_{H_2} \sigma_{eff})$ は $\lambda_{mfp} = 120 \text{ (cm)}$ となる。レーザー強度 $1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 、10ns のパルス照射し、輻射変換効率を 50%とする。輻射が光源から等方的に広がるとすれば光源から 10cm 離れた地点の輻射強度は $8.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ に低下する。10ns 分の光子数を（平均光子エネルギー 57eV として） $1 \text{ (cm}^2\text{)}$ あたりの入射光子数を見積もると $8.8 \times 10^{16} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$ となる。水素圧力 100 (mTorr) の場合の平均自由行程 $\lambda_{mfp} = 120 \text{ (cm)}$ であるから、入射光子数と平均自由行程から、光電離にて光電離直後に発生する電子密度 n_e は $n_e = 7.3 \times 10^{14} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ と見積もることができる。また光電離で発生する電子のエネルギーは入射エネルギーからイオン化エネルギー 15eV を差し引いた値であり、光電離で発生直後の電子は 40-50eV を中心に分布すると言える。

まとめ

本年度は 2 次元輻射流体シミュレーションを実施し、スズをターゲットとした極端紫外光源の条件で水素雰囲気中の光電離を評価した。本報告書に概要を示したように、光電離で発生する電子は炉壁に対して影響を及ぼしうる密度、エネルギーである。実際の時間応答では電子衝突緩和を考える必要があるが、輻射流体シミュレーションで計算された輻射場を基に、光電離で発生した電子の炉壁への影響の詳細を今後評価し、実験的な結果との比較を行っていく。

謝辞

本計算実施にあたり、大阪大学サイバーメディアセンター及び阪大レーザー研の計算機 SX を使用しました。ここにサイバーメディアセンター及び高性能計算機室に感謝致します。

参考文献

[1] A. Sunahara et al., Plasma Physics and Controlled Fusion **61**(2019) 025002.