



Title	核融合炉壁炭素材料の損耗過程（炭素材の照射促進昇華）
Author(s)	上田, 良夫
Citation	大阪大学低温センターだより. 1998, 104, p. 24-29
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/3999">https://hdl.handle.net/11094/3999</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 核融合炉壁炭素材料の損耗過程 (炭素材の照射促進昇華)

工学研究科 上 田 良 夫 (内線7236)

E-mail:yueda@ppl.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

将来の基幹エネルギー源を目指し、核融合エネルギー\*の研究は国内外で大型の装置を使って行われている。核融合反応を起こすためには、重水素と三重水素の原子核を電気的な斥力にうち勝てるような高いエネルギーで衝突させる必要がある。そのため、数億度にも及ぶ温度のプラズマ\*を、真空容器内でその内壁に出来るだけ触れさせずに保持する必要が生じる。プラズマ中のイオン（原子核）と電子は電荷を持っているので、磁力線に巻き付いて運動する性質があり、通常プラズマの保持には強磁場（数テスラ）を用いる。

しかしながら、プラズマを完全に壁から離すことは現実的には不可能であり、一部のプラズマは壁に衝突して熱負荷をあたえたり、壁の材料を損耗させたりする。従って、現在のプラズマ保持実験装置ではその真空容器の内壁に、耐熱性が高く、またプラズマに混入した場合にも影響の少ない低原子番号の材料が多く用いられている。その代表的な材料は炭素材であり、これがプラズマにさらされた場合にどの程度の早さで損耗していくかを研究することは重要な課題である。

炭素材の損耗過程として、最も基本的なものは温度上昇による熱昇華で、炭素材の温度がおおよそ2200Kを越えると観測されはじめる。これより低い温度では、プラズマ中のイオン衝突による損耗が支配的であり、プラズマ中の電子衝突による損耗はほとんど無視できる（電子衝突は熱負荷のみを与えると考えて良い）。従って通常炭素材の損耗の基礎実験はイオンビームを照射して行われる。

炭素材にイオンビームを照射した際の損耗過程は主に3種類ある[1]。一つは、物理スパッタリングと呼ばれるもので、入射イオンにより材料内の原子がはじき出される現象であり、これはすべての材料で起こる。それ以外に、化学スパッタリングと照射促進昇華という炭素材特有の現象が知られている。化学スパッタリングは、水素イオンもしくは酸素イオンを炭素材に入射した場合に、気体の分子（メタン、一酸化炭素など）を発生して、炭素材が損耗する現象である。これは、プラズマCVD法でのダイヤモンド薄膜形成におけるグラファイト層の除去機構と関係がある[2]。最後に、本論文で取り上げる照射促進昇華であるが、この現象は炭素材にイオンを照射する事で、通常の熱昇華よりも低い温度で昇華が起こる現象である。現在のところ、この現象がはっきり観測されているのは炭素材のみであり、その機構についてはまだ不明な点が多く、非常に興味ある現象といえる。

イオン衝突による損耗現象では、入射イオン1個に対して放出される炭素原子数（スパッタリング率）が、炭素材料の損耗を考える上で重要である。しかしながら、最近の我々の研究から、照射促進昇華のスパッタリング率はイオンの入射粒子粒子束が大きくなると、強い粒子束依存性を示すことが分かって

きた[3,4]。以下では、この話題について簡単に述べてみたい。

## 2. 高粒子束ビーム照射実験の概要

核融合炉壁に衝突するイオンのエネルギーは、プラズマ条件や場所により異なるが数10eVから数keVという低エネルギー領域にある。従来、このエネルギー領域でのイオンビームと材料の相互作用実験は、高々 $10^{16}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度の粒子束を持つイオンビーム装置により行われてきた。しかしながら、核融合炉壁でのイオンと固体の相互作用を考えると、粒子束は最も高いところでは $10^{19}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を越える。もちろん、材料とイオンの相互作用が、スパッタリング率一定という線形的な応答しかしないのであれば、従来の実験結果を外挿することはたやすい。しかしながら、プラズマ保持実験において、従来のイオンビーム実験の結果では説明できないような現象が見つかっており、より核融合炉壁での条件に近い高粒子束のビーム照射実験が必要であると考えられている。

そこで我々の研究グループは従来のイオンビーム装置よりも高い粒子束領域で実験をするために、新たにビーム照射装置を開発し実験を行っている[5]。実験装置の概略図を図1に示す。放電容器内で熱陰極アーク放電\*により生成されたプラズマから球面電極（曲率半径50cm、電極の実効直径14cm）を用いてイオンビームを引き出し、幾何学的に収束させることで高い粒子束を得る。磁界により質量分析を行っていないので、不純物が数%程度混入しているが、従来の質量分析を行っているイオンビーム発生装置よりも2桁程度高い粒子束で材料を照射する事が出来る。ビームの粒子束は、カロリメータを用いた熱測定から算出する。また、試料の損耗率は、照射前後の試料の質量変化より粒子束を考慮して算出している。排気系、冷却系、電源系の問題から、本装置ではパルス運転のみ可能である（最大パルス幅4秒、ビーム間隔1分半）。

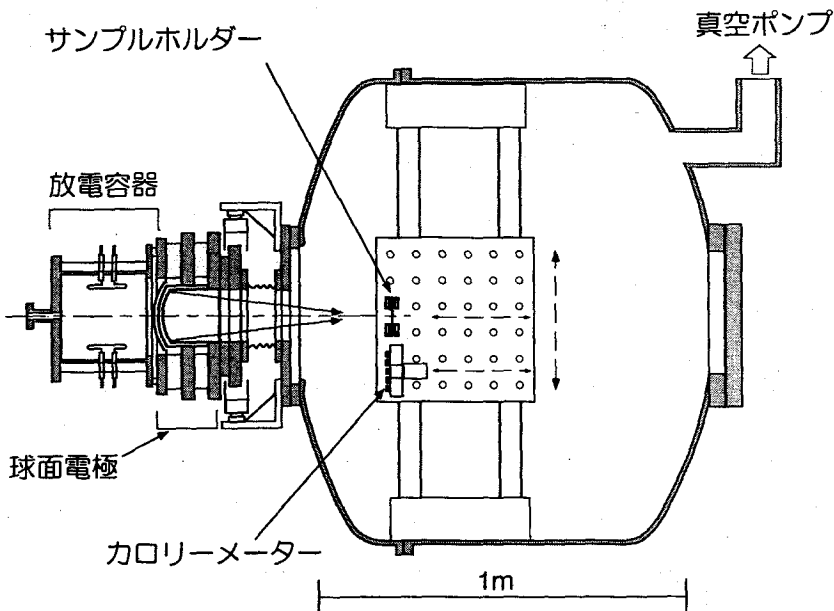


図1. 高粒子束ビーム照射実験装置。大きな真空容器はイオン源から流出するガスを拡散させるために使用。

高粒子束ビームを照射する場合に、実験上注意することは試料の温度制御である。本実験では、主に5keVのアルゴンビームを用いて実験を行ったが、その最大粒子束は $10^{17}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達し、この時の熱負荷は $80\text{Wcm}^{-2}$ になる。本研究では、試料温度1500Kから2000Kの領域で実験を行っており、炭素材の薄板試料（厚み0.1–0.2mm）に直接通電することで抵抗加熱している。試料ホルダーを図2に示す。炭素材の試料の固定の際は、Ta板と試料の間に炭素板を挟むことで高い温度でも電気的な接触を安定させるように工夫している。この炭素板がない状態では、高温でTaが微妙に変形して電気的な接触が悪くなり、局所的に試料が加熱されることがあるので注意が必要である。さて、本実験における試料温度範囲では、試料からの熱輻射と抵抗加熱による入力力がほぼ釣り合うように試料温度が決定される（熱伝導の効果は小さい）。熱輻射は温度が2000Kの場合に、約 $140\text{Wcm}^{-2}$ （試料の表面と裏面の合計）でありこの値はほぼ試料へのビーム熱入力と同程度である。従って、ビーム照射と同時に加熱電流を適切に減少させることで試料温度をほぼ一定に制御することが出来る。その様子を図3に示す。ビーム照射と同時に加熱電流を50Aから25Aまで減少させることで、試料の温度がほぼ2000Kに保たれていることが分かる（試料の温度は赤外温度計で測定）。

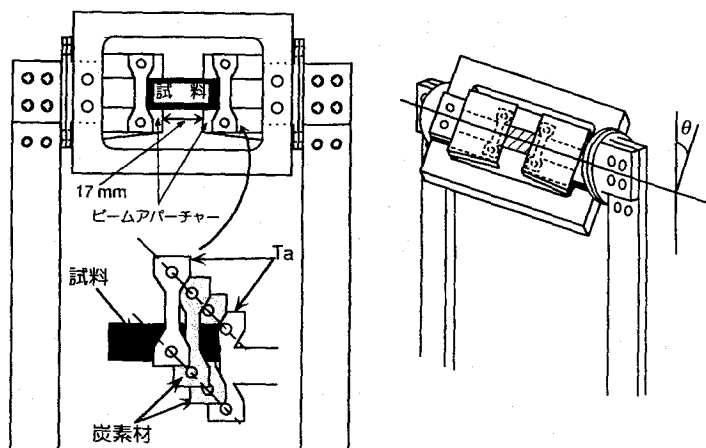


図2. 試料ホルダーの図。左側の図は、放電容器と反対側から見た図。ビーム照射角を変えることが出来る。

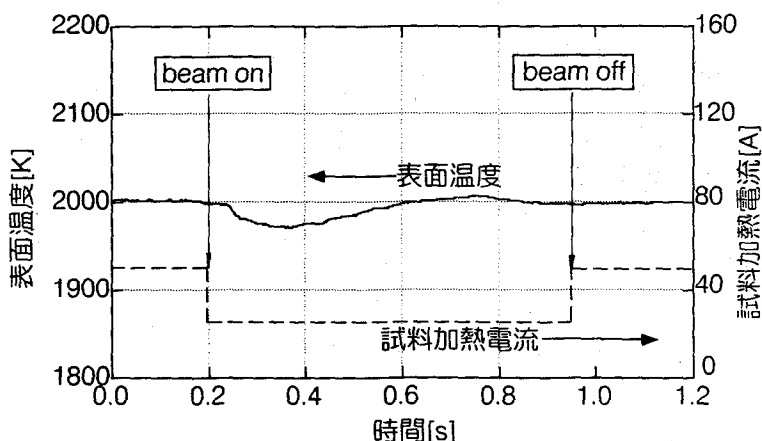


図3. 試料の表面温度と試料加熱電流の時間変化。5keVのArビームを照射（熱入力 $96\text{Wcm}^{-2}$ ）。

### 3. 実験結果と考察

図4にスパッタ率の温度依存性の結果を示す。ここで使用した炭素材は、等方性炭素材（ISO-630、東洋炭素）で密度が約 $1.8\text{gcm}^{-3}$ とグラファイトの単結晶材に比べて低く、多くの気孔を有する材料である。図4では、温度が1500Kから2000Kまでは、前節で述べた温度の制御法をもちいているが、300K付近の照射では熱輻射が小さく温度制御が難しいため、試料の温度は照射中に約900Kまで増加している。しかしながらこの温度領域ではまだ照射促進昇華は問題にならない。図に示すように、我々の実験結果は、過去にPhilippsらによって行われた低粒子束の照射実験結果[6]と、温度依存性においてはほぼ同様の傾向を示すが、その絶対値は小さくなっている。

そこで、照射粒子束に対してスパッタリング率がどのように変化するかについて記す。1000Kを越える温度領域では、炭素材の損耗は照射促進昇華と物理スパッタリングの和と考えられる。また、物理スパッタリングには温度依存性はないと考えられるので、全スパッタリング率から物理スパッタリング率（常温照射におけるスパッタリング率を用いる）を引いた照射促進昇華のスパッタリング率を、粒子束に対してプロットしたものを図5に示す。これより従来の低粒子束領域では、粒子束に対する依存性が弱いという結果に対し（粒子束の $-0.07$ 乗）、我々の実験では粒子束に対してより強い依存性を示していることが分かる（粒子束の $-0.26$ 乗）。このことは、粒子束が大きくなると照射促進昇華の機構が変化している可能性を示唆している。

照射促進昇華の機構については、まだ十分に理解されていないが、いくつかの実験結果から次のようなモデルが提唱されている[7]。まず、入射イオンと炭素材の格子原子が衝突し、炭素の格子間原子と空孔が生成される。続いて格子間原子は、拡散に伴う活性化エネルギーが低いので速やかに表面に拡散する。格子間原子は格子原子に比べて表面における結合エネルギーが低いので、通常の熱昇華よりも低い温度で昇華する。格子間原子が表面に拡散する過程では、一部の格子間原子は空孔と再結合し消滅す

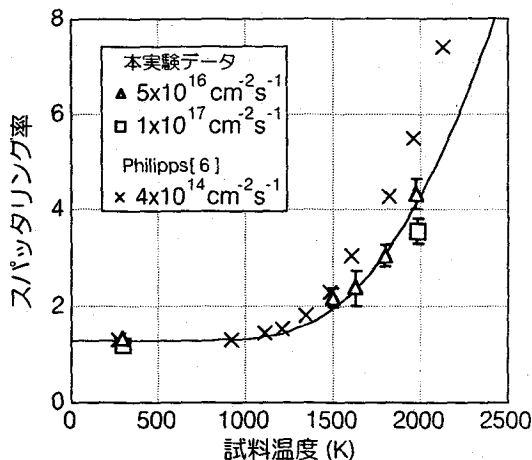


図4. スパッタリング率の温度依存性。5keVのArビームを照射。照射促進昇華により、1000Kを越えるとスパッタリング率が指数関数的に増加する。

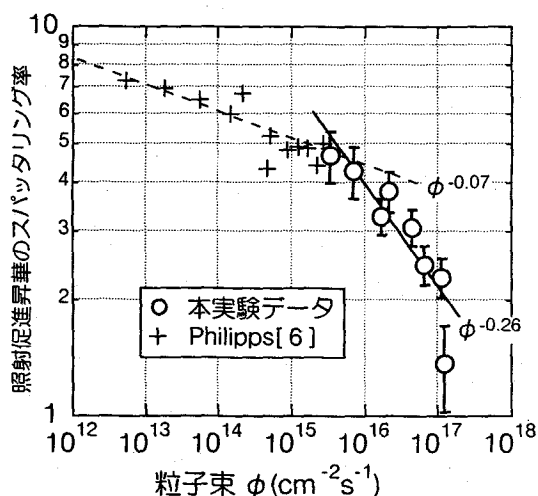


図5. 照射促進昇華のスパッタリング率のビーム粒子束依存性。5keVのArビームを照射。粒子束が $10^{15}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を越えるとスパッタリング率の減少率が大きくなる。

る。いっぽう、空孔の拡散に伴う活性化エネルギーは大きいため、空孔は低温ではほとんど動かないが、本実験の温度領域（1500Kから2000K）では拡散が無視できなくなる。従って、この温度領域になると空孔が拡散して表面などで消滅し、空孔密度が減少すると考えられる。その結果、格子間原子が表面へ拡散する割合が大きくなり、さらに試料温度が上がっていることで表面からの昇華も促進されるため、照射促進昇華のスパッタリング率が大きくなる。また、粒子束が大きくなると空孔の生成率が増加し、その結果空孔密度が高くなって表面まで拡散する格子間原子の割合が少なくなるため、粒子束とともに照射促進昇華のスパッタリング率が減少する。

上記モデルを定式化して、ある仮定の下で解くと照射促進昇華のスパッタ率は粒子束の $-0.25$ 乗で減少するという結果が得られ[3]、我々の実験結果とおおよそ対応する。しかしながら、従来の低粒子束実験における弱い粒子束依存性とは対応しない。この理由として、空孔以外に結晶粒界や転位などが格子間原子のシンクとして働くためではないかという指摘がある[6]。これは、低粒子束では空孔の密度が低いためにこれらのシンクの影響が主となり、粒子束依存性が弱いという考え方である。この考え方では、これらのシンクは元々材料中に存在しており、その密度は粒子束によってあまり変化しないと考ええる。しかしながら、この考えを取り入れても温度特性等のパラメータ依存性を完全に説明できないため、より進んだモデルが必要である。

#### 4. 最後に

照射促進昇華現象は、炭素材と同様の電子配置を持つシリコンなどでも観測されておらず、極めて特異な現象である。我々のグループは、従来行われなかった高粒子束領域のビーム照射により、本現象の特徴的な粒子束依存性を初めて明らかにした。しかしながら、その機構の解明については、さらなる実験データの蓄積と、照射欠陥のダイナミクスについてのより進んだ理解が必要である。

#### 参考文献

- [1] W. O. Hofer and J. Roth, *Physical Processes of the Interaction of Fusion Plasmas with Solids* (Academic Press, 1996).
- [2] A. Horn, A. Schenk, J. Biener, B. Winter, C. Lutterloh, M. Wittmann and J. Kuppers, *Chem. Phys. Lett.* 231, 193 (1994).
- [3] Y. Ueda, K. Nakano, Y. Ohtsuka, M. Isobe, S. Goto and M. Nishikawa, *J. Nucl. Mater.* 227, 251 (1996).
- [4] Y. Ohtsuka, J. Ohashi, Y. Ueda, M. Isobe and M. Nishikawa, *Journal of Nuclear Science and Technology* 34, 792 (1997).
- [5] M. Nishikawa, Y. Ueda and S. Goto, *Fusion Eng. Des.* 16, 351 (1991).
- [6] V. Philipps, E. Vietzke, R. P. Schorn and H. Trinkaus, *J. Nucl. Mater.* 155-157, 319 (1988).
- [7] J. Roth and W. Moller, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B7/8*, 788 (1985).

## 用語説明

### 核融合エネルギー

1 核子あたりの結合エネルギーは鉄原子が最も大きい。従ってこれより大きい核子が分裂する（例：ウランの核分裂反応）か、もしくは軽い原子が融合する（核融合反応）事で核子の結合エネルギーの差に相当するエネルギーが放出される。この核融合反応のうち、現在エネルギー源として開発の対象になっているのは、重水素と三重水素の原子核の核融合反応である。この反応を起こすためには数10keVの衝突エネルギーが必要である。核融合反応によって発生する粒子は $\alpha$ 粒子と中性子であり、発生エネルギーのほとんどは中性子の運動エネルギーとなる（全発生エネルギーの4/5、1中性子あたり約14MeV）。

### プラズマ

物質は温度が上がるに従い、固体から液体、気体が変わっていくが、さらに高温になるとイオンと電子に分離する。このようにイオンと電子がほぼ等しい電荷量を持ちガス状に集まっている状態をプラズマという。一例として、熱平衡状態にあるアルゴンがほぼ完全電離してプラズマ状態になる温度は約10,000Kである（圧力が1Paの場合）。

### 熱陰極アーク放電

一般に気体の直流放電は、グロー放電とアーク放電に分類される。これらの主な違いは、陰極（カソード）からの電子の放出機構にあり、グロー放電ではイオンが陰極に衝突した場合に発生する2次電子であり、アーク放電の場合は熱電子放出（熱陰極アーク放電）や強電界による放出など（冷陰極アーク放電）による。熱陰極アーク放電においても、外部から積極的に陰極を加熱（通電加熱など）する場合と、放電プラズマからのイオンの衝突により加熱される場合がある。本実験装置では、前者の熱陰極アーク放電を利用しており、熱陰極にはタングステンのフィラメントを用いて直接通電により3000K程度まで加熱して熱電子を放出させている。