

解説

## 核融合炉第一壁の開発計画とその見通し

田 辺 哲 朗

(名古屋大学理工科学総合研究センター)

### Research and Development of the First Wall — A Critical Review —

TANABE Tetsuo

*Center for Integrated Research in Science and Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan*

(Received 3 March 1998)

#### Abstract

Research and development of the first wall in a fusion reactor is critically reviewed. After briefly summarizing the research history of plasma-materials interaction in plasma apparatus and in laboratory experiments, it is demonstrated that the first wall plays an active role in plasma confinement. Referring the importance of removal of  $\alpha$  heating power, future work necessary for research and development of the first wall is suggested. Strong cooperation or correlation between material and plasma scientists is highly required.

#### Keywords:

first wall, divertor, plasma materials interaction (PMI), heat load, heat removal, erosion, radiation, low Z materials, high Z materials, material selection

#### 1. はじめに

現在までに、核融合炉第一壁あるいはプラズマと第一壁との相互作用の研究開発に関連する幾多の解説、講座などが著されており、本誌に掲載されたものだけでも参考文献にあげたように五指にあまる[1-13]。このような状況下で標記の課題での解説は今更ながらという感が強い。とくに本誌小特集「プラズマ対向壁としての高Z材」では高Z材に限らず、広くプラズマ対向材の今後の研究方向について議論されたのが記憶に新しい[7]。またITERではベリリウム、炭素材料、タングステンの3つがプラズマ対向材として選択されており[14]、その結果をみないで、その先の第一壁の開発計画を云々するのは非常にむずかしい。

しかし一方ではITERにおけるベリリウムの選択につ

author's e-mail: [tanabe@cirse.nagoya-u.ac.jp](mailto:tanabe@cirse.nagoya-u.ac.jp)

いて「？」を掲げる研究者は少なくない。とりわけにITERの設計には直接かかわっていないがPWI (Plasma Wall Interaction)の研究に長年携わってきた人ほどその傾向が強いようである。プラズマ対向壁の役割について考え方の相違があるように見える。

そこで本稿の役割を、核融合燃焼プラズマ生成と長時間燃焼をターゲットとして、プラズマ対向壁の役割を改めて見直し、長期的な視野から核融合炉第一壁（のみにとどまらないが）の開発・研究への道筋を探るためのものと定め、ややScientificな厳密性を欠くことを承知の上で問題点の所在を指摘し、それへの対処の方策について議論を喚起することにした。それゆえ、“見える”，“思える”など正確を欠く表現あるいは記述が多いことをお許しいただきたい。

## 2. Plasma Materials Interaction (PMI) 研究の現状

現在の大型トカマク装置での実験は、そのすべてを詳細にわたって個々の研究者が把握できるレベルを超えているように見える。個々の部分について様々な興味ある現象が見いだされ、それなりの学問（専門）分野が成立し、その研究を深めていくうちに結構有名になり、政治的な力を発揮できるようになる。あえてその分野外のことに興味を持たない限り大きく見る（大きく見ると詳細は見えなくなるが）必要を感じなくなる。その結果とくに大型装置での、個々の場合によっては特殊な経験あるいは出来事が（皆が注目しているだけに）あたかも自然原理であったかのごとく大手を振って歩き出し、多くの研究者がそれに振り回されることになる。

「プラズマ研究者は、今日は炭素、あしたはボロン、次はタンゲステンという、その次は？」といった材料研究者からのクレームはまさにこのとおりである。これは一面では正しいが一面では正しくない。1つの大型装置が、たとえばボロンで良い結果を出すと、それが一般的原理のごとく感じてしまい、どこかで、「はい次はボロンにしましょう」という決定がなされるのである。とくにそれが比較的安価に実行できるときは顕著である。炭素であろうとボロンであろうとプラズマ実験は可能でその結果を皆が注目してくれれば、やらない理由を見つけたすのはむずかしい。たとえ Decision に Science base がなかったとしても。

かくして大から小まで多くのプラズマ装置で特定の材料をプラズマ対向壁とした（ある意味では偏った）膨大なデータベースが積みあげられ、ある種のスケーリング則が見つけだされる。何のことはない、それからはずれたデータは取れないだけのことなのだ。磁場の強度と装置の大きさでプラズマの性質が決まってしまう？もちろん good confinement を見つけるための努力は続けられる。それがたとえたったの2倍の改良にしかすぎないにしろ。

さて、従来のプラズマ・材料相互作用 (PMI) 研究は主として損耗、不純物の発生、水素（トリチウム）蓄積、除熱に関することが主体であり、いわば **passive** な研究であった。周辺プラズマからの壁に入射するであろう電子やイオンのエネルギー、粒子束などを予測し、それに対応するイオン（電子）源を用いてイオン（電子）-固体相互作用に関連するデータを作り出してきた。その結果スパッタリング（物理・化学）、粒子反射、二次電子放出など固体表面で引き起こされる PMI の個々の物

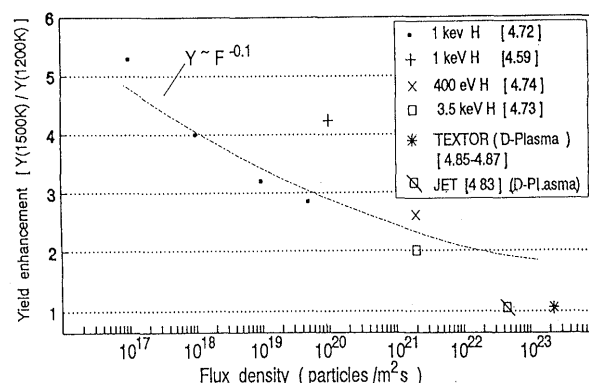


Fig. 1 Ratios of the erosion yield of graphite at 1,500 K to that at 1,200 K (enhancement factor) depending on the impinging flux density for different experiments. The dashed line corresponds to a decrease of this enhancement factor with flux density depending to  $F^{-0.1}$  [16].

理素過程の理解はかなり深まってきた[15-17]。

しかし PMI を考える上で最も重要な低エネルギー領域（100 eV 以下）および高粒子束領域（ $10^{22}/\text{m}^2$  以上）ではいまだデータがほとんどない。低エネルギー高フラックスの水素イオン源がない、あるいは作るのが非常にむずかしい所為である。ある意味では核融合装置そのものが低エネルギー高粒子束の水素イオン源である。もちろん、現状のデータを低エネルギー高粒子束領域に拡張する試みがなされており、Fig. 1 に示した照射誘起蒸発のように、少なくとも実験室レベルの低粒子束の実験結果と直線型のプラズマ装置での高粒子束での実験結果がつながるようになってきてはいるが[16,18]、なぜ高粒子束側で減少するのかその原因はまだ不明である。

いずれにしろ個々の素過程の物理パラメータは、イオンと固体、あるいは電子と固体との相互作用そのものであり、電子、イオンが共存しさらに磁場が負荷されている実際のプラズマと固体の相互作用にまで外挿できるかどうかは確認できていない。言いかえると実験室レベルでの基礎データが実機で起こっている現象を説明するには不十分、あるいは両者はうまく結びつけられていないのである。後に示すように（Fig. 5 参照）表面から飛び出した粒子が、表面近くでイオン化された後、非常に浅く入射する磁力線の効果により才差運動を起こし、容易に壁に再付着し不純物の放出が押さえられる prompt-redeposition 効果が確認されたのは、ほんの数年前である[19,20]。

シースに及ぼす二次電子放出の効果[16,17]があることは誰もが納得するものの、実際にダイバート領域で二

次電子放出やイオンの反射が材料を変えた時にどのように効いているかは不明のままである。プローブによる計測にとっても、もしイオンや電子による実効的な二次電子放出率が非常に大きければ計測結果の解釈を変える必要が生じる。

さらに、プラズマは実際には純粋な水素プラズマではなく、不純物が一杯入っている（最近の高純度材料や半導体技術で使われるガスの不純物が ppm レベル以下であるのと較べると、1%以上の炭素や酸素の入った現在の大型装置のプラズマがいかに不純であることか）。しかも**プラズマの性質は不純物によって大きく左右されている**。壁が不純物の発生源であること、壁の水素を抜いておかねばプラズマの密度制御がむずかしいことなどを鑑みれば、壁はプラズマにたいして **passive** ではなく **active** であることは明白である。しかし幸か不幸か第一壁の開発はプラズマ研究に対して **active** ではなかった。プラズマ閉じ込めの改善を最優先させるためと信じ（させられ）て選択された材料の改良に黙々と努めてきたといえよう。核融合炉第一壁の研究はプラズマの研究から独立してはあり得ない。プラズマとかかわることのない PMI 研究はあり得ないと同時に、プラズマ研究者にその場しのぎの壁材料の選択をさせてはならない。

### 3. 熱負荷と熱除去

熱は両刃の剣である。核融合は人類の欲するエネルギー（熱）源であり、それを求めて研究開発が進められ

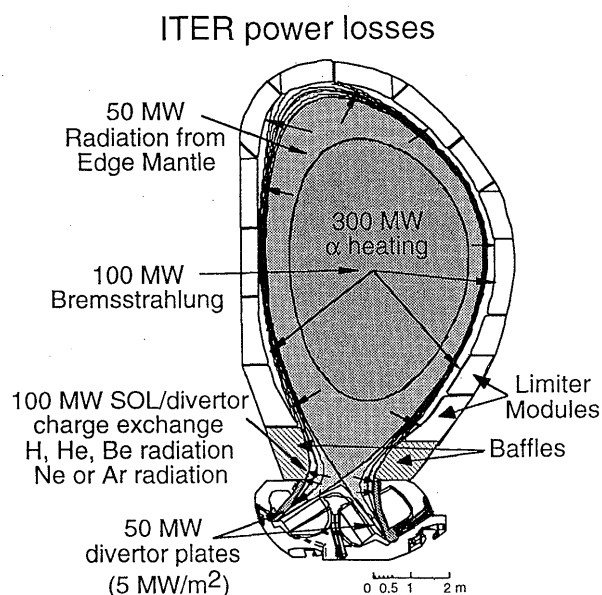


Fig. 2 Schematic division of power flowing to the first wall and divertor [21].

ている。しかし一方では発生する熱が大きすぎるとそれを制御できなくなる。核融合プラズマは高温高密度に加熱されていないと燃焼を続けてくれない。自己点火に至るまでの加熱は別にしても、 $\alpha$  加熱として使われたエネルギーは、いずれプラズマを取り囲む壁のどこかへいかざるをえない。不純物除去あるいはヘリウム排気のためのダイバータに、そのエネルギー（熱）除去の役目が課せられるのは当然であろう。

ITER では  $\alpha$  加熱は 300 MW と見積もられており、この内 50 MW は先に述べたダイバータ板で、100 MW をプラズマ中心からの制動放射、シンクロトロン放射あるいは不純物からの放射で除去、残り 150 MW はダイバータ部あるいはスクレープオフプラズマ部での放射に頼ることになっている [14, 21] (Fig. 2 参照)。はたしてそんなにうまく行くのだろうか？ Fig. 3 に様々な熱源の熱流束を比較したが、ダイバータ板への熱負荷は、さながらロケットが太陽に突入する（もし可能なら）時に受け

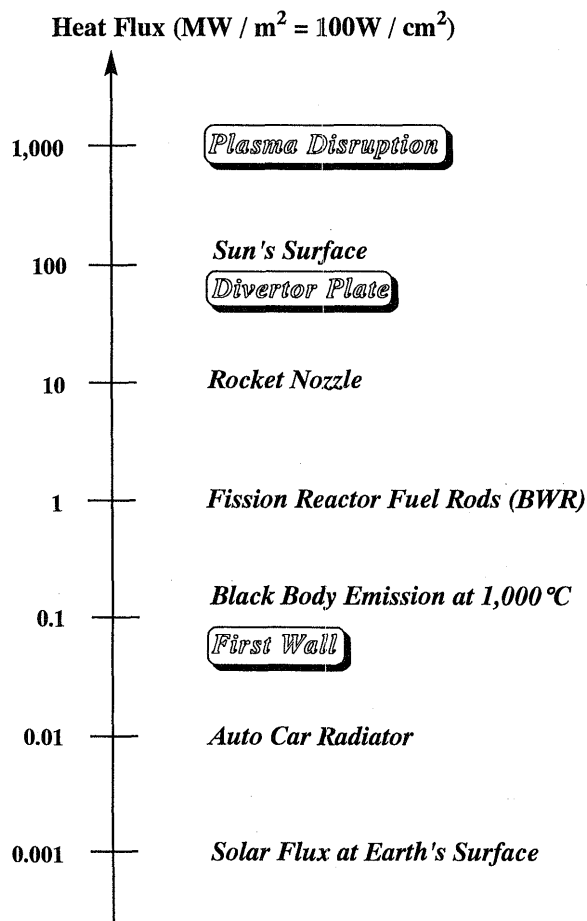


Fig. 3 Comparison of heat load or heat flux to the surface subjected to various heat sources [22].

るであろう熱負荷に匹敵している。プラズマ電流崩壊 (Disruption) についてはここでは議論しない。商用炉で Disruption が発生すると、それによる熱応力および電磁応力 (現在の大型装置でも Disruption 時には数 G の加速度が発生している。) には耐えられない。現在のところ Disruption を完全に封じ込める方法はまだない。ITER の初期の運転では数%の Disruption を許容しそれをなくするための研究が行われる。

ダイバータ板での熱除去に関しては、黒鉛 (含む C/C 材) あるいはベリリウム (Be) と銅との接合による設計に沿ったダイバータ水冷モジュールの開発が進んでおり、数  $\text{MW}/\text{m}^2$  の熱に耐えるという目標達成は可能のように見える [14]。しかし工学的に除去可能な熱流束には限りがあり、材料には融点がある。ITER ダイバータの2つの足にそれぞれに 25 MW の熱負荷をかけて 50 MW の熱除去をはかるのは材料がそれ以上の熱負荷に耐えないからである。ここには材料選択のはっきりした限界がある。工学的に材料からの熱除去技術がいかに進んだとしても、水による熱除去を前提に考えると、100  $\text{MW}/\text{m}^2$  の熱負荷に耐える材料などありえない。

問題はダイバータ部の 150 MW とプラズマ中心からの 100 MW の放射冷却にもある。皮肉な話ではないか。今まで中心部での不純物はプラズマ加熱の障害になるからできるだけ減らさないと良いプラズマができないということで、努力がなされてきた。現在でもこの努力を続けなければ良いプラズマが手には入らない。しかし一方ではもし燃焼プラズマができたなら中心から熱をとらなければならない。制動放射だけでは 100 MW の放射が保証されない可能性があり、積極的に不純物 (たとえば Xe) を導入し、その放射損失にたよるための実験すら行われているのである [23]。周辺プラズマからの放射 50 MW についても同様であり、Ne や Ar による周辺冷却が行われており成功しているように見える [24, 25]。それらが壁のスパッタによる損耗を増やすことは明白なのに。

プラズマ対向壁は低 Z 材でなければならないと教えられてきた材料の研究者から、次のプラズマ対向壁は何ですかとたずねられたら、「プラズマからの放射は原子番号の3乗に比例して大きくなる。だから不純物を減らさねばならない。また不純物として酸素より重い物はだめだ。炭素が良い」と信じ込まされてきた彼らに (信じた方が悪い?), どのように答えれば良いのだろうか?

かなり高温のプラズマができあがってしまえば、酸素だって導入できる。酸素とネオンの差は、原子番号 (質

量) の差による放射パワーやスパッタ率の差よりも、むしろ化学効果の差が大きいのであって、それが今までのプラズマで問題にされていたとすれば、壁での化学効果が非常に重要であったという結論になる。

もちろん誰も非難されるべきではないだろう。酸素を減らさないとプラズマ性能を上げることができなかったのは事実だし、いったん良いプラズマができれば、プラズマの自己遮蔽効果 (それがどんな物理機構によっていようと) により少々の不純物が入ってもプラズマはつぶれないことも明らかになってきた。JT-60U で壁からはがれたタイルが放電の間、プラズマをつぶすこともなく、プラズマとその上部の対向壁との間をはね回っているのがビデオにとられている。

もしあえて責められるとすると、大型装置を引っ張ってきた研究者が、自分たちのプラズマをよくすることと、将来の核融合のプラズマのためにすることとは、必ずしも同方向ではないことを (知ってか知らずか) 明瞭に言わなかった (言えなかった) ことかもしれない。しかしこれとて、プラズマ閉じ込めが良くなったからこそできる議論でもある。

従来の研究 (たとえ大型であろうと) は、自分たちの手で (研究所で)、改良開発を続けていくことにより完成されていったが、核融合実験炉に至ってはあまりに大型になりすぎ、(問題がたくさんありすぎ) 少々のスタッフを集めたとしてもまったく不十分で、外部の力を必要とするようになってきたものの、外部の力をどう結集させ、どう利用するかについては、いまだに適当な方法を知らないからなのかもしれない。あるいは科学としての体系化という努力を怠ってきたという言い方もできるかもしれない。

#### 4. 核燃焼プラズマからの壁への熱負荷

仮に放射冷却が可能だとしても、どのような波長で壁に負荷されるかによっては新たな問題が生じる。光の反射によるエネルギー負荷の減少はもとより [26]、とくに 10 eV から 1 keV の光 (軟 X 線) の場合は、材料表面で新たな物理化学過程を引き起こし、ただちには熱にならない。たとえば 10 eV 程度の光照射による材料から光電子放出の量子効率約 0.1 以上になる [27]。電子放出にとどまらず、不純物や水素の光誘起脱離などが引き起こされる。しかし、SOR リングによる放射光を除くと、そのような波長領域の強力な光源がないため、PMI の観点からの実験はまだあまり行われていない。

核融合燃焼のためのプラズマ研究では、現状のプラズ

マ性能の向上を支えるための実験とは場合によっては矛盾することを行わねばならないと同様、核融合燃焼プラズマにおける PMI は現状とはかなり異なる、あるいは現状を大幅に外挿しなければならないであろう。

現在の大型、中型装置の経験を将来の装置に外挿せざるを得ないのは明白であるが、現状は、ややもするとそれぞれの装置の（言い過ぎかもしれないが、決して Scientific base に沿っているとは思われない）経験をそのままごり押ししようとしているように見えてならない。

放射パワーのデータ一つみても、Fig. 4 のようにコロナ平衡にもとづいた、あるいはそれをすこし modify した温度依存性のデータが出されているが[28]、だれもこれをプラズマ装置の中で実験的に裏打ちしてはいないし、そのための実験は、ソースがないため行うのがむずかしい。（逆に現在の大型プラズマ実験装置しか放射パワーのソースがない）この図に基づけば、周辺部に相当するような温度領域では Ne や Ar の放射パワーが強いから、中心では Xe のそれが強いから、放射冷却にはよいだろうというわけである。最近の高 Z リミタの実験によれば、いったんプラズマが立ち上がれば、少量であればどのような不純物でもプラズマに持ち込めるようであり、TFTR では Xe を注入してプラズマ性能を劣化させることなく中心から放射損失を増やすのに成功したと聞く[23]。ただしプラズマの条件によってはプラズマ中心に不純物が集積しプラズマをつぶしてしまう。この不純物の集積は Neo-classical theory で説明されている

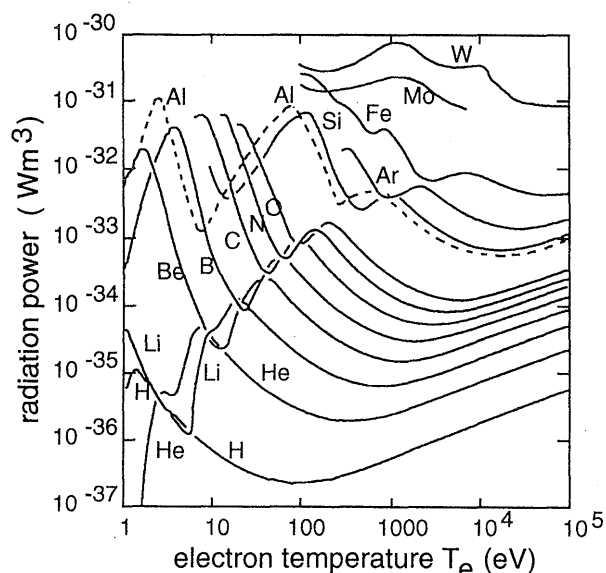


Fig. 4 Temperature dependence of radiation power for various elements [28].

[29,30]. しかしここで問題にしている不純物からの放射損失の温度性が十分考慮されているとはいえない。

Ar や Kr が良いのなら Al だっていい材料だから、これで第一壁を覆いましょうという話だってあり得るはずではないか。（もちろんそんな金のかかることはできないといわれてつぶされるに決まっているが。）壁材料をとっかえひっかえ実験すること（もちろんプラズマ対向面を全部同一材料にしてとっかえひっかえしなければならない）を勧めたい。それでこそ実験であるというと響きをかうのであろうか？

## 5. 熱負荷と冷却

水により除去可能な熱流束は、 $20 \text{ MW/m}^2$  程度が限界と考えられており、核融合炉のダイバータ部ではそれ以上の熱が直接負荷されないものとして設計される。仮にそのような設計が可能であるとしても、 $20 \text{ MW/m}^2$  を超える高い熱負荷に耐える材料は、そう多くはない。高融点であるだけでなく、熱勾配によるひずみあるいは、熱衝撃に耐える一方、材料からスパッタされたり蒸発してくる粒子がプラズマに悪影響を及ぼしてはならない。プラズマをあまり汚さないで（低い原子（Z）番号のものがよい）しかも熱的性質のよい黒鉛や、プラズマによりあまり損耗されないタングステンが候補材たる所以である[31]。

黒鉛やタングステンを使ったとしても除熱効率を高めるための技術開発が欠かせない。黒鉛に限って言えば、熱伝導度を増加させるために様々な工夫がなされており、またずいぶん改良が進んだ[32]。当初は、高温ガス炉用として開発された高強度の等方性焼結黒鉛（いわゆる原子炉級黒鉛）が核融合にも応用された。しかし、黒鉛のような焼結体では、激しい熱衝撃によりそれを形成する個々の結晶粒に相当すると思われる粒子の放出が起こり、単なる熱蒸発より激しく損耗することが明らかにされ、黒鉛を使用した場合には頻繁な交換が必要とされる。それ故、非常に熱負荷の大きい場所では炭素繊維で強化された C/C 材が選択されるようになってきた。等方性黒鉛では  $100 \text{ W/mK}$  程度の熱伝導度を持つにすぎなかったのが、 $400 \text{ W/mK}$  を超える熱伝導度を持った C/C 材が開発されるに至っている。

高温材料としてのタングステンの欠点は、再結晶化とそれに伴う結晶粒成長がもたらす脆化である[7,31]。TiC や LaO の添加あるいは合金化により再結晶化温度を高める工夫がかなりの成果を収めてはいるが、ダイバータでの熱負荷により表面温度が  $2,500^\circ\text{C}$  を超えるよ

うな事態になれば結晶成長を防ぐのはむずかしい。Wの場合核融合中性子との核反応によりレニウム (Re) に核変換される反応断面積がかなり大きいため、長期間使用するのにはむずかしいかもしれない。

材料そのものの改良開発の一方で、水あるいはガスによる冷却除熱のため、プラズマ対向材の銅等で作られた冷却構造あるいは冷却管への接合が工業技術面での重要な鍵となっている。日本では日本原子力研究所を中心に開発が進められており、 $20 \text{ MW/m}^2$  の定常熱負荷に耐えるような冷却構造がすでに作られている。第一壁の開発は、黒鉛に限らず単一な材料の限界を踏まえた上で、繊維などを利用した材料の複合化あるいは傾斜材料化、また材料と技術が一体となった複合機能要素を作るといった観点からの開発に変わりつつある。

## 6. 粒子負荷と材料の損耗

粒子負荷による材料の損耗と損傷はもう一つの問題点である。高エネルギー粒子が材料に入射すると、表面では材料の構成原子の弾き出し (スパッタリング) が起こり、材料は損耗する。スパッタリングには物理的な衝突によるものだけでなく、材料に対して化学的に活性な水素粒子が入射すると、化学反応が引き起こされ損耗や損傷が加速される場合がある。黒鉛が典型的な例で [16, 17, 32], 水素イオン入射によりメタン生成をとまなう化学スパッタが引き起こされ、物理スパッタリングよりもはるかに高い損耗を受けることはよく知られている。金属表面に付着あるいは結合されていた酸素も同じように水素により化学スパッタされ、発生した酸素がプラズマの性質を著しく劣化させる原因となっている。

このようなイオンあるいは励起原子により引き起こされる化学現象は、通常の熱力学では説明しきれない、いわゆる非平衡状態あるいは励起状態の化学といえよう。とくに入射粒子束の高いダイバータ領域での化学現象は超高温熱物理化学とも呼ばれるべき新しい学問領域である。そこでは表面近傍で引き起こされる化学過程にとどまらず、粒子負荷により表面から放出される反射粒子やスパッタ粒子の周辺プラズマ中でのその後の挙動が (それらの粒子が持つ運動エネルギーは壁温度で予想されるものよりはるかに高いので)、非常に重要である。

しかし我々の経験の集積である熱力学から著しく離れた現象が起こることを意味しない。たとえば炭素の水素による化学スパッタリングを念頭に、

$\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4 - \Delta G$  の反応を考えると、低温では  $\Delta G$  が負すなわち反応は右側 (メタン生成) の方向

に進むが、 $500^\circ\text{C}$  付近で  $\Delta G$  がゼロすなわち高温ではメタンは安定でなくなる。すなわち化学スパッタリング率が  $800 \text{ K}$  付近で最大になり、それより高温ではメタン生成が減少し、化学スパッタリング率が減少することがうなずけるし、もっと高い温度では水素が炭素の中にとどまらなくなることも当然である。W や Mo の酸素による化学スパッタリングはよく誤解される。純粋な酸素イオンの照射により、蒸気圧の高い  $\text{WO}_3$  や  $\text{MoO}_3$  が生成する化学スパッタリングが起こる [33, 34] のは当然であるが、水素が主成分であるプラズマ中での不純物酸素によるそれは起こり得ない。そのような還元性雰囲気では  $\text{WO}_3$  や  $\text{MoO}_3$  などできっこないのである。物理スパッタリングは避けようがないので、プラズマ装置内での炭素材料の損耗は化学スパッタリングがどの程度起こるかによって大きく左右される。

固体内で原子がはじき出されると、いわゆる照射欠陥が形成され、材料の性質劣化がもたらされる。構造材料の照射損傷については多くの解説・総説 [35] があるので簡単に述べるにとどめる。D-T 核融合反応で発生する  $14 \text{ MeV}$  中性子による照射損傷は、核融合炉の構成材料のすべてに及び、しかも中性子のエネルギーが高いため、原子炉の場合より、その影響が大きい。原子炉で構造材として使われている 316 オーステナイトステンレス鋼の核融合炉での使用が危ぶまれており、スウェリング特性や放射化の点ではオーステナイト鋼より優れているフェライト鋼の開発がはかられている。核融合炉の主たる構造材に何を使うかは長期的な材料開発の最大の課題である。

実用炉における  $14 \text{ MeV}$  中性子による材料の放射化は、装置の修理保守点検をむずかしくするため、長期的な観点から見ると、フェライト鋼では低放射化が不十分で、V 合金や SiC が構造材として候補にあがっているが両者ともまだまだ研究開発が必要である。炭素を中心とした低 Z 材の場合は中性子による放射化が少ないので保守点検等の点で大きなメリットであるが、照射による損傷のため熱伝導度が著しく低下する。 ( $500^\circ\text{C}$  以上ではかなり軽減される) 一方高 Z 材は放射化に対する懸念が大きい。またタングステンでは中性子を吸収して核変換しレニウムになる確率がかなり大きい。長期間使ったタングstenは W-Re 合金になってしまうことになる。

核融合では中性子のエネルギーが原子炉の中性子に比べ、大きいので原子炉中性子を使った照射の経験やデータを、そのまま応用するわけにはいかない。このため  $14 \text{ MeV}$  中性子源が必要であるという声は強い。しかし

一方では、電子顕微鏡等による微視的な損傷構造からマクロな材料劣化などが完全に理解できている段階に至っているわけでないで、材料の研究者は何をしているのかいつまでたってもベストな構造材料が出てこないではないかという批判も起こる。プラズマの閉じ込め同様、その詳細を見れば研究は大きく進んでいるが（たとえば[36]）、飛躍的な進展など望めそうもない。

現実要求されている材料、長期的に必要とされる材料との違いもあって研究の戦略に工夫がいるのかもしれない。いずれにしろ中性子が発生すれば、その照射に伴う性質劣化、材料の放射化共に避けることはできないので、両者を考慮に入れて、**複合的に材料を組み合わせ要求される機能が発揮されるような機器開発が必須である**。ITER ダイバータのモジュールとして炭素と銅を接合させた試験体を作るのには成功しているが、とくに接合面が中性子照射を受けたときにどうなるか、また接合剤に放射化の強い銀などを避けなければならないなど、工学的に解決されるべき課題は少なくない。

## 7. 粒子と熱の同時負荷

従来のPMI研究の多くは、粒子入射による現象を、粒子の輸送方程式あるいは質量移行方程式に基づいて、エネルギーの入射は熱輸送方程式にもとづいてそれぞれ独立に解析しており、入射粒子バランスとエネルギーおよび運動量のバランスが同時に考慮されていない場合が多かった。しかし実際には入射する粒子が跳ね返される場合にはそれが同時にエネルギーを持ち去るし、非弾性効果として二次電子放出、光放出によりエネルギーを持ち去る。残されたエネルギーも必ずしもすべてが熱に変換されるわけではなく、固体内での欠陥生成あるいは、スパッタ粒子およびその運動エネルギーとして取り去られる。結果として固体内に残されたエネルギーも必ずしもすべてが熱に変換されるわけではなく、固体内での欠陥生成などにも使われる。固体内の粒子輸送は、このようにして生じた欠陥や励起電子に大きな影響を受け、例えば照射誘起拡散や析出が引き起こされる。PMI研究も個々のデータが整備されるにつれ、このような総合的な観点からの仕事へと移り変わりつつある。周辺プラズマの研究もプラズマ流体科学からイオン、電子、中性粒子の粒子運動科学へと変わりつつあるように見える。**プラズマとそれを取り囲むプラズマ対向壁を一体とした科学の体系化が必要**ということになるのか。

Fig. 5に、最近明らかにされたスパッタされた材料の磁場による再堆積過程の模式図を示したが[7,37]、まさ

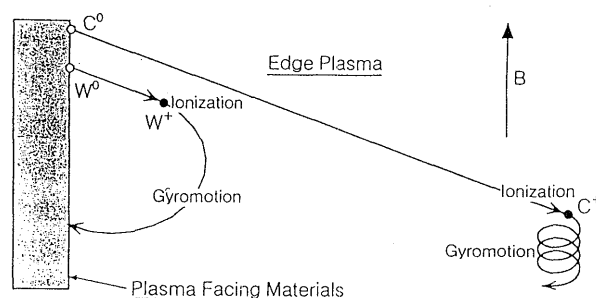


Fig. 5 Schematics of erosion, ionization and gyromotion of tungsten and carbon in edge plasma (Prompt redeposition is easier for heavy higher Z elements) [37].

にこれは磁場が（しかも磁力線が材料に極めて浅い角度で侵入する）存在する時に初めて出現する効果であって、イオン・固体相互作用のような個々の基礎過程の研究では確かめることができなかった総合的な現象である。

プラズマ対向材料として高Z材料と低Z材料とを比較すると、粒子（イオン、電子）反射係数およびエネルギー反射係数に大きな違いがある。このことは両者が同じ粒子およびエネルギー流束に曝されたときに受けるエネルギーに差があること、また反射係数の大きな高Z材では、反射して戻ってくる粒子のエネルギーが大きいことを意味する。実際、TEXTORで行われた高Zリミタへの入熱試験によりMoとWとでは温度密度ともに同じプラズマに曝された時に入熱に差があることが確認された（Fig. 6参照）[38]。これはリミタ試験であるため、対向壁全体がまったく異なったZ番号の材料で覆われたとき、その中で形成されるプラズマがどのような影響を受けるかは未知である。極端な言い方をすると、現在のプラズマのスケーリング則は、低Z材とりわけ炭素材をプラズマ対向壁に選択した場合の結果の集大成であり、対向壁をすべて高Z材にした時にもあてはまるという保証はない。

また材料からの反射粒子は必ずしも基底状態ではなく、かなりの部分が励起状態にあることもわかってきた[39]。従来の周辺プラズマの粒子輸送では壁からの粒子はすべて基底状態にあるとしていたが、励起状態にあるとイオン化断面積などが基底状態のそれとは大きく異なるので、周辺プラズマでの輸送過程が大きく異なることになる。最近の研究では、反射粒子だけでなく、壁からの放出される水素分子でさえ励起された振動回転状態にある物が少なくないことが報告されている[22,40]。

プラズマ・壁相互作用とは、入射するのはイオンだけでなく電子、先に述べた様々な波長の光が壁に入射しそ

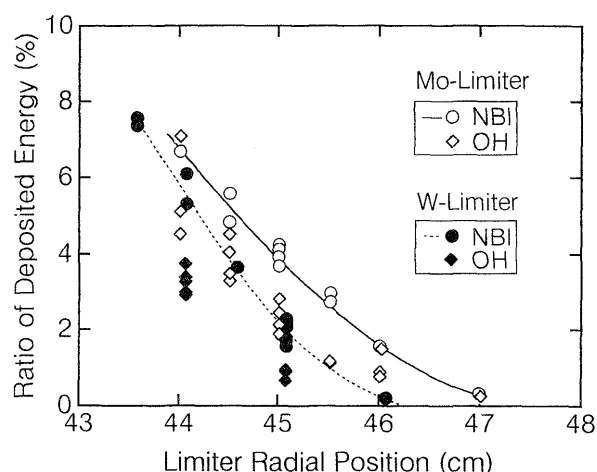


Fig. 6 Comparison of the ratios of the deposited energy on the W and Mo limiter to total convective energy in the TEXTOR plasma in terms of the limiter position [38].

れらが、相互に影響しながら材料表面を改質するだけでなく、周辺プラズマそのものを変化させる現象をいうべきであるが、いかんせん現象があまりに複雑すぎるのと、現状の大型トカマク装置ですら周辺を見るための、「道具立て」が不十分で統一的に見ることは不可能であったといえよう。直線型プラズマ装置でこれをシミュレートしようとする試み[41]も、次期大型装置の粒子、熱負荷を再現するだけのパワーがない。

最近科学の終焉論[42]、地球上で使える素材としての機能の限界が知られるようになったこと、あるいは技術の悲観論など、科学技術の先行きに悲観論を唱えるのがはやっているが、ここには新しい学問領域あるいは科学としての体系化されるべき現象がまだまだあるように思える。キーワードとして「イオン・固体衝突の物理から励起状態の化学へ」、「高粒子束あるいは非 Maxwell-Boltzman エネルギー分布の超高温熱物理化学」あるいは「非平衡状態の熱力学」「多価イオンの化学」など、PMI 研究には、ある意味では物理的視点から化学的視点への変換が求められているのかも知れない。物理から化学へそして化学工学による工業化へ、ある意味では今までの科学技術がたどってきた道と同じである。

## 8. 水素（トリチウム）に特有の問題

プラズマ対向壁に蓄積される水素は次の4つの観点から重要である。(1)プラズマの密度制御、(2)トリチウムのインベントリ、(3)安全性、(4)材料の機械的強度への影響。ところが材料中の水素濃度は何桁にも渡って変わりうる

上、それぞれ問題にされる濃度は大きく異なるため(1)～(4)を同質に議論することはむずかしい。(2)や(3)は非常に少ない量まで監視、制御されなければならないのに対して、(1)や(4)は比較的高い濃度にならないと問題にならない。

定常状態ではプラズマ側から壁に入射した粒子束のほとんど(99%以上)はプラズマ側に戻る。しかしこれはトリチウムが材料中に蓄積あるいは透過が少ないことを意味しない。(微量と積分量の違い)。実際に材料中に蓄積される水素の総量は、プラズマ中の水素の総量に比べ桁違いに多い。このため壁での蓄積水素のわずかな変化が、プラズマに大きな影響をあたえる。それ故、炭素材をプラズマ対向壁のベースとしている現在の大型装置ではあらかじめ壁コンディショニングにより水素を抜いておき、いわゆる低リサイクリングの状態にしないと、プラズマの密度制御がむずかしいのである。またコンディショニングされた壁として、放電回数が増えてくるとそこへの水素蓄積は無視できなくなる。すなわち ITER など1,000秒を超えるような長時間放電では、この問題がクローズアップされることになる。長時間放電により壁での水素蓄積量が飽和せざるを得ないことから、本質的に蓄積量の少ない金属壁の方がよいのではという議論もある。しかし拡散係数の小さい Be や Al 等が低温で使われると打ち込まれた水素は拡散しないで材料中にとどまるので、結果としては炭素材とあまり変わらないということになる。実際 JET で使われてたベリリウム中の表面近傍の蓄積水素量は黒鉛のそれとほぼ同じであったことが報告されている[43]。

しかし、壁温度を高温に保つことができれば水素蓄積量は著しく減少する[44]。黒鉛として500℃以上に保つことができれば、金属材料とあまりかわらないかもしれない。とくに1,000℃を越えると、入射した水素は、ほとんど蓄積されずに、しかも表面で再結合せず原子状で放出されるようになる[45]。

どのような材料が使われるにしろ、壁温度によって水素蓄積量は何桁にもわたって大きく変化するので、核融合装置でのトリチウムインベントリには最大の不確定要素が残されている。壁温度と材料を決めないと評価のしようがないが、ITER の場合は試験炉であり、必要なだけ供給しデータベースとする覚悟が必要のように思える？ しかし一方では、メンテナンスのために人間が近づけることを考えると、低放射化とともに、壁に蓄積されているトリチウムをできるだけ低減化する必要があることは論を待たない。このため炭素材の場合は、酸素を導入してトリチウムを水の形で除去しようとする実験す

ら行われている。トリチウムに関しては、核融合システムとしてみた場合に、どこにプライオリティを置いて、どのような研究を進めて行くかの議論が必要かもしれない。

水素吸蔵金属（例：V, Nb, Ta など）はその水素蓄積量の多さと、水素化物析出による脆化に対する懸念によりプラズマ対向壁には不可と烙印を押されているが、これらが常に500℃以上に保持されて使われるのであれば、少なくとも脆化の点ではあまり問題にならない。むしろ溶解度、拡散係数ともに小さいMoやWが、低温で使われたときに打ち込まれた水素が蓄積し材料を脆化させる可能性がある。

どのような材料を使おうと真空壁や冷却系へのトリチウムの透過は防ぎようがない。表面酸化物を透過障壁にしようとする試みもあるが、現状では信頼性に欠ける[46]。透過を抑制しようすると、必然的に材料内での蓄積量を増やしてしまうので、むしろ透過させてそれを処理することにする方が現実的のように思える。

## 9. 材料の選択

プラズマ対向材料に限って言えば、高融点材料として黒鉛（低Z材）か、あるいはMoやWのような高融点金属（高Z材）かの選択はプラズマに大きな影響を与えるだけでなくプラズマ対向材料の研究開発の方向性等にも大きな影響を与える。

従来のプラズマの研究では、現在の装置でのプラズマ閉じ込めを最優先課題としてきたため、材料の選択に長期的視野は入っていなかった。プラズマを汚染させる可能性の少ない低Z材、酸素の低減化、高熱衝撃耐性（高融点）等を必須の条件にすると、黒鉛をベースに、低Zの酸素ゲッター材（たとえばBe, Li, B）を添加あるいはコーティング利用するのが大勢であった。しかし来たるべきDT核融合反応の試験炉、たとえばITERのダイバータの熱負荷は現在の大型プラズマ実験装置のそれを約1桁上回る。こうなると黒鉛の損耗が激しく（1年間に数十センチメートルの厚さの炭素が失われるという試算すらある）その利用に“？”がともる。高Z材ではそれを構成する原子が重いので、燃料水素によるスパッタリングが小さく、また化学効果もないので損耗が少ない。最大の利点であり、ITERでは実際にWを使用する設計となっている。

しかし高Z材はそれが一旦プラズマ中に侵入すると、放射損失を増加させプラズマの加熱あるいは高温保持をむずかしくするとして避けられていた材料であった[3]。それゆえ実際のプラズマ実験装置ではほとんど使われて

おらず、プラズマとの相互作用に関するデータベースがまったくといっていいほど整備されていなかった。最近ようやく、高Z材をプラズマ対向壁として実験が行われるようになり、現在のプラズマ装置でも高Z材とプラズマとの両立が可能である条件が存在することがわかってきた[12]。しかし、高温、高密度のプラズマとの両立性についてはまだ“？”が残っている。

ITERでは第一壁としてベリリウムが選択されている。プラズマ放電のために酸素低減化と、低Z不純物を第一優先とするならばその選択は間違っていないかも知れない。しかしエンジニアリング的に見れば、機械的性質が良くないだけでなく、高温で蒸気圧が高くしかも酸化物が有毒であるベリリウムを使うことは決して奨められない。

繰り返しになるが材料の選択は低Z材対高Z材といった単純な対峙によって決められるべきではない。どのような材料がプラズマ対向壁材料に選ばれるにせよ、壁材料を変化させるとプラズマの性質が変化させられることが明らかになりつつある。すなわち壁はプラズマに対してactiveであり、従来のように壁がプラズマに対してpassiveと考え材料の研究者とプラズマの研究者がややもすると独立に活動していたのでは研究開発がきわめて不十分であることが明白になってきた。

## 10. 結論

いろいろなキーワードを並べた。一言でいってしまえば**プラズマとそれを取り囲むプラズマ対向壁を一体とした科学への体系化が必要**ということかもしれない。やってみないとわからないことを、やらないでわかるようにする。外挿するために必要なデータはなにか。それをどこでどのように取得し、正しい外挿であることをどう保証するか。やってみてわかった経験を、後世にやらないでもわかるように伝える。ということであろうか。

結論としていえば、核融合炉のような苛酷環境においては、材料はそれ自身の持つ単一の機能ではもはや耐えられず、材料の組み合わせによる機能化あるいは複合機器としての設計が必須になってきている。またプラズマ対向材料の研究開発は、プラズマと壁とのactiveな相互作用を考慮してはじめて可能になる。言い換えるとプラズマ対向材の研究開発は、材料研究者とプラズマ研究者のactiveな相互作用なしには進まなくなっており、まさに科学研究領域の総合化、学際化が起こっている先端分野といえよう。

本稿では第一壁を問題にしたため中性子照射損傷、お

よび放射化についての議論は不十分である。とくにプラズマ性能向上という至上命令のため、いわば良さそうなことは（それが簡単にできれば）手当たり次第（それを Scientific Base の上に立っていないと批判したのだが）やってきたのであり、中性子照射効果にまで手が回っていなかったが実情といえようか。核融合炉が受け入れられるためには放射化が少ない方がいいことは論を待たない。低放射化材料の開発も、まさに対向壁開発と同じ轍を踏んでいるようである。今欲しい材料、長期的にきつと必要なる材料、材料開発に戦略が必要であろう。もちろん長期的視野から見れば、プラズマ対向材だけでなく、本稿では触れなかった構造材の照射損傷、あるいは冷却材による腐食など材料の問題は山積していることを付言しておく。

### おわりに

本稿は、極めて非科学的な感想に過ぎない、とお叱りを受けるかも知れない。世界情勢を見回したとき、決して楽観は許されない核融合研究の継続が可能になりかつ実り多いものになるために、真に核融合研究を目指してどのような研究が必要か、一度外部の識者に評価してもらうことが必要かもしれない。もちろんいったん研究がとん挫した後、新しい研究が立ち上がったときにはそれが真に必要な研究であったといえるであろうが。

一方では、寄り道、道草が必要であることは論を待たない。それは20年あるいは30年後に花開くための肥やしになることが少なくない故に。本稿が日頃忙しく自分のフィールドで立ち働いてる方々への一石になることを望んでいる。

### 参考文献

- [1] 川村孝式：核融合研究 **63**, 235 (1990) 以下講座「プラズマ・壁相互作用」。
- [2] 田辺哲朗, 宮原 昭：日本原子力学会誌 **32**, 544 (1990)。
- [3] T. Tanabe, N. Noda and H. Nakamura, J. Nucl. Mater. **196-198**, 11 (1992)。
- [4] 山脇道夫他：プラズマ・核融合学会誌 **69**, 1301 (1993)。
- [5] 秋場真人他：プラズマ・核融合学会誌 **71**, 368 (1995)。
- [6] 高村秀一他：プラズマ・核融合学会誌 **72**, 857 (1996)。
- [7] 田辺哲朗他：プラズマ・核融合学会誌 **72**, 983 (1996)。
- [8] 講座「炉壁材料分析技術」, プラズマ・核融合学会誌 **72**, 663 (1996) 以下連載。
- [9] 日野友明他：プラズマ・核融合学会誌 **73**, 561 (1997)。
- [10] 奥野健二他：プラズマ・核融合学会誌 **73**, 1317 (1997)。
- [11] 日野友明他：日本原子力学会誌 **39**, 854 (1997)。
- [12] N. Noda, V. Philipps and R. Neu, J. Nucl. Mater. **241-243**, 227 (1997)。
- [13] C. S. Pitcher and P.C. Stangeby, Plasma Phys. Control. Fusion **38**, 779 (1997)。
- [14] 下村安夫, 松田慎三郎他：ITER 設計報告, プラズマ・核融合学会誌 **73**, supplement。
- [15] 例えば Sppl. J. Nucl. Fusion, Vol.1 から Vol.6 を参照。
- [16] *Physical Process of the Interaction of Fusion Plasmas with Solids*, W.O. Hofer and J. Roth eds., (Academic press 1996)。
- [17] *Atomic and Plasma-materials Interaction Processes in Controlled Thermonuclear Fusion*, R.K. Janev and H.W. Drawin eds. (Elsevier Sci Publishers, 1993)。
- [18] Y. Ueda, K. Nakano, Y. Ohtsuka *et al.*, J. Nucl. Mater. **227**, 251 (1996)。
- [19] D. Naujorks, K. Asmussen *et al.*, Nucl. Fusion **36**, 671 (1996)。
- [20] Y. Ueda, T. Tanabe, V. Philipps *et al.*, J. Nucl. Mater. **220-222**, 240 (1995)。
- [21] R. Parker, G. Janeshitz, H. D. Pacher *et al.*, J. Nucl. Mater. **241-243**, 1-26 (1997)。
- [22] T. Tanabe, J. Nucl. Mater. **248**, 418 (1997)。
- [23] C. Wong, *Private Communication*
- [24] U. Sam *et al.*, Plasma Physics and Control. Fusion **35**, B167 (1993)。
- [25] A. Kallenbach *et al.*, Nucl. Fusion **35**, 1231 (1995)。
- [26] M. Nagatsu, N. Takada, T. Tukishima and M. Shimada, J. Nucl. Mater. **220-222**, 846 (1995)。
- [27] 超高真空の物理, 岩波書店。
- [28] R. J. Hawryluk, Nuclear Fusion **19**, 1307 (1979)。
- [29] M.Z. Tokar, T. Balemans, V. Philipps *et al.*, Plasma Phys. and Control. Fusion **37**, A241 (1995)。
- [30] J. Rapp, M. Tokar, L. Koenen *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **39**, 1615 (1997)。
- [31] T. Tanabe, High Z Candidate Plasma Facing Materials, Suppl. J. Nucl. Fusion **5**, 129 (1994)。
- [32] 田辺哲朗, 丸山忠司：プラズマ・核融合学会誌 **69**, 415 (1993)。
- [33] E. Hechtel and J. Bohdansky, J. Nucl. Mater. **122&123**, 1431 (1984)。
- [34] M. Saidoh, H. Ganser and W.O. Hoffer, Nucl. Instr. Methods B **28**, 540 (1987)。
- [35] H. Trinkhaus, B. N.Sighn and C.H. Woo, J. Nucl. Mater. **212**, 18 (1994) をはじめとして Intern. Conf. Fusion Reactor Materials の各プロシーディングス (いずれも J. Nucl. Mater. の特集号として刊行されている) には常に関連する解説が掲載されている。

- [36] 室賀健夫：プラズマ・核融合学会誌 **74**, 9 (1998).
- [37] K. Ohya, J. Kawata T. Tanabe *et al.*, *Proc. Intern Conf. on Plasma Physics*, Nagoya pp.650-653.
- [38] T. Tanabe, V. Philipps, K. Nakamura *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **241-243**, 1164 (1997).
- [39] T. Tanabe, K. Ohya and Y. Otuki, *J. Nucl. Mater.* **220-222**, 841 (1995).
- [40] A. Pospieszczyk, G. Sergienko, D. Rusbult *et al.*, *Proc. 24th EPS Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics*, Berchesgaden, 9-13, June 1997, **21A**, 1733.
- [41] M.Y. Te, S. Takamura and N. Ohno, *J. Nucl. Mater.* **241-243**, 1243 (1997).
- [42] J. Horgan, *The End of Science*, (Addison-Wesely Publishing Co. Ltd., 1996).
- [43] R. Behrish, A. P. Martinelli, S. Grigull *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **220-222**, 590 (1995).
- [44] 田辺哲朗：核融合研究 **61**, 367 (1989).
- [45] J. W. Davis and A. A. Haastz, *J. Nucl. Mater.* **223**, 312 (1995).
- [46] T. Tanabe, *Fusion Technol.* **28**, 1278 (1995).