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

第1回　Ⅰ．はじめに

核融合科学研究所　相良明男，大阪大学　乗松孝好

Ⅱ-1 壁の前で何が起きているか？

慶應義塾大学　畑山明聖，日本原子力研究開発機構　滝塚知典

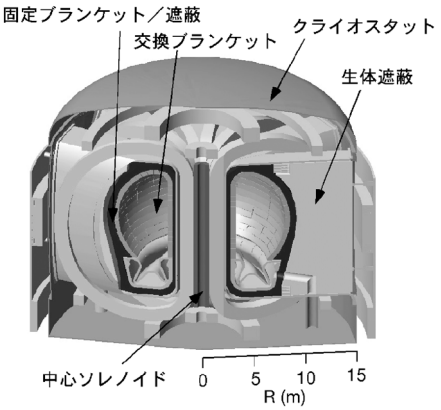
Ⅰ．は じ め に

1．チャレンジは始まっている

磁場を用いる国際熱核融合実験炉イータ（ラテン語で道の意，ITER：International Thermonuclear Experimental Reactor）の建設が始まった[1]。慣性を用いる核融合分野では，2012年頃には点火燃焼の実験が米国で予定されている。いずれも実用規模の核融合エネルギーを初めて発生させる。その後，原型炉から実用炉へと続く。そこでは核融合炉の「壁」を構成する高熱流機器やブランケットが新しい主役となる。そこにはどんな物理や化学，工学が渦巻いているか。数値モデリングによって壁の働きを理解して予測する研究が期待されている。核融合エネルギー炉を設計するチャレンジはすでに始まっている。

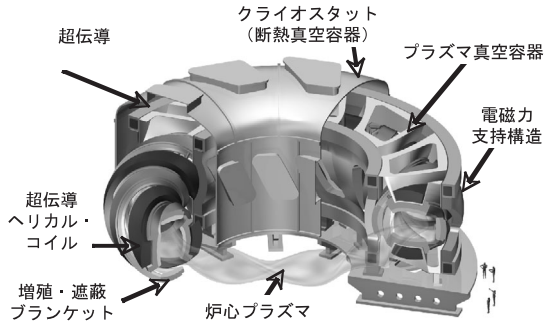
2．炉の中で何が起きるのか

第Ⅰ-1～3図にトカマク型核融合炉[2]，ヘリカル型核融合炉[3]，レーザー核融合炉[4]の概念設計例を示す。核融

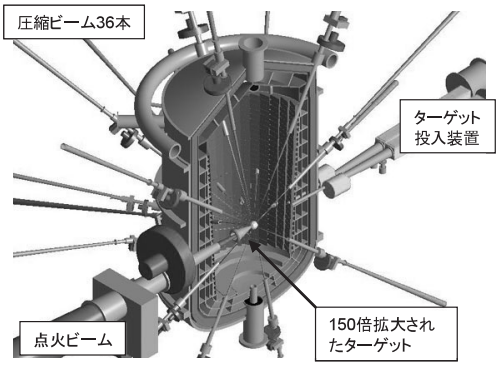


第Ⅰ-1図　トカマク型核融合炉 SlimCS[2]

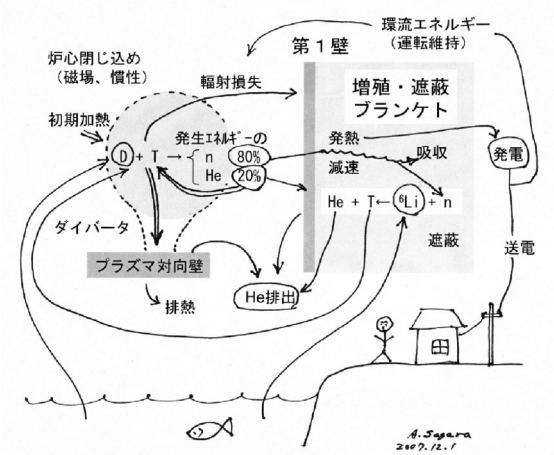
The Fusion Reactor Wall is Getting Hot!—A Challenge towards the Future for Numerical Modelling（1）：Chap. Ⅰ introduction：Akio SAGARA, Takayashi NORIMATSU, Chap. Ⅱ What is Really Happening Between the Plasma edge and the Wall?—1. Physics Modeling：Akiyoshi HATAYAMA, Tomonori TAKIZUKA.
（2008年　1月29日　受理）



第Ⅰ-2図　ヘリカル型核融合炉 FFHR[3]



第Ⅰ-3図　レーザー核融合炉 KOYO-F[4]



第Ⅰ-4図　核融合炉壁（増殖・遮蔽ブランケット）の役割

合エネルギー炉を実現するには，**第Ⅰ−4図**に示すように，重水素(D)と三重水素(T)の高温高密度プラズマを使う。磁場閉じ込め核融合プラズマでは，高密度といっても大気の10万分の１程度だが，温度が１億度(10 keV)程度あるので数気圧の高圧となっており，これを５テスラ程度の磁場の磁気圧〜100気圧で押し留める。あるいは強力なレーザーで高温プラズマを固体密度以上に圧縮できれば，短時間なら止まって見える“慣性”も強力な「容れ物」となる。レーザー方式については，本章の後半で詳しく述べるとして，まず磁場方式を前提に話を進めるが，基本原理は共通である。

DT 核融合反応で発生するエネルギーの20%はアルファ(α)粒子(ヘリウムイオン)が受け持ち，主に高温プラズマの維持に使われる。そのエネルギーは，熱粒子のエネルギーや電磁波の輻射エネルギーとして最終的に「容れ物」の壁に逃げていく。これらのエネルギー収支がバランスすると外部加熱が要らない自己燃焼が続く。止める時はDやTの燃料供給をストップするだけでよい。正に焚き火の原理である。

他方，残り80%のエネルギーは高速中性子として「容れ物」から飛び出して，周囲の「壁」に入り込む。そしてブランケットの材料原子との衝突を繰り返しながら発熱し，冷媒によって炉外に運ばれて発電に至る。この過程で減速して熱化した中性子は，^{6}Li と反応してTを増殖する。したがって，ここでも１核融合反応当たり１T生成の収支バランスが必須である。これがクリアできれば，消費原料は海水からいくらでも安く手に入るDとLiだけであり，排出物は無害の He だけである。

太陽においては，巨大な「引力の容れ物」の中で，陽子と陽子の核融合反応(P-P サイクル)を持続し，ガンマ線とニュートリノのエネルギーを宇宙空間に放出している。一方，我らが人工太陽では，中性子を利用した全く新しい小型システムを構築している。しかしその容れ物の「壁」は，表面だけに特に集中する高熱流と，「壁」内部に突入して分散する高速中性子作用の，２重の過酷な条件にさらされることになる。**第Ⅰ−5図**に示すように，ダイバータ熱流は太陽表面での熱流に近づくほどであり，中性子による壁材原子の弾き出し損傷(DPA)は高速炉容器の1,000倍ほどである。この両方を矛盾なく制御することも大きなチャレンジとなっている。そのためには，実験的研究開発に並んで，数値モデリングによって現象を理解して予測する研究が強く期待されている。

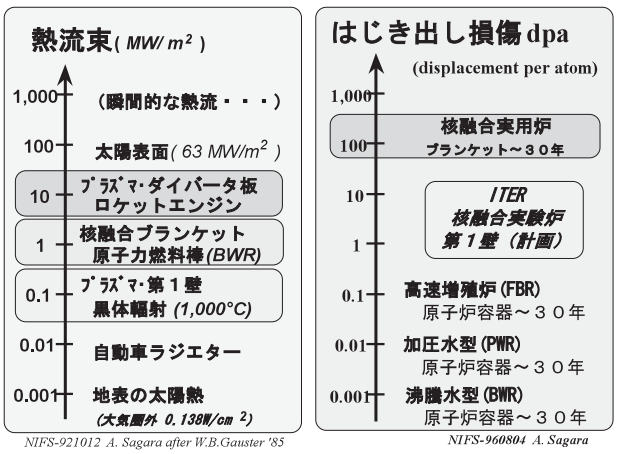
磁場閉じ込め方式の核融合炉は定常運転が基本である。したがって，第Ⅰ−第４図に示すように，磁気ダイバータによってヘリウムなどの不純物を常にポンプで排気し続けることも必須である。他方，慣性閉じ込め方式は間欠運転であるため，ダイバータは不要だが瞬間的な熱流が極めて高いため，別の要請がある。すなわち α 粒子による壁負荷は半径３mの液体壁で10^{11}W/m^{2}程度となる。最新の概念設計炉 KOYO-F の場合[4]，第一壁は厚さ３〜５mm の液体 LiPb の滝で保護されていて，炉全体で10 kg 程度の液体 LiPb が蒸発する。液体壁での課題の一つは，この蒸発した金属のその後の挙動である。次のターゲット照射の時までに(１s 以下で)10 Pa 程度まで排気できるか検証をする必要がある。また，微粒子がターゲットに付着してターゲットの性能を落とす恐れがあるので，微粒子の挙動についての研究が必要である。

第Ⅰ−6図に表面での現象をまとめる。時間的な経過は無視されていて，右半分は主にα粒子が壁に到達した頃，左半分はそれにより蒸発したガスが対向壁に到達した頃をイメージして描かれている。α粒子は液体金属中に入ると，衝突を繰り返し，エネルギーを放出する。原子過程，電子遷移等を含めた詳細な過程については，本講座第Ⅸ章で詳しく触れられる予定である。

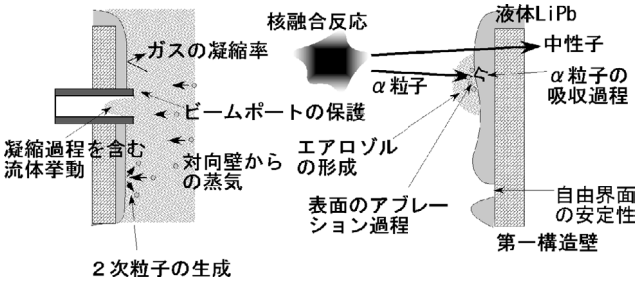
蒸発した液体金属は断熱膨張により，急速に冷却され，エアロゾルを形成しながらやがて対向壁にまで到達する。先に述べた流体力学的不安定性により形成された直径数 μm の粒子も同様である。これらの蒸気，エアロゾル，粒子がどのような効率で対向壁に吸収されるかは高繰返し照射を実現する上で大変重要なデータとなる。

3. この企画もチャレンジ

本講座では，以上の観点を全11章，12回に分けて，壁



第Ⅰ−5図　単位面積当たりの熱入力の比較，中性子照射による壁材原子１個当たりの移動割合の比較



第Ⅰ−6図　液体壁レーザー核融合炉の表面近傍での課題
時間的な経過は無視されている。

の前で何が起きているか(Ⅱ章)，その表面で何が起きているか(Ⅲ章)，その中で何が起きているか(Ⅳ章)，それによって壁はどのくらい熱くなるか(Ⅴ章)，そのとき壁の中は傷まないか(Ⅵ章)，それによって壁の寿命はどのくらいか(Ⅶ章)，その時に壁が作る燃料をどうしたらいいか(Ⅷ章)，そもそも壁は熱でどうなるか(Ⅸ章)，その熱をどうするか(Ⅹ章)，今後の展望は(Ⅺ章)を駅伝方式でつなげてみる。リレーがしっくりこなければ，そこが新しい課題であろう。いずれにしても本企画もまた，今までにないチャレンジである。　(相良明男，兼松孝好)

—参 考 文 献—

1) http：//www.naka.jaea.go.jp/ITER/
2) K. Tobita, *et al*., *Nucl. Fusion*, **47**, 892-899 (2007).
3) A. Sagara, *et al*., *Nucl. Fusion*, **45**, 258-263 (2005).
4) 神前康次, 他, プラズマ核融合学会誌, **82**, 819-822 (2007).

Ⅱ．壁の前で何が起きているか？—物理モデル

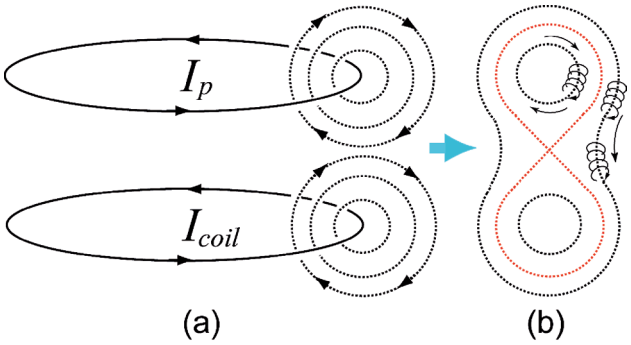
炉心プラズマと固体壁との間に位置する“境界層プラズマ”を通して，国際熱核融合実験炉(ITER)では約10万kWもの熱が固体壁へと輸送される。さらに，原型炉ではその約6倍にもなる。境界層プラズマの理解と，その制御なしには，核融合炉の実用化はないといっても過言ではない。ITER設計活動を契機として，境界層プラズマの数値モデリングは着実に進展してきている。まさに，“熱い”テーマである。欧米に比較して，数値モデリングの立場からこの“熱い”テーマに取り組む研究者，とくに，若手は数少ない。本稿をきっかけに，少しでも多くの若手が，この分野に興味をもってくれれば幸いである。

1. 壁の前で何が起きているか？

(1)　ダイバータとは？

核融合炉におけるプラズマと壁との相互作用を考える上で，ダイバータ概念を抜きには語れない。核燃焼コアプラズマを高温で高純度に保つためには，“高温プラズマと壁との相互作用をコアプラズマからできるだけ遠く離れた領域に限定し，相互作用によって生じる不純物がなるべくコアプラズマに入るのを防ぐ”ことが必要となる。

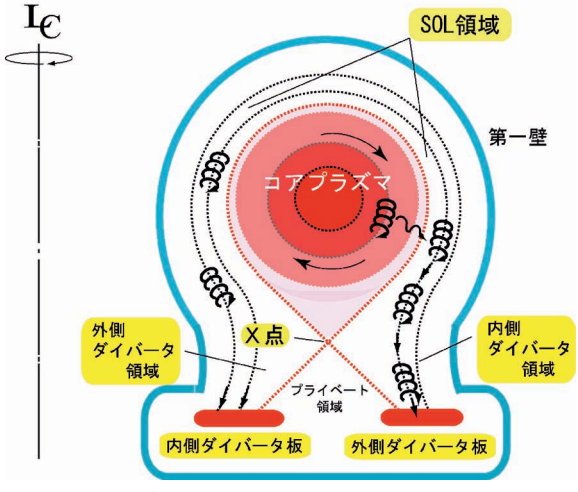
ここでは，最も基本的なダイバータ概念を第Ⅱ－1図に示す。磁場閉じ込め核融合の代表的な一つであるトカマクでは，第Ⅱ－1図(a)のように，コアプラズマに主に電子の流れによって生じる円環状電流I_pが流れている。この円環電流に垂直な面を考えると，アンペールの法則から電流を取り囲むような磁場が生じる(磁力線の様子を破線で示した)。ここで，コアプラズマの下側に



第Ⅱ－1図　ダイバータ形状

円環状のコイル(ダイバータコイルと呼ぶ)を置き，プラズマ電流と同じ方向に電流I_{coil}を流し，コイルを取り囲む磁場を作る。これら2つの電流による合成磁場は，第Ⅱ－1図(b)のようになる。プラズマとコイルとの間に，互いに作る磁場が打ち消しあい，磁場の垂直面内成分がゼロになる点が生じている(トロイダルコイルで作るトロイダル磁場[1]があるので，磁場強度はゼロにならないことを注意しておく)。この点をその形状からX点と呼び，X点を通る8の字状の線(面)を，セパラトリックスと呼ぶ。セパラトリックスを境にして，磁力線のトポロジーに大きな違いが生じていることが，図から容易にわかる。セパラトリックス内部では，磁力線はおのおのの電流を囲んで閉じているのに対して，外部の磁力線は2つの電流を同時に取り囲む“ダルマ形状”となっている。

さて，壁とプラズマの相互作用に話しを戻す。閉じ込め装置ではプラズマを取り囲んで，第Ⅱ－2図のように，第一壁が存在する。上で述べたように，ドーナツ形のコアプラズマ領域では磁力線は閉じており，プラズマ粒子は磁力線に巻き付いて旋回運動(ラーマー運動)をしながらセパラトリックス内部に閉じ込められている。しかし時間がたてば，衝突や乱流に起因する拡散過程により，セパラトリックス外部に流失する。ここで重要なのは，“プラズマは磁力線に沿って運動しやすい”という性質で



第Ⅱ－2図　トカマク断面図

ある。すなわち，流出してきたプラズマ粒子は，そのまま拡散してコア周りの壁に到達するのではなく，主に磁力線に沿って図に示したダイバータ板まで導かれる。したがって，ダイバータ板をコアから十分に離しておけば，壁とプラズマとの相互作用をコアから離れたダイバータ板にのみ限定することができる。セパラトリックスと壁との間に存在する境界層のことを，“SOL（Scrape-Off Layer）”領域と呼ぶ。さらに，SOL のうち，X 点より下のダイバータ板に近い領域のことを，特にダイバータ領域と呼ぶことが多い。

第Ⅱ－3 図は，ダイバータトカマク装置（ASDEX-U：ドイツ）の内部写真である[2]。赤く発光している部分は比較的低温のプラズマであり，電離されきれない水素原子がプラズマによって励起されて赤の波長領域の光を発している。一方，高温プラズマからの発光は，可視光より波長が短く透明となり，プラズマを透かして裏側の壁が黒く見えている。右側の図は，この発光の様相を数値モデリングによって再現したものである。白と緑の矢印が，おのおの第Ⅱ－2 図の内側ダイバータ板と外側ダイバータ板の部分に対応している。

（2）　ダイバータの功罪

ダイバータ配位は，上に述べたように，コアプラズマを高温・高純度に保ちやすいメリットがある反面，相互作用がダイバータ板に集中するというデメリットがある。言い換えると，コアプラズマから流出する粒子と熱をダイバータ板が，ほぼ一手に引き受けることになり，その負荷は熾烈なものとなる。これに対して，上に述べた ITER[3]においては，ダイバータ板におけるピーク熱負荷を10 MW/m^{2}以下に抑えることが要求されている。そのため，ダイバータ板に到達する前に先に第Ⅱ－3 図でみたように，SOL やダイバータ領域における光の放射として，壁全体にエネルギーを分散させる（放射冷却ダイバータ概念）ことや，プラズマが直接ダイバータ板に届かないようにする（非接触ダイバータプラズマ概念）ことで，ダイバータ板へのプラズマの熱負荷を低減し，この問題を克服する。これら概念が成立するかどうかについて，実験的な研究とともに，数値モデリングが重要な役割を果たしている。その詳細は，次回で詳しく説明する。実験炉の次のステップの実証炉[4]では，核融合熱出力が ITER の約 5 倍，300万 kW にもなる。このうち，約1/5の60万 kW がプラズマとしてダイバータ板にそのまま到達することになると，ダイバータ設計は極めて困難なものとなる。ダイバータの成立性が，磁気閉じ込め核融合炉実現にとって極めて重要な意味を持つ。数値モデリングの高度化と予測精度の向上が急務となっている所以である。まさに，核融合炉実現にとって，“熱い”分野といえる。

（3）　境界層プラズマで何が起きているのか？

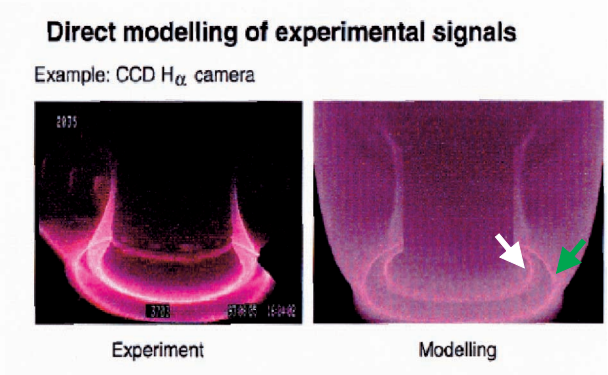
SOL およびダイバータプラズマに関する数値モデリングの現状は，以下で詳しく述べることにして，ここでは，これら境界層プラズマで“どのような物理現象が起こっているのか？”を，まずは定性的に考えてみよう。**第Ⅱ－4 図**に主な物理過程/現象を概念的に示す。

(a)　クーロン衝突と SOL 中の熱輸送

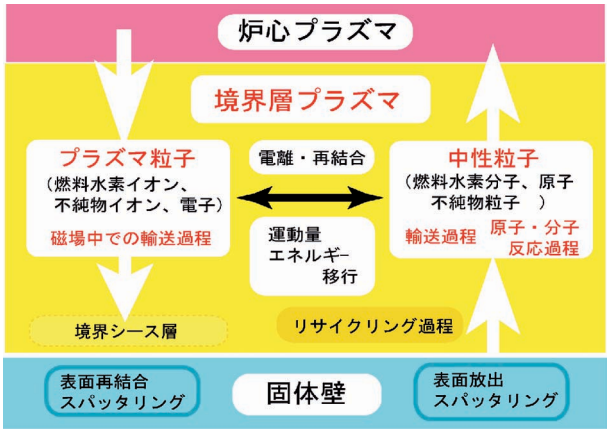
コアから漏れ出たプラズマ粒子は，先に説明したように，磁力線に沿って SOL 中を輸送される。コアに近い SOL 上流では，荷電粒子間のクーロン衝突過程が重要となる。クーロン衝突は，プラズマの温度が高くなるほど，その頻度は少なくなる。この性質は，SOL 中でのプラズマの磁力線方向の熱伝導や，不純物に働く力などを考える上で重要な役割を果たす。例えば，磁力線方向のプラズマの熱伝導率 $\kappa_{//}$はプラズマ温度 T の5/2乗に比例して大きく変化する。

(b)　シース

一般に，プラズマはイオンの密度 n_i と電子の密度 n_e がほぼ等しい“準中性”と考えられている。これは，もし電荷の偏りがあると電場が生じて，その偏りを打ち消すようにプラズマを動かすからである。しかしながら，ダイバータ板の直前では，このような準中性からのズレは大きく，定常的に大きな電場が存在する領域が存在している。この領域をシース領域という。イオンに比較して



第Ⅱ－3 図　トカマク装置（ASDEX-U）ダイバータ領域における水素原子からの発光
（左図：実験，右図：数値モデリング）[2]



第Ⅱ－4 図　SOL/ダイバータプラズマ中の物理過程

電子は圧倒的に質量が小さく，速く動き回っているので先にダイバータ板に逃げていき，板の電位を低下させていく。しかし，この電位降下は電子を減速させ，さらにはエネルギーの低い電子を反射する(負電荷を持つ電子にとって電位降下は上り坂になる)。このため，電子の壁への流入は減少していく。一方，イオンは，電位降下により壁に向かって加速され，イオンの流入は増加する。やがて，壁に入射するイオン粒子束と電子粒子束はバランスし,定常的な電位降下がプラズマと壁(ダイバータ板)との間に生じることになる。プラズマ粒子およびそのエネルギーは，このシースを介して壁に入る。シース抜きにはプラズマ-壁相互作用を語れない。

(c)　原子分子過程とリサイクリング過程

固体壁に到達したイオンは，固体表面で電子と再結合(表面再結合)し，中性の原子，あるいは，分子として，再びプラズマ中に戻っていく。これら中性粒子は，プラズマ(主として電子)と衝突し，解離，励起，電離(イオン化)などを行う。第Ⅱ-3図のダイバータ領域における発光は，実はこのような励起過程によって生じた中性水素原子から放出される光を，CCDカメラによって撮影したものである。

ダイバータ板で生じた中性粒子が，ダイバータ領域でイオン化すると，磁力線に束縛され，再びダイバータ板に入射する。プラズマ(イオン＋電子)→固体表面→中性粒子→電離→プラズマ(イオン＋電子)→固体表面→…の過程が繰り返される。これを“リサイクリング過程”と呼ぶ。この過程において粒子束は増幅されることになる。粒子束の増幅が大きい“高リサイクリング状態”では，ダイバータ領域でのプラズマ密度が上昇するようになる。一方，プラズマ圧力は磁力線に沿ってほぼ一様になろうとするので，ダイバータ領域のプラズマ温度は低下することになる。同時に，上で述べた解離，励起，電離などのプラズマと中性粒子との相互作用によって，プラズマはエネルギーを失い，ダイバータ板前面のプラズマの温度は低下する。　励起，イオン化に加えて，中性粒子がイオンに，イオンが中性粒子になる荷電交換反応も重要な原子分子過程の一つである。電荷移行の際には通常，各粒子の運動エネルギーの変化は生じない。反応の結果生じる中性粒子は，もとのイオンのエネルギーを保っている。しかし“中性”粒子になるので，もはや“磁力線の束縛を受けず自由に運動”し，やがて壁に衝突する。イオンは磁力線に束縛され，ダイバータ板の限られた領域に入射するのに比べて，粒子・熱負荷は比較的広い範囲に分散される。

ダイバータ板前面に，低温の中性ガス層を形成し，これをあたかもクッションとして，プラズマと壁とを非接触状態に保つことができれば，ダイバータ板への粒子・熱負荷を著しく軽減することができる。このような“非接触プラズマ状態”については，次回でより詳しく説明する。

(d)　不純物発生とプラズマ中で不純物イオンに働く力

ダイバータ板に入射するイオンは，上で述べたリサイクリング過程を行うと同時に，ダイバータ板の材料の原子をたたき出す(スパッタリング)。たたき出された原子は，不純物としてプラズマ中に放出される。スパッタリングの過程は，壁材料組成や壁に入射するイオンのエネルギー,入射角などに強く依存する。カーボン材料では，入射水素との化学反応によりメタンなどになって放出される場合もある(化学スパッタリング)。このようなプラズマ粒子と壁との相互作用については，本講座第3回で詳しく取り上げる。

壁で発生した不純物粒子は，燃料水素の場合と同様，プラズマ粒子との相互作用により，励起，イオン化される。一方，ダイバータ領域に流入するプラズマは，この不純物との相互作用によりエネルギーを失うことになる。ダイバータプラズマは冷却され，ダイバータ板への熱負荷が低減できるようになる。ただしこのとき，不純物イオンがダイバータ領域にとどまってくれる必要がある。コアへの侵入量が多ければ，コアプラズマは冷却されるし燃料が希釈されてしまう。はたして，不純物イオンはダイバータ領域にとどまるのか？それとも，コアに侵入してしまうのか？侵入量は，許容値以下に抑えられるのか？これらを精度よく予測することも，周辺プラズマの数値モデリングの重要な使命の一つである。

(e)　ヘリウム排気

核融合反応によって発生する高エネルギーのヘリウムイオンは，燃料プラズマを加熱し，高温に維持する。しかし，この衝突過程でエネルギーを失ったヘリウムイオン(ヘリウム“灰”と呼ばれることもある)がコアプラズマに蓄積すると，燃料水素は希釈され核融合反応の出力が減少する。コアで発生したヘリウムイオンの一部は，燃料水素イオンと同様，SOL中を磁力線に沿ってダイバータ領域に導かれる。このようなヘリウム灰をダイバータ領域から，効率的に排気できれば，コアでのヘリウム灰の蓄積と燃料の希釈を防ぐことができる。コア，SOL中でのヘリウム粒子輸送，ダイバータ領域における排気は，核融合出力維持という観点で非常に重要である。

(畑山明聖，滝塚知典)

—参 考 文 献—

1) P. C. Stangeby, *The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices*, IOP Publishing London, (2000).
2) R. Schneider, X. Bonnin, K. Borrass, D. P. Coster, *et al*., “Plasma Edge Physics with B2-Eirene”, *Contrib. Plasma Phys*, **46**, 3 (2006).
3) 下村安夫，他，“ITER工学設計”，プラズマ・核融合学会誌　第78巻増刊，(2002).
4) R. Hiwatari, K. Okano, Y. Asaoka, K. Shinya, Y. Ogawa,

“Demonstration Tokamak Fusion Power Plant for Early Realization of Net Electric Power Generation”, *Nucl. Fusion*, **45**, 96(2005).

＊文献1)は，上で取り上げた境界層プラズマの物理現象，原子分子過程，壁相互作用など広い範囲をカバーした優れた教科書。単なる現象の羅列ではなく，しっかりとした物理的見方も示してくれている。境界層プラズマに興味を持たれた読者は，ぜひ一読することをお勧めする。

著 者 紹 介

相良明男(さがら・あきお)

自然科学研究機構
(専門分野/関心分野)核融合炉工学/特にプラズマ壁相互作用における物質移行物理工学と炉システム設計統合

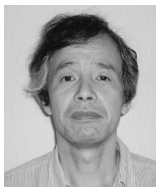
乗松孝好(のりまつ・たかよし)

大阪大学
(専門分野/関心分野)レーザー核融合/炉工学，トリチウム，ターゲット開発

畑山明聖(はたやま・あきよし)

慶應義塾大学
(専門分野/関心分野)プラズマ物理/特に核融合境界層プラズマおよび負イオン源プラズマのモデリング

滝塚知典(たきづか・とものり)



日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)プラズマ物理/トカマクの周辺プラズマモデリング(特に粒子シミュレーション)および核燃焼プラズマの統合モデリング

原子力学会誌　広告のご案内

社団法人　日本原子力学会

日本原子力学会誌は、毎月 8 千部を発行しており、全国の主要大学、原子力研究機関、電力会社、メーカー、地方自治体、メディアなど、原子力に関係する多くの方々が目を通しています。また、昨年 4 月号から誌面を一部刷新し、学会誌の Web アンケートも開始しました。

さらに、本年 4 月号より表紙デザインと名称を変更し、より親しまれ、さらに多くの読者に読まれる学会誌として引き続き、刷新を行ってまいります。

この機会に、学会誌への広告掲載をぜひ検討していただけることをお願いいたします。

■ 広告料金(1 頁あたり)

表 2	110,000 円	前付	80,000 円
表 3	100,000 円	後付	70,000 円
表 4	130,000 円	差し込み	160,000 円
前付色紙頁	95,000 円	記事中	80,000 円（1/2 頁 40,000 円）＊書籍・文献等広告に限る

※年間契約(一括お支い)の場合、4 回以上 10%，12 回 20%割引

■ 原稿支給の場合は版下・フィルム製作費として 20,000 円、版下支給の場合はフィルム製作費として 5,000 円を別途申し受けます。

■ 連絡先

105-0004　東京都港区新橋 2-3-7 新橋第二中ビル 3F　社団法人　日本原子力学会

学会誌編集担当　富田，野口　TEL　03−3508−1262　FAX03−3581−6128　E メール：hensyu@aesj.or.jp