

小特集

プラズマ対向壁としての高Z材

6. どのような実験，研究が必要か

伊藤 公孝

(核融合科学研究所)

(1996年6月20日受理)

Future Experiments and Research

ITOH Kimitaka

National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan

(Received 20 June 1996)

Abstract

Some issues related to the high-Z material as the plasma facing component are discussed from the view point of the key for the understanding of the plasma. Possible new area for the plasma science is discussed.

Keywords:

high-Z material, impurities, neutrals, improved confinement, diagnostics, complex plasma

数学の世界には、たとえば Klein の Erlangen Programme とか、Hilbert の23の問題とか、今後の必要な研究を規定する有名な展望があります。「予想」自身が重要な研究であると認識されているわけです。さて、数学の伝統とプラズマ物理・核融合研究の伝統には大きな差があるものの、本誌の講座には、最後に今後の展望を議論する、というチャンスが用意されていて、にぎやかな討論が折々に掲載されてきています。

6.1 問題の背景

この小特集で論じられるプラズマ対向壁としての高Z材が最近広い興味の対象になるのは、もちろん ITER の具体的設計を例として、核融合実験炉の検討が真摯に行われているからです。実際に容器が熱負荷／中性子照射／損耗に耐えなければならないことを考えると、プラズマ対向壁としての高Z材を活用することが一つの方策として思いかびます。一方、炉心プラズマ性能への要請も楽ではなく、H-mode 始め大きな改善度や高い燃料純度を要請して設計を進めることになります。物理的高性

能と技術的高性能の双方が同時に求められます[1]。閉じ込め実験の歴史をみると、プラズマ対向壁として高Z材を用いた PLT でのホロー温度分布が悪い印象を与えました。また、低Z材をプラズマ対向壁として用いることで、改善閉じ込めが進歩したことから、結局のところ、高Z材のもとでの実験データ・ベースが希薄になってしまいました。

「プラズマ対向壁としての高Z材」をいかに全体として把握すればよいか考えることは急務です。ただし、ITER など実験炉の成立性が重要な問題であることは疑いがないのですが、その側面だけからこの問題をとらえることは不十分です。プラズマの理解の鍵という面からの研究も重要です。現在まだ未熟なその面をなおざりにすると、後々になって、希薄な研究蓄積を嘆く歴史を繰り返すことになりかねません。

対向壁が高Z材であるか否かをプラズマは知っていて、性質が変わります(例えば論文[2])。それは大きな謎です。プラズマと対向壁が相互作用しあうのは介在する機構があるからです。その機構を不純物と中性粒子に

振り当てて、謎を挙げそれを例に取って、どのような研究が必要かについてその一部を論ずることにします。

6.2 不純物イオンと中性粒子

不純物イオンは、核融合反応の燃料にならないもので、芳ばしくない名前をつけられています。燃料の希釈、放射損失による自己点火への障害などを引き起こすので、できるだけ避けるべきものと考えられて来ました[3]。しかし、最近、放射損失の助けを借りたい、という考え方も出てきました。(中心を冷やさないで、しかし周辺やダイバータ部では積極的に放射損失させて、荷電粒子による熱負荷を減らそうというわけです[4].) そうすると、不純物の閉じ込めという問題が出てきます。不純物の輸送は大事な課題でしたが、不純物イオンの挙動に関する理解に一段と深いものが求められます。さらに、不純物イオンを加えたほうが閉じ込めが良くなるように見える現象も現われて、たいへん興味深い切り口を見えています。不純物と主プラズマとが双方向に影響しあう機構を理解することが求められています。

中性粒子についても同様な研究の流れがあります。ダイバータ部の設計やプラズマ制御の立場から、中性粒子を積極的に活用しようとするものです[5]。他方、経験的に、様々な改善閉じ込めが中性粒子の制御によって実現してきたことも驚くべき事柄です[6]。プラズマ中の中性粒子は、その発生の初期条件からしてプラズマの状態に強く規定されていて、ただの中性ガスとは違うわけです。双方向の影響は、プラズマの性質の内まだきちんと把握されていない側面を代表しているように思われます。

6.2.1 不純物と中性粒子に対する主プラズマの影響

不純物イオンがどんな振る舞いをするかを考える伝統的方法は、主プラズマの環境を与えておいて、そのなかでイオンのダイナミックスを追うものです。

最も整備された理論は、衝突拡散の理論でしょう[7]。燃料イオンとの衝突によって、不純物がどのように動くか計算します。主プラズマ中では、ドリフト運動するイオンと衝突するので、ポロイダル方向に力を受け、半径方向に動きます。イオンとドリフト速度が等しくなると衝突による力はなく、主プラズマから受ける力が消えます。その時の分布は(イオンと不純物をほぼ等温とすると)

$$\frac{n_z(r)}{n_z(0)} = \left(\frac{n_i(r)}{n_i(0)} \sqrt{\frac{T_i(0)}{T_i(r)}} \right)^Z$$

と導かれています。(n, Tは密度と温度, Zは不純物の

荷数を示します。添字_iと_zは主イオンと不純物を指します。) 内部では、不純物は、「高密度なほうへ、低温なほうへ」引かれていくことになります。一方、ダイバータ付近で生じたイオンはスクレイブオフ層では、磁力線にそって流れます。そのときは逆に「低密度なほうへ、高温なほうへ」引かれていきます。

ここまでは理論としてははっきりしていますが十分ではありません。実際にプラズマのなかではダイナミックな変動がありますから、それを考える必要があります。

プラズマに異常輸送があることは良く知られていて、衝突拡散でプラズマ閉じ込めの性能を解釈/予測する人は極一部を除いて今やほとんどいません。「異常輸送」というのは、高温プラズマの閉じ込め実験が始められた時に、予測に反して速いプラズマ輸送が観測されたのでそう名付けられましたが、プラズマの物性としては普通の現象です。) 異常輸送をもたらすような揺らぎがあったとして、それが不純物にどのように影響するか、理論計算することが原理的には可能です。準線形理論で、形式的に結果が導かれています。準線形理論では輸送係数そのものを求めることができませんが、主イオンの輸送係数と大体同じ程度と計算されています[8]。その大きさが不純物イオンの衝突拡散と比較して際立って大きいわけではないので、まとまった研究がなされていません。「大体 neoclassical」といったおおざっぱな議論がなされている段階です。トカマクのイオン温度分布が neoclassical だという議論が完全に消えたのは 1980 年代も終わりに近づいた頃で、実際にイオン温度をきちんと測れるようになってからでした。不純物の輸送係数の実験的見通しが得られるのはもう少し時間がかかりそうです。

不純物の異常輸送といった緩やかな現象だけでなく、sawtooth, ELM, 高ベータ崩壊, Fish-bone, X-event 等、ダイナミックな現象によっても不純物の運動は強い影響を受けます。たとえば、sawtooth のある場合、不純物の中心への集中が抑えられることはよく知られています[9]。ELM のパルスごとに不純物も吐き出されますし、ELM-free の H-mode では不純物の蓄積によって放射損失が増えて短時間で H-mode 状態が終了するのが通例です。ほんやり考えていると、こういうバースト状態で不純物が外へと逃げるのはあたりまえのようですが、少し考えると実に不思議なことです。たとえば、sawtooth は (q-分布等の計測が進んで) 磁場の stochasticity による崩壊のモデルや、Kadomtsev の bubble theory のようなモデルが描像として考えられています。(実際いろいろなものがあるのでしよう.) 磁場の stochasticity による崩壊だけであるなら、主

イオンのほうが速く逃げるでしょうから、不純物イオンを排出する機構があるに違いありません。bubble theoryで不純物を選択的に逃がすのにも、なにか機構が働くのでしょうか。ELMによる排出についても同じです。

ELMでの衝撃的な熱負荷も対向壁の損耗にとって注意すべき課題とされています。一つの熱パルスあたりの熱負荷も重要なら、パルスの構造も大事です。一つのバーストを分析すると、最初は高温の電子が強いピークを持っていて、後半は、高温のイオンがピークを持っているでしょう。時間平均熱負荷だけでなくピークが重要なように、バーストの内部構造も対向壁の反応を考察する上で重要な研究課題です。

平均熱負荷の評価では、スクレイプオフ層での熱拡散係数が大事な情報です。現状では、これもよく判ってません。(ある実験の解釈はボーム型の温度依存性を可とし、別の実験ではそれを非とし擬古典則のような依存性を可としています。) 実験結果を見ると、データに colinearity があって、精度良くパラメータ依存性を判別できなくても不思議はありません。colinearity を解消するような実験が強く求められます。

中性粒子自体は電磁場の影響を受けません。しかし、エネルギー分布や励起状態(さらに反応断面積)はプラズマの影響で決まるのでしょうから、分子流的振る舞いと粘性流的振る舞いのちがいがなど、主プラズマからの入力で大きな影響を受けますし、エネルギー源としてはプラズマから供給されるのでしょうから、不可分なものと考えるべきです。

不純物や中性粒子の運動を予言したいし制御したいのです。ただ減らすだけでなく周辺部では逆に閉じ込めたい、と考える人もいます。(それは核融合研究だけでな

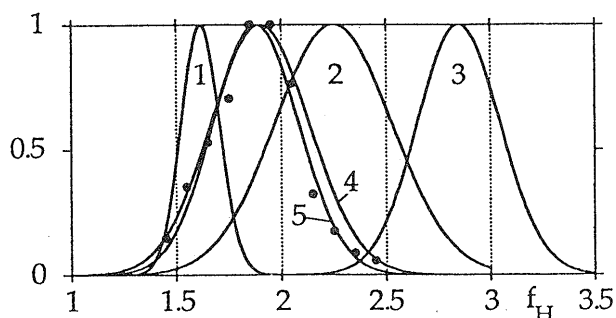


Fig. 1 The statistical analysis of the confinement improvement factor on the ASDEX tokamak. The distribution of discharges are shown as a function of the factor of the improved confinement, f_H , which is the ratio of the energy confinement time to the scaling law of the L-mode. The magnitude of the improvement depends on the material of the plasma-facing component. Case-2 is for stainless-steel walls and the case-3 is for Boronized walls. [2]

くプラズマ応用でも変わりがないでしょう。) その基盤になる知識を増やしたいのですが、むしろ、プラズマの知識の不足な所を照らすように思います。

6.2.2 主プラズマに対する不純物と中性粒子の影響

閉じ込め改善度が対向壁の材質で影響を受けます。(Fig. 1) さらに、不純物が加わると、エネルギー閉じ込め時間が長くなることも認められています。古くは ISX-B トカマクの Z-mode が知られていましたが、最近 TEXTOR の I-mode への不純物添加実験などが知られています。この小特集でも解説されています。中性粒子の影響はもっと広く知られています。表に引用したように[6], 中性粒子の制御と改善閉じ込めは経験的には深く結びついています。

改善閉じ込めを径電場の分岐やその構造による揺動の

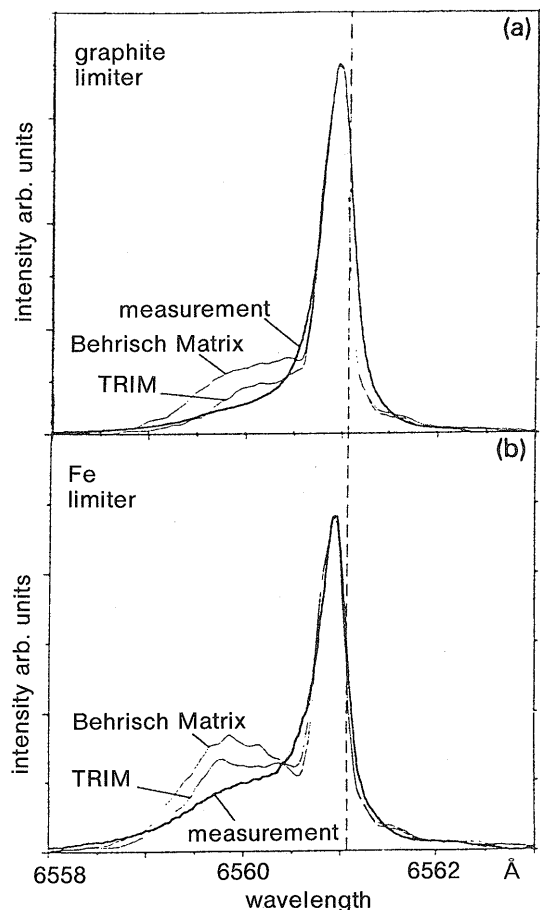


Fig. 2 The H_α spectrum in front of the limiter of TEXTOR tokamak (Thick lines). The cases of the graphite limiter (a) and the iron limiter (b) are shown. Component with the large Doppler-shift is observed, showing the birth of the fast neutral particles. Fast neutral component is more abundant if the limiter is composed of the heavier element [10].

Table 1 Various improved confinement modes and the experimental conditions [6].
(For the references in this table, see [6].)

Mode	Phenomena	Possible Mechanism	Ref.	Operation Condition
(1) H-mode ($H^{\pm}$)	Edge pedestals for $n(r)$ and $T(r)$ Sharp reduction of loss at LH transition Improvement propagates into core Associated with ELMs	edge $E_r(r)$, $V_\phi(r)$	ASDEX [1]	Found in divertor configuration Degradation by neutrals by limiter Better under low-Z wall Location of X-point and threshold power
(2) VH-mode	Further improvement in the core Terminated by giant ELM; MTE	(1) + global $E_r(r)$ partially low $s(r)$	DIII-D [8]	(1) and Low-Z wall, high triangularity
(3) Supershot	Peaked profile for $n(r)$ and $T(r)$ Reduced thermal transport in core		TFTR [4]	Needs strong degassing of the wall Needs particle control for peaked density
(4) High- β_p mode	Peaked $T_i(r)$ and $n(r)$, for $\beta_p > 1$ Reduced χ_i and μ in the Core	$s(r)$ in core	DIII-D, JT-60U [6]	Needs wall conditioning Start with low I_p Preferable for peaked density
(5) High- β_p H-mode	(1) + (4)		JT-60U [9]	(1) + (4)
(6) High T_i mode	T_i is enhanced but T_e is not clearly	$V_\phi(r)$ peak	JET, JT-60 [10]	
(6') High T_i H-mode	(1) + (6)		JET, DIII-D [11]	Start with low density target Initiated by reduction of gas-puff in controlled recycling (cf. Peaked in LOC, flat in SOC)
(7) IOC	Peaked $n(r)$ and τ_E recovers the Alcator scaling		ASDEX [5]	Deep fuelling by pellet with low I_p
(8) Pellet mode	Peaked $n(r)$ and τ_E recovers the Alcator scaling (OH) Peaked $n(r)$ and core improvement (NBI...)	$s(r)$ in core	ALCATOR-C [3]	Shallow fuelling gives poor enhancement
(9) PEP H-mode	(1) + (8)		DIII.. [12] JET, 2M [13]	(1) + (8) and needs (approx) central fuelling
(10) CTR-NBI mode	Peaked $n(r)$ and improvement of χ_{eff} in core	$V_\phi(r)$ peak	ASDEX [14][15]	Coexist with peaked density profile
(10') IL-mode	Peaked $n(r)$ and improvement of χ_{eff} in core		JFT-2M [16]	as above
(10'') I-mode	Peaked $n(r)$ and large fraction of hot ions Peaked $n(r)$ and lower χ_{eff} in core by Ne/Si		TEXTOR [17]	Toroidal belt-limiter & B-zation Enhanced by Ne or Si injection
(10'') Z-mode			ISX-B [18]	Introduction of low-Z Impurity
(11) L-Hybrid mode	Peaked $T_e(r)$ at center, impurity free	$q(0) > 1$	Toresupra.. [19]	Induced by central deposition Edge/SoL control for proper accessibility
(12) High- I_i mode	$\tau_E/\tau_E(L)$ follows I_i when I_p is reduced	Low- q (core)	TFTR... [20]	Penetration of reverse current near edge
(13) Core H-mode	Peaked $n(r)$ and lower χ_{eff} in Core		PBX [21]	Ion Bernstein wave heating

抑制と考えるのが一つの考え方として定着しています [6]. この考え方では, 自然に中性粒子の重要な役割が指摘されています. 径電場の発展を考えますと, イオンの運動量損失が重要なことがわかります. 径電場とともにプラズマが回転します. それを生む力には, イオンの軌道損失や異常輸送の荷電分離などがありますが, 一方, それを消滅させる機構には粘性が重要です, また, 荷

電分離損失による運動量損失も無視出来ません. 中性粒子密度が高ければ, 運動量損失も大きく, 回転運動が阻害され, 閉じ込め改善が妨げられると考えられます. 実際, プラズマ対向壁の違いによって, 発生する中性粒子のエネルギースペクトルに差があることが実験で確認されています (Fig. 2) [10]. そう考えて行きますと, プラズマ対向壁の材質が主プラズマの閉じ込めに及ぼす効果

も定性的には理解されます。対向壁に入射する中性粒子の反射を考えると、対向壁の材質が軽元素であるほど、反射率が小さく、その結果、主プラズマ中の中性粒子の密度が下がり、径電場がより強く発達するでしょう。

時間軸の考察も重要です。TRIAM-1M, JT-60, 更には Toresupra など、長時間の経過とともにリサイクリング率が変わることが観測されています。そして TRIAM-1M で密度分布の選択現象が見られていることも重要です。

こうした精妙な効果の他にも多くの影響があります。代表的なものは MARFE や detachment のような放射構造の現われがあります。今の所、不純物のイオン一つ当たり放射するエネルギー (L_Z とします) の温度依存性に起因していると考えられています。不純物が単位体積当たり放射するパワーを $P_{\text{rad}} = \sum_Z n_e n_Z L_Z$ と書くとき、温度の変化 δT に対して此の放射損失を

$$\left(\frac{dP_{\text{rad}}}{dT} \right) \delta T = P_{\text{rad}} \left(\frac{dn_e}{n_e dT} + \frac{dn_Z}{n_Z dT} + \frac{dL_Z}{L_Z dT} \right) \delta T$$

と表わしてみましょう。右辺の最後の項 dL_Z/dT が負になることが放射構造の発生の原因だとされています。温度が下がれば放射損失が増し、ますます温度が下がる、という訳です[11]。そうして「密度限界」がもたらされる、と考える人もたくさんいます。密度限界は炉の設計からは高くあってほしいものです。しかしはっきりとわかっていませんし、その近傍でのダイナミックスについても知識はまだ限られています。まず、放射能率が十分把握されていない点に注意されています。密度や温度の広い範囲で正確な値を求めて行く研究がますます進められていくでしょう。さらに、放射能率だけでなく、右辺の第一項や第二項の研究も必要です。

不純物が不均一であると、色々な不安定性が起きることが線形理論では知られています。(不純物ドリフト波や, rippling mode, 放射と温度変化とが結び付いて起きる不安定性等。) その結果、不純物イオンと主イオンが入れ替わるようなことが起きます。(外から不純物が流れ込んでいるような状況では、不純物がプラズマ内部へと侵入するのを加速します。) これはイオン温度勾配モードと考え方が似ています。イオン温度勾配モードの場合は、(内側の) 高温のイオンと (外側の) 低温のイオンが入れ替わって、イオンのエネルギーが外部へ流れ出す結果になります。イオン温度勾配モードのほうは、活発な研究が行われて乱流状態の研究が進んでいますが、粒子の交換のほうは余り注意を集めていません。不純物のもたらす乱流は、粒子ピンチの謎など、幅広いインパ

クトを持つ割りには、実験・理論とも今後の研究に待つ所が多いようです。

不純物が主プラズマの閉じ込め状態にもたらす影響のなかで、もっとも印象的なものは disruptive instability といってよいでしょう。内部から突如高温プラズマが噴き出し、内部インダクタンスが急変するのはそれなりの理由がある訳ですが、それが放電停止につながるのか (そして危険なほど急速に電流を停止させるか) には、不純物の放射冷却が (したがってプラズマ対向壁の材質が) 重要な役割を果たしています[12]。さらに考えを進めれば、壁から発生した不純物をプラズマ中心へ運ぶのはどのような機構かが謎だといえます。プラズマのベータ値が高くなれば、プラズマ電流の有無に拘わらず、様々な崩壊現象が起きると予想されます。そのときに起きる対向壁の損耗と、不純物の集中は定常な放電を妨げるでしょうが、インパクトの大きさはよく見通しが立っていません。この問題は、トカマクに限らぬ普遍的な課題になると思われます。

6.3 状態の観測と把握

対向壁が高Z材であるか否かをプラズマが知っている、ということは今まで述べましたが、プラズマと対向壁が相互作用しあうのは、何か介在する機構があるからです。その機構を不純物と中性粒子に振り当てて、問題の設定をしてみました。それを一言でいうと、「内部自由度」があると言い替えてもいいと思います。(大気中に雲ができたり雨が降ったりするのも、大気の「内部自由度」のためです。)

不純物イオンには荷電数が大きくなりえます。さらに踏み込んで見ると、おなじ電荷でも、さまざまな励起状態が可能ですから、さらに多くの内部自由度があります。2節に述べたダイナミックスは、この内部自由度のダイナミックスと捉えてもよい問題です。すると、それを実際に観測し、把握する研究が重要です。

最近の実験の進展には心強いものがあります[13]。分光実験で不純物の密度分布の情報も増えてきています。レーザー光の協同散乱によるイオン温度や密度の測定が得られるようになりました。レーザー誘起蛍光法では、プラズマ中の中性粒子密度の評価も可能にしています。H α 分光などと併せ、多次元分布が議論されるようになっていきます。温度揺動なども次々に新たに報告されています。

その一方で、主イオンの密度分布が直接測られた例はあまりありません。イオンの密度分布が直接測られてこ

なかったというのは(その核融合反応を利用しようとするのですから)他所の人が聞いたら、たいへん奇妙に思うかも知れません。それだけでなく、電子密度をもとにし、分光学的手法による不純物密度を差し引いて、イオン密度を実験的に評価している状況では、実のところ不純物のダイナミックスを精密に考えようというのが無理な注文だったのかもしれませんが。というのも、上に述べた主イオンと不純物イオンの選択的輸送の問題に答えるには、主イオンの分布のダイナミックスと、不純物の移動とその双方を独立に観察する必要があるからです。片方の観測から他方を推定しているのですから、colinearityの問題から逃れられません。

別の見方をすると、こうした観測と知識の進歩にはthresholdがあって、あるレベルになったところで突然理解が進みます。一例にイオンの熱伝導の問題があります[14]。CXRS (Charge exchange recombination spectroscopy) でもってイオン温度が測られるようになりましたが、中心温度のみを議論している限りは「イオンの熱輸送はneoclassical」という見方が大勢を占めていて(なかには「3倍のneoclassical」という奇妙な議論もありましたが)、イオンの熱輸送の実態がはっきりしたのは分布がきちんと求められた後でそんなに昔のこととは言えません。電場分岐理論も「プラズマ回転はneoclassical」というのが大勢でしたが計測の精密化で描像が変わってきました。しかし、改善閉じ込めに関する多くの電場計測が、不純物を通じた計測です。独立な電場計測が広く行われれば、主イオンと不純物イオンとのあいだの径方向の流れの差も実験で観測するチャンスが出てきます。

研究の進展はいろいろに報告されていますが、「プラズマ偏光分光」の結果が最近豊富になってきています[15]。偏光に着目することで、不純物の非等方性にまで観測範囲を広げています。「非等方」というとき、磁場閉じ込めプラズマでは磁場方向が最も目立つ非等方な方向です。トロイダルプラズマが「ポロイダル磁場」で閉じ込められていることは核融合研究の初期からわかっていたことですが、トカマクのポロイダル磁場が測られ広く議論されるようになったのは(小数の例を除き)やはり80年代後半です。こちらも、測ってみると、主流をなす思いこみは誤差の大きいものでした。最近は改善閉じ込めにおける磁場分布の効果が注目を集めていて、熱心な研究が行われるようになりました[16]。プラズマ対向壁と電流分布の関係もいずれ明らかになるに違いありません。

不純物の非等方性がわかるようになると、さらにプラズマの理解が深まるでしょう。不純物の非等方性をもたらすものはやはりプラズマの非等方性です。例えば電流駆動に関連する高速電子と偏光分光の解析も可能になっています。高速電子というと、軟X線や硬X線の前方放射と後方放射の違いから議論されています[17]。そこで謎とされているのはいわゆる spectrum gap の問題で、光の速度に近い高速な成分と熱成分の中間が、どんなふうに関連しているかの問題です。中間エネルギー分布の非等方性は、電流駆動効率に止まらず、加熱効率の実験でも重要です。(たとえば、ヘリカル系でECH加熱を行い正の径電場を形成したとする。すると、垂直方向にエネルギーを得た電子は、ロスコーンに落ちて逃げだし、それが加熱効率を定めることがあります。当然この径電場の発達には高速電子の損失や壁からの中性粒子の運動量損失が肝腎でしょう。対向壁の材質とも結局不可分です[6].) 非等方性を、より広い範囲でより精密に観測することで、プラズマの性質に関する理解が一段と深まるに違いありません。

H α 分光などと併せ、多次元分布が議論されるようになってくると書きましたが、まだまだ十分内部自由度を把握しているとは言い難いわけです。壁から解離して行く中性粒子は、励起状態も含めて、中性粒子分布を正確に解釈するには、まだ理解が足りないのではないかと思います。

不純物や中性粒子について、そしてそれを介在としたプラズマと対向壁の相互作用について注目が集まっています。さらには、不純物や中性粒子を都合良く利用しようとするしています。そのためには、現在のレベルを超えた一層深い理解が求められています。内部自由度についての適切な観測なしになされている現在の理解が、いずれ大きな問題に直面するだろうことは、歴史の示しているところだと思います。

正確に不純物や中性粒子の運動を把握するためには、観測を進め、知識がthresholdを超えることが必要です。それができれば、その運動をもたらししている、プラズマからの力や電磁場の姿がくっきりとわかってくるに違いありません。

6.4 もっと遠い将来は?

プラズマ中の不純物イオンをひとつとって考えたり、対向壁近傍でのプラズマ粒子や原子分子を一つ着目して研究することについて、研究が進んできた[18]ことは間違いありません。しかし、不思議な謎こそが、将来の学

問的魅力をもつ事柄です。それは、多数の粒子や荷電／励起／結合といった内部自由度が、電磁場を介在として、組成を含めての構造形成をもたらす問題（プラズマの分布に話を限っているのではなくて、プラズマと固体の界面、L-mode/H-mode といったプラズマとプラズマの界面とか、様々あります）であろうと思います。内容の組成のちがいがもたらすプラズマの特性は、それ自身で一つの学問的柱をなす程豊富なもので、例えば、Physics of complex plasma (Physics of impure plasma では語呂が悪いので) といった領域が栄えるにちがいありません。

このように風呂敷をひろげて書くと、読者の方はあるいは「高Z材でなくとも問題は同じではないか」「プラズマ対向壁とは限らないだろう」とおっしゃるにちがいありません。まさにその通りです。この小特集は、研究課題を限って部分的な課題を進めてきた従来の研究の、その切り口を再構成すべき時が来ている、という動機を持って計画されているに違いありません。

謝辞

ここでのべたことがらは、伊藤早苗、居田克巳、三浦幸俊、飯尾俊二、福山淳、嶋田道也、加藤隆子、藤本孝の諸博士はじめ、いろいろな方との日頃の議論に基づいているのですが、編者からの求めにより、筆者の強引な書き方で終始していることをお許し願います。なお、その議論にあたっては、文部省科学研究費、核融合科学研究所共同研究、九州大学応用力学研究所強磁場プラズマ・材料実験施設共同研究の援助を受けたことを感謝します。

参考文献

この特集の性質から、できるだけ総合記事を引用します。さらに詳細な議論は、引用された記事の示すところによって下さい。

- [1] 山本賢三他：「核融合プラズマの閉じ込め改善点に関する調査研究」(原子力委員会委託調査報告書、プラズマ核融合学会、1990年3月)
さらに本誌小特集「プラズマ閉じ込め性能向上のためのプラズマ対向機器開発およびプラズマ表面相互作用研究の現状」(プラズマ核融合学会誌 **71**, 368 (1995).)

- [2] F. Wagner *et al.*, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1990* (IAEA, Vienna, 1991) Vol. 1, p.277.
[3] J. A. Wesson, *Tokamaks* (Oxford, 1987) Chap. 9
[4] 最近の動向は、たとえば *Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Device*, J. Nucl. Materials **220-222** (1995) に詳しい。特に、G. Janeschitz *et al.*, J. Nucl. Materials **220-222**, 73 (1995) を参照。
[5] たとえば、G. F. Matthews, J. Nucl. Materials **220-222**, 104 (1995).
[6] 最近の進展のレビューは S. -I. Itoh *et al.*; J. Nucl. Materials **220-222**, 117 (1995).
[7] 宮本健郎：核融合のためのプラズマ物理学、(改訂版、岩波、1987) 8.6章
F. L. Hinton and R. D. Hazeltine, Rev. Modern Physics **48**, 239 (1976).
[8] T. Tange *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **42**, 2006 (1977).
[9] 鋸歯状振動の観察については、本誌解説 辻 俊二、安積正史：核融合研究 **61**, 287 (1989) を参照下さい。
最近の鋸歯状振動の描像については A. J. Lichtenberg *et al.*, Nucl. Fusion **34**, 495 (1994).
Y. Nagayama *et al.*, Phys. Plasmas **3**, 1647 (1996).
[10] D. Reiter *et al.*, J. Nucl. Materials **196-198**, 1059 (1992).
[11] 本誌解説 伊藤早苗他：核融合研究 **67**, 136 (1992) を参照。
[12] 常松俊秀：核融合研究 **68**, 140 (1992).
R. Yoshino, J. Nucl. Materials **220-222**, 132 (1995).
[13] 本誌解説 村岡克紀他：プラズマ核融合学会誌 **71**, 1075 (1995).
[14] 居田克巳：日本物理学会誌 **46**, 934 (1991).
[15] 藤本 孝：「偏光プラズマ分光学の開拓と診断への応用」(科学研究費研究成果報告書、1996年)
[16] 伊藤公孝他：プラズマ核融合学会誌 **69**, 1524 (1993).
[17] S. von Goeler *et al.*, Nucl. Fusion **25**, 1515 (1985).
[18] 本学会誌には講座「プラズマ壁相互作用」が川村孝式：核融合研究 **63**, 235 (1990) 以下発表されています。最近の進展については例えば高村秀一「高熱流プラズマ炎の物理化学過程に関する総合的研究」(科学研究費研究成果中間報告書、1996年) などがあります。