

## 小特集 燃焼・高ベータプラズマの実現に向けたプラズマ分布制御の課題

### 3. 分布制御と応答特性

坂本 宜照

日本原子力研究開発機構

(原稿受付：2010年7月23日)

核融合炉の経済性を左右する高ベータ燃焼プラズマを実現するためには、各種要素性能の最高値をめざすのではなくバランス良く成立させる分布の最適化を通じて、ベータ限界を高めつつ高い燃焼度を得る必要がある。細密な分布制御のためにはプラズマの応答特性を明らかにする必要がある。これまで実験およびシミュレーションによって研究が行われてきた。ここでは、これまでの研究に基づいて分布制御と応答特性の実例について紹介する。

#### Keywords:

DEMO, burning plasma, self-regulated system, internal transport barrier, plasma response, plasma profile, actuators, heating, current drive, rotation drive, particle fuelling, magnetic coils

#### 3.1 はじめに

一昔前には、プラズマの半径方向分布は制御できない所謂 Profile Consistency の考え方が広く認識されていた。ところが、大型トカマク実験において過渡的であるにしても電流分布の制御が可能になると、内部輸送障壁 (ITB) の発見[1]や電流ホール発見[2]など、プラズマの自己組織化や多様な分布構造形成が注目されるようになった。それと並行して、炉心プラズマの高総合性能化をめざした研究開発において[3]、分布制御は重要なキーワードの一つになった。近年では、各種要素性能の最高値をめざすのではなくバランス良く達成するためには、圧力、電流、回転等の分布の最適化が重要であると広く認識されている。

核融合炉の経済性を左右する高ベータ燃焼プラズマを実現するためには、ベータ限界を高めつつ高い燃焼度を達成できるように分布の最適化が必要である。ベータ限界を高めるには、プラズマ断面形状に加えて MHD 不安定性の駆動源である圧力勾配と電流の分布の最適化が必要であるが、一方で高い閉じ込め性能を追求すると、結果として形成される大きな圧力勾配がベータ限界を低下させてしまう。両者の兼ね合いをどこに選ぶかは核融合炉の概念に依存する。燃焼プラズマ中には、このようなトレードオフの関係が複数存在し、これらを考慮してすべての分布の最適化を考えなければならない。

燃焼プラズマにおける分布制御の目的は、2章で述べられているように、運転限界の範囲内で運転裕度を確保しつつ高い燃焼度を持つプラズマの生成と安定維持である。トカマクプラズマにおいて特に重要なのは、圧力 (密度と温度の積)・電流・回転の各分布であるが、これらは自己加熱・自発電流・自発回転に代表される燃焼プラズマの自律性に直接係るとともに相互に関連するため、2章で指摘

しているように、個別の分布制御ではなく、分布のセット制御として考える必要がでてくる。そのためには、何を操作したらプラズマの各分布が時間・空間的にどのように発展するのか、等のプラズマ応答特性を良く整理して、上手く階層化した制御応答関数を構築していかなくてはならない。

本章では、3.2節にて燃焼プラズマにおける分布制御の考え方を整理し、そこでの課題について述べる。3.3節では、分布制御の観点から外部アクチュエータの特徴について述べる。3.4節では、実験やシミュレーションで得られている炉心プラズマの応答特性の実例について、特に先進トカマクプラズマに必要な ITB に関連する例を中心に紹介する。3.5節では、原型炉に向けた課題について簡単にまとめる。

#### 3.2 燃焼プラズマにおける分布制御

燃焼プラズマにおける分布制御では、自己加熱、自発電流、自発回転に代表される高い自律性を踏まえた制御ロジックの構築が必要である。

まず、自己加熱プラズマとしてエネルギー増倍率  $Q$  値が 30~50 の核融合炉を想定する。アルファ粒子によるプラズマ加熱の割合は 85~90% に達し、残りの 10~15% の外部加熱源で電流駆動を行い、プラズマ電流を維持する。主要な加熱源となるアルファ粒子加熱の分布は燃料粒子の温度と密度の分布によって決まるため、燃焼プラズマの加熱分布をプラズマ自身が決定する自己加熱プラズマとなる。このことは、外部加熱源だけで分布を制御するには、きわめて高度な技術を要求することを意味する。つまり、外部加熱源は電流駆動の役割も担っており、すべてをプラズマ制御に利用することは困難である。仮に変調可能な外部加熱

源を10-20%程度とすると、プラズマ制御に割り当てることができるのは総加熱パワーの数%程度でしかない。このような状況下で分布制御を行うには、(i)少ない外部加熱源で大きなプラズマの変化が得られるような応答特性、(ii)小さな変化をきっかけに大きな変化へ成長するような応答特性、(iii)外部加熱源を利用しない分布制御手法、等の開発が必要である。

次に、高自発電流割合が必要なトカマク型定常核融合炉では、自己加熱プラズマであるが故に限られた外部電流駆動源と所内循環電力低減のため、プラズマ電流の70~80%程度を自発電流で賄う必要があり、プラズマ電流分布は自発電流分布でほとんど決まってしまう。自発電流は圧力勾配に応じて自然に流れる電流なので、圧力分布が電流分布を決めることになる。さらに、電流分布は輸送特性を決める重要な要素の一つであり、電流分布が圧力分布に影響し、両者は相互に関連する。しかも通常、両者の特性時間は一桁程度異なる。このような状況下で分布制御を行うには、2章で述べられているように、圧力分布と電流分布(と回転分布)をセットとして考える制御ロジックの構築が必要である。そのためには、(i)複雑な制御マトリックスの導入や、(ii)プラズマの発展を実時間で予測するためのシミュレーション技術の開発が必要である。

さらに、トラス周回方向のプラズマの流れであるトロイダル回転分布は輸送特性やMHD不安定性に大きな影響を与える要素の一つである。輸送特性については径電場シアを通してトロイダル回転が間接的に影響を与えている。トロイダル回転分布は、外部からの運動量入力によって制御することができるが、プラズマの粘性やアルファ粒子の軌道損失とリップル損失による非両極性流速等の影響を受けて決まる径電場分布にも依存する。ただし、燃焼プラズマでは外部からの運動量入力が小さいため、近年注目されている自発回転が特に重要になる。したがってトロイダル回転の分布制御を行うには、(i)自発回転の含めたトロイダル回転分布の正確な予測と、(ii)トロイダル回転を制御できるアクチュエータの開発が必要である。

### 3.3 分布制御性と外部アクチュエータ

本節では、分布制御の観点から将来の核融合炉で適用可能ないくつかの外部アクチュエータの特徴について簡単に述べる。注意すべきことは、一つのアクチュエータが複数の物理量に直接影響を与えることである。そのため、この観点からも分布のセット制御の考え方が必要である。また、ITERにおいて外部アクチュエータと被制御量の関係について、主要な効果と二次的な効果を詳細に整理しているので参考文献[4]を参照していただきたい。

#### (1)中性粒子ビーム入射装置

中性粒子ビーム入射装置(NBI装置)は、これまでのトカマク実験装置で最も実績のあるアクチュエータの一つである。ITERでは、1 MeV, 33-50 MWの負イオン源NBIが計画されている。NBIはプラズマ加熱、電流駆動、回転駆動、粒子補給の役割を同時に担うが、それぞれとして作用する程度はビームエネルギーや入射角度等により変わる

(変えられる)。ビームエネルギーを高くすると回転駆動量や粒子供給量は相対的に小さくなり、加熱や電流駆動の分布形状も変化する。また、高密度プラズマへの入射やビームエネルギーが低い場合のように、ビームが周辺部分で電離する場合には、加熱分布はホローな分布になるが、電流駆動分布や運動量入力分布は周辺部での捕捉イオンの割合が増えるためホローな分布にはならず駆動量が減少する。そのため、例えば輸送や不安定性の制御性を確保するために、ビームエネルギーを低くして回転駆動量を稼ぐことは残念ながらできない。なお、NBIによるトロイダル回転制御は輸送に影響を与える径電場の制御にも利用される[5]。

#### (2)電子サイクロトロン波入射装置

電子サイクロトロン(EC)波入射装置は、長距離伝送が可能のため発振装置であるジャイロトロンを炉心プラズマから離れた所に設置できることや、入射ポートに必要な空間が小さいためブランケットの占有面積に与える影響が小さいなどの工学的利点を持つ。さらに、局所的な加熱と電流駆動が行える特長に加えて、可動鏡を利用して入射位置を自在に制御できるため、核融合炉の分布制御において有用なアクチュエータである。また、最近の研究でトロイダル回転に影響を与えることが明らかになってきており[6]、トロイダル回転分布の制御アクチュエータとしての可能性も考えられる。しかしながら、他の電流駆動装置に比べて電流駆動効率が低く、自発電流を除くすべての非誘導電流を賄うには膨大な電力が必要になる短所がある。

#### (3)粒子供給・排気装置

自己加熱が支配的な燃焼プラズマにおいて、外部加熱源を利用しない制御手段の一つとして有用なアクチュエータである。粒子供給装置としては、ガスパフ、ガスジェット、ペレットが挙げられる。ガスパフは、バルブ開閉とボンベの圧力により供給量を制御することが可能である。ガスジェットは、特殊なバルブを用いることで、高圧力のガスをプラズマに吹き付け、ガスパフよりもプラズマの内部まで燃料を供給させることが期待されている。ペレットは、固体燃料を入射するため、ガスパフやガスジェットよりもさらにプラズマ奥深くまで粒子を供給することが可能である。プラズマへの燃料粒子の侵入長が異なるこれらの装置の組合せを変えつつ、ダイバータ部からの粒子排気量を制御することで、密度の分布制御が期待できる。さらに、導入ガス種として不純物を使用すると、主にダイバータ板への定常熱流束を放射損失によって低減することに利用できる。特に、分布制御の観点からは、ガス種(アルゴン、ネオン等)を組み合わせることにより、放射分布や不純物(実効電荷)分布を制御することが可能である。また、不純物混入による燃料希釈を通して自己加熱分布を制御することも検討されている。

#### (4)外部磁場コイル

通常のプラズマ断面形状制御に加えて、粒子供給・排気装置と同様に、外部加熱源を利用しない燃焼プラズマ制御手段の一つになり得る。定常トカマク運転では非誘導電流駆動によって全てのプラズマ電流を駆動するため、プラズマ電流の立ち上げ・立ち下げ時にのみ利用が想定されてい

る中心ソレノイドコイルは、定常運転中は電流を流し続けているだけであり、制御への利用が検討されている。中心ソレノイドコイル電流に微小変化を加えることで周回電場を誘起し、過渡的ではあるが、プラズマ電流分布に影響を与えることができる。また、ダイバータコイル電流を制御することでダイバータストライク点の位置を挿引し、ダイバータ板への熱・粒子負荷を分散させることが検討されている。さらに、ダイバータストライク点と排気スロットの相対的な位置関係によりダイバータ排気量を制御することも可能である。

### 3.4 プラズマの応答特性

燃焼プラズマは、非線形性と非局所性を持つとともに各分布が相互に関連し、さらに各分布が異なる特性時間を持って発展するため、現れる応答は極めて複雑になることが想像される。また、プラズマ制御に利用可能な外部加熱源はアルファ加熱を含む全加熱源の数%程度と限られている。このような少ない外部加熱源で十分なプラズマ応答を得なければならない燃焼プラズマの観点からすると、一般には運転限界として捉えられるプラズマ中の遷移現象やセミグローバルな特性は、制御に利用すべきプラズマ応答特性の一つとして捉えることもできる。本節では、燃焼プラズマの自律性（自己加熱、自発電流、自発回転）に大きく係わり、重要な制御対象の一つである ITB に関するプラズマの応答特性の実例を中心に紹介する。

#### (1) 非線形応答

最も身近な非線形応答の例は、Hモードや内部輸送障壁のような輸送の遷移現象だろう。実験的には、プラズマへの加熱入力を増大していくと、あるところで熱拡散係数が急激に低減し、急峻な圧力勾配を伴う輸送障壁を形成する。輸送障壁の形成機構として、径電場シアによる流れのズレが、異常輸送の原因として考えられている乱流の渦構造を変形・分断することが理論的に示されている。最近では、ビーム放射分光法（BES）等の乱流の2次元可視化と流れ（ゾナル流）の測定によって、実験と理論との比較が深まっている。したがって、輸送障壁の応答特性は、熱拡散係数の径電場シアに対する依存性として考えることができる。JT-60Uでは弱磁気シアや負磁気シアプラズマに対する加熱パワースキャンのデータを用いて、径電場シアに対する熱拡散係数の依存性を調べている[7]。弱磁気シアプラズマおよび負磁気シアプラズマのそれぞれの場合についてイオン熱拡散係数の径電場シアに対する依存性を図1に示す。弱磁気シアプラズマの径電場シアの小さい領域では、径電場シアとともに熱拡散係数が増大している。これは、加熱パワーとともに閉じ込めが劣化するLモードプラズマの特性に対応しており、ITBが形成されていないことを示している。径電場シアをさらに増大させると、熱拡散係数が連続的に低減し、弱いITBを形成するとともに熱拡散係数が連続的に低減する。さらに、径電場シアを増大させ、ある閾値に達すると熱拡散係数が急減し、強いITBへと発展する。このときの熱流速と温度勾配の時間発展を調べると輸送状態の分岐が起きており、強いITB形成

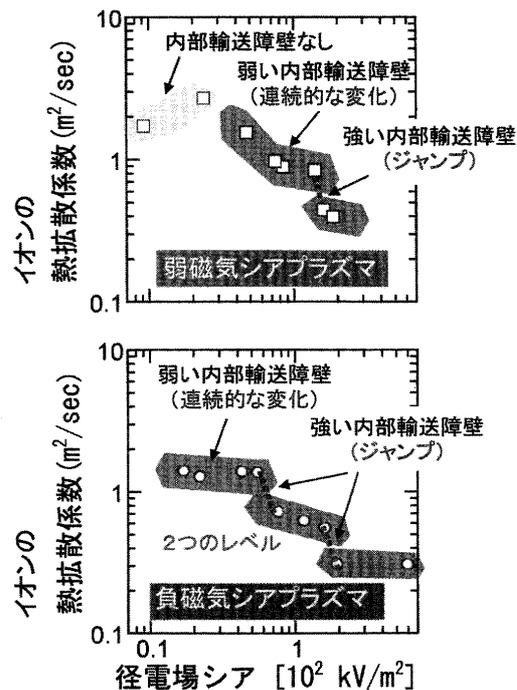


図1 弱磁気シアプラズマと負磁気シアプラズマにおけるイオン熱拡散係数の径電場シアに対する依存性。

は、遷移現象を伴った不連続な変化であることが解る。一方、負磁気シアプラズマの場合では、径電場シアをスキャンした範囲では、ITBのない状態は観測されず、小さい径電場シア領域から弱いITBを形成している。さらに特徴的なことは、輸送状態の分岐が2度起こっており、最終的に熱拡散係数は新古典理論値程度まで低減し、強いITBを形成する。このことは、複数の乱流がプラズマの異常輸送に関与していることを示唆する。以上のように、プラズマ（熱拡散係数）の応答が被制御量（径電場シア）に対して、連続的な変化なのか？不連続なのか？あるいは、大きなジャンプなのか？小さいのか？等を被制御量の制御範囲を含めて整理し、燃焼プラズマの制御に適用可能なかを判断する必要がある。

#### (2) 非局所応答（大域的応答）

プラズマの非局所応答としては、Hモードプラズマに見られる分布の硬直性がよく知られている[8]。硬直性の強いプラズマでは、周辺付近を加熱したときに熱流速のおよばない中心付近の温度が拡散の時定数よりもずっと素早く上昇する、あるいは温度分布が加熱分布に依存しない等の応答がある。このようなプラズマでは、周辺部温度が高ければ中心の温度も高くなるため、核融合反応率が周辺部温度に大きく依存する。この性質を利用すると、周辺部の温度のわずかな制御で中心部の温度を大きく制御するような分布制御を通じた核融合出力制御が可能である。また、ITBプラズマにおいても非局所応答が観測されている。例えば、NBIによるトロイダル回転分布制御を通してITBの強度を制御した際、ITB領域の一部分の径電場シアだけが減少しても、ITB全体が劣化する実験結果がJT-60Uで得られている[9]。プラズマ電流方向（CO方向）とプラズマ電流方向に対して逆方向（CTR方向）のNBIパワーが同じ

となるBAL入射によって形成した強いITBに対して、加熱パワーを同じにしたままCTR入射に切り替えると、ITBが劣化する。このときのBAL入射中とCTR入射によりITB劣化が起こる直前の径電場シア分布を図2に示す。規格化小半径0.6付近の径電場シアはほとんど変化せずに0.4付近が減少した後に、径電場シアが減少していない領域を含めたITB全体領域において劣化が同時に起こる。同様の実験結果がBAL入射からCO入射に切り替えた場合にも得られている。その場合、規格化小半径0.4付近の径電場シアがほとんど変化せずに0.6付近が減少する。一方で、ITBにおける温度分布の曲率が自発的に遷移を繰り返す現象も観測されており[10]、これもプラズマの非局所性に由来する構造間遷移と捉えることができる。このようなプラズマの非局所性を利用すると、外部からの小さな操作で大きなプラズマ応答を得られる可能性があり、非局所応答は燃焼プラズマの分布制御において有用である。また、EC入射装置は局所的な加熱・電流駆動に加えて、トロイダル回転分布に影響を与えることが明らかになってきており、EC入射に対する非局所性に由来する応答特性の研究は、燃焼プラズマの分布制御に向けて重要な研究開発項目の一つである。

### (3)高自発電流割合プラズマの応答

自発電流は圧力勾配に応じて自然に流れる電流であるため、自発電流割合が高いほど、圧力分布と電流分布の結合が強まる。したがって、圧力分布の制御による電流分布への影響は、プラズマ電流に対する自発電流の割合が高いほど大きくなる。圧力勾配の変化に対する電流分布（安全係数分布）の変化の関係がJT-60Uの負磁気シアプラズマで

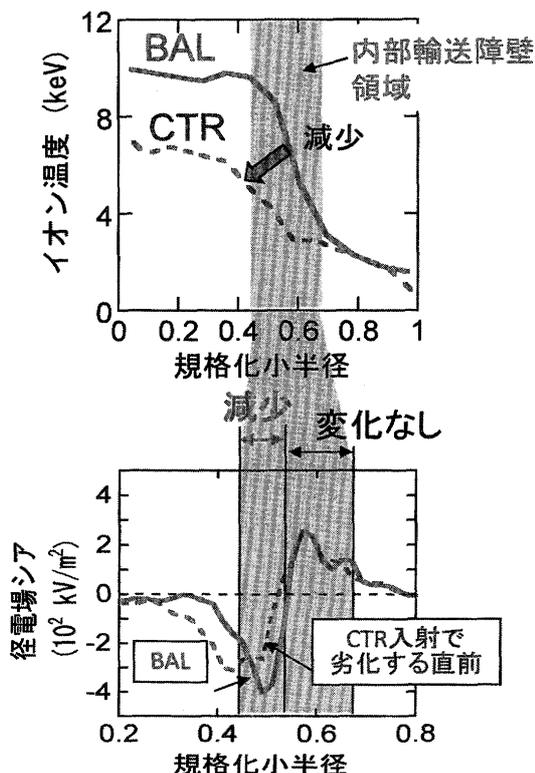


図2 回転分布制御を用いたITB制御実験で示された径電場シアとITBとの関係における非局所性。

調べられている[11]。図3に示すデータは、プラズマ回転によってITBの強さを制御したときのものである。JT-60Uの負磁気シアプラズマでは、安全係数の極小位置からその内側にITBが形成されるため、ITB領域の自発電流が変化すると安全係数の極小値に直接変化が現れる。イオン温度勾配が増大すると安全係数の極小値が増大し、イオン温度勾配が減少すると減少する。自発電流割合70%の場合は50%の場合に比べて、安全係数の極小値の変化が格段に大きい。このように、分布間の結合が強いような高自律性プラズマにおいては、各分布のセット制御の考え方が重要であることがわかる。例えば、不安定性を避けるために圧力分布を予定どおりに制御しても、その結果として電流分布が大きく変化して不安定性を引き起こす有界面が現れてしまい、プラズマ崩壊を引き起こすことも考えられる。したがって、圧力分布を制御する際には電流分布の変化を予測して、その分を外部電流駆動で補うようなセット制御が必要となる。

### (4)誘導電流駆動に対するITBの応答

完全非誘導電流駆動状態にあるプラズマにおいて、中心ソレノイドコイル電流を用いた周回電圧摂動を印加した時のプラズマの応答が、TCV装置で調べられている[12]。周回電圧摂動を印加することで微少な誘導電流を駆動させることができる。TCV装置では、EC入射によって電子系ITBを形成し、自発電流とEC駆動電流によってすべてのプラズマ電流を維持する完全非誘導電流駆動プラズマを、電流拡散時間（ $\sim 0.15 - 0.25$  s）よりも十分に長く維持することができている。完全非誘導電流駆動状態から周回電圧（+30 mV, 0 mV, -30 mV）をショット毎に変化させてITBの変化を比較すると、周回電圧を印加しない場合（0 mV）に対して、+30 mVの場合にはITB半径の縮小と中心圧力の低減が観測された。一方、-30 mVの場合には、ITBが成長し中心圧力が増大した。このとき、ASTRAコードを用いた電流分布の解析では、30 mVで正磁気シア、0 mVで平坦シア、-30 mVで負磁気シア配位となっている。

原型炉相当のプラズマにおける誘導電流摂動に対する

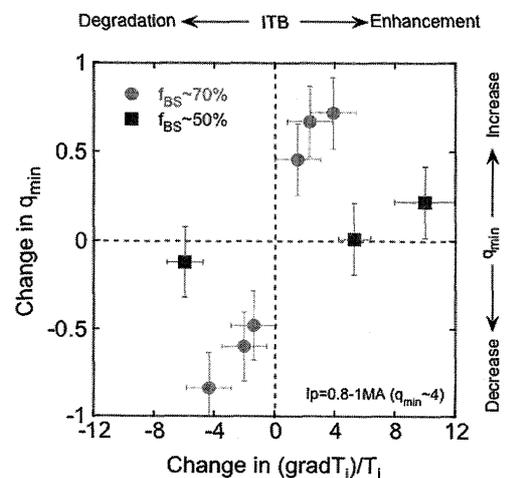


図3 高自発電流割合プラズマにおけるイオン温度勾配に対する安全係数極小値の応答特性。

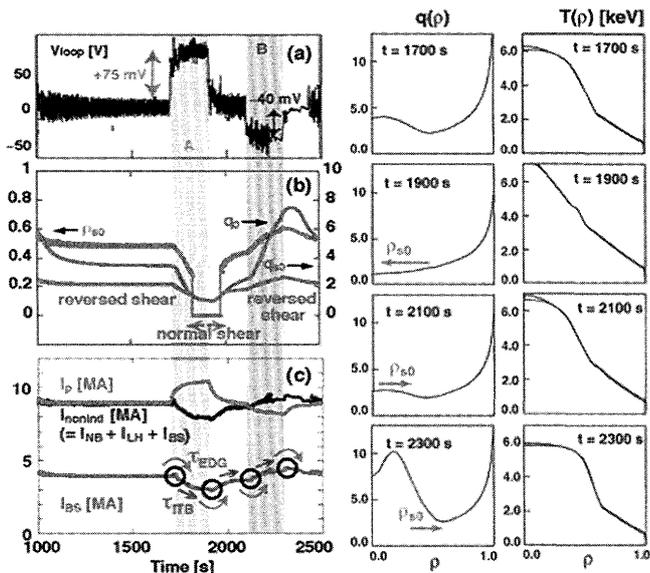


図4 誘導電流摂動を用いたITB能動制御のTSCシミュレーション.

ITBの応答が, Tokamak Simulation Code (TSCコード)を用いて調べられている[13]. 図4に示すように完全非誘導電流駆動状態(周回電圧0 mV)から周回電圧+75 mVを200秒間印加すると, 正の誘導電流がコア部にしみ込むにつれて, 負磁気シアから正磁気シアへITB内側での電流拡散の時間スケール(~100秒)で電流分布が変化する. このとき, ITBでの圧力勾配の劣化によって, 自発電流が1 MA程度減少する. 全プラズマ電流は1.5 MA増大しているので, 外部からの摂動分は2.5 MAであり, 全電流の~30%に相当する. その後, -40 mVを200秒間印加すると逆の応答があり, 正磁気シアから負磁気シアに変化しITBでの圧力勾配も増大する. このように, 外部加熱源を用いない過渡的な電流分布制御を通して内部輸送障壁(圧力分布)の能動制御が可能であることが実験およびシミュレーションによって示されている.

(5) EC波入射に対する不純物分布の応答

閉じ込め性能の高いプラズマでは, 通常, 不純物の閉じ

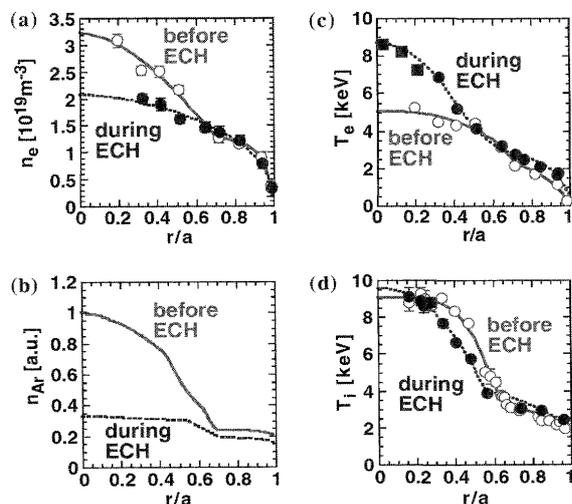


図5 ITBプラズマにおけるEC入射に対するアルゴン密度の応答.

込めも良くなり, 燃料希釈のため核融合燃焼度の低下が懸念される. そのため, ITBプラズマを核融合炉に適用する上で不純物制御は特に重要な課題の一つである. ここでは, JT-60Uでの実験結果として, ITBプラズマにEC波入射を行った時の不純物の応答について紹介する[14]. 図5は, ITBを持つ弱磁気シアプラズマの中心付近( $r/a \sim 0.15$ )にEC波を入射した前後の電子密度, アルゴン密度, 電子温度, イオン温度の各分布を示している. EC波入射によって電子温度が上昇するとともに電子密度が減少し, アルゴンが吐き出されている. 同様の応答特性がASDEX-UやDIII-Dでも観測されている. このアルゴン密度分布の変化は, 電子密度勾配の減少による新古典ピンチ速度の減少と矛盾しない. ただし, EC波入射によってトロイダル回転シアとイオン温度勾配の減少が観測される場合があることや, 負磁気シアプラズマでは密度減少やアルゴンの吐き出しが観測されていないことから, それらの物理機構解明は今後の課題として残されている.

(6) 不純物ガス種に対する放射損失分布の応答

経済性に優れたコンパクトな核融合炉概念では, 第一壁やダイバータ板への熱負荷が必然的に高くなる. ITER以降の燃焼プラズマ実験では, 局所的な熱負荷を低減させるために不純物ガス導入による放射損失増大によって, 熱負荷を低減させることが必須である. 例えば, ITERでの放射損失割合は, 全加熱パワーの60%, SlimCSでは90%が必要である. ダイバータ部においてすべての放射損失を担わせると, 熱負荷がダイバータ付近に集中するので, 不純物がコアプラズマ性能に影響を与えない範囲で主プラズマ領域からも放射損失させる必要がある. そこで, 放射損失関数の異なる不純物ガスを組み合わせることによって, 放射損失分布を制御することが考えられる. 例えば, 高電子温度領域ではアルゴンの方がネオンよりも放射損失関数が大きいので, 主プラズマ領域で放射損失させるためにはネオンよりもアルゴンの方が有効である. 図6には, JT-60Uで得られた, アルゴンのみ, ネオンのみ, アルゴン&ネオンの不純物ガスを導入した時の主プラズマ領域とダイ

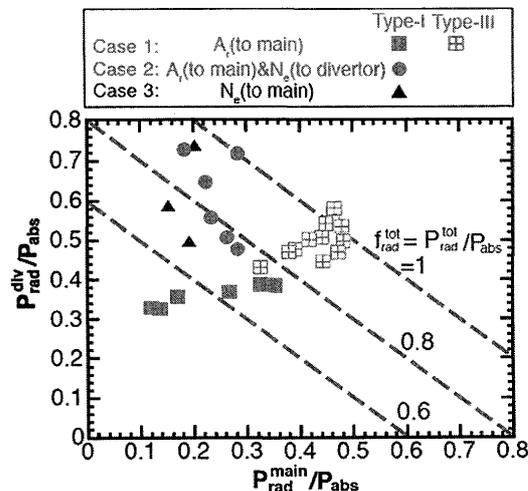


図6 異なる組合せの不純物ガスを導入した時の主プラズマ領域とダイバータ領域からの放射損失割合の関係.

バータ領域からの放射損失割合の関係を示している[15]. アルゴン(ネオン)のみの時は, 主プラズマ(ダイバータ)領域からの放射損失しか制御できないが, アルゴンとネオンを組み合わせることによって, 主プラズマ領域からの放射損失割合を変えずにダイバータ領域からの放射損失割合を増大させることができている.

### 3.5 原型炉に向けて

プラズマの応答特性に関する知見を深めることは, 燃焼プラズマの分布制御に有用なだけでなく, プラズマの本質を理解することでもある. 応答特性を調べる過程で予期せぬプラズマの素性が明らかになるかもしれない. また, 原型炉のプラズマ設計や運転シナリオ構築に必要な炉心プラズマシミュレータには, 燃焼プラズマの定常状態だけでなく過渡応答特性まで記述できるモデル構築が必要である. 因果関係を含めた応答特性の知見を, 燃焼プラズマのモデリングの検証に役立てていただきたい.

高自律性, 非線形性, 非局所性, 分布の連関, 異なる時空間スケールを併せ持つ燃焼プラズマを制御するためには, 本章で扱ったプラズマの応答特性の解明に加えて, それらに基づいた制御手法や制御ロジックの開発は極めて重要であるとともに挑戦的な課題の一つである. しかも, 原型炉の過酷な環境下や空間的制約のため, 設置可能なセン

サーとアクチュエータは極端に制限されるだろう. 数%の外部加熱源でどのようなプラズマ分布制御が可能だろうか? 原型炉に向けた燃焼プラズマに関しては, ITER やサテライトトカマク装置で制御手法の技術的見通しを得なければならぬだろう. 最終的には, プラズマ制御のできる範囲で原型炉を構想する必要がある.

### 参考文献

- [1] Y. Koide *et al.*, Phys. Rev. Lett. **72**, 3662 (1994).
- [2] T. Fujita *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 245001 (2001).
- [3] Y. Kamada and the JT-60 team, Nucl. Fusion **41**, 1311 (2001).
- [4] J.B. Lister *et al.*, Nucl. Fusion **40**, 1167 (2000).
- [5] E.J. Synakowski *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78**, 2972 (1997).
- [6] M. Yoshida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 065003 (2009).
- [7] Y. Sakamoto *et al.*, Nucl. Fusion **44**, 876 (2004).
- [8] K. Toi *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **78**, 895 (2002).
- [9] Y. Sakamoto *et al.*, Nucl. Fusion **41**, 865 (2001).
- [10] K. Ida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 055003 (2008).
- [11] Y. Sakamoto *et al.*, Nucl. Fusion **47**, 1506 (2007).
- [12] O. Sauter *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 105002 (2005).
- [13] Y. Nakamura *et al.*, Nucl. Fusion **46**, S645 (2006).
- [14] H. Takenaga *et al.*, Nucl. Fusion **43**, 1235 (2003).
- [15] N. Asakura *et al.*, Nucl. Fusion **49**, 115010 (2009).