

## 連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ

### 第 2 回 核融合炉設計のためのプラズマの性質 トカマク炉心プラズマに必要な総合性能

日本原子力研究所 鎌田 裕



核融合炉の炉心はプラズマです。そこでは、要求される総合的な性能を実現し、これを定常的に維持することが必要です。本章では、この炉心プラズマについて、核融合炉を設計する上での要点を概観します。第 1 章では炉心プラズマの基本構成、第 2 章では求められる総合性能を述べ、第 3 章で制御の考え方を解説します。

#### 1. 炉心プラズマの基本構成

核融合炉の炉心は数億度のプラズマです。プラズマは電磁流体であり、流れや分布、構造が存在します。核融合炉ではこれを効率的に閉じ込めて、思うように制御する必要があります。燃料の重水素と三重水素の密度を  $n_D$ ,  $n_T$  とすると、単位体積あたりの核融合反応率  $f$  は  $n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{DT}$  で表されます。ここで、 $\langle \sigma v \rangle_{DT}$  は反応係数です。また、燃料密度の和  $n$  を一定とすると、 $f$  は、 $n_D = n_T = 1/2 n$  で最大となります。また、プラズマ温度  $T$  が 1 億度の近傍では、反応係数  $\langle \sigma v \rangle_{DT}$  は、 $T$  の 2 乗に比例するので、 $f \propto n^2 T^2$  プラズマ圧力<sup>2</sup> となります。したがって、高い温度と密度、すなわち高い圧力のプラズマを作ることが基本です。

#### 1.1. どのようにプラズマを閉じ込めるのですか？

プラズマの構成粒子はイオンと電子です。これらの荷電粒子は、磁場の中では磁力線に巻き付くラーマー運動をするので、磁力線に捕捉されます。この性質を利用して、真空容器の内部に高温のプラズマを閉じ込めるのが磁場閉じ込めの原理です。ただ

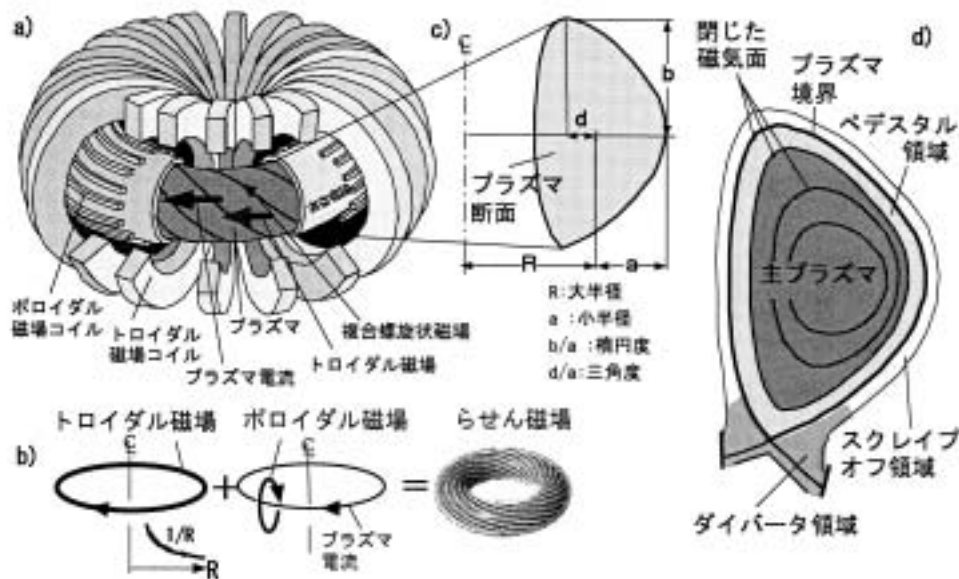
し、円柱のソレノイドコイルが作る直線磁力線では端からプラズマが逃げるので、ドーナツ状にします。また、単純なドーナツ磁力線でも荷電分離と呼ばれる現象でプラズマが逃げてしまうため、磁力線をらせん状にします。この「ドーナツ&らせん」方式の一つがトカマク方式です。

トカマクでは、ドーナツ状に並べたトロイダル磁場コイルで強いトロイダル方向の磁場  $B_t$  を作り出す(第 1 図(a))。さらに、プラズマ中に電流(プラズマ電流  $I_p$ )を流し、この電流が作るポロイダル方向の磁場と上記のトロイダル磁場とを合わせてらせん磁場を作り出す(第 1 図(b))。プラズマ電流を電磁誘導で流したり、プラズマの位置や断面形状を制御するコイル群をポロイダル磁場コイルと呼びます。

プラズマの幾何学形状は、性能を大きく左右します。ドーナツ中心からプラズマ中心までの距離を大半径  $R$ 、プラズマ中心からプラズマ境界までの距離を小半径  $a$  と呼びます。また、断面の縦長度を楕円度、どの程度三角形に近いかを三角度で表します(第 1 図(c))。加えて、高温のプラズマを空中に保持するために、第 1 図(d)のような「ダイバータ配位」とします。トカマクのエネルギー閉じ込め時間はプラズマ電流にほぼ比例するため、プラズマ電流は高いほど良いのですが、ある上限を超えると大きな不安定性が生じます。その値は、 $B_t / (R/a)$  に比例します。ここで、 $(R/a) = A$  をアスペクト比と呼びますが、この値が小さいほど(すなわち、太ったドーナツほど)、安定に流せるプラズマ電流が上昇するのです。しかし、アスペクト比が小さくなると、ドーナツ内側に超伝導コイルやブランケット等を置く空間が不足します。楕円度  $\kappa$  も高いほど、閉じ込め性能が上昇しますが、限界を超えるとプラズマが上下方向に不安定となります。三角度  $\delta$  も到達圧力を向上しますが、高過ぎると熱や粒子を制

*Intelligible Seminar on Fusion Reactors ( 2 )  
Introduction of Plasma Characteristics for Fusion  
Reactor Design* : Yutaka KAMADA.

( 2004年 12月14日 受理 )



第1図 トカマクの磁場構成；(a)コイルの基本構成，(b)らせん磁場の成り立ち，  
(c)プラズマ断面形状，(d)プラズマ領域の構成

御するダイバータの構造と整合しません。以上の理由で、ITERでは $A=3.1$ ， $\kappa=1.7$ ， $\delta=0.33$ を基本値としています。

プラズマは幾つかの領域に分けられます(第1図(d))。中心から外に向かって、燃焼を起こす数億度の「主プラズマ領域」、それを囲む数千万度の「周辺ペDESTAL領域」、「プラズマ境界」、数百万度の「スクレイプオフ層」、そして数万度程度の「ダイバータ領域」です。主プラズマの中では、「磁気面」が同心円状に形成されます。磁気面は、同じらせんピッチを持つ磁力線が作る面ですが、イメージは、長ネギの輪切りです。外から剥いていくと、次々に皮が現れます。電子やイオンは、磁力線に巻き付いて運動するので、磁力線に沿った方向には速く一様に広がります。このため、磁気面の上では温度や密度は一定と考えてよいのです。

## 2. 粒子の収支はどうなっていますか？

プラズマは電子とイオンからなります。イオンのほとんどは、燃料である重水素と三重水素ですが、DT反応で生ずるヘリウム( $\alpha$ 粒子)、第一壁材料に起因する不純物等が存在します。燃料粒子は熱化(数keV～数10keV)していますが、 $\alpha$ 粒子は3.5MeVの高速イオンとして生まれ、電子や燃料イオン等にエネルギーを与えて熱化します。ここで、「熱化」とは、粒子の速度分布が等方的なマックスウェル分布

となり、「温度」が定義できる状態になることをいいます。その温度をeVの単位で表すと、10keVは1.16億度に相当します(度 eV)。

粒子の収支を第2図(a)に示します。燃料の重水素 $D_2$ と三重水素 $T_2$ は、ガス状態でプラズマに吹きかけるか(ガスパフ)、あるいは極低温で作る固体ペレットとして連発銃のように入射します。ペレット入射は、プラズマ境界内部に直接粒子を供給できるため、供給効率が高く、高密度化に適しています。また、中性粒子ビーム(重水素原子ビーム：1～2MeV)も粒子源で、プラズマ中心部に直接入り電離します。

粒子はプラズマ中を輸送され、やがてプラズマの外に出てきます。プラズマ境界の内側では、磁力線は磁気面上で閉じていますが、境界外側の磁力線は、第1図(d)のように、ダイバータ板を横切ります。プラズマ境界から出た荷電粒子は、この「開いた」磁力線に巻き付きながらダイバータ部に流れてきます。このため、ダイバータ部には、プラズマから出て来た粒子やそれが運ぶ熱が集中します。 $\alpha$ 粒子等の高エネルギーイオンは、軌道が大きいいため、直接第一壁に衝突するものもあります。プラズマの外に出て来た粒子は、一部はダイバータ下部から排気されますが、第一壁に吸着された後、脱離してプラズマに戻ったりします。この粒子の戻りをリサイクリングと呼びます。

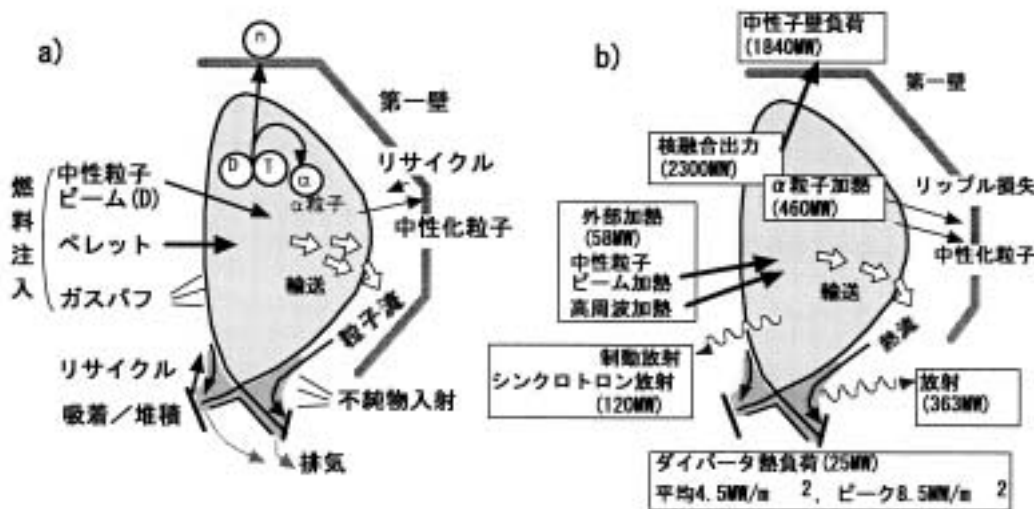
炉心プラズマの中には、燃料である重水素と三重水素以外にも、ヘリウムや第一壁の材料に起因する不純物も含まれています。この不純物の制御は大変重要です。核融合反応で生じたヘリウムは、プラズマ中に溜まり過ぎると燃料を希釈して核融合出力を下げってしまうので、効率よく排気する必要があります。現在想定しているヘリウムの混入量は電子密度の5%程度です。第一壁の表面材料の混入も抑える必要があります。原子番号の大きな粒子は、大きな放射損失を引き起こしてプラズマを冷やすからです。しかし、逆に、不純物による放射を利用することも大切です。プラズマから出て来た熱がすべてダイバータ板に集中すると、50 MW/m<sup>2</sup>を超える熱負荷になり、材料は耐えられません。そこで、Ne や Ar 等の希ガスをダイバータ領域に導入して放射を増大し、熱を第一壁全体に分散させます。ただし、主プラズマへの混入は困るので、スクレイブオフ領域にダイバータに向かう粒子の流れを作り、不純物粒子をダイバータ領域に押しとどめる必要があります。

3. 熱の収支はどうなっていますか？

次は、熱の収支(第2図(b))です。プラズマを加熱するのは、 $\alpha$  粒子加熱(自己加熱)と、中性粒子ビームおよび高周波による外部加熱です。核融合のエネルギー利得  $Q$  は、「核融合パワー/外部加熱パワー」で定義され、 $Q = 1$  を臨界プラズマ条件、 $Q = \infty$  を自己点火条件と呼びます。核融合炉は、プラ

ズマ電流を流す等の制御に外部加熱が必要なので、おおよそ  $Q = 30 \sim 50$  程度で設計しています。DT 反応では、核融合パワーの4/5が発生中性子に渡り、プラズマ外へ逃げます。残りの1/5が  $\alpha$  粒子に渡り、これが閉じ込められて自己加熱に使われます。自己加熱と外部加熱の比は、 $Q = 30$  の場合、 $Q/5 : 1 = 6 : 1$  となり、全加熱パワーの86%が自己加熱となります。ITER の目標である  $Q = 10$  では、自己加熱割合は67%です。DT 燃料による実験は、これまでJET(欧)とTFTR(米)で行われていますが、自己加熱割合は10%程度です。「自己加熱が支配的なプラズマ」はITERで初めて実現されるのです。一方、「熱の逃げ」は、熱輸送(伝導と対流)および放射で決まります。熱輸送が中心的な過程です。放射については、高温の主プラズマからは制動放射とシンクロトロン放射等が発生します。プラズマ境界から出て来た熱はダイバータ板に向かいますが、上述のように、途中で光の形で放散させます。

高温高密度のプラズマをいかに少ない加熱パワーで効率よく維持できるかの指標を、エネルギー閉じ込め時間  $\tau_E$  といいます。プラズマの冷えにくさを表す量ともいえ、プラズマが持っている熱(蓄積エネルギー)を  $W$ 、加熱パワー(自己加熱+外部加熱)を  $P_{heat}$  とすると、 $dW/dt = P_{heat} - W/\tau_E$  で与えられます。加熱パワーをゼロとした場合、蓄積エネルギーが  $1/e$  に減少する時定数です。また、定常状態( $dW/dt = 0$ )では、蓄積エネルギーを加熱パワーで割った値です。例えば10 MW の加熱パワーで20 MJ の

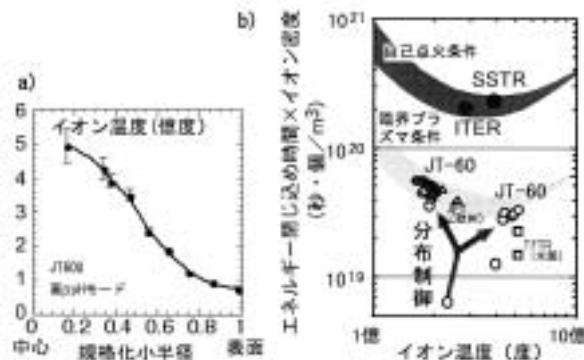


第2図 トカマクの(a)粒子バランスと(b)熱バランス(図(b)中の値は発電実証プラント設計例のもの)

蓄積エネルギーを保持できたとすると、 $\tau_E = 2s$ です。 $\tau_E$ は、JT-60(原研)では1s程度、ITERでは5s程度です。しばしば誤解されますが、エネルギー閉じ込め時間はプラズマの持続時間ではありません。家電製品に例えると、電気ポットで電気を切ると、お湯はある時間(=  $\tau_E$ )で冷めますが、電源につないでおけば、何日でもお湯を保てます(= 持続時間)。同体積・同加熱パワーで、核融合出力はエネルギー閉じ込め時間の2乗に比例して増加します。

プラズマの中にはヘリウム等の不純物が存在します。その蓄積につれて核融合出力は低下し、例えばヘリウム混入率(電子密度に対する割合)が5%で85%、10%で71%になってしまいます。閉じ込め性能が良いプラズマでは、不純物粒子もよく閉じ込められてしまうことが問題です。効率的な排気で、いかに不純物の蓄積を抑えるかが鍵になります。

プラズマの温度、密度、圧力等は、空間的に分布を持っています。第3図(a)は、JT-60のイオン温度の例ですが、中心部では約5億度、周辺部では数千万度です。プラズマ諸量の分布は、非常に重要です。必要な条件を整えてうまく分布を作れば、同じ磁場やプラズマ電流、加熱パワーであっても、プラズマの性能は1桁も上昇します(第3図(b))。基本的に、温度や密度の分布は熱や粒子の拡散で決まりますが、プラズマ中には様々な電場や磁場の揺動が発生して拡散を大きくします。その拡散係数は、温度や密度の勾配、電流分布で決まります。また、プラズマを回転させ、その回転に空間的な勾配をつけることでプラズマ中にできる乱流的な渦を分断して拡散を抑えることもできます。



第3図 (a)JT-60でのイオン温度の空間分布と (b)分布制御による核融合性能の上昇

## ・プラズマの性能向上の策

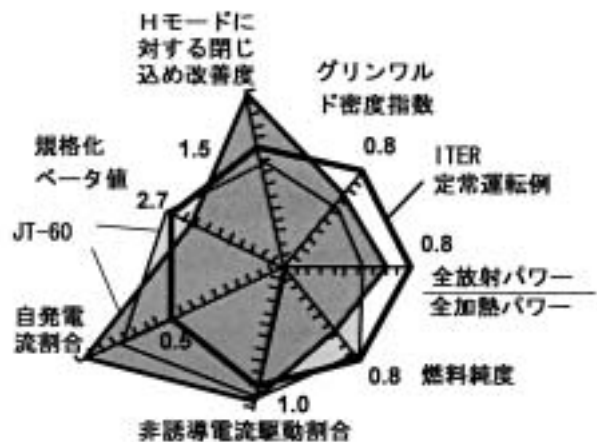
核融合炉では、高い閉じ込め性能で所要の出力を発揮し、第一壁への熱流を許容範囲に保ちつつ、高い出力密度でコンパクトな炉心を実現すると同時に、小さな循環電力で定常的にプラズマを維持することが求められます。この総合性能を7つの指標で表したものが第4図です。すなわち、

- (1) 閉じ込め改善度が高い：核融合出力の上昇
- (2) 規格化ベータ値(圧力指標)が高い：コンパクト化
- (3) 自発電流割合が大きい：循環電力低減
- (4) 非誘導電流駆動割合が大きい：定常維持
- (5) 密度指数が高い：核融合出力の上昇とダイバータ熱負荷低減
- (6) 放射率(=放射パワー/全加熱パワー)が大きい：ダイバータ熱負荷低減
- (7) 燃料純度が高い：核融合出力の確保

です。第4図には、ITERの定常運転の目標と、JT-60で得られている総合性能を示してあります。おのおのの要素性能が最適となる条件は異なり、全体をいかに高い次元で統合できるかが鍵となります。以下、これらの要素を説明します。

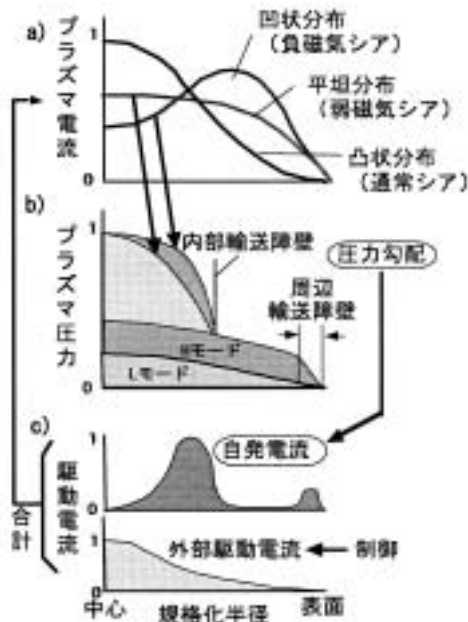
### 1. 閉じ込め性能を上げるにはどうするのですか？

ITERの標準運転モードをHモードといいます。これは、「輸送障壁」と呼ばれる熱や粒子の拡散を遮る層がプラズマの周辺部に形成されて閉じ込めが改



第4図 要求される総合性能(正七角形)：ITERの定常運転の目標値、実験データ：JT-60で得られた総合性能の例)

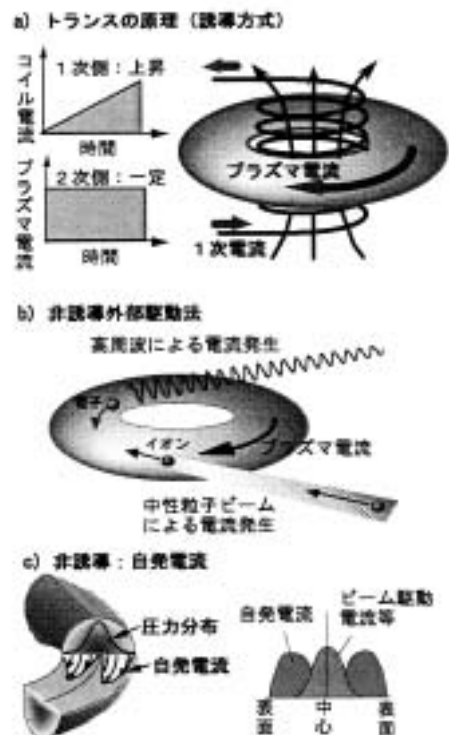
善される状態(第5図(b)),最も基本的な閉じ込め状態であるLモードの約2倍のエネルギー閉じ込め時間を持ちます。世界のほぼすべての装置で日常的に得られ,十分な実績があります。一方,プラズマの中心部が改善される運転モードもあります。その中で,特にJT-60で発見された「内部輸送障壁」は,閉じ込め性能を大きく向上します。さらに,これをHモードと重畳することで,一層高い閉じ込め改善(Hモードの1.5~2倍)が得られ,核融合炉の有力な運転モードとなっています(第5図(b))。Hモードのエネルギー閉じ込め性能に比べて,どの程度改善されているかを表す指標が,「閉じ込め改善度」です。通常,プラズマ電流は,プラズマ中心で高い凸状の分布をとりますが,この内部輸送障壁は,電流分布が凹状あるいは平坦な場合に形成されます(第5図(a))。このような電流分布によって,JT-60では臨界プラズマ条件や世界最高のエネルギー増倍率( $Q=1.25$ )が達成されています。ただし,閉じ込めが良くなりすぎて過度に急峻な圧力勾配が形成されると,プラズマが不安定になったり,内部輸送障壁の内側に不純物が溜まりすぎてしまいます。このため,電流分布や回転速度の分布を調節して,内部輸送障壁の強さを制御します。



第5図 (a)典型的な電流分布,(b)プラズマ圧力の空間分布(Lモード,Hモード(周辺改善モード),および中心改善モードとHモードの複合),(c)自発電流と外部駆動電流の分布 (a)(c)は相関ループを形成。

## 2. どのようにプラズマ電流を維持するのですか?

通常,プラズマ電流は,ポロイダル磁場コイルをトランスの1次巻線,プラズマを2次巻線として電磁誘導で流します(第6図(a))。しかし,一定のプラズマ電流を維持するためには,ポロイダル磁場コイルに流れる電流を増加し続けなければならず,定常運転はできません。このため,電磁誘導を用いない電流発生技術が必要です。これを「非誘導電流駆動」といい,これによって流す電流の全プラズマ電流に対する割合を「非誘導電流駆動割合」と呼びます。非誘導電流駆動には,外部駆動方式と,プラズマが自発的に電流を流す性質を利用する方式があります。外部駆動方式(第6図(b))には,電磁波を入射して電子を一方向に加速する高周波方式と,プラズマ電流と同じ向きに中性粒子ビームを入射する方式があります。高周波では,低域混成波と呼ばれる数GHz帯の波が最も効率よく電流を駆動でき,TRIAM-1M(九大)では世界最長の5時間の電流駆動が達成されています。電子サイクロトロン波を用いた方式は,プラズマ中の狙った場所に局所的な電流駆動を行える利点があります。主力であるビーム



第6図 プラズマ電流の発生手法;(a)トランスの原理(誘導方式),(b)非誘導外部駆動法(中性粒子ビーム法と高周波法),(c)自発電流

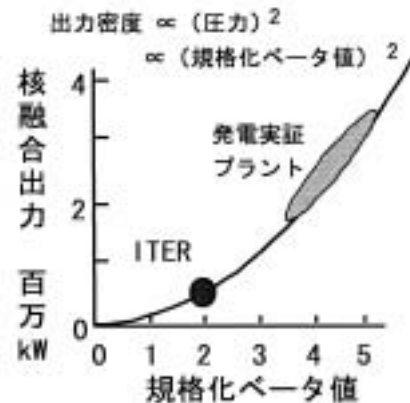
方式はプラズマの中心部に電流を流します。

しかし、外部駆動方式だけで全電流を賄おうとすると、核融合炉の電気出力に匹敵する循環電力が必要となり、炉の設計は困難です。そこで「自発電流」の利用が重要になります。自発電流は、プラズマ圧力の上昇とともに自然に発生します(第6図(c))。その割合を高めて外部駆動分のパワーを低減するのです。全プラズマ電流に対する自発電流の割合を「自発電流割合」といいます。自発電流は、プラズマの圧力勾配が駆動するため、原理的にプラズマ中心には流れません。このため自発電流の割合を増やすと、プラズマ電流全体の空間分布は平坦～凹状となります。したがって、前節で述べた内部輸送障壁と周辺輸送障壁を併せ持つ高閉じ込めモードは、自発電流の割合が高いプラズマが自然に帰着する配位なのです(第5図)。JT-60によって、高い割合の自発電流(70～80%)とビーム駆動電流の複合による完全非誘導電流駆動の下での高閉じ込め状態の維持が初めて実証され、ITERの定常運転や核融合炉の物理基盤が得られています。

### 3. 圧力を上げる鍵は何ですか？

核融合出力密度は、プラズマ圧力の2乗に比例します。このため、プラズマ圧力を高めれば、所定の出力を得るために必要なプラズマの体積が小さくて済み、経済性に優れたコンパクトな炉になります。同時に、自発電流の割合も大きくなり、さらに経済的です。しかし、プラズマ圧力が高くなり過ぎると磁場で支えきれなくなり、不安定性が発生してしまいます。この圧力限界の指標が「規格化ベータ値」 $\beta_N = p / (B I_p / 2 \mu_0 a)$ です。これはどれだけ低いトロイダル磁場  $B_t$  とプラズマ電流  $I_p$  で高いプラズマ圧力  $p$  が得られるかを表します。 $a$  はプラズマの小半径、 $\mu_0$  は真空中の透磁率です。ITERの標準運転では  $\beta_N \sim 2$  を想定しています。エネルギー閉じ込め改善度の高いプラズマでは、性能の限界を決めるのはベータ限界です。規格化ベータ値を4割増加するだけで核融合出力は倍増します(第7図)。一方、出力密度を上昇させると壁への熱負荷や中性子負荷が上昇します。したがって、プラズマの安定性と材料・構造技術の接点出力密度を決定します。

ベータ値の上限は、プラズマ電流と圧力の空間分布で大きく(3倍程度)変化します。また、プラズマ断面の三角度の上昇が有効です。さらに、不安定性



第7図 規格化ベータ値とともに上昇する核融合出力 (ITERの値で規格化)

が発生しても、その発生位置に電子サイクロトロン波を入射して安定性を回復する技術も開発されました。これらの研究の結果、現在では  $\beta_N \sim 3$  の定常維持が可能になりました。しかし、経済的な核融合炉を目指す場合、さらに高い  $\beta_N = 3.5 \sim 5$  の定常維持が必要です。その実現には、プラズマを囲む導体壁と真空容器内制御コイルによる安定性向上が必要で、今後の大きな研究課題です。

### 4. 壁への熱集中はどのように緩和するのですか？

ダイバータ板に集中する熱を低減するために、ダイバータ領域のプラズマを低温高密度として、燃料や不純物の原子あるいは非完全電離イオンから放射される光を増やし、光の形で熱を散逸させます。この放射パワーの全加熱パワーに対する割合を「放射率」と呼びます。放射率を上昇するためには、主プラズマの密度も上昇する必要がありますが、過度に増加させると主プラズマが冷えてしまいます。いかに閉じ込め性能の劣化なしに高密度と高放射率を実現できるかが鍵です。主プラズマの平均密度の経験的な指標をグリーンワルド密度といい、 $n_G [10^{20}/m^3] = I_p / (\pi a^2) [MA/m^2]$  で与えられます。この値で規格化したプラズマの密度を「密度指数」と呼びます。これまでに、プラズマ断面の三角度を高めることで、ITERで要求される性能(放射率 $\sim 80\%$ 、電子密度 $\sim n_G$ )を達成できる目処がついています。また、ダイバータの構造が重要です。連載第5回で詳しい解説が行われますが、「閉ダイバータ(第2図)と呼ばれる構造とし、ダイバータ領域から主プラズマへの粒子の逆流を小さくしつつダイバータ下方からの

排気効率を高めます。

### 5. ディスラプションは避けられますか？

プラズマの密度や圧力が限界を越えると、プラズマが急速に消滅する「ディスラプション」が発生します。まずプラズマからの熱の放出(熱消滅)が起き、続いてプラズマ電流の消滅(電流消滅)が発生します(第8図(a))。熱消滅ではダイバータ板への大きな熱流が問題です。電流消滅では、プラズマ電流が持っていた磁気エネルギーの急速な開放によって真空容器内構造物にハロー電流が誘起され、これとトロイダル磁場との相互作用による電磁力が問題となります。電流消滅時には、多くの場合、プラズマの垂直移動現象が発生し、プラズマが第一壁に押し付けられてプラズマと真空容器内を介して大きな電流路を作ります。これがハロー電流です(第8図(b))。一方、垂直移動が小さい場合には、磁束を保存するために誘起された高電場によって、高エネルギー(数十 MeV)の逃走電子が発生する場合があります。これが第一壁に接触すると局所的な高熱負荷を与えます。これらの理由から、ディスラプションの回避と、仮に発生した場合でもダメージを緩和することが重要です。

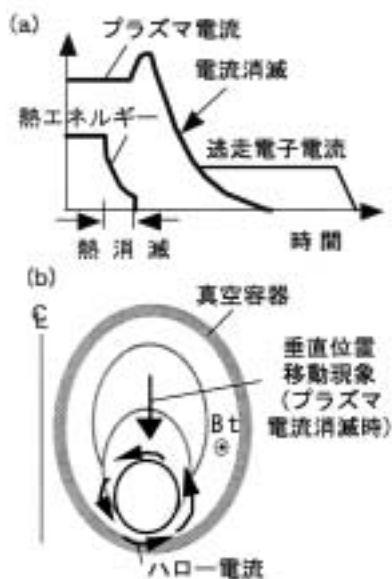
ディスラプションの発生条件はよく理解されています。回避の基本は、適切な運転シナリオで、密度、放射率および圧力の限界に対して十分な裕度を保つことです。例えば、ITERの標準運転程度であれば

ディスラプションはほぼ完全に回避できます。しかし、核融合炉では圧力や放射率を一層高める必要があります。現状では、規格化ベータ値を3以上、放射率を90%以上に高めていくと安定な運転領域は狭くなり、擾乱が加わった場合にディスラプションが発生する可能性がでてきます。今後、このような領域で運転裕度を定量化し、それに基づいて運転裕度を実時間で評価・予測して回避操作を行う技術を確立する必要があります。

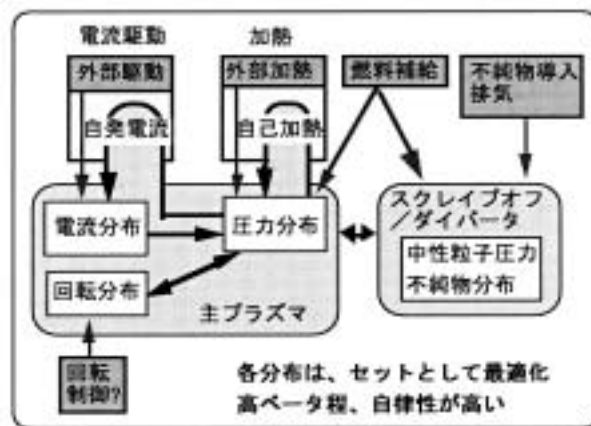
故障等の不測の事態でディスラプションを回避できない場合を想定して、緩和手法の開発も進んでいます。熱消滅の緩和では、ネオンのペレットをプラズマに入射することで、ダイバータ板に流入する熱を放射で拡散し、熱負荷の集中を大きく低下できることが実証されています。ハロー電流の緩和では、垂直移動現象の抑制が焦点です。垂直移動現象は、電流消滅時に真空容器等に誘起される渦電流とプラズマ電流が及ぼし合う力のバランスで決まります。この時、力が上下対称となる位置(中立平衡点)にプラズマの中心を設定すれば移動現象が発生しません。逃走電子については、外部エラー磁場の増大や熱消滅後の不純物ペレットの入射によって抑制できます。

### 炉心プラズマに必要な制御

これまで見て来たように、求められる総合性能を満足するにはプラズマ諸量の空間分布制御が不可欠です。そこには、燃焼制御という大切な役割も加わります。制御の考え方を第9図に示します。制御すべき量は、電流、圧力、回転および密度の分布です。ここで重要なことは、これらの分布が従属的な関係



第8図 (a)ディスラプション時の熱消滅と電流消滅および(b)垂直移動現象とハロー電流の発生



第9図 自律系プラズマと制御の考え方



を持つことです。第5図で述べたように、電流分布は輸送を左右し、特徴的な圧力分布を自己形成します。同時に、電流分布は、圧力分布が決定する自発電流の分布に大きく影響されます。また、圧力分布に応じて発生する $\alpha$ 粒子加熱の分布は、圧力分布自体の決定要因となります。核融合炉では、自己加熱パワーが全加熱パワーの約90%を占めるため、加熱分布の大部分はプラズマが自ら決定します。また、自発電流割合が70~80%を占めるため、電流分布もプラズマが自分で決める割合が大きいのです。このような「自律性」が強い核融合炉のプラズマを、全加熱の10%程度の外部加熱パワーと20~30%の外部駆動電流で制御するのは、燃焼度の確保やダイバータ熱負荷の軽減に必要な燃料や不純物粒子の制御は、主プラズマからダイバータ領域に至る全体的な制御として捉える必要があります。各分布が変化するとき定数は異なります。核融合炉の領域では、温度、密度、圧力、回転等は数秒から10秒程度、電流は100秒程度の時定数です。異なる時定数で発展する各分布をセットとして制御する必要があります。燃焼度が変動しては炉は成り立ちません。どのような計測およびアクチュエータを用いて、いかなるロジックで制御するのか。これは今後の課題です。ITERは、高い自己加熱割合を初めて実証する課題を負っています。また、強い自律系を形成する高ベータプラズマの定常維持の手法を確立することも極めて重要な課題です。

## ・終わりに

炉心プラズマは一つのシステムをなします。そこ

では、適切な制御の下で総合的な性能を満たすことが求められます。さらに、炉心プラズマを核融合炉システムの中でのサブシステムとして捉えて、核融合炉全体の最適化を図ることが重要です。そのような視点から、本稿が参考になれば幸いです。なお、研究の詳細に関しては、以下の文献を参考にして下さい。

### 参考文献

- 1) 岸本 浩, 他, “小特集 ITER 物理 R&D の成果”, プラズマ核融合誌, 76, 19(2000); 76, 116(2000).
- 2) 森 雅博, 他, “小特集 トーラスプラズマにおける輸送障壁”, プラズマ核融合誌, 74, 967(1998).
- 3) 山崎耕造, 他, “小特集 ベータ限界と MHD”, プラズマ核融合誌, 79, 121(2003).
- 4) 朝倉伸幸, 他, “小特集 周辺プラズマ研究の最近の進展”, プラズマ核融合誌, 80, 181(2004).
- 5) 鎌田 裕, 他, “JT-60の臨界プラズマ条件達成と核融合炉への展望”, 原子力誌, 39, 367(1997).
- 6) 二宮博正, “定常核融合炉を目指した JT-60の最近の成果”, 原子力誌, 45, 243(2003).

### 著者紹介

鎌田 裕(かまだ・ゆたか)



1988年東京大学原子力工学専攻博士課程修了。現在、日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部炉心プラズマ実験計測開発室長。国際トカマク物理活動周辺ペDESTAL物理グループ議長。JT-60での高ベータ・先進トカマク運転開発と周辺ペDESTAL研究等に従事。