

連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ

第4回 核融合炉の状態を診断し，最適に制御するシステム

日本原子力研究所 栗原 研一



・ プラズマ計測制御はおおよそどこまで来たか？

1955年の「第1回原子力平和利用国際会議」により世界中で本格的な核融合炉研究開発が開始されてから、今年でちょうど半世紀となります。最も実用化に近いトカマク型核融合装置は、この20年の研究開発の結果、短時間ながら投入エネルギーと発生エネルギーが等しい「臨界プラズマ条件」を達成し第1の関門をクリアできました。これでようやく核融合炉の実現への開発シナリオが描けるようになりました。そのシナリオは大雑把に言えば、まず実験炉ITERにおいて、これまで経験のないDT 燃焼しているプラズマ制御の課題、発電ブランケットの課題などを摘出するとともに、これら課題の解決を行うというものです。そこで次の段階への不確定性を最小限にした時点で、発電実証炉の建設に移行して核融合発電が実現される、といったところでしょうか。

このような見通しを想像できるようになるまで、半世紀もの期間を要した最大の理由は、プラズマに投入したエネルギーが思った以上に早く散逸してしまい、この対応策を見出すために、新たな装置建設や各種改造さらには実験上の試行錯誤が必要であったからです。世界中の様々なトカマク装置で取得された、プラズマのマクロパラメータ(閉じ込め磁場強度、総プラズマ電流、位置形状、等)とエネルギー閉じ込め性能との関係を基に、必要な性能を発揮する装置サイズなどを一定の確度で予想することが可能となりました。この関係式を使って実験炉

の設計仕様を決めているのです(関昌弘編, 核融合炉工学概論, 日刊工業新聞社, (2001))。

要求性能の装置サイズなどを決めるために使われるこのマクロパラメータに関する関係式を「スケーリング則(付録参照)」と呼んでいます。プラズマにおけるエネルギー閉じ込め現象は、単純化すれば電磁場中での多体問題といえます。こう考えますと、電磁場の方程式や粒子の運動方程式などを連立偏微分方程式系として然るべき境界・初期条件の下で時間進行方向で計算すれば、エネルギー閉じ込め現象の解析は一見可能に思われるかもしれませんが、しかし、そのような粒子と場あるいは粒子同士の相互作用といった複雑系の計算はあまりに膨大であるため、計算科学として研究がいま進行している段階です。ですから、現時点では実験式として求めることが合理的な方法となるわけです。

実験データを基に統計処理して得られたこの式は、装置が満たすべき必要条件を表していると考えられますが、十分条件にはなっていません。いい換えますと、あるエネルギー閉じ込め性能を標準的に達成するために必要な装置のマクロパラメータを与えるものであって、そのマクロパラメータを持つ装置が普通実現するエネルギー閉じ込め性能はその値を(上限付近に)含む様々な値をとります。このばらつき要因は、スケーリング則に現れる装置のマクロパラメータ以外に決定因子がまだ存在するということを意味します。それらは近い将来すべて明らかにされると思われませんが、主なものは、電流、密度、温度、電磁場などのプラズマ内分布であると考えられています。さらにそれら分布パラメータは、プラズマに対する制御とプラズマ自身の特性に依存しています。また核融合炉のプラズマでは、DT 燃焼によって発生した α 粒子(ヘリウム原子核)が自己を加熱しプラズマへの加熱のほとんど(ITERで約70

Intelligible Seminar on Fusion Reactors (4) Plasma Control and Diagnostics System: Kenichi KURIHARA.
(2005年 2月17日 受理)

%、核融合炉規模で約90%)を賄うようになるため自律性が増し、外部からの加熱の影響度が変わる可能性があります。

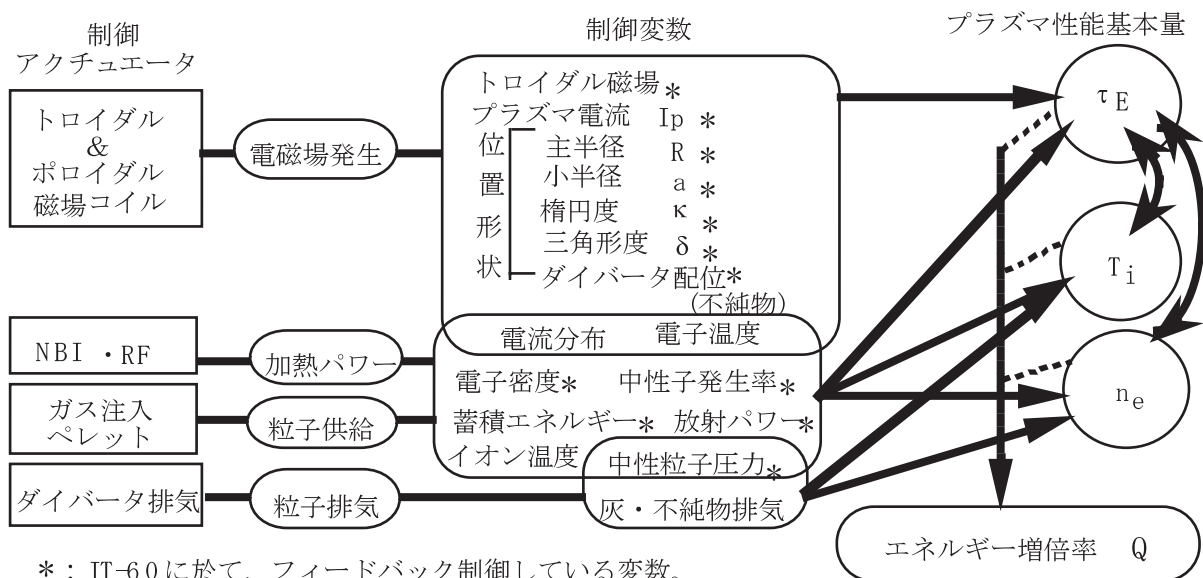
このように、トカマクプラズマの完全な解明へ課題を残していますが、基本的なパラメータの制御技術はほぼ方法論的に明確になりつつあります。本講座では、主要なプラズマ制御に関する技術レベルの現到達点について解説を試みます。また、制御用の各種パラメータを計測する機器の開発や計測データを基に物理パラメータを再構築する診断技術等の開発なども急速に進展してきましたが、紙面の関係で触れる程度に留めます。

・プラズマの制御と閉じ込め性能の関係はどうなっているのか？

核融合炉が核分裂炉と制御上最も大きく異なる点は、制御対象の数の多さとその出力制御のメカニズムです。核分裂反応の場合、投入エネルギーはほぼゼロとみなせる状況でエネルギーを発生させますから、あえて核融合と同様のエネルギー増倍率(Q値=出力パワー/投入パワー)を定義すればほぼ無限大であり、主として制御棒で反応速度を操作して出力パワーの制御を行う、いわばブレーキによる制御といえます。

これに対して、核融合炉では、プラズマにとってみた時の入出力パワーの比(エネルギー増倍率Q値)は、プラント内の環流エネルギー分が必要とされるので、 $Q = 30$ 程度以上を維持することが要求されています。このエネルギー増倍率が、エネルギー閉じ込め時間(t_E)、プラズマ密度(n_e)、プラズマイオン温度(T_i)の3つの積 $n_e t_E T_i$ の関数 $Q = C n_e t_E T_i / (D - n_e t_E T_i)$ と近似的に書ける(C, D は定数)ことから、まずこれらの値を制御しQ値を所定の値にすることが必要となります。次にその状態で投入パワーを操作して、核融合反応による出力パワーを制御しなければなりません。このように概念的には2段階の制御を同時に行うことになり少々複雑です(第1図参照)。

第1図についてさらに説明を加えます。エネルギー閉じ込め時間が加熱パワーの関数でもある上、密度、温度もパワーの依存性があるので、これらの総合結果としての出力パワー(中性子発生率)をフィードバック制御することになります。また、エネルギー閉じ込め時間(t_E)、プラズマ密度(n_e)、プラズマイオン温度(T_i)のプラズマ性能基本3指標は、第1図に示すように、いろいろなアクチュエータや関係因子の結果ですから、これら各因子をエネルギー増倍率を高める側に精度よく制御し、最終的



*: JT-60に於て、フィードバック制御している変数。

第1図 プラズマ性能基本3指標と制御変数との相互関係概要

制御変数が多数あることで、御覧のように図を複雑にしていますが、このように多数の変数がプラズマの性能に関係していることがプラズマの計測制御システムを考える時の重要なポイントです。これらを複数同時に調節してプラズマ性能基本3指標を向上させエネルギー増倍率Q値を大きくすることを狙います。(出典：関昌弘編、「核融合炉工学概論」、日刊工業新聞社、p.13(2001)図9.1を基に作成)

には核融合反応による出力パワーを制御することが求められます。

・プラズマ計測と制御の関係は？

プラズマ性能基本3指標に関係するプラズマ中の物理諸量は、第1図に示しましたように、総プラズマ電流のマクロ量に加え、プラズマ最外殻磁気面位置形状(単に位置形状と呼ぶ場合が多い)、プラズマ電流密度分布、電子密度(分布)、イオン温度(分布)、電子温度(分布)の分布量が最も基本的で、これらの複数の量に関係した核融合反応率(分布)あるいはマクロ的にはエネルギー増倍率は、炉の出力に直結する最終的な制御量になるものと思われます。

プラズマに作用を及ぼす制御アクチュエータは、プラズマを生成維持し高温・高密度・高閉じ込め状態にするための装置群です。制御アクチュエータは、それに強く感度を持つ状態変数を直接制御し、さらにそれら状態変数に感度を持つプラズマ性能基本量を目標とする数値に高めることで最終的には炉出力を制御することが目標です。

これらプラズマ制御に使用される諸量は、計測器で測定された信号を直接あるいはなんらかの計算処理をすることで求められます。プラズマ電流、コイル電流、ポロイダル磁場、ポロイダル磁束、トロイダル磁束といった電磁気計測が最も基本的な計測器です。この電磁気計測からプラズマ位置形状をはじめ平衡状態にあるプラズマ内部磁場分布などのプラズマの磁力線に関する重要な情報が求められます。

この電磁気計測に加え、密度、電子・イオン温度、核融合中性子発生率などの分布量、プラズマからの電磁波放射量、不純物量等とから、基本3量が検出あるいは計算されます。

これら諸量とそれらに対応する計測機器の例として、ITERにおいて、最も基本的なプラズマ制御と装置保護を目的とした計画を抜粋して第1表に示します。これらが最終的に核融合炉でも使用できるかどうかは、高速中性子の照射環境下での作動、定常放電時の静的な場での計測の2条件にパスするのですが、今後の研究開発を待つ部分もあります。

プラズマの制御方法について整理しておきます。核融合動力炉が実現した後の制御方法は、おそらく幾つかの運転パターンを選択するだけの洗練されたものになると思います。特に現時点ではまだ自由自在に制御することができない閉じ込め時間について

第1表 ITER計画においてプラズマ制御と装置保護を目的とした計測機器と対応するプラズマ諸量一覧

(最も基本的な計測器だけを示しています。より進んだ計測器を装着する計画もあります)

計測するプラズマの諸量	計測機器
プラズマ電流, プラズマ位置形状, プラズマ1周電圧ポロイダルベータ値 コイル電流値 電磁流体的振動モード, 鋸歯状振動	電磁気計測検出器 (磁場, 磁束, 電流, 電圧計測)
プラズマ電子密度(線積分) プラズマ放射損失パワー 核融合中性子発生率 トリチウム・重水素密度比 実用的原子番号, 不純物モニタ ダイバータ板温度, 損耗度 ダイバータ中性ガス圧力周辺プラズマと中性ガスとの相互作用 真空度 真空容器内監視 逃走電子	レーザー干渉計, 他 ポロメータ計測 フィッシュンチェンバ, 他 速波反射計 連続可視分光計, 他 反射計 圧力ゲージ 水素系列スペクトル計測 圧力ゲージ 可視/赤外テレビカメラ 硬X線計測

は、プラズマ内部の諸量との関係を明確にすることが最重要課題です。それに加えて、閉じ込め性能の劣化などプラズマの様々な変化に対応してアクチュエータの指令を調節して回復させたり、標準的な運転を逸脱した場合で調整が困難と判断された場合には、安全に停止させる機能も必要です。

・力学的平衡状態のプラズマ制御はどんなものか？

現状の実験装置では、プラズマは、着火、立ち上げ、フラットトップ(総プラズマ電流値が一定の時間帯)、立ち下げというように推移します。核融合炉では、プラズマ電流が維持されているフラットトップにおいて定常状態を保持することになります。

ポロイダル磁場(PF)コイルをアクチュエータとして、プラズマ電流と位置形状を制御対象に行う制御を「平衡制御」と呼びます。

プラズマ粒子は、磁力線に巻き付いて運動するという描像が成り立ちます。またプラズマの質量密度は常温気体の約300万分の1程度と極めて軽いので、運動方程式 $\text{grad } p - j \times B = \rho dv/dt$ (ここで、

$\text{grad } p$: プラズマ圧力勾配, j : プラズマ電流密度ベクトル, B : 磁束密度ベクトル, ρ : プラズマ質量密度, v : 速度ベクトル)の右辺の慣性項は, 左辺の圧力勾配や電磁力に比べて小さく無視できます。これは, プラズマの内部の各点でミクロ的な力学平衡状態が, 0.1 ms 程度の制御の時定数(コイル用電源の制御応答時間)で見ると, 常に成立していると近似できます。この物理的性質のために, プラズマ平衡状態の制御は磁力線の制御といえます。

しかし, 「平衡が常に成り立っているのに動特性はない」ということではありません。プラズマ中の力のミクロな平衡は成立している内部の動特性は無視できますが, マクロ的なプラズマの動きはその回りの磁力線が, 導体のコイルや構造材中を通過する過程で, 通過速度に応じて導体中に電流を励起するのでマクロ的な動特性を生じさせます。このときできる磁場はプラズマに対して移動を妨げる力を生じさせるのです。この導体中に励起される電流を渦電流^{a)}と呼び平衡動特性の重要因子です。

1. プラズマ電流制御

着火とプラズマ電流立ち上げを行うため, 真空容器中のトーラス周回方向の空間に印加される電圧を制御します。ドーナツ型のプラズマ中空部に磁束を供給しているコイルの電流を変化させて, ファラデーの法則(電磁誘導)で真空中に電場を励起します。具体的には, コイル電圧の時間変化波形(プレプログラム波形と呼ぶ)とおりコイル電源に指令し, プラズマ電流を急速に立ち上げます。JT-60の場合, 100 ms 程度で 1 MA 以上に立ち上げた後, 放電終了まであらかじめ設定したプラズマ電流目標値(プレプログラムに沿うように, フィードバック制御を行います。安定して流れるプラズマ電流の時定数は, おおよそ数秒という長いものなので, 高精度に制御することが可能です。なお, プラズマ電流分布の制御については後で触れます。

2. プラズマ位置形状制御

プラズマは, ポロイダル磁場がほぼゼロの点(ヌル点)となる真空容器内の領域に一定以上の強さの

電場が印加されると着火します。ポロイダル磁場が十分小さくないと, プラズマ電流が成長する前に種火の電子が磁力線に沿って壁に移動し消滅してしまうからです。ヌル点ができるように各 PF コイルに電流を流しておき, プラズマが着火の瞬間を迎えます。着火した後, 急速に放電が立ち上がっていくには, プラズマが内部の拡張力によって広がって壁に移動して消滅しないことが必要です。あらかじめ設定した位置形状目標値に追従するようにフィードバック制御を行います。

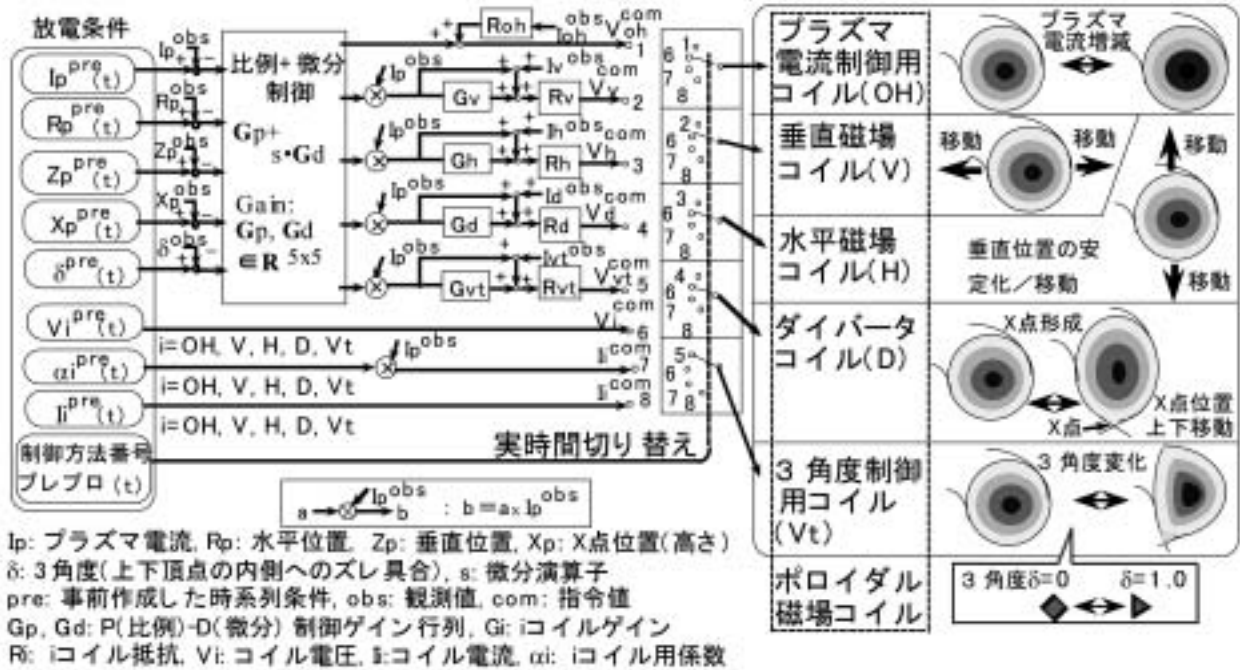
特に形状は, 第 1 図に示されているように, エネルギー閉じ込め性能を向上させる重要因子であることがわかっています。ダイバータ配位と呼ばれる真空容器から浮いた状態を作ったり, プラズマ断面の三角度を強めたりする制御を行います。

位置形状のマクロパラメータ例を, JT-60の場合を例に, その平衡制御系のブロック図とともに第 2 図に示します。少し複雑な図ですが, この図でほぼ完全な形で平衡制御の動作が読み取れますので, あえて簡略化せずに載せました。フィードバック制御手法は, 目標となるプラズマ電流・位置形状値と計測値との偏差に対する古典的な比例および微分(PD)制御です。基準値(少なくとも最低必要な量)はその瞬間での各 PF(ポロイダル磁場)コイル抵抗による電圧降下分を補償することで, 超電導コイルへのフィードバック制御と等価になっています。各 PF コイルは, 制御対象に対応していて, 第 2 図の右に示した動きを操作する磁場を発生させます。

コイル系全体の抵抗および自己インダクタンス, さらにコイル間の相互インダクタンスは時間変化しません。一方, プラズマ自身の自己インダクタンス, プラズマ・コイル間の相互インダクタンスは時間変化しますが, その変化の時定数は秒オーダーであり, 制御周期の ms 程度に比べ極めてゆっくり変化するので, プラズマおよび PF コイルからなるシステムは線形と見なせます。これにより, 多変数線形フィードバック制御手法が適用でき, システムの構造としては, 比例・微分ゲインは第 2 図の上の四角のブロック内に示された行列形式になります。

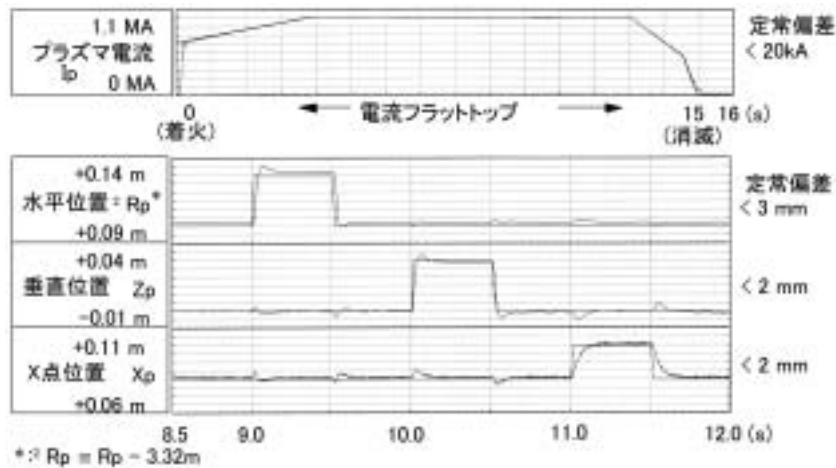
第 3 図に, JT-60におけるプラズマ電流と各位置形状マクロパラメータの制御性能(パルス応答)を示します。位置の時定数もコイルの時定数でこの図からも極めて高い制御特性であることがわかります。このような高い制御精度に加え, 運転上の高い柔軟

^{a)} 磁束の変化で導体中に電場が誘起され, 電流が流れるが渦のように環流電流となって巡ることからこう呼びます。



第2図 平衡制御系のブロック図と各制御動作との対応(JT-60の場合)

ここでは5種類のPFコイルが用意されていて、それぞれ制御パラメータにおおよそ1対1対応しています。図の左の上の方の5つはマクロパラメータです。その下の指令値は、プラズマの着火、立ち上げ時などコイル電流や電圧を直接制御するような場合に使います。図中でプラズマ電流との積をとる信号が多いのは、基本的にはコイル電流はプラズマ電流に比例するからです。この図は略図ではありません。このような道具立てで平衡制御が精度良く実現できています。(出典：関昌弘編、「核融合炉工学概論」, 日刊工業新聞社, p.135(2001) 図9-2を転載)



第3図 標準的プラズマ電流制御性能及び各位置形状マクロパラメータのステップ応答制御性能(JT-60の場合の制御目標値と実測値との重ね描き)

プラズマ電流は目標波形と実験とがあまりに一致して違いがほとんど判らないほどです。下の3図は同じ放電の同じ時間です。過渡期にオーバーシュートが見られますが、すぐに整定しています。(出典：関昌弘編、「核融合炉工学概論」, 日刊工業新聞社, p.136(2001) 図9-3を転載)

性、再現性を確保するために、高速デジタル計算機から成る制御システムが研究開発され、最短0.25ms周期でフィードバック制御を実行しています。

・プラズマ形状や電流分布をどう知りどう操るのか？

すでに触れましたが近年、この平衡制御が次の2つの理由から核融合開発上、最重要視されてきてい

ます。第1の理由は、プラズマをダイバータ配位にしたり、三角形度を上げるとプラズマのエネルギー閉じ込め性能が上がるということが実験的に確認されてきたことです。第2の理由は、負磁気シア放電と呼ばれる凹状電流分布を持つプラズマを生成すると、内部から外部に向かう熱エネルギーの流れが、電流密度がピークとなる付近で急激に遮られ、内部に高いエネルギー閉じ込め領域が生成されることが実験的に確認されてきたことです。

これを確実に実現するには、まずプラズマの断面形状を瞬時に把握することが重要な課題となります。JT-60ではすでにプラズマ断面形状を0.5 ms周期で再構築するシステムが稼働しています。プラズマの断面形状を計算するには、電磁気計測器で磁束、磁場を測定し、これらとポロイダル磁場コイル電流とを条件として、軸対称電流場の偏微分方程式を解くこととなります。JT-60では高精度に計算するために、解析解を用いて電磁気計測データに適合するように未定係数を決定するという方法で解を構成し、0.5 ms周期の実時間制御で実用に供しています。断面形状が把握できるため、プラズマと壁との距離など幾何学的諸量がすべて制御対象にできるようになり、実験の柔軟性も著しく増しました。

電流分布の再構築と制御は、まだホットな研究開発領域です。形状と同様に早く精度よく求め、それを基に希望とする凹状分布などの分布に、電流駆動装置によって、フィードバック制御することが必要です。これまで凹状分布を持つ負磁気シア放電は、実験上の手順の工夫で実現されています。すなわち、プラズマ立ち上げ直後にNBI加熱によりプラズマの電気伝導率を上げて(注：プラズマは温度を上げると抵抗が下がるという性質があります)おき、そこでプラズマ電流を急激に立ち上げることで、中心部分へのプラズマ電流の浸み込みを遅らせて、過渡的に外側に電流密度の高い領域を有するプラズマを生成させます。このプラズマにNBI加熱を行ってプラズマ内部にエネルギーを蓄積させるという方法で、JT-60では世界最高となるエネルギー増倍率 $Q = 1.25$ を短時間達成しています。

JT-60では昨年、低域混成波という周波数帯の高周波により、指定した場所に電流を流して電流分布を制御する実験が本格的に開始されました。また、電流分布を高精度に再構築する方法としても、電流と磁場との掛算が力であるため、必然的に非線形と

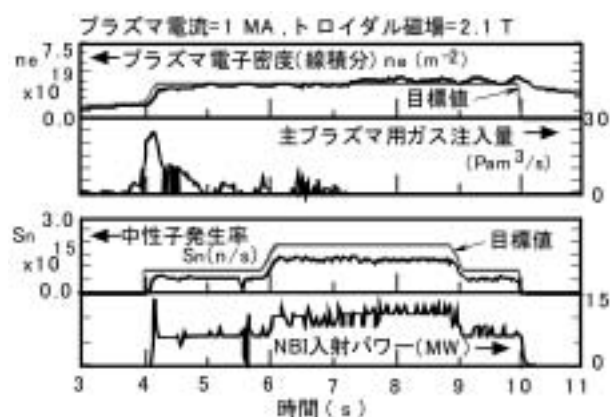
なる平衡条件下での電流分布の解法を開発し、JT-60体系で良好な結果が得られています。ここ数年以内ぐらいで、思い通りに電流分布を制御することが可能となると思われます。以上見てきましたように、高性能プラズマの生成には平衡制御系が重要な役割を果たしています。

密度制御、核融合反応率(中性子発生率)制御などの方法は？

プラズマ性能基本3指標の一つであるプラズマ密度は、高いプラズマ密度が高性能プラズマを実現するために必要です。マイクロ波やミリ波をプラズマに入射し、少し波長の異なる波とのビート信号の位相変化からコードに沿ったプラズマ電子密度の平均値が計測されます。この制御方法は、主プラズマ部への燃料ガス(重水素、トリチウム)注入量を操作して、予定の密度波形に一致するようにフィードバック制御をかけるというシンプルなものです。

「核融合反応率(中性子発生率)制御」は、将来の核融合炉における出力制御に対応するもので重要です。制御方法は、中性粒子入射装置(NBI)のパワー(=入射ユニット数)を操作して、プラズマイオン温度の上昇による中性子発生率が、予定の時間変化プロプログラム波形に一致するようにフィードバック制御をかけます。

また、JT-60放電において、プラズマ密度、核融合反応率(中性子発生率)制御の2つの制御を同時に行った様子を第4図に示します。



第4図 プラズマ密度、中性子発生率の同時フィードバック制御(JT-60の場合)

上がプラズマ密度、下が中性子発生率の制御結果です。それぞれの2段の上段が、目標値と制御結果の重ね描き、下段は、フィードバック制御の結果であるアクチュエータの時間変化です。

定常炉を目指す場合、ポロイダル磁場コイル(プラズマ電流制御用コイル)による誘導電場(磁束を変化させて誘起される電場)を用いずに定常的に電流を駆動することが必要です。この非誘導電流駆動を実現するアクチュエータとして、高周波 RF 加熱装置および負イオン源中性粒子入射(N-NBI)加熱装置が考えられています(1月号掲載の第 4 章参照)。また、プラズマ中を強力に加熱すると、プラズマの外側から中心に大きな圧力勾配が生じ、そこに自発電流(bootstrap current)が流れますが、この割合を増やすことで外部からの直接的な電流駆動分を減らすことも重要な視点です。

・異常時のプラズマ停止制御や不安定性回避制御の技術レベルは？

核融合炉の実現に向けた基本要素の一つは安全性です。なんらかの異常時に安全にプラズマを停止させることが必要です。JT-60では、プラントの異常でも制御系が健全であるような時には、加熱等のエネルギー注入装置を停止させ、平衡制御系を用いて直ちにプラズマ電流を立ち下げます。

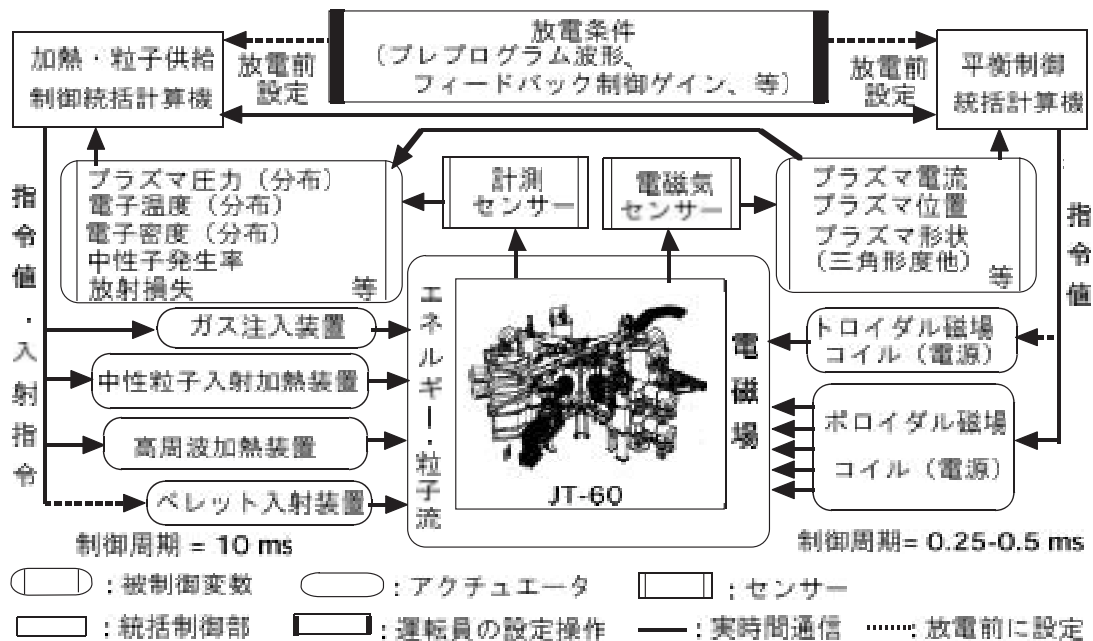
次に制御系・コイル・電源が異常な場合やプラズマ自身が異常の場合には、位置形状の制御が健全で

ある限りプラズマと壁との接触をしないように制御して、プラズマのエネルギーをプラズマ自身やコイルの抵抗発熱で徐々に解放するようにします。ディスラプションの中でも比較的遅いものは、できるだけプラズマの磁気エネルギーを回生するために、減少するプラズマ電流に合わせてプラズマ電流制御を最後まで実行します。

ディスラプションが発生する前には、通常プラズマ不安定性と呼ばれる現象が内部で成長し、磁力線の幾何構造の変化が進行していると考えられます。したがって、そのような不安定性現象を発生させないか、発生したとしても成長する前に消滅させることが必要です。これまで内部の電子温度揺動を捉えてその点に高周波を入射するなど、回避制御の試験が開始され、良好な結果が得られています。

・計測制御システムはどう作るか？

ここまで、核融合炉における主要な制御要素について述べてきました。平衡制御および幾つかのマクロ量の制御について、精力的に研究開発が行われた結果、現在、高精度の制御が実現しています。これを踏まえて、計測制御システムの構成を示します。プラズマ制御の対象となっている諸量は、最外殻磁



第 5 図 計測制御システム構成図例(JT-60)

右側が、平衡制御系で数100マイクロ秒周期で、左側が、加熱粒子制御系で10 ms 周期で実時間フィードバック制御が行われます。計測制御のポイントは、プラズマ内部の分布量の計測や推定手法、フィードバック制御ロジック、プラズマ着火から目標の性能発揮までのプラズマの制御シナリオ、などです。残る研究開発課題の解消に向けた努力が今後も継続されます。(出典：関昌弘編、「核融合炉工学概論」、日刊工業新聞社、p.41(2001 図4.1を転載)

気面位置形状, プラズマ電流(分布), プラズマ密度(分布), 中性子発生率(分布), 電子温度(分布), イオン温度(分布), プラズマ回転(分布)等であり, これらの複合した結果であるエネルギー閉じ込め時間も想定されます。これらを直接, 間接的に計測する機器が必要となります。制御アクチュエータは, 磁場コイル, 中性粒子ビーム, 高周波, 燃料ガス/ペレット等です。これらの各機器と制御用計算機を繋げ, その計算機に上述の各種方法(再構築, 制御, 他)をおおむねそのまま使用したシステムを構成すれば, 核融合炉の計測制御システムの基本となります(第5図参照)。

今後, 実験によって各種計測制御手法の改良が進むと思われます。ITERなどで核燃焼実験が行われると, DT反応で発生する3.5 MeVの α 粒子の挙動が明確になり, 燃焼制御方法が試験されます。また, 不安定性回避制御ではプラズマの理解が一層進み, 完全回避に向けた制御機能の拡充が図られると思われます。さらに発電ブランケットなど機構が装着された場合, 発電プラントにおける計測制御システムの全体像が見えてきます。このような各開発段階で, 基本システムに修正や改良を加えることで, 最適な核融合炉の計測制御システムが確立されていくものと考えています。

〔付録〕

実験データの整理の仕方としては, 同様の物性値を扱ってきた流体力学の解析にならって, 各パラメータのべき乗で構成される項の積形式であると仮

定しました。この式に, これまで運転されてきた世界のトカマク装置のデータを当てはめ最小2乗処理で, 式中の未知数であるべき乗数を決定することにより経験則(「スケーリング則」と呼びます)を導いています。下に国際熱核融合実験炉ITERの設計で使用しているエネルギー閉じ込め時間 τ_E の式を示します。

$$\tau_E = 0.0562 I_p^{0.93} B_T^{0.15} P^{-0.69} n_e^{0.41} M^{0.19} R_p^{1.97} \varepsilon^{0.58} \kappa^{0.78}$$

ここで, τ_E : エネルギー閉じ込め時間(s)

I_p : プラズマ電流(MA)

B_T : トロイダル磁場(T)

P : 加熱パワー(MW)

M : 燃料ガス元素の質量数

n_e : 平均電子密度(10^{19}m^{-3})

R : 主半径(m)

ε : 逆アスペクト比(= a/R , a : 小半径, 短径),

κ : プラズマ断面形状の非円形度(= 長径/短径)

スケーリング則は, 各装置で実際に達成されたデータの組みを基に導いていますが, その性能を確実に実現する運転シナリオが確立されなければならず, その課題の解決は現実装置においても最重要といえます。

著者紹介

栗原研一(くりはら・けんいち) 本誌, 46(12) p.852 参照。