

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

2. 制御目的と制御対象

鎌田 裕

日本原子力研究開発機構

(原稿受付：2010年7月8日)

原型炉では、求められる総合的性能を有するプラズマを高い信頼性で定常的に維持する必要がある。そのためには、自律・複合系を成す燃焼・高ベータプラズマシステムにおいて、その制御応答特性を理解し、運転限界・運転裕度・制御範囲、アクチュエータおよび被制御量・モニタ量、制御ロジックを適切に選択し、計測・予測・制御・判断を必要な時定数で行う必要がある。その研究開発の方向は、高度な科学が支える制御の簡素化である。

Keywords:

high-beta burning plasma, integrated performance, real-time control, self-regulating combined system, profile control, control actuators and diagnostics, plasma control logic

2.1 はじめに

本小特集の導入として、この章では、どのようなプラズマを対象として制御を行うのか、その課題は何か、そしてどのような方向で研究開発を進めていくのか、について読者の方々と一緒に考えてみたい。そして、ITER[1]という燃焼プラズマシステムやJT-60SA[2]という高ベータ高自発電流プラズマシステムを用いて、原型炉[3]に向けてどのようにプラズマ制御を確立していくのかについての議論の端緒としたい。

2.2 制御の目的

原型炉では、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る。図1は、この総合性能を7つの指標で表したものである。即ち、

- A) 閉じ込め改善度が高い：核融合出力の上昇
- B) 規格化ベータ値（圧力指数）が高い：コンパクト化
- C) 自発電流割合が大きい：循環電力低減
- D) 非誘導電流駆動割合が大きい：定常維持
- E) 密度指数が高い：出力上昇とダイバータ熱負荷低減
- F) 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
- G) 燃料純度が高い：核融合出力の確保

である。これら各々の要素性能が最適となる条件は異なるが、プラズマシステムとしては、その全体を如何に高い次元で統合・最適化できるかが鍵となる。このような、高い総合性能を、十分な信頼性で定常的に維持することが制御の目的である。そのためには、上記A～Gに関わる運転限界・裕度を明らかにし、被制御量と制御手段（アクチュ

エータ）を決め、プラズマの応答特性に基づいた制御ロジックを選択する必要がある。

2.3 運転限界・裕度・制御範囲の設定

原型炉において、燃焼度が発散的に増大・減少したり、周期変動しては炉は成り立たないことは言うまでもないが、加えて重要なことは、ディスラプションのようなプラズマに崩壊を生じさせる運転限界に触れることなく裕度を保ちつつ制御を行うことである。さらに、何らかのアップノーマルイベントが発生した場合であっても、ディスラプションを回避したり、あるいは緩和するに十分な迅速な制御性、あるいは停止するか回復をめざすかの判断力も備える必要がある。このような実時間制御の考え方を図2に示す。我々が制御の対象とする量（被制御量）には、運転限界（上限あるいは下限）がある。その限界には、プラズマの崩壊（ディスラプション等）や遷移で決まる限界と、一

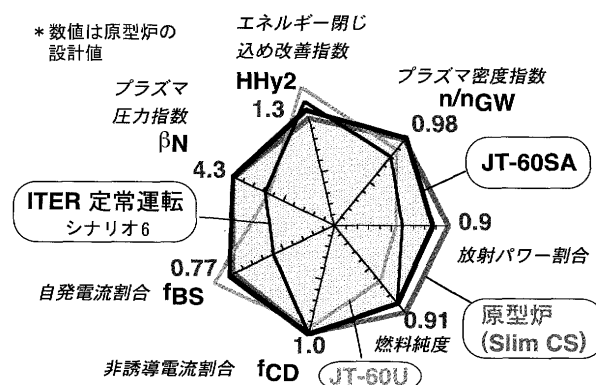


図1 原型炉 (Slim CS) で必要な総合性能と ITER, JT-60SA の目標例、および JT-60U での同時達成値。

定時間内での積分値（第一壁やダイバータ熱負荷等）で決まる限界がある。そして、その限界に対する運転裕度の範囲内に、制御目標値（中心値）と制御範囲を設定することになる。ここで大切なことは、このような運転限界と運転裕度はプラズマ諸量の関数であり、また、制御範囲はプラズマの応答特性を勘案して決定すべきものであるということである。そして、ある基準を設けて「判断（例えば、停止）」を行う必要がある、そのためには、実時間でその時点での状態を評価して次のプラズマの振る舞いを予測する「実時間予測機能」が不可欠である。このような「計測・予測・制御・判断」を、定常状態に加え、出力（燃焼度）の増減時やプラズマの立ち上げ・立ち下げ時等の過渡状態を含めて行うわけである。その際、重要な事柄は、我々の対象とするプラズマが、以下に記すような自律・複合系を成すことであり、その制御は、本質的にプラズマ諸量の空間分布制御であることである。

2.4 自律・複合系

プラズマの温度、密度、回転速度、プラズマ電流等は、空間的に一様ではなく、分布を持つ。原型炉プラズマに必要な総合性能を獲得し、それを維持するためには、このようなプラズマ諸量の分布をセットとして適切に制御することが不可欠である。例えば、分布の違いによって、燃焼度（エネルギー増倍率）は1桁変化する。炉心プラズマ制御の考え方を図3に示す。最適化の制御をしなければならないパラメータは、電流、圧力、回転および密度等の空間分布である。重要なことは、これらの分布が互いに独立ではなく、プラズマ中の諸法則（構造の自己形成も含めて）により従属的な関係、即ち自律性を持つことである。例えば、電流分布は輸送を左右し、また特徴的な圧力分布型を自己形成する。同時に（逆に）、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る。また、圧力分布に応じて発生するアルファ粒子加熱の分布は、温度分布（圧力分布）を決定する主要要因である。同時に、圧力はプラズマ中に自発回転を発生させ、その回転の変化が輸送やMHD安定性を左右する。このような分布制御は、高ベータ高自発電流割合のプラズマにおいて一層重要となる。基本的

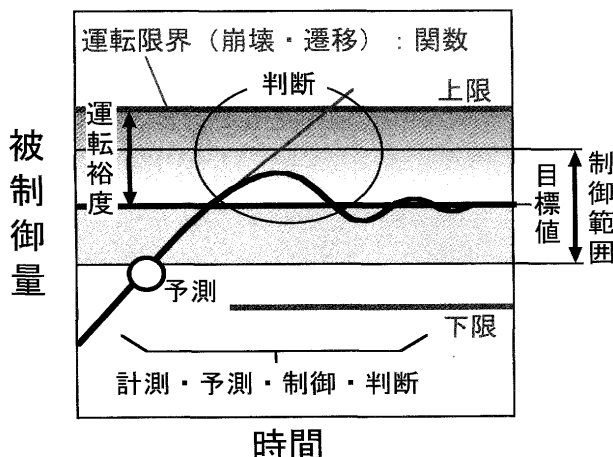


図2 実時間制御の考え方。

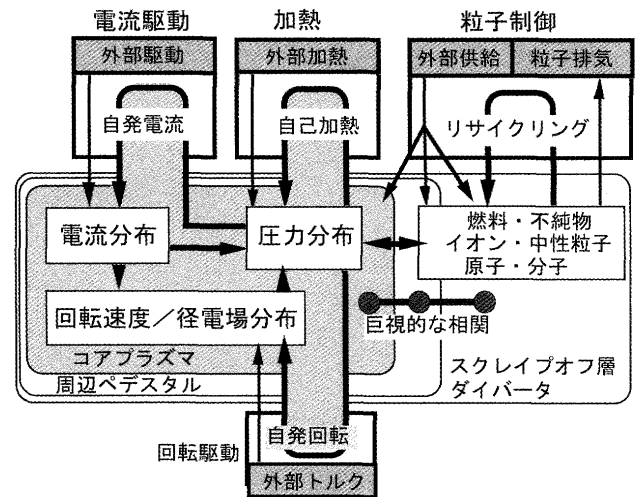


図3 プラズマ制御模式図。

に、ベータ値が高まるほど、分布間の相関が強まる一方、特に電磁流体力学的安定性の観点から規格化ベータ値や自発電流割合が増加する程、精密な分布制御の必要性が高まるからである。ヘリウム灰やその他の不純物の量と分布も所定の燃焼度を確保する上できわめて重要な制御対象である。燃料や不純物の密度は、さらに主プラズマとダイバータ性能（熱・粒子排気）との整合性確保の観点からも制御する必要がある。

「分布」は、主プラズマのみに留まらず、その外側のスクレイプオフ領域からダイバータ領域に至る全体的な分布として捉える必要がある。その一つの理由は、プラズマ中には、大域的な連関性（複合性）が存在するからである。例えば、プラズマの輸送を決める乱流はプラズマ半径方向に長い相関距離を有しており、コアプラズマと周辺プラズマは連動して変化する。プラズマ周辺状態に起因して定常的に存在するELM等の周期的脈動も周辺プラズマとコアプラズマを「混ぜる」。即ち、周辺プラズマは、単に局所輸送が決定する系の境界条件という以上の意味を持つ。そして、この周辺プラズマは、スクレイプオフ領域・ダイバータ領域と、プラズマ過程及び原子分子過程を含む強い関連を持つ。複合性のもう一つの意味は、電子系の揺動、イオン系の揺動、MHD不安定性の揺動等の階層が複合して全体の分布を決定するということである。プラズマは本来非線形系であり、したがって、非線形制御が基本であるが、制御量や被制御量も含めてその制御マトリックスを決定する上で、このような自律性と複合性がきわめて重要な視点となる。その際、この自律・複合性を難しさと捉えるのではなく、これを逆手に取って利用し、有効な制御手法を見つけていくことも大切な視点である。

2.5 被制御量とモニタ量の選択

我々が行う制御の種類としては、

- ・常時必要な制御：
 - 例) 燃焼度
- ・過渡状態のみ必要な制御：

例) プラズマ電流立上・立下

・ Event 発生時のみ必要な制御:

例) disruption 回避・緩和

があり, また, 能動/受動制御の別がある.

・ 能動制御: 例) 燃焼度, 電流分布

・ 受動制御: 例) 導体壁安定化

これらを組み合わせ, 信頼性の高い制御システムを構築することが大切である. 特に, 原型炉という観点では, 制御に必要な電力の最小化, 計測・アクチュエータの合理的簡素化が重要である. 例えば計測に関しては, 必要なトリチウム増殖比 (TBR) を得るために必要なブランケットの占有面積 (体積) が重要な制限要素である. 現在日本原子力研究開発機構で行っている原型炉の設計では, TBR を確保するためには, 第一壁表面積 $800\text{--}900\text{ m}^2$ の内必要なプラズマ計測に使用出来るのは 5 m^2 以下であると言われている. その意味で, 被制御量やプラズマ状態の評価に必要な計測量 (モニタ量) はミニマムなセットとしなければならない.

被制御量として確実に必要なものとしては, 核融合出力 (中性子), プラズマ平衡 (プラズマ電流, プラズマ位置形状, 周回電圧等), 安定性 (ベータ値, 密度), 第一壁熱負荷である. 一方, 被制御量あるいはモニタ量として選択を考えるべきものには, プラズマ電流分布, 温度 (イオン, 電子) 分布, 密度分布, 回転速度分布不純物種とその分布, 放射パワー分布, 磁場揺動等がある. これらを, どのような空間・時間スケールで計測するのか, また, その内何を被制御量とするのか, これらをすべて計測する必要があるのか, 等を決定しなければならない. 図 4 に, 代表的なプラズマ現象の時間スケールと空間的スケール (プラズマ半径方向の広がり) を示す. 時間スケールはマイクロ秒のオーダーから ~ 100 秒のオーダーに広がりを持ち, 空間的にも小半径の 100 分の 1 以下の局所的なものから小半径程度の大域的なものがある. そして, これらの諸現象が複合的に

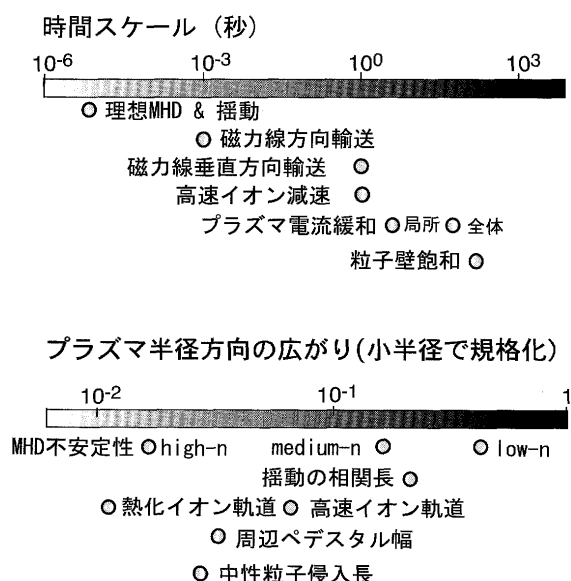


図 4 プラズマ現象の時間スケールと空間的広がり.

関連している. プラズマ現象の物理機構の理解のためには, このような幅広い時間・空間スケールでの計測が不可欠であり, そのような計測の進展が核融合プラズマ研究を拓いてきた. しかしながら, 原型炉に必要な計測は, このようなセットではない. 原型炉では, それに必要なプラズマ物理の理解は既に完了しているべきであり, 被制御量およびモニタ量として必要な最小限のセットの計測を実施することとなる.

2.6 外部アクチュエータと制御時定数

磁場による基本的な平衡制御に加えて, プラズマ制御に用いる外部アクチュエータとして想定されるのは,

A: 加熱 (中性粒子ビーム (NB) 加熱, 高周波 (RF) 加熱)

B: 電流駆動 (NB 電流駆動, RF 電流駆動)

C: 回転制御 (NB 運動量注入, RF 印加, 誤差磁場印加等)

D: 粒子制御 (燃料ガスパフ, ペレット, 不純物ガス, 不純物ペレット, 排気量)

E: 磁場制御 (誤差磁場印加等)

である (表 1). これらと被制御量との関係は, アクチュエータの入力が外部ソースとして直接に制御する部分と, 自己加熱・自発電流・自発回転等を媒介して制御する部分との組み合わせとなる. これらを用いて制御を行うわけであるが, 大切なことは, 各々のアクチュエータの特長を最大限に利用して, これを組み合わせることである. 例えば中性粒子ビーム入射は, 加熱, 電流駆動, 運動量注入の 3 者の機能を同時に持つ. これは, 特定のパラメータ (例えば, 温度, 電流, 回転) の独立制御は難しいが, 一方で, この 3 者を複合して制御できる利点があるとも言える. 要点は, 結果として得られる「温度・電流・回転」のセットが適切であるよう設計することである. 一方, 局所制御性の観点からは, 電子サイクロトロン (EC) 加熱・電流駆動・回転駆動が適している. その代表例は, EC 電流駆動による新古典テアリングモードの抑制であるが, これは上記のようなセット制御というよりも, 「単一目標の制御」である.

加えて重要な事柄は, 「外部制御の割合」を, どの程度に設定するかである. 現在までの実験 (例えば JT-60U) では, プラズマの加熱は中性粒子ビーム等の外部加熱で行い, その下で電流分布等, 上記の分布制御を行ってきた. しかしながら, 今後制御しなければならない燃焼プラズマでは, そのときの温度や密度の分布に従って, プラズマが自らを加熱する系となる. 現在想定する原型炉では, DT 燃焼による自己加熱パワーが 80–90% 以上を占めるため, 加熱分布の大部分はプラズマが自ら決定する. また, 自発電流割合が 70–80% を占め, 電流分布もプラズマが自分で決める割合が大きい. 換言すれば, このような自律系の分布を, 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ことになる (図 5).

このような「自発割合」を, 何処に設定するかはきわめて重要な思想である. 自発割合の増加は, 制御に必要な電力を低減する等原型炉の合理化にとって必要不可欠ではあるが, 一方で制御裕度の低下を意味するからである. 即

ち、どこまで小さな外部入力で「上手に制御できるか」は、原型炉の経済性の向上に必須の研究課題である。具体的には、ITER のエネルギー増倍率 $Q = 10$ のプラズマ制御の実績から原型炉の $Q = 30 \sim 50$ プラズマ制御の予測を行うこと（図 5 (a)）、JT-60SA において原型炉で想定する自発電流割合 70~80% での高ベータプラズマ制御を実証すること（図 5 (b)）、そしてこれらを組み合わせて「燃焼・高ベータプラズマの制御」を構築することが我々が今後行うべき事柄である。その際、燃焼プラズマ (ITER) と高ベータ高自発電流プラズマ (JT-60SA) の両者のプラズマの振る舞いを統合して理解し、原型炉の予測を可能とするモデリングの開発が不可欠であり、そのモデルを用いて原型炉のプラズマ制御を構築することになる。

各分布が変化する時定数は異なる。原型炉の領域では、温度、密度、圧力、回転等は数秒から10秒程度、電流は100秒程度の時定数である。炉心プラズマの最適化のためには、上に述べたように各分布をセットとして最適化する必要があるが、それぞれの分布が発展する時定数が数オーダー異なる。これを上手に利用し、時定数領域で階層化し、各領域で適切なアクチュエータとロジックを選択することが重要である。その意味で、プラズマの温度や密度という燃焼や安定性（ベータ値）に直結する分布変化を決定する「エネルギー閉じ込め時間の時定数」での制御は大変重要である。この制御では、粒子供給・排気による燃料密度制御が主体となる。なぜならば、時定数の長い電流分布制御では追いつかず、また、原型炉では外部加熱割合が小さいために加熱制御の範囲が限定されることからである。しかしながら、密度制御は同時に第一壁の健全性確保に必要な放射パワー制御の主役でもあるため、「エネルギー閉じ込め時間の時定数」での制御アクチュエータを粒子供給・排気のみで賄えるか否かは大きな課題である。もし別のアクチュエータが必要な場合には、この時定数で変化する回転分布制御に大きな役割を期待することとなる。

2.7 制御の簡素化

以上に述べたように、燃焼・高ベータプラズマの制御を確立するため、我々は「求める総合性能」、「自律・複合性」、「外部制御割合・時定数」を考慮し、アクチュエータ、被制御量および制御マトリックスを決定していくことになる。その際、「炉」という工学システム概念、即ち実用の観点が重要であり、ミニマムな計測とアクチュエータのセットで評価・判断・制御を実現しなければならない。

例えば、表 1 に記した磁場印加手法は、周辺局在化モード (ELM) や抵抗性壁モード (RWM) の制御に有効であるが、プラズマに近い領域に制御用コイルを設置しなければならない。このような制御手法は、ITER・JT-60SA 世代までは研究開発に有効な手段であるが、最終的に原型炉でこのような磁場印加を行うことは非常に難しい。そのため、ELM の小振幅化は磁場印加ではなく、JT-60U で見いだされた Grassy ELM (プラズマ断面の三角形度が高い場合に発生) のように自然に発生する小振幅 ELM を利用すべきである。また、RWM については、プラズマ回転を安定化

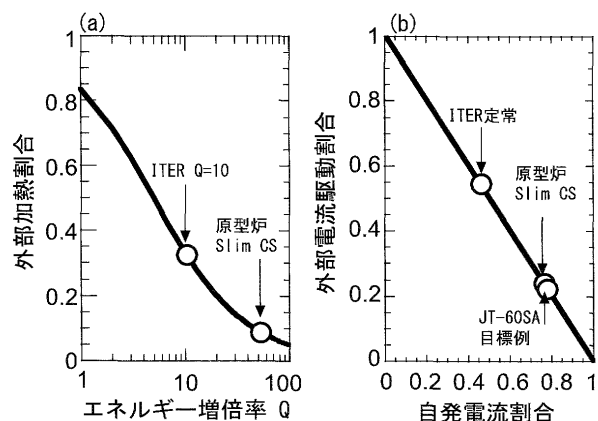


図 5 (a)エネルギー増倍率と外部加熱割合、(b)自発電流割合と外部電流駆動割合。

表 1 アクチュエータと被制御量。

		NBI	RF	ガス、ペレット	排気	磁場印加
直接分	加熱	○	○			
	電流駆動	○	○			
	回転制御	○	○			○
	粒子制御	△		○	○	○
	磁場制御					○
媒介分	自己加熱	○	○	○	○	○
	自発電流	○	○	○	○	○
	自発回転	○	○	○	○	○

に必要なしきい値以上に維持することによって、磁場印加なしであってもこれを安定化し、高ベータプラズマを維持することが重要である。一方、プラズマ回転制御を積極的に行うべきか否かに関しては、今後詳細な検討が必要である。プラズマ回転はRWMの安定化に必要であるが、もし、自然に発生する回転（自発回転）がその安定化しきい値以上であれば、RWMの安定化に関しては積極的な制御は行なう必要はない。その場合、前節末尾に記したようにエネルギー閉じ込め時間スケールでの制御手段としての回転分布制御の必要性が重要な判断基準となる。また、プラズマ諸量の空間分布に関しても、どこまで詳細な計測が必要かを判断する必要がある。

以上のような、原型炉に向けた「自律系プラズマの制御とその簡素化」は、これまで我々が行ってきた炉心プラズマ研究とは、質的にあるいはアプローチとして異なるものになる。ITERにおいては、まずそのミッションである $Q = 10$ の実現のためにすべての詳細な制御を動員することになるであろうことを考えると、JT-60SA において、この「自律系プラズマの制御とその簡素化」を成就することが大変重要である。

2.8 おわりに

以上、本小特集の導入として、自律・複合系を成す燃焼・高ベータプラズマシステムにおいて、目的とする高い総合的性能を維持するために必要な制御手法の研究開発課

題を述べた。運転限界・運転裕度・制御範囲、アクチュエータおよび被制御量・モニタ量、制御ロジックの選択や、計測・予測・制御・判断の確立等、挑戦を続けていくべき研究開発の宝庫である。「一を聞いて十を知る計測」と「ツボを押せば全身が健康に保たれる制御」が究極であるが、そのような簡素化をめざす制御の確立には高度な科学とその実証が必要であり、ITERでの燃焼プラズマ制御とJT-60SAでの高ベータ高自発電流プラズマ制御研究、そしてこれらのプラズマの振る舞いを統合して理解し実時間予測を可能とするモデリングの開発、これらを組み合わ

せ、原型炉に向けて燃焼・高ベータプラズマの制御を実現していくことが大切である。

参考文献

- [1] 'Progress in the ITER Physics Basis', Nucl. Fusion 47, S1 (2007).
- [2] Y. Kamada *et al.*, J. Plasma Fusion Res. SERIES Vol.9, 641 (2010).
- [3] K. Tobita *et al.*, Nucl. Fusion 49, 075029 (2009).