

3.4 プラズマの形状を決める

3.4.1 はじめに

トカマクプラズマの性能(エネルギー閉じ込め時間, MHD 安定性等)は, プラズマ断面形状に依存することが理論的に推測され, 実験でも実証されている. 従って, トカマク型核融合炉ではプラズマ形状制御が性能向上の為の基本的条件となる. またトカマクは原理的に鎖交磁束の変化によってプラズマ電流を誘起してプラズマを維持する為, 非誘導電流駆動が援用されるとしても, 何らかの鎖交磁束変化機能は不可欠である. ポロイダルコイル(ポロイダル磁場を供給するためトロイダル方向に巻かれる)は, 上記2機能を達成する為に設置され, トカマク型核融合炉設計の基本要素となっている. 本節では, プラズマ性能を向上するために望ましい平衡形状を達成する為に必要なポロイダルコイルの要件, 設計手法についてについて上記の2要素を勘案しながら記述する.

トカマクプラズマの性能向上には, プラズマの楕円度 κ と三角度 δ の増大が有効である. 楕円度は, プラズマ断面の垂直方向サイズと水平方向サイズの比で定義される. 三角度はプラズマ断面の頂上の大半径位置からずれと小半径の比で定義され, 内側へのずれを正とする. トカマクプラズマの電磁流体的安定性を記述する基本的な指標として安全係数がある. 任意の磁気面(ポロイダル磁束 Ψ)の安全係数は次式で定義される.

$$q(\Psi) = \frac{F}{2\pi} \oint_{l_p} \frac{dl_p}{R^2 B_p}$$

$$F = RB_T$$

ここで周回積分は磁気面上でポロイダル方向に1周することによって行う. R は積分点の大半径, B_p はその点でのポロイダル磁場, B_T はトロイダル磁場である. 最も重要な値はプラズマ表面(ダイバータプラズマでは 95%磁気面の値で代用することが多い)での値で, ポロイダル磁場がプラズマ電流で表示できるため下記のように近似できる.

$$q_a = \frac{2\pi}{\mu_0} \sqrt{\frac{1+\kappa^2}{2}} \frac{1}{A} \frac{aB_T}{I_p}$$

ここで a はプラズマの小半径, A はアスペクト比(プラズマ大半径と小半径の比)である. 通常, トカマクではプラズマ表面での安全係数を 2.5 以上に設定する. 即ち一定のトロイダル磁場とアスペクト比に対してプラズマ電流の上限が存在する. プラズマの楕円度が大きくなればその分プラズマ電流を増大できる. アスペクト比はトカマク炉の設計思想によって異なるが, 凡そ 2.5 から 5 の範囲であり, トロイダル磁場の大きさは工学的な制限があるため, 楕円度とプラズマ電流がほぼ一意的に安全係数の大きさを決定していると見なしてよい.

ところでプラズマの経済性能の指標となるトロイダルベータ値(プラズマ圧力と真空トロイダル磁場圧力との比)の最大許容値は, 規格化ベータを用いるとプラズマ電流に関連して下記のように表示できることが, 実験結果や MHD 安定性のシミュレーションで分かっている.

$$\beta[\%] = \beta_N \frac{I_p [MA]}{aB_T}$$

規格化ベータ β_N の値は H モードで 2.5 程度, 先進的プラズマの場合で 4.0 程度の値が採用される. 上式と安全係数の式を結合すると次式が得られる.

$$q_a \beta[\%] = 5 \sqrt{\frac{1+\kappa^2}{2}} \frac{\beta_N}{A}$$

上式は安全係数およびベータ値の何れの増大にも楕円度を増大することが有効であることを示している. 三角度の増大は, 安全係数の増大に若干寄与すると同時にダイバータプラズマに於けるダイバータ板への熱負荷増大の1要因である ELM 抑制に効果的であることが, JT-60U の実験結果で示されている[3.4-1]. 従ってトカマク炉の設計に於いては, 如何にして楕円度と三角度の大きいプラズマ形状を実現できるかが焦点となる. 一方, 楕円度の増大はプラズマの垂直方向不安定を誘起し, この対策としてプラズマに近接した導体壁と, 導体壁によって抑えきれないゆっくとした不安定成長を抑制する位置制御コイルを必要とする. 本章では位置不安定は上記方法の採用で制御されているものとし, 形状制御を中心に述べる.

3.4.2 プラズマ形状と多重極磁場

トカマク型核融合炉では, 不純物制御, プラズマ対向機器の熱対策等でダイバータプラズマの採用は不可欠である. また炉構造の面から炉上部に大型重量物を配置することは望ましくない為, 現在では下方シングルヌルダイバータが採用される. 従ってプラズマ断面形状は上下非対称となる. このような上下非対称シングルヌルダイバータプラズマの形状制御に際して, トカマクプラズマの平衡を記述する Grad-Shafranov 方程式の解析解を求めることは不可能であり, 数値解法が使用される. このために種々の物理現象や工学設計の要求を取り入れた平衡解析コードが数多く開発されている[3.4-2].

炉設計においてはプラズマパラメータや位置形状を指定して, それを実現するポロイダルコイル電流を求める Backward solution の平衡計算方法が取られる. 実験解析等では, 反対にコイル電流が既知であるため, このコイル電流が生成する磁場(場合によっては構造物の電流による磁場も含む)中でどのようなプラズマが実現されるかという Forward solution が対象となる.

炉設計において, ポロイダルコイルの位置, 個数は炉本体の設計と密接に関連しているので, 炉設計の初期段階で決定しておく必要がある. しかし, 初期設定に際して, 多様な運転シナリオに対応した平衡計算を行って全ての要求を満足するポロイダルコイル系を決定することは事実上不可能であり, 現在では, これまでの経験に基づいた知識と, プラズマ形状と多重極磁場の関係を利用し概略を決定する方法がとられる. 炉構造が固まった後には, 平衡計算が多用される.

プラズマ形状を特徴づける要素(楕円度, 三角度, 場合によっては四角度)と多重極磁場の間には一定の関係が見られる。ここで多重極磁場は次式に示すように, 赤道面上の平衡磁場をプラズマ断面の幾何学中心で局所的に多項式展開したもので, アスペクト比が大きい場合は磁場の展開法としてよい近似となる。アスペクト比が2程度に下がってもそれほど近似の精度は低下しないので, トカマク炉の設計では十分に使用に耐える。

$$\frac{B_z}{B_a} = b_D + b_Q \frac{r}{a_p} + b_H \left(\frac{r}{a_p} \right)^2 + \dots$$

$$B_a = \mu_0 I_p / 2\pi a_p$$

ここで r はプラズマ断面の幾何学中心からの距離, a_p はプラズマ小半径, B_a は円柱近似でのプラズマ表面磁場, b_D, b_Q, b_H は夫々 B_a で規格化された垂直磁場, 四重極磁場および六重極磁場である。垂直磁場は無限長ソレノイド内の磁場のように完全な垂直方向成分のみを有する一様磁場である。四重極磁場は, アスペクト比無限大の極限でプラズマを取り巻いて配置された総計4本のコイルに正負交互に流れる電流が生成する磁場, 六重極磁場は6本の電流が生成する磁場であり, いずれもプラズマ断面中心では大きさが零となり, プラズマの大半半径位置には基本的に影響しないが, プラズマ断面形状に大きく影響する。

垂直磁場の大きさは基本的に Shafranov 磁場で与えられる大きさを有し, 形状要素に対する依存性は小さく, ポロイダルベータと内部インダクタンスとともに増大する。

$$B_{sh} = -\frac{\mu_0 I_p}{4\pi R_p} \left(\ln \frac{8R_p}{a_p} + \beta_p + \frac{l_i}{2} - 1.5 \right)$$

規格化された垂直磁場は

$$b_D = -\frac{1}{2A} \left(\ln(8A) + \beta_p + \frac{l_i}{2} - 1.5 \right)$$

四重極磁場はコイルが赤道面で負電流となるように配置された場合, プラズマ断面をインボード側とアウトボード側でプッシュするので上下方向に断面が伸ばされ楕円度が1以上となる。垂直磁場と四重極磁場が合成された縦長断面プラズマに対する平衡磁場は, 赤道面上で大半半径内側に凸の磁力線となっており, 磁力線の曲率は四重極磁場が大きい程大となる。磁場の曲率は次式の曲率指数で評価される。楕円度の大きいプラズマは負の曲率指数を有する。曲率指数は通常プラズマ断面の幾何学中心で評価される。

$$n = -\frac{R_p}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial R} = -A \frac{b_Q}{b_D}$$

ここで重要なことは, 曲率指数はプラズマ断面中心では規格化された四重極磁場と垂直磁場の比にアスペクト比を乗じた形になっていることである。曲率指数は垂直位置不安定の強度の指数であるが, アスペクト比を考慮

しないで曲率指数の大きさのみで位置不安定の危険性を議論することは正確とは言えないので注意を要する。

規格化された四重極磁場は, 楕円度が小さいうちはほぼ楕円度に比例して増大し, 1.5 程度の楕円度から徐々に変化率が減少し, 2 を超えるあたりから飽和の傾向が見られる。全体的傾向は負の指数を有する指数関数に類似している。六重極磁場は δ/κ^2 に比例して増大する。ここで δ は三角度, κ は楕円度で, 注意すべき点は楕円度に対する感度が三角度よりも大きいことである。垂直磁場と同様に四重極磁場もポロイダルベータと内部インダクタンスとともに増大する。六重極磁場は, 反対にポロイダルベータの増大に従って減少し内部インダクタンスの増大に従って増大する。即ち形状を固定してプラズマ圧力を増大すると, 四重極磁場は増大し六重極磁場は減少する。これはプラズマ圧力増大に伴ってより円形に近い断面形状になろうとする性質と磁気軸の外側シフトにより自然に三角度が発生することに起因する。また電流がピーキングして内部インダクタンスの大きいプラズマはより円形に近い断面になろうとする性質を有する。

上記多重極磁場を達成するポロイダルコイル電流を考察すると, 多重極性が大きい程単位電流のプラズマ領域の磁場生成効率は小さいので, 楕円度が小さく三角度の大きいプラズマ程大きいコイル電流を必要とすることになる。この点はトカマク炉の設計に於いて念頭に置いておく必要がある。

それではプラズマパラメータおよび形状から要求される磁場を生成する為に, どのようなポロイダルコイル配置が必要なのであろうか。直線円筒近似では多重極磁場生成に効率的なコイル位置は容易に推測できる。即ち, 四重極磁場ならば赤道面から4分割した点, 六重極磁場ならば6分割した点にそれぞれあたる。しかし実際の炉設計にあたってはトロイダル効果と, コイル配置が一般的に D 型のトロイダルコイルの外周に沿って配置されることを考慮する必要がある。

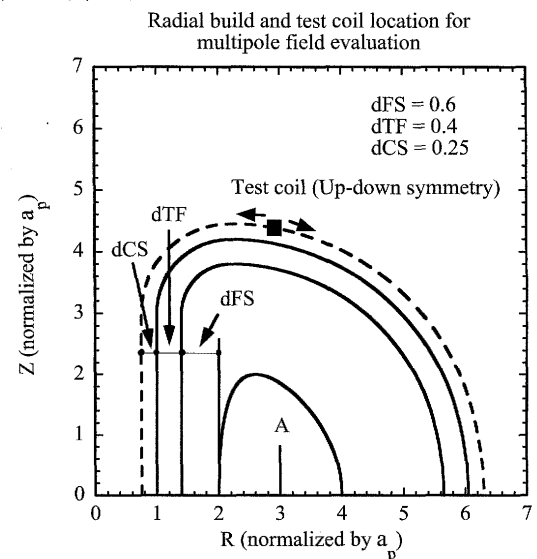


図 3.4-1 多重極磁場生成効率計算の為にテストコイル配置、D 型トロイダルコイルの外周の上下対称位置に単位電流のコイルを配置する。

図 3.4-1 に示すポロイダルコイル配置曲線上の任意の点に上下対称に2個の単位電流のコイルを設置し、生成した赤道面上の磁場を多重極磁場の定義式に従って展開した多重極磁場の値を、コイル位置を変えてプロットした結果を図 3.4-2 に示す。図 3.4-1 に示したケースはアスペクト比3のプラズマを想定している。図 3.4-2 の様相はアスペクト比によって異なってくる。図 3.4-3 はアスペクト比5の場合で、大半径外側での生成効率が若干減少し、反対にTFC頂上より内側とりわけ中心ソレノイド位置での生成効率は大幅に増大している。このことはアスペクト比の小さい球状トカマクでは、同様なプラズマ断面形状を達成しようとした場合、中心ソレノイドに大きな電流を必要とすることを示している。

図 3.4-2 のアスペクト比3のプラズマでは、垂直磁場、四重極磁場、六重極磁場の全てで大半径外側の赤道面上が最大生成効率を有している。実際の設計では赤道面上には炉内アクセス用のポートが設置されることが多いので、上下に振り分けられることになる。外側赤道面上コイルのみでは垂直磁場、四重極磁場、六重極磁場を独立して制御できないので、次に赤道面上のコイルとは符号が異なる四重極磁場と六重極磁場を発生する為に、テストコイル位置で100から140の位置に別コイルを設置する必要がある。多様なプラズマ形状を実現しようとする場合は、四重極磁場と六重極磁場の独立制御を効果的に行う為に、独立した2個のコイルを設置することが望ましい。赤道面内側にも感度が高い領域が存在する。ここにもコイルを設置することになるが、この領域はプラズマの鎖交磁束を制御する中心ソレノイド(Central Solenoid)に対応する。中心ソレノイド端部からトロイダルコイル頂上付近にかけての領域は、平衡磁場形成には寄与が少ない領域となっているが、プラズマ電流立ち上げ時の磁束供給に対して重要な役割を果たす。このためこの領域にも独立したコイル配置が必要となる。図 3.4-3 のアスペクト比5の場合も基本的な様相は同様である。

中心ソレノイドを鎖交磁束制御の面からのみとらえて1コイルとすることは、赤道面付近のプラズマ形状制御機能を見捨てることになり、望みうる楕円度と三角度を達成できない状況が発生する[3.4-3]。この点は炉設計に際して十分に考慮する必要がある。またプラズマ大半径より外側のコイルによる大きな垂直磁場発生能力による磁束供給で中心ソレノイドを廃する考え方も存在するが、この場合もプラズマ形状制御能力について十分検討しておく必要がある。通常は赤道面付近とコイル両端の電流を独立に制御できる中心ソレノイドを採用する。

トカマクプラズマの電流立ち上げに際しては鎖交磁束の変化が必要である。効率的な磁束変化を実施する為に、通常、ポロイダルコイルに電流を流し1方向に磁化し、立ち上げ時に磁化を反転させる両振りを採用する。最初に磁化することを初期励磁と呼ぶ。初期励磁とそれ以降の磁束変化に中心ソレノイドは主たる役割を果たすが、それ以外のコイル電流にも注意が必要である。初期励磁は磁化すると同時に、プラズマ領域に磁場を漏洩しない

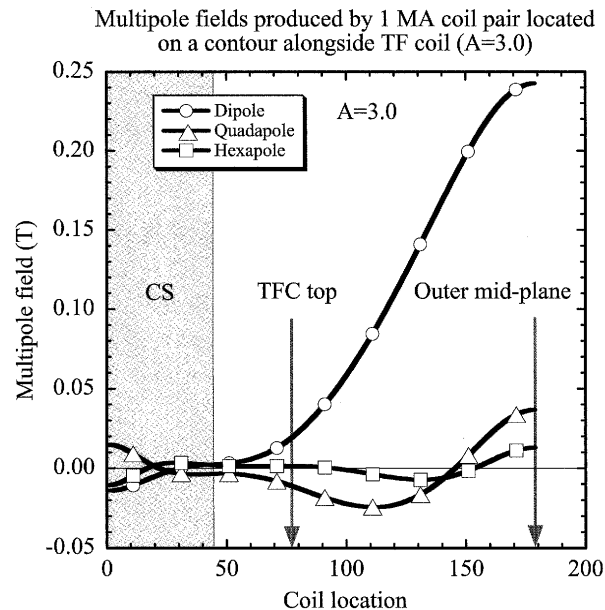


図 3.4-2 アスペクト比3の場合の垂直磁場、四重極磁場および六重極磁場の生成効率。

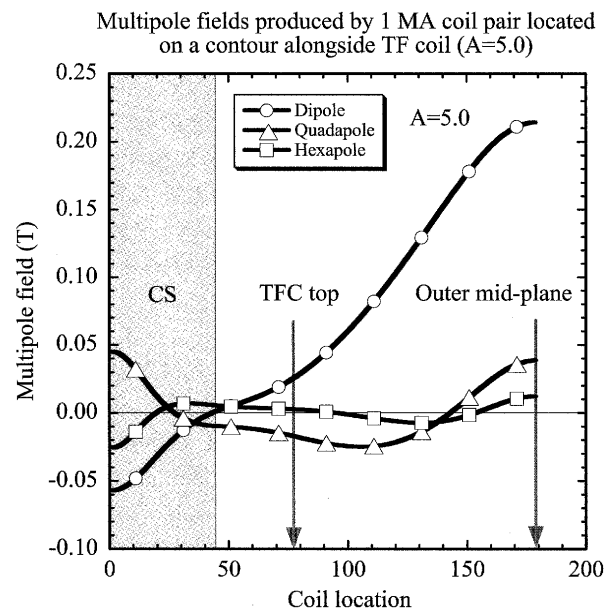


図 3.4-3 アスペクト比5の場合の垂直磁場、四重極磁場および六重極磁場の生成効率、装置中心軸側の効率が大きくなる。

という条件が加わる。漏洩磁場は、ブレイクダウン時にプラズマ生成領域からの電子の損失を増大し、ブレイクダウンを阻害する要因となる。中心ソレノイドのみでは大きな漏洩磁場が発生する為、これを補正する電流をポロイダルコイルに妥当な分布で流す必要がある。補正に最も重要なコイルは、中心ソレノイドに繋がったトロイダルコイルの頂点付近に存在するコイル(しばしばダイバートコイルと呼ばれる)である。この領域に必要な数のコイルを設置し電流を供給しないと、補正は十分に行われぬ。ダイ

バータコイルには、初期励磁に際して中心ソレノイドに匹敵する電流を流すことになる。磁束の変化に伴ってダイバータコイルの電流値も大きく変化する。時には負電流となることもある。これはダイバータコイルの平衡形成機能からだけでは推測できない。

3.4.3 ダイバータ平衡形成に関する留意点

現在のトカマク炉設計では、プラズマ立ち上げの早い段階でダイバータプラズマに移行し、燃焼時はダイバータプラズマを維持するように運転シナリオが設定される。本節ではシングルヌルを中心としたダイバータプラズマ平衡の炉設計での注意点について述べる。

ダイバータプラズマでは、コアプラズマから流出したエネルギーは一部が輻射によって失われた後、ダイバータ板に集中して大きな熱負荷となって流入する。エネルギーの流路であるスクレイプオフ層(SOL)は、ダイバータ板到達まで第一壁から隔離されなければならない。SOLの熱幅は、これまでの実験結果から赤道面外側で3-5cm程度と推測され、この磁力線がプラズマ全周で第一壁から隔離される必要がある。シングルヌルダイバータの場合は、磁力線は赤道面外側と内側を連結するので、赤道面内側では5cmを大きく超える可能性がある。従ってSOL幅の内側と外側の比が一つの設計ポイントとなる。SOL幅の比はプラズマのアスペクト比やポロイダルベータに大きく依存し、アスペクト比が小さい程またポロイダルベータが大きい程大きくなり、容易に数倍に達する。即ちプラズマ内側には、第一壁との間に十分な空間を確保しなければならない。プラズマ側からはポロイダルベータ(プラズマ圧力)の増大に伴って、大半径の外側移動や小半径の縮小が必要になるかもしれない。

シングルヌルダイバータの場合、プラズマ表面を規定するアクティブセパトロックスとその外側に位置するパッシブセパトロックスが存在する。アクティブセパトロックスとパッシブセパトロックスの間隔がSOLの熱幅より小さいと、パッシブセパトロックスより外側のSOL磁力線は、プラズマを一周せずに第一壁に達し、この部分に熱負荷を与える。従って、アクティブセパトロックスとパッシブセパトロックスの間隔がSOLの熱幅より大きくなくてはならないというもう一つの条件が付加される。通常、間隔はパッシブヌル側の楕円度と三角度が大きくなる程小さくなる。従って、パッシブヌル側の楕円度と三角度には上限が存在する。四角度は間隔を広げる為に有効であるが、その効果は小さい。

ダイバータ板には高密度の熱流束が磁力線に沿って流入する為、ダイバータ板近傍では磁力線はできるだけ広がっていることが望ましい。一方、ダイバータ領域から中性粒子が逃れ去ることを阻止する為に屢々バップル版を設置するが、バップル版の熱負荷低減の為にはSOLの熱幅をクリアしなければならない。従って効果的な中性粒子の逆流阻止には、バップル版近傍でSOL幅は狭いことが望ましく、ダイバータ板での要求と相反することになる。現在のところこの問題を簡単に解決する現実的な方

法は見出されていない。

図3.4-4にITERのシングルヌルダイバータプラズマの平衡計算例を示す。SOL磁力線は1cm, 3cm, 5cm, 10cmの4本をプロットしている。いずれもパッシブセパトロックス内に存在する。3cmの磁力線までがダイバータ構造に干渉せずダイバータ板に到達している。

図3.4-4の平衡を実現するポロイダルコイル系について簡単に説明する。プラズマ電流は15MAである。シングルヌルダイバータプラズマであるため、基本的に上下コイルの電流は独立に制御される。コイル位置は多重極磁場展開で述べた結果に沿って設定されている。中心ソレノイドは初期励磁に際してプラズマ領域への漏れ磁場を低減する為に、プラズマの垂直サイズに比べて十分長くしている。6分割して中心ソレノイド内の電流分布を制御できるようになっている。但し図3.4-4の計算では赤道面で隣接するコイルは同一制御としている。上下端のコイルは形状制御というよりは、漏れ磁場抑制の機能が大きい。但し、ダイバータプラズマのヌル点形成には、ヌル点近傍の僅かな磁場が影響するので、上下端コイルの影響は大きい。プラズマ内側表面の形状を効果的に制御するには、中心ソレノイドコイルの中央部コイル長はプラズマの上下長の1/2程度とする。各コイルのアンペアターンをコイル脇に示した。単位はMATである。鎖交磁束が負に反転して振り込まれた状態である為、中心ソレノイドの電流値は下端を除いて負となっている。下端コイル

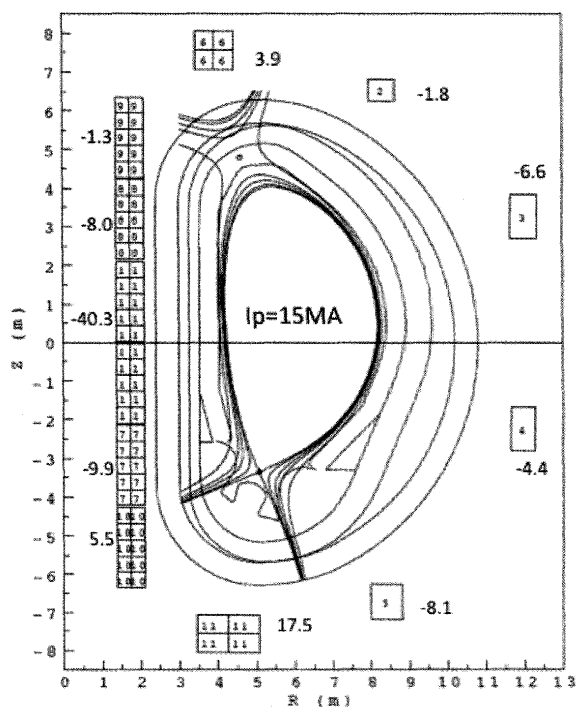


図 3.4-4 ITERのシングルヌルダイバータ平衡計算例

赤道面外側でプラズマ表面から10cmまでのSOL磁力線が第一壁に干渉せずおさまっている。

第3章 トカマク炉の設計

は正電流であり、負電流である直上のコイルとの間からダイバータプラズマのヌル点形成に必要な磁場がプラズマ領域に流入している。

ダイバータプラズマではダイバータ板に熱負荷が集中するため、ダイバータ板とセパトリックスの交点(ストライク点)は厳密に制御されなくてはならない。ポロイダルベータや内部インダクタンスの値の変化に伴って、ヌル点とストライク点の相対位置は変化する。炉設計の立場からは多少のヌル点位置の変動は許容して、ストライク点を固定する制御方法がとられる。

3.4.4 運転シナリオの考え方

トカマク炉ではプラズマ維持に大きなプラズマ電流が必要であるため、必ず最初に電流立ち上げの期間が存在する。最初からフルサイズのダイバータプラズマを形成することは、種々の面から不可能である為、通常プラズマ断面の小さいリミタプラズマから出発して、プラズマ電流増大に伴って徐々にプラズマサイズの増大、楕円度や三角度の増大、リミタプラズマからダイバータプラズマへの移行を実施する。この際、ポロイダルコイルの電源定格(電圧、電流)による制限やコイルの経験磁場、電磁力等を考慮する必要がある。

リミタプラズマとダイバータプラズマではポロイダルコイルの電流パターンが大きく異なる為、移行に際して、特にダイバータコイルの電流値が大きく変化する。この状況を緩和するには、移行直前にヌル点をプラズマ表面に近づけておくことが望ましい。場合によってはオーバーサイズのリミタプラズマを形成してダイバータプラズマ移行時にサイズを絞り込むという方法がとられることもある。リミタへの熱負荷低減のため、ダイバータプラズマへの移行は定格電流に達する以前になされる。プラズマ加熱は、通常、電流立ち上げと同時に行われる。コイル電流が過大とならないようにするため、プラズマ電流が低い状態からベータ値限界の範囲内でプラズマ加熱を行う方法が屢々採用される。これはコイル電流で大きい割合を占める六重極成分に対応する部分を、ポロイダルベータ値を上昇することによって緩和する考えに基づいている。

定格プラズマに達して燃焼が開始すると、ポロイダルコイルには、燃焼時間中のプラズマの抵抗によって失われる磁束を補償するだけの電流変化のみが必要になる。いずれかのコイル(通常は中心ソレノイド)の経験磁場が制限値に達した時点で燃焼を終了することになる。その後電流立ち下げフェーズに入るが、立ち下げに際してはデ

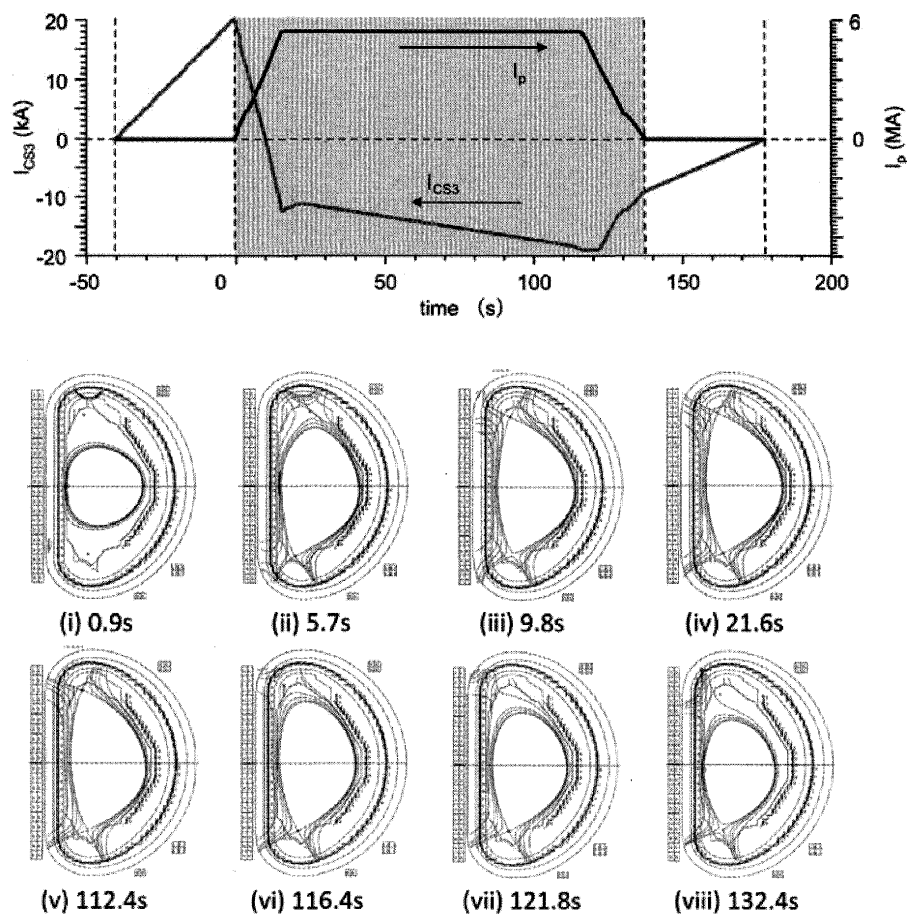


図 3.4-5 JT-60A の誘導駆動による運転シナリオ例,
(上)プラズマ電流および CS コイル電流の時間変化,
(下)プラズマ形状発展 (Progress Report of the Broader
Approach Activities Part II [3.4-4]より引用)

イスラプションが発生しないような電流減衰, 形状制御が必要になる. 立ち下げについての検討は深化していない.

運転シナリオは無数のシナリオが想定できる. 通常的设计では代表的なシナリオを複数設定し, 特徴的な時刻でのスナップショット平衡を計算してコイル電流の時間変化を求める. 平衡計算は渦電流の影響, 電源電圧, 最大電流およびコイルの経験磁場の制限を取り入れて行われる.

図 3.4-5 に JT-60SA の設計で検討された運転シナリオの例を示す²⁾.

参考文献

- [3.4-1] Y. Kamada et al., Plasma Phys. Control. Fusion 42, A247 (2000).
- [3.4-2] コードは公開されているものではないが, MUEDAS, EQUICIR, TOSCA, GAQ などの平衡解析コードが開発されている. また, ERATO などのMHD不安定解析の前段階として必ず平衡を解くことが必要なので, 不安定解析には独自の平衡解析機能が組み込まれている.
- [3.4-3] K. Shinya, Plasma Fusion Res. 1, 036 (2006).
- [3.4-4] Description of the Activities of the Broader Approach Projects, Chap.3, p.3-37.