

解説

トカマクのディスラプションにおける垂直移動現象 (VDEs : Vertical Displacement Events) 回避研究の現状

中 村 幸 治

(日本原子力研究所那珂研究所)

Present Status of VDEs (Vertical Displacement Events) Avoidance Studies in Tokamak Disruptions

NAKAMURA Yukiharu

Naka Fusion Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki 311-0193, Japan

(Received 26 June 2001)

Abstract

Present knowledge on the consequences of tokamak disruption and disruption-related effects are reviewed from a viewpoint of disruption mitigation and/or avoidance. The Vertical Displacement Events (VDEs), which are frequently observed in disruptive discharges of elongated tokamaks, are described in detail with an emphasis on the close relationships between the generation of halo currents and runaway electrons. The newly found "neutral point," at which VDEs hardly occur, is also addressed. Finally, VDE-related issues remaining to be addressed in future works are discussed.

Keywords:

tokamak, disruption, vertical displacement event (VDE), thermal quench, current quench, neutral point, tokamak simulation code (TSC), positional instability, eddy current, runaway electron

1. はじめに

ここ数年の間に、JT-60Uなどのトカマクで負磁気シアプラズマの内部輸送障壁や径電場形成などの閉じ込めの高性能化研究[1, 2], さらに、自発電流駆動による定常化研究が大きく前進している[3, 4]. また、実際に世界の大型トカマクで10 MW程度のDT核反応出力を得るとともに、等価なエネルギー増倍率が1を上回る状態が相次いで実現されるなど、最近のトカマク研究の進展には目覚ましいものがある[5, 6]. 一方この間、日欧露三極によって国際熱核融合実験炉(ITER)の工学設計活動が進められ、これが具体化するにつれて、これまでもトカマクの宿命と考えられてきたディスラプションの重要性がよ

り一層クローズアップされてきている[7]. 電力の安定供給が前提であるトカマク型核融合炉の実現は、今や、このディスラプションの問題を解決できるか否かに掛かっているといっても過言ではない[8].

本稿では、ディスラプションの際すべてのトカマクで観測され、プラズマ対向機器の損傷と深くかかわっている垂直移動現象(VDE: Vertical Displacement Event)と呼ばれる現象[7, 8]について、ディスラプションの無害化の観点から研究の現状と将来の展望を解説する.

次章では、ディスラプションの原因や発生頻度、また、実験効率上、炉工学上問題となるVDEなどのディスラプションの特徴を述べる. さらに、ディスラプションの

author's e-mail: nakamura@fusion.naka.jaeri.go.jp

予測と回避, 緊急放電停止シナリオなどの無害化研究について現状と今後の見通しを述べる. 第3章では, VDEがプラズマの電流消滅と同期して発生することやハロー電流の発生と深くかかわっていることを示す. また, ディスラプションを無害化する上でVDEを回避することが重要であることを述べる. さらに, VDEの挙動を模擬する数値シミュレーション手法を概説する. 第4章では, シミュレーションによって明らかになったVDEの発生機構とVDE回避に有利な中立平衡点と呼ぶプラズマ配置について述べる. さらに, 中立平衡点とシェルの幾何学的配置やプラズマの電流分布・形状との関係を概説する. 第5章では, 今後期待されるVDE回避の研究を展望する.

2. トカマクにおけるディスラプション

ディスラプションが発生すると, 第一壁タイルやダイバータ板が溶融・蒸発したり電磁力によって破損する場合があり, この問題を解決しない限りトカマクを核融合炉にすることは難しいと長い間考えられてきた. 特に, ITERではプラズマ対向機器の補修や交換が容易でないため, 主要な物理R&D課題の一つとしてディスラプションが取り上げられ, その国際協力研究がスタートした1991年以来世界中から膨大なデータベースが提供され, 系統的な研究が行われてきた[7,9].

その結果, ディスラプションの発生機構や発生の引き金となる原因についての理解が大きく進み, 従来は偶然に発生するとされていたディスラプションの発生頻度を今では定量的に評価できるようになっている. さらに, ディスラプションを回避するためのプラズマの運転条件やこれを核融合炉に適用するための外挿性なども明らかにされつつある. 今や, ディスラプションは核融合炉の開発にとって手に負えない厄介な現象ではなくなっている.

2.1 ディスラプションの原因と発生頻度

2.1.1 発生原因

プラズマを閉じ込めていた磁気面の規則正しい「入れ子構造」がなんらかの原因で破壊されると, 径方向の熱輸送が急増しディスラプションが発生する. 原因の一つは, 磁気島と呼ぶ局所的な磁場の乱れが成長したり, 隣り合う複数の磁気島が空間的に重なる結果, 磁力線が「入れ子構造」を保つことができなくなり, ストカスティックな構造となって磁気面が破壊される[10-12]. もう一つの原因は, プラズマを中心部の高温領域と周辺部の低温領域とに分けていた磁気面のトポロジーがある

不安定性の成長によって急変し, 高温と低温領域が大域的に入れ替わるためと考えられている[13].

2.1.2 発生頻度

磁気面の破壊を避けるためには, プラズマの電流分布, 周辺部でのパワーバランス, プラズマの圧力の3つを考慮することが重要であることが明らかにされている. このことから最近では,

(a)安全係数: q [14]

(b)プラズマ密度とグリーンワルド密度値:

$$n_{\text{GW}}(10^{20} \text{ m}^{-3}) = I_p (\text{MA}) / a^2 (\text{m}) \text{の比} [15]$$

(c)(Troyon)規格化ベータ値:

$$\beta_N = \langle \beta(\%) \rangle I_p (\text{MA}) / a (\text{m}) B (\text{T}) [16-18]$$

の3つのパラメータで, ディスラプションを避ける運転領域を述べることが多い. 核融合炉の経済性を上げた状態, すなわち, (a)が低く, (b), (c)が高いとき, ディスラプションが発生しやすく, おおよその目安 ($q_{95} \sim 2$, $n/n_{\text{GW}} \sim 1$, $\beta_N \sim 3.5$)が与えられている[7]. 通常見られる発生例のほとんどは, 意図してこの目安に近づいたり, 運転操作を誤り限界を超えてしまうなど, これら3つの運転条件のいずれかが守られない場合である. そもそも実験とは新しい運転領域を開拓するもので, この限界を超えるチャレンジを試みるのが実際には多い[19]. また, これらすべての目安に対して十分な裕度を持った運転領域でも, 運転中プラズマに大きな不純物塊が混入したり, プラズマの位置制御回路に不具合が生じたりすることでディスラプションが発生する場合もある.

したがって, 実際の発生頻度はトカマク装置や運転条件ごとにさまざま, 統一的に定量化することは難しいが, ITERの工学設計のために集められたデータベースを基に統計的な数値が評価されている[7]. それによれば, 制御回路に不具合がないと仮定し, 同時にディスラプションを避ける運転条件の目安に対して安全な「保守側」の場合で約3%, 積極的に危険な「限界側」に運転条件を設定した場合で約40%と考えられている. ITERではこれをもとに, 放電の最適化に必要な初期実験の段階で30%のディスラプション発生頻度を想定している. また, 安全係数や規格化ベータ値を $q_{95} = 3$, $\beta_N = 2.2$ のように注意深く選んだ高性能化先進プラズマ実験の段階で10%を設計基準としている. そのときのディスラプションは, できるだけ高密度のプラズマを得ようとすることから密度限界型のものが想定されている. また, 負磁気シアプラズマ中心部の弱シア領域で発生するMHD不安定性が新たなディスラプションの引き金になること

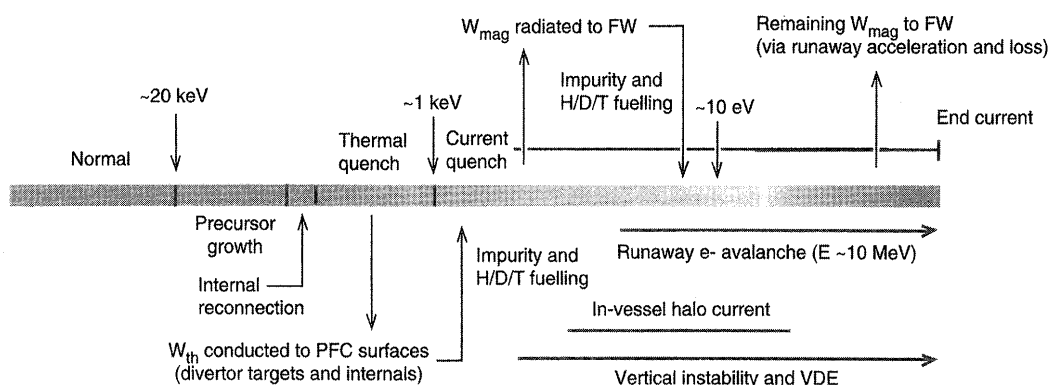


Fig. 1 Disruption and disruption related effects (schematic) [7].

もあり、ディスラプション回避の観点から研究が行われている。

2.2 ディスラプション特性と炉工学上の問題

共通して観測されているディスラプションの特徴、および、これらがプラズマ対向機器 (Plasma-Facing Components: PFC) または第一壁 (First Wall: FW) に与える影響を、Fig. 1に示す。ディスラプションの前兆となるMHD振動の成長 (precursor growth) に始まって、次に述べる急激な連鎖的現象が互いに関連しながら現れる。

2.2.1 熱消滅 (thermal quench) [20]

MHD振動がしばらく続いた後、プラズマ内部で起きる磁力線のつなぎ変え (internal reconnection) によって磁気面が破壊され、プラズマの熱エネルギーの大半が失われる[21]。熱消滅 (thermal quench) と呼ぶこの現象は、現在のトカマクでは $\sim 100 \mu\text{sec}$ の短時間に衝撃的に起こるため、プラズマ対向機器の表面が溶融したり蒸発したりする[22]。熱流束が飛躍的に増大すると考えられるITERでは、これが $\sim 1.0 \text{ msec}$ で発生すると見積もられており、損耗した壁材をより頻繁に交換することになってしまうことが懸念されている[7]。このため、前兆現象であるMHD振動の検出と同時に不純物を含む氷結ペレットをプラズマに入射して、大部分の熱エネルギーを放射エネルギーに変換し、これによって熱流束を広範囲に散逸させる技術が開発されている[23-25]。

2.2.2 電流消滅 (current quench)

熱消滅によって壁から発生した不純物がプラズマに混入し、電子温度がさらに低下するとプラズマの電気抵抗 R が増え、プラズマ電流が急激に減少する (current quench)。その結果、真空容器などの導電性構造体に渦電流が生じ大きな電磁力が発生する[7, 8]。プラズマの

インダクタンスを L とすると、電磁力の大きさは電流消滅の際の時定数 $\tau_d = L/R$ に反比例する。一方、プラズマの電気抵抗は熱消滅直後の電子温度でほぼ決まり、これまでのディスラプションのデータベースから割り出すと最低で約 3 eV になった[7]。この温度は、不純物による放射冷却のモデルとも矛盾しないことからITERにも外挿可能な妥当な値とされ、ITERの電流消滅の時定数は最も短い場合で 100 msec 程度と予想されている[7]。

2.2.3 垂直移動現象 (VDE: Vertical Displacement Event)

トカマクでは古くから、縦長非円形のプラズマは垂直方向に不安定であることが知られ、垂直不安定性 (vertical instability) と呼ばれている。一方、ディスラプションの際、電流消滅と同期して垂直不安定性とよく似た現象が常に観測され、広く、垂直移動現象 (VDE: Vertical Displacement Event) と呼ばれている[8, 26]。垂直移動事象 (vertical displacement episode) あるいは垂直ディスラプション (vertical disruption) と呼ぶこともある。また、電流消滅のときは電子温度が低いことから cold plasma VDE と呼ばれることがある。これに対して、電流の減衰を伴わない垂直不安定性では、プラズマは高温状態を保ったまま急速移動するため hot plasma VDE と呼ばれることもある。

VDEそのものは炉構造物に直接の悪影響を与えないが、これによってプラズマが大きく移動する結果プラズマ対向壁と直接接触したり、次に述べるハロー電流の発生と強く関わっていることから、その発生機構や回避方法の研究が精力的に行われている[27-30]。

2.2.4 ハロー電流 (halo current) [31-33]

VDEによってプラズマがダイバート側に移動した場

合、電流消滅によって生じているトロイダル電界を起電力源とするハロー電流と呼ぶ大きな電流が発生する。その流れる経路は、セパトリックス外側の冷たいプラズマ領域の開いた磁力線に沿って force-free の条件でたどり、ダイバータ側を迂回している第一壁構造部を最小インピーダンスの条件で還流する。この第一壁構造部ではハロー電流のポロイダル成分がかなり大きいため、トロイダル磁場と相互作用して大きなローレンツ電磁力を構造体に与える[34-38]。また、ハロー電流は冷たいプラズマ領域では三次元のヘリカル構造を持って流れているため、実際に観測されている分布は強い非軸対称性を有している[39-41]。このため炉構造の設計が極めて複雑なものになっている[42, 43]。

ダイバータと反対側に向かって VDE が起きた場合、ハロー電流の流れる経路が長くなり、これに沿った電気抵抗が高くなるため発生するハロー電流は少ない。したがって、VDE を制御できれば、ハロー電流ひいては電磁力を大幅に抑制できると期待される。

2.2.5 逃走電子(runaway electron) [44, 45]

電流消滅で生じた強いトロイダル電界 (~ 10 V/m) によって、プラズマの内部で電子が加速され、10 MeV を超える高エネルギー状態のままトロイダル方向を周回する。この逃走電子(runaway electron)が生成する電流は、プラズマ電流の50%以上にも及ぶ場合がある[46-48]。ディスラプションの最終段階では、第一壁に衝突、消滅するが、このとき非常に局在化して衝突するため、プラズマ対向壁が大きく損傷したり放射化する。

強いディスラプションが起きると、逃走電子に加えて高エネルギーのプラズマ粒子が激しく第一壁に叩き込まれ、これによって粒子リサイクリングの状態が変化する。このため、しばらくはプラズマ放電が立ち上らず(fizzle-out)、半日程度の壁調整運転を強いられることがある[49]。

2.3 無害化研究の現状と見通し

ディスラプションの発生頻度や回避条件の研究に基づいて、発生し得るディスラプションと整合する工学設計が行われてきた ITER のように、今後期待される研究の進展を見込んでも、将来ディスラプションを完全に回避できると想定するのは難しい。

したがって、現在の研究開発段階では発生頻度をさらに低くしたり、発生してもトカマク装置に悪影響を与えないなどのディスラプションを極力無害化することを狙った研究が重要になる。プラズマ対向壁の疲労や損耗、放射化の軽減をはかるもので、ディスラプションを

予測し回避のための操作を積極的にとったり、緊急放電停止シナリオと呼ばれる小規模のディスラプションをあらかじめ能動的に発生させるものがある。

2.3.1 ディスラプションの予測と回避

一つは、先の運転パラメータをニューラルネットワークなどで常時監視しておき、ディスラプションの危険があると判断した場合、それぞれ最も適切な回避操作を行う自然な方法である[50-52]。たとえば、ガスパフ量の減少によってプラズマの密度を下げたり、補助加熱の追加によってプラズマ周辺部でのパワーバランスやプラズマ圧力、あるいは電流分布を制御することで安全な運転領域に逃げることができる。この方法は、新古典テアリングモードなどプラズマの閉じ込め時間スケールの現象(この成長時間はITERの場合 >10 sec程度と予想されている)に対して有効で、これよりも速い不安定現象の場合には使えない[53, 54]。

もう一つは、オンラインで前兆現象を検出し、ディスラプションの原因である磁気島の成長を抑制することによって磁気面の破壊を回避する直接的な方法である[55, 56]。そのための回避操作としては、電子サイクロトロン共鳴加熱によって磁気島を局所加熱したり[57-59]、中性粒子入射によってプラズマ回転を変化させることが提案され、実験でこれらが有効であることが示されている。しかしながら、これらの方法が適用できるのは、前兆現象とディスラプションの発生タイミングとの間に十分な時間的余裕がある抵抗性テアリングモードやロックモードなどの不安定現象の場合に限られ、前兆現象が短い理想 MHD 不安定性の場合には不向きである。

このように、ディスラプションを予測し回避する研究の成功例はいくつか報告され実用化に向けて大きく進歩しているが、その反面、成功確率を定量化できるほどの実績には乏しく、今後のより一層の発展が待たれる。いまのところ、ディスラプションを確実に回避するためには、運転限界に対する裕度と前兆現象を捕まえる時間的な裕度を踏まえ、それぞれの方法を個別あるいは複合的に用いるのが妥当とされている[7]。

2.3.2 ディスラプションの緩和と緊急放電停止シナリオ

核融合炉では冷却材喪失などの機器異常の事態にそなえて、プラズマ対向壁を保護する観点から、すみやかに核燃焼を停止し放電を安全に停止させる緊急放電停止シナリオが必要である[60-62]。異常を検出した後放電を停止するまでに許される時間は、たとえば ITER では数 sec 程度とされている[7]。このシナリオによる放電停止は、意図して起こすディスラプションに他ならず、熱消

減, 電流消滅, VDE, ハロー電流や逃走電子などディスラプションと同じ現象が現れる[63, 64]. したがって, 熱エネルギーを放射冷却の形態でできるだけ一様に放散させたり, プラズマと壁とが強く接触することなくプラズマ電流を適度な速さで減少させることなどが必要で, 緊急放電停止シナリオの開発とディスラプションの無害化研究とは同じ課題を共有している.

最も有望な緊急放電停止シナリオとして, キラーペレットと呼ばれる氷結不純物ペレットをプラズマに高速入射することが提案され, JT-60U[65] を初め ASDEX-Upgrade[24], DIII-D[25], Alcator C-Mod[63], JET[64], TFTR などが最適な入射条件を調べている. JT-60U では, ネオンを不純物とする高速ペレットをプラズマ中心深くまで打ち込んだ結果, 大半の熱エネルギーをプラズマ対向壁全体に一様に拡散させ (~ 0.5 msec), ダイバータへ集中していた熱負荷を激減させることに成功している. また, 当初 1.6 MA あったプラズマ電流を VDE とハロー電流の双方を抑制しながら ~ 20 msec にわたり穏やかに消滅させることに成功している. 一方, 入射ペレットがプラズマの中心部まで到達せず電子温度が十分に下がらないと, 密度限界型のディスラプションが発生した. 放射冷却が急激 (~ 10 msec 以内) に起きるとプラズマ対向壁が溶融してしまう ITER では, 不純物の種類や入射速度さらにペレット径などを最適化する必要がある[66-68].

キラーペレット入射の際の最も大きな問題は, すべてのトカマクでかなり大量の逃走電子が観測されていることである. この問題は, 現在のトカマクよりも逃走電子が発生しやすいと理論予測[69]されている ITER で深刻で, ハロー電流を防止するため VDE を回避している間に逃走電子がますます増加することが懸念される. このため, 誤差磁場を印加して逃走電子を積極的に抑制する研究も行われている[65, 70-74].

3. ディスラプションと VDE

ここでは, ハロー電流や逃走電子の発生と深くかかわっている VDE について, 実験で観測されている特性を詳しく述べるとともに, VDE を回避することによるプラズマ側あるいは装置側の利害得失を概説する. さらに, VDE の挙動を真空容器などのシェルの流れる渦電流を含めて総合的に模擬する数値シミュレーションの手法を述べる.

3.1 実験で観測されている VDE の特徴

Fig. 2 に, Alcator C-Mod のディスラプションで観測さ

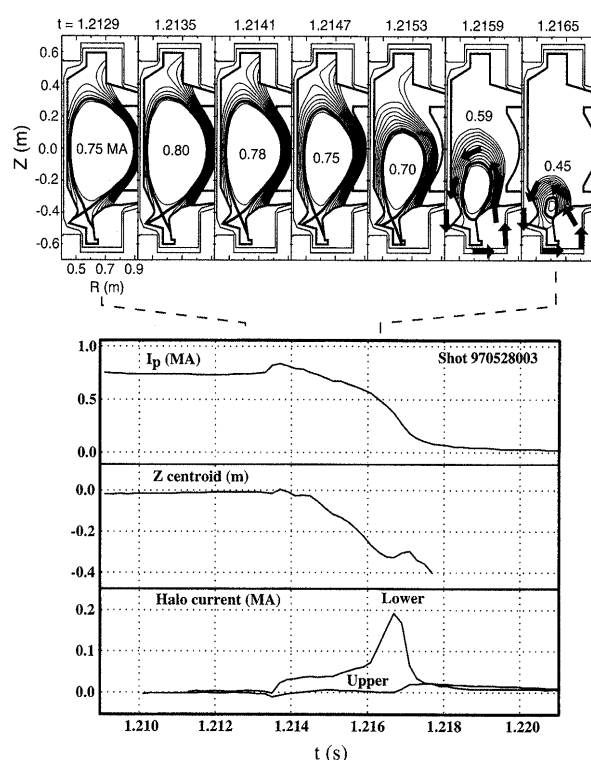


Fig. 2 Upper figure: magnetic flux reconstructions at 0.6 msec intervals during a disruption and subsequent vertical displacement in Alcator C-Mod [75]. The arrows show the poloidal projection of halo current flow. The halo circuit in the plasma scrape off actually follows a helical path, in order to be force free. Lower figure: plasma current, vertical motion, and in-vessel halo currents in the upper and lower portions of the vacuum vessel wall. In this example of a downward going displacement, halo current in the upper portion of the vessel is essentially zero.

れた典型的な VDE を示す[75]. 電流消滅とほぼ同期してプラズマがダイバータ側に向かって急速に移動する VDE が発生している. また, VDE によってプラズマが大きく下側に変位し, ダイバータ足が短くなった後大量のハロー電流 (全プラズマ電流の 25%) が発生している. 電流消滅と同時に VDE が発生することは JT-60U などすべてのトカマクに共通してみられ, また一般に, 電流の消滅時間が短くなると VDE が発生しやすい傾向にある. 移動の方向に関しては, ダイバータ側へ移動する VDE が多いが, その反対方向への移動も多く観測されている. この Alcator C-Mod の場合では, ハロー電流は下側にあるダイバータ構造部を還流しており, これと反対の上側にはほとんど流れていない. ハロー電流を抑制する観点からは, 長いダイバータ足を引きずったままプラズマが停留するか, ダイバータと反対側へゆっくりと移動することが好ましい.

VDEが発生せず定点に停留したままプラズマ電流を消滅させることができると、ハロー電流は発生しないと期待される。また、第一壁タイルやダイバート構造部にプラズマが直接接触しないため、局所的な熱負荷が発生せずプラズマ対向壁の損耗を大幅に低減できる。プラズマからみれば、プラズマ対向壁と強く接触しないため金属不純物の混入も少なく、プラズマ電流の消滅速度を抑えることも期待できる。もし、十分に電流消滅速度を抑えることができ、トロイダル電界 E が逃走電子発生のおしきい値 E_c ($\sim 0.12 n_{e,20}$ V/m[7])以下になれば、プラズマ電流の大半を担っていた逃走電子も発生しないと期待される。ただし、この間、プラズマは定点近くに長時間留まったまま逃走電子が発生しやすい状態にあるため、トロイダル電界が少しでもしきい値を上回ると大量の逃走電子が発生してしまうことに注意が必要である[76]。

VDEの発生頻度を低減するだけでも、ディスラプションによる装置損傷を大幅に改善できる。昔、ディスラプションによって真空容器がかなり損傷したJETでは、プラズマ断面の楕円度を高速で制御することで垂直不安定性を抑制し、これによってVDEを緩和して真空容器に発生する電磁力を低減している。しかし、ITERのような核融合炉ではポロイダル磁場コイルの電源容量が大きくなってしまったため、この方法を用いることはできない[7]。

したがって、VDEを確実に回避する新しい技術が求められており、そのためには電流消滅と同期している機構や移動の方向を決めている機構など、VDEの発生機構を明らかにする必要がある。プラズマ電流が一定のまま起きる垂直不安定性とは異なって、VDEでは常に電流消滅が伴い、真空容器などのシェルに大きな渦電流が流れているため、シェルを含めてVDEの挙動を総合的に模擬する数値シミュレーションが必要である。

3.2 VDEシミュレーションのための数値計算法

ディスラプションなどの急激なプラズマ挙動を模擬する手法の一つに、電流が流れているプラズマを多数の軸対称電流要素の集合体とみなし、これと電源も含めたコイル系さらに真空容器とを連成させた実用的なモデルがある。その代表が多層リングモデルで、トカマクシステムの平衡解を、系全体について導いた自由エネルギーを直接法によって最小化することで求めることができる[77]。準平衡状態の時間発展を計算する際は、時間刻みをプラズマ領域の電気抵抗で決まる時定数にとることができるため、高速計算が可能なモデルである。

多層リングモデルはおおまかなプラズマの動きを経済

的に議論することができるが、セパトリックスの正確な位置などプラズマ内部の現象を詳細に表すことができない。時間発展の各瞬間においてプラズマ平衡がなりたっているとして、プラズマをグラッド・シャフラノフ方程式でモデル化したコードにDINA[78,79]がある(コード名は開発者のお子さんにちなんでいる)。コイルの電源に過渡的な特性を与え、これらと渦電流を含めて時間発展を追跡するため、安定限界近くの急激な垂直不安定性などの過渡現象を解析するのには向かないが、プラズマ外部の真空領域については解く必要がなく計算時間のコストが大幅に少ない利点がある。

3.2.1 TSCコード

より正確なモデルとして、プラズマを電磁流体で模擬したMHDシミュレーションが用いられる。その代表的コードであるTSC(Tokamak Simulation Code)[80]は、トカマク、スフェロマックなどのトラス型装置の設計、および、トカマク放電の制御解析のために作られた自由境界軸対称抵抗性MHDコードである。軸対称であるのでキンク、テアリングなどの不安定性は表現できないが、Fig.3のように、プラズマのほかに真空容器やコイルも考慮することができる。

プラズマの圧力、密度、温度は磁気面の関数であるとする。また、アルヴェン時間に比べて十分に遅い現象を対象としており、プラズマの慣性にはほとんどよらない力学的平衡がほぼ成り立つと仮定している。すなわちTSCでは、慣性項は力の項 $\mathbf{j} \times \mathbf{B} - \nabla p$ に比べて無視できるとして、運動方程式を

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} + \mathbf{F}_v(\mathbf{m}) = \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \nabla p \quad (1)$$

と仮定している。ここで、 $\mathbf{m} \equiv \rho \mathbf{v}$ はプラズマの運動量密度である。第(1)式左辺第2項は粘性項

$$\mathbf{F}_v(\mathbf{m}) = \nu_1 [\nabla^2 \mathbf{m} - \nabla(\nabla \cdot \mathbf{m})] - \nu_2 \nabla(\nabla \cdot \mathbf{m}) \quad (2)$$

で、通常のMHD方程式の対流項に対応する。この項はアルヴェン振動を減衰させるためのもので物理的な意味はない。 ν_1, ν_2 はそのための人為的な数値粘性係数である。また、通常のMHDモデルでは、運動方程式の特徴的時間はアルヴェン時間であり、数値積分の時間刻みをこのアルヴェン時間より長くとることはできない。これに対して、TSCではプラズマ(イオン)の質量を実際の数十倍にとることにより、アルヴェン時間を伸ばす技法が用いられている。大型トカマク装置ではアルヴェン時間 $\tau_A \propto \sqrt{\rho}$ と磁場の拡散時間 τ_R の比である磁気レイノルズ

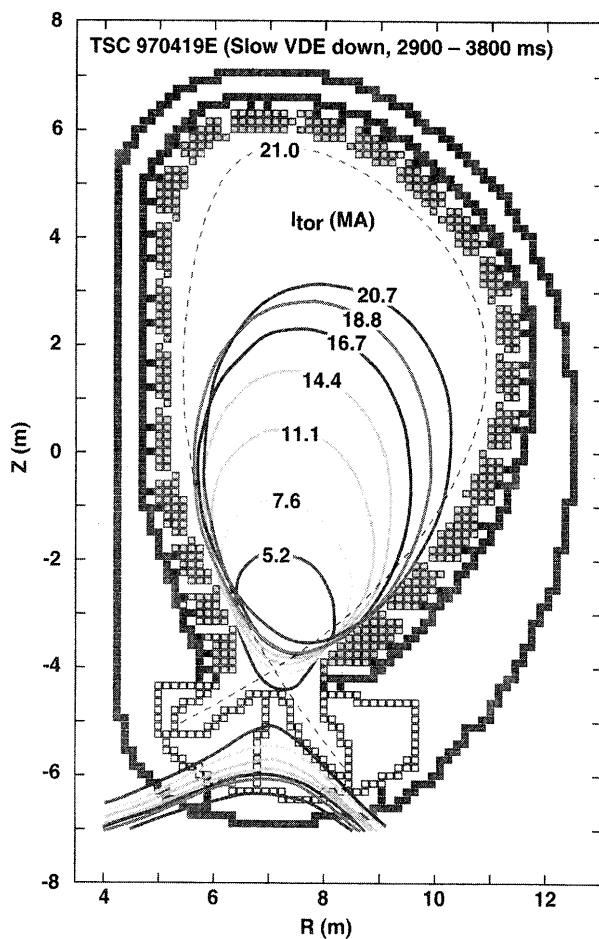


Fig. 3 The TSC simulation model. Plasma configuration and toroidal current for a slow VDE in ITER [7].

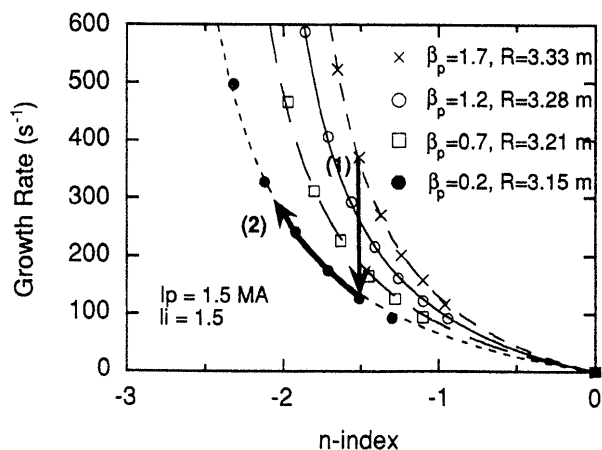


Fig. 4 Linear growth rates of JT-60U positional instabilities as a function of n -index [81]. (1) Path corresponding to collapse of $\Delta\beta_p = -1.5$. (2) Path corresponding to destabilization of positional instability due to degradation of $\Delta n = -0.6$.

数 $S_m = \tau_R/\tau_A$ は周辺プラズマの領域でも 10^4 以上であり、プラズマの質量を数十倍にしても磁場の拡散時間程度の現象には影響しない。これらの便宜的技法により、TSC では時間刻みをアルヴェン時間より長くとることができるが、これらがシミュレーション結果に影響を与えないことの確認が必要である。

次に、オームの法則は

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta_{\parallel} \mathbf{j} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 $\eta_{\parallel}$ はスピッツァーの電気抵抗率である。軸対称系での磁場 $\mathbf{B}$ はポロイダル磁束関数 $\Psi(r, z)$ 、トロイダル磁場関数 $g(r, z)$ を用いて、

$$\mathbf{B} = \nabla\phi \times \nabla\Psi + g\nabla\phi \quad (4)$$

と書ける (ϕ はトロイダル角変数)。電磁場の変化はポロイダル磁束関数とトロイダル磁場関数の時間発展として、ファラデー・マクスウェル方程式と第(3)式を用いて得られる。

TSC の真空領域はセパトリックス、またはリミタで決まる最外殻磁気面の外側の領域で、模擬的に冷たいプラズマで満たされているとする。この疑似真空領域についても軸対称電磁流体の運動方程式を解き、計算領域内部のコイルおよび真空容器は、計算グリッドを1本のコイルとしている。その部分は電気伝導度と外部から周囲電圧が加えられること以外は、真空領域と同じように扱われる。また TSC では、計算領域の外側にもポロイダル磁場コイルを置くことができる。それらのコイルと内部のコイル、真空容器、プラズマとは、計算領域の境界条件を介して電磁的な結合が与えられる。

TSC では真空領域もプラズマ領域として取り扱っているため、TSC コード全体の時間刻みがこの疑似真空領域の電気抵抗で決まってしまう。時間刻みを大きくとれる DINA コードに対して、TSC のシミュレーションに要する計算時間は最新のワークステーションを用いても数十時間にもおよぶ場合がある。

3.2.2 高 β_p プラズマの熱消滅時に発生する VDE [81]

TSC によって、計算時間はかかるものの非常に正確で詳細なシミュレーションができる一例を示す。ポロイダルベータ値が高い ($\beta_p \sim 1.7$) プラズマが熱消滅によって急激に圧力を失うと、プラズマ電流が減少しないまま垂直不安定性が増大し、急激な垂直方向への移動 (VDE) が生じる場合がある。

Fig. 4 に TSC シミュレーションによって得た n -index (外部垂直磁場の曲率) と成長率の関係を示す。プラズマ

の楕円度は比較的大きい $\kappa \sim 1.5$ とした場合の計算結果で、 n -index が小さくなると垂直不安定性の成長率は大きくなるが、圧力 (β_p) が小さくなると成長率は小さくなることを示している。つまり、プラズマ圧力の急激な減少には安定化効果がある (Fig. 4 の太線 (1))。しかし、圧力減少のためプラズマは内側に移動し、真空容器内側の部分にプラズマ電流と逆向きの渦電流を誘起する。この電流により、プラズマ位置での n -index が減少し不安定性の成長率は増大する (Fig. 4 の太線 (2))。JT-60U では Fig. 4 の太線で示すように、圧力減少による安定化効果の方が n -index 減少の不安定効果を上回るため、このタイプの VDE は生じない。ところが、シェルの幾何学的配置によっては、 n -index 減少の不安定効果 (Fig. 4 の太線 (2)) の方が、圧力減少による安定化効果 (Fig. 4 の太線 (1)) を上回り、その結果急激な VDE が発生する場合がある。このように、VDE の発生にはプラズマとシェルとの相互作用が極めて重要であることが、TSC によって示されている。

4. 中立平衡点を用いた VDE 回避

TSC のような MHD モデルを用いると、実際のトカマクにかなり近い装置・プラズマ条件の下で VDE の挙動を模擬することが可能で、実験結果との直接比較ができるようになる。

4.1 中立平衡点

プラズマ電流が消滅を始める前、あらかじめある垂直位置にプラズマを配置しておけば VDE が発生しないことが JT-60U で初めて明らかにされている [28, 29]。

JT-60U の VDE を模擬した TSC シミュレーションでは、まず Fig. 5 のように、低 β_p (~ 0.2) で楕円度が比較的大きい ($\kappa \sim 1.6$) プラズマを赤道面近くの上下にいくつか配置し、それぞれに熱消滅を与えプラズマ電流を減少させた。50 sec⁻¹ 程度の同じ速さで電流が消滅し、ハロー電流が発生しない数 msec の間のプラズマの動きを詳しく調べた。その結果、実験で観測されていたと同様、プラズマ電流の消滅と同期した急激な VDE が発生した。その移動方向は熱消滅直前にプラズマが置かれていた初期垂直位置と関係し、ある垂直位置を境にして上下反対になった。熱消滅後 1.0 msec 経ったときの VDE の移動距離を Fig. 6 に示す。ディスラプションが起きる前、プラズマを赤道面から約 15 cm 以上上側に配置しておくと VDE は必ず上向きになり、約 15 cm よりも下側に配置しておくと必ず下向きになる。しかも、この位置から離れるにしたがって VDE が急激になる。これは、電流

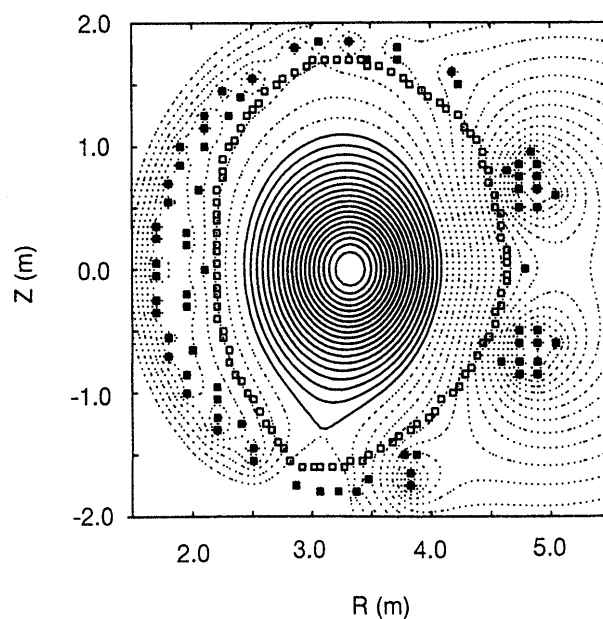


Fig. 5 TSC configuration of JT-60U plasma equilibrium with poloidal field coil system (closed boxes) and vacuum vessel (open boxes) [29].

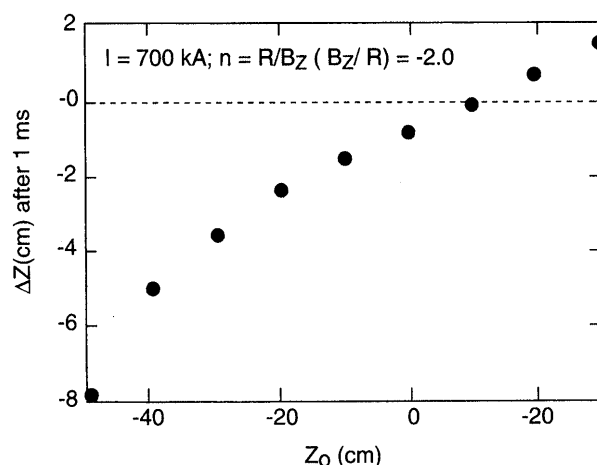


Fig. 6 Calculation with a TSC model of the initial displacement of the JT-60U plasma magnetic axis 1 ms after a simulated thermal quench. The initial position Z_0 of the plasma magnetic axis before the quench is varied relative to the machine midplane ($Z = 0$). The field index parameter n chosen for the modelling results in a plasma with an initial elongation of about 1.6. The neutral point is about 15 cm above the midplane [29].

消滅で生じた真空容器の渦電流がプラズマに対して上下に不均衡な電磁力を与えているためと考えられる。一方、赤道面から 15 cm 上のところにプラズマを配置した場合は、ちょうどよく不均衡電磁力が相殺され VDE が発生しない。現在、この垂直位置は、中立平衡点 (neutral point) と呼ばれ、ディスラプションの緩和研究にお

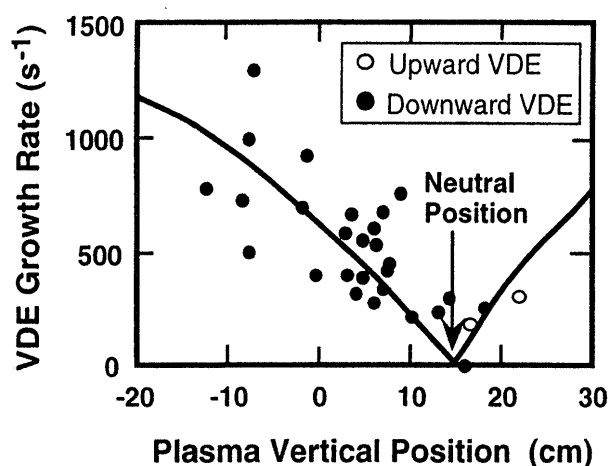


Fig. 7 Dependence of VDE growth rate and direction on vertical position of magnetic axis. Closed and open circles are experimental data of the JT-60U and solid curve is obtained from the TSC simulation. Plasma located initially at the neutral position is hardly displaced.

ける有用な概念として注目されている。

従来の垂直不安定性については、これを安定化するために導電性のシェルが必要であることはよく知られていたが、垂直方向のプラズマ配位についてこれをあらかじめ最適化する必要があるとは考えられていなかった。しかし、トカマクに中立平衡点が見つかったことで、ディスラプションを考慮した核融合炉の設計をするためには、プラズマとシェルとの相対配置を最適化する必要があることがわかった。

4.2 JT-60U 実験での VDE 回避

Fig. 7に、JT-60Uのディスラプション実験で得たVDEの特性を示す。ディスラプションが起きる前に置かれていた磁気軸の垂直位置に対するVDEの成長率を示している。赤道面から約15 cm上を境にして、上下反対方向にVDEが発生しており、この中立平衡点から離れるのにしたがってVDEが急激になるなど、実験結果(上向き移動の○および下向き移動の●印)とTSCのシミュレーション結果(実線)がよく一致していることがわかる。また、実験のバラツキは、主にVDEの成長率がプラズマ電流の減衰率に依存しているためで、これについても実験とシミュレーションはよく一致している。

中立平衡点は垂直方向に唯一点だけ存在するが、その場所はシェルの幾何学的配置やプラズマの断面形状と関係している。たとえば、シェルもプラズマも赤道面に関して完全に上下対称であれば、中立平衡点は赤道面上にある。JT-60Uの場合、中立平衡点は赤道面から約15 cm上にあるがその理由は、下側にダイバータ構造部

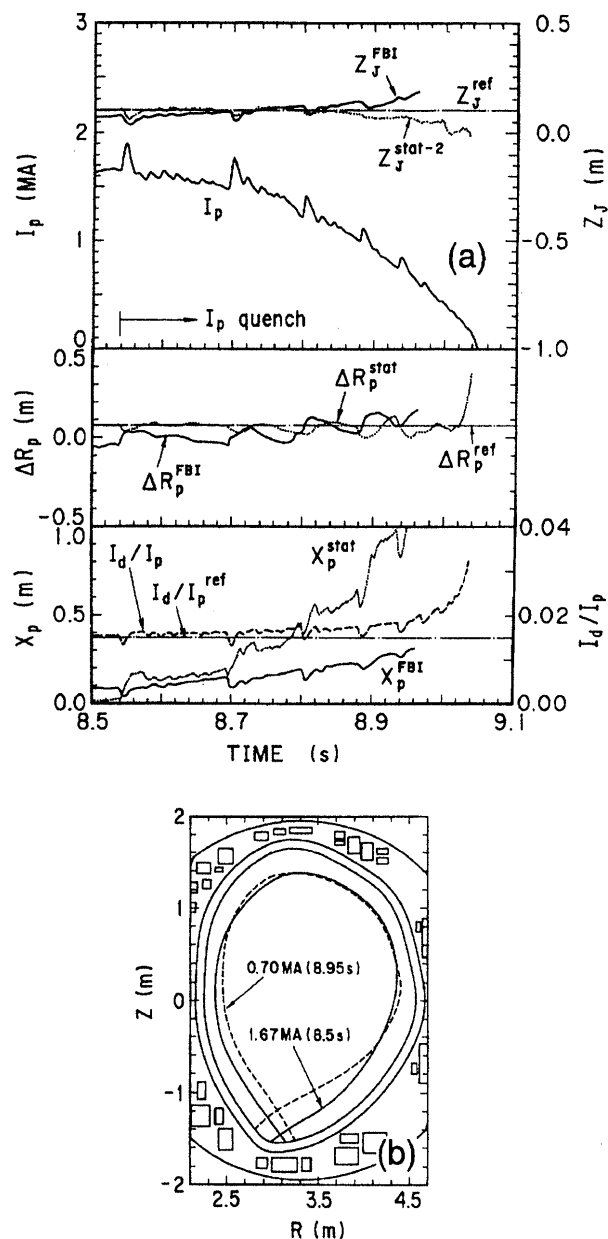


Fig. 8 (a) Time evolution of I_p quench with control of the divertor coil current I_d to be proportional to the plasma current I_p . The reference value of I_d/I_p is 0.015. The divertor plasma configuration is maintained during the I_p quench. (b) Time evolution of the plasma configuration in (a) [82].

を設置する必要から真空容器の右下部がプラズマ側に向かって変形しており、その分上下非対称な配置になっているためと考えられる。

中立平衡点をシミュレーションによってあらかじめ評価しておけば、上下いずれかの方向にVDEを制御することができる。下側ダイバータを持つJT-60Uのような配位の場合、中立平衡点よりも上にプラズマを配置しておけば下向きにVDEが発生する最悪ケースを回避する

ことが可能である。また、プラズマを中立平衡点近くに配置しておきキラーペレットや不純物ガスを入射することでVDEを緩和し、安全確実な緊急放電停止シナリオを実現することも期待できる。

実際 JT-60U で、中立平衡点の近くに置いたプラズマに大量のヘリウムガスを吹き込み、比較的ゆっくりとしたプラズマ電流消滅を起こす実験が行われた[82]。このとき、高精度のプラズマ位置制御を援用することでVDE

を抑制したが、その様子を Fig. 8 に示す。当初 1.7 MA あったプラズマ電流が、0.7 MA まで減少するまでの間、ほとんど VDE を発生させることなくプラズマを制御できていることがわかる。しかもこの間、理想とする下側ダイバータ配位をほぼ完全に維持しており、ハロー電流もほとんど発生しなかった。

4.3 シミュレーションによる中立平衡点の解析例

中立平衡点はシェル上に分布する渦電流の特性と深くかかわっていることから、核融合炉ではシミュレーションによって中立平衡点を評価しながら、プラズマ配位と炉構造とを最適化する必要がある。ここでは、複雑なシェル構造を持つ ITER と JT-60 改修装置の解析例を述べる。

4.3.1 ITER[83]

ITER-EDA あるいは ITER-FDR と呼ぶ工学設計段階の ITER は、Fig. 9 に示すように、上下に非対称なポロイダル磁場コイル、二重構造の真空容器やブランケット・モジュールを支持するバックプレートなど複雑なシェル構造を持つ。真空容器は赤道面に関してほぼ上下対称であるのに対して、バックプレート全体は赤道面から上側に大きく偏って配置されており、しかも、ダイバータ用の開口部が下側にある。また、下側ダイバータを持つプラズマは赤道面から 1.44 m 上に配置するのが標準の運転条件となっているなど全体的に上下の非対称性が著しい。TSC シミュレーションによって、これら複雑なシェルを含む ITER の中立平衡点が解析された。

Fig. 10 に、当初与えられたプラズマ平衡の初期位置に対して、プラズマ電流が時定数 156 msec で消滅を開始した後 55 msec 経過した時の垂直方向への移動距離を示す。これから、中立平衡点は赤道面から $Z = 1.22$ m のところにあり、 $Z = 1.44$ m のプラズマ標準配位から約 22 cm 下に存在することがわかった。その結果、ITER でディスラプションが起きるとプラズマはダイバータ構造部と反対方向の上向きに移動し、ダイバータの損傷が懸念されるハロー電流の発生も少ないと期待されている。しかも、標準配位と中立平衡点が大きく離れていないため、発生し得る VDE はゆっくりとしたものと予想され、ITER の工学設計は妥当なものとされた。

1998 年以降、ITER はそれまでの設計を ITER-FEAT (Fusion Energy Advanced Tokamak) と呼ばれるものに低コスト化した[84]、そこでもシェル構造の最適化が検討され、VDE を抑制するための安定化シェルが追加設置されている[85]。

4.3.2 JT-60改修装置

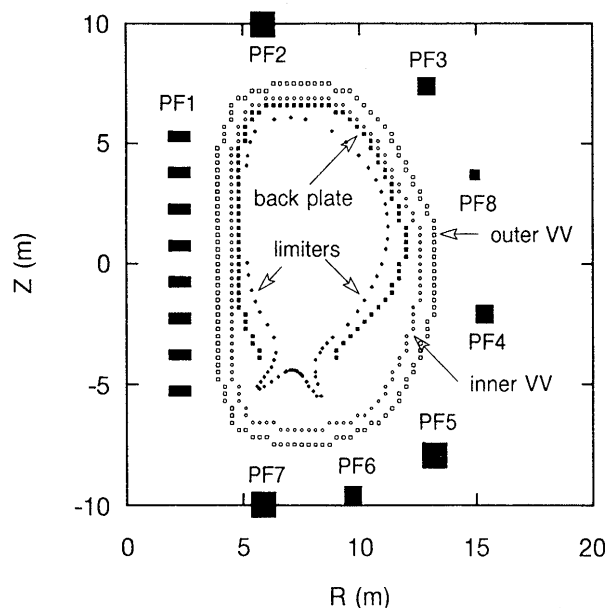


Fig. 9 TSC configuration of modeled ITER-like tokamak with poloidal field coil system (large closed boxes), double-walled vacuum vessel (small open boxes), back plate for blanket-module-support and a set of limiter points [83].

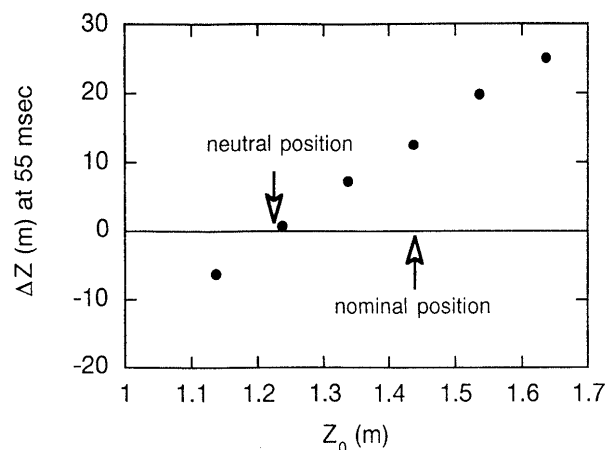


Fig. 10 Vertical displacement of plasma magnetic axis at 55 msec after thermal quench followed by I_p quench with a decay time of 156 msec [83].

現在、日本原子力研究所(原研)ではJT-60Uの改修を計画している[86]。本改修の具体的な装置設計は今後大学等と共同で行われるが、原研で検討している設計例では、二重構造の真空容器の内部に上下非対称なバッフル板が設置される。このバッフル板はプラズマの垂直不安定性を安定化するためのもので、中立平衡点と周りの構造配置との関係で設置する場所を最適化する必要がある。Fig. 11にバッフル板の配置案を示す。A案は、標準的なプラズマ配位($Z=0.20$ m)に対するバッフル板の配置案で、B案は、真空容器もバッフル板も赤道面に対して上下対称に配置した場合のものである。同じくFig. 11に、A案、B案それぞれの場合の中立平衡点を示す。A案の場合、赤道面から8 cm上、すなわち、標準としているプラズマ配位から12 cm下に中立平衡点が存在する。一方、B案のそれは赤道面から4 cm下、すなわち、標準としているプラズマ配位から24 cm下に中立平衡点が存在し、JT-60改修装置ではバッフル板の設置の最適化が重要であることがわかった。ちなみに、標準のプラズマ配位($Z=0.20$ m)と中立平衡点が近いA案では、ディスラプションが起きるとプラズマは下側にあるダイバータと反対の方向にゆっくりと動き、ハロー電流の発生も少ないと予想される。

このように、真空容器などの具体的なシェル条件を考慮したシミュレーションによって中立平衡点を評価することにより、トカマク設計の段階で上下移動に関するVDEの特性を最適化することができる。

5. VDE 回避研究の展望

熱消滅さらにハロー電流と逃走電子の問題が解決できれば、ディスラプションの無害化研究の目的はほぼ達成されたと考えてよい。この観点から、プラズマ対向壁の損耗や破損と深くかかわっているVDEに着目した研究が行われ、電流消滅の初期過程における発生機構と挙動が明らかにされた。その結果、VDEを回避する上で有利な中立平衡点が見つかり、上向きあるいは下向きにプラズマの動きを定めることができるなど、従来は不可能と思われてきたVDEの制御が可能になってきた。中立平衡点の近くではVDEの制御性が回復しやすいため、外部回路によってプラズマの位置を制御する上でも緊急放電停止シナリオを実行する上でも有利である。本稿で述べた垂直移動に対する中立平衡点に加えて、水平移動に対する中立平衡点が主半径方向にもあるが、今後の研究にゆだねられている。

JT-60Uの研究によって、シェルに誘起された渦電流

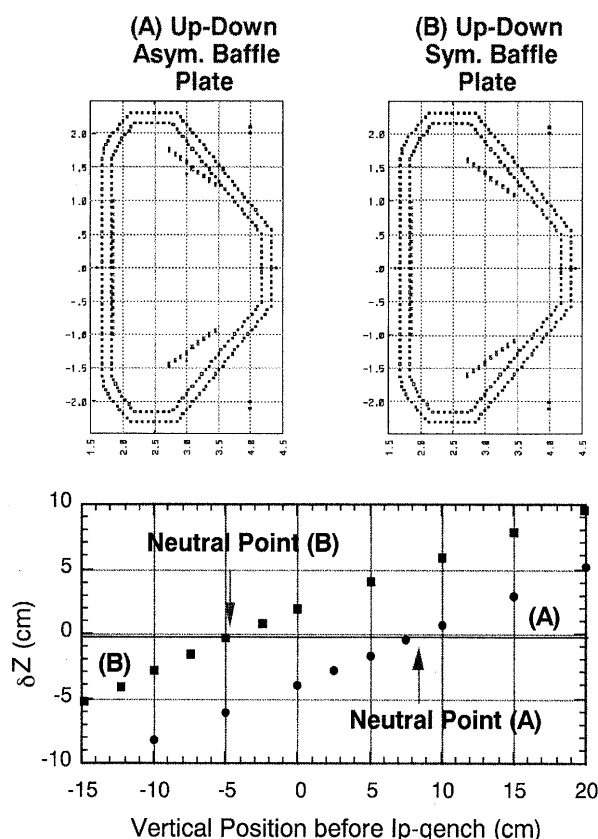


Fig. 11. Neutral point of the new JT-60U (JT-60SC) now on drawing board. Vertical shifts (δZ) were measured at 3 msec after the start of I_p quench. (A) Up-down asymmetric baffle plate (closed circle). (B) Up-down symmetric baffle plate (closed box).

の分布がVDEと深くかかわっていることがわかったことから、JT-60Uと異なるシェル構成を持つ Alcator C-ModやASDEX-Upgradeとの国際研究協力が進んでいる。Alcator C-Modでは、銀を不純物として含みリチウム氷結ペレットをプラズマに入射してディスラプションを起こし、中立平衡点がTSCの予測に近い場所に存在することを実験で確かめている。ASDEX-Upgradeは、真空容器内部に上下逆に結線されたコイルをシェルとして持つ特殊な構成をしたトカマクで、はっきりとした中立平衡点が存在しないといわれている。現在、幾何学的配置や電気特性などのシェル構造あるいは断面形状や電流分布などのプラズマ平衡の詳細と中立平衡点とがどのように関係するのか、核融合炉の設計にとっても重要な問題であるため、日独による共同研究が行われている。

そのほか、今後のVDE回避研究として残された課題を思いつくままあげると、次のようになる。

- (1) 極端に高非円形のプラズマでは、上下移動の方向性が定まらない垂直不安定性が支配するので、中立平衡点

の概念が成り立たないはずである。しかしながら、これまでの研究では、かなり高非円形のプラズマに対しても中立平衡点は存在するようで、今のところ限界の非円形度は不明である。この問題は、ディスラプション時のVDEは大きく不安定化した垂直不安定性であるとする従来解釈の妥当性とも関係している。

- (2) 熱消滅の直後、プラズマの電流分布が急激に平坦化 ($\Delta I_i < 0$; I_i は内部インダクタンス) することを反映してトーラスを一周する強い負のワンターン電圧が生じ、ほぼ同時にプラズマ電流がパルス状に増加する現象が共通して観測されている。その際、プラズマがかなり垂直移動をしているため、中立平衡点の有効性の観点からその詳細な挙動の解明が必要である。
- (3) 中立平衡点の近くで行う能動的なフィードバック制御の最適化を進め、より確実にVDEを抑制する制御技術の開発が必要である。
- (4) 逃走電子の大量発生が懸念されているITERの緊急放電停止シナリオと整合するVDEの回避技術の開発が必要である。特に、プラズマ電流のほとんどを逃走電子が担う放電は、電流分布がピークした高 I_i 状態になるが、これをうまく制御しながら軟着陸させる見通しは今のところ立っていない。
- (5) 最近の研究によって、プラズマ電流分布の変動がVDEの挙動に大きな役割りを果たしていることが明らかにされつつある。高 I_i の改善閉じ込め配位や低 I_i の負磁気シア配位など、ITERで想定されている運転モードの詳細と整合する中立平衡点の高精度評価が必要である。
- (6) 緊急放電停止シナリオの最適化のため、核燃焼の高 β_p 状態から熱消滅、電流消滅、VDEおよびハロー電流の発生、さらに、逃走電子も含めたディスラプション挙動を総合的に模擬するシミュレーションが必要である[87]。

6. おわりに

トカマク核融合炉の研究開発において、ディスラプションの無害化研究の観点からVDEを回避することが中心的な課題であると考え、実験およびシミュレーション研究の現状を概説し、今後の発展を展望してみた。ディスラプションは依然としてトカマクにとって厄介な現象ではあるが、解決に向けて進めるべき研究の方向やどう取り組むべきかの処方は見えてきたといえよう。

謝辞

原研のJT-60Uで、一緒になってVDE回避の研究に取り組んでいただいている芳野隆治博士と関谷 譲博士に感謝いたします。Alcator C-ModとASDEX-Upgradeトカマクを用いた共同研究では、ディスラプション実験の実施とデータベースへのアクセスなどで特段のご配慮をいただきました、それぞれ、R.S. Granetz 博士と O. Gruber 博士および G. Pautasso 博士に心からお礼を申し上げます。この解説をまとめるにあたり、貴重なコメントをいただいた小関隆久博士、滝塚知典博士、白井 浩博士に心から感謝いたします。VDE回避研究に日頃からご支援をいただいている杉原正芳博士、狐崎晶雄博士、岸本 浩博士にお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Sakamoto *et al.*, Nucl. Fusion **41**, 865 (2001).
- [2] T. Fujita *et al.*, *Proc. 18th IAEA Fusion Energy Conference*, Sorrento, 2000, IAEA-CN-77/EX4/1, to be published in Nucl. Fusion (2001).
- [3] Y. Kamada *et al.*, *Proc. 18th IAEA Fusion Energy Conference*, Sorrento, 2000, IAEA-CN-77/OV1/1, to be published in Nucl. Fusion (2001).
- [4] Y. Kamada *et al.*, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1994 (*Proc. 15th Int. Conf.* Seville, 1994) IAEA, Vienna (1995) Vol.1. p. 651.
- [5] S. Ishida and JT-60 Team, Nucl. Fusion **39**, No. 9Y, 1211 (1999).
- [6] S. Ishida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **79**, 917 (1997).
- [7] ITER Physics Basis Editors, Nucl. Fusion **39**, 2251 (1999).
- [8] F.C. Schüller, Controlled Fusion and Plasma Physics 1995 (*Proc. 22nd Eur. Conf.* Bournemouth, 1995) Plasma Phys. Control. Fusion **37**, A135 (1995).
- [9] R. Yoshino *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **76**, 116 (2000).
- [10] B. Kadomstev, Plasma Phys. (Rus.) **1**, 710 (1975).
- [11] P.V. Savrukhin *et al.*, Nucl. Fusion **34**, 317 (1994).
- [12] P.L. Taylor *et al.*, Phys. Rev. Lett. **76**, 916 (1996).
- [13] B. Kadomstev and O. Pogutse, JETPh **65**, 575 (1973).
- [14] C.Z. Cheng *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **29**, 351 (1987).
- [15] M. Greenwald *et al.*, Nucl. Fusion **28**, 2199 (1988).
- [16] F. Troyon *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **26**, 209 (1984).
- [17] E.J. Strait *et al.*, Phys. Plasmas **1**, 1415 (1994).
- [18] S. Ishida *et al.*, Controlled Fusion and Plasma Physics 1997 (*Proc. 24th Eur. Conf.* Berchtesgaden, 1997) European Physical Society, Geneva (1997) Vol.21A, part II p.489.

- [19] H. Takenaga and the JT-60 Team, *Phys. Plasmas* **8**, 2217 (2001).
- [20] J.A. Wesson, *Nucl. Fusion* **29**, 641 (1989).
- [21] J.D. Callen *et al.*, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1978 (Proc. 7th Int. Conf. Innsbruck, 1978)* IAEA, Vienna (1978) Vol.1, p.415.
- [22] R. Yoshino *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **70**, 1081 (1994).
- [23] R. Yoshino *et al.*, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1994 (Proc. 15th Int. Conf. Seville, 1994)* IAEA, Vienna (1995) Vol.1, p.685.
- [24] G. Pautasso *et al.*, *Nucl. Fusion* **36**, 1291 (1996).
- [25] A.G. Kellman *et al.*, *Fusion Energy 1996 (Proc. 16th Int. Conf. Montreal, 1996)* IAEA, Vienna (1997) Vol. 1, p.739.
- [26] O. Gruber *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **35**, B191 (1993).
- [27] R. Yoshino *et al.*, *Nucl. Fusion* **36**, 295 (1996).
- [28] Y. Nakamura *et al.*, *Nucl. Fusion* **36**, 643 (1996).
- [29] Y. Nakamura *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.* **33**, 609 (1996).
- [30] R.O. Sayer *et al.*, *Nucl. Fusion* **33**, 969 (1993).
- [31] P. Noll *et al.*, *Fusion Engineering 1985 (Proc. 11th Symp. Austin, 1985)* IEEE, New York (1986) Vol.1, p.33.
- [32] E.J. Strait *et al.*, *Nucl. Fusion* **31**, 527 (1991).
- [33] R. Granetz *et al.*, *Nucl. Fusion* **38**, 449 (1998).
- [34] O. Gruber *et al.*, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1994 (Proc. 15th Int. Conf. Seville, 1994)* IAEA, Vienna (1995) Vol.1, p.675.
- [35] JET Team (presented by A. Tanga), *Fusion Energy 1996 (Proc. 16th Int. Conf. Montreal, 1996)* IAEA, Vienna (1997) Vol.1, p.723.
- [36] V. Riccardo *et al.*, *Fusion Engineering 1997 (Proc. 17th Symp. San Diego, 1997)* IEEE, Piscataway, NJ (1998) Vol.1, p.112.
- [37] P. Andrew *et al.*, *Fusion Engineering 1997 (Proc. 17th Symp. San Diego, 1997)* IEEE, Piscataway, NJ (1998) Vol.1, p.108.
- [38] A. Sakasai and JT-60 Team, *Fusion Engineering 1997 (Proc. 17th Symp. San Diego, 1997)* IEEE, Piscataway, NJ (1998) Vol.1, p.18.
- [39] N. Pomphrey *et al.*, *Nucl. Fusion* **38**, 449 (1998).
- [40] P.J. Knight *et al.*, *Nucl. Fusion* **40**, 325 (2000).
- [41] R.S. Granetz *et al.*, *Nucl. Fusion* **36**, 545 (1996).
- [42] J. Wesley *et al.*, *Fusion Energy 1996 (Proc. 16th Int. Conf. Montreal, 1996)* IAEA, Vienna (1997) Vol. 2, p.971.
- [43] Y. Neyatani *et al.*, *Nucl. Fusion* **39**, 559 (1999).
- [44] R. Yoshino and S. Tokuda, *Nucl. Fusion* **40**, 1293 (2000).
- [45] R. Jaspers *et al.*, *Nucl. Fusion* **36**, 367 (1996).
- [46] A.C. Janos *et al.*, *Plasma Physics and Controlled Fusion Research 1992 (Proc. 14th Int. Conf. Wuzburg, 1992)* IAEA, Vienna (1993) Vol.1, p.527.
- [47] G. Martin *et al.*, *Controlled Fusion and Plasma Physics 1995 (Proc. 22nd Eur. Conf. Bournemouth, 1995)* European Physical Society, Geneva (1995) Vol.19C, Part II, p.41.
- [48] R.D. Gill, *Nucl. Fusion* **33**, 1613 (1993).
- [49] R. Granetz, *private communication* (2000).
- [50] G. Pautasso *et al.*, *Proc. 1998 ICCP & 25th EPS Conf. On Controlled Fusion and Plasma Physics*, Prague (1998) Part I, p.275.
- [51] D. Wroblewski *et al.*, *Nucl. Fusion* **37**, 725 (1997).
- [52] G. Raupp *et al.*, *Fusion Technol.* **32**, 444 (1997).
- [53] P. Franzen *et al.*, *Controlled Fusion and Plasma Physics 1996 (Proc. 23rd Eur. Conf. Kiev, 1996)* European Physical Society, Geneva (1996) Vol.20C, Part I, p.87.
- [54] T. Zehetbauer *et al.*, *Fusion Technology 1996 (Proc. 19th Symp. Lisbon, 1996)* North Holland (1996) Vol.1, p.925.
- [55] A.W. Morris *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 1254 (1990).
- [56] D.A. Kislov *et al.*, *Nucl. Fusion* **37**, 339 (1997).
- [57] H. Zohm *et al.*, *Nucl. Fusion* **39**, 577 (1999).
- [58] A. Isayama *et al.*, *Nucl. Fusion* **41**, 761 (2001).
- [59] 小関隆久, 諫山明彦: *プラズマ・核融合学会誌* **77**, 409 (2001).
- [60] M. Rosenbluth *et al.*, *Nucl. Fusion* **37**, 955 (1997).
- [61] S. Putvinski *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **241-243**, 316 (1997).
- [62] B.V. Kuteev *et al.*, *Nucl. Fusion* **35**, 1167 (1995).
- [63] R.S. Granetz *et al.*, *Fusion Energy 1996 (Proc. 16th Int. Conf. Montreal, 1996)* IAEA, Vienna (1997) Vol.1, p.757.
- [64] G.L. Schmidt *et al.*, *Controlled Fusion and Plasma Physics 1995 (Proc. 22nd Eur. Conf. Bournemouth, 1995)* European Physical Society, Geneva (1995) Vol. 19C, Part IV, p.21.
- [65] R. Yoshino *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **39**, 313 (1997).
- [66] P.B. Parks and R.J. Trunbull, *Phys. Fluids* **21**, 1735 (1978).
- [67] S.L. Milora *et al.*, *Nucl. Fusion* **35**, 657 (1995).
- [68] D.G. Whyte *et al.*, *Controlled Fusion and Plasma Physics 1997 (Proc. 24th Eur. Conf. Berchtesgaden, 1997)* European Physical Society, Geneva (1997) Vol.21A, Part III, p.1137.
- [69] R. Jayakumar *et al.*, *Phys. Lett. A* **172**, 447 (1993).
- [70] Y. Kawano *et al.*, *Fusion Energy 1996 (Proc. 16th Int. Conf. Montreal, 1996)* IAEA, Vienna (1997) Vol. 1, p.345.
- [71] Y. Kawano *et al.*, *Controlled Fusion and Plasma Physics 1997 (Proc. 24th Eur. Conf. Berchtesgaden, 1997)* European Physical Society, Geneva (1997) Vol. 21A, Part II, p.501.
- [72] R. Yoshino *et al.*, *Nucl. Fusion* **39**, 151 (1999).
- [73] S. Tokuda *et al.*, *Nucl. Fusion* **39**, 1123 (1999).
- [74] H. Tamai *et al.*, *Proc. 18th IAEA Fusion Energy Conference, Sorrento, 2000*, IAEA-CN-77/EX9/2.

- [75] R.S. Granetz *et al.*, Nucl. Fusion **36**, 545 (1996).
- [76] M.N. Rosenbluth and S.V. Putvinski, Nucl. Fusion **37**, 1355 (1997).
- [77] H. Tsutsui and R. Shimada, J. Plasma Fusion Res. **72**, 1252 (1996).
- [78] R. Khayrutdinov and V. Lukash, Plasma Phys. Rep. **22**, 91 (1996).
- [79] R. Khayrutdinov and V. Lukash, J. Comput. Phys. **109**, 193 (1993).
- [80] S.C. Jardin *et al.*, J. Comput. Phys. **66**, 481 (1986).
- [81] Y. Nakamura *et al.*, Plasma Phys Control. Fusion **38**, 1791 (1996).
- [82] R. Yoshino *et al.*, Nucl. Fusion **37**, 1161 (1997).
- [83] Y. Nakamura *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **72**, 1387 (1996).
- [84] Y. Shimomura, J. Plasma Fusion Res. **76**, 949 (2000). G. Janeschits *et al.*, Nucl. Fusion **40**, 1197 (2000).
- [85] Y. Gribov *et al.*, *Proc. 18th IAEA Fusion Energy Conference*, Sorrento, 2000, IAEA-CN-77/ITERP/02.
- [86] 石田真一, 松田慎三郎: プラズマ・核融合学会誌 **76**, 602 (2000); 松田慎三郎: プラズマ・核融合学会誌 **76**, 1203 (2000).
- [87] S.C. Jardin *et al.*, Nucl. Fusion **40**, 923 (2000).