

原研における炉心プラズマ基礎研究の最近の成果

平成9年9月2日
日本原子力研究所

1. はじめに

日本原子力研究所では、主にJT-60を用いた閉じ込め性能の向上とトカマク定常化を目指した実験研究を行っており、これと同時に（１）機動性を活かしたJFT-2Mによる先進的な実験研究、（２）計算科学の手法を取り入れた理論・計算機シミュレーションの研究、（３）炉心プラズマ診断技術の研究開発など、炉心プラズマに関する基礎的な研究を行っている。これらの成果を総合的、効果的に活用して、ITER-EDAのための物理R&Dを進めるとともに、原研で検討を行っている定常トカマク炉(SSTR)の基礎の確立に役立っている。今回は、これら炉心プラズマの基礎研究として行われているJFT-2Mでの実験研究と理論・シミュレーション研究について、最近の成果を報告する。

2. JFT-2M における実験研究の進展

JFT-2Mでは中規模装置としての機動性を活し、当面JT-60では直ちに実施が困難な、あるいは、JT-60に先行して行うことが必要な研究課題を中心に研究を進めている。また、大学をはじめ国内各研究機関や国外研究機関との研究協力を積極的に行っている。将来は、強磁性体フェライト鋼を用いたITERリップル低減化試験や材料プラズマ試験等の先進的な研究を計画している。

2. 1 ディスラプション制御の研究

ITER物理R&Dの課題であるディスラプション制御法の開発に対して、JFT-2Mでは電子サイクロトロン共鳴（EC）波による磁気島の局所加熱の研究を進めており、テアリングモードを抑制してディスラプション回避が可能であることを世界で初めて実証した（図1）。この実験では磁気島の位相に応じたEC波パルスのフィードバック制御による磁気島中心加熱がディスラプション制御に有効であることを明らかにした。また、計算機シミュレーションによっても、EC波による電流分布制御が安定化に有効であることを示した。この研究は現在ITERの緊急課題であるEC磁気島抑制によるベータ値向上の先駆的成果として評価されている。

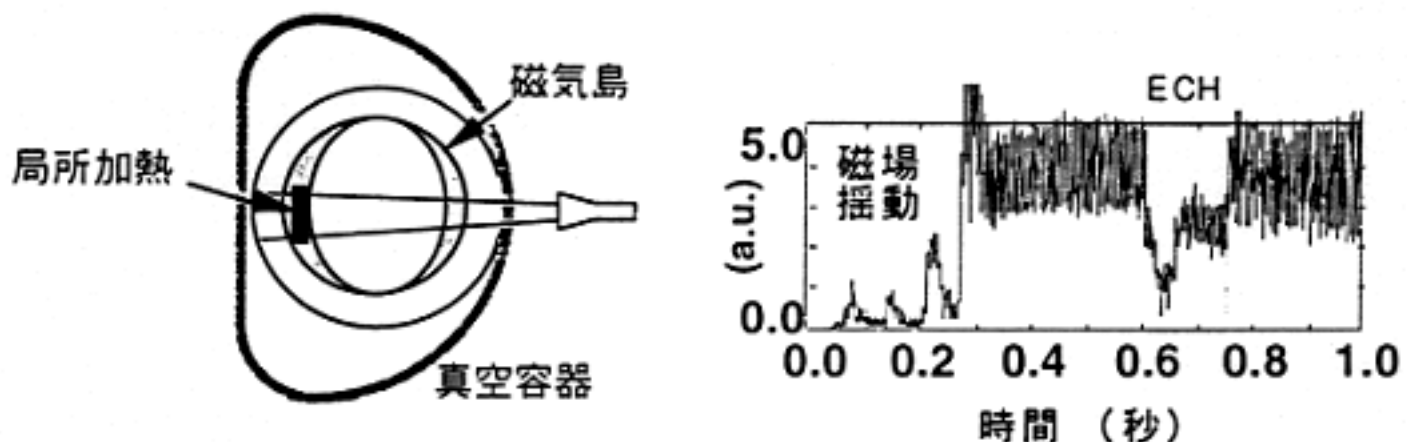
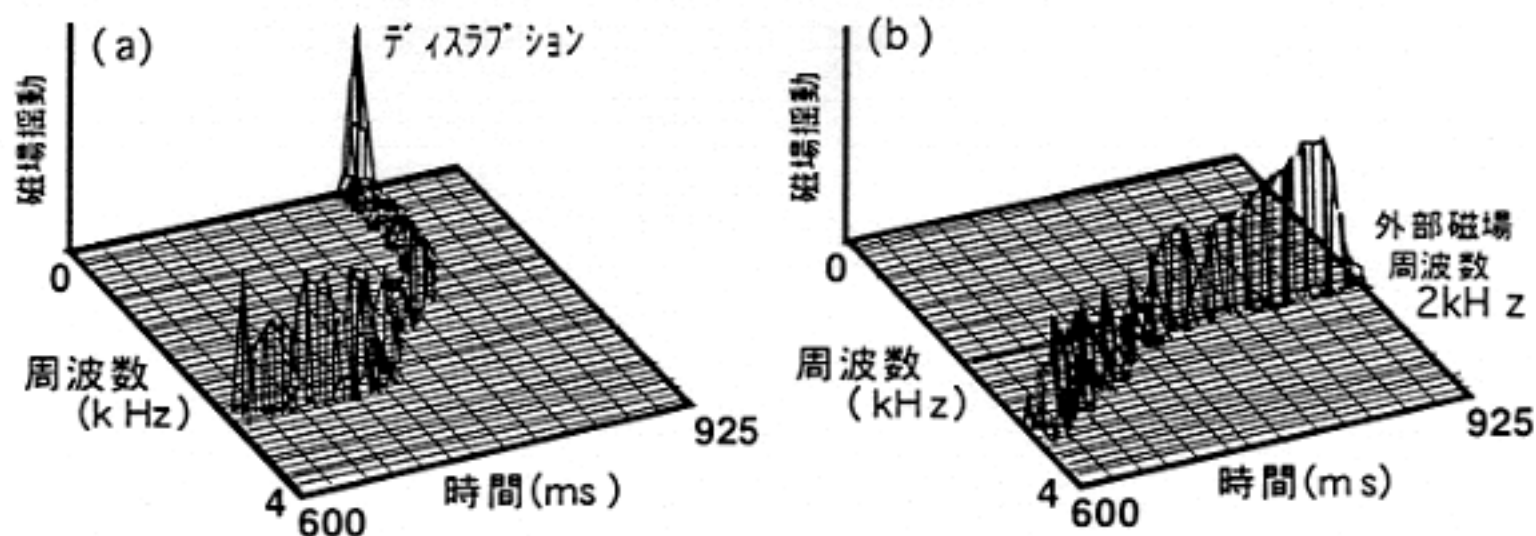


図1 EC局所加熱による磁気島抑制実験の結果

さらに、外部磁場コイルによりプラズマ中に不安定性と同じ構造の磁場を加え、ディスラプションを回避させることにも成功している（図2）。この成果は、JT-60やJET等の大型トカマク装置に同様の制御コイルを組み込む科学的な根拠を与え、プラズマ内部構造制御への道を開いた。



(a) 外部磁場を加えない場合 (b) 外部磁場を加えた場合

図2 外部回転磁場によるディスラプション制御実験

2. 2 Hモード物理の研究

ITERの標準運転方式であるELMy Hモードの研究の一環として、JFT-2Mでは、様々な周辺プラズマ制御の実験を進めてきた。特に、LH遷移パワーについては、ダイバータ板と真空容器に電圧をかけるバイアス実験や強いガス供給実験によって遷移パワーが低減出来ることを示した。さらに、この物理機構として、X点近傍での中性粒子の振舞いが重要であることを明らかにした。この成果は、中性粒子との荷電交換により生じた低エネルギー・イオンの損失が電場の形成を促し、LH遷移を引き起こすという理論を裏付けるものである。また、鋸歯状振動に伴うイオン熱パルスをも初めて観測し、鋸歯状振動による周辺イオン温度の上昇がLH遷移を引き起こすことを示した。さらに、エルゴディック磁場を使った能動的ELM制御によりHモードを定常的に持続できることを示した（図3）。現在、核融合科学研究所との協力により重イオンビームプローブ測定装置の整備を進めており、上記の実験成果をさらに発展させて、電界分布の測定によるHモードの物理の解明を行う予定である。

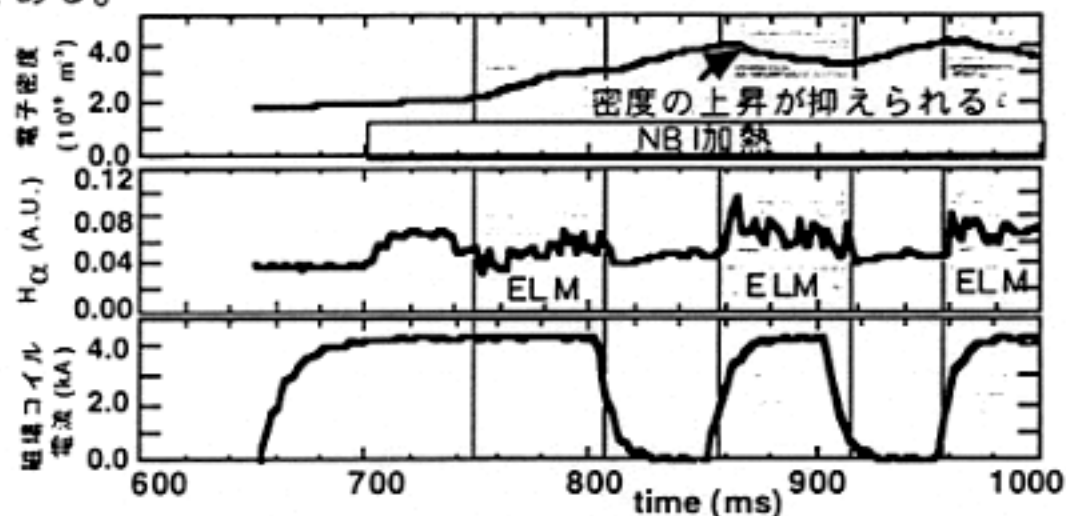
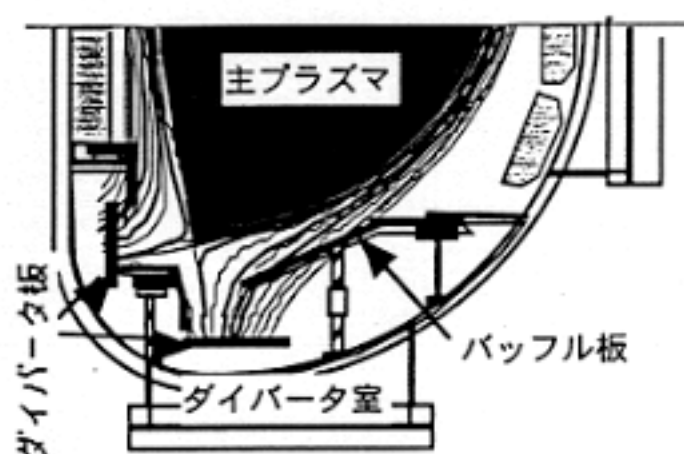


図3 エルゴディック磁場印加によるH α バースト（ELM）の制御

2. 3 ダイバータ物理の研究

ITER物理R&Dの重要課題である高密度Hモードと低温ダイバータの両立について、JFT-2Mでは、仕切板（バッフル板）を用いた閉ダイバータの研究を進めており、Hモード特性を維持したままで低温高密度ダイバータが実現できることを実証した（図4）。これは、ダイバータ部に圧縮された中性粒子が主プラズマ周辺部へ逆流することをバッフル板で抑制することにより、加熱中のガス供給量を増加させてダイバータ・プラズマの低温高密度化を図っても、Hモード特性が劣化しないことを明らかにしたものである。現在、グリーンワルド限界の8割程度の高プラズマ密度でもHモードと低温高密度ダイバータの両立が確認されており、今後、さらに閉じ込め特性の向上を図って行く予定である。これらの成果はJT-60Uのダイバータ改造に反映されており、また、ITERでの高密度Hモードと低温ダイバータの両立にも見通しを与えるものである。



JFT-2M閉ダイバータ概念図

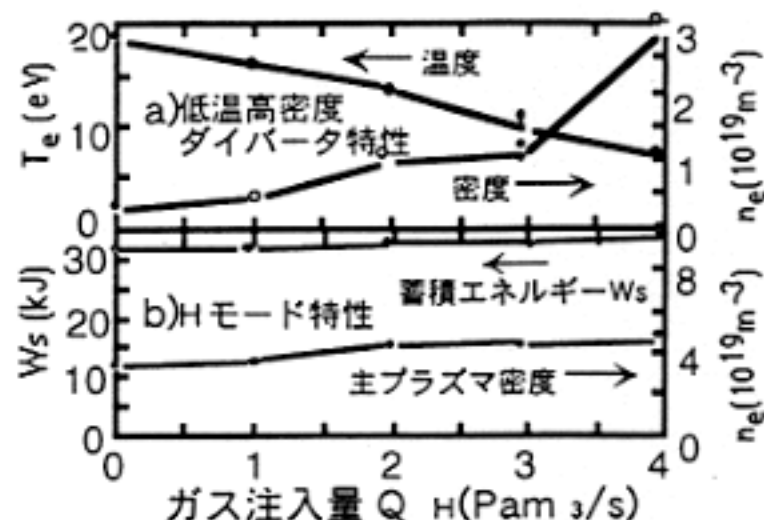


図4 JFT-2MにおけるHモードと低温ダイバータ両立の実験

2. 4 コンパクトトロイド（小プラズマ塊）入射実験計画

ITERでは高プラズマ密度での高閉じ込め運転の実現が重要な課題であり、コンパクトトロイド入射による密度向上が大きな期待を集めている。JFT-2Mでは、姫路工業大学との協力の下にコンパクトトロイド入射装置の整備を進めており、Hモード・プラズマへの初めてのコンパクトトロイド入射実験を今秋より開始し、ITERの要請に応じた高密度高閉じ込めHモード研究を進めることとしている（図5）。

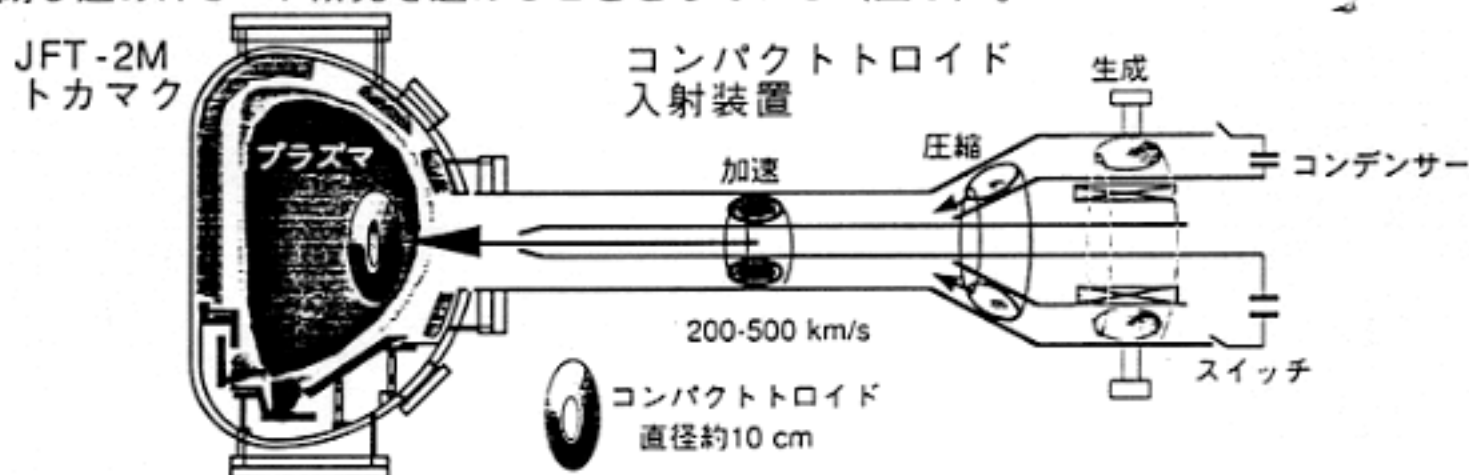


図5 JFT-2Mにおけるコンパクトトロイド入射模式図

2. 5 先進材料プラズマ試験計画

このようなプラズマ物理研究と並行して、JFT-2Mでは、原型炉の材料として有力視されている低放射化フェライト等の先進材料を用いた材料プラズマ試験を予定している。まず第1段階では、強磁性体であるフェライト鋼をトロイダルコイルの内側に設置してリ

リップルの低減化を試験し（図6）、負磁気シア配位によるITER 定常運転シナリオに向けたデータベースの整備を図る。さらに、第2段階では、フェライト鋼を用いたプラズマ適合性試験を行う事を計画し、低放射化核融合炉構造材料として有力視されているフェライト鋼のトカマクへの導入の可能性を明らかにする。

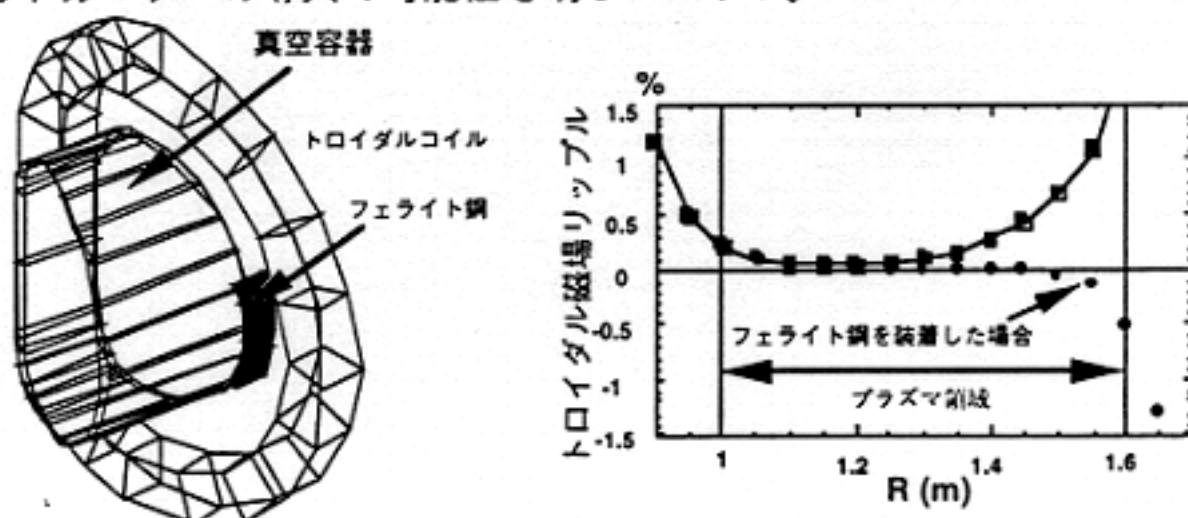


図6 JFT-2Mにおけるフェライト鋼設置によるトロイダル磁場リップル低減の計算例

3. 理論・計算機シミュレーション研究の進展

炉心プラズマ理論の分野では、JT-60などで観測される物理現象の理解に努めるとともにITERをはじめ将来の核融合炉での理論的課題について研究を進めているが、特に、近年の計算機の進歩と計算科学の成果を利用したトカマク数値実験（NEXT）の第1段階計画が進捗している。また、天体物理、光量子科学等との学際的な研究協力を積極的に進め、核融合プラズマ物理の一層の理解を図り、計算科学全般への貢献も目指した研究活動を進めている。また、近年の計算機ネットワークの発展により、実験解析やシミュレーションの分野における共同研究を国際的な規模で行っている。

3. 1 高自発電流トカマクにおける MHD 安定限界

JT-60で観測された高自発電流放電の実証(1989年)はトカマクの定常運転の可能性を切り開き、定常トカマク炉(SSTR)概念を確立して、近年の先進トカマク研究を主導する契機となった。高自発電流トカマクでは電流分布が必然的に凹となり、安全係数分布が負の磁気シア配位となるため、巨視的MHD安定性の観点からの問題が指摘されていた。これに対して、負磁気シア配位においても、プラズマ圧力分布の適正な制御により、通常の正磁気シア配位よりも安定領域が広げられる可能性があること、さらに、負イオンNB Iを用いたSSTRの安定性解析により、負磁気シア安定放電の理論的成立性などが示された(図7)。これらの研究成果は、その後、TFTR、DIII-D、JT-60などで負磁気シア配位による閉じ込め実験が飛躍的に展開する重要な理論的基盤となった。

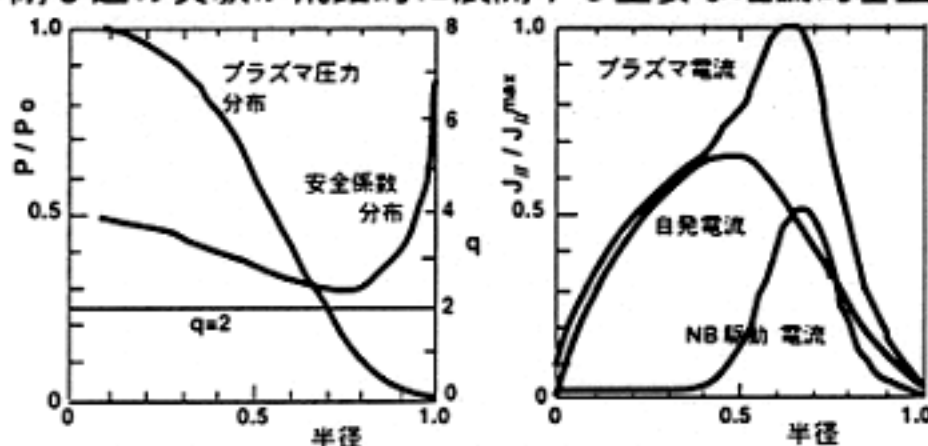


図7 MHD的に安定な高プラズマ圧力・高自発電流トカマク（SSTR）の計算例

3. 2 負磁気シア・プラズマにおける輸送障壁形成の理論

トカマク・プラズマにおける輸送現象の解明はプラズマ理論における最大の研究課題であるが、最近の粒子シミュレーション研究の進展により徐々に手がかりが得られつつある。原研においても、テキサス大学との研究協力により大規模粒子シミュレーション研究を進め、イオン温度勾配モードが巨視的スケールの乱流渦 ($\delta \sim (\rho a)^{1/2}$) を形成し、イオン熱異常性の要因となっていること、プラズマの回転シアによって乱流渦の規模が抑制され改善が得られること、等の成果を得ている。さらに、最近、負磁気シア配位でのシミュレーション研究により、負磁気シア配位での輸送障壁の形成を示唆する成果が得られている。すなわち、図8に示すように、負磁気シア配位では、シアが零になる半径 ($q'=0$ 面) の近傍でモード間結合が切れて乱流渦が分断され、プラズマ中心からの熱流が零シア半径近傍で遮断されるためである。今後、さらにプラズマの回転シアや輸送障壁形成の動的な過程を明らかにし、トカマクの閉じ込め改善の理論的シナリオを構築する努力が続けている。

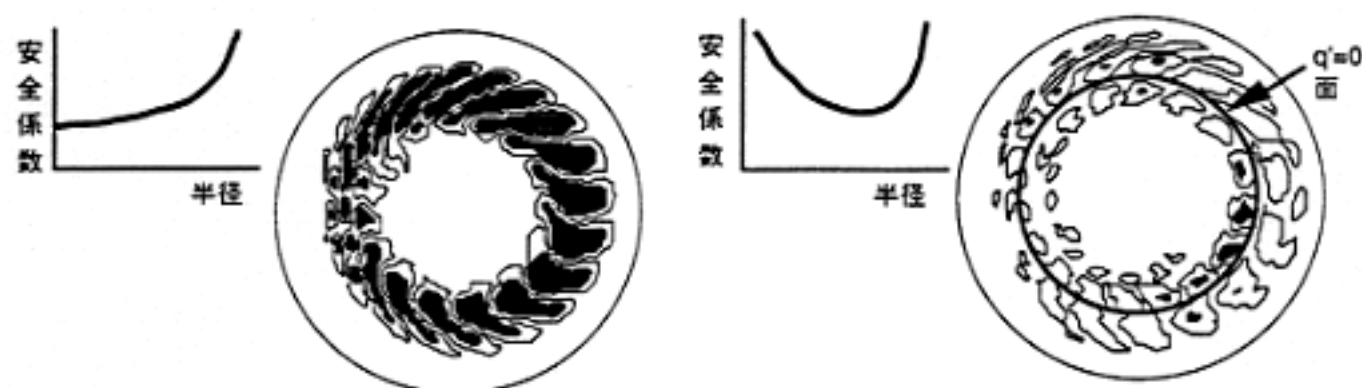


図8 正磁気シア分布と負磁気シア分布における乱流渦構造の違い
(粒子シミュレーションによるイオン温度勾配モードの計算例)

3. 3 垂直移動現象の解明と安定化の研究

トカマクでディスラプション等によりプラズマの急速な変化が生じた場合、プラズマ柱全体の急峻な垂直移動現象 (VDE) が起こり、真空容器等の周辺構造体に大きな電磁力が発生するため、その回避がITER設計上の最重要課題の一つとなっている。原研では、プリンストン大学プラズマ物理研究所 (PPPL) との研究協力の下にトカマク・シミュレーション・コード (TSC) による研究を進め、VDEが真空容器とプラズマとの電磁相互作用の結果生じる現象であること等を明らかにした。さらに、真空容器構造に依存してVDEが発生しないプラズマ垂直位置 (中立平衡点) が存在することを初めて示すとともに、JT-60Uの実験を通じてこの中立平衡点の存在を実証した (図9)。この研究結果に基づき、現在、ITERで中立平衡点に係わる本格的な研究が進められつつある。

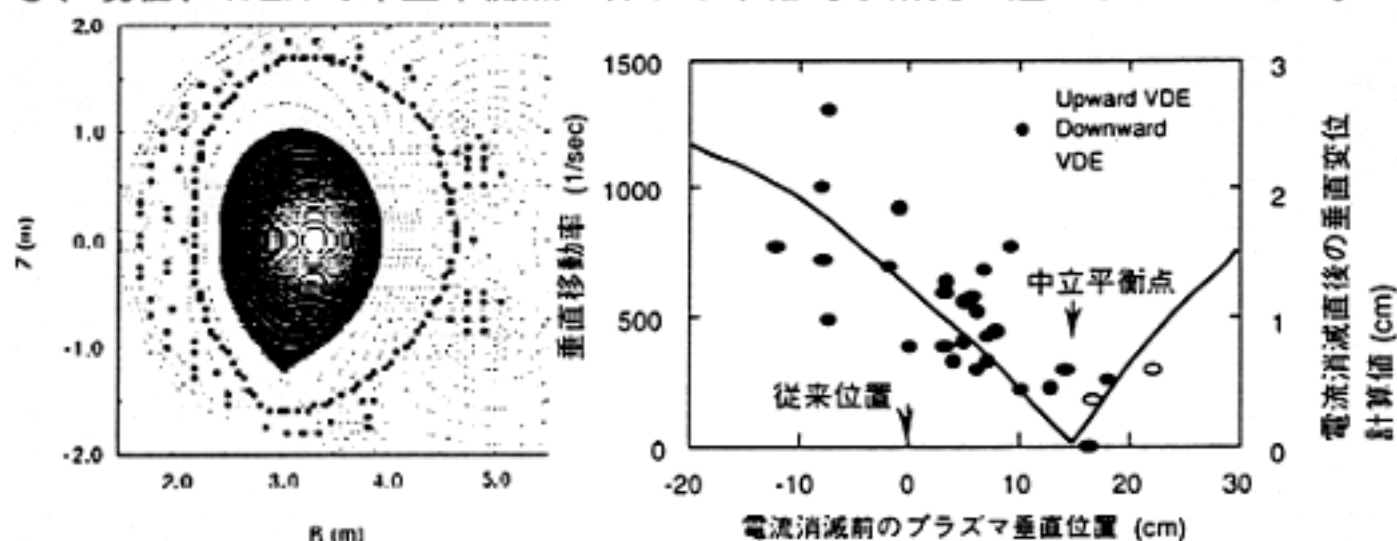


図9 JT-60におけるVDEに対する中立平衡点と実験結果

3. 4 ダイバータによる不純物粒子、中性粒子の抑制機能の解明

トカマク型核融合炉実現の鍵となるダイバータ研究では、モンテカルロ手法を用いた粒子シミュレーションを進め、ダイバータ形状効果等についての定量的なデータベースの提供を通して、実験データの解析やダイバータ設計に貢献している。特に、ダイバータ部での不純物粒子発生については、JT-60 での実験データと不純物粒子シミュレーション結果の詳細な比較により、化学スパッタリングによるメタン不純物の発生を確認するとともに、オープン型からW型閉ダイバータ構造への改良により主プラズマへの炭素不純物の混入を抑制できる可能性を示した(図10)。また、高閉じこめモードの質を劣化させると考えられているダイバータ領域から主プラズマへの中性粒子の逆流についても、粒子シミュレーションによる定量的な評価を進め、W型ダイバータ構造の採用により、粒子排気や中性粒子の逆流抑制を明らかにした。JT-60 でのダイバータ改造は、これらの解析結果に基づいて行われた。

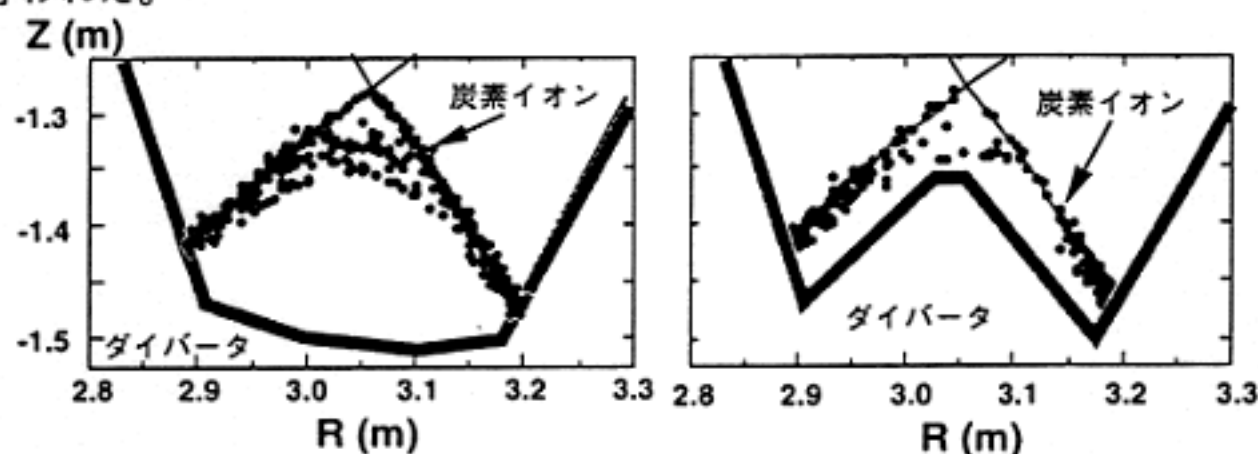


図10 ダイバータ構造の違いによる炭素不純物イオン挙動の解析
(不純物粒子モンテカルロ・シミュレーション結果)

4. おわりに

日本原子力研究所では、JT-60 と JFT-2M 及び理論・シミュレーションなどの基礎的な研究の密接な連携のもとに、ITER 及び将来の核融合炉における物理課題の解決に向けた炉心プラズマ研究を進めている。今後も、他の学問分野との連携を深めつつ、大学をはじめとする国内、国外研究機関、大学との研究協力を積極的に進め、炉心プラズマ研究の一層の展開を図って行く計画である。

以上

第 125 回核融合会議
平成 9 年 9 月 2 日

原研における
炉心プラズマ基礎研究の
最近の成果

日本原子力研究所

原研における炉心プラズマ研究

ITER -EDAのための物理 R&Dの推進
将来の核融合炉の為の基礎データの取得

JT-60

閉じ込め高性能化
トカマク定常運転

理論・シミュレーション研究
物理機構の解明
計算科学への貢献

JFT-2M 実験研究
機動性を活かした
先進的実験

計測技術開発研究
高度計測開発・整備

JFT-2M における実験研究の進展

中型トカマク装置の機動性を活かした先進的研究

- ディスラプション制御の研究
- Hモード物理の研究
- ダイバータ物理の研究

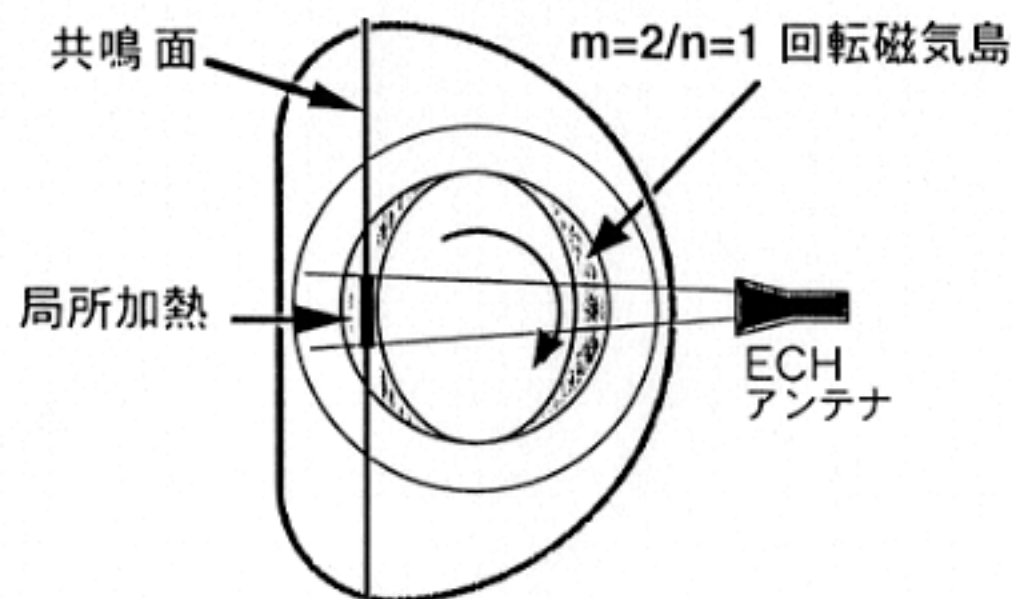
- コンパクトトロイド入射実験計画
ー新燃料供給法の研究
- 先進材料プラズマ試験計画
ーリップル低減化試験計画

国内、国外研究機関・大学との研究協力

核融合科学研究所、東京大学、横浜国立大学、神戸商船大学、
姫路工業大学、北海道大学、広島大学、理化学研究所、等
GA, MIT, PPPL、カールスルーエ研究所、中国科学技術大学、等

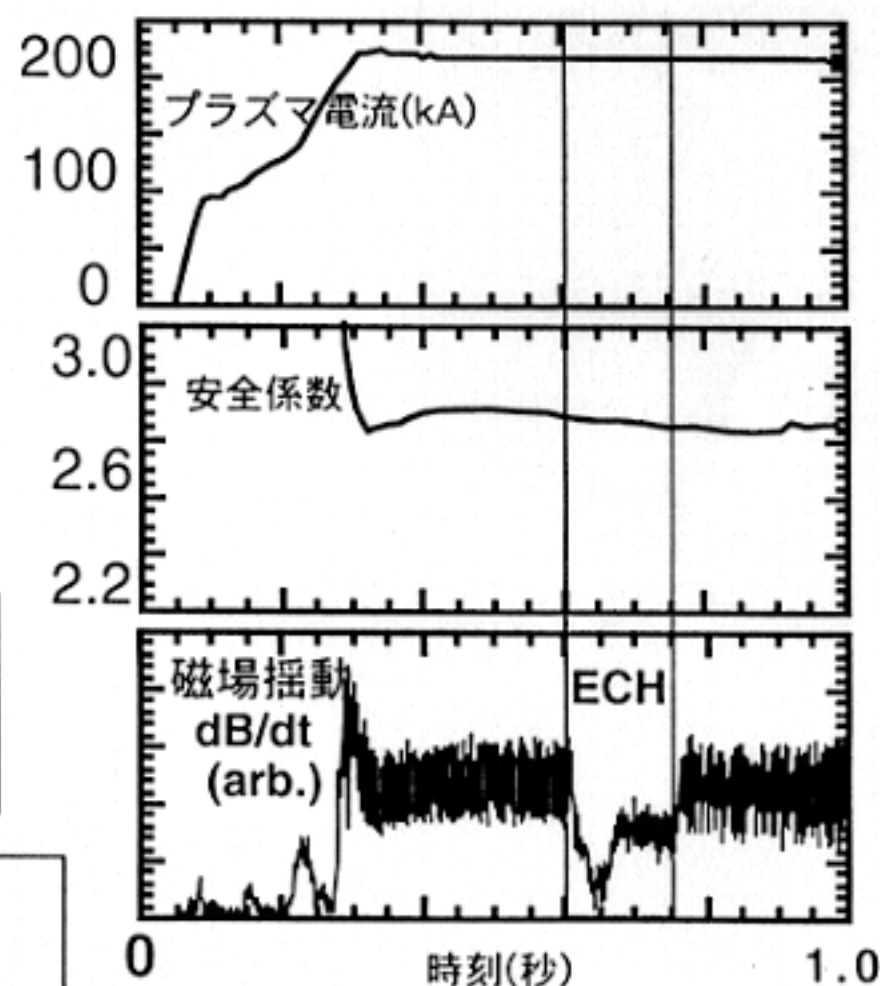
ディスラプション制御の研究

電子サイクロトロン共鳴(EC)局所加熱による磁場揺動の抑制



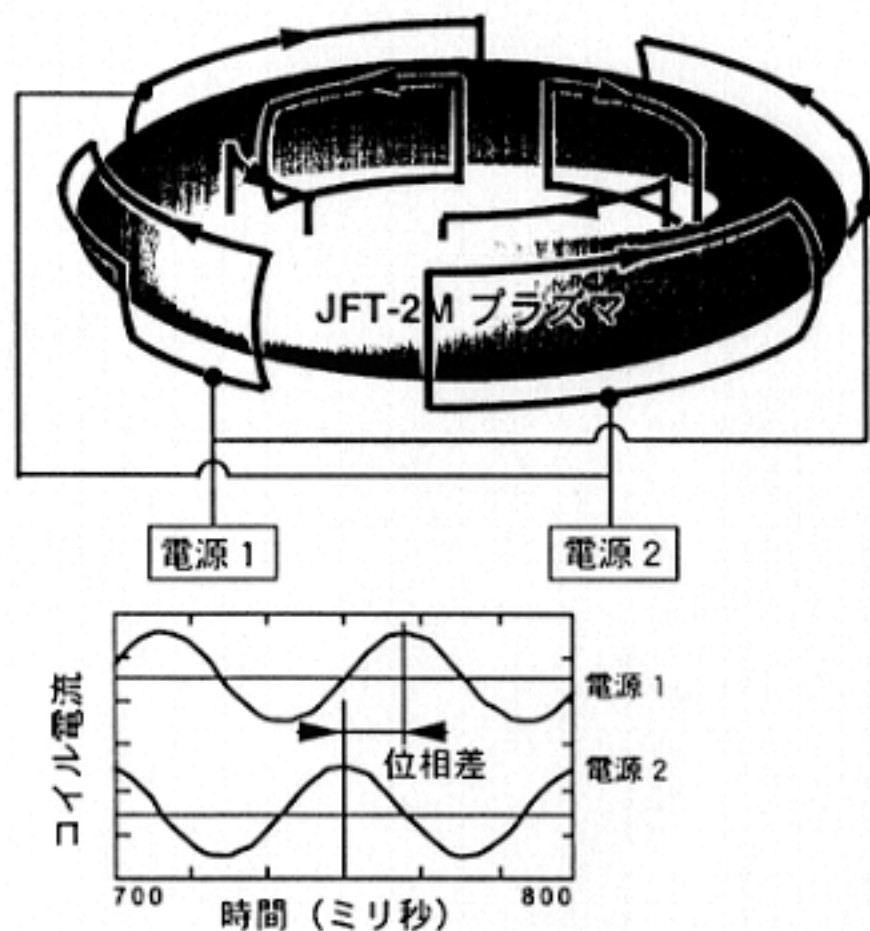
計算機シミュレーションによる物理機構の解明
→ 電気抵抗変化を通じた
磁気島内の電流分布制御

EC波によるディスラプション制御の
先駆的成果
⇒ITER高ベータ化の物理R&D課題

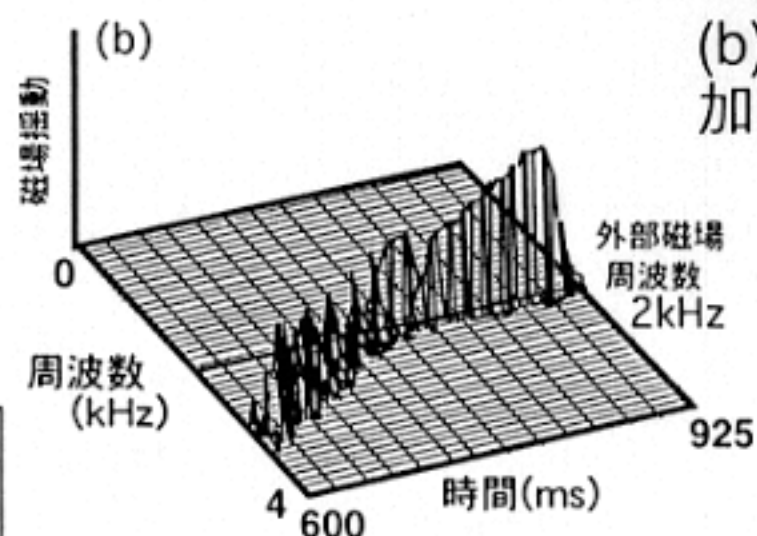
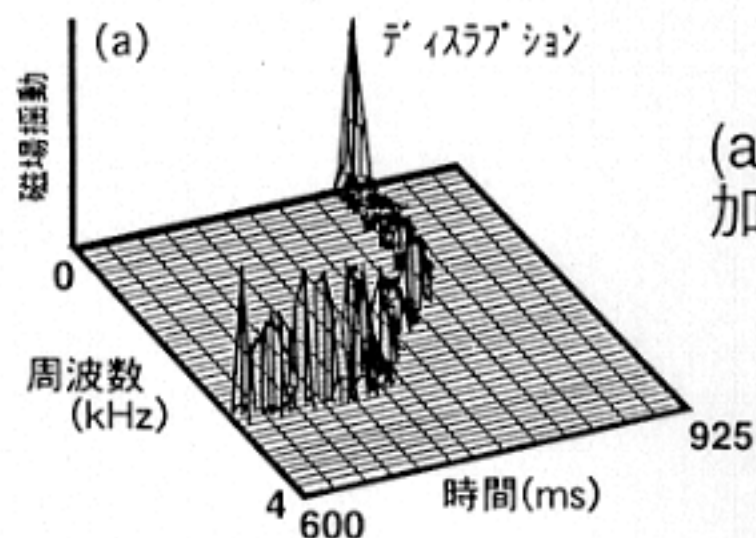


ディスラプション制御の研究

回転磁場コイル電流によるディスラプションの抑制

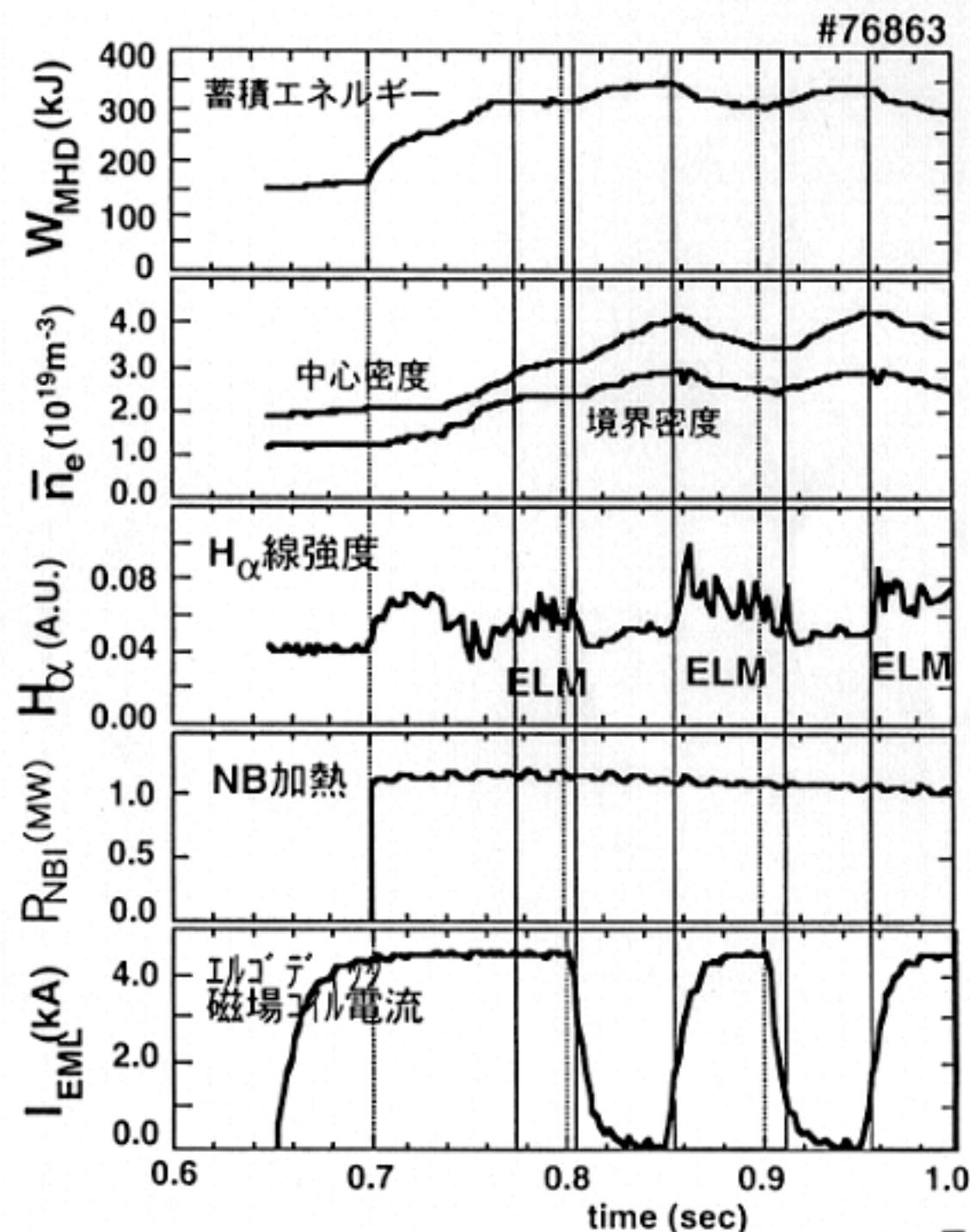


外部補助コイルによるプラズマ
内部構造制御への道を開く



Hモード物理の研究

- ダイバータ・バイアス実験やガス供給実験によるL/H遷移パワー低減の実証と遷移理論の検証
- 鋸歯状振動にともなうイオン熱パルスとL/H遷移の観測
- エルゴディック磁場を用いた能動的ELM制御の実証
Hモード定常化手法の開発
- 重イオンビームプローブ計測
電界分布測定→Hモード物理の解明
核融合科学研究所との共同研究



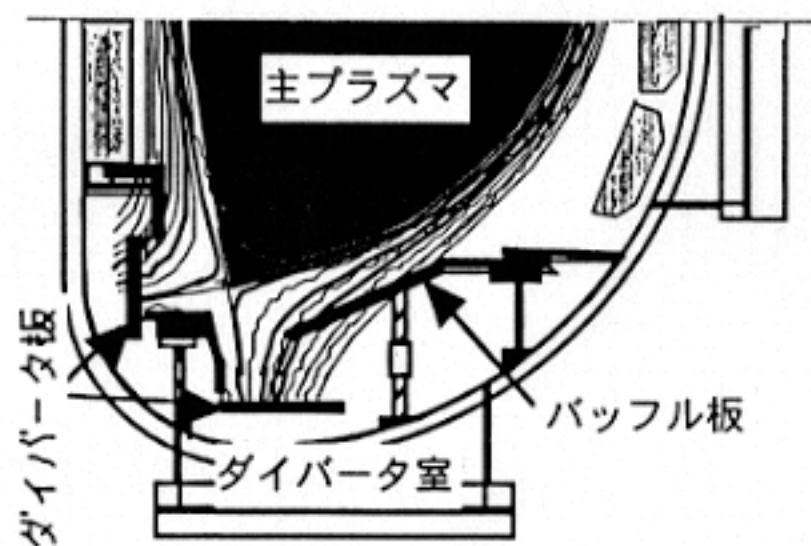
ダイバータ物理の研究

仕切板（バッフル板）を用いた閉ダイバータ実験：

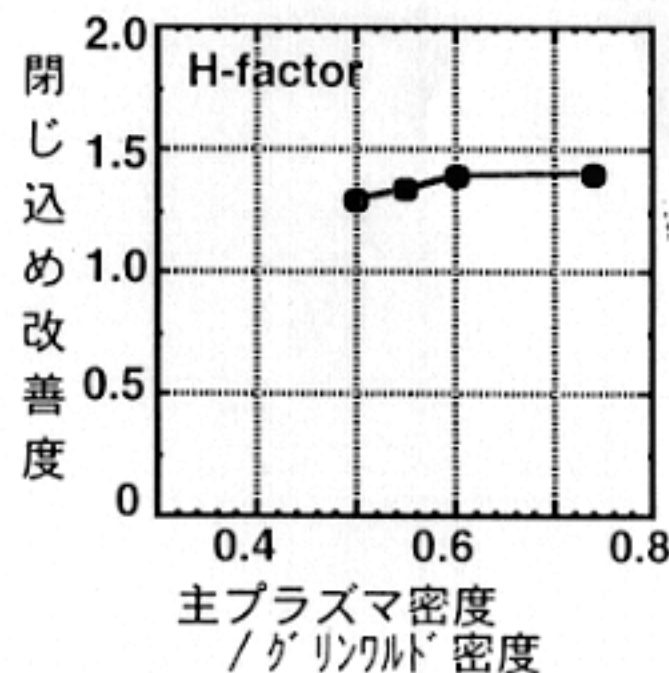
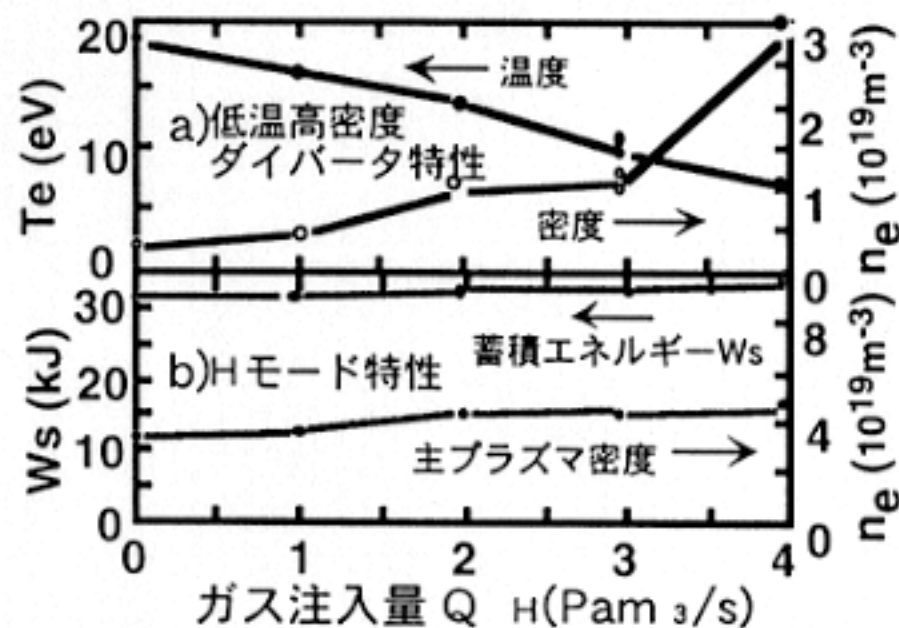
ダイバータ室内中性粒子の主プラズマへの混入を抑制

低温・高密度ダイバータとHモードの両立を実証

ITER高密度Hモード放電の可能性を示唆

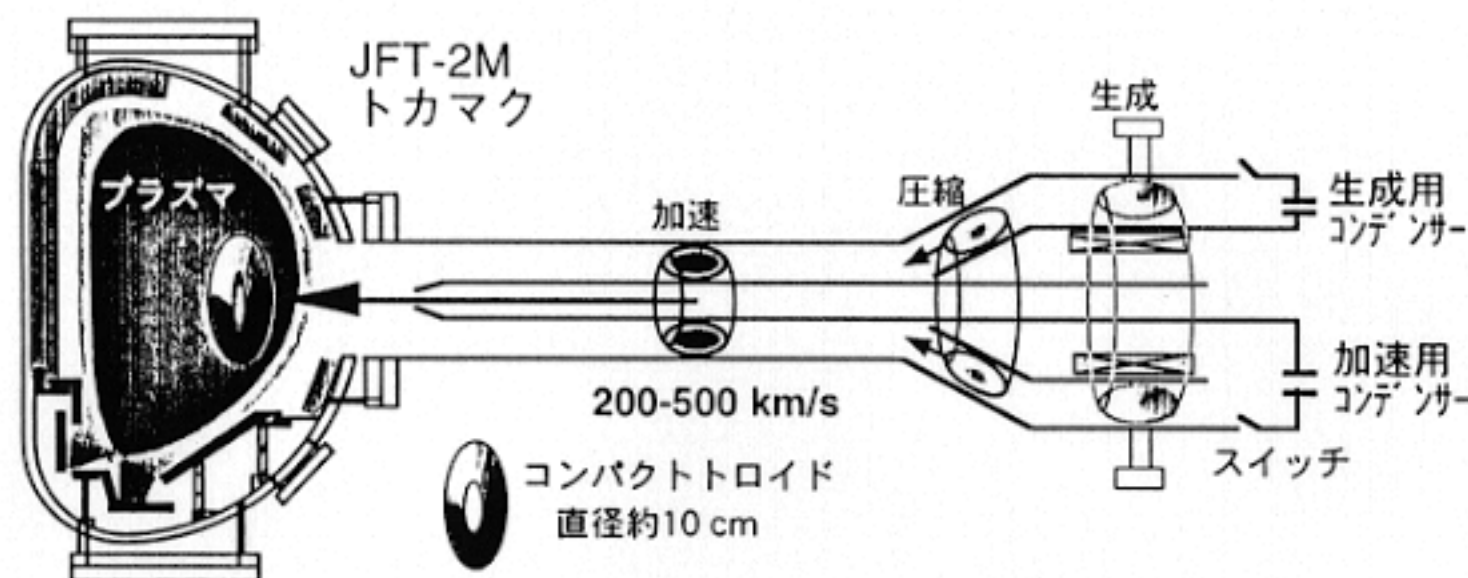


JFT-2M閉ダイバータ概念図

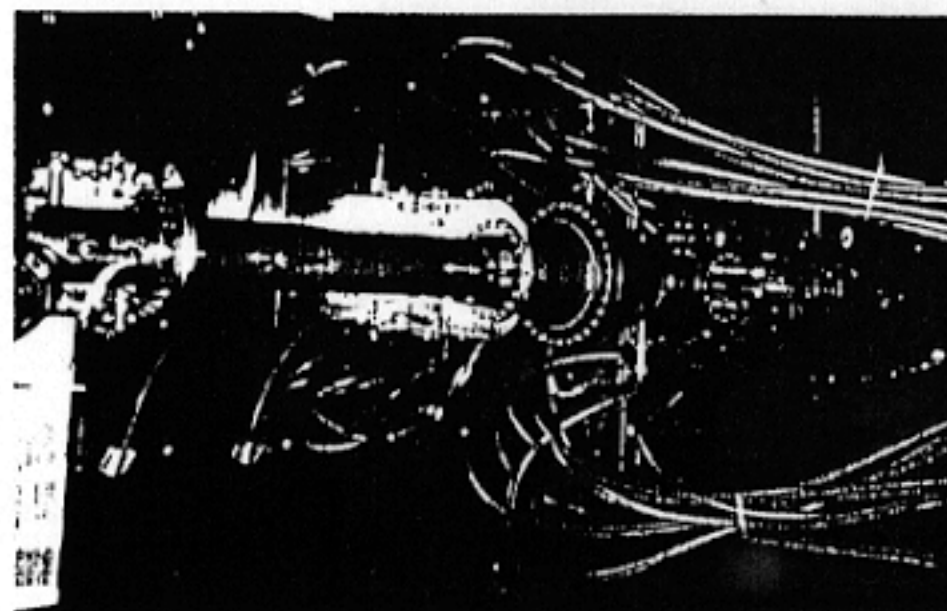


コンパクト・トロイド入射実験計画

Hモード・プラズマへの効率的な燃料供給法の研究
高密度高閉じ込めHモード・プラズマの生成へ



コンパクト・トロイド入射装置模式図



10月 実験開始の予定

有力な中心部燃料供給法として
開発の必要性を強調
(ITER詳細設計報告書)

CTプラズマパラメータ	目標値	達成値
速度 V_{CT} (km/s)	500	<200
密度 n_e ($\times 10^{21} \text{m}^{-3}$)	10	<2
長さ L_{CT} (m)	<0.3	>1
パイプ束 (mWb)	5	1

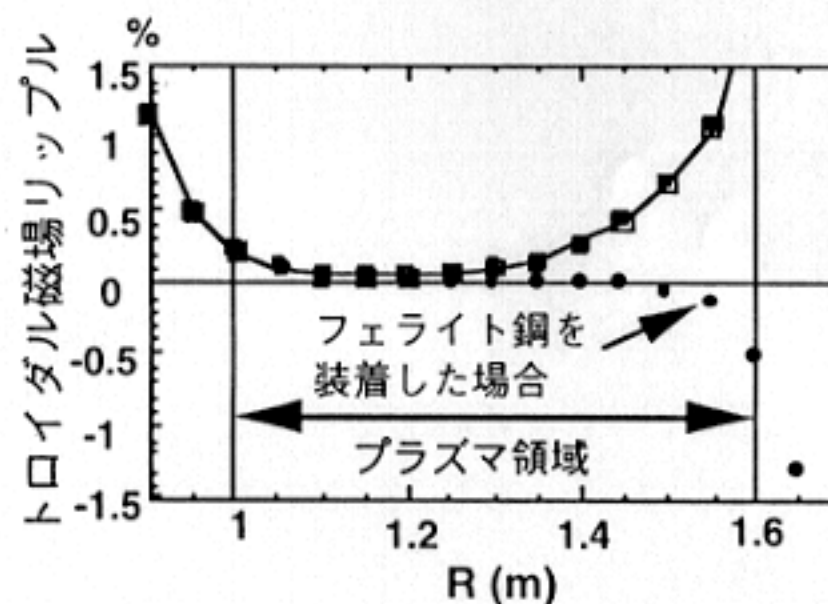
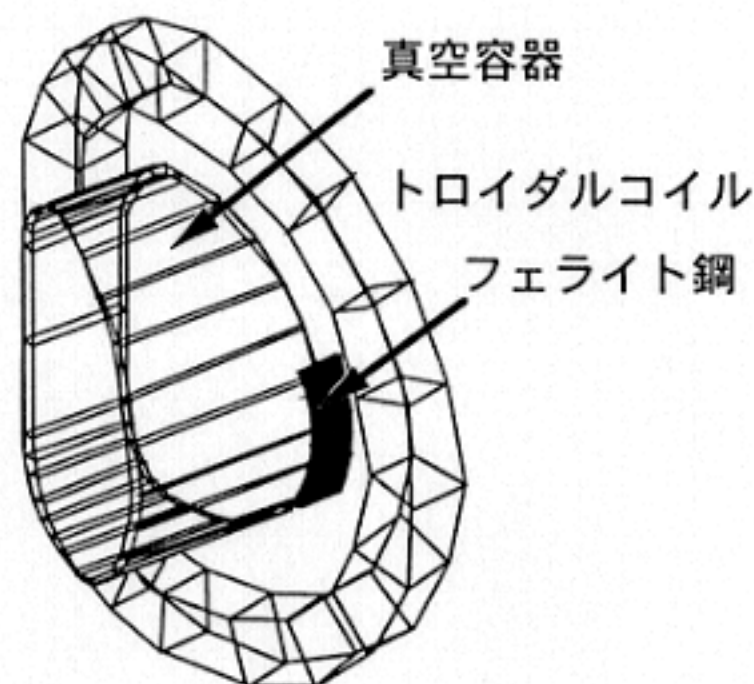
姫路工業大学との共同研究

先進材料プラズマ試験計画

第1期：リップル低減化試験計画

ITER定常運転シナリオにおける
高エネルギーイオン閉じ込めの改善に向けて

フェライト鋼装着
によるトロイダル
磁場リップルの低
減の計算例



第2期：先進材料プラズマ適合性試験計画

フェライト鋼を構造材として用いた場合の
着火特性、プラズマ制御性等を試験

理論・計算機シミュレーション研究の進展

炉心プラズマにおける物理現象の解明

ーJT-60、ITER、SSTRなど

計算科学の成果を利用した大規模計算機シミュレーション研究

ートカマク数値実験(NEXT)計画

- 高自発電流トカマクにおけるMHD安定限界
- 負磁気シア・プラズマにおける輸送障壁形成の理論
- 垂直移動現象の解明と安定化の研究
- ダイバータによる不純物粒子・中性粒子抑制機能の解明

学際的分野を含めた国内外の研究機関・大学との研究協力の推進
計算機ネットワークによる遠隔研究参加(実験解析等)の推進

高自発電流トカマクのMHD安定性

JT-60における高自発電流放電の実証

⇒定常トカマク炉(SSTR) 概念の確立

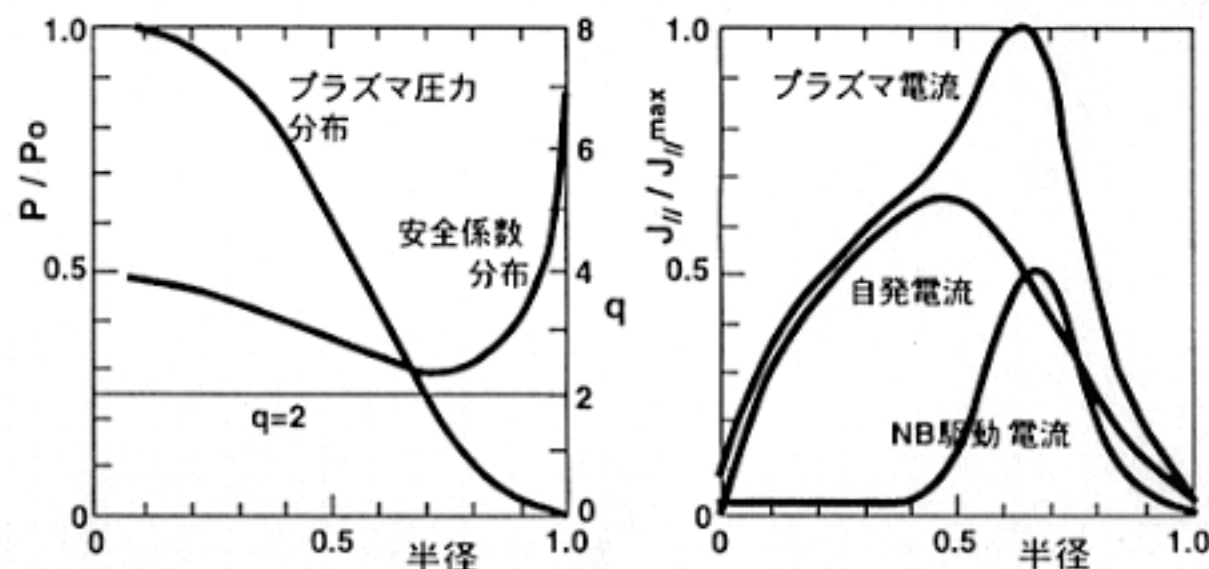
高自発電流トカマク：凹状電流分布（負磁気シア配位）

凹状電流分布のMHD安定性を理論的に確認

MHD安定性解析の観点からSSTRの成立性を確認

負イオンNBIによる電流分布制御の重要性

高プラズマ圧力・高自
発電流トカマク(SSTR)
でのMHD安定配位の
解析例

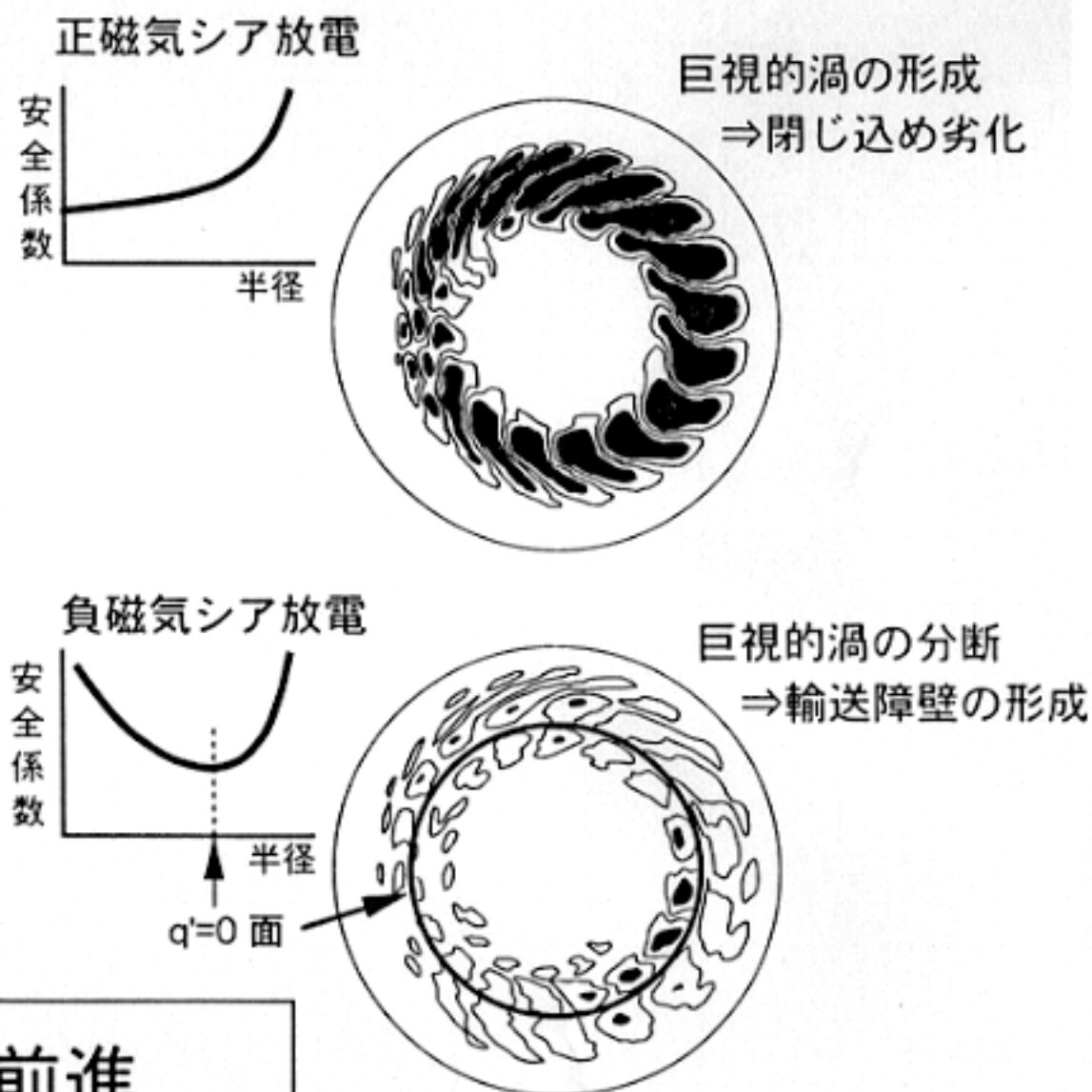


負磁気シア放電実験本格化の理論的基盤

負磁気シア放電における輸送障壁形成理論

大規模粒子シミュレーションによる
プラズマ乱流輸送過程の解析

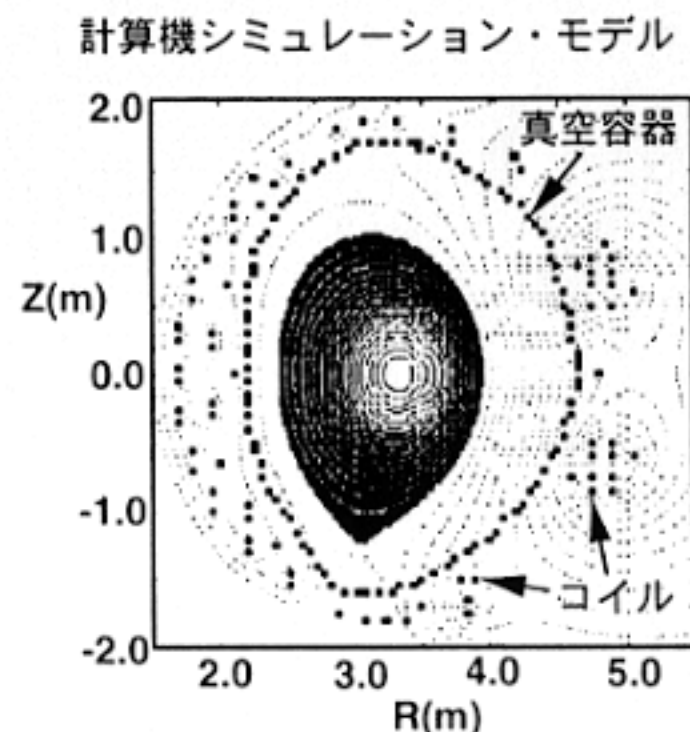
- イオン温度勾配モードによる
巨視的スケールの渦の形成
⇒イオン熱異常性の要因
- プラズマ回転シアによる
巨視的渦の振断
⇒高プラズマ圧力放電
による閉じ込め改善
- 負磁気シアによる
巨視的渦の分断
⇒輸送障壁の形成



トカマク輸送現象の解明に大きな前進

テキサス大学との共同研究

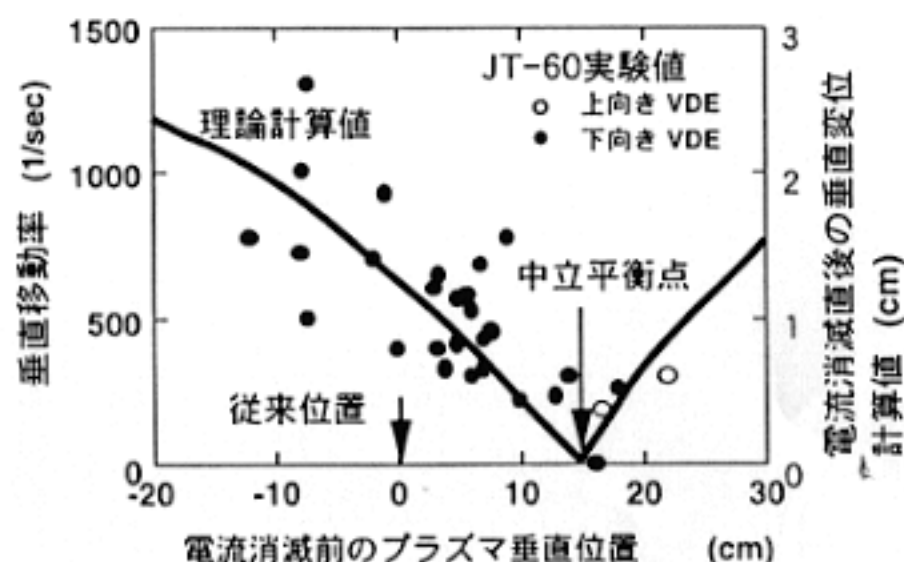
垂直移動現象の解明と安定化



プラズマ電流が消滅 (~ 0.01 秒)
垂直位置の急速な移動 (VDE)
 $\Rightarrow$ 装置に過大な電磁力

物理機構

1. 真空容器等構造物の非対称性から生じる渦電流のアンバランス
2. 磁場曲率(n 指数)の劣化



力の釣り合う位置の存在を予測
(中立平衡点の発見)
JT-60実験による検証
ITERへの導入の検討が進展

プリンストン大学プラズマ物理研究所との共同研究

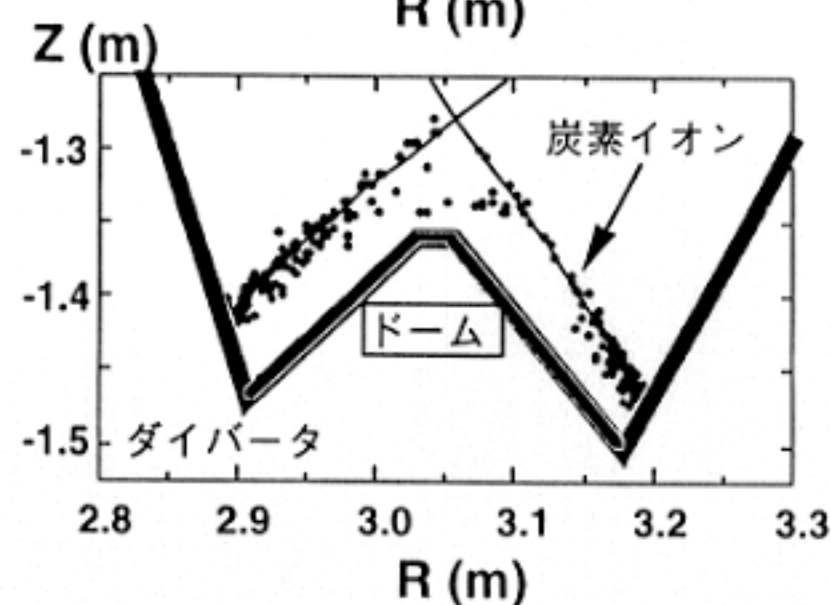
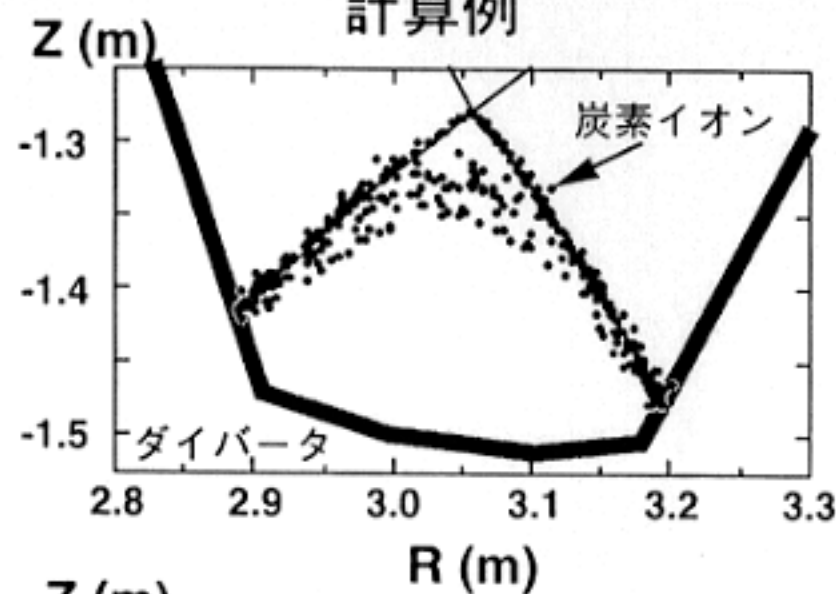
ダイバータによる不純物粒子・中性粒子制御

モンテカルロ粒子シミュレーション によるダイバータ機能の研究

- ① JT-60実験解析
 - 不純物発生機構の解明
 - 化学スパッタリングの重要性
 - 境界層プラズマでの中性粒子挙動
- ② ダイバータ形状効果の解析
 - ドームによる不純物粒子混入の抑制
 - 仕切板による中性粒子逆流の抑制

JT-60ダイバータ改造計画
への定量的指針

不純物粒子シミュレーション
計算例



ま と め

- JT-60とJFT-2M及び理論シミュレーションなどの基礎研究の密接な連携のもとに、ITER及び将来の核融合炉における物理課題の解決に向けた炉心プラズマ研究を進めている。
- 他の学問分野との連携を深めつつ、国内、国外研究機関・大学等との研究協力を積極的に進め、炉心プラズマ研究の一層の展開を図って行く予定である。