

JT-60の最近の成果と今後の計画について

平成9年2月19日
日本原子力研究所

1. 負磁気シアによる臨界プラズマ条件の達成

臨界プラズマ試験装置JT-60は、ITERのためのプラズマ開発（ITER物理R&D）を重点的に進めている。このほど、原研が1992年（平成4年）に定常トカマク核融合炉の運転方式として提案し、ITERにも採用が検討されている新しい運転方式（凹状電流分布を持つ負磁気シア運転、図-1）により、プラズマに注入されたエネルギーと核融合反応によって発生するエネルギーが等しくなる臨界プラズマの条件を達成した（図-2）。

この結果は、平成8年10月31日、11月1日の両日に行われた負磁気シア実験において得られたもので、主要なプラズマ性能は、エネルギー閉じ込め時間0.97秒、プラズマイオン温度1.9億度、プラズマ電子密度97兆個/cm³である（表-1）。

新しい運転方式では、凹状の電流分布の山の近傍に輸送障壁と呼ばれるプラズマの熱や粒子の流れをせき止められる現象が生じるために、閉じ込め性能が格段に改善される（図-3）。この改善は電流分布の山の両側でプラズマが乱れ、山の頂上では乱れが少ないために起こるものと考えられている。新しい運転方式による輸送障壁で電子の熱エネルギーをせき止められるのは、現在のところJT-60だけである。

重水素プラズマによる臨界プラズマ条件は、1992年（平成4年）欧州共同体のJETで一度達成したことが報告されている。

なお、今回の一連の実験は、プリンストン大学プラズマ物理研究所の遠隔実験参加のもとで行われた。

2. 負磁気シア配位の長時間維持

上記の負磁気シアによる臨界プラズマ条件の達成は、プラズマ電流の立ち上げ過程で形成される過渡的な凹状電流分布により実現したものであるが、負磁気シアの本来の運転形態である定常運転のために、以下の二つの実験を行った。

A. 低域混成波（LHW）による負磁気シアの形成と維持

プラズマ電流の立ち上げ時に形成された負磁気シア配位を、低域混成波により7.5秒間維持した（図-4）。低域混成波入射の後半では、ほぼ定常な電流分布が実現し、コイル通電時間の制限がなければ、より長時間あるいは準定常の負磁気シアの維持が可能であることを示すものである。

低域混成波によって維持された負磁気シア配位においても、1に述べたと同様の輸送障壁がイオンと電子の両方について形成され、総合的な閉じ込め性能の改善が観測された。

JT-60における低域混成波による負磁気シアの長時間維持の成功により、

ITERにおいても、最終設計に向けて低域混成波システムの設計を進めることとなった。

B. 高自発電流による負磁気シアの形成と維持

もともと負磁気シアの運転は、燃焼プラズマにおいて実現する高い自発電流割合のもとで実現する凹状電流をベースに考えられた。JT-60においては、強いNBI加熱のもとで高い自発電流割合のプラズマを生成し、この時形成される負磁気シアの長時間維持を試みた(図-5)。自発電流割合60%のもとで浅い負磁気シアが形成され、高いベータ値($\beta_p=2$, $\beta_p=2.5-3$)、高い閉じ込め性能(閉じ込め改善率 $H=2.5$)を2.5秒間にわたって維持した。ベータ値や閉じ込め性能の緩やかな低下は、新古典ティアリングモードによるものとされ、ITERの緊急物理R&Dとして研究が進められることとなっている。

3. 高ベータ運転による高イオン温度、高核融合積の実現

負磁気シアによる臨界プラズマ条件の達成にさきだち、平成8年8月の実験において、強いNBI加熱による高ベータ実験により、イオン温度5.2億度、核融合積 177 億度・秒・兆個/cm³を実現した。いずれも世界最高の値であるとともに、核融合積については、自己点火条件の5分の1に迫る高い値である(表-1、図-2)。

4. 無次元ITER模擬実験

既存のトカマク装置を用いてITERの性能予測を行うために、プラズマの無次元パラメータである規格化ラーマー半径 ρ^* 、規格化衝突周波数 ν^* 、ベータ値 β 等をITERの設計値に合わせ、規格化した閉じ込め時間 τ_E/ρ^* のパラメータ依存性を調べた。その結果、ITERで想定されているパラメータ領域で、閉じ込め性能が楽観的なジャイロボーム則に従うことが示され、自己点火を目指すITERの設計に強い科学的裏づけを与えるものとなった(図-6)。この結果は、JET、DIII-Dの実験においても確認されている。

5. 今後の計画

JT-60は、上記の先進的な研究を通してITER EDAに最大限の貢献をしてきた。今後も負イオンNBI(500keV/10MW)を用いた電流分布制御による高性能プラズマの実現や新しいダイバータ構造(図-7)の採用による高放射冷却ダイバータ研究、その他のITER物理R&Dの課題にとりくんで行く予定である。特に重要な物理R&Dの課題は、ITERで想定されている高い密度、高いベータ値、高い放射冷却ダイバータの条件のもとで、所定の閉じ込め性能を確保できることを実証することであり、JT-60の先進的な研究により、これらに貢献して行く考えである。

表ー1 世界の3大トカマクの閉じ込め性能

(同一ショットでの達成パラメータ)

	JT-60		TFR	JET
特 徴	負磁気シアモード	高プラズマ圧力 Hモード	スーパー ショット DT放電	高イオン温度 Hモード
閉じ込め時間 (秒)	0.97	0.75	0.24	1.2
中心電子密度 (兆個/cm ³)	97	60	85	51
中心イオン密度 (兆個/cm ³)	49	46	63	41
中心イオン温度 (億度)	1.9	5.2	5.1	2.2
核融合積 (億度・ 秒・兆個/cm ³)	90	177	77	108
エネルギー 増倍率	1.05	0.43	0.3	1.1

図-1 高プラズマ圧力Hモードと負磁気シアモードの運転

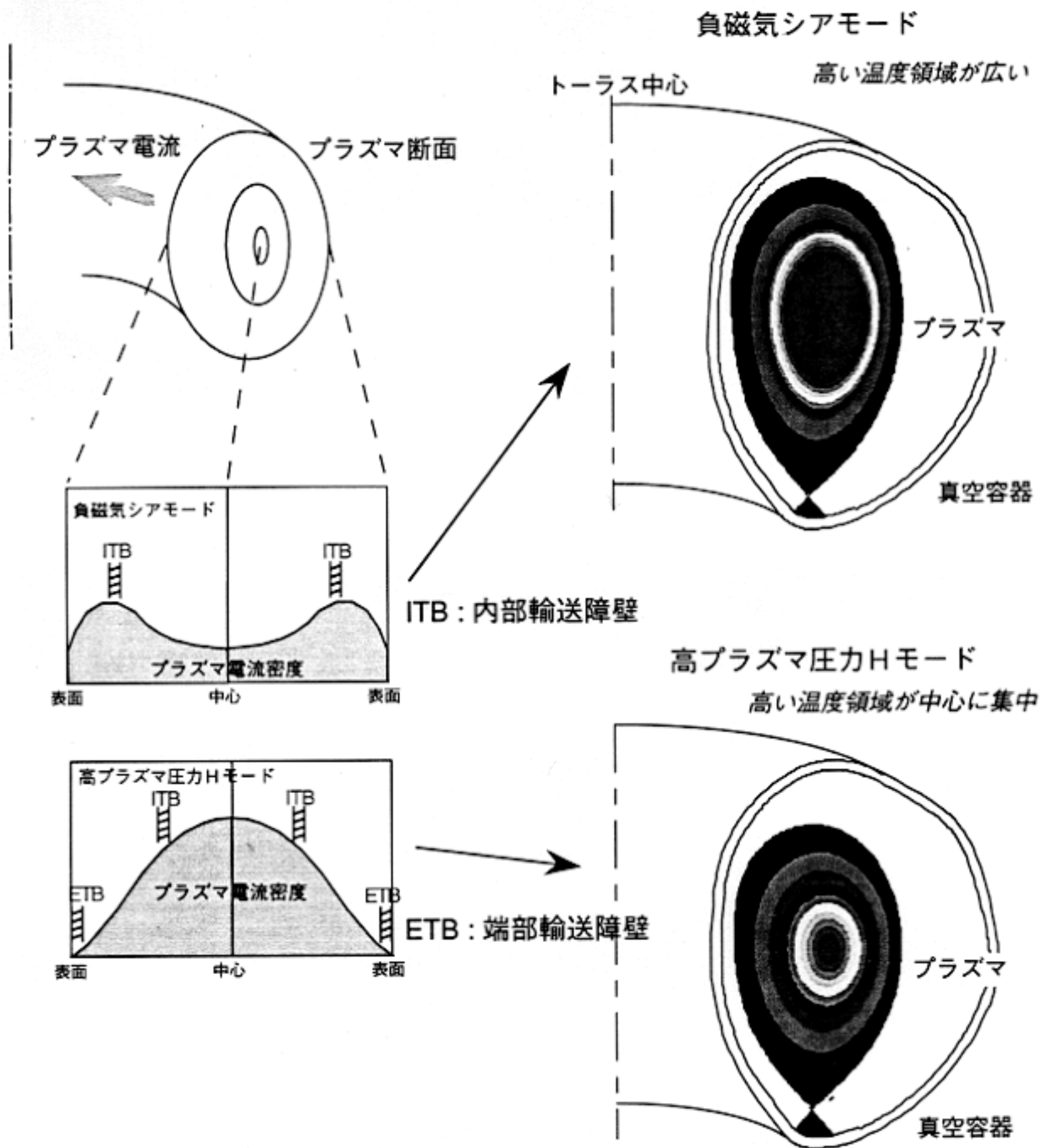


図-2 トカマクプラズマ性能の進展

平成8年11月

閉じ込め時間×中心密度
(秒・兆個/立方cm)

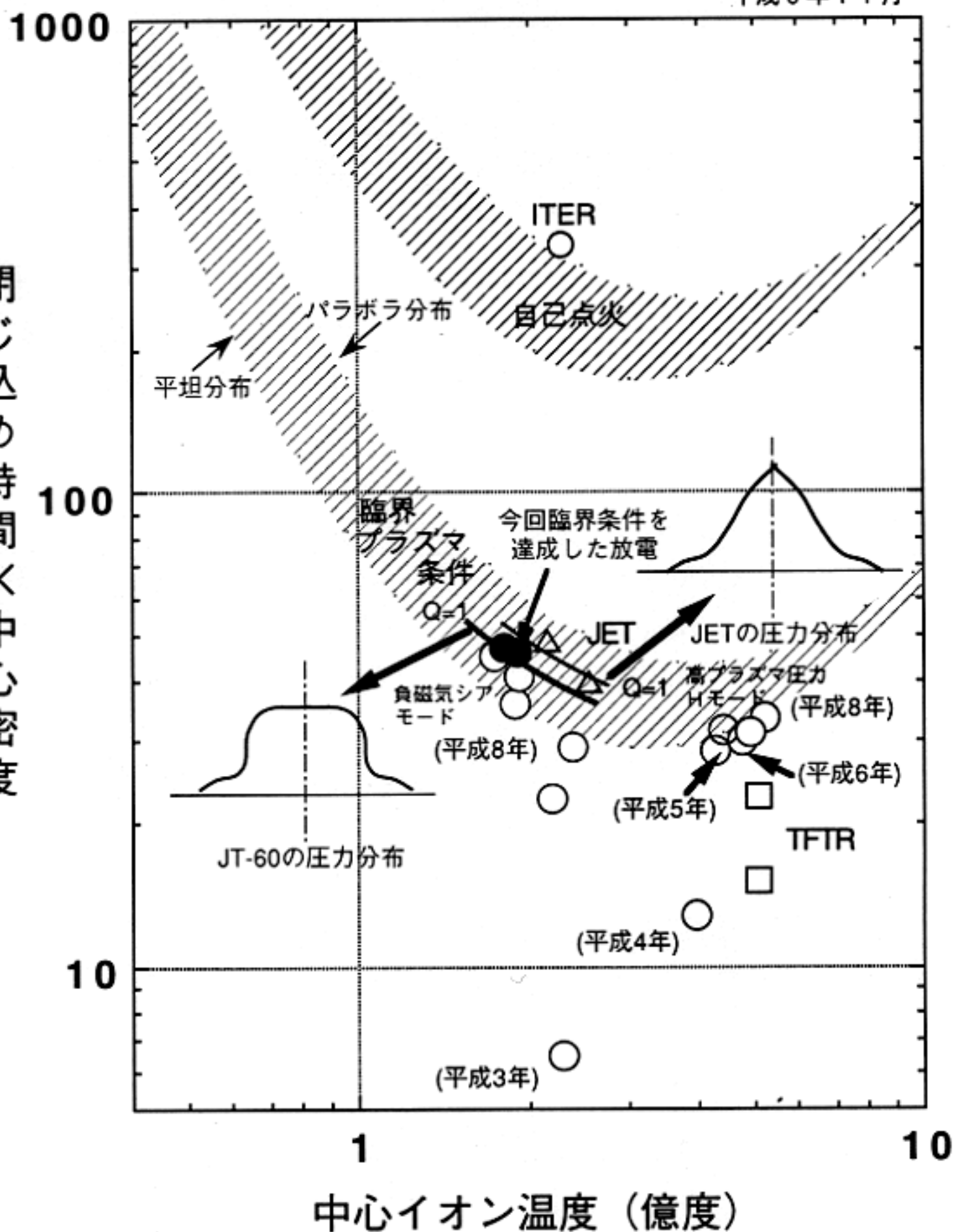


図3 負磁気シアによる輸送障壁の形成

プラズマ内部に輸送の障壁ができる

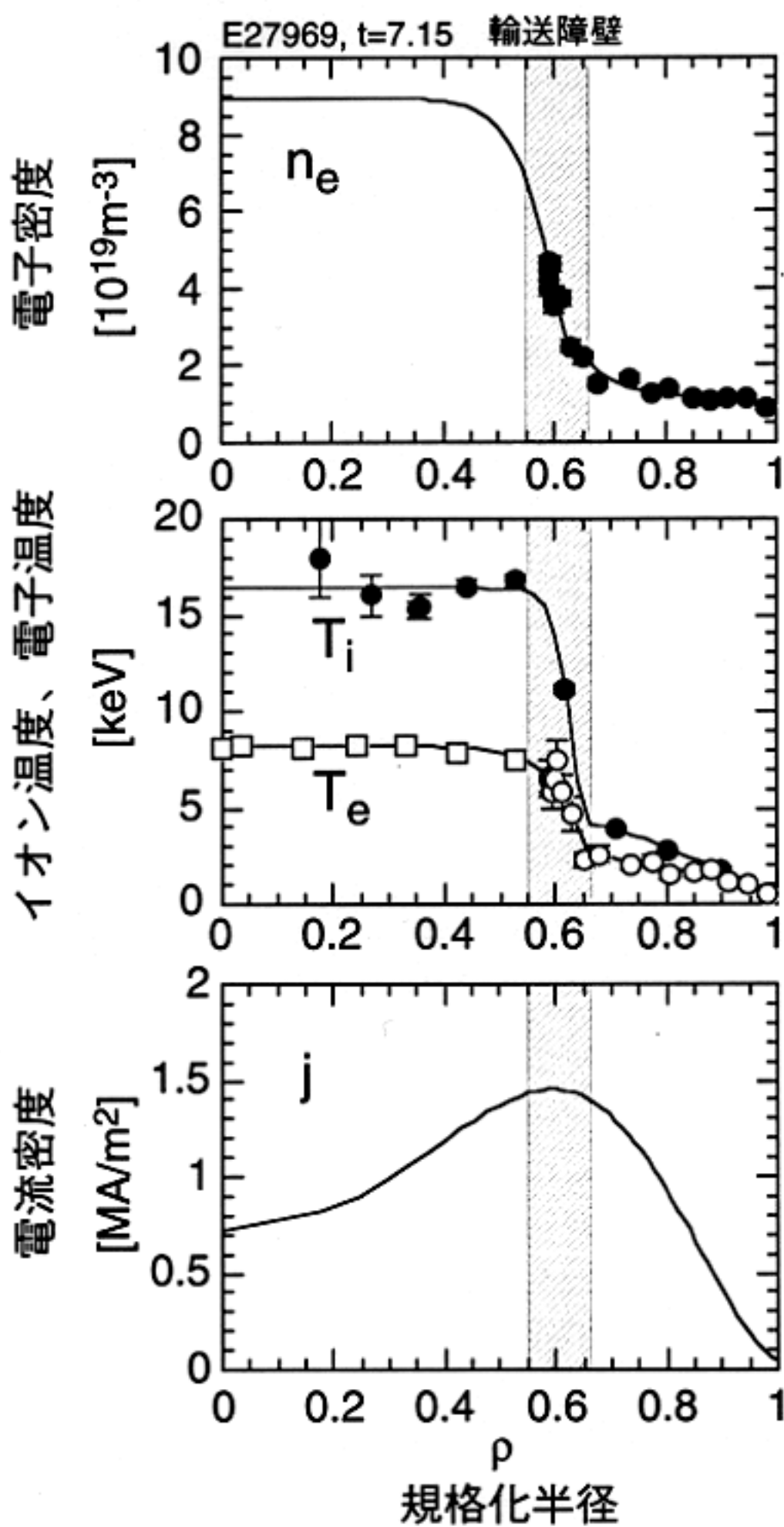


図-4 低域混成波による負磁気シアの維持

低域混成波により負磁気シアを7.5秒維持

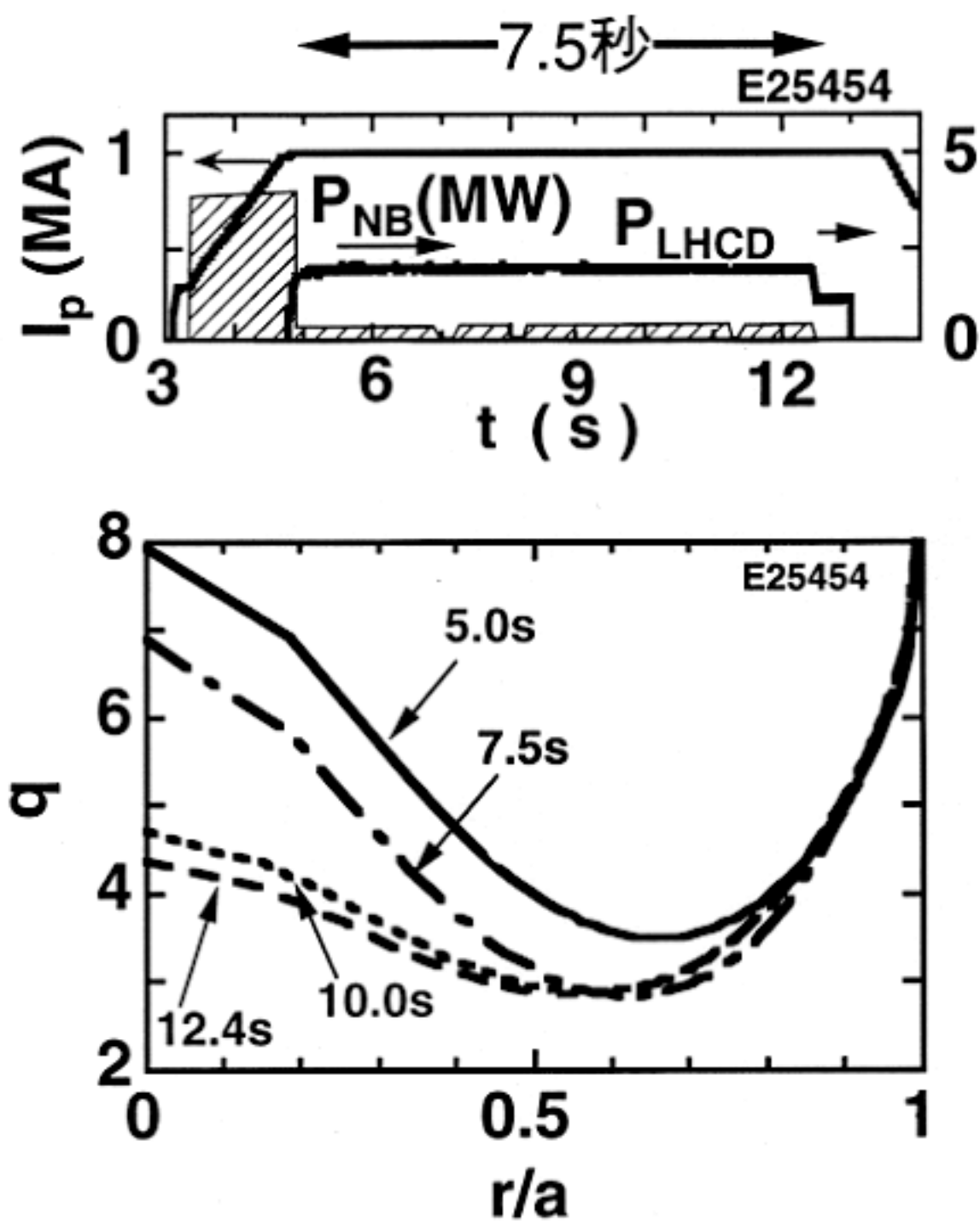


図 - 5 高自発電流率プラズマにおける負磁気シア

～80%非誘導電流駆動

(自発電流：ビーム駆動電流=2:1)

Hファクター～2.5, ～2.5を2.6秒間維持

$I_p=1.5\text{MA}$, $B_t=3.6\text{T}$, $\delta=0.34$

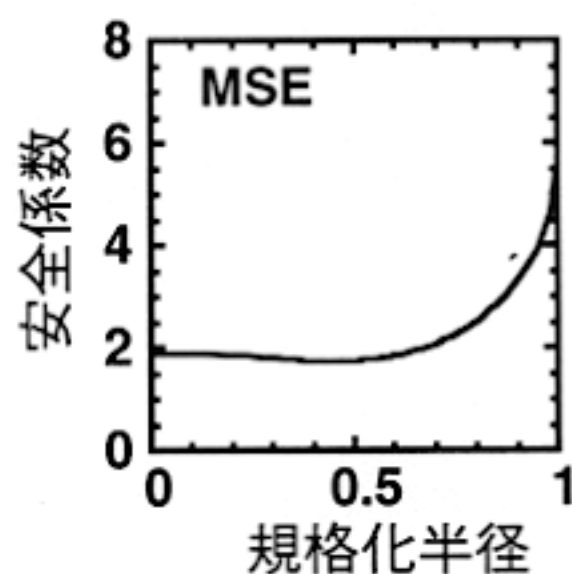
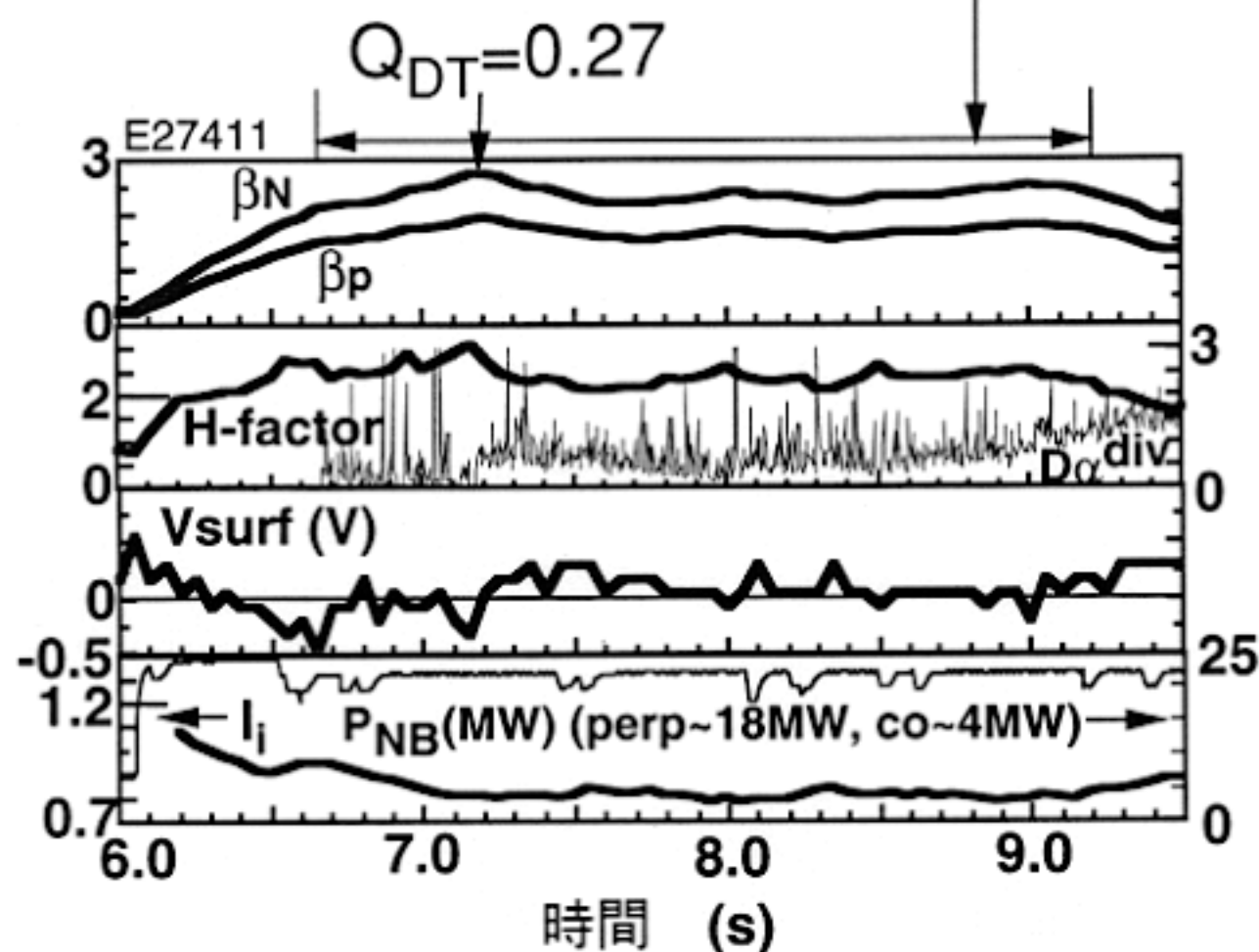
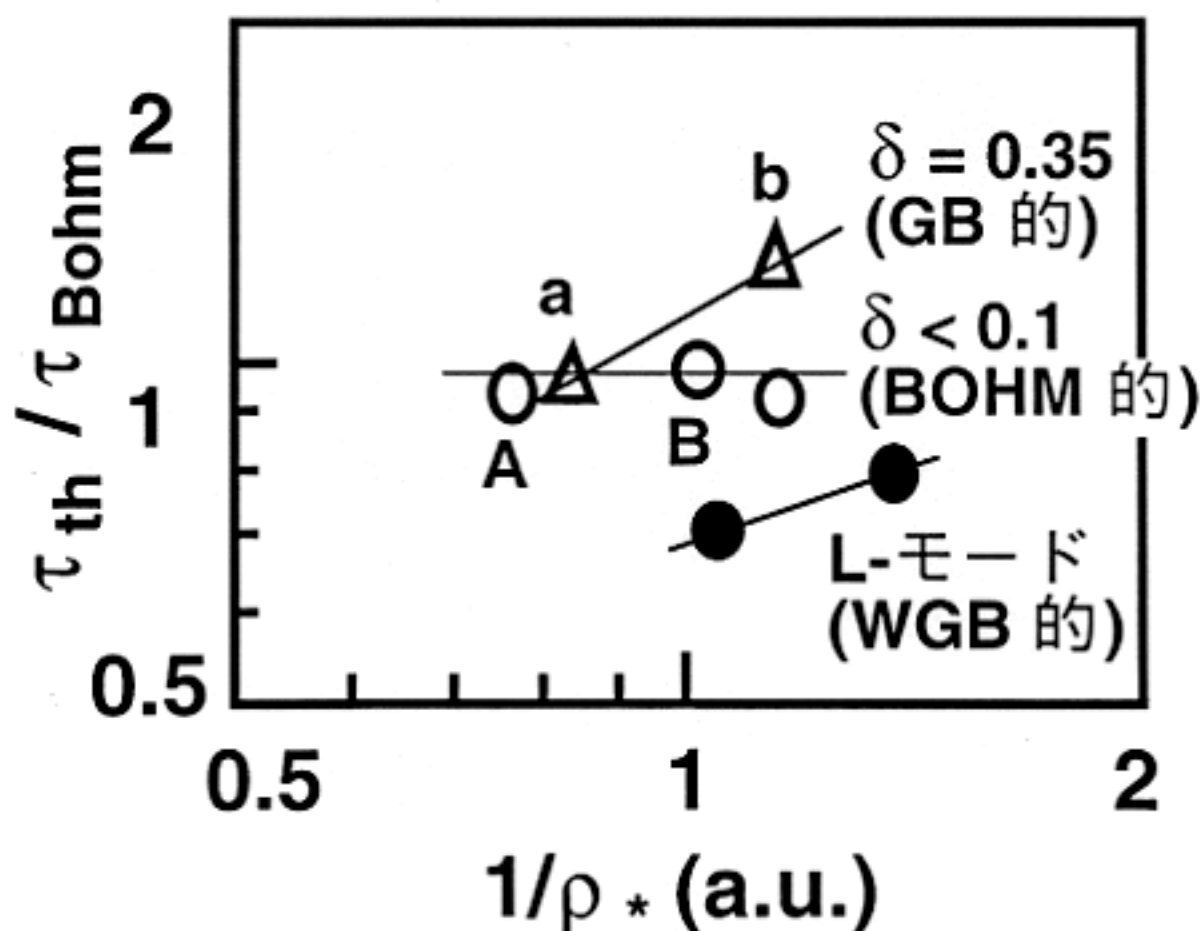
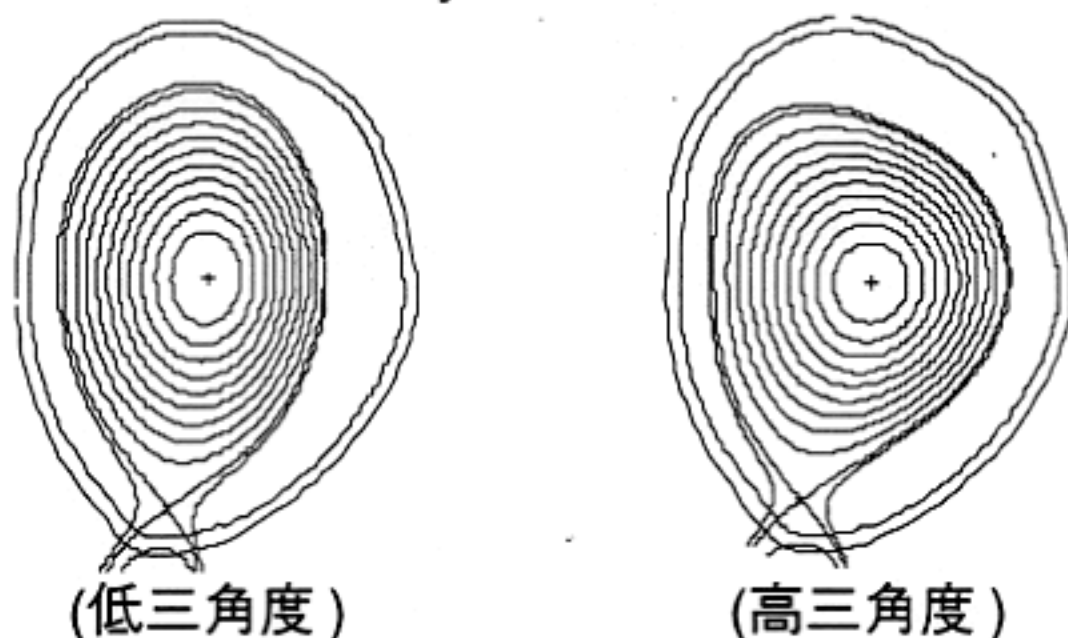


図-6 無次元 ITER 模擬実験

無次元量 (ρ^* , v^* , β) を ITER の設計値にあわせて
熱化プラズマの閉じ込め特性 (τ_{th}) を調べる。

ELMy H-モード

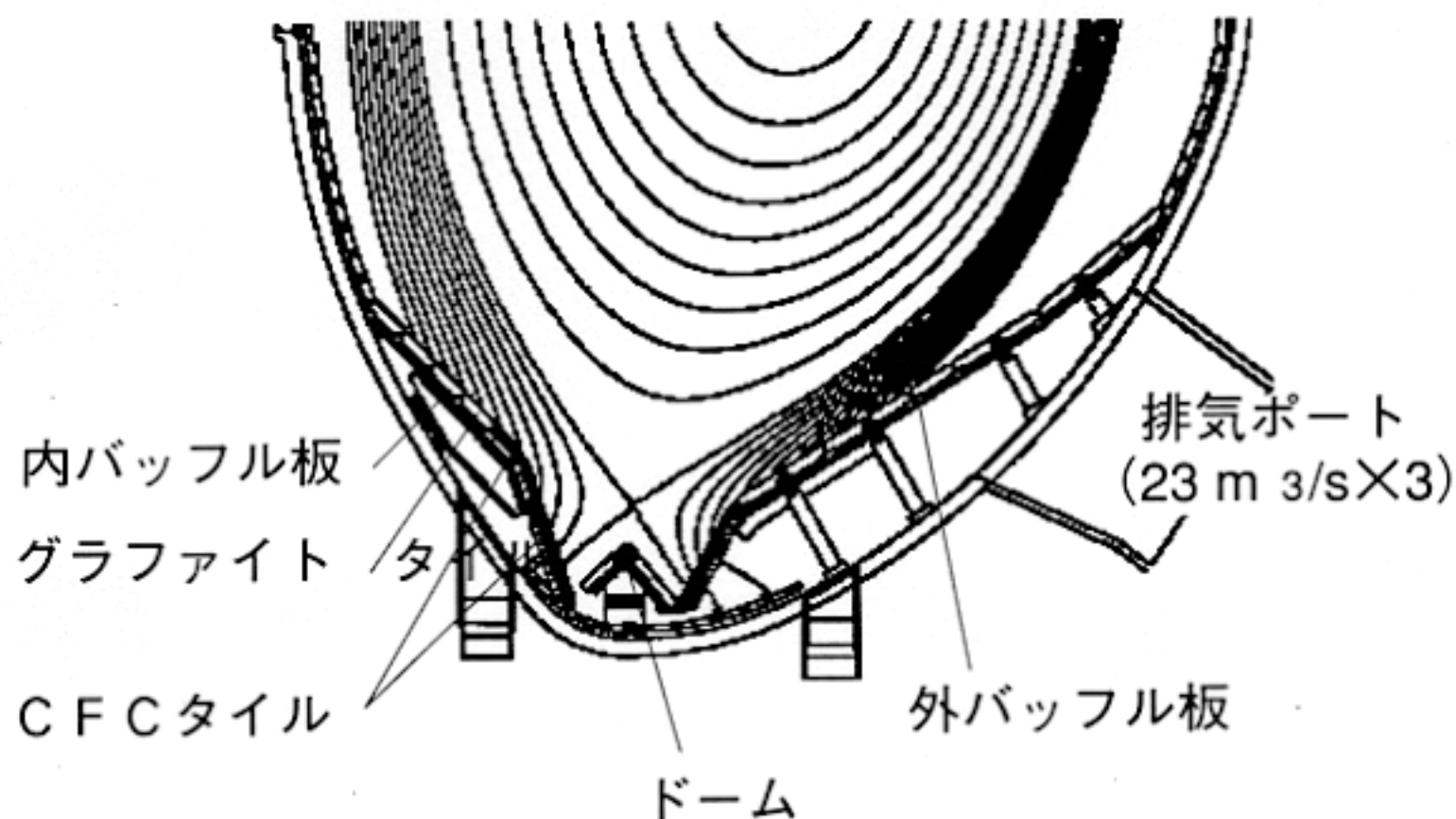


結論：三角度をある程度大きくしてELM制御すれば、
ITERは楽観的なジャイロ・ボーム則で予測できる。

図-7 ダイバータ改造

W型ダイバータへの改造

- 中性粒子の逆流防止
- 放射冷却ダイバータ実現
- 粒子排気



中性粒子密度分布の予測計算結果

改造前

改造後

