

J T - 6 0 における
最近のダイバータ実験の成果

JT-60における最近のダイバータ実験の成果

平成10年1月22日

日本原子力研究所

1. はじめに

日本原子力研究所では、ITERの長時間燃焼運転や将来の核融合炉の定常運転に不可欠となる熱・粒子の制御法を開発するため、これまでのダイバータ（滑らかな真空容器底部にX点配位を形成）に替えて、ITERと基本的に同じ構造のW型ダイバータをJT-60真空容器内に取り付け、平成7年6月より調整運転に入った。8月からは、加熱実験を開始し、この結果、ヘリウム・ビーム入射による核燃焼灰制御の模擬実験でヘリウム灰除去に関する見通しをうると共に、高熱負荷のもとでの不純物制御により高閉じ込め性能プラズマを長時間維持することに成功した。以下、これらJT-60における最近のダイバータ実験の成果について報告する。

2. JT-60 W型ダイバータ改造とその基本性能試験

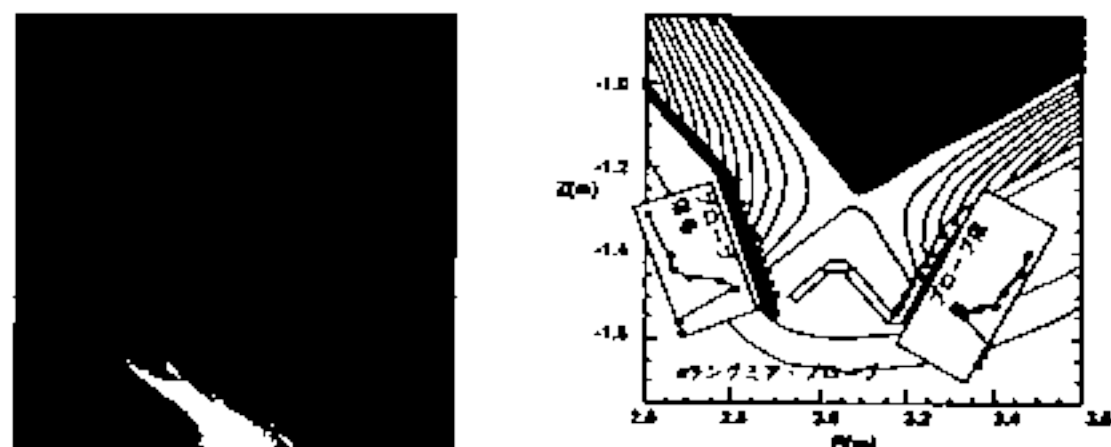
JT-60ではこれまで磁力線構造のみをダイバータ配位とし、高熱負荷に対する保護のために真空容器第一壁の一部を特殊な炭素壁(CFC)で置き換えた、開ダイバータ構造(open diverter)を用いて炉心プラズマ条件におけるダイバータ機能の検証を進めてきた。その後、低温高密度ダイバータ・プラズマの生成、ダイバータ排気等ダイバータ機能の一層の向上を図るため、最新のダイバータコードによる解析を進めた後、真空容器内に高性能プラズマ対向機器を備えた閉ダイバータへの改造工事を実施した。新しいダイバータは、ITERのダイバータ構造と同様のW型の構造をしており、炉心プラズマから直接高熱を受けるダイバータ板に加えて、ダイバータ部から主プラズマへの中性粒子の逆流を抑制するバッフル板（遮蔽板）、ダイバータ部での不純物発生を抑制するドーム、及び、ダイバータ部からの粒子排気を行うための真空排気系からなっている（図1）。このうち、ダイバータ板は磁力線との角度を浅くし、かつCFCを用いて熱負荷からの保護を図っている。



図1 JT-60 W型ダイバータの模式図

約3カ月のダイバータ改造を終了して、6月からダイバータ配位の調整運転を実施し、ダイバータ配位の制御やダイバータ排気特性等、ダイバータ基本性能の確認を行った。図2はダイバータ放電の写真で、ダイバータ部で低温プラズマが生成されて発光している様子が示されている。ダイバータ配位の制御性はダイバータ部に備え付けられた静電プロ

ープを用いて行っており、磁気信号とMHD解析から得られた磁場配位をプラズマ計測によって確認している。



第2図 ダイバータ放電写真とダイバータ配位制御性の確認

3. ヘリウム灰制御の実証試験

核融合炉では、D-T燃焼の結果生じるアルファ粒子がヘリウム灰としていつまでもプラズマ中心部にとどまっているとD-T燃料の希釈を起こして核融合反応の効率的持続が困難になる。このため、良好なエネルギー閉じ込めのもとで効率的にヘリウム灰を除去することが必要となる。例えば、ITERではプラズマ中のヘリウム灰の許容範囲を10%と仮定して設計作業を進めており、この数値の妥当性の確認がITERでの長時間燃焼実験の鍵となっている。

JT-60では60keVのヘリウム・ビームをHモード・プラズマ中に入射することによって核融合反応によるヘリウム灰生成を模擬し、ダイバータ排気によるヘリウム灰排気の有効性を実証した。図3はプラズマ中のヘリウム・イオン密度の時間変化を示したもので、ダイバータ排気を行うことによりヘリウム密度はプラズマ密度の10%以下の低密度で定常維持されている。この実験で入射されたヘリウム量は、例えばITERでのアルファ粒子生成の30%に相当している。ヘリウム灰排気特性を示すヘリウム実効閉じ込め時間とエネルギー閉じ込め時間の比 τ_{He}/τ_E は4を得ており、ITERの現在の設計条件 $\tau_{He}/\tau_E < 10$ を十分に満たしている。また、ダイバータ部でのヘリウムと燃料粒子のガス圧比 $P_{He}/2P_{D2}$ はプラズマ中での密度比 n_{He}/n_{D2} に近くなっており、ダイバータ部でのヘリウムの高い圧縮率を実現している。

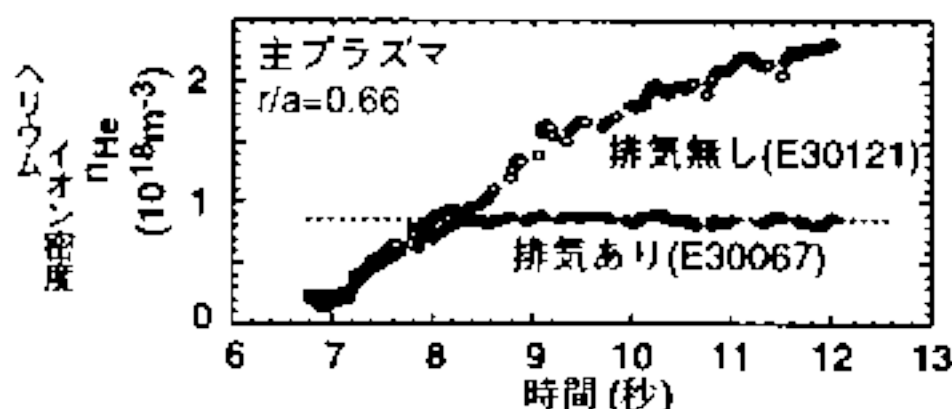


図3 JT-60でのヘリウム・ビーム入射実験でのヘリウム密度時間変化

4. 高性能プラズマの長時間維持

核融合炉における長時間燃焼を実現するためには、ダイバータ板の熱負荷ならびに主プラズマの純度を効率的に制御し、高い核融合反応頻度を保持する必要がある。新しいダイバータ配位による高性能プラズマ実験を進めた結果、大きな加熱入力(20-25 MW の中性粒子入射加熱)の下で、中心イオン温度約1億度のELMのあるHモードを加熱装置のほぼ定格の出力時間である約9秒間にわたって定常的に維持することに成功した。この時、プラズマ電流1.5 MA、トロイダル磁場3.6Tで、閉じ込め改善度は約1.7である(図4)。ダイバータ改選前の同種の放電では、積算加熱エネルギー約70MJで炭素不純物や粒子リサイクリングの増加によって閉じ込め性能が劣化し、高閉じ込め状態の維持時間は2・3秒程度であった。下図の放電では、積算加熱エネルギーが203MJ(ダイバータ付トカマク実験では世界最高値)に達しても、粒子リサイクリング及び炭素不純物量はほぼ一定値を保った。今回得られた長時間維持の飛躍的な進展は、改選ダイバータの形状効果や排気効果によって、炭素不純物やリサイクル粒子の発生や混入が抑制されたためと考えられる。高加熱入力運転の長パルス化によって、長い時定数を有する物理量(電流分布等)の閉じ込めや安定性への影響が一層明らかになると期待される。

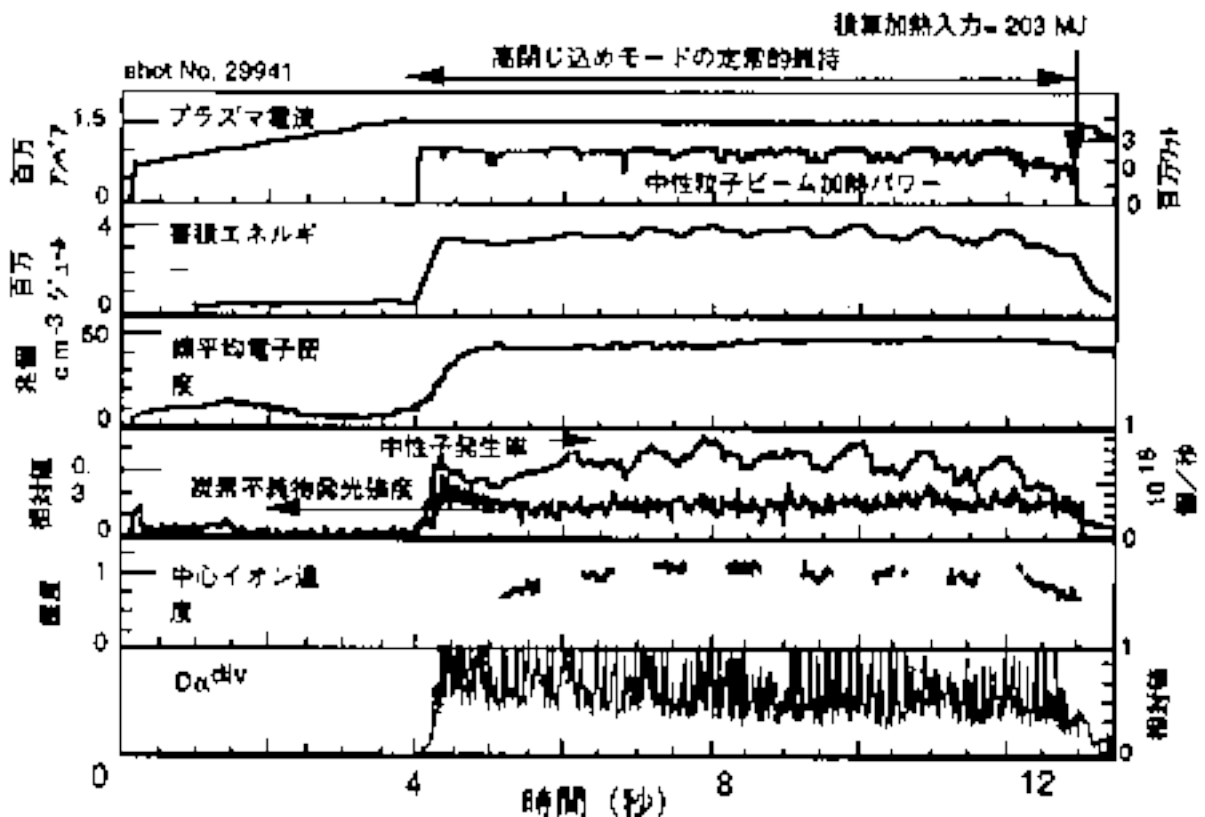


図4 高加熱負荷状態での不純物発生の抑制による
高閉じ込めモードの準定常維持

5. 負磁気シアによる高閉じ込めの準定常維持

負磁気シア放電でも、高閉じ込めの定常化が大きく進展した。従来ベータ限界で制限されていた高い閉じ込め性能の維持時間を改善するため、負磁気シアモードにHモードを重畳させ、高三角度配位を用いてベータ限界を改善するとともに、この限界以下に収まるよう、NBI加熱により中性粒子発生率を一定に保つフィードバック制御を行った。この結果、NBI加熱中の約4.3秒間(エネルギー閉じ込め時間 τ_E の18倍以上)にわたって、閉じ込め改善度1.7の状態を準定常的に維持することに成功し、負磁気シアモードによる高閉じ込め状態の長時間維持に見通しが得られた。

電流拡散時間より充分長い負磁気シア分布の維持と閉じ込め性能の両立が次の課題であるが、これについては、LH電流駆動による内部輸送障壁の制御による実験が進み、展望が得られている。LH および自発電流という非誘導電流駆動源によって、電流拡散時間よりも長く負磁気シア配位を維持し、内部輸送障壁を伴った高い閉じ込め状態で閉じ込め性能を一定に保つことにも成功した。

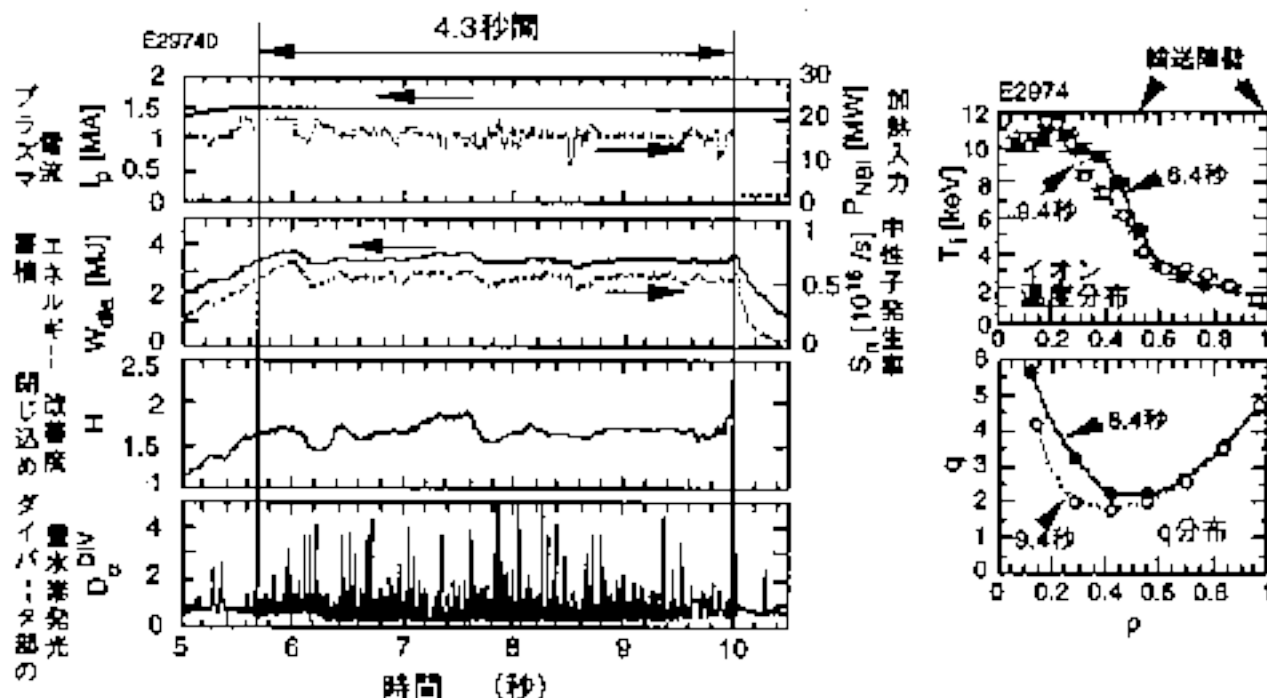


図5 ダイバータ配位における負磁気シアの長時間維持

6. 今後の課題

JT-60 での新型ダイバータによる実験は改造工事終了後から順調に進展し、5 カ月間という短期間にITER 物理 R&D 課題として重要なヘリウム灰制御や高性能閉じ込めの長時間維持などに予定以上の成果あげ、トカマクの定常炉心実現に大きな進展を見た。ITERの定常運転にも有力な根拠を与えるものと言える。JT-60 では、今後 ITER 物理 R&D の課題としても重要とされている 高密度領域での高閉じ込め状態の実現と高性能炉心プラズマ運転裕度の確保を目指した研究を進めていく予定である。これらの課題の解決のためには、炉心プラズマとダイバータ・プラズマの最適化を更に進めると同時に、ダイバータ機能に適合した効率的な燃料補給法の開発を進めていく必要がある。これらに関する先行的な研究は既に JFT-2M において大学との共同研究として現在進めているところであり、今後この JFT-2M での研究成果を JT-60 研究に反映していく計画である。

JT-60における最近の ダイバータ実験の成果

日本原子力研究所
那珂研究所

概要

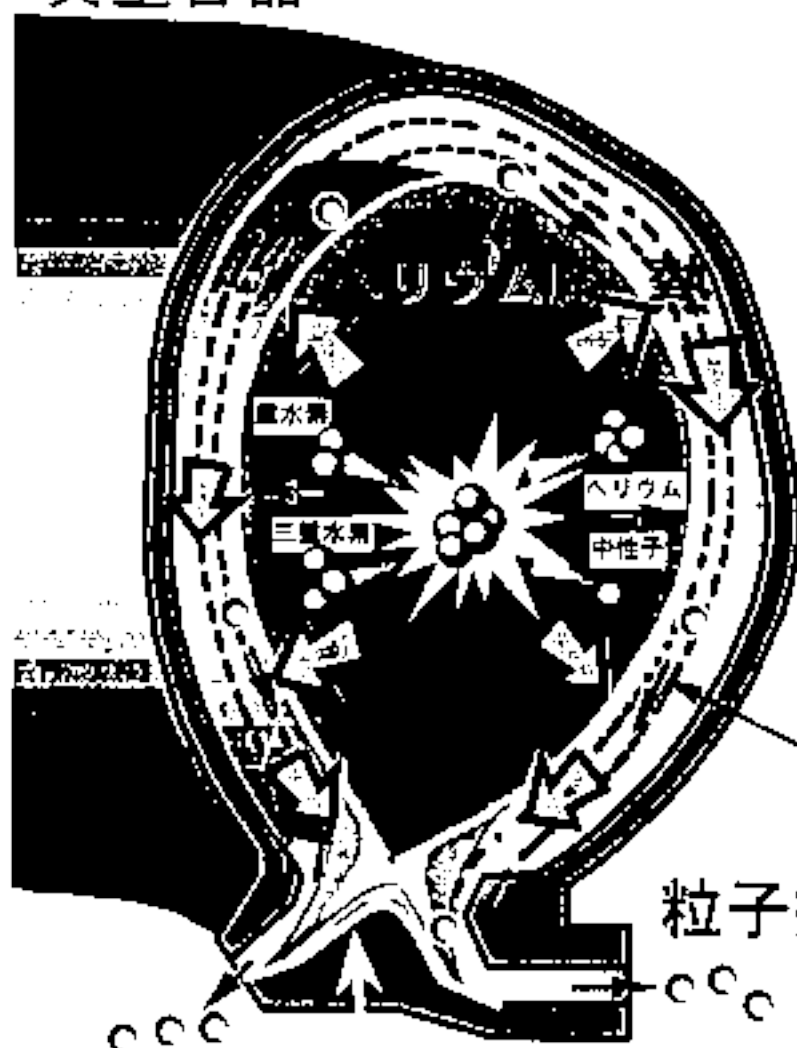
1. W型ダイバータの構造・原理
2. W型ダイバータの基本性能
3. 優れた排気特性と定常保持性能
4. 今後の展望

ダイバータの機能

JT-60

各種の粒子（ヘリウム灰等）の排気および熱を集め、排気または除熱する役割を果たす。

真空容器



燃料粒子、
ヘリウム粒子、
不純物粒子

粒子排気

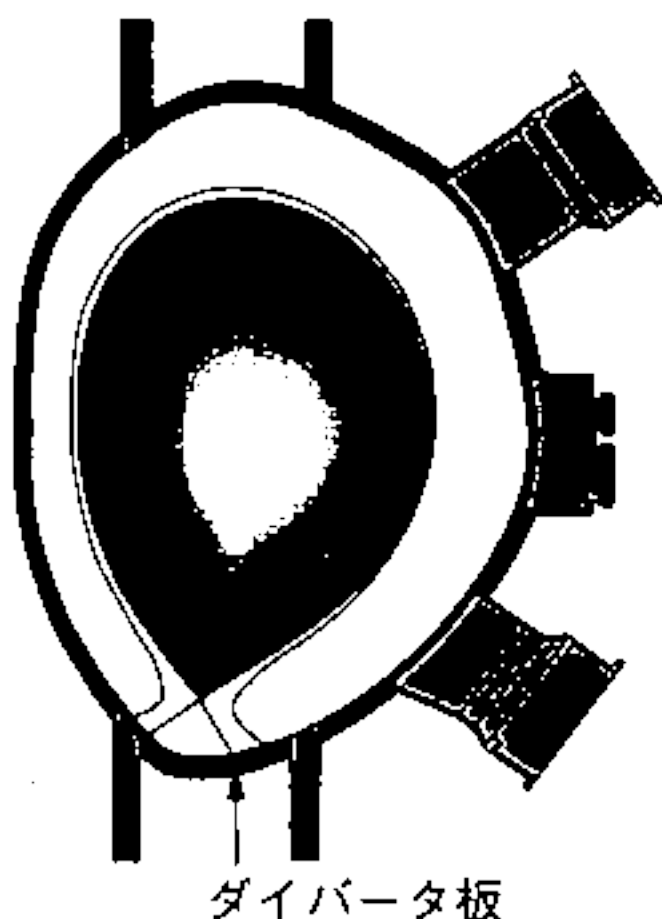
ダイバータ板（冷却）
除熱

開放型ダイバータ (改造前)

JT-60

JT-60大電流化改造後から平成9年2月まで

- ダイバータ板：真空容器第一壁の一部
- 粒子排気機能なし
- プラズマの位置・形状に融通性



改造前の真空容器内部

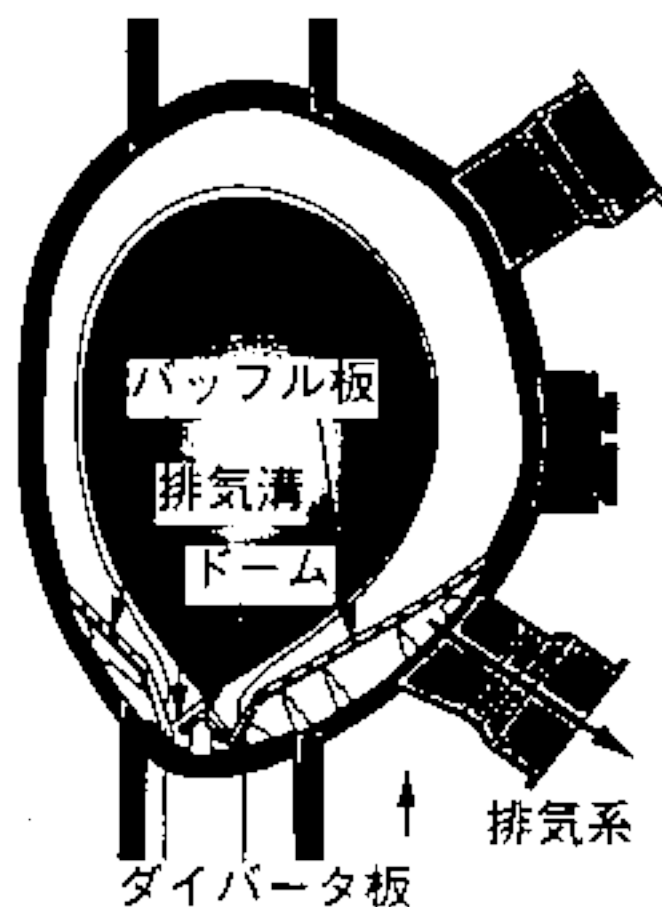


W型ダイバータ改造

JT-60

平成9年6月から実験開始

- バップル板：中性ガスの逆流防止
- 斜めダイバータ板：受熱面積の拡大
- ドーム：不純物逆流防止と中性ガス圧縮
- 排気溝：効果的な粒子排気



改造後の真空容器内部



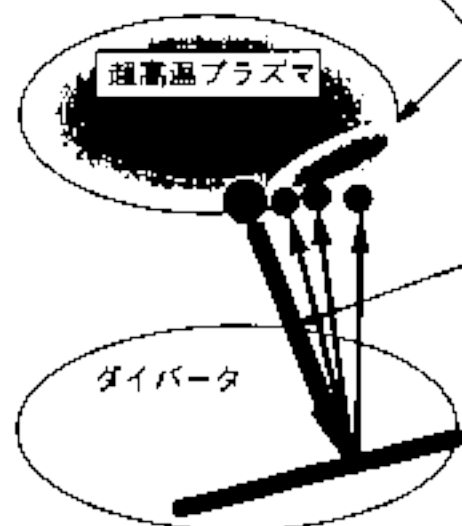
W型ダイバータの原理

JT-60

開放型ダイバータ

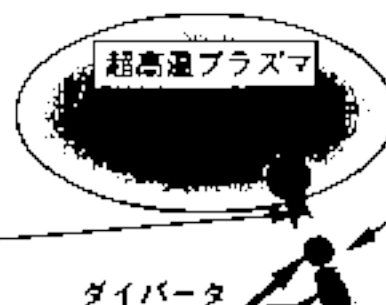


W型ダイバータ

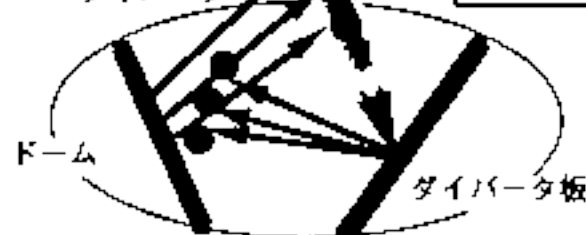


ダイバータ板から
反射した冷たい粒
子で超高温プラズ
マが冷やされる

超高温プラズマ
から漏れてきた
熱・粒子



ダイバータ板の冷
たい粒子はダイバ
ータ部に封じ込め
られ、ダイバータ
プラズマを冷や
す。



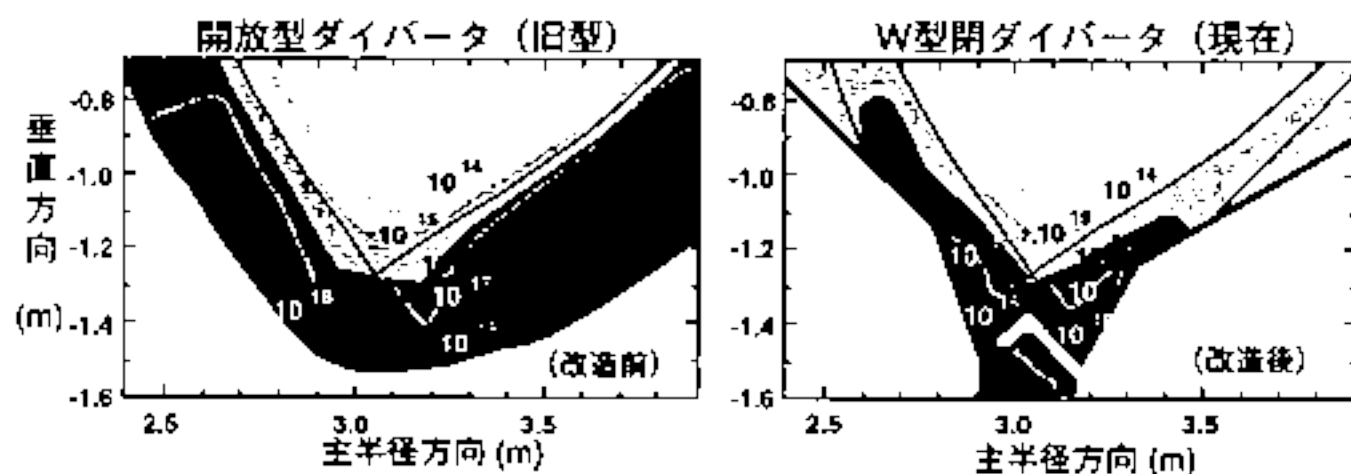
ダイバータ機能の解析

JT-60

計算機シミュレーションによる ダイバータ形状の最適化研究

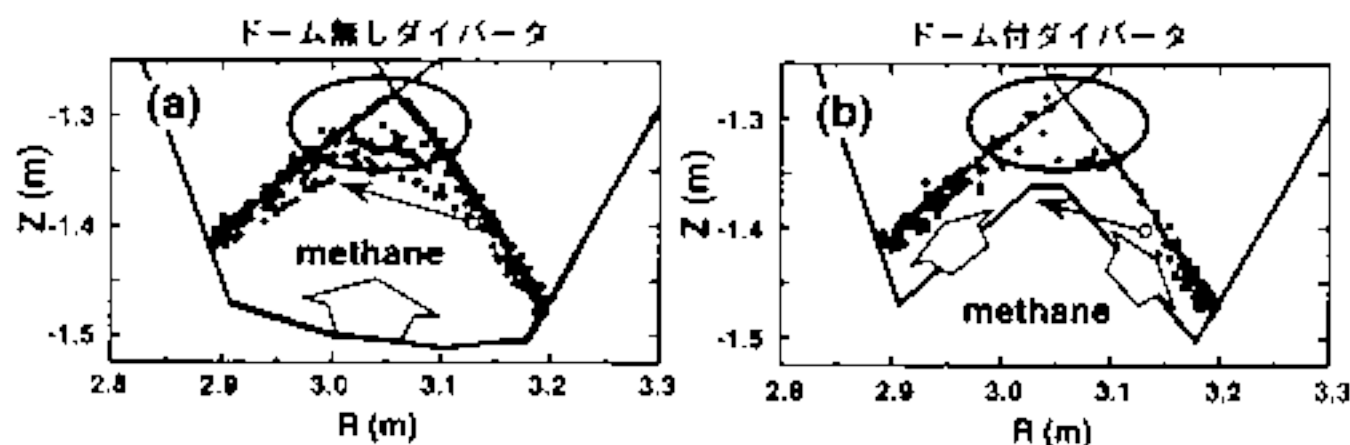
1. ダイバータ部からの中性粒子逆流の抑制効果

ダイバータ部及び主プラズマ周辺部の中性粒子圧力の比較
— バッフル板（遮蔽板）による逆流抑制



1. ダイバータ部からの不純物発生抑制効果

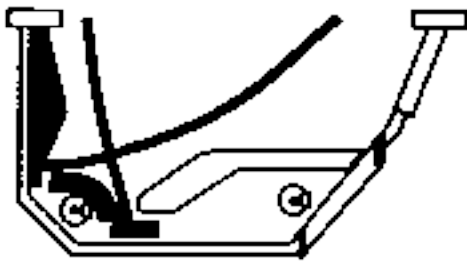
ダイバータ部の炭素不純物粒子の比較
— ドーム構造による化学スパッタリングの抑制



代表的装置のダイバータ形状

JT-60

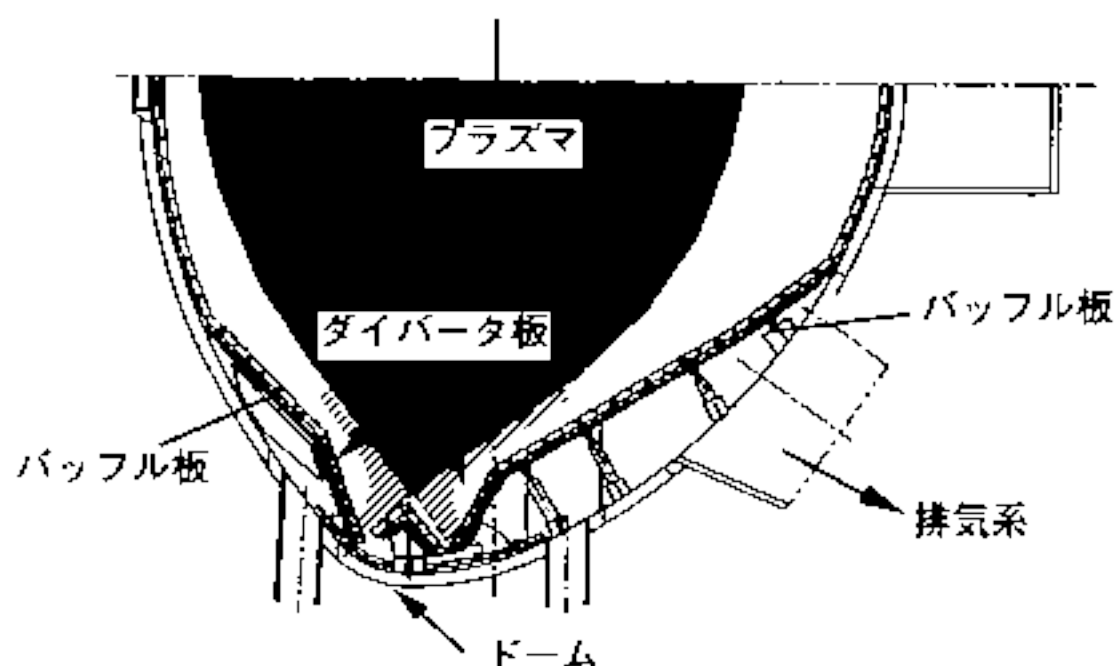
- JT-60では、ITERのダイバータ形状に最も近いW型ダイバータを採用

	ダイバータ	特徴
JT-60 日本 JAERI	W型ダイバータ 1997年6月～ 	○小型 ○傾斜ターゲット ○排気速度可変 ○長時間排気可能 ○高気密性 ○ドームによる中性粒子制御
JET 欧州 JET	ガスボックス型 ダイバータ 1997年10月～ 	○旧ITER形式の評価 ○容器内にコイル設置で高融通性 ○取付け構造が簡単 ○粒子排気無し
DIII-D 米国 GA	上下ダイバータ 1997年5月～ 	○容器の内側にダイバータを設置 ○上下ダイバータ ○排気用ポンプを内蔵（短時間運転）

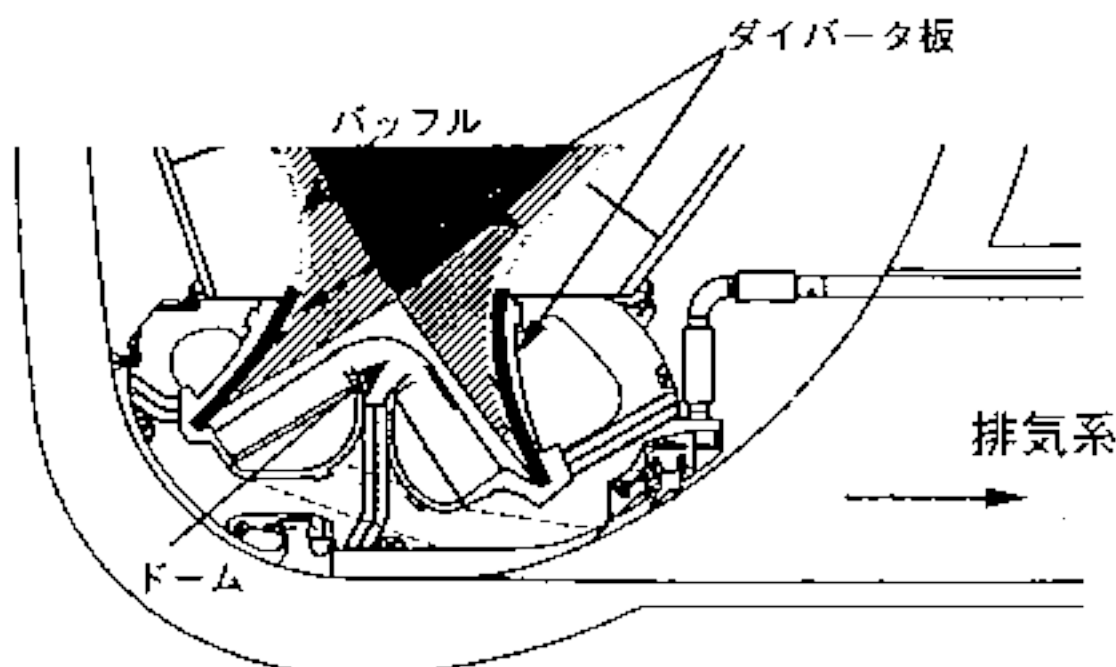
ITERダイバータとの比較

JT-60

ITERのバッフル効果、ドーム効果、排気位置効果等の試験が可能



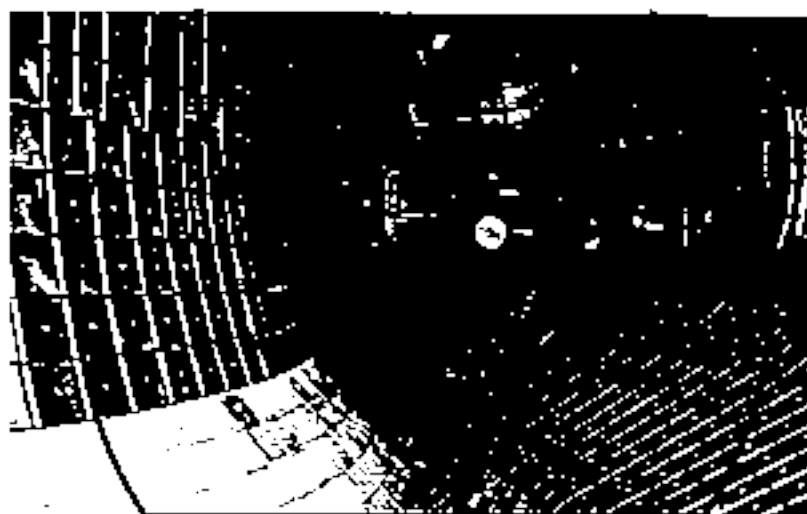
JT-60のW型ダイバータ構造



ITERのダイバータ構造

ダイバータ配位の確認

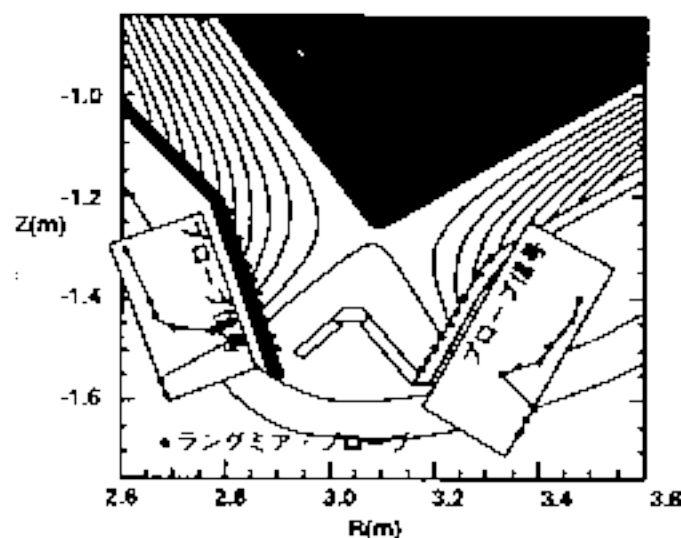
JT-60



真空容器
内部写真



ダイバータ
放電写真



ダイバータ配位測定結果

磁場測定に基づく
MHD平衡計算結果と
ラングミア・プローブによる
プラズマ測定結果の比較

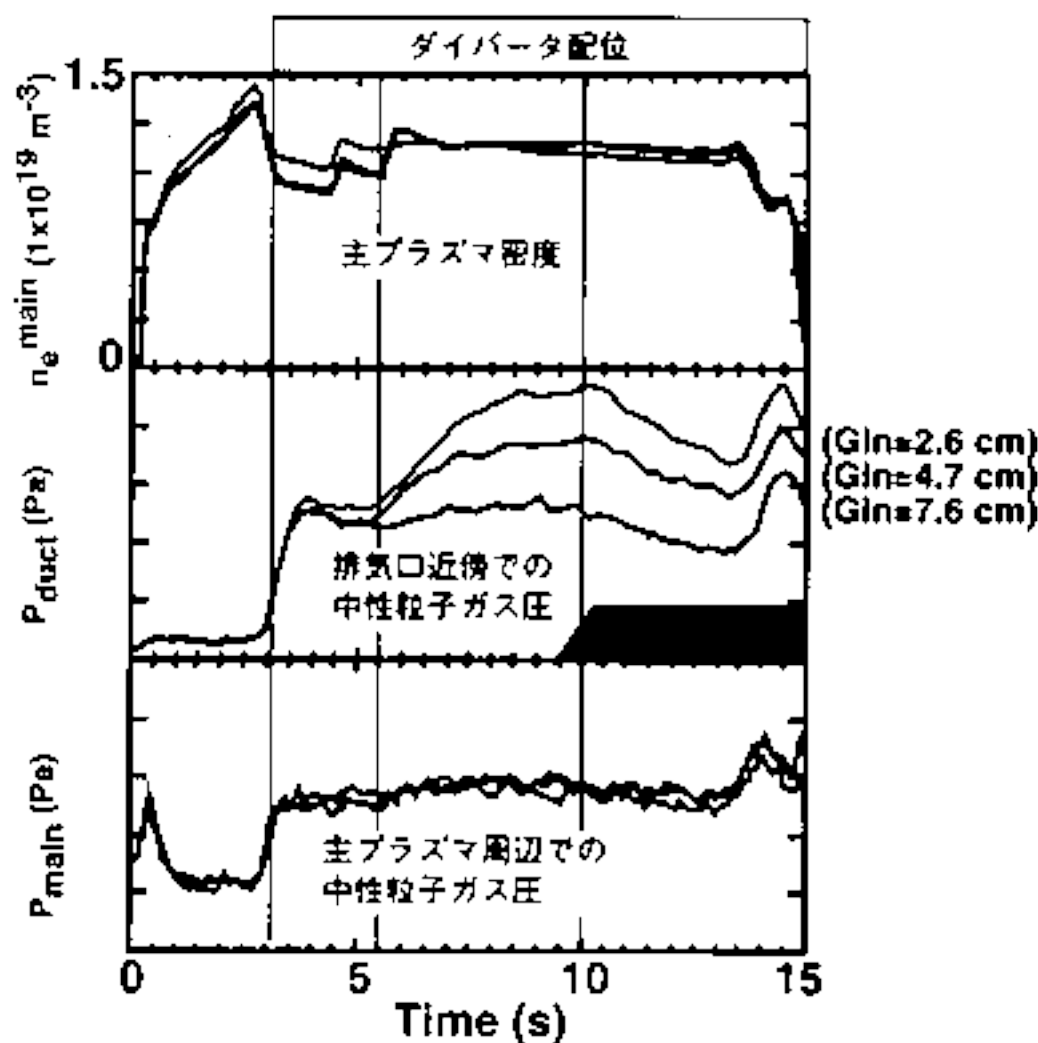
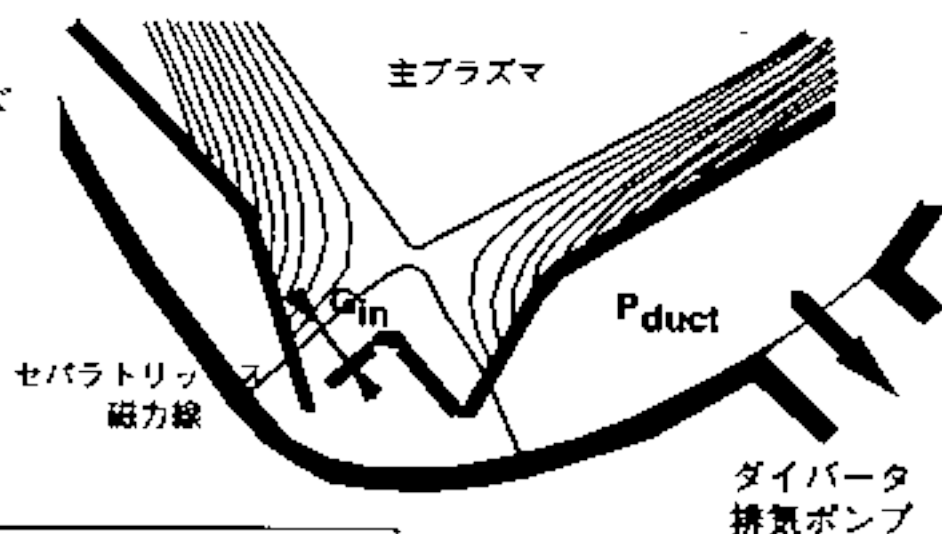
高精度、高信頼性での
ダイバータ配位制御が可能

ダイバータ排気特性

JT-60

ダイバータ形状制御による 効率的なダイバータ排気の実証

セバトリックス・ドーム間の距離 G_{in} の制御による中性粒子ガス圧 P_{duct} の制御



プラズマの純度の向上

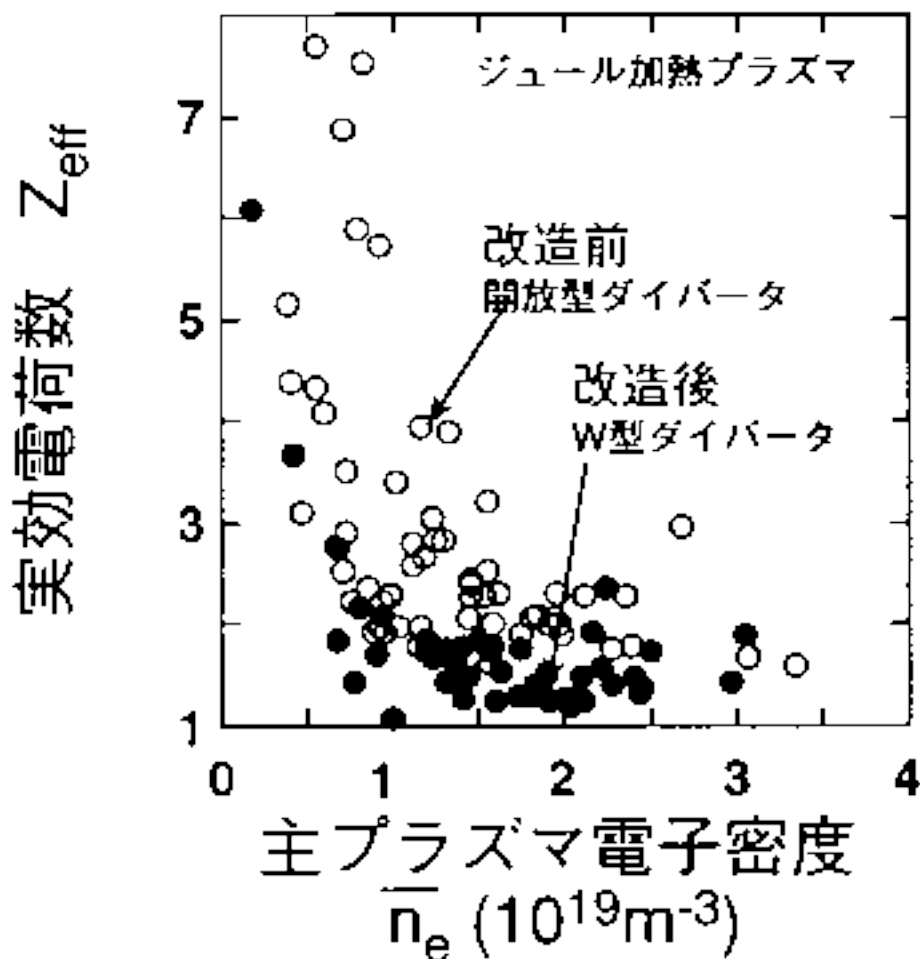
JT-60

Z_{eff} : プラズマの実効電荷数
 プラズマの純度に逆比例

改造前（開放型ダイバータ）： $Z_{\text{eff}} > 1.6$

改造後（W型ダイバータ）： $Z_{\text{eff}} > 1.1$

W型ダイバータへの改造により、プラズマの純度が向上



—ヘリウム排気性能の実証—

JT-60

実験方法

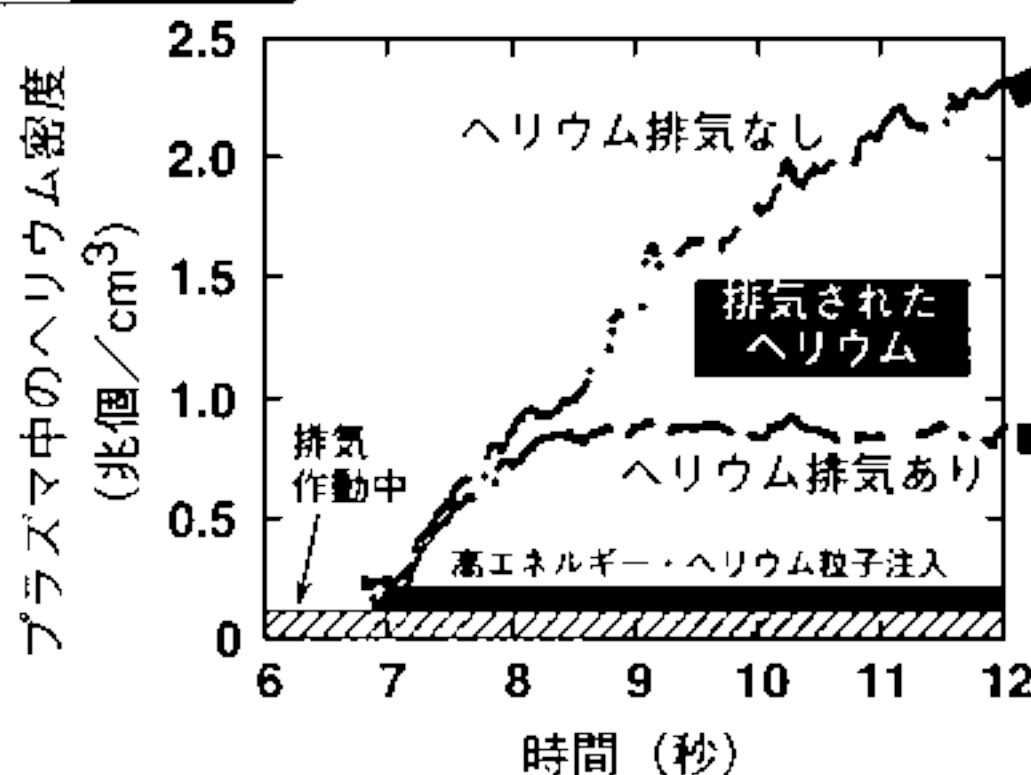
高エネルギーヘリウム粒子を炉心へ注入

Heビーム：

60keV/1.4 MW ($1.5 \times 10^{20}/s$)ITERで発生する α 粒子の約30%に相当ヘリウム
排気ポンプへ

排気溝

実験結果

ヘリウムが
時間の経過
とともに蓄
積ヘリウム密
度を一定に
制御

ヘリウム排気時定数
エネルギー閉じ込め時間 $\sim 4 \Rightarrow$ ITERに必要な条件 (10以下) を実証

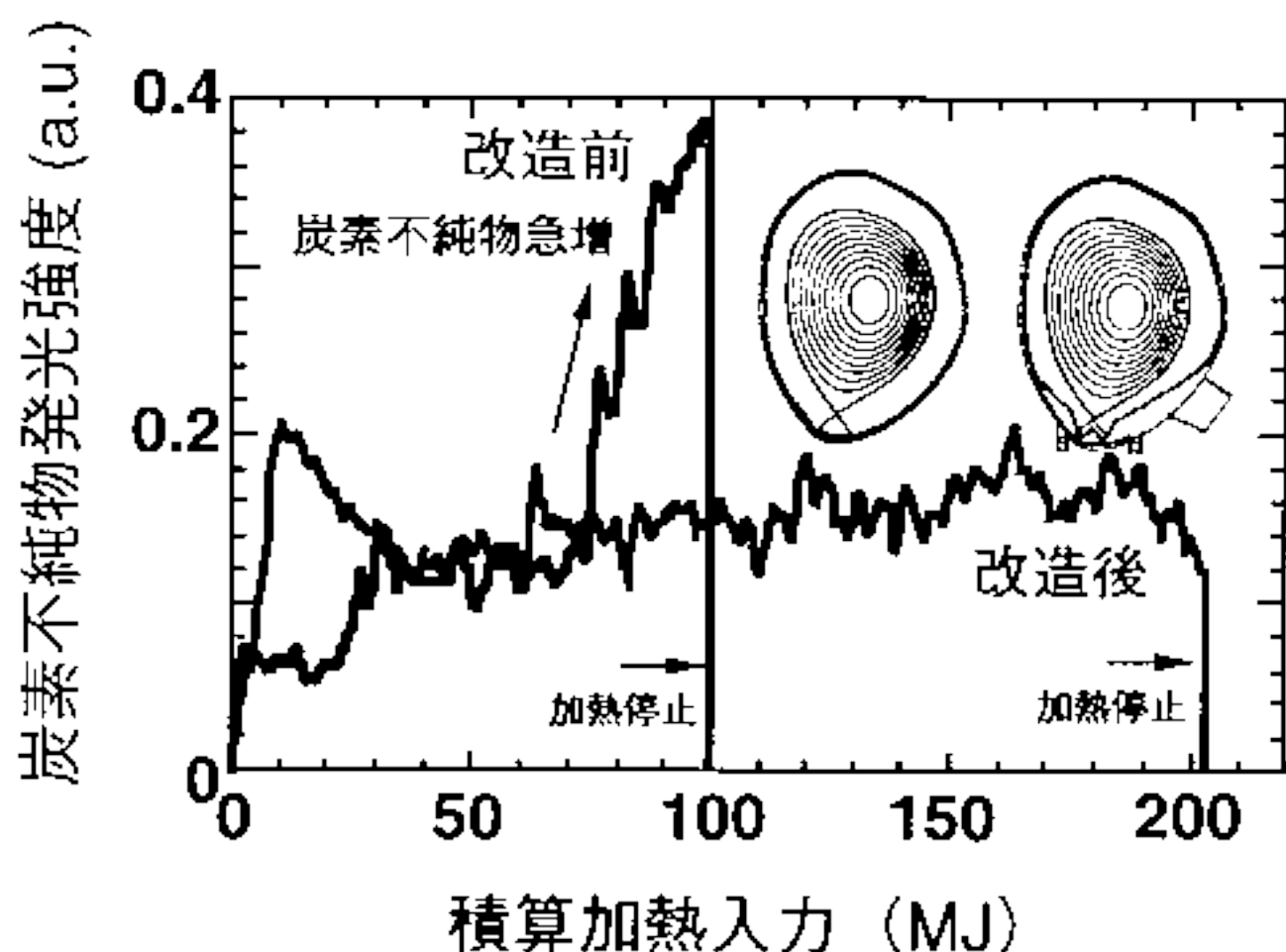
ヘリウム濃縮度 $[P_{He}/(2P_{D2})][n_{He}/n_e] \sim 1$ (従来の約5倍を実現)

ダイバータ部の不純物発生を抑制

JT-60

開放型：70MJ（23MW, 3秒）加熱で
炭素不純物の急増

W型：200MJ（23MW, 9秒）加熱でも
炭素不純物の急増はない



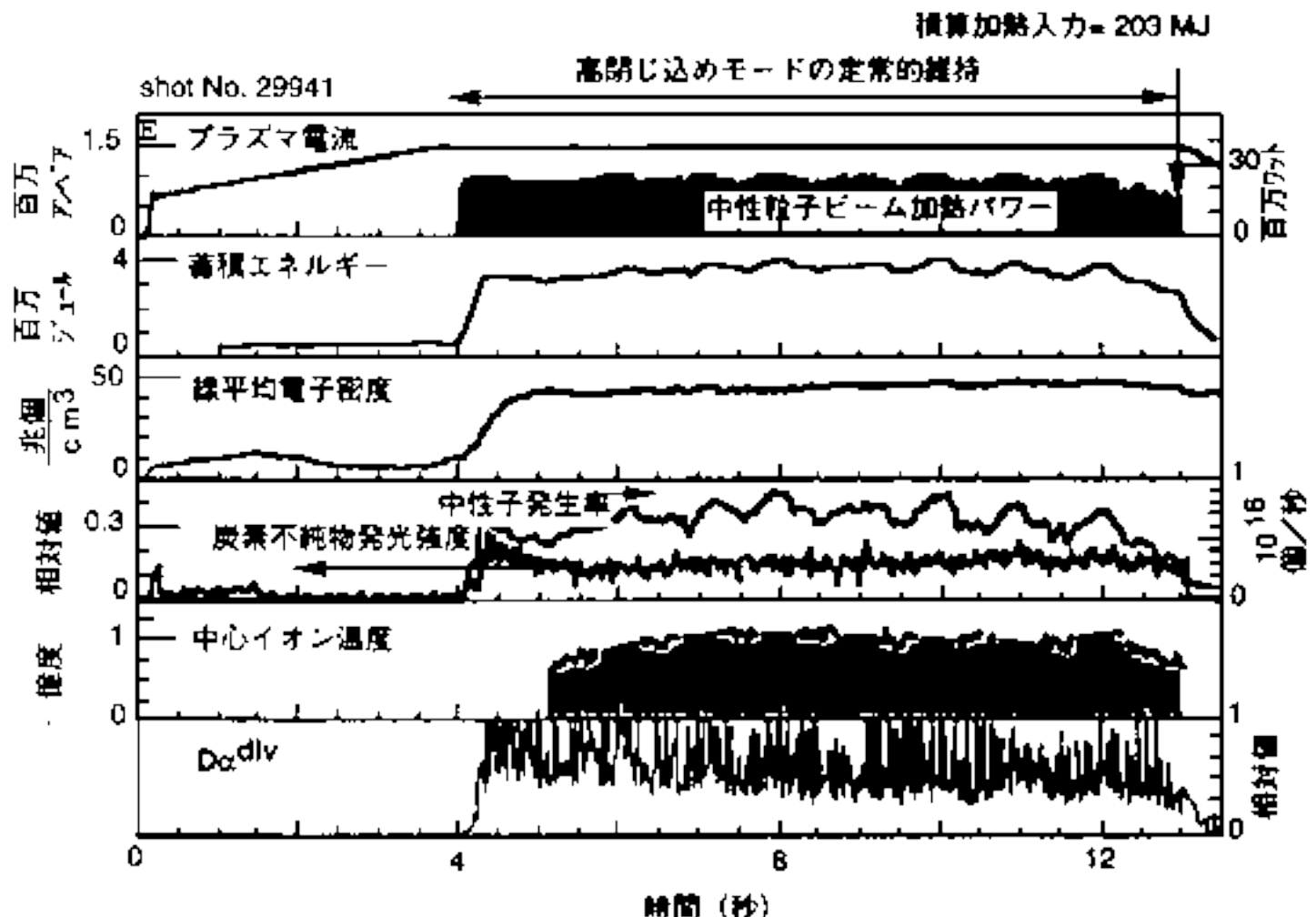
高性能プラズマの長時間維持

JT-60

W型ダイバータにより高パワー加熱・高性能プラズマの長時間運転性能が飛躍的に向上。

- ITERの標準的運転モードの改善閉じ込め（Hモード）状態で、約1億度の高温プラズマを約9秒間（～最大加熱時間）保持
- 閉じ込め性能、炭素不純物、粒子リサイクリング、等をほぼ一定値に保持

プラズマ電流：1.5MA、トロイダル磁場：3.6T
中心イオン温度：～1億度、閉じ込め改善度：H=1.7



負磁気シア放電の準定常維持

(ITERの定常運転シナリオ)

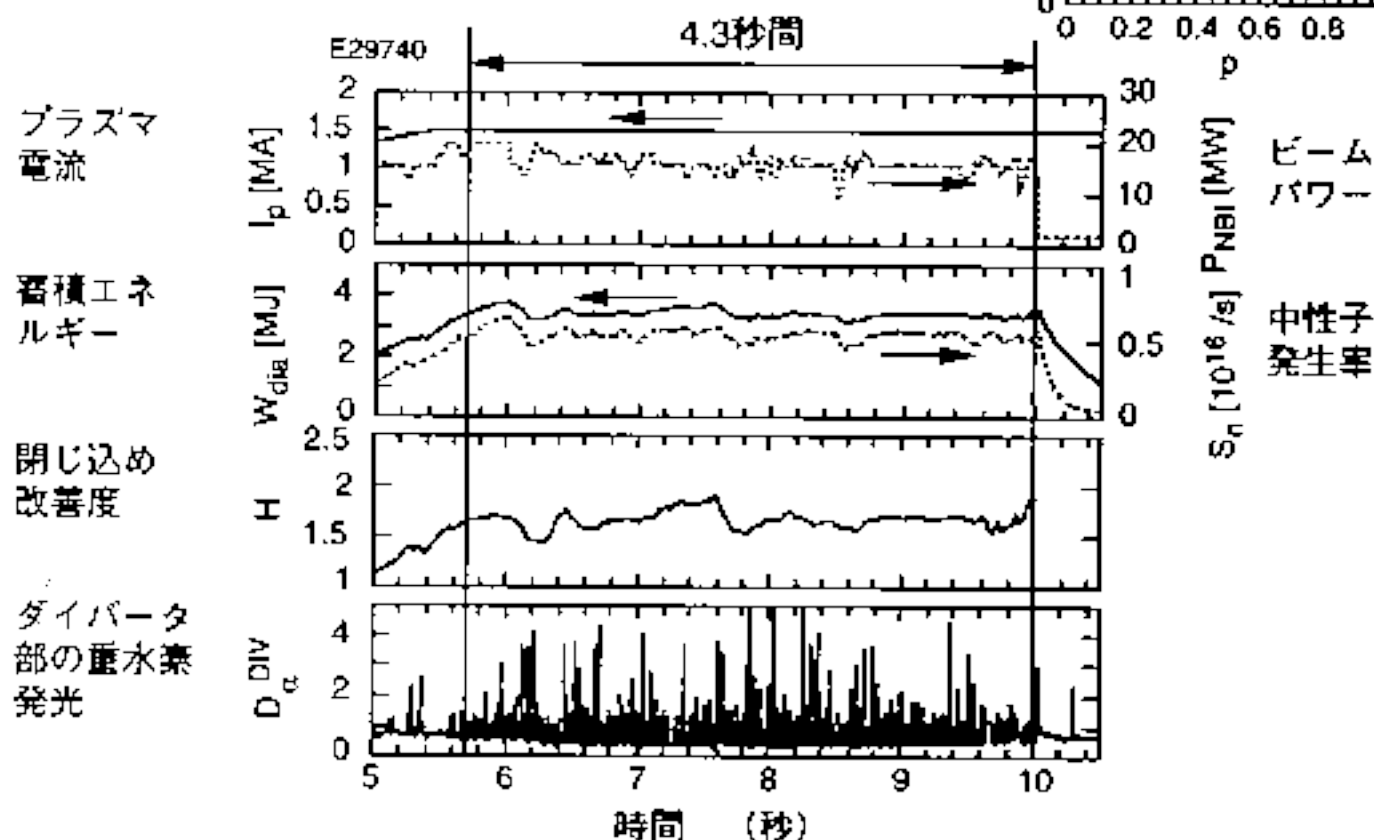
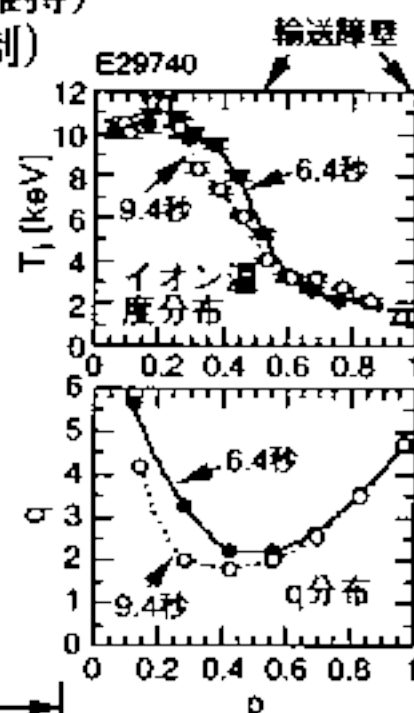
JT-60

炉心プラズマ高性能化手法の統合化の試み

負磁気シア・モード	(内部輸送障壁の形成)
Hモード	(境界輸送障壁の形成)
高三角形度運転	(MHD安定性の改善)
中性発生率制御	(MHD安定性の維持)
ダイバータ運転	(不純物蓄積の抑制)

負磁気シア放電でMHD不安定性を抑制して
 蓄積エネルギー $W \sim 3.5 \text{ MJ}$
 閉じ込め改善度 $H \sim 1.7$
 規格化ベータ値 $\beta_N \sim 1.5$
 の高性能プラズマを4.3秒間($\sim 18 \times \tau_E$)維持

今後、負イオンNBI等の外部電流駆動
 を用いて非誘導放電化を予定



今後の展望

JT-60

○先進的粒子制御

W型ダイバータの排気性能に適合した
高効率燃料補給法の開発

- ・遠心加速型ペレット入射
- ・コンパクトトロイド入射 (JFT-2M) 等

高密度領域で高閉じ込め状態を実現

○高性能炉心プラズマの運転裕度の確保

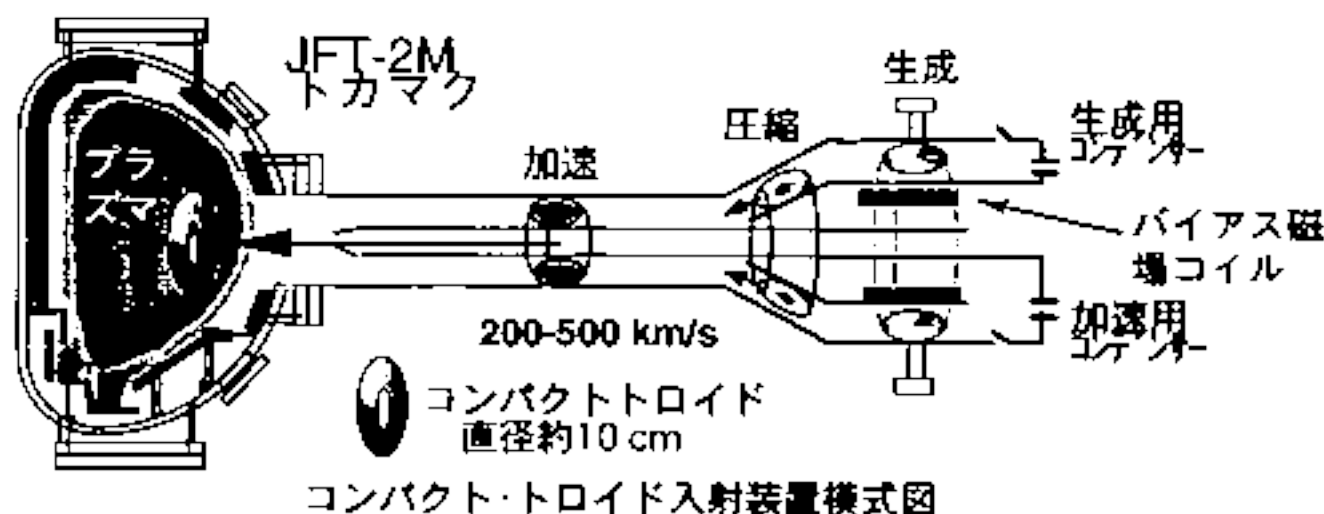
高密度運転のマージン (先進粒子制御)
高ベータ運転のマージン (分布制御)
ダイバータプラズマ制御と炉心プラズマ
高性能化手法の統合化

ITERの運転シナリオを確証

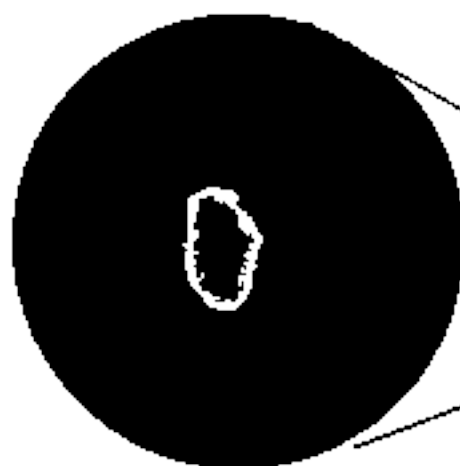
JFT-2Mにおけるコンパクトトロイド入射

JT-60

- 利点
- ・電磁力により高速度にまで加速可能
 - ・速度の調整が容易(局所的な燃料補給が可能)
 - ・電離損失がない



JFT-2M真空容器内部



露光時間：50マイクロ秒



高速カメラで捉えたコンパクトトロイド