

# 炉心プラズマ研究開発 における成果

日本原子力研究所

# 目次

## JT-60関係主要成果

- 1 : 臨界プラズマ試験装置 : JT-60
- 2 : JT-60施設概要
- 3 : IAEA国際会議で最大の貢献をするJT-60
- 4 : DRAM並みの進歩を遂げる核融合積進で先頭に立つJT-60
- 5 : 様々な閉じ込め方式、トカマク装置の中で世界のトップに立つJT-60
- 6 : 主要なパラメータで世界最高値を達成したJT-60
- 7 : JT-60パラメータ進捗の歩み
- 8 : 加熱入力で 40 MWを達成しプラズマ蓄積エネルギーで 10 MJを超えたJT-60
- 9 : 排気ダイバータによりITERに必要なHe排気性能を実証したJT-60
- 10 : 世界初、1億度の高温プラズマを9秒間保持したJT-60
- 11 : 世界初、負イオンNBIによってビーム駆動電流発生効率の世界記録(従来の3倍)を達成したJT-60
- 12 : 世界最高: 自発電流率80%を実現し理論を実証したJT-60
- 13 : 世界で初めて内部輸送障壁を発見
- 14 : 負磁気シアで電子の内部輸送障壁を発見
- 15 : 自発電流割合が8割の完全定常運転の実証
- 16 : 電流ホールを有する平衡の発見
- 17 : SOLプラズマの逆流の発生機構を世界で初めて解明
- 18 : 負磁気シア放電で放射冷却ダイバータを生成
- 19 : 世界最大の非誘導電流(3.6MA)を高周波で駆動
- 20 : 世界初、負磁気シア配位を7.5秒間準定常維持
- 21 : MHD的に安定な負磁気シアプラズマの発見
- 22 : 高自発電流割合プラズマでの自己形成過程
- 23 : ディスラプション時の垂直移動現象(VDE)の抑制法の発見
- 24 : シミュレーションによるW型ダイバータの特性を初めて解明

## JFT-2M関係主要成果

- 25 : ディスラプション回避を世界に先駆けて実証(高周波法)
- 26 : ディスラプション回避を世界に先駆けて実証(外部磁場法)
- 27 : Hモードを定常化するELMの制御
- 28 : 高閉じ込め(H)モードの物理の研究で世界初の成果
- 29 : コンパクト・トロイド(CT)入射による先進的燃料供給法を開発
- 30 : フェライト鋼板の真空容器内部設置によりプラズマ適合性を予備的に評価

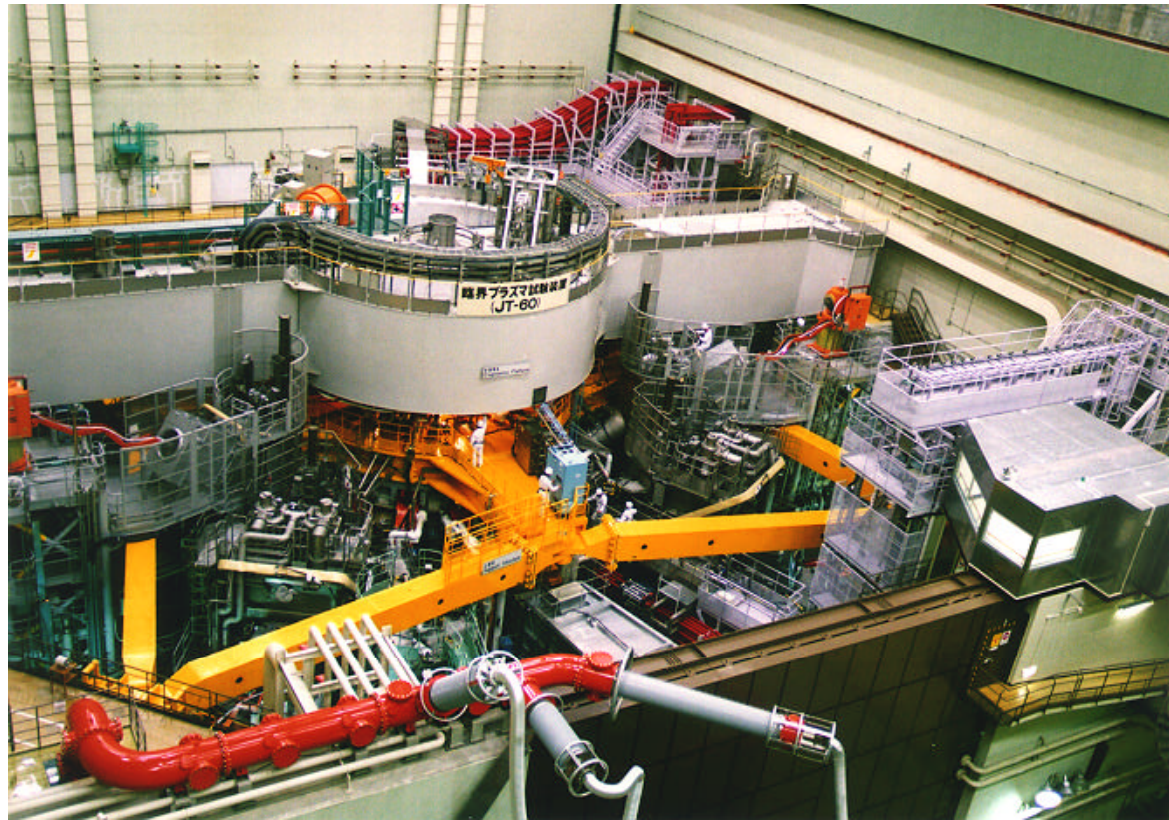
## プラズマ理論主要成果

- 31 : 核融合プラズマの科学
- 32 : NEXT計画における主要シミュレーション結果
- 33 : 乱流と輸送の理解
- 34 : 乱流構造とその抑制
- 35 : ETG乱流の非線形シミュレーション
- 36 : MHD崩壊過程のジャイロ粒子シミュレーション
- 37 : 負磁気シアプラズマにおける非線形不安定化現象
- 38 : コンパクトトロイド(CT)入射による新燃料補給法の磁気流体シミュレーション
- 39 : 学術的波及効果: 粒子・流体系が関与する基礎科学分野に幅広く貢献
- 40 : 大規模シミュレーションを中心に据えた新しい遠隔研究システム
- 41 : Virtual Reality 仮想環境の配信と新しい研究システム

## 核融合炉設計主要成果

- 42 : 原研における核融合動力炉の設計実績
- 43 : 最新版動力炉設計、A-SSTR2の特徴
- 44 : 核融合炉の放射性廃棄物とその毒性

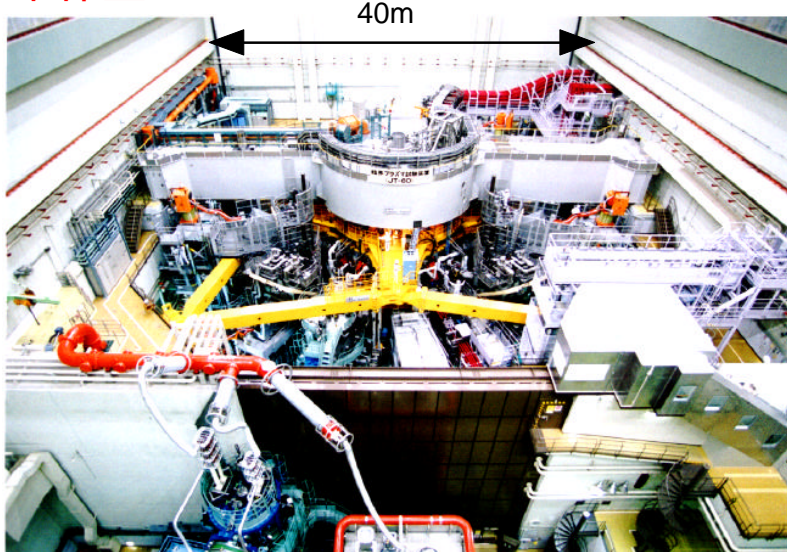
# JT-60研究の成果



# 1. 臨界プラズマ試験装置 JT-60

JT-60

本体室



臨界プラズマ試験装置 : JT-60

原子力委員会が定めた第2段階核融合研究開発基本計画の中核装置

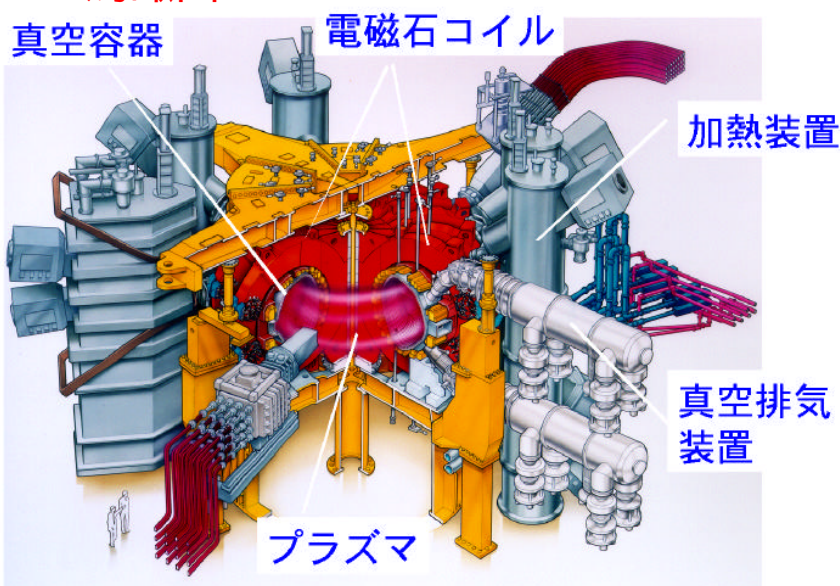
1976年建設開始

1985年運転開始

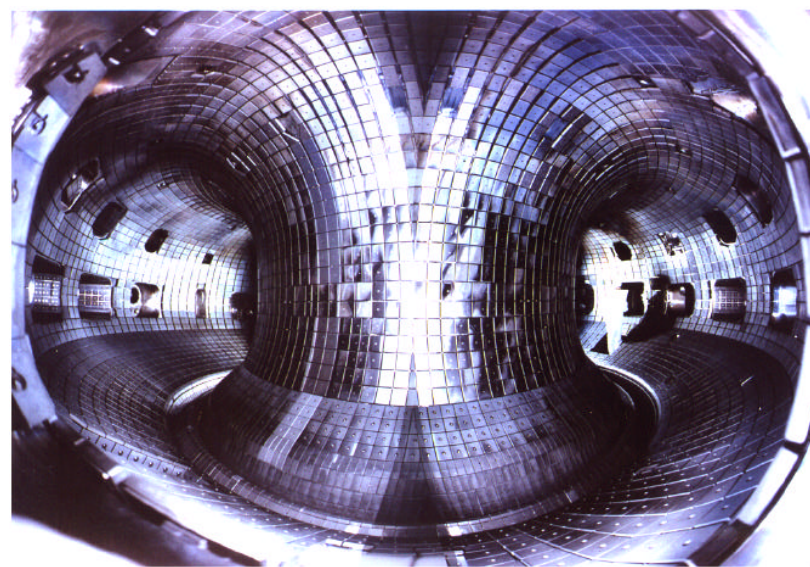
1992年～

第3段階核融合研究開発基本計画に従い、実験炉以外のトカマク装置として研究開発を進めている。

JT-60鳥瞰図



JT-60真空容器内



# 2. JT-60施設概要

JT-60

世界最大の入射パワー（40MW）  
の正イオンNBIと世界最高ビーム  
エネルギーの負イオンNBI

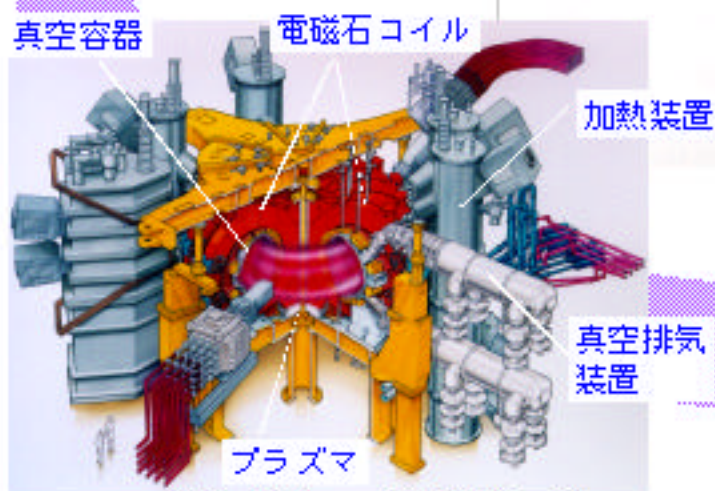
3つの周波数帯（IC:120MHz,  
LH:2GHz, EC:110GHz）を入  
射する世界最大級の高周波加  
熱装置



高周波加熱装置

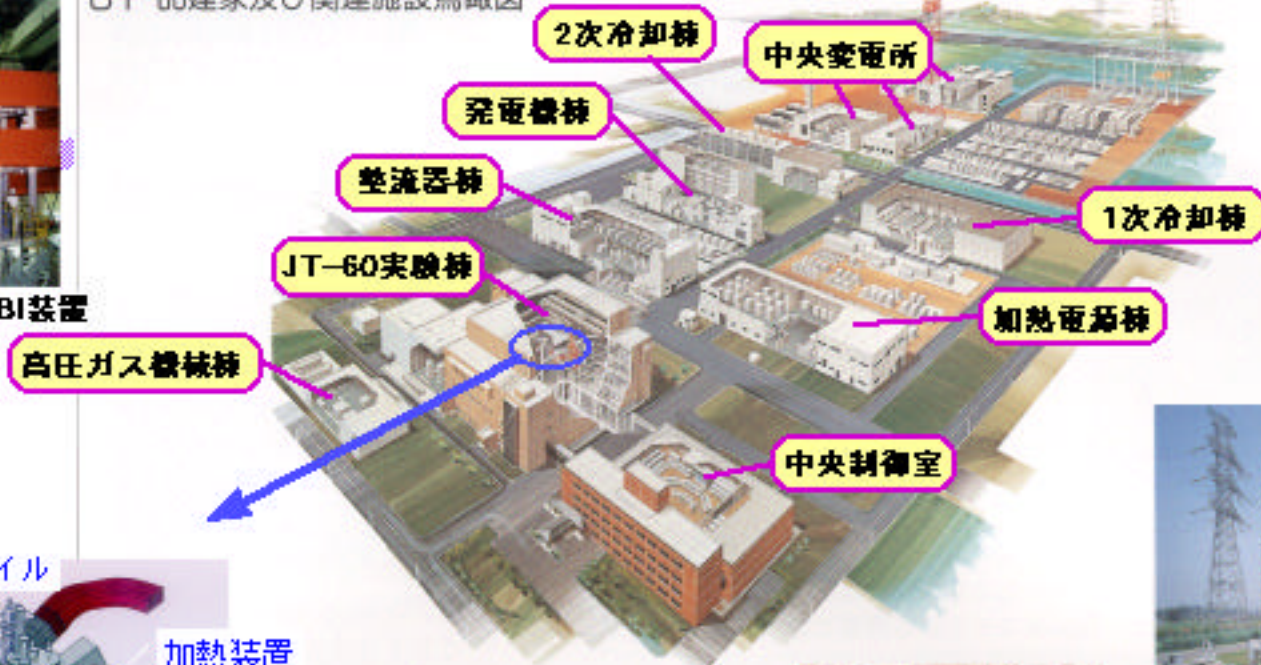


負イオンNBI装置



4 Tの磁場を発生する世界最大規模の  
トカマク型実験装置

JT-60建家及び関連施設鳥瞰図



中央変電所  
275kV系統の受電設備



トランスヤード  
最大130万kWの電力を扱う  
電源設備

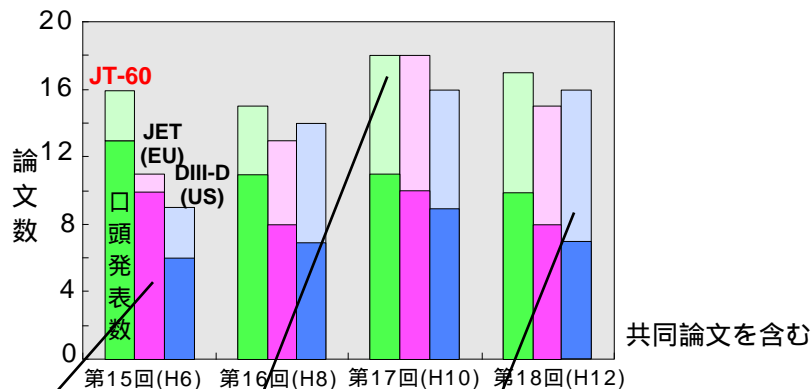


加熱用  
ボロイダル  
磁場コイル用  
トロイダル  
磁場コイル用  
電動発電機  
総発電量110万kWの世界最大級  
の電動発電機

# 3. IAEA国際会議で最大の貢献をするJT-60

JT-60

世界のトカマク装置と主要3装置の発表論文数

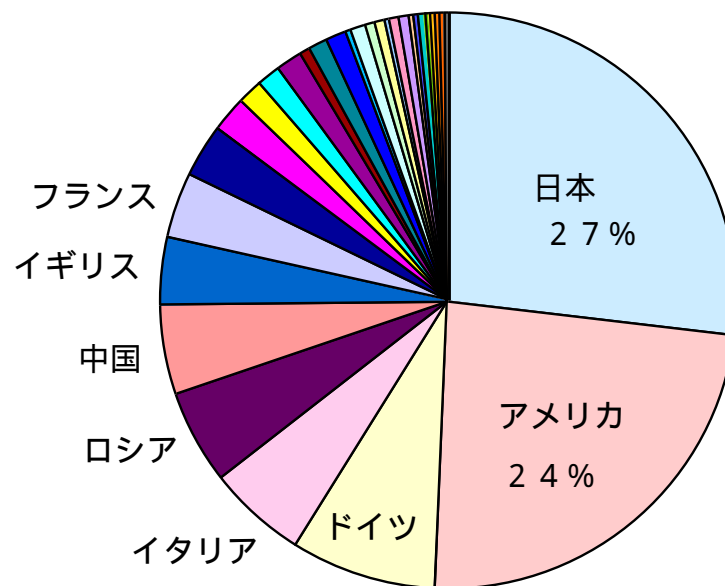
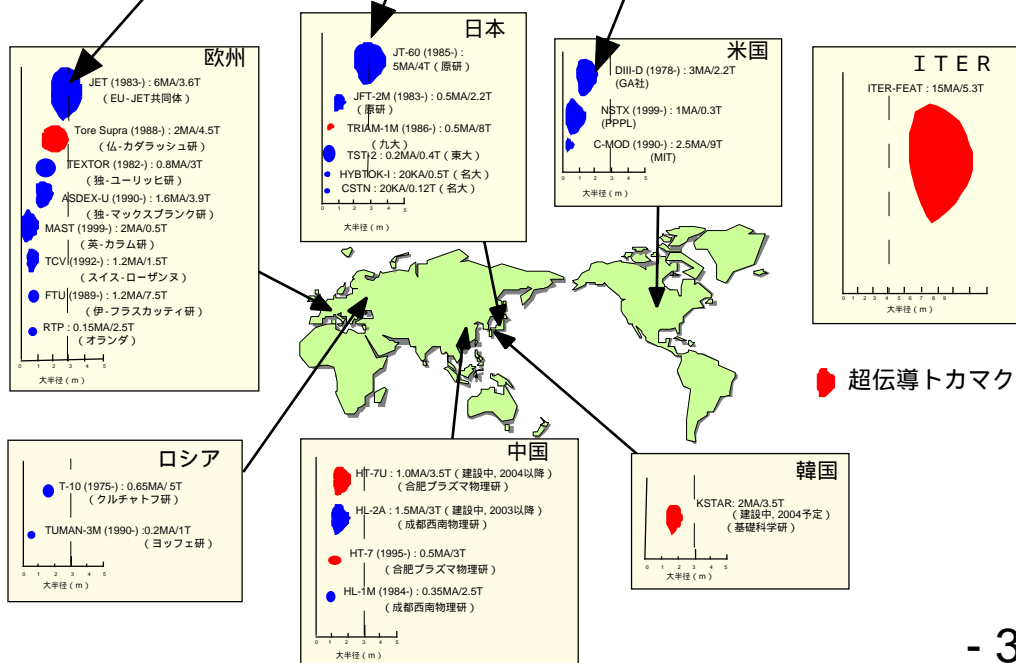


JT-60は、IAEA主催核融合エネルギー国際会議（核融合分野での進歩を競う"オリンピック"）で発表された（2000年は採択された）論文数が、世界の代表的なトカマク（日、米、欧）の中で最も多く、科学的な面でも世界をリードする中核装置と位置付けられている。また、最近2回連続で会議冒頭講演を行っている。

日本は国別ランキングでは、最大の論文採択数。

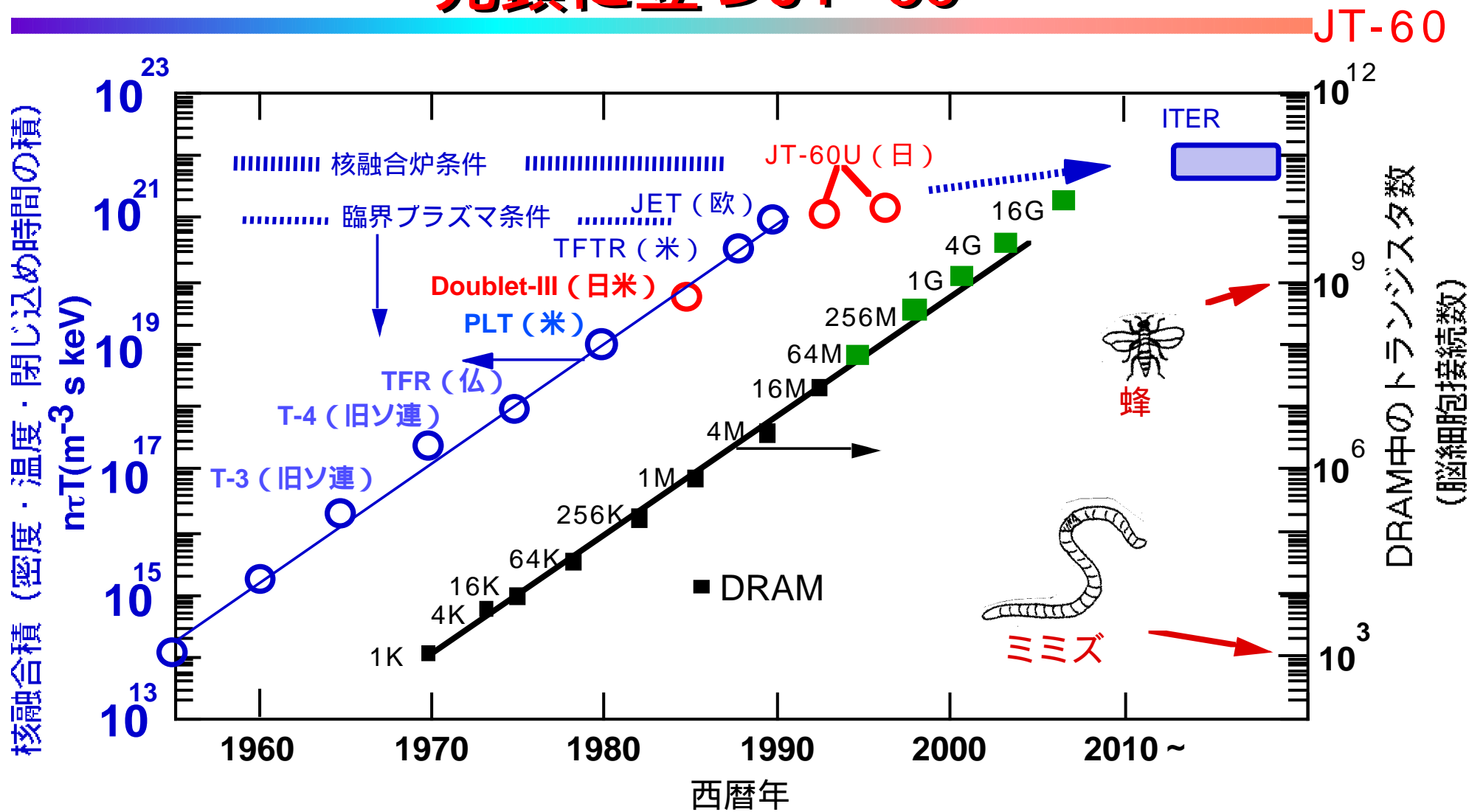
トカマク以外の閉じ込め方式を含む多様な研究成果

## 世界のトカマク装置とITER



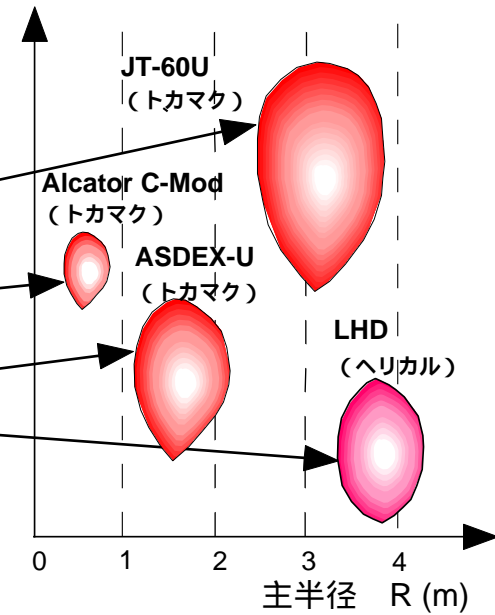
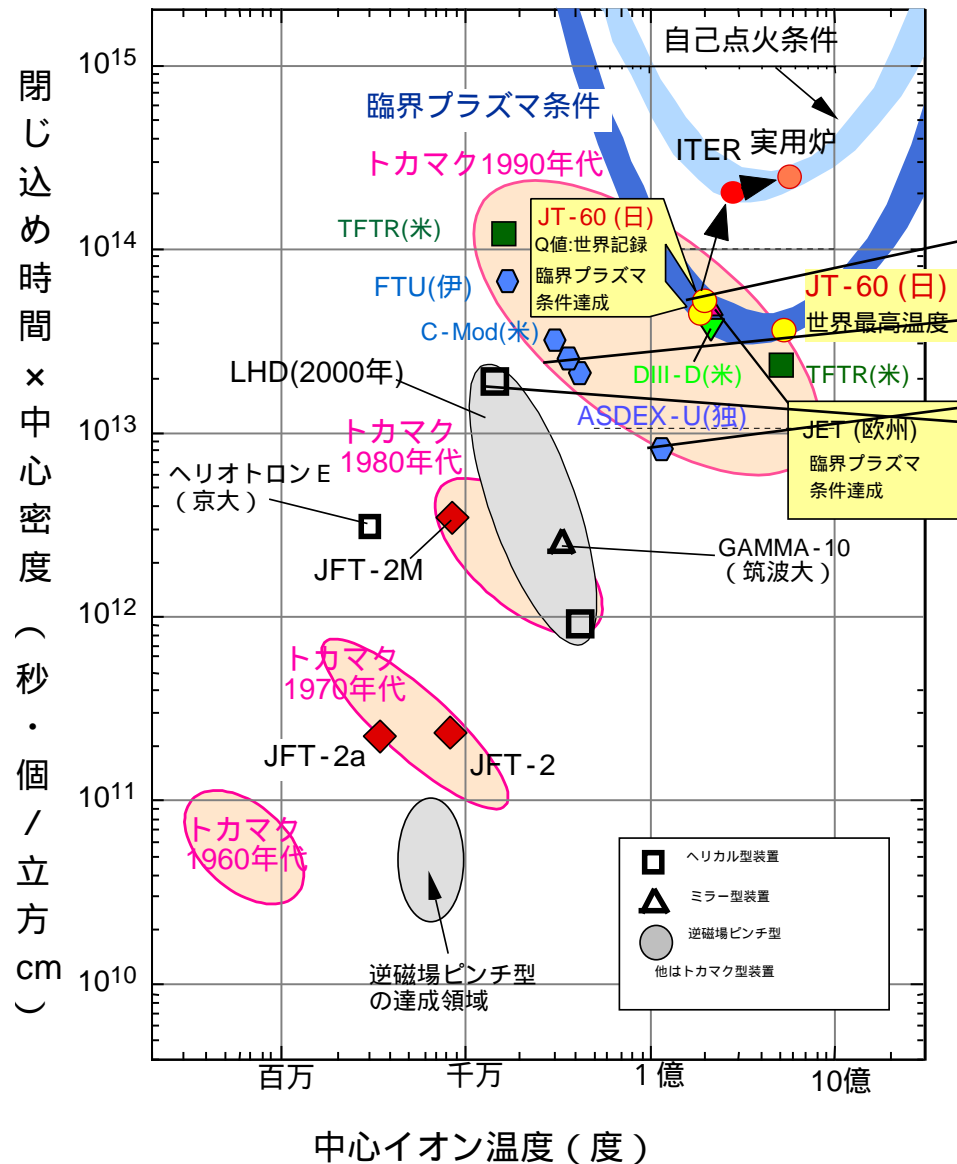
第18回核融合エネルギー国際会議での採択論文数の国別論文数 (総数374)

# 4. DRAM並みの進歩を遂げる核融合積進展で 先頭に立つJT-60



# 5. 様々な閉じ込め方式、トカマク装置の中で世界のトップに立つJT-60

JT-60



	ASDEX-U	LHD	JT-60
イオン温度	15keV	3.5keV	45keV
電子温度	25keV	10keV	21keV
閉じ込め時間	0.2秒	0.36秒	1.08秒
核融合積 ( $10^{20}\text{keVsm}^{-3}$ )	1.1	0.22	15.3
蓄積エネルギー	1MJ	1MJ	10.9MJ



## 6. 主要なパラメータで世界最高値を達成したJT-60

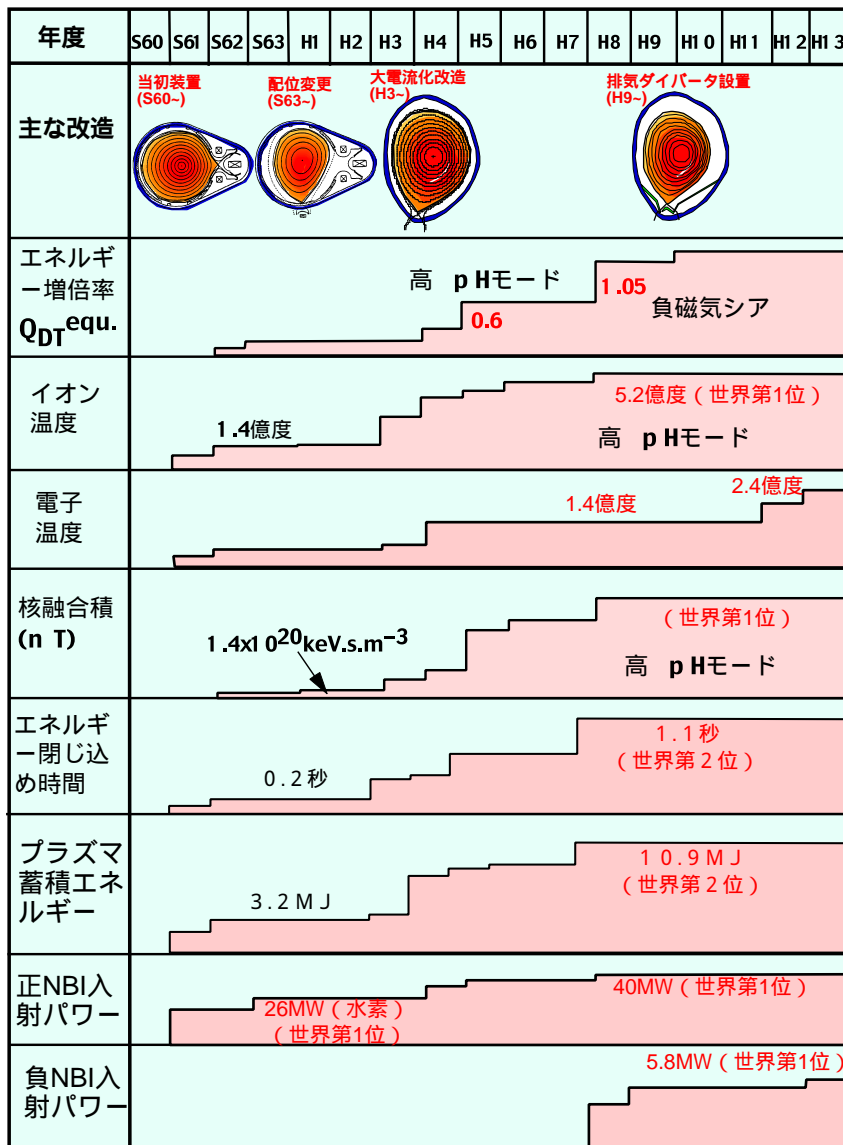
JT-60

注：赤字アンダーラインをしたパラメータは世界最高値

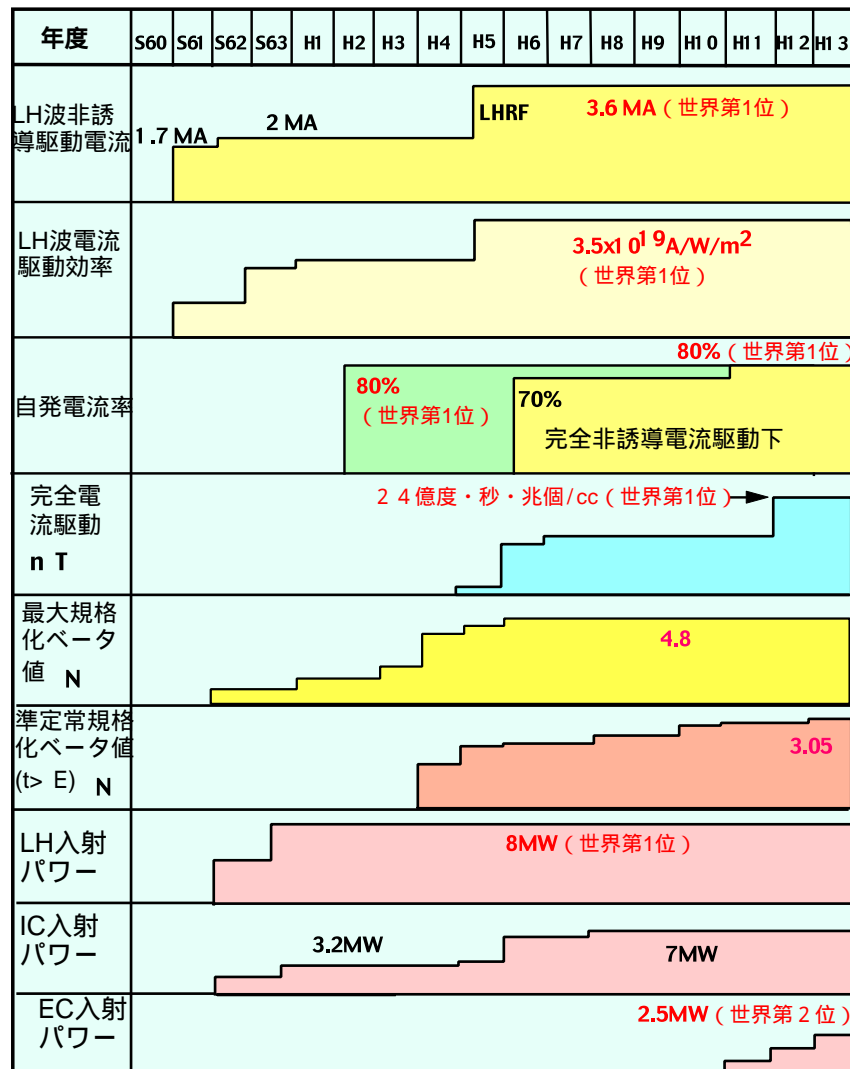
項目	値	項目	値
プラズマ電流	5MA	中心イオン温度	<u>45keV</u>
トロイダル磁場	4.5T	中心電子温度	21keV
プラズマ主半径/小半径	3-3.56m / 0.7-1.05m	中心電子密度	$2.8 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$
プラズマ体積	40-100m <sup>3</sup>	中性子発生率 (DD反応)	<u><math>5.6 \times 10^{16}</math>個 /sec</u>
加熱パワー(正/負イオンNB)	<u>40MW/5.8MW</u>	エネルギー閉じ込め時間	<u>1.08秒</u>
加熱パワー(LH/IC/EC)	<u>8MW/7MW/2.5MW</u>	Lモードに対する改善度(H89P)	4
積算加熱入力	203MJ	Hモードに対する改善度(HHy2)	2.3
プラズマ蓄積エネルギー	10.9MJ	規格化ベータ値 (最大値)	4.8
エネルギー増倍率 $Q_{DT}^{equ}$ (最高値)	<u>1.25</u>	規格化ベータ値 (準定常値 > E)	3.05
同上 $Q_{DT}^{equ}$ (準定常値 > E)	0.5	トロイダルベータ値	2.7%
エネルギー増倍率 $Q_{DD}$ (最高値)	<u>0.006</u>	ポロイダルベータ値	4.7
核融合積 (ni(0) E Ti(0), 最高値)	<u><math>1.53 \times 10^{21} \text{keVsm}^{-3}</math></u>	自発電流割合	<u>80%</u>
核融合積 (準定常値 > E)	<u><math>0.51 \times 10^{21} \text{keVsm}^{-3}</math></u>	ビーム駆動電流	<u>1MA</u>
核融合積 (非誘導電流駆動)	<u><math>0.2 \times 10^{21} \text{keVsm}^{-3}</math></u>	LH波駆動電流	<u>3.6MA</u>
		ビーム電流駆動効率	<u><math>1.55 \times 10^{19} \text{A/W/m}^2</math></u>
		LH波電流駆動効率	<u><math>3.5 \times 10^{19} \text{A/W/m}^2</math></u>

# 7. JT-60パラメータ進捗の歩み

JT-60



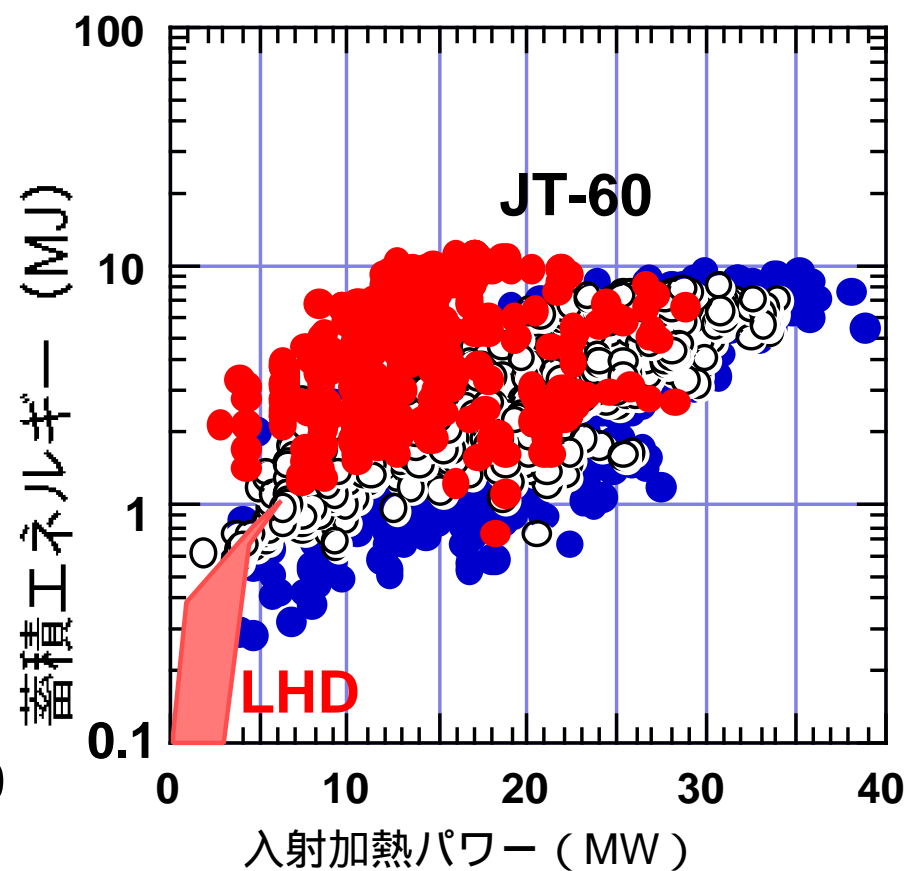
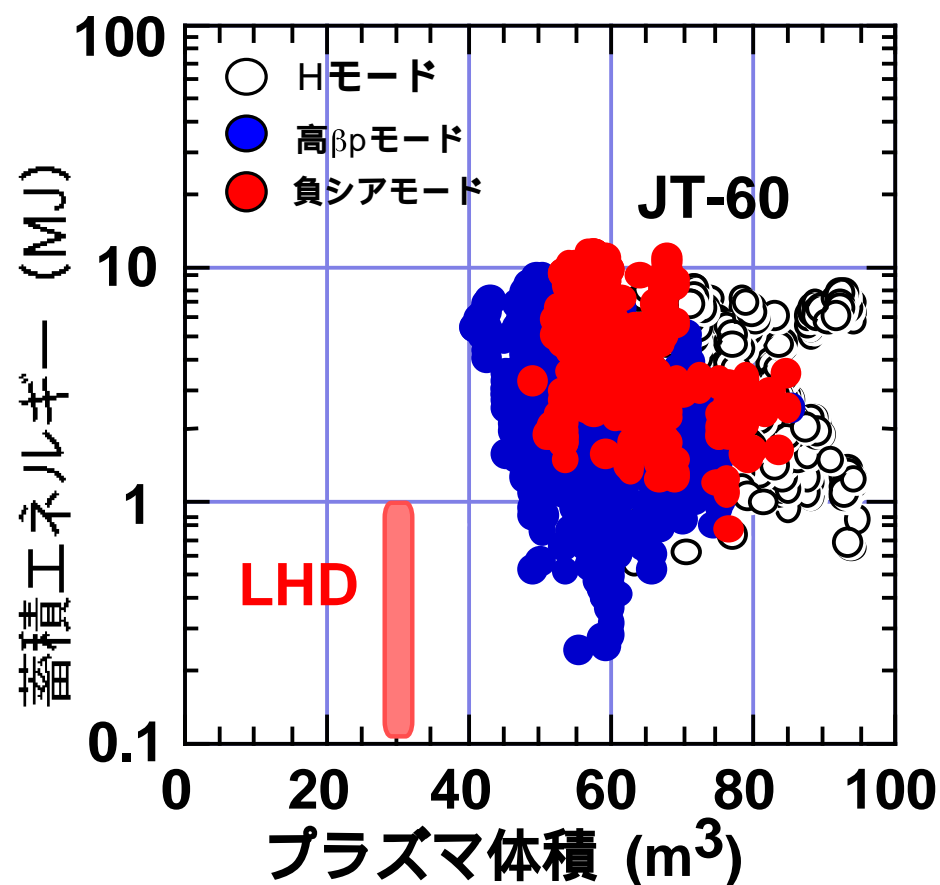
## WR : 世界最高記録



## 8. 加熱入力で40MWを達成し、プラズマ蓄積エネルギーで10MJを超えたJT-60

JT-60

最大プラズマ蓄積エネルギー：10.9MJ



# 9. 排気ダイバータによりITERに必要なHe排気性能を実証したJT-60

JT-60

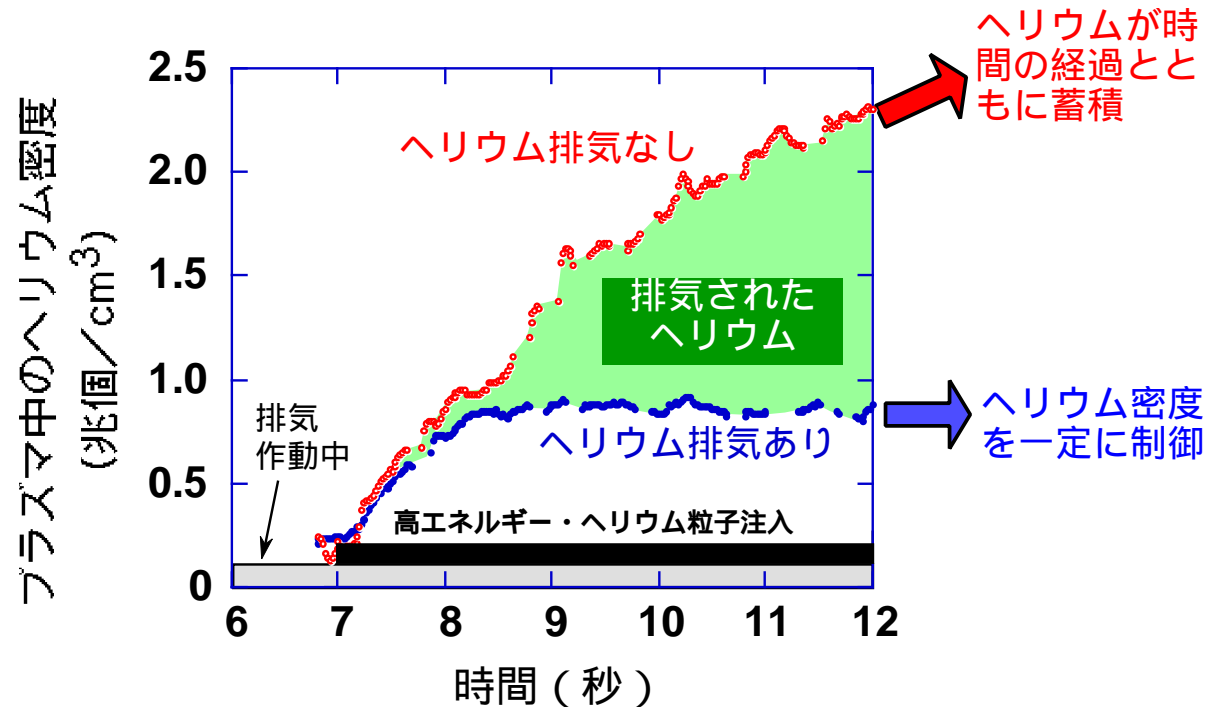
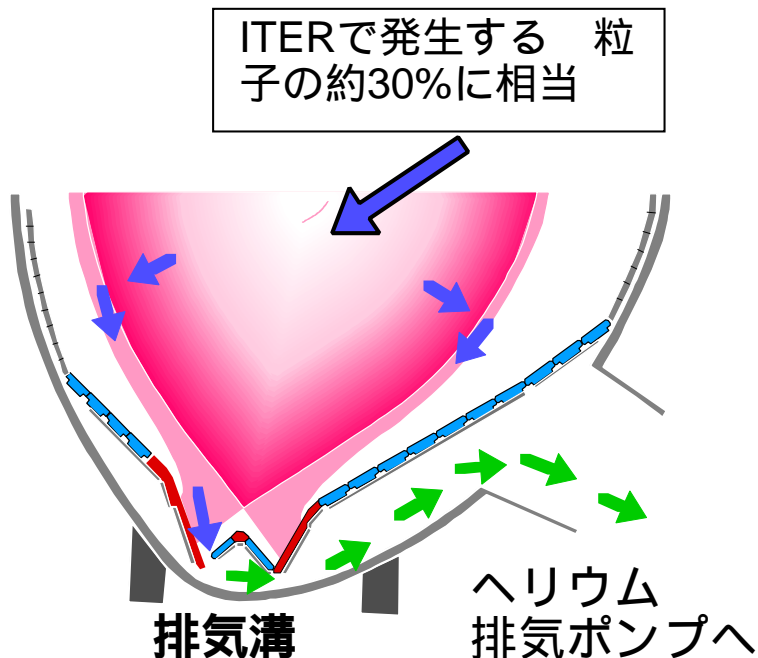
## 実験方法

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のヘリウム排気に要求される条件： $He^*/E < 5$

実験結果： $He^*/E \sim 4$

$He^*$ ：実効ヘリウム閉じ込め時間

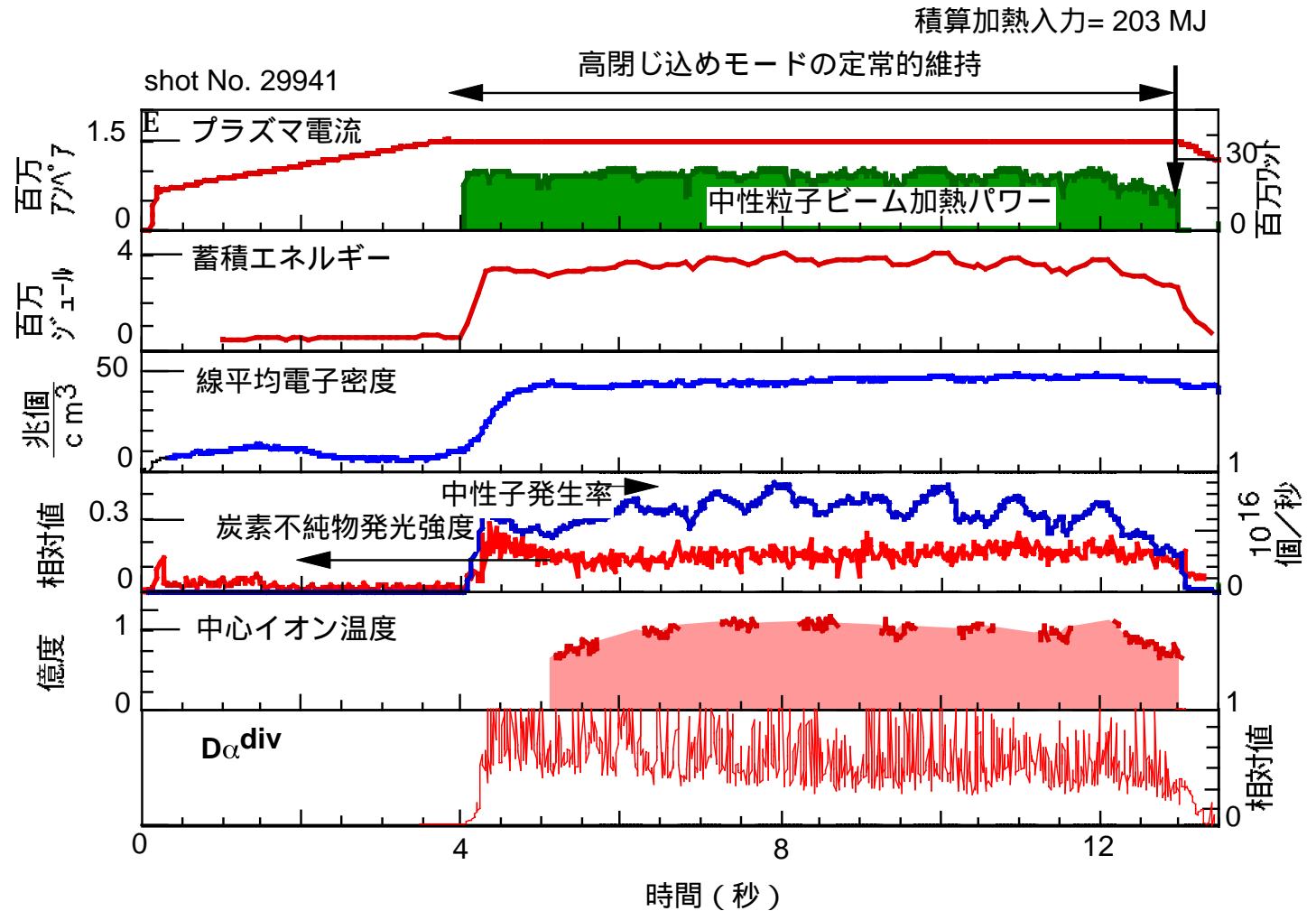
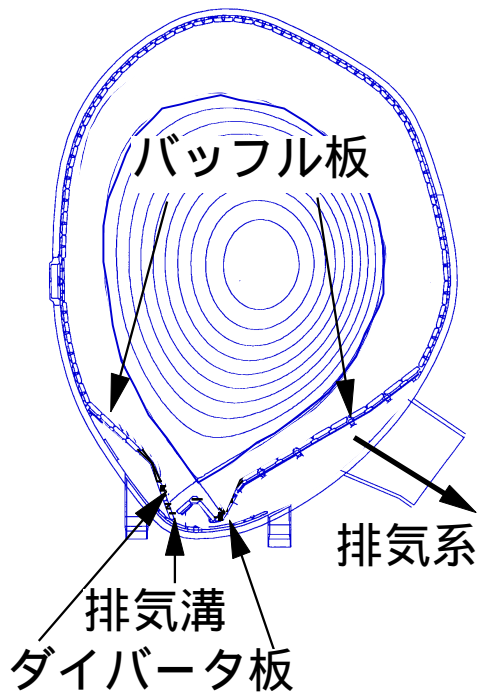


A. Sakasai et al., J. Nucl. Mater., 266-269 (1999) 312.

# 10. 世界初、1億度の高温プラズマを9秒間保持したJT-60

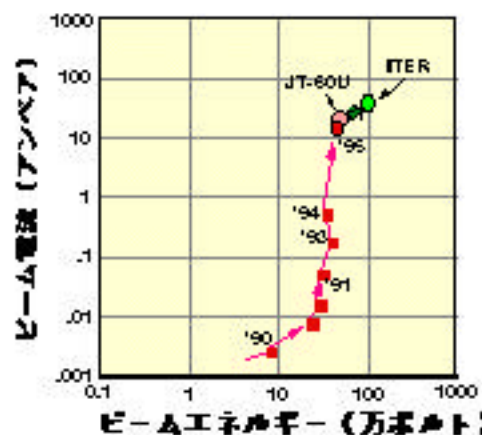
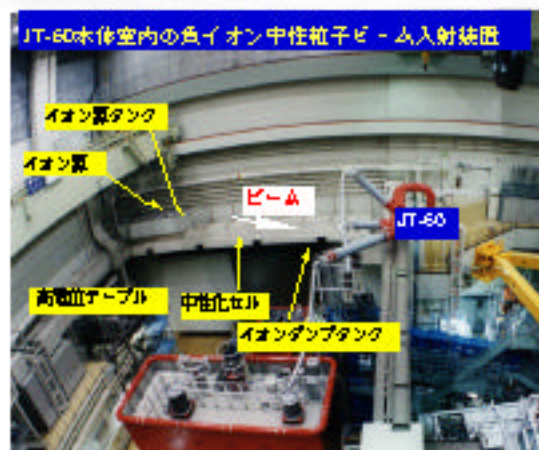
JT-60

工夫：W型排気ダイバータにより、不純物バーストを回避



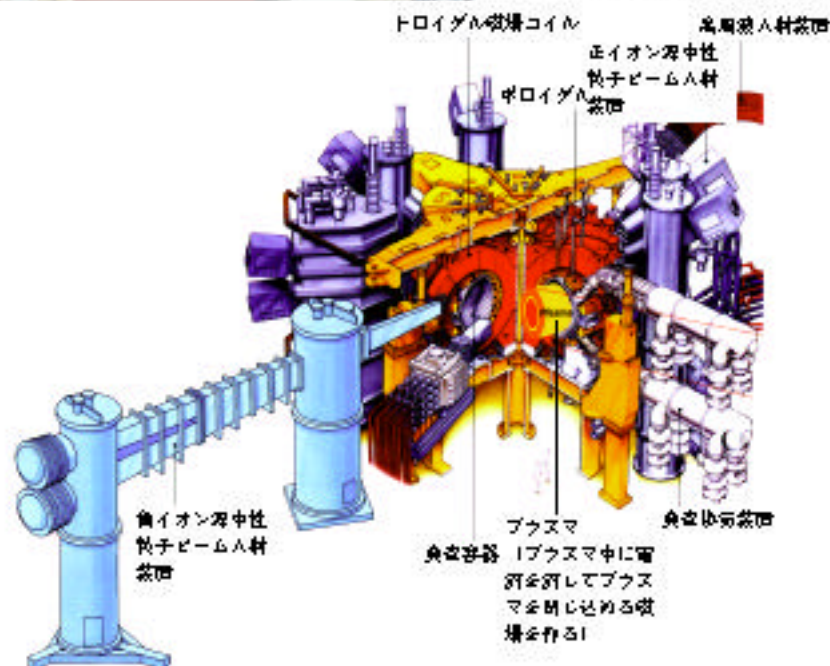
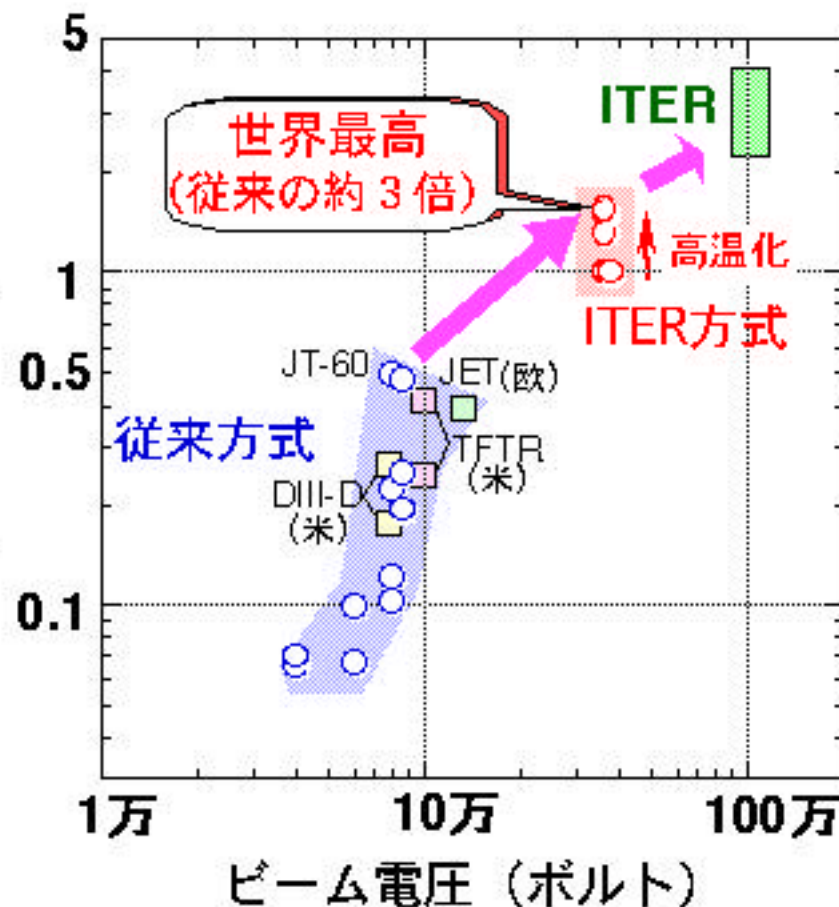
# 11. 世界初、負イオンNBIによってビーム駆動電流発生効率の世界記録（従来の3倍）を達成したJT-60

JT-60



プラズマ電流発生効率

( $10^{19} \text{m}^{-2} \text{A/W}$ )

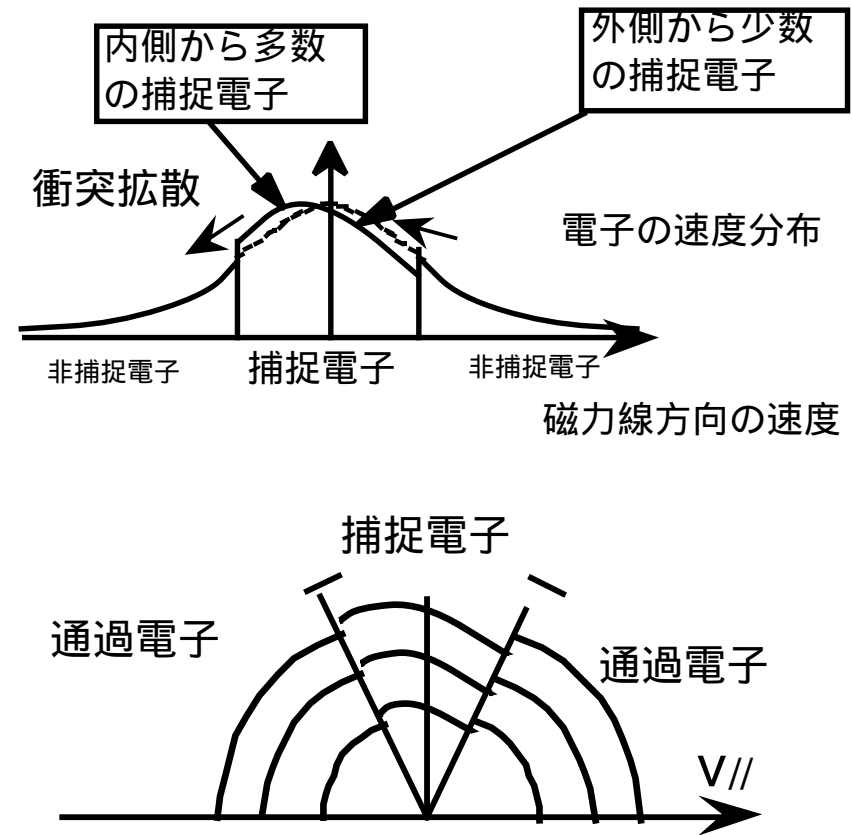
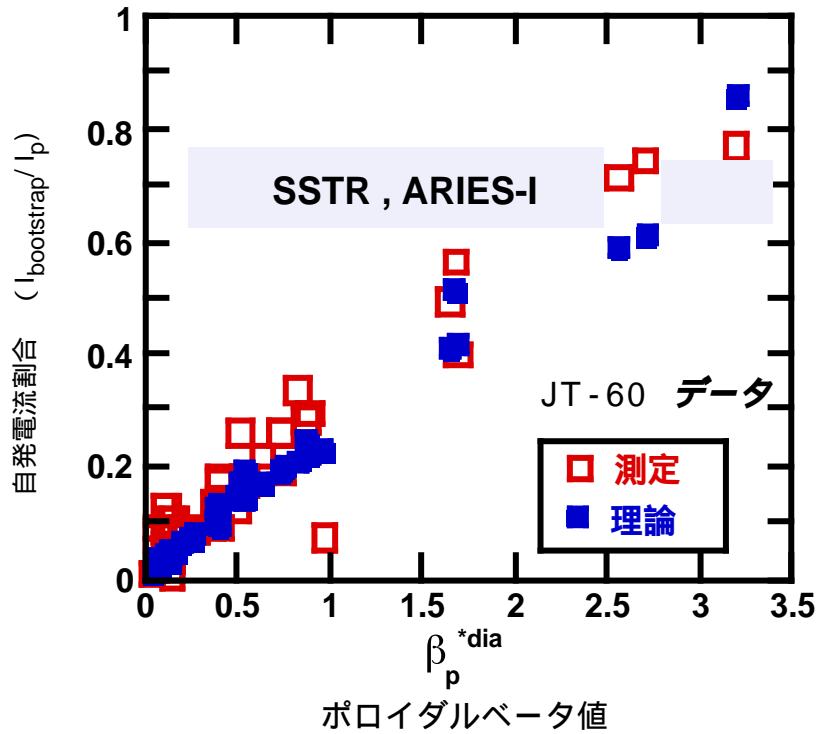


T. Oikawa et al., Nucl. Fusion 41 (2001) 1575

# 12. 世界最高：自発電流率 80% を実現し 理論を実証した JT-60

JT-60

$$J_{bs} = -en_e \mathbf{u}_b \sim -\epsilon^{0.5} \frac{1}{B_\theta} \frac{dP}{dr}$$



# 13. 世界で初めて内部輸送障壁を発見

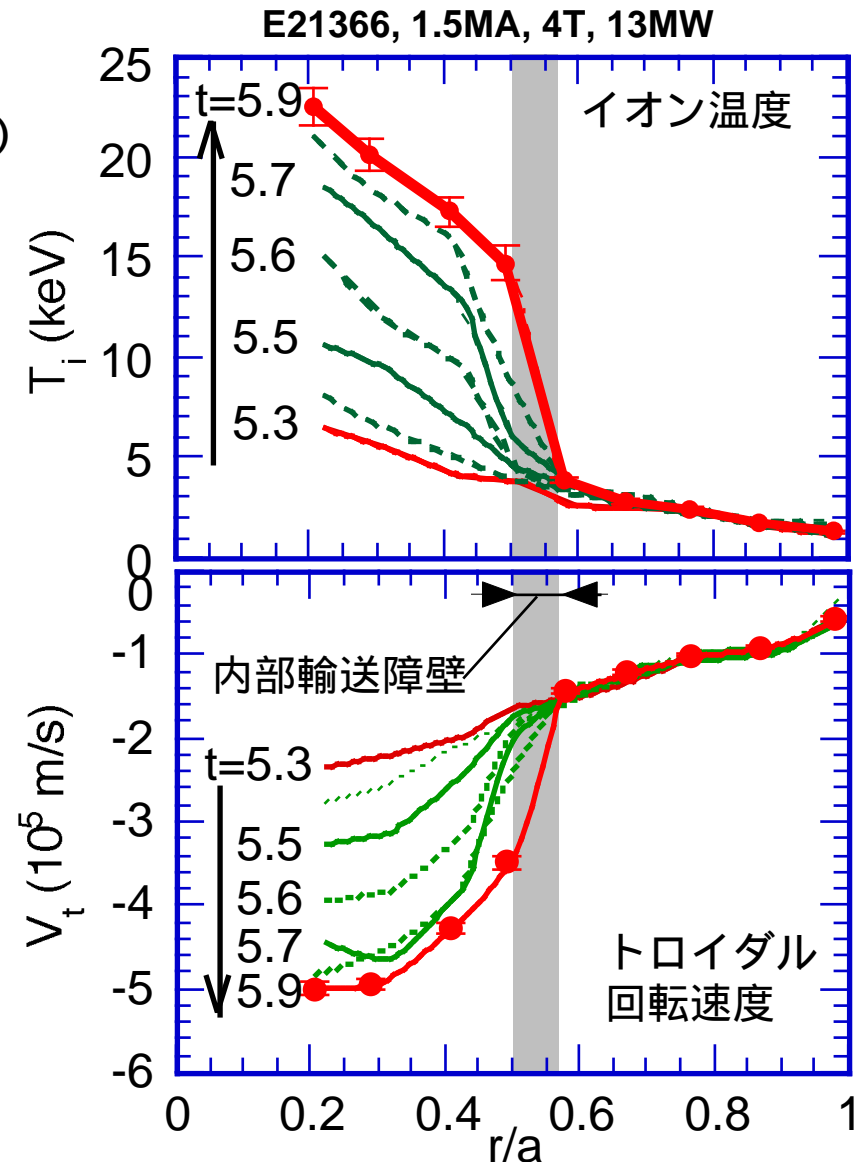
JT-60

- ・ プラズマ小半径の中ほど（右図では、 $r/a$  0.5）で、イオン温度の勾配が急峻になる現象を世界で初めて発見
- ・ プラズマ回転速度が大きく変化し、イオン系熱拡散係数が激減することを観測



内部輸送障壁  
(Internal Transport Barrier : ITB)

- ・ 異常輸送を解明する糸口を与える現象として世界的に注目され、主要なトカマク装置で共通に存在することを確認。現在では、閉じ込め改善現象の物理理解の鍵となる現象として認識されている



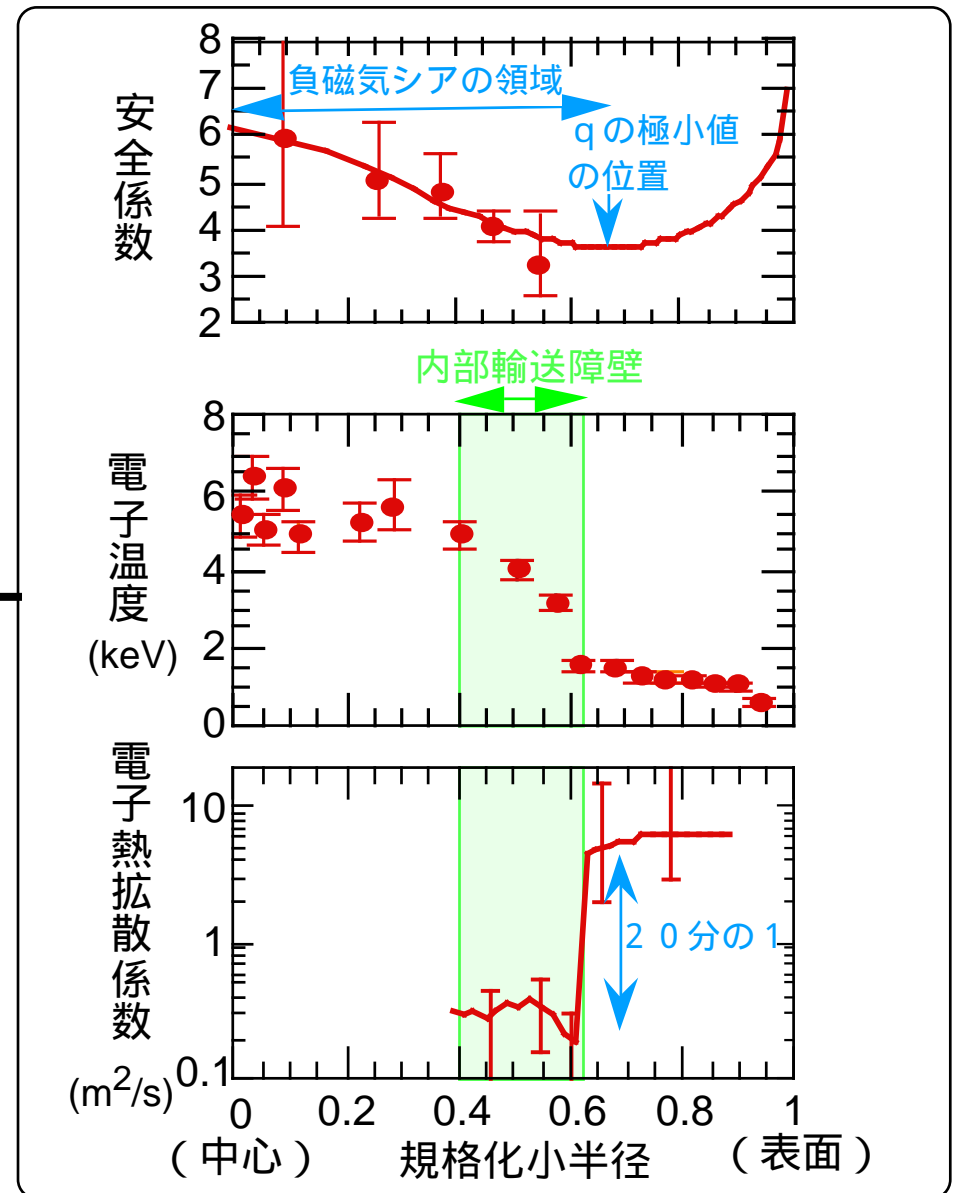
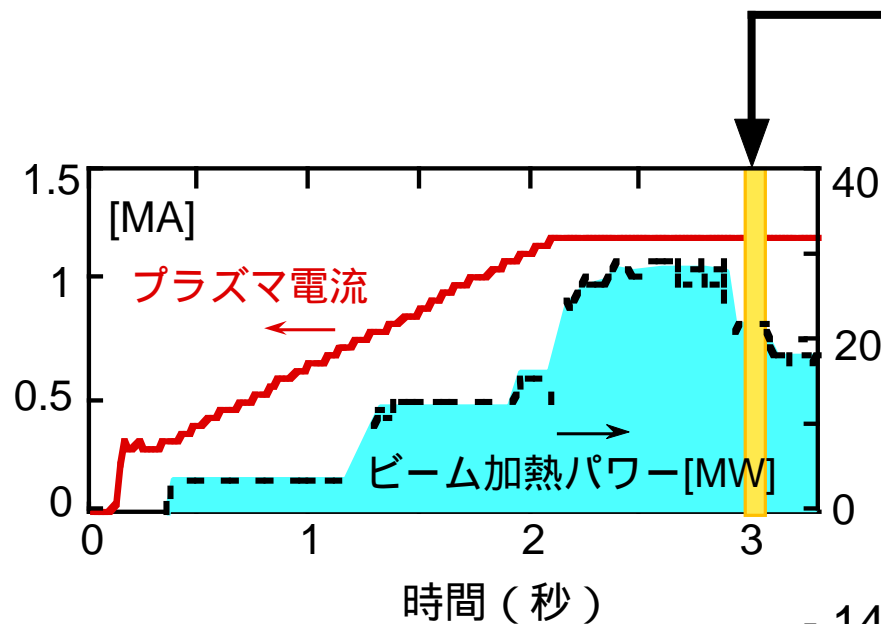
Y. Koide et al., Phys. Rev. Lett. 72 (1994) 3662



# 14. 負磁気シアで電子の内部輸送障壁を発見

JT-60

- ・ 負磁気シアプラズマではイオンだけでなく電子熱輸送の低減を伴う内部輸送障壁が形成されることを世界で初めて発見
- ・ また、温度分布だけでなく密度分布にも内部輸送障壁が出現することを発見
- ・ アルファ粒子による電子加熱が主体となる将来の核融合炉での電子系熱輸送低減に見通し



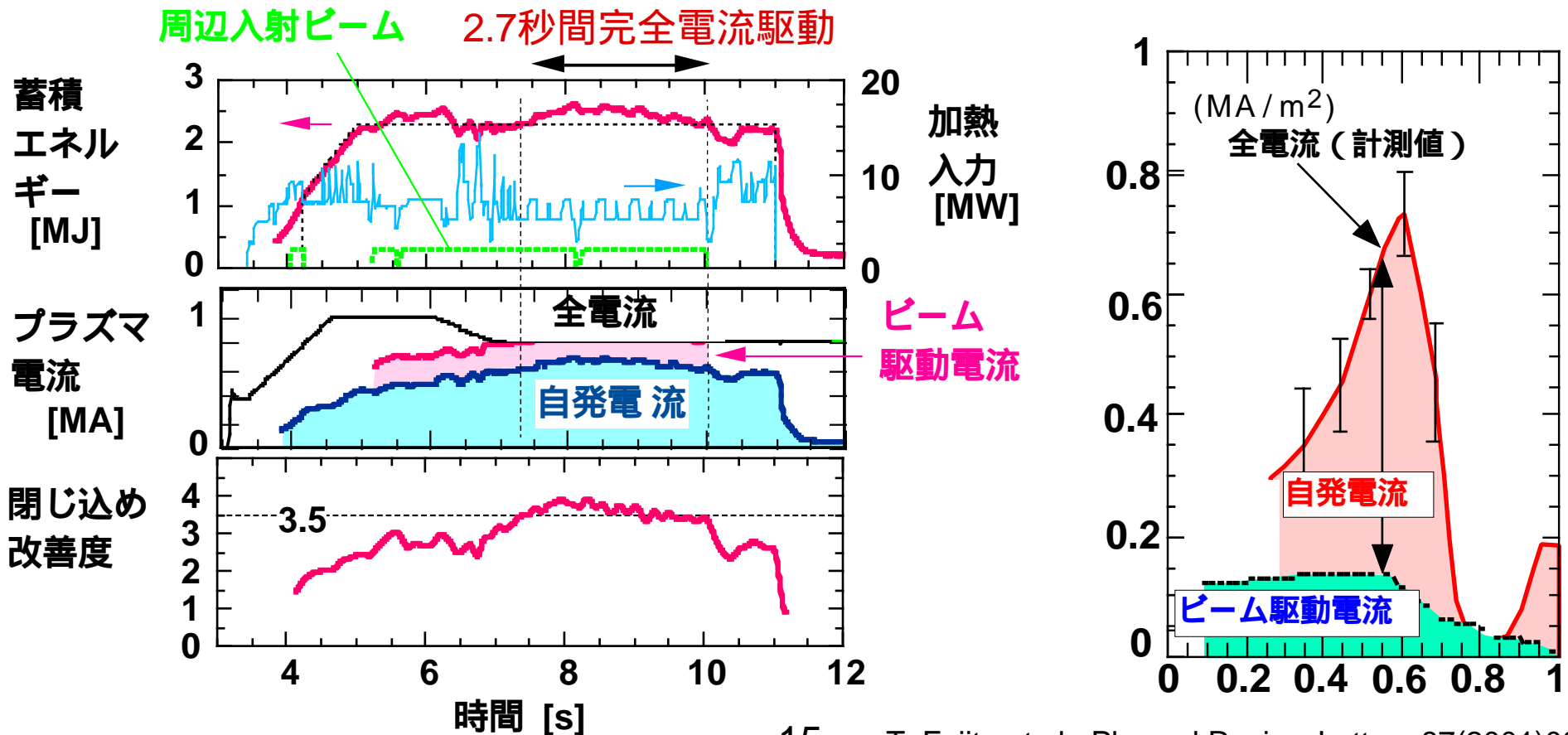
T. Fujita et al., Physical Review Letters 78(1997)2377

# 15. 自発電流割合が8割の完全定常運転の実証

JT-60

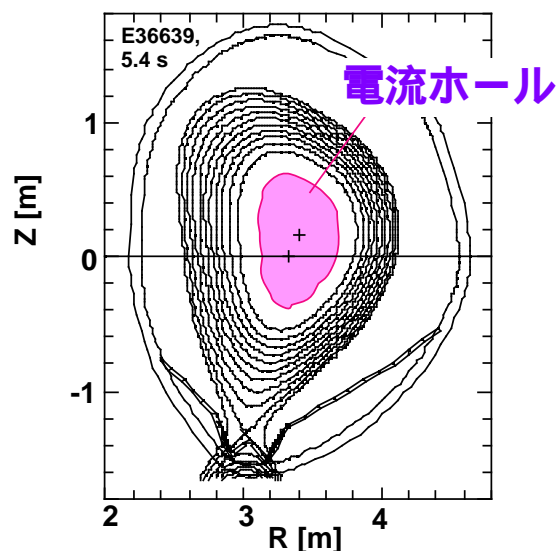
高性能負磁気シアプラズマを用いた先進定常運転方式を世界で初めて実証

- ・ 自発電流 ( ~ 80% ) と中性粒子ビーム駆動電流 ( ~ 20% ) で完全電流駆動
- ・ 自発電流が負磁気シア分布を形成 高閉じ込め ( 閉じ込め改善度 : 3.5 )
- ・ 2.7秒間、電流分布をほぼ定常に持続 ( 閉じ込め時間の約 8 倍 )

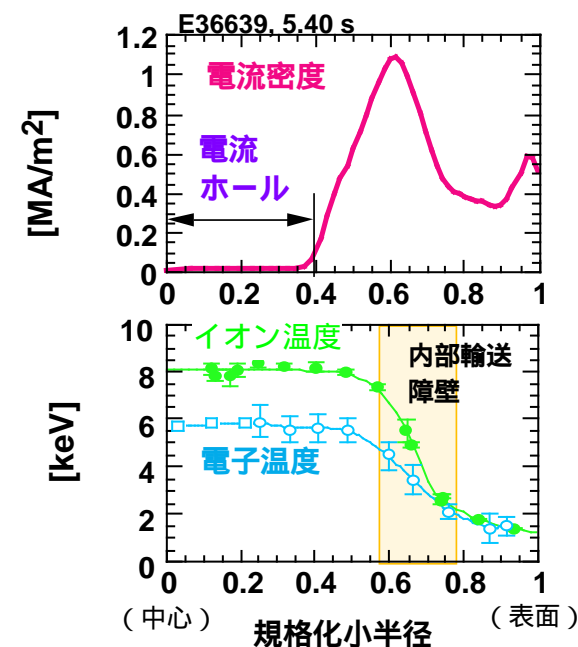
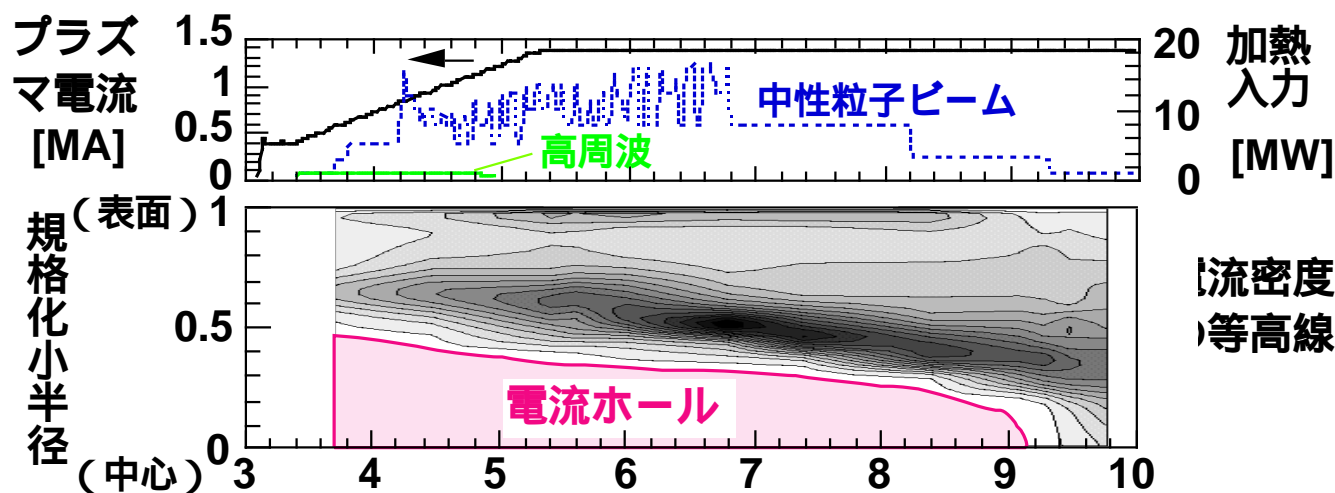


# 16. 電流ホールを有する平衡の発見

JT-60



- ・ 負磁気シアプラズマで、中心領域にプラズマ電流が流れていない平衡が安定に持続することを世界ではじめて発見
- ・ 電流ホール内：トロイダル磁場のみの単純トラスの状態に高温プラズマが安定に閉じ込められている
- ・ 従来必要と考えられていた中心部の電流駆動が無い新しい定常運転方式の可能性



# 17. SOLプラズマの逆流の発生機構を世界で初めて解明

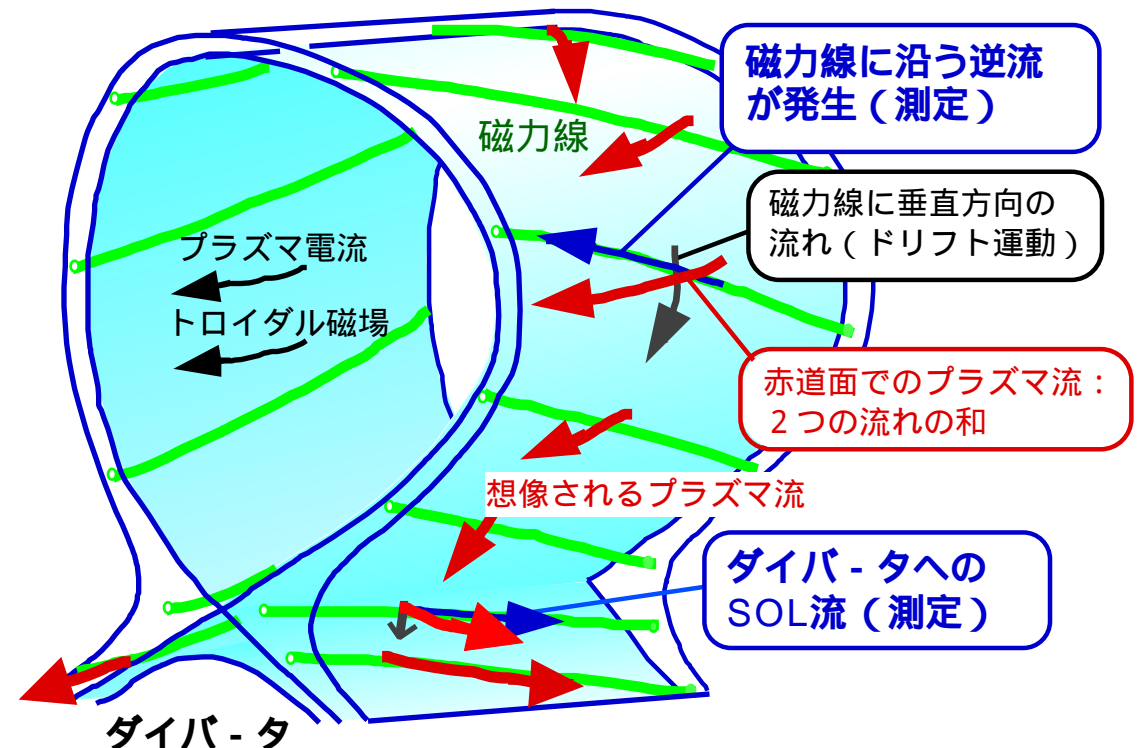
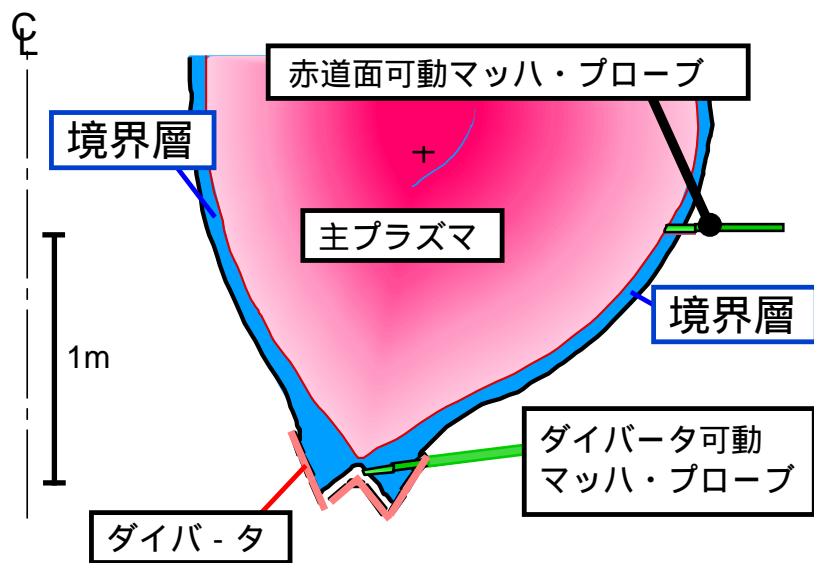
JT-60

プラズマ境界のすぐ外側（境界層）を流れるプラズマ流（SOL流）は、主プラズマから排出されるヘリウム灰や不純物の排気性能に影響を与える。

従来の考え方（主プラズマ側からプラズマ圧力の低いダイバータ方向へ磁力線に沿って流れる）と異なり、**主プラズマ周辺部でのみで逆流していることを発見。**

**磁力線に垂直方向に流れる機構（ドリフト運動）が逆流発生の原因であることを解明**

SOL流の速度を、可動静電プロ・ブで2ヶ所測定

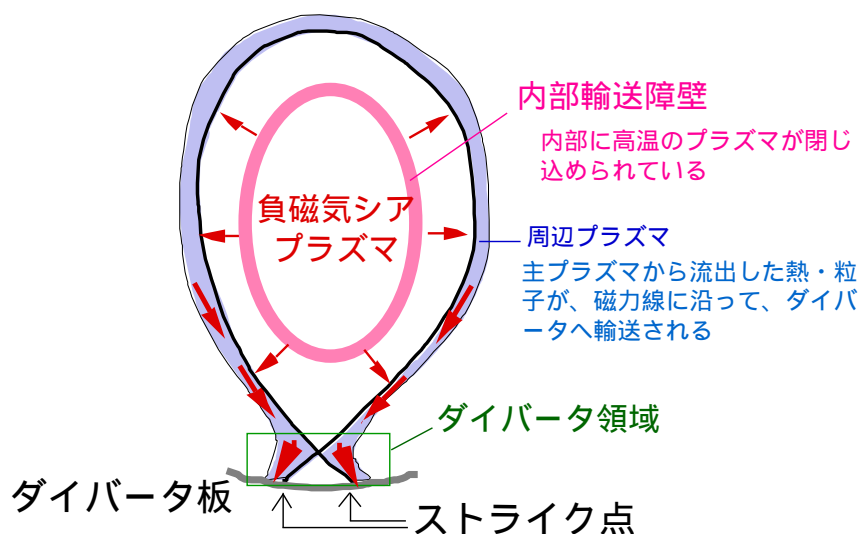


これらの実験結果による指摘から、ドリフト運動をダイバータ・プラズマのシミュレーション計算に導入することが進められており、ITERにおけるダイバータ形状設計の最適化を進める上で大きなインパクトを与えた。

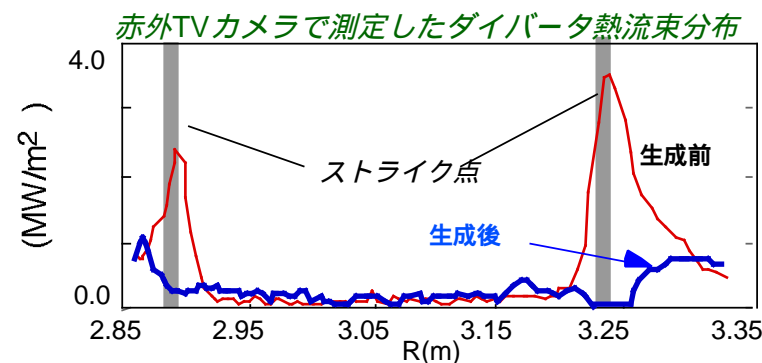
# 18. 負磁気シア放電で放射冷却ダイバータを生成

- 内部輸送障壁とダイバータ熱流束低減が両立することを世界で初めて実証 -

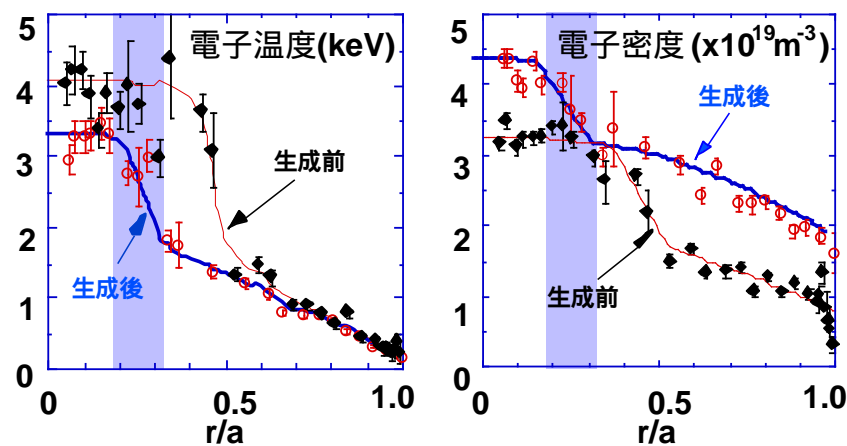
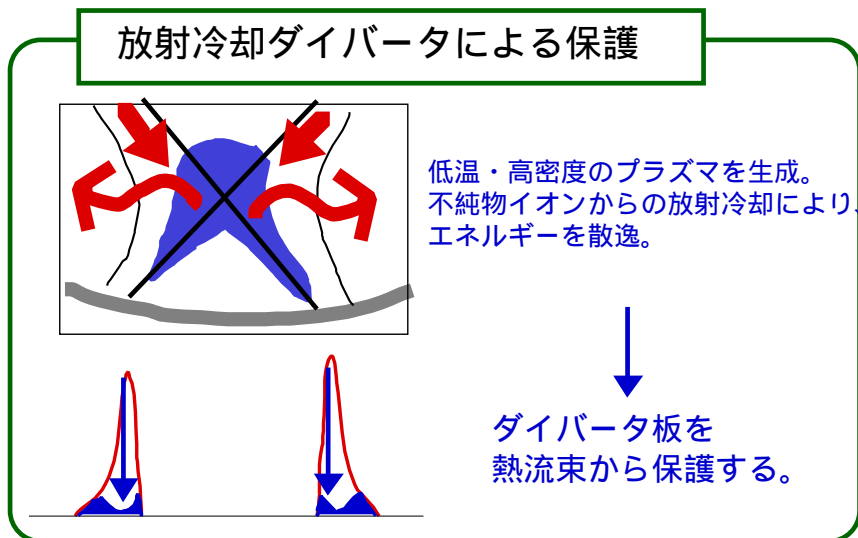
JT-60



ストライク点での熱流束を、ほぼ消滅させた



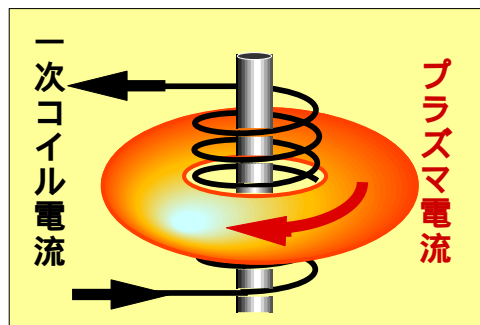
放射冷却ダイバータ生成後も、内部輸送障壁を維持



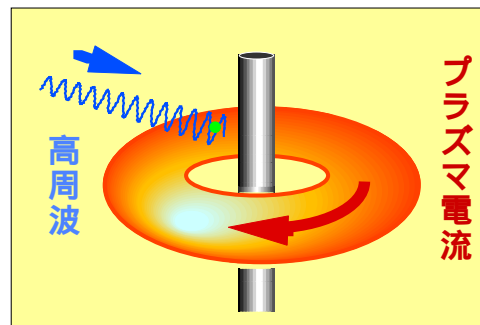
# 19. 世界最大の非誘導電流 (3.6 MA) を高周波で駆動

JT-60

トランス方式の電流駆動  
パルス運転

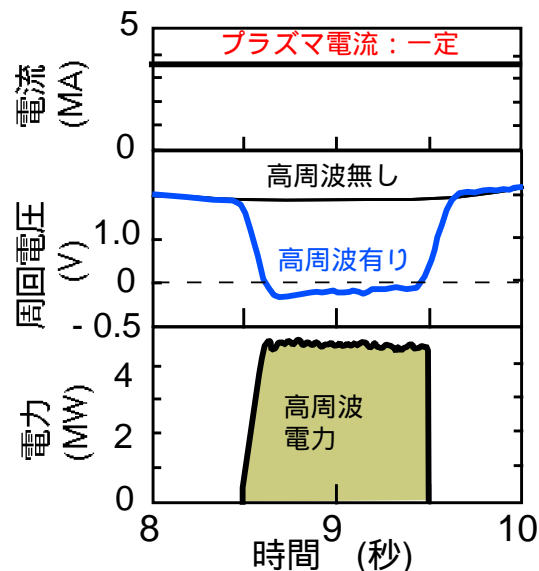


高周波による電流駆動  
定常運転が可能

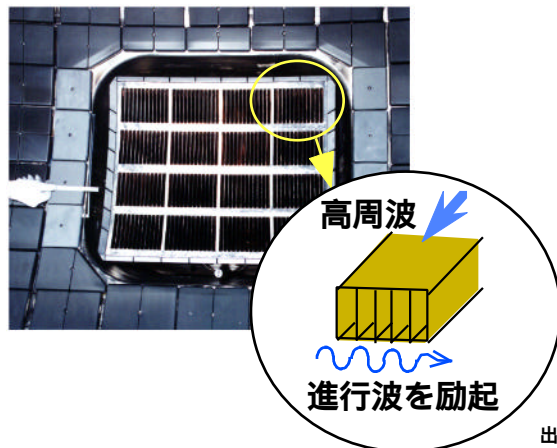


電子の走行速度と共鳴する  
進行波を励起し、電子を加速し、  
大電流を生成する。

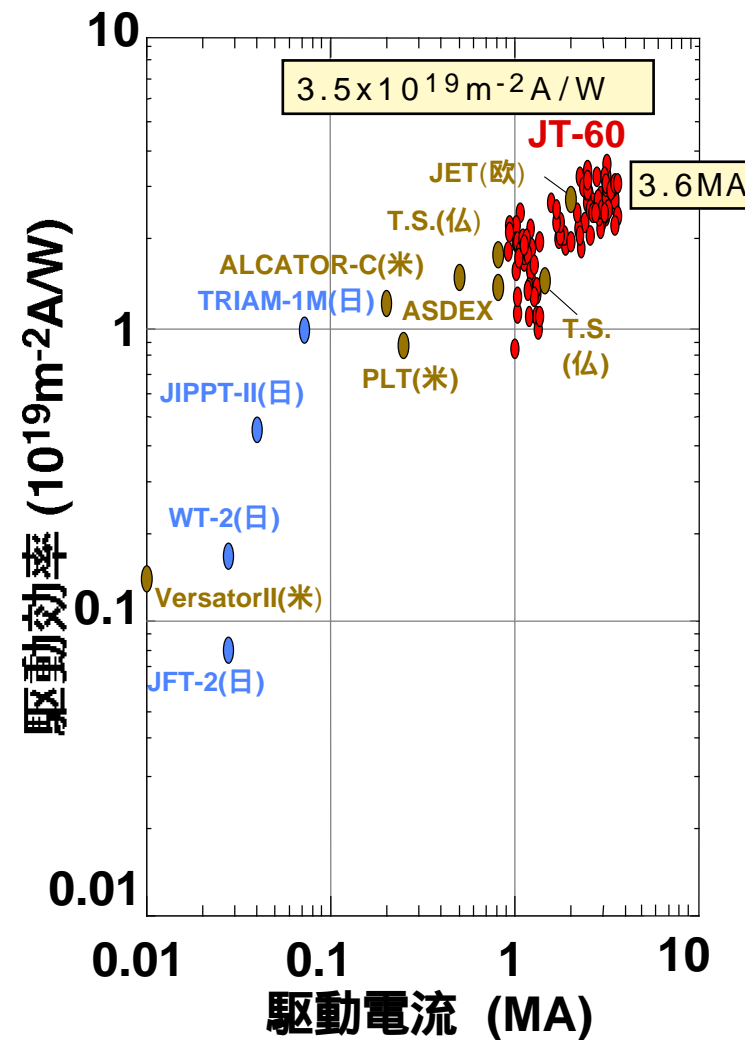
高周波電流駆動により、  
周回電圧はマイナスに！



電流駆動用アンテナ



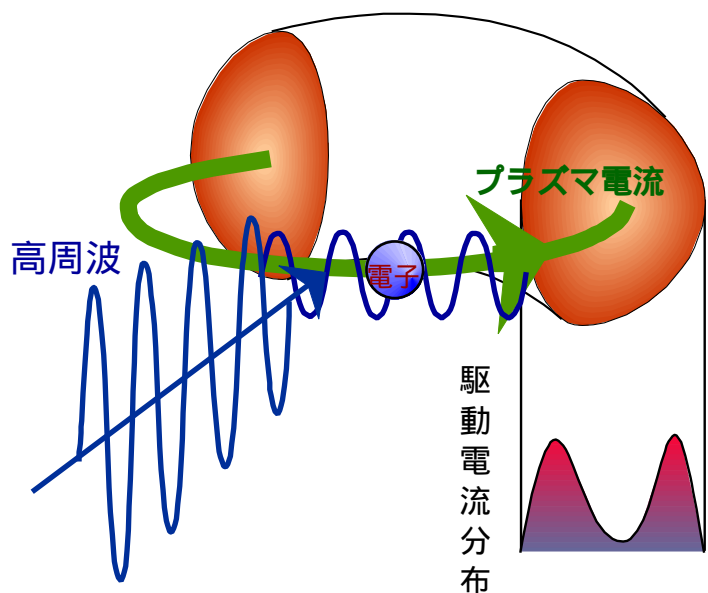
世界最高の効率を達成



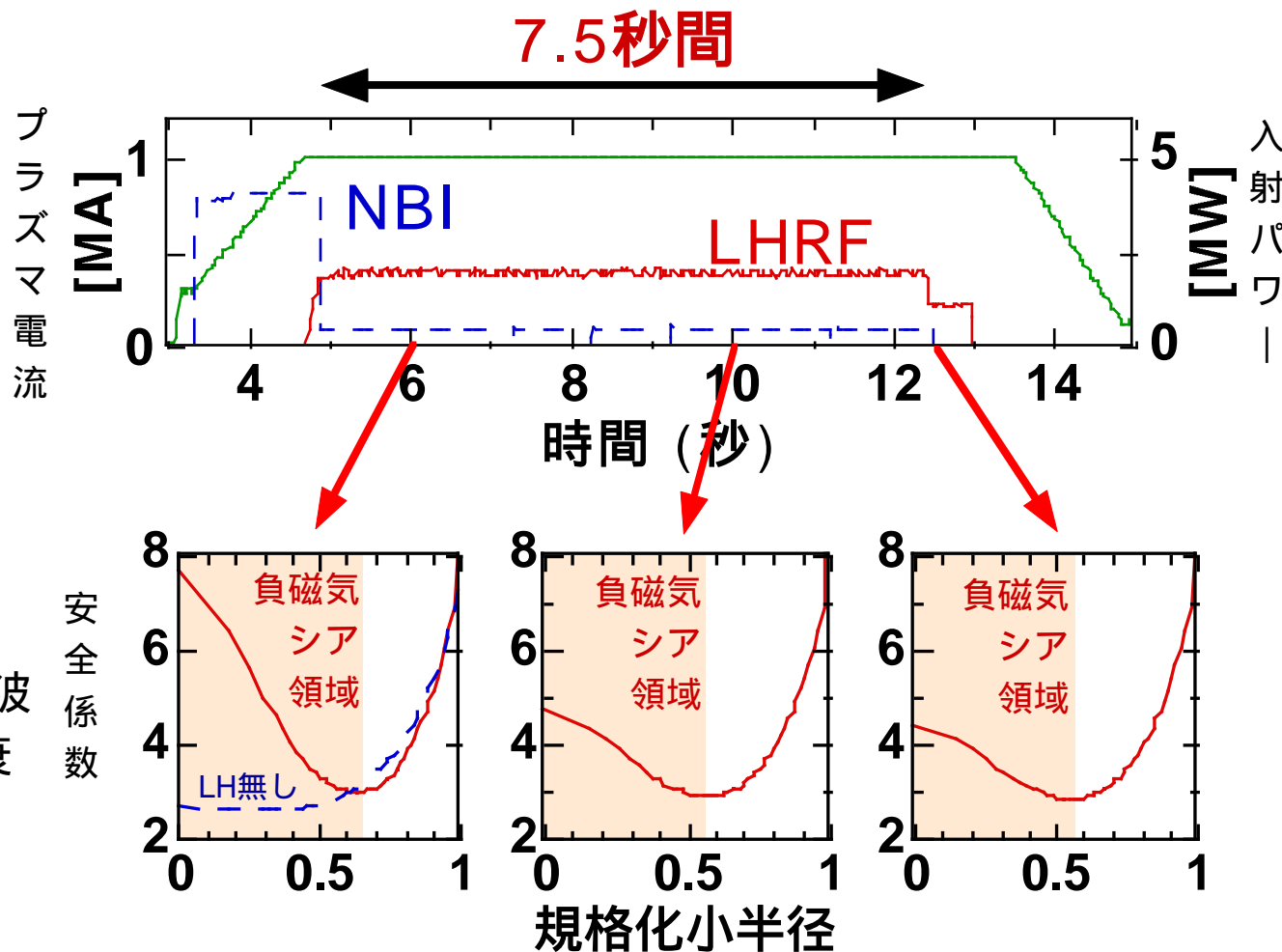
出典：Y.Ikeda et al., High power lower hybrid current drive experiments in JT-60L  
Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Vol.4, 415(1994).

# 20. 世界初、負磁気シア配位を7.5秒間準定常維持

JT-60



低域混成波帯域 (LHRF) の高周波をプラズマに入射、ランダウ減衰により局所的に電子を加速して、プラズマ電流分布を制御



周辺電流駆動

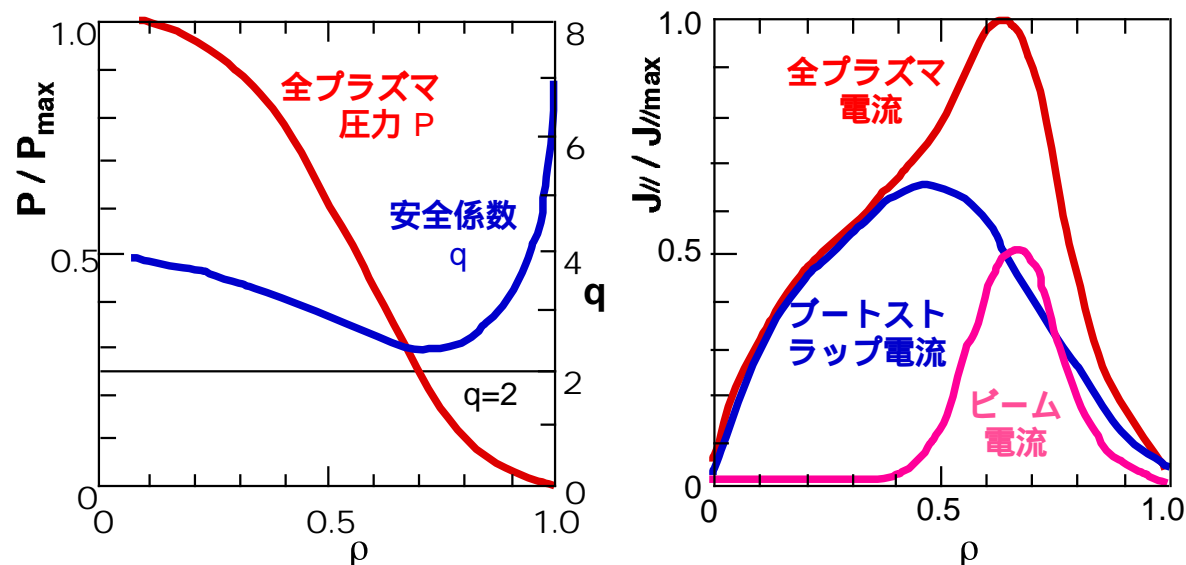
負磁気シア配位 (凹状電流分布) の準定常維持

S.Ide et al., 16th IAEA Fusion Energy Vol. 3 (1996) 253.

# 21. MHD的に安定な負磁気シアプラズマの発見

JT-60

凹状電流分布（負磁気シア）プラズマにおいて、  
高ベータでもMHD的に安定な電流分布、圧力分布を理論的に発見。  
負磁気シアプラズマによる先進的定常炉心プラズマ概念を提唱。



SSTR  
parameter  
 $N=3,$   
 $p=1.6,$   
 $fbs=65\%$

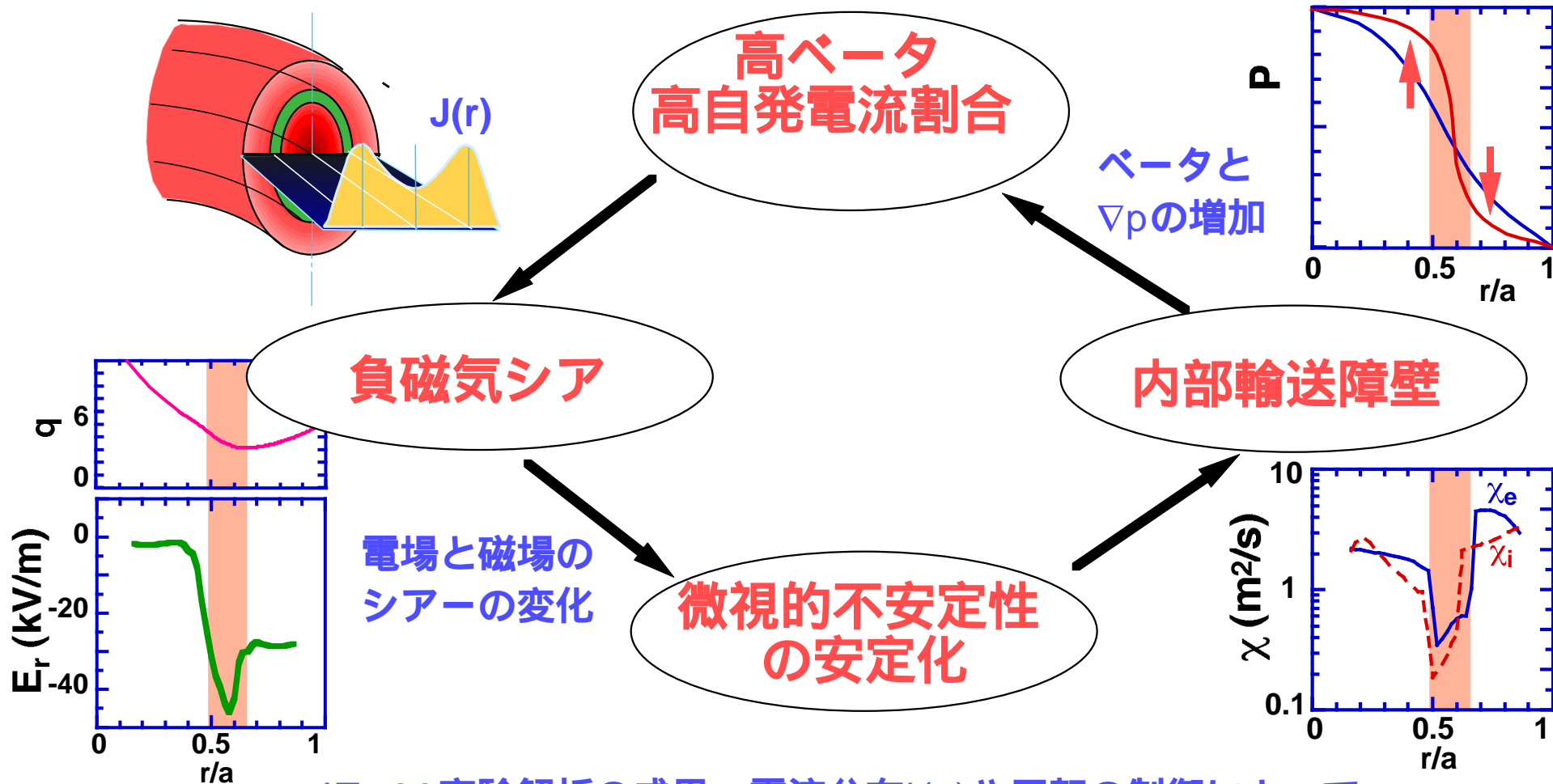
大きなブートストラップ電流に非軸中心の電流駆動により凹状電流分布を形成：  
低  $n$  キンクモード及び高  $n$  バルーンモードに対する安定性を確認。  
プラズマ中心付近のポロイダル磁場  $B_p$  の低下により、高いブートストラップ  
電流を形成。核融合増倍率の向上。

T.Ozeki, et al, 14th IAEA Conf, Vol.2 (1992)187



# 22. 高自発電流割合プラズマでの自己形成過程

JT-60



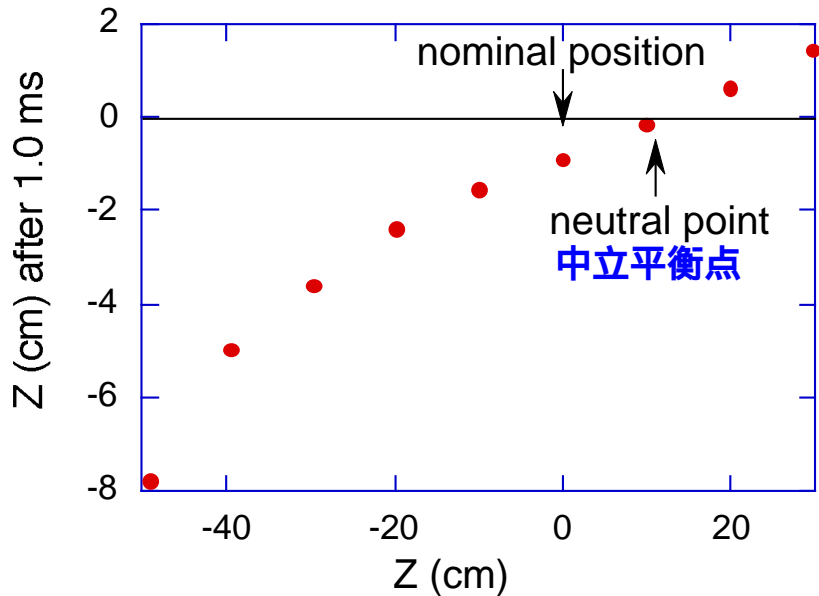
JT-60実験解析の成果：電流分布 $j(r)$ や回転の制御によって自己形成過程を制御することが可能であることを示した。

# 23. ディスラプション時の垂直移動現象(VDE)の抑制法の発見

JT-60

ディスラプション時のプラズマ挙動をシミュレーションにより解析し、VDE抑制できる「中立平衡点」を発見

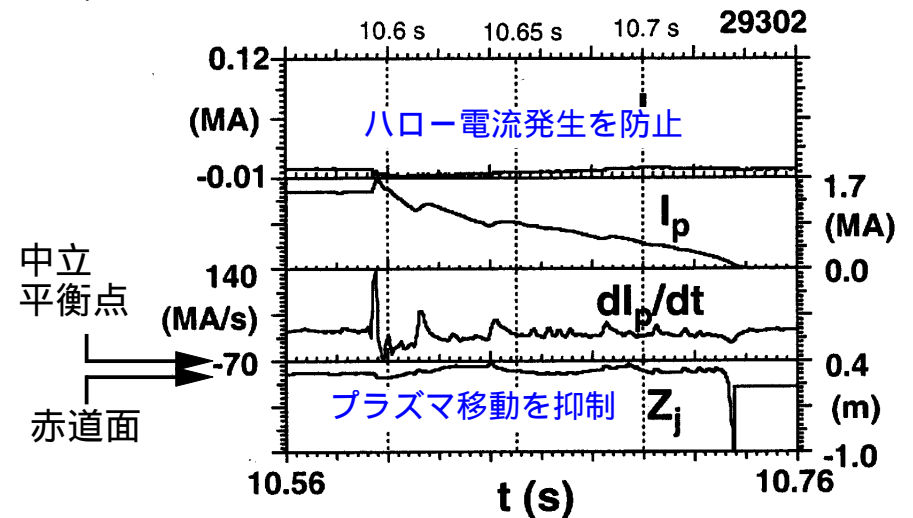
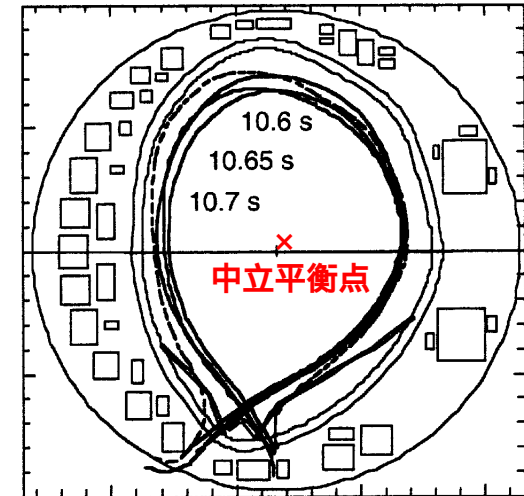
「中立平衡点」によりハロー電流の発生を防止し電磁力を緩和



(Y. Neyatani et al., Nucl. Fusion 39 (1999) 559.)

(Nucl. Fusion, Vol.36, No.5 (1996) 643.)

Stable Termination



ディスラプション直前、 $Z = 15 \text{ cm}$  (中立平衡点) に配置し、急激なプラズマ移動とそれによるハロー電流を抑制  
 実験によりプラズマ電流の安定消滅を実現

# 24. シミュレーションによるW型ダイバータの特性を初めて解明

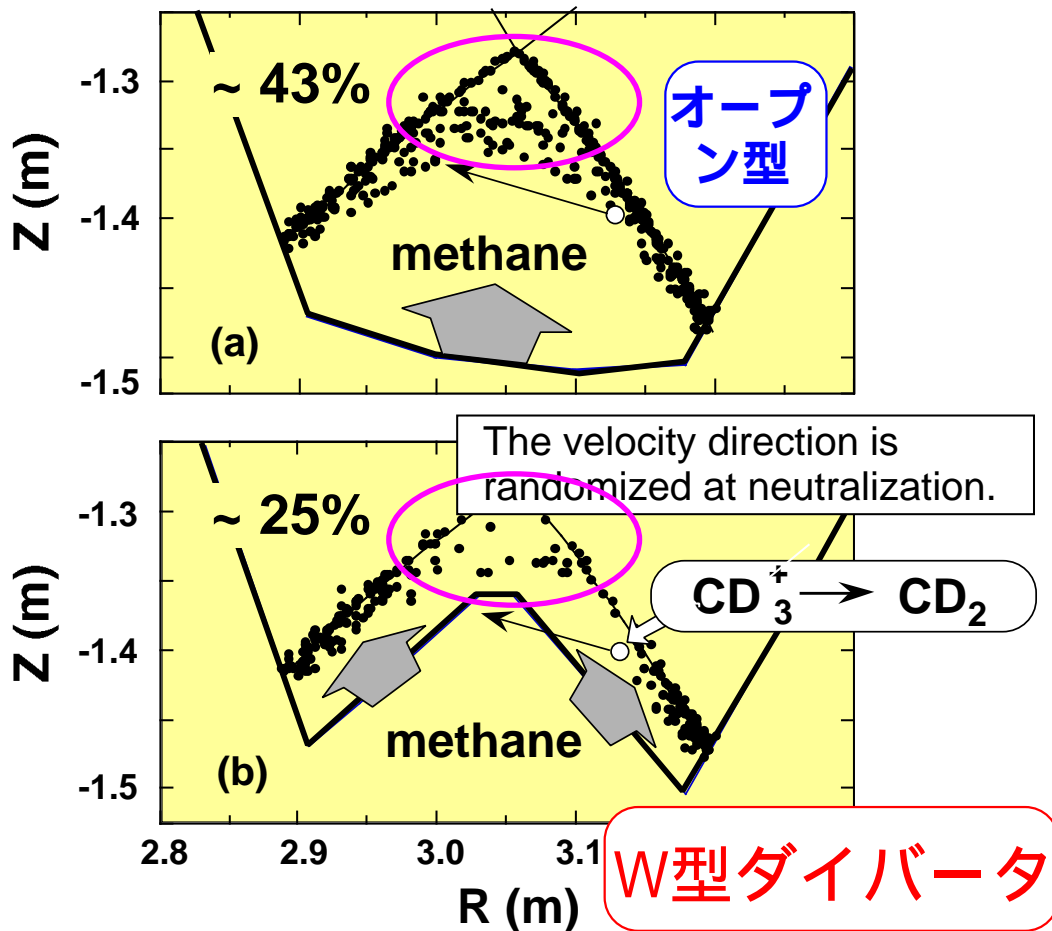
JT-60

X点付近の不純物発生を  
シミュレーションにより予測

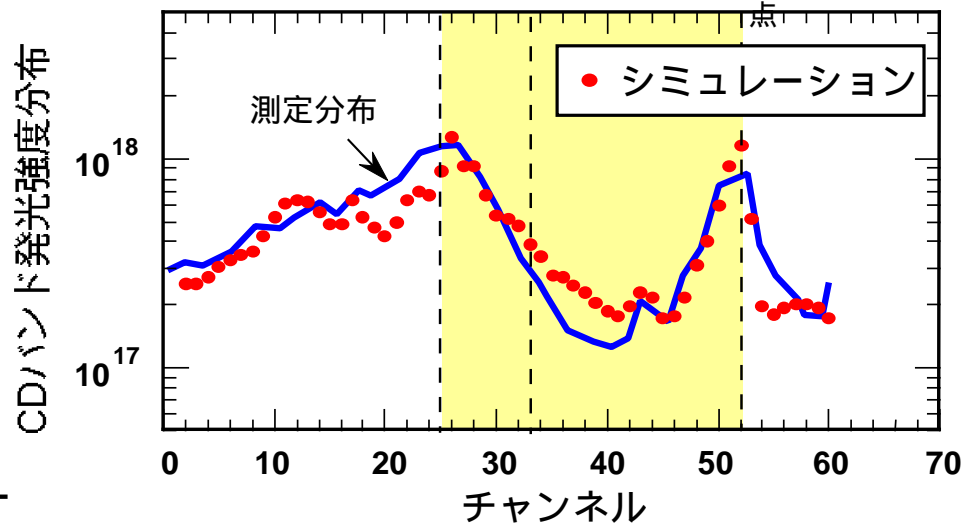
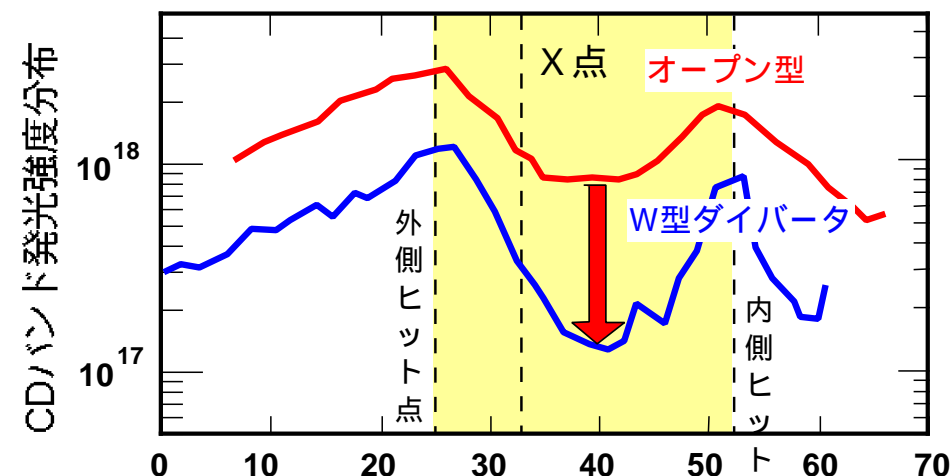
不純物混入防止に対するドームの有効性を  
シミュレーション、実験により解明

メタンの解離で発生する炭素イオンの分布

シミュレーション解析で予測されたように、ドーム  
効果がC Dバンドの分布に観測されている

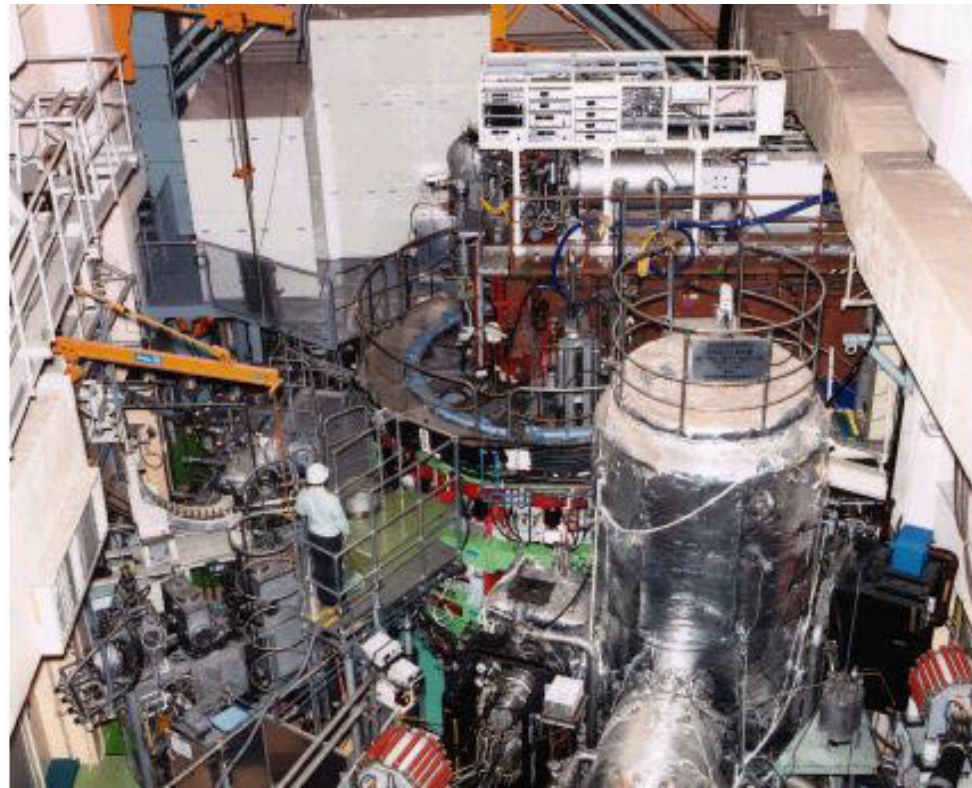


密度変化に伴う発光量の増加



( K. Shimizu, J. Plasma and Fusion Research 1995 )

# JFT-2M研究の成果

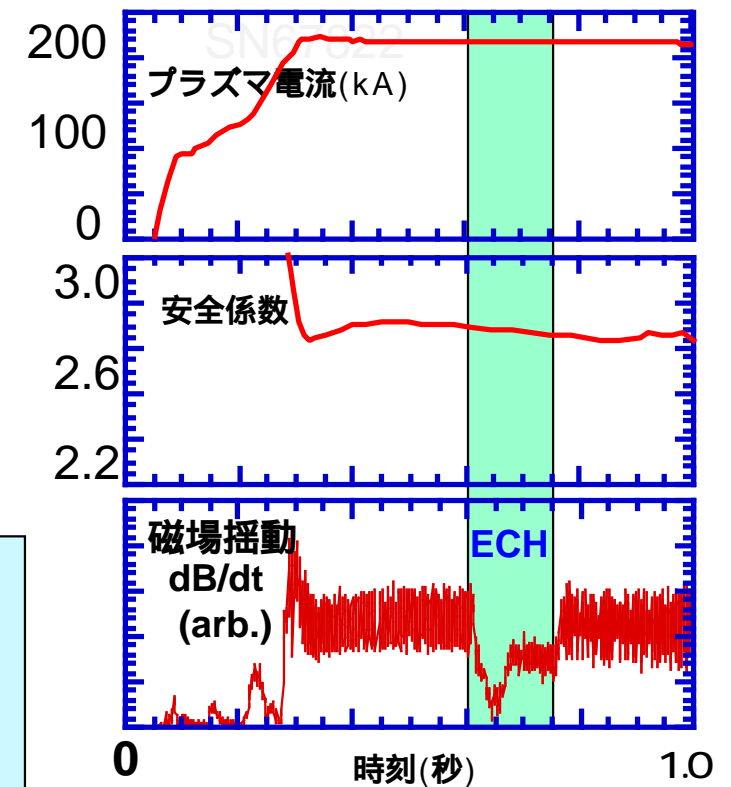
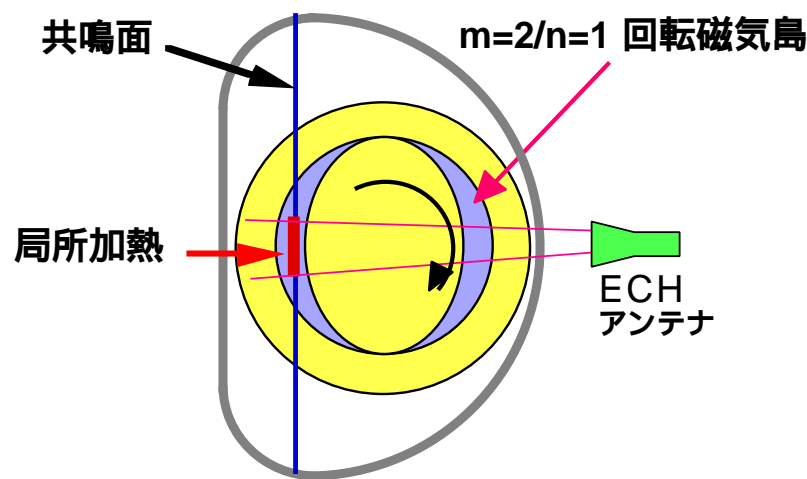


# 25. ディスラプション回避を世界に先駆けて実証(1)

電子サイクロトロン共鳴加熱を用いる方法



ディスラプションの原因となるプラズマ中の磁場揺動を電子サイクロトロン波(EC波)による局所加熱により抑制



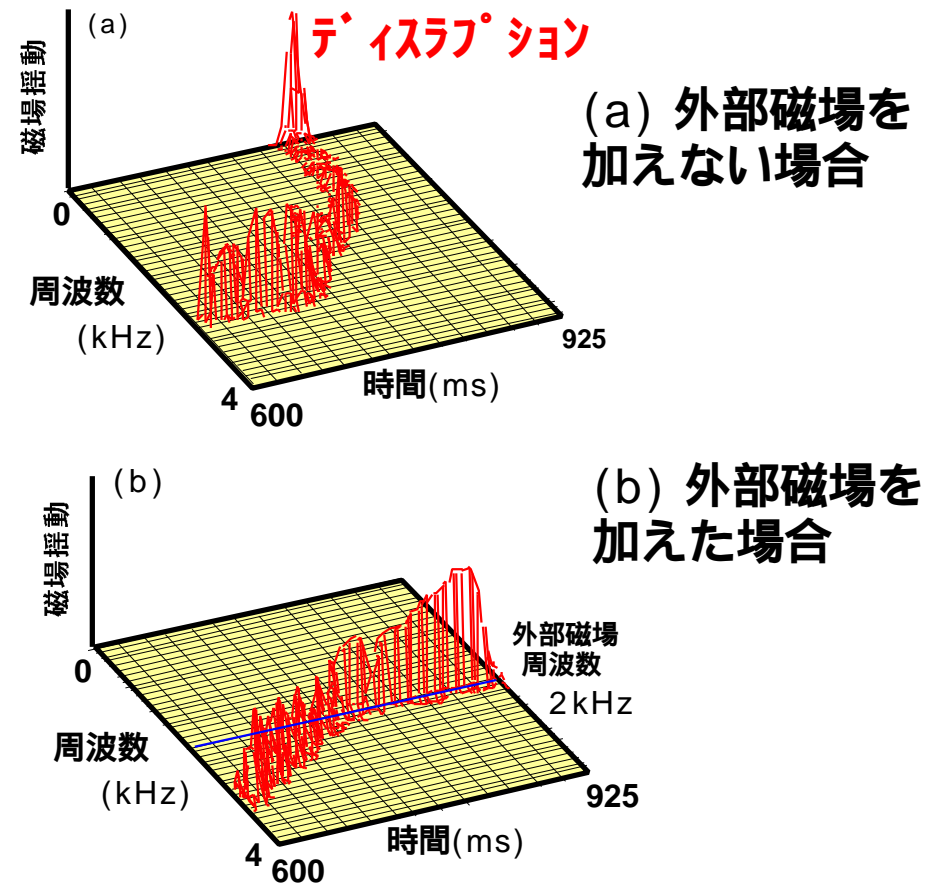
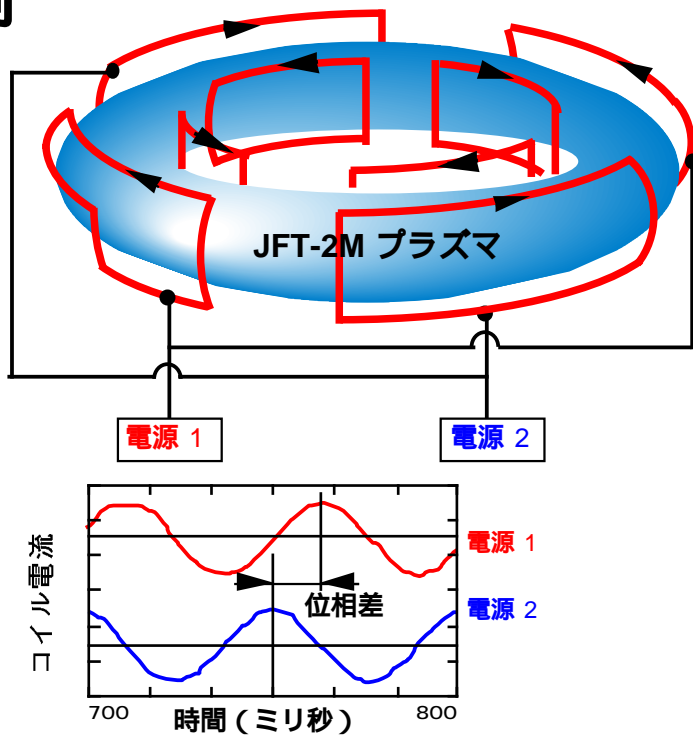
EC波によるディスラプション制御、高ベータ化の先駆的成果  
現在の主要研究課題となる。ITERの高ベータプラズマの安定保持へ展望

# 26. ディスラプション回避を世界に先駆けて実証(2)

## 外部補助コイルを用いる方法



### 外部コイルを用いた回転磁場印加によるディスラプションの抑制



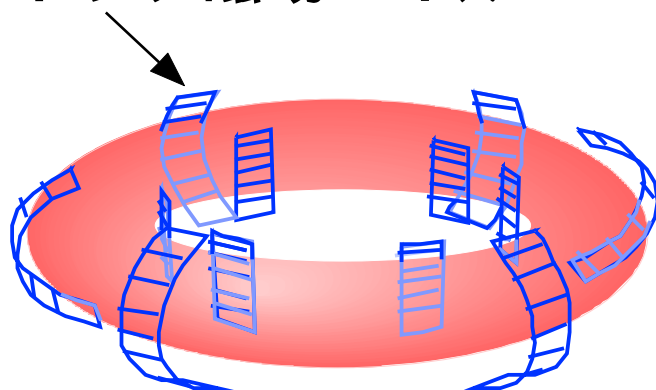
外部コイルによる高ベータプラズマ安定化制御への道を開く

K. Ohasa, et al., 15th IAEA Conf., 2, 279 (1994).

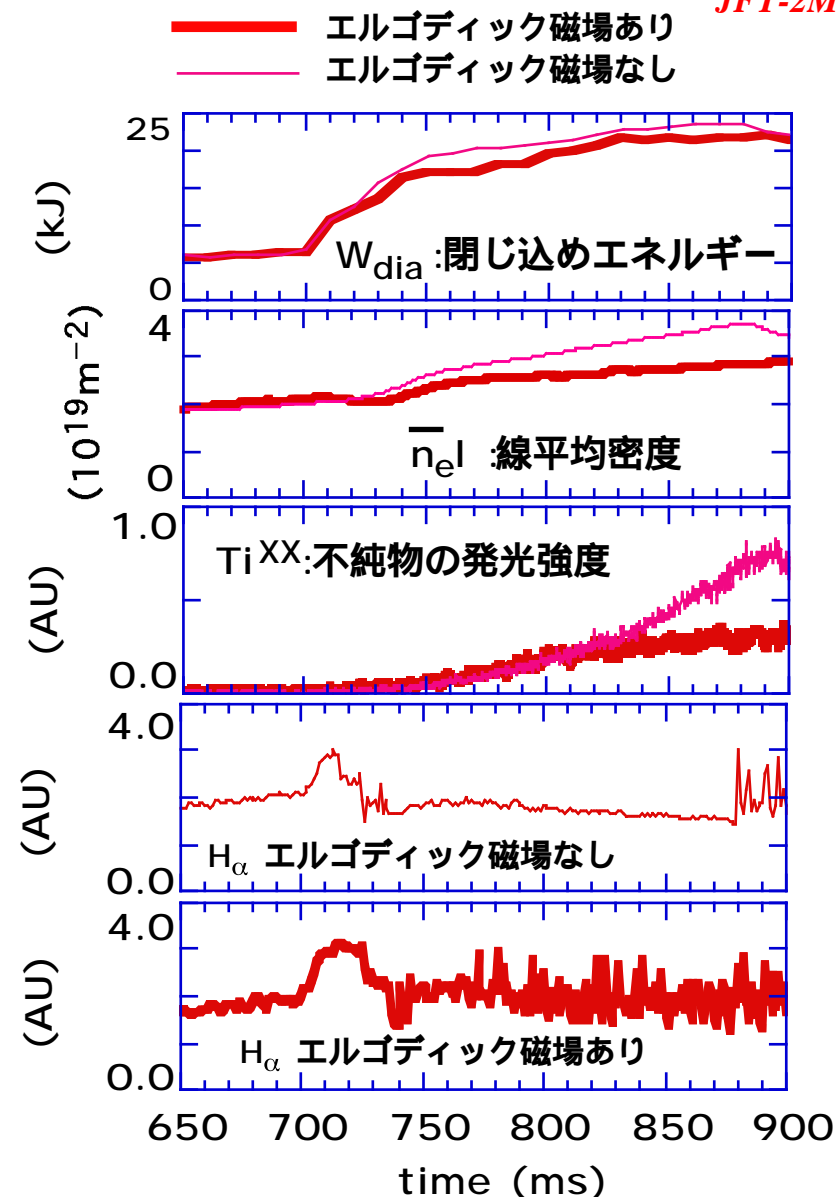
# 27. Hモードを定常化するELMの制御



## エルゴディック磁場コイル



- エルゴディック磁場を印加して、周辺不安定性 (ELM) を能動的に誘起し、高閉じ込め (H) モードを定常化し、不純物の蓄積を押さえることに成功
- ELMの発生頻度と印可磁場のフーリエ成分から、ELM制御にはトロイダルモード数が4以上の成分が効果的であることを解明

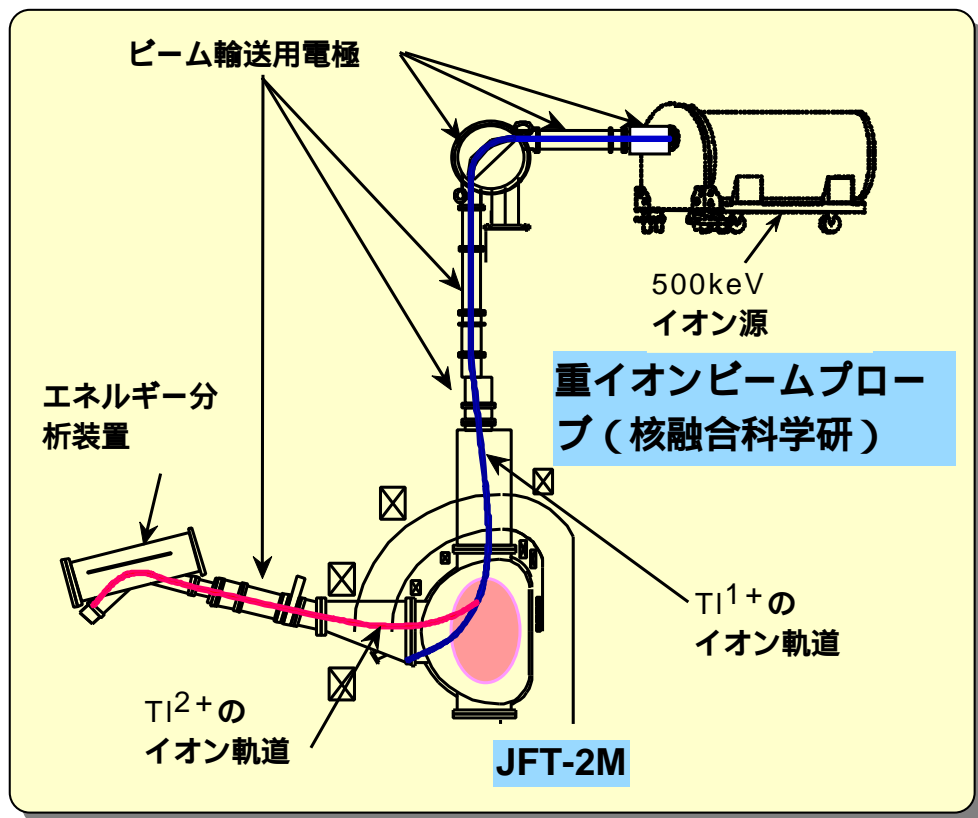


# 28. 高閉じ込め(H)モードの物理の研究で世界初の成果

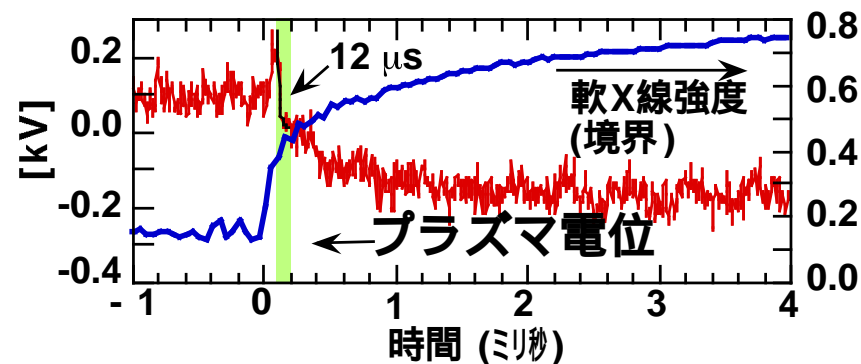
核融合科学研究所との研究協力



核融合科学研究所との協力によりプラズマ中の電位分布が高時間分解能 ( $2\mu\text{s}$ ) で求まる重イオンビームプローブを設置



Hモード遷移時の電位分岐の時間スケールを世界で初めて明らかにした



測定された時間スケールは電場形成の物理機構を明らかにする上で重要である。



# 29. コンパクト・トロイド(CT)入射による先進的燃料供給法を開発

姫路工業大学との研究協力



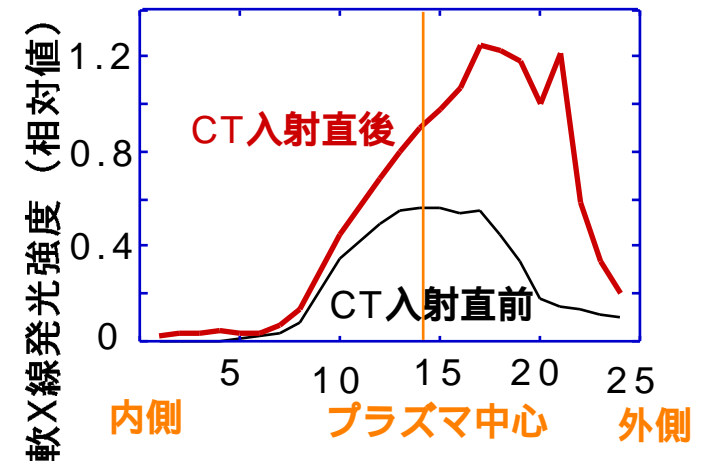
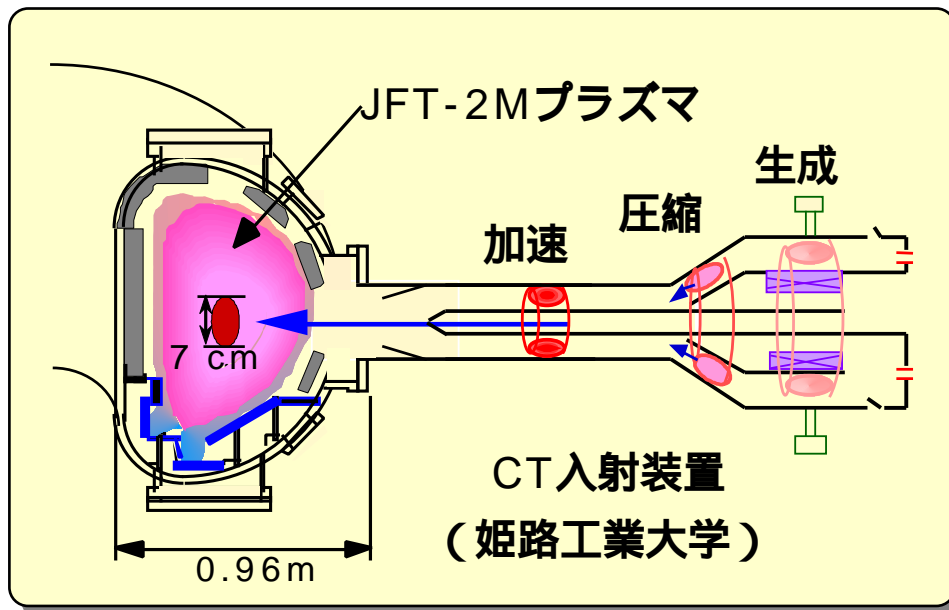
## CT入射によるプラズマ中心部への粒子供給を実証

CT速度： 300km/s

電子密度の増分： $\Delta \bar{n}_e = 4 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$

燃料補給効率： 40%

## Hモードプラズマの中心領域へのCTの到達を世界で初めて実証



軟X線発光強度分布の変化

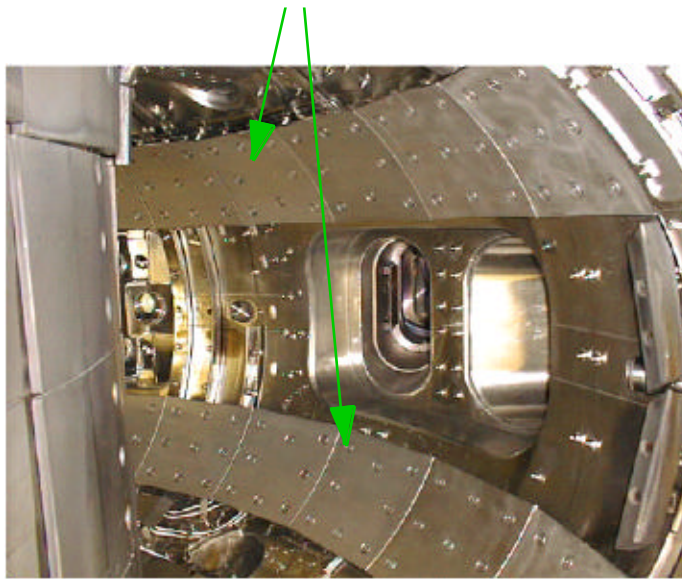
( $B_T = 0.8 \text{ T OH}$  プラズマ)

# 30. フェライト鋼板の真空容器内部設置により プラズマ適合性を予備的に評価

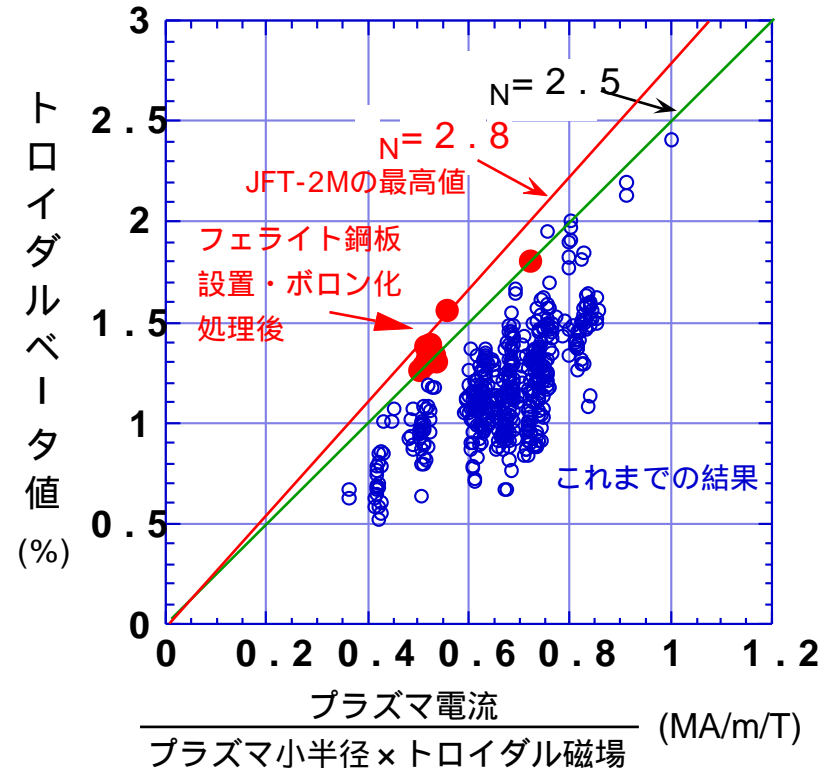


プラズマへの悪影響は見られず、高規格化ベータプラズマを実現

フェライト鋼板（真空容器内壁  
の約20%をカバー）



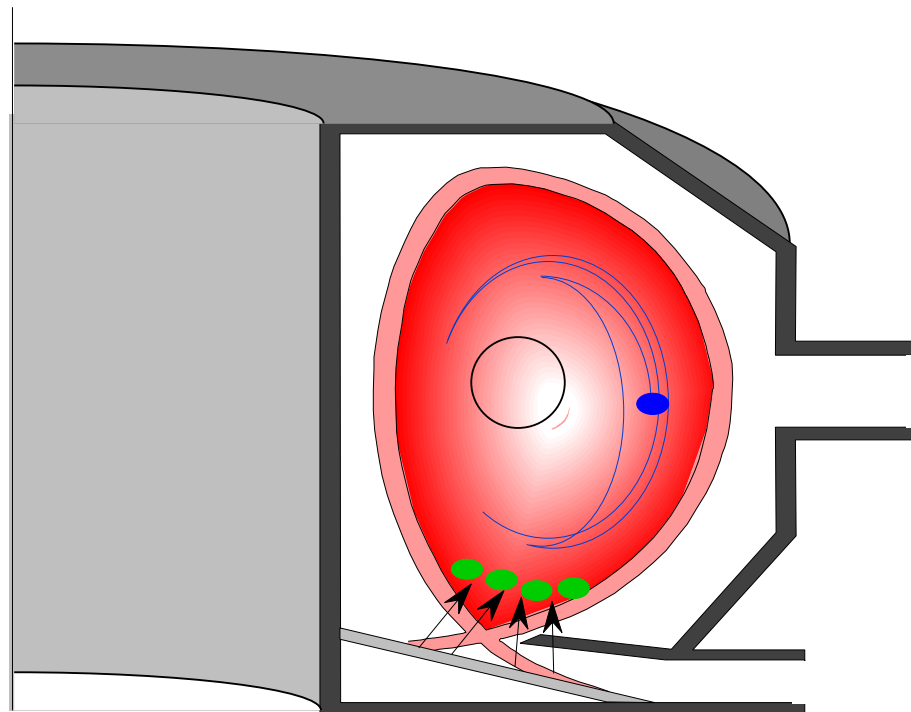
真空容器内部

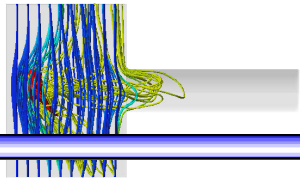


フェライト鋼板設置・ボロン化処理後のトロイダルベータ値とこれまでの結果との比較

フェライト鋼の磁氣的効果は、少なくとも  $\beta_N=2.8$  までの高  $\beta_N$  放電に悪影響を与えないことを実証

# 理論・シミュレーション研究成果



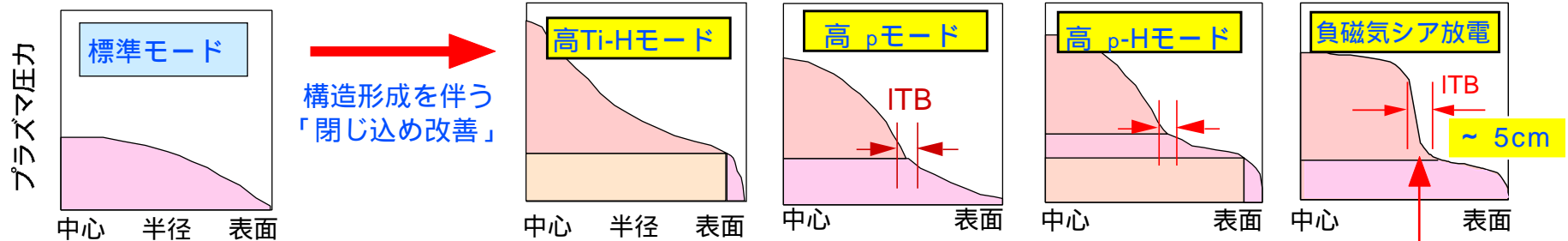


# 31. 核融合プラズマの科学

NEXT

## 複雑現象がおりなす多彩な構造形成と新しい閉じ込め状態

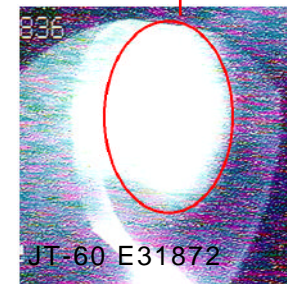
プラズマ分布に対する「同一性」から「多様性」の時代へ（プラズマの古典概念の一掃）



時間スケールの異なる

複数の要因が関与した「複雑現象」

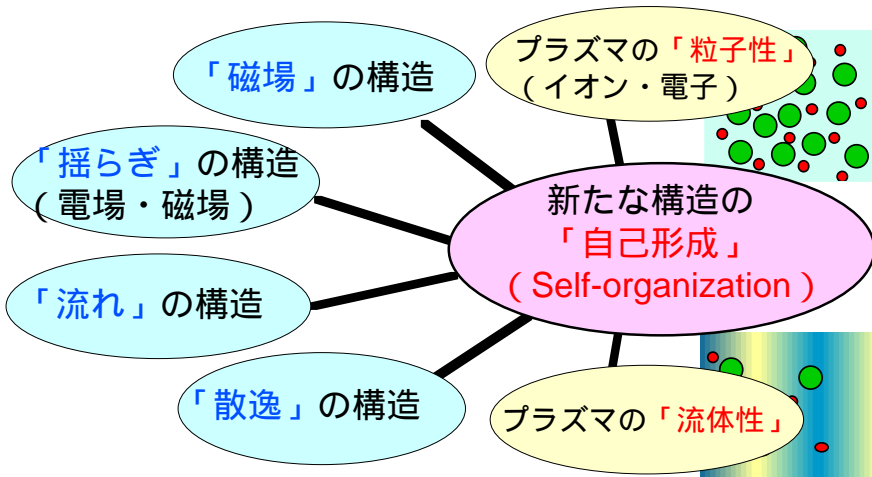
空間に局在した  
"熱絶縁"領域の出現



「複雑現象の理解と制御」

「多様な構造形成」の背後にある物理メカニズムの解明  
 「複雑系」を記述する理論体系の構築  
 （ 広範囲の学問領域の知見の結集 ）  
 「多様な構造形成」の安定保持と複雑現象の制御

質の高い核融合炉実現に対する新たな可能性



# 32. NEXT 計画における主要シミュレーション結果

NEXT

**数値トカマク実験 ラボラトリ NEXT**

複雑系物理  
天体物理  
流体物理  
加速器物理  
プラズマ物理

先端エネルギー科学 シミュレーション

**3次元トロイダル粒子シミュレーション**  
トカマクの3次元乱流構造

**コンパクトトロイ入射3次元MHDシミュレーション**  
CT入射時のトカマク磁場とのリコネクションとショック形成

**3次元簡約MHDシミュレーション**  
磁気島の発生安定飽和  
磁気島の磁気再結合によるディスラプション

**3次元粒子・流体ハイブリッドシミュレーション**  
ディスラプション時の無衝突磁気リコネクション

**3次元ジャイロ電磁粒子シミュレーション**  
ディスラプション時の電場形成による密度の渦構造  
内部ディスラプション時の粒子の掃き出し

**レーザー・クラスタ相互作用 2次元電磁粒子シミュレーション**  
レーザー照射によるクラスタプラズマのゲーロン爆発過程

**ダイバータ不純物挙動シミュレーション**  
methane  
3.0 3.1 3.2 3.3  
主半径方向 (m)

**3次元非円形ジャイロ流体シミュレーション**  
JT60U 反転磁気シア放電におけるITGモード構造

**3次元非構造メッシュMHDシミュレーション**  
太陽風による木磁気圏のショック構造と磁場構造

**3次元相対論的電子拡散シミュレーション**  
磁場揺動化における逃走電子の拡散・損失過程

# 33. 乱流と輸送の理解

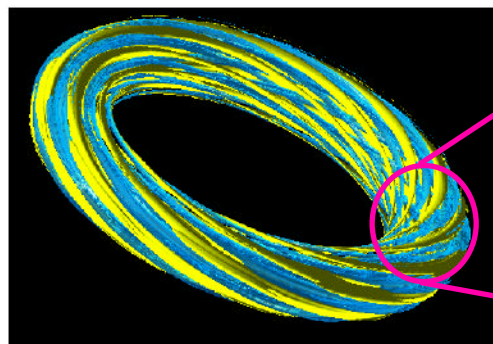
NEXT

JT-60U 負磁気シア放電

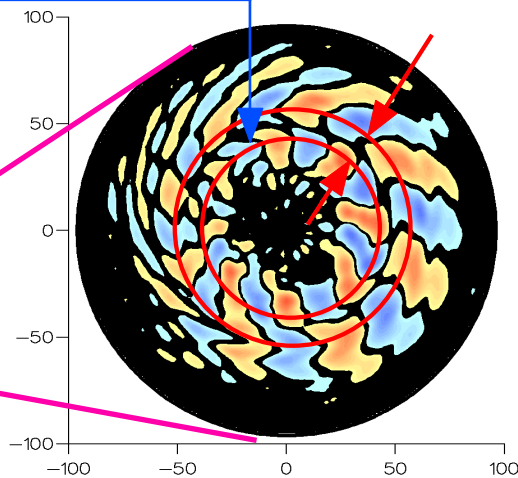


内部輸送障壁形成時の揺らぎの相関長の測定 (リフレクトメータ)

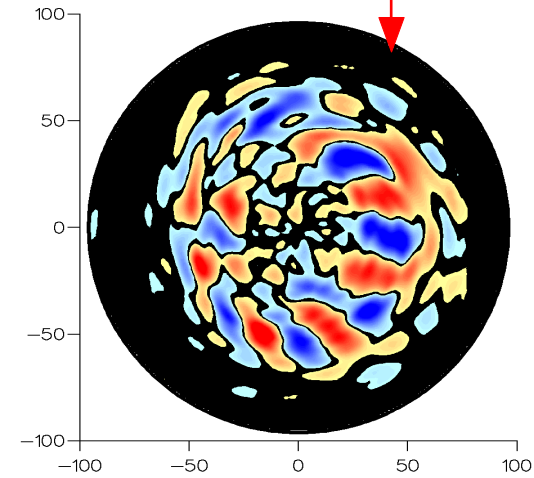
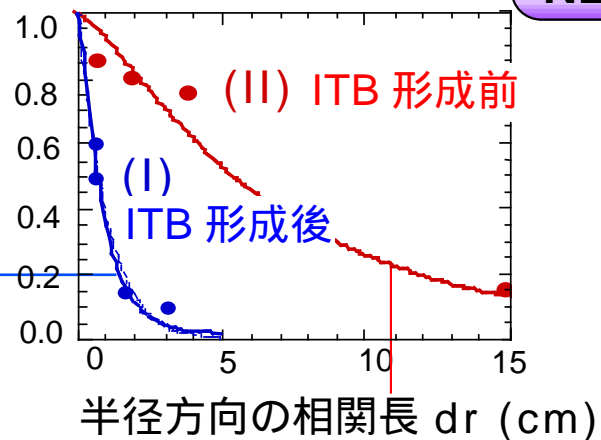
ギャップ (不連続面) の形成 (揺らぎ構造の分断)



「揺らぎ」の3次元構造



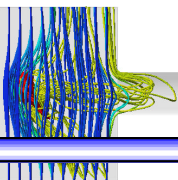
(I) 内部輸送障壁を有する閉じ込め改善状態



(II) セミグローバルな揺らぎによる低い閉じ込め状態

並列スーパーコンピュータによる1000万個の粒子を用いた大規模シミュレーション

# 34. 乱流構造とその抑制



NEXT

イオン温度勾配モードによる乱流構造

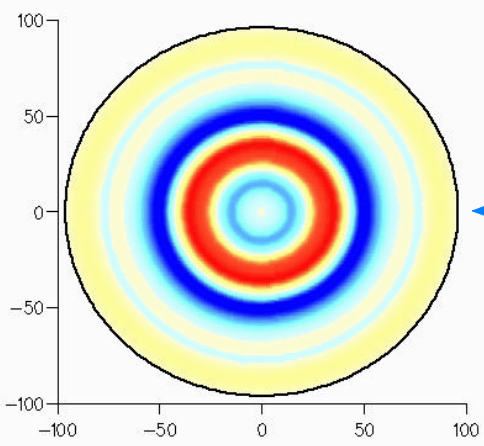
- ・ 乱流の半径方向の相関長
- ・ 乱流の揺らぎ振幅



レイノルズ応力（非線形効果）による半径方向の電場（ $E_r$ ）の生成  
 → 「Zonal 流（帯状流）」の励起

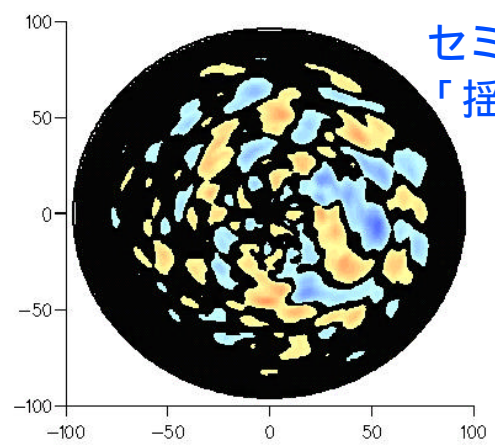
「Zonal 流」を考慮した粒子シミュレーション

赤: 正方向  
青: 負方向



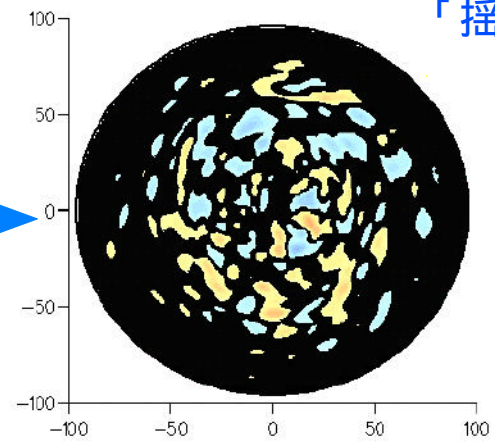
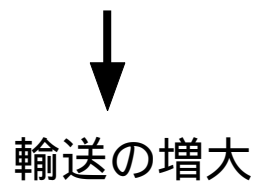
「Zonal 流」の構造  
 (ポロイダル断面)

「Zonal 流」を考慮しない粒子シミュレーション



Zonal 流がない場合の乱流構造

セミマクロサイズの「揺らぎ」の発生



Zonal 流がある場合の乱流構造  
 (ポロイダル断面のポテンシャル構造)

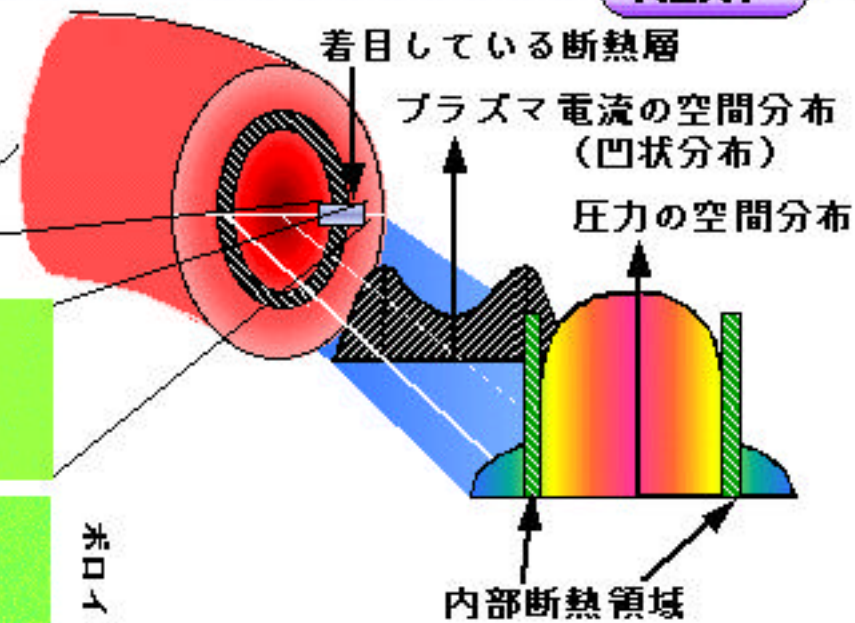
「揺らぎ」と輸送の低減

- ・ 相関長の減少
- ・ 振幅の減少

# 35. ETG 乱流の非線形シミュレーション

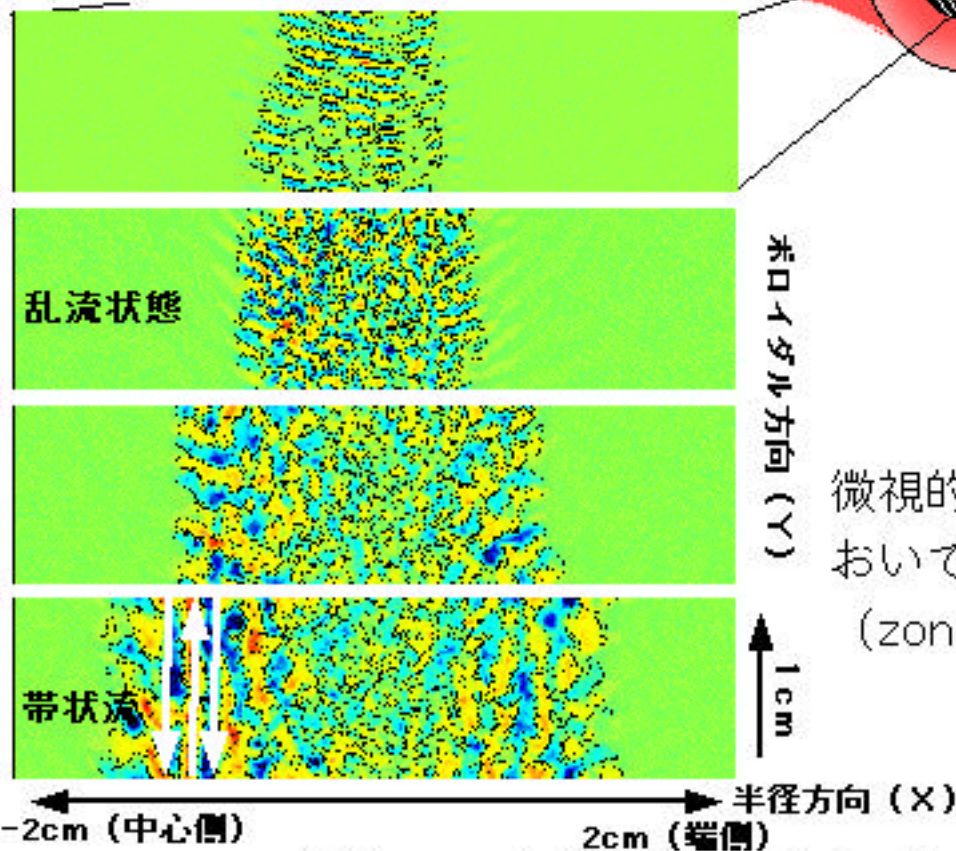
NEXT

ジャイロ運動論的粒子コードによる  
電子温度勾配駆動(ETG)乱流の非線形シミュレーション



粒子・熱の損失方向 →

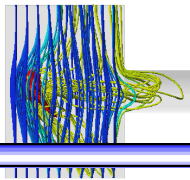
- 時間経過 ↓
- (a)  $t=2\mu\text{sec}$   
揺らぎの発生
  - (b)  $t=4\mu\text{sec}$   
乱流の状態
  - (c)  $t=6\mu\text{sec}$   
プラズマ流が発生
  - (d)  $t=8\mu\text{sec}$   
帯状流の形成



微視的なスケールの電子系乱流においても非線形効果により帯状流 (zonal flow) が形成される







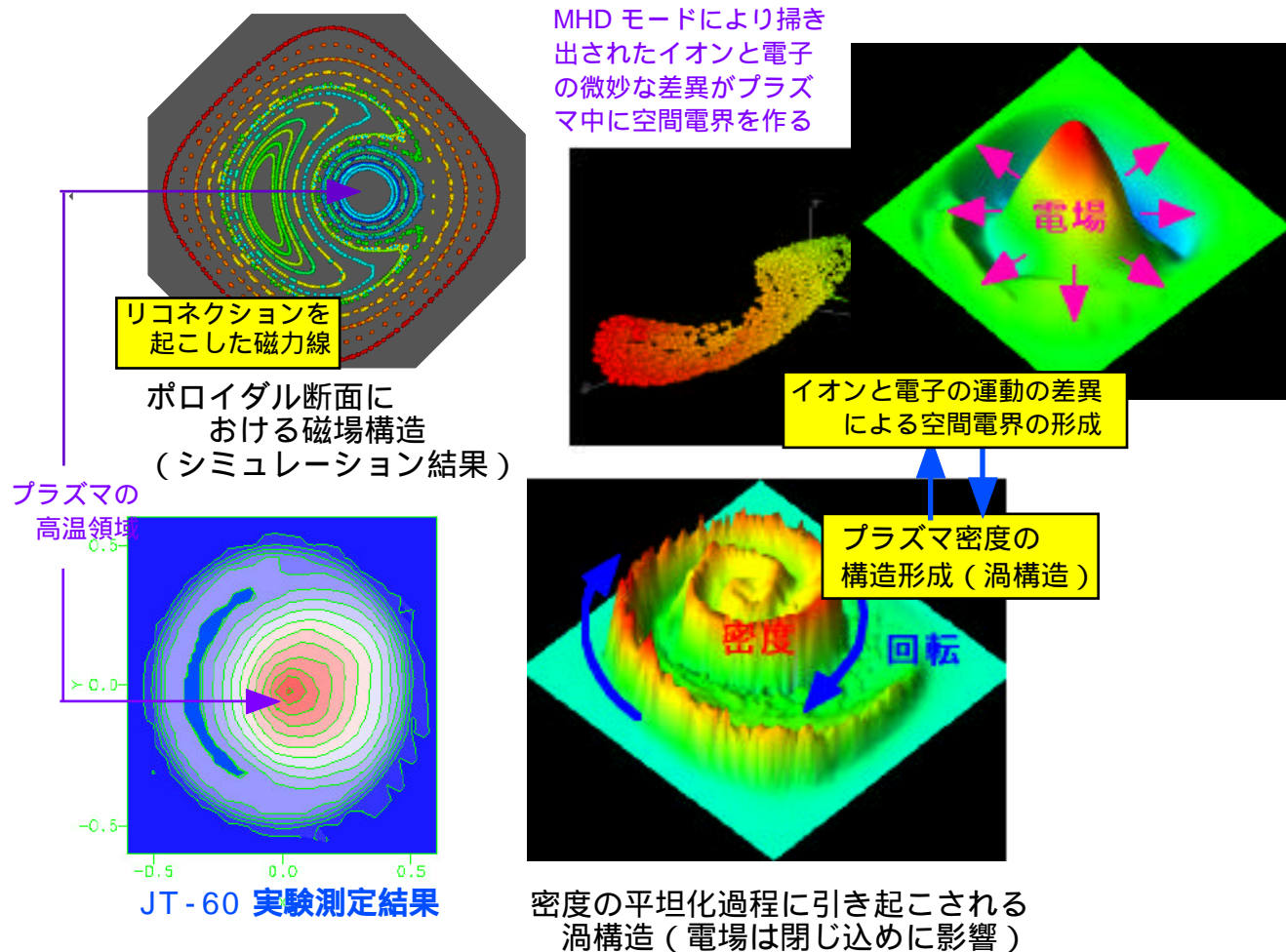
# 36. MHD 崩壊過程のジャイロ粒子シミュレーション

NEXT

ジャイロ粒子モデルによる運動論的 3 次元 MHD コードの開発  
— 内部崩壊過程における自己形成現象の数値模擬 —

内部崩壊現象が引き起こす径方向の  
電場形成の発見と物理機構の解明

Paragon 128 PE : 0.010 TFLOPS :  
CPU Time 200 時間  
粒子数 800 万個



研究上の意義

MHD 現象における  
空間電界の自己形成  
(流体モデルでは予測不可能)

電子の運動論的効果の役割を実証  
(高温プラズマにおける研究課題)

第一原理に基づく数値模擬  
・ 電子の慣性  
・ イオンのジャイロ運動

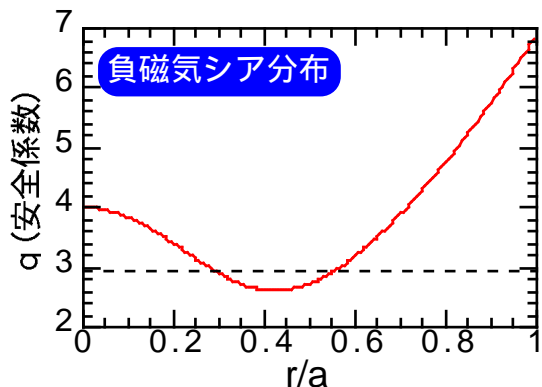
↑ ↓

マクロな  
構造形成の出現

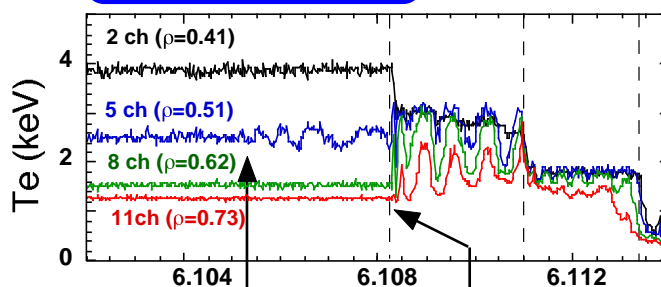
# 37. 負磁気シアプラズマにおける非線形不安定化現象

NEXT

## 磁気島の構造変形により駆動される新しい非線形不安定化機構の発見



JT-60実験データ

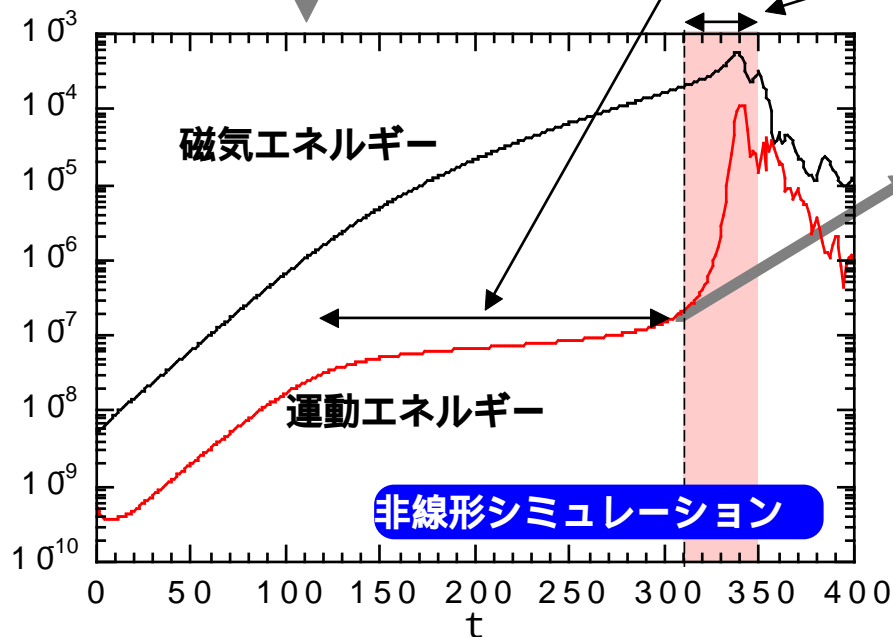


遅い時間スケールでの成長後に生じる、不安定性の急激な成長

反転磁気シアプラズマの低崩壊

遅い時間スケールの現象

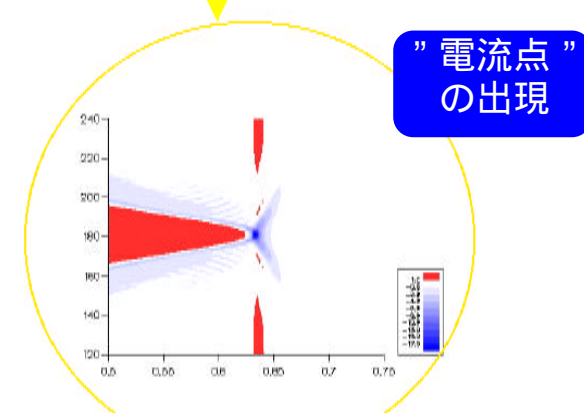
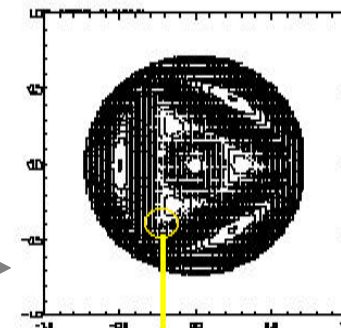
速い時間スケールの現象



遅い時間スケールの領域において磁気島が三角変形する

非線形不安定化 (プラズマ崩壊)

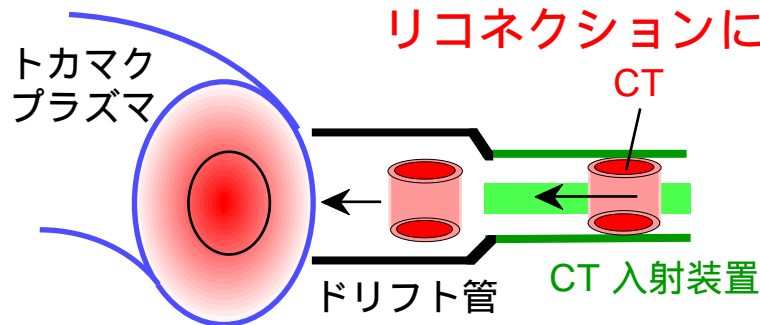
低崩壊を回避できる可能性を示す



# 38. コンパクト トロイド (CT) 入射による新燃焼補給法の磁気流体シミュレーション

NEXT

CT 入射によるトカマク磁場の変形 **磁気張力の重要性を指摘**  
 トカマク磁場とCT 磁場のリコネクションが重要  
**リコネクションによる磁気張力の緩和を指摘**



< プラズマ >

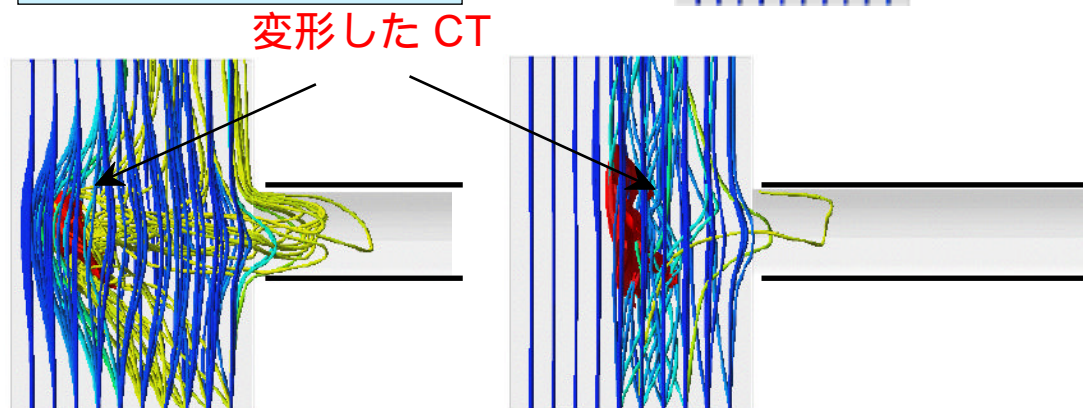
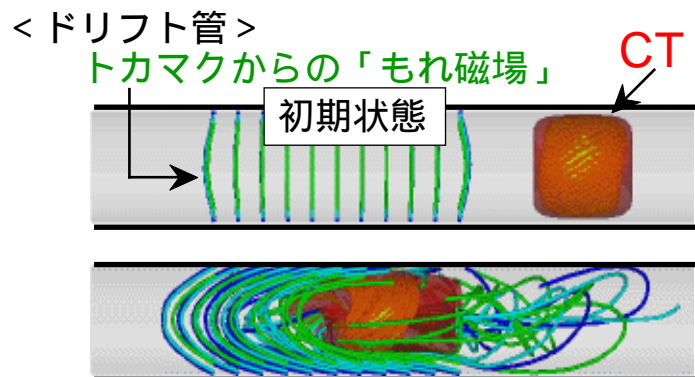
初期状態

トカマク磁場 →

CT

入射前のダイナミクス

入射後のダイナミクス



**「もれ磁場」による CT の減速と変形**

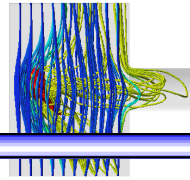
磁場が弱い場合

磁場が強い場合

Y. Suzuki et al., 核融合学会第16回年会招待講演 (1999) (核融合学会誌 Vol.76, (2000) 288)

Y. Suzuki et al., 18th IAEA Fusion energy Conference (2000) (Nuclear Fusion Vol.41, (2001) 873)

# 39. 学術的波及効果： 粒子・流体系が関与する基礎科学分野に幅広く貢献

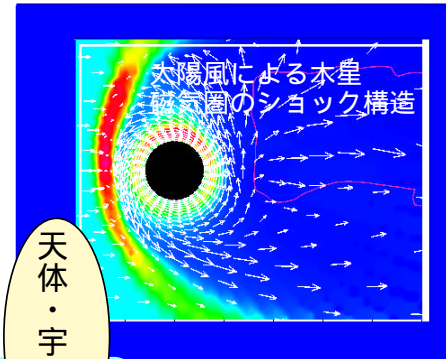
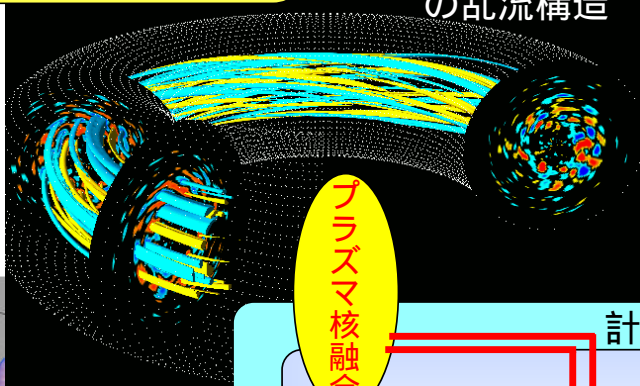
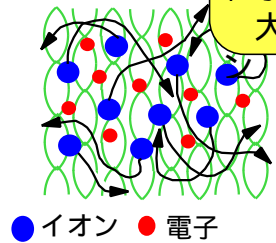


NEXT

超高温・燃焼状態の核融合プラズマ

- 粒子性・流体性及び時間スケールの混在
- 微少な対称性の破壊が巨視的現象を誘発

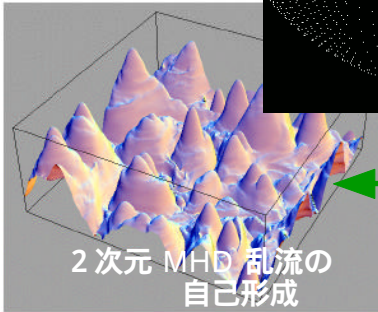
粒子モデルに基づく  
大規模シミュレーション  
トカマクプラズマ  
の乱流構造



プラズマ流と  
惑星磁場の相互作用

T.Miyoshi et al., J. Geophysical Res. (2001)

磁気  
流体  
乱流  
現象



プラズマ  
核融合

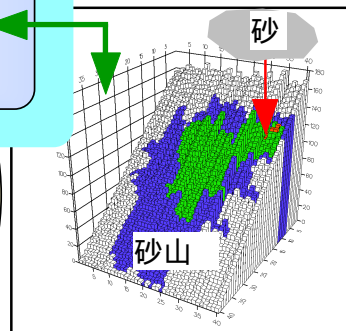
計算科学

天体・宇宙物理

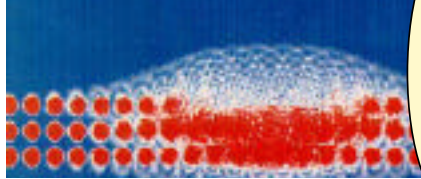
地球・環境科学



砂山の輸送現象



レーザーによるクラスタ粒子照射



レーザーと物質との相互作用

レーザ  
物理

加速器  
ビーム  
物理

固体物性

# 40. 大規模シミュレーションを中心に据えた新しい遠隔研究システム

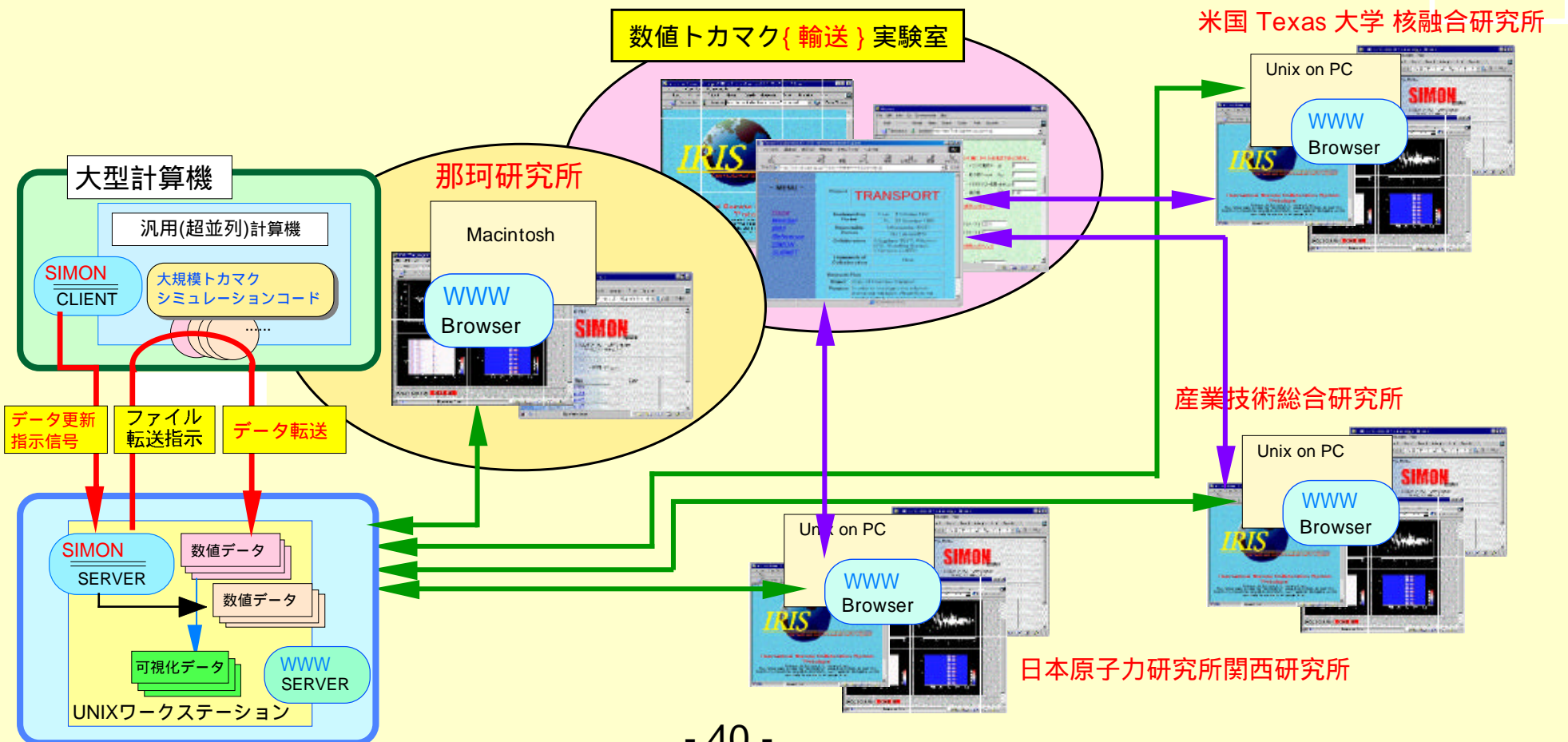
NEXT

—数値トカマク実験ラボラトリ実現に向けた取り組み—

**SIMON** : Simulation MONitoring system (シミュレーション結果の即時性と共有化)

**IRIS** : International Remote collaboration System (遠隔研究者との討議とプロジェクトの共有化)

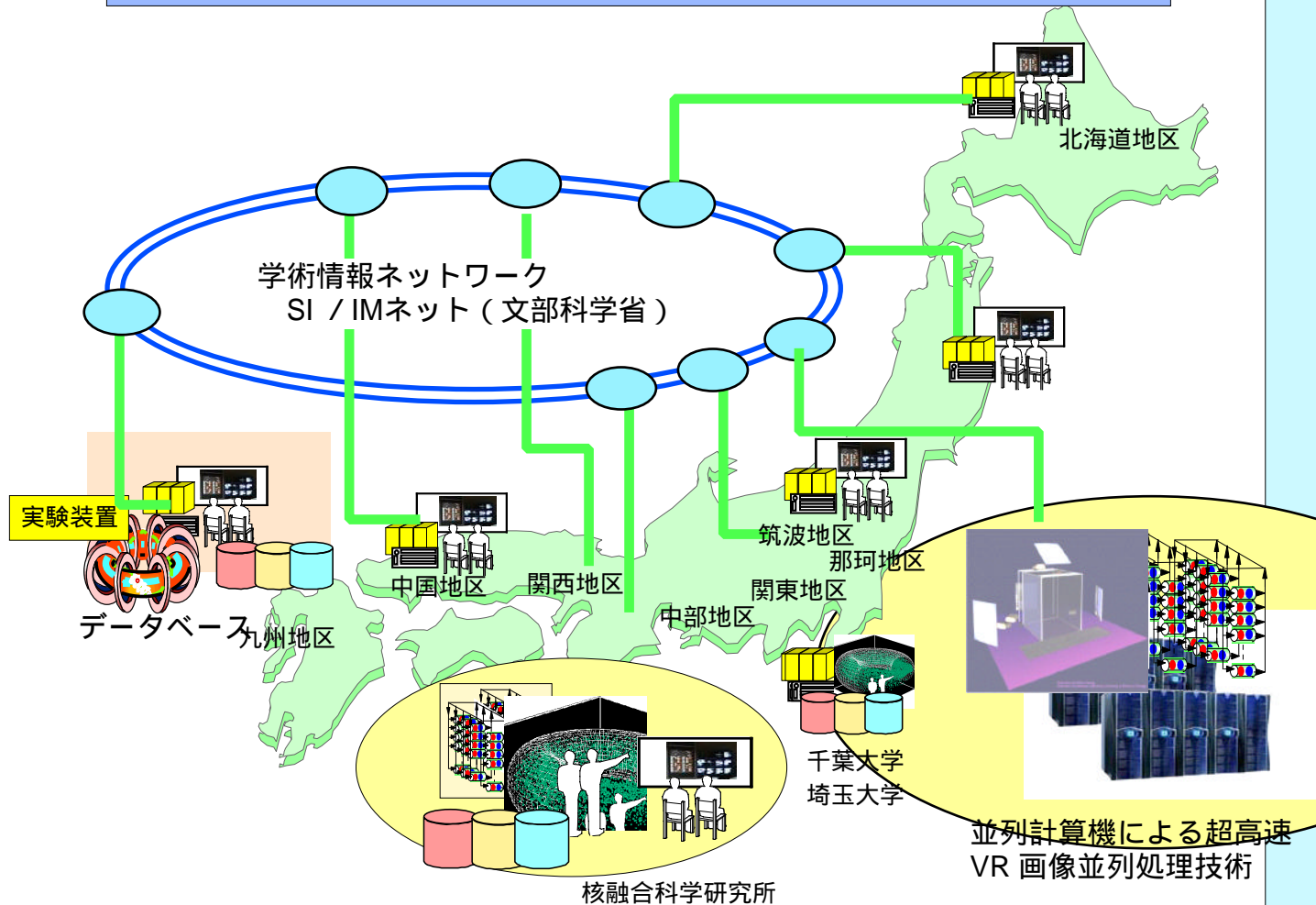
例： トロイダル粒子コードによる「**TRANSPORT (輸送)**」プロジェクト



# 41. Virtual Reality仮想環境の配信と新しい研究システム

NEXT

仮想研究環境上 (Virtual Lab.) での核融合実験・解析・大規模シミュレーションの統合・実時間の遠隔研究参加とデータの共有



設計環境の実現



実験環境の再現

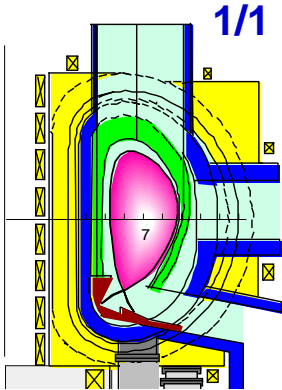
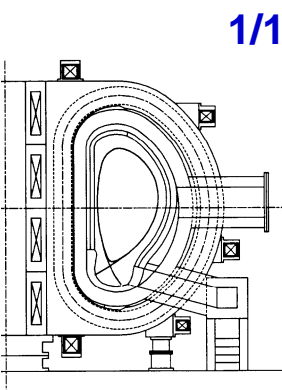
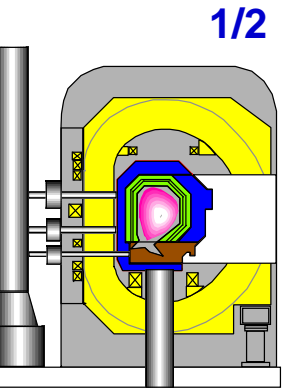
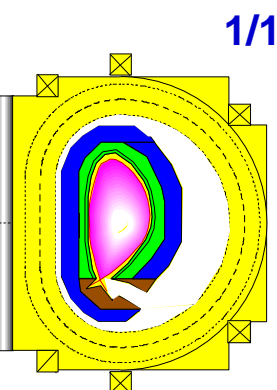


シミュレーション環境の再現



# 42. 原研における核融合動力炉の設計実績

炉システム

<p>原型炉 <b>SSTR</b></p> <p>→ <b>A-SSTR</b> 経済性追求</p> <p>→ <b>DREAM</b> 保守性、環境適合性</p> <p>↓</p> <p><b>A-SSTR2</b></p>	<p><b>SSTR</b> (1990)</p>  <p>1/1</p>	<p><b>A-SSTR</b> (1996)</p>  <p>1/1</p>	<p><b>DREAM</b> (1996)</p>  <p>1/2</p>	<p><b>A-SSTR2</b> (1999)</p>  <p>1/1</p>
<p>装置名</p> <p>種類</p> <p>プラズマ電流</p> <p>主半径</p> <p>アスペクト比</p> <p>トロイダル磁場</p> <p>最大中性子束</p> <p>第一壁熱流速</p> <p>ダイバータ熱負荷</p> <p>中性子フルエンス</p> <p>冷却材出口温度</p> <p>核融合出力</p> <p>電流駆動パワー</p> <p>第一壁材料</p> <p>冷却材</p> <p>真空容器材料</p> <p><math>I_p</math></p> <p><math>R_p</math></p> <p><math>A</math></p> <p><math>B_t</math></p> <p><math>n</math></p> <p><math>q_w</math></p> <p><math>q_{div}</math></p> <p><math>F</math></p> <p><math>T_{max}</math></p> <p><math>P_f</math></p> <p><math>P_{CD}</math></p>	<p>SSTR DEMO</p> <p>12MA</p> <p>7m</p> <p>4</p> <p>9T</p> <p>5MW/m<sup>2</sup></p> <p>1MW/m<sup>2</sup></p> <p>7MW/m<sup>2</sup></p> <p>7MWa/m<sup>2</sup></p> <p>550°C</p> <p>3GW</p> <p>60MW</p> <p>F82H</p> <p>P. Water</p> <p>SS</p>	<p>ASSTR Commercial</p> <p>12MA</p> <p>6m</p> <p>4</p> <p>11T</p> <p>10MW/m<sup>2</sup></p> <p>2MW/m<sup>2</sup></p> <p>4MW/m<sup>2</sup></p> <p>14MWa/m<sup>2</sup></p> <p>650°C</p> <p>4.5GW</p> <p>60MW</p> <p>F82H</p> <p>P. Water</p> <p>SS</p>	<p>DREAM Commercial</p> <p>9.2MA</p> <p>16m</p> <p>8</p> <p>14.5T</p> <p>4MW/m<sup>2</sup></p> <p>0.5MW/m<sup>2</sup></p> <p>7MW/m<sup>2</sup></p> <p>10MWa/m<sup>2</sup></p> <p>900°C</p> <p>5.5GW</p> <p>50MW</p> <p>SiC/SiC</p> <p>He</p> <p>SS</p>	<p>ASSTR-2 Commercial</p> <p>12MA</p> <p>6.2m</p> <p>4</p> <p>11T</p> <p>8MW/m<sup>2</sup></p> <p>2MW/m<sup>2</sup></p> <p>4MW/m<sup>2</sup></p> <p>12MWa/m<sup>2</sup></p> <p>900°C</p> <p>4.0GW</p> <p>60MW</p> <p>SiC/SiC</p> <p>He</p> <p>F82H</p>

# 43 最新版動力炉設計、A-SSTR2の特徴

炉システム

## 小型で高出力の炉 (経済性)

$R_p=6.2\text{m}$ ,  $a_p=1.5\text{m}$ ,  $\kappa_{95}=1.8$ ,  $\delta_{95}=0.4$   
 $\beta_N < 4.0$ ,  $P_f \sim 4.0\text{GW}$  with  $H_H < 1.2$

## 簡易な分解・保守 (稼働率向上)

トロイダルセクター一括引き抜き

## 高温超伝導コイル (強磁場化、小型化、経済性)

$T_{op}=20^\circ\text{K}$ ,  $B_{max}=23\text{T}$

## 中心ソレノイドコイル無し (簡素化、経済性)

非誘導電流駆動立ち上げ

## 低放射化材料 (安全性、環境適合性)

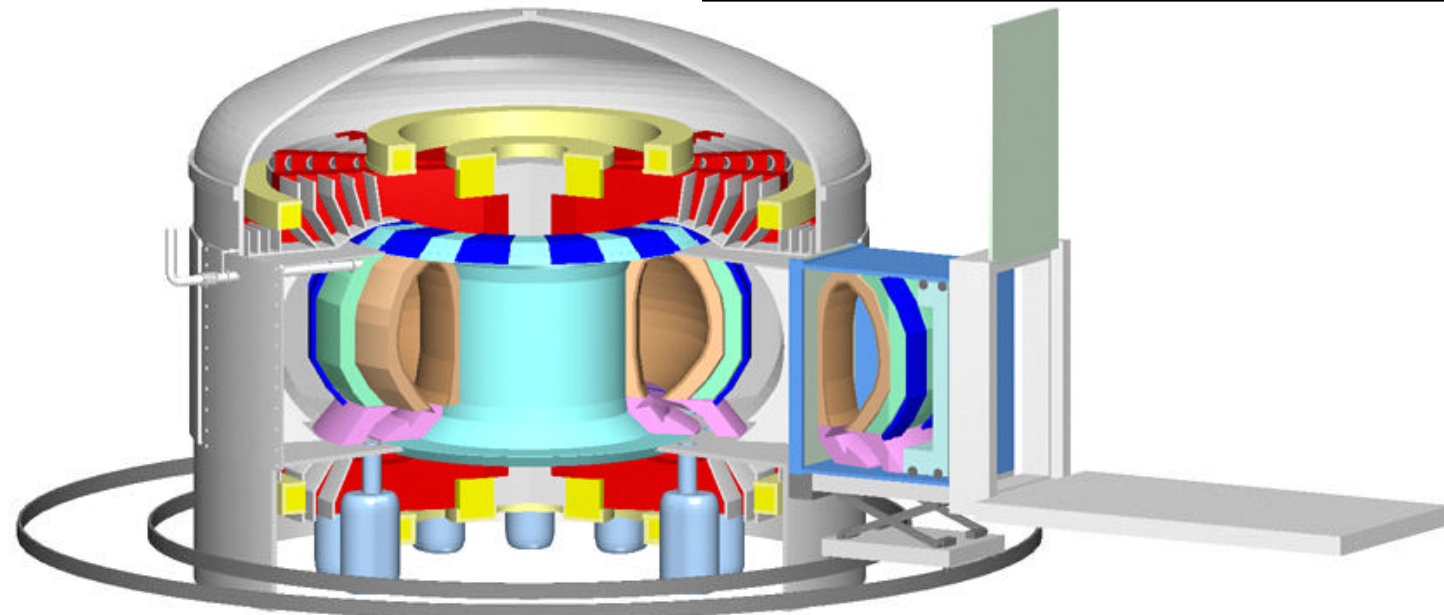
ブランケット構造材 : SiC/SiC  
プラズマ安定化シェル材 : V-alloy  
遮蔽体バルク材 :  $\text{TiH}_2(\text{VH}_2)$   
クライオスタット材 : F82H/V-alloy

## He冷却ガスタービン (高動力変換効率)

Thermal Efficiency: 50%  
 $T_{in/out}=600^\circ\text{C}/900^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{He}}=10\text{MPa}$

## ペアー炉プラント (設備結有効利用)

コンパクトなプラント、建家

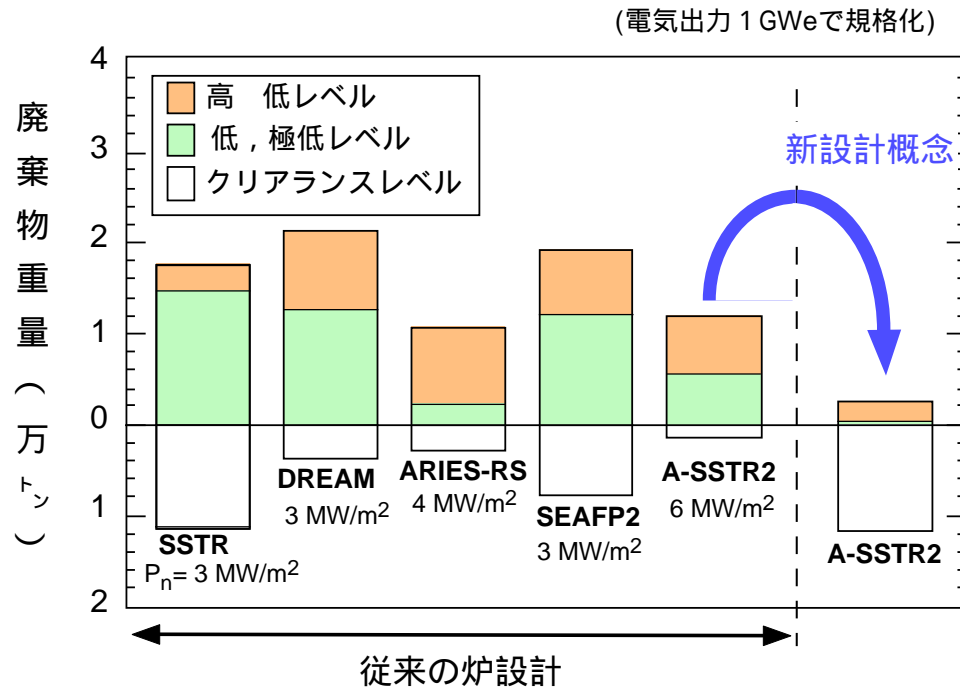




# 44. 核融合炉の放射性廃棄物とその毒性

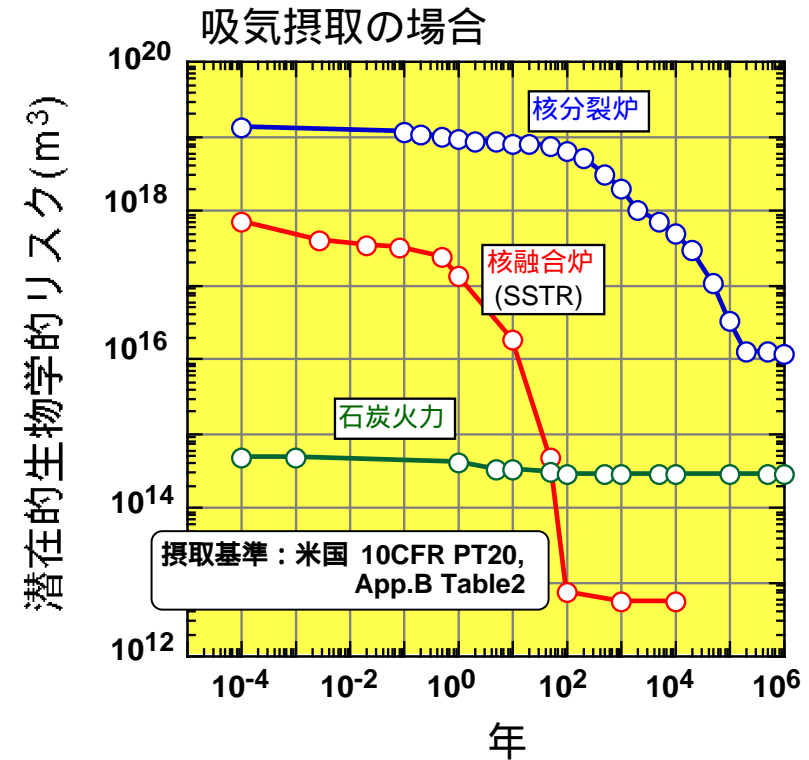
## 放射性廃棄物を低減する新設計概念

コンパクトで強力な遮蔽を実現するため先進遮蔽材（金属水素化物）を導入  
 大部分の構造物の放射能をクリアランス（規制から除外）レベル以下にする



## 毒性の定量化

摂取可能な濃度に薄めるのに必要な溶媒量



従来設計のSSTRでも放射性毒性は50年程度で石炭火力を下回る。