

第16回 核融合研究開発基本問題検討会

# トカマク型発電実証プラントの 熱・粒子制御

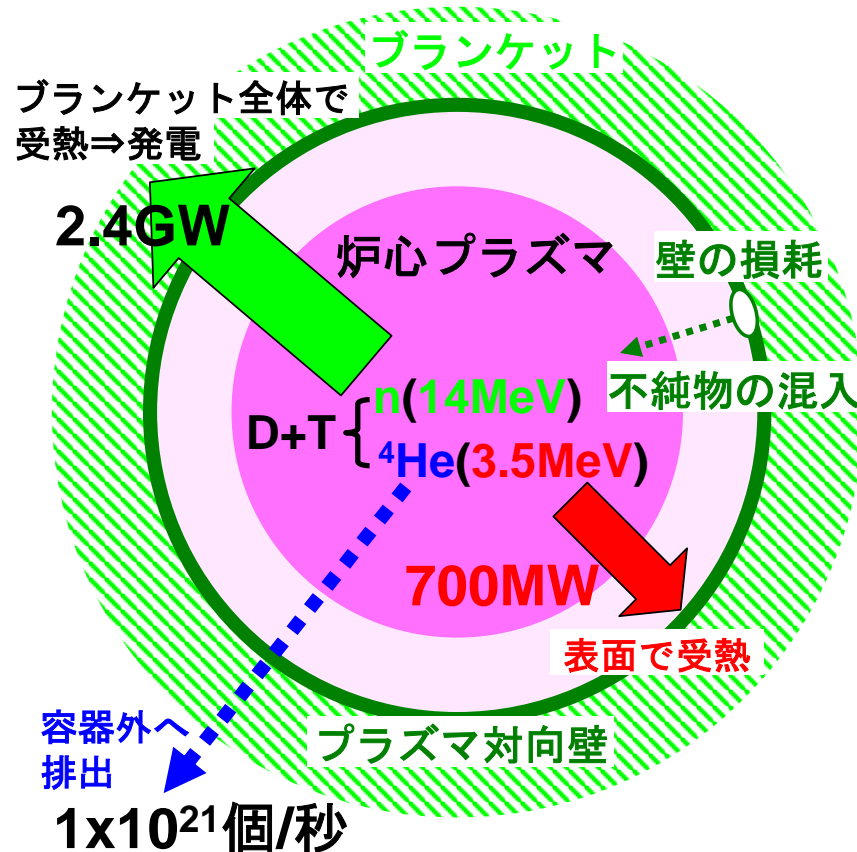
平成15年12月16日

日本原子力研究所

櫻井 真治

# 熱・粒子制御の目的

## 発電実証プラントの熱と粒子の収支 (核融合出力 3GW、外部加熱100MWの場合)

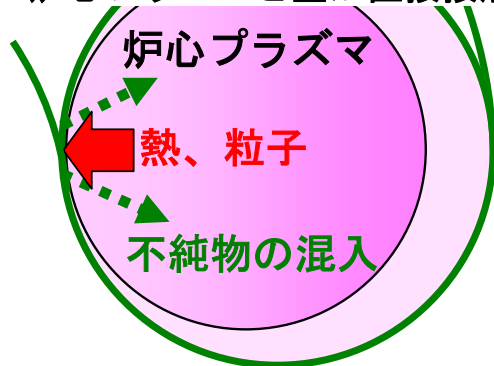


1. プラズマ対向壁表面から**熱を取り除く**。  
~150MW (ITER)  
~700MW (発電実証プラント)
2. 核融合反応で生じた**He灰を排出する**。
3. プラズマ対向壁の**損耗を低減する**。  
炉心プラズマへの**不純物の混入を防ぐ**。  
対向壁の寿命  
~10<sup>6</sup>秒 (ITER)  
>10<sup>7</sup>秒 (発電実証プラント)

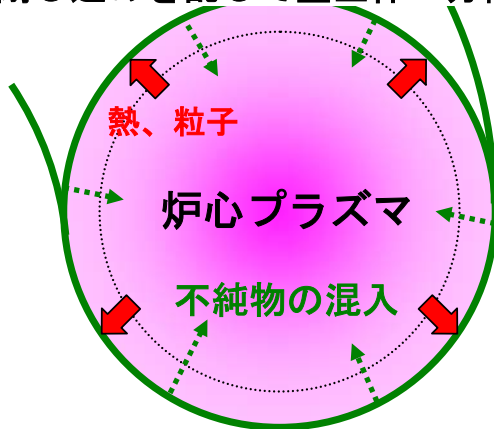
# ダイバータ方式による熱粒子制御を採用

## リミター方式

炉心プラズマと壁が直接接触

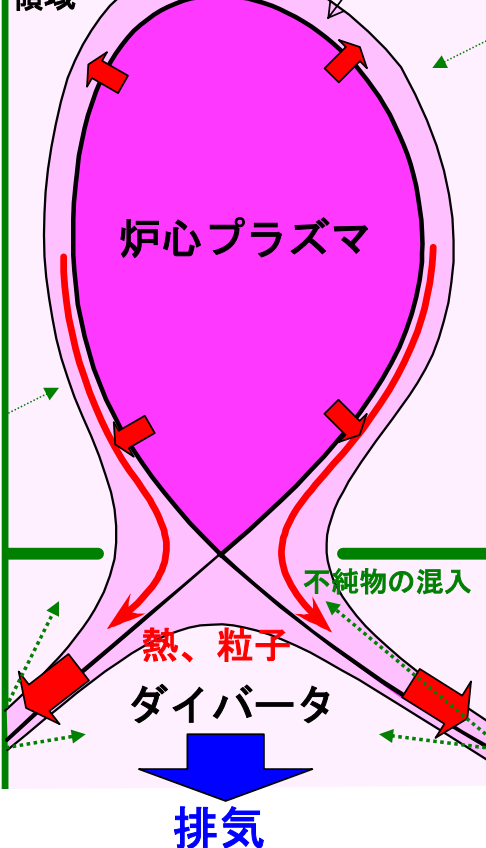


Ergodic磁気リミター方式  
閉じ込めを乱して壁全体へ分散



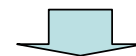
## ダイバータ方式

主プラズマ領域 スクレイプオフ層



磁力線に沿って  
炉心プラズマから  
離れた場所

(ダイバータ) に  
熱と粒子を導いて排  
出し、プラズマへの  
不純物混入と冷却を  
防ぐ。



Hモードが得られ  
る。

炉心プラズマが  
冷えにくい。

排気に適する。

多くの実験装置  
で実績有り。

# 工学側から要請される設計条件

---

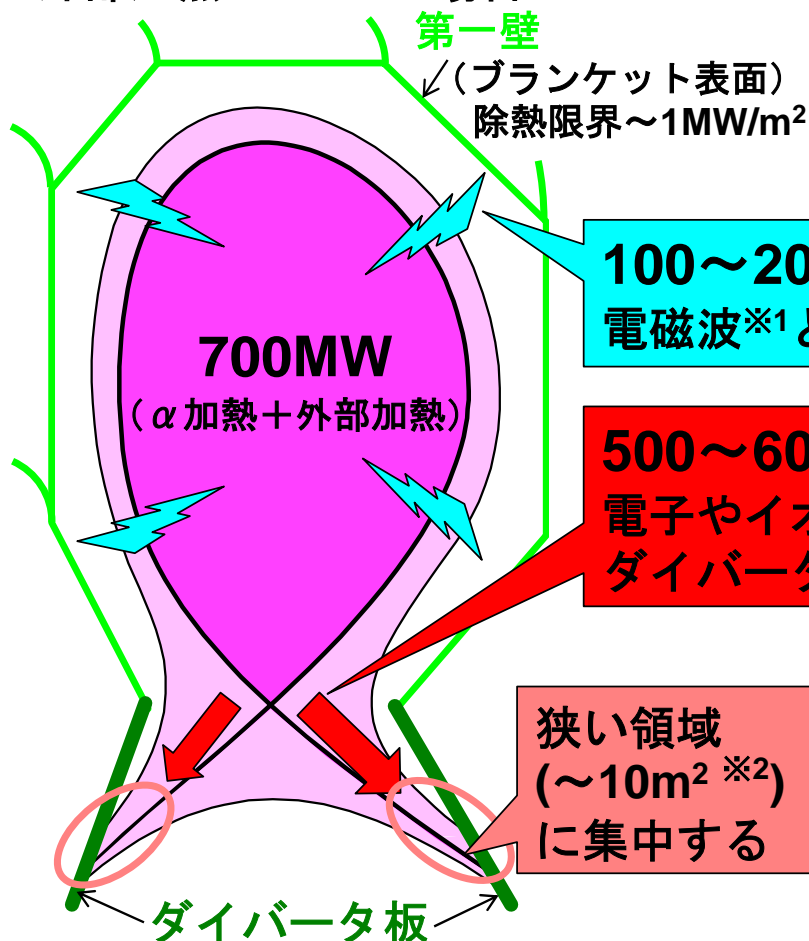
タングステン（表面保護材）および  
低放射化フェライト鋼（冷却管、構造材）を使用。

1. **ダイバータ板定常熱流束  $\leq 10 \text{ MW/m}^2$**   
（冷却管材質と冷却水温による冷却限界）  
第一壁（ブランケット表面）定常熱流束  $\leq 1 \text{ MW/m}^2$   
（構造材の熱応力による）
2. ダイバータ板前面の**プラズマ温度  $\leq 10 \text{ eV}$**   
（物理スパッタリングによる損耗回避）  
（水素およびHe脆化防止のためには更に低減が必要）
3. **瞬間熱流束**（デイスラプション、ELM※：パルス幅 $\leq \text{ms}$ ） **$\leq 0.2 \text{ MJ/m}^2$**   
（表面の溶融による損耗を回避）

※Edge Localized Mode：熱と粒子が周期的に吐出される現象⇒後で説明

# ダイバータ板への熱流束の大幅な低減が必要

核融合出力3GW、  
外部加熱100MWの場合



ダイバータ板への熱流束

= 500~600MW / ~10m<sup>2</sup>

= 50~60MW/m<sup>2</sup>

≫ 定常除熱限界 (~10MW/m<sup>2</sup>)

※1

サイクロトロン放射：ミリ波  
制動放射：赤外～可視光  
線放射：真空紫外～軟X線

※2 ITERと同程度のサイズの場合  
~10cm × (内側~30m + 外側~60m)  
= ~10m<sup>2</sup>

ダイバータ板  
~10cm  
磁力線を横切る方向には熱が流れにくい

# 放射を促進し壁全体に熱を散逸させる

核融合出力3GW、  
外部加熱100MWの場合

100～200MW  
電磁波として放出

約90%の熱を放射等で壁全体へ  
散逸させることができれば、  
ダイバータ板への熱流を低減できる。

炉心が冷えないか？ (閉じ込め性能との両立)  
燃料が薄まらないか？ (燃料純度との両立)

700MW  
( $\alpha$  加熱 + 外部加熱)

入射不純物からの放射損失※1  
(第一壁の除熱限界で制限)

入射不純物からの放射損失等※2  
(ダイバータの除熱限界で制限)

400～  
500MW  
が必要

1 線放射: 赤外～可視光

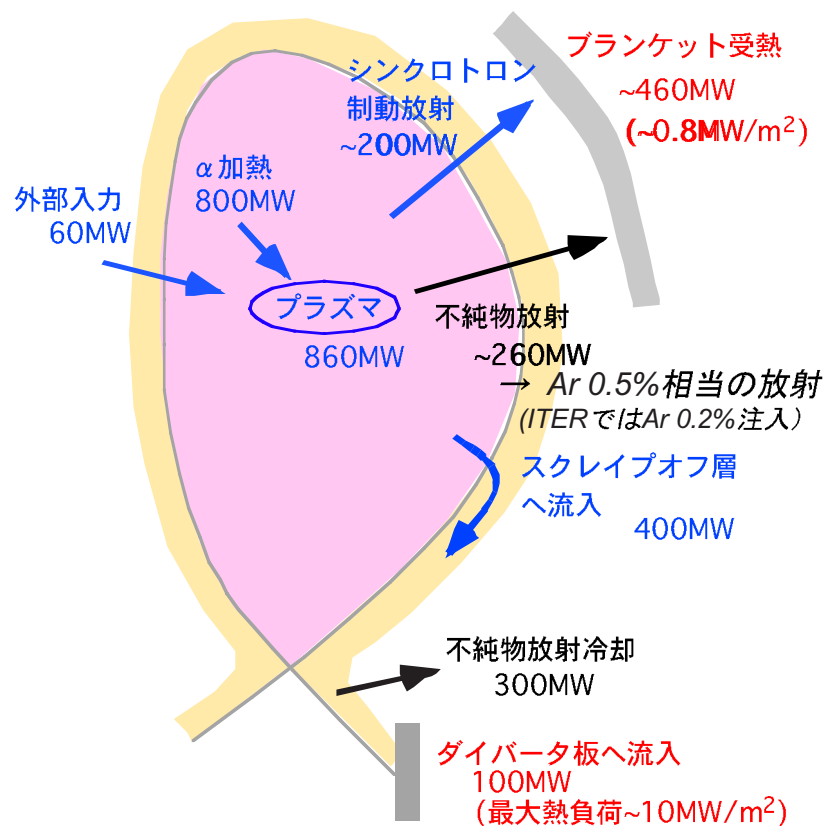
2 線放射、再結合損失、荷電交換損失など

微量の不純物を入射

ダイバータ板への熱流の許容値  
 $= 10\text{MW/m}^2 \times (\sim 10\text{m}^2) = \sim 100\text{MW}$

# ArおよびNeを注入し、熱の90%を放射冷却 (A-SSTR2の熱流制御シナリオ)

パワー分配の例(目標)  
(核融合出力4GW)

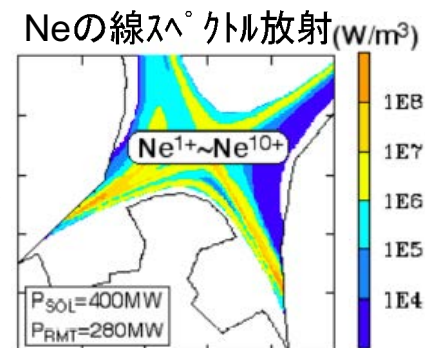


主プラズマへAr注入 0.5%  
ダイバータへNe注入 2%

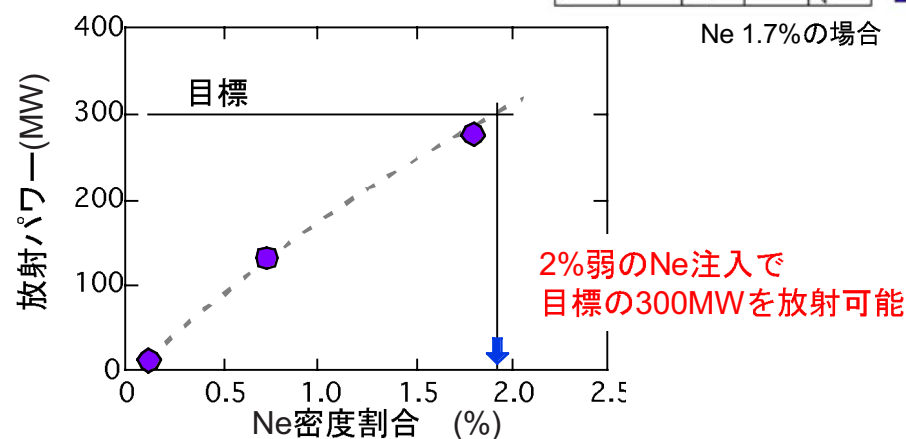
## B2コードによる解析

Braginskii流体方程式を  
多流体2温度モデルで解く  
計算条件:

- スクレイプオフ層への流入400MW
- ダイバータにNeガスを注入



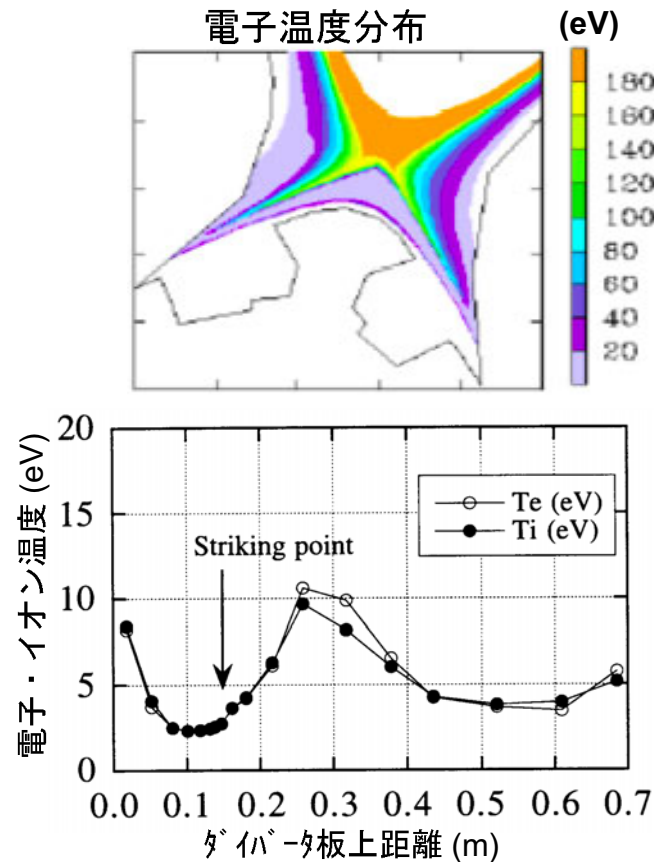
Ne 1.7%の場合



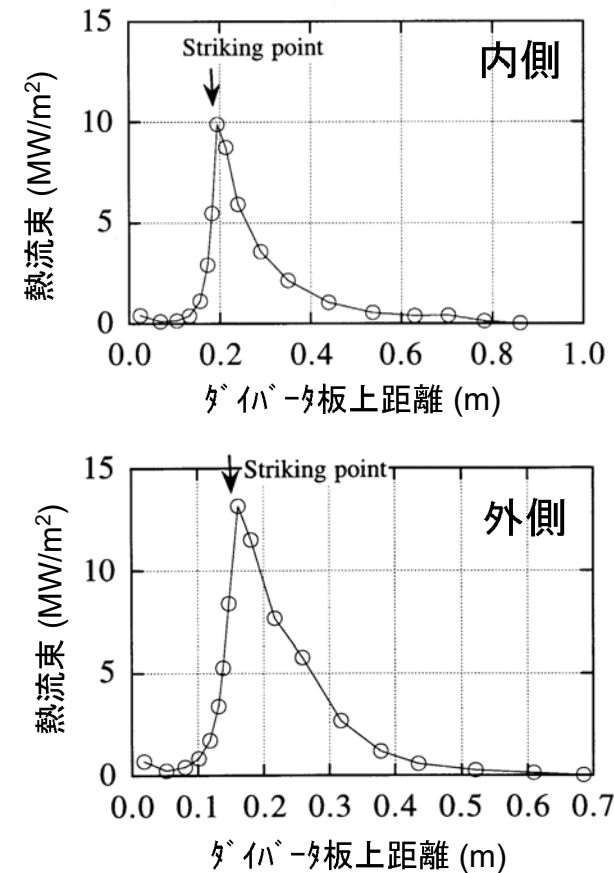
2%弱のNe注入で  
目標の300MWを放射可能

# ダイバータ熱負荷 $\sim 10\text{MW/m}^2$ およびプラズマ温度 $\sim 10\text{eV}$

Ne 1.7%の場合



ダイバータ板表面で  
10eVまで温度低下

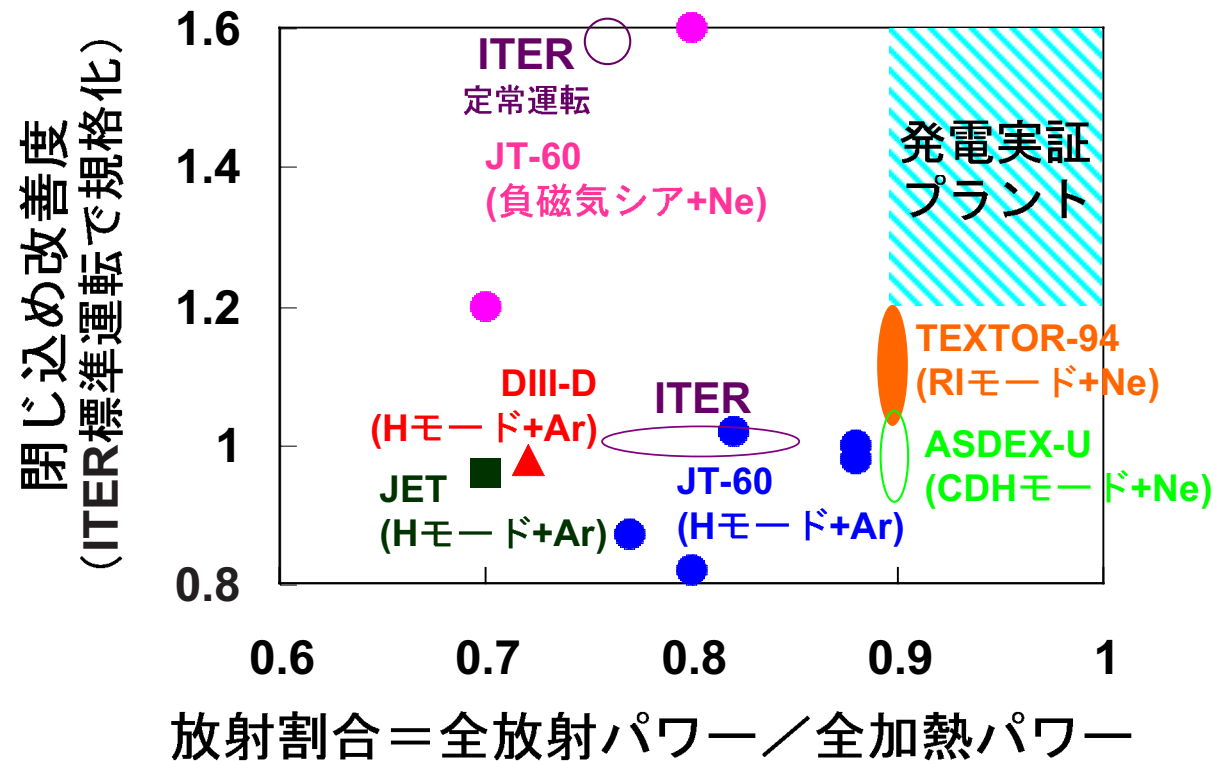


熱負荷 $\sim 10\text{MW/m}^2$ を実現



# 燃料純度との両立が課題

放射割合～90%でも閉じ込め性能は劣化しない。  
但し、燃料純度は数～20%低下する。

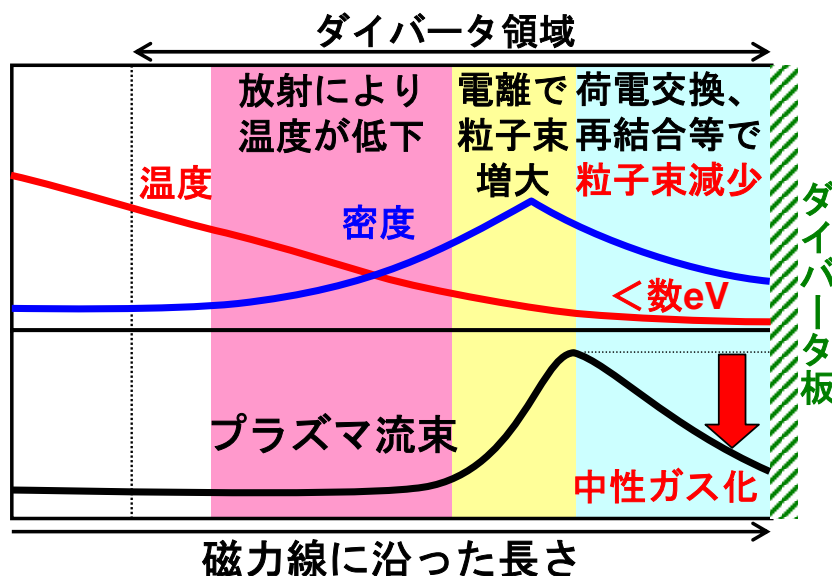


課題：入射不純物の炉心プラズマへの混入を抑制する  
方策の確立

# ダイバータ板の一部では $<10\text{eV}$ を安定に維持

部分的な非接触ダイバータ状態と高い閉じ込め性能は両立  
非接触状態が拡大すると不純物が混入し閉じ込めが劣化

## 非接触ダイバータ状態の概念

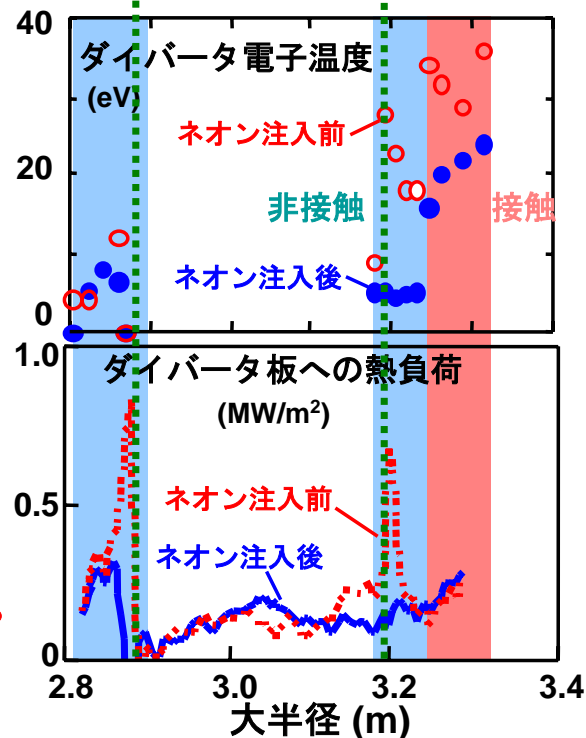


ダイバータ前面にプラズマが到達しにくくなる。  
⇒熱負荷低減、物理スパッタ低減

## ダイバータへのネオン注入 (JT-60)

(ネオン注入後も閉じ込め性能を維持)

内側ダイバータ 外側ダイバータ

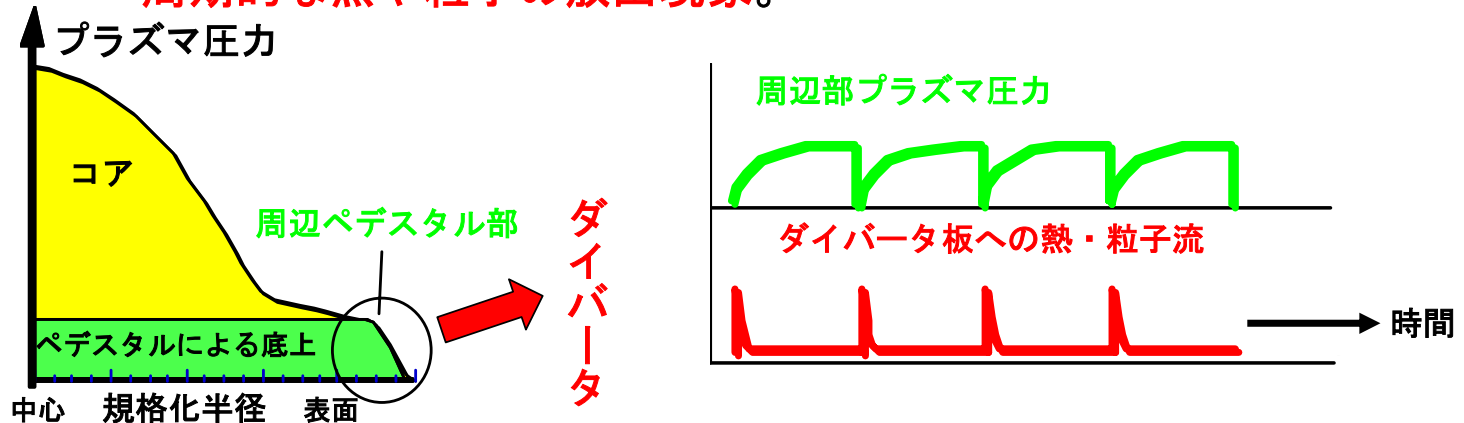


課題：非接触の範囲を拡げつつ、不純物混入を低減する

# ELM発生時の瞬間熱負荷は重要な課題

## ELM (Edge Localized Mode)

プラズマ表面近傍の不安定性による周辺部からの  
周期的な熱や粒子の放出現象。



周辺ペデスタルが完全に放出される大振幅ELMの場合  
放出エネルギーはプラズマ蓄積エネルギーの2～6%

⇒ITER :  $0.2 \sim 2 \text{ MJ/m}^2$  (炭素材、数1000ショットで交換)

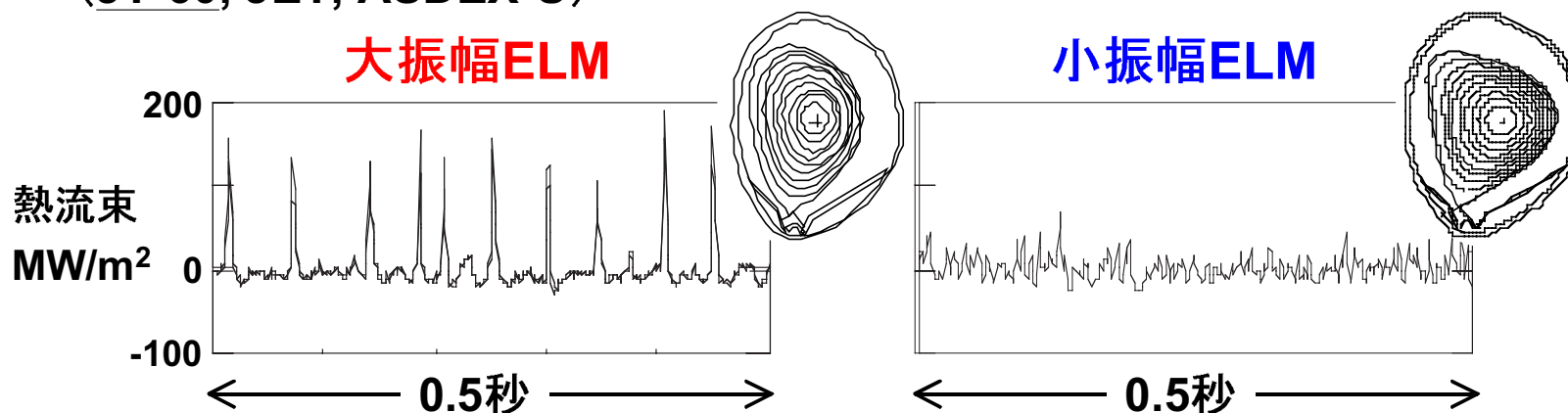
⇒実証プラント (高ベータ＝高ペデスタル圧力) :

より大きくなる可能性が大 > タングステンの許容値

課題：大振幅ELMを回避する方策の確立

# ELM発生時の放出エネルギーを低減する方策

1. プラズマ断面の高三角度化による小振幅、高周波数化  
(JT-60, JET, ASDEX-U)



2. 高頻度の燃料ペレット入射による小振幅ELMの誘起  
(ASDEX-U)
3. 高粒子リサイクリングによるELM抑制 (JET-2M, Alcator-Cmod)
4. 外部磁場印加によるELM抑制 (DIII-D, JFT-2M)

課題：放出エネルギーの予測精度の向上

小振幅化で不足の場合、ELM無しの運転方式の確立

ELM時に非接触状態 ( $< 10\text{eV}$ ) を維持できるか？

# まとめと今後の課題

## 熱流制御

### 実証プラントの設計条件

定常熱負荷 $\leq 10\text{MW/m}^2$ 、プラズマ温度 $\leq 10\text{eV}$ 、瞬間熱負荷 $\leq 0.2\text{MJ/m}^2$

### 運転シナリオ

不純物入射による放射促進（放射割合 $\sim 90\%$ ）

$\Rightarrow$  熱負荷 $\sim 10\text{MW/m}^2$ 、プラズマ温度 $\sim 10\text{eV}$ をシミュレーションで確認

非接触ダイバータ（プラズマ温度 $< 10\text{eV}$ ）

ELM時の瞬間熱負荷の低減

### 現状と課題

- 放射促進と閉じ込め性能は両立するが、燃料純度の向上が課題。
- 部分的な非接触ダイバータと閉じ込め性能は両立する。  
タングステンの脆化、損耗を避けるために非接触領域の拡大が必要。
- ELMの小振幅化は可能。瞬間熱負荷の予測精度を向上し、更に損耗を低減する手法を開発する。非接触状態へのELMの影響を評価する。

## 粒子制御

補足資料を御参照ください。

☆熱流制御と粒子（不純物）制御の同時達成が重要課題

# 補 足 資 料

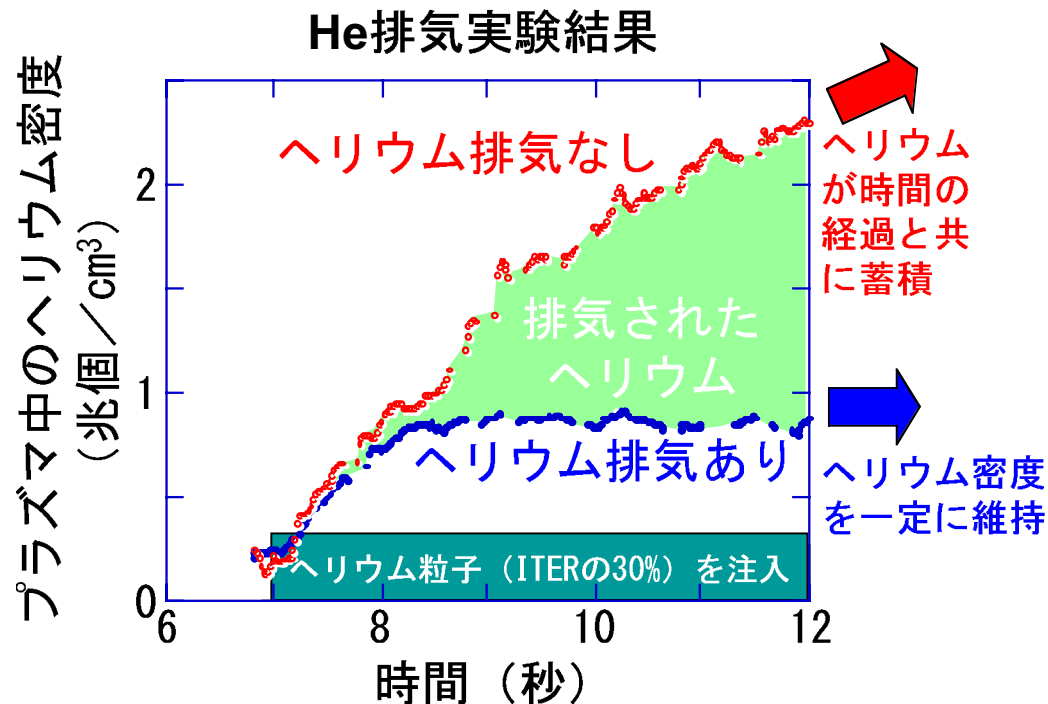
# 核融合反応で生成されたヘリウムの排気

ITERおよび発電実証プラントで必要とされるヘリウム排気性能

ヘリウム排気性能の指標  $\leq 5$  (ヘリウム濃度 $\sim 4\%$ )

$$\left\{ \equiv \frac{\text{Heの実効閉込め時間}}{\text{エネルギー閉込め時間}} \right\}$$

JT-60の模擬実験で良好なヘリウム排気性能を実証



排気性能の指標 = 4  
(ヘリウム濃度 $\sim 4\%$ )

今後の課題

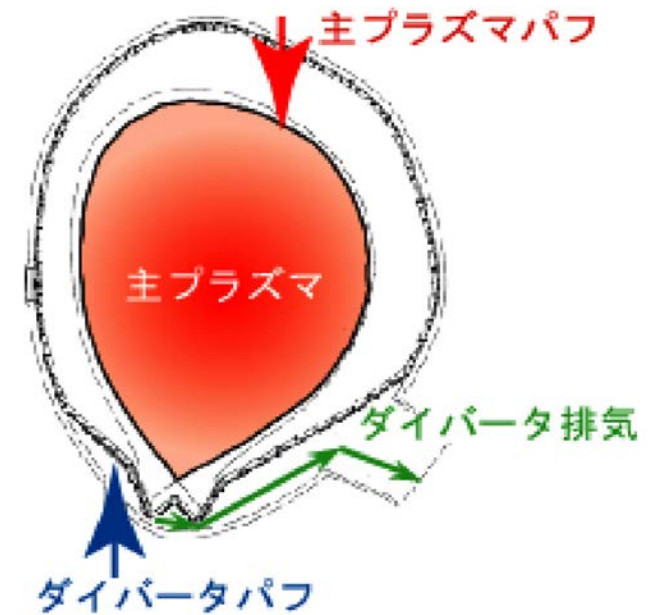
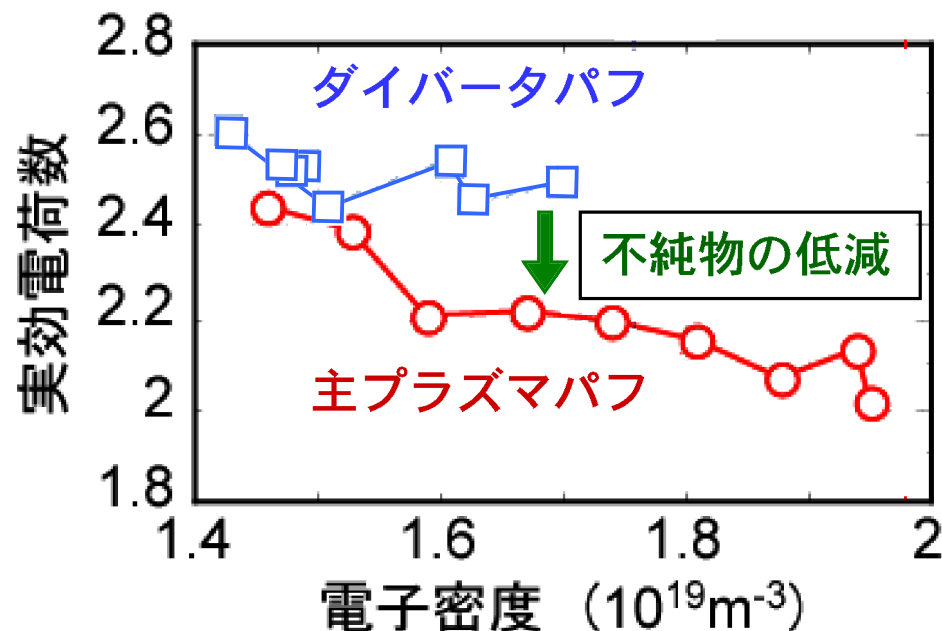
実証プラントの運転シナリオ  
と排気性能の整合性

- ◆ 完全非接触ダイバータ状態
- ◆ 強い内部輸送障壁の存在下

# プラズマ流による不純物の低減

ダイバータ板へ向かうプラズマ流の  
摩擦力により不純物を押し流す  
(パフ & ポンプ)

JT-60におけるパフ & ポンプの実証



今後の課題

プラズマ流が形成される  
メカニズムの解明  
(シミュレーション)

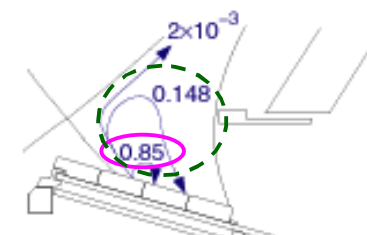
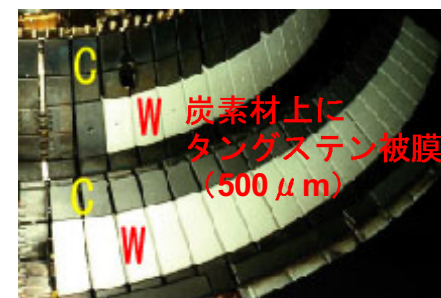
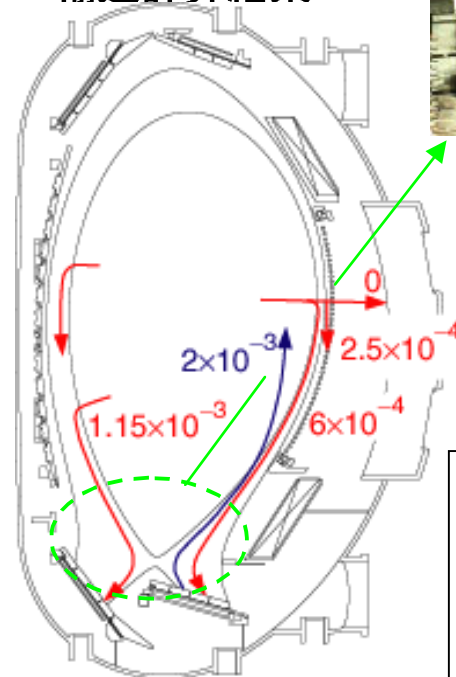


# タングステン被膜ダイバータから炉心プラズマへの タングステンの混入は十分に少ない

## ASDEX-Uの実験結果

高密度、高温度の  
周辺プラズマ  
⇒ 炉心プラズマの  
W濃度  $< 2 \times 10^{-5}$

タングステンの  
輸送計算結果



ダイバータ  
プラズマ中で電離  
⇒ ラーマー運動  
により再堆積

## 今後の課題

非接触ダイバータ時の混入増大の低減 ⇒ 形状効果等をsimulationなどで評価  
第一壁からの混入の懸念 ⇒ ASDEX-U、(国内重点化装置)