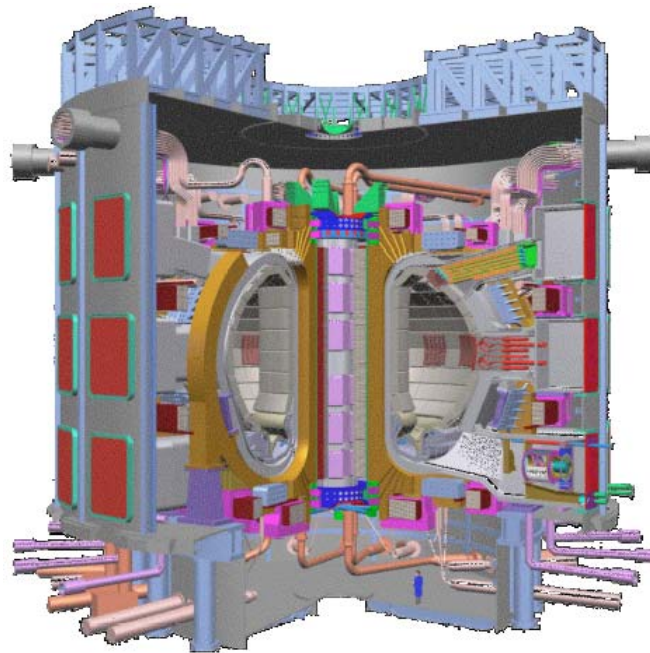


# ITERにおける燃焼プラズマ物理研究 のための計測と制御

及川聡洋

ITER国際チーム物理部



第9回若手科学者によるプラズマ研究会

2006年3月15-17日

日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所

## ITERで達成すべき項目

- ・ Q>10において核融合燃焼を長時間にわたって制御
- ・ Q>5において定常運転を実証
- ・ 燃焼プラズマの理解、予測、制御、改良
- ・ トリチウム製造兼発電用ブランケット等の発電炉に必要な核機器の試験
- ・ 核融合炉の安全性の実証、システムとしての信頼性向上の見通しを得る

# ITERの究極の目標(物理)

- ・ DEMO炉設計に十分な知見を得る
  - 物理機構
  - 予測手法
  - 制御手法
- ・ DEMO炉
  - 発電の実証 ( $\beta_N \sim 4$ ,  $HH \sim 1.3$ ,  $n \sim n_G$ ,  $Z_{\text{eff}} \leq 2$ )
  - 定常 ( $I_{\text{bs}} \sim 0.8I_p$ )、信頼性
  - Off-normal eventがない(ディスラプション、ELM等)
  - 機器寿命の確保 ( $P_{\text{rad}} \sim P_{\text{heat}}$ )

# ITERの目標達成のための 重要開発課題

- 計測器
- プラズマ制御
- シミュレータ

計測

# 計測器の役割

- 異常事象に対する装置の保護

例) ダイバータ及び第一壁の熱負荷、Disruption, プラント監視、等

- 装置の運転（基本的なプラズマ制御）

例)  $I_p$ ,  $B_t$ , プラズマ平衡配位、密度、核融合出力、 $n_T/n_D$ 比、等

- プラズマ性能の最適化と性能評価

例) 温度、密度、電流密度の分布等

- プラズマ性能向上の為の高度な制御

例) 温度、密度、電流密度の分布、MHD等

- プラズマ物理研究ための計測診断

例)  $\alpha$ 粒子分布、揺動計測、TAEモード、ペDESTAL計測、径電場等

# 計測器の満たすべき要件

- プラズマ制御及び物理研究に必要な精度、時間・空間解像度

例) Ti (core) : 0.5-40keV, 100ms,  $a/10$ , 10%精度

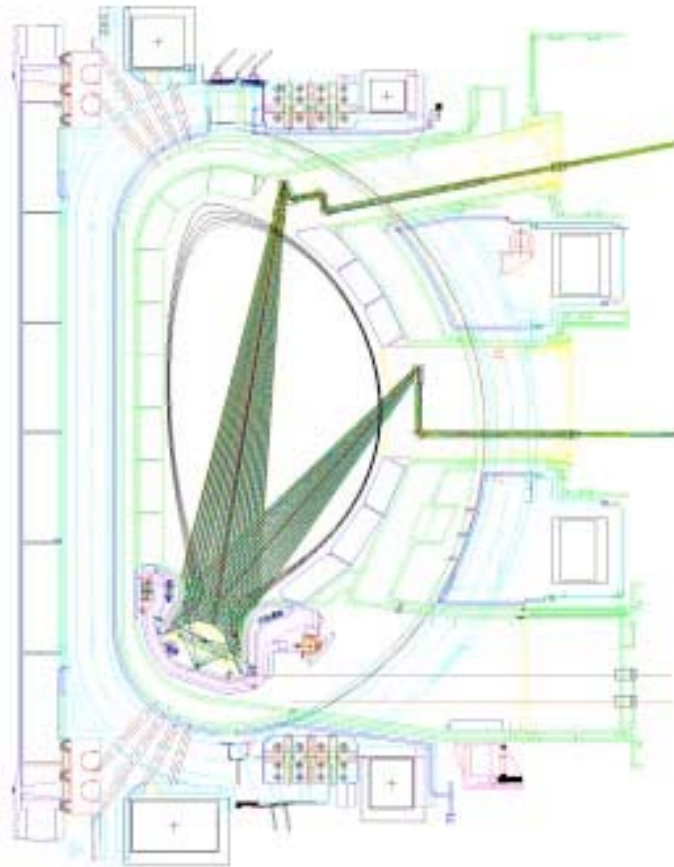
safety factor  $q$  : 0.5-5, 10ms,  $a/20$ , 10%精度 (物理研究)

$r(q=3/2, 2)/a$  : 0.3-0.9, 10ms, 50mm精度 (NTM制御)

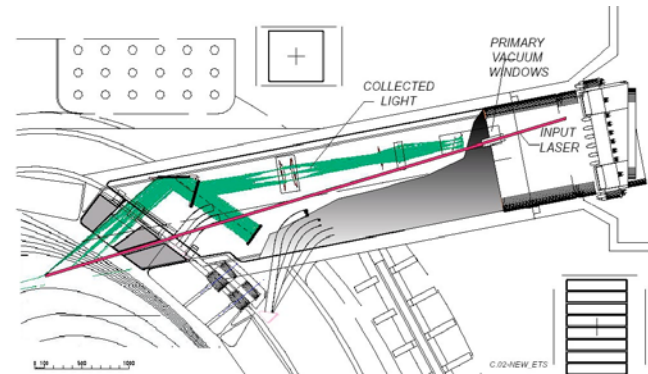
- 計測コンポーネントの耐中性子性、耐 $\gamma$ 線性
- 放射線遮蔽を考慮した設計 (開口部)
- ポート (上部、水平、ダイバータ) 構造との整合性

# ITERのポート構造

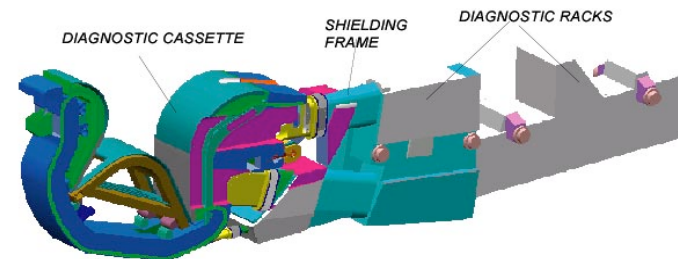
- トロイダル方向に18セクション。
- 各セクションは上部ポート、水平ポート、ダイバータポートから成る。



Upper, Equatorial and Divertor Ports  
(the divertor impurity monitor)



Schematic of the Edge Thomson Scattering  
system installed in an Upper Port

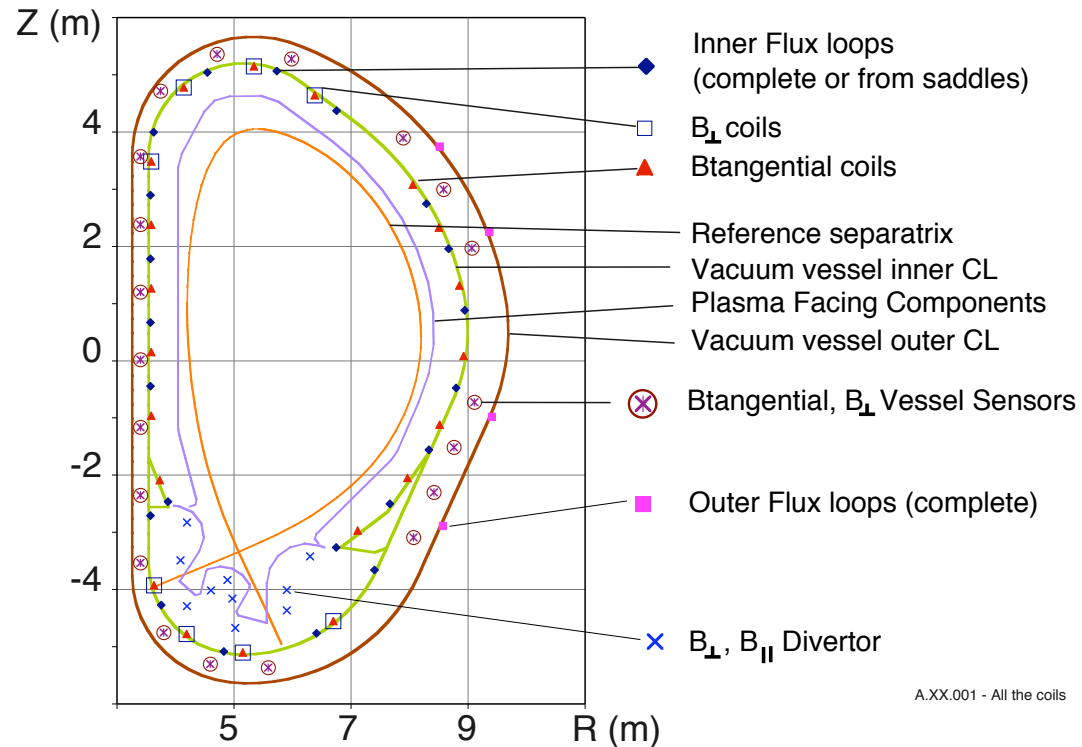


Arrangement of divertor diagnostic cassette  
and diagnostic racks



# 磁気計測

- 磁気プローブ、磁束ループ、ロゴスキーコイル (Halo電流計測用含む)、反磁性ループ、定常磁場センサを設置。
- プラズマ平衡配位、 $I_p$ , Halo電流 蓄積エネルギー、MHDモードを計測。  
(長時間放電ではプラズマ位置反射計も併用して平衡計測の精度を補う)

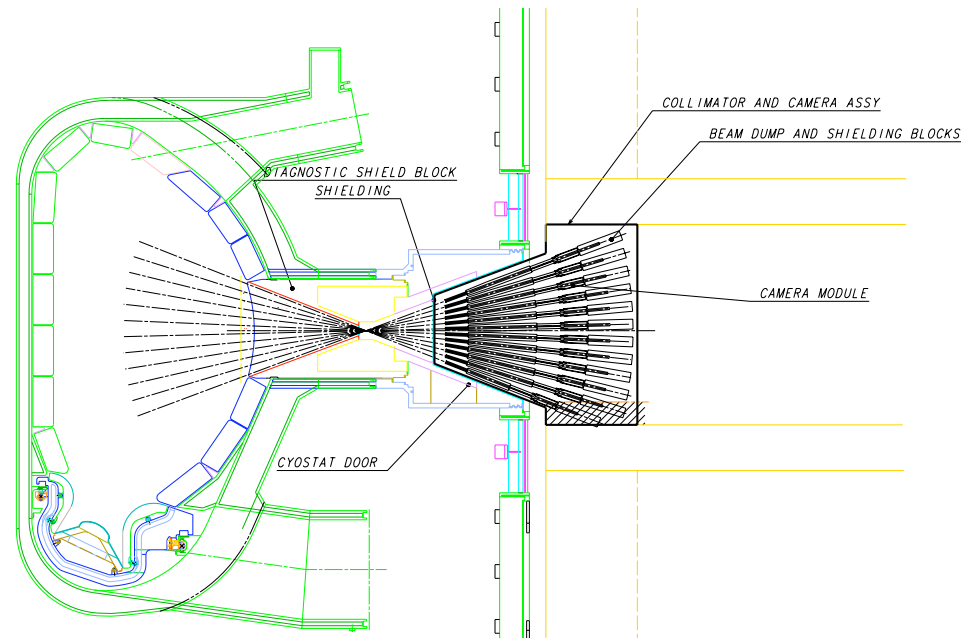


A.XX.001 - All the coils

Design Description Document (DDD) 5.5.A, Fig.1 on p.6

# 核融合出力（中性子）計測

- 中性子カメラ（radial, vertical）：Sn分布,  $\alpha$ 粒子発生分布
- 中性子束モニタ ( $^{235}\text{U}$  fission chamber)：全Sn、中性子カメラの感度較正
- 中性子放射化システム：高精度の中性子発生強度計測（低時間分解能）



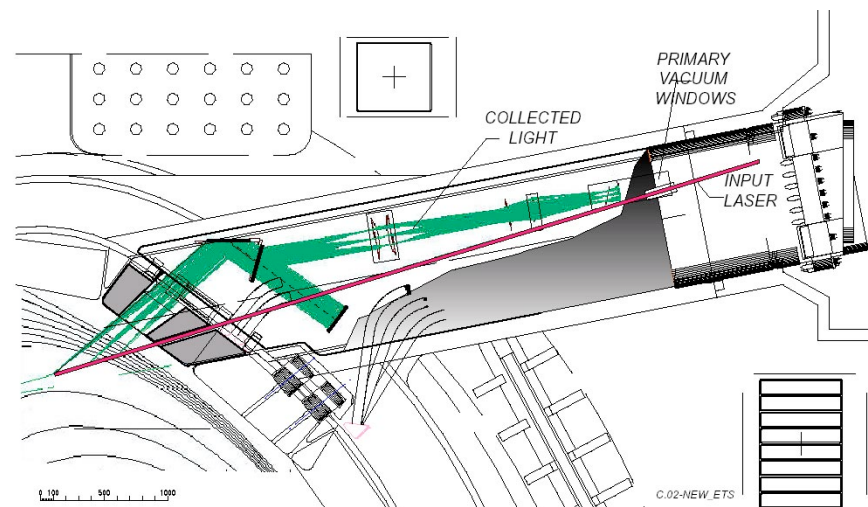
Vertical view of the radial neutron camera  
DDD 5.5.B, Fig.1.1.5-1 on p.12

# $\alpha$ 粒子計測

- 中性子カメラ :  $\alpha$  粒子発生分布
- 協同トムソン散乱計測 : プラズマ中  $\alpha$  粒子のエネルギー分布、空間分布。今後のR&D重要。
- 荷電交換再結合反応分光 (CXRS) : Heライン、熱化  $\alpha$  粒子の密度分布
- 中性粒子分析器 (NPA) in 0.1-4MeV :  $\alpha$  粒子のエネルギースペクトル
- 損失  $\alpha$  粒子計測 : リップルや不安定性による損失  $\alpha$  粒子のエネルギースペクトル。今後のR&D重要。

# 電子温度、電子密度計測

- 中心部トムソン散乱計測：LIDAR方式、 $n_e$  &  $T_e$ 分布計測、 $\Delta t=10\text{ms}$ 、 $\Delta r=a/30$
- 周辺部トムソン散乱計測： $90^\circ$  散乱、 $n_e$  &  $T_e$ 分布計測、 $\Delta t=10\text{ms}$ 、 $\Delta r=5\text{mm}$
- トロイダル干渉計：線平均電子密度計測
- ECE計測： $T_e$ 分布及び $T_e$ 揺動分布計測
- 反射計： $n_e$ 分布及び $n_e$ 揺動分布計測
- X点トムソン散乱計測、ダイバータトムソン散乱計測、プラズマ位置反射計



Schematic of the Edge Thomson Scattering system installed in an Upper Port

# イオン温度、イオン密度計測

- CXRS : He, Cライン、Ti, 回転, 不純物密度分布計測、  
計測ビーム (H<sup>-</sup>, 100keV) 使用、  
 $\Delta t=100\text{ms}$ 、 $\Delta r=10\text{cm}$  (周辺は2cm)
- 協同トムソン散乱計測 : Ti分布。今後のR&D重要。
- 中性子スペクトロメータ : Ti分布
- $\gamma$ 線スペクトロメータ : 燃料混合比  $nT/nD$ 分布。  
今後のR&D重要。
- 中性粒子分析器 (NPA) at 10–200keV :  $nT/nD$

# ダイバータ計測

- $T_e$  : ダイバータ&X点トムソン散乱計測
- $n_e$  : ダイバータ&X点トムソン散乱計測、干渉計、ダイバータ反射計
- 放射損失 : ボロメータ
- 不純物量 : 分光計測
- 中性粒子圧力 : 高速イオンゲージ (ASDEXゲージ)
- ダイバータ板上の  $T_e, n_e$  : ラングミュアプローブ
- ダイバータ板上の温度分布 : 赤外線計測、熱電対
- ダイバータの損耗 : erosionモニタ
- ダストモニタ

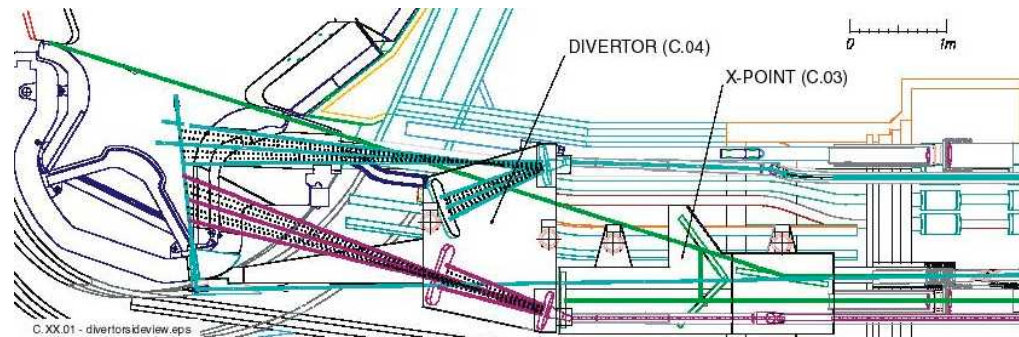


Figure 7: The X-point (C.03, green) and Divertor (C.04, blue and magenta) beam paths.

## 電流密度（安全係数）分布計測

- 動的Stark効果 (MSE) 偏光計測：磁場ピッチ角、加熱NB (D-, 1MeV) 使用、 $\Delta r=5\text{cm}$
- ポロイダル偏光計：線平均ポロイダル磁場

## 放射損失分布計測

- ボロメータ：340ch。トモグラフィで空間分布を再構成。

## プラズマ対向機器、運転監視計測系

- 広視野監視カメラ（第一壁の75%をカバー）、赤外線サーモグラフィ、熱電対
- 圧力計、残留ガス分析器
- 逃走電子モニタ
- ダイバータラングミュアプローブ、ダストモニタ、erosionモニタ

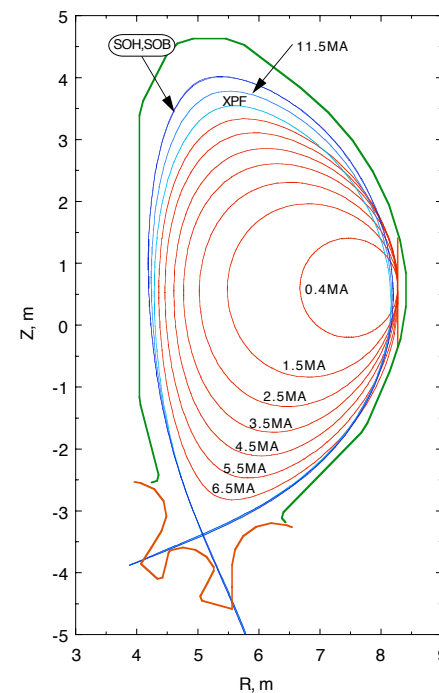
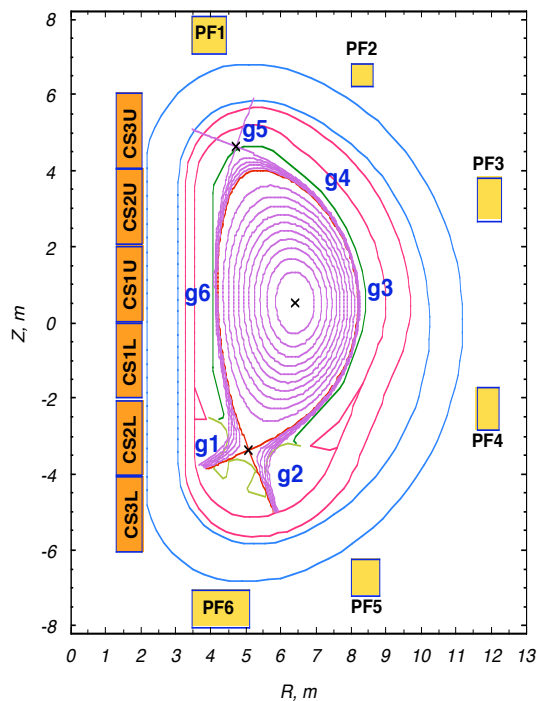
# 制御

- ・ 燃焼制御、位置形状制御、分布制御、MHD安定化 (NTM, RWM, ELM, TAE)、ディスラプション制御、熱・粒子制御 (T含む) の統合制御
- ・ 実時間、非線形、異なる時間スケール、複雑
- ・ 限られた制御手段 (燃料供給、H/CD)
- ・ 定常運転では実時間で輸送・安定性解析が必要
- ・ アルゴリズム開発と実証が建設・運転期の重要項目
- ・ ITERの重要成果



# プラズマ平衡配位の制御

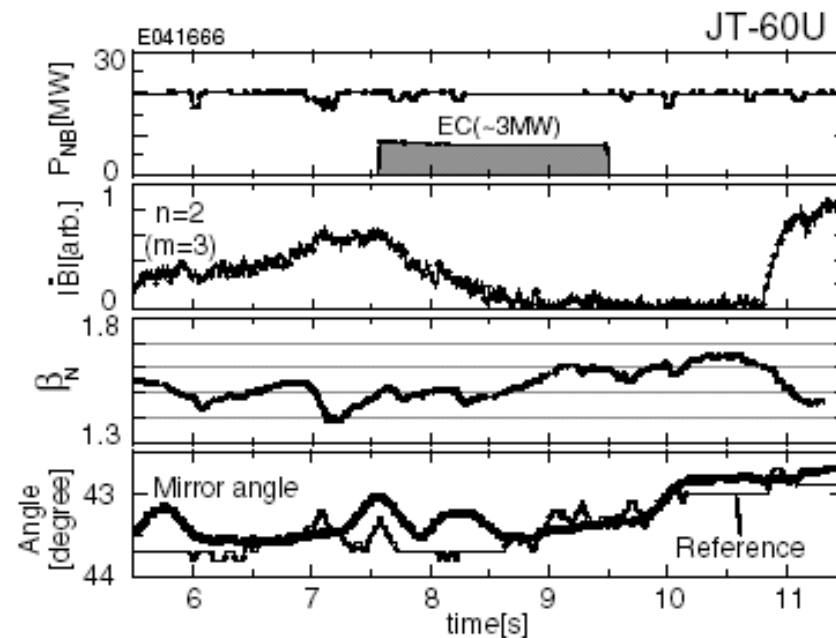
- プラズマ平衡を実時間で検出（磁場計測、反射計）
- 1 2本のCS, PFコイルにより平衡配位を制御。
- ダイバータ板上のセパトリックス足位置、第一壁との距離、RFアンテナとの距離を精度良く制御する必要がある。
- MSEも使いj, q分布の実時間検出 => 電流分布制御、NTM制御



# MHD制御(1)

## 新古典テアリングモード (NTM)

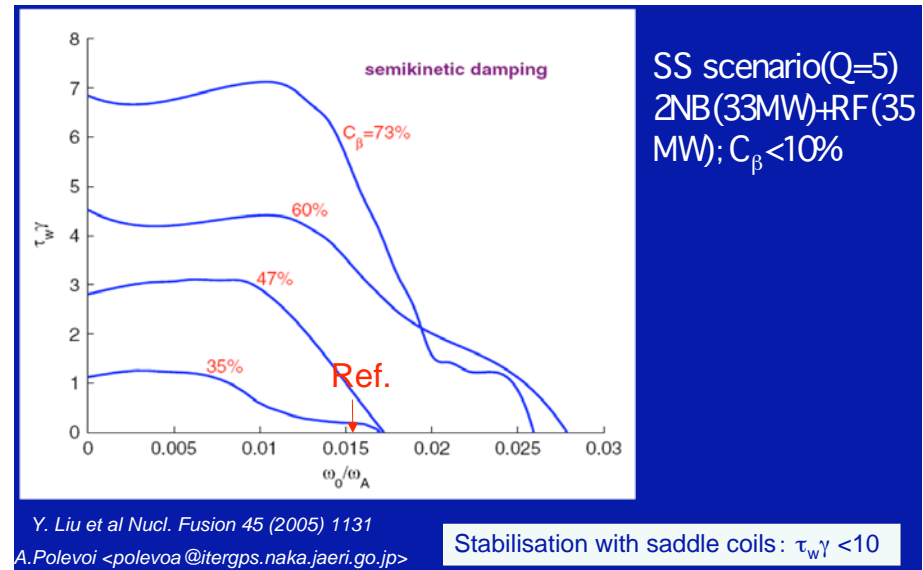
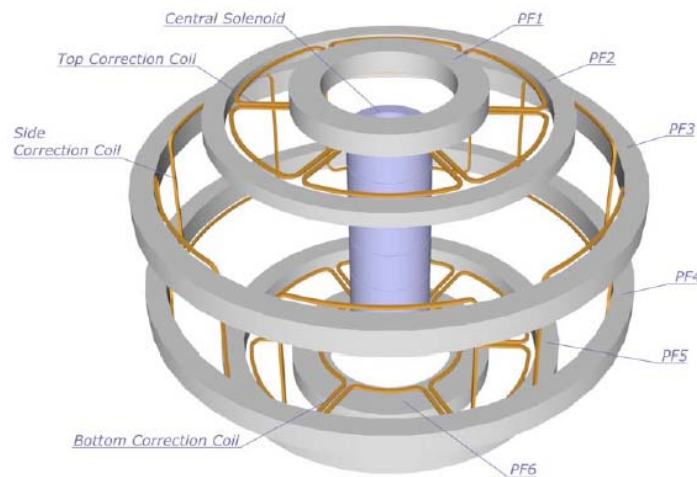
- JT-60U : ECEで検出した磁気島位置にEC波を入射しNTMを抑制。
- DIII-D : MSEで検出した $q=3/2$ 面にEC入射しNTM発生を回避。
- ITER : MSEと磁場揺動による実時間検出、上部ECランチャーによるNTM回避・抑制。初期実装の20MWで十分か？



# MHD制御 (2)

## 抵抗性壁モード (RWM)

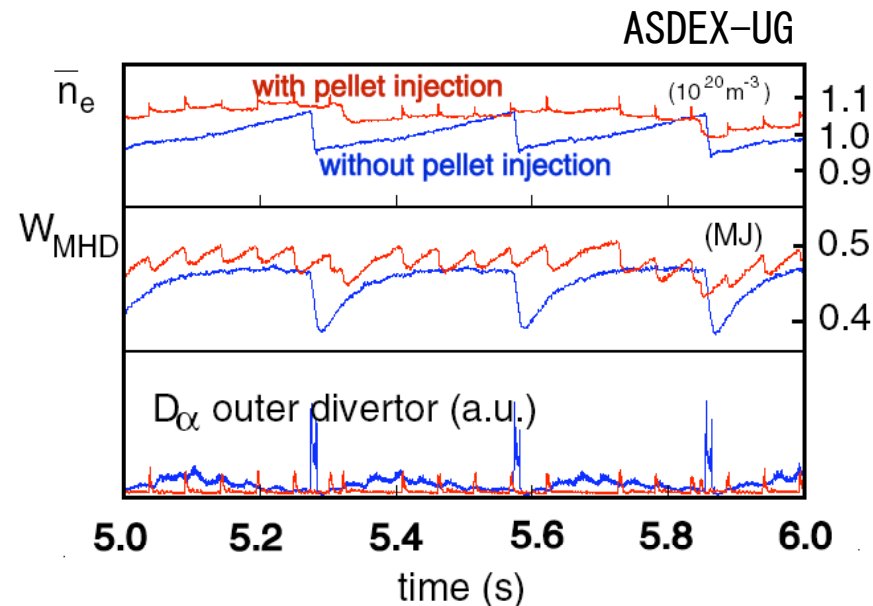
- DIII-D : 外部磁場コイルとプラズマ回転の組み合わせにより RWMを抑制出来ることを実証。
- ITER : n=1モードを励起する外部磁場コイルを設置。  
 $C_\beta \sim 0.8$ までRWM制御が可能との解析結果。  
 $(C_\beta = (\beta - \beta_{no\_wall}) / (\beta_{ideal\_wall} - \beta_{no\_wall}))$   
 RWMコード、予測されるプラズマ回転の不確定性あり。



## MHD制御(3) : 周辺部局在モード(ELM)

- ASDEX-UG : pellet pace-makingでELMサイズを減少させる。
- DIII-D : 外部磁場コイルで周辺磁場をergodicにしてELMを抑制。
- JT-60U : プラズマ回転によりsmall ELM or ELM-free化。
- ITER : Pellet pace-making => どの程度の性能劣化?  
燃料供給や形状制御 => 性能低下とのtrade-off。

m/n=9/3 ergodicコイルも検討。

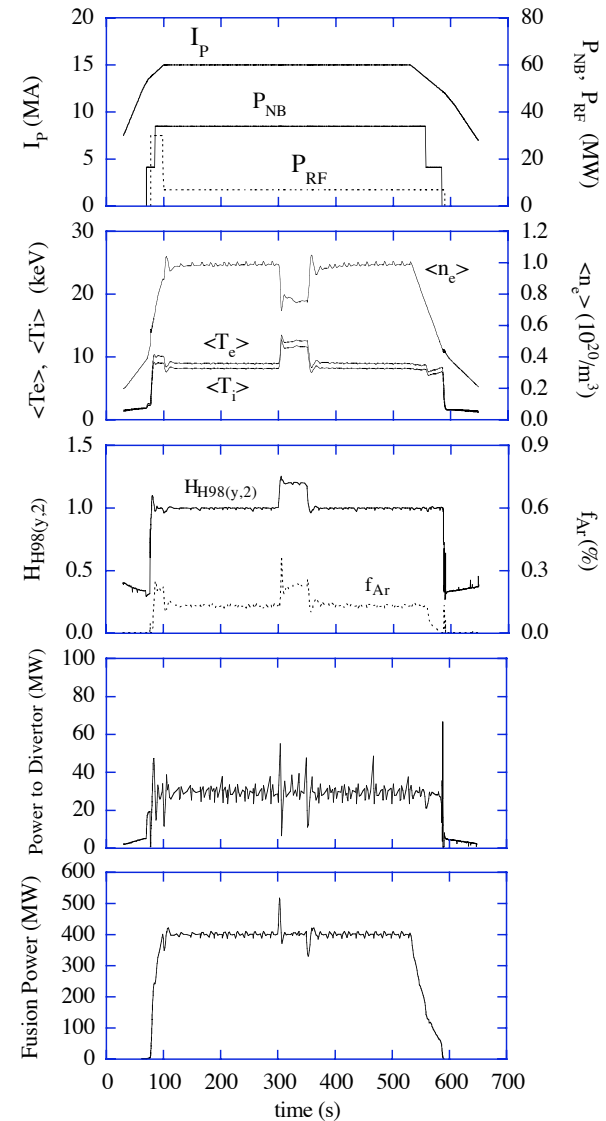


# ダイバータ制御

- ダイバータ板上の熱電対とリングミュアプローブ、IRカメラ等でダイバータをモニタ。
- ELM制御。
- 放射損失をモニタし不純物等の入射で放射損失を制御（デタッチメント制御）。
- セパラトリックス足位置の制御。

# 燃焼制御

- 制御パラメータ：
  - 核融合出力
  - ダイバータ板熱負荷
  - 表面熱流束 (L-H遷移)
- アクチュエータ：
  - 加熱電流駆動装置 (NB, RF)
  - 燃料供給 (pellet, gas-puff)
  - 不純物注入 (gas-puff)
- 平衡制御、MHD制御も同時に行う。
- 適切な燃料供給を行う為にnT/nD信号を使った制御アルゴリズムの開発。
- 分布制御は可能か？



# ディスラプション制御

- 予測：蓄積エネルギーや内部インダクタンス等の実時間検出とニューラルネットワークを組み合わせることで前兆をとらえディスラプションを予測。
- 回避：プラズマ電流、圧力、密度の制御により回避。
- 緩和：不純物ガスの入射により、第一壁への熱の流入、うず電流やHalo電流による電磁力を低減。

## シミュレータ

- ・ プラズマ、計測器、制御手段(コイル系、加熱・電流駆動、燃料補給等)の相互作用・応答を予測
- ・ 実験計画、計測計画、実験解析、制御法開発に利用
- ・ 建設・運転期の重要開発項目
- ・ ITERの重要成果



# 最後に

- ITERは豊富な計測器を備え核燃焼プラズマの詳細な物理研究が行える唯一の機会であり、計測器開発は重要。
- プラズマ物理の理解を深め、予測技術を向上させる必要がある。ITERは、これまでのプラズマ研究の進め方が評価される機会でもある。
- ITERにおける制御開発では、ITER目標の達成のみならず、DEMO炉に適用可能な制御手法の開発・選択をしなければならない。
- 制御は新たな運転領域の発見の手段でもある。魅力的な運転領域があると分かれば、それに合わせた炉設計を行い、制御への依存度を低めることが可能。



# 運転計画

