

# TRIAMの実験と制御

彌政敦洋, TRIAM実験グループ

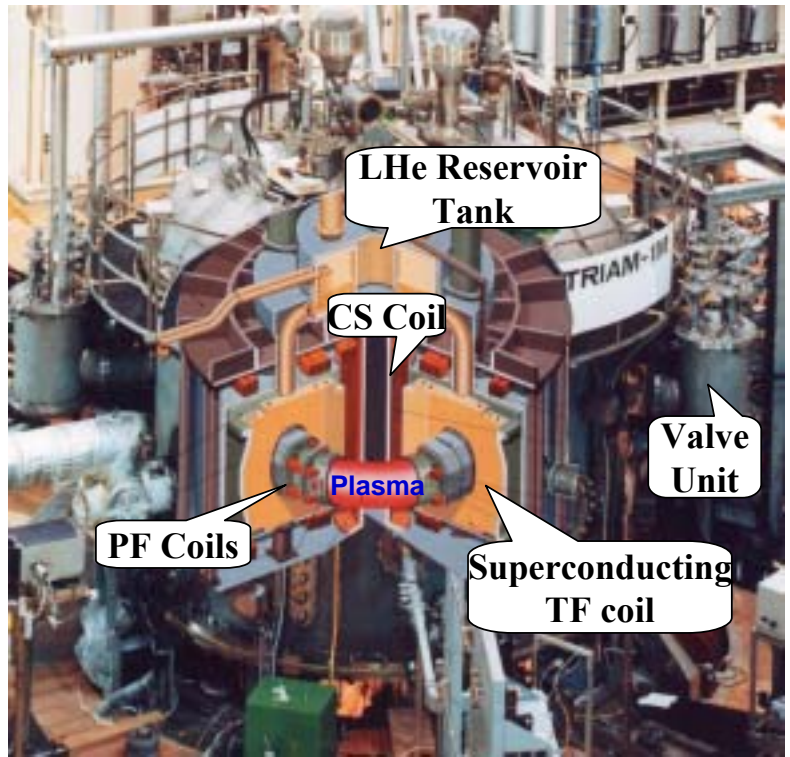
九州大学応用力学研究所 炉心理工学研究センター

## OUTLINE

- Introduction
- 低密度超長時間放電
- 高性能プラズマ長時間化

# Introduction

## - TRIAM-1M -



Major radius	0.84m
Minor radius	0.12m x 0.18m
<b>Toroidal Field</b>	<b>8T (Steady State)</b>
Plasma current (OH)	<430kA
(LHCD)	<70kA
Additional power	450kW (LHCD) ┌ 200kW 8.2GHz x2 └ 50kW 2.45GHz x1 <b>200kW(ECH)</b> ┌ <b>170GHz x 1</b>

16 Nb<sub>3</sub>Sn TF coils  
 PF coils : Cu (normal conductor)

# Introduction

## - 加熱装置 -

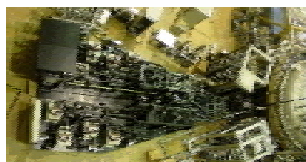
### 主要諸元

Major radius	0.84m
Minor radius	0.12m×0.18m
Toroidal Field	8T (Steady State)
Plasma current (OH)	<430kA
(LHCD)	<70kA
Additional power	LHCD (200kW 8.2GHz×2) (50kW 2.45GHz×1) ECH (200kW 170GHz×1)

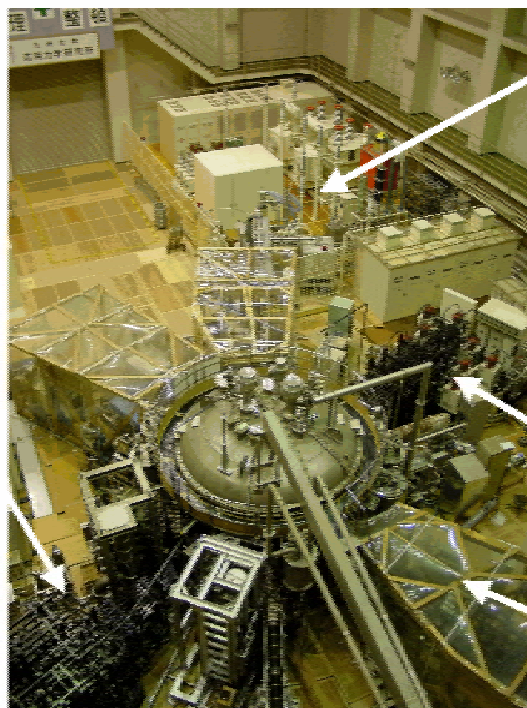
16 Nb<sub>3</sub>Sn TF coils

PF coils : Cu (normal conductor)

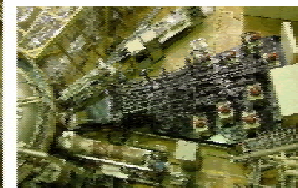
**8.2GHz LHCD**  
**200 kW**



### TRIAM-1Mの鳥瞰写真と電流駆動系、加熱系



**170GHz ECH**  
**200 kW**



**8.2GHz LHCD**  
**200 kW**

**2.45GHz LHCD**  
**50 kW**

# Introduction

## - 研究課題と取り組み -

---

- トカマクの定常化のための長時間制御研究
  1. プラズマ位置形状制御
    - リアルタイムOS搭載のWSにより位置制御
    - 長時間に対応した磁場測定・・・ホール素子により対応
  2. 粒子・熱制御
    - Ha線強度を用いた密度制御
    - 熱除去能力を向上させた可動リミターによる熱制御
- プラズマ・壁相互作用研究
  - リサイクリング, 再堆積層問題
- 高性能プラズマの長時間化研究
  - 高効率電流駆動モード(ECDモード)時の不純物混入
- 電流密度分布制御
  1. 方形アンテナを用いて入射角を制御するECCD実験
  2. LHCDの位相制御による電流密度分布制御計画

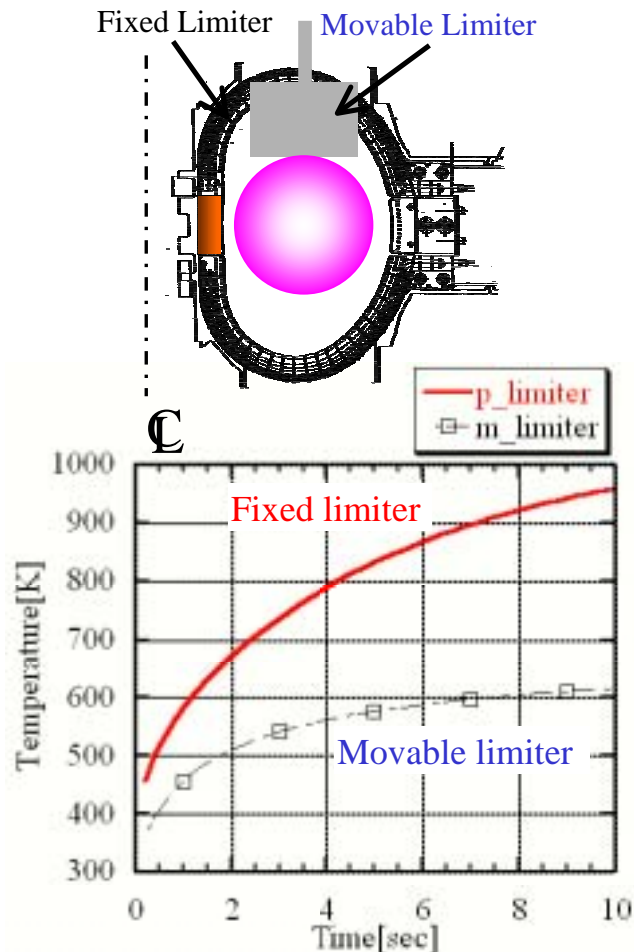
# 超長時間放電 - 制御概要 -

これまでの超長時間放電の際の制御

- ホール素子を用いたプラズマ位置制御
- 内側リミターへの熱負荷の集中をさけるためのTV映像によるプラズマ位置制御
- ガス供給はH<sub>2</sub> 光 (influx) が一定になるように制御

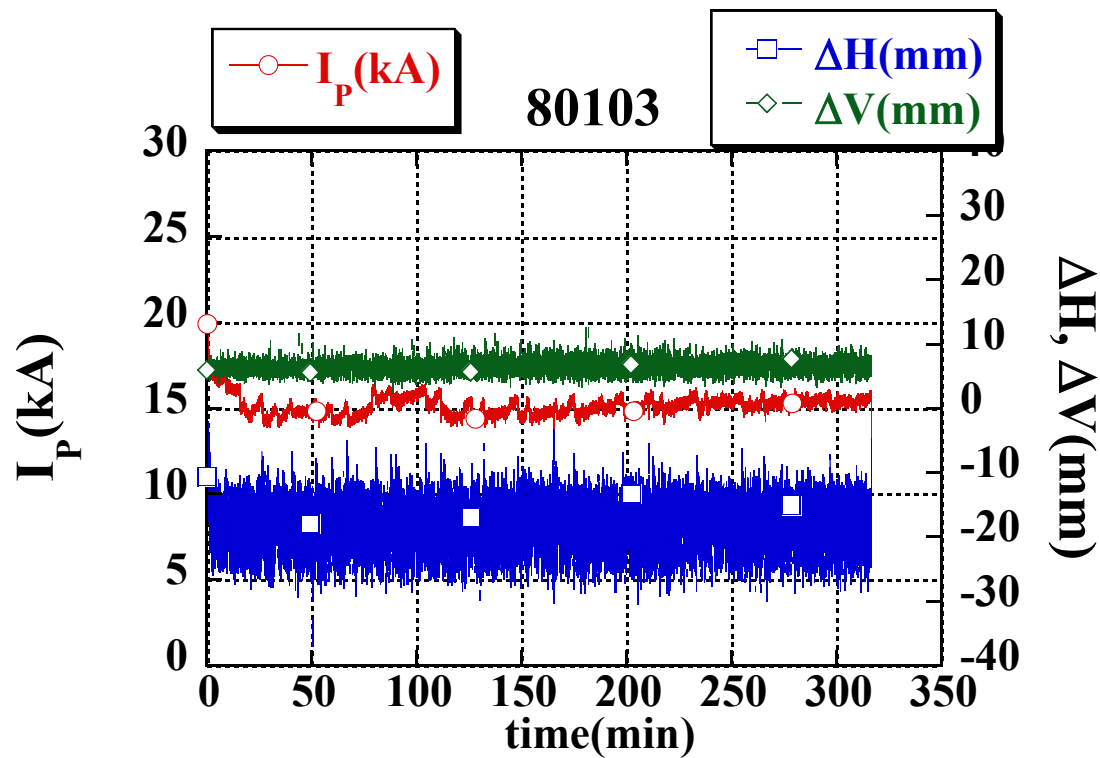
冷却効率の高い可動リミターの設置

- 現在設置されている固定リミターに比べて2倍程度の冷却効率  
真空容器, 固定リミターの温度上昇の低減, 水素リサイクリングの抑制等の効果が期待される



# 超長時間放電

## - プラズマ位置制御 -



$$B_T = 6 \text{ T}, P_{RF} = 7 \text{ kW}, n_e = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$$

5時間にわたりプラズマ位置を一定に制御

# 超長時間放電

## - 熱負荷分布の変化 -

可動リミターなし

熱負荷分布

Fixed limiter 35%

Vacuum vessel 64%

可動リミターあり

熱負荷分布

Movable limiter 36%

Vacuum vessel 49%

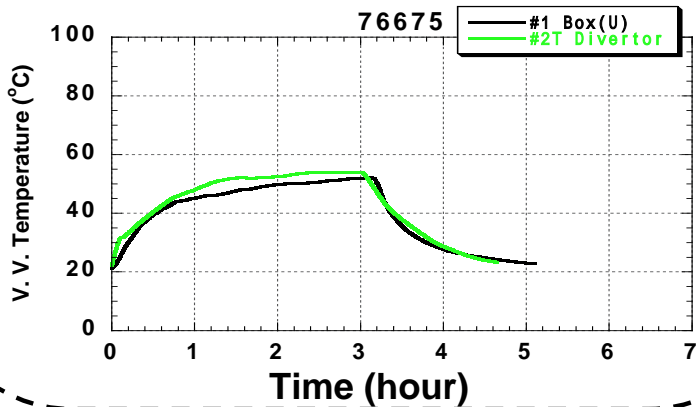
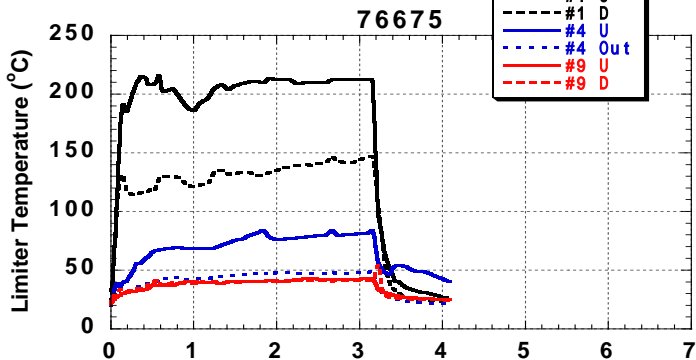
Fixed limiter 15%

- 熱除去能力の高い**可動リミタ**に**全体の30%以上の熱負荷**を与えた。  
(従来の3カ所の固定リミターへの熱負荷と同等)
- 内側リミターへの熱負荷の集中がなく温度上昇を抑えられホットスポットができなかったため、TV映像によるプラズマ位置制御は行っていない

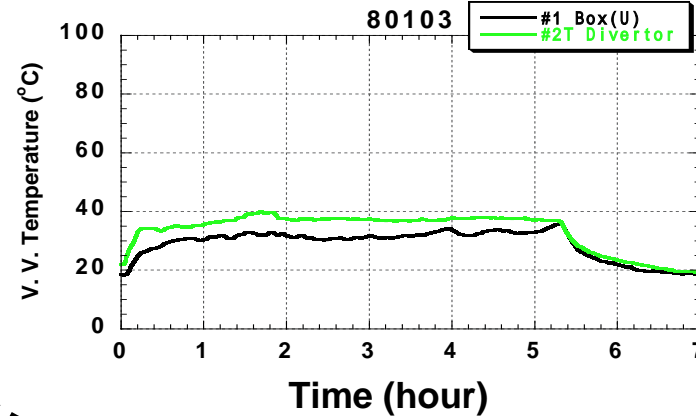
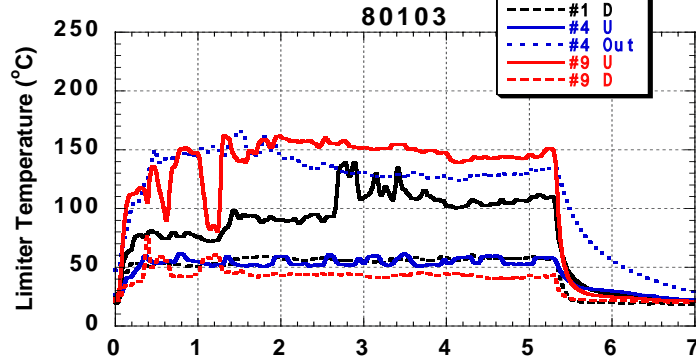
# 超長時間放電

## - 真空容器の温度上昇抑制 -

可動リミターなし



可動リミターあり

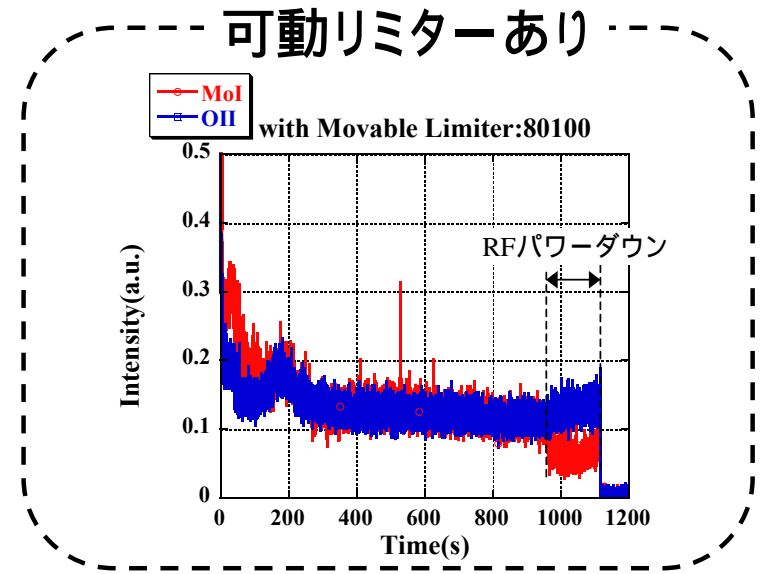
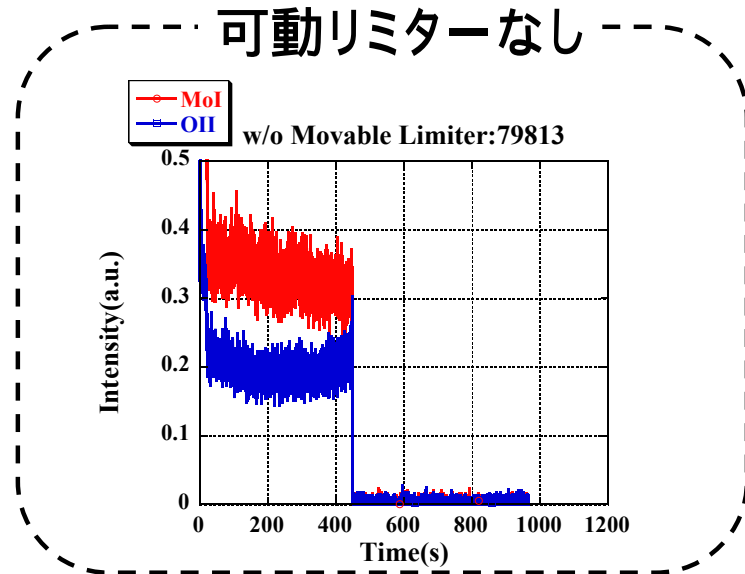


- 可動リミターによる熱除去の効果によりPFCの温度上昇が抑えられた



# 超長時間放電

## - 不純物の抑制 -

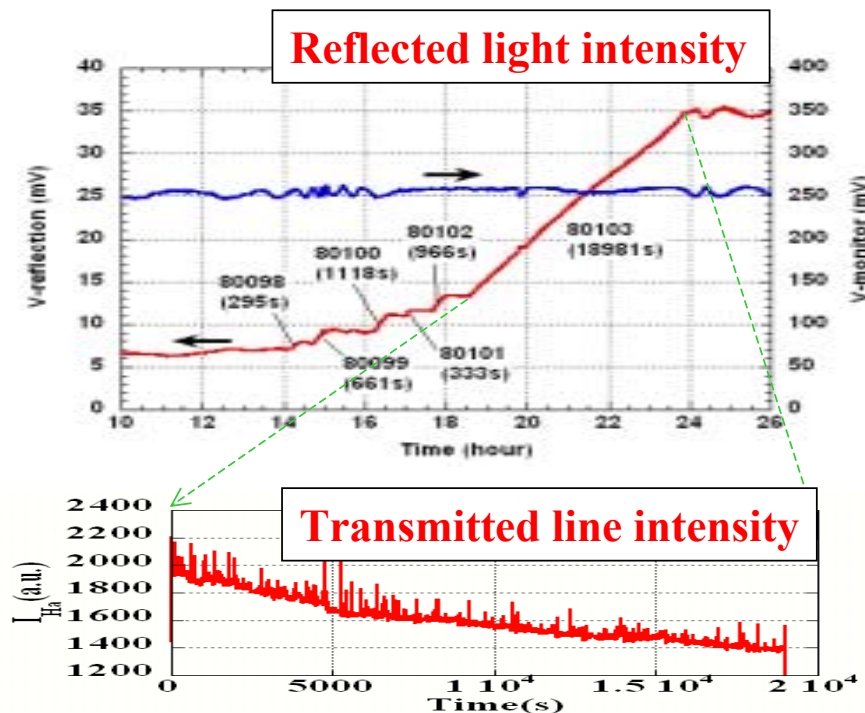


- 可動リミターを用いた場合不純物の流入量が減少 (MoI:43% , OII:65%)  
radiation lossが減少し, 真空容器への熱負荷が減少
- 特にモリブデンの流入量が減少.

# 超長時間放電

## - 再堆積層の形成と壁排気速度 -

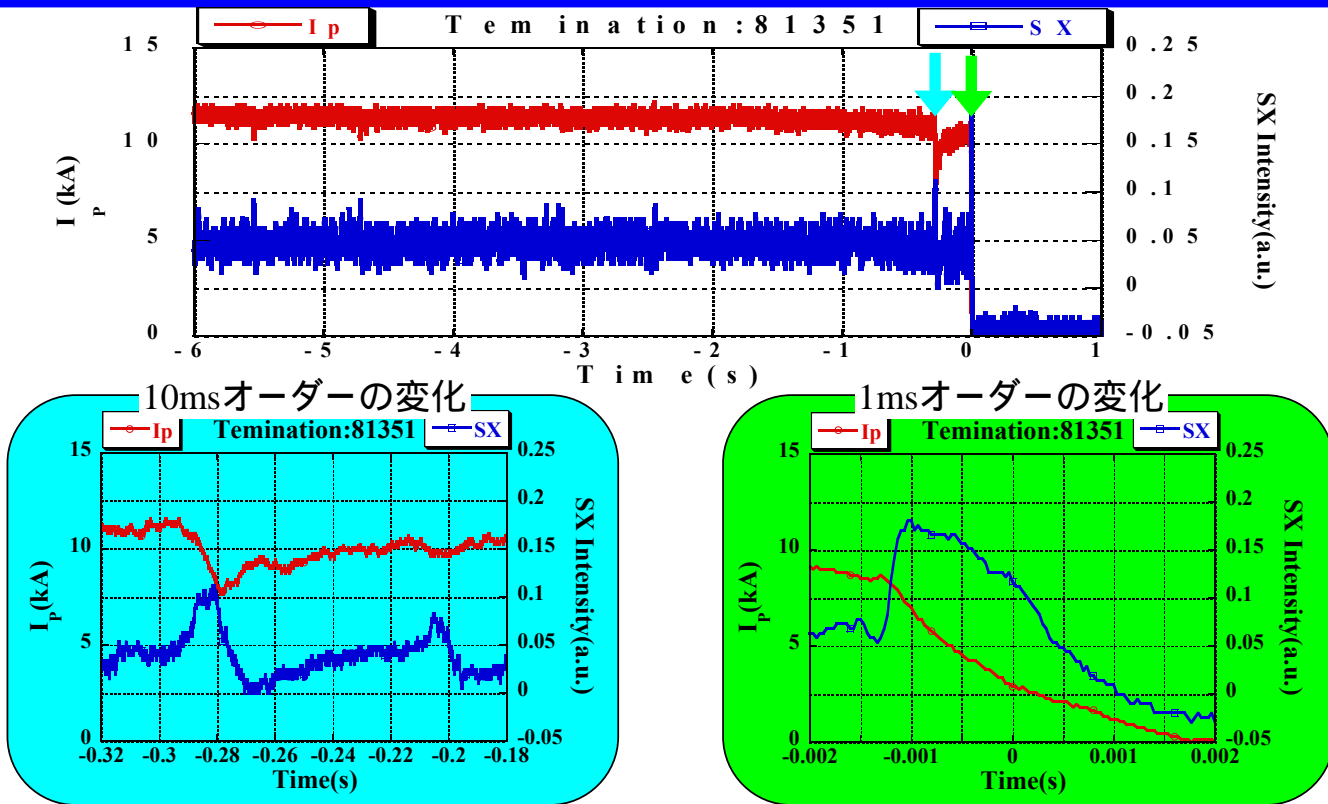
- プラズマから約30cmの位置にある観測窓において反射光, 透過光を測定
- 長時間放電の間に透過光の強度が低下していった モリブデンの再堆積の影響
- 見積もられた水素の壁排気速度  
 $3.85 \times 10^{15} \text{atoms/m}^2/\text{s}$
- 粒子バランスから求められた壁排気速度は  $1.5\text{-}2.4 \times 10^{16} \text{atoms/m}^2/\text{s}^*$  である。(可動リミターなしの放電で見積もった量)



- 透過率の時間変化から求めた堆積率  
 $1.1 \times 10^{16} \text{atoms/m}^2/\text{s}$
- Mo中の水素保持量を0.35とすると、水素の壁排気速度は  $3.85 \times 10^{15} \text{atoms/m}^2/\text{s}$  と見積もられる。

\*M.Sakamoto et al., IAEA (2002)

# 超長時間放電 - 停止する原因 -

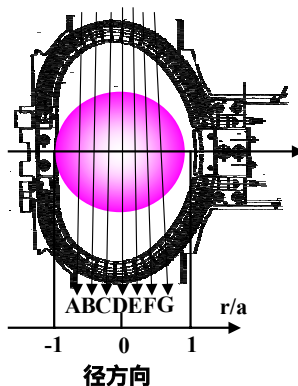


$I_p$ と軟X線信号にスパイク、電流駆動効率から $Z_{\text{eff}}$ を見積もると数倍に増加  
原因はモリブデンの再堆積層の剥離？

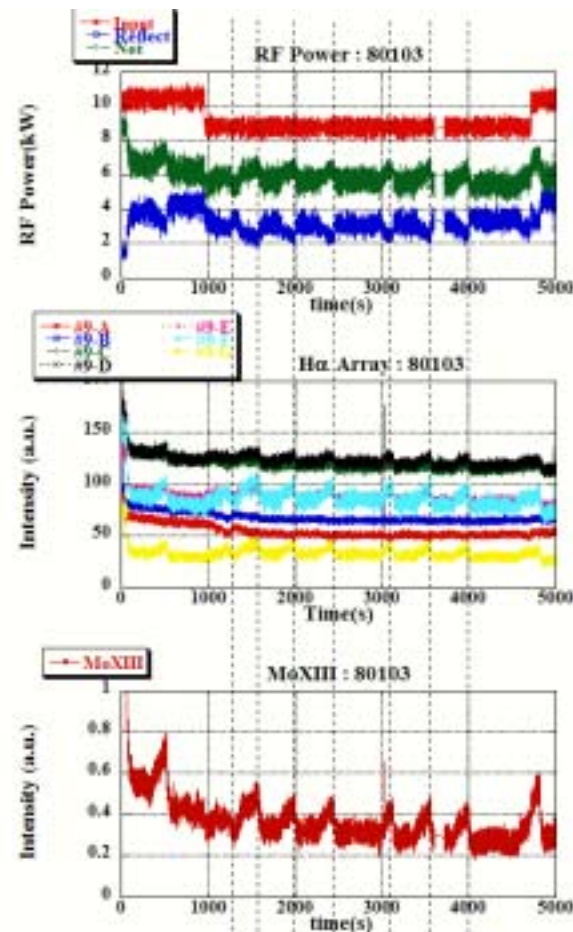
# 超長時間放電

## - 長い周期の振動現象 -

- 放電中に数百秒周期の振動現象が観測された
- 振動が見られるのはRFの反射パワー, 弱磁場側の $H\alpha$ 線強度,  $Mo$ 発光強度, プラズマ電流等
- 詳細な現象や原因等は現在のところ調査中



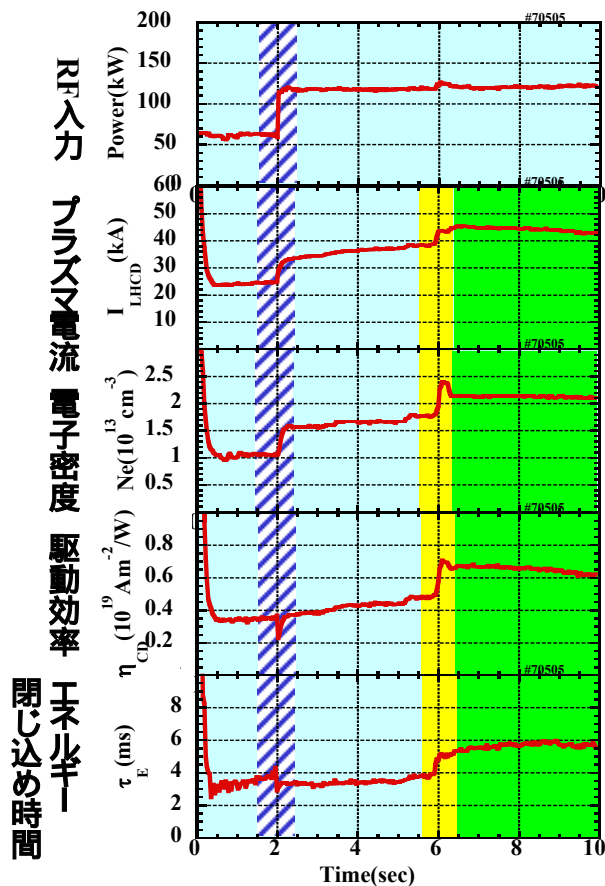
Ha線観測視線



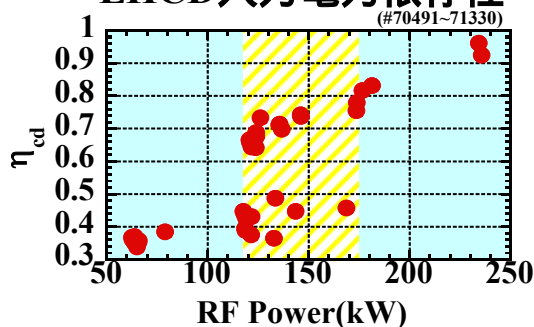
# 高性能プラズマ: ECD mode

## - 典型的な放電波形 -

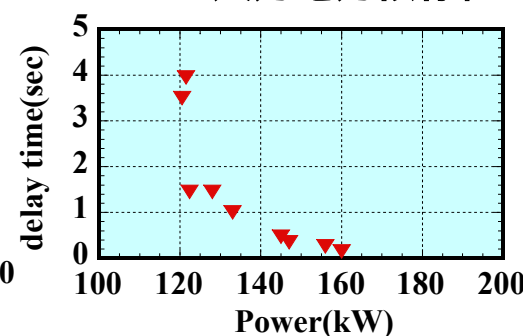
### ECD mode遷移時の典型波形



### 遷移のための LHCD入力電力依存性



### 遷移までの遅延時間の LHCD入力電力依存性

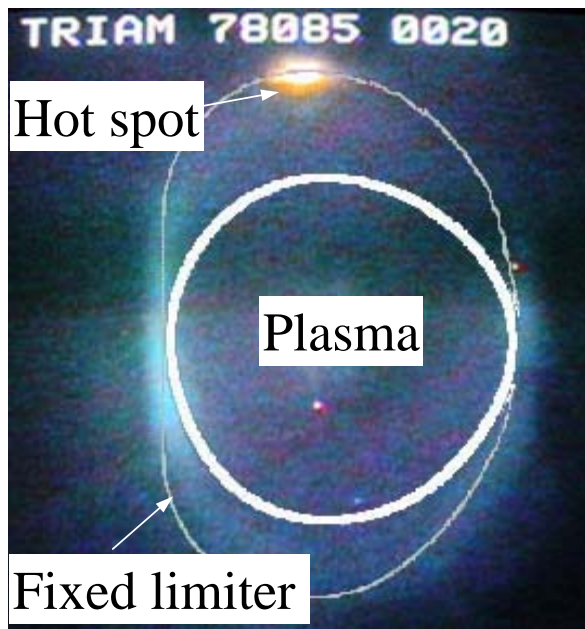


### Enhanced Current Drive mode (ECD mode)

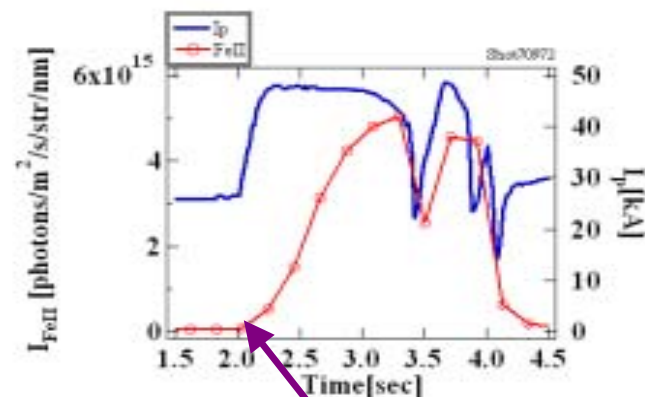
LHCDの入力電力に或る閾値( ~ 130kW)があり、その閾値を超えて電流駆動を行うと、或る遅延時間を持って自発的に電流駆動効率、エネルギー閉じ込め時間が改善される放電

# 高性能プラズマ: ECD mode

## - ステンレスの溶損による停止 -



真空容器上部  
(ステンレス)  
の溶損跡



金属不純物が  
ECD遷移に伴い  
急激に増加

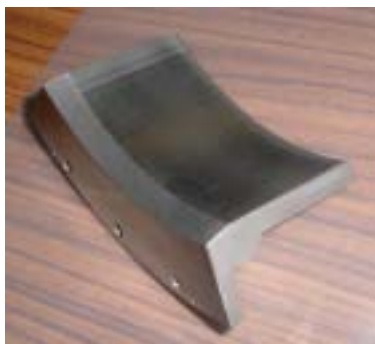
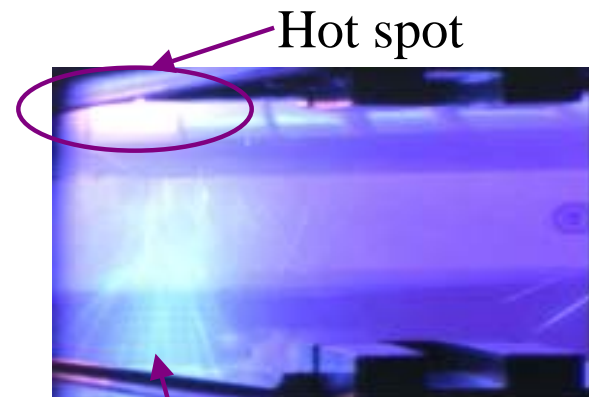
MoリミターのHot spot  
(ECD180kW放電)

金属不純物のプラズマへの混入は放射損失、電流駆動効率の低下  
などの悪影響を引き起こす

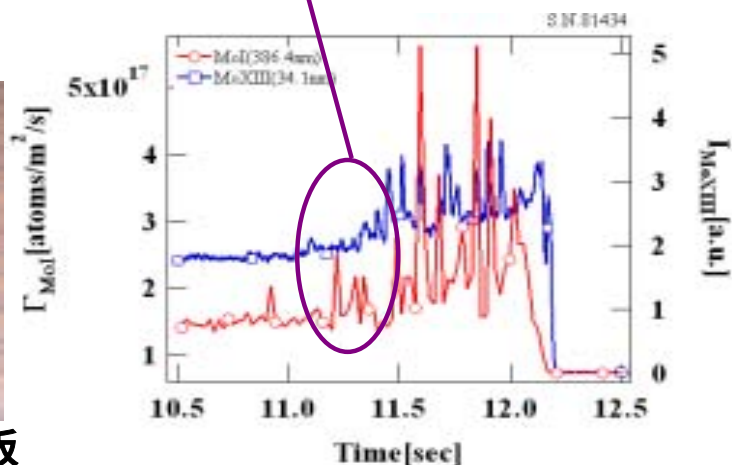
# 高性能プラズマ : ECD mode

## - 保護板を取り付けたがモリブデンが発生 -

- 真空容器を保護するためのモリブデン製の保護板を設置
- 放電終了前にモリブデンのラインにスパイクが観測された
- 可動リミターを撮影しているCCDカメラの映像に火花
- 発生原因等の究明が必要



モリブデン製真空容器保護板



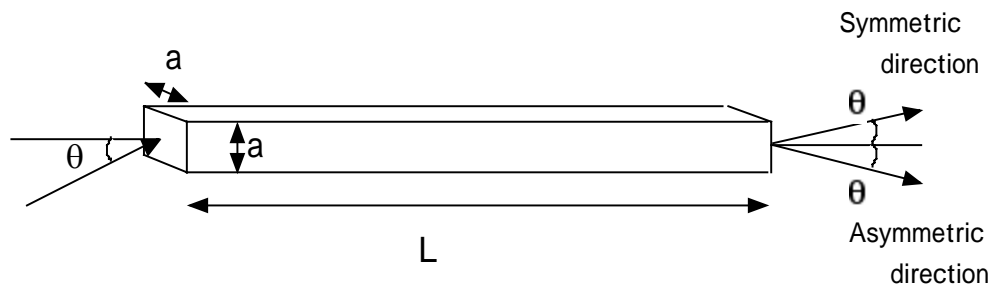


# 電流密度分布制御：ECCD実験

## - 方形アンテナを用いた入射角制御システム -



170GHz Gyrotron



旧アンテナ(上)と新アンテナ(下)

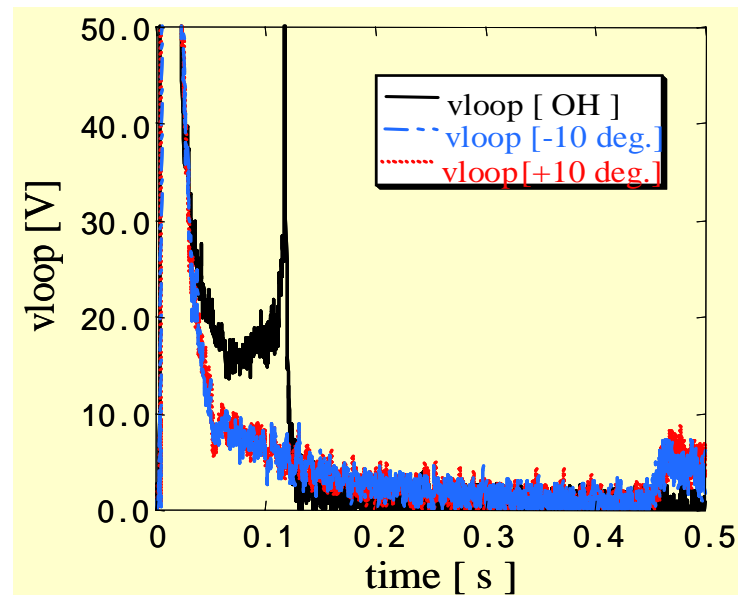
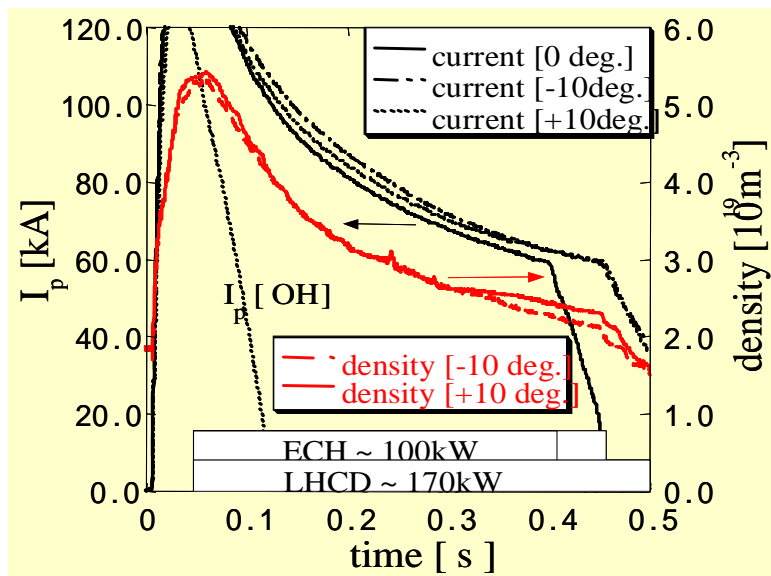


新アンテナでは磁場に対して斜めに入射するために方形コルゲート導波管を採用している。



# 電流密度分布制御: ECCD実験

## - 初期実験結果 -



方形コルゲート導波管とMOUを組み合わせたRemote Steering Antennaシステムが世界で初めて実機の導入されて、プラズマへの入射に成功。ただし、電流駆動効果は今のところ確認されていない。

# 電流密度分布制御： ニューラルネットワーク(NN)によるLHCD位相制御

---

## 目的

- ECDプラズマの高性能化及び高性能状態の維持

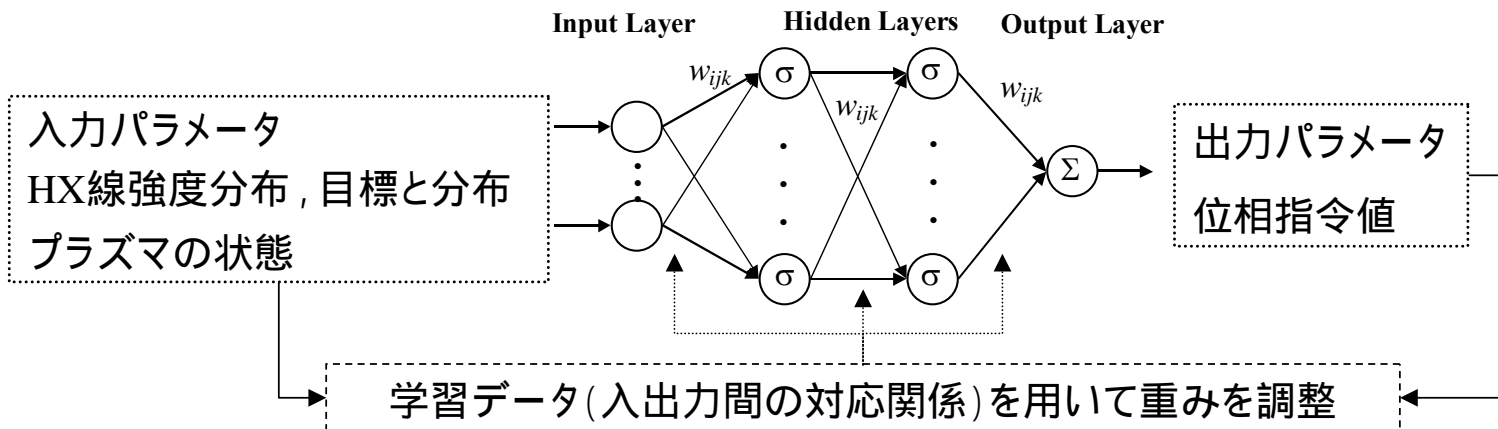
## 概要

- 8.2GHz LHCD(CD)を用いて電流駆動が行われているプラズマに8.2GHz LHCD(PC)を印加し, その位相を制御することにより電流密度分布の制御を行う
- 電流密度分布はHX線の径方向分布に反映されているとし, これをモニターとして使用する
- HX線の径方向分布と位相の関係をニューラルネットワークにより学習し, 位相の目標値を決定する

# 電流密度分布制御：NNによるLHCD位相制御

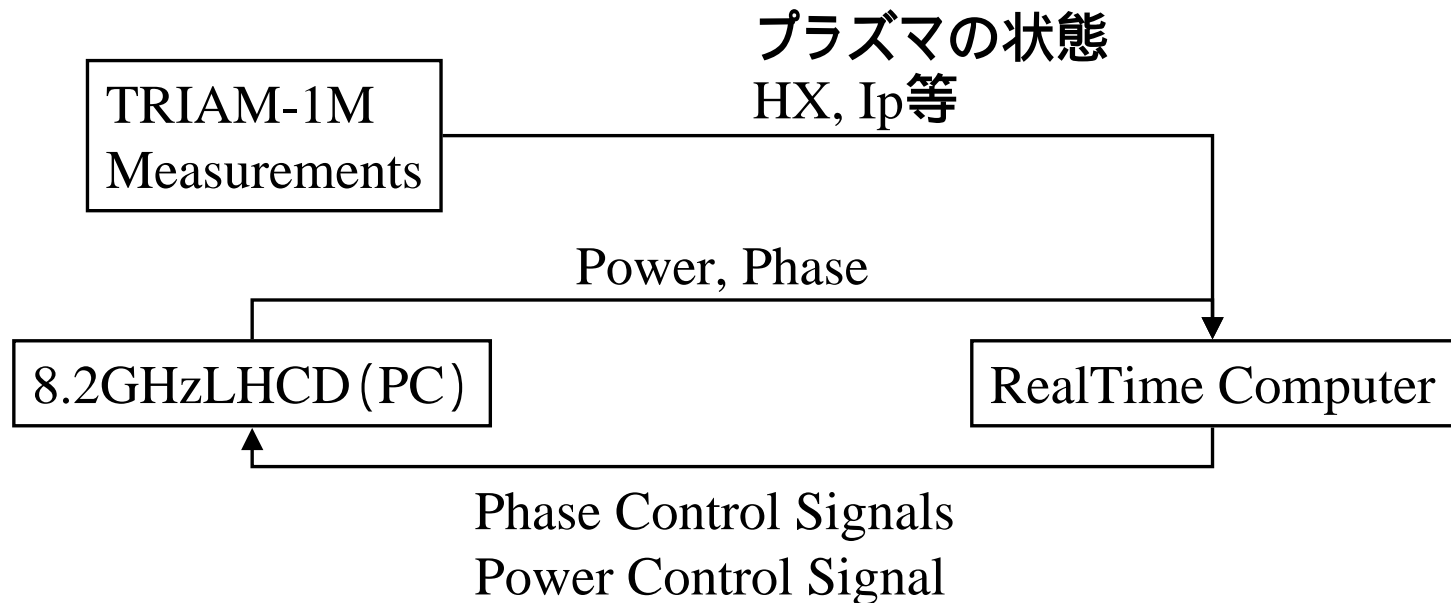
## - ニューラルネットワーク -

- ニューラルネットワーク
  - 神経回路網をモデル化し, 脳で行っている柔軟な情報処理を実現
    - “学習”により正しい答えを出力する
    - 解析的に陽に表せない入出力関係も容易に実現できる
- ニューラルネットワークのトカマクプラズマに対する応用例
  - ディスラプション予測
  - 平衡量, 密度分布等の同定等



# 電流密度分布制御：NNによるLHCD位相制御

## - 実験装置概要 -



Step 1: 設定値と位相との関係, 位相駆動速度の測定  $24^\circ/\text{s}$  程度が最高

Step 2: 学習データ収集 来期の実験で実施予定

HX線の径方向分布とLHCDのパワー, 位相との関係を計測,  
位相の変化速度とプラズマの反応速度の調査

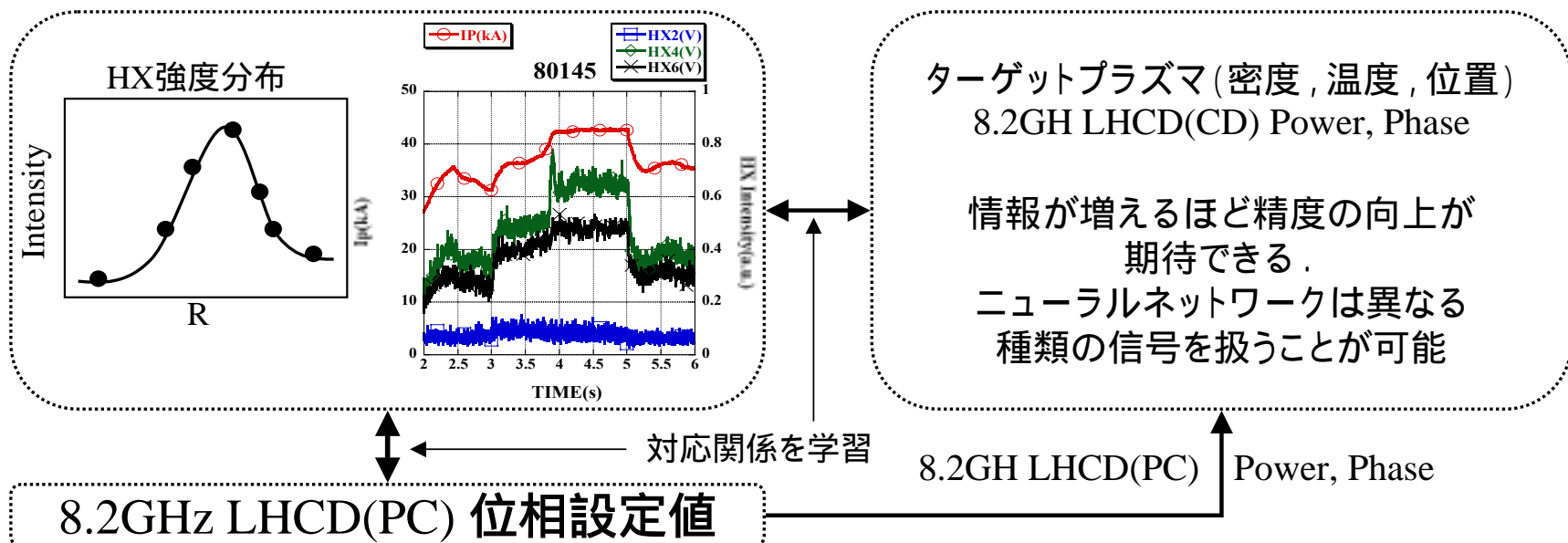
Step 3: 分布制御実験 来期の実験で実施予定

# 電流密度分布制御：NNによるLHCD位相制御

## - Step 2: 学習データ -

### • 学習データ収集

- HX径方向分布と位相設定値との相関に関するデータを収集
- プラズマのリアクションはターゲットプラズマの状態に依存すると考えられるので入力する情報を増やすことにより精度の向上が期待できる
- 位相を変えることにより反射の状況が変わることが予想される。これは電流密度分布に影響を及ぼす可能性があるため学習データに含める

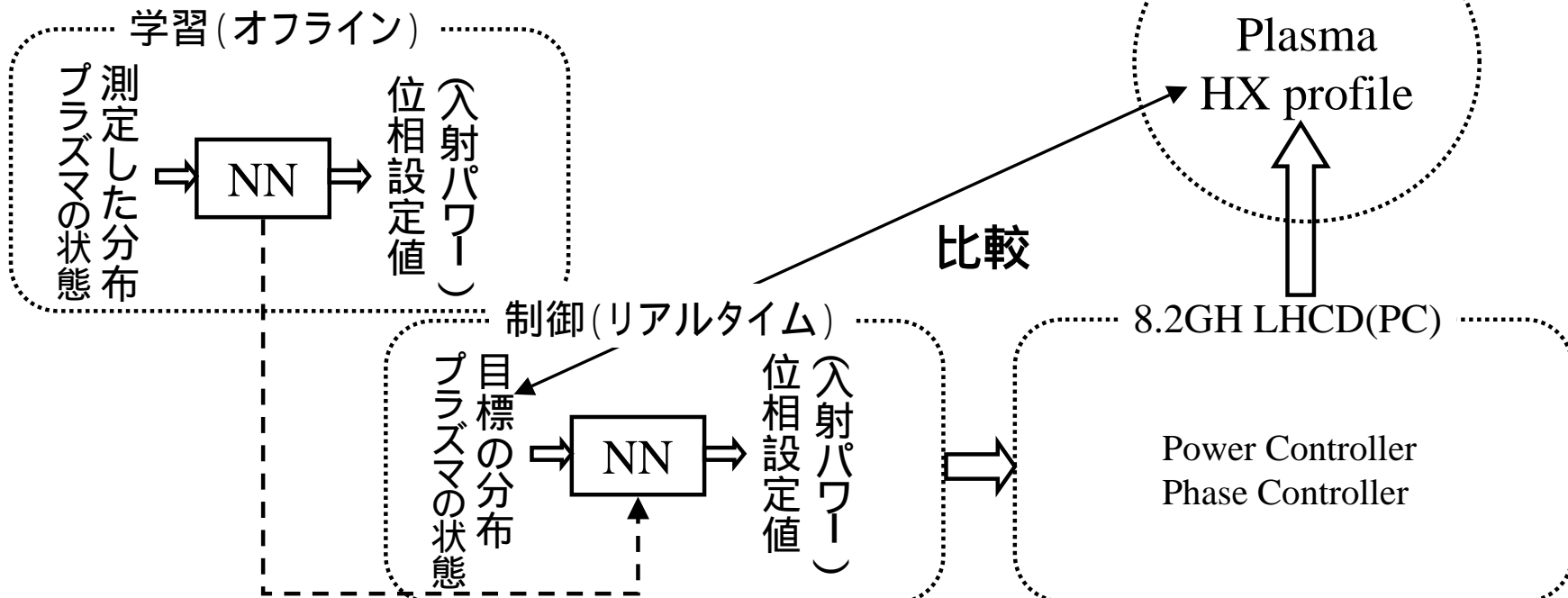


# 電流密度分布制御：NNによるLHCD位相制御

## - Step 3: 制御信号の決定 -

### • 位相目標値の決定

- HX径方向分布の目標値を設定
- ニューラルネットワークにより位相設定値を導出
- 指令値を出力し, 位相を変える
- 一定時間経過後に目標値とHX径方向分布を比較



## まとめ

- トカマクの定常化のための長時間制御研究  
プラズマ位置形状制御, 粒子・熱制御
  - 5時間以上の安定した放電を達成
- プラズマ・壁相互作用研究
  - 冷却効率の向上により真空容器温度上昇を抑制, 不純物を低減
  - 再堆積層の実時間計測
- 高性能プラズマの長時間化研究
  - 高電流駆動効率プラズマの停止原因の究明
- 電流駆動
  - 方形アンテナを用いて入射角を制御するECCD実験を開始
  - ニューラルネットワークを用いたLHCD位相制御による電流密度分布制御を計画