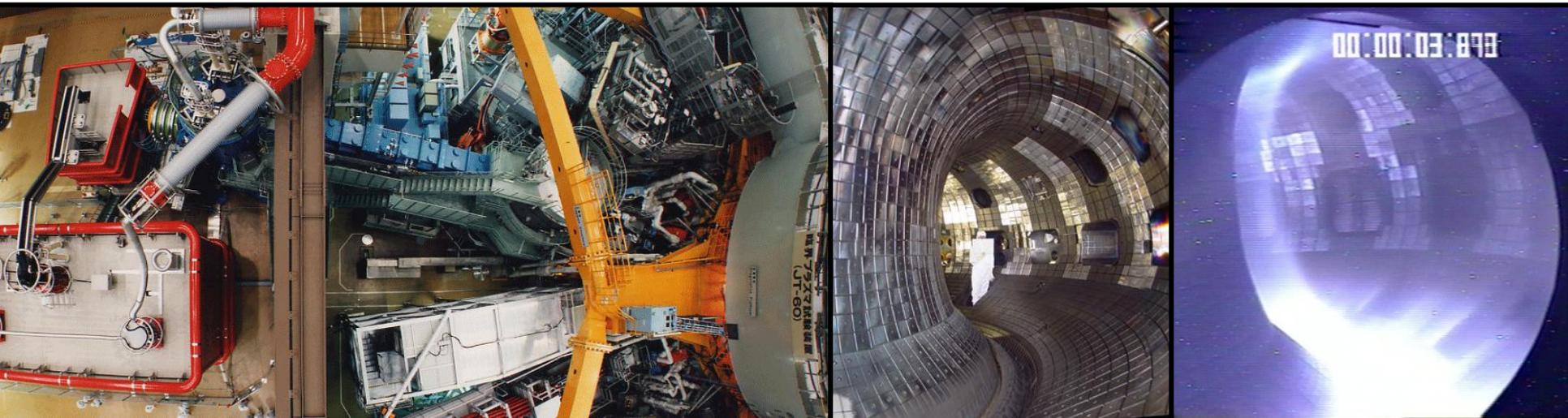


JT-60におけるプラズマ加熱と制御

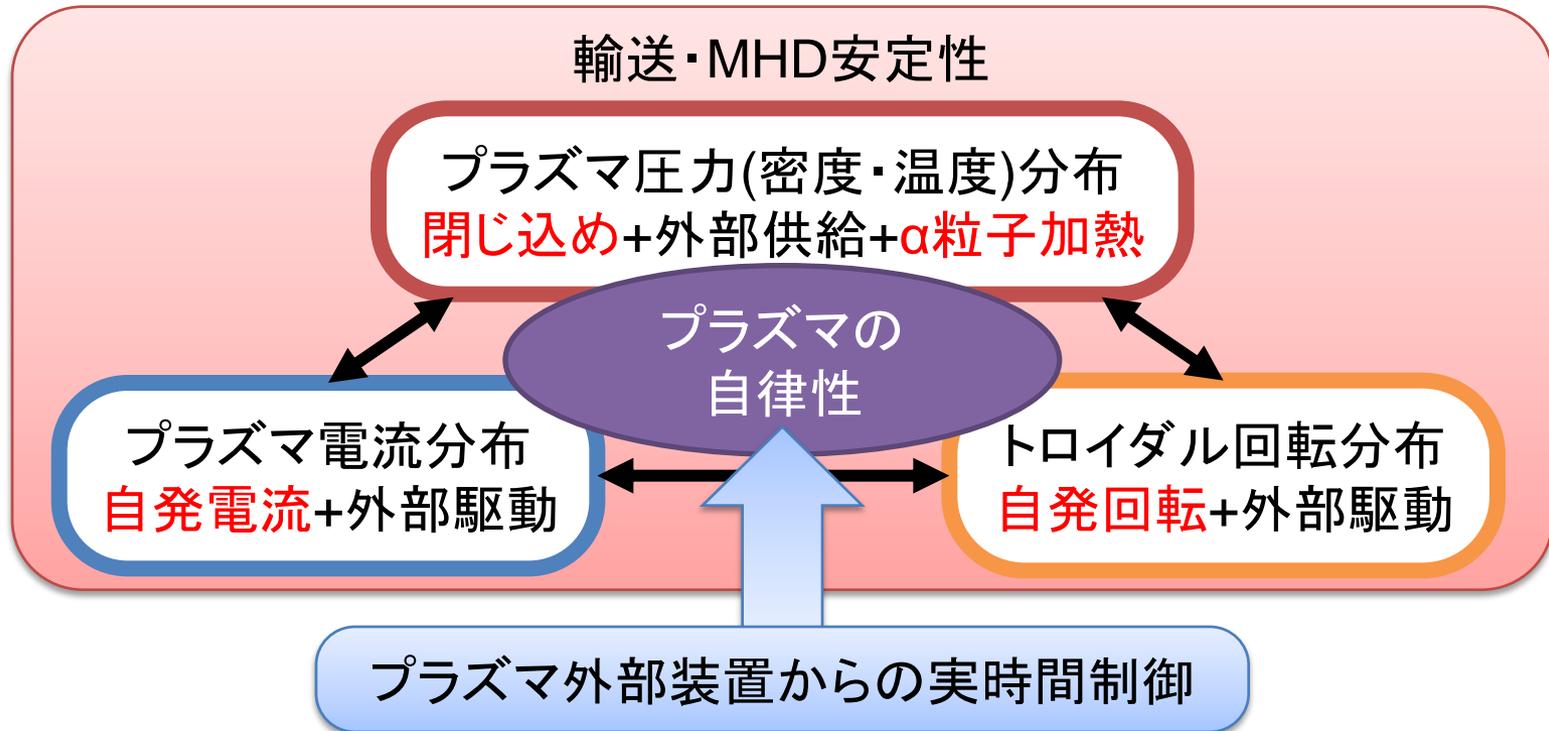
原子力機構 小島有志、小林貴之、吉田麻衣子、諫山明彦、
JT-60チーム

平成22年3月10日 第13回若手科学者によるプラズマ研究会

- 概要
- NBIと荷電交換分光計測を用いた実時間イオン温度勾配制御
- 変調ECCDを用いた実時間NTM抑制制御
- まとめ



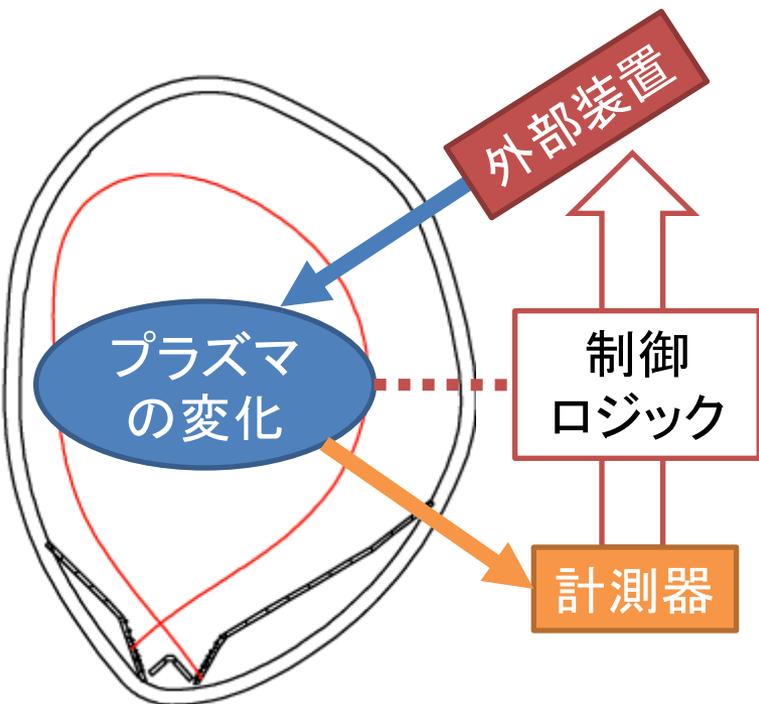
概要



- プラズマの閉じ込め(輸送)や安定性(MHD安定性)はプラズマの圧力・電流・回転分布に大きく左右される。
- 圧力・電流・回転分布は互いに密接に関連しているため、プラズマが自律的な振る舞いを示す。

プラズマ外部の装置からプラズマを制御し、不安定性を回避・抑制しつつ、閉じ込めの良い状態を維持する手法が必要 ⇒ 実時間制御の研究開発

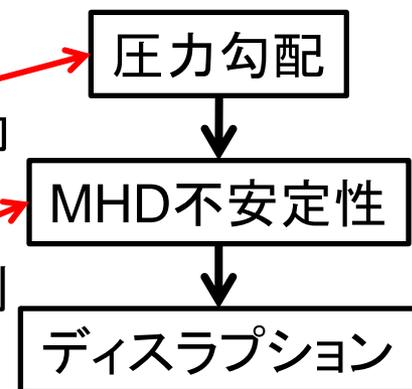
JT-60の実時間制御



プラズマ	計測器	外部装置
密度	干渉計	ガス注入
電子温度/分布	ECE	NBI/ECRF
イオン温度勾配	CXRS	NBI
回転		
蓄積エネルギー	反磁性ループ	NBI
電流分布	MSE	LHRF
中性子発生量	中性子計測	NBI
不安定性抑制	ECE	ECRF
	磁気プローブ	ECRF

今回は、

- 計測器 (CXRS) と制御ロジックの開発により進展した
イオン温度勾配制御
M. Yoshida et al., Fusion Eng. Des. 84 (2009) 2206.
 - 制御ロジックと加熱装置 (ECRF) の開発により進展した
不安定性 (NTM) 抑制
A. Isayama et al., Nucl. Fusion 49 (2009) 055006.
- について報告する。



NBIと荷電交換分光計測(CXRS)による イオン温度勾配制御

JT-60のNBI装置

正イオンNBI:

~85 keV, 11ユニット×2MW

- 接線入射

Co (Ip方向): 2 ユニット

Ctr (反Ip方向): 2 ユニット

⇒ 回転制御

- 垂直入射

中心加熱: 5 ユニット (偶数番号)

周辺加熱: 2 ユニット (奇数番号)

⇒ イオン温度制御

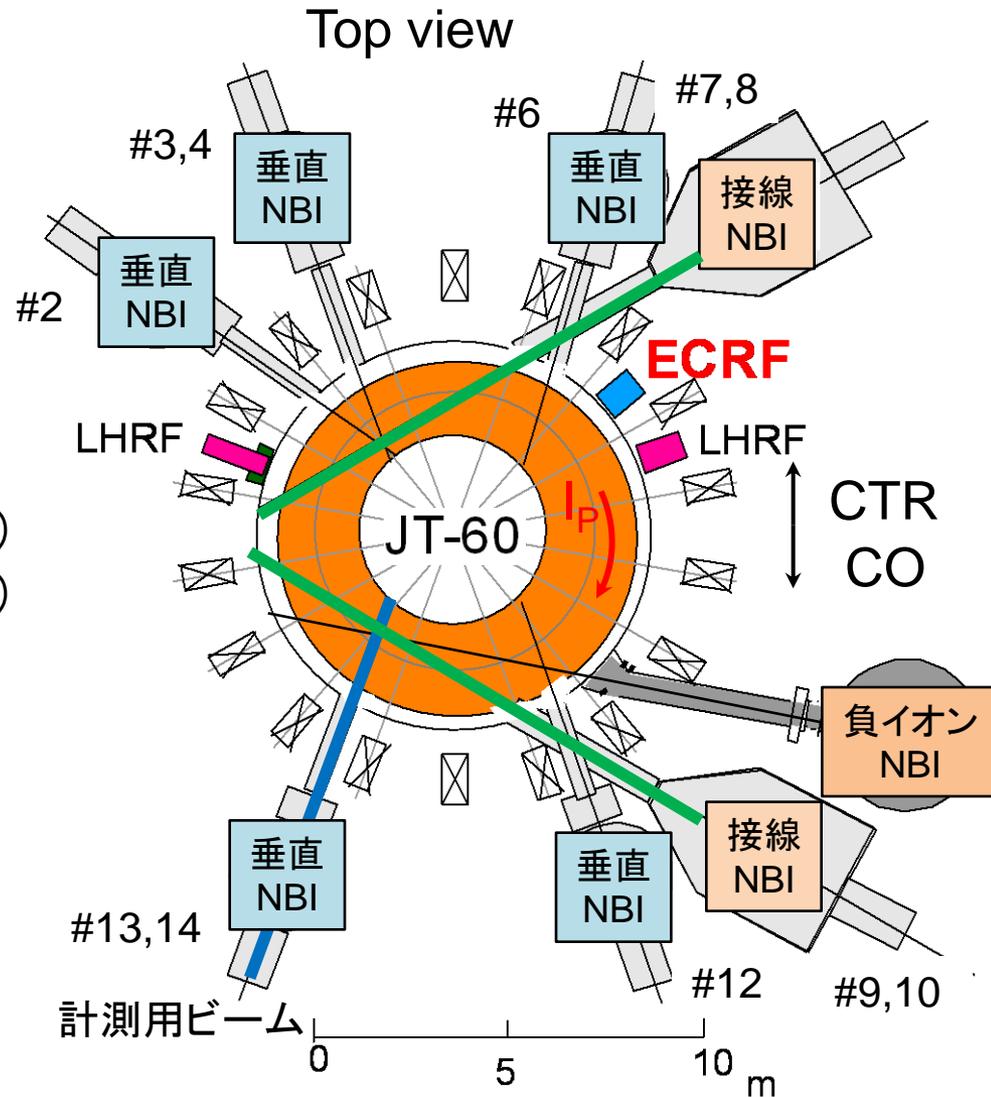
負イオンNBI:

~500keV, 2イオン源×5MW

- 接線入射

Co (Ip方向)

⇒ プラズマ電流制御 (JT-60SA)



正イオンNBIと荷電交換分光計測を用いて、イオン温度勾配の実時間制御を行った。

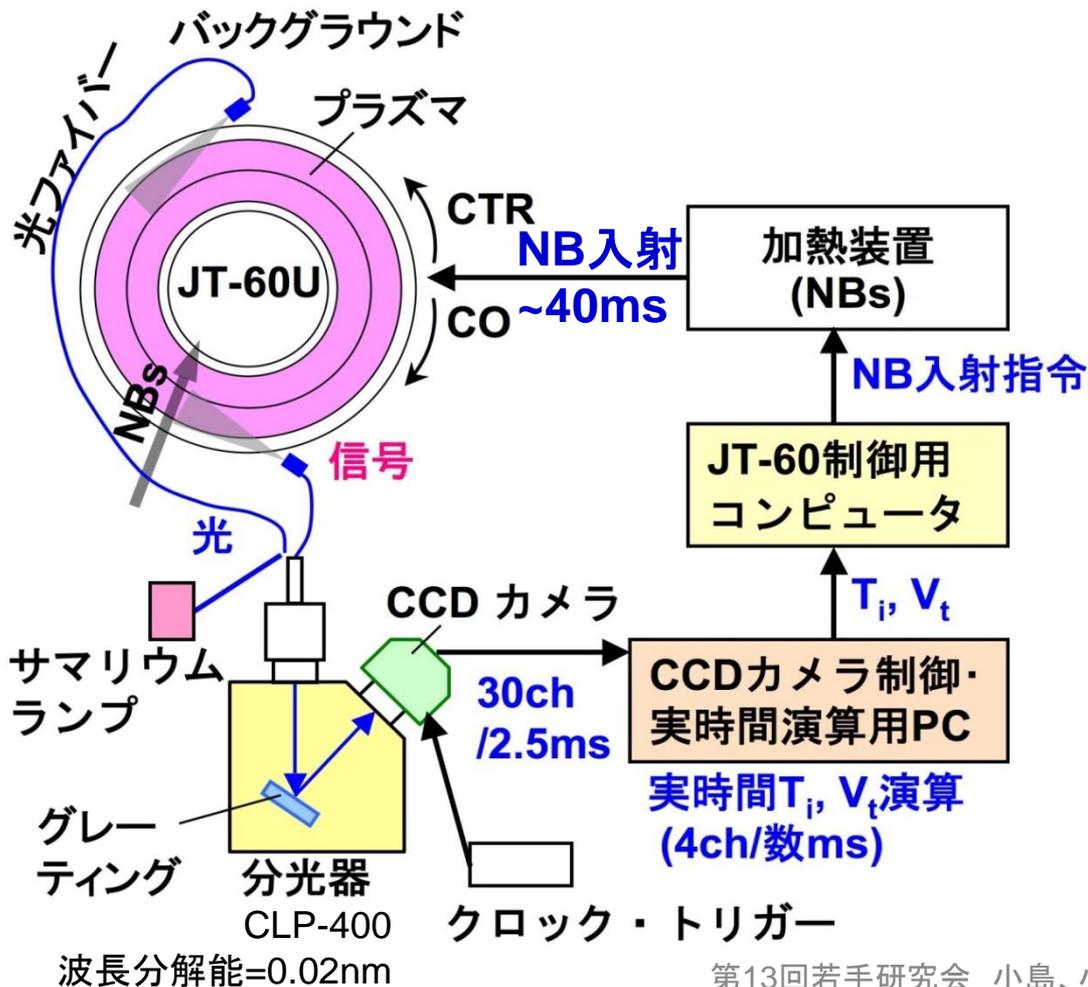
高速な荷電交換分光計測を開発した。

荷電交換分光計測の低時間分解能~16msがこれまでの課題であった。

高スループットな分光器 + 高速CCDカメラ + 多チャンネル計測

= 高S/N + 高時間分解能 + 分布制御性

を用いて、PID制御を行った ⇒ 広いパラメータ範囲での制御を実現させる。



高時間分解能

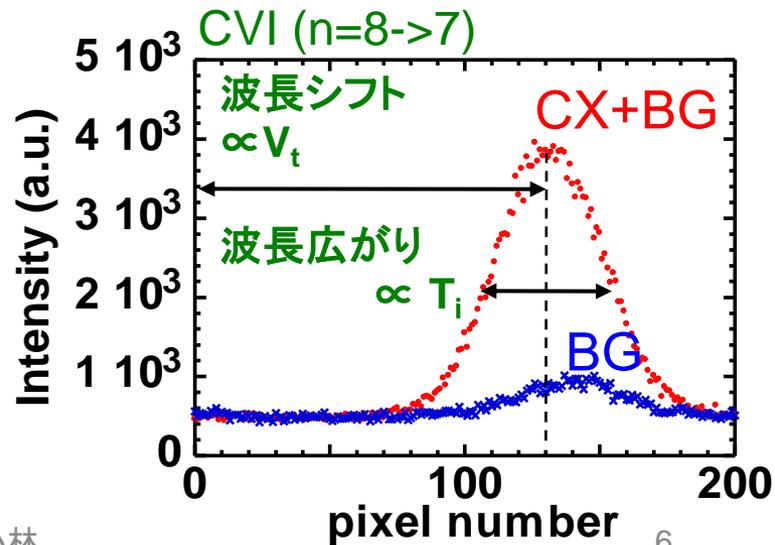
$$2.5 \text{ ms} \ll \tau_E$$

高S/N

$$\text{誤差 } T_i, V_t \sim 5\%$$

空間分解能

$$\sim 3.5 \text{ cm [30ch]}$$



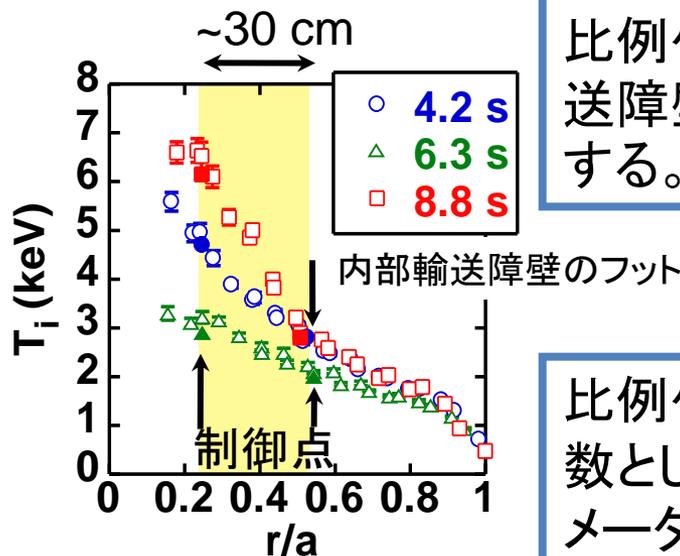
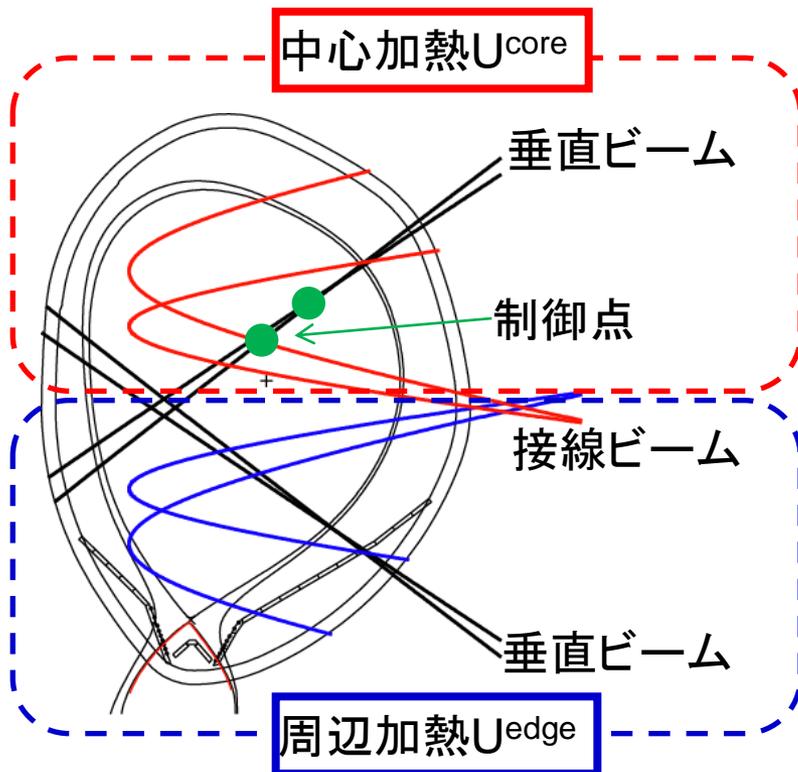
イオン温度勾配の制御手法

二点間の ΔT_i とリファレンスとの差で
中心加熱(Core)と周辺加熱(Edge)のNBI入射ユニット数をPID制御する。

$$U^{core} = U_{offset}^{core} + G_P^{core} \Delta T_d(t) + G_D^{core} \frac{\Delta T_d(t) - \Delta T_d(t - \Delta t)}{\Delta t} + G_I^{core} \sum \Delta T_d(t) \Delta t$$

NB入射ユニット数

比例ゲイン リファレンスと実測の差 微分ゲイン 積分ゲイン



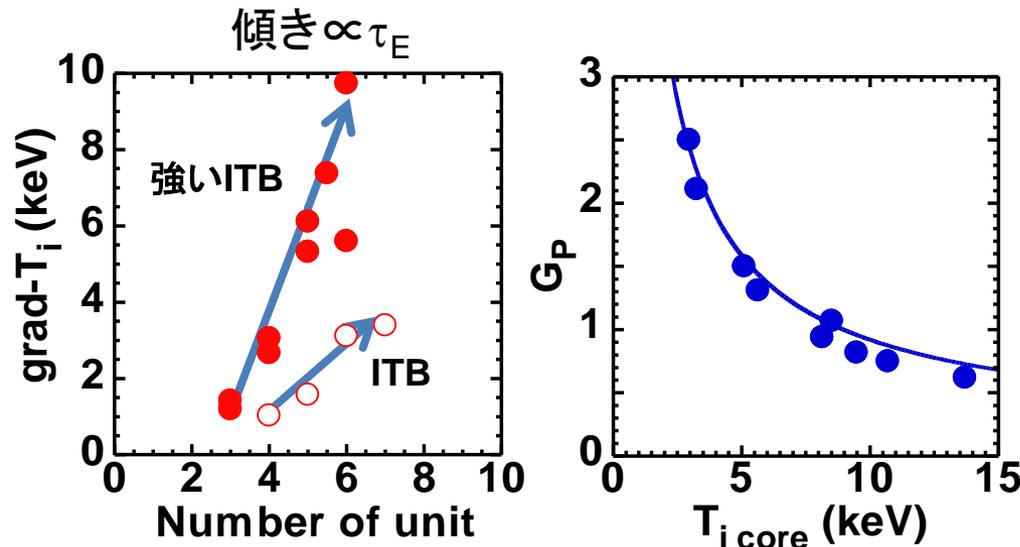
比例ゲインが内部輸送障壁の強さに依存する。

比例ゲインを T_i の関数として、広いパラメータ範囲に適用させる。

比例ゲインは実際のプラズマを用いて調整した。

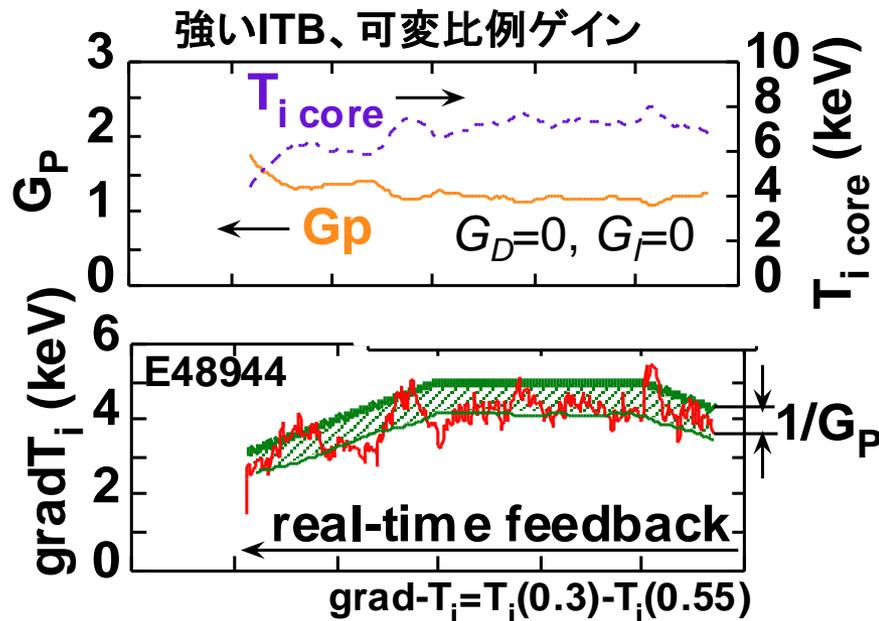
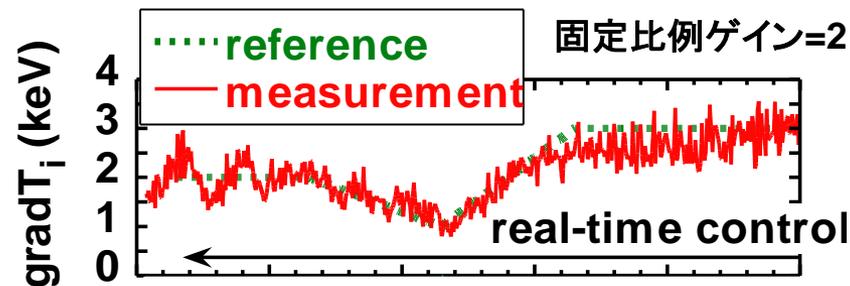
比例ゲインを T_i の関数とした制御ロジックを開発した。

強い内部輸送障壁のあるプラズマで、入射ユニット数と ΔT_i の関係を
得て、比例ゲインの T_i 依存性を調べた。



比例ゲインは中心部 T_i ($r/a \sim 0.3$)の関数として近似できる。

$$\rightarrow G_P'(1 + A T_{i\text{ core}}^B)$$

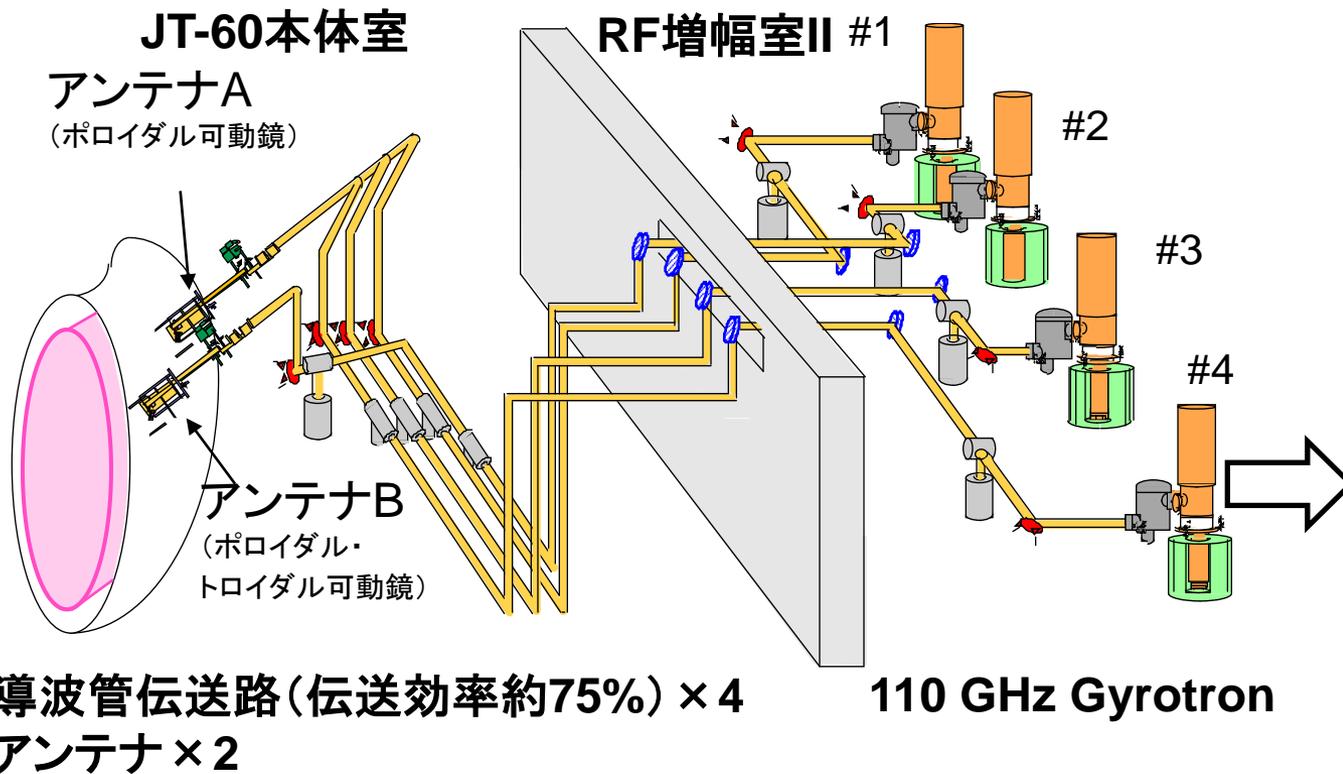


非線形的な応答特性を調べて制御ゲインを最適化したイオン温度勾配制御を実証し、 $1/G_P$ 程度の追従性で内部輸送障壁の強さの制御に成功した。

ECRFと磁気プローブによる NTM抑制

JT-60の高周波加熱装置

ECRF装置 (110 GHz, 1MW-5秒 × 4系統)



- 半径方向の局所領域(半値幅~10cm)の電子加熱/電流駆動
- 広い密度領域で高効率電子加熱

- 着火アシスト、ディスラプション回避、ELM制御、RF壁洗浄
- NTM制御

プラズマ制御ツールとしても有用

ECCDを用いたNTM抑制

新古典ティアリングモード (NTM)

- 正磁気シアの高 β プラズマで発生
ITER Standard and Hybrid scenarios
- ベータ値の到達値を制限 $\beta_N < \beta_N^{ideal}$
- ディスラプションを引き起こす要因の一つ

⇒ **NTM 制御** が重要: $m/n=3/2$ and $2/1$

NTM **回避** → 温度勾配制御

NTM **抑制**: ECCD

JT-60UでのECCDを用いたNTM抑制の成果

- 実時間ミラー制御(電流駆動の位置制御)による抑制
- 早期ECCDによる抑制
- **変調ECCDによる抑制**

⇒ NTMの周波数を上回る高速変調入射の技術開発と制御ロジック開発の進展により、NTM信号に同期変調させたECCDが実現した。

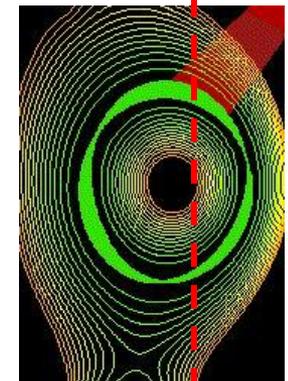
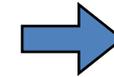
m=3 NTM抑制のイメージ

磁気島の中に電流駆動

磁気島が消滅

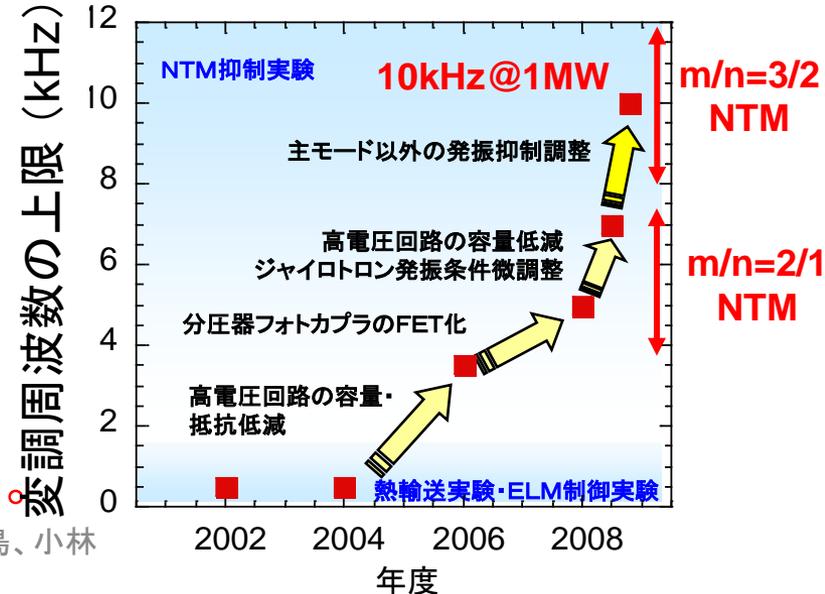


ECCD



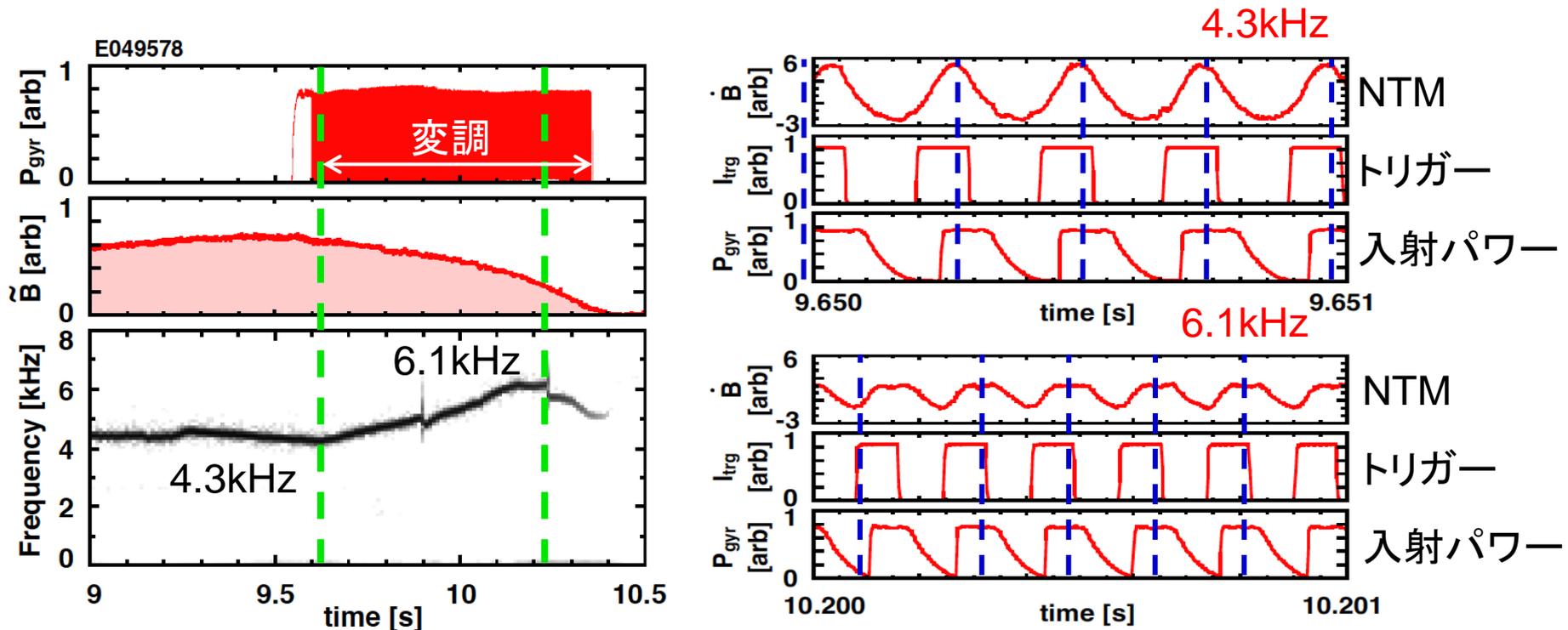
共鳴層

高速変調技術開発の進展



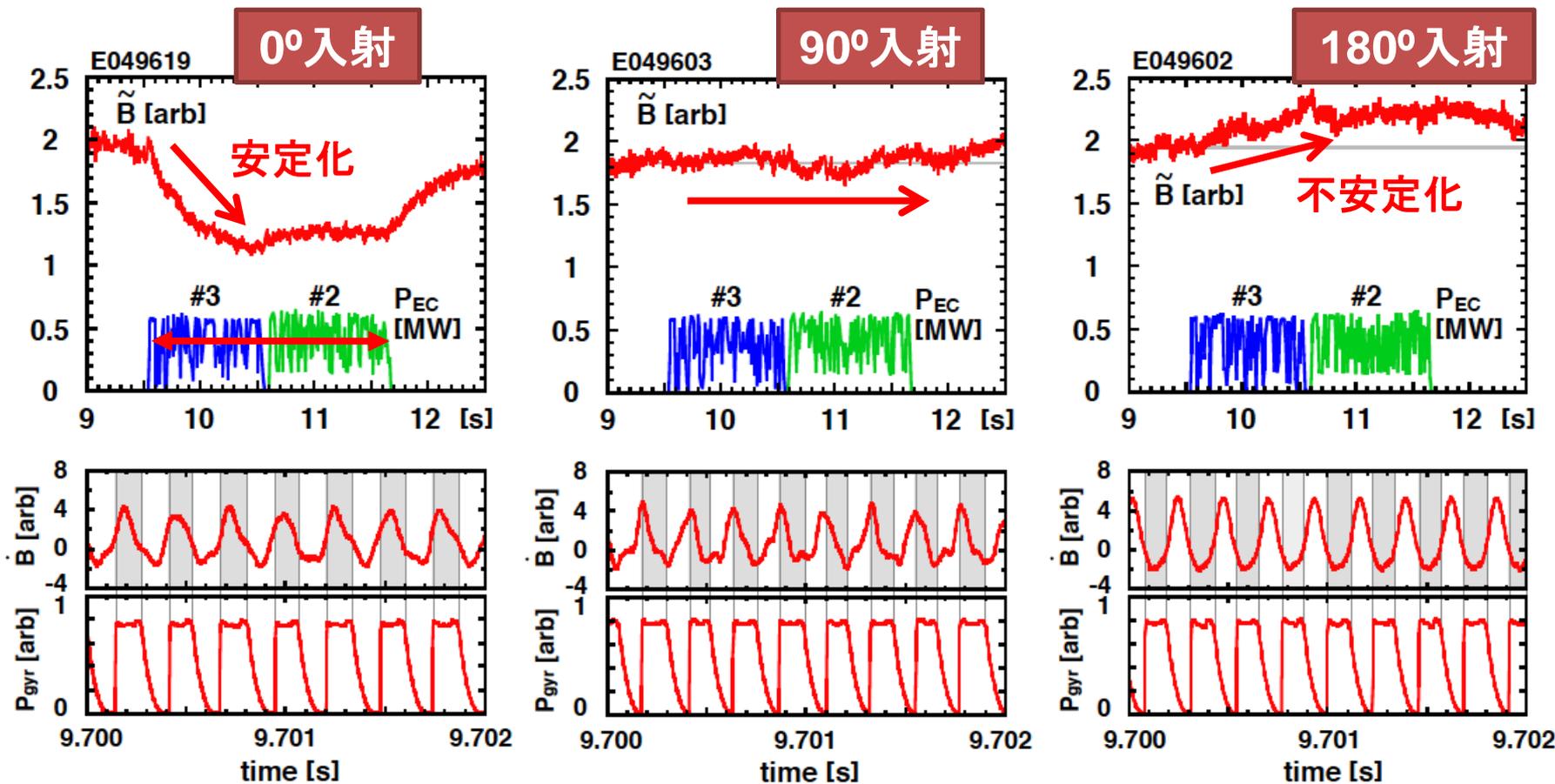
NTM周波数の自動追跡に成功した。

- 磁気島の中心にECCDする事がNTM抑制に効率的
⇒ 磁気プローブでNTMの位相を計測し、ECCD入射タイミングを同期させる
- NTM周波数(～プラズマ回転周波数)は時間的に変化する
⇒ 入射タイミング制御には周波数追跡が必須であり、ジャイロトロン発振条件を
実時間で制御してNTMに同期させた



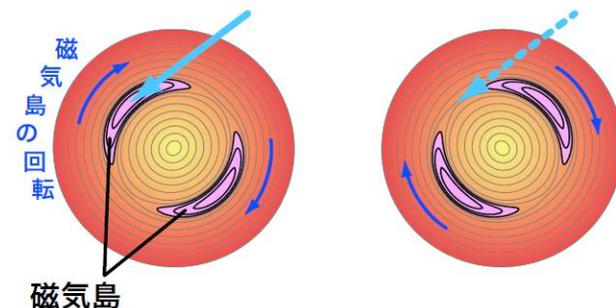
- NTM周波数が4.3kHzから6.1kHzに変化したことに応じて、トリガー波形 (I_{trig})とジャイロトロン出力(P_{gyr})の遅れを実時間で補正することに成功。

NTM抑制効果は dB/dt と ECCDの位相差に大きく影響される



周波数自動追跡変調ECCDによるNTMの安定化・不安定化を実証した。

変調ECCDによるNTM抑制を効率良くするには、NTMに対する変調ECCDの位相制御が重要。



まとめとJT-60SAに向けた課題

高時間分解能を有する荷電交換分光計測を開発し、それを用いてイオン温度勾配の実時間制御を行った。

⇒加熱パワーに対する非線形な応答性を比例ゲインに反映し、内部輸送障壁の強さの制御に成功した。

ジャイロトロン的高速パワー変調を開発し、磁気プローブ信号と同期してNTM抑制の制御を行った。

⇒NTMの位相とECCDのタイミングが安定化・不安定化に重要である事を実験的に実証した。

