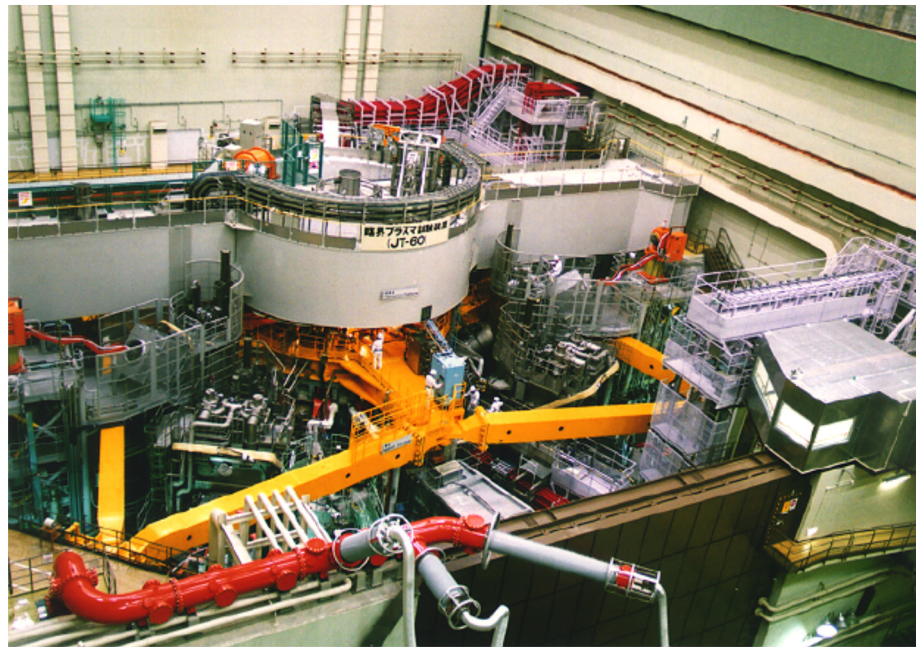




第9回 若手科学者によるプラズマ研究会 2006.03.15-17 那珂
2004.03.15/15:00-15:30 (30min.)

JT-60Uにおける実時間計測と制御

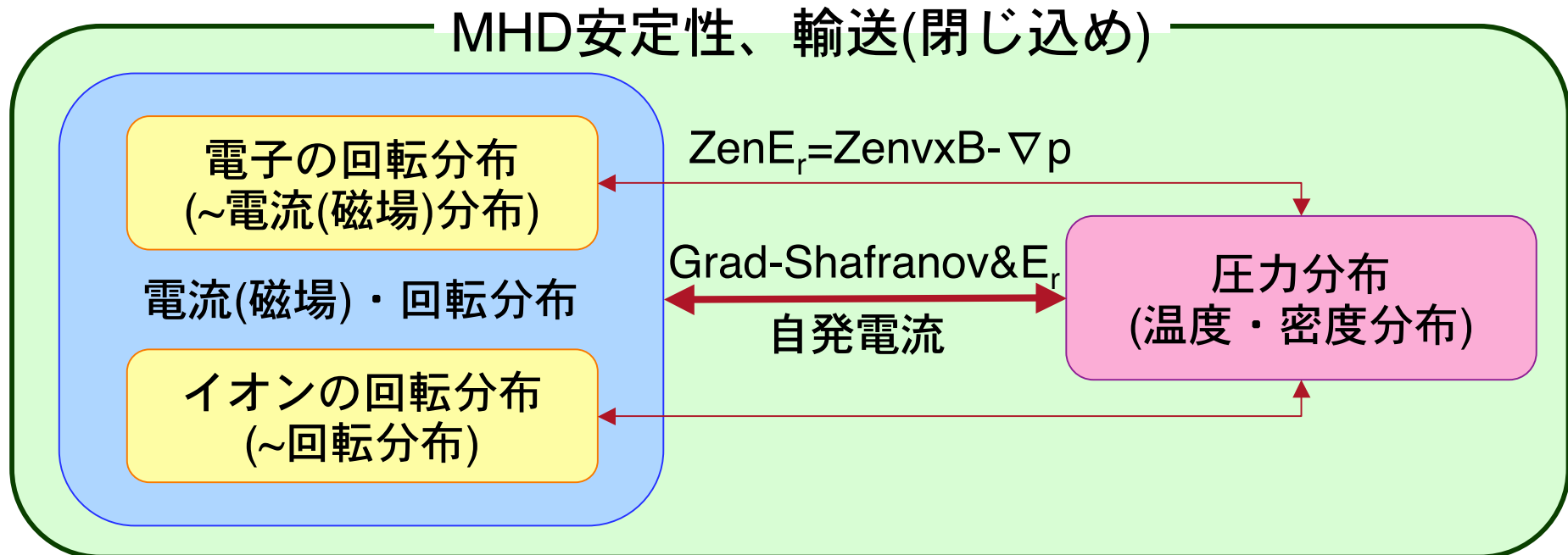


鈴木隆博、JT-60チーム
原子力機構

はじめに

JT-60U

- 電流分布と圧力分布はMHD安定性と輸送を決める

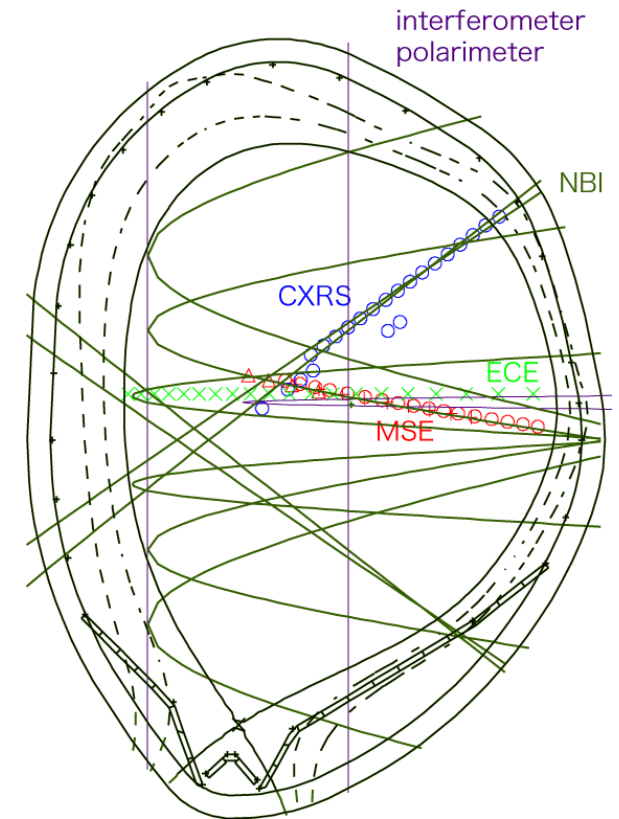


- 実時間制御の必要性
 - ◆ 高い安定性と閉じ込めのために最適な分布
 - ◆ 内部・外部からの擾乱に対しても定常維持
 - ◆ 実験の再現性の向上 (誰でも望むプラズマを作れる ; 職人技の排除)

JT-60Uにおける様々な実時間計測と制御

JT-60U

- 密度制御
 - ◆ 干渉計・偏光計とガスパフ
- 中性子発生率制御
 - ◆ 中性子計測とNB加熱
- 蓄積エネルギー制御
 - ◆ 反磁性蓄積エネルギーとNB加熱
- 電流分布制御
 - ◆ モーショナルシュタルク効果(MSE)と低域混成波電流駆動(LHCD)
- 電子温度・温度勾配制御
 - ◆ ECEとNB加熱
- 新古典テアリングモード(NTM)安定化制御
 - ◆ ECE揺動分布とECCD位置(ECミラー角)
- q分布による条件付き回転制御
 - ◆ MSEとNB運動量入射
- イオン温度・温度勾配・回転制御
 - ◆ 高速CXRSとNB加熱
- etc...



ここでは最近のトピック
(赤字)について話します

本発表の内容

JT-60U

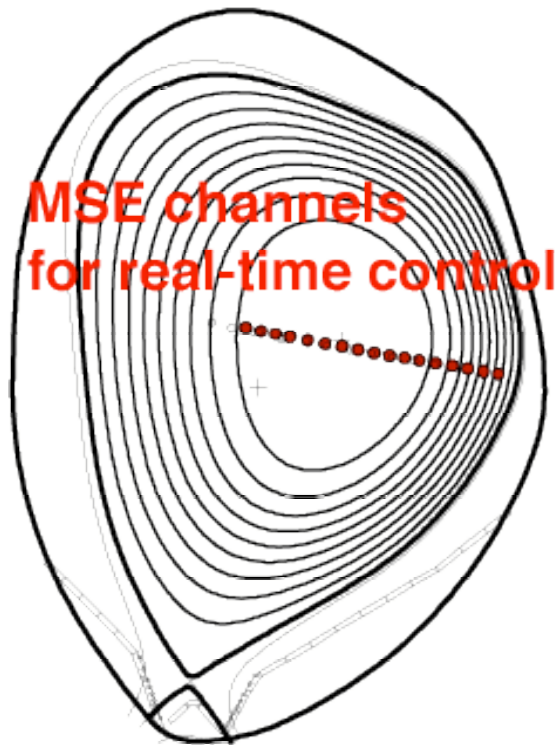
- 実時間安全係数分布制御
- 実時間安全係数分布による条件つき回転制御
- 実時間イオン温度分布測定と制御(計画)
- まとめ

実時間電流分布(安全係数分布)制御

MSE計測を用いた高速な実時間q分布評価手法を開発

JT-60U

MSEは磁場の局所的なピッチ角の分布 $\gamma(\rho)$ を測定



- 平衡を解かずに最外殻磁気面のみを求め
ることで高速に形状・配位を計算;

$$R_p, R_{ax}, Z_{ax}, a, \kappa, \delta.$$

- 内部磁気面を巨視量を用いてパラメータ
化

$$R = R_{ax} + \Lambda(\rho) + a \rho \cos(\theta + \delta \sin \theta),$$

$$Z = Z_{ax} + a \rho \kappa \sin \theta,$$

$$\text{with an assumption } \Lambda(\rho) = (R_p - R_{ax}) \rho^2.$$

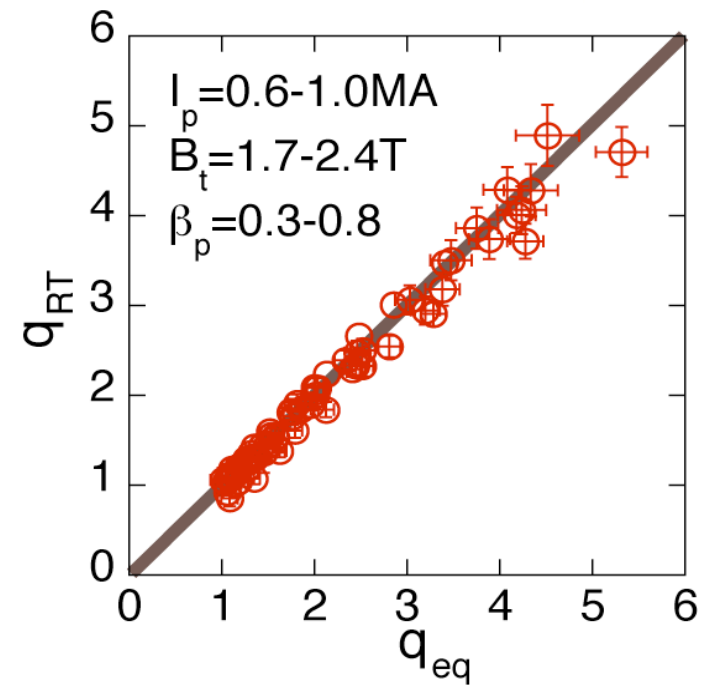
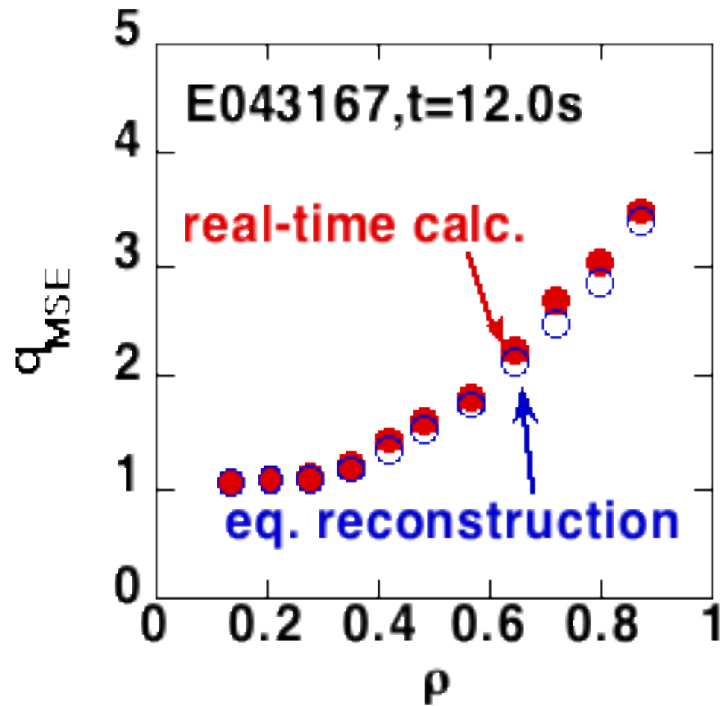
- 非線形連立方程式を解く \Rightarrow 実空間(R,Z)
のMSE計測点を磁気空間(ρ, θ)にマッピン
グし安全係数を評価;

$$q(\rho) = \sqrt{\frac{1 + \kappa^2}{2}} \frac{a \rho}{R_{ax}} \frac{1}{\tan(\gamma(\rho))}$$

- 電流分布 $j(r)$ も得られる

多チャンネルMSEを用いて実時間でq分布を精度よく評価

JT-60U

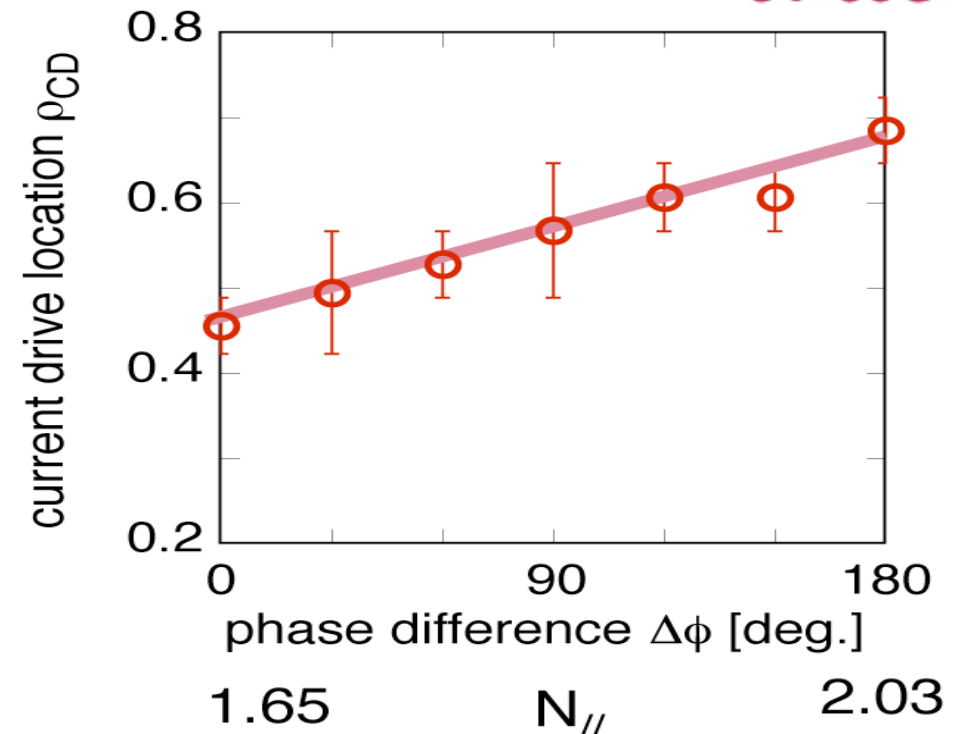
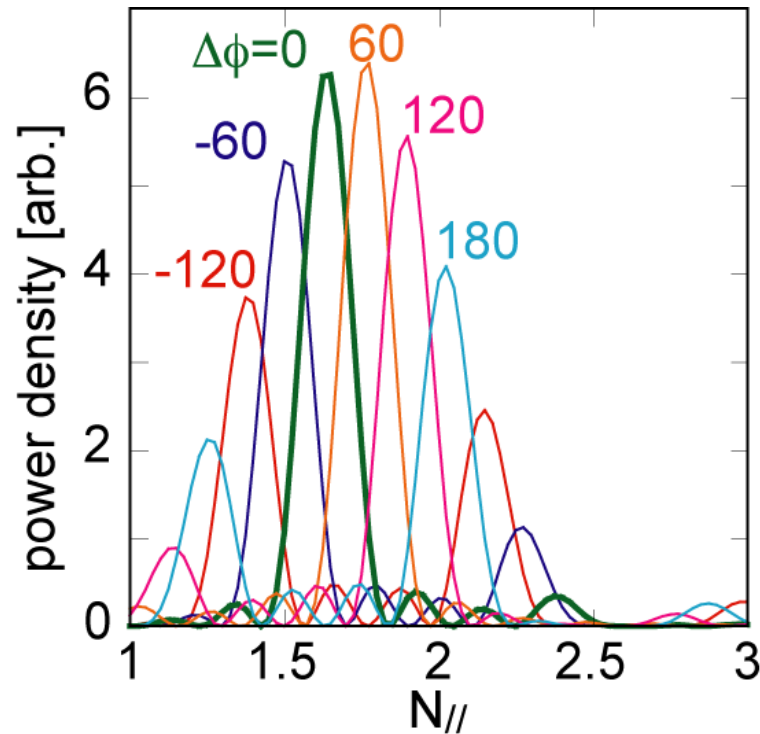


- 実時間q分布計算は高速であり(10ms以内)、MSEを用いた平衡計算(10分程度)の結果と良く一致

- 実時間q分布計算手法は広範囲のプラズマパラメータに適用可能

$N_{//}$ 制御による電流駆動位置の制御

JT-60U

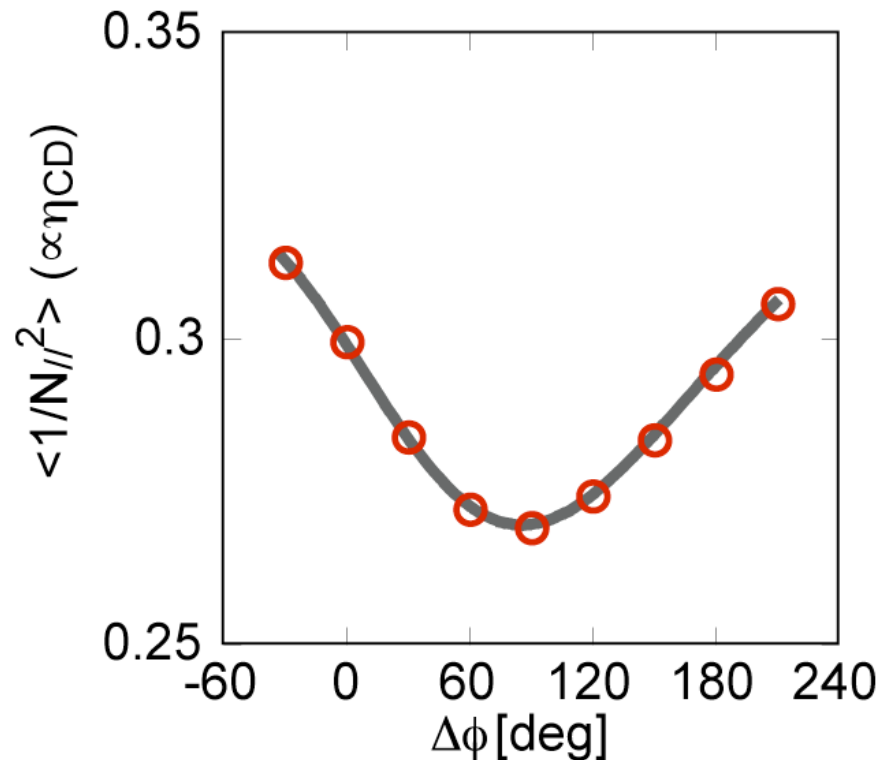


- アンテナモジュール間のLH波位相差 $\Delta\phi$ の制御により $N_{//}$ スペクトルを制御

- $N_{//}$ により電流駆動位置 ρ_{CD} の制御が可能
 - ◆ $q(0)\sim 1$ 正磁気シア
 - ◆ L-mode, low β
 - ◆ NB(2MW)+LH(~ 1 MW)

LH駆動電流を一定にするようにLHパワーを制御

JT-60U

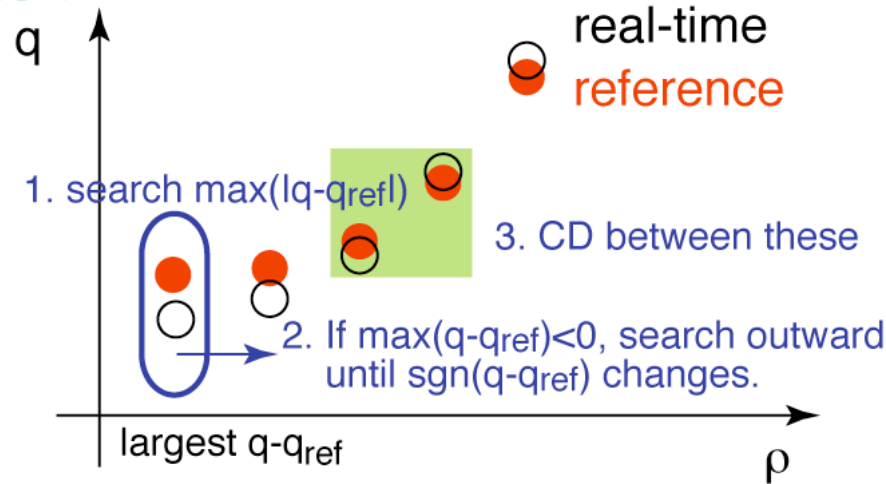


- LH波の電流駆動効率は $\langle 1/N_{||}^2 \rangle$ に比例
 - ◆ M. SEKI *et al.*, Fusion Sci. Tech. **42** (2002) 452.
- LHパワーも制御.
 - ◆ $P_{LH} \propto I_{LH} / \eta_{CD} \propto \langle 1/N_{||}^2 \rangle^{-1}$
 - ◆ P_{LH} は $\pm 10\%$ 程度の変化
 - ◆ n_e, R_p は一定に制御しているため上式では無視
- $\Delta\phi$ により P_{LH} を決定

実時間q分布と参照分布の比較により制御システムは最適な電流駆動位置を決定

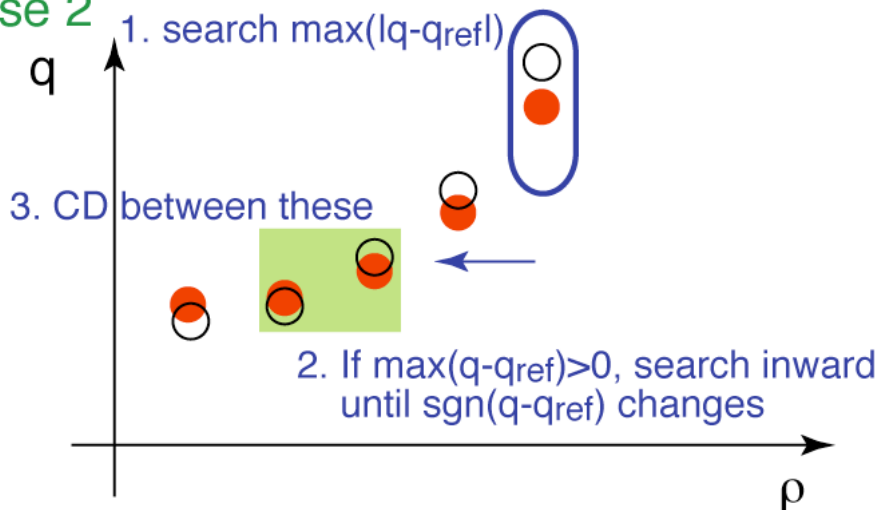
JT-60U

case 1



1. 実時間q分布と参照分布を比較し、残差($q-q_{ref}$)最大位置を探索
2. 最適な電流駆動目標位置 ρ_{ref} を判断
3. 位相差を制御し、電流駆動位置 ρ_{CD} が目標位置に近づくように位相差 $\Delta\phi$ を制御

case 2



$$\frac{d}{dt}(\Delta\phi) = -\alpha(\rho_{CD} - \rho_{ref})$$

α は正定数 :

電流駆動位置が目標位置より外側なら $\Delta\phi$ を減らし電流駆動位置を内側に制御

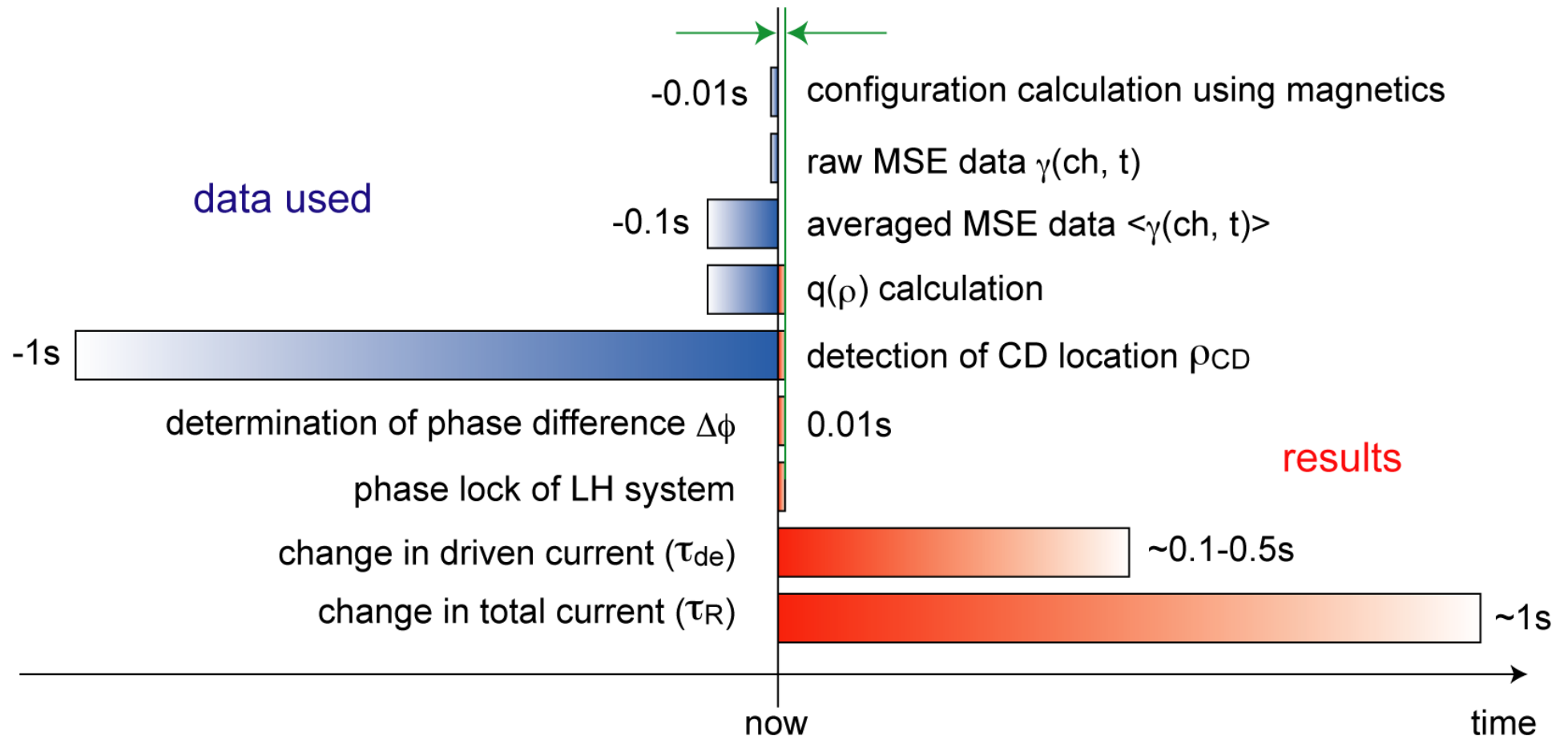
case 3...

1s程度の電流分布の応答時間に対し、10msの周期で制御

JT-60U

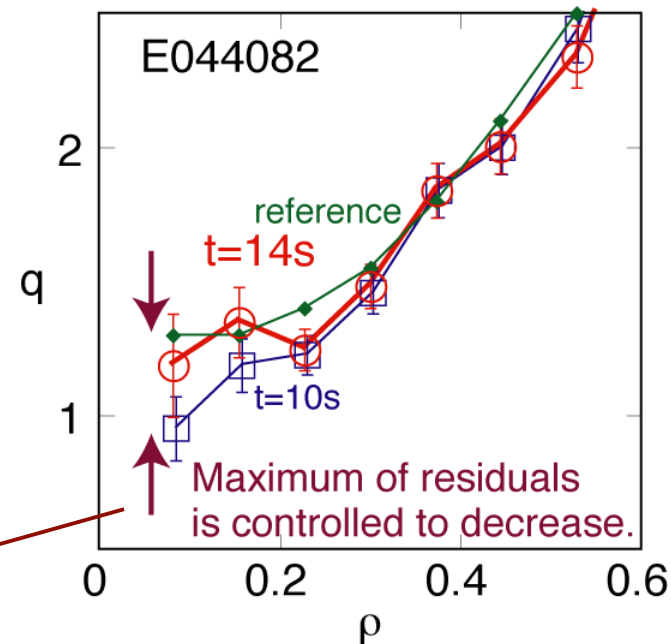
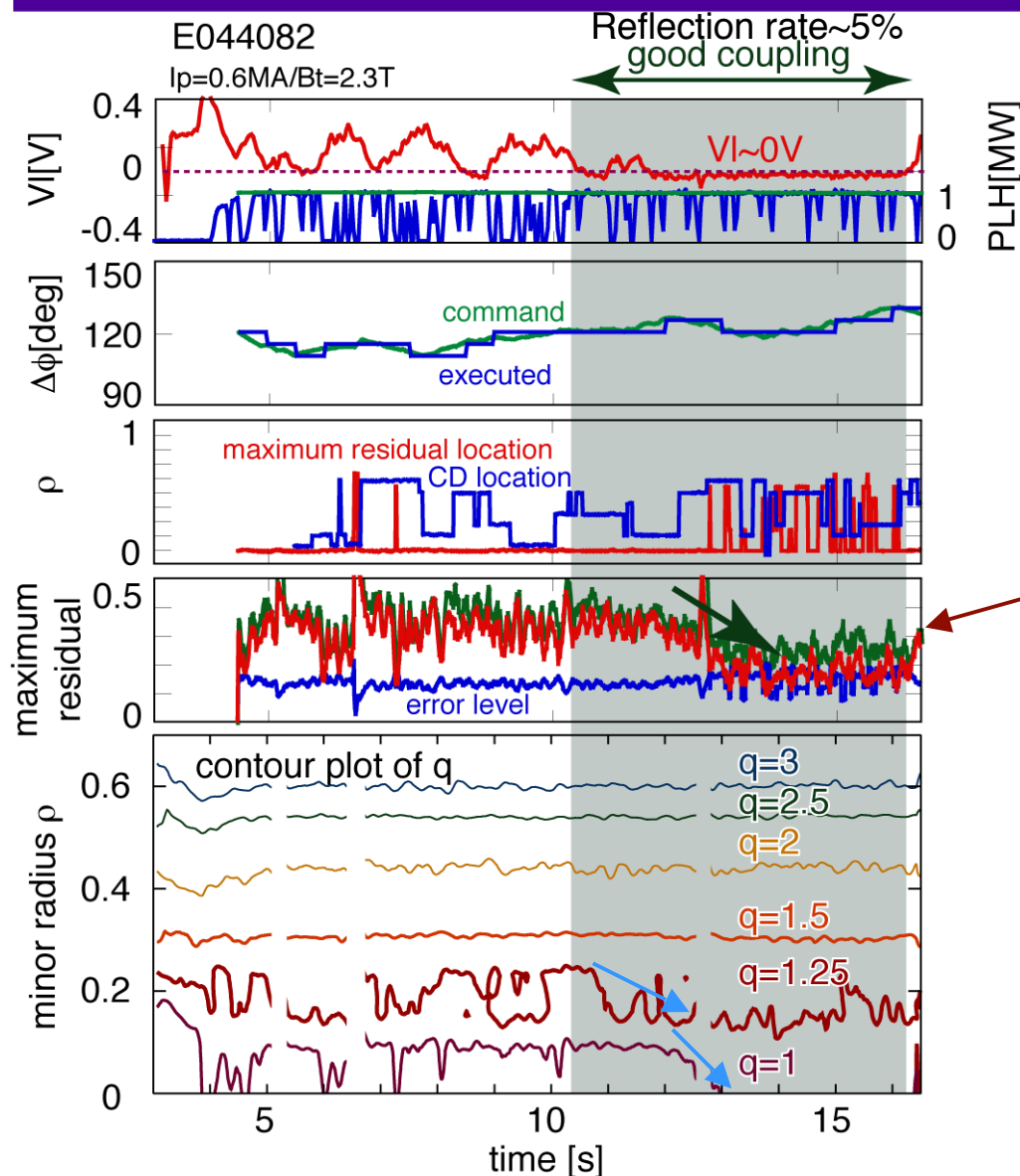
JT-60放電は15-60秒間

All calculations finish within control-cycle of the real-time system (0.01s).



q(0)~1の正磁気シアプラズマをq(0)~1.3の分布に向けて制御・維持した

JT-60U

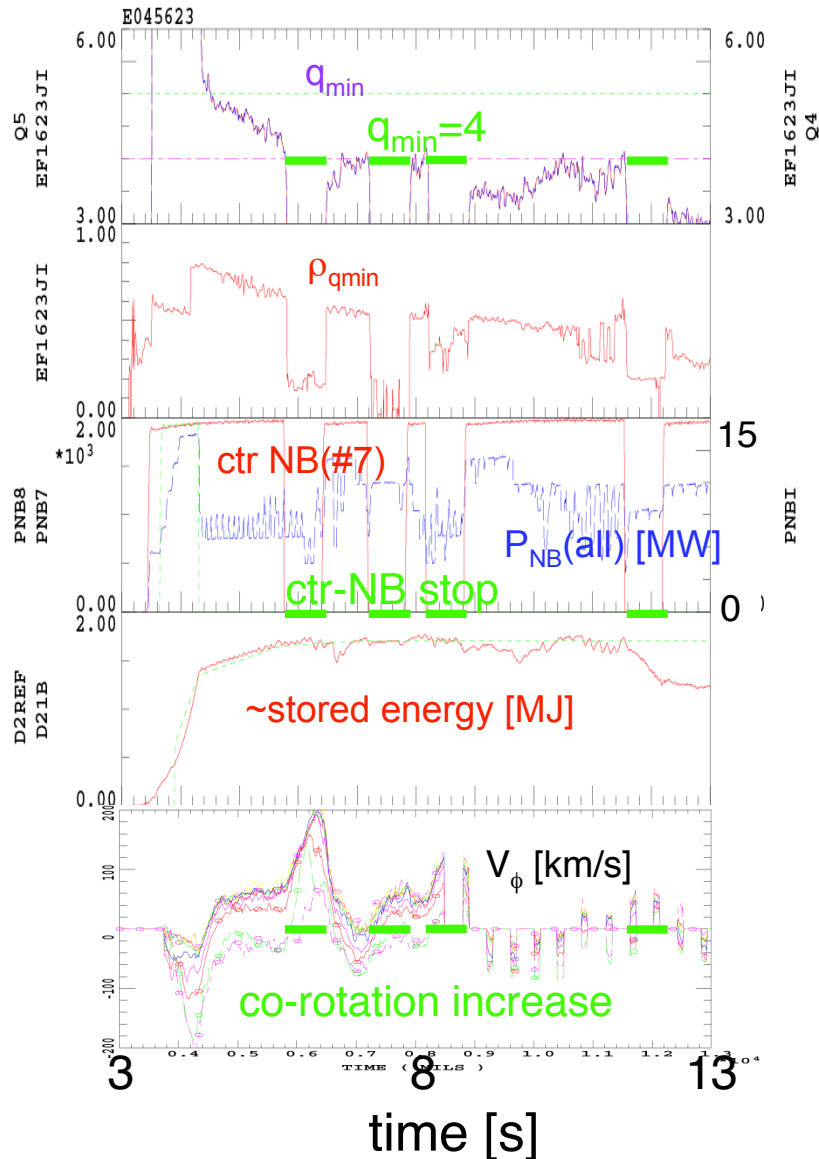


- Δφ を制御
- q分布はt=13sで参照分布に近づき、3秒間維持
 - ◆ n_e=0.5x10¹⁹m⁻³
 - ◆ η_{CD}~1x10¹⁹A/W/m⁻²

実時間 q 分布による条件付き 回転制御

安全係数最小値が4となる不安定な状態を 時間で検出し回転制御により不安定性を回避

JT-60U



- 高閉じ込め負磁気シア放電では
 - ◆ 全圧力(\propto 蓄積エネルギー)を一定に制御しても
 - ◆ q_{min} が有理数となるとcollapseやdisruption
 - ◆ co方向回転により回避できる
- $q_{min}=4-4.3$ でctr接線NB(#7)を一定時間停止する制御を導入
- 制御により、NB#7が4回停止し、co方向のトロイダル回転が増加
- 回転を制御し大きなcollapse無しに高圧力を維持できた ($W_{dia} \sim 1.7\text{MJ}$, 5.5s)

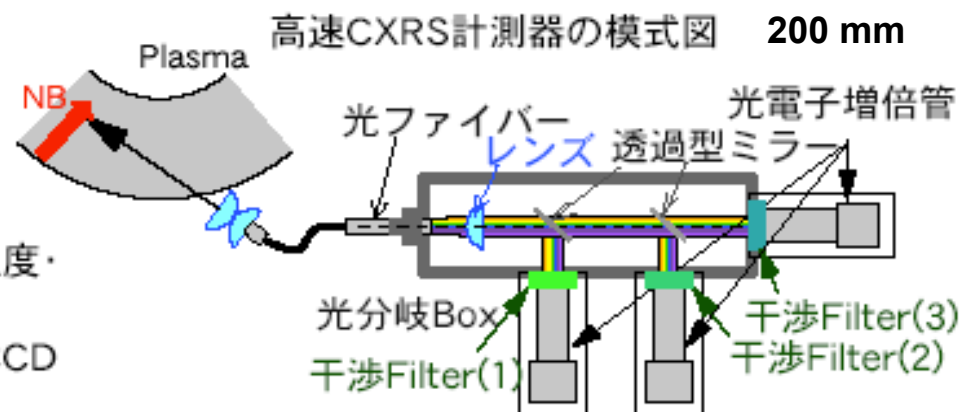
イオン温度・温度勾配制御 (計画)

高速荷電交換分光(CXRS)を用いたイオン温度 (T_i)、回転速度(V_ϕ)の実時間評価

JT-60U

NBとの荷電交換再結合(CXR)過程
 $H^0 + C^{6+} \rightarrow H^+ + C^{5+} (n=8)$
 $\rightarrow C^{5+} (n=7) + h\nu$

この発光を分光計測することでイオン温度・
 回転速度を評価
 ⇒JT-60の従来型CXRS装置は分光器+CCD

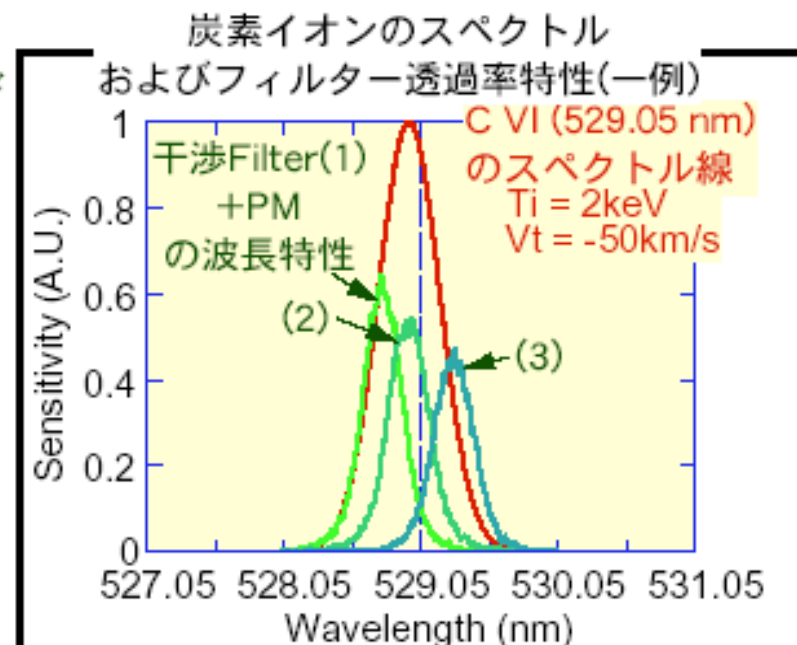


高速測定のためのアイデア…

- 中心波長の異なる3つの干渉フィルターでCXR光を分光(バンド幅1~0.2nm)(データ収集は0.16ms)
- 干渉フィルターを透過した信号強度の比からイオン温度(T_i)及び回転速度(V_t)を導出(信号強度から不純物イオン密度)
- 予め信号強度比に対する T_i , V_t の関係をマトリックスで求める

$$\begin{aligned} \text{Int}(F1)/\text{Int}(F2) &= 0.94 && \rightarrow && T_i = 2\text{keV} \\ \text{Int}(F3)/\text{Int}(F2) &= 0.69 && && V_t = -50\text{km/s} \end{aligned}$$

*本計測器は最大で空間6点の計測可能

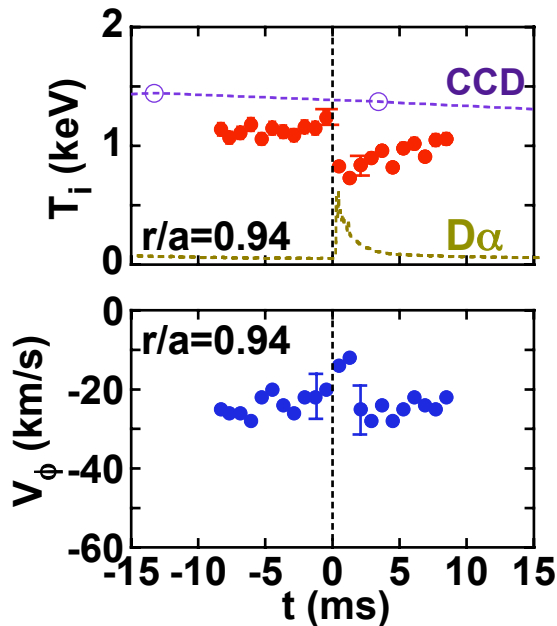


高速CXRSとNBによる $T_i(r)$ または $v_\phi(r)$ の帰還制御を計画中

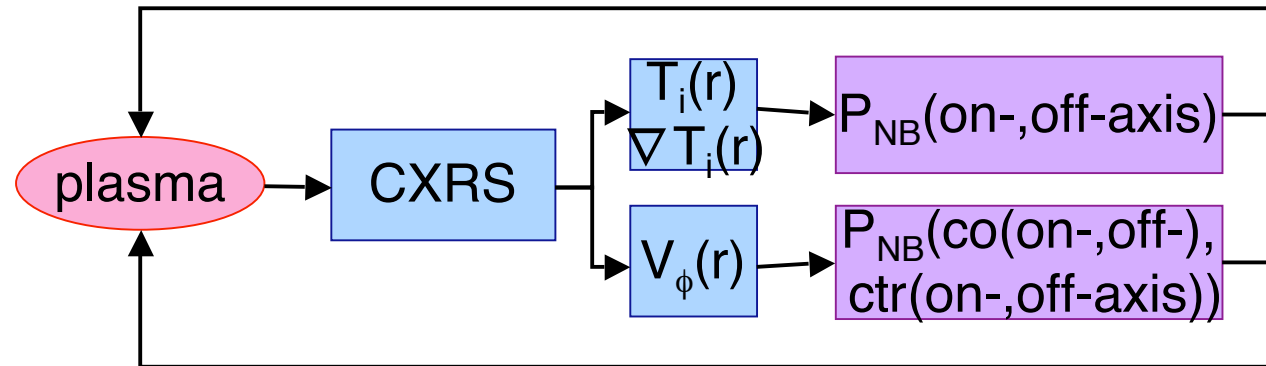
JT-60U

高速CXRS計測

サンプリング : 0.8 ms



この実験では ELM現象の速度が速い(~ms)ため誤差を減らす目的でensemble平均をしている。実時間制御では $\tau_E=O(100ms)$ での評価でよい



- JT-60Uの多様なNB入射geometryを生かして、分布を制御
 - ◆ 加熱分布によるイオン温度・温度勾配分布制御→圧力・圧力勾配制御
 - ✦ たとえば...

$$P_{NB, \text{on-axis}} \propto -\alpha (T_i - T_{i, \text{ref}}) + P_{NB, \text{base}}$$
 - ◆ トロイダル運動量入射分布によるトロイダル回転分布制御→閉じ込め電場 $E_r(r)$ 制御

まとめ

JT-60U

- JT-60Uでは様々な実時間制御を開発・駆使して性能向上に役立てている
- 実時間電流分布制御
 - ◆ 圧力バランス(Grad-Shafranov方程式)を解かずに、MSE計測から電流分布を実時間評価した
 - ◆ 目標となる電流分布に向けてLHCDにより電流分布を制御した
- 実時間q分布による条件付き回転制御
 - ◆ 不安定性の発生なく、高い蓄積エネルギー(圧力)を維持
- 高速CXRSによる実時間イオン温度・温度勾配・回転分布制御を計画中
 - ◆ 圧力分布、閉じ込め電場の制御に役立つ
 - ◆ 実時間電流分布制御との複合制御により、MHD安定性を決める電流分布・圧力分布を制御することを目標