

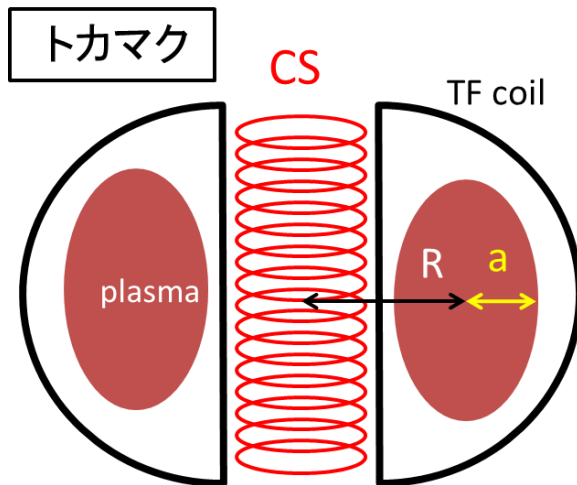
# 統合コードTOPICSを用いたプラズマ 立ち上げ中のCS磁束削減手法の検討

量子科学技術研究開発機構

若月 琢馬

# はじめに

- トカマクにおける中心ソレノイド(CS)の役割
  - 電磁誘導によるプラズマ電流の駆動

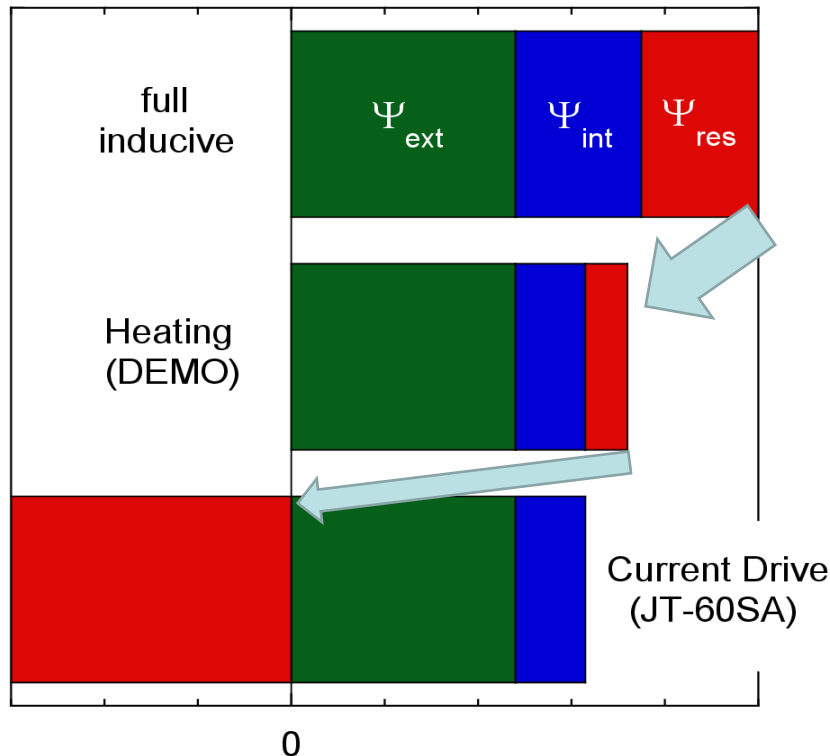


- 定常炉設計では要らない？
  - プラズマ電流の立ち上げ時はCSによる電流駆動を行う設計が一般的
  - その場合、炉の大型化(> 8 m程度)が避けられない
  - 炉設計における強い制約条件
- プラズマ電流の立ち上げに消費されるCSの磁束を削減できれば、CSの小型化が可能
  - 建設コストの削減が期待できる

# CS磁束消費の内訳と削減手法

$$\Psi_{\text{total}} = \Psi_{\text{ext}} + \Psi_{\text{int}} + \Psi_{\text{res}}$$

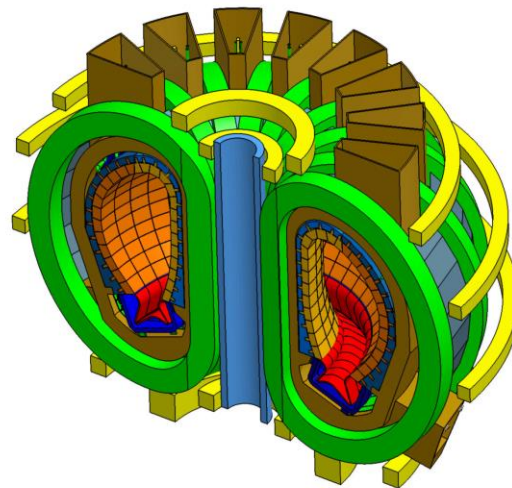
Poloidal Flux Consumption



- $\Psi_{\text{int(ext)}} \equiv \int_0^t \frac{dt'}{I_p} \int_{\text{int(ext)}} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{B_P^2}{2\mu_0} \right) dV$
- $\Psi_{\text{res}} \equiv \int_0^t \frac{dt'}{I_p} \int J_\phi E_\phi dV$

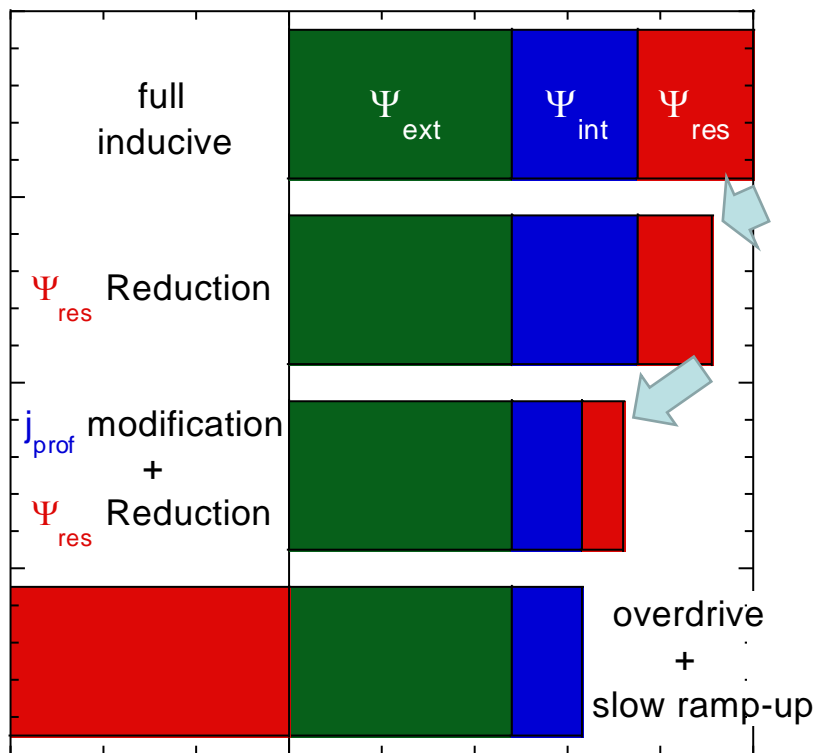
- CSの磁束消費は大きく3つの成分に分けられる
- そのうち、 $\Psi_{\text{ext}}$ はプラズマ電流とプラズマ形状から決定され、削減できない
- $\Psi_{\text{int}}$ はプラズマ電流分布をbroadにすることで削減できるが、その削減可能量はそれほど大きくない
- 主眼は $\Psi_{\text{res}}$ を削減することにある
- 加熱を行うだけでもプラズマの電気抵抗が減少し、 $\Psi_{\text{res}}$ は削減できる
  - DEMO炉を対象に検討
- 非誘導電流駆動によりCSを用いずにプラズマ電流をランプアップする際には $\Psi_{\text{res}}$ が負になってその他の消費分を打ち消すことができる
  - JT-60SAを対象に検討

TOPICS統合輸送コードを用いた  
原型炉における低磁束消費  
プラズマ電流ランプアップシナリオの検討



# 原型炉における研究の概要

$$\Psi_{\text{total}} = \Psi_{\text{ext}} + \Psi_{\text{int}} + \Psi_{\text{res}}$$



0

- $\Psi_{\text{int(ext)}} \equiv \int_0^t \frac{dt'}{I_p} \int_{\text{int(ext)}} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{B_P^2}{2\mu_0} \right) dV$
- $\Psi_{\text{res}} \equiv \int_0^t \frac{dt'}{I_p} \int J_\phi E_\phi dV$

- CS磁束を完全に用いないプラズマ電流ランプアップでは高ベータで安定性限界に近いプラズマが必要になる

▶ 原型炉のために、より安全なシナリオを検討したい

- 原型炉設計 **JA Model 2014\*** を対象に検討 (R ~ 8.5 m,  $I_p = 12.3$  MA,  $B_t = 5.9$  T)

\* Y Sakamoto, et al., 25th IAEA FEC, FIP/3-4Rb, 2014

- 低ベータに抑えた加熱だけでも  $\Psi_{\text{res}}$  は削減可能

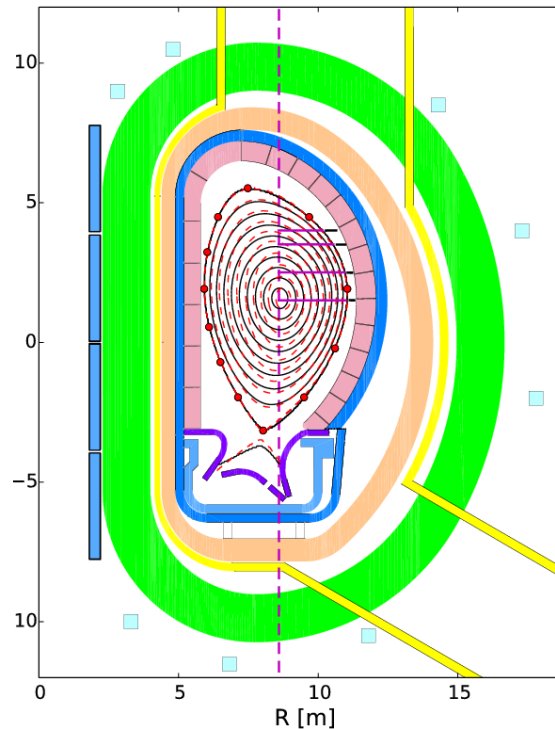
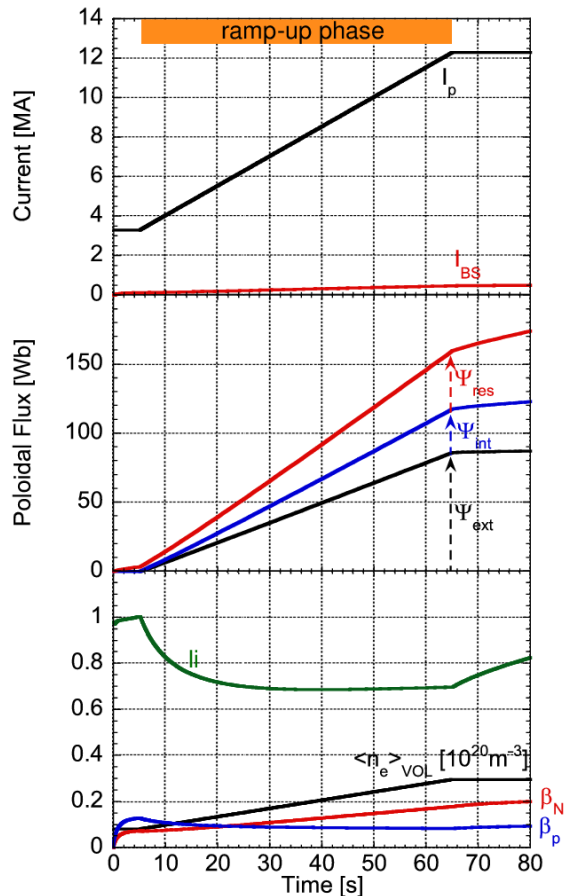
– 同時に電流の拡散が遅くなり、broadな電流分布、負磁気シアのq分布を持つプラズマが生成されやすくなる

- 加熱による磁束消費削減量とq分布の定量的な関係を提示した

# EC加熱の最適化手法を検討

## 原型炉設計 JA Model 2014\* を対象に検討

$R_p \sim 8.5$  m,  $a \sim 2.6$  m,  $I_p = 12.3$  MA,  $B_T = 5.9$  T,  $q_{95} \sim 4.0$ ,  $P_{\text{fusion}} \sim 1.5$  GW



- 電流ランプアップ
  - 3.3 MA  $\rightarrow$  12.3 MA
- EC加熱
  - $\rho_{\text{abs}} \sim 0.1, 0.25, 0.5, 0.65$
  - $P_{\text{EC}} < 50$  MW
  - 垂直入射
- $f_{\text{GW}} \sim 0.3, 0.6, 0.9$
- CDBMモデル

\* Y Sakamoto, et al., 25th IAEA Fusion Energy Conf., FIP/3-4Rb, St. Petersburg, Russia, 2014

# q分布の時間発展を変えない磁束消費削減手法

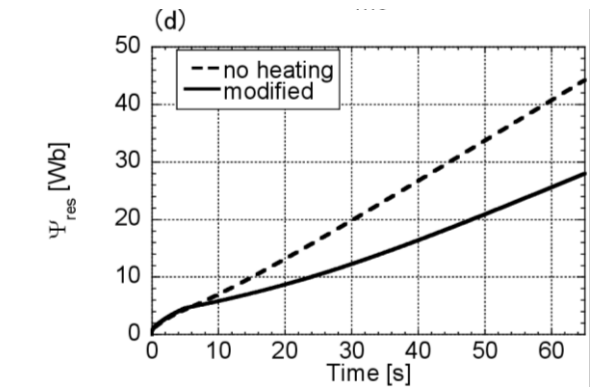
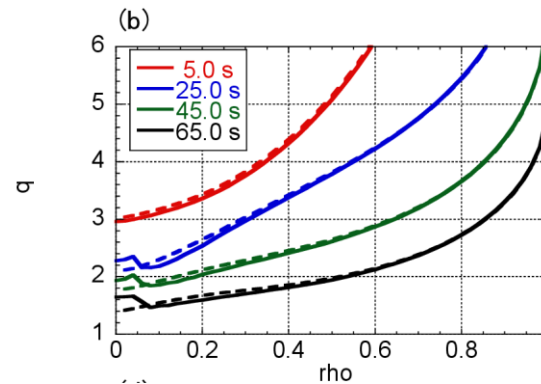
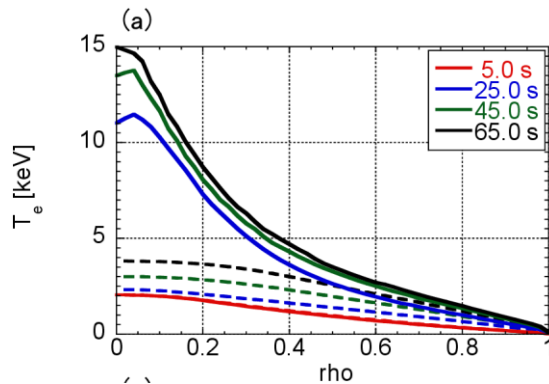
- 磁気面形状の変化が無視できるとき、ポロイダル磁束の拡散方程式から

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{q} \right) = \frac{2\pi}{f \langle R^{-2} \rangle V'} \frac{\partial V_{\text{loop}}}{\partial \rho}$$

が成立し、 $V_{\text{loop}}$  から  $\rho$  に依存しないオフセットが差し引ければ、q分布の時間発展を変えずに磁束消費を削減できる

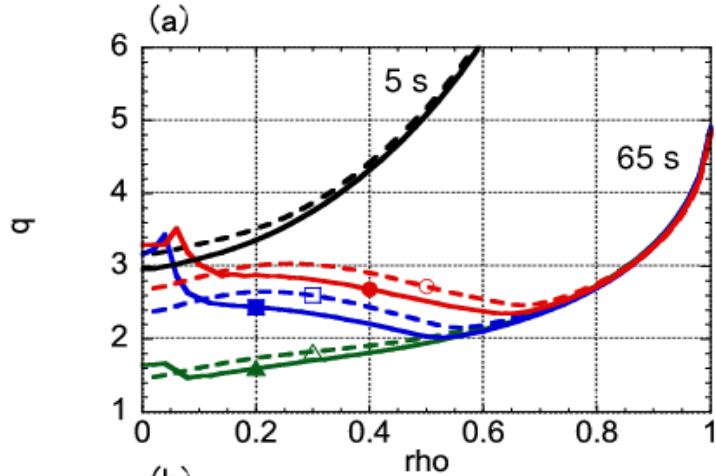
– 抵抗分布の変換式

$$\eta_{\parallel,2} = \eta_{\parallel,1} + C \frac{f \langle R^{-2} \rangle}{\langle j_{\parallel} B \rangle}$$



- 正磁気シアプラズマに対しても、抵抗性の磁束消費を半減できる可能性があることを明らかにした

# q分布と磁束消費最小値の関係を提示



$$\int_{t_0}^{t_1} V_{loop}^{surface} dt = \int_{t_0}^{t_1} V_{loop}^{axis} dt + \int \frac{f \langle R^{-2} \rangle V'}{2\pi} \left( \frac{1}{q|_{t=t_1}} - \frac{1}{q|_{t=t_0}} \right) d\rho$$

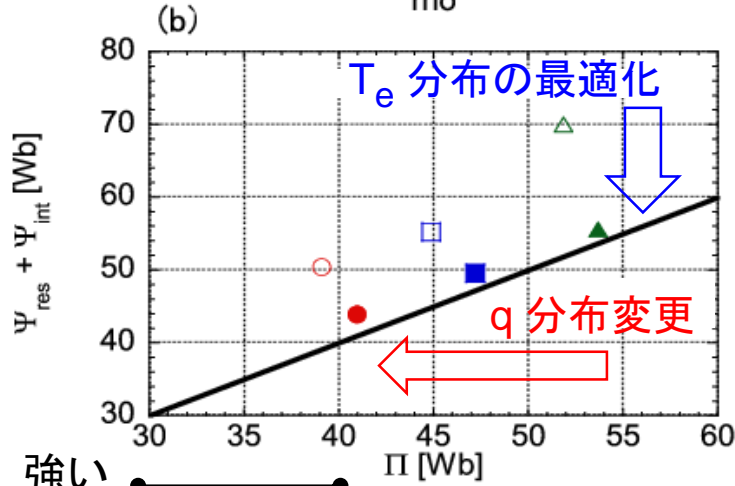
$$= \Psi_{res} + \Psi_{int} \quad \rightarrow 0$$

**≡ Π:  $\Psi_{res} + \Psi_{int}$  の下限**  
(電流駆動を行わない場合)

- 加熱によって削減可能な磁束消費量は電流ランプアップ開始前後のq分布の差に依存することを明らかにした

## 加熱分布の最適化

原型炉で20 MWのEC加熱を適切な位置に行うことで、磁束消費を20%削減できることを示した  
10%程度のCS半径縮小効果



強い  
負磁気シア

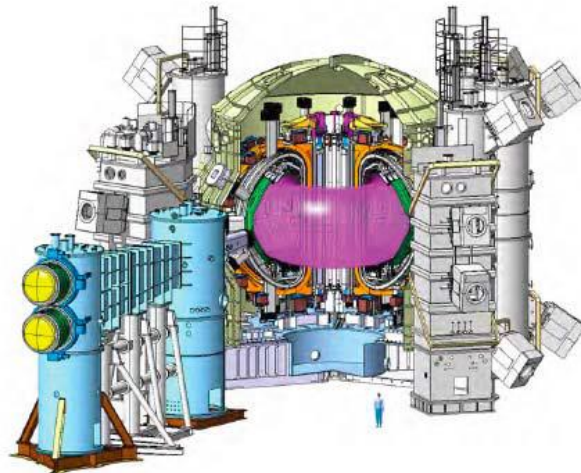
弱い  
負磁気シア

正磁気  
シア

T. Wakatsuki, et al., 26th IAEA FEC, EX/P8-38 (2016)  
T. Wakatsuki, et al., NF 57, 016015 (2017)



# TOPICS統合輸送コードを用いた JT-60SAにおける非誘導プラズマ 電流ランプアップシナリオの検討



# JT-60SAでの研究の概要

- CSを用いないプラズマ電流ランプアップは主に小型~中型程度のトカマクで実験されている
  - 大型トカマクでの実証を行うことで、核融合炉への適用可能性を検討したい
- JT-60SAにおける非誘導立ち上げシナリオを検討
  - 核融合炉で必要とされるレベルに近い高性能プラズマが生成できる大型トカマク
- TOPICS統合輸送コードを用いてシナリオを検討
  - 熱輸送：CDBMモデル
  - 電流拡散：新古典抵抗
  - JT-60SAの実際のコイル配置を用いたMHD平衡

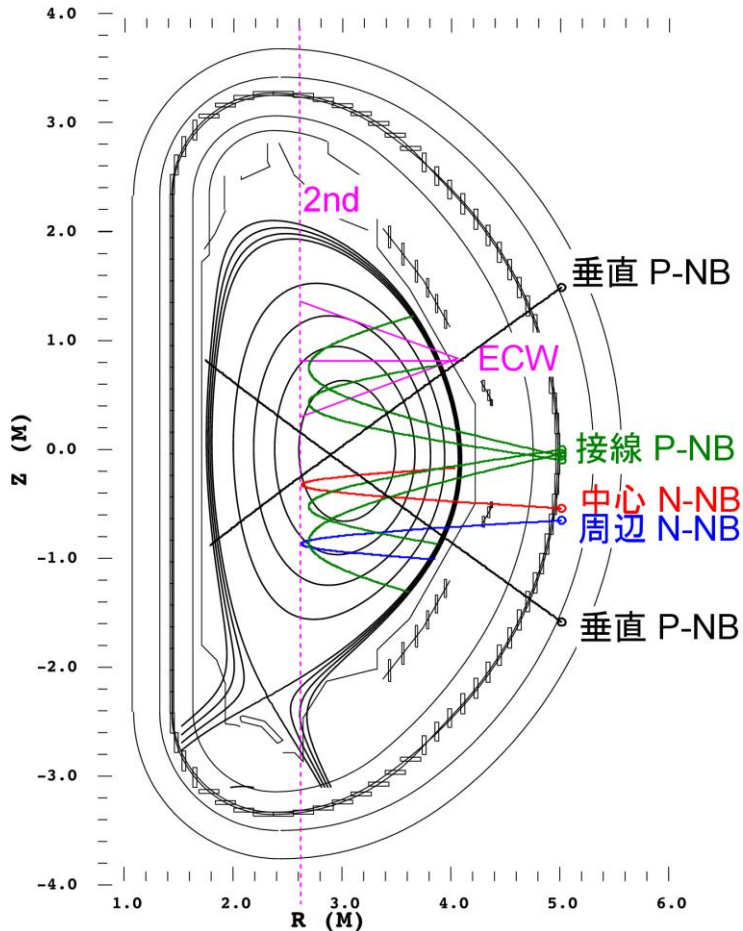
# JT-60SAの加熱、電流駆動源

- Neutral Beams

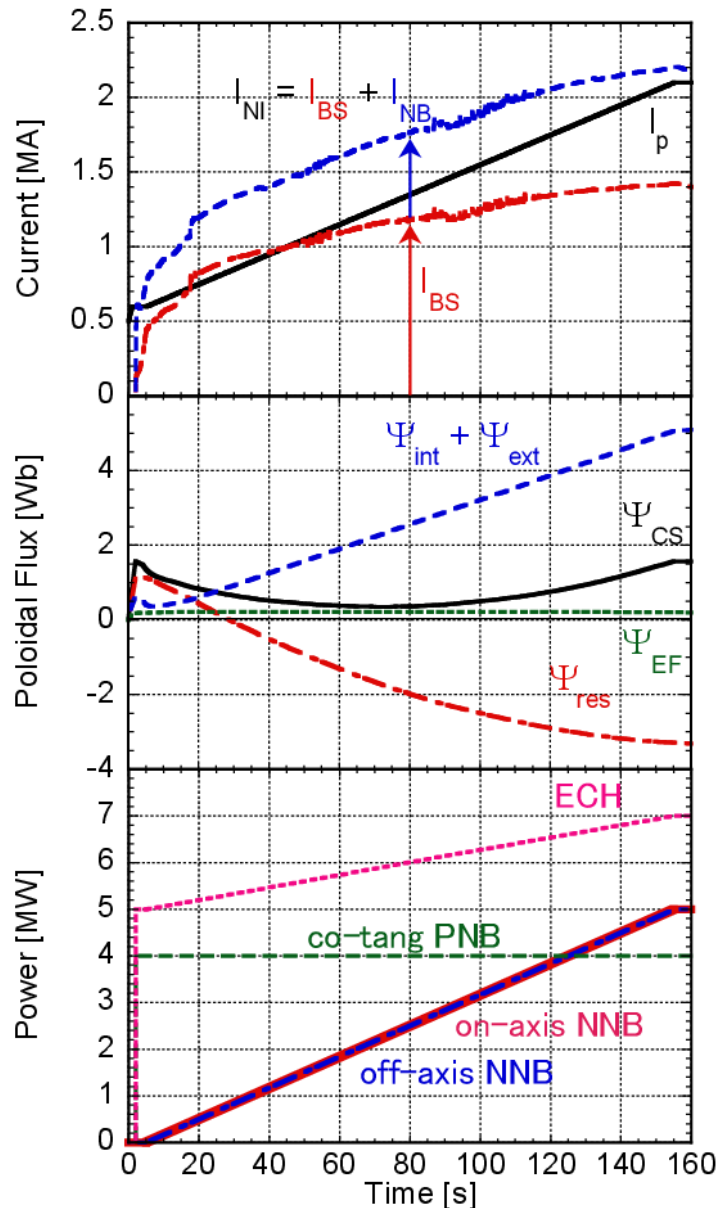
中心 N-NB	500 keV	5 MW x 1 beam
周辺 N-NB	500 keV	5 MW x 1 beam
接線 P-NB	85 keV	1 MW x 4 beams
逆接線 P-NB	85 keV	1 MW x 4 beams
垂直 P-NB	85 keV	1 MW x 16 beams

- Electron Cyclotron Wave

パワー	7 MW
周波数	110 GHz / 138 GHz
トロイダル角	$-15^{\circ}$ - $+15^{\circ}$
ポロイダル角	$-40^{\circ}$ - $+20^{\circ}$



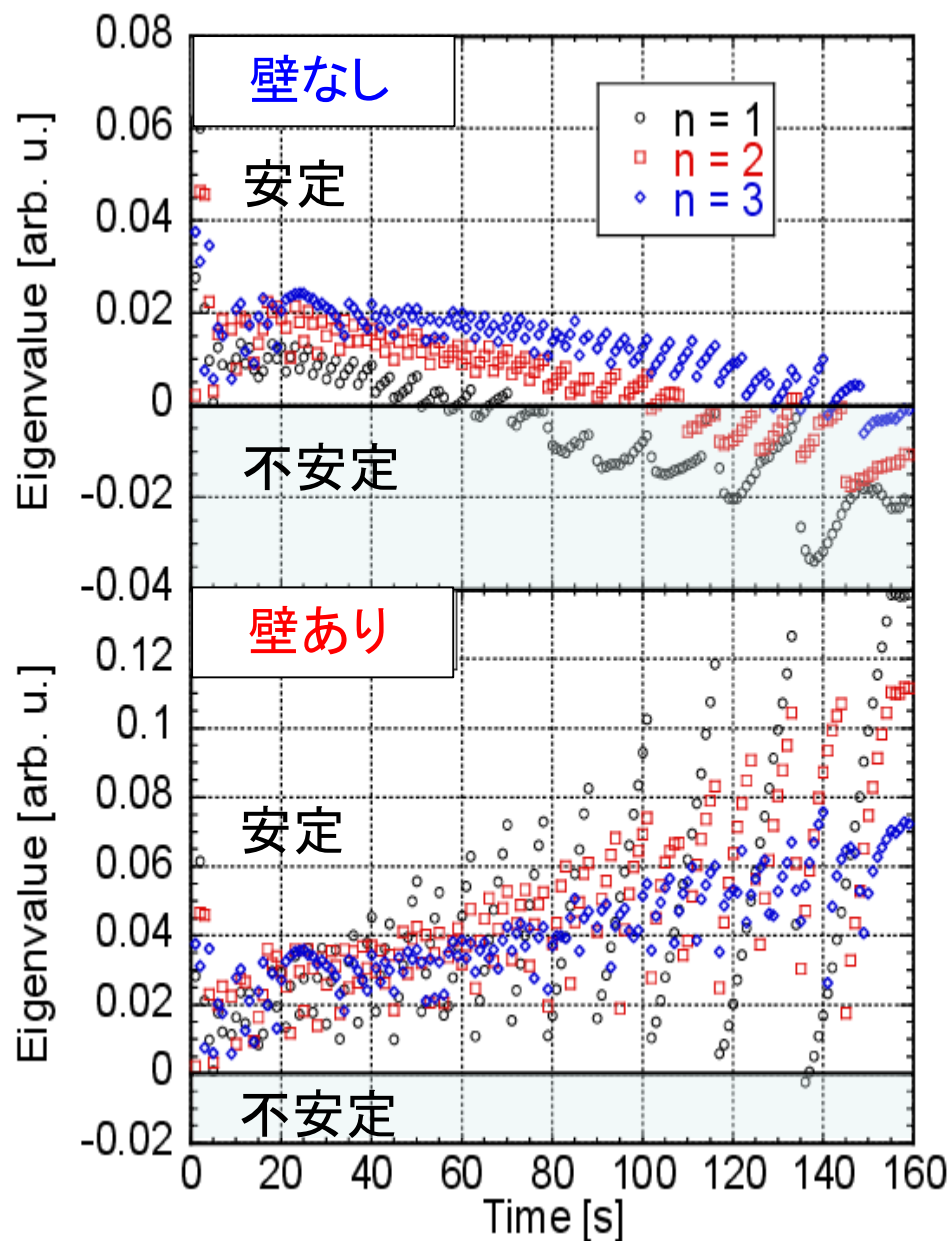
# JT-60SAの加熱、電流駆動源の性能と整合したシナリオを作成



- 0.6 -> 2.1 MAをCSなしで立ち上げ
- JT-60SAの高 $\beta_N$ 高密度定常プラズマシナリオ(#5-2)に接続することを目指した
- 低 $I_p$  (< 1 MA)でのオーバードライブ
  - 高エネルギーで電流駆動効率の高いNNBは突き抜け損失が大きい
  - off-axisなECHによってITBを形成し、自発電流を有効に活用した
- プラズマ電流をオーバードライブしても、プラズマ電流は非常にゆっくり立ち上げる必要があることを明らかにした
  - ポロイダル磁束の収支に着目して解析
  - このシナリオでは150秒程度かかる

$$\beta_N \lesssim 3.5, H_{H98y2} \sim 1.5$$

# 導体壁による安定化効果があるとほとんどの時間で安定となる



- $\beta_N > 4 \times I_i$  (安定性限界の目安)
  - MHD安定性を満たしているか確認する必要がある
  - MARG2Dにより安定性解析
- 壁なし
  - 周辺部に局在した外部キンクモードが不安定
- 壁あり (完全導体)
  - ほとんどの時間で安定
- JT-60SAでMHD安定性を確保しながら非誘導プラズマ電流ランプアップ実験を行える可能性があることを明らかにした
  - ただし、非軸対称コイルのフィードバック制御やプラズマ回転によってRWMを安定化する必要がある

# まとめ

- 原型炉における低磁束消費プラズマ電流ランプアップシナリオの検討
  - q分布の時間発展と磁束消費の間の定量的な関係を提示
  - 磁束消費を最小化するための電子温度分布の求め方を明らかにした
  - EC加熱分布の最適化により、20%程度の磁束消費の削減が行える可能性を提示した
- JT-60SAにおける非誘導プラズマ電流ランプアップシナリオの検討
  - 理想MHD安定性を満たす非誘導電流ランプアップシナリオを提案
  - JT-60SAにおいて、CSを全く用いないプラズマ電流ランプアップ実験を行うためには以下の2点に注意する必要があることを明らかにした
    - 非常に長いプラズマランプアップ時間が必要
    - RWMの安定化が必要