

トカマクにおけるディスラプション挙動 の軸対称シミュレーション

Axisymmetric MHD Simulation of Disruption Dynamics in Tokamak Plasmas

武井奈帆子、中村幸治¹⁾、河野康則¹⁾、筒井広明、小関隆久¹⁾、飛田健次¹⁾、
杉原正芳¹⁾、飯尾俊二、嶋田隆一、S.C. Jardin²⁾
東工大原子炉研、原研那珂¹⁾、PPPL²⁾

TAKEI Nahoko, NAKAMURA Yukiharu¹⁾, KAWANO Yasunori¹⁾, TSUTSUI Hiroaki,
OZEKI Takahisa¹⁾, TOBITA Kenji¹⁾, SUGIHARA Masayoshi¹⁾,
TSUJI-IIO Shunji, SHIMADA Ryuichi and S.C. Jardin²⁾.

Tokyo Institute of Technology

1)Japan Atomic Energy Research Institute

2)Princeton Plasma Physics Laboratory

トカマクにおけるディスラプション

(A) 熱消滅: Thermal quench

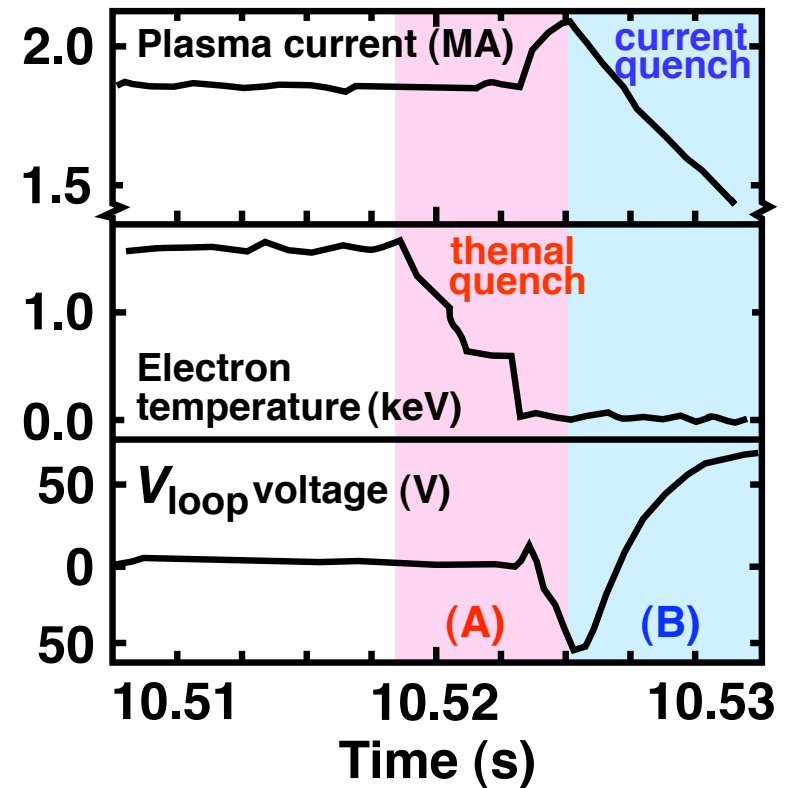
不安定性によって磁気面が破壊され、**大半の熱エネルギー**が1 msの時定数で失われる。

→ プラズマ対向壁表面の溶融・蒸発

(B) プラズマ電流消滅: Current quench

電子温度がさらに低下するとプラズマの電気抵抗が増え、**プラズマ電流が急激に減少**する。

→ 真空容器などに渦電流が生じ、大きな電磁力が発生



本研究の目的

急激な現象であるディスラプションについては
数値シミュレーションが有力な研究手段



- **MHDシミュレーションとJT-60U実験との比較検証によって、**
 - (1) プラズマ電流のスパイク
 - (2) 高ベータ負磁気シアプラズマで観測された速いプラズマ電流消滅現象について、それぞれの物理機構を解明。

軸対称MHDシミュレーション・モデル

● 基礎方程式

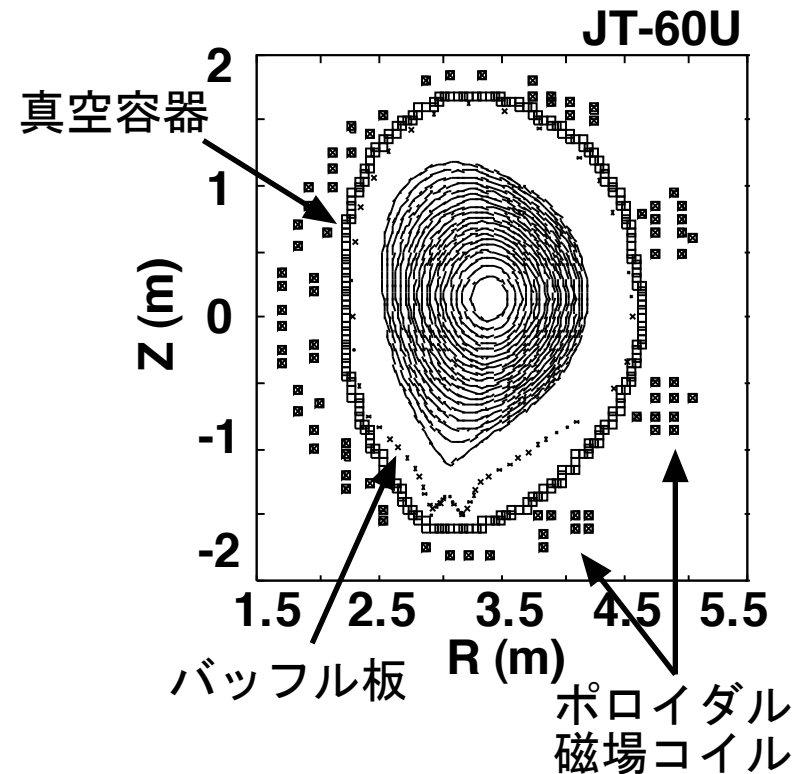
$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} + \mathbf{F}_v(\mathbf{m}) = \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \nabla p$$

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{j}_{\text{oh}} \quad (\mathbf{j}_{\text{oh}} = \mathbf{j}_{\text{total}} - \mathbf{j}_{\text{bs}})$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} T \right) - \nabla \cdot (\chi \nabla T) = Q$$



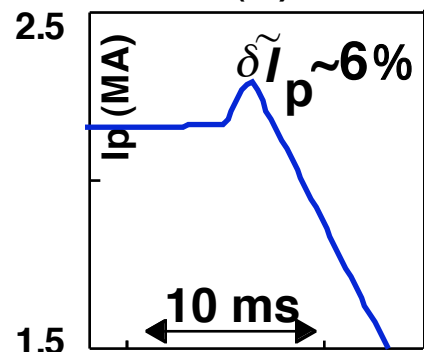
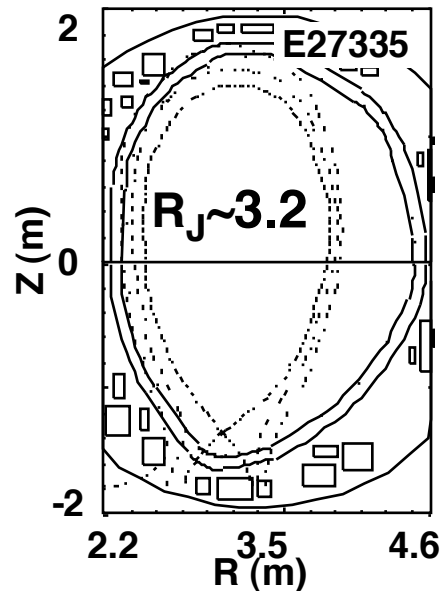
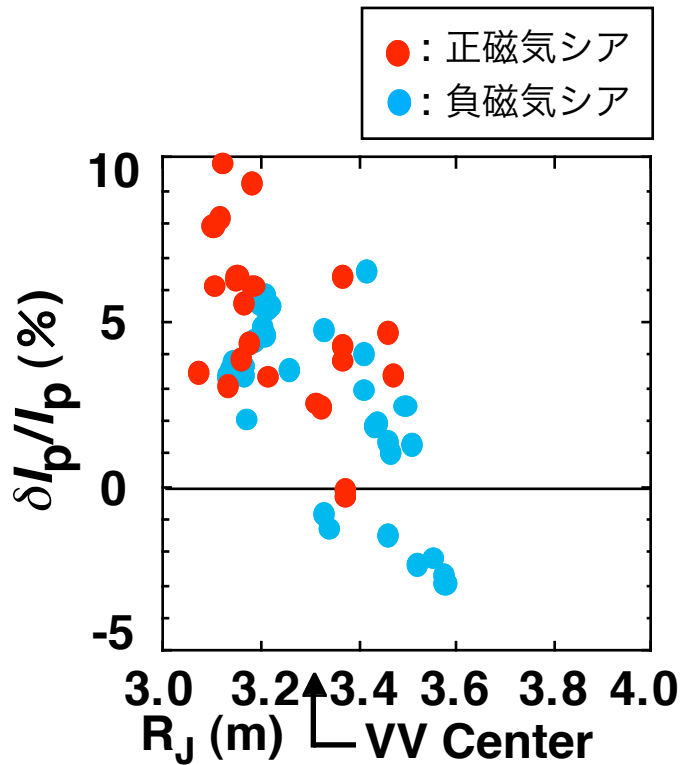
密度、圧力、温度 (磁気面量)
を任意関数で与える。

$$n = n(\Psi(r, z), t)$$
$$p = p(\Psi(r, z), t)$$

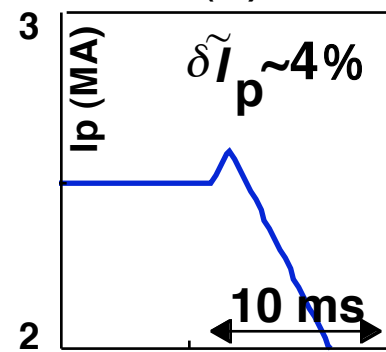
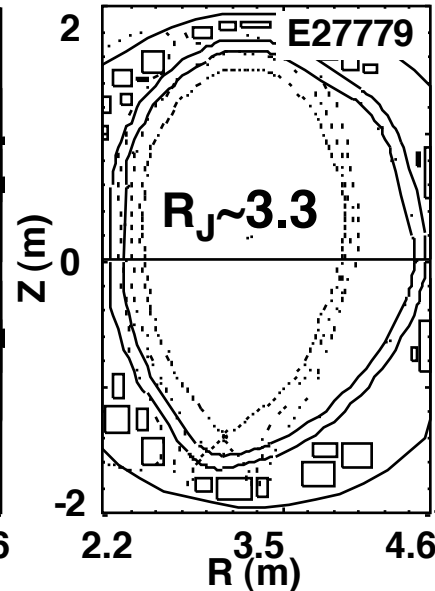
ディスラプション直前の実験データに合わせている。

プラズマ電流スパイク

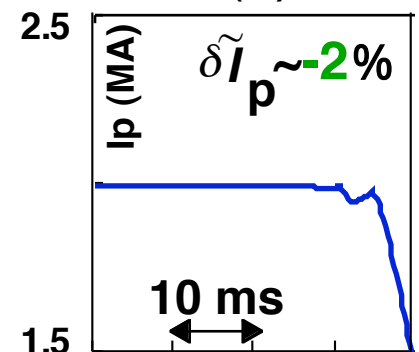
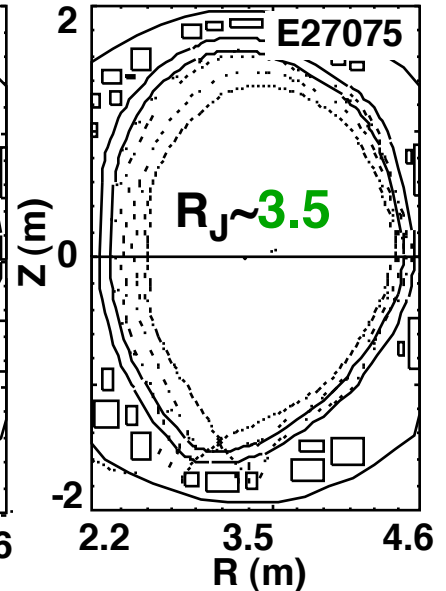
JT-60Uの電流スパイク特性



$\delta \tilde{I}_p \sim 6\%$
with $R_J \sim 3.2\text{m}$



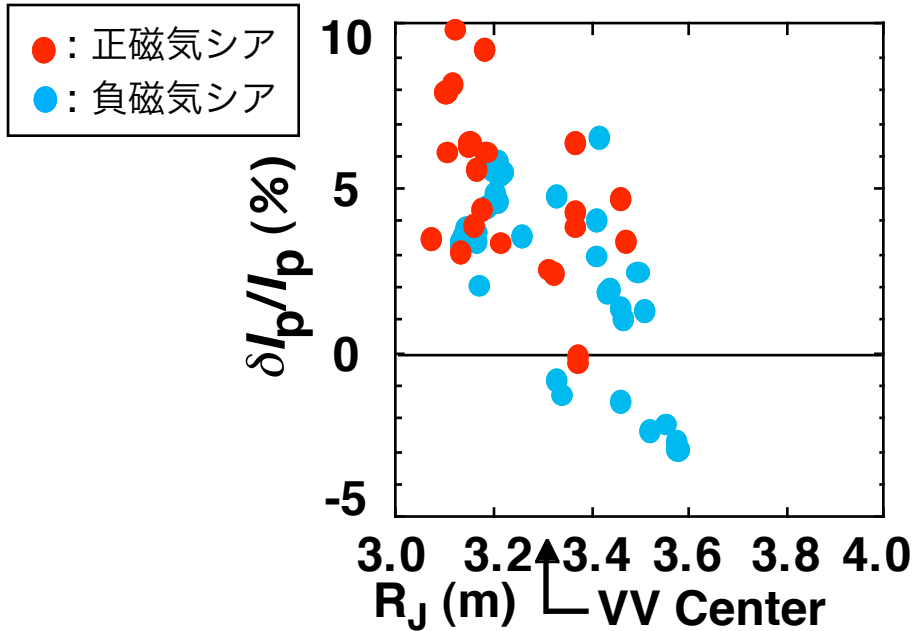
$\delta \tilde{I}_p \sim 4\%$
with $R_J \sim 3.3\text{m}$



$\delta \tilde{I}_p \sim -2\%$
with $R_J \sim 3.5\text{m}$

従来は、正の電流スパイクのみが発生するとされていたが、**負のスパイク**も観測されている。

急激な圧力低下による電流スパイク



- プラズマの内向き移動により常に正スパイクが発生(従来の解釈)



プラズマ電流重心の水平位置 R_J に依存する傾向が見られる。

→ 渦電流の寄与を予測

- シミュレーションにより、 R_J が真空容器の幾何学中心位置より

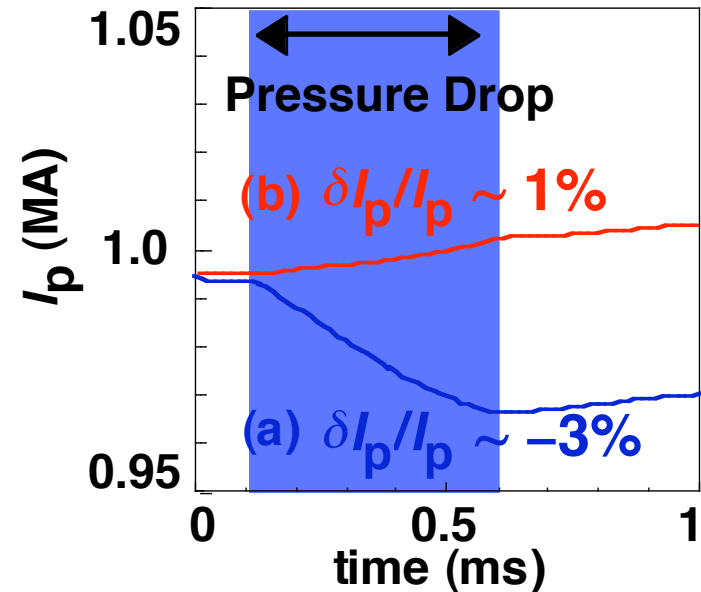
(a) 外側の場合 ($R_J \sim 3.8$ m)

→ 負のスパイク

(b) 内側の場合 ($R_J \sim 3.1$ m)

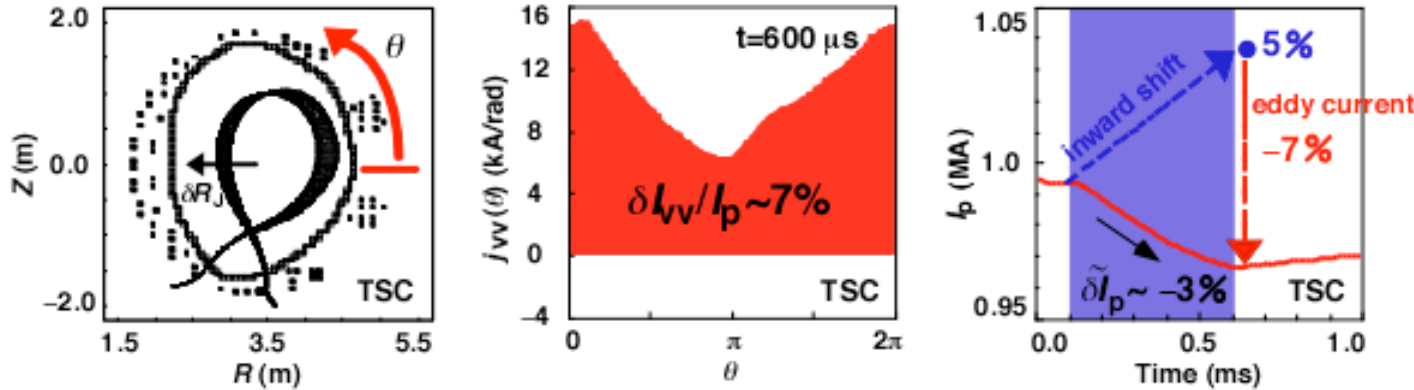
→ 正のスパイク

が発生することが判明。



電流スパイクに対する渦電流効果

(a) 外側の場合 ($R_J \sim 3.8$ m)



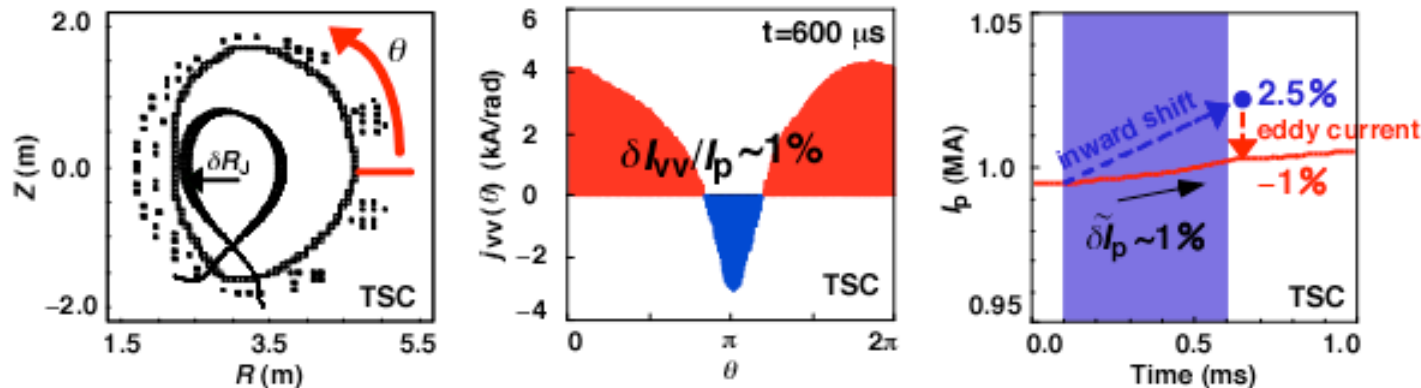
- 真空容器に誘起される渦電流

$$\delta l_{vv}/I_p \sim 7\%$$

- 負のスパイク

$$\delta I_p/I_p \sim -3\%$$

(b) 内側の場合 ($R_J \sim 3.1$ m)



- 真空容器に誘起される渦電流

$$\delta l_{vv}/I_p \sim 1\%$$

- 正のスパイク

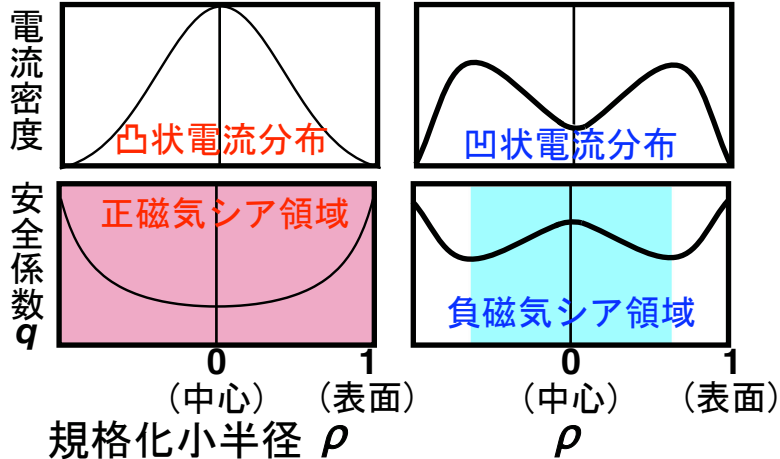
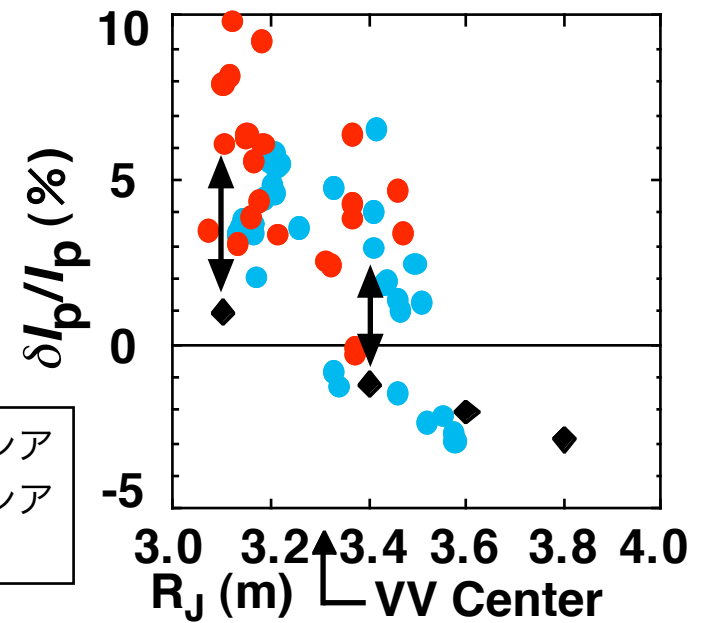
$$\delta I_p/I_p \sim 1\%$$

圧力の急減により真空容器に誘起される渦電流分布が、プラズマ配置に応じて大きく異なる。

電流分布の平坦化と電流スパイク

- 実験の電流スパイクを説明するには圧力低下の効果のみでは不十分

.....▶ プラズマ電流分布の平坦化による効果



内部インダクタンス(プラズマ内部の規格化磁気エネルギー)

- 完全表面電流分布 ~ 0
- 平坦電流分布 ~ 0.5
- パラボラ電流分布 ~ 1

従来の解釈

- 正磁気シアプラズマでは、平坦化によって内部インダクタンスが**低下**
→ 磁束保存により電流が急増(**正のスパイク**)
- 負磁気シアプラズマでは、平坦化によって内部インダクタンスが**増加**
→ **負のスパイク**

磁気面破壊による平坦化

- 磁気面破壊による緩和現象を模擬するモデル: **"Magnetic braiding"**

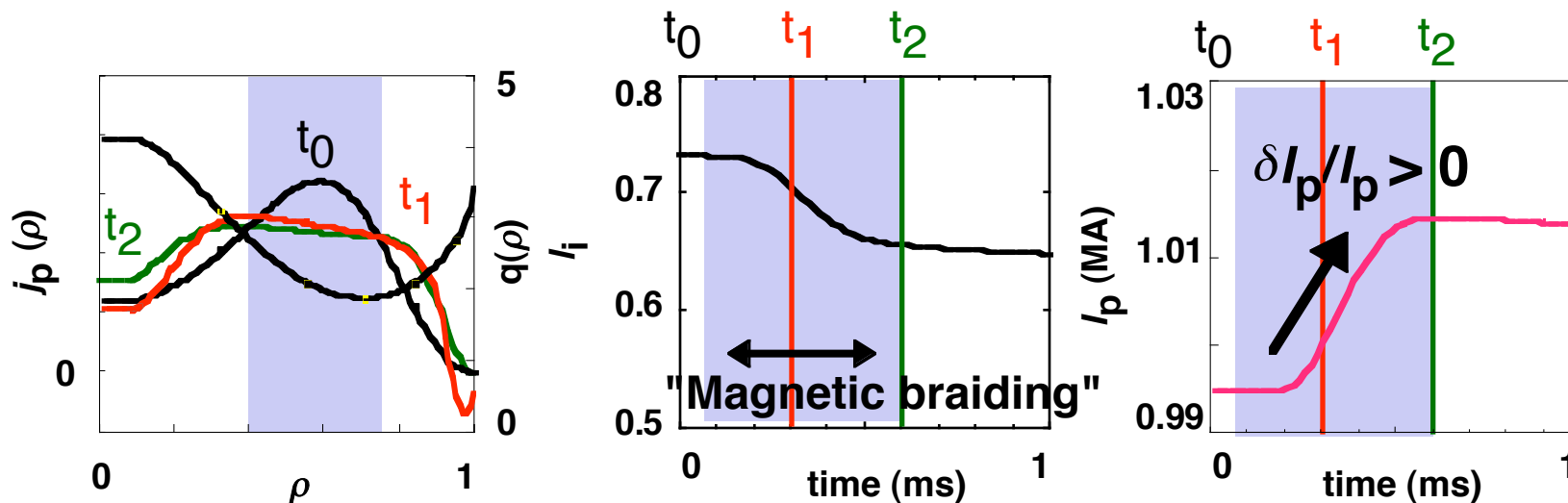
オームの式に擾乱磁場による電場の効果を導入。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} &= \eta \mathbf{j} - \frac{\delta \mathbf{v} \times \delta \mathbf{B}}{B^2} \\
 &= \eta \mathbf{j} - \frac{\mathbf{B}}{B^2} \nabla \left(\lambda \frac{\nabla j_{||}}{B} \right)
 \end{aligned}$$

λ : 任意の正関数

-----▶ テアリング等の磁気面破壊を伴う現象を模擬。

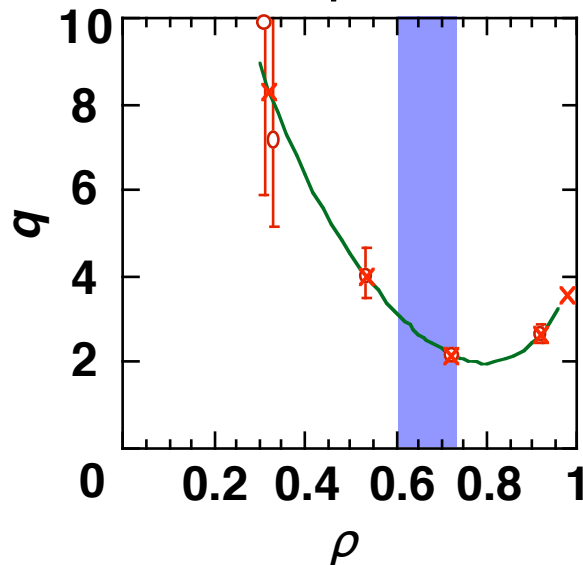
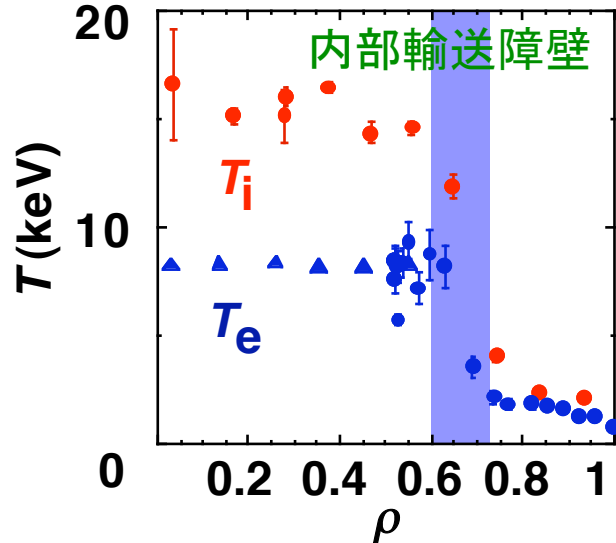
- 負磁気シアプラズマでも、従来の解釈に反して**正スパイク**が発生



プラズマ電流消滅挙動

高ベータ負磁気シアプラズマの特性

温度・密度の急勾配(内部輸送障壁)が内部形成され、プラズマ性能が向上



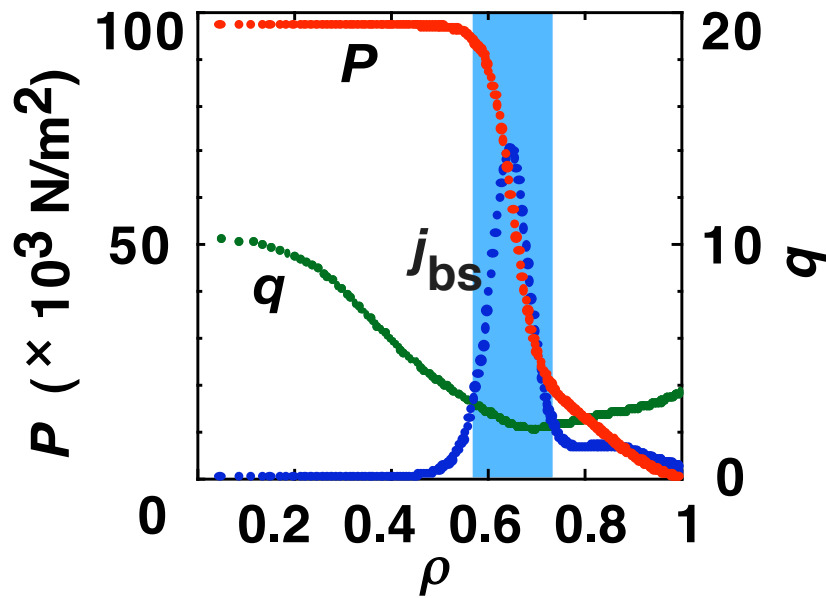
ブートストラップ
電流の割合が上昇 $J_{bs} \propto \frac{dp}{dr}$

内部輸送障壁を伴う負磁気シア
プラズマは定常化に適した運転方式

内部輸送障壁の消失による
ディスラプションが発生し易い

高ベータプラズマの電流消滅挙動

内部輸送障壁によるブートストラップ電流分布と整合したモデルをTSCに組み込み、プラズマ電流消滅挙動を解析した。



$$n = n(\Psi(r, z), t)$$

$$p = p(\Psi(r, z), t)$$

- 内部輸送障壁モデル

内部輸送障壁の脚部の位置と磁気シア反転位置とを連動させ、ディスラプションの時間発展を追う。

- 内部輸送障壁の消失を

急激な圧力低下 (< 1 ms)

+

磁気面破壊による緩和現象を模擬するモデル

"magnetic braiding"

により模擬した。

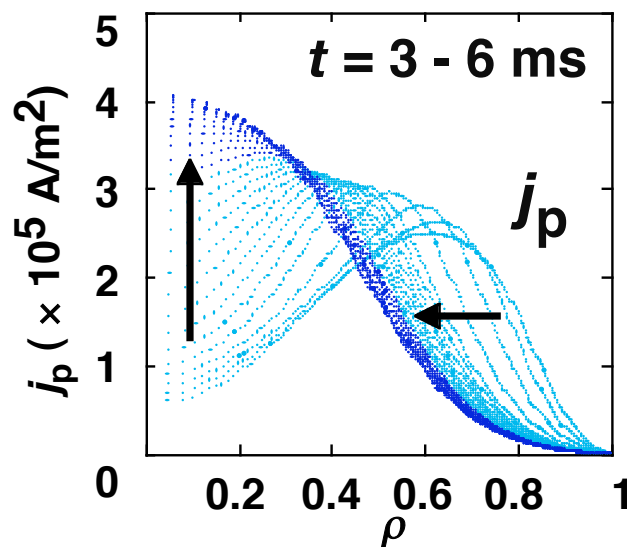
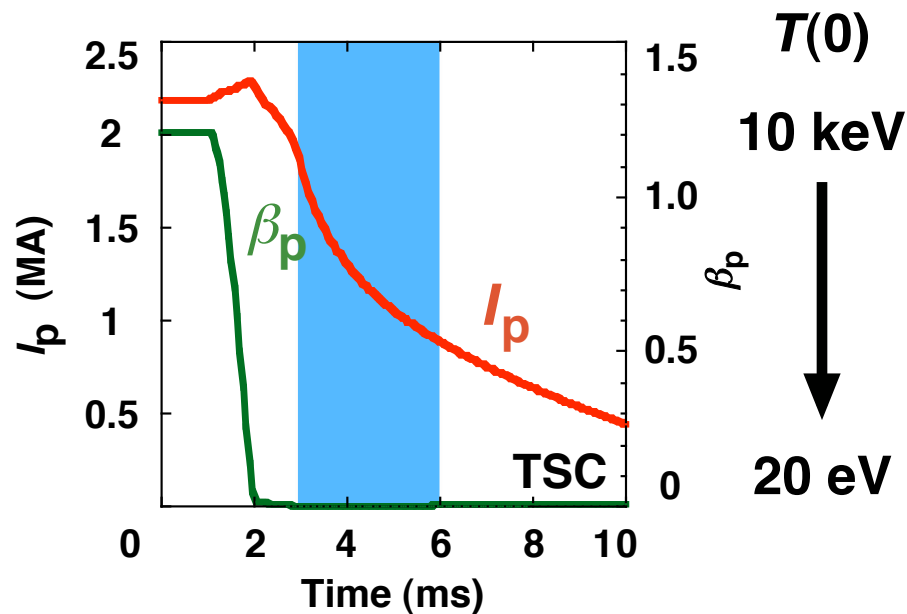
電流拡散による電流分布の変化

- 凹状電流分布の負磁気シアプラズマでは、電流拡散によって凸状分布へと変化する。

cf. 正磁気シアプラズマ
では凸状分布のまま

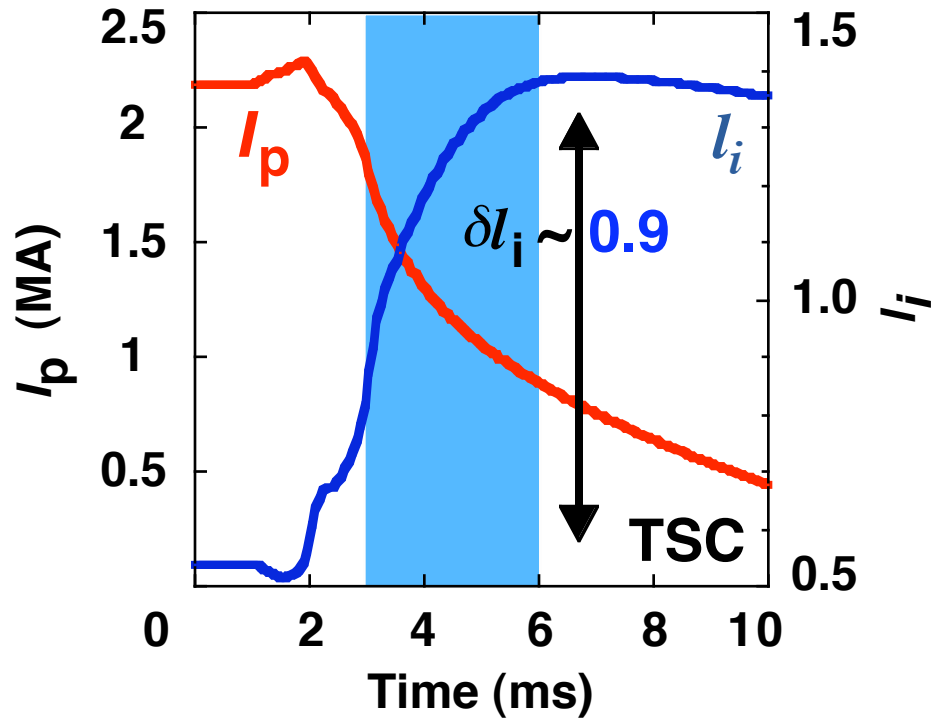
- 内部インダクタンスの急激な増加により、電流の減衰が速くなる。

→ 負磁気シア配位特有の現象

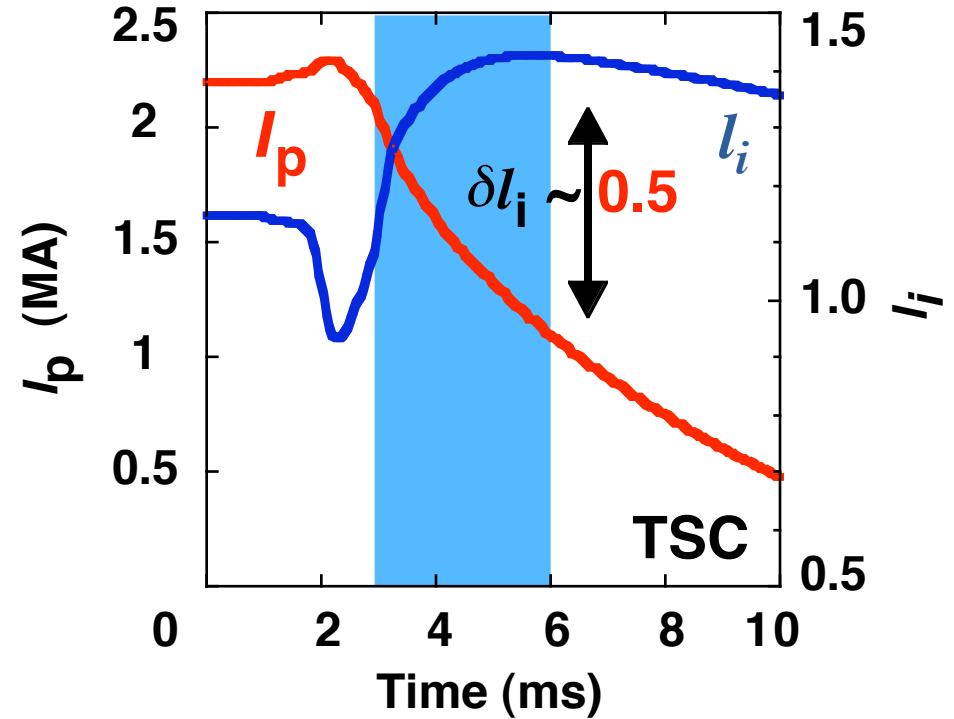


速い電流消滅現象の物理機構

● 負磁気シアプラズマ



● 正磁気シアプラズマ

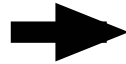


負磁気シアプラズマでは、 l_i の急激な変化により減衰が速くなる過程が加わる。

本研究のまとめ

(1) 熱消滅によるプラズマ電流スパイク

プラズマの内向き移動によって真空容器に誘起される渦電流分布がプラズマ配置に応じて大きく異なることが判明した。



電流スパイクの極性が電流重心の水平位置に依存することを明らかにした。

(2) 負磁気シアプラズマの電流消滅挙動

急激な電流拡散によって速い電流の減少が起きることを示した。