

第12回 若手研究者によるプラズマ研究会

平成21年3月16-18日 那珂核融合研究所

大型トカマク装置JT-60Uにおける電流クエンチ時のL/Rモデルの実験的検証

柴田欣秀¹、岡本征晃²、渡邊清政³、大野哲靖¹、河野康則⁴、
諫山明彦⁴、仲野友英⁴、大山直幸⁴、栗原研一⁴、後藤基志³

名大院¹、石川高専²、核融合研³、原研機構⁴

1. 核融合研究の現状

磁場閉じ込め核融合

⇒トカマク装置(円環状の容器に外部コイルにより作るトロイダル磁場とプラズマ電流を流すことにより作るポロイダル磁場によりプラズマを閉じ込める)

国際熱核融合実験炉(ITER)

⇒世界最大のトカマク実験装置

プラズマ電流: 15 MA
トロイダル磁場: 5.3 T
外部加熱入力: 40 MW
電流維持時間: 300-500 sec

将来の発電プラントとして成り立たせるために長時間放電を目指す

<トカマク型核融合炉の問題点>

ディスラプションの発生

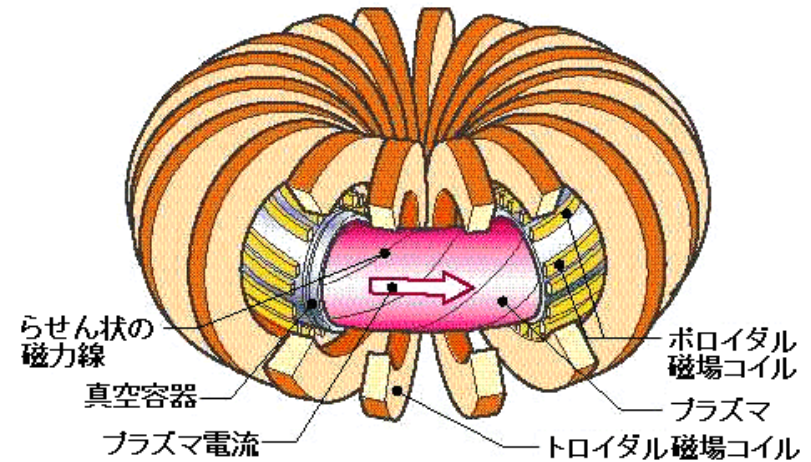


図1:トカマクの概要

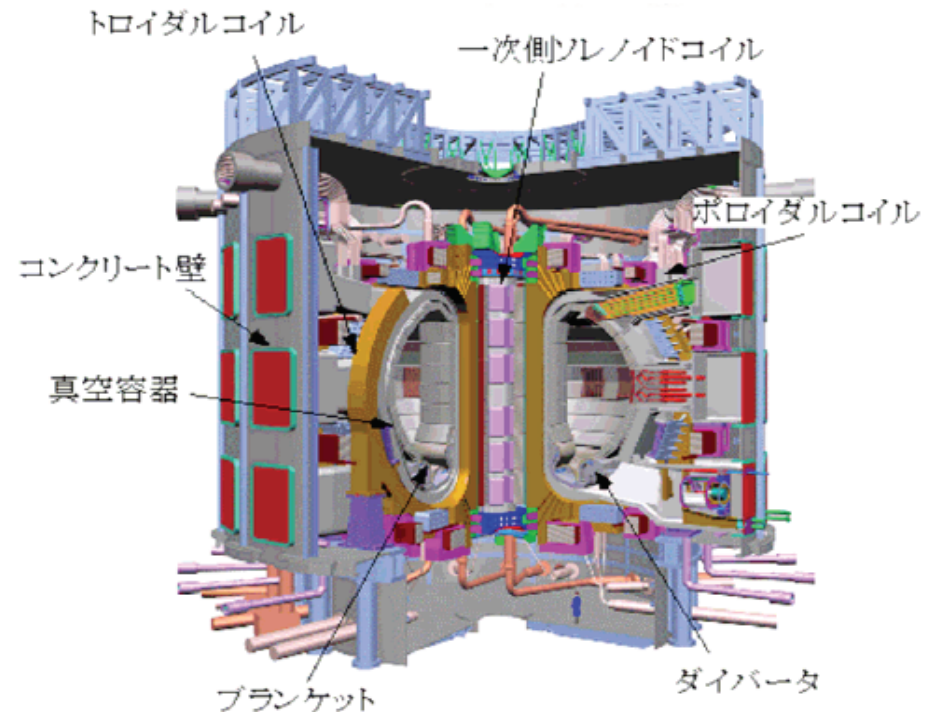


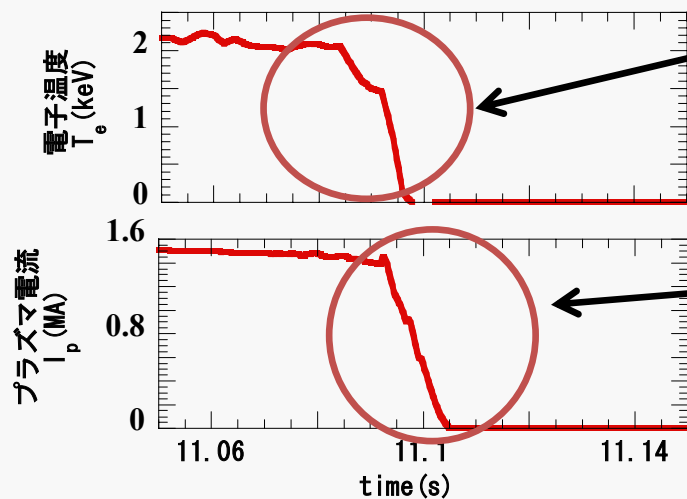
図2:ITERの鳥瞰図

2. トカマクにおけるディスラプション現象

トカマク装置におけるディスラプション現象

⇒プラズマの閉じ込めが急激に失われ、急激にプラズマ電流が減少する現象

ディスラプション時の主な現象



サーマルクエンチ

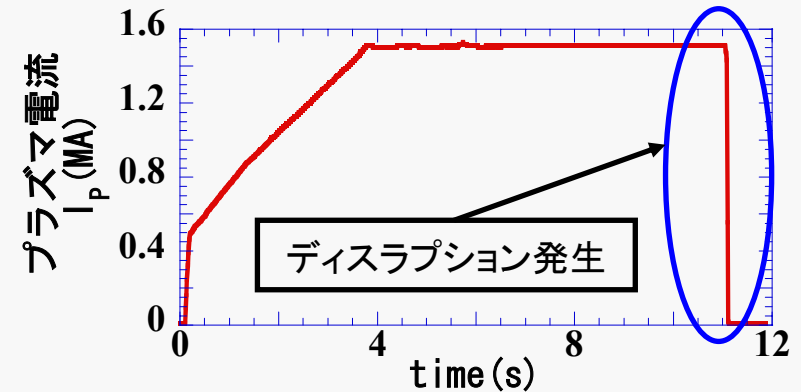
プラズマの熱エネルギーが急激に放出される現象

⇒熱エネルギーは装置に放出されるため、装置に多大な熱負荷がかかる

電流クエンチ

プラズマ電流が急激に減少する現象

⇒電流が急激に減衰することにより真空容器に渦電流が発生し、 $j \times B$ により装置に電磁力が働いてしまう



装置を設計する上においてはディスラプション時に装置が破壊されることを防ぐために装置にかかる負荷を評価することが必要となる

⇒今回は電流クエンチにより発生する電磁力の評価に注目

渦電流はプラズマ電流の減衰率に比例して発生する(急激に減衰する場合は多く発生)



ディスラプション時の電磁力評価には電流減衰時間(電流減衰率)の予測が重要となる

3. プラズマ電流減衰時間 (τ) の評価 (L/R model)

トカマク型装置ではトランスの原理を利用してジュールコイルに電流を流すことによりプラズマに電流を流している

⇒そこでプラズマを抵抗とコイルからなる電氣的な回路と考える

トカマク装置におけるエネルギー保存式は

$$\frac{1}{2} L_p I^2 + \int_{t_0}^t R_p I^2 dt = \int_{t_0}^t V I dt$$

L_p : プラズマインダクタンス

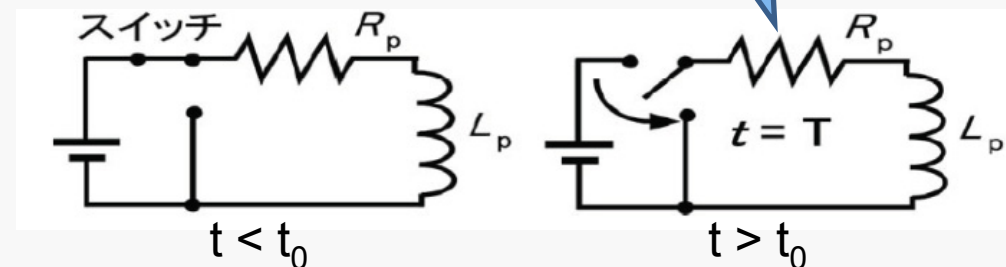
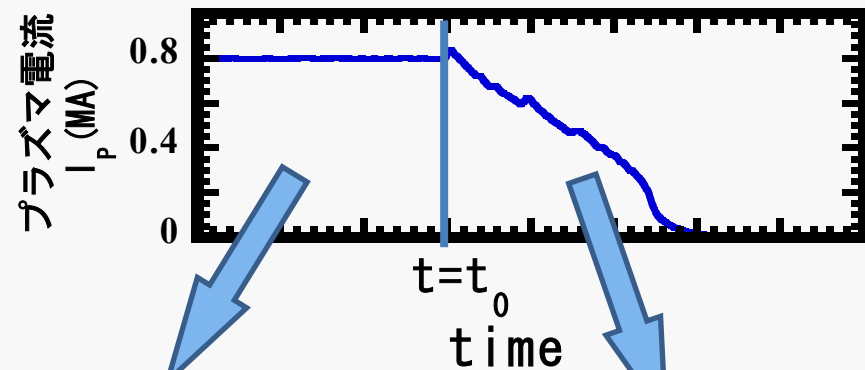
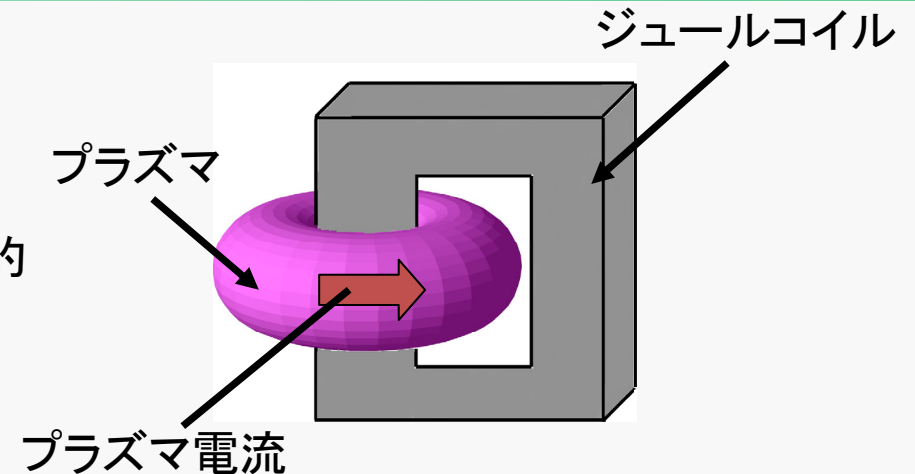
R_p : プラズマ抵抗

V : 電流が流れている方向にかかる一周電圧

上の式を時間微分すると回路方程式を導くことができる

回路方程式

$$\frac{1}{2} \frac{dL_p}{dt} I + L_p \frac{dI}{dt} + R_p I = V$$



4. プラズマ電流減衰時間 (τ) の評価 (L/R model)

回路方程式
$$\frac{1}{2} \frac{dL_p}{dt} I + L_p \frac{dI}{dt} + R_p I = V$$

- ここで仮定として
- ① プラズマインダクタンス L_p は時間変化をしない ($dL_p/dt = 0$)
 - ② プラズマ抵抗 R_p は時間変化をしない
 - ③ 一周電圧 V は他の項に比べて無視できるほど小さい

回路方程式は

$$L \frac{dI}{dt} + RI = 0 \quad \longrightarrow \quad I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (\text{時定数: } \tau = L_p/R_p)$$

⇒この回路方程式から求められる時定数を使うことによりディスラプション時の電流減衰時間を見積もることができる

プラズマ抵抗 R_p とプラズマ抵抗率 η_p は

$$\eta_p = \frac{R_p S}{2\pi R_0} \quad \eta_p = 1.65 \times 10^{-9} \times Z_{\text{eff}} \times \ln \Lambda \times T_e^{-3/2}$$

R_0 : プラズマ大半径
 S : プラズマ断面積
 T_e : 電子温度
 Z_{eff} : 実効電荷

規格化電流減衰時間

$$\frac{\tau}{S} = \frac{L_p / 2\pi R_0}{\eta_p} \quad \longrightarrow \quad \frac{\tau}{S} \propto \frac{T_e^{3/2}}{Z_{\text{eff}}}$$

規格化電流減衰時間

- ① 電子温度 T_e の3/2乗に比例
- ② 実効電荷 Z_{eff} に反比例

5. プラズマ電流減衰時間 (τ) の評価 (L/R model)

L/Rモデルにおける規格化電流減衰時間

$$\frac{\tau}{S} \propto \frac{T_e^{3/2}}{Z_{eff}}$$

①電子温度 T_e の3/2乗に比例

②実効電荷 Z_{eff} に反比例

実際に各トカマク装置における規格化電流減衰時間と電流クエンチ中の電子温度、実効電荷と比較をしたデータベースはない

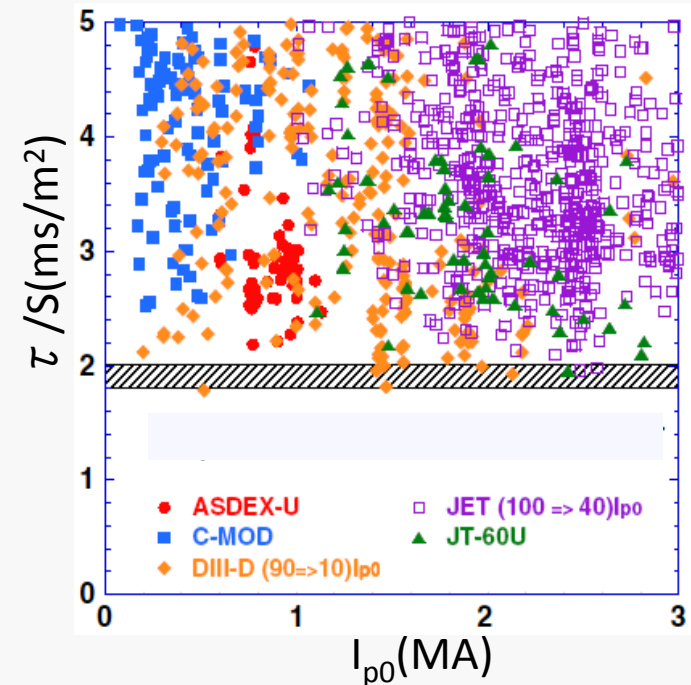
⇒電流クエンチは低温かつ短時間で発生するため、大型装置では電子温度・実効電荷の計測が難しい

電子温度計測

⇒電流クエンチ前に急激な電子温度低下があるため、数eVの電子温度計測が難しい

実効電荷計測

⇒バックグラウンドが強くなり、分光測定より評価するのが難しい



< Progress in the ITER Physics Basis, Nuclear Fusion, 47 (2007) S128, ch3より抜粋 >

L/Rモデルの妥当性を確かめるためには従来の計測法とは異なる電子温度・実効電荷の評価法が必要

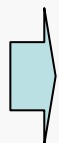
6. 本研究の目的

大型トカマク装置JT-60UにおけるNeガスパフにより発生したディスラプション時の電流減衰モデルの検証

JT-60Uにおける重水素放電において放電後半にNeガスパフを行うことによりディスラプションを発生させる(発生原因を限定)

電流減衰モデル検証に必要なプラズマパラメータ

- ・ 電子温度計測
- ・ 磁気計測

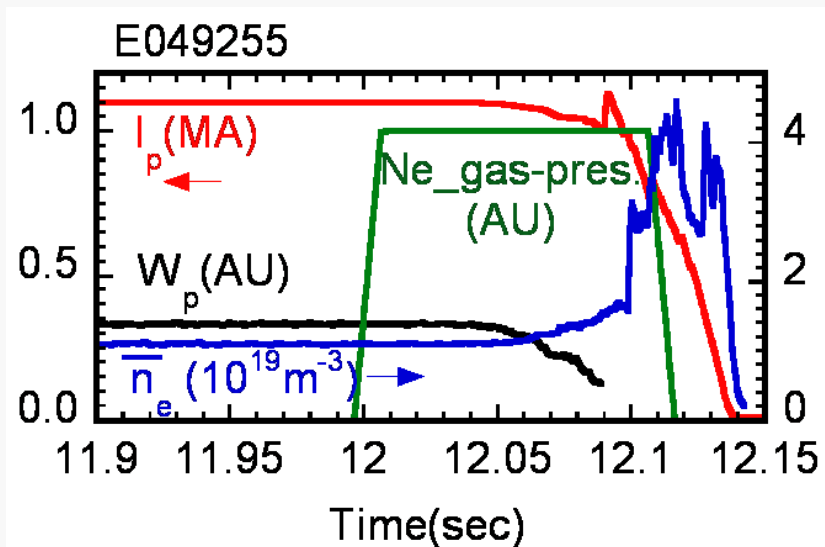


プラズマ抵抗 R_p 、プラズマインダクタンス L_p を評価し、電流減衰モデルの検証

電流クエンチ時のプラズマ抵抗、プラズマインダクタンスを評価することによりITER用の電流減衰時間データベースで使用されているL/Rモデルの実験的検証を行う

7. JT-60UにおけるNeガスパフによるディスラプション実験

今回Neガスパフによるディスラプション実験の電流減衰時間について解析を行った

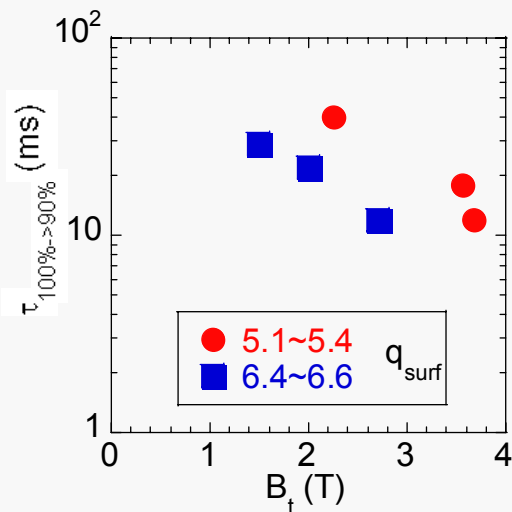
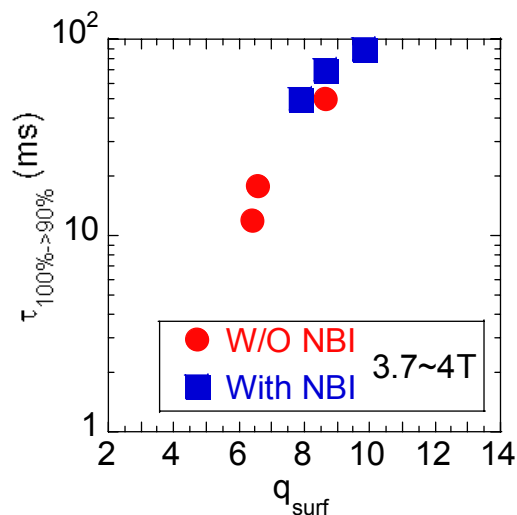


Neガスパフ後、電子密度は増加し、それと同時にプラズマの蓄積エネルギーが減少している



電流クエンチが発生し、急激な電子密度の上昇が観測された

<実験パラメータ>



q_{surf}	5.1-10
B_t	1.5-3.8T
NBI	ON/OFF
Volume	58m ³
R_0	3.22m

8.電流クエンチ中の電子温度計測

①電子サイクロトロン放射(ECE)計測

電子が螺旋運動をする際に生じる電子サイクロトロン放射より電子温度を計測する方法

$$I = (\omega^2 / 8\pi^3 c^2) \kappa T_e [1 - \exp(-\tau)],$$

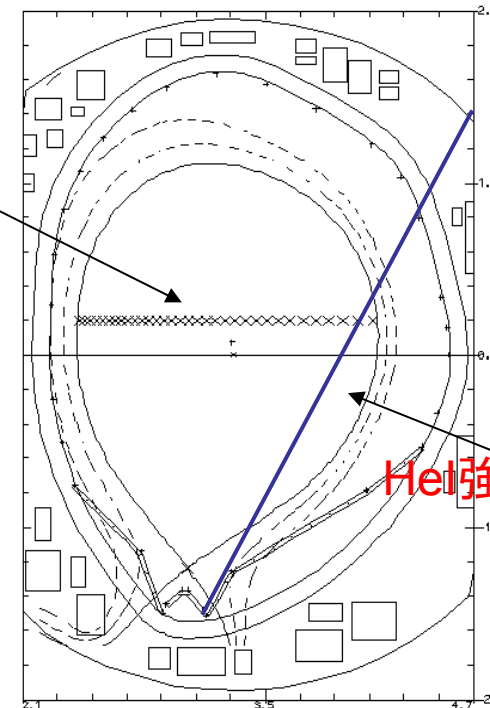
τ は光学的厚さを表す

光学的に厚い(光学的厚さが大きい)プラズマであれば放射強度と電子温度が比例する

⇒低温領域では光学的厚さが小さくなるため計測が不可能

ECE計測

HeI強度比法

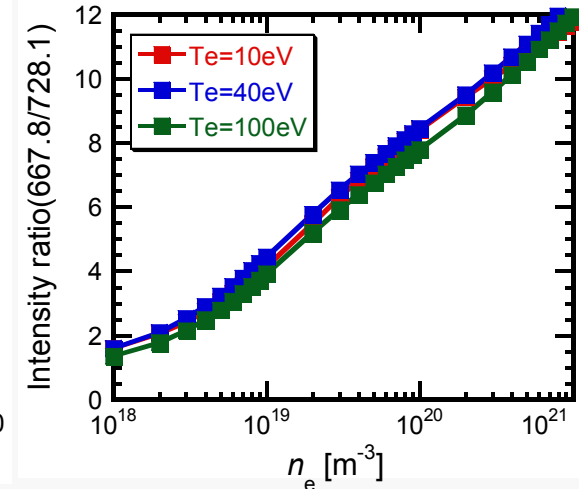
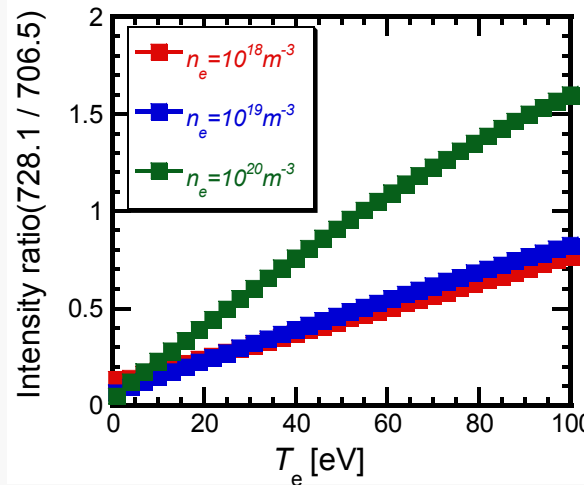


②HeI線強度比法を用いた電子温度計測

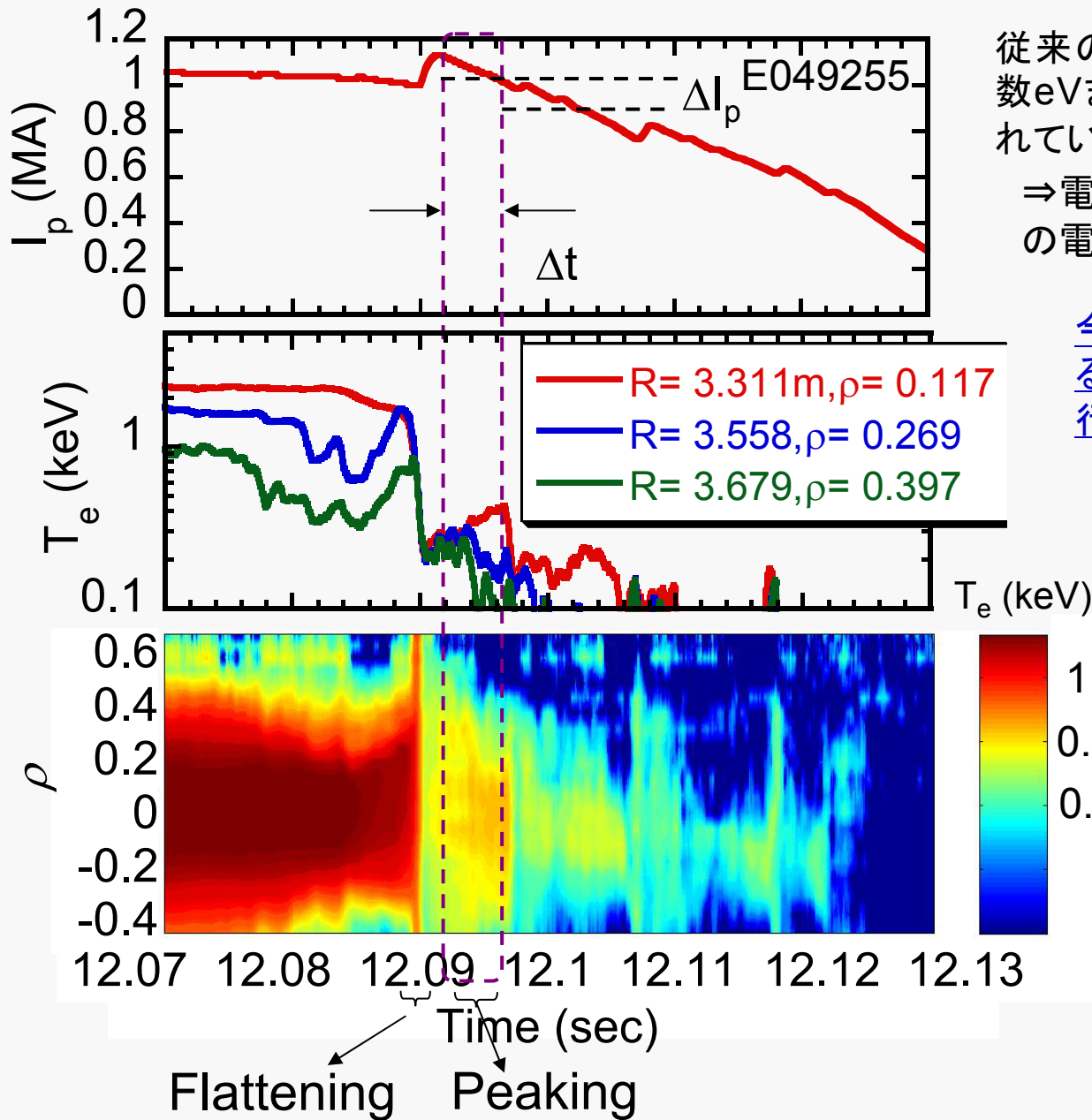
HeIの3つの波長(667nm, 706nm, 728nm)の強度比を用いて電子温度を評価する方法

⇒強度比が電子温度・電子密度に比例しているため、強度比から評価が可能

高速で低温まで計測可能である
が計測値が積分値である



9.ECE計測による電子温度分布の計測



従来の考えではサーマルクエンチ時に数eVまで電子温度が低下すると考えられていた

⇒電流減衰中でもコア部は400eV程度の電子温度があることがわかった

今回は電子温度分布が評価できている初期の電流減衰に着目し、解析を行った

電流減衰時間の定義

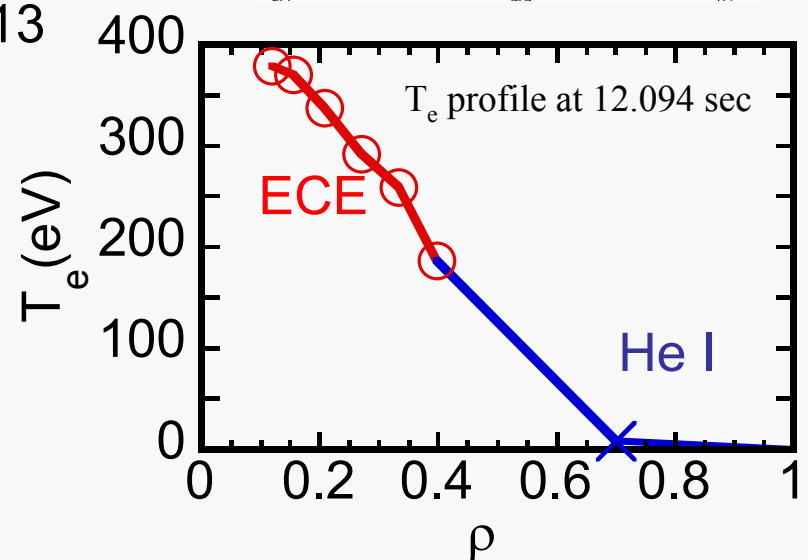
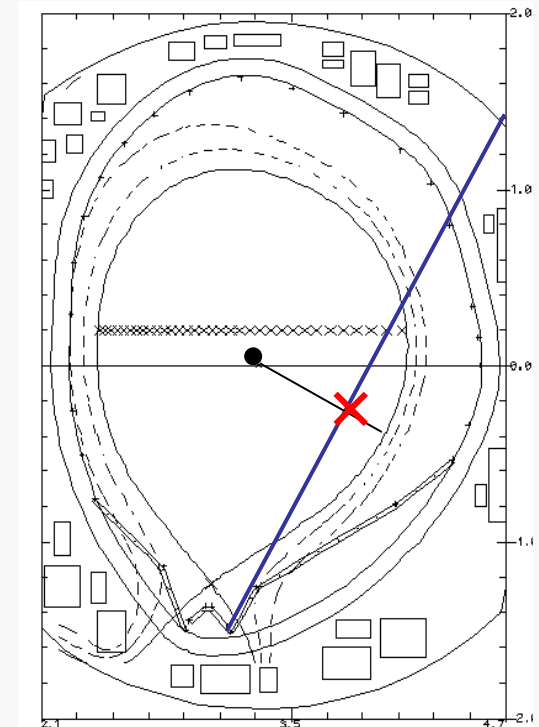
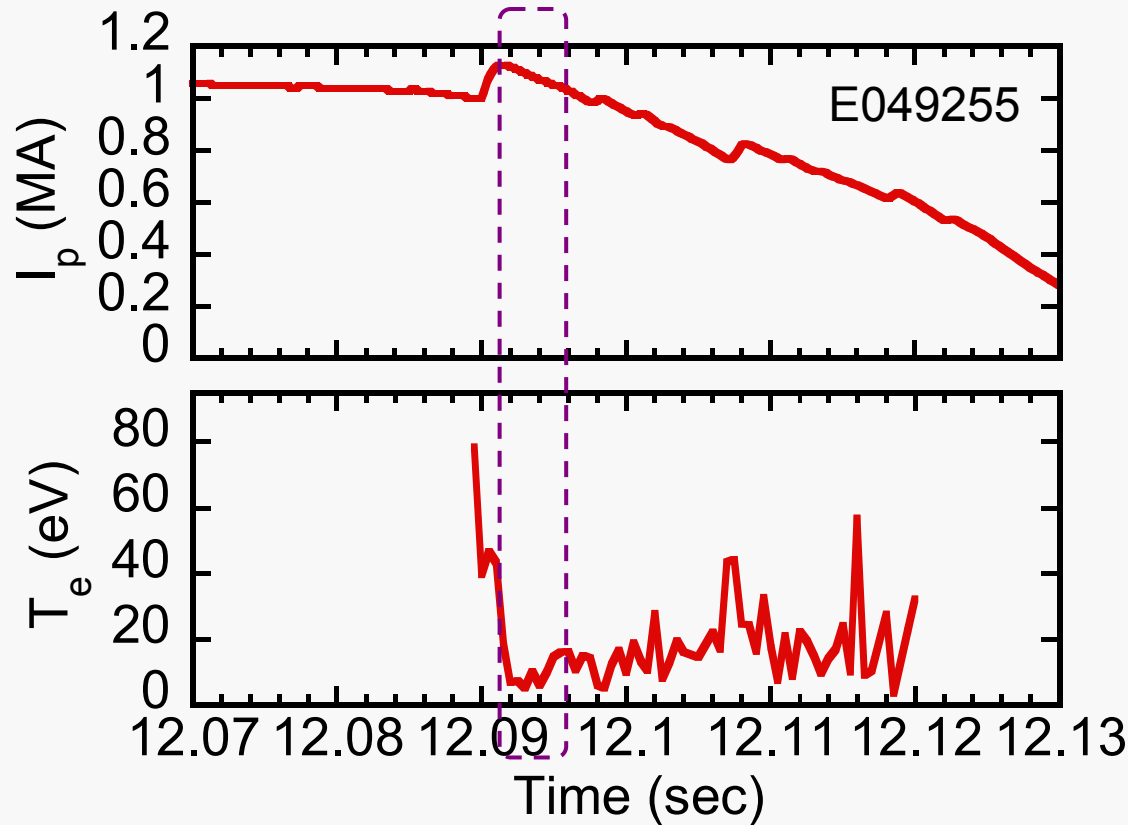
$$\tau_{100-90\%} = I_{p0} / (\Delta I_p / \Delta t)$$

ECE計測では光学的厚さの関係から $\rho > 0.4$ の領域の電子温度は評価することができなかった



$\rho > 0.4$ の領域はHeI強度比法により電子温度の評価を行った

10.電子温度の分布の評価

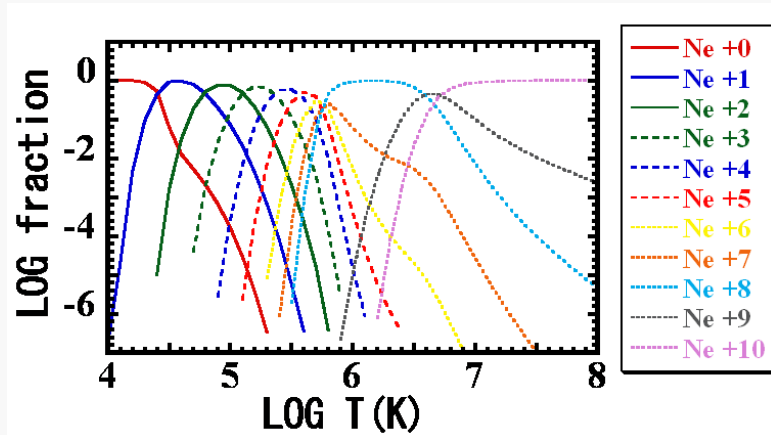


HeI計測は線積分計測であるため、視線上でプラズマ中心から一番近い点を計測していると考えた(規格化半径では $\rho=0.7$)

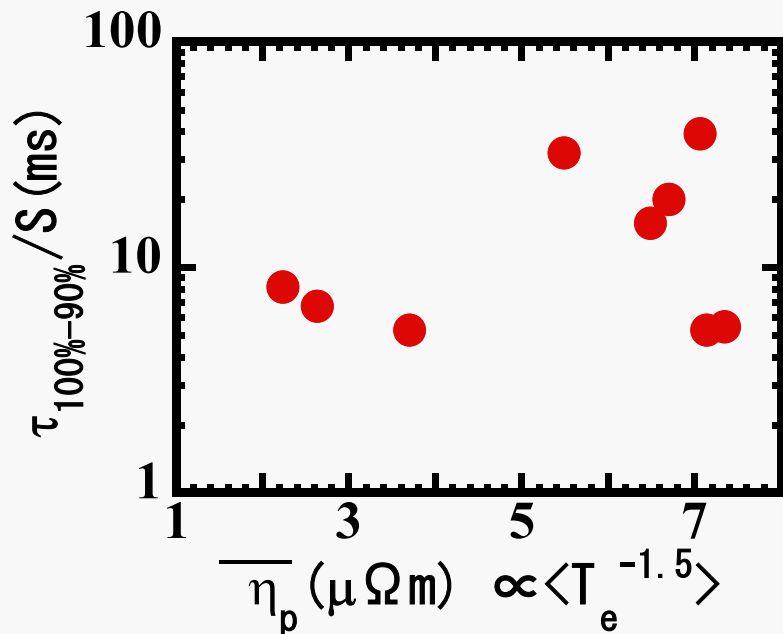
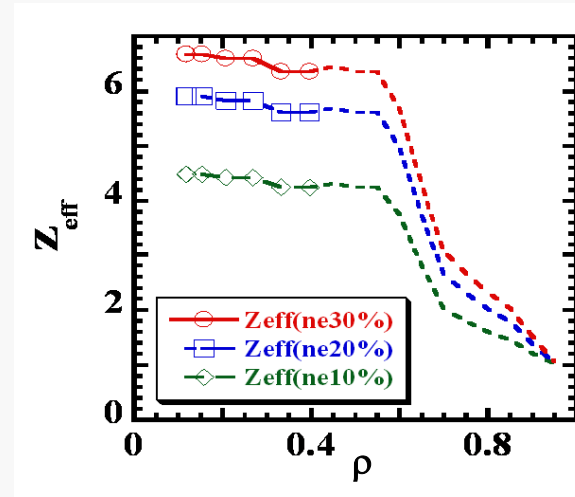
⇒ECE計測と組み合わせることにより電流クエンチ中の電子温度分布を評価

11. 電流減衰時間と電子温度の関係

電子温度分布よりNeのイオンの存在確立の電子温度依存性から実効電荷の分布を評価



NeがDに対して10%, 20%, 30%混入したと考慮して計算



電子温度分布と実効電荷分布 (Ne20%混入) を用いて、プラズマ抵抗率を評価した

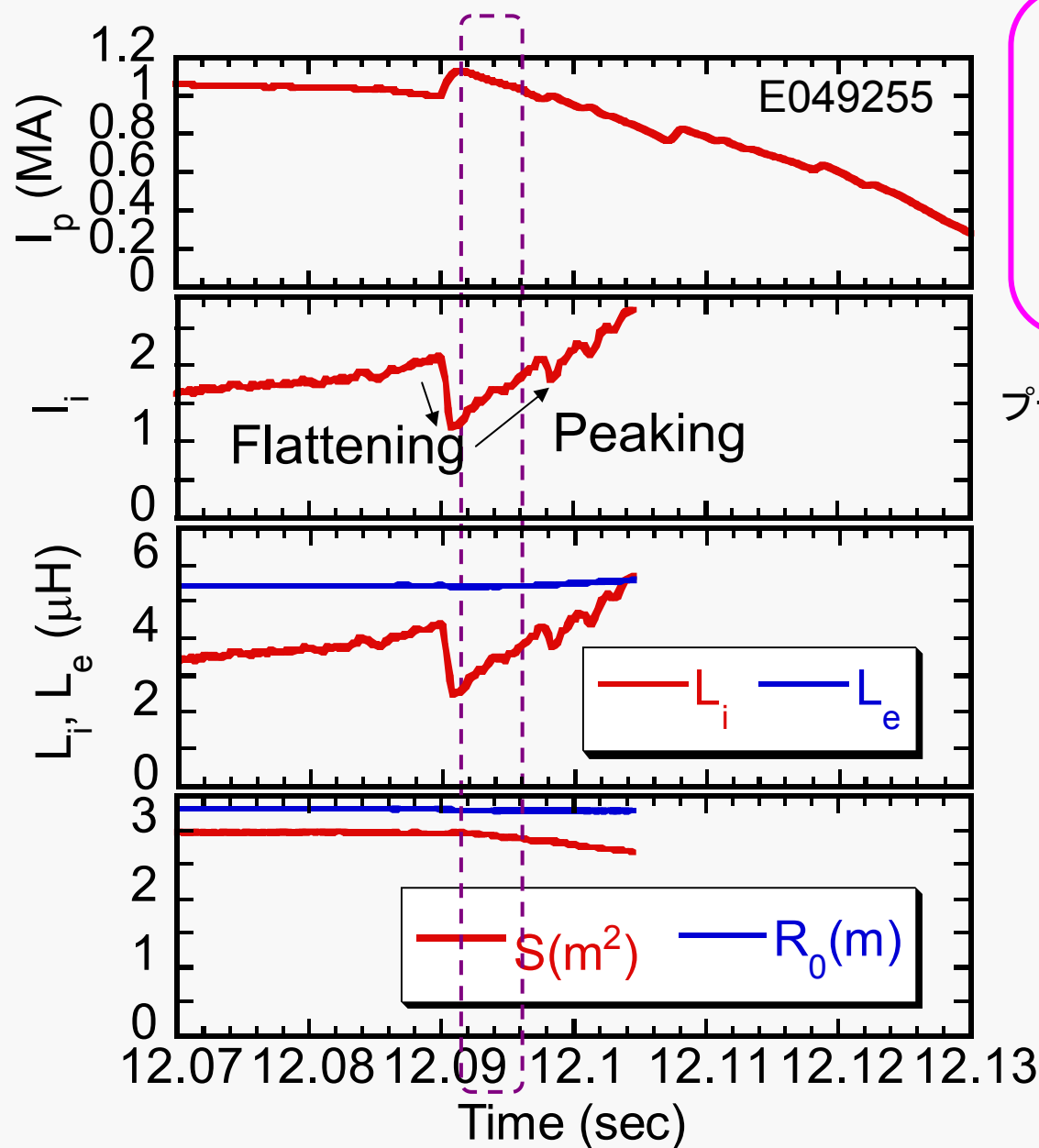
$$\overline{\eta_p} = 1.65 \times 10^{-9} \cdot Z_{eff} \cdot \ln \Lambda \cdot T_e^{-1.5}$$

<L/Rモデルでの規格化電流減衰時間>

$$\frac{\tau_{L/R}}{S} = \frac{L_p / 2\pi R_0}{\overline{\eta_p}}$$

L/Rモデルにあるよう電流減衰時間と電子温度の相関は見られなかった

12.CCS法によるプラズマインダクタンスの評価(JT-60U)



CCS法

真空容器外部に設置された磁気センサーよりプラズマの最外殻磁気面を同定し、平衡量を評価する計算コード

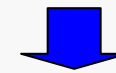
プラズマインダクタンス L_p は以下の式で評価

$$L_i = \mu_0 R_0 l_i / 2$$

$$L_e = \mu_0 R_0 (\ln 8R_0 / a - 2)$$

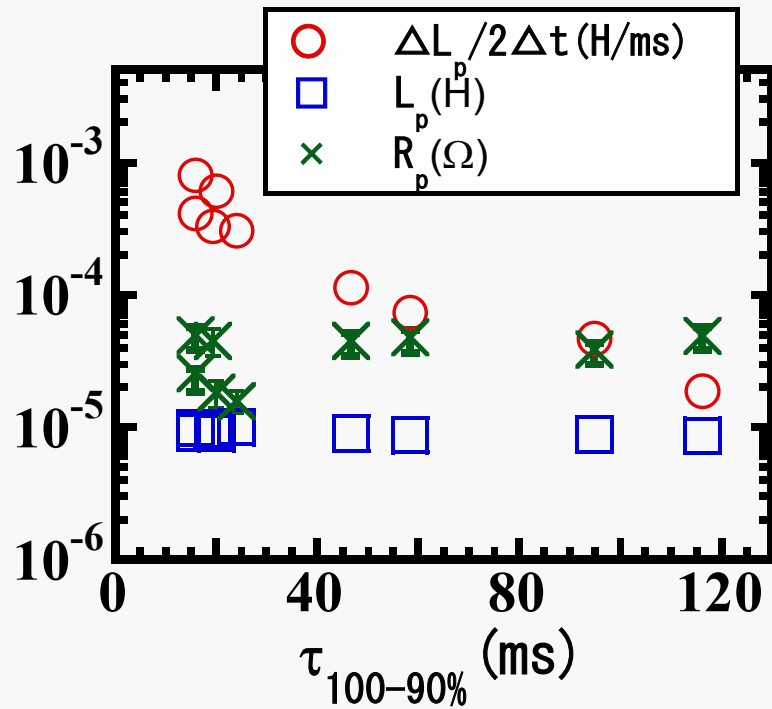
$$L_p = L_i + L_e$$

CCS法により電流減衰初期の段階ではプラズマインダクタンス(特に内部インダクタンス)が時間変化していることがわかった



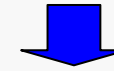
これはL/Rモデルの仮定" $dL_p/dt=0$ "は不適切であることを示している

13. 電流減衰時間と理論値の比較 (JT-60U)



プラズマインダクタンスの時間変化を考慮した回路方程式

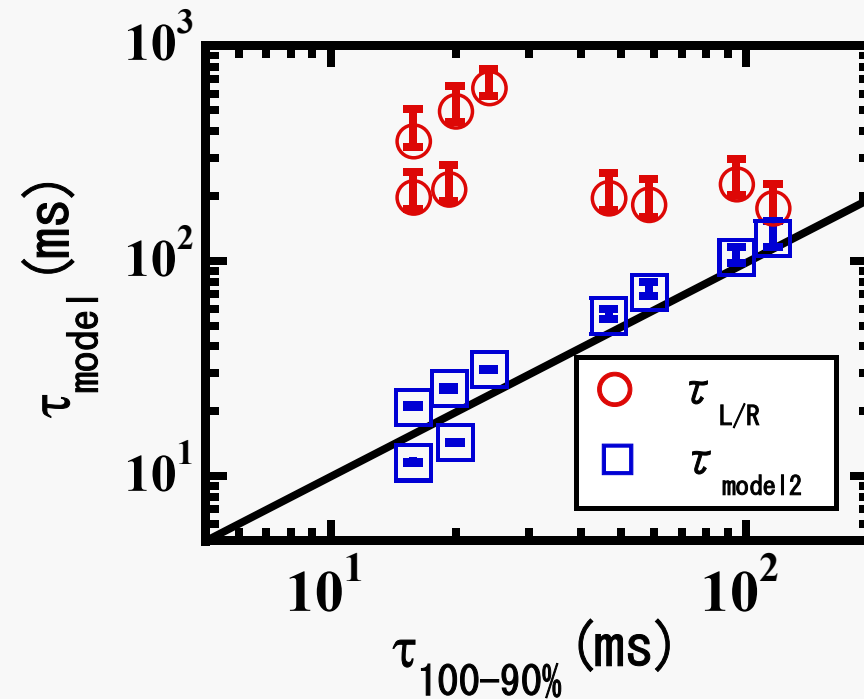
$$0 = \frac{1}{2} \dot{L}_p I_p + L_p \dot{I}_p + R_p I_p$$



電流減衰時間

$$\tau_{model2} = \frac{L_p}{\Delta L_p / 2\Delta t + R_p}$$

プラズマインダクタンスの時間変化を考慮することにより、実際の電流減衰時間との良い一致を得ることができた



14.まとめ(JT-60UにおけるNeガスパフディスラプション実験)

Neガスパフによるディスラプション実験において電流減衰モデルの検証を行った

①電流減衰時間と電子温度の関係

＜L/Rモデルでの規格化電流減衰時間＞

$$\frac{\tau_{L/R}}{S} = \frac{L_p / 2\pi R_0}{\bar{\eta}_p}$$

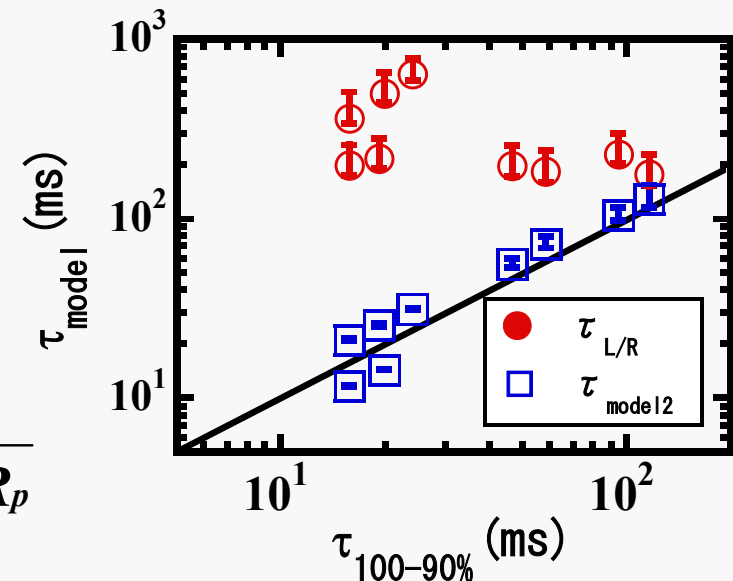
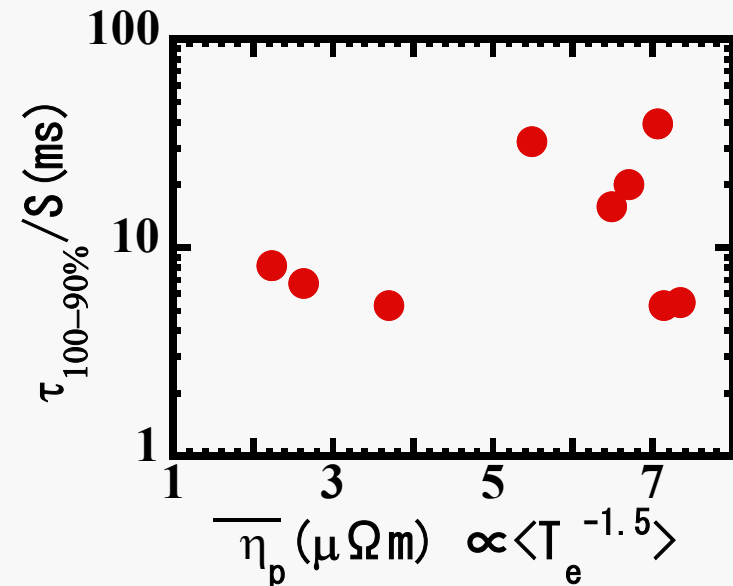
L/Rモデルにあるような電子温度(プラズマ抵抗率)との相関は見られなかった

②L/Rモデルの仮定について

CCS法を用い磁場平衡計算により電流減衰初期ではプラズマインダクタンスが時間変化していることがわかった

⇒ $dL_p/dt = 0$ という仮定は不適切

プラズマインダクタンスの時間変化を考慮した電流減衰時間

$$\tau_{model2} = \frac{L_p}{\Delta L_p / 2\Delta t + R_p}$$


付録

CCS法

マクスウェル方程式

$$\begin{aligned} \text{rot} B &= \mu_0 j, & B &= \text{rot} A \\ \text{div} B &= 0, & & \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \text{rot}(\text{rot} A) = \mu_0 j,$$

$$\begin{aligned} \text{div} A &= 0 \\ \text{トロイダル軸対称} & \longrightarrow \text{div}\left(\frac{\text{grad} \phi}{r^2}\right) = -\frac{\mu_0 j_\omega}{r}, \end{aligned}$$

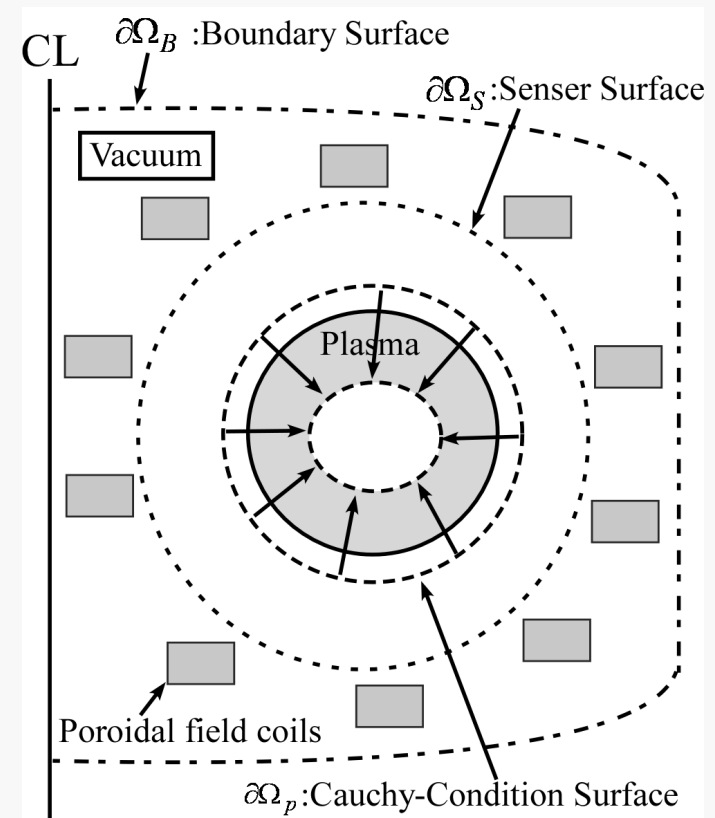
($\phi = rA_\omega$: 磁束関数)

ある点での磁束関数値と r 方向、 z 方向のポロイダル磁場の関係は以下のように表すことができる

$$B_{pol} \equiv \frac{1}{r} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \text{grad} \phi,$$

磁束関数の勾配が分かれば、ポロイダル磁場の評価が可能

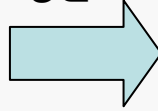
ポロイダル磁場の等高線を描くことにより、プラズマ最外殻磁気面の同定が可能となる



CCS法

$$\operatorname{div}\left(\frac{\operatorname{grad}\phi}{r^2}\right) = -\frac{\mu_0 j_\omega}{r},$$

グリーン関数を用いると



$$\begin{aligned} \sigma \cdot \phi(x) + \int_{\partial\Omega_p} [G(x, y) \cdot \operatorname{grad}\phi(y) - \phi(y) \cdot \operatorname{grad}G(x, y)] \cdot \frac{dS(y)}{r_y^2} \\ = \int_{\Omega_p} \mu_0 j(y) \cdot G(x, y) \cdot \frac{dV(y)}{r_y^2}, \end{aligned}$$

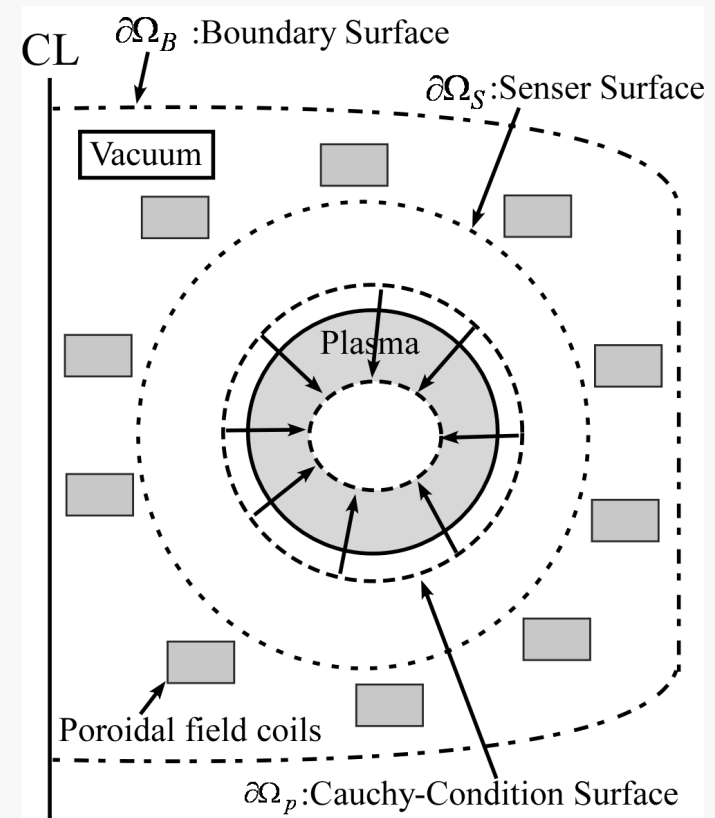
(j : 電流分布、 G : グリーン関数)

例えば、 $\partial\Omega_p$ をプラズマ、 Ω_p をプラズマを除く領域にすれば、プラズマ外側の磁束関数を求めることができる。

真空容器外側に設置された磁気センサー(磁気プローブ、磁束ループ)とコイル電流ポロイダル磁場コイルの電流値を使用することによりプラズマ外部の磁場と磁束を評価することができる



プラズマ最外殻磁気面を同定し、プラズマ平衡量(内部インダクタンス、プラズマ中心など)を評価することができる



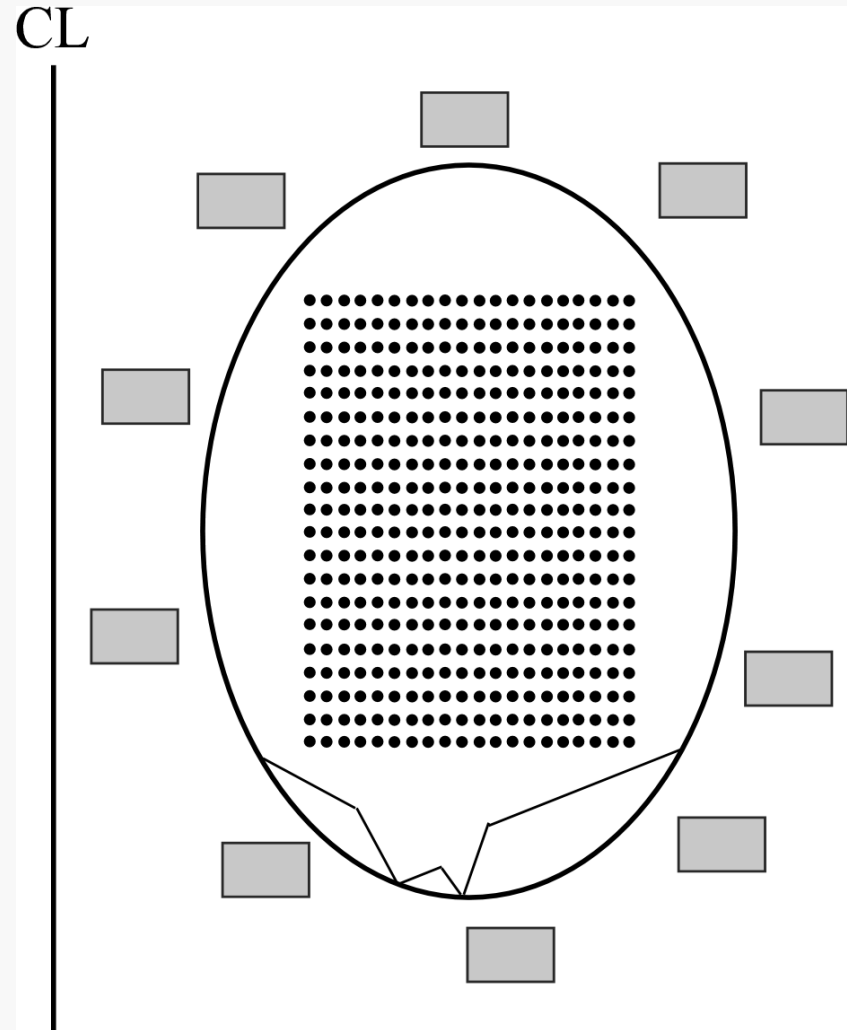
MCCP法

プラズマの電流中心はMCCP法を用いて評価している

プラズマ内部に400(20×20)本のフィラメント電流を仮定し、磁気センサーとの比較を行い、最も高い相関を示すフィラメント電流の位置を電流中心として評価している

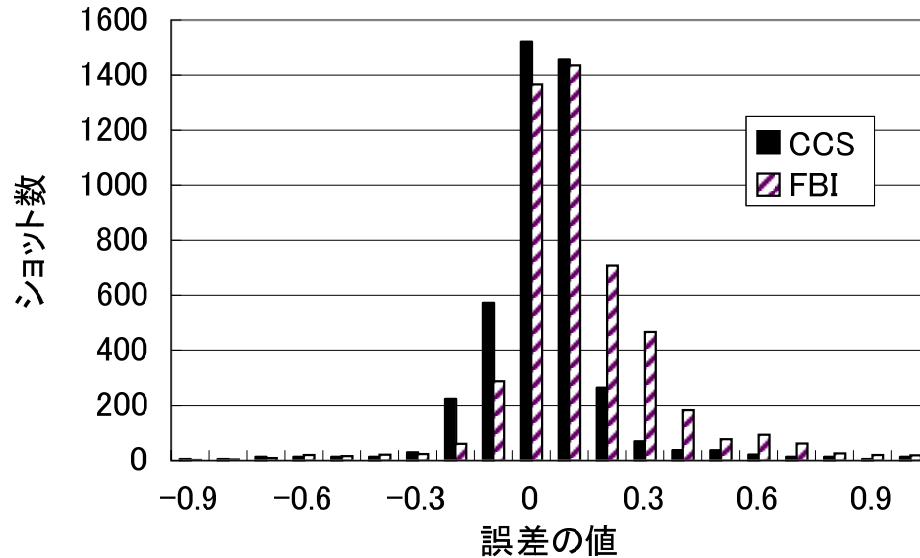
$$\eta^2 = \frac{\left\{ \sum_i^n (X_i - X_{AV})(Y_i - Y_{AV}) \right\}^2}{\sum_i^n (X_i - X_{AV})^2 \sum_i^n (Y_i - Y_{AV})^2}$$

X_i, Y_i はそれぞれ計測器位置*i*での計測値とフィラメント電流による予測値で、添え字AVはXあるいはYの平均値を示している

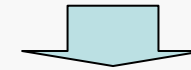


CCS法の妥当性について

△計算値の誤差(高三角度結線)

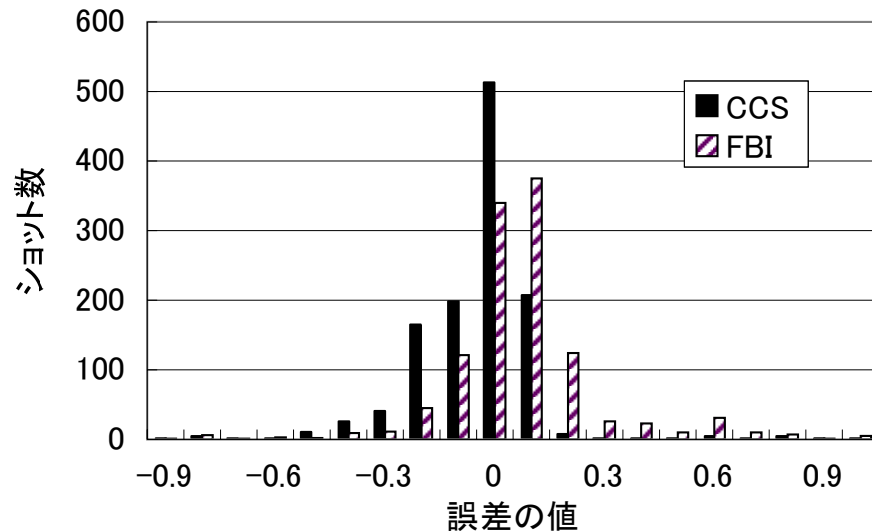


様々なプラズマ平衡を仮定して、その平衡を入力パラメータとしCCS法を計算



CCS法により再構築されたシャフラノフラムダと入力として使用した平衡のシャフラノフラムダを使用して誤差を計算した

△計算値の誤差(高非円形度結線)



実際に実計測されたパラメータとの比較を行う必要があるが、ある程度精度よく評価できていると考えられる

渦電流の効果

渦電流がCCS法における計算に与える影響について調べた

⇒渦電流を計算するプログラムを用いて、電流クエンチ中の渦電流を評価し、渦電流が磁気センサーに与える評価を見積もっている

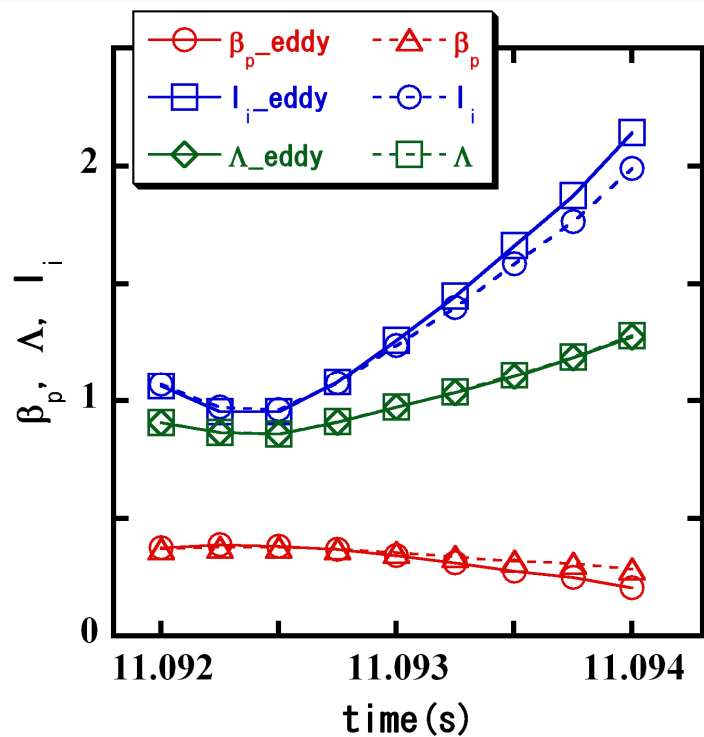


図1 放電番号49051における渦電流の効果の比較。eddyとついているパラメータは渦電流の効果考えたCCS法により評価したもの。

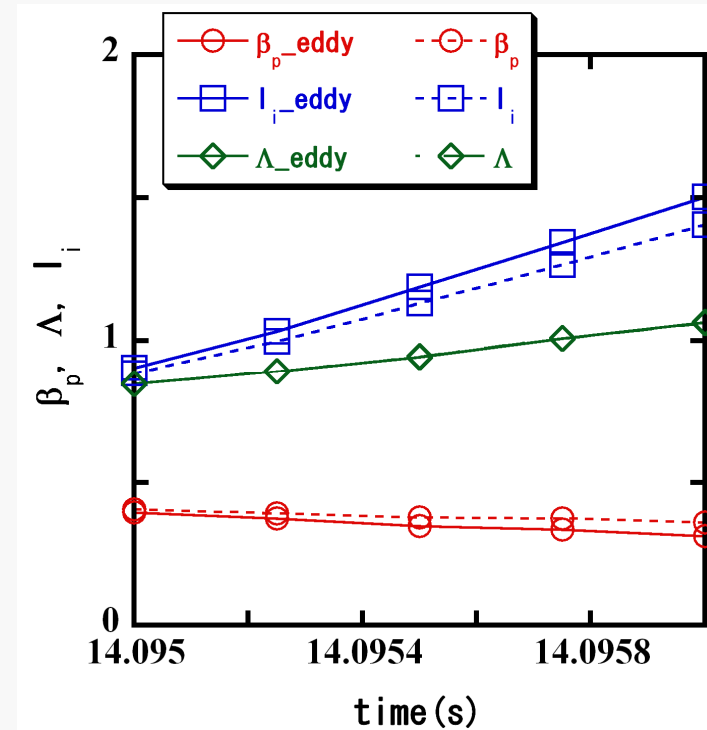
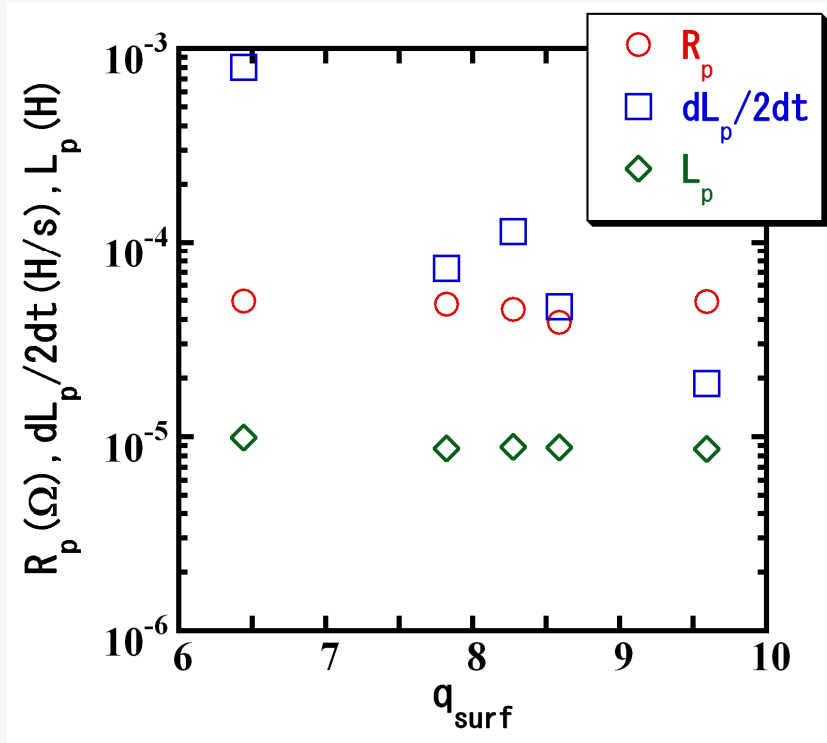
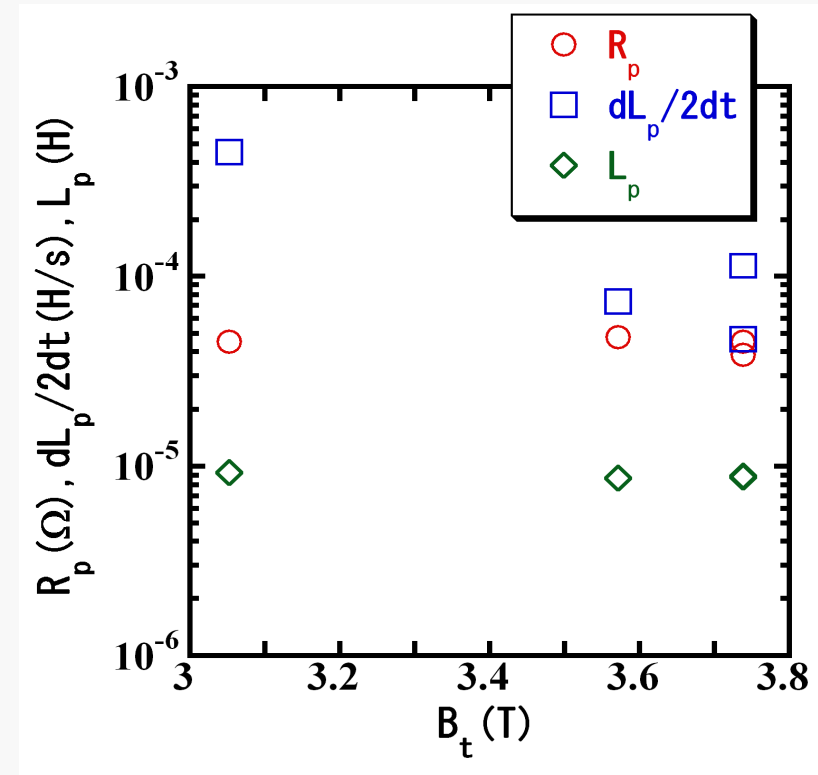


図2 放電番号49605における渦電流の効果の比較。eddyとついているパラメータは渦電流の効果考えたCCS法により評価したもの。

q_{surf} 、 B_t と電流減衰時間の依存性



安全係数と回路方程式の各項の比較

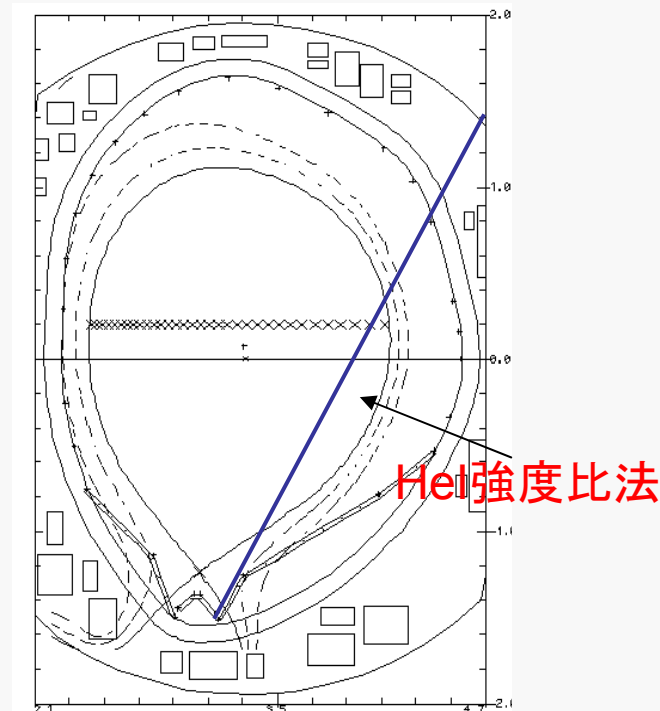
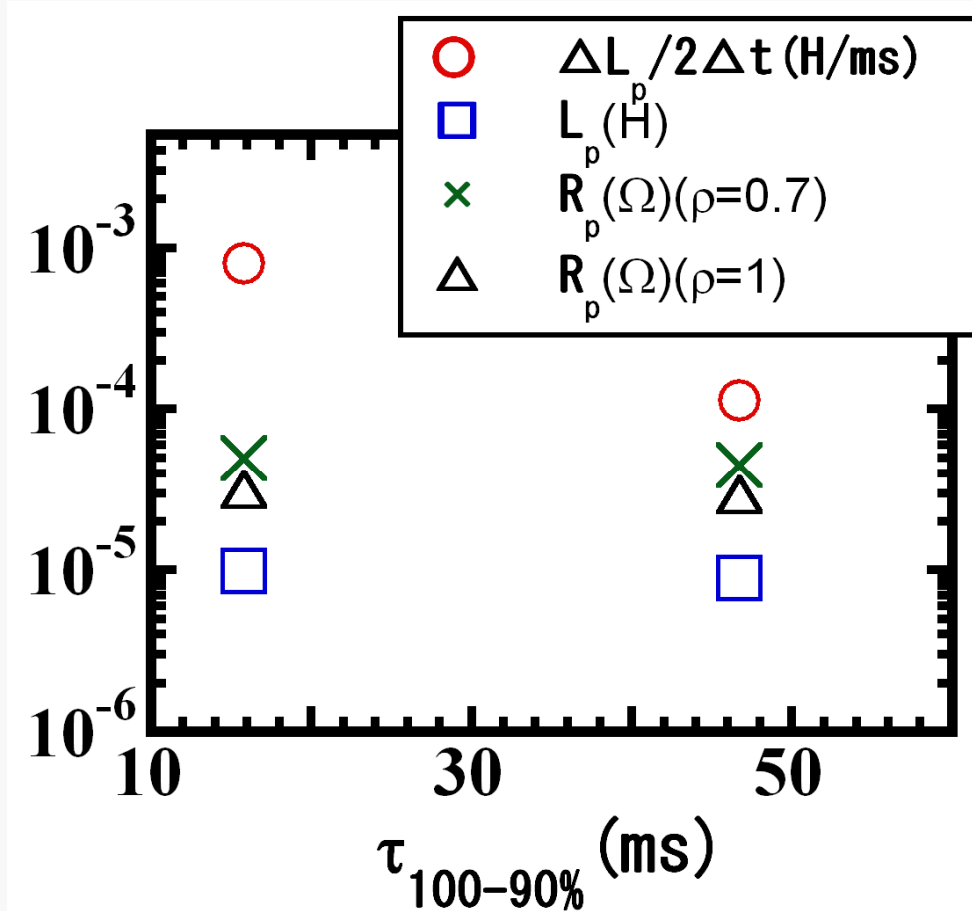


トロイダル磁場と回路方程式の各項の比較

安全係数もトロイダル磁場もプラズマインダクタンスの時間変化に関係している

⇒物理機構はわかっていない

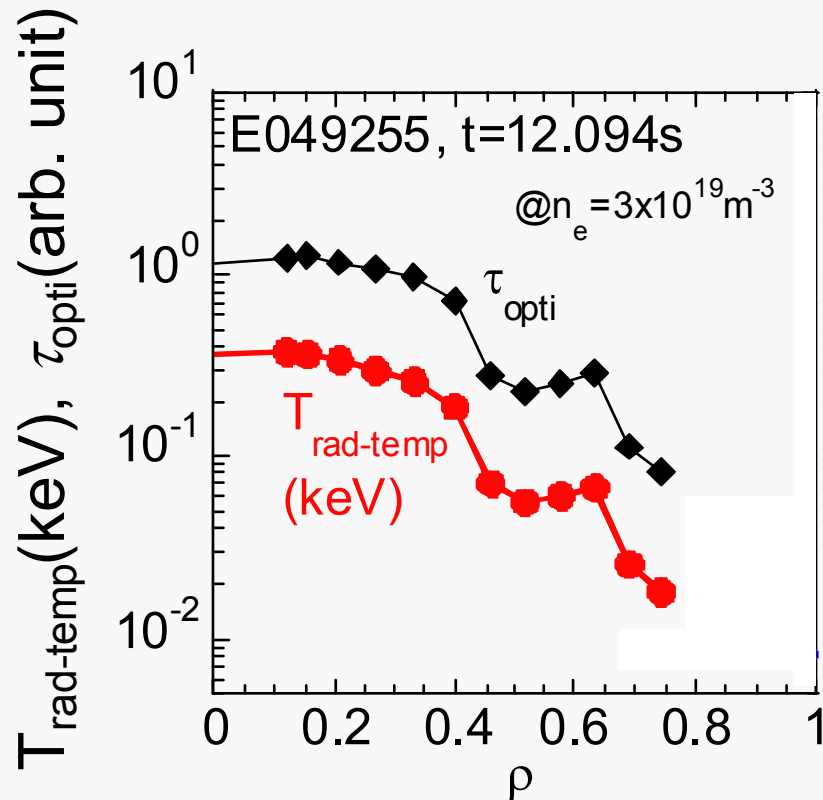
中性ヘリウム発光計測の計測点の効果



仮に中性ヘリウム発光計測の計測点がプラズマ端 ($\rho = 1$) を計測しているとした場合に、電流減衰時間のどれだけ影響するかを考えた

⇒ プラズマインダクタンスの時間変化に比べて影響は小さい

プラズマの光学的厚さ



ディスラプション時における光学的厚さ τ_{opti} とECE計測による電子温度 $T_{\text{rad-temp}}$ の空間分布。

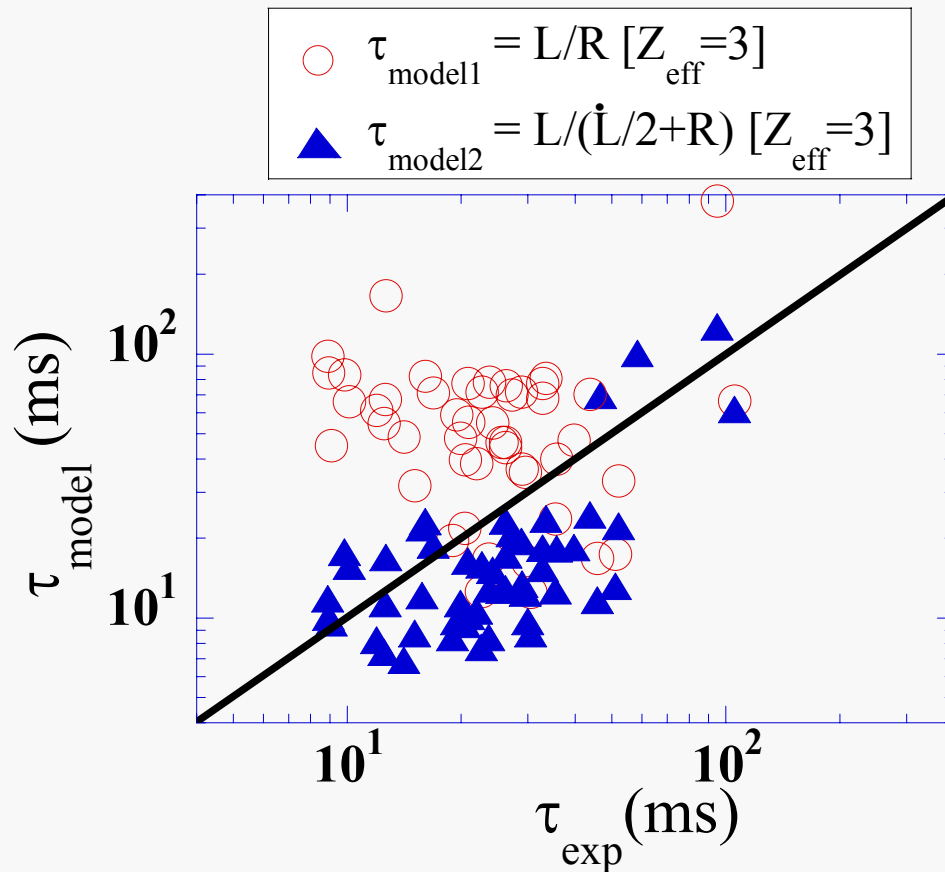
<光学的厚さ>

$$\tau = 2\pi^2 \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{ce}} \left(\frac{kT_e}{mc^2} \right) \frac{R}{\lambda}$$

<放射強度>

$$I = (\omega^2 / 8\pi^3 c^2) \kappa T_e [1 - \exp(-\tau)],$$

Neガスパフ実験以外の電流減衰時間



2006、2007年度の実験サイクル
において発生した電流クエンチ時
の電流減衰時間の比較

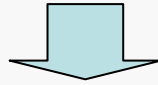
電子温度計測としてはHeI強度比を
用いた電子温度計測のみを使用

Neガスパフ時のような一致は見られ
なかったが、プラズマインダクタンス
の時間変化を考慮することにより、実
験値との関係性が得られた

13. 電流減衰中の渦電流が磁気センサーに与える影響

電流減衰中は真空容器に渦電流が発生することが予想される

⇒CCS法に使用している磁気センサーは真空容器近傍に設置されているため、渦電流が作り出す磁場が磁気センサーに影響を与えす可能性がある



渦電流がCCS法における計算に与える影響について調べた

⇒渦電流を計算するプログラムを用いて、電流クエンチ中の渦電流を評価し、渦電流が磁気センサーに与える評価を見積もっている

CCS法において内部インダクタンス l_i は

$$l_i = 2(\Lambda - \beta_p)$$

今回解析を行った放電9shotにおいて内部インダクタンス評価における渦電流の効果は最大でも6%の誤差しかなかった

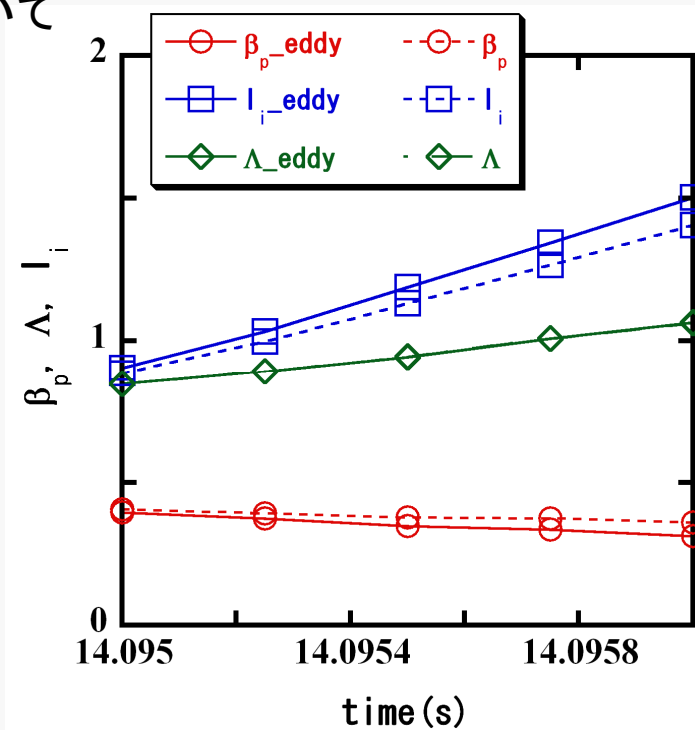


図 放電番号49605における渦電流の効果の比較。eddyとついているパラメータは渦電流の効果考えたCCS法により評価したもの。