

第20回 NEXT研究会 2015 Jan.13-14 京都テルサ 東館3階D 会議室、西館3階第2会議室(ポスター)

# ディスラプション時の電流減衰時間に対する MHD平衡の時間変化の影響に関する研究

渡邊 清政1),柴田 欣秀2),原 雄二郎3),中村 祐司3), 河上 翔4),諌山明彦2)

1) 核融合研, 2)原子力機構, 3)京大・エネ科, 4)名大

#### # 概要

トカマクのディスラプション時の電流減衰時間の決定機構の解明と精度の 高い電流減衰予測・装置への影響評価が可能な解析ツールの構築を目指 した研究の途中経過について報告する。 なお、解析ツールは、MHD平衡コードと1次元輸送コードを基礎とし、MHD 非線形等のシミュレーションが必要な部分は実験結果に基づくモデル化 (スケーリング等)の利用を想定している。



ITER ; 5.3T, 15MA, R/a=6.2m/2m, β<sub>N</sub>~1.8% (<β<sub>tor</sub>>~2.4%), 熱エネルギーW<sub>p</sub>= 133MJ, 崩壊時間が100msとして、1.33GW 電磁エネルギー LI<sup>2</sup>/2~1.23GJ, 電流消滅時間~100ms => 12.3GW (膨大な熱の発生)

W<sub>p</sub>= 270MJ,崩壊時間が100msとして、2.7GW LI<sup>2</sup>/2~1.5MJ,電流消滅時間~100ms => 15MW



 $\frac{dL_{p}}{dt}I_{p} + L_{p}\frac{dI_{p}}{dt} + R_{p}I_{p} = V$   $R_{p}: \mathcal{I} \ni \mathcal{I} \Rightarrow \mathcal{$ V:一周電圧 (外部コイル[オーミックコイル等]による)

さらに、
$$L_p dI_p/dt, R_p I_p >> dL_p/dt, V$$
を仮定。  

$$L_p \frac{dI_p}{dt} + R_p I_p = 0 \quad \square \quad I_p = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (時定数 : \tau = L_p/R_p) \quad \infty \quad ST_e^{1.5} Z_{eff}^{-1}$$

$$R_p = 1.65 \times 10^{-9} \times Z_{eff} \times \ln\Lambda \times T_e^{-3/2} \times \frac{2\pi R_0}{S} \qquad L_p = \mu_0 R_0 \left(\frac{1}{2}l_i + \ln\frac{8R_0}{a} - 2\right) \qquad S: \ \mathcal{T} = \mathcal{T} \times \mathcal{T} \times \mathcal{T} = \mathcal{T} \times \mathcal{T}$$

### 電流の減衰時間は何で決まるのか? ||

#### # ITERの装置設計のモデル(基準モデル)が成り立つ条件は??

=> MHD平衡(well-definedな磁気面)が存在すること *L<sub>p</sub>*(自己インダクタンス)が変化しないこと



# 電流の減衰時間は何で決まるのか? III

# ITERの装置設計のモデル(基準モデル)が成り立つ条件は??

=> MHD平衡(well-definedな磁気面)が存在すること

L<sub>p</sub>(自己インダクタンス)が変化しないこと

$$L_{\rm p} = \mu_0 R_0 \left(\frac{1}{2}l_{\rm i} + \ln\frac{8R_0}{a} - 2\right)$$



#### CCS Method [1]

CCS (Cauchy-Condition Surface) method

- # Estimate the magnetic field and the magnetic flux outside of plasmas only by the magnetics.
- $\Rightarrow Temporal evolution of$ **plasma**inductance and**plasma**shape.
- # Originally developed in JAEA.
- # Integrated Maxwell equation is resolved based on Boundary Element Method.
- ⇒ the exact solution when measurement accuracy and the number of magnetic sensors are enough.
- # Typical accuracy; under JT-60U measurement systems (12
- mag.-probes and 15 mag.-flux loops 15 )
  =>Shafranov-lamda (L)

is within about 0.1.

[1] K.Kurihara, Nucl. Fusion 33 (1993) 399.





Plasma inductance and shape

/(内部インダクタンス)の時間変化は無視できない

# 電流の減衰時間は何で決まるのか? IV



JT-60Uの幅広いパラメーターのディスラプション放電の電流減衰の初期フェ イズの電流減衰時間は以下の仮定の基、修正版ITERの装置設計のモデルで 説明が可能。

=> MHD平衡(well-definedな磁気面)が存在すること /が時間変化すること(抵抗は新古典モデルで説明可)

#### ディスラプション時の電流クエンチ時間のモデル化には、MHD平衡存 在下での電流の時間発展モデルの構築が必要

[ref1] Y.Shibata et al., Nucl. Fusion 50 (2010) 025015. [ref2] Y.Shibata et al., Plasma Fusion Res. 6 (2011) 1302136.

### 電流の減衰時間は何で決まるのか? V

#### 電流分布時間発展の基準モデル; 新古典効果を含む抵抗による電流分布の時間発展モデルを採用



7

[ref.] S.Kawakami et al., Phys. Plasma 20 (2013) 112507.

#### 4 cases of the Te profiles are assumed as the follows;

- (i) Te profile and its time evolution are described by the fitting expression [green solid].
- (ii) Te profile is uniform and the value is evolved as to be same with the spatially averaged Te observation [green dotted]
- (iii) Te profile is described by the fitting expression at  $\kappa = \kappa_{\min}$  and the profile does not evolve [Red]
- (iv) Te profile is described by the fitting expression at  $\kappa = \kappa_{max}$  and the profile does not evolve[Blue].



Results and discussion

# Te profile is uniform ==> I and li hardly change

# Te profile has profile ==> I and li change time evolution of Te profile is not basically important for the time evolution.

more peaked Te profile leads to the fast increase of li.

Hypothesis

# Relationship between expected steady state current profile and initial current profile determine the increasing of li!!?



κとνの差が大きい(温度がピークで電流が平坦)ほど、電流は早く減衰する。

Hypothesis

# Relationship between expected steady state current profile and initial current profile determine the increasing of li!!?

To check the validity of Hypothesis

# we analyze the relationship between the peakedness of the current profile at the start of the current quench and that of the Te profile during the initial phase of the current quench for the all discharges in Ref.[1]



All discharges with the increase of the internal inductance in Ref.[1] satisfy the condition

[1] Y.Shibata et al., Nucl. Fusion 50 (2010) 025015.

[新古典効果を含む抵抗による電流分布の時間発展モデル]の 定性的な妥当性を検証。電流分布の変化理由も解明。

### 電流分布時間発展の基準モデルの定量的検証 |

新古典効果を含む抵抗による電流分布の時間発展モデル

- + MHD平衡の時間発展モデル
- + 外部コイル、導体とプラズマ電流の相互作用は回路方程式で関連付け

### # DINAコードの活用

\*DINAコード

プラズマ電流と外部コイル電流の時間変化とそれに起因する渦電流を考慮したMHD平衡の時間発展解析コード
(ITERディスラプション解析の基準コードの一つ:他にはTSCコードが著名)

- ・渦電流は、プラズマ電流とコイル電流を含む回路方程式により評価。
- MHD平衡は、グラッドシャフラノフ方程式(ポロイダル磁束の偏微分方程式)で評価。境界条件はコイル電流、渦電流による磁場分布。圧力分布は外部入力。
- ・プラズマ電流分布の時間発展は、ポロイダル磁場の拡散方程式で評価。



[ref] Y. Shibata et al. Plasma Phys. Control. Fusion 56 (2014) 045008.

# 電流減衰時間予測の更なるモデル化

κとνの差が大きい(温度がピークで電流が平坦)ほど、電流は早く減衰する
 => 電流の減衰時間は電流クエンチ初期のκとνの大きさに大きく依存

### 熱クエンチ前後の温度分布の変化、電流分布の変化のモデル化

Massive neon gas-puff exp. in JT-60U



[ref] Y. Shibata et al., Plasma Conf. 2014 (2014 Nov.) Niggata, 18PB-023.

### 電流減衰時間予測の更なるモデル化 II



[ref] Y. Shibata et al., Plasma Conf. 2014 (2014 Nov.) Niggata, 18PB-023.

### まとめ

トカマクのディスラプション時の電流減衰時間の決定機構の解明と精度の 高い電流減衰予測・装置への影響評価が可能な解析ツールの構築を目 指した研究の途中経過についてまとめた。

- ・熱クエンチの前後を除けば、MHD平衡コードと1次元輸送コード(新古典 論に基づく電流の拡散コード)の組み合わせで、精度の高い電流減衰時 間の予測が可能なことを示した。
- ・熱クエンチの前後の温度分布や電流分布の変化のモデル化は、緒についたばかりで今後、系統的なデータ解析が必要である。

短い電流減衰時間を有するディスラプションの解析には、MHD不安定 性による異常抵抗の導入や垂直移動現象の解析ツールの構築等、熱ク エンチの前後の温度分布や電流分布の変化のモデル化以外の課題が ある。