

# TOPICS を用いたデータ処理・解析概要

日本原子力研究所 那珂研究所

炉心プラズマ計画室

白井 浩

核燃焼プラズマ統合コード作業会

平成 14 年 3 月 17 日, 18 日 九州大学応用力学研究所

## TOPICS の概要 (1)

(Tokamak Prediction and Interpretation Code System)

- 2次元 MHD 平衡 + 1次元輸送
- 汎用計算機 (IBM RS6000) およびワークステーション上で実行
- 元々は輸送シミュレーションコード
- JT-60 実験 (大電流化改造, 1991) 頃から JT-60 実験データ読み込みルーチンを整備
  - (実験解析用の公開 version と、安積 version に若干の差異がある)
- MHD 平衡は内部計算もしくは平衡 DB の読み込み
  - は (R,Z) 平面  $129 \times 129$  メッシュで計算
- トロイダル磁束平方根小半径を使用、方向 51 メッシュ
  - (実験データは体積平均小半径で、読み込む際にメッシュの変換)
- 多成分水素・不純物 (輸送シミュレーション)  
通常水素・不純物ともに 1 成分 (輸送解析)
- 不純物は完全電離を仮定  
IMPACT (全荷電状態を考慮) と結合

## TOPICS の概要 (2)

- 新古典輸送

  - NCLASS (Houlberg, 2000)

  - Matrix Inversion 法 (Kikuchi, 1999)

- 異常輸送

  - Romanelli の  $i$  モード以外は経験則モデル ( $s \ll \omega$  で  $\omega \ll \nu$ )

- NBI 加熱計算

  - Stix の定常解、OFMC (輸送解析)

  - 1 次元および 2 次元 Fokker-Planck (輸送シミュレーション)

- EC 加熱・電流駆動コード

- OFMC (軌道追跡モンテカルロコード) および

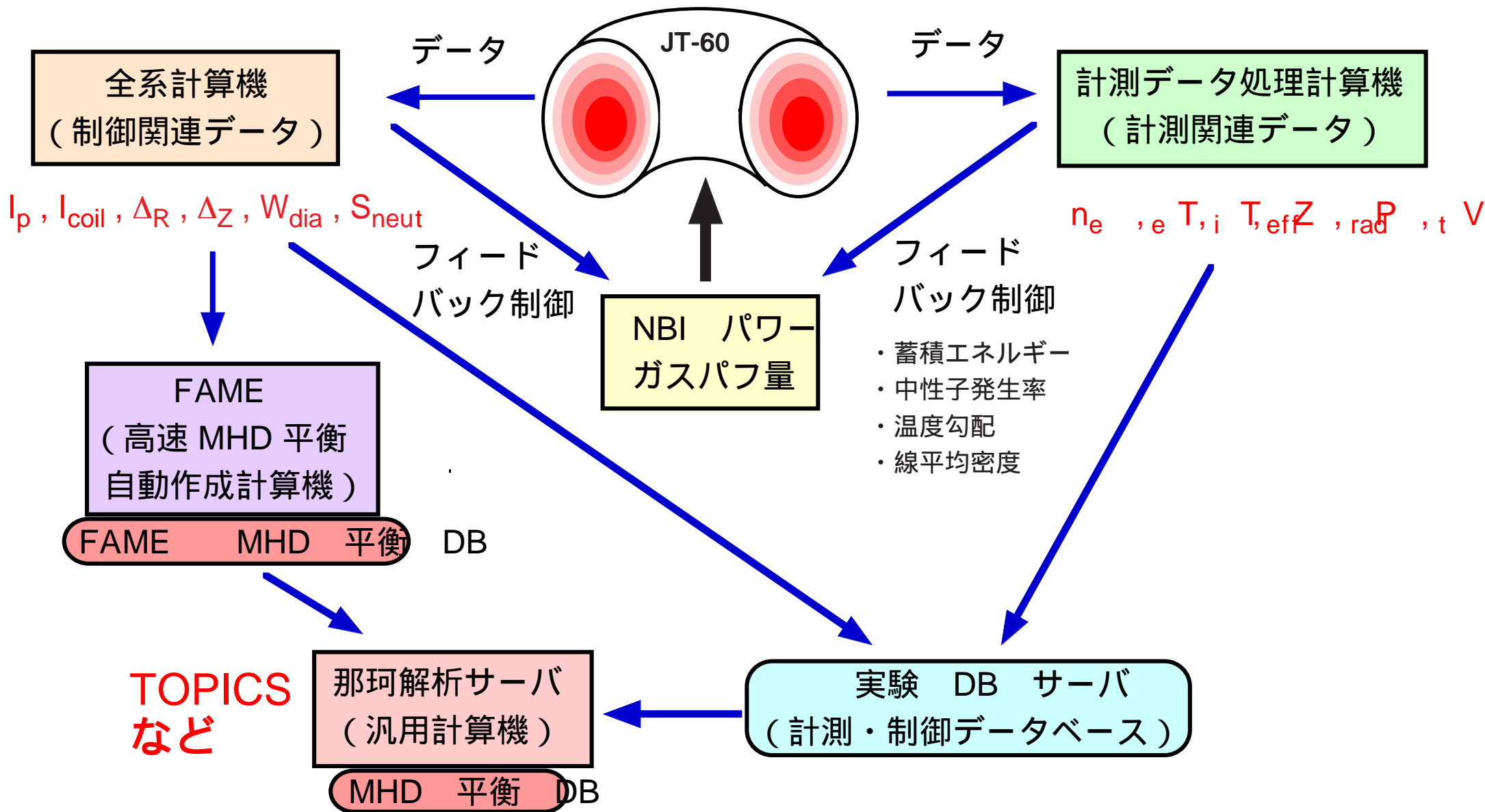
  - ACCOMME (MHD 平衡と自己無撞着なプラズマ電流解析コード)

  - は、TOPICS とは独立のコード (データを受け渡し)

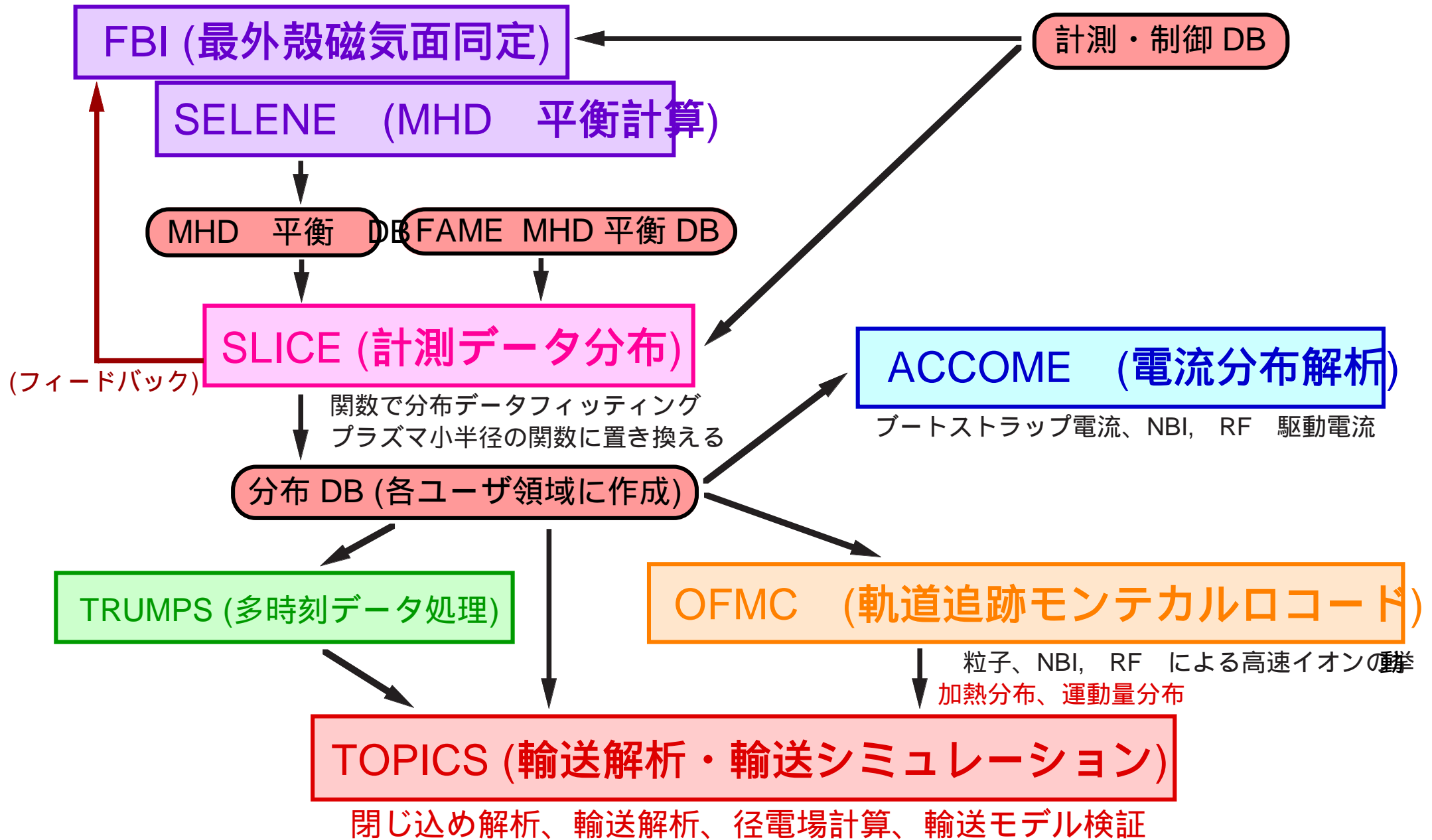
- プロット用に ADAM 形式 (バイナリ形式) のファイル出力

- UFILE 形式 (テキスト形式) のデータ書き出しツールあり

# JT-60 からのデータの流

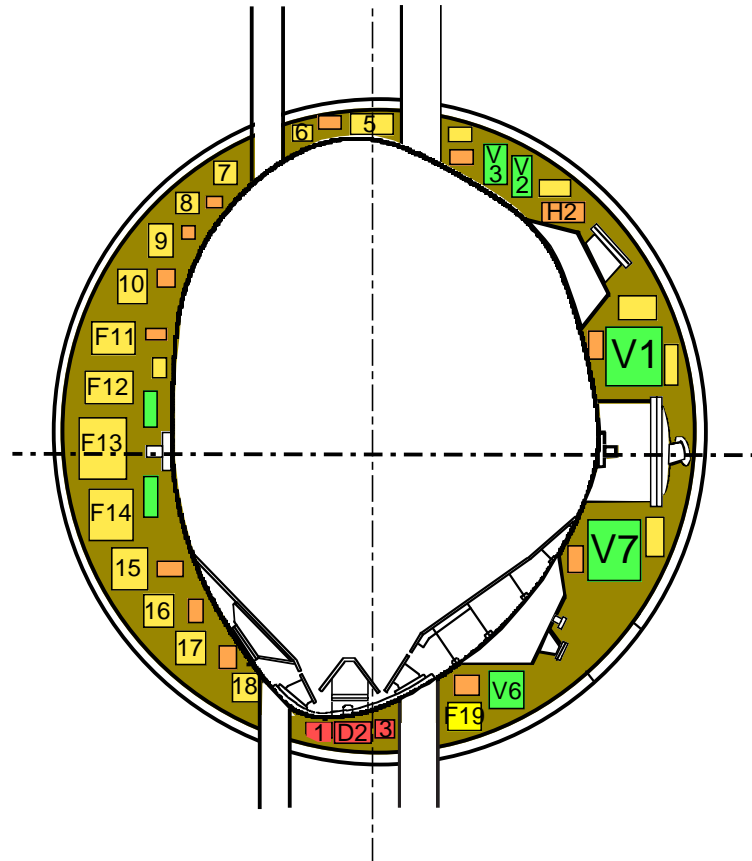


# 輸送・閉じ込め解析の流れ

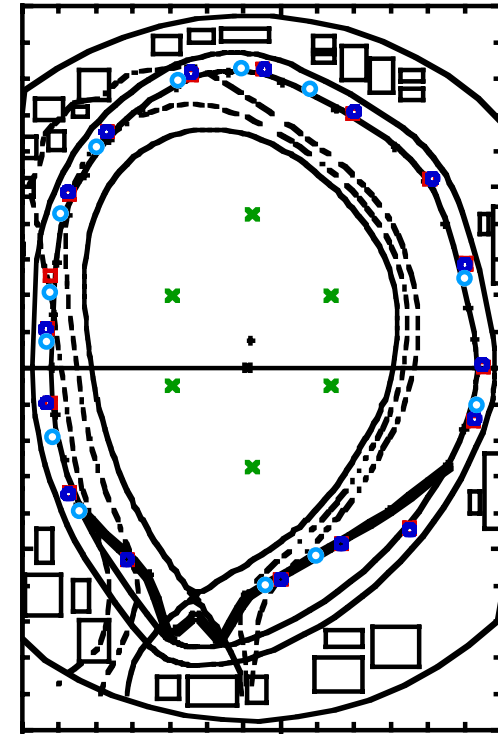


# MHD 平衡計算 (最外殻磁気面同定)

JT-60 のポロイダルコイル系



最外殻磁気面の同定  
(First Boundary Identification Code)

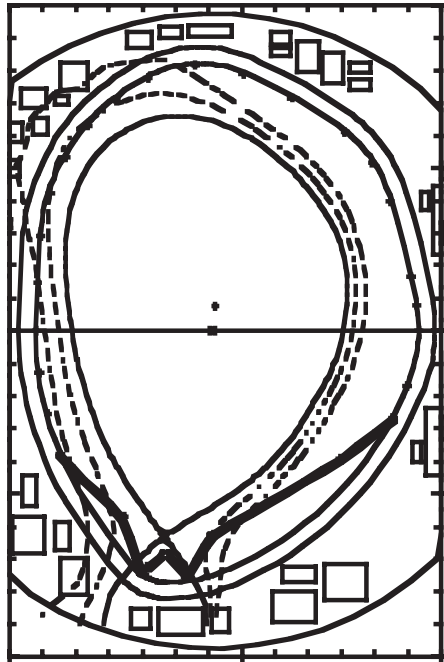


- F コイル** : プラズマ電流を流すための磁束を供給
- V コイル** : 主にプラズマ水平位置を制御
- H コイル** : プラズマの上下位置を制御する
- D コイル** : ダイバータ配位を形成する

- 接線磁気プローブ
- 垂直磁気プローブ
- ワンターンループ
- × 円環電流フィラメント

## MHD 平衡計算 (プラズマ内部)

(境界条件)



$$\frac{dP}{d\psi} = C A(1) Y(\psi)$$

$$\frac{1}{\mu_0} F \frac{dF}{d\psi} = C (1 - A(1)) R_p^2 Y(\psi)$$

$$Y(\psi) = 1 - \psi_n^3 + A(4) + A(2)(\psi_n - \psi_n^3) + A(3)(\psi_n^2 - \psi_n^3)$$

$$\psi_n = \frac{\psi - \psi(0)}{\psi(1) - \psi(0)}$$

フィッティング関数は数種類ある

MSE データがある場合には、ベストフィットするように関数形を選ぶ

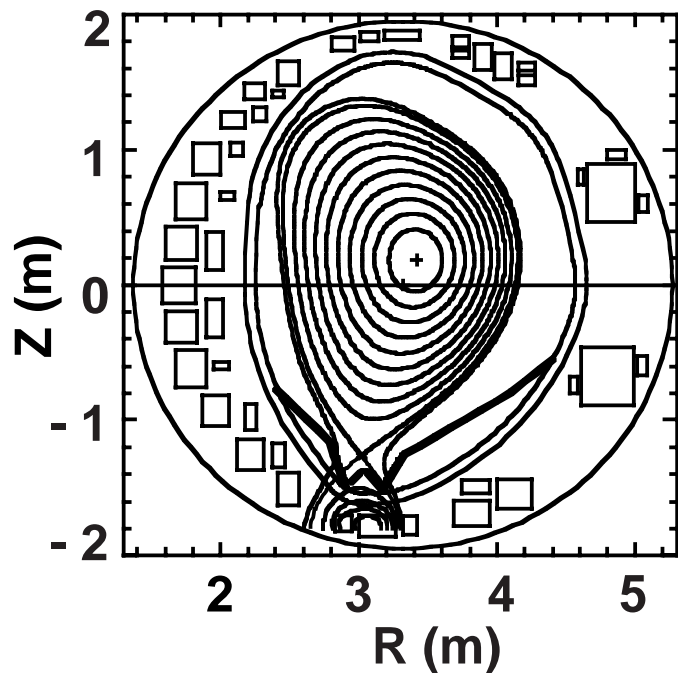
### JT-60 の MHD 平衡 DB

- **FAME** (Fast Analyzer for Mhd Equilibrium)  $q(0)=1$  : 仮定)  
FAME DB は放電終了後に自動作成される (0.1 s おきのデータ)
- **EQDB**  $q(0)=1$  : 仮定)
- **EQRV** MSE データ 使用)
- **EQPRE** MSE データ 使用, Preliminary, 私的データベース)
- **EQEFIT** MSE データ 使用, E-FIT code)

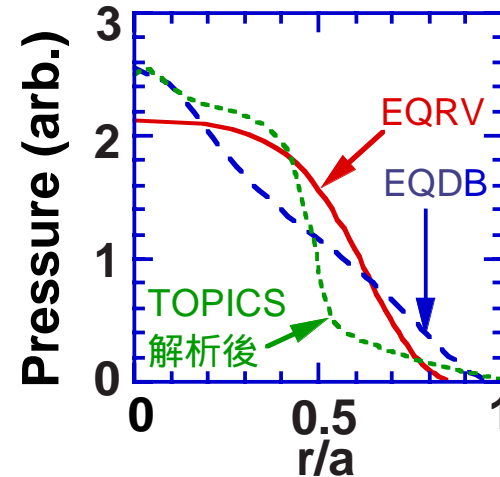
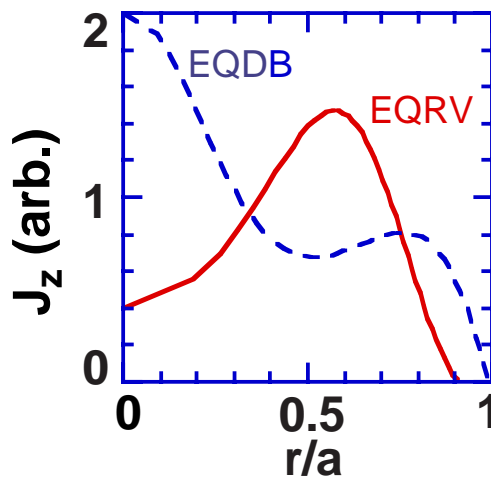
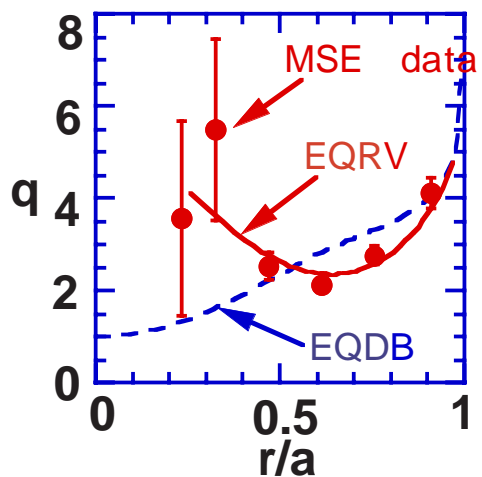
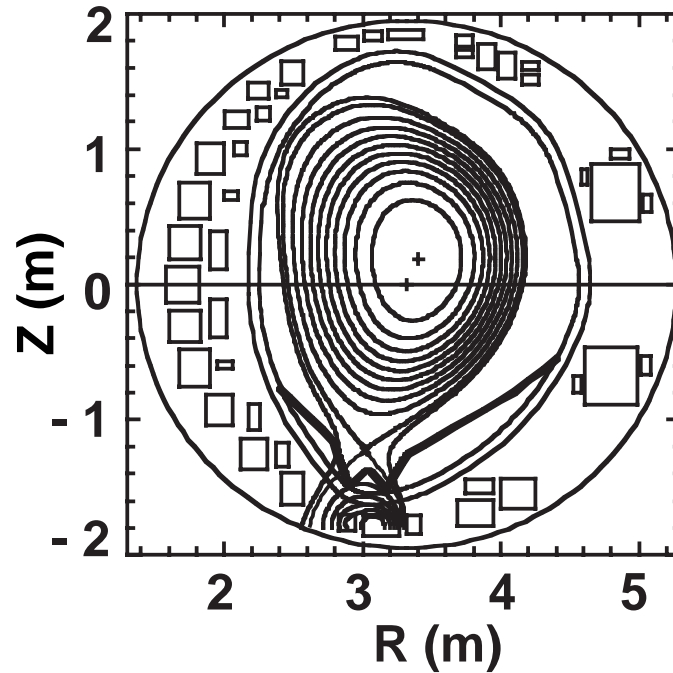
MSE データに基づく MHD 平衡 DB が信頼性が高いが、常に MSE データが取れているわけではない

# MHD 平衡の較

EQDB :  $q(0)=1$  を仮定



EQVRV : MSE データを使用



MHD 平衡計算の仮定が異なると圧力分布は異なる

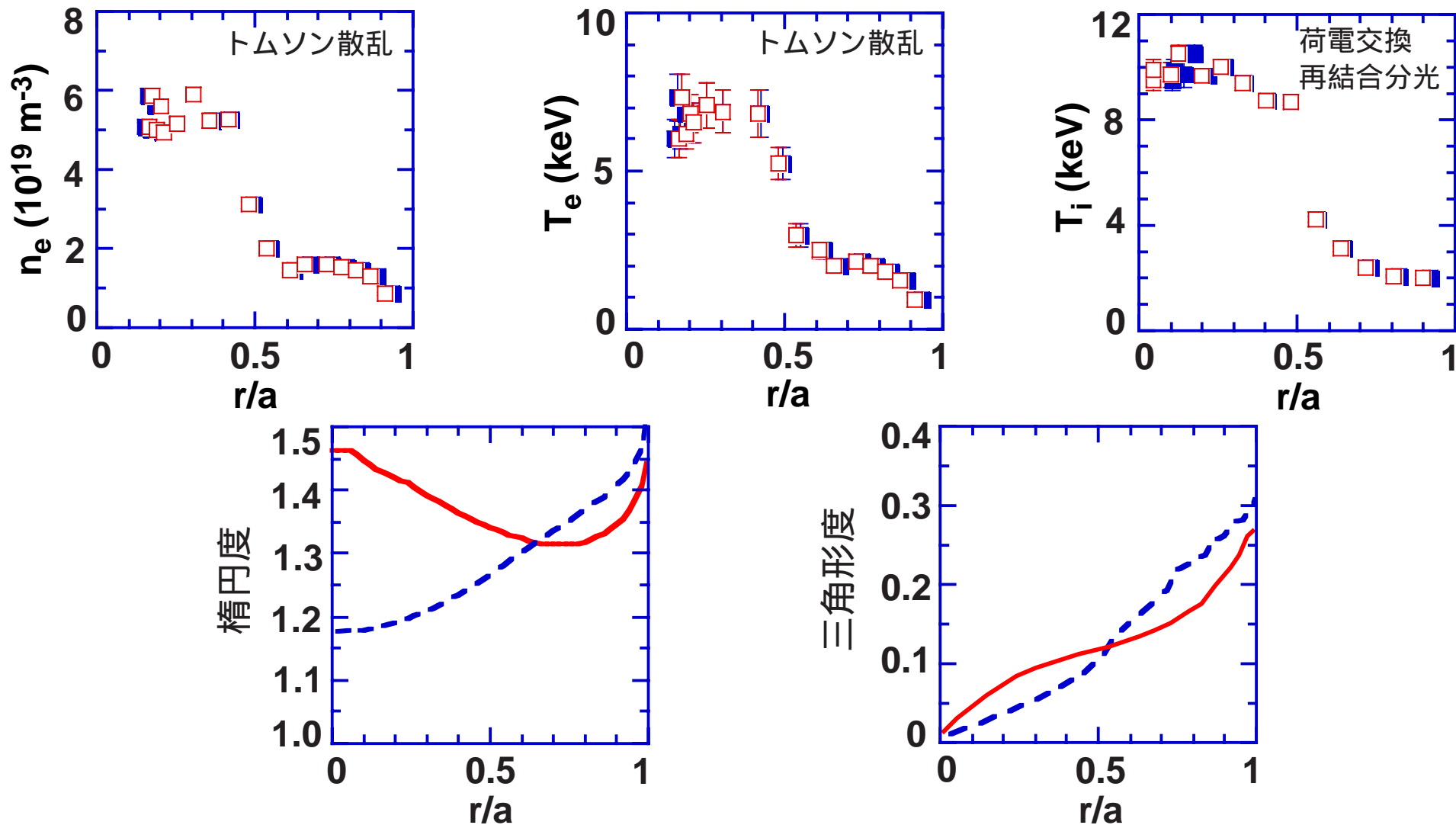
内部輸送障壁の圧力分布の再現は？



# MHD 平衡が異なる場合の密度・温度分布

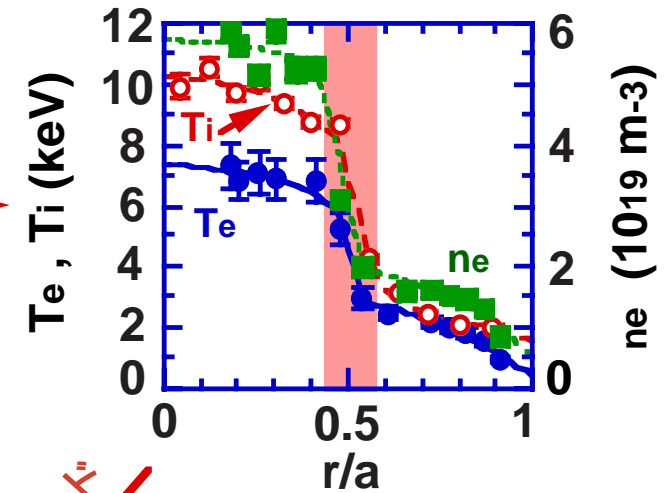
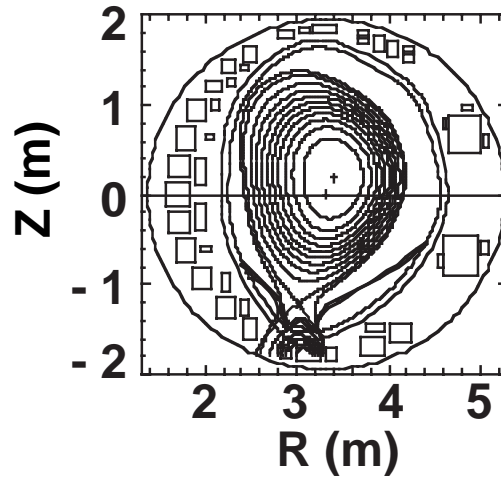
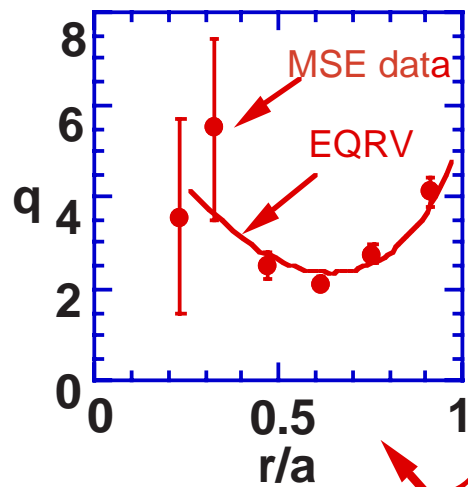
(R,Z) 座標から (体積平均小半径) 座標への変換

EQRV MSE データを使用  
EQDB :  $q(0)=1$  を仮定



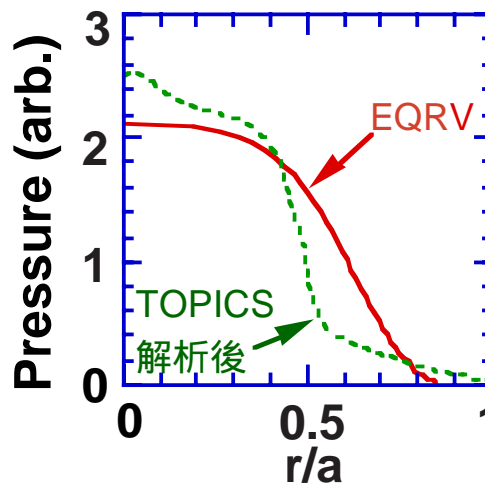
この場合は、密度・温度分布の差はあまりないが、場合によっては内部輸送障壁の位置が  $r/a$  で  $\sim 5\%$  ずれるものもある

# MHD 平衡の再計算 (より正確な MHD 平衡の評価)



MHD 平衡に MSE データをマッピングして MHD 平衡を計算

圧力分布



解析コード

MHD 平衡上に計測データをマッピング

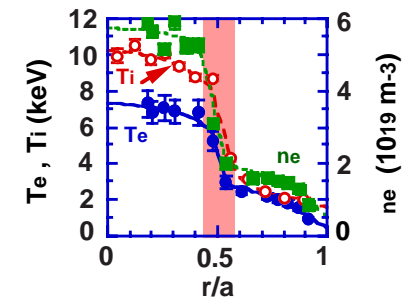
解析で評価した圧力分布は、MHD 平衡計算の際の圧力分布とは等しくない

TOPICS (1.5 次元輸送コード) 及び OFMC (モンテカルロコード) で計算した圧力分布を、MHD 平衡計算の入力値として使用 (繰り返し計算)

ブートストラップ電流、新古典ティアリングモード、径電場の評価に影響

## SLICE のフィッティング関数形

- @FIT 1 :  $Q_1 - C_2 * \{1 - (r/a)^{**2}\}^{**C_4} + C_2$
- @FIT 2 :  $Q_1 - C_2 * \{1 - (r/a)^{**C_3}\}^{**C_4} + C_2$
- @FIT 3 :  $Q_1 - C_2 * \{1 - (r/a)^{**2}\} + C_2 + C_5 * (1 - r/a) * (r/a)^{**2} + C_6 * \{1 - (r/a)^{**2}\} * (r/a)^{**2}$
- @FIT 4 :  $Q_1 - C_2 * \{1 - (r/a)^{**2}\}^{**C_4} + C_2 + C_5 * \text{EXP}\{-[(r/a)/C_6]^{**2}\}$
- @FIT 6 :  $Q + C_2 * (r/a) + C_3 * (r/a)^{**2} + C_4 * (r/a)^{**3} + \dots + C_{M+1} * (r/a)^{**M}$   
(M : 次元, 2 ≤ M ≤ 10)
- @FIT 7 :  $Q + C_2 * \{1 - (r/a)^{**2}\} + C_3 * \{1 - (r/a)^{**2}\}^{**2} + C_4 * \{1 - (r/a)^{**2}\}^{**4}$   
 $+ C_5 * \{1 - (r/a)^{**2}\}^{**8} + C_6 * \{1 - (r/a)^{**2}\}^{**16}$
- @FIT 8 :  $Q + C_2 * \{1 - (r/a)^{**C_4}\}^{**C_5} + C_2 * \{1 - \text{ERF}[(r/a - C_6)/\text{SQRT}(2 * C_7)]\} + C_3$   
( $C_4, C_5, C_6, C_7$  : 手入力係数, ERF : 誤差関数)
- @FIT 9 :  $Q + C_2 * \{1 - (r/a)^{**2}\} + C_3 * \{1 - (r/a)^{**2}\}^{**2} + C_4 * \{1 - (r/a)^{**2}\}^{**4}$   
 $+ C_5 * \{1 - (r/a)^{**2}\}^{**8} + C_6 * \{1 - \text{ERF}[(r/a - C_7)/\text{SQRT}(2 * C_8)]\}$   
( $C_6, C_7$  : 手入力係数, ERF : 誤差関数)
- @FIT 10 : 離散データ間を直線で内挿
- @FIT T : ちズマを2つの領域に分けて各々でフィッティングして連結  
領域 1 (プラズマ中心部) : @FIT 1, 2, 3, 4, 6 (=Q)  
領域 2 (プラズマ周辺部) : @FIT 3, 6 (=Q)



## 輸送解析データの作成

- 分布データ :  $n_e$ ,  $T_e$ ,  $T_i$ ,  $Z_{\text{eff}}$
- MHD 平衡

OFMC (Orbit Following Monte-Carlo) Code

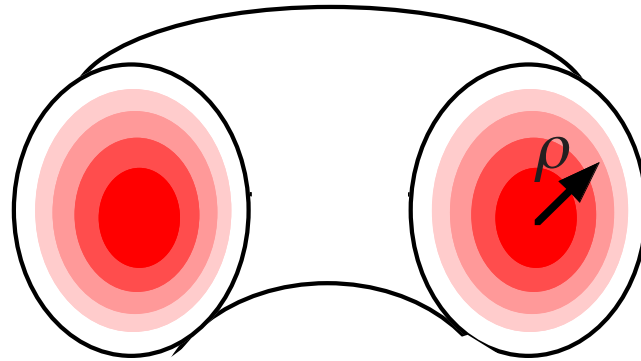
テスト粒子数 : 数千 1万

高速イオン損失機構 : 軌道損失 (リップル、バナナ)  
荷電交換、突き抜け

- エネルギー源
- 運動量源
- 高速イオン圧力
- 高速イオン密度

TOPICS (1.5 D Transport Code)

## プラズマ小半径の定義



SLICE, OFMC **体積平均**

$$\rho_i^V = \sqrt{V_i / 2\pi R}$$

TOPICS : **トロイダル磁束小半径**

$$\rho_i^\phi = \sqrt{\Phi_i / \Phi(a)}$$



## 径電場分布の評価

運動量バランスの式 
$$m_a n_a \frac{d\vec{u}_a}{dt} = e_a n_a (\vec{E} + \vec{u}_a \times \vec{B}) - \nabla P_a - \underbrace{\nabla \cdot \hat{\Pi}_a}_{\text{摩擦テンソル}} + \underbrace{\vec{F}_{a1}}_{\text{摩擦力}} + \underbrace{\vec{M}_a}_{\text{運動量源}}$$

熱運動量バランスの式 
$$m_a \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\vec{q}_a}{T_a} \right) = \frac{e_a}{T_a} \vec{q}_a \times \vec{B} - \frac{5}{2} n_a \nabla T_a - \underbrace{\nabla \cdot \hat{\Theta}_a}_{\text{粘性テンソル}} + \underbrace{\vec{F}_{a2}}_{\text{熱摩擦力}} + \underbrace{\vec{Q}_a}_{\text{熱運動量源}}$$

磁力線に平行な成分を磁気面平均

$$\langle \vec{B} \cdot \vec{F}_{a1} \rangle = \langle \vec{B} \cdot \nabla \cdot \hat{\Pi}_a \rangle - \langle \vec{B} \cdot \vec{M}_a \rangle - e_a n_a \langle \vec{B} \cdot \vec{E} \rangle$$

$$\langle \vec{B} \cdot \vec{F}_{a2} \rangle = \langle \vec{B} \cdot \nabla \cdot \hat{\Theta}_a \rangle - \langle \vec{B} \cdot \vec{Q}_a \rangle$$

7×7 の行列式にまとめる

$$\hat{L} \vec{U}_{\parallel} = \hat{M} [\vec{U}_{\parallel} + \vec{V}] - \vec{S} - \vec{\mathcal{E}}$$

$\hat{L}$  規格化摩擦行列  
 $\hat{M}$  規格化粘性行列  
 $\vec{U}_{\parallel}$  磁力線方向の流速に関するベクトル  
 $\vec{V}$  熱力学的力  
 $\vec{S}$  運動量・熱運動量源  
 $\vec{\mathcal{E}}$  磁力線方向の電場に関するベクトル

すなわち 
$$\vec{U}_{\parallel} = \left[ (\hat{L} - \hat{M})^{-1} \hat{M} \right] \vec{V} - (\hat{L} - \hat{M})^{-1} \vec{S} - (\hat{L} - \hat{M})^{-1} \vec{\mathcal{E}}$$

## 径電場分布の評価（続き）

- 磁気面平均された磁力線に平行な不純物速度 (不純物の実験データを使うため)

$$\langle Bu_{\parallel} \rangle = \sum_{j=1}^7 \left\{ \underbrace{\left[ (\hat{L} - \hat{M})^{-1} \hat{M} \right]_{I,j}}_{\text{ブートストラップ項}} V_j - \underbrace{\left[ (\hat{L} - \hat{M})^{-1} \right]_{I,j}}_{\text{外部駆動項}} \langle B \cdot M \rangle_j - \underbrace{e_j n_j \left[ (\hat{L} - \hat{M})^{-1} \right]_{I,j}}_{\text{誘導項}} \langle B \cdot E \rangle_j \right\}$$

$\hat{L}$  摩擦行列

$\hat{M}$  粘性行列

$V_j$  熱力学的力

$S_j$  運動量・熱運動量源 (OFMC code)

・ 運動量

j=1: 電子

j=2: 熱化イオン

j=3: 不純物

j=4: 高速イオン

・ 熱運動量

j=5: 電子

=6 熱化イオン

j=7: 不純物

- 不純物のトロイダル速度

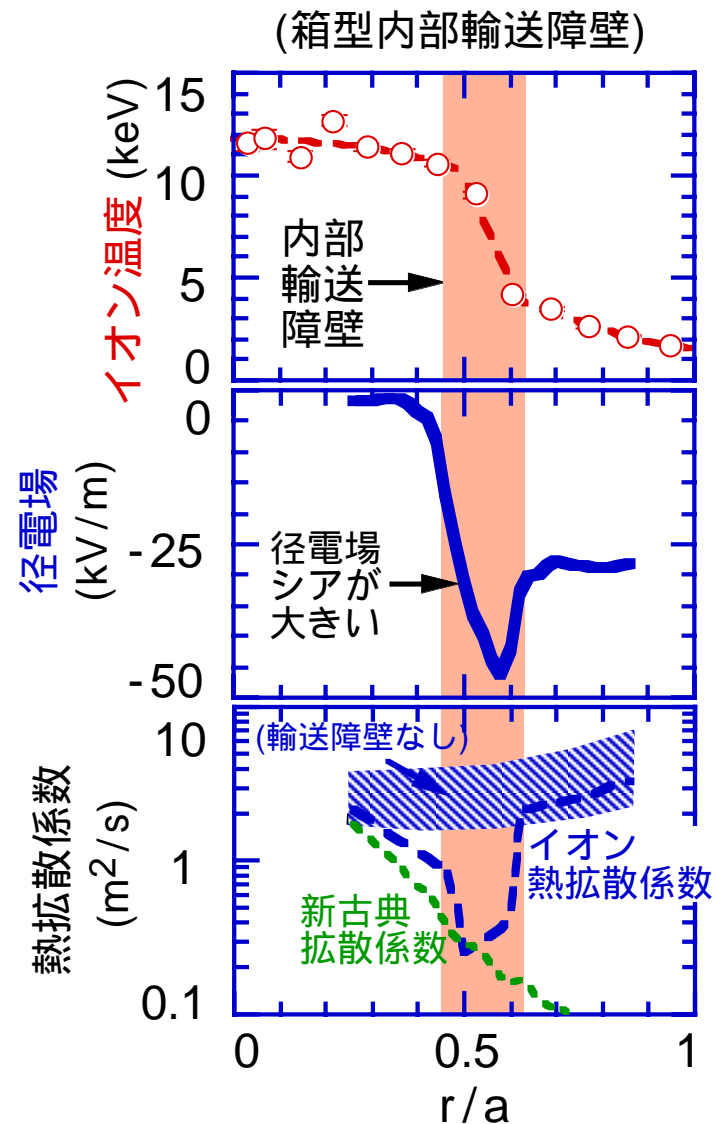
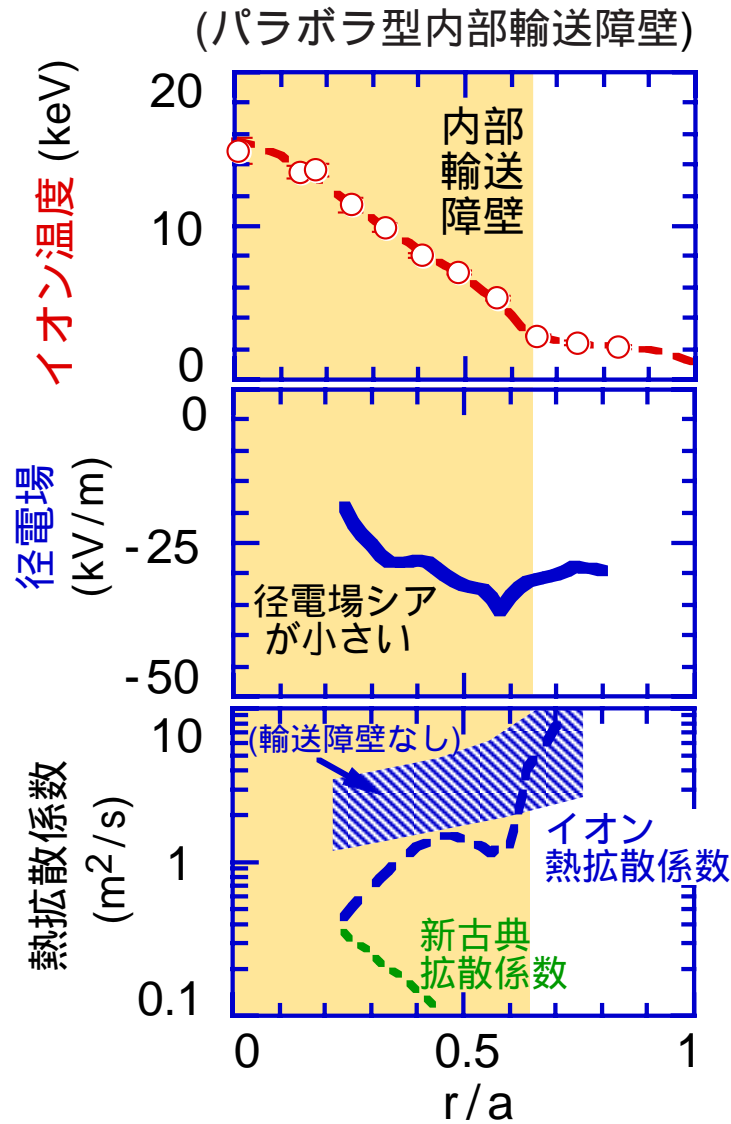
荷電交換  
再結合分光

$$u_{I\phi} = \frac{B_\phi}{\langle B^2 \rangle} \langle Bu_{\parallel} \rangle - \left( 1 - \frac{B_\phi^2}{\langle B^2 \rangle} \right) R \left( \frac{d\Phi}{d\psi} + \frac{1}{e_I n_I} \frac{dP_I}{d\psi} \right) \quad (\text{ポロイダル回転は新古典理論に従う})$$

$$E_r = -\frac{d\Phi}{d\rho} = \frac{1}{\sum_{j=1}^4 \alpha^*_{I,j}} \left( -\frac{\langle B^2 \rangle}{(RB_\phi)^2} \frac{d\psi}{d\rho} Ru^*_{I\phi} - \sum_{j=1}^4 \alpha^*_{I,j} \frac{1}{e_j n_j} \frac{dP_j}{d\rho} + \sum_{j=1}^3 \alpha^*_{I,j+4} \frac{1}{e_j} \frac{dT_j}{d\rho} \right)$$

$$u^*_{I\phi} = u_{I\phi} + \frac{B_\phi}{\langle B^2 \rangle} \sum_{j=1}^7 \left[ (\hat{L} - \hat{M})^{-1} \right]_{I,j} \langle B \cdot M \rangle_j \quad \alpha_{i,j} = \left[ (\hat{M} - \hat{L})^{-1} \hat{M} \right]_{i,j} \quad \alpha^*_{I,j} = \alpha_{I,j} - \left( \langle B^2 \rangle / B_\phi^2 - 1 \right) \delta_{I,j}$$

# 定常輸送解析 (内部輸送障壁と熱拡散係数, 径電場)





## 弱い磁気シアで輸送係数が減少する輸送モデル

$$x_e = x_e^{\text{ano}} + C_{e3} x_i^{\text{NC}}$$

$$x_i = x_i^{\text{ano}} + C_{i3} x_i^{\text{NC}}$$

$$x_e^{\text{ano}} = C_{e1} (1 + C_{e2} \rho^2) \frac{a^2}{\tau_E^{85\%ELMfree}} E_e(s)$$

$$x_i^{\text{ano}} = C_{i1} (1 + C_{i2} \rho^2) \frac{a^2}{\tau_E^{85\%ELMfree}} E_i(s)$$

$$E_\beta(s) = \left[ 1 + \exp \left\{ \alpha_\beta (s + \Delta_\beta) \right\} \right]^{-1} + \left[ 1 + \exp \left\{ -\alpha_\beta (s - \Delta_\beta) \right\} \right]^{-1}$$

$$D = C_d x_e$$

$\chi_i^{\text{NC}}$  : neoclassical ion thermal diffusivity

$C_{e/i 1}$  : adjusted to fit  $\tau_E^{\text{th}}$  to  $\tau_E^{85\%ELMFree}$

$C_{e/i 2}$  : = 4 to fit JT-60 R/S L-mode edge

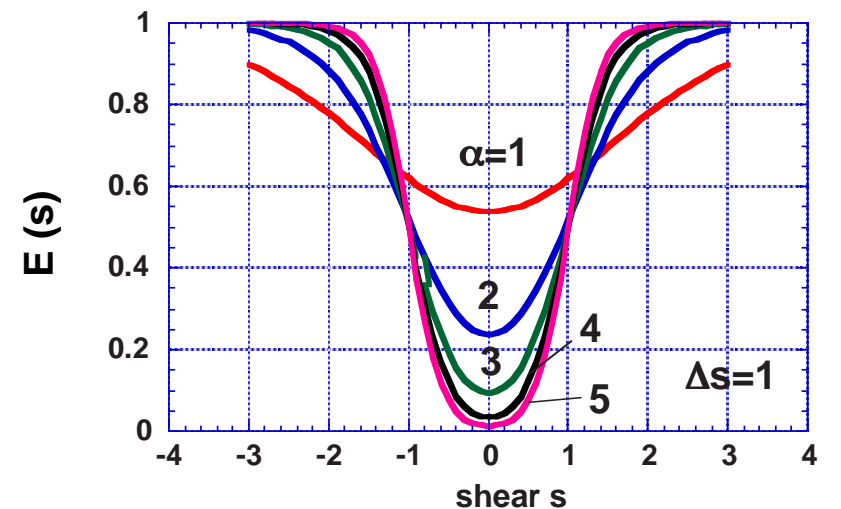
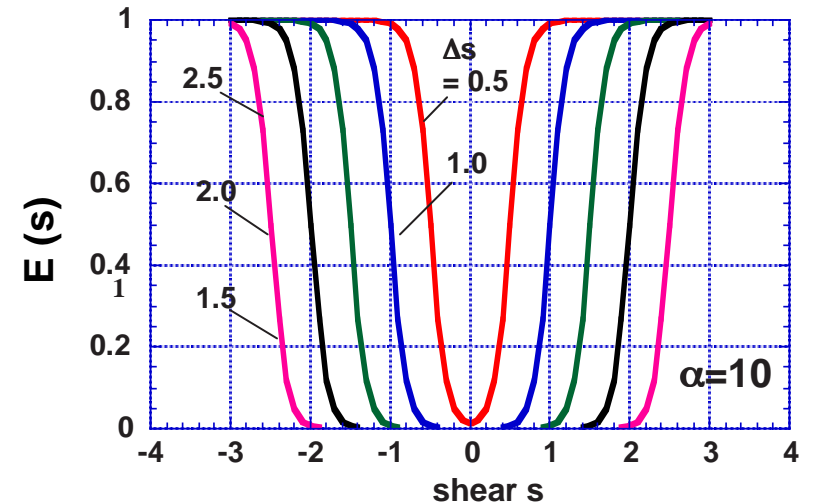
$C_{e/i 3}$  : = 1

$\alpha_{e/i}$  : = 5 to fit JT-60 R/S ITB

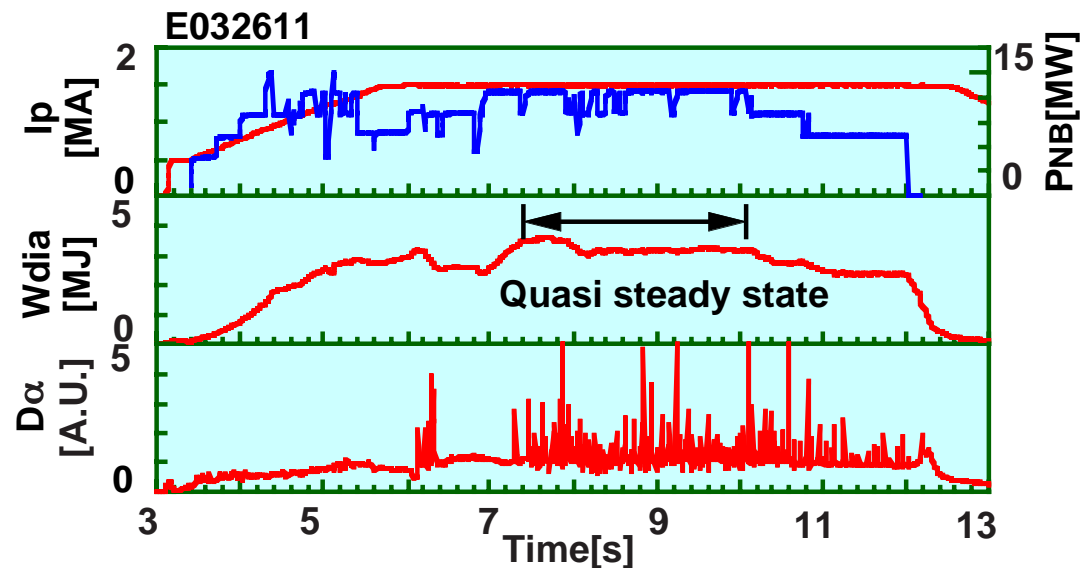
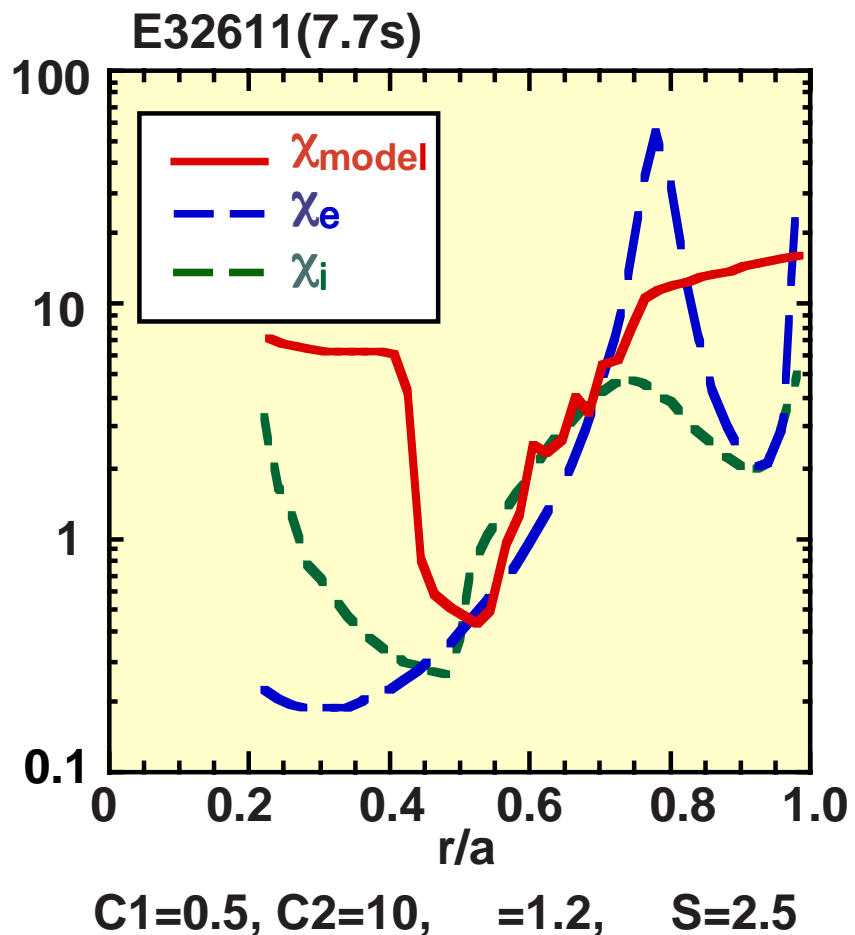
$\Delta_{e/i}$  : = 1 to fit JT-60 R/S ITB location

$C_d$  : = 0.1 to make ITB on density

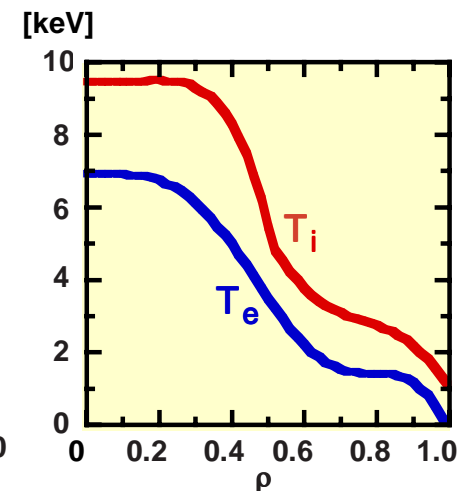
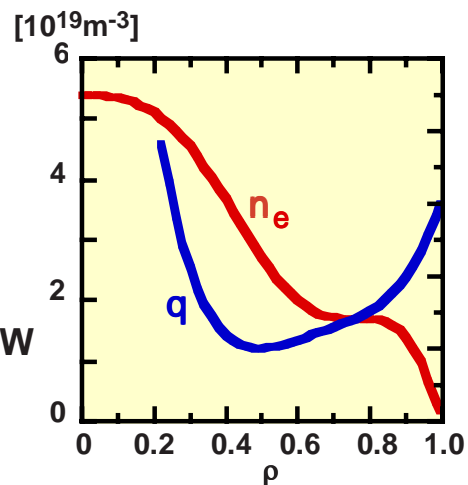
$$E(s) = \frac{1}{1 + \exp(\alpha[s + \Delta s])} + \frac{1}{1 + \exp(-\alpha[s - \Delta s])}$$



# 輸送モデルと JT-60U の輸送係数との比較



At  $t=7.7\text{s}$   
 $I_p=1.5\text{MA}$   
 $B_t=3.5\text{T}$   
 $R=3.6\text{m}$   
 $a=0.84\text{m}$   
 $q_{95}=3.8$   
 $\text{PNB}=10.5\text{MW}$   
 $\tau_E=0.33\text{s}$



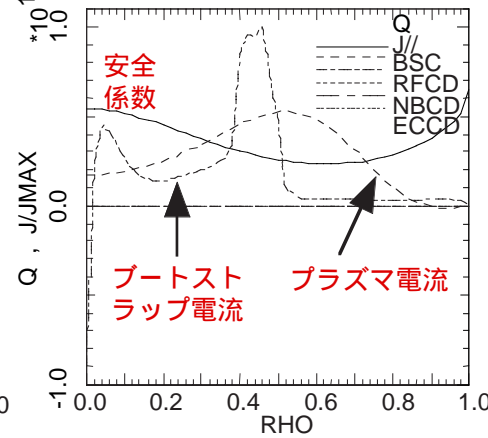
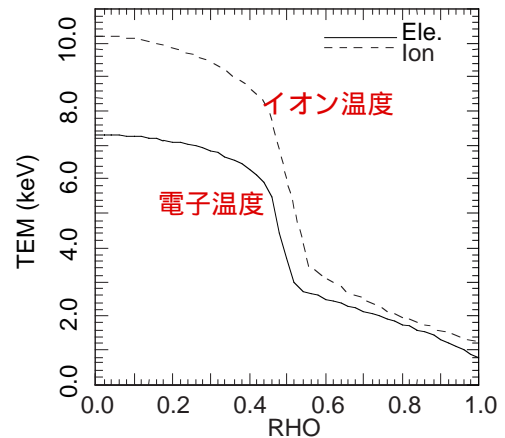
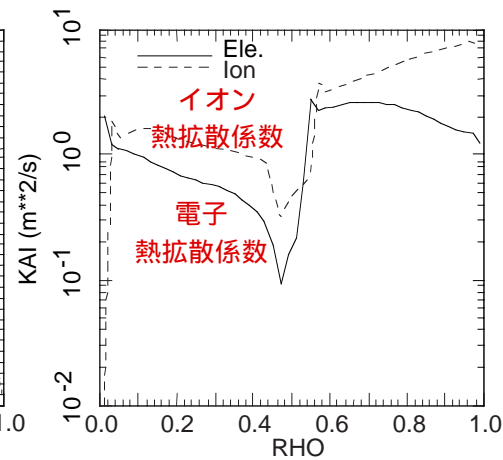
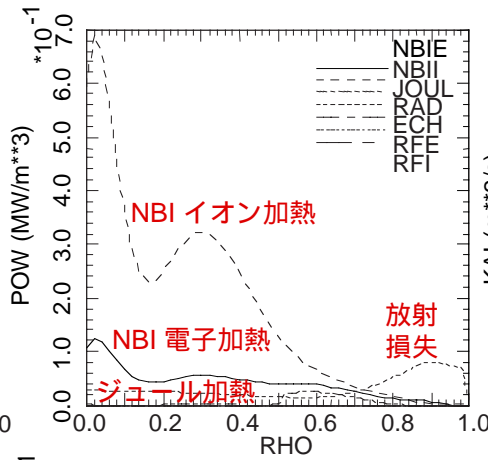
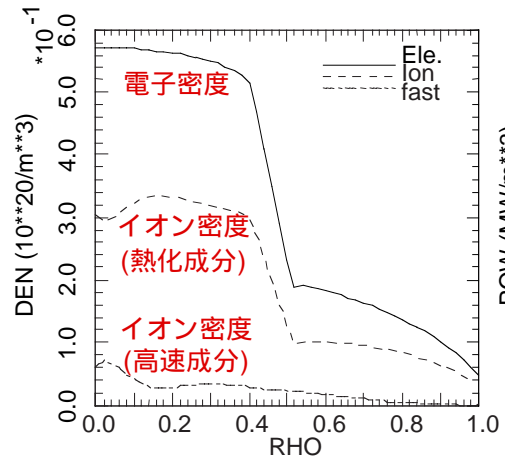
# TOPICS の輸送解析結果出力例

E029728 case012 tokdrv\_ofmc : 6.680sec / EQDB\_RV : 6.680sec

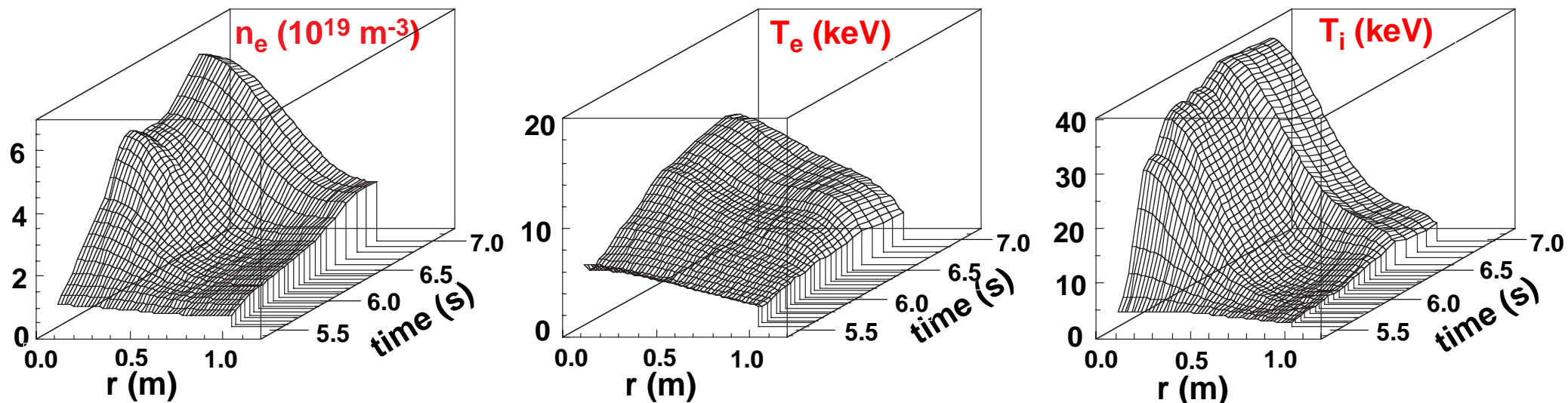
DATE=03-03-11

## DISTRIBUTION OF PLASMA

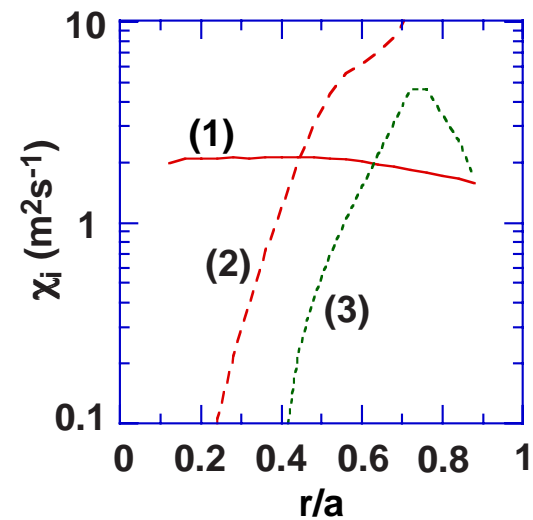
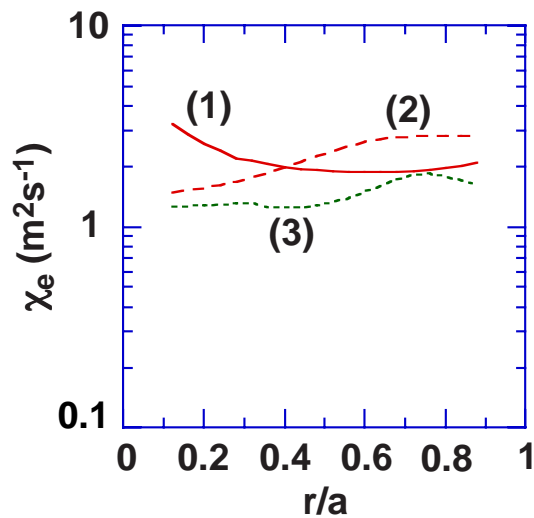
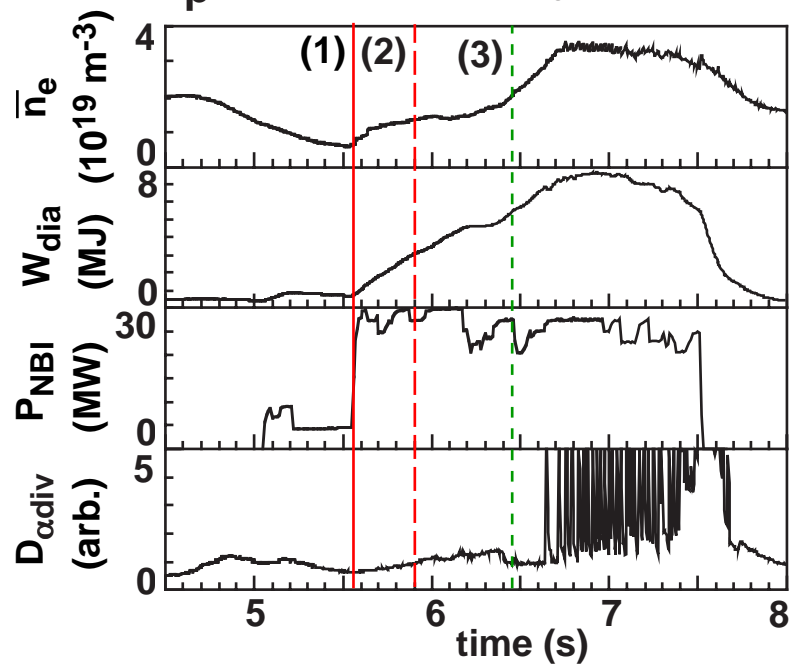
BETA-T= 0.6578	AV-DE = 0.2332	JOULE = 0.3831	TAUE = 0.4538	DD = 0.000D+00
BETA-J = 0.9123	AV-TE = 4.6076	NBI-E = 1.8069	TAUP = 0.3000	TH = 0.000D+00
ICUR = 1.4971	AV-TI = 6.2651	NBI-I = 6.3547	ZEF-SP= 0.0000	TB = 0.000D+00
TBSC = 0.9247	WS-E = 1.6953	RAD = -2.5040	ZEF-NC= 0.0000	BB = 0.000D+00
QAXL = 5.4176	WS-L = 1.4761	REEH = 0.0000	CKI-NC= 0.0000	DT = 0.000D+00
QSUR = 6.4695	WS-B = 0.7062	RFFH = 0.0000	TIO-NC= 0.0000	TH = 0.000D+00
VL = 0.0000	TOT-WS= 3.8776	ECH = 0.0000	NC-FAC= 1.0000	TB = 0.000D+00
VL-NC = -0.2045	ZEFF = 2.8000	TOT-IN= 8.5447		T-FRAC= 5.000D-01



# 非定常輸送解析 (高イオン温度モード)



$I_p = 2.1 \text{ MA}$     $B_t = 4.0 \text{ T}$



# UFILE の例 (ITER 物理 R&D 分布 DB 用、テキスト形式)

(E34487, t=4.6s, Ti)

```
j 34487 JT60 2 0 6      ;-SHOT #- F(X) DATA -uwrite- 18-APL-00
19-DEC-02              ;-SHOT DATE- UFILES ASCII FILE SYSTEM
0                      ;-NUMBER OF ASSOCIATED SCALAR QUANTITIES-
RHO                    ;-INDEPENDENT VARIABLE LABEL: X-
TIME                   SECONDS ;-INDEPENDENT VARIABLE LABEL: Y-
Ti                     eV      ;-DEPENDENT VARIABLE LABEL-
4                      ;-PROC CODE- 0:RAW 1:AVG 2:SM 3:AVG+SM
    51                 ;-# OF PTS- X, F(X) DATA FOLLOW:
    1                   ;-# OF Y PTS- X,Y,F(X,Y) DATA FOLLOW:
0.000000E+00 2.000000E-02 4.000000E-02 6.000000E-02 8.000000E-02 1.000000E-01
1.200000E-01 1.400000E-01 1.600000E-01 1.800000E-01 2.000000E-01 2.200000E-01
2.400000E-01 2.600000E-01 2.800000E-01 3.000000E-01 3.200000E-01 3.400000E-01
3.600000E-01 3.800000E-01 4.000000E-01 4.200000E-01 4.400000E-01 4.600000E-01
4.800000E-01 5.000000E-01 5.200000E-01 5.400000E-01 5.600000E-01 5.800000E-01
6.000000E-01 6.200000E-01 6.400000E-01 6.600000E-01 6.800000E-01 7.000000E-01
7.200000E-01 7.400000E-01 7.600000E-01 7.800000E-01 8.000000E-01 8.200000E-01
8.400000E-01 8.600000E-01 8.800000E-01 9.000000E-01 9.200000E-01 9.400000E-01
9.600000E-01 9.800000E-01 1.000000E+00
4.600000E+00
1.874068E+04 1.870750E+04 1.860800E+04 1.844235E+04 1.821087E+04 1.791393E+04
1.755144E+04 1.712592E+04 1.664338E+04 1.610725E+04 1.552086E+04 1.488848E+04
1.421486E+04 1.350508E+04 1.276465E+04 1.200010E+04 1.121801E+04 1.042509E+04
9.629133E+03 8.838983E+03 8.063406E+03 7.311970E+03 6.595521E+03 5.925367E+03
5.314926E+03 4.778537E+03 4.333539E+03 4.001851E+03 3.821413E+03 3.685258E+03
3.523527E+03 3.366604E+03 3.215970E+03 3.071439E+03 2.933008E+03 2.800604E+03
2.674175E+03 2.553689E+03 2.439055E+03 2.330246E+03 2.227179E+03 2.129805E+03
2.038052E+03 1.951848E+03 1.871130E+03 1.795830E+03 1.725874E+03 1.661193E+03
1.601667E+03 1.547420E+03 1.500000E+03
;----END-OF-DATA-----COMMENTS:-----
```

# TOPICS からの UFILE 出力変数一覧

## 小半径定義

小半径の対応 (RHOPHI)

## 平衡関係

プラズマ体積 (VOL)

メッシュゾーンごとの体積 (DVOL)

プラズマ断面積 (AREA)

プラズマ表面積 (SUF)

大半径 (RMAJ)

小半径 (RMIN)

楕円度 (ELL)

三角度 (TRG)

メトリック  $\langle | \quad | \rangle$  (GR1)

メトリック  $\langle | \quad |^2 \rangle$  (GR2)

## 実験データ

電子密度 (NE)

高速イオン密度 (BDENS)

電子温度 (TE)

イオン温度 (TI)

有効電荷数 (ZE)

トロイダル回転速度 (VTCX)

トロイダル回転周波数 (WT)

## 圧力電流電場

プラズマ圧力 (バルク) (PTH)

プラズマ圧力 (高速イオン) (PBEAM)

プラズマ電流 (CUR)

ブートストラップ電流 (CURBS)

安全係数 (計算値) (Q)

安全係数 (MHD 平衡データ) (QQ)

周回電圧 (V)

新古典プラズマ抵抗 (ETA\_NC)

径電場 (ER)

ExB シア率 (EBSHEAR)

## source 項

NBI による粒子源 (SBTH)

リサイクリングによる粒子源 (SWTOT)

ジュール加熱パワー (POH)

NBI 加熱パワー (電子) (PBE)

NBI 加熱パワー (全イオン) (PBI)

放射損失パワー (PRAD)

運動量源 (電子) (MELE)

運動量源 (水素イオン) (MDEU)

運動量源 (不純物イオン) (MIMP)

運動量源 (全イオン) (MION)

## 輸送関係

電子熱拡散係数 (CONDE)

イオン熱拡散係数 (CONDI)

伝導熱流束 (電子) (QCNDE)

伝導熱流束 (イオン) (QCNDI)

対流熱流束 (電子) (QCNVE)

対流熱流束 (イオン) (QCNVI)

エネルギー等分配熱流束 (QIE)

放射損失熱流束 (QRAD)

荷電交換損失熱流束 (QCX)

## データのインターフェース

- 現在の所、データのインターフェースとしては UFILE 書き出しのみ  
ITER Physics R&D, ITPA への 0 次元データと 2 次元データ  
PPPL の FULL, GS2 コード用の分布データ  
(TRANSP を前処理に使用)
- 横軸：体積平均小半径、トロイダル磁束平方根小半径いずれも出力
- TASK 等で解析する際のデータ形式を決める必要あり  
(送る変数の種類についても検討：必要十分か?)
- 他装置のデータを読み込んだでの解析はまだ行っていない  
(ITPA にデータの提出義務だけでなく、データ使用权も行使)  
輸送モデルの改良に不可欠

## 今後の課題

- ・ 核となる輸送コードは？  
（輸送コード間のベンチマークテスト）
- ・ データのインターフェース
- ・ 輸送モデルの組み込み  
フローのある輸送モデル・・・

以上の作業の大雑把なスケジュール