

JAERI-Data/Code

JP0350232

2003-008



プラズマ過渡事象解析コード  
SAFALYの改訂（第一部）

2003年6月

仙田 郁夫・藤枝 浩文・閨谷 讓・多田 栄介・莊司 昭朗

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

## プラズマ過渡事象解析コード SAFALY の改訂（第一部）

日本原子力研究所那珂研究所 I T E R 開発室

仙田 郁夫・藤枝 浩文・閨谷 讓・多田 栄介・莊司 昭朗

(2003年4月8日受理)

トカマク核融合装置のシステム応答解析を目的に開発された SAFALY コードの改訂を行った。改訂では、プラズマのモデル化及び計算アルゴリズムを修正したほか、新たにプラズマ電流の時間変化機能の追加、プラズマ制御系モデル化の強化など、新規の機能追加を行った。また、プラズマ対向機器のモデル化が容易に出来るよう修正した。そのほか、プラズマ対向面間の輻射による熱相互作用に係わる形状行列など、解析に必要なデータを揃えるためのコード体系の整備を行った。

報告書は2部で構成される。本書第一部ではプラズマ及びプラズマ対向機器のモデル化、解析パラメータの詳細について述べる。さらに、2001年ITER 詳細設計報告書の標準的プラズマを用いた擾乱に対するプラズマ応答の解析結果、及びプラズマ応答の特徴について報告する。第二部では、プラズマの初期状態や解析パラメータについての詳細な感度解析の結果を報告する予定である。

## Revised Version of Tokamak Transient Simulation Code SAFALY (1)

Ikuo SENDA, Hiromi FUJIEDA, Yuzuru NEYATANI,  
Eisuke TADA and Teruaki SHOJI

Department of ITER Project  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 8, 2003)

Tokamak transient simulation code, named SAFALY, was revised. SAFALY code has been developed to simulate transient events in Tokamaks. Modeling of the plasma and algorithms of the simulation were revised. The code was also modified to deal with the variation of the plasma current. The code was improved to allow flexible modeling of in-vessel components. The data transfer between SAFALY and related codes was arranged to prepare data required in analyses with SAFALY, such as the distributions of heat/neutron loads and the radiation form factor between in-vessel components.

The report is composed of two volumes. The formulation and the parameters in modeling plasma and in-vessel components are described in this first volume. Examples of simulation results, using the design of ITER-FDR in 2001, are presented and general properties of plasmas' responses with respect to perturbations are discussed. The results of the sensitivity studies with respect to simulation parameters and initial conditions will be reported in the second volume.

Keywords: Tokamak, Safety Analysis, Plasma Facing Components, ITER, SAFALY

## 目次

1. はじめに .....	1
2. プラズマのモデル化 .....	2
3. プラズマ対向機器の熱解析モデル .....	10
4. 入出力ファイル .....	13
5. 解析パラメータ概要 .....	13
6. 計算例 .....	16
7. まとめ .....	20
参考文献 .....	21
付録 1. 物理係数 .....	32
付録 2. 初期状態の解法 .....	36

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Plasma Modeling .....	2
3. Modeling of the In-vessel Components .....	10
4. Input and Output Files .....	13
5. Simulation Parameters .....	13
6. Example of Simulations .....	16
7. Summary .....	20
References .....	21
Appendix 1. Physics Formulas .....	32
Appendix 2. Derivation of the Plasma Initial Condition .....	36

This is a blank page.

## 1. はじめに

核融合装置において、核融合出力が増加する様な擾乱が加わったとき、どの程度まで出力が増加するか、またプラズマ対向機器にどれだけの負荷がかかるかという問題は、核融合装置の設計にとって重要である。核融合燃焼プラズマの動特性は、プラズマ固有の特性のほか、制御系による燃焼制御や磁場配位制御の特性、およびプラズマとプラズマ対向機器との相互作用の影響を大きく受けるため、擾乱に対する応答を評価するにあたっては、これらの要素を包括的に評価することが求められる。

本書で報告するプラズマ過渡解析コード (SAFALY) は、トカマク装置に於ける核融合燃焼の過渡事象解析を行うことを目的に、1990 年代から開発が続けられている[1,2]。本コードは、国際熱核融合炉 (ITER) でのシステム応答解析にも使用されている[3]。今回の修正は、ITER 建設に備えたコード整備として実施した。これまでの SAFALY コードはプラズマ電流を固定していたが、擾乱によりプラズマ温度やベータ値が上昇する場合、プラズマ電流が増加し、閉じこめ性能を向上させたり、密度限界や圧力限界の条件が緩和され、核融合出力がさらに上昇する効果がある。今回の修正ではこの効果を考慮するために、プラズマ電流の時間変化を加えた。さらに、燃料制御、加熱制御、磁束供給制御、不純物供給制御の機能追加を行った。また、これまでのコードはプラズマ対向機器モデルのパラメータがコードに組み込まれておりモデルの変更が困難であったが、モデルの変更が容易に出来るよう、プラズマ対向機器モデルをすべて入力データで操作出来るようコードを修正した。併せて、これまでのコードが持っていたコーディング上の誤りや計算アルゴリズムの問題点を修正した。そのほか、プラズマ対向機器間の輻射による熱相互作用に係わる形状行列など、SAFALY の解析を実行するのに必要なデータを一通りそろえることが出来るよう、コード体系の整備を行った。SAFALY コードと他の解析コードの連携関係を図 1 に示す。

SAFALY コードの定式化については既に文献[1,2]があるが、本報告書では重水素 - 三重水素 (D-T) 燃焼装置を解析するためのコードについて、今回修正を加えた部分を含めた定式化およびモデル化の全体像を報告する。

本報告書は二部から構成され、第一部（本書）では、プラズマ、プラズマ制御系及びプラズマ対向機器のモデル化について詳細を報告する。第二部では、トカマク装置をモデル化するうえで導入された種々の解析パラメータに対する感度解析の結果について報告する。

次の第 2 節では、プラズマのモデル化について述べる。第 3 節では、プラズマ対向機器のモデル化とその温度分布解析の方法について述べる。第 4 節では、SAFALY コードの入出力ファイルについて概要を説明する。第 5 節では、SAFALY コードの解析パラメータをリストアップし、それらの意味を説明する。また、第 6 節では、2001 年 ITER 最終設計報告書の設計に基づく、標準プラズマパラメータを用いた解析結果を報告し、擾乱に対するプラズマの応答とその特徴についてまとめる。第 7 節で、本報告のまとめと課題について述べる。

## 2. プラズマのモデル化

本節では、プラズマの動特性を記述するモデルについて述べる。モデルは、電子とイオンの温度を別に扱うゼロ次元エネルギー、粒子保存則からなる。

### 2. 1. 変数とその分布関数

#### 2. 1. 1. 密度

DTイオン、ヘリウムイオン、その他不純物イオンの密度を独立変数とする。

$n_{DT}$  : DTイオン密度 ( $1/m^3$ ) 但し、 $n_{DT} = n_D + n_T$ ,  $n_D = n_T$  とする。

$n_\alpha$  : ヘリウムイオン密度 ( $1/m^3$ )

$$n_{imp} : \text{ヘリウム以外の不純物イオン密度 } (1/m^3), n_{imp} = \sum_k^{Z_k > 2} n_k$$

電子密度は、イオン密度より次式で与えられる。

$$n_e = n_{DT} + 2 \cdot n_\alpha + \sum_k^{Z_k > 2} Z_k \cdot n_k$$

これらの密度は体積平均密度を使用する。密度の径分布は次式で与えられるものとする。

$$n(r) = n_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r}{a_p} \right)^2 \right]^{AP}$$

但し、 $a_p$ はプラズマ小半径、 $n_0$ は中心密度、 $AP$ は分布を表す定数で電子・イオンに共通とする。変数  $r$  はプラズマポロイダル断面で半径を表すパラメータである ( $0 \leq r \leq a_p$ )。簡単化のために、半径パラメータ  $r$  の体積要素を、 $R$  を主半径、 $\kappa$  を非円形度として、 $4\pi^2 R \kappa r dr$  で与える。このとき、体積平均密度と中心密度は次式の関係をもつ。

$$n_{Average} = n_0 / (1 + AP)$$

ITER の標準運転モードである ELMY-H モードは平坦な密度分布を持つことが知られており、ELMY-H モードでの運転解析では  $AP=0.1$  程度を使用するのが妥当である[4]。

ヘリウム以外の不純物イオンの混合割合は、プラズマ対向壁材料のスパッタリングや昇華、及び不純物ガスの外部からの供給により決定される。不純物イオン種の割合を  $\{F_k\}$  で与え、各不純物イオン密度を次式で定義する。

$$n_k = \frac{F_k}{\sum_m^{Z_m > 2} F_m} \cdot n_{imp}, \quad Z_k > 2$$

#### 2. 1. 2. 温度

電子温度とイオン温度の二つの温度を使用した定式を採用する。

$T_e$  : 電子温度 (keV)

$T_i$  : イオン (DT、He、その他不純物) の温度 (keV)

これらは、密度加重体積平均値を使用する。但し、温度は次式の径分布を持つと仮定する。

$$T(r) = T_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r}{a_p} \right)^2 \right]^{AT}$$

$T_0$  は中心温度、 $AT$  は分布の定数である。密度加重平均温度  $T_{av}$  と中心温度は次式の関係を持つ。

$$T_{av} = T_0 \cdot (1 + AP) / (1 + AP + AT)$$

## 2. 2. 定式化

プラズマの時間発展を粒子保存、エネルギー保存、磁束保存を連立させて解く。以下の式に用いた物理係数は付録 1 にまとめた。

### 2. 2. 1. 粒子保存

イオン密度について粒子保存の式を解く。2. 1 節で導入した変数について、次の式が成り立つ。

$$\frac{dn_{DT}}{dt} = S_{DT} - \frac{1}{2} \cdot f_p \cdot n_{DT}^2 \cdot \langle \sigma v \rangle_{DT} - \frac{n_{DT}}{\tau_{p,DT}} + \frac{P_{NBI}}{E_b \cdot V_p}, \quad (1)$$

$$\frac{dn_\alpha}{dt} = \frac{1}{4} \cdot f_p \cdot n_{DT}^2 \cdot \langle \sigma v \rangle_{DT} - \frac{n_\alpha}{\tau_{p,\alpha}}, \quad (2)$$

$$\frac{dn_{imp}}{dt} = S_{imp} - \frac{n_{imp}}{\tau_{p,imp}} + S_{imp}^{(sub)} + S_{imp,CTL}, \quad (3)$$

式の単位は  $m^{-3}s^{-1}$  であり、 $f_p$  は分布の関数である。 $\langle \sigma v \rangle_{DT}$  は重水素-三重水素核融合反応率、 $P_{NBI}$  は中性粒子ビーム加熱パワー、 $E_b$  は中性粒子ビームの入射エネルギー、 $V_p$  はプラズマ体積を意味する。第 3 式右辺の不純物粒子源の項、 $S_{imp}$ 、 $S_{imp}^{(sub)}$ 、 $S_{imp,CTL}$  については、2. 2. 2 節で説明する。各種イオンの粒子閉じ込め時間を  $\tau_p$  で表し、これらの初期値は電子エネルギー閉じ込め時間に比例するものとする。

$$\tau_{p,DT} = CPF \cdot \tau_{E,e}, \quad \tau_{p,\alpha} = CA \cdot \tau_{E,e}, \quad \tau_{p,imp} = CP \cdot \tau_{E,e}$$

比例係数  $CPF$ 、 $CA$ 、 $CP$  は解析パラメータである。

DT 粒子保存式の右辺第一項は燃料注入項で、定常供給分、燃焼制御のためのフィードバック分、及び対向壁との相互作用によりプラズマに流入する分の和で表される。

$$S_{DT} = S_{DT,0} + S_{DT,CTL} + S_{PFC}$$

燃料制御によりプラズマに入る DT 粒子は  $\tau_{DT,FUEL}$  の一次遅れ時間を持つものとする。

$$\frac{dS_{DT,CTL}}{dt} = -\frac{S_{DT,CTL}}{\tau_{DT,FUEL}} + \frac{1}{\tau_{DT,FUEL}} \cdot \Gamma_{DT} \quad (4)$$

$\Gamma_{DT}$  は燃焼制御で外部から注入する DT 粒子束密度を表す。遅れ時間は DT 粒子閉じ込め時間に比例するとし、比例係数と定数項を解析パラメータとする。

$$\tau_{DT,FUEL} = C_{DT,FUEL} \cdot \tau_{p,DT} + \tau_{DT,FUEL}^0$$

また、式 (1) 右辺第 4 項は中性粒子ビームによる粒子供給量である。簡単のため、ここでは中性粒子ビームの DT 比が 1:1 であると仮定している。

## 2. 2. 2. 不純物イオン ( $Z > 2$ ) の取り扱い

現在の定式化では、プラズマに供給される不純物の原因として、以下の 3 つがある。

- 1, プラズマ対向壁材料のスパッタリング
- 2, プラズマ対向壁材料の昇華
- 3, 不純物ガスの供給 (ダイバータ熱負荷低減を目的にフィードバック制御を行う)

これらの事象はそれぞれ、式 (3) 右辺の  $S_{imp}$ 、 $S_{imp}^{(Sub)}$ 、 $S_{imp,CTL}$  に対応する。

プラズマから漏れた DT 粒子によりスパッタされたプラズマ対向壁材料のプラズマへの流入は一次遅れ系で表されるとし、 $S_{imp}$  の時間変化を次式で与える。

$$\frac{dS_{imp}}{dt} = -\frac{1}{\tau_{imp,D}} \cdot S_{imp} + \frac{1}{\tau_{imp,D}} \left( \frac{n_{DT}}{\tau_{p,DT}} \cdot f_{z1} \cdot f_{z2} \right) \quad (5)$$

右辺第 2 項の  $f_{z1}$  は主プラズマから漏れた DT イオンがプラズマ対向壁に入射する確率、 $f_{z2}$  は不純物がスパッタされ主プラズマに入る確率を表し、これらは解析パラメータである。遅れ時間  $\tau_{imp,D}$  は DT 粒子閉じ込め時間に比例するとし、比例係数を解析パラメータとする。

$$\tau_{imp,D} = C_{SIMP} \cdot \tau_{p,DT}$$

また、スパッタによる不純物イオンの総量  $S_{imp}$  のイオン別割合を次式で与える。

$$S_{imp} = \sum_m^{Z_m > 2} r_m \cdot S_{imp}, \quad (6)$$

$$r_m = f_m / \sum_n f_n, \quad f_m = \sum_i^{material(i)=m} R_{sputter,m} \cdot SC_i^{\chi_i} \cdot A_i$$

但し、 $R_{sputter,m}$ は材料 m のスパッタ率、 $SC_i$ は i 番目の対向壁面で発生した不純物が主プラズマに入る率を表すスクリーニング因子、 $\chi$ はスクリーニング因子の指数（1.0～2.0）、 $A_i$ は i 番目対向壁の面積 ( $m^2$ ) を表し、i についての和は表面材料が m であるプラズマ対向壁についてとる。

プラズマ対向面の温度上昇により昇華したプラズマ対向面材料原子が主プラズマに入り込む量 ( $S_{imp}^{(Sub)}$ ) は、各壁からの寄与の和で表される[5]。

$$S_{sub,m} = \sum_i^{material(i)=m} SC_i \cdot S_{b,i} \quad (7)$$

$$dS_{b,i}/dt = (-S_{b,i} + S_{b,i}^{(0)}) / (\tau_{imp,D} \cdot f - delay_i) \quad (8)$$

$$S_{b,i}^{(0)} = \frac{1}{f_{peaking,i} \cdot m_{mol,i}} \cdot A_i \cdot N_A \cdot \rho_i \cdot \frac{C}{\sqrt{T}} \exp(-(\Delta H / \kappa)/T) \quad (9)$$

式 (8) では、i 番目の対向面で発生した昇華不純物の遅れ時間を、因子  $f \cdot delay_i$  と  $\tau_{imp,D}$  の積で与えている。因子  $f \cdot delay_i$  は、各プラズマ対向面毎に与えられる解析パラメータである（5節、表2参照）。式 (9)において、 $f_{peaking}$  は表面熱負荷のピーキング因子で解析パラメータ、 $m_{mol}$  はモル質量 (kg/mol)、 $N_A$  はアボガドロ数、 $\rho_i$  は i 番目対向壁材料の密度 ( $kg/m^3$ )、C は蒸発係数 (~1.0)、 $\Delta H/\kappa$  は対向壁材料の活性化エネルギー (K)、T は対向壁表面温度 (K) である。式 (3) の昇華による不純物流入項は、式 (7) を用いて、次式で与えられる。

$$S_{imp}^{(Sub)} = \sum_m S_{sub,m} / V_p$$

式 (3) 右辺第4項は、不純物供給制御によりコアプラズマに供給される不純物粒子（アルゴン、ネオンなど）を示す。供給不純物束  $\Gamma_{imp}$  に対して、DT 燃料と同じ遅れ時間をもつ一次遅れ系として扱う。

$$\frac{dS_{imp,CTL}}{dt} = -\frac{S_{imp,CTL}}{\tau_{DT,FUEL}} + \frac{1}{\tau_{DT,FUEL}} \cdot \Gamma_{imp} \quad (10)$$

不純物イオンの粒子保存則は式 (3) でまとめて記述されるが、不純物イオン種の混合割合は個々の粒子保存則から求める。プラズマ対向壁材料に起因する不純物イオン (Be、C、W など) の保存則は次式で与えられる。

$$\frac{dn_m}{dt} = -\frac{n_m}{\tau_{p,imp}} + S_{imp} \cdot r_m + \frac{S_{sub,m}}{V_p} \quad (11)$$

また、外部から制御により供給する不純物イオン (Ar、Ne など) の保存を次式で与える。

$$\frac{dn_m}{dt} = -\frac{n_m}{\tau_{p,imp}} + S_{imp, CTL, m} \quad (12)$$

粒子閉じ込め時間は、不純物イオンに共通であるとする。

### 2. 2. 3. エネルギー保存

体積平均エネルギーの保存について解く（単位： $keV m^{-3} s^{-1}$ ）。

イオンのエネルギー保存は次式で与えられる。

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{3}{2} n_I T_I \right) = P_{\alpha,I} + P_{AUX,I} - P_{ie} - \frac{1}{\tau_{E,I}} \left( \frac{3}{2} n_I T_I \right) \quad (13)$$

但し、イオン密度  $n_I$  は各種イオンの和で与えられる。

$$n_I = n_{DT} + n_\alpha + \sum_k^{Z_k > 2} n_k$$

また、(13)式右辺は、第1項が $\alpha$ 粒子のイオン加熱分、第2項が外部加熱のイオン加熱分、第3項が電子-イオン相互作用、第4項が輸送損失項を表す。外部加熱としては、中性粒子ビーム加熱と高周波加熱を考慮し、その割合は解析パラメータ ( $FNB$ ) である。第4項のイオンエネルギー閉じ込め時間は電子のエネルギー閉じ込め時間に比例するとし、比例係数を解析パラメータとする。

$$\tau_{E,I} = CI \cdot \tau_{E,e}$$

電子のエネルギー保存を次式で表す。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{3}{2} n_e T_e \right) &= P_{\alpha,e} + P_{AUX,e} + P_{ie} + P_{OH} - P_{RAD} - \frac{1}{\tau_{E,e}} \left( \frac{3}{2} n_e T_e \right) \\ P_{RAD} &= P_{brm} + P_{sy} + P_{li} \end{aligned} \quad (14)$$

右辺第4項はオーム加熱、第5項は輻射による損失を表し、制動輻射、シンクロトロン輻射と線輻射の和で与えられる。電子エネルギー閉じ込め時間は、既存装置の実験データベースに基づく閉じ込め時間スケーリング則を用いて、次式で与えられる[4]。

$$\tau_{E,e} = C_H \cdot \tau_{E,Scaling}$$

右辺定数  $C_H$  はスケーリング則に対する閉じ込め時間改善係数で、解析パラメータである。

式 (13)、(14) の右辺第二項の外部加熱を、定常分と燃焼制御の和で表す。

$$P_{AUX} = P_{AUX,0} + P_{AUX,CTL}$$

制御による加熱がプラズマに熱化する過程を一次遅れ系で表し、 $P_{AUX,CTL}$  を次式の解で与える。

$$\frac{d}{dt} P_{AUX,CTL} = -\frac{P_{AUX,CTL}}{\tau_{AUX}} - \frac{1}{\tau_{AUX}} \cdot P_{AUX,FB} \quad (15)$$

第二項の  $P_{AUX,FB}$  は各時刻で加えるフィードバック加熱である。遅れ時間を、加熱で生ずる高速粒子が熱化する時間と制御系の遅れ時間の和で表す。NBI 高速イオンのエネルギー損失時間 ( $\tau_{SD}$ ) を熱化時間の代表として、加熱制御の遅れ時間を次式で与える。

$$\tau_{AUX} = C_{SD} \cdot \tau_{SD} + \tau_{AUX,0}$$

但し、右辺の熱化時間比例係数及び定数項は解析パラメータである。

## 2. 2. 4. プラズマ磁束保存

プラズマ誘導電流 ( $I_{OH}$ ) の時間変化を、プラズマ磁束保存の式（回路方程式、単位 V）から求める。

$$L_p \cdot \frac{dI_{OH}}{dt} + \frac{d\Psi_{EX}}{dt} + \eta_p \cdot I_{OH} = 0 \quad (16)$$

但し、プラズマの自己インダクタンスを  $L_p$ 、一周抵抗を  $\eta_p$  で表す。外部供給磁束 ( $\Psi_{EX}$ ) の時間変化を定常分とフィードバック制御の和で表す。

$$\frac{d\Psi_{EX}}{dt} = \frac{d\Psi_{EX}}{dt} \Big|_0 + \frac{d\Psi_{EX,CTL}}{dt}$$

磁束制御の遅れ時間は十分短いため (<秒)、無視出来るものとした。

## 2. 3. 初期状態

前節の式 (1) ~ (16) の定常解を解析の初期配位とする。初期配位を与える条件は以下の通りである。

- ① プラズマ形状パラメータ（主半径、小半径、非円形度、三角度）
- ② プラズマ電流
- ③ 核融合出力
- ④ 核融合利得 (Q 値)
- ⑤ 電子エネルギー閉じ込め時間のスケーリング則に対する比 ( $C_H$ )
- ⑥ 各種閉じ込め時間のエネルギー閉じ込め時間に対する比 ( $CPF, CA, CI$ )
- ⑦  $Z > 2$  の不純物密度の電子密度に対する割合

解析コードでは、以上の条件が同時に満たされる配位を収束計算により求める。

不純物密度の収束条件は、プラズマ対向機器モデルの取り扱いにより異なる。プラズマ対向機器を考慮した解析を行う場合は、入力されたベリリウム (Be)、アルゴン (Ar) 密度の電子密度に対する比を収束条件とする。Be 密度比については燃料粒子閉じ込め時間の電子エネルギー閉じ込め時間に対する比 (CP) を収束変数とし、Ar 密度比についてはアルゴン供給量を収束変数とする。収束計算の結果、CP、アルゴン供給量の初期値が求まる。この場合、Be、Ar 以外の不純物密度の電子密度比の初期値は、式 (11) の定常解を用いて、プラズマ対向面の面積、スペッタ率、スクリーニング因子に依存して決定されるため、入力値は無視される。また、プラズマ対向機器を考慮しない解析を行う場合は、Ar を除く入力の不純物密度の電子密度比を収束条件として CP を求め、入力された Ar 密度の電子密度比を収束条件としてアルゴン供給量求める。よって、この場合の初期配位では、不純物密度の電子密度比は入力の値になる。初期状態の求め方の詳細については、付録 2 にまとめる。

## 2. 4. 時間発展の計算

式 (1) ~ (16) の微分方程式を解いて、プラズマに関する物理諸量の時間発展を求める。時間発展中のプラズマ閉じ込め時間の取り扱いは、初期状態を求める場合と異なる。エネルギー閉じ込め時間については、与えられた閉じ込め改善因子と  $\tau_{E,I} = CI \cdot \tau_{E,e}$  の関係を用いて求める。

粒子閉じ込め時間については、初期状態の粒子閉じ込め時間 ( $\tau_{P,DT}^{(0)}, \tau_{P,\alpha}^{(0)}, \tau_{P,imp}^{(0)}$ ) に対して、以下の密度・加熱パワー依存性を用いて評価する。

$$\begin{aligned}\tau_{P,DT} &= \tau_{P,DT}^{(0)} \cdot \left( \frac{n_e}{n_e^{(0)}} \right)^{-0.36} \cdot \left( \frac{P_{Heating}}{P_{Heating}^{(0)}} \right)^\eta \cdot \left( \frac{I_P}{I_P^{(0)}} \right)^{0.21} \\ \tau_{P,\alpha} &= \tau_{P,\alpha}^{(0)} \cdot \left( \frac{n_e}{n_e^{(0)}} \right)^{0.66} \cdot \left( \frac{P_{Heating}}{P_{Heating}^{(0)}} \right)^\eta \cdot \left( \frac{I_P}{I_P^{(0)}} \right)^{0.21} \\ \tau_{P,imp} &= \tau_{P,imp}^{(0)} \cdot \left( \frac{n_e}{n_e^{(0)}} \right)^{-0.36} \cdot \left( \frac{P_{Heating}}{P_{Heating}^{(0)}} \right)^\eta \cdot \left( \frac{I_P}{I_P^{(0)}} \right)^{0.21}\end{aligned}\quad (17)$$

但し、(0)の付いた変数は初期状態での物理量を示す。また、 $\eta$  は L モードプラズマの場合 -0.3、H モードプラズマの場合 -1.1 を取る指数である。この粒子閉じ込め時間の依存性は JT-60U の実験解析の結果に基づく [6]。DT・不純物粒子と He 粒子の取り扱いの違いは、DT・不純物粒子がプラズマ周辺部からの粒子供給であるのに対して、He 粒子はプラズマ中心で発生するため、周辺と中心の粒子供給の場所により、異なるスケーリングを使用している。DT 粒子をペレットで供給する場合は周辺供給とは言い難いが、現 ITER 設計のペレット入射速度では小半径の 70% ~80%程度までしか燃料供給が出来ないため [7]、プラズマ周辺からの燃料供給として良い近似になると考えられる。

先に述べたように、式(1)のDT粒子保存式のDT粒子源は、プラズマ対向壁面ダストに捕捉されていた水素同位体が放出されたことによる寄与( $S_{PFC}$ )を含む。ダストの水素同位体捕捉率の温度依存性を実験データにもとづき、次式で線型近似する。

$$f_{(T)}^R = -C \cdot T_{(K)} + f_0^R, \quad T < T_{critical} = f_0^R / C$$

定数、 $C$ 、 $f_0^R$ は材料固有であり、 $T_{critical}$ 以上の温度では捕捉率を0とする。低温でダストに吸着された水素同位体が、対向壁温度が上昇するとき、捕捉率が下がることでダストから水素同位体が放出されるものと考える。逆に温度が下がる場合は、水素同位体の吸着が起こる。この近似式を用いて、 $S_{PFC}$ を次式で与える。

$$\begin{aligned} S_{PFC} &= \sum_m S_{PFC}^{(m)}, \quad S_{PFC}^{(m)} = \sum_i^{material(i)=m} S_{PFC}^{(i)}, \quad S_{PFC}^{(i)} = SC_i \cdot y_i / V_p \\ \frac{dy_i}{dt} &= \frac{1}{\tau_{delay,i}} (S_{PFC}^{(i)} - y_i), \quad S_{PFC}^{(i)} = A_i \cdot n_{Dust,i} \cdot C_i \cdot \frac{dT_{i,surface}}{dt} \\ \tau_{delay,i} &= \tau_{imp,D} \cdot f - delay_i \end{aligned} \quad (18)$$

係数 $SC_i$ は*i*番目プラズマ対向壁のスクリーニング因子、 $n_{Dust,i}$ は*i*番目プラズマ対向面のダスト密度である。遅れ時間 $\tau_{delay}$ は、昇華不純物の主プラズマ侵入の遅れ時間と同じと仮定した。

不純物の流入が増加し、輻射冷却によりプラズマ表面を通過する熱( $P_{Loss}$ )が減少すると、HモードからLモードへの遷移が起こることが知られている。本コードでは、次式でH-L遷移の条件を与えていた。

$$P_{Loss} < C_{H-L} \cdot P_{Thr-scaling}$$

ここで、比例係数 $C_{H-L}$ は解析パラメータ、 $P_{Thr}$ は物理データベースから求めたL-H遷移加熱パワー閾値スケーリング則が与える加熱パワーである[4]。この遷移が起きたとき、電子エネルギー閉じ込め時間は、Lモードの閉じ込めスケーリング則に従うとする。また、分布係数(AP、AT)もLモードの値に変わるのであるが、これら分布係数はエネルギー閉じこめ時間をかけて線形に時間変化するものとする。また逆に、Lモードで $P_{Loss}$ が増加する場合は、次式の条件でLモードからHモードへの遷移が起こるとする。

$$P_{Loss} > C_{L-H} \cdot P_{Thr-scaling}$$

ここで、比例係数 $C_{L-H}$ は解析パラメータである。

### 3. プラズマ対向機器の熱解析モデル

#### 3. 1. 概要

本コード SAFALY の特徴は、プラズマ対向機器との相互作用を考慮した燃焼プラズマ動解析が行えることである。プラズマの挙動、それに伴う対向機器の温度分布の時間変化、及び対向機器で発生する不純物の主プラズマへの侵入を連立して解く。真空容器内機器の冷却を正確に解析するためには、冷却流路から除熱系まで含めてモデル化する必要がある、またダイバータやブランケット第一壁など高熱負荷部の冷却では冷媒の流体としての取り扱いにも注意を要する。このような詳細な冷却解析は、既存の信頼性のあるコードで実施し、SAFALY コードでは詳細解析で得られる冷却水温度や冷却管の熱伝達率など主要な物理量を用いて、簡略化したモデルで冷却系の影響を評価する。

SAFALY コードでは、ブランケットモジュール、ダイバータカセットの構成部分をそれぞれ一次元の層構造でモデル化する。図 2 に、2001 年 ITER 最終報告書[8]に記載されたプラズマ対向機器の配置に基づく、SAFALY の解析モデルを示す。プラズマ対向機器の温度分布は、温度  $T(^{\circ}\text{C})$ 、伝導熱流束を  $q (= -\kappa dT/dx)$  として、次の熱伝導の式を解いて求める（単位  $\text{J/m}^3/\text{s}$ ）。

$$\rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = -\frac{dq}{dx} + Q_{Load,(x)} \quad (19)$$

式 (19) で、 $\rho$  は重量密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $c$  は熱容量 ( $\text{J/K/kg}$ )、 $\kappa$  は熱伝達係数 ( $\text{J/m/s/K}$ )、 $x$  は厚さ方向の座標 ( $\text{m}$ ) である。これら物性値は、FDR の技術文書[9]に記載された値を使用した。変数  $Q_{Load}$  は熱源で、プラズマからの輻射・熱流束による熱負荷、核発熱、冷却、輻射冷却などから成る。

解析では厚さ方向に離散化したメッシュを用意し、メッシュ要素で厚み方向に式 (19) を積分することで熱伝導方程式の離散化を行い、冷却水温度や真空容器内壁温度を境界条件として温度分布を解く。また、冷却水の温度や熱伝達係数は、TRAC など熱解析コードの結果を用いる。

プラズマ対向機器のモデルは、構造物層、冷却層、ギャップ層から構成されるとする。対向機器表面はプラズマに面しており、その反対の面は真空容器内壁やダイバータカセット本体に面しているとする。それぞれの層の取り扱いを以下の節で説明する。

#### 3. 2. プラズマ対向面の取り扱い

プラズマ対向面はプラズマからの表面熱負荷を受けることから、取り扱いが構造物とは異なる。熱伝導方程式を離散化し、次式で近似する。

$$\rho \cdot c \cdot \delta x \cdot \frac{dT}{dt} = q_{surf} - q_{(\delta x)} + \int_{x_1}^{x_1 + \delta x} dx' Q_{nucl(x')} \quad (20)$$

但し、プラズマ対向面の座標を  $x_1$  とし、表面での温度を  $T_1$  とした。また、 $\delta x$  はメッシュの厚みの半分 ( $\delta x = (x_2 - x_1)/2$ )、右辺第 1 項はプラズマ対向面の熱負荷、第 3 項は核発熱の厚み方向の積分である。

プラズマ対向面の熱負荷 ( $J/m^2/s$ ) は次式で与えられる。

$$q_{surf} = q_{Plasma} - q_{rad} - q_{evapolate} \quad (21)$$

右辺第1項はプラズマからの輻射・熱流束負荷密度、第2項は対向壁表面の輻射冷却、第3項は表面材料の昇華による冷却を表す。プラズマからの熱負荷は、プラズマ対向壁負荷解析 (NRCX) コードで予め解析した熱負荷分布を用いて評価する。

$$q_{Plasma} = q_{rad-Main,NRCX} \cdot \frac{P_{rad-Main}}{P_{rad-Main,NRCX}} + q_{rad-Div,NRCX} \cdot \frac{P_{rad,Div}}{P_{rad,Div,NRCX}} + q_{cond,NRCX} \cdot \frac{P_{cond}}{P_{cond,NRCX}} \quad (22)$$

右辺第一項は主プラズマ室での輻射の寄与、第二項はダイバータ室での輻射の寄与、第三項は直接プラズマが対向面に接することによる熱流束の寄与であり、 $P_{rad}$ ,  $P_{cond}$  は各時刻での輻射、熱流束パワーを意味する。NRCX の添え字が付いた変数  $q$ ,  $P$  は、プラズマ対向壁負荷解析コード (NRCX) を使用した解析で求めた熱負荷密度及びその時の輻射パワー、熱流束パワーである。

式 (21) 右辺第二項の輻射冷却を次式で与える。

$$q_{rad,i} = E_i \cdot c_{SB} \cdot (T_i + 273.15)^4 - \sum_j^{j \neq i} F_{rad(i,j)} \cdot E_j \cdot c_{SB} \cdot (T_j + 273.15)^4 \quad (23)$$

但し、 $E_i$  は  $i$  番目プラズマ対向面の輻射率、 $c_{SB}$  はステファン-ボルツマン定数、 $F_{rad}$  はプラズマ対向面相互の輻射形状因子を意味する。輻射形状因子は NRCX コードで予め求めたものを使用する。

式 (21) 右辺第三項は、対向壁材料の昇華による冷却を意味し、式 (9) の変数を用いて次式で表すことが出来る。

$$q_{evapolate} = H_{ev} \cdot \rho_i \cdot \frac{C}{\sqrt{T}} \exp(-(\Delta H / \kappa)/T) \quad (24)$$

ここで、 $H_{ev}$  は蒸発潜熱 ( $J/kg$ ) である。

### 3. 3. 冷却層、ギャップ層の取り扱い

図 3 に示す配置で冷却層に接する面の熱伝達を評価する。図に示すように、冷却層は面積割合  $R_{CH}$  が冷却水の通路、残りの部分が構造材であるとする。式 (19) を積分・離散化し、次式を解く。

$$\rho \cdot c \cdot \delta x \cdot \frac{dT_i}{dt} = q_{i-1} - q_i + \int_{x_{i-1} + \delta x_{i-1}}^{x_i + \delta x_i} dx' Q_{nucl}(x') \quad (25)$$

但し、式中の  $\delta x$  以下の通り。

$$\delta x = \delta x_{i-1} + (1 - R_{CH}) \cdot \delta x_i, \quad \delta x_{i-1} = (x_i - x_{i-1})/2, \quad \delta x_i = (x_{i+1} - x_i)/2$$

式 (25) 右辺第3項は核発熱の寄与であるが、冷却層の核発熱は構造物部分、割合 ( $1 - R_{CH}$ )、での発熱のみを評価する。

冷却層と接する面での熱流束密度  $q_i$ を次式で与える。

$$q_i = R_{CH} \cdot \alpha_C \cdot (T_i - T_w) \cdot (1 - S_{BO}) - (1 - R_{CH}) \cdot K_i \cdot \frac{T_{i+1} - T_i}{x_{i+1} - x_i} + E_i \cdot c_{SB} \cdot R_{CH} \cdot ((T_i + 273.15)^4 - (T_k + 273.15)^4) \cdot S_{BO} \quad (26)$$

変数  $\alpha$ は冷却水と接する面での熱伝達係数 (W/m<sup>2</sup>/K)、 $T_w$ は冷却水温度である。 $S_{BO}$ は冷却管のバーンアウトを示すスイッチで、通常は0、LOFA や LOCA によりバーンアウトが起きたときは1をとり、 $T_k$ は冷却層反対面の温度を示す。右辺第三項は、バーンアウトが起こった場合の輻射熱伝達を意味する。

ギャップ層は冷却層と同じ構造であるが、冷却水はなく、空間があるだけである。よって、ギャップ層の熱伝達は、式(25)、(26)において  $S_{BO}=1$  とおいた式で記述する。

また、プランケット、ダイバータターゲット板などは、プラズマと反対側の面で、真空容器内壁やダイバータカセット本体に面している。温度分布解析では、真空容器内壁やダイバータカセット本体温度を一定として、境界条件を与えており、真空容器やダイバータカセットに接する層の温度変化もギャップ層と同じに扱うことができる。但し、式(26)の反対面の温度  $T_k$ を真空容器内壁やダイバータカセット温度に入れ替える。

### 3. 4. 温度分布解析

式(20)、(25)の様に離散することで、熱伝導方程式を行列形式に表すことができる。

$$\begin{pmatrix} M \\ \rho_i \cdot c_i \cdot dT_i/dt \\ M \end{pmatrix} = -A(\{T\}) \cdot \begin{pmatrix} M \\ T_i \\ M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M \\ F_i(\{T\}) \\ M \end{pmatrix} \quad (27)$$

右辺の行列  $A$  は熱伝達係数を含む行列で、温度の関数である。また、右辺第二項のベクトルは、核発熱、冷却、輻射の効果を含み、対向機器厚さ方向の温度分布に依存する。プラズマ対向機器それぞれについて式(27)が得られ、プラズマ対向面での輻射冷却を通じてプラズマ対向機器間で相互に影響を及ぼし合っている。

定常状態は、式(27)右辺をゼロとおくことで得られる。

$$\begin{pmatrix} M \\ T_i \\ M \end{pmatrix} = A(\{T\})^{-1} \cdot \begin{pmatrix} M \\ F_i(\{T\}) \\ M \end{pmatrix} \quad (28)$$

但し、 $A$ 、 $F$ が対向機器の温度分布に依存するため、式(28)で得られた温度分布を用いて再度  $A$ 、 $F$ を求めて温度分布を補正することを繰り返し、収束計算をおこなうことで定常状態の温度分布を求めることができる。こうして得られた定常状態を初期状態として、過渡解析を実施する。また、プラズマ対向機器の温度分布の時間発展は、式(27)を解くことで得られる。

#### 4. 入出力ファイル

本解析コードを使用する場合、以下の入力ファイルを用意する。

- ① **input\_plasma** : プラズマ解析条件および解析オプションの設定
  - ② **input\_pfc** : プラズマ対向機器のモデルおよびパラメータ
  - ③ **data\_for\_safaly** : NRCX コードで求めた対向機器熱負荷分布、輻射形状因子
  - ④ "restart file" : 繼続計算入力ファイル、ファイル名は **input\_plasma** 内で指定
- また解析の結果、以下のファイルが出力される。
- ① **out\_safaly** : 計算途中経過が出力される。**input\_plasma** のオプション選択より、プラズマ対向機器の厚さ方向の温度分布などを出力する。
  - ② **out\_plasma\_histroy** : プラズマパラメータの時間発展を出力する。
  - ③ **out\_pfc\_surface\_history** : プラズマ対向機器の表面パラメータ（温度、熱負荷密度）の時間発展を出力する。
  - ④ **out\_temporary** : 計算終了時の変数値を出力する。継続計算をする場合は、このファイルを読み込む。

#### 5. 解析パラメータ概要

2節、3節で述べた解析のモデル化には、数多くのパラメータがある。2002年12月版の入力ファイルの解析パラメータ一覧を表1、表2で整理する。また、計算への影響を、D=設計依存、△=影響あり、○=要注意、◎=重要な分類した。これらの解析パラメータについての感度解析については、本報告書第2部で報告する。

表1. プラズマに関するパラメータ（入力ファイル：**input\_plasma**）

変数	概要	初期状態	時間発展	監視条件
<b>1. プラズマ幾何形状</b>				
R	プラズマ大半径(m)	D		
PLARAD	プラズマ小半径(m)	D		
XKX	非円軽度	D		
XKA	非円形度 (IPB98y2 スケーリング則に使用)	D		
DLT	三角度	D		
BTOR	中心トロイダル磁場 (T)	D		
IDIV	ダイバータ配位、1=ダブルヌル、2=シングルヌル	D		
<b>2. SOLに関するパラメータ</b>				
ISOL	PFC 表面材料昇華のプラズマへの影響評価に関するフラグ：考慮する(=1)、しない(=0)		○	
EGRAD	プラズマ周辺での輻射パワー初期値(MW)	○	○	
FRPLI	コア線輻射の周辺輻射パワーに対する比	○	○	
ENEG	周辺プラズマ電子密度のコア電子密度に対する比	○	○	
ENDV	ダイバータ電子密度のコア電子密度に対する比	○	○	
ASPUT	スペッタされたPFC 表面材料のコアプラズマ混入比を評価する因子：混入比～(スクリーニング因子) <sup>ASPUT</sup>	◎	◎	

変数	概要	初期状態	時間発展	監視条件
3, 時間発展に関するパラメータ				
ICAL1	PFC 考慮に関するフラッグ：考慮する(=1)、しない(=0)	○	○	
ICAL2	時間発展に関するフラッグ：考慮する(=1)、しない(=0)			
DTIME, STIME	時間ステップ、終了時間(秒)			
FZ1, FZ2	コアから漏れたプラズマが PFC 材料をスパッタさせ、その不純物がコアプラズマに進入する割合。FZ1・FZ2 の積で使用される。	◎	◎	
RPL	アルファ粒子リップル損失割合	△	△	
RPK	アルファ粒子負荷ピーキング因子			
SWDT	dW/dt 項の因子：入れない(=0)、入れる(=1.0)		○	
CI	イオンエネルギー閉じこめ時間の電子エネルギー閉じこめ時間に対する比	○	◎	
CPF	DT 粒子閉じこめ時間の電子エネルギー閉じこめ時間に対する比	○	◎	
CP	不純物粒子閉じこめ時間の電子エネルギー閉じこめ時間に対する比の初期値。ベリリウムの電子密度比を FBE にする収束計算において変数として取り扱われる。	結果は 要注意		
CA	ヘリウム粒子閉じこめ時間の電子エネルギー閉じこめ時間に対する比	○	◎	
EPSNEW	初期配位計算時の収束条件	△		
GK	シンクロトロン輻射の壁反射率	○	○	
ISCALE	初期配位の閉じこめモード：5=H モード、6=L モード	○		
FACTLH	L-H 遷移のスケーリング則マージン値		△	
FACTHL	H-L 遷移のスケーリング則マージン値		○	
ATL	L モードでの温度分布パラメータ			
APL	L モードでの密度分布パラメータ			
ATH	H モードでの温度分布パラメータ		○	
APH	H モードでの密度分布パラメータ		○	
4, 初期状態パラメータ				
Q	核融合利得：等出力では、高 Q で高密度・低温度、低 Q 値で低密度・高温度になり、これら初期状態により擾乱に対する応答が異なるため要注意。	◎		
WLN	核融合出力初期値 (MW)	○		
CHH0	閉じこめ時間改善因子初期値 (収束条件)	○		
TI	イオン温度の計算初期値 (keV)、但し初期配位の計算で、HH 因子についての収束計算で収束変数として扱われる。			
PIP	プラズマ電流初期値 (MA)	○		
Q0	安全係数中心値	△		
XLI	内部インダクタンス (li3)	D	D	
FBE	ベリリウムの電子密度比初期値 (収束条件)	○		
FC	ICAL1=0 の場合、これらが不純物の電子密度比になるよう初期状態を求める。			
FO				
FE	ICAL1=1 の場合、入力値は無視され、PFC 表面でスパッタされた不純物のコア流入割合から、これらの不純物密度を求める。			
FCU				
FW				
FAR	アルゴンの電子密度比初期値 (収束条件)	○		
5, プラズマ制御パラメータ				
ICN1	DT 燃料供給制御 : 0=off, 1=on		△	
PFUS0	出力目標値 (MW)		△	
GS1	制御ゲイン : SI0*GS1*(Pf/PFUS0-1.0)		△	
GF_LIM	供給 DT 燃料最大値 (1/m3/s)		△	
ICN2	加熱制御 : 0=off, 1=on		△	
GS2	制御ゲイン (PFUS0 を出力目標値とする)		△	
PMAX	最大加熱パワー (MW)		△	

変数	概要	初期 状態	時間 発展	監視 条件
PIP_REF	電流制御目標値 (MA)		△	
GIP	制御ゲイン: Flux = - F0*(1 + GIP*(Ip - PIP_REF))		△	
VS_LIM	供給磁束変化率最大値 (Wb/s=V)		△	
ICN3	アルゴン供給制御 : 0=off、1,2=on		△	
GAR_REF	目標値 (ICN3=1 : Zeff、=2: ダイバータ熱流束)		△	
GPUF_AR	制御ゲイン		△	
CGR	密度限界のグリーンワルド密度比			○
C_BN	圧力限界の規格化ベータ値に対する比			○
C_SID	DT 燃料供給の一時遅れ時間= C_SID*TAUPF+TAU_GP		△	
TAU_GP	TAUPF は DT の粒子閉じこめ時間 (ICN1=1 の場合有効)		△	
C_EID	加熱制御の一時遅れ時間= C_EID*TAU_SD+TAU_AUX		△	
TAU_AUX	TAU_SD はビームの熱化時間 (ICN2=1 の場合有効)		△	
C_SIMP	スパッタされた PFC 材料のコアプラズマ流入遅れ時間 = C_SIMP*TAUP (ICAL1=1 の場合有効)		◎	
<b>6. 外部加熱パラメータ</b>				
FNB	NBI 加熱の全加熱に対する割合	○	○	
FMA	ビーム質量数	D	D	
EWN	ビームエネルギー (keV)	D	D	
ZBEAM	ビーム粒子の電荷数	D	D	
SNBI	入射パラメータ ( $R_{tang} = RP - AP/SNBI$ )	D	D	
COEF_NBI	NBI 電流駆動効率の改善因子	△	△	
FRFE	RF 加熱の電子加熱割合	△	△	
FOMCD_RF	RF 電流駆動の Figure of merit (A/W/m <sup>2</sup> )	△	△	
<b>7. 摘乱パラメータ 1</b>				
SXNI	時刻 0 でのイオン密度擾乱 (1.0 が擾乱なし)	△		
SXNB	時刻 0 でのアルファ粒子密度擾乱 (1.0 が擾乱なし)	△		
SXNZ	時刻 0 での不純物粒子密度擾乱 (1.0 が擾乱なし)	△		
STI	時刻 0 でのイオン温度擾乱 (加算的, keV)	△		
STE	時刻 0 での電子温度擾乱 (加算的, keV)	△		
<b>8. 摘乱パラメータ 2 (時間変化入力)</b>				
pnb1	NBI 加熱 (MW)	◎		
prf	RF 加熱 (MW)	◎		
fuel	DT 燃料供給 (SI0=初期 DT 供給量に対する比)	◎		
ch	閉じこめ改善因子の増減	◎		
flux	磁束供給 (初期の磁束供給量に対する比)	◎		

表 2. プラズマ対向機器に関するパラメータ (入力ファイル: input\_pfc)

変数	概要	初期 状態	時間 発展	監視 条件
<b>1. PFC に関するパラメータ</b>				
screening factor	各 PFC 表面で発生する、昇華・スパッタリングによる不純物、ダストからの DT 粒子がコアプラズマに進入する割合。	◎	◎	
f-delay	各 PFC 表面で発生する、昇華による不純物、ダストからの DT 粒子がコアプラズマに進入する一時遅れ時間 $delay\_time = f\_delay*C\_SIMP*TAUP$		○	
density_dust	表面のダスト密度 (1/m <sup>2</sup> )		○	
peaking factor	熱負荷のピーリング因子		◎	
PFC モデル	レイヤー構成、各レイヤーの厚さ、材料、核発熱分布、冷却水温度、熱伝達係数、ギャップ/冷却パスの割合	△	◎	

## 6. 計算例

本節では計算例として、2001年ITER最終設計報告書(FDR)に基づくプラズマ対向機器のモデルを用いて、燃焼プラズマに擾乱が加わった場合のプラズマ応答を列挙する。初期状態のプラズマは最終設計報告書の設計シナリオ1の燃焼プラズマを用い、5節で述べた解析パラメータは標準的なパラメータを用いた。プラズマの振る舞いはこれらの解析条件に依存することから、総合的な感度解析を実施し、報告書第2部にまとめる。

### 6. 1. プラズマ対向機器のモデル

プラズマ対向機器は、プランケットモジュールとダイバータカセットから構成される。図2は、それらの配置を示しており、PFC#1からPFC#17は17個のプランケットモジュール、PFC#18からPFC#25はダイバータカセットの各部分をモデル化している。ダイバータカセットは、バックフル部(PFC#18、PFC#19、PFC#25)、ターゲット部(PFC#20、PFC#24)、及びドーム部(PFC#21、PFC#22、PFC#23)から構成される。

プランケットモジュールの断面概略を図4-1に示す。プランケットモジュールは第一壁と遮蔽モジュールから成り、第一壁のプラズマ対向面にはアーマーが配置される。第一壁と遮蔽モジュールの間、遮蔽モジュールと真空容器内壁の間にはギャップがある。また、第一壁には2層、遮蔽モジュールには6層の冷却層が配置される。図4-2から図4-4はダイバータカセットに配置されたプラズマ対向機器をモデル化したものである。プランケットモデルは、SADL-3[9]で使用されているモデルであるが、プランケットを多層構造でモデル化しているため、最終設計報告書のプランケット冷却流路をそのままモデル化することはできない。そのため、別途熱解析を実施し、温度分布を再現するようモデル及び冷却水の温度・伝熱係数を設定することが求められる。表3は、解析で用いた冷却水温度及び熱伝達係数である。これらの値は、TRACコードを用いた熱解析の結果から得られたものである。

プラズマ対向機器のプラズマの反対面は、真空容器内壁やダイバータカセット本体に面している。以降の解析では、真空容器内壁やダイバータカセット本体温度を100°Cとした。

表3. 解析で用いた冷却水温度及び熱伝達係数

プラズマ対向機器	冷却水温度	熱伝達係数
プランケット	第一壁1層目：120°C ～モジュール6層目：150°C	$2.2 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2/\text{s}$
ダイバータ (バックフル、ターゲット、ドーム共通)	120°C	$3.0 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2/\text{s}$

### 6. 2. プラズマの初期条件

本節の解析では標準的な例として、2001年ITER-FDRに掲載されている設計シナリオ1(DS1)をプラズマの初期条件とした[7]。プラズマの諸パラメータを表4にまとめる。

表4, 2001年ITER-FDR設計シナリオ1のプラズマパラメータ

パラメータ	値
主半径／小半径 (m)	6.2/2.0
非円形度／三角度 (95%磁気面)	1.7/0.33
プラズマ電流 (MA)	15
安全係数 ( $q_{95}$ )	3.0
核融合出力 (MW)	500
核融合エネルギー増倍率 (Q)	10.0
規格化電子密度 ( $n_e/n_{GW}$ )	0.94
規格化 $\beta$ 値 ( $\beta_N$ )	2.0
閉じ込めモード	ELMy·H
エネルギー閉じ込め改善率 ( $H_H$ )	1.0
ベリリウム密度比 ( $n_{Be}/n_e$ )	2%
アルゴン密度比 ( $n_{Ar}/n_e$ )	0.14%
燃焼磁束* (Vs)	37

\*燃焼磁束: DT燃焼の間に外部コイルから供給できる磁束

### 6. 3. 摘乱に対するプラズマの応答例

核融合出力が上昇し、プラズマ対向機器熱負荷の増加を引き起こす事象（摘乱）に対するプラズマの応答を以下にまとめると。

#### 6. 3. 1. 燃料過剰注入

燃料供給系の不具合やプラズマへの燃料供給効率の突然の改善により、プラズマに DT 燃料が過剰に供給されるようになった場合を想定する。図 5-1 では、時刻 0 に、燃料供給が定常供給分の 2 倍（約  $3.0 \times 10^{19} (1/m^3/s)$ ）増加し、そのまま供給が継続されたときのプラズマの応答である。応答は制御の有無で異なることから、図 5-1 では、燃焼制御やプラズマ電流制御の有無について、異なる制御条件で解析した結果を比較した。燃焼制御と電流制御の両方を施した場合（実線）では、出力の上昇も、プラズマ電流の変位も押さえられ、対向壁熱負荷は上昇しない。しかしながら燃焼制御が無い場合（破線）は、出力が大きく上昇し、対向壁負荷も高くなる。

図 5-2 は、グリーンワルド密度で規格化した電子密度 ( $n_e/n_{GW}$ ) と核融合出力の平面上での軌跡を描いたものである。既存装置で得られている知見では、 $n_e/n_{GW} > 1.0$  で密度限界ディスラプション又はプラズマ閉じこめ性能の劣化により燃焼が終わるが、より厳しい負荷条件で評価するために、ほぼ確実にプラズマ燃焼が止まると考えられる保守的な条件として  $n_e/n_{GW} = 1.5$  を上限値とする。この条件で燃焼制御を行わない場合、核融合出力は 650MW 程度まで上昇し、その後密度限界ディスラプションなどにより燃焼が停止する。

燃焼制御なし、かつプラズマ電流制御有りの条件での、プラズマパラメータ、ダイバータターゲット板の熱負荷及びその温度の時間変化を図 5-3 に示す。ダイバータ熱負荷は、プラズマからの熱伝導や輻射による負荷から、放射冷却及び表面材料の昇華冷却分を引いた、ダイバータで除熱される熱負荷である。約 4 秒以内にプラズマは密度限界に達し、燃焼は終了する。密度上昇とともに輻射損失が増加し、その結果ダイバータ熱負荷やその表面温度の上昇は少ない。図 5-4 は、解析中の時刻 10 秒における、アウトボードブランケット (a) 及びインボードダイバータ

ターゲットの厚さ方向の温度分布である。

以上の解析結果より、燃料過剰注入では密度限界で燃焼が終了する、プラズマ電流制御の有無は結果に大きく影響を与えない、という特徴が理解できる。

### 6. 3. 2. プラズマ閉じ込め性能改善

初期状態は、ELMyH モードエネルギー閉じこめスケーリング則に対して閉じこめ改善因子を 1 としたが、何らかの理由で閉じ込めが突然改善した場合を検討する。既存装置でも、VH モードや負磁気シアモードなど ELMyH モードより閉じこめ性能の良いモードが発見されており、このような高閉じこめモードに突然遷移するような事象を想定する。

ELMyH モードに対する閉じこめ改善因子が 1 から 2 に突然遷移した場合のプラズマ及びダイバータ表面の応答を図 6 に示す。この解析では、燃焼制御は行わず、プラズマ電流制御のみを行った。閉じこめ改善では、プラズマ温度が上昇し、出力及び  $\beta$  値も上昇する。密度も上昇するものの、密度限界に至るほどの上昇は見られない。プラズマ電流制御はコイル電源容量に依存して限度があり、図 6 の結果の場合、温度上昇による一周電圧の低下や圧力上昇による自発電流の増加を制御しきれず、プラズマ電流が増加する。

図 6 中の  $\beta_N/q_{95}$  は、圧力限界の指数である。既存装置では、 $\beta_N/q_{95} \sim 1.0$  で圧力限界に達するが、プラズマ対向機器負荷が厳しくなる保守的な条件として、 $\beta_N/q_{95}=1.5$  を圧力限界の条件とした。圧力限界以上では、ディスラプションで燃焼は停止する。図 6 の結果では、約 4.5 秒以内に圧力限界に達する。このとき出力は 1.4GW に達し、ダイバータ表面熱負荷は 12MW/m<sup>2</sup>、インボーダー・ダイバータ表面温度は 1600 度程度になる。

### 6. 3. 3. プラズマ過加熱

初期状態の外部加熱は 50MW であるが、ITER の初期設備は 73MW の外部加熱容量をもつ。機器の不具合などにより、時刻 0 秒以降 73MW の加熱が加わった場合のプラズマの応答を図 7 に示す。加熱增加分は高周波加熱分とし、その電流駆動効率を 0 とした。解析では、燃焼制御は行わず、プラズマ電流制御のみを行った。

加熱によりプラズマ温度は上昇するが、プラズマ閉じこめ性能劣化のために、密度は減少する。その結果、出力は 40MW 程度の上昇にとどまる。密度、圧力ともディスラプションが発生するほどは上昇しない。このことより、50MW から 73MW への外部加熱増加程度では、問題になるような出力上昇は発生しないことがいえる。

### 6. 3. 4. 磁束過剰供給

初期条件の設計シナリオ 1 では、プラズマ一周電圧が 0.075V 程度であり、37Vs の燃焼磁束で約 500 秒間燃焼可能である。プラズマに供給可能な磁束変化は、CS・PF コイル系の電源容量で決まり、2001 年 ITER の設計では 2.1V 程度が最大である。電源制御の不具合などの理由で、時刻 0 秒以降、最大の磁束供給がなされた場合のプラズマ応答を図 8 に示す。この解析では、フィードバック制御やプラズマ電流を制限する機能は動作しないとした。

磁束過剰供給のため、プラズマ電流が上昇し、それに伴いエネルギー閉じこめ時間が長くなるため、温度及び出力が上昇する。しかしながら、時刻 17 秒で供給磁束の上限 37Vs に達し、17

秒以降のプラズマ電流増加は起こらない。密度限界や圧力限界に達することが無いため、時刻 17 秒まで燃焼が継続し、プラズマ電流が 18.5MA まで増加し、出力が 630MW 程度まで上昇たのち運転が停止する。

#### 6. 4. 解析例のまとめ

以上の解析により、2001 年 FDR の標準プラズマに対して、擾乱が加わった時のプラズマ応答の概要が理解できる。定性的には、1998 年 ITER-FDR の標準プラズマを用いた解析結果と同様の結果を得ることが出来た[2]。今回の改訂では、プラズマ電流の変化を考慮するようコードを変更したが、定性的なプラズマの振る舞いには影響を与えないようである。しかしながら、定量的には、取り扱うプラズマやプラズマ対向機器が異なることや、プラズマの取り扱いが異なるため、結果に差が現れている。

6 節の解析結果から、各擾乱に対するプラズマ応答の定性的特徴として、以下のことがいえる。

- ①燃料過剰注入：出力が増加し、密度限界で燃焼停止に至る。
- ②閉じこめ改善；出力が増加し、圧力限界で燃焼停止に至る。
- ③過加熱：2001 年 FDR 設計の外部加熱容量では、大きな出力上昇はない。
- ④磁束過剰供給：プラズマ電流増加とともに出力が増加し、供給磁束の制限で燃焼停止に至る。

以上の振る舞いはプラズマの初期条件、擾乱の条件、及び解析パラメータに大きく依存するため、本報告書第二部の感度解析結果を参考に、解析条件の妥当性や保守性を検討することが重要である。

## 7. まとめ

本報告書では、今回の改訂を施した後の SAFALY コードの全体像を報告した。今回の改訂により、コードそのものが簡素化されたほか、データ入力や真空容器内機器のモデル化も容易になった。また、本報告書では、代表的な擾乱に対するトカマク装置の応答解析を行い、擾乱に対する燃焼プラズマ応答の概要を検討した。

今回導入したプラズマ電流の時間発展（式（16））については、6節の代表的擾乱での解析例で述べたように、プラズマ電流の増加に伴って出力が上昇する影響が現れている。特に閉じ込め性能の改善事象では、自発電流の増加が大きく、電流制御系の電源容量が間に合わないためプラズマ電流が上昇し、その結果ベータ限界条件が緩和され、核融合出力が上昇する。このように、プラズマ電流の変化を考慮することにより、より保守的な出力変動の評価が可能になった。

現在の SAFALY コードは、ITER 工学設計活動を通じて蓄積された物理データベースをもとに、プラズマをモデル化しているが、モデル化の重要な部分で知見が欠けているため、確定できない部分が幾つかある。特に、プラズマ粒子や不純物の振る舞いについては燃焼応答解析において重要であるにもかかわらず、物理的解明が進んでいない。現 SAFALY では、式（5）と（6）でプラズマ対向壁でスパッタされた不純物の振る舞いを、式（7）～式（9）で昇華したプラズマ対向壁材料の振る舞いをモデル化している。これらのモデル化では、スクリーニング因子が重要な役割を果たしている。また、主プラズマの粒子閉じ込めを式（17）でモデル化している。これは、粒子源がプラズマの中心にあるか周辺であるかにより、JT-60U のデータを解析して得られた結果であるが、他の既存装置を含めたデータベースで統一的に理解されたスケーリング則を使用することが望ましい。今後、このような分野の研究進展が望まれる。

第5節の表1、表2で示したように、SAFALY コードは多数の解析パラメータを持つ。今回の改訂では御系のモデル化を強化したため、制御システムやプラントの応答に関する数々のパラメータが導入されている。これらのパラメータの幾つかはプラント機器の設計で決るものであるが、その多くは正確に掴めないことから、感度解析によりプラズマ燃焼応答への影響を評価する必要がある。本報告書の第二部では、SAFALY コードの解析パラメータや解析初期条件に対する感度解析を実施し、出力変動やプラズマ対向機器負荷との相関を検討する。

### 参考文献

- [1] T. Honda, T. Uda, K. Miki, T. Okazaki, Y. Seki and I. Aoki, Fusion Technol. 25 (1994) 451.
- [2] T. Honda, K. Miki, T. Okazaki, T. Uda, Y. Seki, I. Aoki, T. Kunugi, Fusion Technol. 26 (1994) 1228.
- [3] Generic site safety report (GSSR), in ITER FDR (2001).
- [4] ITER Physics Basis, Nucl. Fusion 39 (1999) 2137.  
ITER Physics Guideline, in ITER FDR (2001).
- [5] H. Th. Klippelel, Fusion Eng. Des., 9 (1989) 49.  
R. A. Langley, et. al., Data compendium for plasma-surface interactions, Nucl. Fusion (1984).
- [6] H. Takenaga, et. al., Nucl. Fusion, 39 (1999) 1917.
- [7] Physics Performance Assessment, in ITER FDR (2001).
- [8] Plant description document, in ITER FDR (2001).
- [9] Safety analysis data list-3 (SADL-3), ITER Joint central team, 2001.
- [10] ITER Documentation series, No. 10 and No. 21, IAEA (1991).
- [11] T. Mizoguchi, et. al, JAERI-M 87-120.
- [12] 藤枝 浩文他、JAERI-M 92-178.

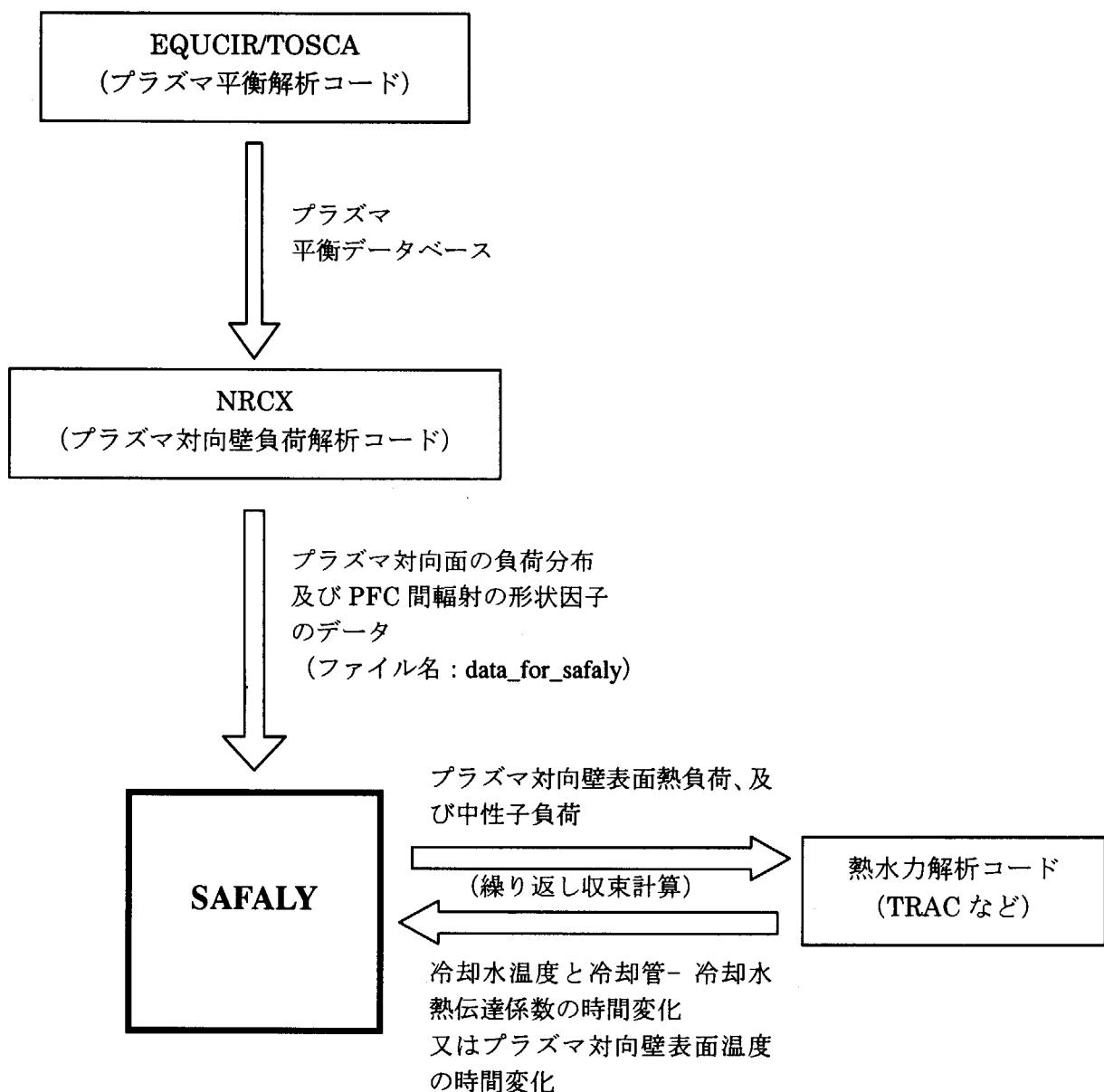


図1， SAFALY コードと他の解析コードとの連携関係。図中の矢印はデータの流れを意味する。

### Position of plasma facing components (PFC) in the analysis of safaly

( ) = material of armor

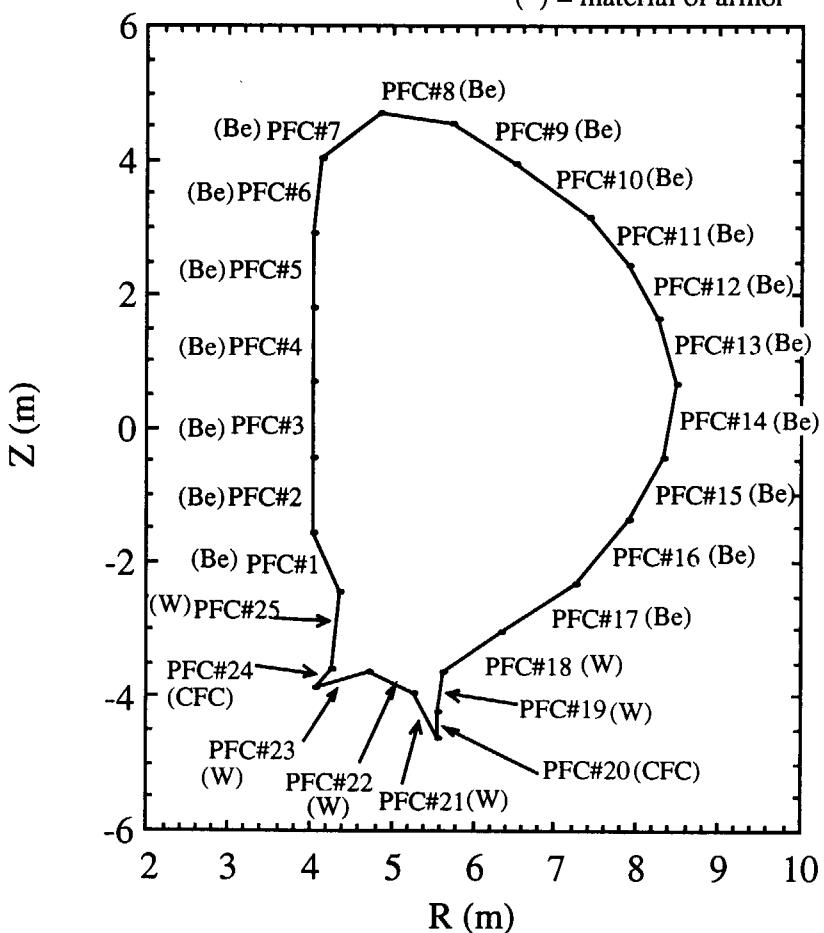


図2、SAFALY 解析用、プラズマ対向機器モデルの配置。2001年ITER最終設計報告書に記載された真空容器内機器の配置をモデル化した。括弧内はプラズマ対向面（アーマー）の材料を示す。

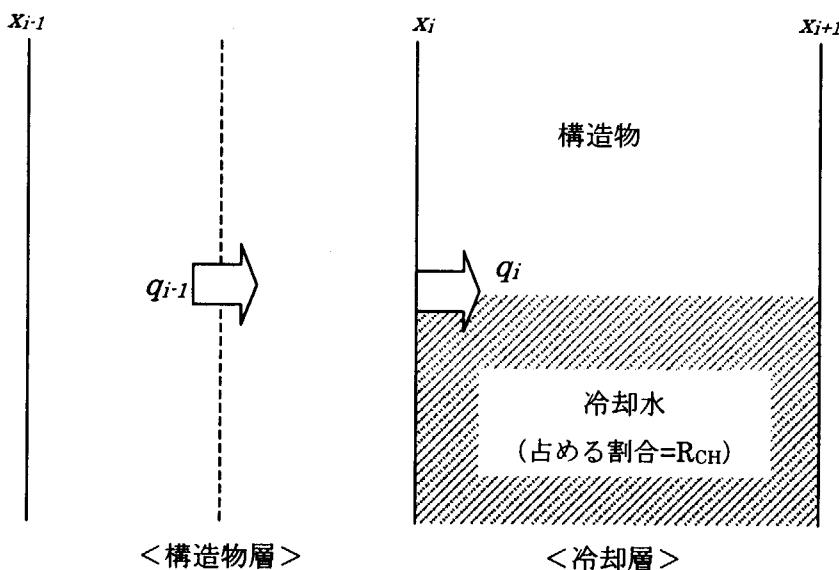


図3、冷却層と接する面の概念図

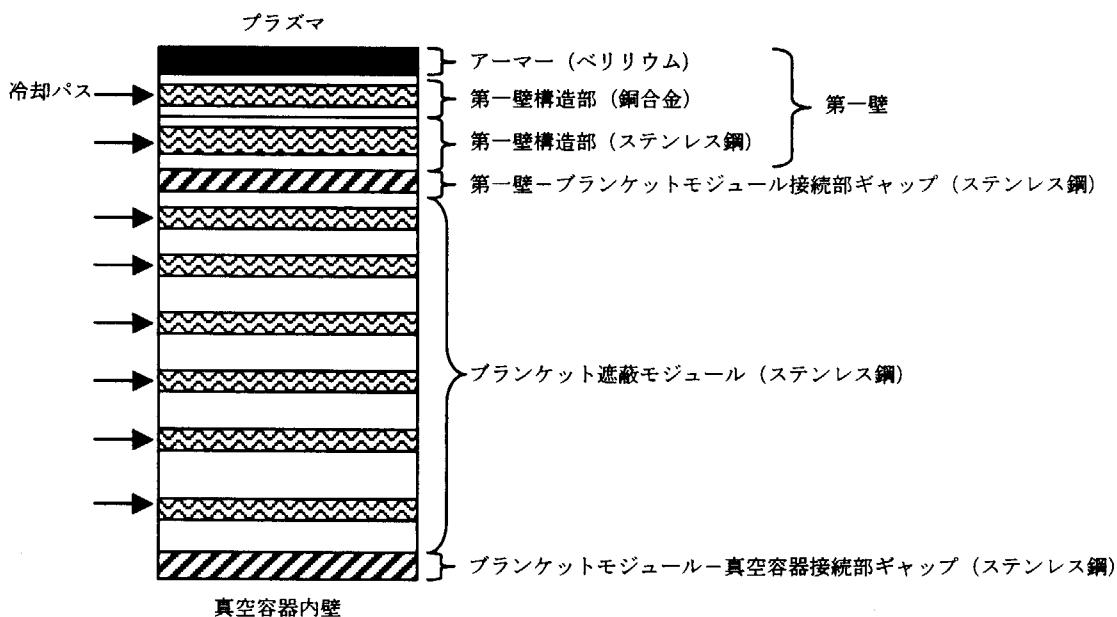


図4-1, ブランケットモジュールのモデル (全体厚さ=0.455m)

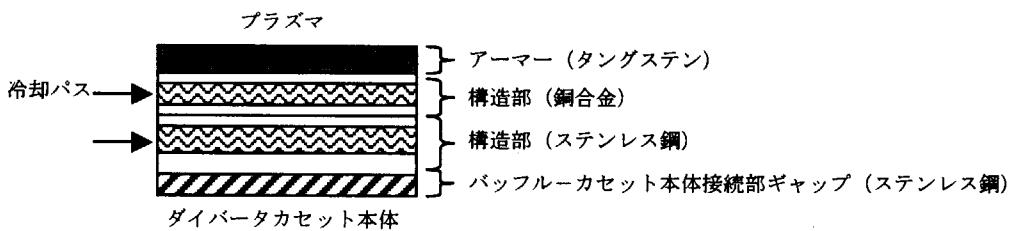


図4-2, ダイバータバックフル板のモデル (全体厚さ=0.16m)

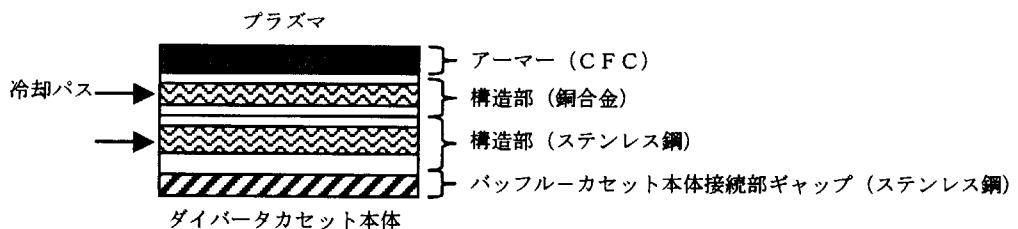


図4-3, ダイバータターゲット板のモデル (全体厚さ=0.23m)



図4-4, ダイバータドーム部のモデル (全体厚さ=0.09m)

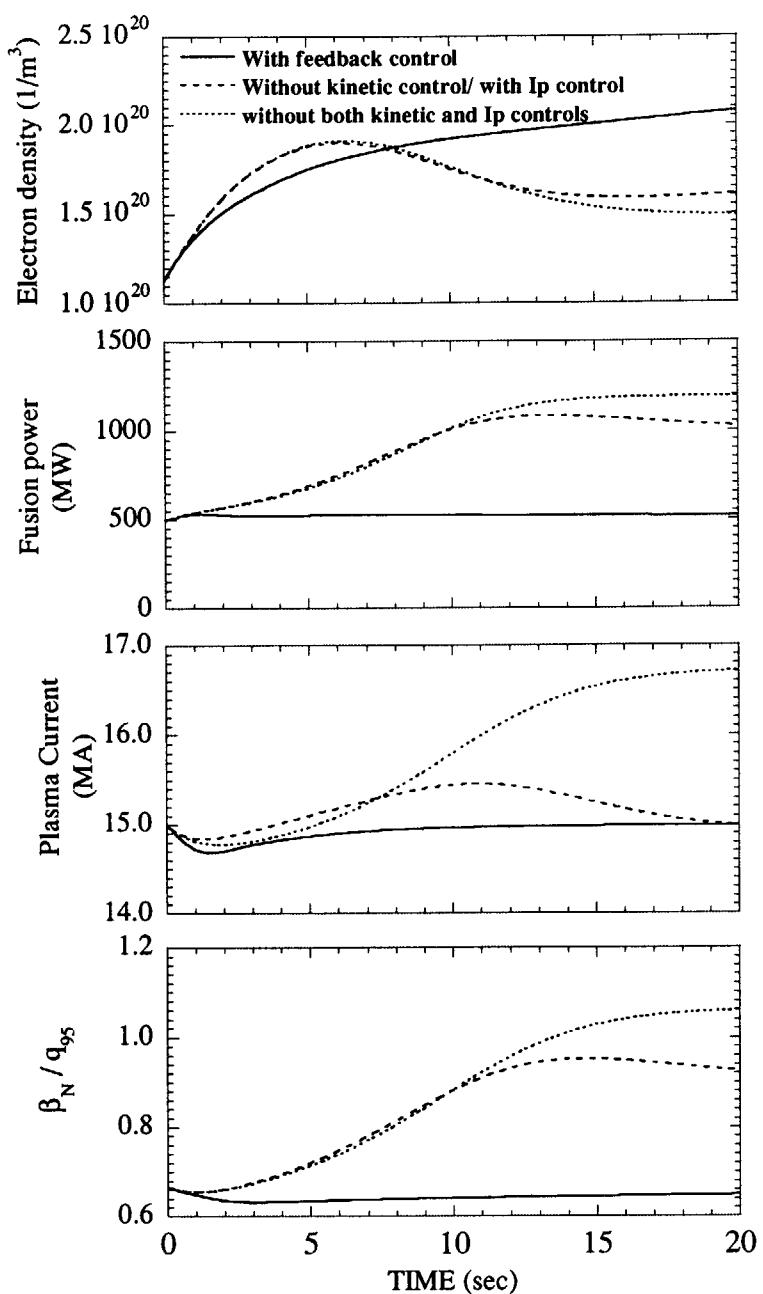


図 5－1，フィードバック制御の有無による、燃料過注入時のプラズマパラメータ時間発展の変化（1）。ITER-FEAT の設計シナリオ 1（プラズマ電流 15MA、出力 500MW）に於いて、定常時の 2 倍の燃料が時刻 0 以降余分に注入されたとした。実線は制御がある場合、長破線はプラズマ電流制御はあるが燃焼制御が無い場合、細破線は制御が全くない場合を示す。

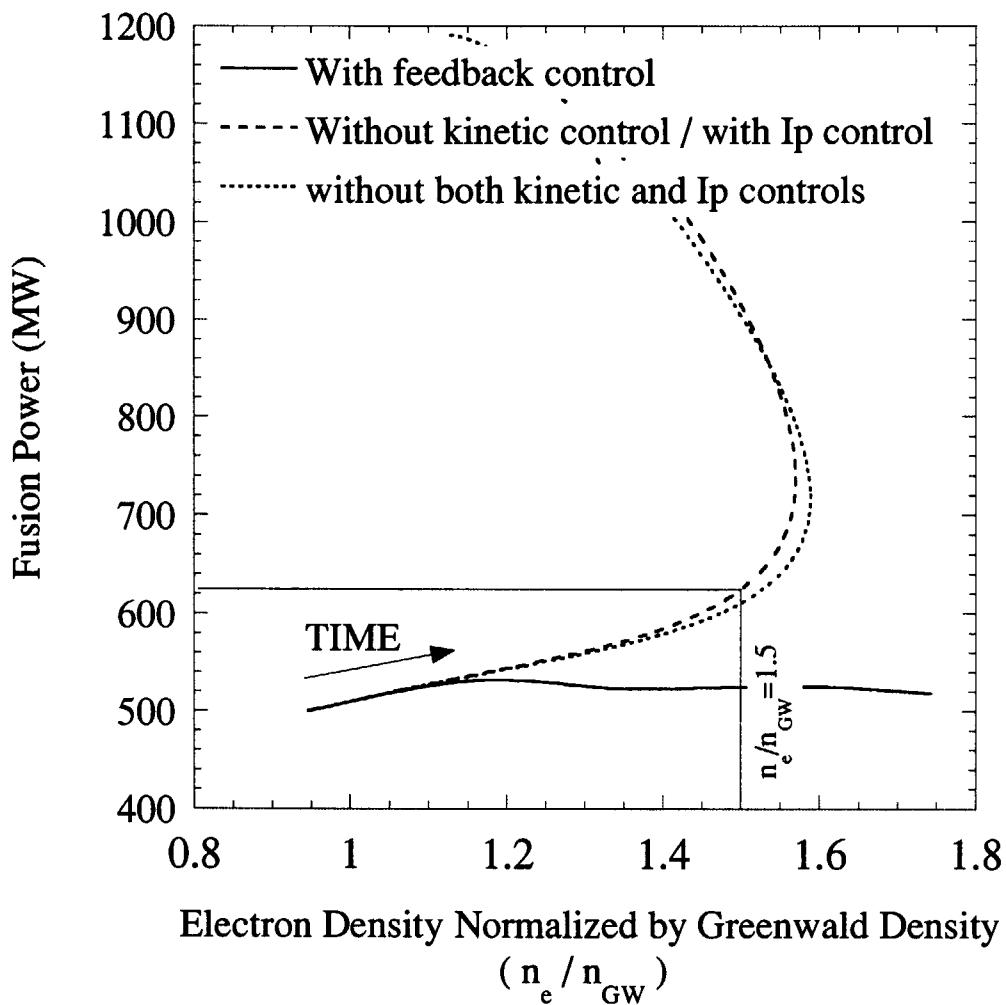


図5-2、フィードバック制御の有無による、燃料過注入時のプラズマパラメータ時間発展の変化(2)。図は、 $(n_e/n_{GW})$ -核融合出力平面での軌跡を示す。保守的な密度限界条件を  $n_e/n_{GW}=1.5$  とした場合、核融合出力が約 650MW まで増加したところで、密度限界に達することが図より読みとれる。

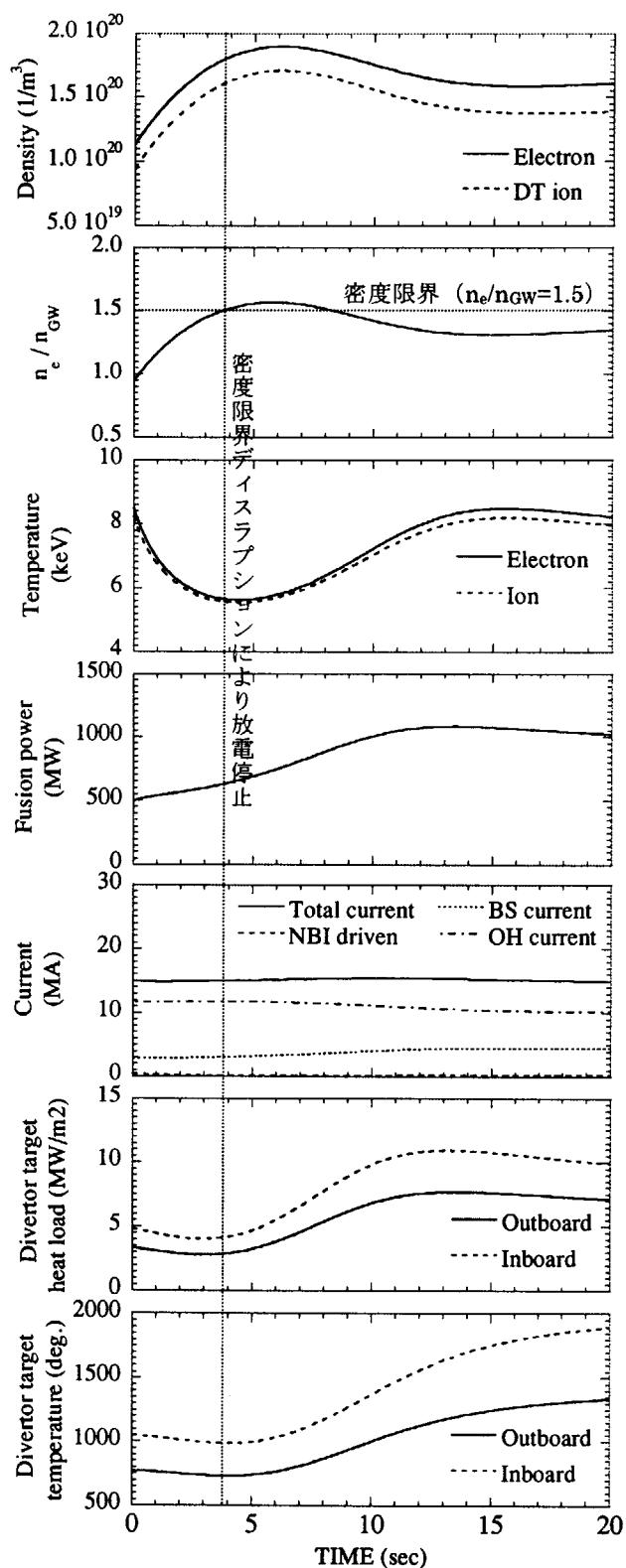
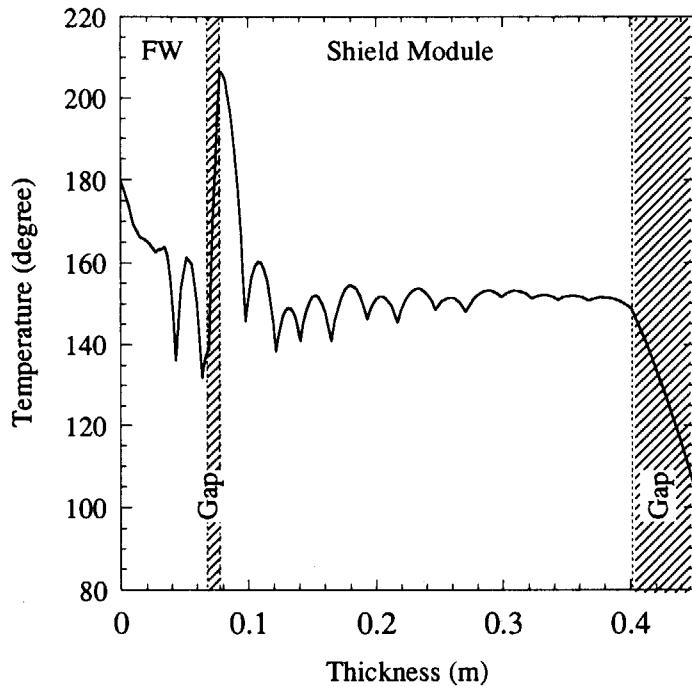


図 5-3, ITER-FEAT の設計シナリオ 1 に於いて、定常時の 2 倍の燃料が時刻 0 秒以降余分に注入され、プラズマ燃焼制御を行わない場合のパラメータ時間発展。燃料過注入発生後 4 秒程度で保守的な密度限界の条件、 $n_e/n_{GW}=1.5$ 、に達する。出力は 650MW まで上昇し、密度限界ディスラプションで放電は終了する。

a) Temperature distribution of the outboard blanket  
(PFC#13) at T=10sec



b) Temperature distribution of the inboard divertor target  
(PFC#24) at T=10sec

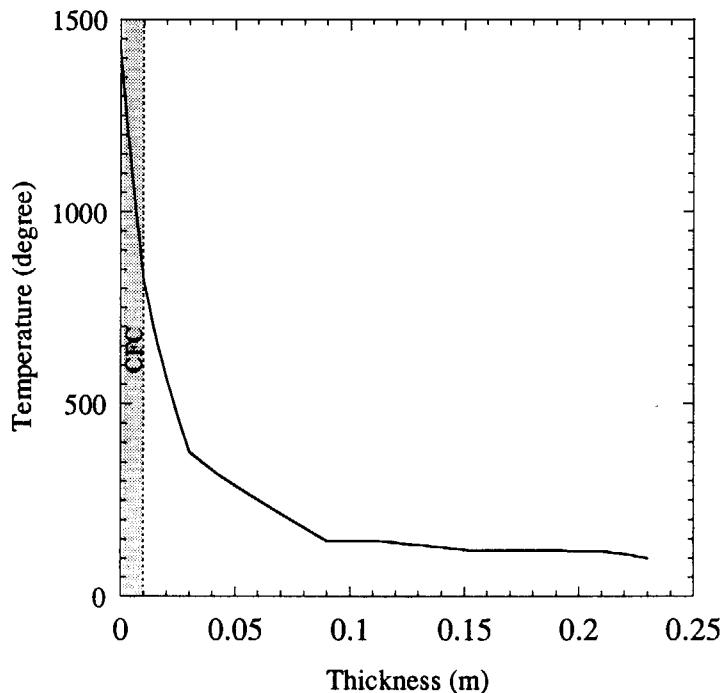


図5-4, 図5-3の解析で時刻10秒における、a) アウトボードブランケットモジュール及びb) インボードダイバーターゲット板の厚さ方向の温度分布

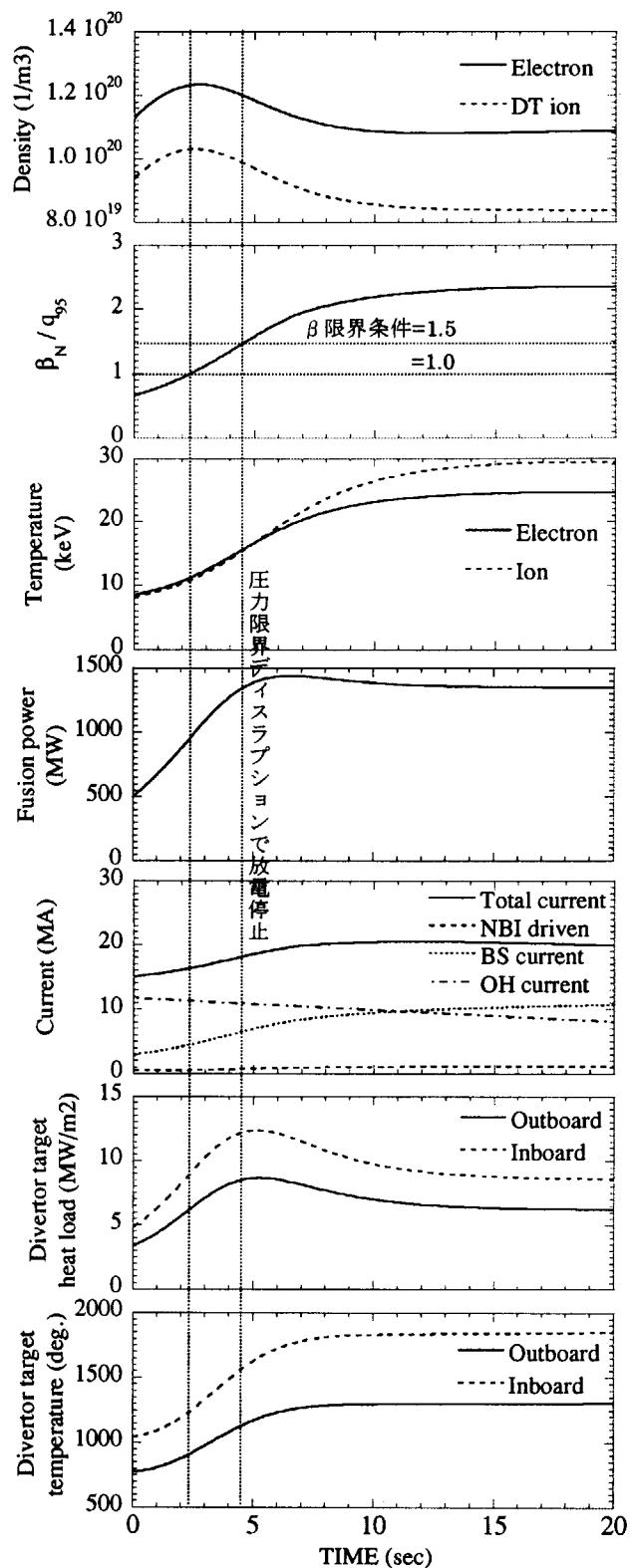


図6, ITER-FEATの設計シナリオ1に於いて、閉じこめ改善因子( $H_H$ )が時刻0秒以降1.0増加し、プラズマ燃焼制御を行わない場合のパラメータ時間発展。 $H_H$ 因子増加後約2秒で通常の圧力限界( $\beta_N/q_{95}=1.0$ )に達する。さらに、4.5秒で保守的な圧力限界条件( $\beta_N/q_{95}=1.5$ )に達し、出力が1.35GWまで上昇し、ディスラプションで放電は終了する。

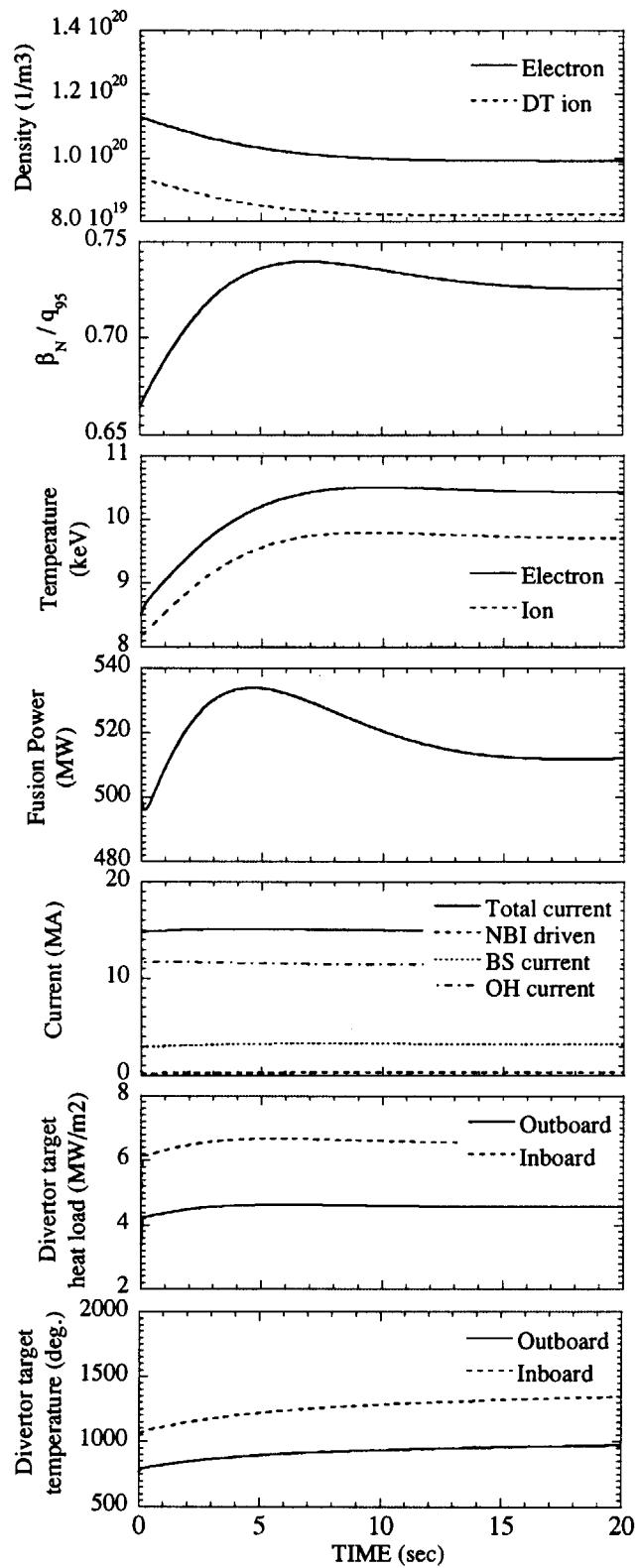


図 7, ITER-FEAT の設計シナリオ 1 に於いて、外部加熱が時刻 0 秒以降 73MW に増加し、プラズマ燃焼制御を行わない場合のパラメータ時間発展。

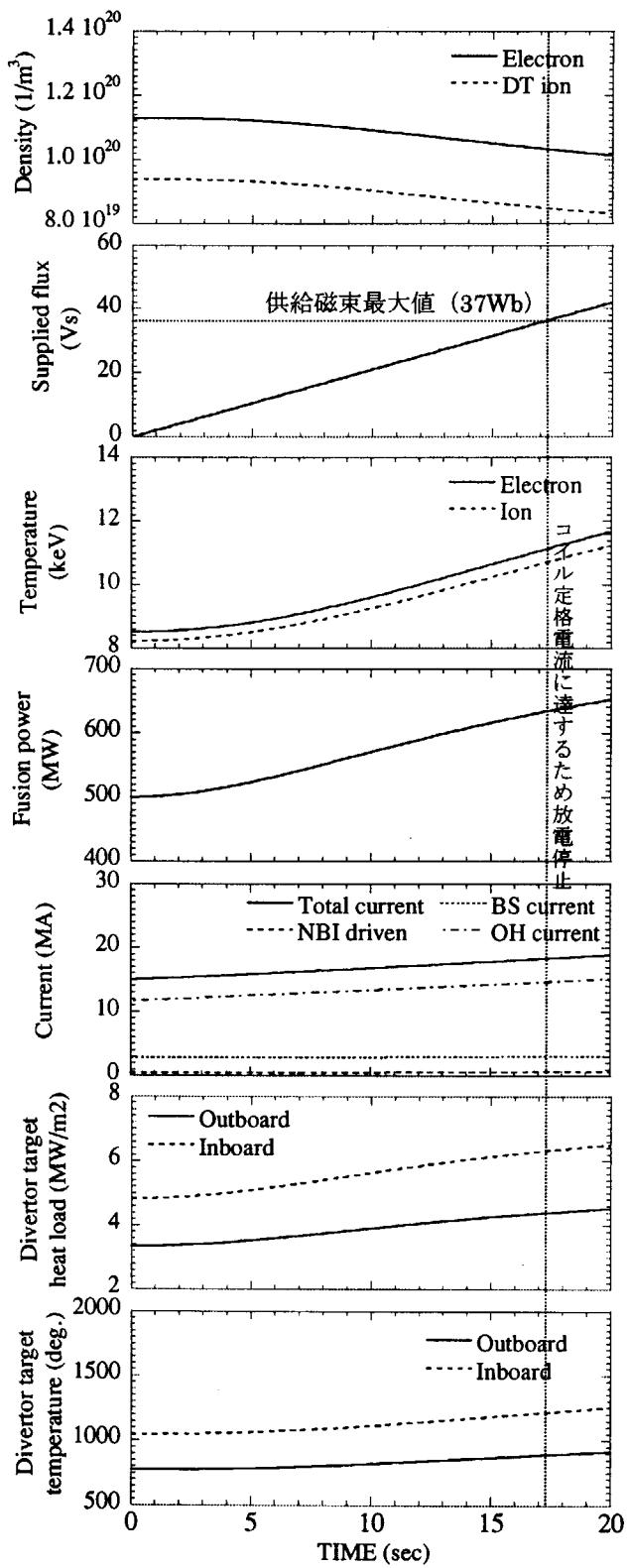


図8, ITER-FEAT の設計シナリオ1に於いて、時刻0秒以降磁束供給が増加し（プラズマ一周電圧2.1V）、プラズマ燃焼制御を行わない場合のパラメータ時間発展。時刻約17秒で、コイル・電源系が供給できる最大磁束37Wbに達するため、放電が停止動作にはいるか、又はインターロックが作動し燃焼を停止する。このとき、出力は最大630MWまで上昇する。

## 付録 1. 物理係数

以下にプラズマの保存則を書き下すのに使用した物理量をまとめる。出典については、文献[10]～[12]を参照されたい。

### 1. 核融合反応の分布依存性

$$f_p = (-0.395 + 1.128 \cdot A_p + 3.777 \cdot A_T - 1.022 \cdot A_p \cdot A_T) \cdot [T_e(\text{keV})]^{\lambda}$$

$$\lambda = 0.009 - 0.023 \cdot A_p - 0.385 \cdot A_T + 0.15 \cdot A_p \cdot A_T$$

### 2. DT核融合反応率 (m³/s)

$$\langle \sigma \cdot v \rangle_{DT} = 0.97397 \cdot 10^{-22} \cdot \exp(f_{DT})$$

$$f_{DT} = 0.038245t^3 - 1.0074t^2 + 6.3997t - 9.75, \quad t = \ln(T_i(\text{keV}))$$

### 3. $\alpha$ 粒子加熱密度 (keV/m³/s)

$$P_{\alpha,I} = f_{\alpha,I} \cdot P_\alpha \cdot (1.0 - RPL)$$

$$P_{\alpha,e} = (1.0 - f_{\alpha,I}) \cdot P_\alpha \cdot (1.0 - RPL)$$

$$P_\alpha = \frac{1}{4} f_p \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{DT} \cdot n_{DT}^2 \cdot \left( E_\alpha - \frac{3}{2} T_i \right)$$

$$f_{\alpha,I} = 1.0 - [1.0 - (T_e(\text{kev})/50) - 0.37 \cdot (T_e(\text{kev})/50)^{1.75}]$$

但し、RPL はリップル損失率であり、入力パラメータである。また、 $E_\alpha$  は  $\alpha$  粒子エネルギー (3.52MeV) である。

### 4. 外部加熱密度 (keV/m³/s)

$$P_{AUX,I} = FINJ \cdot FNB \cdot P_{AUX} + (1.0 - FRFE) \cdot (1.0 - FNB) \cdot P_{AUX}$$

$$P_{AUX,e} = (1.0 - FINJ) \cdot FNB \cdot P_{AUX} + FRFE \cdot (1.0 - FNB) \cdot P_{AUX}$$

$$FINJ = 1.0242 - 0.33742x + 0.071039x^2 - 9.378 \cdot 10^{-3}x^3$$

$$+ 7.0196 \cdot 10^{-4}x^4 - 2.2061 \cdot 10^{-5}x^5$$

$$x = \frac{E_b(\text{keV})}{E_c}$$

$$E_c = 14.8 \cdot T_e \cdot A_b \cdot \left( \frac{1}{n_e} \sum_i \frac{Z_i^2 n_i}{A_i} \right)^{2/3}$$

但し、FNB は NBI 加熱の割合で入力パラメータ、FRFE は RF 加熱のイオン加熱率で入力パラメータである。外部加熱  $P_{AUX}$  はベースの加熱とフィードバック分の和で与えられるが、初期状態に於いては、核融合利得  $Q$  と核融合出力  $P_{Fusion}$  から、 $P_{AUX} = P_{Fusion}/Q$  で与える。

5, イオン-電子相互作用項 (keV/m<sup>3</sup>/s)

$$P_{ie} = 3.0 \cdot 10^{-18} \cdot n_e \cdot \sum_j \frac{Z_j^2 \cdot n_j}{A_j} \frac{T_i - T_e}{T_e^{1.5}}$$

## 6, 自発電流 (MA)

$$\begin{aligned} I_{BS} &= I_p \cdot C_{BS} \cdot (\epsilon^{0.5} \cdot \beta_p^*)^{1.3} \\ C_{BS} &= 1.32 - 0.235 \cdot (q_\psi/q_0) + 0.0185 \cdot (q_\psi/q_0)^2 \\ \beta_p^* &= \beta_T \times (B_T/B_a)^2, \quad B_a = \mu_0 I_p / (2\pi a_p K^{0.5}) \end{aligned}$$

## 7, NBI 駆動電流 (MA)

$$\begin{aligned} I_{NBI} &= \eta_{NBI} \cdot P_{NBI} \\ \eta_{NBI} &= 2.675 \cdot C_p \cdot (R_{TANG}/R_p) \cdot (1.0 - f_s) \cdot \frac{T_e(10keV)}{n_e(10^{20}m^{-3}) \cdot R_p} \cdot J_b(x, y) \cdot F(Z) \\ C_p &= (1.0 - 0.2 \cdot E_b + 0.09E_b^2)(1.0 - 0.35 \cdot A_p + 0.14 \cdot A_p^2)(1.0 - 0.21 \cdot A_T) \\ R_{TANG} &= R_p - a_p/SNBI \\ f_s &= \exp(-2.0 \cdot \sigma_{eff} \cdot D_L(m) \cdot n_e(m^{-3})) \\ D_L &= \sqrt{(R_p + a_p)^2 - R_{TANG}^2}, \quad \sigma_{eff} = 0.82 \cdot 10^{-20} / (E_b(MeV))^{0.78} \\ J_b(x, y) &= \frac{x^2}{4.0 + 3y + x^2 \cdot (x + 1.39 + 0.61 \cdot y^{0.7})} \\ x &= \sqrt{E_b/E_c}, \quad y = 0.8 \cdot Z_{eff}/A_b \\ F(Z) &= 1.0 - \left( \frac{Z_b}{Z_{eff}} \right) \cdot (1.0 - G), \quad G = (1.55 + 0.85/Z_{eff}) \cdot \bar{\epsilon}^{0.5} - (0.2 + 1.55/Z_{eff}) \cdot \bar{\epsilon} \end{aligned}$$

但し、 $E_b$  は中性粒子ビームエネルギー (MeV) である。SNBI は入射半径を求めるための入力パラメータ、 $\bar{\epsilon} = \epsilon/2$  である。

## 8, RF 駆動電流 (MA)

$$\begin{aligned} I_{RF} &= \eta_{RF} \cdot P_{RF} \\ \eta_{RF} &= \gamma_{RF} \cdot \frac{1}{n_e(10^{20}m^{-3}) \cdot R_p} \end{aligned}$$

但し、RF 電流駆動効率指標 (Figure of merit)  $\gamma_{RF}$  は入力パラメータである。

9, 誘導電流加熱 (OH 加熱、keV/m<sup>3</sup>/s), プラズマ抵抗

$$P_{OH} = 1.021 \cdot 10^{19} \cdot \left( \frac{I_{OH}(MA)}{S_p} \right)^2 \cdot Z_{eff} \cdot \log \Lambda \cdot (T_e(keV))^{-1.5} \cdot f_{OH} \cdot G_{NC}$$

$$f_{OH} = [(1.0 + A_p)/(1.0 + A_p + A_T)]^{3/2} \cdot (1.0 + 3.0 \cdot A_T / 2.0)$$

$$G_{NC} = \begin{cases} 4.3 - 0.6 \cdot A & (2.5 < A < 4) \\ 1.0 - 2.4/A + 24.0/A^2 & (4 < A) \end{cases}$$

$$\log \Lambda = 16.09 - 1.15 \cdot \log_{10}(n_e(10^{20} m^{-3})) + 2.3 \cdot \log_{10}(T_e)$$

但し、 $S_p$  はプラズマポロイダル断面積である。初期状態を求める場合、 $I_{OH}$  を  $I_{OH} = I_p - I_{BS} - I_{NBI} - I_{RF}$  で与え、時間発展では回路方程式（16）を解いて求める。また、回路方程式に用いるプラズマ一周抵抗は  $P_{OH}$  から次式で求める。

$$\eta_P(\Omega) = (1.602 \cdot 10^{-16} \cdot P_{OH} \cdot V_p) / (I_{OH}(A))^2$$

10, 制動輻射密度 (keV/m<sup>3</sup>/s)

$$P_{brm} = AR \cdot n_e^2 \cdot Z_{eff} \cdot (T_e(keV))^{0.5}$$

$$AR = 3.34 \cdot 10^{-21} \cdot (1.0 + A_p)^{3/2} \cdot (1.0 + A_p + A_T)^{1/2} / (1.0 + 2 \cdot A_p + A_T / 2)$$

11, シンクロトロン輻射密度 (keV/m<sup>3</sup>/s)

$$P_{sy} = CSY \cdot \left( \frac{n_e}{a_p} \right)^{1/2} \cdot (T_e)^{5/2} \cdot (B_T)^{5/2} \cdot (1 + \chi_{sy})^{1/2} \cdot (1 - \gamma_w)^{1/2}$$

$$CSY = 2.56993 \cdot 10^5, \quad \chi_{sy} = 5.7 / (A \sqrt{T_e(10keV)})$$

但し、 $\gamma_w$  はプラズマ対向壁の反射係数で入力パラメータである。

## 12, 線輻射 (MW)

次式で主プラズマの線輻射を評価する。

$$P_{li} = P_{LI-core} = P_{Edge} \cdot F_{Core/Edge}$$

但し、 $F_{Core/Edge}$  は主プラズマでの線輻射と周辺での輻射の比率で入力パラメータである。 $P_{Edge}$  はプラズマ周辺部での輻射で、初期値は入力パラメータである。また、時間発展での周辺部輻射は、初期状態での周辺部輻射と  $P_{Edge}$  についての次式の比例関係を用いて評価する。

$$P_{Edge} \propto \sum_k^{Z_k > 2} Z_k^{2.54} (1.0 - 1.0977 \cdot Z_k^{-0.363}) \frac{n_k}{n_e} \cdot n_e^{1.5}$$

## 1 3, プラズマ自己インダクタンス (H)

$$L_p = C_{SI} \cdot \mu_0 \cdot R_p \cdot \left[ \ln\left(\frac{8 \cdot R_p}{a_p}\right) + \frac{\lambda_i}{2} - 2.0 \right]$$

平衡計算の結果と合わせるための係数  $C_{SI}$ 、および内部インダクタンス  $\lambda_i$  は入力パラメータである。

## 1 4, NBI ビーム熱化時間

$$\tau_{SD} = \frac{2}{3} \tau_{eb}^E \cdot \ln\left(1 + \left(\frac{E_b}{E_c}\right)^{1.5}\right), \quad \tau_{eb}^E = 9.989 \cdot 10^{18} \frac{A_b(T_e \text{ (keV)})^{1.5}}{Z_b^2 \cdot n_e \cdot \log \Lambda}$$

## 付録 2. 初期状態の解法

粒子保存式 (1) は燃料供給項  $S_{DT}$  を求めるのに使用される。式 (2)、(3) を用いてヘリウム粒子密度、不純物密度を式 (13)、(14) より消去する。式 (13)、(14) を DT イオン密度の二乗で割り、これらを整理すると次の式を得る。

$$0 = A1 + FINJ \cdot PINJD + PINRI \\ -AIE \cdot [(1 + ZZ \cdot CZC) + 2 \cdot AA \cdot X] \cdot \left[ \left( \frac{5}{12} + ZZA \cdot CZC \right) + AA \cdot X \right] \cdot (T_i - Y) \cdot T_e^{-1.5} \quad (13') \\ -\frac{3}{2} \cdot \left( \frac{T_i}{CI} \right) \cdot \left[ AA + \frac{1}{X} \cdot (1 + CZC) \right]$$

$$0 = A2 + (1 - FINJ) \cdot PINJD + PINRE \\ + AIE \cdot [(1 + ZZ \cdot CZC) + 2 \cdot AA \cdot X] \cdot \left[ \left( \frac{5}{12} + ZZA \cdot CZC \right) + AA \cdot X \right] \cdot (T_i - Y) \cdot T_e^{-1.5} \\ + POH \cdot CL \cdot Y^{-1.5} - PSY \cdot Y^{5/2} - PLI \quad (14') \\ - AR \cdot [(1 + ZZ \cdot CZC) + 2 \cdot AA \cdot X] \cdot [(1 + Z2FK \cdot CZC) + 4 \cdot AA \cdot X] \cdot Y^{0.5} \\ - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{X} \cdot [(1 + ZZ \cdot CZC) + 2 \cdot AA \cdot X] \cdot Y$$

変数  $X$  を独立変数として扱い、 $Y$  は  $X$  の関数 ( $Y(X)$ ) である。これらの変数はそれぞれ、電子温度、イオン密度に次の関係を持つ。

$$X = \tau_{E,e} \cdot n_{DT}, \quad Y = T_e$$

以上の式中に現れる係数は陰に  $X$ 、 $Y$  に依存する。以下に変数の定義及び温度・密度依存性を列挙する。

$$A1(T_e, T_i) = \frac{1}{4} \cdot f_{\alpha,I}(T_e) \cdot SV0 \cdot (E_\alpha - 1.5 \cdot T_i) \cdot (1 - RPL), \quad SV0(T_i) \equiv f_p \langle \sigma v \rangle_{DT}$$

$$A2(T_e, T_i) = \frac{1}{4} \cdot (1 - f_{\alpha,I}(T_e)) \cdot SV0 \cdot (E_\alpha - 1.5 \cdot T_i) \cdot (1 - RPL)$$

$$AIE = 3.0 \cdot 10^{-18}$$

$$AA(T_i) = \frac{1}{4} \cdot SV0 \cdot CA$$

$$FINJ = FINJ(T_e, n_{DT}, n_\alpha, n_{imp})$$

$$PINJD(T_i) = 0.25 \cdot SV0 \cdot E_f \cdot FNB/Q$$

$$PINRI(T_i) = 0.25 \cdot SV0 \cdot E_f \cdot (1 - FRFE) \cdot (1 - FNB)/Q$$

$$PINRE(T_i) = 0.25 \cdot SV0 \cdot E_f \cdot FRFE \cdot (1 - FNB)/Q$$

$$CZC \equiv \frac{CP}{CPF} \cdot \left( f_{Z1} \cdot f_{Z2} + \frac{\tau_{p,DT}}{n_{DT}} S_{imp,CTL}^{(0)} \right)$$

$$POH(n_{DT}, T_e, T_l) = P_{OH} / (\log \Lambda \cdot n_{DT}^2 \cdot T_e^{-1.5})$$

$$CL(T_e, n_e) = \log \Lambda$$

$$PSY(T_e, n_i) = P_{sy} / (n_{DT}^2 \cdot T_e^{5/2})$$

$$PLI = P_{li} / (n_{DT}^2)$$

$$ZZ = \sum_k^{Z_k > 2} Z_k \cdot F_k / \sum_m^{Z_m > 2} F_m$$

$$Z2FK = \sum_k^{Z_k > 2} Z_k^2 \cdot F_k / \sum_m^{Z_m > 2} F_m$$

$$ZZA = \sum_k^{Z_k > 2} (Z_k^2 / A_k) \cdot F_k / \sum_m^{Z_m > 2} F_m$$

$$AZ = \sum_k^{Z_k > 2} A_k \cdot F_k / \sum_m^{Z_m > 2} F_m$$

$$ZEFF(n_{DT}, n_\alpha) = (n_{DT} + 4n_\alpha + Z2FK \cdot n_{imp}) / (n_{DT} + 2n_\alpha + ZZ \cdot n_{imp})$$

以上の式では、プラズマ対向機器表面材料の昇華の影響を無視した。

イオン温度  $T_I$  が与えられたとして、式 (13')、(14') を連立して  $X$ 、 $Y$ について解くことで、電子温度や DT 密度が得られるが、上に列挙したように、係数が  $(T_e, n_{DT})$  依存するため、収束計算が必要になる。また、初期条件として、電子エネルギー閉じ込め時間のスケーリング則に対する改善係数  $C_H$ 、不純物の電子密度に対する比  $\{n_k/n_e\}$  を与えるため、これらに対する以下の収束計算が必要となる。

①ループ変数 :  $T_I$ 、収束条件 :  $C_H$  が与えられた値になること。

②ループ変数 :  $CP$ 、収束条件 :  $\{n_{Be}/n_e\}$  が与えられた値になること。

③ループ変数 :  $S_{imp,CTL}^{(0)}$ 、収束条件 :  $\{n_{Ar}/n_e\}$  が与えられた値になること。

ループ③の変数  $S_{imp,CTL}^{(0)}$  は、式 (12) の不純物供給量の初期値である。

これらの収束計算を経て、初期状態が求まる。収束ループ②で得られた CP を使って以降時間発展計算を行うため、計算においては CP の収束値が妥当である確認する必要がある。また、不純物量は、Be、Ar についてはループ②、③に於いて入力値と同じになるよう収束計算をするが、他の不純物密度はプラズマ対向壁からのスペッタリングの条件からコード内で求めており、入力値と異なる値が初期値として使われる。但し、プラズマ対向機器のモデルを使わない計算オプションが選択された場合は (ICAL1=0)、不純物の電子密度比が入力値と同じになる初期状態を使用する。

**This is a blank page.**

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	$J/s$
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$V/A$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$A/V$
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリー	H	$Wb/A$
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$
放射能	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
吸収線量	グレイ	Gy	$J/kg$
線量等量	シーベルト	Sv	$J/kg$

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	$\mu$
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

1. 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換 算 表

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
力	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
力	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
力	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

エネルギー・仕事・熱量	J( $=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{-8}$
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{-9}$
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{-25}$
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{-19}$
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{-8}$
	$1.60218 \times 10^{19}$	$1.63377 \times 10^{20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1

$$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J} (\text{計量法})$$

$$= 4.184 \text{ J} (\text{熱化学})$$

$$= 4.1855 \text{ J} (15^\circ \text{C})$$

$$= 4.1868 \text{ J} (\text{国際蒸気表})$$

$$\text{仕事 } 1 \text{ PS} (\text{仮馬力})$$

$$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$$

$$= 735.499 \text{ W}$$

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$		1	100
	$3.7 \times 10^{10}$	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

R100  
古紙配合率100%再生紙を使用しています