

JAERI-Data/Code

2003-013



JP0350403



ペレット入射による燃料供給シミュレーションコードPEPSI

2003年8月

高瀬 治彦*・飛田 健次・西尾 敏

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。

入手の間合わせは、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、お申し越してください。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）で複写による実費頒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, Ibarakiken 319-1195, Japan.

ペレット入射による燃料供給シミュレーションコード PEPSI

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

高瀬 治彦*・飛田 健次・西尾 敏

(2003年7月1日受理)

核融合炉において燃料供給は重要な課題の1つであり、有力な燃料供給法としては、水素固体ペレットを高速に加速し炉心プラズマに入射する方法がある。核融合炉の設計上、ペレットの大きさ、個数、入射速度、入射サイクルを決定する必要がある。そこで炉心プラズマ中のペレット及びペレットから生成されたプラズマ雲の運動の計算と、1次元のプラズマ輸送方程式とを組み合わせた燃料供給シミュレーションコード PEPSI (PEllet injection and Plasma behavior SIMulation code) を開発し、これらの設計値を定量的に検討できるようにした。

PEPSI の特徴は、高温のバックグラウンドプラズマ中におけるペレット及びプラズマ雲の運動について2つの有力なモデル (Parks モデル、Strauss モデル) を採用していることと、輸送解析と組み合わせて核融合出力の時間変化を解析できる点にある。

本報告では、解析モデル、数値計算法、計算のフローチャート、サブルーチン、変数の一覧及び計算例を示して PEPSI の使用方法を説明する。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

* (株) 東芝

Pellet Injection and Plasma Behavior Simulation Code PEPSI

Haruhiko TAKASE^{*}, Kenji TOBITA and Satoshi NISHIO

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

(Received July 1, 2003)

Fueling is one of the major issues on design of nuclear fusion reactor and the injection of solid hydrogen pellet to the core plasma is a useful method. On the design of a nuclear fusion reactor, it is necessary to determine requirements on the pellet size, the number of pellets, the injection speed and the injection cycle. PELlet injection and Plasma behavior Simulation code PEPSI has been developed to assess these parameters.

PEPSI has two special features:

- 1) Adopting two numerical pellet models, Parks model and Strauss model,
- 2) Calculating fusion power and other plasma parameters in combination with a time-dependent one-dimensional transport model.

This report describes the numerical models, numerical scheme, sequence of calculation, list of subroutines, list of variables and an example of calculation.

Keywords: PEPSI Code, Tokamak, Pellet Injection, Fueling, Transport, Parks Model,
Strauss Model

^{*}Toshiba Corporation

目 次

1. 概要	1
2. 解析モデル	3
2.1 入射ペレットモデル	3
2.1.1 Parks によるペレット入射モデル	3
2.1.2 Strauss によるペレット入射モデル	8
2.2 輸送解析モデル	9
2.2.1 密度方程式	9
2.2.2 電子・イオンのエネルギー方程式	12
3. 数値計算法	17
4. フローチャート	18
5. サブルーチン一覧	22
6. 変数一覧	24
7. 使用説明	35
8. まとめ	45
謝辞	45
参考文献	46

Contents

1. Introduction	1
2. Numerical Model	3
2.1 Pellet Model	3
2.1.1 Parks Model	3
2.1.2 Strauss Model	8
2.2 Transport Model	9
2.2.1 Equation of Density	9
2.2.2 Equation of Energy for Electron and Ion	12
3. Numerical Scheme	17
4. Sequence	18
5. List of Subroutines	22
6. List of Variables	24
7. Input Example	35
8. Summary	45
Acknowledgement	45
References	46

1. 概要

磁場閉じ込め方式において定常的な核融合炉を想定した場合、核融合燃焼を維持及び制御する必要があり、このための制御技術の1つとして電流駆動法とともに燃料供給法の確立は重要な課題である。現時点の最も有力な方式としては高速に加速した固体ペレットもしくは液体ジェットによる方法が考えられているが、核融合燃焼を維持するための燃料供給に関する数値的な解析は、充分に行われているとは言えず、採用する物理モデル、数値シミュレーションコードの確立とともに燃焼制御法には検討の余地がかなり残されている。

核融合炉の設計上、燃料供給法における興味ある課題としては、まず第一に所望の核融合出力を定常的に維持できる入射ペレットの諸パラメータ（例えばペレットサイズ、入射速度、入射個数、入射サイクル）の範囲をおさえることにある。入射ペレットにおいては他にも興味深い課題があり、例えば入射ペレットによる閉じ込め改善や緊急炉心停止制御があるが、本解析コード開発に当たっては、核融合出力の維持という課題のみに絞ることにした。

核融合出力を維持できるペレット諸パラメータを決定するという目的のためには、少なくとも高温のバックグラウンドプラズマ中のペレットの運動、更にペレットから溶発したプラズマ雲の運動を解いてバックグラウンドプラズマ中への侵入深さを解析し、その結果を用いてバックグラウンドプラズマの密度・温度分布の変化を解き、核融合出力の変動を解析できることが不可欠である。そこでペレット/プラズマ雲の運動モデルと1次元の輸送モデルを組み合わせた解析コードPEPSI (PELlet injection and Plasma behavior SIMulation code) を開発した。

まずペレット/プラズマ雲の運動モデルの採用について検討する。冒頭でも述べたように固体ペレットの入射モデルは現時点で確かな物理モデルはなく、いくつかの有力なモデルが存在するだけである。そこでPEPSIでは2つの代表的なモデル (Parksモデル [1]、Straussモデル [2]) を採用し、入力パラメータでどちらか1つを選択できるようにした。両者を比較した時の最も重要な違いは、Parksモデルにおいて無限の磁力線長を仮定している点にある。それ故両方のモデルで調べることにより、磁力線長に影響を受けない設計を行うことができる。また、将来2次元へと拡張する予定であるが、現状プラズマ大半径方向1次元の運動のみを考えてモデル化している。

高温のバックグラウンドプラズマの輸送モデルに関しては、円柱近似・軸対称プラズマ小半径方向1次元1流体2温度・時間発展の流体モデルを採用し、核融合出力の変動を求められるようにした。輸送モデルに関しても、閉じ込め機構の第一原理がわからない現時点では、輸送係数に大きな不確定要素を孕んでいるが、核融合出力の制御解析を検討するためには必要不可欠である。PEPSIで採用している輸送係数は現状1種類しかないが、輸送係数の計算だけを1つのサブルーチンにまとめ、将来本格的な設計を行う場合に備えて様々な輸送係数を採用できるようにした。ペレット/プラズマ雲の運動モデルで述べた考えと同様に、いくつかの輸送係数を採用することで、それら輸送係数の適用限界をお互いにカバーするように設計することになる。

PEPSIで解析する最終的な重要課題は、燃焼制御法の確立であるが、本報告では加熱による温度フィードバック制御のみで、ペレット自身のフィードバック制御はまだ検討の段階にある。燃焼制御法は、核融合炉設計上おそらく最重要課題となり、今後この方面が発展すると推察されるが、これに関しては本報告では特に述べないこととする。

本報告では、まず2章で解析モデルについて詳述し、3章で数値計算法、4章で主な計算のフローチャートを解説する。5、6章で各サブルーチンの機能、各変数の意味について説明し、7章で入力例、計算例を示す。8章ではPEPSIの使用上のまとめと今後の発展について述べてまとめている。

なお、特別に断らない限り単位系はS I単位系で統一する。

2. 解析モデル

本章では解析コード作成のための定式化について述べるが、ペレット入射モデルとプラズマ輸送の2つに分けて定式化を行う。

2.1 入射ペレットモデル

概要でも述べたように、2種類のペレット入射モデルについて以下に記述する。

2.1.1 Parksによるペレット入射モデル

固体ペレットによる実験 [3~5] によれば、高磁場側もしくはトーラス内側から入射された固体ペレットは、低磁場側もしくはトーラス外側から入射した場合に比べてよりプラズマ中心部へと燃料を供給できることが確認されている。この高磁場/低磁場入射による固体ペレットの侵入長の違いは現時点で理論的に充分解明されている訳ではないが、メカニズムの1つの要因として gradient B ドリフト効果 (\mathbf{B} : 磁場) が考えられている。固体ペレットから溶発してできたプラズマ雲の内部では、 gradient B ドリフト効果により電荷分離が発生し、その結果電場 \mathbf{E} が形成され、その電場と強いトロイダル磁場によりプラズマ雲に $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 力がかかる。この $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 力の向きはプラズマ大半径方向であり、高磁場側入射ではプラズマ雲を加速する方向に働くが、低磁場側入射では逆に減速する方向に働く。

このような背景から有力な理論モデルとして、Parksら [1] はこの $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 力によるドリフトを考慮した固体ペレットのモデルを提案している。Parksらのモデルの概要は箇条書きにすると、以下のようなシーケンスである。

- 1) 入射された固体ペレットが背景の炉心プラズマ (バックグラウンドプラズマ) の熱によって溶発する。
- 2) 溶発した固体ペレットはプラズマ雲となり、未だ溶けていないペレット周囲に付く。
- 3) $m=1$ の不安定性により固体ペレットからプラズマ雲が離れるが、その不安定性の成長時間はおおよそ

$$\tau_{instability} \sim \frac{eBr_{\perp}^2}{0.025T_e} \quad (1)$$

と見積られ、固体ペレットが完全に溶発するまでに10～20個程度のプラズマ雲が形成される。ここで e 、 B 、 r_{\perp} 、 T_e は各々単位電荷、磁場強度、ペレット周辺にできるプラズマ雲の半径（後に示す）、バックグラウンドプラズマの電子温度（単位： eV ）である。

- 4) このプラズマ雲中に電場が生じ、トロイダル磁場によりプラズマ雲に $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 力がかかり、プラズマ雲を加速（高磁場側入射）、または減速（低磁場側入射）する。また、同時にプラズマ雲は磁力線方向に拡がっていく。
- 5) 10～20個のプラズマ雲は各々運動して速度が0になったところでバックグラウンドプラズマに吸収される。

従来の固体ペレットの溶発モデルと異なって連続的に吸収されるのではなく、3)で述べたようにプラズマ雲が不連続に生成されるため、燃料の吸収分布が不連続になる可能性がある。

Parksらのモデルによる固体ペレットの侵入長はDIII-D装置の実験結果と合うが、このモデルをITERに適用すると高磁場側入射の場合、侵入長が4m以上となり、ITERのスケールを突き抜けてしまう。彼らの意見によると、一様プラズマを仮定したところに原因があるとしている。

そこでプラズマの非一様分布は2.2の輸送解析モデルで考慮するとし、ここではParksモデルを基にペレット入射モデルを構築する。ペレット入射部分は最終的には輸送解析に組み込むことになるが、ペレット入射部分は輸送解析中で各磁気面におけるペレット入射による密度変化 $\partial n / \partial t (pellet)$ を与えることになる。溶発のみのモデルならばペレット半径 r_p の時間変化 dr_p / dt がわかれば密度変化 $\partial n / \partial t (pellet)$ が計算できる。 dr_p / dt はペレット周囲に発生するプラズマ雲の位置からバックグラウンドプラズマの電子温度、電子密度(T_e 、 n_e)等が与えられれば計算できる。バックグラウンドプラズマ中における固体ペレットの運動は抵抗がなく、完全に溶発するまで初期入射速度で運動すると仮定すると、この溶発によるペレット半径の変化は以下のように計算される。

$$\frac{dr_p}{dt} = -C_p \frac{n_e^{1/3} T_e^{5/3}}{4\pi n_{solid} r_p^{2B} W_i^B} \quad (2)$$

ここで n_{solid} 、 W は水素の固体密度、質量数であるが、質量数 W を変更することにより水素（重水素、三重水素）のみならず、それらの複合燃料も扱えるようにしている。また C_p は、参考文献 [6] に提示されている重水素に関する値と、参考文献 [7] で提示されている比例則を用いると、

$$C_p = 7.4 \times 10^{16} \left\{ \frac{\gamma - 1}{(\gamma + 1) W_i Z_i^2} \right\}^{4/3} \quad (3)$$

で与えられる。ここで Z 、 γ は各々電荷数及び比熱比 ($\gamma = 5/3$) である。

一方、Parksモデルでは溶発した固体ペレットからプラズマ雲が形成され、磁場中を荷電粒子であるプラズマ雲が通過することによってプラズマ雲が減速する効果（電磁流体発電と同様な効果）及び $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 力で運動するが、密度変化 $\partial n / \partial t$ (*pellet*) を求めるにはバックグラウンドプラズマ中のプラズマ雲の位置が計算出来ればよい。結局、(2) 式と併せてプラズマ雲の運動方程式を解けば良いことになる。ここでは Parksモデルによる運動方程式（プラズマ大半径 R 方向のみ）をどのようにして解くかについて考える。運動方程式は、以下の式で与えられる [1]。

$$\Sigma_p \frac{dv_x}{dt} = -\frac{2B^2 v_x}{\mu_0 c_A} + \frac{2}{R} \int_0^{z_c(t)} \{p_c(z,t) - p(x)\} dz \quad (4)$$

右辺第1項は磁場中を荷電粒子であるプラズマ雲が運動することによってプラズマ雲が減速する効果、第2項の積分は $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 力によるドリフト効果を表す。ここで x はプラズマ大半径方向、 B は磁場、 v_x はプラズマ雲の速度、 c_A はバックグラウンドプラズマのアルフベン速度 ($= B / \sqrt{\mu_0 m_i n_i}$)、 L_c はペレットの溶融による磁力線方向に伸びたプラズマ雲の半値幅で $L_c \sim \sqrt{r_1 R}$ 、 $p_c(z,t)$ はプラズマ雲内圧力、 $p(x)$ はバックグラウンドプラズマの圧力、 z は磁力線方向、 r_1 はペレット周辺にできるプラズマ雲の半径を表す。(4) 式の第2項を見ると、プラズマ雲内圧力はバックグラウンドプラズマの圧力より通常高いので、低磁場側入射ではプラズマ雲の運動に減速をかける形になっている。また、 Σ_p は、

$$\Sigma_p = m_i(n_c + n_i)L_c \quad (5)$$

ここで、 m_i は燃料イオンの質量、 n_c はプラズマ雲の数密度、 n_i はバックグラウンドプラズマの燃料イオンの数密度である。 n_c は n_i よりもかなり大きい（4桁ぐらい）ので n_i は省略できる。また、入射前の燃料ペレットの数密度を n_{solid} として n_c を求めると、ある地点（磁気面）における燃料ペレット半径の減少分を Δr_p として

$$n_c = n_{solid} \frac{4\pi r_p^2 \Delta r_p}{2\pi r_1^2 L_c} \quad (6)$$

となるので、(5)式はペレット周辺にできるプラズマ雲の半径 r_1 とペレット半径の比を $\kappa_c \equiv r_1/r_p$ とし、

$$\Sigma_p \approx 2m_i n_{solid} \frac{\Delta r_p}{\kappa_c^2} \quad (7)$$

となる。ここで Δr_p は燃料ペレットの溶発を計算する(2)式から与えられる。

実際に運動方程式(4)式を解くためには、右辺第2項の積分を実行しなければならない。今、磁力線方向に拡がったプラズマ雲の形状を円柱とし、この円柱の磁力線方向の長さは磁力線がトロイダル方向に一周する間の長さに比べて短いとす。即ち、磁力線の空間変化は考慮しない。プラズマ雲の半径 r_1 は変わらず、一様な圧力とすると仮定する。圧力の空間一様性の仮定はParksらの論文[1]中、図4にも出ているが、時間が少し経てば、磁力線方向の圧力分布は一様と見なせる。また、磁力線方向の長さ $z_c(t)$ は音速で拡がるとして、 $z_c(t) \sim L_c + c_s t$ とする。音速 c_s はプラズマ雲の温度 T_c の関数であるが、厳密には磁力線方向のプラズマ雲の膨張運動について解いてプラズマ雲の温度を求める必要がある。ここでは簡単化のためプラズマ雲の温度は時間の関数とし、Parksらの論文の図5から時間に関する簡単な温度のスケーリングを作ってコードに組み込むことにした。スケーリングとして、

$$\frac{T_c}{T_0} = \frac{1.5c_0}{L_c} t + 1 \quad (8)$$

とした。ここでプラズマ雲中の電子温度、イオン温度は等しいと仮定している。更に理想気体の仮定の下に、 $n_c(z,0) \times L_c \approx n_c(z,t) \times z_c(t)$ とすると、(4)式の積分は、

$$\int_0^{z_c(t)} \{p_c(z,t) - p(x)\} dz \approx (L_c + c_s t) \times \left\{ p_c(z,0) \times \frac{T_c}{T_0} \frac{L_c}{L_c + c_s t} - p \right\} \quad (9)$$

上式のうち、 $p_c(z,0) \approx n_{c0} T_{ce}$ で、プラズマ雲の初期温度 $T_{ce} \approx 2eV$ 、 $c_0 = \sqrt{2T_{ce}/m_i}$ 、また、 $p(x)$ は輸送解析より与えられ、分布効果を入れることができる。更に、

$$n_{c0} = \frac{6.03 \times 10^{15} n_e^{1/3} T_e^{1/6}}{M_0 \kappa_c^2 W^{1/3} c_{s0} r_p^{2/3} (\ln \Lambda_{en})^{2/3}} \quad (10)$$

(10)式中、温度 T_e は電子ボルトが単位である。 M_0 はプラズマ雲中心でのマッハ数であるが、おおよそ $[(3/7)^{1/2}, 1]$ の範囲を取るので、定数として与える。

$c_{s0} = \sqrt{2\gamma T_{ce}/m_i}$ は音速、 $\Lambda_{en} = 2T_e/7.5$ である。また、 κ_c は、

$$\kappa_c \equiv \frac{r_\perp}{r_p} = \frac{3.32 \times 10^5 T_e^{1/6}}{(1 - \mu_E)^{1/2} W^{1/6} (n_e r_p \ln \Lambda_{en})^{1/3}} (4\gamma T_e + \epsilon_{ion} + \epsilon_{diss})^{1/2} \quad (11)$$

ここで $\mu_E = 0.5$ 、 $\gamma = 5/3$ 、プラズマ雲の電子温度 $T_e \approx 2eV$ 、プラズマ雲の電子密度 $n_{ce} \approx n_0$ 、イオン化エネルギー $\epsilon_{ion} = 13.6eV/ion$ 、イオンの解離エネルギー $\epsilon_{diss} = 2.2eV/ion$ である。また、(11)式中、温度 T_e はeVが単位である。

これらの式及び $dR/dt = v_x$ を連立させて解けば、プラズマ雲におけるプラズマ大半径方向の位置を求めることができる。

また、Parksらの論文では $v_x = 0$ での場所が侵入長としているが、必ずしも速度0で決まらなると考えられる。例えば、圧力差が逆転しても相変わらずプラズマ雲はバックグラウンドプラズマより高い密度を有している。そこではレーリー・テラー不安定性が起こる可能性があり、プラズマ雲は潰れて吸収されると考えられる。このレーリー・テラー不安定性の成長時間が 10^{-4} s程度ならば圧力差で瞬時につぶれると考えても良い。その結果、加速機構となっている電場構造は消滅して加速さ

れなくなり、この圧力差がなくなる場所を侵入長と定義するべきと考えられる。因みにレーリー・テラー不安定性の成長時間は $\sim \sqrt{k g}$ で、 k は不安定性の特性長の逆数、 g は加速度である。 $k \sim 1/r_1$ 、 $g \sim \nabla p/\rho \sim k p/\rho \sim k c_s^2$ とすると、成長時間は最終的に $r_1/c_s \sim 10^{-5-6}$ sである。これから圧力差が少なくなった場合、レーリー・テラー不安定性を起こしてプラズマ雲が壊れる可能性が高い。そこで本解析のParksモデルを採用した場合は、圧力平衡によりプラズマ雲の吸収分布が決まると仮定する。

2.1.2 Straussによるペレット入射モデル

確かなペレット入射モデルが存在しないという現時点では、将来の核融合炉を設計する場合、色々なモデルを試し、その可能性と限界を検討しておくことが必要である。即ち、Parksのモデルのみの検討では不十分であり、他の物理的メカニズムを試す必要がある。

一方、Parksらの提案したモデル以外でペレット入射モデルとして有力なもの1つは、Straussらのペレット入射モデル [2] がある。Straussらは簡略型MHD方程式をペレットから発生したプラズマ雲に適用し、簡易的なペレットの侵入長の式を得ている。この簡易的な侵入長を用いて実験との比較やITERに適用した場合の試算が示されている [8] が、核融合燃焼時の制御等、詳細な検討はされていない。

そこで2.1.1のParksモデルで検討した時と同様に、Straussモデルを基にペレット入射モデルを構築する。ペレットの溶発に関するモデルはParksモデルと同一であり、式(2)、(3)を使用する。

次に溶発後のプラズマ雲の侵入長を考える。まず、簡略型MHD方程式は、

$$\frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} \cdot \nabla \nabla^2 \psi = -\frac{2}{R} \frac{\partial p}{\partial Z} \quad (12)$$

ここで μ_0 、 ψ 、 p 、 R 、 Z は各々真空透磁率、磁束値、プラズマ圧力、プラズマ大半径位置、垂直位置である。これにより、ペレット入射によって発生したプラズマ雲による磁束変化 $\delta\psi$ を導き出し、プラズマ雲の侵入長 δx は次式ようになる。但し、ここでの磁束値の定義は、 $\psi \equiv \frac{1}{2\pi R_p} \int \mathbf{B}_p \cdot d\mathbf{S}_p$ であり、ポロイダル磁束をトロイダ

ル長で割ったものである。

$$\delta x \sim \frac{a \delta \psi}{\Delta \psi} = \frac{q \beta B}{\Delta \psi} \frac{r_{\perp}^2}{\left(1 + \frac{q L_c}{a}\right)} \frac{\delta n}{(n + \langle \delta n \rangle)} \cos \theta \quad (13)$$

ここで a はプラズマ小半径、 $\Delta \psi$ はプラズマ表面の磁束値とプラズマ中心の磁束値との差で予め平衡解析を実施して求めておく。また q は安全係数、 β はトロイダルベータ値、 θ は磁気面の外側への法線ベクトルとプラズマ大半径ベクトルとの角度（外側入射ならば $\theta = 0$ ）である。

また δn 、 $\langle \delta n \rangle$ は、 δN をプラズマ雲の粒子数とすると各々、

$$\delta n = \frac{\delta N}{\pi r_{\perp}^2 L_c}, \quad \langle \delta n \rangle = \frac{\delta N}{4\pi^2 r r_{\perp} R_p} \quad (14)$$

となる。また、 n はプラズマ密度である（本報告では燃料イオン密度としている）。

以上から、(2) 式及び (13) 式を連立させて解けば、プラズマ雲におけるプラズマ大半径方向の位置を求めることができる。また、(13) 式中に現れる r_{\perp} 及び L_c は 2.1.1 における Parks のモデルと同様にして求め、(13) 式に代入する。

2.2 輸送解析モデル

ここでは輸送解析モデルとして円柱近似で軸対称プラズマ小半径方向 1 次元・1 流体 2 温度の流体モデルを考え、その定式化を以下に詳述する。

2.2.1 密度方程式

プラズマ中における電子・イオンに関する密度方程式は、簡単化のため燃料イオン密度 n_i のみを考え、電子、不純物イオンは後に 2.2.2 の電子・イオンのエネルギー方程式のところで与える。燃料イオン密度の定式化は Shafranov シフトを省略し、プラズマ小半径方向のみに依存する 1 次元円柱近似を行うと、

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r D_{eif} \left(\frac{\partial n_i}{\partial r} + C_v \frac{2r}{a^2} n_i \right) \right\} + \dot{S}_p + \dot{S}_g + \dot{S}_{recycle} - \dot{S}_{react} \quad (15)$$

となる。右辺 {} 内は拡散及びInward pinchによる項、2～4項目は、各々ペレット、ガス注入による燃料供給、リサイクリングによる供給及び重水素-三重水素反応による燃料減少を表している。 r 、 D_{eif} 、 C_v は、各々、プラズマ小半径位置、粒子拡散係数、Inward pinch係数である。ガス注入による燃料供給及びリサイクリングによる供給については、ITERやSSTRのような高温プラズマを想定すると、プラズマへの中性粒子の侵入長が短いので、プラズマ端部のイオン密度を与えることで省略できる。端部のイオン密度は、例えばコアプラズマ平均密度の1/3程度を境界条件として与える。また、(15)式ではInward pinchによる速度は $v_{inward} = D_{eif} C_v 2r/a^2$ とし、 C_v は実験と合うように決めることになるが、密度分布がピーキングする場合は1程度、比較的平坦な場合は0.1程度となる。 C_v が小さい場合はInward pinchによる効果は無視できる。

\dot{S}_p はペレットによる燃料密度吸収分布であるが、ペレットの溶発を(2)式で計算した後、(4)式もしくは(13)式を計算することにより各磁気面に吸収される量が求められる。

また \dot{S}_{react} は以下のように与えられる。

$$\dot{S}_{react} = \frac{n_i^2}{4} \langle \sigma v \rangle_{DT}, \quad (16)$$

ここで

$$\langle \sigma v \rangle_{DT} = 0.97397 \times 10^{-22} e^{f(T_i)}$$

$$f(T_i) = 0.038245 (\ln T_i)^3 - 1.0074 (\ln T_i)^2 + 6.3997 (\ln T_i) - 9.75$$

ここで T_i はイオンの温度で単位はkeVである。

境界条件としては、

$$\frac{\partial n_i(r=0)}{\partial r} = 0, \quad n_i(r=a) = n_b \quad (17)$$

としている。

次に輸送係数について述べる。ここでの輸送係数とは、電子/イオンの熱伝導係数 χ_{ei} 及び粒子拡散係数 D_{ei} を指す。また、輸送係数は新古典論的輸送 χ_{ei}^{neo} と異常輸送 χ_{ei}^{ano} を組み合わせ、更に異常輸送に関してはボーム χ_e^B 及びジャイロボーム拡散 χ_e^{sB} の組み合わせを考えると以下のような定式化となる。

$$\begin{aligned} \chi_e &= \chi_e^{ano} + \chi_e^{neo}, \quad \chi_e^{ano} = C \cdot (\chi_e^B + \chi_e^{sB}) \cdot E(s), \quad \chi_i = f_{ei} \chi_e^{ano} + \chi_i^{neo} \\ D_{ei} &= f_{Dix} \times \chi_e, \\ \chi_e^B &= 2.5 \times 10^{-4} \left(\frac{T_e}{B_T} \right) \cdot q^2 \cdot \left(a \frac{\nabla P_e}{P_e} \right), \quad \chi_e^{sB} = 3.5 \times 10^{-2} \left(\frac{T_e}{B_T} \right) \cdot q^2 \cdot \frac{\rho_g}{a} \left(a \frac{\nabla P_e}{P_e} \right), \\ E(s) &= \frac{1}{\{1 + e^{\alpha(s+1)}\}} + \frac{1}{\{1 + e^{-\alpha(s-1)}\}} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、 C はエネルギー閉じ込め時間則 IPB98 (y, 2) に合うように与えるが、ITER-FEATクラスではおおよそ0.17、A-SSTR2クラスで0.23程度である。A-SSTR2はIPB98則と異なる負磁気シアモードであるが、HHファクタとして1.3程度を想定している。また、 f_{ei} 、 f_{Dix} は各々イオン/電子における異常輸送係数の比、粒子拡散係数と熱伝導係数との比である。 $E(s)$ はシアパラメータ ($s \equiv r(dq/dr)/q$ 、 r : プラズマ小半径位置、 q : 安全係数) で表される関数で、安全係数が極小値を取る所で最小となる関数である。これによって負磁気シアプラズマでの輸送係数の空間変化を与える。 α はELMyHモードプラズマ (正磁気シア) $\alpha = 0.01$ 、負磁気シアプラズマでは $\alpha = 5$ を採る。安全係数は平衡解析から与えるようにし、初期温度は以下の式で与える。

$$n = (n_0 - n_s) \times \left\{ 1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right\}^{\alpha_n} + n_s, \quad T = (T_0 - T_s) \times \left\{ 1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right\}^{\alpha_T} + T_s \quad (19)$$

ここで n_0 、 n_s 、 α_n 、 T_0 、 T_s 、 α_T は各々、電子及び各種イオンの中心密度、周辺密度 (セパトリックス密度)、密度形状因子、中心温度、周辺温度 (セパトリックス温度)、温度形状因子である。また圧力に関しては理想気体を過程している。

B_T 、 ρ_g は各々、トロイダル磁場、電子ラーモア半径である。 P_e は電子圧力であり、理想気体 $P_e = n_e T_e$ を仮定している。更にプラズマ端部では $\chi_{ei}(D_{ei}) = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ と仮定している。また、安全係数分布は平衡解析を予め行って求めておく。

2.2.2 電子・イオンのエネルギー方程式

ここでは電子・イオンに関するエネルギー方程式について考察する。まず、標準的な解析モデルとしては準中性仮定に基づく1流体2温度の流体モデル（ヘリウム、中性子の輸送は除く）を出発点とする。即ち、1流体モデルではイオン・電子間の電場生成はデバイ遮蔽によって発生しないと考えている。また、加熱機構としてはアルファ粒子のみで、中性粒子ビームや波動加熱はアルファ粒子加熱に比べて小さいとして省略する。即ち、高エネルギー利得の場合のみを想定する。但し、定常状態を実現するために、電子に対して仮想的なフィードバック制御による加熱を導入する。更にペレットから生成されるプラズマ雲とバックグラウンドプラズマとのミキシングは等エンタルピー下での電子、イオン温度変化を仮定し、これよりペレット入射による温度変化を求める。これらの仮定の下にイオン・電子の2温度モデルによるエネルギー方程式を円柱座標系で書き下す。

電子のエネルギー方程式

$$\frac{\partial E_e}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \left\{ \chi_e n_e \frac{\partial T_e}{\partial r} + D_e \frac{3}{2} T_e \left(\frac{\partial n_e}{\partial r} + C_v \frac{2r}{a^2} n_e \right) \right\} + P_\alpha - P_{ei} - P_R + \dot{E}_p + P_{fd} \quad (20)$$

イオンのエネルギー方程式

$$\frac{\partial E_{ii}}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \left\{ \chi_{ii} n_{ii} \frac{\partial T_{ii}}{\partial r} + D_{ii} \frac{3}{2} T_{ii} \left(\frac{\partial n_{ii}}{\partial r} + C_v \frac{2r}{a^2} n_{ii} \right) \right\} + P_{\alpha ii} + P_{ei} + \dot{E}_p \quad (21)$$

ここで添字の*i*、*e*は各々イオン、電子に関する物理量を表し、*ii*は燃料イオン及び不純物イオンを含めた全イオンとしての物理量を表す。更に燃料イオンと不純物イオンの温度は等しいと仮定している。また E 、 T 、 r 、 χ 、 D 、 P_α 、 P_{ei} 、 P_R 、 \dot{E}_p 、 P_{fd} は各々内部エネルギー密度、温度、プラズマ小半径位置、熱伝導係数、粒子拡散係数、アルファ粒子加熱、電子-イオン間のエネルギー緩和、電子の放射損失、プラズマ雲を吸収したことによる単位時間当たり内部エネルギーの増加及び仮想的なフィードバック制御による加熱を表す。

実効的電荷数 $Z_{eff} \equiv \sum_i Z_i^2 n_i / n_e$ を導入して以下の不純物を考慮する。添字 *j* は燃料イオン及び不純物イオンを示す。不純物としてはヘリウム（アルファ粒子）、ベリ

リウム、炭素、酸素、アルゴンを考え、 f_{He} 、 f_{Be} 、 f_C 、 f_O 、 f_{Ar} を電子密度に対する不純物の割合とする。但し、不純物の割合及び実効的電荷数は空間で一様としている。以上から実効的電荷数と電子密度、燃料イオン密度、不純物イオン密度割合との関係は以下のようになる。

$$Z_{eff} = \frac{n_i}{n_e} + 4f_{He} + 16f_{Be} + 36f_C + 64f_O + 324f_{Ar} \quad (22)$$

燃料イオンの数密度は(15)式を解くことにより得られるので、この式より Z_{eff} 及び f_{He} 、 f_{Be} 、 f_C 、 f_O 、 f_{Ar} を与えることで、電子数密度及び不純物イオンの数密度を求めることができる。また、全イオン数密度は $n_{ii} = n_i + n_{He} + n_{Be} + n_C + n_O + n_{Ar}$ である。

内部エネルギー密度 E は密度 n 、温度 T と以下の関係になる。

$$E_e = 1.5 \times n_e T_e, \quad E_{ii} = 1.5 \times n_{ii} T_i \quad (23)$$

理想気体を仮定しているので、圧力と密度、温度の関係は以下のようになる。

$$P_e = n_e T_e, \quad P_{ii} = n_{ii} T_i \quad (24)$$

アルファ粒子加熱 P_α については以下のように考える。アルファ粒子はイオン、電子と衝突してエネルギーをプラズマ内に落とすが、ここでは簡単のため、発生した地点(磁気面)で吸収されるとして次のように定式化する。

$$P_\alpha = P_{\alpha i} + P_{\alpha e} = \left(\frac{1}{\tau_\alpha} + \frac{1}{\tau_{\alpha e}} \right) n_\alpha E_\alpha \equiv \frac{n_\alpha}{\tau_\alpha} E_\alpha, \quad \frac{\partial n_\alpha}{\partial t} = n^2 \frac{\langle \sigma v \rangle_{DT}}{4} - \frac{n_\alpha}{\tau_\alpha} \quad (25)$$

ここで $E_\alpha = 3.5 \text{ MeV}$ (核融合反応当たりの生成されたアルファ粒子が持つエネルギー)である。 n_α は高速のアルファ粒子密度であり、エネルギーをバックグラウンドのプラズマへ落とした後、熱化されて燃料イオンの温度と等しくなり、 n_{He} の数密度になると考える。ここで温度 T_e としては keV の単位で入力する。

また τ_α は以下の式より求める。

$$\frac{1}{\tau_\alpha} = \frac{1}{\tau_{\alpha e}} + \frac{1}{\tau_{\alpha i}} = \frac{1}{E_\alpha} \left[\frac{e^4 n_e \ln \Lambda}{\pi \epsilon_0^2 m_e v_\alpha} \left\{ \sum_i \frac{m_e n_i Z_i^2}{m_i n_e} + \frac{4}{3\pi^{3/2}} \left(\frac{m_e E_\alpha}{m_\alpha T_e} \right)^{3/2} \right\} \right] \quad (26)$$

ここで e 、 ϵ_0 、 m_e 、 $\ln \Lambda$ 、 v_α 、 m_α は各々素電荷、真空の透磁率、電子質量、クーロン対数、アルファ粒子-イオンの相対速度（ほぼアルファ粒子のエネルギーで決まる）、アルファ粒子質量である。(25)式では、簡単のためアルファ粒子の拡散は考えていない。また、アルファ粒子がエネルギーを与えるイオンは燃料イオンのみとしている（実際、イオンへのアルファ加熱の寄与は電子より少なく、更に不純物によって吸収される割合は燃料イオンの10%程度なので充分小さいと見なせる）。

電子とイオンのエネルギー緩和項は以下のようになる。

$$P_{ei} = \frac{3}{2} n_e \frac{T_e - T_i}{\tau_{ei}}, \quad \frac{1}{\tau_{ei}} = \frac{Z_{eff} n_e e^4 \ln \Lambda \sqrt{m_e}}{(2\pi)^{3/2} 3\pi \epsilon_0^2 m_i T_e^{3/2}} \quad (27)$$

ここで τ_{ei} は電子-イオン間のエネルギー緩和時間である。

電子の放射損失 P_R については制動放射及びシンクロトロン放射を考慮する。但し、 T_e としてはeVの単位で入力する。

$$P_R = 1.69 \times 10^{-38} Z_{eff}^2 n_e^2 \sqrt{T_e} + 1.3 \times 10^{-18} \sqrt{\frac{n_e}{a} (1 - R_{ref}) (1 + \chi_{syn}) T_e^{3/2} B_T^2} \quad (28)$$

ここで1項目は制動放射、2項目はシンクロトロン放射であり、 R_{ref} は壁の反射係数で通常0.6程度、 χ_{syn} は非一様磁場及びドップラー効果に対する補正で、

$$\chi_{syn} = \frac{570}{A \sqrt{T_e}} \quad (29)$$

で与えられる。ここで A ($= R_p/a$) はアスペクト比である。

プラズマ雲を吸収したことによる単位時間当たり内部エネルギーの増加 \dot{E}_p は、プラズマ雲中の電子、イオンがバックグラウンドプラズマの電子、イオンへそれぞれ吸

収されるとする最も簡単なモデルを採用し、且つ断熱的に吸収されると仮定して密度方程式の定式化の時と同様に定式化する。

$$\dot{E}_p = \frac{1.5nT}{\Delta t} \quad (30)$$

一方、フィードバック制御時における加熱であるが、以下のようにする。

$$P_{fd} = G \times (T_{e0} - T_{ref}) \quad (T_{e0} > T_{ref}) \quad (31)$$

ここで G はフィードバック比例ゲイン、 T_{e0} 、 T_{ref} は各々中心電子温度、中心電子温度の目標値であり、 $T_{e0} > T_{ref}$ の時のみ有効、それ以外では $P_{fd} = 0$ である。また、加熱する磁気面としては、プラズマ小半径にして10～20%程度の中心近傍を考えているが、勿論PEPSIでは加熱範囲を自由に選択できる。このような加熱は仮想的としているが、電子サイクロトロン加熱方式に相当する。

境界条件としては、

$$\frac{\partial T_{e(i)}(r=0)}{\partial r} = 0, \quad T_{e(i)}(r=a) = T_{be(i)} \quad (32)$$

とする。

以上の定式化をまとめて計算手順は次の通りである。

- (I) プラズマの平衡解析を行い、プラズマ電流分布を与えて所望のプラズマから磁束分布、安全係数分布を求めておく。
- (II) 与えられたバックグラウンドプラズマの温度・密度分布からペレットの溶発について(2)式を解く。これによって各プラズマ雲の生成位置 R 等が与えられる。
- (III) 各プラズマ雲の侵入長をParksの運動方程式(4)式もしくはStraussの式(13)式を用いて求める。これから燃料が到達する磁気面が求められ、磁気面に供給される燃料供給量が計算される。

(IV) 燃料イオンの数密度及び電子・イオンに関するエネルギー方程式に (4) 式もしくは (13) 式の結果を与え、輸送解析を解く。

(V) 再びIIに戻り、準定常状態になるまでII~IVの手順を繰り返す。

ここで述べる準定常状態とは、ペレット入射が間欠的に行われるので、完全に核融合出力が静定した状態の実現は原理的に不可能であるが、ペレットの入射サイクル程度の時間平均を行えば定常状態と見なせるような状態のことを言う。

なお、コード使用の際に起きるモデル上の制限条件としては、水平入射のみである。即ち、プラズマ雲の運動方程式はプラズマ大半径方向1次元のみである。ペレットもしくはプラズマ雲がプラズマの外部へ抜けた場合のみ計算を停止するようにしている。ペレット入射間隔時間はその間隔時間を可変できるようにしている。

3. 数値計算法

2章の解析モデルで定式化した(2)、(4)、(15)、(21)、(22)式の解法について述べる。

ペレット/プラズマ雲の運動を解く(2)式、(4)式は通常常微分方程式であり、時間間隔を変えなければならないような事態は起こらないと推察されるため、最も効率的な数値計算法としてはAdams-Moulton法のような高次の予測子-修正子法が良いと考えられるが、これら方程式を解くための計算時間は、後に解く高温のバックグラウンドプラズマの輸送方程式に比べてそれほど大きな割合を占めていないので、高次の前進公式であるFehlberg公式を用いた方がプログラム上単純化できると考え、本解析コードでは後者を選択した。

一方、(15)、(21)、(22)式は基本的には放物型の偏微分方程式であることから、時間微分に対しては

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta t} \quad (33)$$

と1次誤差オーダーを持つ差分を採用し、他方空間差分に対しては、

$$\frac{\partial f}{\partial r} \approx \frac{f_{j+1} - f_{j-1}}{2\Delta r}, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \approx \frac{f_{j+1} - 2f_j + f_{j-1}}{(\Delta r)^2} \quad (34)$$

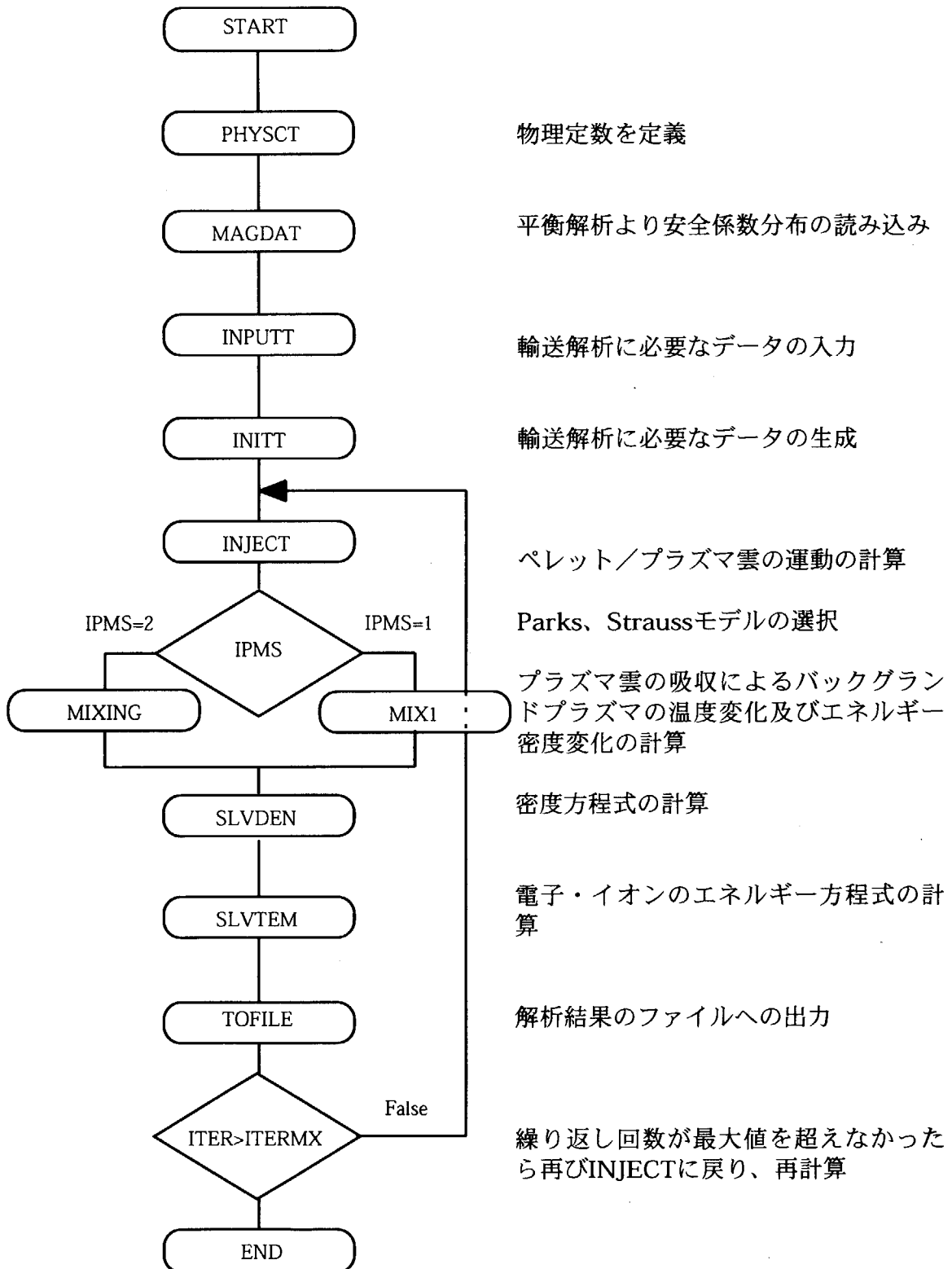
と2次誤差オーダーを持つ中心差分とした。ここで f は物理量であり、添字の i 、 j は各々、時間、空間差分の順番を表す。空間の2階差分については、輸送係数に関して中間地点($j \pm 1/2$)の値が必要となってくる。ここでは単純に j と $j \pm 1$ との平均値を採用している。

(34)式及び(35)式の差分化の結果、三重対角行列を解くことに帰着されるので、これを適切な数値計算ライブラリを用いて解けば良い。PEPSIではIMSLルーチンを採用している。

4. フローチャート

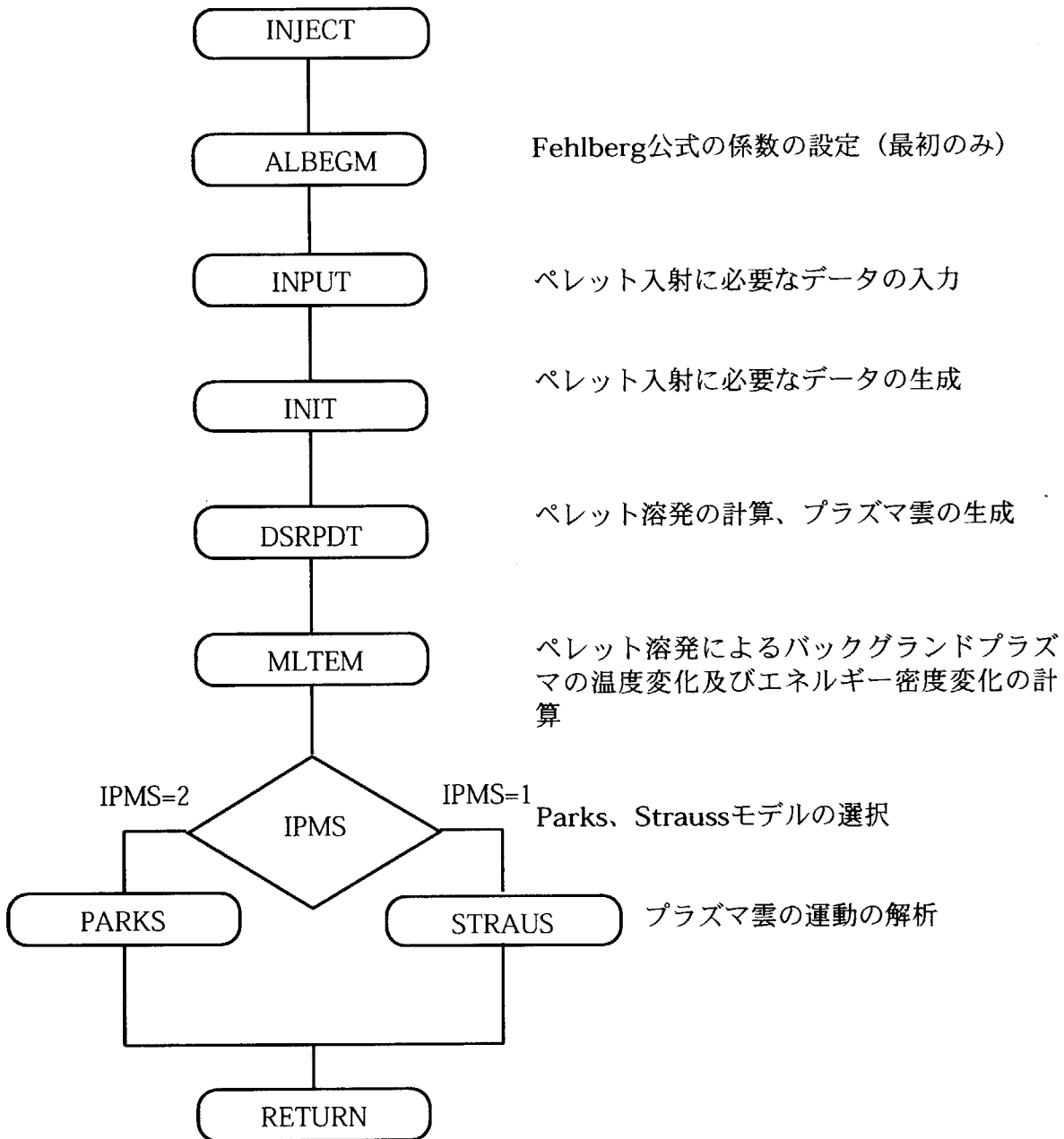
ここではPEPSIにおける計算の主なフローチャートを示す。

1) メインプログラム



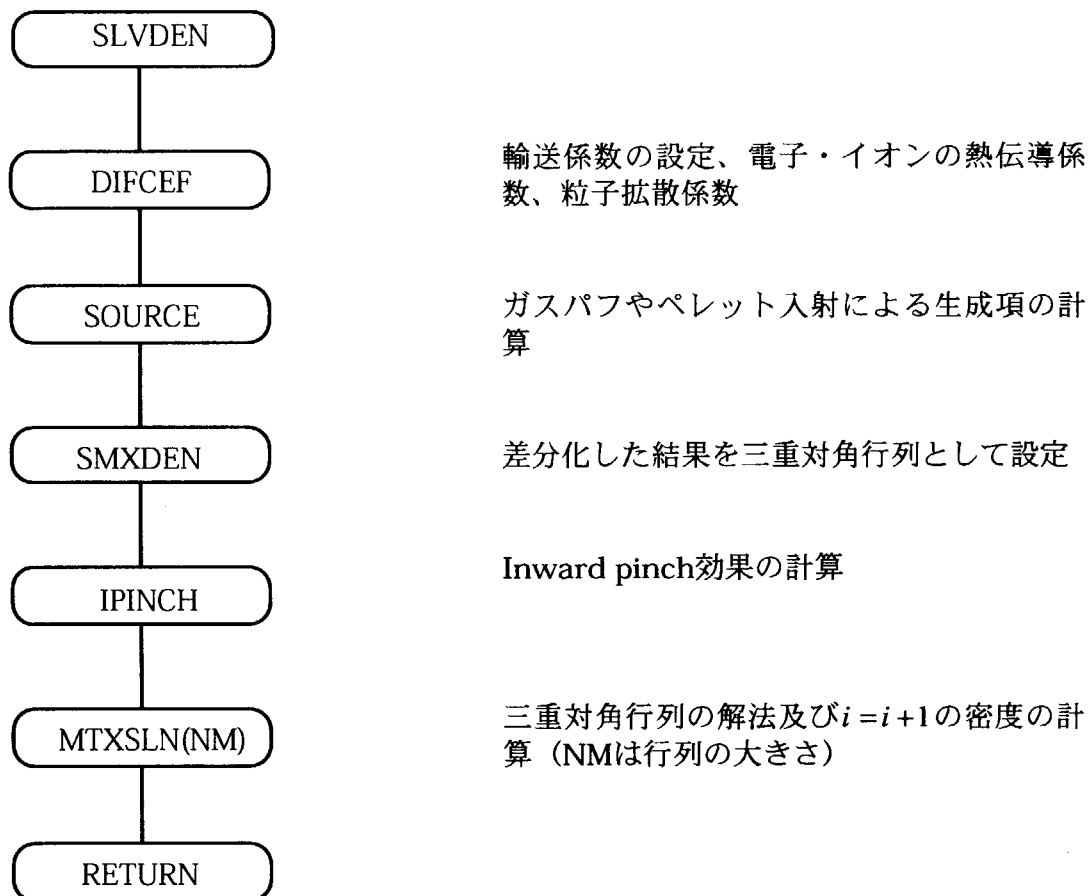
2) INJECT

ペレット入射（ペレット溶発、プラズマ雲の運動）について解くフローチャート
を下記に示す。



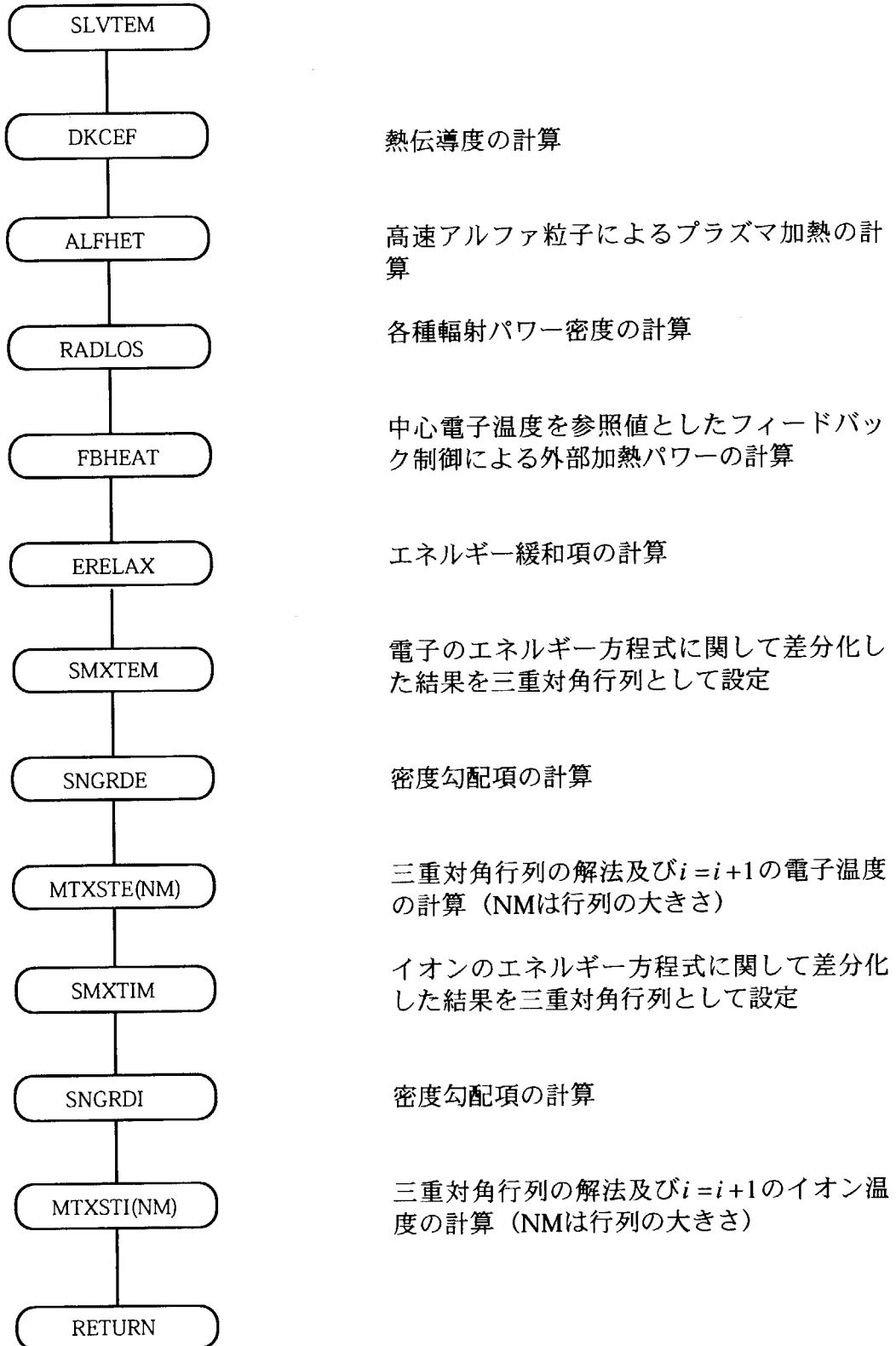
3) SLVDEN

密度方程式の解析についてのフローチャートを下記に示す。



4) SLVTEM

電子・イオンのエネルギー方程式の解析についてのフローチャートを下記に示す。



5. サブルーチン一覧

各サブルーチンについて簡単に説明する。

- MAGDAT: 平衡解析コードTOSCAの結果（安全係数分布）の読み込み
TOFILE: 各物理量のデータをファイルに保存
PHYSCT: 物理定数の定義
INPUTT: 主に輸送解析で用いるパラメータ入力
INITT: 主に輸送解析で用いる物理量の定義
SLVDEN: 密度分布を求めるためのサブルーチンをコール
DIFCEF: 輸送係数（熱伝導、粒子拡散）の計算
SOURCE: ペレット入射及びガス注入による粒子生成項を定義
SMXDEN: 密度分布を解くための行列の作成
SIGMAV: 重水素-三重水素核融合反応率
IPINCH: Inward pinchの項の差分
INVGJ: チェックのために逆行列を計算するサブルーチンで現在未使用
MTSLN: IMSLルーチンを用いての行列解法及び密度分布等出力
SLVTEM: エネルギー方程式を解くためのサブルーチン
DKCEF: 熱伝導度の計算
ALFHET: アルファ粒子加熱の計算
RADLOS: 制動放射及びシンクロトロン放射損失の計算
FBHEAT: イオン温度を参照したフィードバック制御による加熱パワーの計算
ERELAX: 電子-イオン間のエネルギー緩和項の計算
SMXTEM: 電子のエネルギー方程式を解くための行列要素を計算
MTXSME: 電子のエネルギー方程式をIMSLルーチンを用いての行列解法
SNGRDE: 電子のエネルギー方程式における圧力項の差分
SMXTIM: イオンのエネルギー方程式を解くための行列要素を計算
MTXSTI: イオンのエネルギー方程式をIMSLルーチンを用いての行列解法

- SNGRDI : イオンのエネルギー方程式における圧力項の差分化
- MIX1 : Straussモデルを選択した時のペレットからのエネルギー増加項を計算
(現時点では0としている)
- MIXING : Parksモデルを選択した時のプラズマ雲がバックグラウンドプラズマ
に吸収された時の内部エネルギーの変化を計算
- INJECT : ペレットの溶発及びプラズマ雲の運動を解くためのメインルーチン
- INPUT : 主にペレットの溶発で用いるパラメータ入力
- INIT : 主にペレットの溶発で用いる物理量の定義
- DSPRDT : ペレットの溶発に関する方程式の計算
- MLTEM : ペレットが溶融する時の昇華エネルギー分によるバックグラウンドプ
ラズマ内部エネルギーの変化を求める
- DPSTP1 : Straussモデルを選択した時のペレットの吸収分布を求める
- DPSTP2 : Parksモデルを選択した時のペレットの吸収分布を求める
- STRAUS : Straussモデルを選択した時のプラズマ雲の吸収分布を求める
- PARKS : Parksモデルを選択した時のプラズマ雲の運動方程式の計算
- DPSTPC : Parksモデルを選択した時のプラズマ雲の吸収分布を計算
- COEFF1 : ペレットの溶発を計算する方程式で用いる係数の計算
- COEFF2 : Parksモデルを選択した時のプラズマ雲の運動方程式で用いる係数の
計算
- ALBEGM : Fehlbeg公式で用いる定数の定義

6. 変数一覧

主な変数の説明としてCOMMON変数について解説する。

COMMON変数の配列の大きさを定義する変数

MXNM	: バックグラウンドプラズマの磁気面数最大値
MXPLT	: ペレット数の最大値
MXPM	: プラズマ雲数の最大値
MXTM	: プレプログラミングによる入射パラメータの最大変更回数
MXNMT	: バックグラウンドプラズマのプラズマ小半径方向メッシュ数最大値 (MXNMT=MXNM+1である)

COMMON /PHYSCT/

PAI	: 円周率
E	: 素電荷
DMYU0	: 真空透磁率
SME	: 電子質量
SMP	: 陽子質量
CV	: 光速度
EPSI0	: 真空誘電率
HPLNK	: プランク定数
GMMAH	: 比熱比
SMDD	: 重水素質量
SMDT	: 三重水素質量
SNSLD	: 水素固体密度
SMHE4	: ヘリウム4質量
SMBE	: ベリリウム質量
SMAR	: アルゴン質量

EALPH : 重水素-三重水素反応によるアルファ粒子分の核融合エネルギー
 HIE : 水素のイオン化エネルギー
 HDE : 水素の解離エネルギー
 SMC : 炭素質量
 SMO : 酸素質量
 AMU : 単位質量

COMMON /CLMLOG/

DCLN : クーロン対数

COMMON /RKGCSST /

ALPHA(6),BETA(6,6),GAMMA(6) : Fehlberg公式の各係数

COMMON /INTGER/

IO : 高低磁場側入射を示すフラッグ
 NM : 磁気面数
 MXIN : ペレット及びプラズマ雲の運動を解く時の最大時間メッシュ数
 IN : ペレット及びプラズマ雲の運動を解く時の時間メッシュ数
 NPC : 現在不使用 (NPC=NM+1)
 IPC : プラズマ雲の番号
 NPLLT : 生成されたプラズマ雲の総数
 ITER : 入射サイクル反復回数
 IMLT : 磁気面の番号を一時記憶するための変数
 IMP : 1サイクル当たりのペレット数
 IOP : プラズマ雲がバックグラウンドプラズマ外に出たことを示すフラッグ
 IPMS : Straussモデル (IPMS=1) もしくはParksモデルの選択 (IPMS=2)
 NLOUD : プラズマ雲の数をカウントするための変数
 IDTP : プレプログラミング変更回数

IPTM : プレプログラミングの変更回数をカウントするための変数

COMMON /INTGR1/

NPCD : 各ペレット、プラズマ雲の運動を計算中か否かを判断するフラッグ

COMMON /RLDT0/

T : 時間

DT : 時間メッシュ

RP : プラズマ大半径

AP : プラズマ小半径

BT0 : 装置中心でのトロイダル磁場強度

SNE0 : 初期中心電子密度

SNI0 : 初期中心燃料イオン密度

TE0 : 初期中心電子温度

TIO : 初期中心イオン温度

AN : 初期密度分布形状因子

AT : 初期温度分布形状因子

SRP0 : ペレットの初期半径

VP0 : ペレットの入射速度

W : ペレットを構成する元素の質量数

Z : ペレットを構成する元素の電荷数

RIP : ペレット入射位置、プラズマ大半径位置

ZIP : ペレット入射位置、垂直位置 (磁気軸を原点とする、通常 0 m)

SRP : ペレットの半径で計算用

SRP1 : 時間メッシュで 1 メッシュ前のペレット半径 (現在不使用)

DR : 空間メッシュ

RPI : ペレット初期位置

RPD : ペレット位置

CA : (2) 式の係数の一部
 CA3 : プラズマ雲の運動方程式に含まれる係数の一部
 CB3 : プラズマ雲の運動方程式に含まれる係数の一部
 ELNG : プラズマの非円形度
 SRPCA : 時間メッシュで1メッシュ前のペレット半径
 TCHECK : プラズマ雲の不安定成長時間を計るための変数
 SRPMLT : 初期のペレット半径を記憶させておく変数
 TTLMS : 初期のペレット質量
 TTMM : バックグラウンドプラズマに吸収されたペレット全質量

COMMON /RLDT1/

SR : プラズマ小半径位置、空間メッシュの中心で定義
 RL : プラズマ大半径位置
 SNE : 電子密度
 SNI : 燃料イオン密度
 TE : 電子温度
 TI : イオン温度
 DVL : 各磁気面の体積
 SNPLT : 溶発したペレットの水素粒子数
 RX : プラズマ雲のプラズマ大半径位置
 TSN : プラズマ雲の数密度
 TMM : プラズマ雲の全質量
 VX : プラズマ雲の速度
 FLAG : プラズマ雲の運動に関する計算を継続するか否かのフラッグ
 SRPM : ペレットの半径で記憶用
 TPLT : プラズマ雲の温度
 SNPLTP : プラズマ雲の全粒子数

COMMON /RLDT2/

TSNPC : 各磁気面に吸収されたプラズマ雲の数密度

TMMPC : 各磁気面に吸収されたプラズマ雲の質量

COMMON /PLTPLS/

TSNPC2 : ある磁気面に吸収されたプラズマ雲の全粒子数

TPLT2 : ある磁気面に吸収されたプラズマ雲の温度

COMMON/CHECK1/

CSHIFT : Straussモデル使用時のプラズマ雲のシフト位置

CSRPERP : Straussモデル使用時のプラズマ雲の小半径

CSQH : Straussモデル使用時のバックグラウンドプラズマ安全係数分布

CDSN : Straussモデル使用時のプラズマ雲の数密度

CDSNMN : Straussモデル使用時のプラズマ雲の全質量

CSLCX : Straussモデル使用時のプラズマ雲の磁力線方向の半値幅

CDLSN : Straussモデル使用時のプラズマ雲の全粒子数

CSRPCA : Straussモデル使用時のプラズマ雲で、時間メッシュで1メッシュ前のペレット半径

CSRP : Straussモデル使用時のプラズマ雲のペレット半径

COMMON /PREPRO/

TP : ペレットパラメータ変更時間

VPI : 変更後のペレット入射速度

SRPI : 変更後のペレット半径

DLTPI : 変更後のペレット入射間隔時間

COMMON /INTGRT/

NTMX : 輸送解析の時間メッシュ数最大値 (現在無効)

NX : 輸送解析の空間メッシュ数
 IT : 輸送解析の時間メッシュ数 (現在無効)
 ICONV : 現在不使用
 IPM : 正負磁気シアの区別 (現在不使用)
 ITERMX : ペレット入射回数 (実質的に時間ステップ最大値を決める)
 LMTR1 : フィードバック制御で加熱するプラズマ領域においてプラズマ
 最内側のメッシュ位置
 LMTR2 : フィードバック制御で加熱するプラズマ領域においてプラズマ
 最外側のメッシュ位置
 IWRT : 空間分布及び平均値の出力間隔 (時間メッシュ数 20 回ごとならば
 IWRT=20)
 IOUT : ペレット入射回数のうち、出力ファイルに出力する間隔
 NR : 現在不使用
 NZ : 現在不使用

COMMON /RLDTOT/

DTT : 輸送解析の時間メッシュ幅
 SQ0 : 中心安全係数 (現在不使用)
 AQ : 安全係数分布の形状因子 (現在不使用)
 SQM : (現在不使用)
 SQS : (現在不使用)
 SQR : (現在不使用)
 ZEFF : 実効的電荷数
 DTPI : ペレット入射間隔時間
 CPINCH : Inward pinchの係数
 COK : 輸送係数を決めるパラメータ 1 (本報告 2 章の C)
 ALPHAS : 輸送係数を決めるパラメータ 2 (本報告 2 章の α)
 GASPF : 単位時間・単位体積当たりガス注入量

SNB	: 周辺プラズマ密度 (現在不使用)
SQ2	: 安全係数分布の関数を決めるパラメータ 1 (現在不使用)
SQ4	: 安全係数分布の関数を決めるパラメータ 2 (現在不使用)
SQ10	: 安全係数分布の関数を決めるパラメータ 3 (現在不使用)
RREF	: シンクロトロン放射の反射率
PWFUS	: 核融合出力
EDB	: 周辺エネルギー密度を記憶しておく変数
SNIB	: 周辺燃料イオン密度
SNEB	: 周辺電子密度
TIB	: 周辺イオン温度
TEB	: 周辺電子温度
EFCT	: 現在不使用
DREI	: 電子密度に対する燃料イオン密度の比
FCTHE	: 電子密度に対するヘリウム 4 密度の比
FCTC	: 電子密度に対する炭素密度の比
FCTO	: 電子密度に対する酸素密度の比
FCTBE	: 電子密度に対するベリリウム密度の比
FCTAR	: 電子密度に対するアルゴン密度の比
XEAV	: 現在不使用
AIP	: プラズマ電流
BETAP	: ポロイダルベータ値
ALI	: 内部インダクタンス
TIME	: 輸送解析で経過した時間
TAUE	: IPB98(y,2)則から計算したエネルギー閉じ込め時間
PLOSS	: 実質加熱エネルギー
HHF	: HHファクター
TAUEX	: 蓄積エネルギー等から計算したエネルギー閉じ込め時間
WJ	: 蓄積エネルギー

- ELNG95 : 磁束値 95% での非円形度
- EIRAT : 異常輸送部分におけるイオン熱伝導係数 / 電子熱伝導係数比
- WJP : 時間メッシュで 1 メッシュ前の蓄積エネルギー
- DKRAT : 粒子拡散係数 / 電子熱伝導係数比
- TPSI : 全磁束値 (現在不使用)
- PSIO : 中心磁束値 (現在不使用)
- PSIB : 周辺磁束値 (現在不使用)
- BETAT : トロイダルベータ値
- COMMON /HEAT1T/
- PWLMT : 加熱パワーの制限値
- TREF : 中心電子温度の参照値
- GAIN : 参照値と中心電子温度との差異にかけるフィードバック制御の利得
- PWTOTAL : 外部加熱パワー
- COMMON /RLDT1T/
- SRT : プラズマ小半径位置、SRと半メッシュ分ずらし、メッシュの端で
定義
- DNDFF : 粒子拡散係数
- SN : 粒子生成項
- BN : 偏微分方程式を差分化した時に出てくる定数をまとめた変数
- SQ : 空間メッシュの端で定義された安全係数
- SQH : 空間メッシュの中心で定義された安全係数
- SHP : シアパラメータ
- SNIH : 空間メッシュの中心で定義された燃料イオン密度
- SNEH : 空間メッシュの中心で定義された電子密度
- TIH : 空間メッシュの中心で定義された電子温度
- DNEO : 新古典論的電子粒子拡散係数

DINEO : 新古典論的イオン粒子拡散係数
 ROUE : 電子ラーモア半径
 DKINEO : 現在不使用
 SNA : 高速アルファ粒子密度
 SNAP : 時間メッシュで1メッシュ前の高速アルファ粒子密度
 XE : 電子熱伝導係数
 XI : イオン熱伝導係数
 XENEO : 新古典論的電子熱伝導係数
 XINEO : 新古典論的イオン熱伝導係数

COMMON /RLDT1U/

PALFHT : 高速アルファ粒子の全加熱パワー密度
 PRADLS : 輻射による損失のエネルギー密度
 PBHEAT : 外部加熱パワー密度
 DKICF : 現在不使用
 DKECF : 現在不使用
 TDKCF : 全熱伝導度 (現在不使用)
 EDI : 全イオンのエネルギー密度
 EDE : 電子のエネルギー密度
 DNDRN : (35) 式中、 f を密度に置き換え、左側の式を密度で割った量
 SNIP : 時間メッシュで1メッシュ前の燃料イオン密度
 SNEP : 時間メッシュで1メッシュ前の電子密度
 TIP : 時間メッシュで1メッシュ前のイオン温度
 TEP : 時間メッシュで1メッシュ前の電子温度
 PALFHI : 高速アルファ粒子の電子への加熱パワー密度
 PALFHE : 高速アルファ粒子のイオンへの加熱パワー密度
 TAUEI : エネルギー緩和時間
 PETAUEI : エネルギー緩和項

TDKCE : 電子熱伝導度
 TDKCI : イオン熱伝導度
 SNTI : 全イオン密度
 SNTIP : 時間メッシュで1メッシュ前の全イオン密度
 SNHE : ヘリウム4密度
 SNBE : ベリリウム密度
 SNC : 炭素密度
 SNO : 酸素密度
 SNAR : アルゴン密度
 SEI : 燃料供給による燃料イオン数増加からのエネルギー密度生成項
 SEE : 燃料供給による電子数増加からのエネルギー密度生成項

COMMON /RLDT2T/

DENMX : 密度方程式の差分化により生成された三重対角行列
 EDIMX : イオンのエネルギー方程式の差分化により生成された三重対角行列
 EDEMx : 電子のエネルギー方程式の差分化により生成された三重対角行列

COMMON /TEMPDT/

PSYNDT : シンクロトロン放射パワー密度

COMMON /MAGRED/

EQSRT : 平衡解析コードTOSCAからの入力データ (プラズマ小半径位置)
 EQFLUX : 平衡解析コードTOSCAからの入力データ (磁束値)
 EQSQ : 平衡解析コードTOSCAからの入力データ (安全係数)

COMMON /RLDT03/

SIGMP : プラズマ雲の質量 Σ_p
 SLC : プラズマ雲の初期半値幅 L_c

C0 : 音速
P0 : プラズマ雲の初期圧力
B0BI : プラズマ雲とバックグラウンドプラズマのベータ値比 (現在不使用)
SN0 : プラズマ雲の初期密度
RW : 現在不使用

7. 使用説明

起動方法はMacintosh上でロードモジュールであるPEPSIをクリックするだけでよい。必要なファイルは入力ファイルfort.5p、平衡解析結果fort.17p及び出力ファイルfort.18p、fort.20p~23p、25pで、グラフ処理機能は現時点では付け加えていないので、出力ファイルより適宜必要なデータを取り出して適当なグラフ作成ソフトで処理することになる。fort.17pは平衡解析コードTOSCAの出力であるが、プラズマ電流分布から安全係数分布を求めた結果である。TOSCAの取り扱いについてはここでは説明を省略する。PEPSIは原則平衡解析結果を取り込まなければならないことに注意する。

以下は入力ファイル作成時の入力データの説明で、入力形式は整数データでI10、実数データではE10.0で統一されている。また、入力は原則SI単位、温度のみeVである。

1) 入力ファイルfort.5pの内容

1行目：RP,AP,BT0,ELNG95,AIP,BETAP,BETAT,ALI

RP	: プラズマ大半径 (m)
AP	: プラズマ小半径 (m)
BT0	: 装置中心でのトロイダル磁場強度 (T)
ELNG95	: 磁束値95%における非円形度
AIP	: プラズマ電流
BETAP	: ポロイダルベータ値
BETAT	: トロイダルベータ値
ALI	: 内部インダクタンス

2行目：ZEFF,FCTHE,FCTBE,FCTC,FCTO,FCTAR,RREF

ZEFF	: 実効的電荷数
FCTHE	: 電子密度に対するヘリウム4密度比
FCTBE	: 電子密度に対するベリリウム密度比

FCTC : 電子密度に対する炭素密度比
 FCTO : 電子密度に対する酸素密度比
 FCTAR : 電子密度に対するアルゴン密度比
 RREF : シンクロトロン放射の反射率

3行目 : SNE0, SNIO, TE0, TIO, AN, AT

SNE0 : 初期中心電子密度 (m^{-3})
 SNIO : 初期中心燃料イオン密度 (m^{-3})
 TE0 : 初期中心電子温度 (eV)
 TIO : 初期中心イオン温度 (eV)
 AN : 初期密度分布形状因子
 AT : 初期温度分布形状因子

4行目 : SNEB, SNIB, TEB, TIB

SNEB : 周辺電子密度 (m^{-3})
 SNIB : 周辺燃料イオン密度 (m^{-3})
 TEB : 周辺電子温度 (eV)
 TIB : 周辺イオン温度 (eV)

5行目 : IPM

IPM : 正磁気シア配位では > 0 、負磁気シア配位の場合 < 0 と入力

6行目 : SQ0, SQS, AQ (IPM > 0 の場合だが、現在不使用、ダミーとして入力)

SQ0 : 中心安全係数 (現在不使用)
 SQS : 95%磁束値における安全係数 (現在不使用)
 AQ : 安全係数分布の形状因子 (現在不使用)

6行目：SQ0,SQ2,SQ4,SQ10 (IPM<0の場合だが、不使用、ダミーとして入力)

- SQ0 : 中心安全係数 (現在不使用)
- SQ2 : 安全係数分布の関数を決めるパラメータ 1 (現在不使用)
- SQ4 : 安全係数分布の関数を決めるパラメータ 2 (現在不使用)
- SQ10 : 安全係数分布の関数を決めるパラメータ 3 (現在不使用)

7行目：PWLMT,LMTR1,LMTR2,TREF,GAIN

- PWLMT : フィードバック制御の最大加熱パワー
- LMTR1 : フィードバック制御で加熱するプラズマ領域においてプラズマ最内側のメッシュ位置
- LMTR2 : フィードバック制御で加熱するプラズマ領域においてプラズマ最外側のメッシュ位置
- TREF : フィードバック制御における中心イオン温度の参照値
- GAIN : フィードバック制御の比例ゲイン

8行目：NTMX,ITERMX,NX,IWRT,IOUT

- NTMX : 輸送解析の時間メッシュ最大値 (現在無効)
- ITERMX : ペレット入射回数 (実質的に時間メッシュ数最大値を決める)
- NX : 輸送解析の空間メッシュ数
- IWRT : 空間分布及び平均値の出力間隔 (例：時間メッシュ 20 回に 1 回出力)
- IOUT : ペレット入射回数のうち、出力ファイルに出力する間隔

9行目：DTT,DTPI,GASPF,SNB

- DTT : 輸送解析の時間メッシュ幅 (s)
- DTPI : ペレット入射間隔時間 (s)
- GASPF : 単位時間・単位体積当たりガス注入量量 (m^3s^{-1})
- SNB : 周辺プラズマ密度 (m^{-3}) (現在不使用)

1 0 行目 : CPINCH,COK,EIRAT,DKRAT,ALPHAS

- CPINCH : Inward pinchの係数
- COK : 輸送係数を決めるパラメータ 1 (本報告 2 章の C)
- EIRAT : 異常輸送部分におけるイオン熱伝導係数 / 電子熱伝導係数比
- DKRAT : 粒子拡散係数 / 電子熱伝導係数比
- ALPHAS : 輸送係数を決めるパラメータ 2 (本報告 2 章の α)

1 1 行目 : IO,IMP,IPMS

- IO : 低磁場側入射では > 0 、高磁場側入射では < 0 と入力
- IMP : 同時入射ペレット数
- IPMS : Straussモデル (IPMS=1) もしくはParksモデルの選択 (IPMS=2)

1 2 行目 : SRP0,VP0,W,Z,RIP,ZIP

- SRP0 : ペレット半径 (m)
- VP0 : ペレット入射速度 (m/s)
- W : ペレットを構成する元素の質量数
- Z : ペレットを構成する元素の電荷数
- RIP : ペレット入射位置、プラズマ大半径位置 (m)
- ZIP : ペレット入射位置、垂直位置 (m) (磁気軸を原点とする、通常 0 m)

1 3 行目 : DT

- DT : ペレット及びプラズマ雲の運動を解く時の時間メッシュ幅 (s)

1 4 行目 : MXIN

- MXIN : ペレット及びプラズマ雲の運動を解く時の最大時間メッシュ数

1 5 行目 : IDTP

IDTP : プレプログラミングによるペレット入射パラメータの変更回数

1 6 行目 : TP(I),VPI(I),SRPI(I),DLTPI(I)

TP(I) : ペレットパラメータ変更時間 (s)

VPI(I) : 変更後のペレット入射速度 (m/s)

SRP(I) : 変更後のペレット半径(m)

DLTPI(I) : 変更後のペレット入射間隔時間(s)

2) 各出力ファイルの内容

各出力ファイルについて以下に順次説明する。

fort.18p

固体燃料ペレットによる燃料供給の空間分布

Straussモデルの場合

I,RL(I),SRT(I),TSNPC(1,I),TSNPC(2,I),SNPLT(I),SNPLTP(I)

I : 磁気面の番号

RL(I) : プラズマ大半径位置(m)

SRT(I) : プラズマ小半径位置(m)

TSNPC(1,I) : 吸収されたプラズマ雲の数密度 (m^{-3})

TSNPC(2,I) : 溶発したペレットの数密度 (m^{-3})

SNPLT(I) : 吸収されたプラズマ雲の粒子数

SNPLTP(I) : 溶発したペレットの粒子数

Parksモデルの場合

IM,RL(IM),TSNPC(1,IM),TMMPC(1,IM),DVL(IM)

IM : 磁気面の番号

RL(IM) : プラズマ大半径位置 (m)
 TSNPC(1,IM) : 吸収されたプラズマ雲の数密度 (m^{-3})
 TMMPC(1,IM) : 吸収されたプラズマ雲の質量 (kg)
 DVL(IM) : 磁気面の体積 (m^3)

fort.20p

時間メッシュIWRTごとに以下の空間分布を出力

SRT(I),SNTI(I),SNE(I),SNI(I),TE(I),TI(I),XE(I),XI(I)

TIME : 輸送解析で経過した時間 (s)
 SRT(I) : プラズマ小半径位置 (m)
 SNTI(I) : 全イオン密度 (m^{-3})
 SNE(I) : 電子密度 (m^{-3})
 SNI(I) : 燃料イオン密度 (m^{-3})
 TE(I) : 電子温度 (eV)
 TI(I) : イオン温度 (eV)
 XE(I) : 電子熱伝導係数 (m^2/s)
 XI(I) : イオン熱伝導係数 (m^2/s)

fort.21p

時間メッシュWRTごとに以下の物理量を出力

TIME,SNTIM,SNEM,SNIM,TEM,TIM,PFNTI,PFNE,PFNI,PFTE,PFTI

TIME : 輸送解析で経過した時間 (s)
 SNTIM : 平均全イオン密度 (m^{-3})
 SNEM : 平均電子密度 (m^{-3})
 SNIM : 平均燃料イオン密度 (m^{-3})
 TEM : 平均電子温度 (eV)
 TIM : 平均イオン温度 (eV)
 PFNTI : 全イオン密度分布形状因子

PFNE : 電子密度分布形状因子
 PFNI : 燃料イオン密度分布形状因子
 PFTE : 電子温度分布形状因子
 PFTI : イオン温度分布形状因子

fort.22p

時間メッシュIWRTごとに以下の物理量を出力

TIME,HHF,TAUE,WJ,PWFUS,PLOSS,PWTOTAL

TIME : 輸送解析で経過した時間 (s)
 HHF : 閉じ込め改善度
 TAUE : スケーリングによるエネルギー閉じ込め時間 (s)
 WJ : 蓄積エネルギー (MJ)
 PWFUS : 核融合出力 (MW)
 PLOSS : 全加熱パワー (MW)
 PWTOTAL : フィードバック制御による外部加熱パワー (MW)

fort.23p

出力リスト

fort.25p

時間メッシュIWRTごとに以下の物理量を出力

TIME,TAUEX,TAUE,HHF,WJ,WJP,DWDT,PLOSS,PAL

TIME : 輸送解析で経過した時間 (s)
 TAUEX : エネルギー閉じ込め時間 (s)
 TAUE : スケーリングによるエネルギー閉じ込め時間 (s)
 HHF : 閉じ込め改善度
 WJ : 蓄積エネルギー (MJ)
 WJP : 時間で1メッシュ前の蓄積エネルギー (MJ)

DWDT : 蓄積エネルギーの時間変化 (MW)
PLOSS : 全加熱パワー (MW)
PAL : アルファ粒子加熱パワー (MW)

3) 入力例

A-SSTR2 [9] のパラメータを基に作成した入力パラメータ例を以下に示す。

```

6.200E+00 1.500E+00 1.100E+01 1.800E+00 1.200E+07 2.600E+00 0.026E+00 0.490E+00
1.600E+00 0.100E+00 0.000E+00 0.005E-00 4.500E-03 0.000E+00 0.600E+00
3.600E+20 2.642E+20 3.000E+04 3.000E+04 0.800E+00 1.200E+00
3.600E+19 2.642E+19 1.000E+03 1.000E+03
-1
3.620E+00-4.500E+00 6.075E+00 1.730E+00
6.000E+07      1      10 3.000E+04 1.000E+05
      550      50      51      50      1
1.000E-03 0.550E+00 0.000E+20 3.600E+18
0.200E+00 0.230E+00 1.000E+00 1.000E+00 5.000E+00
      -1      1      1
6.000E-03 2.000E+03 2.500E+00 1.000E+00 4.800E+00 0.000E+00
1.000E-07
      100000
      3
0.000E+00 2.000E+03 6.000E-03 0.550E+00
1.100E+01 2.000E+03 6.000E-03 0.550E+00
1.000E+03 2.000E+03 6.000E-03 0.550E+00

```

4) 出力ファイル例

下記にfort.22pの出力例の一部を示す。

TIME	HHF	TAUE	WJ	PWFUS	PLOSS	PWTOTAL
5.00000E-02	5.98733E-01	1.98474E+00	7.02187E+02	3.78472E+03	3.06219E+02	6.00000E+01
1.00000E-01	9.70738E-01	1.45309E+00	6.96084E+02	3.73807E+03	4.69340E+02	6.00000E+01
1.50000E-01	1.03881E+00	1.31930E+00	6.96467E+02	3.76578E+03	5.27144E+02	6.00000E+01
2.00000E-01	9.99620E-01	1.27613E+00	6.96889E+02	3.75836E+03	5.40065E+02	6.00000E+01
2.50000E-01	9.52273E-01	1.26020E+00	6.95645E+02	3.71621E+03	5.36825E+02	6.00000E+01
3.00000E-01	9.13166E-01	1.25475E+00	6.92610E+02	3.64633E+03	5.27207E+02	6.00000E+01
3.50000E-01	8.80206E-01	1.25571E+00	6.87939E+02	3.55370E+03	5.13899E+02	6.00000E+01
4.00000E-01	8.50390E-01	1.26204E+00	6.81767E+02	3.44238E+03	4.97797E+02	6.00000E+01
4.50000E-01	8.21996E-01	1.27335E+00	6.74193E+02	3.31593E+03	4.79428E+02	6.00000E+01
5.00000E-01	7.94258E-01	1.28942E+00	6.65297E+02	3.17768E+03	4.59267E+02	6.00000E+01
5.50000E-01	7.66934E-01	1.31007E+00	6.55162E+02	3.03071E+03	4.37778E+02	6.00000E+01
6.00000E-01	9.28983E-01	1.24930E+00	6.68506E+02	3.19250E+03	6.07046E+02	6.00000E+01
6.50000E-01	1.02766E+00	1.33143E+00	6.70748E+02	3.37685E+03	5.43881E+02	6.00000E+01
7.00000E-01	1.02970E+00	1.33961E+00	6.73197E+02	3.48972E+03	5.28476E+02	6.00000E+01
7.50000E-01	9.97791E-01	1.32914E+00	6.74588E+02	3.54585E+03	5.23175E+02	6.00000E+01
8.00000E-01	9.61460E-01	1.31787E+00	6.74573E+02	3.55173E+03	5.17949E+02	6.00000E+01
8.50000E-01	9.29950E-01	1.30812E+00	6.73148E+02	3.52289E+03	5.11701E+02	6.00000E+01
9.00000E-01	9.02735E-01	1.30169E+00	6.70413E+02	3.46881E+03	5.03553E+02	6.00000E+01
9.50000E-01	8.77665E-01	1.29956E+00	6.66443E+02	3.39457E+03	4.93066E+02	6.00000E+01
1.00000E+00	8.53274E-01	1.30211E+00	6.61274E+02	3.30344E+03	4.80200E+02	6.00000E+01
1.05000E+00	8.28845E-01	1.30938E+00	6.54929E+02	3.19806E+03	4.65154E+02	6.00000E+01
1.10000E+00	8.04145E-01	1.32127E+00	6.47429E+02	3.08089E+03	4.48241E+02	6.00000E+01
1.15000E+00	9.05702E-01	1.35443E+00	6.58770E+02	3.10978E+03	5.53036E+02	6.00000E+01
1.20000E+00	1.00636E+00	1.41971E+00	6.60444E+02	3.28208E+03	5.07779E+02	6.00000E+01
1.25000E+00	1.01603E+00	1.41282E+00	6.62679E+02	3.39351E+03	5.01580E+02	6.00000E+01
1.30000E+00	9.91580E-01	1.39159E+00	6.64218E+02	3.45616E+03	5.02120E+02	6.00000E+01
1.35000E+00	9.62178E-01	1.37114E+00	6.64680E+02	3.47634E+03	5.01967E+02	6.00000E+01
1.40000E+00	9.36856E-01	1.35302E+00	6.64032E+02	3.46694E+03	5.00483E+02	6.00000E+01
1.45000E+00	9.15106E-01	1.33873E+00	6.62341E+02	3.43519E+03	4.96921E+02	6.00000E+01
1.50000E+00	8.94823E-01	1.32910E+00	6.59644E+02	3.38462E+03	4.90862E+02	6.00000E+01
1.55000E+00	8.74544E-01	1.32437E+00	6.55938E+02	3.31735E+03	4.82223E+02	6.00000E+01
1.60000E+00	8.53557E-01	1.32454E+00	6.51205E+02	3.23512E+03	4.71125E+02	6.00000E+01
1.65000E+00	8.31646E-01	1.32947E+00	6.45425E+02	3.13964E+03	4.57808E+02	6.00000E+01
1.70000E+00	8.91408E-01	1.43094E+00	6.55595E+02	3.09007E+03	5.20593E+02	6.00000E+01
1.75000E+00	9.90456E-01	1.48251E+00	6.56866E+02	3.25010E+03	4.86271E+02	6.00000E+01
1.80000E+00	1.00407E+00	1.46403E+00	6.58878E+02	3.35725E+03	4.85871E+02	6.00000E+01
1.85000E+00	9.84435E-01	1.43552E+00	6.60406E+02	3.42095E+03	4.89790E+02	6.00000E+01
1.90000E+00	9.60114E-01	1.40857E+00	6.61058E+02	3.44826E+03	4.92806E+02	6.00000E+01
1.95000E+00	9.39614E-01	1.38440E+00	6.60805E+02	3.45019E+03	4.94424E+02	6.00000E+01
2.00000E+00	9.22211E-01	1.36443E+00	6.59697E+02	3.43227E+03	4.93923E+02	6.00000E+01

8. まとめ

本報告では、核融合炉における燃料供給法を検討するために、固体ペレット入射を用いた供給法について、輸送解析モデルと組み合わせた解析コードを作成した。

本解析コードは、入射ペレットモデルについては水平方向1次元モデルであるが、2つの代表的な解析モデル（Parks モデル、Strauss モデル）が選択でき、1次元輸送解析モデルを組み合わせたことにより、核融合出力の制御が検討できることが特徴である。

解析コードとして今後の課題としては、

- 1) 入射ペレットモデルの2次元化、もしくは更に精度の高いモデル（流体モデル）の採用
- 2) 1次元輸送解析モデルにおける輸送係数の種類の充実
- 3) 固体ペレットによる燃焼制御法検討のためのフィードバック制御機能の追加

等が考えられる。特に3) はまだあまり手をつけられていない領域であり、2) の輸送係数によっても影響を受けるが、本解析コードもしくはより進歩した本解析コードにより、今後の研究の進展が期待される。

謝辞

本稿に対して数多くの有益なご意見をいただいた日本原子力研究所 竹永秀信 副主任研究員（炉心プラズマ実験計測開発室）に深く感謝致します。

参考文献

- [1] P. B. Parks, W. D. Sessions and L. R. Baylor, *Phys. Plasmas* **7**, 1968 (2000).
- [2] H. R. Strauss and W. Park , *Phys. Plasmas* **5**, 2676 (1998).
- [3] P. T. Lang, K. Buchl, M. Kaufmann, R. S. Lang, V. Mertens, H. W. Muller, J. Neuhauser, ASDEX Upgrade and NI Teams, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1487 (1997).
- [4] L. R. Baylor, T. C. Jernigan, S. K. Combs *et al.*, *Phys. Plasmas* **7**, 1878 (2000).
- [5] J.de Kloe, E. Noordermeer, N. J. Lopes Cardozo and A. A. M. Oomens, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 2685 (1999).
- [6] M. N. Rosenbluth, S. V. Putvinskij and P. B. Parks, *Nucl. Fusion* **37**, 955 (1997).
- [7] B. Pegourie, J. M. Picchiottino, H. W. Drawin, A. Geraud and M. Chatelier, *Nucl. Fusion* **33**, 591 (1993).
- [8] A. R. Polevoi and M Shimada, *Plasma Phys. and Control. Fusion* **43**, 1525 (2001).
- [9] 西尾 敏 他：「核融合動力炉 A - S S T R 2 の物理検討」JAERI-Research 2000-029 (2 0 0 0) .

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
物質質量	モル	mol
光度	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·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·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·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	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	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
線量当量	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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

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	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 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, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 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。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れていない。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

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 cal = 4.18605 J (計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (15 °C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

ペレット入射による燃料供給シミュレーションコードPEPSSI



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています