

JAERI-M

5207

4端子回路網理論による非平衡MHD
発電機の電離緩和現象の解析

1973年3月

白形 弘文

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

4端子回路網理論による非平衡MHD発電機の電離緩和現象の解析

日本原子力研究所東海研究所物理部

白形弘文

(1973年2月13日受理)

4端子回路網理論による非平衡発電特性の2次元解析法を拡張し、非定常状態の特性すなわち多電極ファラデー発電機の電離緩和現象を調べた。この計算法によって、在来の精密解を求める手法では解くことが困難であった多電極発電機全体の電離緩和現象を一度に調べることが可能になった。数値計算は32対の電極を持ち第1電極間に予備電離電極のあるファラデー発電機について行われ、流れに沿う電子密度、電子温度、発電電流の変化などが調べられた。なお、この計算には、壁抵抗の有限性および電離不安定の影響が考慮されている。

Analysis of the Relaxation Phenomena
in Nonequilibrium MHD Generator by
Four-Terminal Network Theory

Hirofumi SHIRAKATA

Division of Physics, Tokai, JAERI

(Received February 13, 1973)

By extending the method for two-dimensional analysis of the electrical characteristics of a nonequilibrium MHD generator using four-terminal network theory, the relaxation phenomena in a multi-electrode generator have been studied.

It is possible by this technique to examine the relaxation phenomena in the multi-electrode generator as a whole, which usually defies the conventional methods.

Numerical calculations are made on the Faraday generator which have 32 electrode pairs and preionizers. The variations in electron density, electron temperature and output current along the generator channel are evaluated, taking into consideration the effects of wall leakage current and electrothermal instability.

目 次 な し

1. ま え が き

最近、非平衡MHD発電機内の2次元電流分布を求める理論的研究も相当進み、電離緩和の効果も考慮される様になつてきた。^(1~3) これらの方法は、流れ関数の方程式 (streamfunction equation : 非線型2階偏微分方程式である)、電子のエネルギー保存の方程式 (energy conservation equation) および連続の式 (continuity equation) の3方程式を連立させて解くため、計算が複雑で、一般に発電流路を入口近傍、中央部、出口近傍の様に分割し、それぞれの場合について解を求めている。一方、実験研究の方は、電流分布を測定する様な基礎実験⁽⁴⁾をのぞき、大部分の研究は、上記理論計算が複雑すぎるので、もつぱら擬一次元理論による解析にたよっているのが現状である。^(5~7)

両者のギャップを埋るべく、著者は精密な理論計算から見出された特徴ある物理的性質の大部分を保持しつつ、かつ実験結果の解析に便利な解法として、4端子回路網理論による非平衡MHD発電特性の2次元解析法を導いた。⁽⁸⁾ ここで、本論文のテーマをはつきりさせるため、まず参考文献(8)の要約を述べる。これはホール効果を考慮した2次元オームの法則が、4端子回路網の基本方程式と同じであることにヒントを得て、トランジスタの等価回路を導く方法を用いて、2次元オームの法則を表現する能動回路網としての基本等価回路を見出したことに始まる。この基本等価回路を合成することによつて、2つの境界層(アノードおよびカソード側)と1つの自由流を持つ多電極フラデー発電機の3層モデルについての合成等価回路をつくった。この回路を用いて回路方程式(これは前記の流れ関数方程式に相当する)が求まる。この方程式は、たとえばS対の電極を持つ発電機ならば、 $\{5(S-1)+1\}$ 元連立一次方程式となる。更に、発電機内のプラズマが定常である(前記精密解のうち発電機中央部の解に相当)と仮定すると、回路方程式は非常に簡単になり3元連立一次方程式となる。この定常解とエネルギー保存の方程式を連立させて解くことによつて非平衡MHD発電特性の定常解を得た。これによつて非平衡発電特性の計算が非常に簡単化され、そのため前述の精密解を求める計算においては計算が複雑なために困難であったところの境界層における電子温度の上昇の効果と電離不安定の効果を同時に含めて計算が出来るようになった。その結果、今まで非平衡特性の劣化原因とのみ考えられていた電離不安定が、境界層の電子温度上昇にともなり、境界層からの電流漏洩を防ぐ働きをしていると言うような興味ある結果が得られた。ついで、この理論の適用性をたしかめるため、我々の実験結果⁽⁹⁾およびBrederlowらの実験結果⁽¹⁰⁾と計算結果の比較検討の結果、両者はよく一致した。上記の理由により、4端子回路網理論による2次元解析法が、非平衡発電特性の解析に非常に有効であることがわかった。以上が参考文献(8)の要約である。

本論文の目的は、この4端子回路網理論による解析を一步進め、非定常状態における解を計算すること、すなわち非平衡MHD発電機の電離緩和現象の解析法を見出すことにある。第2章では、基本方程式と計算方法について述べ、第3章には、数値計算結果と検討事項が記述される。

2. 基本方程式および計算方法

2.1 基本方程式

発電流路内の電離緩和現象の解析をおこなうためには、回路方程式と電子のエネルギー保存方程式と連続の式を連立して解かねばならない。

基本方程式を導くために、前提として、次の2次元条件を仮定する。

(1) 各物理量について、 $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial}{\partial z} = 0$ とする。

(2) 各ベクトル量の成分は、

$$\vec{B} = B \vec{e}_z, \quad \vec{j} = j_x \vec{e}_x + j_y \vec{e}_y, \quad \left. \right\} (1)$$

$$\vec{u} = u \vec{e}_x, \quad \vec{E} = E_x \vec{e}_x + E_y \vec{e}_y,$$

とする。ただし、 \vec{B} は磁場の強さ、 \vec{j} は電流密度、 \vec{u} はガス流速、 \vec{E} は電場、 \vec{e}_x , \vec{e}_y , \vec{e}_z はそれぞれ x , y , z 方向の単位ベクトルである。

(3) イオン・スリッパを無視する。

(4) 2つの境界層（アノードおよびカソード側）と1つの自由流を持つ、流れの3層モデルを仮定する。

(5) 電極降下は無視する。^{*}

(6) 壁抵抗は有限とする。

(7) 電離不安定の効果は計算に入れる。

以上の仮定の下で、各基本方程式を導くことにする。なお単位系はMKS単位系を用いている。

非平衡MHD発電領域での主な再結合形式は、3体再結合であるから、これを考慮して連続の式を導くと次の様になる。

$$u \frac{\partial n_e}{\partial x} = \rho_e (S n_e n_K - n_e^3), \quad (2)$$

ここで、 n_e は電子密度、 n_K は中性のシード物質の原子密度、 ρ_e は3体再結合係数である。

また

$$S = \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\epsilon_i}{k T_e}\right), \quad (3)$$

ただし、 m_e は電子の質量、 T_e は電子温度、 k はボルツマン定数、 h はプランク定数、 ϵ_i はシード物質の電離電圧である。

*これは、外部負荷抵抗の一部と考えると補正可能である。

一方、電子のエネルギー保存の方程式は、

$$\begin{aligned} u \frac{\partial}{\partial x} \left\{ n_e \left(\frac{3}{2} k T_e + \epsilon_i \right) \right\} &= \vec{j}_e \cdot \vec{E}^* - \delta_{\text{eff}} \left(\frac{m_e}{m_a} \right) 3 k (T_e - T_g) \nu_c n_e \\ &= g - \frac{3 k n_e e \delta_{\text{eff}} (T_e - T_g)}{m_a \mu_e}, \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

$$g = \vec{j}_e \cdot \vec{E}^*, \quad \vec{E}^* = \vec{E} + \vec{u} \times \vec{B},$$

$$\nu_c = e^2 n_e / m_e \sigma, \quad \sigma = n_e e \mu_e,$$

なお、 σ は導電率 (理論的な)、 e は電子の電荷、 T_g はガス温度、 μ_e は電子の移動度、 m_a は中性原子の質量、 δ_{eff} は電子の有効エネルギー損失係数 (ただし、弾性衝突のとき $\delta_{\text{eff}} = 1$) である。

回路方程式は、Fig. 1 に示した多電極フラデー発電機の等価回路から閉路方程式 (loop equation) 表示にて次の様になる⁽⁸⁾

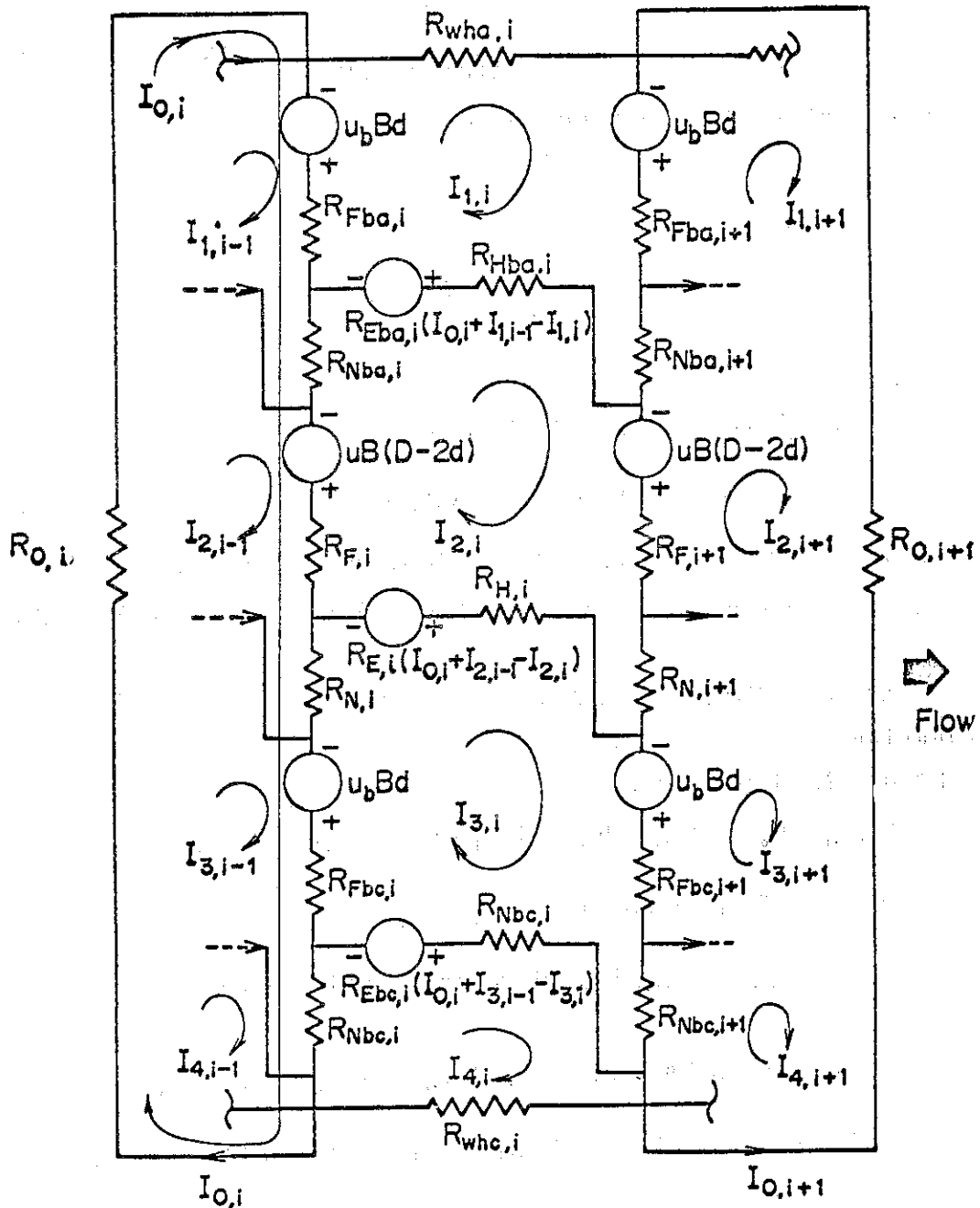
i 番目の電極対間において、

$$\begin{aligned} & (c_{ba,i} + c_{c,i} + c_{bc,i} + R_{o,i}) I_{o,i} + c_{ba,i} I_{1,i-1} - (c_{ba,i} + a_{ba,i}) I_{1,i} \\ & - (c_{o,i} + a_{o,i} - a_{ba,i}) I_{2,i} + c_{o,i} I_{2,i-1} - (c_{bc,i} + a_{bc,i} - a_{o,i}) I_{3,i} \\ & + c_{bc,i} I_{3,i-1} + a_{bc,i} I_{4,i} = B \{ u (D - 2d) + 2u_b d \}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & (R_{wha,i} + c_{ba,i} + c_{ba,i+1} + b_{ba,i}) I_{1,i} + (a_{ba,i} - c_{ba,i}) I_{o,i} \\ & + (a_{ba,i} - c_{ba,i}) I_{1,i-1} + c_{ba,i+1} I_{o,i+1} - (c_{ba,i+1} + a_{ba,i+1}) I_{1,i+1} \\ & + a_{ba,i+1} I_{2,i+1} - (b_{ba,i} + a_{ba,i}) I_{2,i} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & (c_{o,i} + b_{ba,i} + c_{o,i+1} + b_{o,i}) I_{2,i} - (c_{o,i} + a_{ba,i} - a_{o,i}) I_{o,i} \\ & + (a_{o,i} - c_{o,i}) I_{2,i-1} - a_{ba,i} I_{1,i-1} + (a_{ba,i} - b_{ba,i}) I_{1,i} + c_{o,i+1} I_{o,i+1} \\ & - (c_{o,i+1} + a_{o,i+1}) I_{2,i+1} + a_{o,i+1} I_{3,i+1} - (b_{o,i} + a_{o,i}) I_{3,i} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & (c_{bc,i} + b_{o,i} + c_{bc,i+1} + b_{bc,i}) I_{3,i} - (c_{bc,i} + a_{o,i} - a_{bc,i}) I_{o,i} \\ & + (a_{bc,i} - c_{bc,i}) I_{3,i-1} - a_{o,i} I_{2,i-1} + (a_{o,i} - b_{o,i}) I_{2,i} + c_{bc,i+1} I_{o,i+1} \\ & - (c_{bc,i+1} + a_{bc,i+1}) I_{3,i+1} + a_{bc,i+1} I_{4,i+1} - (b_{bc,i} + a_{bc,i}) I_{4,i} = 0, \end{aligned} \quad (8)$$



$$\begin{aligned}
 R_{Fba,i} &= \left(\frac{1}{\sigma_{ba,i}}\right) \frac{d}{LH} + \left(\frac{\beta_{ba,i}}{\sigma_{ba,i}}\right) \frac{1}{H}, & R_{Hba,i} &= \left(\frac{1}{\sigma_{ba,i}}\right) \frac{L}{dH} + \left(\frac{\beta_{ba,i}}{\sigma_{ba,i}}\right) \frac{1}{H}, & R_{Nba,i} &= -\left(\frac{\beta_{ba,i}}{\sigma_{ba,i}}\right) \frac{1}{H}, \\
 R_{F,i} &= \left(\frac{\beta_i}{\sigma_i}\right) \frac{(D-2d)}{LH} + \left(\frac{\beta_i}{\sigma_i}\right) \frac{1}{H}, & R_{H,i} &= \left(\frac{1}{\sigma_i}\right) \frac{L}{(D-2d)H} + \left(\frac{\beta_i}{\sigma_i}\right) \frac{1}{H}, & R_{N,i} &= -\left(\frac{\beta_i}{\sigma_i}\right) \frac{1}{H}, \\
 \frac{1}{R_{0,i}} &= \frac{1}{R_{wf,i}} + \frac{1}{R_{L,i}}, & R_{Eba,i} &= 2\left(\frac{\beta_{ba,i}}{\sigma_{ba,i}}\right) \frac{1}{H}, & R_{E,i} &= 2\left(\frac{\beta_i}{\sigma_i}\right) \frac{1}{H},
 \end{aligned}$$

Fig. 1 Equivalent circuit for a multi-electrode Faraday generator. (8)

$$(R_{whc,i} + b_{bc,i}) I_{4,i} - a_{bc,i} I_{0,i} - a_{bc,i} I_{3,i-1} + (a_{bc,i} - b_{bc,i}) I_{3,i} = 0, \quad (9)$$

ここで,
$$\frac{1}{R_{0,i}} = \frac{1}{R_{L,i}} + \frac{1}{R_{wf,i}},$$

$$a_{ba,i} = \left(\frac{\beta_{ba,i}}{\sigma_{ba,i}}\right) \frac{1}{H}, \quad b_{ba,i} = \left(\frac{1}{\sigma_{ba,i}}\right) \frac{L}{dH}, \quad c_{ba,i} = \left(\frac{1}{\sigma_{ba,i}}\right) \frac{d}{LH},$$

$$a_{bc,i} = \left(\frac{\beta_{bc,i}}{\sigma_{bc,i}}\right) \frac{1}{H}, \quad b_{bc,i} = \left(\frac{1}{\sigma_{bc,i}}\right) \frac{L}{dH}, \quad c_{bc,i} = \left(\frac{1}{\sigma_{bc,i}}\right) \frac{d}{LH},$$

$$a_{0,i} = \left(\frac{\beta_i}{\sigma_i}\right) \frac{1}{H}, \quad b_{0,i} = \left(\frac{1}{\sigma_i}\right) \frac{L}{(D-2d)H}, \quad c_{0,i} = \left(\frac{1}{\sigma_i}\right) \frac{(D-2d)}{LH},$$

なお, D は対向電極の間, H はプラズマ流路の高さ, d は境界層の厚さ, L は1電極ピッチの長さ, β はホール係数, I は閉回路電流, u_b は境界層のガス流速である。また, 添字 ba はアノード側境界層, bc はカソード側境界層, 0 は自由流, i は電極対番号を示している。

今, 電極対の数が S 対のファラデー発電機の場合, 閉路方程式の数は $\{5(S-1)+1\}$ コとなる。したがって, すべてのプラズマ・パラメーターが各回路網ごとに異なっているような非定常の場合, $\{5(S-1)+1\}$ 元連立一次方程式を解けばよいことになる。

以上の3種の方程式が, 電離緩和現象を解析するための基本方程式である。今, 電離不安定の効果を考慮しないときは, 上記の方程式を解いて行けばよい。しかしながら非平衡MHD発電実験の結果⁽⁵⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は, 電離不安定の存在を確認しているのので, 非平衡MHD発電特性の解析に, この効果を無視することは出来ない。

一方, 電離不安定についての研究⁽¹¹⁾⁽¹²⁾から, 電離不安定があるとき, オームの法則に使用する導電率とホール係数は理論値ではなく有効値を用いなければならないことがわかっている。理論的な導電率 σ およびホール係数 β と有効導電率 σ_{eff} と有効ホール係数 β_{eff} の関係は, 上記研究結果などからだいたい求められている。たとえば Solbes はクーロン衝突が支配的の場合, 次の式を得ている。⁽¹²⁾

$\beta \leq \beta_{crit}$ のとき,

$$\sigma_{eff} = \sigma, \quad \beta_{eff} = \beta, \quad (10)$$

$\beta > \beta_{crit}$ のとき,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{eff} &= \left(\frac{\beta_{crit}}{\beta}\right) \sigma, \\ \beta_{eff} &= (\beta_{crit} - 1) + \frac{\beta_{crit}}{\beta}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ただし、 β_{crit} はクリティカル・ホール係数である。なお、 σ 、 β と σ_{eff} 、 β_{eff} の関係式の適用性については、参考文献(8)に述べられている。

したがって、電離不安定の効果を入れて基本方程式を解く場合には、エネルギー保存の方程式(4式)に用いられている導電率は理論値 σ を使い、閉路方程式((5~9)式)に用いられている導電率およびホール係数は、それぞれ有効値 σ_{eff} 、 β_{eff} を使用して計算すればよいことになる。

以後の計算においては、電離不安定の効果を考慮したものを取扱うので、(5~9)式に用いられているパラメーター a 、 b 、 c は、いずれも有効値 σ_{eff} 、 β_{eff} を使用していることに注意する必要がある。

2.2 電子温度および電子密度の計算公式

MHD発電機の電離緩和現象の計算は、一口で言えば前節で導いた基本方程式を解けばよいということになるが、方程式はそれぞれ非線形である上に、発電機の電極数が多いときは閉路方程式は相当大きな多元連立方程式*となるので、実際問題として簡単に解くことは出来ない。

そこで、MHD流路内プラズマの電子温度 T_e の緩和時間が電子密度 n_e の緩和時間にくらべて充分短いという性質を利用して、(2)式と(4)式を線形化した。すなわち、

(1) 電子温度緩和領域において、 $n_e = \text{定数}$ 、

(2) 電子密度緩和領域において、 $T_e = \text{定数}$ 、

と仮定する。この状態をFig.2に示す。

以上の仮定に基づいて、自由流中で $(i-1)$ 番回路網から i 番回路網へ移る場合についての(2)式と(4)式の解を求めてみる。

(a) 電子温度緩和領域 ($0 \leq x \leq \Delta L(T_{e,i})$)

この領域において、電子密度は $n_{e,i-1}$ の値に保存され、 $\frac{dn_e}{dt} = 0$ である。ここで、 $\Delta L(T_{e,i})$ は電子温度が $T_{e,i}$ に到達する最終到達距離**である。本論文では、最終到達距離 $\Delta L(T_{e,i}) = 5 l_{Te,i}$ と定義した。ただし、 $l_{Te,i}$ は電子温度緩和距離である。したがって、この領域において(4)式は、

$$\frac{3}{2} k u n_e \frac{dT_e}{dx} = g - \frac{3 k n_e e \delta_{eff} (T_e - T_g)}{m_a \mu_e} \tag{12}$$

となる。今回は $(i-1)$ 番回路網から i 番回路網へ移る間の現象を考えているのであるから、次の様に物理量を変換する。

$$\left. \begin{aligned} n_e &\rightarrow n_{e,i-1} & g &\rightarrow G_i = \frac{g_{i-1} + g_i}{2} \\ \mu_e &\rightarrow \bar{\mu}_{e,i} = \frac{\mu_{e,i-1} + \mu_{e,i}}{2} \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

* 今回の計算では、電極対数 $S = 42$ を取ったので、閉路方程式は、206元連立一次方程式となった。

**一般に、 $\Delta L(T_{e,i}) \ll L$ である。

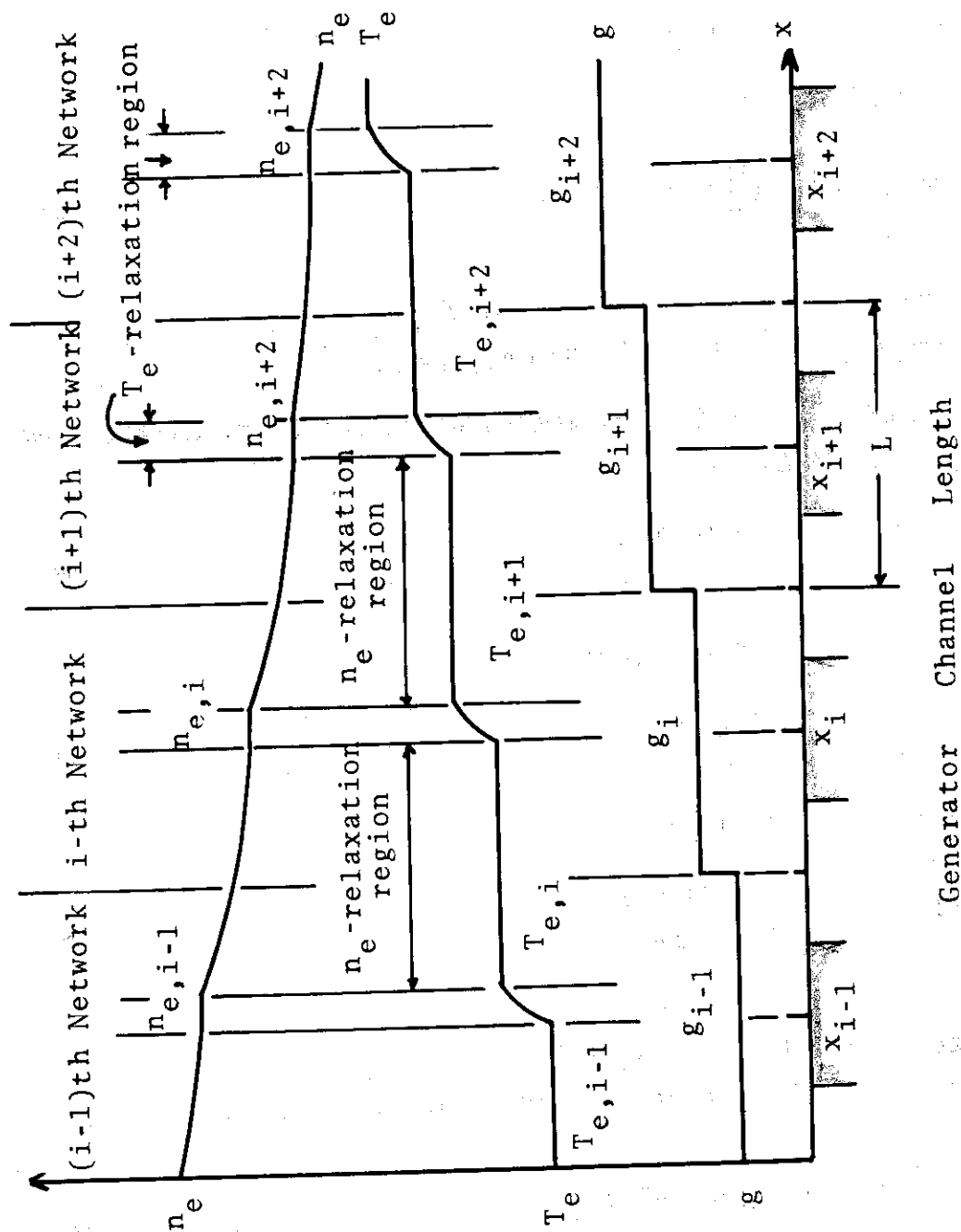


Fig. 2 Schematic representation of variations of electron temperature, electron density and the electron heating term, for numerical calculation.

これらの量は、いずれもこの範囲で定数である。すると(12)式は次のように書きかえられる。

$$\frac{dT_e}{dx} + \left(\frac{2e\delta_{eff}}{um_a \bar{\mu}_{e,i}} \right) T_e = \frac{2G_i}{3ukn_{e,i-1}} + \frac{2e\delta_{eff} T_g}{um_a \bar{\mu}_{e,i}} \quad (14)$$

これは、一階線形常微分方程式であるので、簡単に解ける。今、初期条件として、

$$x=0 \text{ にて, } T_e = T_{e,i-1}$$

を仮定すると、(14)式は次のようになる。

$$T_e = T_{e,i-1} e^{-Px} + \left(\frac{Q}{P} \right) (1 - e^{-Px}), \quad (15)$$

ただし、

$$P = \frac{2e\delta_{eff}}{um_a \bar{\mu}_{e,i}}, \quad \frac{Q}{P} = T_g + \frac{m_a G_i \bar{\mu}_{e,i}}{3ken_{e,i-1} \delta_{eff}}$$

(15)式から明らかのように、 x を大きくすると、右辺第1項は零に近づくので、最終到達電子温度 $T_{e,i}$ は $T_{e,i-1}$ に無関係となり、

$$T_{e,i} = \frac{Q}{P} = T_g + \frac{m_a G_i \bar{\mu}_{e,i}}{3ken_{e,i-1} \delta_{eff}} \quad (16)$$

となる。ここで、電子温度緩和距離 $l_{Te,i}$ は、

$$l_{Te,i} = \frac{1}{P} = \frac{um_a \bar{\mu}_{e,i}}{2e\delta_{eff}} \quad (17)$$

であるから、最終到達距離 $\Delta L(T_{e,i})$ は、

$$\Delta L(T_{e,i}) = 5 l_{Te,i} = \frac{5um_a \bar{\mu}_{e,i}}{2e\delta_{eff}} \quad (18)$$

となる。^{*}

(b) 電子密度緩和領域 $\{\Delta L(T_{e,i}) \leq x \leq L\}$

この領域では、電子温度は $T_{e,i}$ (定数)である。すると(2)式は、次のようになる。

$$\frac{dn_e}{dx} = \frac{\rho_{e,i}}{u} (n_{e\infty,i}^2 n_e - n_e^3) \quad (19)$$

* $x \gg 0$ なる領域で、(15)式は次のようになる。

$$T_e \approx \left(\frac{Q}{P} \right) (1 - e^{-Px})$$

したがって、 $l_{Te,i} = (1/P)$ においてよいことがわかる。また、 $x = 5 l_{Te,i}$ の点で、 T_e は最終到達電子温度の 99.34% に達するので、この距離を最終到達距離 $\Delta L(T_{e,i})$ と考えてもさしつかえないであろう。

ただし, $n_{e\infty,i}^2 = S(T_{e,i}) n_K$

今ここで, シード物質が弱電離状態にあるとする。すなわち, $n_K \approx n_K + n_e = n_{K0}$ を仮定すると, $n_{e\infty,i}$ は(8)式より

$$n_{e\infty,i}^2 = n_{K0} \left(\frac{2\pi m_e k T_{e,i}}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\epsilon_i}{k T_{e,i}}\right) \quad (20)$$

となり, 定数となる。

一方, 再結合係数 $\rho_{e,i}$ も $T_{e,i}$ の関数であるので, これも定数と考えることが出来る。電子-電子-イオン三体再結合係数としては, たとえば Hinno⁽¹³⁾ は,

$$\rho_{e,i} = \frac{1.1 \times 10^{-20}}{T_{e,i}^{4.5}}, \quad (\text{m}^6/\text{sec}) \quad (21)$$

と表わしている。

つぎに, $x' = x - \Delta L(T_{e,i})$ なる変換をおこない, $x' = 0$ にて, $n_e = n_{e,i-1}$ なる初期条件で, (10) 式を解いて, $x' = L - \Delta L(T_{e,i}) \equiv \Delta x_i$ なる位置における電子密度 $n_{e,i}$ は次の式のようになる。

$$\left(\frac{n_{e,i}}{n_{e\infty,i}} \right)^2 = \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{n_{e\infty,i}}{n_{e,i-1}} \right)^2 - 1 \right\} \exp\left(-\frac{2n_{e\infty,i}^2 \rho_{e,i} \Delta x_i}{u}\right)} \quad (22)$$

この式を用いて, i 番目の回路網の電子密度 $n_{e,i}$ が求まる。

以上の結果, 各回路網中の電子温度と電子密度は, それぞれ(10)式および(22)式から計算できる。この計算に必要な電子加熱項 g の計算式は, 文献(8)に記載されているが, 以下再記しておく。

(1) アノード側境界層で

$$g_{ba,i} = \left(\frac{1}{\sigma_{ba,i}} \right) \left\{ \left(\frac{I_{0,i} + I_{1,i-1} - I_{1,i}}{LH} \right)^2 + \left(\frac{I_{2,i} - I_{1,i}}{dH} \right)^2 \right\}, \quad (23)$$

(2) 自由流で

$$g_i = \left(\frac{1}{\sigma_i} \right) \left\{ \left(\frac{I_{0,i} + I_{2,i-1} - I_{2,i}}{LH} \right)^2 + \left(\frac{I_{3,i} - I_{2,i}}{(D-2d)H} \right)^2 \right\}, \quad (24)$$

(3) カソード側境界層で

$$g_{bc,i} = \left(\frac{1}{\sigma_{bc,i}} \right) \left\{ \left(\frac{I_{0,i} + I_{3,i-1} - I_{3,i}}{LH} \right)^2 + \left(\frac{I_{4,i} - I_{3,i}}{dH} \right)^2 \right\}, \quad (25)$$

ただし, 電離不安定があるとき, (23~25) 式に使用する導電率 $\sigma_{ba,i}$, σ_i , $\sigma_{bc,i}$ はすべて有効導電率 σ_{eff} を用いなければならない。

2.3 閉路方程式および電位分布の計算公式

閉路方程式は $\{5(S-1)+1\}$ 元連立一次方程式をそのまま解くことになるが、全体を一度に解くことはなかなか困難である。

そこで、別の数値解法をさがすべく、(5~9)式の特徴を調べると、これらの式は5元連立一次方程式のくりかえしの形をしている(未知数の数が多いので、このままでは解けないが)。このような形の式は、楕円型偏微分方程式の数値解法⁽¹⁴⁾の技術を応用して解くことが出来る。具体的計算方法については、§2.4で述べる。ここでは、計算に利用する公式を示すにとどめる。

まず、電位分布については、⁽⁸⁾

(1) アノード境界層で

$$V_{Fba,i} = u_b B d - c_{ba,i} (I_{0,i} + I_{1,i-1} - I_{1,i}) - a_{ba,i} (I_{2,i} - I_{1,i}), \quad (26)$$

$$V_{Hba,i} = a_{ba,i} (I_{0,i} + I_{1,i-1} - I_{1,i}) - b_{ba,i} (I_{2,i} - I_{1,i}), \quad (27)$$

(2) 自由流で

$$V_{F,i} = u B (D - 2d) - c_{0,i} (I_{0,i} + I_{2,i-1} - I_{2,i}) - a_{0,i} (I_{3,i} - I_{2,i}), \quad (28)$$

$$V_{H,i} = a_{0,i} (I_{0,i} + I_{2,i-1} - I_{2,i}) - b_{0,i} (I_{3,i} - I_{2,i}), \quad (29)$$

(3) カソード境界層で

$$V_{Fbc,i} = u_b B d - c_{bc,i} (I_{0,i} + I_{3,i-1} - I_{3,i}) - a_{bc,i} (I_{4,i} - I_{3,i}), \quad (30)$$

$$V_{Hbc,i} = a_{bc,i} (I_{0,i} + I_{3,i-1} - I_{3,i}) - b_{bc,i} (I_{4,i} - I_{3,i}), \quad (31)$$

ここで、 V_F 、 V_H は、それぞれフララデーおよびホール方向の電位差を示す。

つぎに、出力電圧 V_L およびホール方向の壁電圧 V_{wh} の i 番目の成分は、

$$V_{L,i} = R_{0,i} I_{0,i}, \quad (32)$$

$$V_{wha,i} = -R_{wha,i} I_{1,i}, \quad (33)$$

$$V_{whc,i} = R_{whc,i} I_{4,i}. \quad (34)$$

最後に、閉路方程式は、(5~9)式を変形し、次のような5元連立一次方程式群が出来る。まず $i=1$ のループについて考えると、 $I_{j,0} = 0$ 、 $(j=0, 1, \dots, 4)$ だから、閉路方程式は、

$$\begin{pmatrix} A_{1,1}^1 & A_{1,2}^1 & A_{1,3}^1 & A_{1,4}^1 & A_{1,5}^1 \\ A_{2,1}^1 & A_{2,2}^1 & A_{2,3}^1 & 0 & 0 \\ A_{3,1}^1 & A_{3,2}^1 & A_{3,3}^1 & A_{3,4}^1 & 0 \\ A_{4,1}^1 & 0 & A_{4,3}^1 & A_{4,4}^1 & A_{4,5}^1 \\ A_{5,1}^1 & 0 & 0 & A_{5,4}^1 & A_{5,5}^1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{0,1} \\ I_{1,1} \\ I_{2,1} \\ I_{3,1} \\ I_{4,1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{1,1} \\ f_{2,1} \\ f_{3,1} \\ f_{4,1} \\ f_{5,1} \end{pmatrix} \quad (35)$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 A_{1,1}^1 &= c_{ba,1} + c_{0,1} + c_{bc,1} \\
 A_{1,2}^1 &= -(c_{ba,1} + a_{ba,1}) \\
 A_{1,3}^1 &= -(c_{0,1} + a_{0,1} - a_{ba,1}) \\
 A_{1,4}^1 &= -(c_{bc,1} + a_{bc,1} - a_{0,1}) \\
 A_{1,5}^1 &= a_{bc,1} \\
 A_{2,1}^1 &= a_{ba,1} - c_{ba,1} \\
 A_{2,2}^1 &= R_{wha,1} + c_{ba,1} + c_{ba,2} + b_{ba,1} \\
 A_{2,3}^1 &= -(b_{ba,1} + a_{ba,1}) \\
 A_{3,1}^1 &= -(c_{0,1} + a_{ba,1} - a_{0,1}) \\
 A_{3,2}^1 &= a_{ba,1} - b_{ba,1} \\
 A_{3,3}^1 &= c_{0,1} + b_{ba,1} + c_{0,2} + b_{0,1} \\
 A_{3,4}^1 &= -(b_{0,1} + a_{0,1}) \\
 A_{4,1}^1 &= -(c_{bc,1} + a_{0,1} - a_{bc,1}) \\
 A_{4,3}^1 &= a_{0,1} - b_{0,1} \\
 A_{4,4}^1 &= c_{bc,1} + b_{0,1} + c_{bc,2} + b_{bc,1} \\
 A_{4,5}^1 &= -(b_{bc,1} + a_{bc,1}) \\
 A_{5,1}^1 &= -a_{bc,1} \\
 A_{5,4}^1 &= a_{bc,1} - b_{bc,1} \\
 A_{5,5}^1 &= R_{whc,1} + b_{bc,1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{1,1} &= \{ B \{ u (D-2d) + 2u_b d \} - V_{L,1} \} \\
 f_{2,1} &= -c_{ba,2} I_{0,2} + (c_{ba,2} + a_{ba,2}) I_{1,2} - a_{ba,2} I_{2,2} \\
 f_{3,1} &= -c_{0,2} I_{0,2} + (c_{0,2} + a_{0,2}) I_{2,2} - a_{0,2} I_{3,2} \\
 f_{4,1} &= -c_{bc,2} I_{0,2} + (c_{bc,2} + a_{bc,2}) I_{3,2} - a_{bc,2} I_{4,2} \\
 f_{5,1} &= 0 .
 \end{aligned}$$

つぎに、 $2 \leq i \leq (S-2)$ 間のループでは、

$$\begin{bmatrix} A_{1,1}^i & A_{1,2}^i & A_{1,3}^i & A_{1,4}^i & A_{1,5}^i \\ A_{2,1}^i & A_{2,2}^i & A_{2,3}^i & 0 & 0 \\ A_{3,1}^i & A_{3,2}^i & A_{3,3}^i & A_{3,4}^i & 0 \\ A_{4,1}^i & 0 & A_{4,3}^i & A_{4,4}^i & A_{4,5}^i \\ A_{5,1}^i & 0 & 0 & A_{5,4}^i & A_{5,5}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{0,i} \\ I_{1,i} \\ I_{2,i} \\ I_{3,i} \\ I_{4,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{1,i} \\ f_{2,i} \\ f_{3,i} \\ f_{4,i} \\ f_{5,i} \end{bmatrix} \quad (36)$$

ただし、 $A_{1,1}^i = c_{ba,i} + c_{0,i} + c_{bc,i} + R_{0,i}$,

$$\begin{aligned}
 A_{1,2}^i &= -(c_{ba,i} + a_{ba,i}) , \\
 A_{1,3}^i &= -(c_{0,i} + a_{0,i} - a_{ba,i}) , \\
 A_{1,4}^i &= -(c_{bc,i} + a_{bc,i} - a_{0,i}) , \\
 A_{1,5}^i &= a_{bc,i} , \\
 A_{2,1}^i &= a_{ba,i} - c_{ba,i} , \\
 A_{2,2}^i &= R_{wha,i} + c_{ba,i} + c_{ba,i+1} + b_{ba,i} , \\
 A_{2,3}^i &= -(b_{ba,i} + a_{ba,i}) , \\
 A_{3,1}^i &= -(c_{0,i} + a_{ba,i} - a_{0,i}) , \\
 A_{3,2}^i &= a_{ba,i} - b_{ba,i} , \\
 A_{3,3}^i &= c_{0,i} + b_{ba,i} + c_{0,i+1} + b_{0,i} , \\
 A_{3,4}^i &= -(b_{0,i} + a_{0,i}) , \\
 A_{4,1}^i &= -(c_{bc,i} + a_{0,i} - a_{bc,i}) ,
 \end{aligned}$$

$$A_{4,3}^i = (a_{0,i} - b_{0,i}) ,$$

$$A_{4,4}^i = c_{bc,i} + b_{0,i} + c_{bc,i+1} + b_{bc,i} ,$$

$$A_{4,5}^i = -(b_{bc,i} + a_{bc,i}) ,$$

$$A_{5,1}^i = -a_{bc,i} ,$$

$$A_{3,4}^i = (a_{bc,i} - b_{bc,i}) ,$$

$$A_{5,5}^i = R_{whc,i} + b_{bc,i} ,$$

$$f_{1,i} = B \{ u (D - 2d) + 2u_b d \} - c_{ba,i} I_{1,i-1} - c_{0,i} I_{2,i-1} - c_{bc,i} I_{3,i-1} ,$$

$$f_{2,i} = -(a_{ba,i} - c_{ba,i}) I_{1,i-1} - c_{ba,i+1} I_{0,i+1} + (c_{ba,i+1} + a_{ba,i+1}) I_{1,i+1} - a_{ba,i+1} I_{2,i+1} ,$$

$$f_{3,i} = -(a_{0,i} - c_{0,i}) I_{2,i-1} + a_{ba,i} I_{1,i-1} - c_{0,i+1} I_{0,i+1} + (c_{0,i+1} + a_{0,i+1}) I_{2,i+1} - a_{0,i+1} I_{3,i+1} ,$$

$$f_{4,i} = -(a_{bc,i} - c_{bc,i}) I_{3,i-1} + a_{0,i} I_{2,i-1} - c_{bc,i+1} I_{0,i+1} + (c_{bc,i+1} + a_{bc,i+1}) I_{3,i+1} - a_{bc,i+1} I_{4,i+1} ,$$

$$f_{5,i} = a_{bc,i} I_{3,i-1} .$$

$i = S - 1$ ループでは、 $I_{1,S} = I_{2,S} = I_{3,S} = I_{4,S} = 0$ であるから、閉路方程式は次の様になる。

$$\begin{bmatrix} A_{1,1}^{S-1} & A_{1,2}^{S-1} & A_{1,3}^{S-1} & A_{1,4}^{S-1} & A_{1,5}^{S-1} \\ A_{2,1}^{S-1} & A_{2,2}^{S-1} & A_{2,3}^{S-1} & 0 & 0 \\ A_{3,1}^{S-1} & A_{3,2}^{S-1} & A_{3,3}^{S-1} & A_{3,4}^{S-1} & 0 \\ A_{4,1}^{S-1} & 0 & A_{4,3}^{S-1} & A_{4,4}^{S-1} & A_{4,5}^{S-1} \\ A_{5,1}^{S-1} & 0 & 0 & A_{5,4}^{S-1} & A_{5,5}^{S-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{0,S-1} \\ I_{1,S-1} \\ I_{2,S-1} \\ I_{3,S-1} \\ I_{4,S-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{1,S-1} \\ f_{2,S-1} \\ f_{3,S-1} \\ f_{4,S-1} \\ f_{5,S-1} \end{bmatrix} , \quad (37)$$

ただし、

$$A_{1,1}^{S-1} = c_{ba,S-1} + c_{0,S-1} + c_{bc,S-1} ,$$

$$A_{1,2}^{S-1} = -(c_{ba,S-1} + a_{ba,S-1}) ,$$

$$A_{1,3}^{S-1} = (c_{0,S-1} + a_{0,S-1} - a_{ba,S-1})$$

$$A_{1,4}^{S-1} = -(c_{bc,S-1} + a_{bc,S-1} - a_{0,S-1})$$

$$A_{1,5}^{S-1} = a_{bc,S-1}$$

$$A_{2,1}^{S-1} = a_{ba,S-1} - c_{ba,S-1}$$

$$A_{2,2}^{S-1} = R_{wha,S-1} + c_{ba,S-1} + c_{ba,S} + b_{ba,S-1}$$

$$A_{2,3}^{S-1} = -(b_{ba,S-1} + a_{ba,S-1})$$

$$A_{3,1}^{S-1} = -(c_{0,S-1} + a_{ba,S-1} - a_{0,S-1})$$

$$A_{3,2}^{S-1} = a_{ba,S-1} - b_{ba,S-1}$$

$$A_{3,3}^{S-1} = c_{0,S-1} + b_{ba,S-1} + c_{0,S} + b_{0,S-1}$$

$$A_{3,4}^{S-1} = -(b_{0,S-1} + a_{0,S-1})$$

$$A_{4,1}^{S-1} = -(c_{bc,S-1} + a_{0,S-1} - a_{bc,S-1})$$

$$A_{4,3}^{S-1} = (a_{0,S-1} - b_{0,S-1})$$

$$A_{4,4}^{S-1} = c_{bc,S-1} + b_{0,S-1} + c_{bc,S} + b_{bc,S-1}$$

$$A_{4,5}^{S-1} = -(b_{bc,S-1} + a_{bc,S-1})$$

$$A_{5,1}^{S-1} = -a_{bc,S-1}$$

$$A_{5,4}^{S-1} = (a_{bc,S-1} - b_{bc,S-1})$$

$$A_{5,5}^{S-1} = R_{whc,S-1} + b_{bc,S-1}$$

$$f_{1,S-1} = [B\{u(D-2d) + 2u_b d\} - V_{L,S-1}] - c_{ba,S-1} I_{1,S-2}$$

$$- c_{0,S-1} I_{2,S-2} - c_{bc,S-1} I_{3,S-2}$$

$$f_{2,S-1} = -(a_{ba,S-1} - c_{ba,S-1}) I_{1,S-2} - c_{ba,S} I_{0,S}$$

$$f_{3,S-1} = -(a_{0,S-1} - c_{0,S-1}) I_{2,S-2} + a_{ba,S-1} I_{1,S-2} - c_{0,S} I_{0,S}$$

$$f_{4,S-1} = -(a_{bc,S-1} - c_{bc,S-1}) I_{3,S-2} + a_{0,S-1} I_{2,S-2} - c_{bc,S} I_{0,S}$$

$$f_{5,S-1} = a_{bc,S-1} I_{3,S-2}$$

i = S ループ, すなわち最終ループでは, 出力電流 $I_{0,S}$ は次の様に簡単になる。

$$I_{0,S} = \frac{\{B\{u(D-2d)+2u_b d\}-V_{L,S}\}-c_{ba,S}I_{1,S-1}-c_{0,S}I_{2,S-1}-c_{bc,S}I_{3,S-1}}{(c_{ba,S}+c_{0,S}+c_{bc,S})}$$

(38)

以上の公式を用いて電離緩和現象の計算が出来る。

2.4 数値計算の方法

発電流路内の電離緩和現象の数値計算は、基本的にはエネルギー保存の式の近似解(18)式と連続の式の近似解(22)式および閉路方程式群(35~38)式を連立させて解けばよい。

まず、計算に用いる発電流路のモデルとして、我々が非平衡発電実験用に製作したC-51発電チャンネル⁽⁹⁾の幾何学的配置を採用した。すなわち、第1電極対間に予備電離機構があり、32対の電極を持つフラデー発電機である。

ここで、計算にあたり、次の仮定を追加する。

- (1) 発電流路の末端効果を考慮して、第1電極の上流に5対分の、最終電極の後方に5対分のループを加える。
- (2) 発電機の上流と下流のホール方向の壁抵抗 R_{whs} を一定(アノードおよびカソード側共通)とする。また、発電機内のホール方向の壁抵抗 R_{wh} を一定とする。
- (3) 境界層のガス流速 u_0 を自由流の流速 u の半分とする。
- (4) 第1電極間には、予備電離のため、自由流においては電子温度 T_{ep} および境界層においては温度 T_{epb} におけるSahaの平衡状態にあるとする。また第1電極より上流の各ループは、定常状態にあるとする。
- (5) 電子の移動度 μ_e は電子温度のみの関数とする。

仮定(5)に述べた電子の移動度 μ_e は、カリウムをシードしたアルゴンガスについて、当研究室でくわしく計算されている⁽¹⁵⁾。実際の計算では、これら μ_e の計算値に最小自乗法で合わせた次の様な T_e の多項式を用いた。

$$\mu_e = \alpha_0 + \alpha_1 T_e + \alpha_2 T_e^2$$

(39)

ただし、 α_0 、 α_1 、 α_2 はそれぞれ定数である。一方、導電率およびホール係数の理論値は、それぞれ次の式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= en_{e,i} \mu_{e,i} \\ \beta_i &= \mu_{e,i} B \end{aligned} \right\}$$

(40)

なお、再結合係数は(21)式を基準にして計算した。

以上の条件のもとで、FACOM 230-60用のプログラムを作製した。解法としては、閉路方程式を偏微分方程式のポイント法⁽¹⁴⁾を修正した方法で解き、その結果をエネルギーの式および連続の式に代入し、全体を反復(Iteration)法で解く方法を採用した。プログラムの詳細は“付録A”に記載されている。

3. 数値計算結果および検討

3.1 入力データおよび計算の経過

第2章で述べた公式を用い、付録Aに記載されているプログラムを使用して計算を行った。発電回路の寸法はC-51発電チャンネル⁽⁹⁾の値を採用した。そこで、この計算に使用した入力データは、次の様にとった。

$$D = 5 \text{ cm}, \quad H = 1.5 \text{ cm}, \quad L = 0.6 \text{ cm}, \quad d = 0.3 \text{ cm},$$

$$R_{wh} = 2 \times 10^4 \Omega, \quad R_{whs} = 3 \times 10^4 \Omega, \quad B = 1.46 \text{ T}, \quad \beta_{crit} = 2.0,$$

$$K_{L,in} = K_{L,ex} = 0.99, \quad u = 320.0 \text{ m/sec}, \quad T_g = 1800^\circ \text{K},$$

$$T_{gb} = 1600^\circ \text{K}, \quad \delta_{eff} = 15, \quad p = 1 \text{ atm}, \quad R_0 = 300 \Omega$$

であった。ここで、作動流体はカリウムをシードしたアルゴンである。シード比は、0.07%と仮定したので、カリウムの原子数密度 $n_{K0} = 2.86 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ となった。なお上記の記号の説明は、“付録A”に示した。

数値計算は、予備電離電極の位置の電子温度 T_{ep} 、 T_{ebp} 、上流電極対(162電極~164電極間)の外部負荷抵抗 $R_{0,in}$ および再結合係数 ρ_e を可変パラメータとして行った。

この計算は、206元連立一次方程式と連続の式およびエネルギーの式を組合せた、非線型連立方程式を解くことにあるので、計算が複雑となり、このプログラムによる計算ではすべてのパラメータについて収束すると言いつけにはいかなかった。一般に、 $T_{ep}, T_{ebp} \gg T_g, T_{gb}$ なる条件下では容易に収束するが、 T_{ep}, T_{ebp} が T_g, T_{gb} に近いときは収束困難であった。収束した場合の計算時間は、FACOM 230-60で、1ケースあたりCPU時間で約450秒であった。今後の問題としては、計算時間短縮のためのプログラム開発が必要である。以下に述べる計算結果は収束したケースについての例を示したものである。

3.2 数値計算結果

前述の方法によつて得られた計算結果を、電離緩和時間が短いときと長いときについての、流れに沿うプラズマ諸量の変化と言う形にまとめてみた。

まず、電子密度の緩和時間が比較的短い(再結合係数 ρ_e が、Hinnovらの式*で求めた再結合係数 ρ_e (Hinnov)の6倍の大きさをもつとき)場合についての、流れに沿う電子密度、電子温度、出力電流の変化を、それぞれFig.3, Fig.4およびFig.5に示す。

一方、電子密度の緩和時間が比較的長い($\rho_e = \rho_e$ (Hinnov))の場合の、流れに沿う電子密度、電子温度、出力電流の変化を、それぞれFig.6, Fig.7およびFig.8に示す。

上記のグラフの比較から、次のようなことがわかる。まず、電子密度の変化をみると、中心

* (21)式。

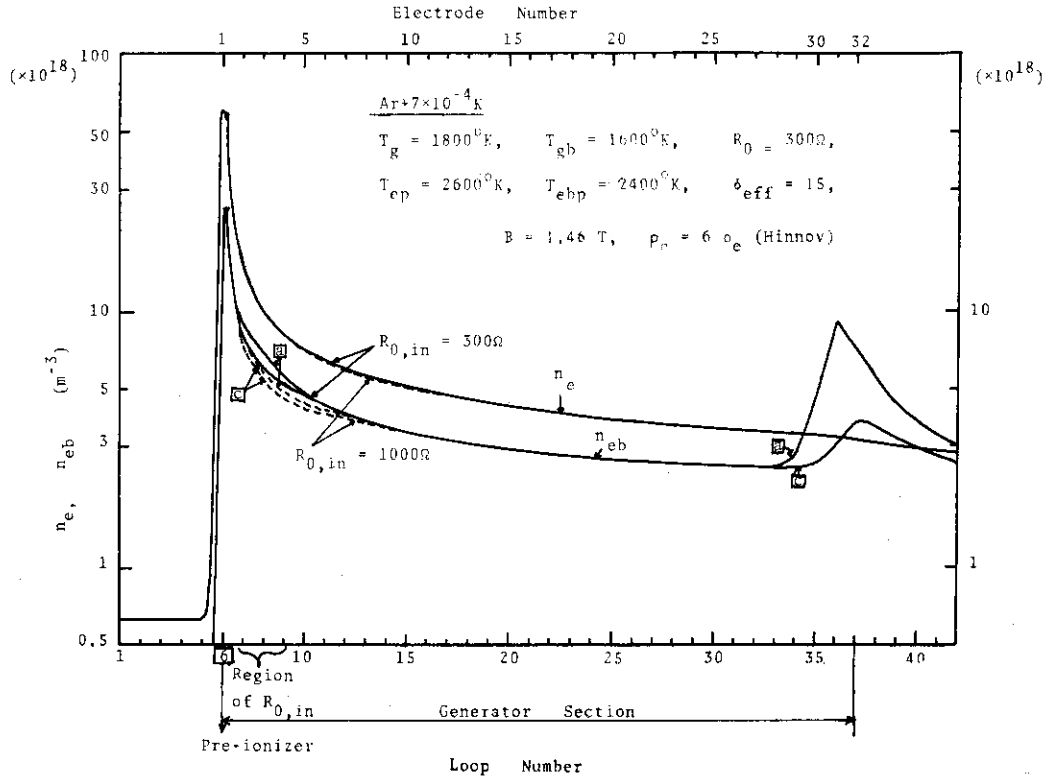


Fig. 3 Variation of electron density along the generator channel, for $\rho_e = 6\rho_e \text{ (Hinnov)}$, where $\rho_e \text{ (Hinnov)}$ is the recombination coefficient calculated from eq. (21).

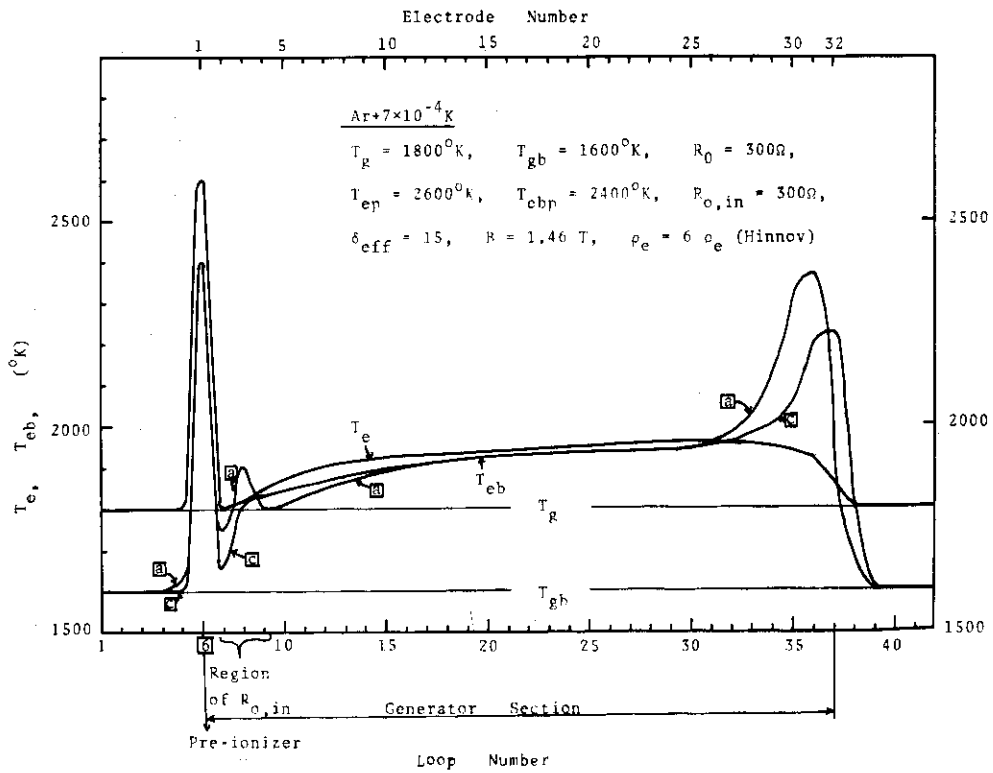


Fig. 4 Variation of electron temperature along the generator channel, for $\rho_e = 6\rho_e \text{ (Hinnov)}$.

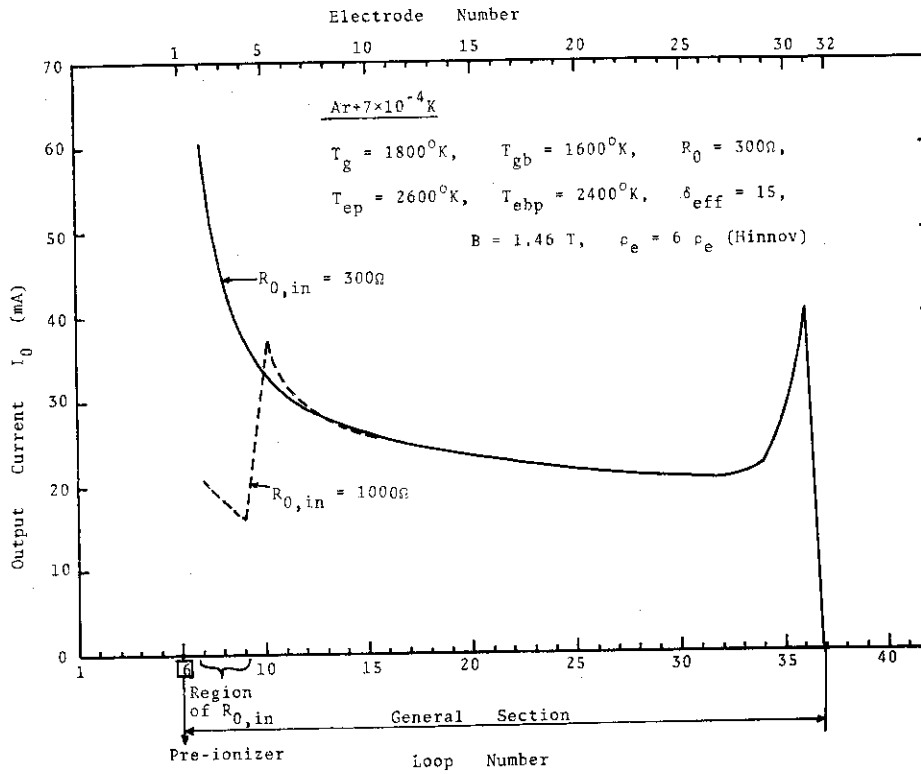


Fig. 5 Variation of the output current along the generator channel, for $\rho_e = 6\rho_e$ (Hinnov).

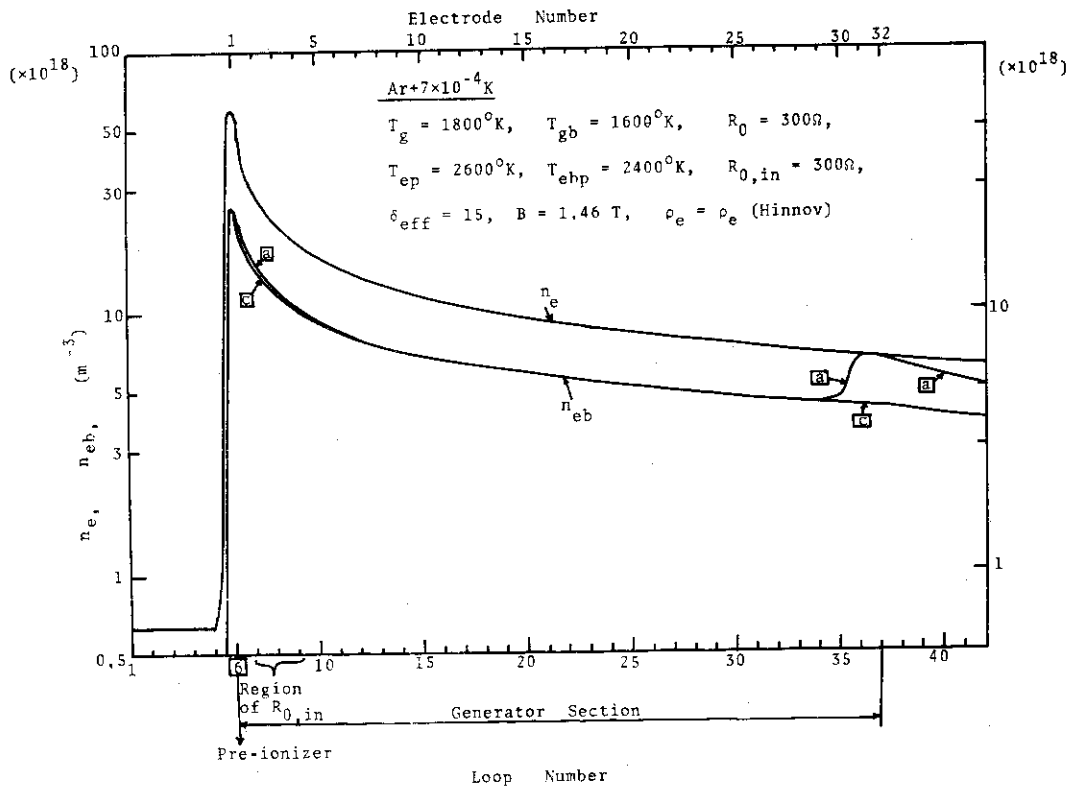


Fig. 6 Variation of electron density along the generator channel, for $\rho_e = \rho_e$ (Hinnov).

流における電子密度 n_e の変化は単なる減衰曲線であるが、境界層における電子密度 $n_{e,b}$ は外部抵抗値が変化する場所および発電流路の末端部近傍にて大きく変化する。またそのような場所において、アノード側境界層の電子密度とカソード側の電子密度が異つた値を持つことがわかる (Fig. 3 と Fig. 6 を見よ)。このアノード側境界層とカソードのそれにおける相異は、当然ながら、電子温度など他のプラズマ量にもおよんでいる (Fig. 4 と Fig. 7 参照)。なお、発電流路中央部において両者の差はほとんどない。

次に、電子密度の緩和時間が長いときの電子密度は、緩和時間が短いときに比べて再結合が起りにくいので、緩和時間が短い場合の電子密度より高い値に保持されている。そのため出力電流も緩和時間が長いときの方が大きくなる (Fig. 5 と Fig. 8 参照)。また、発電機上流における外部抵抗値が下流における外部抵抗値より高い場合 ($R_{0,in} > R_0$ のとき)、上流領域は開回路状態に近づくので、 $R_{0,in} = R_0 = 300 \Omega$ の状態にくらべて出力電流が相対的に低くなり、そのため電子のジュール加熱の割合も低下するので、電子密度の減衰率も増加する。しかしその影響は上流電極近傍のみにとどまり、発電機中央部より下流では、両者の差はほとんどなくなることをわかった。

一方、電子温度の変化について見てみると、電子密度の緩和時間が長いときは (Fig. 7 を見よ)、この程度の発電ダクトの長さでは、定常状態に到達していないことがわかる。他方、電子密度の緩和時間が短いときは (Fig. 4 を見よ)、発電ダクト中央部の電極対近傍から定常状態に近づいていることがわかる。現在行われている MHD 発電実験例では、実効再結合係数は Hinnov らの計算値の数倍と考えられているから、⁽⁶⁾⁽⁷⁾ Fig. 4 の例の方がより現実に近いと思われる。

そのほか、図では示していないが、発電流路内の電位分布なども同時に計算できている。

以上、 T_{ep}, T_{ebp} が T_g, T_{gb} に比べて相当に高い場合の非平衡 MHD 発電機内の電離緩和領域における諸パラメータの変化の様子を調べることができたが、今後の問題点としては、 T_{ep}, T_{ebp} が T_g, T_{gb} に近い場合の収束をよくするために、数値計算における加速法の適用と云う問題が残っている。

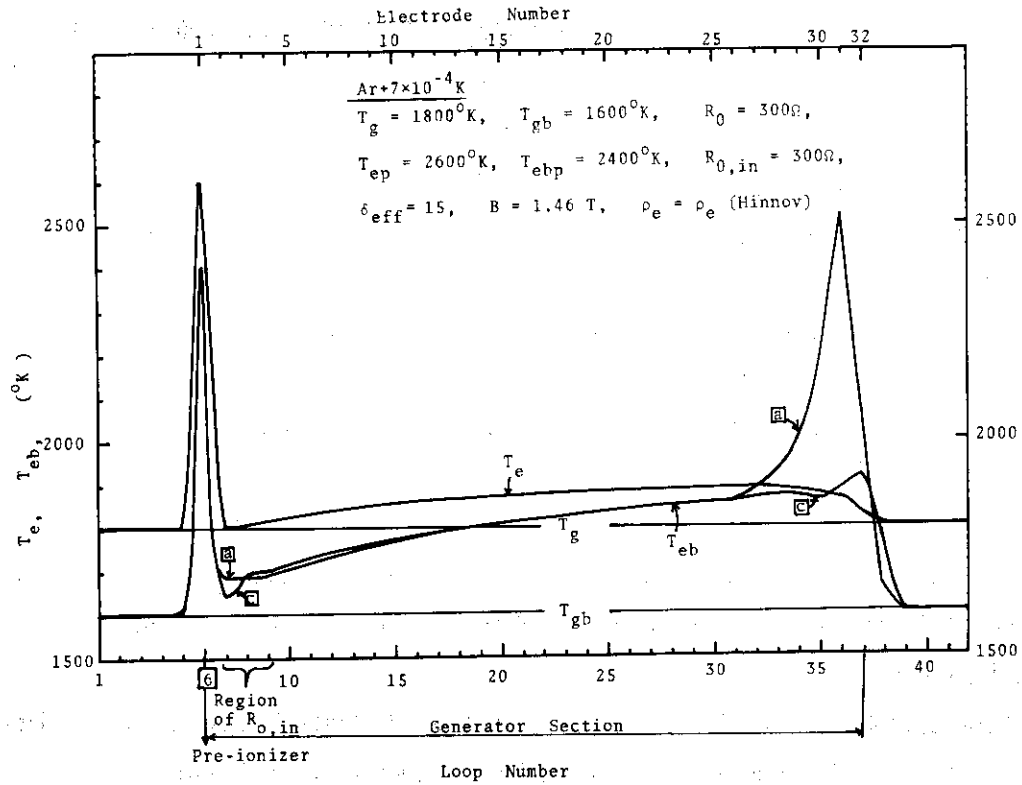


Fig. 7 Variation of electron temperature along the generator channel, for $\rho_e = \rho_e(\text{Hinnov})$.

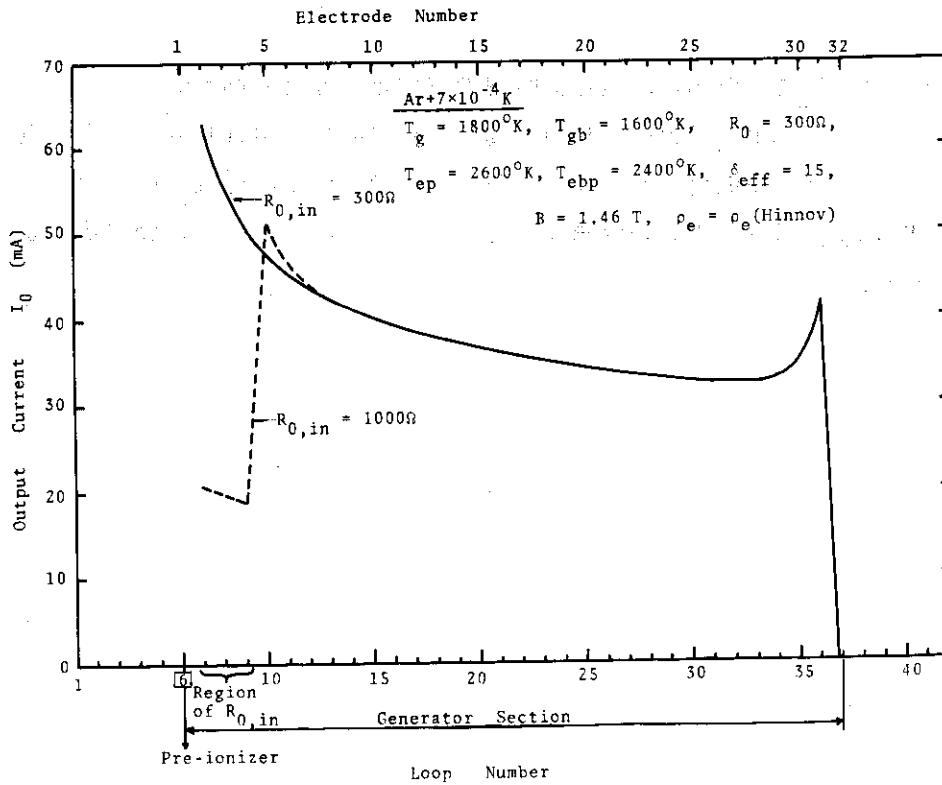


Fig. 8 Variation of the output current along the generator channel, for $\rho_e = \rho_e(\text{Hinnov})$.

4. ま と め

4端子回路網理論による非平衡発電特性の2次元解析法を拡張し、非定常状態の特性すなわち多電極フラデー発電機の電離緩和現象を計算するための方程式をみちびいた。この計算には、壁抵抗の有限性、境界層からの電流漏洩および電離不安定の影響が考慮されている。

この計算法の成立によって、在来の精密解を求める手法では解くことが困難であった多電極発電機全体の2次元電離緩和現象を一度に調べる事が可能となった。

数値計算は32対の電極を持ち第1電極間に予備電離電極のあるフラデー発電機について行われ、 T_{ep} , T_{ebp} が T_g , T_{gb} に比べて相当に高い場合の、流れに沿う電子密度、電子温度および発電電流の変化などが調べられた。

なお、今後の課題としては、より詳細な極討を行うために、計算時間短縮のための新しいプログラム開発の問題がある。

おわりに、本解析の遂行にあたって、いろいろの御援助をたまわった電離気体研究室、矢野淑郎室長に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) L. L. Lengyel: Energy Conversion 9 (1969) 13.
- (2) G. S. Argyropoulos and S. T. Demetriades: J. appl. Phys. 40 (1969) 4400.
- (3) G. S. Argyropoulos, M. A. Casteel and S. T. Demetriades: Energy Conversion 10 (1970) 189.
- (4) G. Dodel: Plasma Physics 12 (1970) 273.
- (5) E. Bertolini, M. Gasparotto, P. Gay and R. Toschi: Electricity from MHD (IAEA, Vienna, 1968) Vol. II, p.957.
- (6) H. Shirakata, T. Hiramoto and S. Yano: Japan J. appl. Phys. 8 (1969) 772.
- (7) T. Sakaguchi and T. Noguchi: Fifth Intern. Conf. MHD Electrical Power Generation (Munich, 19-23, April, 1971) Vol. II, p.49.
- (8) H. Shirakata: to be published in Japan J. appl. Phys. 11 1612 (1972).
- (9) H. Shirakata, K. Takahashi, T. Hiramoto and S. Yano: to be published in J. Nucl. Sci. Technol.
- (10) G. Brederlow and H. Zinko: Tenth Symposium on Engineering Aspects of MHD (MIT, Cambridge, 1969) p. 179.

- (11) J. F. Louis: *Phys. of Fluids* 10 (1967) 2062.
- (12) A. Solbes: *Electricity from MHD* (IAEA, Vienna, 1968) Vol. 1, p.499.
- (13) E. Hinnov and J. G. Hirschberg: *Phys. Rev.* 125 (1962) 795.
- (14) たとえば, 磯田和男, 大野豊編: "FORTRAN による数値計算ハンドブック", (オーム社, 東京, 1971).
- (15) T. Umehara: Master thesis (Osaka University, 1970). (unpublished).

付 録 A

電離緩和現象を計算するためのプログラム

§ 2 で述べた方程式および計算方法を用いて、FACOM 230-60用のプログラムを作成した。このプログラムを用いて、次の諸量が計算される。

各電極対ごとに、

- (1) 電子温度； $T_{eba,i}$ (TEBA), $T_{e,i}$ (TE), $T_{ebc,i}$ (TEBC),
- (2) 電子密度； $n_{eba,i}$ (NEBA), $n_{e,i}$ (NE), $n_{ebc,i}$ (NEBC),
- (3) 導電率； $\sigma_{ba,i}$ (SIAT), σ_i (SIT), $\sigma_{bc,i}$ (SICT), $\sigma_{eff,ba,i}$ (SIAE),
 $\sigma_{eff,i}$ (SIE), $\sigma_{eff,bc,i}$ (SICE),
- (4) ホール係数； $\beta_{ba,i}$ (BEAT), β_i (BET), $\beta_{bc,i}$ (BECT), $\beta_{eff,ba,i}$ (BEAE),
 $\beta_{eff,i}$ (BEE), $\beta_{eff,bc,i}$ (BECE),
- (5) 電子温度の最終到達距離； $\Delta L(T_{ebc,i})$ (DXBA), $\Delta L(T_{e,i})$ (DX), $\Delta L(T_{ebc,i})$
(DXBC),
- (6) 電流； $I_{Fa,i}$ (IFA), $I_{F,i}$ (IF), $I_{Fc,i}$ (IFC), $I_{Ha,i}$ (IHA), $I_{H,i}$ (IH),
 $I_{Hc,i}$ (IHC), $I_{wha,i}$ (IWA), $I_{whc,i}$ (IWC), $I_{0,i}$ (IO)
- (7) 電圧； $V_{Fba,i}$ (VFA), $V_{F,i}$ (VF), $V_{Fbc,i}$ (VFC), $V_{Hba,i}$ (VHA), $V_{H,i}$ (VH),
 $V_{Hbc,i}$ (VHC), $V_{wha,i}$ (VHWA), $V_{whc,i}$ (VHWC), $V_{L,i}$ (VL),

ここで、 $I_{Fa,i} = I_{0,i} + I_{1,i-1} - I_{1,i}$, $I_{F,i} = I_{0,i} + I_{2,i-1} - I_{2,i}$, $I_{Fc,i} = I_{0,i} + I_{3,i-1} - I_{3,i}$,
 $I_{Ha,i} = I_{2,i} - I_{1,i}$, $I_{H,i} = I_{3,i} - I_{2,i}$, $I_{Hc,i} = I_{4,i} - I_{3,i}$,
 $I_{wha,i} = -I_{1,i}$, $I_{whc,i} = I_{4,i}$.

一方、発電流路全体について、

- (8) ガスについてのパラメーター； M (M), M_b (MB), u_b (UB),
 $B \{ u (D - 2d) + 2u_b d \}$ (UBD),

ただし、 M はマッハ数、添字 b は境界層を表わす。なお、カッコ内の文字は出力データの記号を示す。

このプログラムのフローチャートをFig. A-1に示す。このプログラムの特徴は、楕円型偏微分方程式の数値解法の一つであるポイント法⁽¹⁴⁾を修正した方法による閉路方程式の計算

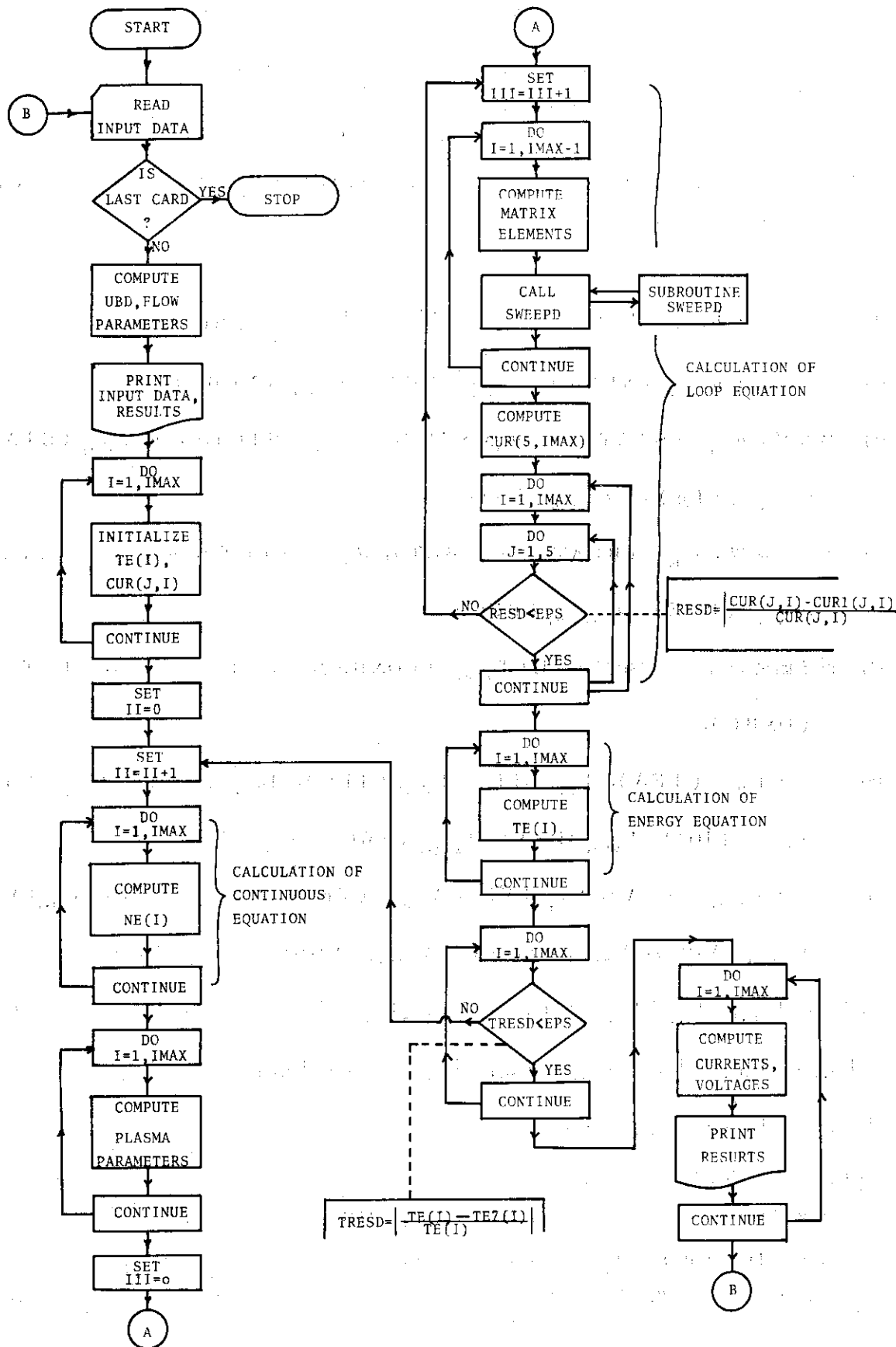


Fig. A-1 Flow chart for calculation of relaxation phenomena.

の部分と閉路方程式とエネルギー保存方程式および連続の式の3者の連立非線型方程式を反復法で解く部分にある。

次に、このプログラムで使用されているサブルーチンを説明する。

SUBROUTINE SWEEPDP; これはFAMOM 230-60 内蔵の科学用サブルーチンであり、スイープアウト法によって連立一次方程式の解を求めるものである。

入力形式

このプログラムの入力データを、9枚のカードに、次に示す表の様式にしたがって記入する。なお、データは、一部をのぞき、FORMAT(E12.5)なる形式で記入しなければならない。

カード番号	桁位置	プログラム記号	論文中の記号	説明
1	1~80	COMMEN		タイトルカード(A-FORMAT)。最終カードの場合は、1~4桁の間に“SIRA”なる記号をパンチする。
2	1~12	D	D	電極巾(m)。
	13~24	H	H	チャンネルの高さ(m)。
	25~36	DL	L	電極ピッチ(m)。
	37~48	SD	d	境界層の厚さ(m)。
3	1~12	RWH	R_{wh}	発電機内ホール方向の壁抵抗(Ω)。
	13~24	RWHS	R_{whs}	発電機上、下流のホール方向の壁抵抗(Ω)。
	25~36	BMAG	B	磁場の強さ(T)。
	37~48	BECRIT	β_{crit}	クリティカルホール係数。
4	1~12	TG	T_g	自由流中のガス温度($^{\circ}K$)。
	13~24	TGB	T_{gb}	境界層のガス温度($^{\circ}K$)。
	25~36	U	u	自由流中のガス流速(m/sec)。
	37~48	DEFF	δ_{eff}	電子の有効エネルギー損失係数。
5	1~12	RKLIN	$K_{L,in}$	発電機の上流のループの負荷率。
	13~24	RKLEX	$K_{L,ex}$	発電機の下流のループの負荷率。
	25~36	RO	R_0	外部抵抗(Ω), $((1/R_0) = (1/R_L) + (1/R_{wf}))$ 。
	37~48	QNKO	n_{K0}	シード物質の原子数密度 (m^{-3})。
6	1~12	TEP	T_{ep}	第1電極間自由流中の電子温度($^{\circ}K$)
	13~24	TEBP	T_{ebp}	第1電極間境界層の電子温度($^{\circ}K$)
	25~36	TEI		$T_{e,i}$ の初期値(任意)($^{\circ}K$)
	37~48	TEB1		$T_{eb,i}$ の初期値(任意)($^{\circ}K$)
7	1~12	CURO0		$I_{0,i}$ の初期値(任意), (A)
	13~24	CURO3		$I_{3,i}$ の初期値(任意), (A)
	25~36	CURO4		$I_{4,i}$ の初期値(任意), (A)

カード 番号	桁位置	プログラム 記号	論文中的 記号	説明
8	1~12	B (1)	α_0	電子の移動度 μ_0 を求める (39) 式の定数。これらの定数は最小自乗法で求められる。
	13~24	B (2)	α_1	
	25~36	B (3)	α_2	
9		EPS		収束限界
		ROIN	$R_{0,i}$ の一 部	上流電極対 ($n \leq 2$ 以下) の R_0 (Ω)。
		INRO		ROIN なる抵抗を持つ電極対数。
		JEL	S	電極対数 ($S \leq 50$)。

FORTRAN Program

```

C          NONEG-GENERATOR CHARACTERISTICS (RELAXATION REGION)
C          WORKING GASES = ARGON/POTASSIUM
C          - INCLUDING INSTABILITY -
C
1          DOUBLE PRECISION A
2          DIMENSION A(10,10),B(5),C(5),COMMON(20),@NE(60),@NEBC(60),
10NFBA(60),TE(60),TEBC(60),TEBA(60),CUR(5,60),CUR1(5,60),AC(60),
2ABA(60),ABC(60),BO(60),BEA(60),RBC(60),CO(60),CBC(60),@NE@(60),
3@NEQBA(60),@NEQBC(60),SITH(60),SITHBA(60),SITHBC(60),SIEF(60),
4SIEFFBA(60),SIEFFBC(60),BETH(60),BETHBA(60),BETHBC(60),BEEF(60),
5BEEFFBA(60),BEEFFBC(60),EMC(60),EMBA(60),EMBC(60),RECO(60),
6RECEBA(60),RECEBC(60),CURF(60),CURFA(60),CURFC(60),CURC(60),
7CURH(60),CURHA(60),CURHC(60),CURWA(60),CURWC(60),VF(60),VFA(60),
8VFC(60),VL(60),VH(60),VHA(60),VHC(60),VHWA(60),VHWC(60),RRECO(60),
9RRECEBA(60),RRECEBC(60),GGC(60),GGBA(60),GGBC(60),GOC(60),GBA(60),
1GBC(60),DELX(60),DELXBA(60),DELXBC(60),SLT(60),SLTRA(60),
2SLTBC(60),HKL(50),@@NE(60),@@NEC(60),@@NEA(60),CBA(60),
3TE7(60),TEBA7(60),TEBC7(60),TSUM(60),TRASUM(60),TBCSUM(60),
4CUSUM(5,60)
3          DATA ZZ/4HSIRA/
4          1 READ(5,5) COMMON
5          5 FORMAT(20A4)
6          IF(CCOMMON(1).EQ.ZZ) STOP
7          READ(5,10) D,H,DL,SD
8          10 FORMAT(4E12,5)
9          READ(5,10) RWH,RWHS,BMAG,BECRIT
10         READ(5,10) TG,TGB,U,DEFF
11         READ(5,10) RKLIN,RKLEX,RC,@NKO
12         READ(5,10) TEP,TEBP,TE1,TEB1
13         READ(5,10) CURCO,CURC3,CLRO4
14         READ(5,15) (B(J),J=1,3)
15         15 FORMAT(3E12,5)
16         READ(5,20) EPS,RCIN,INRC,JEL
17         20 FORMAT(2E12,5,2I6)
18         UB=U/2.0
19         GMACH=U/SQRT(347.1*TG)
20         GMACHB=UB/SQRT(347.1*TGB)
21         UBD=BMAG*(U*(D-2.0*SD)+2.0*UB*SD)
22         WRITE(6,505) COMMON
23         505 FORMAT(1H1,20X,20A4)
24         WRITE(6,510) D,H,DL,SD
25         510 FORMAT(1F0,10X,4F D =,F8.4,10X,4H H =,F8.4,10X,4H DL =,F8.4,
110X,4H SD =,F8.4)
26         WRITE(6,515) RWH,RWHS,BMAG,BECRIT
27         515 FORMAT(1F0,10X,4FRWH =,E8.3,10X,4FRWS =,E8.3,10X,4F B =,F8.4,
210X,4HREC =,F8.2)
28         WRITE(6,520) TG,TGB,U,UB
29         520 FORMAT(1H0,10X,4H TG =,F8.1,10X,4HTGB =,F8.1,10X,4H U =,F8.1,
310X,4H UB =,F8.1)
30         WRITE(6,525) UBD,GMACH,GMACHB,DEFF
31         525 FORMAT(1H0,10X,4HUBD =,F8.2,10X,4H M =,F8.4,10X,4H MB =,F8.4,
410X,4HDEF =,F8.1)
32         WRITE(6,530) RKLIN,RKLEX,RC,@NKO
33         530 FORMAT(1H0,10X,5HKLIN =,F15.5,10X,5HKLEX =,F15.5,10X,5H RO =,E15.5,
510X,5H NKO =,E15.5)

```



```

34      WRITE(6,535) TEP,TEBP,TE1,TEB1
35      535 FORMAT(1H0,1CX,5H TEP=,F15.2,1CX,5HTEBP=,F15.2,1CX,5H TE1=,F15.2,
        61CX,5HTEB1=,F15.2)
36      WRITE(6,550) CURCO,CURO3,CURC4
37      550 FORMAT(1H0,1CX,5H CURC=,E15.5,1CX,5HCUR3=,E15.5,1CX,5HCUR4=,E15.5)
38      WRITE(6,540) JEL,INRC,ROIN,EPS
39      540 FORMAT(1H0,1CX,5H JEL=,I15,1CX,5HINRC=,I15,1CX,5HRCIN=,E15.5,
        71CX,5H EPS=,E15.2)
40      WRITE(6,545) (B(J),J=1,3)
41      545 FORMAT(1H0,1CX,3E20.7)
      C
      C      PRELIMINARY CALCULATION
      C
42      IMAX=JEL+10
43      IJUMP=1
44      DO 11 I=1,IMAX
45      GO TC (103,106,109),IJUMP
46      103 TE(I)=TE1
47      TERA(I)=TEB1
48      TERC(I)=TEB1
49      IF(I.EQ.5) IJUMP=2
50      GO TC 11
51      106 TE(I)=TEP
52      TERA(I)=TEBP
53      TERC(I)=TEBP
54      IJUMP=3
55      GO TC 11
56      109 TE(I)=TE1
57      TERA(I)=TEB1
58      TERC(I)=TEB1
59      11 CONTINUE
      C
60      IJUMP=1
61      DO 22 I=1,IMAX
62      GO TC (101,111),IJUMP
63      101 CUR(5,I)=CURCO
64      CUR(1,I)=-CURC4
65      CUR(2,I)=-CURC3
66      CUR(3,I)=CURC3
67      CUR(4,I)=CURC4
68      IF(I.EQ.IMAX-1) IJUMP=2
69      GO TC 22
70      111 CUR(5,I)=CURCO
71      CUR(1,I)=0.0
72      CUR(2,I)=0.0
73      CUR(3,I)=0.0
74      CUR(4,I)=0.0
75      22 CONTINUE
      C
76      IMIN=IMAX-1
77      DO 44 I=1,IMAX
78      SLT(I)=0.0
79      SLTBA(I)=0.0
80      SLTBC(I)=0.0
81      44 CONTINUE

```

```

C
C      ITERATION PROCESS
C      CONTINUOUS EQUATION
C
82      II=0
83      IMSUM=6
84      999 II=II+1
85      LUMP=1
86      DO 33 I=1,IMAX
87      GO TO (113,116,119),JUMP
88      113 SSNE=2.4147E+21*(TE(I)**1.5)*EXP(-5.0249E+04/TE(I))
89      SSNEBA=2.4147E+21*(TEBA(I)**1.5)*EXP(-5.0249E+04/TEBA(I))
90      SSNEBC=2.4147E+21*(TEBC(I)**1.5)*EXP(-5.0249E+04/TEBC(I))
91      @NE(I)=(SQRT(4.0*SSNE*@NKC+SSNE**2)-SSNE)/2.0
92      @NEBA(I)=(SQRT(4.0*SSNEBA*@NKC+SSNEBA**2)-SSNEBA)/2.0
93      @NEBC(I)=(SQRT(4.0*SSNEBC*@NKC+SSNEBC**2)-SSNEBC)/2.0
94      @NE@ (I)=@NE(I)**2
95      @NE@BA(I)=@NEBA(I)**2
96      @NE@BC(I)=@NEBC(I)**2
97      IF(I.EQ.5) JUMP=2
98      GO TO 33
99      116 SSNE=2.4147E+21*(TEP**1.5)*EXP(-5.0249E+04/TEP)
100     SSNEBA=2.4147E+21*(TEBP**1.5)*EXP(-5.0249E+04/TEBP)
101     SSNEBC=SSNEBA
102     @NF(I)=(SQRT(4.0*SSNE*@NKC+SSNE**2)-SSNE)/2.0
103     @NEBA(I)=(SQRT(4.0*SSNEBA*@NKC+SSNEBA**2)-SSNEBA)/2.0
104     @NEBC(I)=(SQRT(4.0*SSNEBC*@NKC+SSNEBC**2)-SSNEBC)/2.0
105     @NF@ (I)=@NE(I)**2
106     @NE@BA(I)=@NEBA(I)**2
107     @NE@BC(I)=@NEBC(I)**2
108     @QNE(I)=@NE@ (I)
109     @QNEC(I)=@NE@BC(I)
110     @QNEA(I)=@NE@BA(I)
111     LUMP=3
112     GO TO 33
113     119 SSNE=2.4147E+21*(TE(I)**1.5)*EXP(-5.0249E+04/TE(I))
114     SSNEBA=2.4147E+21*(TEBA(I)**1.5)*EXP(-5.0249E+04/TEBA(I))
115     SSNEBC=2.4147E+21*(TEBC(I)**1.5)*EXP(-5.0249E+04/TEBC(I))
116     @NF@ (I)=((SQRT(4.0*SSNE*@NKC+SSNE**2)-SSNE)/2.0)**2
117     @NF@BA(I)=((SQRT(4.0*SSNEBA*@NKC+SSNEBA**2)-SSNEBA)/2.0)**2
118     @NF@BC(I)=((SQRT(4.0*SSNEBC*@NKC+SSNEBC**2)-SSNEBC)/2.0)**2
119     RECO(I)=1.1E-20/(TE(I)**4.5)
120     RECBA(I)=1.1E-20/(TEBA(I)**4.5)
121     RECBC(I)=1.1E-20/(TEBC(I)**4.5)
122     RECO(I)=6.0*RECO(I)
123     RECBA(I)=6.0*RECBA(I)
124     RECBC(I)=6.0*RECBC(I)
125     DELX(I)=DL-SLT(I)
126     DELXBA(I)=DL-SLTBA(I)
127     DELXBC(I)=DL-SLTBC(I)
128     @QNE(I)=@NE@ (I)/(1.0+(@NE@ (I)/@QNE(I-1)-1.0)*EXP(-2.0*@NE@ (I)
129     1*@RECO(I)*DELX(I)/U))
130     @QNEA(I)=@NE@BA(I)/(1.0+(@NE@BA(I)/@QNEA(I-1)-1.0)*EXP(-2.0*
131     2@NF@BA(I)*RECBA(I)*DELXBA(I)/UB))
132     @QNEC(I)=@NE@BC(I)/(1.0+(@NE@BC(I)/@QNEC(I-1)-1.0)*EXP(-2.0*

```

```

30NF@BC(I)*RECBC(I)*DELXRC(I)/UB))
131 @GNF(I)=SQRT(@@ONE(I))
132 @GNFBA(I)=SQRT(@@ONEA(I))
133 @GNFBC(I)=SQRT(@@NEC(I))
134 33 CONTINUE
C
C CALCULATION OF PLASMA PARAMETER
C
135 DO 66 I=1,IMAX
136 EMC(I)=B(1)+B(2)*TE(I)+B(3)*TE(I)**2
137 EMBA(I)=B(1)+B(2)*TEBA(I)+B(3)*TEBA(I)**2
138 EMBC(I)=B(1)+B(2)*TERC(I)+B(3)*TEBC(I)**2
139 IF(EMC(I).LE.2.0) EMC(I)=2.0
140 IF(EMBA(I).LE.2.0) EMBA(I)=2.0
141 IF(EMBC(I).LE.2.0) EMBC(I)=2.0
142 SITH(I)=1.6021E-19*@ONE(I)*EMC(I)
143 SITHBA(I)=1.6021E-19*@ONEA(I)*EMBA(I)
144 SITHBC(I)=1.6021E-19*@NEC(I)*EMBC(I)
145 BETH(I)=BMAG*EMC(I)
146 BETHBA(I)=BMAG*EMBA(I)
147 BETHBC(I)=BMAG*EMBC(I)
148 IF(BETH(I).GT.BECRIT) GO TO 1310
149 BEEF(I)=BETH(I)
150 SIEF(I)=SITH(I)
151 GO TO 1312
152 1310 BEEF(I)=(BECRIT-1.0)+(BECRIT/BETH(I))
153 SIEF(I)=BECRIT*SITH(I)/BETH(I)
154 1312 IF(BETHBA(I).GT.BECRIT) GO TO 1317
155 BEEFBA(I)=BETHBA(I)
156 SIEFBA(I)=SITHBA(I)
157 GO TO 1321
158 1317 BEEFBA(I)=(BECRIT-1.0)+(BECRIT/BETHBA(I))
159 SIEFBA(I)=BECRIT*SITHBA(I)/BETHBA(I)
160 1321 IF(BETHBC(I).GT.BECRIT) GO TO 1323
161 BEEFBC(I)=BETHBC(I)
162 SIEFBC(I)=SITHBC(I)
163 GO TO 1327
164 1323 BEEFBC(I)=(BECRIT-1.0)+(BECRIT/BETHBC(I))
165 SIEFBC(I)=BECRIT*SITHBC(I)/BETHBC(I)
166 1327 AO(I)=BEEF(I)/(SIEF(I)*H)
167 ABA(I)=BEEFBA(I)/(SIEFBA(I)*H)
168 ABC(I)=BEEFBC(I)/(SIEFBC(I)*H)
169 BC(I)=DL/(SIEF(I)*H*(D-2.0*SD))
170 BBA(I)=DL/(SIEFBA(I)*H*SD)
171 BBC(I)=DL/(SIEFBC(I)*H*SD)
172 CO(I)=(D-2.0*SD)/(SIEF(I)*H*DL)
173 CBA(I)=SD/(SIEFBA(I)*H*DL)
174 CBC(I)=SD/(SIEFBC(I)*H*DL)
175 66 CONTINUE
C
C LOOP EQUATION
C
176 III=0
177 INSUM=6
178 777 III=III+1

```

```

179      DO 2001 I=1,IMIN
180      CUR1(5,I)=CUR(5,I)
181      CUR1(1,I)=CUR(1,I)
182      CUR1(2,I)=CUR(2,I)
183      CUR1(3,I)=CUR(3,I)
184      CUR1(4,I)=CUR(4,I)
185      2001 CONTINUE
186      CUR1(5,IMAX)=CUR(5,IMAX)

C
187      LUMP=1
188      DO 2005 I=1,IMIN
189      A(1,2)=- (CBA(I)+ABA(I))
190      A(1,3)=- (CC(I)+AC(I)-ABA(I))
191      A(1,4)=- (CBC(I)+ABC(I)-AC(I))
192      A(1,5)=ABC(I)
193      A(2,1)=ABA(I)-CBA(I)
194      A(2,3)=- (BBA(I)-ABA(I))
195      A(2,4)=0.0
196      A(2,5)=0.0
197      A(3,1)=- (CC(I)+ABA(I)-AC(I))
198      A(3,2)=ABA(I)-BBA(I)
199      A(3,3)=CC(I)+BBA(I)+CO(I+1)+BC(I)
200      A(3,4)=- (BC(I)+AC(I))
201      A(3,5)=0.0
202      A(4,1)=- (CBC(I)+AC(I)-ABC(I))
203      A(4,2)=0.0
204      A(4,3)=AC(I)-BC(I)
205      A(4,4)=CBC(I)+BC(I)+CBC(I+1)+BBC(I)
206      A(4,5)=- (BBC(I)+ABC(I))
207      A(5,1)=-ABC(I)
208      A(5,2)=0.0
209      A(5,3)=0.0
210      A(5,4)=ABC(I)-BBC(I)
211      GO TO (2105,2110,2115,2120,2125,2130),JUMP
212      2105 A(1,1)=CBA(I)+CC(I)+CBC(I)
213      A(1,6)=UBD*(1.0-RKLIN)
214      A(2,2)=RWS+CBA(I)+CBA(I+1)+BBA(I)
215      A(2,6)=-CHA(I+1)*CUR(5,I+1)+(CBA(I+1)+ABA(I+1))*CUR(1,I+1)
216      1-ABA(I+1)*CUR(2,I+1)
217      A(3,6)=-CO(I+1)*CUR(5,I+1)+(CO(I+1)+AC(I+1))*CUR(2,I+1)
218      2-AQ(I+1)*CUR(3,I+1)
219      A(4,6)=-CBC(I+1)*CUR(5,I+1)+(CBC(I+1)+ABC(I+1))*CUR(3,I+1)
220      3-ABC(I+1)*CUR(4,I+1)
221      A(5,5)=RWS+BBC(I)
222      A(5,6)=0.0
223      LUMP=2
224      GO TO 2200
225      2110 A(1,1)=CBA(I)+CC(I)+CBC(I)
226      A(1,6)=UBD*(1.0-RKLIN)-CBA(I)*CUR(1,I-1)-CO(I)*CUR(2,I-1)
227      4-CBC(I)*CUR(3,I-1)
228      A(2,2)=RWS+CBA(I)+CBA(I+1)+BBA(I)
229      A(2,6)=- (ABA(I)-CBA(I))*CUR(1,I-1)-CBA(I+1)*CUR(5,I+1)+(CBA(I+1)
230      5+ABA(I+1))*CUR(1,I+1)-ABA(I+1)*CUR(2,I+1)
231      A(3,6)=- (AC(I)-CC(I))*CUR(2,I-1)+ABA(I)*CUR(1,I-1)-CC(I+1)*CUR(5,
232      6+1)+(CO(I+1)+AC(I+1))*CUR(2,I+1)-AC(I+1)*CUR(3,I+1)

```

```

227      A(4,6)=- (ABC(I)-CBC(I))*CUR(3,I-1)+AC(I)*CUR(2,I-1)-CBC(I+1)*CUR
228      7(5,I+1)+(CBC(I+1)+ABC(I+1))*CUR(3,I+1)-ABC(I+1)*CUR(4,I+1)
229      A(5,5)=R*HS+BBC(I)
230      A(5,6)=ABC(I)*CUR(3,I-1)
231      IF(I.EQ.5) JUMP=3
232      GO TC 2200
233      2115 A(1,1)=CBA(I)+CC(I)+CBC(I)
234      A(1,6)=UBD*(1.0-RKLIN)-CBA(I)*CUR(1,I-1)-CO(I)*CUR(2,I-1)-CBC(I)
235      9*CUR(3,I-1)
236      A(2,2)=R*H+CBA(I)+CBA(I+1)+BBA(I)
237      A(2,6)=- (ABA(I)-CBA(I))*CUR(1,I-1)-CBA(I+1)*CUR(5,I+1)+(CBA(I+1)
238      9+ABA(I+1))*CUR(1,I+1)-ABA(I+1)*CUR(2,I+1)
239      A(3,6)=- (AC(I)-CC(I))*CUR(2,I-1)+ABA(I)*CUR(1,I-1)-CC(I+1)*CUR(5,
240      1I+1)+(CO(I+1)+AC(I+1))*CUR(2,I+1)-AC(I+1)*CUR(3,I+1)
241      A(4,6)=- (ABC(I)-CBC(I))*CUR(3,I-1)+AC(I)*CUR(2,I-1)-CBC(I+1)*CUR
242      2(5,I+1)+(CBC(I+1)+ABC(I+1))*CUR(3,I+1)-ABC(I+1)*CUR(4,I+1)
243      A(5,5)=R*H+BBC(I)
244      A(5,6)=ABC(I)*CUR(3,I-1)
245      IUMP=4
246      GO TC 2200
247      2120 IF(I.GT.INRC+6) GO TC 2610
248      A(1,1)=CBA(I)+CC(I)+CBC(I)+RCIN
249      GO TC 2650
250      2610 A(1,1)=CBA(I)+CC(I)+CBC(I)+RC
251      2650 A(1,6)=UBD-CBA(I)*CUR(1,I-1)-CC(I)*CUR(2,I-1)-CBC(I)*CUR(3,I-1)
252      A(2,2)=R*H+CBA(I)+CBA(I+1)+BBA(I)
253      A(2,6)=- (ABA(I)-CBA(I))*CUR(1,I-1)-CBA(I+1)*CUR(5,I+1)+(CBA(I+1)
254      3+ABA(I+1))*CUR(1,I+1)-ABA(I+1)*CUR(2,I+1)
255      A(3,6)=- (AC(I)-CC(I))*CUR(2,I-1)+ABA(I)*CUR(1,I-1)-CC(I+1)*CUR(5,
256      4I+1)+(CO(I+1)+AC(I+1))*CUR(2,I+1)-AC(I+1)*CUR(3,I+1)
257      A(4,6)=- (ABC(I)-CBC(I))*CUR(3,I-1)+AC(I)*CUR(2,I-1)-CBC(I+1)*CUR
258      5(5,I+1)+(CBC(I+1)+ABC(I+1))*CUR(3,I+1)-ABC(I+1)*CUR(4,I+1)
259      A(5,5)=R*H+BBC(I)
260      A(5,6)=ABC(I)*CUR(3,I-1)
261      IF(I.EQ.IMIN-5) IUMP=5
262      GO TC 2200
263      2125 A(1,1)=CBA(I)+CO(I)+CBC(I)
264      A(1,6)=UBD*(1.0-RKLEX)-CBA(I)*CUR(1,I-1)-CO(I)*CUR(2,I-1)
265      6-CBC(I)*CUR(3,I-1)
266      A(2,2)=R*HS+CBA(I)+CBA(I+1)+BBA(I)
267      A(2,6)=- (ABA(I)-CBA(I))*CUR(1,I-1)-CBA(I+1)*CUR(5,I+1)+(CBA(I+1)
268      7+ABA(I+1))*CUR(1,I+1)-ABA(I+1)*CUR(2,I+1)
269      A(3,6)=- (AC(I)-CC(I))*CUR(2,I-1)+ABA(I)*CUR(1,I-1)-CC(I+1)*CUR(5,
270      8I+1)+(CO(I+1)+AC(I+1))*CUR(2,I+1)-AC(I+1)*CUR(3,I+1)
271      A(4,6)=- (ABC(I)-CBC(I))*CUR(3,I-1)+AC(I)*CUR(2,I-1)-CBC(I+1)*CUR
272      9(5,I+1)+(CBC(I+1)+ABC(I+1))*CUR(3,I+1)-ABC(I+1)*CUR(4,I+1)
273      A(5,5)=R*HS+BBC(I)
274      A(5,6)=ABC(I)*CUR(3,I-1)
275      IF(I.EQ.IMIN-1) IUMP=6
276      GO TC 2200
277      2130 A(1,1)=CBA(I)+CO(I)+CBC(I)
278      A(1,6)=UBD*(1.0-RKLEX)-CBA(I)*CUR(1,I-1)-CO(I)*CUR(2,I-1)
279      3-CBC(I)*CUR(3,I-1)
280      A(2,2)=R*HS+CBA(I)+CBA(I+1)+BBA(I)
281      A(2,6)=- (ABA(I)-CBA(I))*CUR(1,I-1)-CBA(I+1)*CUR(5,I+1)

```

```

269      A(3,6)=- (AC(I)-CC(I))*CUR(2,I-1)+ABA(I)*CUR(1,I-1)-CC(I+1)*CUR(5,
270      4I+1)
270      A(4,6)=- (ABC(I)-CBC(I))*CUR(3,I-1)+AC(I)*CUR(2,I-1)-CBC(I+1)*CUR
271      5(5,I+1)
271      A(5,5)=R*HS+BBC(I)
272      A(5,6)=ABC(I)*CUR(3,I-1)

C
273      2200 CALL SWEEP(A,10,5,6,1,0D-15,ILL)
274      IF(ILL.EQ.0) GO TO 2210
275      WRITE(6,2215) I,I,ILL
276      2215 FORMAT(1H0,10X,4H I I=,11C,10X,4H I =,18,10X,4H ILL=,18)
277      WRITE(6,2220) ((A(LL,MM),MM=1,6),LL=1,5)
278      2220 FORMAT(1H0,10X,6E20,7)
279      GO TO 1
280      2210 CUR(5,I)=A(1,6)
281      CUR(1,I)=A(2,6)
282      CUR(2,I)=A(3,6)
283      CUR(3,I)=A(4,6)
284      CUR(4,I)=A(5,6)
285      2005 CONTINUE

C
286      CUR(5,IMAX)=(URD*(1.0-RKLEX)-CBA(IMAX)*CUR(1,IMIN)-CC(IMAX)*CUR
287      1(2,IMIN)-CBC(IMAX)*CUR(3,IMIN))/(CHA(IMAX)+CC(IMAX)+CBC(IMAX))

C
287      DO 2310 I=1,IMIN
288      DO 2320 J=1,5
289      RESD=ABS((CUR(J,I)-CUR1(J,I))/CUR(J,I))
290      IF(RESD.GE.EPS) GO TO 2810
291      2320 CONTINUE
292      2310 CONTINUE
293      RESDD=ABS((CUR(5,IMAX)-CUR1(5,IMAX))/CUR(5,IMAX))
294      IF(RESDD.GE.EPS) GO TO 2810
295      GO TO 3000

C
296      2810 IF(III.GT.25) GO TO 3000
297      IF(NSUM.GT.5) GO TO 2840
298      NSUM=NSUM+1
299      CMEAN=CMEAN+1.0
300      DO 2820 J=1,IMAX
301      DO 2830 I=1,5
302      CUSUM(J,I)=CUSUM(J,I)+CUR(J,I)
303      CUR(J,I)=CUSUM(J,I)/CMEAN
304      2830 CONTINUE
305      2820 CONTINUE
306      GO TO 777

C
307      2840 NSUM=0
308      CMEAN=1.0
309      DO 2850 I=1,IMAX
310      DO 2860 J=1,5
311      CUSUM(J,I)=CUR(J,I)
312      2860 CONTINUE
313      2850 CONTINUE
314      GO TO 777

C

```

```

C
C      ENERGY CONSERVATION EQUATION
C
315 3000 DO 3002 I=1,IMAX
316      TE7(I)=TE(I)
317      TEA7(I)=TEBA(I)
318      TERC7(I)=TEBC(I)
319 3002 CONTINUE
C
320 3100 IJUMP=1
321      DO 3110 I=1,IMAX
322      GO TC (3120,3130,3140),IJUMP
323 3120 GOC(I)=(((CUR(5,I)-CUR(2,I))/(DL*H))**2+((CUR(3,I)-CUR(2,I))/(H*
324      1(D-2.0*SD))**2)/SIEF(I)
325      GBA(I)=(((CUR(5,I)-CUR(1,I))/(DL*H))**2+((CUR(2,I)-CUR(1,I))/(H*
326      2SD))**2)/SIEFBA(I)
327      GBC(I)=(((CUR(5,I)-CUR(3,I))/(DL*H))**2+((CUR(4,I)-CUR(3,I))/(H*
328      3SD))**2)/SIEFBC(I)
329      IJUMP=2
330      GO TC 3110
331 3130 GOC(I)=(((CUR(5,I)+CUR(2,I-1)-CUR(2,I))/(DL*H))**2+((CUR(3,I)-
332      4CUR(2,I))/(H*(D-2.0*SD))**2)/SIEF(I)
333      GBA(I)=(((CUR(5,I)+CUR(1,I-1)-CUR(1,I))/(DL*H))**2+((CUR(2,I)-
334      5CUR(1,I))/(H*SD))**2)/SIEFBA(I)
335      GBC(I)=(((CUR(5,I)+CUR(3,I-1)-CUR(3,I))/(DL*H))**2+((CUR(4,I)-
336      6CUR(3,I))/(H*SD))**2)/SIEFBC(I)
337      IF(I.EQ.IMAX-1) IJUMP=3
338      GO TC 3110
339 3140 GOC(I)=(((CUR(5,I)+CUR(2,I-1))/(DL*H))**2)/SIEF(I)
340      GBA(I)=(((CUR(5,I)+CUR(1,I-1))/(DL*H))**2)/SIEFBA(I)
341      GBC(I)=(((CUR(5,I)+CUR(3,I-1))/(DL*H))**2)/SIEFBC(I)
342 3110 CONTINUE
C
343 DO 3200 I=2,IMAX
344 GGC(I)=(GOC(I)+GOC(I-1))/2.0
345 GGBA(I)=(GBA(I)+GBA(I-1))/2.0
346 GGRC(I)=(GBC(I)+GBC(I-1))/2.0
347 3200 CONTINUE
C
348 DO 3250 I=2,IMAX
349 SLT(I)=1.042E-06*U*(EMO(I)+EMO(I-1))/(2.0*DEFF)
350 SLTBA(I)=1.042E-06*UB*(EMBA(I)+EMBA(I-1))/(2.0*DEFF)
351 SLTBC(I)=1.042E-06*UB*(EMBC(I)+EMBC(I-1))/(2.0*DEFF)
352 3250 CONTINUE
C
353 IJUMP=1
354 DO 3300 I=1,IMAX
355 GO TC (3310,3320,3330),IJUMP
356 3310 TE(I)=TG+((1.0063E+16*EMC(I)*GOC(I))/(DEFF*@NE(I)))
357      TEBA(I)=TGB+((1.0063E+16*EMBA(I)*GBA(I))/(DEFF*@NEBA(I)))
358      TEBC(I)=TGB+((1.0063E+16*EMBC(I)*GBC(I))/(DEFF*@NEBC(I)))
359      IF(I.EQ.5) IJUMP=2
360      GO TC 3300
361 3320 TE(I)=TEP
362      TEBA(I)=TEBP

```

```

357      TERC(I)=TEBP
358      LUMP=3
359      GO TO 3300
360      3330 TE(I)=TG+((1.0063E+16*GGC(I)*(EMC(I)+EMC(I-1)))/(2.0*QNE(I-1)*
      1DEFF))
361      TERA(I)=TGB+((1.0063E+16*GGBA(I)*(EMBA(I)+EMBA(I-1)))/(2.0*
      2GNEBA(I-1)*DEFF))
362      TERC(I)=TGB+((1.0063E+16*GGBC(I)*(EMBC(I)+EMBC(I-1)))/(2.0*
      3GNEBC(I-1)*DEFF))
363      3300 CONTINUE
C
364      DO 3610 I=1,IMAX
365      TRES0=ABS((TE(I)-TE7(I))/TE(I))
366      IF(TRES0.GE.EPS) GO TO 3888
367      TARE0=ABS((TERA(I)-TERA7(I))/TERA(I))
368      IF(TARE0.GE.EPS) GO TO 3888
369      TCRES0=ABS((TEBC(I)-TEBC7(I))/TEBC(I))
370      IF(TCRES0.GE.EPS) GO TO 3888
371      3610 CONTINUE
372      GO TO 4100
C
373      3888 IF(I.GT.35) GO TO 5100
374      IF(I.GT.10) GO TO 7250
375      DO 3910 I=1,IMAX
376      IF(TE(I).LT.TG) TE(I)=TG
377      IF(TERA(I).LT.TGB) TERA(I)=TGB
378      IF(TEBC(I).LT.TGB) TEBC(I)=TGB
379      IF(ABS(TE(I)-TE7(I)).GT.1000.0) TE(I)=(TE(I)+TE7(I))/2.0
380      IF(ABS(TERA(I)-TERA7(I)).GT.1000.0) TERA(I)=(TERA(I)+TERA7(I))/2.0
381      IF(ABS(TEBC(I)-TEBC7(I)).GT.1000.0) TEBC(I)=(TEBC(I)+TEBC7(I))/2.0
382      3910 CONTINUE
383      GO TO 999
C
384      7250 IF(MSUM.GT.5) GO TO 7450
385      MSUM=MSUM+1
386      TMFAN=TMEAN+1.0
387      DO 7350 I=1,IMAX
388      IF(TE(I).LT.TG) TE(I)=TG
389      IF(TERA(I).LT.TGB) TERA(I)=TGB
390      IF(TEBC(I).LT.TGB) TEBC(I)=TGB
391      IF(ABS(TE(I)-TE7(I)).GT.1000.0) TE(I)=(TE(I)+TE7(I))/2.0
392      IF(ABS(TERA(I)-TERA7(I)).GT.1000.0) TERA(I)=(TERA(I)+TERA7(I))/2.0
393      IF(ABS(TEBC(I)-TEBC7(I)).GT.1000.0) TEBC(I)=(TEBC(I)+TEBC7(I))/2.0
394      TSUM(I)=TSUM(I)+TE(I)
395      TBASUM(I)=TBASUM(I)+TERA(I)
396      TBCSUM(I)=TBCSUM(I)+TEBC(I)
397      TE(I)=TSUM(I)/TMEAN
398      TERA(I)=TBASUM(I)/TMEAN
399      TERC(I)=TBCSUM(I)/TMEAN
400      7350 CONTINUE
401      GO TO 999
C
402      7450 MSUM=0
403      TMFAN=1.0
404      DO 7650 I=1,IMAX

```



```

405      IF (TE(I).LT.TG) TE(I)=TG
406      IF (TEBA(I).LT.TGB) TEBA(I)=TGB
407      IF (TEBC(I).LT.TGB) TEBC(I)=TGB
408      IF (ABS(TE(I)-TE7(I)).GT.1000.0) TE(I)=(TE(I)+TE7(I))/2.0
409      IF (ABS(TEBA(I)-TEBA7(I)).GT.1000.0) TEBA(I)=(TEBA(I)+TEBA7(I))/2.0
410      IF (ABS(TEBC(I)-TEBC7(I)).GT.1000.0) TEBC(I)=(TEBC(I)+TEBC7(I))/2.0
411      TSUM(I)=TE(I)
412      TBASUM(I)=TEBA(I)
413      TBCSUM(I)=TEBC(I)
414      7650 CONTINUE
415      GO TO 999

C
416      5100 WRITE(6,5200) I,I,I
417      5200 FORMAT(1F0,10X,3F11=,110,10X,4HIII=,110)

C
C      CALCULATION OF CURRENTS AND VOLTAGES
C
418      4100 LUMP=1
419      DO 4200 I=1,I MAX
420      CUR0(I)=CUR(5,I)
421      GO TO (4205,4210,4215,4220,4225,4230),JUMP
422      4205 CURF(I)=CUR(5,I)-CUR(2,I)
423      CURFA(I)=CUR(5,I)-CUR(1,I)
424      CURFC(I)=CUR(5,I)-CUR(3,I)
425      CURH(I)=CUR(3,I)-CUR(2,I)
426      CURHA(I)=CUR(2,I)-CUR(1,I)
427      CURHC(I)=CUR(4,I)-CUR(3,I)
428      CURWA(I)=-CUR(1,I)
429      CURWC(I)=CUR(4,I)
430      VF(I)=U*BMAG*(D-2.0*SD)-CO(I)*CURF(I)-AC(I)*CURH(I)
431      VFA(I)=UB*BMAG*SD-CBA(I)*CURFA(I)-ABA(I)*CURHA(I)
432      VFC(I)=UB*BMAG*SD-CBC(I)*CURFC(I)-ABC(I)*CURHC(I)
433      VL(I)=RKLIN*UBD
434      VH(I)=AC(I)*CURF(I)-BC(I)*CURH(I)
435      VHA(I)=ABA(I)*CURFA(I)-BBA(I)*CURHA(I)
436      VHC(I)=ABC(I)*CURFC(I)-BBC(I)*CURHC(I)
437      VHW(A)=R*WHS*CUR(1,I)
438      VHW(C)=R*WHS*CUR(4,I)
439      LUMP=2
440      GO TO 4300
441      4210 CURF(I)=CUR(5,I)+CUR(2,I-1)-CUR(2,I)
442      CURFA(I)=CUR(5,I)+CUR(1,I-1)-CUR(1,I)
443      CURFC(I)=CUR(5,I)+CUR(3,I-1)-CUR(3,I)
444      CURH(I)=CUR(3,I)-CUR(2,I)
445      CURHA(I)=CUR(2,I)-CUR(1,I)
446      CURHC(I)=CUR(4,I)-CUR(3,I)
447      CURWA(I)=-CUR(1,I)
448      CURWC(I)=CUR(4,I)
449      VF(I)=U*BMAG*(D-2.0*SD)-CO(I)*CURF(I)-AC(I)*CURH(I)
450      VFA(I)=UB*BMAG*SD-CBA(I)*CURFA(I)-ABA(I)*CURHA(I)
451      VFC(I)=UB*BMAG*SD-CBC(I)*CURFC(I)-ABC(I)*CURHC(I)
452      VL(I)=RKLIN*UBD
453      VH(I)=AC(I)*CURF(I)-BC(I)*CURH(I)
454      VHA(I)=ABA(I)*CURFA(I)-BBA(I)*CURHA(I)
455      VHC(I)=ABC(I)*CURFC(I)-BBC(I)*CURHC(I)

```

```

456      VHWA(I)=RWS*CURWA(I)
457      VHC(I)=RWS*CURWC(I)
458      IF(I.EQ.5) JUMP=3
459      GO TC 4300
460      4215 CURF(I)=CUR(5,I)+CUR(2,I-1)-CUR(2,I)
461          CURFA(I)=CUR(5,I)+CUR(1,I-1)-CUR(1,I)
462          CURFC(I)=CUR(5,I)+CUR(3,I-1)-CUR(3,I)
463          CURH(I)=CUR(3,I)-CUR(2,I)
464          CURHA(I)=CUR(2,I)-CUR(1,I)
465          CURHC(I)=CUR(4,I)-CUR(3,I)
466          CURWA(I)=-CUR(1,I)
467          CURWC(I)=CUR(4,I)
468          VF(I)=U*BMAG*(D-2.0*SD)-CO(I)*CURF(I)-AC(I)*CURH(I)
469          VFA(I)=UB*BMAG*SD-CBA(I)*CURFA(I)-ABA(I)*CURHA(I)
470          VFC(I)=UB*BMAG*SD-CBC(I)*CURFC(I)-ABC(I)*CURHC(I)
471          VL(I)=RKLIN*UBD
472          VH(I)=AC(I)*CURF(I)-BC(I)*CURH(I)
473          VHA(I)=ABA(I)*CURFA(I)-BBA(I)*CURHA(I)
474          VHC(I)=ABC(I)*CURFC(I)-BBC(I)*CURHC(I)
475          VHWA(I)=RWH*CURWA(I)
476          VHC(I)=RWH*CURWC(I)
477          JUMP=4
478          GO TC 4300
479      4220 CURF(I)=CUR(5,I)+CUR(2,I-1)-CUR(2,I)
480          CURFA(I)=CUR(5,I)+CUR(1,I-1)-CUR(1,I)
481          CURFC(I)=CUR(5,I)+CUR(3,I-1)-CUR(3,I)
482          CURH(I)=CUR(3,I)-CUR(2,I)
483          CURHA(I)=CUR(2,I)-CUR(1,I)
484          CURHC(I)=CUR(4,I)-CUR(3,I)
485          CURWA(I)=-CUR(1,I)
486          CURWC(I)=CUR(4,I)
487          VF(I)=U*BMAG*(D-2.0*SD)-CO(I)*CURF(I)-AC(I)*CURH(I)
488          VFA(I)=UB*BMAG*SD-CBA(I)*CURFA(I)-ABA(I)*CURHA(I)
489          VFC(I)=UB*BMAG*SD-CBC(I)*CURFC(I)-ABC(I)*CURHC(I)
490          IF(I.GT.INRC+6) GO TC 4720
491          VL(I)=RCIN*CUR(5,I)
492          GO TC 4730
493      4720 VL(I)=RC*CUR(5,I)
494      4730 VH(I)=AC(I)*CURF(I)-BC(I)*CURH(I)
495          VHA(I)=ABA(I)*CURFA(I)-BBA(I)*CURHA(I)
496          VHC(I)=ABC(I)*CURFC(I)-BBC(I)*CURHC(I)
497          VHWA(I)=RWH*CURWA(I)
498          VHC(I)=RWH*CURWC(I)
499          IF(I.EQ.IMIN-5) JUMP=5
500          GO TC 4300
501      4225 CURF(I)=CUR(5,I)+CUR(2,I-1)-CUR(2,I)
502          CURFA(I)=CUR(5,I)+CUR(1,I-1)-CUR(1,I)
503          CURFC(I)=CUR(5,I)+CUR(3,I-1)-CUR(3,I)
504          CURH(I)=CUR(3,I)-CUR(2,I)
505          CURHA(I)=CUR(2,I)-CUR(1,I)
506          CURHC(I)=CUR(4,I)-CUR(3,I)
507          CURWA(I)=-CUR(1,I)
508          CURWC(I)=CUR(4,I)
509          VF(I)=U*BMAG*(D-2.0*SD)-CO(I)*CURF(I)-AC(I)*CURH(I)
510          VFA(I)=UB*BMAG*SD-CBA(I)*CURFA(I)-ABA(I)*CURHA(I)

```

```

511      VFC(I)=UB*BMAG*SD-CBC(I)*CURFC(I)-ABC(I)*CURHC(I)
512      VL(I)=RKLEX*UBD
513      VH(I)=AC(I)*CURF(I)-BC(I)*CURH(I)
514      VHA(I)=ABA(I)*CURFA(I)-BBA(I)*CURHA(I)
515      VHC(I)=ABC(I)*CURFC(I)-BBC(I)*CURHC(I)
516      VHW(A(I)=RWHS*CURWA(I)
517      VHW(C(I)=RWHS*CURWC(I)
518      IF(I.EQ.IMAX-1) JUMP=6
519      GO TO 4300
4230     CURF(I)=CUR(5,I)+CUR(2,I-1)
520     CURFA(I)=CUR(5,I)+CUR(1,I-1)
521     CURFC(I)=CUR(5,I)+CUR(3,I-1)
522     CURH(I)=C.0
523     CURHA(I)=0.0
524     CURHC(I)=0.0
525     CURWA(I)=0.0
526     CURWC(I)=0.0
527     VF(I)=U*BMAG*(D-2.0*SD)*CO(I)*CURF(I)
528     VFA(I)=UB*BMAG*SD-CBA(I)*CURFA(I)
529     VFC(I)=UB*BMAG*SD-CBC(I)*CURFC(I)
530     VL(I)=RKLEFX*URD
531     VH(I)=AC(I)*CURF(I)
532     VHA(I)=ABA(I)*CURFA(I)
533     VHC(I)=ABC(I)*CURFC(I)
534     VHW(A(I)=C.0
535     VHW(C(I)=C.0
536
C
C      RECORD
C
527     4300 WRITE(6,4500) I
528     4500 FORMAT(1F0,10X,5FLOCP=,I6)
529     WRITE(6,4505) TEBA7(I),TE7(I),TEBC7(I)
530     4505 FORMAT(1F0,2CX,5HTEBA=,F10.1,15X,5HTE =,F10.1,15X,5HTEBC=,F10.1)
531     WRITE(6,4510) QNEBA(I),QNE(I),QNEBC(I)
532     4510 FORMAT(1F0,2CX,5HQNEBA=,E15.5,10X,5HQNE =,E15.5,10X,5HQNEBC=,E15.5)
533     WRITE(6,4515) SITHBA(I),SITH(I),SITHBC(I)
534     4515 FORMAT(1F0,2CX,5HSIAT=,E15.5,10X,5HSIT=,E15.5,1CX,5HSICT=,E15.5)
535     WRITE(6,4520) SIEFBA(I),SIEF(I),SIEFBC(I)
536     4520 FORMAT(1F0,2CX,5HSIAE=,E15.5,10X,5HSIE=,E15.5,1CX,5HSICE=,E15.5)
537     WRITE(6,4525) HETHBA(I),RETH(I),BETHBC(I)
538     4525 FORMAT(1F0,2CX,5HBEAT=,E15.5,10X,5HBET=,E15.5,1CX,5HBECT=,E15.5)
539     WRITE(6,4530) BEEFBA(I),REFF(I),BEEFBC(I)
540     4530 FORMAT(1F0,2CX,5HBEAE=,E15.5,10X,5HBEE=,E15.5,1CX,5HBECE=,E15.5)
541     WRITE(6,4535) DELXBA(I),DELX(I),DELXBC(I)
542     4535 FORMAT(1F0,2CX,5HDXBA=,E15.5,10X,5HDX =,E15.5,1CX,5HDXBC=,E15.5)
C
543     WRITE(6,4540) CURFA(I),CURF(I),CURFC(I)
544     4540 FORMAT(1F0,2CX,5HIFA=,E15.5,10X,5HIF =,E15.5,10X,5HIFC=,E15.5)
545     WRITE(6,4545) CURHA(I),CURH(I),CURHC(I)
546     4545 FORMAT(1F0,2CX,5H IHA=,E15.5,10X,5H IH =,E15.5,1CX,5H IHC=,E15.5)
547     WRITE(6,4550) CURWA(I),CURWC(I)
548     4550 FORMAT(1F0,2CX,5H IWA=,E15.5,10X,5H IWC=,E15.5,1CX,5H IO =,E15.5)
C
549     WRITE(6,4555) VFA(I),VF(I),VFC(I)
550     4555 FORMAT(1F0,2CX,5H VFA=,F15.5,10X,5H VF =,E15.5,1CX,5H VFC=,F15.5)

```

```
561 WRITE(6,4560) VHA(I),VH(I),VHC(I)
562 4560 FORMAT(1H0,20X,5H VHA=,E15,5,10X,5H VH =,E15,5,10X,5H VHC=,E15,5)
563 WRITE(6,4565) VHW(A(I),VHW(C(I),VL(I)
564 4565 FORMAT(1H0,20X,5HVHWA=,E15,5,10X,5HVHWC=,E15,5,10X,5H VL =,E15,5)
565 WRITE(6,4600) (CUR(JJ,1),JJ=1,5)
566 4600 FORMAT(1H0,10X,5E20,5)
567 WRITE(6,4600) (CUR1(JJ1,1),JJ1=1,5)
568 WRITE(6,4703) TEBA(I),TE(I),TEBC(I)
569 4703 FORMAT(1H0,20X,5HTBA8=,F10,1,15X,5H TE8=,F10,1,15X,5H TRC8=,F10,1)
570 4200 CONTINUE
571 GO TO 1
572 END
```

An Example of Output Data

LCCP= 14						
TEHA=	1875.1	TE =	1914.6	TEBC=	1890.4	
NEHA=	C.35494E 19	NE =	0.53213E 19	NEBC=	C.35279E 19	
SIAT=	C.70589F 01	SIT=	0.10609E 02	SICT=	C.70250E 01	
SIAF=	C.77896F 00	SIF=	0.11678E 01	SICF=	C.77425F 00	
BEAT=	C.18124E 02	BET=	C.18169E 02	BECT=	C.18147E 02	
BEAF=	C.11104F 01	BEF=	0.11101E 01	BECF=	C.11102F 01	
DXRA=	C.58621E-02	DX =	0.57234E-02	DXBC=	C.58619E-02	
IFA=	C.26999E-01	IF =	0.26944E-01	IFC=	C.26737E-01	
IHA=	C.34574E-02	IH =	-0.78841E-02	IHC=	C.46464E-02	
IWA=	C.13193E-03	IWC=	0.87787E-04	IO =	C.26998E-01	
VFA=	-C.78311E 00	VF =	0.57768E 01	VFC=	-C.89445E 00	
VHA=	C.19739F 01	VH =	0.17688E 01	VHC=	C.17557F 01	
VFWA=	C.26386E 01	VHWC=	0.17557E 01	VL =	C.80993F 01	
	-C.13193E-03	0.33255E-02	-0.45586E-02	0.87787E-04	0.26998E-01	
	-C.13193E-03	0.33255E-02	-0.45586E-02	0.87787E-04	0.26998E-01	
	TEHA=	1875.1	TE8=	1914.6	TECA=	1890.4
LCCP= 15						
TEHA=	1887.2	TE =	1920.0	TEHC=	1898.9	
NEHA=	C.33898E 19	NE =	C.50694E 19	NEBC=	C.33794E 19	
SIAT=	C.67484E 01	SIT=	0.10109E 02	SICT=	C.67329E 01	
SIAF=	C.74394E 00	SIF=	0.11126E 01	SICF=	C.74166E 00	
BEAT=	C.18142E 02	BET=	0.18172E 02	BECT=	C.18156E 02	
BEAF=	C.11102E 01	BEF=	0.11101E 01	BECF=	C.11102F 01	
DXRA=	C.58620E-02	DX =	0.57233E-02	DXBC=	C.58618E-02	
IFA=	C.26163E-01	IF =	0.26160E-01	IFC=	C.25945E-01	
IHA=	C.34608E-02	IH =	-0.76694E-02	IHC=	C.44317E-02	
IWA=	C.13351E-03	IWC=	0.89616E-04	IO =	C.26161E-01	
VFA=	-C.81578E 00	VF =	0.95717E 01	VFC=	-C.90752E 00	
VHA=	C.19827E 01	VH =	0.18027E 01	VHC=	C.17923E 01	
VFWA=	C.26701E 01	VHWC=	0.17923E 01	VL =	C.78484E 01	

この部分は、収束状態を確認するための参考データである。