

JAERI-M

9320

大強度パルス電子線による気体電離過程  
の数値解析

—計算プログラムの作成とArへの適用—

1981年2月

新井英彦

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、お申しこしてください。

*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.*

大強度パルス電子線による気体電離過程の数値解析  
— 計算プログラムの作成と Ar への適用 —

日本原子力研究所高崎研究所研究部

新井英彦

(1981年1月23日受理)

現在、各種の大強度パルス電子線が、プラズマの生成、気相放射線化学反応、気体レーザーの発振の研究に広く使われているが、数 Torr 以上の比較的圧力の高い気体中でのパルス電子線照射による電離過程の解明はほとんど為されていない。本報では、パルス電子線照射により生じる誘導電場とプラズマ逆電流を考慮した自己無撞着法により、パルス電子線照射による気体電離過程の数値解析可能なプログラムを作成し、Ar に適用し、その妥当性と有用性を確かめた。このプログラムは任意のビーム電流特性のパルス電子線および気体に適用可能で、電離過程での各素過程の寄与を明らかにすることができる。

Numerical Analysis of Gas Ionization by an Intense  
Pulsed Electron Beam - Program and Its Application to Ar -

Hidehiko ARAI

Division of Research, Takasaki Radiation Chemistry Research  
Establishment, JAERI

(Received January 23, 1981)

Intense pulsed electron beams of various types are widely used at present for the researches on the plasma production, radiation chemistry in gas phase, and gas laser. However, the details of gas ionization processes above several Torr by intense pulsed electron beams have been hardly clarified. In this study, a program has been designed which can make a numerical analysis of gas ionization by pulsed electron beams self-consistently including the effects of induced electric field and plasma backward current. The validity and usefulness of this program have been confirmed by its application to Ar. This program is applicable to any gas and to pulsed electron beams of arbitrary characteristics, and useful to clarify the roles of various elementary processes during ionization.

Keywords; Intense Pulsed Electron Beams, Gas Ionization,  
Numerical Analysis, Program, Argon,  
Self-Focusing

## 目 次

1. 結 論 .....	1
2. 基本方程式の組み立て .....	1
3. 基本方程式の解法 .....	3
3.1 空間電荷中和係数 $f_e(t)$ の導入 .....	3
3.2 初期条件および $t \leq t_N$ での解法 .....	4
3.3 $t > t_N$ での解法 .....	4
4. 計算プログラム .....	6
4.1 記号—変数名の対応 .....	6
4.2 MAIN PROGRAM .....	6
4.3 SUBROUTINE GALOP .....	6
4.4 SUBROUTINE RUNGE 1 .....	7
4.5 SUBROUTINE DIF 1 .....	7
4.6 SUBROUTINE WALTZ .....	7
4.7 SUBROUTINE RUNGE 2 .....	7
4.8 SUBROUTINE DIF 2 .....	8
4.9 SUBROUTINE PLOT 1 .....	8
4.10 FUNCTION AI (T) .....	8
4.11 FUNCTION PTF(Z) .....	8
4.12 FUNCTION EV(Z) .....	8
4.13 FUNCTION QM (EV) .....	8
4.14 FUNCTION RC (EVZ) .....	8
4.15 FUNCTION RC 2 (EVZ) .....	8
5. Ar についての主な計算結果 .....	16
6. 解析モデルの妥当性 .....	20
7. 計算結果の解析 .....	24
8. 結 論 .....	27
謝 辞 .....	28
参考文献 .....	29
付録— Ar に関する実際のプログラム .....	30

## Contents

1. Introduction	-----	1
2. Basic equations	-----	1
3. Solution of the basic equations	-----	3
3.1 Introduction of space-charge neutralization		
factor $f_e(t)$	-----	3
3.2 Initial conditions and solution for $t \leq t_N$	---	4
3.3 Solution for $t > t_N$	-----	4
4. Program	-----	6
4.1 Correspondences between notations and the names		
of variables	-----	6
4.2 MAIN PROGRAM	-----	6
4.3 SUBROUTINE GALOP	-----	6
4.4 SUBROUTINE RUNGEL	-----	7
4.5 SUBROUTINE DIF1	-----	7
4.6 SUBROUTINE WALTZ	-----	7
4.7 SUBROUTINE RUNGE2	-----	7
4.8 SUBROUTINE DIF2	-----	8
4.9 SUBROUTINE PLOT1	-----	8
4.10 FUNCTION AI(T)	-----	8
4.11 FUNCTION PTF(Z)	-----	8
4.12 FUNCTION EV(Z)	-----	8
4.13 FUNCTION QM(EV)	-----	8
4.14 FUNCTION RC(EVZ)	-----	8
4.15 FUNCTION RC2(EVZ)	-----	8

5. Computation results on Ar	-----	16
6. Validity of the analysis model	-----	20
7. Analysis of the computation results	-----	24
8. Conclusion	-----	27
Acknowledgement	-----	28
References	-----	29
Appendix - the program applied to Ar	-----	30

## 1. 緒 論

大強度パルス電子線の気体中での挙動は気体種および気体圧により著しく影響される<sup>1)~3)</sup>。我々はその原因がパルス電子線による気体電離過程と関連することをすでに明らかにした<sup>4)</sup>。このような大強度パルス電子線（通常、ピーク電流 数kA~数10kA、パルス半値幅 数ns~数10ns）による気体の電離過程は、低圧気体（10 Torr 以下）についてはプラズマ生成の観点から数多く研究されているが<sup>5)</sup>、近年、気相放射線化学の初期過程あるいは気体レーザー発振の研究で盛んに使われる高圧気体（10 Torr 以上）についての研究は少ない<sup>6)</sup>。また、パルス持続時間中での電離過程の各種の測定は、大電流照射による雑音および高速現象（ns~数10ns）のため困難である。本報告では、上述の気体中でのパルス電子線の挙動の解明のため、パルス電子線による気体電離過程解析の数値計算プログラムの作成について述べると共に、Arに適用して得られた主な解析結果を述べる。

## 2. 基本方程式の組み立て

パルス電子線照射により照射セル内に流れる電流  $I_{net}(t)$  (A単位) の変化からビーム中心軸付近では、次式で与えられるビーム軸方向 ( $z$ 方向) の誘導電場  $E_z(t)$  (V/cm単位) が発生する<sup>脚注1)</sup>。

$$E_z(t) = -3.0 \times 10^9 \cdot 300 \cdot \frac{2}{c^2} \left\{ \frac{1}{2} + \ln \frac{R}{r_0(t)} \right\} \frac{dI_{net}(t)}{dt} \quad (1)$$

ここで、 $c$ は光速、 $R$ はセル半径、 $r_0(t)$ は時間  $t$  でのビーム半径である。また、factorの  $3.0 \times 10^9$  および  $300$  はそれぞれA単位をesu単位へ、c. g. s. e. s. u. 単位をV単位への換算係数である。

この  $E_z(t)$  の作用により、系中の二次電子が加速され二次イオン化が起きる。この他、ビーム電子の衝突イオン化および損失の項を含めると、パルス電子線照射による気体中での二次電子生成速度  $dn_e(t)/dt$  はPutnam<sup>6)</sup>の電子雪崩モデルに準拠すると次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{dn_e(t)}{dt} = & \alpha_b \frac{I_b(t)}{\pi r_0(t)^2} + \frac{n_e(t)}{t_i(t)} \\ & - \alpha_r n_e(t) n_i(t) - \alpha_{rd} n_e(t) n_d(t) - \Delta \cdot \vec{F} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、上式中の未定義の各記号の意味は次の通りである。

脚注1) この式は半径方向に均一な電子密度の円筒ビームを仮定し、ビーム半径が  $r_0(t)$  に固定の場合の式である。



$I_b(t)$  : 時間  $t$  でのビーム電流 (A)

$\alpha_b$  : ビーム電子による二次電子の生成係数で,  $n_0 \sigma_{ion}(E_b)/e$  で与えられる。  
 $n_0$  は中性粒子密度 ( $\text{cm}^{-3}$ ),  $\sigma_{ion}(E_b)$  はエネルギー  $E_b$  のビーム電子に対する気体のイオン化断面積,  $e$  は電子の電荷である。

$n_e(t)$  : 時間  $t$  での二次電子数密度 ( $\text{cm}^{-3}$ )

$n_j(t)$  : 時間  $t$  でのモノマーイオン数密度 ( $\text{cm}^{-3}$ )

$n_d(t)$  : 時間  $t$  でのダイマーイオン数密度 ( $\text{cm}^{-3}$ )

$\alpha_r$  : 電子-モノマーイオン再結合係数 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

$\alpha_{rd}$  : 電子-ダイマーイオン再結合係数 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

$t_i(t)$  :  $E_z(t)$  により加速された二次電子による二次イオン化 1 回当たりの平均時間 ( $\text{s}/\text{イオン対}$ ) で,  $E/p$  ( $E$  は電場強度,  $\text{V}/\text{cm}$ ,  $p$  は気体圧, Torr) の関数

式(2)の右辺第 1 項は, ビーム電子による直接イオン化の項, 第 2 項は  $E_z(t)$  による二次イオン化 (電子雪崩) の項, 第 3 項および第 4 項はそれぞれ電子-モノマーイオンおよび電子-ダイマーイオン再結合による損失項, 第 5 項は拡散等による損失項である。この第 5 項は ns のタイムスケールでは無視できる。この第 3 項と第 4 項は次の一連の反応によると仮定した。



ここで  $M^+$  はモノマーイオンを,  $M_2^+$  ダイマーイオンを,  $M$  は中性原子あるいは分子を,  $M^{(*)}$  は基底状態あるいは励起状態にある原子あるいは分子を,  $e^-$  は電子を意味する。

上述のようにして生じた電離気体の時間  $t$  での全導電率  $\sigma_T(t)$  ( $\text{mho}/\text{cm}$  単位) は近似的に次式で与えられる。

$$\sigma_T(t) = \sigma_{en}(t) \sigma_{ei}(t) / (\sigma_{en}(t) + \sigma_{ei}(t)) \quad (3)$$

ここで,  $\sigma_{en}(t)$  および  $\sigma_{ei}(t)$  はそれぞれ時間  $t$  での電子-中性粒子との衝突で決まる導電率と電子-イオン衝突で決まる導電率 (Spitzer resistance の逆数) である。 $\sigma_{en}(t)$  は次式で近似されることをすでに示した<sup>4)</sup>。

$$\sigma_{en}(t) = 1.29 \times 10^{-16} \frac{n_e(t)}{p \cdot Q_m(\bar{\epsilon}) \bar{\epsilon}^{1/2}} \cdot \frac{1}{9.0 \times 10^{11}} \quad (4)$$

ここで,  $\bar{\epsilon}$  は系中の二次電子の平均エネルギー (eV),  $Q_m(\bar{\epsilon})$  は, エネルギー  $\bar{\epsilon}$  eV の電子に対する気体の運動量移動衝突断面積 ( $\text{cm}^2$ ) である。また,  $p$  は  $20^\circ\text{C}$  での気体圧 (Torr) で,  $n_0 = 3.30 \times 10^{16} p$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) である。上式中の  $1/9.0 \times 10^{11}$  の factor は導電率の単位を  $\text{s}^{-1}$  から  $\text{mho}/\text{cm}$  にかえる換算係数である。

また,  $\sigma_{ei}(t)$  は次式で与えられている<sup>7)</sup>。

$$\sigma_{ei}(t) = 97.1 (2\bar{\epsilon}/3)^{3/2} / \ln [1.55 \times 10^{10} (2\bar{\epsilon}/3)^{3/2} / (n_e(t))^{1/2}] \quad (5)$$

すると、式(1)の $E_z(t)$ の作用により、媒体気体中には次式で与えられるプラズマ逆電流 $I_{back}(t)$ が流れる<sup>脚注2)</sup>。

$$I_{back}(t) = \pi r_0(t)^2 E_z(t) \sigma_T(t) \quad (6)$$

この結果、セル中を流れる正味の電流 $I_{net}(t)$ は次のようになる。

$$I_{net}(t) = I_b(t) + I_{back}(t) \quad (7)$$

$dI_{net}(t)/dt > 0$  のときは、式(1)から $E_z(t)$ の符号は負となるので、 $I_{back}(t)$ の符号も負となる。式(7)の $I_{net}(t)$ は式(1)中の $I_{net}(t)$ と同一のものであるので、 $I_{net}(t)$ の時間的変化率が $E_z(t)$ を決め、また、 $E_z(t)$ が電子雪崩、プラズマ逆電流を通して $I_{net}(t)$ を決めることになる。

なお、モノマイオンおよびダイマイオンの生成速度はそれぞれ式(8)と(9)で与えられる。

$$\frac{dn_i(t)}{dt} = \alpha_b \frac{I_b(t)}{\pi r_0(t)^2} + \frac{n_e(t)}{t_i(t)} - \alpha_r n_e(t) n_i(t) - k_d n_i(t) n_0(t)^2 \quad (8)$$

$$\frac{dn_d(t)}{dt} = k_d n_i(t) n_0(t)^2 - \alpha_{rd} n_e(t) n_d(t) \quad (9)$$

また、 $t_i(t)$ は絶縁破壊形成時間 $t_f$ の実測文献値 $pt_f$ <sup>8)</sup> ( $E/p$ の関数)から次式を用いて得られる。

$$t_i(t) = t_f / (18.4 p) \quad (10)$$

### 3. 基本方程式の解法

#### 3.1 空間電荷中和係数 $f_e(t)$ の導入

ビームの挙動は空間電荷の影響を受ける<sup>9)</sup>。 $f_e(t)$ は次式で定義される。

$$f_e(t) = (n_i(t) + n_d(t)) / n_B(t) \quad (11)$$

ここで、 $n_B(t)$ はビーム電子数密度 ( $\text{cm}^{-3}$ ) で次のように与えられる。

$$n_B(t) = I_b(t) / (\pi r_0(t)^2 c \beta e) \quad (12)$$

$\beta$ は光速に対するビーム電子速度の比である。

脚注2) 本研究の場合、ビーム電流の自己磁場が存在するので、厳密にはこの効果を考慮しなくてはならないが、1 Torr 以下の極低圧域を除いて、電子と中性粒子との衝突頻度が高いため、この効果は無視できる。

### 3.2 初期条件および $t \leq t_N$ での解法

初めて  $f_e(t) = 1$  に到達する時間を空間電荷中和時間  $t_N$  と定義し、 $t_N$  後では  $f_e(t) = 1$  とする。この  $t_N$  以前では、空間電荷電場の作用により、二次電子は生成されるや直ちにビーム外に押し出され<sup>脚注 3)</sup>、イオンのみビーム通路内に残留すると仮定する。すなわち、 $t \leq t_N$  では、

$n_e(t) = 0$ ,  $\sigma_T(t) = 0$ ,  $\sigma_{en}(t) = 0$ ,  $\sigma_{ei}(t) = 0$ ,  $I_{back}(t) = 0$  とする。  
従って、 $t \leq t_N$  でのイオンの生成は式(8), (9)の代りに式(13), (14)による。

$$\frac{dn_i(t)}{dt} = \alpha_b \frac{I_b(t)}{\pi r_0(t)^2} - k_d n_i(t) n_0(t)^2 \quad (13)$$

$$\frac{dn_d(t)}{dt} = k_d n_i(t) n_0(t)^2 \quad (14)$$

他方、時間  $t$  でのビーム電流密度を決める因子<sup>9)</sup> ( $f_B(t)$  と名付ける) を次式から計算する。

$$f_B(t) = I_b(t)^2 | 1 - f_e(t) - \beta^2 | \quad (15)$$

但し、 $f_e(t) < 1 - \beta^2$  では  $f_B(t) = 0$  とする。

### 3.3 $t > t_N$ での解法

基本方程式で

$$c_1 = -3.0 \times 10^9 \cdot 300 \cdot \frac{2}{c^2} \left\{ \frac{1}{2} + \ln \frac{R}{r_0(t)} \right\}$$

$$c_2 = \pi r_0(t)^2$$

$$c_3 = c_1 c_2$$

と置き、 $\Delta t$  を微小な時間とすると、式(1)より  $t = t + \Delta t$  での  $E_z(t + \Delta t)$  は次式で近似的に与えられると仮定する。

$$E_z(t + \Delta t) = c_1 \cdot \Delta I_{net} / \Delta t \quad (16)$$

上式中の  $\Delta I_{net} = \{ I_b(t + \Delta t) + c_2 \cdot \sigma_T(t + \Delta t) E_z(t + \Delta t) \} - I_{net}(t)$  であるので、式(16)は次式のように書きかえられる。

$$E_z(t + \Delta t) = \frac{c_1 \{ I_b(t + \Delta t) - I_{net}(t) \}}{\Delta t - c_3 \cdot \sigma_T(t + \Delta t)} \quad (17)$$

一応、 $E_z(t + \Delta t)$  は式(17)で与えられるが、上式の右辺中の  $\sigma_T$  は下記のように  $E_z(t)$  の複雑な関数となっている。すなわち、

式(3)で

脚注 3) このため、 $t \leq t_N$  では  $E_z(t)$  による二次イオン化は起きない。

- $\bar{\varepsilon}$  :  $|E_z(t)|/p$  の関数
- $Q_m(\bar{\varepsilon})$  :  $\bar{\varepsilon}$  の関数
- $n_e(t)$  : 式(2), (8), (9)で決まる値
- 式(2), (8), (9)で
- $t_i(t)$  :  $|E_z(t)|/p$  の関数
- $\alpha_r$  :  $\bar{\varepsilon}$  の関数
- $\alpha_{rd}$  :  $\bar{\varepsilon}$  の関数

従って、 $E_z(t + \Delta t)$ の正しい解を得るためには、式(1)~(2)を自己矛盾なく解かねばならない。この解法は、Swainの文献<sup>10)</sup>の方法を参考にして次のようなステップで行なう。

- ステップ① :  $\sigma_T(t_N) = \sigma_1$  とする。3.2で述べたように、 $t \leq t_N$ では  $n_e(t) = 0$  であるので  $\sigma_1 = 0$  である。 $\sigma_T = \sigma_1$  として式(1)より仮の  $E_z(t_N + \Delta t)$  を求め、EZ 1 とする。
- ステップ② :  $t_N \sim t_N + \Delta t$  間、EZ 1 を作用させ、式(2), (8), (9)を4次のRunge-Kutta法<sup>11)</sup>で解き、 $t = t_N + \Delta t$  での  $n_e(t)$ ,  $n_i(t)$ ,  $n_d(t)$  を求める。
- ステップ③ :  $|EZ 1|/p$  で決まる  $\bar{\varepsilon}$ ,  $Q_m(\bar{\varepsilon})$  および上で求めた  $n_e(t)$  を用いて、式(3), (4), (5)より  $t = t_N + \Delta t$  での仮の  $\sigma_T = \sigma_{1c}$  を求める。
- ステップ④ :  $\sigma_1$  と  $\sigma_{1c}$  を比較し、

$$|\sigma_1 - \sigma_{1c}| / \sigma_{1c} < \varepsilon \quad \text{脚注 4)} \quad (18)$$

が成立しないときは、 $\sigma_2 = \sigma_1^\alpha \sigma_{1c}^{(1-\alpha)}$  として  $\sigma_2$  を求め、この  $\sigma_2$  を新しい  $\sigma_1$  としてステップ①にもどる<sup>脚注 4)</sup>

上述のステップを式(18)が満足されるまで繰り返し、満足されたときの  $\sigma_{1c}$ ,  $n_e(t)$  等の値を  $t = t_N + \Delta t$  での正解とする。 $t = t_N + 2\Delta t$  では  $t = t_N + \Delta t$  での正解値をもとに同様のステップを繰り返し、正解を求める。以下、計算終了指定時間  $t_{end}$  まで同様の計算を繰り返す。

また、同時に各時間での  $f_B(t)$  を次式で計算する。

$$f_B(t) = I_{net}(t) I_B(t) \beta^2 \quad (19)$$

さらに、式(15)および式(19)の積分値はビーム中心軸上に置いた線量計で測定した線量に対応する<sup>9)</sup>ので、この積分値も同時に求められるようにした。また、計算は  $r_0(t) =$ 一定の仮定の下に解くことにする。

脚注 4)  $\varepsilon$  の値は、適当な値を予め与えておく。本研究では、0.01とした。また、 $\alpha \geq 0.7$  とするとき収束することが知られている<sup>10)</sup>。

## 4. 計算プログラム

Arに関する実際のプログラムを巻末に付録として載せるが、ここでは、基本式中の記号とプログラム中の変数名の対応関係、各プログラム・ルーチンのフローシートと概略を述べる。

### 4.1 記号—変数名の対応

Table 1 に示す。

### 4.2 MAIN PROGRAM

MAIN PROGRAMのフローシートをFig. 1 と Fig. 2 に示す。プログラム中の各文の概略を以下に述べる (ISN……はSEQUENCE)。

- ISN 00118 ~ 00123 : COMMON宣言。
- ISN 00143 ~ 00148 : SUBROUTINE GALOPでの初期値の設定。
- ISN 00149 : SUBROUTINE GALOPにより  $t \leq TN$ での EN1 等の出力値を計算。
- ISN 00154 ~ 00160 :  $f_e(t) = 1$  となる TN 値を定める (SUBROUTINE GALOP と WALTZ の使用の境界を定める)。
- ISN 00159 ~ 00167 : SUBROUTINE WALTZ の初期値の設定。
- ISN 00168 : SUBROUTINE WALTZ により,  $t > TN$ での EN1 等の出力値の計算。
- ISN 00169 : 時間  $t > TN$ での計算終了の判定。
- ISN 00170 ~ 00176 : SUBROUTINE WALTZ の新しい初期値の設定。
- ISN 00181 ~ 00186 : 計算結果を印字する。
- ISN 00187 : 計算結果のうち, AII(J), AIN(J), EN1(J)を SUBROUTINE PLOT 1 でラインプリンタ上にプロットする。
- ISN 00188 ~ 00189 : GAS PRESSURE ループを気体圧数 NPI 回行なう。
- ISN 00190 : P(I), TN(I), SUM1(I)を印字する。

### 4.3 SUBROUTINE GALOP

フローシートを Fig. 3 に示した。この副プログラムは,  $t \leq TN$ での各出力値を計算する。

- ISN 00070 ~ 00076 :  $t = 0$  ( $J = 1$ )での FE, EZT, PMN, PDN 値を与える ( $t = 0$ では FE, EZT を定義できないため)。
- ISN 00077 ~ 00078 : AIT は時間  $t$ でのビーム電流値, AITH は時間  $(t - dt)$ でのビーム電流値。
- ISN 00080 : SUBROUTINE RUNGE 1 で  $t = t$ での PM (モノマーイオン数密度), PD (ダイマーイオン密度)を求める。
- ISN 00082 : 時間  $t$ でのビーム電子密度を与える。

- ISN 00083 : 時間  $t$  での空間電荷中和係数  $FE$  を与える。  
 ISN 00085 : 時間  $t$  での中性気体圧 (Torr) を与える。  
 ISN 00086 :  $f_D = 1.0 - \beta^2 - f_e(t)$  を与える。  
 ISN 00088 ~ 00103 : 時間  $t$  での各出力変数の値を記憶させる。WP(J) と ALPP(J) は今回の計算では不要。  
 ISN 00106 ~ 00117 :  $f_D > 0$  のときはビームは発散するので AIN1 と BRF は定義できない。  
 $f_D \leq 0$  のときは AIN1(J) = AIT とし BRF, BRF(J), SUM1 を定めて、この副プログラムを終る。

#### 4.4 SUBROUTINE RUNGE 1

$t \leq TN$  ( $t = t + \Delta t$  での値ではなく) での PM, PD を 4 次の Runge-Kutta 法<sup>11)</sup> で求める。

#### 4.5 SUBROUTINE DIF 1 (PM, PD, T, PI, G2, G3, RK)

$t \leq TN$  でのモノマイオン, ダイマイオン生成の微分方程式を与える。G2, G3 はそれぞれ式(13), (14)に対応する。

#### 4.6 SUBROUTINE WALTZ

時間  $t > TN$  での各出力変数値を計算する。フローシートを Fig. 4 に示す。

- ISN 00377 :  $t = t + \Delta t$  でのビーム電流値。  
 ISN 00378 : EZ 1 値の計算 (式(17)に対応)。  
 ISN 00379 : EZ 1 を  $t$  より  $t + \Delta t$  の間作用させたときの EN, PM, PD の値を 4 次の Runge-Kutta で求める。  
 ISN 00380 :  $EN < 0$  ならストップさせる。  
 ISN 00386 ~ 00388 : 残存中性気体圧と EZ 1 の値から  $E/p$  の関数としての  $\bar{\epsilon}$ , すなわち, EVZ を求める。  
 ISN 00389 ~ 00392 :  $\sigma_{ei}$  を求める (基本方程式(5))。  
 ISN 00393 :  $\sigma_{en}$  を求める (基本方程式(4))。  
 ISN 00394 :  $\sigma_{ic}$  を与える。  
 ISN 00395 : 式(18)に対応する。  
 ISN 00396 ~ 00399 : 前述のステップ④に対応する。  
 式(18)の条件が満足されたとき, ISN 00400 以下の計算を行脚注 5) 行う。

#### 4.7 SUBROUTINE RUNGE 2

$t > TN$  での  $t = t + \Delta t$  における EN, PM, PD を 4 次の Runge-Kutta で求める。

---

脚注 5)  $t = t_N + \Delta t$  での最初の計算の際は  $\sigma_1 = 0$  であるが, ISN 00397 の対数計算では  $\sigma_1 \approx 0$  でなくてはならないので,  $\sigma_1$  の初期値として 0.0001 以下の値を仮に与えた。

#### 4.8 SUBROUTINE DIF 2

$t > TN$ での二次電子, モノマーイオン, ダイマーイオン生成の微分方程式を与える。F1, F2, F3はそれぞれ式(2), (8), (9)に対応する。RCZ (基本方程式では $\alpha_r$ )はFUNCTION RC (EVZ)で与える。RC2Z ( $\alpha_{rd}$ )はFUNCTION RC2 (EVZ)で与える。また, EVZは, FUNCTION EV (Z)で与える。

#### 4.9 SUBROUTINE PLOT 1

AII(J), AIN(J),  $\log(EN1(J))$ をラインプリンター上にプロットさせる。

#### 4.10 FUNCTION AI (T)

ここではFebetron 706のビーム電流<sup>9)</sup> ( $I^p = 8 \text{ kA}$ ,  $r_0 = 0.6 \text{ cm}$ ,  $t_r = 2.2 \text{ ns}$ ,  $t_{\text{flat}} = 0.5 \text{ ns}$ ,  $t_d = 2.5 \text{ ns}$ ,  $\beta = 0.857$ , ビーム電子の平均エネルギー 480 keV)を用いた。

#### 4.11 FUNCTION PTF (Z)

Arに関するFelsenthalとProudの絶縁破壊の形成時間 $pt_r$ の実測値<sup>8)</sup>の図よりE/pの関数として35点を選び出し(一部外挿点を含む), Lagrangeの補間法<sup>11)</sup>を用いて, 任意のE/pにおける $pt_r$ 値を自動的に算出, 利用できるようにした。

#### 4.12 FUNCTION EV (Z)

LakshiminarasimhaとLucas<sup>12)</sup>の $D_L/\mu$ の実測値( $D_L$ は電場方向と直角方向への電子の拡散係数,  $\mu$ は電子の移動度)から, Ar中の電子の平均エネルギー $\bar{\epsilon} = 1.5 D_L/\mu$ の関係式を用いて求めた $\bar{\epsilon}$ より, E/pの関数として33点(一部外挿点を含む)を選び出し, FUNCTION PTF (Z)と同様な方法で任意のE/pにおける $\bar{\epsilon}$ 値を利用できるようにした。

#### 4.13 FUNCTION QM (EV)

FrostとPhelpsの $Q_m$ の値<sup>13)</sup>より13点を選び出し, FUNCTION PTF (Z)と同様な方法で任意の $\bar{\epsilon}$ における $Q_m$ 値を利用できるようにした。

#### 4.14 FUNCTION RC (EVZ)

単原子正イオンの電子との再結合係数 $\alpha_r$ は一般に,  $10^{-12} \text{ cm}^3/\text{s}$ 以下である<sup>14)</sup>ので, ここでは少し大きめの $\alpha_r = 1.0 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$ を用いた。 $\alpha_r$ は分子正イオンでは, 通常,  $\bar{\epsilon}$ の関数であるので, ここでは関数形として与えた。

#### 4.15 FUNCTION RC 2 (EVZ)

$\text{Ar}_2^+$ と電子の再結合係数 $\alpha_{rd}$ はMehrとBiondiにより<sup>15)</sup>電子温度10000 K以下で $\alpha_{rd} = 9.5 \times 10^{-8} \times \bar{\epsilon}^{-0.67}$ とし与えられているが, ここでは, 10000 K以上でもこの式を拡張してそのまま用いた。但し, Arの第1イオン化ポテンシャル15.76 eV以上では $\alpha_{rd} = 0$ とした。

Table 1 Correspondences between notations and variables

	in equations	in program	for output	unit	remarks
induced electric field	$E_Z(t)$	{EZ1 EZ1C	EZ(J)	V/cm	
beam current	$I_b(t)$	AIT etc	AII(J)	A	given by AI(T) at a function of t
net current	$I_{net}(t)$	AINT AIN	AIN1(J)	A	
plasma back current	$I_p(t)$	AIPB		A	
(e,n) conductivity	$\sigma_{en}(t)$	SGE	SGEP(J)	mho/cm	
(e,i) conductivity	$\sigma_{ei}(t)$	SGI		"	
total conductivity	$\sigma_T(t)$	{SG1 SG1C	SIG1(J)	"	
number density of secondary electrons	$n_e(t)$	EN,ENN	EN1(J)	$cm^{-3}$	
number density of monomer ions	$n_i(t)$	PM,PMN	PMP(J)	"	
number density of dimer ions	$n_d(t)$	PD,PDN	PDP(J)	"	
number density of beam electrons	$n_B(t)$	BEN		"	
mean energy of secondary electrons	$\bar{\epsilon}$	EVZ	EVP(J)	eV	given by a function of E/p
recombination coefficient between electrons and monomer ions	$\alpha_r$	RCZ		$cm^3/s$	given by a function of $\bar{\epsilon}$
recombination coefficient between electrons and dimer ions	$\alpha_{rd}$	RC2Z		$cm^3/s$	given by a function of $\bar{\epsilon}$
mean ionization time	$t_i(t)$	TI		s/ion	given by a function of E/p
rate constant of dimer ion formation	$k_d$	RK		molec. <sup>2</sup> $\cdot cm^6$ $\cdot s^{-1}$	
space charge neutralization time	$t_N$	TN	TN(I)	ns	
chamber radius	R	RW		cm	
beam radius	$r_o(t)$	RB		cm	



Table 1 (continued)

	in equations	in program	for output	unit	remarks
space charge neutralization factor	$f_e(t)$	FE	FEP(J)		
gas pressure	p	PI	P(I)	Torr	at 20°C
number density of neutral molecules	$n_o(t)$	GD		$\text{cm}^{-3}$	$n_o = 3.30 \times 10^{16} p$
momentum transfer collision cross section	$Q_m$	QM		$\text{cm}^2$	given by a function of $\bar{e}$
coefficient of production of secondary electrons by the direct ionization ionization cross section	$\alpha_b$	ALFB			$= n_o \sigma_{ion} / e$
factor determining the beam radius	$\sigma_{ion}(E_b)$	SIÖN		$\text{cm}^2$	
	$f_B(t)$	BRF	BRFP(J)		$= I_b(t)^2  1 - f_e(t) - \beta^2 $
light velocity	c	SL		cm/s	
tentative conductivity	$\sigma_1$	SG1		mho/cm	
conductivity given by EZ1	$\sigma_{1c}$	SG1C		"	
induced electric field given by a tentative $\sigma_1$	$E_z(t+\Delta t)$	EZ1		V/cm	
induced electric field given by a $\sigma_{1c}$		EZ1C	EZ(J)	"	
	$\alpha$	ALPHA			assumed to be 0.8
	$\epsilon$	EPS			assumed to be 0.01
	$c_1$	C1			
	$c_2$	C2			
	$c_3$	C3			
1st ionization potential		EIP		eV	
SUM + BRF*H		SUM	SUM1(J)		
$1 - f_e(t) - \beta^2$		FD			

Table 1 (continued)

	in equations	in program	for output	unit	remarks
time step for calculation	$\Delta t$	H			$5 \times 10^{-12} \text{s}$
rise time of the beam current		TR		s	
peak time of the beam current		TF		"	
down time of the beam current		TD		"	
end time of calculation	$t_{\text{end}}$	TEND			$10 \times 10^{-9} \text{s}$
peak current of the beam	$I^P$	AIP			
number of gas pres- sure calculation		NPI			
write out every NP points		NP			
correction factor for equation (1)		EZP			0.93 for a cylindri- cal beam
	$\alpha_b I_b(t) / \pi r_0^2$	TERM1			1st term of equation (2)
	$n_e(t) / t_i(t)$	TERM2			2nd term
	$-\alpha_T n_e(t) n_1(t)$	TERM3			3rd term
	$-\alpha_{rd} n_e(t) n_d(t)$	TERM4			4th term

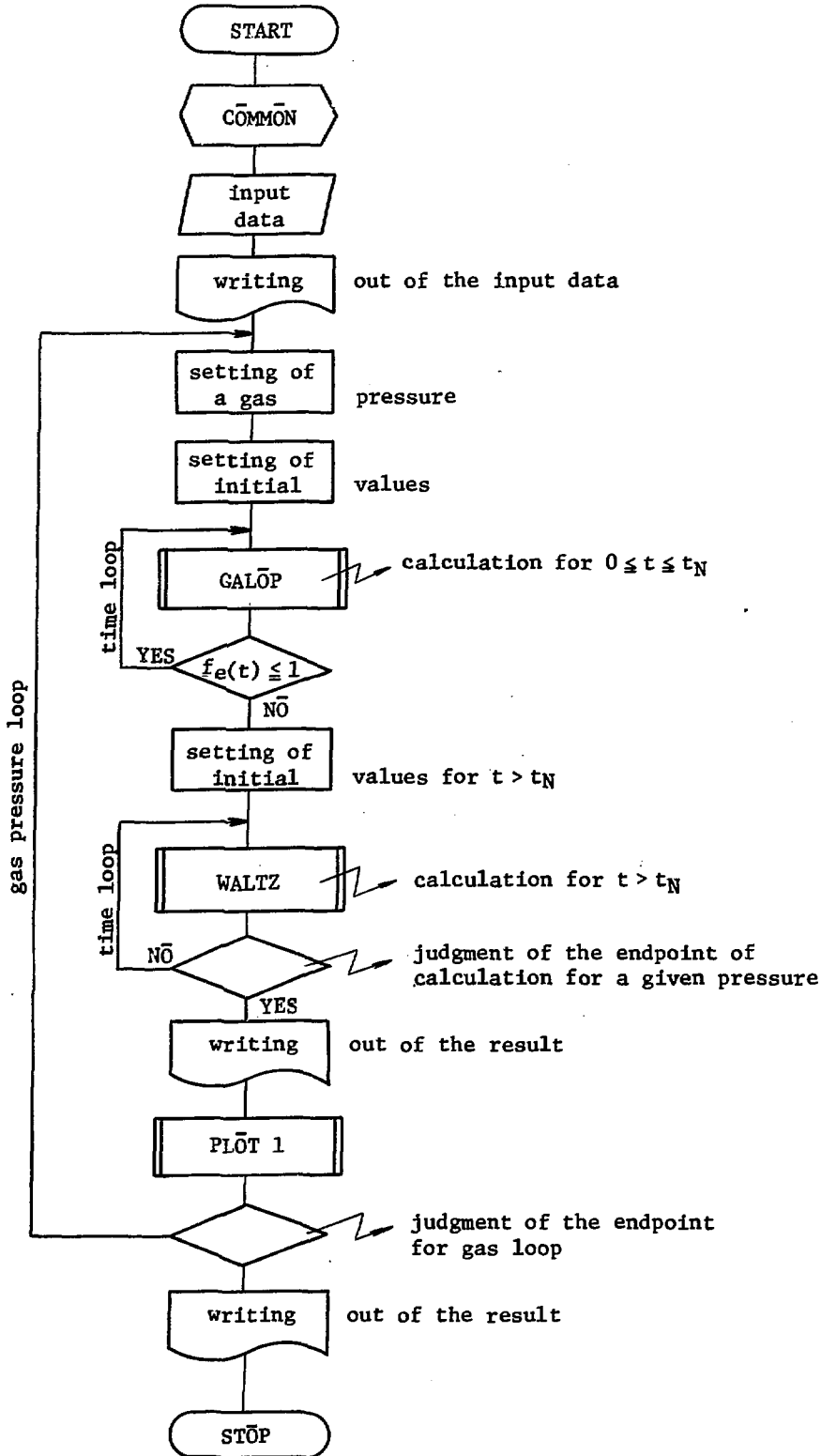


Fig. 1 The flow sheet of MAIN PROGRAM

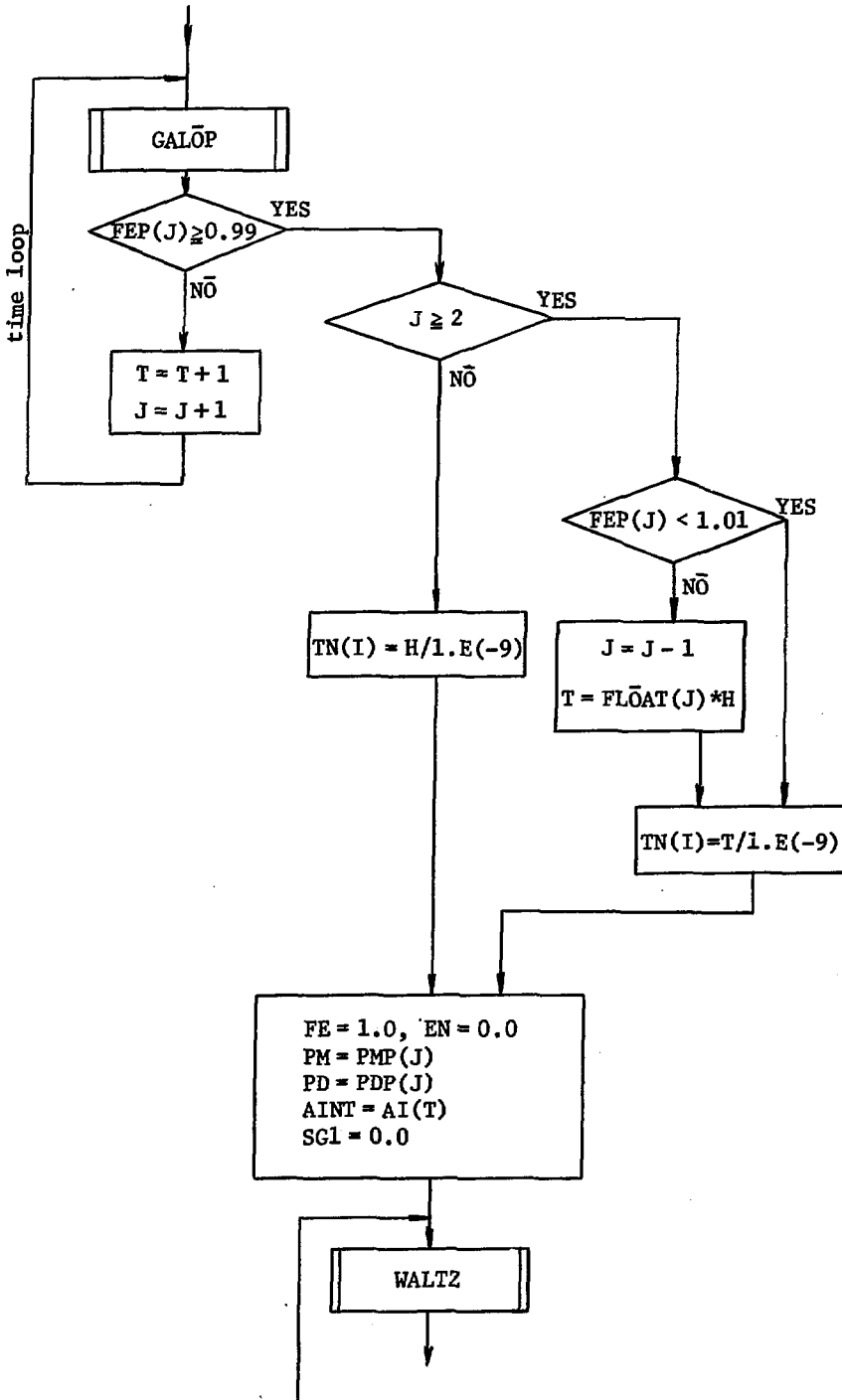


Fig. 2 The details of the portion judging  $f_e(t) = 1$  in MAIN PROGRAM

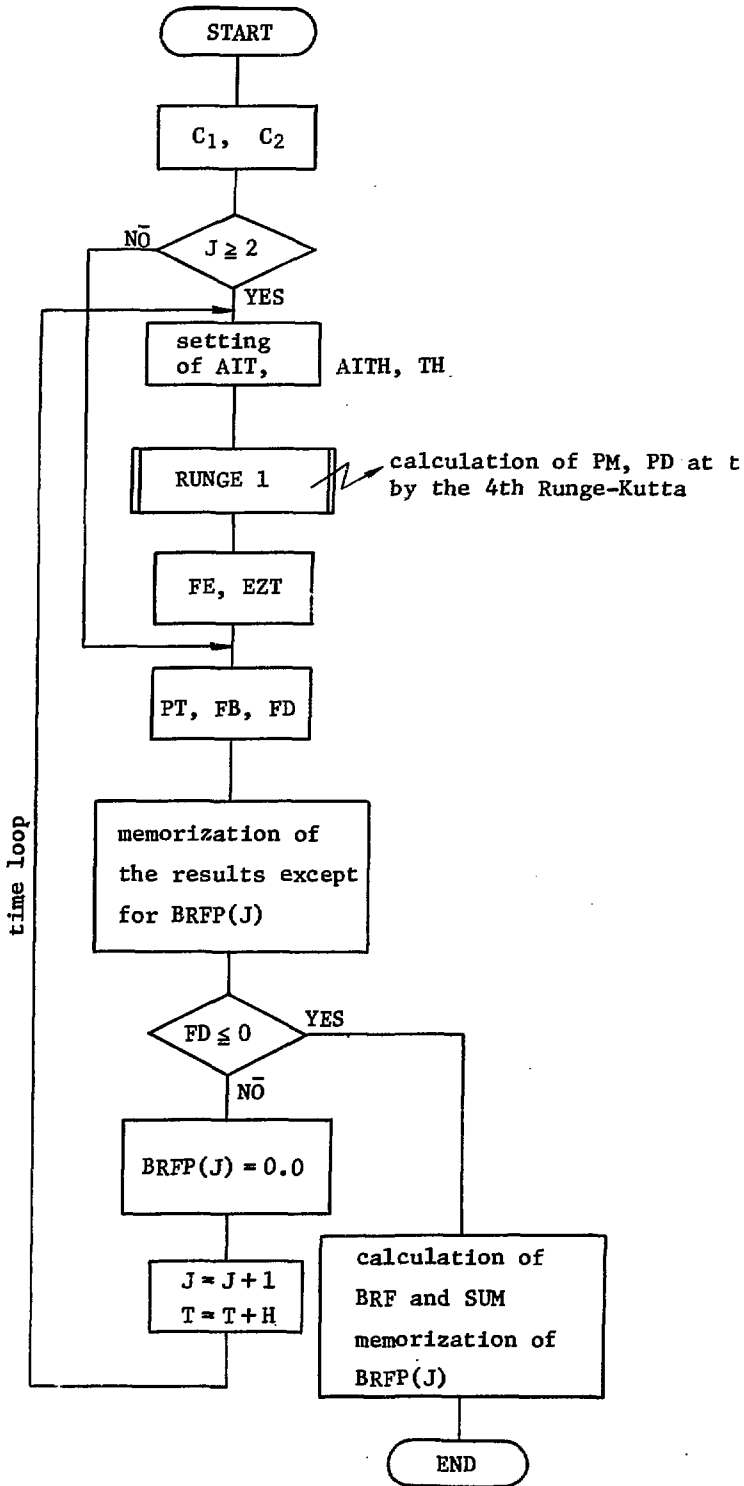


Fig. 3 The flow sheet of SUBROUTINE GALOP

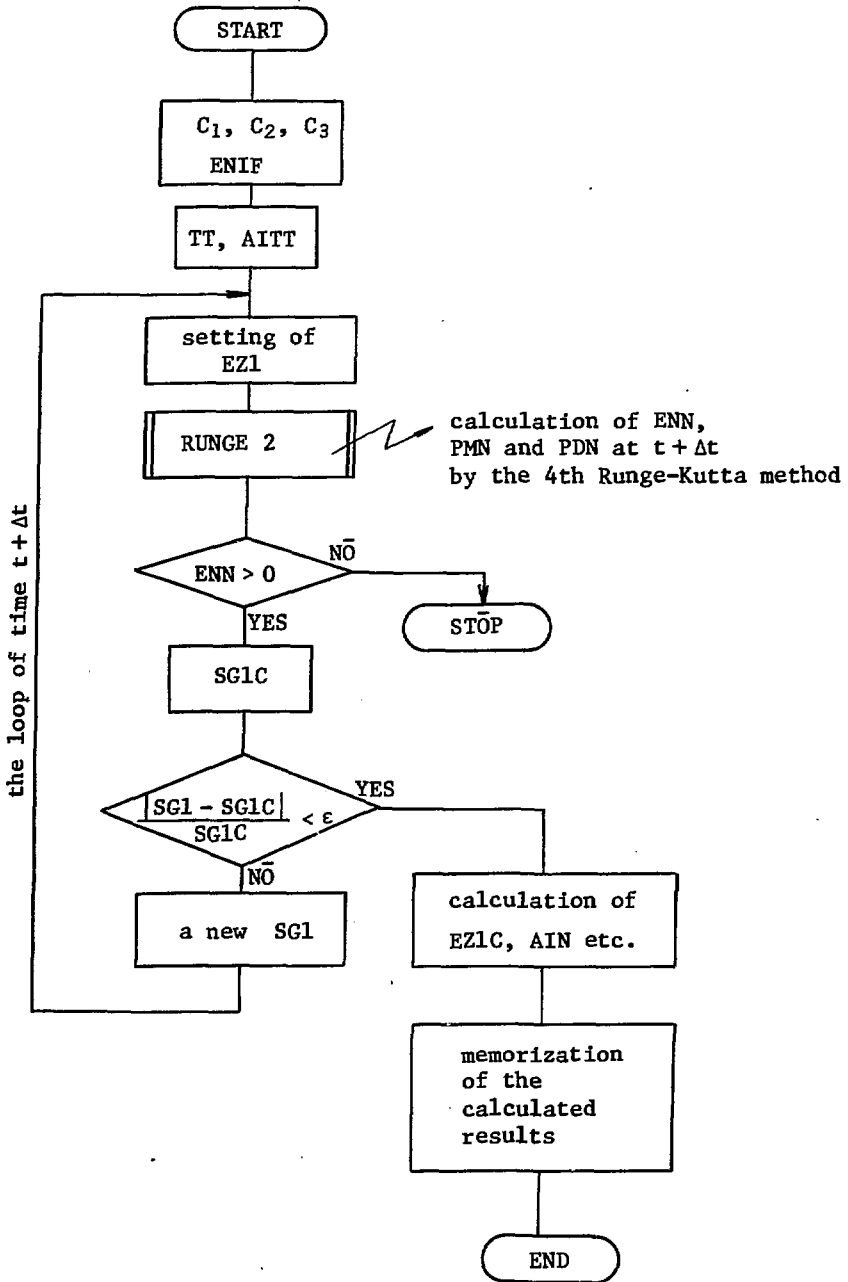


Fig. 4 The flow sheet of SUBROUTINE WALTZ

## 5. Ar についての主な計算結果

Ar の  $\sigma_{\text{ion}}(480 \text{ keV}) = 9.99 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 \text{ }^{16)}$ , ダイマーイオン生成の速度定数  $k_d = 2.1 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ }^{17)}$  を用い, また  $r_0 = 0.6$  の一定の仮定の下に, 気体圧 2, 5, 10, 30, 50, 80, 140, 300 Torr で得られた  $I_{\text{net}}(t)$ ,  $E_z(t)$ ,  $|E_z(t)|/p$ ,  $n_e(t)$ ,  $\sigma_T(t)$ ,  $n_d(t)$  の計算値をそれぞれ  $t$  の関数として Fig. 5 ~ Fig. 10 に示した。これらの結果の主な特徴は次の通りである。

$I_{\text{net}}(t)$  : Fig. 5

10 Torr 以下では,  $I_{\text{net}}(t)$  はある時間以後はほぼ一定値を取るが, 気体圧が高くなると,  $t$  と共に増加し極大を経て減少する。

$E_z(t)$  : Fig. 6

$t$  と共に  $|E_z(t)|$  は速やかに減少し, ある時間以後  $E_z$  の向きがかわった後, 再び増加する。

$|E_z(t)|/p$  : Fig. 7

$t$  と共に速やかに減少すると共に, 気体圧の増加と共に減少する。

$n_e(t)$  : Fig. 8

気体圧が高くなると, パルス後半部での増加が大きくなるが, ピーク電流値付近の 3 ns 近くでの  $n_e(t)$  値は  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  のオーダーであり, 50 Torr 以上では気体圧を増すと逆に減る傾向にある。

$\sigma_e(t)$  : Fig. 9

10 Torr 以下では,  $\sigma_T(t)$  の最終値は 5 ~ 6 mho/cm に到達するが, 気体圧が高くなると,  $\sigma_T(t)$  の最終値は 1 mho/cm 以下となる。

$n_d(t)$  : Fig. 10

気体圧と共に  $n_d(t)$  値は大きくなるが, 300 Torr でも最終値は  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  のオーダーであり, 最大でも  $n_e(t)$  値の数%以下である。

図示しなかったが,  $n_i(t)$  値は  $n_e(t)$  値とほとんど同じ値であり, 気体圧が高くなるとダイマー正イオン生成により減少するが, その減少の程度は  $n_e(t)$  値の数%以下であった。また, 図示しなかったが, 系中の二次電子の平均エネルギー  $\bar{\epsilon}$  は, 気体圧とほとんど無関係に 9 ~ 11 eV であった<sup>脚注 6)</sup>。

脚注 6) この  $\bar{\epsilon}$  値は本研究の計算から得られたものではなく, 単に  $|E_z(t)|/p$  の関数としての文献 12) の  $D_L/\mu$  の値から換算したものである。

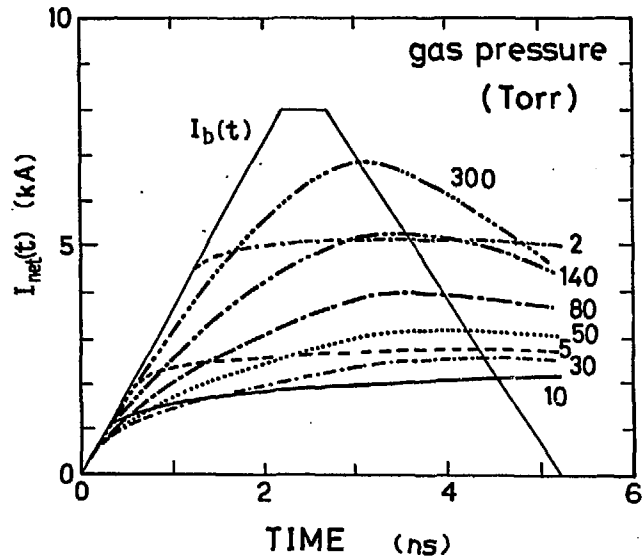


Fig. 5 The calculated values of the net current  $I_{net}(t)$  as a function of time for various pressures of Ar. The solid straight lines show the beam current

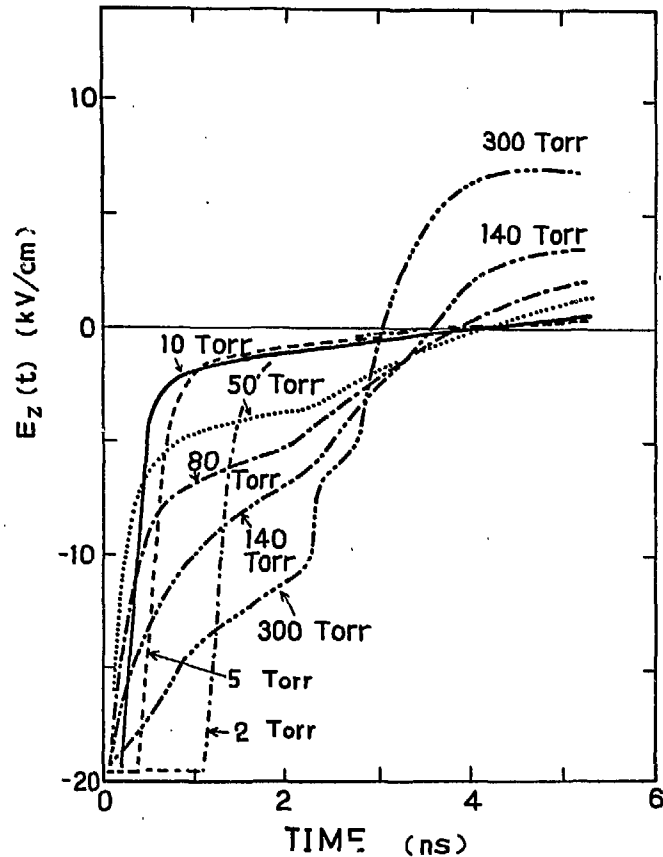


Fig. 6 The calculated values of the induced longitudinal electric field  $E_z(t)$  as a function of time for various pressures of Ar



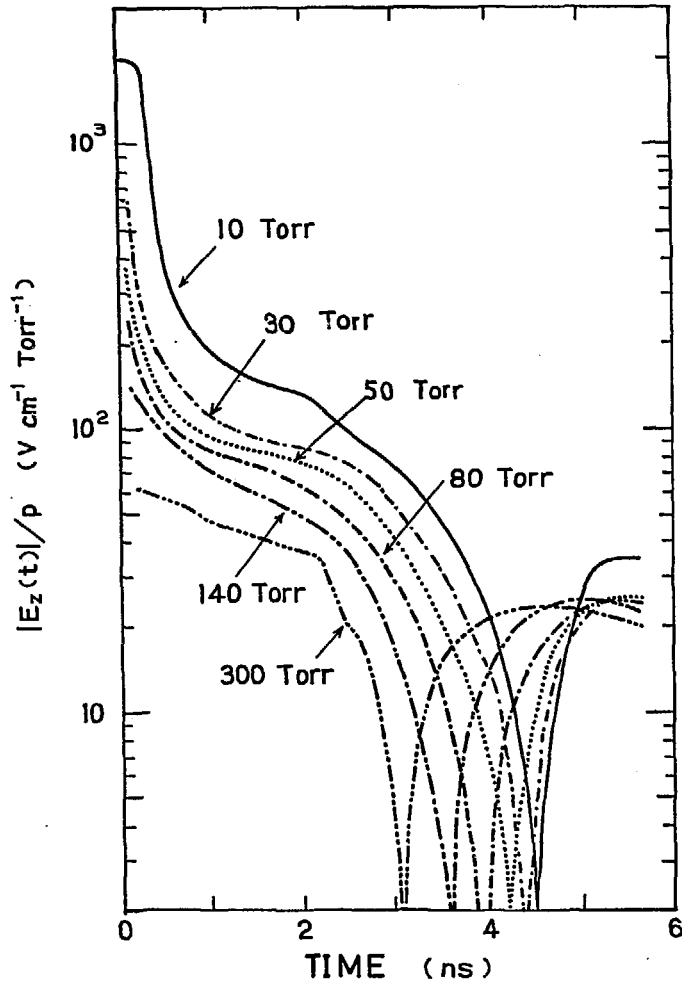


Fig. 7 The calculated values of  $|E_z(t)|/p$  as a function of time for various pressures of Ar

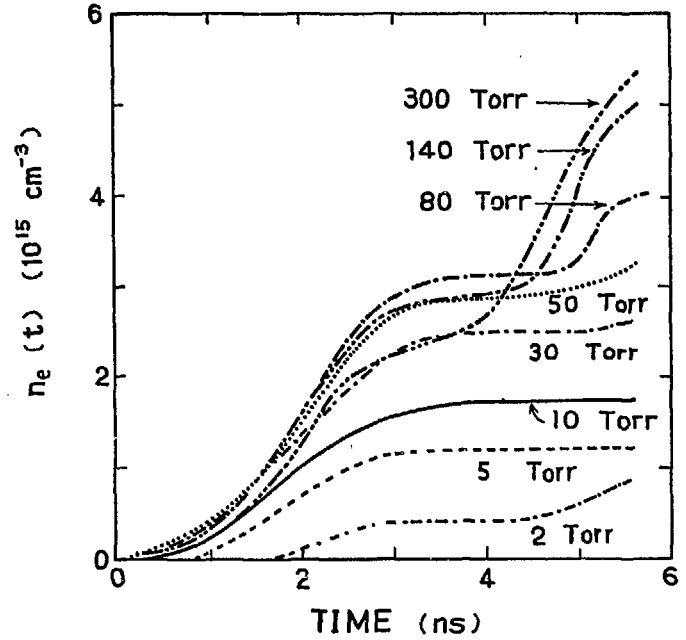


Fig. 8 The calculated values of the number density of the secondary electrons  $n_e(t)$  as a function of time for various pressures of Ar

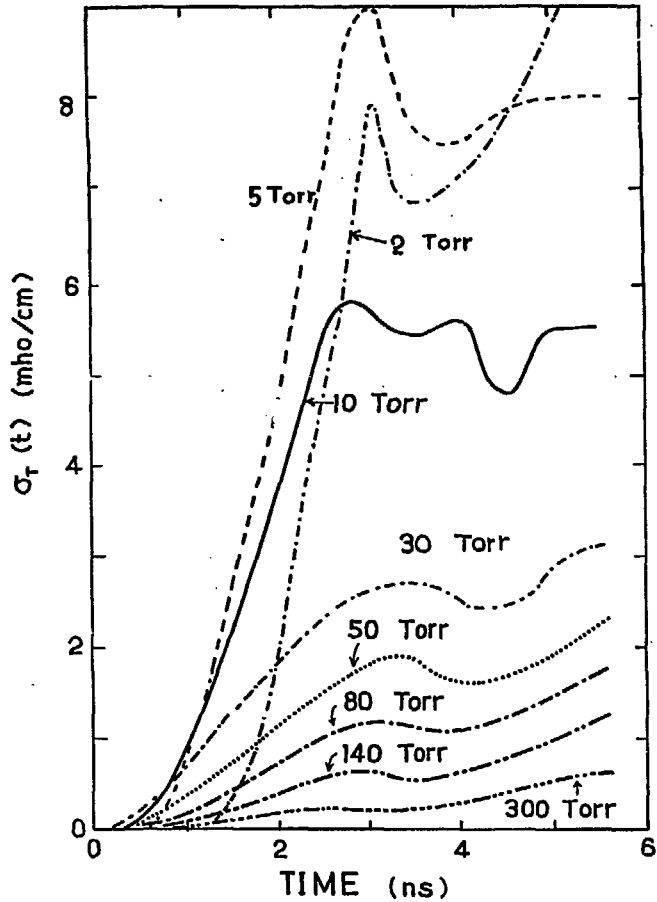


Fig. 9 The calculated values of the total electric conductivity  $\sigma_T(t)$  as a function of time for various pressures of Ar

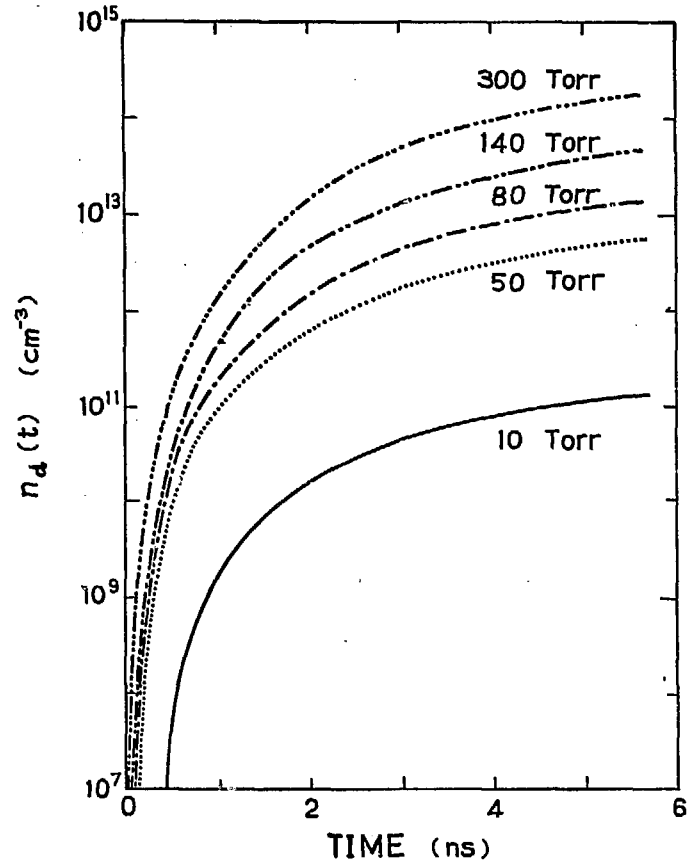


Fig. 10 The calculated values of the number density of dimer ions  $n_d(t)$  as a function of time for various pressures of Ar

## 6. 解析モデルの妥当性

気体セル中に打ちこまれた大強度パルス電子線のビーム強度分布を、ビーム中心軸上のある固定点に置いた線量計で線量として測定した場合、観測線量  $D_{\text{obs}}$  は式(2)で与えられる<sup>9)</sup>。

$$D_{\text{obs}} \propto \int_0^{t_N} \frac{I_b(t)^2 |1 - f_e(t) - \beta^2|}{\epsilon(t)^2} dt + \int_{t_N}^{t_p} \frac{I_{\text{net}}(t) I_b(t) \beta^2}{\epsilon(t)^2} dt \quad (2)$$

ここで  $\pi \epsilon(t)$  はビーム・エミッタンスでビーム固有の発散性を表わす尺度である。また、 $t_p$  はパルス持続時間 (Febetron 706 では約 5.2 ns) である。

用いたモデルの妥当性を確かめるため、 $\epsilon(t)$  = 一定として、5. の数値計算の際同時に求められた式(2)の積分値を  $t_N$  の値と共に Table 2 にまとめると同時に任意のスケールで気体圧の関数として、Fig. 11 中に○印で示し、図中に▲印で示した実測線量と比較する (図中の他の記号は、ビーム電流の特性をパラメータとして変化させた場合の式(2)の積分値である)。実測線量との比例性はよくないが、積分値の気体圧依存性は実測線量のそれとよく対応しているため、モデルはほぼ妥当なものと言える。Fig. 11 の 300 Torr 以上で実測線量が減少するのは、気体原子による一次電子線の多重散乱による<sup>2)</sup>。

4. 10 で与えたビーム電流の特性の値およびビーム半径には不確な部分があるので、これらの値をパラメータ的に変えた場合の計算値の変化について検討する。Table 3 に各 Input Data をまとめた (Fig. 5 ~ Fig. 10 は Input Data 1 を用いて得られたもので、この Input Data を基準として他の Input Data では変更点の値のみを記載した)。まず、式(2)の積分値に与える影響を Fig. 11 に示した。この積分値に対してはビーム半径およびビーム電流の立ち上がり時間  $t_r$  の変化の効果が大きい。ビーム半径が多少変化した場合の効果は小さいことがわかる。各 Input Data を用いて気体圧 10, 50, および 140 Torr で得られた  $t = t_p$  での主な出力変数値を Table 4 にまとめた。これらの表から、ピーク電流値および  $t_r$  の特性の変化は、 $n_e(t)$  等の値を本質的に変えるものではないことがわかる。ビーム半径の変化による  $n_e(t)$  値等の変化量は大きい。これは数密度がビーム半径の 2 乗に反比例するため、本質的に問題とはならない。

以上の検討から、本研究のモデルは妥当なものと考えられるが、Fig. 5 ~ 10 の計算結果は上述のような値の幅を含むことに注意する必要がある。

Table 2 The calculated values of the integral in equation (20) and  $t_N$  at various pressures of  $A_T$

gas pressure (Torr)	the value of the integral	$t_N$ (ns)
0.1	0.00325	4.60
0.2	0.0139	4.09
0.4	0.0431	3.35
0.6	0.0694	2.91
0.8	0.0892	2.57
1.0	0.0997	2.27
1.2	0.1050	1.95
1.5	0.0944	1.56
2.0	0.0787	1.17
5.0	0.0431	0.47
10	0.0321	0.24
20	0.0318	0.12
30	0.0351	0.08
50	0.0434	0.05
80	0.0557	0.03
140	0.0735	0.02
300	0.0930	0.01
500	0.0974	0.005
760	0.0995	0.005

Table 3 The list of the Input Data 1 ~ 5

	Input Data 1	Input Data 2	Input Data 3	Input Data 4	Input Data 5
$I^P$ (A)	8000	9000			
$r_0$ (cm)	0.6		0.8	1.2	
$t_r$ (ns)	2.2				3

Table 4 The summary of the values of the representative variables calculated using the input data in Table 3 at 10, 50, and 140 Torr of Ar

gas pressure (Torr)		Input Data				
		1	2	3	4	5
10	$I_{net}(t)$ (A)	2180	2310	2300	2520	2070
	$E_Z(t)$ (V/cm)	345	315	371	418	306
	$\sigma_T(t)$ (mho/cm)	5.60	6.48	3.08	1.34	5.96
	$n_e(t)$ ( $10^{15}\text{cm}^{-3}$ )	1.73	2.00	0.942	0.399	1.83
	$n_i(t)$ ( $10^{15}\text{cm}^{-3}$ )	1.73	2.00	0.942	0.399	1.83
	$n_d(t)$ ( $10^{12}\text{cm}^{-3}$ )	0.123	0.141	0.0692	0.0300	0.146
50	$I_{net}(t)$ (A)	3070	3150	3330	3780	3440
	$E_Z(t)$ (V/cm)	1280	1120	1350	1820	1330
	$\sigma_T(t)$ (mho/cm)	2.12	2.48	1.23	0.460	2.14
	$n_e(t)$ ( $10^{15}\text{cm}^{-3}$ )	3.05	3.54	1.80	0.693	3.10
	$n_i(t)$ ( $10^{15}\text{cm}^{-3}$ )	3.05	3.53	1.79	0.692	3.10
	$n_d(t)$ ( $10^{12}\text{cm}^{-3}$ )	4.97	5.83	2.75	1.12	5.07
140	$I_{net}(t)$ (A)	4510	4780	4710	4950	4890
	$E_Z(t)$ (V/cm)	3430	3440	3420	3400	3420
	$\sigma_T(t)$ (mho/cm)	1.16	1.23	0.686	0.321	1.27
	$n_e(t)$ ( $10^{15}\text{cm}^{-3}$ )	4.62	4.87	2.72	1.27	5.02
	$n_i(t)$ ( $10^{15}\text{cm}^{-3}$ )	4.58	4.82	2.69	1.26	4.98
	$n_d(t)$ ( $10^{12}\text{cm}^{-3}$ )	40.8	49.5	22.3	9.14	40.0

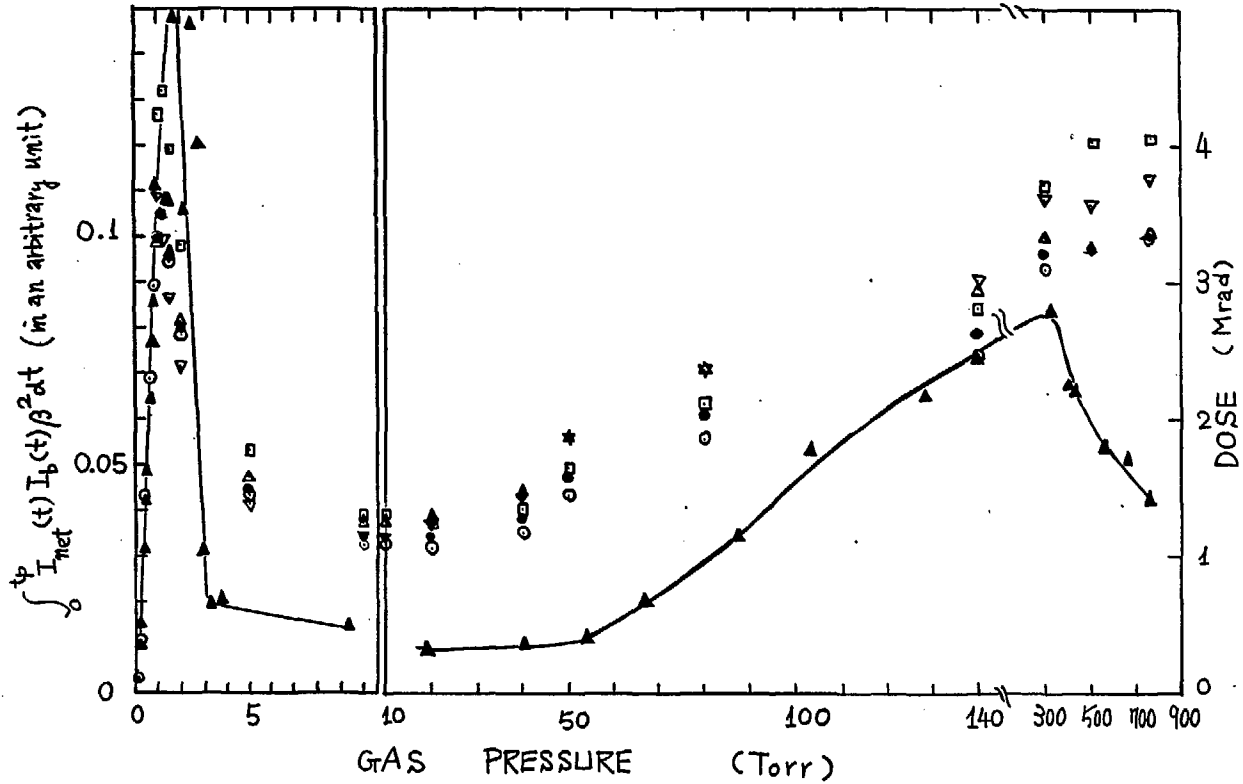


Fig. 11 Comparison between the observed dose (▲) and the values of integral in equation (20);  
 Input Data 1 (O), Input Data 2 (□), Input Data 3 (●),  
 Input Data 4 (▲), Input Data 5 (▼).

## 7. 計算結果の解析

Table 2 に示したように、Ar の 10 Torr 以上では  $t_N \approx 0$  となる。すると、式(2)の右辺は第 2 項のみとなる。すなわち、 $I_b(t)$  と  $\epsilon(t)$  はビーム固有のものと考えられるので、Fig. 11 の 10 ~ 150 Torr での実測線量の増加と Fig. 5 の  $I_{net}(t)$  の計算結果を対応させると、実測線量の増加は  $I_{net}(t)$  の増加によることがわかる。従って、上記圧力域でのビーム挙動の解明には、 $I_{net}(t)$  増大の因子を解明すればよい。ここでは、代表的な気体圧として 10 Torr と 140 Torr をとり上げて以下に解析する。

Fig. 12 に 10 Torr と 140 Torr での  $I_{back}(t)$  の経時変化を示す。図から明らかなように、140 Torr では 10 Torr の半分程度の  $I_{back}(t)$  しか流れない。すなわち、10 Torr と違って、140 Torr で  $I_{net}(t)$  が一様に増加するのは、 $I_{back}(t)$  が十分に流れないため、 $I_{back}(t)$  によるビーム電流中和効果が不完全なためである。他方  $I_{back}(t)$  は、式(6)で与えられるように、 $E_z(t)$  と  $\sigma_T(t)$  の積に比例する。そこで、どちらの因子が支配的であるか検討するため、10 Torr での  $E_z(t)$ 、 $\sigma_T(t)$  に対する 140 Torr でのそれぞれの値の比を取り、その経時変化を Fig. 13 に示した。図からわかるように、ビーム電子の大部分が含まれる 1 ~ 3 ns では、 $E_z(t)$  は 140 Torr の方が 5 倍程度大きい、 $\sigma_T(t)$  は逆に 140 Torr の方が 1/10 程度である。すなわち、140 Torr で小さな  $I_{back}(t)$  値は、主に小さい  $\sigma_T(t)$  が原因であることがわかる。

$\sigma_T(t)$  について見ると、5. で述べたように、 $\bar{\epsilon}$  は気体圧にほとんど依存しないので、式(4)中の  $Q_m(\bar{\epsilon}) \bar{\epsilon}^{1/2}$  はほとんど一定と見なせる<sup>脚注 7)</sup>。すると、 $\sigma_T(t)$  は次のように書き改められる。

$$\sigma_T(t) \propto \frac{n_e(t)}{p} \quad (2)$$

$n_e(t)$  値について見ると、Fig. 8 に示したように、 $t = 2 \sim 4$  ns での 140 Torr での  $n_e(t)$  値は 10 Torr の値の 2 倍程度の大きさである。一方、気体圧は 14 倍である。すなわち、140 Torr で  $\sigma_T(t)$  が大きな値にならない原因は、気体圧の増加の割合に比べ  $n_e(t)$  の増加の割合がはるかに小さいためである。この  $n_e(t)$  の増加が小さい原因は、Fig. 7 に示したように、気体圧が大きくなると、 $|E_z(t)|/p$  値が小さくなり、 $E/p$  の関数である  $t_i(t)$  値が大きくなる<sup>8)</sup>ためである。 $t_i(t)$  値が増大すると、式(2)の右辺第 2 項の寄与が少なく、式(2)の  $dn_e(t)/dt$  が小さくなるからである。Fig. 14 と Fig. 15 に式(2)の右辺の各項の値の経時変化を示した。10 Torr では第 2 項の寄与が第 1 項の寄与に比べ 100 倍近く大きい (0.5 ~ 3.5 ns) が、140 Torr では、第 2 項の相対的寄与率が減少していることがわかる。また、両圧力とも、イオン-電子再結合による二次電子の消失はほとんど無視できること、および、140 Torr ではダイマー正イオンによる二次電子消失速度が、モノマー正イオンのそれに比べ大きいことがわかる。

脚注 7) 10 Torr 以上では  $\sigma_{ei}(t)$  の寄与はほとんど無視できる。

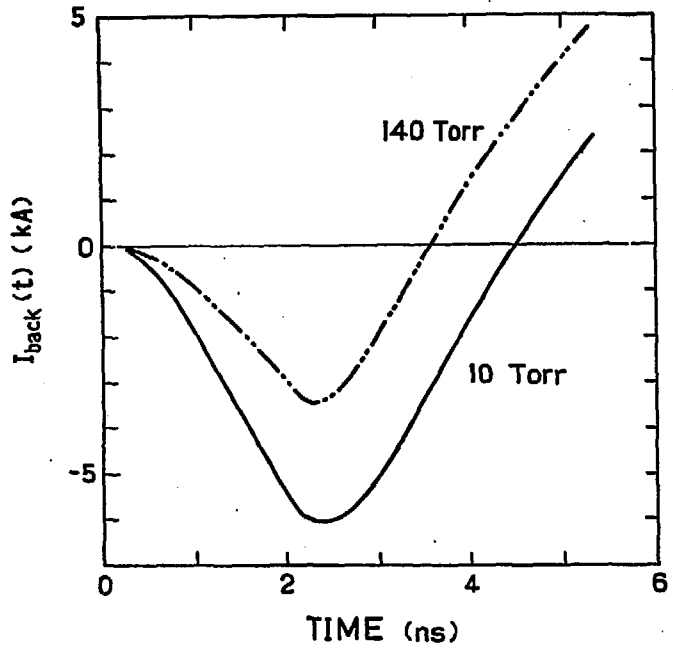


Fig. 12 The values of the plasma back current  $I_{\text{back}}(t)$  as a function of time for 10 and 140 Torr of Ar. The negative values show that the plasma back current streams in the opposite direction of the beam current

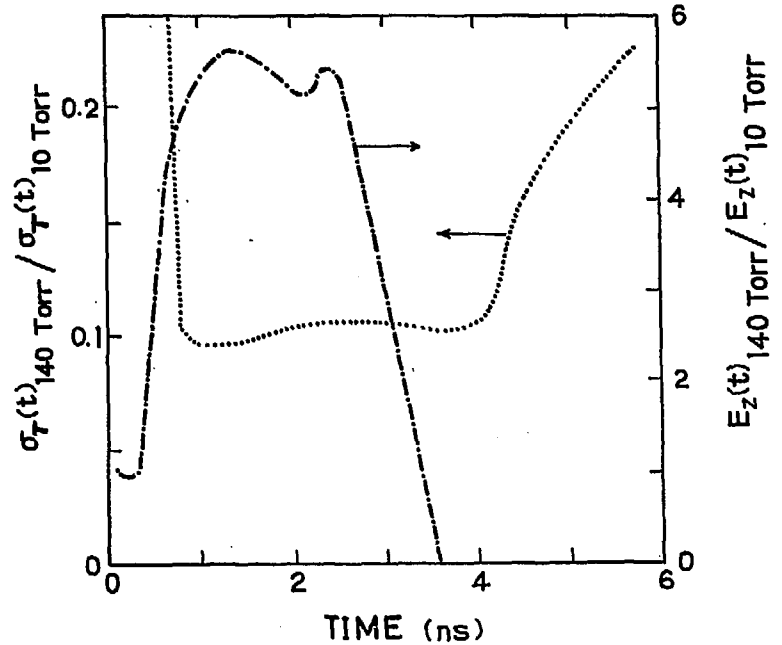


Fig. 13 Comparison between the calculated values of  $\sigma_T(t)$  and  $E_z(t)$  for 10 and 140 Torr of Ar



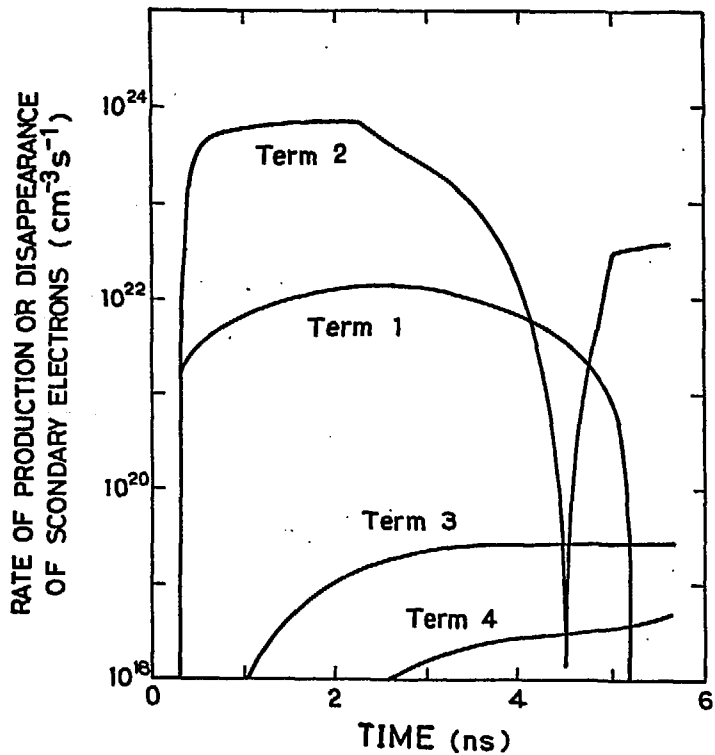


Fig. 14 The calculated values of the 1st, 2nd, 3rd and 4th terms in equation (2) as a function of time at 10 Torr of Ar

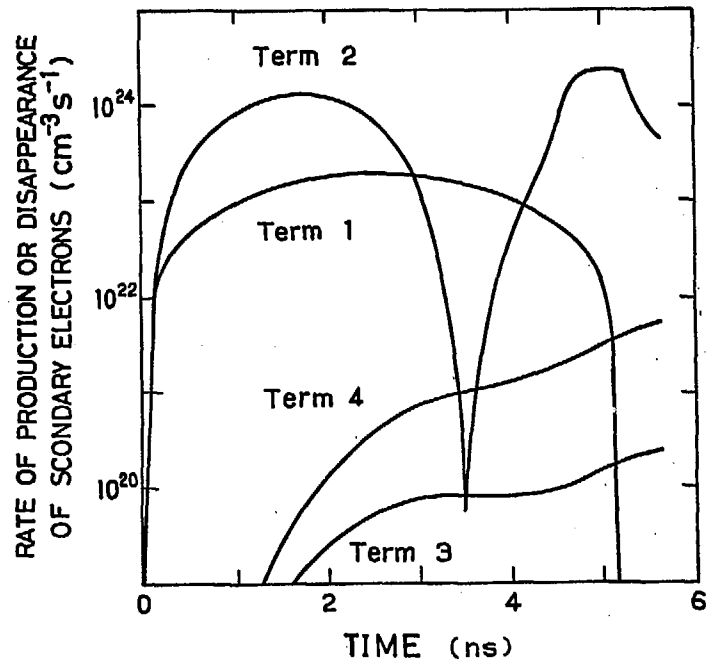


Fig. 15 The calculated values of the 1st, 2nd, 3rd and 4th terms in equation (2) as a function of time at 140 Torr of Ar

## 8. 結 論

本研究では、中間圧力域でのビーム挙動の支配因子を解明するため、パルス電子線による Ar 気体中での二次電子生成過程と電流中和過程を電算機によるシミュレーションを行ない、その結果の解析から次のような事を明らかにした。

- (1) 10 ~ 140 Torr の中間圧力域でのビーム挙動の気体圧依存性は、 $I_{net}(t)$  の気体圧依存性で説明される。
- (2)  $I_{net}(t)$  は 10 Torr 以下では、ある時間以後はほぼ一定値をとるが、気体圧が高くなると、ほぼ全パルス持続時間を通して  $I_{net}(t)$  の値は大きくなると共に、 $t$  の経過と共に増加する。
- (3) 気体圧を高めたことによる  $I_{net}(t)$  の増加は、気体圧が高くなると、 $\sigma_T(t)$  が減少し、十分な逆電流が流れないため、ビーム電流の中和が不完全なためである。
- (4) 上の  $\sigma_T(t)$  の減少は、気体圧が高まると、 $|E_z(t)|/p$  値が減少し、電場で加速された二次電子による電離周波数が減少し、系中の二次電子密度の増加分が気体圧の増加分には比小さいためである。
- (5) 低い線量が観測される条件下では、パルス電子線照射により気体の急速なイオン化が進行し、効率よくプラズマが生じている。
- (6) Ar 中では、パルス持続時間中でのイオンと電子の再結合による二次電子の消失はほとんど無視できる。

これらの結論は他の単一気体についても適用できるものと考えられる。

以上述べたように、本研究で作成したプログラムは、パルス電子線照射気体の電離過程の解明に極めて有効である。このプログラムは一般性を持たせて作成されてあるので、ごく一部を替えるだけで任意のビーム電流波形のパルス電子線、あるいは、絶縁破壊の形成時間  $t_f$ <sup>脚注 8)</sup>、運動量移動断面積  $Q_m$ 、電場下の気体中の二次電子の平均エネルギー  $\bar{\epsilon}$  等の既知の任意の気体について適用可能である。さらに、問題とするタイムスケールに応じて、副プログラム中の Runge-Kutta の部分をさらに簡略化、あるいは、別の新しい反応を組みこむことも容易である。

式(5)は、電子間の相互作用の無視できる仮想的な完全電離気体中での磁場に垂直な電流に対する式である。電子間相互作用を含めると 0.582 倍の値となる<sup>7)</sup>。厳密には、後者の値を使うべきであるが、本研究でのイオン化度は低い(数%以下)ので、近似的には、式(5)で十分であろう。

脚注 8)  $t_f$  の実測値の知られていない気体については、Townsend の第 1 電離係数  $\alpha$  (イオン対数/cm)、電子の移動速度  $w$  (cm/s) の知られている気体<sup>18)</sup> については、次式より求められる  $t_f$  値を用いることができる。

$$t_f = 1 / (w \alpha) \quad (22)$$

## 謝 辞

本研究は昭和 46 ~ 52 年の間、高崎研究所研究部で堀田 寛主任研究員（現福井工大教授）を中心に進められてきた気体中での大強度パルス電子線の自己集束現象の研究から派生した問題を、筆者の大阪研究所勤務時期（昭和 52 年 ~ 55 年）、放射線化学の基礎過程の研究の一環として行なったものである。終始御指導を頂いた堀田 寛教授、また、本研究を進めるに際して御理解と激励を頂いた大島裕之助大阪研究所長および畑田主任研究員に心から感謝申し上げます。また、東海研究所計算センター柴田勝成氏には電子計算機利用に際して御高配を頂き、富士通（株）佐藤真一氏にはプログラム作成と電算機利用に際して、貴重な御助言と御協力を頂いたことを明記して、両氏に深く感謝致します。また、本プログラム中の Lagrange の補間法の部分は北海道大学工学部田頭博昭教授の御教示によることを記して田頭教授に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) H. Hotta, R. Tanaka, H. Sunaga, and H. Arai, Radiat. Res. 63, 24 (1975).
- 2) H. Hotta, R. Tanaka, and H. Arai, *ibid.* 63, 32 (1975).
- 3) H. Arai and H. Hotta, *ibid.* 64, 407 (1975).
- 4) H. Hotta and H. Arai, J. Chem. Phys. 67, 3608 (1977).
- 5) G. Yonas and A.J. Topfer, "Gaseous Electronics", Vol.1, ed. M.N. Hirsh and H.J. Oskam, Academic Press, New York, 399 (1978).
- 6) S. Putnam, PIFR-72-105, "Theoretical Studies of Intense Relativistic Electron Beam-Plasma Interactions", Physics International Comp., (1971).
- 7) L. Spitzer, Jr., "Physics of Fully Ionized Gases", Interscience Tracts on Physics and Astronomy, John Wiley and Sons, 138 (1962).
- 8) P. Felsenthal and J.M. Proud, Phys. Rev. 139, A1796 (1965).
- 9) H. Arai and H. Hotta, Radiat. Res. 77, 405 (1979).
- 10) D.W. Swain, J. Appl. Phys. 43, 396 (1972).
- 11) S.S. Kuo, "Numerical Methods and Computers", Addison-Wesley Publishing Comp., Inc., 1965  
 [村越勝弘訳, 「FORTRAN のための数値計算法」, p. 148, 日本コンピューター協会 (1972)].
- 12) C.S. Lakshminarasimha and J. Lucas, J. Phys. D 10, 313 (1977).
- 13) L.S. Frost and A.V. Phelps, Phys. Rev. 136, A1538 (1964).
- 14) D.R. Bates, S.E. Kingston, and P.W.P. McWhirter, Proc. R. Soc. A267, 297 (1962).
- 15) F.J. Mehr and M.A. Biondi, Phys. Rev. 176, 322 (1968).
- 16) F.F. Rieke and W. Prepejchal, Phys. Rev. A 6, 1507 (1972).
- 17) A. Good, Chem. Rev. 75, 561 (1975).
- 18) J. Dutton, J. Phys. Chem. Ref. Data 4, 577 (1975).

## 付録— Ar に関する実際のプログラム……

```

C----- MAIN PROGRAM -----
C*****
C
C      SIMULATION OF GAS IONIZATION
C
C      TIME : TIME(NS)
C      AII  : BEAM CURRENT (A)
C      AIN1 : NET CURRENT (A)
C      EZ   : INDUCED ELECTRIC FIELD (V/CM)
C      SIG1 : TOTAL CONDUCTIVITY (MHO/CM)
C      SGEP : CONDUCTIVITY DETERMINED BY ELECTRON-NEUTRAL COLLISION
C            (MHO/CM)
C      TERM1 : PRODUCTION RATE OF SECONDARY ELECTRONS BY BEAM ELECTRONS
C              (/CM**3/S)
C      TERM2 : PRODUCTION RATE OF SECONDARY ELECTRONS BY ELECTRON
C              AVALANCHE (/CM**3/S)
C      TERM3 : CONSUMPTION RATE OF SECONDARY ELETRONS BY MONOMER IONS
C              (/CM**3/S)
C      TERM4 : CONSUMPTION RATE OF SECONDARY ELECTRONS BY DIMER IONS
C
C      EVP  : MEAN ELECTRON ENERGY (EV)
C      FEP  : SPACE-CHARGE NEUTRALIZATION FACTOR
C      BRFP : BEAM RADIUS FACTOR
C      EN1  : DENSITY OF SECONDARY ELECTRON (CM**3)
C      PMP  : DENSITY OF MONOMER ION (CM**3)
C      POP  : DENSITY OF DIMER ION (CM**3)
C      WP   : ELECTRON DRIFT VELOCITY (CM/S)
C      ALLP : TOWNSEND'S FIRST IONIZATION COEFFICIENT (IPS/CM)
C
C*****
C      COMMON/BLKDAT/ SL,PAI,BETHA
C      COMMON/BLKIND/ SION,TR,TF,TD,H,AIP,RW,RB,ALPHA,EPS,NP
C
C      COMMON/BLKTN/ TIME(2100),AII(2100),AIN1(2100),EZ(2100),SIG1(2100),
C      +SGEP(2100),TERM1(2100),TERM2(2100),TERM3(2100),TERM4(2100),
C      +EVP(2100),FEP(2100),BRFP(2100),EN1(2100),PMP(2100),POP(2100),
C      +WP(2100),ALPP(2100),SUM
C
C      COMMON/BLKINP/ EZ1,EZP,SG1,SG1C,AIN,AINT,EN,PM,PD,ENN,PMN,PON,
C      +C1,C2,C3,RK
C
C      COMMON/BLKRC/ FIP
C
C      COMMON/BLKEZC/ EZ1C
C
C      DIMENSION P(25),SUM1(25),TN(25)
C      REAL*8 ANAME
C
C      READ(5,99) ANAME, NPI, FIP
C      READ(5,100) (P(I),I=1,NPI)
C      READ(5,101) SION,TR,TF,TD,TEND,H,RK
C      READ(5,102) AIP,RW,ALPHA,EPS,EZP,NP,RB
C
C
C      WRITE(6,200)
C      WRITE(6,201) ANAME
C
C      WRITE(6,202)
C      WRITE(6,203) SION,RK,H,TEND,TR,TF,TO
C      WRITE(6,204)
C      WRITE(6,205) AIP,RW,ALPHA,EPS,EZP,NF
C
ISN 00118
ISN 00119
ISN 00120
ISN 00121
ISN 00122
ISN 00123
ISN 00124
ISN 00125
ISN 00126
ISN 00127
ISN 00128
ISN 00129
ISN 00130
ISN 00131
ISN 00132
ISN 00133
ISN 00134
ISN 00135

```

```

ISN 00136      JEND = IFIX(TEND/H)
C
ISN 00137      I = 1
ISN 00138      80 P1 = P(I)
ISN 00139      WRITE(6,206) P1,RB
C
ISN 00140      C1 = -(2.0/SL**2)*(ALOG(RH/RB)+0.5)+300.0*3.0E9*EZP
ISN 00141      C2 = PA1*RB**2
ISN 00142      C3 = C1*C2
C
ISN 00142      J = 1
ISN 00144      T = 0.0
ISN 00145      PM = 0.0
ISN 00146      PD = 0.0
ISN 00147      EN = 0.0
ISN 00148      SUM = 0.0
C
ISN 00149      10 CALL GALOP(T,J,PI)
ISN 00150      IF(FEP(J).GE.0.99) GO TO 15
ISN 00151      T = T+H
ISN 00152      J = J+1
ISN 00153      GO TO 10
C
ISN 00154      15 IF(J.GE.2) GO TO 20
ISN 00155      TN(I) = H/1.0E-9
ISN 00156      GO TO 50
C
ISN 00157      20 IF(FEP(J).LT.1.01) GO TO 40
ISN 00158      J = J-1
ISN 00159      T = FLOAT(J)*H
C
ISN 00160      40 TN(I) = T/1.0E-9
ISN 00161      50 FE = 1.0
ISN 00162      EN = 0.0
ISN 00163      PM = PMP(J)
ISN 00164      PD = PDP(J)
C
C
C
ISN 00165      AINT = AIN1(J)
C
ISN 00166      SG1 = 0.0001
ISN 00167      EZ1C = EZ(J)
C
ISN 00168      30 CALL WALTZ(T,J,PI)
C
ISN 00169      IF(J.GE.JEND) GO TO 70
ISN 00170      SG1 = SG1C
ISN 00171      AINT = AIN
C
ISN 00172      EN = ENN
ISN 00173      PM = PMN
ISN 00174      PD = PDN
ISN 00175      J = J+1
ISN 00176      T = T+H
ISN 00177      GO TO 30
C
C
ISN 00178      70 SUM1(I) = SUM
C
ISN 00179      JP = IFIX((TR+TF+TD)/H)
ISN 00180      NP2 = NP+2
C
ISN 00181      WRITE(6,207)
ISN 00182      WRITE(6,208) (TIME(J),AII(J),AIN1(J),EZ(J),SIG1(J),SGEP(J),
+TERM1(J),TERM2(J),TERM3(J),TERM4(J),J=1,JP,NP)
C
ISN 00183      WRITE(6,208) (TIME(J),AII(J),AIN1(J),EZ(J),SIG1(J),SGEP(J),
+TERM1(J),TERM2(J),TERM3(J),TERM4(J),J=JP+1,JEND,NP2)
C
ISN 00184      WRITE(6,209)
ISN 00185      WRITE(6,210) (TIME(J),EVP(J),FEP(J),BRFP(J),EN1(J),PMP(J),PDP(J),
+WP(J),ALPP(J),J=1,JP,NP)
ISN 00186      WRITE(6,210) (TIME(J),EVP(J),FEP(J),BRFP(J),EN1(J),PMP(J),PDP(J),
+WP(J),ALPP(J),J=JP+1,JEND,NP2)

```

```

C
ISN 00187      CALL PLOT1(JEND)
C
ISN 00188      I   = I+1
ISN 00189      IF(I-1.LT.NPI) GO TO 80
C
ISN 00190      WRITE(6,211) (P(I),TN(I),SUMI(I),I=1,NPI)
C
ISN 00191      99  FORMAT(A8,I4,F8.2)
ISN 00192      100 FORMAT(7F6.1/12F6.1)
ISN 00193      101 FORMAT(7E11.2)
ISN 00194      102 FORMAT(F8.1,4F6.2,I4,F6.2)
C
ISN 00195      200 FORMAT(1H1///10X,'SIMULATION OF GAS IONIZATION')
ISN 00196      201 FORMAT(1H0,10X,'MEDIUM GAS=',A8)
ISN 00197      202 FORMAT(1H0,10X,'SIDN(CH**2)',1X,'RK(MC**2 CM**6/S)',5X,'H(S)',
+11X,'TEND(S)',12X,'TR(S)',12X,'TF(S)',12X,'FD(S)')
C
ISN 00198      203 FORMAT(1H0,4X,7E17.3)
ISN 00199      204 FORMAT(1H0,12X,'AIP(A)',4X,'RW(CH)',4X,'ALPHA',6X,'EPS',7X,'E2P',
+6X,'NP')
ISN 00200      205 FORMAT(1H0,10X,F7.0,4F10.2,I7)
C
ISN 00201      206 FORMAT(///1H1,15X,'GAS PRESSURE P=',F6.1,2X,'TORR AT 200C',
+10X,'BEAM RADIUS =',F6.2,2X,'(CM)')
C
ISN 00202      207 FORMAT(1H0,3X,'TIME(NS)',1X,'AI(A)',4X,'AIN1(A)',3X,'EZ(V/CM)',
+1X,'SIG1(MHO/CM)',1X,'SGEP',2X,'TERM1(/CM**3/S)',2X,'TERM2',8X,
+'TERM3',8X,'TERM4')
C
ISN 00203      208 FORMAT(1H ,F9.3,2F10.1,F11.2,2F10.3,4E13.3)
C
ISN 00204      209 FORMAT(///3X,'TIME(NS)',6X,'EVP(EV)',5X,'FEP',6X,'BRFP',7X,
+'EN1(CH**3)',2X,'PMP(CH**3)',2X,'PDP(CH**3)',4X,'NP(CH/S)',1X,
+'ALPP(IPS/CM)')
C
ISN 00205      210 FORMAT(1H ,F9.3,2F10.2,6E13.3)
C
ISN 00206      211 FORMAT(///1H1,110X,'PRESSURE=',F6.1,2X,'TORR',6X,'TN=',F6.3,6X,
+'SUM=',E9.3))
C
ISN 00207      STOP
ISN 00208      END

```

```

ISN 00065      SUBRCUTINE GALGP(T,J,PI)
C
ISN 00066      COMMON/BLKDAT/ SL,PAI,BETHA
ISN 00067      COMMON/BLKIND/ SION,TR,TF,TD,H,AIP,RW,RB,ALPHA,EPS,NP
C
ISN 00068      COMMON/BLKTN/ TIME(2100),AII(2100),AINI(2100),EZ(2100),SIGI(2100),
+SGEP(2100),TERM1(2100),TERM2(2100),TERM3(2100),TERM4(2100),
+EVP(2100),FEP(2100),BRFP(2100),EN1(2100),PMP1(2100),PDP(2100),
+WP(2100),ALPP(2100),SUM
C
ISN 00069      COMMON/BLKINP/EZ1,EZP,SG1,SG1C,AIN,AINT,EN,PH,PD,ENN,PHN,PON,
+C1,C2,C3,RK
C
ISN 00070      IF(J.GE.2) GO TO 10
ISN 00071      FE = 0.0
ISN 00072      EZT = 0.0
ISN 00073      PMN = 0.0
ISN 00074      PDN = 0.0
ISN 00075      AIT = AI(T)
ISN 00076      GO TO 20
ISN 00077      10 AIT = AI(T)
ISN 00078      AITH = AI(T-H)
ISN 00079      TH = T-H
ISN 00080      CALL RUNGE1(TH,PI)
C
ISN 00081      ALL = PHN+PDN
ISN 00082      BEN = AIT/(C2*1.6E-19*SL*BETHA)
ISN 00083      FE = ALL/BEN
ISN 00084      EZT = C1*(AIT-AITH)/H
C
ISN 00085      20 PT = PI-(PMN+2.0*PDN)/3.3E16
C
ISN 00086      FD = 1.0-BETHA**2-FE
ISN 00087      Z = ABS(EZT/PT)
C
ISN 00088      TIME(J) = T/1.0E-9
ISN 00089      AII(J) = AIT
ISN 00090      EZ(J) = EZT
ISN 00091      SIGI(J) = 0.0
ISN 00092      SGEP(J) = 0.0
C
ISN 00093      TERM1(J) = 0.0
ISN 00094      TERM2(J) = 0.0
ISN 00095      TERM3(J) = 0.0
ISN 00096      TERM4(J) = 0.0
C
ISN 00097      EVP(J) = EV(Z)
ISN 00098      FEP(J) = FE
ISN 00099      EN1(J) = 0.0
ISN 00100      PMP(J) = PHN
ISN 00101      PDP(J) = PDN
ISN 00102      WP(J) = 1.0E1
ISN 00103      ALPP(J) = 1.0E1
C
ISN 00104      PH = PHN

ISN 00105      PD = PDN
ISN 00106      IF(FD.LE.0.0) GO TO 30
ISN 00107      AINI(J) = 0.0
ISN 00108      BRFP(J) = 0.0
ISN 00109      J = J+1
ISN 00110      T = T+H
ISN 00111      GO TO 10
C
ISN 00112      30 BRF = AIT**2*ABS(FD)
ISN 00113      SUM = SUM+BRF*H
ISN 00114      AINI(J) = AIT
ISN 00115      BRFP(J) = BRF
C
ISN 00116      RETURN
ISN 00117      END

```



```

ISN 00298      SUBROUTINE RUNGE1(T,PI)
C
ISN 00299      COMMON/BLKINP/ EZ1,EZP,SG1,SG1C,AIN,AINT,EN,PM,PD,ENN,PHN,PDN,
+C1,C2,C3,RK
ISN 00300      COMMON/BLKIND/ SION,TR,TF,TD,H,AIP,RW,RB,ALPHA,EPS,NP
C
ISN 00301      T1 = T
ISN 00302      PM1= PM
ISN 00303      PD1= PD
C
ISN 00304      CALL DIF1(PM1,PD1,T1,PI,G2,G3)
C
ISN 00305      DPM1= H*G2
ISN 00306      DPD1= H*G3
C
ISN 00307      T2 = T+H/2.
ISN 00308      PM2= PM+DPM1/2.
ISN 00309      PD2= PD+DPD1/2.
C
ISN 00310      CALL DIF1(PM2,PD2,T2,PI,G2,G3)
C
ISN 00311      DPM2= H*G2
ISN 00312      DPD2= H*G3
C
ISN 00313      T3 = T+H/2.
ISN 00314      PM3= PM+DPM2/2.
ISN 00315      PD3= PD+DPD2/2.
C
ISN 00316      CALL DIF1(PM3,PD3,T3,PI,G2,G3)
C
ISN 00317      DPM3= H*G2
ISN 00318      DPD3= H*G3
C
ISN 00319      T4 = T+H
ISN 00320      PM4= PM+DPM3
ISN 00321      PD4= PD+DPD3
C
ISN 00322      CALL DIF1(PM4,PD4,T4,PI,G2,G3)
C
ISN 00323      DPM4= H*G2
ISN 00324      DPD4= H*G3
C
ISN 00325      PHN = PM+{(DPM1+2.0*DPM2+2.0*DPM3+DPM4)}/6.0
ISN 00326      PDN = PD+{(DPD1+2.0*DPD2+2.0*DPD3+DPD4)}/6.0
C
ISN 00327      RETURN
ISN 00328      END

```

```

ISN 00019      SUBROUTINE DIF1(PMDI,PDDI,T,PI,G2,G3)
C
ISN 00020      COMMON/BLKINP/ EZ1,EZP,SG1,SG1C,AIN,AINT,EN,PM,PD,ENN,PHN,PDN,
+C1,C2,C3,RK
C
ISN 00021      COMMON/BLKIND/ SION,TR,TF,TD,H,AIP,RW,RB,ALPHA,EPS,NP
C
ISN 00022      PT = PI-(PMDI+2.0*PDDI)/3.3E16
ISN 00023      ALFB = 3.3E16*PT+SION/1.6E-19
ISN 00024      GD = 3.3E16*PT
C
ISN 00025      G2 = ALFB*AI(T)/C2-RK*PMDI*GD**2
ISN 00026      G3 = RK*PMDI*GD**2
C
ISN 00027      RETURN
ISN 00028      END

```

```

ISN 00369      SUBROUTINE WALTZ(T,J,PI)
C
C
ISN 00370      COMMON/BLKDAT/ SL,PAI,BETHA
ISN 00371      COMMON/BLKIND/ SION,TR,TF,TD,H,AIP,RW,RB,ALPHA,EPS,NP
C
ISN 00372      COMMON/BLKTN/TIME(2100),AII(2100),AINI(2100),EZ(2100),SIGI(2100),
+SGEP(2100),TERM1(2100),TERM2(2100),TERM3(2100),TERM4(2100),
+EVP(2100),FEP(2100),BRFP(2100),EN1(2100),PMP(2100),PDP(2100),
+WP(2100),ALPP(2100),SUM
C
ISN 00373      COMMON/BLKINP/EZ1,EZP,SG1,SG1C,AIN,AINT,EN,PH,PD,ENN,PMN,PDN,
+C1,C2,C3,RK
C
ISN 00374      COMMON/BLKEZC/ EZ1C
C
ISN 00375      ENIF= 0.5*3.3E16*PI
ISN 00376      TT = T+H
ISN 00377      AITT= A1(TT)
C
ISN 00378      10 EZ1 = C1*(AITT-AINT)/(H-C3*SG1)
C
ISN 00379      CALL RUNGE2(T,PI,F1,F2,F3)
C
ISN 00380      IF(ENN.GE.0.0) GO TO 36
ISN 00381      WRITE(6,212)
ISN 00382      STOP
C
ISN 00383      36 IF(ENN.LE.ENIF) GO TO 37
ISN 00384      WRITE(6,213)
ISN 00385      STOP
C
ISN 00386      37 PT = PI-(PMN+2.0*PDN)/3.3E16
ISN 00387      Z =ABS(EZ1/PT)
C
ISN 00388      Z =ABS(EZ1C/PT)
C
ISN 00388      EVZ = EV(Z)
C
ISN 00389      ET = 0.667*EVZ
ISN 00390      ETSR= ET*SQR(ET)
ISN 00391      ALAMD=23.5*ALOG(ETSR)-0.5*ALOG(ENN)
ISN 00392      SGI = 97.1*ETSR/ALAMD
C
ISN 00393      SGE = 1.29E-16*ENN/PT/QM(EVZ)/SQR(EVZ)/9.0E11
ISN 00394      SGI= SGE+SGI/(SGE+SGI)
C
ISN 00395      DELTA=(SG1-SG1C)/SG1C
ISN 00396      IF(ABS(DELTA).LE.EPS) GO TO 30
C
ISN 00397      ASG = ALPHA*ALOG(SG1)+(1.0-ALPHA)*ALOG(SG1C)
ISN 00398      SGI = EXP(ASG)
C
ISN 00399      GO TO 10
C
ISN 00400      30 EZ1C= C1*(AITT-AINT)/(H-C3*SG1C)
ISN 00401      Z = ABS(EZ1C/PT)
C
ISN 00402      EVZ = EV(Z)
C
ISN 00403      AIPB= C2*SG1C+EZ1C
ISN 00404      AIN = AITT+AIPB
C
ISN 00405      BRF = AITT*AIN*BETHA**2
ISN 00406      SUM = SUM+BRF*H
C

```

```

ISN 00407      TIME(J) = TT/1.0E-9
ISN 00408      AII(J) = AITT
ISN 00409      AIN1(J) = AIN
ISN 00410      EZ(J) = EZ1C
ISN 00411      SIG1(J) = SG1C
ISN 00412      SGEPI(J) = SGE

C
ISN 00413      ALFB = 3.3E16*PT*SION/1.6E-19
ISN 00414      TI = PTF(Z)/PT/18.4

C
ISN 00415      TERM1(J) = ALFB*AITT/C2
ISN 00416      TERM2(J) = ENN/TI
ISN 00417      TERM3(J) = -RC(EVZ)*ENN*PMN
ISN 00418      TERM4(J) = -RC2(EVZ)*ENN*PDN

C
ISN 00419      EVP(J) = EVZ
ISN 00420      FEP(J) = 1.00
ISN 00421      BRFP(J) = BRFP

C
ISN 00422      EN1(J) = ENN
ISN 00423      PMP(J) = PMN
ISN 00424      PDP(J) = PDN
ISN 00425      WP(J) = 1.0E1
ISN 00426      ALPP(J) = 1.0E1

C
C
ISN 00427      212 FORMAT(1H0,10X,'EN.LT.0.0')
ISN 00428      213 FORMAT(1H0,10X,'EN.GT.0.5*3.3E16*P(I)')

C
ISN 00429      RETURN
ISN 00430      END

```

```

    ISN 00329      SUBROUTINE RUNGE2(T,PI,F1,F2,F3)
    C
    C
    ISN 00330      COMMON/BLKINP/EZ1,EZP,SG1,SG1C,AIN,AINT,EN,PH,PD,ENN,PHN,PDN,
    +C1,C2,C3,RK
    ISN 00331      COMMON/BLKIND/SION,TR,TF,TD,H,AIP,RW,RB,ALPHA,EPS,NP
    C
    ISN 00332      T1=T
    ISN 00333      EN1=EN
    ISN 00334      PH1=PH
    ISN 00335      PD1=PD
    C
    ISN 00336      CALL DIF2(EN1,PH1,PD1,T1,PI,F1,F2,F3)
    C
    ISN 00337      DEN1=H*F1
    ISN 00338      DPH1=H*F2
    ISN 00339      DPD1=H*F3
    C
    ISN 00340      T2=T+H/2.
    ISN 00341      EN2=EN+DEN1/2.
    ISN 00342      PH2=PH+DPH1/2.
    ISN 00343      PD2=PD+DPD1/2.
    C
    ISN 00344      CALL DIF2(EN2,PH2,PD2,T2,PI,F1,F2,F3)
    C
    ISN 00345      DEN2=H*F1
    ISN 00346      DPH2=H*F2
    ISN 00347      DPD2=H*F3
    C
    ISN 00348      T3=T+H/2.
    ISN 00349      EN3=EN+DEN2/2.
    ISN 00350      PH3=PH+DPH2/2.
    ISN 00351      PD3=PD+DPD2/2.
    C
    ISN 00352      CALL DIF2(EN3,PH3,PD3,T3,PI,F1,F2,F3)
    C
    ISN 00353      DEN3=H*F1
    ISN 00354      DPH3=H*F2
    ISN 00355      DPD3=H*F3
    C
    ISN 00356      T4=T+H
    ISN 00357      EN4=EN+DEN3
    ISN 00358      PH4=PH+DPH3
    ISN 00359      PD4=PD+DPD3
    C
    ISN 00360      CALL DIF2(EN4,PH4,PD4,T4,PI,F1,F2,F3)
    C
    ISN 00361      DEN4=H*F1
    ISN 00362      DPH4=H*F2
    ISN 00363      DPD4=H*F3
    C
    ISN 00364      ENN=EN+(DEN1+2.*DEN2+2.*DEN3+DEN4)/6.
    ISN 00365      PHN=PH+(DPH1+2.*DPH2+2.*DPH3+DPH4)/6.
    ISN 00366      PDN=PD+(DPD1+2.*DPD2+2.*DPD3+DPD4)/6.
    C
    ISN 00367      RETURN
    ISN 00368      END

    ISN 00029      SUBROUTINE DIF2(ENI,PHOI,PDDI,T,PI,F1,F2,F3)
    C
    C
    ISN 00030      COMMON/BLKIND/SION,TR,TF,TD,H,AIP,RW,RB,ALPHA,EPS,NP
    C
    ISN 00031      COMMON/BLKINP/EZ1,EZP,SG1,SG1C,AIN,AINT,EN,PH,PD,ENN,PHN,PDN,
    +C1,C2,C3,RK
    C
    ISN 00032      AIT=AI(T)
    ISN 00033      PT=PI-(PHOI+2.*PDDI)/3.3E16
    ISN 00034      Z=ABS(EZ1/PT)
    ISN 00035      TI=PTF(Z)/PT/18.4
    C
    ISN 00036      ALFB=3.3E16*PT+SION/1.6E-19
    ISN 00037      EVZ=EV(Z)
    ISN 00038      RCZ=RC(EVZ)
    ISN 00039      RCZ2=RC2(EVZ)
    ISN 00040      GD=3.3E16*PT
    C
    ISN 00041      F1=ALFB*AIT/G2+ENI/TI-RCZ*ENI*PMDI-RCZ2*ENI*PDDI
    ISN 00042      F2=ALFB*AIT/G2+ENI/TI-RCZ*ENI*PMDI-RK*PMDI*GD**2
    ISN 00043      F3=RK*PMDI*GD**2-RCZ2*ENI*PDDI
    C
    ISN 00044      RETURN
    ISN 00045      END

```

```

ISN 00209      SUBROUTINE PLOT1(JEND)
ISN 00210      COMMON/BLKIND/SION,TR,TF,TD,H,AIP,RW,RB,ALPHA,EPS,NP
C
ISN 00211      COMMON/BLKTN/TIME(2100),AII(2100),AIN1(2100),EZ(2100),SIG1(2100),
+SGEP(2100),TERM1(2100),TERM2(2100),TERM3(2100),TERM4(2100),
+EVP(2100),FEP(2100),BRFP(2100),ENI(2100),PHP(2100),PDP(2100),
+WP(2100),ALPP(2100),SUM
C
ISN 00212      DIMENSION IP(130),MARK(3)
ISN 00213      DATA MARK(1),MARK(2),MARK(3),ZERO,BLANK/'*','+','0','1',' '
ISN 00214      INTEGER HI,ZERO,BLANK
ISN 00215      NP2=NP*2
ISN 00216      WRITE(6,300)
ISN 00217      DD 3 I=1,JEND,NP2
ISN 00218      DD 2 K=1,130
ISN 00219      IP(K)=BLANK
ISN 00220      2 CONTINUE
ISN 00221      IP(10)=ZERO
ISN 00222      HI=FIX(AII(I)+0.006+10.0)
ISN 00223      IP(HI)=MARK(1)
ISN 00224      HI=FIX(AINI(I)+0.006+10.0)
ISN 00225      IP(HI)=MARK(2)
ISN 00226      HI=FIX(ALDG10(ENI(I)+30.0+10.0))
ISN 00227      IP(HI)=MARK(3)
ISN 00228      WRITE(6,301) TIME(I),(IP(J),J=1,130)
ISN 00229      3 CONTINUE
C
ISN 00230      300 FORMAT(1H1,5X,'PLOT OF RESULT'//17X,'*BEAM CURRENT ***',3X,
+*NET CURRENT +*+*',3X,'*ELECTRON DENSITY 0000*')
ISN 00231      301 FORMAT(1H ,F5.2,130A1)
C
ISN 00232      RETURN
ISN 00233      END

ISN 00001      FUNCTION A1(T)
C
ISN 00002      COMMON/BLKIND/SION,TR,TF,TD,H,AIP,RW,RB,ALPHA,EPS,NP
C
ISN 00003      IF(T.GE. TR+TF+TD) GO TO 10
ISN 00004      IF(T.GT. TR+TF ) GO TO 20
ISN 00005      IF(T.GE. TR ) GO TO 30
C
ISN 00006      AI=AIP+T/TR
ISN 00007      RETURN
ISN 00008      10 AI=0.0
ISN 00009      RETURN
ISN 00010      20 AI=AIP*(1-(T-TR-TF)/TD)
ISN 00011      RETURN
ISN 00012      30 AI=AIP
C
ISN 00013      RETURN
ISN 00014      END

ISN 00015      BLOCK DATA
ISN 00016      COMMON/BLKDAT/SL,PA1,BETHA
ISN 00017      DATA SL,PA1,BETHA/2.998E10,3.1416,0.857/
ISN 00018      END

```

ISN 00234

FUNCTION PTF(Z)

```
C*****
C
C THIS FUNCTION CALCULATE 'PTF' IN LAGRANGE'S INTERPOLATION
C FORMULA FOR ARGON.
C
C*****
```

ISN 00235  
ISN 00236

```
DIMENSION X(50),Y(50)
DATA (X(I),Y(I),I=1,35)/1.0,203.0E6, 2.0,25.6E6, 3.0,8.2E5,
15.0,2150000.0, 10.0,270000.0, 20.0,42600.0,
230.0,13500.0, 40.0,5820.0, 50.0,3210.0, 60.0,1820.0,
370.0,1330.0, 90.0,700.0, 100.0,439.0, 150.0,169.0, 200.0,80.0,
4300.0,32.5, 400.0,19.8, 500.0,14.9, 600.0,11.5, 800.0,9.00,
51000.0,7.11, 1500.0,5.50, 2000.0,4.32, 3000.0,3.30, 4000.0,
62.74, 6000.0,2.19, 8000.0,1.80, 10000.0,1.58, 15000.0,1.18,
720000.0,1.00, 40000.0,0.70, 60000.0,0.57, 80000.0,0.48,
810000.0,0.43, 200000.0,0.28/
```

ISN 00237  
ISN 00238  
ISN 00239  
ISN 00240  
ISN 00241  
ISN 00242  
ISN 00243  
ISN 00244  
ISN 00245  
ISN 00246  
ISN 00247  
ISN 00248  
ISN 00249  
ISN 00250

```
C
IF(Z.LT.X(1)) GO TO 20
IF(Z.GE.X(35)) GO TO 30
DO 10 I=3,35,2
IF(Z.LT.X(I)) GO TO 40
10 CONTINUE
STOP
20 PTF=203.0E-3
RETURN
30 PTF=0.28E-9
RETURN
40 A =(Z-X(I-1))*(Z-X(I))/(X(I-2)-X(I-1))/(X(I-2)-X(I))
B =(Z-X(I-2))*(Z-X(I))/(X(I-1)-X(I-2))/(X(I-1)-X(I))
C =(Z-X(I-2))*(Z-X(I-1))/(X(I)-X(I-2))/(X(I)-X(I-1))
PTF=(A*Y(I-2)+B*Y(I-1)+C*Y(I))+1.E-9
```

ISN 00251  
ISN 00252  
ISN 00253  
ISN 00254  
ISN 00255  
ISN 00256  
ISN 00257  
ISN 00258  
ISN 00259  
ISN 00260  
ISN 00261

```
C
IF(PTF.LE.0.0) GO TO 900
RETURN
900 CONTINUE
IF(I.GE.35) GO TO 999
A =(Z-X(I))*(Z-X(I+1))/(X(I-1)-X(I))/(X(I-1)-X(I+1))
B =(Z-X(I-1))*(Z-X(I+1))/(X(I)-X(I-1))/(X(I)-X(I+1))
C =(Z-X(I-1))*(Z-X(I))/(X(I+1)-X(I-1))/(X(I+1)-X(I))
PTF=(A*Y(I-1)+B*Y(I)+C*Y(I+1))+1.E-9
999 CONTINUE
RETURN
END
```

ISN 00046

FUNCTION EV(Z)

```
C*****
C
C THIS FUNCTION IS MEAN ELCTRON ENERGY IN ARGON.
C
C*****
```

ISN 00047  
ISN 00048

```
DIMENSION X(50),Y(50)
DATA (X(I),Y(I),I=1,33)/0.100,3.54, 0.165,4.13, 0.207,4.65,
10.413,6.30, 0.831,10.2, 0.973,12.0, 1.28,12.0, 2.75,11.0,
24.62, 12.0, 6.89, 12.0, 9.31,11.0, 14.0,12.0, 18.6,9.90,
323.1,9.30, 27.2,9.60, 37.0,9.90, 47.9,9.30, 56.4,10.0, 66.0,
49.50, 94.7,8.30, 112.0,8.70, 140.0,9.30, 187.0,10.0, 238.0,
511.0, 283.0, 13.0, 366.0,12.0, 406.0,14.0, 600.0,16.0, 800.0,
619.0, 1000.0,22.0, 2000.0,32.0, 4000.0,52.0, 6000.0,75.0/
```

ISN 00049  
ISN 00050  
ISN 00051  
ISN 00052  
ISN 00053  
ISN 00054  
ISN 00055  
ISN 00056  
ISN 00057  
ISN 00058  
ISN 00059  
ISN 00060  
ISN 00061  
ISN 00062

```
C
IF(Z.LT.X(1)) GO TO 20
IF(Z.GE.X(33)) GO TO 30
DO 10 I=3,33,2
IF(Z.LT.X(I)) GO TO 40
10 CONTINUE
STOP
20 EV=3.54
RETURN
30 EV=75.0
RETURN
40 A =(Z-X(I-1))*(Z-X(I))/(X(I-2)-X(I-1))/(X(I-2)-X(I))
B =(Z-X(I-2))*(Z-X(I))/(X(I-1)-X(I-2))/(X(I-1)-X(I))
C =(Z-X(I-2))*(Z-X(I-1))/(X(I)-X(I-2))/(X(I)-X(I-1))
EV =A*Y(I-2)+B*Y(I-1)+C*Y(I)
```

ISN 00063  
ISN 00064

```
C
RETURN
END
```

```

ISN 00262      FUNCTION QH(EV)
C*****
C
C      THIS FUNCTION CALCULATE 'QH' IN LAGRANGE'S INTERPOLATION
C      FORMULA FOR ARGON.
C
C*****
ISN 00263      DIMENSION X(20),Y(20)
ISN 00264      DATA (X(I),Y(I),I=1,13)/1.0,1.05, 1.5,1.74, 2.0,2.48, 3.0,4.07,
1 4.0,5.80, 6.0,8.7, 8.0,11.7, 10.0,13.8, 12.0,14.5, 15.0,
213.2, 20.4,10.4, 26.0,8.3, 30.0,7.2/
C
ISN 00265      IF(EV.LT.X(1)) GO TO 20
ISN 00266      IF(EV.GE.X(13)) GO TO 30
ISN 00267      DO 10 I=3,13,2
ISN 00268      IF(EV.LT.X(I)) GO TO 40
ISN 00269      10 CONTINUE
ISN 00270      STOP
ISN 00271      20 QH=1.05E-16
ISN 00272      RETURN
ISN 00273      30 QH=7.2E-16
ISN 00274      RETURN
ISN 00275      40 A =(EV-X(I-1))*(EV-X(I))/(X(I-2)-X(I-1))/(X(I-2)-X(I))
ISN 00276      B =(EV-X(I-2))*(EV-X(I))/(X(I-1)-X(I-2))/(X(I-1)-X(I))
ISN 00277      C =(EV-X(I-2))*(EV-X(I-1))/(X(I)-X(I-2))/(X(I)-X(I-1))
ISN 00278      QH=(A*Y(I-2)+B*Y(I-1)+C*Y(I))*1.E-16
C
ISN 00279      RETURN
ISN 00280      END

```

```

ISN 00281      FUNCTION RC(EVZ)
C
ISN 00282      COMMON/BLKRC/FIP
C
ISN 00283      IF(EVZ.GT.FIP) GO TO 10
C
ISN 00284      RC = 1.0E-11
ISN 00285      RETURN
C
ISN 00286      10 RC = 0.0
ISN 00287      RETURN
ISN 00288      END

```

```

ISN 00289      FUNCTION RC2(EVZ)
C
ISN 00290      COMMON/BLKRC/FIP
C
ISN 00291      IF(EVZ.GT.FIP) GO TO 10
C
ISN 00292      ARC2 = (-0.67)*ALOG(EVZ)
ISN 00293      RC2 = 9.5E-8*EXP(ARC2)
ISN 00294      RETURN
C
ISN 00295      10 RC2 = 0.0
ISN 00296      RETURN
ISN 00297      END

```