

JAERI-M

9 1 5 2

気体放電中のタングステンフィラメント  
陰極の温度分布計算一定電流電源の場合

1980年11月

田中 茂

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.

気体放電中のタングステンフィラメント陰極の温度分布計算  
— 定電流電源の場合 —

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

田 中 茂

(1980年10月1日受理)

気体放電中のタングステンフィラメント陰極の温度分布計算を、ヒーター電源が定電流電源の場合について行なった。放電電流によるフィラメントの加熱の外に、イオン衝撃による加熱、電子放出による冷却効果も考慮した。直径0.5 mmから、1.8 mmまでのフィラメントについて計算した結果、以下のような事がわかった。

i) 放電電流が大きいほど、放電時のフィラメントの温度分布は不均一となり、フィラメントの負端子近傍が最高温度となる。その不均一分布の程度は、フィラメントが細くなるほど大きくなり、負端子近傍で断線する可能性が増す。

ii) フィラメントの周囲のプラズマ密度が十分に高いと、フィラメントの温度限界まで電子電流が放出され得る。この場合、放電電流がフィラメント内を通り、これを加熱するため、熱電子放出が促進され、さらに、放電電流が増加する。これにより温度分布は不均一となり、負端子近傍で断線する可能性が増す。

Calculation of Temperature Distribution of Tungsten Filament

Cathode in Gaseous Discharge

-- in the case of constant heater current --

Shigeru TANAKA

Division of Thermonuclear Fusion Research,

Tokai Research Establishment, JAERI

( Received October 1, 1980)

Temperature distribution of tungsten filament cathode in gaseous discharge was calculated in the case where the filament power supply was regulated to keep a constant current. Heating of the filament due to ion bombardment and electron emission cooling as well as heating due to discharge current were taken into account. Calculations were carried out for the filament diameters of 0.5 to 1.8 mm, and following results were obtained:

- i) The temperature distribution of the filament becomes non-uniform with the increase of discharge current and the position of maximum temperature shifts nearer to the negative leg of the filament. Non-uniformity of the distribution increases for the thinner filament.
- ii) When the density of plasma surrounding the filament is sufficiently high, the filament can emit thermionic electrons up to the temperature limited level. In this case, the discharge current passes through and heats up the filament, then the thermionic electron emission is enhanced and as a result the discharge current increases. Thus, the temperature distribution tends to become non-uniform with the increase of plasma density.

Keywords: Temperature distribution, Tungsten filament cathode,  
Gaseous discharge, Constant heater current

## 目 次

1. はじめに	1
2. 定式化	2
2.1 熱収支の式	2
2.2 $I_{net}$ の決定法	4
2.3 差分方程式化	5
2.4 $j_e, j_i$ の決定	7
3. 計算結果	9
4. 検 討	13
5. ま と め	14
謝 辞	14
引用文献	15
図表説明	16

Contents

1. Introduction - - - - -	1
2. Formulation - - - - -	2
2.1 Power balance equation - - - - -	2
2.2 Determination of $I_{net}$ - - - - -	4
2.3 Difference equation - - - - -	5
2.4 Determination of $j_e$ and $j_i$ - - - - -	7
3. Calculated Results - - - - -	9
4. Discussions - - - - -	13
5. Summary - - - - -	14
Acknowledgement - - - - -	14
References - - - - -	15
Figure captions - - - - -	16

## 1. はじめに

現在、中性粒子入射装置用イオン源の陰極としてタングステンフィラメントが多くの研究所で使用されている。しかし、これからの中性粒子入射装置は、入射時間のパルス巾が長くなるためイオン源も準定常放電に近い状態で使用することとなる。その時に、従来のタングステンフィラメントがそのような放電に耐え得るか、あるいは耐え得ても寿命はどの程度になるのかという懸念が生じてくる。

タングステンフィラメントをイオン源の直熱型陰極として用いた場合、外部からフィラメントを加熱するためのフィラメント電流と放電電流の一部が重畳してフィラメント内を流れるため、フィラメント電流と放電電流の向きが一致しているフィラメントの負端子側では、局所的な加熱がなされ、タングステンの蒸発が促進される。フィラメント電源の負端子がアーク電源の負端子に接続された場合には、フィラメントの負端子側の方がより低い電位（フィラメント電圧程度）にあるため、プラズマ中のイオンは選択的にそこを衝撃して、加熱あるいはスパッターする。これらにより、フィラメントの負端子側は、正端子側に比べてより早く細くなっていく。細くなった部分の抵抗は以前より大きくなるため、その部分の温度は他の部分より上昇し、そこから熱電子が放出されやすくなり、タングステンの蒸発も他の部分に比べより早く進行する。これら一連の過程が原因となって、フィラメントの負端子側が最も早く細くなり、断線に至る。即ちこの過程がタングステンフィラメントの寿命を決めていると考えられる。

放電中のタングステンフィラメントの温度分布を知ることは、それらの効果を調べる上で重要な情報を与えてくれる。例えば、ある値のフィラメント電流で加熱されているタングステンフィラメントが放電状態に入った時、放電電流の値によってはタングステンフィラメントの一部の温度が上昇して暴走状態となり、放電中に断線してしまうことも考えられる。そうならないようなフィラメント電流と放電電流の上限も温度分布計算で調べることが出来る。あるいは、放電中のタングステンフィラメントの最高温度から、蒸発だけで決まるようなフィラメントの寿命も推定できる。

この報告では、放電中のタングステンフィラメントの温度分布計算について述べる。放電中のフィラメントの熱収支を詳しく取り入れた式を考えて、それを差分方程式化し、数値計算でフィラメント各部の温度が求められるようにした。各種の物理量の時間変化も同時に計算される。

## 2. 定式化

### 2.1 熱収支の式

タングステンフィラメントの放電中の熱収支を計算に取り込む時、フィラメントを加熱するよ  
うに働くものとして、以下のものを考慮した。

- ① フィラメント電力
- ② 放電電流のフィラメント通過による加熱
- ③ プラズマからのイオン衝撃

この外にも、プラズマからの光による加熱が考えられるが、①～③に比べ非常に小さく無視可能  
である。

一方、フィラメントを冷却するように働くものとして、次の3つのものを考慮した。

- ④ フィラメント表面からの熱輻射
- ⑤ 電子放出
- ⑥ フィラメント支持端からの熱伝導

この外にも、タングステンの蒸発による冷却、タングステンを取り囲む気体への熱伝導が考えら  
れるが、④～⑥に比べて非常に小さく無視可能である。

放電していない時の熱収支は、上記の①、④、⑥のみを考慮するだけで良い。

1本のフィラメントを考え、フィラメントの径方向断面内の温度分布は一様であるとし、簡単  
化のため、フィラメント電源は定電流制御電源であるとする。配置関係は、第1図のようになっ  
ているとする ( $r_{in} \gg$  タングステンフィラメントの抵抗)。即ち、フィラメントの全長を  $L$ (cm)  
半径を  $a$ (cm) とし、 $x=0$  をフィラメントの正端子、 $x=L$  を負端子とする。 $x=x$  の位置に  
ある長さ  $dx$  の微小片部分の熱収支の式は、ある時刻  $t$ (sec) の  $x=x$  での温度を  $T(x,t)$ (°K)  
とすると、以下のように書き表わせる。

$$\begin{aligned}
 C \rho_m \pi a^2 dx \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} &= \frac{\rho(T(x,t))}{\pi a^2} \cdot I_{net}^2 (T(x,t)) \\
 &\quad + j_i (T(x,t)) (V_{c,f} + V_i - \varphi) 2 \pi a dx \\
 &\quad - \epsilon (T(x,t)) \sigma T^4 (x,t) 2 \pi a dx \\
 &\quad - \left( \varphi + \frac{2 k T(x,t)}{e} \right) j_e (T(x,t)) 2 \pi a dx \\
 &\quad + \frac{\partial \left( \lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right)}{\partial x} \cdot \pi a^2 dx \quad (W)
 \end{aligned} \tag{1}$$



ここで、

- C : タングステンの比熱 (J/g°K)
- $\rho_m$  : タングステンの密度 (g/cm<sup>-3</sup>)
- $\rho(T(x,t))$  : 温度 T(x,t) の時のタングステンの比抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
- $I_{\text{net}}(T(x,t))$  : x=x の断面を通過する正味の電流 (フィラメント電流と放電電流の一部の重畳)
- $j_i(T(x,t))$  : x=x の位置に入射するイオン電流密度 (A/cm<sup>2</sup>)
- $j_e(T(x,t))$  : x=x から放出される電子電流密度 (A/cm<sup>2</sup>)
- $V_{c,f}$  : 陰極降下電圧 (V)
- $V_i$  : 気体の電離電圧 (V)
- $\varphi$  : タングステンの仕事関係 (V)
- $\epsilon(T(x,t))$  : 温度 T(x,t) の時のタングステンの射出率
- $\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 (w/cm<sup>2</sup> °K<sup>4</sup>)
- $\lambda$  : タングステンの熱伝導率 (w/°K cm)
- k : ボルツマン定数 (J/°K)

(1)式の右辺の各項の下に付した、①~⑥は前述した①~⑥の番号に対応している。(1)式を計算しやすい形に書き直すと、以下のようなになる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} &= \frac{1}{c \rho_m} \left\{ \frac{\rho(T(x,t))}{(\pi a^2)^2} \cdot I_{\text{net}}^2(T(x,t)) \right. \\
 &+ \frac{2}{a} j_i(T(x,t)) (V_{c,f} + V_i - \varphi) \\
 &- \frac{2}{a} \epsilon(T(x,t)) \sigma T^4(x,t) \\
 &- \frac{2}{a} \left( \varphi + \frac{2kT(x,t)}{e} \right) j_e(T(x,t)) \\
 &\left. + \partial \left( \lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) / \partial x \right\} \quad (2)
 \end{aligned}$$

(2)式の右辺を見るとわかるように、(2)式は明らかにT(x,t)に関する非線形方程式である。

比抵抗 $\rho$ と放射率 $\epsilon$ は、第2, 3図<sup>1,2)</sup>に示すように温度の関数であり、各々次のような式で近似する。

$$\rho(T) = \rho_0 + \alpha T \quad (3)$$

$$\begin{cases}
 \rho_0 = -6.16 \times 10^{-6} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) & (300^\circ\text{K} \leq T \leq 2000^\circ\text{K}) \\
 \alpha = 0.0315 \times 10^{-6} \quad (\Omega \cdot \text{cm}/^\circ\text{K}) \\
 \rho_0 = -13.7 \times 10^{-6} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) & (2000^\circ\text{K} \leq T \leq 3640^\circ\text{K}) \\
 \alpha = 0.0347 \times 10^{-6} \quad (\Omega \cdot \text{cm}/^\circ\text{K})
 \end{cases}$$

$$\epsilon(T) = \epsilon_0 + \beta T + \gamma T^2 \quad (4)$$

$$\begin{cases} \epsilon_0 = 0.033 \\ \beta = 1.8 \times 10^{-5} (\text{}/^\circ\text{K}) \\ \gamma = 6 \times 10^{-8} (\text{}/^\circ\text{K}^2) \end{cases} \quad (300^\circ\text{K} \leq T \leq 2000^\circ\text{K})$$

$$\begin{cases} \epsilon_0 = -0.112 \\ \beta = 2.6 \times 10^{-4} (\text{}/^\circ\text{K}) \\ \gamma = -3.7 \times 10^{-8} (\text{}/^\circ\text{K}^2) \end{cases} \quad (2000^\circ\text{K} \leq T \leq 3640^\circ\text{K})$$

## 2.2 $I_{net}$ の決定法

(2)式中の  $I_{net}$  の求め方は、複雑なので、以下に詳しく説明する。

第4図に示すように、フィラメント電源の内部抵抗を  $r_{in}(\Omega)$  とし、フィラメントの負端子がアーク電源の負端子に接続されているものとする。この時、 $x=x$  に中心をもつ微小片  $dx$  に入ってくる放電電流  $dI_{arc}(x)$  が、フィラメントの負端子経由の回路と、正端子経由の回路にどのように分割されて流れるかを考える。

フィラメントの正端子 ( $x=0$ ) から  $x=x$  までの抵抗  $R(x)$  は、次式で表わされる。

$$R(x) = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^x \rho(x) dx \quad (5)$$

$x=x$  に入ってきた放電電流にとって、フィラメントの正端子を経由してアークの負端子に至るまでの抵抗  $R_1(x)$  は、次式で与えられる。

$$R_1(x) = r_{in} + R(x) \quad (6)$$

一方、フィラメントの負端子を経由してアークの負端子に至るまでの抵抗  $R_2(x)$  は、次のようになる。

$$R_2(x) = R(L) - R(x) \quad (7)$$

従って、 $dI_{arc}(x)$  は、 $R_1(x)$  を流れる。

$$dI_{arc1}(x) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} dI_{arc} \quad (8)$$

と、 $R_2(x)$  を流れる

$$dI_{arc2}(x) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} dI_{arc} \quad (9)$$

の2つの電流に分割される。

放電電流が大部分負端子を経由して流れるようにする ( $dI_{arc2} \gg dI_{arc1}$ ) には、内部抵抗  $r_{in}$  をタングステンフィラメントの全抵抗  $RL$  より十分大きくすれば実現する。放電電流が負端子側を加熱する効果をみるため、この計算では、そのように  $r_{in}$  を設定する。

$dI_{arc}(x)$  は、 $x=x$  に位置する微小片  $dx$  の表面から放射される電子電流と、微小片に入射してくるイオン電流の和であるから、次式のように表わされる。

$$dI_{arc}(x) = (j_e(x) + j_i(x)) 2\pi adx \quad (10)$$

第4図で、 $x=x$  の断面を左方向に通過する電流  $I_L(x)$  は、 $dI_{arc1}$  の  $x=x$  から  $x=L$  までの積分である。即ち、

$$\begin{aligned}
 I_L(x) &= I_{arc1}(L) - I_{arc1}(x) \\
 &= \int_{I_{arc1}(x)}^{I_{arc1}(L)} dI_{arc1} = \int_x^L \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot 2\pi a (j_e + j_i) dx \quad (11)
 \end{aligned}$$

一方、 $x=x$  の断面を右方向に通過する電流  $I_R(x)$  は、 $dI_{arc2}$  の  $x=0$  から  $x=x$  までの積分とフィラメント電流の和である。即ち、

$$\begin{aligned}
 I_R(x) &= I_{arc2}(x) + I_{fil} = \int_{I_{arc2}(0)}^{I_{arc2}(x)} dI_{arc2} + I_{fil} \\
 &= \int_0^x \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot 2\pi a (j_e + j_i) dx + I_{fil} \quad (12)
 \end{aligned}$$

結局、フィラメント電流の流れる方向を正とすると、 $x=x$  の断面を流れる正味の電流  $I_{net}(x)$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 I_{net}(x) &= I_R(x) - I_L(x) \\
 &= I_{arc}(x) + I_{arc1}(x) - I_{arc1}(L) + I_{fil} \quad (13)
 \end{aligned}$$

なお、(10)式に関連して、このフィラメントに入る全放電電流  $I_{arc}$  は、次式で表わされる。

$$I_{arc} = \int_0^L 2\pi a (j_e + j_i) dx \quad (14)$$

### 2.3 差分方程式化

(2)式を数値的に解くために差分化する。差分化の方法は、文献3)を参考とした。 $\Delta t$  を時間ステップ、 $\Delta x$  を空間ステップとして、implicit な差分法に直すと、(2)式は、以下のように表わせる。

$$\begin{aligned}
 \frac{T(x, t + \Delta t) - T(x, t)}{\Delta t} &= \\
 \frac{1}{C\rho_m} \left\{ \frac{1}{(\pi a^2)^2} \cdot \frac{\rho(T(x, t + \Delta t)) I_{net}^2(T(x, t + \Delta t)) + \rho(T(x, t)) I_{net}^2(T(x, t))}{2} \right. \\
 &+ \frac{2}{a} \cdot \frac{j_i(T(x, t)) + j_i(T(x, t + \Delta t))}{2} \cdot (V_{cf} + V_i - \varphi) \\
 &- \frac{2}{a} \cdot \sigma \cdot \frac{\epsilon(T(x, t + \Delta t)) T^4(x, t + \Delta t) + \epsilon(T(x, t)) T^4(x, t)}{2} \\
 &- \frac{2}{a} \cdot \frac{\left(\varphi + \frac{2kT(x, t + \Delta t)}{e}\right) j_e(T(x, t + \Delta t)) + \left(\varphi + \frac{2kT(x, t)}{e}\right) j_e(T(x, t))}{2} \\
 &+ \frac{\lambda}{2(\Delta x)^2} \{ T(x + \Delta x, t + \Delta t) - 2T(x, t + \Delta t) + T(x - \Delta x, t + \Delta t) \\
 &\quad \left. + T(x + \Delta x, t) - 2T(x, t) + T(x - \Delta x, t) \} \right\} \quad (15)
 \end{aligned}$$

後で説明するように  $I_{net}$  や  $j_e, j_i$  は温度  $T$  の複雑な関数であり、 $T$  に関して非線形である。また、熱放射の項も非線形である。従って、(15) 式をその形のままで解くのは難しいので、以下のような近似を導入する。

[近似]

$\Delta t$  が十分に小さければ、

$$\begin{aligned} I_{net}(T(x, t + \Delta t)) &\doteq I_{net}(T(x, t)) \\ j_e(T(x, t + \Delta t)) &\doteq j_e(T(x, t)) \\ j_i(T(x, t + \Delta t)) &\doteq j_i(T(x, t)) \\ \epsilon(T(x, t + \Delta t)) T^4(x, t + \Delta t) &\doteq \epsilon(T(x, t)) T^4(x, t) \end{aligned} \quad (16)$$

この近似は、 $t = t + \Delta t$  での物理量を  $t = t$  での値で代用しようというもので、温度  $T$  の時間変化があまり急激でなければ、 $\Delta t$  を十分小さくとることにより、良く成り立つはずである。

(16) 式で表わされる近似を (15) 式に代入すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} T(x, t + \Delta t) - T(x, t) = & \frac{\Delta t}{C\rho_m} \left\{ \left( \frac{I_{net}(T(x, t))}{\pi a^2} \right)^2 \times \frac{\rho(T(x, t + \Delta t)) + \rho(T(x, t))}{2} \right. \\ & + \frac{2}{a} j_i(T(x, t)) (V_{c,f} + V_i - \varphi) \\ & - \frac{2}{a} \sigma \epsilon(T(x, t)) T^4(x, t) \\ & - \frac{2}{a} \left( \varphi + \frac{kT(x, t + \Delta t) + kT(x, t)}{e} \right) j_e(T(x, t)) \\ & \left. + \frac{\lambda}{2(\Delta x)^2} [T(x + \Delta x, t + \Delta t) - 2T(x, t + \Delta t) + T(x - \Delta x, t + \Delta t) \right. \\ & \left. + T(x + \Delta x, t) - 2T(x, t) + T(x - \Delta x, t)] \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

次に、

$$\begin{aligned} T(x - \Delta x, t + \Delta t) &\equiv T_{n-1}^{m+1}, \quad T(x - \Delta x, t) \equiv T_{n-1}^m \\ T(x, t + \Delta t) &\equiv T_n^{m+1}, \quad T(x, t) \equiv T_n^m \\ T(x + \Delta x, t + \Delta t) &\equiv T_{n+1}^{m+1}, \quad T(x + \Delta x, t) \equiv T_{n+1}^m \end{aligned}$$

という表示法を用いると、(17) 式は下記のような三項方程式で表わされる。

$$a_n T_{n-1}^{m+1} + b_n T_n^{m+1} + c_n T_{n+1}^{m+1} = d_n \quad (18)$$

ここで、

$$\begin{aligned} a_n = c_n &= -\frac{1}{2} \frac{K}{K_0} \quad (K \equiv \lambda / c\rho_m, \quad K_0 \equiv (\Delta x)^2 / \Delta t) \\ b_n &= 1 + \frac{K}{K_0} - \frac{K}{K_0} \cdot \frac{(\Delta x)^2}{\lambda} \left[ \frac{\alpha}{2} \left( \frac{I_{net}(T_n^m)}{\pi a^2} \right)^2 - \frac{2}{a} \frac{k}{e} j_e(T_n^m) \right] \\ &= 1 + \xi(T_n^m) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_n = & -a_n T_{n-1}^m + (1 - \xi(T_n^m)) T_n^m \\
 & - \frac{K}{K_0} \cdot \frac{(\Delta x)^2}{\lambda} \cdot \frac{2}{a} \sigma \varepsilon (T_n^m) (T_n^m)^4 \\
 & - C_n T_{n+1}^m \\
 & + \frac{K}{K_0} \frac{(\Delta x)^2}{\lambda} \left[ \rho_0 \left( \frac{I_{net}(T_n^m)}{\pi a^2} \right)^2 \right. \\
 & \left. + \frac{2}{a} (j_i(T_n^m) (V_{cf} + V_i - \phi) - \phi j_e(T_n^m)) \right]
 \end{aligned}$$

境界条件として、タングステンフィラメントの両端では温度一定とする。即ち、

$$x = 0, L \text{ で } T = T_0 \tag{19}$$

(18), (19) 式を行列表示で表わすと以下のようなになる。

$$\begin{pmatrix} b_1 & c_1 & 0 & \dots & 0 \\ a_1 & b_2 & c_2 & & \\ 0 & & & & \\ \vdots & & & & \\ 0 & \dots & 0 & a_N & b_{N+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1^{m+1} \\ T_2^{m+1} \\ \vdots \\ T_N^{m+1} \\ T_{N+1}^{m+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \\ d_{N+1} \end{pmatrix} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 b_1 = 1, \quad c_1 = 0, \quad d_1 = T_0 \\
 a_N = 0, \quad b_{N+1} = 1, \quad d_{N+1} = T_0
 \end{aligned}$$

(20) 式を解くことにより、数值的に各時間の各座標の温度を求めることができる。

### 2.4 $j_e, j_i$ の決定

D. Bohm<sup>4)</sup>によれば、放電電流の空間電荷制限領域では、陰極シースが安定に存在するための条件から、熱陰極表面より放出し得る電子電流密度  $j_e$  は、次の不等号式で制限される。

$$j_e \leq r \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} j_i \quad (j_i = en_0 c_s) \tag{21}$$

ここで、

- $m_i, m_e$  : イオンと電子の質量
- $n_0$  : 陰極まわりのプラズマ密度
- $c_s \equiv \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}$  : イオン音波速度
- $r$  :  $1/3 \sim 2/3$  の定数

即ち、陰極を取り囲むプラズマの密度が低ければ、陰極温度をいくら高めても(21)式の右辺以上の電子電流密度は得られない。

もし、プラズマ密度が十分に高く、 $j_i$ が十分に大きければ、今度は $j_e$ が陰極の温度制限をうけて、以下のRichardsonの式で表わされる熱電子放出密度の値を越えられない。(第5図参照)

$$j_{e,th} = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad (22)$$

従って、フィラメントのある位置の温度が $T$ であるとして、そこからとり得る最大の電子電流密度を $j_e$ とすると、

$$\begin{aligned} \text{i) もし, } j_{e,th} > r \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} j_i & \quad \text{ならば,} \\ j_e &= r \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} j_i \quad (\text{空間電荷制限}) \\ \text{ii) もし, } j_{e,th} \leq r \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} j_i & \quad \text{ならば,} \\ j_e &= j_{e,th} \quad (\text{温度制限}) \end{aligned}$$

のように $j_e$ を定めることができる。

Bohmの熱陰極表面の理論は、その後改良され、陰極表面の電場が零でないこと、イオンの初期エネルギーが零でないこと、等を考慮に入れた理論<sup>5)</sup>がつくられた。それによると、陰極を取り囲むプラズマの電子温度を $T_e$ として、陰極降下電圧が

$$V_{c,f} = 10 kT_e / e \quad (\text{V}) \quad (23)$$

の時、空間電荷制限領域で、電子電流密度の上限は、次式で与えられる。

$$\max j_e = 87.34 \times 10^{-4} en_0 \sqrt{\frac{kT_e}{m_e}} (20)^{3/2} \quad (\text{A/cm}^2) \quad (24)$$

また、熱陰極表面から電子電流密度 $j_e$ が放出された時、陰極表面に入射するイオンの電流密度 $j_i$ は、次の式で表わされる。

$$j_i = en_0 c_s \sqrt{\frac{1+20J_b}{1-J_b}} \quad (25)$$

ここで、

$$J_b = j_e / j_c, \quad j_c = en_0 \sqrt{\frac{kT_e}{m_e}} \times (20)^{3/2}$$

従って、この報告では、空間制限領域での $j_e$ の上限として、 $r \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} j_i$ の代わりに、(24)式の $\max j_e$ を用い、 $j_i$ は(25)式を用いて計算するものとする。即ち、

$$\begin{aligned} \text{i) もし, } j_{e,th} > \max j_e & \quad \text{ならば, } j_e = \max j_e \quad (\text{空間電荷制限}) \\ \text{ii) もし, } j_{e,th} \leq \max j_e & \quad \text{ならば, } j_e = j_{e,th} \quad (\text{温度制限}) \end{aligned}$$

問題は、(24)、(25)式中のプラズマ密度 $n_0$ をどのようにして決定すべきかである。 $n_0$ は、その熱陰極を使用しているプラズマ源の構造や性能、動作ガス圧、あるいは、熱陰極から放出される電子電流自身や電子のもつエネルギーに関係したものであり、簡単には決定できない。このため、 $n_0$ は実際のプラズマ源内の値に近いものを選んで与えてしまうものとする。

### 3. 計算結果

タングステン陰極を取り囲むプラズマ密度  $n_0 = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , 電子温度  $kT_e = 4 \text{ eV}$ , 陰極降下電圧  $V_{c,f} = 40 \text{ V}$ , というプラズマ条件を設定した。

フィラメントの長さ  $L = 15 \text{ cm}$  とし, その両端は, 一定温度  $T_0 = 423^\circ\text{K}$  ( $150^\circ\text{C}$ ) に保たれるものとする。フィラメントの半径  $a$  は,  $0.025, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.075, 0.09 \text{ cm}$  の7種類を選んで計算したが, この報告では,  $a = 0.025, 0.05, 0.075 \text{ cm}$  という, 良く用いられる太さのフィラメントの計算例について主に説明する。

時間ステップ  $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ , 空間ステップ  $\Delta x = 0.1 \text{ cm}$  とした。手順として, まず放電していない時の温度分布を計算し, 分布が定常状態 (フィラメントの空間の全点で,  $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$  後の温度上昇が  $0.1^\circ\text{K}$  以下となった状態とする) に達した後に放電させ, その後の温度分布がどのようになるかを計算し, 定常状態になるまで計算を続ける。

i)  $a = 0.025 \text{ cm}$

第6図-(a)~(c)から第9図-(a)~(c)は,  $a = 0.025 \text{ cm}$  の時に, フィラメント電流  $I_{fil} = 19.6, 21.6, 23.6, 25.5 \text{ A}$  を流した場合の4通りについて計算した結果を示したものである。各図の(a)は, フィラメントに沿っての温度分布を示したもので, 実線は放電していない時の各時点での温度分布, 点線は放電して定常状態になった時の温度分布を示す。 $x = 0$  がフィラメントの正端子,  $x = 15 \text{ cm}$  が負端子である。各図の(b)は, フィラメントの中心点 ( $x = 7.5 \text{ cm}$ ) と, 放電後最高温度になった点の温度の時間変化を示したものである。また, 各図の(c)は, 以下の式で表わされるフィラメント全体に関係したパワーと電流の時間変化を示したものである。

$$P_{fil} = \int_0^L \frac{\rho(x)}{\pi a^2} I_{fil}^2 dx = R(L) I_{fil}^2 \quad (\text{外部加熱パワー}) \quad (26)$$

$$P_{rad} = - \int_0^L \epsilon(x) \sigma T^4(x) 2\pi a dx \quad (\text{輻射損失パワー}) \quad (27)$$

$$P_{cond} = - \int_0^L \frac{a}{2} \lambda \frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2} dx = \frac{a}{2} \lambda \left( \frac{\partial T(L)}{\partial x} - \frac{\partial T(0)}{\partial x} \right) \quad (\text{熱伝導損失パワー}) \quad (28)$$

$$P_{arc} = \int_0^L \frac{\rho(x)}{\pi a^2} \left[ \int_0^x (j_i(x') + j_e(x')) 2\pi a dx' \right]^2 dx \quad (\text{放電電流加熱パワー}) \quad (29)$$

$$P_{ion} = \int_0^L j_i(x) (V_{c,f} + V_i - \varphi) 2\pi a dx \quad (\text{イオン衝撃加熱パワー}) \quad (30)$$

$$P_{elec} = - \int_0^L j_e(x) \left( \varphi + \frac{2kT(x)}{e} \right) 2\pi a dx \quad (\text{電子放出損失パワー}) \quad (31)$$

$$I_{arc} = \int_0^L (j_i(x) + j_e(x)) 2\pi a dx \quad (\text{全放電電流}) \quad (32)$$

第6図-(a), (b)は, 19.6Aの一定電流を  $t = 0$  から流し始めると, 5.11sec 後には温度分布が定常状態となり,  $x = 7.5\text{cm}$  で  $2729^\circ\text{K}$  の最高温度になっている事を示す。その後, 放電を開始させるとフィラメント各部の温度は上昇し, 1.95sec 後に定常分布となり, 最高温度は  $2790^\circ\text{K}$  となる。また, 第6図-(c)より, 放電後の温度上昇は,  $P_{ion} + P_{arc}$  が  $P_{elec}$  よりも大きいため起きたことが理解される。この場合, 放電電流は, 6A程度が得られている。

$I_{fil}$  を増やして 21.6A にすると第7図-(a)~(c)のようになる。放電の前後で, 温度はそれほど変化しないのは,  $P_{ion} + P_{arc}$  をほぼ  $P_{elec}$  が相殺しているためであることが, 第7図-(c)より読みとれる。放電電流は 13.8A である。

$I_{fil}$  をもっと増やして 23.6A にすると, 第8図-(a)に示されるような放電中の温度分布となる。フィラメントの負端子付近の温度が, 正端子付近と比べて  $500^\circ\text{K}$  も高くなる非対称分布となっている。これは, 放電電流が, 21.1A (第8図-(c)) と大きくなって, その大部分が負端子に向かって流れるため, 負端子付近では  $I_{fil}$  と重畳してそこを加熱し, その部分の温度を異常に高めているからである。このことは,  $P_{arc}$  の大きさからも判断できる (第8図-(c))。

第8図をもっと極端にしたのが, 第9図-(a)~(c)で, 放電を開始すると,  $x = 13.3\text{cm}$  の点で熔融破断してしまうことを示している。

以上のほかに,  $I_{fil} = 11.8, 13.7, 15.7, 17.7\text{A}$  についても計算したので, 主要結果を第1表と第10, 11図に示す。第10図は, 放電なしの場合について, フィラメント電流  $I_{fil}$  と, フィラメントの最高温度  $T_{max}$  の関係, あるいはフィラメント端子電圧  $V_{fil}$  との関係を示す。第11図は放電なしの場合に, 温度分布が定常になるまでの時間  $t_{sat}$  と  $I_{fil}$  との関係を示し, もう一つは, 放電させた場合に, 定常温度分布時の放電電流  $I_{arc}$  と  $I_{fil}$  の関係を示す。第11図より,  $t_{sat}$  は  $I_{fil}$  が大きいほど小さくなることがわかる。これは,  $I_{fil}$  が大きいほどフィラメントが早く暖まり, それによって抵抗も増加して, 加熱効率が高まり, 平衡温度分布に達する時間も短縮されるからと考えられる。また, 放電中, 最高温度になる点の座標は,  $I_{fil}$  が大きい ( $I_{arc}$  が大きい) ほど, 負端子に近づくことが, 第1表よりわかる。

ii)  $a = 0.05\text{cm}$

第12図-(a)~(c)から第14図-(a)~(c)は,  $a = 0.05\text{cm}$  の時,  $I_{fil} = 55, 62.8, 70.7\text{A}$  を流した場合の三通りについて計算した結果を示したものである。各図の(a)~(c)の意味は,  $a = 0.025\text{cm}$  の場合と同様である。第12図-(a)は,  $I_{fil} = 55\text{A}$  で, 放電前最高温度が  $2710^\circ\text{K}$  だった温度分布が, 放電により最高温度が  $2750^\circ\text{K}$  の平坦な温度分布になることを示している。この時, 放電電流は, 10A ぐらい得られる。

第13図-(a)は,  $I_{fil} = 62.8\text{A}$  にすると, 放電前最高  $2740^\circ\text{K}$  だった温度分布が, 放電により非対称分布に近づき, フィラメントの大部分で温度が下がってしまうことを示している。これは放電により, 当初フィラメントの正端子側からもかなり多くの電子が放出され, それによる冷却が, イオン衝撃による加熱や放電電流による加熱をしのいで, その部分が冷やされたためであることが, 第13図-(c)より推測できる。

第14図は,  $I_{fil}$  を更に大きくして  $70.7\text{A}$  にすると, 放電時の温度分布がもっと非対称になるこ



とを示している。正端子付近と負端子付近では、300 °K 程度の温度差が生じている。

以上のほかに、 $I_{fil} = 47.1, 66.8, 74.6, 78.5, 86.4$  A の場合についても計算したので、主要な結果を第2表と、第15, 16図に示す。第16図で、 $I_{arc}$  が  $j_{fil} = 8 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup> 以上で飽和し出すのは、プラズマ密度  $n_0 = 10^{12}$  cm<sup>-3</sup> と、外部から勝手に指定したことにより、フィラメント表面から放出される電子電流密度が  $10.5$  A/cm<sup>2</sup> を越えないようになっていることに起因する(2.4節, (24)式参照)。10.5 A/cm<sup>2</sup> は、熱電子放出密度からは、2955 °K というタングステン温度に対応する(第5図参照)。即ち、フィラメントのある部分の温度が2955 °K を越えても、その部分からは、10.5 A/cm<sup>2</sup> の電子電流しか放出できないようになっている。これが、 $I_{arc}$  が制限されている原因である。

iii)  $a = 0.075$  cm

第17図-(a)~(c)から第19図-(a)~(c)は、 $a = 0.075$  cm の時、 $I_{fil} = 106, 114.9, 123.7$  A を流した場合の3通りについて計算した結果を示したものである。第17図-(a)は、 $I_{fil} = 106$  A で放電前最高2790 °K だった温度分布が、放電により温度上昇し、最高2800 °K の平坦な温度分布になることを示している。この時、放電電流は、19 A 得られている。第18図-(a)は、 $I_{fil} = 114.9$  A にすると、放電前最高2930 °K の温度分布が、放電により電子放出冷却され、最高2880 °K のほぼ平坦な温度分布になることを示している。第19図-(a)は、 $I_{fil}$  を更に大きくして、123.7 A にすると、放電時の温度分布がもっと非対称になることを示している。正端子と負端子付近の温度差は、約100 °K である。

以上のほかに、 $I_{fil} = 88.4, 132.5, 141.4, 159$  A についても計算したので、主要結果を第3表と、第20, 21図に示す。第21図で、 $I_{arc}$  が  $j_{fil} = 7 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup> 以上で飽和し出すのは、 $a = 0.05$  cm の項で説明したのと同じ理由による。

[フィラメント太さへの依存性]

上記3種類の太さのフィラメントのほかにも、 $a = 0.03, 0.04, 0.06, 0.09$  cm の場合についても類似の計算を行なったので、いろいろな量のフィラメント太さ依存性について説明する。タングステンフィラメントは、イオン源の陰極としては、3000 °K ( $j_{e,th} = 14.1$  A/cm<sup>2</sup>) 付近か、それ以下の温度で使用することが通例である。従って、まず放電させない状態で、フィラメント中央 ( $x = 7.5$  cm) の温度が3000 °K で、温度分布が定常になっている場合を基準として考える。

i)  $j_{fil}, I_{fil}, V_{fil}, P_{fil}$  の  $a$  依存性

上記の基準状態にするには、半径  $a$ 、長さ 15 cm のタングステンフィラメントにどれだけの電流 ( $I_{fil}$ ) をどれだけの密度 ( $j_{fil}$ ) で流さなければならないかを示したのが、第22図でありその時のフィラメント電圧 ( $V_{fil}$ ) と電力 ( $P_{fil}$ ) を示したのが第23図である。第22図より、 $x = 7.5$  cm を同じ3000 °K にするのに、フィラメントが太いほど電流密度が小さくて済むことがわかるが、その理由は、次のように説明できる。フィラメントへの熱入力は、 $(RL) I_{fil}^2 \propto j_{fil}^2 a^2$  であるが、フィラメントからの熱損失は、大部分熱輻射で決まり、 $P_{rad} \propto a$  である。従って、同じ  $j_{fil}$  ならば、 $a$  が大きいほど相対的に熱入力が大きくなり、高温度で熱輻射損失とバランスする。即ち、同じ温度にするなら、 $a$  が大きいほど  $j_{fil}$  が小さくて良いこととなる。結局、 $j_{fil}$  は正確ではないが、ほぼ

$$j_{fil} \propto a^{-1/2} \quad (33)$$

という a 依存性をもつ。従って、 $I_{fil}$  は、ほぼ

$$I_{fil} = \pi a^2 j_{fil} \propto a^{3/2} \quad (34)$$

という a 依存性になる<sup>6)</sup>。

第 22 図からは、 $x = 7.5$  cm を 3000 °K にすると、フィラメントが太いほどその両端の電圧差  $V_{fil}$  が小さくなるのがわかるが、この理由も次のように説明できる。

$$V_{fil} = R(L) I_{fil} \propto \frac{1}{\pi a^2} \times \pi a^2 j_{fil} \propto j_{fil}$$

即ち、 $V_{fil}$  は  $j_{fil}$  と同様の a 依存性をもつ。従って、ほぼ

$$V_{fil} \propto a^{-1/2} \quad (35)$$

また、

$$P_{fil} = V_{fil} I_{fil} \propto a \quad (36)$$

## ii) 所要時間の a 依存性

次に定電流電源の場合、 $x = 7.5$  cm の点が 3000 °K の定常温度分布になるまでに、どれ位の時間がかかり、その a 依存性はどのようになるかを示したのが、第 24 図である。図で、 $t_{sat}$  は計算上の都合から定義した飽和時間で、フィラメントの全点で 0.01 sec 後の温度上昇が 0.1 °K 以下になる時の時間である。この定義は、厳密すぎて実用には適さないと考えられるので（第 6 図～第 21 図の(b)参照）、次のような時間を定義する。423 °K で出発すると、 $x = 7.5$  cm の点の温度が目標の 3000 °K に達するまでに 2577 °K 温度上昇しなければならないが、その 90% を達するまでの時間、即ち、 $423 + (3000 - 423) \times 0.9 = 2742$  °K を通過する時の時間を  $t_{90\%}$  とする。1 mm 径のタングステンフィラメントでは、 $t_{sat} = 7.5$  sec のものが  $t_{90\%} = 3.5$  sec となり、かなり実際に近い値となる。 $t_{sat}$ 、 $t_{90\%}$  とともにほぼ a に比例する。即ち、太いフィラメントほど暖まりにくい。これは、(2)式で、熱輻射に対応する項が  $1/a$  に比例しているためと考えられる。

## iii) 温度分布の a 依存性

太さが温度分布に与える影響を示したのが、第 25 図である。 $x = 7.5$  cm が 3000 °K の定常温度分布に達している時、フィラメントのうち 2950 °K 以下の長さが片側でどれだけあるかを縦軸に示してある。その長さは、フィラメントが太くなるほど大きくなる。即ち、フィラメントが太いほど温度分布の「肩」の部分が丸みを帯びてくる。これは、太いほど支持端からの熱伝導損失が増し、フィラメントの支持端付近の温度が上昇しにくいためと考えられる。

## iv) 放電時の諸量の a 依存性

$x = 7.5$  cm の点で 3000 °K の定常温度分布になった後、放電させると、新たな定常温度分布が得られる。その時、フィラメント全体に入る放電電流とフィラメント効率（放電電流/フィラメント電力）の a 依存性を示したのが第 26 図である。a が大きくなるとフィラメント効率が低下するが、これは第 25 図で示したように支持端近くの温度が上昇しにくくなり、その部分の熱電子放出が少ないためである。

放電時の定常温度分布の a 依存性について説明する。第 7 図-(a)、第 13 図-(a)、第 18 図-(a)を順に比べてみるか、或いは第 8 図-(a)、第 14 図-(a)、第 19 図-(a)を比べるとわかるように、

ほとんど同じ温度で放電し始めても、フィラメントが細いほど放電時の温度分布の一樣性が崩れてくる。特に、第8図-(a)のような温度分布になった場合、フィラメントの負端子付近で断線する危険性がある。このような不均一な温度分布が生じる原因は、主に放電電流がフィラメント中をフィラメント電流とともに流れることにある。その効果がフィラメントが細いほど顕著になるのは、(2)式と(11), (12), (13)式からわかるように、(2)式中の放電電流によるフィラメントの加熱に対応する項が  $1/a^2$  に比例するのに対し、主な冷却要素である熱輻射に対応する項が  $1/a$  しか比例していないためである。従って、フィラメントは、細いほど放電中に断線しやすい。

#### 4. 検 討

3節の第16図の説明のところで触れたように、この計算では、プラズマ密度を  $n_0 = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  と仮定したため、電子電流密度の上限が  $10.5 \text{ A/cm}^2$  (熱電子放出では、 $2955 \text{ }^\circ\text{K}$  に対応) となっている。プラズマ密度をもっと大きくとれば、電子電流密度の上限が上昇して、とり得る放電電流も増加するため、最高温度が  $2955 \text{ }^\circ\text{K}$  以上のフィラメントが放電した場合の定常温度分布は一層、一樣性が悪くなる方向となる。そのことを示したのが、第27図である。 $n_0 = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  の場合には、放電中の定常温度分布もかなり一樣であるが、 $n_0 = 2.44 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  とすると、全体として温度が上り、定常温度分布も極端に不均一になり、負端子付近で溶融破断する。

一般に、イオン源では、一旦その構造や寸法が決まれば、その中のプラズマ密度は、放電電流放電電圧、ガス圧、等の関数である。従って、この計算で仮定したように放電電流に関係なくプラズマ密度が一定ということとはありえない。即ち、今後の改良の方向として、プラズマ密度を放電電流と関係づけることがある。

この計算では、フィラメント電源として定電流電源を想定したが、実際の電源は定電圧電源に近い。定電圧電源にした場合、当初フィラメントには大電流が流れるが、温度が上昇するにつれて抵抗が増加するため、次第にフィラメント電流が減少することが予想される。放電時の各種の量の時間応答にも、定電流電源の場合とは異なった面が出てくると考えられるが、その計算は、今後行う予定である。

## 5. ま と め

気体放電中のタングステンフィラメント陰極の温度分布計算を、フィラメント電源が定電流電源の場合についてできるようにした。直径 0.5 mm から 1.8 mm までのフィラメントについて計算し、以下の事がわかった。

i) 放電なしの場合、フィラメント中心が 3000 °K の定常温度分布を得るに必要なフィラメント電流密度、フィラメント電流、フィラメント電圧、フィラメント電力のフィラメント径(2a)への依存性は次のようになる。

$$j_{fil} \propto a^{-1/2}, \quad I_{fil} \propto a^{3/2}$$

$$V_{fil} \propto a^{-1/2}, \quad P_{fil} \propto a$$

また、定常温度分布到達時間は、太いほど長い。温度分布の一様性は、細い方が良くなる。

ii) 放電ありの場合、放電電流が大きいほど温度分布は不均一となり、最高温度の点が負端子に近づく。その不均一分布の程度は、フィラメントが細くなるほど大きくなる。その結果、フィラメントが細いほど、放電中に負端子近傍で断線する危険性が増す。

iii) フィラメントを取り囲むプラズマが十分に濃いと、そのフィラメントの温度限界まで電子電流が放出され得る。この場合には、放電電流がフィラメント内を通り、これを加熱するため熱電子放出が促進され、更に放電電流が増加する。ii) のことを考えあわせると、プラズマ密度が高いほど、負端子で断線する危険性が増す。

## 謝 辞

本計算にあたり、終始有益な助言と激励を頂いた白形弘文加熱工学第1研究室長、松田慎三郎副主任研究員に感謝致します。また喜んで討議して下さいました加熱工学第1研究室の方々に謝意を表します。本研究遂行に際し、御指導と激励を戴いた磯康彦核融合研究開発推進センター長、小幡行雄核融合研究部長に感謝致します。

## 引用文献

- 1) H. Kohl : Materials and Techniques for Vacuum Devices, Van Nostrand-Reinhold Company (1967).
- 2) F.E. Domann and T. May : J. Appl. Phys. 49 (1978) 5074.
- 3) 松田 慎三郎 : JAERI-M 5035 (1972).
- 4) D. Bohm : The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields, A. Guthrie and R.K. Wakerling eds, New York, McGraw-Hill (1949).
- 5) P.D. Prewett and J.E. Allens : Proc. R. Soc. Lond. A 348 (1976) 435.
- 6) K.W. Ehlers and K.N. Leung : Rev. Sci. Instrum. 50 (1979) 356.

第1表 :  $a = 0.025 \text{ cm}$  の場合の主な計算結果。 $j_{fil}$ ,  $I_{fil}$  は各々、フィラメント電流密度とフィラメント電流である。 $V_{fil}$ ,  $P_{fil}$  はフィラメントの負荷端電圧と、フィラメント電力を表わす。 $T_{max}$  はフィラメントの最高温度であり、 $x_{max}$  は、その点の座標である。 $t_{sat}$  は、温度分布が定常状態になるまでの時間である。また、 $I_{arc}$  は、放電後、定常温度分布になった時の放電電流である。

$$kTe = 4 \text{ eV}, V_{c.f} = 40 \text{ V}, n_0 = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

$$a = 0.025 \text{ cm}, r_{in} = 7 \Omega$$

	$j_{fil} \text{ (A/cm}^2\text{)}$	$6 \times 10^3$	$7 \times 10^3$	$8 \times 10^3$	$9 \times 10^3$	$10^4$	$1.1 \times 10^4$	$1.2 \times 10^4$	$1.3 \times 10^4$
	$I_{fil} \text{ (A)}$	11.8	13.7	15.7	17.7	19.6	21.6	23.6	25.5
without discharge	$V_{fil} \text{ (V)}$	4.65	6.07	7.59	9.33	11.3	13.3	15.5	18.0
	$P_{fil} \text{ (w)}$	54.9	33.2	119.1	165.1	221.0	287.8	366.6	458.3
	$T_{max} \text{ (}^\circ\text{K)}$	2044	2222	2392	2563	2729	2892	5053	3214
	$t_{sat} \text{ (sec)}$	11.6	9.0	7.3	6.0	5.1	4.4	3.8	3.3
with discharge	$V_{fil} \text{ (V)}$	5.45	6.82	8.31	9.89	11.6	13.5	16.0	
	$P_{fil} \text{ (w)}$	64.3	93.5	130.4	175.1	228.1	291.5	298.3	melted after 0.26 sec
	$T_{max} \text{ (}^\circ\text{K)}$	2295	2420	2545	2666	2790	2953	3459	
	$x_{max} \text{ (cm)}$	9.5	10.0	10.9	11.8	12.6	13.4	13.5	
	$I_{arc} \text{ (A)}$	0.8	0.98	1.53	2.98	6.22	13.8	21.1	

第2表 :  $a = 0.05\text{cm}$  の場合の主な計算結果。定義は、第1表と同じ。

$$kTe = 4\text{ eV}, V_{c,f} = 40\text{ V}, n_0 = 10^{12}\text{ cm}^{-3}$$

$$a = 0.05\text{ cm}, r_{in} = 2\Omega$$

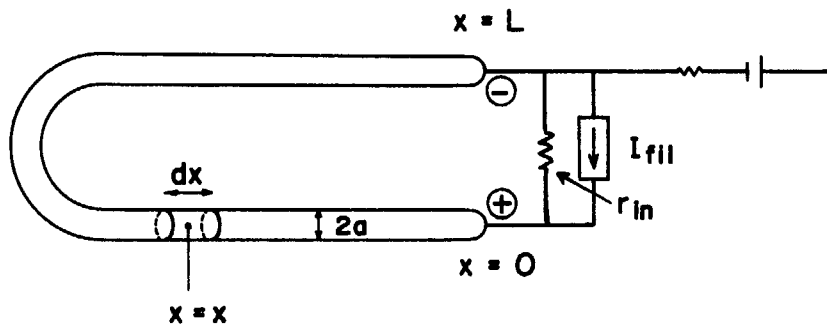
	$J_{fil}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$6 \times 10^3$	$7 \times 10^3$	$8 \times 10^3$	$8.5 \times 10^3$	$9 \times 10^3$	$9.5 \times 10^3$	$1 \times 10^4$	$1.1 \times 10^4$
	$I_{fil}$ (A)	47.1	55.0	62.8	66.8	70.7	74.6	78.5	86.4
without discharge	$V_{fil}$ (V)	5.73	7.56	9.62	10.7	11.9	13.1	14.4	17.2
	$P_{fil}$ (w)	270.1	415.6	604.2	716.2	841.2	979.8	1132.8	1486.5
	$T_{max}$ (°K)	2476	2712	2943	3057	3171	3285	3399	3633
	$t_{sat}$ (sec)	12.6	9.9	8.0	7.2	6.6	6.1	5.6	4.8
with discharge	$V_{fil}$ (V)	6.21	7.83	9.59	10.6	11.8	13.0	14.4	
	$P_{fil}$ (w)	292.4	430.8	602.3	706.1	832.6	972.9	1127.8	melted after 0.03 sec
	$T_{max}$ (°K)	2601	2756	2908	3069	3264	3395	3521	
	$x_{max}$ (cm)	9.4	11.1	12.3	12.6	12.6	12.7	12.7	
	$I_{arc}$ (A)	3.8	10.0	25.3	37.5	43.1	44.3	45.1	

第3表 :  $a = 0.075\text{cm}$  の場合の主な計算結果。定義は、第1表と同じ。

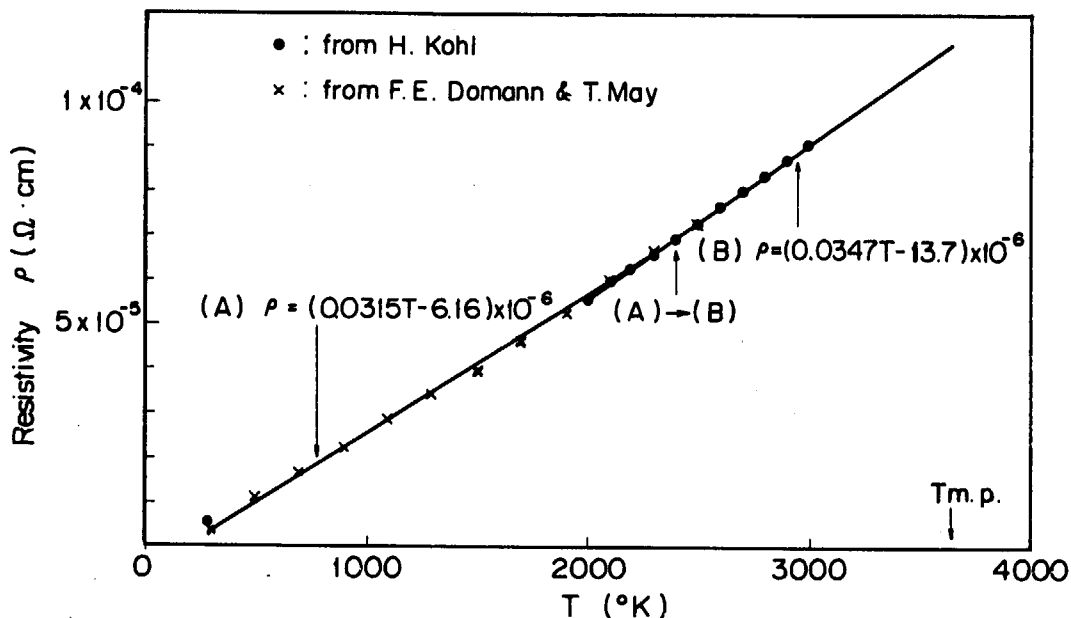
$$kTe = 4.0\text{ eV}, V_{c,f} = 40\text{ V}, n_0 = 10^{12}\text{ cm}^{-3}$$

$$a = 0.075\text{ cm}, r_{in} = 0.8\Omega$$

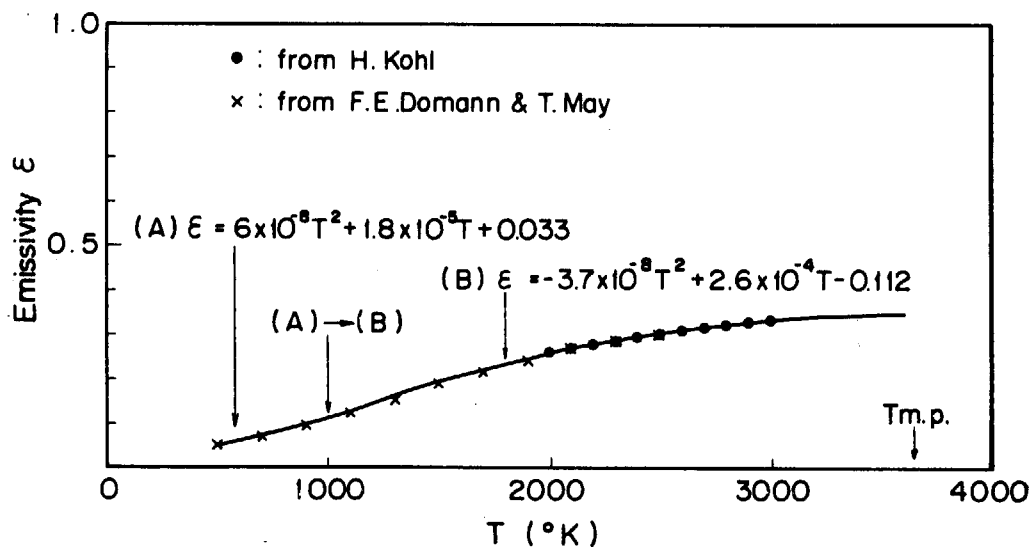
	$J_{fil}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$5 \times 10^3$	$6 \times 10^3$	$6.5 \times 10^3$	$7 \times 10^3$	$7.5 \times 10^3$	$8 \times 10^3$	$9 \times 10^3$
	$I_{fil}$ (A)	88.4	106.0	114.9	123.7	132.5	141.4	159.0
without discharge	$V_{fil}$ (V)	4.71	6.57	7.60	8.70	9.88	11.1	12.9
	$P_{fil}$ (w)	416.1	696.3	873.0	1076.6	1309.1	1572.9	2204.1
	$T_{max}$ (°K)	2505	2793	2934	3073	3213	3353	3638
	$t_{sat}$ (sec)	17.7	13.3	11.7	10.4	9.3	8.4	7.0
with discharge	$V_{fil}$ (V)	5.09	6.73	7.58	8.49	9.63	10.9	
	$P_{fil}$ (w)	450.3	713.4	871.5	1050.0	1275.7	1538.7	melted after 0.28 sec
	$T_{max}$ (°K)	2620	2799	2880	2977	3178	3340	
	$x_{max}$ (cm)	8.2	10.5	11.4	12.0	11.9	12.0	
	$I_{arc}$ (A)	5.9	18.9	32.2	52.6	62.1	64.5	



第1図 : フィラメントの温度分布計算をするときの配置。I<sub>fil</sub> は、定電流電源を表わす。

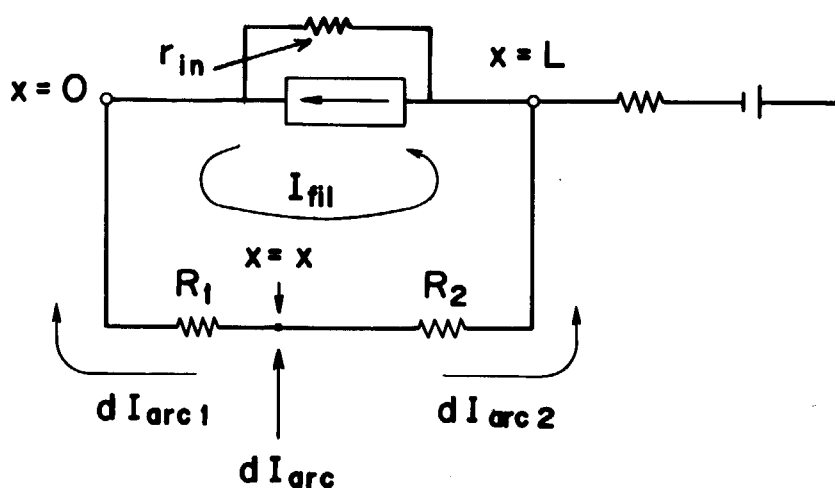


第2図 : タングステンの比抵抗と温度の関係。×印は文献2) から、●印は文献1) より引用した。折線は、近似式を表わす。

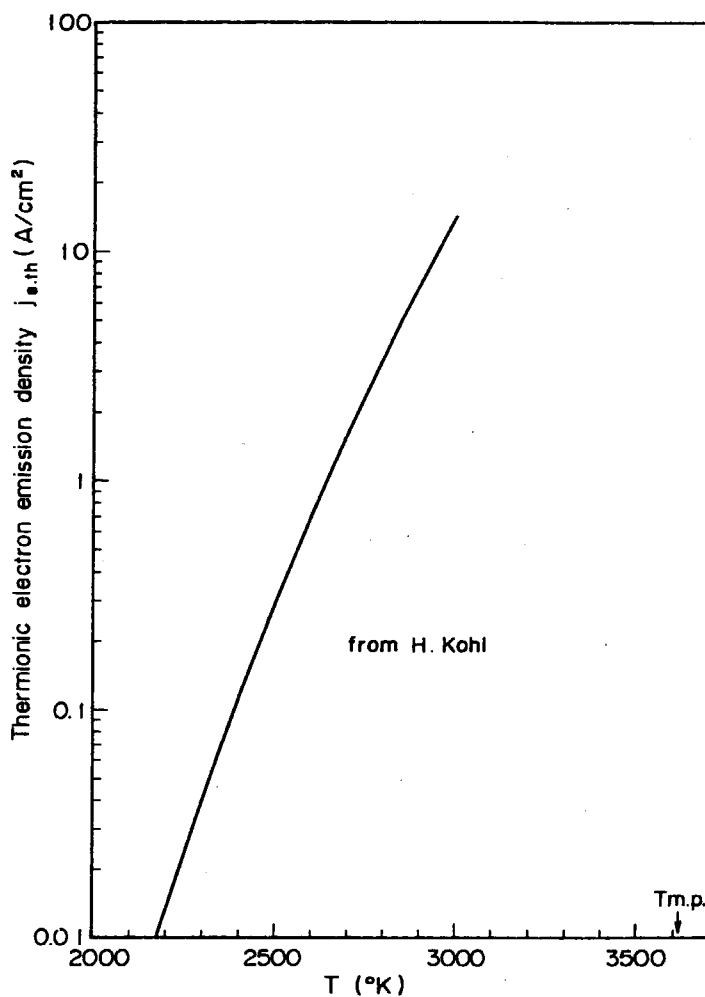


第3図 : タングステンの放射率と温度の関係。×印は文献2) から、●印は文献1) より引用した曲線は、近似式を表わす。

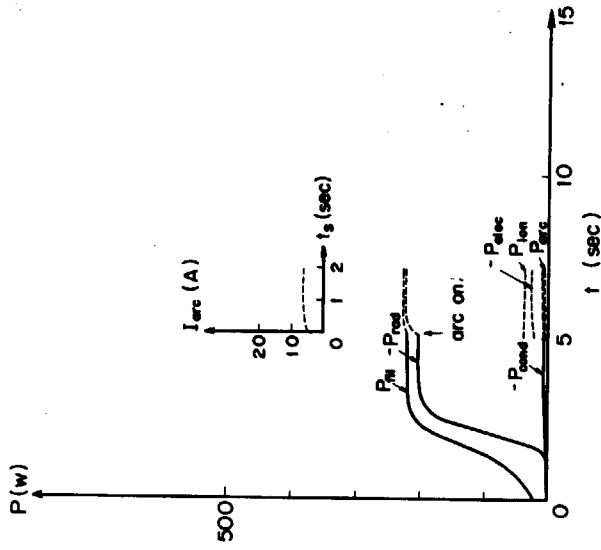




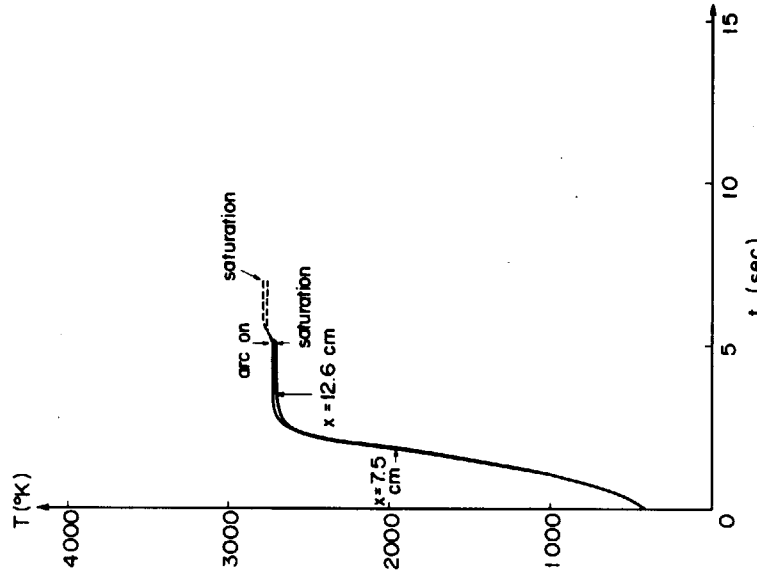
第4図 :  $x=x$  の点から入った放電電流  $dI_{arc}$  が、フィラメントの左右にどのように分流するかを決定するための図。



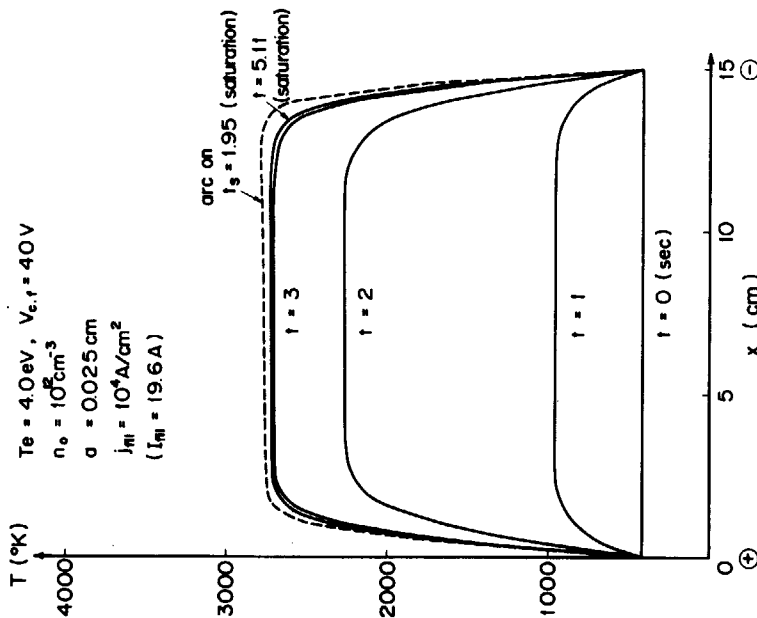
第5図 : タングステンの熱電子放射密度と温度の関係。文献1)より引用した。



第6図-c: フィラメント全体に関係したパワーと電流の時間変化を表わす。P<sub>fil</sub>は、外部からのフィラメント加熱電力、  
 -P<sub>rad</sub>は、フィラメントからの熱輻射パワー、-P<sub>cond</sub>は、フィラメント支持端からの熱伝導損失パワーを示す。  
 P<sub>ion</sub>は、放電中、イオン衝撃によりフィラメントに入るパワー、-P<sub>elec</sub>は、熱電子放出によりフィラメントから失われるパワー、P<sub>arc</sub>は、放電電流がフィラメント中を流れることで加熱することになるパワーを示している。  
 I<sub>arc</sub>は、放電電流を示す。

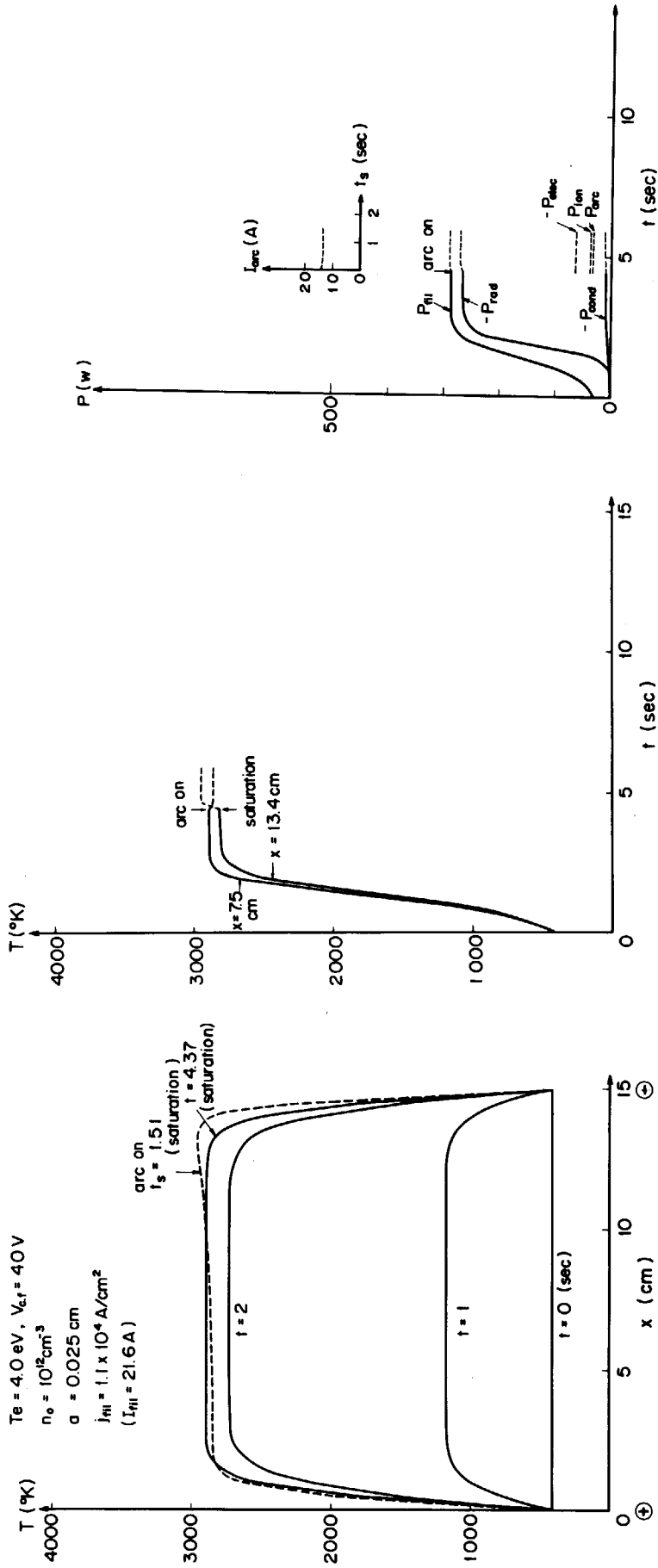


第6図-b: フィラメントの中心点 x = 7.5 cmと、放電後、最高温度になった点 x = 12.6 cmの温度の時間変化を表わす。  
 実線は、放電なしの場合、点線は放電後の時間変化を表わす。条件は第6図-aと同じ。



第6図-a: a = 0.025 cmのタンゲステンフィラメントに I<sub>fil</sub> = 19.6 A を流した場合の温度分布。x = 0 がフィラメントの正端子側である。  
 実線は、放電しない場合の各時刻の温度分布を表わす。点線は、放電後、定常になった時の温度分布を表わす。

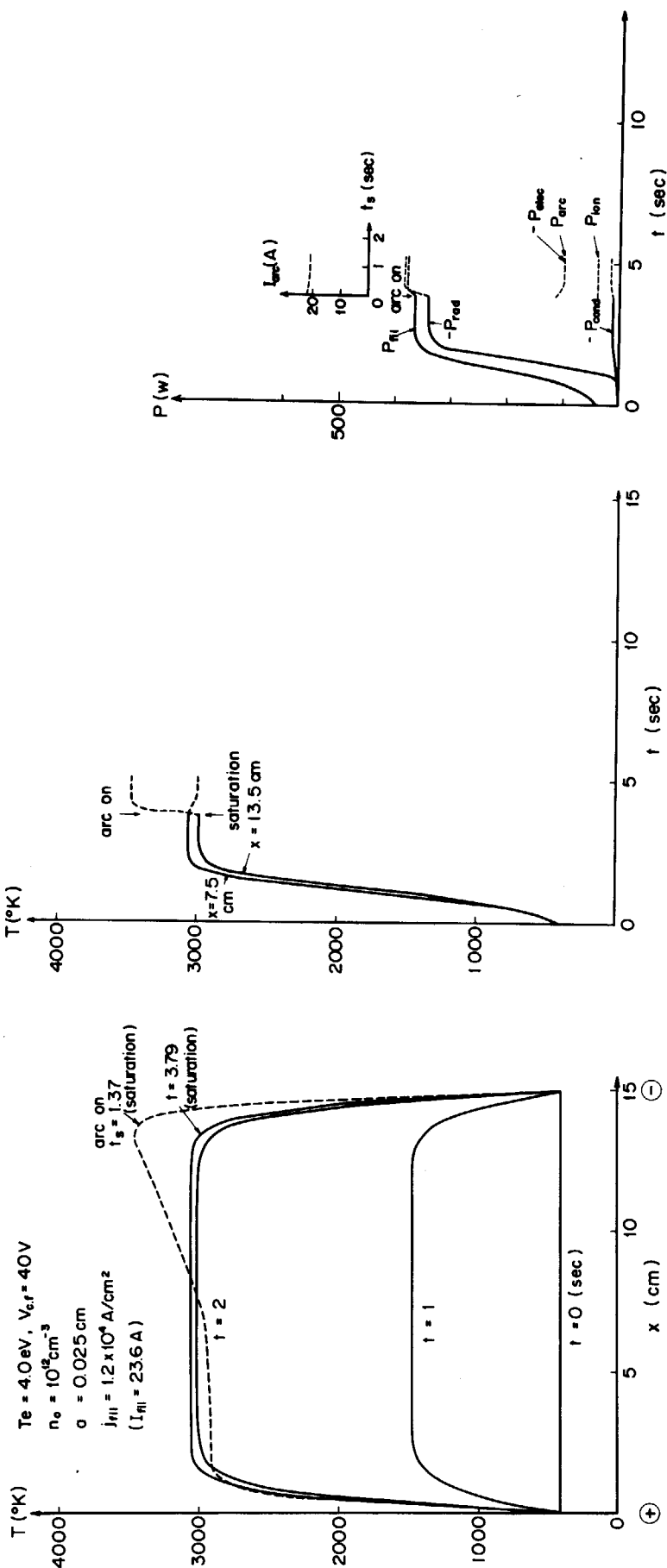
Te = 4.0 eV, V<sub>c,r</sub> = 40 V  
 n<sub>0</sub> = 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>  
 a = 0.025 cm  
 j<sub>m</sub> = 10<sup>9</sup> A/cm<sup>2</sup>  
 (I<sub>m</sub> = 19.6 A)



第7図-a : a = 0.025 cm のフィラメントに  $I_{fil} = 21.6 \text{ A}$  を流した場合の温度分布

第7図-b : x = 7.5 cm と x = 13.4 cm の点の温度の時間変化。条件は、第7図-a と同じ。

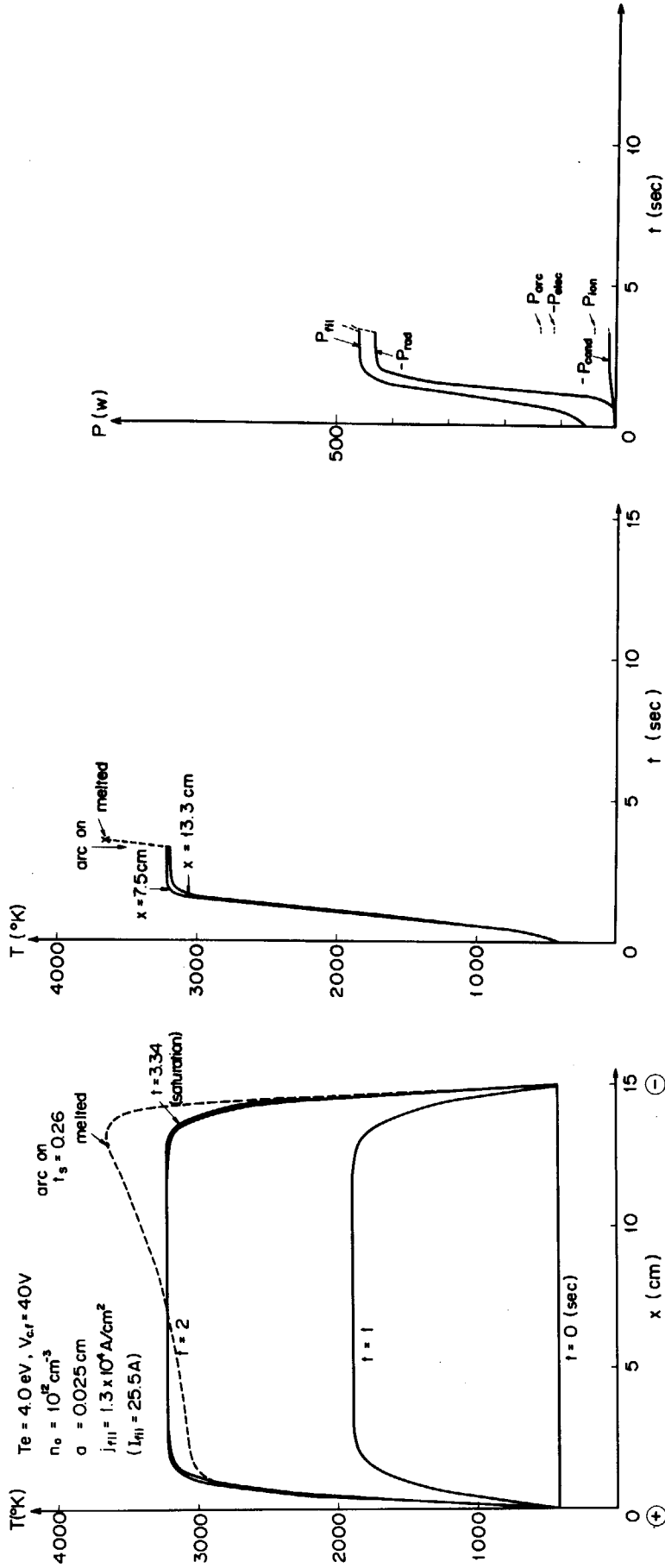
第7図-c : フィラメント全体に流したパワーと、放電電流の時間変化。条件は、第7図-a と同じ。



第8図-a :  $a = 0.025 \text{ cm}$  のフィラメントに  $I_{fil} = 23.6 \text{ A}$  を流した場合の温度分布。

第8図-b :  $x = 7.5 \text{ cm}$  と  $x = 13.5 \text{ cm}$  の点の温度の時間変化。条件は、第8図-a と同じ。

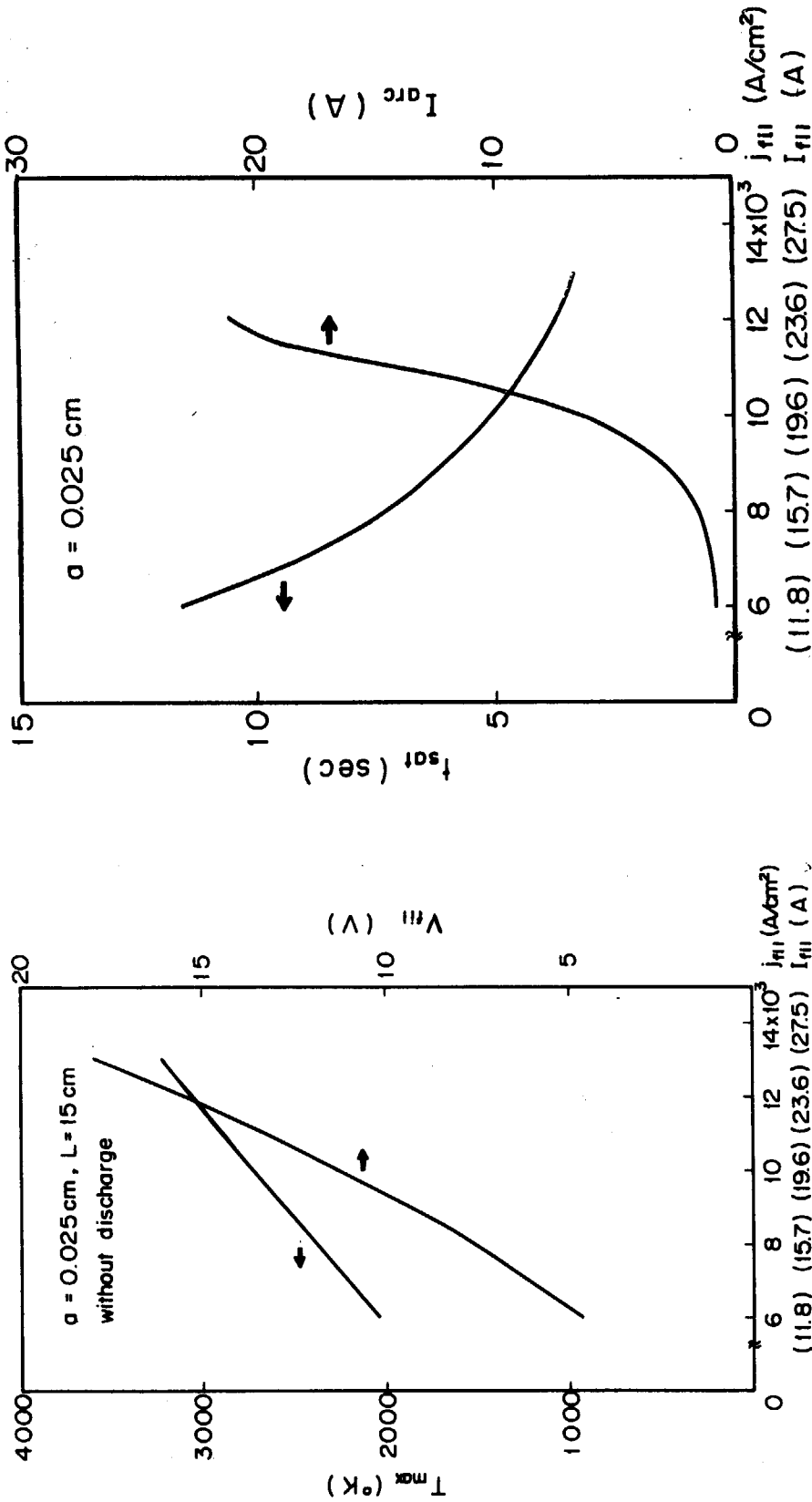
第8図-c : フィラメント全体に関する放電電力の関係を。条件は、第8図-a と同じ。



第9図-a :  $a = 0.025 \text{ cm}$ のフィラメントに  $I_{f,1} = 25.5 \text{ A}$ を流した場合の温度分布。放電させると、 $0.26 \text{ sec}$ 後に  $x = 13.3 \text{ cm}$ の点が熔融破断する。

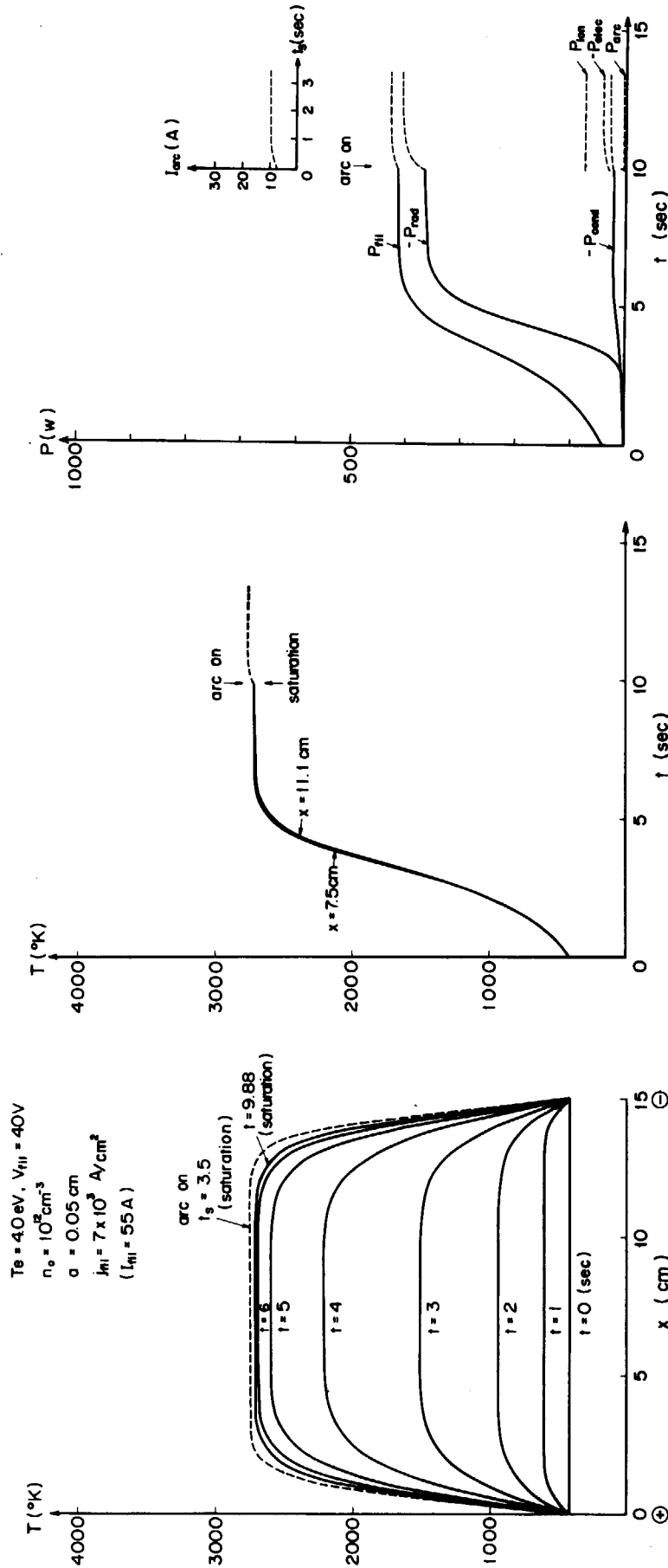
第9図-b :  $x = 7.5 \text{ cm}$ と  $x = 13.3 \text{ cm}$ の点の温度の時間変化。条件は、第9図-aと同じ。

第9図-c : フィラメント全体に關係したパワー時間変化。条件は、第9図-aと同じ。



第10図：放電なしの場合について、フィラメント電流密度  $j_{fil}$ 、フィラメント電流  $I_{fil}$  とフィラメントの最高温度  $T_{max}$  の関係、あるいはフィラメント電圧  $V_{fil}$  との関係を示す。a = 0.025 cm, L = 15 cmである。

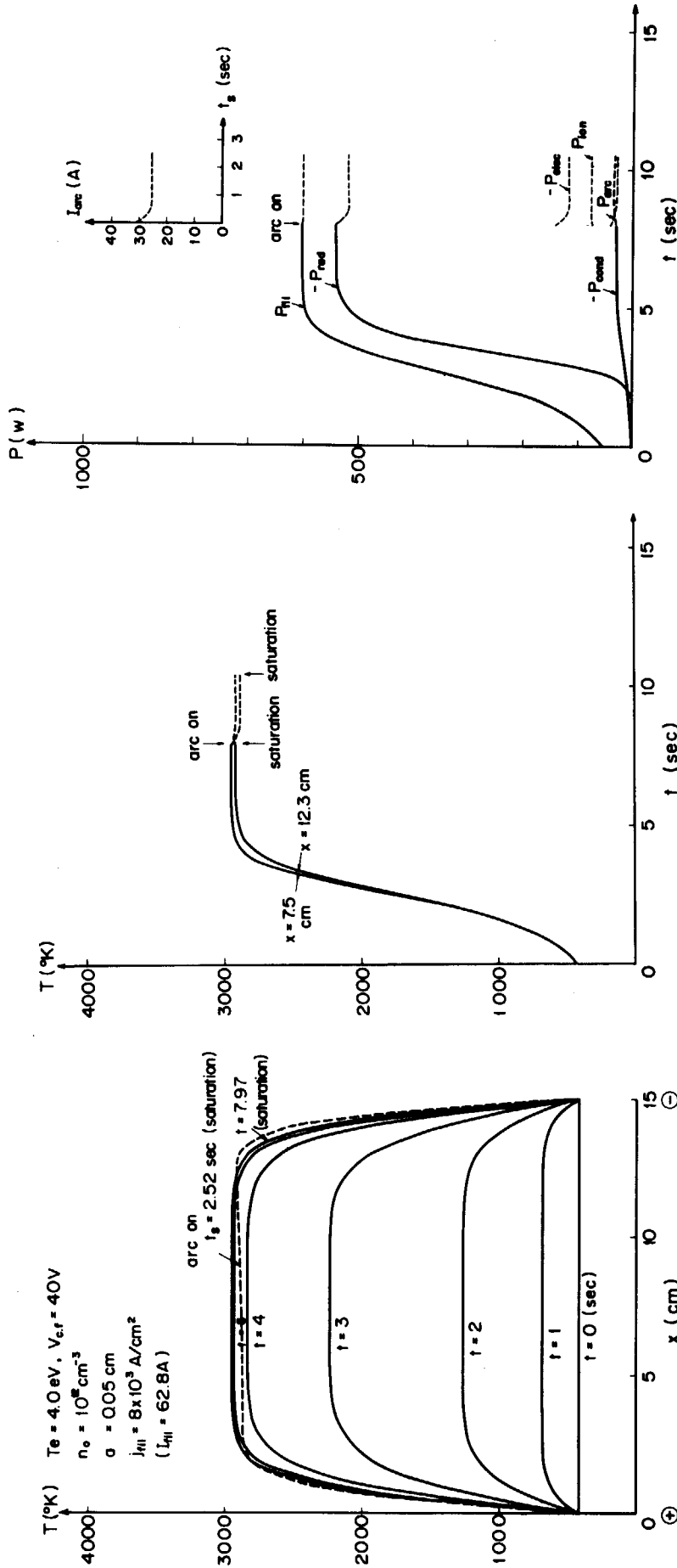
第11図：放電なしの場合、温度分布が定常になるまでの時間  $t_{sat}$  と、 $j_{fil}$ 、 $I_{fil}$  の関係を示す。あるいは、放電させた場合に、定常温度分布時の放電電流  $I_{arc}$  と  $I_{fil}$  の関係を示す。a = 0.025 cm, L = 15 cmである。



第12図-a : a = 0.05 cm のタンダステンフィラメントに  $I_{fil} = 55 \text{ A}$  を流した場合の温度分布。

第12図-b : x = 7.5 cm と x = 11.1 cm の点の温度の時間変化。条件は、第12図-a と同じ。

第12図-c : フィラメント全体に関するパワーと放電電流の時間変化。条件は、第12図-a と同じ。

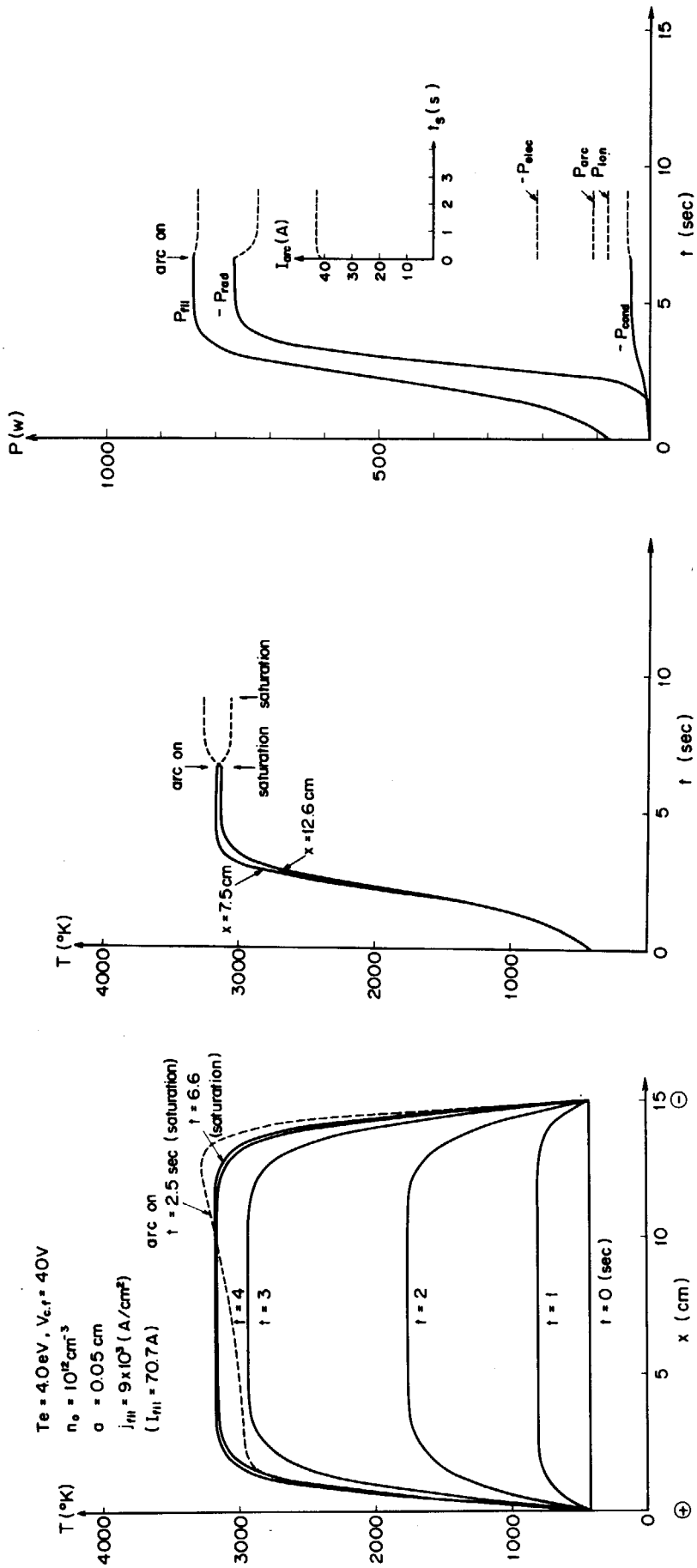


第13図-a :  $a = 0.05 \text{ cm}$  のファイラメントに  $I_{H1} = 62.8 \text{ A}$  を流した場合の温度分布。

第13図-b :  $x = 7.5 \text{ cm}$  と  $x = 12.3 \text{ cm}$  の点の温度の時間変化。条件は、第13図-aと同じ。

第13図-c : ファイラメント全体に關係したパワーと放電電流の時間変化。条件は、第13図-aと同じ。

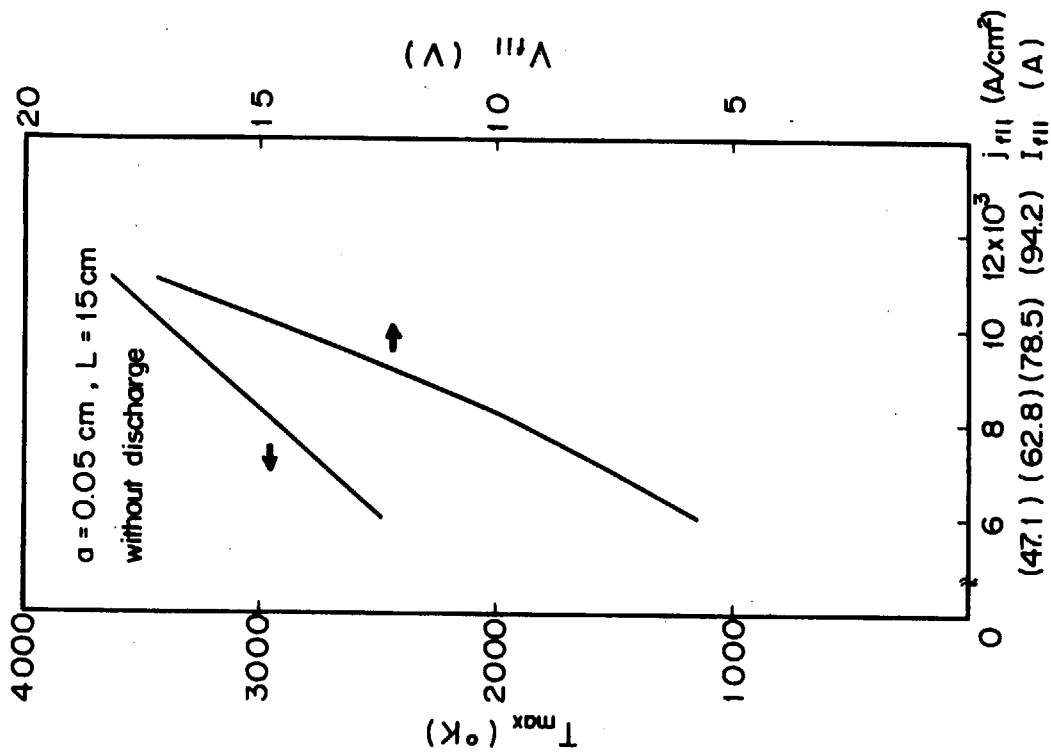




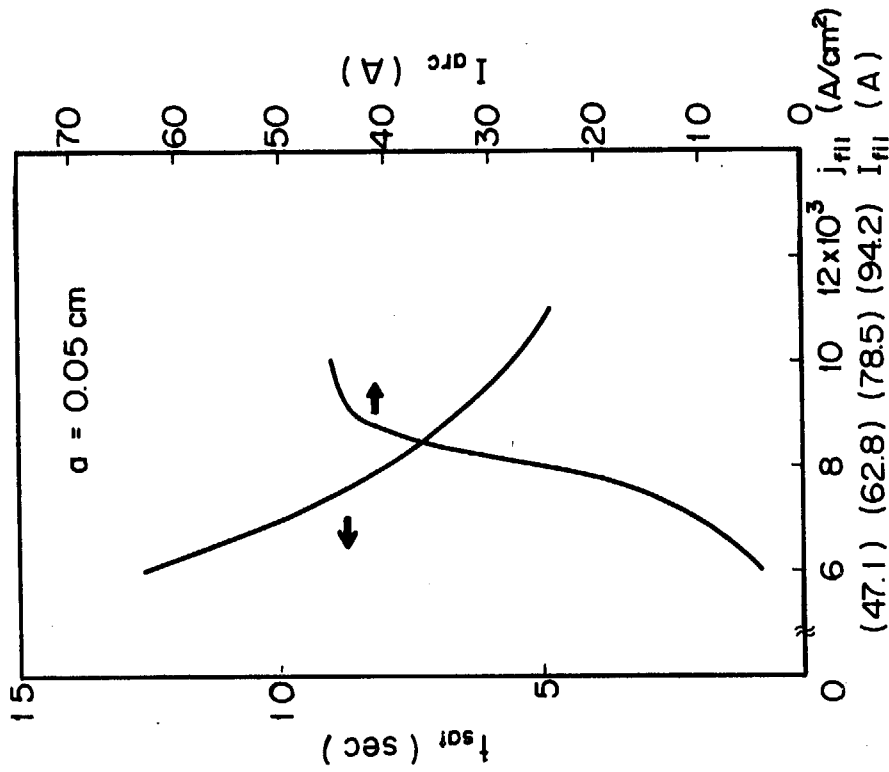
第14図-a :  $a = 0.05 \text{ cm}$ のフライメントに  $I_{fII} = 70.7 \text{ A}$ を流した場合の温度分布。

第14図-b :  $x = 7.5 \text{ cm}$ と  $x = 12.6 \text{ cm}$ の点の温度の時間変化。条件は、第14図-aと同じ。

第14図-c : フライメント全体に関係したパワーと放電電流の時間変化。条件は、第14図-aと同じ。



第15図：放電なしの場合について、 $j_{fil}$ 、 $I_{fil}$ と $T_{max}$ の関係、あるいは $V_{fil}$ との関係を示す。 $a = 0.05 \text{ cm}$ 、 $L = 15 \text{ cm}$ である。



第16図：放電なしの場合、 $t_{sdi}$ と $j_{fil}$ 、 $I_{fil}$ の関係を示す。あるいは、放電させた場合に、定常温度分布時の $I_{arc}$ と $I_{fil}$ の関係を示す。 $a = 0.05 \text{ cm}$ 、 $L = 15 \text{ cm}$ である。

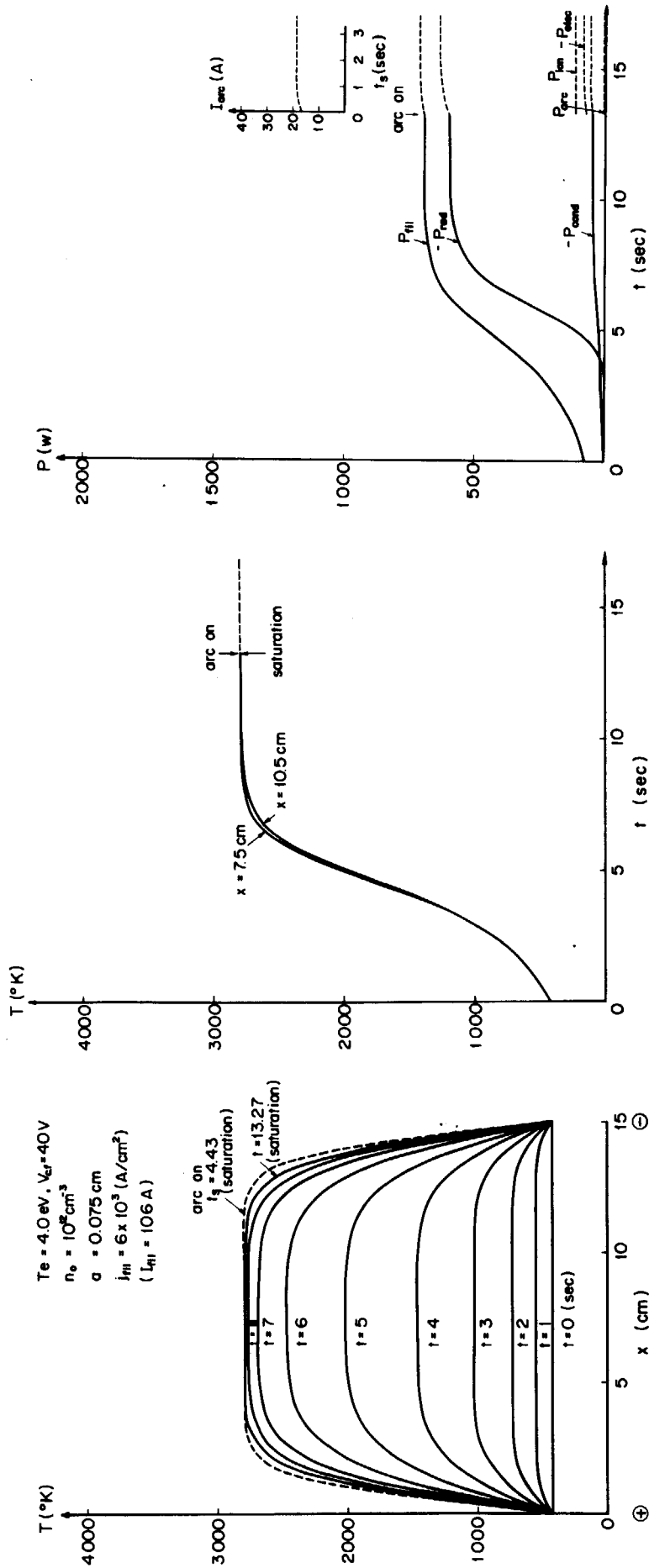
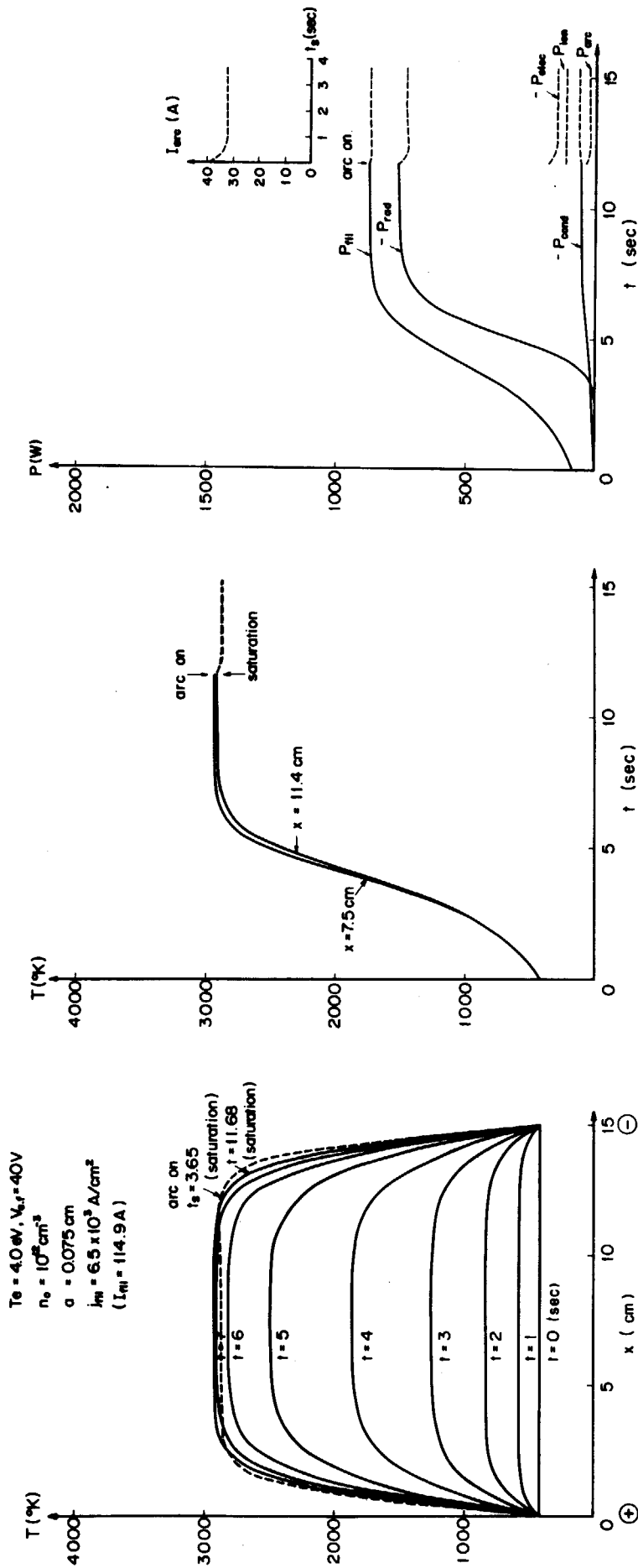


図 17 図-a :  $a = 0.075 \text{ cm}$  のタングステンフィラメントに  $I_{fil} = 106 \text{ A}$  を流した場合の温度分布。

第 17 図-b :  $x = 7.5 \text{ cm}$  と  $x = 10.5 \text{ cm}$  の点の温度の時間変化。条件は、第 17 図-a と同じ。

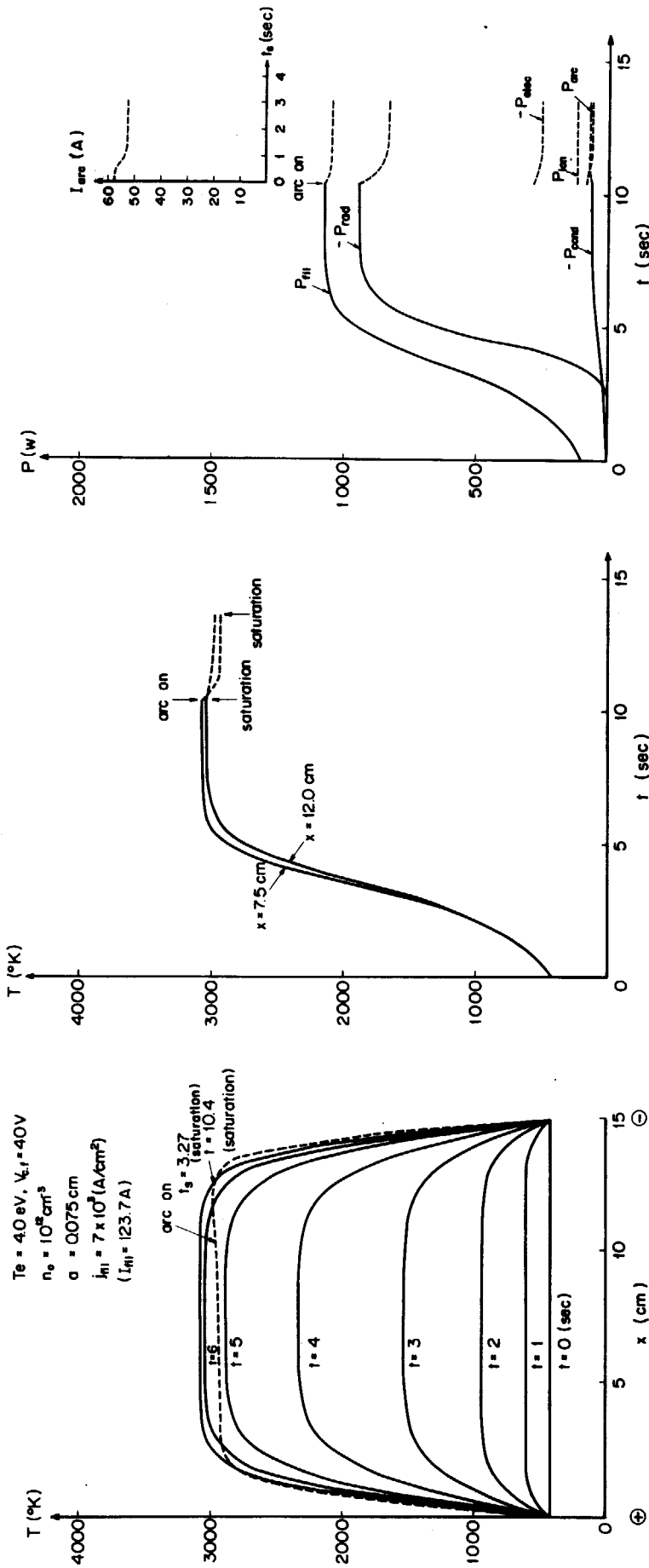
第 17 図-c : フィラメント全体に關係したパワーと放電電流の時間変化。条件は、第 17 図-a と同じ。



第18図-a :  $a = 0.075 \text{ cm}$  のフライメントに  $I_{f,1} = 11.9 \text{ A}$  流した場合の温度分布。

第18図-b :  $x = 7.5 \text{ cm}$  と  $x = 11.4 \text{ cm}$  の点の温度の時間変化。条件は、第18図-a と同じ。

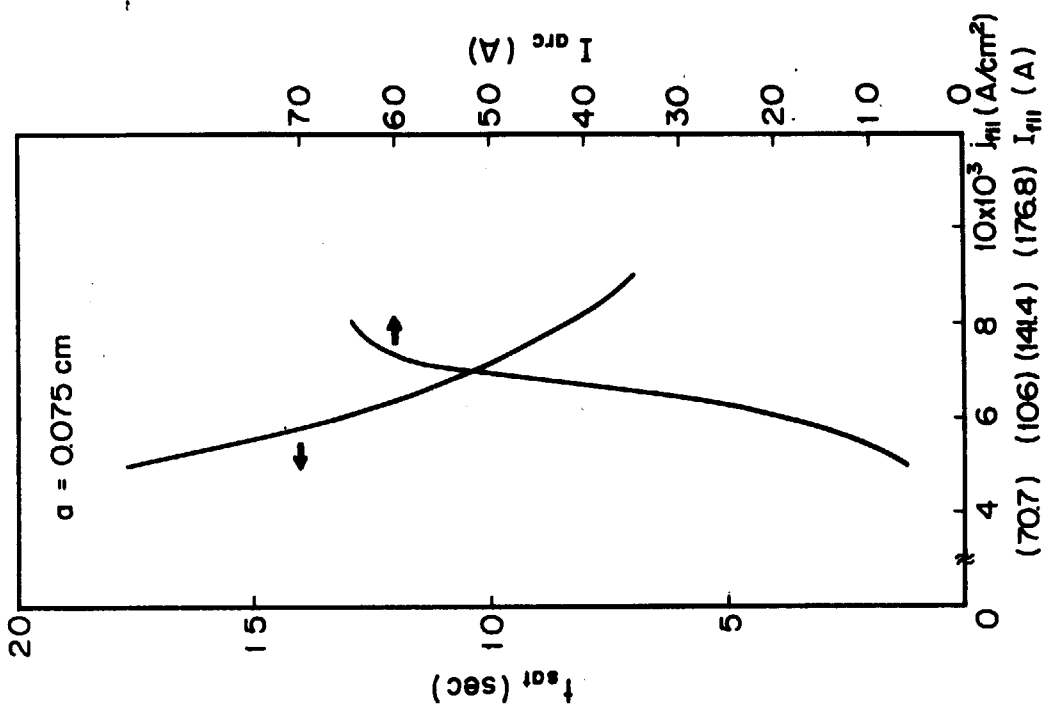
第18図-c : フライメント全体にわたる放電電流の時間変化。条件は、第18図-a と同じ。



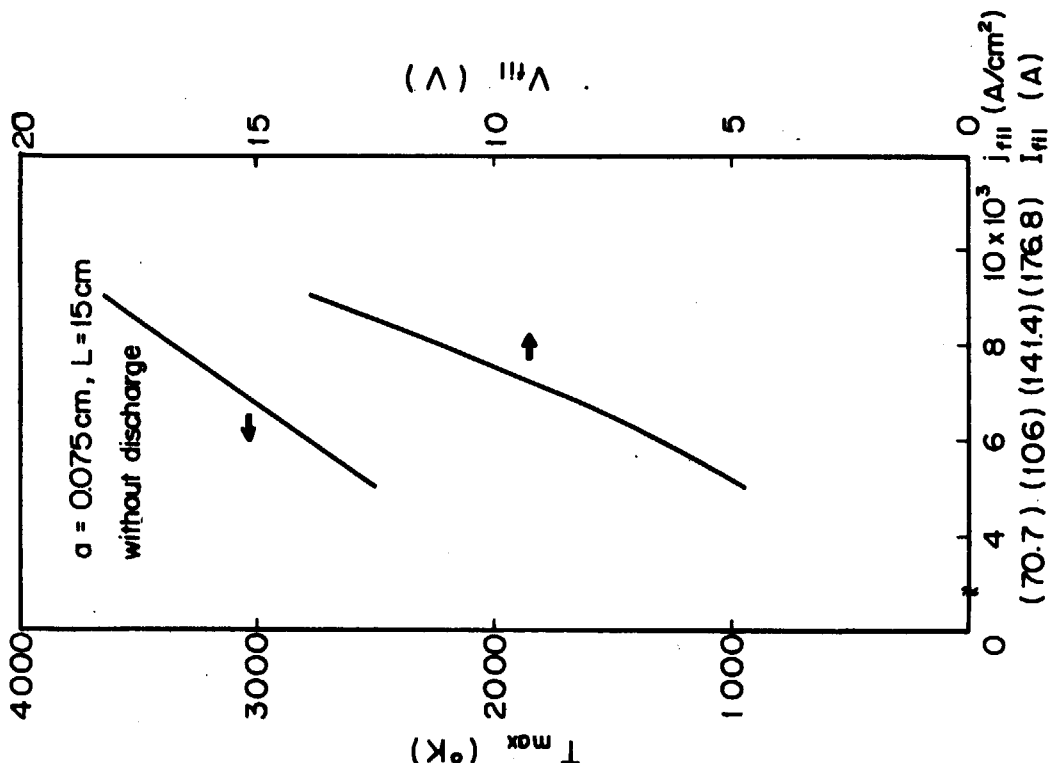
第19図-a :  $a = 0.075 \text{ cm}$  のフィラメントに  $I_{H1} = 123.7 \text{ A}$  流した場合の温度分布。

第19図-b :  $x = 7.5 \text{ cm}$  と  $x = 12.0 \text{ cm}$  の点の温度の時間変化。条件は、第19図-a と同じ。

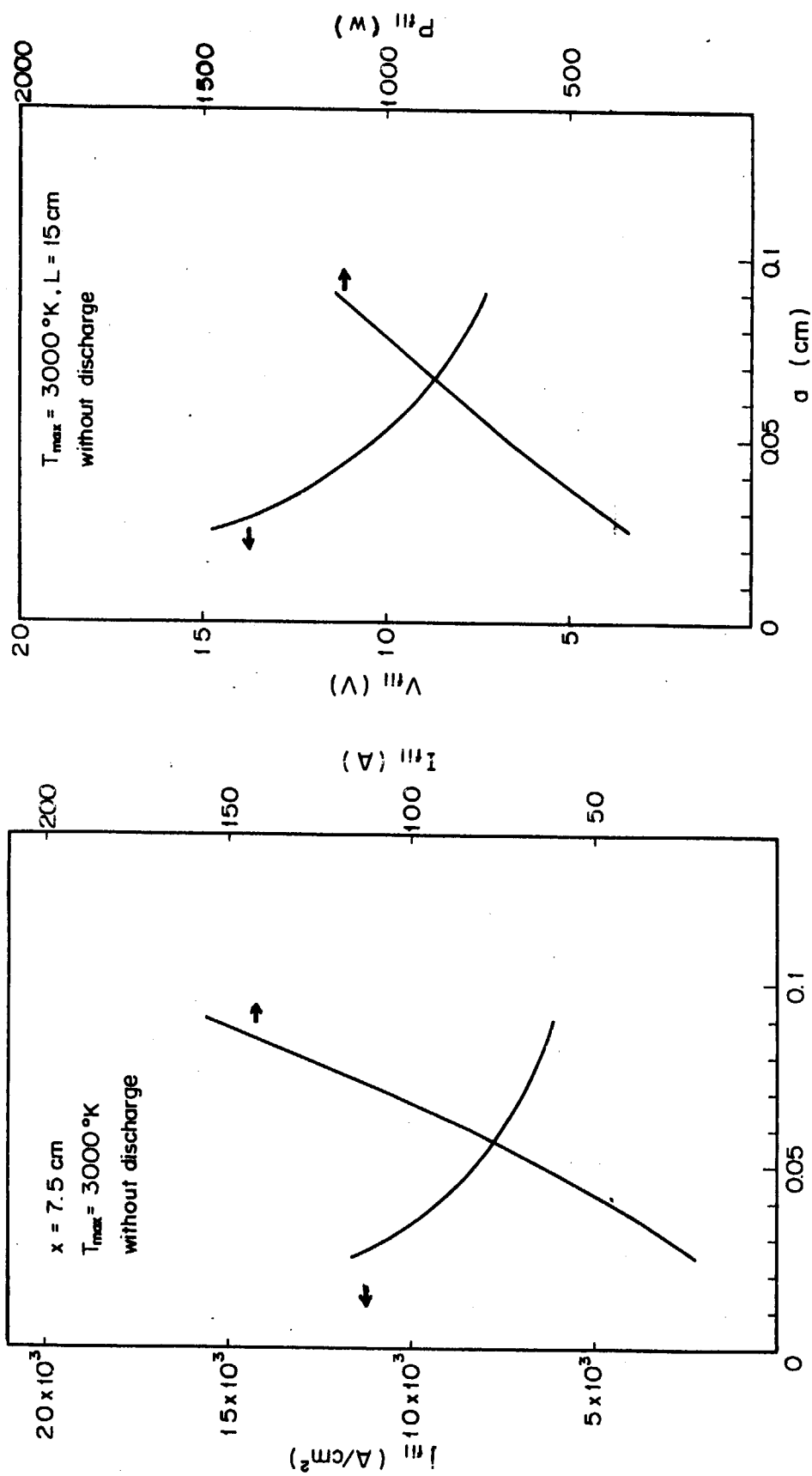
第19図-c : フィラメント全体に関係したパワーと放電電流の時間変化。条件は、第19図-a と同じ。



第21図：放電なしの場合， $t_{\text{sat}}$ と $j_{\text{fil}}$ ， $I_{\text{fil}}$ の関係を示す。あるいは，放電させた場合に，定常温度分布時の $I_{\text{arc}}$ と $I_{\text{fil}}$ の関係を示す。 $a = 0.075 \text{ cm}$ ， $L = 15 \text{ cm}$ である。

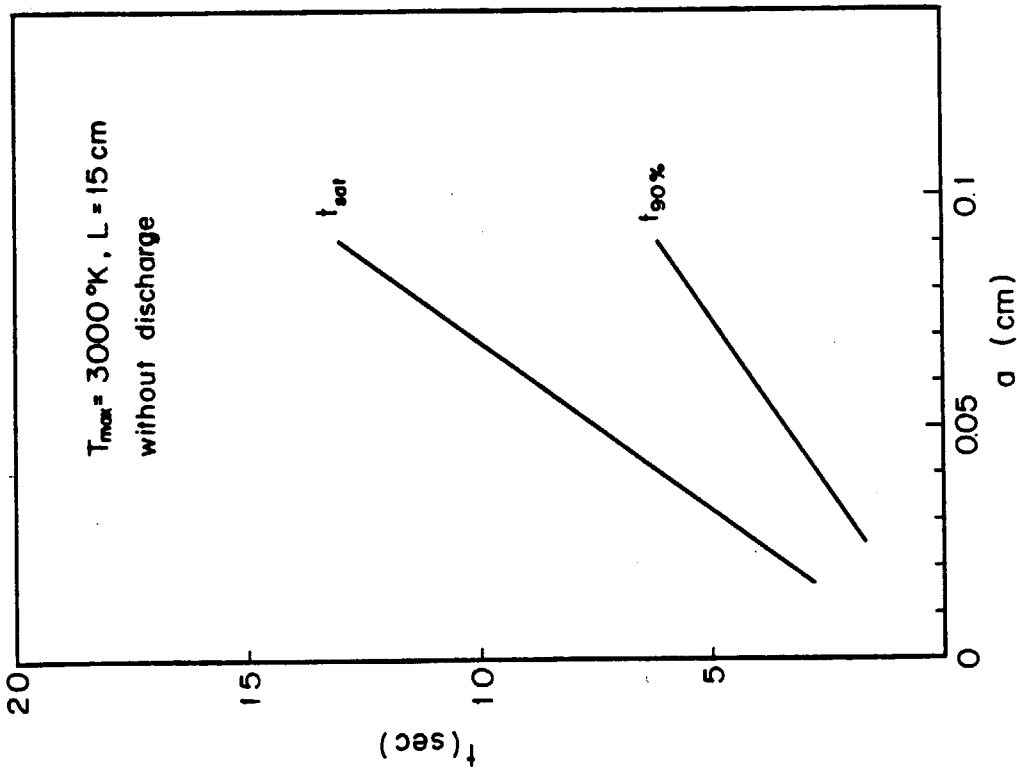


第20図：放電なしの場合について， $j_{\text{fil}}$ ， $I_{\text{fil}}$ と $T_{\text{max}}$ の関係，あるいは $V_{\text{fil}}$ との関係を示す。 $a = 0.075 \text{ cm}$ ， $L = 15 \text{ cm}$ である。

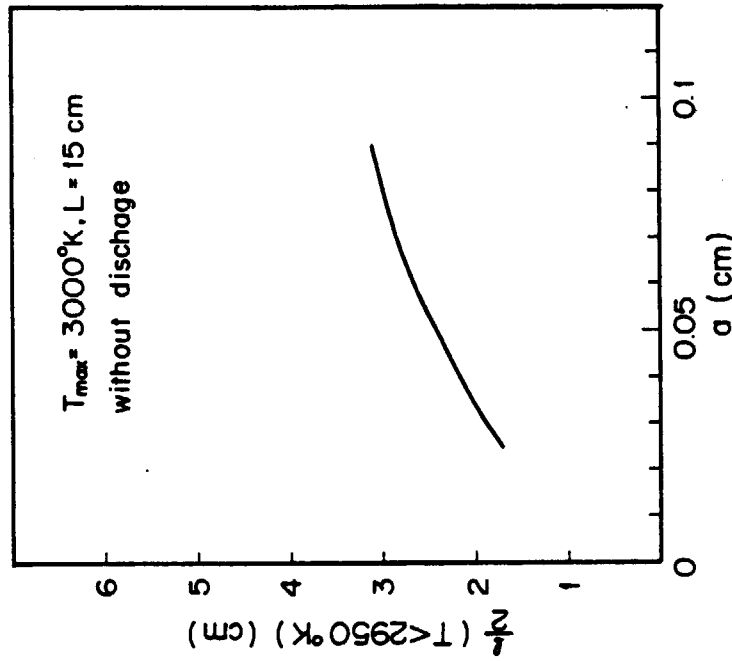


第22図：放電なしの場合、フィラメント中央が3000°Kの定常温度分布になるときの、 $j_{f,II}$ 、 $I_{f,II}$ とフィラメント半径  $a$  の関係。

第23図：放電なしの場合、フィラメント中央が3000°Kの定常温度分布になる時の、 $V_{f,II}$ 、 $P_{f,II}$ と  $a$  の関係。

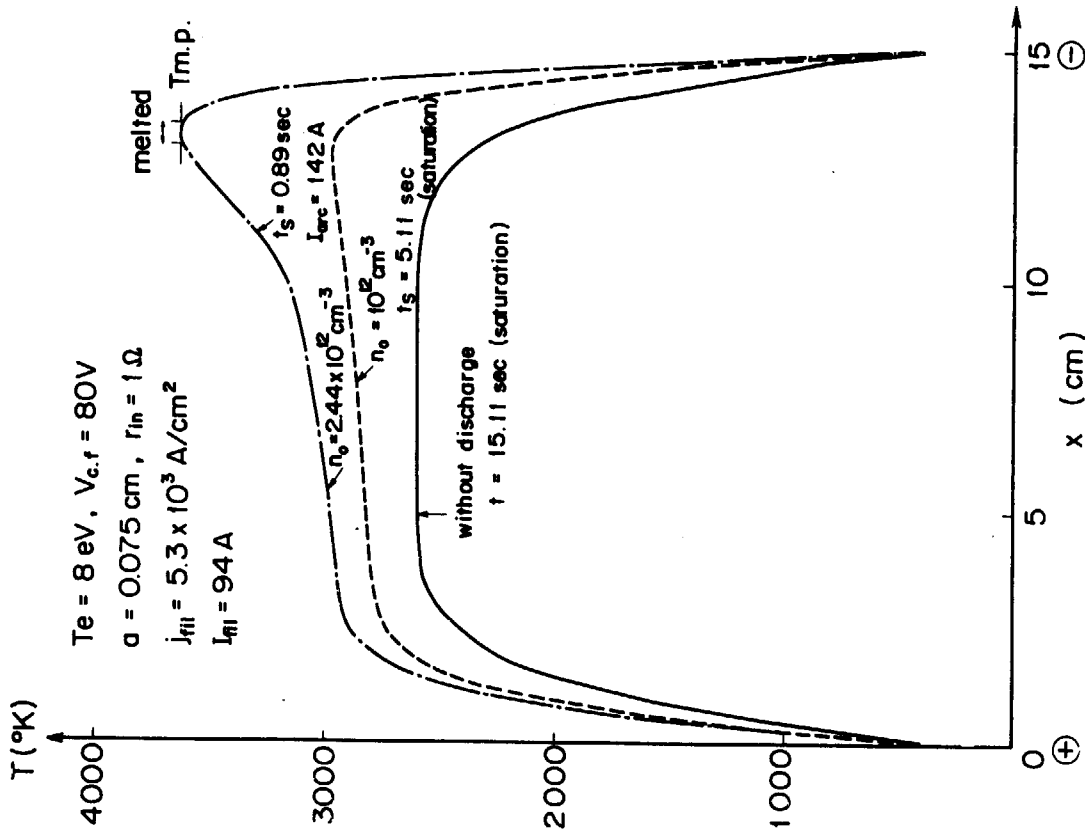


第24図：放電なしの場合、フィラメント中央が3000°Kの定常温度分布になるまでの時間  $t_{sat}$  と  $a$  の関係。あるいは、そのような状態になるまでにフィラメント中央の温度が2742°Kを通過する時間の時間  $t_{90\%}$  と  $a$  の関係。

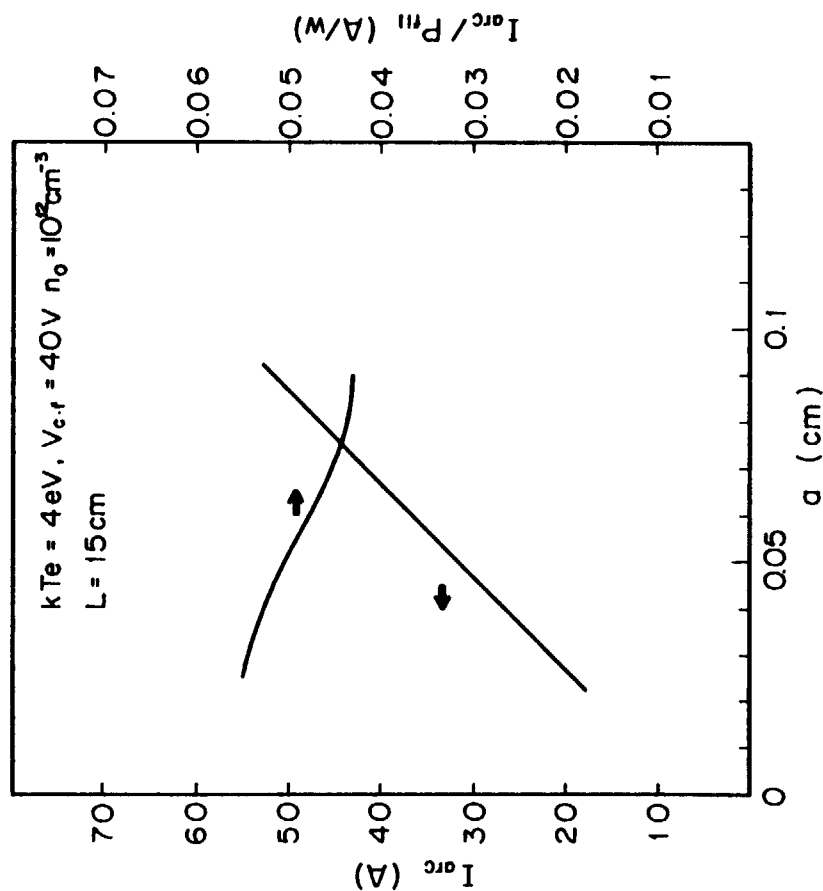


第25図：放電なしの場合、フィラメント中央が3000°Kの定常温度分布になった時、温度が2950°K以下になっている部分の半分の長さ  $a$  と  $a$  の関係。





第27図:  $a = 0.075 \text{ cm}$  のフィラメントに  $I_{fil} = 94 \text{ A}$  を流した場合の温度分布。実線は、放電なしの場合の定常温度分布、点線は、 $n_0 = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  とした場合の放電時の定常温度分布を示し、一点鎖線は  $n_0 = 2.44 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  とした場合の放電時の温度分布を示す。



第26図: フィラメント中央が  $3000^{\circ}K$  の定常温度分布になった後、放電させて得られる放電電流とフィラメント効率 (放電電流/フィラメント電力) の  $a$  依存性。