

# 宇宙におけるガス蒸発実験 (FMPT・M14)

名大 和田伸彦、加藤学、澤井真也、仙石昌也、  
静岡理工大 佐藤利和、五藤俊明、野田敏昭、谷昌明  
土肥稔

## Gas evaporation in space(FMPT・M14)

Nobuhiko Wada, Manabu Kato, Minoru Dohi, Shinya Sawai, Masaya Sengoku,  
Toshikazu Sato, Toshiaki Goto, Toshiaki Noda and Masaaki Tani  
Faculty of Science, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01

Department of Electric Technology,  
Shizuoka Institute of Science and Technology, 2200-2, Toyozawa, Fukuroi, Shizuoka 437

### Abstract

Ag metals evaporated in Ar or Xe gas atmosphere (gas evaporation) with various pressure under low gravity of space shuttle. Round shape of smoke of particles are grown around the evaporation source instead of convective ones. For Xe gas of the highest pressure (100 Torr), the instability is appeared in the boundary surface of the smoke ball and streams of smokes are gush out to the various directions. A method of molecular process of evaporation of materials in the gas atmosphere is proposed for the interpretation of the phenomena.

Key Words space shuttle, gas evaporation, ultrafine particle

## 1 はじめに

不活性ガスの中で、種々の物質を加熱蒸発すると、submicron (ミクロン以下) の超微粒子結晶が煙状に発生する。この方法によれば、広範囲の物質について、極めて純度の高い超微粒子が得られる。これを”ガス蒸発”(gas evaporation)と呼んで、学術研究及び工学的応用の両方に広く利用されている<sup>1)</sup>。真空中で物質を加熱蒸発し、基板上に薄膜を作る真空蒸発についての研究は確立されており、その分子過程の解明はかなり進行している。しかるに、気相中での物質の蒸発は、海面からの水蒸気の発生や、沸騰する湯にみられるような自然現象から、溶解炉や分溜、蒸溜等の工業的応用の分野に至るまで広く見られるごく一般的な現象であるにもかかわらず、これまでにほとんど解明がなされていない。これは地上における気相中での加熱蒸発は必ず対流と沈降が伴いその現象自体複雑であり、実験事実をうまくつかむことが出来にくいためである。対流と沈降の影響のない宇宙で、ガス蒸発によるAg微粒子の生成実験を行ない、均一な微粒子が得られることを確認した。又、ガスの種類と圧力を選ぶことにより、熱や蒸気が、蒸発源の付近に高密度に集中することを発見した。この事実は、”Langmuir”仮説では説明できない。筆者等は気相中での蒸発に関する新しいmodelを考察し、説明を試みた。

## 2 実験方法

図1のように、中心にタングステンフィラメントに約50mgの銀をつけた蒸発源を具えた実験球に、Ar 50 Torr (A)、300 Torr (B)、Xe 5 Torr (C)、100 Torr (D)をそれぞれ封入したもの4本を宇宙船に搭載、宇宙の低重力下で実験球を実験装置(GEF)のソケットに順次さしこみ、フィラメントに通電してAgを蒸発させた。実験中のフィラメント温度は、GEFに帰還され1100度℃保つよう制御されている。実験の終わった実験球は、発生した微粒子の煙のVTR映像と伴に地上に持ち帰り、切開して内壁に付着したAg微粒子を電子顕微鏡で観察し、無重力中での微粒子の生成過程を解析した。この方法は宇宙での限られた空間でガスの圧力・温度等、複雑な多くのパラメーターを全て実験球に前もって設定しておくことにより、宇宙船上での複雑な操作を低減することを目的として考案された。無重力の影響を均一にするため実験容器は球状にした。蒸発源はヘアピン型のタングステンフィラメントの先端に球状のAgを付着させたものを用いた。

## 3 結果

図3は、4本の各実験球の動作中に見られた煙の様子である。画面により細いスリット光が画面に平行に照射されており、赤い輪の部分は発生した超微粒子の散乱照射光である。(A)は輪が見えないが、空間には蒸気のみで光を散乱する微粒子が存在しないことを意味している。(B)(C)は同程度の煙の球が観察される。(D)は煙の玉の界面が不安定で、部分的にあちこちが破れて煙が噴出するのが観察される。一度暗くなってから光度が極めて高くなり、明暗をくり返し約2分間で実験は途中で停止した。図4は動作中のフィラメントの温度の時間変化である。(A)(B)(C)は設定どおり1150℃のフィラメント温度を3分間保持している。(D)は最初の4秒間だけ設定温度よりやや低めの1110℃を保持しているが、その後測定限界温度1290℃を越して温度は激しく上下し、約2分間で断線、実験を停止している。最初の4秒の影響は煙の発生と対応してお

り、それ以後の激しい温度変化は光度の明暗と一致している。実験球は切開して、得られた微粒子の電顕による観察した。粒度は(D)を除いてよくそろっており、大きさは20nm~30nmであった。

## 4 考察

気相中での蒸発に関する従来の考え方は、蒸発源表面に対流の影響を受けない域厚さの気体の層"Langmuir sheath"を考え、そこでは蒸気分子が拡散によって移動しているというのが一般的である。(2)(3)(4)境界条件としては蒸発源にその温度の飽和蒸気圧を、又層の外側表面で蒸気圧0をそれぞれ仮定した拡散速度を蒸発速度として考えている。拡散速度を決めるのは、この拡散層の厚さである。実際にこの層の厚さは、対流の状況によって決まるものであるが、これは一般的に予想することは困難であるから実際は結果から推定するより致し方ない。無重量又は無対流の場合は、容器内全体が拡散層そのものであるからその厚さは対流のある場合のそれと比べたら、比べものにならないくらい大きな値になってしまう。従って拡散速度は極めて小さくほとんど蒸発が生じないことになる。しかるに実験結果は大きくこの予想に反して、いずれの場合も試料の銀の蒸発は生じ、微粒子の煙が発生している。更に原子量の大きな(Xe)ガスをより高い圧力(100Torr)で封入した実験球(D)において煙の玉が不安定となり、あちこちから煙が噴出するという現象は、蒸発を蒸気の拡散とする従来の考え方とはまったく相入れない。今回は1パラメーター1個の実験しか出来なかったが、偶然の事後的結果ではないことは、これまでに落下塔や飛行機によって行われてきた予備実験によって保証される。今回の最も低い重力での長時間の安定した条件でも予備実験の結果と一致したことはこの現象を確定的なものにした。

この事実を説明するために筆者等は気相中での蒸発に関する新しいmodelを提案している。(5)このmodelでは蒸発は単なる拡散ではなく、真空蒸発の場合と同様蒸発源からの自発的な蒸気原子の放射(emission)によるものと考えている。放射された原子は真空の場合はそのまま壁まで到達するが、気体中では気体と衝突し散乱されて気体と混合する。以後は拡散によって容器内に広がる。拡散速度より放射速度の方が大きいと、その差は空間のどこかに溜まり蒸気密度の濃い部分を作る。気体の圧力が高いほど、原子量が大きいほど、蒸気の拡散速度は遅くなるから空間に溜まる蒸気の濃度はより高くなる。この考えは、次のような微分方程式で表される。

$$D\nabla^2\rho - \nabla J = \frac{d\rho}{dt}$$

$D; \rho; J$ は、それぞれ拡散係数、蒸気密度、放射原子流を示す。これを解くことにより図5のような蒸気密度分布が得られる。この一例は、飽和蒸気密度の数10倍の過飽和蒸気の溜まる部分が出る可能性を示唆している。この過飽和度は気体の圧力を高く、原子の質量数を大きくするほど大きくなる傾向にあり、気体のある圧力で蒸気の圧力が気体の圧力を越すことが、実験球(D)のような煙の界面の不安定や煙の噴出の原因であると考えられる。熱も同様、対流の無い無重量の状態では蒸発源の近くに集中し、高温になり得るものと考えられる。実験球(D)のフィラメント温度の異常高温と中途断線もこのことを示唆している。本来の目的の一つであった均一な粒子の作成に関しては、予想通りであった。地上の実験では、今回の蒸発温度では、煙の発生が認められない。これも無重量中の蒸発過程を示す重要な結果である。更にパラメーターを変えた実験の機会を希望する。

## 5 参考文献

1. R. Uyeda; *Progress in Material Science* **35** (1991) 1-96 (Pergamon Press)
2. G. R. Fonda; *Phys. Rev.* **31** (1928) 260
3. W. A. Brayant; *Vac. Scie. and Technol.* **8** (1971) 561
4. K. Kawamura; *Jpn. Appl. Phys.* **12** (1973) 1685
5. M. Dohi, S. Sawai, M. Kato and N. Wada; *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**

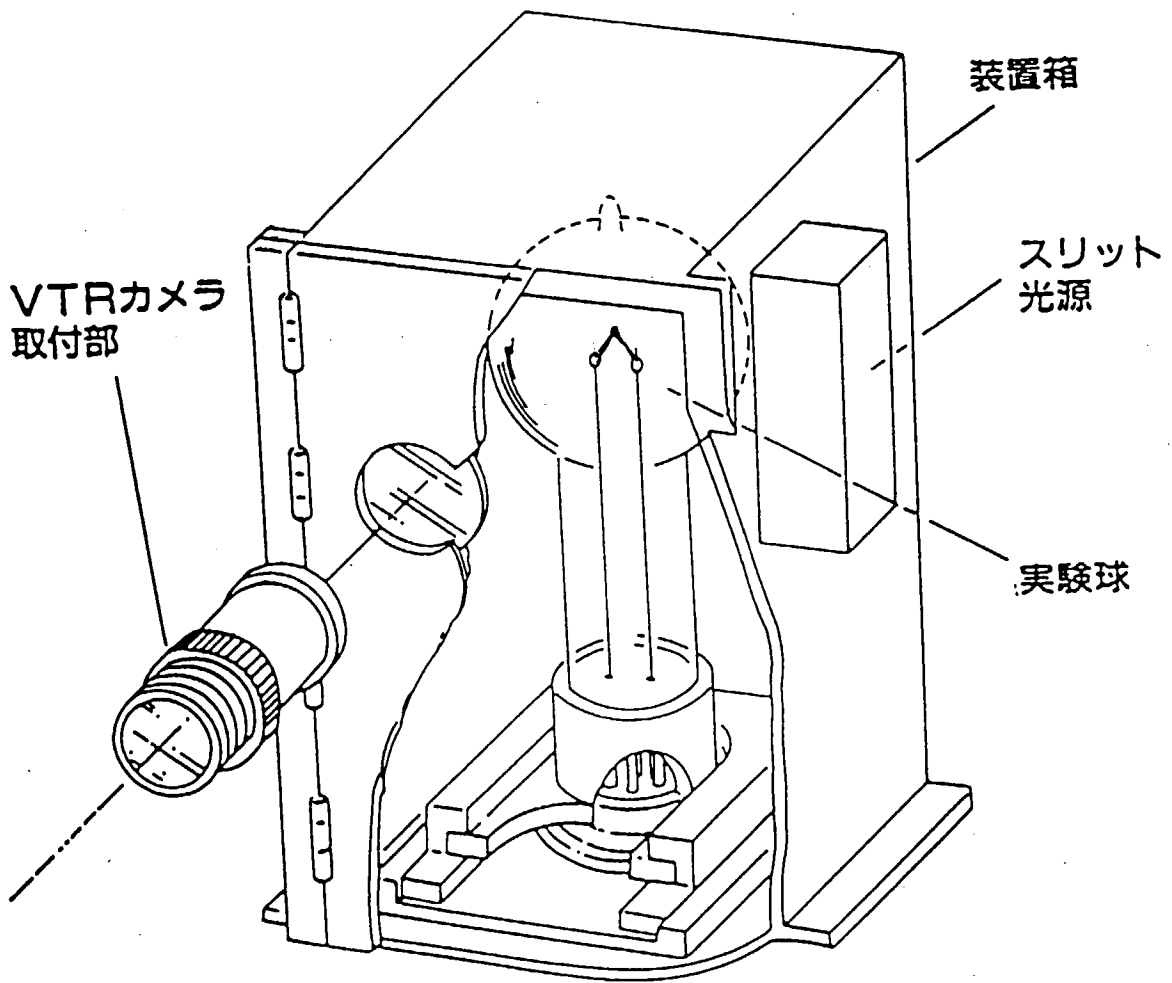


図1 スペースラブ搭載の金属微粒子生成実験装置（概念図）

## 実験球の構成

実験球の主な構成要素は、次の通りです。

- ① 保護カバー  
ポリカーボネイト製
- ② 実験球バルブ  
硬質ガラス製  
封入ガス及び圧力  
He  $2.02 \times 10^4$  Pa (150 Torr)
- ③ フィラメント  
軸線、タングステン直径 0.6 mm  
コイル、タンタル 直径 0.4 mm  
蒸発金属 銀99.99 %
- ④ フィラメント温度測定熱電対  
タングステンレニウム熱電対
- ⑤ バルブ内壁面温度測定熱電対  
白金ロジウム熱電対 (PR)
- ⑥ 圧力センサー  
米国PCB社製ピエゾ素子105A
- ⑦ 電流供給端子  
タングステン 直径 2 mm
- ⑧ ゲッター  
サエスゲッターズ製  
ST172 / LHI / 1.5- 7/70

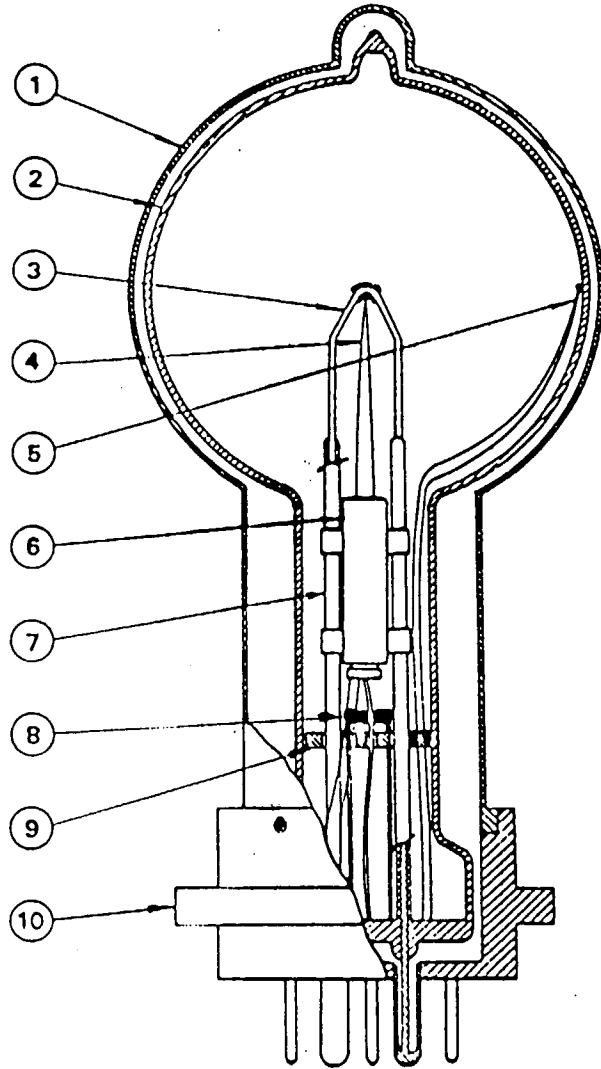


図2 実験球の構成

A

Ar 50

257:03:26:40

B

Ar 300

257:03:57:30

C

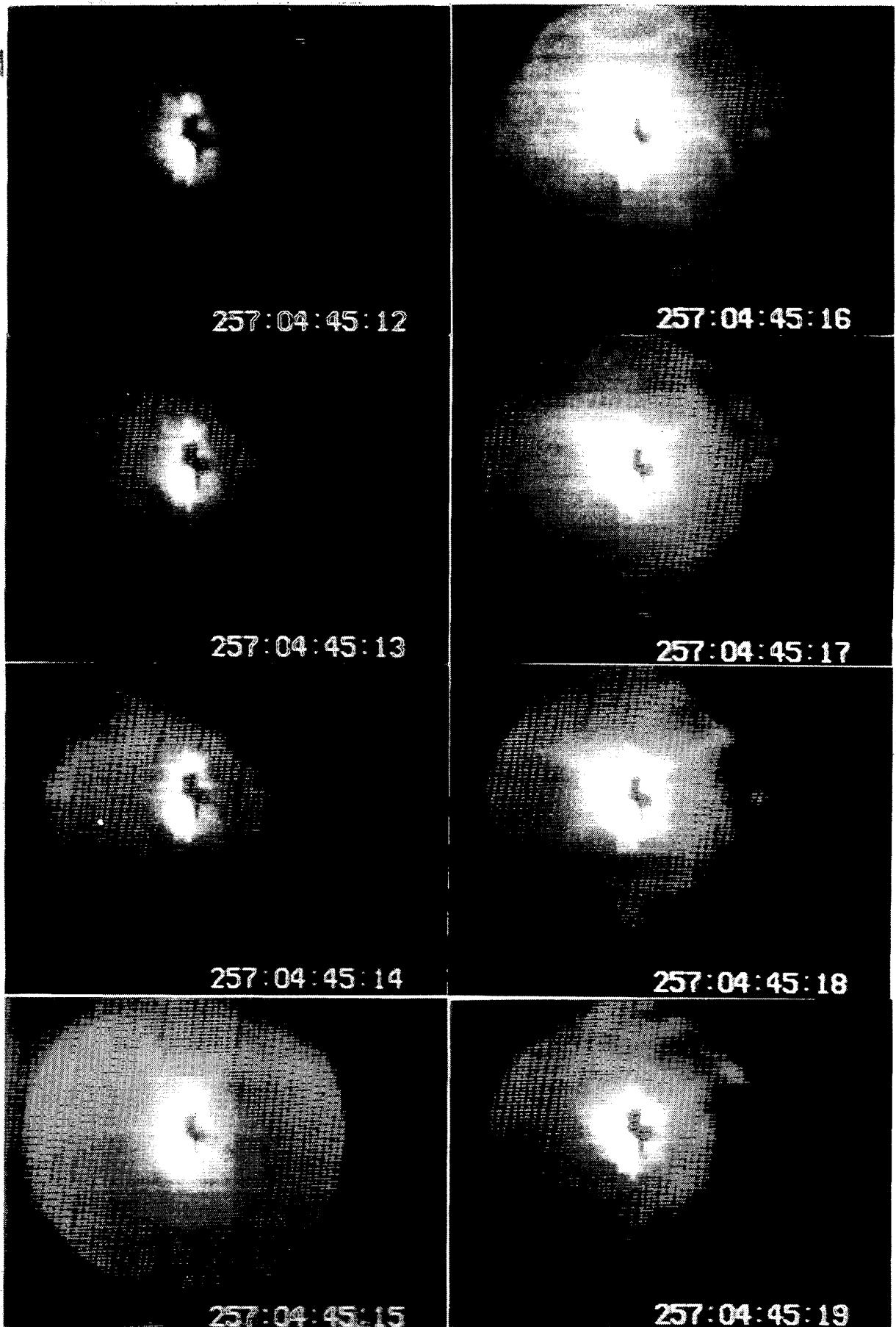
Xe 5

257:04:22:50

D

Xe 100 torr

257:04:45:16





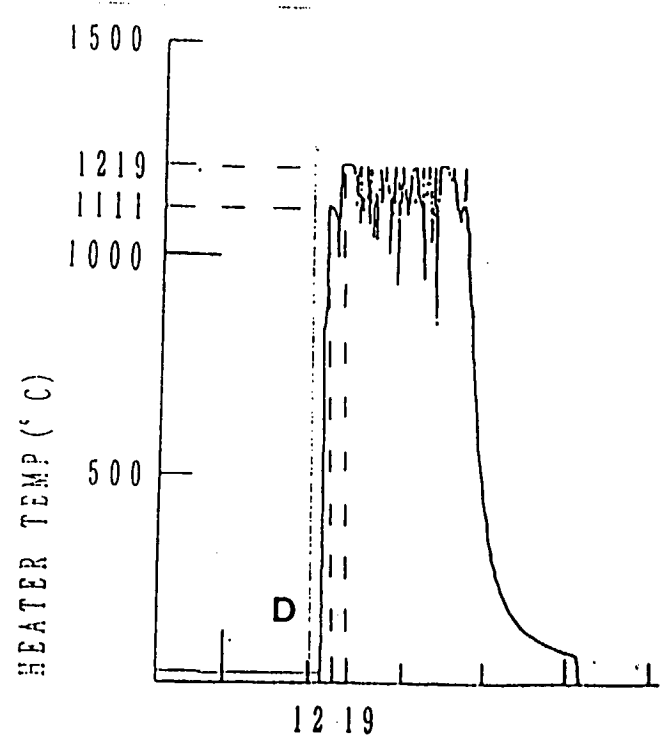
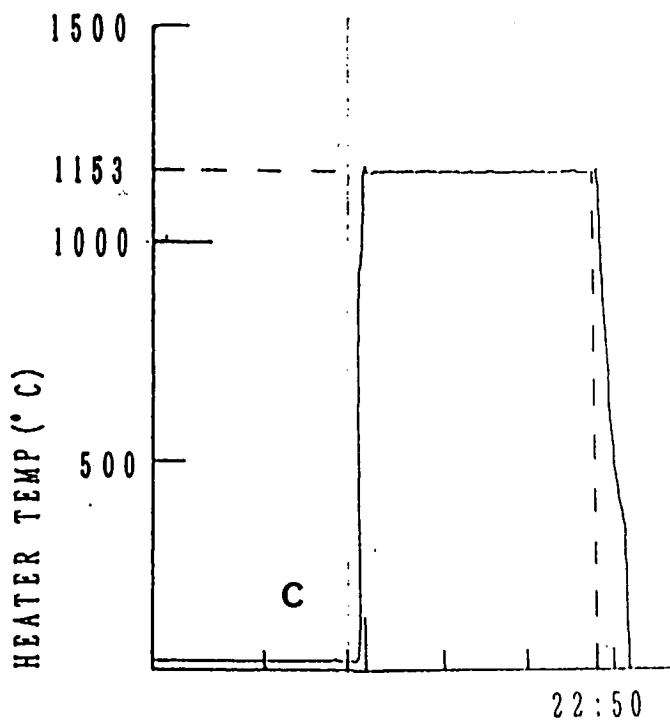
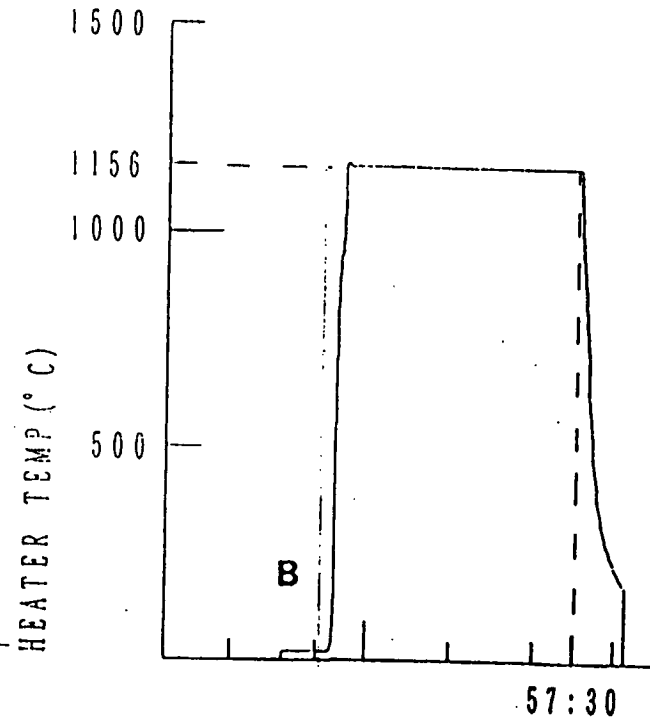
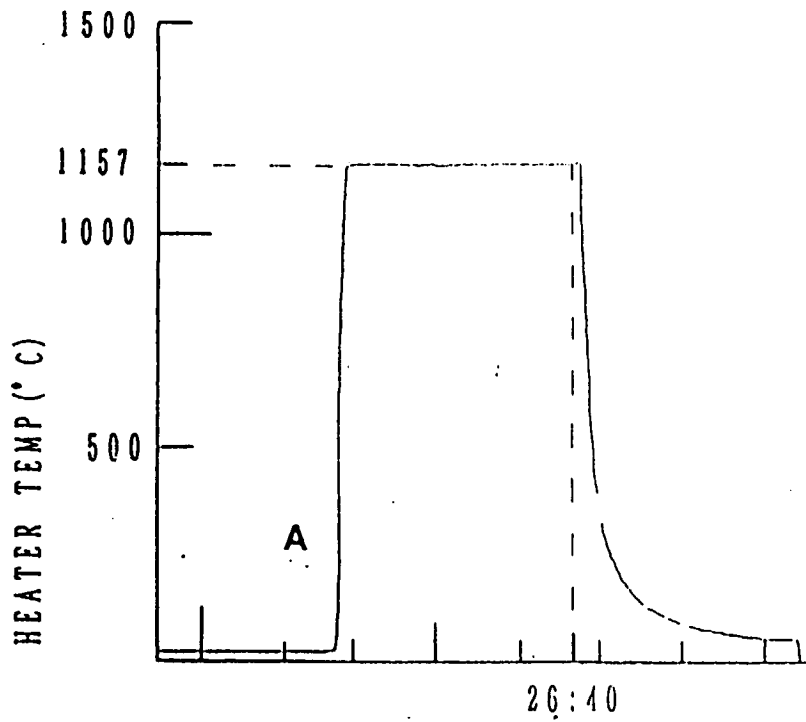


図4 フィラメント温度