

JAERI-Tech
99-050



JP9950425



通電加熱されたフィラメントの温度分布

1999年7月

田村浩司・大場弘則・柴田猛順

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

通電加熱されたフィラメントの温度分布

日本原子力研究所東海研究所物質科学研究部

田村 浩司・大場 弘則・柴田 猛順

(1999年6月1日 受理)

通電加熱したフィラメントの表面温度分布を測定した。直径 0.25mm、長さ 24.7mm の 5%レニウム入りタンゲステンフィラメントを 5A から 7A の直流電流で通電加熱し、その表面を単色フィルターを通して CCD カメラで撮影録画し、画像信号からフィラメント長に亘っての放射強度分布を得た。フィラメント中心部では放射強度が数 mm 以上に亘ってほぼ一定であった。温度分布も一様で熱伝導によるエネルギー損失はないので、この部分の温度を投入電力と放射損失のバランスから求めた。このフィラメント中央部の温度を基準点とし、フィラメントの各点との放射輝度比からプランクの式を用いてフィラメントの温度分布を決定した。本方法により、容易にフィラメントの温度分布を測定できることがわかった。

Temperature Distributions of a Conductively Heated Filament

Koji TAMURA, Hironori OHBA and Takemasa SHIBATA

Department of Materials Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 1, 1999)

Temperature distributions of a heated filament were measured. A W-Re(5%) filament (0.25 mm in diameter, 24.7 mm in length) was conductively heated by currents between 5A and 7A with a DC power supply, and the surface of the filament was imaged with a charge coupled device (CCD) camera through a monochromatic filter. The spectral radiation intensity at the filament center region was almost uniform. Since the temperature distribution was also uniform and the energy loss by thermal conduction was negligible, temperature in this region was determined from the energy balance between applied power and radiation loss. Temperature distribution of the filament was determined based on the Planck's law of radiation from the spectral radiation intensity ratio of the filament surface using obtained temperature as a reference. It was found that temperature distribution of a filament was easily measured by this method.

Keywords: Filament, Temperature Profile, CCD Camera, Spectral Radiation Intensity, Planck's Law, Tungsten, Rhenium.

目次

1. はじめに	1
2. 測定方法	1
3. 測定結果と考察	2
4. まとめ	3
謝辞	3
参考文献	4

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedure	1
3. Experimental Results and Discussion	2
4. Conclusion	3
Acknowledgements	3
References	4

1. はじめに

タングステンフィラメントはイオン源や電離真空計をはじめ、さまざまな分野で用いられている。タングステンフィラメントを多くの分野で用いる場合、通電加熱時のフィラメント表面の温度とその温度分布が必要となる。著者らは、表面電離型原子ビーム検出器^{1,2,3)}を試作し、ランタノイド原子ビームの検出に用いている。その特性評価では、フィラメント表面の温度分布は、フィラメントが十分長く通電によるジュール加熱と表面からの放射損失が釣り合っていると表面温度が決まると考えた。しかし、フィラメント固定端への熱伝導を考えるとフィラメントの温度は一様ではなく、中心部の温度も推定温度よりも低くなる可能性がある。このようなフィラメントの温度分布は、計算^{4,5)}により評価できるが、この場合フィラメント端部の温度が必要である。しかし、フィラメント端部の温度は、フィラメントを固定している電流導入端子の温度、フィラメントと導入端子の接触熱伝導係数等が明らかでないと推定は困難である。

大場等^{6,7,8,9)}は、電子銃加熱蒸発時の蒸発面からの放射強度を電荷結合素子(CCD)カメラにより測定し、蒸発面の温度分布を求めた。本報告では、大場等と同様に CCD カメラにより通電加熱したフィラメントの放射強度を測定し、表面の温度分布の測定を試みた。

2. 測定方法

輝度分布測定に用いた実験装置の概念図を Fig.1 に示す。真空容器内の 5% レニウム入りタングステンフィラメント (0.25mm 径、長さ 24.7mm、Goodfellow 社製) を、定電流電源により通電加熱した。赤熱したフィラメント像をフィルターを通して CCD カメラで撮影し、ビデオレコーダーで録画した。フィルターには中心波長 650nm、半値全幅 10nm の狭帯域フィルターを用いた。録画面像の信号を画像処理装置 (浜松フォトニクス社製 DVS-300) に接続して AD 変換を行い、8ビット (256階調) でフィラメント表面の 2次元の輝度分布 (640×485 ドット) を求めた。撮影はフィラメントを 5~7A の定電流で通電加熱させながら、カメラレンズ (Nikon 社製 35~70mm) の絞り値 ($f=3.3\sim 22$) と光吸収フィルター (ND フィルター) の組み合わせを変えて段階的に CCD 素子が飽和しなくなるまで撮影し録画した。フィラメント上の各点の放射強度 L は、カメラの絞り値 f と ND フィルターの透過率 t で撮影録画した画像の処理出力輝度値に f^2/t をかけたものとして求めた。

この測定では放射強度の相対値しか求まらない。このため、温度分布算出には、温度がわかっている基準点が必要となる。次節で述べるように、フィラメント中心部では放射強度が数 mm 以上に亘ってほぼ一定であるので、フィラメント固定部への熱伝導は無視でき、通電によるジュール熱と表面からの熱放射とが釣り合っているととしてその温度を推定した。

得られた温度を基準点としてプランクの式を用いて温度分布を算出した。

3. 測定結果と考察

Fig. 2 (a),(b) に 7A の電流を通電した場合のフィラメント像を示す。フィラメントは直線状に取り付けたが、通電加熱後、図のように変形している。Fig. 2 (a)ではフィラメント中心部での輝度が飽和しており、端部にはフィラメント取り付け金具が見える。Fig. 2 (b)はこれを ND フィルターで十分減光しフィラメント中心部でも輝度が飽和していない場合のフィラメント像である。

CCD 素子が飽和していない領域のフィラメント像を用いて、フィラメントの放射強度分布を求めた。Fig. 3 は、フィラメント電流が 5 A、6 A、7 A における放射強度 L のフィラメント長に亘っての分布である。輝度は中心部が高く、フィラメント電流が増すにつれて高くなっている。また、中心部での放射強度は数 mm の範囲に渡ってほぼ一定であるので、フィラメントは十分長く、中心部では通電によるジュール熱と熱放射が釣り合っていると考えられる。

基準点となるフィラメント中心部の各電流値での温度は以下のように推定した。フィラメントが十分長いとすると、通電によるジュール熱と表面からの熱放射が釣り合っていると考えられるのでフィラメントの表面温度 T は、

$$I^2 \cdot \rho / (\pi d^2 / 4) = \epsilon \sigma T^4 \cdot \pi d$$

で決まる。ここで I はフィラメント電流、 ρ は抵抗率、 d はフィラメントの直径、 ϵ はフィラメントの放射率、 σ はシュテファン-ボルツマン定数である。また、フィラメント周囲の温度はフィラメント温度 T に比べ十分低いので無視した。実験で用いた 5% レニウム入りタングステンの抵抗率 ρ (Ωm) は、

$$\rho = (0.0335T - 4.7) \times 10^{-8}$$

である¹⁰⁾。また、放射率 ϵ はタングステンと同じと仮定し¹¹⁾、

$$\epsilon = -3.7 \times 10^{-8} T^2 + 0.00026T - 0.112$$

として上式より温度 T を求めた。結果を Fig. 4 に実線で示す。7A 通電時の中心部分の温度は 2798K と推定される。得られた各電流値での温度を基準点とした。

フィラメント上の各点の放射強度 $L(\lambda, T)$ と温度 T は、基準となる点の放射強度 $L_r(\lambda, T_r)$ と温度 T_r を用いて次の関係式で表される。

$$\frac{\epsilon_r L(\lambda, T)}{\epsilon L_r(\lambda, T_r)} = \exp \left\{ \frac{ch}{k\lambda} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 ϵ 、 T と $L(\lambda, T)$ はフィラメント表面の放射率、温度と分光放射強度であり、 ϵ_r 、 T_r と $L_r(\lambda, T_r)$ は基準点の放射率、温度と分光放射強度である。 c は光の速度、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 λ は単色フィルターの透過波長である。

関係式(1)を用いて求めた各電流値でのフィラメントの温度分布を Fig. 5 に示す。ここで、各点の放射率 ϵ は等しいとしている。また、フィラメント端部では放射強度が小さく測定ができないため、この部分については端部近傍での測定値を端部まで外挿した。この部分を点線で示す。中心部の温度が一様である領域はフィラメント電流が高い 7A の場合の方が、低い 5A の場合よりも広いことがわかる。

Fig.5 は、各フィラメント電流値での中心部温度を基準点としているが、あるフィラメント電流値での温度を基準点とすれば、他のフィラメント電流値での温度も (1) 式を用いて求めることができるはずである。フィラメント電流が 7A の時の中心部温度 (2798K) を基準点に、5A と 6A での中心部の放射強度より温度を求めたものを Fig.4 に Δ 印で示す。この結果は、熱収支から求めた温度とよく一致しており、各電流値での中心部温度の推定値と矛盾がないことがわかる。また、この結果より、フィラメントが十分長く、フィラメントに沿う熱伝導が無視できるとき、ジュール加熱と放射熱が釣り合うとして求めた温度を基準点として、フィラメントが短い場合や太い場合の温度分布も本方法で容易に求めることができることがわかる。また、表面電離の実験で用いた 0.25mm の 5% レニウム入りタングステンフィラメントの温度を熱収支から求め、10mm に亘って一定と考えたが³⁾、これは Fig. 5 に示す結果より妥当であることがわかった。

4. まとめ

直径 0.25mm、長さ 24.7mm の 5% レニウム入りタングステンフィラメントを 5A から 7A の直流電流で通電加熱し、その表面を CCD カメラで撮影録画することによりフィラメント長に亘っての放射強度分布を得た。放射強度が一定であり、温度分布も一定であることから、投入電力と放射損失のバランスから求めたフィラメント温度を基準点とし、各点との放射強度比からプランクの式を用いてフィラメントの温度分布を求めた。本方法により、容易にフィラメントの温度分布を測定できることがわかった。

謝辞

本研究の実験および取りまとめにあたり、岡崎哲治氏、足立肇氏にご協力いただきました。ここに、心から感謝いたします。また、本論文を読んでいただき貴重なコメントをして下さった物質科学研究部の池添康正氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 田村浩司、柴田猛順: 真空 41, 332 (1998).
- 2) 田村浩司、足立肇、柴田猛順: JAERI-Research 98-20 (1998).
- 3) Tamura K., Ohba H., Okazaki T., Adachi H. and Shibata T.: Jpn.J.Appl.Phys., 37, 6651 (1998).
- 4) Halas S. and Durakiewicz T.: Vacuum 49, 331 (1998).
- 5) 田中茂: JAERI-M 9152 (1980).
- 6) 大場弘則、小倉浩一、柴田猛順: 真空 36, 203 (1993).
- 7) 大場弘則、柴田猛順: JAERI-M 93-243 (1993).
- 8) Ohba H. and Shibata T.: Jpn. J. Appl. Phys. 34, 4253 (1995).
- 9) 大場弘則、柴田猛順: JAERI-Research 98-069 (1998).
- 10) Goodfellow 社私信.
- 11) Doma F. E. and May T.: J. Appl. Phys. 49, 5074 (1978).

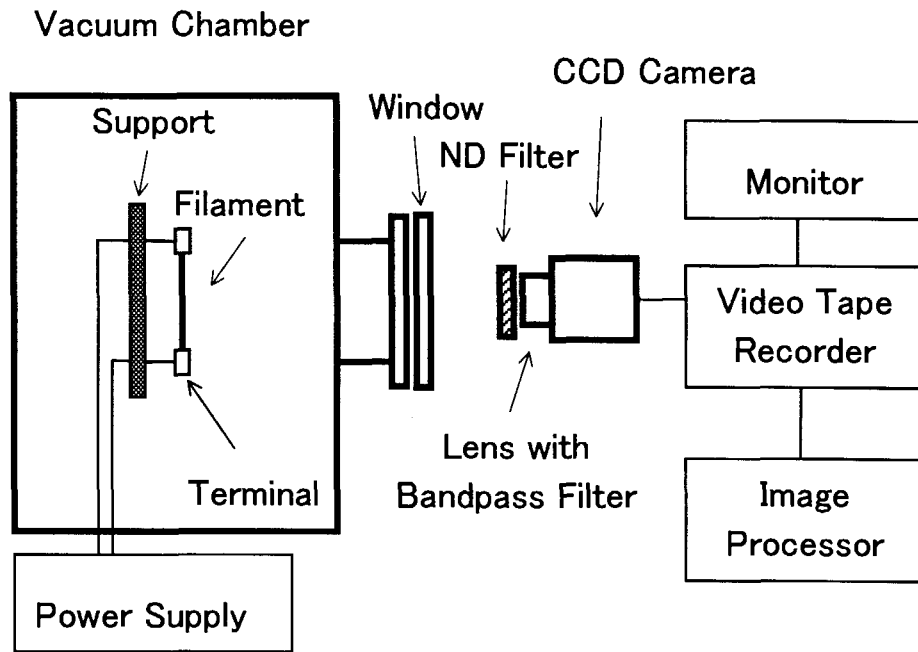
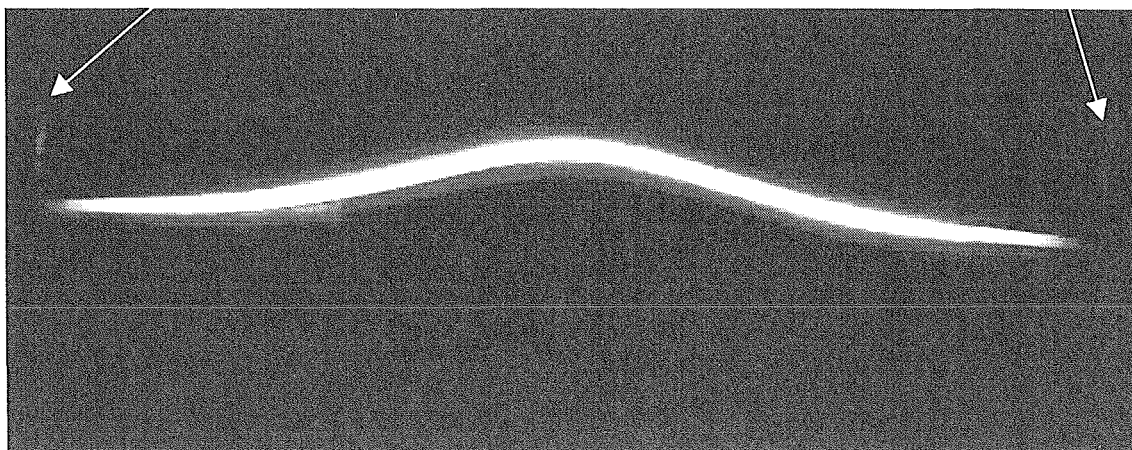


Fig. 1 Schematic drawing of the experimental setup.

(a)

Terminal

Terminal



(b)

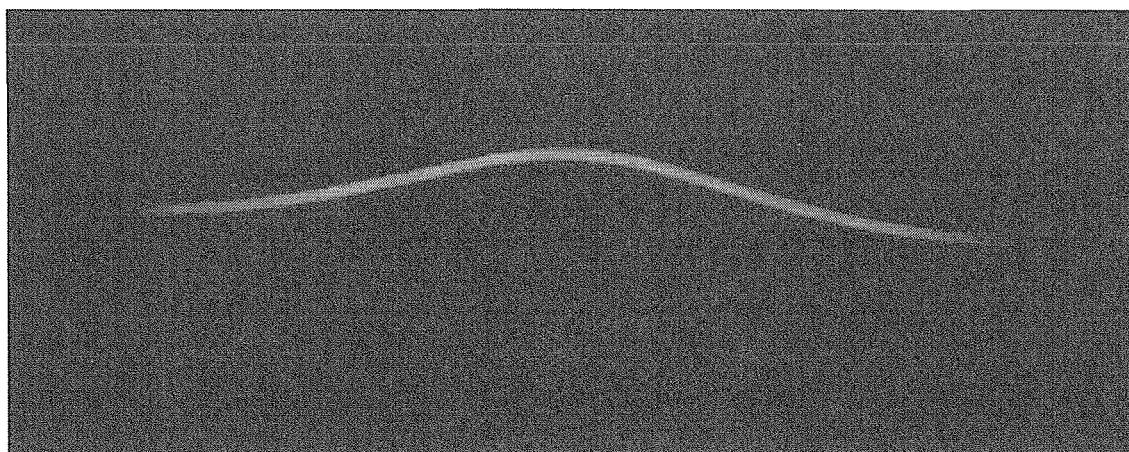


Fig. 2 Image signals of a filament heated with filament current of 7A.

(a) $f=16$. Transmission of ND filter was 0.25.

(b) $f=16$. Transmission of ND filter was 0.0039.

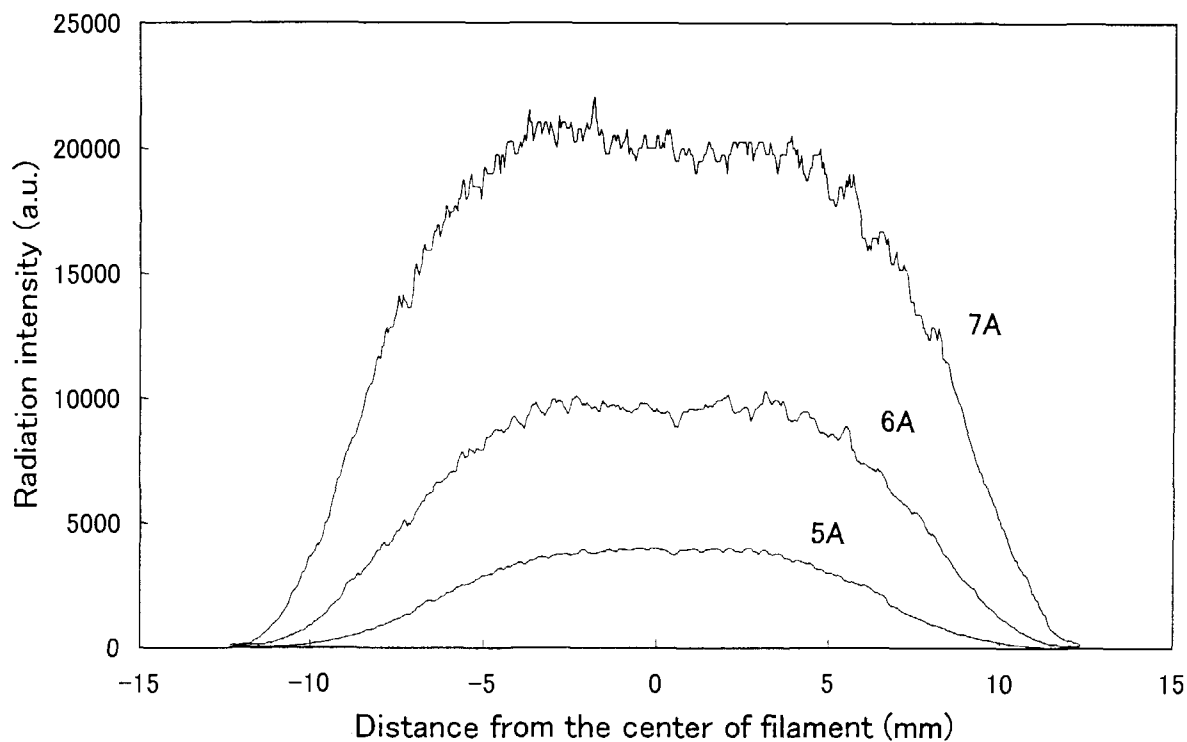


Fig. 3 Spectral radiance profile of a filament as a function of distance from filament center for filament currents of 5A, 6A and 7A.

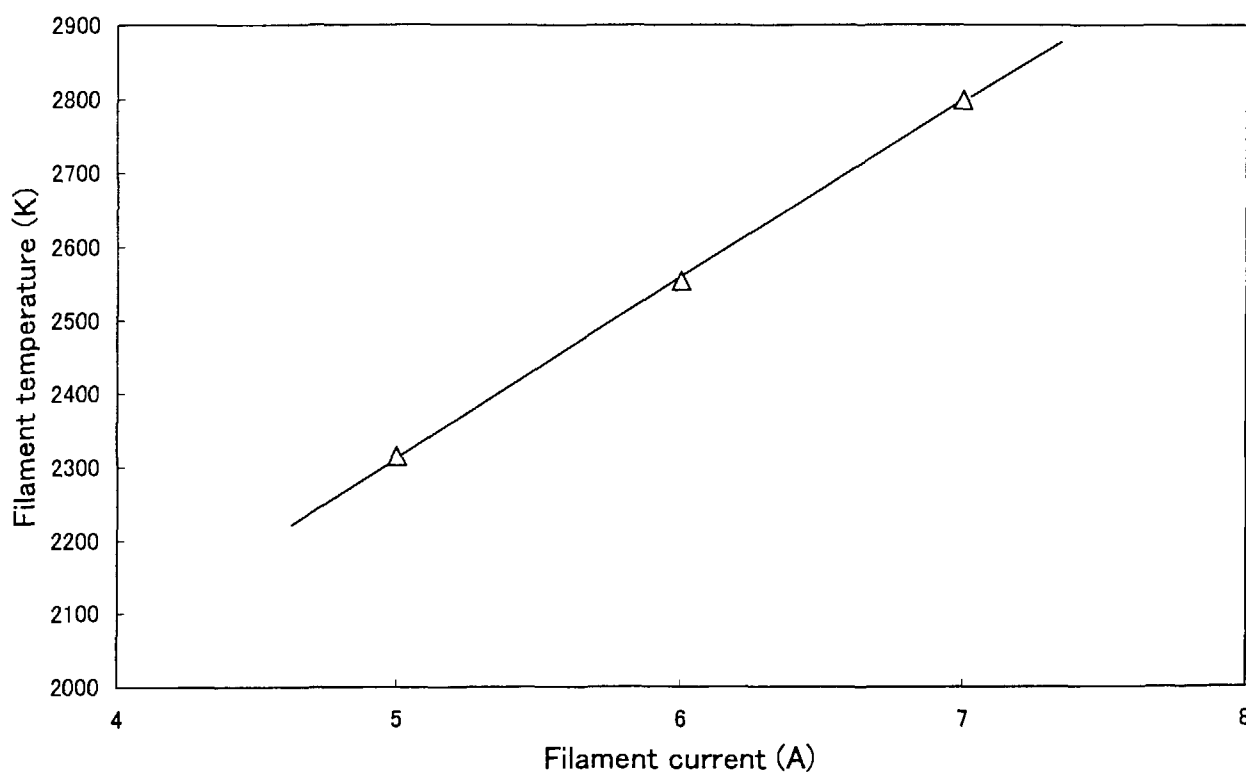


Fig. 4 Filament temperature as a function of filament current.

Solid line: Temperature determined from the energy balance between applied power and radiation loss.

Triangles: Temperature determined from the radiation intensity ratio assuming the temperature at the filament current of 7A.

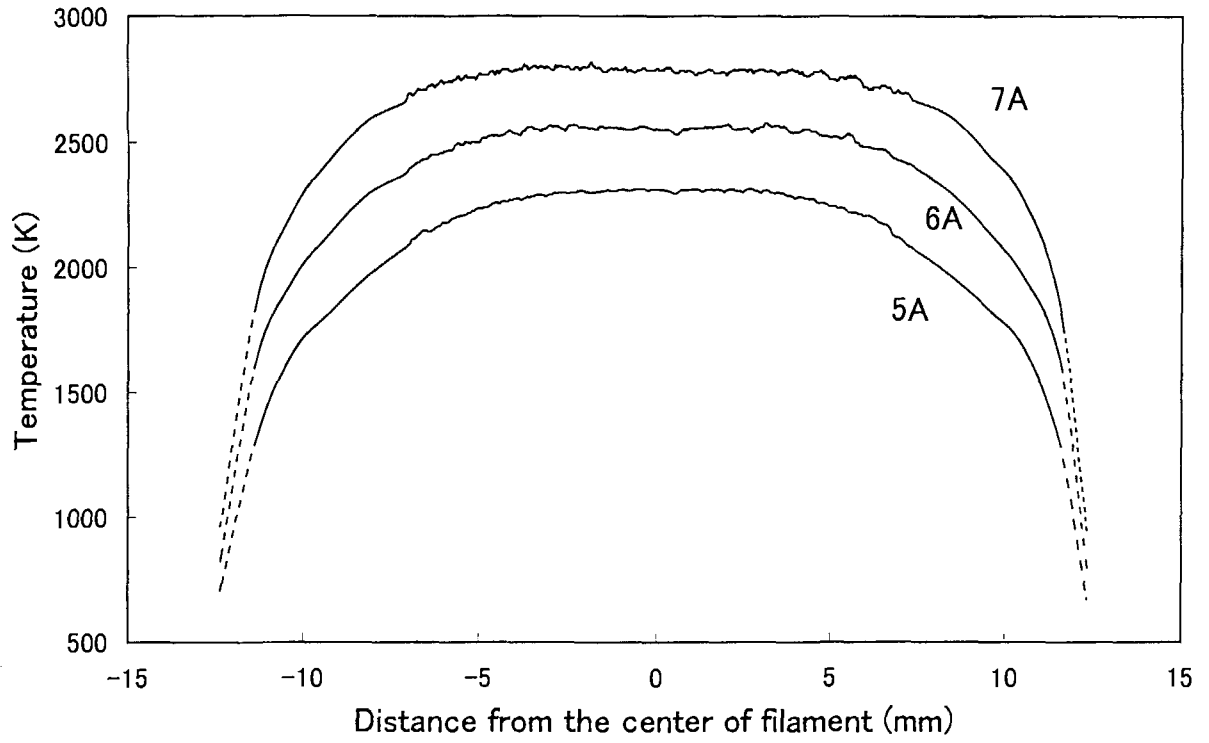


Fig. 5 Temperature distributions of a heated filament at the filament current of 5A, 6A and 7A.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

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

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

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

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

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

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

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

通電加熱されたフィラメントの温度分布