

JAERI-Research
98-069



電子ビーム加熱ウラン蒸発時の
蒸発面温度分布測定

1998年11月

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, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

電子ビーム加熱ウラン蒸発時の蒸発面温度分布測定

日本原子力研究所東海研究所物質科学部研究部

大場 弘則・柴田 猛順

(1998年10月14日受理)

電子ビーム加熱によるウラン蒸発時の水冷銅るつぼ内の表面温度分布を測定した。蒸発面を650nmの狭帯域透過フィルターを通してモノクロCCDカメラで撮像録画し、画像信号を画像処理装置に接続してるつぼ内の2次元分光輝度分布を表示させた。表面温度はウラン凝固点または参照光源を基準点として、それらと蒸発部との分光放射輝度比からプランクの式を用いて求めた。電子ビーム入力の増加に伴い最高温度は3000Kを越えること、飽和の傾向を示すことがわかった。また、測定温度は測定した蒸着速度とウランの飽和蒸気圧のデータを用いて推定した表面温度とほぼ一致することが確認できた。

Measurement of Surface Temperature Profiles on Liquid Uranium Metal
during Electron Beam Evaporation

Hironori OHBA and Takemasa SHIBATA

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

(Received October 14, 1998)

Surface temperature distributions of liquid uranium in a water-cooled copper crucible during electron beam evaporation were measured. Evaporation surface was imaged by a lens through a band-path filter ($650 \pm 5\text{nm}$) and a double mirror system on a charge coupled device (CCD) camera. The video signals of the recorded image were connected to an image processor and converted to two-dimensional spectral radiance profiles. The surface temperatures were obtained from the spectral radiation intensity ratio of the evaporation surface and a freezing point of uranium and/or a reference light source using Planck's law of radiation. The maximum temperature exceeded 3000K and had saturation tendency with increasing electron beam input. The measured surface temperatures agreed with those estimated from deposition rates and data of saturated vapor pressure of uranium.

Keywords: Temperature Profile, Evaporation Surface, Uranium, Electron Beam Evaporation, CCD Camera, Spectral Radiation Intensity, Planck's Law

目 次

1. はじめに	1
2. 測定方法	1
3. 測定結果	3
3.1 ウラン凝固点を用いた表面温度分布測定	3
3.2 参照光源を用いた温度分布測定	3
3.3 測定の誤差について	4
3.4 表面温度の電子ビーム入力依存性と推定温度	4
4. おわりに	5
引用文献	5

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedure	1
3. Results	3
3.1 Measurement of Temperature Profiles using a Freezing Point of Uranium	3
3.2 Measurement of Temperature Profiles using a Reference Light Source	3
3.3 Uncertainty in Temperature Measurements	4
3.4 Beam Power Dependence of Surface Temperature and the Estimated Temperature	4
4. Conclusion	5
References	5

This is a blank page.

1. はじめに

電子ビーム加熱蒸発源は蒸気圧の低いウラン等の高融点金属でも容易に原子を蒸発できるので、原子法レーザーウラン濃縮用の原子蒸気生成に用いられる。水冷銅るつぼ内のウラン金属は電子ビーム加熱により液化され、その液体表面よりウラン蒸気が生成する。液体金属内では電子ビームスポット部と水冷されたるつぼ壁との大きな温度勾配により対流を生じる。その結果るつぼへの熱損失が大きくなり、原子蒸気生成に必要なエネルギーコストが高くなる。特に原子法レーザーウラン濃縮では、全エネルギーコストの大部分をウラン蒸発に要するエネルギーが占めるので効率の良い蒸発法の開発が求められている。ウラン蒸発時のるつぼ内液体金属表面の温度分布を知ることが効率の良い蒸発の開発に役立つと考えられる。

このため著者らはウラン蒸発面、電子ビーム加熱蒸発面を単色フィルターを通してCCDカメラで撮像録画し、画像処理を行って蒸発面温度分布を測定する手法を開発した。これまでにこの測定方法を銅およびガドリニウムの蒸発面に適用し報告している^{1,2,3,4)}。ここでは電子ビーム加熱時のウラン蒸発面の温度分布を測定した。また著者らは、電子ビーム加熱で生成したウラン蒸気特性を測定し、蒸発面温度との関係を調べてきているが、報告した蒸発面温度は水晶発振式膜厚計で測定した蒸着速度と蒸気圧のデータを用いて推定した値である。測定した表面温度が、これまでの推定と一致するかどうかについても調べた。

2. 測定方法

測定系概略をFig.1に示す。水冷銅るつぼ内に入れたウランを電子ビームで加熱蒸発させた。るつぼ内には対流熱損失を低減させる目的で多孔質タンクステン、タンクステン円筒およびタンクステン粒を入れた。電子ビーム発生装置の詳細は別に述べてある⁵⁾。蒸発面を石英窓と単色フィルターを通してモノクロCCDカメラ（有効画素：270,000）で撮像しビデオカセットテープに録画した。蒸発面からの光を直接石英窓に通すと、蒸発原子が窓に蒸着し、数秒で蒸発面からの光が透過しなくなってしまう。このためミラーにより窓への蒸着を防いだ。録画画像の信号を画像処理装置（浜松ホトニクス社製DVS-3000）に接続してAD変換を行い、8ビット（256階調）の解像度でのるつぼ内の2次元分光輝度分布（640×485ドット）を表示させた。単色フィルターはプランクの式を用いての絶対温度の算出、および蒸発面でのウラン蒸発原子の発光波長を避けるために透過中心波長650nm、半値全幅10nmの狭帯域単色フィルターを用いた。

撮像は一定の電子ビーム入力で蒸発させながらカメラレンズ（Nikon社製35～70mm, f3.3～4.5）の絞り値をf=3.3からf=22まで段階的に変化させて行った。このとき絞り値を最も大

きくしてもCCD素子が飽和する領域があれば、光吸収（ND）フィルターも用いてCCD素子が飽和しなくなるまで撮像してビデオカセットテープに録画した。るつぼ表面各点の分光放射強度はCCD素子が飽和していないところでは $1/f^2$ に比例し、またNDフィルターを用いたときにはその透過率 t にも比例する。従って、るつぼ表面の分光放射強度分布は画像処理出力輝度値に f^2/t をかけて求めることができる。蒸発面の撮像と同時に蒸発面から450mm上方に設けた水晶発振式膜厚計で蒸着速度を測定した。撮像は電子銃加速電圧を22kV一定とし、電子ビーム入力5～30kWの範囲で行った。測定時の真空容器内圧力は 10^{-6} Torrのオーダーであった。

絶対温度の算出は、ウラン凝固点または参照光源を基準点として行った。るつぼ内の蒸発試料はウランとタンゲステンとが混在しているが、電子ビーム低入力時には表面上層部でウラン金属のみが溶融するので、電子ビームを瞬間に切ると、液体ウランが凝固するところで分光放射強度が数秒間一定となるプラトーを観測することができる。これは融点での分光放射強度を示しているため、基準点 $L_m(\lambda, T_m)$ 、 T_m として用いることができる、蒸発時の分光放射強度 $L(\lambda, T)$ を測定すれば、次式から蒸発温度 T が算出できる。

$$\frac{\epsilon_m L(\lambda, T)}{\epsilon L_m(\lambda, T_m)} = \exp \left\{ \frac{ch}{k\lambda} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) \right\} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ϵ 、 ϵ_m はそれぞれ蒸発時、凝固点のウランの放射率、 c は光の速度、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 λ は光の波長でフィルターの透過波長である。しかしながら、高入力時には液体ウランが高温になるため、タンゲステンが液体ウランに溶解し凝固点が一定でなくなる。このため、凝固時に一定の分光放射強度を示さないので、参照光源を用いて温度を算出する必要がある。本測定では円筒状のタンタル（直径4mm、長さ40mm、肉厚0.1mm、純度99.95%）を加熱して参照光源とし、その温度 T_r と分光放射強度 $L_r(\lambda, T_r)$ を基準にした。この基準点の分光放射強度および温度と加熱蒸発面からの分光放射強度分布 $L(\lambda, T)$ の比から、次式を用いてるつぼ内表面温度 T を算出した。

$$\frac{\epsilon_r L(\lambda, T)}{\epsilon L_r(\lambda, T_r)} = \exp \left\{ \frac{ch}{k\lambda} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right\} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ϵ 、 ϵ_r はそれぞれ蒸発時ウランの放射率、参照光源（タンタル）の放射率である。なお、算出方法の詳細については前報^{1,2)}で詳述している。

石英窓への蒸着を防いでいるミラーにはウランが蒸着するが、蒸着面がミラーになるので真空容器を大気開放するまでの長時間の観測ができる。ミラーの反射率が蒸着で変化しても温度分布を算出できるように、蒸発面撮像終了後、毎回電子ビームを切り、凝固点およびタンタルヒータも撮像録画し、画像処理を行ってそれぞれの分光放射強度を求めた。

3. 測定結果

3.1 ウラン凝固点を用いた表面温度分布測定

電子ビーム入力5kW時の画像信号の一例をFig.2（絞り値F=3.3）、Fig.3（絞り値f=22）に示す。Fig.2のf=3.3では中心付近の分光放射強度が大きくCCD素子が飽和してしまっている。Fig.4は各絞り値での録画画像から求めた分光放射強度分布である。なお撮像方向に対して平行方向をY、垂直方向をX方向と表示した。液体領域は直径約37mmで固液境界は酸化物が存在しているため分光放射強度が大きくなっている。るっぽ内の観測は蒸発面法線方向から60°の角度で行っているので、垂直方向は真上から観測した状態に補正している。Fig.4より中心部の分光放射強度は周辺部の約200倍であることがわかる。

Fig.5に絞り値f=3.3にして、電子ビーム入力5kWの定常運転から電子ビームを切った直後のるっぽ表面の画像の一例を示す。中心付近平坦部の分光放射強度は一定で、その領域は縮小し、2秒程度で消失した。これはウランが凝固するとき観測されるプラトーを示しており、融点(1405K)での分光放射強度に相当する。このときの液体ウランからの分光放射強度もFig. 4に示した。

Fig.4の各位置での分光放射強度と融点の分光放射強度の比からプランクの式を用いて各点の温度を算出した。プランクの式には単色フィルター透過波長の650 nmを代入した。ここでは液体ウランの放射率は融点から蒸発温度までの範囲で変化しないとした。算出した二次元温度分布をFig.6に示す。また、Fig.7には撮像画像を合成して求めた等温線を示す。ビームスポットは約10mm×15mmの機能形であった。スポット中心温度は1995Kに達し、るっぽ半径方向に向って急激な温度勾配があることがわかる。

3.2 参照光源を用いた温度分布測定

Fig.8、Fig.9はそれぞれ電子ビーム入力20kW、絞り値がf=22の時、さらに透過率1.3%のNDフィルターを用いたときの画像である。このときの蒸着速度は6nm/sであった。Fig.10は

各絞り値での録画画像から求めた分光放射強度分布である。Fig.11は蒸発部撮像終了後、参照光源として用いているタンタルをるつぼと観測ミラーの間に移動して加熱したときの画像である。表面温度とヒータ投入電力の関係は、予めウラン融点で校正した二色温度計で調べており、このときの表面最高温度は1575Kになっている。また、5kW入力時において、ウラン凝固点を定点として求めた温度と参照光源を用いて求めた温度は一致することを確認した。

Fig.10の各位置での分光放射強度と参照光源の分光放射強度の比、および基準温度からプランクの式を用いて各点の温度を算出した。タンタルと液体ウランの分光放射率はそれぞれ文献値⁶⁾0.42、0.34を用いた。Fig.12に二次元温度分布をFig.13には等温線を示す。最高温度は3100Kを越え、るつぼ壁近傍でも融点を越えているのがわかる。ウラン金属はるつぼ内のほぼ表面上全域に亘って溶融しており、るつぼ内で激しい対流が生じていることが予想される。

3.3 測定の誤差について

本温度測定系における不確定性はほとんどがCCDカメラ撮像素子の感度むらで決まる。CCDアレイの感度むらについては均一度のむらが1%以下の面光源（Labsphere社 Unisource-600）を用いて測定した。その結果ウランの凝固点での分光放射強度に相当する光源輝度では10%の感度むらがCCDアレイに存在することがわかった。この感度むらは2000K近傍の温度測定においては±17K程度の誤差を与える。また本測定手法はレンズ絞りを変化させて撮像する必要があるため、測定に数十秒の時間を要する。この間に蒸発面が変動すれば輝度値も変動する。このような不確定性を含めて、本温度測定において生じる誤差は±1%程度と思われる。

3.4 表面温度の電子ビーム入力依存性と推定温度

Fig.14は電子ビーム入力に対する蒸着速度測定値と溶融部拡がり長さを示したものである。ビーム入力値増大に伴い溶融域が徐々に広がるため、るつぼ壁への熱の移動が顕著になることが予想される。また、蒸発量は対流熱損失がなければ指數関数的に増加するはずであるが、入力に比例して増加する傾向を示していることがわかる。Fig.15にはるつぼ内最高温度の電子ビーム入力依存性を示す。もし、熱損失が無ければ最高温度は電子ビーム入力の増大に従って比例関係になるはずである。本測定では電子ビーム入力の増加に伴い、最高温度は飽和の傾向を示しているのがわかる。電子ビーム照射により加熱された溶融部内では激しい液体金属対流を生じる。この溶融部は、Fig.12に示したように電子ビーム入力増加に伴い広がるので、流動部がるつぼ壁近くまで達する。このため、るつぼ壁への熱損失が増大して

最高温度が飽和すると考えられる。これまで、蒸発表面温度は銅^{2,4)}とガドリニウム^{3,7)}について、目視観察で推定したビームスポット径と水晶発振式膜厚計で測定した蒸着速度からラングミュアの式⁸⁾を用いて推定してきた。これまでの推定法でも表面温度を推定してみた。ウランは10mm×15mmの楕円から一様に蒸発し、蒸発の角度分布は $\cos^n \theta$ に従いn=3とした。ここで、nは角度分布指数、θは法線とのなす角度である。付着率を1.0とし、測定した蒸着速度とウランの飽和蒸気圧のデータ⁹⁾を用いて推定した表面温度をFig.15中に破線で示した。推定温度は測定温度とほぼ一致することが確認できた。これまでの推定法は妥当であったといえる。

4.おわりに

電子ビーム加熱蒸発面からの分光放射強度分布を単色フィルターを通してCCDカメラで撮像録画し、画像処理を行って蒸発面温度分布を測定することができた。電子ビーム入力の増加に伴い最高温度は3000Kを越えること、飽和の傾向を示すことがわかった。また、水晶発振式膜厚計で測定した蒸着速度とウランの飽和蒸気圧のデータを用いて表面温度を推定したところ実験値とほぼ一致し、従来の蒸着速度からの表面温度推定法が妥当であることが確認された。

なお、本報告は科学技術庁からの受託研究「レーザー法ウラン濃縮技術開発」の成果の一部である。

引用文献

- 1) 大場弘則、柴田猛順：JAERI-M 93-243(1993年12月)
- 2) H.Ohba and T.Shibata: Jpn.J.Appl.Phys.34(1995)4253.
- 3) H.Ohba and T.Shibata: Proceedings of The 6th International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research,Mito(Japan). ; 23-25 Mar.1994. JAERI-CONF-95-005(Vol.2)(1995)963.
- 4) H.Ohba and T.Shibata: J.Vac. Sci. Technol.A16(1998)1247.
- 5) 大場弘則、雨川和博、柴田猛順：JAERI-Research 98-011(1998年3月)
- 6) Smithells Metals Reference Book,6th ed.,ed by E.A.Brandes (Butterworths,1983)pp17-6.
- 7) A.Nishimura, T.Arisawa, H.Ohba and T.Shibata: J.Vac.Sci.Technol.A11(1993)1516.
- 8) R.Glang: Handbook of Thin Film Technology, ed. by L.I.Maisel and R.Glang (McGraw-Hill, New York 1970)pp1-27.
- 9) D.Das, S.R.Dharwadkar and M.S.Chandrasekhariah: J.Nucl.Mater.,130(1985)217.

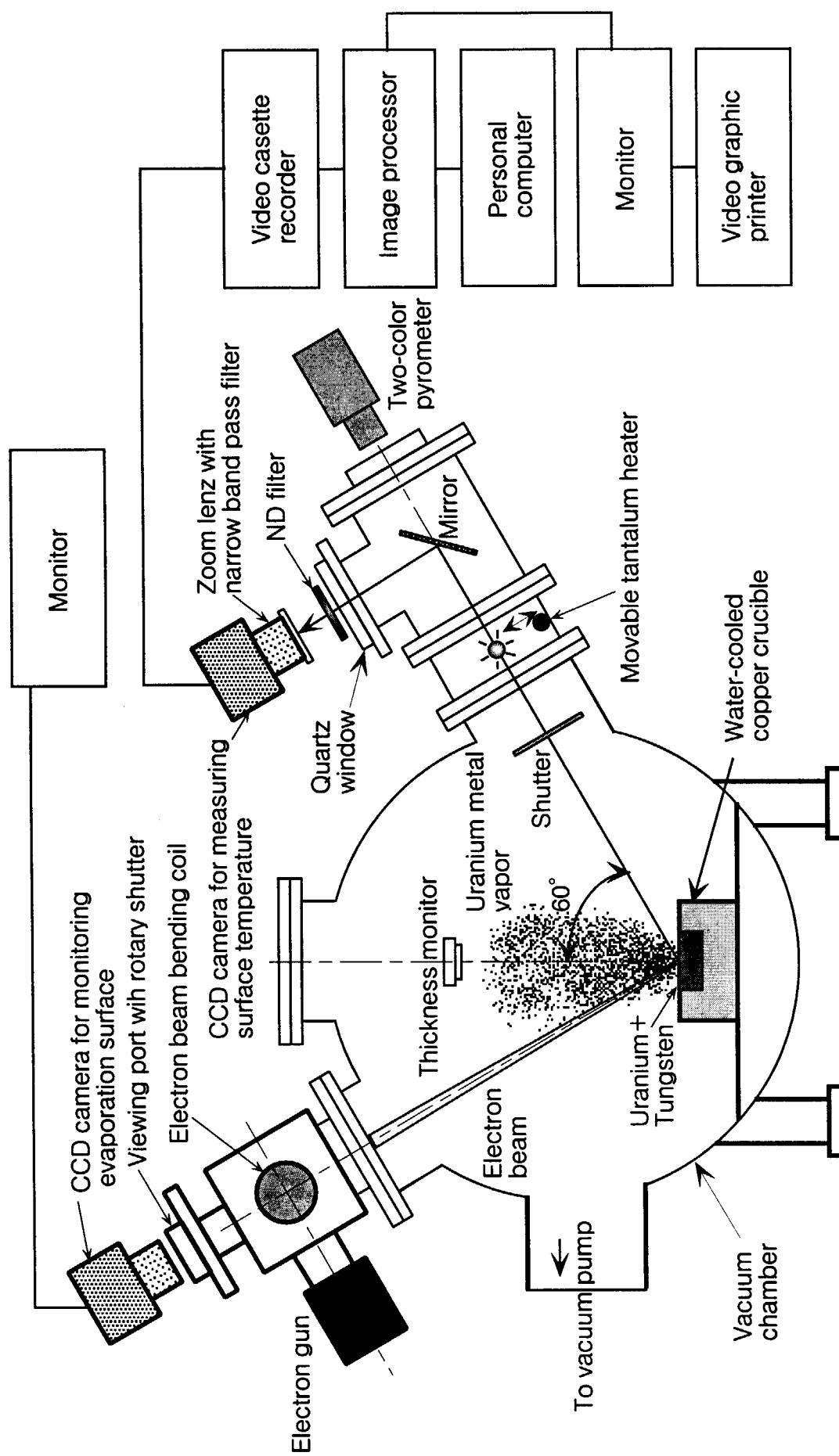


Fig.1 Schematic drawing of experimental set-up.

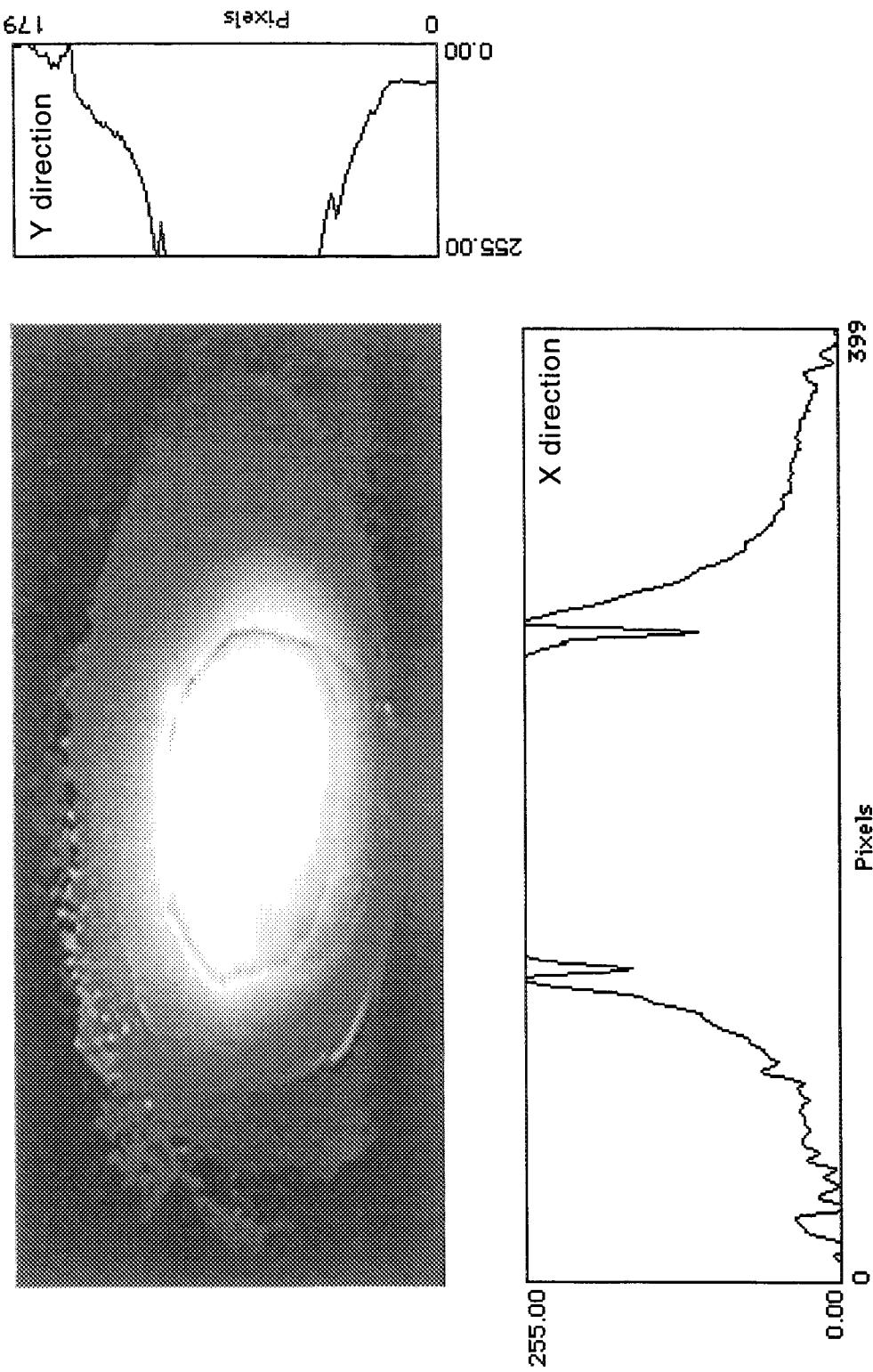


Fig.2 Image signal and line profiles of uranium metal surface during evaporation
at input power of 5kW.
($f=3.3$, X direction distance:0.11mm/pixel,Y direction distance:0.22mm/Pixel)

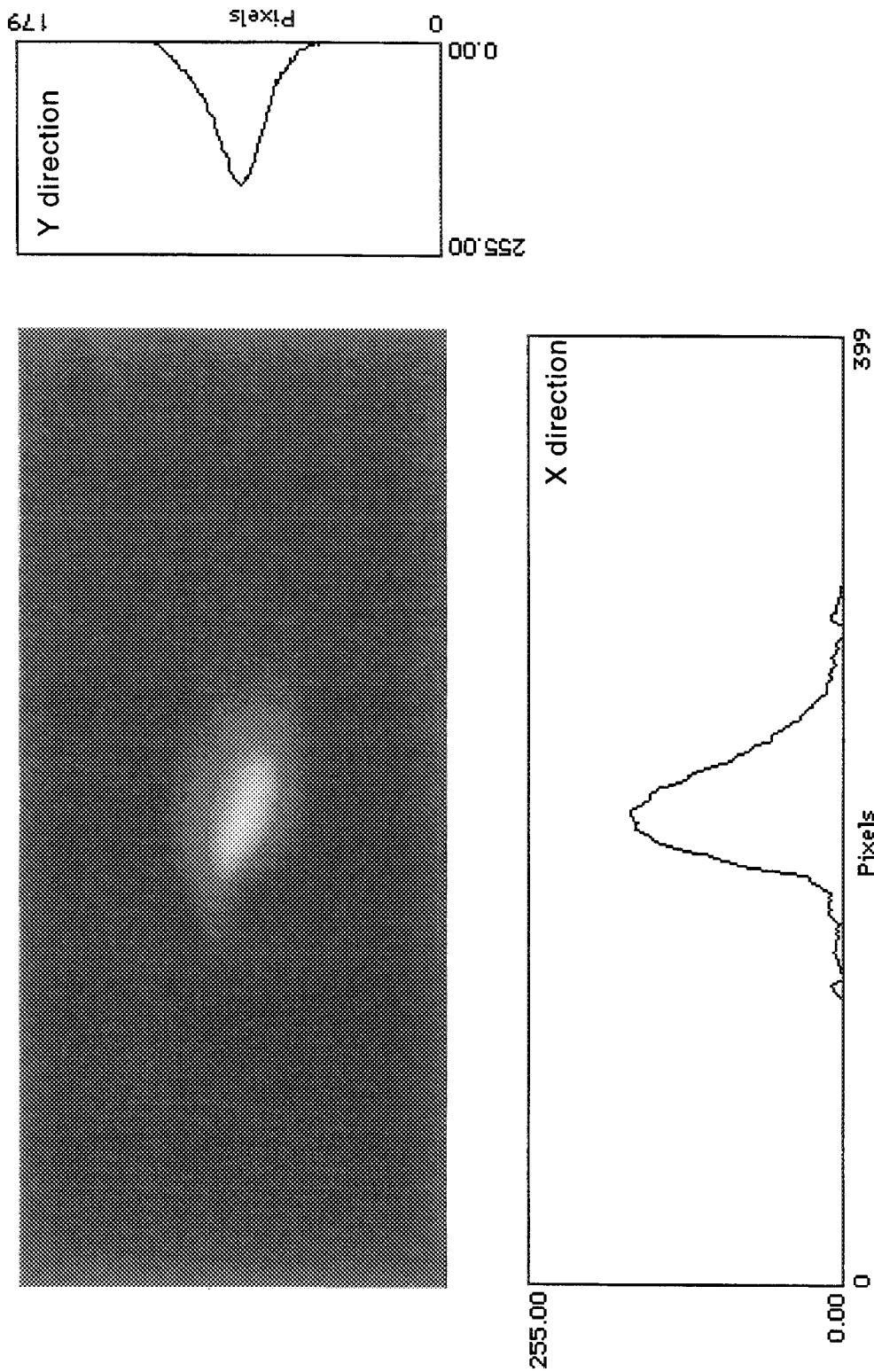


Fig.3 Image signal and line profiles of uranium metal surface during evaporation at input power of 5kW.
(f=22, X direction distance:0.11mm/pixel,Y direction distance:0.22mm/Pixel)

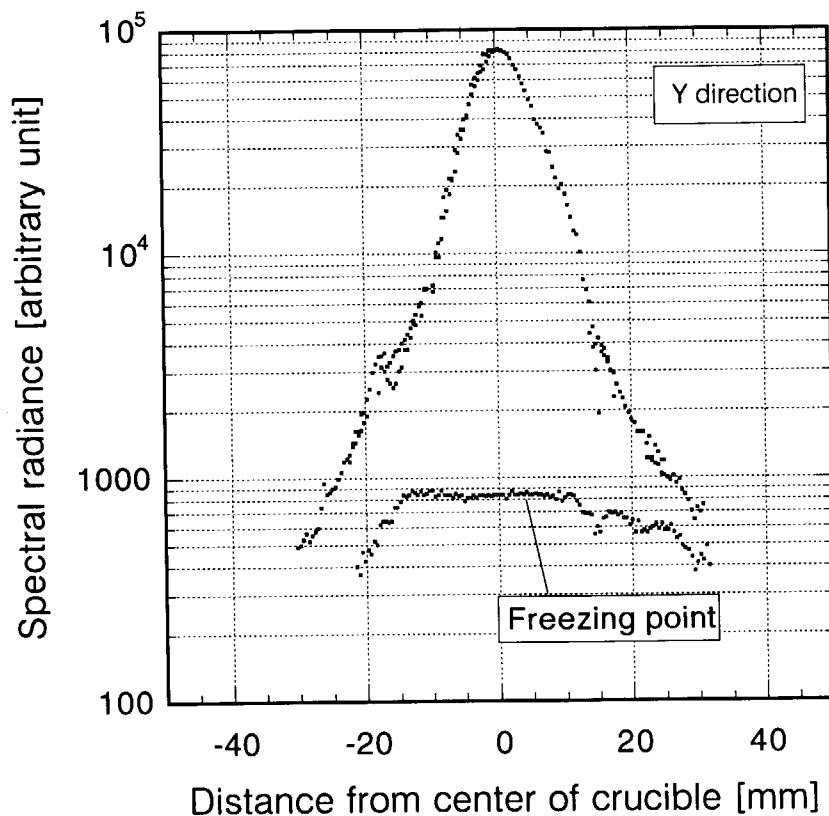
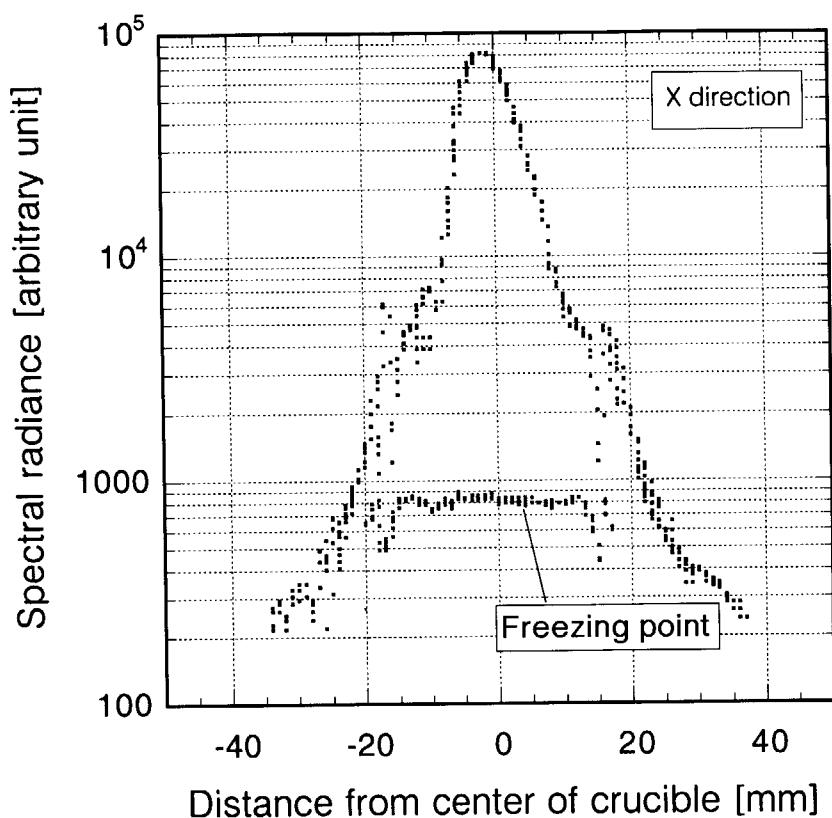


Fig. 4 Spectral radiance profile of uranium metal surface during evaporation at input power of 5kW

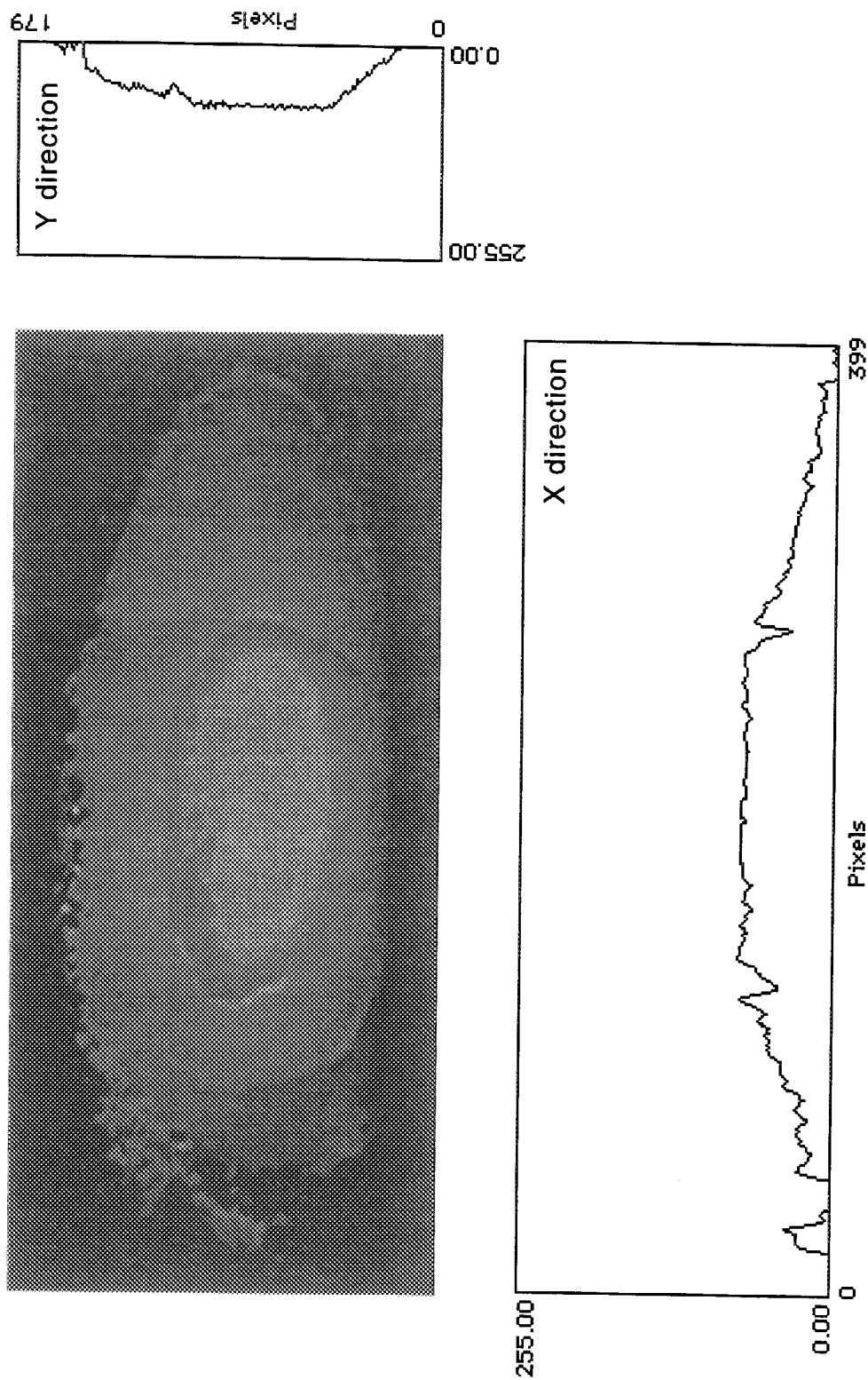


Fig.5 Image signal and line profiles of uranium surface just after the electron beam of 5kW was switched off. ($f=3.3$)

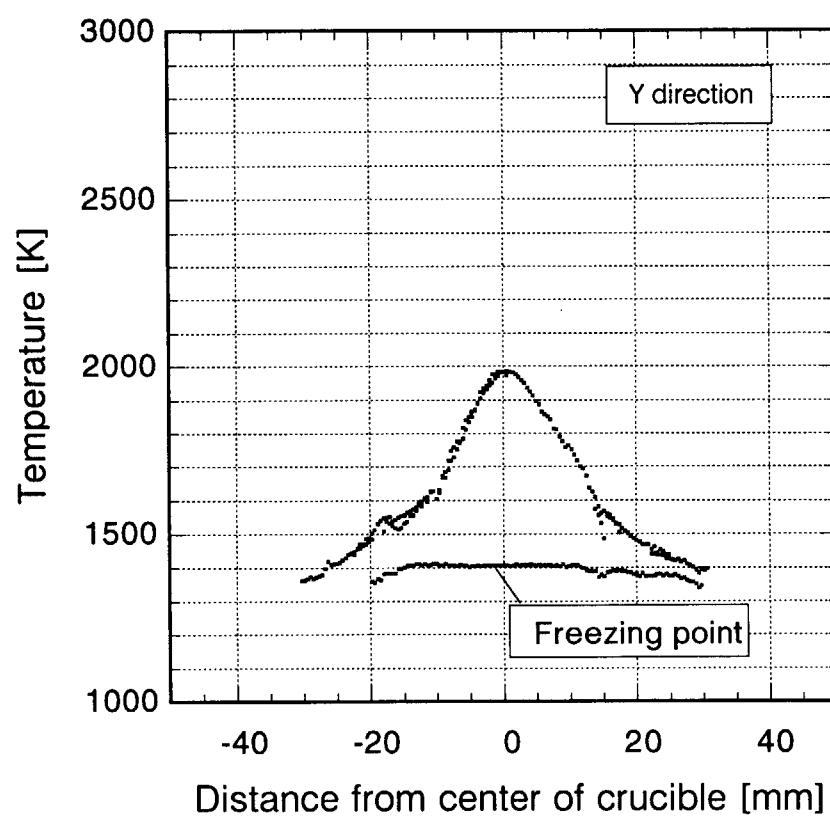
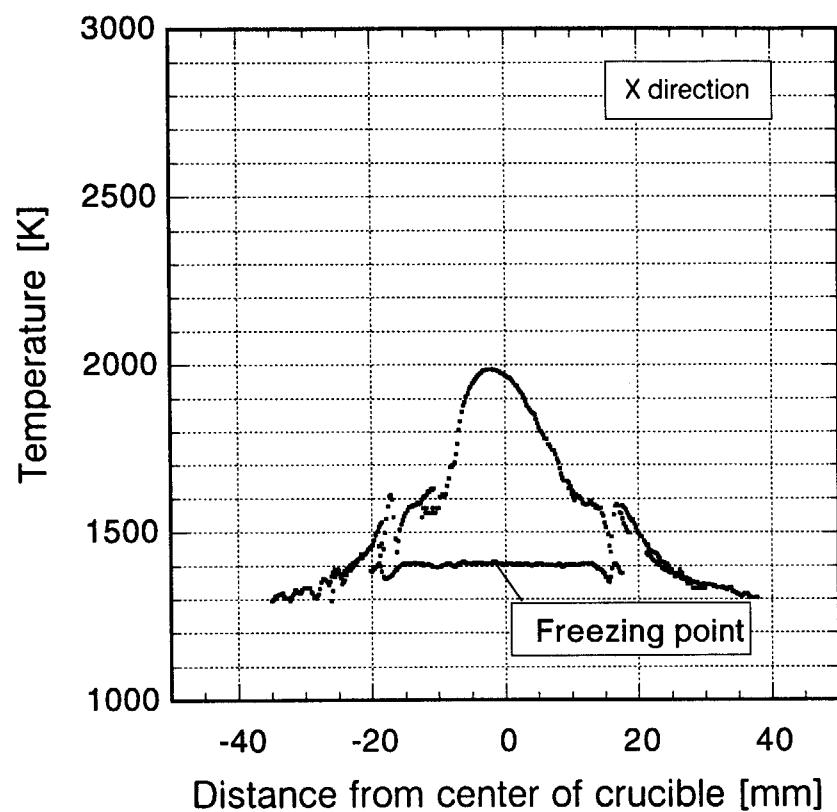


Fig.6 Temperature profile of uranium metal surface during evaporation at input power of 5kW.

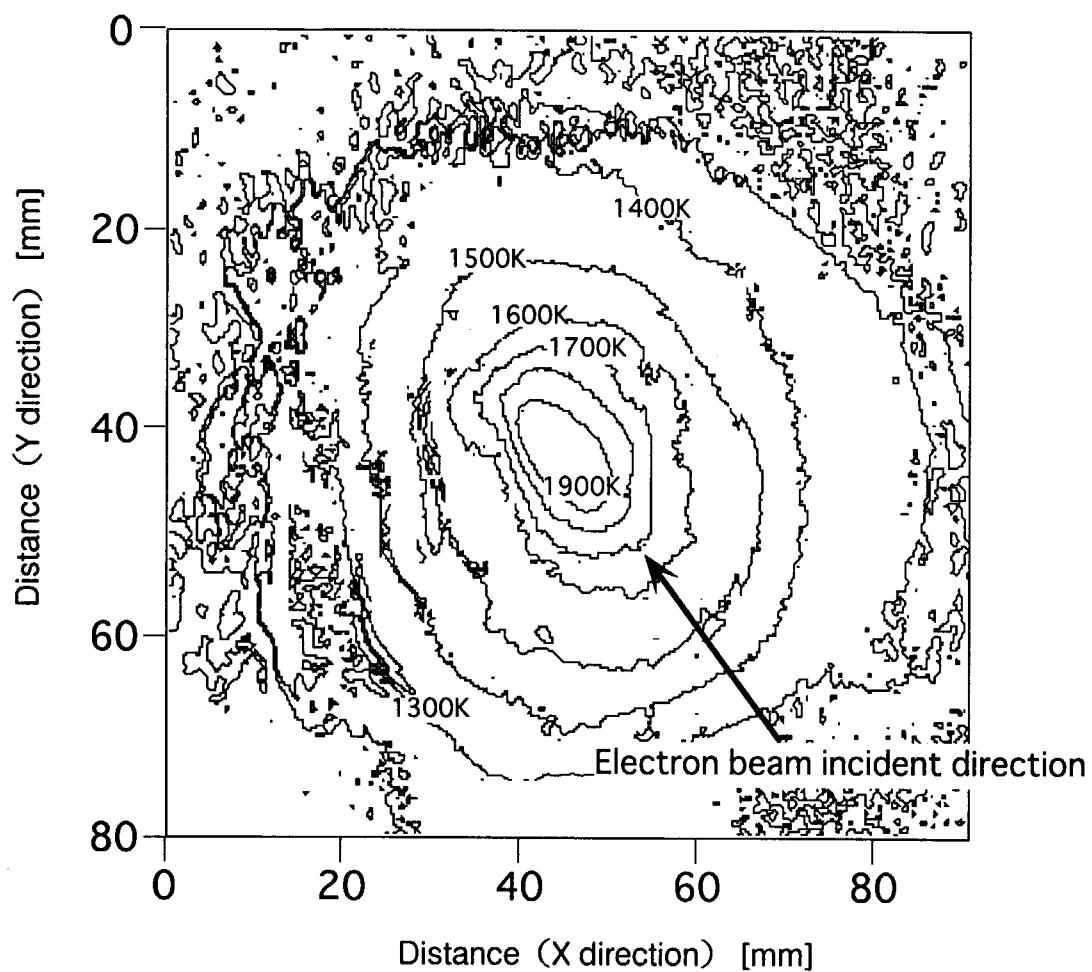


Fig.7 Contour plot of uranium metal surface during evaporation at input power of 5kW.

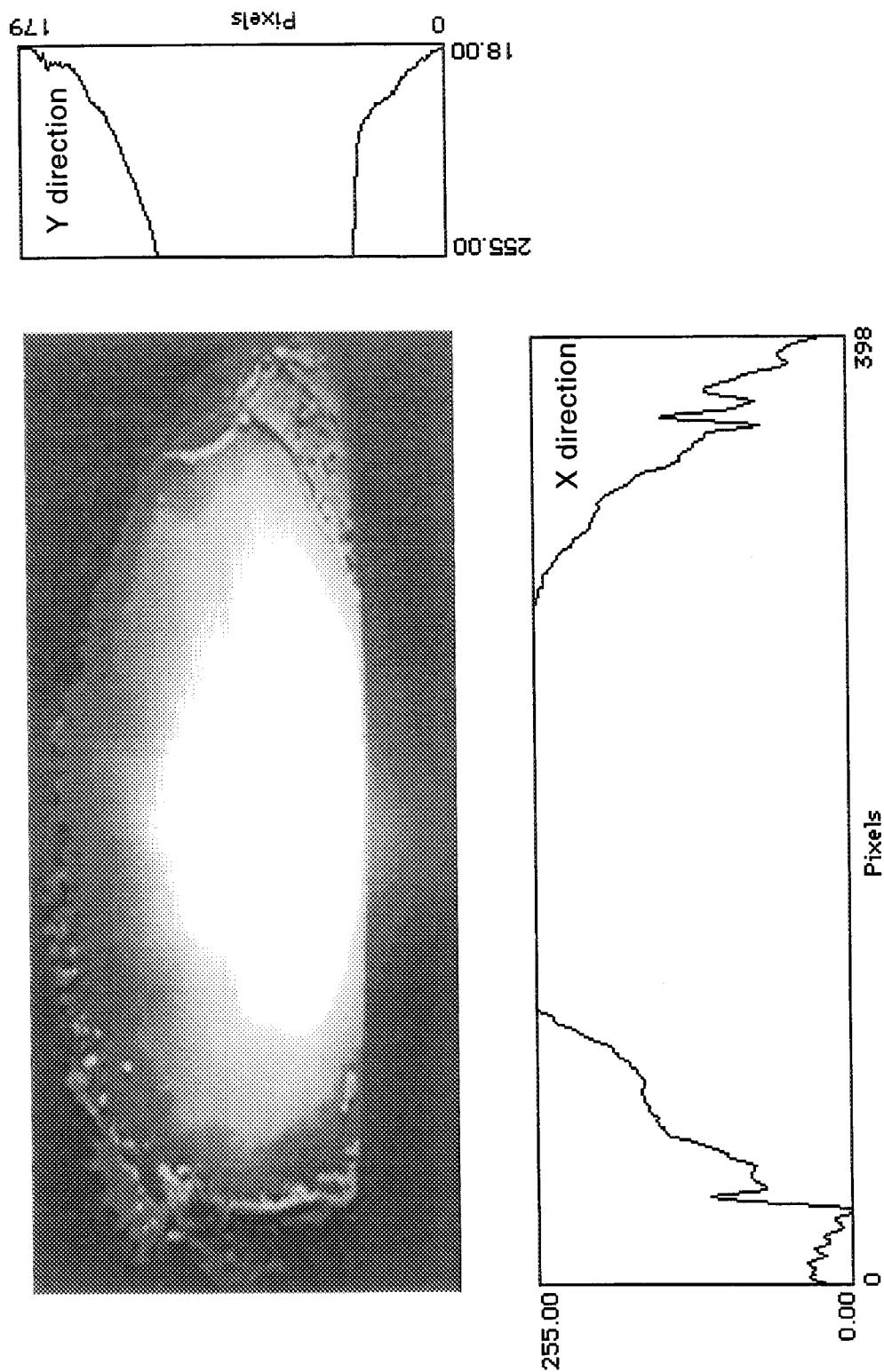


Fig.8 Image signal and line profiles of uranium metal surface during evaporation at input power of 20kW.
(f=22, X direction distance:0.11mm/pixel,Y direction distance:0.22mm/Pixel)

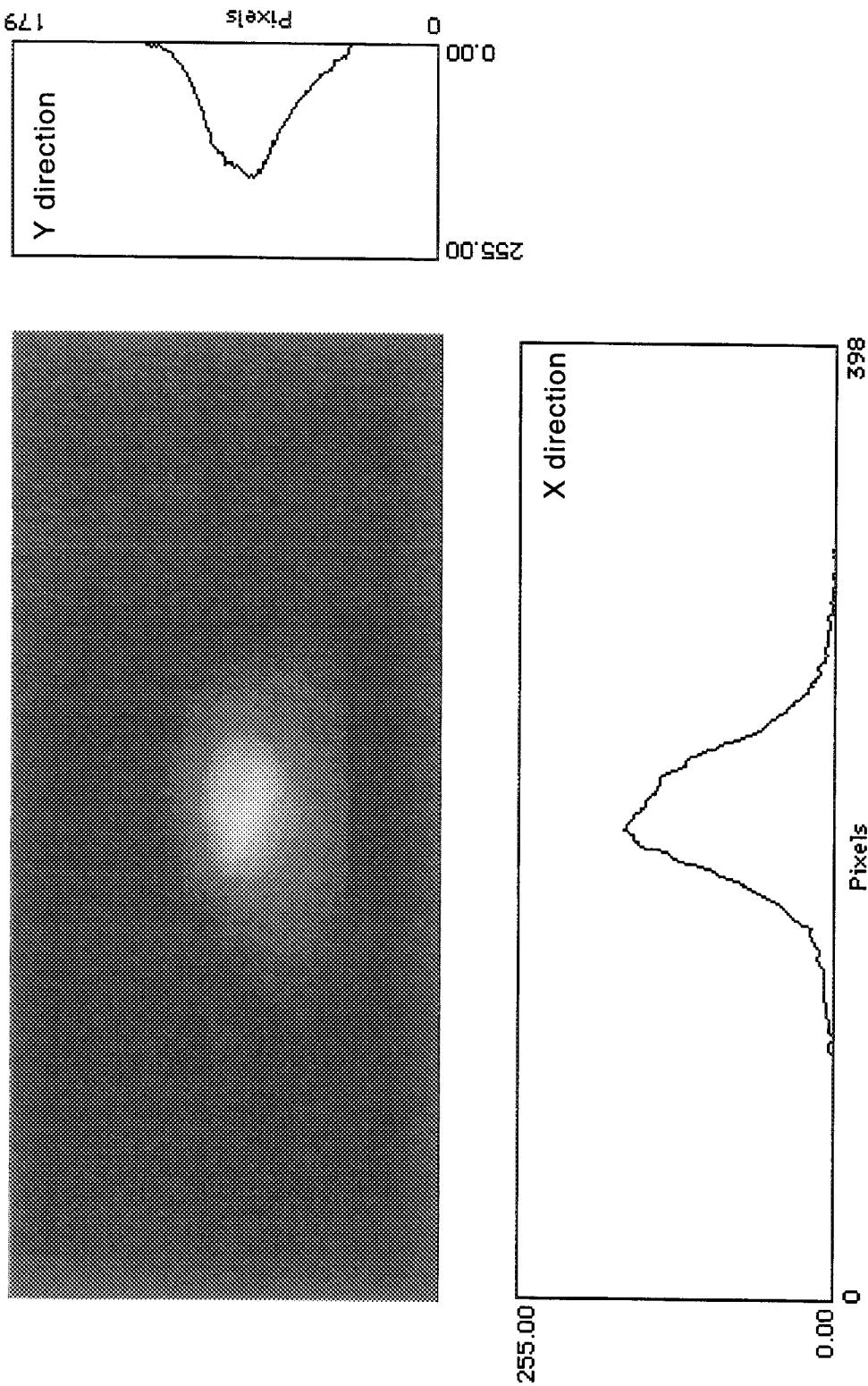


Fig.9 Image signal and line profiles of uranium metal surface during evaporation at input power of 20kW.
($f=22+1.3\%$ transmission ND filter, X direction distance:0.11mm/pixel,
Y direction distance:0.22mm/Pixel)

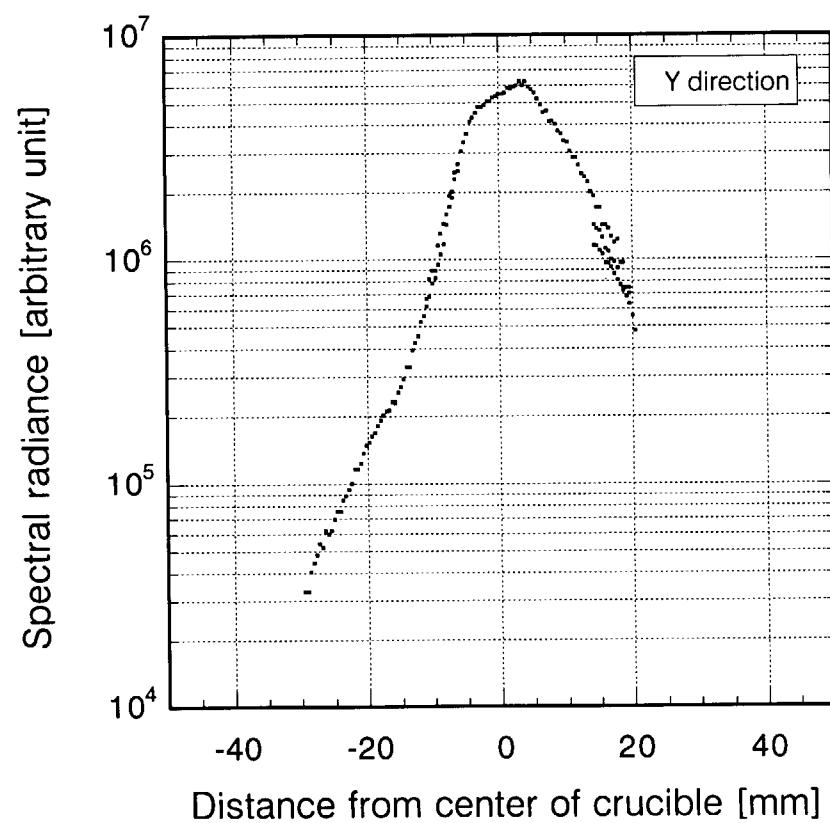
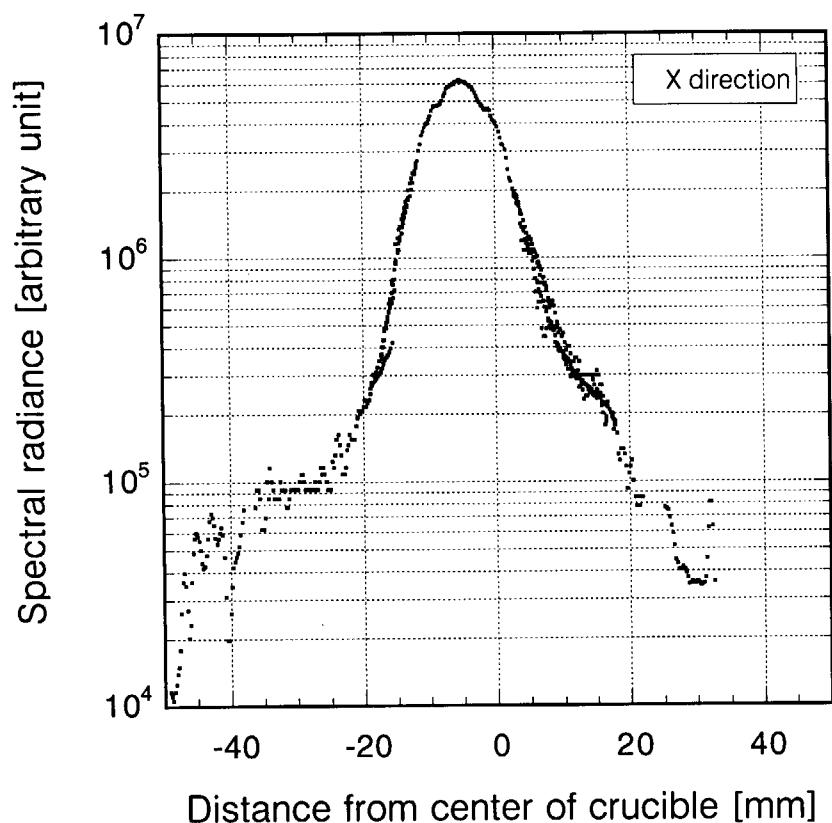


Fig.10 Spectral radiance profile of uranium metal surface during evaporation at input power of 20kW.

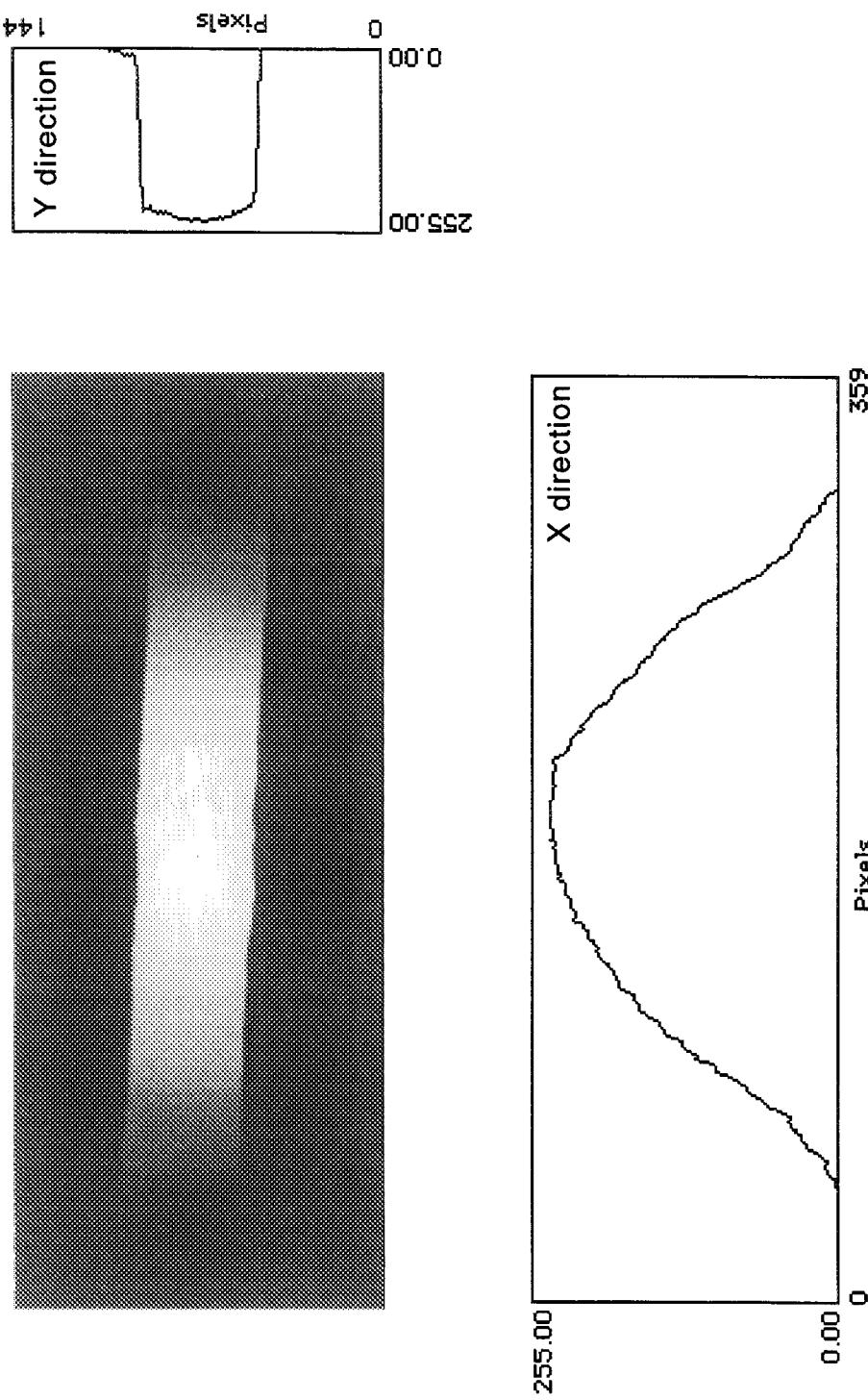


Fig.11 Image signal and line profiles of heated tantalum pipe. ($f=5.6$)

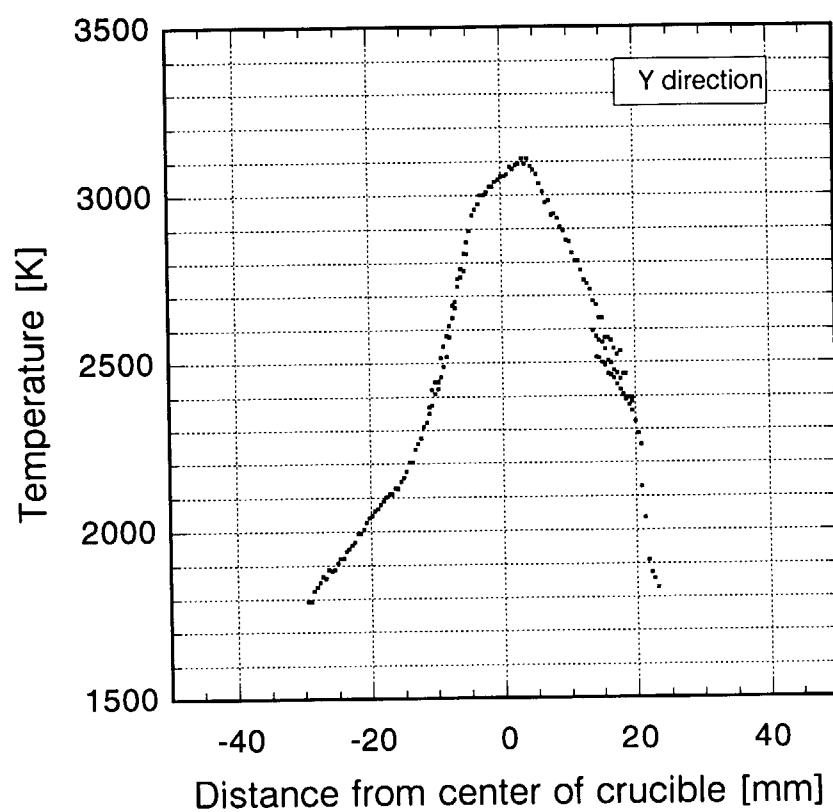
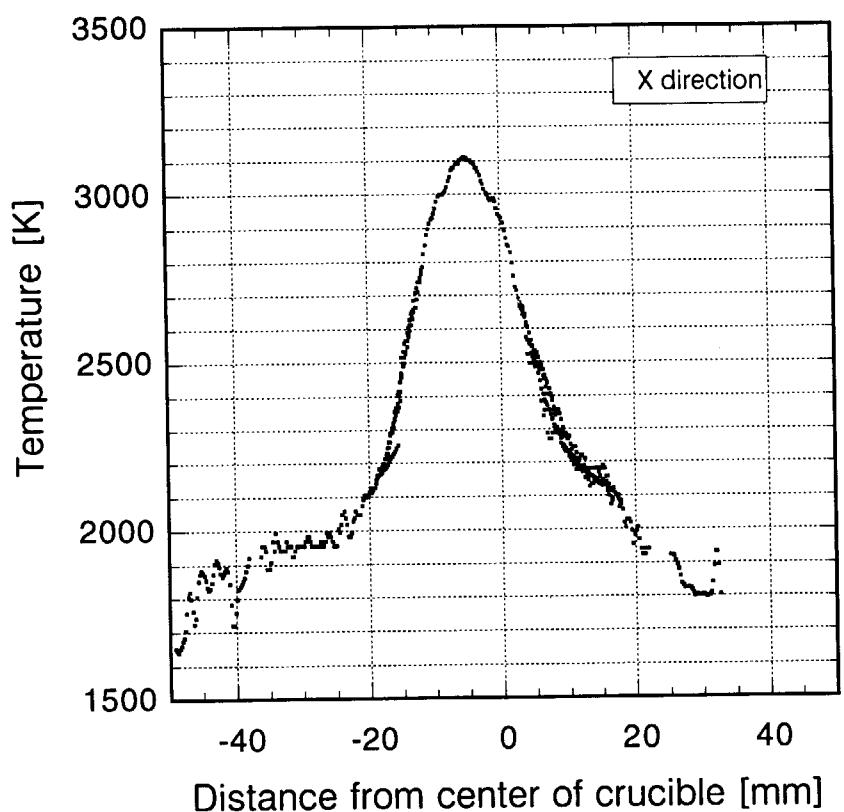


Fig.12 Temperature profile of uranium metal surface during evaporation at input power of 20kW.

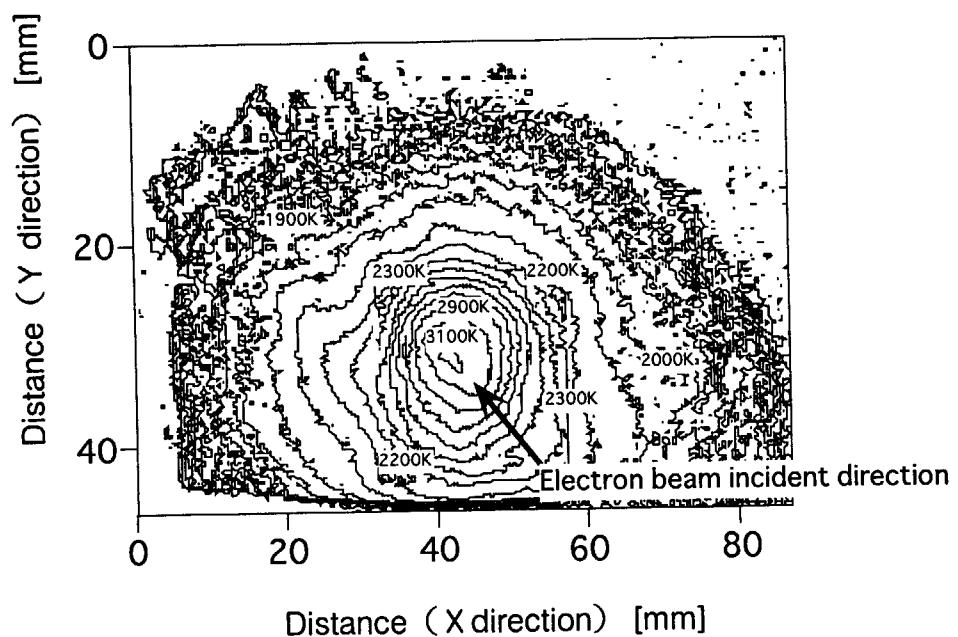


Fig.13 Contour plot of uranium metalsurface during evaporation at input power of 20kW.

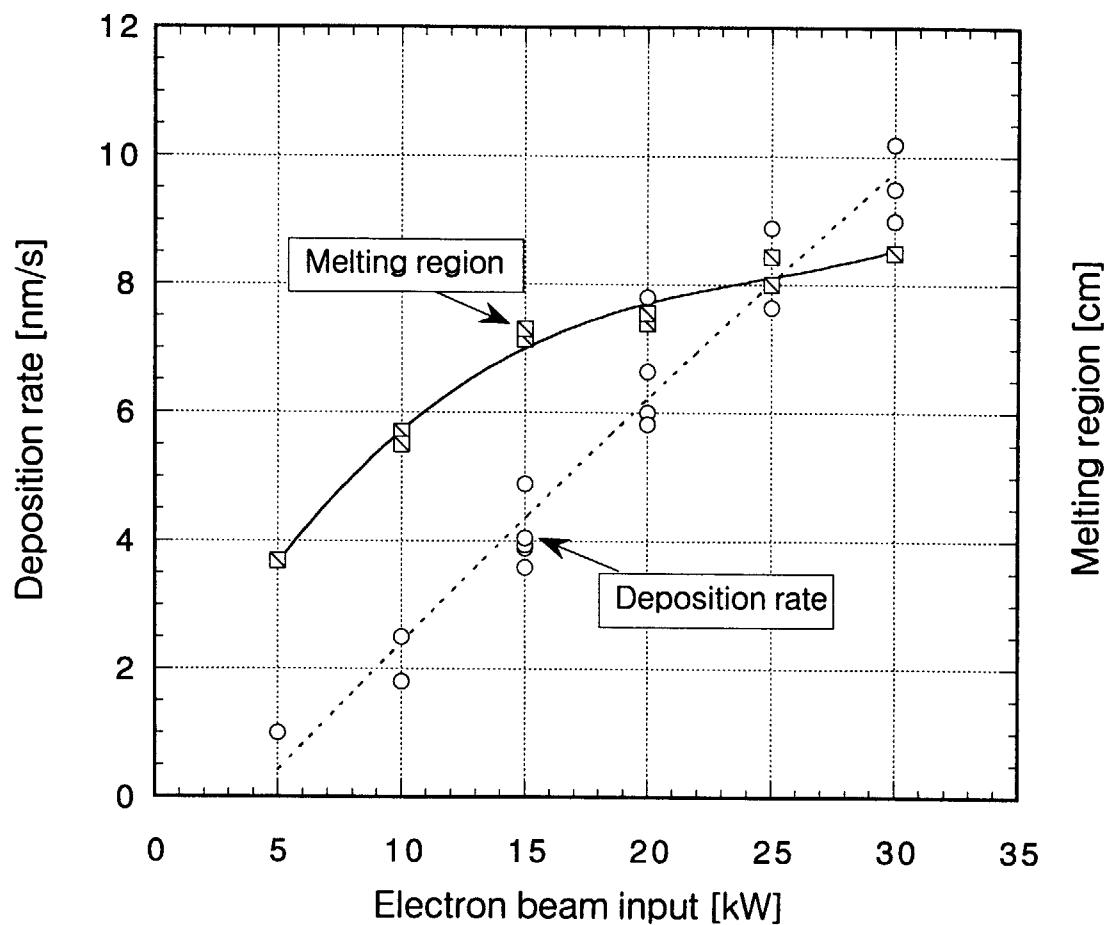


Fig.14 Electron beam input dependence of deposition rate and melting region in the crucible.

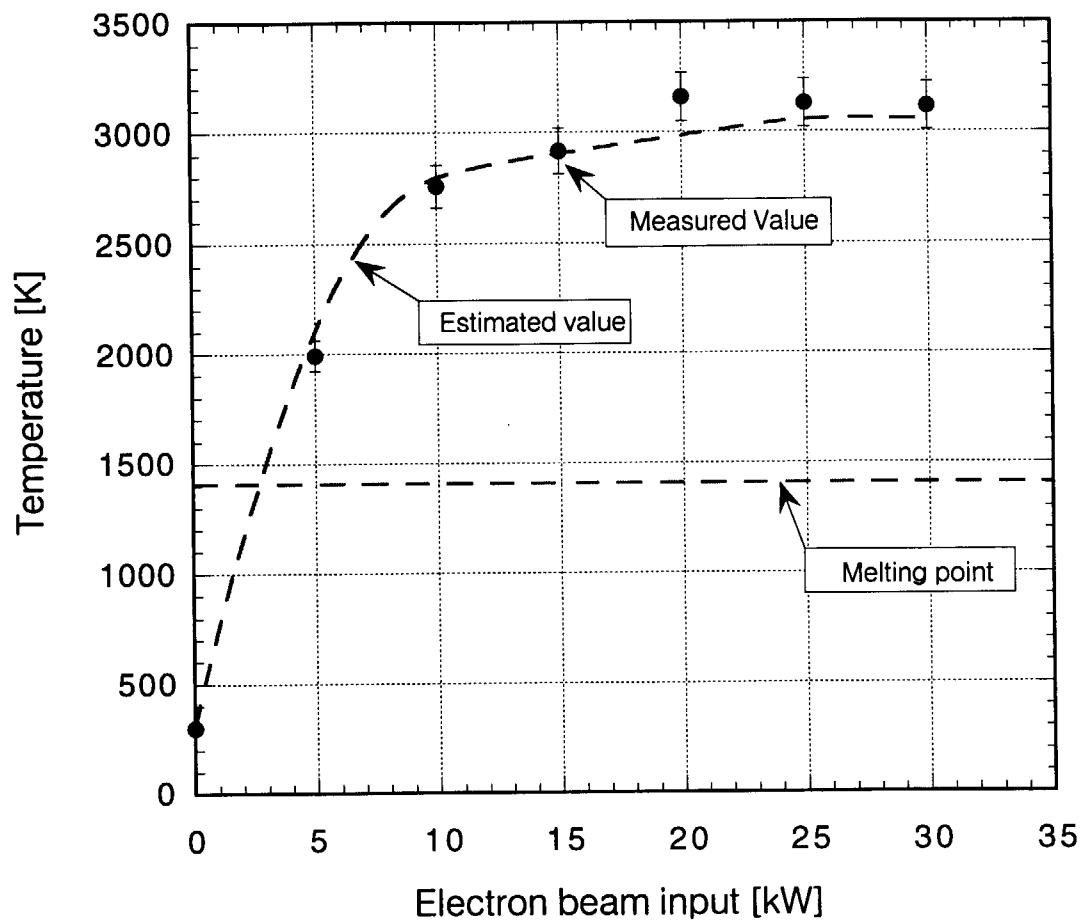


Fig.15 Electron beam input dependence of maximum temperature of uranium metal in the crucible.

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
物質量	モル	mol
光强度	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
功率、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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	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	ルーメン	lm	cd·sr
照度	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
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

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=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

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

(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、1eVおよび1u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、ヘクト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。
- ECE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 ³ dyn)	kgf	lbf	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	0.101972	0.224809	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
	9.80665	1	2.20462	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	4.44822	0.453592	1	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
粘度	1Pa·s(N·s/m ²)	10 P(ボアズ)(g/(cm·s))		1.33322×10 ⁻¹	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
動粘度	1m ² /s	10 ⁴ St(ストークス)(cm ² /s)		6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻⁵	6.80460×10 ⁻⁵	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 cal= 4.18605J (計量法) = 4.184J (熱化学) = 4.1855J (15°C) = 4.1868J (国際蒸氣表)
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻¹	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 ²³	
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仮馬力)
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻⁴	1	8.46233×10 ¹⁵	= 735.499W
	1.60218×10 ¹⁶	1.63377×10 ²⁰	4.45050×10 ²⁶	3.82743×10 ²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量率	Sv	rem
	1	2.70270×10 ⁻¹¹		1	100		1	3876		1	100
	3.7×10 ¹⁰	1	吸収線量	0.01	1	照射線量	2.58×10 ⁻¹	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

電子ビーム加熱ウラン蒸発時の蒸発面温度分布測定