

JAERI-Research

98-011



レーザー光吸収法による電子ビーム加熱生成ウラン蒸気諸特性の計測

1998年3月

大場弘則・雨川和博・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。
入手の間合わせは、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）で複写による実費領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
印 刷 (株)原子力資料サービス

レーザー光吸収法による電子ビーム加熱生成ウラン蒸気諸特性の計測

日本原子力研究所東海研究所燃料研究部

大場 弘則・雨川 和博・柴田 猛順

(1998年2月3日受理)

原子法レーザーウラン濃縮における蒸発基礎データ取得試験の効率化を図るため、電子ビーム加熱で生成したウラン蒸気の諸特性値をレーザー光吸収法を用いて同時に測定する手法を考案した。蒸発の中心軸上および中心軸からある角度を持たせた位置に複数のスリット口の開けたパイプをウラン蒸气流中に設置した。パイプ内をアルゴンレーザー励起リング色素レーザーを透過させて、スリットを通過した基底状態のウラン原子の吸収スペクトルを測定した。測定された吸収スペクトルから、蒸発角度分布、基底準位原子密度、蒸気速度および蒸气流並進温度を求めた。その結果、一回のレーザー光の波長掃引でこれらの蒸気特性値が測定できるだけでなく、蒸発速度を高くすると蒸气流の垂直方向並進温度は流れ方向の並進温度に近づくという知見などが得られた。

Measurement of Vapor Properties of Electron-Beam-Evaporated Uranium using Laser Absorption Spectroscopy Method

Hironori OHBA, Kazuhiro AMEKAWA and Takemasa SHIBATA

Department of Chemistry and Fuel Research

Tokai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 3, 1998)

To acquire efficiently the basic data of evaporation process in atomic vapor laser isotope separation for uranium enrichment, the vapor properties of uranium produced by an electron beam heating were measured simultaneously using a laser absorption spectroscopy method. A stainless steel pipe was located into a uranium vapor stream, which had slits on the vertical centerline and on the shifted axis from the vertical centerline. An argon ion pumped ring dye laser beam was tuned to an absorption transition of ground states' uranium atomic vapor passing through the slits. Many interesting results on the vapor properties such as angular distributions, density, velocity and translational temperature of vapor flow were obtained by sweeping the laser beam wavelength at a time. One of them is that the perpendicular translational temperature of uranium vapor stream approaches to the parallel translational temperature with increasing evaporation rate.

Keywords: Laser Isotope Separation, Electron Beam Evaporation, Laser Absorption Spectroscopy, Vapor Properties, Uranium, Simultaneous Measurement

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
3. 試験結果および考察	4
3.1 吸収スペクトル測定例	4
3.2 ウラン蒸発角度分布	4
3.3 ウラン蒸気密度	5
3.4 ウランの蒸気速度	6
3.5 ウラン蒸気流の並進温度について	7
4. おわりに.....	9
参考文献	10

Contents

1. Introduction.....	1
2. Experimental Procedure.....	2
3. Results and Discussion	4
3.1 Example of Measured Absorption Spectra	4
3.2 Angular Distribution of Uranium Vapor	4
3.3 Uranium Vapor Density at Ground State Level	5
3.4 Mean Uranium Vapor Velocity.....	6
3.5 Translational Temperature of Uranium Vapor Stream	7
4. Summary	9
References	10

This is a blank page.

1. はじめに

原子法レーザーウラン濃縮プロセスは、電子ビーム加熱により生成させた金属ウラン蒸気にレーザー光を照射し、ウラン235同位体のみをイオン化して電極に回収するものである。このプロセスにおけるウラン蒸気特性は、光反応部でのレーザー照射条件や回収部での電極形状寸法等を決める上で重要である。このため、濃縮プラントを設計するためにはその特性を把握する必要がある。蒸気特性としては蒸気密度、蒸発角度分布、蒸気速度分布、準安定準位占有率分布等が挙げられる。著者らはこれまでに、蒸気速度分布をレーザー誘起蛍光ドップラー法、準安定準位占有率分布をレーザー光吸収法、角度分布を秤量法、蒸気密度を膜厚計で測定される蒸気フラックスおよびレーザー誘起蛍光ドップラー法により測定される蒸気速度の比、というように様々な手法で各々の値を別個に測定してきた^{1,2,3)}。しかしながら、蒸気密度の測定においては、水晶振動子型や電子衝撃型膜厚計は長時間高密度蒸気の正確な測定には不向きである。蒸発角度分布は蒸着板を用いた秤量法でのみ測定しているが、蒸着板を取り出すために真空容器を大気開放する必要があり、蒸着膜の剥離や測定値が直ちに得られない等の問題がある。また真空容器内に種々の検出器を取り付ける場合、構造上の問題や高温、液体ウラン金属による腐食性といった環境的な問題もある。また、蒸気速度分布や準安定準位占有率分布では各々別個に測定してきたため、蒸気特性値を得るには長時間の計測を要していた。このため短時間で、あるいは一度の計測で多くの蒸気特性測定できれば、試験の効率化を図れるだけでなく、将来的にはウラン濃縮プラント蒸発プロセスにおけるフィードバック制御にも適用できる可能性がある。

レーザー光吸収法はウラン蒸気中にレーザー光を透過させ、特定の遷移線での吸収スペクトルを検出することにより、上記のウラン蒸気特性を測定可能であるし、波長を吸収ピーク線に固定できるレーザー光源を用いれば、ウラン蒸気の時間変動も測定できる。また将来、合金で蒸発させる場合を考慮しても、特定の試料の原子蒸気のみ検出できるので、モニタリング等に適用すれば蒸発プロセス制御としては有効な手段である^{4,5)}。さらに、

吸収法では真空容器内にはウラン蒸気の通過するスリットを設けるだけで、検出器等は容器外に設けるため調整、メンテナンスが容易である。今回の計測では、ウラン蒸発角度分布、蒸気密度、蒸気速度、蒸気フラックスの蒸気特性測定および中性原子散乱付着の基礎データとして重要な蒸气流並進温度を、一回のレーザー光波長掃引で求める試験を行った。

2. 試験方法

試験装置概略をFig.1に示す。装置は蒸気発生部と計測用試験部から構成される。直径900mm、長さ900mmの真空容器内に設置された水冷銅るつぼ（容量320cc）にウランを入れ、電子銃（Ardenne社製 EH-30/20）により加熱蒸発させた。蒸気発生部の特長は電子ビームが鉛直軸とのなす角度30°の斜め上方から照射しており、るつぼ近傍には電子ビーム偏向磁場がないことである。るつぼ内には対流熱損失を低減させる目的でタングステン粒を混入させている。ウランの蒸発量は蒸発面から450mm離れた位置に置いた水晶振動子膜厚計（Inficon社製）を用いて測定した。蒸発面から220mmの高さにはステンレス鋼製パイプを設けた。このパイプにはスリット穴が5ヶ所設けてあり、このスリットを通過したパイプ内のウラン蒸気中にリング色素レーザー光を透過させた。本試験で用いた試料は天然の金属ウランであるため、吸収スペクトルはほとんどが ^{238}U である。このため同位体間のピークの重なりを考慮する必要がなく、吸収法による蒸気特性計測には好都合である。後述するようにレーザー光の線幅は十分に狭いので、ここで測定される吸収スペクトルはウラン蒸気のドップラー拡がりによるものである。ウラン蒸気の通過するスリットを中心軸上とある角度を持たせた位置に開けることで、中心軸での吸収スペクトルとある角度でのドップラーシフトした吸収スペクトルが測定できる。つまりレーザー光波長を一回掃引することで、中心軸上での吸収量から相対的な蒸気密度、中心軸上とドップラーシフトした位置での吸収量の割合から蒸発角度分布、吸収スペクトルピークのドップラーシフト量が

ら蒸気速度が計測可能である。また、吸収スペクトルの拡がりからウラン蒸気流の並進温度を求めることができる。これまでに報告されているウラン蒸気速度 $500\sim 1000\text{m/s}^5$)に相当するドップラーシフト量と蒸気通過角度におけるドップラー拡がりを考慮して、スリットはレーザー光透過方向に対して開口部 $5\text{mm}\times 10\text{mm}$ とし、中心軸上 0° と中心軸とのなす角度 30° および 60° の位置に対称な5ヶ所に設けた。

レーザー光源には線幅 ($\sim 500\text{kHz}$) の狭いアルゴンイオンレーザー (Spectra-Physics社製 model 2030) により励起されるリング色素レーザー (Spectra-Physics社製 model 380D) を用いた。色素はRhodamine 6Gを使用した。リングレーザーより出た光をビームスプリッターで計測用と波長掃引幅モニター用に分割した。波長掃引幅は 150MHz エタロンを有するファブリ-ペロー干渉計と波長計を用いてモニターした。計測用レーザー光は光学チョッパーにて変調した後、ビームスプリッターで参照光とウラン蒸気中を通過する透過光に分けて、それぞれ半導体検出器 (Spectra-Physics社製 model 404/385) で光強度を測定した。吸収スペクトルはレーザー光の時間変動の影響を除くため検出信号をロックインアンプにて信号処理した後ペンレコーダー上に記録した。レコーダーでは同時に参照光/透過光比、参照光/透過光比の対数、波長掃引信号、電子ビーム入力、膜厚計出力を記録した。レーザー光が強いと吸収の飽和が起こり線形吸収領域から外れる。このためレーザー光路内に光吸収フィルターを入れてレーザー光を十分に弱くし、線形吸収領域になるようにした。測定を通してのレーザー光強度は $5\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 以下でレーザー光強度を変えても吸収量が変化しないことを確認した。今回の測定ではウラン吸収遷移レベル $0\text{-}16900\text{cm}^{-1}$ のみを用いた。吸収スペクトル測定は電子ビーム入力 $10\sim 26\text{kW}$ の間で蒸発量を変化させて行った。

3. 試験結果および考察

3.1 吸収スペクトル測定例

測定結果の一例としてFig.2にレーザー光波長掃引幅を3.3GHz ($\sim 0.11\text{cm}^{-1}$)とした時、電子ビーム入力20kW、蒸着速度4.38nm/sにおける吸収スペクトルを示す。この吸収ピークの拡がり、使用したリングレーザー光の線幅が $2 \times 10^{-5}\text{cm}^{-1}$ 以下と狭いことから、レーザー光が透過したウラン蒸気の色度分布によるドップラー効果だけで決まる。本試験での吸収ピークは中心軸上においては蒸気のコリメート角が 1.6° と小さいため、水平に入射されたレーザー光とウラン蒸気の色度の角度がほとんど 90° なので、ドップラー効果の影響が小さく線幅の狭い大きいピークになっている。これに対して 30° の位置ではレーザー光とウラン蒸気の色度の角度が 90° ではないので、線幅が広く小さいピークが得られ、中心軸上でのピークからドップラーシフトしたスペクトルになっている。測定用パイプには5ヶ所のスリットを設けたが、中心軸から 60° の位置での吸収は蒸発量を増大させても観測されず、中心軸上と中心軸に対して対称な 30° の位置での吸収ピークだけが測定された。また本測定例からは波長掃引速度およびベースラインが一定でないことがわかる。Fig.3には波長掃引幅と測定スペクトルのベースラインを補正した吸収スペクトル(対数)結果で、吸収スペクトルで吸収中心周波数からのシフト量に対する吸収量を示した。Fig.3中には電子ビーム入力26kW、蒸着速度26.2nm/sでの測定例も示す。蒸発量を増加させるとともに2つのピークのシフト量が大きくなっていること即ち蒸気速度が増加していることがわかる。

3.2 ウラン蒸発角度分布

蒸発の色度分布を表示する場合、通常点蒸発源からの球面上への蒸発では中心軸上での蒸気フラックスを ϕ_0 とすれば、中心軸とのなす角 θ における蒸気フラックス ϕ は、付着率が

1.0の場合、次の余弦則で表せる⁶⁾。

$$\phi = \phi_0 \cos^n \theta$$

ここで n は蒸発量に依存する角度分布指数である。しかしながら、本測定では点蒸発源から原子が平面上のスリットを通過している場合に相当するので、パイプ内の 30° の位置での蒸気フラックス ϕ_p と中心軸上の蒸気フラックス ϕ_0 との関係は

$$\phi_p = A\phi_0 \cos^{n+2} \theta$$

となる。ここで A はレーザー光入射位置における照射領域に関する補正係数で、本実験では1である。中心軸上と 30° の位置における吸収スペクトル積分量の比を蒸気フラックス比として上式を用いて角度分布指数 n を算出した。なおFig.3中、ドップラーシフトした中心軸に対称な吸収量は等しくなかったため平均値で n を求めた。吸収量が異なる理由としては、るつぼ内の電子ビーム照射スポット位置が中心からずれていたこと、電子ビームを斜め上方から入射しているため、蒸気の発生方向が垂直上方でなく多少ずれていること等が考えられる。参考のため、ウラン蒸気の計測用パイプへの付着状況をFig.4に示した。この図からも蒸発に偏りがあったことが確認できる。Fig.3の測定例からは電子ビーム入力20kW時で $n=2.3$ 、入力26kW時で $n=4.8$ と求められた。なお、 n の値は蒸発量増大に伴って増加し上方に指向性を持つ蒸気が生成されていることが確認され、一度のレーザー光波長掃引で蒸発角度分布が測定できるようなことがわかった。しかしながら、低密度蒸発時の角度分布については 30° の位置での吸収量は非常に少なく、ベースラインの補正によってその量が大きく左右されるため分布指数を決定することは困難であった。

3.3 ウラン蒸気密度

ウラン蒸気密度は中心軸上の吸収スペクトル積分値から得られる。本測定では基底準位を対象にした密度を求めた。光の吸収が線形吸収であるとき透過前の光強度を I_0 、透過後

の光強度を I とすると光吸収量 $\ln(I_0/I)$ は振動子強度 f と次の関係にある。

$$2\pi \int \ln \frac{I_0}{I} d\nu = 0.167 f n_i l \quad (s^{-1})$$

ここで、 n_i はウラン原子の基底準位密度(cm^{-3})、 l は吸収長(cm)、 ν は光の周波数である。

ウランの $0-16900\text{cm}^{-1}$ の遷移の振動子強度は文献値の $f=0.019\pm 0.003^{7)}$ を用いた。吸収測定用パイプに設けたスリット幅は5mmであるが、パイプを真空容器から取り出してスリット上部の蒸着部を観察したところ、蒸発面上直径20mmのスポットからスリットに蒸気が入射しているらしいことが推定された。このとき蒸気中のレーザー光透過長は6mmであり、これを吸収長とした。また蒸気は前節で述べたように角度分布を有するが、吸収長が短いのでウラン原子密度は一様であるとした。Fig.5にはウラン原子の基底準位密度の蒸着速度依存性を示す。蒸着速度と基底準位密度はほぼ比例関係にあることから、蒸気密度がモニターできること、波長を吸収ピークに固定することによって蒸気的时间変動もモニタリングできることが確認できた。

3.4 ウランの蒸気速度

ウラン蒸気速度 $u(\text{m/s})$ は中心軸上の吸収ピークと 30° の位置における吸収ピークのドップラーシフト量 $\Delta f(\text{GHz})$ を用いて次式から求めた。

$$\Delta f = \frac{u}{\lambda_0} \cos \alpha$$

ここで λ_0 は中心波長(nm)、 α はレーザー光入射軸と蒸気流との交差角で 60° である。Fig.3の

測定例では電子ビーム入力20kW時で704m/s、入力26kW時で922m/sの蒸気速度が得られた。Fig.6にウラン蒸気速度の蒸着速度依存性を示す。Fig.6には参考のために蒸発面温度と熱平衡な速度およびマッハ数無限大時の速度も破線で示した。この結果は以前に本実験装置を用いてレーザー誘起蛍光法で測定した値⁸⁾と一致した。

3.5 ウラン蒸気流の並進温度について

ここでは、中心軸上およびドップラーシフトした吸収スペクトルピークの拡がりから蒸気流垂直方向温度および蒸気流平行方向温度を求めてみる。ここで定義される温度は速度分布に対応するもので、回収電極への中性原子付着率を評価するのに重要なパラメータとなる。Fig.7は中心軸上および30°の位置でのドップラーシフトした吸収スペクトル拡がりから求めた蒸気流垂直方向の並進温度、蒸気流平行方向の並進温度である。中心軸上では蒸発量の増加とともに蒸気流垂直方向の拡がりが増大する。つまり蒸気流垂直方向並進温度が上昇する。この拡がりには蒸発量増大に伴い蒸発面近傍の衝突領域がスリット近傍まで上昇するためである。一方、30°の位置での吸収ピークの拡がりには、蒸気流平行方向の並進温度 $T_{//}$ と蒸気流垂直方向の並進温度 T_{\perp} の両方からの寄与がある。このため本測定で観測された吸収ピークの拡がりには見掛けの流れ方向並進温度 T_{eff} である。Fig.8に中心軸から角度 θ の位置での吸収スペクトル形状の考察に用いた概念図を示す。蒸気の流れの速度分布関数は、流れの平行方向 $v_{//}$ とそれに直角な v_{\perp} の各成分がそれぞれ別個の温度でボルツマン分布していれば、

$$\begin{aligned}
 & f(v_{\parallel}, v_{\perp}, v_z) dv_{\parallel} dv_{\perp} dv_z \\
 &= \alpha \exp \left\{ -\frac{m}{2kT_{\parallel}} (v_{\parallel} - v_0)^2 - \frac{m}{2kT_{\perp}} v_{\perp}^2 - \frac{m}{2kT_{\perp}} v_z^2 \right\} dv_{\parallel} dv_{\perp} dv_z
 \end{aligned}$$

と書くことができる。ここで m は原子の質量、 k はボルツマン定数である。吸収はFig.8に示す x 方向で観測するので、 x 、 y について変数変換を

$$v_{\parallel} = v_x \sin \theta + v_y \cos \theta, \quad v_{\perp} = v_x \cos \theta - v_y \sin \theta$$

のように行えば、

$$\begin{aligned}
 & f(v_{\parallel}, v_{\perp}, v_z) dv_{\parallel} dv_{\perp} dv_z \\
 &= \alpha \exp \left[-\frac{m}{2kT_{\parallel}} \left\{ (v_x \sin \theta + v_y \cos \theta) - v_0 \right\}^2 - \frac{m}{2kT_{\perp}} (v_x \cos \theta - v_y \sin \theta)^2 - \frac{m}{2kT_{\perp}} v_z^2 \right] dv_x dv_y dv_z
 \end{aligned}$$

となる。上式を v_y 、 v_z で積分することにより、 v_x 方向のみ、つまりFig.8中の T_{eff} を考慮すれば、

$$f(v_x) dv_x = \alpha' \exp \left\{ -\frac{mv_x^2}{2k(T_{\parallel} \sin^2 \theta + T_{\perp} \cos^2 \theta)} \right\} dv_x = \alpha' \exp \left\{ -\frac{mv_x^2}{2kT_{eff} \sin^2 \theta} \right\} dv_x$$

となり、

$$T_{eff} \sin^2 \theta = T_{\parallel} \sin^2 \theta + T_{\perp} \cos^2 \theta$$

の関係が導かれる。ここで

$\theta=30^\circ$ のとき、

$$T_{//} = T_{eff} - 3T_{\perp}$$

となる。上式からもわかるように、今回測定された吸収スペクトルの拡がりから得られる見掛けの並進温度は、垂直方向の拡がりを含んだ値である。そのため蒸発量の変化に対して大きな温度の変化は見られないと思われる。垂直方向の拡がりを引き去った真の平行方向並進温度 $T_{//}$ もFig.7に示す。蒸発量の少ない時はマックスウェル分布しており蒸発面温度に近いが、蒸発量の増加に伴い温度が低下して蒸气流垂直方向の並進温度に近づくことがわかる。これは蒸発量増大に伴い衝突が多発し冷却された結果と思われる。以上の結果は以前に本実験装置でガドリニウムを用いて行った試験結果²⁾と同様の傾向を示すことがわかった。

4. おわりに

レーザー光吸収法を用いて、電子ビーム加熱で生成したウラン蒸気の諸特性値を同時に計測する手法を考案した。一回のレーザー光の波長掃引で測定される吸収スペクトルから蒸発角度分布、基底準位原子密度、蒸気速度、蒸气流並進温度などの蒸気特性値が取得可能であるだけでなく、蒸発速度を高くすると蒸气流の垂直方向並進温度が流れ方向並進温度に近づくという知見も得られた。本手法は今後、効率的な基礎データ取得に役立つだけでなく、蒸気モニターとしても有効であることが確認できた。

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。

参考文献

- 1)A.Nishimura,H.Kaburaki,H.Ohba and T.Shibata,J.Nucl.Sci.Technol.,3 0(1993)270.
- 2)A.Nishimura,H.Ohba and T.Shibata,J.Nucl.Sci.Technol.,2 9(1992)1054.
- 3)A.Nishimura,T.Arisawa,H.Ohba and T.Shibata,J.Vac.Sci.Technol.,A 1 1(1993)1516.
- 4)L.V.Berzins, T.M.Anklam, F Chambers, S.Galanti, C.A.Haynam and E.F.Worden,Surface and Coating Technology,76-77(1995)675.
- 5)T.M.Anklam, L.V.Berzins, D.G.Braun, C.A.Haynam, T.Meier and M.A.McClelland,Surface and Coating Technology,76-77(1995)681.
- 6)S.Schiller,U.Heisig and S.Panzer: *Electron beam technology*(John-Wiley, Toronto, 1982)175.
- 7)T.M.Bieniewski,J.Opt.Soc.Am.,6 8(1978)1173.
- 8)西村昭彦、大場弘則、柴田猛順: 未公表(1992).

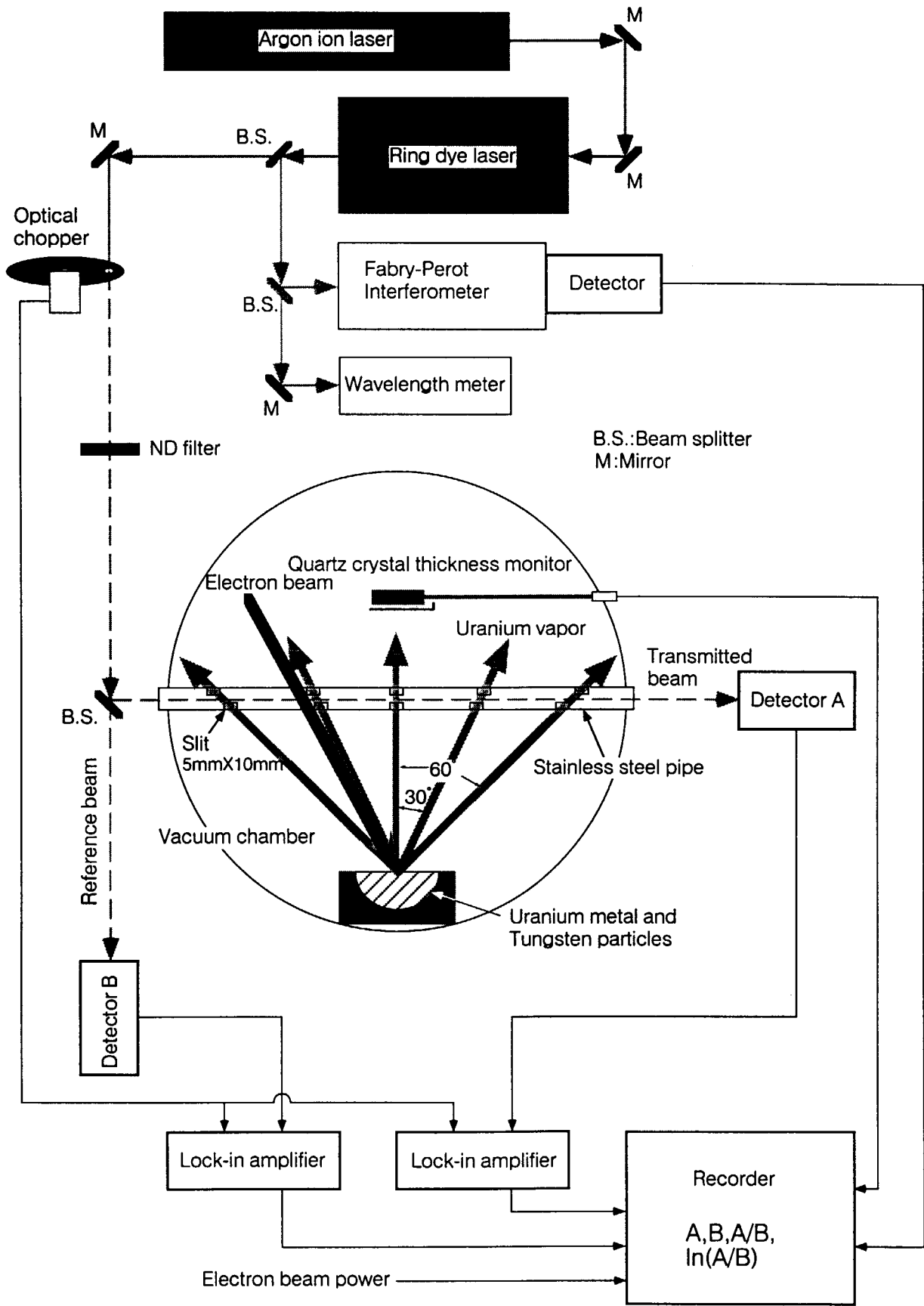


Fig.1 Schematic drawing of experimental apparatus.

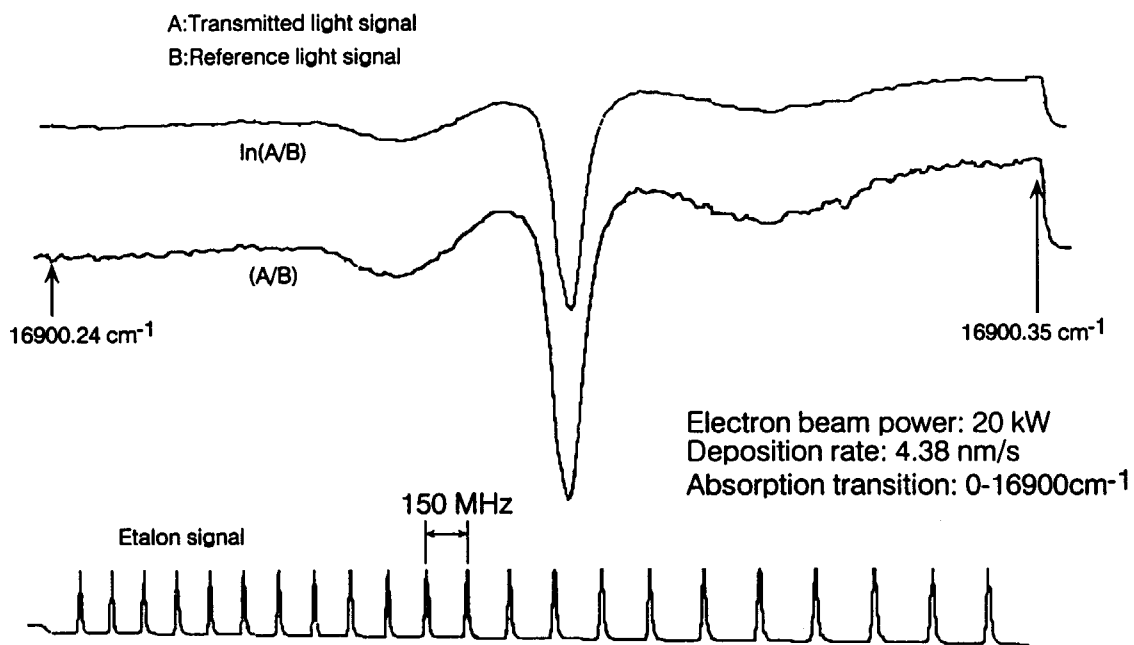
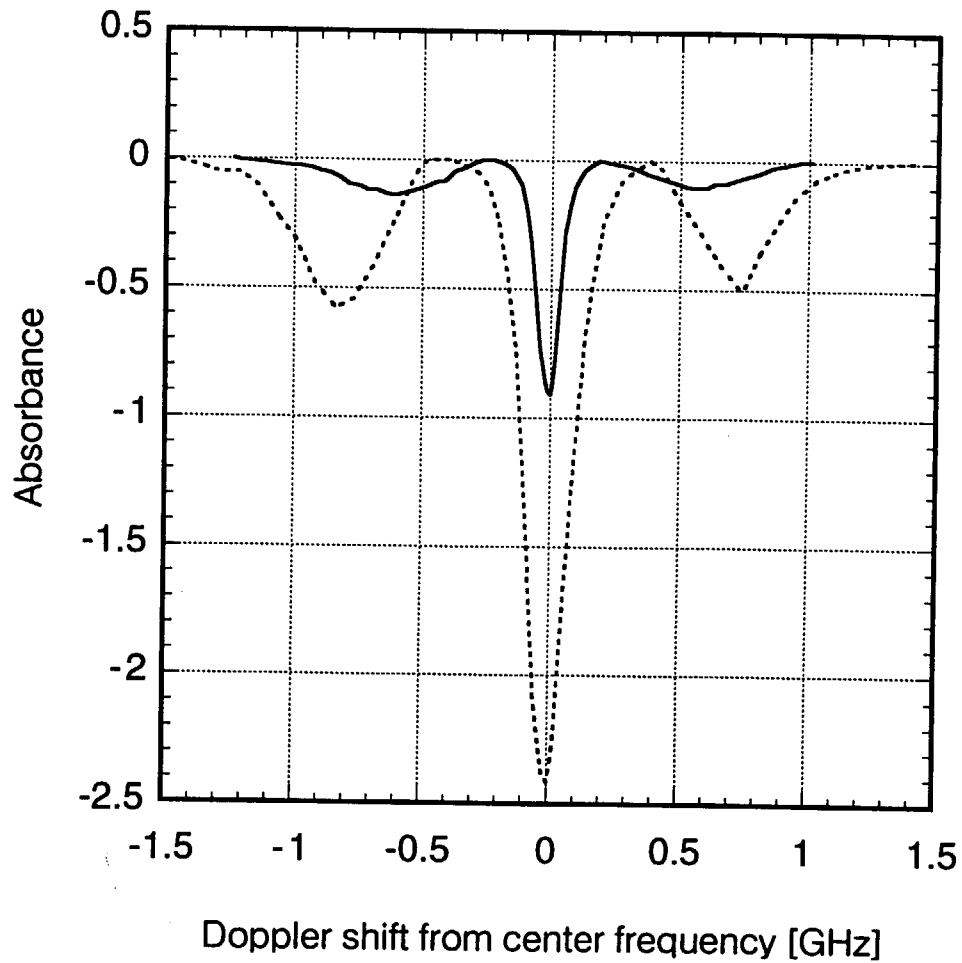


Fig.2 Example of measured absorption spectrum of uranium vapor.



	Solid line	Dashed line
Electron beam power:	20 kW	26 kW
Deposition rate:	4.38 nm/s	26.2 nm/s
Beaming exponent:	n=2.3	n=4.8
Vapor velocity:	v=704 m/s	v=922 m/s

Fig.3 Uranium absorption spectra after the laser wavelength sweep width was compensated.

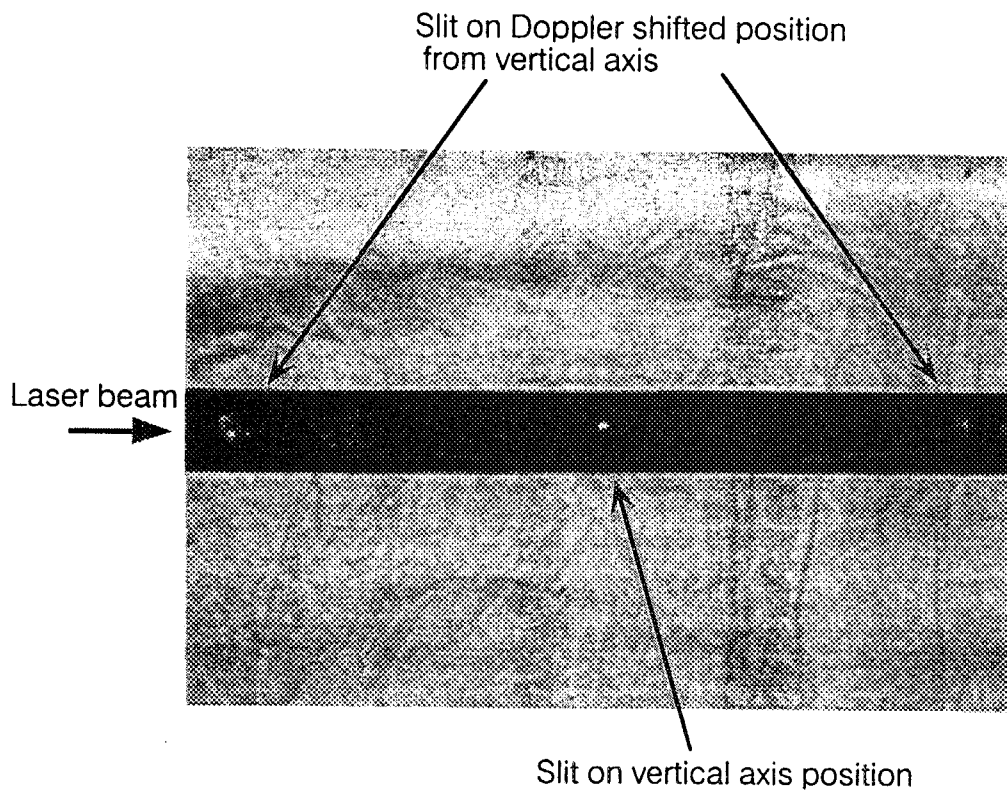


Fig.4 Photograph of uranium deposited on the stainless steel pipe.

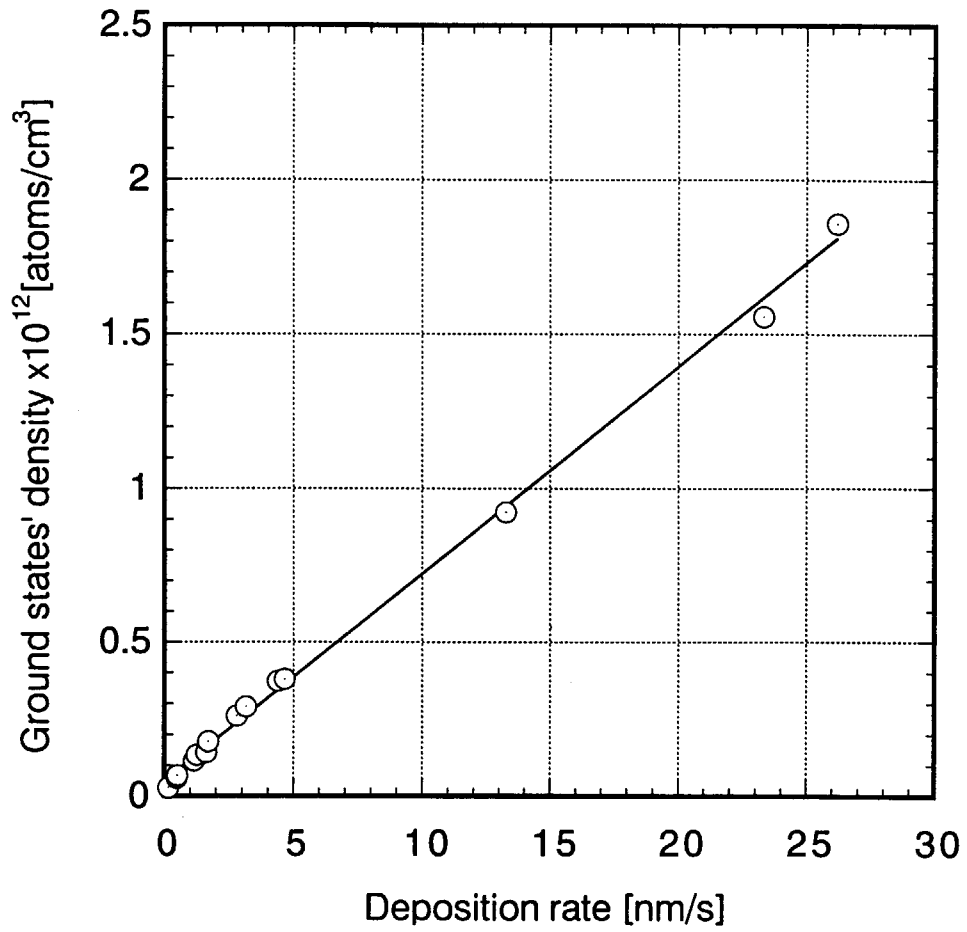


Fig.5 Ground states' density of uranium atom as a function of deposition rate.

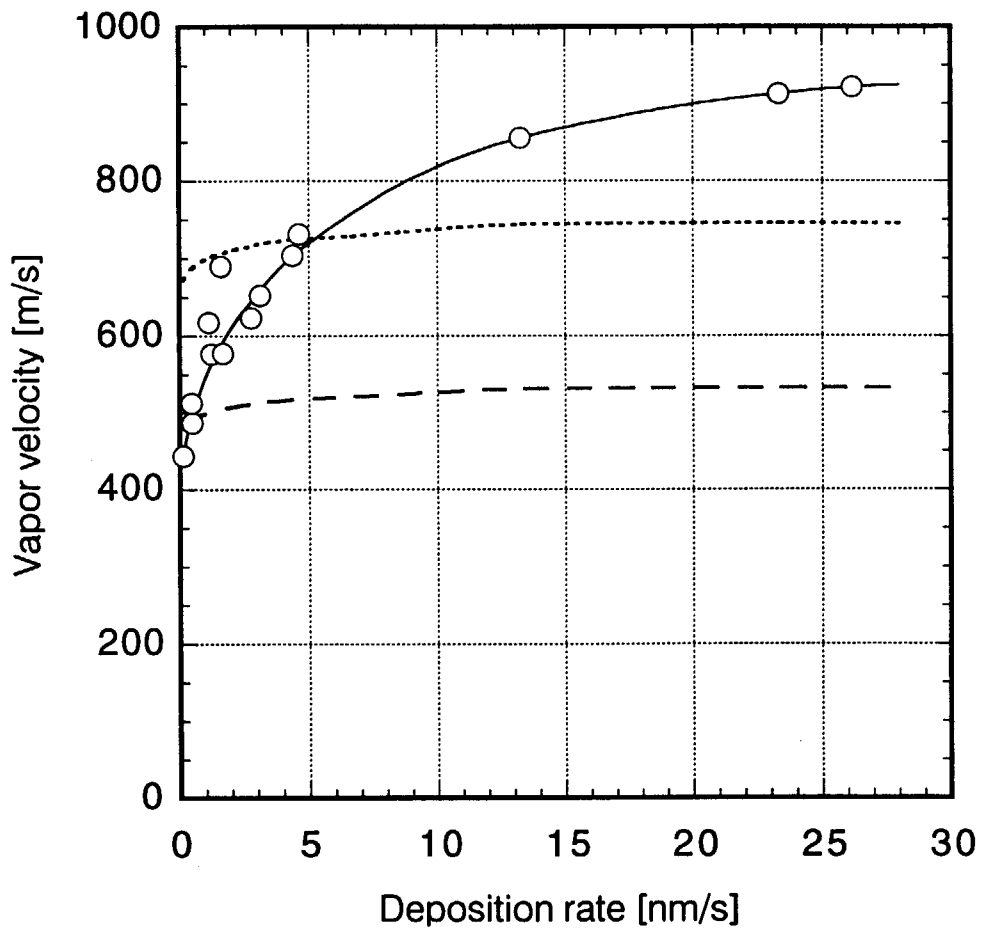


Fig.6 Uranium vapor velocities as a function of deposition rate. Circles show the measured value, dashed line shows the thermal mean velocity and dotted line indicates the maximum velocity by adiabatic free expansion of an ideal monatomic gas.

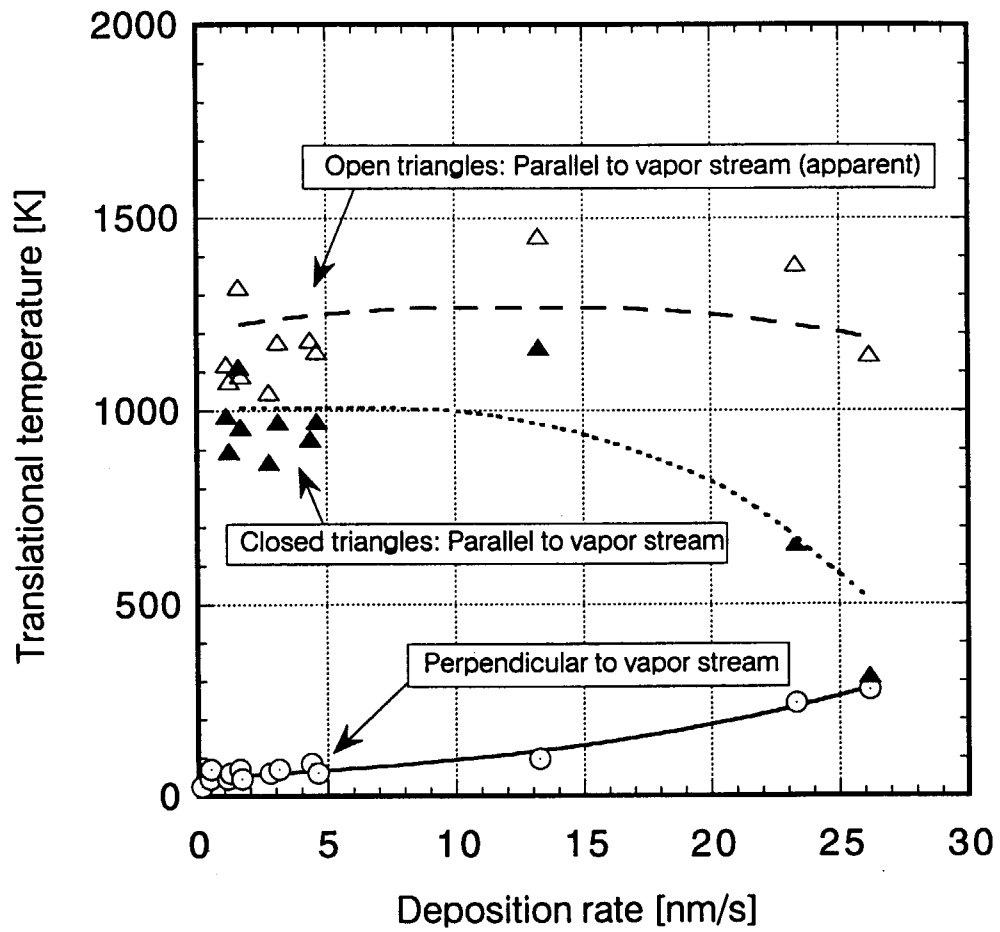


Fig.7 Translational temperature of parallel and perpendicular to atomic vapor stream as a function of deposition rate.

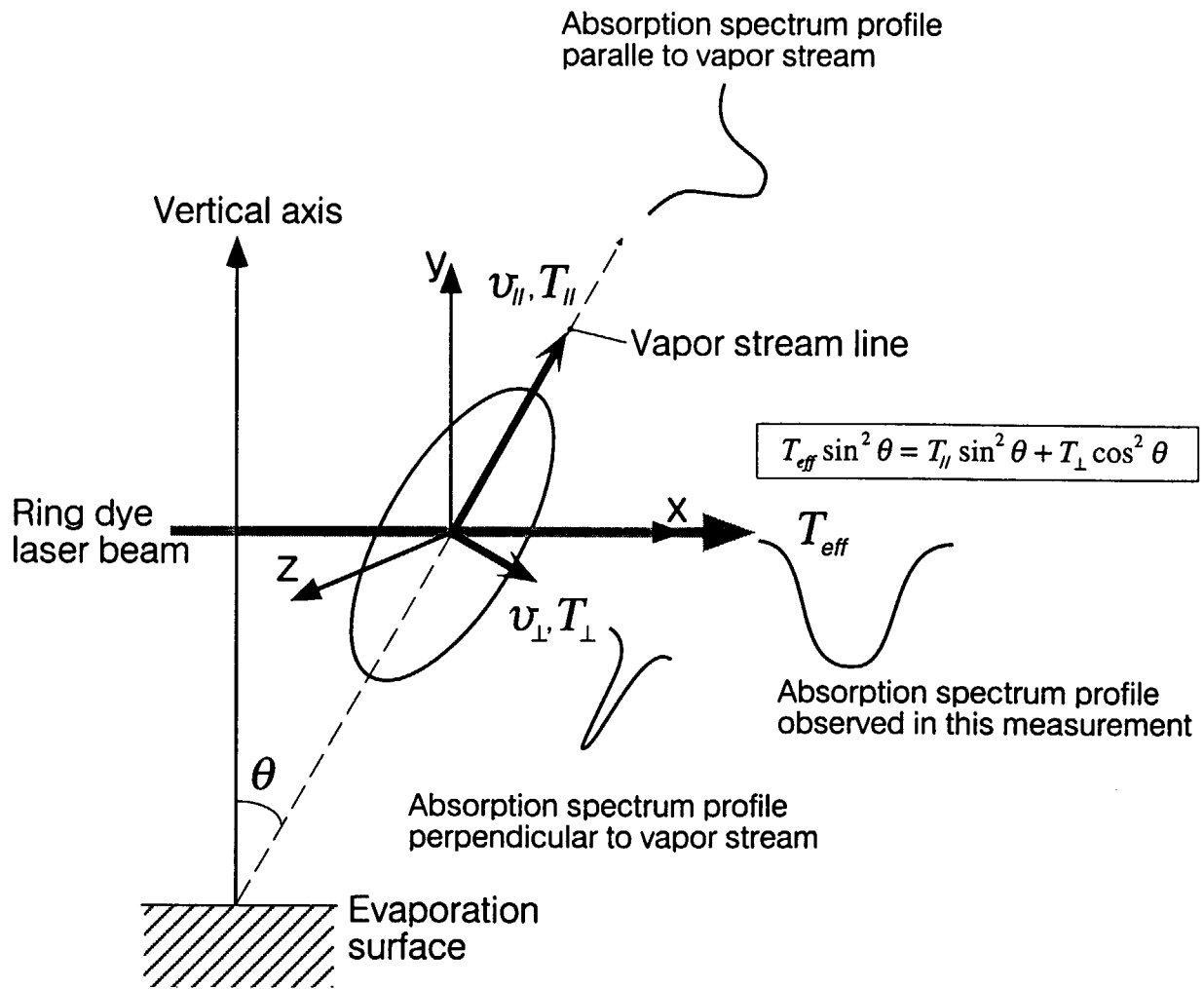


Fig.8 Conceptual drawing of translational temperature calculation.

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
上率, 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	
光束照度	ルーメン	lm	cd·sr
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²
放射線当量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg
	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 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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	b
バール	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

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、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 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)
	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	仕事率 1 PS (仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	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	

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

レーザー光吸収法による電子ビーム加熱生成ウラン蒸気諸特性の計測