

電子ビーム加熱蒸発で生成したネオジウム原子の  
準安定準位分布

Population Distribution of Metastable States of Neodymium Atoms Produced  
by Electron Beam Heating

柴田 猛順 小倉 浩一

Takemasa SHIBATA and Koichi OGURA

先端基礎研究センター

Advanced Science Research Center

March 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

電子ビーム加熱蒸発で生成したネオジウム原子の準安定準位分布

日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター

柴田 猛順、小倉 浩一<sup>+</sup>

(2008年12月22日受理)

電子ビーム加熱蒸発で生成したネオジウム原子ビームの準安定準位分布をレーザー誘起蛍光法で測定した。測定した準安定準位分布より求めた原子励起温度は、推定蒸発面温度(～2000K)より低く、蒸発量を増加させるとともに1500K程度まで低下することがわかった。電子ビーム加熱蒸発で同様に生成したガドリニウム原子の場合、原子励起温度が500Kまで低下するのと比較すると、ネオジウム原子はガドリニウム原子に比べて原子励起温度が高く緩和しにくい。ネオジウム原子もガドリニウム原子も蒸発面近傍での原子間衝突で超微細構造間の遷移を引き起こし緩和が進む。ガドリニウム原子は $4f^7 5d 6s^2$ で軌道半径が比較的大きい5d電子をもっているが、ネオジウム原子は $4f^4 6s^2$ で5d電子がない。このため、ネオジウム原子は原子間衝突で緩和しにくく原子励起温度がガドリニウムに比べ非常に高いと考えられる。

Population Distribution of Metastable States of Neodymium Atoms  
Produced by Electron Beam Heating

Takemasa SHIBATA and Koichi OGURA<sup>+</sup>

Advanced Science Research Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 22, 2008)

The metastable states' population of neodymium atoms produced by electron beam heating was measured with the laser induced fluorescence method. The atomic excitation temperature derived from the metastable state distribution was lower than the temperature of evaporation surface (about 2000K). With increasing deposition rate, the atomic excitation temperature decreased to about 1500K. This excitation temperature is about three times higher than that of gadolinium atoms produced by electron beam heating. Near the evaporation surface the collisional relaxation of neodymium and gadolinium atoms occurs through inelastic collisions between fine structures. The gadolinium and neodymium atoms have ten valence electrons of  $4f^75d6s^2$  and six valence electrons of  $4f^46s^2$ , respectively. The orbital radius of 5d electron is relatively larger than that of 4f electron. Low collisional relaxation of neodymium is considered to be due to small orbital radius of 4f electron and no existence of 5d electron.

Keywords: Electron Beam Heating, Atomic Beam, Metastable State, Neodymium,  
Population Distribution, Atomic Excitation Temperature

---

<sup>+</sup>Advanced Photon Research Unit, Quantum Beam Science Directorate

目次

1. はじめに	1
2. 測定方法	1
3. 実験結果	2
4. 考察	4
5. おわりに	4
参考文献	5

Contents

1. Introduction	1
2. Measurement Method	1
3. Experimental Results	2
4. Discussion	4
5. Conclusions	4
References	5

This is a blank page.

## 1. はじめに

電子ビーム加熱蒸発法<sup>1)</sup>は高融点金属を容易に蒸発させることができるので原子衝突研究<sup>2)</sup>や原子法レーザー同位体分離<sup>3)</sup>、薄膜生成など多くの分野で用いられている。多くの高融点金属は低いエネルギー状態に複数の準安定状態を持つので生成した原子ビーム中の原子は多くの準安定状態に分布する。原子ビームを用いる上で準安定状態にある原子の割合を知ることが重要である。

著者等は、これまでに電子ビーム加熱蒸発で生成したガドリニウムやウランの原子ビームの準安定準位密度分布を光吸収法<sup>4,5)</sup>、レーザー共鳴イオン化法<sup>6,7)</sup>、レーザー蛍光法<sup>8)</sup>を用いて測定した。ガドリニウム原子やウラン原子の準安定準位密度分布はボルツマン分布をしていること、密度分布から求められる原子励起温度は、電子ビーム蒸発面温度に比べて低いことを明らかにした。特に電子ビーム加熱蒸発ガドリニウム原子特性<sup>5,9)</sup>については詳細に調べ、原子励起温度が蒸発面温度より極めて低いこと、そして原子励起温度低下とともにガドリニウム原子速度増加も同時に起きており、蒸発面近傍での膨張冷却時に原子間衝突で原子の励起エネルギーが運動エネルギーに移行していることを示してきた。

ガドリニウムと同じくランタノイドであるネオジム原子の電子配置は $4f^46s^2$ で基底状態近傍には $^5I_4$ 、 $^5I_5$ 、 $^5I_6$ 、 $^5I_7$ 、 $^5I_8$ 、 $^5I_9$ の5つの準位がある<sup>10)</sup>。図1にネオジムの基底状態近傍のエネルギー準位を示す。ここでは、ネオジム原子ビームを電荷移行断面積測定などの原子衝突実験に用いるために、電子ビーム加熱生成ネオジム原子ビームの準安定準位分布を測定したところ、ガドリニウムの場合とは非常に異なる結果が得られたので報告する。

## 2. 測定方法

ガドリニウムの準安定準位分布の測定は、レーザー光吸収法とレーザー共鳴イオン化法で、ウランの準安定準位分布測定は、レーザー蛍光法で行った。レーザー吸収法では、吸収測定に用いる遷移の振動子強度データを必要とし、振動子強度データの誤差がそのまま準安定準位占有率分布測定結果の誤差となってしまう。また、原子密度が低いと吸収量が小さくなりすぎ測定できなくなる。レーザー共鳴イオン化では振動子強度などの分光データを必要せず、原子密度が低くても測定できる。レーザー共鳴イオン化法では複数の準安定準位から共通準位への励起用レーザーとイオン化用レーザーを用いる。レーザー蛍光法では励起用レーザーのみでよいのでここではレーザー蛍光法で測定した。

実験装置の概略図を図2に示す。本装置はレーザー同位体分離<sup>11,12,13)</sup>や電荷移行断面積測定<sup>2,14)</sup>の基礎実験に用いてきたもので多くの報告書に述べてあるので簡単に述べる。水冷銅のつぼ中の金属ネオジムを電子ビーム(ULVAC社製EGK-35)で加熱蒸発させてネオジム原子ビームを生成した。生成した原子ビームは14mm×80mmのスリットを通して間隔20mmの二枚の平行平板の回収電極の間に導いた。るつぼからの高さ683mmの位置に水晶振動子膜厚計を置き蒸着速度を測定した。電子ビーム加熱蒸発部生成プラズマが原子ビームとと

もに回収電極間に入射しないように除去電極を回収電極の下に設置し-200V の電圧を印加した。

エキシマーレーザー (Lambda-Physics 社製 LPX120i) 励起の色素レーザー (Lambda-Physics社製FL3002) 光を平行平板電極間でつぼからの高さが413mmの位置に照射した。レーザー照射位置と同じ高さで回収電極にあけた穴を通してレーザー誘起蛍光を光電子増倍管により測定した。蛍光測定のための回路の時定数はレーザーパルス及び励起準位の寿命に比べ十分長くして測定信号のピーク値が蛍光量に比例するようにした。表1に実験に用いた遷移<sup>10)</sup>と分光データ<sup>15)</sup>を示す。0cm<sup>-1</sup>、1128cm<sup>-1</sup>からは共通励起準位22010cm<sup>-1</sup>に色素レーザーで励起した。レーザー強度が十分強いと、吸収が飽和し下準位と励起準位の密度比は統計重率の比になる。いずれの準位から励起されても励起準位からの蛍光検出効率は同じなので、蛍光強度から0cm<sup>-1</sup>、1128cm<sup>-1</sup>の準位の密度比を求めることができる。同様に1128cm<sup>-1</sup>、2367cm<sup>-1</sup>から22737cm<sup>-1</sup>に、2367cm<sup>-1</sup>、3682cm<sup>-1</sup>から共通励起準位23997cm<sup>-1</sup>に励起しその蛍光強度を測定して2準位についてのそれぞれの原子密度比を求めることができる。これらの組み合わせによって5049cm<sup>-1</sup>を除く4準位の相対的な準安定準位原子密度を求める。レーザー誘起蛍光による測定は蒸着速度が比較的低い0.45nm/sの近辺でのみ測定した。

各準位の相対的原子密度の蒸着速度依存性は準安定準位にある原子をパルス色素レーザーで一波長二段階共鳴イオン化により生成されるイオン量を測定した。表2にイオン化に用いた遷移<sup>10)</sup>を示す。いずれも二光子の吸収でネオジムのイオン化ポテンシャル<sup>16)</sup>44562cm<sup>-1</sup>より高くなっている。イオン量の検出には、図2に示す回収電極の一方の電極を接地し他方にレーザー照射後に正のパルス電圧を印加し、接地した電極に原子ビームの流れ方向に沿って長い長方形の穴をあけファラデーカップを設けて生成イオン量を測定した。ファラデーカップの信号はボックスカー積分器型平均化回路に入力した。これらのイオン量は準安定準位を占有する原子数に比例している。こうして得られる準安定準位原子数の蒸着速度依存曲線を蛍光測定によって得られた準安定準位の比を用いて校正することによって低い蒸着速度から高い蒸着速度に至る準安定準位密度分布の蒸着速度依存性を得た。

### 3. 実験結果

レーザー誘起蛍光測定では励起用のレーザー光を十分強くして準安定準位と励起準位の原子密度比を飽和させることが重要である。図3は準安定準位1128cm<sup>-1</sup>にある原子を励起準位22010cm<sup>-1</sup>に励起して蛍光を測定したものである。レーザー強度が0.5mJ/cm<sup>2</sup>以上で準安定準位と励起準位間の遷移が飽和していることがわかる。同様に他の準安定準位についても実験に用いたレーザー強度で遷移が飽和していることを確認した。表1には振動子強度から推定したレーザーの飽和強度と実験時のレーザー強度も示す。実験時のレーザー強度が推定値より十分高いことがわかる。得られた蛍光の相対強度比から0cm<sup>-1</sup>、



1128 $\text{cm}^{-1}$ 、2367 $\text{cm}^{-1}$ 、3682 $\text{cm}^{-1}$ の相対的占有率を求めると、25 : 9.5 : 5.7 : 2.2 となった。これを各準位の統計重率で割ってボルツマンプロットしたものを図4に示す。ボルツマン分布を仮定して図のデータの傾きから温度を求め得ると原子励起温度は1860Kとなる。

0 $\text{cm}^{-1}$ 、1128 $\text{cm}^{-1}$ 、2367 $\text{cm}^{-1}$ および、3682 $\text{cm}^{-1}$ の各準位密度の蒸着速度依存性は、一波長二段階共鳴イオン化で生成したイオン量の変化により測定した。XYレコーダのX軸に水晶振動子膜厚計で測定した蒸着速度を、Y軸にイオン生成量に比例しているボックスカー出力を入力した。図5の(a)、(b)、(c)、(d)は、それぞれ、0 $\text{cm}^{-1}$ 、1128 $\text{cm}^{-1}$ 、2367 $\text{cm}^{-1}$ および、3682 $\text{cm}^{-1}$ の相対的な占有原子数の蒸着速度依存性である。0.45nm/sの蒸着速度のとき蛍光測定で求めた準安定準位占有率と図5のデータより導いた各準安定準位占有率の蒸着速度依存性を図6に示す。基底状態の占有量は蒸着速度に比例して増加するが、1128 $\text{cm}^{-1}$ の占有量は蒸着速度が早くなると増加する割合が減少している。また、2367 $\text{cm}^{-1}$ と3682 $\text{cm}^{-1}$ の準位では蒸着速度の増加に対し占有量が飽和し全体に占める占有率が低下していくことがわかる。なお、本実験の測定では各準位の準位密度の絶対値は得られない。著者等は本実験で用いたのおなじ電子ビーム、蒸発容器でネオジム原子を作りその速度を電子天秤で測定している。蒸着速度 $J$ と原子ビームの原子密度 $n$ 、速度 $v$ とは

$$J = m n v / \rho$$

の関係にある。ここで $\rho$ はネオジムの密度7.0 $\text{g}/\text{cm}^3$ である。蒸発面から683mmでの蒸着速度が3nm/sのとき、 $v = 880\text{m}/\text{s}$ であった<sup>17)</sup>。レーザー照射位置である蒸発面から415mmでの蒸着速度は8.1nm/sであり、ここでの原子密度は $2.7 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ となる。図6の縦軸のスケールは蒸着速度3nm/sのとき各準位の原子密度の和が $2.7 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ になるように決めた。

図4には蒸着速度0.45nm/sのときだけでなく図6のデータをもとに0.1、1.5、4.5nm/sのときのボルツマンプロットも示す。いずれの蒸着速度でもプロットはほぼ直線にのっている。この傾きから原子励起温度を求めることができ、0.1、1.5、4.0nm/sのとき、それぞれ、2000K、1730K、1470Kである。図7に原子励起温度の蒸着速度依存性も示す。図8には、蒸着速度から推定した蒸発面温度とともに、比較のため、ガドリニウム蒸発時の原子励起温度<sup>6,7)</sup>と蒸発面温度も示している。なお、ガドリニウムの励起温度測定時の蒸着速度は蒸発面から543mmのところで行った。図7では蒸着速度をネオジム測定時の蒸発面から683mmのときの蒸着速度にしている。ここで蒸発面温度はネオジムの飽和蒸気圧のデータ<sup>18,19)</sup>を用い、ネオジム蒸発面の直径7mmとして、蒸着速度から推定した。電子ビーム加熱で銅を蒸発させたとき、おなじ手法によって推定した蒸発面温度は測定値とほぼ一致する<sup>20,21)</sup>ことが確認されている。

#### 4. 考察

ネオジムの原子励起温度は蒸発速度が小さいところでは蒸発面温度とほぼ同じで、蒸発量の増加に伴い低下し 1500K まで低下している。一方、ガドリニウムの場合は、原子励起温度は 500K まで低下している。ネオジムの蒸発面温度はガドリニウムに比べ約 300K も低いにもかかわらず原子励起温度はガドリニウムよりはるかに高い。電子ビーム加熱蒸発生成ガドリニウム原子ビーム特性研究で原子励起温度の低下は蒸発面近傍での膨張冷却時で並進運動エネルギーが低下し、このとき原子間衝突で原子の励起エネルギー緩和が起こるためであることを明らかにしてきた。原子間衝突による励起エネルギーから運動エネルギーへの移行は原子の微細構造間の遷移によって起こる。ネオジム原子の電子配置は  $4f^46s^2$  で  $^5I_{4\sim9}$  の微細構造間遷移は  $4f^4$  のスピンと軌道角運動量の向きの変化が必要である。図 8 にネオジムの波動関数を示すが、 $4f^4$  電子は  $5s$ 、 $6s$ 、 $5p$  電子の内側にあり、 $4f^4$  の電子配置換えは非常に起こりにくいと考えられる。これに対しガドリニウムの電子配置  $4f^75d6s^2$  で  $^9D_{2\sim6}$  の微細構造間遷移は  $4f^75d$  のスピンと軌道角運動量の向きの変化である。図 9 のようにガドリニウムは  $6s$  電子の内側ではあるが、 $4f$  電子に比べその軌道半径が大きい  $5d$  電子がある。このため、原子間衝突での  $4f^75d$  のスピンと軌道の向きの変化が容易でエネルギー移動がネオジムに比べ起きやすく、原子励起温度も低下すると考えられる。

#### 5. おわりに

電子ビーム加熱蒸発で生成したネオジム原子ビームの準安定準位分布をレーザー誘起蛍光法で用いて測定した。測定した準安定準位分布より求めた原子励起温度は、推定蒸発面温度 ( $\sim 2000\text{K}$ ) より低く、蒸発量を増加させるとともに 1500K 程度まで低下することがわかった。電子ビーム加熱蒸発で同様に生成したガドリニウム原子は原子励起温度が 500K まで低下するのと比較すると、ネオジム原子はガドリニウム原子に比べて原子励起温度が高く緩和しにくい。ネオジム原子もガドリニウム原子も蒸発面近傍での原子間衝突で超微細構造間の遷移を引き起こし緩和が進む。ガドリニウム原子は  $4f^75d6s^2$  で軌道半径が比較的大きい  $5d$  電子をもっているが、ネオジム原子は  $4f^46s^2$  で  $5d$  電子がない。このため、ネオジム原子は原子間衝突で緩和しにくく原子励起温度がガドリニウムに比べ非常に高いと考えられる。

参考文献

- 1) S. Schiller, U. Heising, and S. Panzer: "Electron Beam Technology" John Wiley and Sons, New York (1982).
- 2) K. Ogura and T. Shibata: 質量分析 (J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.) 41, 37 (1993).
- 3) P. T. Greenland: Contemporary Phys. 31, 495 (1990).
- 4) 西村昭彦、有澤孝、大場弘則、小倉浩一、柴田猛順: 真空, 34, 639 (1991).
- 5) A. Nishimura, T. Arisawa, H. Ohba, and T. Shibata: J. Vac. Sci. Technol. A 11, 1516 (1993).
- 6) 小倉浩一、柴田猛順: "レーザー共鳴イオン化法によるガドリニウム原子ビームの準安定準位占有率分布の測定" JAERI-M 93-098 (1993).
- 7) K. Ogura and T. Shibata: J. Phys. Soc. Jpn. 63, 834 (1994).
- 8) 大場弘則、西村昭彦、小倉浩一、柴田猛順: "電子ビーム加熱で生成したウラン原子の準安定準位分布" JAERI-Research 2000-033 (2000).
- 9) 西村昭彦、有澤孝、小倉浩一、大場弘則、柴田猛順: 真空 35, 305 (1992)
- 10) W. C. Martin, R. Zalubas and L. Hagan: "Atomic Energy Levels-The Rare-Earth Elements" U. S. Department of Commerce National Technical information Service PB-282 067 (1978), NIST Atomic Spectra Database (version 3.1.5): <http://physics.nist.gov/asd3>
- 11) 小倉浩一、有澤孝、柴田猛順: "レーザー共鳴イオン化で生成したGdプラズマからのイオン回収" JAERI-M 91-222 (1992).
- 12) K. Ogura, T. Arisawa, and T. Shibata: Jpn. J. Appl. Phys., 31, 1485 (1992).
- 13) T. Shibata and K. Ogura: J. Nucl. Sci. Technol., 33, 834 (1996).
- 14) K. Tamura, H. Adachi, and T. Shibata: Jpn. J. Appl. Phys., 38, 2973 (1999)
- 15) N. P. Penkin, V. N. Gorshkov, and V. A. Komarovskii: J. Prikladnoi Spekt., 16, 533 (1984).
- 16) E. F. Worden, R. W. Solarz, J. A. Paisner, and J. G. Conway: J. Opt. Soc. Am., 68, 52 (1978).
- 17) 岡崎哲治、田村浩司、足立肇、大場弘則、雨川和博、柴田猛順: "電子ビーム加熱で生成した希土類金属の原子ビームの速度" JAERI-Tech 98-020 (1998).
- 18) 日本学術振興会薄膜第131委員会編: "薄膜ハンドブック" オーム社, 東京, p. 909-910 (1993).
- 19) C. E. Habermann and A. D. Daane: J. Chem. Phys., 41, 2818 (1964).
- 20) 大場弘則、小倉浩一、柴田猛順: 真空 36, 203 (1993).
- 21) H. Ohba and T. Shibata: Jpn. J. Appl. Phys., 34, 4253 (1995).

表 1 測定に用いた遷移の分光データと飽和レーザー強度

下準位 <sup>(1)</sup> ( $\text{cm}^{-1}$ )	励起準位 <sup>(1)</sup> ( $\text{cm}^{-1}$ )	寿命 (ns) <sup>(3)</sup>	振動子強度 <sup>(2)</sup>	飽和強度 ( $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ )	レーザー強度 ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )
0.0 (J=4)	22010.3 (J=4)	98	0.024	3.21	0.46
1128.1 (J=4)	同上		0.01	8.05	1.67
1128.1 (J=5)	22736.7 (J=5)	20	0.024	3.16	2.1
2366.7 (J=6)	同上				0.69
2366.7 (J=6)	23996.5 (J=6)	37	0.18	0.42	4.9
3681.7 (J=7)	同上		0.067	1.19	0.59

(1) 参考文献(10)

(2) 参考文献(14)

(3) 参考文献(14)

表 2 一波長二段階共鳴イオン化に用いた遷移

下準位 <sup>(1)</sup> ( $\text{cm}^{-1}$ )	励起準位 <sup>(1)</sup> ( $\text{cm}^{-1}$ )	イオン化準位 ( $\text{cm}^{-1}$ )
0.0 (J=4)	→ 22530.4 (J=5)	→ 45060.7
1128.1 (J=5)	→ 23755.8 (J=4)	→ 46383.4
2366.7 (J=6)	→ 24984.2 (J=6)	→ 47601.7
3681.7 (J=7)	→ 25478.1 (J=6)	→ 47274.6

(1) 参考文献(10)

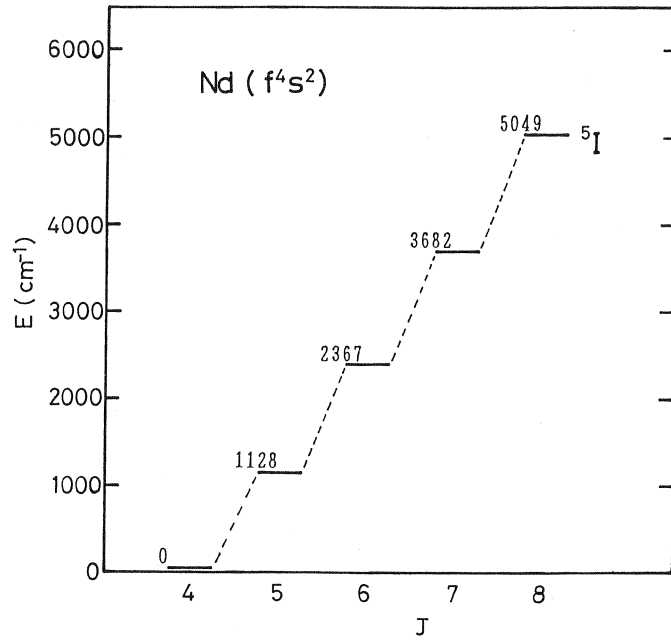

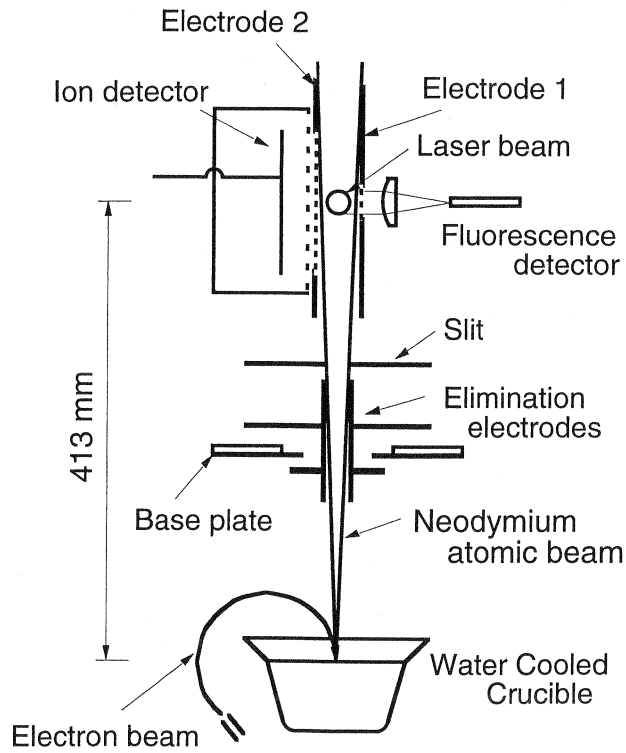


図1 ネオジムの基底状態近傍のエネルギー準位

 Quartz Crystal Sencer



Experimental apparatus

図2 実験装置概略図

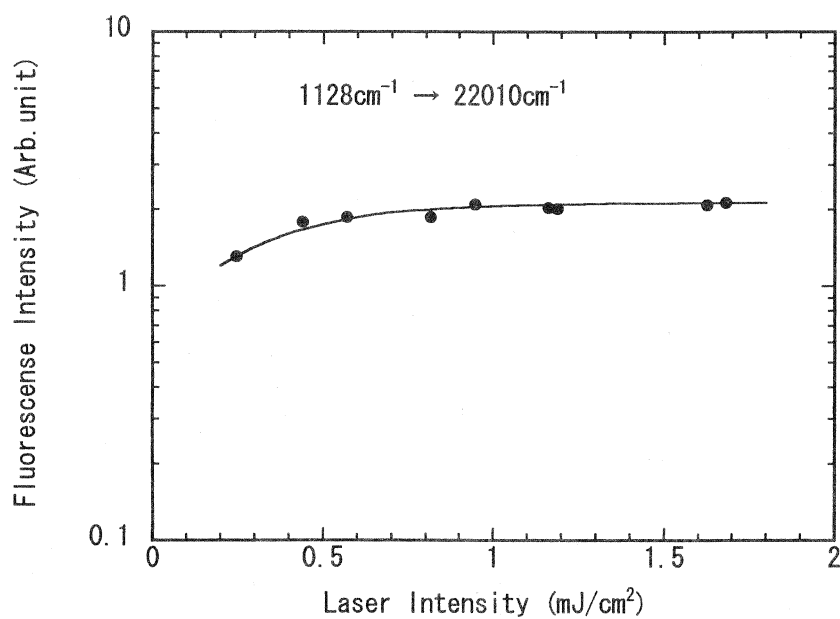


図3 レーザー誘起蛍光の飽和の一例

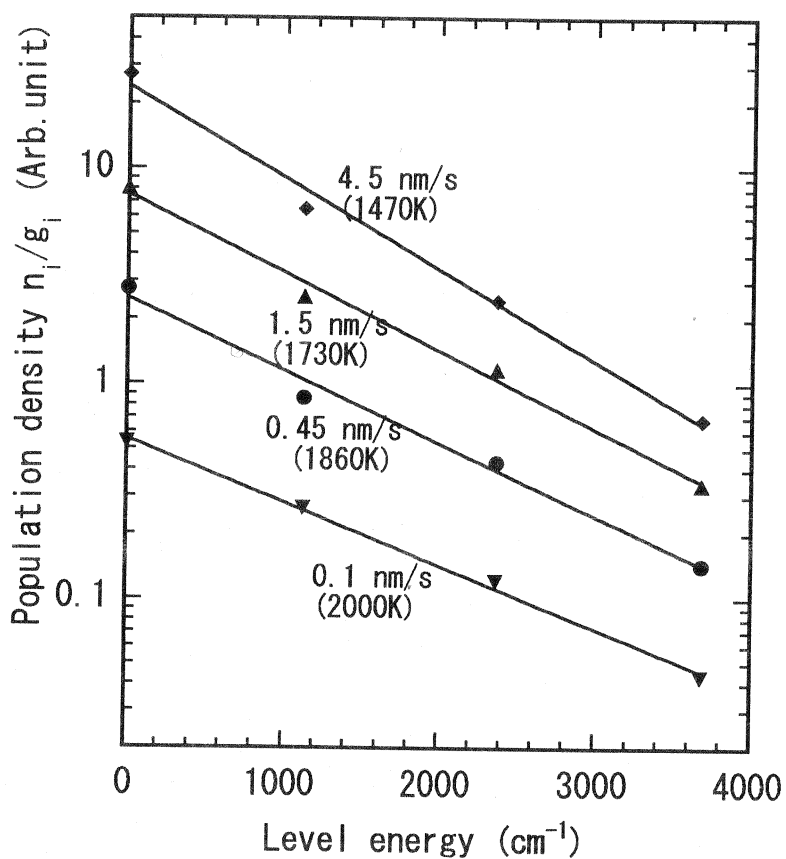


図4 ネオジム原子の準安定準位分布のボルツマンプロット  
(蒸着速度は蒸発面より 683mm での値)

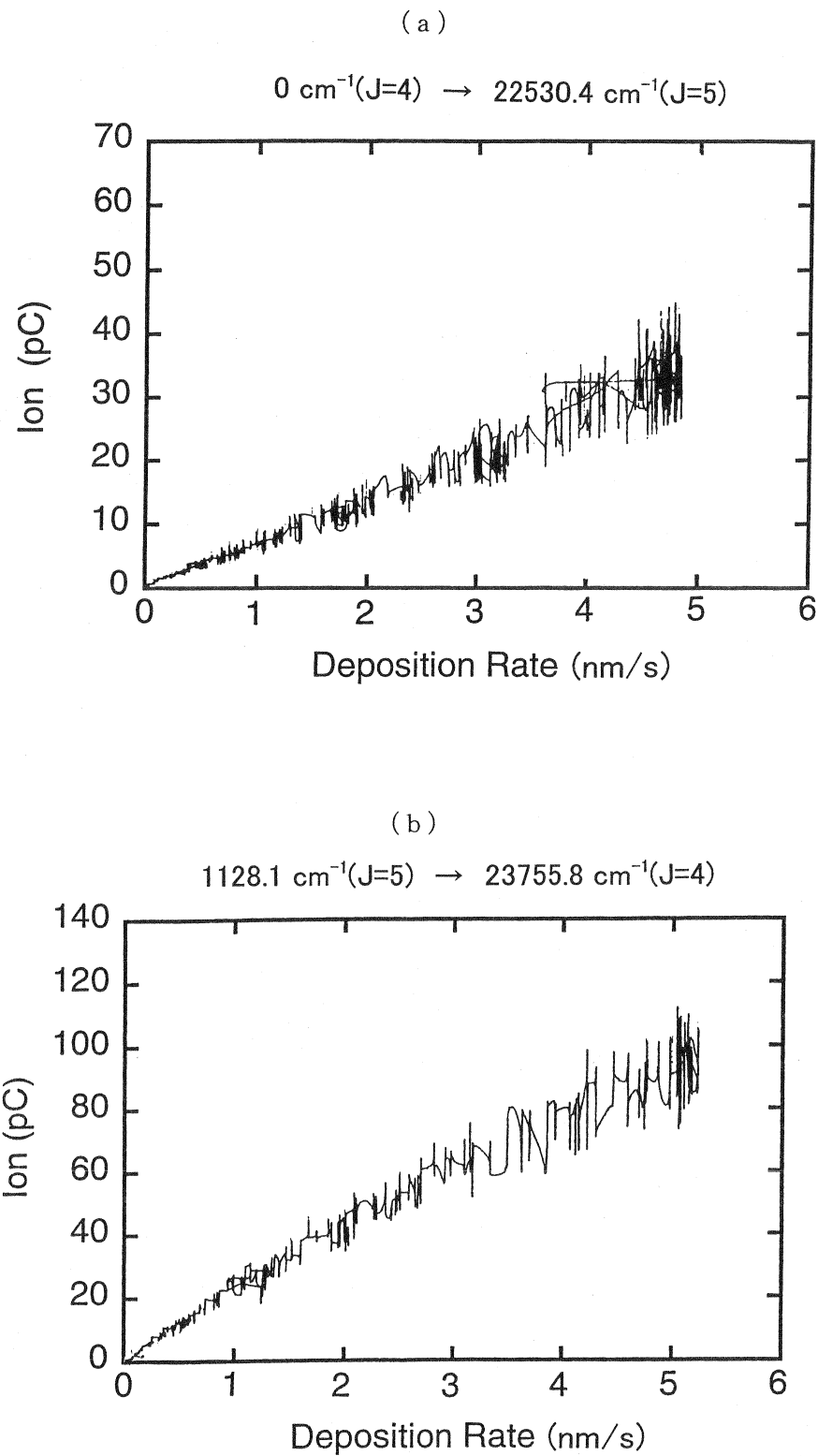


図5 一波長二段階共鳴イオン化生成イオン量の蒸着速度依存性 (1/2)  
 (蒸着速度は蒸発面より 683mm での測定値)

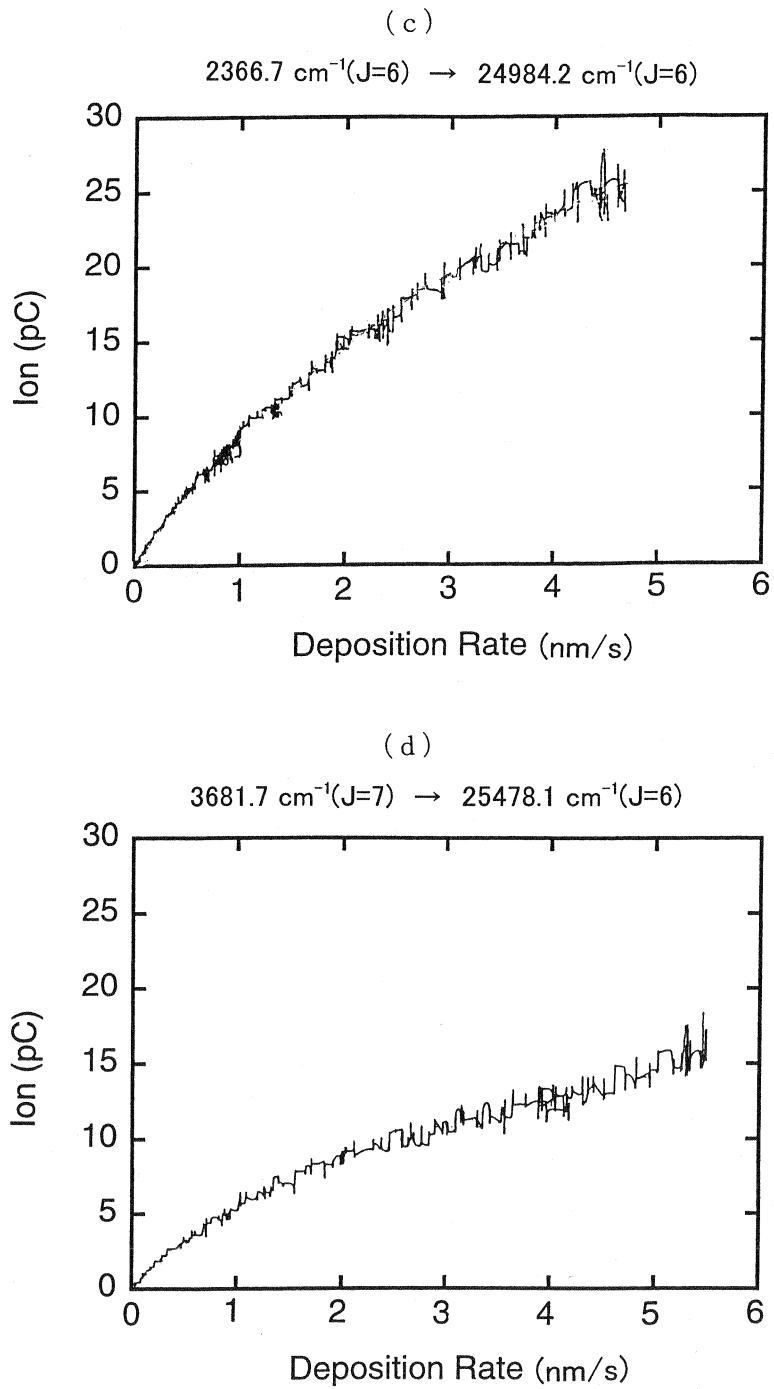


図5 一波長二段階共鳴イオン化生成イオン量の蒸着速度依存性 (2/2)  
 (蒸着速度は蒸発面より 683mm での測定値)



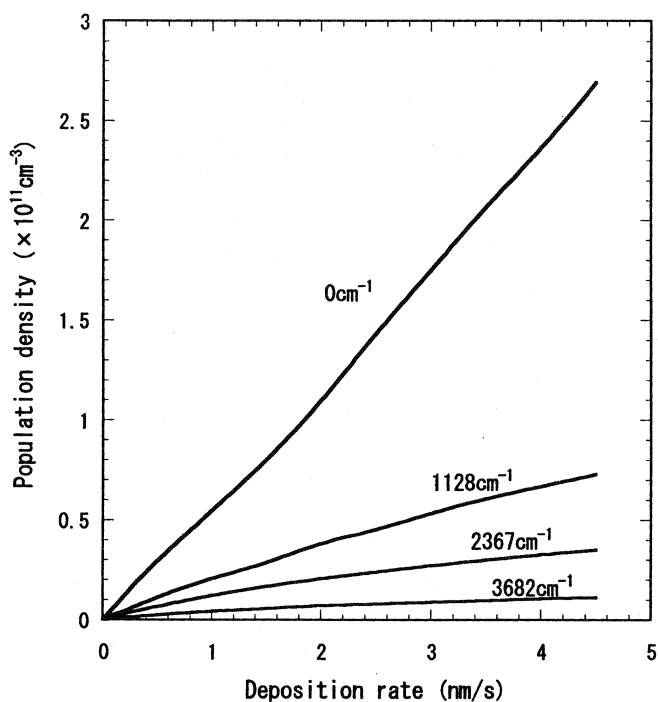


図6 各準安定準位の蒸着速度依存性  
(蒸着速度は蒸発面より 683mm での値)

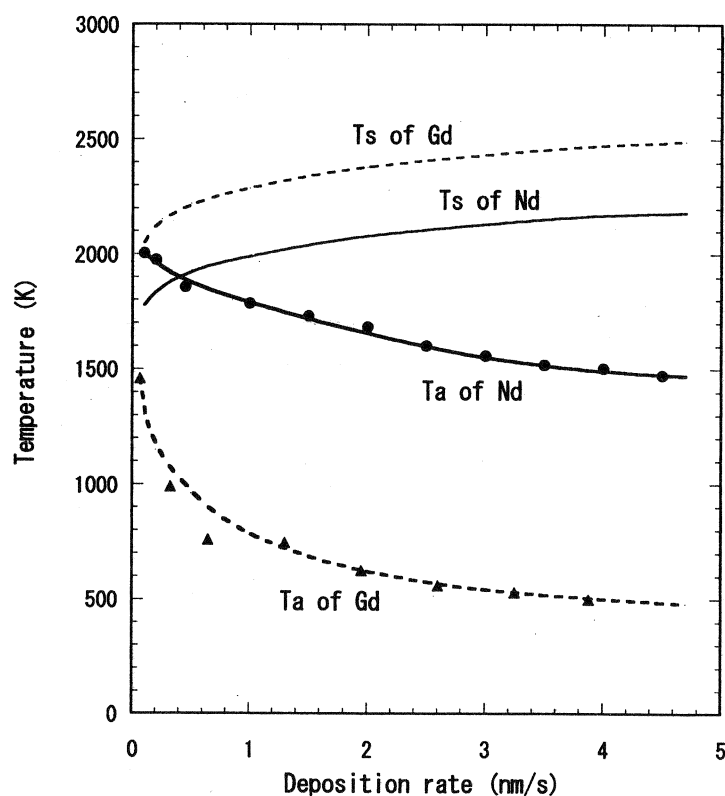


図7 原子励起温度(Ta)の蒸着速度依存性  
(蒸着速度は蒸発面より 683mm での測定値、Tsは推定蒸発面温度)

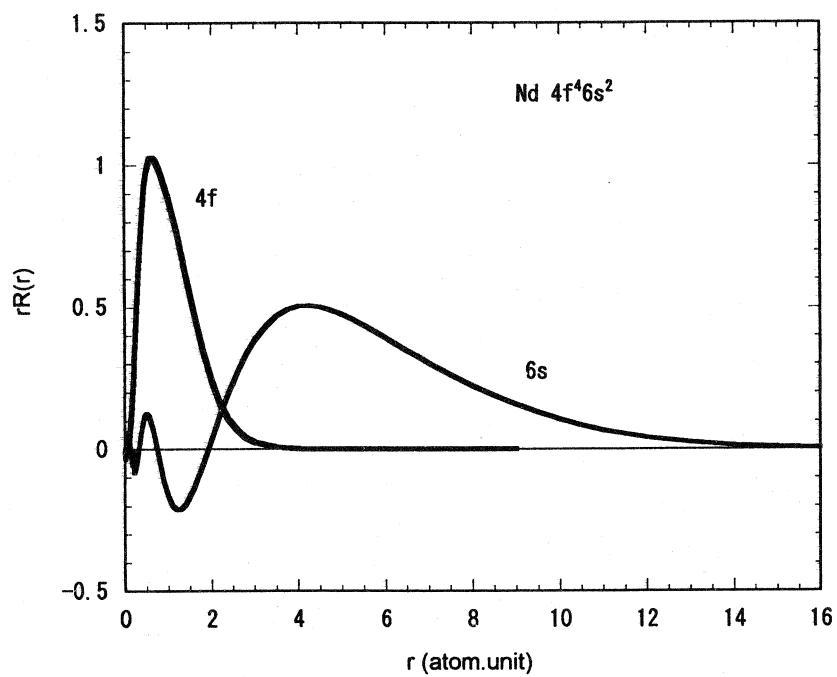


図8 ネオジウム原子の波動関数

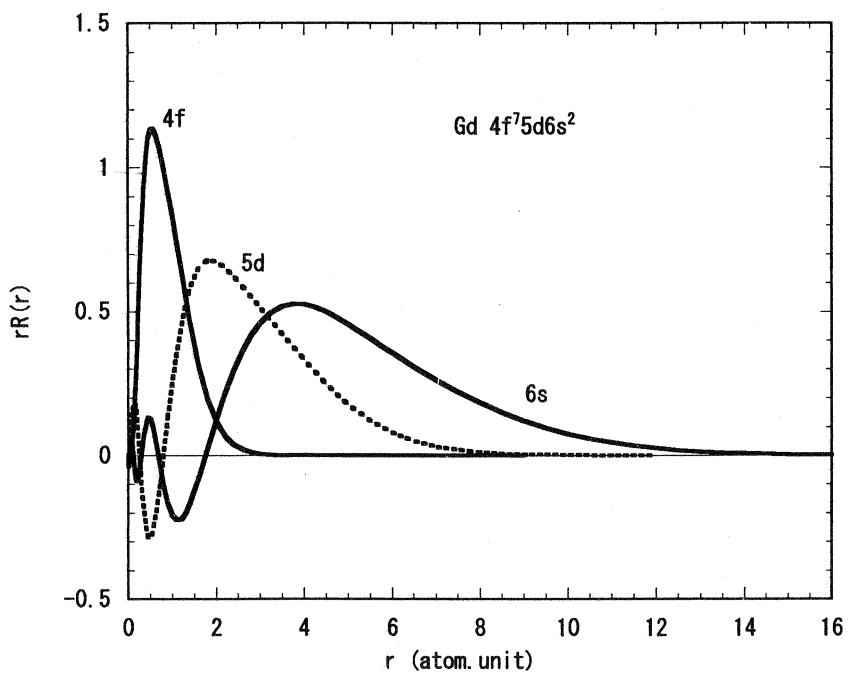


図9 ガドリニウム原子の波動関数

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	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
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	s <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m kg s <sup>-2</sup>	m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C	s A	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	AV	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C	K	K
光強度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat	s <sup>-1</sup> mol	s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	SI基本単位による表し方	
粘り	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>	
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>	
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>	
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>	
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>	
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>	
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>	
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A	
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A	
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A	
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>	
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>	
照射線量 (X線及びγ線)	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol	

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	zepto	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	yocto	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-15</sup> cm <sup>2</sup> )/2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	fm	1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (15°Cカロリ), 4.1868 J (IT)カロリ, 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

