

JAERI-Research
99-044



JP9950427



レーザー誘起蛍光法による
回収ウランの同位体シフト測定

1999年7月

大場正規・赤岡克昭・宮部昌文・若井田育夫

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

レーザー誘起蛍光法による回収ウランの同位体シフト測定

日本原子力研究所東海研究所環境科学研究部
大場 正規・赤岡 克昭⁺・宮部 昌文^{*}・若井田育夫

(1999年6月23日受理)

^{236}U を含む回収ウランの同位体シフトをレーザー誘起蛍光法により測定した。8本の2eV付近の偶準位及び3本の4eV付近の奇準位について測定し、 ^{238}U 、 ^{236}U 、 ^{235}U の同位体シフトが得られた。4eV準位の測定ではドップラーフリー2光子吸収法を用い、 ^{235}U の超微細構造を同時に解析することができた。また、3本の遷移について ^{234}U も観測された。

Measurement of Isotope Shift of Recycled Uranium by Laser Induced Fluorescence Spectroscopy

Masaki OBA, Katsuaki AKAOKA⁺, Masabumi MIYABE[※], Ikuo WAKAIDA

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

(Received June 23, 1999)

Isotope shift of the recycled uranium atom include the ^{236}U was measured by laser induced fluorescence method. 8 of the 2 eV even levels and 3 of the 4 eV odd levels were measured and then isotope shift between the ^{238}U , ^{236}U and ^{235}U was obtained. As for the measurement of the 4 eV levels, the Doppler free two photon absorption method was used, and the hyperfine structure of the ^{235}U was analyzed simultaneously. The isotope shift of ^{234}U was also observed in the three transition.

keywords: Laser Isotope Separation, Laser Spectroscopy, Ring Dye Laser, Uranium Atom, Recycled Uranium, Two Photon Absorption, Doppler Free, Isotope Shift, Hyperfine Structure, Laser Induced Fluorescence

⁺ Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment

[※] On loan to the Science and Technology Agency

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置	1
3. 測定結果	4
4. おわりに	6
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	1
3. Results	4
4. Summary	6
Reference	8

1. はじめに

原子炉核燃料であるウランには天然には ^{235}U 、 ^{238}U が存在しているが、廃棄物から再処理により回収されたウランには天然に存在しない ^{236}U などの同位体が含まれている。これまでに、天然に存在する ^{233}U 、 ^{235}U 、 ^{234}U についてはその同位体シフト、 ^{235}U の超微細構造などの分光学的データが報告されている^{1)~14)}。赤岡らは4eVの高励起準位の超微細構造を測定したが、これらの同位体シフトは得られていない。また、 ^{236}U を含むウラン同位体についての分光学的データはJ.M. Gagneらにより6本の遷移について得られているが¹⁵⁾、ほとんど得られておらず、これらの分光データを収集することは、ウラン原子核の分光学的研究や、原子法レーザーウラン濃縮による再濃縮などにおいて、有用な情報である。そこで今回、原子ビームとリングダイレーザーを用いたレーザー誘起蛍光法により回収ウランの2eV偶準位、および4eV奇準位の高励起準位について、各同位体の同位体シフトを測定し、また、高励起準位における ^{235}U の超微細構造も同時に解析した。

2. 実験装置

実験装置の概略図をFig.1に示す。Fig.1(a)は2eV準位の測定装置、Fig.1(b)は4eV準位の測定装置である。原子ビーム発生部は、2eV、4eV準位の測定装置で共通である。真空容器中で試料を抵抗加熱により加熱蒸発させ、コリメータによりビーム状の蒸気を発生する。高温の液体金属ウラン試料は浸食作用が大きいいため、試料を入れるるつぼには比較的高温で液体金属ウランに耐えうる単結晶タングステンるつぼを用いることで、約1800℃まで昇温可能になった。このるつぼはさらに液体金属ウランに比較的浸食されにくいイットリアるつぼに入れられ、さらにこのイットリアるつぼはこれが割れたときの保持用として焼結タングステンるつぼに入れられ、ウラン試料がるつぼの外に漏れないように3重構造になっている。試料を加熱するヒーターはタングステンのメッシュヒーターを用いて試料を1800℃以上に昇温することができる。試験では1700℃で行い、PID制御により±1℃以下の精度で温度制御している。発生した蒸気は、穴径2mmのコリメータによりビーム状に蒸発することにより、スペクトルのドップラー広がりを押さえている。用いた試料は、 ^{238}U ：約30%、 ^{236}U ：約15%、 ^{235}U ：約55%である。また、 ^{234}U も約1%程度含まれている。

2eV準位の測定では1本のリングダイレーザーのみを用いて測定する。4eV準位の測定法としては、 ^{235}U の超微細構造を含んだ全同位体のスペクトルを1度に測定できる2光子吸収法を用いる^{16)~20)}。また、この測定法では2本のレーザーを互いに対向させて原子ビームに入射することにより、スペクトルのドップラー広がりを押さえることもでき、高分解能測定が可能になる。他の測定法としては、1本のレーザー波長を1段目の各同位体スペクトルに同調し、2本目のレーザー波長を掃引して、各同位体のスペクトル位置のズレを観測する測定法が考えられるが、このような測定法で

は各同位体について一つずつ測定しなければならず、その間、レーザー波長も安定でなければならないため非常に面倒な作業になる。

レーザー装置はアルゴンレーザーで励起されるリングダイレーザーを用いる。出力は数100mWである。2eV準位測定では1本のレーザー光を用いるが、4eV準位の測定では1段目近共鳴励起用、2段目スペクトル観測用の2本のレーザー光を用いる。2eV準位の測定ではレーザー光は、原子ビームに1度だけ垂直に入射する。4eV準位の測定では、レーザー装置から出た2本のレーザー光は偏光ビーム結合器で結合されるが、ドップラーフリーで測定するために入射方向を互いに対向させる。2光子吸収法は非線形効果であるため、ビーム強度を高くする必要がある。レンズにより一旦レーザービームを拡大し、さらにレンズにより真空容器中の原子ビーム上で焦点を結ぶように集光する。焦点でのビーム径は約0.1mmで、ビーム強度は数kW/cm²になる。原子ビームを通過したレーザービームを、凹面鏡により再び折り返し、再び原子ビーム上に集光する。1パス目のレーザービームと折り返されたレーザービームは原子ビーム上で僅かに上下に離れたところで焦点を結ぶ。このようにすることで反応体積が2倍になり、信号強度も2倍になる。1段目の近共鳴用レーザー光の波長をフリンジ間隔 (free spectral range: FSR) 750MHzの温度安定化したスペクトラムアナライザーによりモニターし、波長ドリフトなどがなく、波長が安定していることを監視する。また、2段目励起用レーザー光波長は、FSR150MHzのスペクトラムアナライザーにより波長掃引幅をモニターする。

蛍光検出部は2eV、4eV準位の測定で共通である。レーザー光と反応して励起された原子は、脱励起により低いエネルギー準位に遷移するとともに蛍光を放出する。この蛍光を蛍光集光レンズにより光ファイバーに集光する。集光効率は全方位に放出される蛍光に対して約3%である。光ファイバーを通った蛍光を分光器により蛍光以外の迷光と分離し、電子冷却された光電子増倍管により検出し、電気パルス信号に変換される。この電気パルスをフォトンカウンターにより計数する。レーザー光が真空容器内で散乱され、検出器に入ってくるのを防ぐために光反応部を黒色の遮光板で囲んでいる。さらに、ルツボを1700℃の高温に加熱するため、熱輻射による迷光が非常に強く波長分布もかなり広いため、雑音の原因になる。そのため、原子ビームが噴出するコリメータの上部に光を吸収する黒色の吸収板を装着した。このような対策を施しても完全に除ききれない迷光雑音もあるため、放出される複数の波長を含んだ蛍光から、レーザー光波長と異なる蛍光を分光器により選別することでレーザー光の散乱迷光による雑音や、熱輻射の迷光雑音を押さえることが出来る。

Fig.2にエネルギー準位図を用いた2光子吸収の測定原理を示す。1段目近共鳴励起用レーザー光波長は、1段目の仲介準位 (中間状態) のどのスペクトルにも共鳴しない近共鳴であれば、任意の波長に調整できるが、今回の測定では、スペクトルを容易に確認出来る²³⁸Uと²³⁶Uスペクトルのほぼ中間に固定した。2本目の観測用レーザー光の波長を掃引して1本目のレーザー光の光子エネルギー $h\nu_1$ と2本目のレーザ

一光の光子エネルギー $h\nu_2$ の和 $h\nu_1+h\nu_2$ が基底準位（始状態）と2段目の励起準位（終状態）間のエネルギー ΔE_{gu} に共鳴したとき、原子は始状態から終状態に直接励起される。また、2本のレーザービームを対向入射することで、原子ビームのレーザービーム方向速度成分のドップラー効果によるスペクトルの広がりを押さえることが出来る。1段目の近共鳴用レーザービームの入射方向に対向して原子が速度 v で飛んでくるとすると、原子から見たレーザー光波長は1段目近共鳴用、2段目励起用レーザー光に対してそれぞれ

$$\nu_1' = \frac{\nu_1(c+v)}{c} \quad (1\text{段目励起用レーザー光})$$

$$\nu_2' = \frac{\nu_2(c-v)}{c} \quad (2\text{段目励起用レーザー光})$$

となる。原子が励起されるためには、

$$\Delta E_{gu} = h\nu_1' + h\nu_2' = h\nu_1 + h\nu_2 + \frac{h(\nu_1 - \nu_2)v}{c}$$

を満たさなければならず、 ν_1 と ν_2 が等しければドップラー効果は相殺される。2本のレーザー光波長が異なる場合には、ドップラー効果は完全には相殺されないが、2波長の差が小さければドップラー効果をかなり小さくできる。

2光子吸収遷移強度は ω_1 が1段目に近共鳴の場合、スペクトル強度 W は

$$W \propto \left| \sum_n \left\{ \frac{\langle u | e_2 \cdot \mu_{un} | n \rangle \langle n | e_1 \cdot \mu_{ng} | g \rangle}{\Delta E - h\nu_1} + \frac{\langle u | e_1 \cdot \mu_{un} | n \rangle \langle n | e_2 \cdot \mu_{ng} | g \rangle}{\Delta E - h\nu_2} \right\} \right|^2 \quad (1)$$

で与えられる²¹⁾。ここで $|u\rangle$ は2光子吸収遷移の終状態、 $|n\rangle$ 、 $\langle n|$ は2光子吸収を仲介する中間状態、 $|g\rangle$ は励起前の始状態（基底準位または準安定準位）、 $\Delta E = E_n - E_g$ である。 Σ は近共鳴の中間状態 n についての和をとる。また、 μ_{ij} は原子の i 、 j 状態間の電気双極子ベクトル、 e_1 、 e_2 はそれぞれ1段目近共鳴用、2段目励起用レーザー光電場ベクトルを表す。ある特定の中間状態を近共鳴として2段目に励起する場合には、 n の和はその中間状態のみが大きく関与し、他の準位の関与は無視できる。また、和の第2項は1段目の共鳴周波数からの離調周波数が第1項のものよりも大きい場合、各項の分母を比較すると $\Delta E - h\nu_2 \gg \Delta E - h\nu_1$ であり、第2項は無視することが出来る。²³⁵Uは超微細構造を有しているため、始状態-中間状態間の各超微細構造スペクトルからの離調周波数を考慮する必要があり、式(1)に対応する式として次のように与えられる。

$$W_{gJF \rightarrow uJ''F''} \propto \sum_{n, F'} \left\{ \frac{\langle uJ''F'' | e_2 \cdot \mu_{uF'', nF'} | nJ'F' \rangle \langle nJ'F' | e_1 \cdot \mu_{nF', gF} | gJF \rangle}{\Delta E_{gJF \rightarrow nJ'F'} - h\nu_1} + \frac{\langle uJ''F'' | e_1 \cdot \mu_{uF'', nF'} | nJ'F' \rangle \langle nJ'F' | e_2 \cdot \mu_{nF', gF} | gJF \rangle}{\Delta E_{gJF \rightarrow nJ'F'} - h\nu_2} \right\}^2 \quad (2)$$

ここで、各<>内は超微細構造間の遷移確率を表し、

$$\langle nJF | e \cdot \mu | n' J' F' \rangle \propto (2F+1)(2F'+1) \left\{ \begin{matrix} J & F & I \\ F' & J' & 1 \end{matrix} \right\}^2 \quad (3)$$

で表され、 $\left\{ \begin{matrix} J & F & I \\ F' & J' & 1 \end{matrix} \right\}$ は6Jシンボルである。(1)式と同様に(2)式の第2項は無視することができる。また、和の部分では1段目近共鳴の中間状態のみを考慮する。

(1)式と異なるのは中間状態の超微細構造のF値について和を取るところである。測定されたスペクトルの強度とこのスペクトル強度計算を比較して、対応するスペクトルの遷移を特定することができる。また、超微細構造のエネルギー準位はCasimirの式により次式で表される²²⁾。

$$E_F = E_0 + \frac{1}{2}CA_J + \frac{3C(C+1) - 4I(I+1)(J+1)}{8I(2I-1)J(2J-1)}B_J \quad (4)$$

$$C = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1) \quad (5)$$

ここで A_J 、 B_J はそれぞれ超微細構造定数A係数、B係数、 E_0 は核スピンの0で超微細構造を持たないと仮定したときのエネルギー準位である。超微細構造の各スペクトル位置からA係数、B係数を求め、スペクトル重心位置、すなわち E_0 の位置を決定する。これにより²³⁵Uの同位体シフトを求めることができる。

3. 測定結果

Fig.3に1段目の測定例を示す。測定した遷移は0-16900 cm^{-1} である。²³⁵Uの超微細構造定数は赤岡らの結果より、A係数は-170.1MHz、B係数は2643MHzである¹⁴⁾。²³⁶U及び²³⁵U、²³⁴Uの同位体シフトは²³³Uを基準にしてそれぞれ5120MHz、8388MHz、10034MHzである。今回の測定で得られた2eV準位の各同位体シフトの結果をTable.1に示す。0-16900 cm^{-1} 、0-17070 cm^{-1} では、²³⁴Uも観測された。表では、超微細構造を持つ²³⁵Uを基準とするよりも、²³³Uを基準として表している。

Fig.4に測定した2光子吸収スペクトルの例を示す。この例では 16900cm^{-1} を近共鳴中間状態として、 $0\text{--}33907\text{cm}^{-1}$ を測定したものである。最も左に現れているピークは ^{238}U であり、2番目に現れているピークは ^{236}U である。測定では1段目の ^{238}U と ^{236}U のスペクトルピークのほぼ中間に固定しているため、この2本の2光子吸収スペクトルピーク比は丁度同位体比に等しくなる。この試験では ^{238}U と ^{236}U の組成比は約2:1であるから、これらのスペクトルピーク比も約2:1となっており、観測されたスペクトル強度比から ^{238}U と ^{236}U のピークを同定することが出来る。さらにその右側に広範囲に広がったスペクトル群は ^{235}U の超微細構造スペクトルである。Fig.5にスペクトルの波長幅を示す。スペクトルの半値幅は約25MHzであるが、励起寿命217nsから求められる自然幅は1MHz以下であり、ドップラーフリーの測定としては大きすぎる値である。この原因としてはリングレーザーの波長の揺らぎが考えられる。スペクトルアナライザーにより測定した波長の揺らぎは約10MHzであり、1段目のレーザーと2段目のレーザーの波長の揺らぎを合わせると約20MHz程度の揺らぎがあると思われる。レーザーの波長揺らぎの原因としては光学台の振動、色素ジェットの揺らぎ、色素の劣化、周囲の空気の揺らぎ、電気的な雑音、など様々な原因が考えられる。これらの原因を取り除けばレーザー波長も安定し、さらにスペクトル幅の狭い高分解能測定が行えると思われる。 ^{238}U 、 ^{236}U は超微細構造を持たないため、現れるスペクトルはそれぞれ1本のみであり、これらの同位体シフトを求めるのは容易である。この測定例では ^{238}U と ^{236}U の同位体シフトは10202MHzと容易に得られる。また、 ^{234}U の同位体シフトは、同様に、20302MHzと得られる。他の準位についても ^{236}U の同位体シフトはほぼ10GHz程度の同位体シフトが得られている。

^{235}U の超微細構造を解析して得られたA係数、B係数はそれぞれ $A=-79.63\text{MHz}$ 、 $B=1207\text{MHz}$ であった。これにより ^{238}U と ^{235}U 超微細構造重心の同位体シフト12071MHzが得られる。また、これらの係数を用いて超微細構造スペクトルを再現することができ、Fig.6にその再現されたスペクトルを示す。実測されたスペクトルと、スペクトル強度、スペクトルの現れる位置がともに良く一致して再現されていることがわかる。この測定で得られた4eV奇準位の超微細構造定数及び各遷移の同位体シフトをTable.2に示す。 34160cm^{-1} の超微細構造定数は、信号強度が小さいため解析に必要となる十分なスペクトル情報が得られず、 ^{235}U の同位体シフトは赤岡らの超微細構造定数を用いて得られた。また、 34434cm^{-1} の超微細構造解析では解析に必要となる最小限のスペクトル情報しか得られず、定数の誤差分散は現れない。

同位体シフトには原子核の質量が有限であるために起こる質量シフトと、原子核の電荷分布に依存する体積効果によるフィールドシフトがある。一般にはこれらの効果が同時に起こるが、ウランの場合にはほとんどフィールドシフトが支配的になり、質量シフトは小さい。ある遷移aに対する同位体シフト $\Delta\nu_{i,j}^a$ 、 $\Delta\nu_{i,k}^a$ の相対同位体シフト (relative isotope shift; RIS) は

$$\text{RIS}_a = \frac{\Delta v_{ij}^a}{\Delta v_{ik}^a} = \frac{\frac{M_j - M_i}{M_i M_j} K_a + (C_j - C_i) E_a}{\frac{M_k - M_i}{M_i M_k} K_a + (C_k - C_i) E_a}$$

で表される²³⁾。ここで*i*、*j*、*k*は各同位体、 M_i は同位体*i*の原子核質量を表わす。 C_i 等は、各同位体の同位体シフト定数と言われ、次式で表される。

$$C_i = \int_0^{R_i} \left[V_i(r) + \frac{Ze^2}{r} \right] r^2 dr$$

これは原子核が無限に小さいと仮定したときと、有限の大きさを仮定したときのポテンシャルエネルギーの差を表す。また、 K_a 、 E_a はそれぞれ遷移*a*における質量シフト、フィールドシフトの効果の寄与を表す因子である。フィールドシフトが支配的であるウランの場合、 $K_a \approx 0$ であり、RISは遷移に依らず一定となり、ある遷移の同位体シフトの値を*x*に、他の遷移の同位体シフトの値を*y*として、点(*x*,*y*)をグラフに表すと、Fig.7に示すように各遷移におけるそれぞれの点はほぼ原点を通る直線上にあることがわかる。この性質を用いると、ある遷移に対して観測が困難な同位体のスペクトルについてもその位置を推定することが可能である。たとえば、 $0-17362\text{cm}^{-1}$ の遷移の測定で、 ^{234}U のスペクトルが ^{235}U の超微細構造に重なっているため観測されていないが、RISが直線上に載ることから、 ^{234}U の同位体シフトは約6000MHzであると推測することが出来る。超微細構造を持たない偶核に着目すると、フィールドシフトは、 M^{23} に比例し、

$$\text{RIS}_{\text{field}} = \frac{\Delta v_{238,234}}{\Delta v_{238,236}} \approx 2.003$$

で与えられる。 ^{234}U が観測されている $0-16900\text{cm}^{-1}$ 、 $0-17070\text{cm}^{-1}$ 、 $0-33907\text{cm}^{-1}$ についてRISの値を求めると、それぞれ1.990、1.987、1.990で、ほぼ一致しているが、いずれも0.01程度低い値が得られている。この違いは測定誤差とも考えられるが、いずれも同程度低い値となっており、質量シフト等による他の効果が関与している可能性も考えられる。

4. おわりに

今回、回収ウランの同位体シフトを測定し、 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{236}U 、 ^{238}U の同位体シフトを求めた。2光子吸収法による4eV奇準位の測定では、 ^{238}U - ^{236}U の同位体シフトはおおよそ8~10GHzであった。また、4eV準位の ^{235}U の超微細構造が解析され、 ^{235}U

の同位体シフトを求めることが出来た。これらの測定から、相対同位体シフトをグラフに表すと、ほぼ原点を通る直線上に載り、ウラン原子の同位体シフトはほとんどが原子核の体積効果によるものであることを確認できた。また、この性質により、例えば ^{234}U など測定では観測されなかった同位体のスペクトル位置を推測することが可能である。

本研究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」で得られた成果の一部である。

参考文献

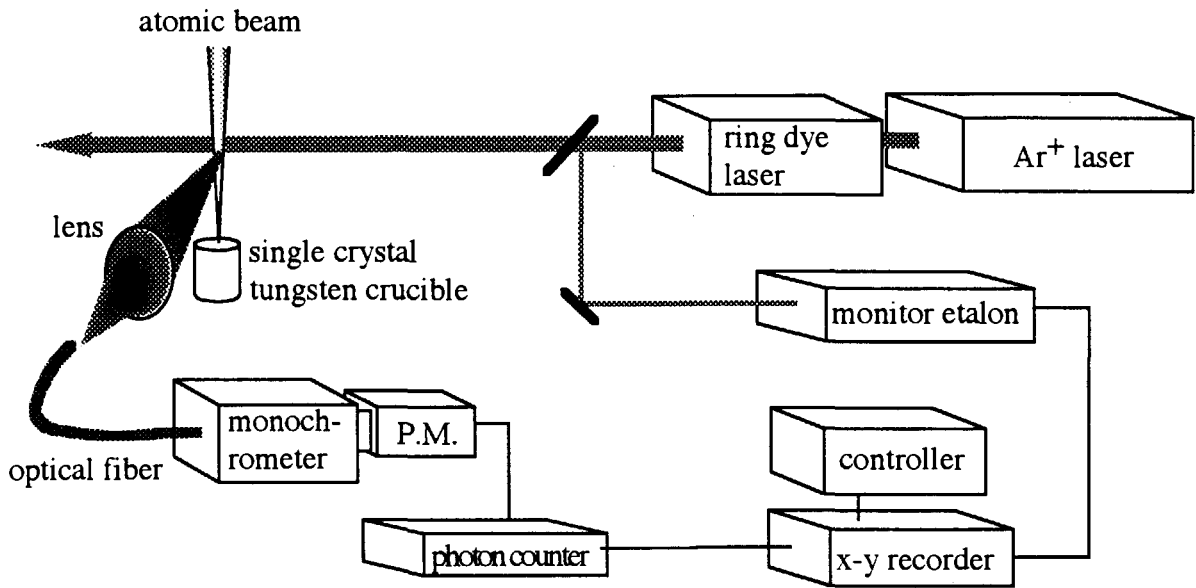
- 1) S. Gerstenkorn, P. Loc and Cl. Banchearnoult, *J. Phys. (Paris)* 34, 805 (1973)
- 2) J. A. Paisner, C. A. May, L. R. Carlson, E. F. Worden, S. A. Jhonson and R. W. Solarz, UCRL-78736, Sept. 30 (1976)
- 3) H. D. V. Bohn, W. Michaelis and C. Weitkamp, *Optics Comm.* 26, 177 (1978)
- 4) D. J. H. Wort, C. G. Brown and R. D. Plumbe, *J. Phys. E*, 12,, 829 (1979)
- 5) L. A. Hackel, C. F. Bender, M. A. Johnson, and M. C. Rushford, *Opt. Soc. Am.* 69, 230 (1979)
- 6) W. J. Childs, O. Poulsen and L. S. Goodman, *Opt. Lett.* 4, 35 (1979)
- 7) W. J. Childs, O. Poulsen and L. S. Goodman, *Opt. Lett.* 4, 63 (1979)
- 8) S. J. Goodship, P. T. Greenland and D. J. H. Wort, AERE-TP-883 APR. (1981)
- 9) R. Avril, M. de Labachellerie, F. Viala, and A. Petit, *J. Less Common, Metals*, 122, 47 (1986)
- 10) Y. Demers, J. M. Gange, C. Dreze and P. Pianarosa, *J. Opt. Soc. Am. B*, 3, 1678 (1986)
- 11) J. Blaise and L. J. Radziemski, Jr., *J. Opt. Soc. Am.* 66, 644 (1976)
- 12) R. Engleman, Jr. and B. A. Palmer, *J. Opt. Soc. Am.* 70, 308 (1980)
- 13) R. Avaril, A. Petit, J. Radwan, E. Vors, JAERI-CONF 95-005, 425 (1994)
- 14) 赤岡克昭、大場正規、若井田育夫、有澤孝, JERI-Research 98-065, (1998)
- 15) J. M. Gagne, S. Nguyen Van, J. P. Saint-Dizier, P. Pianarosa, *J. Opt. Soc. Am.* 66, 1415 (1976)
- 16) D. Pritchard, J. Apt and T. W. Ducas, *Phys. Rev. Lett*, 32, No. 12, 641 (1974)
- 17) F. Biraben, B. Cagnac and G. Grynberg, *Phys. Rev. Lett*, 32, No. 12, 643 (1974)
- 18) M. D. Levenson and N. Bloembergen, *Phys. Rev. Lett*, 32, No. 12, 645 (1974)
- 19) N. Bloembergen, M. D. Levenson and M. M. Salour, *Phys. Rev. Lett*, 32, No. 16, 867 (1974)
- 20) K. C. Harvey, R. T. Hawkins, G. Meisel and A. L. Shawlow, *Phys. Rev. Lett*, 34, No. 17, 1073 (1975)
- 21) N. Bloembergen and M. D. Levenson, in: *High-Resolution Laser Spectroscopy*, ed. by K. Shimoda (Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1976) p.315
- 22) B. Le. Garrec and A. Petit, *J. Less Common, Metals*, 122, 55-58 (1986)
- 23) W. H. King, *J. Phys. B*, 12, No. 3, 383 (1979)

Table.1 Isotope shift of the 2 eV even levels on the recycled uranium

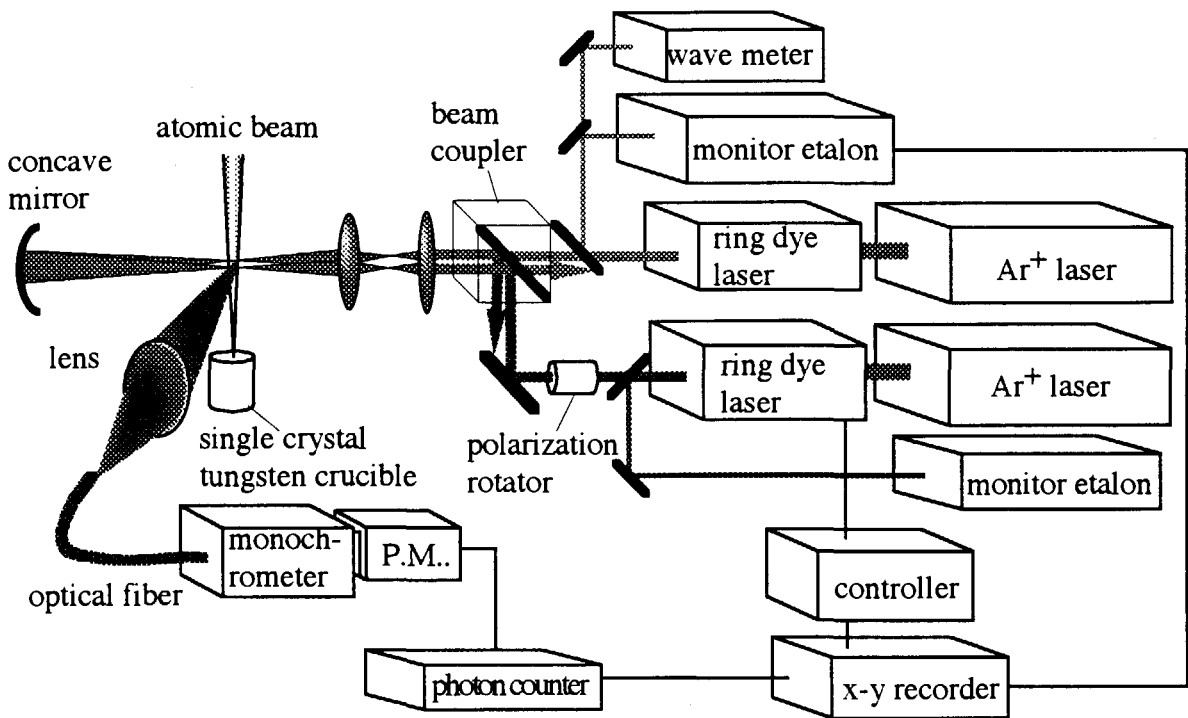
transition (cm ⁻¹)	isotope shift (MHz)		
	238-236	238-235	238-234
0 (J=6) - 16505 (J=6)	-3265	-5358	
0 - 16900 (7)	5120	8388	10191
0 - 17070 (6)	1313	2164	2609
0 - 17362 (6)	2980	4976	
620 (J=5) - 17070 (J=6)	1341	2286	
620 - 17362 (6)	3087	5159	
620 - 18186 (4)	-713	-1247	
620 - 18254 (6)	1425	2354	

Table.2 Isotope shift and hyperfine structure constant of the 4 eV odd levels on the recycled uranium

transition (cm ⁻¹)	hyperfine structure constant		isotope shift (MHz)		
	this work (MHz)	ref. 14 (MHz)	238-236	238-235	238-234
0 - 33907	A=-79.63 (±0.01) B=1207 (±14)	A=-79.9 (±0.38) B=1170 (±15)	10202	17053	20302
0 - 34160	-	A=-81.8 (±0.25) B=1012 (±9.9)	13897	23238	-
0 - 34434	A=-59.67 (± -) B=1764 (± -)	-	8481	14191	-



(a) for 2 eV level measurement



(b) for 4 eV level measurement

Fig.1 experimental setup

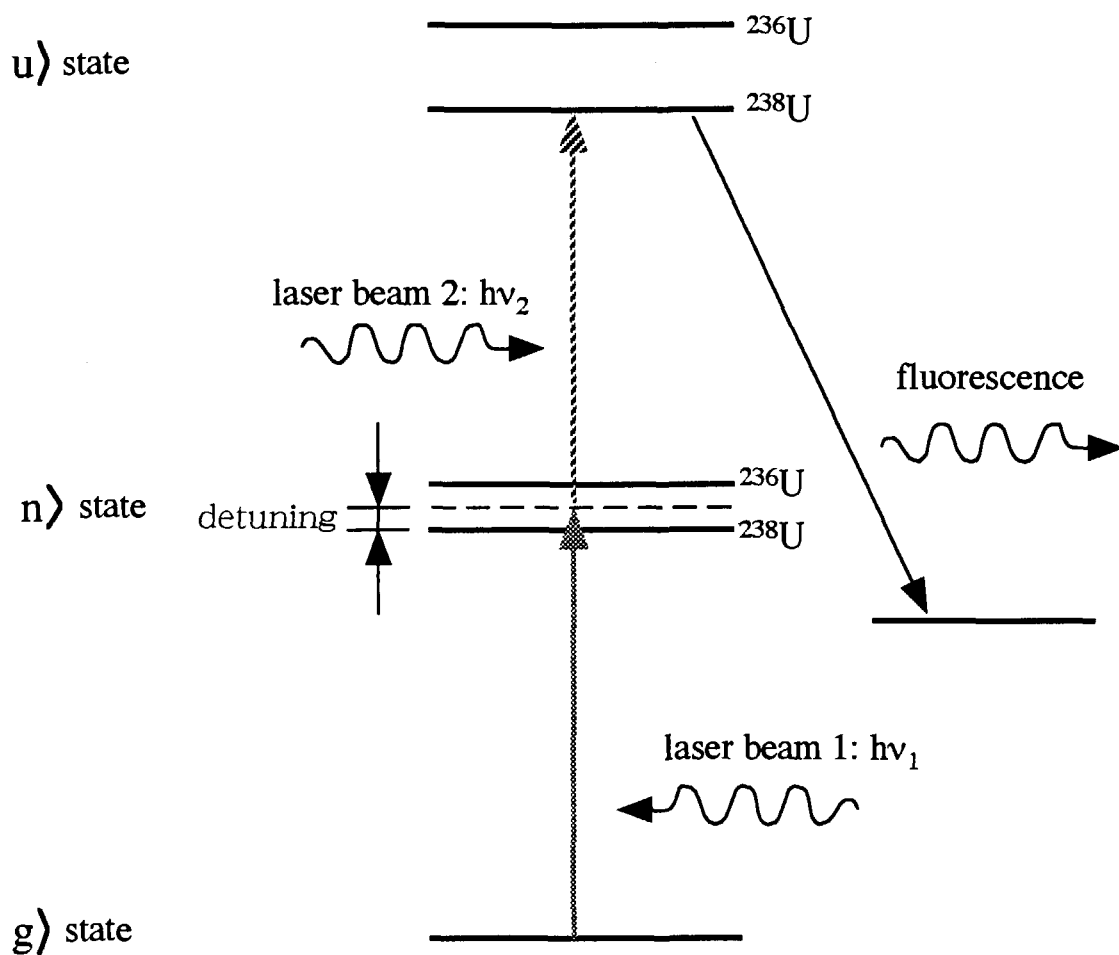


Fig.2 2 photon absorption scheme

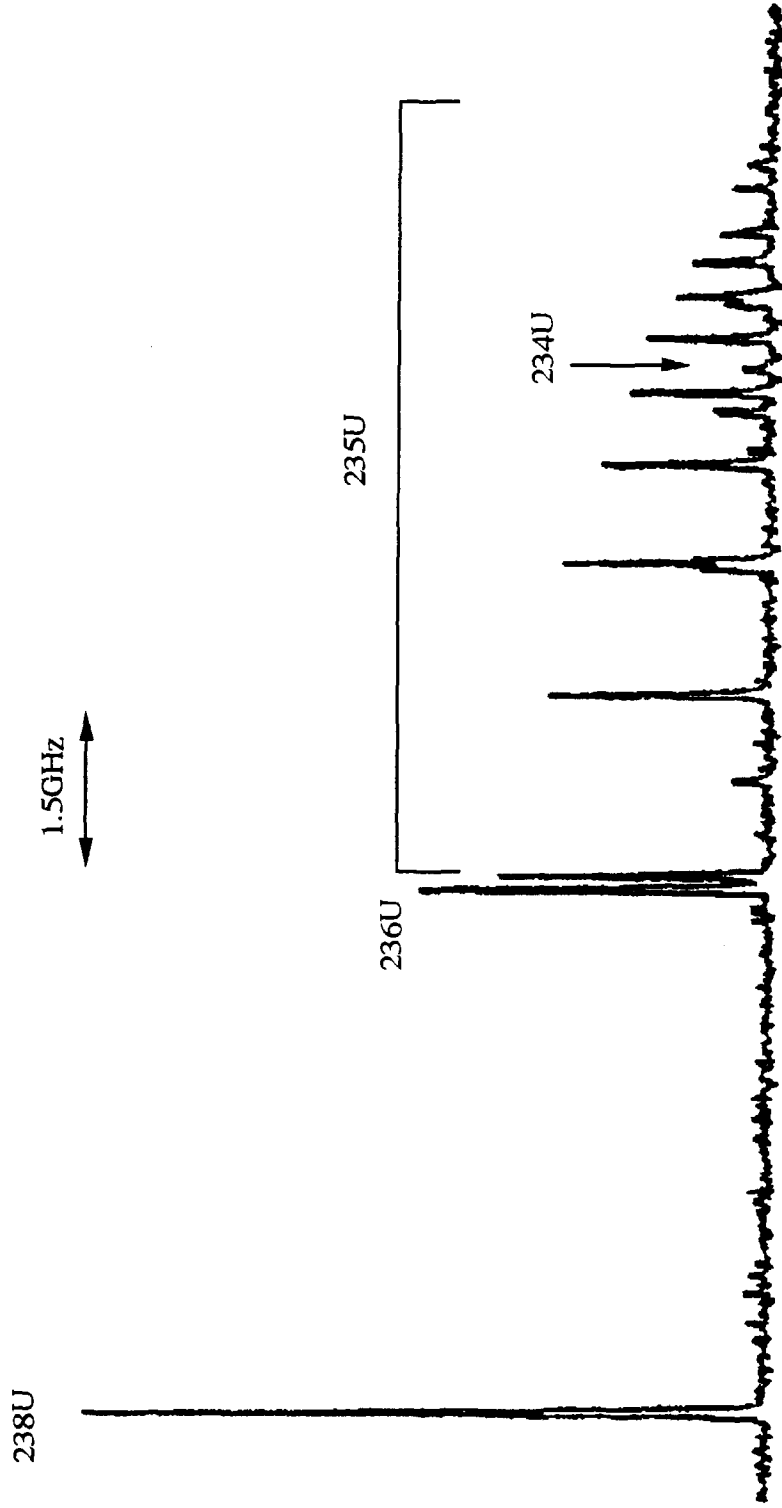


Fig. 3 Isotope shift and hyperfine structure of the recycled uranium
transition : 0-16900cm⁻¹

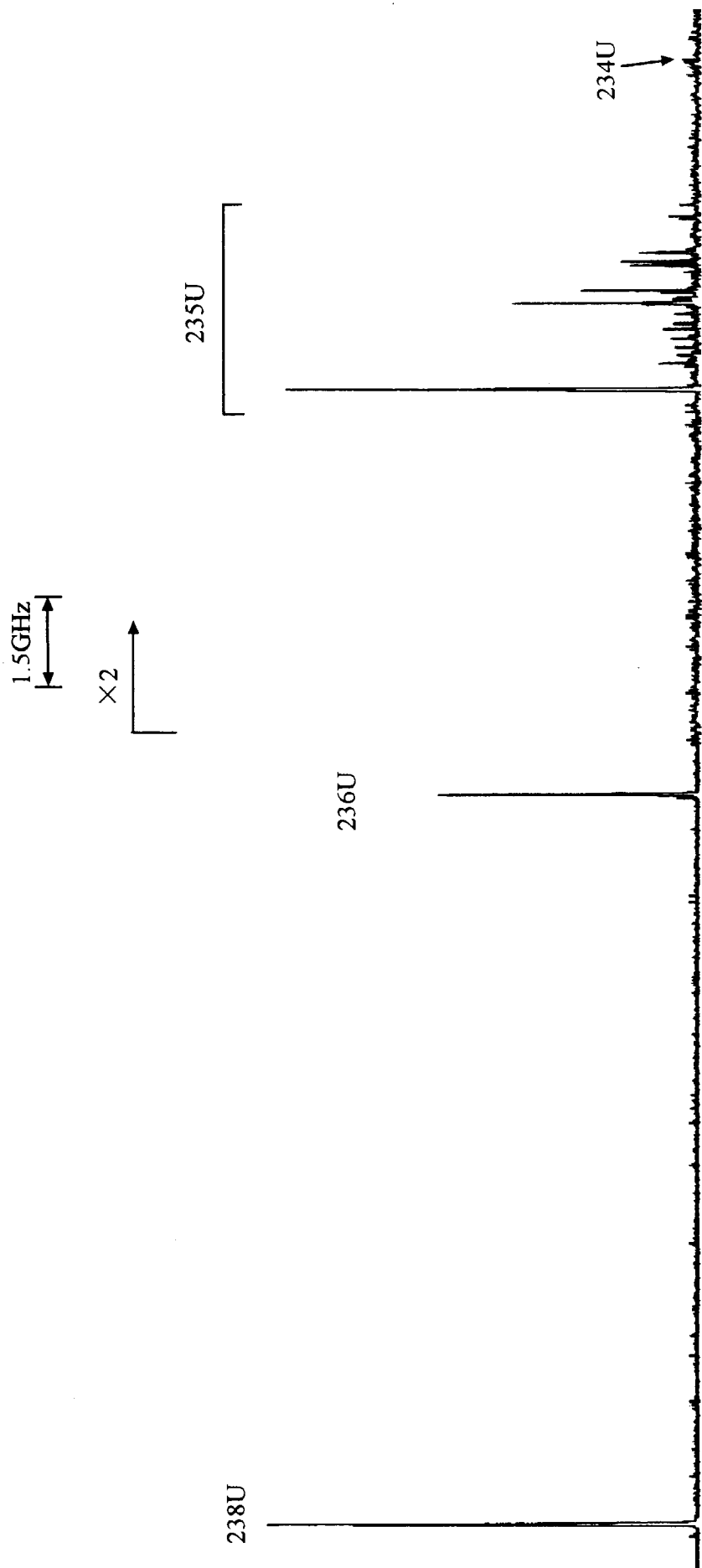


Fig.4 Isotope shift of two photon absorption spectra of the recycled uranium
transition : $0 - 33907 \text{ cm}^{-1}$ via 16900 cm^{-1}

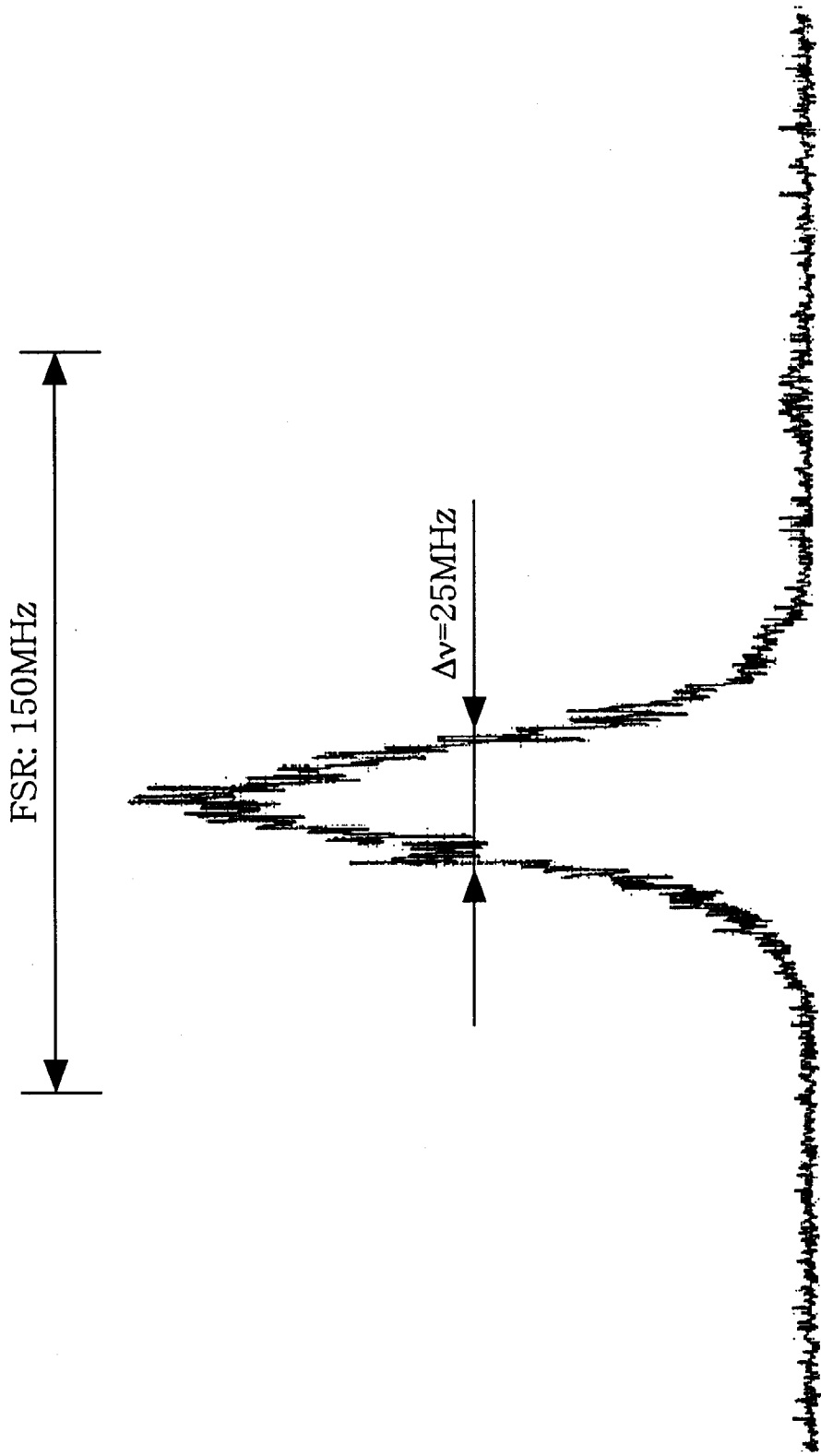


Fig.5 spectral width of two photon absorption spectra
 ^{238}U of the transition $0 - 33907\text{cm}^{-1}$

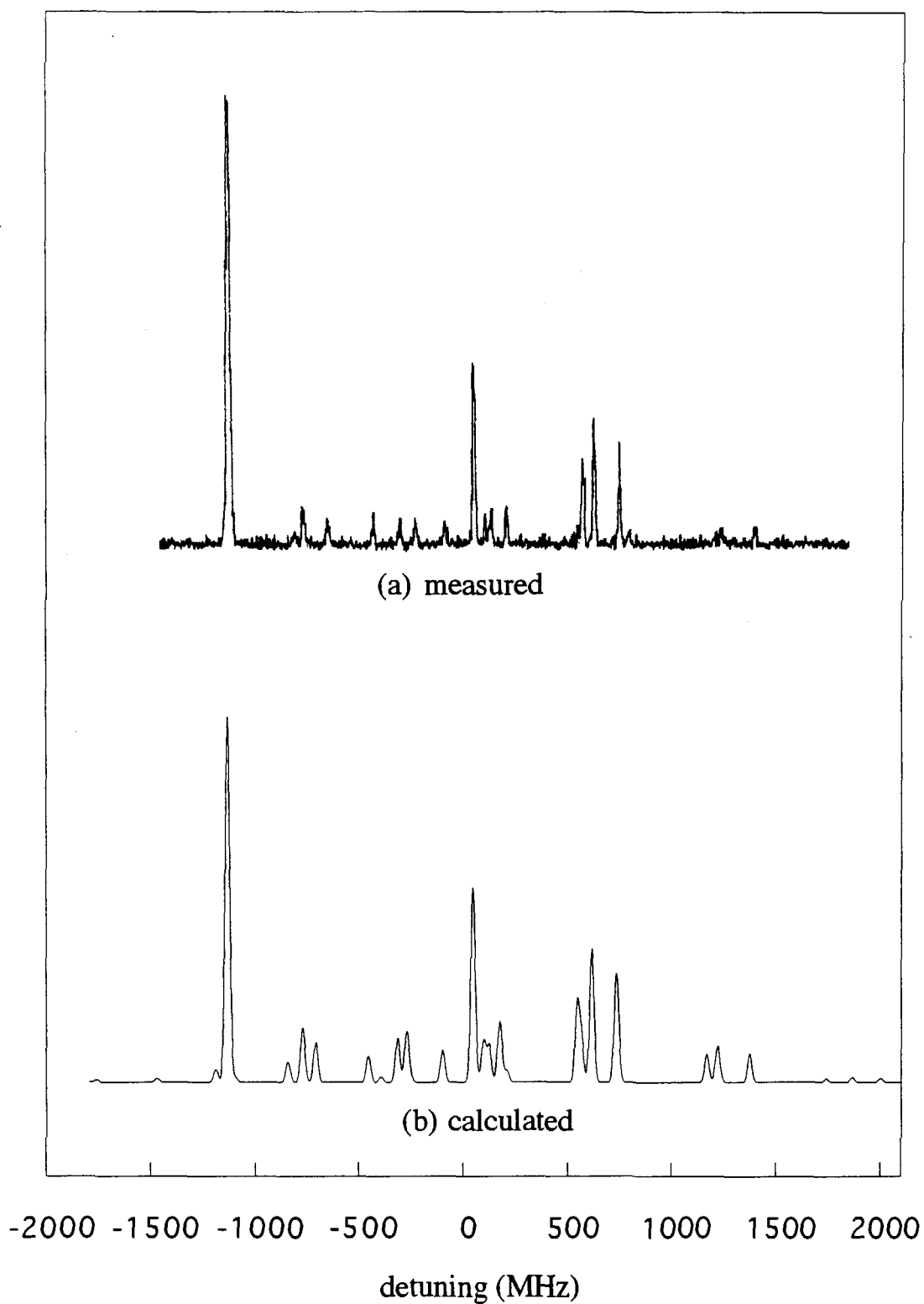


Fig.6 Hyperfine structure of ^{235}U at $0 - 33907 \text{ cm}^{-1}$ two photon absorption transition via 16900 cm^{-1}

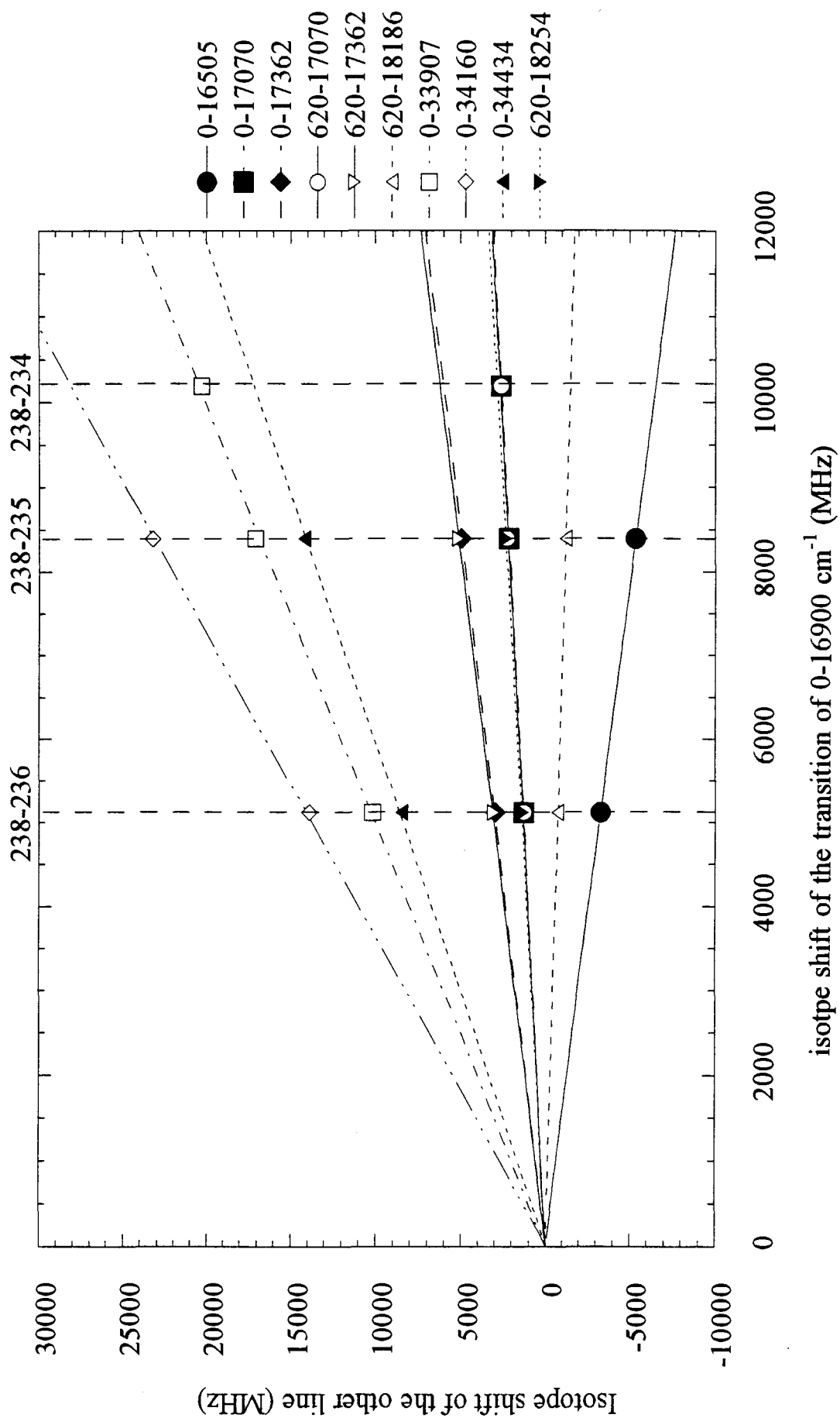


Fig.7 Relative isotope shift of recycled uranium

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
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	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
バール	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=0.1nm=10⁻¹⁰m

1 b=100fm²=10⁻²⁸m²

1 bar=0.1MPa=10⁵Pa

1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²

1 Ci=3.7×10¹⁰Bq

1 R=2.58×10⁻⁴C/kg

1 rad=1cGy=10⁻²Gy

1 rem=1cSv=10⁻²Sv

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す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E.C.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=10⁶St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(-10bar)	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 ⁻¹	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 ⁷	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= 4.18605J (計量法)
 = 4.184J (熱化学)
 = 4.1855J (15°C)
 = 4.1868J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS(馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499W

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

