特集 7

大阪大学におけるレーザー同位体分離研究

山中龍彦*・仁木秀明*・藤原関夫*
井沢靖和*・望月孝晏*・山中千代衛*

(1986年5月29日 受理)

Studies on Laser Isotope Separation in Osaka University

Tatsuhiko YAMANAKA*, Hideaki NIKI*, Etsuo FUJIWARA*,

Yasukazu IZAWA*, Takayasu MOCHIZUKI*

and Chiyoe YAMANAKA*

(Received May 29, 1986)

1. はじめに

大阪大学では、レーザーによる同位体分離、特にウラン濃縮への応用に早くから着目し、1973年よりその基礎的研究を開始した。まず、アンモニアガス(NH_3)¹⁻⁵⁾あるいは六フッ化イオウガス(SF_6)を用い、レーザー照射による同位体分離の検証を行い、分離の機構を検討した。1975年よりウラン同位体分離の研究に重点を置き、ウラン原子の分光学的研究⁶⁻⁸⁾ならびにウラン原子ビームを用いた(原子法)2段階電離法による分離実験⁹⁻¹²⁾を実施し、50倍の濃縮を確認した。六フッ化ウラン(UF_6)を用いる手法(分子法)の研究は1977年より開始され、分離用光源としての赤外レーザーの開発^{13, 14)}ならびに UF_6 の分光学的研究¹⁵⁻¹⁹⁾が実施された。1978年にはNEET(Nuclear Excitation by Electron Transition)による ^{235}U の核励起を実験により初めて検証し、分離の可能性を検討した²⁰⁻²³⁾。その後、原子法に焦点を絞り、分離光源として

近年有望とされている銅蒸気レーザー、およびこれを励起光源とした色素レーザーの研究に着手し、1985年に実用規模の装置開発に成功した。

原子法によるレーザーウラン濃縮を実用化するためには、原子ビーム発生部やレーザーの高効率、長寿命、大出力化といった技術的開発が必要であるほか、レーザーとウラン原子の相互作用に関するデータの集積も不可欠である。

本稿では、現在までに得られた研究成果をとりまとめ、今後の研究方針について言及する。

2. レーザー同位体分離の研究

2.1 ^{235}U の選択的2段階電離実験

ウラン原子ビームを用い、2段階電離法による濃縮実験を実施し、濃縮比、効率、電荷交換断面積等の評価を行った⁹⁻¹²⁾。

Fig. 1 にウラン原子ビーム発生用チャンバーを示す。金属ウランを電子ビーム加熱することにより蒸気を発生させ、スリットを通してビームとした。ウラン原子の選択的励起用及び電離

* 大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565 吹田市山田丘2-6)

* Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6, Yamada-oka, Suita Osaka 565)

Fig.1 Schematic diagram of the vacuum chamber for laser uranium enrichment by atomic vapor method.

用光源として、それぞれ色素レーザー及び窒素レーザーを用いた。生成イオンは電界で偏向させ、質量分析器を通して検出した。Fig. 2はウラン原子の1つの吸収線(4246 Å)近傍で、色素レーザーの発振波長を変化させたときのウランイオンの検出量を示す。波長を ^{235}U の吸収線に一致させた場合、波長幅0.03 Åに対して濃縮比として約50倍が得られた。色素レーザーの波長を ^{235}U の吸収線に固定し、ウラン原子密度を増加させると、濃縮比の減少が観測された(Fig. 3)。選択性の減少の原因としていくつかのスクランプリング過程が考えられるが、これを電荷交換のみによる効果と考え、その断面積を $\sigma = 5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ とした場合の計算結果をFig. 3に実線で示す。また、レーザーで電離したウランイオンをウラン原子ビーム中に通過させ、電荷交換により生成されたウランイオンを検出する手法により電荷交換断面積を評価した(Fig. 4)。図中●は本実験で得られたもので、破線はFig. 3の結果より見積った値である。実線及び一点鎖線は計算値であり○はウランイオンと CO_2 分子との組み合わせに対する実測値である。

Fig.2 Measurement of the counting rates of ^{235}U and ^{238}U as a function of the wavelength of the dye laser.

また2段階電離の基礎研究として、アルゴンイオンレーザーを用いた一連の実験を実施し^{7,8)}、吸収断面積、電離断面積、吸収線幅、超微細構

Fig.3 Yield ratio of ^{235}U to ^{238}U as a function of the uranium atomic density.

Fig. 4 Charge exchange cross-section from uranium ions to uranium atoms as a function of a relative kinetic energy.

造の広がりや同位体シフト等が調べられた。

2.2 励起ウラン原子の化学反応⁶⁾

レーザー励起ウラン原子と酸素との化学反応性を調べた。装置を Fig. 5 に示す。実験はウランビーム、酸素ビーム、レーザービームが互いに直交する配置にし、生成された UO_2^+ イオン電

Fig. 5 Photograph of the vacuum chamber for chemical reaction of uranium.

流を測定した。反応は

であり、励起用レーザーの波長をウラン原子の吸収線 ($4631.62 \text{ \AA}$) 近傍で変化させた時の生成イオン量を Fig. 6 に示す。レーザー波長を吸収線に同調させた場合、約 8 % の反応の促進が観測された。これは基底状態のウラン原子に対する反応率の約 100 倍に相当する。

2.3 NEET²⁵⁾ による ^{235}U の核励起実験^{20~23)}

ウラン金属にレーザー照射することにより生成されるプラズマを用いて NEET による ^{235}U の核励起実験を実施した。ウラン同位体 (^{235}U , ^{238}U) の第 1 核励起エネルギーはそれぞれ $73 \pm 0.5 \text{ eV}$, 44.7 keV と差が非常に大きいので、高い選択励起が期待できる。Fig. 7 に示す実験装置

Fig. 6 Intensity of $^{235}\text{UO}_2^+$ signal as a function of the laser wavelength.

Fig. 7 Experimental apparatus of the nuclear excitation of uranium.

を用い、CO₂レーザーあるいはガラスレーザーで生成したウランプラズマ中の電子とウラン原子との衝突を利用し、核異性体 $^{235}\text{U}^m$ を生成させた。イオンはコレクターで捕集し、セラトロンにより電子放出の減衰時間とエネルギーを測定した (Fig.8)。減衰曲線は半減期 1.2 ± 0.1 分 (減衰1), 25.7 ± 0.4 分 (減衰2) 及び時間によらない定常成分から成っている。減衰2は、放出電子のエネルギーが 90 eV 以下であること及び半減期が理論値の26分と一致することから核異性体によるものであることが確認された。減衰1は真空中に拡散した ^{234}U , ^{238}U からの α 線に、また定常成分はコレクターに捕集された ^{234}U 及び ^{238}U からの α 線によるものである。一連の実験より NEET の確率として $\langle \alpha_N \text{U} \rangle = 1.4 \times 10^{-20} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ が得られた。核異性体の回収方法が確立さ

Fig.8 Decay curve of the counting rate. Open and closed circles are total counting rates in each one minute, and averaged over 5 minutes, respectively. Open and closed squares show the decay components subtracting the time independent component from the total counting rate, which correspond to open and closed circles, respectively.

れば、この方法は、高い濃縮率をもつ分離法となる可能性がある。

2.4 マトリックス中における UF₆ の分光特性²⁴⁾

希ガスを冷却して作成したマトリックス中に UF₆ を閉じ込めることにより、効率よく冷却することができる。またこれを標的に用いて選択的励起の実験を行なうことも出来る。Table I は $^{238}\text{UF}_6$ を各種希ガスマトリックス中に閉じ込めて測定した ν_3 モードの吸収線である。Kr, Xe の場合には吸収線が2つに分裂した。Ar の場合吸収線幅が最も狭くなり、半値幅で 1.0 cm^{-1} 以下という、同位体シフト (0.65 cm^{-1}) に近い値が得られた。またマトリックスの作る場に依存するスペクトルシフトが観測された。これにより吸収スペクトルの位置を制御できる可能性がある。

2.5 ウラン以外の同位体分離実験¹⁻⁵⁾

ウランの同位体分離実験に先立ち、レーザー同位体分離の可能性を実証するために、窒素及び硫黄の分離実験を実施した。

窒素の分離実験は NH₃ の振動励起および前期解離を利用して行った。 $^{14}\text{NH}_3$ と $^{15}\text{NH}_3$ の赤外及び紫外での吸収スペクトルを測定し、使用する CO₂ レーザーの発振線及び紫外光の適切な波長を調べた。分離実験は CO₂ レーザーの P(32) 線 ($^{14}\text{NH}_3$ の Q(5,3) 線に一致) を選択励起用に、また NH₃ ガスフィルターを通した球ギャップよりの紫外線 2205 Å を解離用光源として用いた。 $^{14}\text{NH}_3 : ^{15}\text{NH}_3 = 1 : 1$ の混合ガスにこれらを同時照射することにより、78% $^{14}\text{N}_2$ と 22% $^{15}\text{N}_2$ が

Table I Absorption peak wavenumber of the ν_3 mode of $^{238}\text{UF}_6$ in a rare gas matrix.

Sample	Absorption peak (cm^{-1})
Ne + $^{238}\text{UF}_6$	625.3
Ar + $^{238}\text{UF}_6$	618.6
Kr + $^{238}\text{UF}_6$	620.8, 618.3
Xe + $^{238}\text{UF}_6$	616.8, 619.8

生成され、同位体分離が実証された。

硫黄の同位体分離は、 SF_6 の赤外多光子解離を利用して行った。光源として CO_2 レーザーを用い、セル中に封入した SF_6 に照射して、 $^{32}\text{SF}_6$ を選択的に解離することにより、残留ガス中で他の同位体が濃縮されることを確かめた。

これら一連の実験において、濃縮比のレーザー照射回数、パワー、ガス圧等に関する依存性が調べられ、分離の機構が検討された。

3. 分子法ウラン濃縮装置の開発

3.1 UF_6 励起用赤外レーザーの開発^{13, 14)}

UF_6 の光励起用レーザーとして CO_2 レーザーで励起する NH_3 レーザー($12.08\ \mu\text{m}$)及び CF_4 レーザー($16\ \mu\text{m}$)の開発を行った。構成図をそれぞれFig.9及びFig.10に示す。 NH_3 レーザー発振波長の同調はブレイズ波長 $11.5\ \mu\text{m}$ 、溝数 66.5本/mm の回析格子により行い、高出力を得るため、出力は回析格子より取り出した。発振線、出力、パルス幅の NH_3 圧力依存性、出力ビーム特性、偏光特性等が調べられた。 CO_2 レーザー入力 $1\sim 3\ \text{J}$ ($R(30)$, $9.22\ \mu\text{m}$, $100\ \text{ns}$)に対して出力 $50\ \text{mJ}$ ($\lambda=12.08\ \mu\text{m}$)が得られた。発振線としては $12.08\ \mu\text{m}$ と $12.3\ \mu\text{m}$ が観測された。

CF_4 レーザーは低温窒素ガスにより $150\ \text{K}$ にレーザー管を冷却し、励起波長に対してTable IIに示すような発振線が観測された。

Fig.9 Schematic diagram of NH_3 laser which is pumped with CO_2 laser.

Fig.10 Schematic diagram of CF_4 laser which is pumped with CO_2 laser.

3.2 UF_6 分光用半導体レーザーと超音速ノズル

UF_6 を高い選択性で励起させたり、また UF_6 の基底状態からの吸収スペクトルを詳しく調べるためには、 $100\ \text{K}$ 以下に冷却しホットバンドの影響を避け、かつ高分解能測定が要求される。

高分解能分光用光源として、富士通研究所の協力を得て、 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ダイオードレーザーを開発した。数種類の異なる組成比をもつも

Table II Lasing lines of CF_4 laser.

PUMP LASER CO_2 ($9.6\ \mu\text{m}$ BAND CO_2)	$^{12}\text{CF}_4$ LASER LINE (cm^{-1})		
	P-BRANCH	Q-BRANCH	R-BRANCH
R(10)	618.2		
R(12)	615.1		
	615.7'		
R(14)	612.2		
	613.7		
R(16)			640.9
R(18)		630.8	641.9
		631.5	
R(20)			643.1

a), b) The polarization of the pump laser.

のに対して、液体ヘリウムまたは液体窒素による冷却で、 $6 \sim 16 \mu\text{m}$ の波長領域をカバーすることができた。これを用い、各種の気体状分子の高分解能分光が可能となった¹⁵⁻¹⁹⁾。

ガス冷却装置として二次元シャープエッチ型超音速ノズルを試作し、その冷却効果が確かめられた。Fig. 11は超音速ノズル冷却した SF_6 (キャリアガス: Ar 99%) を、 $10 \mu\text{m}$ 近傍で発振するダイオードレーザーを用いて分光した結果であり、 ν_3 帯 R 枝の一部の吸収スペクトルを示すものである。吸収ピークの間隔は $\sim 0.05 \text{ cm}^{-1}$ で、基底状態のみからの吸収が観測された。冷却温度はマッハ数測定及び SF_6 の回転温度測定等から、 54 K と算出された。

4. 原子法ウラン濃縮装置の開発

4.1 銅蒸気レーザーの開発

銅蒸気レーザーは、高出力、高繰り返し、高効率という特徴をもち、原子法によるレーザーウラン濃縮において、色素レーザー励起光源として有望とされている。分離光源システムに対する自主技術の向上をはかるため、銅蒸気レーザー及びこれを励起光源とした色素レーザーを開発した。

銅蒸気レーザーは自己放電加熱型でその構造を Fig. 12 に示す。レーザー管は高純度のアル

Fig. 11 Absorption spectrum of SF_6 cooled by a supersonic expansion nozzle (ν_3 band, R-branch).

laser tube: available diameter below 60 mm, total length 1.7 m, ceramic tube length 1m.

Fig. 12 Longitudinal cross section of cylindrical discharge copper vapor laser.

ミナ放電管であり、その周りはセラミック断熱材と真空断熱との併用によって熱シールドされている。レーザー管は数 kHz の高繰り返し放電によって銅金属の十分な蒸気圧の得られる 1500°C に加熱され、その温度が維持される。レーザーの電気回路を Fig. 13 に示す。充放電用コンデンサーにはセラミックコンデンサーを用いており、発振器では $C_1 = 6 \text{ nF}$, $C_2 = 1.3 \text{ nF}$ である。電源にはインバータ方式を採用し、水素サイトロンに十分な回復時間を与えた結果、長時間安定な動作が得られた。

レーザー発振器には内径 28 mm の放電管を用い、安定共振器の光学系で出力 $16 \text{ W} / 5 \text{ kHz}$ が得られた。これはレーザー出力の放電管断面積との比例則²⁶⁾に照らして最大出力が達成されている。しかし安定共振器ではビーム広がりが $6 \sim 7 \text{ mrad}$ と大きく、色素レーザーの励起には不適当なため、不安定共振器とした。不安定共振器は曲率半径 4.5 m 及び 0.8 m のミラーから構成され、拡大率 (magnification) M は 5.6 である。出力は $14.5 \text{ W} / 5 \text{ kHz}$ と安定共振器と比べて若干劣るものの、ビーム広がりには回折限界の数倍程度にまで改善された。不安定共振器でのレーザーの発振波形を Fig. 14 に示す。A はレーザー波形を、B は蛍光を表わしており、蛍光の 10 ns 後にレー

Fig. 13 Copper vapor laser electrical circuit.

Fig.14 Oscilloscope trace of a CVL light pulse from an unstable resonator. A: the main laser pulse, B: the amplified spontaneous emission which is side light. Sweep speed is 10 ns/div., Vertical sensitivity of A and B are different.

ザーは立上がり,それとともに蛍光は減衰する。この遅れ時間は共振器の往復時間にはほぼ匹敵する。Ne ガスをバッファガスに用いており, ガス圧力は1~6 kPa の範囲で出力に変化は見られなかった。同様にレーザーの放電開始電圧や放電電流にもガス圧力依存性が見られなかった。レーザーの出力安定性は, 電源からの3%程度の交流リップルを含めて, 長期では数時間以上にわたって数%の安定性が得られている。発振器は定常的に色素レーザーに光を供給しており, すでに400時間以上サイラトロン(EG&G, HY-3001)等の交換なしに稼動している。

レーザー増幅器には内径50 mmの放電管を用い, 安定共振器として出力25 W/5 kHzが得られた。増幅器の写真をFig. 15に示す。放電長は1 mであり, 構造は発振器と同様である。銅蒸気レーザーは実質的にはエネルギー蓄積が困難なレーザーであるため, レーザー間の同期には注意を要する。試作銅蒸気レーザーへのマスタートリガー信号とレーザー出力との同期ジッターは発振器, 増幅器単体ではそれぞれ ± 2.5 ns及び ± 3.5 nsであった。増幅システムとしての同期ジッターは ± 5 ns以下であった。放電管温度1400℃に対して増幅利得, 飽和強度を測定した。発振器と増幅器間の同期調整はトリガー信号線

Fig.15 Copper vapor laser with 5 cm bore.

の長さを変えることにより行った。Fig. 16に入力レーザー強度に対する利得の実験結果(○印)を示す。銅蒸気レーザーの増幅特性を解析するために2種類の相異なったモデルを検討した。一方は定常動作レーザーモデルとあり, 次式で与えられる。

$$\ln \frac{E_0}{E_i} = g_0 l - \frac{E_0 - E_i}{E_{sat}}$$

ここで E_i 及び E_0 はそれぞれレーザー入力及び出力エネルギー, l は励起長, E_{sat} は飽和エネルギーである。他方はFrantz, Nodvikによって与えられたエネルギー蓄積型レーザーモデル²⁷⁾である。それぞれの計算結果をFig.16に実線及び破線で示す。銅蒸気レーザーはその性質上2つの増幅モデルの中間に位置するものと考

Fig.16 Amplifier gain as a function of average input power at 5 kHz. The temperature of the discharge tube is about 1400℃.

えられる。増幅モデルとの比較から小信号利得 $g_0 = 6.5$ 、飽和強度 $35 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ が得られ、実効的な励起長を 50 cm と仮定すると $g_0 = 13\%/\text{cm}$ となり高利得レーザーであることが分かる。測定結果から増幅率は小信号入力時では $1,000$ 倍に近いが、飽和エネルギーが小さい。このために $1 \text{ W}/\text{cm}^2$ ($0.2 \text{ mJ}/\text{cm}^2 \cdot \text{パルス}$) 程度の入射レーザー強度での利得は 2 倍にまで減少する。飽和強度以上の入力に対しては、増幅器からの取り出しエネルギーはもはや一定であり、増幅出力は発振器からの出力と増幅器からの最大取り出しエネルギーとの単純な算術和で与えられる。本測定では最大取り出しエネルギーは $1 \text{ W}/\text{cm}^2$ であった。

4.2 色素レーザーの開発

試作した色素レーザー発振器は Littrow 型で、出力ミラー、色素セル (8 mm)、プリズムビームエキスパンダー (40 倍)、石英エタロン (FSR: 20 GHz , フィネス: 13)、回析格子 (ブレース角 54° , 5 次光使用) で構成される。温度変化に対する波長の変動をおさえるため、各部品はインバー基盤上に固定し、色素溶液は 0.05°C 以内に温度安定化を行った。色素としてローダミン 6 G を用いた。銅蒸気レーザーで励起した場合の色素レーザーの発振波形とスペクトル波形をそれぞれ Fig.17(a),(b) に示す。Fig.17(a) は約 1000 ショットの重ね撮りであり、ピーク出力の安定性は銅蒸気レーザーの 3% 以内に対し、色素レーザーも 5% 以内と安定である。Fig.17(b) は単一縦モード発振器のスペクトル波形であり、スペクトル幅は 100 MHz 程度である。出力ミラー及びエタロンはピエゾ素子により電圧駆動され、共振器長ならびにエタロン角度は微細に調整できる。単一縦モード発振を常に維持するために、エタロン角度を微細に周期的に変化させることで変調されたレーザー出力光を、ロックインスタビライザーを用いてエタロン角度にフィードバックする方式を用いた。これにより、出力ミラー駆動による波長掃引時にも、モードホップすることなく、特定の縦モードを維

→ | ← 10ns
(a)

← 1.5GHz →
(b)

Fig. 17 (a) The pulse shapes of the dye laser oscillator (lower trace) and the CVL, (upper trace). (b) The spectral profile at single mode oscillation.

持できることが確かめられた。

色素レーザー増幅器は、励起を空間的に一様とするため、対向方向より 2 ビームで励起する横励起方式である。増幅特性を調べるため、励起パワー最大 2 W に対し、励起体積を $0.3 \text{ mm}\phi \times 10 \text{ mm}$ 程度と小さくし、利得、入力パワー、励起パワー等の関係を測定した。また実験結果を解析するために、 2 準位系に対するレート方程式の定常解を求め²⁸⁾、比較した。Fig.18(a),(b) は、それぞれ、利得対励起パワー、利得対入力パワーについて得られた実験結果を示す。ロー

Fig.18 The experimental results and the calculation of the change of the gain by
 (a) the pumping power of the CVL and (b) the input power of the dye oscillator. Here Φ_L is a beam diameter of the focused input beam of the dye laser oscillator.

Table III Data base for laser uranium enrichment by using atomic vapor method.

I. 濃縮用レーザーの開発研究	II. レーザーウラン原子相互作用データベース	III. 原子ビーム衝突データベース	IV. ウラン蒸気発生源データベース	V. 原子・レーザー系のシミュレーション
1) 銅蒸気レーザー パルス幅制御 銅蒸気空間密度制御 励起効率, 取出効率 蛍光増幅 寄生発振	1) レーザー光吸収特性 エネルギー準位 超微細構造 同位体シフト 2) 光励起特性 励起断面積 蛍光寿命・分岐比 波長の選択・組合せ 3) 光電離特性 自動電離準位 電離断面積 4) 光伝播特性 スペクトル変化 ビームブレイクアップ 5) コヒーレント相互作用 イオン化効率 同位体選択性	1) 電荷交換特性 電荷交換断面積 2) エネルギー交換特性 励起移乗断面積 準安定状態の緩和速度 3) 電子衝突特性 励起断面積 電離断面積 4) 電磁場相互作用 電界電離 磁場効果 電荷分離	1) ウラン蒸気特性 蒸気密度空間分布 速度分布 2) レーザー加熱法 レーザー加熱特性 ウラン蒸気量と空間分布 準安定状態占有率	1) 原子レベルと遷移のダイナミックス 原子・光子モデル 2) レーザー光伝播 光線追跡コード 非線形屈折率
2) 色素レーザー 単一モード発振 波長チューニング スペクトル制御 高効率増幅 色素流制御				
3) レーザーモデリング シミュレーションコード 発振増幅システム				

ダミン6 G等の色素については、レート方程式による解析に必要な物理常数（吸収断面積，誘導放出断面積，上準位の寿命等）がよく調べられている。Fig.18には破線によりレート方程式の解も示してある。このように，発振パルス幅（20～30 ns）が色素の自然放出寿命（ ≤ 5 ns）より十分大きい場合は，レート方程式の定常解により増幅特性がよく説明される。これにより増幅器の最適化，大型化の目安が得られた。

5. 近共鳴媒質中のレーザー光伝播特性実験

大型分離装置では，ウラン蒸気中をレーザービームが伝播する際，レーザー光が時間的，空間的あるいはスペクトル的に変化を受け，濃縮比や効率に影響を与えることが予想される。

^{235}U の共鳴線に同調したレーザー光はウラン蒸気の99%を占める ^{238}U に対し，同位体シフト分だけずれた近共鳴光となる。レーザー光は主としてこの ^{238}U との相互作用により変化を受ける。このような現象は厳密にはマックスウェル方程式とブロッホ方程式の組み合わせにより記述される。空間的效果はレーザー光の空間的強度分布と媒質の非線形屈折率により，現象としてself-focusingやself-defocusingが起こる。時間的效果は，入射レーザー光の時間波形を変形させ，その結果レーザー光スペクトルをも変化させる。これらの効果により，結果としてウラン蒸気中のレーザー照射体積，強度，スペクトルが複雑となり， ^{235}U の励起のダイナミクスに大きく影響する。

このような効果を調べるため，さしあたり，ナトリウム蒸気中での色素レーザー光の伝播特性について研究を進めている。Fig.19は，400℃に加熱した，長さ1.9 mのナトリウム蒸気槽中に， D_1 線近傍に同調した色素レーザー光を伝播させた時の時間波形である。上下のトレースは，それぞれ入射光，透過光の時間波形である。このようにパルス幅の短縮，立上りの急峻化，ピーク値の増幅等の現象が観測される。また，self-focusingやself-defocusing等の空間的效果も顕著に観測されている。

Fig.19 Temporal profiles of the dye laser. The upper and lower traces give the input pulse and the transmitted pulse, respectively (10 ns/div.)

高効率のレーザーウラン濃縮システムの設計には，以上に述べた効果の基礎データを取得することにより，ウラン蒸気の密度や長さ，入射レーザー光強度，パルス波形等の最適化を行う必要があると考えられる。

6. 今後の研究方針

以上述べたように，大阪大学では，レーザー同位体分離，特にウラン濃縮を目標として早くから幅広い研究を行ってきた。現在，原子法に力を集中し，高効率のウラン濃縮技術の開発に必要な基礎研究に着手している。レーザー法ウラン濃縮技術実用化のためには，高度なレーザーとそれを用いた分離プロセスの技術開発とならんで，実用化規模で生ずると予想される問題点をも含んだレーザーウランとウラン原子との相互作用に関する基礎データの取得が不可欠である。取得すべきデータあるいは技術開発項目をTable IIIにまとめた。今後これに沿った研究が展開される予定である。

参考文献

- 1) 井沢他：応用物理 **44** (1975) 898.
- 2) 井沢他：レーザー研究 **2** (1975) 29.
- 3) 井沢他：原子力学会誌 **17** (1975) 166.
- 4) H.Noguchi et al.: Technol. Repts. Osaka Univ. **26** (1976) 151.

- 5) 井沢他：電気学会電子装置研究会資料，EDD -76-10 (1976) .
- 6) T.Mochizuki and C.Yamanaka : Technol. Repts. Osaka Univ. **28** (1978) 205.
- 7) T.Mochizuki et al. : Appl. Phys. Lett. **32** (1978) 212.
- 8) H.Maeyama et al. : Technol. Repts. Osaka Univ. **29** (1979) 177.
- 9) 仁木他：電気学会論文誌 **102-C** (1982) 45.
- 10) H.Niki et al. : Technol. Repts. Osaka Univ. **28** (1978) 465.
- 11) 仁木他：電気学会レーザー工学研究資料，LEG - 78 -8 (1978) .
- 12) 井沢他：電気学会レーザー工学研究資料，LEG - 79 -3 (1979) .
- 13) 森川他：レーザー研究 **6** (1978) 40.
- 14) T.Mochizuki et al. : Japan. J. Appl. Phys. **17** (1978) 1295.
- 15) H.Kawakami et al. : Japan. J. Appl. Phys. **17** (1978) 461.
- 16) 植田他：レーザー研究 **5** (1978) 239.
- 17) H.Kawakami et al. : Technol. Repts. Osaka Univ. **28** (1978) 473.
- 18) H.Niki et al. : Japan. J. Appl. Phys. **19** (1980) 1801.
- 19) 仁木他：レーザー研究 **9** (1981) 55.
- 20) Y.Izawa and C.Yamanaka : Phys. Lett. **88B** (1979) 55.
- 21) 井沢，山中：レーザー研究 **7** (1979) 55.
- 22) Y.Izawa et al. : in "Laser Interaction and Related Plasma Phenomena", Vol. 5, eds. H.J.Schwarz et al., Plenum (1981), p. 289-297.
- 23) 仁木他：電気学会光・量子デバイス研究資料，OQD -80-10 (1980) .
- 24) 望月他：日本物理学会量子エレクトロニクス分科会 (1979年 4 月) .
- 25) M.Morita : Prog. Theor. Phys. **49** (1973) 1574.
- 26) R.E.Grove : Laser Focus, July (1982) 45.
- 27) L.M.Frantz and J.S.Nodvik : J. Appl. Phys. **34** (1963) 2346.
- 28) R.S.Hargrove and T.Kan : IEEE J. Quantum Electron. **QE-16** (1980) 1108.