

《解 說》

Laser 에 의한 同位體分離

徐 斗 煥

韓國原子力研究所

(접수일자: 76. 5. 8)

머 리 말

솔이 있어도 땀감이 없으면 불은 타지 않는다. 이것은 原子力에서도 마찬가지로, 原子爐와 核燃料의 양쪽이 갖추어져야 비로서 原子의 불이 일게 된다. 그래서, 지금 先進各國의 原子力界에서는 核燃料을 만드는데 中核이 되는 우라늄濃縮의 技術開發을 서둘러 있다.

우라늄濃縮은, 核燃料가 되는 ^{235}U (天然우라늄中 0.7%含有)를 天然우라늄에서 分離·濃縮하는 것으로서 (1) gas擴散, (2) 遠心分離의 두가지 方法이 알려져 있다. 그러나 laser를 利用한 同位體分離法은, 이와 다른 第三의 濃縮法으로서 從來의 方法에 比해서, (1) 높은 分離比를 얻을 수 있다. (2) energy效率이 높다. (3) 經濟적이다 라는 점에서 期待되어, 各國마다 注目하여 研究를 始作하고 있다.

새로운 laser에 의한 分離法은, 어떤 同位元素, 예를 들면 ^{235}U 이면, ^{235}U 만을 그 同位元素에 對應되는 波長の 빛으로 刺戟시켜 分離하는 것으로서, 原理적으로는 오래 前부터 알려져 있었다.^{1,2)} 단 當時는 좋은 光源이 없어서 實用化는 도저히 생각할 수 없었다.

그러나, laser가 생기고 또한 波長可變의 laser 出現으로 事情이 一變하였다. 特히 1974年 美國 San Francisco에서 열린 第 8回量子 electronics 國際會議에서 Lawrence Livermore研究所가 ^{235}U 의 濃縮實驗 成功을 發表한³⁾ 以來, laser에 의한 同位體分離法은 世界의 原子力關係者의 關心거리가 되었다. 美國의 試算에 의하면, 從來의 方法과 比較하여 設備 cost를 3分の 1, 運轉 cost를 10分の 1로 줄일 수 있을 것이라고 報告하고 있다. 그래서 原子力先進各國에서 laser에 의한 同位體分離研究開發은 이미 始作되어, 美·蘇·西獨 그리고 日本에서도 研究가 進行되고 있다. laser에 의한 同位

體分離에 關해서는, 이미 基本的인 條件의 檢討가 되어 있고, 約 十種類의 原子分子에 對한 實驗의 成功이 報告되어 있다⁴⁻⁶⁾. 本稿에서는, 筆者가 昨年 一年間 東京大學에 留學하면서 理化學研究所에서 하고 있는 laser 同位體分離의 研究 group에 從事하였을 때 얻은 知識과 入手한 文獻들을 參考로 하여, 1에 laser의 의한 同位體分離의 基本的인 方法을 紹介하고, 2에서는 지금까지 成功한 方法中 代表的인 實例에 對하여 說明하고자 한다.

Laser에 의한 同位體分離는, 英文으로 대개 Laser Isotope Separation이라고 쓰여져 있기 때문에 以下에서는 LIS라고 略記한다.

1. LIS의 基本的過程

1-1 分離의 基本條件

LIS가 成立하기 위해서는

(1) 特定한 isotope 原子 또는 分子의 energy 準位를 laser에 의하여 選擇적으로 勵起시킬 수 있을 것.

(2) 이에 따르는 分離過程에서 選擇性이 損失되지 않을 것.

이라는 條件을 滿足시켜 주지 않으면 안된다.

第一條件에 對해서는, 먼저 LIS하기 위한 特定 isotope 成分이, 그가 가진 吸收 spectrum이 잘 分離되어 있고, 또한 이에 잘 共鳴하는 單色性이 높은 laser 光源이 있어야 한다. Spectrum의 分解能을 높이기 위해서 試料를 低壓氣相으로 하면, spectral 線幅은 Doppler 幅까지 좁힐 수 있다. 特定 isotope成分이 spectrum上에서 辨別할 수 있도록 하기 위해서는, 그 線幅보다 큰 isotope shift를 가져야 하고, 또한 近傍에 있는 다른 吸收線에서 充分히 떨어져 있어야 한다는 것이 要求된다. Isotope shift는, 核質量이나 核 spin의 差異에 따

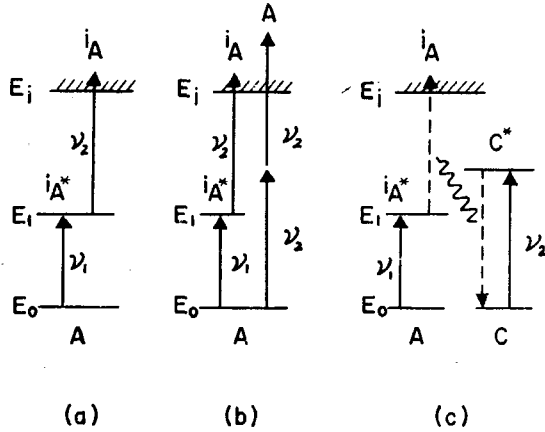


Fig. 1. Schema of Selective Two-Step Photoionization

라서 原子 spectrum 線의 系列이나 超微細構造에 나타나고, 또한 分子의 경우에는 分子의 振動, 回轉構造 및 換算質量이나 慣性 moment의 差異에 의해서 나타난다. 그 isotope shift의 크기 $\Delta\nu_i$ 는 原子分子의 種類와 量子準位에 따라 여러가지 많은 값을 취하게 되지만, 質量비가 큰 isotope에서는 $\nu_0/\Delta\nu_i \approx 10^4$ 程度가 될 수도 있다. 吸收斷面積은, 許容된 電子遷移의 경우, $10^{-10} \sim 10^{-12} \text{cm}^2$ 程度의 값을 가지는 것이 많다. 한편, 發振波長을 外部制禦할 수 있는 laser의 研究가 最近 急速히 進行되어, 選擇勵起의 光源으로서 優秀한 것이 開發되고 있다⁷⁾. 이것은 發振出力光의 spectrum 幅이 吸收線의 Doppler 幅보다도 좁다. 따라서 吸收斷面積을 有效하게 使用하려면, laser를 多 mode 發振시키는 研究 등이 必要하다.

第二의 條件은, 勵起된 isotope를 勵起狀態의 壽命이 끝나기 前에 收率 좋게 分離시켜야 한다. 分離過程에서 그 自身이 isotope 選擇성을 가지지 않아도 좋지만, 選擇한 勵起狀態에 있는지 없는지를 區別할 수 있는 機能을 가질 必要가 있고, 그것에 의해서 isotope의 選擇성을 끝까지 維持할 수 있는 것이어야 한다. 勵起狀態의 原子分子는 放射의 또는 非放射의 緩和하는 한편, 適當한 手段을 쓰면, (1) 分解, (2) ion化, (3) 異性體化, (4) 重合, (5) 化合, (6) exciplex 生成 등의 過程을 일어나게 할 수 있다는 것이 알려져 있다. Isotope의 選擇勵起에 따르는 分離過程은, 먼저 이와같은 過程의 하나를 積極的으로 利用하여 勵起狀態의 isotope를 보다 安定된 狀態로 옮겨 놓고, 다음에 isotope를 抽出하는 方法을 취하여야 한다. Isotope를 抽出하는 데는, 採用한 過程에 應해서, 適當한 物理的 化學의 手段이 쓰

여진다. 以下에 LIS 方法을 紹介한다.

1.2 Isotope 量 分離하는 方法

1) 光 ion化를 利用한 方法

Laser로서 勵起된 isotope成分을 光照射시켜 ion化하여, 電場을 걸어서 抽出하는 方法이다. 初期狀態 E_0 (基底狀態에 限하지 않고)에 있는 原子 A의 isotope 'A'를 laser光 $h\nu_1$ 으로서 準位 E_1 에 選擇勵起시켜, 뒤따라 第二의 照射光 $h\nu_2$ 를 使用해서 ion化시키는 것으로서, 選擇의 二段階法의 한 方法이다. (그림 1(a))



$h\nu_1$ 은 'A'의 共鳴吸收에 의해서 勵起되고, $h\nu_2$ 는 勵起狀態 E_1 에 있는 原子만을 辨別하여 ion化시키지 않으면 안되므로

$$E_1 - E_0 = h\nu_1 \quad (2)$$

$$E_i - E_0 > h\nu_2 > E_i - E_1 \quad (3)$$

이다. 여기서 E_i 는 ion化 energy이다. 準位 E_1 의 吸收斷面積을 σ_1 라 하고, 이것을 laser 入力 power P_1 으로서 飽和시켰다고 하면

$$\sigma_1 P_1 / h\nu_1 = 1/T \quad (4)$$

右邊은 準位 E_1 의 緩和 rate이다. 勵起原子를 緩和에 의한 損失없이 ion化하기 위해서는, $h\nu_2$ 의 吸收斷面積 σ_2 와 入力 power P_2 는

$$\sigma_2 P_2 / h\nu_2 > 1/T,$$

따라서

$$P_2 / P_1 > (\sigma_2 / \sigma_1) (\nu_2 / \nu_1) \quad (5)$$

이러야 한다. σ_2 에 對한 正確한 값은 모르지만, $\sigma_2 = 10^{-17} \sim 10^{-19} \text{cm}^2$ 程度의 매우 작은 값으로 알려져 있다. $\sigma_1 = 10^{-10} \sim 10^{-12} \text{cm}^2$, $\nu_2 / \nu_1 = 1$ 로 잡으면, P_2 는 P_1 의 $10^5 \sim 10^7$ 倍의 強度가 必要하게 된다.⁸⁾

한편, P_2 가 너무 커서 準位 E_0 에서 2光子 ion [그

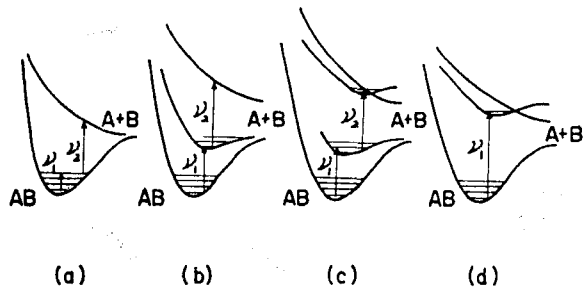


Fig. 2. Schema of Molecular photodissociation

Table I Example of Laser Isotope Separation

Isotope	Place	Material	Method	Light Source	Reference
D	Aerospace	H ₃ COH	PCS	HF	4)
D	Berkeley	H ₂ CO	PD	ruby	14)
D	LLL	H ₂ CO	PD	Cd	24)
¹⁰ B, ¹¹ B	LASL	BCl ₃	STS PD	CO ₂ +u. v.	13, 17)
¹⁰ B, ¹¹ B	NBS	BCl ₃	PCS	CO ₂	25)
¹⁰ B, ¹¹ B	Moscow	BCl ₃	MPA PD	CO ₂	26)
¹⁰ B, ¹¹ B	LASL	BCl ₃	MPA PD	CO ₂	27)
¹² C	Berkeley	CH ₂ O	PD	dye	28)
¹³ C, ¹⁸ O	Rensselaer	CO	PCS	iodine	29)
¹⁴ N, ¹⁵ N	Moscow	NH ₃	STS PD	CO ₂ +u. v.	30)
¹⁴ N, ¹⁵ N	Osaka	NH ₃	STS PD	CO ₂ +u. v.	21)
¹⁴ N, ¹⁵ N	New York U	C ₂ H ₂ N ₄	PD	dye	31)
³² S, ³⁴ S	Moscow	SF ₆	MPA PD	CO ₂	32)
³⁴ S	LASL	SF ₆	MPA PD	CO ₂	33)
³⁵ Cl, ³⁷ Cl	Moscow	HCl	STS PD	Raman+Nd glass	34)
³⁵ Cl, ³⁷ Cl	NBS	CSCl	PCS	Ar or dye	35)
³⁵ Cl, ³⁷ Cl	Columbia	ICl	PCS	dye	36)
³⁵ Cl	Max-Planck	HCl	PCS	HCl	37)
⁴⁰ Ca	Köln	Ca	STS PI	dye+Ar	11)
⁸¹ Br	Berkeley	Br ₂	PCS	Nd-YAG	38)
⁸¹ Br	理化學研	Br ₂	PCS	dye	22)
Ba	LLL	Ba	LPPD	dye	39)
²³⁵ U, ²³⁸ U	LLL	U	STS PI	dye+u. v.	16)
²³⁵ U	LLL	U	STS PI	Xe+Kr	18)
²³⁵ U, ²³⁸ U	Avco	U	STS PI	dye+N ₂	18)

PCS: Photochemical Separation MPA: Multiphoton Absorption
 LPPD: Light Pressure Photodeflection STS: Selective Two Step
 PD: Photodissociation or Photopredissociation PI: Photoionization

팀 1 (b)]가 일어나면 當然 isotope의 選擇性을 喪失 (isotope scrambling) 하기 때문에, P₂를 높이는 데에도 限界가 있게 된다. 또한 ion原子 ⁱA⁺가 中性原子 A과 의 衝突에서 電荷를 옮기게 된다.



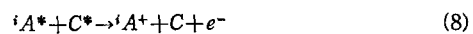
의 斷面積은 中性原子끼리의 衝突에 의한 勵起移乘



의 斷面積보다도 一般의 斷面積으로 커서, 이와 같은 衝突에 의한 isotope選擇性의 喪失을 避하기 위해서는 試料를 低壓으로 하지 않으면 안된다. 이들과 같은 理由에서 이 方法으로는 높은 效率의 isotope分離를 期待할 수는 없다.

이 缺點을 補強하기 위해서 catalyzer를 쓰는 方法이 提案되고 있다.⁹⁾ 即 ν₂에 對하여 吸收斷面積이 큰 共鳴遷移를 가진 原子 C를 共存시켜, ν₂의 빛을 일단 C에 補正시킨다. 勵起 C*와, ν₁으로 選擇勵起된 ⁱA*와의 사

이의 第2種衝突에 外해서 C*의 勵起 energy를 ⁱA의 ion化에 利用하자는 것이다. [그림 1 (c)]



(3)式的 範圍인 hν₂에 共鳴하는 適合한 catalyzer를 찾는 것은 반드시 어려운 것이 아니고, 또 이것에 의해서 σ₂는 實効의 1000倍 程度 커질 可能性도 있다.

2) 分子의 光解離를 利用한 方法

Isotope의 分子는, laser hν₁로서 選擇勵起된 뒤에 解離過程을 經由해서 한층 더 安定한 狀態로 誘導할 수 있다.¹⁰⁾ 解離에 第二의 光照射 hν₂를 利用하는 方法



에 있어서는, 二段階光 ion化의 (3)式에서 E₁을 E_d(解離 energy)로 置換한 條件이 滿足되어야 한다. 一段階의 光 hν₁으로 勵起된 狀態는, 基底電子狀態에 屬하는 準位일지라도 [그림 2 (a)], 또한 電子勵起準位일지라

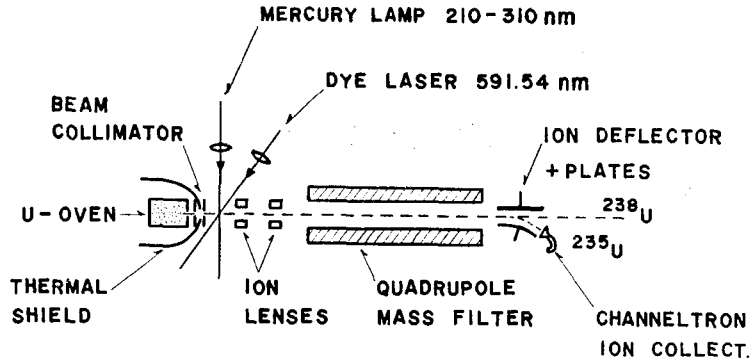


Fig. 3. Experimental Apparatus for the Selective Excitation of Uranium Vapor

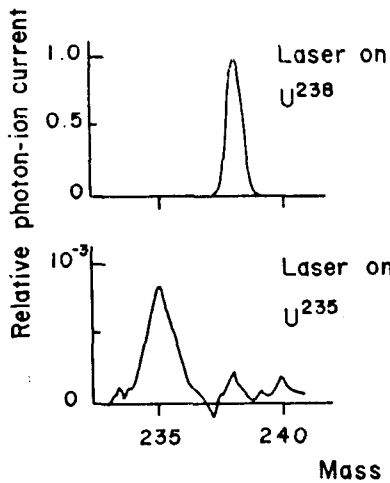


Fig. 4. Mass Filter Trace of LIS of U

도 [그림 2(b)], 二段제에는 前期解離準位를 利用할 수 있다. [그림 2(c)]. 隨動準位를 利用하는 경우에는, 選擇性이 없는 熱의 分布와 區別할 수 있게 높은 振動準位를 擇하는 것이 좋다.

$$h\nu_1 \gg kT \tag{10}$$

또한 分子解離를 隨伴하는 吸收 spectrum은 一般의 輻이 넓은 spectrum이며, 긴 波長쪽의 wing 輻 $\Delta\nu_w$ 에 對하여

$$h\nu_1 \gg h\Delta\nu_w \tag{11}$$

이러야 解離後의 isotope選擇性이 保障된다.

光 pulse의 照射時間에 對해서도 條件이 있다. 例를 들면, 一段제의 勵起時, 勵起遷移의 下準位에 分子가 供給될려면, 回轉緩和時間보다 laser의 pulse輻이 充分히 길어야 하며, 第二段光 pulse輻이나, \rightarrow 및 三段間

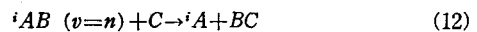
의 遲延時間은 準位 E_1 의 平均壽命보다 充分히 짧게 취하지 않으면 안된다.

Isotope의 分子를 前期解離準位에 laser로서 一段階만 勵起시켜, 解離에 誘導하는 單純한 方法로 可能하다¹⁰⁾ [그림 2(d)].

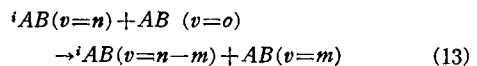
前期解離準位에서는, 解離 rate를 $10^7 \sim 10^{10} \text{sec}^{-1}$ 程度로 높게 취할 수 있는 것이 有利한 點이나, 한편 不確定性原理에 의하여 吸收線輻 $\Delta\nu_{pd}$ 는 넓게 퍼져서, 그 分辨率은 $\nu_0/\Delta\nu_{pd} = 10^3 \sim 10^6$ 程度로 低下하기 때문에 isotope shift가 큰 것만이 對象이 된다.

3) 誘起化學反應을 利用한 方法

原子分子를 laser로서 勵起하므로써 化學反應을 誘起시켜, 이것에 의하여 特定한 isotope를 分離하는 方法이다. Isotope의 選擇의인 振動勵起를 利用할 때 쓰이는 反應은, 例를 들면



가 있다. 이것이 選擇性이 없는 熱分布에 의한 反應에 影響받지 않을것, 反應의 逆過程이나 振動緩和



보다 越等한 rate로 (12)式이 成立되어야 한다. 이런 뜻에서 反應의 速度定數가 매우 重要하다.

2. LIS의 實用化

前述한 LIS의 여러方法에 의해서 分離된 isotope에 對하여, 지금까지 알려진 것들을 原子番號順序로 表 1에 表示한다. 우라늄에 對해서는 2.2에서 詳述하기도 하고 2.1에서는 1.2에서 記述한 LIS中 代表的인 것을 紹介한다.

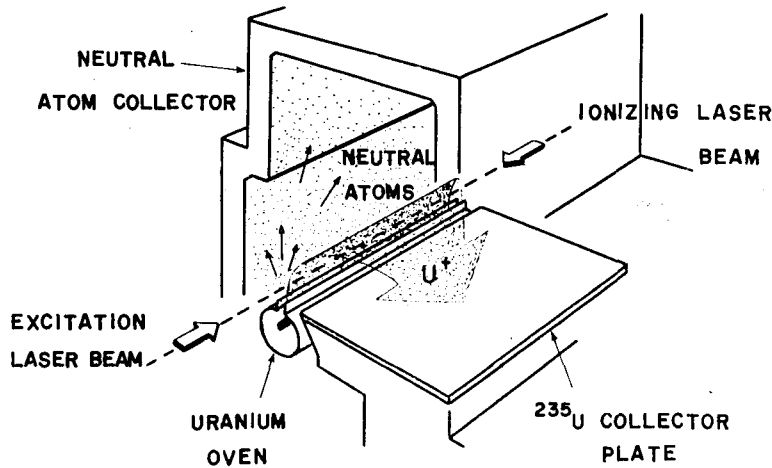


Fig. 5. Geometry of the Photo-separation System of U

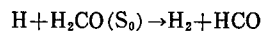
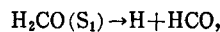
2.1 實驗的으로 分離된 isotope

二段階法에 의한 光 ion化는 最初 Rb蒸氣로서 成功하고, 그後 Ca蒸氣로서 isotope 分離에 應用되었다¹¹⁾. 後述할 ²³⁵U의 濃縮도 이方法을 利用하고 있다. 原理的으로는 分子에도 適用할 수 있지만, 分子는 ion化 energy가 높고 (8~12eV, 光波長으로 1000~1500Å), $h\nu_1, h\nu_2$ 로서 2分하였다 할지라도 紫外線領域의 強力한 光源이 必要하기 때문에, 아직 成功한 例는 없다. Ca의 例에서는 準安定狀態 $4s4p^3P_2$ 를 初期狀態 E_0 에 취하여, 直流放電을 使用해서 $5 \times 10^9/cc$ 程度의 原子를 이곳에 貯藏한다. 이것을 色素 laser (6162Å, 2mW)로서 $4s5s^3S_1$ 狀態로 isotope 選擇勵起시켜, 다음에 Ar⁺ laser (2.5W)로서 ion化하여 ⁴⁰Ca, ⁴²Ca를 分離하고 있다.

分子의 光解離를 利用한 方法은 NH₃ 및 BCl₃의 光分解에 適用되어, 分解生成物에 있어서 各各 ¹⁵N₂, ¹¹B가 濃縮되었다^{12, 13)}. NH₃의 경우는 CO₂ TEA laser (60mJ)을 照射하여 NH₃의 變角振動을 勵起시켜, 空氣放電의 빛으로 解離하였다. 放電光이 基底狀態의 分子를 直接 解離치 못하게 短波長쪽을 cut하여, 두개의 光pulse(幅 = 數百 ns)는 充分히 同期토록 하고 있다. 自然存在比에서 ¹⁴N₂ : ¹⁵N₂ = 1 : 4의 比로 濃縮하였다. 이것이 laser로서 높은 分離比를 얻은 最初의 實驗이다.

Laser에 의한 一段階의 光前期解離에는, H₂CO의 分離에 의한 H₂, D₂ 分離, Br₂分子의 分解에 의한 ⁸¹Br, ⁷⁹Br의 分離 등이 있다^{14, 15)}. H₂CO는 基底狀態 S₀에서의 強한 紫外吸收가 잘 調査되어 있고, ruby laser의 高周波 (3472Å)로서 選擇勵起된 S₁狀態에서는, 主로 다

음과 같은 過程



를 통하여 解離하여, 水素分子가 된다. 吸收線의 isotope shift (5~10cm⁻¹)가 매우 크다는 것, 解離하지 않는 H₂CO分子를 液體窒素로서 trap시킬 수 있다는 有利한 點이 있다. H₂CO : D₂CO = 1 : 1의 比에서 D₂ : H₂ = 6 : 1의 濃度比로 濃縮되었다.

誘起化學反應을 利用한 方法으로 LIS에 처음 成功한 것은 CH₃OH이다⁴⁾. CH₃OH의 OH 伸縮振動을 HF化學 laser (2.7μm)로서 勵起시켜, Br₂와의 反應을 誘起한다. 約 6kJ의 laser照射로서 殘餘의 CD₃OD와 CH₃OH의 存在比는 1 : 1에서 20 : 1로 變化하였다.

2.2 우라늄의 LIS

우라늄原子는 色素 laser가 cover하는 4000~6000Å의 波長範圍에 많은 共鳴吸收線이 있고, 그 어떤것은 isotope shift ≈ 0.4cm⁻¹, 吸收斷面積 10⁻¹³~10⁻¹⁴cm² 程度를 가지고 있다. 二段階光 ion化를 利用한 우라늄의 LIS에 成功한 最初의 實驗¹⁶⁾은 다음과 같다.

金屬우라늄을 2100°C로 加熱하여 壓力 0.01Torr, 密度 5 × 10⁻¹⁰cm⁻³의 蒸氣를 만들어, 이것을 偏平한 斷面을 가진 beam으로 하여 高眞空속에 날린다. Oven에서 18mm 떨어진 곳에서 beam의 直角方向에서 光을 照射시켜, ion化한 isotope의 beam을 電揚으로서 굽힌 뒤 두개의 ion lens로서 mass filter의 入口에 focusing 시키고 있다. (그림 3); Isotope의 選擇勵起에는 40mW

Table I. Laser Isotope Separation

- 1) Well resolved isotope shift in absorption.
- 2) Cases which excites only one isotope.
- 3) Process which acts on only excited species.
- 4) Absence of thermal excitation energy transfer and scrambling processes.

의 연속發振 色素 laser (5915.4Å, 發振幅 50MHz)를 사용하고 있다. 우라늄蒸氣의 Doppler幅은 약 1GHz, 이것에 대하여 ^{235}U , ^{238}U 의 isotope shift는 약 8 GHz 이므로, 充分히 選擇勵起가 可能하다. 光 ion化에는 2500W의 水銀 lamp를 사용하고 있다. Laser勵起되지 않은 原子에 直接的인 ion化를 防止하기 위해서 2100Å 보다 짧은 波長의 빛을 cut하는 filter를 통해서, 약 8W/cm²의 power密度로서 照射하고 있다. 實驗結果는 isotope의 濃縮을 明白하게 나타내었다. 試料로서는 天然우라늄을 사용하고, 色素 laser를 ^{238}U 또는 ^{235}U 의 吸收線에 맞췄을 때 質量分析器를 scanning하여 얻은 trace를 各各 그림 4에 表示한다. 두개의 trace에서 mass spectrum線 強度比가 약 1000:1로 되어있지만, 이것은 ^{235}U 가 自然存在比에서 ^{238}U 의 1/140이기 때문이며, 遷移에는 超微細構造가 있어서, 色素 laser가 그 가운데의 하나에 共鳴的으로 勵起하고 있기 때문이다. 이 有名한 實驗裝置의 寫眞이 Physics Today에 掲載되어 있다¹⁷⁾.

이 實驗에서는, 原理的으로 ^{235}U 를 높은 濃度로 分離할 수 있다는 것을 實證한 것 뿐이고, 第二段階의 吸收斷面積이 작은 遷移에 對하여, 放電管光源을 使用하였기에 分離된 우라늄의 量은 極히 적다. 그래서 보다 많은 量을 分離하기 위해서, 다음에는 短波長인 두개의 laser를 利用한 實驗이 遂行되었다^{18, 19)}. Xe ion laser의 3781Å으로서 第一段, Kr ion laser의 3507Å와 3564Å의 두개의 出力으로서 第二段의 勵起에 使用하여 電離시켰다. 3781Å의 遷移에 對한 ^{235}U 와 ^{238}U 의 isotope shift는 3GHz이다. 이 實驗에서는 原子線의 強度를 增加시키기 위해서 그림 5와 같이 1mm×80mm의 slit에서 나오는 板狀의 beam을 쓰고, 反對方向에서 70mW의 Xe laser와 약 1W의 Kr laser의 빛을 通過시켰다. 發生한 ion은 -1500V의 電壓이 걸린 集電極위에 中和하여 附着하게 된다. 이와 같이 하여 약 3% 濃縮한 우라늄을 2時間 동안에 4mg얻었다. 이것을 試驗管에 採集한 寫眞이 別冊 science에 실려있다²⁰⁾.

맺는 말

前述한 바와 같이 LIS는 앞으로 飛躍的인 發展이 期待되는 分野이므로, (1)原子分子의 高分解能 分光, (2)laser誘起化學反應, (3)高出力, 效率이 높은 周波數可變 laser의 開發 等の 基礎的인 研究가 앞서야 할 것이다. 이웃나라 日本에서도, 大阪大學²¹⁾, 理化學研究所²²⁾ 등에서 많은 豫算을 들이면서 LIS의 研究가 開始되었고 이미 豫備的인 成果를 얻고 있으며, 日本原子力研究所에서도 今年度 부터 LIS의 研究에²³⁾ 着手하여 앞으로의 進展이 注目되고 있다. 이와 같이 LIS의 實用化가 進行함에 따라 그 基礎的인 資料를 外國에서 入手하기 어려울 것 이豫想되므로, 우리나라에서도 獨自的인 基礎研究가 점점 더 必要할 것으로 思料된다. 끝으로 LIS의 條件⁴⁰⁾을 要約해서 表 2에 表示하니 參考하시기 바란다.

參 考 文 獻

- 1) S. Mrozowski: Z. f. Phys., **78**, 826 (1932)
- 2) W. Kuhn, H. Martin: Z. Phys. Chem. Abt., **B21**, 93 (1933)
- 3) B. B. Snavelly: IEEE J., **QE-10**, 771 (1974)
- 4) S. W. Mayer, et al: Appl. Phys. Lett., **17**, 516 (1970)
- 5) V. S. Letoknov: Science, **180**, 451 (1973)
- 6) C. B. Moore: Acc. Chem. Research, **6**, 323 (1973)
- 7) J. Kuhl, W. Schmidt: Appl. Phys., **3**, 251 (1974)
- 8) R. V. Ambartzumian, V. S. Letokhov: Appl. Opt., **11**, 354 (1972)
- 9) S. E. Harris, D. B. Lidow: Appl. Phys. Lett., **26**, 104 (1975)
- 10) V. S. Letokkov: Chem. Phys. Lett., **15**, 221 (1972)
- 11) U. Brinkmann, et al: Appl. Phys., **5**, 109 (1974)
- 12) R. V. Ambartzumian, et al: Zh. E. T. F. Pisma Red., **17**, 91 (1973)
- 13) S. Rockwood, S. W. Radideau: IEEE J., **QE-10**, 789 (1974)
- 14) E. S. Yeung, C. B. Moore; Appl. Phys. Lett.,

- 21, 109 (1972)
- 15) S.R. Leone, C.B. Moore: IEEE J., **QE-10**, 788 (1974)
- 16) S.A. Tuccio, et al: IEEE J., **QE-10**, 790 (1974)
- 17) Physics Today, Sept., 17 (1974)
- 18) S.A. Tuccio, et al: IEEE J., **QE-11**, 101D (1975)
- 19) B.B. Snavely, et al: in Laser Spectroscopy, 268 (Springer, Heidelberg, 1975)
- 20) 宅間宏: 別冊 Science, Laser 特集, 96 (霜田光一編, 日本經濟新聞社, 1975)
- 21) 井澤靖和, 山中千代衛: 電子裝置研究會資料, EDD-76-10 (電氣學會, 1976)
- 22) 鈴木和雄, 難波進: 電子裝置研究會資料, EDD-76-11 (電氣學會, 1976)
- 23) 小幡行雄: 電子裝置研究會資料, EDD-76-9 (電氣學會, 1976)
- 24) J.B. Marling: Chem. Phys. Lett., **34**, 84 (1975)
- 25) S.M. Freund, et al: Chem. Phys. Lett., **32**, 255 (1975)
- 26) V.S. Letokhov, et al: JETP Lett., **20**, 597 (1974)
- 27) J.L. Lyman, et al: IEEE J., **QE-11**, D103 (1975)
- 28) J.H. Clark, et al: Chem. Phys. Lett., **35**, 82 (1975)
- 29) O. Dunn, et al: J. Phys. Chem., **77**, 878 (1973)
- 30) R.V. Ambartzumian, et al: JEPT Lett., **17**, 91 (1973)
- 31) R.R. Karl Jr., et al: Chem. Phys. Lett., **36**, 275 (1975)
- 32) R.V. Ambartzumian, et al: JEPT Lett., **21**, 375 (1975)
- 33) J.L. Lyman, et al: Appl. Phys. Lett., **27**, 87 (1975)
- 34) J.L. Lyman, et al: Appl. Opt., **11**, 354 (1972)
- 35) M. Lamotte, et al: Chem. Phys. Lett., **30**, 165 (1975)
- 36) D.D.S. Lin, et al: J. Am. Chem. Soc., **97**, 2557 (1975)
- 37) D. Arnodai, et al: Phys. Rev. Lett., **34**, 1597 (1975)
- 38) S.R. Leone, et al: Phys. Rev. Lett., **33**, 269 (1974)
- 39) A.F. Bernhardt, et al: Appl. Phys. Lett., **25**, 617 (1974)
- 40) C.B. Moore: 東京大學招請 Seminar에서 (1976)