

레이저를 이용한 동위원소분리

김 응

(연세대 이과대 물리학과교수)

1. 서 론

1970년대에 들어서면서 레이저의 종류가 다양해지고, 특히 파장가변 레이저가 등장하고 그 출력이 높아짐에 따라 레이저를 이용한 동위원소분리에 대한 연구개발이 활발해지기 시작하였다. 특히 미국, 소련등 강대국을 비롯하여 선진각국에서는 우라늄 동위원소의 분리기술이 경제적, 군사적 그리고 기술적인 면에서 지니는 중요성 때문에 각급연구기관을 동원하여 그 기초적인 연구는 물론 실용적 목적을 위한 연구개발을 국책적으로 지원하고 있다. 그 결과 80년대에 들어서면서 공업적인 우라늄 동위원소 분리가 연구개발 단계에 들어서고 있다. 1985년 미국의 에너지성이 우라늄 동위원소 농축에 대한 다음세대의 생산기술로서 원자법을 이용하는 레이저 동위원소 분리법 (Atomic Vapor Laser Isotope Separation)을 공식으로 선택했다는 보고는 이제 레이저분리법이 실용적 단계에 들어서고 있다는 사실을 뒷받침하고 있다. 일본에서도 레이저분리기술의 개발을 위한 대규모의 국책연구가 현재 활발히 추진되고 있다는 것은 잘 알려진 사실이다.

우리나라에서 전체 발전량에 대한 원자력 발전량이 차지하는 비율이 현재 30퍼센트를 넘어서고 있고 계속늘어날 전망이다. 이러한 산업경제의 선진화와 자립화를 추구하고 있는 현 시점에서 핵연료에 대한 기술확보 및 국산화는 머지않아 대두될 국가적인 과제가 아닐 수 없다.

현재 핵연료의 농축및 공급은 몇명 강대국에 의하여 독점적으로 이루어지고 있다. 그러나 기존하는 기계확산법이나 원심분리방법에 비하여 시설투자, 운영비 그리고 생산단가면에서 월등히 우수하다고 평가되고 있는 레이저

동위원소분리법이 대두됨에 따라 선진대열에 있는 많은 나라들이 핵연료의 자체확보를 위하여 이 분야에 대한 연구개발을 서두르고 있는 것이다.

우리나라에서는 이 분야에 대한 연구와 관심이 아직도 미진한 상태에 있으나 앞으로 이 분야에 대한 관심이 높아질 것으로 기대되고 있어 레이저를 이용한 동위원소분리방법에 대한 기초적인 원리를 소개하고자 한다.

2. 동위원소 스펙트럼의 변위(Isotope Shift)

레이저 동위원소분리(Laser Isotope Separation)란 레이저가 갖고 있는 단색성(monochromaticity)과 높은 에너지 밀도를 이용하여 서로 다른 동위원소를 포함하고 있는 원자나 분자들을 선택적으로 여기시켜 이를 여러가지 방법에 의해 분리하는 방법을 말한다. 동위원소의 원자핵들은 원자번호는 같으나 그 질량이 다르기 때문에 원자 스펙트럼 선의 진동수 혹은 파장에 미소한 차이를 보이게 되는데 이를 동위원소 변위(isotope shift)라고 한다. 여러개의 원자들의 결합으로 이루어지고 있는 분자의 스펙트럼에도 이러한 변위가 일어나게 된다.

가장 간단한 수소원자의 경우 경수소와 중수소 사이의 이 변위는 대략 다음과 같다는 것으로 이론적으로 계산할 수 있다.

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \sim 2.7 \times 10^{-4}$$

수소의 경우 이 값은 실측치와 잘 일치한다.

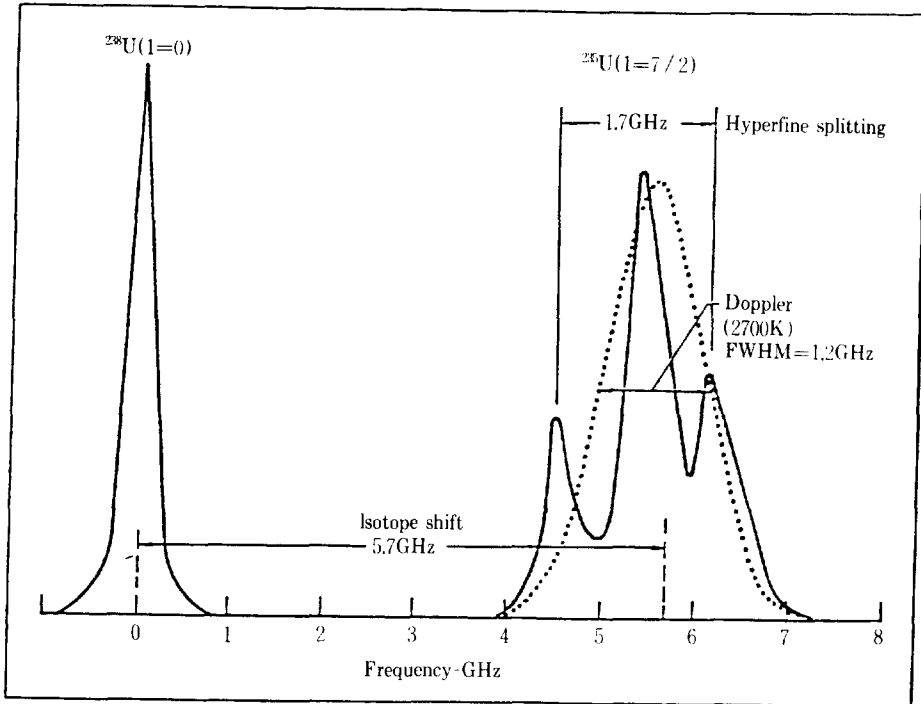


그림 1. 우라늄 공명흡수선에서의 동위원소 변위

표 1. 여러가지 동위원소의 변위

Atoms	Wavelength (Å)	Isotope shift (cm ⁻¹)	Doppler Linewidth (cm ⁻¹)
⁶ Li- ⁷ Li	3232.6	0.35	0.026
¹⁰ B- ¹¹ B	2497.7	0.175	0.44
²⁰⁰ Hg- ²⁰² Hg	2536.5	0.179	0.04
²³⁵ U- ²³⁸ U	4246.3	0.280	0.055

Molecules	Wavelength (μm)	Isotope shift (cm ⁻¹)	Rotational bandwidth (cm ⁻¹)
¹⁰ BCl ₃ - ¹¹ BCl ₃	10.15	9	25
¹⁴ NH ₃ - ¹⁵ NH ₃	10.53	24	71
⁴⁸ TiCl ₄	20.06	7.6	18
²³⁵ UF ₆ - ²³⁸ UF ₆	16.05	0.55	16

더 복잡한 원자나 분자의 경우에는 이론적인 계산이 복잡해 질뿐 아니라 동위원소 핵의 체적 및 전하 분포의 차이 및 핵 스핀(nuclear spin)의 차이에서 오는 효과등도 고려 하여야 함으로 정확한 이론적인 추적이 불가능하게 된다.

따라서 동위원소 변위는 원자나 분자의 스펙트럼을 실험적으로 분석하여 구하게 된다.

그림 1 은 우라늄 원자의 공명 스펙트럼선에서 일어나는 동위원소 변위를 보이고 있고 표1에는 여러가지 동위원소에 대한 변위를 보이고 있다.

그림1에서는 U^{235} 가 갖고 있는 핵 Spin 때문에 생기는 스펙트럼 선의 초미세분리(hyperfine splitting)와 도플러 효과(Doppler effect)에 의한 선폭의 broadening이 표시되어 있다.

이러한 선폭 보다도 동위원소 변위가 커야만 동위원소의 선택적 여기가 가능하게 된다.

U^{235} 와 U^{238} 의 경우 동위원소 변위가 선폭 보다도 훨씬 크다는 것을 알수있다. 분자의 경우에는 동위원소 분리에서 이용하는 준위들은 진동준위(Vibrational level)들인데 이러한 진동준위들은 미세한 회전준위(rotational level)들에 의하여 일정한 선폭을 지니게 된다. 표1에서 보는바와 같이 분자인 경우 동위원소 변위에 비하여 회전준위에 의한 선폭이 일반적으로 더 크다는 것을 알 수 있다.

따라서 동위원소 분리에 필요한 선택적 여기가 효과적으로 이루어지게 하기 위해서는 회전준위에 의해서 생기는 선폭의 증가를 줄여 주어야 한다.

이를 위한 여러가지 방법들이 시도되고 있는 바 시료기체를 단열팽창시킴으로써 그 온도를 낮춰 주는 초음속류법(Supersonic flow method)이 흔히 사용되고 있다.

3. 선택적 여기에 의한 분리

단색성이 좋은 레이저 광을 이용하고 동위원소 변위를 이용하면 시료중 특정한 동위원소를 갖고있는 원자나 분자만을 특정한 여기 상태로 여기시킬 수 있으며 이렇게 여기된 원자나 분자들은 여러가지 물리, 화학적 방법으로 분리시킬 수 있다.

광여기된 원자나 분자들을 분리하는 방법은

- 1) 광 이온화 방법
- 2) 광 해리 방법
- 3) 다광자 해리 방법
- 4) 광화학 반응법

등으로 분류할 수 있다.

3.1 광해리 방법(Photoionization)

선택적으로 여기된 동위원소를 강한 빛을 조사하여 이온화하고 이 이온들을 전기, 자기적인 방법을 이용하여 분리하는 방법을 광 이온화 방법이라 한다.

광이온화가 2단계 혹은 3단계에 이루어질 수 있는데 전자를 2단계 광 이온화, 후자를 3단계 광 이온화 방법이라 부른다.

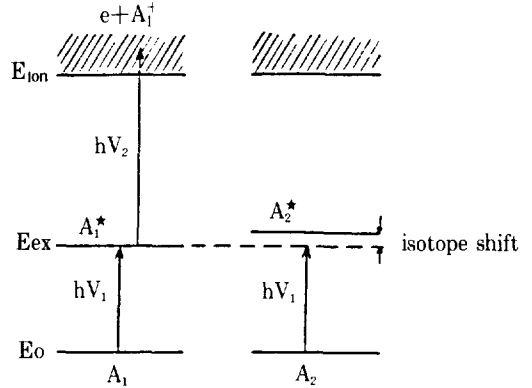


그림 2. 광자 이온화 방법

그림2에 2단계 광 이온화 과정을 보이고 있다.

제2의 광 조사에는 꼭 레이저 광을 사용할 필요는 없으나 그 조사광의 주파수 V_2 는 다음과 같은 범위 속에 들어 있어야 한다.

$$E_{Ion} > hV_2 E_{Ion} - E_{ex}$$

3단계 광 이온화 방법도 같은 원리에 따르지만 두개의 다른 단색성이 좋은 레이저 광이 필요하게 된다.

여기서 E_{Ion} 는 이온화 에너지이고 E_{ex} 는 여기 에너지이다.

여기 상태에 있는 원자의 이온화 단면적은 여기 단면적보다 훨씬 적을 뿐만 아니라 그 정확한 측정값도 잘 알려져 있지 않다.

여기 상태의 원자를 그 수명 τ 보다 짧은 시간내에 이온화를 하기 위해서는 조사광의 파워 밀도 P_2 는 다음 관계를 만족 하여야 한다.

$$P_2 > \frac{hV_2}{\sigma_{Ion}\tau}$$

여기서 σ_{Ion} 는 이온화 단면적을 의미한다.

대전자 원자에서는 그림3에 보인 바와 같이 제1 이온화 계열보다 높은 에너지를 갖는 제2의 에너지 준위가 존재하게 되는데 이 에너지 준위에 원자가 여기 되면 이 여기된 원자는 자기 스스로 이온화 하게 된다.

이것을 자동 이온화(ato-ionization) 혹은 전기 이온화

(preionization)라 한다.

이러한 과정을 이용하면 집적 광 이온화보다 그 효율이 훨씬 높을 수 있다.

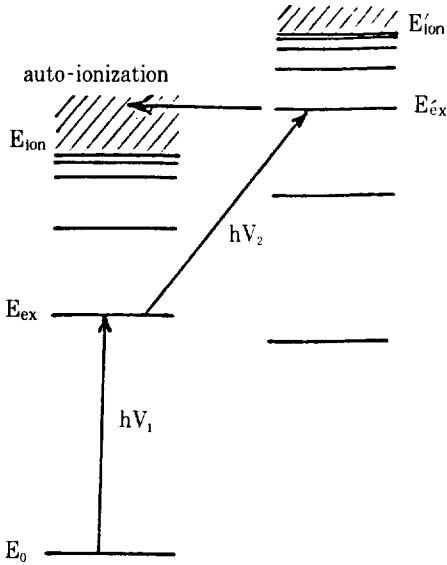


그림 3. Autoionization process.

3.2 광 해리법(photo dissociation)

선택적으로 여기된 분자를 제2의 레이저광을 조사하여 해리하는 방법에는 여러 가지가 있다. 그림4는 2단계 광 해리 과정을 설명하는 그림이다.

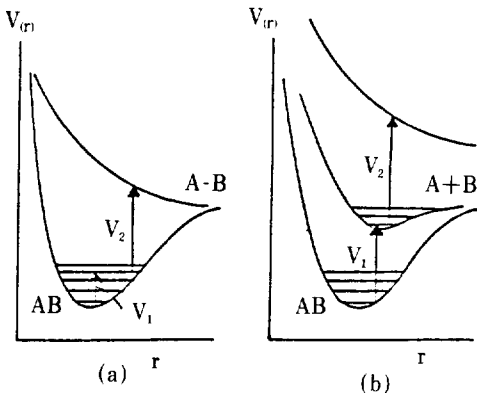


그림 4. 2단계 광 해리 과정

그림4의 (a)에서는 제2의 레이저광으로 집적 해리성

(non bonding) 전자여기상태로 올려 분자를 구성단위인 A와B로 분리하는 것이고 그림4의 (b)에서는 1차 선택적 여기를 통하여 다른 전자상태의 에너지준위로 여기시킨 다음 제2의 광자로서 이를 해리시키는 방법이다. 이밖의 광이론법에서와 마찬가지로 전기해리법(predissociation)을 이용할 수 있다.

분자의 2단계 여기에 있어서 제1 레이저광의 진동수 V_1 과 제2 레이저광의 진동수 V_2 는 다음과 같은 관계를 만족하도록 선택되어야 한다.

$$hV_2 < E_{dis} < h(V_1 + V_2)$$

여기서 E_{dis} 는 분자 해리에너지이다. 일반적으로 열여기때문에 생기는 선택성의 저하를 줄이기 위하여 $hV_1 \gg kT$ 가 되도록 하여야하며 여기 레이저의 펄스폭 Z_p 가

$$Z_{rot} < Z_p < Z_{vib}$$

범위에 있도록 가스의 압력을 선택하는 것이 바람직하다. 여기서 Z_{rot} 과 Z_{vib} 는 회전 준위 및 진동준위의 수명이다. 1단계 여기단면적에 비하여 2단계 해리단면적이 적기 때문에 제2단계 레이저의 출력이 더 커야한다는 것은 광 이온화 과정에서와 마찬가지로이다.

3.3 다광자 해리법(multiphoton-dissociation)

다원자분자의 기체에 강한 적외선 레이저를 조사할때 레이저의 파장이 분자의 흡수대의 에너지 차이와 일치한

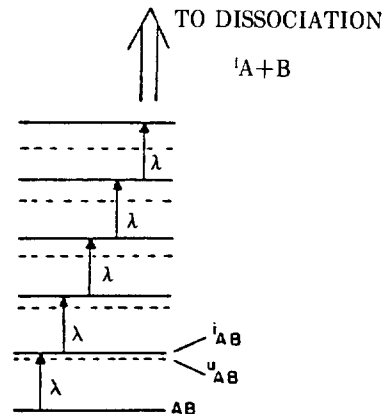


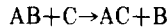
그림 5. 다광자 해리 과정

다면 수많은 광자들(10~100개)이 효율적으로 동시에 흡수되어 분자가 해리하기도 하고 이온화되기도 한다. 이와 같은 현상은 이 이상적인 분자의 진동준위 스펙트럼이 등간격분포를 하고있기 때문에 일어난다고 할 수 있다. [그림 5]

이와같은 해석은 초보적인 이해에 불과하고 그 이론적인 해석은 대단히 복잡한 것으로 알려져 있다. 여러가지 실험적 사실에 의하면 다광자 해리 내지는 이온화는 본질적으로 분자간의 충돌없이 많은 광자들이 거의 동시에 분자에 흡수되는 현상으로 이해되고 있다.

3.4 광 화학반응법(photo-chemical reaction method)

여기상태에 있는 원자나 분자는 화학반응적 활성에서 기저상태에 있는 원자나 분자와 일반적으로 차이를 보이게 된다. 이러한 성질을 이용하여 동위원소를 분리하는 방법을 광 화학반응법이라 한다. 다음과 같이 간단한 화학반응에서



화학반응률 K는 다음과 같은 Arrhenius의 관계식을 만족한다.

$$K = A \exp(-E_{act} / kT)$$

여기서 E_{act} 는 이 반응을 일으키는데 필요한 활성에너지(activation energy)이고 A는 분자들의 충돌횟수등에

관계되는 복잡한 온도 T의 함수이다. 여기상태에 있는 분자인 경우 반응활성에너지가 낮기때문에 반응률 K는 일반적으로 증가하게 된다.

이 방법을 이용하면 원리적으로 제2의 레이저 조사가 필요치 않기 때문에 효율면에서 볼때 다른 방법에 비하여 우수하다고 할 수 있다. 그러나 광 화학반응에 대한 실험적인 자료들이 많이 축적되고 있지만 아직도 이론적인 이해가 부족한 상태이다. 그리고 화학반응에서 생기는 여러가지 중간 생성체들에 의한 복잡한 화학반응들이 관여하게되어 그 분리과정을 분석하는데 아직도 많은 어려움이 있는 것으로 보인다.

4. 레이저분리법에 의한 ^{235}U 의 농축

동위원소분리에 있어서 핵심적인 관심사가 되고 있는 것은 말할 것도 없이 ^{235}U 의 농축이다. 자연 우라늄속에는 핵 연료가 되는 ^{235}U 가 0.71%뿐이므로 현재 대부분의 원자력 발전에 이용되고 있는 경수형 원자로의 핵연료로 사용하기 위해서는 ^{235}U 를 적어도 3%이상으로 농축하여야 한다. 현재 핵연료의 농축은 가스확산법, 원심분리법등 고전적인 방법에 의해서 이루어지고 있고 농축우라늄의 생산, 공급은 미국, 소련, 불란서등 강대국에의해 거의 독점되고 있다.

서론에서도 언급한 바와 같이 레이저를 이용한 동위원소분리방법은 시설투자, 운영및 생산단가에 있어서 종래의 분리방법에 비하여 월등히 우수할 것이라는 판단아래 70년대 중반부터 선진국에서는 국책적인 차원에서 이에 대한 연구및 기술개발이 추진되고 있다.

표2. 레이저법과 다른 방법과의 비교

	Laser Processes				
	Atomic : 2-photon ionization	Molecular : multiphoton dissociation	Centrifuge	Nozzle	Diffusion
Separation factor	10	33	1.25	1.0118	1.0043
Number of steps needed	1	1	6	120	335
Energy requirement (kWh / SWU)	170	51	210	3500	2100
Capital cost (\$ / SWU)	195	18	233	240	388
Possible completion date	1986	1986	1982	?	1945

표2에 실은 수치들은 1976년에 Levy에 의하여 인용된 예측자료인데 레이저분리법이 실용화되는 경우 다른 분리방법보다 기술적, 경제적인 면에서 월등하다는 것을 보여주고 있다. 특히 1985년에 미국이 차세대 농축기술로서 AVLIS(Atomic Vapor Laser Isotope Separation)를 공식적으로 채택하였다는 것은 레이저 분리기술이 벌써 실용단계에 들어서고 있음을 뒷받침하는 중요한 자료라 할 수 있으며 세계적인 관심이 더욱 고조되고 있음을 시사해 준다. 이 과제를 주관하고 있는 Lawrence Livermore 연구소의 제1단계 계획에 의하면 기술개발을 1989년도에 끝내고 분리시설 설치가 끝나는 1992년에 가동시험을 하고 90년대 중반부터 년산 12MSWU 정도의 분리공장이 가동되도록 되어있다.

AVLIS에서는 ^{235}U 와 ^{238}U 사이의 동위원소 변위가 수 GHz정도이므로 [그림 1]

이것은 분해능으로 하면 $10^6 \sim 10^8$ 에 달한다. 따라서 선택적 여기광원으로 사용하는 색소레이저는 이와같은 파장의 차이를 구별할 수 있는 파장폭을 갖어야 한다. 우라늄 동위원소의 선택적 여기 및 이온화를 위해서는 가시광선 영역의 레이저를 사용하는 경우 다단계 광 이온화법이 사용되며 높은 반복률과 고출력인 색소레이저가 우라늄 농축에 필요하게 된다. 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 여기용 광원으로 구리증기레이저(Copper Vapor laser)가 가장 유망시 되어 있어 그 개발이 중요시되고 있다.

현재 500W급 이상의 구리증기레이저가 개발되고 있는 것으로 알려져있다. (그림 6)은 2단계 광 이온화방법에 의한 우라늄농축과정에 대한 개략도이다.

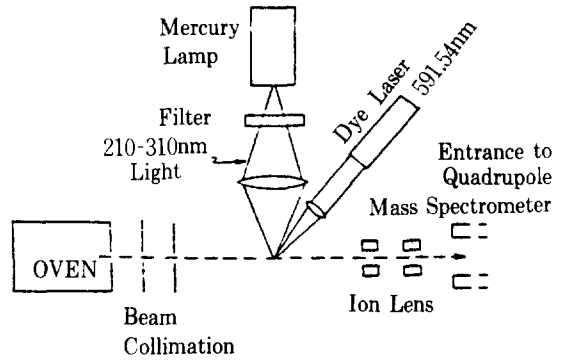


그림 6. 2단계 광 이온화 방법에 의한 분리과정 구성

또 한가지 레이저를 이용한 우라늄분리법은 UF_6 가스를 사용하는광 분자해리방법을 들 수 있다. 이 방법은 미국에서는 Los Alamos연구소와 Exxon사를 중심으로 70년대에 시작되었고 구라파의 여러나라와 일본에서는 분자법의 연구가 계속되고 있다.

표3은 분자법을 사용할 때 요구되는 레이저 파장 및 레이저의 성능을 보여주고 있다. UF_6 의 경우 $16\mu\text{m}$ 에 강한 흡수대가 있어 $16\mu\text{m}$ 영역의 레이저 개발 및 고출력화에 대한 연구개발이 분자법 연구의 주축을 이루고 있다고 할 수 있다. 여러가지 형태의 $16\mu\text{m}$ 레이저들이 연구되고 있고 일본 이화학연구소에서 수행중인 CO_2 레이저를 여기광원으로 하는 para 수소 Raman 레이저는 2joule 정도의 출력을 얻을 수 있는 단계에 와있고 1985년 부터 분자법에 의한 동위원소분리 실증연구가 현재 진행되고 있다.

표3. 분자분리법에 필요한 레이저의 특성

	Near-term needs	Longer-term needs(1980)
Linewidth	$< 0.03\text{cm}^{-1}$	$< 0.03\text{cm}^{-1}$
Pulse repetition rate	1 pps	200 pps
Possible frequencies		
$628 \pm 1\text{cm}^{-1} (\sim 15.9\mu\text{m})$	0.1mJ	1mJ } Pulse
$823 \pm 1\text{cm}^{-1} (\sim 12.2\mu\text{m})$	25mJ	1J } energy
$1160 \pm 1\text{cm}^{-1} (\sim 8.6\mu\text{m})$	8mJ	0.5J } needed
$1294 \pm 1\text{cm}^{-1} (\sim 7.7\mu\text{m})$	10mJ	0.5J } at each
		frequency

"Requirements on lasers to be used in production (~mid-1980s) would be even greater.

5. 결 론

레이저를 이용하여 동위원소를 분리할 수 있을 것이고 우라늄 농축이 가능하리라는 20년전의 과학자들의 꿈이 이제 실용단계에 들어 서고 있다.

현재 선진국가들에서는 그 동안의 연구결과들을 기초로 하여 본격적인 실용화 연구가 추진되고 있고 90년대 중반에는 공업화 단계에 들어 설 것으로 보인다.

우라늄 농축 과정이 핵연료원가에서 차지하는 비율이 60%에 달하고 있고 언젠가는 핵연료의 해외의존에서 벗어나야 한다는 우리나라 실정에서 볼 때 이 기술의 국내 확보는 장기적으로 육성되어야 할 긴급하고 중요한 국책적인 연구개발 과제라 할 수 있다. 레이저를 이용한 우라늄의 분리기술이 선진국에서는 이제 공학적 실증단계에 들어 서고 있는 바 이 기술개발과 관련된 많은 data들은

대부분 공개되고 있지 않은 상태이다. 따라서 우리나라에서 이 연구개발을 추진하는 경우 광범위한 자료를 기초로 하여 자체개발을 위한 종합적인 추진계획이 수립되어야 하며 레이저와 관련된 광범위한 기초연구의 토대가 이루어지도록 국가적인 지원이 있어야 될 것이라 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) The Review of laser engineering, Vol 14, No6(1986).
Special issue on laser-uranium enrichment.
- 2) U. Brinkmann, W. Hartig, H. Telle, and H. Walthev, Appl. Phys. 5, 109(1974)
- 3) Rolf W. F. Gross, Optical Engineering, 13, 506(1974)
- 4) Laser Focus, May. 56(1976).
- 5) John F. Ready, Industrial Applications of lasers, Academic press, New York(1978)
- 6) R. H. Levy, Science 191, 1162(1976)