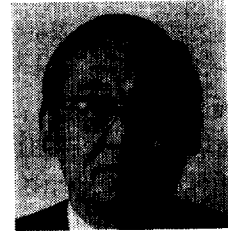


# 레이저에 의한 에너지 개발



Yamanaka, Chiyoie

일본 전기학회 회장 Osaka대학 명예 교수

## I. 서 론

레이저는 금세기의 최대이고 최후의 발명이라고 말한다. 1960년대에 처음 레이저의 발진이 실현된 후 벌써 4분의 1세기가 지났으며 오랫동안 과학의 위대한 결과로 칭송만되었던 레이저는 최근 서서히 공업의 과실로서 산업계에 등장하고 있다.

양자효과라는 것은 대체로 마이크로의 세계에 나타나지 않지만, 레이저 현상은 마이크로의 세계에 실현된다. 이때 원자 및 분자의 기능은 그대로 집약되어 우리의 오감에 전달되는 것이다. 가간섭적인 레이저광은 전파로 할 수 있는 기술의 거의 전부를 빛의 영역으로 수용할 수 있다. 물질의 가공, 동위체 분리, 모든 계측에 사용되며 최근에는 핵융합의 개발에 중요한 역할을 담당하고 있다. 레이저에는 무한의 가능성이 내장되어 있다.

## II. High technology 라는 것은

하이테크 중에서 레이저는 중요한 위치를 점한다.

(주)본고는 지난 7월 3일~4일에 열린 전기·전자공학 학술대회 개최식때의 특별강연을 게재한 것임.

이것은 대체안이 없는 기술이다. 레이저라는 것은 대체되는 형태의 기술은 아니고 현재까지 없었던 기술로서 potentiality는 매우 높다. 이것은 정보기술 이외에 전력기술과의 관련은 매우 깊고, 또한 이의 커버되는 영역은 현저하게 광범위하다. 나라의 장래는 하이테크의 개발에 관계된다고 말하고 있는데 이에 레이저가 등장하는 경우는 여러부분에 걸쳐있다. 성장원적이고 미세기술이며 더우기 대출력이라는 점이 가장 매력적이다.

그러나 새로운 기술이 발명된 후 일시에 산업계의 우상으로 추앙받을 수는 없다. 1947년에 트랜지스터가 발명되고 이것이 하이테크로서 응용된 것은 1961년의 IC의 발견으로 실현되었다. 10년 이상 지난 이후 세상의 실정에 부합되었다. 레이저는 이의 발명 이후 매우 고도의 과학적인 평가를 받았으나 20년간 요람기에 있었다고 할 수 있다. 이것은 1980년대에 들면서 레이저 가공, 반도체 레이저의 연속발전, 광 섬유의 저손실화 등으로 연이어 실현된 결과 오늘날과 같은 융성한 실마리가 열리게 되었다.

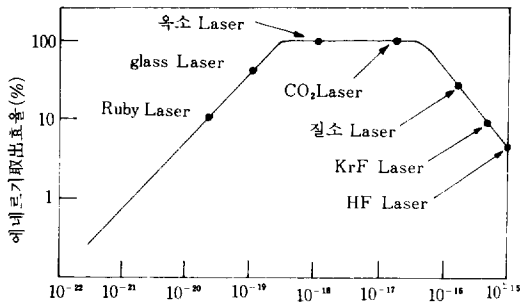
레이저를 중심으로 하는 광전산업은 1985년에 1조엔, 1990년에는 2조엔, 13년후의 2000년에는 10조엔의 벽을 돌파하면서 중요산업의 하나로 될 것이라고 말한다. 본 강연에서는 레이저라는 첨단기술에 초점을 두고 특히 에너지의 관점에서 21세기의 전망을 언급하고자 한다.

### Ⅲ. 극한기술과 레이저

레이저 빔은 자기 파장정도의 미소점에 가간섭적인 빛을 집광할 수 있다. 파장  $1\mu\text{m}$ , 출력  $1\text{TW}$ 라면 초점에서 전자파의 세기는  $10^{20}\text{w}/\text{cm}^2$ , 전계는  $3 \times 10^{14}\text{v}/\text{m}$ , 자계는  $10^{10}\text{oersted}$ 에 달한다. 이와같이 매우 높은 전자계를 극부에 집중인가 할 수 있으므로 종래의 수단으로는 실현 불가능하였던 현상들이 용이하게 발생할 수 있다.

극한기술으로서 레이저의 출력은 어느 정도까지 높이고 이의 Critical path는 무엇인가를 밝히고자 한다. 레이저의 침투출력을 증가하기 위하여는 그림 1과 같은 조건이 있다.

레이저의 파라미터로서 레이저광속  $\phi(\text{J}/\text{cm}^2)$ , 레이저광 유도 방출 단면적  $\sigma(\text{cm}^2)$ , 레이저 파장  $\lambda(\mu\text{m})$ 의 곱셈을 좌표의 횡축에 레이저의 에너지 출력효율  $\eta$ 를 종축으로 정하면 현재의 각종 레이저특성을 명백하게 표시할 수 있다. 비교적 유도방출단면적의 적은 레이저는 내부에 축적된 에너지는 커지므로 이것을 일시에 방출시키면 매우 큰 침투파위를 발생할 수 있다. 이를 위하여 유도방출작용을 세게 할 필요가 있고 보다 큰 광속  $\phi$ 를 도입하여야 한다. 이것은 레이저 매질의 손상 파괴를 유도할 우려가 있으므로 무제한 광속을 높일 수는 없다. 특히 문제가 되는 것은 레이저 빔의 자기집속현상이다. 레이저 빔의 단면공간분포에 불균일이 있으면 큰 전계 분포의 부분은 전계로 유기되는 비선형 굴절을 때문에 광속은 감



$\phi \sigma \lambda (\text{J} \cdot \mu\text{m})$   
 $\phi$  : 레이저광속 ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )  
 $\sigma$  : 유도방출단면적 ( $\text{cm}^2$ )  
 $\lambda$  : 레이저파장 ( $\mu\text{m}$ )

그림 1. 레이저 특성

소되고, 즉凸렌즈상태의 성질을 일으키고, 레이저 빔은 filament화 할 우려가 있다. 이부분의 전계는 굴절율의 자기증배와 상호작용되어 급상승을 하고 파괴에 이른다. 한편 유도방출 단면적이 큰 레이저는 레이저 자신에 큰 에너지를 축적할 수 없다. 대출력을 얻으려면 강력한 에너지 구입을 할 필요가 있다. 즉 펄스 파워 기술의 진보에 의존하게 된다. 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 에너지 출력 효율이 최대가 되는 것은 옥소레이저 또는  $\text{CO}_2$ 레이저 등이며 glass레이저, 질소레이저 등은 다음으로 고효율이다.

그러면 이와같은 레이저를 사용하여 도전해야 할 새로운 기술의 두 셋을 전망하고 미래사회에의 approach를 노력한다

### Ⅳ. 레이저 핵융합

레이저에 의한 핵융합의 연구는 토의구성이 비교적 용이하므로 최근 관심의 초점이 되어있다. 핵융합에 의한 에너지 생성을 간단히 추정하는 방법으로 로손 조건이 유명하다. 이것은 핵융합 반응에너지를 이것을 발생하고저하는 중소수 3중소수(DT) 연료 플라즈마에 가하여야 할 가열에너지보다 큰 값을 얻기 위한 조건이다. 필요 온도를  $10\text{KeV}$ 라면 로손조건은  $n\tau > 10^{14}(\text{s}/\text{cm}^3)$ 된다. 여기에 플라즈마수밀도  $n/\text{cm}^3$ , 반응시간  $\tau(\text{s})$ 이다. 연료 베레트의 반경을  $R(\text{cm})$ , 베레트 내의 음속을  $V(\text{cm}/\text{s})$ 이라면, 반응시간은  $\tau = R/v$ 으로 주어지므로 수밀도  $n$ 을 질량밀도  $\rho$ 로 쓰면  $\rho R > 0.1(\text{g}/\text{cm})$ 된다. 핵융합을 실현하기 위하여 연료를  $10\text{KeV}$ 까지 가열하는데 필요한 에너지  $E_L$ 을 평가한다.

$$E_L = \frac{4}{3} \pi \frac{(\rho R)^3}{\rho^2} \times 4.6 \times 10^8 \times \frac{1}{n_c} (\text{J})$$

여기서  $n_c$ 는 레이저와 베레트간의 결합효율,  $\rho R$ 은 로손조건이며 정수이므로 연료밀도  $\rho$ 의 제곱에 반비례하여 소오레이저 에너지는 적게된다. 만약  $n_c$ 를 10%라면 DT고체연료의 경우  $\rho = 0.2(\text{g}/\text{cm}^3)$ 이므로 레이저 에너지  $E_L$ 은 약  $1\text{GJ}$ 된다. 이와같은 대출력 레이저는 현재 기술적으로 실현할 수 없으나 베레트를 폭축하여 연료의 밀도를  $\rho = 200(\text{g}/\text{cm}^3)$ , 즉 1000배의 압축, 베레트경으로 환산하여  $1/10$

로 압축하면 소요레이저 에너지는 여섯자리 만큼 감소되어 1KJ으로 충분하다. 이와같은 평가는 지나치게 단순화된 가정에 의하였으므로 과소평가되어 있다. 과학적 breakeven을 달성하기 위하여는 100KJ 이상의 레이저가 필요하게 된다. Osaka대학 핵융합 연구센터에서는 1983년에 출력 30KJ의 「GEKKO X II호」 glass레이저를 완성하고 1986년에는 레이저의 파장을 두배 고조파에 변환하는 clean화를 실현하고 있다. 이의 레이저를 사용하여 세계 최고의 핵융합 중성자양  $10^{13}$ 의 발생에 성공하였다.

### V. 레이저 동위체분리

자연계에 존재하는 원소의 약 70%는 동위체의 혼합물이다. 이것을 분리하는 수단으로 전자적 질량 분석법, 기체 확산법, 원심분리법, 증류법, 화학변환법 등이 있다. 질량분석법을 제외한 방법들은 통계적인 분리방식이므로 완전한 분리는 되지 않고 상대적농도가 높아지는 것에 지나지 않는다. 따라서 분리할 때 조작과정을 수백번 반복하는 필요가 발생한다. 레이저 빔은 개별적 분리방식이므로 한번의 조작으로 특정의 동위체를 완전히 분리할 수 있다. 레이저법에서는 목적하는 동위체만 흡수되는 파장의 레이저광을 조사하여 선택적으로 여기를 하고, 제 2의 레이저 조사에 의한 이온화 등으로 분별을 완료한다. 동위체간의 흡수 스펙트럼차, 즉 동위체의 shift는 질량효과, 체적효과 및 핵스핀 효과 등에 의하여 발생한다. 질량효과는 경원소에서 크고, 핵전자분포의 체적효과는 중원소에서 크다.

천연 우라늄에서  $^{235}\text{U}$ 의 존재비는 0.71%이고, 경수 원자로의 핵연료를 사용하기 위하여 3%까지 농축할 필요가 있다.

#### 5.1 원자법

금속 우라늄을 전자빔으로 2,300K이상 가열하고 발생된 우라늄 증기를 원자빔상으로 하고 이에 파장 4246.26Å의 색소레이저를 직각으로 조사한다. 이때  $^{235}\text{U}$ 만 여기된다. 연이어 UV레이저를 직교하고 이온화하여 부전극에서 우라늄 이온을 포집한다. 이와같은 실험은 10년전 Osaka대학에서 실시되고 과

학적인 가능성이 실증되었다. 이때 문제되는 것은 즉 scramble효과이다. 2단계 전리에서 선택적으로  $^{235}\text{U}^+$ 를 생성하여도 전계에 의한 포집과정에서  $^{238}\text{U}$ 과 충돌하거나 전화교환에 의한 분리가 방해된다. 또한 경제성 관점에서는 우라늄 증기 발생을 위한 열원의 방사손실을 충분히 고려하는 것이 중요하다. 레이저 법에 의한 우라늄분리는 원자법에 의한 원심법의 약 10분의 1에 해당하는 에너지로 실현할 수 있을 것으로 본다.

#### 5.2 분자법

중전의 우라늄 분리는  $\text{UF}_6$ 가스를 매체로 사용하고 이의 취급기술은 확립되어 있다. 분자법은  $\text{UF}_6$  분자를 대상으로 연구가 진행되고 있다.  $\text{UF}_6$ 의 강력한 적외선 흡수는 7.74 $\mu\text{m}$ , 8.62 $\mu\text{m}$ , 12.1 $\mu\text{m}$ , 15.9 $\mu\text{m}$ 에 있고 이중에서 15.9 $\mu\text{m}$ 의 흡수는 가장 크고 또한 동위체 shift가 커서 파수로 0.65 $\text{cm}^{-1}$  정도이다. 실온에서는 분자의 회전여기에 의하여 hotband가 생기고 스펙트럼 폭은 넓어져서 선택적 여기는 불가능하다. 따라서 분자밀도는 낮추지 않고 저온상태를 실현하기 위하여 초음속 노즐을 사용하여 단열팽창 F로 선택흡수를 실현한다. 이의 방법에서  $\text{UF}_6$ 을 50K로 냉각하면  $^{235}\text{UF}_6$ 의 Q branch는  $^{238}\text{UF}_6$ 의 두개의 R branch사이에 분리되어 존재하고 있음은 알려져 있다. 적외 레이저의 발전 스펙트럼폭의 파수를 0.03 $\text{cm}^{-1}$ 이하, 주파수정도  $10^{-5}$ 가 필요하다. Osaka대학에서는  $\text{UF}_6$ 와 동형의 분자구조를 갖는  $\text{SF}_6$ 를 시료로 하여  $^{32}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$ 의 분리를  $\text{CO}_2$ 레이저로 연구하여 다광자 헤리의 효과가 확인되었다.

### VI. 장래의 전망

레이저는 매우 높은 에너지 집중 투사를 할 수 있으므로 새로운 기술로서 원대한 미래가 열리려고 한다. 레이저 핵융합을 비롯하여 레이저 동위체분리 레이저 lithography, 레이저 가공, 레이저의용 등과 같은 일련의 연구개발들은 레이저의 첨단기술에 주는 impact로서 높게 평가되고 있다.

또한 대출력 레이저에 관한 기술개발은 매우 광범위한 기술 파급효과를 갖고 있다. 광기술의 전반

에 주는 영향은 매우 커서, 직접 관련된 분야로서 광학 glass, 광소자, 연마기술, 다층막 증착기술, 정밀 계측, 내열재료 개발 등에 대하여 급속한 발달을

유도하고 있다. 21세기에는 대규모의 광산업이 성립할 것으로 기대된다. (이 주회 역)