

개인 열형광 방사선량계의 개발 및 활용  
Development of Personal Thermo-Luminescence Dosimeter  
and Its Application

장시영, 남영미, 김장렬

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

형광물질에 방사선을 쬐인 후 열을 가하면 흡수된 방사선량에 비례하여 형광이 방출되는 원리에 근거하여 사람이나 기타 물체가 피폭한 방사선량을 정확하게 측정하고, 평가할 수 있는 개인 열형광 방사선량계(TLD, Thermo-Luminescence Dosimeter, TL 선량계) LiF:Mg,Cu,Na,Si를 개발하였다. 개발된 TL 선량계는 형광물질 LiF에 소량의 Mg, Cu, Na과 Si 등을 활성화제로 첨가하여 제조되었기 때문에 기존 외국의 상용 TL 선량계인 LiF:Mg,Cu,P보다 방사선 측정감도가 2배 이상 향상되었다. 이 TL 선량계는 방사선의 종류, 에너지의 세기, 조사방향에 관계없이 방사선량을 정확하게 측정할 수 있으므로 방사선 작업자나 방사선 진단 및 치료환자의 피폭선량은 물론 원자력시설 주변 환경방사선량의 측정에도 활용될 수 있다.

Abstract

A new personal thermo-luminescence(TL) dosimeter LiF:Mg,Cu,Na,Si which can measure a radiation dose to personnel and material has been developed on the basis of the principle of a thermo-luminescence generation from a luminescent material, which is proportional to the absorbed radiation dose by heating to this material. This new TL dosimeter, which was made of LiF by adding a small fraction of Mg, Cu, Na and Si as an activator, showed a higher sensitivity in radiation detection by two times than the conventional foreign-made TL dosimeter LiF:Mg,Cu,P. Therefore, because of the fine characteristics of this new TL dosimeter in measuring the radiation dose regardless the radiation type, the intensity of radiation energy and direction of radiation incidence, it can be successfully utilized as a personal radiation dosimeter of radiation workers and patients for radiation diagnosis and therapy as well as an environmental radiation doimeter around the nuclear facility.

## 1. 개인 방사선량 측정기

원자력 연구개발 및 원자력 발전과 같은 원자력의 평화적 이용이나 방사선과 방사성동위원소의 산업적 및 의료적 이용과정에서 불가피하게 발생하는 방사선으로 인한 개인 및 공중의 피폭방사선량을 정확하게 측정하는 것은 개인 및 공중의 방사선 안전 및 재해방지를 위하여 법적, 제도적으로 요구되는 필수요건의 하나이다[1].

개인방사선량 측정, 평가의 기본적 요구사항은 인체에 입사하는 방사선의 종류, 에너지 및 입사 방향에 관계없이 성능기준 요건으로 정해진 정확도 내에서 국제방사선단위측정위원회(ICRU)가 정의한 개인선량당량[2]을 정확하게 측정하고 평가할 수 있어야 한다는 것으로, 이를 위해서는 외부 입사 방사선을 정확하게 측정할 수 있는 개인방사선량 측정기(개인선량계)가 필요하다.

현재 전세계적으로 사용되는 개인선량계로는 필름배지 선량계, 열형광(Thermo-Luminescence, TL) 선량계, 포켓 선량계, 전자식 선량계 및 최근에 개발된 광자극 형광(Optically Stimulated Luminescence, OSL) 선량계 등 여러 종류가 있다. 이들 중에서 필름배지 선량계, TL 선량계는 일정기간동안 개인의 누적피폭 방사선량(개인선량)을 공식적으로 측정, 기록하기 위한 법정 개인선량계로 활용되며, 투과성 광자(photon)에만 반응하는 포켓 선량계 및 전자식 선량계는 보통 출입통제 및 방사선작업 현장에서의 직접적인 피폭확인을 위한 보조선량계로 활용된다.

필름배지는 개인선량 측정용으로 현재까지도 사용되고 있으나, LiF, CaSO<sub>4</sub>, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, MgB<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, CaF<sub>2</sub> 등의 다양한 형광물질을 이용한 TL 선량계가 개발된 후[3] 개인선량을 정확하고 편리하게 측정할 수 있는 TL 선량계의 사용이 전세계적으로 급증하고 있는 추세이며, 국내에서도 개인방사선량 측정기관의 약 80% 이상이 TL 선량계를 사용하여 개인선량을 측정하고 있다[4].

현재 국내에서는 1978년에 상업가동을 시작한 원자력 발전소 외에도 방사성동위원소나 방사선을 이용하는 산업체의 수가 꾸준히 증가하여 왔으며(대략 1300 여업체), 방사선작업종사자의 수도 약 3만명 정도에 이르고 있으나(의료관계기관 종사자를 포함하면 40,000명 정도) 이들의 개인선량측정을 위한 개인선량계는 전량 외국으로부터 수입에 의존하는 실정이다[5].

## 2. 개인 TL 방사선량계의 개발

TL 선량계는 LiF, CaSO<sub>4</sub>와 같은 형광 물질에 방사선이 입사된 후 형광 물질을 가열할 때 발생하는 열형광(thermo-luminescence, TL)의 양이 흡수된 방사선량에 비례하는 성질을 이용하여 방사선량을 측정하는 TL 물질 선량계이다[3]. 보통 TL 물질은 내부의 형광 중심부에 하나 이상의 활성화제(activator)를 함유한 결정체로 구성되어 있다. 활성화제는 TL 물질의 중심부나 결정격자의 결함인 덩(trap)으로 작용하며 활성화제의 함유량은 TL 물질에 따라 수 ppm에서 수 %에 이르기기도 하나, 활성화제의 양과 종류에 따라 TL 방출량 및 TL 감도, 주 피크의 온도 및 감쇠율 특성 등이 달라진다. 가열 온도에 따라 TL 물질에서 방출되는 TL 방출량 및 강도의 변화를 측정하여 나타낸 곡선을 TL 발광(glow) 곡선이라 한다[3]. 따라서 이 TL 발광 곡선을 해석하면 TL 물질에 흡수된 방사선에 대한 정보를 구하여 방사선량을 측정할 수 있다.

한국원자력연구소는 과학기술부 주관 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 지원을 받아 공기(유효원자번호  $Z_{\text{eff}}$  7.64)나 인체조직( $Z_{\text{eff}}$  7.42)과 유사한 조직등가 물질이면서( $Z_{\text{eff}}$  8.14) 외국에서 이미 상용화하여 사용하고 있는  $\text{LiF:Mg,Cu,P}$ [6]보다 방사선 측정 특성이 우수하며 TL 감도가 2배 이상 향상된 새로운 TL 선량계  $\text{LiF:Mg,Cu,Na,Si}$ (사진 1)를 개발하여 특허출원하였다.

이 새로운 TL 선량계는 방사선량 측정범위가 넓고( $2.8 \mu\text{Sv} \sim 60 \text{ Sv}$ ), X- $\gamma$ 선 뿐만아니라  $\beta$ 선 및 중성자 선에 대한 측정감도가 높아 다양한 종류의 방사선을 측정할 수 있다. 또한 임의의 크기와 형태(분말, 펠렛, 칩 등)로 소자화가 가능하고 필름배지 선량계와는 달리 적절한 열처리시 반복사용이 가능하며 잠상 퇴행율이 매우 낮아( $< 2 \%$ /월) 장기간에 걸친 개인의 누적 피폭선량을 정확히 측정할 수 있다. 또한 매우 작은 인체 국소영역의 선량도 측정이 가능하므로 방사선 진단 및 치료시의 흡수선량 측정과, 원자력시설 주변의 환경방사선량 측정에도 활용될 수 있다.

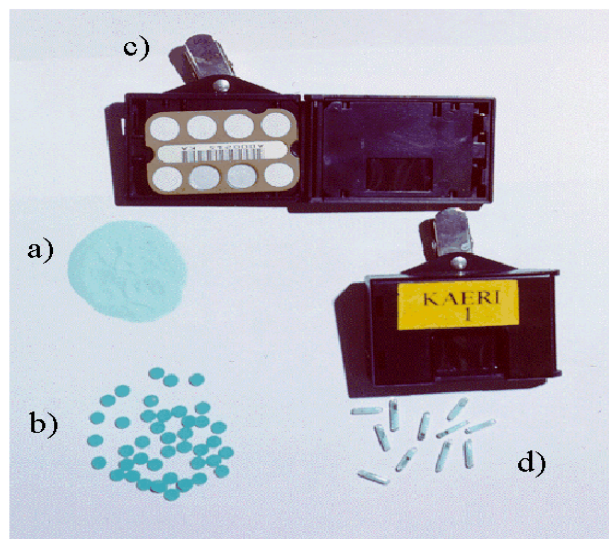


사진 1. 연구소 개발  $\text{LiF:Mg,Cu,Na,Si}$  분말(a), 디스크형 펠렛(b) 및 인체 국부선량측정용 선량계(d). (c)는 열형광선량계 배지시스템이다.

표 1은 연구소에서 개발한 TL 선량계  $\text{LiF:Mg,Cu,Na,Si}$ 와 기존 외국의 상용화 TL 선량계  $\text{LiF:Mg,Cu,P}$ [6] 사이의 특성 비교자료를, 그림 1은 TL 감도특성의 비교결과를 보여주며 그리고 그림 2는 연구소 개발 TL 선량계 분말과 디스크형 펠렛의 TL 발광 곡선을 보여준다.

표 1. 연구소 개발 TL 선량계 LiF:Mg,Cu,Na,Si 및 해외 상용 기존  
TL 선량계 LiF:Mg,Cu,P의 특성비교

특 성	KAERI LiF:Mg,Cu,Na,Si	GR-200(상용) LiF:Mg,Cu,P	비 교
열형광 감도 - 피크높이 - 면 적	1.8(상대비교) 2.0(상대비교)	1.0 1.0	그림2 참조
주 피크온도(°C) (at 5 °C s <sup>-1</sup> )	220	213	
광자에너지 상대감도	1.39	1.06	
판독선량범위	2.8 μSv ~ 60 Sv	2.0 μSv ~ 12 Sv	
배취 균질성	2.3	2.5	
잠상퇴행도(%/월)			
- 실 온	2	3	
- 70 °C	18	33	

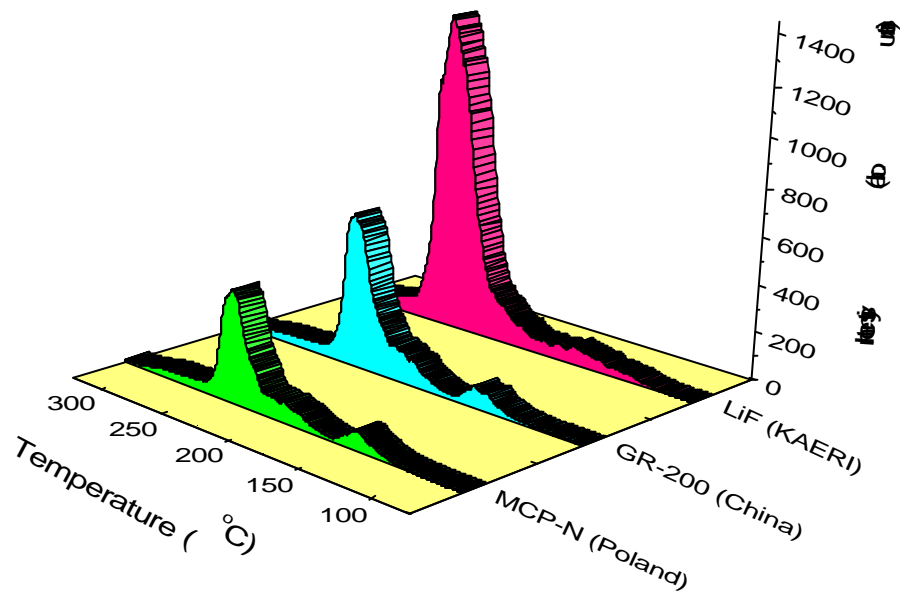


그림 1. 연구소 개발 LiF:Mg,Cu,Na,Si 및 해외 상용 LiF:Mg,Cu,P의 TL감도 비교

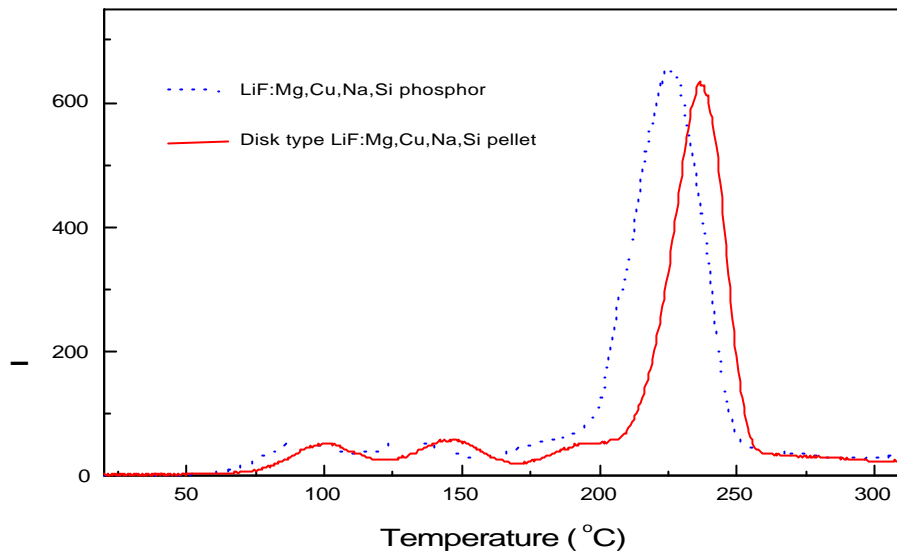


그림 2. KAERI LiF:Mg,Cu,Na,Si 분말과 디스크형 pellet의 TLglow 곡선

### 3 열형광 측정 및 개인선량 평가

그림 3은 TL 선량계에서 TL 발생과정을 설명하기 위한 간단한 에너지 띠(band) 모형을 보여 준다[3]. TL 물질에 방사선 에너지가 흡수되면(1) 원자가 띠(valence band)에 있던 전자가 전도 띠(conduction band)로 여기되어 전도 띠에는 자유전자(free electron)가, 원자가 띠에는 자유양공(free hole)이 생성된다(2,2'). 전도 띠에 있는 대부분의 자유전자는  $10^{-8}$ 초 이내에 원자가 띠의 자유양공과 재결합하면서 순간 방출되지만, 이들 중 일부 자유전자와 자유양공은 TL 물질 결정구조내의 불순물이나 격자결함 등에 기인하는 금지 띠(forbidden band)내의 국소화된 두 에너지의 준위 즉 전자덫(electron trap)과 양공덫(hole trap)에 포획된다(3,3').

실온에서 전자덫에 포획된 채로 오랜 시간 남아있는 자유전자는, TL 물질을 가열하면 덫깊이(trap depth) 에너지 보다 충분한 에너지를 흡수한 자유전자가 전도띠로 여기되어(3) 자유전자로 이동하다가 양공덫에 포획된 양공과 재결합하면서(5) 측정가능한 빛인 TL을 방출하게 된다. 따라서 이 TL 방출량을 물리적으로 적절히 측정하면 TL 물질에 입사한 방사선량을 평가할 수 있다. TL 방출량으로부터 TL 물질에 입사한 방사선량 및 개인선량을 평가하기 위해서는 TL 물질을 선량계로 사용하는 개인선량계의 교정이 필요하다.

개인선량계의 교정이라 함은 개인선량계를 인체모사 모형인 팬텀표면에 부착시켜(작업자의 개인선량계 패용을 모사) 일정한 기준 방사선량으로 조사시킨후 개인선량계의 판독치로부터 ICRU가 정의한 개인선량당량[2]을 산정, 평가하는 물리적 과정 및 절차를 의미한다. 이 교정절차에 의해 개인선량계의 특성 및 성능이 확인된다.

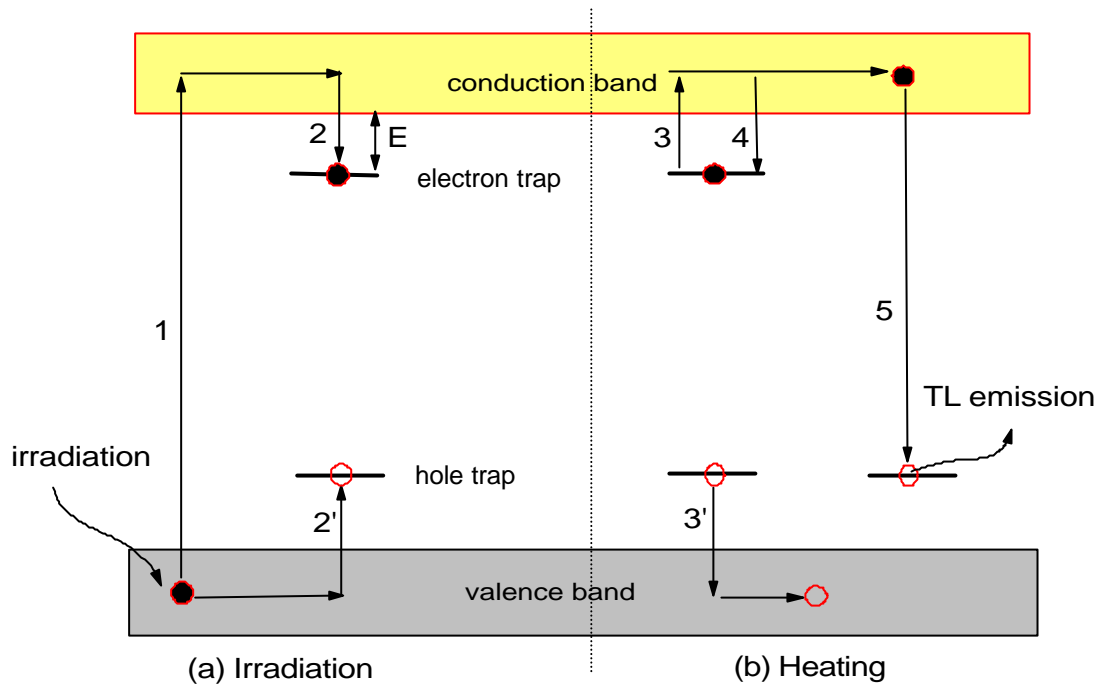


그림 3. 열형광 방출 공정의 에너지 준위 다이어그램 : (1) 이온화, (2)와 (2') 전자포획, (3)과 (3') 가열 방출, (4) 재포획, (5) 재결합 및 형광 방출 (■: 전자, ○: 양공)

교정된 TL 선량계를 이용하여 개인의 피폭방사선량을 평가하기 위해서는 TL 선량계 판독장치 (TLD Reader System)가 필요하다. 이 판독장치는 TL 물질을 상온에서 가열기(heater)속에 넣은 뒤 온도를 증가시키며 따라 방출되는 TL을 광증배관(Photo-Multiplier tube, PM tube)으로 측정하는 장치이며, 그림 4에 TL 측정원리를 개략적으로 나타내었다. TL 선량계 판독장치에 기본적으로 요구되는 사항은 TL 물질 가열기, TL 측정 광증배관 및 TL 계수장치이며 이외에 부수적으로 TL 측정자료인 개인선량계 판독치로부터 개인의 피폭방사선량을 계산 및 평가할 수 있는 개인선량 평가알고리즘[7]의 개발이 필요하다.

개인선량 평가알고리즘은 ICRU에서 개인방사선 모니터링 목적으로 제안한 방사선방호 실용량인 개인선량당량[2]을 개인선량계 판독치로부터 평가하기 위하여 사용되는 S/W 프로그램으로 개인선량계의 교정 및 특성자료를 기초로 설계된다. 개인선량 평가알고리즘을 이용하면 여러 필터 영역으로 구분된 개인선량계 배지 시스템의 각 필터영역에서 조사선량의 단위를 갖는 TL 판독치에 에너지 의존성 선량당량 환산계수를 곱하여 인체의 피부(0.07 mm), 수정체(0.3 mm) 및 심부(10 mm)깊이에서의 개인선량당량  $H_p(0.07)$ ,  $H_p(0.3)$  및  $H_p(10)$ [2]를 평가할 수 있다.

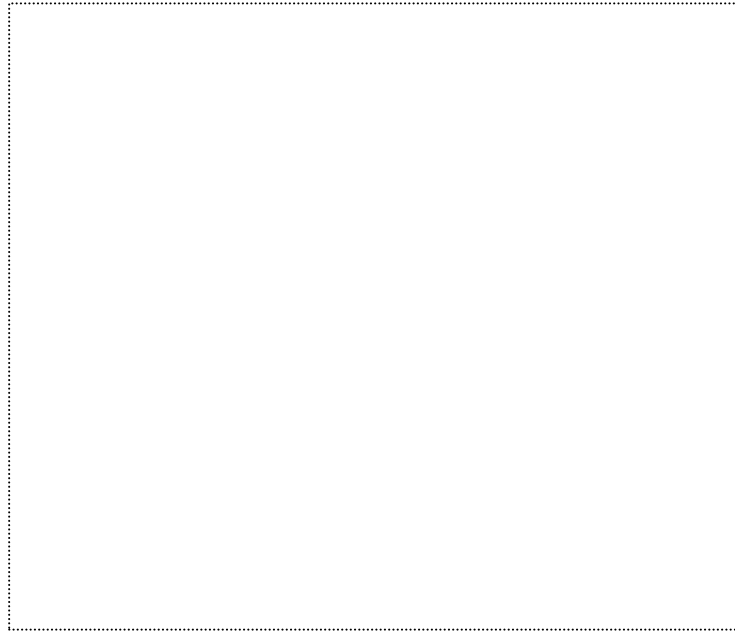


그림 4. TL 선량계 판독장치 개념도

#### 4 개발 선량계의 향후 활용 및 전망

한국원자력연구소에서 개발한 TL 선량계  $\text{LiF:Mg,Cu,Na,Si}$ 는 특성과 성능이 외국의 제품[6]보다 월등히 뛰어나 주목받고 있으며 일부 국가로부터 공동연구가 제안되기도 하였다. 연구소에서는 2000년 3월까지의 1단계 연구기간동안 개발 TL 선량계의 모든 특성을 완전히 해석하는 한편 선량계 배지시스템을 설계, 제작하고 선량평가 알고리즘을 개발하여 국내의 방사선방호 현장에서 개인선량계로 활용하기 위한 연구를 계속 수행할 예정이며, TL 선량계 판독장치의 국산화 연구도 이어서 수행할 계획이다(연구소에서는  $\text{LiF:Mg,Cu,Na,Si}$ 외에도 성능과 감도가 향상된 새로운  $\text{CaSO}_4$  계열 TL 선량계도 개발중이다). 이러한 연구개발이 성공적으로 수행될 경우 현재까지 전량 외국에서 수입하여 사용하고 있는 TL 선량계와 판독장치까지도 국산화되므로서 국내 개인방사선 도시메트리 S/W 및 H/W 기술의 완전자립은 물론 관련기술 및 장비의 동남아 시장 등에 수출도 가능할 것으로 판단된다.

방사선 분야의 국가 교정검사기관이며 방사선 도시메트리 분야의 국가출연 연구기관인 한국원자력연구소는 원자력 연구개발 중장기사업의 지원으로 세계수준의 방사선교정 기준방사선장(X선장,  $\gamma$ 선장, 베타선장, 중성자선장) 및 방사선 교정시설을 확보하여[8] 방사선 계측기 및 개인선량계의 정밀교정에 의한 방사선 및 방사선량 측정의 품질과 신뢰성을 향상시켰으며, 열형광 선량계에 의한 개인선량 평가알고리즘을 개발하고[7] 전파하여[4] 국내 개인방사선 도시메트리 기술을 가일층 제고시킨 바 있다. 앞으로도 한국원자력연구소는 국가 및 산업체에서 필요한 방사선방호 하부기술 및 체계의 구축과 완성을 적극 지원할 것이다.

## 참고문헌

1. 원자력법 및 동 시행령, 과학기술부 (1999)
2. ICRU-46, International Commission on Radiation Unit and Measurement, (1997)
3. A. Oberhofer, A. Scharmann, Applied Thermoluminescence Dosimetry, Adam Hilger Ltd., Bristol, England (1981)
4. 한국원자력연구소, 국내 개인피폭선량 상호비교 워크숍 보고서, 1998. 3. 8. 한국원자력연구소 원자력연수원 (1998)
5. 과학기술부, '97 원자력산업실태 조사보고서(제3차 조사), 한국원자력산업회의/한국방사성동위원소협회 (1998).
6. S.Wang, G. Chen et al., J. Rad. Prot. Dosim. Vol. 14, 223 (1986)
7. 장시영 외, 방사선 방어 및 측정기술 개발, KAERI/RR-1739/96, 한국원자력연구소 (1997)
8. 장시영 외, "한국원자력연구소 기준방사선장 및 방사선교정시설", 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 경북대학교, 1997. 10.

---

\* 본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기사업의 지원을 받아 수행되었습니다.



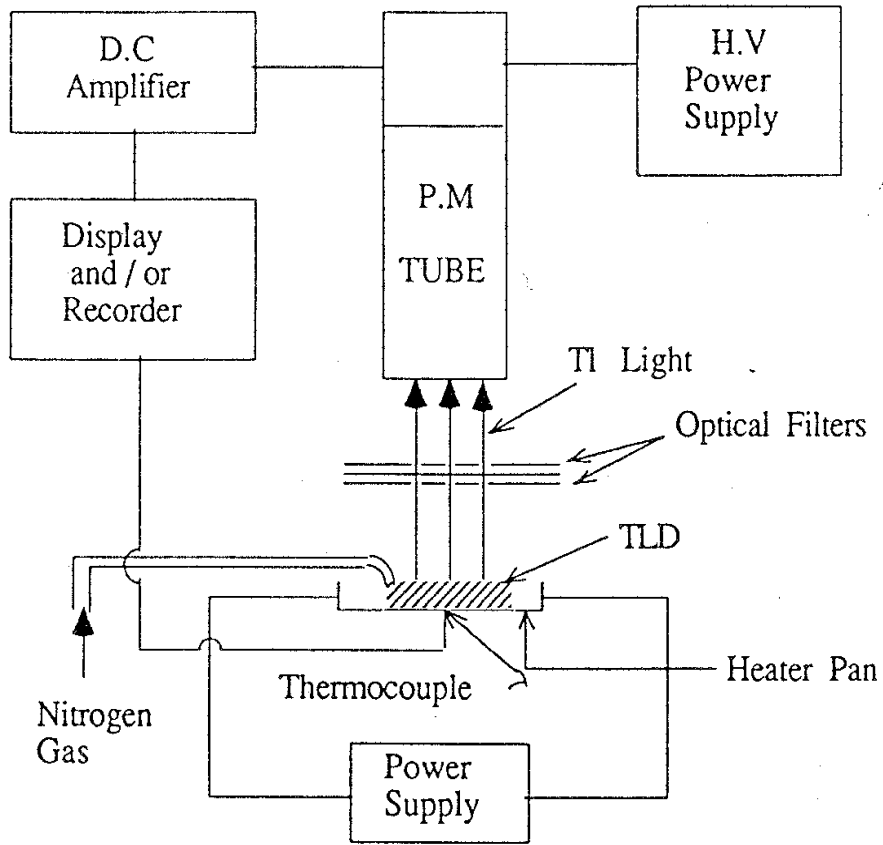


그림 4. TL 선량계 관독장치(TLD reader system) 개념도

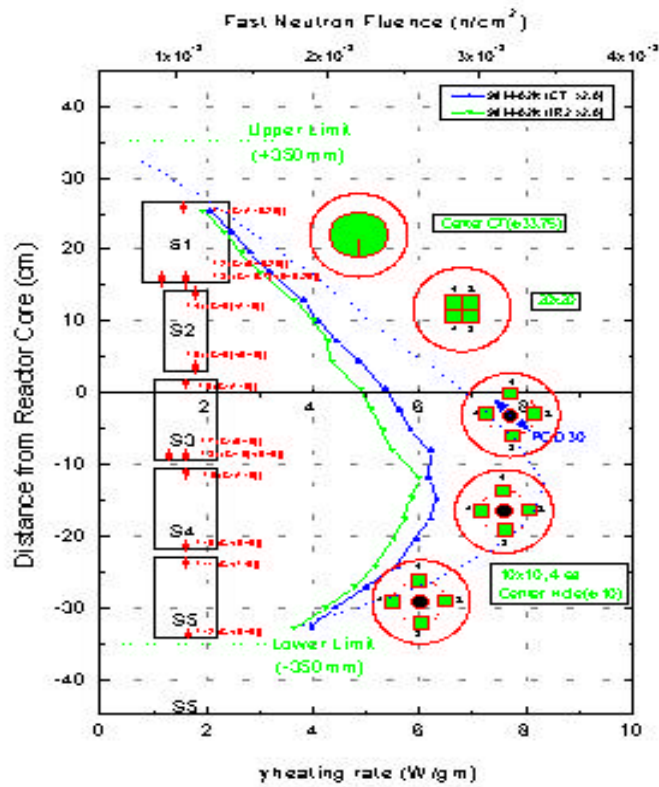


Fig. 3 Schematic view of irradiation capsule for RPV(Reactor Pressure Vessel) materials, (C=center, T=top, B=bottom)

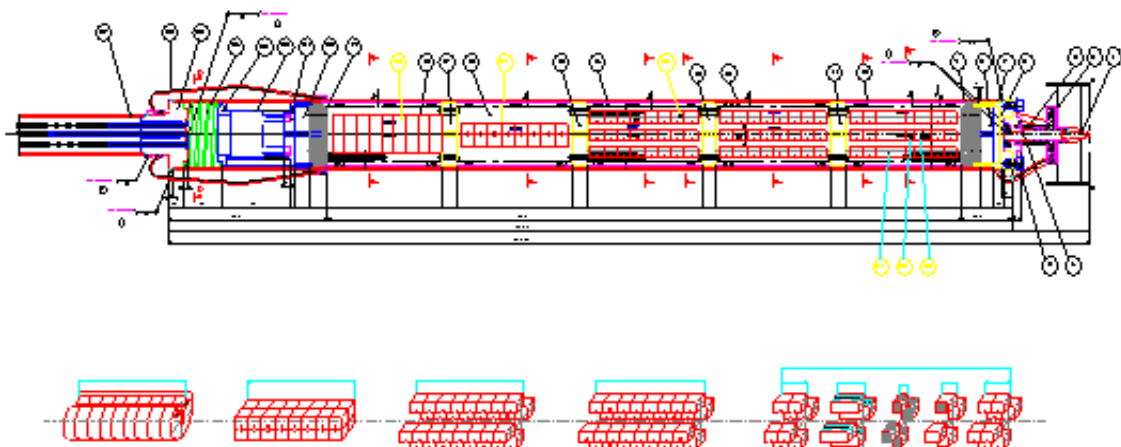


Fig.4 Drawing of HANARO capsule (98M-02K) for the irradiation of RPV material.