

## 감마선검출법에 의한 사용후CANDU핵연료 수중검증장치 개발

이 영 길, 나원우

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150 번지

### 요 약

가압중수로(PHWR)형 원자력발전소의 저장수조에 보관중인 사용후핵연료를 대상으로 하는 핵물질 보장조치(safeguards) 이행에 필요한 핵연료다발 수중검증장치를 개발하였다. 본 장치는 CdTe 감마선검출기, 차폐체 및 시준기등으로 구성된 검출부와 이를 지지 및 구동하기 위한 구동부로 구성되어 있다. 검출부에 대하여 감마선 표준선원 및 사용후핵연료 시료를 사용하여 성능시험을 수행한 결과 현장검증시의 요건을 만족하였고, 구동부의 경우 건식조(dry pit)에서 수행한 예비실험 결과 검증목적에 적합하였다. 따라서, PHWR형 원자력발전소인 월성 1 호기의 수중저장조에 있는 사용후CANDU핵연료에 대한 현장 성능시험을 현재 준비중에 있으며 그 결과를 바탕으로 하여 국가사찰시에 본 장치를 사용할 예정이며, 향후 IAEA 의 공인을 획득하여 IAEA 사찰용 장비로도 활용할 계획이다.

### 1. 서 론

PHWR형 원자력 발전소에서 타고 나온 사용후핵연료는 저장용기(tray)에 담긴 상태로 임시 저장고인 수조속에 저장되어 장시간 냉각되고 있다. 이와 같이 저장·관리되고 있는 사용후핵연료는 플루토늄을 상당량 포함하고 있으므로 주기적인 IAEA 사찰을 받는 매우 민감한 보장조치 대상 핵물질이다. PHWR형 원자로에서 타고 나온 사용후핵연료에 대한 대량결손을 탐지하기 위해 수중카메라를 삽입하거나 감마선 측정 장비의 검출기를 저장용기 사이에 삽입하여 상하방향으로 스캐닝을 수행함으로써 사용후핵연료 다발의 수량(약 19다발)을 확인하는 것이 가능하다<sup>[1~4]</sup>. 본 연구는 감마선 스캐닝방법에 의한 사용후핵연료 검증장치를 개발하여 국가사찰에 활용하고 나아가 수중카메라를 사용(Method K)하는 IAEA 사찰시에도 이 장비로 대체(Method H) 하여 사찰의 효율성 및 질을 향상시키고자 한다.

### 2. 본 론

#### 가. 검출부 제작 및 성능시험

사용후CANDU핵연료 저장수조 속의 선반더미에 저장되어 있는 사용후핵연료 다발의 개수를 측정하기 위한 본 장치의 경우, 선반더미간 간격이 매우 조밀하기 때문에 검출기는 매우 작은 체적을 갖는 탐침(probe) 형태이어야 하고 아울러 수조 속에 저장되어 있는 수많은 사용후핵연료 다발들을 지속적으로 검증하기 위해서는 상온에서 장시간 사용될 수 있어야 한다. 따라서, 이와 같은 조건을 충족시키기 위해 CdTe 검출기(직경:9mm, 길이:80mm, 반도체 결정크기:5×5×2mm)를 선정하여 장치의 검출부를 제작하였다.

### 1) 시준기 제작

검출기를 감싸고 있는 텅스텐 차폐체의 두께를 17.5, 30, 50mm 의 3 가지 조건으로 하여 코드 시뮬레이션으로 스캐닝 모사를 수행한 결과<sup>[5]</sup>, 차폐 두께가 30mm 인 경우도 사용후핵연료 다발간의 구별이 분명하였기 때문에 본 검출부의 차폐체 두께를 30mm 로 정하였다. 직경 70mm, 길이 80mm 인 텅스텐 봉의 중앙에 그림 1 과 같이 직경이 10 mm 인 구멍을 낸 후 내부의 중앙에 CdTe결정이 위치하도록 하였으며 직경이 7.5mm 인 시준기 구멍을 중앙위치에 수평으로 내어 감마선이 이곳으로 입사하도록 하였다. 그림 2 는 제작된 검출부, 신호처리용 전자장비(CLC), 다중과고분석기(MCA) 그리고 자료 수집 및 분석용 컴퓨터 등을 함께 나타낸 사진이다.

### 2) 성능시험

검출부의 텅스텐 차폐체가 갖는 차폐효과 및 차폐체에 대하여 시준기가 갖는 상대적 검출세기를 확인하기 위하여 3 종류의 감마선 선원을 사용하여 실험을 수행하였다.

#### 가) 점선원

그림 3 에서 보는 바와 같이 Cs-137 점선원을 검출부의 서로 다른 5 위치에 각각 두고 감마선 스펙트럼을 수집하였으며 Cs-137 의 662 keV 피크 영역의 면적을 계산한 후, 'Shield' 위치의 값을 기준으로 하여 상대값을 구한 결과 그림에 주어진 표의 값을 얻었다. 텅스텐 물질의 높

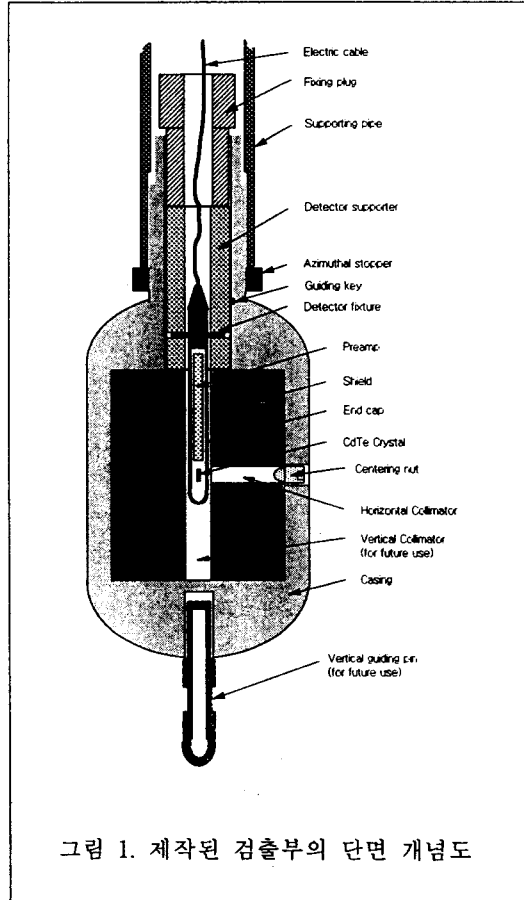


그림 1. 제작된 검출부의 단면 개념도

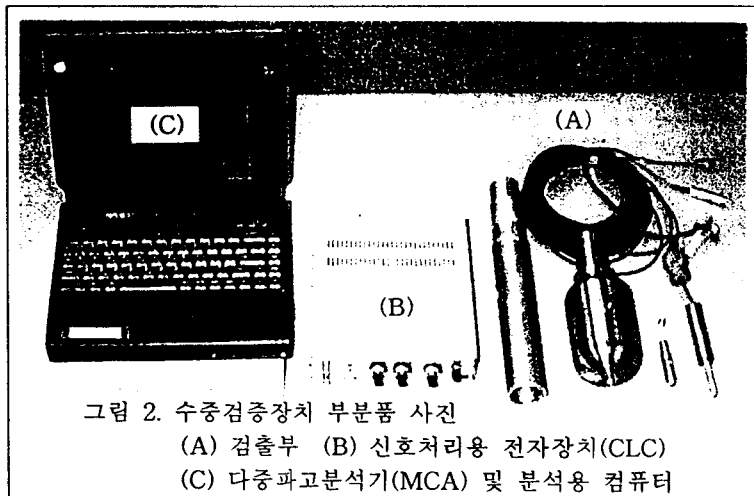


그림 2. 수중검증장치 부분품 사진

(A) 검출부 (B) 신호처리용 전자장치(CLC)

(C) 다중과고분석기(MCA) 및 분석용 컴퓨터

은 차폐효과로 인하여 'Shield'값은 'Collimator'값보다 1/30 로 감소하였으며, 'Up' 과 'Down'값은 'Shield'값보다 약 1/5~1/10 로 감소하였음을 알 수 있다. 이 결과로 부터, CANDU핵연료 다발의 측면에 대한 스캐닝을 수행할 경우 측정 대상 다발 이외의 주변 다발들에 의한 검출계수는 스캐닝 결과에 크게 영향을 미치지 않을 것임을 예측할 수 있다. 한편, 'Bottom'값은 'Collimator'값보다 1/3 정도 줄어든 결과를 갖는데 그 이유는 CdTe 결정과 선원사이의 거리가 더 멀어졌고 동시에 결정을 향하는 선원의 입체각이 줄어들었기 때문인 것으로 생각된다. 'Bottom'값은 추후 응용시에 참고하기 위한 것이다.

#### 나) 액체밀봉 선원

점선원을 사용한 실험은 검출부 각각의 위치가 갖는 차폐효과 및 상대검출효과를 확인하기 위한 것으로 향후 검출부의 특성을 분석할 수 있는 기본 자료가 될 수 있다. 실제로 사용후CANDU핵연료 다발을 대상으로 하는 검증시험을 수행할 경우 시준기가 접하는 연료 위치에 의한 감마선 검출세기가 그 이외의 부분에 의한 검출세기에 비하여 분명히 구분이 되는지의 여부를 실험적으로 확인하기 위하여 그림 4(A) 에서 보는바와 같이 직경 58mm, 높이 40mm인 약 440  $\mu$ Ci 액체밀봉 Cs-137 선원을 사용한 실험을 수행하였다. 앞의 점선원을 사용한 실험결과에

서 시준기 중심축에서 3~4 cm 또는 그 이상 벗어난 위치의 선원이 검출에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있음을 확인하였기 때문에 이 액체밀봉 선원을 직경이 10cm 인 CANDU핵연료 다발의 측면이라고 가정하여도 될 것으로 생각된다. 그림 4(B)는 'Collimator' 위치에서 측정된 스펙트럼을 나타낸 것이고 그림 4(C) 는 'Shield' 위치의 것을 나타낸 것인데 이들의 피크면적을 구하여 세기비를 비교해 본 결과 'Shield'값에 비하여 'Collimator'값은 약 9 배 정도의 높은 값을 나타내었으며 이것은 코드 계산을 통한 감마스캐닝 모사에 의한 결과와 아주 비슷한 값을 보이고 있다. 스캐닝 모사에서, 두께가 30mm 인 텅스텐의 경우 시준기에 의한 감마선 세기는 주변 즉, 'Shield' 에서의 것보다 약 8 배 정도 큰 값을 나타내었다. 결과적으로, 본 CdTe 검출기 결정을 30 mm 텅스텐으로 둘러싸고 있을때 직경이 7.5mm 인 시준기 구멍을 통하여 입사하는 감마선 세기는 차폐체를 통하여 입사하는 감마선의 세기보다 약 1 Order 정도 큰 값을 나타냄을 실험적으로 검증할 수 있었다.

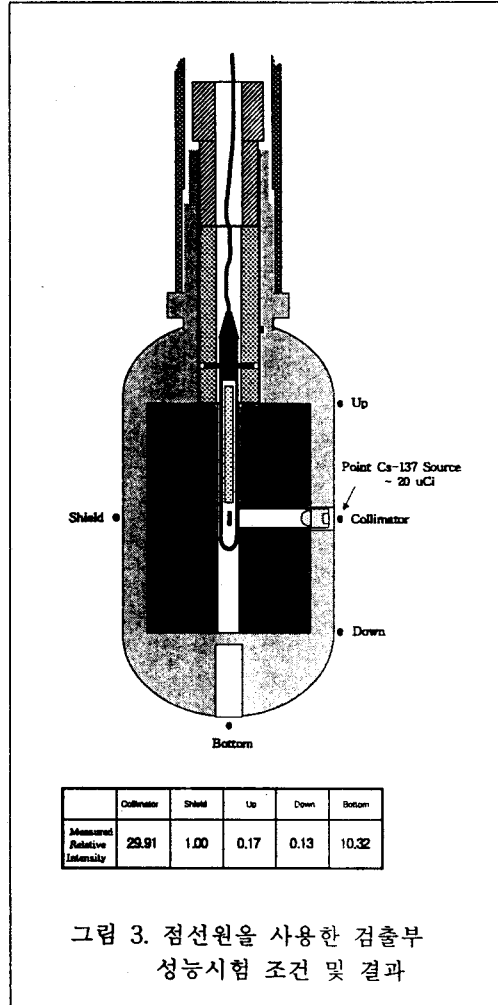


그림 3. 점선원을 사용한 검출부 성능시험 조건 및 결과

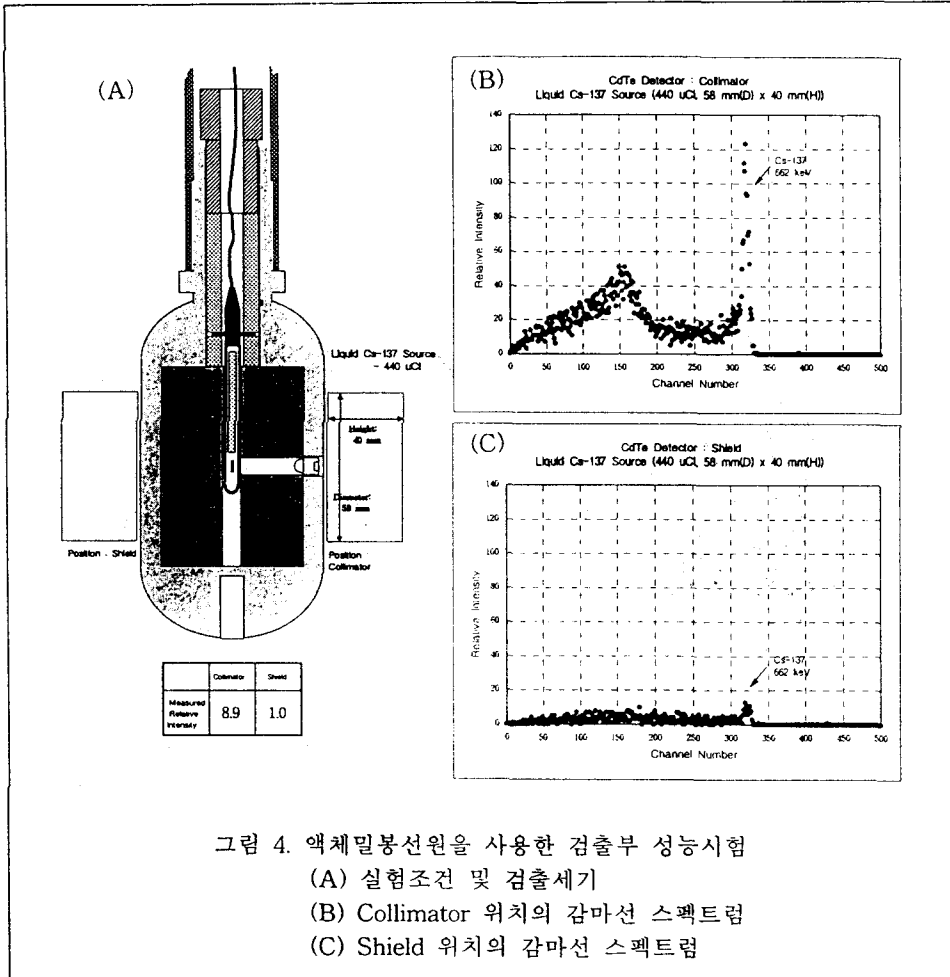


그림 4. 액체밀봉선원을 사용한 검출부 성능시험  
 (A) 실험조건 및 검출세기  
 (B) Collimator 위치의 감마선 스펙트럼  
 (C) Shield 위치의 감마선 스펙트럼

#### 다) 사용후핵연료 선원

앞의 가) 와 나) 항의 실험은  $Cs-137$  감마선 선원을 사용하여 구한 결과이므로 실제 사용후핵연료의 에너지 스펙트럼과는 다르다. 따라서, 실제 사용후핵연료의 여러 핵분열생성물에 의한 감마선 조건에서의 실험이 요구되어 연소도가 약 41 GWD/MTU 이고 약 8년 냉각된 사용후핵연료 시료를 사용하여 그림 5(A)의 조건으로 실험을 수행하였다. 그림 5(B)는 사용후PWR핵연료를 'Collimator'위치에 두고 측정된 스펙트럼을 나타낸 것인데  $Cs-137$ 의 662 keV 피크와  $Cs-134$ 의 605 keV 및 796+802 keV 피크가 나타나 있다. 한편, 이들보다도 높은 에너지의 감마선이 나타나지 않는 이유는 상대적으로 선원의 세기가 약하고 아울러 약 1000 keV 이상의 높은 에너지 영역에서 CdTe 검출기의 검출효율이 크게 떨어지기 때문인 것으로 여겨진다. 한편, 그림 5(C)는 반대쪽인 'Shield' 위치에서 측정된 스펙트럼을 나타낸 것인데 앞의 점선원 및 액체밀봉선원의 실험 결과로부터 예측한 바와 같이 차폐효능이 아주 우수함을 알 수 있다.

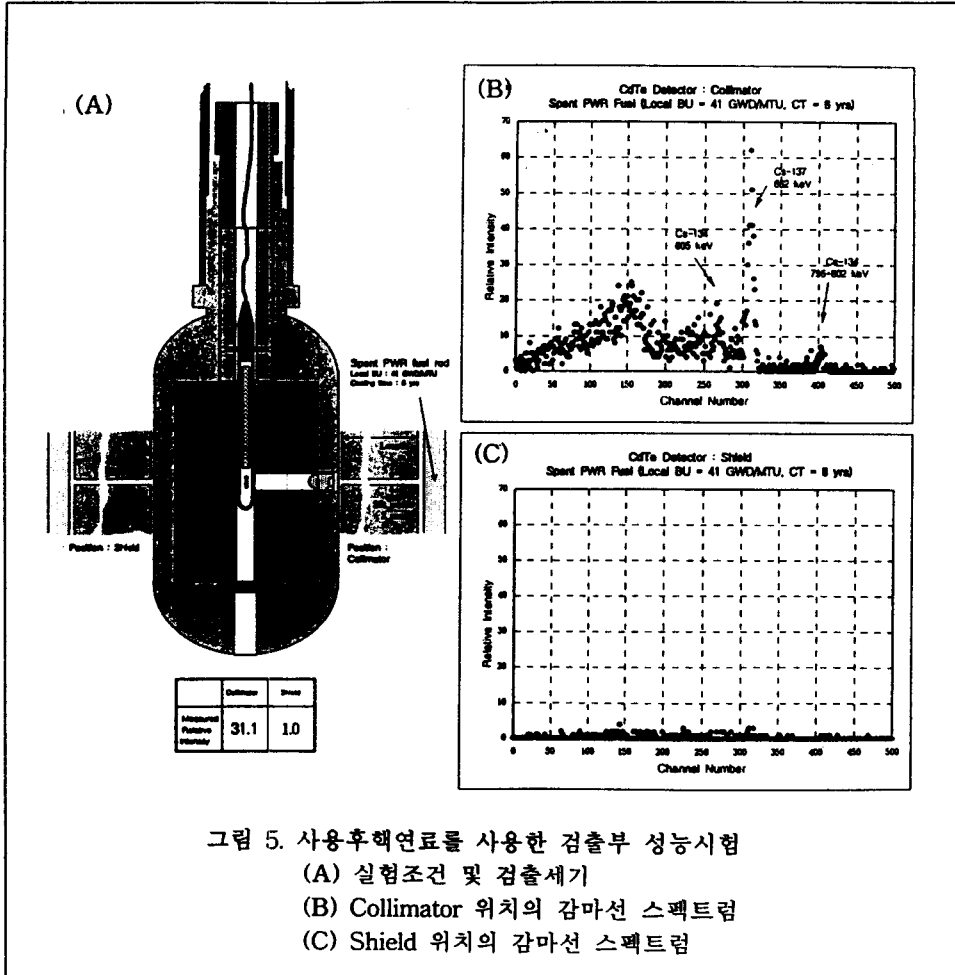


그림 5. 사용후핵연료를 사용한 검출부 성능시험  
 (A) 실험조건 및 검출세기  
 (B) Collimator 위치의 감마선 스펙트럼  
 (C) Shield 위치의 감마선 스펙트럼

#### 나. 구동부 제작

본 CdTe 검출기의 검출부를 구동하기 위한 구동부는 사용후CANDU핵연료 검증에 위한 수중카메라 보조장치<sup>6)</sup>와 겸용으로 사용할 수 있도록 제작하였다. 본 구동부는 발전소 현장에서 쉽게 조립/분해할 수 있고 한정된 사찰기간내에 효율적으로 검증을 수행할 수 있도록 그림 6 과 같이 제작하였다. 이동성을 향상시키기 위하여 각 부분은 2 m 이내의 길이를 갖는 부분품으로 나누었고 경량화를 위하여 재질은 모두 알루미늄으로 하였으며 오염이 쉽게 제거될 수 있도록 하기 위하여 표면처리를 하였다. 그림 6(A) 는 상단부의 측면을 나타낸 것으로 이것은 발전소 저장폴 위에서 운전되고 있는 Gantry 또는 Manbridge 의 Guard rail 에 부착되어 필요시 좌·우 이동 또는 고정될 수 있게 제작하였다. 그림 6(B) 에는 수조의 깊이에 따라 수량을 적절히 조절하여 체결하기 위한 연결봉들과 이를 분해하여 보관하거나 이송시에 사용할 수 있는 보관함도 함께 나타나 있는데 무게를 줄이기 위하여 이 부분도 알루미늄으로 제작하였다. 본 구동부가 상,하,좌,우 운동

시 갖는 진직성, 구동성, 위치 재현성등에 대한 실험을 건식조 (dry pit) 에서 수행한 결과 검증목적에 위한 실험조건을 충분히 만족하였다.

### 3. 결 론

사용후CANDU핵연료 저장조에 보관중인 핵연료 다발에 대한 핵물질 보장조치를 비파괴적으로 수행하기 위하여 제작된 본 수중감마선측정장치의 각 부품에 대한 성능시험은 모두 만족할 만한 결과를 나타내었다. 따라서, 많은 사용후핵연료 다발들이 밀집 저장되어 있는 저장수조의 높은 감마선 백그라운드 하에서의 최종 현장 성능시험을 현재 준비중에 있으며 그 결과를 바탕으로 하여 PHWR형 원자력발전소인 월성 1 호기의 수중저장조에 있는 사용후CANDU 핵연료에 대한 국가사찰시에 본 장치를 사용할 예정이며, 향후 IAEA 의 공인을 획득하여 IAEA 사찰용 장비로도 활용할 계획이다.

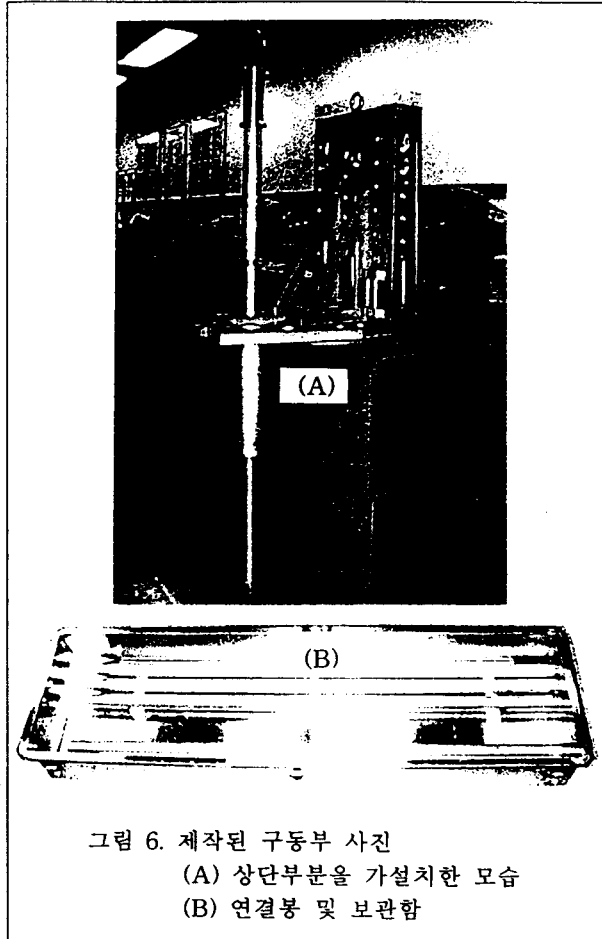


그림 6. 제작된 구동부 사진  
(A) 상단부분을 가설치한 모습  
(B) 연결부 및 보관함

### 참 고 문 헌

- [1] IAEA "Safeguards Criteria (1991-1995)," 1992.
- [2] IAEA "The CANDU Course(Session 10 ; Verification of Irradiated CANDU Fuel Bundles (Method K)," 1993.
- [3] R. Arlt, K. H. Czock and D. E. Rundquist, "Overview of the Use of CdTe Detectors for the Verification of Nuclear Material in Nuclear Safeguards," NIM A322, p575-582, 1992.
- [4] R. Zarucki et al., "The Passive Gamma Ray Non-Destructive Assay Method for Verification of Non-Accessible Nuclear Material in Spent Fuel Ponds," IAEA-SM-333/1549, 1994.
- [5] 나원우, 이영길, "CANDU 사용후핵연료 검증을위한 감마선 측정장치 설계," '96 추계 학술발표회 논문집, 대한방사선방어학회, 1996.
- [6] 나원우, 이영길, "CANDU 사용후핵연료 검증용 수중카메라 보조장치 설계," '96 추계 학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1996.