

'99 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 극저준위 백그라운드 감마선 측정장치의 성능 비교분석

### Inter-Comparison of Ultralow Background Gamma Counting System Performance

나원우, 이영길, 윤완기

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

본 실험은 KAERI, PNNL의 극저준위 백그라운드 감마선 측정장치의 성능을 비교분석하기 위해 PNNL에서 수행되었다. Hanford 지역의 환경시료(토양시료) 분석결과는 과거에 Hanford 지역에서 있었던 핵활동을 입증할 수 있었다. KAERI 측정장치는 Cooper, Radon에 의한 백그라운드 영향이 나타나기 때문에 전에너지 영역에서의 백그라운드 준위는 PNNL 장치 보다 높은 것으로 분석되었다. 현재, 양측의 측정장치는 미신고 핵활동을 탐지하기 위한 극미량 방사능을 측정할 수 있을 정도의 민감도를 갖는 것으로 평가되었다.

#### Abstract

This experiment was carried out to inter-compare performances of PNNL and KAERI's ultralow background gamma counting systems. Environmental sample (soil) analysis result showed that there were past nuclear activities in Hanford sites. Because KAERI instrument has the background effects from the copper and radon, it was appeared that the background level of KAERI instrument is higher than PNNL one. Both instruments were estimated to have good enough sensitivity to count the ultralow radioactivity in order to monitor undeclared nuclear activities.

## 1. 서론

극미량의 방사성 핵종들이 포함된 환경시료의 측정·분석결과에 영향을 미칠 수 있는 백그라운드 요인은 크게 시료 자체에서 방출된 백그라운드 방사선에 의한 것과 측정장치 구성단계에서 고려되어야 하는 측정장치의 백그라운드 요인에 의한 것으로 분류된다. 극미량 방사능을 정확히 측정·분석하기 위해서는 측정장치의 백그라운드 계수율을 낮게 유지하는 것이 중요하다. 그렇지 않으면, 방사능 준위가 낮은 핵종에서 방출된 감마선 스펙트럼은 측정장치의 백그라운드에 묻혀 분석될 수 없게 된다. 이런 극미량 방사능 측정기술은 지난 30년 동안 선진국 연구소들에 의해 발전되어 핵물질보장조치 분야에서 유용하게 사용되고 있다. 정부는 “Low Background Gamma Spectrometry”를 공동연구하여 핵물질조장조치에 적용하기 위한 협력약정을 1997년에 MOST-DOE간에 체결하였다. 본 실험은 협력약정의 후속조치로서 KAERI 극저준위 백그라운드 감마선 측정장치의 성능을 평가하기 위해 PNNL(Pacific Northwest National Laboratory) 측정장치와 비교분석 하는 것이다. 그 동안 KAERI는 협력약정에 명시된 실험을 수행하여 KAERI 장치에 영향을 주고 있는 우주선의 방향성 분석과 우주 중성자 차폐를 위한 차폐체를 제작하여 설치하였다<sup>1)</sup>.

## 2. 본론

### 2.1 실험목적

1997년 MOST-DOE간 체결된 협력약정에 의하여 극저준위 백그라운드 감마선 측정장치의 성능을 비교분석하기 위해서는 표준선원을 이용하여 측정장치의 민감도(Sensitivity) 즉, 최소검출하한값(MDA : Minimum Detectable Activity)을 결정하여 양측 장치의 MDA를 비교하는 것이 바람직한 방법이다. 그러나 양측 장치에 사용할 동일 표준선원을 구매 또는 제작하기가 곤란하기 때문에 PNNL이 제안한 다음의 방안을 따랐다. 첫째, PNNL이 제작한 표준선원을 이용하여 관심대상 인공방사성 핵종인  $^{137}\text{Cs}$ ( $E_{\gamma}$ : 662 keV,  $T_{1/2}$ : 30.0 y) 에너지 영역에서의 PNNL 측정장치의 MDA를 결정한다. 둘째, 교정된 PNNL 측정장치를 이용하여 Hanford 지역에서 채취한 환경시료(토양시료)내의 인공방사성 핵종인  $^{137}\text{Cs}$ 의 방사능 농도를 측정·분석한다. 셋째, PNNL 측정장치에서 측정된 환경시료(토양시료)를 KAERI 측정장치에서 교차 분석하여 KAERI 장치의 MDA를 결정한다. 넷째, 실험결과로 얻은 장치의 최소검출 하한값을 상호 비교하여 양측 측정장치의 성능을 상호 비교분석 한다. 다섯째, 측정된 백그라운드 감마선 스펙트럼을 상호 비교함으로써 양측 측정장치의 백그라운드 요인을 각각 분석하여 백그라운드 요인을 낮출 수 있는 방안을 공동연구 한다.

## 2.2 실험장치

본 실험은 PNNL의 극저준위 백그라운드 감마선 측정장치를 이용하여 PNNL 연구소에서 수행되었다. 실험에 사용된 그림 1의 측정장치는 PNNL에서 자체 설계·제작한 것으로서 수동적, 능동적 차폐법과 공기중 라돈 농도를 낮추기 위한 Antechamber 등을 적용하고 있는 장치이다<sup>[23]</sup>. 표 1은 KAERI, PNNL 측정장치의 구성요소를 비교 분석한 자료이다. 이 자료에 의하면 PNNL은 측정시료와 측정장치 내에 존재할 수 있는 라돈 농도를 최대한 낮추기 위해 Antechamber, Plexiglass air tight inclosure를 적용하고 있다. 극미량 방사능 농도를 측정하기 위해 설계·제작된 PNNL 측정장치는 KAERI 측정장치<sup>[40]</sup>에 비해 라돈에 의한 백그라운드 영향을 덜 받도록 구성되었다. 또한, PNNL 측정장치의 Sample Holder 체적(200mm×200mm×200mm)은 그림 2의 KAERI 측정장치 체적(400mm×400mm×400mm)의 1/8 이다.

핵물질보장조치 이행을 확인하고 감시하는 목적에서 원자력시설내의 공정시료 등을 직접 채취하기 곤란한 경우, 원거리 환경시료내의 극미량 방사능을 정확히 평가할 필요가 있다. 이런 목적의 환경시료 측정장치의 방사능 민감도 (MDA)는 시료분석결과의 신뢰도에 중요한 역할을 한다. 따라서, 본 실험에 사용된 PNNL 측정장치는 백그라운드 방사능 준위를 낮추기 위한 여러 가지 백그라운드 저감법<sup>[5,57]</sup>을 적용한 극저준위 백그라운드 감마선 측정장치이다.

## 2.3 실험 및 결과

### 2.3.1 측정장치 교정

MOST-DOE간 체결된 협력약정에 의해 환경시료(토양시료)를 측정·분석하기 위한 방안으로 PNNL은 관심대상인 <sup>137</sup>Cs( $E_{\gamma}$ : 662 keV,  $T_{1/2}$ : 30.0 y) 핵종을 포함하는 표준선원을 제작하였다. 현재, Hanford 지역의 백그라운드 감마선 준위가 높게 평가되고 있기 때문에 캘리포니아에서 채취한 토양시료를 백그라운드 기준으로 사용하였다. 산화알루미늄( $Al_2O_3$ ) 분말에 용액상태의 <sup>137</sup>Cs 핵종을 섞어서 캘리포니아산 토양시료에 9 pCi/g의 방사능 농도로 균질하게 혼합하여 Marinelli 비이커에 담아 표준시료(Matrix : Soil +  $Al_2O_3$ , wt : 2639.2 g)를 제작하였다. 실험에서 PNNL이 제작한 표준선원과 백그라운드 선원(캘리포니아산 토양시료)을 각각 측정하여 <sup>137</sup>Cs(662keV) 에너지 영역에 대해 PNNL 측정장치의 최소검출하한값(MDA)을 다음과 같이 평가하였다.

$$MDA(Bq/g) = \frac{L_D}{t \cdot \epsilon \cdot \lambda \cdot wt}$$

여기서,

$$L_D = 2.71 + 4.65 \sqrt{\mu_B} \quad : \text{Lower limit of detection,}$$

$t$  : Acquisition live time (s),  
 $\epsilon$  : Efficiency (counts per gamma) at the energy of interest,  
 $\lambda$  : Branching ratio of gamma energy (gamma per decay),  
 $wt$  : Sample weight,

그리고,  $^{137}\text{Cs}(E_\gamma : 662 \text{ keV}, T_{1/2} : 30.0 \text{ y})$  에너지 영역에 대한 HPGe 검출기의

FWHM = 2.03 keV,

Gain = 1.0 keV/channel 이고,

$$1.4 \text{ FWHM} = 1.4 \left( \frac{2.03 \text{ keV}}{1.00 \text{ keV/ch.}} \right) = 2.84 \text{ channel 이다.}$$

백그라운드 선원인 캘리포니아산 토양시료에서도 과거에 있었던 여러 핵활동과 원자력 사고로 인한 방사능 낙진(fallout)에 의해  $^{137}\text{Cs}$  핵종의 감마선이 미량 측정되었다. 실험에서는  $^{137}\text{Cs}$  핵종의 백그라운드 영향이 전혀 나타나지 않는 인접 에너지 영역(670 ~ 725 keV)을 백그라운드 영역으로 설정하고, 1800초 동안 측정하여 5,852 counts/channel의 백그라운드 계수율을 얻었다. 이 에너지 영역에서의 백그라운드 표준편차  $\mu_B$  는

For  $1.4\sigma$

$$\mu_B = (5.8 \text{ counts/ch.})(2.84 \text{ ch.}) = 16.472 \text{ counts 이고,}$$

검출한계  $L_D$  는

$$L_D(1.4\sigma) = 2.71 + 4.65\sqrt{16.472} = 21.58 \text{ 이다.}$$

이때, 표준선원 ( $^{137}\text{Cs} : 9 \text{ pCi/g}, wt : 2639.2\text{g}$ )을 측정하여 662 keV 에너지영역에서 PNNL 측정장치의 검출효율을 다음과 같이 계산하였다.

$$(9.0 \text{ pCi/g}) \times (2639.2\text{g})(0.037 \text{ Bq/pCi}) = 878.85 \text{ disintegrations/second,}$$

$$\gamma(E_\gamma : 662 \text{ keV}, ^{137}\text{Cs}) : 0.85 \gamma/\text{disintegration,}$$

$$(878.85 \text{ d/s}) \times (0.85 \gamma/\text{d}) = 747 \gamma/\text{s 이다.}$$

그러나, 표준선원은 방사능 낙진에 의한 미량의  $^{137}\text{Cs}$  핵종을 포함하고 있기 때문에 이 값을 고려해야 한다. 백그라운드 선원과 표준선원간에  $^{137}\text{Cs}$ 의 계수율을 상호 비교한 결과, 약 13.3  $\gamma/\text{s}$  계수율이 낙진에 의한 것으로 평가되었다. 따라서 표준선원에 포함된  $^{137}\text{Cs}$  방사능은 760  $\gamma/\text{s}$  이다. 1800초 동안 표준선원을 측정하여  $^{137}\text{Cs}$ 에서 7169 counts를 검출하였다.  $^{137}\text{Cs}$ 에 대한 PNNL 측정장치의 검출효율 계산값은

$$\epsilon_{[E=662\text{keV}]}(c/\gamma) = \frac{7169 \text{ counts}}{(760 \text{ } \gamma/\text{s})(1800 \text{ s})} = 0.00524 \text{ c}/\gamma \text{ 이다.}$$

표준선원(wt(net) = 2639.2 g)을 측정·분석한 결과, 측정장치의 최소검출하한값(MDA)은 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{MDA}(1.4\sigma) = \frac{21.58}{(1800)(0.00524)(0.85)(2639.2)} = 1.02 \text{ mBq/g}$$

### 2.3.2 토양시료 측정·분석

MOST-DOE간 체결된 협력약정에 의해 KAERI, PNNL 측정장치의 성능을 비교분석하기 위해 Hanford 지역의 환경시료(토양시료)를 채취하여 분석하였다. Hanford 지역의 원자력시설들 주변에서 유일하게 나무가 자라고 있는 곳은 예전에 미사일 기지로 사용되었던 곳인데, 광활한 사막의 군데군데 서 있는 이 곳의 나무에는 까치들이 동지를 만들어 살고 있다. 까치는 Hanford 지역을 끼고 돌아 나가고 있는 콜롬비아 강가의 진흙과 주변의 나뭇가지 등을 이용하여 동지를 만들기 때문에 까치동지는 Hanford 지역의 환경 방사능 준위를 평가하기에 적당한 환경시료(토양시료)로 사용된다. 본 실험에서는 이곳 까치동지의 토양시료를 채취하여 표준선원 용기와 동일한 Marinelli 비이커(wt : 200 g)에 담아서 실험용 토양시료(wt : 1189.4 g)를 준비하였다. 실험용 토양시료를 PNNL 측정장치의 Antechamber 속에 하루동안 보관하여 시료 내에 포함된 Radon 핵종들이 붕괴할 수 있도록 하였다<sup>[8]</sup>. 토양시료를 측정·분석하여 다음과 같이 시료 내에 포함된 <sup>137</sup>Cs 핵종의 방사능 농도를 평가하였다.

$$\text{ROI}(E_{\gamma} : 662 \text{ keV}) = 3246 \text{ counts,}$$

$$t = 3600 \text{ seconds,}$$

$$\epsilon_{[E=662 \text{ keV}]} = 0.00524 \text{ counts}/\gamma,$$

$$\text{Disintegration rate} = \left(\frac{3246 \text{ c}}{0.00524 \text{ c}/\gamma}\right)\left(\frac{1 \text{ d}}{0.85 \text{ } \gamma}\right)\left(\frac{1}{3600 \text{ s}}\right) = 202.4 \text{ d/s,}$$

$$\text{wt(net)} = 1189.4 - 200 = 989.4 \text{ g 이다.}$$

따라서,

$$^{137}\text{Cs 핵종의 방사능농도} = \frac{202.4 \text{ Bq}}{0.037 \text{ Bq/pCi}} \cdot \frac{1}{989.4 \text{ g}} = 5.53 \text{ pCi/g 이다.}$$

Hanford 지역의 환경시료(토양시료)에서 측정된 5.53 pCi/g의  $^{137}\text{Cs}$  핵종의 방사능 농도는 캘리포니아에서 채취된 백그라운드 선원(토양시료)에 비해 약 30배 높은 것으로 분석되었다. 이는 시료가 채취된 Hanford 지역이 재처리 공장 등이 과거에 운영되었던 지역임을 입증하고 있는 것이다. 토양시료의 측정·분석결과에는 Cs-134( $E_\gamma$  : 604 keV,  $T_{1/2}$  : 2.05 y) 핵종에서 방출되는 감마선이 전혀 측정되지 않았다. 반감기가 2년인 핵종들이 전혀 측정되지 않은 것은 이 지역에서의 핵활동이  $5 \times T_{1/2}$ (2.05 y)인 10년보다 이전에 이루어졌다는 것을 입증하고 있다.

### 2.3.3. 백그라운드 스펙트럼 비교분석

본 실험에서 KAERI, PNNL 측정장치의 백그라운드 스펙트럼을 상호 비교하여 백그라운드에 영향을 미치는 각각의 요소를 분석하였다. 특히, 두 장치는 장치구성에서 몇 가지 다른 점이 있어 백그라운드 요인이 서로 다른 것으로 분석되었다. 측정장치의 백그라운드 요인은 크게 측정장치 자체 내에 존재하는 방사성물질에 의한 것, 불충분한 차폐로 인한 외부방사선에 의한 것, 우주선에 의한 것, 측정장치내의 공기중에 존재하는 라돈에 의한 것 등으로 분류된다.

PNNL, KAERI 측정장치 모두 극저방사능 재질로 제작된 검출기, 차폐체, 그리고 관련 전자장치들로 구성되었다. 표 2의 KAERI 측정장치의 백그라운드 요인분석에서 186 keV 에너지 영역에서 백그라운드 요인이 검출되었다. 이는 수동적 차폐체에서 방출되는 저에너지 영역의 제동복사선을 차폐하기 위해 적용된 Copper가 장치 내로 입사하는 우주선과 상호작용 하면서 발생한 2차 백그라운드 감마선이다. PNNL의 측정장치는 수동적 차폐체 내부에 이와 같은 Copper, Plexiglass 등을 전혀 적용하고 있지 않고 있어, 이로 인한 백그라운드 요인은 전혀 측정되지 않았다.

우주선 특히, 뮤온(muon)에 의한 백그라운드 준위를 저감하기 위해서는 측정장치를 터널 혹은 동굴 등의 지하 깊은 곳(15 MWE 이상)에 설치하여 뮤온의 농도를 낮추어야 한다<sup>[9]</sup>. 그러나 두 장치는 Ground level에서 운영하고 있어서 측정장치를 감싸는 플라스틱 섬광검출기와 HPGe 검출기에 시간적으로 동시에 검출되는 우주선 신호를 제거하는 능동적 차폐법을 적용하였다. PNNL 측정장치는 라돈영향을 줄이기 위해 Antechamber, Plexiglass air tight inclosure 을 적용하였고, Sample holder의 체적(200mm×200mm×200mm)이 작기 때문에 라돈에 의한 영향이 KAERI 측정장치에 비해 낮은 것으로 평가되었다. 본 실험에 의하면 KAERI 장치는 Copper와 라돈에 의한 백그라운드 영향이 PNNL 장치에 비해 높기 때문에 그림 3에 나타난 바와 같이 전에너지 영역에서 백그라운드 준위가 PNNL 장치의 백그라운드 준위(17-A)<sup>[10]</sup> 보다 높은 것으로 평가되었다.

### 3. 결론

MOST-DOE간 체결된 협력약정에 의한 본 실험은 KAERI, PNNL 측정장치의 성능을 비교분석하고 측정장치의 백그라운드 요인을 낮출 수 있는 방안을 연구하는데 목적을 두었다. PNNL이 제작한 표준선원을 이용하여 얻은  $^{137}\text{Cs}(662\text{keV})$  에너지 영역에서의 PNNL 측정장치의 MDA( $1.02\text{mBq/g}$ )는 미신고 핵활동을 탐지하는 핵물질보장조치 목적을 만족할 수 있을 정도의 민감도(Sensitivity)를 갖는 것으로 평가되었다. Hanford 지역에서 채취한 환경시료(토양시료)의 측정·분석결과는 금세기에 Hanford 지역에서 있었던 핵활동을 정확히 규명하였다. 따라서 본 실험장치는 상기의 목적에 적합한 극저준위 백그라운드 감마선 측정장치이다. KAERI, PNNL 측정장치의 백그라운드 스펙트럼을 비교 분석한 결과, KAERI 측정장치는 Cooper, Radon에 의한 백그라운드 영향이 PNNL 장치보다 높게 측정되었다. 향후, 본 실험에서 사용된 환경시료(토양시료)를 표준선원으로 사용하여 KAERI 장치의 MDA를 결정하면, KAERI, PNNL 장치의 성능을 정확히 비교분석할 수 있다. PNNL 연구소는 이 장치를 이용하여 원거리 극미량 방사능 준위 분석, Dark matter 분석<sup>1)</sup> 및 고순도 납 추적 등의 연구에 사용하고 있다.

### 참 고 문 헌

1. 나원우, 윤완기, 이영길 “극저준위 백그라운드 감마선 계측시스템의 백그라운드 요인 분석”, KAERI/TR-984/98 (1997).
2. J.H.Reeves and R.L.Brodzinski, “An Ultralow Background Germanium Gamma-Ray Spectrometer Using Superclean Materials and Cosmic Ray Anticoincidence,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. NS-31, 1, pp697-700 (1984).
3. J.H.Reeves and R.J.Arthur, “Anticomic-Shielded Ultralow-Background Germanium Detector Systems for Analysis of Bulk Environmental Samples,” *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles*, Vol. 193, 1, pp61-70 (1995).
4. 나원우, 윤완기, 이영길, 이용덕, “극저준위 백그라운드 감마선 측정시스템 분석”, KAERI/TR- 856/97 (1997).
5. F.T.Avignone and R.L.Brodzinski, “Theoretical and Experimental Investigation of Cosmogenic Radioisotope Production in Germanium,” *Nuclear Physics B*, 28A, pp280-285 (1992).
6. J. Verplanke, “Low Level Gamma Spectroscopy : Low, Lower, Lowest,” *Nuclear Instruments Methods in Physics Research*, A312, pp174-182(1992).
7. R.L.Brodzinski, H.S.Miley, J.H.Reeves and F.T.Avignone, “Further Reduction of Radioactive Backgrounds in Ultrasensitive Germanium Spectrometers,” *Nuclear Instruments Methods in Physics Research*, A292, pp337-342 (1990).
8. J.H.Reeves and R.J.Arthur, “Bulk Environmental Samples Analyzed with

Antic cosmic-Shielded Ultralow-Background Germanium Detector Systems," PNL-SA-14316, Pacific Northwest Laboratory, (1987).

9. Millies-Lacroix, "Very Low Radioactivities Measurements by Gamma Spectroscopy in the Modane Underground Laboratory," *Meeting of Gamma and X 93 Spectrometry, Saint-Remy-les-Chevreuse (France)* (1993).
10. H.S.Miley, R.L.Brodzinski and J.H.Reeves, "Low-Background Counting Systems Compared," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles*, Vol 160, No 2, pp371-385 (1992).
11. A.K.Drukier, F.T.Avignone III, R.L.Brodzinski, and J.L.Colla, "Progress Report on the Search for Cold Dark Matter using Ultralow Background Germanium Detectors at Homestake," *Nuclear Physics N(proc Suppl.)* 28A, pp293-296 (1992).



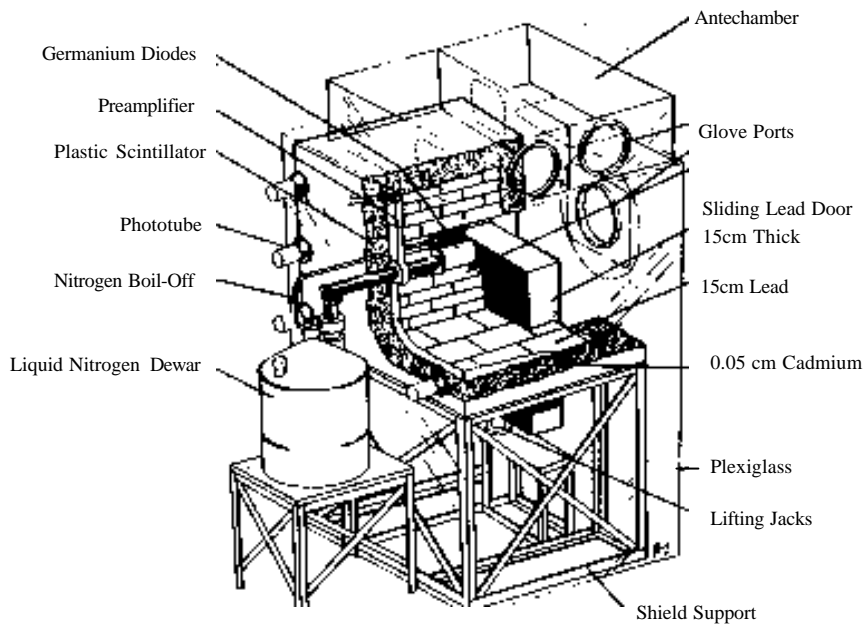


그림 1. PNNL 극저준위 백그라운드 감마선 측정장치

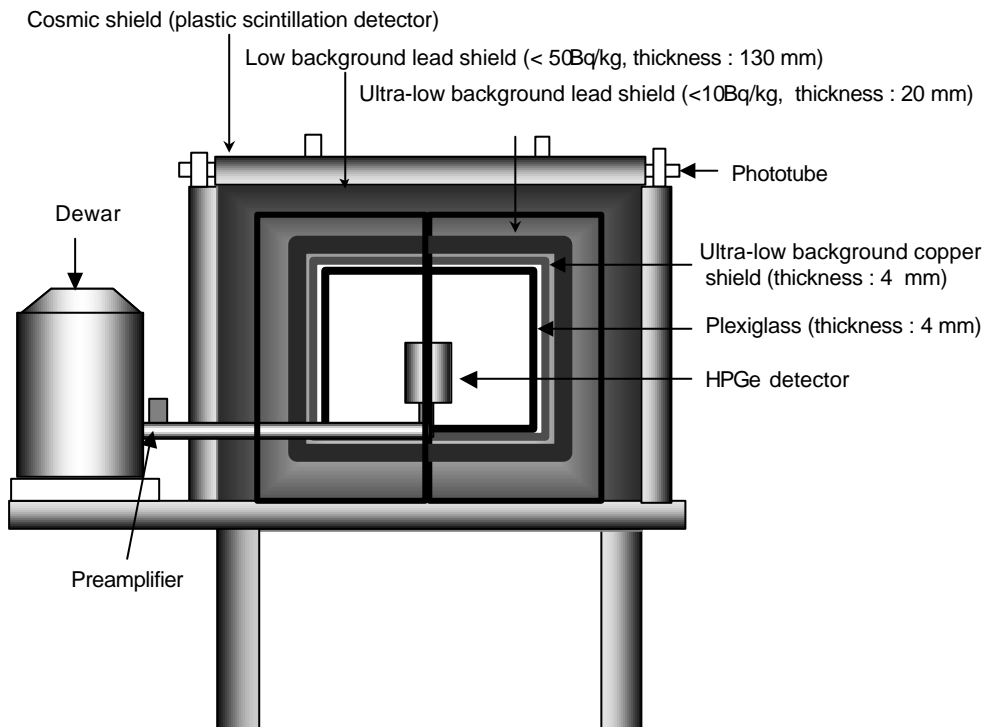


그림 2. KAERI 극저준위 백그라운드 감마선 측정장치

표 1. KAERI, PNNL 측정장치의 구성요소 비교

구성요소	KAERI	PNNL
HPGe detector	Relative efficiency : 60% Energy res. at 1332 keV : 1.95 keV End cap : copper	Relative efficiency : 31.5% Energy res. at 1332 keV : 1.98 keV End cap : copper
Active shield	Plastic scintillator (100mm)	Plastic scintillator (100mm)
Passive shield	Polyethylene (100mm) Boron sheet (3.2mm) Low background lead shield (<50Bq/kg, 130mm) Ultra-low background lead shield (<10Bq/kg, 20mm) Ultra-low background copper shield (4mm) Plexiglass (4mm)	Cadmium sheet (0.5mm) Low background lead shield (150mm)
Others	Nitrogen-boil-off	Nitrogen-boil-off Antechamber Plexiglass air tight inclosure
Sample Holder	400mm × 400mm × 400mm	200mm × 200mm × 200mm

표 2. KAERI 극저준위 백그라운드 감마선 측정장치에서 검출된 백그라운드 감마선 방출 핵종

Energy [keV]	Radionuclides	Observation	Origin	Remark
66.7	Ge-73m	$^{72}\text{Ge}(n, \gamma)^{73\text{m}}\text{Ge}$	cosmic	detector
74.8	Pb K $\alpha$ 1		cosmic	lead
84.2	Pb K $\beta$ 1		cosmic	lead
122.1	Co-57	activation of Cu	cosmic	copper
139.7	Ge-75m	$^{74}\text{Ge}(n, \gamma)^{75\text{m}}\text{Ge}$	cosmic	detector
159.7	Ge-77m	$^{76}\text{Ge}(n, \gamma)^{77\text{m}}\text{Ge}$	cosmic	detector
174.9	Ge-71m	$^{70}\text{Ge}(n, \gamma)$	cosmic	detector
186.0	Cu-66	$^{65}\text{Cu}(n, \gamma)$	cosmic	copper
198.3	Ge-71m	$^{70}\text{Ge}(n, \gamma)^{71\text{m}}\text{Ge}$	cosmic	detector
278.0	Cu-64m	$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64\text{m}}\text{Cu}$	cosmic	copper
295.2	Pb-214		uranium chain	radon
351.9	Pb-214		uranium chain	radon
511.0	Annihilation	muon induced pair production	cosmic	
569.6	Pb-207	$^{207}\text{Pb}(n, n', \gamma)^{207}\text{Pb}$	cosmic	lead
595.8	Ge-74	$^{74}\text{Ge}(n, n', \gamma)^{74}\text{Ge}$	cosmic	detector
609.3	Bi-214		uranium chain	radon
693.4	Ge-72	$^{72}\text{Ge}(n, n', \gamma)^{72}\text{Ge}$	cosmic	detector
803.3	Pb-206	$^{206}\text{Pb}(n, n', \gamma)^{206}\text{Pb}$	cosmic	lead
962.1	Cu-63	$^{63}\text{Cu}(n, n', \gamma)^{63}\text{Cu}$	cosmic	copper
1120.3	Bi-214		uranium chain	radon
1460.8	K-40		environmental	
1765.0	Bi-214		uranium chain	radon
2225.0	H-2m	$^1\text{H}(n, \gamma)^{2\text{m}}\text{H}$	cosmic	plexiglass
2615.0	Tl-208		thorium chain	radon

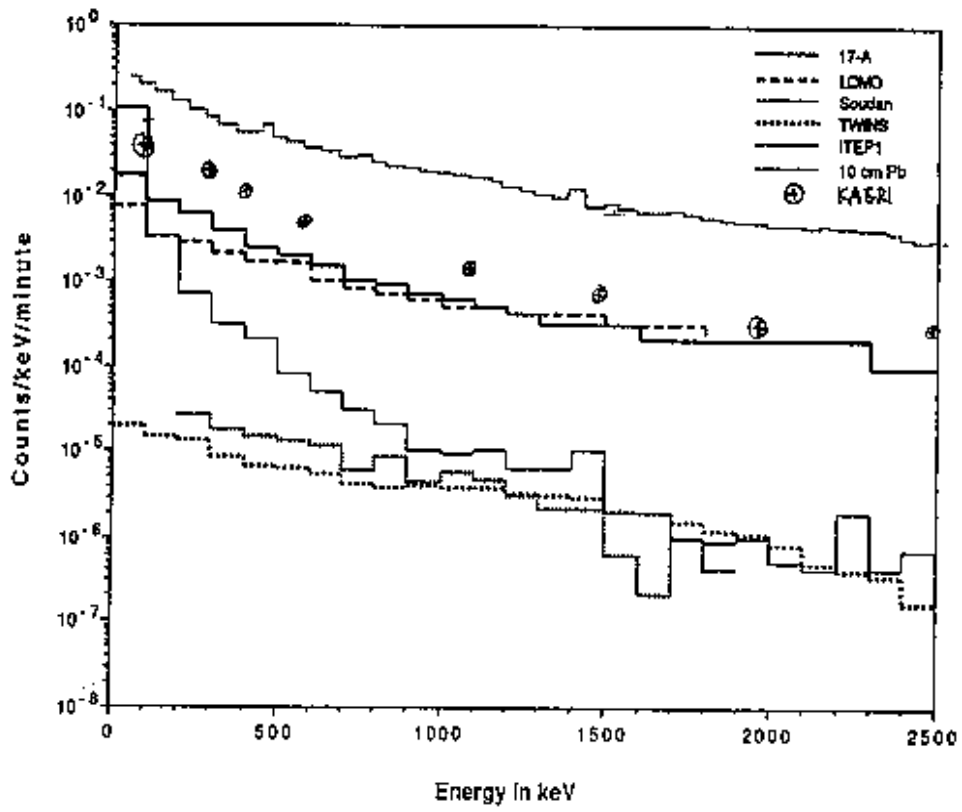


그림 3. 주요 측정장치들의 백그라운드 준위 비교 스펙트럼<sup>[10]</sup>