

교육용 모사 HPGe 검출기 스펙트럼 개발

서경원, 이모성*

한국원자력연구소 원자력연수원, *청주대학교 응용과학부

2006년 11월 28일 접수 / 2007년 2월 15일 채택

원통형 용기에 담긴 액체 혼합선원의 HPGe 검출기 교정용 스펙트럼으로부터 스펙트럼 분석 교육을 위한 모사 스펙트럼을 개발하였다. 모사 스펙트럼은 측정된 스펙트럼으로부터 피크를 분리한 후, 채널별 계수들의 변동이 제거된 스펙트럼을 결합한 것이다. 모사 스펙트럼의 통계적 변동은 Box-Muller 함수로 만들었다. 이 스펙트럼은 18개의 피크를 포함하고 있다. 각 피크의 중심 위치 및 면적 등은 정확하게 정의되었다. 개발된 스펙트럼은 교정용 스펙트럼, 시료 스펙트럼, 백그라운드 스펙트럼 그리고 고기하학적 및 동시합성 보정을 위한 스펙트럼이다.

중심어 : HPGe 검출기, 스펙트럼분석, 교육

1. 서론

대부분의 방사능 조사에서 HPGe 검출기에 의한 분광분석은 필수이며[1], 이에 대한 교육 수요도 많은 편이다. 스펙트럼 분석 교육을 위한 교육 자료로 교육용 HPGe 검출기 스펙트럼이 필요하나 이의 개발 및 활용은 미흡한 실정이다. 구체적으로 에너지, 분해능, 효율 등의 교정, 검출기-선원 간 geometry 보정, 동시합성의 보정, 피크 탐색 한계 설정, 중첩 피크 분리 등의 교육을 위한 스펙트럼이 필요할 것이나, 이 준비에는 적지 않은 시간과 노력이 소요된다.

스펙트럼 분석 프로그램은 프로그램 종류에 따라 차이가 있지만, 스펙트럼 분석에 필요한 피크 핏팅 방법, 백그라운드 형태, 피크 탐색 조건 등 여러 분석조건을 제시하고 있다[2, 3] 이 분석조건의 설정에 따라 스펙트럼 분석결과에 많은 차이가 발생한다. 그러한 예 중의 하나가 피크 탐색에서 피크 여부를 판단하는 기준이다. 이 기준을 적절하게 설정하는데 참고할 만한 사항은 제작사의 스펙트럼 분석 프로그램 절차서에도 제시되지 않고 있다. 이 부분도 스펙트럼 분석 교육을 하는데 곤란한 애로 사항 중 하나이다.

이와 같은 애로 사항을 해결하기 위한 방안은 피크가 정확하게 정의된 스펙트럼과 효율 보정에 필요한 스펙트럼들을 미리 준비하는 일이다. 피크가 정확하게 정의된 스펙트럼으로는 1976년 IAEA에서 HPGe 스펙트럼의 피크탐색, 중첩 피크의 분해, 피크 효율 계산 능력 등을 검사하기 위해 개발한 훈련용 스펙트럼[4]이 있다. 또한 1992년 EML의 Sanderson이 HPGe 스펙트럼 분석 프로그램의 능력을 평가하기 위해 개발

한 스펙트럼[5]이 있다. 이들 스펙트럼에는 피크 면적을 아는 여러 중첩 형태의 피크가 있어, 스펙트럼 분석 프로그램에서 적절한 분석 조건을 찾아내는데 사용할 수 있다. 그렇지만 이들 스펙트럼에는 개발된 시기와 관련한 몇 가지 문제들이 있다. 현재 대부분의 실험실에서는 8000 채널까지 스펙트럼을 측정하고 있으나 IAEA와 Sanderson이 제공하는 스펙트럼은 각각 2000, 4000채널 스펙트럼이다. IAEA에서 제공하는 스펙트럼의 피크는 최근에 제작되고 있는 HPGe 검출기의 스펙트럼 피크 보다 더 비대칭이라 실제와는 약간 다르다. 그리고 Sanderson의 스펙트럼에서 백그라운드는 실제 스펙트럼에서 처럼 계단 모양이 아닌 선형적 형태를 취하고 있고, 계수들의 통계적 변동도 실제 스펙트럼과는 다르다. 또한 이들이 개발한 스펙트럼들은 교육용으로 개발된 것이 아니어서 효율 보정 교육을 위한 스펙트럼도 없다. 이들 스펙트럼은 현재 영국의 NTS에서 스펙트럼 분석 교육에 활용하고 있다[6].

본 연구에서는 IAEA와 Sanderson이 개발한 스펙트럼의 문제점들을 보완한, HPGe 스펙트럼 분석 교육에 사용하기 위한 여러 스펙트럼 즉 피크가 정확하게 정의된 스펙트럼과, 효율 보정을 위한 스펙트럼을 개발하고자 하였다.

2. 교육용 모사 스펙트럼 개발 방법

2.1 스펙트럼 개발 절차

교육용 모사 스펙트럼을 개발하기 위해 Fig. 1과 같은 절차를 따랐다. 먼저 교정용 표준 선원의 스펙트럼에서 계단형 백그라운드를 가정하여 스펙트럼 교정용 피크를 분리하였다. 피크가 분리된 스펙트럼에서 통계적 변동과 교정용 피크 이외의 피크를 제거하기 위해 smoothing하였다. 이 스펙트럼의 계수에 Box-Muller 가우스 함수 분포 발생기로 통계적 변

책임저자 : 서경원, kwseo@kaeri.re.kr, 한국원자력연구소, 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150 한국원자력연구소 원자력연수원

등을 주어 백그라운드 스펙트럼으로 하였다. 한편 분리된 피크들은 효율을 고려하여 그 크기를 조정하고 백그라운드와 결합하여 교정용 스펙트럼과 효율 보정용 스펙트럼을 제작하였다.

$$L_{avg} = \frac{\sum_{i=L-N+1}^L Y_i}{N}, \quad R_{avg} = \frac{\sum_{i=R}^{R+N-1} Y_i}{N} \quad (2)$$

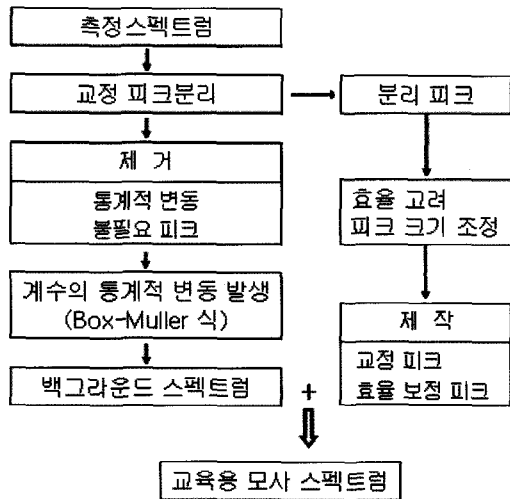


Fig. 1. Development procedure of educational HPGe spectrum

2.2 스펙트럼 측정방법과 스펙트럼의 특성

스펙트럼의 측정에는 상대효율이 28%인 HPGe 검출기 (Canberra GC2520)를 사용하였다. 이 때 사용한 선원은 액체 혼합선원(Amersham, QCY-58)으로, 불감시간은 1% 이하이었다. 이 선원에는 59.5 keV의 감마선을 방출하는 ²⁴¹Am부터 1836.0 keV의 감마선을 방출하는 ⁸⁸Y까지 10개의 핵종이 포함되어 있고, 에너지나 효율 교정에 사용할 피크가 12개 있다. 이 스펙트럼은 90,559초 동안 측정하여, 교정용 피크의 면적이 400,000 counts 이상이 되도록 하였다. 이와 같이 큰 피크 면적이 되도록 한 것은 모사 스펙트럼 제작시 피크의 크기를 1/4 이상 줄여 피크를 이루는 계수들의 통계적 변동을 1/2 정도 줄이기 위해서였다. 피크 에너지를 채널의 2차 함수로 하였을 때 계산되는 피크 에너지의 편차는 0.02%이었으며, 피크의 FWHM을 채널의 2차 함수로 하였을 때 FWHM의 편차는 0.4%이었다. 1332.5 keV 피크에서 FWHM은 1.8 keV이었다.

2.3 피크 분리, 통계적 변동과 불필요한 피크 제거

HPGe 스펙트럼에서 피크의 백그라운드는 저 에너지 쪽 계수가 고에너지 쪽 계수 보다 약간 큰 계단형 모양을 하고 있다. 이 백그라운드를 기술하는 여러 형태의 함수가 제시되고 있는데[7-10], 여기서는 다음과 같은 함수 형태를 가정하였다[11].

$$B_i = L_{avg} + \frac{\sum_{j=L}^i Y_j}{R} * (R_{avg} - L_{avg}) \quad (1)$$

여기서 i 는 백그라운드가 계산되는 채널, L 은 피크 영역의 왼쪽 끝 채널, R 은 피크 영역의 오른쪽 끝 채널, N 은 평균 백그라운드를 계산하는데 사용된 채널의 수, L_{avg} 은 피크 왼쪽의 평균 백그라운드, R_{avg} 은 피크 오른쪽의 평균 백그라운드, Y_j 는 채널 j 의 계수, B_i 는 채널 i 에서 계산된 백그라운드이다. 교정용 혼합 선원 스펙트럼에서 대부분의 교정용 피크들은 독립된 피크이므로 백그라운드 결정에 문제가 없으나, ⁶⁰Co의 1332.5 keV 피크에는 1836.0 keV의 단일 이탈 피크(1325.0 keV 피크)가 피크의 저 에너지 쪽에 간섭 피크로 존재한다. 이 간섭 피크의 영향을 배제하기 위해 ⁶⁰Co 점 선원 스펙트럼으로부터 1332.5 keV 피크를 분리하였다. 한편 ¹⁰⁹Cd의 88.0 keV 피크에는 저 에너지 쪽에 Pb X-선인 72.8, 75.0, 84.9 keV 피크들이 간섭 피크로 존재한다. 이 Pb X-선 피크는 ¹⁰⁹Cd 점 선원을 사용하여 그 크기를 감소시킬 수 있다. 그것은 동일한 피크 계수율을 만드는데 혼합선원보다 단일 감마 선원의 방사능이 낮기 때문이다. 따라서 88.0 keV 피크는 ¹⁰⁹Cd 점 선원 스펙트럼으로부터 분리하였다.

스펙트럼에서 백그라운드 방사선에 의한 피크와 계수들의 통계적 변동을 제거하기 위해, 에너지에 따라 스펙트럼 계수의 변화가 일정한 부분에 대해 $\ln(\text{계수})$ 를 $\ln(\text{Energy})$ 의 다항식에 fitting하였다. 다항식에 fitting할 때 육안으로 피크처럼 보이는 부분의 데이터는 제거하였다. 이 방법이 매우 주관적이긴 하지만, 피크 분석을 위한 교육에는 문제가 없을 것이다.

2.4 모사 스펙트럼 개발

스펙트럼 계수에 통계적 변동을 주기 위해 Box-Muller의 가우스 함수 분포 발생식[12]을 사용하였다. 여기서 X_1 과 X_2 는 0에서부터 1까지 무작위로 발생하는 소수이며, Y_i 은 발생한 값들의 표준편차이다.

$$Y = Y_1 \sqrt{-2 \text{Log}(X_1)} \text{Sin}(2\pi X_2) \quad (3)$$

분리한 피크의 크기를 효율에 맞도록 조정된 후 합성하여 교정용 스펙트럼을 제작하였다. 분리한 피크와 면적 그리고 조정된 면적은 Table 1과 같다. Fig. 2는 백그라운드 방사선에 의한 피크와 계수들의 통계적 변동이 제거된 단일 감마 선원들의 스펙트럼과 교정용 피크들의 면적이 160,000 counts가 되도록 조정된 단일 감마선 스펙트럼들을 합성한 후 통계적 변동이 가해진 모사 스펙트럼을 함께 나타낸 것이다.

시료용기에서 표준선원의 높이별 스펙트럼은 분리한 피크의 면적에 높이별 피크 효율을 고려하여 조정하였으며, 백그라운드 스펙트럼은 교정 피크들의 평균 효율의 크기만큼 조정하였다. 제작된 스펙트럼은 시료용기에서 각각 교정선

원이 10, 20, 30, 40, 50 mm 높이 만큼 담겨져 있을 때 측정될 수 있는 스펙트럼이다.

동시합성 보정 교육을 위한 스펙트럼으로 Peak to Total 비 계산에 필요한 ²⁴¹Am, ¹⁰⁹Cd, ¹³⁹Ce, ¹¹³Sn, ⁸⁵Sr, ¹³⁷Cs, ⁶⁵Zn 점 선원 스펙트럼과, 동시합성 스펙트럼으로 ¹⁵²Eu의 스펙트럼을 측정하였다. 이들 스펙트럼은 가공되지 않은 것이다.

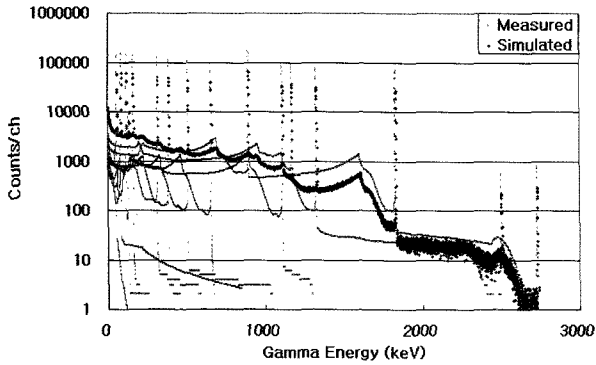


Fig. 2. Standard source spectra removed statistical variation of channel counts and simulated spectra

3. 결과 및 논의

3.1 스펙트럼 계수의 통계적 변동

⁸⁸Y 스펙트럼에서 376 keV ~ 508 keV의 채널별 계수들은 비교적 일정하다. 이 연구에서 사용한 스펙트럼에서 이 영역의 360 채널의 계수는 1505 ~ 1553 counts 범위이었으며, 따라서 계수들의 통계적 변동은 약 38.8 ~ 39.4 counts 이다. 이 스펙트럼의 채널별 계수들의 표준 편차와 함수로부터 계산되는 값에 Box-Muller 식으로부터 계산되는 값들의 표준 편차는 동일한 39 counts이었다.

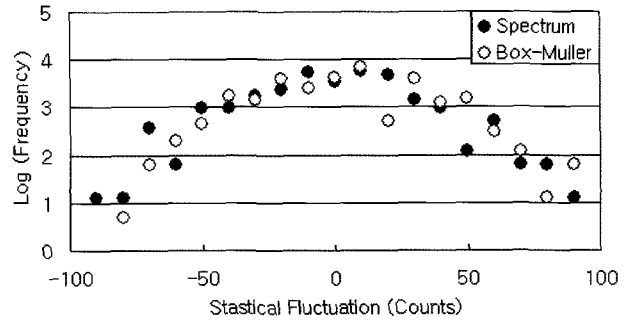


Fig. 3. Distribution of statistical fluctuation and Box-Muller's fluctuation in ⁸⁸Y partial spectrum (376 keV~508 keV)

Table 1. Separated peaks and their area.

Gamma Energy (keV)	Peak Area(Counts)		Adjusted Ratio	Nuclide
	Seperated	Adjusted		
59.5	690467	129442	0.19	²⁴¹ Am
88.0	592622	124112	0.21	¹⁰⁹ Cd
122.1	542918	117766	0.22	⁵⁷ Co
136.4	66990	14387	0.21	⁵⁷ Co
165.9	515900	114088	0.22	¹³⁹ Ce
255.0	32303	6366	0.20	¹¹³ Sn
279.2	544075	123629	0.23	²⁰³ Hg
391.7	650419	148671	0.23	¹¹³ Sn
514.0	742998	171063	0.23	⁸⁵ Sr
661.6	619610	143054	0.23	¹³⁷ Cs
814.0	15521	3513	0.23	⁸⁸ Y DE
898.0	836134	183132	0.22	⁸⁸ Y
1173.2	463461	101244	0.22	⁶⁰ Co
1325.0	16417	3612	0.22	⁸⁸ Y SE
1332.5	414850	90480	0.22	⁶⁰ Co
1836.0	460939	101104	0.22	⁸⁸ Y
2505.7	5333	1265	0.24	⁶⁰ Co SUM
2734.0	8025	1829	0.23	⁸⁸ Y SUM
	Average		0.22	

3.2 개발된 스펙트럼에서 분리한 피크의 형태

HPGe 검출기 스펙트럼의 전 에너지 피크는 일반적으로 가우스 함수 형태를 띠고 있으며, 피크의 저 에너지 쪽에 검출기의 불순물 준위에 의한 일부 전하의 포획으로 작은 tail이 존재한다[13]. 이 tail 또한 가우스 함수 형태를 띠는 것이라고 보고 전체적인 피크 모양을 백그라운드를 포함하여 다음과 같이 나타내었다.

$$Y_i(E) = M(E) \exp(-(i-i_0)^2/2\sigma(E)) + T(E) \exp(-(i-(i_0+\delta))/2\sigma(E)) + B_i(E) \tag{4}$$

여기서 i 는 채널, E 는 피크의 에너지, $Y(E)$ 는 에너지 E 인 피크에서 채널 i 의 계수, $M(E)$ 는 에너지 E 인 피크에서 주 가우스 피크의 진폭, $\sigma(E)$ 는 에너지 E 인 피크의 분산, $T(E)$ 는 에너지 E 인 피크에서 low energy tail 가우스 피크의 진폭, δ 는 피크 중심 위치로부터 low energy tail 가우스 피크 중심 위치

까지의 채널 수, B_i 는 채널 i 에서 계산된 백그라운드이다. low energy tail의 진폭 $T(E)$ 는 주 가우스 피크의 진폭 $M(E)$ 의 2.7% 정도 크기이다. Fig. 4는 ^{60}Co 로부터 방출되는 1173 keV 감마선의 피크를 식 4로 나타낸 것이다. Fig. 4의 아래 그림은 식 (4)로 계산된 값과 측정된 스펙트럼과의 차, 즉 잔차를 나타낸 것이다.

3.3 상용 스펙트럼 분석 프로그램의 분석 결과

스펙트럼 교육용 모사 스펙트럼을 3종의 상용 스펙트럼 분석 프로그램 Aptec, Genie2000, GammaVision으로 분석하였다. 교정 피크들의 중심 위치와 분해능은 세 프로그램 모두에서 각각 0.02 - 0.04 채널 이내에서 일치하였다.

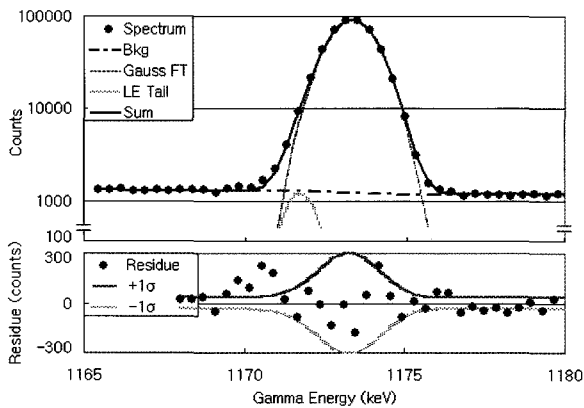


Fig. 4. Full energy peak of 1173 keV gamma ray

Table 2. Peaks area calculated in simulated calibration spectrum

Gamma Energy (KeV)	Peak Area (Counts)			
	Adjusted	Aptec	Genie2000	GV
59.5	129442	129609	129621	128619
88.0	124112	123771	124442	124396
122.1	117766	117959	117736	117532
165.9	114088	113850	113889	114123
279.2	123629	123126	123538	123748
391.7	148671	148279	148554	148754
514.0	171063	170792	171211	171465
661.6	143054	142631	143043	142788
898.0	183132	182578	183224	183145
1173.2	101244	100735	101299	100946
1332.5	90480	90495	90503	90369
1836.0	101104	101076	100945	101185

세 프로그램의 스펙트럼에서 분리한 피크의 면적 계산 결과를 Table 2에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 교육용 모사 스펙트럼에 포함된 교정용 피크들 각각에 대해 3개 스펙트럼 분석 결과는 유효 숫자 3개까지 일치한다.

3.4 피크 탐색 결과

교육용 모사 스펙트럼으로 3종의 스펙트럼 분석 프로그램으로 분석한 결과, 피크 탐색 조건의 설정 변화에 따라 피크 탐색에 변화가 생기는 것을 확인하였다. Aptec 프로그램의 경우, Compton Edge를 피크로 인식하기도 하며, 피크의 저 에너지 쪽 계수가 고 에너지 쪽 계수보다 큰 계단형 백그라운드를 갖는 피크의 경우에 피크의 저 에너지 쪽 부분을 불필요하게 피크로 인식하는 경우가 있다. GammaVision 프로그램에서도 백그라운드를 피크로 인식하는 경우가 있었다.

어떤 스펙트럼 분석 프로그램도 완벽하지는 않으며, 스펙트럼 분석 프로그램에 의한 분석 결과는 사용자의 검토가 필요하다. 그렇게 하기 위해서는 사용자들이 스펙트럼 분석 프로그램의 특성을 잘 이해하여야 하며, 이 연구에서 개발된 교육용 모사 스펙트럼은 스펙트럼 분석 프로그램에 대한 이해에 도움이 될 것으로 판단된다.

4. 결론

혼합 교정 선원 스펙트럼으로부터 계수들의 통계적 변동과 피크를 제거하고, 분리한 교정 피크를 결합하여 제작한 모사 스펙트럼은 측정 스펙트럼과 유사한 피크, 백그라운드, 계수들의 통계적 변동을 가지고 있다. 이 모사 스펙트럼의 피크들은 피크의 중심 위치와 FWHM, 피크 면적 등이 정확하게 정의되어 있어, 스펙트럼 분석 프로그램의 분석 조건을 최적화할 때와 스펙트럼 분석 교육에 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 효율 교정을 위해 시료 용기에 담긴 교정 선원의 높이별 스펙트럼과 Peak to Total 비를 구하기 위한 스펙트럼들은 geometry 및 동시합성 효과 보정 교육에 활용할 수 있다.

본 연구에서 사용한 모사 스펙트럼 개발 과정을 일부 수정하여 ANSI N42에서 요구하는 평가 스펙트럼을 개발하면, 스펙트럼 분석 프로그램들의 피크 탐색, 피크 면적 계산 등의 성능을 평가하는데 사용할 수 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 연구가 계속 진행 중이다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소와 청주대와의 상호협력을 통해 이루어진 것으로 한국원자력연구소의 자체연구개발비로 수행되었습니다.

참고문헌

1. IAEA. Measurement of radionuclides in food and the environment. TR No.295 1989.
2. Canberra. Genie 2000 Operational Manual. 2002:125.
3. Canberra. Multifit Fitting Parameters Setup. APTEC.HLP, 2002.

4. Parr RM, Houtermans H, Schaerf J. The I.A.E.A. intercomparison of methods of processing Ge(Li) gamma-ray spectra - preliminary report, in 'Computers in Activation Analysis and Gamma Ray Spectrometry. I.A.E.A. CONF-780421 1979.
5. Sanderson CG. An evaluation of commercial IBM PC software for the analysis of low level environmental gamma-ray spectra. Environment International 14 1988:379-384.
6. <http://www.nucleartraining.co.uk/program.htm>, Nuclear Training Services Ltd.
7. Kern J. Computer analysis of nuclear spectra and γ - energy standards. Nucl. Instr. and Meth. 1970;79:233-239.
8. Jorch HH and Campbell JL. On the analytic fitting of full energy peaks from Ge(Li) and Si(Li) photon detectors. Nucl. Instr. and Meth. 1977;143:551-559.
9. Teoh W. Cutipie - A computer program to analyze gamma-ray spectra. Nucl. Instr. and Meth. 1973;109:509-513.
10. Dojo M. A shape function of photopeaks for gamma-ray spectrum analysis with Ge(Li) detectors. Nucl. Instr. and Meth. 1974;115:425-429.
11. Canberra. Genie 2000 Operational Manual. 2002:116-117.
12. Knuth DE. The Art of Computer Programming. Addison Wesley 1981:117-127.
13. Gilmore G and Hemingway JD. Practical Gamma-Ray Spectrometry. John Wiley & Sons 1955:167.

Development of Simulated HPGe Detector Spectrum for Education

Kyung-won Seo, Mo-sung Lee*

Nuclear Training Center, Korea Atomic Energy Research Institute 350-353

*Department of Applied Science, Chongju University 360-764

Abstract - From HPGe calibration spectrum of liquid mixed source in cylindrical vial, we developed simulated spectrum for spectrum analysis education. It is the spectrum that combine peaks separated from measured spectrum. After that, spectrum removed statistical variation of channel counts. Statistical fluctuation of the spectrum is made by Box-Muller function. The spectrum contains 18 peaks. The peak's centroid and area were defined exactly. Developed spectra are calibration spectrum, sample spectrum, background spectrum and spectra for efficiency correction for geometry and cascade coincidence.

Keywords : HPGe Detector, Spectrum Analysis, Education

