2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SNU-KAERI PGAA 장치의 감마선 분광계통 개선

Improvement of the Gamma-ray Spectrometer of SNU-KAERI PGAA Facility

선광민, 박창수, 최희동

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

한국원자력연구소의 하나로에 설치된 즉발 감마 방사화 분석(Prompt Gamma Activation Analysis, PGAA) 장치의 감마선 분광계통을 단순모드, Compton 억제 모드, pair 모드를 포함하는 다중 모드 분광계통으로 개선하고 그 성능을 조사하였다. 분광계통의 timing parameter 들을 조정하면서 최적의 분광 조건을 찾고, 선원을 사용하여 Compton suppression factor(CSF) 및 reduction factor(RF)를 측정하였다. 장치 개선 전후의 효율 및 백그라운드 피크 계수율을 비교하여 제시하였다.

Abstract

The single mode gamma-ray spectrometer of the PGAA(Prompt Gamma Activation Analysis) facility constructed at HANARO of the Korea Atomic Energy Research Institute was updated to the multi-mode gamma-ray spectrometer including the single mode, Compton suppression mode and pair mode, and its performances were tested. The timing parameters were tuned for the optimized spectroscopic condition and Compton suppression factor(CSF) and reduction factor(RF) were measured by using the standard sources and the detection efficiency and the count rates of background peaks were also measured and compared with those before the installation of the new spectrometer.

1. 서 론

한국원자력연구소(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)의 하나로에 설치된 즉발 감마 방사화 분석 장치(SNU-KAERI PGAA facility)는 서울대학교(Seoul National University, SNU)와 한국원자력연구소의 공동 노력에 의해 건설되어[1] 2001 년 5 월 시험 가동을 시작한 이래 붕소 농도 분석 및 B, Cd, Sm, Gd, Eu 등의 강한 흡수체에 대한 prompt k_0-factor 측정을 위해 사용되었다[2,3]. 본 장치는 HANARO 의 ST1 수평공 출구에 위치한 플랫폼에 설치되어 있다. 중성자 빔은 pyrolytic graphite(PG) 결정을 사용하는 Bragg 회절법에 의해 인출된다. Bragg angle 은 45º 로 설정되어 있으며 회절차수가 2, 3, 4 인 회절빔이 대부분의 중성자속에 기여한다. 중성자속 및 카드뮴비는 각각

7.9×10^7 n/cm^{2}s 및 266 이다. 빔의 단면적은 2×2 cm^2 이고, 중성자속의 균일성(uniformity)은 중앙부의 1×1 cm^2 에 대하여 12% 이내를 유지한다. 본 장치는 시험 가동 이래 감마선 분광 계통을 HPGe 검출기, 전치증폭기, 분광용 증폭기 및 MCB(Multi-Channel Buffer)로 single bare HPGe 모드로 구성하여 실험을 수행하여 왔다. 이 모드에서의 장치 성능 평가는 다양한 방법에 의해 수행된 바 있다 [4,5,6].

Single bare HPGe 모드의 감마선 분광계에서는 Compton continuum 에 의해 낮은 강도의 피크들의 분별이 제한된다. 이에 비하여 Compton 억제 분광계는 이차 검출기에 의해 흡수되는 산란 감마선과 동시 발생한 사건(coincident event)을 제거하는 방법에 의해 검출한계를 향상시킬 수 있다. 본 장치의 이차 검출기는 NaI(Tl) 섬광체와 BGO(bismuth germanate, $Bi_4Ge_3O_{12}$) 섬광체로 구성되며 hyper pure germanium(HPGe) 검출기 주위를 둘러싸고 있다. 즉발 감마선은 지발 붕괴 감마선에 비해 원자핵의 단일 붕괴에서 나오는 감마선 수가 많게는 보통 수백 개 정도까지 방출되므로 매우 복잡한 양상의 스펙트럼을 형성하며, 이에 따른 Compton continuum 의 영향이 매우 큰 특징을 가지고 있다. 본 연구에서는 하나로의 즉발 감마 중성자 방사화 분석 장치에 새롭게 도입된 Compton 억제형 분광계를 중심으로 단순 모드(single mode), Compton 억제 모드(Compton suppression mode) 및 pair 모드(pair mode)로 이루어진 다중 분광계의 성능을 조사하였다.

2. 장치 구성

다중 모드로 작동하도록 설치된 감마선 분광계의 단면도는 그림 1 과 같다. 검출기의 주요 사양은 표 1 에 나타내었다. 주 검출기는 n-type closed-end coaxial HPGe 검출기이다. HPGe 검출기의 에너지 분해능은 1332.5 keV 감마선에 대하여 2.2 keV 이고, peak-to-continuum ratio 는 45:1 이다. 상대 효율은 43%이다. 많은 PGAA 장치들에서 Compton 억제형 분광계의 이차 검출기로서 검출 효율이 좋고 광수율이 우수한 NaI(Tl)을 사용하여 왔다. 최근에는 광수율이 NaI(Tl)에는 못 미치지만 검출효율이 보다 우수한 BGO 가 널리 사용되며, NaI(Tl)과 BGO 의 적절한 배치로 Compton 억제 성능을 높인 BGO/NaI(Tl) 조합형을 사용하기도 한다. 본 장치에 도입된 이차 검출기는 symmetry type 의 BGO/NaI(Tl) 조합형으로 알루미늄집(aluminum housing) 속에 들어있다. 측면부는 1.5 mm 간극으로 광학적으로 독립되어 있는 8 개의 BGO 섬광체 segment 가 한쪽으로 HPGe 주 검출기를 삽입할 수 있도록 지름 76 mm, 깊이 150.6 mm 의 원통형 hole 을 형성하고 있다. 전면부는 내경이 31.6 mm 인 감마선 입사창을 가진 두께가 30 mm 인 NaI(Tl) 섬광체로 이루어져 있다. 측면부와 전면부는 전체적으로 BGO/NaI(Tl) 섬광체 assembly 를 이루면서 탈착 가능한 8 개의 광증배관을 바라본다. HPGe 검출기는 microm table 위에 안착하여 삽입 및 위치 고정을 한다. 일·이차 검출기는 두께가 10~20 cm 인 납 차폐체에 둘러싸여 있고, 검출기 전단에 내경 2.5 cm 이고 길이 5 cm 인 납 collimator 와, 내경 3.5 cm 이고 길이 5 cm 인 납 collimator 로 이루어져 있는 납 step collimator 가 놓여있다. 그리고, 열중성자에 의한 백그라운드를 줄이기 위하여 ^{6}Li 이 95.4% 로 농축된 두께가 8 mm 인 ^{6}LiF tile 을 납 collimator 입구에 설치하였다. HPGe 검출기는 회절 중성자빔에 수직방향으로 시료 위치로부터 25 cm 떨어진 곳에 위치한다. BGO/NaI(Tl) 이차 검출기가 없을 때 HPGe 검출기에서 시료 위치는 10 cm 까지 접근 가능하다.

그림 2 는 다중 모드 감마선 분광계통의 block diagram 이다. HPGe 검출기의 출력신호는 우선 전치증폭기로 입력된다. 전치증폭기의 출력신호는 두개로 나뉘어 각각 TFA(timing filter amp)와

main shaping amplifier 로 입력된다. Main shaping amplifier 의 linear signal(energy information)은 세 개로 분기되어 각각 세 모드의 16k channel high-rate MCB 로 입력된다. HPGe 검출기의 timing signal 은 TFA 의 출력신호를 CFD(constant fraction discriminator)를 거치게 함을 통하여 발생한다. 8 개의 BGO/NaI(Tl) segment 의 신호는 각각 전치증폭기를 거쳐 좌측의 4 개의 전치증폭기 출력신호와 우측의 4 개의 전치증폭기 출력신호가 별도로 합쳐져서 각각 TFA 및 CFD 를 통해 timing signal 을 형성한다. 주 검출기의 timing signal 은 GDG(gated and delay generator)를 거쳐 TAC/SCA(time-to-analogue converter/single channel analyzer)의 start signal 로 입력되고 BGO/NaI(Tl) 이차 검출기 좌우의 timing signal 은 각각 GDG 를 거쳐 OR Logic module 에서 더해져, TAC/SCA 의 stop signal 로 이용된다. TAC/SCA 의 출력신호는 GDG 를 거쳐 Compton 억제 모드의 MCB 의 gate signal 로 이용된다. 반면 BGO/NaI(Tl) 이차 검출기 좌우의 두개의 CFD signal 과 주 검출기의 CFD signal 은 coincidence module 에 입력되어 pair 모드의 MCB 의 gate signal 로 이용될 coincidence signal 을 발생시킨다. 이와 같이 세 개의 MCB 는 BNC T-terminator 를 사용하는 하나의 lan line 에 연결된 PC(personal computer)에 의해 제어된다.

TAC 을 사용하여 측정한 즉발 감마선의 시간 분포는 그림 3 과 같다. 즉발 감마선의 시간 분포는 HPGe 에서 산란되는 감마선이 HPGe 에 검출된 시간과 산란된 감마선이 BGO 에 검출된 시간 간 차이에 해당하는 시간 분포이다. 시간 분포의 FWHM(Full Width at Half Maximum)과 FWTM(Full Width at Tenth Maximum)은 각각 150 nsec 와 320 nsec 이다. 시간 분포로부터 Compton 억제 모드의 스펙트럼 측정을 위하여 TAC 의 SCA 를 1200 nsec 로 결정하였다. 그리고, pair 모드의 스펙트럼 측정을 위하여 coincidence module 의 분해시간(resolving time)을 110 nsec 로 설정하였다.

3. 성능 조사

3.1. Compton suppression factor(CSF) and reduction factor(RF)

그림 4 에 보인 것은 단순 모드와 Compton 억제 모드에서 측정한 ^{137}Cs 과 ^{60}Co 의 스펙트럼이다. ^{137}Cs 의 Compton 억제 스펙트럼에서의 전에너지 흡수 피크의 계수 손실은 단순 모드에 대하여 약 1% 정도인 반면, Compton edge 는 약 1/3 로 감소했다. Compton continuum 에서 가장 계수가 작은 채널에서 RF 는 4.9 이며, 후방산란피크 근처에서는 약 3 이다. 장치를 특성화하기 위하여 CSF 를 측정하였다. CSF 는 $(P/C)_{suppressed}/ (P/C)_{unsuppressed}$ 로 정의되며, 여기서 Peak-to-Compton ratio (P/C)는 전에너지 흡수 피크의 순면적을 Compton edge 를 포함하지 않는 동일 폭의 채널에 해당하는 Compton continuum 면적으로 나눈 것이다. BGO/NaI(Tl) 이차 검출기를 단지 수동적 차폐(passive shield)로 사용하였을 때에 ^{137}Cs 의 Peak-to-Compton ratio 는 43:1 이고, 반동시계수(anticoincidence counting)를 하였을 때는 209:1 로 향상되었다. 이때 CSF 는 4.9 이다. 그림 5 는 Fe foil 을 중성자 빔에 조사하여 측정한 즉발 감마선 스펙트럼이다. 빔 조사 시간은 3600 초이다. 단순 모드 스펙트럼에서는 단일이탈 피크와 이중이탈 피크와 함께 전에너지 흡수 피크가 관찰된다. Compton 억제 스펙트럼에서는 Compton continuum 이 전체적으로 단순 모드의 약 16% 수준으로 억제되었다. 전에너지 흡수 피크들과 함께 단일이탈 피크와 이중이탈 피크가 보다 분명히 보인다. Pair 스펙트럼에서는 단지 단일이탈 피크와 이중이탈 피크만이 보인다. 이와 같이 복잡한 즉발 감마선 스펙트럼에서 세 모드의 스펙트럼을 비교함으로써 피크 분별을 보다 손쉽게 할 수 있다.

3.2. Coincidence gamma

Compton 억제 스펙트럼에서는 coincidence 로 방출되는 감마선들에 의한 피크들 또한 감소한다. 이러한 사실은 coincidence 감마선이 관심 원소의 라인과 간섭할 때 유용하게 사용될 수 있다. 그림 4(b)의 스펙트럼과 같이 ^{60}Co 은 단지 두 개의 1173.2 keV 와 1332.5 keV 의 coincidence 감마선을 방출하므로 이런 종류의 억제효과를 특성화 하는 데 유용하다. 선원과 HPGe 검출기 표면과의 거리를 25 cm 로 한 상태에서 2% 불감 시간을 가지고 계수했을 때 1173.2 keV 피크는 약 0.8% 감소했고, 1332.5 keV 피크는 약 0.6% 감소했다. 이때 1173.2 keV 피크와 1332.5 keV 피크에 의한 coincidence 피크인 2505.7 keV 피크는 약 38%가 감소했다. 또한 1173.2 keV 피크와 연관된 Compton edge 의 RF 는 3.4, 1332.5 keV 와 연관된 Compton edge 의 RF 는 2.9 였다.

3.3. 검출 효율 검정

검출 효율 검정은 핵분광학 및 방사화분석 분야 모두에서 매우 중요하다. 이의 검정 과정은 표준적인 검정 과정이 존재하지만 검정 에너지가 현재 얻을 수 있는 표준 선원의 지발 붕괴 감마선 에너지 영역을 넘어서는 고 에너지로 확장될 때는 매우 어려운 문제가 된다. 몇 개의 다중 감마 표준 선원(multi gamma-ray standard sources)과 (n,ã) 반응을 이용하여 50 keV ~ 10 MeV 에 이르는 에너지 영역에 대하여 검정하고[2,7], 이를 Compton 억제형 분광계통 설치 이전의 검출 효율[2]과 비교하였다. 그림 6 에서 선원-검출기간 거리가 25 cm 일 때 절대 전에너지 흡수 피크 효율을 나타내었다. 1173.2 keV 의 경우 이전 효율의 60% 수준이다. 이러한 효율 감소는 BGO/NaI(Tl) 이차 검출기의 감마선 입사창이 기하학적으로 제한되고 step collimator 내경이 이전의 3.5 cm 에서 2.5 cm 로 준 이유 등으로 인한 입체각 감소에 주로 기인한다. 검정에 사용된 감마 라인들의 통계 오차는 0.5% 이내로 유지하였다. 검정의 정확도는 100 keV ~ 6 MeV 영역에서 1% 미만이고, 그 외 영역에서는 3% 정도이다. 전에너지 피크와 함께 pair 모드에서 측정한 단일이탈 피크 및 이중이탈 피크 효율을 함께 나타내었다.

3.4. 백그라운드

백그라운드 감마선의 총계수율 변화를 살펴보면 장치 개선 전 기하학적 조건에서 약 2.9 kcps 이었던 것이 현재는 단순 모드에서 약 0.68 kcps, Compton 억제 모드에서 약 0.25 kcps 로 낮아졌다. BGO/NaI(Tl) 이차 검출기 설치 전후의 주요 백그라운드 피크 계수율 변화는 표 2 와 같다. 납에서 방출되는 X-ray 의 경우는 약 10% 수준으로 감소하였고, Ge 의 중성자와의 비탄성 산란에 기인하는 692 keV 피크는 약 40% 정도가 줄었는데 이는 HPGe 검출기로 입사하는 중성자수가 그만큼 감소했음을 의미한다. 반면 붕소에 의한 피크가 새롭게 계측되었는데 이는 BGO/NaI(Tl) 이차 검출기의 알루미늄집속에 불순물로 함유된 붕소에 기인하는 것으로 추측할 수 있으며, 이는 대략 0.2 ìg 정도의 붕소 시료에 해당하는 양이다. 장치 주변을 허용할 수 있는 가장 낮은 방사선량율 이하로 유지하는 것은 방사선 방호의 측면에서 뿐만 아니라 감마선 계측의 측면에서도 중요하다. 본 장치의 경우 원자로가 24 MW 로 가동되고 있을 때, ST1 빔 포트 셔터와 회절 중성자 빔 셔터를 완전히 연 상태에서 감마선 및 중성자 선량율이 빔 셔터 근처에서 각각 20 ìSv/h, 8 ìSv/h 이었고, 빔 stopper 위에서 60 ìSv/h, 1 ìSv/h 이었다. 이를 제외한 곳은 각각 10 ìSv/h, 0.2 ìSv/h 이하로 유지되었다.

4. 결 론

새롭게 한국원자력연구소의 하나로에 설치된 즉발 감마 방사화 분석 장치에 도입된 다중 모드 감마선 분광계에 대한 성능 측정을 수행하였다. Compton 억제 모드에서 전에너지 흡수 피크의 손실은 단순 모드에 비하여 1% 미만이었으며, 전체적으로 Compton continuum 은 16% 수준으로 억제되었다. Compton 억제 모드의 스펙트럼에서는 Compton continuum 으로 말미암아 단순 모드에서는 분별하기 어려웠던 방출 강도가 매우 낮은 감마선들을 보다 명확히 분별할 수 있게 되었다. 또한 백그라운드 감마선의 총계수율이 약 8.6% 수준으로 줄어들었으며, Ge 의 즉발 감마선 및 비탄성 산란에 의한 피크를 비롯하여 주요 백그라운드 피크가 획기적으로 줄어드는 효과를 관찰하였다. 반면 BGO/NaI(Tl) 이차 검출기의 기하학적인 제한과 검출기 전단에 설치된 납 step collimator 내경의 감소로 인하여 입체각이 줄어듦으로써 장치 개선전과 비교하여 검출 효율이 60% 수준으로 저하되는 영향이 발생하였다. 그러나, 전체적으로는 감마선 검출한계의 개선을 달성하였다. 그리고, 이차 검출기의 알루미늄집의 불순물로 함유된 붕소에서 기인하는 것으로 추측되는 미량의 붕소 피크가 형성됨으로써 차후 붕소 농도 분석에서 이에 대한 충분한 고려가 있어야 할 것이다.

참고 문헌

1. S.H. Byun and H.D. Choi, “Design Features for a Prompt Gamma Neutron Activation Analysis System at HANARO ”, J. Radioanal. Nucl. Chem. 244 (2000) 413.
2. G.M. Sun, I.J. Kim, S.H. Byun, H.D. Choi and C.S. Kang, “Prompt k_0-factors and Relative γ-Emission intensities for the Strong Non-1/v Absorbers ^{113}Cd, ^{149}Sm, ^{151}Eu and ^{155,157}Gd ”, presented in the Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Oct. 7-12, 2001, Tsukuba, Japan.
3. G.M. Sun, S.H. Byun and H.D. Choi, “Measurement of the Prompt k_0-factors for the Strong Non-1/v Absorbers relative to Cl ”, submitted to J. Radioanal. Nucl. Chem.
4. S.H. Byun, G.M. Sun and H.D. Choi, “Development of a Prompt Gamma Activation Analysis Facility Using Diffracted Polychromatic Neutron Beam ”, Nucl. Instr. and Meth. A487 (2002) 521. .
5. S.H. Byun, G.M. Sun and H.D. Choi, “Beam Characteristics of Polychromatic Diffracted Neutrons Used for Prompt Gamma Activation Analysis ”, J. Korean Nucl. Soc. 34 (2002) 30.
6. S.H. Byun, G.M. Sun and H.D. Choi, “Characterization of a polychromatic neutron beam diffracted by pyrolytic graphite crystals”, Nucl. Instr. and Meth. A, in press.
7. Z. Kis, B. Fazekas, J. Östör, Zs. Révay, T. Belgya, G.L. Molnár and L. Koltay, “Comparison of effciency functions for Ge gamma-ray detectors in a wide energy range”, Nuclear Instr. and Meth. A418 (1998) 374.

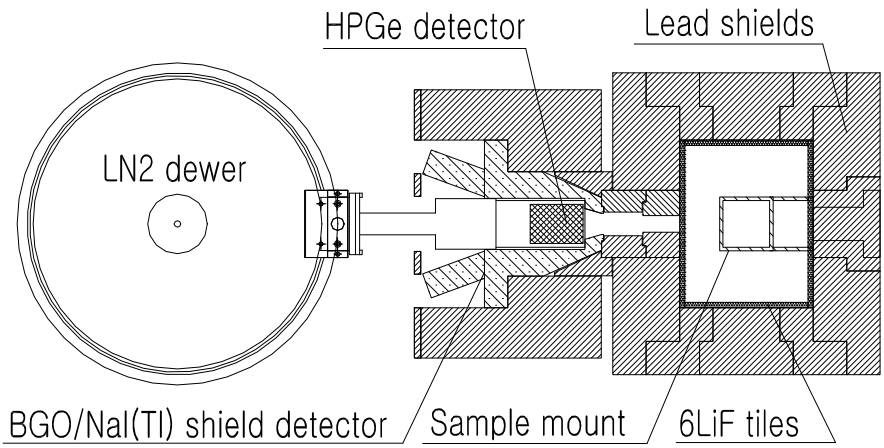

Fig. 1. Cross-sectional view of the HPGe-BGO/NaI(Tl) gamma-ray spectrometer.

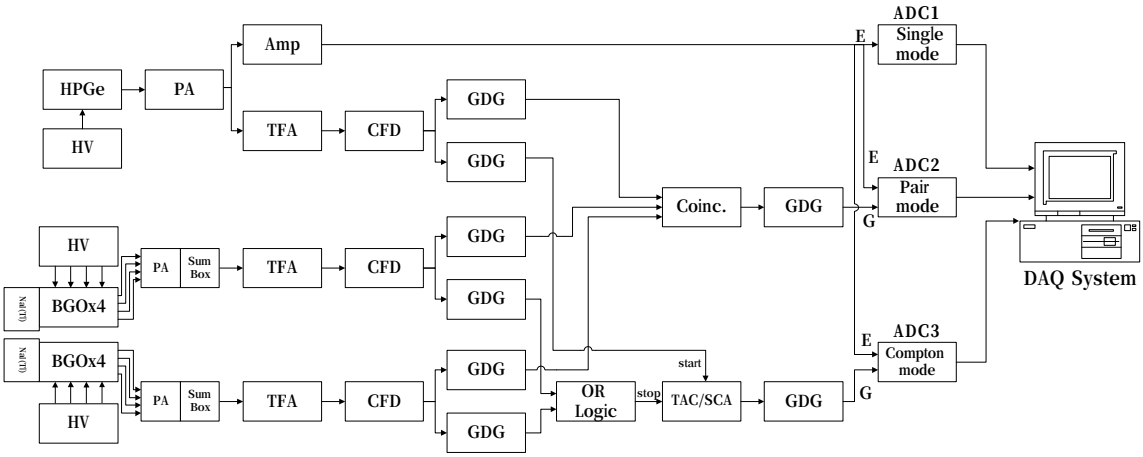

Fig. 2. Block diagram of the SNU-KAERI PGAA gamma-ray spectrometer. E : energy signal, G : gate signal to ADCs.

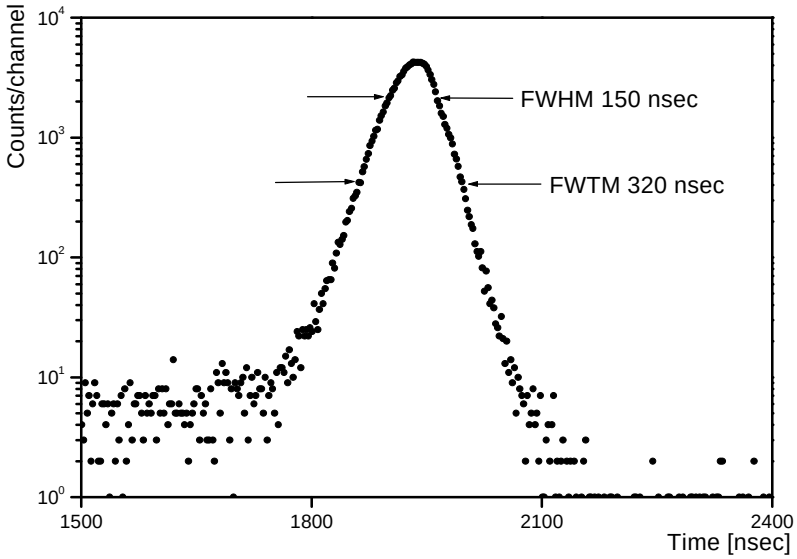

Fig. 3. Time distribution of the HPGe-BGO/NaI(Tl) spectrometer system. Gamma-ray source : prompt gamma-rays from Fe(n,ã).

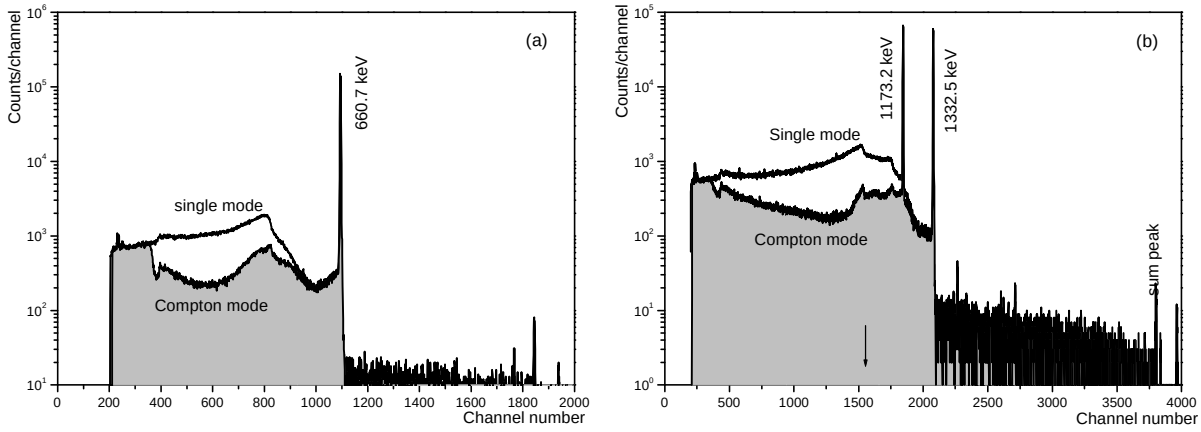

Fig. 4. Photon spectrum of the standard sources by using the single mode and Compton suppression mode. (a) is for ^{137}Cs and (b) is ^{60}Co. Coincidence sum peak is shown 2505.7 keV in (b).

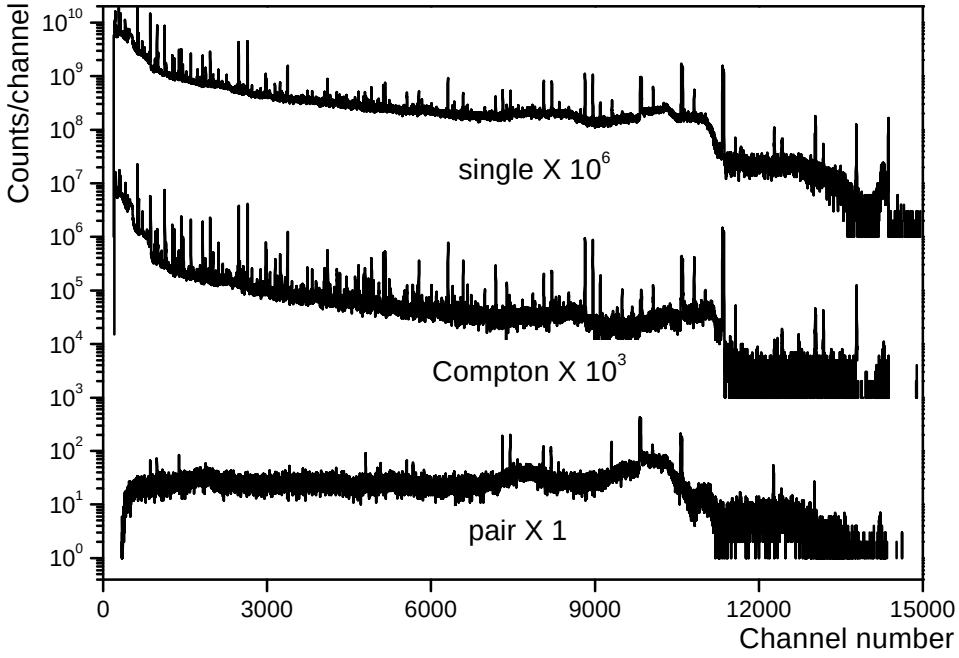

Fig. 5. Photon spectrum obtained by using Fe foil under neutron beam irradiation. Live time is 3600 sec.

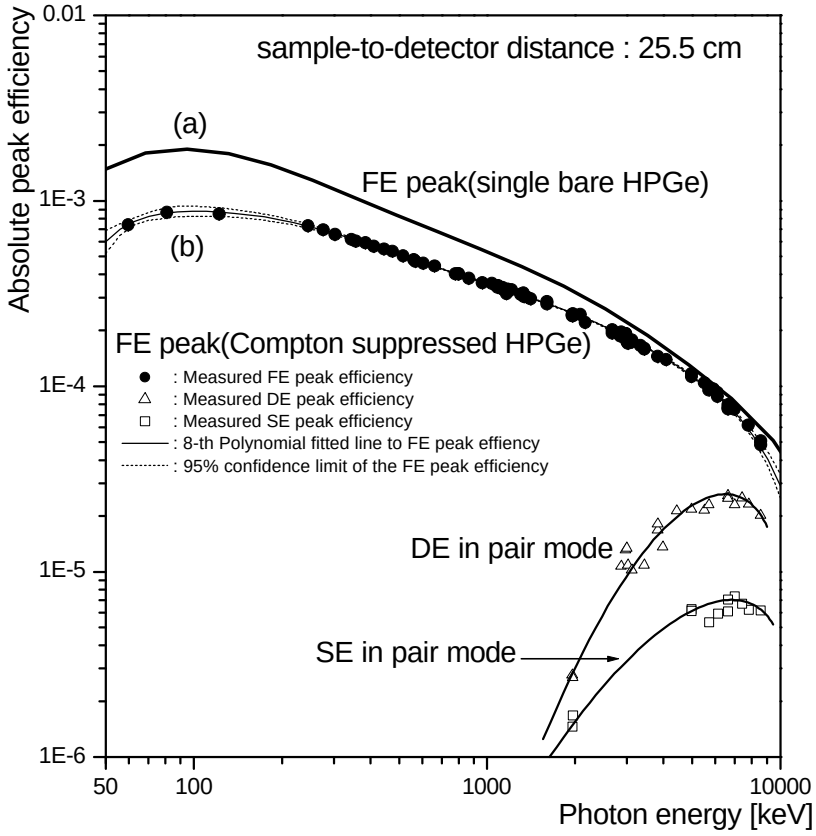

Fig. 6. Absolute peak efficiency curves of the gamma-ray spectrometer for full energy peaks(FE) before update(a) and after update(b), single escape peaks(SE) and double escape peaks(DE).

Table 1. Specification of the detectors.

	HPGe detector	BGO/NaI(Tl) detector
Supplier	EG&G ORTEC	BICRON
Model	GMX30190-S	5.75HW6.30BGO/NaI(Tl)/(8)1.5-X
Crystal size	58.2 mm Ö× 79.0 mm L	-
Preamp or Photomultiplier tube	Resistive feedback type	HAMAMATSU 2060 1.5 inch dia(38.1 mm dia.) 8 tubes
Bias voltage	-3900 V	+700 V
Energy resolution or Pulse height resolution	1.8 keV(guaranteed) 2.2 keV(measured) (for 1332 keV from ^{60}Co)	16% FWHM (for 662 keV from ^{137}Cs)
Relative detection efficiency	43% (for 1332 keV from ^{60}Co)	-
Peak to Compton ratio	209:1 (for 662 keV from ^{137}Cs)	-

Table 2. Background count rates(in cps) under neutron beam irradiation.

Energy [keV]	Element or nuclide	Before update	After update	
		Single bare HPGe	Single mode	Compton suppressed mode
	Total count rate	2.9E+03	6.8E+02	2.5E+02
73	Pb X-ray	2.0E+01	1.3E+00	1.3E+00
75	Pb X-ray	3.7E+01	3.7E+00	3.7E+00
85	Pb X-ray	1.5E+01	6.5E-01	6.4E-01
175	Ge	4.5E+00	6.9E-01	6.8E-01
596	Ge	1.1E+01	4.3E+00	3.8E-01
868	Ge	3.2E+00	1.4E+00	6.7E-02
692	Ge-inelastic	3.1E+00	2.4E+00	1.9E+00
478	B	-	0.3	0.3
511	annihilation	1.7E+01	7.9E+00	1.7E+00
1294	Unknown	1.7E+00	5.1E-01	2.2E-01
2223	H	9.5E-01	1.1E-01	1.2E-01