

n/γ 복합 방사선장에서의 중성자 스펙트럼 분리 측정연구(1)

이광필[†] · 김원식

한국표준과학연구원 화학방사선부
(1993. 11. 12. 접수)

Neutron Spectrum Measurement in n/γ Mixed Field(1)

Kwang-Pill Lee[†], Wuon-Shik Kim

Division of Chemistry and Radiation, Korea Research Institute of Standard and Science, Taejon 305-606, Korea

(Received Nov. 12, 1993)

요약: $^{241}\text{Am-Be}(\alpha, n)$ 중성자 선원의 중성자/감마선(n/γ) 복합 방사선장에서 $^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ 핵 반응을 이용하고 두 섬광체, BC 501(C_8H_{10})과 Cerium의 섬광 감쇠 시간차와 동일 섬광체 내에서의 n/γ에 대한 서로 다른 섬광감쇠 시간차를 병용하여 PSD(Pulse Shape Discriminator) 및 CFD(Constant Fraction Discriminator) 방법으로 n과 γ성분을 분리 측정하였으며 ^6Li 속중성자 분광계의 figure of merit는 1.36으로 평가되었다.

Abstract: In n/γ mixed field of $^{241}\text{Am-Be}(\alpha, n)$ neutron source, we separated the neutron component from gamma ray component. At the center of the detector, ^6Li was doped on the cerium activated glass plate for $^6\text{Li}(\alpha, n)\text{T}$ nuclear reaction. The time differences of the light following excitations by different scintillators, BC501(C_8H_{10}) and cerium, and by the same scintillator for different radiations as neutrons and gamma-rays are used to apply the methods of PSD(Pulse Shape Discriminator) and CFD(Constant Fraction Discriminator). The figure of merit of ^6Li fast neutron spectrometer is estimated as 1.36.

Key words: n/γ mixed field, $^{241}\text{Am-Be}(\alpha, n)$, $^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$, decay time, scintillator, BC501(C_8H_{10}), cerium, PSD, CFD, figure of merit.

1. 서 론

중성자는 전기적으로 중성의 입자라는 특성 때문에 중성자를 측정하기 위해서는 중성자와 물질과의 상호 작용에 있어서 방출하는 하전입자를 간접적으로 측정하여야 한다. 중성자와 물질의 상호작용은 물질의 종류와 중성자 에너지에 크게 의존한다. 현재 국내의 원자력 산업의 증가와 의료 및 기초연구 등에 따른 중성자 측정연구의 중요성이 대두되고 있다.

유기섬광 검출기에 입사된 중성자-감마 혼합방사선에 의해 발생하는 섬광과정은 감마선에 의한 콤프턴 산란전자와 중성자에 의한 반조 양성자로서 이들은 서로 다른 섬광 감쇠시간 특성을 갖는다.¹ 또한 동일한 방사선에 대하여도 섬광체의 종류에 따라 섬광감쇠 시간이 다르다.²

본 연구에서는 ^6Li 속중성자 분광계를 사용하고 이러한 섬광감쇠 시간차를 이용하여 PSD(Pulse Shape Discriminator) 및 CFD(Constant Fraction Dis-

criminator) 방법³으로 중성자 성분과 감마선 성분을 분리 측정하였다.

2. 측정원리

2. 1. ⁶Li 중성자 분광계

이 실험에 사용된 검출기는 BICRON corporation 의 BC-501A 액체 섬광계수관으로서 Fig. 1과 같이 중앙에는 중성자와 반응할 수 있는 ⁶Li를 Ce으로 활성화된 유리면에 도포시키고 그 양편은 BC-501(성분: dimethyl benzene과 fluors)로 충전되어 있다. 입자검출기로서 최초로 쓴 물질이 고체 섬광체로서 1910년 Rutherford가 α 입자 산란실험에 사용하였다. 그러나 섬광체의 광량이 미량이어서 많은 사용이 없었지만 섬광체의 발광 기술이 출현한 이후 그 이용이 증가하고 있다.

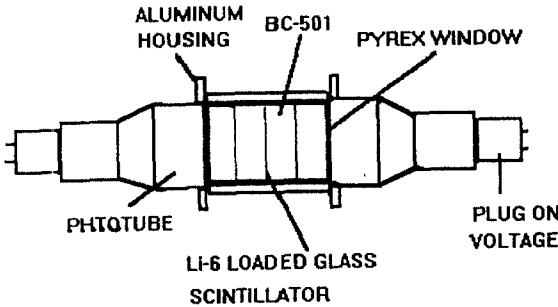
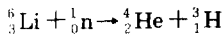


Fig. 1. Block diagram of a fast neutron spectrum detector.

⁶Li(n, α)T 핵반응을 써서 중성자 에너지 측정을 행했다. 중성자는 ⁶Li와 충돌하여 알파입자와 삼중수소를 만든다.



위의 핵반응에 에너지 보존칙과 운동량 보존칙을 적용하면 핵반응 후의 질량 결손으로부터 Q-value는 + 4.78 MeV로서 입사 중성자의 운동에너지가 무시될 수 있을 정도로 작을 경우 $E_\alpha + E_t \approx 4.78 \text{ MeV}$ 이며 입사 중성자의 운동에너지 E_n 이 무시될 수 없을 경우 그

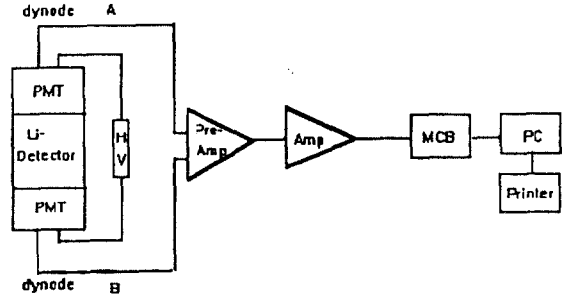


Fig. 2. Block diagram of a test configuration for pulse height measurement.

에너지는 E_α 와 E_t 에 전달되므로, 즉 $E_\alpha + E_t \approx E_n + 4.78 \text{ MeV}$ 이므로 $E_\alpha + E_t$ 를 측정하면 E_n 을 구할 수 있다. ⁶Li 속중성자 분광계는 알파입자 및 삼중수소가 각각 한 쌍의 검출기에 동시에 들어간 경우만 출력의 합 $E_\alpha + E_t$ 가 얻어지도록 되어 있다. 한편, 검출기에 유기 섬광체가 충전되어 있어 섬광체를 여기시켜 여기상태에서 기저상태로 떨어질 때 광자를 방출한다. 이 광자를 광전자 증배관(PMT)을 써서 증폭하여 큰 전기 펄스 신호로 출력한다.

검출기 시험 전자회로계의 구성은 Fig. 2와 같이 PMT의 dynode 출력에서 미소신호를 증폭하는 프리 앰프와 앰프를 거쳐 MCB(Multi Channel Buffer)를 통해 펄스파고의 측정을 한다.⁴

2. 2. γ-n 식별법

n, γ혼합방사선장에 놓여 있는 BC501 섬광체(C₃H₁₀)에 입사한 감마선과 중성자는 각각 콤프턴 산란전자와 recoil 양자에 의하여 섬광체를 여기시키고 섬광체가 여기상태에서 기저상태로 떨어질 때 광자가 방출하여 섬광광되는 실험에 의하면 $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$ 로 나타내는 지수법칙에 따른다. 여기서 N(t) = 시각 t에서 방출되는 광자의 수, τ = 섬광체의 감쇠시간(decay time)이다. 이처럼 섬광체의 감쇠시간이 발광의 원인이 되는 하전입자의 종류에 따라 다르며, 이것을 이용해서 n-γ 식별을 행한다.

원리는 Fig. 7에 나타난 회로도에서와 같이 zero 교차점의 시간차를 이용하여 감마선과 중성자를 분리 측정하는 것이다.

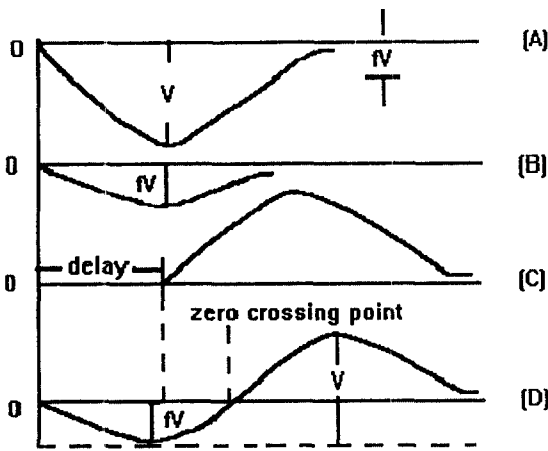


Fig. 3. Time resolution with constant fraction method.

- (A) Input pulse of amplitude V
- (B) Input pulse attenuated by factor f
- (C) Input pulse delayed and reversed
- (D) The sum of pulse (B) and (C)

우선 PMT의 anode 출력에서 신호를 PSD로 받아 CFD의 신호를 TAC(Time to Amplitude Converter)의 start 신호로 하고 PSD의 신호를 stop 신호로 TAC에 입력한 후 TAC의 출력에서 감마선과 중성자를 분별한 후 TSCA(Time Single Channel Analyzer)에 의해 중성자 측정만이 가능하게 된다.

CFD의 원리는 Fig. 3과 같이 입력 펄스 A를 계수 f 만큼 그 높이를 줄여 펄스 B로 만든다. 입력펄스 A를 역상으로 하여 그 rise time보다 긴 시간으로 delay시켜 펄스 C를 만들고 펄스 B와 C를 합하여 펄스 D를 만든다. 펄스 D의 zero 교차점에서 시간신호를 도출하면 펄스의 파고에 의존하지 않는 시간신호를 얻을 수 있다. 같은 rise time을 갖는 펄스는 반드시 같은 zero 교차시간을 준다는 것을 알 수 있다.⁵

CFD에서 rise time에 의한 zero 교차시간차에 상응하는 γ선과 중성자 펄스를 각각 TAC의 start 신호로 보내고 일부는 PSD의 stop 신호로 쓰이게 된다.

TAC의 start에 입력신호가 들어오면 TAC는 작동을 개시하여 내부 용량을 충전하기 시작한다. 다음 γ선의 신호가 stop 신호로 들어오면 TAC는 작동을 정지하고 stop과 start의 시간차에 비례한 높이의 신호를

낸다. 한편, 중성자에 의한 stop 신호가 들어와 stop과 start 신호차에 비례한 높이의 신호를 보낸다. 그 후 TSCA에 의해서 중성자 신호만을 측정한다.

3. 실험 및 결과

중성자선원은 산화 아메리슘에 베릴륨 분말을 혼합한 100mCi의 ²⁴¹Am-Be 선원을 사용하였다. 검출기와 선원 사이에 1 inch 납으로 차폐하고 ²⁴¹Am-Be 선원은 검출기에서 5cm 되는 곳에 놓고 측정하였다.

먼저 ⁶Li 속중성자 검출기의 특성을 파악하기 위해 Fig. 2와 같은 회로계에서 A와 B의 각 회로에 대한 PMT의 반응값이 일치하도록 PMT의 증폭조절 나사를 조절하여 측정된 결과를 Fig. 4, 5에 나타내었으며 A, B 회로 양쪽의 PMT 반응값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

¹³⁷Cs과 ²⁰⁷Pb 등의 감마선원을 사용하여 검출기의 반응을 측정된 결과는 전에 발표한 실험결과와 잘 일치하고 있다.⁸ 이번 실험에서는 ²⁰⁷Pb의 감마선에 의한 컴프턴 산란 전자의 최대 에너지값(E_{max})의 0.95E_{max}(0.374 MeV와 0.814 MeV)를 택하여 MCA의 채널 수를 에너지로 교정하였다.

섬광체로부터 방출되는 빛의 적분값 10%에서 90%로 상승하는 데 걸리는 시간 t_R은 대부분의 섬광체에 대하여 중성자에 의하여 여기되었을 때는 130ns가 걸리고 감마선에 의하여 여기되었을 때는 10ns가 걸린다.³ 3가지 매개변수가 중성자와 감마선의 구별능력을 결정하는데, 즉 주어진 여기 에너지에 대하여 음극에 생성된 광전자의 수 R과 중성자와 감마선에 대한 섬광모양 f(t)와 펄스 모양의 정보를 추론할 수 있는 광전자 준위 j이다.

j번째 광전자의 평균시간은

$$t_j = \tau \ln \frac{R}{R-j} = \tau \ln \frac{1}{1-F} \dots\dots\dots (1)$$

이며 F는 j/R이다.

j번째 광전자의 분산은

$$\sigma_j^2 = \tau^2 \sum_{k=0}^j \left(\frac{1}{R-k} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

이다. 시간분포의 폭은 τ와 광전자준위 j에 비례하지

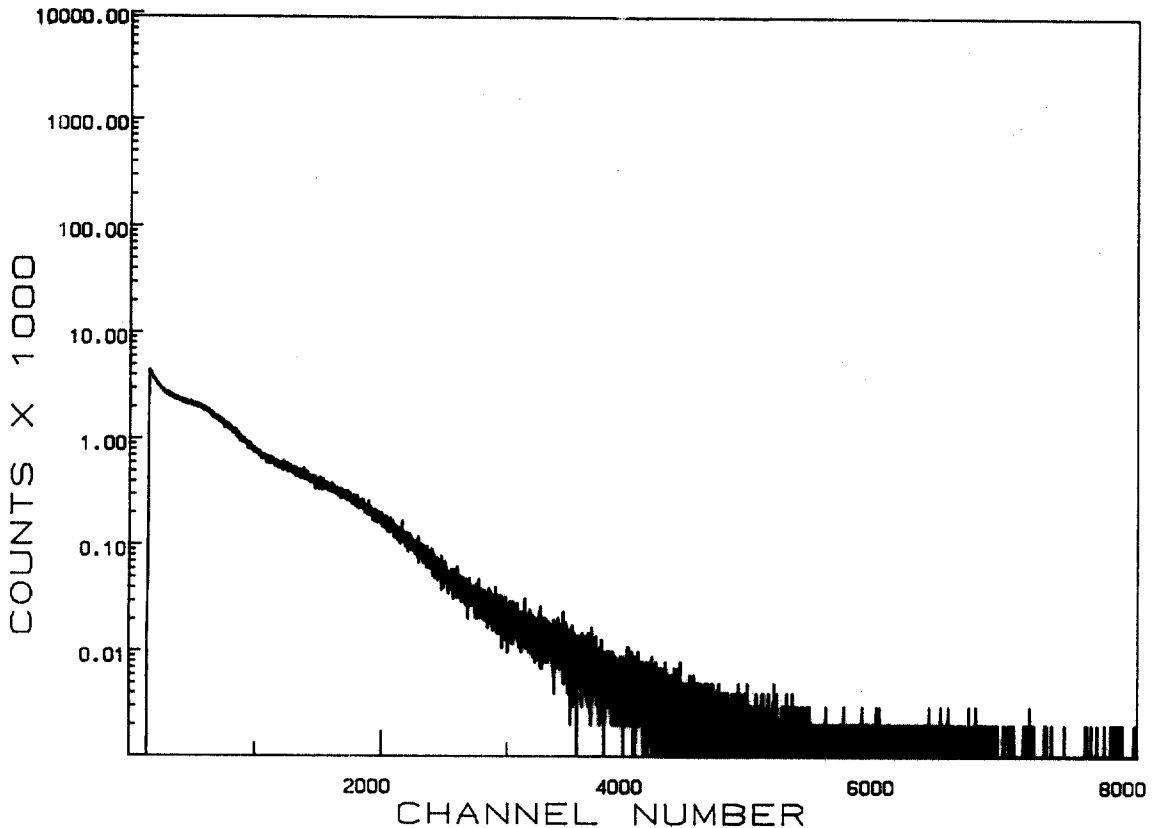


Fig. 4. Response spectrum for ^{207}Bi gamma-ray source with circuit A.

만 전체 광전자수 R에는 역비례한다. 따라서 시간정보를 유출할 수 있는 F가 1로 증가해 가면 중성자와 감마선의 분리는 증가하지만(식 (1) 참고) 시간분해능은 떨어진다(식 (2) 참고).⁹ 이와 같은 이유로 Kuchnir와 Lynch에 의해 중성자와 감마선의 최적분리가 연구되었다.⁹

본 연구에 사용된 ^6Li 속중성자 분광계는 측정결과(Fig. 6 참고) 중성자와 감마선의 최적분리를 위하여 350keV에서 열중성자 포획 피크가 일어나도록 설계되었다고 생각된다.^{4,9}

Fig. 7은 감마선과 중성자를 분리하기 위한 회로도로서 PSD와 CFD의 zero 교차를 이용한 분리신호를 TAC의 start와 stop 신호로 사용하여 감마선과 중성자를 분리할 수 있다. $^{241}\text{Am-Be}$ 중성자 선원으로 부터의 측정에 대한 결과 중 중성자와 감마선 성분의 혼합

피크를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7의 각 계통에서 pulse의 크기, delay 등을 세밀하게 조정하여 최적의 측정조건을 선택하여 TAC 출력 logic pulse를 얻었다. 실험에 사용된 측정조건은 다음과 같다.

^6Li FNS SYSTEM SETUP

HV : +1000V

CFD : Threshold : 0, f = 0.4, CF Mode

PSD : Strobe Delay = 1.52 μs

TAC : Time Range : 1000ns, Anti, Int mode

TSCA : UL = full, LL = 1.48

앞의 측정조건으로 Fig. 7의 회로도에 의한 측정결과를 Fig. 9에 나타내었다. $^{241}\text{Am-Be}$ 중성자 선원으로 부터 감마선과 중성자의 분리 피크를 측정하였다. 이

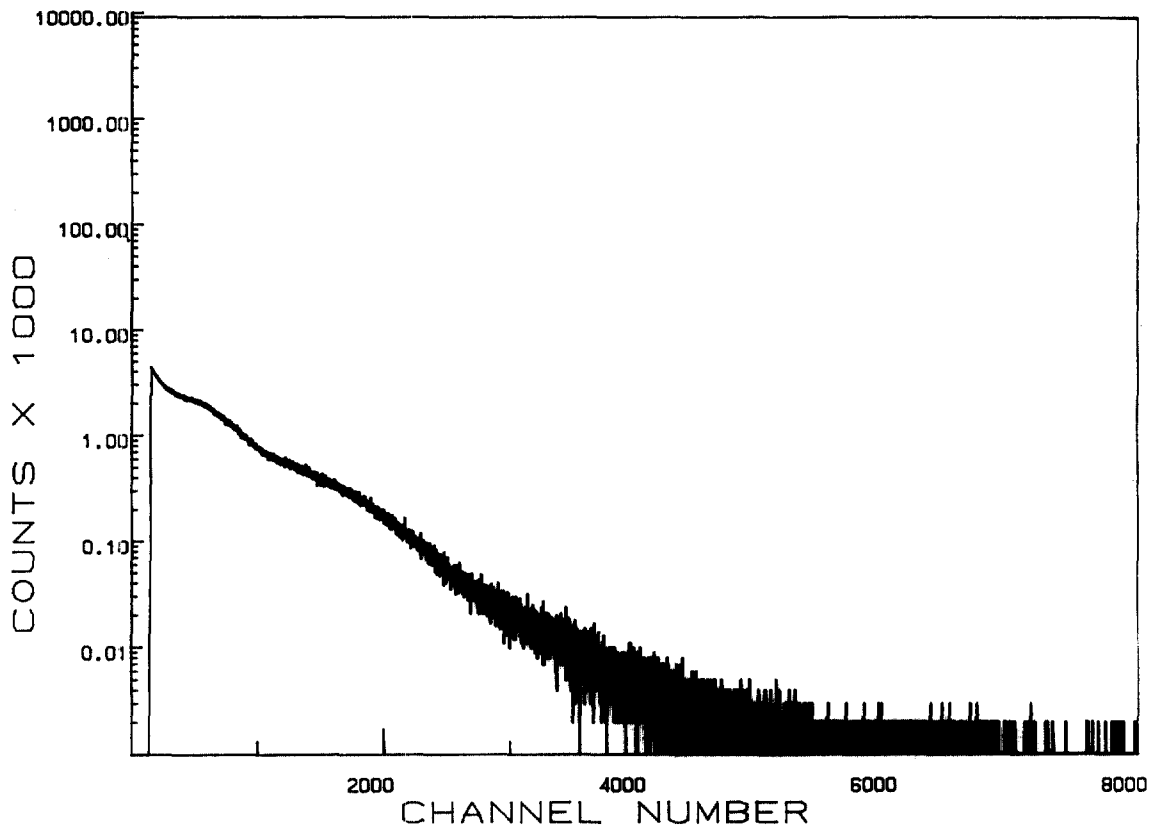


Fig. 5. Response spectrum for ^{207}Bi gamma-ray source with circuit B.

결과는 TAC에서 얻은 logic pulse를 MCA의 ADC를 통하여 측정된 피크이다. 여기서 TSCA의 시간을 조절하여 감마선 성분을 제거하고 중성자 성분만을 측정된 피크를 Fig. 10과 같이 얻었다.

4. 결론 및 토의

이번 실험을 통하여 ^6Li 속중성자 측정 분광계의 감응에 관한 특성조사와 n- γ 혼합장에서의 중성자와 감마선의 분리 피크를 측정하였다.

PMT의 A 및 B의 감응 피크를 일치시켜 A, B 회로의 신호오차를 최소화하였고 ^{207}Bi 감마선의 콤프턴 산란 전자 에너지의 95% 최대값($0.95E_{\text{max}}$)으로 스펙트럼 피크 채널을 교정하였다. 교정한 후 350keV 근처에서 생성되는 열중성자 포획 피크의 위치를 측정된 결

과 350keV에서 나타나 에너지 교정도 잘 된 것으로 사료된다.

전 실험의 ^6Li 중성자 분광계 특성 연구⁸에서는 중성자와 감마선 영역을 분리하지 못하였으나 이번 실험에서는 각 계통의 최적측정 조건의 선택과 미세조정을 한 결과 Fig. 8의 3475 channel과 3550 channel 사이의 분리되지 않은 피크를 Fig. 9와 같이 감마선과 중성자를 분리할 수 있었다. 그리고 TSCA의 시간을 미세조절하여 Fig. 10과 같이 중성자 성분만을 측정하였다. Fig. 8의 background 피크도 측정하였으나 전체 피크에 영향을 미치지 않았다. 실험에 있어서도 거리변화, 선원의 moderate 등에 따른 결과는 큰 변화를 나타내지 않았지만 여러 가지 조건 변화에 따른 상세한 실험을 계속할 예정이다.

한편, 감마선과 중성자의 분리측정 장치의 능력을

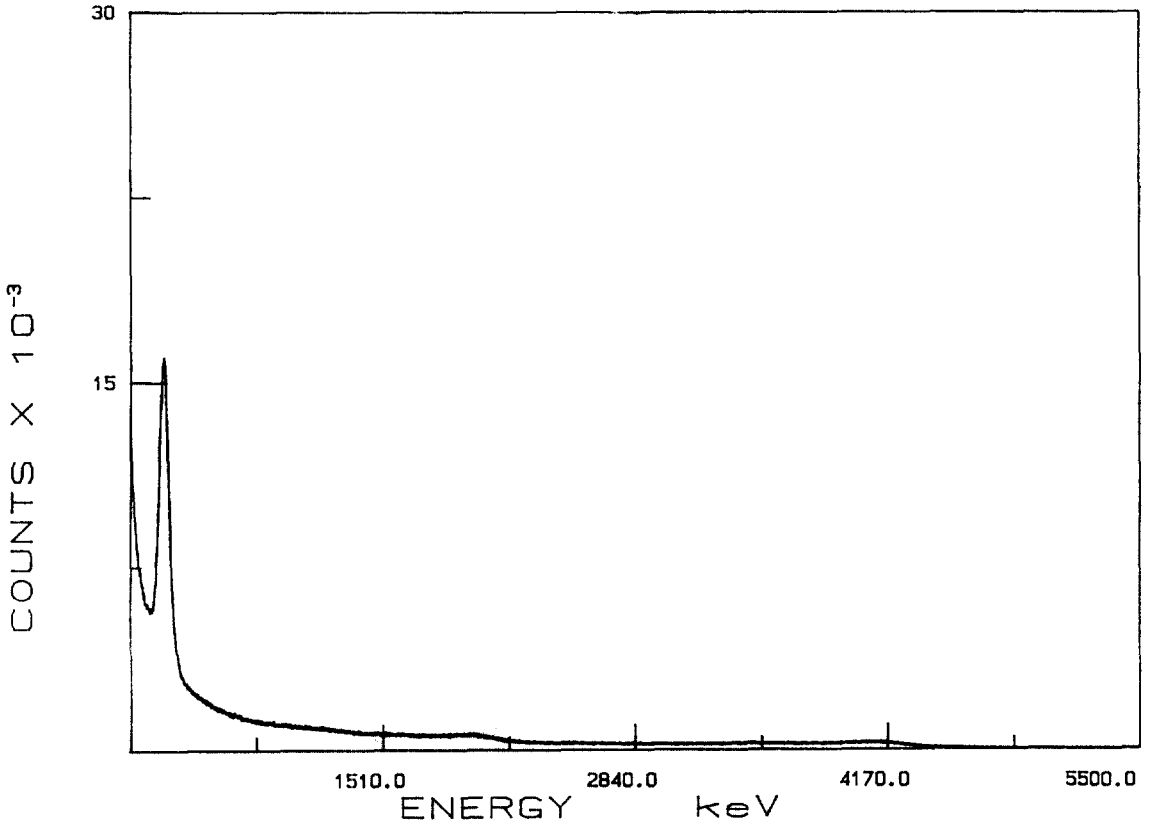


Fig. 6. Thermal neutron capture peak from ²⁴¹Am-Be neutron source.

$$\text{figure of merit}(M) = \frac{(\gamma \text{와 } n \text{의 피크간격})}{(\gamma \text{피크폭}) + (n \text{피크폭})}$$

로 나타내는데,^{6,7,10} 본 연구에 사용된 ⁶Li 속중성자 분광계의 figure of merit(M)는 약 1.36으로 평가되었다. Fig. 10의 중성자 성분만의 피크는 TSCA의 lower level를 조절하여 감마선의 성분을 제거함으로써 얻었다. 이 연구결과를 이용하여 중성자 성분만의 pulse height spectrum 측정이 가능하게 된다.

앞으로 Monte Carlo 방법을 이용한 중성자 스펙트럼 연구와 NE213 등 다른 속중성자 검출기의 비교실험을 통하여 n, γ 혼합 방사선장에서의 중성자 스펙트럼 측정 표준화립 연구를 계속할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처의 정부출연 연구비(1993년)에 의해 이루어진 것임을 밝히며 이에 깊은 감사를 드립니다.

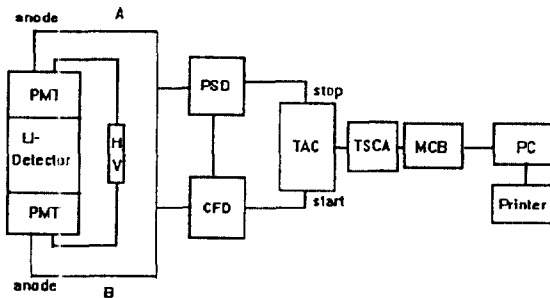


Fig. 7. Block diagram for neutron-gamma separation experiment.

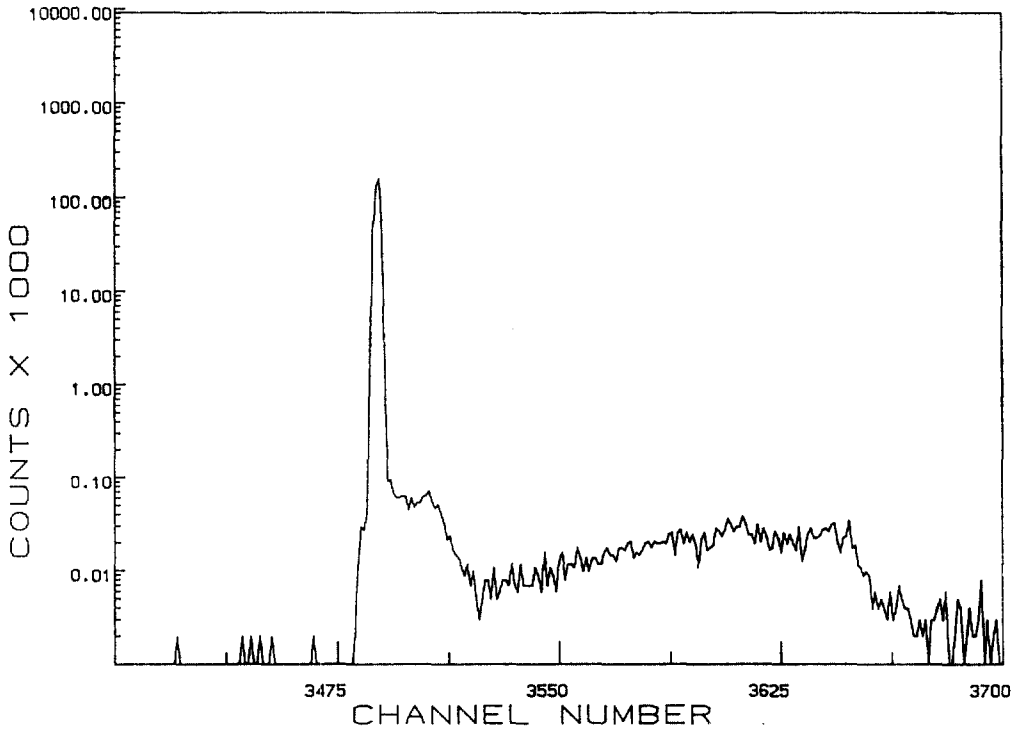


Fig. 8. Neutron-gamma spectra from ^{241}Am -Be neutron source.

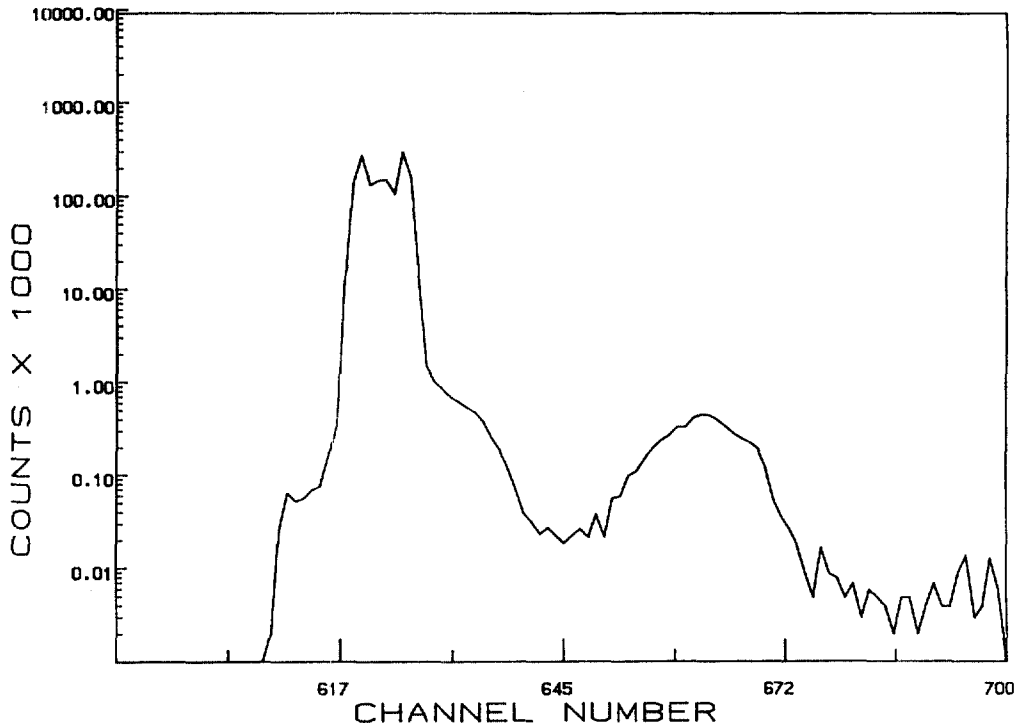


Fig. 9. Neutron-gamma separated spectra from ^{241}Am -Be neutron source.

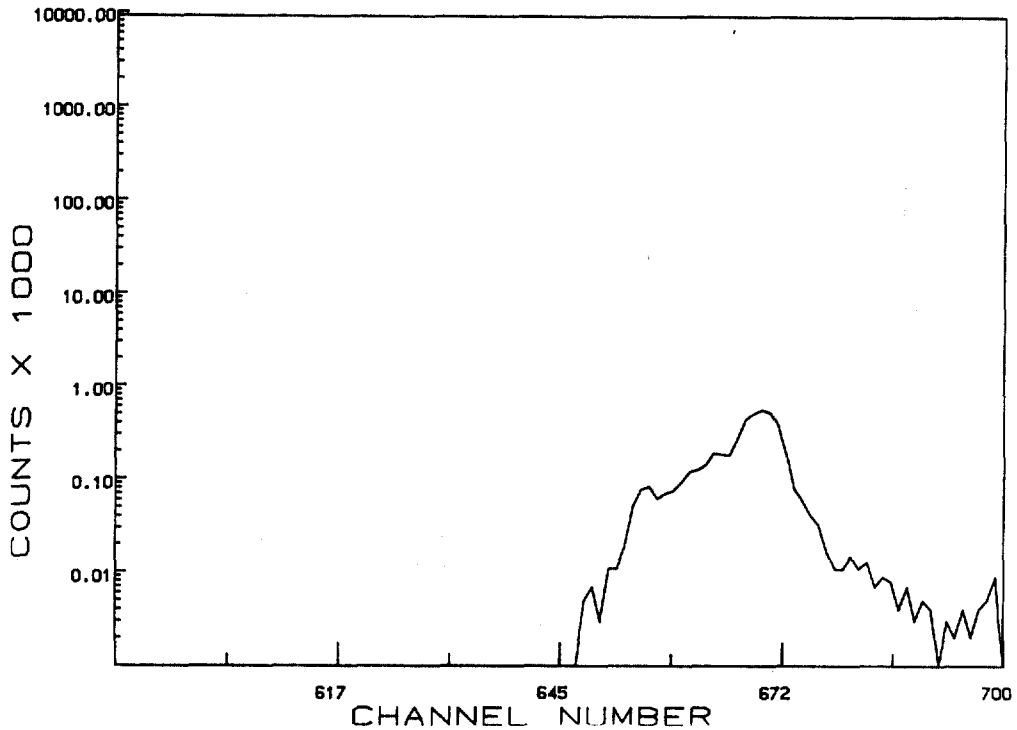


Fig. 10. Neutron spectrum from ^{241}Am -Be neutron source after rejecting the gamma ray component.

참고문헌

1. R. B. Owen, *Nucleonic*, 17(9), 92(1959).
2. G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, p. 349, John Wiley & Sons, 1979.
3. F. Kuchnir and F. Lynch, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-15(3), 107(1968).
4. Canberra Application Note, neutron Detection System with n/γ Discrimination, AN-D-8904, 1989.
5. 阪井英次, 放射線計測 理論 演習, 上巻, pp. 300-304, 現代工學, 1986.
6. P. Sperr, et., *Nucl. Inst. and Meth.* 116, 55(1974).
7. 이경주, 분석과학, 5(4), 367(1992).
8. 최성호, 이광필의 3인, 분석과학, 5(1), 57(1992).
9. Model 460 Delay Line Amplifier Operating and Service Manual, EG & G Ortec.
10. M. Ahmed, *Nucl. Inst. and Meth.* 143, 255(1977).