

Study on the cascade summing correction for high efficiency HPGe detector

M.S.Lee

Dept. of Physics, Chongju University

고효율 HPGe 검출기의 동시합성효과 보정 연구

이모성

청주대학교 물리학과

(2005년 3월 23일 접수, 2005년 9월 1일 채택)

Abstract - Cascade summing occurs when two gamma-rays emitted in the decay of a single nucleus both deposit energy in a detector. The effect may cause systematic errors that can reach levels of more than ten percent for some radionuclides. A method for estimation of the effect of these coincidences was developed. It is based on direct computation of the effect by means of peak to total ratio measured for the place around the detector. It has been shown that the P/T ratio for the given energy in the working space around the detector may not be a constant value and must use its mean value. Some results from a peak to total calibration study in the presence of scattering materials are also given.

Key words : HPGe detector, peak efficiency, cascade summing correction

요약 - 단일 핵종의 붕괴시 방출된 두 감마선이 함께 검출기에 흡수될 때 cascade summing이 일어난다. 이 효과는 일부 핵종에서 10% 이상의 계통적 오차를 야기한다. 이들 동시합성 효과를 추산하기 위해 검출기 주위에서 측정된 피크-토탈 비를 사용하여 그 효과를 직접 계산하였다. 검출기 주변에서 주어진 에너지에 대한 피크-토탈 비는 일정하지 않을 수 있으며, 따라서 측정된 값의 평균을 사용하여야 한다. 산란 물체에 의한 피크-토탈 비의 영향에 대한 결과도 함께 포함되어 있다.

중심어 : HPGe 검출기, 피크효율, 동시합성효과보정

서 론

2개 이상의 감마선을 연속적으로 방출하는 방사성 핵종에서, 그들로부터의 감마선은 그것의 전 에너지가 흡수되더라도 다른 감마선과의 동시합성 효과로 인해 전 에너지 흡수 피크에서 제외될 수 있어 동시합성효과가 없는 경우에 예상되는 피크 효율 보다 낮은 피크 효율을 나타내게 된다 [1]. 특히 이 효과는 감마선의 다중 산란 흡수가 많은 고효율 HPGe 검출기 스펙트럼에서 현저하게 나타난다. 1000 keV 이상의 감마선에 대한 피크 효율 교정을 위해 많은 실험실에서 HPGe 검출기의 피크 효율 교정용 선원에 연속으로 감마선을 방출하는 ^{60}Co 과 ^{88}Y 를 포함시키고 있다. 이

들 핵종으로부터 방출되는 감마선의 피크 효율에는 동시합성 효과에 의해 10% 이상의 계통적 오차가 포함될 수 있다[2].

그 동안 15% 이하의 피크 효율을 갖는 HPGe 검출기에서 ^{60}Co 과 ^{88}Y 선원으로부터 방출되는 감마선의 피크 효율에 대한 동시합성 효과 보정 방법이 많이 연구되어 왔으며[3-12], 이러한 저 피크 효율 검출기에서 동시합성 효과에 영향을 주는 피크-토탈 비(P/T 비)는 검출기 주변에서 일정한 것으로 가정되어 왔다. 일본분석센터(JCAC)에서 제시하고 있는 에너지에 따른 P/T 비는 15% 미만의 낮은 피크 효율을 갖는 HPGe 검출기에 적용할 수 있다[3]. Canberra사에서 제시하고 있는 피크 효율의 동시합성 효과 보정 방법도

검출기로부터 선원까지의 거리에 무관하게 P/T 비가 일정한 15% 이하의 저 효율 검출기에 사용할 수 있다[4]. 그러나 이 절차서가 근거로 하고 있는 Koloyov의 논문[5]을 보면, 검출기로부터 선원까지의 거리에 따라 P/T 비가 약간 증가하는 것으로 되어 있다. 다만 그 증가가 피크 효율 교정에 영향을 미치지 않는 정도로 미미하여 일정한 것으로 간주하였을 뿐이다. 검출기 주변에서 P/T 비의 변화에 대한 원인에 대해서도 검출기 차폐 두께에 의한 산란 혹은 검출기 자체의 특성으로 보는 등 명확하지 않다[5]. 확실한 것은 아직까지 동시합성 효과의 보정이 필요한 15% 이상의 고 효율 HPGe 검출기에 대한 용적 선원의 동시합성 효과 보정방법이 제시되지 않고 있다는 것이다.

따라서 이 연구에서는 상대 피크 효율이 25% 인 HPGe 검출기에서 P/T 비를 사용하여 ⁶⁰Co과 ⁸⁸Y로부터 방출되는 감마선의 동시합성 효과를 보정하는 방법에 대해 연구하였다. P/T 비는 U-8 용기가 위치할 검출기 주위의 여러 점에서 측정하였으며, P/T 비에 대한 피크 효율 교정용 용적 선원 자체의 반사 및 흡수 효과도 측정하였다.

이론적 배경

⁶⁰Co과 ⁸⁸Y과 같이 두개의 감마선 1, 2를 연속으로 방출하는 경우, summing out 없다고 가정할 때, 감마선 1에 의한 피크 계수를 p_1 , 감마선 2에 의한 스펙트럼 전체의 계수를 T_2 라고 하면, 동시합성 효과에 의해 p_1 중 summing out될 계수는 $p_1 T_2/A$ 이다. 따라서 summing out이 일어난 경우에 감마선 1에 의한 피크 계수 p_{1s} 는

$$p_{1s} = p_1 - p_1 \frac{T_2}{A} \tag{1}$$

가 된다. 그런데 피크 효율 ϵ 과 피크 계수 p 사이에는

$$\epsilon = \frac{p}{YA} \tag{2}$$

이므로

$$p = \epsilon YA \tag{3}$$

의 관계가 있다. 여기서 Y 는 감마선 방출률이고

A 는 그 감마선을 방출하는 선원의 방사능(Bq)이다. 한편 P/T 비 P_T 스펙트럼 전체의 계수 T 사이에는

$$P_T = \frac{p}{T} = \frac{\epsilon YA}{T} \tag{4}$$

즉

$$T = \frac{\epsilon YA}{P_T} \tag{5}$$

의 관계가 있다. 식 (3)과 (5)를 식 (1)에 대입하면

$$\begin{aligned} \epsilon_{1s} Y_1 A &= \epsilon_1 Y_1 A - \frac{\epsilon_1 Y_1 A \epsilon_2 Y_2 A}{P_{T2} A} \\ &= \epsilon_1 Y_1 A \left(1 - \frac{\epsilon_2 Y_2}{P_{T2}}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

가 된다. 따라서 감마선 1의 보정 피크 효율 ϵ_1 은 summing out으로 측정된 피크 효율 ϵ_{21} 과 감마선 2의 보정 피크 효율 ϵ_2 , P/T 비 P_T , 방사능 A 를 사용하여

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_{1s}}{1 - \frac{\epsilon_2 Y_2}{P_{T2}}} \tag{7}$$

의 식으로 계산된다. 감마선 2의 보정 피크 효율 ϵ_2 는 식 (7)에서 첨자 1과 2를 바꾸어 놓고 계산할 수 있다. 일반적으로 검출기의 피크 효율 교정 선원에 포함되며 동시합성 효과를 보정하여야 하는 ⁶⁰Co과 ⁸⁸Y 선원의 경우, $Y_2 \approx 1$ 이며[13], HPGe 검출기에서 $\epsilon/P_T < 0.2$ 이다. 따라서 ϵ_2 대신 근사적으로 ϵ_{2s} 를 사용하여도 큰 무리가 없다. 또한 P_T 가 10 % 변할 때 동시합성 효과가 보정된 피크 효율에 미치는 영향은 2.6 % 이내 즉 피크 효율에 대한 영향은 P/T 비 변화량의 1/4 수준이다.

P/T 비 측정

선원과 검출기

⁶⁰Co, ⁸⁸Y은 2개의 감마선을 방출하며 동시합성 효과를 일으키기 때문에 이들 핵종을 사용하여

직접 P/T 비를 구할 수는 없다. 따라서 이들 감마선의 P/T 비는 단일 감마선을 방출하는 핵종을 사용하여 구한 P/T 비로부터 추정되어야 한다. 이 연구에서는 이들 감마선 에너지에서의 P/T 비를 구하기 위해 1 μ Ci의 6개 점 선원 즉 ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{65}Zn (Canberra사 S-PTC)의 스펙트럼을 측정하였다. 이들 점 선원 대부분은 단일 에너지의 감마선만을 방출하나 ^{57}Co 과 ^{113}Sn 은 122, 136 keV과 255, 391 keV의 2개 에너지 감마선을 각각 방출한다. ^{57}Co 에서 방출되는 감마선들의 에너지 차이는 14 keV로 크지 않고, 122 keV 감마선의 방출률이 136 keV 감마선보다 8배 정도 크므로 122 keV 감마선의 P/T 비 계산에는 ^{57}Co 스펙트럼에서 122와 136 keV 피크 면적의 합을 피크 면적으로 할 수 있다. ^{113}Sn 의 경우도 ^{57}Co 과 유사한 이유로 391 keV 감마선의 P/T 비 계산에 ^{113}Sn 스펙트럼에서 255 keV와 391 keV 피크의 면적의 합을 피크 면적으로 할 수 있다.

P/T 비 측정

스펙트럼 측정에 사용된 검출기는 1332 keV 감마선에 대해 상대 피크 효율이 25 %인 HPGe 검출기(Canberra사 GC2520)이었다.

검출기로부터 떨어진 점에서의 P/T 비를 구하기 위해 그림 1과 같이 HPGe 검출기 축 위의 A 점에 점 선원을 두고 스펙트럼을 측정하였다. 검출기로부터 점 선원까지의 거리 h는 각각 5, 50, 75, 100, 125 mm로 하였다. 검출기 주변에서의 P/T 비를 구하기 위해 점 B부터 F까지의 위치에 점 선원을 놓고 스펙트럼을 측정하였다. 이때 스펙트럼 측정의 불감시간을 2 % 이내로 하기 위해 점 선원을 HPGe 검출기로부터 2 cm 떨어진 곳에 놓았다. 스펙트럼 측정 시간은 점선원의 관심 있는 감마선의 피크 면적이 100,000 counts가 되도록 하였다.

일반적으로 환경 시료의 방사능을 측정하기 위한 HPGe 검출기의 피크 효율 교정에는 액체 혼합 선원을 사용하므로 감마선의 흡수체 및 반사체로 증류수를 사용하였다. 반사체에 의한 P/T 비 영향을 조사하기 위해 그림 2와 같이 점 선원을 검출기 축 위 3 mm(H_1)에 놓고, U-8 용기에 증류수를 채워 가며 스펙트럼을 측정하였다. 이때 채워진 물의 높이 H_2 는 각각 18, 28, 38, 48 mm이었다.

흡수체에 의한 PT 비 영향을 조사하기 위해 U-8 용기에 증류수를 50 mm(H_2) 채워 놓고, 점

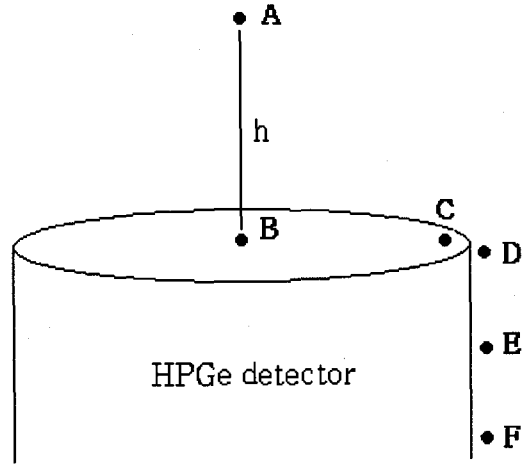


Fig. 1. Positions of the test points around a HPGe detector.

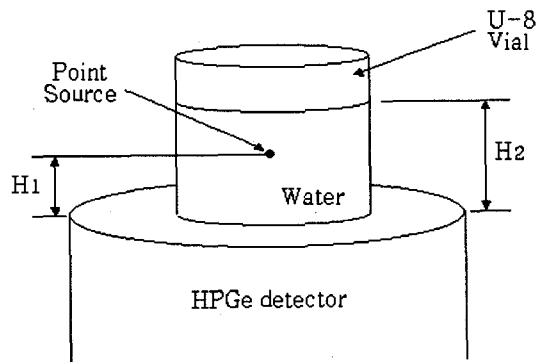


Fig. 2. Positions of the test points on the endcap surface of the detector with absorber and reflector.

선원의 높이 H_1 에 변화를 주면서 스펙트럼을 측정하였다. 이때 점 선원이 위치한 높이 H_1 은 각각 15, 25, 35, 45 mm로 하였다.

P/T 비 측정결과

검출기 주변에서의 P/T 비

그림 3은 HPGe 검출기 축 위에 놓여진 점선원의 스펙트럼으로부터 계산된 P/T 비를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 P/T 비는 검출기 축 중심으로부터 거리에 따라 선형적으로 약간 감소하고 있다. 점 선원의 높이가 검출기로부터 0 ~ 125 mm 까지 각 에너지의 감마선에 대해 P/T 비는 평균치 $\pm 7\%$ 이내에서 변화를 보였으나, U-8 용기의 높이인 0 ~ 50 mm까지는 평균

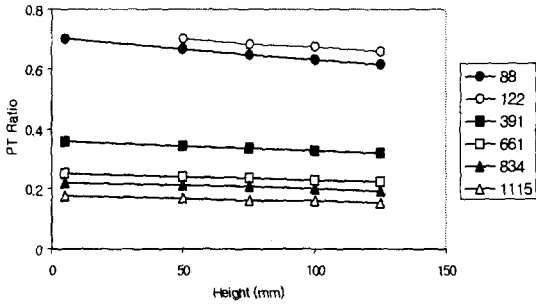


Fig. 3. Peak to Total ratio at different points above the endcap of the detector.

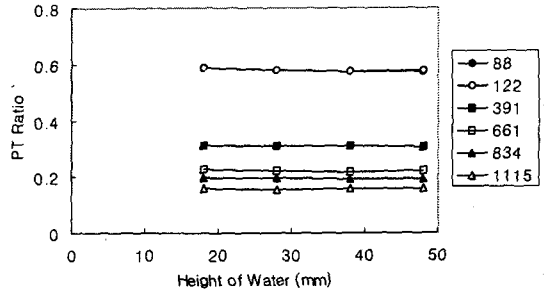


Fig. 5. Peak to Total ratio at different height of water on 3 mm from the endcap of the detector.

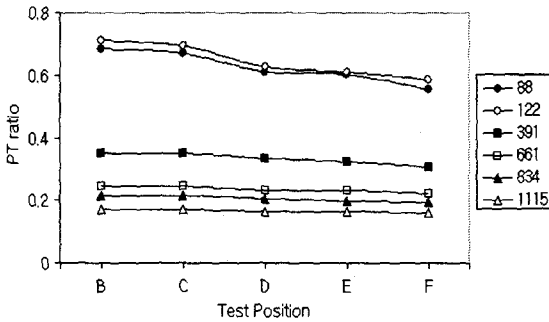


Fig. 4. Peak to Total ratio at different points on the endcap surface of the detector.

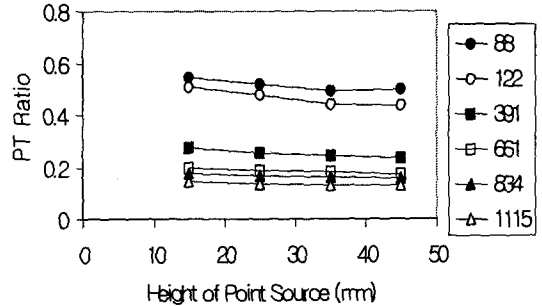


Fig. 6. Peak to Total ratio for different points above the endcap of the detector. U-8 vial was filled with water.

치 $\pm 3\%$ 이내에서 변화를 보이고 있다. 이와 같은 크기의 P/T 비에서의 변화는 식 (7)에 따라 동시합성 보정 피크 효율에 1% 미만의 영향을 주게 된다. 따라서 25% 효율의 검출기에서도 U-8 용기와 같이 검출기 윗면에 놓여지는 교정용 선원의 경우 P/T 비는 일정한 것으로 볼 수 있다.

각각 2개 에너지의 감마선을 방출하는 ^{113}Sn 과 ^{57}Co 로부터 구한 122, 391 keV 감마선의 P/T 비도 다른 에너지 감마선의 P/T 비와 유사한 경향을 보이고 있어, P/T 비 계산 방식에 문제가 있지 않다는 것을 알 수 있다.

그림 4의 B와 C는 검출기 윗면에서의 P/T 비를 나타낸 것으로, 그 값들은 감마선 에너지와 무관하게 $\pm 1\%$ 이내에서 일치하고 있다. 따라서 U-8 용기와 같이 검출기 윗면에 놓여지는 교정용 선원의 수평위치에 따른 P/T 비는 일정한 것으로 볼 수 있다. 반면 HPGe 검출기의 측면까지 포함하면 $\pm 10\%$ 이내에서 변화하고 있으며, 피크 효율 교정에 사용될 고 에너지 영역에서는 $\pm 6\%$ 이내에서 변화하고 있다.

반사체와 흡수체에 의한 P/T 비 영향

그림 5는 HPGe 검출기 축 위 3 mm에 위치한 점 선원의 위쪽에 위치한 증류수에 의한 P/T 비의 영향을 나타낸 것이다. 증류수를 18 ~ 48 mm까지 채워 갔을 때 P/T 비의 변화는 2% 이내로 점 선원 위쪽의 증류수는 P/T 비에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

그림 6은 U-8 용기에 증류수를 채운 상태에서 점 선원의 높이를 증가시키면서 측정한 P/T 비를 나타낸 것이다. P/T 비는 점 선원의 위치가 높아짐에 따라 $\pm 8\%$ 까지 감소하였다. 이것은 공기 중에서는 보다는 증류수에서 검출기로부터 선원이 멀어짐에 따라 선원으로부터 방출된 감마선의 산란이 많아지기 때문이며, P/T 비의 이와 같은 변화는 동시합성 보정 피크 효율에 2% 정도의 영향을 준다.

동시합성효과 보정

위에서 구한 P/T 비는 점 선원에 대한 것이므로, 용적 선원에 적용하기 위해서는 다음의 몇 가

지 사항을 고려하여야 한다. 첫 번째 HPGe 검출기 상단에서 P/T 비는 높이에 따라 1 % 이내에서 변하므로 평균 시료 높이까지 P/T 비의 평균을 사용할 수 있다. 두 번째 반사체에 의한 P/T 비의 영향은 2 % 이내이며 동시합성 보정 피크 효율에 대한 영향은 0.5 %이다. 세 번째 흡수체에 의해 P/T 비는 8 %까지 변하나 평균치를 사용한다면 동시합성 보정 피크 효율에 대한 영향은 1 % 정도가 된다. 따라서 U-8 용기에 담긴 혼합 액체 용적 선원의 경우 증류수 속에서 높이를 증가시키며 구한 P/T 비를 평균하여 사용할 수 있다. 마지막으로 HPGe 검출기의 피크 효율에 대해 동시합성 효과를 보정하기 위해서는 감마선의 에너지 및 시료 높이에서의 P/T 비를 구하여야 한다. 이 P/T 비는 감마선 에너지에 따른 P/T 비 및 높이에 따른 P/T 비로부터 외삽 및 내삽하여 구할 수 있다. 이러한 방식으로 계산한 U-8 시료 용기에 높이 3 mm까지 채워진 표준 선원의 P/T 비를 그림 7에 나타내었다. 이 그림에서 검은 색의 점은 점 선원을 사용하여 구해진 P/T 비이고, 하얀색 점은 외삽하여 구한 P/T 비이다.

그림 8은 P/T 비를 사용하여 U-8 용기에 담긴 ^{60}Co , ^{88}Y 로부터 방출되는 감마선의 동시합성 효과의 크기(%)를 나타낸 것이다. 이 그림에서 높이는 U-8 용기에 담긴 선원의 높이이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 감마선의 에너지에 따라 그리고 선원의 높이가 감소함에 따라 동시합성 효과는 증가한다. ^{60}Co 와 ^{88}Y 에 대해 용기 중 시료의 높이가 10mm 일 때 그 효과의 크기는 11~13% 수준이었으며 50mm일 때는 5~6% 수준이었다.

이 동시합성 효과 보정 피크 효율을 JCAC에서 제시한 P/T 비[11]를 사용하여 계산된 것과의 비로 나타낸 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보정 피크 효율의 비에 사용된 보정 피크 효율은

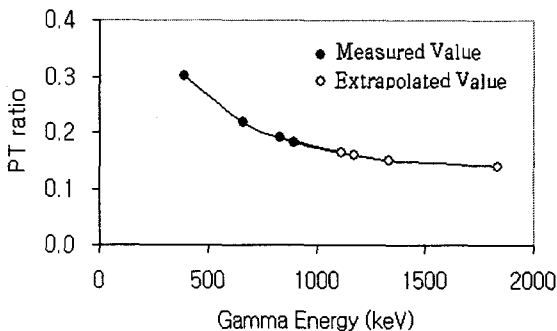


Fig. 7. Measured and extrapolated Peak to Total ratio.

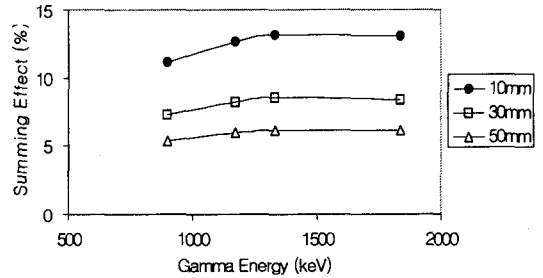


Fig. 8. The sizes of cascade summing effect(%) in the peak efficiencies for the gamma rays emitted from ^{60}Co and ^{88}Y in U-8 vial.

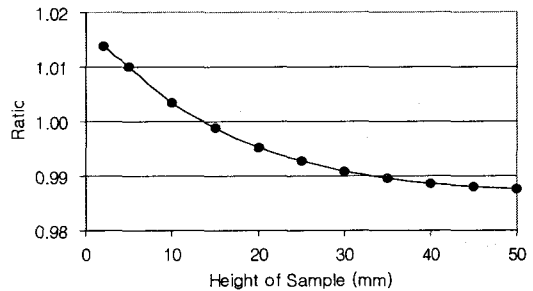


Fig. 9. The ratio of corrected peak efficiency by JCAC and this study.

용적 선원의 높이에서 계산된 ^{60}Co 와 ^{88}Y 의 평균 보정 피크 효율이다. 그림에서 보는 바와 같이 선원의 높이가 낮을 때에는 이 연구에 의한 동시합성 보정 피크 효율이 JCAC 방법에 의한 것보다 1 % 이상 낮았으나, 선원의 높이가 높을 때에는 1 % 정도 높게 나타났다. 선원의 높이에 따른 보정 피크 효율에서의 이 차이는 이 연구에서는 선원 높이에 따라 다른 P/T 비를 사용하였으나, JCAC에서는 일정한 P/T 비를 사용한다.

결론

단일 점 선원들의 P/T 비로부터 ^{60}Co 와 ^{88}Y 로부터 방출되는 감마선의 P/T 비를 추정하여 ^{60}Co 와 ^{88}Y 로부터 방출되는 감마선의 효율에 대해 동시합성효과를 보정하였다. 25% HPGe 검출기에서 ^{60}Co 와 ^{88}Y 로부터 방출되는 감마선에 대해 U-8 용기 중 시료의 높이가 10mm 일 때 피크 효율에 미치는 효과의 크기는 11~13% 수준이었으며, 50mm일 때는 5~6% 수준이었다. 이 효과는 피

크 면적의 크기에 상관없이 피크면적으로부터 계산되는 방사능에 계통적 오차를 발생시키기 때문에 보정이 필요하다. 특히 시료 용기로 마리넬리 비키어를 사용하는 경우 선원과 검출기 사이의 거리가 가깝기 때문에 피크 효율에 미치는 동시합성 효과의 크기는 더 증가할 것으로 예상되기에 대한 보정 연구도 필요하다.

이 연구에서 측정된 P/T 비를 사용하여 U-8 용기에 담긴 ^{60}Co 과 ^{88}Y 의 피크 효율에서 동시합성 효과의 크기는 JCAC에서 제시한 P/T 비를 사용한 결과와 $\pm 1\%$ 이내에서 일치하였다.

감사의 글

이 논문은 2003학년도 청주대학교의 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음

참고문헌

- G.F.Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed., pp. 449-450, John Wiley & Sons, New York(2000)
- IAEA, *Measurement of Radionuclides in Food and the Environment*, pp54, Technical Reports Series No.295, IAEA, Vienna(1989)
- 水本良彦, 日下部俊男, 岩田志朗, "ゲル마ニウム 검출기의 피크對トータル效率比", *Radioisotopes*, 36, 20(1987)
- Canberra, *Genie2000 Customization Tools Manual*, pp320-329, Canberra Industries, (2002)
- V.P. Koloyov, "Estimation of True coincidence corrections for voluminous sources", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 210, 183-196(1996)
- K.Debertin, U.SchÖtting, "Coincidence Summing Corrections in Ge(Li) Spectrometry at Low Source-to Detector Distance.", *Nucl. Inst. Methods*, 158, 471-477(1979)
- D.Arnold and O.Shima, "Coincidence-summing in gamma ray spectrometry by excitation of matrix X-rays", *Applied Radiation and Isotopes*, 52, 725-732(2000)
- F.Piton et al, "Efficiency transfer and coincidence summing corrections for gamma-ray spectrometry" *Applied Radiation and Isotopes*, 52, 791-795(2000)
- H.L.Oczkowski, "Calibration standard for use in gamma spectrometry and luminescence dating", *Geochronometria*, Vol. 20, pp 31-38 (2001)
- P.D.Felice P., P.Angelini, A.Fazio and R.Biagini, "Fast procedure for coincidence-summing correction in gamma-ray spectrometry." *Applied Radiation and Isotopes* 52: 745-752(2000)
- 科學技術廳, "ゲルマニウム半導體檢出器を用いた機器分析法", 日本分析センター, p84(昭和 61)
- M. Blaauw, S.J.Gelsema, "The Influence of Peak Area Determination Bias in Gamma-ray Spectrometry in the Presence of True Coincidence Summing", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A422, 417-422(1999)
- R.R.Kinsey, et al., "The NUDAT/PCNUDAT Program for Nuclear Data,paper submitted to the 9th International Symposium of Capture-Gamma-raySpectroscopy and Related Topics",(1996)