

^{252}Cf 선원을 이용한 즉발감마선 계측시스템 구성

박용준^{*} · 송병철 · 지광용
한국원자력연구소 원자력화학연구팀
(2002. 10. 16 접수, 2003. 1. 14 승인)

Development of Neutron Induced Prompt γ -ray Spectroscopy System Using ^{252}Cf

Yong-Joon Park^{*}, Byung-Chul Song, Kwang-Yong Jee
Nuclear Chemistry Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute
P.O.Box 105, Yusong, Taeduk Science Town, Taejon 305-600, Korea
(Received Oct. 16, 2002, Accepted Jan. 14, 2003)

요 약 : ^{252}Cf 중성자 선원을 이용한 즉발감마선 계측 시스템 (NIPS, Neutron Induced Prompt γ -ray Spectroscopy)을 설계 및 구성하기 위하여, 시스템내의 감속제 및 차폐체등의 효과를 시험하고 감마선 바탕값과 CI을 포함한 시료의 즉발 감마선을 계측하였다. 이를 위한 예비시험으로 한국원자력연구소 내에 있는 TLD 판독용 ^{252}Cf 선원을 이용하였으며 즉발감마선은 시스템 내부의 동축형 HPGe (GMX, 60% relative efficiency)과 시스템외부 (약 20m 거리)의 Notebook PC를 이용하여 측정하였다. 중성자 서베이미터와 감마선 서베이미터를 이용하여 장치 주위에서의 중성자와 감마선의 바탕값을 측정하고, 바탕값을 최소로 할 수 있는 차폐체의 기하학적 구조를 고안하였다. 감마선 바탕값을 최소화하기 위하여 두 개의 HPGe 검출기를 이용한 감마-감마 동시계측법을 이용하였다. 이 실험 자료를 이용하여 최적의 NIPS 시스템을 구성하였다.

Abstract : For the design and set-up of neutron induced prompt γ -ray spectroscopy system using ^{252}Cf neutron source, the effects of shielding and moderator materials have been examined. The ^{252}Cf source being used for TLD badge calibration in Korea Atomic Energy Research Institute was utilized for this preliminary experiment. The γ -ray background and prompt γ -ray spectrum of the sample containing CI were measured using HPGe (GMX 60% relative efficiency) located at the inside of the system connected to notebook PC at the outside of the system (about 20 meter distance). The background activities of neutron and γ -rays were measured with neutron survey meter as well as γ -ray survey meters, respectively and the system was designed to minimize the activities. Prompt γ -ray spectrum was measured using γ - γ coincident system for reduce the background and the continuum spectrum. The optimum system was designed and set up using the experimental data obtained.

^{*} Corresponding author
Phone : +82+(0)42-868-8153 Fax : +82+(0)42-868-8148
E-mail : jparky@kaeri.re.kr

Key words : prompt gamma, neutron, NIPS system, γ - γ coincidence

1. 서 론

즉발감마선 계측 시스템 (NIPS, Neutron Induced Prompt γ -ray Spectroscopy)은 열중성자를 시료에 조사시킬 때 시료가 중성자를 흡수한 후, (n, γ)반응에 의하여 10^{-14} sec 이내에 방출되는 즉발 감마선을 계측함으로써 시료내 성분 원소의 함량을 분석하는 방법이다. 이 방법은 즉발감마중성자방사화분석 (PGNAA)으로도 불리우며 중성자 조사와 동시에 측정을 한다는 측면에서 지발방사화 분석법 (Delayed Neutron Activation Analysis, DNAA)과 구별된다. DNAA는 핵반응에 의하여 시료중에 방사성 핵종이 생성되며, 이 방사성 핵종이 내는 방사선을 측정하여 물질을 정량하는 방법이다. 반면에 PGNAA에서는 핵반응에 의해서 생성되는 물질이 방사성을 띠고 있는지 여부와 상관없이 핵반응과 동시에 내는 즉발감마선을 측정하게 된다.

NIPS 측정시스템은 NAA와 비교하여 상호 보완적인 관계가 있으며, NAA에 비하여 다음과 같은 주요 장점을 가지고 있다.¹ (1) NAA를 이용하여서 측정이 힘든 몇 가지 원소 (B, Cd, S 등)를 NIPS 측정시스템으로 측정이 가능하다. (2) 해양 및 생체시료의 NAA 측정은 시료 중 높은 Na, K 및 Cl의 농도에 제한을 받는다. 그러나 NIPS에서는 크게 영향을 받지 않는다. (3) NAA 측정을 위해서는 시료를 원자로에 넣어야 하는데, 어떤 시료는 부피가 너무 크거나, 방사능에 의해 손상되거나, 혹은 분해 또는 폭발 위험이 있어서 원자로에 넣지 못할 경우에도 NIPS 측정시스템으로 측정이 가능하다. NIPS 측정 시스템으로 분석이 용이한 원소는 중성자 포획 단면적이 큰 B, Cd, Sm 및 Gd 등의 원소와 중성자 흡수후 방사성 동위원소가 생성되지 않는 H, C, N 및 S 등이 있으며 주로 지질학, 생물학, 식품학 등의 분야에 활용되고 있다.^{2,7} 본 연구에서는 원자력발전소의 냉각계통내 원소에 대한 on-line 분석 또는 산업폐수의 현장분석등에 적용할 수 있는 NIPS 측정시스템을 구성하기 위해 다양한 예비 실험을 통하여 여러가지 문제점을 분석하고 보완점과 개선할 점을 도출하였으며 이를 바탕으로 NIPS 측정 시스템을 설계하였다.

2. 실 험

2.1. 예비실험 장치 구성

NIPS 측정 시스템 구성을 위한 예비실험을 위해 한국원자력연구소가 보유하고 있는 TLD 판독용 ²⁵²Cf 중성자선원을 이용하였다. TLD 판독용 ²⁵²Cf 중성자선원에 부착되는 collimator의 설계도면과 사진을 Fig. 1에 나타내었다. Collimator 및 시료 chamber 등의 재료 물질은 Table 1에 나타낸 바와 같이 다양한 중성자차폐 물질을 사용할 수 있는데, 이 중에 중성자 감쇄계수가 10^{16} 인 30% 보론-폴리에틸렌을 사용하였다. 30% 보론-폴리에틸렌은 열중성자에 대한 감속 효과가 뛰어나지만 ²⁵²Cf 중성자 선원에서 발생하는 속중성자는 완벽하게 줄이기 어려우므로 검출기 보호를 위해 폴리에틸렌 블록 (100 mm×250 mm×400 mm)을 이용하여 추가로 차폐하였다.

Table 1. Thermal neutron attenuation factors for various neutron shielding materials

Shielding Material	Macroscopic Thermal Neutron Cross-Section	Thickness		Attenuation Factor (I_0/I)
		inches	mm	
Water (ref.)	0.02	1	25	1.05
Pure Polyethylene	0.03	1	25	1.07
5% Boron-Polyethylene	2.00	1	25	161
80% Pb, 1% Boron-Polyethylene	1.80	1	25	97
10% Boron-Putty	4.70	1	25	10^2
Boron Flexible Sheet (25.3 %)	17.50	0.125	3	259
30% Boron-Polyethylene	14.50	1	25	10^{10}
7.5% Lithium-Polyethylene	0.48	1	25	3.4
Boro-Silicon (1%, castable)	0.71	1	25	22

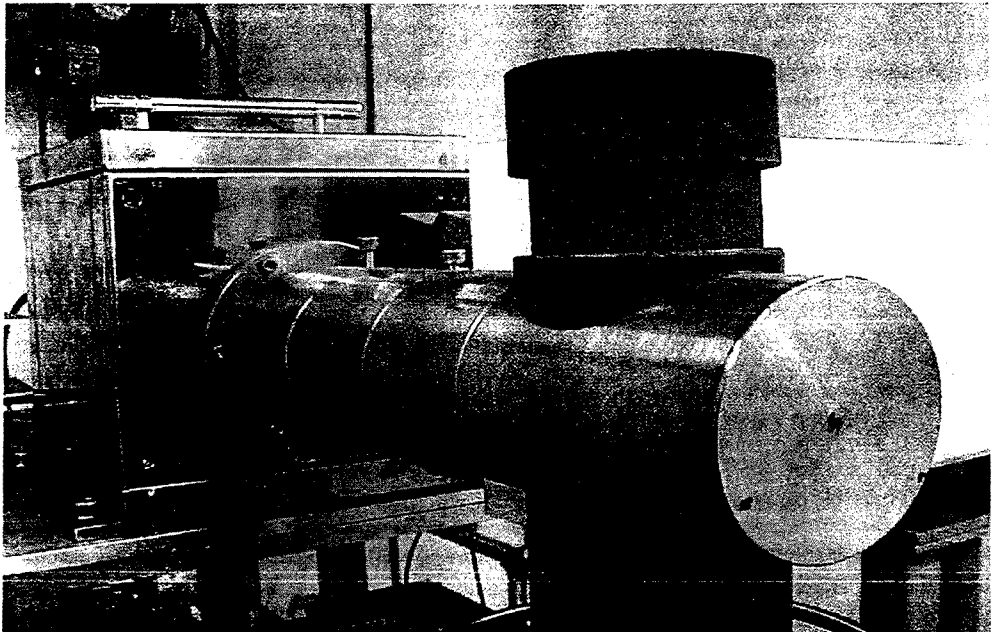
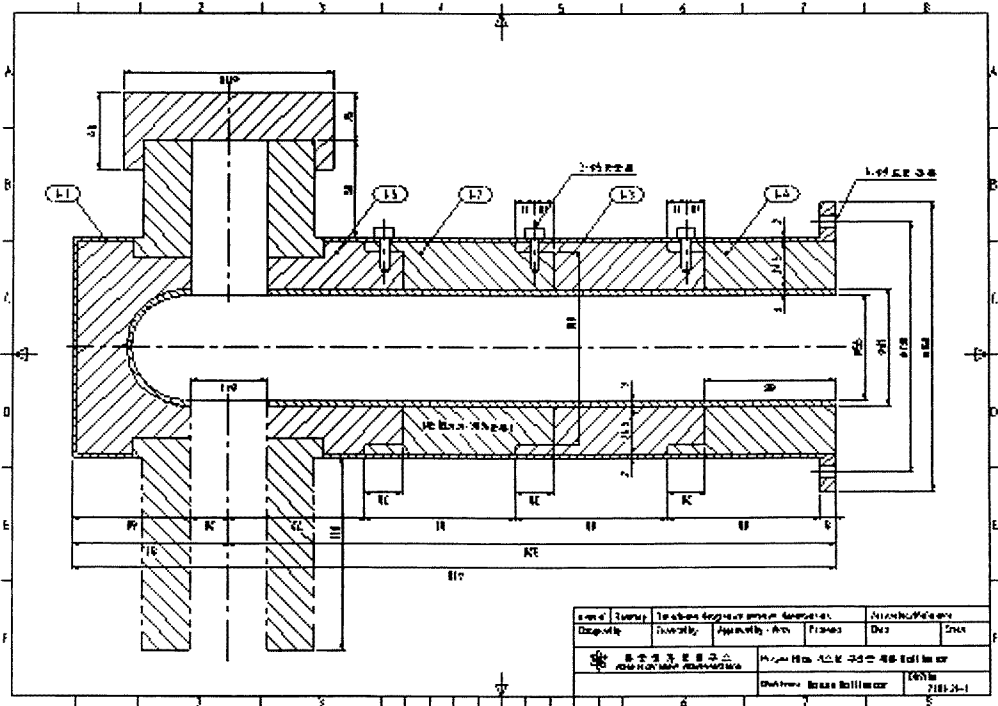


Fig. 1. Drawing and picture of collimator for ²⁵²Cf neutron source.

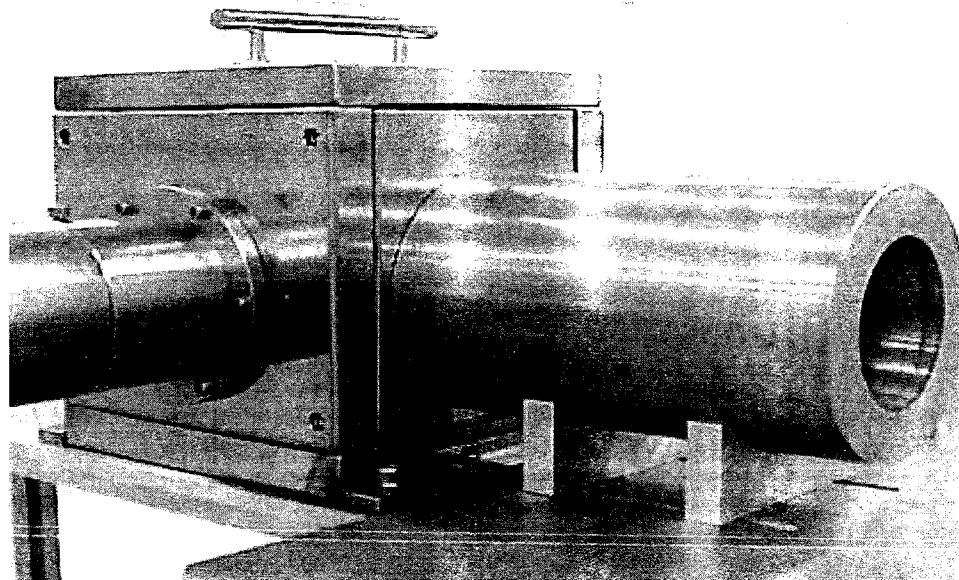
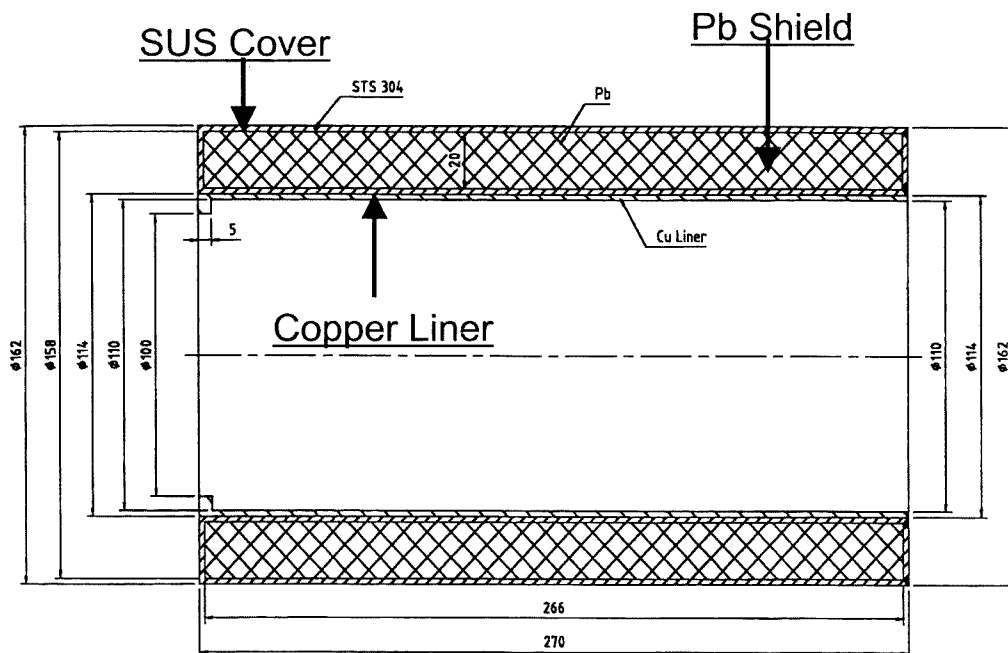


Fig. 2. Drawing and picture of collimator for HPGe detector

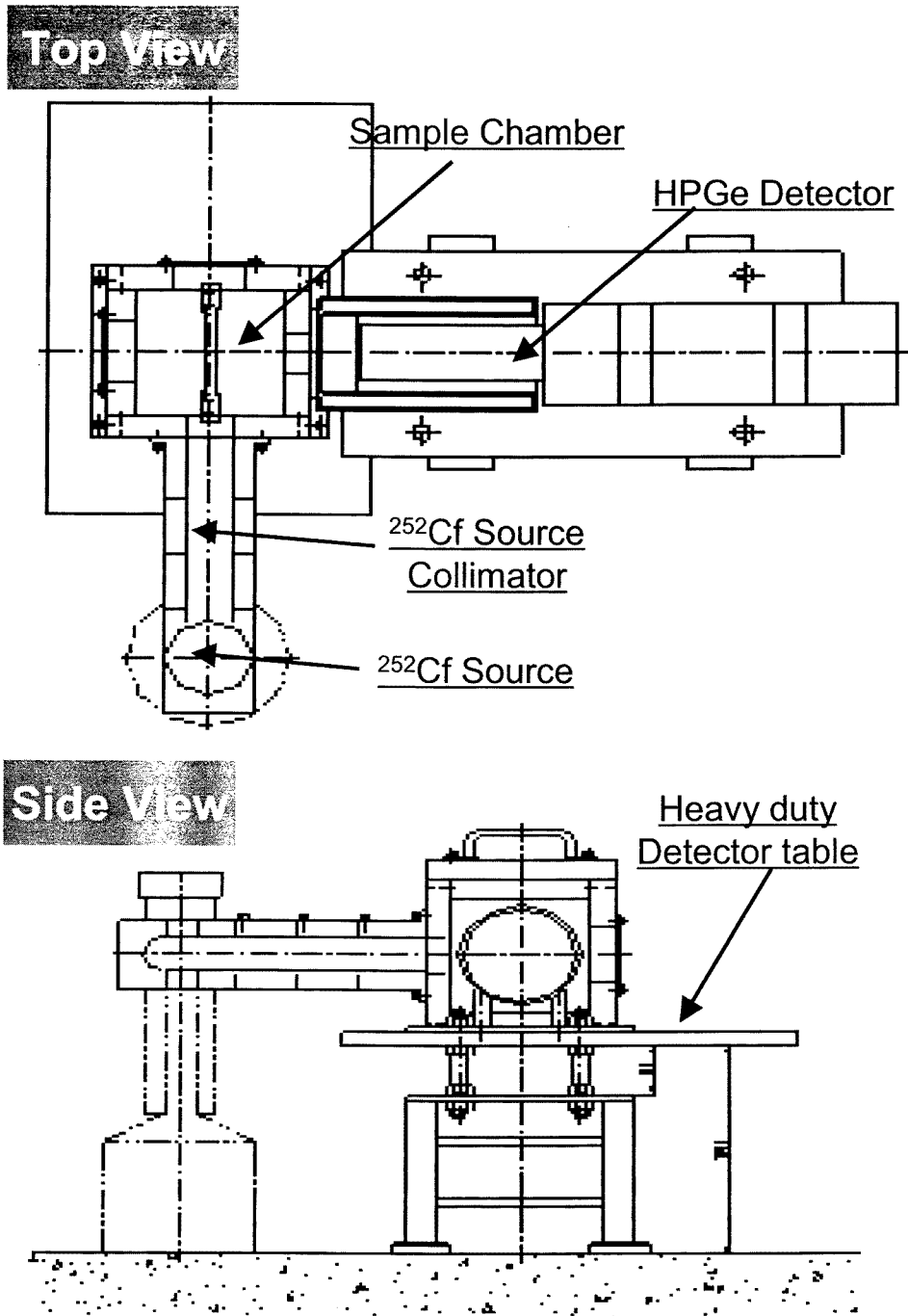


Fig. 3. Drawing of NIPS system for preliminary experiments.

감마선 검출기를 위한 차폐체 앞 부분에는 중성자를 차폐하기 위하여 보론을 이용할 경우 보론의 중성자 capture에 의해 0.42 MeV의 감마선을 방출하여 감마선 바탕값을 높이기 때문에 보론 대신에 중성자 capture 감마선을 방출하지 않는 10 mm 두께의 7.5% 리튬 폴리에틸렌을 사용하였다. 검출기를 위한 차폐체는 검출기 바탕값 신호를 외부로부터 차단하고 시료로부터 발생하는 감마선을 측정할 수 있도록 Fig. 2에 보이듯이 원통형으로 시료 chamber에 부착할 수 있도록 설계하였다. 차폐체 외부면은 스텐강으로 제작하고 안쪽에 2 cm 두께의 납을 부어 바탕 감마선을 차단하였고 안쪽에는 Cu liner를 이용하여 soft X-선을 제거하도록 하였다.

검출기 및 검출기 차폐체는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 중성자 선원 collimator와 90도를 이루도록 설계하여 검출기의 중성자에 의한 훼손을 최소화 하도록 하였다.

2.2. 즉발감마선 검출장치 구성

즉발감마선 측정 실험장치 및 portable HPGe (GMX, 60% relative efficiency) 검출기, portable MCA (NOMAD), notebook PC (Mastro II)를 이용하여 검출기 dead time을 조사하고 감마선 background 및 B와 CI을 포함하는 시료의 즉발감마선을 측정하였다. Notebook PC 연결은 20 m 케이블을 이용하여 조사시험실 내부의 HPGe 검출기와 외부를 연결하여 즉발감마선을 측정할 수 있도록 구성하였다. GAMMA-X와 같은 동축형 검출기들은 GEM형 보다 중성자 손상에 대해 20배 정도 저항성이 크며, 중성자 손상을 입었을 경우 열을 가함으로써 검출기 수리를 하게 되는데 가열온도와 시간적 측면에서 동축형 GAMMA-X 검출기들이 유리하다.

동시계수장치 실험은 두 개의 검출기가 사용되었으며 상기 표기된 검출기 외에 기존의 보유하고 있는 coaxial HPGe (GMX, 30% relative efficiency, pop top cryostat) 검출기를 portable type으로 개조하여 사용하였다.

에너지 calibration은 ^{137}Cs (661.66 keV)와 ^{208}Tl (2.614 MeV)를 이용하여 10 MeV 까지 에너지 보정곡선을 만들었으며 분해능 (FWHM)은 661.66 keV와 2.614 MeV에서의 FWHM으로 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 바탕값 측정 및 차폐체 시험

TLD 판독용 ^{252}Cf 중성자 선원을 이용하기 위해 준비된 즉발감마선 측정 실험장치를 설치하고, 중성자 서베이미터와 감마선 서베이미터를 이용하여 장치 주위에서의 중성자 및 감마선 바탕값을 측정하였다. 중성자 및 감마 서베이미터 측정은 중성자 조사실 외부에서 원격 조정 카메라를 이용하여 조사실 상황과 중성자 및 감마선 서베이미터의 눈금을 확인하였다.

측정장치 주위의 여러 위치에서 중성자 및 감마선 바탕값을 측정된 결과, 실험장치를 통과하여 외부로 투과된 중성자의 세기가 상당히 큰 것을 확인할 수 있었으며, HPGe 검출기의 보호를 위해 추가 차폐가 필요할 것으로 판단되었다. 중성자 차폐는 고밀도 폴리에틸렌을 이용하여 차폐하였다.

중성자가 조사되는 상태에서는 주위의 폴리에틸렌 또는 물시료에서부터 발생하는 즉발감마선 바탕값이 매우 높아져 검출기 dead time이 90% 이상으로 증가되며 결과적으로 피크의 분해능에도 나쁜 영향을 주는 것을 확인하였다. 현재 예비실험장치로 제작된 검출기 차폐체는 TLD 판독용 ^{252}Cf 중성자 선원 구조물에 하중이 가해지지 않도록 형편상 25 mm의 두께의 납으로 제작되었으나 차후 개선된 NIPS 측정시스템에서는 최소한 100 mm 이상의 두께가 필요할 것으로 판단된다.

3.2. 즉발 감마선 측정 시험

TLD 판독용 ^{252}Cf 중성자 선원과 즉발감마선 측정 실험장치 및 portable HPGe 검출기, portable MCA (NOMAD), notebook PC (Mastro II)를 이용하여 검출기 dead time을 조사하고 감마선 background 및 CI을 포함하는 시료의 즉발감마선을 측정하였다.

중성자 선원을 내린 저장상태에서 9,000초와 올린 조사상태에서 50,000초 동안 감마선 바탕값을 측정하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 수소와 철등에 의한 즉발감마선 피크를 확인하였으며, 전 에너지 영역에서 바탕값이 높아짐을 확인하였다. 즉발감마선 측정 시스템이 중성자 빔에 노출되었을 때, 검출기 주위의 감마장의 증가로 인해 작은 감마선 피크는 확인하기 매우 어려웠다. 이는 폴리에틸렌을 구성하는 수소로부터 발생하는 즉발감마선에 의해 바탕값이 높아졌기 때

문인 것으로 추정되며 따라서 고밀도 폴리에틸렌 차폐체와 검출기 사이에 추가로 납벽돌을 이용하여 검출기를 차폐하였다. 또한 검출기의 dead time을 낮추기 위해 MCA의 shaping time을 long mode (6 μ s)에서 short mode (1.5 μ s)로 전환하였을 때, dead time이 줄어들고 즉발 감마피크의 FWHM이 작아짐을 확인하였다.

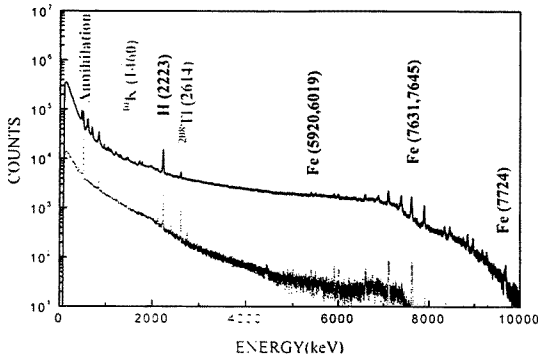


Fig. 4. Background gamma spectra (with Cf-252 without Cf-252).

Marinelli beaker에 NaCl 또는 boric acid 포화용액 1 L를 넣고 측정하였을 때, Fig. 5에 보이듯이 1950.9 keV (100%), 1959.1 keV (67%), 6110.7 keV (92%)에서 Cl 피크를 확인하였으며 477.7 keV (100%)에서 B 피크를 확인하였다.

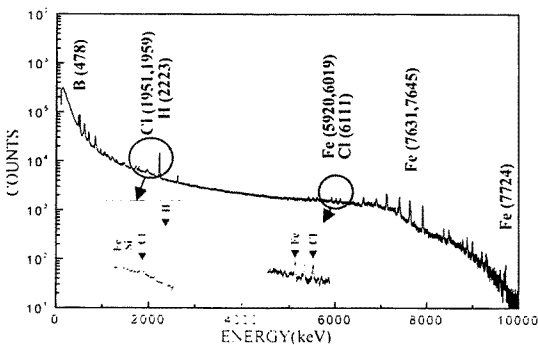


Fig. 5. Prompt gamma spectrum of Cl.

중성자 선원의 collimator 내부에 고밀도 폴리에틸렌

봉을 삽입하여 열중성자로 변환율을 높혀줌으로 즉발 감마선 발생효율의 증가여부를 알아보았다. 폴리에틸렌 봉의 삽입 전이 삽입 후 보다 더 큰 피크의 즉발감마선을 내는 것으로 보아 시료자체가 수용액이므로 시료내에서 속중성자의 열화가 일어나 시료내 존재하는 Cl 등과 반응하여 즉발감마선을 내는 것으로 판단된다.

3.3. 중성자 선원 보관함 설계

중성자 및 방사선 선원 취급시에는 작업자의 안전을 위해 엄격한 규정을 적용하고 있다. 따라서 중성자 선원을 보관하는 보관함 제작은 이 규정의 테두리 안에서 설계를 해야 한다. 보관함 설계를 위한 중성자 및 감마선 차폐해석은 몬테카를로 방법으로 중성자 및 감마선 거동을 묘사하는 MCNP-4B 전산코드를 사용하였으며, MCNP-4B 계산을 통해 중성자 보관함 표면에서의 방사선량을 구하고 이를 근거로 작업자의 안전을 보장하는 차폐체 두께를 선정하여 설계하였다.

MCNP-4B 전산코드의 선량은 측정지점에서의 중성자 혹은 감마선의 에너지에 따른 flux의 분포를 구한 다음, 각 에너지에 맞는 dose conversion factor를 적용하여 평가한다. 이러한 dose conversion factor의 종류는 여러 가지가 있지만 본 계산에서는 중성자는 NCRP-38과 ANSI/ANS-6.1.1-1977을 함께 사용하였고, 감마선은 ANSI/ANS-6.1.1-1977을 사용하였다.

중성자선원 보관함은 실린더 모양으로 설계하였으며, 내부 차폐물질로는 폴리에틸렌을 사용하였다. 폴리에틸렌은 비중이 0.92 g/cm³으로 물보다 가벼우며 또한 물에 대한 수소 함유비가 1.239로 물보다 수소가 많고 고체이기 때문에 중성자 차폐체로 많이 사용하고 있다. 중성자 선원은 185 MBq의 ²⁵²Cf 선원을 사용하며 pneumatic 라인을 통하여 상부의 시료 chamber쪽으로 이동할 수 있도록 장치하였다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 중성자 선원을 실린더의 중심에 놓고 주위의 폴리에틸렌으로 둘러싸은 기하학 구조를 MCNP-4B 전산코드 계산의 모델로 적용하였다.

방사선 안전관리 규정에 의하면 방사선관리구역에 출입하는 종사자에 대한 개인피폭선량이 연간 50 mSv를 넘지 않는 범위에서 5년간 100 mSv의 선량한도를 초과하지 않도록 해야한다. 일년을 50주로 잡았을 때, 방사선 종사자가 하루 8시간동안 중성자 보관함 표면에서 근무한다면 작업자를 안전하게 보호하기 위해서는 중성자 선원보관함 표면에서 10 μ Sv 이하여야 한다.

Fig. 6의 모델을 적용하였을 때 보관함의 중심 선원으로부터의 거리에 대한 각 중성자와 감마선에 의한 선량과 total 선량을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에 보이듯이 보관함의 반경이 약 60 cm 정도 일 때, 방사선 안전관리 기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 또한 중성자 선원과 가까운 위치에서의 선량의 대부분은 중성자에 의한 것으로 나타났으며 중성자선원과 거리가 멀어질수록 열중성자와 차폐물질과의 핵반응에 의해 발생하는 이차 방사선의 선량이 중성자보다 오히려 더 높아지는 것으로 나타났다. 따라서 중성자 선원 보관함의 외부는 감마선을 차폐하고 또한 폴리에틸렌 차폐체를 보호하기 위하여 5 mm 두께의 스텐강을 사용하였다.

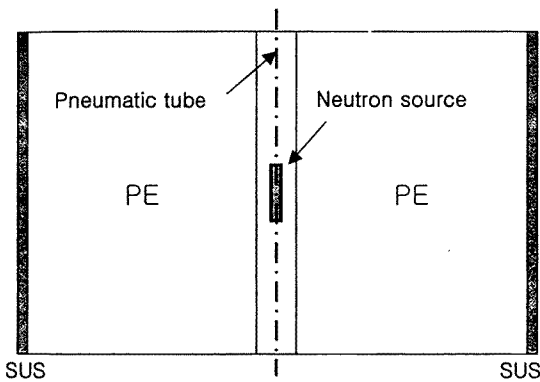


Fig. 6. Model geometry of neutron storage canister for the Monte Carlo calculation.

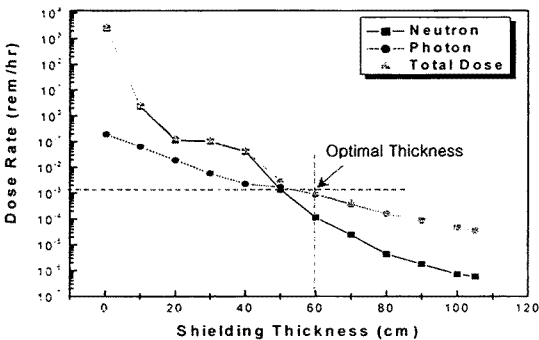


Fig. 7. Dose rates of neutron and photon calculated by MCNP-4B code.

3.4. 동시계수 측정법을 이용한 바탕값 감쇄

검출기의 바탕값은 중성자 차폐물질로 사용되는 폴리에틸렌과 수용액 시료에 존재하는 수소에 의한 즉발 감마선으로 높아지게 된다. 이와같은 바탕값 상승은 실제 낮은 농도의 원소분석을 어렵게 하기 때문에 바탕값을 낮추기 위하여 동시계수 장치 도입이 요구된다.

PGAA 측정에서 continuum과 escape 피크를 줄이는 방법으로 Compton suppression 방법이 가장 많이 사용된다.⁸ 이 방법에서는 HPGe 검출기로터 튀어나온 콤프턴 감마선을 또 다른 검출기로 측정을 하며 이 신호를 컴프턴 바탕값을 낮추는 데 사용하는 방법이다. 감마선의 동시계수법은 최근에 여러 가지 물질의 핵구조를 연구하는데 많이 사용되고 있다. 특히 PGAA 측정에서 수소로부터 발생하는 즉발감마선이 바탕값으로 작용할 경우에는 다른 피크들의 신호대 잡음비를 높혀 주면서 수소 피크를 제거할 수 있어 매우 유용하게 사용된다.

본 연구에서는 감마-감마 동시계수장치를 사용하여 스펙트럼의 바탕값을 줄이고자 하였다. 동시계수장치는 single-channel pulse-height analyzer (SCA)를 이용한 방법과 time-to-amplitude converter (TAC)을 이용한 방법이 알려져 있다. SCA 동시계수장치는 가격면에서 유리하고 단순해서 일반적으로 널리 사용되나 timing을 조절하기 어렵고 동시계수율이 저하되는 단점이 있으며, TFA+CFD+TAC를 이용한 동시계수장치는 동시계수 회로구성이 쉽고 CFD를 통해서 만들어진 총 output pulse가 그대로 동시계수율이 되므로 효율면에서 유리한 장점이 있다. 본 연구에서는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 TFA+CFD+TAC를 이용한 동시계수장치를 구성하였다.

동시계수장치의 성능 시험은 ²²Na 와 ⁶⁰Co RI 선원을 이용하여 timing 조절과 Co의 두 에너지선 (1173.2 keV, 1332.5 keV)에 대한 동시계수 window setting을 하였다. Timing 스펙트럼의 FWHM은 13.8 ns이며, 전에너지 스펙트럼과 동시계수 스펙트럼은 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9는 동시계수장치를 사용하였을 때, Co 피크 이외의 다른 피크들이 사라지는 것을 보여주고 있다.

3.5. NIPS 측정시스템 설계

TLD 판독용 중성자 선원을 이용한 예비실험 장치는 시료의 위치가 선원에서 떨어져 있기 때문에 즉발 감마선의 발생효율이 낮으며 주위의 차폐물질로부터

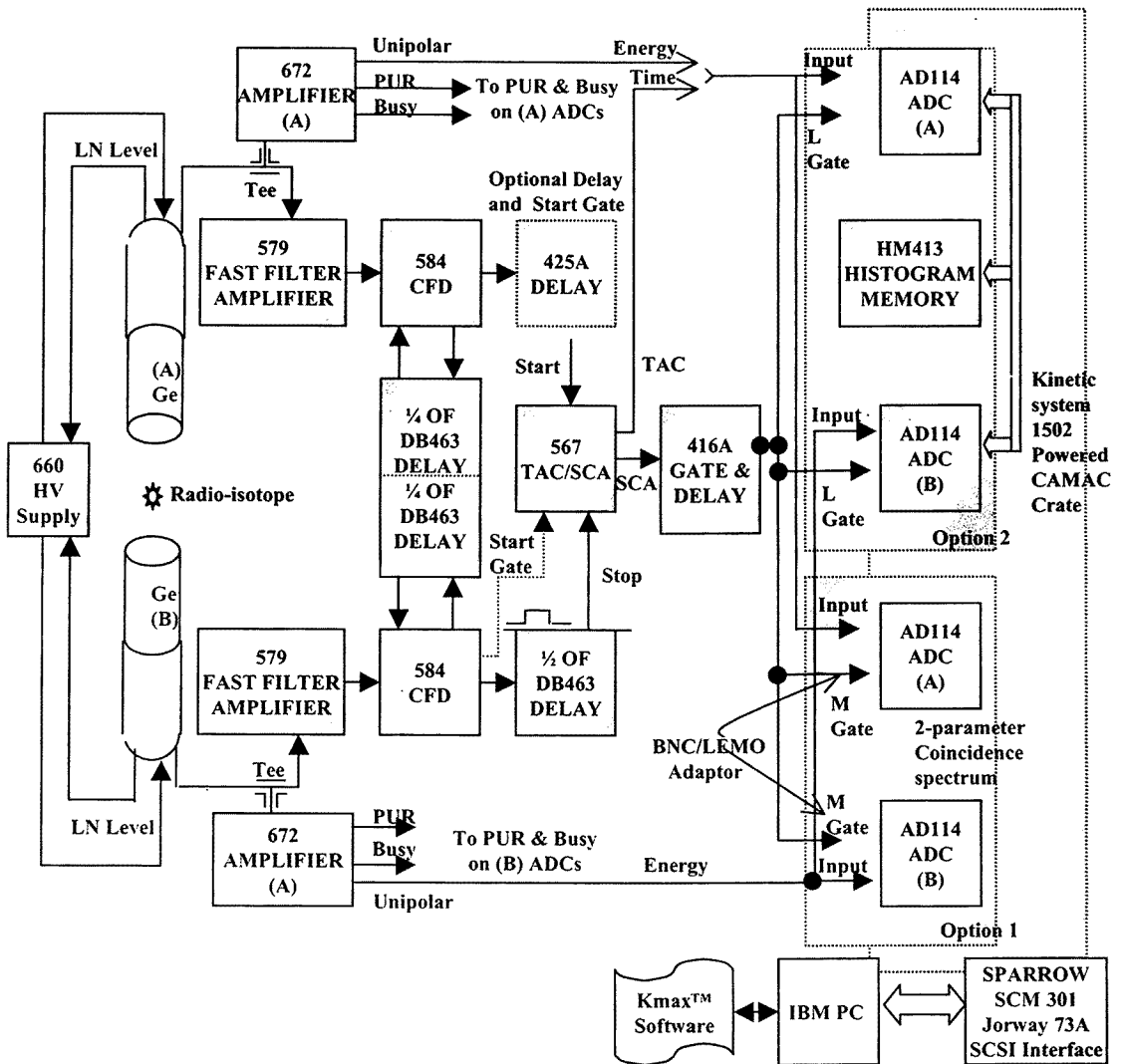


Fig. 8. Gamma-gamma coincidence system utilizing Ge detector with two-parameter energy spectroscopy

많은 즉발감마선 바탕값을 발생시키는 문제점이 있지만 중성자 선원이 시료내부에 위치할 경우는 중성자가 4π 방향으로 조사됨에 따라 즉발감마선 발생 효율을 극대화함으로써 이러한 문제점을 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 이러한 4π 기하학적 구조에서는 중성자 선원에서 발생하는 중성자가 시료자체를 통과할 때, 열중성자화 되므로 추가의 폴리에틸렌등의 moderator가 필요없으므로 열중성자속에서 매우 유리하게 된다.

TLD 판독용 중성자 선원을 이용한 예비실험에서는 장치의 구성물질과 차폐물질로부터 발생하는 즉발감마선 바탕값으로부터 검출기를 차폐하여 검출기의 dead time을 최소화하기 위해서는 100 mm 이상 두께의 납을 사용하여야 하였다. 중성자 선원이 시료내부에 위치하는 기하학적 구조로 설계함으로써 NIPS 측정장치에 철과 같이 바탕값을 높이는 재료물질을 배제하게 되므로 측정 효율을 높일 수 있다.

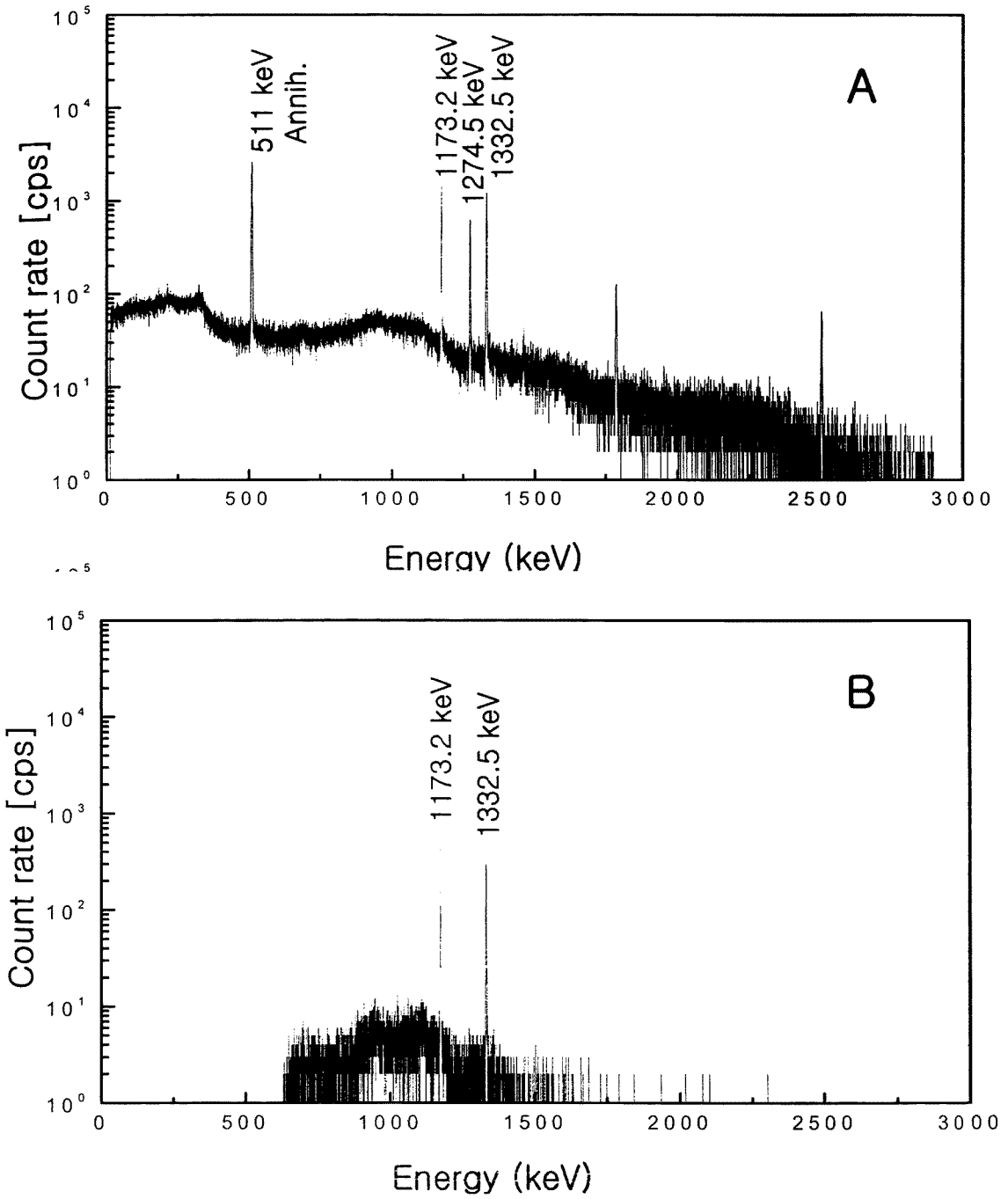


Fig. 9. Full energy spectrum(A) and gamma-gamma coincidence spectrum(B).

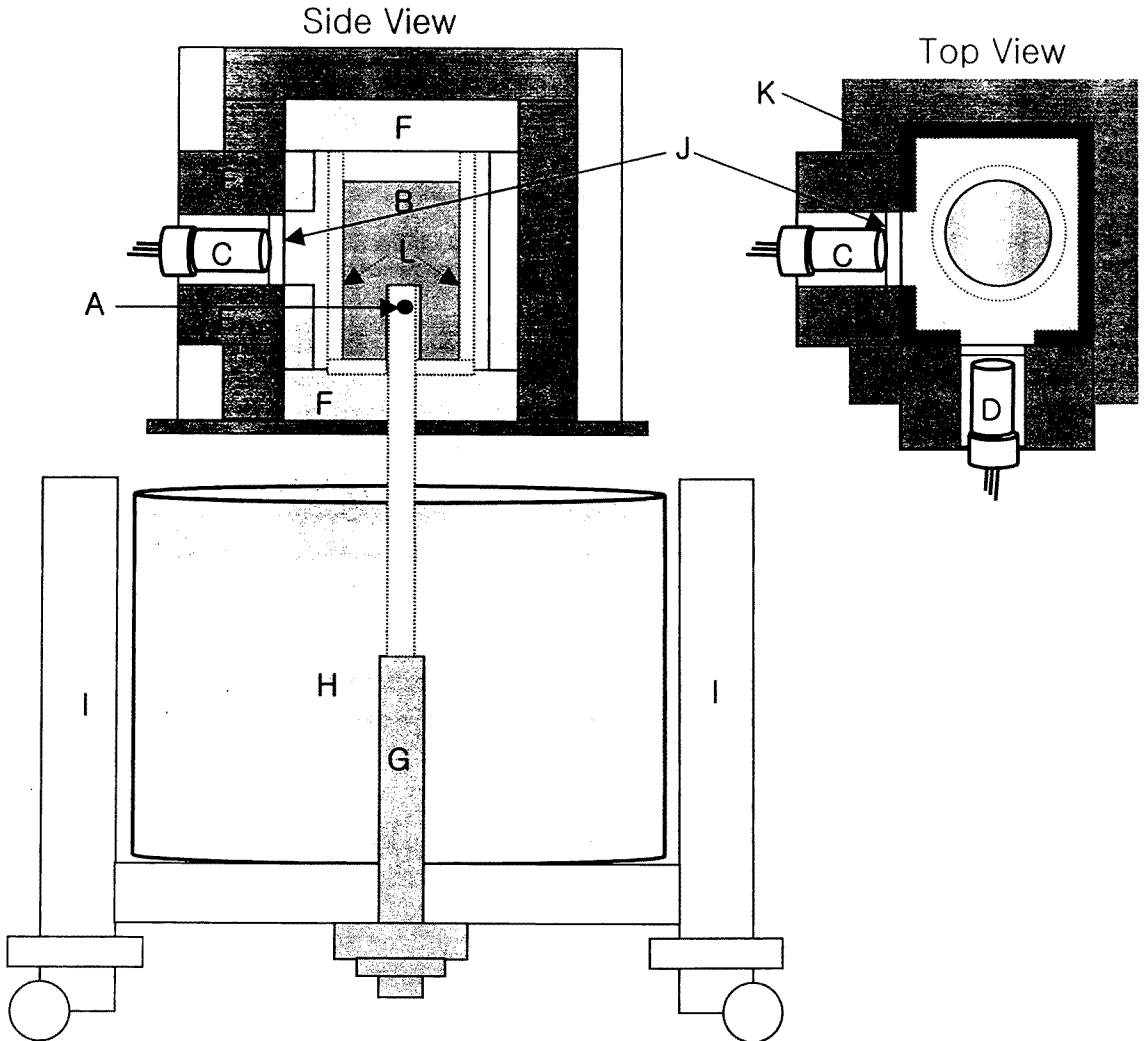


Fig. 10. Conceptual diagram of NIPS system.

A: Cf-252 neutron source (5 mCi), B: sample container, C: portable HPGe detector (GMX, 60% efficiency), D: portable HPGe detector (GMX, 30% efficiency), E: gamma shield (Pb), F: neutron moderator, G: pneumatic source elevator, H: source storage canister, I: table, J: Li-contained neutron shield, K: neutron shield (B containing polymer). L: neutron reflector

시료용액 자체 및 차폐물질로 사용된 폴리에틸렌등에 포함된 수소에 의한 즉발감마선바탕값은 부득이하게 피할 수 없기 때문에 NIPS 측정시스템에서는 두 개의 HPGe 검출기를 이용한 Fig. 8와 같은 감마-감마 동시계수장치를 활용하는 경우 바탕값 피크를 제거할

수 있을 것으로 기대된다.

NIPS 측정시스템의 기하학적 구조는 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 HPGe 검출기(GMX, 60% efficiency)와 HPGe 검출기(GMX, 30% efficiency)의 위치를 90도가 되도록 하여 coincidence 효과를 최대로 하고, 검출

기 전면에는 LiF 차폐체를 부착하여 중성자에 의한 검출기의 훼손을 최소화할 수 있도록 구성하였다. 검출기 차폐를 위해서는 LiF 중성자 차폐체를 사용하며 납 차폐체 안쪽에는 Cu liner를 이용하여 soft X-선을 제거하도록 하였다.

시료용기는 Marinelli 비이커 모양으로 제작하여 중성자 선원이 용기 아래쪽에서 안쪽으로 삽입되어 4π 방향으로 조사되도록 한다. ²⁵²Cf 선원으로부터의 발생하는 중성자는 열중성자의 flux가 비교적 적지만 수용액층을 통과하면서 자연히 열중성자화 될 것으로 기대된다. MCNP-4B 전산코드를 이용하여 중성자가 수층을 통과할 때 얼마나 열중성자로 전환되는 지를 계산하여 중성자 에너지에 따른 중성자 flux를 도시하였다. 중성자가 수층을 통과할수록 열중성자로 변환되지만 반면에 flux 손실이 일어난다. 이 두가지 상반적인 효과를 적절히 만족시키는 수층의 두께는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 약 4 - 6 cm에서 열중성자속이 최대로 되는 것을 알 수 있다. 시료용기 주변은 pyrolytic graphite와 같은 중성자 반사체를 이용하여 시료용기 주변을 둘러 쌓아 중성자 조사 효율을 최대로 하였다. 이와 같은 중성자 반사체의 효과 실험은 현재 진행중이다.

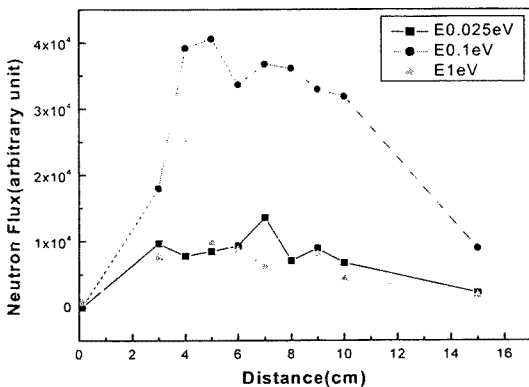


Fig. 11. Plots of neutron flux at various distance in water calculated by MCNP-4B code.

4. 결 론

²⁵²Cf 선원을 이용한 NIPS 측정시스템을 설계 구성하기 위한 예비실험으로 collimator 및 시료 chamber를

30% 보론-폴리에틸렌 중성자 차폐체를 사용하여 제작하고, 장치 주위에서의 중성자 및 감마선 바탕값 및 측발감마선 스펙트럼을 측정하였다. 또한, MCNP-4B 전산코드를 이용하여 시스템 구성 재질들을 통과할 때의 중성자 및 감마선 거동을 예측하였다. 예비실험은 한국 원자력연구소가 보유하고 있는 TLD 판독용 ²⁵²Cf 선원을 이용하였으며, CI등을 포함하는 시료의 측발감마선 스펙트럼을 측정하였다. 중성자 서베이미터와 감마선 서베이미터를 이용하여 장치 주위에서의 중성자 및 감마선 바탕값을 측정하고 바탕값을 최소로 할 수 있는 차폐체의 기하학적 구조를 고안하였다. 바탕값을 최소화하기 위해서는 동시계수법을 이용하였으며, 일반적으로 SCA를 이용한 동시계수방법은 TFA+CFD+TAC을 이용한 동시계수방법에 비해 일반적으로 널리 사용되지만 timing을 조절하기 어렵고 동시계수율이 저하되는 단점이 있으므로, CFD를 통해서 만들어진 총 output pulse가 그대로 동시계수율이 되므로 효율면에서 유리한 TAC 시스템이 본 연구에 도입되었다. 동시계수 장치의 성능은 ²²Na 와 ⁶⁰Co RI 선원을 이용하여 시험하였다. 보관함 및 시료용기는 몬테카를로 방법으로 중성자 및 감마선 거동을 묘사하는 MCNP-4B 전산코드를 이용하여 중성자 보관함 표면에서의 방사선량률을 구했으며 이를 근거로 작업자의 안전을 보장하는 차폐체 두께 및 열중성자로 변환시킬 수 있는 용기 두께를 선정하여 NIPS 시스템을 구성하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Z. B. Alfassi, C. Chung (ed.), "Prompt Gamma Neutron Activation Analysis", CRC Press, Boca Raton, 1995
2. E. T. Journey, *Proc. 3rd Intern. Symp. on Neutron-Capture Gamma-ray Spectroscopy and Related Topics*, R. E. Chrien, W. R. Kane (Eds.), Plenum, New York, p. 441 (1979).
3. R. M. Lindstrom, D. L. Anderson, "Capture Gamma-ray Spectroscopy and Related Topics", S.

- Raman (Ed.), Am. Inst. Physic, New York, p. 810, 1985.
4. R. M. Lindstrom, R. L. Paul, W. B. Walters, G. L. Molnar, "Capture Gamma-ray Spectroscopy and Related Topics", J. Kern (Ed.), World Scientific, Singapore, p. 955, 1994.
 5. R. L. Paul, R. M. Lindstrom, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **243**(1), 181 (2000).
 6. IAEA-TECDOC-459, *Proc. of an Advisory Group Meeting Organized by the IAEA*, Espoo, Finland, 1-5 June (1987).
 7. R. L. Paul, *Analyst*, **122**, 35R (1997).
 8. T. Belgya, Zs. Revay, B. Fazekas, K. Jejja, L. Dabolczi, G. L. Monar, Z. Kis, J. Ostor, Gy. Kaszas, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Capture Gamma-ray Spectroscopy and Related Topics*, Vol. 2, Budapest, Hungary, p. 826 (1996).