

고리1호기 원자력발전소 격납용기내 중성자 스펙트럼 측정

Neutron Spectrum Measurement inside Containment Vessel at Kori Nuclear Power Plant Unit 1

한재문, 김태욱, 김경덕, 윤철환
한수원(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력발전소에서 시설의 검사나 보수 등의 목적으로 방사선작업자가 원전 격납용기 내부로 들어가야 할 경우가 발생한다. 이때 방사선작업자가 받게 될 중성자 피폭선량 평가를 위해 중성자선장 분포에 관한 정보가 기본적으로 요구된다. 이를 위해 BMS를 이용하여 PWR형 원전인 고리 1호기 격납용기내 수직방향 4개 작업층 중 6 ft 와 20 ft에서 각각 4개 지점, 44 ft에서 2개 그리고 70 ft에서 5개 지점을 대상으로 중성자스펙트럼을 측정하였다. 측정결과 6 ft에 경우 중성자 플럭스는 $2.623 \times 10^2 \sim 2.746 \times 10^4$ n/cm²sec, 평균 중성자에너지는 $9.209 \times 10^{-6} \sim 3.377 \times 10^{-2}$ MeV, 선량으로 환산 시키면 0.025 ~ 2.675 mSv/hr 분포를, 20 ft에 경우 중성자 플럭스는 $1.771 \times 10^1 \sim 1.682 \times 10^3$ n/cm²sec, 평균 중성자에너지는 $6.084 \times 10^{-6} \sim 2.988 \times 10^{-1}$ MeV, 선량으로 환산 시키면 0.004 ~ 0.228 mSv/hr 분포를, 44 ft에 경우 중성자 플럭스는 $3.367 \times 10^2 \sim 3.483 \times 10^2$ n/cm²sec, 평균 중성자에너지는 $3.962 \times 10^{-2} \sim 7.360 \times 10^{-2}$ MeV, 선량으로 환산 시키면 0.069 ~ 0.089 mSv/hr 분포를, 70 ft에 경우 중성자 플럭스는 $4.553 \times 10^3 \sim 1.407 \times 10^4$ n/cm²sec, 평균 중성자에너지는 $3.668 \times 10^{-4} \sim 6.764 \times 10^{-2}$ MeV, 선량으로 환산 시키면 0.449 ~ 2.660 mSv/hr의 분포를 보인다.

Abstract

There would be a case for the radiation worker have to work inside of the containment vessel to inspect or repair reactor facilities. In this case, the information about distribution of neutron field is needed to estimate neutron exposure dose of worker. Neutron spectra were measured by BMS(Bonner Multisphere Spectrometer) at

4 points of 6 ft and 20 ft, 2 points of 44 ft, 5 points of 70 ft in containment vessel of Kori unit 1. From the calculation, the following results were obtained. Neutron fluxes of 6 ft were between 2.623×10^2 and 2.746×10^4 neutron/cm² · sec, average neutron energies were between 9.209×10^{-6} and 3.377×10^{-2} MeV, equivalent doses of neutron were between 0.025 and 2.675 mSv/hr. Neutron fluxes of 20 ft were between 1.771×10^1 and 1.682×10^3 neutron/cm² · sec, average neutron energies were between 6.084×10^{-6} and 2.988×10^{-1} MeV, equivalent doses of neutron were between 0.004 and 0.228 mSv/hr. Neutron fluxes of 44 ft were between 3.367×10^2 and 3.483×10^2 neutron / cm² · sec, average neutron energies were between 3.962×10^{-2} and 7.360×10^{-2} MeV, equivalent doses of neutron were between 0.069 and 0.089 mSv/hr. Neutron fluxes of 70 ft were between 4.553×10^3 and 1.407×10^4 neutron/cm² · sec, average neutron energies were between 3.668×10^{-4} and 6.764×10^{-2} MeV, equivalent doses of neutron were between 0.449 and 2.660 mSv/hr.

1. 서론

1978년 고리 1호기 가동 후 국내 원전은 현재 18기가 가동되고 있고 올진 5, 6호기가 건설 중이며 앞으로도 원전의 수적 팽창이 지속적으로 늘어날 것으로 예상된다. 최근 ICRP-60의 개념이 법제화되고, 방사선관리에 대한 규제는 더욱 강화되는 추세로서 연간 50 mSv를 넘지 아니하는 범위에서 5년간 100 mSv를 권고하고 있어 방사선 관리는 더욱 어려워지고 강화되고 있다[1]. 이에 비해 국내 원전은 가동년수가 늘어남에 따라 원전의 노후화가 더욱 가속되어 원전 일차계통내의 방사선량율이 증가하고, 설비의 노후에 따라 보수 빈도 또한 늘어나게 되어 원전작업종사자의 방사선 피폭량은 더욱 증가하게 될 것으로 예상된다.

원자력발전소에서의 방사선피폭은 작업환경 및 작업특성에 따라 그 형태가 다양하게 나타나기 때문에, 원전방사선작업종사자의 피폭선량을 정확하게 평가하기 위하여 각종 개인 선량계 및 모니터링 장비를 사용하고 있다. 그러나 이러한 기기들의 사용 혹은 선량평가 방법의 적용 등이 효과적으로 이루어지기 위하여 반드시 해당 방사선장에 대한 이해가 선행되어야 한다. ICRP-60에서는 중성자에 의한 피폭선량을 중성자 에너지 구간별로 평가하도록 권고하고 있다. 즉, 중성자 에너지 구간을 세분화 시켜 각 구간별로 방사선가중치를 도입하여 중성자에 의한 피폭선량을 평가한다. ICRP-60의 권고 기준을 만족시키려면 출입하는 원자로 건물 내부의 에너지에 근거하여 방사선작업자에 대한 정확한 중성자 피폭선량을 평가해야 한다.

원자력발전소의 안전한 운영과 ICRP-60을 적용한 피폭평가를 위해 중성자선장 측정이 필요한 시점 예와 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 원전의 대부분인 가압경수로 중 가장 오랜 운전이력을 가지고 있는 고리1호기를 대상으로 중성자 측정 장비중 하나인

BMS(Bonner Multisphere Spectrometer)를 사용하여 격납용기내 15개 지점을 선정하여 중성자선장에 대한 특성조사를 수행하고, 측정된 중성자스펙트럼을 바탕으로 ICRP-60에서 제시한 방사선 가중치(W_R)를 적용하여 중성자 선량을 평가하였다.

2. Bonner Multisphere Spectrometer(BMS) 시스템

본 측정에 사용한 BMS(Bonner Multisphere Spectrometer)는 방사선 방호 목적의 중성자 스펙트럼 측정 시스템으로 가장 광범위하게 쓰이고 있는 장비이다. 다른 스펙트로미터 시스템과 비교할 때 높은 중성자 검출효율과 폭넓은 에너지 반응폭(열중성자 ~ 수백 MeV)을 가지고 있어 다양한 에너지 분포를 보이고 있는 원전 격납용기내 중성자선장 측정에 사용하기 적합한 중성자 스펙트로미터이다[2]. BMS(Bonner Multisphere Spectrometer) 시스템은 열중성자용 ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ 검출기와 6개(2, 3, 5, 8, 10, 12 inch)의 폴리에틸렌 감속구로 구성되어 있고, 열중성자의 존재유무를 측정하기 위해 ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ 검출기 내벽에 두께 0.05 cm의 Cd 덮개를 씌워 측정하였다. 이 경우 검출기의 열중성자에 대한 반응도를 줄일 수 있기 때문에 상대적으로 양호한 에너지 스펙트럼을 얻을 수 있다. 이와 같이 8개의 검출기가 하나의 스펙트로미터 시스템(BMSS : Bonner Multisphere Spectrometer System)을 구성하고 있다.

BMS의 교정은 한국원자력연구소에서 수행되었으며, NIST(National Institute for Standard and Technology)의 표준선원에 의해 교정된 ${}^{252}\text{Cf}$ (방출율 : 2.03×10^9 n/sec)를 사용하여 BMS를 구성하고 있는 각 검출기의 검출효율 계산하였다. BMS 시스템의 중성자선속에 대한 교정인자는 0.948이며, 검출기의 반응함수로 HASL-267의 반응격자(response matrix)를, 그리고 BMS 측정값을 Unfolding 하기 위하여 미국 NRL(Naval Research Laboratory)에서 개발한 BUNKI-Code 프로그램을 사용하였다[3][4].

BMS 측정 장치는 시스템 내 전기적 noise를 최소화하기 위하여 검출기와 전치증폭기(Preamplifier)를 1 m의 Cable로 연결하였고, 전치증폭기는 Portable Multichannel Analyzer(DART-012)에 있는 주증폭기(Amplifier)와 전원공급장치(High Voltage Power Supply)와 연결되어 있다. 측정자의 과피폭 방지를 위해 중성자선장(측정지점)에서 멀리 떨어져 안전한 저선량지역에 대피하여 있도록 하였다. 검출기에 인가된 전압은 500 volts이며, 주증폭기 펄스형성 시간은 1 μsec 이다. 그림 1에 BMS를 이용한 중성자 측정 시스템의 구성도를 나타냈다.

3. 중성자 스펙트럼 측정 위치

가동중인 원전 격납용기 내부는 방사선 작업자의 출입이 통제되고 있지만, 그럼에도 불구하고 긴급보수 또는 점검을 위하여 불가피하게 출입하게 될 경우가 발생한다. 따라서 가동중 격납용기내 출입을 가정하여, 작업자의 접근지역을 방사선 피폭 가능 지점으

로 선정하여 중성자선장 특성조사를 수행하였다.

본 연구에서는 고리 1호기 원전 격납용기내 중성자 스펙트럼 측정지점을 선정하기 위하여 원전 자체적으로 측정한 자료를 바탕으로 측정지점을 선정하였다. 긴급보수가 발생할 수 있는 지역이나 정기점검 등으로 방사선작업자가 이동할 수 있는 지역은 주로 중·저준위 선량지역이다. 콘크리트로 차폐되어 있는 노심이나 증기발생기입구는 고선량 지역으로 감마선의 간섭이 크고, 측정시 측정자의 과피폭 우려가 있으므로 측정지점에서 제외 시켰다.

고리1호기 격납용기는 수직방향으로 4개의 층으로 나누어져있다. 가동중인 원자로 격납용기 4개의 작업층을 중심으로 6 ft와 20 ft에서 각각 4개 지점 그리고 44 ft에서 2개, 70 ft에서 5개 지점에 대해서 중성자 스펙트럼을 측정하였다. 고리1호기 격납용기 내부의 각 층별 단면도 및 측정위치를 그림 2, 3, 4, 5에 나타냈다.

4. 중성자 스펙트럼 측정 결과

고리1호기 격납용기 내부의 중성자선장 측정은 BMS 검출기를 이용하여 15 곳을 측정하였다. 측정지점의 선량율에 따라 계측시간을 10 ~ 500 sec로 변화를 주면서 측정하였고, 이때 검출기를 통해 얻어진 순계수율은 BUNKI-Code의 입력 값으로 사용하였다. 중성자스펙트럼을 얻기 위해 사용된 Unfolding Method는 SPUNIT 코드를, Unfolding Matrix는 SAN4를 이용하였다.

가동중인 고리1호기 격납용기내 중·저선량 지역을 중심으로 측정된 15개 지점의 중성자 스펙트럼을 그림 6에 나타냈고, 플럭스, 평균 중성자에너지, ICRP-60에서 제시한 방사선 가중치(W_R)를 적용하여 중성자 선량을 평가한 등가선량을 표 2에 요약했다. 15개 지점에서의 평균 중성자에너지 분포는 9.209 eV ~ 298.8 keV 이며, 6 ft 측정지점 A, C 와 20 ft 측정지점 B, 그리고 44 ft의 A, B, 와 70 ft A에서 유사한 형태의 에너지분포를 갖는 것으로 나타났다. 측정위치 20 ft B 와 70 ft E 를 제외하면 1 MeV 이상의 고에너지 중성자에 의한 선량 기여 분은 10 % 미만으로 나타났다.

격납용기내 중성자의 흐름은 원자로 cavity를 통하여 상부로 진행하면서 산란되어 44 ft에 이르러 중성자 선장을 형성한다. 이와 같은 이유로 6 ft 나 20 ft 지점에 비해 44 ft A, B 위치에서 고른 중성자스펙트럼 분포를 보임을 알 수 있다. 70 ft B, C, D 지점의 중성자스펙트럼은 계측기의 불감시간의 증가로 인해 정확한 데이터를 얻지 못해 다른 지역의 스펙트럼과 비교할 때 저에너지 영역에서의 정확한 분포를 계산하지 못하였다.

측정지점 중 20 ft A를 제외하면 모든 지역에서 평균 중성자에너지는 100 keV 이하이며, 500 keV 이상의 중성자에너지에 대한 선량 기여는 약 30 % 미만이다. 가동중인 격납용기내 피폭 가능지점에서의 주요 피폭선원은 저에너지의 중성자에 의한 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 계획

국내 원자력발전소 중 가장 오랜 운전 경력을 가지고 있는 고리1호기를 대상을 중성자 스펙트럼을 측정하였다. 측정결과 중성자에 의한 피폭이 비교적 저에너지 영역에 걸쳐 있음을 알 수 있었다. 이를 감안하여 개인 선량계 및 서베이메타와 같은 장비들의 교정 및 교정인자 프로그램에 적용하는 연구가 필요할 것이다. 중성자스펙트럼의 경향은 측정지점 혹은 측정조건에 따라 변할 수 있다. 출력운전과 측정지점의 환경조건 및 측정상의 어려움 등이 주요 원인이 되므로 체계적인 측정이 필요하다. 향후 불감시간으로 인해 검출효율이 나쁜 70 ft B, C, D 지점은 장비를 보완해서 다시 한번 측정할 것이며, 또한 원전 계획예방정비기간에 감마선장 특성조사를 실시할 계획이고, 추가 측정 후 모델링 코드와 중성자 플럭스 및 평균에너지와도 비교할 계획이다.

참 고 문 헌

1. ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection Publication 60, 1990.
2. J. C. Liu, F. Hajnal, C. S. Sims and J. Kuiper, "Neutron Spectral Measurement at ORNL", Radiation Protection Dosimetry, vol.30, 3, 169~178, 1990.
3. R. S. Sanna, "Thirty-one Group Response Matrices for the Multisphere Neutron Spectrometer over the Energy Range Thermal to 400 MeV", Health and Safety Laboratory, U. S. Atomic Energy Commission, HASL-267, 1973.
4. K. A. Lowry and T. J. Jhonson, "Modifications to Iterative Recursion Unfolding Algorithms and Computer Codes to Find More Appropriate Neutron Spectra", Naval Research Laboratory, U. S. Department. of Navy, 1984.

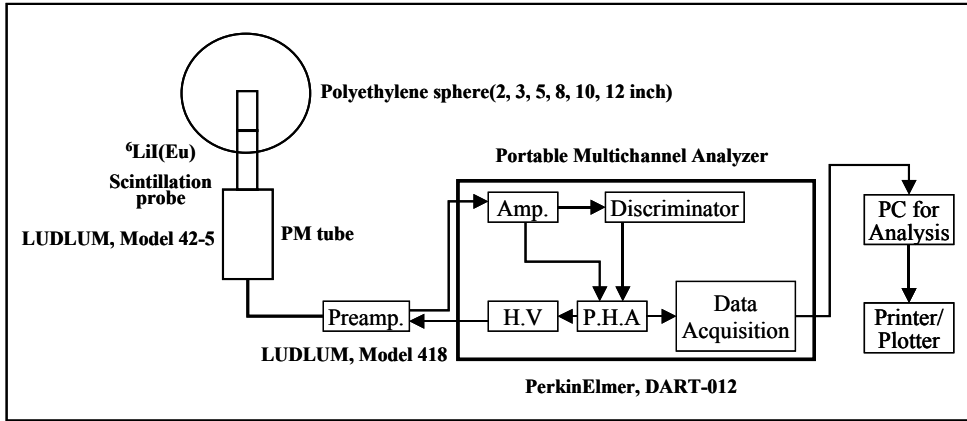


그림 1. BMS 시스템의 구성도

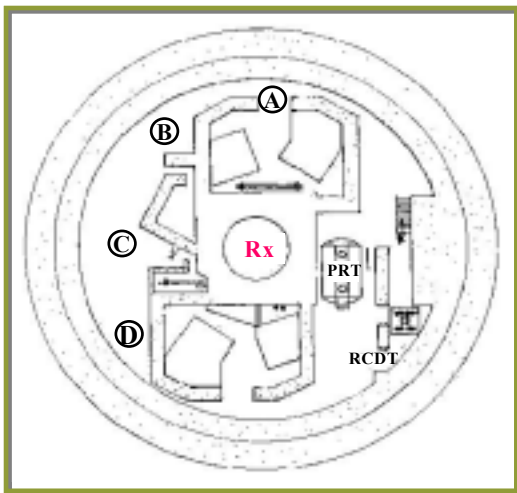


그림 2. 고리1호기 격납용기 6 ft 단면도 및 측정지점

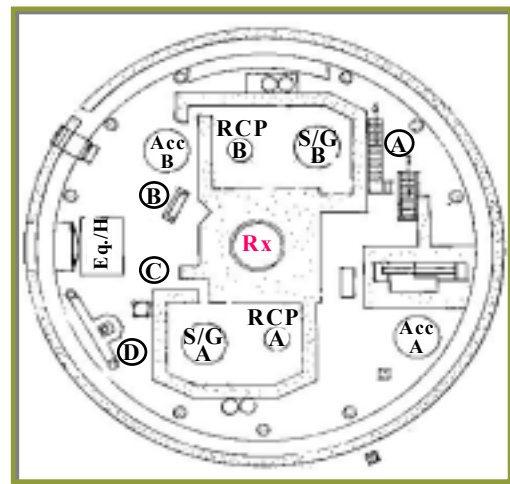


그림 3. 고리1호기 격납용기 20 ft 단면도 및 측정지점

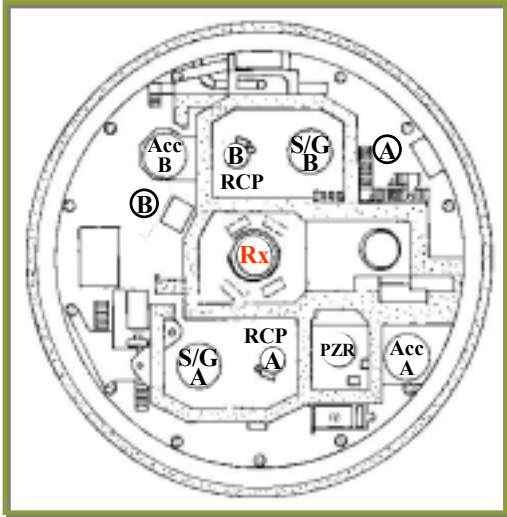


그림 4. 고리1호기 격납용기 44 ft 단면도 및 측정지점

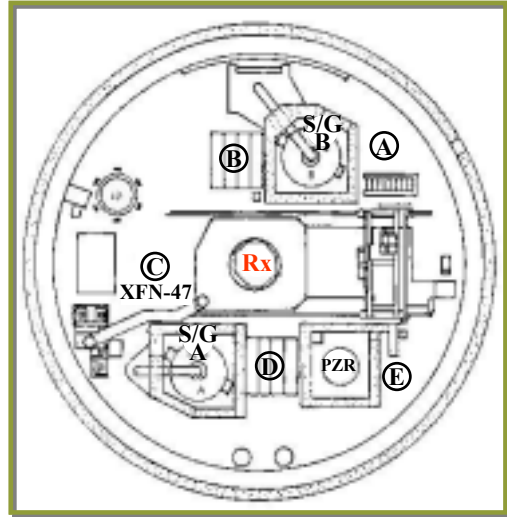
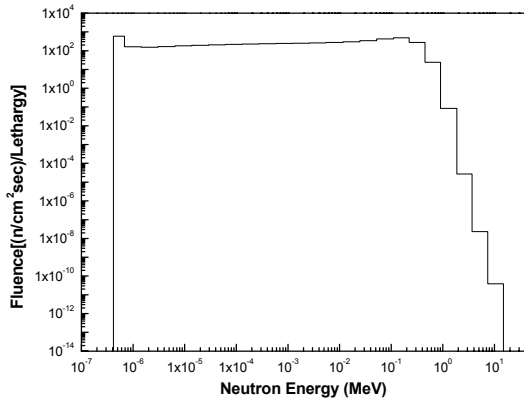
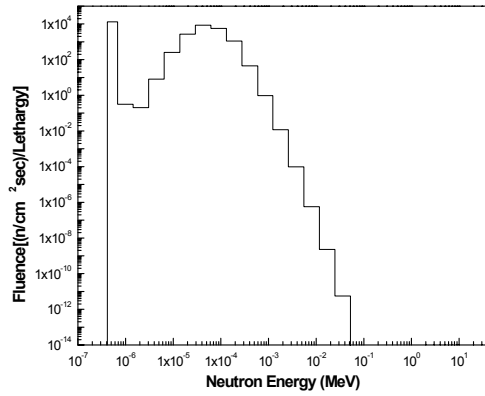


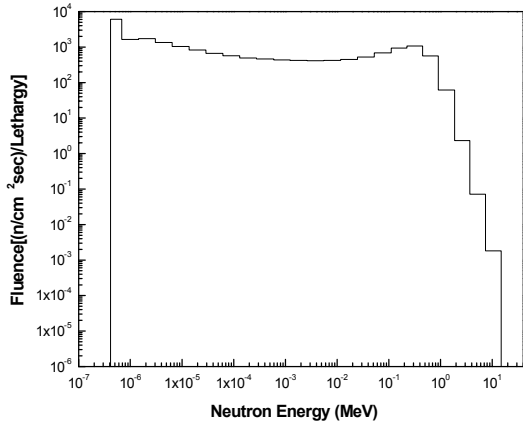
그림 5. 고리1호기 격납용기 70 ft 단면도 및 측정지점



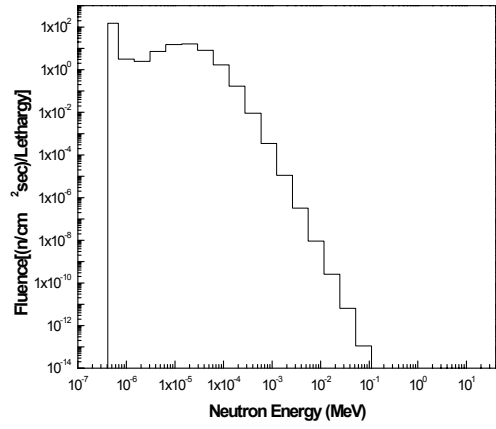
6 ft A 지점



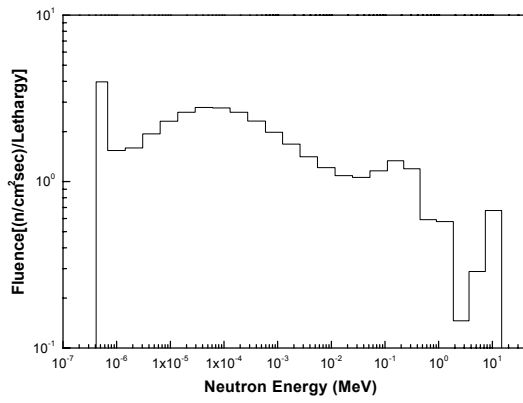
6 ft B 지점



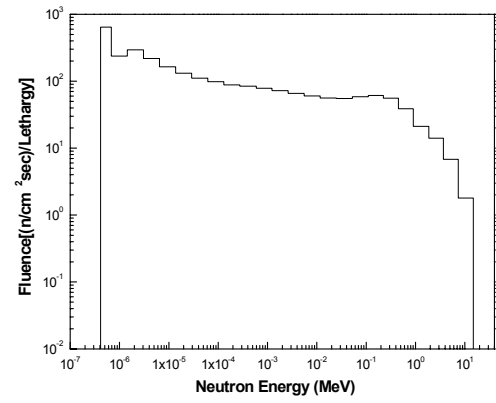
6 ft C 지점



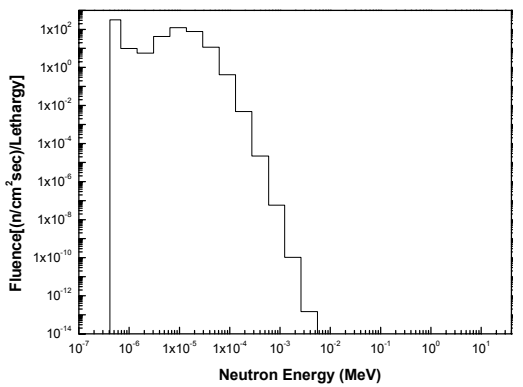
6 ft D 지점



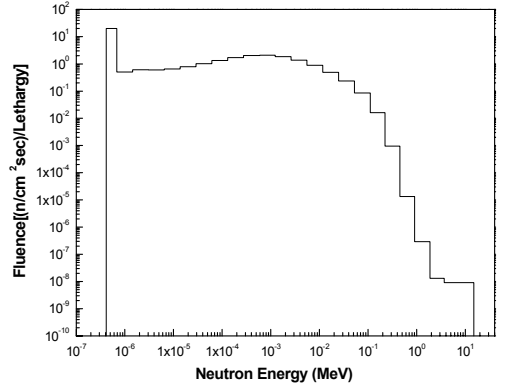
20 ft A 지점



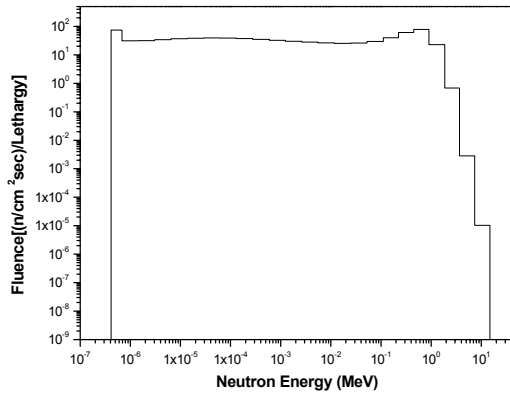
20 ft B 지점



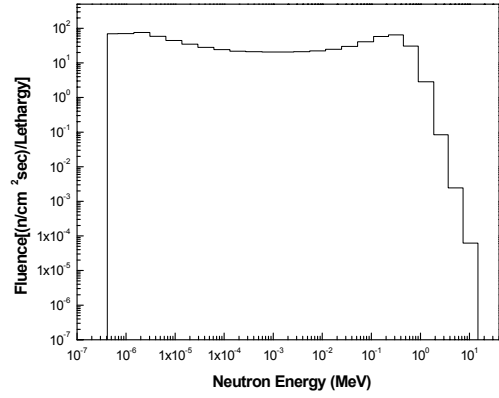
20 ft C 지점



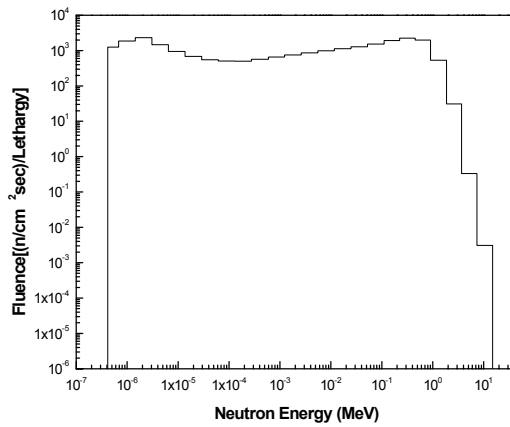
20 ft D 지점



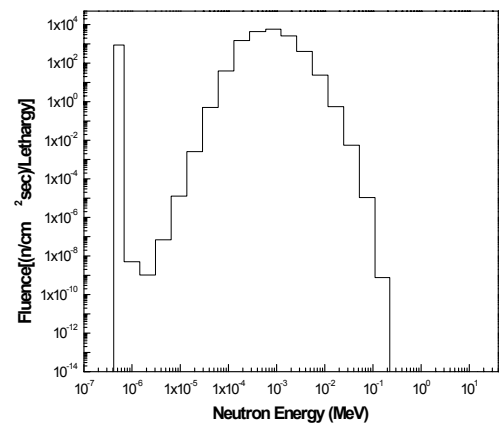
44 ft A 지점



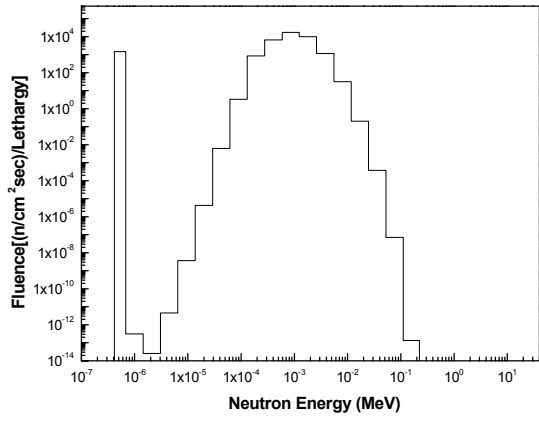
44 ft B 지점



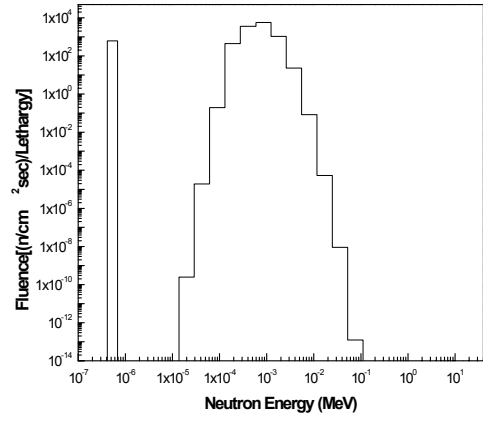
70 ft A 지점



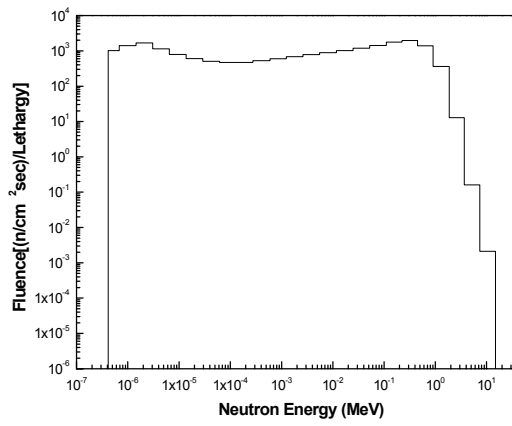
70 ft B 지점



70 ft C 지점



70 ft D 지점



70 ft E 지점

그림 6. 고리 1호기 격납용기내 중성자스펙트럼 측정

표 2. 각 측정위치에서의 중성자 플럭스와 평균에너지, 선량을

위 치		Total Flux (n/cm ² · sec)	Ave. Energy (MeV)	Equivalent Dose (mSv/hr)
6 ft	A	2.426×10^3	2.423×10^{-2}	0.413
	B	2.746×10^4	2.967×10^{-5}	2.675
	C	1.438×10^4	3.377×10^{-2}	2.012
	D	2.623×10^2	9.209×10^{-6}	0.025
20 ft	A	1.771×10^1	2.988×10^{-1}	0.004
	B	1.682×10^3	4.295×10^{-2}	0.228
	C	5.972×10^2	6.084×10^{-6}	0.058
	D	3.748×10^1	1.320×10^{-3}	0.004
44 ft	A	3.484×10^2	7.360×10^{-2}	0.089
	B	3.367×10^2	3.962×10^{-2}	0.069
70 ft	A	9.342×10^3	6.764×10^{-2}	2.660
	B	6.192×10^3	4.293×10^{-4}	0.610
	C	1.407×10^4	5.257×10^{-4}	1.372
	D	4.553×10^3	3.668×10^{-4}	0.449
	E	7.810×10^3	6.089×10^{-2}	2.147