

차폐 해석용 라이브러리 개발 및 검증

Development and Validation of a Library for Shielding Analysis

길충섭, 김정도, 이영숙
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요약

중성자 175군, 감마선 47군의 MATXS형의 차폐 해석용 라이브러리를 개발하였다. 이의 검증을 위해 경수로 압력용기 모의실험인 PCA-REPLICA와 NESDIP2, 철자료 검증을 위한 Winfrith Iron과 Iron88실험 그리고 흑연자료 검증을 위한 Winfrith Graphite 벤치마크를 TRANSX/DANTSYS로 해석하였다. 계산결과 문턱에너지 선량 반응률의 계산값은 측정치와 비교할때 압력용기 모의실험에서는 약 15%내외, 철자료 검증실험에서는 두께 50cm 미만에서는 15% 내외 그리고 흑연자료 벤치마크에서는 두께 60cm까지에서 10% 정도의 차이를 보이고 있는데 이는 실험오차를 고려하면 만족할 만하다.

Abstract

A library for shielding analysis has been developed, which is the MATXS-format and has a coupled structure of neutron 175 and gamma 47 groups. The PCA-REPLICA and NESDIP2 benchmarks which simulated LWR pressure vessel, the Winfrith Iron and Iron88 for validation of iron data and the Winfrith Graphite for validation of graphite data have been analyzed with the TRANSX/DANTSYS code systems. The differences between the calculated/measured dosimetry reaction rates are around 15% in the RPV, about 15% in the iron within 50cm thickness and about 10% in the graphite within 60cm thickness. These results are acceptable, considering the standard deviations of the measured data.

1. 개요

전산기의 급속한 발달에 따라 대용량, 초고속의 전산 시스템을 이용한 방사선 수송계산이 경제적인 부담없이 수행되고 있다. 방사선 차폐해석에는 주로 2~3 차원의 수송코드가 이용되는데 여기서도 다군 계산에서 군수를 점점 늘려가고 있다. 따라서 특정목적으로 축약된 다군 단면적 라이브러리가 다른 목적에 이용되는 것은 비합리적이다. 예를들면 최근 ORNL에서 개발되어 공개된 BUGLE-96은 우리나라에서도 널리 사용되고 있는데 이것은 경수로의 원자로 압력용기(RPV) 선량계산을 목적으로 상세군으로부터 축약된 자료이다. 따라서 이것이 다른 용도의 계산에 이용되는 것은 바람직하지 않다. 특정 목적용 다군 단면적은 그 목적을 전제로하여 상세군 자료로부터 생산되어야 한다. 금번 본연구소에서는 열중성자로, 고속로 그리고 핵융합로 등의 차폐계산에 이용하기 위한 중성자 및 감마선 결합형의 상세군 단면적 자료를 개발하고 있다. 이를 위해 일차적으로 예비 벤치마크를 위한 48핵종 자료를 ENDF/B-VI.3으로부터 NJOY94.105[1] 시스템을 이용하여 생산하였다. 중성자 175 군 그리고 감마선 47군의 MATXS형 자료는 중성자 반응 단면적 뿐만아니라 중성자나 감마선에 의한 발열량이나 조사손상 에너지등 다양한 자료를 포함하고 있다. 여기서는 생산된 라이브러리로 국제적으로 공인된 5가지 차폐벤치마크 문제를 해석하였다.

2. MATXS형 라이브러리 생산

2-1. 생산핵종, 온도 및 배경단면적

일차적으로 차폐해석에 필요한 48핵종 자료를 미국의 최신 평가핵자료집인 ENDF/B-VI.3로부터 선정하여 NJOY94.105 코드를 이용하여 생산하였다. 차폐체의 주 재료로 사용되고 있는 철, 크롬, 니켈 자료는 ENDF/B-VI에서는 동위원소에 따른 평가자료가 주어져 있으므로 라이브러리 역시 동위원소별로 생산되었다. 몰리브덴(Mo)자료는 ENDF/B-VI자료에 문제가 있어 일본의 JENDL-3.2로부터 생산되었다. 경수, 중수 및 흑연 자료는 자유기체(free gas) 또는 열중성자 산란법칙 자료를 모두 이용할 수 있다. 온도는 300, 600, 900, 1500, 2000 그리고 2500 K에서 자기차폐인자 계산을 위한 배경단면적은 핵종에 따라 6~8개 자료로 생산되었다. 수소, 중수소 및 흑연은 열중성자 산란자료가 있는 온도에서 무한회석 단면적자료만을 생산하였다. 산란 매트릭스의 Legendre order는 P_5 까지로 하였다.

2-2. 에너지 군 구조 및 가중함수

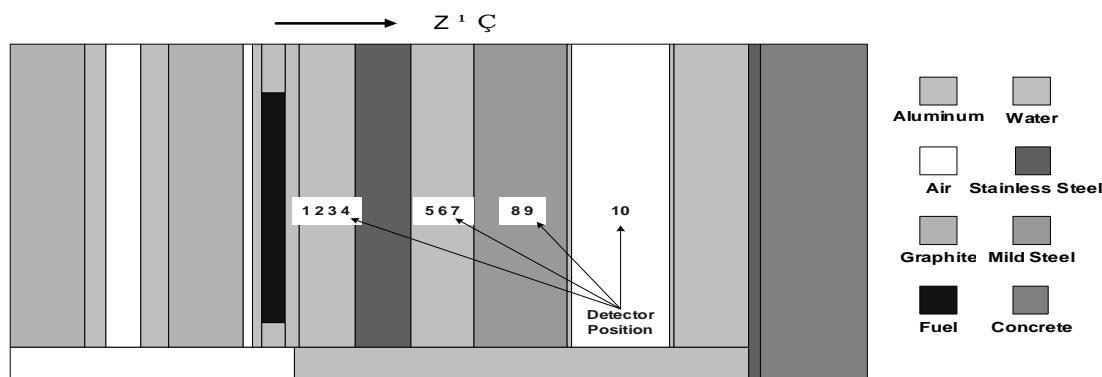
중성자 군구조는 차폐해석에서 관심있는 고속중성자 수송에 적합한 VITAMIN-J의 175군구조를 선택하였다. 열중성자 산란매트릭스 upscattering의 상한 에너지는 5.043eV까지로 하였다. 감마선 또한 VITAMIN-J의 42군 구조를 선택하였으며, 고 에너지 중성자 포획에 따른 감마선의 수송을 위해 30MeV까지 에너지 상한을 확장하였다. 중성자 군정수를 위한 가중함수는 열중성자 영역에서의 Maxwellian 스펙트럼과 감속영역에서의 1/E 그리고 고에너지 영역에서의 핵분열 스펙트럼 형태를 갖는다. 감마선의 가중함수는 광전자 흡수에너지 영역까지 1/E형태이다.

3. 차폐 벤치마크 실험

차폐 벤치마크를 위한 새로운 전자 데이터 베이스인 SINBAD[2]에는 열중성자로, 고속로 및 핵융합로등 차폐 벤치마크를 위한 여러가지 자료들이 정리되어 있다. 여기서는 그중 ASPIS 시설에서 수행된 5가지 벤치마크 문제를 해석하였다. ASPIS 차폐시설은 영국의 Winfrith에 있는 최대 출력 30kW의 NESTOR 원자로에 설치되어 있다. 이 시설은 180cm x 190cm 사각형면이 NESTOR 원자로 흑연반사체와 접속할 수 있게 되어있는 물로 채워진 강철 탱크를 두꺼운 콘크리트 차폐벽이 둘러싸고 있고, 길이는 390cm이다. 이번에 해석한 벤치마크 실험들은 모두 ASPIS 시설에서 수행된 것으로 경수로 압력용기 모의실험인 PCA-RPLICA, NESDIP2, 철 차폐체 실험인 Winfrith Iron, Winfrith Iron88, 그리고 흑연 벤치마크를 위한 Winfrith Graphite 실험이다. 다음에 간략하게 각각의 실험을 설명하고 실험모델을 그림으로 나타냈다.

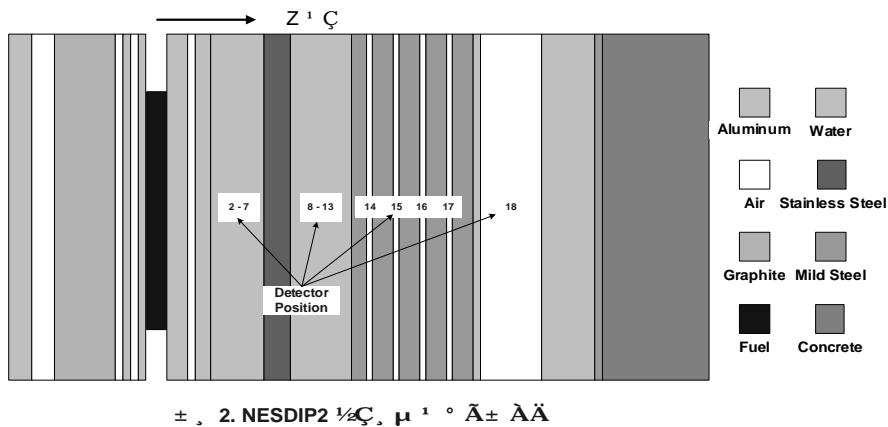
3-1. PCA-RPLICA 벤치마크

미국 ORNL의 PCA(Pool Critical Assembly)에서 LWR Pressure Vessel Surveillance Dosimetry Improvement Program(LWR-PV-SDIP)[3]으로 수행되었던 노심과 열 차폐체, 그리고 열 차폐체와 RPV 사이의 물의 두께를 각각 12와 13cm로 한 소위 12/13 configuration을 그대로 복제한 실험 설비이다. 중성자원(neutron source)은 ASPIS 차폐 설비내 43.91cm 두께의 흑연을 통해 NESTOR 원자로에 의해 조사된 직사각형의 핵분열 판이다. 크기가 63.5cm x 40.2cm x 0.6 cm인 얇은 핵분열판은 U-235가 93.0 w%로 고농축된 알루미늄 합금으로 만들어졌다. 첫번째 12.1cm 두께의 물 다음에는 열 차폐체를 모의한 5.9cm 두께의 스텐레스강이 있고 이어서 12.7cm의 두번째 물 층이 있다. 그 다음에 22.5cm 두께의 연철로된 RPV 모의체가 배치되고 이어서 실제 LWR에서 RPV와 생물 차폐체 사이의 공간을 모의하기 위한 두께 29.58cm의 빈 알미늄 통이 연결되어 있다. 이들 모든 설비는 핵분열판의 중심을 통과하는 수평축(중성자축)에 나란히 배열되어 있다. 이 중성자축을 따라 세가지 문턱에너지 검출기가 10곳에 설치되었다. 이들 검출기는 Rh-103(n,n')Rh-103m, In-115(n,n')In-115m, S-32(n,p)P-32로서 문턱에너지는 각기 0.04, 0.34 그리고 0.95 MeV이다. NESTOR 출력을 고려하여 추정된 핵분열판의 평균 방사선원은 NESTOR Watt당 4.96×10^7 neutron/cm³/sec이다. 그림 1에 실험모델과 검출기 위치를 표시하였다.



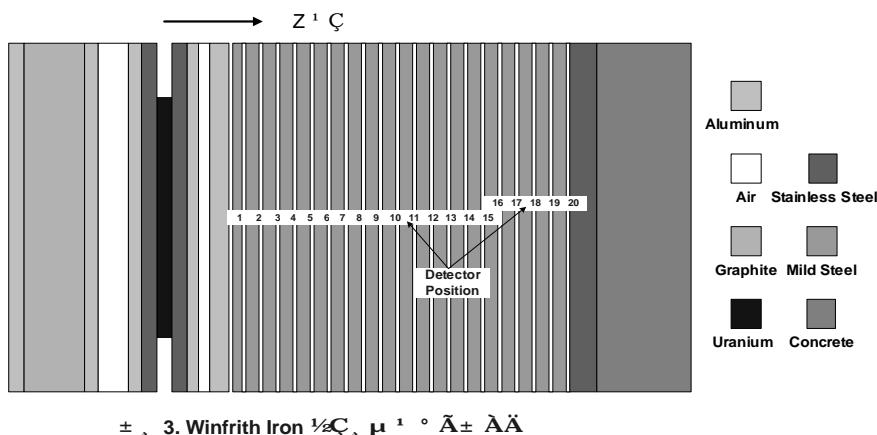
3-2. NESDIP2 벤치마크

유효반경 56.3cm, 두께 2mm의 핵분열판을 선원으로하고, PCA-REPLICA실험과 유사한 12/13 configuration의 물, 열 차폐체, RPV모사체, 콘크리트 등으로 배열하였다. PCA-REPLICA실험과 다른점은 열 차폐체와 이어지는 물 두께가 각각 6.3cm와 13.2cm이고 다음에 2.5cm두께의 스테인레스강과 5.08cm 두께의 연철판 4개를 차례로 배열한 것이다. 핵분열판 평균 방사선원은 4.38×10^7 neutron/cm³/sec이다. 측정된 검출기는 위의 PCA-REPLICA와 같고 그림 2에 실험모델과 검출기 위치를 나타냈다.



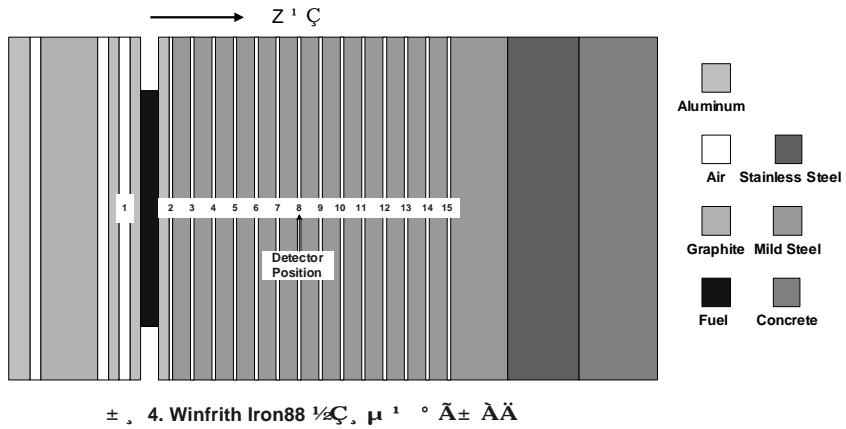
3-3. Winfrith Iron 벤치마크

원자력 시설의 구조재와 차폐체로 쓰이는 철 자료의 벤치마크를 위한 실험으로, 선원으로 천연우라늄이 이용되었으며, 선원에 이어 10.16cm의 철판과 연철강 차폐체가 놓이게 되는데, 차폐체는 24개의 183cm x 191cm x 5.08cm 연철강판이 배열되고 각 강판 사이에는 0.635cm의 공기 틈이 있다. 핵분열판은 총 364개의 5.08cm x 5.08cm x 0.318 cm천연우라늄 plate가 이용되었고 디스크 모양으로 배치되었으며, 선원은 5.46×10^7 neutron/cm³/sec이다. 검출기는 연철강 차폐체 사이사이의 공간 총 16곳에 설치되어 반응률이 측정되었다. 그림 3에 실험모델 및 검출기 위치를 표시하였다.



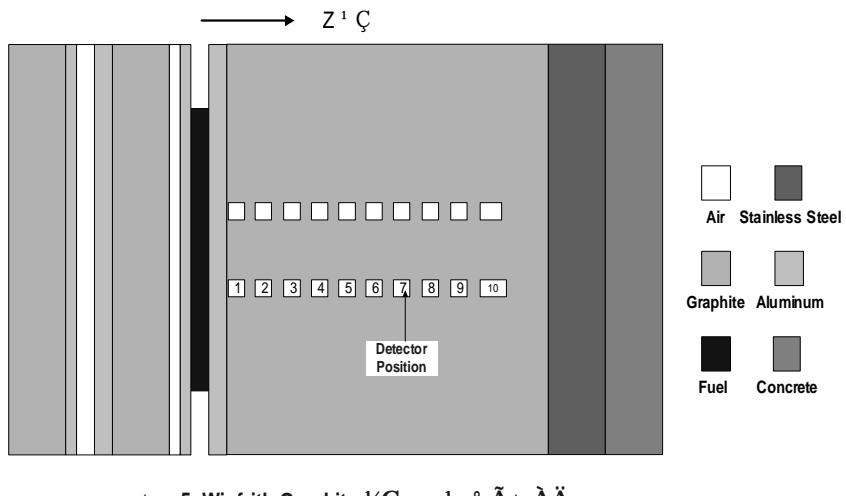
3-4. Winfrith Iron88 벤치마크

선원은 NESDIP2 실험에서 사용한 것과 동일하고, 4.38×10^7 neutron/cm³/sec이다. 선원에 이어 13개의 180cm x 190cm x 5.1cm 연철강판과 평균 0.74cm의 공기 틈이 있게 배치되고, 그 뒤에 차폐를 위해 20.32cm의 연철판과 22.41cm의 스텐레스강이 배치되어 수행된 실험이다. 위의 검출기외에 문턱에너지가 1.9 MeV인 Al-27(n,a)Na-24 반응률도 측정되었으며, 그림 4에 실험 모델 및 검출기 위치를 표시하였다.



3-5. Winfrith Graphite 벤치마크

원자로 감속재나 반사체로 쓰이는 흑연의 벤치마크를 위한 실험으로 선원은 PCA-REPLICA 실험에서 사용되었던 것과 동일하고, $4.96 \times 10^7 \text{ neutron/cm}^3/\text{sec}$ 이다. 흑연 총 두께가 177.32cm이며, 밀도는 1.61g/cm^3 이며 검출기는 위의 Iron88과 같다. 그럼 5에 실험모델과 검출기 위치를 표시하였다.



4. 수송계산

5가지 각각의 벤치마크 실험에 대한 중성자 수송계산을 위해 TRANSX/DANTSYS[4]를 이용하였다. 먼저 생산된 175군의 MATXS형 라이브러리와 TRANSX코드를 이용하여 영역별 거시 단면적을 생산하고 이를 사용하여 1차원 수송계산을 수행하였다. 여기서 얻어진 175군의 영역별 중성자속을 가중함수로 2차원 계산을 위한 영역별 47군의 거시 단면적 자료를 생산하였다. 이를 이용하여 차폐해석에 널리 이용되고 있는 3-D-equivalent flux synthesis방법으로 중성자속을 구하였다. 이 방법은 1차원과 2차원 중성자속으로부터 3차원 계산과 유사한 값을 얻기 위한 방법이다. 즉 $\Phi(x,y,z) = \Phi(x,z) \times \Phi(y,z) \times \Phi(z)$ 으로 1차원 계산인 $\Phi(z)$ 계산은 같은 2차원 $\Phi(y,z)$ 계산에서 Y의 값을 1.0cm로하고 양쪽에 반사경계조건을 설정하여 구함으로써 1혹은 2차원 코드에서 사용하는 서로다른 S_N 값등으로부터의 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 모든 계산에서 $P_3, S_8, 10^{-3}$ 그리고 mesh간격은 1cm를 넘지 않도록 하였다. Winfrith Iron 벤치마크 해석에는 2차원 R-Z 계산이 이용되었다. 한편 검출기 선량 반응률 계산을 위하여 Rh-103(n,n'), In-115(n,n'), S-32(n,p) 및 Al-27(n,a)의 단면적 자료는 IRDF-90 Version 2자료를 이용하였다. 이들 문턱 선량 반응률 단면적 자료 역시 175군 자료로부터 위의 1차원 계산에서 얻어진 검출기 위치의 영역별 중성자속을 가중함수로 선택하여 47군 자료를 생산하였다.

5. 결과 및 분석

각각의 벤치마크 실험에 대해 3-D-equivalent flux synthesis방법 혹은 R-Z 수송계산으로부터 얻은 중성자 속과 각각의 선량 단면적을 이용하여 반응률을 계산하고 실험값과 비교하여 표 1 ~ 표 5에 정리하였다. PCA-REPLICA 실험의 선량 반응률은 차폐체 앞뒤의 물 위치에서는 Rh-103반응률만 측정되었는데 계산결과는 실험값과 약 10%내의 차이를 보이고 있다. RPV의 T/4와 3T/4 위치에서는 상대적으로 문턱에너지가 낮은 Rh-103 선량 반응률은 실험값에 비해 약 20% 높게 계산되었다. In-115와 S-32 반응률은 T/4위치에서는 각각 17%, 7% 크게 계산되었으나 3T/4에서는 실험값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Cavity에서 S-32 계산결과는 실험값에 비해 14% 정도 크게 계산되었고, Rh-103과 In-115 반응률은 실험값과 잘 일치하였다. 유사한 실험인 NESDIP2 해석 결과는 표 2에 정리하였는데 Cavity에서 Rh-103과 In-115 계산값이 실험값에 비해 14% 정도 낮은 것을 제외하면 전체적으로 10%내의 차이를 보이고 있다. 경수로 압력용기를 모의한 PCA-REPLICA 와 NESDIP2 실험 해석결과 실험오차 등을 고려하면 전체적으로 만족할만하다. 철자료 벤치마크를 위한 Winfrith Iron과 Iron88 실험 결과는 표 3, 4에 정리하였는데 Rh-103 반응률은 철의 두께가 두꺼워질수록 실험값에 비해 낮게 계산되는 경향을 보이고 있다. 즉 표 3에서 철 두께 약 50cm 그리고 표 4에서 철 두께 약 30cm 까지는 계산값이 대체로 실험값에 비해 높으나 그 이후에는 급격히 실험값에 비해 낮게 계산되고 있다. In-115 반응률은 전체적으로 실험값에 비해 낮게 계산되고 Rh-103과 유사한 경향을 보이고 있다. 문턱에너지가 상대적으로 높은(약 1 MeV) S-32 반응률은 모든 위치에서 낮게 계산되고 있으나 철의 두께에 따라서는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 표 5에는 흑연자료 검증을 위한 Winfrith Graphite 실험 해석 결과를 정리하였는데, 전체적으로 계산결과가 실험값과 큰 차이를 보이고 있지 않다. Rh-103과 In-115 반응률은 흑연의 두께가 두꺼워질수록 계산값이 실험치에 비해 낮아지고 있음을 알 수 있다. 문턱에너지가 1.9 MeV인 Al-27 반응률은 Iron88 과 Graphite 벤치마크 모두에서 측정치에 비해 약 10% 이상 크게 계산되었다.

6. 맷음말

MATXS형의 차폐 해석용 완성된 라이브러리를 생산중에 있으며, 예비로 생산된 라이브러리를 이용하여 5가지 벤치마크 문제를 해석하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 벤치마크 문제는 경수로 압력용기 모의 실험과 철 및 흑연 핵자료의 검증 실험이다. 앞으로 라이브러리에 좀더 많은 핵종자료를 추가하고, 몇가지 벤치마크 해석을 통하여 검증할 계획이다. 개발될 라이브러리가 국내에서 여러가지 차폐해석에 이용될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력 개발 중장기 과제 중 “핵자료 체제구축” 과제의 일환으로 수행된 것이다.

참고문헌

1. R. E. MacFarlane, D.W. Muir,"The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91," LA-12740-M (Oct. 1994).
2. H.T. Hunter, D.T. Ingersoll, R.W. Roussin, C.O. Slater, I. Kodeli and E. Sartori: Shielding Integral Benchmark Archive and Database, Proceedings of OECD/NEA Second Specialists' Meeting on "Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities (SATIF-2)", CERN, Geneva (October 1995).
3. W.N. McElroy Editor, LWR PRESSURE VESSEL SURVEILLANCE DOSIMETRY IMPROVEMENT PROGRAM: PCA EXPERIMENTS AND BLIND TEST, HEDL-TME 80-87, NUREG/CR-1861 (1981).
4. R.E. Alcouffe, R.S. Baker, F.W. Brinkley, D.R. Marr, R.D. O'Dell, and W.F. Walters, "DANTSYS : A Diffusion Accelerated Neutral Particle Transport Code System," LA-12969-M (June 1995).

표 1. PCA-REPLICA 실험에서의 선량 반응률 비교(C/E)

	검출기 위치	거리 (cm)*	$^{103}\text{Rh}(\text{n},\text{n}')$	$^{115}\text{In}(\text{n},\text{n}')$	$^{32}\text{S}(\text{n},\text{p})$
12 cm Water Gap	1	1.91	1.11		
	2	7.41	0.97		
	3	12.41	1.01		
	4	14.01	0.98		
13 cm Water Gap	5	19.91	1.09		
	6	25.41	1.15		
	7	30.41	1.03		
T/4	8	39.01	1.20	1.17	1.07
3T/4	9	49.61	1.18	1.01	1.01
Void Box	10	58.61	0.96	0.95	1.14

* 선원으로부터의 거리

표 2. NESDIP2 실험에서의 선량 반응률 비교(C/E)

	검출기 위치	거리 (cm)*	$^{103}\text{Rh}(\text{n},\text{n}')$	$^{115}\text{In}(\text{n},\text{n}')$	$^{32}\text{S}(\text{n},\text{p})$
12 cm Water Gap	2	3.06	0.95		
	3	5.15	0.91		
	4	9.05	0.87		
	5	10.15	0.90		
	6	14.05	0.89		
	7	15.6	0.92		
	8	22.0	0.99		
13 cm Water Gap	9	24.65	0.88		
	10	30.41	0.95		
	11	27.45	0.91		
	12	32.45	0.96		
	13	35.2	0.96		
	14	37.7	1.00	1.00	0.94
RPV	15	43.38	1.06	0.98	0.97
	16	49.06	1.11	1.00	1.02
	17	54.74	1.12	0.98	1.01
Cavity	18	60.42	0.86	0.86	1.05

표 3. Winfrith Iron 실험에서의 선량 반응률 비교(C/E)

검출기 위치	거리 (cm)*	$^{103}\text{Rh}(\text{n},\text{n}')$	$^{115}\text{In}(\text{n},\text{n}')$	$^{32}\text{S}(\text{n},\text{p})$
1	5.72	1.11	0.97	0.83
2	11.43	1.14	0.97	0.86
3	17.15	1.17	0.93	0.89
4	22.86	1.15	0.94	0.88
5	28.58	1.18	0.93	0.88
6	34.29	1.17	0.92	0.94
7			0.91	
8	40.01	1.09	0.71	0.87
9	45.72	1.01	0.64	0.93
10	51.44	0.96	0.62	0.86
11	57.15	0.87	0.55	0.91
12	62.87	0.84		0.81
13	68.58	0.74		
14				
15	74.3	0.59		
16	85.73	0.54		
17	91.44			
18	102.87	0.37		
19				
20	114.3	0.29		

표 4. Winfrith Iron88 실험에서의 선량 반응률 비교(C/E)

검출기 위치	거리 (cm)*	$^{103}\text{Rh}(\text{n},\text{n}')$	$^{115}\text{In}(\text{n},\text{n}')$	$^{32}\text{S}(\text{n},\text{p})$	$^{27}\text{Al}(\text{n},\alpha)$
2	0.0	0.96	0.91	0.84	
3	5.10	0.98	0.81	0.76	1.05
4	10.22	1.03	0.82	0.79	
5	15.34	1.02	0.80	0.80	1.12
6	20.44	1.05	0.79	0.81	1.18
7	25.64	1.04	0.74	0.80	1.22
8	30.79	1.02	0.69	0.82	
9	35.99	0.98	0.61	0.76	
10	41.19	0.94	0.60	0.85	
11	46.44	0.88	0.53	0.88	
12	51.62	0.83		0.83	
13	56.69	0.79		0.82	
14	61.81	0.74		0.89	
15	66.99			0.81	

표 5. Winfrith Graphite 실험에서의 선량 반응률 비교(C/E)

검출기 위치	거리 (cm)*	$^{103}\text{Rh}(\text{n},\text{n}')$	$^{115}\text{In}(\text{n},\text{n}')$	$^{32}\text{S}(\text{n},\text{p})$	$^{27}\text{Al}(\text{n},\alpha)$
1	0	1.17	1.13	1.09	1.39
2	5	1.03	0.97	0.88	0.99
3	10	1.00	0.93	0.92	1.12
4	15	0.99	0.95	0.95	1.14
5	20	0.99	0.96	1.02	1.29
6	30	0.94	0.95	1.02	1.19
7	40	0.90	0.90	0.97	
8	50	0.87	0.93	1.09	
9	60	0.82	0.83	1.02	
10	70	0.66	0.78	1.05	