

**SMART 노심 주변 모델에 대한 방사선차폐설계 예비 평가**

**Preliminary Evaluation of Radiation Shielding Design for Near-Core Model of SMART**

김교륜, 김하용, 지성균, 장문희  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

Chang M. Kang  
Advanced Energy Technology Inc.  
10050 N. Wolfe Rd, SW1-274, Cupertino, CA, USA

**요약**

본 연구에서는 SMART의 노심 주변의 차폐 설계를 위하여 DORT 코드를 이용한 예비 차폐 평가를 수행하였다. 차폐 해석 결과에 의하면 60년동안 이용률이 90%인 SMART에서의 원자로 압력 용기에서의 중성자조사량 및 dpa는 원자로 압력용기 하단에서  $1.64 \times 10^{17}$  n/cm<sup>2</sup> 과  $2.71 \times 10^{-4}$  이고, 측면에서는  $6.71 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>과  $9.48 \times 10^{-5}$ 으로 나타났다. 이는 10CFR50.61에서 규정하고 있는 중성자 조사량 요건인  $1.0 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>과 dpa 차폐설계 기준인 2.4 보다 작은 값으로 SMART의 원자로 압력 용기는 수명 기간 동안 건전한 것으로 평가되었다.

**Abstract**

This paper describes preliminary evaluations of SMART shielding design near the reactor core by using the DORT two-dimensional discrete ordinates transport code. The results indicate that maximum neutron fluence and dpa at the bottom of reactor vessel are  $1.64 \times 10^{17}$  n/cm<sup>2</sup> and  $2.71 \times 10^{-4}$  and those on the radial surface of reactor vessel are  $6.71 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup> and  $9.48 \times 10^{-5}$  respectively. These results meet the requirements specified in 10CFR50.61 and established in the shielding design criteria, that are  $1.0 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> for the neutron fluence and 2.4 for the dpa. Therefore the integrity of SMART reactor vessel is confirmed during the lifetime of reactor.

**1. 서론**

중소형 원자로는 세계적으로 발전용, 난방용 및 담수화용으로 지역적 특수성을 고려하여 실용

화를 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 한국원자력연구소는 계통의 단순화, 안전 여유도 증가, 중대 사고 발생 확률의 감소와 사고 심각성의 최소화를 목표로 열출력이 330 MWt인 일체형 원자로인 SMART를 개발하고 있다.

일반적으로 원자로 설계에서는 방사선에 대한 작업 종사자의 안전성과 기기 및 구조물의 건전성을 확인하는 것이 절대적으로 필요하다. 따라서 본 연구에서는 SMART의 개념 설계 단계에서 기하 구조 및 제원이 제시된 원자로 집합체에 대하여 중성자 선속, 방사선량을, 중성자 조사량, 그리고 dpa (displacement per atom)를 평가하여 원자로 구조물에 대한 방사선 손상의 제한치를 만족하는지 확인한다.

본 해석의 대상인 SMART의 원자로 집합체에 대한 차폐 설계 구조는 그림 1과 같으며, 2차원 각분할법 수송 코드인 DORT<sup>1</sup>를 이용하여 SMART의 원자로 집합체의 노심주변 모델에 대해 차폐 해석을 수행한다.

## 2. 차폐 설계 요건

원자로의 차폐설계는 운전중 방사선에 대한 인명의 보호, 중성자로 인한 원자로 장비 및 구조물의 파손, 그리고 냉각수 및 공기의 활성화로 인한 2차방사원의 생성을 감소하는데 목적이 있다. SMART의 차폐설계는 기본적으로 국제방사선 방호위원회가 1990년에 개정한 ICRP-60<sup>2</sup>의 ALARA (As Low As Is Reasonably Achievable) 개념에 준한다. 원자로 압력용기 내의 중성자 조사량은 10 CFR 50.61<sup>3</sup>에 의거 원자로의 수명기간동안  $1.0 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>로 제한한다.

중성자선량에 대한 노출은 원자로구조물에 손상을 야기하고 재료의 연성의 감소를 초래한다. ASME의 Boiler and Pressure Vessel Code에서 요구하는 재료의 연성을 보장하기 위하여 하중 지지구조물에 대하여는 중성자손상의 한계를 Residual Total Elongation (RTE)의 10%, 비하중 지지구조물에 대하여는 RTE의 5% 이상으로 한다. 이에 의해 철구조물인 원자로 압력용기의 dpa는 2.4로 제한한다.

## 3. 분석 방법

SMART의 원자로 집합체에 대한 방사선 차폐 해석을 수행하기 위하여 DORT 전산코드를 사용하였다. 2차원 각분할법 방사선 수송 코드인 DORT는 방사선 차폐 설계에 주로 이용되는 전산 코드로써 DORT 코드를 이용하기 위해서는 노심 선원항 자료와 GIP<sup>1</sup>에 의한 거시 핵단면적 자료가 필요하다. 따라서 원자로 압력 용기 내부에서의 중성자 선속 및 선량을 평가하기 위하여 GIP 및 DORT 코드를 이용하였다.

### 3.1 선원항 평가

330 MWt의 SMART 노심에 대하여 MASTER 코드<sup>4</sup>에 의해 평가한 반경 방향 및 축방향 출력 분포를 이용하여 중성자 수송 계산에 필요한 선원항을 구하였다. 반경 방향 출력 분포는 표 1과 같이 18 격자로 나타나 있고 축방향 출력 분포는 표 2와 같이 10 격자로 나타나 있다<sup>5</sup>. 반경 방향 출력 분포는 노심 중간 위치에서 가장 보수적으로 나타난 값이다. 이런 출력 분포로부터 내삽법을 이용하여 반경 방향 미세 격자 간격 (1.5 cm) 및 축방향 미세 격자 간격 (2.0 cm)에 대한 2차원 출력 분포(61x100 미세 격자 구간)를 생산하였다.

### 3.2 구조 물질 및 거시 단면적 자료

노심 및 노심 외부의 구성물질에 대한 수밀도는 표 3에 나타내었다. 거시 핵단면적 자료는 GIP 코드를 이용하여 중성자 22군과 감마 18군으로 구성된 40군의 DLC-23<sup>6</sup>를 사용하였다.

### 3.3 모델링

SMART 원자로 집합체의 노심 주변 구조(near-core model)를 모델링하였다. Near-Core 모델은 축방향으로 원자로 압력용기 하단( $z=-213.0\text{cm}$ )으로부터 노심 부분을 거쳐 노심 수집 헤더 상부( $z=182.0\text{cm}$ )까지 포함한다.

SMART의 원자로 집합체 내부의 중성자 선속 및 선량을 평가하기 위하여 반경 방향으로는 노심, 노심 주변 구조물, 노심 원통, 냉각재 및 6 겹의 측면 차폐 스크린, 원자로 압력용기 내부 피복재 및 원자로 압력 용기가 모델링되었으며, 축방향 하단으로는 노심, 핵연료 집합체 하중단 부품, 노심 지지판, 냉각재 및 3겹의 하단 차폐 스크린, 원자로 압력 용기 내부 피복재 및 원자로 압력 용기가 모델링되었다. 그리고, 축방향 상단으로는 노심, 핵연료 집합체 상중단 부품, 차폐관 집합체 하단판, 노심 수집 헤더 등이 모델링되었다. 이러한 구조물들을 반경 방향과 축방향에 대해  $181 \times 309$  미세 격자 구간으로 나누어 R-Z 기하구조로 묘사하였다. 이때 노심 축에 대하여 반사체 경계조건을 적용하였고 나머지 경계 면에 대하여는 보이드(void) 경계 조건을 적용하였다.

### 3.4 DORT 평가

노심 평균 선형 출력 밀도  $62.599 \text{ kW/t}$ 와 핵분열당 중성자수 2.6445를 이용하여 체적 출력 밀도  $5.167 \times 10^{12} \text{ n/cm}^3\text{s}$ 를 구할 수 있다. 이로부터 Watt 핵분열 스펙트럼<sup>7</sup>을 이용하여 산출한 에너지 스펙트럼은 표 4에 나타내었다.

압력용기 중성자조사량 평가를 위한 DORT에서  $P_3$ 차원 산란 및  $S_3$ 차원 각분할 방법을 사용하였는다.

선속으로부터 dpa를 구하기 위하여 다음 사항이 고려되었다. 격자 결함 cascade는 중성자 반응에 의한 최초의 반조(recoil)핵이 결정격자내에서 충돌에 의해 에너지가 감소되면서 일어난다. 이

때 이탈원자의 수는 일어날 수 있는 전 손상에너지  $E_a$ 와 하나의 원자를 그의 격자위치에서 이탈 시키는데 필요한 에너지  $E_d$ 에 의해 결정된다. 일반적으로 dpa의 단면적은 Norgett-Robinson-Torrens (NRT) 모델<sup>8</sup>의 개량형인 Kinchin-Pease 식, 즉

$$\sigma_{\text{dpa}} = \kappa \frac{E_a}{2E_d}$$

으로부터 구할 수 있다. 여기서  $\kappa$ 는 이탈효율로서 0.8이 이고  $E_d$ 는 원소별 dpa 평가용 변이 에너지 값<sup>9</sup>으로 표 5에 나타내었으며 dpa 단면적 계산을 위한 손상 에너지 생성 단면적<sup>10</sup>은 표 6에 나타내었다. 따라서, dpa는

$$\text{dpa} = \sigma_{\text{dpa}} \phi t$$

로 나타낼 수 있으며, 여기서  $\phi$ 는 DORT 계산에 의한 선속이고,  $t$ 는 이용률 90%의 수명 기간 60년에 해당하는  $1.703 \times 10^9$  sec이다.

#### 4. 결과 및 토의

Near-Core 모델에 대한 DORT 계산 결과로부터 중성자 선량을 분포 및 감마 선량을 분포, 그리고 전체 선량을 분포를 그림 2, 그림 3, 그리고 그림 4에 각각 제시하였다. 한편, 속중성자 및 열중성자 선속 분포는 그림 5 및 6에 제시하였다. 그리고 속중성자에 의한 조사량 분포는 그림 7에 제시하였다.

원자로 압력용기 하단에서의 중성자, 감마 및 전체 선량은 각각  $3.12 \times 10^6$ ,  $5.73 \times 10^5$  및  $3.70 \times 10^6$  mrem/hr로 나타났다. 노심 중간 높이에서의 전체 선량은 반경 40 cm 위치에서  $2.29 \times 10^{13}$  mrem/hr로부터 원자로압력용기 내부 및 외부에서의  $4.52 \times 10^6$  mrem/hr 및  $3.60 \times 10^5$  mrem/hr로 낮아진다. 또한 속중성자 선속은 원자로 압력용기 하단에서  $6.68 \times 10^6$  n/cm<sup>2</sup>s로 나타났고 노심 중간 높이에서의 속중성자 선속은 반경 40 cm 위치에서  $1.03 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s로부터 원자로 압력용기 내부 및 외부에서의  $8.75 \times 10^6$  n/cm<sup>2</sup>s 및  $5.80 \times 10^5$  n/cm<sup>2</sup>s로 낮아진다. 이러한 중성자 선속 및 선량 평가 자료는 앞으로 원자로 압력용기 외부에 대한 설계가 진행되면 원자로 압력 용기 외부의 구조물에 대한 중성자 조사량 및 방사선 선량등의 평가와 원자로 격실내부 및 외부에서의 방사선 선량을 평가에 이용된다.

표 7에는 SMART를 90%의 이용률로 60년간 이용하였을 때의 최대 중성자조사량과 dpa를 나타내었다. SMART에서의 원자로 압력 용기에 대한 최대 중성자조사량은 원자로 압력용기 하단에서  $1.64 \times 10^{17}$  n/cm<sup>2</sup>이고, 측면에서는  $6.71 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>으로 나타났다. 이는 10 CFR 50.61의 제한 요건인  $1.0 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> 보다 작은 값으로 SMART의 원자로 압력 용기는 수명 기간 동안 건전한 것으로 판단된다. 또한 dpa는 3절에서 제시한 원자로 압력용기에 대한 dpa 제한치 2.4 보다도

훨씬 낮은 수치를 나타내었다. 따라서, SMART의 원자로 압력용기는 중성자 조사량 및 dpa 평가에 의해 60년의 수명 후에도 건전한 것으로 평가되었다.

## 5. 결론

본 연구에서 수행한 차폐 해석 결과에 의하면 60년동안 이용률이 90%인 SMART에서의 원자로 압력 용기에 대한 최대 중성자조사량은 원자로 압력용기 하단에서  $1.64 \times 10^{17}$  n/cm<sup>2</sup>이고, 측면에서는  $6.71 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>으로 나타났다. 또한 dpa는 원자로 압력 용기 하단 및 측면에서의 최대 값이 각각  $2.71 \times 10^4$  및  $9.48 \times 10^5$ 으로 평가되었다. 이는 10 CFR 50.61의 제한 요건인  $1.0 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> 와 원자로 압력용기에 대한 기준치 2.4 보다 작은 값으로 SMART의 원자로 압력 용기는 수명 기간 동안 건전한 것으로 판단된다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

1. RSICC Computer Code Collection-DOORS3.2, CCC-650, ORNL, April, 1998.
2. "Recommendation of the International Commission on Radiological Protection", ICRP-60, Pergamon Press, 1991
3. US NRC, Code of Federal Regulation, Fracture Toughness Requirements for Light Water Reactor Vessel, 10 CFR 50.61.
4. 이 창호 외, MASTER 2.0 USERS MANUAL, KAERI/UM-3/98, KAERI, Mar, 1998.
5. 이 정찬, "SMART 원자로 기본 핵설계 자료 생산," SMART-CA-CA110-06, Rev.1, 한국원자력연구소, 1998.11.10.
6. RSIC Computer Code Collection-CASK, DLC-23, ORNL, Sep. 4, 1978.
7. R. G. Jaeger, "Engineering Compendium on Radiation Shielding," p.68, Vol. I, Springer-Verlag, Berlin, 1968.
8. M. J. Norgett, M. T. Robinson and I. M. Torrens, Nucl. Eng. Design, 33, 50, 1975.
9. L. R. Greenwood and R. K. Smither, "Displacement Damage Calculations with ENDF/B-V," Proceedings of the Advisory Group Meeting on Nuclear Data for Radiation Damage Assessment and Reactor Safety Aspects, 12-16 October 1981, IAEA, Vienna, Austria (1981).
10. 길 충섭, "dpa 단면적 계산을 위한 손상에너지 생성 단면적 자료," e-mail 통보, 1999-03-09.

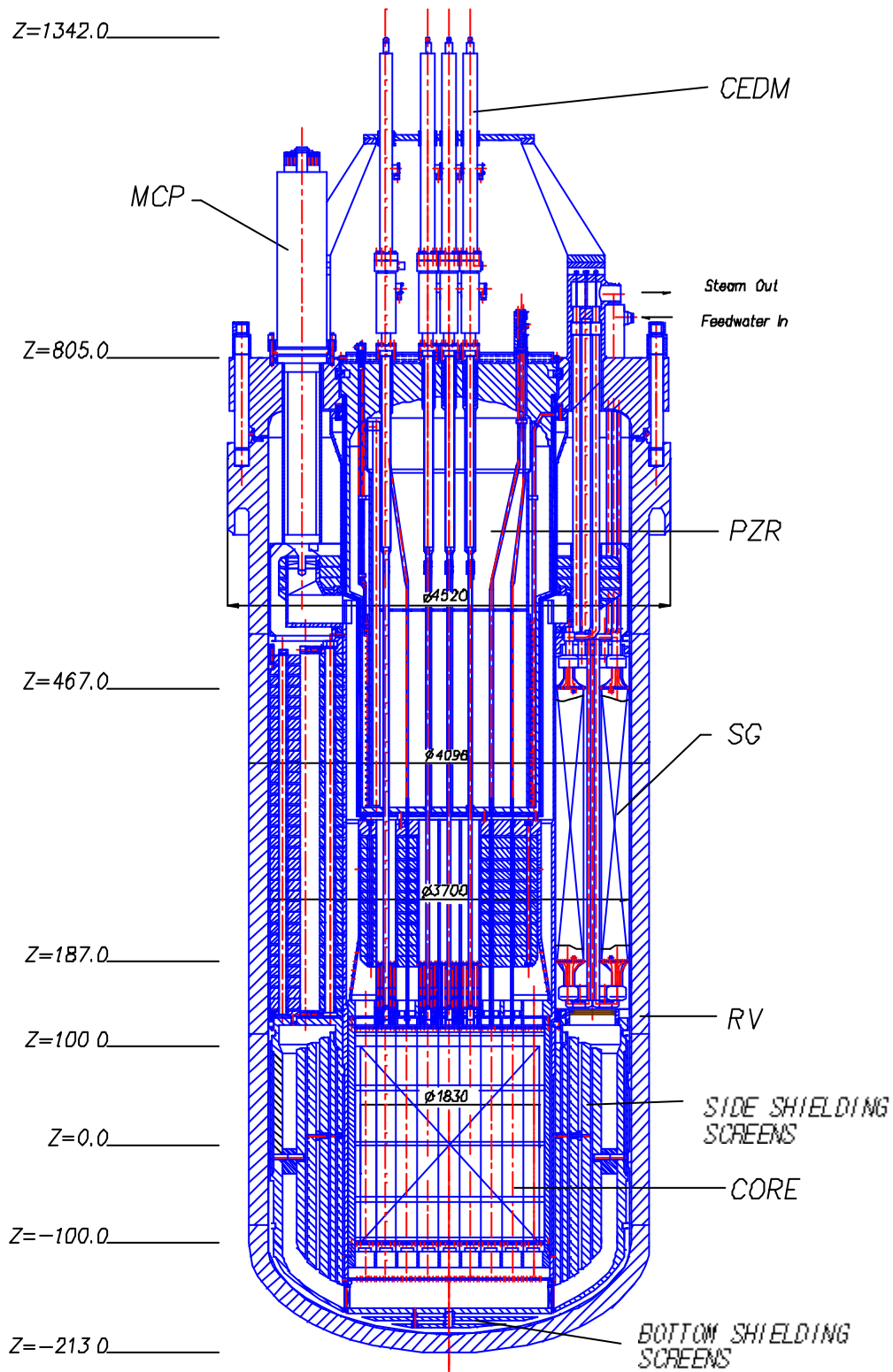


그림 1. SMART의 원자로 집합체

표 1. MASTER에 의한 노심 반경 출력 분포

No.	반경 방향 거리 [cm]	정규화 출력 분포
1	2,688	0,5883
2	8,064	0,6234
3	13,440	0,8327
4	18,816	0,9025
5	24,192	0,9591
6	29,568	1,0088
7	34,944	1,1050
8	40,320	1,1502
9	45,696	1,1872
10	51,072	1,2254
11	55,448	1,3723
12	59,824	1,3433
13	64,200	1,2421
14	69,576	1,0782
15	74,952	0,7979
16	80,328	0,6203
17	85,704	0,4629
18	91,080	0,3196

표 2. MASTER에 의한 축 방향 출력 분포

격자	축 방향 높이 (cm)	격자 간격 출력	최대 출력	최대 봉출력
11	220,0	0,2399	0,3633	0,3633
10	200,0	0,4513	0,6818	0,6818
9	180,0	0,6672	1,0115	1,0115
8	160,0	0,8819	1,3455	1,3455
7	140,0	1,1017	1,6943	1,6943
6	120,0	1,3259	2,0473	2,0473
5	100,0	1,5557	2,3335	2,3335
4	80,0	1,6059	2,3974	2,3974
3	60,0	1,3557	2,0427	2,0427
2	40,0	0,8148	1,2366	1,2366

표 3. SMART 노심 구성 물질[atoms/barn-cm]

Element	Atomic No. Density
40Zr	3.22E-4
1H	3.00E-2
5B	1.45E-4
6C	3.48E-5
8O	2.81E-2
13Al	8.54E-4
14Si	1.63E-8
24Cr	6.27E-7
25Mn	3.25E-8
26Fe	1.49E-6
28Ni	3.42E-7
50Sn	4.91E-6
92U35	2.95E-4
92U38	5.65E-3

표 4. 중성자 선원 스펙트럼

에너지 군	상한 에너지[eV]	핵분열 스펙트럼 [n/cm <sup>2</sup> -s]
1	1.492e+07	8.11852e+08
2	1.220e+07	4.58136e+09
3	1.000e+06	1.80054e+10
4	8.180e+06	7.27344e+10
5	6.360e+06	1.77072e+11
6	4.960e+06	2.48045e+11
7	4.060e+06	5.49430e+11
8	3.010e+06	4.60691e+11
9	2.460e+06	1.10386e+11
10	2.350e+06	6.15367e+11
11	1.830e+06	1.11864e+12
12	1.110e+06	1.02075e+12
13	5.500e+05	6.93490e+11
14	1.110e+05	8.31576e+10
15	3.350e+03	4.24071e+08
16	5.830e+02	3.08394e+07
17	1.010e+02	2.02823e+06
18	2.900e+01	2.86153e+05
19	1.070e+01	7.00167e+04
20	3.060e+00	9.84212e+03
21	1.120e+00	2.17014e+03
22	4.140e-01	6.26727e+02
	1.000e-02	

표 5. dpa 평가를 위한 원자 변이 에너지<sup>17</sup>



원소	$E_d$ [eV]	원소	$E_d$ [eV]
Be	31	Co	40
C	31	Ni	40
Mg	25	Cu	40
Al	27	Zr	40
Si	25	Nb	40
Ca	40	Mo	60
Ti	40	Ag	60
V	40	Ta	90
Cr	40	W	90
Mn	40	Au	30
Fe	40	Pb	25

표 6. dpa 단면적 계산을 위한  
손상에너지 생성 단면적<sup>78</sup>

Group No.	단면적[eV-barn]		
	Fe	Cr	Mn
1	2.728E+05	2.494E+05	2.538E+05
2	2.396E+05	2.186E+05	2.144E+05
3	2.192E+05	2.064E+05	1.929E+05
4	2.004E+05	1.896E+05	1.736E+05
5	1.781E+05	1.664E+05	1.609E+05
6	1.604E+05	1.533E+05	1.500E+05
7	1.398E+05	1.302E+05	1.400E+05
8	1.264E+05	1.147E+05	1.264E+05
9	1.122E+05	1.062E+05	1.204E+05
10	9.886E+04	9.366E+04	1.100E+05
11	6.727E+04	8.192E+04	8.443E+04
12	4.112E+04	4.899E+04	5.004E+04
13	2.145E+04	2.743E+04	2.561E+04
14	6.616E+03	6.676E+03	1.106E+04
15	3.948E+02	3.875E+02	1.015E+04
16	4.225E+01	2.243E+01	1.374E+03
17	1.905E+01	2.990E+01	1.071E+02
18	3.410E+01	5.782E+01	1.713E+02
19	6.178E+01	1.033E+02	2.932E+02
20	1.097E+02	1.812E+02	5.077E+02
21	1.806E+02	2.991E+02	8.347E+02
22	4.820E+02	7.882E+02	2.195E+03

표 6. dpa 단면적 계산을 위한

손상에너지 생성단면적(계속)

Group No.	단면적[eV-barn]		
	Mo	Ni	Ti
1	2,681E+05	2,880E+05	2,372E+05
2	2,225E+05	2,492E+05	2,131E+05
3	1,995E+05	2,353E+05	1,998E+05
4	1,763E+05	2,196E+05	1,858E+05
5	1,499E+05	1,939E+05	1,718E+05
6	1,289E+05	1,644E+05	1,661E+05
7	1,125E+05	1,381E+05	1,520E+05
8	1,012E+05	1,179E+05	1,404E+05
9	9,587E+04	1,085E+05	1,354E+05
10	8,901E+04	9,271E+04	1,173E+05
11	7,344E+04	8,073E+04	7,746E+04
12	5,556E+04	4,967E+04	4,637E+04
13	2,928E+04	3,266E+04	1,577E+04
14	5,626E+03	1,256E+04	2,264E+04
15	3,829E+02	8,754E+02	6,139E+02
16	2,283E+02	6,594E+01	4,380E+01
17	1,062E+03	4,042E+01	4,194E+01
18	5,598E+01	7,672E+01	7,793E+01
19	1,699E+01	1,362E+02	1,375E+02
20	3,060E+01	2,385E+02	2,404E+02
21	5,240E+01	3,933E+02	3,963E+02
22	1,412E+02	1,036E+03	1,044E+03

표 7. 원자로 압력용기에서의 최대 중성자 조사량 및 dpa

	중성자 조사량 [n/cm <sup>2</sup> ]	dpa
원자로 집합체 하단부	1.64x10 <sup>17</sup>	2.71x10 <sup>-4</sup>
원자로 반경 방향	6.71x10 <sup>16</sup>	9.48x10 <sup>-5</sup>

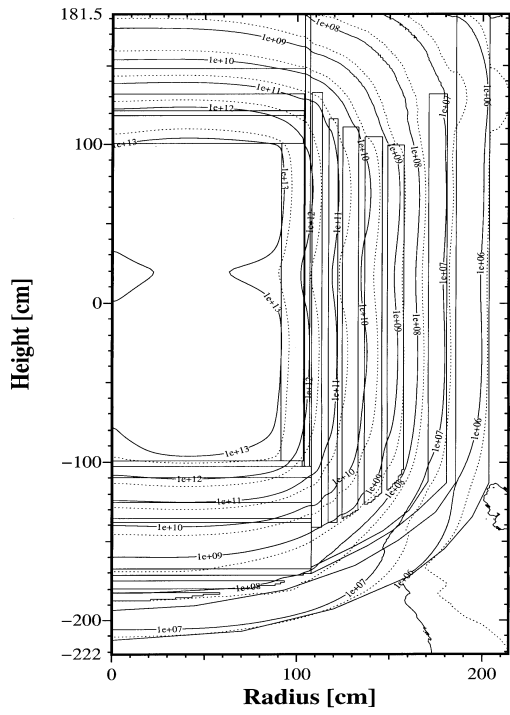


그림 2. 중성자 선량을 분포[mrem/hr]

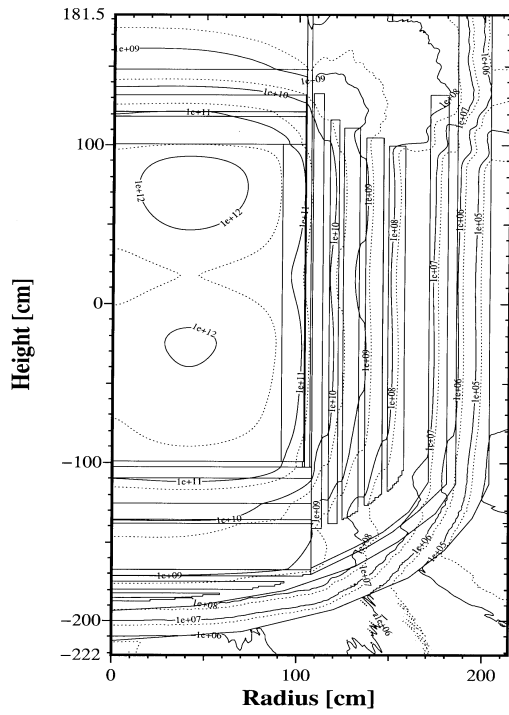


그림 3. 감마 선량을 분포[mrem/hr]

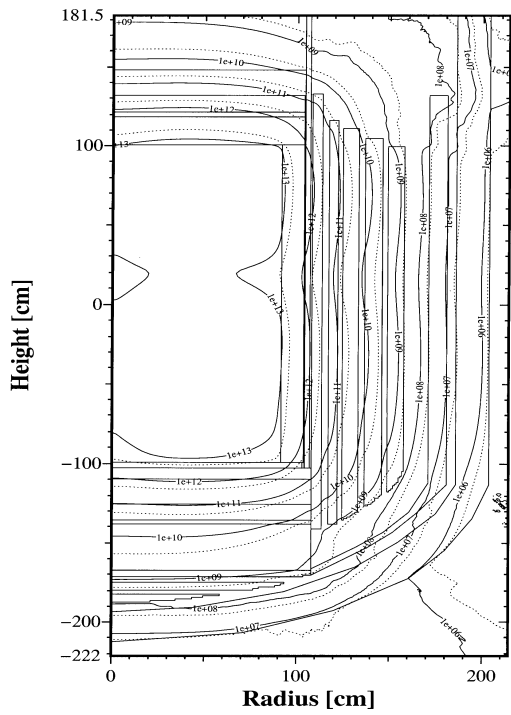


그림 4. 전체 (중성자-감마) 선량을

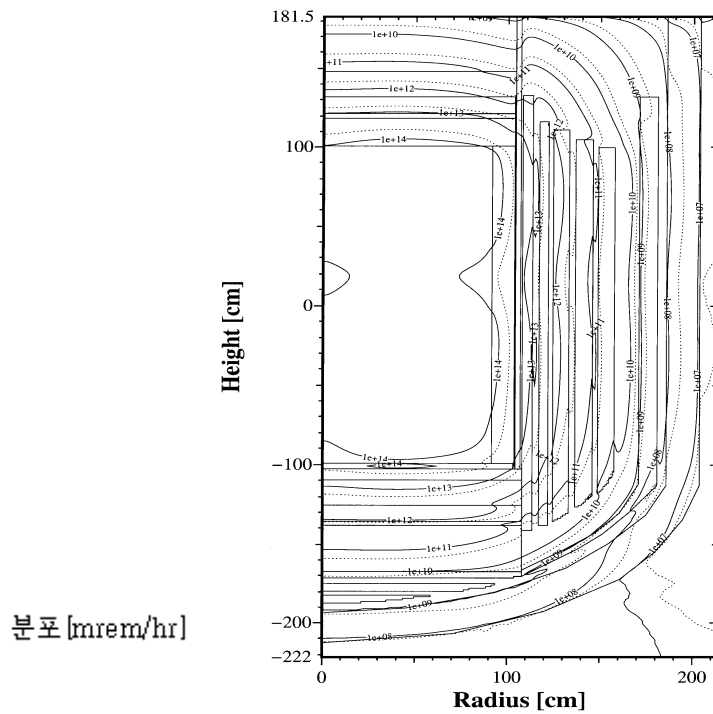


그림 5. 속중성자 선속 분포  $[n/cm^2 s]$

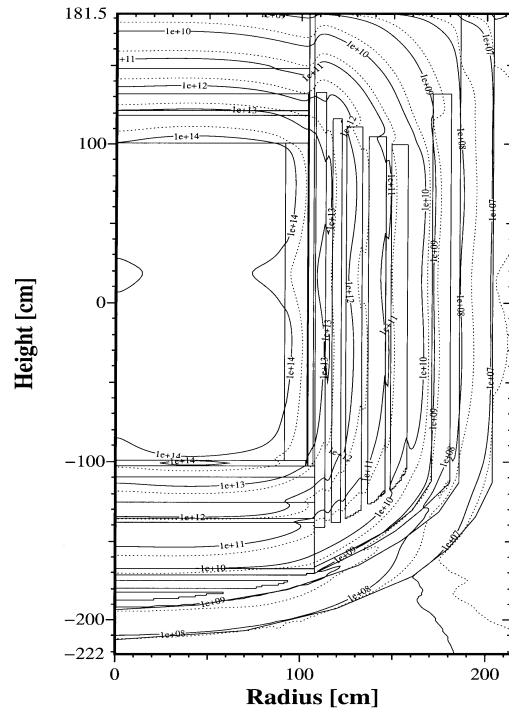


그림 6. 열 중성자 선속 분포[n/cm<sup>2</sup>s]

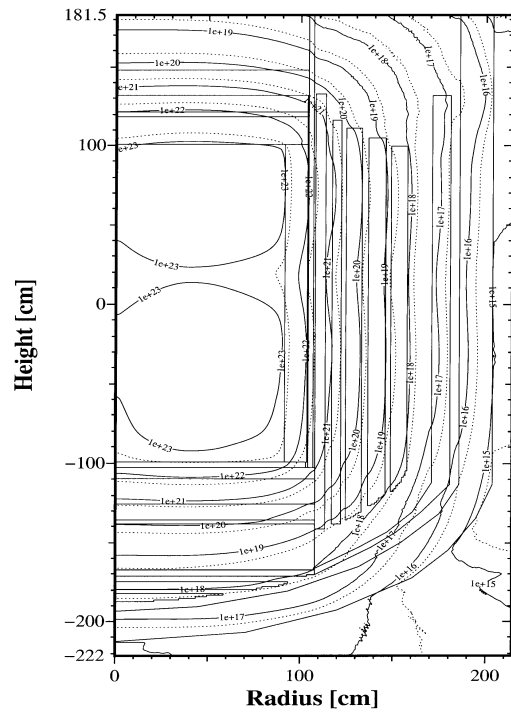


그림 7. 중성자 조사량 분포[n/cm<sup>2</sup>]