

150MWe급 액체금속로에 대한 차폐예비설계 및 설계 평가
Preliminary Shielding Design and Evaluation of a 150MWe Liquid
Metal Reactor

유재운, 김영진
한국원자력연구소

강창무
Advanced Energy Technology Inc.

요약

150MWe급 액체금속로에 대한 차폐예비설계를 수행하였다. 고속중성자 플루언스, DPA, 그리고 2차 방사선원에 대한 잠정적인 차폐설계기준을 설정하였으며 설치가능한 차폐체의 위치 및 재질을 선정하였다. 한국원자력연구소에서 개발한 KAFAX-F22 고속로용 라이브러리를 바탕으로 2차원적 S_N 수송해법에 의한 DORT 코드를 차폐해석에 사용하였으며 전체 노심 외곽 구조물을 R-Z 모델로 근사하여 계산하였다. 차폐설계의 성능을 잠정적으로 설정된 차폐설계 기준과 비교한 결과, Support Barrel 과 Upper Grid Plate, 그리고 다른 노심 구조물에 대한 최대 고속중성자 플루언스와 DPA, IHX내 2차 소듐 방사화량이 차폐설계기준을 만족하였으며, PSDRS의 공기중 방사화량도 10 CFR Part 20에 기술되어있는 최대 허용농도 기준에 부합하는 것으로 나타났다.

Abstract

Preliminary shielding design for the 150MWe liquid metal reactor core have been performed. Tentative shielding design criteria for the fast neutron fluence, DPA, and secondary radioactive source generation were established. Material and location of the shields were suggested. The DORT two dimensional particle transport code was used to evaluate the shielding design based on KAFAX-F22 library, which had been developed by KAERI for fast reactor application. The reactor system was modeled in the R-Z geometry. The performance of the shielding design is compared against the shielding design criteria. The results indicate that the support barrel, upper grid plate, and other reactor structures meet the maximum fast neutron fluence and DPA limits. Activities of the air effluent in the PSDRS and secondary sodium in IHX were also evaluated and are shown to satisfy the MPC limits in 10 CFR Part 20 and design criteria.

1. 서론

본 연구에서 수행한 액체금속로 차폐설계의 일차적인 목표는 수명기간동안 고속중성자에 의한 노심 내외곽 구조물의 구조적 손상을 방지하여, 구조물의 건전성을 확보하는데 있다. 대부분의 1차 냉각계통이 압력용기 외부에 위치한 가압경수로와 달리 현재의 액체금속로 설계는[1,2] IHX(Intermediate Heat

Exchanger), EM Pump와 같은 주요 구조물이 용기내부에 위치해있어 고속중성자에 의한 구조적 손상에 좀더 취약하다고 할 수 있다. 또한 소듐을 냉각재로 사용함에 따라 IHX내부 2차 냉각재의 방사화에 의해 IHX 파이프 라인 주변의 방사선 작업종사자의 피폭량을 증가시킬 수 있으며 높은 온도에서 운전되는 외부용기를 PSDRS(Passive Safety Decay Heat Removal System)를 통해 대기의 자연 순환으로 냉각시키는데 이때 순환되는 공기의 방사화는 대기중 오염을 유발 시킬 수 있다.

본 차폐 예비 설계는 영구구조물의 구조적 손상방지 및 2차 방사선원의 생산 최소화에 주안점을 두어 수행되었으며 이를 위해 미국, 일본의 자료를 토대로 잠정적인 차폐설계기준을 설정하였다. 기존의 고속중성자($E > 0.1 \text{ MeV}$) 플루언스와 함께 구조적 손상정도를 좀더 잘 나타낼 수 있는 DPA(Displacement Per Atom)기준[3]을 병행하여 사용하였다. 차폐설계에서 고려된 주된 노심 외곽 구조물은 Support Barrel, Reactor Vessel, Upper Grid Plate이며, 차폐체로 Radial PSDRS Shields, Inner Fixed Shield, Lower IHX Shield, Inner/Outer IHX Shield가 고려되었다.

전체 차폐해석은 2차원 각분할법에 의한 S_N 수송해법에 의한 DORT코드[4]를 통해 수행되었으며 한국원자력연구소에서 생산한 고속로용 단면적 라이브러리 KAFAX-F22[5]를 사용하였다. 각 구조재에서의 DPA를 직접 계산하기 위해 KAFAX라이브러리에서 제공하는 Damage Energy Production Cross Section을 사용하였다. 전체 노심 내외곽 구조물은 R-2형상으로 모델링 되었으며 계산상의 제약으로 축방향으로 4개의 부분영역으로 나누어 계산하였다.

2. 차폐체 예비설계안 및 설계 기준

2.1. 차폐설계기준

본 연구에서 실제 설계에 적용된 차폐설계기준을 표 1에 나타내었다. 먼저 노심 영구 구조물의 건정성 여부를 판단하기 위하여 차폐설계기준으로 수명기간중 영구 하중 구조물은 10% Residual Total Elongation(RTE)를 넘어서는 안된다. 이러한 RTE는 각 구조물의 중성자 조사량에 의해 좌우 되는 변수로 본 연구에서는 에너지 0.1 MeV 이상의 고속중성자 플루언스와 DPA를 병행하여 사용하였다. 중성자 플루언스는 기존의 경수로에서 압력용기 건전성 여부를 판단하기 위해 널리 사용되어왔던 변수이며 DPA는 중성자 조사에 의한 구조적 손상을 나타내는 좀더 근접한 변수로서 중성자 플루언스가 스펙트럼에 대한 영향이 반영되지 않은 양인데 비해 DPA는 스펙트럼 효과가 포함되어있는 개념이다.

본 연구의 대상노심에서는 냉각재로 소듐을 사용하므로 냉각재의 방사화에 의한 2차 방사선원을 생산하게 되고 이것이 방사선 구역내 작업종사자의 피폭 선량을 증가시키는 요인으로 작용한다. 실제 생성되는 2차 방사선원으로는 Na-22, Na-24, Ne-23으로 이 중에서 중성자 포획반응에 의해 생산되는 Na-24 원소가 주된 2차 방사선원이다. 2차 냉각재 방사화량은 유지보수시의 작업자의 피폭제한 사항에 대한 제약과 소듐화재시 공중피폭량에 대한 제약을 받는다.

높은 열전도도를 갖는 액체금속의 특성으로 인해 액체금속로의 외부용기는 높은 온도에서 운전되며 이것을 냉각하기 위해서 대기의 자연순환에 의해 외부용기를 냉각하기 위한 PSDRS를 사용한다. 이때 PSDRS로 유입되는 대기의 방사화는 대기중 환경오염을 유발시키게 되는데 이때 C-14, N-16, Ar-41와 같은 방사선원이 발생되며 이 중에서 Ar-41이 대부분을 차지한다. 이렇게 발생하는 대기중 방사화량은 10CFR20에 기술되어 있는 MPC(최대 허용 농도:Maximum Permissible Concentration)[6]에 의해 제약받는다.

2.2. 차폐체 예비 설계안

액체금속로는 다양한 구조물들이 용기 내부에 위치해 있기 때문에 각 구조물에 대한 차폐설계기준을 만족시키기 위해 복잡한 차폐설계를 요구한다. 본 연구에서는 차폐체의 중성자 흡수능력과 차폐체의 지지하중, 그리고 설치의 편리성을 고려하여 차폐체의 재질 및 위치를 결정하였다. 차폐체의 재질은 실제 설계에서는 중성자 흡수재를 Stainless Steel과 같은 재질로 둘러싸서 캔의 형식이나 Plate의 형식으로 사용되나 본 연구에서는 차폐체가 중성자 흡수재로만 구성되어 있는 것으로 가정하였다. 중성자 흡수재는 보편적으로 널리 사용되고 있는 자연농축도를 갖는 B₄C 분말을 사용하였으며 차폐체의 설치장소에 따라 Inner Fixed Shield, Radial PSDRS Shields, Lower IHX Shield, Inner/Outer IHX Shield를 설치하였다. 전체 노심 구조물 및 차폐체 설치위치를 그림 1에 나타내었다. Inner Fixed Shield는 Support Barrel 안쪽에 실린더 형태로 설치되어 Support Barrel을 중성자 조사로부터 보호하는 역할을 하며, Radial PSDRS Shields는 Support Barrel과 Flow Guide사이에 3개의 실린더 형태로 위치하여 Reactor Vessel, Containment Vessel을 보호하고 반경방향으로의 중성자 유출에 의한 PSDRS의 방사화를 막는다. IHX내부 2차 냉각재의 방사화를 막기 위해서 Flow Guide 윗쪽과 Support Barrel 안쪽과 바깥쪽에 Lower IHX Shield와 Inner/Outer IHX Shield를 설치하였다. 설치된 각 차폐체의 제원을 표 2에 나타내었다.

3. 차폐해석 방법론

전체 차폐해석은 2차원 각분할법에 의한 S_N수송해석 방법에 의한 DORT코드를 통해 이루어졌으며 P₃ Scattering Order와 S₃ Angular Quadrature가 적용되었다. 단면적 라이브러리는 JEF-2.2를 바탕으로 한국원자력연구소에서 고속로 적용을 목적으로 개발한 KAFAX-F22 라이브러리(중성자 80그룹, 광자 24그룹)를 사용하였다. KAFAX-F22 라이브러리는 수송방정식 해법을 위해 필요한 기본 단면적 이외에 DPA 계산을 위한 Damage Energy Production Cross Section, HEAT, KERMA 등 그외 구조적 손상 및 방사화량 계산을 위한 추가적인 단면적을 같이 제공한다. KAFAX라이브러리는 MATXS 파일형식으로 이것을 차폐계산을 위한 DORT코드에 사용하기 위해 TRANSX[7]/GIP 과정을 통해 단면적 라이브러리 형식 변환 및 각 영역별 거시단면적을 생산하였다.

DORT코드를 통해 노심 내외곽 구조물은 R-Z모델로 근사되었으며 반경방향으로 노심 중앙에서 Collector Cylinder 외부 콘크리트벽까지, 축방향으로는 Containment Vessel 하단의 콘크리트 Floor 부터 IHX 상단부까지를 포함한다. 전체 모델은 계산상의 제약으로 그림 1과 같이 축방향으로 Lower-Core, Near-Core, Upper-Core, Top-Core 모델로 4개의 부분 영역으로 나누어 계산하였으며 각 모델은 축방향과 반경방향으로 대략 240개 내외의 노드로 구성하였다.

차폐계산에서 사용된 중성자 선원항은 DORT 고유값계산을 통해 전체 영역별 핵분열 중성자 선원 분포를 계산하여 다음 식에 의해 계산하였다.

$$\text{중성자 선원항} = \frac{P \cdot C \cdot v}{F} \cdot S_{ij} \cdot \chi_E \quad (\text{식 1})$$

여기서

S_{ij} : 핵분열 중성자의 공간적 분포

χ_E : 핵분열 중성자 스펙트럼

P : 출력밀도 = 87.05 [Wth/cm³]

C : 환산계수 = 6.242 × 10¹² [MeV/sec/Wth]

ν : 핵분열당 방출되는 중성자수 = 2.645 [neutrons/fission]

F : 핵분열 에너지 = 200 [MeV/fission]

핵분열 스펙트럼은 TRANSX로부터 생산한 Outer Core 영역의 값을 사용하였으며 Top-Core 모델과 같이 핵분열 중성자 선원이 모델 내부에 없는 경우에는 Upper-Core 모델계산시 Top-Core 모델의 하부경계부분에서 각종성자속을 미리 저장한 후 Top-Core 모델 계산시 경계선원으로 사용하였다.

DORT 2차원적 R-2모델을 바탕으로 노심에 인접해있는 영구 구조물에 대한 에너지 0.1 MeV 이상의 최대 고속 중성자 플루언스를 계산하였다. 이때 30년 설계수명과 0.85 이용률을 고려하였으며 계산상의 불확실도는 고려되지 않았다. 앞에서 언급한 바와 같이 노심 외곽 구조물의 구조적 손상여부를 판단하기 위해 고속중성자 플루언스와 병행하여 다음 계산식[8]에 의해 DPA를 계산하였다.

$$DPA = T \cdot \sum_{g} \sigma_{d,g} \phi_g \quad (\text{식 2})$$

여기서

$\sigma_{d,g}$: DPA Cross Section

$$= \frac{\lambda \sigma_{DAME,g}}{2E_d}$$

ϕ_g : Neutron Group Flux

λ : Displacement Efficiency(=0.8)

$\sigma_{DAME,g}$: Damage Energy Production Cross Section from MATXS

E_d : Atomic Displacement Energy

T : 설계수명 × 이용률

4. 계산 결과 및 토의

노심에 인접해 있는 영구구조물에 대한 고속중성자 플루언스 및 DPA 계산 결과를 차폐체 설치 여부 에 따라 그림 2와 표 3에 나타내었다. 표 3에서 보인바와 같이 고속중성자 플루언스 제한값 5.0E+21 neutrons/cm²을 모든 구조물에서 충분한 여유도를 갖고 만족하고 있으며 DPA 결과에서도 SS316과 SS304에 대한 기준을 모두 만족함을 볼 수 있다.

표 4에 2차 소동 방사화량 계산결과를 나타내었다. 차폐체가 설치되지 않았을 경우 주된 2차 방사선원 Na-24의 최대 방사능이 2.0E+07 Bq/cm³으로 설계기준을 훨씬 넘어서지만 차폐체가 모두 설치된 경우 1.7E+02 Bq/cm³으로 소동 물 반응시 방출 방사능 기준 1.0E+04 Bq/cm³을 충분히 만족하고 있다. 또한 PSDRS내부의 대기중 방사화량을 볼때도 차폐체 설치시 주 방사선원 Ar-41의 방사능은 최대 9.05161E-09 μ Ci/cm³로 10CFR20에 기술되어있는 Ar-41의 MPC 제한값 1.0E-06 μ Ci/cm³을 충분히 만족하고 있다.

위의 결과에서 보듯이 어느정도 계산상의 불확실도를 적용한다 하더라도 각 차폐설계기준을 만족함을 보임으로써 현재 차폐 예비설계의 타당성을 입증하였다. 현재의 결과를 향후 차폐체 설계의 최적화에 적용하기 위해서는 우선적으로 계산 결과의 보수성이 입증되어야 한다. IHX와 EM-Pump와 같이 반경방향으로 균질하지 않은 분포를 갖는 구조물에 대한 2차원적 해석이 보수적임을 입증할 필요가 있으며 차폐설계에서 여유가 큰 만큼 최적화 과정에서 국소차폐에 대한 정확한 결과를 생산하기 위해서는 3차원적 해석결과를 통한 검증 및 보완이 필요하다.

본 연구에서는 노심 외곽 구조물의 손상 정도를 결정하는 수단으로 고속중성자 플루언스와 DPA라는

두 개의 설계변수를 병행하여 사용하였다. 계산결과를 두가지 설계기준에 대비해 보았을 때 고속중성자 플루언스 보다 DPA에서 좀더 큰 여유도가 있음을 볼 수 있다. 보통 스펙트럼의 영향이 크지 않는한 Stainless Steel의 경우 10^{22} neutrons/cm²의 고속중성자 플루언스는 대략 5 DPA 정도의 결과를 보이는 것으로 알려져 있으나 향후 설계기준으로 DPA의 개념을 사용하기 위해서는 고속중성자 플루언스와 DPA의 상관관계에 대한 좀더 세밀한 자료수집과 평가가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기과제 중 "액체금속로 노심설계기술 개발" 과제의 일환으로 수행하였다.

참고문헌

1. Y. I. Kim, et al., "KALIMER Uranium Metallic Fueled Equilibrium Core Design and Analysis," KALIMER/CD100-ER-01/1998, KAERI (1998).
2. W. Hwang, et al., "Preliminary Design Description of KALIMER Nuclear Fuel System," KAERI/TR-1145/98, KAERI (1998).
3. "WBS 4.1.5, Reactor Shielding Analysis: ALMR Mod-B '93 Reactor System Shielding Analysis," ALMR-W-94-005 (1994).
4. W. A. Rhoades and M. B. Emmett, "DOS: The Discrete Ordinates System," ORNL/TM-8362, ORNL (1982).
5. 김정도, 길충섭, "KAFAX-F22:JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증," KAERI/TR-842/97, KAERI (1997).
6. "Code of Federal Regulations, Title 10, Energy, Part 20, Standard for Protection Against Radiation," US NRC.
7. R. E. Macfarlane, "TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-section Libraries to Nuclear Transport Codes," LA-12312-MS, LANL (1993).
8. 김정도 외, "평가핵자료를 이용한 철의 DPA 단면적 계산 및 비교분석," 98추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회 (1998).

표 1. 잠정적으로 설정된 차폐설계기준

항 목		기 준	비 고
고속중성자 플루언스($E > 0.1 \text{ MeV}$)		$5.0E+21 \text{ neutrons/cm}^2$	
DPA	SS304	2.4	비하중 구조물에 대해서는 하중구조물의 2배
	SS316	4.1	
2차 소듐방사화량	유지보수시	$1.0E+06 \text{ Bq/cm}^2$	
	소듐화재시	$1.0E+04 \text{ Bq/cm}^2$	
PSDRS 대기중 방사화량		$1.0E-06 \mu\text{Ci/cm}^2$	10CFR20 Ar-41

표 2. 액체금속로 차폐체 예비 설계안

차 폐 체	제 원	비 고
Inner Fixed Shield	8 cm	Support Barrel 안쪽에 실린더형으로 위치
Radial PSDRS Shields	15 cm	Support Barrel과 Flow Guide 사이에 실린더형으로 위치
Lower IHX Shield	15 cm	Flow Guide 상단부에 위치
Inner IHX Shield	8 cm	Formal Ring 위에 Support Barrel 안쪽에 위치
Outer IHX Shield	10 cm	Flow Guild 상단부터 Support Barrel 바깥쪽에 위치

표 3. 고속중성자 플루언스 및 DPA 계산 결과

항목		차폐체 설치전	차폐체 설치후
고속중성자 플루언스 [neutrons/cm ²]	Support Barrel	$2.0217E+21$	$2.3972E+20$
	Upper Grid Plate	$7.4543E+19$	$7.4545E+19$
	Reactor Vessel	$6.6421E+17$	$4.3391E+14$
DPA	Support Barrel(SS316)	$7.4818E-01$	$9.8584E-02$
	Upper Grid Plate(SS304)	$3.8982E-02$	$3.8983E-02$
	Reactor Vessel(SS316)	$1.7555E-04$	$1.8259E-07$

표 4. 2차 소듐 및 PSDRS 방사화량 계산 결과

항 목		차폐체 설치전	차폐체 설치후
2차 소듐 방사화량 [Bq/cm ²]	Na-22	$9.1602E-03$	$6.7086E-04$
	Na-24	$2.0575E+07$	$1.7605E+02$
	Ne-23	$2.1550E+00$	$1.5895E-01$
PSDRS 공기중 방사화량 [$\mu\text{Ci/cm}^2$]	Ar-41	$3.0383E-05$	$9.0516E-09$
	C-14	$5.1943E-10$	$1.5144E-13$
	N-16	$1.1738E-07$	$6.0578E-11$

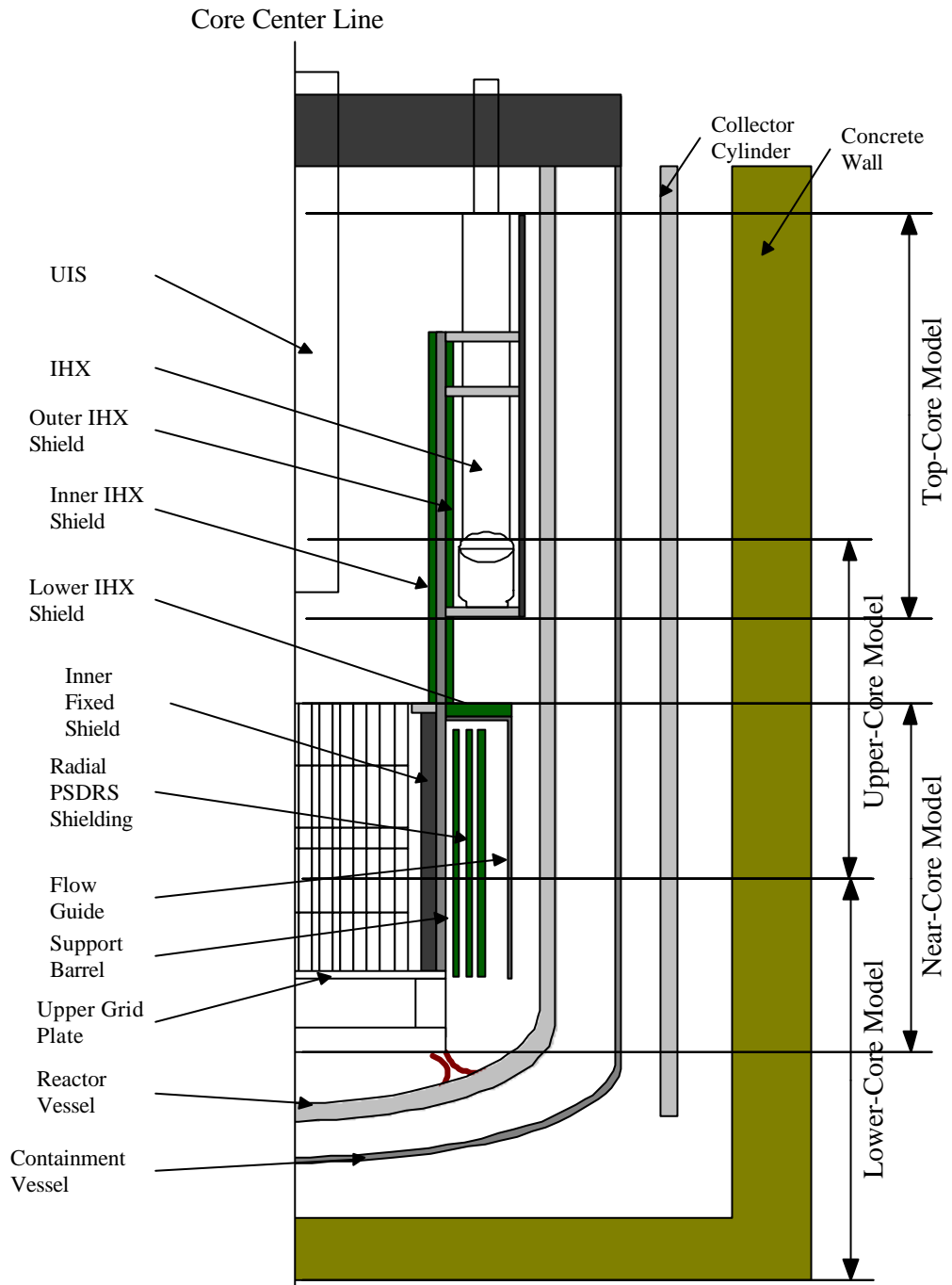
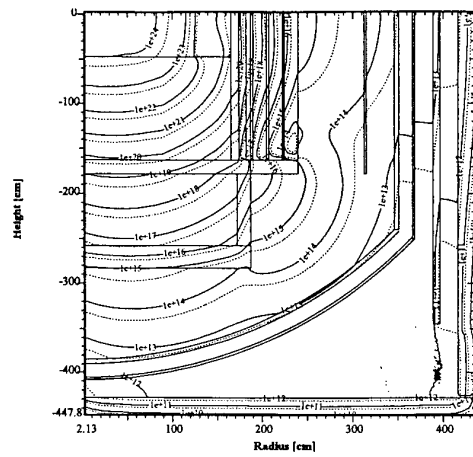
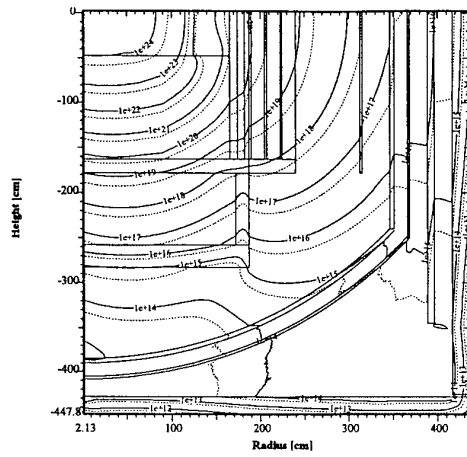
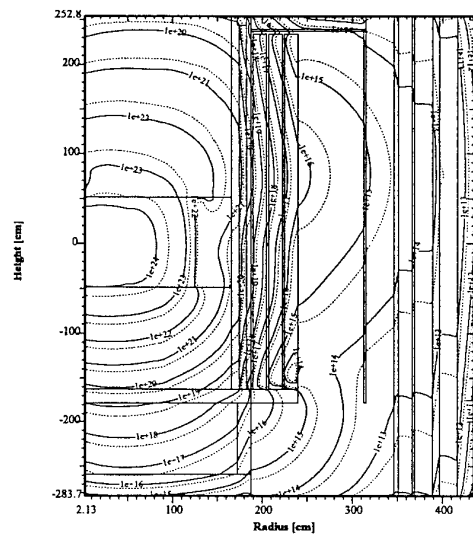
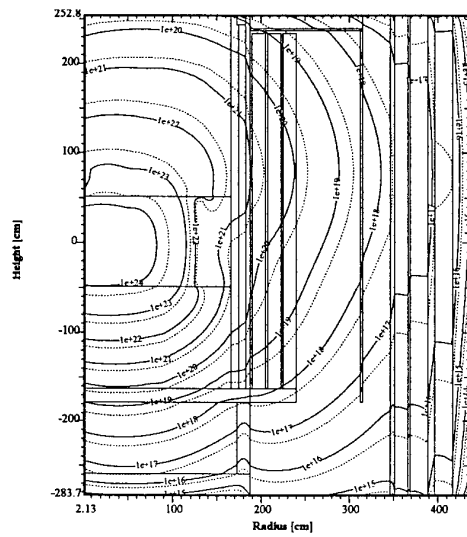


그림 1. 노심 내외곽 구조물 및 차폐체 Layout

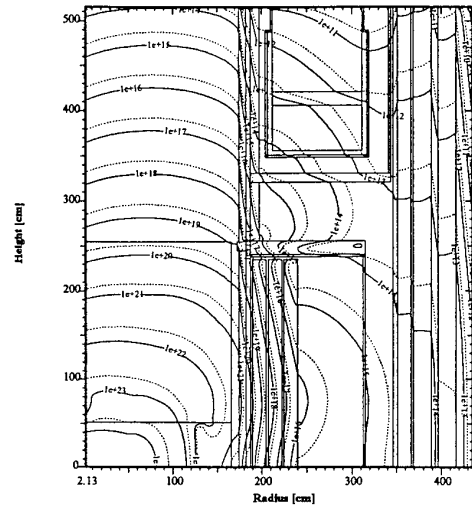
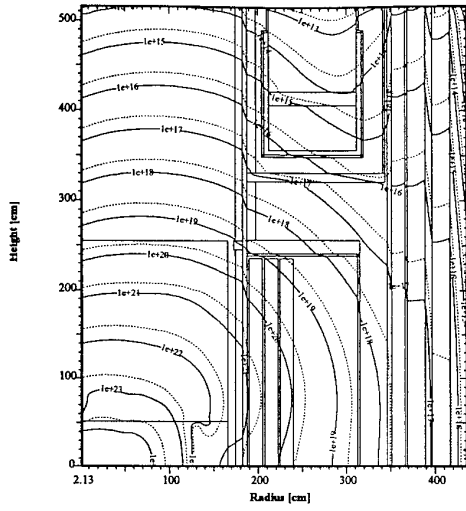


(가) Lower-Core Model

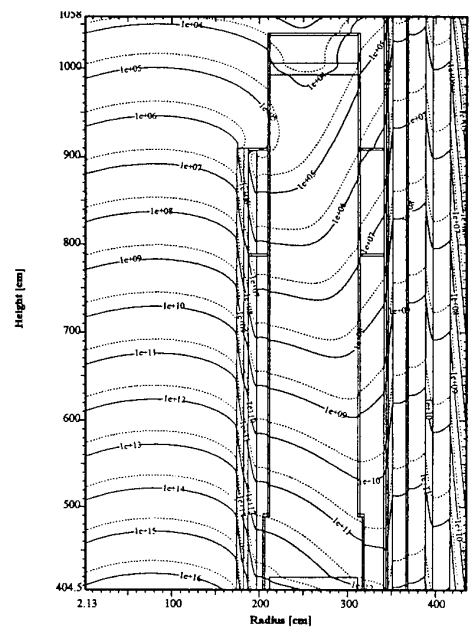
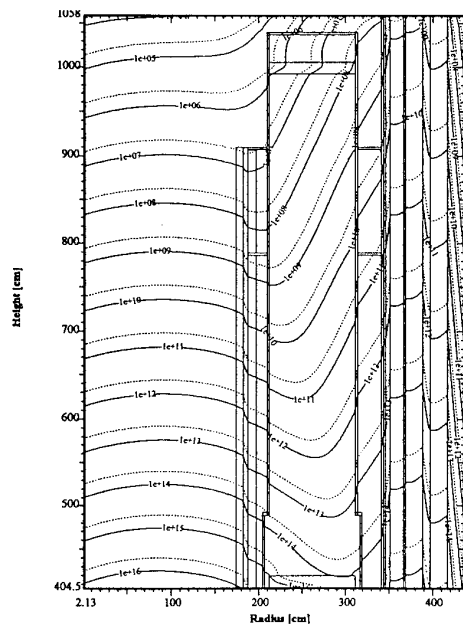


(나) Near-Core Model

그림 2. 각 모델별 차폐체 설치여부에 따른 고속중성자 플루언스 변화



(다) Upper-Core Model



(라) Top-Core Model

그림 2. 각 모델별 차폐체 설치여부에 따른 고속중성자 플루언스 변화(계속)