

## MCNPX 코드를 이용한 고리 1호기 작업구역 내 방사선량 맵핑

### Dose Mapping in Working Space of KORI Unit 1 Using MCNPX Code

이철우, 신창호, 김종경, 김순영\*

한양대학교

\*방사선안전신기술연구센터

서울특별시 성동구 행당동 17

#### 요약

원전 내부에서의 방사선장 분포에 관한 정보는 현재 계측값에 의존하고 있다. 본 연구에서는 측정값의 정확한 평가를 위한 자료를 제공하고, 계측값에 의존하는 방사선장 해석의 한계를 보완하고자 전산코드를 이용해 격납용기 내 전 공간에 대한 방사선장 분포의 경향을 파악할 수 있는 방사선장 맵핑을 수행하였다. 원전 격납건물 내 선량 분포 계산을 위해 실제 가동원전인 고리 1호기 21주기를 대상으로 MCNPX코드를 이용해 격납건물 내 전 공간을 묘사하였다. 가동 중 원자로심에서 발생하는 중성자 선원을 평가하였고, 이를 이용하여 격납건물 내 중성자·감마선에 의한 공간선량 값을 계산하였다. 격납건물 내부의 바닥면으로부터 6~20, 20~44, 44~70ft 높이상의 각 공간을 대상으로 선량맵핑을 수행하였다. 맵핑결과는 방사선장의 분포에 대한 원전 내부의 구조 및 구조물 별 구성물질에 의한 영향을 뚜렷이 보여주었다. 이상의 전산계산을 통해 얻은 방사선장 분포의 경향에 관한 정보는 기존의 계측위치에 한정된 정보를 주변의 관심영역까지 포함하여 해석하는 것을 가능케 하였다. 또한 현재의 연구방법을 사용하여 다른 운전환경 등에서의 예측이나, 임의의 선원을 적용시키는 형태의 해석 및 예측을 가능케 하였다.

## Abstract

Radiation field analysis in nuclear power plant mainly depends on actual measurements. In this study, the analysis using computational calculation is performed to overcome the limits of measurement and provide the initial information for unfolding. The radiation field mapping is performed, which makes it possible to analyze the trends of the radiation field for whole space. By using MCNPX code, containment building inside is modeled for KORI unit 1 cycle 21 under operation. Applying the neutron spectrum from the operating reactor as a radiation source, the ambient doses are calculated in the whole space, containment building inside, for neutron and photon fields. Dose mapping is performed for three spaces, 6~20, 20~44, 44~70 ft from bottom of the containment building. The radiation distribution in dose maps shows the effects from structures and materials of components. With this dose maps, radiation field analysis contained the region near the detect position. The analysis and prediction are possible for radiation field from other radiation source or operating cycle.

### 1. 서론

원자력발전소의 설계 및 운영에 있어 가장 기본적으로 요구되는 것은 원전 내부의 방사선장에 대한 평가이다. 방사선장을 평가하기 위한 가장 기본적이고 신뢰성 있는 방법은 계측기를 이용한 측정이다. 그러나 이 방법은 시간과 장비의 확보 등과 관련해 효율성·경제성 등에 어려움이 있으며, 주요 계측 지점과 계측 시간에 한정하는 정보를 제공하므로 원전 내부의 전 구간에 대한 방사선장의 분포를 얻을 수 없고, 운전환경의 변화에 따른 예측에 한계를 가지고 있다. 이러한 한계점은 방사선 수송해석 코드를 이용한 전산모사의 방법으로 보완할 수 있다. 전산모사를 통한 방사선장의 해석은, 원전 내 전 구간에 대해, 원하는 운전환경을 모사해 결과를 얻는 것이 가능하기 때문이다. 이에 본 연구에서는 전산코드의 장점을 활용할 수 있도록

고준위방사선장 구역인 격납건물 내부의 전 공간에 대한 방사선장의 분포를 전산계산하고, 방사선장 분포에 대한 해석이 용이하도록 맵핑의 형태로 계산결과를 처리하고자 하였다.

## 2. 방사선장 계산

### 2.1 계산체계

본 연구에서는 고리 1호기 원전 격납건물 내부를 계산 대상으로, 운전환경은 가동 중인 21주기를 선정하였다. 복잡하고 방대한 구조를 갖는 원전 내부를 묘사하기 위해 MCNPX 전산코드를 사용하였다.<sup>1)</sup> 방사선원은 가동 중 노심에서 발생하는 중성자를 묘사하였고, 방사선장 분포의 계산은 중성자·감마선장에 대해 수행하였다. 노심에서 발생하는 방사선원은 계산의 효율성을 고려하여 선량 계산과 분리하여 계산을 수행하였고, 평가된 선원항을 격납건물 내에서의 수송계산에 적용하여 방사선장 분포를 계산하였다.

선원항은 노심계산을 통해 수행하였다. 대상 주기인 21주기의 가동 중 노심을 묘사한 MCNPX 노심모델을 사용하여 임계도계산과 출력분포계산을 수행하였다. 이를 통해 검증된 노심모델의 압력용기 외벽에서 선원항으로 사용할 중성자스펙트럼을 평가하였다. 원전 격납건물 내부에서의 방사선장 분포계산에는 평가된 중성자스펙트럼을 선원으로 묘사하였다. 계산대상인 고리 1호기 격납건물 내부를 MCNPX 코드로 모델링하고 내부의 전 공간에서 선량을 계산하였다.<sup>2)</sup> 방사선수송계산은 중성자·감마선장 대해서 수행하였고, 최종적으로 계산결과를 처리하여 선량맵핑을 수행하였다.

### 2.1 선원항 계산

가능한 실제에 가까운 선원항을 계산하기 위해 실제 설계값과 동일하게 모델을 구성하고 원주 및 축방향으로 노심 전체를 묘사하였다. 운전환경은 대상 노심인 고리 1호기 21주기 핵설계보고서 상의 BOC, HFP, ARO 상태에서의 값을 적용하였다<sup>3)</sup>. MCNP 전산코드의 KCODE를 이용한 임계도 계산을 통해 선원항 모델링을 검증

하였고, 검증된 모델을 사용해 선원항계산을 수행하였다.

격납건물 내에서의 수송계산에 사용할 중성자 선원항 계산은 핵연료집합체 별로 상대출력분포에 비례하여 중성자가 발생하도록 모사하여 수행하였고, 최종적으로 원자로압력용기 외벽에 도달하는 중성자 에너지 스펙트럼을 계산하였다. 원자로 압력용기 외벽을 5개 영역으로 구분해 격납건물 내 방사선수송계산에서 선원으로 사용할 수 있도록 하였다.

## 2.2 격납건물 내부 모델링

원전 내 격납건물 내부는 매우 복잡한 구조로 이루어져 실제와 동일한 묘사가 불가능하다. 따라서 방사선장 분포에 대한 영향의 정도와 MCNPX코드의 기하학적 구현 능력의 한계 및 전산모사의 효율성을 고려하여 주요 구조물을 중심으로 다음과 같이 모델링을 수행하였다. 기하학적 구조 및 물질 구성은 최종안전성분석보고서와 건설도면을 근거로 묘사하였다.<sup>4)</sup>

원전 격납건물 내 방사선장 분포에 큰 영향을 미치는 요소는 콘크리트벽 등의 차폐 구조물과 물로 차있는 내부 배관 및 중금속을 함유한 합금으로 구성된 다양한 기기구조물 등이다. 격납건물 모델링에 있어 콘크리트 벽 구조물의 경우 FSAR 설계치를 근거로 실제와 동일하게 묘사하였고, 설계도로 확인이 어려운 일부 미세한 구조물은 인접구조물에 외삽 하였다. 격납건물 내부 일차계통 등의 큰 구조물을 제외한 각종 배관은 모델링에서 제외하였다. 방사선장 해석과 관련한 관심 대상인 주요 작업공간에 위치한 구조물의 경우 그 존재로 인해 공간에서의 방사선장이 교란되는 등의 효과를 나타내게 되므로 주요 관심 영역에 위치한 증기발생기, 원자로냉각수펌프, 가압기 등을 묘사하였다. 묘사한 각각의 구조물은 그 형상이 매우 복잡하고 구성 부품마다 다른 종류의 합금으로 구성되어 설계 그대로의 형상을 묘사하는데 어려움이 있다. 따라서 이들은 실린더 형태로 단순화시키고, 구성물질 데이터를 근거로 내부를 균질화하여 묘사하였다.<sup>5),6)</sup> MCNPX 코드로 모델링된 격납건물 모델을 그림 1에 나타내었다.

## 2.3 격납건물 내 방사선장 맵핑

격납건물 내부 방사선장 맵핑을 위해서는 계산대상의 전 공간에 대한 방사선장 분포를 얻을 수 있어야 한다. MCNPX 코드의 Mesh Tally 기능은 대상공간을 임의의 격자로 구분하여 각각의 격자에 대해서 원하는 계산결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이 Mesh Tally 기능을 사용하여 격납건물 모델 내부의 전 공간을 X-Y 축 방향으로 1×1m, Z 축방향으로 6~20, 20~44, 44~70 ft로 구분되는 격자로 구성하고 각각의 격자에 대하여 선량을 계산하였다. 계산결과 생성된 파일을 Gridconv로 처리하여 그래픽 툴에서 선량맵으로 구현하였다. 선량의 계산은 Track Average Tally에서 MCNPX 코드에 내장된 ICRP-74 공간선량전환인자를 적용하였다.

### 3. 계산결과

#### 3.1 원자로심 모델 검증 및 중성자선원향 스펙트럼

임계도 계산 결과, 유효증배계수는  $0.98289 \pm 0.00056$ 로 계산되었다. 핵연료집합체 별 상대출력분포 계산결과는 핵설계보고서와 비교하여 RMS 오차 1.4572(%)로 계산되었다. 핵연료집합체 별 상대출력분포 계산결과와 핵설계보고서의 설계값을 비교하여 그림 2에 나타내었다.

검증된 모델 내부에서 중성자수송계산을 수행하여 원자로압력용기 외벽의 5개 영역에서 중성자선원향을 계산하였다. 5개의 영역은 압력용기 상·하부면 2개와 노심의 위치를 기준으로 3개 영역으로 구분한 압력용기의 측면이다. 5개 계산 영역과 각 영역별 계산결과를 그림 3에 나타내었다. 계산결과, 압력용기 외벽에서 중성자선원향 계산결과는 압력용기 측면 중간 부분의 선원향이 가장 높게 계산되었다. 이 영역은 노심에 가장 근접한 면으로 최대 중성자속은  $2.42 \times 10^{10}$  neutrons/cm<sup>2</sup>sec로 계산되었다. 압력용기 외벽에서 중성자 에너지 분포는 측면 중간 부분 다음으로 측면 위쪽 영역이 높은 것으로, 또한 압력용기 상부면과 측면 아래쪽 영역은 비슷한 수준으로 계산되었다. 압력용기 하부면은 냉각수가 노심으로 들어가는 부분으로 많은 양의 물로 구성되어있다. 이 물에 의한 차폐효과로 압력용기 하부면으로 빠져나가는 중성자의 에너지 분포가 타 영역에 비해 낮은 것으로 판단된다.

#### 3.2 격납건물 내 방사선수송 계산결과 및 공간선량 맵핑

피폭에 관련한 주요작업 및 격납건물 내 설계구조를 고려하여, 격납건물 내부의 바닥면으로부터 6~20, 20~44, 44~70ft 높이상의 각 공간을 선량 Mapping 대상 영역으로 선정하였다. 계산결과 수행된 선량 맵핑의 결과를 중성자, 감마선장에 대해서 각각 그림 4, 5에 나타내었다. 선량맵 상의 선량분포는 색의 변화로 알 수 있도록 하였다. 높은 값에서 낮은 값으로의 변화를 붉은색에서 푸른색으로 변화시켜가며 나타내었다. 맵 상의 검은색 실선은 등선량의 값을 연결한 것으로 선량변화가 급격히 이뤄지는 경계인 콘크리트벽과 그 외 구조물들의 실제 위치와 동일한 영역에 뚜렷이 나타나고 있어 원전 내부 모델과 유사한 형태를 보인다.

가동 중 노심에서 발생한 중성자 선원에 의한 중성자선장 분포 해석 결과는 다음과 같다. 원자로심에서 발생된 중성자는 원자로 압력용기를 둘러싸고 있는 1차 콘크리트 차폐구조물에 의해 대부분 차폐되고, 1차 콘크리트 차폐구조물 외부의 중성자 선량 값은  $10^2 \sim 10^3$  mSv/hr 수준으로 나타났다. 2차 콘크리트 차폐구조물 내부의 중성자 선량은 모델링된 구조물 주변에서 등선량 분포를 보이는 것으로 계산되었다. 따라서 방사선장 맵상에서 콘크리트구조물 및 주요 기기들의 위치를 뚜렷이 확인할 수 있으며, 이 공간에서는 구조물들이 방사선장 분포의 경향에 주요한 인자로 작용하여 다소 복잡한 분포의 경향을 나타내었다. 원자로 공동과 핵연료집합체 이동경로 상의 공간에서 상대적으로 높은 선량값을 나타내었다. 이 영역은 20~44 ft 공간에서 44~70 ft 공간으로 작업자가 이동하는 경로인 계단과 그 주변 공간을 포함하고 있다. 주요작업 및 작업자의 이동경로를 고려한 관심구역에서의 선량분포는 다음과 같다. 6~20 ft 공간의 증기발생기 하부 영역에서 공간 선량값은 1.49~32.4 mSv/hr로 계산되었다. 20~44 ft 공간 작업자의 주요 이동 경로인 장비반입출구를 통해 증기발생기룸 내부로 향하는 경로와 20~44 ft 공간에서 44~70 ft 공간으로 이동하는 경로상의 선량값은 각각 11.0~18.2 mSv/hr, 32.1~38.2 mSv/hr의 분포를 나타내었다. 44~70 ft 공간의 경우 원자로공동에서 Fuel Transfer Equipment로 이어지는 공간의 영향으로, 원자로심으로부터 거리상으로 멀리 위치하였음에도, 20~44 ft 공간보다 상대적으로 다소 높은 선량분포로 나타내었다. 원자로공동으로 통하는 Fuel Transfer Equipment 시설 구조물 내부영역은 1차 콘크리트 차폐구조물이 존재하지 않아 ~100 mSv/hr 수준의 높은 선량값 분포로 계산되었다. 마지막으로 2차 콘크리트 외부영역에서는 1~10 mS/h 선량율이 단순한 반경방향을 따라 비교

적 단순하게 분포하는 것으로 계산되었다.

동일한 선원에 의해 유도되는 감마선장에 의한 선량분포를 계산한 결과는 다음과 같다. 전반적인 감마선장 분포경향은 중성자선장의 경우와 유사한 것으로 계산되었다. 2차 콘크리트 차폐 구조물 외부의 선량분포는 1~10 mSv/hr로 계산되었다. 이는 동일한 구조물 모델과 선원항이 적용되기 때문이다. 구체적인 계산결과는 다음과 같다. 6~20 ft 공간 증기발생기 하부영역에서 선량분포는 6.89~9.80 mSv/hr, 20~44 ft 공간 장비반입출구를 통해 증기발생기룸 내부로 향하는 경로와 20~44 ft 공간에서 44~70 ft 공간으로 이동하는 영역의 감마선에 의한 선량 분포는 각각 5.83~6.81 mSv/hr, 10.2~11.6 mSv/hr로 나타났다. 44~70 ft 공간의 20~44 ft에서 44~70 ft 공간으로 연결되는 영역의 선량값은 10.3~14.2 mSv/hr의 분포를 나타내는 것으로 계산되었다.

2003년도에 원자력환경기술원에서는 고리 1호기 21주기 가동 중 원전 내에서 중성자장측정을 수행한 바 있다. 측정결과에 따르면 장비반입출구에서 측정한 선량값이 2.012 mS/h 로 나타났다. 이 측정위치는 격납건물 내부로 향하는 통로 영역으로 작업자의 이동에 따른 활동폭이 다소 넓고 구조가 단순한 영역으로 방사선장의 변화가 단순한 것으로 계산된 영역이다. 계산결과는 증기발생기룸으로 향하는 공간방향으로 1~10 mS/h 까지 분포하는 것으로 계산되었다. 한편 44 ft 높이의 공간에서 70 ft 높이의 공간으로 향하는 계단에서 2.66 mS/h 선량값이 측정결과 나타났다. 특히 이 영역은 증기발생기룸 외벽을 따라가는 이동경로에 연결되어지는 계단을 포함하는 부분으로 구조가 복잡하여 방사선장의 분포가 다소 복잡하게 나타나는 것으로 계산되었다. 계산결과는 증기발생기 외벽의 경로에서 0.4~8.2, 계단의 영역에서 11.0~38.2 mS/h 의 선량 분포를 보였다. 원전 내부의 구조는 복잡하기 때문에 방사선장의 분포 또한 위치에 따라 분포의 경향에 차이를 보이게 된다. 따라서 전산계산을 통해 이상과 같이 계측지점 주변의 관심영역에 대한 방사선장의 분포에 관한 정보를 얻고 예측하는 것이 가능할 것이다.

#### 4. 결론 및 제언

본 연구에서는 MCNP전산코드를 사용하여 원전 격납건물 내에서의 중성자·감마선장의 분포를 계산하고, 공간선량값을 사용하여 선량맵핑을 수행하였다. 전산계산을

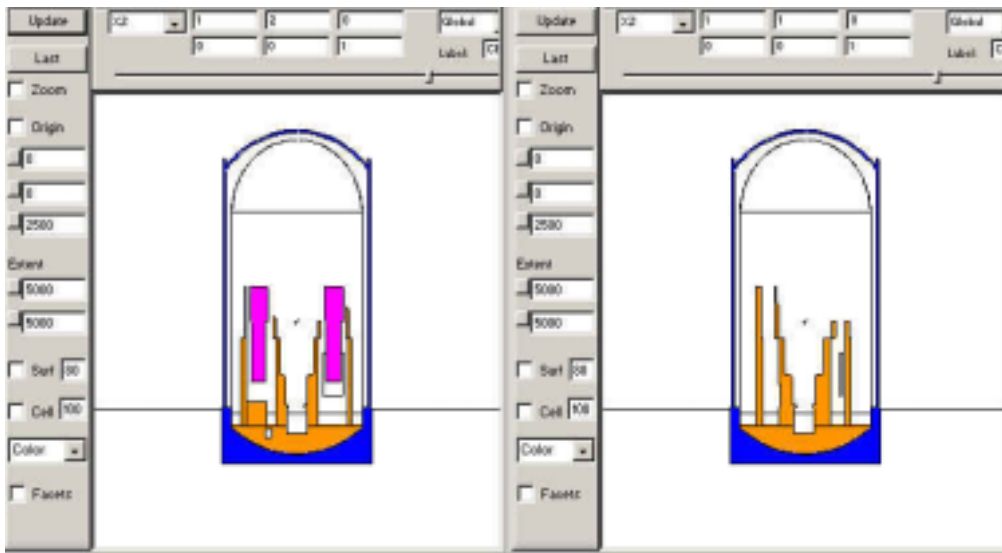
통해 얻은 방사선장 분포의 경향에 관한 정보를 이용하여 기존의 계측위치에 한정된 정보를 주변 영역까지 포함하여 해석하는 것이 가능하였다. 또한 현재의 연구방법을 사용하여 다른 운전환경 등에서의 예측이나, 임의의 선원을 적용시키는 형태의 해석도 가능하다. 이상의 연구결과를 활용하여 원전 내 방사선장의 분포를 계산하고 방사선장해석에 활용하여, 계측값에 의존하는 방법의 한계를 보완할 수 있을 것이다. 이번 연구에서는 가동 중 원자로심에서 발생하는 중성자만을 선원으로 적용하였으나, 향후 원전 내 존재하는 타 방사선원에 대한 평가를 통해 다양한 선원을 적용하여 전산 계산에 의한 방사선장 해석의 효용성을 높일 수 있을 것이다.

감사의 글 : 본 연구는 과학기술부 원자력중장기사업 및 방사선안전신기술연구센터의 지원과 한국수력원자력(주)의 협조에 의하여 수행되었습니다.

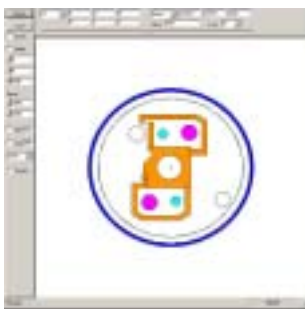
#### 참 고 문 헌

1. J. F. Briesmeister, ed., "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4C," LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, 2000.
2. L. S. Waters, ed., "MCNPX User's Manual, Version 2.4.0," LA-CP-02-408, Los Alamos National Laboratory, 2002
3. 김재식 외, "The Nuclear Design Report for Kori Nuclear Power Plant Unit 1 Cycle 20," KNF-K1C20-01034, 한국수력원자력(주), 2001.
4. 한국전력공사, "Final Safety Analysis Report: Kori Unit 1," 한국전력공사
5. 이철우 외, "몬테칼로방법을 이용한 원전 내 고준위방사선장 해석," 한양대학교 대학원, 2004.
6. 이철우 외, "몬테칼로방법을 사용한 고리 1호기 격납건물 내 중성자 스펙트럼 계산," 2003 한국원자력학회 추계학술발표회집, 447, 2003.

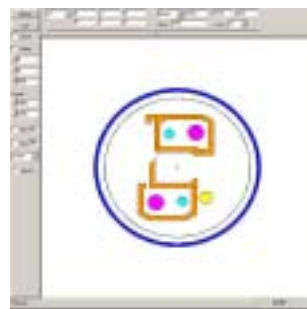




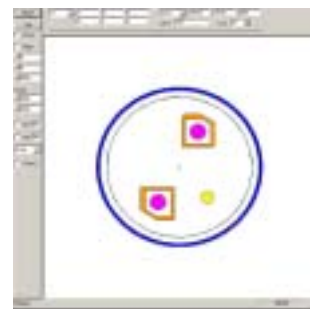
A. 고리1호기 격납건물 종단면 모델링 결과



B. 20ft 모델링 결과



C. 44ft 모델링 결과



D. 70ft 모델링 결과

그림 1. 고리 1호기 격납건물 MCNP 모델링 결과

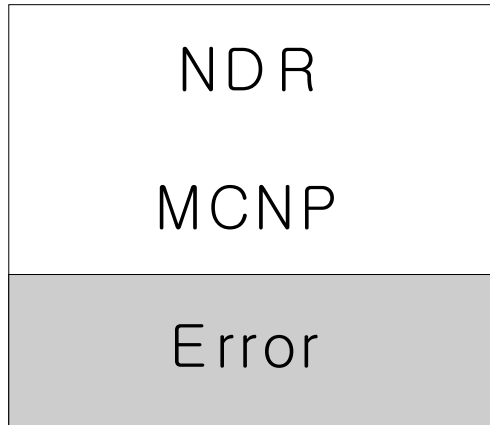
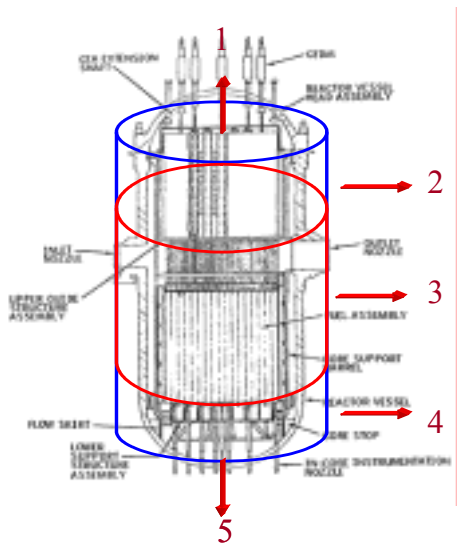
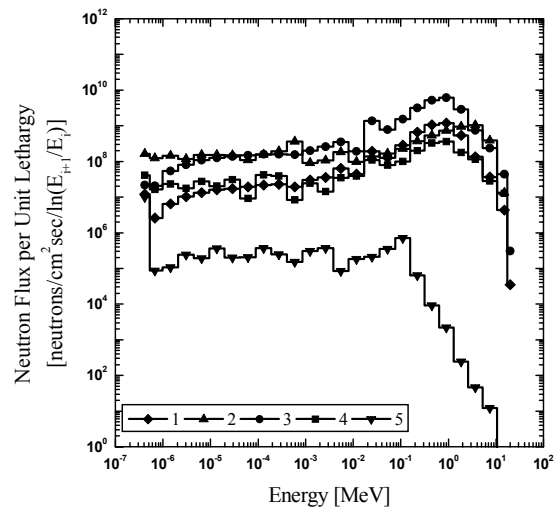


그림 2. 핵연료집합체별 출력분포 계산결과



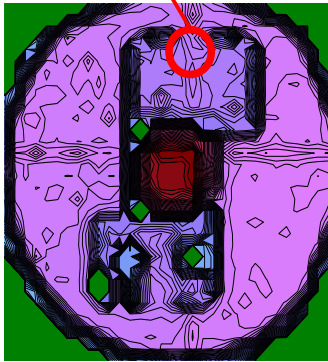
(a) 원자로압력용기 외벽 5개 영역



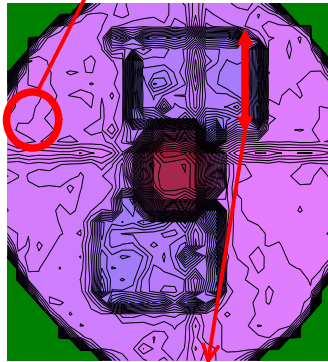
(b) 중성자 에너지 분포 계산 결과

그림 3. 원자로압력용기 외벽에서의 중성자스펙트럼

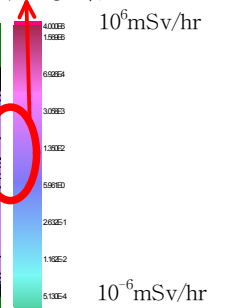
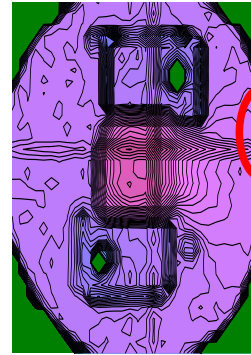
1.49~32.4 mSv/hr  
(증기발생기 하부 영역)



11.0~18.2 mSv/hr  
(장비반입출구 영역)



~100.0 mSv/hr  
( Fuel Transfer Equipment  
영역장비반입출구 영역)



32.1~38.2 mSv/hr  
(44~70 ft 공간으로  
이동하는 통로계단  
영역)

그림 4. 격납건물 내부 전 공간에서의 중성자선량분포 Mapping 결과

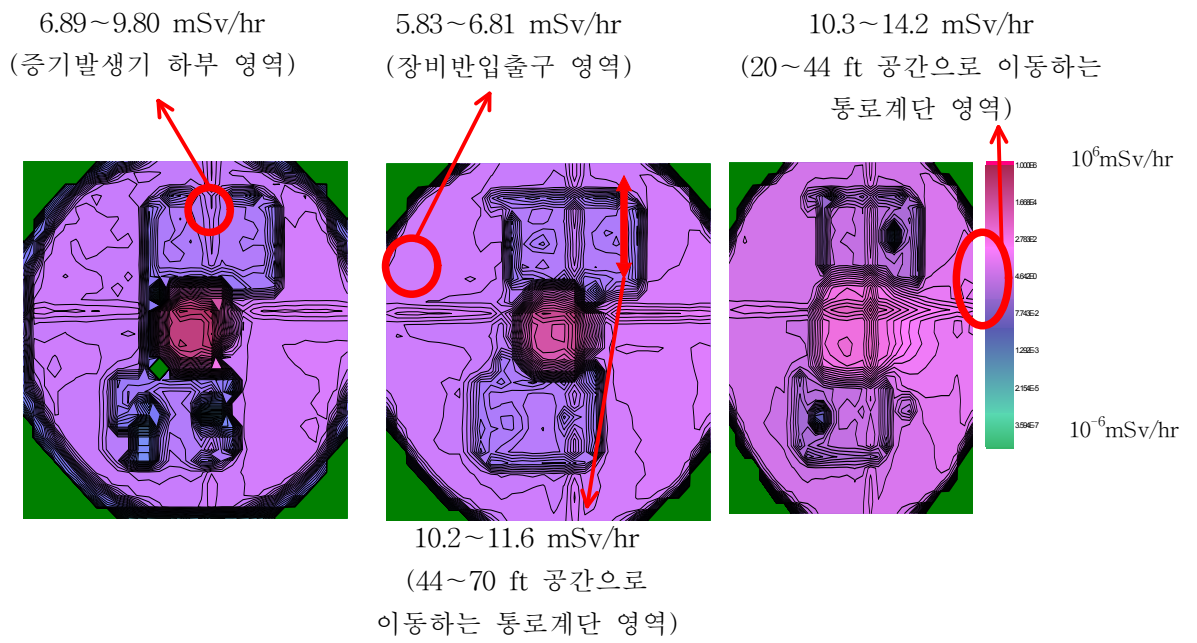


그림 5. 격납건물 내부 전 공간에서의 감마선량분포 Mapping