

## 차세대관리 종합공정 실증을 위한 핫셀의 방사선 차폐능 해석

### Analysis on the Shielding Ability of a Hot Cell to Accommodate Advanced Spent Fuel Conditioning Process

조일제, 국동학, 구정희, 정원명, 유길성, 이은표, 주준식

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

기존의 조사재시험시설의 지하에 위치한 핫셀을 차세대관리 종합공정의 실증을 하기 위한 시설로 사용하기 위한 설계가 현재 진행 중이다. 차세대관리 종합공정에서는 기존 시설의 설계 방사선원의 약 10배 이상의 방사선원을 취급할 예정으로서, 현 시설의 차폐능으로는 방사선의 차폐 설계 기준을 만족시킬 수가 없다. 따라서 차세대관리 종합공정의 최대 선원 취급시에도 법규에서 규제하는 방사선량 허용치 이하로 시설이 유지되도록 차폐벽 보강 설계를 수행하였다. 본 연구에서는 차폐 보강 재료로서 중량콘크리트, 스틸, 납 등을 선택하여, 기존 시설의 보강 설계에 따른 차폐 해석을 QADS 코드를 이용하여 핫셀의 차폐 선량기준을 만족시키기 위한 방사선 선량 해석을 수행하였으며, 이 결과를 바탕으로 핫셀의 보강 방안을 제시하였다. 그리고 보강 방안에 따라 제시된 시설의 MCNP-4C 코드를 이용한 차폐 해석을 통하여, 방사선 차폐 설계의 타당성을 검토하였다.

#### Abstract

A design work is conducting for the IMEF's future cell which located in the basement to use it as a demonstration facility for Advanced Spent Fuel Conditioning Process (ACP). Since the total radiation source which used in ACP is expected as approximately 10 times higher than the design criteria of IMEF, the existing concrete structure cannot meet the shielding requirements. Therefore, shielding design which reinforcing the shielding capability has carried out for the ACP hot cell to satisfy the shielding criteria for the expected maximum radioactivity of ACP. This study presents a shielding analysis results using QADS code for the reinforced shielding wall with heavy concrete, steel or lead, etc. As a results of the analysis, a shielding wall reinforcing method was proposed. Additional shielding analysis was performed for the ACP hot cell with proposed reinforced shielding design using MCNP-4C code, and the validity of radiation shielding design was evaluated.

## 1. 서론

한국원자력연구소에서는 사용후핵연료를 고온의 용융염 매질 하에서 우라늄 산화물의 전도특성과 용융염의 전해특성을 이용한 전기화학적 방법에 의하여 우라늄 금속을 환원시켜, 고준위 방사능물질인 사용후핵연료의 부피 및 방사능양을 획기적으로 감소시켜 저장하는 개념인 차세대관리종합공정 기술개발 연구를 수행 중이다. 차세대관리종합공정 기술개발 시 취급하여야 할 사용후핵연료는 상당히 높은 방사능 준위를 나타내므로, 연구에 필요한 자료들을 생산하기 위한 실증실험을 안전하게 수행하기 위하여서는 방사선 차폐능이 확보된 특수한 시험시설인 핫셀시설이 절대 필수적이라 할 수 있다. 그러나 신규로 시설을 확보하기 위해서는 많은 재원과 인력 및 시간이 소요되므로 한국원자력연구소 조사재시험시설(IMEF) 지하에 위치한 기존 핫셀을, 차세대관리 종합공정 특성에 적합하게 개조하여 공정의 실증시험을 위한 핫셀 시설로 활용하기 위한 설계가 진행 중이다.

그러나 차세대관리 종합공정의 공정수율에 따라 설정된 방사능양을 고려하여 볼 때 (표 1), 차세대관리 종합공정의 방사능양은 기존 핫셀 설계치<sup>1)</sup>의 약 10배 이상이므로, 기존 핫셀을 차세대관리 종합공정 실증시설로 사용하기 위해서는 방사선 선량 기준을 만족시키기 위한 추가적인 차폐 구조물 보강이 필수적임을 알 수 있다.

## 2. 차세대관리 종합공정 실증시설 차폐 설계

### 2.1 기존시설 현황

조사재시험시설 지하에 위치한 기존 핫셀은 그림 1과 같이 전면부에 2개의 오프닝과 후면부에 1개의 오프닝이 설치되어 있다. 핫셀 외부벽들은 일반 콘크리트 80 cm 두께로 타설되어 있으며, 천정은 중량콘크리트 80 cm로 이루어져 있는 상황이다. 핫셀의 내부 공간은 11 m (길이) x 2 m (폭) x 4.55 m (높이)이다. 현재 기존 핫셀은 콘크리트 골조와 일부 벽체만 설치되어 있는 상태며, 현재 일반 콘크리트가 설치되어 있는 외벽들은 Fe-59 35 Ci (1.2 MeV) 선원 기준을 만족하도록 설계, 시공되어 있다.

### 2.2 핫셀의 방사능 차폐 설계기준

현재 핫셀이 위치하고 있는 조사재 시험시설의 기존핫셀 구역은 3개의 방사선 구역으로 설계되어 각 관리구역에 따라 나뉘어 관리되고 있다. 본 차세대관리 종합공정 실증을 위한 핫셀의 경우 기존에 설치되어 있는 핫셀을 보강하는 개념이므로, 차폐 설계기준으로 아래와 같이 기존 시설과 동일한 기준을 적용하였다.

7000 구역 : 상시 운전구역

8000 구역 : 작업구역

9000 구역 : 금지구역

차폐체 설계를 위한 차폐벽이나 차폐물에 관한 설계기준은 원자력관련 고시 2002-1호 방사선방호등에 관한 고시에 제시되어 있으며, 현재 법규상으로는 1주당 방사선작업종사자의 선량한도가 1 mSv를 초과하지 못하도록 되어 있다. 따라서 본 실증시설의 설계기

준으로 주당 작업시간을 40시간 기준으로 할 때 0.025 mSv/hr이나, 보수적 가정을 고려하여 본 실증시설의 설계기준으로는 0.01 mSv/hr를 방사선 차폐 설계기준으로 고려하였다.

### 2.3 차세대관리 종합공정 방사선원향 분석

차세대관리 종합공정 실증시설은 경수로 핵연료를 가공하여 금속 우라늄피로 전환시키기 위한 시설로서, 취급되는 사용후핵연료의 기준 사양은 다음과 같으며, 기준 사양과 차세대관리 종합공정의 특성에 따라 다음과 같은 3개의 방사선원이 실증시설내에 존재한다고 가정하였다.

- 사용후핵연료 1 batch (20 kg - heavy metal)
- 반감기가 긴 휘발성 핵분열생성물 (H,I,Kr) 5 batches
- 폐용융염 2 batches

차세대관리 종합공정에서 취급하는 핵종들 및 각 핵종들의 감마선 방출량은 Origen 2.1 코드를 사용하여 계산하였으며, 차폐계산을 위한 감마선 에너지에 따른 18 그룹 감마선 방출률은 표 2에 나타내었다. 총 방출되는 감마선 선원은  $4.77E+14$  photons/sec로서 공정특성상 사용후핵연료 1 batch분과 폐용융염 5 batch분에서 방출되는 감마선이 대부분을 차지하는 것을 알 수 있다.

### 2.4 핫셀의 보강 방안

선원은 핫셀내에서 다양한 장소에 다양한 형태로 분포하나 계산결과의 보수성을 위하여 한 장소에 점선원 형태로 존재한다고 가정하였다. 방사선 차폐 계산을 위하여 다음과 같이 3가지 경우에 대하여 모델링하여 계산을 수행하였다. Case 1은 현재 차폐벽이 설치되어 있지 않은 전면부 및 후면부 일부를 중량콘크리트 타설시의 경우이며, Case 2 및 3은 이미 설치되어 있는 일반콘크리트 80 cm에 실증시설의 공간 특성 및 내부 공간 확보등을 고려하여 중량콘크리트로 외부를 보강할 경우와 납 차폐체로 내부를 보강할 경우이다.

Case 1. 중량콘크리트에 의한 단일 차폐(현재 차폐벽이 설치되어 있지 않은 전면부 및 후면부)

Case 2. 기존의 일반콘크리트 벽체 + 중량콘크리트 보강 차폐

Case 3. 기존 일반콘크리트 벽체에 대한 납 보강 차폐

차폐 계산시 적용한 핫셀의 기하학적 구조, 차폐체들의 배치, 방사선원 및 선량 측정지점은 그림 2와 같다. SP(Source Point)는 선원의 위치, DP(Detector Point)는 검출기의 위치를 나타낸다.

표 3는 계산에 입력자료로 사용되는 물질들의 구성 성분 및 각 원소별 밀도를 나타낸 표로서, 중량콘크리트의 밀도는  $3.45 \text{ g/cm}^3$ 이며 일반콘크리트에 비해 자철광이 많이 포함되어 있다. 차폐벽 보강 두께를 결정하기 위한 방사선 선량 계산 코드로는 QADS<sup>2)</sup> 전산 코드를 이용하였으며, 선속-선량 환산인자로는 ICRP 74<sup>3)</sup> 자료를 사용하였다.

차폐보강을 위한 3가지 경우에 대하여 차폐체로 선정된 물질에 대한 각각의 계산결과는 그림 3 - 5와 같다. 차폐 계산 결과 중량 콘크리트 단일 차폐체로 설치되는 전면의 경우 선량기준을 만족시키기 위해서는 83 cm 이상의 두께가 요구되었으며, 일반 콘크리트에 중량 콘크리트로 보강을 해야하는 후면의 경우 일반 콘크리트 80 cm 에 중량 콘크리트 25 cm 가 필요한 것을 볼 수 있다. 일반 콘크리트에 납으로 보강 차폐해야 하는 부분은 약 8 cm 두께의 납 보강이 필요하다.

작업구역인 핫셀 전면부의 경우 현재 일부벽체를 제외하곤 오픈 상태이므로, 중량콘크리트 단일 차폐체로 계산 결과보다 7 cm 두꺼운 90 cm 두께의 차폐를 고려하였으며, 일부 일반콘크리트 벽체 부분은 납 8 cm 으로 보강 차폐하였다. 그리고 시설의 여건상 핫셀 후면부 (서비스 구역) 및 좌측벽과 우측벽의 경우 공간이 협소한 관계로 내부에서 납차폐 보강 하였으며, 일부분은 외부에서 중량콘크리트 30 cm 보강 차폐하였다. 그러나 납과 같은 경우 요구되는 두께가 중량콘크리트에 비해 상대적으로 적으나, 재질상 내진 안전성이 취약하므로 납으로 보강할 경우 별도의 구조 보강 방안을 고려 하여야 한다. 그림 6은 핫셀의 구역별 선량기준, 구조물의 내진 안전성, 중성자 차폐능, 공간 활용성 및 경제성, 기존 벽체와의 접합 성능 및 시공의 편이성 그리고 기밀 유지등을 고려한 차세대 관리 종합공정 실증시설의 차폐보강 계획 평면도이다.

### 3 차세대관리 종합공정 실증시설의 차폐보강에 따른 선량평가

QADS 전산 코드의 계산 결과를 근거로 차세대관리 종합공정 실증시설의 차폐보강 방안이 도출되었으며, 최근 방사선 차폐 계산에 범용적으로 사용되고 있는 MCNP-4C<sup>4)</sup> 코드를 이용하여 각각의 보강 차폐체 두께에 따른 선량률을 재평가 하였다. 실증시설의 차폐 계산을 수행하기 위한 수평방향의 대표적인 단면 모델링은 그림 7과 같으며, 측면 단면도는 그림 8에 나타내었다. 차폐 계산을 수행하기 위한 기하학적인 모델링을 제외한 다른 입력자료들은 QADS 입력 자료와 동일하게 적용하여 계산을 수행하였으며, 전면부에 위치한 차폐창의 차폐능은 중량콘크리트 90 cm와 동일하다고 가정하였다. MCNP-4C 코드를 이용하여 차세대관리 종합공정 실증시설의 차폐보강에 따른 선량평가를 구한 결과치는 표 4와 같으며, QADS 코드로 계산한 방사선량과 거의 일치하는 결과를 나타내었다.

### 4. 결 론

한국원자력연구소 내 조사재시험시설에 설치되어 있는 기존의 핫셀을 차세대관리 종합공정의 실증시험을 위한 시험시설로 사용하기 위하여 각 보강 차폐체에 따른 차폐 계산을 수행하였다. 차폐 보강 재료로서 중량콘크리트, 납 등을 선택하여, 각 구역별로 핫셀의 차폐 선량기준을 만족시키기 위한 해석을 수행하였으며, 방사선 선량 설계기준을 만족시키는 보강 차폐체의 두께를 결정하였다. 또한 결과 자료를 바탕으로 핫셀의 보강현장 여건, 차폐창의 설치 문제 및 시공성 등 종합적인 판단아래 차세대관리 종합공정 실증시설의 차폐 보강 방안을 도출하였으며, MCNP-4C 코드를 이용하여 검증 계산을 수행한 결

과 실증시설의 차폐 보강 설계 방안은 적절하게 설계된 것으로 사료되었다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부 주관으로 추진중인 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 추진 하였으며, 관계자 여러분에게 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌

1. “하나로 안전성 분석보고서 - 11.4 조사재 시험시설,” KAERI/TR-710/96
2. B. L. BROADHEAD, “QADS: A Multidimensional Point Kernel Analysis Module,” NUREG/CR-5468 (ORNL/CSD/TM-270), U.S. Nuclear Regulatory Commission (May 1990).
3. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, Volume 26, 1996
4. J. F. BRIESMEISTER, Ed., “MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C,” LA-13709-M (April 2000)

표 1 Inventory Basis of Radioactivities in Hot Cell

| 구분                              | Activity (Ci)         |
|---------------------------------|-----------------------|
| 기준 SF 1 Batch(20 kg-HM)         | 9,930                 |
| 장반감기 Volatile FP(H, Kr) 5 Batch | 679<br>(135.7 × 5)    |
| 폐용융염 2 Batch                    | 12,220<br>(6,110 × 2) |
| <b>Total</b>                    | <b>22829</b>          |

표 2 Total Radioactivities of ACP - 18 Group

| 평균에너지(MeV)   | 감마선 방출율(Photons/sec) |                     |                     |                 |
|--------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
|              | S/F<br>(1 batch)     | VFPs<br>(5 batches) | 폐용융염<br>(2 batches) | Total           |
| 1.00E-02     | 4.95E+13             | 3.40E+12            | 3.25E+13            | 8.54E+13        |
| 2.50E-02     | 1.06E+13             | 6.67E+11            | 6.70E+12            | 1.80E+13        |
| 3.75E-02     | 1.30E+13             | 3.02E+07            | 1.69E+13            | 2.99E+13        |
| 5.75E-02     | 9.79E+12             | 5.56E+11            | 5.54E+12            | 1.59E+13        |
| 8.50E-02     | 5.84E+12             | 2.96E+11            | 3.59E+12            | 9.73E+12        |
| 1.25E-01     | 5.70E+12             | 0.00E+00            | 5.96E+12            | 1.17E+13        |
| 2.25E-01     | 4.81E+12             | 0.00E+00            | 1.93E+12            | 6.74E+12        |
| 3.75E-01     | 2.30E+12             | 0.00E+00            | 3.32E+11            | 2.63E+12        |
| 5.75E-01     | 8.87E+13             | 0.00E+00            | 1.73E+14            | 2.62E+14        |
| 8.50E-01     | 8.70E+12             | 0.00E+00            | 1.68E+13            | 2.55E+13        |
| 1.25E+00     | 3.23E+12             | 0.00E+00            | 6.24E+12            | 9.47E+12        |
| 1.75E+00     | 8.93E+10             | 0.00E+00            | 1.59E+11            | 2.48E+11        |
| 2.25E+00     | 1.92E+09             | 0.00E+00            | 7.77E+07            | 2.00E+09        |
| 2.75E+00     | 1.36E+08             | 0.00E+00            | 5.46E+06            | 1.41E+08        |
| 3.50E+00     | 1.75E+07             | 0.00E+00            | 7.01E+05            | 1.82E+07        |
| 5.00E+00     | 5.38E+05             | 0.00E+00            | 2.15E+04            | 5.60E+05        |
| 7.00E+00     | 6.20E+04             | 0.00E+00            | 2.48E+03            | 6.45E+04        |
| 9.50E+00     | 7.13E+03             | 0.00E+00            | 2.85E+02            | 7.41E+03        |
| <b>Total</b> | <b>2.02E+14</b>      | <b>4.92E+12</b>     | <b>2.70E+14</b>     | <b>4.77E+14</b> |

표 3 Partial Density of Each Shielding Materials

| 원자 번호 | 원소 기호 | Partial Density(g/cm <sup>3</sup> ) |         |          |      |
|-------|-------|-------------------------------------|---------|----------|------|
|       |       | 공기                                  | 일반콘크리트  | 중량콘크리트   | 납    |
| 1     | H     |                                     | 0.00484 | 0.01035  |      |
| 6     | C     |                                     | 0.13    |          |      |
| 7     | N     | 9.635E-04                           |         |          |      |
| 8     | O     | 2.565E-04                           | 1.149   | 1.104    |      |
| 12    | Mg    |                                     | 0.00486 | 0.0207   |      |
| 13    | Al    |                                     | 0.0119  | 0.10005  |      |
| 14    | Si    |                                     | 0.438   | 0.12075  |      |
| 15    | P     |                                     |         | 0.005865 |      |
| 16    | S     |                                     | 0.00192 | 0.036915 |      |
| 20    | Ca    |                                     | 0.581   | 0.210105 |      |
| 22    | Ti    |                                     |         | 0.0966   |      |
| 25    | Mn    |                                     |         | 0.002415 |      |
| 26    | Fe    |                                     |         | 1.74225  |      |
| 28    | Ni    |                                     | 0.00726 |          |      |
| 82    | Pb    |                                     |         |          | 11.3 |
| Total |       | 0.00122                             | 2.32878 | 3.45     | 11.3 |

표 4 차폐벽 종류 및 두께에 따른 코드간 계산결과치

| 차폐벽 종류 및 실제 적용 두께           | 방사선량 (mSv/hr) |           |
|-----------------------------|---------------|-----------|
|                             | QADS          | MCNP-4C   |
| 중량콘크리트 90 cm                | 2.20 E-03     | 2.33 E-03 |
| 일반콘크리트 80 cm + 납 8 cm       | 7.94 E-03     | 8.46 E-03 |
| 일반콘크리트 80 cm + 중량콘크리트 30 cm | 3.33 E-03     | 3.41 E-03 |



그림 1. The Photograph of Hot Cell (Front View) in IMEF

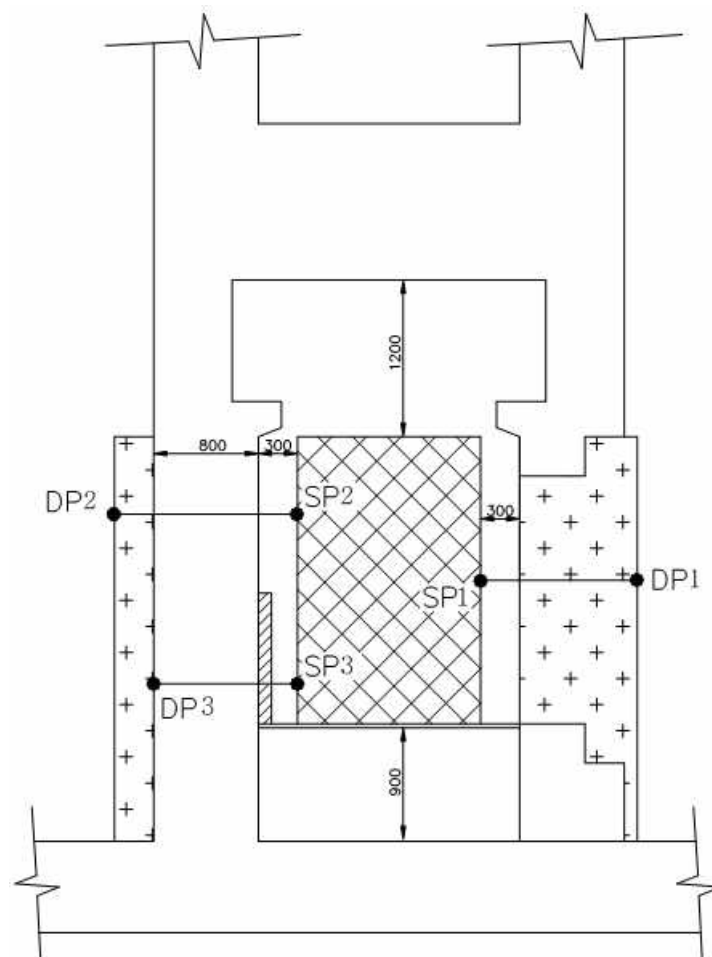


그림 2. Modeling of Hot Cell for Shielding Calculation (QADS)



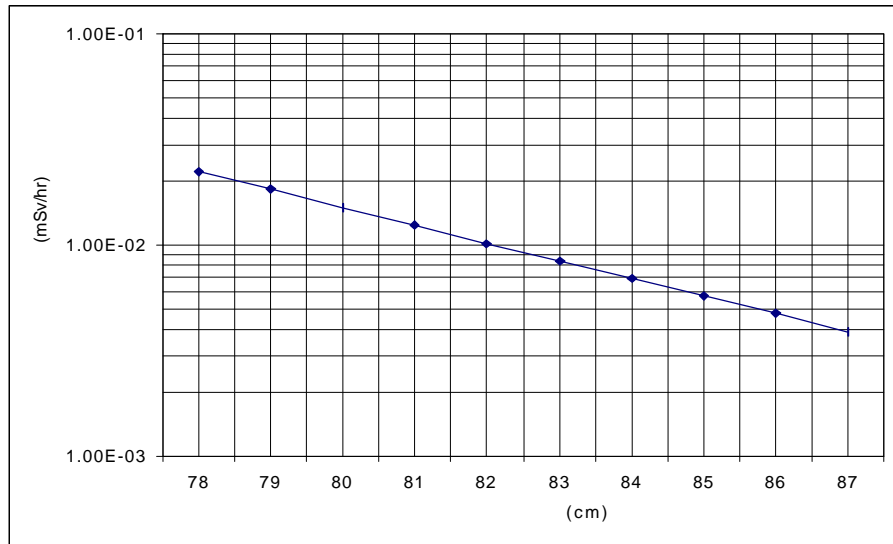


그림 3. 중량콘크리트 두께에 따른 피폭선량-외벽 (Case 1)

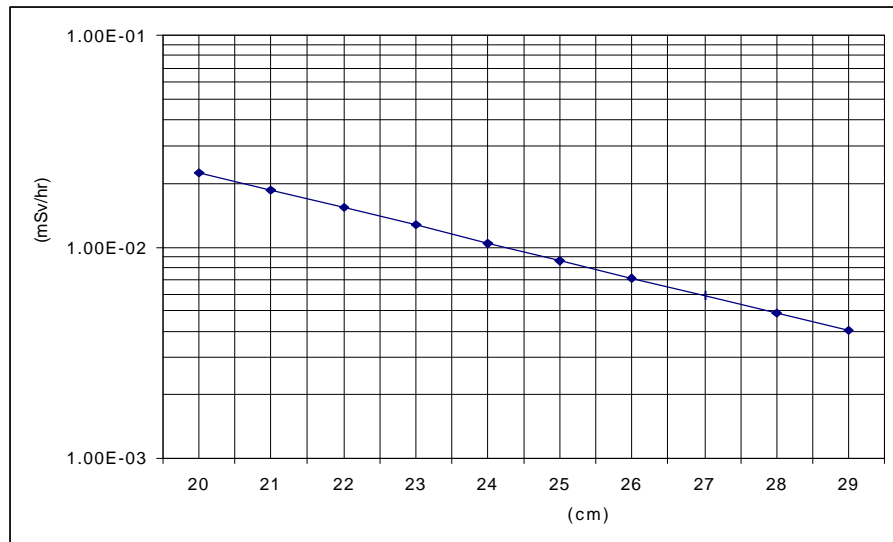


그림 4. 중량콘크리트 보강할 경우 두께에 따른 피폭선량 (Case 2)

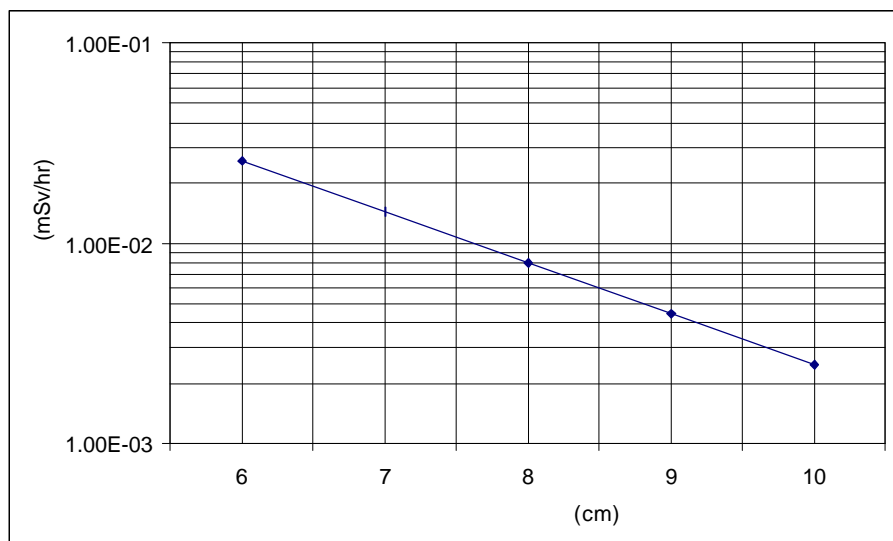


그림 5. 납 보강차폐에 따른 피폭선량 (Case 3)

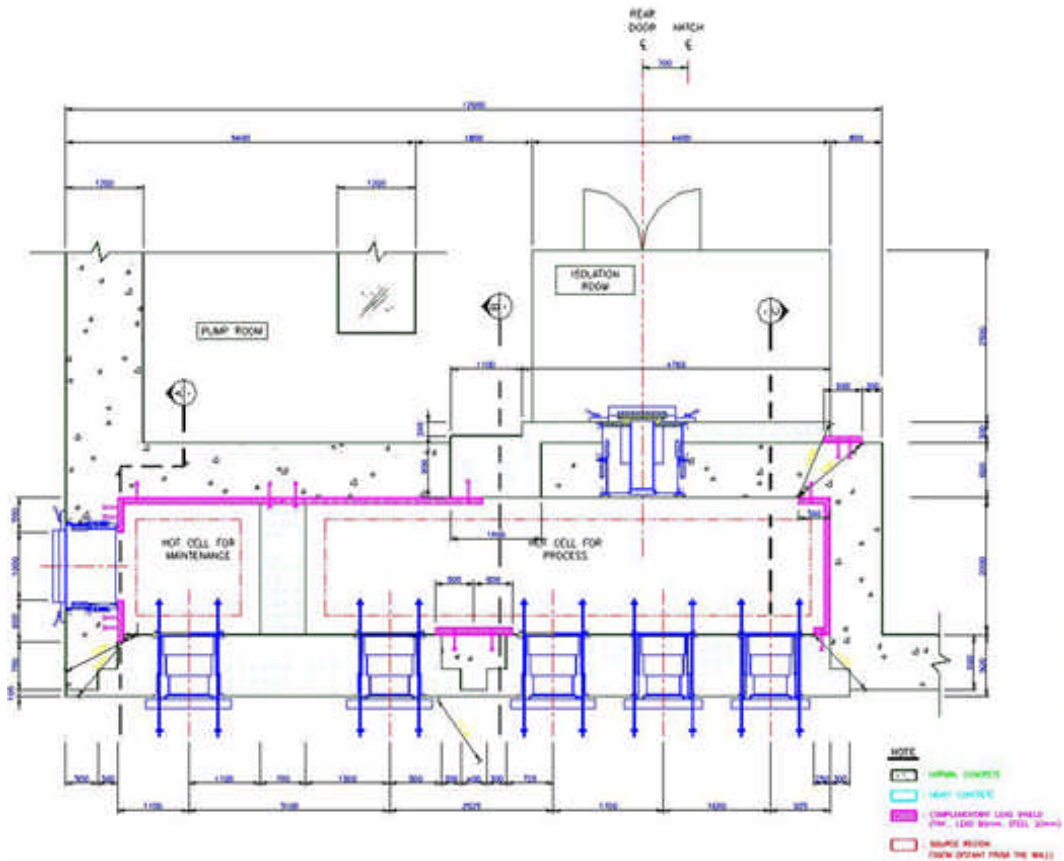


그림 6. 차세대관리 종합공정 실증시설의 차폐보강 방안 평면도

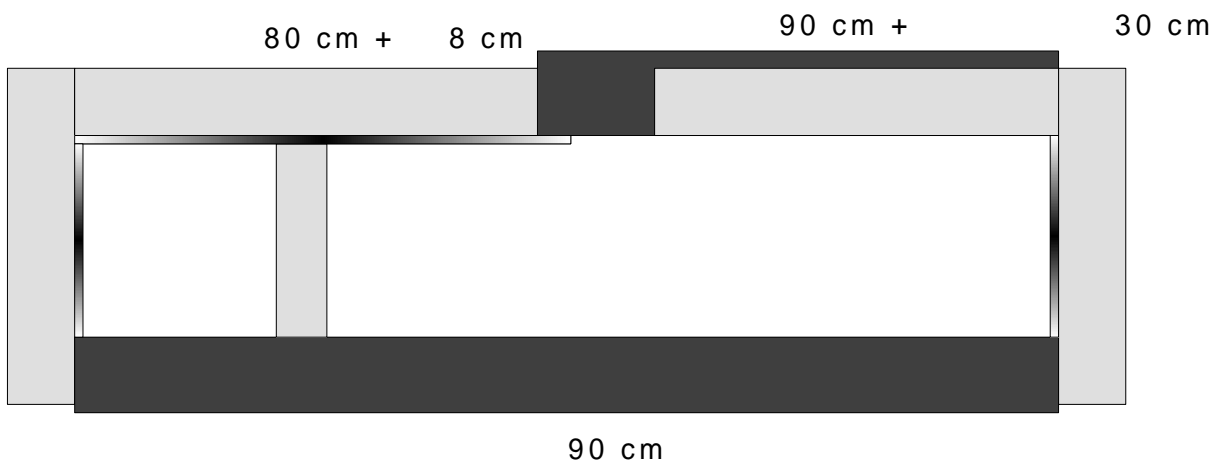


그림 7. 차세대관리 종합공정 실증시설의 MCNP 평면 모델링

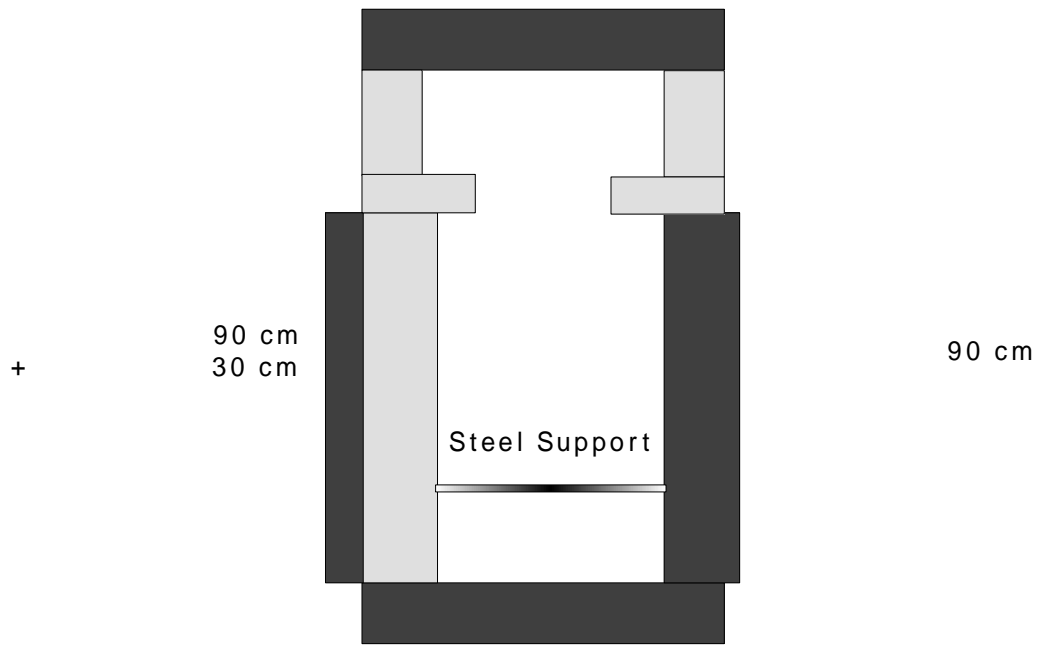


그림 8. 차세대관리 종합공정 실증시설의 MCNP 측면 모델링