

핫셀 주요부위에 대한 차폐 설계

Shielding Design for Main Parts of a Hot Cell

조일제, 국동학, 구정희, 정원명, 유길성, 이은표, 주준식, 박성원

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

차세대관리 종합공정 실증시설의 핫셀 차폐벽은 중량콘크리트 재질로서 외벽의 두께는 90 cm 이상으로 설계되었으며, 차폐벽의 모든 부위는 이와 동일한 차폐능을 확보하도록 하여야 한다. 그러나 핫셀 운영을 위하여 불가피하게 설치되는 여러 가지 부속 시설물들에 의하여 원래 계획한 핫셀 차폐벽의 차폐능 저하를 가져오게 되며, 이런 부속 시설물로는 차폐 출입문, 방사성 물질을 핫셀 내부로 반입하거나 반출하기 위한 수송용기 접합부, 소형물 투입구, 슬리브 및 매설관등이 있다. 본 연구에서는 부속 시설 설치에 따라서 차폐능 저하가 예상되는 부위에 대하여 보강 차폐체의 재질, 두께 및 치수를 결정하기 위한 차폐 계산을 수행하였으며, 차폐 계산 결과에 따라 핫셀 주요부위에 대한 차폐 설계를 완료하였다. 또한 폐용융염 및 방사성물질을 임시로 저장하기 위한 storage vault에 대한 차폐 설계를 수행하였다.

Abstract

The shield wall of ACP (Advanced Conditioning Porcess) hot cell is designed over 90 cm thickness of heavy concrete, and all parts of shield wall should be satisfied this criteria. But decrease of shielding ability is occurred by installing the several parts of utility for operation hot cell such as shielding door, cask adopter for transporting radioactive materials, toboggan, sleeve and embedded pipe. Therefore, this study presents a shielding analysis results to determine the size and materials for reinforcing the weak points on which several utility is installed. and shield design is also performed to storage vault which stores with the residual molten salts and radioactive material temporarily.

1. 서론

한국원자력연구소에서는 사용후핵연료를 고온의 용융염 매질 하에서 우라늄 산화물의 전도특성과 용융염의 전해특성을 이용한 전기화학적인 방법에 의하여 우라늄 금속을 환원시켜, 고준위 방사능물질인 사용후핵연료의 부피 및 방사능양을 획기적으로 감소시켜 저장하는 개념인 차세대관리종합공정 기술개발 연구를 수행 중이다. 차세대관리 종합공정 실증을 완료하기 위하여서는 상당히 높은 방사능 준위의 물질을 취급할 수 있는 방사선 차폐능이 확보된 특수한 시험시설인 핫셀 시설이 절대 필수적이나, 차세대관리 중

합공정의 공정수율에 따라 설정된 방사능 양을 고려하여 볼 때(표 1), 차세대관리 종합공정의 방사능양은 기존 핫셀 설계치¹⁾의 약 10배 이상이므로, 기존 핫셀을 차세대관리 종합공정 실증시설로 사용하기 위해서는 방사선 선량 기준을 만족시키기 위한 추가적인 차폐 구조물 보강이 필수적임을 알 수 있다.

핫셀 차폐 설계는 시설 구조, 방사성 차폐 재료, 선원량, 선원 형태, 선원 위치 및 선원의 에너지 스펙트럼 등을 입력 자료로 사용하여 계산하게 되며, 원칙적으로 ① 선원량은 핫셀에서 취급하는 최대량으로, ② 선원 형태는 점선원, 선선원 및 부피선원 등 실제 선원과 유사한 형태로, ③ 선원 위치는 핫셀 벽면 접촉으로, 그리고 ④ 선원의 에너지 스펙트럼은 실제 선원이 갖고 있는 스펙트럼으로 계산한다. 그러나 본 연구에서는 ① 선원량은 핫셀에서 취급하는 최대량으로, ② 선원 형태는 점선원으로, ③ 선원 위치는 핫셀 벽면에서 30 cm 떨어진 상태로, ④ 실제 선원이 가지고 있는 스펙트럼으로 평가를 수행하였다. 차폐 계산 코드로는 QAD-CGGP²⁾ 및 MCNP-4C³⁾를 이용하였으며, 감마선 피폭 선량을 계산하기 위하여 적용하는 flux to dose conversion factor는 ICRP Publication 74⁴⁾에서 제시된 effective dose conversion factor를 사용하였으며, 조사방향은 AP (Antero-Posterior Geometry)를 적용하였다.

기존 설치되어 있는 차폐벽의 재질이 중량콘크리트로 되어 있고, 상당 부분 제거 후 재설치될 예정이므로 신설되는 차폐벽은 기존과 같은 중량콘크리트로 시공할 예정이며, 방사선 차폐를 위하여 요구되는 중량콘크리트의 두께는 90 cm이다. 현장 여건상 중량콘크리트에 의한 차폐보강이 불가능할 경우에는 강판 또는 납과 같은 별도의 보강 차폐체를 고려하였으며, rear door 및 padirac adapter 부분 등 일부 차폐능이 손실될 우려가 있는 부분에 대하여서는 납을 부분 차폐체로 선택하였다. 핫셀 시설에 대한 일반적인 보강 차폐체 선정 기준은 다음과 같다.

- 구역별 선량기준
- 내진 안전성
- 감마선 및 중성자 차폐능
- 공간 활용성 및 경제성
- 기존 벽체와의 접합 성능 및 시공의 편이성
- 기밀 유지
- 경제성

2. 차세대관리 종합공정 실증시설 방사선원 분석

차세대관리 종합공정 실증시설 방사선원은 차세대관리 종합공정 실증용으로 사용될 사용후핵연료 5 batch에서 핫셀 외부로 반출된 방사선원(폐용융염 2 batches)을 제외한 양으로 설정하였다.

기준선원에서 발생하게 되는 선원의 핵종 및 각 핵종들의 양은 ORIGEN-2⁵⁾ 코드를 이용하여 계산하였으며, 표 1에서 보는 바와 같이 대부분 방사선원은 사용후핵연료, 금속우라늄 및 폐용융염에서 발생한다. 표 1은 차세대관리 종합공정 시 발생하는 총 방사선원항만을 나타내므로, 차폐 계산을 위해서는 에너지에 따른 감마선 방출량을 계산해야 한다. 이를 위하여 차세대관리 종합공정에서 취급할 공정 물질별로, 각 공정물질에 포함되는 핵종들을 고려하여 감마선 방출율을 계산하였으며, 감마선의 에너지에 따른 방출율은

그림 1과 같다. 방출되는 총 감마선의 양은 7.42×10^{14} γ/s 이며, 사용후핵연료, 환원된 금속 우라늄 및 폐용융염이 방출하는 총 감마선량은 비슷하였다. 방출되는 감마선의 평균 에너지는 1 MeV전후이며, 대부분 Cs 및 Eu 에 의한 영향이다.

표 1 Inventory Basis of Radioactivities in Hot Cell

구분	Activity (TBq)
기준 사용후핵연료 - 1 Batch (20 kg-HM)	367.4
금속우라늄 - 4 Batches	545.2 (136.3 × 4)
장반감기 Volatile FP(H, Kr) - 4 Batches	20.0 (5.0 × 4)
폐용융염 - 2 Batches	452.2 (226.1 × 2)
Total	1384.8

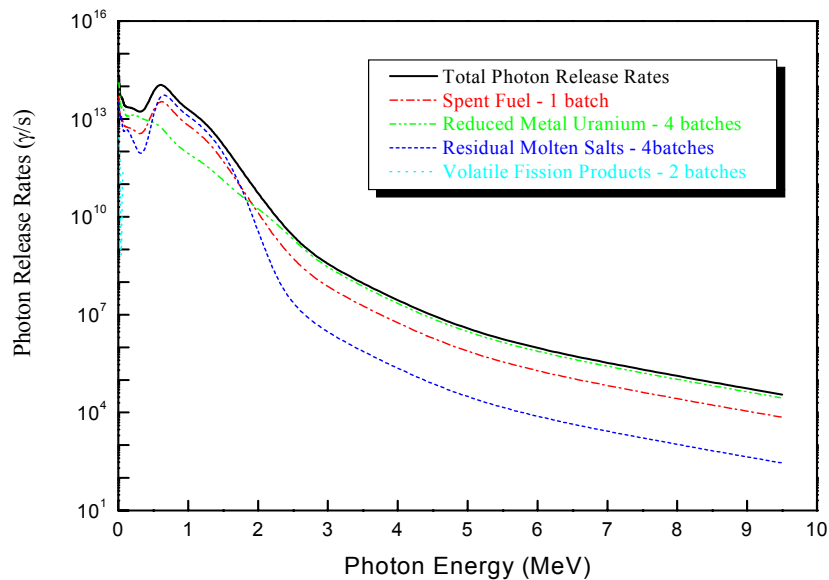


그림 1. Source spectra of spent fuel, reduced metal uranium, volatile fission products and residual molten salts.

3. 핫셀 주요부에 대한 차폐설계

현재 핫셀 전면부 및 후면부 차폐벽에 보강 설계는 그림 2와 같다. 전면부 및 후면 일부는 중량콘크리트 재질로서 외벽 두께가 90 cm가 되도록 설계되어 있으며, 셀을 분리하기 위한 셀간벽의 두께는 70 cm로 설정되어 있다. 그리고 차폐벽의 모든 부위는 이와 동일한 차폐능을 확보하여야 한다.

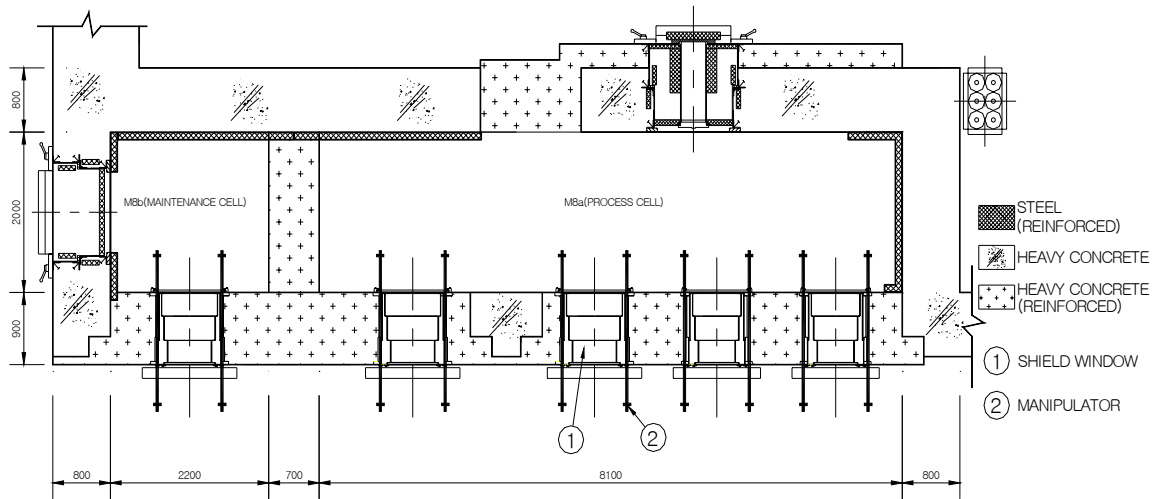


그림 2. Radiological design of hot cell facility.

그러나 핫셀 운영을 위해서는 불가피한 출입문 및 penetration이 핫셀 전면부 및 후면부에 설치될 예정이며, 이 부위의 벽체 두께가 감소됨에 따라 차폐능 저하가 불가피하다. 본 시설에서 차폐벽의 차폐능 감소가 발생할 것으로 예상되는 부위는 다음과 같다.

3.1 Rear Door for M8a Cell

핫셀의 차폐벽에는 핫셀의 운영 및 운전을 편리하게 하기 위한 rear door 및 intercell door 등 차폐문이 설치되게 되며, 특히 문과 문틀 사이에 방사선 누출이 없도록 고려하여야 한다.

본 시설의 M8a cell 및 M8b cell에 설치될 rear door의 상세도는 그림 3 및 그림 4와 같다. Rear door 중앙에 핵물질의 반·출입을 위한 padirac transfer tube가 설치되게 되며, rear door의 주 차폐체는 차폐벽 후면과 두께를 맞추기 위하여 중량콘크리트로 설계되었다. 그리고 중량콘크리트 차폐두께 90 cm에 미달되어 차폐보강이 요구되는 부위 및 차폐계산 모델은 아래와 같다. 차폐 설계 기준은 0.01 mSv/h 이다.

3.1.1 Rear door 와 door frame 간의 틈새 (그림 3, SP1 ~ DP1, SP2 ~DP2)

Rear door와 door frame 간에 그림에서 보는 바와 같은 틈새가 존재하게 되며, 이 틈새 부분의 차폐능 저하가 발생하게 된다. 따라서 이 부분의 차폐능을 보완하기 위하여 틈새 부분에 납 차폐체로 보강하여 설계하였다. 납 차폐체의 두께 A 및 B의 선량기준치를 만족하는 납 차폐체 A 및 B의 두께는 각각 17.62 cm, 5.35 cm이나 안전 여유도를 고려하여 20 cm와 6 cm로 결정하였다.

3.1.2 Travelling motor 하우징 (그림 3, SP3 ~ DP3)

Rear door를 구동하기 위한 모터의 하우징의 크기(C)는 모터 크기에 따라 달라질 수 있으며, 차폐체의 두께(D)는 모터 하우징의 크기(C)-10 cm보다 크게 설계하여야 하며, 차폐체로는 스틸을 사용하였다. 그리고 핫셀 내부의 working table위의 SP에서 나오는 감마선이 모터하우징의 윗 부분에 도달할 경우 중량콘크리트의 두께가 차폐설계기준에 미달될 수 있으므로, 스틸 차폐체의 높이는 모터 하우징보다 높게 설치하여, 감마선 행정이 수평선과 이루는 각도 θ 의 범위 안에는 스틸 차폐체가 존재하도록 설계하였다.

3.1.3 Door wheel (그림 3, SP4 ~ DP4)

모터의 wheel부분을 차폐하기 위하여 납으로 보강하였을 경우, 납 보강 차폐체의 두께는 24.39 cm 이상이어야 하며, 본 시설에는 26 cm를 적용하였다.

3.2 Rear Door for M8b Cell

M8b cell에 설치되는 rear door는 중량 콘크리트 80 cm 두께로서, 중량 콘크리트 90 cm의 차폐능에 미달하므로 중앙에 보강 납 차폐체를 설치하는 것과, padirac transfer tube가 없는 것을 제외하곤 M8a cell에 설치되는 rear door와 기본적으로 같다. 3.1 항의 해석 방법과 동일하게 해석을 수행하였으며, 각 부분에 대한 보강 차폐두께는 A: 납 20 cm, B: 납 11 cm, D: 모터 하우징의 크기와 동일한 스틸 차폐체, E: 납 차폐체 26 cm 및 F: 납 3 cm 로 결정 되었다.

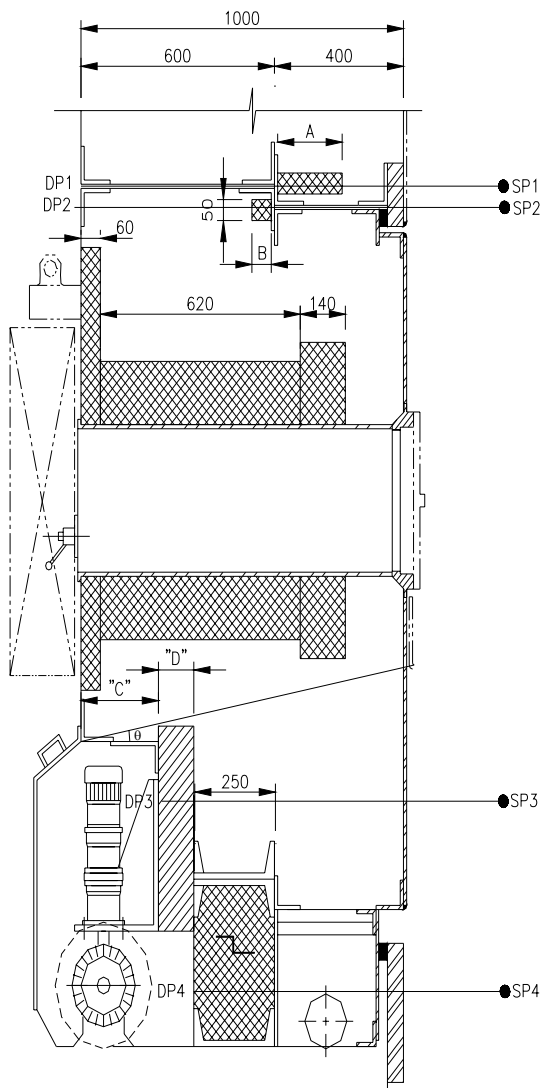


그림 3. Rear Door for M8a Cell의 차폐계산모델

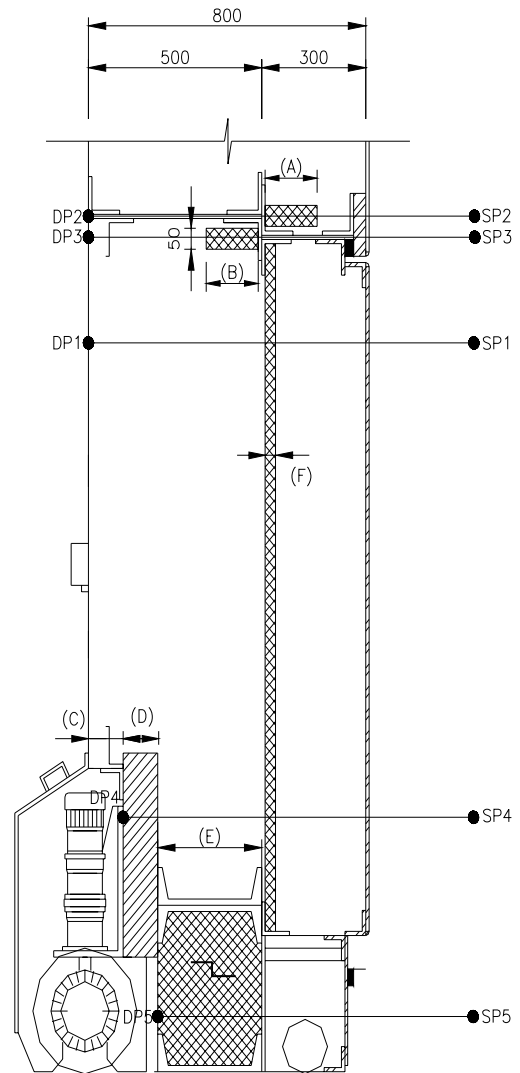


그림 4. Rear Door for M8b Cell의 차폐계산 모델

3.2 Penetrations

핫셀 운전에 필요한 배선, 급배수 설비 및 소화 설비 등 각종 유틸리티 공급에 필요한 penetration으로는 그림 5와 그림 6과 같은 S자 및 L자형의 두 종류가 설치되게 된다. S자형은 핫셀의 전면부 및 후면부에 집합체 형태로 삽입되며, L자형의 경우 전면부 우측 가장자리에 설치되게 된다. penetration 설치에 따른 차폐능 저하 감소분을 보상하기 위하여 penetration type 4의 경우 그림 5와 같은 형태로 납 보강 차폐체를 설치하게 되며, 납 차폐체의 두께 E는 11 cm이다. L자형의 penetration type 5의 보강 차폐체 두께 E는 14 cm이며, 각도가 53° 안에 드는 부분까지 차폐가 되도록 설계하였다. penetration의 경우 방사선이 관통을 따라 streaming될 확률이 존재하나, 예비 평가 결과 그 양이 미미한 것으로 평가 되었다. 그러나 실제 선원의 위치에 따라 streaming될 확률이 존재할 것으로 판명되어, 추 후 이 부분에 대한 자세한 차폐 평가해석이 필요할 것으로 예상된다.

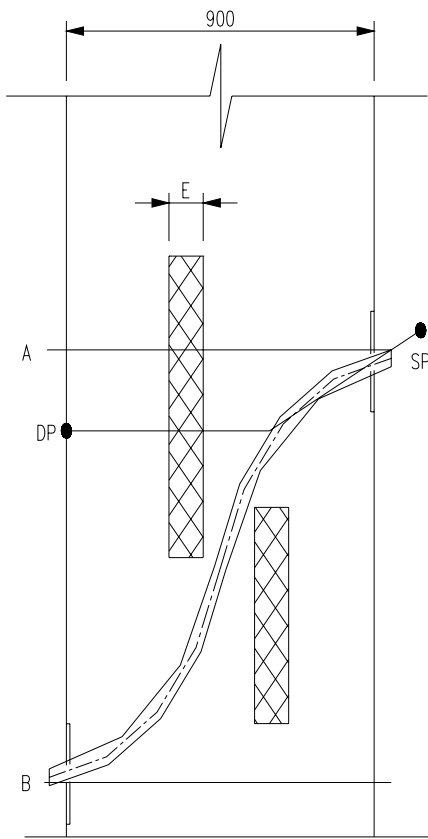


그림 5 Penetration Type 4.

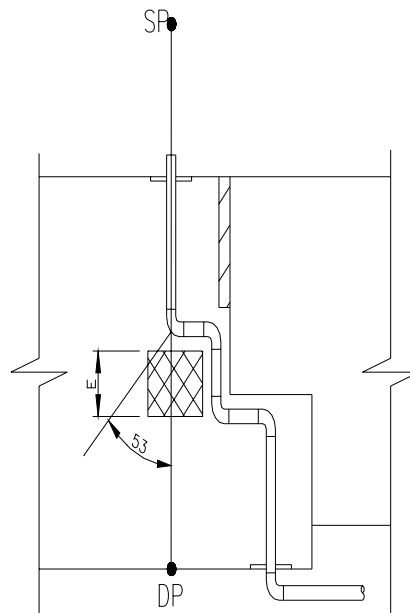


그림 6 Penetration Type 5.

3.3 Protection Screw

환기 덕트가 차폐벽을 관통해야 하는 경우 관통 부분에 차폐벽과 동일한 차폐능을 확보하거나 protection screw를 설치하게 되며, protection screw의 내부는 나선형 구조로서 납으로 제작된다. 본 시설에는 90 cm 및 70 cm 두께의 중량콘크리트에 해당하는 2가지 종류의 protection screw가 사용되며, 나선형 구조로 구성된 납의 두께를 26 cm 및 21 cm 2 종류를 사용한다.

3.4 Toboggan

핫셀 벽에 toboggan이 설치될 경우, toboggan 설치로 인해 생기는 공간을 통한 방사능을 차폐하기 위해 나선형 모양으로 설계를 하고 toboggan 주위를 납 보강 차폐한다. 본 시설에 설치 될 toboggan의 경우, helicoid 형태를 가지도록 설계되었으며, 차폐가 취약할 것으로 예상되는 부분은 각 각의 경우별로 나누어 차폐 해석을 수행하였다. Helicoid 형태의 toboggan의 경우 평면 투시도를 이용하여 평면상에서 계산한 후, Helicoid의 기울어진 각도만큼 보정을 하였다. 그림 7a는 toboggan을 위쪽에서 내려다 보았을 경우의 평면도이며, 그림 7b는 point A와 point B가 기울어진 각도를 나타내는 그림이다.

방사선이 빈 공간을 가장 많이 지나 차폐가 취약할 것으로 예상되는 부분은 방사선이 toboggan 둘레의 접선을 지나는 경우로 A, B, C line이며, 이 부분에 대하여 그림 7a와 같은 18 cm의 납 보강 차폐체를 두었다. 여기서 18 cm의 납 보강 차폐체가 toboggan을 둘러서 차폐하고 있을 경우 A line에서 감마선은 평면도상으로 22.6 cm의 납차폐체 및 8 cm의 중량콘크리트 차폐체를 지나게 되며, 이것은 toboggan이 25.5°의 경사를 이루고 있으므로 실제 거리는 $22.6 \div \cos 25.5^\circ$ cm인 25 cm의 납 차폐체와 9 cm의 중량콘크리트를 지나게 되어, A line에 대한 선량률은 0.943 $\mu\text{Sv/h}$ 로서 선량 제한치를 만족시키는 것을 알 수 있다. B line 을 고려하면 차폐체를 지나는 길이는 평면 투시도 상 20.1 cm의 납과 7.5 cm의 중량콘크리트를 지나므로, 실질적으로 22.2 cm의 납 차폐체와 8.3 cm의 중량콘크리트 차폐체를 통과하게 되어 4.48 $\mu\text{Sv/h}$ 이다. C line 의 경우도 납 차폐체 18 cm로 설계 기준을 만족시켰으나, D 및 E line 의 경우 부분적인 납 보강 차폐가 필요하였다.

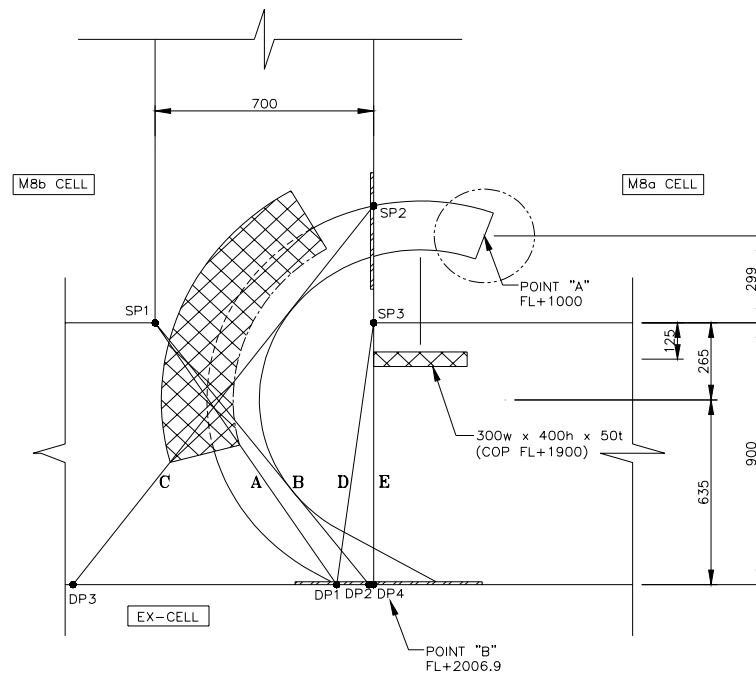


그림 7a. Toboggan 평면도

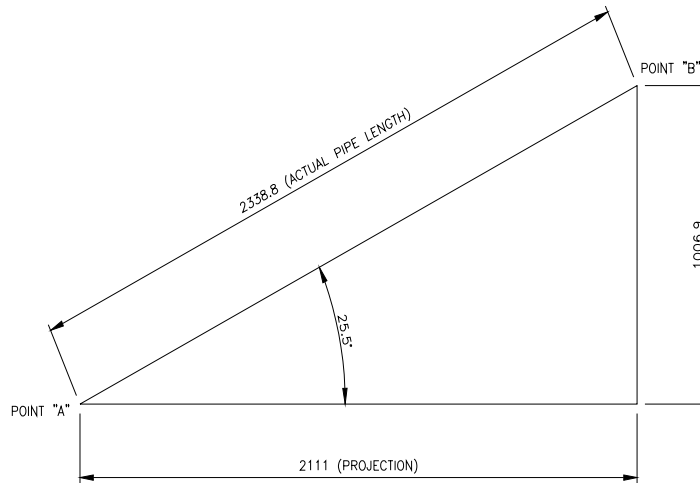


그림 7b. Point A와 Point B 사이의 투영도

3.5 Storage Vault

실증시설 내에 차세대관리 종합공정에서 발생하는 금속우라늄 또는 폐용융염 등의 공정폐기물 등 고준위 방사성물질을 임시 저장하기 위한 storage vault가 M8a 및 M8b cell의 작업테이블 밑에 설치되며, 각각 6개의 독립된 저장소로 구성되어 있다. M8a cell의 storage vault에는 직경 150 mm, 길이 250 mm의 원통형 캐니스터 12개를 저장할 수 있는 용량을 가지며, M8b cell의 storage vault에는 직경 150 mm, 길이 250 mm의 캐니스터 8개와 직경 150 mm, 길이 100 mm의 캐니스터 10개를 동시에 저장할 수 있는 용량을 가진다. Storage vault의 독립된 6개의 저장소 중 실증시험에서 발생하는 폐용융염은 0.5 batch(총 폐용융염 방사선원량의 1/10)씩 5개의 저장소에 들어가며, 나머지 한 개의 저장소에 5 batch 분량의 금속전환체가 저장된다고 가정하여 차폐 해석을 수행하였다. 0.5 batch가 들어가는 저장소의 위치는 그림 8a의 SP1, SP2, SP4, SP5, SP6이고, 금속전환체 5 batch는 SP3에 들어간다. 차폐가 취약할 것으로 예상되는 부분에 대한 결과는 표 2와 같으며, storage vault는 핫셀 내에 설치되므로 선량기준은 0.15 mSv/h로 하였다.

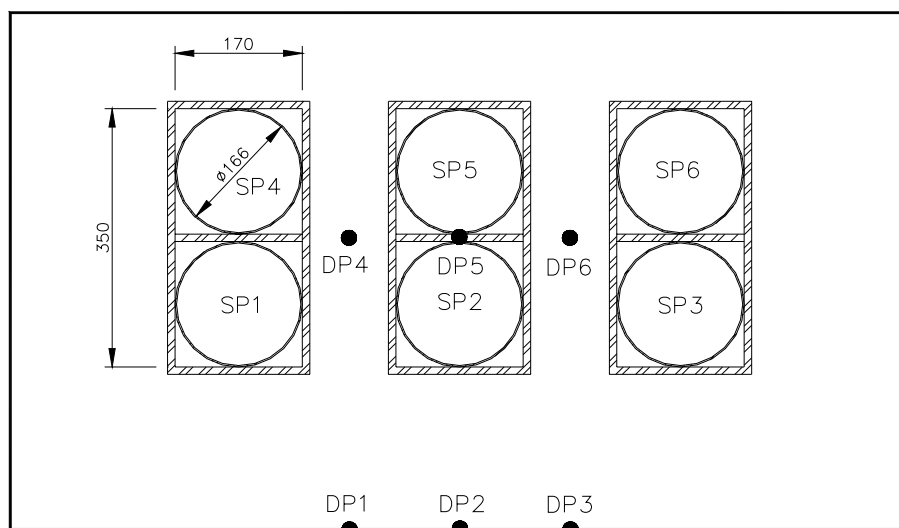


그림 8a. Storage Vault(평면)

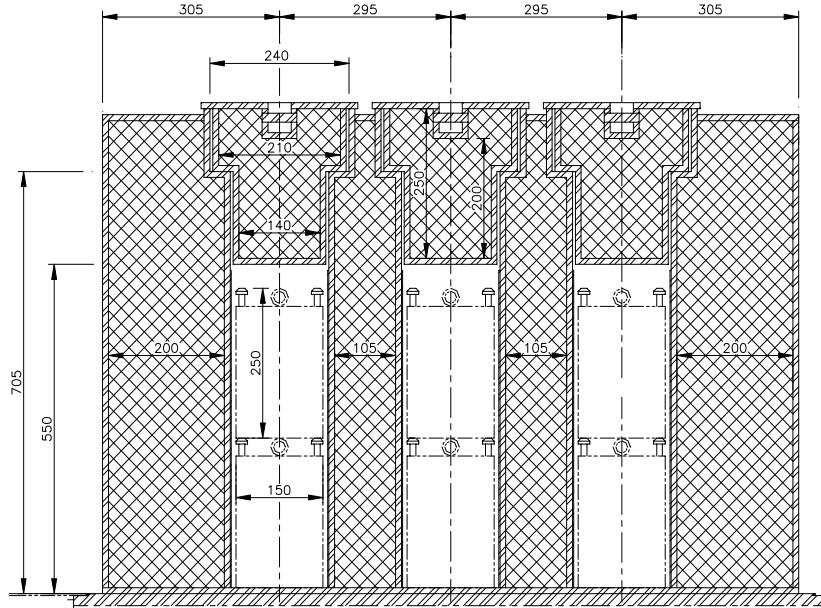


그림 8b. Storage Vault(측면)

표 2 Storage Vault의 피폭선량

Detector Position	피폭선량(mSv/h)
DP1	6.26×10^{-4}
DP2	1.80×10^{-4}
DP3	1.10×10^{-4}
DP4	9.43×10^{-3}
DP5	1.04×10^{-2}
DP6	2.70×10^{-2}

4. 결론

차세대관리 종합공정 실증시설 핫셀의 차폐 안전성을 평가하기 위해 QAD-CGGP 및 MCNP-4C 코드를 이용하여 계산을 수행하였으며, 주요 계산 위치로는 실증시설의 차폐 기준 설계치보다 차폐능이 저하될 것으로 예상되는 Rear Door, Penetration, Protection Screw, Toboggan, Stroage 등에 대한 해석을 수행하였다. 본 차폐 계산 결과를 바탕으로 핫셀 각 부분이 충분히 차폐능을 가질 수 있도록, 차폐체의 두께 및 재질을 결정하였다. 차폐 보강 재료로서 중량콘크리트, 납 등을 선택하여, 각 장치별로 핫셀의 방사선 선량 설계기준을 만족시키는 보강 차폐체의 두께를 결정하였다.

핫셀의 주요 부위에 대한 선량 평가 결과를 토대로, 핫셀에 설치되는 각 각의 부대설비에 따라 핫셀 설계 기준치를 모두 만족시키도록 설계에 반영하였으며, 본 결과는 핫셀

시설을 보강하기 위한 상세 설계 자료로 사용될 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 주관으로 추진 중인 원자력증장기연구개발사업의 일환으로 추진 하였으며, 관계자 여러분에게 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. “하나로 안전성 분석보고서 - 11.4 조사재 시험시설,” KAERI/TR-710/96
2. QAD-CGGP: A Combinatorial Geometry Version of QAD-P5A, A Point Kernel Code System for Neutron and Gamma-Ray Shielding Calculations Using the GP Buildup Factor, Available from Radiation Shielding Information Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-493/QAD-CGGP.
3. MCNP4C monte carlo n-particle transport code system, *ORNL RSIC CCC-700*, Radiation Safety Information Computational Center, Oak Ridge National Lab.
4. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation, *ICRP Publication 74, Volume 26 No.* (1996).
5. G. Croff, A user's manual for the ORIGEN2 computer code, *ORNL/TM-7175* (1980).