

## 방사선차폐시설의 설계요소 검토분석

이 기 준  
(한국원자력연구소 부설  
원자력환경관리센터)

### I. 머릿말

원자로에서 사용한 핵연료 등 높은 방사능을 갖고 있는 물질을 공기중에서 안전하게 취급하기 위해서는 방사선을 차폐시킬 수 있는 특수한 시설이 필요하다. 방사선차폐시설이란 이와같은 특수한 시설을 말하는 것으로, 핵연료 및 노재료의 조사후시험, 사용후핵연료의 재처리, 방사성동위원소의 제조 및 고준위방사성폐기물의 처리 등 용도에 따라 여러시설로 구분되는데, 그 대부분이 어떠한 관계에서라도 원자력기술 개발과 관련되어 사용되고 있다. 따라서 차폐시설은 원자력기술을 개발하기 위한 필수적인 시설로 외국에서는 차폐시설의 설계기술도 중요한 원자력기술의 하나로 보고 이에 관해 많은 자료가 발표되고 있다[1-5].

이에 반하여 우리나라에서는 원자력기술을 대부분 외국으로 부터 도입하여 사용하므로 차폐시설의 중요성에 대한 인식이 낮았다. 그러나 최근에 선진국 문턱에 들어 서면서 원자로기술 자립, 방사성폐기물 처리기술 확립, 핵연료국산화 등 여러 분야에서 원자력의 산업규모가 확대되어 원자력기술 자립의 필요성이 크게 강조되고 있다. 이에 따라 차폐시설의 필요성도 크게 부각되면서 경제적이고 효율적인 차폐시설의 설계에 많은 관심을 갖게 되었다.

본 해설에서는 이러한 狀況에 부응하고자 경제적이고 효율적인 차폐시설 건설을 위해 설계시에 유의해야 할 각종 설계요소를 분석검토하여 개략적으로 기술하여 보고자 한다.

### II. 설계전 검토사항

차폐시설은 경제적이고 효율성있는 시설로 건설해야 하는데, 경제성과 효율성은 서로 相反되는 관계가 있으므로 이를 조화시키기 위해서는 시설의 사용목적 및 작업내용을 사전에 충분히 분석검토해야 한다. 만약에 사용목적과 작업내용을 충분히 검토하지 않고 설계를 수행하면 非經濟的이고 非效率的인 시설이 되기 쉽다. 따라서 각종 설계요소에 대한 조사분석과 필요한 경우에는 컴퓨터 씨뮬레이션 또는 mock-up 시험도 수행해야 한다. 특히 설계기술의 축

적이 적은 경우에는 건설후 사용상의 안전성과 작업의 효율성을 위해서도 mock-up 시험의 필요성은 충분하다. 또 차폐시설은 원자력법규에 적용받는 시설이므로 관련법규 등을 사전에 충분히 이해하여 설계기준에 합당하도록 설계해야 한다.

## 2.1 사용목적 및 작업내용

차폐시설의 설계에 들어가기 전에 결정해야 할 주요사항은 시설의 명료한 사용목적 및 작업내용이다. 사용목적이 명료하지 않으면 여러 경우를 예상해야 하므로 多目的施設로 되기 쉽다. 이렇게 되면 여러 종류의 작업을 수행하기 위해 시설의 구조가 복잡하게 되며, 그 만큼 건설비가 증가하게 되어 비경제적이 된다. 그리고 구조의 복잡에 따라 시설의 효율성도 감소하기 쉽다. 따라서 이러한 경우에는 될 수 있는 대로 목적에 확실히 맞는 부분만을 남기고 그외의 부분은 과감히 제거할 수 있는 결단력이 요구된다.

사용목적이 확정되면 시설에서 취급될 물질의 종류 및 수량이 예측되므로, 이에 의거하여 작업내용을 작성하여 설계의 기초로 삼아야 한다. 작업내용 작성에는 작업량이 중요한데 만일에 이를 정확하게 예측하지 못하면 시설이 과대하게 설계되어 건설비는 물론 건설후 운전비도 과도하게 들어가므로 비경제적인 시설이 되거나 또는 왜소하게 설계되어 작업에 많은 불편이 야기되는 비효율적인 시설이 되기 쉽다. 작업내용은 경제적인 측면에서 한개의 대형 핫셀에서 모든 작업이 수행되도록 작성할 수도 있고 또는 운영적인 측면에서 일방향성으로 하여 여러개의 핫셀에서 수행하도록 작성할 수도 있으나, 어느 경우에도 작업순서에 따라 무리가 없도록 작성해야 작업 효율을 향상시킬 수 있다. 그러나 핫셀의 수량 및 설치기기의 수량 등에 제한이 있는 경우에는 한작업에서 다른 작업으로 가는 도중 다시 돌아오는 내용으로 작업내용을 작성할 수도 있다.

## 2.2 설계기준

차폐시설은 용도에 따라 규제되는 諸法規(원자력법, 건설법, 소방법 등)에 적합하도록 설계하는 것이 전제조건이다. 그러나 이것만으로는 차폐시설의 기능이 충분하지 않으므로, 그 위에 사용목적에 맞는 기능을 갖도록 설계해야 하는데, 이는 기술적인 문제로서 풍부한 설계경험과 함께 설계요소의 철저한

분석검토가 있어야 한다. 그리고 설계는 운전에서 발생하는 문제점에 직접 결부되므로 시설의 운전관리를 잘 이해하는 것도 중요하다.

차폐시설은 전술한 바와 같이 원자력시설이므로 관련 원자력법규에 따라 내진구조로 설계하여야 하는데, 설계에서 준수하여야 할 주요기준에는 다음과 같은 사항들이 있다.

- 1) 내진구조 등 관련법규에서 규제하는 제반사항에 맞을 것
- 2) 最大假想事故에서도 방사성물질의 외부누출은 없을 것
- 3) 最大線源 취급시에도 방사선을 법규에서 규제하는 허용치 이하로 차폐할 것
- 4) 핫셀내부는 필요시에 언제나 부압을 유지할 것
- 5) 핵물질이 임계상태에 도달하지 않는 구조를 갖을 것
- 6) 비상용전원 및 비상경보장치는 신속하고 확실하게 동작할 것

## Ⅲ. 시설규모 및 배치

핫셀규모는 작업내용과 작업량, 취급물질의 방사선강도, 작업소요시간, 그리고 핫셀에 설치할 기기들을 충분히 검토한 후에 결정할 수 있다. 핫셀특유의 작업이 아닌 경우에는 非방사성물질을 취급하는 일반작업의 경험으로부터 추정할 수 있으며, 핫셀작업에 필요한 기기는 작업량과 작업에 소요되는 시간으로부터 수량을 결정할 수 있다. 예로서 단위시간 동안에 많은 작업을 수행해야 한다면 동일기기의 수량을 증가시켜야 하므로 설치기기의 수량이 증가하게 된다.

핫셀의 크기는 작업단위로 결정하는 것이 편리하다. 1개 작업단위의 크기를 어떠한 크기로 하느냐는 작업내용, 취급물의 크기 및 핫셀기기의 크기와 핫셀에서 수행되는 일련의 작업규모에 의해 결정되지만, 일반적으로 콘크리트핫셀의 1개 작업단위는 원격조정기 1組와 차폐창 1개가 설치되는 핫셀전면의 길이가 ~2m 그리고 폭이 2~3m 정도이다. 그런데 작업면으로 보면 1개 작업단위에서 2개의 기기는 동시에 사용이 가능하므로 常時 사용하지 않는 소형기기에 한해서는 1개 작업단위에 4개 까지는 설치할 수 있어 시설규모를 감소시킬 수 있다. 그러나 사용빈

도가 높은 기기는 반듯이 1개작업단위를 사용하지 않으면 안된다. 이와같은 점을 고려하여 작업단위가 결정되면 작업내용의 분류에 따라 필요한 핫셀의 크기와 수량을 결정할 수 있다.

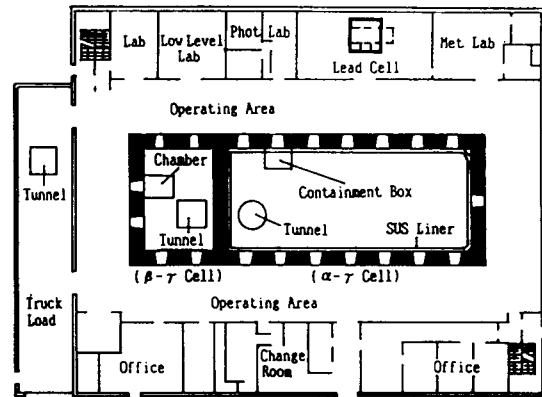
한편 건설비 및 운전비의 절감과 작업의 편리를 위해 1개의 대형핫셀에서 모든 작업을 함께 수행하는 방법도 있는데, 이 경우에는 핫셀기기의 보수 등으로 인해서 다른 작업의 중단이 없도록 기기를 설계하지 않으면 안된다. 예로서 핫셀기기를 원격조정기로 용이하게 분해하여 반출할 수 있고, 작업중에 다른 작업에 영향을 주는 일이 없도록 설계하지 않으면 안된다. 그러나 한개의 대형핫셀에서 모든 작업을 수행하면 핫셀의 제염 및 설비의 보수에서 어려운 점이 많아 장기간의 운전에서는 오히려 損失이 될 수도 있다.

차폐시설은 이러한 제반사항을 검토한 후, 작업의 유기적인 효율향상을 위해 작업공정에 무리가 없도록 핫셀을 배치하고, 이를 기본으로 핫셀전면의 작업구역(operating area)과 핫셀후면의 서비스구역(service area), 그리고 시설운전에 필요한 부대 운전설비의 규모와 배치를 결정한다. 차폐시설의 부대 운전설비로는 급배기설비, 전원설비, 제장설비, 급배수설비, 폐액처리설비, 소화설비, 방사선안전관리설비, 기계설비, 압축공기설비 및 통신설비 등이 있으며, 그 외에도 사무실, 低照射材實驗室(hot lab.), 非照射材實驗室(cold lab.), 제염실, 공작실 등도 확보해 두어야 한다. 그림 1에 방사선 차폐시설 배치에 관한 예가 있다.

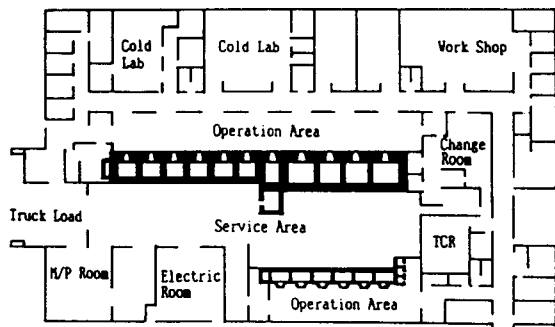
## IV. 핫셀설계

### 4.1 차폐설계

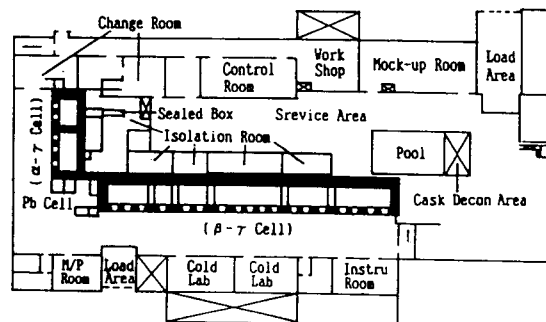
핫셀전면 常時작업구역에서의 방사선허용선량은 원자력법규 및 지침에서 규제하는 규제치 이하가 되도록 방사선을 차폐해야 하는데 일반적으로 핫셀전면 상시작업구역에서의 방사선허용선량은 1주일 작업시간을 40시간으로 보아 0.025mSv 그리고 핫셀후면 등 일시작업구역의 방사선허용선량은 작업시간을 고려하여 상시작업구역의 5~10배 범위에서 규제하고 있는데, 규제선량이 점점 낮아지는 추세에 있다.



(a) Argonne 연구소 HFEF/N



(b) CEA-Saclay 연구소 LECI



(c) 일본원자력연구소 實用燃料試驗施設

그림 1 방사선차폐시설 배치도의 예.

핫셀차폐는 시설구조, 방사성차폐재료, 線源量, 線源形態, 線源位置 및 線源의 에너지 스펙트럼 등을 입력자료로 사용하여 계산하는데, 원칙적으로 선원량은 핫셀에서 취급하는 최대량으로, 선원형태는 点線源, 線線源(line source), 圓柱狀線源 등 실제선

원과 유사한 형으로, 선원위치는 핫셀벽면 접촉으로, 그리고 선원의 에너지스펙트럼은 실제 선원이 갖고 있는 스펙트럼으로 계산해야 한다. 그러나 실제로는 선원에너지는 Co-60의  $\gamma$ -선 에너지, 선원 형태는 점선원, 그리고 핫셀내의 선원위치는 핫셀벽에서 30cm 떨어진 거리를 입력자료로 하여 계산하는 경우가 많다. 차폐계산은 핫셀벽외에도 차폐창(shielding window), 차폐문(shielding door) 및 각종의 대형물의 매설부위에 대해서도 수행한다. 그리고 차폐벽이 콘크리트인 경우에는 각종 대형 매설물이 관통하는 경우가 많으므로 차폐능을 크게하여 설계하면 매설물에 따른 차폐보강이 간단한 이점이 있다. 차폐재료는 핫셀의 사용목적 및 규모에 따라 다르나, 일반콘크리트(비중 $\sim 2.2$ 이상), 중콘크리트(비중 3.5이상), 철, 납 등이 사용되고 있는데, 그림 2에 이들의 차폐능이 있다[6].

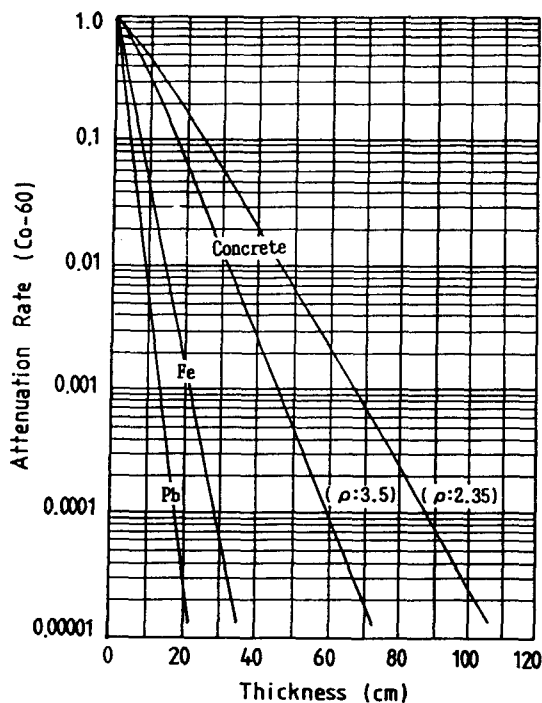


그림 2 Build-Up 효과를 고려한 철, 납, 콘크리트 등 각종 차폐재료의 차폐능 [6].

핫셀을 경제적으로 건설하기 위해서는 차폐능을 일률적으로 하지 말고 각 핫셀별로 취급하는 最大線

源量을 기준으로 차폐계산을 하여 핫셀벽의 두께 또는 차폐재료의 비중을 조절하는 방법이 자주 사용되는데, 이와같은 방법을 사용하면 차폐재료의 비용뿐만 아니라 차폐창 등 설비의 규격도 줄어 들므로 건설비를 상당히 낮출 수 있다. 그리고 동일핫셀에서도 부위에 따라 적절한 차폐재를 선택하면 건설비를 낮출 수 있는데, 예를들면 납유리창 및 원격조정기가 설치되는 핫셀전면은 중콘크리트로, 그리고 후면 등은 일반콘크리트로 설계하면 건설비가 절감된다(중콘크리트는 일반콘크리트에 비하여 가격면에서 15~20배의 차이가 있다). 그외에도 고연소핵연료나 혼합산화물핵연료 등을 취급하는 시설에서는 중성자의 누설을 막기 위하여 수소, 산소, 탄소 등이 많이 함유된 파라핀 또는 gel재로 등을 차폐재료에 혼합하여 사용하는 경우도 있다.

#### 4.2 원격조종기(Manipulator) 동작범위

핫셀내의 모든 구역에서 작업할 수 있도록 충분한 작동반경을 갖는 것이 필수적이다. 핫셀에서 원격조정기는 차폐창과 상관관계가 있는 기본사항으로 원격조정기의 작동범위는 차폐창의 視界와 분리해서 고려할 수는 없다. 즉, 원격조정기의 작동범위가 충분해도 보이지 않는 부위가 있으면 안되며, 또 작업자가 무리한 자세로 작업하는 설계도 피해야 한다. 따라서 원격조정기는 작업자가 무리하지 않은 자세에서 작업할 수 있는 범위를 작동반경으로 갖어야 하므로, 설계경험이 적은 경우에는 시방서 및 기기설명서만으로 작동범위를 결정하는 것은 위험하므로 충분한 자료를 갖고 검토해야 한다. 원격조정기에는 작업대상, 작업범위 등에 따라 표준형, 중작업형, 신축형 또는 강력형 등이 있으므로, 핫셀규모 및 작업내용에 따라 적당한 型을 선정하여야 한다.

#### 4.3 차폐창(Shielding Window)

차폐창은 핫셀건설비에서 큰 비중을 차지하므로 경제적인 설계를 하여야 하는데, 이에는 고도의 전문성이 요구된다. 그럼으로 설계경험의 축적이 적은 경우에는 시설설계자는 핫셀전면 작업구역측에서의 차폐창 치수(size), 차폐능, 작업視界, 투과율 등 기초적인 설계만 하고 그외의 구체적인 설계는 제조업체에게 요구조건에 맞도록 의뢰하는 방법도 많이 사용되고 있다.

차폐창을 통한 핫셀내의 視界는 최대시계 보다는 차폐창에서 20~40cm 떨어진, 실제로 작업하는 위치에서의 시계가 중요한데, 최대시계는 차폐창이 큰 경우에는 좌우 ~70°, 상하 ~60°, 그리고 표면에서 30cm 떨어진 곳의 시계는 좌우 ~30° 정도를 일반적으로 취하고 있다[7]. 차폐창에 사용하는 납유리는 비중이 6.2인 것까지 생산되고 있지만 콘크리트 핫셀의 경우에는 비중이 3.23~5.2 사이의 여러 납유리판을 組合하여 설계하며, 납 및 철셀에서는 비중이 5.2~6.2인 가장 무거운 납 유리를 사용하는 경우도 많이 있다. 그리고 핫셀내측에 설치되는 납유리는 방사선손상으로 착색되어 [8] 투과율이 저하되므로 내방사선재료인  $CeO_2$ 가 첨가된 耐放射線無着色 납유리를 사용하는데 비중이 6.2인 납유리를 제외하고는 모든 납유리에  $CeO_2$ 를 첨가시킬 수 있다.

앞면이 두꺼운 cover glass로 된 탱크에 Zinc Bromide 용액을 넣어 차폐창으로 사용하는 경우도 있는데, Zinc Bromide 차폐창에서는 탱크의 변형 및 내면의 최종처리가 중요하며, 차폐창 파손시 안전을 유지하기 위해 내측면을 二重의 glass로 제작하는 경우도 많으며, 高遮蔽能이 요구되는 경우에는 납유리를 함께 사용하는 경우도 있다.

#### 4.4 각종 차폐문(Shielding Door)

핫셀에는 운전을 편리하게 하기 위하여 뒷문(rear door), 사이문(intercell door), 천정문(roof door) 등 각종 차폐문을 설치하고 있다.

핫셀 뒷문은 핫셀기기의 보수 및 핫셀내부의 제염 등을 위해 작업자가 핫셀을 출입하기 위해 핫셀 후면 벽에 설치하는데, 크기는 콘크리트 구조의 대형셀에서는 보통  $\sim 1m \times \sim 2m$  이고 차폐능은 핫셀뒤벽과 동일하게 설계한다. 그리고 문과 문틀(frame) 사이에서 방사선 누출이 없도록 해야하며, 특히 고연소 사용후 핵연료나 혼합산화물핵연료(MOX fuel)를 취급하는 핫셀에서는 문과 문틀 사이에서 중성자 누출이 일어날 위험성이 크므로 이의 차폐도 설계에서는 고려해야 한다. 핫셀 뒷문 開閉방식으로는 step-back 방식과 hinge방식 등이 주로 사용되고 있는데, 핫셀내부에서도 문을 열수 있는 비상장치를 설치하는 것이 작업자의 안전을 위하여 좋다. 그리고 핫셀

내의 방사선강도가 설정치(보통 100mR) 이상에서는 문이 개방되지 않도록는 인터록(interlock)장치를 설치하여 방사선강도가 설정치 이하일때만 작업자가 핫셀을 출입할 수 있도록 하는 안전장치도 필요하다.

핫셀간 사이문은 핫셀사이벽에 설치하는데, 핫셀 크레인의 부리지(bridge)가 통과하는 문(crane gate)과 크레인이 통과하는 문(crane door)이 한조로 구성되어 벽 상부에 설치하는 大型門과, 그리고 시로 등 소형물의 핫셀간 운반에 이용하기 위해 핫셀 작업대와 같은 높이로 벽의 하부에 설치하는 小型門 등이 있다. 대형문의 형태로는 crane gate는 천정벽을 통하여 상하로 움직이는 상하구동식이, 그리고 crane door에서는 대형이면 슬라이드방식이 중형이면 hinge방식이 많이 채택되고 있다. 특히 대형기기가 설치된 오염셀에 작업자가 출입하기 위해서는 crane door를 크게하여 오염기기의 핫셀간 이송을 간편하게 하는 것이 편리하다.

핫셀천정문은 대형 핫셀기기 또는 설비를 핫셀에 반입 또는 핫셀외부로 반출하기 위해 핫셀천정벽에 설치하는 문으로 hatch식으로 하고 있다. 이 차폐문은 사용하지 않을때는 단순히 핫셀천정벽의 일부가 되는데, 건설비의 추가도 없으므로 가능하면 충분한 크기로 설계하는 것이 좋다. 그리고 핫셀천정문에는 방사성물질 수송용기 등 중량물이 장착되는 경우도 있으므로 이에 대비한 구조강도도 설계시에는 반영해야 한다.

소형납셀 또는 철셀의 경우에도 차폐문은 설치해야 한다. 이 경우의 차폐문은 콘크리트핫셀의 경우보다 차폐능이 적으며 무게도 가벼우지만, 차폐문 주위의 방사선 누출에 특히 유념해서 설계해야 한다. 핫셀 후면벽을 콘크리트로 건설하는 경우에는 작업자의 출입용으로 콘크리트핫셀의 경우와 같이 핫셀뒷문을 설치하고 있지만 핫셀 전체가 납 또는 철 판으로 건조되는 경우에는 전면벽 또는 측면벽에 출입용 소형문을 만들어 사용하는 경우가 많이 있다.

#### 4.5 수송용기 접합부(Cask Adopter)

수송용기 접합부는 방사성물질들을 핫셀내로 반입하거나 또는 핫셀외부로 반출하기 위하여 핫셀 천정벽 또는 후면벽 등에 설치하는데, 여기에 방사성물질 수송용기를 장착하여 방사성물질들을 핫셀에 반입 또

는 핫셀에서 반출한다. 어떠한 경우에도 작업시에 방사선누출이 일어나지 않는 구조로 설계해야 하며 작업자의 방사선피폭을 예방하기 위해 인터록장치를 설치하는 것이 좋다.

수송용기 접합부는 슬라이드식 개폐문, 관통구(material transfer hole), 차폐체등으로 구성되어 있는데, 개폐문 주위에는 차폐체를 보강하여 방사선 누출이 없는 구조로 설계해야 한다. 핫셀천정벽에 설치하는 수송용기 접합부의 인터록장치는 보통 기계적장치로 설계하는데 접합부 위에 수송용기가 장착될 경우에 한하여 접합부의 차폐문이 개방될 수 있는 간단한 pin형 인터록장치가 많이 사용되고 있다.

#### 4.6 소형물 투입구(Toboggan)

핫셀에서는 작업에 소요되는 시약 등 소형물을 자주 핫셀내부로 반입해야 하는데, 이 경우를 대비하여 핫셀전면벽에 간단한 구조의 소형물투입구를 설치하는 것이 핫셀작업에 편리하다. 이 투입구는 보통 6 inch 이상의 SUS 관을 ㄴ나선형으로 가공하여 핫셀전면벽에 매설하는데, 방사성물질의 유출위험성 때문에 소형물을 핫셀내로 투입하는 경우에 만 사용하며, 반출의 경우에는 사용하지 않는다. 투입구 설치로 인한 방사선의 누출은 없어야 하므로 핫셀측벽 또는 핫셀사이벽을 통하여 매설하는 경우가 많으며, 방사선 누출이 있으면 납 또는 철판으로 차폐보강을 하여야 한다.

#### 4.7 각종 스리브(Sleeve)

핫셀벽에는 원격조정기 설치용, 페리스코프(periscope) 설치용, 핫셀기기조작용, 그리고 앞으로 예상되는 추가공급용 등으로 각종 스리브를 설치한다. 원격조정기 설치용으로는 보통 직경이 8~10inch 사이의 스리브가 매설되며, 페리스코프 설치용으로는 10inch 직경의 스리브면 거의 대부분의 페리스코프를 핫셀에 설치할 수 있다. 핫셀기기 조작용으로 설치하는 스리브는 기기의 상세설계가 수행되지 않은 상태에서 설계하면 건설후 기기작동에 지장을 줄 위험성이 있으므로 설계시에 각별한 주위가 요구된다.

#### 4.8 각종 매설관(Embedded Pipe)

핫셀에는 운전에 필요한 배선, 급배수설비 및 소

화설비 등 각종 유틸리티의 공급에 필요한 매설관을 핫셀전면벽 또는 후면벽을 통하여 설치하는데, 설치 위치는 방사선 누출을 피할 수 있는 장소를 선택하는 것이 좋다. 매설관은 보통 0.5~2 inch 직경의 SUS 관을 S형으로 가공하여 설치하는데, 보통은 몇개를 함께 모아 집합체형태로 제작하여 핫셀벽에 매설한다. 그리고 매설에 따른 핫셀벽의 방사선누출 위험성이 있는 경우에는 납 또는 철판으로 차폐보강을 하여야 한다.

#### 4.9 소형핫셀

납 또는 철판으로 건조하는 소형핫셀은 건설비가 저렴하고 운전도 편리하므로 소량의 방사성물질을 취급하는 조직시험, 기계적특성시험, 화학분석 및 동위원소제조 등 각종 소형작업에 많이 사용되고 있다. 일반적으로 연료조직시험의 경우는 납두께 20cm로, 그리고 조사재료의 기계적시험의 경우에는 납두께 15cm로 건설하고 있다.

소형핫셀의 경우도 차폐창, 원격조정기가 설치되며, 그외에도 필요에 따라서는 대형핫셀과 같이 각종 차폐문, 스리브 및 매설관 등도 설치하는데, 가능하면 그 수량을 억제하는 것이 좋다. 한개의 독립된 핫셀이 아니고 몇개의 핫셀로 구성되는 경우에는 그림 3에서 보는바와 같이 핫셀의 전면은 납이나 철판으로 건조하고 후면과 측면 등은 일반콘크리트를 사용하는 것이 구조강도 측면에서도 안전하며 건설비도 절감할 수 있어 좋다. 그리고 이 경우에는 핫셀뒷문도 대형으로 만들 수 있어 핫셀운영에 편리하다.

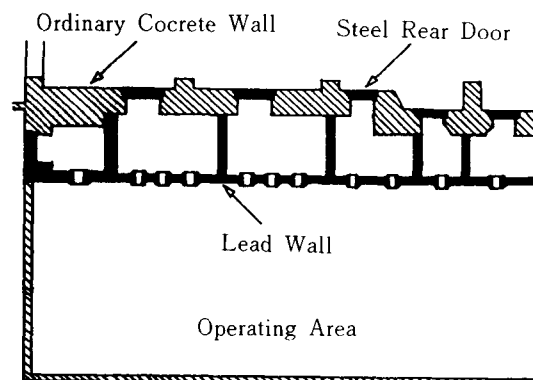


그림 3 전면은 납 그리고 후면은 콘크리트로 건설한 납셀의 예.

#### 4.10 $\alpha-\gamma$ 핫셀

플루토늄은 강력한  $\alpha$ -선 방출체로 흡입하게 되면 인체에 치명적인 손상을 준다. 따라서 플루토늄의 초기농도(照射前 농도)가 일정치 이상인 혼합산화물 핵연료는 핫셀내부의 오염공기가 외부로 유출될 위험성이 있는 일반  $\beta-\gamma$  핫셀에서는 취급할 수 없도록 규제되고 있는데, 일본원자력연구소의 實用燃料試驗施設(RFEF)의 경우에는 플루토늄 초기농도를 5wt% 정도에서 규제하고 있다. 그럼으로 일본의 경우를 보면 플루토늄의 초기농도가 5wt% 이상인 고속증식로연료 등은 내부공기가 외부로 누출할 수 없도록 氣密構造로 건조되는  $\alpha-\gamma$  핫셀에서 만 취급할 수 있다.

따라서 플루토늄이 다량 함유된 핵연료를 취급하는 핫셀인  $\alpha-\gamma$  핫셀은 어떠한 경우에도 핫셀내부의 오염공기가 외부로 유출되지 못하도록 핫셀내부를 SUS로 라이닝(lining)을 하고, 내부에서 외부로 통하는 모든 관통부위도 급배기구를 제외하고는 완전기밀형으로 설계되어야 한다(시료 투입구 등도 기밀형인 double sealed type을 사용해야 한다). 그리고  $\alpha-\gamma$  핫셀에서는 작업자의 핫셀출입이 어렵고, 기기의 핫셀외부 반출도 주변에 오염을 야기시킬 위험이 크므로, 원격조정기를 포함한 핫셀기기의 보수유비를 위해 핫셀측면벽 또는 후면벽에 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 부속으로  $\beta-\gamma$  핫셀을 설치하든가 또는 그림 1(c)에서 보는바와 같이 기밀형 박스(sealed box)을 설치하는 것이 편리하다. 한편 이러한 방법과는 별도로 기존의  $\beta-\gamma$  핫셀내에 핫셀과는 완전히 격리되는 기밀형 SUS box를 설치하여  $\alpha-\gamma$  핫셀로 代用하는 inner box 방식도 있다. 그러나 이경우에는 box의 이동, 각종 유틸리티 공급과의 접속, 오염제거, 급배기 계통설비 등에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

$\alpha-\gamma$  핫셀은 강한 산화성을 갖고있는 플루토늄을 함유한 핵연료를 취급하는 시설이므로 보통 산소 및 습기 등 산화성불순물이 각각 50~100ppm 이하로 제어되는 불활성가스분위기에서 운전되는데, 일반적으로 산화물연료인 경우에는 질소를 그리고 산화성이 더욱 강한 탄화물연료인 경우에는 알곤을 불활성가스로 사용하고 있으며, 정화장치, 순환장치, 그리고 냉각장치 등이 불활성가스의 급배기계통에 부대시설로서 설치된다.  $\alpha-\gamma$  핫셀 설계에서 특히 주의

할 사항은 핫셀의 기밀도인데, 건설상의 어려움으로 핫셀의 기밀도를 낮게하면 정화장치의 규모를 크게 설계해야 하며, 정화장치의 규모를 줄이기 위해 핫셀의 기밀도를 높게하면 건설상에 어려움이 따른다.

#### 4.11 핫셀 전면작업구역과 후면서어비스 구역

핫셀전면 작업구역은 핫셀작업을 위해 작업자가 상주하는 구역으로 작업에 사용되는 각종설비가 설치되는 등 핫셀운전에서 상당히 중요한 위치를 점유하고 있다. 따라서 핫셀전면 작업구역은 작업의 안전과 능률을 향상시키기 위해 좋은 환경에서 장시간 작업을 할 수 있도록 충분한 공간을 확보하여 두는것이 필요하다. 핫셀작업구역의 크기는 핫셀규모에 따라 다르나, 보통 폭이 핫셀 전면벽으로부터 5~6m, 그리고 천정의 높이는 4.5m 이상으로 하고 있다.

한편 핫셀후면의 서어비스구역은 저준위방사성물질이 취급되는 準汚染區域으로 핫셀천정문 개폐 및 연료수송용기 등을 취급하기 위해 대형크레인이 설치되는 구역으로 핫셀제염에 따라 발생하는 저준위 폐기물 및 교체용 핫셀기기의 보관뿐만 아니라, 핫셀의 장기간운전에 따라 노후된 핫셀설비의 임시저장 등에도 자주 이용되므로 충분한 공간을 확보하는 것이 앞으로의 시설운전에 편리하다. 그리고 서어비스구역의 오염도를 낮게 유지하기 위해 그림 1(c)에서 보는 바와 같이 핫셀 후면벽에 격리방(isolation room)을 설치하는 경우도 있는데 일본의 방사선 차폐 시설에서는 이 방법을 많이 채택하고 있다.

### V. 부대운전설비 설계

#### 5.1 급배기설비

차폐시설은 방사성물질의 주변환경 누출을 방지하고 안전한 작업환경을 유지하기 위하여 일반시설과는 특이한 급배기설비를 갖고 있다. 차폐시설은 방사선안전관리상 방사성물질의 오염가능성에 따라 여러 구역으로 나누어 관리하고 있는데, 시설내의 공기흐름은 방사성물질의 오염위험성이 낮은 구역에서 오염위험성이 높은 구역으로 흐르도록 하고 있으며, 시설에 유입된 공기는 재순환시키지 않고 one-through 방식으로 그대로 배기시킨다.

차폐시설은 내부공기의 오염도 저하 및 오염물질

의 외부유출을 방지하기 위하여 부압상태에서 운전해야 하는데, 사무실을 기준으로 하면 시설내 각 구역의 부압크기 및 환기회수는 일반적으로 표 1과 같다.

표 1 방사선차폐시설 설계에서 일반적으로 적용되는 각 구역의 부압 및 환기회수 [3]

구 역	부압(mmAq)	환기(회/시간)
사무실	-	-
핫셀전면 작업구역 각종 측정실 Cold Lab. 등	-2~-4	4~6
핫셀후면 서어비스 구역	-5~-10	4~6
배기실 저장실 제염실 Hot Lab. 등	-5~-10	4~6
핫셀내부	-15~-40	10~40

### 1) 급기계통

시설전체로 보면 외부에서 유입된 공기는 전치필터(prefilter) 및 고성능필터(HEPA filter)를 통해 정화된 다음 방사성물질 오염가능성이 적은 구역에서 오염가능성이 높은 구역으로, 그리고 최종적으로는 방사성물질 취급작업이 수행되는 핫셀을 향하여 흐르며, 특수한 경우를 제외하고는 위에서 아래로 흐르게 하고 있다. 각 구역에 설정된 부압은 급배기 풍량을 조절하여 유지하고, 각 구역을 통한 공기는 주정화장치에서 충분히 방사성물질을 여과시킨후 시설외부로 배기시킨다. 유입공기는 시설에 설치된 설비 및 기기류의 양호한 보전을 위하여 적정의 온도와 습도로 조절해야 하는데, 유입공기의 온도와 습도는 하절기는 27℃, 50%, 그리고 동절기에는 20℃, 40% 정도를 기준으로 하고있다[7]. 대규모시설에서는 시설내부를 사무실, 작업구역 등 여러구역으로 구분하여 각 구역에 맞는 온습도조건을 설정하는 경우도 있다.

### 2) 배기계통

배기계통은 크게 핫셀배기계통과 그외구역 배기계

통으로 양분되는데, 어느 경우든 원자력법규의 규제치에 맞도록 충분히 방사성물질을 여과시킨후 시설외부로 배기하도록 되어있다. 배기가스 규제는 과거에는 각 시설별로 독립적으로 규제하였으나 최근에는 동일지역내에 유사한 시설이 있는 경우에는 독립적이지 않고 이른바 총량규제방식으로 지역전체에서 배출되는 모든 배기기체를 종합하여 방사성물질 농도를 규제하는 방향으로 이행하고 있다.

배기정화장치는 전치필터(prefilter), 고성능필터(HEPA filter), 그리고 필요한 경우에는 활성탄필터(charcoal filter) 등으로 구성하고 있다. 시설전체의 총배기량은 일반적으로 시설내 각 구역의 냉온방부하 및 공기오염도를 낮추기 위해 설정하는 환기회수로 결정하는데, 이것에 의해 배기설비의 용량이 얻어진다. 배기정화장치는 배기용량, 각 배기계통의 배기종류 및 운전보수 등을 고려하여 설계하며, 필요에 따라서는 내화성 및 내수성필터를 사용하는 경우도 있다.

### 3) 핫셀 급배기계통

핫셀은 작업내용에 따라 다르나 특별한 경우를 제외하고는 대기압 보다 15~30mmAq 낮은 범위내의 부압에서 운전하는데, 환기회수는 시간당 10~20회 정도로 하고 있다[3]. 핫셀배기는 핫셀전체를 한개의 배기계통으로 설계하는 경우와 핫셀개개의 배기계통으로 분리하여 설계하는 경우가 있는데, 핫셀전체를 한개의 배기계통으로 하는 경우에는 설비비가 절감되며, 핫셀개개의 배기계통으로 분리하는 경우에는 핫셀부압을 일정하게 유지하는데 편리하다. 그리고 한개의 배기계통으로 핫셀배기를 통합하는 경우에는 핫셀간에 負壓差가 일어나므로, 오염셀의 배기량을 크게하여 오염셀의 공기가 비오염셀로 흐르지 않도록 해야한다.

핫셀의 부압유지에 가장 중요한 사항은 핫셀자체의 공기누설로, 설비의 양호한 운전만으로는 부압유지에 한도가 있다. 그리고 핫셀뒷문 등 각종 차폐문이 개방될 때는 유입공기가 많아지므로 통상의 배기량으로는 부압유지가 어려움다. 따라서 차폐문의 개방시에는 開口部の 유입공기 面速度가(후드의 경우는 보통 0.5m/s로 설정[3])를 기준으로 핫셀배기량을 정하든가 또는 예비배기설비를 가동하여 개구부의 공기유입 면속도를 유지시키는 방안으로 설계 하



여야 한다. 그리고 부압경보창치를 설치하는 경우도 있는데, 보통 부압이 2mmAq 이하인 경우에 경보를 발하도록 설정하고 있다.

핫셀의 공기유입구 및 排氣口에도 필터(incell filter)가 설치하는데, 작업내용에 따라 iodine이 유출되는 배기구 필터장치에는 활성탄필터를 설치해야 한다. 그런데 핫셀배기구의 필터장치 접합성이 불량하여 bypass flow가 생기게 되면 방사성물질이 그대로 핫셀 외부로 유출하여 방사선차폐를 하지않는 주 배기정화장치에 집적되어 주변에 방사선 선량을 높이게 되므로, 핫셀배기중의 방사성물질은 반드시 핫셀내부에서 제거하여 주배기정화장치의 방사성물질 오염을 낮추어야 한다.

## 5.2 전원설비

차폐시설에서는 순간적인 정전에도 방사성물질에 의한 시설내부의 오염은 물론 주변환경으로 방사성 물질이 유출될 위험성이 있다. 따라서 상용전원의 공급이 중단되는 경우에도 즉시 전원공급이 가능하도록 비상용전원을 설치하여 어떠한 경우에도 정전 사태는 없도록 해야한다.

차폐시설에서 사용하는 전원은 다음과 같이 상용 전원, 비상용전원 및 무정전용전원 등 3종류의 전원 공급체제를 갖는것이 운전이 편리하다.

### 1) 상용전원

시설내의 전원중에서 중요도가 비교적 낮은 전원으로 단시간의 정전이 있어도 허용될 수 있는 설비에 공급하는 일반전원이다.

### 2) 비상용전원

상용전원의 순간적인 정전에도 즉시 공급되는 전원으로 비상디젤발전기 등을 가동하여 전원을 공급한다. 시설운전상 순간적인 정전만이 허용될 수 있는 설비에 공급하는데, 배기계통설비에는 상용전원의 정전시에 즉시 이 전원이 공급되어야 한다.

### 3) 무정전용 전원

순간적인 정전도 허용될 수 없는 설비에 공급되는 전원으로, 사용전원 정전시에는 축전지설비에 충전된 DC전원이 그대로 공급하거나, 또는 DC전원을 AC전원으로 변환시켜 공급하는데 방사선안전관리 제어설비 및 컴퓨터에는 이전원이 공급되어야 한다.

## 5.3 배관설비

차폐시설에는 여러 용도의 배관설비가 있다. 그중에서도 특히 설계시에 유의해야 할 사항은 배수용 배관이다. 차폐시설의 배수에는 방사성물질이 포함될 수 있는 배수(hot 배수)와 포함될 수 없는 배수(cold 배수)를 엄격히 구분하여 설계하는 것이 정상가동시 시설운전에 편리하다. Hot 배수관은 부식을 방지하기 위하여 내식성 및 내구성이 좋은 SUS 관을 사용하며, 배수구에는 필터를 사용하여 粒狀의 방사성물질이 배관중에 흘러나가지 않도록 하여야 한다. 운전지침에 따르지만 hot배수는 특별한 경우를 제외하고는 액체폐기물처리시설로 보내 처리하고 있다. 배수관설계에서는 이외에도 배관구배가 중요한데, 구배율은 적어도 1/100 이상으로하여 배수관에 폐액이 남지 않도록 설계해야 하고, 고준위방사성폐액용 배관에서는차폐는 물론 배수관내 세척장치, 차폐저장 탱크 등도 고려하지 않으면 안된다.

폐액 貯藏槽 및 저장탱크는 보통 2개 이상을 서로 연결시켜 설치하고 있는데, 넘치는 것을 방지하기 위해 水位게이지, 경보장치 등을 설치한다. 그리고 장기간 사용시에는 침전물이 생기므로 저장조의 경우는 각반구조로, 탱크의 경우에는 하부에서 배수하는 방식이 사용되고 있다. 특히 산성계통의 용액인 경우에는 저장탱크 내면을 합성고무로 피복하는것이 부식방지에 좋다. 한편 방사성액체폐기물을 배수설비에 의해 폐기하는 경우, 배수설비에서 여과, 이온교환수지법에 의한 방사성물질 흡착제거, 방사선준위의 시간에 의한 감소, 다량의 물에 희석하는 방법 등으로 방사성물질의 농도를 가능한 한 감소시킨후 방수하는 방법도 있으나 이는 海洋으로 폐기하는 경우이나 사용하고 있다. 그러나 이 경우에는 반드시 배수중의 방사성물질 농도가 허용치 이하일 경우에만 방수 할 수 있다.

## 5.4 소화설비

소화설비는 화재발생 가능성 및 규모 등을 정확히 파악하여 그것에 합당한 설비로 설계해야 하는데, 핫셀소화설비와 그외구역의 소화설비로 나누어 고려하는 것이 편리하다. 소화설비설계에서 특히 유의해야 할 사항은 화재가 일어날 가능성이 적은 구역에 高價의 소화설비는 설치하지 말아야 한다. 일반적으로 보아 핫셀에서는 화재가 일어날 가능성이 적으

며, 화재가 발생하더라도 발화성물질이 적어 인접 핫셀로 전파될 정도의 화재는 일어나지 않으므로 고가의 소화설비의 설치는 비경제적이다.

핫셀내의 소화방법으로는 분말소화제 살포, 注水, 할론가스 또는 탄산가스 분출 등이 있는데, 가스분출에 의해 소화하는 경우에는 핫셀부압이 파괴되지 않아야 하며 화재시에 필터파손이 일어나 핫셀내의 오염공기가 그대로 외부로 유출되지 않도록 설계시에 유의해야 한다. 그리고 소화후의 복구작업에 어려움을 주지 말고 다른장치에도 나쁜 영향을 주지 않도록 소화설비 선정에 신중을 기해야 한다.

## VI. 맺음말

지금까지 원자력 관련기술의 국내개발에 필수적인 차폐선 차폐시설의 설계요소에 관하여 개략적으로 분석검토하여 보았다. 방사선차폐시설 설계기술은 원자력기술개발을 지원하는 중요한 기술의 하나로, 충분한 경험이 있어야 경제적이고 효율적인시설을 설계할 수 있다. 그럼으로 우리나라와 같이 설계기술의 경험축적이 적은 경우에는 독창적인 기술 보다는 외국의 유사한 시설을 참조하여 설계하게 되는데, 이 경우에 유의해야 할 사항은 국가간에는 연구규모 및 지향하는 연구목표에도 차이가 있을 수 있으므로 참고하고자 하는 외국시설의 사용목적이나 작업내용을 우리의 입장에서 면밀히 검토분석하여 설계하고자 하는 시설의 사용목적이나 작업내용에 적합하지 않은 사항이 있을 때는 과감히 배제하고 설계해야 경제적이고 효율적인 시설을 건설할 수 있다.

그리고 설계분석자료가 불충분한 경우에는 비용과 시간이 소요되더라도 컴퓨터 씨뮬레이션 또는 mock-up 시험 등을 수행하여 확인하고 설계해야 하며, 핫셀설비에서 교환이 가능한 부품은 高價의 내방사선 부품 보다는 低價의 일반부품을 사용하여 성능이 나빠지면 교체하는 것이 경제적인 경우도 많이 있으므로 이에 대해서도 충분한 검토가 필요하다.

## 참고문헌

1. Poceeding of the 1st-11th Conference on Hot Laboratories Operation and Equipment", Sponsored by ANS, 1953-1964
2. Poceeding of the 12th-36th Conference on Remote Systems Technology, Sponsored by the Remote System Technology Div. of ANS, 1964- 1987.
3. 日本原子力學會, "遠隔操作技術", 1984
4. ANS, "Design Guides For Radioactive Material Handling Facilities & Equipment", 1988
5. C. Cesarano, "Hot Laboratories for Post-Irradiation Examination", 1976.
6. 日本原子力工業, 28(附錄 放射線 Data 應用集), 46(1982)
7. 日本原子力學會, "Hot Lab 設計와 管理", 1976
8. J. M. Stevels, 日本窯業學會誌, 75, 63(1967)