

2002 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

차세대관리 종합공정 실증시설 설계 기준요건 연구

Study on Design requirements for Hot Cell of Advanced Spent Fuel Management Process

조일제, 정원명, 구정희, 이은표, 백상열, 안상복, 유길성, 박성원

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

차세대관리 종합공정은 사용후 핵연료의 관리 안전성을 높이기 위한 공정으로서 불활성 분위기와 공기 분위기의 α - γ type hot cell을 필요로 한다. 본 연구에서는 차세대관리 종합공정의 실증을 위한 hot cell 시설의 설계에 필요한 기본적인 설계요건을 분야별로 정립함으로써 차세대관리 종합공정의 실증을 위한 hot cell의 설계 및 안전성 분석을 위한 기본 자료들을 제시하였다.

Abstract

The advanced spent fuel management process was proposed and developed for effective management of the PWR spent fuel. As hot cell facilities for demonstration of this process, future hot cell located in IMEF was selected, and will be modified to satisfy the requirements of this process. In this study, design requirements and design basis of hot cell facilities for demonstration of this process are proposed in various field of technical design. And then, this results will be utilized as basic concepts to perform the detail design, safety analysis and environmental evaluation of hot cell facilities.

1. 서론

차세대관리 종합공정은 사용후핵연료의 안전하고 효율적인 관리를 위하여 제시된 공정으로 그림 1에 표기된 공정 개념을 적용하고 있다.

이 공정을 이용하여 사용후핵연료를 급속으로 전환하고, 고발열성 핵종(Cs, Sr)을 효율적으로 제거하여 사용후핵연료의 부피, 발열량 및 방사선의 세기를 최대 1/4까지 감소시키고, 처분용기의 소요량과 처분장의 소요면적을 1/2 이상으로 축소함으로써 처분 안전성과 경제성을 높일 뿐만 아니라, 처분장의 규모 축소로 인해 부지 선정을 용이하게 할 수 있다. 그리고 환경 친화적인 기술로서 핵확산 관련 저항성이 높으며, 미래 지향적인 건식 핵연료주기 시스템의 연구개발에 기여할 수 있는 기술적인 장점으로 인하여 현재 연구개발이 진행 중에 있다.

현재 진행 중에 있는 2단계(2001~2003년) 연구개발에서는 개발된 차세대관리 종합공정의 실증을 위한 설계와 관련 인허가 완료를 목적으로 실증시설의 설계연구를 수행하고 있다. 그러나 차세대관리 종합공정의 실증을 위한 차폐시설의 확보를 위하여 신규로 시설을 확보하기 위해서는 많은 재원과 인력 및 시간이 소요되므로 기존 시설을 활용하는 것을 전제로 조사재시험시설의 지하에 설치된 예비 hot cell을 선정하고, 차세대관리 종합공정의 특성 및 용도에 맞게 개조하여 실증시설로 활용하기로 결정하였다.

특히, 차세대관리 종합공정 실증시설의 경우 α - γ type의 hot cell과 불활성(Inert) 분위기의 hot cell을 필요로 하고 있으나 현재 국내에는 α - γ type의 hot cell과 불활성(Inert) 분위기의 hot cell을 보유하고 있지 않다. 따라서 기존의 γ type의 hot cell을 차세대관리 종합공정의 특성에 맞도록 개조하여야 활용이 가능하다.

기존 조사재시험시설의 지하에 설치된 예비 hot cell은 현재 일부 벽체만 설치된 상태로 이를 차세대관리 종합공정의 실증시설로 활용하기 위해서는 개조를 위한 기본설계와 상세설계는 물론 시설의 안전성 확보와 원자력 시설로서의 인허가를 위한 안전성해석 및 주변 환경에 대한 영향을 평가하여 시설의 안전성을 입증하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 실증시설로 활용할 기존 차폐시설(조사재시험시설의 예비 hot cell)의 여건 등을 고려하여 시설의 안전성과 효율적인 공정의 조업성이 확보되도록, 실증시설의 기본설계 및 상세설계를 수행하기 위한 기본 설계요건을 정립하여 제시하였다.

2. 연구 내용 및 결과

2.1. 규제 요건

2.1.1. 사용후핵연료 처리시설의 기술 요건

원자력법[1,2]에 사용후핵연료 처리사업은 핵연료주기사업으로 구분되어 있으며(원자력법 제 43조), 원자력법에 시설 허가를 위한 시설의 기술 요건이 명기되어 있다.

2.1.2. 사용후핵연료 처리시설의 성능에 대한 기술 요건

원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙(제86조)에는 사용후핵연료 처리시설의 성능에 대한 기술 요건으로 핵연료물질의 임계를 방지하는 능력 및 사용후핵연료 등을 한정된 구역에 봉입시키는 능력, 제품 중 원자력핵분열생성물의 함유율이 제시된 기준치 이하로 유지되며, 제품의 회수율이 제시된 기준치 이상 유지되는지에 대한 성능을 확인할 수 있는 기술자료를 제시하여야 한다.

2.1.3. 환경영향 평가를 위한 기술 요건

과학기술부고시 제2001-24, 25호(2001년 9월 19일)에서 원자력법 시행규칙 제133조 제2항의 규정에 의한 “원자력이용시설 주변의 방사선환경조사 및 방사선환경영향평가에 관한 규정”과 관련하여 환경영향평가를 위한 기술적인 방법을 개정·고시하였다.

2.1.4. 차폐 및 기밀 기준

방사선안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙의 핵연료물질 사용시설의 시설 기술기준(제5조)에서 제시된 차폐체 외부에서의 방사선량 요건은 1주당 1 mSv 이하로 제한하고 있으며, Pu 및 그 화합물과 이들 물질의 하나 또는 둘 이상을 함유하는 물질을 사용하거나 사용후핵연료 처리 연구설비를 내부에 설치하는 hot cell은 공기 주입구와 배기구를 제외하고는 밀폐된 구조를 갖거나 내부물질이 외부로 누출될 우려가 없는 구조를 갖추 것을 요구하고 있다.

2.1.5. 환경영향평가 선량 기준

원자력법시행령에 규정한 환경상의 위해 방지를 위해 수행되는 시설의 환경영향평가를 위한 선량기준은 방사선 방호 등에 관한 기준(과학기술부고시 제2001-2호, 2001년 1월 31일)에 설계에 적용할 기준을 제시하였다(제 16조). 그 주요 내용으로는 기체상태의 방출물에 의한 제한구역 경계에서의 외부피폭에 의한 유효선량을 0.05 mSv/yr, 피부등가선량과 입자상 방사성물질, ^3H , ^{14}C , 방사성 옥소에 의한 인체 장기 등가선량을 0.15 mSv/yr로 제한하고 있다. 그리고 동일 부지 내에 다수의 원자력시설을 운영하는 경우에는 제한구역 경계에서 유효선량을 0.25 mSv, 갑상선 등가선량을 0.75 mSv로 제한하고 있다.

2.2 실증시설의 공정시험 개념

실증시설의 설계 기준요건을 정립하기 위하여서는 실증시설의 효율적인 공정 운전 개념을 정립하여야 한다. 실증시설 내에서 수행될 공정시험 개념을 이해하고 실증시설의 효율적인 공정 운전을 위하여 실증시설의 공정작업 흐름도와 장치의 배치도를 그림 2와 3에 나타내었다.

2.3. 실증시설 분야별 설계 요건

차세대관리 종합공정 실증을 위한 $\alpha - \gamma$ hot cell과 Inert hot cell 시설의 설계를 위해 차폐셀 구조, 차폐셀 운전장비, 부대 설비, 환경영향 평가, 핵임계 안전성 등의 각 분야별 설계 기준에 대하여 정리하였다.

2.3.1. 차폐셀 요건

방사성 물질을 취급하게되는 원자력 시설에서 관리되지 않는 방사성 물질이 외부 환경으로 누출되거나 시설 내 오염의 확산을 방지하기 위하여 원자력 시설과 외부, 또는 시설 내 방사선 준위가 다른 관리구역 사이에 차폐체를 포함하는 방호벽을 설치하여 격리되도록 설계된다.

가. 실증시설의 Confinement 설계요건

예비 hot cell 내에 설치될 차세대관리 종합공정에서 취급되는 방사선원의 형태는 사용후핵

연료를 pellet, 분말, 고온의 용융염 및 용융금속, 그리고 금속 및 염 등 다양한 형태로 공정용기 내에서 취급하게되며, 단위공정별 특성에 따라 일반 air 분위기의 confinement와 inert 조건 유지를 위한 argon 분위기의 confinement로 분리되어 구성되며, 모두 Primary Confinement로서 다음의 confinement 설계요건들을 고려하여 설계되어야 한다.

- 취급되는 방사선원의 특성을 고려하여 취급선원을 효율적으로 차단하기 위한 confinement와 isolation 기능을 갖추고, 설계에서 고려되는 보수적인 기준사고가 발생하더라도 설계기준 피폭선량을 초과하지 않아야 한다.
- 예비 hot cell의 confinement 내부로 또는 내부로부터 필요한 장비 또는 물질의 출입시 내부 오염의 확산방지와 분위기 기준요건이 유지되도록 설계되어야 한다.
- Confinement의 차폐체는 시설 내 작업자의 피폭선량이 ALARA 개념에 의해 최소화될 수 있는 차폐능을 갖도록 설계되어야 한다.
- 예비 hot cell의 ventilation 및 clean up system은 Secondary Confinement 및 Tertiary Confinement와 분리되도록 구성되어야 함은 물론이고, air 분위기 confinement와 inert 분위기 confinement도 서로 분리되도록 설계되어야 한다.
- Primary Confinement의 부압 유지가 일시적으로 이루어지지 않는 비정상상태가 발생하더라도 이에 대비해 안전성 확보를 위한 clean up system과 누출제어를 위한 신뢰성 확보가 설계에 반영되어야 한다.
- 예비 hot cell 내에 설치되는 공정장치로부터 배출되는 모든 vent gas는 1차로 off-gas 처리장치를 반드시 거친 후 Primary Confinement의 ventilation 및 clean up system에 연결되도록 설계되어야 한다.

나. 차폐셀 type

현재 활용 예정인 조사제시험시설 지하의 예비 hot cell은 당초 설계시 β - γ type의 hot cell로 설계되었으나 차세대관리 종합공정의 경우 α - γ type의 air 분위기 hot cell과 inert 분위기 hot cell이 모두 필요하다. Air 분위기 hot cell에서는 사용후핵연료의 인입과 핵물질 계량관리를 위한 Neutron detection, Vol-oxidation 공정과 off-gas 처리공정, 우라늄 Ingot 및 hulls, 폐용융염 등 공정처리 후 물질의 인출과 같은 작업들이 수행된다. 그리고 Inert 분위기 hot cell에서는 금속전환공정 및 금속의 Smelting & Casting 공정, 그리고 Li 회수공정 및 용융염 처리공정, off-gas 처리공정과 같은 작업이 수행된다.

다. 차폐설계 기준

차폐체 설계를 위한 원자력법상에 제시된 설계기준은 주당 1 mSv이며, 이 경우 주당 작업시간을 40시간으로 기준할 때 0.025 mSv/hr이다. 그러나 실증시설의 보수적 안전성 확보를 위하여 상시 운전구역(7000 zone)에서는 선량기준을 0.01 mSv/hr를 기준으로 하고, 유지, 보수 수행을 위한 일시 출입구역인 작업구역(8000 zone)에서의 선량기준은 0.15 mSv/hr를 기준으로 차폐설계를 수행한다.

라. 차폐 보강

예비 hot cell의 당초 설계시 방사선원은 Fe-59 35 Ci(1.2 Mev)를 기준으로 하여 70~80

cm 두께의 일반콘크리트가 차폐체로 설치되어 있다. 차세대관리 종합공정의 공정 수율을 기준으로 각 단위공정별로 설정된 방사능양은 표 1과 같다. 그림 4는 기준방사선원 기준으로 단일 차폐체에 대한 차폐능을 계산한 결과이다. 현재 설치된 차폐체의 차폐능은 차세대관리 종합공정에서 취급될 기준방사선원의 약 1/10 정도로서, 차세대관리 종합공정의 기준 방사능양으로 계산하였을 때의 결과는 그림 5와 같으며, 일반콘크리트 기준 32 cm, 중량콘크리트 기준 22 cm, 스틸 기준 12 cm 차폐 보강이 필요로 하다.

마. 차폐셀 부압

예비 hot cell의 부압은 당초 β -v hot cell의 설계기준인 -25 mmAq를 기준으로 설계되었다. 차세대관리 종합공정의 실증을 위하여 활용될 예비 hot cell은 α -v type의 air 분위기 hot cell과 inert 분위기의 hot cell로 구분하여 사용하게 되므로 설계부압을 각 hot cell의 특성에 맞게 설정하는 것이 바람직하다. 실증시설의 경우 air 분위기 hot cell과 inert 분위기의 hot cell이 서로 인접해 있고, inert 분위기 hot cell의 경우 hot cell 내 산소나 수분의 함량을 엄격히 제한(≤ 100 ppm)하고 있기 때문에 air의 혼입을 방지하기 위하여 air 분위기 hot cell의 압력이 inert hot cell의 압력보다 낮게 유지되도록 설계하는 것이 바람직하다. 그러나 과도한 압력차는 inert gas(Ar)의 손실량을 크게 하므로 제어가 가능한 최소 압력차(2~3 mmAq)가 유지되도록 설계하는 것이 바람직하다.

따라서 Inert hot cell의 경우 과도한 부압 유지는 hot cell 외부로부터 공기의 혼입을 초래할 가능성이 높고 이로 인해 inert 분위기 유지를 위한 비용을 증대시키는 요인이 되므로 hot cell의 부압 설계기준 요건을 Inert hot cell의 부압 설계기준은 -25 mmAq로 적용하고, air 분위기 hot cell의 부압 설계기준은 -27~-30 mmAq를 적용하는 것이 바람직하다.

바. 차폐셀 기밀도

α -v type hot cell과 inert 분위기 hot cell에서의 설계기준 누출율로 제시된 수치는 다음과 같으며, 차세대관리 종합공정 실증시설의 경우 이를 기준으로 계산하여 보수적인 경우를 적용하는 것이 바람직하다.

- 환기설계 기준량의 1 %/min at 50 mmAq (UKAEA 설계 지침)
- 5 vol./day at 40 mmAq (AGHCF, ANL)
- 4 vol./day at 30 mmAq (RFEF, JAERI)

그리고 일반적으로 α -v type hot cell과 inert 분위기 hot cell의 기밀도 향상을 위하여 내부 liner box의 구조를 누출율이 최소화되도록 β -v hot cell에 비해 강화하여야 하며, 연결 또는 관통 부위에는 이중 seal이 설치되도록 설계되어야 한다.

사. 차폐셀 Penetration

Hot cell 내에서 필요한 물질의 공급을 위해 차폐벽을 관통하게 되는 penetration은 차폐 구조와 교체를 고려하는지 여부에 따라 유지, 보수를 필요로 하지 않는 영구적인 penetration(process 배관, duct, cable conduit 등 구조물과 일체형)과 교체가 가능한 구조의 penetration(전기나 계측장비를 위한 insert, plug 등)로 구분된다.

① 영구적인 Penetration

주로 hot cell 내부로 공급되는 공정시약 또는 유틸리티 배관, conduit 등으로서 차폐체와 일체형으로 설치되어야 하며, 용도와 유형 그리고 특성에 맞도록 기밀성이 유지되도록 한다.

차폐셀 외부의 연결은 특별한 경우를 제외하고 용접으로 연결하는 것을 원칙으로 하며, 차폐셀 내부 연결은 특성에 따라 용접 연결, screw 연결, 또는 특수 원격 분리가 용이한 connector를 이용한 일체형 연결 등의 방법으로 설계되어야 한다.

차폐체를 관통하는 직선 길이가 가능한 최소가 되도록 하며, 차폐체를 관통하는 배관, duct, conduit 등으로 인해 차폐체에 형성되는 void로 인한 차폐능 저하를 방지하기 위하여 부분적으로 차폐 보강(차폐체 내부 또는 외부)이 되도록 한다.

그리고 차폐체를 관통하는 배관, duct, conduit의 지름이 상대적으로 차폐체 두께보다 매우 클 경우는 한 개의 penetration보다는 작은 규모의 여러개 penetration을 설치하는 것이 차폐능 유지에 유리하므로 이를 고려하여 설계하여야 한다.

② 교체 가능한 Penetration

주로 cable, instruments, 작은 pipe, cylindrical 형태의 매립 sleeve, utility 연결을 위한 plug 혹은 insert 등을 위한 것으로 연결 부분은 나사 또는 flange, fitting과 같이 연결 및 분리가 용이한 connector가 사용된다. 이 경우 penetration 크기나 종류를 표준화하여 다른 크기의 plug나 insert들이 최소화 되도록 설계하여야 하며, 특히 sealing이 잘 유지되도록 이중 seal 및 gasket 등을 사용하는 구조로 설계한다.

가능한 penetration unit를 assembly 형태로 설계하여 교체가 용이한 구조로 하며, 차폐셀 외부에는 flange 형태, 내부에는 plug 형태로 하여 내부에서 원격 조작에 의해 plug만 제거하면 외부에서 교체가 가능한 구조의 형태를 갖도록 한다.

2.3.2 차폐셀 부대장비

2.3.2.1. 원격조작장치

Hot cell 내에서 원격조작 작업특성은 정상적인 공정 운전을 위한 작업, 공정간 상적인 물질의 이동을 위한 작업, 공정운전 중 발생한 경미한 고장에 대한 유지,보수 작업, 공정장치의 이동 등 중량물 취급을 요하는 유지,보수 작업의 4가지로 분류된다. 이상의 작업 특성을 고려하여 차세대관리 종합공정 실증을 위한 hot cell에 설치될 수 있는 원격조작장치로 MSM(Master Slave Manipulator)와 In-cell Crane을 고려하였다.

가. MSM(Master Slave Manipulator)

Hot cell이 α-γ type과 Inert hot cell이므로 sealed type manipulator로서 master와 slave를 연결하는 shaft 경계에 이중 seal 구조(주로 oil lubricated lip seals)를 가지며, seal을 요하는 부분의 packing은 기밀성과 내구성이 좋은 quadruple, nitrile rubber가 사용되어야 하고, MSM의 취급용량은 작업자의 작업성을 고려하여 9~10kg 정도의 취급용량이 바람직 하다.

나. In-cell Crane

In-cell crane은 MSM으로 취급용량을 초과하는 무거운 작업의 수행을 위하여 설치되며,

현재 공정간 일상적인 물질의 이동을 위한 작업과 공정장치의 유지, 보수, 취급 및 이동 등의 작업 수행을 위해 설치된다.

공정간 일상적 물질 이동을 위한 작업으로는 아래와 같은 작업들이 고려된다.

- Pardirac cask에 의해 운반된 사용후핵연료 container의 인입
- Vol-oxidation 공정 처리후 zircaloy tube container의 인출
- Vol-oxidation 공정 처리후 U_3O_8 분말 container의 금속전환 공정으로의 이동
- 금속전환공정 처리후 금속우라늄의 Smelting 공정으로의 이동
- 최종 우라늄 Ingot의 이동 및 인출
- 용융염 bead의 저장 및 인출을 위한 이동

이들 작업에서 취급되는 공정물질의 무게는 25~30kg 정도로 예상되며, 이동 루트가 일정하므로 In-cell crane에 전용 tool을 설치하여 사용하는 것이 바람직하다. 그리고 In-cell crane은 air 분위기 hot cell과 Inert hot cell에 분리하여 별개로 각각 설치되어야 하며, 취급용량은 각 hot cell에 설치되는 장치중 최대 중량물을 기준으로 설정하여 설계하여야 한다.

2.3.2.2. 차폐창

차폐창의 크기를 결정할 때 차폐창의 중심선으로부터 hot cell 내에 설치되는 기기까지의 거리를 hot cell 내부에서의 거리를 기준으로 normal view와 extreme view(the largest view)로 구분 설정하여야 한다. 가능한 넓은 view angle을 확보하기 위해서는 차폐창들이 cold side는 비교적 작은 glass 면적(aperture)를, hot side는 큰 glass 면적을 갖도록 설계하여야 한다.

그리고 차폐창의 납유리는 고준위 방사성 물질에 장기간 노출될 경우 방사선에 의해 취하(degradation)되어 손상을 입게되며, 이 경우 노란색을 띠게되고 빛의 투과율도 감소하게되므로 내방사선 재료인 CeO_2 가 첨가된 내방사선 무착색 납유리를 사용하도록 설계되어야 한다.

차폐창에는 hot side와 cold side에 cover glass가 설치되어야 하며, 차폐창 frame, glass, cover glass, hot cell liner와의 연결 부위는 기밀성 유지를 위하여 각각에 이중 sealing이 되도록 설계되어야 한다. 특히, Inert hot cell에 설치되는 차폐창의 경우는 기밀 보강을 위하여 inert gas를 cold side로부터 hot side로 purge하는 것을 고려할 수도 있다. 또한 차폐창 frame은 구조물의 내진 설계 등급인 내진 1등급을 만족하는 구조로 설계되어야 한다.

2.3.2.3. Rear door 및 쉘칸 door

가. Rear door

Rear door는 hot cell 내 장비의 유지, 보수를 위하여 air 분위기 hot cell과 inert 분위기 hot cell의 후면에 설치되며, 기밀성 유지를 위하여 rear door 내부에 투명하면서 내구성이 강한 재료의 dust barrier를 설치하도록 설계되어야 한다. 특히, rear door는 면적이 크고, door의 구조 특성상 hot cell의 기밀성 유지에 가장 취약한 부분이므로 rear door 내부에 설치되는 dust barrier에서 1차적으로 완벽한 기밀성 유지가 가능하도록 하며, 이를 위하여 dust barrier의 frame 구조를 flange와 같은 유형의 bolt를 체결하는 구조로 하고, 이중으로 seal gasket이 설치되도록 설계하는 것이 바람직하다. 그리고 rear door의 개폐 방식으로는 step-back 방식과 hinge 방식 등이 주로 사용되고 있으며, 기밀성 유지에 유리한 방식을 선정하는 것이 바람직하고, 작업자의 안전성 확보를 위하여 hot cell 내의 방사선 준위가 기준치 (1 mSv/hr) 이상일 경우에

는 rear door가 열리지 않도록 interlock 장치를 설계에 반영하여야 한다.

나. 셀간 door

셀간 door는 air 분위기 hot cell과 inert 분위기 hot cell 간에 필요한 물질의 이동을 위하여 설치되는 문으로서 양쪽 hot cell 사이에는 Inert hot cell로 이동시 air의 혼입을 방지하기 위하여 물질 이동에 필요한 최소 크기의 inert chamber가 설치된다. Inert chamber 양쪽에 셀간 door가 설치되며, 원격조작에 의해 자동으로 작동되는 구조로 설계되며, 각 셀간 door는 닫혀 있는 상태에서 기밀이 유지되도록 설계되어야 한다.

2.3.3. 부대 설비

2.3.3.1. Air 환기설비

Air 환기설비의 설계요건은 조사재시험시설의 기존 설계기준을 고려하여 아래의 기준요건을 기준으로 설계에 반영하는 것이 바람직하다.

- 환기방법 : one-through
- 내부온도 : 25 ~ 35 °C
- 부압조건 : - 27~-30 mmAq
- 환기회수 : 20회

배기는 hot cell 내에 설치되는 1차 filter bank를 거쳐 조사재시험시설의 기존 배기 duct에 연결되어 2차 filter bank(HEPA + Charcoal + HEPA)를 거친 후 배기된다. Hot cell 내에 설치되는 배기 1차 filter bank는 fission gas의 누출에 대비하여 Charcoal과 HEPA를 포함하여야 하고, 급기 filter bank도 누출 사고에 대비하여 Charcoal과 HEPA를 포함하여야 한다. 그리고 공정장치에서 발생하는 off-gas는 반드시 별도의 공정 off-gas 처리장치를 거친 후 배기설비에 연결되도록 고려하여야 한다.

2.3.3.2. Inert gas(Ar) 공급 및 정제설비

Inert hot cell의 경우는 별도의 inert gas(Ar) 공급 및 정제설비를 추가로 설치되어야 한다. 또한 inert hot cell의 경우 유지, 보수를 위한 작업자의 출입할 경우를 고려하여 air 분위로 전환하는 것이 가능하도록 환기설비가 설계되어야 한다. 차세대관리 종합공정에서 사용되는 inert gas는 inert hot cell에 공급되는 inert gas와 공정 반응기 내의 불활성 분위기 유지를 위하여 공급되는 공정용 cover gas로 구분되고, 각 용도에 따라 inert gas의 정제도의 요구조건도 차이가 있으며, 아래의 기준 요건을 기준으로 설계에 반영하는 것이 바람직하다.

가. Inert hot cell 용

Inert hot cell 내의 운전요건은 다음과 같이 설정된다.

- 공급방법 : 순환방식
- 내부 온도 : 25~40 °C
- 부압조건 : - 25 mmAq
- 환기회수 : 10회 이상
- 수분 및 산소농도 : 100 ppm

- 공급방법 : 순환방식
- 공급 용량은 공정의 heat load가 확정된 후 냉각용량과 환기회수를 고려하여 결정되어야 한다.

① Inert gas 냉각장치

예비 hot cell의 공간 제약과 유지, 보수 여건을 고려할 때 차세대관리 종합공정 실증시설의 경우는 냉각 unit를 hot cell 외부에 설치하는 고품량순환방식을 선정하여야 한다.

② Inert gas 정제장치

순환 Ar gas가 제습장치와 산소제거장치로 구성되는 정제설비는 Inert hot cell 내에서 요구되는 inert 요건을 만족하도록 설계되어야 하며, 가능한 정화장치는 필요한 용량의 50 % 용량 크기의 장치를 3대 설치하여 다양한 부하로 운전이 가능하면서도 stand-by 기능을 포함할 수 있도록 설계되어야 한다.

③ Inert gas 공급장치

Inert gas 공급장치는 Ar gas 저장용기, 기화장치 및 압력조절장치로 구성되며, 초기 hot cell의 Ar gas 공급과 순환과정에서의 보충과 hot cell 내부의 일정 부압을 유지하는 기능을 갖도록 설계되어야 한다.

④ Inert gas 배출장치

Inert gas 배출장치는 filter bank, 배출 fan, 압력감시 및 조절장치로 구성되며, 초기 운전시 hot cell 내 공기를 배출하고, 정상운전 중에는 hot cell 내 압력이 기준 요건보다 높을 경우 적정압력 유지하는 조절 기능을 갖도록 설계되어야 한다. Hot cell 내부 배기구에는 Charcoal과 HEPA를 포함하는 filter bank가 설치되어야 하며, 외부공기의 hot cell 내 유입을 방지하기 위하여 seal pot가 설치되고, hot cell 외부에 Charcoal과 HEPA를 포함하는 filter bank를 이중으로 설치하여 오염물질의 외부 유출에 대비하도록 설계되어야 한다.

그밖에 hot cell 내 Ar gas 인입구와 정제설비로 보내지는 배출구에도 Charcoal과 HEPA를 포함하는 filter bank가 설치되어 hot cell 내 누출에 대비한 설계가 고려되어야 한다.

나. 반응기 cover gas 용

공정 처리과정에서 수분이나 산소에 의해 공정 수율 등의 영향을 배제하기 위하여 반응기 내의 불활성 분위기 유지를 위한 용도로 사용되며, hot cell의 inert gas 보다 높은 정제도를 요구한다.

- 수분 및 산소 농도 : 5 ppm
- 공급방법 : 고순도의 Ar gas를 공급하여야 하고, 사용량도 많은 량이 아니므로 one-through로 사용하며 사용 후 Ar gas는 공정 off-gas 처리장치를 거친 후 hot cell의 inert gas 배출, 순환 line에 연결하여 재 사용할 수 있도록 고려한다.

2.3.4. 환경영향 평가 및 책임제 안전성

조사제시험시설 내에 차세대관리 종합공정 실증시설을 설치하여 실증시험을 수행할 경우 이 시설에 대한 정상운전중 방사선 환경영향과 예상되는 시설 내 사고 시 영향을 평가하여, 시설의 안전성 확보 여부를 확인하고, 필요시 시설의 보완 방법이 제시되어야 한다.

2.3.4.1. 정상운전중 환경영향평가

조사제시험시설 내 예비 hot cell에 차세대관리 종합공정 실증시설이 설치되어 실증시험을 수행하는 경우 실증시설로부터 방출되는 액체폐기물은 없으며, 환경으로 방출되는 방사성물질은 기체 상태의 방사성물질에 국한되어 하나로 stack을 통하여 방출된다. 따라서 시설 내 공정에서 배기되는 기체 방사성물질을 기준 방사선원으로 설정하여 off-gas 처리장치, filter bank에서 제거 효율을 고려하여 배출되는 기준 방사선원을 계산하여야 한다. 배기 굴뚝을 통하여 방출된 기준 방사선원의 기체 방사성물질은 바람을 타고 환경으로 확산되는데, 일부는 확산되면서 지표면에 침적된다. 환경으로 방출된 방사성물질은 인근 주민에게 직접, 간접으로 방사선피폭을 야기시키게 되는데 그 피폭경로로는 대기로 방출된 방사능운에 의한 직접피폭, 방사능운의 호흡에 의한 내부 피폭, 방사성물질의 침적에 의해 오염된 농작물의 섭취를 통한 내부피폭 및 오염된 토양으로부터의 외부피폭 등이 고려되어야 하고, 이는 그림6의 피폭 경로도로 표기될 수 있다. 대기확산인자 및 침적인자는 가장 최근에 한국원자력연구소에서 발간된 ‘대덕 원자력관련시설의 운영 중 방사선 환경영향평가’ 보고서에 기록된 자료를 적용하여야 한다. 그리고 최대피폭지점에서의 피폭경로별 피폭선량은 미 규제지침 1.109에 따라 다음과 같은 방법으로 평가되며, 최대개인 피폭선량은 이들 모든 피폭경로에 대한 피폭선량의 합으로 계산된다. 최대개인이란 부지주변 주민중 생활습관, 음식물 섭취량, 주거지 등 여러 조건이 방사능 피폭을 가장 많이 받도록 가정된 가상개인(최대개인)을 말한다.

예비 안전성해석에서 피폭선량계산은 미 규제지침서 1.109의 모델을 기준으로 한국의 실정에 맞게 전산화한 GASDOS 전산프로그램을 사용하고, 개인의 소비량과 선량환산인자는 연령에 따라 변하는 값으로 이를 고려하기 위하여 주민을 성인(17세 이상), 십대(17세 미만 11세 이상), 소아(11세 미만 1세 이상) 및 유아(1세 미만)로 구분하고, 피폭을 받는 장기는 전신, 소화기관, 뼈, 간, 신장, 갑상선, 폐 및 피부를 고려하여야 한다. 선량평가는 외부피폭선량, 호흡에 의한 피폭선량, 농수산물 및 축산물 섭취로 인한 피폭선량 등을 계산하여 종합적으로 평가되어야 한다. 정상운전시 환경영향평가에 의한 설계기준은 보수적인 시설의 안전성 확보를 위해 기체방출물에 의한 제한구역경계에서의 규제기준 유효선량(0.05 mSv/yr)의 1/10을 설계기준으로 적용한다.

2.3.4.2. 사고시 환경영향 평가

공정특성 및 시설 여건을 고려하여 평가를 위한 기준 사고를 다음과 같이 가정할 수 있으며, 이들 사고를 대상으로 사고시 환경영향평가를 수행하여야 한다.

- 배기체 처리장치의 고장으로 인한 fission gas 누출
- Hot cell 내 화재 (Inert 분위기 파괴로 인한 Li 화재 포함)
- 취급하는 우라늄 분말로 인한 분진 폭발
- 핵분열생성물의 decay heat에 의한 위험
- 배기 duct 파단 사고
- 공정장치 heating 장치의 과열로 인한 LiCl fume 누출

이상의 기준 사고별로 누출 가능한 방사성물질을 보수적으로 가정, 계산하여 사고별로 방출 기준 방사선원을 설정하여야 한다. 그리고 사고시 환경영향평가에 의한 설계기준은 국내 규제기준이 없으므로 10 CFR Part 100, Sec.100.11에 제시된 주민 피폭선량(전신: 250 mSv, 갑상선: 300 mSv)를 기준으로 시설 주변이 미국 기준에 비해 인구 밀집지역임을 감안하여 보수적인 시설의 안전성 확보를 1/100을 설계기준으로 적용하는 것이 바람직하다.

2.3.4.3. 핵임계 안전성 평가

차세대공정 종합공정 실증시설의 hot cell 내의 운전 개념은 1 batch 처리후 우라늄 ingot는 다음 batch의 사용후핵연료가 hot cell 내로 인입되기 전에 hot cell 외부로 인출하는 것을 전제로하고 있으며, U-235 농축도는 3.5 %를 기준으로 설정하였다. 따라서 hot cell 내 체류하는 사용후핵연료는 1 batch분 20 kg-HM를 기준하는 것이 타당하나, 보수적인 핵임계 안전성을 확보하기 위하여 Double Batch Principle를 가정하더라도 40 kg-HM이 존재한다. U-농축도 3.5 %를 기준으로 최악의 가상 조건인 주변에 물 감속제로 둘러싸여 있고, 30 cm 두께의 전반사체이며, 비균질(Heterogeneous) metal로 가정할 경우 최소 핵임계질량은 약 50 kg 정도[3]이므로 실증시설의 hot cell에서의 핵임계 안전성이 충분히 확보될 것으로 예상된다. 그러나 공정의 기본설계가 완료되어 구체적 공정자료들이 제시되면 그 공정자료들을 근거로 핵임계 안전성평가가 수행되어야 한다.

3. 결 론

원자력시설 특히 사용후핵연료 처리시설과 관련하여 국내 원자력법령 및 관련 과학기술부 고시를 중심으로 시설 인허가를 위해 요구되는 기술요건과 기술기준들을 분야별로 검토하여 차세대관리 종합공정 실증시설의 설계 기준 요건들을 제시하였다. 원자력법령에 준용을 규정하거나 상세한 내용의 기술이 없는 분야에 대해서는 미국 NRC (Nuclear Regulation Commission)의 10 CFR (Code of Federal Regulations) 및 Regulation Guides에서 제시하고 있는 규제와 관련한 기술 요건 및 기준들을 검토하였다. 설정된 차세대 관리 공정 시험 규모를 기준으로 실증시설에 적용할 차세대관리 종합공정의 기준 공정, hot cell 내에서 취급하게 되는 기준 방사선원 및 차폐시설에 대한 기준 요건을 정립하였다. 그리고 차세대관리 종합공정 실증을 위한 α - γ hot cell과 Inert hot cell 시설의 설계를 위해 차폐셀과 차폐셀 운전장비, 부대시설, 환경영향평가 및 핵임계 안전성등의 분야별 설계 기준요건을 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 주관으로 추진중인 원자력중장기사업의 일환으로 추진하였으며, 관계자 여러분에게 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. 한국방사성동위원소협회, 원자력법령집, 2001.
2. 한국방사성동위원소협회, 원자력관련고시집, 2001.
3. KAERI/TR-861/97, 핵임계안전지침서, 1997

표 1. Radioactivity basis on unit process in hot cell.

구 분	Radioactivities (Ci)
Vol-oxidation	9,950
Fission gas treatment	136
Metalization (Li reduction)	9,773
Smelting & Casting	3,801
Li Recovery	6,083

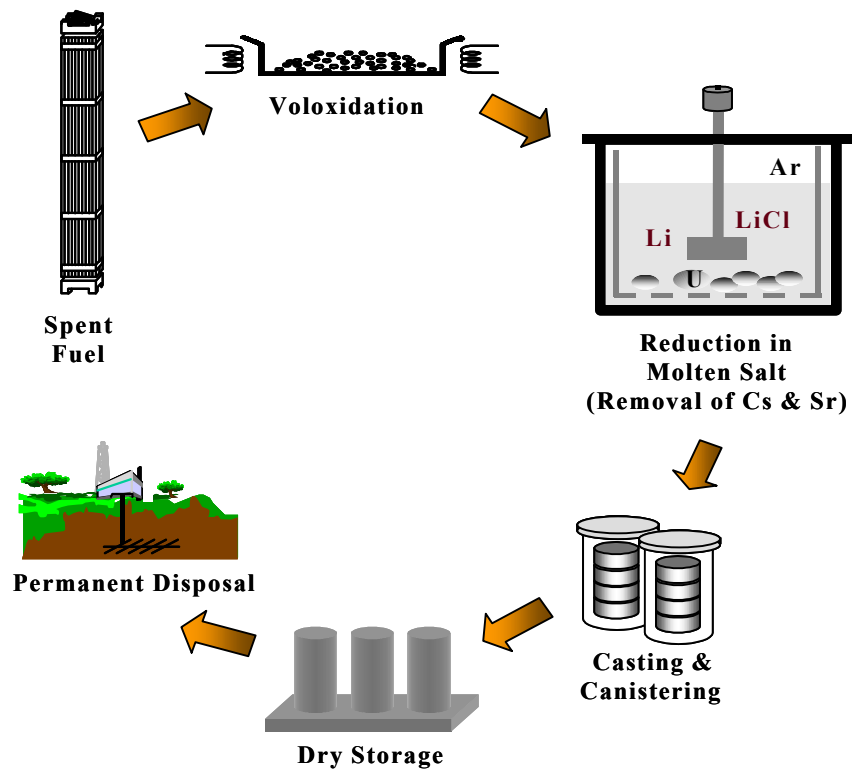


그림 1. Concept of advanced SF management process.

PROCESS WORK FLOW DIAGRAM

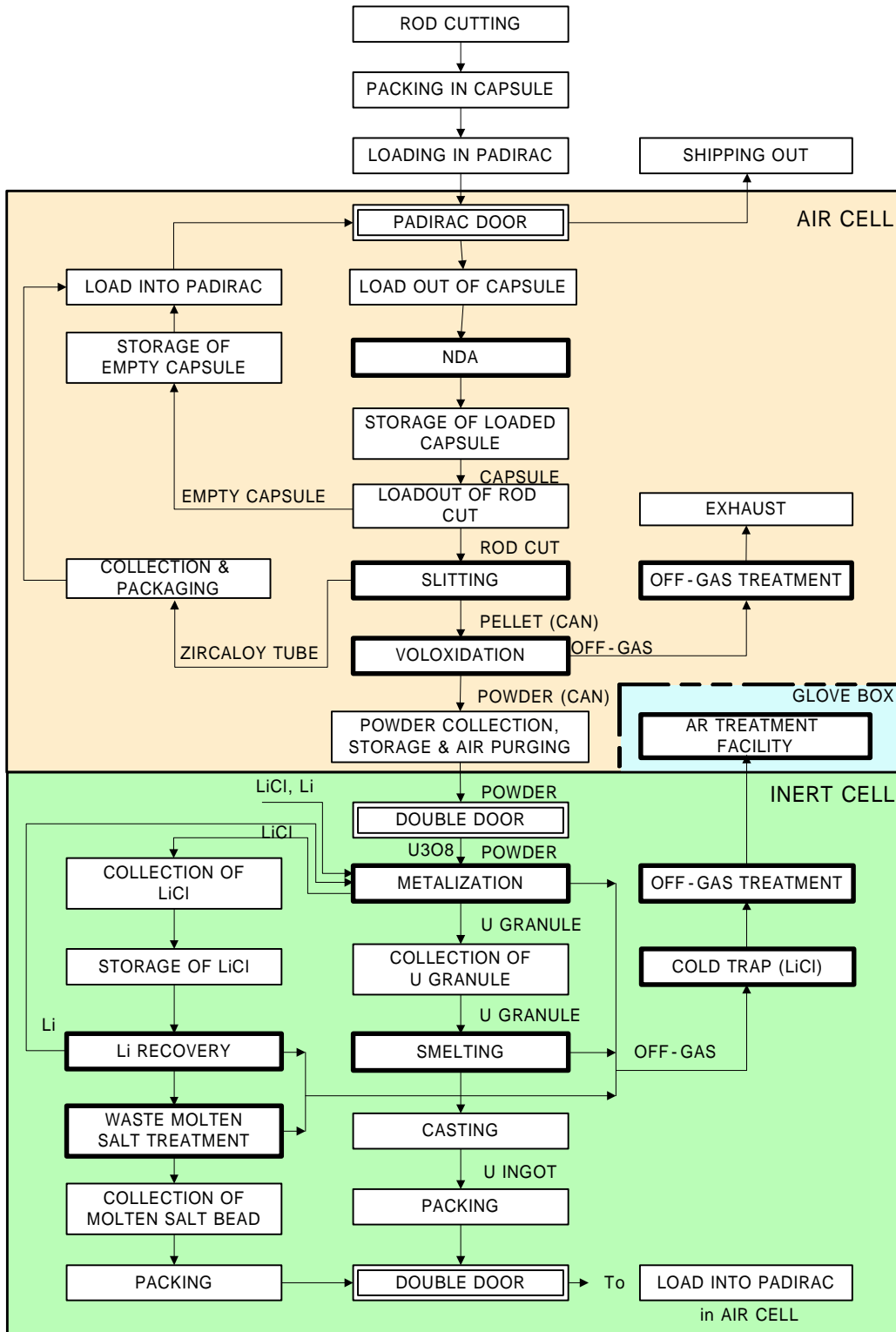


그림 2. Work flow diagram of advanced spent fuel management process in hot cell.

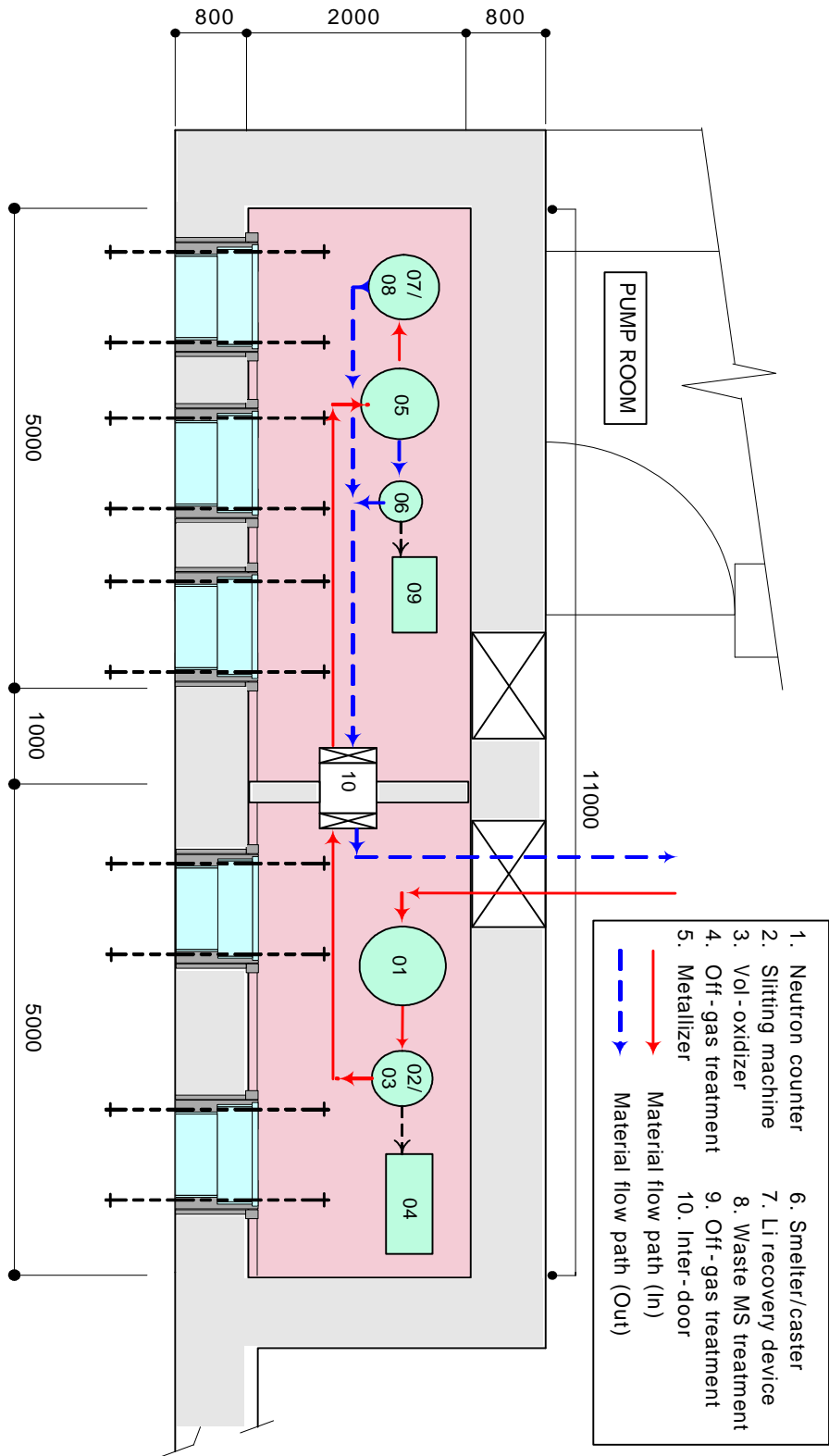


그림 3. Typical lay-out of main process equipments.

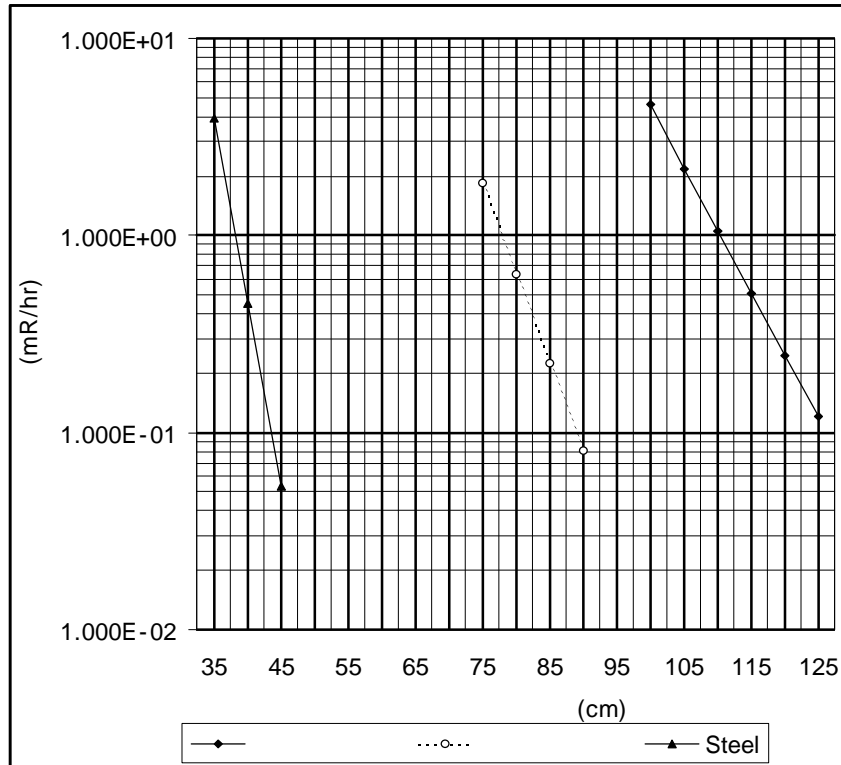


그림 4. The results of shield calculation for shield reinforcement.

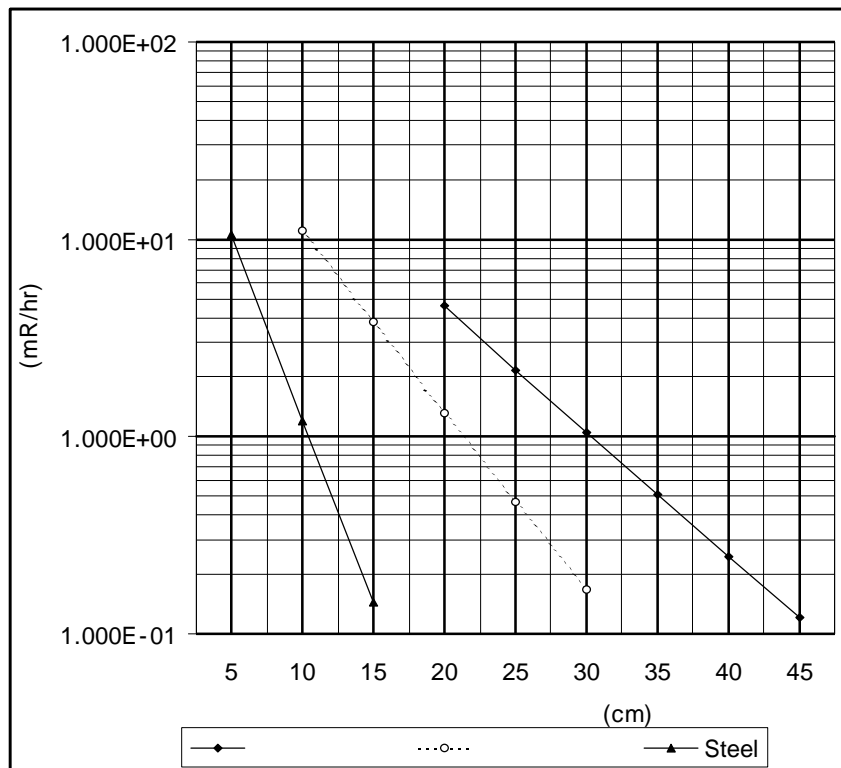


그림 5. The results of shield calculation for shield reinforcement.

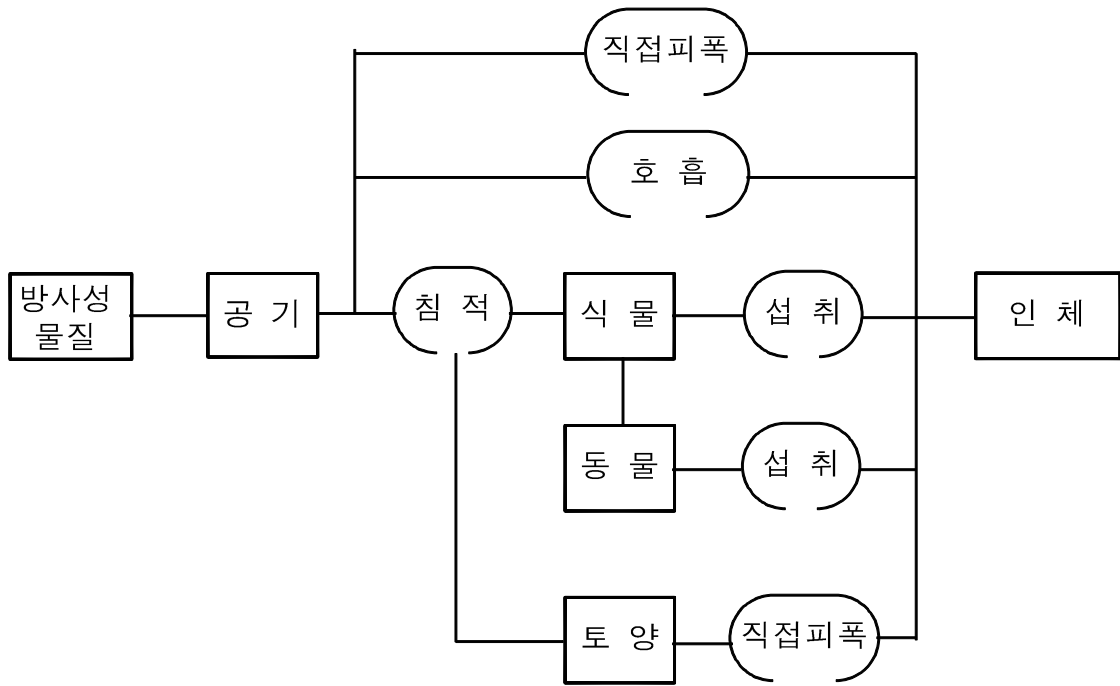


그림 6. Dosing path diagram of human body.