

파이로 Mock-up 시설 안전관리 설비 및 안전성평가

■ 조 일 제 / 한국원자력연구원, hylje@kaeri.re.kr

파이로 Mock-up 시설은 파이로 기술개발에 필수적인 장비 및 공정의 개발 및 시험을 위한 inactive 시험시설이다. 파이로 Mock-up 시설은 천연우라늄 및 감손우라늄을 사용하여 파이로 기술을 실증하기 위한 Mock-up 시험시설로서, 우라늄 기준으로 연간 최대 10 톤의 처리 규모를 가지도록 설계되어 있다. 파이로 Mock-up 시설과 같이 천연우라늄 및 감손우라늄(우라늄 238에 대한 우라늄 235의 비율이 천연혼합물에 미달하는 우라늄)을 사용하는 시설은 원자력법 제57조 및 제59조 규정에 따라 취급 핵연료물질에 대한 사용허가를 받아야 하며, 핵연료물질을 안전하게 사용하기 위한 취급 절차, 시설과 장비 및 인력 등이 적합하다고 확인될 경우만 운영이 가능하다.

따라서 파이로 Mock-up 시설에서 우라늄을 취급하는 공정을 수행함에 따라 예상되는 방사성물질에 대한 주변 환경으로의 환경영향을 평가하여 시설의 안전성을 입증하여야 하며, 또한 시설을 운영함에 따라 작업종사자에 대한 선량한도, 시설내 공기오염도 및 배기를 통해 방출되는 방사능의 원자력 관계법령에서 정하는 기준치 이내를 만족하도록 하기 위한 방사능 설비 및 측정기기를 설치하고 방사선 안전관리 절차를 준수하여야 한다. 또한 파이로 Mock-up 시설 공정설비는 고온의 용융염 매질에서 반응성이 있는 화학물질들을 취급하므로 공정설비의 운전으로 인한 안전성 확보가 매우 중요하여, 설비 운영으로 인한 작업자의 위험을 최소화 하여야 한다. 이를 위하여 파이로 Mock-up 시설 설계와 병행하여 파이로 Mock-up 시설에 대한 안전성을 확보하기 위한 안전성평가 업무의 일환으로 파이로 Mock-up 시설을 운영함에 따라 주위 환경에 미치는 환경영향평가와 파이로 공정에서 취급하는 유해·위험 물질에 대한 평가를 수행하였다.

이 글에서는 파이로 Mock-up 시설을 구축함에 따라 파이로 Mock-up 시설 외부로 방출되는 방사능을 관리하기 위한 방사선 안전관리설비를 소개하고, 시설 주변 환경 및 작업자에 미칠 수 있는 방사선 환경영향평가 및 시설의 안전성 평가를 위한 활동을 기술하였다.

파이로 Mock-up 시설 방사선 안전관리 설비

파이로 Mock-up 시설 방사선 관리 설비는 공기오염 감시계통, 유체 및 고체 방출물 감시계통, 출입감시 설비 등으로 구성되며, 공기오염 감시계통은 시설 내 개봉 우라늄 취급구역내의 공기중 방사능 농도를 측정하며, 고정형 또는 이동형 공기시료 채집 방식을 사용한다. 기체 방출물 감시계통은 (Stack Monitor) 시설 내 관리구역에서 배기를 통해 외부로 방출되는 배기중의 방사능을 측정하기 위한 설비로 측정결과는 통제실에 전송, 취합, 처리되게 된다.

방사선 관리 설비는 개인 오염 감시기 및 공기오염 감시계통 장비로 구성되며, 방사선 감시계통은 종사자는 물론 일반 대중의 방사선 피폭을 가능한 최소화 되도록 설계하며, 시설 내 특정지역 및 방사성 물질을 함유할 수 있는 계통의 방사선 준위를 측정 및 감시할 수 있어야 한다. 방사선 피폭 관리를 위하여 방사선감시 시스템은 개인 오염 감시기 및 공기오염 감시계통 장비로 구성된다. 방사선 감시계통은 종사자는 물론 일반 대중의 방사선 피폭을 가능한 최소한으로 하도록 설계하며, 시설 내 특정지역 및 방사성 물질을 함유할 수 있는 계통의 방사선 준위를 측정, 감시할 수 있어야 한다.

그림 1은 파이로 Mock-up 시설에 설치되는 전체

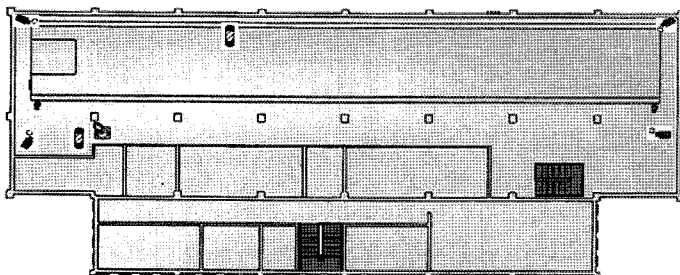
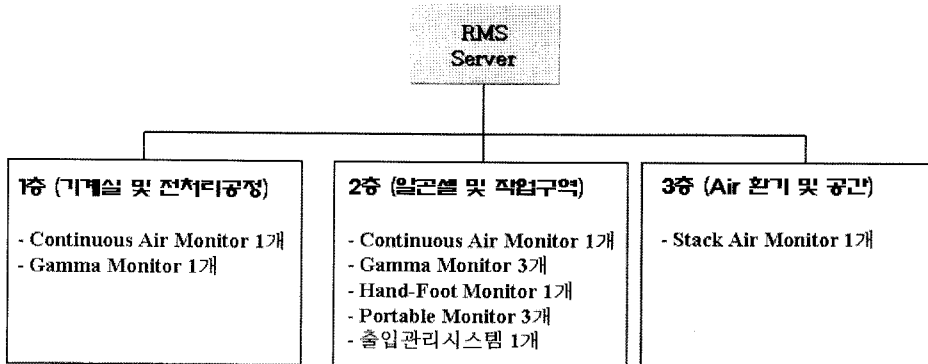
적인 방사선안전관리시스템의 구성도 및 2층 배치 개념도를 보여주고 있다.

공기오염 감시계통(Air Monitoring System)은 우라늄을 취급하는 구역 내의 공기중 방사능 농도를 측정하여 작업장내의 환경을 감시하며 작업자의 방사성 물질 흡입 섭취량을 평가하기 위한 기초자료를 얻기 위하여 설치된다. 공기오염 감시기는 작업구역을 대표할 수 있는 장소에 고정형으로 설치되어 연속 공기오염 감시를 수행하며, 특수 작업시 공기오염을 감시하기 위한 이동형 공기시료 채집기 및 이동형 연속 공기오염 감시기를 보조적으로 사용한다. 배기 감시계통(Stack Monitoring System)은 시설의 굴뚝을 통해 외부로 방출되는 배기의 방사능을 측정하여 배기처리 계통의 성능을 확인하고 대기로 방출된 방사능 물질의 양을 평가하기 위하여 설치된다. 시설에서 방출되는 모든 배기는 공기정화기(HEPA Filter)를 통하여 대기로 방출되어야 하며, 감시기는 공기정화기를 통과한

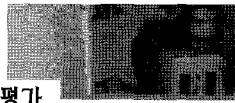
기체에 대한 방사능을 측정하여 대기방출 허용기준치를 초과하면 경보가 발생됨과 동시에 연동신호에 의해 배기 팬을 정지시켜 해당 기체가 대기로 방출되지 않도록 해야 한다. 방사능 측정 기기들은 아래의 규격 및 표준을 만족시켜야 한다.

- ANSI N13.1 : Guide to Sampling Airborne Radioactive Materials in Nuclear Facilities
- ANSI N13.2 : American National Standard Guide for Administrative Practice in Radiation Monitoring
- ANSI N42.18 : Specification and Performance of On-Site Instrumentation for Continuously Monitoring Radioactivity in Effluent
- ANSI N323 : Radiation Protection Instrumentation Test and Calibration
- ANSI/ANS-8.3 : Criticality Accident Alarm System

파이로 Mock-up 시설의 경우 천연우라늄 및 감



[그림 1] 파이로 Mock-up 시설에 설치되는 방사선안전관리시스템 및 2층 배치도



손우라늄을 사용하여 감마선 및 중성자에 의한 작업자의 피폭 위험은 적지만, 방사선안전관리 구역에서 원자력법상 기본적으로 확보하여야 하는 공간 선량률의 측정을 위해 시설 작업구역 및 불활성 분위기 셀내에 공간선량 감시(Area Gamma Monitoring)을 위한 측정기를 설치하였다.

이 외에도 시설 출입 시 작업자의 손, 발 및 의복의 오염을 감시할 수 있는 Hand-Foot-Clothing Monitoring System 및 출입자관리 시스템을 설치하여 작업자 및 방문자들의 안전한 출입 및 오염 여부를 감시할 수 있도록 하며, 아래의 규격 및 표준을 만족시켜야 한다.

- ANSI N13.1 : Guide to Sampling Airborne Radioactive Materials in Nuclear Facilities
- ANSI N13.2 : American National Standard Guide for Administrative Practice in Radiation Monitoring
- ANSI N42.18 : Specification and Performance of On-Site Instrumentation for Continuously Monitoring Radioactivity in Effluent
- ANSI N323 : Radiation Protection Instrumentation Test and Calibration
- ANSI/ANS-8.3 : Criticality Accident Alarm System

파이로 Mock-up 시설 방사선 환경영향 평가

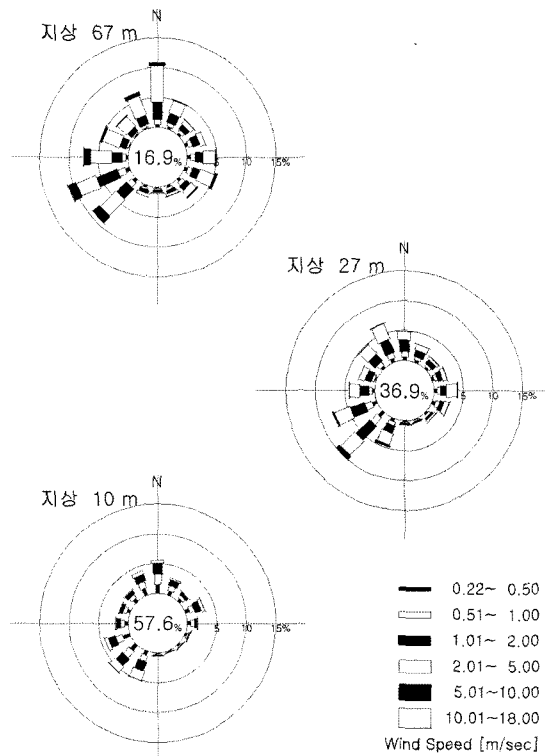
파이로 Mock-up 시설에서 우라늄을 취급하는 공정을 수행함에 따라 예상되는 방사성 물질에 대한 환경영향을 평가하여 시설의 안전성을 입증하여야 한다. 환경영향평가는 정상 운영 시와 사고 시로 구분되며, 환경영향평가 결과를 통하여 시설의 안전성 확보 여부를 확인하고 필요 시 시설 보완을 하게 된다.

정상 운전 시 환경영향 평가

파이로 Mock-up 시설의 정상 운전 시 환경영향 평가를 위하여서는 먼저 정상 운전 시 배기 굴뚝을 통하여 방출되는 기준 방사선원을 결정하여야 한다. 파이로 Mock-up 시설의 공정 과정 중에 방출

되는 액체 방출 물은 없으며, 환경으로 방출되는 방사성물질은 기체 상태의 방사성물질에 국한되므로, 시설 내 공정에서 배기되는 기체 방사성물질을 기준 방사선원으로 설정하여 배기처리장치 및 필터에서 제거되는 효율을 고려한 후 배출되는 기준 방사선원을 계산하게 된다. 배기 굴뚝을 통하여 방출된 기준 방사선원의 기체 방사성물질은 바람을 타고 환경으로 확산되는데, 일부는 확산되면서 지표면에 침적된다. 환경으로 방출된 방사성물질은 인근 주민에게 직접, 간접으로 방사선피폭을 야기 시키게 되는데, 그 피폭경로로는 대기로 방출된 방사능 운에 의한 직접피폭, 호흡에 의한 내부피폭, 방사성물질의 침적에 의해 오염된 농작물의 섭취를 통한 내부피폭 및 오염된 토양으로부터의 외부피폭 등이 고려되어야 한다.

파이로 Mock-up 시설이 위치할 한국원자력연구



[그림 2] 파이로 Mock-up 시설이 위치할 부지에서 측정고도별 바람장미 (2005 ~ 2007 ; 동심원내 숫자는 calm의 발생빈도를 나타냄)

원에는 방사선환경영향평가 등의 목적으로 74.5 m 높이의 3개 측정고도(10 m, 27 m, 67 m)에서의 풍향, 풍속, 온도 및 습도 등 여러 기상요소를 측정, 수집하고 있으며, 그림 2는 동 부지에 대한 기상특성의 대표성을 위해 2005년부터 2007년까지의 3년간의 자료를 분석한 바람장미(wind rose)이다. 파이로 Mock-up 시설은 미국 원자력 규제위원회(NRC) 규제지침(regulatory guide)의 정의에 따라 기체상 방사성 유출물의 방출 유형 상 지표방출에 해당하며, 이 경우 환경영향평가에서는 10 m에서 측정된 기상자료를 사용하게 된다.

파이로 Mock-up 시설의 정상 운전 시 환경영향평가를 위한 대기확산인자 및 침적인자는 가장 최근에 한국원자력연구원에서 발간된 '대덕 원자력 관련시설의 운영 중 방사선 환경영향평가' 보고서에 기록된 자료를 적용 하였다. 피폭선량계산은 미 규제지침서 1.109의 모델을 기준으로 한국의 실정에 맞게 전산화한 GASDOS 전산프로그램을 사용하고, 개인의 소비량과 선량환산인자는 연령에 따라 변하는 값이므로 이를 고려하기 위하여 주민을 성인, 십대, 소아 및 유아로 구분하고 피폭을 받는 장기는 전신, 소화기관, 뼈, 간, 신장, 갑상선, 폐 및 피부를 고려하였다. 선량평가는 외부피폭선량, 호흡에 의한 피폭선량, 농수산물 및 축산물 섭취로 인한 피폭선량 등을 계산하여 종합적으로 평가하며, 보통 정상 운전시 환경영향평가에 의한 설계기준은 보수적인 시설의 안전성 확보를 위해 기체 방출물에 의한 제한구역경계에서의 규제기준 유효선량(0.05 mSv/y)의 1/10을 설계기준으로 적용한다.

사고 시 환경영향 평가

공정특성 및 시설 여건을 고려하여 평가를 위한 기준 사고를 가정하며, 이들 사고를 대상으로 환경영향평가를 수행한다. 이때 기준 사고별로 누출 가능한 방사성물질을 보수적으로 가정, 계산하여 사고별로 방출 기준 방사선원을 설정하여야 한다. 사고 시 환경영향평가에 의한 설계기준은 국내 규제기준이 없으므로 10 CFR Part100, Sec.100.11에 제시된 주민피폭선량(전신 : 250 mSv, 갑상선 : 300 mSv)를 기준으로 시설 주변이 미국 기준에 비해 인구 밀집지역임을 감안하여 보수적인 시설의 안전

성 확보를 위해 1/100을 설계기준으로 적용한다.

그림 3은 원자력 시설에서 발생하는 다양한 사고 시 환경영향 평가를 위한 기준 방사선원을 결정하기 위한 절차를 보여준다. 원자력 시설에서 발생 가능한 사고유형으로는 내부 사건요인 및 외부 사건요인이 있으며, 내부 사건의 주요 인자로는 화재, 폭발, 엇지름 및 임계 등이며, 외부 주요 요인으로는 지진 및 홍수 등이다.

파이로 Mock-up 시설에서 발생 가능한 사고에 대한 기준 방사선원은 DOE-HDBK-3010-94에서 제안한 5 인자 식을 사용하며, 계산 식은 아래와 같다.

$$\text{Source Term} = \text{MAR} \times \text{ARF} \times \text{RF} \times \text{DR} \times \text{LPF}$$

MAR : Material At Risk available for release

ARF : Airborne Release Fraction suspended in air as an aerosol

RF : Respirable Fraction of airborne radionuclides as particles

DR : Damage Ratio

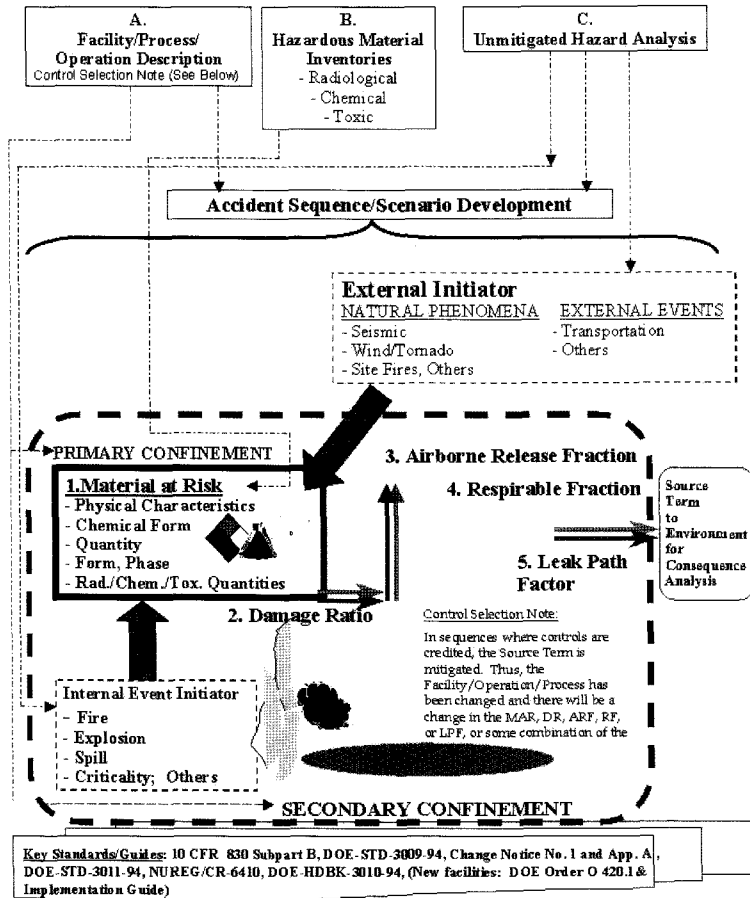
LPF : Leak Path Factor

주변 환경에 대한 환경영향평가를 위한 사고 시 대기확산인자는 미국 원자력규제위원회 규제지침 1.145에서 개발된 PAVAN 프로그램을 이용하여 평가하게 되며, 주민선량평가를 위한 파이로 Mock-up 시설의 운영 중에 발생 가능한 가상적 최악의 사고 시나리오는 화재로 평가 되었다.

파이로 Mock-up 시설 공정 위해도 평가

파이로 Mock-up 시설과 같이 방사성물질과 화학물질을 취급하는 공정설비에서는 주요 위험요소들로 다음의 4가지가 고려된다.

- 공정에서 취급하는 방사성 물질로 인한 위험
- 공정에서 취급하는 물질의 화학적 특성으로 인한 위험
- 공정설비 또는 부대설비의 결함으로 인한 방사성 물질의 누출로 인하여 작업자나 주변 환경이 방사선에 노출될 수 있는 위험
- 공정설비 또는 부대설비의 결함으로 인해 독성이 강하거나 유해한 화학물질의 누출로 인하여



[그림 3] 원자력시설 내 다양한 사고조건에 대한 사고해석 개념도

작업자가 위해 물질에 노출될 수 있는 위험 이와 같은 공정 위험요소들의 종류 및 발생 가능성을 공정별로 검토하여 이들 위험요소들의 발생 요인을 근본적으로 제거하거나 방지하고 대비할 수 있도록 공정을 구성하며, 안전성을 확보할 수 있는 공정설비 및 부대시설의 설계를 수행하는 것이 필수적이므로, 파이로 공정에 대한 안전성 확보를 위해 화학공정으로서의 공정내용 및 특성, 위해 요인에 대하여 분석하여 위험의 발생을 미연에 방지하여야 한다.

공정 취급물질의 위해 특성

파이로 공정에서는 방사성 물질로는 천연 우라늄

만을 취급하게 되며, 방사성 물질의 방사선에 의한 독성지수는 ICRP(the International Commission on Radiological Protection)에서 핵종별로 제시한 작업자의 ALI(Annual Limits on Intake) 수치로 표기될 수 있다. 천연 우라늄의 주 핵종인 U-238의 ALI 수치는 1×10^4 ALI(Bq)로서 상대적으로 다른 핵종에 비해 낮다. 주로 산화물 분말이나 금속 형태로 취급하게 되며, 비산으로 인한 누출 또는 흡입에 유의하여야 하므로 공정장치 외부로 누출되지 않도록 장치 설계에 각별히 유의하여야 한다.

또한 파이로 공정에서 취급하는 주요 공정시약 및 화학물질의 화학적 특성에 의한 위해도를 조사, 분석하여 설계에 반영하여 공정설비의 안전성을

확보토록 하였다. 파이로 Mock-up 시설에서 취급하게 되는 주요 공정시약은 전해환원공정에서 취급하는 LiCl, Li₂O, 전해정련공정에서 취급하는 LiCl, KCl, UCl₃ 전해제련공정에서 추가로 취급하는 KCl, Cd 금속과 반응 후 발생하는 Cl₂ 가스, 그리고 폐용융염 처리공정에서 산화물 침전물 생성을 위해 사용하는 O₂ 가스 등이 고려될 수 있다.

공정 safety 설계요건

파이로 공정과 같이 방사성 물질을 화학적으로 처리하는 공정의 경우는 방사선 위해는 물론 화학적 특성 및 반응성, 공정조건 등과 같은 특성으로 인한 위해로부터 안전성이 확보되어야 하며, 이를 위한 파이로 Mock-up 시설의 일반 설계요건은 다음과 같다.

• 위해 물질의 격리

공정에서 취급하는 방사성 물질이나 화학적 위해 물질들이 가능한 1차 confinement인 공정장치나 배관 내에 격리되고 외부로 오염이 확산되지 않도록 장치설계에 공정장치의 기밀성이 효율적으로 유지되면서 운전 및 유지, 보수가 용이한 구조로 장치를 설계하여야 한다.

• 누출로 인한 위해 요인 최소화

공정장치나 부대설비의 고장(failure)으로 인하여 1차 누출이 발생할 경우 이로 인해 예상되는 2차 누출 또는 오염 확산 등의 전개를 차단할 수 있도록 공정의 감시 및 제어 계통이 설계에 반영되어야 하며, 1차적으로 누출된 물질이 환경 규제기준치를 초과하여 배출되지 않도록 부대설비 설계를 고려하여야 한다. 특히 Pyro Mock-up 공정의 경우 Inert 분위기 유지를 위하여 Ar 분위기 모의 핫셀이 설치되고, 분위기 유지를 위하여 많은 량의 Ar 가스들을 취급하게 되므로 모의 핫셀 또는 배관, 공급설비에서 다량의 누출이 발생하는 경우 작업자의 질식 사고를 유발할 수 있으므로 누출로 인한 위해에 대비한 설계와 주변에 산소농도를 감시하는 설비의 설치가 필수적으로 고려되어야 한다.

• 부압 유지

방사성 물질을 취급하는 공정장치의 경우 오염 확산을 방지하기 위하여 장치 내부의 압력을 외부보다 약간의 부압이 유지되도록 설계하는 것이 일반적이며, 이러한 조건은 공정장치의 off-gas line이 off-gas 처리 계통의 suction head에 연결되어 유지된다. 따라서 이 경우 공정장치의 off-gas line으로부터 off-gas 처리공정을 거쳐 최종 배기되는 지점까지의 부압 조건 및 배기량 등을 전체적으로 고려하여 pressure balance가 유지되도록 설계되어야 한다.

• 전원 및 주요 유틸리티 Failure에 대비한 설계

공정 및 시설의 안전성에 주요한 영향을 미칠 수 있는 공정변수(process parameters)의 경우는 공정의 신뢰성을 높이기 위하여 이중의 감시 및 제어가 가능하도록 하며, 이 경우 서로 다른 원리의 장비가 설치되도록 설계되어야 한다. 운전 중에 반드시 조치를 취하여야 하는 고장의 경우 작업자의 모의 핫셀 내 출입이 불가능하므로 고장 유형별 작업 특성에 대한 분석을 통하여 원격으로 조치할 수 있도록 이를 설계에 반영하여야 한다.

맺음말

파이로 Mock-up 시설은 핵확산저항성과 환경친화성이 향상된 선진핵연료주기 기술인 파이로 기술을 실증하기 위한 inactive 시험검증을 위한 시설이다. 파이로 Mock-up 시설은 방사성물질 및 용융염 등 위해물질을 취급하는 시설이므로, 시설 및 설비의 기능적 요건을 만족할 뿐 아니라, 주변 환경 및 작업자에 대한 안전성이 확보될 수 있어야 한다. 이를 위하여 파이로 Mock-up 시설에서 발생하는 방사성 물질의 누출 최소화를 위한 설계 및 평가를 수행하였다. 또한 방사성 물질의 주변 환경으로 방출 및 작업자의 방사선 피폭을 최소화 할 수 있도록 방사선 안전관리 설비들을 구성하여, 파이로 Mock-up 시설 운영에 따른 주변 환경으로의 영향을 최소화 하였다. ●