

공학규모 기준 파이로 실증시설 설계요건 개발

정원명, 조일제, 유길성, 홍동희, 이은표, 이호희, 문성인, 구정희, 이원경, 김호동
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

wmchoung@kaeri.re.kr

1. 서론

일반적으로 원자력발전소에서 핵연료가 일정기간 원자로 내에서 연소된 후에 새로운 연료로 교체되면서 사용후핵연료가 발생한다. 사용후핵연료는 연소과정에서 핵분열에 의해 생성되는 핵분열 생성물의 높은 방사능 세기와 지속적인 방사선 붕괴로 인해 발생하는 열로 인해 안전한 관리에 기술적인 어려움이 있다. 지속적인 원자력 발전을 위해 사용후핵연료의 효율적인 관리가 필수적이며, 효율적인 관리방안의 일환으로 사용후핵연료의 적절한 처리 및 재활용기술의 개발이 시급하다. 이와 같은 기술개발의 전제조건으로 사용후핵연료의 부피와 발열량 감축을 통한 처분부지 소요면적의 최소화, 방사성 독성의 획기적 감축으로 인한 환경친화성의 제고, 순환재활용을 통한 사용후핵연료의 발생량 최소화 및 기술의존 무한 에너지원 공급체계 구축 등이 고려된다. 사용후핵연료는 연소되지 않은 우라늄 95%, Pu 약 1%와 Minor Actinide 0.1%, 핵분열생성물(약 300여종) 3.9% 등으로 구성되며, 주요 관리대상 핵종군은 우라늄(^{238}U , ^{235}U), 초우란원소(TRU: ^{239}Pu , ^{241}Pu , Np, Am, Cm), 핵분열생성물(FP: I, Tc, Cs, Sr 등)이다. 우라늄은 장반감기 핵종이나 독성이 상대적으로 크지 않으며, 회수하여 경수로 또는 고속로에 재사용이 가능하다. 초우란원소는 장반감기 핵종으로서 독성이 강하며, 처리하여 경수로 또는 고속로에서 재사용이 가능하고, 소멸처리하여 비교적 반감기가 짧은 핵종으로 변환이 가능하다. 핵분열생성물은 대부분 단반감기 핵종들이나 I, Tc은 독성이 크고 장반감기 핵종으로 원자로에서 소멸처리가 가능하고, 고방열 핵종인 Cs, Sr은 저장하여 감쇄후 중저준위로 관리가 가능하다. 국내에서 1997년부터 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위한 처리기술로서 파이로 공정에 대한 기술개발을 수행하고 있다. 파이로 공정기술은 고온(500~650°C)에서 매우 안정한 매질인 LiCl 혹은 LiCl-KCl 용융염계에서 전기화학적 반응을

이용하여 우라늄 및 TRU 원소 등을 회수하는 건식처리기술로서 기존의 PUREX 등 습식처리기술에 비해 핵확산저항성(고순도 Pu 회수의 어려움), 환경친화성(폐기물발생량 감소), 경제성(공정의 단순화) 측면에서 유리한 것으로 알려져 있다. 제 255차(2008년 12월) 국가 원자력위원회에서 의결된 “미래원자력시스템개발 장기추진계획”에 의해 현재 단위공정별로 개발되고 있는 파이로공정을 연계한 일관공정에 대한 Mock-up 시험을 수행하기 위해 Inactive 시험시설(천연우라늄 또는 감손우라늄사용)인 PRIDE(PyRoprocess Integrated DEMonstration facility)를 2011년까지 구축을 목표로 현재 공사가 진행 중에 있다. 당초 PRIDE 시설에 이어 구축 예정이었던 공학규모 실증을 위한 핫셀시설은 대외 환경변화로 인하여 구축이 불확실해짐에 따라 현재 추진 중에 있는 국제협력을 위한 공학규모 실증시설에 대한 기준모델을 정립하기 위한 기초 자료를 확보하고, 추후 계획된 공학규모 실증에 대비하여 ‘공학규모 기준 파이로 실증시설’에 대한 예비 개념설계를 수행 중에 있으며, 본 연구에서는 파이로 실증시설의 주요 설계요건을 정립하여 제시하였다.

2. 본론

2.1 시설 개념

공학규모 기준 파이로 실증시설의 설치 위치는 국내 임해 부지를 전제로 사용후핵연료의 운반을 위한 항만 및 도로 등의 기반시설을 갖춘 지역을 전제로 하였으며, 시설의 처리용량은 Inactive 시험을 위한 Mock-up 시설로서 현재 건설 중에 있는 PRIDE 시설과 같은 규모(10 tHM/yr)를 기준하였다[1]. 시설의 구성은 경수로 사용후핵연료 수송용기의 수납 및 반출, 연간 처리용량에 준하는 사용후핵연료 임시저장, 핵연료봉의 검사 및 인출 및 절단, 전처리 및 폐가스 처리공정과 염폐기물 처리공정을 포함하는 파이로 전체공정, 공정 Product와 폐기물 처리, 부대시설을 갖춘 시설을 기준으로 고려하였다. 시설 내 파이로 공정장치의 연간 가동률

은 55%(200일), 다른 설비의 경우는 70%(255일)로 가정하였으며, 시설의 설계수명을 건물 및 핫셀 구조물의 경우는 60년, 공정장치와 설비는 특성에 따라 10년~40년을 기준으로 설정하였다. 그리고 시설에서 처리하게 되는 사용후핵연료의 기준사양은 국내 경수로원전에서 배출되어 원자력발전소의 저장수조에서 10년 이상 냉각된 최대 연소도 55,000 MWD/MTU, 최대 농축도 4.5 wt%인 16×16 PLUS7 연료를 기준연료로 적용하였다.

2.2 공정기준 및 연계요건

공학규모 기준 파이로 실증시설의 핫셀 내에 설치되는 파이로 종합공정은 전처리공정으로서 사용후핵연료 집합체의 해체 및 절단, 탈피복, 분말제조 및 입도제어, 전처리 폐가스처리, 파이로 공정으로서 전해환원, 전해정련, 전해제련, 염폐기물 처리공정에 정제 및 회수/순환, 고화체 제조공정을 포함하며, 공정간 Interface를 고려하여 기준 공정효율도를 설정하였으며, 전처리공정은 공기분위기 핫셀에 설치하고, 파이로 공정은 아르곤가스 분위기 핫셀에 설치하는 것을 기준으로 설정하였다. 파이로 공정의 처리용량 및 기준시간, 공정조건, 공정물질특성, 핵중평가를 위한 보수적인 공정수율을 고려하여 Mass & Activity Balance (그림 1)을 설정하고, 공정생성물 및 폐기물 특성에 따른 처리 및 관리요건, 안전한 공정물질 취급을 위한 Inert 요건, 유틸리티 공급요건, 공정장치 취급요건을 고려한 운전 및 유지보수 설계요건, 공정장치 제한요건 등을 설정하여 제시하였다.

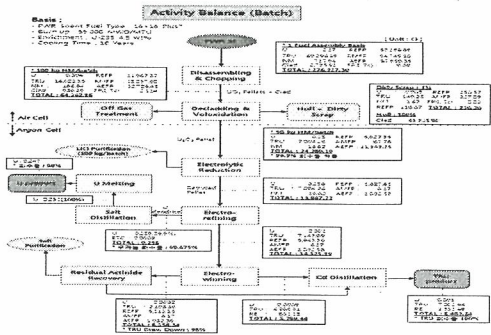


Fig. 1. 파이로공정 Activity Balance (Batch).

2.3 시설 설계요건

공학규모 기준 파이로 실증시설에 설치되는 주요설비별 Hazard Class를 DOE-STD-1027-92에 근거하여 분류하였으며, 인허가요건 및 기술기준에 의해 안전등급, 내진등급 및 품질등급을 설정

하였다. 그리고 설계에 적용하게 되는 분야별 설계기준을 설정하고, 설계관련 전산프로그램의 특성과 장단점을 분석하여 적용할 프로그램을 선정하였다. 실증시설의 배치안을 결정하기 위하여 공정장치 배치요건과 시설의 구성요건을 기준으로 여러 가지 배치안에 대한 공정운전의 효율성, 시설의 안전성과 경제성 등 분석하였으며, 공정장치를 1층 핫셀 내 2열로 배치하고, 구역별 기능에 따라 사용후핵연료 수송용기 인수구역, 공정용 핫셀, 운전 및 서비스 구역, Isolation Room, 기계실, 전기실, 공조실, 사무실 등으로 구성되는 기준 배치안을 확정하였다(그림 2). 건물 구조는 지하1층, 지상3층 구조로 핫셀 구조물은 중량콘크리트를 적용하고, 기타 구조물은 일반콘크리트를 적용하도록 개념을 설정하였다. 시설은 구역별 기능에 따라 사용후핵연료 수송용기 인수구역, 공정용 핫셀, 운전 및 서비스 구역, Isolation Room, 기계실, 전기실, 공조실, 사무실 등으로 구성된다.

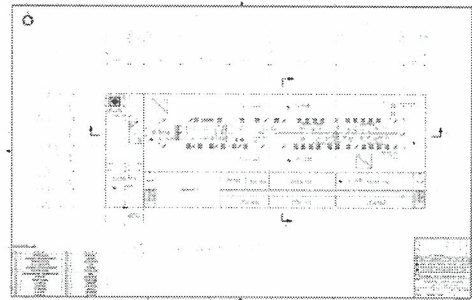


Fig. 2. 파이로공정 실증시설 배치개념도(1층).

3. 결론

공학규모 기준 파이로 실증시설의 기준 모델 제시를 위한 개념설계 연구를 통하여 공정기준 및 연계요건, 각 분야 및 설비별 설계요건을 정립하여 제시하였으며, 이를 기준으로 예비개념설계를 수행할 예정이다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

5. 참고문헌

[1] 차세대핵주기공정 실증시설 설계기술개발, KAERI/RR-3146/2009.