

공학규모 파이로 실증시설 개념연구

정원명, 구정희, 조일제, 이호희, 문성인, 유길성, 김호동
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

wmchoung@kaeri.re.kr

1. 서론

원자력발전소에서 핵연료가 일정기간 원자로 내에서 연소된 후에 새로운 연료로 교체되면서 사용후핵연료가 발생한다. 사용후핵연료는 연소과정에서 핵분열에 의해 생성되는 핵분열생성물의 높은 방사능 세기와 지속적인 방사선 붕괴로 인해 발생하는 열로 인해 안전한 관리를 위한 여러 가지의 기술적 과제를 가지고 있다. 지속적인 원자력발전을 위해서는 사용후핵연료의 효율적인 관리가 필수적이며, 효율적인 관리방안의 일환으로 사용후핵연료의 적절한 처리 및 재활용기술의 개발이 시급하다. 이와 같은 기술개발의 전제조건으로 사용후핵연료의 부피와 발열량 감축을 통한 처분부지 소요면적을 최소화 하고, 방사성 특성의 획기적 감축으로 인한 친환경적이며, 순환재활용을 통한 사용후핵연료의 발생량 최소화와 무한 에너지원 공급체계 구축 등이 고려되어 파이로공정의 기술개발이 수행되고 있다. 파이로 공정기술은 고온(450 ℃ 이상) 조건에서 전기화학적 방법을 활용하여 주로 금속산화물의 금속으로의 환원 또는 전기야금 등의 금속 제조공정에 활용되는 기술로서 원자력에서는 사용후핵연료 가운데 잔류하는 TRU를 공회수하는 공정기술을 의미한다. 기존의 PUREX로 대표되는 습식체처리 공정기술은 사용후핵연료를 주로 결산용액에 녹인 후 TBP 등 유기용매를 이용하여 우라늄 및 TRU를 포함한 핵분열생성물을 분리, 회수하는 공정으로서 특히, 고순도의 Pu를 분리하는데 활용됨으로서 핵확산저장성 측면에서 항상 논란이 되고 있다. 반면에 파이로 공정기술은 고온에서 안정한 매질인 LiCl 또는 LiCl-KCl 등 용융염계에서 전기화학적 반응을 이용하여 우라늄 및 TRU를 포함한 핵분열생성물을 회수하는 기술로서 기존의 습식처리기술에 비해 Pu의 고순도 분리가 상대적으로 어려운 기술로서 핵확산저항성 측면에서 유리한 기술로 평가받는 기술이다.

국내에서는 1990년대 중반부터 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위한 처리기술로서 파이로 공정에 대한 기술개발을 국가가 주도하는 원자력중장기연구

개발사업으로 수행해오고 있다. 현재 파이로 일관공정의 공학규모 Inactive 시험(감손우라늄 사용)을 위해 대형 아르곤 분위기 모의셀을 포함하는 Mock-up 시설로서 PRIDE(PyRoProcess Integrated DEMonstration facility)를 2011년까지 구축을 완료하고, 시운전 중에 있다. 당초 PRIDE 시설에 이어 구축 예정이었던 공학규모 실증을 위한 핫셀시설은 대외 환경변화로 인하여 구축이 불확실해짐에 따라 국제협력을 위한 공학규모 실증시설에 대한 기준모델을 정립과 설계 기초자료를 확보하고, 추후 계획될 공학규모 파이로 실증시설에 대한 개념연구를 수행하였다. 본 연구에서는 선행 연구로 수행한 파이로 실증시설 설계요건 개발에 이어 핫셀시설의 기준 개념과 분야별 설계기준을 설정하고, 주요설비의 계통을 구성하였으며, 추정용량 등을 산정하여 파이로 실증시설의 구체적 개념을 제시함으로써 추후 파이로공정의 실용화를 위한 계획수립에 필요한 기술적인 기초자료로 활용할 예정이다.

2. 본론

2.1 파이로 실증시설 기준요건

선행 연구로 수행한 파이로 실증시설의 설계요건 개발 내용을 기준으로 파이로 핫셀시설의 기준 개념을 아래 Fig. 1에 제시된 것과 같이 처리용량 및 저장시설 기준용량, 가동율, 사용후핵연료 기준사양, 설계수명 및 핫셀 배치개념 등으로 구분하여 기준요건을 설정하였다.

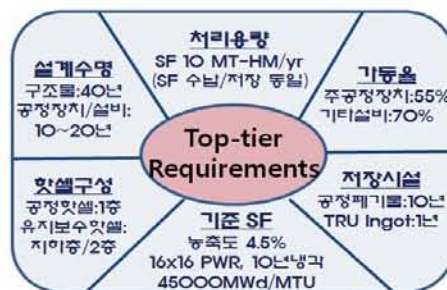


Fig. 1. 파이로 실증시설 기준요건.

2.2 핫셀 구성 및 설계기준

핫셀 구조물의 내진등급은 최상위 안전등급인 내진1등급으로 적용하고, Table 1에 표기된 것과 같이 전처리, 주공정, 유지보수, 제염 및 저장 핫셀로 구분하여 용도에 따라 공기분위기 핫셀과 아르곤 분위기 핫셀로 구분하였으며, 분위기 기체의 흐름은 방사성물질의 확산 방지를 위하여 저오염구역에서 고오염구역으로 흐르도록 하고, 공기 분위기 핫셀의은 Once-through, 아르곤 분위기 핫셀은 재순환 개념을 적용하였다.

Hot Cell 구분	위치	Hot cell type	분위기	주요기능
전처리 핫셀	지상층	$\alpha - \gamma$ type	Air	<ul style="list-style-type: none"> • SF저장(블록)/접합체해체 연료봉 인출 및 절단 • Voloxidation 및 탈피복/Hull 및 연료봉 분리기 • Off-gas처리/고체폐기물 인출 및 밀봉
주공정 핫셀	지상층	$\alpha - \gamma$ type	Argon	<ul style="list-style-type: none"> • 전해원/전해정리/전해제련/U 금속 ingot 제작/UF/TRU/Re 금속 ingot 제작 • 열매기물정제/희수/열매기물 고화처리 • 공정생성물 및 열매기물 처리/밀봉
유지보수 핫셀	지상3층	$\alpha - \gamma$ type	Air	<ul style="list-style-type: none"> • 작업자의 출입이 배제된 원격조작에 의한 공정장치 유지보수 • 작업자가 출입하여 수행하는 접촉 유지보수
	지하층	$\alpha - \gamma$ type	Air	
Ar/Air Changing Buffer Zone	지상3층	$\alpha - \gamma$ type	Argon	<ul style="list-style-type: none"> • Ar 셀장비(크레인,허프) 유지 보수를 위한 Ar/Air 분위기 환송지역
공정생성물/폐기물 일시저장	지하층	$\beta - \gamma$ type	Air	<ul style="list-style-type: none"> • 공정 생성물 및 공정폐기물 저장
제염실	지하층	$\beta - \gamma$ type	Air	<ul style="list-style-type: none"> • 비활성화, 원격조작에 의한 유지보수가 어려운 장비 제염

2.3 핫셀 및 시설 배치개념

핫셀 라인의 구성과 주요 설비의 배치, 운전구역, 사무실 및 편의시설을 고려하여 파이로 실증 시설 건축 규모를 지하층을 포함하여 4개 층으로 계획을 하고, 1층 면적을 기준으로 가로 100m, 세로 40m, 높이는 지상 30m, 지하 9m 규모로 설정하였다. 지하층은 제염실, 공정생성물 및 폐기물 저장실, 전기실, 아르곤 설비, 유틸리티 공급설비가 설치되고, 1층에는 Fig. 2에서와 같이 공정용 주 핫셀 라인과 양쪽에 운전구역, 유지보수구역, truck bay, 출입관리시설, 사무실 및 편의시설 등이 설치되도록 구성하고, 2층 및 3층에는 유지보수용 핫셀 라인과 서비스 구역, 사무실 및 기타 편의 시설이 설치되도록 배치개념을 설정하였다.

2.4 핫셀 주요설비 계통구성 및 용량 추정

주요설비인 아르곤 시스템은 아르곤 분위기 핫셀 내 아르곤 가스의 유동해석 결과와 핫셀 규모 및 효율적인 운영을 위해 순환루프를 2 Train으로 구성하는 최적안을 도출하고, Redundancy를 위해 50% 1 unit를 추가하는 개념을 기준으로 아르곤가스 공급계통, 아르곤가스 정화계통, 아르곤가스 냉각 및 순환계통, 아르곤가스 배기 및 과압

방호계통으로 구성하고, Ar 핫셀 순환회수, 핫셀 내 열부하, 정제설비 용량 등 설계기준을 설정하여

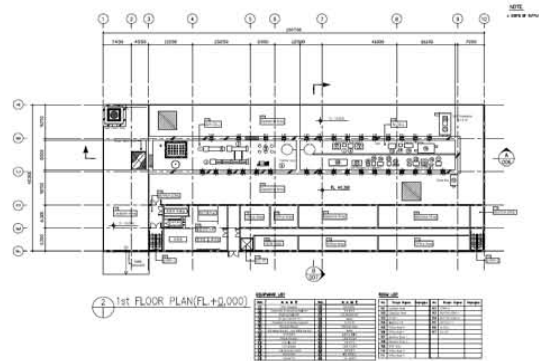


Fig. 2. 1층 핫셀 및 운전구역 배치개념도.

아르곤가스 공급용량 400 Nm³/hr, 아르곤가스 순환용량 및 냉각용량을 75,000 Nm³/hr, 350 kW, 아르곤가스 정제설비 용량을 750 Nm³/hr로 설정하였다. 환기계통은 고방사선 관리구역 및 방사선 관리구역, 비관리구역 등 특성을 고려하여 4지역으로 구분하여 별도의 루프로 구성하도록 하고, 배기계통과 냉난방계통을 구분하여 구성하는 개념을 설정하여 추정용량을 산정하였다. 그리고 전원공급계통을 포함하여 유틸리티 공급계통의 구성개념을 설정하고, 추정용량을 산정하였다.

3. 결론

PRIDE 시설과 동일 규모인 파이로 실증시설의 개념연구를 통하여 파이로 실증시설의 핫셀 및 주요설비의 계통 구성개념을 설정하고, 추정용량 산정 등 구체적인 시설의 개념을 제시함으로써 추후 공학규모 파이로 실증시설 구축을 위한 계획을 구체화하기 위한 기술적 타당성 검토를 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

5. 참고문헌

- [1] 차세대핵주기공정 실증시설 설계기술개발, KAERI/RR-3146/2009
- [2] Tom Jonson & Greg Teske, 'Inert Atmosphere Hot Cells at the Materials and Fuels Complex', INL Presentation, June 14, 2011.