

파이로 핫셀시설 위해도 분석을 위한 공정 위해인자 도출

정원명, 구정희, 유길성, 문성인, 김호동

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

wmchoung@kaeri.re.kr

1. 서론

파이로 공정기술은 원자력 발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위해 개발 중에 있는 사용후핵연료 건식처리기술로서 기존의 습식처리기술인 PUREX(Plutonium Uranium Extraction)에 비해 핵확산저항성, 경제성, 환경친화성 및 자원 활용성 제고를 통한 원자력의 지속가능성 확보가 가능한 기술로 알려져 세계적으로 주목을 받고 있다. 파이로 공정기술의 주요 특징으로는 고온의 조건에서 용융염 매질을 사용하여 전기화학적 방법에 의해 핵물질을 분리하는 개념으로 고순도의 플루토늄 단독 회수가 불가능하다. 그리고 폐기물 발생량이 적으며 방사성 독성 관리기간을 단기간으로 감소시키는 것이 가능하고, 공정이 비교적 단순하여 상대적으로 소규모 시설에서 처리가 가능하며, 제4세대 원자로(고속로)의 핵연료물질 제조가 용이하다. 현재 개발 중에 있는 파이로 공정기술의 실증을 위해서는 고준위방사성 물질인 사용후핵연료를 안전하게 취급, 처리할 수 있는 공정기술과 함께 안전성이 입증된 핫셀시설 설계기술의 확보가 필수적이다. 현재 국내의 파이로공정에 대한 기술개발은 개발된 파이로 단위공정을 연계한 일관공정에 대한 Mock-up 시험을 수행하기 위해 Inactive 시험시설(천연우라늄 또는 감손우라늄 사용)인 PRIDE(Pyroprocess Integrated DEMonstration facility) 시설 구축을 2011년까지 완료하였으며, 현재 시운전을 수행하고 있다. 당초 PRIDE 시설에 이어 구축 예정이었던 공학규모 실증을 위한 핫셀시설은 대외 환경변화로 인하여 유보된 상태이며, 2012년부터 3S(Safeguards, Security, Safety)-by-Design 개념의 파이로 시설의 설계요건을 도출하고 이를 반영한 파이로 핫셀시설의 최적개념 설계안을 제시하기 위한 연구에 착수하였다. 관련 연구의 일환으로 핫셀시설의 위해도 분석을 통하여 설계에 반드시 고려해야 되는 설계기준 위해요인 또는 위험사고(Design Basis Hazard Events or Accidents)를 도출하고, 사고시나리오 분석, 평가를 통하여 안전

성이 향상된 설계요건을 확립하기 위한 연구를 수행하고 있으며, 연구수행 과정에서 파이로 핫셀시설의 위해인자(또는 위험사건)의 도출이 선행되어야 한다. 핫셀시설의 위해인자는 파이로 공정설비와 핫셀설비의 운전특성에서 기인하는 위해요인과 자연재해 등 시설 외부사고와 연계되는 위해요인 등으로 구분된다. 공정설비 위해도 평가기법으로는 PHA(Preliminary Hazard Analysis) 방법, 핫셀설비 위해도 평가기법으로는 FMEA(Failure Mode Effect Analysis) 방법이 주로 사용되며, 이를 위하여 초기사건(Initiation Events)의 도출이 선행되어야 한다. [1,2] 본 연구에서는 우선 공정설비 위해도 평가를 위해 파이로 기준공정을 설정하여 각 단위 공정설비별 위해인자를 도출하고 그 결과로 예상되는 사고 유형을 제시하였다.

2. 본론

2.1 파이로 기준공정

파이로 기준공정은 현재 건설을 완료하고 시운전 중에 있는 Inactive Mock-up 시험시설인 PRIDE 시설에 설치된 동일 규모(처리용량 10 tHM/yr)의 파이로 공정설비를 기준으로 실제 사용후핵연료 취급을 전제로 실증시설에 추가되어야 하는 공정을 고려하여 Fig. 1에 표기된 것과 같이 사용후핵연료 assembly의 반입부터 전처리와 폐가스처리, 염폐기물처리를 포함하는 파이로 전체공정을 기준으로 고려하였다.

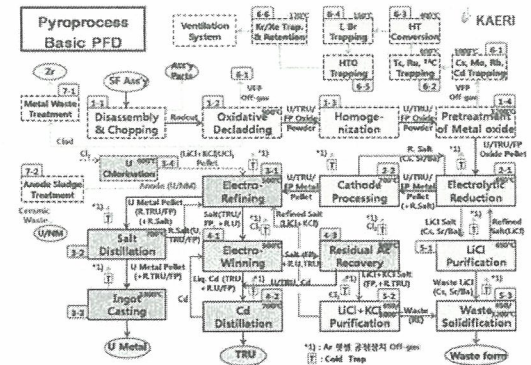


Fig. 1. Pyroprocess flow diagram.

2.2 파이로 핫셀시설 Material Flow

파이로 공정처리를 위한 공정설비는 공정특성에 따라 air 분위기 핫셀과 inert(argon) 분위기 핫셀에 설치되며, 공정에 필요한 시료를 inert 분위기에서 제조하여 공급하는 glove box 등으로 구분되어 설치된다. 전처리공정설비와 전처리공정에서 발생하는 휘발성핵분열생성물을 포함하는 폐가스 처리공정설비, 그리고 여러 가지 형태의 최종생성물들의 저장설비는 air 분위기 핫셀에 설치되고, 전해환원, 전해정련, 전해제련, 염폐기물처리를 위한 공정설비들은 inert(argon) 분위기 핫셀에 설치되며, 각 핫셀 간 물질의 이동은 별도의 밀폐기능을 갖는 transfer lock 장비를 통하여 운반된다. 주요 공정설비의 처리용량은 1 batch 또는 1일 처리용량 50 kg-HM을 기준으로, Fig. 2에 표기된 material flow를 설정하였다.

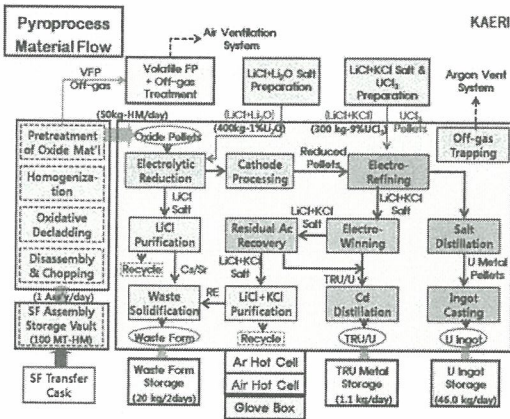


Fig. 2. Pyro hot cell material flow.

2.3 파이로 단위공정별 위해인자

파이로 단위공정별 공정기능, 공정조건, 공정물질의 특성을 평가하고, 단위공정별 공정작업 step별 특성을 분석하여 예상되는 작업 위해인자들을 도출하여 제시하였다. 전처리 및 폐가스 처리공정에서 도출된 주요 위해인자로는 사용후핵연료 집합체 인출과정에서의 낙하로 인한 손상, 연료봉 절단과정에서의 피복관 내 scrap 누출, U₃O₈ 분말 제조와 UO₂ granule 또는 pellets 과정에서 압력제어 failure로 인한 분말의 비산과 반응기 냉각수 내부 누설, 폐가스 처리과정에서 압력제어 및 온도제어, 배기시스템 failure 등으로 인한 처리 또는 decay를 위한 체류 중에 휘발성 핵분열생성물의 누출 등과 사건들이 도출되었다. 파이로공정에서 도출된 주요 위해인자로는 중간 생성물의 운반과정에서의 낙하로 용기 손상으로 인한 누출,

용융염 매질에서 압력제어 및 온도제어 failure로 인한 배기체 누출 및 염 증기의 비산, cold trap 및 배기관 막힘으로 인한 과압 현상, 용융염 이송 배관에서 누출 또는 가열기 failure로 인한 배관이 차단되는 현상, UCl₃ 제조 과정에서 Cl₂ 가스 누출 및 중화설비 failure, U 금속 취급과정에서 inert 분위기 손상으로 인한 화재, LCC 전해제련 및 Cd 증류 과정에서 과열로 인한 Cd 증기 누출 등과 같은 사건들이 도출되었으며, Table 1에 표기된 전해환원공정 공정 step에서의 예와 같이 각 단위 공정장치별로 정리하여 제시하였다.

Table 1. Process characteristics and hazard events in electrolytic reduction.

공정	No.	공정 Step	공정기능	공정조건	공정작업 Step	작업위해인자
전해 환원 (Electro. Reduction) 공정	1	SF Pellets 용기	인출공정	진공	인출공정	진공 상태 유지
	2	LCH-LiCl 전해반응기	환원	650°C	반응기 내 정격	반응기 온도제어 failure로 인한 과열, *시료 분말 손실, Glove box
	3	Cathode 및 Anode	환원	650°C	반응기 내 정격	반응기 배기시스템/ 압력제어 failure로 인한 (배기관 누출/ 원 동기 비산)
	4	U 금속 용융	정련	650°C	반응기 내 정격	Anode에서 반응 폐기물로 발생
	5	Cathode 및 Cathode	정련	650°C	반응기 내 정격	Cold trap/배기관 막힘으로 인한
	6	U 금속 용융	정련	650°C	반응기 내 정격	용융염 이송 배관 누출 또는 가열기 failure로 인한

3. 결론

파이로 핫셀시설의 안전설계요건 도출을 위한 연구의 일환으로 공정설비에 대한 위해인자들을 도출하여 제시하였으며, 이를 기준으로 공정설비에 대한 정량적인 위해도 평가를 수행할 예정이다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

5. 참고문헌

[1] Preparation Guide for U.S DOE Nonreactor Nuclear Facility Documented Safety Analyses, DOE-STD-3009-94.
 [2] Center for Chemical Process Safety, "Guidelines for the Technical Management of Chemical Process Safety", AICE, 1989.