

사용후핵연료 처리공정 기술대안 분석

장홍래, 서중석, 고원일

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

hlchang@kaeri.re.kr

1. 서론

우리나라의 사용후핵연료 관리대안 분석을 위해 선진국에서 현재 전략적으로 개발 중인 순환 핵연료주기를 대상으로 기술적 장·단점을 비교·분석하여 정량화하였다. 분석대상 처리공정으로 는 프랑스가 개발하고 있는 선진습식재처리방법인 COEX(COMBined EXtraction for Plutonium and Uranium) 및 GANEX공정, 일본에서 개발 중인 선진습식재처리기술인 NEXT(New EXtraction System for TRU Recovery)공정, 미국 Argonne National Laboratory(ANL)에서 개발 중인 습식처리기술인 UREX+1a(URanium EXtraction)공정, 우리나라에서 개발 중인 파이로 건식 처리공정과 유사하지만 초기단계 우라늄을 회수하는 단계에서 UREX공정을 이용하는 미국의 PYROX공정, 러시아에서 개발 중인 파이로공정의 일종인 DDP(Dimtrovgrad Dry Process)공정을 선정하였다. 각각의 공정에 대한 핵심기술의 특성분석을 통하여 기술성, 핵확산저항성, 그리고 GEN-IV 원자로와의 연계성을 비교하였다.

2. 기술성 분석

- 처리용량: 선진습식재처리기술인 NEXT, COEX, UREX+1a 공정은 대규모 처리용량의 공정개발에서 상대적으로 용이하다는 이점이 있다. 파이로 건식처리기술의 대표적인 공정인 PYROX와 DDP공정은 약 20여개의 장치로 구성되며, 공정장치의 단순화 및 모듈화에 의하여 시설공간은 선진습식처리시설의 약 1/12 수준일 것으로 예측된다.
- 폐기물발생량: 현재 개발단계인 선진습식재처리 및 파이로 건식처리기술의 폐기물발생량 추정 은 매우 어렵다. 그러나 선진습식재처리기술은 고준위폐기물 발생량 최소화가 기술개발 목표임에 도 불구하고, 공정관점에서 파이로 건식처리공정보다는 폐기물발생량이 많다는 것은 분명하다.
- 공정의 안전성: 선진습식재처리공정은 대체로 상온 및 상압조건에서 운전되기 때문에 파이로 건식처리기술과 비교하여 안전성 측면에서 유리하다고 할 수 있다. 그러나 선진습식재처리공정은 유독성 및 인화성의 유기용매를 사용한다는 점에서 불리하다고 할 수 있다.
- 처리비용: 비용평가는 신뢰성 있는 자료 확보의 한계로 인하여 정확한 평가가 가장 어려운 항목이다. 선진습식재처리 비용은 대체로 플렉스 재처리공정보다 약 20~30 % 낮을 것으로 추정된다. 연간 100 tHM 규모 이상의 처리용량에서 파이로 건식처리기술은 선진습식재처리 기술보다 비용이 불리한 것으로 평가된다. 그러나 향후 5년 이내에 신개념의 혁신기술 도입 및 공학규모의 공정개발이 성공적으로 추진된다면, 파이로 건식처리기술의 경제성은 적어도 선진 습식재처리기술과 대등하거나 우세할 것으로 예측된다.
- 기술성숙도: 현재는 미국 ANL연구소 중심으로 실험실규모의 UREX+1a 공정에 대한 실증을 완료한 단계로, 앞으로도 상용화규모 공정개발을 위해서는 적어도 10년 이상의 연구개발 기간이 소요될 것으로 예측된다. 그 외, 프랑스와 일본의 COEX·GANEX 및 NEXT 공정도 UREX+1a 공정과 거의 대등한 기술수준이라고 판단된다. PYROX공정은 세부공정 항목에 따라 기술개발 수준은 크게 다르나, 기술개발 수준이 가장 앞선 PEER형의 고용량 전해정련장치는 공학규모(200~300kgHM/batch)의 장치를 개발하고, 우라늄을 이용한 실증실험을 수행하는 단계이다.

3. 핵확산저항성

- 플루토늄 분리가능성: 파이로 건식처리기술은 전해분리반응만을 이용하기 때문에 일정 플루토늄 환원전위 조건에서조차 용융염의 저항으로 인한 전위구배 존재, 그리고 근접 환원전위를 갖는 원소의 동반회수로 인하여 고순도 플루토늄을 회수할 수 없다는 자체가 핵확산저항성 관점에서

장점이라고 할 수 있다. 선진습식재처리기술은 공정관점에서 플루토늄의 단독분리를 원천적으로 차단하고, 잉여 우라늄을 재활용 혹은 저준위폐기물로 회수하여 처분하고, Transuranics(TRU)를 비롯한 Minor Actinide(MA) 원소는 대체로 공분리하는 전략을 채택하고 있다.

○ 제염계수: 선진습식재처리기술은 TRU 공회수에도 불구하고, 플렉스공정에 버금가는 제염계수를 갖는 사실만으로도 핵확산저항성이 낮게 평가될 수밖에 없다. 그러나 파이로 건식처리의 대표적인 기술인 PYROX와 DDP공정의 제염계수는 약 10 정도로, 회수된 핵연료물질은 “Dirty Fuel and Clean Waste” 개념과 자체방호요건(Self Protection Criteria)을 만족한다고 할 수 있다. 이러한 관점에서 파이로 건식처리기술은 UREX+1a, NEXT 및 COEX 공정보다 핵확산저항성이 훨씬 유리하다고 할 수 있다.

○ 안전조치성: 연속공정이 가능한 습식공정이 실시간 계량관리에 더 유리하기 때문에 안전조치성 측면에서 우수하다고 할 수 있다. 또한, 건식공정인 경우 핵물질 측정에서 요구되는 핵물질 균질성을 확보하는 데 어려움이 예상된다.

4. GEN-IV 원자로와의 연계성

파이로 건식처리기술은 전해환원(Electrolytic Reduction)과 전해정련(Electrorefining)기술을 이용하여 경수로 사용후핵연료를 금속으로 전환한 후, 95% 이상을 차지하고 있는 우라늄금속을 중·저준위폐기물로 회수함으로써 처분대상 고준위폐기물의 부피를 획기적으로 감축할 수 있으며, 전해제련(Electrowinning)단계에서 우라늄과 TRU원소를 공회수하여 고속로에 핵연료로 공급할 수 있다. 특히, 우리나라가 개발하고 있는 KALIMER-600의 핵연료는 U-TRU-Zr 금속핵연료를 이용하는 설계개념을 갖고 있기 때문에, 현시점에서 파이로건식처리공정이 KALIMER-600 개발을 위한 금속핵연료 재순환기술로서 유일한 대안이다.

5. 종합평가

표 1은 전술한 5개 공정에 대한 정성적 분석결과를 바탕으로 정량화한 결과를 나타내고 있다. 우선 평가항목에 대한 가중치를 부여하였는데, 가중치는 정성적 분석에 참여하지 않은 연구원으로 자문그룹을 구성하여 자문위원들로 하여금 도출하도록 하였다.

정량적 비교·분석결과, 파이로 건식처리 공정이 기술성, 핵확산저항성, GEN-IV 원자로와의 연계성 측면에서 모두 우수한 것으로 나타났다.

표 1. 사용후핵연료 선진처리공정에 대한 정량적 평가 결과

평가 항목	파이로		선진습식			
	PYROX	DDP	COEX, GANEX	NEXT	UREX+1a	
기술성 평가 (30)	처리용량(6)	4	5	6	6	6
	폐기물발생량(7)	7	6	4	4	4
	공정의 안전성(5)	4	4	5	5	5
	처리비용(7)	7	5	4	4	4
	기술성속도(5)	3	5	5	5	5
	소계	25	25	24	24	24
핵확산 저항성 평가 (45)	플루토늄 분리가능성(15)	15	13	10	10	12
	제염계수(15)	15	14	10	10	12
	안전조치성(15)	10	10	13	13	11
	소계	40	37	33	33	35
GEN-IV 원자로와의 연계성(25)	25	23	15	15	25	
합 계	90	85	72	72	84	