

파이로 공정 손실 핵물질 회수에 의한 처분비 감소효과

김성기, 김철민*, 서중석, 김광락, Ruxing Gao, 장흥, 고원일
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
 *usekim00@kaeri.re.kr

1. 서론

일반적으로 화학공정에서는 원재료의 약 10% 이내의 손실률이 발생되며, 파이로 공정에서도 외국 문헌에 따르면 약 5-20%의 핵물질 손실이 발생하는 것으로 보고되고 있다 [1]. 즉, 전해제련을 제외한 전처리, 전해환원, 전해정련, 그리고 잔류악티늄족 회수공정에서 우라늄 약 12.7%와 TRU 약 4.3%의 손실률이 발생된다. 따라서 총 약 17%의 손실률이 계산된다.

파이로 공정에서 손실되는 핵물질을 처분하는 것보다 추가 공정을 통하여 회수하면 심지어 처분비가 크게 줄어 경제적으로 유리하다. 왜냐하면 회수된 핵물질을 고속로 핵연료의 원재료로 재활용할 수 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 파이로 공정에서 추가공정을 도입하여 회수할 수 있는 핵물질 양을 문헌자료를 근거로 먼저 평가한 후에 이 양을 재활용 했을 경우, 감소되는 처분비용을 계산하였다.

2. 본론

2.1 파이로 공정의 손실률

파이로 공정은 Fig. 1과 같이 물리적 손실, 전해 및 화학적 손실 등의 시스템 손실이 발생한다 [2]. 파이로 처리단계에서의 시스템 손실에 대한 실험적 결과가 없기 때문에 정확한 기술적 판단이 어렵지만, 물리적 손실에 의한 시스템 손실은 매우 클 것으로 예상 된다 [3]. 따라서 손실된 핵물질을 회수하지 않으면, 파이로 공정의 기술적 목표인 99.9% 회수의 달성이 매우 어려울 것으로 판단된다.

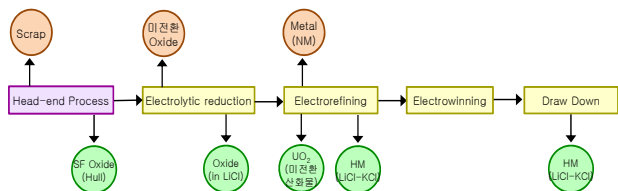


Fig. 1. System loss of pyroprocess.

2.2 U, TRU 금속의 회수율

U, TRU 금속의 회수율은 파이로 일련의 처리공정에서 물리적 손실, 전해 혹은 화학적 손실 등의 시

스템 손실을 통해 평가하였다. Table 1은 파이로 전체 공정단계에서 발생한 시스템 손실을 보여 주며, 우라늄(U) 시스템 손실은 도입량 대비 약 5.72-19.7%가 손실되는 것으로 평가되었다. 또한 TRU는 2.12-7.92%로 매우 높게 평가되었다. Table 1은 이러한 손실률에서 최빈값을 나타낸 것이다 [3].

Table 1. System Losses during Pyroprocess of PWR SF

Process Step & System Losses (1 campaign of 30THM/yr plant)	System Losses (kg)		
	U	TRU	
Head-end	19.385	0.184	
Electrolytic Reduction	17.475	0.1300	
Electrorefining	Anode→Molten Salt	0.260	
	NM Waste	0.129	
	Unreduced Oxide	58.00	
	PuCl3	0.022	
Draw Down	0.0072	0.0174	
Total	Losses (kg)	147.067	0.742
	(%)	12.66	4.29

Table 2는 파이로 여러 공정단계에서 발생하는 U, TRU 손실물을 회수하기 위한 추가공정을 도입 하였을 경우, 발생하는 손실률을 평가한 것이다. 파이로 공정에서 시스템 손실은 대부분 물리적 손실이며, 여과방법에 의해 회수가 가능하다. 특히 물리적 손실물은 95% 이상 회수가 가능할 것으로 판단된다. 다만 전해정련공정 NM 폐기물의 잔류핵물질은 CdCl₂를 이용하여 염화물로 전환하고, 전해제련단계에서 회수하는 방안을 강구해야 한다. 우라늄은 도입량 대비 약 0.56-1.18%, TRU는 0.32-0.62%의 시스템 손실이 발생하는 것으로 평가되었다. Table 2는 이러한 손실률에서 최빈값을 보여주고 있다 [3].

Table 2. System Losses during Pyroprocess of PWR SF(Introduced Recovery Process)

Process Step & System Losses (1 campaign of 30THM/yr plant)	System Losses (kg)		Recovery Process	
	U	TRU		
Head-end	3.094	0.004	by Voloxidizer	
Electrolytic Reduction	0.874	0.006	by Filtration	
Electrorefining	Anode→Molten Salt	1.740	0.030	by Filtration
	NM Waste	1.740	0.007	by CdCl ₂
	Unreduced Oxide	2.900		by Filtration
	PuCl ₃		0.022	-
Draw Down	0.0072	0.0174	-	
Total	Losses (kg)	10.355	0.086	
	(%)	0.89	0.50	

2.3 처분비용 감소 효과

파이로 공정에서 회수된 핵물질은 고속로 핵연료로 재활용할 수 있다. 만약 파이로 추가공정을 통하여 회수하지 않으면 이러한 핵물질은 직접처분해야 한다. 따라서 추가공정에 따른 경제적 효과는 처분비용의 감소라고 주장할 수 있다. 그러므로 파이로 시설의 수명기간을 60 년으로 가정하면 회수된 양만큼의 처분비용 감소를 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$CR = \sum_{t=1}^{60} (Q_t \times UC_{Disposal}) \quad (1)$$

where CR= cost-reduction(unit: \$), Q_t= quantity of recovery at year t(unit: kg), UC_{Disposal}= unit cost of disposal(\$/kgHM)

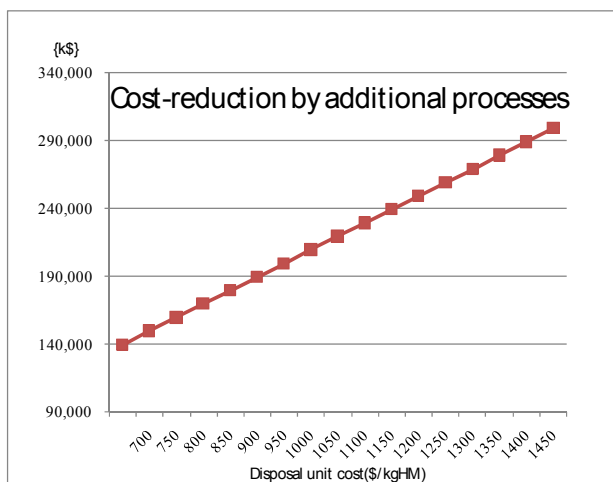


Fig. 2. Cost-reduction due to the recovery process.

10톤 규모의 파이로 공정장치 1개 라인을 50 kgHM 처리용량의 단일셀 5개로 구성된다고 가정하면 1회의 배치 운전에서 250 kgHM을 처리할 수 있다. 즉, 하나의 캠페인 운전시 5회 배치 운전한다고 가정하면 1.25tHM을 처리할 수 있다. 그런데 30톤 처리용량의 파이로 시설에서 PWR 핵연료의 1 캠페인에 대한 핵종재고량은 U 3,510 kg/campaign 과 TRU 51.9 kg/campaign이다. 또한 1년에 8 캠페인을 운전할 경우, 추가공정에 의한 손실된 우라늄과 TRU의 회수량은 각각 3,305 kg/yr과 15.7 kg/yr이다. 그러므로 손실된 핵물질의 회수에 대한 경제적 효과를 파악하기 위하여 식 (1)을 이용하여 처분단가에 따른 처분비용 감소효과를 계산한 결과, Fig. 2와 같이 계산되었다.

3. 결론

일본의 문헌자료에 따르면 파이로 공정에서 발생되는 핵물질 손실률은 U과 TRU에서 각각 12.66%와 4.29%로 나타났다. 그러나 추가공정을 도입하면 U과 TRU의 손실률을 각각 0.89%와 0.5%로 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 추가공정에 따른 회수된 핵물질을 고속로에 재활용할 경우에 대한 처분비용 감소효과를 계산한 결과, 무시할 수 없는 비용감소 효과가 있는 것으로 나타났다. 즉, 파이로 공정 중에 발생하는 손실된 핵물질은 추가공정을 통하여 회수하는 것이 경제적인 측면에서 바람직한 것으로 분석되었다. 향후 파이로 추가공정에 따른 자본투자비를 계산하여 손익분기점을 계산하는 것이 필요하다.

4. 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 원자력 연구개발비의 지원으로 수행하였습니다.

5. 참고문헌

- [1] 第4回 FaCT評価委員会, “今後の再処理技術開発の基本的考え方”. 日本原子力研究開発機構, 発表資料, 平成23年.
- [2] 第3回 FaCT評価委員会, “金属燃料サイクルの研究開発 進捗状況”, 日本原子力研究 開発機構 発表資料, 平成22年.
- [3] 日本 原子力研究 開発機構, “고속증식로사이클의 실용화전략조사연구 Phase II 기술검토서-연료사이클시스템”, JAEA-Research 2006-043, 2006.