

’95 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

저준위 방사성폐기물 유리화에 관한 타당성 분석

박종길, 안희진, 김연숙, 송명재

전 력 연구 원

요 약

최근 전세계적으로 활발히 연구가 진행되고 있는 저준위 방사성폐기물 유리화에 관한 타당성을 조사하기 위해 여러 형태의 유리용융로에 대한 기술성을 분석하고, 기술성 분석에서 선택한 용융로를 이용한 3종류의 새로운 처리개념에 대한 경제성 분석을 수행하였다. 기술성 분석 대상 용융로는 프랑스 CEA/SGN 사의 직접유도가열식 저온로, 미국 VECTRA 사의 수직전극가열식 저온로, 미국 SEG 사의 용융금속로, 미국 Retech 사의 플라즈마토치 용융로이다. 기술성 분석결과 직접유도가열식 저온로와 플라즈마토치 용융로를 병행하여 적용하는 것이 바람직하다는 결론을 얻었다. 이 용융로들을 이용한 3종류의 처리개념에 대해 처분부피, 처분단가에 따른 처분비, 처리비를 산정하고 현재 적용하고 있는 처리개념과 상호 비교하였다. 비교 결과 유리화 기술을 적용하는 것이 경제적이다 것과 현재 보다 80 % 이상 처분부피를 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다.

1. 서 론

전세계적인 관심사인 지구 환경보전과 처분장 부지확보의 어려움 등으로 인해 원전에서 발생하는 방사성폐기물을 장기적으로 안전하고도 처분부피를 대폭 줄일 수 있도록 처리할 수 있는 기술을 개발해야 할 필요성이 대두되었다. 이러한 주변 여건을 충족시킬 수 있는 기술중 하나가 바로 유리화 기술이다. 지금까지 유리화 기술은 재처리시 발생하는 고준위 액체폐기물을 처리하는데 주로 이용되어 왔다. 저준위 폐기물의 경우는 고준위 폐기물에 비해 발생하는 폐기물의 종류가 다양하고 발생량도 많기 때문에 고준위 폐기물 유리화 기술을 저준위 폐기물 유리화에 그대로 적용할 수 없다. 그래서 유리화 기술을 저준위 폐기물 처리에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 현재 전세계적으로 진행되고 있는 유리화 기술개발 현황을 간략하게 살펴 보고, 개발중에 있는 유리 용융로에 대한 기술성을 분석하고자 한다. 기술성 분석을 통해 선정된 용융로를 이용한 3종류의 처리개념과 현재 적용되고 있는 처리개념간에 경제성을 분석한다. 경제성 분석을 위해 각 처리 개념에서 발생하는 처분부피를 계산하고 이를 이용하여 처분단가별 처분비용을 산정하여 처리비용과 합산한 후 비교분석한다.

2. 기술성 분석

현재 세계적으로 저준위 방사성폐기물 유리화에 응용하려고 하는 유리용융로는 지금까지 고준위

폐기물 처리에 이용해 온 용융로를 개선한 것과 용융금속을 이용하는 용융로, 그리고 플라즈마토치를 이용하는 용융로를 들 수 있다.[1,2,3] 기존의 용융로를 개선한 것에는 프랑스 CEA/SGN 사에서 개발하여 시험운전중에 있는 직접유도전류가열식 저온로(cold crucible melter heated by direct induction : CCDI)와 미국 VECTRA 사에서 개발중에 있는 수직전극가열식 저온로(cold crucible melter heated by vertical electrodes : CCVE)가 있다.

CCDI는 처리용량이 210 Kg/hr로 제한받는 반면 수명기간중 교체재료가 없고 용융로 수명이 길다는 장점이 있다. CCVE는 처리용량의 증대가 자유로운 반면, 전극, 내화재 등을 교체해야 하고 용융로 수명도 길지 못하다는 단점이 있다. 용융금속 용융로는 미국의 SEG 사에서 개발하고 있는 것으로써 폐기물 분해 매체로써 용융금속을 이용하며, 플라즈마토치 용융로는 미국의 Retech 사 및 Mason & Hanger 사 등에서 개발중에 있는데, 일반폐기물 처리에 사용되고 있으며 방사성폐기물 처리에 적용하기 위한 연구가 진행 중에 있다.

위와 같은 4종류의 용융로에 대해 다음과 같은 항목에 대해 기술성을 평가하였다: 원전에서 발생하는 모든 폐기물을 처리할 수 있는지의 여부 평가, 수명기간중 교체재료, 용융로 수명, 1000 Mwe급 PWR 2개호기에서 최대 발생 가능한 폐기물량의 처리능력 평가, 방사성 Cs의 배기체 유입량. 각 항목별로 점수를 분배하고 가중치를 적용하여 평가한 결과 CCDI - 플라즈마토치 용융로 - CCVE - 용융금속로의 순으로 높은 점수가 나왔다.

CCDI를 단독으로 유리화 공정에 도입하면 휘발점이 낮은 방사성 Cs 및 유해물질을 용융유리내에 구속시키는 능력이 우수하다는 점과 배기체 처리계통에서 발생하는 폐세정액을 재순환시킬 수 있다는 장점이 있지만 금속함량이 높은 폐기물과 액체필터를 처리할 수 없게 된다. 반면, 플라즈마토치 용융로를 단독으로 이용하게 되면 전처리 없이 모든 폐기물을 처리할 수 있지만 휘발점이 낮은 방사성 Cs 및 유해물질의 대부분이 배기체로 유입되어 배기체계통의 차폐비용이 증가하고 폐세정액의 발생량이 증가할 뿐만 아니라 폐세정액을 재순환시킬 수 없어서 2차 폐기물 발생량이 증가하게 된다. 따라서 원전에서 발생하는 모든 폐기물을 유리화시키기 위해서는 CCDI와 플라즈마토치 용융로를 함께 적용하는 것이 바람직하다.

3. 경제성 분석

가. 처리개념 설정

경제성 분석에 사용될 폐기물 발생량은 표 1과 같다. 이 발생량은 1,000 Mwe급 PWR 2개호기에서 연간 발생할 수 있는 최대발생량으로써 국내 원전에서 최대 발생한 폐기물량에다 10 %를 가산하여 얻어진 것이다.[4] 표 2는 경제성 분석에 이용된 자본비와 운전유지비를 나타낸다. 이 표에서 시설비는 단순히 기기 구입비를 의미한다. 건조기, 초고압 압축기, 시멘트 고화설비는 한전 도입가이며 이들의 운전비는 정확한 데이터가 부족하여 EPRI 보고서[5]중의 자료에다가 물가 상승율을 감안하여 계산하였다. 증발기의 시설비와 운전비도 EPRI 보고서에서 인용하여 위와 같은 방법으로 계산하였다. 유리화 시설에 대한 물가 자료는 SGN 사에서 제공한 데이터이며 플라즈마 토치에 대한 자료는 미국의 Retech Inc. 에서 제공한 것과 EPA 보고서[6] 내용을 사용하였다. 시멘트 고화설비에 대한 운전비는 증발기 운전비와 같다고 가정하였다.

이들 데이터를 이용하여 4종류의 처리개념에 대해 경제성을 분석하였다. 그림 1의 처리개념(1)은 현재 국내원전에서 적용하고 있는 처리개념이다. 비가연성 DAW의 조성은 콘크리트·석고류가 3%, 공기 필터류가 7%, 유리철재·형광등류가 31%, 모래 및 기타가 58%이고 필터류중 프레임과 여과재의 부피비는 2 : 8이고 유리·철재·형광등류 중 철재의 비율은 90%라고 가정하였다. 각 처리방법의 감용비(VRF)는 운전 자료와 기기 공급업자가 제공한 자료를 사용하였다.

그림 2의 처리개념(2)는 가연성 DAW, 폐수지, 봉산 농축액, 배기체세정액은 유리화시키고 액체 필

터는 수작업으로 시멘트 고화시키며 비가연성 DAW는 유리화 시설로 처리가 곤란한 금속폐기물(13m³)과 공기필터(4m³)를 선별하여 초고압 압축기로 압축시키고 기타 비가연성폐기물(33m³)은 유리화시키는 개념을 채택하였다. 유리화설비에서 발생하는 배기체세정폐액은 처리대상 폐기물 톤당 0.3m³ 이라고 가정하였고 비가연성 DAW에서 분류된 기타 폐기물은 세정폐액 발생에 기여하지 않는다고 가정하였다. 비가연성 DAW중에서 유리화가 가능할 것으로 구분된 폐기물의 90%는 모래이고, 10%는 시멘트, 석고, 형광등이기 때문에 감용비가 약 1.5일 것으로 예상된다. 가연성 DAW를 유리용 용로에 투입하기 전에 잘게 자르기 위해 사용되는 파쇄기는 유리화시설의 폐기물 공급계통에 포함되어 있는 것으로 가정하였다. 보수적인 경제성 분석을 위해 유리화에 대한 감용비는 여러회사에서 실험실적으로 제시한 값중에서 가장 낮은 값을 취하였다.

그림 3의 처리개념(3)은 처리개념(2)중에서 시멘트고화처리하던 액체필터와 비가연성 DAW중 공기필터와 금속을 플라즈마 용융로로 처리하는 개념이다. 플라즈마 용융로의 감용비산정을 위해 필터중 필터프레임은 스테인레스강이나 탄소강으로 되어 있고 부피는 필터의 약 20%이고 여과재의 부피는 80%라고 가정하였다. 그리고 금속폐기물의 감용비는 약 2, 공기필터 여과재의 감용비는 100, 액체필터의 여과재의 감용비는 30이라고 가정하였다. 공기필터 여과재와 액체필터 여과재의 감용비를 다르게 가정한 이유는 공기필터 여과재는 비교적 감용비가 큰 활성탄 등의 여과재가 많이 사용되기 때문이다. 또다른 이유는 액체필터 여과재내의 방사성핵종 농도의 최대치가 폐수지와 거의 같은데[7] 용융 금속로로 폐수지처리를 연구하고 있는 SEG에서 폐수지의 감용비를 30정도로 하는 것이 타당하다고 제시하였다. SEG는 폐수지의 감용비가 최대 400정도 되는데 유리고화체내의 방사성 핵종농도를 class C 등급에 맞추기 위해서는 30정도가 적절하다고 제시한 것이다. 플라즈마토치 용융로의 최대 감용비는 용융금속로에 비해 클것으로 예상되지만 이 역시 고화체내 핵종농도의 제한 때문에 감용비를 30으로 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

유리화설비에서 발생하는 세정폐액의 양은 처리개념(2)와 같으며 플라즈마토치 설비에서 발생하는 세정폐액은 처리폐기물 톤당 1m³의 폐액이 발생한다는 가정과[6] 비가연성 DAW 중 공기필터(4m³)만이 세정폐액 발생에 기여한다는 가정에 계산되었다. 처리개념(3)에서 주기는 유리화시설이고 보조기는 플라즈마 용융로이다. 이러한 처리개념은 두시설의 단점을 보완해 줄 수 있는 이점이 있다. 즉 배기체공정의 부산물중 유리화시설로 처리가 곤란한 공기필터와 원전에서 발생하는 액체 및 기체필터는 플라즈마 용융로로 처리하고 플라즈마 용융로만 있을 때는 처리가 어려웠던 세정액을 유리화시설로 처리할 수 있게 된다.

그림 4의 처리개념(4)은 모든 폐기물을 플라즈마 용융로로 처리하고 유리화 시설은 세정액만 처리하는 개념이다. 배기체세정액은 앞에서 언급한 기준에 의해 186m³으로 계산되었다. 각 폐기물에 대한 감용비는 앞에서 언급한대로 폐수지 감용비를 기준으로 각 폐기물내의 핵종농도에 비례하여 산정하였다.

나. 처리개념별 경제성 비교

국내의 수송비 및 처분비는 1992년 기준으로 65만원/드럼(309만원/m³)으로 책정된 바 있으나 이는 전세계에 운전중이거나 계획중인 처분장의 처분단가에 대한 평균값이고, 또한 미국의 Barnwell 처분장이 천층처분장인데도 처분단가가 650만원/m³이라는 점과 굴업도 처분장은 동굴처분 방식이라는 점을 감안한다면 309만원/m³ 이상이 될 것으로 판단된다. 여기서는 굴업도 처분장의 처분비가 정해지지 않았기 때문에 여러종류의 처분단가에 대해 비교하여 보았다. 처리개념(1)에 의해 처리할 때 발생하는 처분드럼수는 660드럼(138.7m³)으로 계산되었는데 전체적인 감용비가 약 2.5에 해당하는 셈이다. 연간 시설비 및 운전유지비는 15.43억원으로 계산되었다. 연간 시설비는 모든 기기의 감가상각기간을 15년으로 가정하고 총시설비를 감가상각기간으로 나누어 계산하였다.

처리개념(2)의 경우 발생하는 처분드럼수는 249드럼(52.22m³)으로서 처리개념(1)에 비해 처분부피를

62% 감소시킬 수 있다. 계산된 시설비 및 운전유지비중 13.95억원은 기존의 시설을 변경하는 것이 아니라 새롭게 건설하는 처리시설에 대한 값이고 19.93억원은 처리개념(1)과 같은 시설에다가 유리화시설을 추가한 경우에 대한 값이다. 즉 유리화시설을 추가할 때는 기존의 시멘트고화처리설비를 사용하지 않지만 이미 설치되어 있기때문에 이에 해당하는 시설비를 추가해야 한다.

처리개념(3)에 의해 발생하는 폐기물 드럼수는 116드럼(24.43m³)으로서 처리개념(1)에 비해 82% 정도 감소한 양이다. 연간 소요되는 시설비와 운전유지비는 신규시설에 대해서는 17.49억원, 현시설에 추가설치하는 경우는 24.67억원으로 나타났다. 처리개념(4)에 의해 발생하는 처분드럼수는 90드럼(18.8m³)으로 가장 적은 것으로 나타났지만 시설비 및 운전 유지비는 각각 18.73억원과 25.91억원으로 나타났다.

그림 5는 제안된 개념에 따라 폐기물 처리계통이 신규로 건설될 경우 처분단가의 변화에 따라 처리 및 처분비용이 어떻게 변화하는지를 보여준다. 대안으로 제시된 모든 처리개념들이 현재의 처리개념보다 경제적인임을 알 수 있다. 그림 6은 현재의 폐기물처리계통에 추가로 유리화시설을 설치할 때의 처분단가의 변화에 대한 각 처리개념의 처리 및 처분비용의 변화를 보여주고있다. 기존의 개념과 비교할 때 개념(2)는 처분비용이 550만원/m³ 이상일때, 개념(3)의 경우 처분비용이 800만원/m³ 이상일때, 개념(4)의 경우는 880만원/m³ 이상일때 경제성이 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

원전에서 발생하는 모든 폐기물을 처리하여 처분환경에서 장기적으로 안정한 고화체를 만들고 처분 부피를 대폭 줄일 수 있는 유리화 시설을 개발하기 위해서는 프랑스의 SGN 사의 직접유도가열식 저온로와 플라즈마토치 용융로를 병행하여 사용하는 것이 바람직하다. 이 두개의 용융로를 이용한 3종류의 처리개념에 대해 처분부피 발생량을 계산하고 이를 바탕으로 처분비와 처리비를 계산하여 상호 비교한 결과 저준위 폐기물의 유리화가 경제적인임을 알 수 있었다. 우리나라의 처분단가는 처분장이 동굴 처분장이기 때문에 천층처분장의 처분단가 보다 클 것으로 예상되고, 처분단가도 계속 증가할 것으로 예상되므로 유리화 시설을 개발하는 것이 경제적이다. 개발할 유리화 시설은 비가연성잡고체폐기물과 액체처리용폐필터는 소형의 플라즈마토치 용융로를 이용하여 처리하고 기타 폐기물은 직접유도가열식 저온로로 처리하는 개념을 도입하는 것이 바람직하다. 이 개념을 도입하면 현재보다 처분드럼수를 82% 이상 감소시킬 수 있어서 그만큼 처분장 부지의 소요면적이 줄어들게 된다.

참고문헌

1. SGN과 SEG에서 제공한 유리용융로에 관한 자료
2. Retech과 Mason & Hanger에서 제공한 플라즈마토치 용융로에 관한 자료
3. J. B. Mason, Modular Enviroglass™ Vitrification Technology for Low Level Radioactive and Mixed Waste, VECTRA Document No. SP-5010-01(Rev. 2), 1995.
4. 국내 원전에서 제공한 방사성폐기물 발생량 및 발생특성 자료
5. EPRI Report, Assessment of Power reactor Waste Immobilization by Vitrification, EPRI NP-3225, 1983.
6. EPA Report, Retech, Inc., Plasma Centrifugal Furnace - Applications Analysis Report, EPA/540/A5-91/007, 1992.
7. EPRI Report, Updated Scaling Factors in Low-Level Radwaste, EPRI NP-5077, 1987.

표 1. 원전 부지당 연간 처리할 폐기물량

폐기물	발생부피(m ³)	비중(kg/m ³)	발생 무게(kg)
가연성	200	200	40,000
비가연성	50	1,500	75,000
봉산 농축폐액	80	1,100	88,000
폐수지	14	730	10,220
폐필터	1	1,500	1,500
합계	345		214,720

표 2. 경제성 분석 데이터

설비	시설비		운전유지비		비고
	(\$ 1000)	(억원)	(\$ 1000)	(억원)	
유리화 시설 ⁽¹⁾	10,000	78.00	110	0.86	배기체 처리
시멘트 고화설비 ⁽³⁾	11,500	89.70	200	1.56	공정 포함
증발기	8,500	66.30	164	1.30	
플라즈마 토치 ⁽²⁾	8,000	62.40	1,120/톤	0.87/톤	배기체 처리
건조기 ⁽³⁾	950	7.41	50	0.39	공정 포함
초고압 압축기 ⁽³⁾	2,300	18.00	11	0.09	

주 : (1) SGN제공 데이터(1995년 기준)

(2) EPA 보고서에서 인용, 처리용량 227 kg/hr 기준, 운전유지비 단위는 백만원/톤

(3) 한전 도입가(1995년 기준)

(4) 기타 데이터는 1980년 자료(EPRI NP-3225 참조)

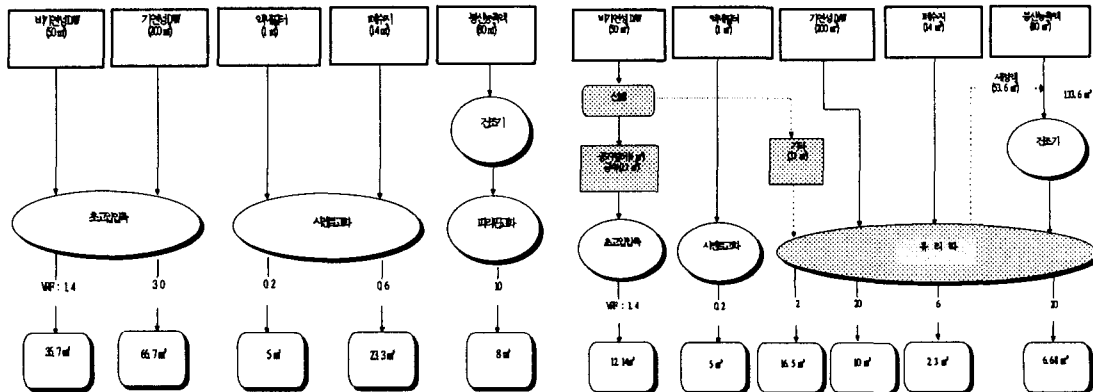


그림 1. 처리개념(1)

그림 2. 처리개념(2)

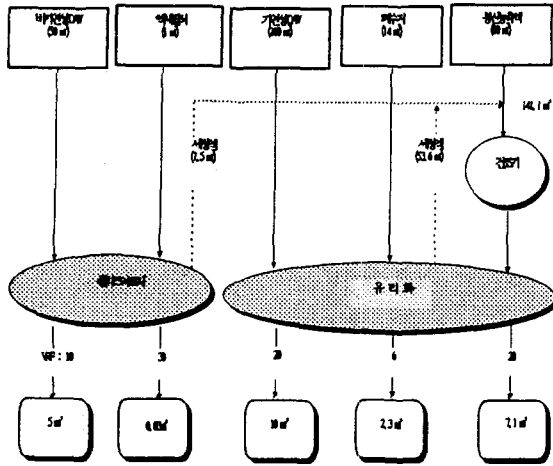


그림 3. 처리개념(3)

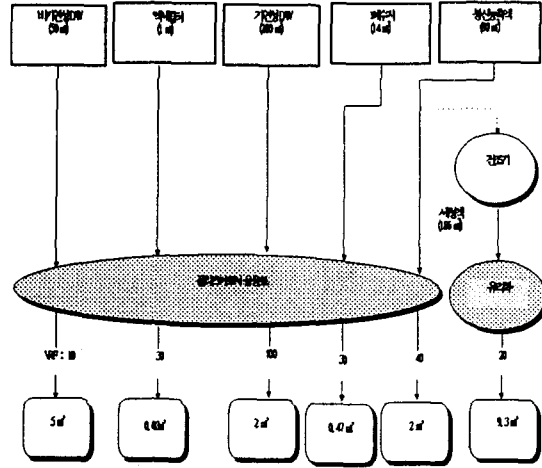
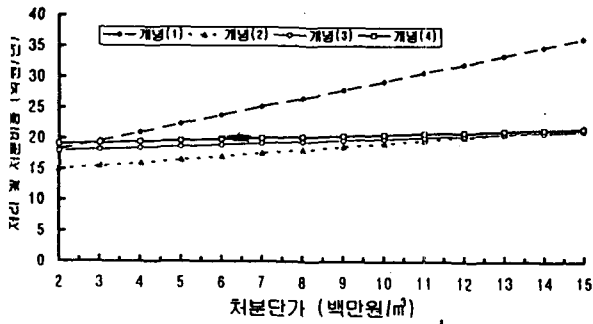


그림 4. 처리개념(4)



참고 : 미국 Barnwell 천송처리장의 처분단가 - 6.5백만원/m³

그림 5. 신규로 건설된 폐기물처리계통에 의한 처리개념별 처리 및 처분비 비교

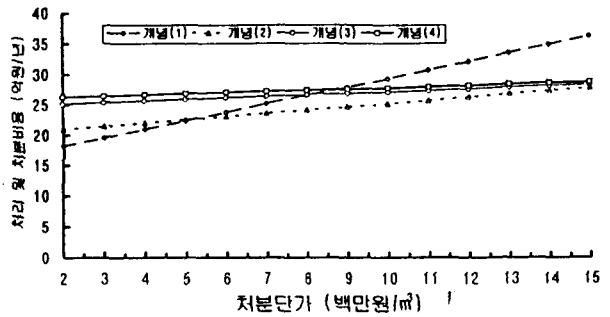


그림 6. 기존 처리계통에 추가로 설치할 경우 처리개념별 처리 및 처분비 비교