

중·저준위 방사성폐기물 유리화(Vitrification) 기술

송 명 재

한전 원자력환경기술원 연구개발실장

1. 왜 유리화(Vitrification)인가?

현재 국내 원전에서 발생하는 방사성폐기물은 기체, 액체, 고체폐기물로 구분하여 처리되고 있다. 기체폐기물은 핵분열시 발생하는 방사성 제논(Xe), 크립톤(Kr) 등을 함유하고 있는 폐기물로서, 활성탄 탑을 이용하여 흡착 지연시켜 충분히 방사능을 낮춘 다음 환경으로 방출된다. 액체폐기물은 원전의 밸브, 기기 등의 누설에 의해 주로 발생되며 증발기로 농축하고 농축액을 건조기로 건조시킨 후 건조물을 파라핀으로 고화시켜 고건전성 용기에 저장하고 있다. 고체폐기물은 원전의 운전 및 정비 중 발생하는 폐기물이 대부분이며 방호복, 폐수지, 목재, 비닐 시트 등의 가연성 폐기물과 금속류, 필터류, 콘크리트, 모래 등의 비가연성 폐기물로 구성되어 있다. 이중 가연성폐기물은 철제 드럼(208리터)에 넣어 초고압 압축기로 압축하여 보관하고 있으며, 비가연성 폐기물은 별도의 처리 없이 드럼에 넣어 보관하고 있다. 현재 국내 원전에서 보관하고 있는 방사성 폐기물 드럼 수는 약 5만드럼 정도인데 2010년 경에는 저장용량이 한계에 이를 것으로 전망된다. 또한, 환경에 대한 관심이 고조됨에 따라 폐기물 고화체에 대한 규제 기준이 엄격해질 전망이다. 즉, 고화체가 처분장

에서 지하수와 접촉했을 때 고화체내의 방사성 물질이 지하수로 거의 빠져나오지 않는 고화체 품질 기준이 적용될 전망이다.

이러한 환경변화에 대응하기 위해서는 폐기물 발생드럼 수를 대폭 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 고화체의 품질을 향상시킬 수 있는 새로운 처리기술 개발이 필요하다. 이러한 필요성을 충족시켜 줄 수 있는 기술 중에서 현재는 고준위 방사성 액체폐기물을 처리할 때 적용되고 있는 유리화(琉璃化, Vitrification) 기술과 전세계적으로 활발히 연구를 수행하고 있는 플라즈마 용융 기술이 가장 유망한 것으로 알려져 있다. 이 외에 현재 국외에서 폐수지를 제외한 가연성 폐기물 처리에 활용되고 있는 소각기술도 대안으로 고려될 수 있으나, 소각기술은 소각재의 처리가 난제로 남아 있어 소각재를 처리하기 위해 별도의 유리화 설비를 접목하려는 시도가 진행되고 있다. 또한 소각재를 이송하기 위해서는 별도의 설비가 필요하고 이송과정에서 발생하는 작업자 방사선 쏙임량 증가 등의 문제가 여전히 남게 된다. 반면 유리화 기술은 폐기물의 처리와 유리화가 동시에 발생하기 때문에 시설의 단순성, 방사선 쏙임량 감소 등의 면에서 매우 유리할 것으로 예상된다. 그리고, 소각과 달리 폐기물이 분해될 때 용융유리와 방사성 원소간

처리하는 것이 매우 중요하다.

가. 유리화 용융로

유리화 용융로는 유리 형성제와 폐기물을 용융시켜서 폐기물내의 휘발성 성분은 배기체 처리공정으로 배출시키고 방사성 핵종, 중금속 등의 독성물질은 유리 망상구조의 일부가 되도록 열을 가해 주고 균질의 용융유리 혼합체가 형성될 때까지 체류시간을 제공하며 유리용융물을 배출시키는 기능을 갖는다. 용융로는 가열방식에 따라 크게 전기식 가열방식과 화석연료를 이용한 가열방식으로 나눌 수 있고 전기식 가열방식은 다시 줄열

가열식(Joule Heating), 플라즈마 가열식(Plasma Heating), 마이크로파 가열식, 유도전류 가열식으로 구분할 수 있다. 그 외에 용융금속을 폐기물 처리의 열원으로 이용하는 용융로가 있으나 유도전류를 사용하여 금속을 용융하기 때문에 이 또한 유도전류 가열식의 범주에 포함된다. 현재 활용 가능한 용융로의 특징은 표 1과 같다.⁽²⁾⁽³⁾

용융로를 선정할 때 가장 먼저 고려해야 할 사항은 처리하고자 하는 폐기물의 특성이라 할 수 있다. 예를 들어 처리 대상 폐기물이 부식성 기체를 다량 발생하는 것이라면 수직전극 가열식인 JHSC-VE-HT 용융로보다는 전극이 용융유리내에 잠기는 수평전극식이나 전극

〈표 1〉 유리화 용융로 종류 및 특징

구분	용융로	특징
전극 가열식	JHCL-PE-LT	내화재 사용, 용융로 외벽 수냉각, 인코넬 690 판형전극, 넘침덱 배출, 최고 운전온도 1,150℃
	JHCL-HE-HT	내화재 사용, 금속 외벽, 수평으로 배치된 수개의 전극, 배출용 하부탭 및 측면탭, 직사각형 용융로, 최고 운전온도 1,500℃(고온 운전을 위해 인코넬/몰리브데넘 전극 사용)
	JHSC-VE-HT	내벽 수냉각, 내화재 배제, 수직전극, 하부탭 배출, 최고 운전온도 1,500℃
	JHHW-STR-LT	인코넬 690 금속 내벽, 내화재 배제, 기계식 혼합기, 혼합기와 금속 내벽이 전극으로 작용, 최고 운전온도 1,150℃
	JHHW-CE-LT	중앙의 공기냉각 전극, 원통의 공기냉각 내부 금속통이 또 다른 전극으로 작용, 하부탭 배출, 최고 운전온도 1,150℃
유도전류 가열식	IHHW-LT	내부의 금속벽이 유도전류에 의해 가열됨, 내부 금속벽 외측을 단열재로 싸고 외부 금속벽 설치, 외부 금속벽 주위에 유도 코일 설치, 2개의 하부탭 배출, 최고 운전온도 1,100℃
	IHCW-HT	분할된 수냉각 금속벽 용융로, 고주파(400-17,60kHz)에 의한 유도전류 발생, 하부탭 배출, 최고 운전온도 1,600℃
	IHMM-UHT	용융 금속을 폐기물 처리 열원으로 사용, 저주파 유도전류에 의해 금속 용융, 용융로 하부는 용융금속 내식성 도가니 사용, 상부는 슬랙/세라믹 내식성 재료 사용, 운전온도 > 1,650℃
	ICAN-LT	처리/처분 겸용 금속 용융로, 용융로를 간접 저항식 또는 유도전류식으로 가열, 최고 운전온도 1,150℃
플라즈마 가열식	PH-HT	플라즈마 토치가 직접 폐기물을 용융, 내화재 피복 수냉각벽, 넘침덱에 의한 슬랙 배출, 최고 운전 온도 1,600℃
	PC-HT	플라즈마 토치가 직접 폐기물을 용융, 용융로는 내화재로 피복된 회전형, 회전형 용융로 주위에 내화재 피복 금속로 설치, 회전로의 회전속도를 감소시켜 슬랙 배출, 최고 운전 온도 1,600℃
	PA-HT	흑연 전극 사이의 전기 아크시 발생하는 열에 의해 폐기물 용융, 흑연으로 피복된 용융로 하부가 하나의 전극으로 작용, 투입되는 폐기물 크기가 제한됨, 최고 운전 온도 1,600℃
히터 가열식	FWR-HT	입자형((1~2mm)폐기물을 고온 환원분위기의 용융로 상부로 투입, 용융로 내부에서 입자형 폐기물이 유동하므로 용융로벽에 축적을 방지, 용융로벽 외부에 설치된 흑연 가열기에 의해 간접 가열, 운전 온도 > 2,000℃
연료 가열식	CYCL-HT	연소 버너에 의한 직접 가열, 내화재 피복, 수냉각, 싸이클론 용융로, 내화재 피복된 슬랙/기체 분리로, 운전 온도 > 1,600℃
	RKLN-HT	연소 버너에 의해 직접 가열, 내화재 피복의 로타리 킬른 용융로, 최고 운전 온도 1,500℃

을 사용하지 않는 유도전류 가열식 용융로 등을 사용하는 것이 유리할 것이므로 폐기물이 용융로 안에서 분해될 때 발생하는 물리화학적 현상을 고려하여 용융로를 선정해야 한다. 일반적으로 전극가열식 용융로는 대부분 내화재를 사용하고 용융로 수명도 유도전류 가열식 용융로에 비해 짧은 편이어서 2차 폐기물 발생량이 많은 반면 처리용량 증가가 비교적 용이하다.

플라즈마 용융로는 고온에서 운전되기 때문에 플라즈마 기체로 공기를 사용할 때는 NO_x 발생이 문제가 될 수 있고 폐기물 내에 휘발성이 있는 물질이 포함될 경우에는 대부분 배기체 처리공정으로 유입되어 배기체 처리공정의 오염 뿐만 아니라 2차폐기물의 발생량을 증가시킬 수 있다. 반면 플라즈마 용융공정은 소각 공정에 비해 순간적인 고온 발생, 배기체 유량의 감소, 플라즈마 내에 존재하는 이온에 의한 반응성 증가, 온도 제어의 신속성 등의 장점이 있다.

현재 고준위 방사성폐기물의 처리에 주로 응용되고 있는 용융로는 전극가열식과 유도전류 가열식 용융로로서 유도전류 가열식은 주로 유럽에서, 전극 가열식은 미국을 비롯한 기타 국가에서 주로 사용하고 있고, 중·저준위 방사성폐기물 유리화의 경우에는 수직전극 가열식, 유도전류 가열식, 플라즈마 가열식 용융로를 이용한 처리방법 개발을 활발히 추진하고 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 중·저준위 폐기물은 고준위 폐기물에 비해 폐기물의 종류, 발생량, 화학적 조성 등이 다르기 때문에 고준위 폐기물 유리화에 적용하는 기술을 그대로 중·저준위 폐기물 유리화에 적용할 수는 없다. 고준위 폐기물은 대부분 액체 폐기물이지만 중·저준위 폐기물은 액체와 가연성 및 비가연성 폐기물로 구성되어 있어서 중·저준위 방사성폐기물을 처리하는 용융로와 배기체 처리공정은 고준위 폐기물 처리용과 달라야 한다. 현재 상용 운전되는 중·저준위 폐기물 처리용 용융로는 존재하지 않지만 기존의 고준위 폐기물 처리에 사용해 온 용융로를 개조하여 적용하려는 연구가 진행되고 있다.

나. 유리고화체의 조성

유리고화체의 조성비 결정에 영향을 주는 요인으로는 유리형성체의 종류, 고화체 건전성 평가 기준, 폐기물 내 중금속 또는 산화물의 종류 및 농도, 용융로의 운전 용이성 등을 들 수 있다.

유리형성체를 붕규산 유리로 사용할 때 원소들의 대략적인 용해도와 몇 가지 산화물들의 기능을 표 2에 열거하였다. 이러한 용해도와 기능들을 고려하여 폐기물 내에 존재하는 금속원소들을 최대한 유리고화체에 혼합시키면서 유리고화체의 건전성을 확보하고, 용융유리의 배출, 혼합, 용융로 마모 감소 등을 고려하여 설정된 적정점도와 온도를 유지할 수 있도록 유리고화체의 조성비를 결정하는 것이 유리고화체 조성(Glass Formulation)의 주목적이다.

Glass Formulation에 있어서 고려해야 할 다른 주요 인자는 규제기관에 의해 설정된 건전성 기준을 충족시키는 것이다. 보통 유리고화체의 건전성을 확인하기 위해서는 고화체의 침출능과 압축강도를 측정한다. 유리고화체의 침출능과 압축강도는 시멘트 고화체에 비해 월등히 높으나 시료의 제조 방법에 따라 변동폭이 크다는 특징이 있다. 예를 들면 시멘트 고화체를 천층 처분할 때 전세계적으로 적용되는 기준 중 가장 엄격한 기준은 침출률이 10g/m²/d 이하이고 압축강도는 15MPa 이상인 반면 고준위 폐기물 유리고화체의 침출률은 10⁻⁴~0.4g/m²/d, 압축강도는 500~1,000MPa의 범위에 있다. 현재 중·저준위 폐기물의 유리화 고화체에 대한 기준은 설정되어 있지 않으나 고화체의 처분방식, 국가별 규제기준 등에 따라 달라질 것이다. 이 기준들은 감용비에도 영향을 미치기 때문에 유리화공정의 경제성을 좌우한다.

유리 고화체의 침출률을 측정하는 것은 수용액과 대기물질의 공격에 대해 내구성을 측정하는 수단이다. 유리고화체의 수용액 중에서의 용해 메커니즘은 매우 복

〈표 2〉 실리카 유리에서 원소들의 용해도 및 산화물의 기능

용해도	원 소	
0.1 wt.% 이하	Ag, Ar, Au, Br, H, He, Hg, I, Kr, N, Ne, Pd, Pt, Rh, Rn, Ru, Xe	
1 ~ 3 wt.%	As, C, Cl, Cr, S, Sb, Se, Sn, Tc, Te	
3 ~ 5 wt.%	Bi, Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Ti	
5 ~ 15 wt.%	Ce, F, Gd, La, Nd, Pr, Th, B, Ge	
15 ~ 25 wt.%	Al, B, Ba, Ca, Cs, Fe, Fr, K, Li, Mg, Na, Ra, Rb, Sr, U, Zn	
25 wt.% 이상	P, Pb, Si	
산화물	공정에 미치는 영향	고화체에 미치는 영향
SiO ₂	점도 크게 증가, 폐기물 용해도 감소	내구성 증가
B ₂ O ₃	점도 감소, 폐기물 용해도 증가	양이 작을 때는 내구성 증가, 클 때는 감소
Na ₂ O	점도 및 저항 감소, 폐기물 용해도 증가	내구성 감소
Li ₂ O	Na ₂ O와 동일한 영향이지만 효과가 큼, 비유리화 경향 증가	내구성 감소(Na ₂ O보다는 영향 적음)
K ₂ O	Na ₂ O와 동일한 영향, 비유리화 경향 감소	내구성 감소(Na ₂ O보다는 영향 큼)
CaO	점도와 폐기물 용해도 증가후 감소	내구성 증가 후 감소
MgO	CaO와 동일한 영향, 비유리화 경향 감소	CaO와 동일한 영향, 그러나 내구성 감소경향이 큼
TiO ₂	점도 약간 감소, 폐기물 용해도 증가후 감소, 비유리화 경향 감소	내구성 증가
ZrO ₂ , La ₂ O ₃	폐기물 용해도 감소	내구성 크게 증가

잡하며 이는 많은 물리적·화학적 현상을 포함한다. 그러나, 대부분 유리의 용해공정은 이온교환 및 상호확산, 용해 및 가수분해, 침윤효과, 침전과 제2상의 형성이라는 4가지 기본반응을 갖는다. 현재 알려진 침출률 시험법으로는 Toxic Characteristic Leach Procedure(TCLP), Product Consistency Test (PCT), Materials Characterization Center Static Leach Test(MCC-1P), Materials Characterization Center MCC-3 Test, American Nuclear Society Leach Test(ANS-16.1) 등이 있다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

유리고화체의 압축강도는 처분환경에서 지반이 침강할 때를 고려하여 결정해야 할 사항이다. 침강이 일어나면 주변의 수분이 빠져나가기보다는 물러오는 경향이 있다. 고준위 폐기물의 유리고화체는 극히 높은 압축강도를 가지므로 유리고화체에 대한 압축강도 규제는 의미가 없을 수 있으나 중·저준위 폐기물의 경우는 폐기

물 특성을 고려할 때 폐기물이 분해되고 남은 무기원소 중 특정 원소의 혼입률이 높아지면 압축강도가 급격히 감소할 수도 있다.⁽⁷⁾

다. 배기체 처리

유리화 시설에서 발생하는 배기체는 처리하는 폐기물의 종류에 따라 달라진다. 고준위 방사성폐기물의 경우는 주로 휘발성 방사성핵종과 수분이 주를 이루게 되고 상대적으로 배기체 발생량은 적지만 방사능 준위는 높을 것이다. 반면 저준위 방사성폐기물에는 폐수지, 방호복 등 유기성분이 다량 포함되어 있어서 발생하는 배기체 양이 많을 뿐만 아니라 배기체 성분도 다양하게 된다. 물론 앞서도 언급했듯이 배기체의 조성은 폐기물의 종류 및 투입방법에 따라 달라지겠지만 저준위 방사성폐기물을 유리화할 때 발생가능한 배기체 성분으로

는, 세습 같은 휘발성 방사성 핵종 및 중금속, 휘발성 유기물, 코발트 등의 방사성 콜로이드가 흡착되어 있는 입자, 수증기, 이산화탄소, 일산화탄소, SO_x, NO_x, 유입된 공기, 여러 종류의 탄화수소 등을 들 수 있고, 붕산폐액을 처리할 때나 유리형성제로 붕규산 유리를 사용할 때는 붕소화합물이 휘발되며 최근 문제가 되고 있는 다이옥신도 발생할 수 있다.

일반적으로 배기체의 처리 원칙은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 배기체의 발생량을 최대한 줄이는 것이고 다른 하나는 발생된 배기체를 환경 유출 기준을 충족시킬 수 있도록 처리하는 것이다. 유리화 시설에서 배기체 발생량을 줄이는 방법으로 다음과 같은 것들을 고려해 볼 수 있다⁽²⁾.

폐기물 투입 방법을 변형시키면 발생량을 줄일 수 있다. 예를 들어 가연성 폐기물 또는 이들의 열분해재를 용융유리 속으로 투입하면 세습 등이 용융유리와 반응하여 배기체내 세습량이 훨씬 감소될 수 있다. 그러나 완전 연소되지 않은 탄소 입자가 유리 고화체의 품질을 저하시킬 가능성도 존재한다. 또 다른 투입 방법은 유리 용융온도를 낮추는 유리 변형제를 폐기물과 함께 투입하여 입자나 휘발성 물질의 발생을 감소시키는 것인데, 이 때도 용융로의 운전 특성 등의 변화에 주의해야 한다. 또한, 용융유리 위에 폐기물이 쌓이게 하여 Cold Cap를 형성시켜서 발생하는 휘발성 물질을 1차적으로 여과시키는 방법이 있으며, 용융로 후단에 후단연소기를 설치하여 일산화탄소 등의 불완전 연소물을 완전 연소시키거나 다이옥신을 완전히 분해시킴으로써 처리가 까다로운 유해물질이 배기체 공정으로 유입되는 양을 줄이는 방법과 후단연소기와 용융로 중간에 SiC 필터 같은 고온 세라믹 필터를 설치하여 입자, 방사성 세습 등을 포집한 후 용융로로 재순환시키는 방법이 있다.

일단 배기체 처리공정으로 유입된 배기체는 환경규제에 맞게 처리하여 방출해야 한다. 배기체 처리공정의 선택은 환경규제, 배기체 발생특성 등에 따라 달라진

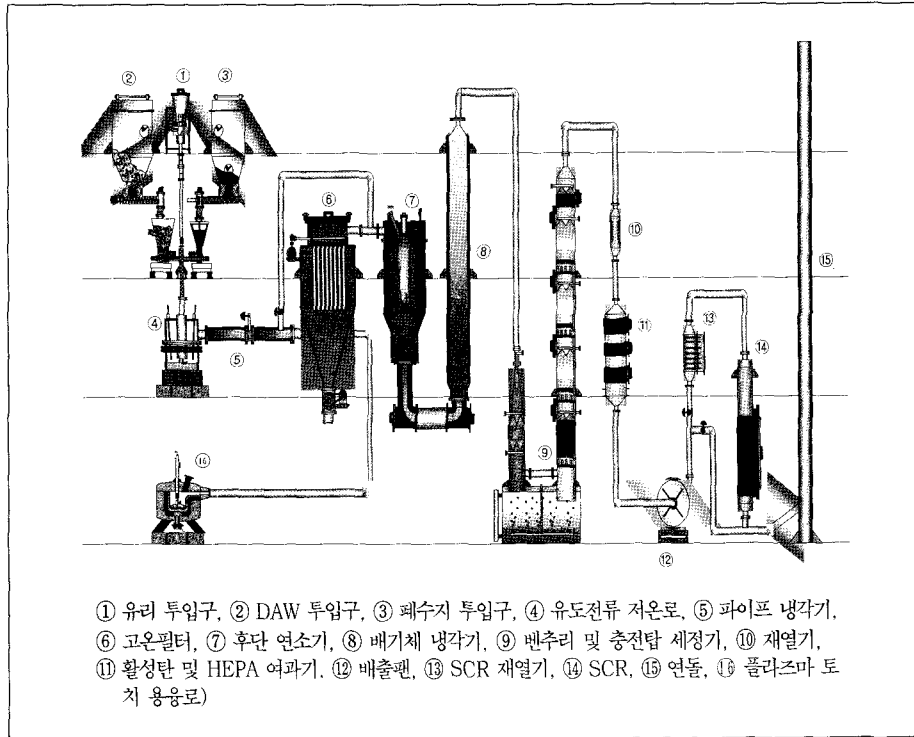
다. 고준위 방사성폐기물 유리화 시설의 배기체 처리공정은 일반적으로 HEPA 필터, 냉각기, 제진기 세정탑, 제습기 및 재가열기, 배출팬으로 구성된다. 하지만 중·저준위 방사성폐기물 유리화 시설의 경우에는 다이옥신 발생을 억제할 수 있는 급냉기, NO_x와 다이옥신 배출농도를 제어할 수 있는 SCR(Selective Catalytic Reduction) 등의 추가설비가 필요하게 될 수 있다. 방사성폐기물 유리화 시설의 배기체 처리설비는 비방사성 폐기물 처리설비에 비해 훨씬 엄격하게 선정되고 관리되어야 한다.

3. 한전의 유리화 연구 현황

한전은 지난 '94년에 "저준위 방사성폐기물 유리화에 관한 타당성 연구"를 시작하여 그 동안 지속적으로 연구를 진행하여 왔다. 타당성 연구를 통하여 가연성 폐기물은 직접유도가열식 저온로(CCM)를 이용하여, 비가연성 폐기물은 플라즈마 토치 용융로(PTM)으로 처리하는 것이 타당하며, 경제성도 뛰어나다는 결론이 도출되었고 이 결론을 바탕으로 '96년부터 처리용량 50kg/hr의 CCM, 10kg/hr의 PTM, 그리고 배기체 처리계통으로 구성된 파일럿 설비 개발에 착수하여 '99년 6월 완공하였다. 그 동안 파일럿 플랜트 설계를 위해 프랑스 SGN사와 공동으로 설계자료 생산을 위한 오리엔테이션 시험을 수행하였고, 파일럿 플랜트에서 실증할 수 있는 유리고화체 조성도표를 도출하였다. 그림 2는 유리화 파일럿 설비의 개략도를 보여주고 있으며 각각의 기기에 대한 개요는 다음과 같다.

가. 유도전류 저온로 (Cold Crucible Melter)

유도전류 저온로(CCM)는 프랑스 CEA에서 고준위 방사성폐기물 처리용으로 개발한 고온 용융로를 개조한



〈그림 2〉 중·저준위 유리화 파일럿 플랜트 개략도

용융로이다. 고온 용융로는 노 주위의 유도전류자(Inductor)에 의해 가열되는데, 유도전류는 노벽 주위에서 줄(Joule)열을 발생시키며, 발생된 열은 전도에 의해 유리로 전달된다. 저온로 역시 유도전류자의 코일에 의해 둘러싸이지만 전자기장의 상대적인 투과성을 확보하기 위해 스테인리스강으로 만들어진 직사각형 판을 여러 개 연결하여 원통형으로 만들고 판 사이에는 운모 절연체가 삽입되어 있다. 각각의 직사각형판에는 냉각수의 유입구와 유출구가 있어 금속벽을 냉각시키게 된다. 노벽의 온도는 200℃ 이하로 유지되므로 노벽과 접촉하는 용융유리가 고화되어 얇은 층을 형성하게 되어 금속용융로의 밀봉성을 확보한다. 저온로는 콘크리트 구조물과 스테인리스판으로 만들어진 지지대 위에 설치되는데 스테인리스판에는 용융유리 배출관과 산소 주입 노즐이 수개 존재한다. 이 노즐을 통하여 주입된

공기 또는 아르곤은 용융유리를 혼합시켜 열적·화학적 균일성을 도모한다.

노에는 유도전류자, 고주파발생기 및 트리머(Trimer)가 필요한데, 유도전류자는 구리튜브로 만들어져 있고 이 튜브 안으로 냉각수가 흐르면서 유도전류자를 냉각시킨다. 유도전류자에는 고주파 교류가 공급되는데 여기서 용융유리 내에 유도전류를 발생시킨다. 이 유도전류가 줄효과에 의해 열을 발산한다. 노의 기동을 위해 초기에 유리 형성제와 함께 티타늄 링을 노에 넣고 유도전류자에 고주파 전류를 흘려주면 티타늄 링에 유도전류가 발생하여 티타늄이 녹으면서 유리가 용융되어 유리 형성제가 전도성을 갖게 된다. 고주파 전류의 주파수 선택은 매우 중요한데, 그 이유는 전기에너지 효율에 관계되기 때문이다. 유도된 전류가 유리내부로 침투되는 깊이는 유리의 저항, 전류의 주파수와 관계가

있다. 좋은 효율을 얻기 위해서는 침투깊이가 노의 반경보다 작아야 한다. 유리를 녹이기에 적절한 주파수 범위는 100~500kHz이며 처리 대상 폐기물에 따라 적절한 주파수를 선택해야 한다.

CCM을 이용하여 처리할 수 있는 폐기물은 폐수지, 가연성 폐기물, 봉산농축폐액 등으로서 금속의 함유량이 지나치게 많지 않다면 모든 고체 및 액체 폐기물을 처리할 수 있다. 폐수지 및 가연성의 경우에는 용융유리 위에 직접 투입하고 잉여산소를 불어넣어 완전연소시켜서 유독성 및 폭발성 기체의 생성을 최소화하면서 중금속을 산화물로 전환시켜 용융유리 속에 침투시키게 된다. 봉산폐액은 건조기에서 건조시킨 후 분말형태로 용융유리 위로 투입한다. 봉산폐액 건조물은 경우에 따라 가연성폐기물 처리에 필요한 봉규산 유리의 유리 형성제로 사용될 수 있다.

나. 플라즈마 용융로⁽⁸⁾⁽⁹⁾

플라즈마 토치/아크 용융기술은 1950년 이래로 발전하였으며 처음에는 강철 산업에 사용되었으나 지금은 전세계적으로 폐기물 처리에 적용하는 추세이다. 미국, 프랑스 등에서는 병원 폐기물, 석면 폐기물, 생활폐기물 소각재의 용융처리에 응용하고 있으나, 방사성폐기물 처리 기술은 개발단계에 있다.

플라즈마 아크가 발생하는 원리는 토치와 전극의 종류에 따라 달라진다. 플라즈마 토치는 일반적으로 구리나 내열 금속성 전극을 이용하는 아크 플라즈마 토치와 전극을 이용하지 않는 유도 플라즈마 토치가 있다.

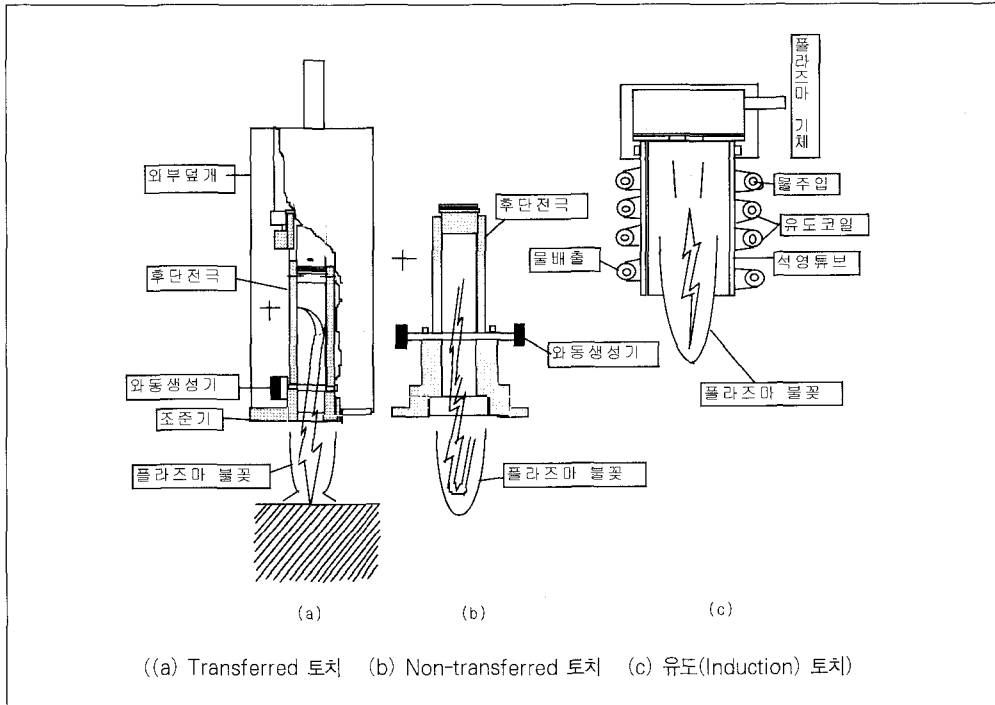
플라즈마 토치는 전극의 종류에 따라 이송식(Transferred) 토치와 비이송식(Non-transferred) 토치로 구분된다. 비이송식(Non-transferred) 토치는 아크 단자점으로 토치 전단과 후단을 전극으로 사용한다. 이송식(Transferred) 토치는 전단 전극으로는 토치 자체를, 후단 전극으로는 외부 단자점인 용융 슬랙

풀을 사용한다. 가장 널리 사용하는 아크 플라즈마 토치를 그림 3의 (a)와 (b)에 나타내었다. 플라즈마 기체는 후단전극과 전단전극 사이의 와동 생성기(Vortex Generator)를 통해 주입된다. 주입된 기체는 먼저 후단전극 쪽으로 이동하여 단자점을 형성후 토치의 전단부로 플라즈마를 형성하여 안정화된다. 사용하는 기체는 처리대상 폐기물, 경제성 등에 따라 달라지며, 질소, 아르곤, 공기, 헬륨, 증기 등이 사용되는데 증기를 사용하는 플라즈마 토치를 스팀 플라즈마라고 한다.

한전의 플라즈마 토치 시스템의 용량은 200kW로서 고온의 플라즈마 기체로부터 발생하는 Joule 열 또는 유도 전류에 의하여 발생된 플라즈마 아크로에서 발생하는 에너지를 사용하여 유기성분을 기체화하고 무기물을 용융시키는 시스템이다. 이 플라즈마 토치 용융로는 배치 타입으로 운전되며, 원전에서 발생하는 콘크리트, 모래, 폐필터 등을 처리하는 연구를 수행할 수 있도록 설계되어 있다. 파일럿 플랜트에 채택된 플라즈마 토치는 이송식과 비이송식 운전 모두가 가능한 토치이고 플라즈마 기체로는 질소를 주로 사용한다.

다. 배기체 처리 계통

배기체 처리계통은 독립적으로 운전되는 CCM과 PTM으로 발생하는 배기체를 처리할 수 있도록 설계되었다. 설계는 휘발성 방사성 세슘으로 인한 오염의 최소화, 2차 폐기물 발생량의 최소화 원칙에 따라 수행되었다. 세슘을 배기체 처리계통 최전단에서 포집하기 위해서 CCM 상부를 냉각하고 고온필터로 연결되는 배관을 냉각하여 배기체 온도를 낮게 유지한다. 이렇게 하면 방사성 세슘의 휘발 온도보다 낮은 상태에서 휘발된 방사성 세슘이 배관 및 고온 필터에 대부분 침적될 것으로 예상된다. 고온 필터는 잘게 잘라 CCM의 용융유리 속으로 투입하여 처리하거나 플라즈마 토치 용융로에서 특별한 방법으로 처리하면 필터에 침적된 세슘



〈그림 3〉 플라즈마 토치

이 거의 모두 유리고화체 내에 모두 구속될 것으로 예상된다.

고온필터를 지난 배기체는 프로판으로 연소되는 후단 연소기로 유입되어 여기서 CO, 다이옥신 등의 유해 물질들이 안전한 형태로 변형되거나 분해된다. 후단 연소기는 1,100℃를 유지하고 배기체 체류시간이 2초가 되도록 설계되었다. 후단 연소기를 거친 배기체는 냉각기를 지나 벤추리 세정탑 및 충전 세정탑을 거치면서 미립자 및 염소가스가 제거된다. 염소가스의 제거 효율을 높이기 위해 NaOH를 이용하여 세정액의 pH를 알칼리로 유지한다. 그 다음 배기체는 가열기에서 약간 가열되어 가열기 후단에 있는 활성탄 및 HEPA 여과기로 유입되어 미량의 다이옥신과 입자가 제거되고 마지막으로 SCR에 유입되어 NO_x가 제거된다. SCR에는 암모니아 기체가 주입되어 NO_x의 제거 효율을 높인다. 배기체가 대기중으로 방출되는 연돌에는 배기체

감시설비가 설치되어 있어서 배기체를 연속 감시하도록 되어 있다.

4. 전망 및 기대효과

지금까지 알려진 고준위 방사성폐기물 안정화 방법 중에서 붕규산 유리를 이용한 유리화 기술이 가장 적합한 기술로 알려져 있다. 수년전까지만 해도 이 기술을 중·저준위 방사성폐기물 처리에 접목하는 것은 비경제적이라는 의견이 지배적이었다. 그러나 최근 환경보호에 대한 관심 고조로 인한 규제 강화, 처분장 선정의 어려움, 처분비의 상승 등으로 중·저준위 방사성폐기물 처리에 적용하려는 연구를 활발히 추진하고 있는 추세이다.

중·저준위 방사성폐기물은 고준위 방사성폐기물과 달리 방호복, PVC 시트, 이온교환수지, 모래, 시멘트,

목재 등 매우 다양한 물질로 구성되어 있어서 고준위 방사성폐기물에 사용하고 있는 기술을 그대로 적용할 수 없다. 폐기물 특성에 맞게 이용 가능한 용융로들을 적절히 개선하고 적합한 Glass Formulation을 도출해야 한다. Glass Formulation을 도출하는 일은 폐기물의 다양성으로 인해 상당한 연구개발이 필요하며, 유리화체의 건전성 확인기준, 유리화공정의 경제성, 감용비 등을 고려하여 도출되어야 한다.

또한, 중·저준위 방사성폐기물 분해시에 방사성핵종이나 유독성 물질이 배기체로 유입되는 것을 최소화할 수 있는 처리방법의 개발과 발생된 배기체를 효율적으로 처리할 수 있는 배기체 처리시스템의 개발이 필요하다. 유해물질의 배기체로의 유입을 줄일 수 있는 방법으로는 유리의 물리화학적 특성을 변형시킬 수 있는 물질을 폐기물과 함께 투입하는 방법, 용융로 바로 후단에서 회수하여 재순환시키는 방법 등이 있다. 배기체처리 시스템 개발에 있어서는 2차 폐기물의 발생량을 최소화하면서도 경제적인 시스템 개발이 관건이며, 2003년부터 규제 예정인 다이옥신에 대해 처리할 수 있는 방안도 고려해야 한다.

한전에서 지금까지 개발하여 설치한 파일럿 플랜트는 중·저준위 방사성폐기물의 유리화에 대한 기술성 및

경제성 분석에 필요한 실질적인 자료를 생산하고 검증하는데 활용될 것이다. 그리고 기술성과 경제성이 입증되면 상용화에 필요한 자료를 생산하는데 이용될 것이다. 지금까지 연구결과에 의하면 상용화 가능성이 높은 것으로 나타났고, 상용화가 될 경우에 발전소에서 발생하는 호기당 연간 드림수가 1/10로 줄어들 것으로 예상된다. 이러한 감소량은 1,000MWe PWR 12기에서 30년간 발생하는 방사물의 양이 13,320드림 정도일 것이라는 것을 말해 준다. 이렇게 폐기물 드림수가 대폭 감소하면 유리화 설비를 기존 발전소에 추가로 건설할 경우에도 처분 단가가 500만원/m³ 이상에서 경제성이 있을 것으로 예측된다. 현재 미국의 방사성폐기물 처분비가 300~500\$/ft³(1300~2200만원/m³)이며, 우리나라의 경우 영구처분장 건설시 약 600만원~1000만원/m³ 정도로 예상되므로 충분히 경쟁력이 있을 것으로 판단된다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾

또한, 영구 처분장의 사용기간을 10배 정도 늘릴 수 있어 처분장 건설에 소요되는 경비를 대폭 줄일 수 있고, 시멘트 고화체에 비해 유리화체는 고화체가 지하수와 접촉했을 때 방사성 핵종이 빠져 나오는 속도가 10~100배 정도 작아지기 때문에 처분장 안전성 향상에 기여하리라 전망된다.⁽⁹⁾ ■

참 고 문 헌 •

1. R. H. Doremus, Glass Science(2nd edn.). John Wiley & Sons Inc., New York(1994)
2. U.S EPA Report, Handbook: Vitrification Technologies for Treatment of Hazardous and Radioactive Waste, Office of Research and Development, U. S. EPA(April 1992)
3. J. B. Mason, Vitrification Melters for Low-Level Radioactive and Mixed Wastes, VECTRA Technologies, Inc.(1995)
4. EPRI Report, EnviroGlass Vitrification Program Feasibility Study, EPRI TR-106079(1996)
5. Toxicity Characteristic Leaching Procedure(TCLP) Method 1311, 40CFR, Ch. 1, Pt.261, App. II.
6. C.M. Jantzen and N.E. Bibler, Product Consistency Tests(PCT) Method Version 3.0, WRSC-TR-90-539, Westinghouse Savannah River Laboratory, Aiken, SC(1989)
7. Jong-Kil Park and Myung-Jae Song, Feasibility Study on Vitrification of Low-and Intermediate-Level Radioactive Waste from Pressurized Water Reactor, Waste Management, vol. 18(3), pp. 157~167(1998)
8. 송명재 외, 저준위 방사성폐기물 유리화에 관한 타당성 연구, 전력연구원 기술보고서, KEPRI-94Z-17(1995)
9. 송명재 외, 중·저준위 방사물 유리화기술 개발(I): 중간보고서, 전력연구원 Technical Memo, TM.96NJ17.M1998.600(1998).