

## 미국 방사성 폐기물 처리 기술 동향



정철우 부경대학교 건축공학과 조교수

### 1. 서론

이 세상을 살아가는 사람 중에 세계 2차대전에 대해서 모르는 사람은 없을 것이다. 또한 미국을 비롯한 연합국을 최종 승리로 끌고 갈 수 있었던 가장 중요한 요소 중 하나는 일본 본토에 투하된 원자력 폭탄 두발의 위력이 아니라고 부인할 사람은 거의 없을 것이다. 미국은 2차 세계대전 중 원자력 폭탄 개발 및 제작이라는 목적을 위해서, 맨해튼(Manhattan) 프로젝트라고 명명된 극비 보안 프로그램을 실시하였다. 1940년 초에 시작된 이 프로젝트는 로스앨러모스 연구소 (Los Alamos National Laboratory), 오크리지 연구소 (Oak Ridge National Laboratory), 및 헨포드 사이트 (Hanford Site)로 알려진 각기 다른 세 군데의 시설에서 진행되었는데, 오크리지 연구소에서는 히로시마에 투하된 우라늄을 탄두로 사용한 원자력 폭탄을 개발하였으며, 나가사키에 투하된 플루토늄을 탄두로 사용한 원자력 폭탄은 플루토늄의 정제 및 농축은 헨포드 사이트에서 담당하였고, 폭탄의 개발 및 제작은 로스앨러모스 연구소에서 이루어졌다.

미국은 핵무기 개발 및 제조에 오랜 역사 및 기술을 가지고 있으며, 이런 이유로 방대한 양의 방사성 폐기물이 생성되게 되었다. 이 중 가장 많은 양의 폐기물이 저장된 장소는 맨해튼 프로젝트에서 플루토늄의 정제를 담당한, 미국 워싱턴주에 위치한 헨포드 사이트이다 (그림 1 참고). 헨포드 사이트에 존재하는 방사성폐기물들은 원래 두겹 정도로 싸인 두꺼운 스테인레스 철판로 만들어진 컨테이너에 보관되어 있었으나, 이후 컨테이너의 부식 및 열화과정으로 인해, 저장된 방사성 폐기물들이 콜럼비아 강으로 조금씩 유출되는 상

황이 발생하여, 큰 사회적 환경적 문제를 일으키게 되었고, 이로 인해 유출된 오염물질의 처리 및 고정화, 또한 저장된 폐기물들을 다른 재료를 이용해서 영구적으로 고정화시켜 주변의 환경으로 유출을 막을 수 있도록 고안된 방사성 폐기물의 개발의 필요성이 대두되게 되었다.

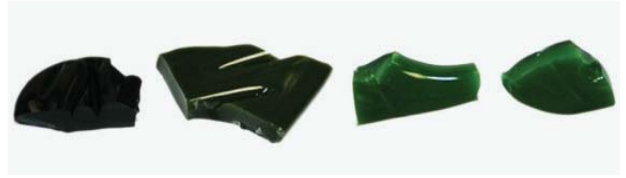


그림 1. 미국 워싱턴주 리치랜드시 북부 (North Richland, Washington State, United States)에 위치한 헨포드 사이트 간판. 이 간판 이후의 지역은 일반인들이 방문하지 못하고, 특별 허가가 주어질 경우에만 방문할 수 있다. 외국인 방문 불가 지역이다. (그림은 [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com) 에서 다운로드 받은 것임)

현재 미국에서 가장 활발하게 방사성 폐기물에 대해서 연구하는 곳은 사바나리버 연구소 (Savannah River National Laboratory), 미국 카톨릭 대학교 (Catholic University of America) 및 북서 태평양 연구소 (Pacific Northwest National Laboratory)이다. 특히 필자가 근무했던 북서 태평양 연구소 ([www.pnnl.gov](http://www.pnnl.gov) operated by Battelle Memorial Institute)는 헨포드 사이트의 연구를 진행하는 것을 돕고자 헨포드 사이트가 위치한 워싱턴 주 리치랜드(Richland)시에 설립되었고, 이후 미국 에너지부



1) Cs/Sr/Ln 및 Cs/Sr/Ln/TMPF 폐기물로 만들어진 유리 폐기물 형태



2) 철, 인산염계통 유리 폐기물 형태



3) 일반적인 고준위 유리 폐기물 형태



4) 핸포드의 저준위 유리폐기물형태

그림 2. 유리화 공정을 통해 만들어진 여러 종류의 폐기물 (그림은 <http://rmt.d.pnnl.gov/> 로부터 다운로드 되었음)

(Department of Energy) 산하 국립연구소로 승격하기 이전까지는 방사성 관련 연구를 주로 담당하던 곳이기 때문에, 방사성 물질에 대한 노하우가 어느 곳 보다도 더 뛰어난 곳이라 할 수 있겠다. 통상적으로 방사성 폐기물은 일반적으로 고준위 (High Level Waste) 및 저준위 (Low Activity Waste)로 구분하게 되는데, 이는 방사성 원소의 함량과 직결되어 있다. 북서 태평양 연구소에서는 주로 폐기물의 유리화 공정 (glass vitrification)에 관한 많은 연구를 진행하였으며 (그림 2 참조), 그러한 이유로, 핸포드 고준위 및 일정 부분의 저준위 폐기물은 유리화 반응을 이용한 유리결정체 내부에 방사성 원소를 고정화 시키는 것으로 이미 결정이 내려져 있는 상태이다. 한때 고준위 폐기물을 처리하기 위해 시멘트계 재료를 고려한 적도 있었다고 들었으나, 물과 결합하는 시멘트계 재료의 특성상 필수적으로 발생하는 모세관 공극의 존재 (투수성 및 확산의 문제로 인해 폐기물이 유출될 수 있음) 및 여타 정치적인 이유를 극복하지 못하고, 폐기되게 된 것으로 알고 있다. 반면 유리화 공정은 시멘트계 재료가 지니는 공극의 문제를 없애고, 방사성 물질을 유리구조 내부에 구조적으로 혼입시켜, 내구성의 향상을 가져온 측면은 있지만, 유리화 공정을 진행할 수 있는 공장의 설립 및 운영비용이 너무나 비싼 관계로, 지금까지도 계속적으로 저준위 폐기물에 한해서는 다른 재료를 이용해서 방사성 폐기물을 고정화 시키는 방안을 강구하고 있다.

또한, 방사성 폐기물의 유리화 공정은, 몇가지의 해결이 어려운 다른 문제점을 안고 있다. 높은 온도에서 반응시키는 유리화 공정의 특성 때문에, 방사성 원소 중, 휘발성이 강한

세슘 (Cesium), 요오드 (Iodine), 및 테크니시움 (Technetium)의 일정 부분은 공정상 증발하게 되어, 처리시설 내부에 응축되게 되는데, 이러한 부분들을 처리해서 모이는 용액 (공정상 2차적 폐기물이라 부른다) 또한 결과적으로 방사성을 띄게 되고, 그러한 이유로 인해 발생하는 2차적 폐기물 (secondary waste: 특히 요오드와 테크니시움 같은 방사성 원소들의 고정화)을 처리할 수 있는 기술의 필요성이 대두되게 되었다. 미국 에너지부에서는 이 두 방사성 원소 (테크니시움, 요오드)를 고정화시키기 위해, 간편한 공정 및 저비용을 요구하는 폐기물의 개발을 요구하였고, 이를 위해 북서 태평양 연구소에서 개발된 시멘트계 재료 및 포졸란계 재료인 시멘트, 플라이애쉬, 슬래그를 이용해서 생산하는 폐기물 (Cast Stone), 미국 카톨릭 대학에서 개발된 포졸란계 재료를 이용해 지오폴리머 (Geopolymer) 반응을 촉진시키는 폐기물 (DuraLith), 그리고 미국 알곤 연구소 (Argonne National Laboratory)에서 개발된 인산염의 반응을 이용한 마그네슘 (Magnesium) 인산염 (Phosphate) 복합체인 폐기물 (Ceramicrete)이 최종선정을 위해 복합적으로 경쟁하였고 (그림 3 참조), 최종적으로는 여러 전문 패널들의 의견을 통틀어 Cast Stone이 최종적으로 적합한 형태로 권고되어, 현재 핸포드 사이트의 유리화 공정에서 발생하는 2차적 방사성 폐기물은 Cast Stone으로 고정화시키는 것으로 결정되어 버렸다. 어떠한 이유들이 전문 패널들을 Cast Stone을 최종형태로 권고하게 되었는지는 완전히 알려져 있지 않지만, 필자는 그러한 이유들을 다음과 같이 보고 있다. 첫째로, 사바나리버 연구소에서 만드는 SaltStone의 성공 (CastStone의 사촌형제쯤으로 인식하면 됨), 상대적으로 가

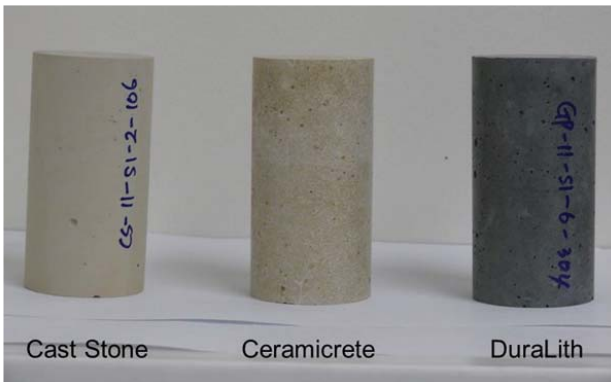


그림 3. 2차적 폐기물의 고정화에 사용된 폐기물 형태  
(그림은 <http://rmtd.pnnl.gov>에서 다운로드 되었음)

폐기물의 고정화라는 문제는 필수적으로 발생할 것이며, 이를 위한 대비가 충분히 이루어져야 한다고 본다. 화학적 다양성을 고려해서, 공정상의 충분한 워커빌리티 및 작업시간을 확보하고, 최대한 많은 양의 폐기물을 단위 용적에 고정화 시키는, 폐기물 형태의 개발이 필요하다. 우리나라는 미국과는 달리 고준위 폐기물의 양은 그리 많지 않는 것으로 알고 있다. 이러한 점을 생각해 볼 때에는, 유리화 공정 대신 시멘트계 건설 재료가 우리나라에서 생산되는 방사성 폐기물의 고정화에 사용되지 못할 이유는 없다고 개인적으로 생각한다.

· 정철우 e-mail : cwchung@pknu.ac.kr

장 잘 알려진 물질을 결합재료 사용하였다는 점, 저비용을 요구하는 생산성, 충분한 배합시간, 워커빌리티 및 응결시간의 확보가 가능했기 때문이 아닌가 판단하고 있다. 이러한 Cast Stone의 성공은 미국 에너지부가 지금 현재 유리화 공정으로 처리되지 못하는 (비용문제 때문에) 다량의 저준위 폐기물을 시멘트계 재료를 이용해 고정화 시키는 것을 하나의 대안으로 다시 고려하도록 만들었으며, 이를 위한 계획의 수립 및 연구의 과정은 북서태평양 연구소, 사바나리버 연구소 및 오크리지 연구소의 논의를 통해 이미 이루어졌고, 미국 에너지부의 최종 승인만 남겨두고 있는 상황이다. 또한, 복잡하고 다양한 방사성 폐기물의 화학적 특성을 고려해서, 어떻게 하면 화학적으로 결합된 안정된 결정체의 형태로 시멘트계 폐기물에서 존재하게 될 수 있는지에 대한 연구도 준비중인 것으로 알고 있다.

필자가 아는 바로는 현재 미국정부에서 시멘트계 폐기물을 원자력 에너지에서 생산된 (원자력 발전소의 가동시 생기는) 폐기물의 처리에 이용하고자 하는 계획은 없는 것으로 알고 있다. 지금 현재에는 유리화 공정만 고려중인 것으로 알고 있지만, 만약 저준위 폐기물 (핵무기생산으로부터 유래된)이 시멘트계 재료를 이용해서 성공적으로 고정화시킬 수 있다는 것이 판명된다면, 상대적으로 생산이 쉽고 저비용인 시멘트계 건설 재료가 원자력 에너지 폐기물의 고정화에 사용되지 말라는 법은 없어 보인다. 이러한 기술적 상황을 우리나라의 현 상황에 대입해 본다면, 많은 양의 전력 생산을 원자력 발전소에 의지하는 우리나라의 특성상, 원자력 에너지의 생산 시 발생하는 폐기물의 처리에 고심할 수밖에 없는 것이 현실인지라, 앞으로 우리나라에서도 원자력