

방사성폐기물의 저장 및 운반과정에서 기체발생 현상에 대한 예비평가

정재학

한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 구성동 19번지

radwaste@kins.re.kr

처분조건에서 방사성폐기물에 함유된 금속의 부식 및 셀룰로스의 미생물 분해는 기체 (수소, 메탄, 이산화탄소 등)의 발생을 유발할 수 있으며, 지금까지 처분안전성 측면에서 기체발생 현상에 대해 많은 연구가 국내외에서 수행된 바 있다. 특히 폭발성 또는 가연성 기체 (수소, 메탄 등)가 다량으로 발생될 경우에는 화재나 폭발에 의한 잠재적인 위험도가 증가될 수 있으며, 이는 처분안전성 뿐 아니라 저장 및 운반 안전성 측면에서도 관심을 가질 필요가 있다. 실제로 미국의 반월 처분장에서는 탈수·건조된 여과기 및 폐수지 포장물 인수 과정에서 기체의 누출 또는 기체발생으로 인한 용기의 변형현상이 확인된 사례가 보고된 바 있다.

상기 문제점과 관련하여 NRC는 일련의 Generic Communications를 발간하여 사업자의 조치를 촉구하였으며, 특히 Information Notice No. 84-72에서는 운반과정에서 요구되는 가연성기체 관련 요건을 "예상되는 반출기간의 2배 기간동안 표준상태 (STP)에서 포장물 내부 수소기체의 발생을 용기 빈공간의 부피비 5% 이내로 제한해야 한다"는 입장을 표명하였다. 동 문서에서 수소기체의 발생량을 공극부피의 5%로 제한함에 따른 기술적 배경은 제시되지 않았으나, 이는 수소기체의 폭발 가능성을 배제하기 위한 목적으로 설정된 것으로 추정된다.

이 논문에서는 지금까지 국내에서 심도 있게 논의되지 못했던 저장 및 운반과정에서 방사성폐기물 용기내부의 기체발생 가능성과 이에 따른 안전성 측면의 Implication을 예비적으로 고찰하였다. 우선 수소기체 발생 가능성이 상대적으로 큰 것으로 알려진 유기물질을 함유한 페이온교환수지 (IRN-150 HOH형 혼상탈염기) 시멘트 고화체와 파라핀으로 안정화된 농축폐액 폐기물 (이하 파라핀 폐기물)을 대상 폐기물로 선정하였다. 이들 폐기물은 발생된 후 30일이 경과된 시점에 용기 (DOT-17H 드럼; 내경 57.2 cm, 높이 84.46 cm)에 장입·밀봉 (뚜껑 고정장치 체결)되며, 용기 내부 (상부) 빈공간의 부피는 용기 내부 총부피의 10%로 가정하였다. 임시저장 및 운반에 소요되는 시간을 고려해, 밀봉된 용기는 일정기간이 경과된 후 처분장에 인수된다고 가정하였다. 개별 용기의 방사선원항은 1996년 National Academy Press가 발간한 NAS-NS-3119에 제시된 PWR 발생 폐기물의 평균값을 적용하였다 (단, TRU는 ^{239}Np 로 가정). 한편 문헌조사를 통해 각 폐기물 구성성분에 대한 GH_2 값 (흡수되는 100 eV의 방사선에너지 당 생성되는 H_2 분자의 개수)을 확보하였다. 표 1은 파라핀의 조성별 GH_2 값 조사결과를 보여주고 있다 (표 1 참조).

표 1. 파라핀 조성변화에 따른 GH_2 값

조사온도		-77℃	실온	55℃
파라핀의	$\text{C}_{20}\text{H}_{42}$	2.14	2.26	3.32
	$\text{C}_{21}\text{H}_{44}$	2.16	2.38	3.32
조성	$\text{C}_{23}\text{H}_{48}$	2.25	2.45	3.28
	$\text{C}_{24}\text{H}_{50}$	2.16	2.52	3.22

이 논문에서는 방사성폐기물의 기체발생 현상을 평가하기 위해 개발된 많은 모델들 중에서, Radcalc 4.0 (개발사: Duratek)을 이용해 용기내 폐기물의 방사분해에 의한 수소기체 발생량과 발생률을 시간 경과에 따라 평가하였으며, 그 결과를 그림 1에 도시하였다. 금속의 부식이나 셀룰로오스의 미생물 분해 메커니즘은 저장 및 운반조건 및 소요되는 시간을 고려해 반영하지 않았다.

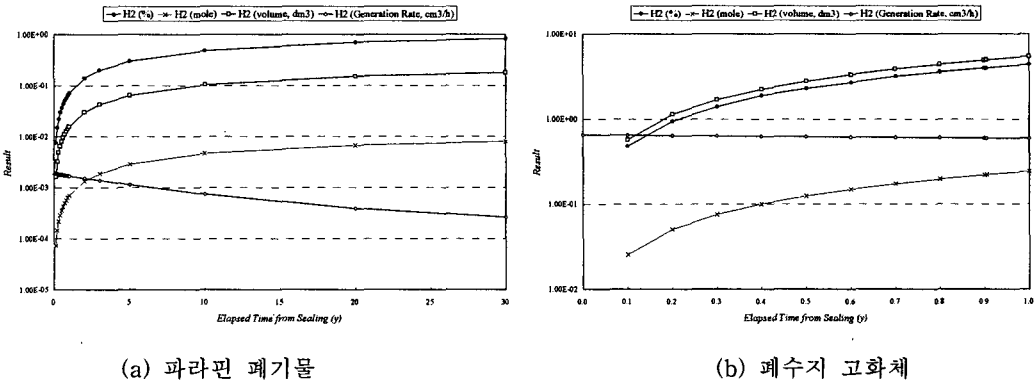


그림 1. 폐기물 드럼의 밀봉 후 시간 경과에 따른 수소기체 발생량 및 발생률 예측결과

파라핀 폐기물의 경우 주어진 조건에서 용기를 밀봉한 후 1년 내지 10년 동안 수소기체의 농도는 0.072% 내지 0.48% 범위로서 낮은 수준으로 유지될 것으로 예상되었다. 그러나 폐수지 고화체 내부의 수소농도는 밀봉 후 점차 증가한다고 약 0.9년이 경과한 시점에서 4%에 도달하는 것으로 평가되었다. 이 논문에서 적용한 폐수지와 시멘트의 G_{H_2} 값 (0.41)이 파라핀 폐기물의 G_{H_2} 값 (2.5) 보다 작음에도 불구하고 폐수지 고화체의 수소기체 발생률이 상대적으로 크게 평가된 이유는 폐수지 고화체 용기내의 총방사선원량 (1.4×10^{12} Bq)이 파라핀 폐기물의 방사선원량 (1.58×10^9)에 비해 상대적으로 크기 때문인 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 사용후핵연료 손상으로 인해 계통의 방사능 농도가 증가된 시기에 발생된 유기물질을 함유한 폐기물은 저장기간이 장기화될 경우 용기 내부에 수소기체가 유의할 만한 수준으로 누적될 가능성을 배제할 수 없음을 암시하고 있다.

한편 수소의 발생률이 같을 경우 용기 상부의 빈공간이 감소하거나 폐기물의 겉보기 밀도가 증가하면, 같은 시점에서 용기 내부의 수소농도가 상대적으로 높아지는 것으로 나타났다. 이는 용기 내부에 폐기물을 과도하게 압축·장입할 경우 저장·운반과정에서의 수소기체 농도관리 필요성이 증가함을 의미하는 것이다. 또한 문헌조사 과정에서 방사분해에 의한 물 (water)의 수소기체 발생률이 일반적인 무기물질에 비해 높은 수준 (G_{H_2} 값이 각각 1.6, 0.53 및 0.45)임을 확인하였으며, 이를 통해 습식폐기물의 경우 건식폐기물에 비해 수소기체 발생현상에 대한 고려 필요성이 상대적으로 큼을 알 수 있었다.

물론 국내 방사성폐기물의 실제 자료를 적용하지 못한 상태에서 수행된 이 논문의 예비 평가 결과만으로 저장·운반과정에서 수소기체 발생현상에 대한 추가적인 고려 필요성을 논의하는 것은 한계가 있다. 그러나 방사성폐기물 임시저장 기간이 장기화되고 있고 처분장 운영과 관련하여 향후 소외운반 수요가 증가될 것으로 예상되는 국내 상황을 고려할 때, 저장·운반 안전성 측면에서도 방사성폐기물 용기 내부의 가연성기체 발생·누적 가능성에 대한 보다 구체적인 검토가 필요한 시점이라고 판단한다.