

# 비계획적 방출에 의한 해외 원전 부지 지하수 오염 및 감시 기술현황 분석

손 욱, 이갑복, 양양희

한국수력원자력(주) 중앙연구원

2013년 4월 2일 접수 / 2013년 4월 11일 1차 수정 / 2013년 4월 15일 채택

원전 운영자는 규제 지침에 따른 계획적 방출 감시 및 관리를 통해 환경 및 주민의 방사선 위험도를 합리적으로 가능한 한 낮게 유지하여 왔다. 그러나 최근 미국을 중심으로 한 일부 해외 원전에서 발생한 지하수 오염의 원인이 비계획적 방출로 드러남에 따라 이에 대한 관심이 커지면서, 비계획적 방출은 현재 미국 원전산업계의 최대 이슈로 대두되었다. 본 논문은 미국 원전의 비계획적 방출에 의한 지하수 오염·감시 사례 및 이에 대한 미국 원전 산업계 및 규제기관의 대응 상황의 소개를 통하여 향후 국내 원전 부지 지하수 감시의 효과적인 운영에 도움을 주는 것을 목표로 하였다.

중심어: 비계획적 방출, 지하수, 삼중수소, 모니터링, 오염문

## 1. 서론

원자력발전소(이하 “원전”이라 한다)의 운영으로 생성된 방사성물질은 극히 일부이긴 하지만 법적인 허용 범위 내에서 원전 운영특성상 외부환경으로 방출된다. 이러한 방사성물질의 방출은 그 원전의 운영기술지침서에서 규정한 절차에 따라 이행되어야 하고, 규제치 이하의 농도로 사전에 정해진 배출경로를 통해 방출되어야 하며, 주기적인 감시를 통해 확인되어야 한다. 이를 계획방출(planned release)이라 한다. 원전 운영자는 이와 같이 계획방출을 통해 외부환경으로 방출된 방사성물질이 원전 주변 환경 및 주민에 미치는 영향을 평가하고, 방사선량 측면에서 합리적으로 달성 가능한 한 낮게(ALARA) 유지되는지 확인해야 한다.

최근 미국을 중심으로 한 해외 일부 해체 원전 및 가동 원전에서 계통·기기의 누설 및 작업자의 조작 실수 등에 의해 방사성물질이 비의도적으로 외부로 방출되어 지하수가 오염되는 사례가 발생하였다[1-4]. 비계획적 방출이라고 불리는 이러한 방출은 계획적 방출과는 달리 사전에 정해진 경로를 통해 방출되는 것이 아니기 때문에 감시 및 관리가 되지 않은 상태에서 방사성 물질이 환경에 도달되는 위험성을 내포하고 있으며 또한 운영기술지침서 상에서 허용되고 있지 않다. 따라서 원전 운영자는 이러한 비계획적 방출의 발생을 사전에 방지해야 하나 그 발생의 원인이 계통·기기의 열화 및 운전 조작 실수에 의한 경우가 많은 관계로 실제에 있어 완벽한 방지가 힘들

기 때문에 신속한 대응을 위한 비계획적 방출의 조기 감지가 중요하다.

미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Committee, NRC)에서는 2005년 일리노이주 Braidwood 원전 등에서 발생한 누설 사건을 계기로 미국내 모든 원전을 대상으로 비계획적 방출에 의한 지하수 오염사례를 조사하였다. 그 결과 일부 원전에서 비계획적 방출이 있었지만 그 방출량은 미미한 수준이어서 원전주변 주민에게 위해가 될 정도는 아니었다. 그러나 일반국민의 신뢰확보 측면에서 상시적으로 지하수를 감시하고 그 결과를 기록할 필요가 있다는 결론을 내렸다[1]. 이에 2007년에 미국의 원자력 산업계는 비계획적 방출의 조기 감지를 통한 지하수 보호를 위한 자발적인 내부지침[5]을 수립하고 이에 근거하여 전 원전에서 지하수 감시 프로그램을 실시하고 있다. 최근에는 미국 NRC가 원전의 건설단계를 포함한 전 단계에 걸쳐 발생하는 방사성폐기물의 양을 최소화하여 해체 시의 부지 내 잔류 방사능 규제요건을 충족시키는 것을 골자로 하는 신규 원전 대상의 새로운 규제지침(10CFR 20.1408 "Minimization of Contamination" 및 Regulatory Guide 4.21 "Minimization of Contamination and Radioactive Waste, Generation - Life Cycle Planning")을 내놓으면서 지하수 감시가 이의 중요한 수단으로 인식되게 되었다.

본 논문은 미국을 중심으로 한 해외 원전의 비계획적 방출에 의한 지하수 오염 및 감시 사례의 소개 및 관련 미국 원자력 규제기관의 조사 결과와 미국 원전 산업계의 대응방안의 검토를 통해 국내 원전 부지 지하수 감시의 효과적인 운영에 도움을 주는 것을 목표로 하였다.

교신저자 : 손 욱, wsohn@khnp.co.kr  
대전광역시 유성구 문지로 65

**Table 1.** Summary of Groundwater Contamination at Nuclear Power Plants [1,4,6,7].

Nuclear Power Plant	Reactor Type	Year of Release Discovery	Source of Release	Detected Radionuclide	Detected Max. <sup>3</sup> H Concentration (Bq L <sup>-1</sup> )	Notes
Big Rock Point	BWR	1984	-	<sup>3</sup> H, <sup>54</sup> M, <sup>137</sup> Cs, <sup>60</sup> Co, <sup>110m</sup> Ag	-	Non Operational
Braidwood	PWR	2005	Vacuum Breaker Valves on Circulating Water Blowdown Line	<sup>3</sup> H	9,250	
Byron		2006			141	
Brunswick	BWR	2007	Tank		33,300	
Callaway	PWR	2006	Vacuum Breaker Valves on Circulating Water Blowdown Line	<sup>3</sup> H, <sup>60</sup> Co, <sup>137</sup> Cs	7,400	
Catawba		2007	-	<sup>3</sup> H	1,554	
Connecticut Yankee	BWR	1996	RWST	<sup>3</sup> H, <sup>137</sup> Cs	5,291	Non Operational
Davis-Besse		1990*	-		888	
Dresden	BWR	2004,2006	Non-safety Related HPCI Suction and Return Line	<sup>3</sup> H	25,160	
Fitzpatrick		1991*	-		>740	
Ginna	PWR	-	-		740	
Hatch	BWR	1986	Fuel Transfer Canal		-	
Humboldt bay		1985	-		281	Non Operational
Indian Point	PWR	2005	SFP	<sup>3</sup> H, <sup>137</sup> Cs, <sup>90</sup> Sr, <sup>60</sup> Co	5,213	
Kewaunee		2006*	-		>740	
Millstone	BWR	-	-	<sup>3</sup> H	1,258	
Monticello		2009*	-		788	
Oconee	PWR	2010*	-		1,277	
Oyster Creek	BWR	1996*	Condenser Transfer System		153,920	
Palisades	PWR	-	-		1,280	
Palo Verde		2006	Rain Precipitation after Gaseous Release		155,400	
Paks	BWR	2003	RWST Pipe	<sup>3</sup> H, <sup>60</sup> Co	1,049	Hungary
Peach Botteom		-	-		4,551	
Perry	CANDU	2006	Feedwater	<sup>3</sup> H	2,220	
Pickering A		1997	Pit		190,920,000	Canada
Point Beach	PWR	1999*	Retention Pond	<sup>3</sup> H, <sup>137</sup> Cs	527	
Quad Cities	BWR	2008*	-		111,000	
River Bend		2008*	-		4,773	
San Onofre	PWR	2006*	-	<sup>3</sup> H	12,210	
Seabrook		1999	SFP		27,750	
Salem	BWR	2002	-		555,000	
St. Lucie		2000*	-		5,957	
Susquehanna	PWR	1995*	-	<sup>3</sup> H	>740	
Turkey Point		1979*	-		>740	
TMI	PWR	2006	Condenser Storage Tank		1,665	
Trojan		2005	-		11,248	Non Operational
Vogtle	BWR	1990s*	-	<sup>3</sup> H, <sup>137</sup> Cs, <sup>90</sup> Sr <sup>60</sup> Co	>740	
Vermont Yankee		2010	AOG Pipe Tunnel		92,500	
Waterford	PWR	1997*	-		>740	
Watts Bar		2002	Effluent Release Pipe & SFP Transfer Tube	<sup>3</sup> H, FPs	1,110	
Yankee Rowe	BWR	1999	IX pit & SFP	<sup>3</sup> H	1,665	Non Operational
Zion		2006	-			185

\*Indicates the year when the maximum tritium concentration was measured.

## 2. 해외 원전 부지 지하수 오염 및 감시 사례

미국에서는 원전 부지 내 지하수 오염은 2005년 이전에도 일부 원전에서 보고된 바 있으며 또한 1997년에 캐나다 Pickering 원전에서도 누설 사례가 보고되었음에도 불구하고 큰 관심을 받지 못 하였다. 그러다가 2005년에 발생한 Braidwood 원전 및 Indian Point 원전에서의 비계획적 방출에 의한 지하수 오염을 계기로 미국 원자력산업계가 이에 대한 대책을 강구하게 되었다. 그 주된 이유로, Braidwood 원전의 경우 사업자가 원전 주변 주민의 우물에서 삼중수소가 검출될 때까지 누설 발생의 보고 및 공개를 미루어 해당 주 정부로부터 고발을 당하는 등 일반 대중의 원전 운영자에 대한 신뢰가 떨어진 사실과, Indian Point 원전의 경우 해당 부지가 미국 수도인 워싱턴 D.C로부터 지리적으로 가까워 정치적인 관심의 대상이 되었다는 사실을 들 수 있다. 또한 2010년 1월에는 Vermont Yankee 원전에서 부지 내 지하배관(underground pipe)의 누설에 의해 지하수가 오염된 사실이 밝혀져 이전 주 청문회에서 그 가능성을 부정한 사실 때문에 발전소 최고 경영자가 위증죄로 해고되었을 뿐만 아니라 이를 이유로 해당 원전의 연장 운전 허가가 주 상원에서 부결되었으며 현재 이를 둘러싼 재판이 진행 중에 있다. 이를 계기로 비계획적 방출에 의한 지하수 오염 문제는 현재 미국 원자력산업계의 최대 이슈로 대두된 상태이다.

미국에서는 현재 65개의 원전에서 104기의 원자로가 가동 중에 있으며, 이 가운데 57%인 37개 원전(일리노이 주 Braidwood 원전, Byron 원전, Quad Cities 원전 및 Dresden 원전; 뉴욕 주 Indian Point 원전, Ginna 원전 및 FitzPatrick 원전; 애리조나 주 Palo Verde 원전; 미시간 주 Palisades 원전, 및 Cook 원전; 위스콘신 주 Kewaunee 원전, 및 Point Beach 원전; 펜실베이니아 주 Limerick 원전; 캘리포니아 주 San Onofre 원전 및 Diablo Canyon 원전; 오하이오 주 Perry 원전 및 Davis-Besse; 플로리다 주 St. Lucie 원전; 노스캐롤라이나 주 Brunswick 원전 및 McGuire 원전; 사우스캐롤라이나 주 Catawba 원전 및 Oconee 원전; 미주리 주 Callaway 원전; 테네시 주 Watts Bar 원전, Browns Ferry 원전 및 Sequoyah 원전; 뉴저지 주 Salem 원전 및 Oyster Creek 원전; 미네소타 주 Prairie Island 원전; 뉴햄프셔 주 Seabrook 원전; 매사추세츠 주 Vermont Yankee 원전; 네브래스카 주 Fort Calhoun 원전; 조지아 주 Hatch 원전; 코네티컷 주 Millstone 원전; 루이지애나 주 River Bend 원전; 미네소타 주 Monticello 원전)에서 비계획적 방출에 의한 지하수 오염이 발생하였다[1, 4, 6, 7]. 또한 가동 정지 또는 해체 상태의 18개 원전의 50%인 9개 원전(코네티컷 주 Connecticut Yankee 원전; 뉴욕 주 Long Island 원전; 버지니아 주 Lynchburg 원전; 캘리포니아 주 Humboldt Bay 원전; 메인 주 Main Yankee 원전; 매사추세츠 주 Yankee Rowe 원전, 오리건 주 Trojan 원전; 미시건 중 Big Rock Point 원전; 일리노이 주 Zion 원전)에서도 지하수 오염이 발견되었다[1]. 이들 중 관련

정보가 입수가 가능한 원전에서 발생한 지하수 오염 사례를 정리하면 표 1과 같다. 이하에서 대표적인 지하수 오염 및 감시 사례를 소개한다.

### 2.1 Braidwood 원전

2005년 3월 일리노이 주 환경보호국(Environmental Protection Agency)으로부터 원전 주변 주민의 우물에서 삼중수소가 검출됨을 통보 받은 지 8개월 후에 사업자(Exelon)는 부지 내 우물에서 높은 준위(최고 2,146 Bq/L)의 삼중수소를 검출하고 이 사실을 미국 NRC에 통보하였다. 지하수 삼중수소 오염 원인이 방사성 액체 폐기물을 방출하는 동안 이 방출에 사용된 순환수 인출라인의 11개 진공차단 밸브 중 5 개의 밸브에서 발생한 누설로 밝혀짐에 따라 사업자는 해당 라인을 통한 방출을 중단하고 모든 액체 방사성 폐기물을 임시 저장 탱크에 저장하였다. 조사에 따르면, 1996년에 약 946,353 L, 그리고 1998년과 2000년에는 약 11,356,236 L의 누설이 해당 밸브를 통해 발생하였으며, 이러한 대규모 누설 이외에도 1996년부터 2005년 사이에 소규모의 누설이 여러 차례 발생하였다[1].

이에 2005년부터 사업자는 오염 평가를 시작하였으며 이를 위해 환경시료를 분석하고 누설 라인을 따라 다수의 우물을 설치하였다. 원전 부지 외 일반 주민의 우물 한 곳에서 52~59 Bq L<sup>-1</sup>의 삼중수소가 측정되었으며 부지 내 우물에서는 8,325~9,250 Bq L<sup>-1</sup>의 삼중수소가 측정되었다. 부지 외 우물에서 측정된 삼중수소 농도로부터 계산된 피폭선량은 규제치(Appendix I to 10 CFR 50, 0.03 mSv y<sup>-1</sup>)보다 작은 값(0.003 mSv y<sup>-1</sup>)으로 나타나 주변 주민에게는 큰 위해가 없는 것으로 확인되었다[8]. 사업자는 주 정부와의 합의에 의해, 부지 밖 삼중수소 오염지역 내의 연못과 그 주변의 양수한 오염된 지하수를 정상 방출 경로를 통해 Kankakee 강으로 방출하였다[1].

### 2.2 Indian Point 원전

2005년 9월 1일, 사업자(Entergy)는 Indian Point 2호기 사용후연료저장조 남쪽 벽에 인접한 핵연료저장빌딩 선적구역 근처에서 굴착 작업 도중, 사용후연료저장조 남쪽 벽을 따라 습기가 찬 미세균열을 발견하였으며 2주 후에 두 번째 균열을 발견하였다. 이들 균열에서 채취한 시료에서 삼중수소가 검출되었다.

사업자는 이러한 누설에 의한 오염 정도를 평가하기 위해 미국 전력연구소(Electric Power Research Institute, EPRI)에서 2005년 9월에 발간한 지하수 감시 지침[9]에 따라 추가 우물을 포함한 지하수 감시 프로그램을 실시하여 지하수 오염범위(plume)를 조사하였다. 그 결과, 당초 누설이 발견되었던 2호기 사용후연료저장조 이외에 2호기 변압기 야드 내에서도 다른 누설이 발견되었으며, 더욱이 1974년에 가동이 정지된 1호기에서도 <sup>90</sup>Sr의 새로운 누설이 발견되었다. 이때 2호기 변압기 야드내 우물에서 측정된 삼중수소 농도는 1,587~5,213 Bq L<sup>-1</sup>이었다[10]. 한 가지 특기할 사항은 지하수에서 삼중수소 이외에 <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co 및 <sup>63</sup>Ni 등이 검출되었는데 이들 핵종은 여전

히 많은 양의 방사성 물질이 존재했던 1호기 사용후연료 저장조에서 유래된 것으로 추정되었다[1].

사업자는 오염 원인에 대한 조사를 진행하면서 수문학적 정보와 감시우물의 시료분석 결과에 근거하여 일부 오염된 지하수가 계획적 방출의 방출지점인 주변의 Hudson 강으로 유입된 것으로 판단하였다. Indian Point 원전에서는 발생한 누설 중 삼중수소에 의한 주변 주민 피폭선량은  $0.01 \text{ mSv y}^{-1}$  이하( $0.2 \text{ uSv y}^{-1}$ )인 것으로 추정되었다. 반면에  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우는 삼중수소보다는 높으나 여전히 Appendix I to 10 CFR 50의 값( $0.03 \text{ mSv y}^{-1}$ )보다 적은 것으로 나타났다[1].

### 2.3 Pickering 원전

1997년 7월, 사업자(Ontario Power Generation)는 Ontario 호숫가에 위치한 Pickering 원전 내 Upgrading Plant Pickering (UPP) 지역의 지하수에서 삼중수소가 검출된 사실을 캐나다 환경부에 통보하였다. 이에 정부는 사업자에게 오염원 및 원인을 규명할 것을 요구하였으며 사업자는 1998년부터 삼중수소 누설원을 찾기 위한 조사를 착수하여 1999년에 300 여개 이상의 우물을 포함하는 광범위한 지하수 관측망을 구축하고 운영하였다. 최종적으로 삼중수소로 오염된 것으로 확인된 지역은 UPP 지역 이외에 1호기 하수관 라인 차단구역(기반층 배수), Pickering A 지역의 조사후 연료저장조 그리고 남쪽 야드 지역의 빗물수조이었다. 사업자는 누설원인 저장조를 보수하고 수조를 폐쇄하는 조치를 취했으며 누설된 삼중수소의 영향 평가를 통해 원전 주변 주민에의 영향은 무시할 수준임을 확인했다. 2000년 1호기 인근 지하수에서 약  $10^7 \text{ Bq/L}$ 의 삼중수소가 검출되었으며 2006년 발전소 외곽 지역의 지하수 내 삼중수소 농도가  $10,000 \text{ Bq/L}$ 에서  $30,000 \text{ Bq/L}$ 로 증가하였다. 측정된 삼중수소 최고 농도는 감속재 정화실 내 수조에서 측정된  $191 \text{ MBq/L}$ 이었다.

### 2.4 Hatch 원전

1979년 및 1986년의 누설을 포함하여 발전소 전 수명 기간 동안 비계획적 유출이 반복적으로 발생한 Hatch 원전의 사업자(Southern Company)는 1978년의 누설을 계기로 발전소 건설 당시 운영허가 취득을 위해 설치되었던 기존의 우물 외에 추가적으로 17개의 우물을 설치하여 지하수 감시를 시작하였다. 외부 기관의 수문학적 조사의 결과, 적은 양의 삼중수소가 누설 발생 지점 주변의 지하수로 유입된 후 Altamaha 강으로 흘러간 것으로 밝혀졌다[1].

1986년 12월 3일, Hatch 원전에서 운전조작 실수로 인해 사용후연료저장조의 실(seal)에서 바람이 빠진 것이 원인이 되어 저장조에서 약  $535,636 \text{ L}$ 의 삼중수소가 두 원자로 건물 사이로 흘러나와 부지 내 다른 건물과 주위 환경으로 방출되는 사건이 발생하였다. 회수 작업을 통한 평가에 의하면  $7.4 \text{ GBq}$ 의 삼중수소와  $13.8 \text{ GBq}$ 의 핵분열 생성물이 포함된 약  $469,391 \text{ L}$ 의 오염수가 부지 내에 머물렀다가 Altamaha 강으로 흘러가는 늪으로 방출된 것으로 나타났다. 독립적으로 행해진 환경 조사에서 이 늪

을 통해 강으로 방출된 삼중수소 및 핵분열 생성물은 하류의 물 이용자 또는 주변 주민에게 위해를 주지 않는 것으로 결론이 났는데, 이는 2005년 한 해 동안 Altamaha 하류에서 채취된 지표수 시료의 삼중수소 농도가 최소검출가능방사능(MDA)에서  $10 \text{ Bq L}^{-1}$  사이의 값을 보였으며, 또한 수문학적 연구 결과에 의하면 깊은 심도의 지하수 대수층을 통해 물이 부지 경계부터  $366 \text{ m}$  되는 지점으로 이동하는 데 걸리는 약 200년 이상의 기간 동안 삼중수소는 방사능 붕괴하여 백그라운드 수준으로 떨어지는 것으로 나타났기 때문이다[1].

### 2.5 Yankee Rowe 원전

1961년에 상업운전을 시작하여 1991년에 해체를 위해 정지된 Yankee Rowe 원전에서는 1960년대 초반에 이온교환 피트(pit)에서 발생한 누설을 계기로 1980년대 말에서 1990년대 초에 걸쳐 34개의 지하수 감시 우물이 설치되었으며 초기  $266,400 \text{ Bq L}^{-1}$ 까지 상승했던 삼중수소 농도는 꾸준히 감소하였다. 이후 해체 및 운영허가 종료를 위한 작업도중, 추가로 사용후연료저장조 및 지하 액체방사성폐기물 배관의 누설 발생 가능성이 제기되었다. 이의 확인을 위해 1990년대에 설치된 우물에서 시료가 채취되었으며 필요한 경우 추가적으로 우물이 설치되었다.

2002년에 채취된 지하수 시료 분석결과, 지하수 내 존재하는 유일한 방사성 핵종은 삼중수소였으며 그 농도는  $222 \text{ Bq L}^{-1}$ 이었다. 또한 조사 결과에 따르면, 삼중수소 오염은 부지 밑에 위치한 불투수성의 빙하표석점토(glacial till)로 인한 제한된 지하수의 수직적 이동 때문에 얇은 깊이에만 국한되었으며 오염원은 매우 단순하게 강 방향으로 경사진 분포를 보였다. 이후 오염원 분포에 대한 상세한 정보를 얻기 위해 부지 전체를 커버하는 지점에 다양한 깊이를 갖는 우물 17개를 추가적으로 설치하였다. 이를 통해 삼중수소 오염원은 깊이에 따라 다음과 같이 세 개의 뚜렷한 수평적 분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 제1 삼중수소 오염원은 얇은 용빙(融氷) 대수층 내 분포하였으며 최대 삼중수소 농도 약  $130 \text{ Bq L}^{-1}$ 이고 그 방향은 지하수 유동 방향과 일치하였다. 제2 삼중수소 오염원은 점 더 깊은 샌드렌즈(Sand Lens)내 분포하였으며 최대 삼중수소 농도는 약  $1,665 \text{ Bq L}^{-1}$ 이고 그 방향은 북향이었다. 마지막으로 제 3의 삼중수소 오염원은 모암내 존재하였으며 최대 삼중수소 농도는 약  $185 \text{ Bq L}^{-1}$ 이었다 [11].

### 2.6 Vermont Yankee 원전

2009년 11월 17일에 미국 원전 산업계의 지하수 보호 지침[5]의 1 단계로 해당 부지에 설치된 우물 중 하나에서 2009년 4분기에 채취된 지하수에서 측정된 삼중수소 농도가  $26 \text{ Bq L}^{-1}$ 라는 사실을 해당 외부 분석 업체가 2010년 1월 6일에 사업자(Entergy)에게 통보하였다. 사업자는 분석 결과의 확인을 위해 같은 우물에서 재차 시료를 채취하여 분석한 결과,  $629 \text{ Bq L}^{-1}$ 의 삼중수소 농도가 측정되었다. 이를 계기로 사업자는 지하수 오염의 원인을 규명하고 지하수 유동 특성을 파악하기 위해 2010년 겨울

Table 2. Historical Unplanned Releases at St. Lucie Nuclear Power Plant [13].

Year	Amount Release (L)	Activity Released (Bq)	Tritium Conc. (Bq L <sup>-1</sup> )	Source	Cause
1977	25,196	1.21×10 <sup>11</sup>	2.70	Refueling Water Tank	Overfill
1993	208,731	2.42×10 <sup>11</sup>	-	Refueling Water Tank	Leak
1995	42,586	1.46×10 <sup>11</sup>	-	Primary Water Tank	Overfill
2000	379	5.55×10 <sup>5</sup>	-	Waste Monitoring Tank	Mal-operation
2001	314	8.55×10 <sup>5</sup>	-	Waste Monitoring Tank Hose	Leak
2002	57	-	0.83	Resin Dewatering Hose	Mal-operation
2004	9,085	1.78×10 <sup>10</sup>	-	Refueling Water Tank	Overfill
2005	286,347	5.27×10 <sup>11</sup>	-	Pipe Containing Radioactively Contaminated Water	Line Break

과 봄에 걸쳐 20개의 추가 우물을 설치하여 체계적인 조사를 시작하였다.

추가적으로 설치된 우물에서 측정된 삼중수소 농도는 최소검출가능방사능(MDA) 이하부터 81,400 Bq L<sup>-1</sup>까지의 값을 보였으며, 최대 삼중수소 농도는 Augmented Off Gas (AOG) 배관 터널에서 4.8 m 떨어진 지점에 위치한 우물에서 측정되었다. AOG 배관 터널은 지하 5.2 m에 위치한 방수 처리된 터널로써, 그 안으로 터빈 건물과 AOG 건물 간을 연결하는 process piping이 통과하고 있다. Boroscope와 원격조정장치를 이용한 조사를 통해 해당 터널 안에서 계통수가 새어 물이 고여 있는 것이 발견되어 삼중수소 누설 지점이 AOG 배관 터널임을 밝혀졌다.

확인된 지하수 오염 경위는 다음과 같다. AOG 배관 터널 내 process piping 중 하나인 배관의 곡관(曲管) 부하류 지점에 충격침식(impingement erosion)에 의해 작은 결함이 발생하였고, 이 결함을 통해 하루 최대 379 L의 삼중수소를 포함한 계통수가 AOG 배관 터널 바닥으로 흐르게 되었다. 이때 터널의 바닥 배수구가 건설 당시의 쓰레기에 의해 막혀 누설된 계통수가 정상적으로 배수되지 않고 터널 안에서 차기 시작했다. 해당 터널은 1978년의 공사로 인해 방수기능이 상실된 상태였기 때문에 터널 안에서 누설된 계통수가 차서 수위가 터널의 틈새부위에 이르게 되자 지하수로 유출되었으며 유출 발생 후 몇 개월이 지나서 누설 지점의 하류 지역에 위치한 우물에서 삼중수소가 검출되었다. 2010년 2월 15일에 AOG 배관 터널의 바닥 배수구를 막고 있던 건설 쓰레기가 제거되어 지하수로의 유출이 삼중수소 검출 6주 만에 효과적으로 차단되었다. 2010년 5월의 28차 핵연료재장전 보수정지 기간 동안에 AOG 건물 내 파이프를 원래 위치였던 터널 내부에서 지표 위로 이동시켜 육안 검사가 가능하도록 하였다.

최종적으로 23개 우물 중 일부 우물에서 삼중수소가 검출되었으며, 현재 측정되고 있는 삼중수소 농도 중 가장 높은 것은 부지 동쪽에 위치한 우물에서 측정된 약 18,500 Bq L<sup>-1</sup>이다. 초기에 81,400 Bq L<sup>-1</sup>까지 측정되었던

한 우물의 삼중수소 농도는 현재는 최소검출가능방사능(MDA) 수준까지 감소하였다. AOG 건물에서 약 91.4 m 떨어진 지점에 위치한 Connecticut 강의 제방을 따라 삼중수소 오염원이 약 76.2 m 분포하고 있으며 이 제방에 설치된 우물에서 채취된 시료의 최대 삼중수소 농도는 약 12,950 Bq L<sup>-1</sup>로 추정되었다. 그러나 부지 내의 응용수용 우물 및 Connecticut 강에서 채취한 어떠한 시료에서도 삼중수소는 검출되지 않았다. 또한 지하수 시료에서는 삼중수소 이외의 핵종은 검출되지 않았다. 다만 오염 지역 근방의 토양에서 미량의 <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr 및 <sup>60</sup>Co 등의 핵종이 검출되어 약 7.1 m<sup>3</sup>의 오염된 토양이 복구되었다. 한편 삼중수소 오염원의 중심부에 설치된 추출 우물(extraction well)을 통해 제거된 약 511,031 L의 오염된 지하수를 발전소 보충수(make-up)로 재사용하기 전까지 임시 저장시설에 저장하고 있다. 임시 저장시설에 저장된 오염수의 초기 삼중수소 농도는 37,000 Bq L<sup>-1</sup>를 약간 상회하였으나 현재는 555 Bq L<sup>-1</sup>까지 감소하였다[12].

### 2.7 Saint Lucie 원전

Saint Lucie 원전은 표 2에 요약 한 것처럼 1977년부터 현재까지 8건의 비계획적 방출 사례를 경험하였다[13].

1977년 4월 6일, 약 14,385 L의 방사능으로 오염된 계통수가 1호기의 핵연료재장전수탱크(Refueling Water Tank, RWT)에서 넘쳐 지표로 흘러들었으며 약 10,811 L의 오염수가 빗물 배수관(storm drain)으로 유입된 후 사업자 부지 내 집수 연못(settling basin)으로 흘러들었다. 이 유출(spill)로 인해 1.21×10<sup>11</sup> Bq의 방사능이 유출되었는데, 그 중 5.96×10<sup>10</sup> Bq는 집수 연못에 유입된 것으로 평가되었으며 이때 우물에서 측정된 삼중수소 농도는 3 Bq/L이었다. 1993년 6월 15일 1호기 RWT에서 지표로 약 208,731 L의 계통수가 누설된 것이 발견되었으며 이때 2.42×10<sup>11</sup> Bq의 삼중수소가 포함된 것으로 평가되었다. 1995년 8월 19일 약 42,586 L의 방사능으로 오염된 계통수가 원자로계통수탱크(Primary Water Tank, PWT)에서 넘쳐 지표와 빗물 배수관으로 흘러들어갔으며 이 때 누설된 방사능(1.46×10<sup>11</sup> Bq)의 대부분이 삼중수소였다.

2000년 7월 20일, 페인팅 작업자가 실수로 폐기물감시탱크에 구멍을 뚫어 약 379 L의 방사능으로 오염된 계통수가 지표로 누설되었으며 이때 누설된 삼중수소의 방사능은  $5.55 \times 10^5$  Bq이었다. 2001년 9월 20일, 폐기물감시탱크에 연결된 호스로부터 약 314 L의 방사능으로 오염된 계통수가 지표로 누설되었는데 거의 대부분이 삼중수소로 누설된 총 방사능은  $8.55 \times 10^8$  Bq이었다. 2002년 2월 8일 수지 dewatering hose가 바닥 배수와의 연결이 끊기면서 약 57 L의 오염수가 바닥으로 누설되었으며 이 중 약 19 L가 빗물 배수관에 유입되었다. 감마핵종은 검출되지 않았으며 오염수의 삼중수소 농도는 0.83 Bq/L이었다. 2004년 4월 13일, 약 9,085 L의 방사능 오염수가 RWT에서 지표로 넘쳤으며 빗물 배수관으로 유입되었다. 누설된 총 방사능은  $1.78 \times 10^{10}$  Bq이었으며 이 중 삼중수소의 방사능은  $3.45 \times 10^{10}$  Bq이었다. 2005년 9월 5일, discharge canal 준설 도중에 방사능 오염수가 담긴 파이프가 파괴되어 원자력교육센터 부근의 지역에 수천 리터의 폐기물이 방출되었다. 폐기물은 낮은 지점에 쌓였다가 빗물 배수구를 통해 정상 방출지점인 집수 연못으로 유입되었다. 이 폐기물에서  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  그리고  $^{137}\text{Cs}$  등이 검출되었다. 상기 방출의 방출량은 총 286,347 L이었으며 이때 같이 환경으로 방출된 방사능은  $5.27 \times 10^{11}$  Bq이었다.

사업자(Florida Power & Light Company)는 2007년에 NEI 07-07에 따라 지하수 감시 프로그램을 수립하고 실시하였다. 사업자는 우물을 감시 목적에 따라 sentinel well, monitoring well 그리고 site boundary well로 구분하여 운영하였다. 즉, sentinel well은 누설 위험성이 큰 계통 및 기기 바로 근처에 설치되어 해당 계통 및 기기의 누설을 조기에 감지하는 것을 목적으로 하며, monitoring well은 기존에 누설이 발생했던 시설 부근에 설치되어 기존 누설에 의한 지하수 오염의 확산 정도를 감시하는 것을 목적으로 하며, site boundary well은 부지 경계에 설치되어 오염된 지하수의 부지 외로의 이동 여부를 감시하는 것을 목적으로 한다.

2007년 이전에 다른 목적으로 설치된 감시 우물에서, 1977년 및 1993년의 누설로 인한 지하수 내 삼중수소의 최대 측정농도는 다음과 같다. 즉, 감시 우물 한 곳에서 2000년 4월에 채취된 지하수 시료에서  $5,957 \text{ Bq L}^{-1}$ , 감시 우물 한 곳에서 2000년 10월에 채취된 시료에서  $1,066 \text{ Bq L}^{-1}$ , 감시 우물 한 곳에서 1998년 1월에 채취된 시료에서  $4,066 \text{ Bq L}^{-1}$ , 그리고 감시 우물 한 곳에서 1998년 6월에 채취된 시료에서  $929 \text{ Bq L}^{-1}$ 의 최대 삼중수소 농도가 각각 측정되었다. 또한 1995년 누설과 관련해서는 감시 우물 한 곳에서 1998년 1월에 채취된 지하수 시료에서  $844 \text{ Bq L}^{-1}$ 의 최대 농도가 측정되었다.

이러한 누설 및 유출에 대해 여러 대응조치가 취해졌으며 그 중 가장 규모가 큰 것은 1호기 RWT 지역에 대한 복구 조치였다. 복구를 통해 약 42 톤의 토양이 1호기 RWT 주변 지표에서 제거되었으며 제거된 토양은 방사성 폐기물로서 처리되었다.

### 3. 미국 규제기관 및 원전 산업계 대응

2005년에 미국 Exelon 사 소유 Braidwood 원전에서 비계획적 방출에 의해 오염된 부지내 지하수에 의해 인근 주변 주민의 우물에서 삼중수소가 검출된 것과, 같은 회사 소유의 Byron 원전, Dresden 원전 및 Entergy 사 소유의 Indian Point 원전 등에서 비계획적 방출에 의한 지하수 오염이 확인된 것을 계기로, 2006년 3월 10일 NRC는 Liquid Radioactive Release Lessons Learned Task Force를 발족시켜 미국 전 원전을 대상으로 유사 사례에 대한 조사를 실시하였다. NRC는 같은 해 6월 10일에 Information Notice 2006-13 "Ground-Water Contamination due to Undetected Leakage of Radioactive Water"를 발행하여 원전 운영자에게 조사 결과를 일부 알리고, 2006년 9월 1일에 최종 조사보고서인 "Liquid Radioactive Release Lessons Learned Task Force Final Report 1"를 발행하였다. 본 보고서의 주요 결론으로는, 방출된 삼중수소에 의한 인적·환경적 영향은 무시 가능한 수준이었으며, 열화에 의한 잠재적 누설 가능 계통은 사용후연료저장조, 지중매설 배관, 유출물 방출 배관 밸브 및 재장전수탱크 등이었다는 것이었다. 또한 열화 이외에도 운전 조작 실수에 의해서도 비계획적 방출이 일어날 수 있기 때문에 비계획적 유출물에 의한 인적·환경적 영향 평가를 위해 지하수 감시가 바람직하며 또한 모든 비계획적 방출을 기록 할 것을 권고하고 있다.

현재 NRC는 원전 부지 지하수 내 삼중수소 농도에 대해 별도의 제한치를 갖고 있지 않으며 대신 미국 환경보호국의 음용수 내 삼중수소 제한치인  $740 \text{ Bq L}^{-1}$ 를 적용하고 있다. 즉 부지 내 지하수가 음용수로 사용될 경우는 삼중수소 농도가 EPA 제한치인  $740 \text{ Bq L}^{-1}$  이하가 되도록 규제하고 있으며 음용수로 사용되지 않을 경우에는  $1,110 \text{ Bq L}^{-1}$  이하가 되도록 규제하고 있다. 참고로 미국의 지하수 오염 사례에서 삼중수소 농도가  $740 \text{ Bq L}^{-1}$ 를 초과하는 오염 사례는 34건으로 파악되고 있다(표 1 참조).

미국 원전 산업계는 그 협의체인 Nuclear Energy Institute (NEI)를 중심으로 원전 부지 내 비계획적 방출을 예방하고 조기에 감지하기 위한 산업계의 자발적 지하수 보호 지침(Industry Ground Water Protection Initiative, NEI 07-07 5)을 2007년 8월에 수립하였다. NRC는 가동원전에 대해서 비계획적 방출에 대한 별도의 규제사항을 제정하지 않은 대신 원자력 산업계의 자발적인 지침인 NEI 07-07의 준수를 강력히 요구하고 있으며, 따라서 현재 미국의 전 원전은 NEI 07-07에 따라 지하수 감시를 실시하고 있다. NEI 07-07의 목적은 원전 운영의 투명성 및 안전성 제고를 위한 원전 운영자의 비계획적 방출에 대한 관리·감시 및 방출 발생 시 외부 이해단체 및 규제기관에의 통보 등에 관한 자율적인 규제방안을 수립하는 것으로, 다음과 같이 크게 3개의 내용으로 구성되어 있다 [5].

- 지하수 보호 프로그램(groundwater protection program): 지하수로 유입 가능한 비계획적 유출 상황에 대한 관리능력의 개선
- 소통(communication): 지역사회, 주 정부, 규제기관 및 일반대중과의 원활한 소통을 통해 원자력 산업계의 방사선 안전 확보 및 환경보호 수행에 대한 신뢰 및 확신 확보
- 지하수 보호 프로그램 관리(program oversight): 지하수 보호 프로그램의 효과적인 수행을 위한 프로그램의 관리

특히, 상기의 지하수 보호 프로그램은 다음과 같은 내용으로 구성된다.

- Site hydrology and geology: 현재 부지 조건에 근거한 지하수의 지배적인 구배 결정
- Site risk assessment: 방사능 물질을 포함하고 그것이 지하수로 이동될 충분한 가능성이 있는 모든 Systems, Structures or Components (SSCs) 및 작업 역무에 대한 지하수 오염 위험도 평가
- On-site groundwater monitoring: 지하수로의 방사능 유출의 적시 감지를 위한 부지내 지하수 감시 프로그램
- Remediation process: 방사능 물질의 부지 밖 이동 방지 및 해체에의 영향 최소화를 위한 복구 절차 수립
- Record keeping: 누설 및 복구 수행에 대한 기록 유지

NEI가 지하수 보호를 위한 전체적인 지침을 수립하고 있다면, EPRI와 몇몇 전문기관은 지하수 삼중수소 오염 감시의 실질적이고 기술적인 내용을 담당하고 있다. EPRI는 1995년 5월에 발간된 "Groundwater Monitoring Guidance for Nuclear Power Plants 9"을 통해, 부지내 지하수 중 핵종, 특히 삼중수소 검출 목적과 지하수 모니터링 프로그램 계획 및 실시를 위한 틀을 제공하였으며, 최종적으로 산업계에서 적용 가능한 지하수 보호 프로그램 기술지침인 "Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants [14]"를 마련하여 미국 원전에서 적용되고 있다. 또한 최근에는 원전 해체를 고려한 오염된 지하수 및 토양의 복구에 관한 기술지침서인 "Groundwater and Soil Remediation Guidelines for Nuclear Power Plants: Public Edition [15]"을 발간한 바 있다.

#### 4. 결론

미국의 경우, 전체 원전의 반 이상에서 비계획적 방출에 의한 지하수 오염이 발생할 정도로 비계획적 방출은 그 발생 빈도가 상대적으로 높았다. 또한 이들 지하수 오염 사례를 누설별로 조사한 그림 1에서, 주요 누설원은 지하배관(35%), 사용후연료저장조(24%) 그리고 탱크(12%)로 이들 3개의 누설원이 전체의 71%를 차지하고 있

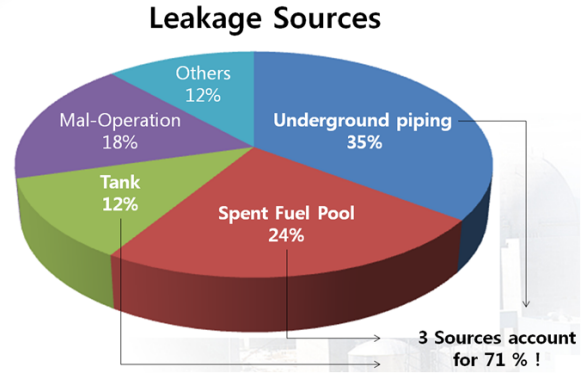


Fig. 1. Leakage sources of groundwater contamination at U.S. nuclear power plant[2].

음을 알 수 있다. 특히 최근에는 현재 가동 및 해체 중인 원전의 지하배관이 건설 당시 비계획적 방출에 대한 고려가 되지 않은 관계로 누설에 상대적으로 취약하다는 점이 새롭게 인식되면서 지하배관 건전성에 대한 조사 및 연구 활동이 매우 활발하게 진행 중에 있다. 또한 실제 각 원전에서 발생한 지하수 오염 사례는 매우 큰 스펙트럼을 갖는 것을 확인할 수 있었는데, 그 예로, Hatch 원전의 경우는 다량의 오염수가 짧은 기간 동안 지하수에 유출된 반면 Indian Point 원전의 경우 적은 양의 오염수가 장기간에 걸쳐 유출되면서 지하수를 오염시켰다.

다만 특기할 사항은, 모든 비계획적 방출에서 삼중수소가 검출되었으며, 방출이 일어난 모든 사례에서 일부 소수의 원전을 제외하고는 오염된 지하수가 외부로 이동되지 않았던 만큼 원전 주변 주민이 받게 되는 방사성 위험도는 매우 낮았다는 사실이다. 실제로 오염된 지하수가 부지 외로 이동된 Braidwood 원전의 경우에도 주민의 방사성 위험은 규제치 이하로 평가되어 피폭선량측면에서 문제가 되지 않았다. 또한 원전 종사자의 피폭경로가 될 수 있는 부지 내 음용수용 우물에서도 삼중수소는 검출되지 않아 비계획적 방출에 의한 방사성 위험도는 피폭선량측면에서 문제가 되지 않음을 확인할 수 있었다.

그 특성상, 원전 부지 지하수 감시는 해당 부지의 수리 및 지질학적 특성 등의 원전 부지 특성에 크게 좌우되는 측면이 있다. 따라서 국내 원전에서 지하수 감시를 효과적으로 수행하기 위해서는 지하수 감시기술 뿐만 아니라 국내 원전 부지 특성에 대한 연구 및 조사도 필요할 것으로 생각된다. 또한, 기술된 해외 사례에서 확인된 바와 같이 비계획적 방출에 의한 주민의 피해는 매우 낮아 무시할 수준임을 감안할 때, 지하수 감시는 원전 설비의 건전성 유지 확인 측면의 중요성이 더 크다고 할 수 있다. 즉, 비계획적 방출의 주원인인 설비 열화의 조기 감지 수단으로 지하수 감시가 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. Richards S, Frye T, Shepherd J, Nicholson T, Kuzo G, Shoop U, Sakai S, Allen R. Liquid radioactive release lessons learned task force final report. Washington D.C U.S. 2006.
2. 손순환, 최원학, 이갑복, 손옥, 강금석, 양양희, 이두호, 고영우, 장영식, 김윤식, 윤정균, 김규원, 이수진. 원전 부지 지하수 모니터링 방안 연구. 대전 한국. 2010.
3. 손옥, 손순환. 해외지하수오염사례조사. 대전 한국. 2010.
4. 현승규, 이희택, 심택모, 진소범. 원전부지 내 액체방사성물질 누출감시에 관한 규제지침(안) 개발. KINS/RR-736. 대전 한국. 2009.
5. Nuclear Energy Institute. Industry ground water protection initiative-Final guidance document. NEI 07-07. Washington D.C U.S. 2007.
6. Urfer B. Groundwater contamination from nuclear reactors goes nationwide. Nukewatch Quarterly. U.S. 2008.
7. Nuclear Regulatory Commission. List of historical leaks and spills at U.S. Commercial Nuclear Power Plants. Washington D.C U.S. 2010.
8. Excelon. Braidwood station groundwater tritium investigation. [pbadupws.nrc.gov/docs/ML1024/ML102450690.pdf](http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1024/ML102450690.pdf).
9. Bushart S, Scott D, Keefer D, Darois M, Darois E, Cardarelli R. Groundwater monitoring guidance for nuclear power plant. 1011730. Palo Alto U.S. 2005.
10. [Http://greennuclearbutterfly.blogspot.com/2007\\_10\\_14\\_archive.html](http://greennuclearbutterfly.blogspot.com/2007_10_14_archive.html).
11. Terrell MS, McGee D. Decommissioning lessons learned at Yankee Rowe. WM '01 Conference. 2001.
12. Heathwaite R. INPO OE CR-VTY-2010-00069. Personal Communication, 2010.
13. Stall JA. RE: Groundwater protection-Data collection questionnaire. L-2006-180. U.S. 2006.
14. Kim K, Chardarelli R, Cumming E, Darois E, Scott D. Groundwater protection guidelines for nuclear power plants. 1015118. Palo Alto U.S. 2007.
15. Kim K, McGrath R. Groundwater and soil remediation guidelines for nuclear power plants: Public edition. 1023464. Palo Alto U.S. 2011.

## Review of Contamination and Monitoring of On-site Groundwater at Foreign Nuclear Power Plants due to Unplanned Release

Wook Sohn, Gab-bok Lee, and Yang-hee Yang

Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. LTD.

**Abstract** - Utilities have tried to ensure that radiological hazards to the environment and residents are kept as low as reasonably achievable by monitoring and controlling planned releases. However, since groundwater contamination was reported to occur due to unplanned releases mostly in the United States nuclear power plants, the interest of the stakeholders has increased to a point where it is now one of the most important issues in the United States nuclear power industry. This paper aims to help to implement an effective on-site groundwater monitoring program at domestic nuclear power plants by briefing the experiences of the United States nuclear power plants on groundwater contaminations and groundwater monitoring, and responses of the United States nuclear industry and regulator body for them.

**Keywords** : Unplanned release, Groundwater, Tritium, Monitoring, Plume