

해외원전 비계획적 방출 및 한국의 환경감시 현황 분석

박수찬¹ · 함박눈¹ · 권장순² · 조동건² · 정지혜² · 권만재^{1*}

¹고려대학교 지구환경과학과

²한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부

Review of Unplanned Release at Foreign Nuclear Power Plants and Radiological Monitoring at Korean Power Plants

Soo-Chan Park¹ · Baknoon Ham¹ · Jang-Soon Kwon² · Dong-Keun Cho²
Jihye Jeong · Man Jae Kwon^{1*}

¹Department of Earth and Environment Sciences, Korea University

²Radioactive Waste Disposal Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

ABSTRACT

Despite of safety issues related to radiological hazards, 31 countries around the world are operating more than 450 nuclear power plants (NPPs). To operate NPPs safely, safety regulations from radiation protection organizations were developed and adopted in many countries. However, many cases of radionuclide releases at foreign NPPs have been reported. Almost all commercial NPPs routinely release radioactive materials to the surrounding environments as liquid and gas phases under control. These releases are called ‘planned releases’ which are planned, regularly monitored, and well documented. Meanwhile, the releases focused in this review, called ‘unplanned releases’, are neither planned nor monitored by regulatory and/or protection organizations. NPPs are generally composed of various structures, systems and components (SSCs) for safety. Among them, the SSCs near reactors are closely related to safety of NPPs, and typically fabricated to comply with stringent requirements. However, some non-safety related SSCs such as underground pipes may be constructed only according to commercial standards, causing the leakage of radioactive fluids usually containing tritium (³H). This paper discusses SSCs of NPPs and introduces several cases of unplanned releases at foreign NPPs. The current regulation on the environmental radiological surveillance and assessment around the NPPs in South Korea are also examined.

Key words : Nuclear facility, Unplanned release, Radioactive, Monitoring, Soil and groundwater

1. 서 론

원자력발전소가 주변 환경에 미치는 다양한 영향은 전 세계적으로 주요 사회적 이슈 중 하나로써 원자력발전소의 건설이 시작된 이후 지속적으로 논의가 이루어지고 있다. 특히 후쿠시마 원전사고를 포함한 자연재해 및 인공 재해 사건 이후로 많은 사람들이 방사능에 대해 관심을 갖게 되면서 원자력발전소로부터 주변 환경에 대한 방사능 유출에 대한 우려도 증가하고 있다.

원자력발전소에서는 발전의 원료로 우라늄(²³⁵U)을 사용

한다. 우라늄(²³⁵U)의 연쇄반응의 결과로 방사선(radiation)과 딸핵종(daughter radionuclides)이 생성되며, 딸핵종 또한 붕괴하면서 방사선을 배출할 수 있다. 따라서 원자력 발전소에서는 방사성핵종의 격납이 매우 중요하며 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency - IAEA)와 국제방사선방어위원회(International Commission on Radiological Protection - ICRP) 등의 단체에서 방사선 방호와 관련된 가이드를 제시하고 있다(Gonzalez et al., 2007; Valentin, 2007; Amano, Y., 2011).

원자력발전소에서 방사성물질이 외부로 배출되는 것은

*Corresponding author : manjaekwon@korea.ac.kr

Received : 2018. 6. 3 Reviewed : 2018. 7. 20 Accepted : 2018. 7. 28

Discussion until : 2018. 10. 31

배출되는 형태에 따라 원전 내부에서 방사성물질이 외부로 배출되는 충칭을 ‘방출(release)’, 계통 및 기기 등에 발생한 틈새와 같은 결함에 의해 방사성물질이 외부로 배출되는 것을 ‘누설(leak)’ 그리고 일시적 비정상운전 및 조작에 의해 방사성물질이 외부로의 배출되는 것을 ‘유출(spill)’이라고 정의한다. 일반적으로 상업적으로 운영되는 원자력발전소에서는 사실상 운영 중에 기체 또는 액체의 형태로 방사성핵종이 배출되며, 이러한 기체 또는 액체는 주변 환경에 영향이 최소화될 수 있도록 관리되어 배출되는데(Nicholson et al., 2006; Sohn et al., 2011), 이를 계획적 방출(planned release)이라고 한다. 그러나, 2005년 미국 일리노이 주의 Braidwood 원전 주변 우물에서 방사성핵종 중 삼중수소(^3H)가 검출되면서 관리되어 배출되는 방사성 물질 이외의 누출(비계획적 방출, unplanned release)에 대한 조사가 시작되었다. 미국에서는 전체 원전의 반 이상에서 비계획적 방출에 의한 지하수 오염이 발생할 정도로 빈도가 높은 것으로 보고되었다(Sohn et al., 2013).

본 논문에서는 원자력발전소의 시스템, 구조, 구성요소에 대해 살펴보고, 현재까지 보고된 원전부지 비계획적 방출에 대한 해외사례를 조사하여 방사성물질의 비계획적 방출에 대한 취약지점 및 원인을 분석하였다. 또한, 국내 원자력발전소 주변에서의 환경방사능 감시 현황과 그 결

과를 비교하고, 향후 원자력발전소 주변 토양 및 지하수를 대상으로 한 보다 정밀하고 체계적인 중장기 모니터링의 필요성에 대해 논하고자 한다.

2. 원자력발전소의 구조 및 방사성핵종의 형성

원자력발전소는 기본적으로 핵연료에서 발생한 열을 전달하는 매개체로 물을 사용하며, 핵연료가 존재하는 원자로(Reactor)와 핵연료에서 얻은 열을 증기발생기로 전달해주는 1차계통(Reactor coolant system), 증기발생기에서 생성된 증기를 터빈으로 이어주고 터빈을 돌린 증기를 액상으로 바꾸어 다시 증기발생기로 보내주는 2차계통(Secondary system)으로 크게 구성된다(Fig. 1).

한편, 원자력발전은 사용하는 원자로의 종류에 따라 Pressurized Water Reactor(PWR), Boiling Water Reactor(BWR) 그리고 Pressurized Heavy Water Reactor(PHWR)로 나눌 수 있다(Fig. 2). 이때, CANDU는 중수를 이용하는 가압중수로(PHWR) 원자로 종류 중 하나이다. 각각의 원자로는 원자로에서 발생한 열을 터빈까지 전달해주는 매개체인 냉각재를 중수(Heavy water) 또는 경수(Light water)를 쓰는지, 그리고 원자로와 연결되어 있는 1차계통에서 비등의 유무에 따라 나누어진다. BWR의 경우에는 원자로에서 물의 비등이 일어나기 때문에 1차계

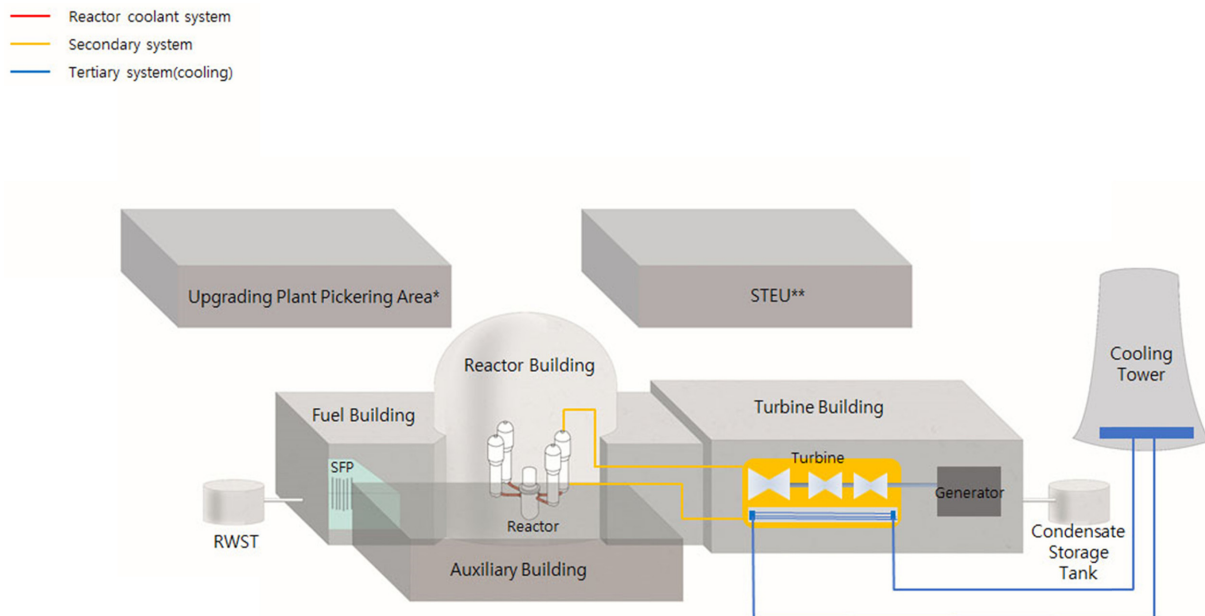


Fig. 1. Simplified diagram of structures, systems, and components of Pressurized Water Reactor (PWR). Refueling Water Storage Tank (RWST) stores borated water supplied to reactor to cool the reactor when emergency happens. Spent Fuel Pool (SFP) stores spent fuel assemblies to remove the heat generated. Upgrading Plant Pickering Area* is a facility constructed in PN. STEU** represents Uranium-bearing Effluent Treatment Station in Tricastin site in France.

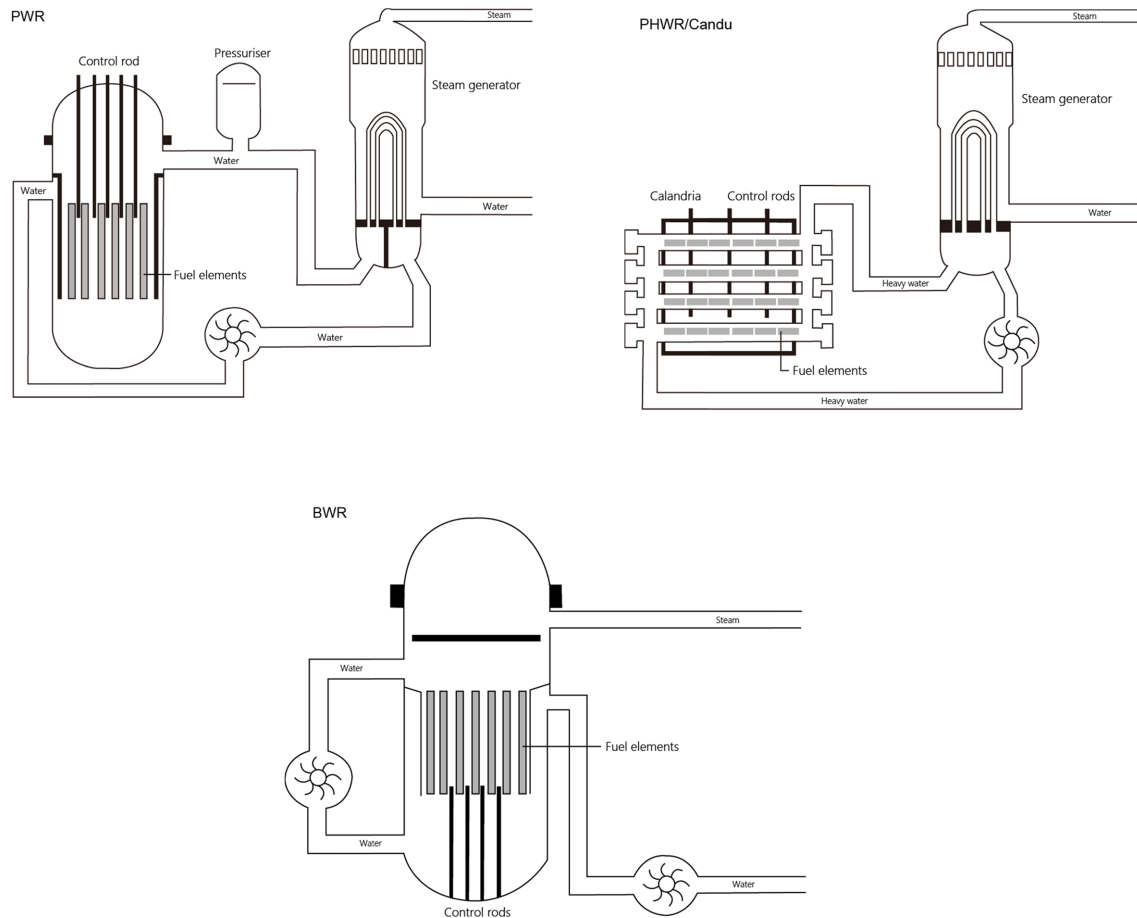


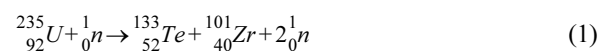
Fig. 2. Schematic diagrams of different reactor types [Reproduced from the website (<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>)].

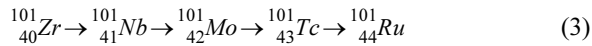
통과 2차계통으로 나누어지지 않는다(Table 1)(Robertson, 1978; US Nuclear Regulatory Commission, 2007a, b).

원자력발전소는 크게 격납건물(Containment/Reactor Building), 터빈건물(Turbine Building), 복합건물(Auxiliary Building), 그리고 연료건물(Fuel Building)으로 구성된다(Fig. 1). 격납건물에는 원자로와 증기발생기, 그리고 1차계통이 존재하는데 원자로에는 핵분열의 연쇄반응이 일어나는 장소로서 핵연료봉이 고정될 수 있도록 장치가 구성되어 있다. 원자로에는 핵분열이 일어나는 장소이기 때문에 중성자와 방사선에 대한 차폐가 되어 있으며, 경수 또는 중수로 둘러싸여 있다. 원자로와 증기발생기를 이어주는 계통을 1차계통이라고 하고 원자로에서 발생한 열을 전달받은 경수 또는 중수는 증기발생기로 이동한다. 터빈건물에는 전기를 발생시키는 터빈과 증기발생기와 터빈을 이어주는 2차계통, 그리고 터빈을 돌리고 난 증기를 다시 액상으로 바꿔주는 3차(냉각)계통이 존재한다(Fig. 1). 복합건물에는 원자력발전소의 안전과 관계된 설비가 설치되는

데 비상상황이 발생할 경우 원자로에서 발생하는 열을 제어하기 위한 장치들이 필요하기 때문에 이와 관련된 장비가 구비되어 있다. 마지막으로 연료건물에는 사용후연료 저장조(Spent Fuel Pool-SFP)가 설치되어 있고, 사용하지 않은 연료가 저장될 수 있는 공간이 내부에 존재한다.

원자력발전소에서 만일 방사성핵종의 유출이 발생하였다면 유출될 수 있는 방사성핵종의 생성은 핵연료에서부터 시작된다. 핵연료로 사용하는 우라늄(^{235}U)의 핵분열 연쇄반응으로 인해 방사성핵종이 생성되며(예: 식 (1)-(3)), 원자력발전소에서 사용하는 핵연료는 사용 중 손상이 발생하지 않도록 기본적으로 엄격한 기준에 맞추어 설계된다. 하지만 핵연료에서 손상이 발생하는 경우 방사성핵종이 핵연료로부터 누설이 되어 1차계통, 2차계통으로 유출될 수 있는 가능성이 있다.





삼중수소는 핵연료 주변에서의 중성자의 반응에 의해 생성될 수 있다. 가압경수로에서는 냉각재와 제어봉집합체 내에 있는 붕소(B), 리튬(Li), 중수소(^2H)와 중성자의 반응에 의해 생성될 수 있고, 가압중수로에서는 감속재/냉각재로 사용되는 중수의 중수소와 중성자가 반응하여 생성될 수 있다(Korean Electric Power Corporation, 1992; Korea Hydro & Nuclear Power, Publication Year Unknown). 삼중수소는 미국에서의 사례의 분석 결과 비계획적 방출에서 공통적으로 방출되는 핵종이며, 원자로의 형태에 무관하게 비계획적 방출이 발생하는 것으로 보고되었다. 삼중수소는 베타선을 방출하며, 베타선은 공기 중 투과 거리가 약 $6\text{ }\mu\text{m}$ 로 일반적인 세포의 크기인 $7\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 보다 짧기 때문에 외부피폭에는 거의 기여하지 않는다. 하지만 흡입 또는 섭취로 인체 내부에 들어올 경우 체내에 흡수되어 내부피폭을 일으킬 수 있다 (The Korean Association for Radiation Protection, 2016).

3. 해외원전 비계획적 방출 사례

미국에서는 2005년 일리노이 주의 Braidwood 원자력발

전소 주변의 우물에서 삼중수소가 검출된 것을 계기로 미국 내의 모든 원자력발전소에서의 비계획적 방출에 대한 조사가 실시되었고, 그 조사결과를 포함하여 해외 비계획적 방출 사례를 Fig. 3에 원전 구성 계통별로 요약 도시하고, 대표 사례에 대해 아래에 기술하였다 (Nicholson et al., 2006; US Nuclear Regulatory Commission, 2006; Areva, N.P., 2012; Sohn et al., 2013).

3.1. Braidwood

2005년 3월, 일리노이 주 환경보호국(Environment Protection Agency)은 원전 사업자에게 인근 우물에서 삼중수소가 검출되었음을 통보하였다. 동년 11월, 원전 사업자는 Braidwood 원전 주변 천부 지하수 감시 관정 내 삼중수소의 검출 사실을 US Nuclear Regulatory Commission (NRC)에게 보고하였다. 당시 원전 사업자는 이 유출이 순환수 인출 라인에 존재하는 진공 밸브(Vacuum breaker valves along the circulation water blowdown line)로부터 기인한 것으로 결론을 도출하고, 이 라인은 원자력발전소에서 '계획적 방출'이 배출되는 통로이기도 하기 때문에 사업자는 방사성물질의 배출을 즉시 중지하였다. Braidwood 원전에는 순환수 인출 라인에 11개의 진공밸브가 존재했고, 1996년, 1998년, 2000년에 이 중 3개의

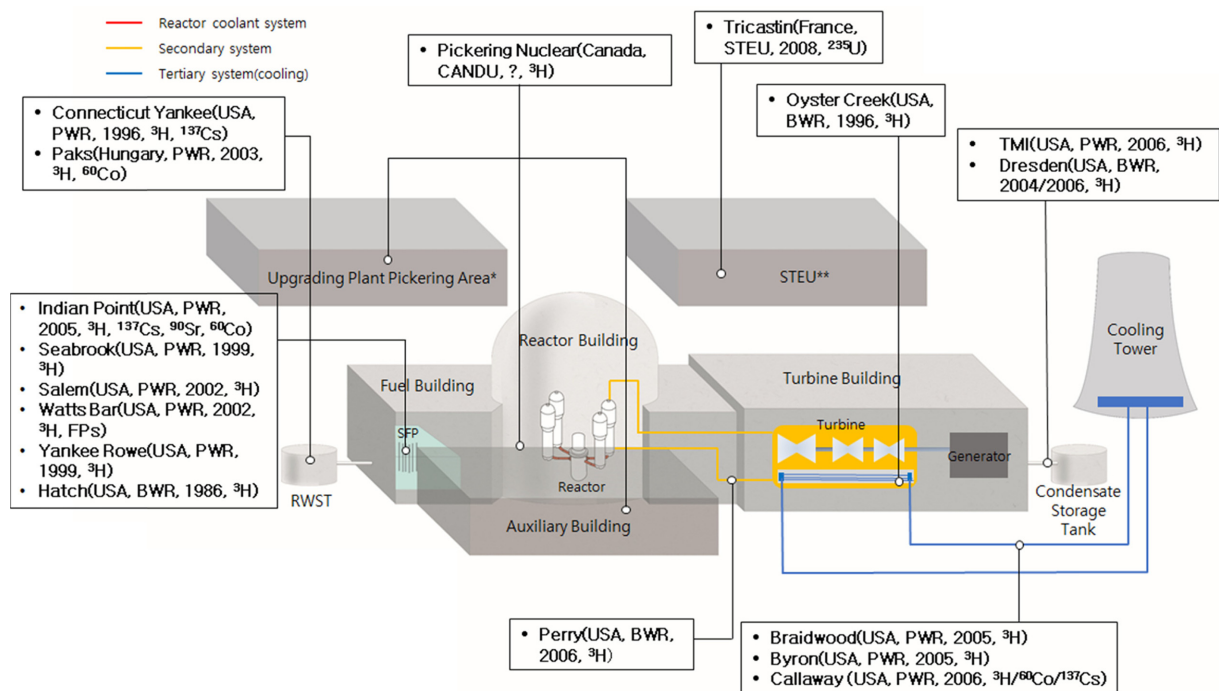


Fig. 3. Case events of unplanned releases from various spots of nuclear power plants. Location, reactor types, event year and detected radionuclides are shown in the boxes. The event year in Pickering Nuclear cases is unknown (Canadian Nuclear Safety Commission 2014).

밸브에서 방사성물질이 비계획적으로 방출되었으며, 2005년까지도 그 방출이 확인되었다. 이에 따라 해당 원전 사업자는 2005년부터 2006년 사이에 식수로 활용되는 원전 주변 해당 우물 근처에서 시료를 채취하여 분석을 실시하였고, 그 결과 US EPA 기준에 훨씬 미치지 못하는 삼중수소의 양이 분석되었다.

3.2. Byron

2006년 2월, 해당원전 사업자(Exelon)는 NRC에 Byron 원전의 진공 밸브(Vacuum breaker valve vaults)에서 삼중수소가 검출되었다고 보고하였다. 이 배관은 Braidwood에서와 같이 계획적 방출의 주요 통로이기도 하기 때문에 사업자는 방사성물질의 방출을 중지하였고, 추가적으로 감시관정을 설치하여 진공밸브 6개 중 2개의 밸브에서 삼중수소 누출 사실을 확인하였다.

3.3. Callaway

2006년 6월, Union Electric Company(해당 원전사업자)는 NRC에 파이프라인(Blowdown discharge pipeline)을 통한 높은 농도의 삼중수소 검출사실을 보고하였다. 상세 조사결과, 방사성물질의 유출이 파이프의 밸브(Air-relief valves)의 열화(degradation)에서 기인한 것으로 결론지어졌으며, 이때 방사성 코발트(^{60}Co)와 세슘(^{137}Cs) 또한 밸브 주변의 토양에서 검출되었다.

3.4. Dresden

2004년 8월 사업자 Exelon은 Dresden 원전 주변 감시관정에서 방사성물질로 지하수가 오염되었음을 확인하였다. 오염된 지하수가 확인된 감시관정은 1990년대 응축수 저장탱크(Condensate storage tank)에서 발생할 수 있는 유출을 감시하기 위해 설치되었던 관정으로, 해당 년도 지하수 방사성 오염은 응축수 저장탱크와 연결된 파이프에서 기인한 것으로 평가되었다. 2006년 2월, 사업자는 감시관정 지하수 내 높은 농도의 삼중수소를 계측하였고, 이는 응축수 저장탱크와 고압 냉각수 주입 시스템을 연결해주는 파이프(Non-safety, High Pressure Coolant Injection System Suction and Return pipe)의 열화로 인해 누출이 발생한 것으로 판단되었다. 현재까지 사업자는 이와 관련하여 파이프를 교체하고 2018년 현재까지 방사능 감시를 진행하고 있다.

3.5. Hatch

1986년 12월, Hatch 원전에서 상기의 원전사례 내 기

기 및 계통의 열화가 아닌 운전조작 실수로 인해 사용후연료 저장조의 실(seal)에서 바람이 빠진 것이 원인이 되어 저장조에서 삼중수소와 핵분열물질이 포함된 유체가 두 원자로 건물 사이로 흘러나와 부지 내 다른 건물과 지표/지하환경을 통해 강으로 방출되는 사건이 발생하였다. 사업자와 Georgia 주의 Department of Natural Resources가 진행한 조사에 따르면 다행스럽게도 이 방출에 의해 강 하류지역에서 거주하는 주민들에게 노출되는 방사능 위험도는 적은 것으로 조사·평가되었다.

3.6. Indian Point

2005년 9월 1일, 해당원전 사업자(Entergy)는 Indian Point 2호기 사용후연료 저장조 남쪽 벽에 인접한 핵연료 저장빌딩 선적구역 근처에서 벽을 따라 습기가 찬 미세균열을 발견하였고, 2주 후에는 두 번째 균열을 발견하였다. 최초 이들 균열에서 채취한 시료에서 삼중수소가 검출되었으며, 그 외에도 ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co 및 ^{63}Ni 등의 핵종이 검출되었다. 이 핵종들은 1974년에 운영이 정지되었지만 여전히 많은 양의 방사성물질이 존재했던 Indian Point 1호기 사용후연료 저장조에서 유래된 것으로 추정되었다.

3.7. Oyster Creek

1996년 9월, Oyster Creek 원전에서는 응축수 교환 시스템(Condensate Transfer System)에서 누출된 오염된 유체가 주변 환경으로 노출되었다. 이 유체는 방화방지시스템(Fire Protection System)과 상수관(Service Water System)을 통해 순환수 배출 터널로 유입되어 결국 자연환경으로의 비계획적 방출이 발생하였다. 이 방출의 원인은 정밀 조사 결과 원전 운영 중 작업자의 밸브조작 실수로 밝혀졌다.

3.8. Perry

2006년 3월, Perry 원전의 하부집수시스템(Underdrain System)에서 삼중수소와 감마선 방출 핵종이 검출되었다. 해당 사업자(FirstEnergy Nuclear Operation Company)는 이 삼중수소가 급수계통(Feedwater System)의 플랜지(Flange)에서 기인했으며, 이 유출이 구조사이의 공간을 통해 하부집수시스템까지 내려간 것으로 발표하였다.

3.9. Salem

2002년 9월 Salem 원자력발전소에서는 복합건물 벽으로 오염된 유체가 누출된 흔적이 발견되었다. 해당 사업자(PSEG Nuclear)는 복합건물과 연료건물 사이에 존재하

는 좁은 틈(seismic gap)을 통해 사용후연료 저장조에서 누출이 발생한 것으로 보고하였다. Seismic gap은 궁극적으로 지하수시스템과 연결되어 있어 감시관정을 주변에 더 설치하여 지하수 조사 프로그램을 시행하였다. 아울러 삼중수소가 검출된 seismic gap 주변에는 정화 프로그램을 실시하였다.

3.10. Seabrook

1999년 6월, Seabrook 원자력발전소의 Steam Generator Blowdown Demineralizer Sump에서 높은 수치의 삼중수소가 검출되었다. 이는 연료건물에 있는 연료교환배관과 연결된 사용후연료 선적조(Cask loading pool)에서 기인한 것으로 판단되어, Seabrook 원전은 이듬해인 2000년부터 지하수 양수를 시작하였고, 삼중수소농도가 가장 높은 지역 주변의 지하수를 양수함으로써 오염이 확산되는 것을 방지하였다. 또한 Seabrook 원전은 이후 감시 관정을 추가적으로 더 설치하여 지속적으로 지하수의 오염정도를 평가하고 있다.

3.11. Three Mile Island

2006년 5월, 주차장에서 원인 미상의 유체가 누출되는 것이 최초 확인되었다. 조사결과, 유체 내 삼중수소의 농도가 높게 분석되었으며, 이는 Condensate System에서 기인되어 Condensate Storage Tank와 이어지는 지하 파이프에서 전화선(Telephone Cable)을 따라 주차장으로 누출된 것으로 판단되었다. 이에 대한 대응으로 지하 파이프가 교체되었으며 더욱 강화된 감시 시스템이 현장에 설치되었다.

비계획적 방출에 따른 원전부지 조사에서 공통적으로 삼중수소가 검출됨에 따라 US NRC에서는 삼중수소의 마시는 물에 대한 US Environment Protection Agency (EPA) 기준인 20,000 pCi/L를 기준으로 원전부지 삼중수소 환경방사능 평가 결과를 매년 보고서로 작성하고 있다. 이 보고서에 따르면, 2017년 현재 미국에서 운영중인 원자력발전소 부지 61곳 중 43곳에서 최소 1회 이상 삼중수소의 비계획적 방출이 있었던 것으로 평가되었다(US Nuclear Regulatory Commission, 2017). 한편 원자력발전소 내 비계획적 방출의 주요 누설원은 지하배관(35%), 사용후연료저장조(24%), 그리고 탱크(12%)로 이 3개의 누설원이 전체의 71%를 차지한다고 보고되었다(Nuclear Regulatory Commission, 2011; Sohn et al., 2013). 지하배관은 주로 지하배관을 구성하는 파이프나 밸브의 열

화로 인해 손상이 발생하여 비계획적 방출이 발생한 것으로 조사되었으며, 나머지 두 개의 누설원 역시 열화에 의한 방사성핵종의 방출 가능성이 존재한다.

US NRC에서는 기존의 강력한 규제 아래에서도 방사성 물질의 비계획적 방출의 가능성이 존재한다고 확인, 판단하였고, 그에 대한 근거를 다음과 같이 설명하였다(Nicholson et al., 2006).

- 방사성 물질이 포함된 유체가 누출된 원자력발전소 내 수개의 부품은 훨씬 엄격한 기준을 통과해야 하는 발전소 안전계통(Plant Safety System) 내 부품과 다르게 상업용 기준에 맞추어 설치/운영되었다.
- 누출이 발생한 몇몇 계통은 US NRC에서 규정하는 주요 감시, 유지 또는 주기적 상세 조사 대상이 아니었다. 따라서 이러한 계통에서 발생한 누출은 검출되지 않을 확률이 높고, 누출 및 이동속도가 느리기 때문에 오랜기간 동안 누출이 진행되었어도 감지하기 쉽지 않을 수 있다.
- 원전 내 몇몇 계통은 구조적으로 운영자가 점검에 힘든 부분이 있으며, 이곳에서 누출이 발생할 경우 이를 감지할 확률은 낮아진다. 대표적으로 매설된 파이프나 사용후연료 저장조가 예이다.
- 발전소 하부 지하수의 방사성 오염 모니터링에 대한 US NRC의 규제 및 고시가 없기 때문에 비계획적 방출이 발전소 건물 아래로 누출이 발생하는 경우 그 오염을 감지하기 어려울 수 있다.
- US NRC의 규정에 따라 원자력발전소는 방사성물질 방출에 대한 감시가 이루어지고 있지만, 일반적으로 방사성핵종이 계획적으로 방출되는 계통에 대해서 중점적으로 실시되기 때문에 방사성물질이 비계획적으로 방출되는 경우 기존의 감시 시스템에 검출되지 않고 원전부지 밖으로 확산될 수 있다.

이에 미국 원전사업자 협의체는 자발적으로 방사성물질의 비계획적 방출을 예방하고 조기에 감지하기 위해 지하수 보호 프로그램, 지역주민과의 소통, 그리고 지하수 보호 프로그램 관리 등의 내용을 담은 지하수 보호 지침(Industry Ground Water Protection Initiative, NEI 07-07)을 수립하였다(Nuclear Energy Institute, 2007).

캐나다의 경우 방사선 안전과 관련된 규제는 Canadian Nuclear Safety Commission(CNSC)에서 담당하고 있다. CNSC의 보고서에 따르면 과거 Pickering Nuclear(PN)에서 비계획적 방출에 의한 지하수오염이 발생하였으며, 그 내용을 Table 2와 Fig. 3에 정리하였다. 캐나다에서는 삼중수소에 대한 지하수 방출 기준이 규제되어있지 않으며

Table 1. Comparison of different reactor types

	PWR*	BWR**	PHWR***/Candu
Reactor coolant	Light water	Light water	Heavy water
Neutron Moderator	Light water	Light water	Heavy water
Boiling in reactor coolant system	X	O	X
Pressurized in reactor coolant system	O	X	O

*PWR: Pressurized Water Reactor

**BWR: Boiling Water Reactor

***PHWR: Pressurized Heavy Water Reactor

Table 2. Tritium (^3H) Concentrations in Groundwater at Nuclear Reactors in Pickering Nuclear, Canada [Modified from Canadian Nuclear Safety Commission (2014)]

Facility	Number of Monitoring Wells	Maximum Concentration (Bq/L)	Comments on the Contamination Sources	Data Year
PN Unit 1-4 Area	30	128,800,000	(1) Leaking concrete pit in the Moderator Purification room. The pit gets tritium from spills on the floor (2) Leaking RAB sumps receiving tritium from spent resin storage tank.	
PN UPP (Upgrading Plant Pickering Area)	32	888,000	Past practice of discharging tritiated water onto the ground. Practice stopped. No new releases.	
PN Irradiated Fuel Bay A&B (Wells and Sumps)	13	21,100,000	Due to tritium migration from Unit 1 area and sump leaking.	2006
PN Vacuum Building Area	11	1,200,000	Due to tritium migration from Unit 1 area and sump leaking.	
PN Catchbasin-97	6	108,410	Historical sources in 70's and 80's from Moderator Upgrader (Sulzer).	
PN "B" Reactor Auxiliary Bay (Sumps)	4	10,200,000	Leaking sump pipes. Repaired at Units 5 and 7. Repairs at Unit 6 were completed in 2007. Sump tritium concentration is decreasing. Unit 8 is normal.	

원전 주변에서의 높은 삼중수소 농도는 부품의 결함이나 과거의 사고, 또는 방출된 물질이 씻겨 내려오면서 발생하게 된다고 보고하고 있다. 오염된 지하수는 일반적으로 퍼지지 않도록 조치되었으며, 근로자나 대중에게 방사선에 의한 피해가 간 사례는 없었다. 또한, 원전 주변에 식수 또는 생활용 우물이 존재하지 않기 때문에 근로자나 대중의 건강에 피해가 간 사례도 없었다(Canadian Nuclear Safety Commission, 2014).

한편, 프랑스의 경우 비계획적 방출에 의해 우라늄이 방출된 사례가 보고되었다(Fig. 3). 프랑스 환경방사능 감시기관인 Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)에서 발표한 보고서에 따르면 2008년 7월, Tricastin 지역의 Uranium-bearing Effluent Treatment Station(STEU)의 탱크에서 조작자의 실수와 관련설비의 오작동으로 인해 우라늄이 함유된 유체가 누출되어 주변 지하수와 지표수로 흐른 사고가 발생하였으며, 이 사고 이후로 이 지역에 대규모의 감시설비가 설치되었다. 이 보

고서에 따르면 2008년 프랑스에서는 원전에서의 비계획적 방출이 다른 해에 비해 많이 보고되었으며, 이들 중 대표적인 사례의 원인은 지하에 매설된 파이프의 결함, 또는 오래된 설비에 설치된 파이프의 열화에 의한 것이었다고 보고하고 있다(Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, 2010).

미국, 캐나다 등의 국가에서는 원전에서의 비계획적 방출에 의한 지하수오염에 대한 복원작업이 시행되었으며, 일반적으로 Pump & Treat 방법으로 진행되었다. 미국과 캐나다에서는 오염된 지하수를 양수하여 처리함과 동시에 감시관정을 여러 개 설치하여 오염된 지하수의 이동 및 오염의 정도를 관찰하고 있다. 정화 사례 중에서 대표적인 성공사례인 미국 Braidwood 원전의 경우, 삼중수소로 오염된 지하수를 인근 연못에서 양수하고, 양수한 지하수의 유량을 조절하여 기존의 배출통로에 주입시켜 최종적으로 배출되는 삼중수소의 농도를 기준치 이하로 만드는 방법으로 정화작업을 시행하였다(Fig. 4)(PSEG Nuclear

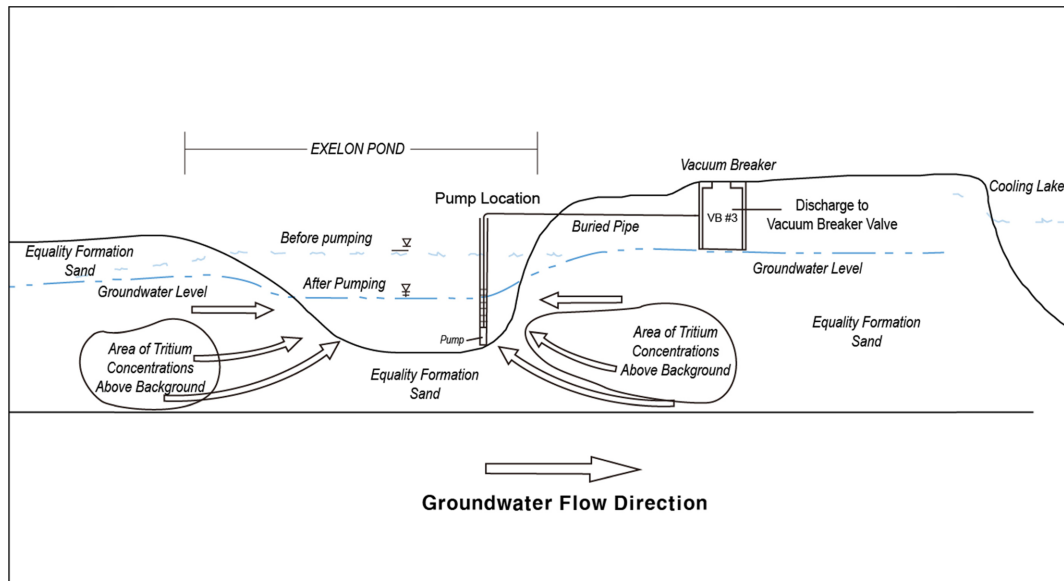


Fig. 4. Conceptual diagram showing remediation process in Braidwood NPP [Reproduced from PSEG Nuclear LLC Salem Generating Station (2005)].

LLC Salem Generating Station, 2005; Exelon Generation Company, 2006; US Nuclear Regulatory Commission, 2010).

4. 국내 원전 및 환경방사능 감시 현황 분석

2018년 현재 우리나라는 한울 원자력발전소에서 6기, 월성 원자력발전소에서 6기, 고리 원자력발전소에서 4기, 신고리 원자력발전소에서 3기, 한빛 원자력발전소에서 6기 등 총 25기의 원전을 운영 중에 있다.

‘원자력안전위원회고시 제2014-12호’는 원자력안전법 시행규칙 제136조 제2항에 따라 원자력이용시설 주변의 방사선환경조사 및 방사선환경영향평가에 관한 규정을 고시하고 있으며, 제6조에서 환경조사 요령을 고시하고 있다. 육상시료 중 지하수에 대해서는 삼중수소와 우라늄, 감마동위원소를 매 분기마다 측정을 하며, 지표수에 대해서는 전베타, 삼중수소, 우라늄, 감마동위원소에 대하여 매월마다 측정을 하고 있다. 지표수와 지하수 이외의 육상시료와 환경방사선, 그리고 해양시료에 대한 방법을 환경조사요령에서 고시하고 있으며, 환경조사를 실시할 때 조사지점을 선정하는 방법 및 비교지점의 선정 또한 고시하고 있다. 이 내용을 Table 3에 요약 정리하였다. 국내에서 원자력발전소 주변 부지의 환경방사능을 평가하고 있는 기관은 한국원자력안전기술원(KINS)과 한국수력원자력(KHNP)이며, 각각의 기관에서 고시에 의해 평가한 방사

성핵종과 그 결과를 Table 4와 5에 정리하였고, 4개의 원전 부지 중 월성부지의 시료 채취 지점과 지하수 내 삼중수소의 농도를 Fig. 5 (a), (b)에 도시하였다.

분석된 결과에 따르면 원자력발전소 주변지역에서 채취한 2016년도 환경시료 중 인공방사성핵종의 농도범위는 대부분의 시료에서 과거 5년간 조사된 농도범위 내에 포함되어 예년과 비슷한 경향을 나타내었다. 그리고 국내 원자력발전소 주변 토양, 해수 등에서 미량 검출된 ^{137}Cs , ^{134}Cs 및 ^{90}Sr 등 인공방사성 핵종은 과거 핵실험과 후쿠시마 사고에 기인한 것으로 추정하였으며, 이들 핵종의 농도는 낙진 준위와 유사하였다(Korea Hydro & Nuclear Power, 2016; Korea Institute of Nuclear Safety, 2016).

5. 국내 원자력발전소 주변 토양지하수 조사에 대한 시사점

원자력발전소 주변에서의 방사성물질의 비계획적 방출은 지하에 매설된 파이프와 같이 Non-Safety 계통, 즉 일반적으로 감시활동이 이루어지지 않는 곳에서 주로 발생하였다. 현재까지 보고된 원전부지 비계획적 방출 사례를 분석한 결과 공통적으로 검출된 방사성물질은 삼중수소였으며, 유출된 방사성물질이 인근 주민의 건강에 영향을 미친 사례는 알려지지 않았다(Canadian Nuclear Safety Commission, 2014; Nicholson et al., 2006). 하지만 미국의 경우, 환경단체를 포함한 인근 주민은 비계획적으로

Table 3. Guidelines for radiological environmental monitoring items and cycles in South Korea [Modified from Nuclear Safety and Security Commission (2011)]

Monitoring items		Monitoring Cycle		Guidelines for selecting the monitoring locations
Environmental Media	Nuclides	Sampling Frequency	Analysis Frequency	
Radiation	Environmental radiation dose	Continuous	Monthly	① The locations for measurement and sampling should be selected considering distance from nuclear facilities, direction of wind, population etc. The most important thing is population.
	Accumulated radiation dose		Quarterly	② The locations for measurement and sampling should be held 1m above the soil or grassplot considering the effect of the radiation from surface.
Terrestrial Samples	Air	Gross beta, ^{14}C , ^{131}I , U, Gamma	Monthly	
	Air moisture	^3H	Continuous	
	Drinking water/ Groundwater	^3H , U, Gamma	Quarterly	① The locations for measurement and sampling should be selected evenly from nuclear facilities but the location of high probability of contamination should be selected first.
	Precipitation/Surface water	Gross beta, ^3H , U, Gamma	Monthly	② The locations for measurement and sampling should be selected considering monitoring constituents, geographic features, possibility of sampling etc and every sampling should be held at the same locations.
	Soil (superficial layer)	^{90}Sr , Pu, U, Gamma	Twice a year	
	Soil (river sediment)	U, Gamma	Quarterly	
Marine Samples	Seawater	Gross Beta, ^3H ^{90}Sr , Pu, Gamma	Monthly Once a week Quarterly	① The locations for measurement and sampling should be selected considering the flow of seawater. The most probable location of contamination should be selected.
	Marine deposits	^{90}Sr , Pu, Gamma	Twice a year	② Intake and drain should be included in the sampling sites. ③ The locations for measurement and sampling should be selected considering the usage of the ocean.

* Guidelines for selecting the locations for comparison

- ① The locations for measurement and sampling should be selected where the influence of the nuclear facilities can be ignored
- ② More than one location should be selected for comparison per every environmental monitoring item.

Table 4. Sampling and analytical schedules for environmental radiological monitoring in South Korea (Modified from The Annual Report on the Environmental Radiological Surveillance and Assessment around the Nuclear Facilities by Korea Institute of Nuclear Safety and Korea Hydro & Nuclear Power)

Institute	Media	Monitored constituents	Frequency	Number of Samples				Starting year
Korea Institute of Nuclear Safety	Soil	Locations						
		Gamma(¹³⁷ Cs, ⁴⁰ K)	Twice a year	5-7 samples around the site				
		⁹⁰ Sr, ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	Once a year	2 samples around the site				
		²⁴⁰ Pu/ ²³⁹ Pu atomic ratio	Once a year	0	0	0	2	
	Seawater	U isotopes	Quarterly	3-6 samples from intakes and drains around the nuclear power plant				2012
		Gamma(¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co), ³ H	Twice a year	2-4 samples from intakes and drains around the nuclear power plant				
		⁹⁰ Sr, ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	Twice a year	2 samples around the site				
		²⁴⁰ Pu/ ²³⁹ Pu	Quarterly	0	0	0	0	1
	Groundwater	Gamma(¹³⁷ Cs), ³ H	Monthly	1	6	1	1	2
	Surface water	Gamma(¹³⁷ Cs, ¹³¹ I)						
Korea Hydro & Nuclear Power	Precipitation	³ H						
	Drinking water	Locations						
	Groundwater	Gamma(⁶⁰ Co, ¹³¹ I, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs), ³ H, Gross Beta	Every 3 month	4	4	2	3	
	Surface water		Every 3 month	3	4	2	3	
	Precipitation		Monthly	4	5	2	3	
		Gamma(⁶⁰ Co, ¹³¹ I, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs), ³ H, Gross Beta	Monthly	5	8	4	5	2007
	Soil(surface layer)	Gamma(⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ⁶⁰ Co, ¹⁰⁶ Ru, ¹³¹ I, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs), ¹⁴⁴ Ce, ⁹⁰ Sr	Twice a year	5	4	5	6	
	Soil (river sediment)	Gamma(⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ⁶⁰ Co, ¹⁰⁶ Ru, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs), ¹⁴⁴ Ce, ⁹⁰ Sr	Every 3 month	5	3	2	3	
Korea Hydro & Nuclear Power	Seawater	Gamma(⁵⁴ Mn, ⁵⁹ Fe, ⁵⁸ Co, ⁶⁰ Co, ⁶⁵ Zn, ⁹⁵ Zr, ⁹⁵ Nb, ¹³¹ I, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs), ^{110m} Ag, ³ H, Gross Beta, ⁹⁰ Sr	Monthly	13	6	4	5	

Table 5. Summary of environmental radiological monitoring results in 2016 in South Korea (Modified from The Annual Report on the Environmental Radiological Surveillance and Assessment around the Nuclear Facilities by Korea Institute of Nuclear Safety)

	Nuclides	Sites	Results from Korea Institute of Nuclear Safety		Results from Korea Hydro & Nuclear Power	
			Average in 2016	Concentration range	Concentration range in recent 5 years	Average around the site in 2016 (Min~Max)
Precipitation	^3H (Bq/L)	Kori weather station	5.43 ± 5.42	<1.25 ~ 19.7	<1.33 ~ 22.3	6.06 (<1.04 ~ 60.9)
		Wolsong weather station	193 ± 151	32.5 ~ 562	2.65 ~ 683	78.9 (<1.08 ~ 641)
		Hanbit weather station	29.2 ± 19.7	4.85 ~ 78.6	3.85 ~ 98.7	11.1 (<1.81 ~ 81.9)
		Hanul weather station	7.25 ± 6.30	1.52 ~ 18.6	<1.28 ~ 11.6	10.6 (<1.08 ~ 54.4)
		Daedeok	2.36 ± 1.80	<1.29 ~ 6.39	<1.25 ~ 38.7	2.83 (<1.60 ~ 11.8)
Groundwater	^{137}Cs , ^{131}I (mBq/L)	Daedeok		nd*		ND**
		Kori	1.26 ± 0.16	1.03 ~ 1.48	0.736 ~ 1.91	<1.03+
		Wolsong	0.696 ± 0.390	0.374 ~ 1.35	0.196 ~ 11.3	3.21 (<1.16 ~ 7.99)
		Hanbit	0.656 ± 0.223	0.422 ~ 0.953	0.168 ~ 1.03	<1.74+
		Hanul	0.821 ± 0.186	0.548 ~ 1.02	0.511 ~ 1.09	<1.07+
Surface water	^{137}Cs (mBq/kg)	Daedeok	0.549 ± 0.187	0.365 ~ 0.811	<0.193 ~ 0.839	<1.68+
		All sites		nd		nd
		Daedeok		nd		ND
		Kori	3.17 ± 3.08	<0.824 ~ 9.24	<1.04 ~ 11.1	2.24 (0.366 ~ 6.39)
		Wolsong	2.37 ± 1.70	<0.869 ~ 6.57	<0.834 ~ 8.13	0.418 (0.240 ~ 0.679)
Soil	^{137}Cs (Bq/kg-dry)	Hanbit	1.54 ± 0.37	<0.979 ~ 2.24	0.889 ~ 9.17	1.17 (0.396 ~ 4.59)
		Hanul	1.82 ± 0.42	<1.17 ~ <2.65	<0.945 ~ 7.81	1.01 (<0.296 ~ 3.68)
		Daedeok	1.71 ± 0.49	<0.962 ~ <2.50	<0.972 ~ 4.73	2.81 (<0.706 ~ 15.8)
		Kori	0.522 ± 0.356	<0.166 ~ 0.878	<0.0990 ~ 1.29	0.294 (0.245 ~ 0.374)
		Wolsong	1.15 ± 0.56	0.594 ~ 1.71	<0.0770 ~ 2.19	0.243 (0.252 ~ 0.471)
Soil	^{90}Sr (Bq/kg-dry)	Hanbit	0.290 ± 0.145	<0.145 ~ 0.434	<0.0980 ~ 0.766	0.537 (0.320 ~ 0.774)
		Hanul	0.248 ± 0.079	<0.169 ~ 0.327	<0.0780 ~ 0.572	0.410 (0.267 ~ 0.598)
		Daedeok	0.452 ± 0.180	0.272 ~ 0.631	<0.0780 ~ 0.577	<0.109+
		Kori	0.215 ± 0.210	0.00585 ~ 0.425	<0.00542 ~ 0.430	
		Wolsong	0.158 ± 0.139	0.0187 ~ 0.297	<0.00338 ~ 0.340	
Soil	$^{239+240}\text{Pu}$ (Bq/kg-dry)	Hanbit	0.0250 ± 0.0152	0.00982 ~ 0.0402	0.00541 ~ 0.251	ND
		Hanul	0.0213 ± 0.0120	0.00922 ~ 0.0333	0.00237 ~ 0.0529	
		Daedeok	0.0735 ± 0.0070	0.0665 ~ 0.0805	0.0112 ~ 0.128	

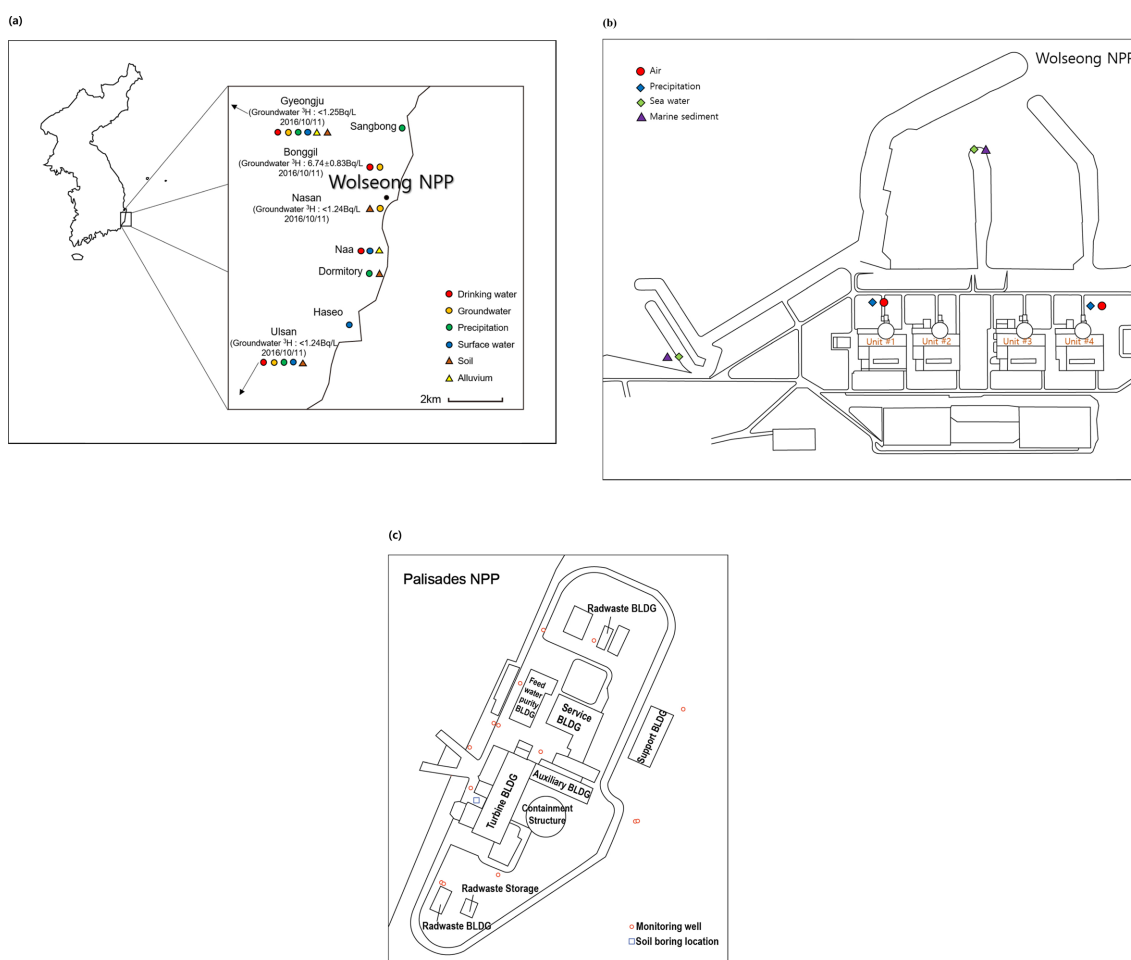
Table 5. Continued

Nuclides	Sites	Results from Korea Institute of Nuclear Safety		Results from Korea Hydro & Nuclear Power	
		Average in 2016	Concentration range	Concentration range in recent 5 years	Average around the site in 2016 (Min~Max)
Soil	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	Kori	0.190 ± 0.003	0.187 ~ 0.192	0.170 ~ 0.185
		Wolseong	0.183 ± 0.001	0.182 ~ 0.184	0.165 ~ 0.185
		Hanbit	0.174 ± 0.001	0.173 ~ 0.174	0.160 ~ 0.181
		Hanul	0.176 ± 0.003	0.173 ~ 0.178	0.164 ~ 0.194
		Daedeok	0.185 ± 0.003	0.182 ~ 0.187	0.170 ~ 0.206
			29.5 ± 2.2	26.7 ~ 32.1	23.7 ~ 78.2
^{238}U (Bq/kg-dry)					45.5 (25.7 ~ 56.6)
^{235}U (Bq/kg-dry)			0.949 ± 0.300	<0.630 ~ 1.35	0.863 ~ 3.11
^{234}U (Bq/kg-dry)			30.4 ± 2.8	26.4 ~ 32.9	24.2 ~ 77.1
Seawater					45.6 (24.8 ~ 57.8)
	^{137}Cs (mBq/kg)	Kori	1.92 ± 0.30	<1.05 ~ 2.55	<0.973 ~ 2.88
		Wolseong	1.98 ± 0.24	1.49 ~ 2.53	<1.07 ~ 3.24
		Hanbit	1.58 ± 0.26	1.17 ~ 2.23	0.897 ~ 3.19
		Hanul	1.64 ± 0.16	1.36 ~ 1.89	<1.03 ~ 3.83
		Kori	2.05 ± 3.94	<0.0600 ~ 19.5	<0.0880 ~ 2.43
	^3H (Bq/L)	Wolseong	11.8 ± 25.7	0.281 ~ 113	0.103 ~ 95.6
		Hanbit	3.79 ± 3.93	0.337 ~ 13.1	0.460 ~ 14.2
		Hanul	0.412 ± 0.249	<0.150 ~ 1.09	<0.117 ~ 91.5
		Kori	0.897 ± 0.128	0.722 ~ 1.20	<0.358 ~ 1.70
	^{90}Sr (mBq/kg)	Wolseong	0.806 ± 0.128	0.575 ~ 1.00	<0.356 ~ 1.46
		Hanbit	1.25 ± 0.28	0.775 ~ 1.50	<0.346 ~ 1.34
$^{239+240}\text{Pu}$ (Bq/kg-dry)		Hanul	0.884 ± 0.156	0.655 ~ 1.09	<0.355 ~ 0.839
		Kori	7.61 ± 3.38	3.53 ~ 15.1	3.09 ~ 9.42
		Wolseong	6.19 ± 0.14	4.54 ~ 7.98	2.92 ~ 14.9
		Hanbit	11.7 ± 3.4	6.61 ~ 16.3	3.16 ~ 45.2
		Hanul	4.99 ± 0.41	4.42 ~ 5.53	2.81 ~ 9.43
		Kori	0.239 ± 0.003	0.231 ~ 0.246	0.205 ~ 0.273
		Wolseong	0.236 ± 0.007	0.215 ~ 0.241	0.207 ~ 0.284
		Hanbit	0.222 ± 0.004	0.216 ~ 0.230	0.198 ~ 0.232
		Hanul	0.235 ± 0.006	0.227 ~ 0.246	0.191 ~ 0.246
					ND
					ND

* nd: not detected, ** ND: Not Determined

Table 6. US radiological environmental monitoring program [Modified from Meinke and Essig (1991)]

Exposure pathway and/or sample	Sampling and collection frequency	Type and frequency of analysis
Direct Radiation	Quarterly	Gamma dose quarterly
Airborne (Radioiodine and Particulates)	Continuous sampler operation with sample collection weekly, or more frequently if required by dust loading	Radioiodine Cannister: I-131 analysis weekly Particulate Sampler: Gross beta radioactivity analysis following filter change; and gamma isotopic analysis of composite (by location) quarterly
Waterborne (Surface)	Composite sample over 1 month period	Gama isotopic analysis monthly. Composite for tritium analysis quarterly
Waterborne (Ground)	Quarterly	Gama isotopic and tritium analysis quarterly
Waterborne (Drinking)	Composite sample over 2-week period when I-131 analysis is performed; monthly composite otherwise	I-131 analysis on each composite when the dose calculated for the consumption of the water is greater than 1 mrem per year. Composite for gross beta and gamma isotopic analyses monthly. Composite for tritium analysis quarterly
Waterborne (Sediment from shoreline)	Semiannually	Gama isotopic analysis semiannually


Fig. 5. (a) Sampling location in Wolsong NPP in South Korea [Reproduced from Korea Hydro & Nuclear Power (2016)]. (b) Sampling location near Wolsong NPP in South Korea [Reproduced from Korea Hydro & Nuclear Power (2016)]. (c) Sampling location in Palisades NPP in U.S. [Reproduced from Ellegood (2009)].

방출되는 방사성물질이 인간의 건강에 나쁜 영향을 주지 않을 수 있다 하더라도 주변환경에 직간접적으로 영향을 미치기 때문에 비계획적 방출과 관련된 정보를 해당 사업자 기관에 요구하고 있다. US NRC에서는 방사성물질의 방출과 관련된 규제를 실시하고 있으며, 대부분의 비계획적 방출이 US NRC에서 사용하는 US EPA 먹는 물 기준농도(20,000 pCi/L)를 넘고 있지 않기 때문에 특별한 대응을 하지 않는 실정이다. 캐나다, 벨기에, 불가리아, 유럽 연합, 네덜란드 등의 국가에서도 방사성물질의 농도가 기준치보다 낮은 비계획적 방출에 대한 규제가 따로 정해지지 않았다(US Nuclear Regulatory Commission, 2010).

우리나라의 경우 환경방사선에 대한 시료채취 및 조사의 빈도는 미국과 비교하여 크게 차이가 없다(Table 3 and 6). 하지만 원자력발전소 부지 내의 지하수 감시 시료 채취지점의 수는 원전 내 각각의 건물 주변에서 시료를 채취하고 있는 미국과 캐나다의 사례와 비교하였을 때 적은 숫자라고 판단된다(Table 2, Fig. 5 (b), (c)). 따라서 원전부지 내 과거 해외사례에서 비계획적 방출이 발생 하였던 건물 주변에 삼중수소의 비계획적 방출에 대한 감시관정의 설치 및 감시가 필요할 것으로 사료되며, 이와 더불어 비계획적 방출의 경우, 오랜 기간에 걸쳐 방출이 진행될 수 있으므로, 부지조사를 통해 적절한 위치에 감시관정을 설치하는 등 장기적인 모니터링에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

6. 결 론

방사성물질의 비계획적 방출은 그 영향이 지역 주민에게 거의 없는 만큼 해외에서도 관련 규제가 적은 실정이다. 하지만 방사성물질의 인간에 대한 영향뿐만 아니라 원자력발전소 주변의 환경 및 생태계까지의 영향을 포괄적으로 고려하면서 원전부지 비계획적 방출에 대한 관심이 커지고 있다.

방사성물질의 비계획적 방출은 과거의 사례를 보았을 때 주로 일반적으로 감시활동이 이루어지지 않는 원전 계통에서 발생하였으며, 검출되지 않은 상태로 오랜 시간동안 방출이 진행되어 환경을 오염시킬 수 있으므로 미국의 조사 보고서에서는 비계획적 방출에 대한 규제와 감시활동이 강화되어야 한다고 보고하고 있다. 우리나라의 경우 각각의 원자력발전소에서 감시활동이 이루어지고 있지만, 부지 내의 환경방사능 감시 시료채취 개소수가 적어 비계획적 방출에 대한 대비가 부족하다고 판단된다. 따라서 국내 원자력발전소 및 주변 부지에서 비계획적 방출에 의한

토양 및 지하수의 오염을 방지하기 위해서 강화된 감시활동 및 규제의 제정이 필요하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20171510300670).

References

- Amano, Y., 2011, Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards, No. GSR Part 3, p.1-435.
- Areva, N.P., 2012, US EPR Final Safety Analysis Report, Chapter, p.10.4-24.
- Canadian Nuclear Safety Commission, 2014, Tritium releases and dose consequences in Canada in 2006, INFO-0793.
- Ellegood, J.A., 2009, E-Mail from Ellegood to Lerch, Monitoring well tritium results from 4-10-09 sampling event., <https://www.nrc.gov/docs/ML1020/ML102030245.pdf> [accessed 18.06.04]
- Exelon Generation Company, 2006, Interim Remedial Action Plan, p.1-10.
- Gonzalez, A., Mason, G., Clarke, R., Wrixon, A., Cooper, J., Holm, L., Boice, J.J., Cousins, C., Cox, R., and Valentin, J., 2007, Scope of radiological protection control measures, *Annals of the ICRP*, 37(5), p.1-105.
- Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), 2010, Nuclear fuel cycle facilities, laboratories, irradiators, particle accelerators, under-decommissioning reactors and radioactive waste management facilities safety. Lessons learned from events notified between 2005 and 2008: Institut de Radioprotection et de Sret Nuclaire (IRSN), p.1-51.
- Korea Electric Power Corporation, 1992, Preliminary Safety Analysis Report: Wolsong plant unit 3, 4: Korea Electric Power Corporation, Chapter 11.
- Korea Electric Power Corporation, Final Safety Analysis Report: Uljin plant unit 3, 4: Korea Electric Power Corporation, Chapter 11. http://www.khnp.co.kr/nsios/board/BRD_000409/board-View.office?pageIndex=1&boardSeq=66240&mnCd=BR100407&schPageUnit=10&searchCondition=0&searchKeyword= [accessed 18.06.04]
- Korea Hydro & Nuclear Power, 2016, The annual report on the environmental radiological surveillance and assessment around the nuclear facilities, p.1-641.

- Korea Institute of Nuclear Safety, 2016, The annual report on the environmental radiological surveillance and assessment around the nuclear facilities, *KINS/AR-140*, **27**, p.1-162.
- Meinke, W. and Essig, T., 1991, Offsite dose calculation manual guidance: Standard radiological effluent controls for pressurized water reactors: Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Radiation Protection and Emergency Preparedness, p.64.
- Nuclear Energy Institute, 2007, Industry ground water protection initiative-Final guidance document., v. NEI 07-07, p.1-4.
- Nuclear Regulatory Commission, 2011, Fact sheet on underground pipes at nuclear reactors. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/buried-pipes-fs.html> [accessed 18.06.04]
- PSEG Nuclear LLC Salem Generating Station, 2005, Quarterly remedial action progress report second quarter 2005, p.1-13.
- Robertson, J., 1978, The CANDU reactor system: An appropriate technology, *Science*, **199**(4329), 657-664.
- Sohn, W., Lee, G.-B., and Yang, Y.-H., 2013, Review of contamination and monitoring of on-site groundwater at foreign nuclear power plants due to unplanned release, *JRPR*, **38**(2), 124-131.
- Sohn, W., Sohn, S.-H., Chon, C.-M., and Kim, K.-Y., 2011, Groundwater flow and tritium transport modeling at Kori nuclear power plant 1 site, *JNFCWT*, **9**(3), 149-159.
- The Korean Association for Radiation Protection, 2016, Scientific analysis of health effect of tritium, p.135-136.
- US Nuclear Regulatory Commission, 2006, Ground-water contamination due to undetected leakage of radioactive water. Washington, DC, p.1-8.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2006, Liquid radioactive release lessons learned task force final report. Washington, DC, p.1-53.
- US Nuclear Regulatory Commission, 2007a, Reactor concepts manual, Boiling Water Reactor Systems, Washington, DC, p.1-15.
- US Nuclear Regulatory Commission, 2007b, Reactor concepts manual: Pressurized Water Reactor (PWR) Systems: US Nuclear Regulatory Commission Technical Training Center, Washington DC, *Educational Teaching Material*, **603**, p.1-28.
- US Nuclear Regulatory Commission, 2010, Groundwater task force final report, p.1-85.
- US Nuclear Regulatory Commission, 2017, List of historical leaks and spills at US commercial nuclear power plants: Washington, DC.
- Valentin, J., 2007, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Elsevier Oxford, p.35-47.