

원전사고에 따른 토양·지하수 방사성오염의 효과적인 관리 연구

김희주 · 현윤정 · 김영주 · 황상일*

한국환경정책·평가연구원

A Study on Effective Management Scheme for Soil and Groundwater Contaminated by Radioactive Materials Due to Nuclear Accidents

Hee Joo Kim · Yunjung Hyun · Youngju Kim · Sang Il Hwang*

Korea Environment Institute

ABSTRACT

In this study, we suggested the management scheme of analyzing the national and oversea related policy against soil and groundwater contamination by radioactive materials due to nuclear accidents. In Korea, we need to remedy swiftly the contaminated land due to intensive land development demand. So, we need to develop more effective management scheme to recover actively the land contaminated by radioactive materials. We require to improve monitoring network, to expand media-specific monitoring system, to prepare management system for remediation of contaminated land, and to develop flow work for soil and groundwater remediation.

Key words : Nuclear accident, Soil, Groundwater, Radioactive-Contaminated, Effective management scheme

1. 서 론

2011년 3월에 발생한 일본 후쿠시마 원자력 발전소 사고는 국제 원자력 사고 등급(International Nuclear Event Scale, INES) 최고단계인 7등급을 기록하며 일부 방사성 물질이 외부로 유출되었다. 이는 1986년에 일어난 체르노빌 원전 사고와 같은 등급으로 방사성 물질 유출이 현재도 계속 진행 중이라는 점에서 문제의 심각성을 더하고 있다.

후쿠시마 원전에서 방출된 방사성 세슘의 오염실태 조사결과, 일본의 최남단인 규슈 지역을 제외한 일본 전 국토의 토양이 방사성 세슘에 오염되었다. 세슘에 의한 토양오염은 일본 동부지역에서 토양 1kg당 최대 250 Bq, 주코쿠·시코쿠 지방의 산악지역에서 최대 25 Bq에 달할 것으로 추정되었으며 이 지역들은 지금까지 일본 정부의 방사성 물질 측정에서 오염되지 않은 곳으로 조사된 지역이다(Yasunari et al, 2011). 또한 원전사고의 초기대응으로 하루 평균 500톤의 냉각수를 주입하였는데 원전 주변

부 지하수 방사능 레벨이 기준치의 1만배 정도로 높게 측정되어 주변 지하수가 요오드-131과 세슘-137 등의 방사성물질에 심각하게 오염된 것으로 알려졌다. 사고발생 두 달 뒤에 후쿠시마 제1원전의 지하수에서는 요오드나 세슘보다 위험한 방사성 스트론튬이 검출되었다.

후쿠시마와 약 1,000 km 가량 떨어진 우리나라의 경우 이 사고로 유출된 방사성 물질이 국내에 미칠 영향은 적을 것으로 예상되지만, 중국, 러시아 원전 및 북한의 핵시설 등 인접국가에서 유사한 사고가 발생한다면 지리적 특성상 방사능이 빠르게 확산되어 국내에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

원전사고 시 바람을 타고 온 방사성 낙진은 공기 흡입으로 인한 직접적인 내부피폭의 영향뿐만 아니라, 강우를 통해 토양 및 지하수(떡눈물)의 2차 오염을 유발한다. 또한, 방사성 물질로 오염된 토양에서 자란 식물을 동물이 섭취하고, 이 농축산물을 다시 인간이 섭취하는 간접적인 내부피폭으로 인해 토양 및 지하수의 방사성 오염은 장기적이고 지속적으로 환경에 영향을 미칠 수 있다. 따라서,

*Corresponding author : sangilh@kei.re.kr

원고접수일 : 2011. 12. 14 심사일 : 2011. 12. 16 게재승인일 : 2011. 12. 17
질의 및 토의 : 2012. 2. 29 까지

원전사고 발생 시 일어날 수 있는 토양 및 지하수 오염의 대응책 및 관리방안의 마련이 필요하다.

본 연구에서는 원전사고로 인한 토양·지하수 방사성 오염이 발생하였을 경우 정책적인 측면에서의 종합적인 관리 및 대응방향을 제시하고자 하였다. 이를 위해 국내·외 방사선 관련 정책 및 관리체계를 알아보고 이를 토대로 원전사고 발생 시 효과적인 토양·지하수의 관리방향을 제시하였다.

2. 토양·지하수 매체에서의 방사성 오염

2.1. 토양 방사성 오염의 특성

원자력시설의 사고가 발생하여 대기로 방출된 방사성 물질은 두 가지 주요 경로를 통해 인체에 피폭된다. 자연 혹은 인공적 방사선 노출원으로부터 대기, 지표면을 통해 방사선이 전달되는 외부 피폭(external exposure)과, 방사성 물질이 대기로부터 주변의 토양에 침적하고 이러한 토양에서 재배된 오염된 농작물, 축산물(우유, 고기, 달걀) 등의 음식물과 식수를 인간이 섭취함으로써 몸으로 들어온 방사성 물질이 신체 내에 있으면서 방사선을 방출하여 노출되는 내부 피폭(internal exposure)이 있다(IAEA, 2006).

토양 방사성 오염이 경작, 식량 생산에 끼치는 영향은 지속적이고 장기적이기 때문에 특별한 주의가 필요하다. 체르노빌 사고 후 농업 생산품, 소의 우유 및 고기에서의 방사성 축적을 줄이기 위한 토양처리 및 제염의 여러 기술들이 사용되어 왔지만, 구 소련 내의 많은 농토가 여전히 사용되고 있지 않다.

토양 방사성 오염물질 중 세슘은 가장 큰 문제인데, 이 물질은 반감기가 30년인데다 흡착하는 성질을 지니고 있어 토양에 스며들 경우 토양 자체의 오염은 물론 재배하는 식물로 연쇄적으로 오염될 가능성이 크다. 그리고 자연에 존재하는 칼륨과 성질이 비슷하기 때문에 세슘이 토양에 혼재해 있을 때 식물은 세슘을 잘 흡수한다. 스트론튬은 세슘과 다르게 검출 여부 조사과정이 까다로우며 반감기가 긴 세슘과 플루토늄이 방사성 토양 오염의 중요한 지표로 여겨지고 있다.

방사성 물질 자체는 잔류성이 크고 비중이 높아 이동성이 매우 낮다. 대기나 강우 유출수를 통한 이동 등 정상적인 방사성 유출에 직접적인 영향을 받는 오염 지역은 반경 20 km 정도로 예상하고 있으며 최악의 경우라도 분진을 포함하여 100 km 이상 이동하기는 어려울 것으로 보고 있다. 따라서 국내 원전사고 시에는 원전 주변을 중심으로 토양 정화 작업이 이루어져야 한다. 인접국의 재

난성 원전사고의 경우에는 기류를 통해 우리나라에 상륙할 가능성을 완전히 배제할 수 없으므로 이 경우에는 강우에 의한 피부접촉 피해보다는 토양에 축적 후 농작물에 흡수되어 다시 인체로 섭취될 가능성이 더 높기 때문에, 농경지 토양의 방사능 오염대책이 우선적으로 필요하다(김영진, 2011).

2.2. 지하수 방사성 오염의 특성

원전사고 시 누출된 방사성 물질에 의한 지하수 오염은 여러 가지 경로를 통해 발생한다. 대표적인 오염 경로는 원전시설로부터 방사성 물질 유출에 의한 지하수 오염이다. 원전사고로 인해 연료봉이 손상되어 멜트다운(노심용융)이 일어나면서 녹아내린 연료봉이 원전 주변 땅에 흘러들어 지하수를 오염시키게 된다. 이러한 경우, 그 오염 정도는 매우 심각할 뿐만 아니라, 플루토늄과 같은 반감기가 길고 방사선량이 많은 방사성 물질에 의한 오염이기 때문에 자연적으로 저감되는 속도가 느리다. 멜트다운과 함께 수증기 폭발이 일어난 경우에는 플루토늄 뿐만 아니라 방사성 요오드-131이나 세슘-137, 스트론튬-90과 같은 물질도 함께 유출되는데, 그 중에서 반감기가 짧은 방사성 물질(방사성 요오드-131의 반감기 약 8일)은 지반환경에서의 지하수 유속이 매우 느리기 때문에 원전사고 발생 후 오염원이 확산되기 전에 상당부분 저감되거나 소멸될 가능성이 크고, 반감기가 약 30년인 세슘-137이나 스트론튬-90과 같이 반감기가 긴 방사성 물질은 상당히 오랜 시간동안 지하수에 남아있게 되어 중·장기적인 지하수 오염 정화 작업이 필요하다.

또 다른 오염경로는 원전사고 시 대기나 지표로 방출된 방사성 물질이 빗물을 타고 흘러들어 2차적으로 지하수 오염을 유발하는 것이다. 이 경우에는 대기를 통해 확산된 방사성 물질에 의해서 광역적인 규모의 지하수오염이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 경로를 통한 지하수 오염은, 국내에서의 원전사고뿐만 아니라, 주변 국가에서 원전사고가 발생했을 시 대기에서의 방사성 물질의 확산, 이동이 우리나라에까지 도달할 경우 국내에서도 발생할 수 있다. 이러한 경우는 2차적인 오염이므로 1차적인 오염에 비해 그 오염의 심각성은 상대적으로 작은 편이다. 원전사고가 발생한 지점에서 지리적으로 멀리 위치한 곳에서는 스트론튬-90이나 플루토늄-239와 같이 무거운 방사성 물질은 거의 없고 요오드-131, 세슘-137과 같이 비교적 가벼운 방사성 물질에 의한 오염이 발생한다.

이 외에도 방사성 물질이 낙진에 의해 오염된 지표수가 있을 때, 오염된 지표수가 있는 강이나 하천 등이 손실하

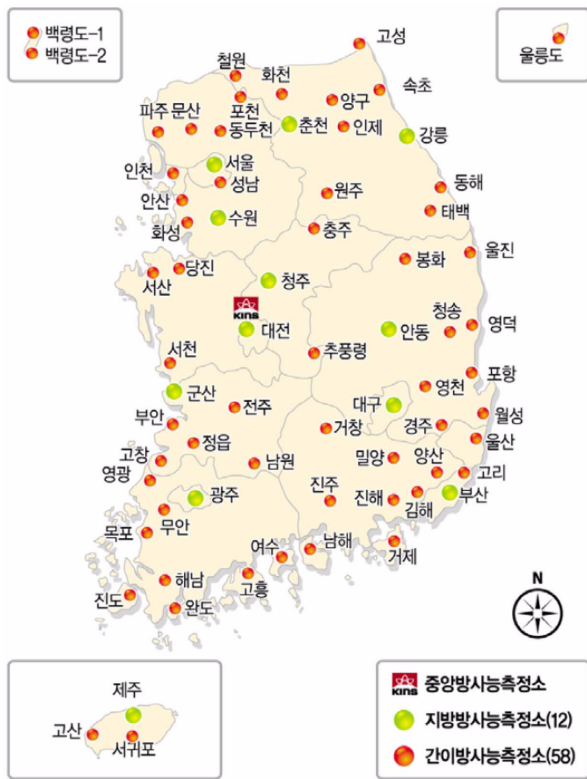


Fig. 1. Operation status of environmental radioactivity auto-monitoring network (Korea Institute of Nuclear Safety, 2010).

천이어서 주변 대수층으로 기저유출이 일어나는 경우, 오염된 지표수가 주변 대수층에 유입되면서 지하수 방사성 오염을 유발할 수 있다.

3. 국내 관리 현황

3.1. 토양·지하수 방사성 오염 관련 감시망 및 프로그램

3.1.1. 방사성 오염 관련 감시망

국내의 방사능 측정소는 12개 지방 측정소와 58개 간이 측정소를 운영하고 있다(Fig. 1). 또한 전국의 방사능 감시는 평상시와 비상시로 구분하여 수행되는데 비상시에는 중앙 방사능 측정소에서 방사능 사고와 관련된 정보를 입수하고 그 영향을 예측하여 방사능 사고 유형에 따라 감시 계획을 수립·운영한다. 전국 12개 지방 방사능 측정소의 방사능 감시는 방사능 비상 조기의 탐지를 목적으로 신속하게 그 변동을 탐지할 수 있는 공간 감마 선량률을 비롯하여 대기 부유진, 낙진, 빗물 및 상수 중의 방사능 농도를 그 대상으로 하고 있다(Table 1). 비상시 환경방사능 감시로는 북한의 핵실험에 대응하기 위하여 교육과학기술부의 「북핵 우발사태」 위기관리 실무매뉴얼에

따라 핵실험진위 여부의 확인 및 만일의 방사능 오염사고에 대비하여 비상시 환경방사능 감시 체제 및 비상대응 훈련을 시행중이다(한국원자력안전기술원, 2010).

후쿠시마 원전사고와 같은 비상시의 환경 방사능 감시는 평상시와 비상시의 감시가 구분되어 있다. 공간선량률의 경우 평상시 15분의 감시주기가 5분으로, 대기부유진 감시는 매월에서 매일 측정으로, 빗물의 경우 매월에서 매강우시마다 측정하도록 한다. 하지만 토양의 경우는 감마핵종을 분석항목으로 하여 평상시와 비상시가 모두 같은 연2회 측정이며, 이 경우의 환경방사능 감시에 지하수는 포함되어있지 않고 전베타를 분석항목으로 하는 수돗물(23개소)에서 주1회 실시하던 감시를 주2회로 늘리는 수준이다(www.kins.re.kr).

전국적인 환경방사능 감시 외에 고리, 월성, 영광, 울진 원자력발전소 부근의 방사성 조사는 토양의 경우 표층토양과 하천토양으로 구분하여 실시한다. Table 2에서 제시된 것과 같이 표층토양의 경우 스트론튬-90, 플루토늄, 우라늄, 감마동위원소를 감시핵종으로 하며 채취 및 분석을 연 2회 실시한다. 또한 하천토양의 경우 우라늄, 감마동위원소를 감시핵종으로 하며 채취 및 분석을 분기별로 1회 실시한다. 일반적인 환경 방사능 감시에는 없던 지하수의 감시는 원자력발전소 부근에서 행해지며, 유사한 관련 매체로는 식수, 지표수, 빗물 등의 감시가 있다. 지하수 감시의 경우 트리튬, 우라늄, 감마동위원소를 감시핵종으로 하여 채취 및 분석을 분기별로 1회 실시한다. 식수의 경우도 지하수와 조사항목 및 주기가 같으며, 빗물과 지표수의 경우에는 전베타, 트리튬, 우라늄, 감마동위원소를 감시핵종으로 하여 월 1회의 채취 및 분석을 실시한다(한국수력원자력주식회사, 2010).

하지만 위에서 살펴본 전국도의 환경 방사성 오염 관련 감시에서 평상시와 비상시의 감시망체제가 크게 다르지 않고, 원자력발전소 부근의 감시에서는 비상시는 어떻게 대처할 것인가에 대한 계획이 수립되어 있지 않다.

3.1.2. 모니터링 프로그램

국내의 방사성 오염 관련 프로그램 및 시스템 중, 한국원자력안전기술원에서 시행되고 있는 대표적인 프로그램으로는 방사능방재기술지원전산시스템(AtomCARE System), 클린 시스템(Computerized Local & overall country's Environmental radioactivity data Analysis Network System, CLEAN System) 그리고 국가방사능상황관리시스템(System for Identifying Radiation in Environments Nationwide, SIREN) 등이 있다.

Table 1. National radiation monitoring plan for 2009 (modified from Korea Institute of Nuclear Safety, 2010)

구 분	감시대상	분석항목	감시주기	시료채취
중앙측정소	공간감마선	공간 감마 선량률 직접 선량(TLD)	연 속 매분기	자동감시망(70개소) 지방/간이 측정소 및 군 방사능 감시 Post
	대기부유진	감마핵종	매 월	중앙 측정소 Post
	낙 진	감마핵종	매 월	중앙 측정소 Post
	빗 물	감마핵종	매 월	중앙 측정소 Post
	우 유	감마핵종	매 월	대전 인근 지역
지방측정소	공간감마선	공간 감마 선량률	연 속	지방 측정소 Post
	대기부유진	전베타/감마핵종	매일/매월	
	낙 진	감마핵종	매 월	
	빗 물	전베타/감마핵종 ³ H 시료채취	강수시/매월 매 월	
	상 수	전베타	매 주	지방 측정소 Post 관할 지역 15개 지점 관할 지역 생산품 솔잎, 쭈
	토 양	감마핵종	연 2회	
	지표수		연 2회	
	쌀, 배추		연 1회	
	지표 식물		연 1회	
	공간 감마선 토양	공간 감마 선량률 감마핵종	연 4회 연 1회	
군연계 감시망	공간감마선	공간 감마 선량률	연 속	국군 화학방어연구소
	공간감마선	직접 선량(TLD)	매분기	성남, 고성, 양구, 화천, 포천, 동두천, 파주, 안산, 화성, 당진, 서천, 진해, 부평, 문산, 철원, 양구, 간성,
	빗 물	³ H 시료채취	매 월	국군 화학방어연구소

Table 2. Checklist for radiation around nuclear power plants (modified from Korea Hydro&Nuclear Power co., 2010)

구 분	조 사 항 목		조 사 주 기	
	환 경 매 체	감 시 핵 종	채취빈도	분석빈도
방사선	환경방사선	공간감마선량률	연속감시	월1회
		집적선량(TLD)		분기1회
육상시료	공 기	전베타, ¹⁴ C, ¹³¹ I, U, 감마동위원소	연속채취	월1회
	공기중 수분	³ H		월2회
	식수 / 지하수	³ H, U, 감마동위원소	분기1회	분기1회
	빗물 / 지표수	전베타, ³ H, U, 감마동위원소	월1회	월1회
	표층 토양	⁹⁰ Sr, Pu, U, 감마동위원소	년2회	년2회
	하천토양	U, 감마동위원소	분기1회	분기1회
	농산물	³ H, ¹⁴ C, ⁹⁰ Sr, U, 감마동위원소	수확기	년2회
	육 류	¹⁴ C, 감마동위원소	년2회	년2회
	우 유	³ H, ⁹⁰ Sr, ¹²⁹ I, ¹³¹ I, 감마동위원소 ¹⁴ C	월1회 월1회	월1회 분기1회
	지표 생물	⁹⁰ Sr, 감마동위원소	년2회	년2회
해양시료	해 수	전베타, ³ H ⁹⁰ Sr, Pu, 감마동위원소	주1회	월1회 분기1회
	해저퇴적물	⁹⁰ Sr, Pu, 감마동위원소	년2회	년2회
	어 · 패류	⁹⁰ Sr, Pu, 감마동위원소	년2회	년2회
	해조류	⁹⁰ Sr, ⁹⁹ Tc, ¹²⁹ I, ¹³¹ I, 감마동위원소	년2회	년2회

방사능방재기술지원전산시스템(AtomCARE System)은 원자력시설의 사고 시에 대응하는 관계자들의 판단을 지

원하는 시스템으로써, 온라인으로 수신된 데이터를 수집 하여 원자력발전소의 안전 운전상태를 실시간으로 확인할



Fig. 2. Rules and regulations related to the utilization of nuclear power in Korea (2011.10.26).

수 있으며 만일의 사고로 방사성 물질이 외부 환경으로 방출되었을 때 지역과 확산정도를 예측한다. 또한 주민의 피해를 최소화하기 위하여 적합한 대응 수립을 마련한다. AtomCARE 시스템은 실시간 정보를 수집하고, 데이터베이스를 유지관리 하며, 정보 처리 및 분석을 통한 해석을 제공하고, 정보 공유 서비스를 통한 의사결정 지원의 기능을 수행한다.

클린 시스템(CLEAN System)은 우리나라 전 국토에 대한 환경방사능 분석 자료의 통합적인 관리 시스템에 대한 개발과 운영을 통하여 정보화 시대에 능동적으로 대처할 수 있도록 고안된 프로그램이다. 환경방사능 분석 자료의 표준 규격화된 데이터베이스 구축은 환경시료의 채취·전처리·분석 등 절차를 객관적으로 확립할 수 있으며, 이를 통하여 환경방사능 기초자료의 체계적 관리와 신뢰성을 제고할 수 있다. 또한, 축적된 방사능 분석 자료의 다양한 통계처리로 환경방사능 현황 및 변동추이 등의 경향 분석과 신속하고 정확한 정보를 제공할 수 있다.

국가방사능상황관리시스템(SIREN)은 기상관측 자료를 확보하여, 방사능 사고 진원지를 역추적할 수 있는 프로그램이다. 동시에 탐사 계획을 중앙에서 일괄적으로 설계 및 관리하여 관련 정보를 빠르고 정확하게 분석할 수 있다. 자동감시망에 이상징후가 포착된 지 얼마 되지 않아 주민들을 대피하고 음식물 섭취 제한령을 내리는 기능도 있으며 정보를 빠르게 입수하여 분석하고 이를 활용하여 정책 결정을 신속하고 정확하게 내릴 수 있는 시스템이다.

SIREN은 중국(16곳)과 일본(56곳) 등 인접국 원자력발전소 주변 75개 지점의 기상관측 자료를 6시간마다 확보하고 이를 활용해 기류 분석을 수행, 방사능 사고 시 방사능 오염물질이 어떻게 확산될지를 예측하여 효과적인 방재대책을 수립할 수 있도록 하는 역할을 한다.

3.2. 토양·지하수 방사성 오염 관련정책

국내의 원자력 안전 관리체계 및 관련 법령 및 정책은, 일본 후쿠시마 원전사고 이후 기존의 비상설 대통령 자문 기구였던 원자력 안전 위원회를 대통령 직속 상설 행정위원회로 바꾸면서, 기존의 교육과학기술부 산하 원자력안전국을 원자력 안전 위원회 산하 사무처에 안전정책국과 방사선방재국으로 조직체계를 새롭게 개편하였다(www.nssc.go.kr). 원자력 안전 위원회의 대통령 직속 상설기구로서의 설치는 처음으로 원자력 안전 업무(안전규제·핵통제·방재 등)가 원자력 진흥(연구·개발) 및 이용(원전 건설·운영·수출 등) 업무로부터 행정상 완전히 분리·독립한다는 데 큰 의의가 있다. 또한 원자력안전위원회의 산하에 방재환경과가 새로 신설되면서 방사성 오염과 환경관련 부서 간의 긴밀한 협조가 요구된다.

원자력 관계 법령은 관련 정책과 긴밀한 협조를 맺고 있으며 Fig. 2에서 보여지듯이, 2011년 7월 25일 기존 원자력 규제와 진흥 방안을 뒤섞어놓았던 원자력법을 원자력안전법과 원자력진흥법으로 분리하여, 2011년 10월 26일에는 「원자력안전법」, 「원자력안전위원회의 설치

및 운영에 관한 법률», 「원자력 시설 등의 방호 및 방사능방재 대책법», 「방사성폐기물 관리법」 등 원자력의 안전 및 규제에 관한 법령과 「원자력진흥법», 「방사선 및 방사성동위원소 이용 진흥법», 「비파괴검사기술의 진흥 및 관리에 관한 법률», 등 이용 및 진흥에 관한 법령, 「한국원자력안전기술원법」 등 원자력 관련 기관 설립 근거법 및 「원자력 손해배상법», 「원자력 손해 배상 보상계약에 관한 법률」 등 원자력 사고에 대비한 민사책임 및 그 책임담보에 관한 법령 등으로 변경하였다(www.law.go.kr).

원전사고에 의한 방사성오염원이 토양·지하수 매체와 같이 원전사고 발생 후 중장기적인 방사성 영향이 있을 가능성이 큰 경우에는 사후조치가 매우 중요하다. 이와 관련하여 방재법의 제3절 사후조치 조항을 살펴보면 ‘재난해제 기술지원본부의 장과 협의하여 방사능재난이 발생한 지역의 중장기 방사능영향을 평가하여 피해복구계획을 수립’하기로 되어있는데, 이 경우에는 방호의 성격보다는 매체별 영향 평가 및 관리의 필요성이 드러나는 조항이 있다. 또한 「방재법」의 제3절의 제 42조에서 제46조를 살펴보면 사후관리에서는 발생지역의 중장기 방사능 영향 평가 및 복구 계획 수립을 위해서 매체별 평가 및 관리를 위한 전문적 지식 및 기술, 그리고 그에 기반한 조치 기준 및 관리지침이 필요하다. 그러나, 위에서 살펴본 바와 같이 현재 우리나라의 방사성 오염 관련 법령 및 관리 체계는 방호 중심으로 이루어져 있으며, 아직까지 토양·지하수를 포함한 매체별로 구분된 방사성 오염관련 지침이나 기준은 마련되어 있지 않은 실정이다.

4. 외국 관리 제도 현황

4.1. 관리체계 및 관련 프로그램

미국의 경우 대통령과 연방정부 그리고 주정부의 체계 하에서 원자력 규제위원회, 연방비상관리청, 국무부, 에너지부, 국립연구소, 상무부 등의 주요기관으로 그 행정체계가 이루어져 있다. 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC)의 감독 하에 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)는 먹는물과 공기 중 방사능물질에 대한 환경관리기준 및 배출허용기준을 설정하고 있고, 방사능 오염과 관련하여 공기, 물 등의 환경 방사능 모니터링(Air and Water)을 제시하고 있다. 이외에 식품의약품안전청(Food Drug and Administration, FDA)가 식품에 대해서, 노동부(Department of Labor, DOL)가 핵관련활동 작업종사자들에 대한 노출권고기준을 제

시하고 있다.

일본의 경우 내각부와 내각 그리고 지방정부의 체계 하에서 과학기술정책위원회, 원자력위원회, 원자력안전위원회, 문부과학성, 경제산업성, 국토교통성, 후생노동성 등의 관계부처가 있다. 원자력 관련기관의 체계를 살펴보면 과학기술정책위원회(Council for Science and Technology Policy, CSTP)는 일본의 과학기술정책을 결정하는 최고 회의기구로 과학기술 진흥을 위한 기본 정책 및 조사·심의 등을 하며 원자력을 포함한 과학기술전반 종합전략 책정, 과학기술기본계획, 과학기술관련 자원 배분 방침, 국가적 중요 프로젝트 평가, 자발적 의견 제안, 정보전달 등의 역할을 수행한다. 원자력 위원회(Atomic Energy Commission, AEC)에서는 원자력의 연구·개발·이용에 관한 정책수립, 예산 배분 등 원자력 관련 중요사항의 기획·심의·결정 등을 수행하며, 1978년 설립된 원자력 안전위원회(Nuclear Safety Commission, NSC)가 있고 원자력의 안전규제 정책수립, 원자력 에너지 이용 전체의 원자력안전·규제, 원자력시설 및 원전의 폐지조치, 원자력방재에 관한 정책수립을 하는 원자력안전보안원이 있다.

중국의 원자력 행정체계로는 정부기관으로는 국무원 이하 산업정보부, 국가환경보호국, 국가발전개혁위원회, 국방과학기술공업위원회, 국가자산관리위 등이 있으며 하위 단계에 정부투자기관인 공사와 연구원 등이 있다. 원자력 관련기관을 살펴보면 국방·과학·공업·기술분야 정책 수립 및 시행, 국가 원자력사업 정책수립을 하는 국방과학기술공업위원회, 원자력 및 방사선 안전규제, 방사선 환경방호 등의 업무를 수행하는 중국의 원자력안전규제기관인 국가핵안전국, 중국의 원자력사업 총괄 운영, 원자력 발전 및 설계(원전, 연구용원자로 등), 핵연료 생산(지질검사, 광산개발, 우라늄 농축 및 핵연료 제조), 동위원소 생산 및 기타 원자력기술 응용분야의 연구를 맡고 있는 중국 핵 공업 집단공사 등이 있다(www.icons.or.kr).

최근 원전사고와 관련하여 미국 환경보호청(EPA)의 방사능 모니터링 시스템인 EPA RadNET 모니터링 네트워크가 주목을 받고 있다. 미국 환경보호청(EPA)은 기존 방사선 모니터링 네트워크의 번호를 통합하여 RadNet을 설립하였다. RadNet 프로그램은 원래 핵무기 시험과 관련된 모니터링 방사선에 대한 초기 감지가 주 담당이었으나 나중에 방사선 응급 모니터링 환경 방사능 수준의 동향에 따라, 선량 계산에 대한 데이터를 제공하도록 확장되었다. 미국은 본토 48개 주 100개 지점에서 대기 중 방사성 물질에 대한 검사를 시행하고 있으며 일본 원전사고 후 하와이와 알래스카, 괌, 북마리아나 제도에도 측정장비를 추

가로 설치하였다(www.epa.gov).

4.2. 지침 및 기준

외국의 경우에도 방사성 오염과 직접적으로 관련된 토양·지하수의 지침 및 기준은 아직 미비한 상황이며, 국제방사선 방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP), 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA), 미국, 일본 등에서 토양·지하수와 관련된 방사성 오염 대응 및 관리지침은 식품섭취를 기준으로 마련하고 있다.

1984년 국제방사선 방호위원회(ICRP)는 방사성관련 사고 후 개입에 대한 계획 수립의 일반적인 원리를 제시하였다. 이 지침은 사고 후 초기단계에서의 보호조치에 대한 소개, 사고 후속 단계에서 광범위한 지역의 다년간에 걸친 보호조치의 도입과 연장 등의 내용을 다루고 있다. 또한 음식물섭취제한 기준을 설정하는데 있어 오염된 식품을 대체하는 경우의 비용이득분석을 적용하였다. 단일 식품에 대한 연간섭취기준을 10mSv로 제한하고 있으며 식품대체가 가능하지 않은 경우에는 더 높은 값도 허용하고 있다(ICRP, 1984).

국제원자력기구(IAEA)는 체르노빌 사고이후 개입준위에 대한 기본원리를 명확히 해야한다는 명제에 따라 국제방사선 방호위원회(ICRP)의 권고, 유엔식량농업기구(Food and Agriculture Organization, FAO)세계보건기구(World Health Organization, WHO)의 국제무역에 있어서의 식품제한기준, 세계보건기구의 주민보호를 위한 유도개입준위 권고 등을 바탕으로 관련 지침을 제정하였다(IAEA, 2006).

미국 환경보호청(EPA)는 원자력사고 또는 방사선 비상에 대응하기 위한 지침으로 “Manual of Protective Action Guides and Protective Actions for Nuclear Incidents; (PAG)(US EPA; 1991)를 출간하여 방사선 비상대책에 적용하고 있다. 이 보고서는 식품에 대한 보호조치기준으로 1982년 식품의약품안전청(FDA)에 의해 발간된 Accidental Radioactive Contamination of Human Food and Animal Feeds; Recommendations for State and Local Agencies를 제시하고 있다.

일본의 경우 지방공공단체가 독자적 판단에 의해 재해대책본부를 설치하는 것을 정부가 권고하며 초기활동을 개시하는 기준으로 발전소 주변 모니터링 포스트에서 실측된 공간방사선량률이 10 μ Gy/h(1 mR/h)이상의 값, 또는 주민이 거주하거나 활동하는 장소에서 5 mSv(500 mrem)을 제안하고 있다(원자력안전위원회, 2000; 한국원자력안

전기술원, 2000). 음식물섭취에 제한에 있어서는 방사성 오염물질 중 옥소, 우라늄 및 플루토늄을 선정하는 동시에 구 소련 체르노빌 사고 시의 경험을 감안하여 세슘을 선정하였다. 방사성 옥소의 경우 ICRP-63 등의 국제적 동향을 감안 갑상선등가선량 50mSv/년을 기조로 하여, 음료수, 우유, 유제품 및 야채류(무, 당근류는 제외)의 3가지 식품종류에 대한 지표를 책정하였다. 방사성세슘 및 스트론튬에 있어서는 식품섭취제한 지표 도입을 고려하여 전 식품을 음료수, 우유·유제품, 야채류, 곡류 및 육류·계란·생선·기타의 다섯가지 종류로 나누어 지표를 산정하였다. 구체적으로는 실효선량 5 mSv/년을 각 식품종류에 균등하게 1/5씩 할당하고, 이들식품의 섭취량 및 방사성세슘 및 스트론튬의 기여를 고려하여 각 식품 종류마다 세슘-134 및 세슘-137에 대한 섭취제한 지표를 산출하였다. 우라늄의 경우 핵연료시설의 방재대책을 보다 실효성 있게 하기위해서 우라늄에 대한 일본의 식생활 등을 고려하여 지표를 정한다는 지침에 따라 실효선량 5 mSv/년을 기조로 전 식품을 음료수, 우유·유제품, 야채류, 곡류 및 육류·계란, 어류, 기타의 5가지 종류로 나누어 지표를 선정하였다.

5. 향후 정책방향 및 결론

국내의 기상학적 특성으로 인하여 최근 발생한 일본 후쿠시마 원전사고의 방사성 오염이 미치는 영향은 적을 것으로 전망되지만, 과거 체르노빌 원전 사고시 유럽 전체에 이르는 광범위한 영역이 오염되었고, 기상학적 특성이나 주변국의 원전 상황은 변할 수 있으므로 모든 상황에 대비할 필요가 있다. 토양 및 지하수(먹는물)의 방사성 오염은 직접적인 영향뿐만 아니라 농축산물의 섭취에 의한 내부피폭으로 인해 인체 및 생태계에 장기적이고 지속적인 영향을 미칠 수 있다. 원전사고로 인해 토양·지하수가 오염되었을 경우 오염 정화에는 장기적인 시간이 소요되며, 방사성오염으로 인한 공포감 때문에 정화를 한다 하더라도 오염된 지역에 대해 불안감을 지니게 된다. 우리나라는 토지집약적인 국가이므로, 일본 후쿠시마와 같은 원전사고가 발생하거나 주변국의 원전사고의 피해에 직접적으로 노출된 경우, 오염된 지역에서 영구이주를 하거나 그 지역을 폐쇄하는 일은 현실적으로 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 원전사고 시 토양·지하수 방사성 오염에 대한 적극적인 대책마련을 위해 현재 국내·외에서 시행되고 있는 감시망 및 프로그램과 관련정책을 살펴보고 이를 바탕으로 향후 국내 방사성오염의 토양·지하수관리를 위

해 다음과 같은 관리 방향을 제안하였다.

5.1. 토양·지하수 내 환경방사능 감시망 및 프로그램 개선

국내·외 원전사고 발생 시, 전국 단위의 토양·지하수 방사성 물질의 농도를 감시하고 분석하는 등의 환경방사능 감시를 강화시킬 필요가 있다.

현재 국내 토양 방사능 조사는 평상시와 비상시 모두 12개 지방방사능측정소에서 매년 2회씩 조사하고 있지만 이는 부족한 실정이다. 과거 1997년 853개 지점의 전국 환경방사능조사가 이루어졌지만 일본 원전 사고 이후 전국 단위의 조사가 이루어지지 않았다. 지하수 모니터링도 원자력 시설 또는 방사성 폐기물 처리장 주변에 극히 소수의 관정에서만 이루어지고 있다. 우리나라의 혹은 주변 국가에서 원전사고가 발생하였을 경우, 오염된 경우 또는 낙진에 의해 오염된 지표수로 인한 지하수 오염 여부를 모니터링 할 수 있는 시스템이 전혀 갖추어지지 않은 상황이다.

이를 위해 원전사고 발생과 같은 비상시에는 유관기관의 토양·지하수 수질 측정망을 활용하여 유사시 신속하게 대응하고 정보를 공유해야 할 것이다. 또한 다른 오염 측정과는 달리 방사성 물질의 측정은 매우 어려워 전문성이 요구된다. 특히 스트론튬은 측정을 위한 전처리 과정이 상당히 까다롭고 오래 걸리기 때문에 토양 방사능 조사 항목에 포함되지 않고 있다. 따라서 전 핵종에 대한 검사 항목의 확대와 방사능 측정 숙련도 및 정확도의 향상을 위한 교육 및 프로그램 지원 등 비상시 대응을 위한 국가적 인프라를 구축하여야 한다.

마지막으로 토양, 지하수 내 환경 방사능의 감시를 강화하기 위한 기술개발에도 적극적으로 투자해야 할 것이다. 원전사고 현장과 그 주변지역의 방사능 모니터링은 추후 방재 대책을 수립하는 데에 있어서 중요한 정보를 제공한다. 일본 후쿠시마 원전사고 발생과 관련하여 미군 무인 정찰기인 글로벌 호크는 원전 상공에서 고성능 카메라로 원전내부를 촬영해 방사능 누출 상황을 파악하는 데 직접적 도움을 제공했다. 이와 같이 원전사고 발생 시 현장과 그 주변지역의 모니터링이 어려울 경우 환경 매체에서의 방사능 모니터링 기술을 개발하는 데에 보다 적극적인 투자가 필요할 것이다.

5.2. 원전사고에 따른 방사성오염의 토양·지하수 관리체계 개선

최근 원자력 안전 위원회가 대통령 직속 상설 기관으로 출범한 것과 연계하여 기존 교육과학기술부에서 주관하던

관리체계가 근본적으로 개선되어야 한다. 원자력 관리조직이 대통령 직속기관으로 구성된 외국의 사례를 바탕으로 우리나라의 원자력 관리 체계의 개선 방향을 제안하면 다음과 같다.

원자력규제위원회(NRC)를 대통령 직속기관으로 두고 있는 미국의 경우, NRC 감독하에 환경보호청(EPA)은 먹물과 공기 중 방사능물질에 대한 환경관리기준 및 배출 허용기준을 설정하고 있다. 미국환경보호청(EPA)에서는 방사능 폐기물 관리(Waste Management), 방사능 오염지역 복원(EPA and Multi-Agency Cleanup), 방사능 오염사고 대응 및 대비(Emergency Response), 공기, 물 등의 환경 방사능 모니터링(Air and Water), 환경 방사능 오염원 관리(Source Reduction and Management), 라돈 등 자연방사능 모니터링(Naturally-Occurring Radiation), 연방 정부 차원의 방사능물질 위해성평가 지침 마련(Risk Assessment and Federal Guidance) 등의 방사능오염 관련 프로그램이 있다. 다시 말해, 원자력규제위원회에서 매체별 평가 및 관리에 관한 업무는 환경보호청에서 관할하고 있다는 것이다. 우리나라의 경우도 방사성 오염의 매체별 감시체계와 오염 관리 및 오염지역 복원 등을 위해 원자력안전위원회의 지시 하에 효율적으로 관리할 수 있는 역할 분담과 프로그램이 필요할 것으로 생각된다.

5.3. 방사성 물질로 오염된 토양·지하수 복원을 위한 정책방향

방사성 물질로 인해 심각하게 오염된 토양 및 지하수를 정화하고 오염지역을 복원하는 데에 있어서 필요한 기술을 개발하고 기술지원에 대한 역할 분담을 할 필요가 있다. 체르노빌 원전사고 후 방사선 축적을 줄이기 위한 토양처리 및 여러 제염 기술이 사용되었지만 여전히 구 소련 내의 많은 지역이 사용되지 않고 있다. 하지만 우리나라의 경우 국토가 좁고 인구밀도가 높은 점을 고려하여, 원전사고 시 방사선 방호 대책 외에 보다 적극적인 토양·지하수 오염 복원 노력이 이루어 져야 할 것이다.

현재 우리나라 「원자력안전법」에는 원자력 시설 운영에 의한 방사성 오염에 대해 운영자 또는 관계 사업자를 상대로 방사성 물질 제거 등에 대한 조치를 명시하고 있으나, 「방재법」에는 비상시 대응시설로 방사능오염 제거 시설 및 장비를 확보하도록 명시하고 있을 뿐, 방사성 오염의 제거 또는 정화 등에 관한 구체적인 내용이 결여되어 있다. 중장기적인 토양·지하수 복원의 내용이 보완되어야 한다.

또한 국내에서 원전사고가 발생한다면, 방사성 오염의

확산 및 피해를 방지하기 위해 원전 주변을 중심으로 신속한 토양·지하수 정화 작업이 이루어져야 한다. 주변국 원전사고의 경우 저선량의 방사선 노출도 장기적으로 중요한 영향을 미칠 수 있으므로 전국 단위의 토양·지하수 방사성 감시를 강화하고, 영향력이 큰 지역을 중심으로 하여 현실적인 오염대책이 이루어 져야 하며, 특히 농경지와 식품에 대한 엄격한 관리와 관련지침이 필요하다.

또한 방사성 오염이 발생한 원인 및 경로에 따라 오염 토양 및 지하수의 정화, 복원을 위한 전반적인 flow work을 개발하고 기술지원에 대한 역할 분담 체계를 구축할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국환경정책·평가연구원의 수시연구과제 “재난성 원전사고에 따른 방사성오염의 토양·지하수관리 방향 마련” 연구의 일부분으로써 한국환경정책·평가연구원의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김영진, 2011, 토양 및 지하수의 방사능오염과 복원방향, *Rural Resources*, 53(2), 19-24.

원자력안전위원회, 2000, 원자력시설 등의 방재대책에 대하여.
한국수력원자력주식회사, 2010, 원자력발전소 주변 환경방사선 조사계획.

한국원자력안전기술원, 2000, 원자력발전소 등 주변의 방재대책에 대하여.

한국원자력안전기술원, 2010, 원자력 안전백서.

IAEA, 2006, Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience, Report of the Chernobyl Forum Expert Group' Environment, International Atomic Energy Agency.

ICRP, 1984, Protection of the Public in the Event of Major Radiation Accidents: Principles for Planning, International Commission on Radiological Protection.

Tepei J. Yasunari, Andreas Stohl, Ryugo S. Hayano, John F. Burkhardt, Sabine Eckhardt, and Tetsuzo Yasunari, 2011, Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, no.49, vol.108, 19530-19534.

US EPA, 1991, Manual of Protection Action Guides and Protection Actions for Nuclear Incidents, United States Environmental Protection Agency.