

Evaluation of Separation Distance from the Temporary Storage Facility for Decontamination Waste to Ensure Public Radiological Safety after Fukushima Nuclear Power Plant Accident

후쿠시마 원전 사고 이후 일반인의 방사선학적 안전성 확보를 위한 제염폐기물 임시저장시설 이격거리 평가

Min Jun Kim, A Ra Go, and Kwang Pyo Kim*

Kyung Hee University, 1732, Deokyeong-daero Giheoung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

김민준, 고아라, 김광표*

경희대학교, 경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732

(Received April 12, 2016 / Revised June 8, 2016 / Approved June 20, 2016)

The object of this study was to evaluate the separation distance from a temporary storage facility satisfying the dose criteria. The calculation of ambient dose rates took into account cover soil thickness, facility size, and facility type by using MCNPX code. Shielding effects of cover soil were 68.9%, 96.9% and 99.7% at 10 cm, 30 cm and 50 cm respectively. The on-ground type of storage facility had the highest ambient dose rate, followed by the semi-ground type and the underground type. The ambient dose rate did not vary with facility size (except $5 \times 5 \times 2$ m size) due to the self-shielding of decontamination waste in temporary storage. The separation distances without cover soil for a $50 \times 50 \times 2$ m size facility were evaluated as 14 m (minimum radioactivity concentration), 33 m (most probably radioactivity concentration), and 57 m (maximum radioactivity concentration) for on-ground storage type, 9 m, 24 m, and 45 m for semi-underground storage type, and 6 m, 16 m, and 31 m for underground storage type.

Keywords: Fukushima NPP accident, Decontamination waste, Temporary storage facility, Ambient dose rate, Separation distance

*Corresponding Author.

Kwang Pyo Kim, Kyung Hee University, E-mail: kpkim@khu.ac.kr, Tel: +82-31-201-2560

ORCID

Min Jun Kim <http://orcid.org/0000-0001-5487-2267>

A Ra Go <http://orcid.org/0000-0003-1878-3827>

Kwang Pyo Kim <http://orcid.org/0000-0003-0544-2978>

후쿠시마 원전사고 이후 광역의 방사성 오염부지가 발생되었으며, 이에 대한 제염작업으로 인하여 다량의 제염폐기물이 발생하였다. 일본에서는 이를 보관하기 위하여 각 지역에 임시저장시설이 운영되고 있으며, 이들 시설들은 피난지시해제가 이루어진 지역의 일반인에 대하여 방사선학적 영향을 미칠 것으로 판단된다. 본 연구에서는 임시저장시설 인근에 거주하는 일반인의 방사선학적 안전성 확보를 위하여 임시저장시설 특성에 따른 거리별 공간 방사선량률 및 선량제한치를 만족하는 임시저장시설로부터의 이격거리를 평가하였다. 이를 위해 임시저장시설의 형태 및 크기, 복토 두께 등을 고려하였으며, MCNPX를 이용하여 방사선량률을 평가하였다. 복토에 의한 차폐효과는 두께가 10 cm일 때 68.9%, 30 cm일 때 96.9%, 50 cm일 때 99.7%로 나타났다. 임시저장시설 형태에 따른 공간 방사선량률은 지상 보관형일 때 가장 높게 나타났으며, 이어서 반지하 보관형, 지하 보관형일 순으로 나타났다. 임시저장시설 크기에 따른 공간 방사선량률은 $5 \times 5 \times 2$ m 시설을 제외한 시설에 대하여 유사하게 나타났다. 이는 임시저장시설 내 적재된 제염폐기물에 의하여 자기차폐가 이루어지기 때문이다. 최종적으로 크기가 $50 \times 50 \times 2$ m이고, 복토가 없는 임시저장시설의 경우, 지상 보관형의 평가된 이격거리는 14 m(최소농도), 33 m(최빈농도), 57 m(최대농도)이며, 반지하 보관형의 이격거리는 9 m(최소농도), 24 m(최빈농도), 45 m(최대농도), 지하 보관형의 이격거리는 6 m(최소농도), 16 m(최빈농도), 31 m(최대농도)로 나타났다.

중심단어: 후쿠시마 원전사고, 제염폐기물, 임시저장시설, 방사선량률, 이격거리

1. 서론

2011년 3월 일본 동북부 지역에 규모 9의 지진 및 연이은 해일로 인하여 후쿠시마 원자력발전소(이하 원전) 사고가 발생하였다. 이로 인해 다량의 방사성 물질이 대기로 방출되었으며, 이 중 약 22%의 방사성 세슘이 토양으로 침적되었다[1]. 이에 따라 일본 전역에 광역의 방사성 오염부지가 발생하였으며, 일본 정부에서는 '2011년 3월 11일에 발생한 동북지방 태평양 앞 바다의 지진에 따른 원자력발전소의 사고에 의해 방출된 방사성 물질에 대하여 환경 오염을 대처하기 위한 특별조치법' (이하 방사성 물질 오염대처 특조법)을 제정하여 원자력 재해에 대한 방재 대책 및 환경 복원 방안을 계획하였다. 방사성 물질 오염대처 특조법에서는 제염특별지역(연간 20 mSv 이상)에 대하여 단계적이고 신속한 제염을 통한 오염 지역 축소를 목표로 하고 있으며, 오염상황 중점조사지역(연간 20 mSv 미만)의 경우 추가 피폭방사선량을 장기적으로 연간 1 mSv 이하를 목표로 제염을 실시하고 있다[2,3].

현재까지 일본에서는 방사성 오염부지에 대한 제염작업을 활발히 수행하고 있다. 제염특별지역의 경우 일본 정부에서 직접적으로 제염작업을 관리하고 있으며, 오염상황 중점조사지역에서는 각 시정촌에서 별도의 관리가 이루어지고 있다. 제염특별지역 내(귀환관란구역 제외) 도로의 경우

약 10 km², 농지의 경우 54 km², 산림의 경우 46 km²에 대하여 제염작업을 완료하였다[4]. 오염상황 중점조사지역 내 제염작업은 지정된 60 곳의 시정촌 중 제염 실시계획을 미수립한 2곳의 지역을 제외한 58 곳의 시정촌에 대하여 도로는 약 5,300 km, 농지 및 목초지는 약 14 km², 생활권 인근에 위치한 산림의 경우 3 km²를 완료하였다[5]. 이러한 제염작업으로 인하여 다량의 제염폐기물이 발생하였으며, 그 양은 약 2,200 만 m³으로 추정된다[6]. 일본 환경성에서는 제염작업으로 발생된 폐기물들을 처분하기 위하여 대책지역 내 폐기물 관리 계획을 수립하였다[7]. 폐기물 관리 계획에 따르면 제염작업 직후 약 3년간 임시저장시설에 제염폐기물들을 보관하며, 이후 중간저장시설로 이송하여 약 30년 동안 보관 및 관리하도록 하고 있다. 이후 최종 처분장의 건설이 이루어지면, 최종 처분장으로 제염폐기물을 이송 후 관리하도록 명시하고 있다.

제염작업 직후 폐기물 보관이 이루어지는 임시저장시설은 제염작업이 이루어진 각 지역에서 운영되고 있다. 현재 임시저장시설은 제염특별지역의 경우 약 11 곳의 시정촌에서 261 개소가 운영되고 있으며, 폐기물 보관량은 약 560 만 m³에 달한다[8]. 오염상황 중점조사지역 내 임시저장시설은 현장보관 지점을 포함하여 약 23,678 개소의 저장시설이 운영되고 있으며, 보관량은 약 42 만 m³에 이르고 있다[9].

중간저장시설 및 최종 처분시설 건설 시 관련 기술요소 확보 및 부지 선정 등 수 년에서 수십 년 이상 소요될 것으로 예상되므로 원전사고 이후 제염폐기물 임시저장시설의 운영은 불가피한 선택이다. 2015년 3월 중간저장시설이 개설되어 일본 정부는 임시저장시설 내 보관되어있는 제염폐기물들에 대한 운반 작업을 시작하였다[10, 11]. 그러나 중간저장시설의 폐기물 저장용량에 한계가 있어 임시저장시설 내 제염폐기물 보관이 장기화가 이루어질 전망이다. 또한 임시저장시설의 경우 생활권 인근에 노출되어 있으므로 피난지시해체가 이루어진 지역에 대하여 귀환 거주민의 방사선학적 안전성 확보가 필요한 실정이다. 일본 임시저장시설 기술지침서 및 제염폐기물 보관 지침서에 따르면 임시저장시설로부터 발생한 방사선에 의한 일반인 추가 피폭방사선량을 감소시키기 위해 이격거리 확보 및 복토 설치 등의 필요한 조치를 강구해야 한다고 제시하고 있다[12,13].

본 연구에서는 임시저장시설 인근에 위치하는 일반인들의 방사선학적 안전성 확보를 위하여 일반인 선량제한치를 만족시키는 임시저장시설의 이격거리를 평가하였다. 이격거리를 평가하기 위해 임시저장시설 내 복토로 인한 차폐 영향을 평가하였으며, 임시저장시설 형태 및 크기에 따른 공간방사선량률을 평가하였다. 이를 바탕으로 임시저장시설 특성에 따른 일반인 선량제한치를 만족시키는 이격거리를 평가할 수 행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 제염폐기물 특성

임시저장시설 내에 보관되어있는 제염폐기물은 대부분 불가연성 제염폐기물로서 전체 폐기물량 중 약 75%가 제염작업으로 인하여 발생된 오염토양 폐기물로 구성되어 있다 [9]. 또한 제염폐기물은 톤 백(플렉서블 컨테이너)에 포장되어 임시저장시설 내에 보관되고 있으며, 톤 백 용기는 빗물 침투 방지 및 오염 토양 분진의 비산 방지 등을 목적으로 하고 있어 차폐 효과가 매우 미미하다[12,13]. 제염폐기물 내 주요 방사성 핵종은 ^{134}Cs 및 ^{137}Cs 이며, 방사능 농도는 제염작업 지역에 따라 다양하게 분포하고 있다. 일본 환경성에 따르면 임시저장시설 내 보관중인 제염폐기물의 방사능 농도는

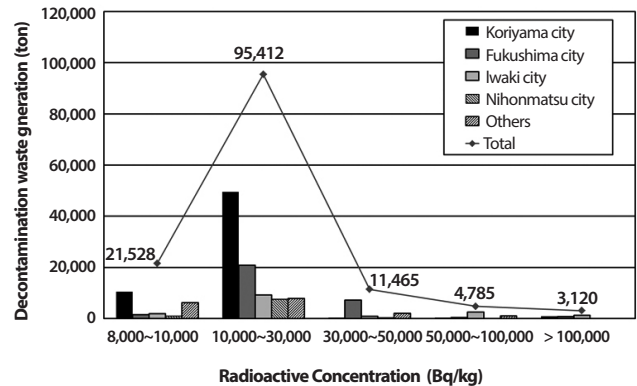


Fig. 1. Quantity of decontamination waste generation under radioactive concentration [14].

Table 1. Density and elemental compositions of soil

Property	Value	
Density (g/cm ³)	Cover soil	1.6
	Contaminated soil	1.6
Elemental Composition (%)	H	2.2
	O	57.5
	Al	8.5
	Si	26.2
	Fe	5.6

10,000~30,000 Bq/kg 구간에서 발생량이 가장 높게 나타나고 있다[14]. Fig. 1에 제염작업 지역별 발생된 제염폐기물 방사능 농도 분포를 나타내었다.

본 연구에서는 임시저장시설의 공간 방사선량률을 평가하기 위하여 상기 제염폐기물의 특성을 고려하였다. 제염폐기물의 구성성분 및 밀도는 국제방사선단위위원회(ICRU) 간행물 53에서 제시하는 토양 1형 자료로 설정하였다[15]. Table 1에 본 연구에서 설정한 토양의 밀도 및 구성성분에 대하여 나타내었다. 제염폐기물 내 함유된 방사성 핵종은 ^{134}Cs 및 ^{137}Cs 로 고려하였으며, 이들의 방사성 핵종에 따른 방사능 농도 비율은 후쿠시마 원전사고 초기 비율인 1:1로 설정하였다[16]. Table 2에 본 연구에서 고려한 ^{134}Cs 과 ^{137}Cs 의 감마선 에너지 및 방출 분율을 나타내었다. 제염폐기물 방사능농도의 경우 임시저장시설 내 폐기물 저장 현황을

바탕으로 최소값, 최빈값, 최대값으로 설정하였으며, 이는 각각 8,000 Bq/kg, 30,000 Bq/kg, 100,000 Bq/kg이다.

2.2 임시저장시설 특성에 따른 공간 방사선량을 평가

임시저장시설은 제염폐기물로부터 발생하는 방사선에 의하여 인근에 위치하는 일반인의 피폭방사선량을 저감하기 위하여 필요에 따라 복토를 실시한다. 복토는 작업의 효율성 및 시설의 유지관리 등을 고려하여 톤 백 등에 넣어 임시저장 시설의 측면과 상부에 설치하고 있다. 임시저장시설 형태의 경우 해당 지역의 지형도, 토지이용도, 지질도, 기상정보, 지하수 특성 등을 고려하여 안전성이 확보된 최적의 형태를 선정하여 설계한다[12]. 현재 일본에서 고려하는 임시저장시설의 형태는 크게 지상 보관형, 지하 보관형, 반지하 보관형으로 구분되며, 특수한 상황의 경우 경사지 보관형을 설치할 수 있으나 토사 재해의 영향을 피하기 위해 일본에서는 경사지 보관형 설치를 지양하고 있다. 임시저장시설의 크기는 제염폐기물의 발생량 및 지형적 요소를 고려하여 설계되며, 임시저장시설의 크기에 따라 저장시설 내 보관되는 제염폐기물 양이 상이하다. 높이의 경우 구조적 안전성을 유지하기 위하여 각 층의 폐기물 적재량을 달리한다. Fig. 2에서는 임시저장시설의 형태 및 구조 단면도를 나타내었다.

본 연구에서는 임시저장시설의 복토로 인한 차폐 영향을 평가하기 위하여 복토두께에 따른 거리 별 공간 방사선량을 평가하였다. 복토의 구성성분 및 밀도의 경우 앞서 나타난 오염 토양의 특성과 동일하게 설정하였으며, 복토 두께 조건인 경우 10 cm, 30 cm, 50 cm에 대하여 평가를 수행하였다. 임시저장시설의 형태는 지상 보관형, 지하 보관형, 반지하 보관형을 고려하였으며, 크기의 경우 5 × 5 × 2 m, 20 × 20 × 2 m, 50 × 50 × 2 m, 100 × 100 × 2 m, 200 × 200 × 2 m로 총 5개의 임시저장시설 크기 조건에 대하여 평가를 수행하였다. 임시저장시설 내 1층 및 2층의 폐기물 적재량은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 임시저장시설 형태에 따라 다르게 설정하였다. 본 연구에서는 위의 조건을 바탕으로 임시저장시설 형태 및 크기에 따른 지표면에서 높이 1 m 지점에서의 거리 별 공간 방사선량을 평가하였다. 공간 방사선량을 평가는 MCNPX 전산코드와 국제방사선방호위원회(ICRP) 74 간행물에서 제시하는 공간 방사선량을 환산인자를 이용하여 실시하였다[17].

Table 2. Gamma radiation energies and yields of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs

Nuclide	Energy (MeV)	Yield (#/decay)
¹³⁴ Cs	0.563	0.084
	0.569	0.154
	0.605	0.976
	0.796	0.855
	0.802	0.087
	1.365	0.030
¹³⁷ Cs	0.662	0.851

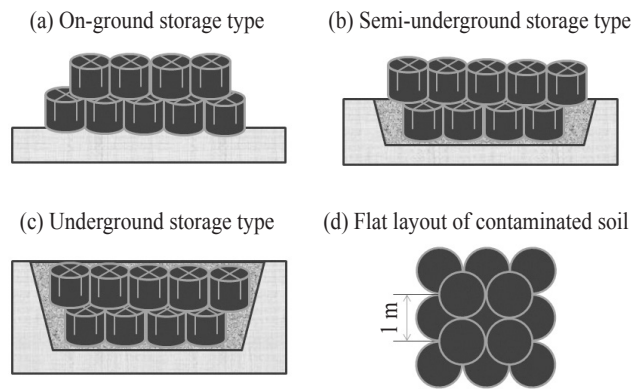


Fig. 2. Different types of temporary storage facility: (a) On-ground storage type, (b) Semi-ground storage type, (c) Underground storage type and (d) Flat layout of contaminated soil.

2.3 선량제한치를 만족하는 이격거리 평가

임시저장시설의 특성에 따른 거리 별 공간 방사선량을 이용하여 선량제한치를 만족하는 이격거리를 평가하였다. 일본 정부는 제염지역 구분 및 공간 방사선량률 기준을 마련하기 위하여 일반인에 대한 연간 피폭방사선량 계산 시 아래 식을 이용하였다[18, 19].

$$E = (H - B) \times (t_{out} + t_{in} \times SF) \times 365 \quad (1)$$

여기서 E는 연간 피폭방사선량(mSv/y), H는 해당지역의 공간 방사선량률(μ Sv/h), B는 배경준위(μ Sv/h), t_{out} 는

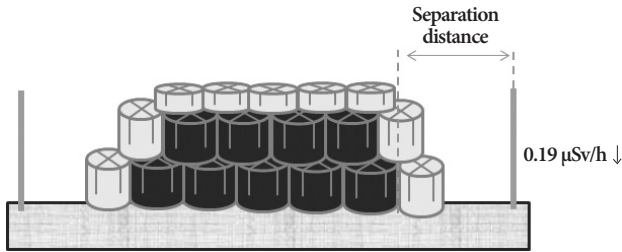


Fig. 3. Temporary storage facility with fence satisfying dose criteria.

실외 거주시간(hour), t_{in} 는 실내 거주시간(hour), SF는 실내 차폐계수이다. 일본에서 제시한 공간 방사선량률 기준인 $0.23 \mu\text{Sv/h}$ 은 일반인 선량한도인 연간 1mSv 에 대하여 도출되었으며, 실외 거주시간 및 실내 거주시간은 각 8시간, 16시간으로 설정하였다. 또한 일본 제염 지역의 대부분 주거형태는 목조건물이므로 건물특성에 해당하는 차폐계수인 0.4를 적용하였으며, 배경준위를 $0.04 \mu\text{Sv/h}$ 로 설정하였다. 이에 따라 본 연구에서는 일본 공간 방사선량률 기준에서 배경준위를 제외한 $0.19 \mu\text{Sv/h}$ 를 선량제한치로 선정하였으며, 이에 적합한 임시저장시설 특성에 따른 이격거리를 평가하였다(Fig. 3).

3. 결과 및 고찰

3.1 복토 두께에 따른 거리 별 공간 방사선량률

Fig. 4에 지상 보관형 임시저장시설의 크기가 $50 \times 50 \times 2 \text{m}$, 제염폐기물의 방사능 농도가 $30,000 \text{Bq/kg}$ 일 때 복토 두께에 따른 거리 별 공간 방사선량률을 나타내었다. 임시저장시설 거리에 따른 공간 방사선량률은 복토 두께가 증가할수록 감소하였다. 복토에 의한 차폐효과는 10 cm일 때 68.9%, 30 cm일 때 96.9%, 50 cm일 때 99.7%로 나타났다. 본 연구에서는 상기 결과를 일본재해대책본부(NERHQ)에서 실측한 임시저장시설의 복토 영향평가 결과와 비교하였다[20]. 비교 결과 복토 두께가 10 cm일 때 5%, 30 cm일 때 1%의 오차를 보였으며, 본 연구의 결과와 유사하게 나타났다.

임시저장시설 내 복토로 인한 영향은 공간 방사선량률 결과에 큰 영향을 나타내었다. 복토 두께를 증가시킬수록

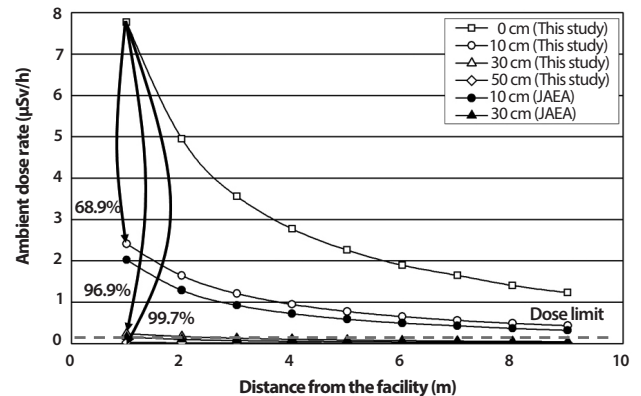


Fig. 4. Ambient dose rate by thickness of cover soil when the size of temporary storage was $50 \times 50 \times 2 \text{m}$ and concentration of contaminated soil was $30,000 \text{Bq/kg}$.

공간 방사선량률이 크게 감소하였다. 그러나 복토의 경우 오염되지 않은 토양 및 오염된 토양을 정화하여 사용하므로 복토 두께가 증가할수록 복토 생산에 해당하는 비용 손실이 증가할 것이다. 따라서 본 연구의 결과를 바탕으로 임시저장 시설 설계 시 경제적 측면을 고려하여 최적의 복토 두께를 설정할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 임시저장시설 형태에 따른 거리 별 공간 방사선량률

Fig. 5에 임시저장시설의 크기가 $50 \times 50 \times 2 \text{m}$, 제염폐기물의 방사능 농도가 $30,000 \text{Bq/kg}$ 일 때 임시저장시설 형태에 따른 거리 별 공간 방사선량률을 나타내었다. 공간 방사선량률은 지상 보관형에서 가장 높게 나타났으며, 이어서 반지하 보관형, 지하 보관형 순으로 나타났다. 복토가 없을 경우 반지하 보관형은 지상 보관형에 비해 공간 방사선량률이 38% 감소하였으며, 지하 보관형의 경우 44% 감소하였다. 임시저장시설로부터 거리가 멀어짐에 따라 지상 및 반지하 보관형의 경우 1 m 이격거리의 공간 방사선량률에 비해 거리에 따라 평균 약 56%(3 m 거리에서), 72%(5 m), 80%(7 m), 84%(9 m) 감소하였다. 지하 보관형의 경우 64%(3 m 거리에서), 80%(5 m), 86%(7 m), 90%(9 m) 감소하여 지상 및 반지하 보관형에 비해 거리에 따른 공간 방사선량률이 빠르게 감소하였다.

국내 유사사고 발생 시 최종적으로 적용할 임시저장시설

형태는 공간 방사선량을 결과, 각 시설의 구조적 안전성, 운반 용이성, 비용적 측면 등을 고려하여 최적의 형태를 선정하여야 한다. 반지하 보관형과 지상 보관형의 경우 공간 방사선량은 기준치 이하로 나타나지만 일본의 임시저장시설 기술지침에 의하면 지상 보관형에 비해 지상과 지하부분의 경계를 통한 강수 침투 위험성이 높아 이에 대한 대책이 필요하다고 제시하고 있다. 또한 반지하 및 지하 보관형의 경우 굴착 시에도 구조적 안전성을 확보하기 위하여 시추 조사가 우선적으로 실시되어야 하며, 다량의 굴착 토양이 발생할 경우 이를 보관할 장소가 추가적으로 필요하다고 제시하고 있다. 지상 보관형은 다른 형태의 시설에 비해 공간 방사선량이 높게 나타나지만, 제염폐기물의 이동, 반출 등이 용이하다는 장점이 있다. 이는 제염폐기물 운반 및 보관 작업자의 작업 편의성을 높여 작업시간을 단축시키고 결과적으로 작업자의 피폭방사선량을 감소시킨다. 또한 지상 보관형은 시설의 유지보수가 용이하며 제염폐기물 양에 따라 유동적으로 시설의 크기를 변경할 수 있다는 장점이 있다. 이 뿐만 아니라 지상 보관형은 제염폐기물의 반출 후 굴착이 이루어진 다른 형태에 비해 부지복원이 용이하다. 따라서 지상 보관형의 공간 방사선량이 다른 형태에 비해 높게 나타났으나 기타 요인들을 종합적으로 고려해 보았을 때 적절한 두께의 복토가 존재한다면 지상 보관형이 가장 적합한 임시저장 시설 형태로 판단된다.

3.3 임시저장시설 크기에 따른 공간 방사선량률

Fig. 6에 방사능 농도가 30,000 Bq/kg, 복토가 없는 경우 임시저장시설 크기에 따른 거리 별 공간 방사선량률을 나타내었다. 임시저장시설의 크기 $5 \times 5 \times 2$ m 를 제외한 시설에 대하여 공간 방사선량률의 결과는 비교적 유사하게 나타났다. 상기 시설에서 거리에 따른 공간 방사선량률은 1 m에서 $6.5 \mu\text{Sv/h}$, 3 m에서 $2.0 \mu\text{Sv/h}$ (1 m 를 기준으로 70% 수준), 5 m에서 $0.9 \mu\text{Sv/h}$ (86%), 7 m에서 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ (92%), 9 m에서 $0.3 \mu\text{Sv/h}$ (95%)로 나타났다. 시설크기가 $5 \times 5 \times 2$ m일 경우 다른 시설크기에 비해 공간 방사선량률이 거리에 따라 빠르게 감소하였으며, 1 m에서 $7.7 \mu\text{Sv/h}$, 3 m에서 $3.6 \mu\text{Sv/h}$ (54%), 5 m에서 $2.2 \mu\text{Sv/h}$ (71%), 7 m에서 $1.6 \mu\text{Sv/h}$ (79%), 9 m에서 $1.2 \mu\text{Sv/h}$ (84%)로 나타났다.

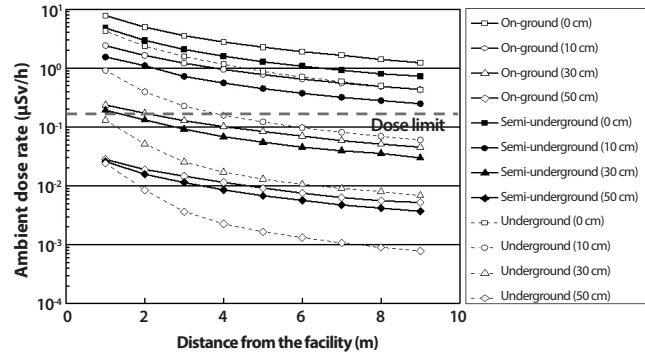


Fig. 5. Ambient dose rate by type of temporary storage facility when the size of temporary storage was $50 \times 50 \times 2$ m and concentration of contaminated soil was 30,000 Bq/kg.

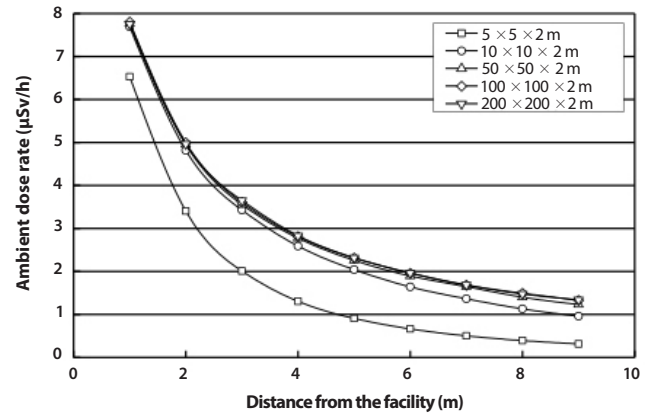


Fig. 6. Ambient dose rate by size of temporary storage when the concentration of contaminated soil was 30,000 Bq/kg and there was no cover soil.

임시저장시설의 크기가 증가할수록 보관하는 제염폐기물의 양이 증가함에도 불구하고 공간 방사선량률이 유사하게 나타난 것은 적재 중인 제염폐기물에 의하여 방사선이 차폐되기 때문이다. 즉 내부에 존재하는 제염폐기물에서 발생하는 방사선은 외부에 적재된 제염폐기물에 의해 차폐되어 임시저장시설 부지 경계의 방사선량에 미치는 영향이 미미하다. 일본 환경성에서는 반입되는 제염폐기물량에 따른 공간 방사선량률에 대하여 측정을 수행하였다[21]. 일본 환경성 측정 결과에 따르면 임시저장시설 내 보관되는 시간에 따라 임시저장시설에 적재되는 제염폐기물의 양은 증가하지만, 공간 방사선량률 측정값은 일정하게 유지되어 본 연구와 유사한 경향을 나타냄을 확인하였다.

Table 3. Separation distance from the temporary storage facility satisfying the dose criteria

Thickness of cover soil (cm)	Concentration of contaminated soil (Bq/kg)	Separation distance (m)						
		On-ground type					Semi-underground type	Underground type
		5×5×2 m ³	20×20×2 m ³	50×50×2 m ³	100×100×2 m ³	200×200×2 m ³		
0	8,000	6	11	14	16	16	9	6
	30,000	12	23	33	39	42	24	16
	100,000	21	39	57	69	79	45	31
10	8,000	4	6	6	6	6	3	2
	30,000	8	14	18	20	19	12	4
	100,000	14	26	36	43	45	26	10
30	8,000	0	0	0	0	0	0	0
	30,000	2	2	2	3	2	1	0
	100,000	5	7	7	8	8	5	1
50	8,000	0	0	0	0	0	0	0
	30,000	0	0	0	0	0	0	0
	100,000	0	0	0	0	0	0	0

3.4 선량제한치를 만족시키는 이격거리 평가

Table 3에 선량제한치를 만족시키는 임시저장시설로부터의 이격거리를 나타내었다. 이격거리는 제염폐기물의 방사능농도, 복토 두께, 임시저장시설의 형태 및 크기를 고려하여 계산하였다. 이 중 임시저장시설의 형태 및 복토의 두께가 이격거리 설정 시 가장 큰 영향을 주었다.

크기가 50 × 50 × 2 m인 지상 보관형에 대해서는 복토두께가 0 cm인 경우 이격거리는 14 m(최소농도), 33 m(최빈농도), 57 m(최대농도)로 각각 평가되고, 복토 두께가 10 cm인 경우 6 m(최소농도), 18 m(최빈농도), 36 m(최대농도), 복토 두께가 30 cm인 경우 0 m(최소농도), 2 m(최빈농도), 7 m(최대농도)로 평가되었다. 반지하 보관형에 대해서는 복토두께가 0 cm인 경우 이격거리는 9 m(최소농도), 24 m(최빈농도), 45 m(최대농도), 복토 두께가 10 cm인 경우 3 m(최소농도), 12 m(최빈농도), 26 m(최대농도), 복토 두께가 30 cm인 경우 0 m(최소농도), 1 m(최빈농도),

5 m(최대농도)로 평가되었다. 지하 보관형에 대해서는 복토 두께가 0 cm인 경우 6 m(최소농도), 16 m(최빈농도), 31 m(최대농도), 복토 두께가 10 cm인 경우 2 m(최소농도), 4 m(최빈농도), 10 m(최대농도), 복토 두께가 30 cm인 경우 0 m(최소농도), 0 m(최빈농도), 1 m(최대농도)로 평가되었다. 복토 두께가 50 cm일 때 이격거리는 임시저장시설 형태에 관계없이 본 연구에서 고려한 제염폐기물 방사능 농도 구간에서 0 m로 평가되었다.

본 연구에서 평가한 선량제한치를 만족시키는 이격거리는 제염폐기물의 방사능 농도, 복토층의 두께에 따라 비교적 넓은 범위를 나타내었다. 사고 이후 오염지역 내 대표적인 제염폐기물의 방사능 농도를 바탕으로 최적화된 복토층 두께를 선정할 수 있으며, 이를 통해 이격거리 범위의 폭을 줄임으로써 본 연구의 유효성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구의 결과를 바탕으로 임시저장시설 설계 시 인근에 거주하는 일반인 및 작업자들의 방사선 안전성 확보를 위하여 물리적 방호를 수립할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 제염폐기물 임시저장시설 인근에 생활하는 일반인의 방사선학적 안전성 확보를 위하여 임시저장시설의 이격거리를 평가하였다. 이격거리 평가 시 임시저장시설 내 복토층에 대한 차폐영향 평가를 수행하였으며, 임시저장시설의 형태 및 크기에 따라 거리별 공간 방사선량을 평가하였다. 이를 바탕으로 선량제한치를 만족시키는 임시저장시설로부터의 이격거리를 도출하였다.

임시저장시설의 복토 두께는 공간 방사선량률 결과에 크게 영향을 미쳤으며, 복토에 의한 차폐효과는 10 cm일 때 68.9%, 30 cm일 때 96.9%, 50 cm일 때 99.7%로 나타났다. 복토 두께가 30 cm 일 경우 대부분의 방사선이 차폐되어 제염폐기물의 방사능 농도가 최대인 100,000 Bq/kg 일지라도 10 m 이내에서 선량제한치를 만족하였다. 임시저장시설 형태에 따른 방사선량률은 지상 보관형, 반지하 보관형, 지하 보관형 순으로 높게 나타났다. 크기가 50 × 50 × 2 m이고 복토두께가 0 cm인 경우, 지상 보관형의 평가된 이격거리는 14 m(최소농도), 33 m(최빈농도), 57 m(최대농도)이며, 반지하 보관형의 이격거리는 9 m(최소농도), 24 m(최빈농도), 45 m(최대농도), 지하 보관형의 이격거리는 6 m(최소농도), 16 m(최빈농도), 31 m(최대농도)로 나타났다. 복토의 두께가 증가함에 따라 이격거리는 감소하였는데, 복토두께가 30 cm인 경우 지상보관형의 이격거리는 농도에 따라 각각 0 m, 2 m, 7 m, 반지하 보관형의 이격거리는 0 m, 1 m, 5 m, 지하 보관형의 이격거리는 0 m, 0 m, 1 m로 평가되었다. 복토 두께가 50 cm일 때 이격거리는 임시저장시설 형태에 관계없이 본 연구에서 고려한 제염폐기물 방사능 농도 구간에서 모두 0 m로 평가되었다.

그러나 지상 보관형의 경우 유지관리 및 부지복원이 타 유형시설에 비해 용이하므로 적절한 복토 차폐를 설치한다면 지상 보관형이 가장 적합한 시설일 것으로 판단된다. 임시저장시설 크기에 따른 이격거리 평가 시 크기의 영향은 미미하게 나타났으며, 이는 적재된 제염폐기물로 인해 자기차폐가 발생하였기 때문이다. 해당 결과를 바탕으로 지형적 요소, 유지관리, 부지복원의 용이성, 경제적 측면 등을 고려하여 최적화된 임시저장시설 형태를 설계할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 현재 일본에서 운영중인 임시저장시설에 대한 방사선학적 안전성 개선방안으로 활용될 것으로

판단된다. 또한 폐기물 관리 기반 연구 및 방사능방재 관련 연구의 기초자료로도 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업(No.20141510101630)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] Y. Morino, T. Ohara, and M. Nishizawa, "Atmospheric Behavior, Deposition, and Budget of Radioactive Materials from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in March 2011", *Geophys Res Lett.*, 38(7) (2011).
- [2] Ministry of Environment, Aug. 2011. "Goal of Decontamination Work in Special Decontamination Area and Intensive Contamination Survey Area", MOE, Accessed Mar. 12. 2016. Available from: http://josen.env.go.jp/about/method_necessity/goal.html.
- [3] International Atomic Energy Agency, The Fukushima Daiichi Accident; Post-accident Recovery, IAEA Technical Volume 5/5, 16-24, STD/PUB/1710 (2015).
- [4] Ministry of Environment, Feb. 15. 2016. "Progress of Decontamination Work in the Special Decontamination Area", MOE, Accessed Mar. 12. 2016. Available from: http://josen.env.go.jp/material/pdf/josen_gareki_progress_201603.pdf.
- [5] Ministry of Environment, Sep. 2015. "Progress of Decontamination Work in the Intensive Contamination Survey Area", MOE, Accessed Mar. 12. 2016. Available from: <http://www.env.go.jp/press/files/jp/28496.pdf>.
- [6] Ministry of Environment, July. 21. 2015. "Current State of Intermediate Storage Facility", MOE, Accessed Mar. 12. 2016. Available from: http://josen.env.go.jp/chukan-chozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/proceedings_150721_03.pdf.

- [7] Ministry of Environment, Sep. 2011. "Outline of Road map for the Special Decontamination Areas", MOE, Accessed Mar. 12. 2016. Available from: http://josen.env.go.jp/en/roadmap/pdf/chart1_5.pdf.
- [8] Ministry of Environment, Mar. 4. 2016. "Amount of Waste in Temporary Storage Facility in Fukushima Prefecture", MOE, Accessed Mar. 12. 2016. Available from: http://josen.env.go.jp/area/provisional_yard/number.html.
- [9] Ministry of Environment, Sep. 2015. "Number of Waste in Temporary Storage Facility in Outside Fukushima Prefecture", MOE, Accessed Mar. 12. 2016. Available from: http://josen.env.go.jp/zone/pdf/removing_soil_storage_amount_h27_09.pdf.
- [10] Ministry of Environment, Planning of Decontamination Waste Transportation to Interim Storage Facilities in H26~H27, Ministry of Environment Report, 2-17 (2015)
- [11] Ministry of Environment, Basic Plan for the Transportation of Contaminated Soil to Interim Storage Facility, Ministry of Environment Report, 3-5 (2014)
- [12] Ministry of Environment, Decontamination Guidelines, 2nd ed, Tentative Translation, Ministry of Environment Report, 4-8 (2013).
- [13] Fukushima Prefecture, Temporary Storage Technical Guideline, 3rd ed, Fukushima Prefecture Report, 14-16 (2015).
- [14] Ministry of Environment, July. 31. 2015. "Amount of Design Waste in Temporary Storage Facilities in Fukushima Prefecture", MOE, Accessed Mar. 12. 2016. Available from: http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives_fukushima/pdf/specified_waste_status_150731.pdf?var02.
- [15] International Commission on Radiation Units and Measurements, Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU Report 53, Bethesda. ICRU (1994).
- [16] United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, "Report of the United Scientific Committee on the effects of atomic radiation to the general assembly", UNSCEAR 2013 Report, Vol 1, New York (2014).
- [17] International Commission on Radiological Protection, "Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation", ICRP Publication 74, Pergamon Press, Oxford (1997).
- [18] Ministry of Environment, Aug. 2011. "Calculation of Ambient Dose Rate Under Dose Criteria", MOE, Accessed Mar. 3. 2016. Available from: http://josen.env.go.jp/#map_on.
- [19] International Atomic Energy Agency, The Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-site the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, International Atomic Energy Agency Report, 26-28, NE/NEFW/2013 (2014).
- [20] Nuclear Emergency Response Headquarters, Aug. 26. 2011. "Decontamination Guideline by Municipalities of Japan", NERHQ, Accessed Mar. 3. 2016. Available from: <http://www.city.sakura.lg.jp/cmsfiles/contents/0000008/8474/20110826001-6.pdf>.
- [21] Ministry of Environment, Aug. 29. 2014. "Results of Decontamination work in Naraha", Accessed Mar. 11. 2016. Available from: <http://josen.env.go.jp/area/data/naraha.html#>.