Journal of Radiation Industry 12(3) : 239~247(2018)

원자력시설 해체 시 극저준위방사성폐기물 처분을 위한 국내외 방사성폐기물 분류체계 및 인수기준에 대한 연구

송지영[1] · 송교혁[1] · 박진호[1] · 지승우[1] · 도태관[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Review Study of Radioactive Waste Classification and Waste Acceptance Criteria for Disposal of VLLW from Decommissioning of Nuclear Facilities

Ji Young Song[1], Gyo Hyeok Song[1], Jin Ho Park[1], Seung Woo Ji[1], Tae Gwan Do[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]*Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732, Deogyeong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea*

Abstract - Waste acceptance criteria (WAC) for disposal of very low level waste (VLLW), which is generated in large quantities during decommissioning of nuclear facilities should be developed. For the WAC development, it is required to investigate current status to develop WAC for disposal of VLLW. The objective of the present study was to investigate radioactive waste classification and WAC for disposal of VLLW from decommissioning of nuclear facilities. Each country developed its own system for the classification of radioactive waste. Therefore, the classification system for radioactive waste in each country was analyzed to review its WAC of the radioactive waste, which is equivalent to the VLLW in the Korea waste classification system. The category of the VLLW in the waste classification systems of the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the United Kingdom (UK) was similar to the category of the VLLW in the waste classification systems of Korea. For the United States (US), the category of Class A was similar to the VLLW in the Korea system. The IAEA provided the general guidance for the WAC based on the safety assessment of disposal system. The US and the UK developed the WAC based on national radioactive waste disposal policy and characteristics of disposal facilities and radioactive waste in addition to the IAEA general guidance. Therefore, the WAC for disposal of VLLW in Korea should be developed by considering the national radioactive waste disposal policy, characteristics of disposal facilities, and the IAEA guidance. This study results will contribute to establishment of national management system of radioactive waste.

Key words : Decommissioning of nuclear facilities, Very low level waste, Classification of radioactive waste, Waste acceptance criteria

서 론

원자력시설 해체 시 다량의 방사성폐기물이 발생될 것으로 예상되고 있다. 상업용 원자력발전소를 기준으로 하였을

* Corresponding author: Kwang Pyo Kim, Tel. +82-10-4030-7067, Fax. +82-31-273-3592, E-mail. kpkim@khu.ac.kr

때, 해체 시 발생되는 방사성폐기물의 양은 원자력발전소 운영 전 주기 동안 발생되는 양의 10배에서 최대 200배에 이른다(IAEA 2006). 고리1호기를 대상으로 한 해체 시 방사성폐기물 발생량 예측에 관한 연구에 의하면 방사성폐기물 준위별 발생량은 극저준위(54.6%), 저준위(45.3%), 중준위(0.2%) 순으로 추정되고 있다(Lee *et al*. 2017). 원자력시설 해체 시 발생되는 방사성폐기물 중 극저준위방사성폐기물이 절반 이상을 차지할 것으로 예상되고 있다. 따라서 원자력시설 해체를 대비하여 극저준위방사성폐기물의 처분을 위한 체계가 수립되어야 한다.

미국, 영국, 프랑스 등에서는 원자력시설 운영 또는 해체 시 발생되는 방사성폐기물을 위한 처분시설을 운영하고 있으며, 각 처분시설의 특성에 맞는 방사성폐기물 인수기준을 수립하였다. 미국은 저준위방사성폐기물을 위한 천층처분형식의 클리브(Clive), 반웰(Barnwell), 리치랜드(Richland), 앤드류(Andrews) 처분시설을 운영하고 있다. 영국은 공학적 천층처분형식의 드릭(Drigg) 저준위방사성폐기물 처분시설을 운영하고 있으며, 프랑스는 천층처분형식의 로브(L'Aube) 중저준위방사성폐기물 처분시설을 운영하고 있다. 해당 처분시설에서는 국가의 방사성폐기물 처분 정책 그리고 처분시설 및 발생되는 방사성폐기물의 특성 등을 반영하여 방사성폐기물 인수기준을 수립하였다(IAEA 2007).

국내에서도 원자력시설 운영 또는 해체 시 발생되는 극저준위방사성폐기물처분을 위해 매립형 천층처분 방식의 3단계 처분시설 건설계획을 가지고 있다(정 등 2016). 극저준위방사성폐기물을 위한 3단계 처분시설을 건설하고 운영하기 위해서는 방사성폐기물 인수기준 개발이 필요하다(김과 김 2014). 극저준위방사성폐기물 인수기준을 개발하기 위해서는 우선 이에 대한 국내외 현황에 대한 조사연구가 필요하다. 국가마다 방사성폐기물 분류체계가 상이하므로 국내의 극저준위방사성폐기물 준위와 유사한 폐기물 준위를 파악하기 위해 각국의 방사성폐기물 분류체계를 조사하여야 한다. 그리고 해당 폐기물 처분시설의 방사성폐기물 인수기준에 대해 조사가 이루어져야 한다.

본 연구 목표는 원자력시설 해체 시 극저준위방사성폐기물처분을 위한 국내외 방사성폐기물 분류체계와 인수기준을 조사하는 것이다. 이를 위해 국제원자력기구, 원자력시설 해체 경험이 있거나 해체가 진행 중인 미국, 영국, 한국을 대상으로 방사성폐기물 관리에 대한 조사를 실시하였다.

재료 및 방법

원자력시설 해체 시 발생되는 극저준위방사성폐기물 처분을 위한 국내외 방사성폐기물 분류체계와 인수기준을 파악하기 위해 방사성폐기물 관리에 대한 문헌조사를 실시하였다. 조사 대상 국가로는 방사성폐기물 관리에 국제적인 기준을 제시하는 국제원자력기구, 원자력시설 해체 경험이 있거나 해체가 진행 중에 있는 미국, 영국, 한국을 선정하였다. 방사성폐기물 분류체계는 각국의 방사성폐기물 분류체계를 조사하고, 각국의 분류체계에서 국내의 극저준위방사성폐기물과 유사한 폐기물 준위를 분석하였다. 방사성폐기물 인수기준은 앞서 조사한 결과를 바탕으로, 해당 준위의 방사성폐기물처분시설에서 수립한 인수기준을 조사하고 분석하였다.

1. 방사성폐기물 분류체계 조사

방사성폐기물 분류체계는 각 국가별 방사성폐기물의 물리화학적 특성, 규제기관의 방사선학적 목표 및 정책 등을 반영하여 설정한다(IAEA 2009). 따라서 각 국가별로 방사성폐기물 분류체계는 상이하며, 사용되는 용어도 상이할 수 있다. 국제원자력기구는 각 국가가 방사성폐기물 관리정책과 시행전략을 일관성 있게 확립할 수 있도록 지속적으로 방사성폐기물에 대한 기술기준을 권고하고 있다(한국원자력안전기술원 2011). 국제원자력기구의 방사성폐기물 분류체계를 파악하기 위해 국제원자력기구에서 발행한 자료에 대한 문헌조사를 실시하였다. 미국의 경우 미국 원자력규제위원회(NRC)에서 상업용 원자력시설에서 발생하는 방사성폐기물에 대한 관리체계를 보유하고 있다. 미국의 상업용 원자력시설을 대상으로 한 방사성폐기물 분류체계를 파악하기 위해 미국연방규정(CFR)에서 제시하고 있는 내용을 조사하였다. 영국의 경우 원자력해체청(NDA)의 산하기관인 저준위방사성폐기물처분장(LLW Repository Ltd.)에서 방사성폐기물을 관리하고 있다. 따라서 영국의 저준위방사성폐기물처분장에서 발간한 방사성폐기물 분류체계에 관해 자료를 조사하였다. 한국의 경우 원자력안전위원회 고시 제2017-36호 '방사선방호 등에 관한 기준'과 제2017-65호 '방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정'을 조사하였다. 조사한 결과를 바탕으로 각국의 방사성폐기물 분류체계에서 국내의 극저준위방사성폐기물과 유사한 폐기물 준위를 분석하였다.

2. 극저준위방사성폐기물 인수기준 조사

극저준위방사성폐기물 인수기준 조사를 위해 각각의 처분시설에서 발간한 자료에 대한 문헌조사를 실시하였다. 국제원자력기구의 인수기준은 천층처분시설의 인수기준에 대해 제시하고 있는 자료를 조사하였다. 미국의 경우 4곳의 저준위방사성폐기물처분시설 중 Class A만을 취급하는 클리브 처분시설의 방사성폐기물 인수기준을 조사하였다. 영국은 저준위방사성폐기물처분장에서 제시하는 극저준위방사성폐기물 인수기준을 조사하였다. 국내의 경우에는 현재 극

Table 1. Radioactive waste classification and criteria by the IAEA and country

Country	Radioactive waste classification	Criteria between categories
IAEA	− High level waste	− General activity: 10^4∼10^6 TBq·m^{-3} Heat-generation: 2∼20 kW·m^{-3}
	− Intermediate level waste	− Disposal at a depth of 10∼100 m
	− Low level waste	− Suitable for near surface disposal
	− Very low level waste	− Disposal in near surface landfill type facility
	− Very short lived waste	− Contain only radionuclides of very short half-life with activity concentration above clearance level
	− Exempt waste	− Below clearance level
USA	− High level waste	− Highly radioactive material from spent fuel reprocessing and spent fuel
	− Low level waste	− Not classified as HLW or byproduct
	• GTCC	• Greater than Class C
	• Class C	• Class A, B, C classification criteria are given by radionuclide and its concentration for long-lived radionuclides and short-lived radionuclides separately.
	• Class B	
	• Class A	
	− Byproduct	− Uranium or thorium mill tailings
UK	− High level waste	− Heat-generating capacity > 2 kW·m^{-3}
	− Intermediate level waste	− More than concentration criteria of LLW
	− Low level waste	− α < 4 GBq·ton^{-1} and β, γ < 12 GBq·ton^{-1}
	• Very low level waste	• Low volume VLLW for ^{14}C, ^{3}H: Activity < 40,000 kBq·m^{-3} for all radionuclides: Activity < 4,000 kBq·m^{-3} • Bulk volume VLLW for ^{3}H: Activity < 40 MBq·ton^{-1} for all radionuclides: Activity < 4 MBq·ton^{-1}
	− Out-of-scope waste	− Below CL set down in Euratom Basic Safety Standard
Korea	− High level waste	− Specific activity > 4,000 Bq·g^{-1} of α-emitting radionuclides, half-life > 20 years, heat-generating capacity > 2 kW·m^{-3}
	− Intermediate level waste	− More than concentration criteria of LLW
	− Low level waste	− Between concentration criteria of LLW and 100 × CL
	− Very low level waste	− Between 1 × CL and 100 × CL
	− Exempt waste	− Below clearance level (CL)

저준위방사성폐기물에 대한 인수기준이 존재하지 않으므로 중저준위방사성폐기물처분시설의 인수기준을 조사하였다. 조사한 결과를 바탕으로 처분시설의 방사성폐기물 인수기준을 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 방사성폐기물 분류체계

본 연구에서는 각 국가의 법적 기준에 제시되어 있거나 방사성폐기물 관리와 관련된 기관에서 발간한 자료를 통해 각 국가의 방사성폐기물 분류체계를 조사하였다. 본 연구에서 조사한 각 국가별 방사성폐기물 분류체계는 Table 1에 요약하였다.

국제원자력기구에서는 과거 방사성폐기물을 고준위, 중저준위, 규제면제로 분류하였다. 중저준위방사성폐기물은 방사능농도와 반감기에 따라 장반감기 중저준위, 단반감기 중저준위로 하위 분류되었다(IAEA 1994). 최근에는 방사성폐기물의 장기간 안전관리, 즉 처분 전 관리와 처분 후 관리를 용이하게 하기 위한 새로운 방사성폐기물 분류의 필요성을 제기하였다. 이에 방사성폐기물 분류체계의 효율성을 증대시키기 위해 처분시설 안전성 개발, 운영, 평가 시 얻은 경험을 바탕으로 최신 분류체계를 제시하였다. 최신 방사성폐기물 분류체계는 방사능농도와 반감기에 따라 고준위, 중준위, 저준위, 극저준위, 극단반감기, 규제면제를 포함하여 총 6가지로 구성되어 있다(Fig. 1 참조) (IAEA 2009). 국제원자력기구에서 제시하는 방사성폐기물 분류체계 중 고준위방사성폐기물은 방사능농도가 높으며(10^4∼10^6 TBq·m^{-3} 수준), 방사성붕괴로 인해 열발생률(2∼20 kW·m^{-3} 수준)이 큰 방사성폐기물을 의미한다. 중준위방사성폐기물은 장반감기 방사성핵종이 함유되어 있어 천층처분시설보다 높은 수준의 처분시설이 요구되는 방사성폐기물을 의미한다. 저준위방사성폐기물은 낮은 농도의 장반감기 방사성핵종이 함유되어 있으며, 천층처분시설이 적합한 방사성폐기물을 의미한다. 극저준위방사성폐기물은 방사능농도가 규제면제기준보다 높으며, 천층처분방식 중 하나인 표층매립시설이 적합한 방사성폐기물을 의미한다. 극단반감기방사성폐기물은 단반감기 방사성핵종(약 30년 이내)만이 포함되어 있으

며, 수 년간의 붕괴 저장을 통해 규제면제될 수 있는 방사성폐기물을 의미한다. 규제면제 폐기물은 함유된 방사성핵종의 농도가 작아서 규제관리로부터 제외되는 폐기물을 의미한다.

미국 원자력규제위원회(NRC)에서는 방사성폐기물을 방사능농도에 따라 고준위방사성폐기물, 저준위방사성폐기물, 이외의 부산물로 분류한다. 고준위방사성폐기물은 사용후핵연료, 사용후핵연료 재처리 과정에서 발생되는 액체폐기물, 이러한 액체폐기물을 고형화시킨 폐기물로 정의하고 있다(US NRC 2017a). 저준위방사성폐기물은 장반감기 방사성핵종과 단반감기 방사성핵종별 방사능농도 기준에 따라 Class A, B, C, GTCC (Greater Than Class C)로 분류되며, 방사능농도 기준은 10 CFR 61.55에 제시되어 있다(Table 2 참조) (US NRC 2001). 해당 법규상에 제시하고 있는 장반감기 방사성핵종으로는 ^{14}C, ^{99}Tc, ^{241}Pu, 반감기가 5년 이상인 알파선을 방출하는 초우라늄핵종 등으로 구성되어 있으며, 단반감기 방사성핵종으로는 ^{3}H, ^{60}Co, ^{63}Ni, 반감기가 5년 이하인 방사성핵종 등으로 구성되어 있다. Class A는 미국의 방사성폐기물 분류체계 중 가장 낮은 준위의 방사성폐기물로, 장반감기와 단반감기 방사성핵종에 대한 기준이 존재한다. 해당 기준은 핵종별 방사능농도에 대한 상한치만을 제시하고 있다. 그리고 법규상에 제시되어 있지 않은 핵종으로 구성된 방사성폐기물은 Class A로 분류된다. Class B는 단반감기 방사성핵종인 ^{63}Ni, 방사화된 금속 내 ^{63}Ni, ^{90}Sr, ^{137}Cs에 대한 방사능농도 기준이 존재한다. Class C의 경우, 장반감기 방사성핵종에 대한 기준은 Class A 기준의 10배이며,

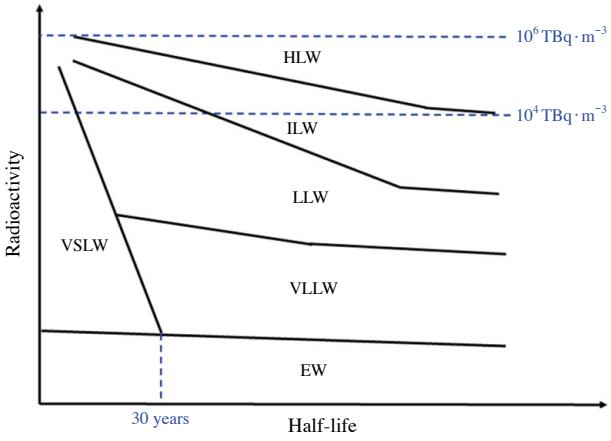

Fig. 1. Classification of radioactive waste in the IAEA: HLW (high level waste), ILW (intermediate level waste), LLW (low level waste), VLLW (very low level waste), VSLW (very short lived waste), EW (exempt waste).

Table 2. Classification criteria of low level waste in the USA

Half-life	Radionuclides	Waste class		
		Class A	Class B	Class C
Long-lived radionuclides	^{14}C	0.8 Ci·m^{-3}	No Class B	8 Ci·m^{-3}
	^{14}C in activated metal	8 Ci·m^{-3}		80 Ci·m^{-3}
	^{59}Ni in activated metal	22 Ci·m^{-3}		220 Ci·m^{-3}
	^{94}Nb in activated metal	0.02 Ci·m^{-3}		0.2 Ci·m^{-3}
	^{99}Tc	0.3 Ci·m^{-3}		3 Ci·m^{-3}
	^{129}I	0.008 Ci·m^{-3}		0.08 Ci·m^{-3}
	Alpha emitting transuranic nuclides with half-life greater than 5 years	10 nCi·g^{-1}		100 nCi·g^{-1}
	^{241}Pu	350 nCi·g^{-1}		3,500 nCi·g^{-1}
	^{242}Cm	2,000 nCi·g^{-1}		20,000 nCi·g^{-1}
Short-lived radionuclides	Total of all nuclides with less than 5 year half-life	700 Ci·m^{-3}	No Class B	No Class C
	^{3}H	40 Ci·m^{-3}		
	^{60}Co	700 Ci·m^{-3}		
	^{63}Ni	3.5 Ci·m^{-3}	70 Ci·m^{-3}	700 Ci·m^{-3}
	^{63}Ni in activated metal	35 Ci·m^{-3}	700 Ci·m^{-3}	7,000 Ci·m^{-3}
	^{90}Sr	0.04 Ci·m^{-3}	150 Ci·m^{-3}	7,000 Ci·m^{-3}
	^{137}Cs	1 Ci·m^{-3}	44 Ci·m^{-3}	4,600 Ci·m^{-3}

For quotation of original law in USA, Ci instead of Bq is used.

단반감기 방사성핵종의 경우에는 Class B에서 제시하고 있는 방사성핵종에 대해 더 높은 방사능농도 기준이 존재한다. GTCC는 Class C의 기준을 초과하는 방사성폐기물을 말하며, 표층처분시설에 처분이 불가하다. 부산물에는 광물 처리과정에서 발생되는 우라늄 또는 토륨의 추출 또는 농축과정에서 발생하는 폐기물 등을 포함된다(US NRC 2017b).

영국의 방사성폐기물은 방사성폐기물의 열발생과 방사능농도에 따라 분류되며, 중준위방사성폐기물 이하로는 방사능농도를 기준으로 분류된다. 분류체계는 고준위, 중준위, 저준위방사성폐기물, 규제면제로 구성되며, 저준위방사성폐기물의 하위 항목으로 극저준위방사성폐기물이 있다(LLWR 2016). 극저준위방사성폐기물은 작은 부피 극저준위방사성폐기물과 큰 부피 극저준위방사성폐기물로 나뉜다. 고준위방사성폐기물은 방사성붕괴에 의해 높은 열이 발생하는(일반적으로 2 $kW \cdot m^{-3}$ 이상) 폐기물을 의미한다. 중준위방사성폐기물은 저준위방사성폐기물 제한치 이상이며 열이 발생하지 않는 폐기물을 의미한다. 저준위방사성폐기물은 알파방출 핵종의 경우 4 $GBq \cdot ton^{-1}$ 이하, 베타/감마 방출 핵종의 경우 12 $GBq \cdot ton^{-1}$ 이하의 방사능농도를 만족하는 폐기물을 의미한다. 작은 부피 극저준위방사성폐기물은 일반 쓰레기 매립장과 같은 불특정한 시설에 처분될 수 있는 폐기물을 의미하며, ^{3}H, ^{14}C을 제외한 전체 방사능량과 ^{3}H, ^{14}C에 대한 기준이 존재한다(Table 1 참조). 큰 부피 극저준위방사성폐기물은 특정 시설에 처분되는 폐기물을 말하며, ^{3}H을 제외한 전체 방사능량과 ^{3}H에 대한 기준이 존재한다(Table 1 참조). 규제면제 폐기물은 방사능농도가 유럽원자력공동체에서 설정한 규제해제 기준보다 낮은 폐기물을 의미하며, 이는 규제관리로부터 제외된다.

국내는 영국과 동일하게 방사성폐기물을 열발생과 방사능농도에 따라 분류하며, 중준위방사성폐기물 이하의 경우에는 방사능농도를 기준으로 분류한다. 분류체계는 고준위, 중준위, 저준위, 극저준위방사성폐기물, 자체처분 대상 폐기물 5단계로 구성되어 있다. 분류기준은 원자력안전위원회 고시에 제시되어 있다(Fig. 2 참조)(원자력안전위원회 2017a; 원자력안전위원회 2017b). 고준위방사성폐기물은 반감기 20년 이상의 알파선을 방출하는 핵종 중에서 방사능농도가 4,000 $Bq \cdot g^{-1}$ 이상이고 열발생률이 2 $kW \cdot m^{-3}$ 이상인 폐기물이 해당된다. 중준위방사성폐기물은 저준위방사성폐기물 방사능농도 제한치 이상인 것이 해당된다. 저준위방사성폐기물은 방사능농도가 자체처분 허용농도의 100배 이상이고, 저준위방사성폐기물 방사능농도 제한치 미만인 폐기물이 해당된다. 극저준위방사성폐기물은 방사능농도가 자체처분 허용농도의 1~100배 사이인 폐기물이 해당된다. 자체처분 대상 폐기물은 자체처분 허용농도 또는 자제처분 허용선량을 만족하는 폐기물이 해당된다.

국내외의 방사성폐기물 분류체계를 조사한 결과를 바탕으로 각 국가의 분류체계에서 국내의 분류체계 중 극저준위방사성폐기물과 유사한 폐기물 준위를 분석하였다. 국제원자력기구의 경우 분류기준의 수치적인 값을 명확하게 제시하지 않지만, 폐기물 준위의 의미를 바탕으로 극저준위방사성폐기물이 가장 유사한 것으로 분석되었다. 미국의 경우에는 Class A가 국내의 분류체계 중 저준위와 극저준위방사성폐기물에 걸쳐있는 것으로 분석되었다. 영국의 경우 방사능농도에 대한 분류기준이 핵종별로 제시된 것이 아닌 넓은 범위의 알파방출 핵종, 베타/감마 핵종, ^{3}H, ^{14}C으로만 구성되어 있다. 따라서 ^{3}H, ^{14}C의 방사능농도 기준을 비교한 결과, 영국의 분류체계 중 극저준위방사성폐기물이 국내 분류체계 중 극저준위방사성폐기물과 유사한 것으로 나타났다.

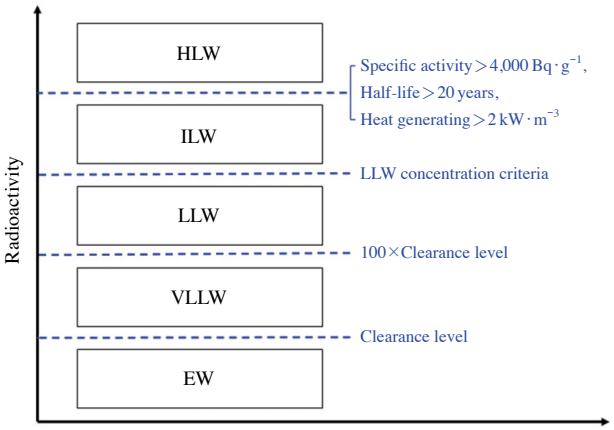

Fig. 2. Classification of radioactive waste in Korea: HLW (high level waste), ILW (intermediate level waste), LLW (low level waste), VLLW (very low level waste), EW (exempt waste).

2. 극저준위방사성폐기물 인수기준

국내외 극저준위방사성폐기물 인수기준을 분석하기 위해 국제원자력기구, 미국, 영국, 국내에서 제시하고 있는 방사성폐기물 인수기준을 조사하였다. 인수기준은 방사성폐기물 준위에 따라 상이하므로 본 연구의 관심 대상인 국내 분류체계 중 극저준위방사성폐기물에 상응하는 국가별 폐기물 준위를 대상으로 인수기준을 조사하였다(Table 3 참조). 국제원자력기구는 방사성폐기물 인수기준을 처분시설의 형태에 따라 제시하고 있다. 국제원자력기구에서는 극저준위방사성폐기물을 천층처분할 것을 권고하고 있으므로 본 연구에서는 국제원자력기구에서 제시하고 있는 천층처분시설의 인수기준을 조사하였다. 미국의 경우 국내 분류체계의 극저준위방사성폐기물과 유사한 폐기물 준위는 Class A로 조사되었다. 따라서 Class A 방사성폐기물을 처분하는 클리브 처분시설의 방사성폐기물 인수기준을 조사하였다(Energy Solutions 2015). 영국의 경우 저준위방사성폐기물 분류 내에 속해 있는 극저준위방사성폐기물의 범주가 국내

Table 3. Radioactive waste acceptance criteria by the IAEA and country

Country	IAEA	USA	UK	Korea
Waste class	Waste disposed in shallow facility	Class A waste	Very low level waste	Intermediate and low level waste
Radiological requirements	− Radionuclide content − Surface dose rate − Surface contamination	− Radioactivity (average, maximum) − Surface dose rate − Surface contamination	− Radioactivity − Surface dose rate − Dose rate of 1 m − Surface contamination	− Radionuclide content − Radioactivity − Surface dose rate − Surface contamination − Criticality resistance
Non-radiological requirements	− Leachability − Corrosive material − Combustibility − Gas generation − Microbial degradation − Free liquid − Chelating or complexing agents − Explosive material − Pyrophoric material − Corrosion resistance − Criticality resistance	− Free liquid − Absorbent − Moisture content − Hazardous constituent − Density − Percentage of material type − Material size	− Acceptable waste − Non-waste material − Reactive metal and material − Pressurized gas receptacles and aerosols − Toxic material − Unknown substance − Chemical contamination − Hazardous waste − Hazardous substance − Explosive material − Corrosive material − Soluble solid − Strong oxidizing agent − Chemical complexing or chelating agent − Ion exchange material − Biological, infectious and pathogenic material − Flammable or highly flammable material − Liquid	− Particular material − Filling − Free liquid − Chelating or complexing agents − Pyrophoric material − Hazardous material − Explosive material − Corrosive material − Gas generation − Flammable material − Biological, infectious and pathogenic material
Other requirements	− Structural stability − Thermal and radiation effect − Waste package identification − Waste package configuration	− Waste description	− Waste package and transport container − Non-containerised waste − Maximum weight − Packing efficiency − Transport regulation − Transport of fissile radionuclide − Site rule	− Waste package and transport container − Maximum weight

의 극저준위방사성폐기물 단계와 유사하기 때문에 이에 대한 인수기준을 조사하였다. 국내의 경우 현재 극저준위방사성폐기물에 대한 인수기준이 존재하지 않으므로, 중저준위방사성폐기물처분시설의 인수기준을 조사하였다. 인수기준은 일반적으로 방사선학적 요건, 비방사선학적 요건, 포장물에 대한 요건으로 구성되어 있다.

국제원자력기구에서는 방사성폐기물 인수기준으로 총 18개의 항목을 방사선학적, 비방사선학적, 포장물에 대한 요건에 따라 나누어 제시하고 있다(IAEA 1985). 국제원자력기구는 국제적인 기준을 제시하는 것이므로 인수기준을 특정 수치로 나타내기 보다는 기술적인 지침을 제시하고 있다. 방사선학적 요건으로는 방사성핵종 규명, 표면방사선량률, 표면오염도로 구성되어 있다. 방사성핵종 규명은 포장물 내에 존재하는 방사성핵종의 종류와 함유량을 규명해야 한다는 것이다. 비방사선학적 요건으로는 총 11개의 항목을 제시하고 있으며, 부식성 물질, 기체 발생, 유리수 등으로 구성되어 있다. 포장물에 대한 요건으로는 4개의 항목을 제시하고 있으며, 구조 안전성, 열 또는 방사선 에너지 방출, 포장물에 대한 표식, 형상으로 구성되어 있다.

미국의 경우 Class A만을 취급하는 에너지솔루션 사의 클리브 처분시설의 방사성폐기물 인수기준은 총 12개의 항목을 제시하고 있다(Energy Solutions 2015). 이는 방사선학적 요건, 비방사선학적 요건, 이외의 요건에 따라 나누어 제시하고 있다. 방사선학적 요건으로는 핵종별 방사능농도, 표면방사선량률, 표면오염도로 구성되어 있다. 핵종별 방사능농도는 2가지 형태로 제출하여야 한다. 이는 핵종별 최대 방사능농도와 물질 전체로 평균화했을 때의 핵종별 방사능농도이다. 비방사선학적 요건으로는 7개의 항목을 제시하고 있으며, 유리수, 흡착제 유무, 수분 함유량, 위험물질 존재 여부, 밀도, 물질별 부피비, 입자 크기로 구성되어 있다. 유리수의 경우 전체 방사성폐기물 중 유리수가 부피의 1%를 초과해서는 안된다. 초과하는 경우에는 폐기물 내 유리수 비율을 제출해야 한다. 흡착제는 폐기물 내에 존재해서는 안되며, 수분 함유량은 3%를 초과해서는 안 된다. 방사성폐기물 내에 위험물질 존재 여부 분석을 수행하여야 한다. 위험물질과 각 위험물질별 한도는 40 CFR 261.24에서 제시하고 있다(US NRC 2006). 추가적으로 인수기준에는 존재하지 않지만, 처분을 위해 필요한 폐기물의 발생과정, 물리적 구성성분, 특징, 방사선학적, 화학적 특성 분석 방법 등을 자세하게 기술할 수 있는 항목이 존재한다.

영국의 경우 저준위방사성폐기물처분장에서 제시하고 있는 극저준위방사성폐기물의 인수기준은 총 28개의 항목으로 구성되어 있다(LLWR 2012; LLWR 2017). 이는 방사선학적 요건, 비방사선학적 요건, 포장물에 대한 요건에 따라 나누어 제시하고 있다. 방사선학적 요건으로는 방사능농도, 방사선량률, 표면오염도로 구성되어 있다. 방사선량률은 표면방사선량률과 1 m 이격거리에서의 방사선량률로 구성되어 있다. 비방사선학적 요건으로는 18개의 항목을 제시하고 있으며, 비폐기물 물질 제한, 폭발성 물질, 부식성 물질 등으로 구성되어 있다. 비폐기물 물질 제한은 방사성폐기물의 인수기준을 만족하기 위한 목적으로 의도적인 방사능농도 희석, 차폐체 추가 등을 방지하기 위함이다. 폐기물 발생자는 폭발성 물질, 부식성 물질, 미립자, 반응성 물질, 용해성 고체, 강 산화제, 독성 물질, 복합 화학 물질, 킬레이트 화합물, 이온교환 물질, 생물학적 · 전염성 · 병원성 물질, 인화성 물질, 폐기물 내에 규명되지 않은 물질, 유해물질, 오염물질을 포함해서는 안된다. 그리고 폐기물 용기 표면이 화학적으로 오염되지 않아야 한다. 포장물에 대한 요건으로는 7개의 항목을 제시하고 있으며, 포장 및 운반 용기, 최대 중량 등으로 구성되어 있다.

국내의 경우 한국원자력환경공단에서 제시하고 있는 중저준위방사성폐기물에 관한 인수기준은 총 18개의 항목으로 구성되어 있다(원자력안전위원회 2017c). 이는 방사선학적 요건, 비방사선학적 요건, 포장물에 대한 요건에 따라 나누어 제시하고 있다. 방사선학적 요건은 5개의 항목을 제시하고 있으며, 핵종 규명, 핵종별 방사능농도, 표면방사선량률, 표면오염도, 임계 안전으로 구성되어 있다. 폐기물에 포함되어 있는 전체 방사능량의 95% 이상을 구성하는 방사성핵종을 규명하여야 하며, 저준위방사성폐기물 방사능농도 제한치에 제시되어 있는 핵종의 방사능농도가 제시하여야 한다. 비방사선학적 요건으로는 물리적 요건과 화학적 요건으로 구성되어 있다. 물리적 요건으로는 총 4개의 항목을 제시하고 있으며, 입자성물질, 유리수, 채움률, 킬레이트제 등에 대한 구성비 제한으로 구성되어 있다. 입자성물질을 포함하는 방사성폐기물의 경우, 일정 직경 이하의 입자가 폐기물 무게의 일정량 이상 구성되어서는 안 된다. 유리수의 경우, 고건전성용기는 폐기물 부피의 1%, 그 외의 용기는 0.5% 초과해서는 안 된다. 채움률의 경우에는 고건전성용기를 제외한 모든 포장물은 용기 내부 부피의 85% 이상을 차지하여야 한다. 킬레이트제 등은 방사성폐기물 무게의 0.1% 이상인 경우에는 화학명, 존재량 명시해야 하며, 8% 이상인 경우에는 처분이 불가능하다. 화학적 요건으로는 총 7개의 항목을 제시하고 있으며. 발화성 물질, 유해성 물질, 폭발성 물질, 부식성 물질, 인화성 물질, 생물 · 미생물 · 감염물질 존재 여부, 기체 발생으로 구성되어 있다. 포장물에 관한 요건으로는 포장물의 크기와 중량을 제한하고 있다.

3. 극저준위방사성폐기물 인수기준 분석

본 연구에서는 국내외 극저준위방사성폐기물 인수기준을 조사한 결과를 바탕으로 처분시설의 인수기준을 분석하였다. 각국의 방사성폐기물 인수기준은 방사선학적 요건, 비방

사선학적 요건, 포장물에 관한 요건과 같이 유사한 체계로 구성되어 있다. 세부 항목은 각 국가의 방사성폐기물처분에 대한 정책, 처분시설 및 발생되는 방사성폐기물의 특성 등에 따라 결정되므로 국가마다 그리고 처분시설마다 상이한 것으로 나타났다(IAEA 2007).

국제원자력기구에서는 방사성폐기물 처분안전성 관점에서 최소한의 요건을 제시하고 있다(IAEA 1985). 국내의 인수기준과 비교해 보았을 때, 국제원자력기구의 인수기준 중 침출성, 내식성과 같은 포장물에 대한 요건을 제외하고는 국내의 인수기준에 모두 포함되어 있는 것으로 나타났다. 영국의 인수기준과 비교해 보았을 때, 방사성핵종 규명, 임계안전, 포장물에 대한 요건을 제외하고는 영국의 인수기준에 모두 포함되어 있는 것으로 나타났다. 영국의 인수기준에 방사성핵종 규명이 존재하지 않는 이유는 영국의 방사성폐기물 분류기준이 핵종별 방사능농도가 아닌 방출 방사선에 따른 방사능농도로 제시하고 있기 때문이다. 국내와 영국 모두 국제원자력기구를 기반으로 인수기준을 수립하는 것으로 나타났다. 따라서 향후 극저준위방사성폐기물을 위한 인수기준 개발 시에도 기본 요건을 제시하고 있는 국제원자력기구의 인수기준을 반영하는 것이 필요하다.

미국의 클리브 처분시설의 인수기준은 총 10개의 항목으로, 조사한 인수기준 중 가장 적은 항목으로 구성된 것으로 나타났다. 미국 클리브 처분시설의 인수기준은 국내의 인수기준과 비교해 보았을 때, 인수기준 중 방사선학적 요건은 모두 국내 인수기준에 포함되어 있는 것으로 나타났다. 비방사선학적 요건은 국내의 요건들과는 상이한 것으로 나타났다. 이는 미국의 클리브 처분시설은 처분시설 내에 폐기물 처리시설도 포함하고 있어 방사선폐기물 인수기준에 처분시설 내에서의 처리여부를 결정하기 위해 필요한 요건들을 포함하고 있기 때문이다(Energy Solutions 2015).

영국의 저준위방사성폐기물처분장의 인수기준은 총 28개의 항목으로, 조사한 인수기준 중 가장 많은 항목으로 구성된 것으로 나타났다. 영국의 저준위방사성폐기물처분장의 인수기준을 국내의 인수기준과 비교해 보았을 때, 방사선학적 요건 중에서 1 m 이격거리에서의 방사선량률을 제외하고는 모든 요건이 국내 인수기준에도 포함되어 있는 것으로 나타났다. 비방사선학적 요건은 국내보다 더 많은 항목들로 구성되어 있으며, 국내의 비방사선학적 요건의 대다수가 영국의 비방사선학적 요건에 포함되어 있는 것으로 나타났다. 포장물에 대한 요건에서도 국내의 포장물에 대한 요건을 모두 포함하고 있는 것으로 나타났다.

국내외 극저준위방사성폐기물 인수기준을 분석한 결과, 국제원자력기구의 방사성폐기물 인수기준은 안전성 관점에서 최소한의 요건을 제시하고 있는 것으로 나타났으며, 미국과 영국의 경우에는 국제원자력기구에서 제시한 최소한의 요건을 기반으로 각 국가의 방사성폐기물에 관한 전략 그리고 처분시설 및 방사성폐기물의 특성에 따라 인수기준을 수립한 것으로 나타났다. 따라서 향후 국내에서는 국제원자력기구에서 제시하고 있는 요건, 국내 방사성폐기물 처분에 대한 정책, 처분시설 및 발생되는 방사성폐기물의 특성 등을 종합적으로 반영하여 국내 상황에 가장 적합한 극저준위방사성폐기물을 위한 처분시설 인수기준을 개발하여야 할 것이다. 향후 인수기준 수립을 위한 연구가 꾸준히 진행되어야 할 것이며, 수립된 인수기준의 적합성을 판단하기 위한 연구도 진행되어야 할 것이다.

결 론

원자력시설 해체 시 다량으로 발생되는 극저준위방사성폐기물을 위한 처분시설의 인수기준이 개발되어야 한다. 극저준위방사성폐기물 인수기준을 개발하기 위해서는 국내외 현황에 대한 조사연구가 필요하다. 본 연구에서는 원자력시설 해체 시 극저준위방사성폐기물처분을 위한 국내외의 방사성폐기물의 분류체계와 인수기준을 조사하였다.

국제원자력기구, 미국, 영국, 국내의 방사성폐기물 분류체계를 조사하였다. 국제원자력기구의 경우 방사성폐기물을 방사능농도와 반감기에 따라 고준위, 중준위, 저준위, 극저준위, 극단반감기, 규제면제를 포함하여 총 6가지로 분류하고 있다. 미국의 경우 방사능농도에 따라 고준위방사성폐기물, 저준위방사성폐기물, 부산물로 분류하고 있으며, 저준위방사성폐기물의 경우 핵종별 방사능농도에 따라 Class A, B, C, GTCC 4단계로 분류하고 있다. 한국과 영국은 열발생과 방사능농도에 따라 분류하고 있으며, 중준위방사성폐기물 이하의 경우에는 방사능농도를 기준으로 분류하여, 방사성폐기물을 고준위, 중준위, 저준위, 극저준위방사성폐기물, 자체처분 대상 폐기물 총 5단계로 분류하고 있다. 국내의 극저준위방사성폐기물과 유사한 폐기물 준위로는 국제원자력기구와 영국의 경우 극저준위방사성폐기물 그룹이, 미국의 경우 Class A가 가장 유사한 것으로 나타났다.

극저준위방사성폐기물처분시설의 인수기준을 조사하였다. 각국의 방사성폐기물 인수기준은 방사선학적 요건, 비방사선학적 요건, 포장물에 관한 요건과 같이 유사한 체계로 구성되어 있다. 세부 항목은 각 국가의 방사성폐기물처분에 대한 정책 그리고 처분시설 및 방사성폐기물의 특성 등에 따라 결정되므로 국가의 처분시설마다 상이한 것으로 나타났다. 국제원자력기구의 방사성폐기물 인수기준은 방사성폐기물 처분안전성 관점에서 최소한의 요건을 제시하고 있는 것으로 나타났다. 미국과 영국의 경우에는 국제원자력기구에서 제시하는 최소한의 요건을 기반으로 각 국가의 방사성폐기물에 관한 정책 그리고 처분시설 및 방사성폐기물의 특성에 따라 인수기준을 수립한 것으로 나타났다. 국내의

경우 극저준위방사성폐기물에 대한 인수기준은 아직 수립이 되지 않은 상태이며, 중저준위방사성폐기물에 대한 인수기준은 국외와 마찬가지로 이는 방사선학적, 비방사선학적, 포장물에 대한 요건에 따라 나누어 제시하고 있다.

국내 원자력발전소 해체를 대비하여 극저준위방사성폐기물처분을 위한 국내외의 방사성폐기물의 분류체계와 인수기준을 조사한 결과, 향후 국내에서는 국제원자력기구에서 제시하고 있는 요건, 국내 방사성폐기물 처분에 대한 정책, 처분시설 및 발생되는 방사성폐기물의 특성 등을 종합적으로 반영하여 국내 상황에 가장 적합한 극저준위방사성폐기물을 위한 처분시설 인수기준을 개발하여야 할 것이다. 본 연구의 결과는 향후 원자력시설 해체 시 다량으로 발생되는 극저준위방사성폐기물을 위한 처분시설 설계 및 운영 시 방사성폐기물 인수기준 수립에 활용될 수 있을 것이다. 그리고 국가적 차원의 방사성폐기물 관리체계 확립에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20171510300580).

참 고 문 헌

김범인, 김창락. 2014. 극저준위 해체폐기물 처분을 위한 방사성폐기물 인수기준 분석. 한국방사성폐기물학회지. **12**(2): 165-169.

원자력안전위원회. 2017a. 방사선방호 등에 관한 기준. 원자력안전위원회고시 제2017-36호.

원자력안전위원회. 2017b. 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정. 원자력안전위원회고시 제2017-65호.

원자력안전위원회. 2017c. 중 · 저준위 방사성폐기물 인도규정. 원자력안전위원회고시 제2017-60호.

정강일, 김진형, 권미진, 정미선, 홍성욱, 박진백. 2016. 우리나라 중 · 저준위 방사성폐기물처분시설 종합개발계획(안)과 예비안전성평가. 한국방사성폐기물학회지. **16**(4):385-410.

한국원자력안전기술원. 2011. 리스크 차등접근법에 따른 방사성 폐기물 분류체계 개선방안 연구. 한국원자력안전기술원.

Energy Solutions. 2015. Energy Solutions Clive, Utah Bulk Waste Disposal and Treatment Facilities Waste Acceptance Criteria. Energy Solutions.

IAEA. 1985. Acceptance Criteria for Disposal of Radioactive Waste in Shallow Ground and Rock Cavities. IAEA Safety Series No. 71. International Atomic Energy Agency.

IAEA. 1994. Classification of Radioactive Waste. IAEA Safety Series No. 111-G-1.1. International Atomic Energy Agency.

IAEA. 2006. Management of Problematic Waste and Material Generated During the Decommissioning of Nuclear Facilities. IAEA Technical Reports Series No. 441. International Atomic Energy Agency.

IAEA. 2007. Disposal Aspects of Low and Intermediate Level Decommissioning Waste. IAEA TECDOC-1572. International Atomic Energy Agency.

IAEA. 2009. Classification of Radioactive Waste. IAEA General Safety Guide No. GSG-1. International Atomic Energy Agency.

Lee JH, Hwang YH, Lee BG and Kim CW. 2017. Waste Characterization and Treatment Methodology for Decommissioning of Kori 1 Unit. International Nuclear Fuel Cycle Conference 2017 A-170.

LLWR. 2012. WAC; Very Low Level Waste Disposal, WSC-WAC-VER. Low Level Waste Repository Ltd.

LLWR. 2016. International Approaches to Radioactive Waste Classification, NWP-REP-134. Low Level Waste Repository Ltd.

LLWR. 2017. Very Low Level Waste Service Guidance, WSC-Guidance-V-001. Low Level Waste Repository Ltd.

US NRC. 2001. Waste Classification. United States Nuclear Regulatory Commission 10 CFR 61.55.

US NRC. 2006. Toxicity Characteristic. United States Nuclear Regulatory Commission 40 CFR 261.24.

US NRC. 2017a. Definition. United States Nuclear Regulatory Commission 10 CFR 60.2.

US NRC. 2017b. Definition. United States Nuclear Regulatory Commission 10 CFR 72.3.

Received: 8 July 2018
Revised: 14 August 2018
Revision accepted: 24 August 2018