Journal of Radiation Industry 14(4) : 423~433(2020)

Technical Paper

러시아의 방사성폐기물 처분 분석을 통한 국내 인수기준 개선 검토

박성희[1,*] · 이경호[1] · 정세원[1] · 박기현[1]

[1](주)오리온이엔씨

Review of Improvement on Waste Acceptance Criteria based on Analysis of Radioactive Waste Disposal in Russia

Seong Hee Park[1,*], Kyung Ho Lee[1], Se Won Chung[1] and Ki Hyun Park[1]

[1]*ORION ENC, 37, 22 Gil Seongsui-ro, Seongdong-gu, Seoul 04797, Republic of Korea*

Abstract - Russia is not well known country in radioactive waste aspect and the technical merits on treatment and disposal of radioactive wastes, etc. as well as policy, status and waste acceptance criteris, etc. Thus through the analysis of radioactive disposal status related to decommissioning we review the possibility of parts which can be adopted in relation to waste acceptance criteria (WAC) and suggest the improvements in domestic WAC.

Key words : Disposal, Waste acceptance criteria, Near surface disposal, Subsurface disposal, Treatment

서 론

러시아는 방사성폐기물(이하 "방폐물")과 관련하여 국내에서는 방사성폐기물 정책, 현황 및 인수조건 등은 물론 방폐물 관련 처리, 처분 등의 대한 기술적 장점 등이 잘 알려져 있지 않다. 따라서 러시아의 원전 해체와 관련한 방폐물 처분 현황 분석을 통해 국내 표층형 및 매립형 처분시설의 건설 이후 방폐물의 인수와 관련하여 방폐물 특성기준 즉, 일반요건, 고형화요건, 방사선적 요건, 물리적 요건, 화학적 요건 및 생물학적 요건 등에 대하여 반영할 수 있는 부분이 있는지를 검토하였고 반영할 수 있는 요건 및 조건을 도출하여 국내 방폐물의 인수기준 개선(안)을 제안하였다(한국원자력환경공단).

* Corresponding author: Seong Hee Park, Tel. +82-2-3414-2038, Fax. +82-2-3414-2031, E-mail. shpark@orionenc.com

본 론

1. 러시아의 원자력 해체사업

러시아 원자력공사(ROSENERGOATOM; 약칭 Rosatom)는 러시아 원전해체와 관련된 주요 기관이며 이 기관은 원자력 및 방사선 안전에 관해 연방 목표 프로그램에 따라 재정 지원을 받고 있다. 러시아는 방폐물과 관련하여 원자로와 핵무기의 안전한 해체와 관련된 문제를 광범위하게 다루어 왔다. 1981년에서 1990년 사이에 대부분의 원자로가 폐쇄되었고 현재 6기의 민간 원자로가 해체 대기 중이다. 러시아 정부는 2015년 원자력 발전소 해체에 약 50억 달러를 할당하였고 Arktika, Lenin, Sibir의 3기의 원자력 쇄빙선도 해체하였다. 러시아는 2016~2030년 원자력 및 방사선 안전을 위한 Rosatom의 제2차 연방 target 프로그램(FTP NRS-2)에 약 860억 달러를 승인하였다. 이 계획에 따르면 예산의 약 73%가 상업용 원자로 해체에 투자될 전망이다. 2018년 기준 러시아의 원전 해체 현황은 Table 1과 같다(Appolo

Table 1. Decommissioning status in Russia

Reactor Unit	Shutdown Reason	Decommission strategy	Current decommissioning phase	Current fuel management phase	Decommissioning licensee	Licence termination year
APS-1	Lifetime expiration	Long term shutdown	Permanent shutdown	Storage	Rosatom	N/A
BELOYARSKY-1	Lifetime expiration	Long term shutdown	Permanent shutdown	Storage	Rosatom	N/A
BELOYARSKY-2	Lifetime expiration	Long term shutdown	Permanent shutdown	Storage	Rosatom	N/A
NOVOVORONEZH-1	Lifetime expiration	Long term shutdown	Permanent shutdown	Storage	Rosatom	N/A
NOVOVORONEZH-2	Lifetime expiration	Long term shutdown	Permanent shutdown	Storage	Rosatom	N/A
NOVOVORONEZH-3	Lifetime expiration	Long term shutdown	Permanent shutdown	Storage	Rosatom	N/A

2020).

2. 러시아의 방폐물 관리 현황

러시아는 2014년 기준 870만톤(3.59×10^{19} Bq)의 고체 폐기물이 발생하였고 대부분이 저준위 방폐물이다. 이들의 97%가 광산 및 우라늄 처리 시 발생된 것이다. 고준위는 전체 고체방폐물 방사능의 98%를 차지하며 이는 일반 환경에서 격리된 특수 건물이나 구조물들에 보관되고 있다. 러시아의 경우 방폐물은 1960년대부터 해변지역에 주로 저장시설을 구축하여 관리하고 있다. 현재 산업부지 136개 지역에 저장시설 및 임시 저장을 위한 43개 지역에서 총 1,466곳에 시설을 구축하고 있다. 이렇게 저장시설이 많은 이유는 총 190개의 원자력잠수함, 해빙선 등을 대상으로 2002년 이후 해체 지역이 많기 때문이며 임시 저장 이후 총 10개 이상의 처분 부지를 고려 중이다. 사용후핵연료의 저장은 400 m 깊이 이상의 심저 처분을 고려 중이며 2021년까지 Zheleznogorsk 지역에 처분 시설을 구축할 예정이다. 사용후핵연료의 처분 시설은 주로 250~1,000 m 깊이의 광산 또는 2,000~5,000 m 깊이로 Blast Hole에 설치하고자 하고 있다. 고준위 방폐물은 500 m 깊이의 Krasnoyarsk 지역에 2021~2030년까지 처분 시설을 구축할 계획이며 원자력 해빙선 등의 장기저장도 Chukotka 지역의 Bilibino 해체 원전을 이용할 계획을 갖고 있다. 방폐물은 금속 또는 콘크리트 용기에 저장되며 일부는 금속 또는 콘크리트 탱크에 보관되기도 한다. 액체방폐물은 외부 저장 pool에 보관 중이다. Fig. 1은 러시아의 방폐물 처분 최대 부지 지역을 보여준다. 본 지역은 1945년 이후 운영된 Ozyorsk나 처분 시설을 확장하여 2021년까지 건설할 예정이며 년 2,000 m^3의 양을 처분할 수 있는 최대 시설이다.

Fig. 1. Largest waste disposal site in Russia (Appolo 2020).

원자력발전소에서 발생된 방폐물은 주로 발전소 내 보관되고 있으며 1970년대 이전 건설된 원자력발전소의 경우 해체 시 보관 중인 방폐물을 해체폐기물과 함께 처분할 계획이다.

3. 러시아의 방폐물 관리 정책

러시아의 방폐물 처리 정책은 연방법 "On radioactive wastes treatment"에 의해 좌우된다. 방폐물은 FSUE (Federal State Unitary Enterprise) "RosRAO"사에 의해 관리되며 고체 방폐물 등급은 연방법 (2011.11.11) 번호 190-FZ "On Radioactive Waste Amendments to Certain Legislative Acts of Russian Federation" (Federal Environmental 2014) 및 연방법 시행령 (2012.10.19) 번호 1069 "On Criteria of Solid, Liquid and Gaseous Waste and to Disposal Radioactive Wastes, the Criteria of Radioactive Wastes Attribution to Special Radioactive Wastes and to Radioactive Waste", 및 "the Classification Criteria for Disposal of Radioactive

Table 2. Classification of solid radioactive waste

Category of RW	Specific activity of Radioactive Waste (RW), $Bq \cdot g^{-1}$			
	Tritium	Beta-nuclide	Alpha-nuclide (including transuranium)	Transuranium elements
Very Low Level Waste (VLLW)	$<10^7$	$<10^3$	$<10^2$	$<10^1$
Low Level Waste (LLW)	$10^7 \sim 10^8$	$10^3 \sim 10^4$	$10^2 \sim 10^3$	$10^1 \sim 10^2$
Intermediate Level Waste (ILW)	$10^8 \sim 10^{11}$	$10^4 \sim 10^7$	$10^3 \sim 10^6$	$10^2 \sim 10^5$
High Level Waste (HLW)	$>10^{11}$	$>10^7$	$>10^6$	$>10^5$

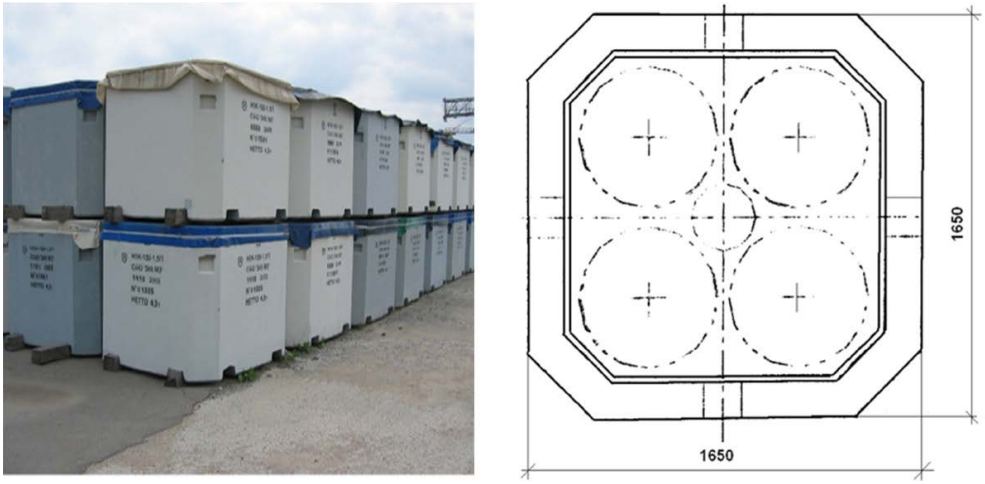

Fig. 2. View of HIC (type; NZK-150-1.5P) used in Russia (KORAD 2010).

Wastes" (IAEA 2018)에 따라 Table 2와 같이 4단계로 같이 구분된다. 액체의 경우 극저준위방폐물(Very Low Level Waste; VLLW)은 구분하지 않는다.

처분 관점에서는 총 6단계로 구분하며 이는 열적피폭을 감소하기 위한 사전 조치의 유무에 따른 심저 처분(Class 1 및 Class 2), 100 m 깊이 지표와 표층 및 처분의 열적피폭을 감소하기 위한 사전 조치가 없는 표층 처분(Class 3 및 Class 6), 매립 처분(Class 4), 액체방폐물의 심저 처분(Class 5)으로 구분된다(Table 3 참조).

4. 러시아의 방폐물 인수조건

러시아의 방폐물 주요 인수조건에 대한 사항은 아래와 같이 요약된다.

4.1. 물리적 조건

러시아의 방폐물 인수조건은 포장물의 경우 변형이 없는 구조재로 제작이 되어야 하며 콘크리트 용기의 경우 아래 조건을 만족토록 요구한다.

- 압축강도 >B 40 (M 550 = 40 MPa)
- 수분 저항성 >W 10 (10 atm)
- 어는점 저항성(부동성) >F 200 (200 Freeze - Thaw Cycle)

용기에 대한 주요 시험 기준은 아래와 같다.

1) 용기무게(내부 채움 무게 포함)의 5배 무게로 24시간 압축 시험
2) 직선으로 및 모서리 방향으로 용기를 각각 50 cm 높이에서 낙하시험
3) 32 mm 직경의 탄소강 막대의 반구 끝부분으로 용기 충격 시험
4) 1 m 높이 거리에서 6 kg 무게 충격 시험

4.2. 화학적 조건

주로 부식 방지 및 가스 발생 방지가 요구된다. 연소성 물질과의 혼재를 금하고 방폐물의 부유 및 흘림을 방지할 수 있는 bulky waste의 수용은 가능하다.

4.3. 방사선적 조건

4.3.1. 고준위 기준

고준위의 기준은 러시아 GOST P 50926-96 (Radioactive Vitrified Waste)에 따라 β 및 γ 방출 방사선은 10^8 Gy 이상

Table 3. Classification of radioactive waste in consideration of disposal (IAEA 2018)

Class	Type of radioactive waste	Method of disposal
Class 1	Solid or liquid solidified HLW with high heat containing radionuclide with the following specific activities: • Tritium - $>10^{11}$ Bq · g^{-1} • By beta-emitters (except for tritium) - $>10^{7}$ Bq · g^{-1} • Alpha emitters (excluding TRU) $>10^{6}$ Bq · g^{-1} • For transuranic nuclide - $>10^{5}$ Bq · g^{-1}	Disposal in points of deep disposal of preconditioned radioactive wastes to reduce its heat release.
Class 2	Solid or liquid solidified HLW and spent sealed sources of ionizing radiation containing radionuclide with the following specific activities : • Tritium - $>10^{11}$ Bq · g^{-1} • By beta-emitters (except for tritium) - $>10^{7}$ Bq · g^{-1} • Alpha emitters (excluding TRU) - $>10^{6}$ Bq · g^{-1} • For transuranic nuclide - $>10^{5}$ Bq · g^{-1} Solid long-life (ILW) containing radionuclide with half-lives of more than 30 years and a specific activity: • from 10^{8} to 10^{11} Bq · g^{-1} - for tritium radioactive waste; • from 10^{4} to 10^{7} Bq · g^{-1} - for RW containing beta-emitting radionuclide (except for tritium); • from 10^{3} to 10^{6} Bq · g^{-1} - for radioactive waste containing alpha-emitting radionuclide (except transuranic); • from 10^{2} to 10^{5} Bq · g^{-1} - for RW containing transuranic radionuclide	Disposal in points of deep disposal of non-preconditioned radioactive waste without in order to reduce its heat exposure.
Class 3	Solid ILW containing radionuclide with a specific activity: • from 10^{8} to 10^{11} Bq · g^{-1} - for tritium radioactive waste; • from 10^{4} to 10^{7} Bq · g^{-1} - for RW containing beta-emitting radionuclide (except for tritium); • from 10^{3} to 10^{6} Bq · g^{-1} - for radioactive waste containing alpha-emitting radionuclide (except for transuranic); • from 10^{2} to 10^{5} Bq · g^{-1} - for RW containing transuranic radionuclide; Solid long-lived LLW containing radionuclide with half-lives of more than 30 years and a specific activity: • from 10^{7} to 10^{8} Bq · g^{-1} - for tritium radioactive waste; • from 10^{3} to 10^{4} Bq · g^{-1} - for RW containing beta-emitting radionuclide (except for tritium); • from 10^{2} to 10^{3} Bq · g^{-1} - for radioactive waste containing alpha-emitting radionuclide (except for transuranic); • from 10 to 10^{2} Bq · g^{-1} - for RW containing transuranic radionuclide.	Disposal in points of subsurface disposal of non-preconditioned radioactive waste to be placed at the depth of 100 meters.
Class 4	Solid long-life LLW containing radionuclide with specific activity: • from 10^{7} to 10^{8} Bq · g^{-1} - for tritium radioactive waste; • from 10^{3} to 10^{4} Bq · g^{-1} - for RW containing beta-emitting radionuclide (except for tritium); • from 10^{2} to 10^{3} Bq · g^{-1} - for radioactive waste containing alpha-emitting radionuclides (except transuranic); • from 10 to 10^{2} Bq · g^{-1} - for RW containing transuranic radionuclide. Very low-level solid radioactive waste containing radionuclides specific activity: • to 10^{7} Bq · g^{-1} - for tritium radioactive waste; • to 10^{3} Bq · g^{-1} - for RW containing beta-emitting radionuclide (except for tritium); • to 10^{3} Bq · g^{-1} - for RW containing alpha-emitting radionuclide (except for transuranic); • to 10 Bq · g^{-1} - for RW containing transuranic radionuclide.	Near surface disposal at the same level with ground surface
Class 5	Liquid ILW containing radionuclide with specific activity: • from 10^{4} to 10^{8} Bq · g^{-1} - for tritium radioactive waste; • from 10^{3} to 10^{8} Bq · g^{-1} - for RW containing beta-emitting radionuclide (except tritium); • from 10^{2} to 10^{6} Bq · g^{-1} - for radioactive waste containing alpha - emitting radionuclide (except transuranic); • from 10 to 10^{5} Bq · g^{-1} - for RW containing transuranic radionuclide. Liquid LLW containing radionuclide specific active Stew: • to 10^{4} Bq · g^{-1} - for tritium radioactive waste; • to 10^{3} Bq · g^{-1} - for RW containing beta - emitting radionuclide (except tritium); • to 10^{2} Bq · g^{-1} - for RW containing alpha - emitting radionuclide (except transuranic); • to 10 Bq · g^{-1} - for RW containing transuranic radionuclide.	Disposal in points of deep disposal of liquid radioactive waste, constructed and operated as for the day of validation of the Federal Law on Radioactive wastes treatment.
Class 6	RW generated during mining and processing of uranium ores, as well as during the implementation of activities not related to the use of atomic energy while mining and processing minerals and organic materials with a high content of natural radionuclide.	Disposal in points of subsurface disposal of non-preconditioned radioactive waste

및 α의 경우 10^{18}~10^{19} decay·g^{-1} 초과하는 것이며 핵분열성 물질의 경우 함유량이 2 wt/% 미만이다.

4.3.2. 표면선량률

포장물 용기 표면에서 2 mSv·h^{-1} 미만이어야 하며 1 m 거리에서 0.1 mSv·h^{-1} 미만이어야 한다.

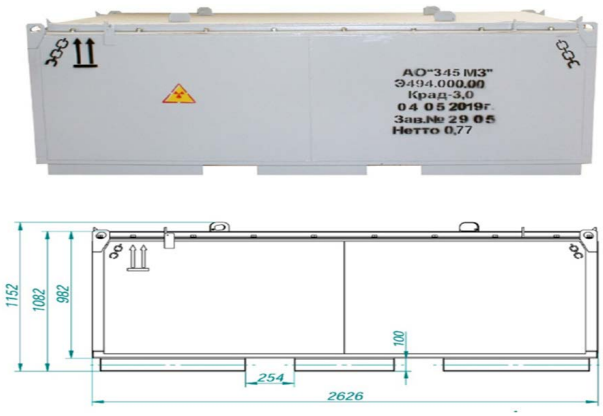

Fig. 3. KRAD 3.0 Transportation & disposal container (KORAD 2010).

4.3.3. 확산 투과율

^{137}Cs: 1.0×10^{-13} $m^2\cdot s^{-1}$

^{3}H: 1.5×0^{-13} $m^2\cdot s^{-1}$

4.4. 포장 용기 조건

고건전성용기(High Intergrity Container; HIC)의 사용은 허용되며 JSC사 공장에서 제작된 NZK-150-1.5P형 용기가 50년간 발전소에서 보관 후 최종 처분장으로 이동하여 300년 동안 저장된다(Fig. 2 참조). 본 용기는 0.1 Sv·h^{-1} 이상의 고준위 방폐물 처분에도 사용될 예정이다.

일반적으로 이용되는 포장 용기는 A2201형으로 3그룹으

Fig. 4. KMZ-M container (KORAD 2010).

Table 4. Characteristic criteria of radioactive waste (Russian GOST 2002)

	Main Category	Sub Category
Characteristic Criteria of radioactive Waste	1 General Requirements	1 Shape of Waste
		2 Packaging, Packaging container
		3 Specification Restrictions (Weight, Size, Shape, etc.)
	2 Solidification Requirements	4 Solidification/Immobilization
	3 Radiological Requirements	5 Classification of Waste Products, Restriction of Radioactivity Concentration
		6 Identification of Nuclides and Radioactivity Concentration
		7 Surface Dose Rate
		8 Criticality Safety
		9 Surface Contamination
	4 Physical Requirements	10 Filling Ratio
		11 Free Water
	5 Chemical Requirements	12 Kilate
		13 Corrosiveness
		14 Explosive, Ignitability, Flammable, etc.
		15 Gas Production
		16 Chemical Hazard
	6 Biological requirements	17 Biological Hazard

Table 5. Waste acceptance criteria for class 1～class 4 (Russian Federation 2011)

Condition	WAC			
	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Explosion	No	No	No	No
Flammable and spontaneous ignition material	＜1%	＜1%	＜1%	＜1%
Substance having reaction with the release of self-ignition or flammable gas	No	No	No	No
Emission of toxic gas, aerosol and sublimation	No	No	No	No
Infected (pathogenic) substance	No	No	No	No
Mechanical strength, MPa	＞10	＞10	＞5	＞5
Complex-forming substance	–	＜1%	＜1%	＜1%
Free liquid	–	＜3%	＜3%	–
Surface contamination ($cm^2 \cdot min$)			＜10 $mGy \cdot h^{-1}$	＜2 $mGy \cdot h^{-1}$
– Beta	＜10^4 particles	＜10^4 particles	＜2×10^3 particles	＜2×10^3 particles
– Alpha	＜2×10^2 particles	＜2×10^2 particles	＜2×10^1 particles	＜2×10^1 particles
Insulation capability	＞1,000 years	＞1,000 years	＞100 years	Before burial
Thermal stability	up to 450°C	–	30 cycles (－40－40°C)	–
Radiation resistance				
– Beta/Gamma	10^8 Gy	Preserve with ＞20% at 10^6 Gy	Decrease with ＜20% at 10^6 Gy	–
– Alpha	10^{19} decays cm^{-3}			
Heat dissipation	＜2 $kW \cdot m^{-3}$	＜100 $W \cdot m^{-3}$	–	–
Output rate of nuclide	–	–	^3H: 10^{-2}/year Beta/Gamma: 10^{-1}/year Alpha: ＜10^{-4}/year	–

로 구성되며, 최대 표면선량률을 기준으로 다음과 같이 구분된다.

1) 1그룹: 1 $mSv \cdot h^{-1}$를 초과하지 않는 용기

2) 2그룹: 1～5 $mSv \cdot h^{-1}$인 용기

3) 3그룹: 5 $mSv \cdot h^{-1}$ 초과하는 용기

용기의 적재 시 빈 공간이 발생하면 운반용기 표면선량률을 감소시키기 위하여 용기의 충진재(밀도＝～2.1 $g \cdot cm^{-3}$)를 이용하여 빈 공간을 채운다. 국내의 경우 방폐물 특성기준에 따른 분류는 Table 4와 같다. 그러나 러시아의 경우, NP-093-14에 따라 방폐물 등급 1～4 등급의 주요 인수기준은 Table 5와 같다.

운반 및 처분 겸용 용기의 경우 KRAD3.0이 많이 이용되며(Fig. 3 참조) 수명은 50년 이상이다.

이 외 K-RAD 1.36 및 KMZ-M형도 많이 이용되며 모두 철재로 제작된 각각 IP-2 및 A형의 용기이다.

4.5. 고형화 조건

고형화 조건에 대한 사항은 시멘트, 아스팔트 및 유리화에 따라 틀리며 각각 GOST R 51883-2002, GOST 50927-96 및 GOST P 50926-96에 따라 아래 Table 6과 같이 적용된다.

유리화의 경우는, Borosilicate 및 러시아 Yellow Phase 유리 구성 재료(Glass Compositi-on Material; GCM)의 사용에

Table 6. Immobilization conditions (Russian Federation 2012)

	Conditions	Regulation limit	Test method
Cement	Leaching rate (^{137}Cs), g·cm^{-2}, day	$<10^{-3}$	GOST 29114
	Mechanical durability Compressive strength, MPa	>4.9	GOST 310.4
	Radiation durability, Gy	10^6	Change of mechanical durability
	Freeze durability (freeze-thaw cycle)	>30	GOST 10060.1
	Long term water immersion, day	90	Change of mechanical durability
Bitumen	Leaching rate (^{137}Cs), g·cm^{-2}, day	$<10^{-3}$	GOST 29114
	Stability to swelling, Volume increase after 90 days immersion in water	<3	Change of volume
	Content of free water, For salt concentrate (%) For ion-exchange resins (%)	<1 3~5	Loss of Mass at heating up to 110°C
	Thermal durability, Flash point °C Ignition temp. °C Self-ignition temp.	≥200 ≥250 ≥400	GOST 12.1.004
	Radiation durability, Increase of volume after 10^6 Gy (vol, %)	≤3	Change of volume
	Biological stability	No fungus	GOST 9.049
Vitrified	Vitrified material	Borosilicate Glass	GCMs
	Waste oxide content, wt %	30~35	30-35 up to 15 vol % of yellow phase
	Viscosity Pa second at 1,200°C	3.5~5.0	3.0~6.0
	Resistivity, Ω m at 1,200°C	0.03~0.05	0.03~0.05
	Density, g·cm^{-3}	2.5~2.7	2.4~2.7
	Compressive strength, MPa	80~100	50~80
	Thermal durability	>550°C	>550°C
	Leaching rate, 28 days IAEA · g·cm^{-1}·day^{-1} – ^{137}Cs – Cr, Mn, Fe, Co, Ni – ^{90}Sr – Na – B – SO_4^{2-}	 10^{-5}~10^{-6} 10^{-7}~10^{-8} 10^{-6}~10^{-7} 10^{-5}~10^{-6} $<10^{-8}$ 10^{-5}~10^{-6}	 ~10^{-5} 10^{-7}~10^{-8} 10^{-6}~10^{-7} 10^{-6}~10^{-7} 10^{-6}~10^{-7} 10^{-4}~10^{-5} up to 15 vol % of yellow phase

After vitrified the packing material has the value of >9 MPa and >41 MPa compressive strength and flexural strength respectively.

해당된다.

앞 절에서 언급된 러시아에서 사용 중인 NZK-150-1.5P, KRA3.0 및 KMZ-M형 용기(Fig. 4 참조)는 각각 내부 용적 1.5 m^3, 3.0 m^3, 3.1 m^{3}를 가지며 크기 및 재질은 각각 1,650×1,650×1,370 mm (concrete), 1,250×1,250×850 mm (steel) 2,626×1,152×1,152 (steel)를 가진다. A2201형은 일반적으로 국내에서 사용되는 200L Steel 드럼 형태이다. NZK-150-1.5P 용기는 주로 폐수지를 보관하며 생물학적 보

Table 7. Main waste acceptance criteria in Korea (Russian GOST 2002)

Inspection item		Waste Acceptance Criteria (WAC)
Radiological characteristics	Radioactivity	• Below the limit of disposal concentration by nuclide • If necessary, additional concentration identification is required towards decommissioning wastes besides nuclides in current WAC
	Nuclide identification	• Identify over 95% among total radioactivity quantity in wastes • Hereinbelow nuclides' concentration is required. ^{3}H ^{14}C ^{55}Fe ^{58}Co ^{60}Co ^{59}Ni ^{63}Ni ^{90}Sr ^{94}Nb ^{99}Tc ^{129}I ^{137}Cs ^{144}Ce Total Alpha • If necessary, additional concentration identification is required towards decommissioning wastes besides nuclides in current WAC
	Surface radiation dose	• Below 10 $mSv \cdot hr^{-1}$ • If separate container is used the surface radiation dose of separate container is applied
	Criticality safety	• Concentration of fissile materials shall be sufficiently lower to keep criticality safety
	Surface contamination	• Removable surface contamination value is the average value measured over 300 cm^2 at random surfaces – Beta/Gamma and Low toxic Alpha emitters: Under 4 $Bq \cdot cm^{-2}$ – All Alpha emitters besides above: Under 0.4 $Bq \cdot cm^{-2}$
Physical characteristics	Particle material	• Packing by handling wihout dispersion
	Filling ratio	• Over 85%
	Free water content	• Under 1% of waste volume
	Kilate, etc.	• Chemical name and existing content shall be identified when containing over 0.1% of waste's weight • Solidification when containing over 1% of waste's weight • Waste shall not contain over 8% of kilate, etc.
Chemical & biological characteristics	Ignition materials	• Handling and packing are done to ensure ignition can't be possible
	Toxic materials	• Wastes containing toxic materials shall be removed.
	Explosive materials	• None
	Corrosive materials	• Handling and packing are done for wastes containing corrosive materials to remove or reduce.
	Gas production	• Integrity of containers or disposal facility performance shall not be degraded.
	Combustible materials	• Handling and packing are done for wastes containing combustible materials to remove or reduce.
	Living things, pathogen and infections	• Removal (None)

호 두께는 150 mm이고 KRA3.0은 기존 KRA1, 3형 (크기 1,250×1,250×880 mm, 내부용적 1.3 m^3)을 보다 대형화 한 것으로 생물학적 보호두께는 10 mm이다. KMZ-M형은 생물학적 보호두께가 5 mm로 비교적 선량이 적게 나오는 방폐물을 보관 및 운반 목적으로 제작되었다.

러시아 인수기준을 분석한 결과 기술적인 측면에서 국내 인수기준에 비교하였을 때 장점은 아래와 같다.

4.5.1. 일반 조건

국내 처분 시설에 기반할 때(매립형 처분 시설은 건설 계획 단계이고 포장용기에 대한 결정이 아직 되고 있지 않아 본 논문에서는 관련 내용을 제외함) 금속용기의 경

우 200 L 및 320 L 용기와 크기 1.4×1.1×1.0 m 이상 및 6.1×2.5×1.5 m (사각형) 이하로 포장용기 크기를 요구하고 있고 사각 용기의 종류가 많지 않으나 러시아의 경우 크기가 다양한 사각형 용기를 사용 중이고 일시에 많은 부피의 방폐물을 옮길 수 있는 용기 개발이 잘 되어 있다. 따라서 원전 해체 시 다량 발생되는 해체폐기물을 처분하는데 큰 이점을 갖고 있다. 또한 국내에서는 인허가를 득하고 있지 않은 HIC 용기에 대한 승인을 통해 다수의 HIC 용기를 보유하고 있다. 러시아는 용기의 수명도 50년 이상을 요구하고 있어 국내의 경우 제도적 관리기간인 300년을 유지하도록 하는 조건보다 기준을 낮게 유지하고 있다.

4.5.2. 물리적 조건

포장용기의 낙하시험의 경우 국내는 용기 중량에 따라 0.3～1.2 m 높이에서 시험을 하도록 하고 있으나 러시아의 경우 직선 및 모서리 방향으로 0.5 m에서만 시험을 하도록 하고 있어 비교적 규제가 쉽도록 하고 있다.

4.5.3. 화학적 조건

bulky waste에 대한 용기 사용을 러시아는 허용하고 있으나 국내는 아직 기준 수립이 되고 있지 않다.

4.5.4. 방사선적 조건

유리화 후 고준위 방폐물에 대한 기준을 러시아는 제시하고 있으나(β 및 γ 방출 방사선은 10^8 Gy 이상 및 α의 경우 10^{18}～10^{19} decay·g^{-1} 초과) 국내는 일반적인 고준위에 대한 기준만을 적용하고 있어 추후 유리화 고준위에 대한 기준 수립이 필요하다. 또한 표면선량률도 국내의 10 mSv·h^{-1} 미만과 달리 2 mSv·h^{-1}로 작업자의 피폭을 낮게 방지하는 수준으로 유지하고 있다. 방폐물 종류도 국내는 4단계(고준위, 중준위, 저준위, 극저준위)로 구분하고 있으나 러시아는 Class 1～6까지 세분화하여 처분 수용성에 대한 인수조건에 대하여 방폐물의 수용을 용이하게 하고 있다.

4.5.5. 고형화 조건

러시아는 시멘트, 아스팔트, 유리화에 대한 고형화 방법을 다양하게 적용하고 있으나 국내는 아직 시멘트 및 폴리머를 이용하고 있으나 원자력발전소에서는 현재 시멘트 고화는 하고 있지 않다.

5. 국내 인수 검토

국내의 경우 인수기준은 방폐물 특성기준에 따라 방폐물이 갖는 고유의 특성 항목을 6개의 대분류 하에 17개의 소분류로 구분하고 각 항목이 의미하는 바에 따라 방폐물 인수기준을 제시하고 있다. 국내에서 발생되는 방폐물은 원전 또는 원자력 시설에서 발생되는 운영폐기물과 원전 해체폐기물 및 일반 산업체 발생 방폐물로 구분된다. 운영폐기물은 잡고체, 폐수지, 폐필터 및 농축폐액으로 구분되며 해체폐기물은 콘크리트(콘크리트 조각 및 스캐블링 콘크리트), 대형기기, 소형금속, 토양, 잡고체, 전선류, 토양, 일차계통 폐수지, 폐수지 및 필터, 단열재, 석면, 유해성폐기물로 구분된다. 해체폐기물의 경우 콘크리트 및 소형금속이 많은 부분을 차지한다. 인수기준의 요건은 일반요건, 고형화, 방사선적 특성요건, 물리적 특성, 화학적 특성, 생물학적 특성 요건으로 구분되며 일반 요건의 경우 포장 용기의 중량 및 크기가 제한되며, 고형화의 경우, 분산성 또는 입자성 물질에 대한 고형화 및 고형화 시험 요건 및 비균질폐기물에 대한 고정화 요건(반감기가 20년 이상 핵종의 총 방사능 농도가 74,000 Bq·g^{-1} 이상인 경우 고정화) 등이 요구된다. 방사선적 특성은 표면 방사선량률(10 mSv·h^{-1} 이하) 및 표면오염도(베타 감마선 방출 및 저족성 알파 방출체의 경우 <4 Bq·cm^{-2} 및 모든 알파방출체<0.4 Bq·cm^{-2}) 조건이 만족되어야 한다.

물리적 특성의 경우 채움률(85% 이상) 및 유리수(0.5% 미만), 킬레이트제(폐기물 무게의 0.1% 이상 함유 시 화학명 및 존재량 명시 등) 요건이 만족되어야 하며, 화학적 특성은 발화성, 유해성, 부식성, 폭발성, 인화성, 기체발생 등에 포장용기에 존재하지 않도록 요구하는 요건을 만족하여야 한다. 생물학적 특성은 생물, 병원균 및 감염물질이 포장용기에 존재하지 않도록 요구하는 요건을 만족하여야 한다.

물리적, 화학적, 생물학적 및 방사선적 주요 인수기준은 Table 7과 같이 주어진다.

6. 인수기준 개선(안) 제안

국내 인수기준은 최초 동굴형 처분에 기초하여 작성되었고 따라서 원전 해체 시 발생되는 방폐물을 모두 다 동굴에 수용하기는 어렵다. 따라서 현재 표층형 인수기준을 마련중에 있고 매립형 처분시설의 인수기준 도입도 조만간 준비될 전망이다. 표층형의 경우 저준위 및 극저준위 방폐물을 수용하고 매립형의 경우 극저준위 방폐물 만을 수용할 수 있으므로 방폐물의 특성에 맞는 처분 수용성과 처분 안전성을 고려한 인수기준 마련이 필요하다.

논 의

러시아 인수기준을 분석한 결과, 러시아의 경우 인수기준은 국내 인수기준과는 많은 부분이 다르며 특히 고준위 방폐물의 발생이 많은 관계로 유리화기술의 고형화 적용, 고준위 방폐물의 기준 구체화, 포장용기의 다양화, 일부 시험기준의 완화 등 일반 조건, 물리적 조건, 방사선적 조건 등에 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 국내의 경우 고준위 방

폐물은 1차계통 폐수지 및 폐필터 등에만 해당하여 상당히 제한적이며 따라서 러시아의 경우와 같이 방폐물의 구분 확대(Class 1~6) 등은 불필요하고 고준위의 유리화도 시기상조라 할 수 있다. 그러나 해체폐기물 측면에서는 많은 포장 용기를 활용하고 있는 러시아의 사례가 도움이 되며 또한 방사선적 조건의 완화(표면선량률 2 $mSv \cdot h^{-1}$ 미만) 등도 국내에서 작업자의 피폭 저감 측면에서 받아들여야 할 조건이라 할 수 있다.

또한 러시아의 경우 많은 방폐물을 처분한 사례가 있어 처분 수용서 측면에서 방폐물의 고형화 시 침출률과 관련하여 잠재적 유해 핵종(Cr, Mn, Fe, Ni)의 추가 확인 등이 필요할 것으로 본다. 국내도 Co, Cs alc Sr 3개 핵종 외 ^{152}Eu 핵종에 대한 추가 여부를 검토 중에 있어 러시아의 사례도 같이 논의하여야 할 사항이라고 판단된다. 특히 HIC 용기는 중, 고준위 폐수지의 처분에 활용될 것으로 보여 HIC 내 유리수 함유를 1% 미만으로 유지하여야 하는 것도 러시아의 처분 경험과 안전성 분석 사례를 분석 비교하여 최적의 유리수 함량을 재결정할 필요도 있다. 러시아의 경우 극저준위 방폐물에 대한 적용에서 극저준위 액체 방폐물은 방폐물 분류에 포함하고 있지 않는 사실도 향후 해체 시 액체폐기물 처분 시 고려되어야 할 사항이라고 판단된다. 참고로 공릉동 연구로 1 & 2호기 해체 시 극저준위 액체폐기물은 일부 자연 증발로 처리한 사례가 도움이 될 것으로 판단된다.

결 론

러시아의 경우를 반영하여 국내인수 기준 개선(안)은 아래와 같이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

1) 시설별 전용 용기 수용: 동굴형, 표층형, 매립형 처분시설에 적합한 처분 용기를 결정하여 처분 수용성을 높일 필요가 있다. 특히 매립형 처분 시설의 경우 중형 또는 대형 용기가 주로 사용되도록 한다.
2) 방사선적 인수 기준 완화: 현재 국내 기준에 제시된 10 $mSv \cdot h^{-1}$의 표면 선량률 조건을 러시아와 같이 2 $mSv \cdot h^{-1}$로 하향 적용할 것을 제안한다.
3) 운반 용기 내 충진재 사용: 러시아의 경우처럼 표면선량률을 줄이기 위하여 필요 시 충진재를 사용하도록 제안한다(밀도 2.1 $g \cdot cm^{-3}$ 이상)
4) 고형화 시험: 국내의 경우 시멘트, 유리화 및 폴리머 고형화가 고려되고 있고 따라서 러시아의 시멘트, 아스팔트 및 유리화와는 약간 고형화 방법이 틀리나 국내 고형화 사례를 반영한 아래 개선을 제안한다.
   - 침출의 경우 Cs, Co, Sr 외 침출에 대하여는 필요 시 Cr, Mn, Fe, Ni 등에 대한 핵종 침출률도 해체 폐기물에 대해 추가 적용을 제안한다.
   - 유리수 제한은 현재 0.5% 미만(HIC 1%) 이온교환수지에 대한 유리수 함유를 3~5%까지 HIC 처분 시에 완화를 제안한다. 이온교환수지의 경우 수분 함유는 다른 방폐물과 달리 비교적 많으므로 건조의 과정이 간소화하고 건조에 대한 상당한 시간과 노력이 배제할 수 있도록 하여 현재 1%에서 러시아의 경우처럼 완화를 제안한다(향후 아스팔트 고화 적용 시).
   - 유리화의 경우 기존 인수기준을 세분화하여 유리화에 맞는 기준으로 추가 적용 항목을 반영한다.
   - 추가 적용 항목: 산소농도 조건 추가 / 열화 저항성 조건 추가/침출조건 상향/압 축강도 요건 상향 등
5) 매립형 처분 시설에 수용되는 고형화방폐물은 현재 인수기준에 제시된 시험 요건을 완화한다.
   - 완화 항목
   - 압축강도: 현재 기준 3.44 MPa 준수(러시아의 경우 국내보다 상향 수치임)
   - 열화저항성: 기계적 강도(압축 강도)에 따라 차등화
   - 침출지수: ^{137}Cs 만 고려(시멘트 고화 시)
   - 침수시험: 부피에 따라 차등화
   - 열 순환시험: 시험 온도 및 순환 cycle 완화
6) Bulky waste 수용 허용

사 사

본 논문은 “원전해체사업 표준 공정 및 표준 품셈”과제(과제번호: 20191510301180)의 지원으로 작성되었습니다.

참 고 문 헌

한국원자력환경공단. www.korad.or.kr. 2단계 표층형처분시설 개요.

Appolo. 2020. Technical Report on Waste Certification Program. 1st ed. pp. 52-53. Appolo. Zurich.

Federal Environmental. Industrial and Nu- clear Supervision Service No. 572. 2014. Criteria for accepting Radioactive Waste for disposal.

IAEA. 2018. Country Nuclear Power Profiles, Russian Federation 2018 Edition.

KORAD. 2010. Waste Acceptance Criteria for Intermediate and Low Level radioactive Waste. pp. 13-85. KORAD. Gyeongju.

Russian GOST. 2002. Cemented Radioactive Waste, General Technical Requirements.

Russian Federation. Federal Law No. 190-FZ. 2011. Management of Radioactive Waste.

Russian Federation. Ministerial Decree No. 169. 2012. Validating Criteria for Classification of Solid, Liquid, Gaseous, Waste as Radioactive Waste.

Received: 22 October 2020
Revised: 11 November 2020
Revision accepted: 26 November 2020