

# A Basic Study on the Radiological Characteristics and Disposal Methods of NORM Wastes

## 공정부산물의 방사선적 특성과 처분방안에 관한 기본 연구

Jongtae Jeong<sup>1\*</sup>, Min-Hoon Baik<sup>1</sup>, Chung-Kyun Park<sup>1</sup>, Tae-Jin Park<sup>1</sup>, Nak-Youl Ko<sup>1</sup>, and Ki Hoon Yoon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeokdaero 989, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

<sup>2</sup>Korea Institute of Nuclear Safety, 62 Gwahakro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

정종태<sup>1\*</sup>, 백민훈<sup>1</sup>, 박정균<sup>1</sup>, 박태진<sup>1</sup>, 고낙열<sup>1</sup>, 윤기훈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

<sup>2</sup>한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 과학로 62

(Received August 6, 2014 / Revised September 1, 2014 / Approved September 15, 2014)

Securing the radiological safety is a prerequisite for the safe management of the naturally occurring radioactive materials (NORM) which cannot be reused. This becomes a crucial focus of our R&D efforts upon the implementation of the Act on Protective Action Guidelines against Radiation in the Natural Environment. To secure the safety, the establishment of technical bases and procedures for securing radiological safety related to the disposal of NORM is required. Thus, it is necessary to analyze the characteristics, to collect the data, to have the radiological safety assessment methodologies and tools, to investigate disposal methods and facilities, and to study the effects of the input data on the safety for the NORM wastes. Here, we assess the environmental impact of the NORM waste disposal with respect to the major domestic and foreign NORM characteristics. The data associated with major industries are collected/analyzed and the status of disposal facilities and methodologies relevant to the NORM wastes is investigated. We also suggest the conceptual design concept of a landfill disposal facility and the management plan with respect to the major NORM wastes characteristics. The radionuclide pathways are identified for the atmospheric transport and leachate release and the environmental impact assessment methodology for the NORM waste disposal is established using a relevant code. The assessment and analysis on the exposure doses and excessive cancer risks for the NORM waste disposal are performed using the characteristics of the representative domestic NORM wastes including flying ash, phosphor gypsum, and redmud. The results show that the exposure dose and the excessive cancer risks are very low to consider any radiation effects. This study will contribute to development in the areas of the regulatory technology for securing radiological safety relevant to NORM waste disposal and to the implementation technology for the Act.

**Keywords:** NORM, NORM waste disposal, Radiological safety, Management of NORM waste

생활주변방사선안전관리법 도입에 따라 재활용하지 못하는 공정부산물의 안전관리를 위해서는 방사선적 안전성 확보가 필수적이다. 이를 위해서 처분대상 공정부산물 특성화 자료 수집 및 분석, 처분방법과 처분시설의 조사 및 분석, 처분시설의 운영으로 인한 방사선적 안전성평가 방법론 정립과 도구 확보, 주요 입력자료들의 안전성에 미치는 영향 파악 등이 필요하다. 이를 통하여 매립과 같은 참조 처분방법을 선정하고 피폭선량과 인체보건 리스크 평가를 통하여 공정부산물 처분에 따른 방사선적 안전성 확보를 위한 절차 및 기준마련을 위한 기술적 근거를 확보할 필요가 있다. 본 연구에서는 공정부산물 처분방법과 공정부산물 처분시설에 대한 국내외 현황 조사 및 분석과 국내외의 주요 산업별 처분대상 공정부산물 특성화 자료 수집 및 분석을 수행하였다. 이를 바탕으로 주요 공정부산물 특성에 따른 관리방안과 매립 처분시설에 대한 개념설계를 제안하였다. 또한, 공정부산물 처분시 대기확산에 의한 방사성핵종의 전이경로와 침출수 유출로 인한 방사성핵종의 전이경로 파악을 수행하고 적절한 코드를 선정하여 예제 평가를 수행함으로써 코드의 유용성을 확인하였다. 그리고 국내 대표 공정부산물인 비산재, 인산석고, 레드머드 특성화 자료를 이용하여 공정부산물 처분시 피폭선량 및 초과 암 리스크를 평가하고 분석하였

다. 개념적 설계 예제에 대한 방사선적 안전성 평가 결과에 의하면 공정부산물 처분시 피폭선량 및 초과 압 리스크는 매우 낮은 값을 가지며 우려할 만한 방사선적 영향을 보이지는 않는다. 연구결과는 향후 생활방사선 안전관리를 위한 규제기술 개발에 활용 가능할 뿐만 아니라 생활주변방사선안전관리법 이행기술 기반 구축에 기여할 수 있을 것이다.

중심단어: 생활주변 방사선, 공정부산물 처분, 방사선적 안전성, 공정부산물 관리방안

\*Corresponding Author.

Jongtae Jeong, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: jtjeong@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2718

## 1. 서론

2012년 대한민국 정부는 생활주변에서 접할 수 있는 방사선의 안전관리에 관한 사항을 규정함으로써 국민의 건강과 환경을 보호하여 삶의 질을 향상시키고 공공의 안전에 이바지함을 목적으로 생활주변방사선안전관리법[1]과 생활주변방사선안전관리법 시행령[2]을 공포하였다. 이 법에 의하면 생활주변방사선은 1) 원료물질, 공정부산물 및 가공제품에 함유된 천연방사성핵종에서 방출되는 방사선(원자력안전에 따라 관리되는 핵물질에서 방출되는 방사선은 제외), 2) 태양 또는 우주로부터 지구 대기권으로 유입되는 방사선(우주방사선), 3) 지구표면의 암석 또는 토양에서 방출되는 방사선(지각방사선), 4) 국내 또는 외국에서 수집되어 판매되거나 재활용되는 고철(재활용고철)에 포함된 방사성물질에서 방출되는 방사선을 의미한다. 또한, 국가는 생활주변방사선으로부터 국민의 건강과 환경을 보호하기 위하여 생활주변방사선의 안전관리에 필요한 시책을 마련하도록 규정하고 있다. 이에 따라 국가에서는 매 5년마다 생활주변방사선방호 종합계획의 수립, 연도별 시행계획 수립, 생활주변방사선에 대한 연구개발사업의 추진, 안전지침의 작성·배포 등의 종합계획을 수립하고 시행해야 한다. 또한, 원료물질·공정부산물 및 가공제품에 대한 관리, 방사선·방사능 감시기의 설치·운영 등에 관한 사항을 규정하여 시행하도록 하였다.

이러한 규정에 따라 정부에서는 생활주변방사선의 안전관리에 필요한 시책 마련의 일환으로 생활주변방사선안전관리법 이행기반 구축을 위하여 관련 연구들을 수행하고 있으며 공정부산물 처분에 관한 방사선적 안전성 확보를 위한 기술적 근거 수립에 관한 연구도 수행되고 있다. 생활주변방사선안전관리법 시행령에는 공정부산물을 처리·처분 또는 재

활용할 때 요구되는 기준이 규정되어있으며 이는 1) 공정부산물의 처리·처분 또는 재활용 업무에 종사하는 사람에 대하여 피폭방사선량을 합리적으로 낮출 수 있는 방법과 절차를 수립할 것, 2) 공정부산물을 처분하거나 재활용할 때에는 해당 공정부산물에 포함된 방사능 농도를 낮추는 방법으로 할 것, 3) 공정부산물을 처분할 때에는 재활용하지 못하게 매립 등의 방법으로 할 것, 4) 공정부산물을 가공제품으로 재활용할 때에는 가공제품의 안전기준에 적합하도록 할 것 등이다.

본 논문에서는 공정부산물 처분시 방사선적 안전성 확보를 위한 기술적 근거 수립을 위하여 국내외 주요 공정부산물 특성화 자료 수집 및 분석, 처분방법 및 처분시설에 대한 국내외 현황 조사 및 분석, 처분시 대기확산과 침출수 유출을 통한 방사선핵종의 전이경로 파악, 참조 매립처분 시설 제안, 국내 대표 공정부산물에 대한 피폭선량 및 초과 압 리스크 평가 등의 환경영향 평가 및 분석을 수행하였다.

## 2. 국내외 주요 산업별 공정부산물 특성화 자료 수집 및 분석

공정부산물은 NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials)과 TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials)을 포함한다. 공정부산물은 다양한 산업 현장에서 발생될 수 있는데, 농도가 낮더라도 발생량이 매우 많아서 주변 환경이나 일반 대중에 미치는 영향이 크거나, 비록 발생량이 적더라도 포함된 천연 방사성물질의 농도가 매우 높아서 일반대중이나 산업계 종사자에게 방사선에 의한 피폭을 증가시킬 소지가 있는 경우

에, 따로 분류하여 관리를 해야 할 필요성이 발생하게 된다.

미국 EPA(U.S. Environmental Protection Agency)에서는 공정부산물의 발생원에 대해 광산폐기물, 에너지 생산 폐기물, 수처리 폐기물, 소비자 제품 등의 4가지 부류로 나누어 제시하고 있다. Table 1에는 미국 EPA에서 제시된 공정부산물의 농도 범위와 평균 농도[3] 등을 나타내었다.

국내에서는 공정부산물을 농도는 낮으나 대량으로 발생하는 공정부산물과 그 발생량은 적으나 상당히 높은 농도를 가진 공정부산물로 분류하고 있다[4, 5]. 농도는 낮으나 대량으로 발생하는 공정부산물들은 무연탄 및 유연탄을 사용하는 화력발전의 부산물인 비산재(fly ash), 복합비료 생산과 관련된 공정부산물인 인산석고(phosphogypsum), 수산화알루미늄 생산에 필요한 원료인 보오크사이트를 처리하면서 발생하게 되는 레드머드(bauxite redmud), 제철 산업에서 발생하게 되는 슬러지나 슬래그 등이다. 발생량은 적으나 상당히 높은 농도의 공정부산물은 대형 플랜트에서 국부적으로 발견될 수 있는 관석(pipeline scale), 광물의 선별, 정광 과정에서 농축되는 중광물(광미) 등이 대표적인 예이다.

## 2.1 석탄재(Coal ash) 공정부산물

석탄재(coal ash)는 석탄이 보일러에서 연소할 때 발생된다. 석탄은 연소되면서 원래 부피의 약 10%에 해당하는 재(ash)를 발생하는데 이러한 재의 약 96%는 공정부산물로 분류될 수 있으며 비산재(fly ash), 바닥재(bottom ash), 보일러 슬래그(boiler slag)가 여기에 포함된다. 비산재는 뜨거운 연소가스에 포함되어 있는 것으로 굴뚝 필터에 의해 잡히며, 발생된 석탄재의 약 74% 정도를 차지한다. 바닥재는 연소가스에 포함되기엔 너무 크거나 무거운 것으로 보일러 바닥에 가라앉으며, 전체 석탄재의 약 20%를 차지한다. 보일러 슬래그는 강한 열 조건에서 재가 녹을 때 형성되며, 보일러 바닥과 연소 굴뚝 필터에 모이는데 전체 석탄재의 약 6% 정도를 차지한다. 이러한 석탄재에 함유된 자연발생적 핵종들은 우라늄(U), 토륨(Th), 칼륨(K), 라듐(Ra) 등이다. 또한, <sup>210</sup>Pb와 <sup>210</sup>Po와 같은 휘발성 핵종들이 비산재와 굴뚝에서 방출되는 작은 입자들에 축적된다.

Table 2에는 다양한 석탄 연소 잔유물에 존재하는 방사성핵종들의 측정된 농도를 요약하였다. 이러한 농도들은 나라별로 채광 위치와 지역에 따라 달라지는 석탄의 광물함량

Table 1. A range of reported concentrations and average concentration measurements of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) by EPA [3]

Sources	Radiation Level (pCi/g)		
	low	average	high
<b>Soils of the United Sites</b>	0.2	NA	4.2
<b>Geothermal Energy Production Wastes</b>	10	132	254
<b>Oil and Gas Production Wastes</b>			
Produced water (pCi/L)	0.1	NA	9,000
Pipe/Tank Scale	< 0.25	< 200	> 100,000
<b>Drinking Water Treatment Wastes</b>			
Treatment Sludge (pCi/L)	1.3	11	11,686
Treatment Plant Filters	NA	40,000	NA
<b>Waste Water Treatment Wastes</b>			
Treatment Sludge (pCi/L)	0.0	2	47
Treatment Plant Ash (pCi/L)	0.0	2	22
<b>Aluminum Production Wastes</b>			
Ore (Bauxite)	4.4	NA	7.4
Product		0.23	
Product Wastes	NA	3.9 - 5.6	NA
<b>Coal Ash (fact sheet)</b>			
Bottom Ash	1.6	3.5 - 4.6	7.7
Fly Ash	2	5.8	9.7
<b>Copper Mining and Production Wastes</b>	0.7	12	82.6
<b>Fertilizer and Fertilizer Production Wastes</b>			
Ore (Florida)	7	17.3 - 39.5	6.2 - 53.5
Phosphogypsum	7.3	11.7 - 24.5	36.7
Phosphate Fertilizer	0.5	5.7	21
<b>Gold and Silver Mining Wastes</b>			
<b>Rare Earth (monazite, Xenotime, Bastnasite) Extraction Wastes</b>	5.7	NA	3224
<b>Titanium Production Wastes</b>			
Titanium Ore		8.0	24.5
Rutile		19.7	NA
Ilmenite	NA	5.7	
Wastes	3.9	12	45
<b>Uranium Mining Wastes</b>			
Uranium Mining Overburden			low
Uranium In-situ Leachate Evaporation Pond	3	30	3000
Solids	300		3000
<b>Zircon Mining Wastes</b>			
Wastes	87	68	1300

Table 2. Measured concentrations (Bq/kg) of radionuclides in various coal burning residues [6]

Residues	<sup>238</sup> U	<sup>234</sup> U	<sup>230</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>228</sup> Ra	<sup>210</sup> Pb	<sup>210</sup> Po	<sup>235</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	Total
Fly ash emitted to the atmosphere from UK power station											
Drax	109.7	121	34.5	53		188	171.3	<3.6	39.6		
Eggborough	84.9	88	30.6	74		125.4	139.8	<1.9	19.1		
Alberthaw	43.3	47.9	38.2	44.3		98	64.2	2.08	28.6		
High Marnham				< 200		208	74				
Drakelow				< 200		220	92				
West Burton				< 400		290	158				
Polish coal fired power stations (1195 ash and 645 slag samples)											
Ash(average)				146	102					631	
Ash(median)				131	101					654	
Ash(range)				18-870	16-275					35-1484	
Slag(average)				108	79					549	
Slag(median)				97	79					561	
Slag(range)				17-487	17-261					23-1103	
Croatian coal fired power plants											
Fly ash	8700			2400	20			400		150	11700
Bottom ash and slag	3400			2000	60			200		290	5900
Brazilian coal and combustion products											
Coal	72			72	62	72				62	
Bottom ash	156			120	84	70				96	
Fly ash	144			192	144	440				80	
US coal combustion wastes <sup>a</sup>											
Fly ash	96	96	67	111	96	200	207	5	63		1003 <sup>b</sup>
Bottom ash and slag	26	26	19	26	22	52	52	1	15		255 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Assumes that 80wt% of the concentration is fly ash.

<sup>b</sup> Excludes contributions from other (short lived) radionuclides in decay chains.

에 따라 크게 다르다[6]. Table 3은 국내 무연탄, 유연탄 그리고 비산재에 대한 천연 방사성핵종 분석 결과이다[4, 5]. 무연탄 사용 비산재에서는 천연방사성핵종의 농도가 원료에 비해 대략 2-3배 정도 농축이 되며 유연탄 사용 비산재의 경우 대략 9-19배 정도 농축되는 경향을 보인다.

## 2.2 인산염 산업 공정부산물

약 30개 나라에서 내수 및 해외 수출용으로 인광석을 생산하고 있으며 거의 대부분의 인광석은 노천에서 채굴된다. 일반적으로 원광 처리공정에서는 원료에 존재하는 <sup>226</sup>Ra의

Table 3. Radionuclide concentration (Bq/kg) in coal and flyash [5]

Samples	<sup>40</sup> K	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th
Domestic anthracite coals			
Hwasoon	409 ± 13	40.5 ± 1.2	50.0 ± 1.8
Dogye	410 ± 6	53.7 ± 1.5	71.2 ± 2.9
Jangseong	117 ± 2	23.8 ± 1.2	27.4 ± 1.8
Gyeongdong	221 ± 10	40.0 ± 1.3	45.6 ± 1.9
Fly ash from anthracite coal-fired power plants			
Seocheon	802 ± 23	86.2 ± 2.1	102 ± 3
Yeongdong	681 ± 20	84.9 ± 2.1	101 ± 3
Donghae	749 ± 23	116 ± 3	146 ± 4
Imported bituminous coals			
Australia	26.4 ± 0.6	16.6 ± 0.9	14.9 ± 1.5
China	< 8.25	10.4 ± 0.9	5.35 ± 1.40
USA	33.7 ± 0.7	11.6 ± 0.9	5.75 ± 0.84
Russia	76.7 ± 9.2	12.2 ± 0.9	8.48 ± 1.37
Indonesia	< 7.34	4.67 ± 0.68	< 2.21
	35.7 ± 8.4	1.36 ± 0.68	< 2.44
Fly ash from bituminous coal-fired power plants			
Dangjin	< 2.71	< 0.519	4.06 ± 0.92
Honam	495 ± 16	65.8 ± 1.8	61.5 ± 2.1
Boryeong	390 ± 13	48.2 ± 1.3	56.5 ± 1.9
Hadong	315 ± 12	195 ± 4	110 ± 3

80%, <sup>232</sup>Th의 30%, <sup>238</sup>U의 14%가 인산석고에 남아 있다. 우라늄과 토륨은 원래 값(총 우라늄과 토륨의 70%)의 약 150%까지 농축된다[6]. 인산석고(phosphogypsum)는 습식 인산(phosphoric acid) 생산 공정에서 발생하는 주요 폐기물이다. 인산석고는 슬러리(slurry)로 발생되며 대부분 더미로 쌓아 저장하거나 강이나 바다로 방출한다. 인산 생산 시설은 하나 또는 2개 이상의 인산석고 더미들을 가지고 있으며 이 더미들은 덮개로 덮여 있다. 석고에서의 라듐 농도는 배경 농도에서부터 최대 1,700 Bq/kg에 이른다(Table 4 참조)[6].

Table 4. Examples of radionuclide concentration in phosphogypsum (Bq/kg) [6]

Country (source)	<sup>226</sup> Ra	<sup>238</sup> U	<sup>210</sup> Pb	<sup>210</sup> Po	<sup>232</sup> Th
USA					
South and central Florida	507-1358	41-366	577-1853	437-1765	11
North Florida	270-599	22-451	348-551	355-566	
Europe	15-1700	500	1300	900	10
South Africa					
Local rock	45-48	64-73	76-132		205-284
Togo rock			17		61
Australia	280-350	10-24	320-440	150-360	4-7

Table 5. Examples of radionuclide concentration in scales (Bq/kg) [6]

Country (source)	<sup>226</sup> Ra	<sup>238</sup> U	<sup>210</sup> Pb	<sup>210</sup> Po	<sup>232</sup> Th
South Africa					918-
Local rock	70-4,470	66-3,510			11,000
Togo rock	129,000-139,000	0.62			470-2,730
USA	333,000				
Europe	370,000-3,700,000				
Australia	3-3,900		30-1,300	5-112	
Brazil	52-889	52-132	45-186		24-189

인산 공정에서 추가적인 폐기물은 공정 파이프, 여과탱크 등에서 발생하는 소량의 스케일이며, 파이프를 마모시키기 때문에 주기적으로 제거되어야 한다. 비록 이러한 폐기물이 생산된 인산석고의 부피와 비교해서 그리 많은 부하가 되는 것은 아니지만, 이들은 일부 핵종의 경우에는 인산석고보다 1,000배 이상까지 높은 방사능 농도를 보인다(Table 5 참조)[6].

국내의 경우, 가장 큰 복합비료 생산업체인 남해화학은 인산석고 적치장을 가지고 있다. 수입 인광석은 그 산지에 따라 다양한 천연방사성핵종의 농도 범위를 가지고 있으며 일부의 경우 그 원산지에 따라 상당히 높은 농도를 갖기도 한다. 생산 공정을 거치는 동안 인광석 내에 포함된 천연방사성핵종 중 라듐(<sup>226</sup>Ra, <sup>224</sup>Ra)은 대략 90% 이상이 인산석고로

Table 6. Radionuclide concentration in raw materials, products, and residues of phosphatic fertilizer (Bq/g) [5]

Samples	Radionuclide Concentration (Bq/g)			
	<sup>40</sup> K	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	
Imported Phosphate Rock	China	0.02-0.07 (0.04)	0.10-0.93 (0.37)	0.004-0.009 (0.005)
	Phillippines	< MDA <sup>a</sup>	0.60	< MDA <sup>a</sup>
	Morocco	0.02	1.2	0.001
Phosphoric Acid	-	0.8-1.4 (1.1)	0.006-0.035 (0.02)	
Calcium Chloride	17.2-17.5 (17.3)	< MDA <sup>a</sup>	< MDA <sup>a</sup>	
Composite Fertilizer	0.02-0.08 (0.05)	0.10-0.51 (0.31)	0.003-0.007 (0.005)	
Phosphogypsum	< MDA <sup>a</sup> -0.038 (0.022)	0.43-0.84 (0.45)	0.004-0.011 (0.007)	
Phosphogypsum Transport Pipe Scale	< MDA <sup>a</sup>	12.2	0.151	

<sup>a</sup> MDA: minimum detectable activity

농축되며 우라늄(<sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U)은 대략 95% 이상이 인산으로 농축되게 된다. Table 6에 제시된 바와 같이 인산석고의 <sup>226</sup>Ra의 농도 범위는 대략 0.4-0.8 Bq/g, 인산 내 포함된 <sup>226</sup>Ra의 농도 범위는 대략 0.8-1.4 Bq/g 이다. 또한 복합비료 제조공정에 필수적인 수입 정제 염화칼륨(KCl)의 경우는 <sup>40</sup>K의 함량이 상당히 높았다(~17 Bq/g)[5].

### 2.3 알루미늄 산업 공정부산물

알루미늄은 약 50%의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2H<sub>2</sub>O를 함유한 보오크사이트로 대규모로 채광된다. 호주, 기니, 브라질 등이 가장 큰 보오크사이트 광물의 생산국이며 보오트사이트 광은 상당한 농도의 방사능을 가지고 있다[6]. 이러한 방사능은 <sup>238</sup>U와 <sup>232</sup>Th에 의해 발생한다. 보오크사이트는 수산화알루미나(알루미노-실리케이트)로 이루어진 부산물을 남기게 되는데 통상 이를 레드머드로 칭하고 있다. 이 레드머드에는 통상 그 원료인 보오크사이트에 비하여 다소 높으며, 대략 3배 이상 천연방사성핵종이 농축된다[6]. 미국 EPA의 보오크사이트 산업에서 발생하는 공정부산물의 종류와 농도 범위, 평균 농도는 Table 7과 같다[3].

Table 7. A range of concentrations and average concentration in ore, product, production wastes in bauxite industry (pCi/g) [3]

Materials	Radiation Level (pCi/g)		
	low	average	high
Ore (bauxite)	4.4	NA	7.4
Product	0.23		
Product Wastes	NA	3.9-5.6	NA

<sup>a</sup> NA: not available

Table 8. A measured radionuclide concentrations in a domestic bauxite industry (Bq/g) [5]

Sample	Radionuclide Concentration (Bq/g)			
	<sup>40</sup> K	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	
Imported Bauxite	China	0.003-0.23 (0.09)	0.07-0.39 (0.29)	0.25-0.41 (0.36)
	Australia	0.01	0.06	0.08
Bauxite Redmud	0.01-0.07 (0.04)	0.18-0.20 (0.19)	0.26-0.28 (0.27)	

Table 8에 나타난 바와 같이 국내 기업체에서 채취한 시료의 레드머드 시료 2종의 분석결과, 방사성핵종의 농도는 토륨계열이 대략 0.3 Bq/g 라듐 계열이 0.2 Bq/g 정도이다[5].

### 2.4 제철 슬래그 및 관석 공정부산물

철과 강철 생산의 원료물질(철광석, 코크, 석회석 등)에 존재하는 작은 양의 우라늄에 의해 재순환 열공정 공장에서 배기가스 세정 먼지에 있는 <sup>210</sup>Pb와 <sup>210</sup>Po의 농도준위가 증가하게 된다. 비록 철과 강철 슬래그에서 방사능 농도가 낮기는 하지만 만약 이러한 물질들이 시멘트 제조와 같은 다른 산업들에 순차적으로 사용된다면 잠재적 피폭의 가능성이 있다. 제철 슬래그의 주요 사용처는 도로포장(29%), 아스팔트 구성물(19%), 시멘트 및 콘크리트 활용(18%) 등이다. 강철 슬래그의 사용처는 주로 도로포장(30%), 아스팔트 구성물(27%) 등이다. 금속 생산 공정에서 발생하는 라듐을 많이 함유한(100-200 Bq/kg) 슬래그들도 가끔 건축물 벽면 충전재로 사용되었다. 일부 강철 제강 회사들은 100-1,000,000 Bq/kg 보다 낮은 농도의 공정부산물을 배출하는 유해 구성물을 함유한 원료 물질을 매년 백만톤까지 취급하기도 한다. 국내에서 채취된 제철 및 제련 슬래그의 경우 천연 방사

Table 9. A measured radionuclide concentrations in domestic iron smelting slags (Bq/g) [5]

Samples	Radionuclide Concentration (Bq/g)		
	<sup>40</sup> K	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th
Iron Ore	0.01-0.10 (0.07)	0.002-0.004 (0.003)	0.001-0.006 (0.003)
Limestone	< MDA <sup>a</sup> -0.08 (0.02)	< MDA <sup>a</sup> -0.02 (0.006)	< MDA <sup>a</sup> -0.002 (0.001)
Iron Slag	0.01-0.15 (0.10)	0.01-0.22 (0.13)	0.01-0.09 (0.05)
Non-Iron Slag	0.20-0.20 (0.20)	0.02-0.03 (0.02)	0.010-0.015 (0.012)

<sup>a</sup> MDA: minimum detectable activity

Table 10. Cases of domestic NORM contaminated scales [5]

Date	Type of scales	Radionuclide Concentration	Sources (Confirmation and Presumption)
2006.	Pipeline Scale	125 Bq/g of <sup>226</sup> Ra	Unidentified
2008.8	Pipeline Scale (Detect during site survey )	12.2 Bq/g of <sup>226</sup> Ra	Namhae Chemical Phosphogypsum transport Pipeline
2008.10	Pipeline Scale (Gate-type detector)	40 Bq/g of <sup>214</sup> Pb, <sup>214</sup> Bi	Unidentified
2009.4	Pipeline Scale (Gate-type detector)	41 Bq/g of <sup>214</sup> Pb, <sup>214</sup> Bi	Namhae Chemical
2009.9	Pipeline Scale (Gate-type detector)	30 Bq/g of <sup>214</sup> Pb, <sup>214</sup> Bi	Unidentified

성핵종의 농도가 매우 낮아 크게 주의를 기울일 필요는 없는 것으로 판단된다. 그러나, 이 결과는 상당히 규모가 큰 제철 공정 전반을 조사한 결과가 아니고, 제철공정의 원료 물질에는 원광인 철광석은 물론 재활용 고철 등 매우 다양한 공정 부산물이 포함되어 있는 점을 고려해 볼 때에 보다 체계적인 조사와 평가가 필수적이다[5]. Table 9에 나타난 바와 같이 3개의 제철슬래그 및 2개의 비철 슬래그의 분석결과, 천연방사성핵종의 농도는 그램 당 0.2 Bq 이하의 매우 낮은 농도를 보였다[5].

국내의 경우, 2006년 재활용고철을 취급하는 한 업체에 설치된 방사능 문형 검출기(Radiation Portal Monitor)에서 상당히 높은 농도의 관측이 발견된 사례가 있으며 이 경우에는 매우 높은 <sup>226</sup>Ra(약 123 Bq/g)을 함유하고 있었다. 또한, 인산 생산공정에서 부산물로 생성된 인산석고를 적치장으로 이송하는데 이용되었던 파이프라인 내의 관석에서 <sup>226</sup>Ra이

비교적 높은 농도(12.2 Bq/g)로 검출된 사례도 있다. 극히 낮은 천연 방사성핵종을 포함하고 있는 원료를 사용하는 시설이라 할지라도 오랜 플랜트의 운영으로 인하여 이러한 관석은 배관 내나 배관의 압력경계부에 침적되어 존재할 가능성이 있고 또한 관석은 상당히 높은 천연방사성핵종을 포함하는 경우가 대부분이기 때문에 보다 많은 관심을 기울일 필요가 있다. Table 10에는 국내 공정부산물 오염 관석 발견 사례들이 정리되어 있다.

## 2.5 오일 및 가스 산업 공정부산물

철과 오일 및 가스 산업에서 공정부산물의 방사성핵종 농도 관점에서 가장 큰 관심은 밑으로 내려가는(down-hole) 튜브 내부에 형성되는 경질 스케일(hard scale)이다. 많은 오일시설 부지에서 밑으로 내려가는 튜브는 라듐을 함유하는 스케일 침적물로 코팅될 수 있다. 밑으로 내려가는 튜브에서 유동성능(flow capacity)의 손실 때문에 이러한 스케일들은 종종 제거되어야 한다. 이들이 제거되었을 때 이들은 폐기물관리 대상이 된다.

오일 및 가스 생산설비에서 공정부산물 스케일과 슬러지는 수백만 Bq/kg 정도로 높은 방사능 농도를 보이며, 이러한 농도는 지표층부에 적합한 농도의 상한선에 위치한다. 일반적으로는 1,000-100,000 Bq/kg의 평균 방사능농도를 보인다. 피폭관점에서 스케일은 상대적으로 불용성이기 때문에 환경으로의 유출이 더 느리게 일어날 수 있다. 스케일의 특성상 라돈의 방출계수는 광미 또는 슬러지와 같은 다른 물질들보다 작다.

탱크에 축적되는 슬러지와 생산설비 내의 다른 침전 구역들은 공정부산물이 스케일보다 덜 농축되는 경향이 있으나 농도는 여전히 관심의 대상이며 1×10<sup>4</sup>-4×10<sup>4</sup> Bq/kg에 이르는 농도범위를 가진다[6]. 천연가스 시설에서 슬러지와 필름들도 유사한 농도 범위를 보인다. 가스 공장에서 <sup>210</sup>Pb 및 <sup>210</sup>Po의 필름들은 매우 높은 농도를 나타낸다. 슬러지에서의 방사성핵종들은 스케일의 경우보다 더 쉽게 환경으로 유출될 수 있다.

International Association of Oil & Gas Producers(OGP)에서는 2008년도에 오일 및 가스 산업에서 발생하는 공정부산물 관리에 대한 지침서를 발간하였다[7]. 여기에서 생산수, 원유, 관석, 슬러지와 짚은 부스러기(scrapings), 가스 생산공

Table 11. Radionuclide concentrations in production water, crude oil, scales, and sludges in oil and gas industries [7]

Waste (Unit)	Radionuclide	Reported Range
Production water (Bq/L)	U-238	0.0003 - 0.1
	Ra-226	0.002 - 1,200
	Pb-210	0.05 - 190
	Th-232	0.0003 - 0.001
	Ra-228	0.3 - 180
	Ra-224	0.5 - 40
Crude oil (Bq/g)	U-238	0.0000001 - 0.01
	Ra-226	0.0001 - 0.04
	Po-210	0 - 0.01
Hard scales (Bq/g)	Th-232	0.00003 - 0.002
	U-238	0.001 - 0.5
	Ra-226	0.1 - 15,000
	Pb-210	0.02 - 75
	Po-210	0.02 - 1.5
	Th-232	0.001 - 0.002
Soft/medium hard scales (Bq/g)	Ra-228	0.05 - 2,800
	U-238	0.001 - 0.05
	Ra-226	0.8 - 400
	Pb-210	0.05 - 2,000
	Th-232	0.001 - 0.07
Sludges (Bq/g)	Ra-228	0.05 - 300
	U-238	0.005 - 0.01
	Ra-226	0.05 - 800
	Pb-210	0.1 - 1,300
	Po-210	0.004 - 160
Scrapings (Bq/g)	Th-232	0.002 - 0.01
	Ra-228	0.5 - 50
	Ra-226	0.01 - 75
Natural gas (Bq/m <sup>3</sup> )	Pb-210	0.05 - 50
	Po-210	0.1 - 4
	Ra-228	0.01 - 10
NGL/Hydrocarbon condensate (Bq/L)	Rn-222	5 - 200,000
	Pb-210	0.005 - 0.02
	Po-210	0.002 - 0.08
	Rn-222(NGL)	0.01 - 1,500
	Rn-222 (C3-liq)	0.01 - 4,200
	Pb-210	0.3 - 230
	Po-201	0.3 - 100

정 등에서 발생하는 방사성 핵종의 종류와 농도를 제시하였다. 이를 정리하여 Table 11에 제시하였다.

## 2.6 기타 공정부산물

지열 에너지 생산시설, 공동 급수 시스템, 도시의 수처리 시설, 건축자재 등에서도 공정부산물이 발생한다. 지열 시스템 개발과 탐사, 발전 또는 직접적인 열 이용 등에 의해 발생하는 고체 잔유물들에서 공정부산물들이 발견된다. 지열에너지를 이용한 발전의 경우, 스케일이 추출과 전력시스템의 분배를 위해 사용되는 장비들 내에 침전에 의해 형성될 수 있다. 슬러지는 냉각단계 동안 침전과 침강에 의해 형성된다. 또한 가스방출은 어떠한 단계에서도 발생할 수 있다. 이러한 잔유물을 함유하는 공정부산물들은 용액으로부터 침전되고 지열을 추출하기 위한 시추와 생산 장비의 표면 내부에 스케일이나 슬러지를 형성하고 광물들을 포함한다. 이러한 잔유물들은 상당한 농도의 라듐과 라듐 붕괴생성물 뿐만 아니라 바륨, 칼슘, 스트론튬 염(탄산염, 황산염, 규산염)과 실리카를 함유하고 있다. 오일 및 가스가 생산되는 경우처럼 우라늄과 토륨과 그들의 방사성 붕괴생성물이 지열수가 추출되는 지질대에 존재한다. 그러나 우라늄과 토륨의 일부는 지열수에 잡히거나 용해되는 것으로 알려져 있다. 지열수에 존재하는 주요 방사성핵종들은 <sup>238</sup>U로부터 <sup>224</sup>Ra, <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb, <sup>212</sup>Pb, <sup>222</sup>Rn 및 <sup>232</sup>Th 붕괴사슬들이다[6].

공동급수 시스템은 강, 하천, 저수지로부터 또는 관정을 통해 지하수로부터 물을 얻고 있으며 매년 엄청난 양의 음용수를 지하로부터 얻고 있다. 지하수로부터 얻어지는 음용수의 약 78%는 처리를 필요로 한다. 일반적으로 지하수에서 관심 있는 방사성핵종들은 <sup>226</sup>Ra와 <sup>222</sup>Rn를 포함하는 딸핵종들이다. <sup>226</sup>Ra의 농도는 미국에서 지표수에서는 4×10<sup>-4</sup>-4×10<sup>-2</sup> Bq/L 범위에 있고, 지하수에서는 0.02-0.93 Bq/L 정도이다. <sup>226</sup>Ra에 대해서는 7.4 Bq/L 정도로 높은 값들이 보고되었지만 대부분의 경우 1.85 Bq/L를 넘지 않는다[6]. 비록 라듐이 지하수에 더 잘 녹기는 하지만 지하수와 지표수에서 우라늄과 <sup>232</sup>Th 또한 관측되며, 우라늄 방사능 준위는 지하수와 지표수 시료들에서 24.1 Bq/L 정도인 것으로 관측되었다. <sup>230</sup>Th와 <sup>234</sup>Th 동위원소들은 지하수 시료들에서 잘 관측되지 않으며 상위 평균농도가 단지 0.001과 4×10<sup>-4</sup> Bq/L 정도이다. 유사하게 지하수에서 <sup>232</sup>Th의 농도도 약 4×10<sup>-4</sup> Bq/L 정

도로 매우 낮으며, 가끔 0.04 Bq/L 정도 것으로 관측되었다. <sup>222</sup>Rn의 붕괴생성물인 장반감기의 <sup>210</sup>Pb와 <sup>210</sup>Po은 지하수에서  $7 \times 10^{-4}$ - $4.4 \times 10^{-3}$  Bq/L 정도로 낮은 것으로 알려져 있다[6].

도시의 수처리 시설로부터 나온 잔유물을 함유한 공정부산물물은 방사성 물질로 오염된 물뿐만 아니라 오염된 필터슬러지와 필터슬러지, 사용된 이온교환수지, 사용된 입자성 활성탄소 등이다. 예를 들면, 미국 전체에서 약 백만 톤의 공정부산물물이 20년 동안의 음용수 처리로부터 발생되었다. 즉, 매년 약 50,000 톤 정도 발생된 셈이다.

건축자재들 또한 공정부산물물을 함유하고 있다. 이것은 원료(즉, 천연 암석) 또는 산업적 생산물(예, 지르콘 모래), 중간체, 또는 부산물(예, 석탄재, 인산석고, 용광로 슬래그)의 첨가로부터 기인한다. Table 12는 최종 생산물로 건축자재에서의 천연 방사성핵종들의 농도를 요약한 것으로 유럽 연합 회원국과 비회원국의 자료, 논문들을 취합하여 정리되었다[6].

국내에서도 수처리 시설에서 발생할 수 있는 슬러지, 중광물 또는 산화티타늄(TiO<sub>2</sub>) 취급 산업체에서 발생할 수 있는 폐기물, 연·아연 등 금속 제련에서 발생할 수 있는 폐기물 또는 슬러지, 가스전 등에서 사용된 파이프라인 스케일 등에 대해서도 조사가 필요하다. 또한, 일부 천연방사성핵종이 높게 검출될 가능성이 있는 폐광산지역의 광미에 대한 조사도 수행될 필요가 있다. 향후 안전한 공정부산물 관리를 위해 추가 조사가 요구되는 산업분야는 상수 및 하수처리산업, 중

사(Mineral Sand) 및 이산화티타늄(TiO<sub>2</sub>) 관련 산업, 금속 제련 및 정제 산업, 대륙붕 가스전, 석유화학 및 정유산업, Zircon, Zirconia 관련 산업, 분체 산업(Pulverizing & Milling), 우라늄 광산 및 희토류(REE) 광산 개발 등이 있다[5]. 또한, 아스팔트, 재활용 고철, 보석류, 생필품, 생수/지하수 등에서도 오염된 사례가 발견되었거나 오염 가능성이 제기되고 있기 때문에 이들에 대해서도 조사 및 분석이 필요하다.

### 3. 공정부산물 처분방법에 대한 조사 및 분석

공정부산물물은 방사성 특성뿐만 아니라 그 발생원이나 물리화학적 성상에 따라 다양한 처분방식을 택하고 있다. 공정부산물 처분에서도 방사성폐기물 처분관리 관점에서 장기간 감시나 관리 없이 안전성을 확보하도록 처분시설을 건설하고 운영하는데 주안점을 둔다. 대부분의 공정부산물 처분시설에서도 방사성폐기물을 방벽을 설치해 격리시킴으로써 방사성핵종이 환경으로 유출되지 않도록 하여 안전성을 확보한다. 이 방벽은 천연지질 방벽을 활용하고 필요시 인공방벽을 추가하기도 한다. 다중방벽 설치하는 없는 경우에 비해 폐기물을 환경과 더욱더 격리시키고 핵종의 누출을 방지하는 효과를 줌으로써 안전성에 대한 신뢰도를 높인다.

방사성핵종의 반감기와 방사선세기에 따라 합리적으로

Table 12. Radionuclide concentrations in building materials (Bq/kg)[6]

	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
Concrete	1-250 (5000 <sup>238</sup> U)	1-190	5-1570
Aerated and lightweight concrete	9-2200	<1-220	180-1600
Clay(red) bricks	1-200 (590 <sup>238</sup> U)	1-200	60-2000
Sand-lime bricks and limestones	6-50 (90 <sup>238</sup> U)	1-30 (60) <sup>c</sup>	5-700
Natural gypsum	<1-70	<1-100	7-280
Cement	7-180	7-240	24-850
Tiles(glazed and unglazed)	30-200	20-200	160-1410
Phosphogypsum(plasterboard)	4-700	1-53	25-120
Blast furnace slag stone and cement	30-120	30-220	-

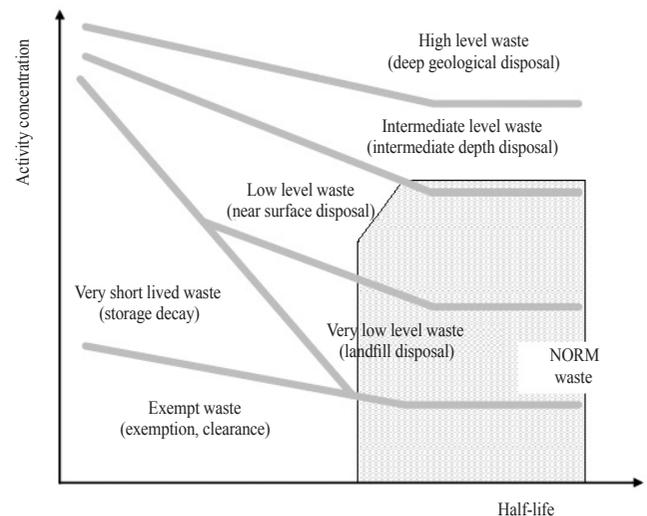


Fig. 1. Classification scheme for radioactive waste - Application to NORM waste[8].

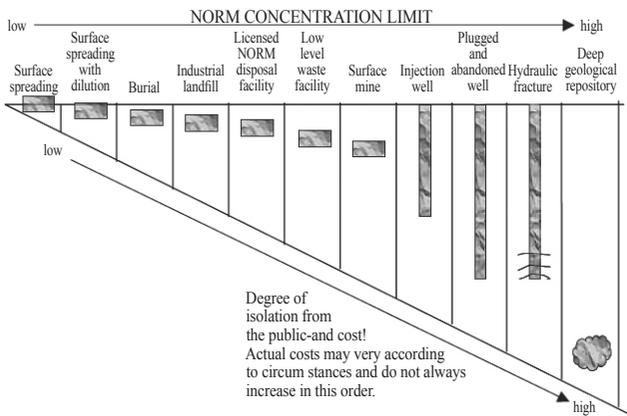


Fig. 2. Disposal alternatives for NORM wastes [9, 10].

취할 수 있는 처분방식은 Fig. 1에 도시된 바와 같다[8]. 그림에서 보면, 공정부산물 폐기물은 상대적으로 장반감기핵종들로 구성되고, 주로 저준위폐기물영역에 속하며 지표층 매립을 주로 하고 있다. 또한, Fig. 2는 미국석유협회(American Petroleum Institute)가 마련하고 미국지질조사국(USGS)이 보완한 공정부산물 농도와 처분심도를 고려한 다양한 처분방식을 제시하고 있다[9, 10]. 이 중 지표층 살포 처분방식은 미국 내 대부분의 주에서는 최근에는 허용되고 있지 않는 방식이다[6].

### 3.1 지표층 살포(Land spreading)

폐기물의 방사선준위가 면제준위 근처에 접근하고, 폐기물 부피가 많을 때, 지표층 살포를 고려할 수 있다. 규제면제 폐기물(exempt waste)의 방사능 준위설정은 나라마다 조금씩 다른데, IAEA의 선량기준에 따르면, 개인에 대한 연간선량이 0.01 mSv 미만이고, 집단에 대한 총 선량이 1 man · Sv 미만일 때 규제해제(clearance) 대상이 된다[11]. 지표층 살포 방식에서는 그 지역의 기후조건이 중요한데, 예로 강수량이 많은 지역에서는 도입하기 곤란하다. 이 방식은 방사성핵종이 환경에 직접 노출되므로 지표수, 지하수, 대기수준들에 대한 면밀한 관찰과 환경영향 평가가 필요하다. 지표면 비방사능 농도를 줄이기 위해 일반 토양을 같이 혼합해 살포하는 방식도 있다. 이 방식은 주로 땅이 넓고 거주민이 적은 나라에서 광산 폐기물, 광미 등을 처분하는데 적용하고 있다.

미국 Sanifill/Campbell Wells 등이 상용 지표층 살포 처

분장의 예인데, 최근에는 일반인이 쉽게 접근 가능하다는 점과 바람에 의해 비산물 등이 환경에 미치는 영향을 우려해 이 방식을 제한하고 있으며 미국 내 대부분의 주에서는 허용되고 있지 않는 방식이다[6]. 미국에서는 유전 공정부산물 처분을 위한 허용조건으로 유정 공정부산물에 많이 함유된 황화바륨(barium sulphate)이 지표와 얇은 토양층에서 불용성이 확보되고 함유된 라듐이 생물학적으로 이용불가인 조건을 만족함을 입증하게 하였다. 하지만 최근 연구결과는 중정석(barite)이 토양과 혼합되어 배양되었으며, 바라이트 결정 격자 속에 있던 라듐이 토양미생물의 작용으로 방출되어 먹이사슬에 접근 가능함을 보여주었다[8].

### 3.2 트렌치형 야적

방사능 준위가 아주 낮은 폐기물을 대상으로 하는데, 지표층 살포가 땅이나 지하수층과 구분 격리가 없는 반면에, 지하수 오염으로 방사성핵종이 외부로 이동하는 것을 방지하기 위해 트렌치 벽과 바닥을 점토나 고분자물질로 방어층을 형성시키는 방법이다. 주로 고밀도 폴리에틸렌 막(HDPE sheet)이 사용된다. 비료 생산 공장에서 발생하는 인산염, 알루미늄 생산 공정에서 발생하는 보오크사이트 레드머드 등 발생 부피가 대단위인 것들은 공장부지 근처에 지중매립 시설을 설치해 야적하는 방식을 주로 택해왔다. 이 방식은 최근에 강화된 기준에 의해 유출수 오염은 관리하지만 시설이 넓은 면적을 차지하는 관계로 유입되는 강수는 차단하지 않는다.

### 3.3 지표층 매립 처분(Landfill disposal)

우리나라뿐만 아니라 세계적으로 일반 산업폐기물이나 독성폐기물 처분을 위해 가장 많이 채택하는 방법이다. 외국에서 공정부산물 처분에서도 가장 많이 채택하는 방법이다. 극저준위 폐기물의 경우, 인공방벽 설정 없이 바로 폐기물을 매립하는 단순한 방식에서부터, 환경과의 격리성과 방사선적 안전성을 높이기 위해 콘크리트 방벽이나 사일로를 건설해 방사성폐기물을 인공방벽 내에 가두는 방법을 택하고 있다[8]. 지표층 매립처분은 부지나 인근 지역이 향후 산업, 농업, 관광, 거주 등의 목적으로 재활용하려는 시도가 생길 수 있으므로, 면밀한 부지조사와 향후 가능성 예측, 장기간 시설

존재의 부각, 장기간 안전성 평가 등을 중요하게 다루어야 한다. 여러 나라에서 가장 많이 사용하는 방식이며, 향후 우리나라에서 공정부산물 처분방식으로 채택할 가능성이 높다.

미국에서는 워싱턴주 남동부에 위치한 Hanford부지 저준위 방사성폐기물 처분장을 운영하고 있는데 1997년부터 공정부산물도 같이 처분하고 있다. 유타주 Clive에서도 저준위 방사성폐기물과 공정부산물을 같이 처분한다. 영국에서는 지중 매립 방식으로 운영되는 공정부산물을 포함한 저준위 폐기물처분장이 2004년 기준으로 6개소가 있다. 인산석고의 경우, 현재 전 세계적으로 연간 160 M ton 정도 발생하는데 발생량이 많은 관계로 생산시설 주변부지에 적층방식으로 처분하는 것이 일반화 되어 있다.

### 3.4 지하 관정 주입 (Injection well)

주로 유정에서 발생하는 폐기물을 모았다가 다시 폐공에 주입해 처분하는 방식이다. 지상시설에는 폐기물을 작은 조각으로 분쇄하기 위한 분쇄기, 연마기, 지하 관정에 폐기물을 주입하기 위한 고압송출 시스템과 관정주입 시스템 등을 갖추고 있다. 폐기물 처리를 위해 새로 관정을 뚫는 방식과 기름채취 후에 폐관정에 폐기물을 처분하는 방식이 있다. 유럽과 아메리카 폐유전에서 가장 선호하는 처분방식이다. 또한 안전성을 높이기 위해 폐기물을 용기에 밀봉하여 관정에 주입하고 관정 윗부분을 점토나 시멘트 등으로 봉하는 방식도 있다[12]. 이 방법은 처분안전성을 높이는 좋은 방법이나 많은 부피를 처분할 수 없다는 단점이 있다.

미국에서는 두 개의 공정부산물 폐기물 상업처분회사가 지하 관정 처분장을 운영하고 있는데, 하나는 동부 텍사스주 Winnie에서 미국에서 발생하는 대부분 공정부산물 폐기물을 처분하고 있고, 다른 한 회사는 서부 텍사스주 Andrews 가까운 곳에 공정부산물 폐기물 처분장을 1997년부터 운영하고 있다. 공정부산물 폐기물에 오염된 관석, 슬러지, 기타 고체폐기물을 지하 관정에 주입처분하고 있다. North Slope Alaska 유전에서 3000개 오일관과 용기에서 약 100 톤의 고체 공정부산물 폐기물이 발생하였고, 이 고체폐기물을 80 mm 이하로 잘게 부순 다음 10,000 bbl 물과 혼합해 지하 관정에 투여하였다. 노르웨이에서도 1998년부터 이 방법으로 처분하고 있다.

### 3.5 암염층 처분 (Salt dome disposal)

유럽이나 미국처럼 암염층이 발달한 지역에서 상대적으로 높은 방사능 준위를 가진 폐기물을 처분하는 방식으로서, 미국, 캐나다 등지에서는 이미 상당수의 처분장을 운영하고 있다. 독일 Asse 광산은 저준위 방사성폐기물 처분장으로 운영되고 있다. 다양한 공정부산물을 처분하기 이전에 석유산업 폐기물을 이미 이 방식으로 처분해서 안전성은 상당 수준 입증된 상태이다. 이 방식은 상대적으로 높은 물리화학적 격리성을 가지며 기름성분 공정부산물 처분에 적합하다. 하지만 주변에 석회암층이 존재하거나 지하수층이 가까이 있을 경우, 균열이 발생하고 용해가 일어나 지하수가 침투할 가능성이 있다.

### 3.6 지하 동굴 처분 (Underground rock tunnel disposal)

각 나라마다 산재한 폐광에 처분하는 방식을 우선적으로 많이 고려하고 있는데, 다른 방식에 비해, 경제성이나 안전성 측면에서 뛰어난 점이 없어 실제적인 적용은 미약하다. 가장 심부에 처분하는 방식은 주로 미국에서 시행하고 있는 암염층에 처분하는 방식이다. 독일과 프랑스에서도 시행하고 있다. 이 방식은 지하수 유동이 거의 없는 지역이라는 장점과 균열이 생겨도 다시 메워질 수 있다는 장점이 있다. 프랑스, 스웨덴 등 중서부 유럽은 볼트(Vault) 처분형을, 스웨덴, 핀란드 등 북유럽은 암염동굴형을 취하고 있다. 처분깊이가 깊어질수록 지상생태계에 미치는 오염넓이는 좁아지는 경향을 볼 수 있다. 노르웨이에서는 2008년부터 Gulen에 동굴 처분방식으로 공정부산물 처분장을 건설운영 중이다. 이 처분장에서는 지상에 볼트형으로 비산재 처분 공간이 위치하고 그 아래층에 터널을 뚫어 콘크리트 격납고를 건설하여, 상대적으로 방사능 준위가 높은 공정부산물을 처분하는 개념을 적용하였다.

## 4. 공정부산물 처분에 따른 예제 환경영향 평가

### 4.1 예제 환경영향 평가를 위한 공정부산물 특성화 자료

생활주변방사선안전관리법에 의하면 공정부산물은 원료물질 또는 그 밖의 물질을 취급하는 시설에서 부수적으로 발생하는 물질로서 원자력안전위원회가 정하여 고시하는 방사능 농도를 초과하는 천연방사성핵종이 포함된 물질로서 정의되며 인간행위의 개입으로 공정부산물에 함유된 천연방사성핵종의 농도가 증가하게 된다. 이는 다양한 산업 현장에서 발생할 수 있으며 발생량이 매우 많거나 비록 발생량이 적더라도 포함되거나 농축된 천연 방사성핵종의 농도가 매우 높아서 일반대중이나 산업계 종사자에게 피폭선량을 증가시킬 소지가 있다. 국내에서 발생할 수 있는 대표적인 공정부산물은 무연탄 및 유연탄을 사용하는 화력발전의 부산물인 비산재(Fly Ash), 복합비료 생산과 관련된 공정부산물인 인산석고(Phosphogypsum), 수산화알루미나를 생산하기 위하여 그 원료인 보오크사이트를 처리하면서 발생하게 되는 레드머드(Redmud), 제철산업에서 발생하게 되는 슬러지나 슬래그 등의 부산물, 대형 플랜트에서 국부적으로 발생할 수 있는 관석(Pipeline Scale), 광물의 정광 과정에서 농축되게 되는 중광물(광미) 등이 있다. RESRAD-OFFSITE 코드[13]를 이용한 공정부산물 처분에 따른 예제 환경영향 평가를 위해 국내의 대표 공정부산물로 호주산 유연탄 사용으로 인한 비산재, 인산석고, 보오크사이트 레드머드를 선정하였다. 대표적인 방사성핵종의 농도는 참고문헌 자료를 이용하였으며 이는 Table 13에 요약된 바와 같다[4, 5].

#### 4.2 참조 처분 방법 및 처분시설 선정

공정부산물은 그 종류가 다양하고 물리화학적 특성이나 방사선적 특성도 다양하기 때문에 이를 효과적으로 분류하고, 그에 합당한 관리방안을 모색하는 작업이 중요하다. 하지만 아직 세계적으로나 국제기관에서 정립한 방안이 없다.

Table 13. Radionuclide concentrations in typical NORM wastes (Bq/kg) [5]

NORM Wastes Radionuclides	Fly Ash	Phosphogypsum	Bauxite Redmud
K-40	26.4	17.0	-
Ra-226	16.6	0.8	-
Th-232	14.9	-	0.3
U-238	-	1.4	0.2

우리나라 공정부산물의 특성을 고려하여 Table 14와 같이 공정부산물을 네 가지로 분류하고, 각각 별도의 관리전략을 수립할 것을 제안하였다.

먼저 규제해제(clearance)성 폐기물은 방사능 농도가 1 bq/g 이하로서 처분시 안전성평가결과가 연간선량 0.01 mSv 미만, 집단선량 1 man · Sv 미만이 확보되는 폐기물이 대상이다. 규제해제가 되었으므로 일반산업폐기물로 분류할 수 있으며, 재활용이나 산업폐기물 매립장에 처분할 수 있다.

대량발생 공정부산물로 인산 비료공장에서 발생하는 인산석고나 알미늄 생산 공장에서 발생하는 보오크사이트 광미인 레드머드가 이에 해당한다. 이들의 방사능 농도는 극히 낮지만 발생량이 워낙 많기 때문에 별도 관리가 필요하다. 현재 대부분 생산시설 인근에 자체 지중매립시설을 운영하고 있지만 좀 더 강화된 관리감독과 시설이 필요하다.

일반적인 공정부산물은 유럽 국가들과 같이 재활용 방안을 모색하여 안전성 기준에 만족할 경우에는 재활용을 유도하고, 나머지는 처분하는 방법을 택하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

마지막으로 가장 방사능 준위가 높은 것은 모나자이트, 지르콘, 관석 등인데, 모나자이트는 주로 건강생활용품으로 활용되며 단기적으로 소규모 수입, 생산 후 사업종료 되는 경우가 많기 때문에 관리가 어려우며, 수입단계에서부터 집중적인 관리가 필요한 영역이다. 관석은 대규모 생산시설의 관속에 누적된 찌꺼기로서 방사능 농축 효과가 있다. 이들

Table 14. Classification and management plan for domestic NORM wastes

Classification	Specific Activity (bq/g)	Materials	Management Strategy
NORM Wastes Containing Uranium	> 10	Monazite, zircon, pipe scale	Dispose into the disposal facility as low-level waste repository and/or dispose into specific NORM waste disposal facility
General NORM Wastes	1 ~ 10	TENORM	Reuse after safety assessment or dispose them into disposal sites
Large Quantity NORM Wastes	< 1	Phosphogypsum, iron sludge, bauxite red-mud	Reuse/Landfill disposal near the facility
Clearance Level NORM Wastes	< 1	Minerals and other materials	Reuse/Treat industrial waste

공정부산물은 저준위 폐기물에 포함해 경주처분장에 이송하거나, 별도의 공정부산물 처분장을 운영하여 처리해야 할 대상이다.

공정부산물 처분을 위해 별도의 처분장을 운영할 경우, 처분방식은 지중매립 형태를 취하는 것이 우리나라 여건에 가장 부합하는 것으로 판단된다. 또, 다양한 지중매립 방식 중에서 공정부산물 처분장은 일반 산업폐기물 매립시설과 경주 중·저준위 처분장 시설기준에서 중간수준에 해당한다고 볼 수 있으므로, 가장 안전성이 강화된 산업폐기물 매립시설과 중·저준위 처분장의 특징을 간단하게 검토하고, 공정부산물처분장 개념을 제안하고자 한다.

국내에서 일반 산업폐기물은 전반적으로 생활권과 수 km 떨어진 지역에 지중매립방식으로 처분하고 있는데, 이전에 건설한 매립지는 단순히 땅을 파서 쓰레기를 매립한 다음, 복토하는 방식을 사용했으나 서울의 난지도 매립지처럼 장마철 강수량이 많은 지역에서는 침출수에 의한 환경오염을 경험하게 됨으로써, 최근에는 비투수층 막 설치, 침출수 처리 등 강화된 시스템을 적용하고 있다. 전국적으로 가장 강화된 오염방지 시설을 갖춘 대전의 일반폐기물 매립시설의 경우, 침출수 처리시설뿐만 아니라 생활쓰레기에서 발생하는 가스를 처리하기 위해 매립가스를 포집해 발전시설로 재활용하는 시설도 갖추고 있다. 또한 쓰레기 매립공간 경계면에서 불투수성 고밀도 폴리에틸렌 막을 설치해 외부 토양과 단절시키는 조치를 취하였다.

한편, 방사성폐기물의 경우에는, 경주처분장에서 방사능 농도가 상대적으로 높은 중준위폐기물은 사일로 처분방식으로 심도 130 m 지하 터널 내에 처분하고, 저준위폐기물은 볼트형 천층처분시설을 건설해 처분하는 방식으로 정책이나 관리방안이 진행되고 있다. 방사성폐기물 처분장은 상당히 엄격한 법적 관리기준과 방사선적 안전성평가로써 운영인허가 요건이 필요하지만, 공정부산물은 대부분 방사능 농도가 극저준위 또는 그 이하에 해당하므로, 산업폐기물과 방사성 폐기물 중간 정도에 해당한다고 볼 수 있는데, 관리수준이나 방식은 산업폐기물에 더 근접한 방식으로 운영하여도 안전성 확보 측면에서는 문제가 없을 것으로 판단된다.

극저준위 방사성폐기물의 경우, 스페인과 프랑스는 단순 매립방식 천층처분 시설을 건설해 운영하고 있다. 국내 공정부산물 처분시설로 스페인과 프랑스와 유사한 처분개념을 가지고, 국내 장마기간 중 폭우와 홍수를 염두에 두고, 강

우와 지하수로부터 차단된 개념의 처분시설 개념을 설정하고, 일반산업폐기물 매립시설을 보장하는 수준으로 지중매립 방식의 공정부산물 처분장에 대한 기본적인 개념 설계를 Fig. 3에 도식화 하였다.

처분부지 선정은 산업폐기물 매립지와 같이 생활권에서 수 km 이상 떨어진 곳에 자리 잡아야 하며, 장마시 산사태나 범람 등의 가능성이 없는 곳으로 자리 잡아야 한다. 건설단계에서는 처음에 지상에서 일이십 미터 깊이로 처분공간을 확보하고, 밑바닥과 옆면에 점토층을 약 1 m 두께로 설치한다. 점토층에서는 물의 침투가 아주 느려서, 외부에서 물이 유입되는 것을 막아줄 뿐 아니라, 폐기물에서 생성된 침출수가 환경으로 유출되는 것도 막아준다. 또한, 핵종 유출이 일어났을 경우에도 점토의 큰 핵종 수착능으로 상당기간 이동 지연 효과를 기대할 수 있다. 그 위층에 비투수 고분자막을 씌워, 침출수가 주변 환경으로 스며들지 못하게 한다. 처분 공간에 폐기물을 적치하고, 지상으로 폐기물 표고가 올라올 때에는 옆면과 윗면에도 비투수막을 씌운다. 비투수막은 상용화된 고밀도 폴리에틸렌 막 등으로 구성한다. 처분장 바닥에는 배수로를 설치하고, 유출수를 한 곳으로 모은 다음, 방사능 농도를 측정하여, 방사능 준위가 높을 때는 다시 처분장으로 돌려보내고, 허용한도 이하일 때에는 침출수 처리시설로 보내 필요한 물리, 화학적 처리를 거친 다음 환경으로 배출한다. 폐기물 적재 시에 생기는 사이 공간은 흙이나, 점토, 파쇄암석 등으로 매우고, 위를 약 0.5 m 이상 복토한 다음, 다시 복층으로 폐기물을 적재하도록 한다.

처분장 건설 및 폐기물 반입 시에는 지붕이나 차단막을 설치하여 강수를 막고, 폐기물 적재 완료 후 봉합단계에서는 불포화 차단막을 설치하고 점토층을 1 m 수준으로 씌워 빗물 침투가 어렵게 한다. 다음, 지표면에는 일반 토양을 1 m

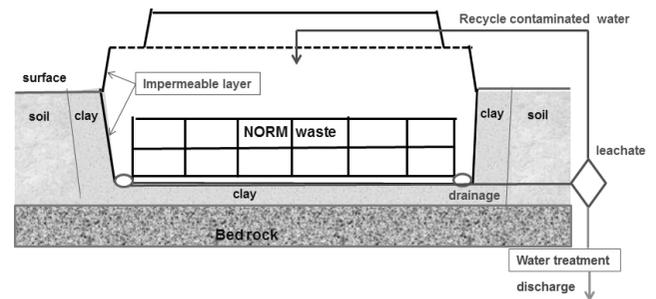


Fig. 3. Conceptual design for landfill disposal of NORM wastes.

두께 이상으로 복토하여 식물이 자라도록 한다. 또한, 자연 경사를 만들어서 강수가 자연스럽게 흘러내려가게 한다. 일반적으로 중·저준위 방사성폐기물 처분장 운영 및 관리기간을 100 ~ 300 년을 잡는데, 공정부산물에는 반감기가 지질학적 기간에 해당할 만큼 긴 우라늄과 토륨이 주요핵종이므로, 처분장 관리기간이 지난 후에도 일반인들이 처분부지에 접근하여 생활하거나 개발행위를 하지 않도록 장기간 사후 기록 및 인지 유지 방안도 고려해야 할 것이다.

### 4.3 참조 처분시설 운영으로 인한 예제 환경영향 평가

Table 13에 요약된 대표 공정부산물별 방사성핵종 농도 자료를 이용하여 RESRAD 코드 군 중 RESRAD-OFFSITE 코드[13]를 활용하여 피폭선량과 초과 암 리스크에 대한 평가를 수행하였다. RESRAD-OFFSITE 코드에서 평가되는 초과 암 리스크 (excess cancer risk)는 공정부산물 처분시 일차 오염원인 토양층 외부의 방사성물질에 의한 일정 기간 피폭으로 인해 한 개인에게 발생 가능한 암으로 인한 리스크로써 정의된다. 이 코드에서는 외부피폭, 호흡 및 오염된 경작물 섭취로 인한 내부피폭 등의 피폭경로를 고려하며 처분되는 방사성물질과 방사성붕괴로 인한 자핵종으로 인한 영향을 모두 고려한다.

RESRAD 코드 군은 9개의 코드로 구성되어 있으며 평가 목적에 맞는 코드를 이용하여 환경영향 평가를 수행할 수 있다. 이 RESRAD 코드 군은 방사능 오염물질에 의해 거주자가 받는 피폭선량과 리스크를 평가하기 위한 목적으로 미국 에너지부(DOE; Department of Energy)의 지원 아래 아르곤 국립연구소(ANL; Argonne National Laboratory)에서 개발되었다. 개발 초기에는 미국 내 군사용 우라늄 채광지역 주변 토양의 오염 및 이에 따른 환경복원 기준을 도출하기 위한 목적으로 개발되었으나, 최근에는 다양한 코드군을 개발함으로써 그 활용분야가 매우 넓다. 현재 방사능에 오염된 부지에 대한 환경영향 평가를 위한 미국 에너지부의 승인을 받은 코드이며, NRC에서도 원전의 해체 시설 인허가에 RESRAD 코드 군을 활용한 피폭선량 평가 결과를 인정하고 있다. 이미 전 세계의 300개가 넘는 부지에 적용된 사례가 있으며 RESRAD 코드 군을 국내에서도 방사성물질 오염 토양 및 콘크리트에 대한 자체처분 인허가[14], 연구로 해체 콘크

리트폐기물의 자체처분 후 매립에 의한 영향평가[15] 등에 활용된 사례들이 있다.

RESRAD 코드군 중 RESRAD-OFFSITE는 가장 핵심적인 코드인 RESRAD 6.5[16]를 기반으로 필요한 모델들을 개선하거나 추가하여 오염된 토양에 존재하는 방사성물질로 인한 피폭선량 및 초과 암사망 위험도를 평가할 수 있는 코드이다. 코드에 의해 모델화되는 모든 누출의 원인이 되는 일차 오염원은 토양층이다. 일차 오염원으로부터 오염물질의 누출은 대기, 지표 유출, 지하수를 매개로 발생하게 된다. 아래 Fig. 4에는 RESRAD-OFFSITE 코드에서의 일차 및 이차 오염원 지역 경계가 표시되어 있으며 이 코드의 주요 모델은 지하수 누출 모델, 지하수 유동 모델, 표토 혼합모델, 방사능 먼지 누출 모델, 피폭선량 평가 모델이 있다. 피폭선량 평가를 위해 적용되는 피폭경로는 토양 내 오염물질에 의한 직접 피폭, 입자상 방사성물질의 호흡에 의한 피폭, 라돈의 호흡에 의한 피폭, 야채, 곡물, 과일과 같은 작물의 섭취에 의한 피폭, 육류 섭취에 의한 피폭, 우유류 섭취에 의한 피폭, 수산물

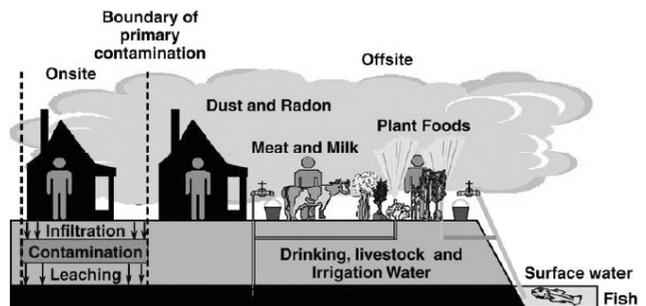


Fig. 4. Locations of Primary and Secondary Contamination in RESRAD-OFFSITE[13].

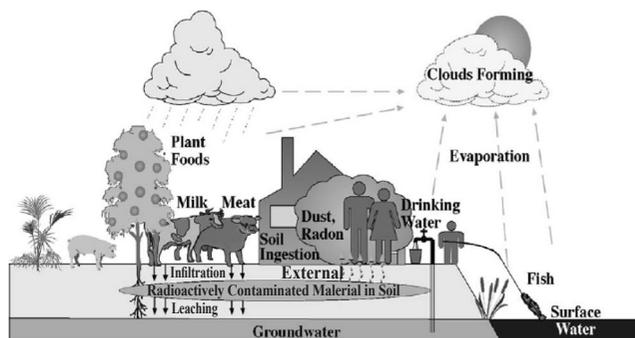


Fig. 5. Exposure Pathways Considered in RESRAD-OFFSITE[13].

섭취에 의한 피폭, 음용수 섭취에 의한 피폭, 부수적인 토양 섭취에 의한 피폭 등이 있으며 Fig. 5에 요약된 바와 같다[16].

Table 13에 요약된 주요 공정부산물별 방사성핵종 농도와 주요 입력자료에 대한 RESRAD-OFFSITE 코드 내정값 (default value)를 이용하고, RESRAD-OFFSITE 코드를 활용하여 평가한 피폭선량과 초과 암 리스크는 각각 Table 15에 요약된 바와 같다. 표에 요약된 바와 같이 대표 공정부산물인

비산재, 인산석고, 레드머드의 처분으로 인한 피폭선량은 각각,  $4.0 \times 10^{-4}$  mSv/yr,  $2.0 \times 10^{-4}$  mSv/yr,  $3.62 \times 10^{-7}$  mSv/yr 로써 우리나라의 연간 자연방사선으로 인한 피폭선량 보다 현저히 낮은 수준을 보여준다. 또한, 일반 대중에 대한 초과 암 리스크도 원자력발전소의 중대사고시 안전목표치와 국내 고준위 방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준(안)[17]의 리스크보다 낮은 수준임을 확인하였다.

Table 15. Exposure doses and excessive cancer risks for disposal of typical domestic NORM wastes

	Fly Ash	Phosphogypsum	Bauxite Redmud
Exposure Dose (mSv/yr)	4.0E-04	2.0E-04	3.62E-07
Excessive Cancer Risk	9.63E-07	5.21E-07	8.13E-10

Table 16. Exposure doses for different pathways resulting from the disposal of flyash(mSv/yr)

Radionuclide	Exposure Pathways						
	Ground	Inhalation	Plant	Meal	Milk	Soil	Total
K-40	$4.84 \times 10^{-06}$	$7.18 \times 10^{-12}$	$1.44 \times 10^{-11}$	$6.63 \times 10^{-12}$	$2.90 \times 10^{-12}$	$3.31 \times 10^{-14}$	$4.94 \times 10^{-06}$
Ra-226	$1.29 \times 10^{-04}$	$3.30 \times 10^{-08}$	$6.80 \times 10^{-09}$	$2.71 \times 10^{-10}$	$1.38 \times 10^{-10}$	$1.95 \times 10^{-10}$	$1.95 \times 10^{-04}$
Th-232	$1.87 \times 10^{-04}$	$3.09 \times 10^{-06}$	$6.22 \times 10^{-09}$	$9.33 \times 10^{-11}$	$9.90 \times 10^{-11}$	$2.43 \times 10^{-10}$	$2.00 \times 10^{-04}$
Total	$3.21 \times 10^{-04}$	$3.13 \times 10^{-06}$	$1.30 \times 10^{-08}$	$3.70 \times 10^{-10}$	$2.40 \times 10^{-10}$	$4.38 \times 10^{-10}$	$4.00 \times 10^{-04}$

Table 17. Exposure doses for different pathways resulting from the disposal of phosphogypsum(mSv/yr)

Radionuclide	Exposure Pathways						
	Ground	Inhalation	Plant	Meal	Milk	Soil	Total
K-40	$4.54 \times 10^{-07}$	$4.14 \times 10^{-13}$	$9.40 \times 10^{-13}$	$4.49 \times 10^{-13}$	$2.06 \times 10^{-13}$	$1.88 \times 10^{-15}$	$4.64 \times 10^{-07}$
Ra-226	$1.32 \times 10^{-04}$	$2.08 \times 10^{-08}$	$4.85 \times 10^{-09}$	$2.01 \times 10^{-10}$	$1.07 \times 10^{-10}$	$1.21 \times 10^{-10}$	$2.00 \times 10^{-04}$
Th-232	$8.50 \times 10^{-09}$	$4.95 \times 10^{-10}$	$6.87 \times 10^{-13}$	$7.28 \times 10^{-15}$	$2.31 \times 10^{-14}$	$2.15 \times 10^{-14}$	$9.33 \times 10^{-09}$
Total	$1.32 \times 10^{-04}$	$2.12 \times 10^{-08}$	$4.85 \times 10^{-09}$	$2.01 \times 10^{-10}$	$1.07 \times 10^{-10}$	$1.21 \times 10^{-10}$	$2.00 \times 10^{-04}$

Table 18. Exposure doses for different pathways resulting from the disposal of redmud(mSv/yr)

Radionuclide	Exposure Pathways						
	Ground	Inhalation	Plant	Meal	Milk	Soil	Total
Th-232	$3.38 \times 10^{-07}$	$3.43 \times 10^{-09}$	$7.83 \times 10^{-12}$	$1.21 \times 10^{-13}$	$1.35 \times 10^{-13}$	$2.56 \times 10^{-13}$	$3.60 \times 10^{-07}$
U-238	$2.13 \times 10^{-09}$	$1.24 \times 10^{-10}$	$1.72 \times 10^{-13}$	$1.82 \times 10^{-15}$	$5.79 \times 10^{-15}$	$5.37 \times 10^{-15}$	$2.33 \times 10^{-09}$
Total	$3.40 \times 10^{-07}$	$3.56 \times 10^{-09}$	$8.00 \times 10^{-12}$	$1.23 \times 10^{-13}$	$1.40 \times 10^{-13}$	$2.71 \times 10^{-13}$	$3.62 \times 10^{-07}$

Table 16, 17, 18에는 비산재, 인산석고, 레드머드 처분 시 핵종별 주요 피폭경로별 피폭선량을 요약하였다. 결과에 의하면 3가지 공정부산물 모두 가장 큰 피폭선량을 야기하는 피폭경로는 지표면 침적에 의한 외부피폭으로 비산재의 경우 80%, 인산석고의 경우 66%, 그리고 레드머드의 경우에는 94%를 차지한다. 또한, 3가지 공정부산물 모두 우유나 육류와 같은 오염된 경작물의 섭취로 인한 피폭선량의 총 피폭선량에의 기여도는 매우 낮다.

비산재의 경우 K-40의 핵종농도가 가장 높음에도 불구하고 총 피폭선량에의 기여도는 1% 정도로 매우 낮아서 무시할 정도의 수준이며 Ra-226과 Th-232의 총 피폭선량에의 기여도가 대부분을 차지하며 Ra-226의 경우 32%, Th-232의 경우 47%를 차지한다. 이는 방사성붕괴를 고려하기 때문에 모핵종뿐만 아니라 자핵종의 기여도가 고려되었기 때문이다. 인산석고의 경우에는 K-40과 U-238의 총 피폭선량에의 기여도는 무시할 정도의 수준이며 Ra-226의 총 피폭선량에의 기여도가 대부분을 차지한다. 레드머드의 경우에는 Th-232의 총 피폭선량에의 기여도가 93%로 대부분을 차지한다.

## 5. 요약 및 결론

천연 방사성핵종 함유물질 처분에 따른 방사선적 안전성 확보를 위한 기술적 근거 수립을 위하여 공정부산물 처분방법 및 처분시설에 대한 국내외 현황 조사 및 분석을 수행하고 처분방법 및 시설에 대한 환경영향 평가 방법론 및 도구 조사를 수행하였다. 이를 위하여 국내외 공정부산물 특성화 및 처분에 관한 여러 가지 참고문헌 자료를 수집하고 분석하여 이를 토대로 처분방법 및 처분시설에 대한 특성을 분석하였다. 또한 처분에 따른 환경영향 평가를 위하여 평가 방법론과 도구 조사를 통하여 공정부산물 처분에 따른 인체 피폭선량 평가를 위한 도구로써 RESRAD-OFFSITE를 선정하였다. 이 코드 내 모델 분석을 통하여 대기확산을 통한 방사성핵종의 전이경로 파악 및 침출수 유출로 인한 방사성핵종의 전이경로 파악을 하고, 이를 이용하여 환경영향 평가 방법론을 정립하였다. 또한, 환경영향 평가 수행을 위한 주요 입력인자를 도출하고 각 입력인자들의 특성을 파악하고 대표적인 입력인자 값들을 RESRAD-OFFSITE 코드의 내정값을 토대로 정리하였다.

이러한 공정부산물 특성화 자료와 국내 대표적인 공정부산물인 비산재, 인산석고, 레드머드의 핵종 함유량을 이용하고 RESRAD-OFFSITE 코드를 활용하여 예제 환경영향 평가를 수행하였다. 평가 결과에 의하면 이들 공정부산물 처분으로 인한 인체 피폭선량은 우리나라 자연방사선에 의한 피폭선량 보다 낮으며 이로 인한 초과 암 리스크도 국내 원전의 중대사고로 인한 안전목표치 보다 낮은 값을 보인다는 것을 확인하였다. 이를 통하여 국내 공정부산물 처분에 따른 환경영향 평가 도구와 주요 입력인자 값들을 확보하고 예제 평가를 수행함으로써 공정부산물 처분에 따른 환경영향 평가 기반을 확보하였다. 또한, 공정부산물 처분에 따른 방사선적 안전성 확보를 위한 기술적 근거 수립의 일환으로 대기 확산 모델 및 침출수 유출 모델 활용의 타당성을 확보하였으며 주요 입력인자들의 국내자료 입수와 활용 타당성을 확보하였다.

본 연구에서 수행된 공정부산물 특성화 자료 및 공정부산물 처분에 따른 방사선적 안전성 도구 확보, 방법론, 입력 자료 및 기술적 근거 등을 바탕으로 심화된 연구 개발이 가능할 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 향후 국내에서 발생 가능한 여러 가지 산업 분야에서의 공정부산물 발생현황 및 특성화 자료뿐만 아니라 부적합한 가공제품 등에 관한 다양한 공정부산물 특성화 자료들을 수집하고 분석할 필요가 있다. 이러한 자료들은 향후 데이터베이스화하여 체계적으로 관리할 필요가 있으며 처분안전성 평가를 위한 기초자료로써 활용될 수 있다. 또한 이러한 특성화 자료들을 활용하여 대표적인 공정부산물 처분방안인 매립처분에 대하여 비방사능(Bq/kg)과 총 방사능(Bq)을 고려한 피폭선량 및 리스크 평가를 수행하여 안전성 확보를 위한 다양한 기초자료를 확보할 필요가 있다. 이러한 특성화 자료에 관한 데이터베이스와 피폭선량 및 리스크에 관한 자료들을 활용하면 공정부산물 처분에 관한 방사선적 안전성평가 및 기술적 타당성 분석이 가능하며 이는 공정부산물 처분 관리방안 수립을 위한 기초자료로써 활용될 수 있다. 이러한 연구결과들은 향후 천연방사성핵종 함유물질의 처분안전성 확보를 위한 기술지침 개발에 활용됨으로써 규제기술 개발을 위한 기반기술을 확보에 기여할 수 있으며 이를 통하여 공정부산물 처분에 따른 환경안전성 확보 기반을 마련하고 생활주변방사선안전관리법 이행 기술기반 구축에 기여할 수 있을 것이다.

## REFERENCES

- [1] NSSC, Act on Safety Control of Radioactive Rays around Living Environment, Nuclear Security and Safety Commission (Radiation Safety Division), (2013).
- [2] NSSC, Enforcement Ordinances of the Act on Safety Control of Radioactive Rays around Living Environment, Nuclear Security and Safety Commission (Radiation Safety Division), (2012).
- [3] US EPA, TENORM Sources, <http://www.epa.gov/radiation/tenorm/sources.html>. (2013).
- [4] B.U. Chang, Y.J. Kim, S.M. Koh, and H.W. Chang, "Natural Radioactivity of Coal and Fly Ash in Several Coal-Fired Plant in Korea", *J. of the Geological Society of Korea*, 44(4), pp. 479-488 (2008).
- [5] B.U. Chang, J.W. Kwon, K.H. Kim, D.J. Kim, Y.J. Kim, et al., Nationwide surveillance on the environmental radiation, Korea Institute of Nuclear Safety Research Report, pp. 171-181, KINS/RR-937/2012 (2012).
- [6] IAEA, Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation, IAEA Technical Report Series No. 419, IAEA, Vienna (2003).
- [7] International Association of Oil and Gas Producers (OGP), Guidelines for the Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the Oil & Gas Industry, OGP Report No. 412, pp. 1-10, (2008).
- [8] IAEA, Management of NORM residues, IAEA-TEC-DOC-1712, pp. 41-43, IAEA, Vienna (2013).
- [9] American Petroleum Institute (API), Bulletin on management of naturally occurring radioactive materials (NORM) in oil & gas production, API Bull. E2, p. 45, Washington, DC., (1992).
- [10] US Geological Survey (USGS), Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Produced Water and Oil-Field Equipment, USGS Fact Sheet FS-142-99, USGS, <http://pubs.usgs.gov/fs/fs-0142-99/fs-0142-99.pdf>, (1999).
- [11] IAEA, "International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources," IAEA safety series No.115, p. 97, IAEA, Vienna (1996).
- [12] SNIFFER, Summary Guidance of Project UKRSR07, Identification and assessment of alternative disposal options for radioactive oilfield wastes, pp. 11-15 (2005).
- [13] C. Yu, E. Gnanapragasam, B.M. Biwer, S. Kamboj, J.J. Cheng, T. Klett, D. LePoire, A.J. Zielen, S.Y. Chen, W.A. Williams, A. Wallo, S. Domotor, T. Mo, and A. Schwartzman, User's Manual for RESRAD-OFF-SITE Version 2, Argonne National Laboratory Report, pp. 1-3~1-7, ANL/EVS/TM07-1, DOE/HS-0005, NUREG/CR-6937 (2007).
- [14] D.S. Hong, I.S. Kang, K.K. Kwak, T.K. Kim, S.M. Bae, S.J. Ahn, J.S. Shon, K.B. Shin, Y.G. Ryu, B.C. Lee, E.P. Lee., W.H. Jang, Y.S. Joo, and Y.Y. Ji, Scenario Development and Dose Assessment for Regulatory Clearance of Spent Drum, KAERI Technical Report, pp. 45-54, KAERI/TR-4954/2013 (2013).
- [15] S.B. Hong, G.H. Kim, B.K. Seo, S.K. Park, U.S. Chung, and K.W. Chung, The Results of the Assessment for Clearance of Dismantling the Concrete Waste from the Research Reactor Facilities, KAERI Technical Report, pp. 11-38, KAERI/TR-3176/2006 (2013).
- [16] C. Yu, A.J. Zielen, J.J. Cheng, D.J. LePoire, E. Gnanapragasam, S. Kamboj, J. Arnish, A. Wallo III, W.A. Williams, and H. Peterson, User's Manual for RESRAD Version 6, Argonne National Laboratory Report, pp. 1-3~1-7, ANL/EAD-4 (2001).
- [17] NSSC, A General Guideline for the High-Level Radioactive Waste Disposal Facility (Draft), Nuclear Security and Safety Committee (2012).