Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 1, pp. 43-53, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.1.43

Original article

국내 NORM 취급 산업 방사선 환경영향평가 방법론 및 절차 개발

이정우[1] · 유승범[1] · 이동규[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Development of a Methodology and Procedure for the Radiological Environmental Impact Assessment of NORM Industries in Korea

Jeong Woo Lee[1], Seung Beom Yoo[1], Dong Gyu Lee[1], and Kwang Pyo Kim[1,*]

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

ABSTRACT Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) is widely utilized as a raw material in various industrial sectors, undergoing physical and chemical processes. During these operations, radionuclides naturally present in materials become concentrated, resulting in by-products such as scale and phosphogypsum with elevated levels of radioactivity. In Korea, landfill disposal is the primary method prescribed for managing such by-products. However, radionuclides present in landfilled materials may migrate through soil and groundwater, potentially causing radiological impacts on nearby populations. This study aims to develop a methodology and procedures for radiological environmental impact assessment for industries handling NORM in Korea. The research consists of three main stages: selecting assessment tools and determining sites, defining source terms and exposure scenarios, and establishing dose assessment parameters. Based on domestic and international case studies, the RESRAD-OFFSITE computational code was selected as the primary dose assessment tool. A methodology for site characterization reflecting Korean environmental conditions was proposed. Source terms were identified as radionuclides contained in NORM, including ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th and ^{40}K. Exposure scenarios appropriate for domestic conditions were designed using pathways specified in RESRAD-OFFSITE. The dose assessment parameters were determined based on domestic and international references, incorporating factors such as soil and hydrogeological properties, atmospheric dispersion coefficients, and dietary intake rates tailored to Korean conditions. This study provides a systematic methodology for assessing the radiological impacts of managing and disposing of NORM by-products. It enables the quantification of radiation dose levels in domestic NORM industries and serves as a foundational resource for developing NORM safety management policies in Korea.

Key words: NORM, Radiological Environmental Impact Assessment, RESRAD-OFFSITE, Exposure Scenarios

1. 서 론

천연방사성핵종 함유물질(Naturally Occurring Radioactive Material; NORM)은 천연방사성핵종인 ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th 계열 핵종, ^{40}K 핵종을 함유한 물질로, 다양한 산업 분야에서 원료물질로 사용된다[1]. NORM은 산업체에서 다양한 공정을 통해 물리적, 화학적 과정을 거치게 된다. 이러한 과정에서 공정물질에 천연방사성핵종이 농축되며, 천연방사성핵종이 농축된 스케일, 인산석고 등의 공정부산물이 발생한다[2]. 국내 폐기물관리법에서는 이러한 공정부산물을 처리·처분하는 최종적인 방법으로 매립을 제시하고 있다[3]. 매립된 공정부산물 내에 존재하는 방사성물질은 토양, 지하수 등을 통해 부지 주변 일반인에게 방사선학적 영향을 미칠 수 있다[4,5].

이탈리아 국립 보건원(Istituto Superiore di Sanità; ISS)에서는 NORM이 포함된 슬러지를 비료로 사용할 때 농업 활동 중 방사성 물질의 외부피폭과 내부피폭을 평가하기 위한 방법론

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Kwang Pyo Kim
Tel: +82-31-201-2560, Fax: +82-31-273-3592, E-mail: kpkim@khu.ac.kr

Received 22 January 2025 **Revised** 9 March 2025 **Accepted** 17 March 2025

을 개발하였다[6]. 경희대학교에서는 EURADOS의 내부피폭 방사선량평가 프로젝트인 IDEAS의 세 가지 기본 원칙을 기반으로, NORM 산업체 작업자에 대한 내부피폭 방사선량평가 절차를 개발하였으며, 개발된 절차를 국내 산업에 적용하여 평가 절차에 대한 적용 방법을 제시하였다[7]. 베네토 지역 환경 보호국(Regional Environmental Protection Agency of Veneto; ARPAV)에서는 NORM 산업체에서 방출되는 방사성 물질의 공기 배출, 폐기물 및 비료의 환경적 영향을 평가하기 위해 PC-Cream, RESRAD 등의 평가 모델을 사용하여 작업자와 일반인의 피폭 방사선량을 추정하였다[8]. 스페인 방사선보호위원회(Consejo de Seguridad Nuclear; CSN)는 스페인 Huelva 지역의 인산염 산업에서 발생하는 인산석고의 방사능 농도를 평가하고, 토양과 지하수에 미치는 영향을 분석하였다[9]. 스페인 에너지, 환경, 기술 연구 센터(Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas; CIEMAT)에서는 NORM 산업체의 방사선 영향을 평가하기 위해 현실적 선량평가(Realistic dose assessment) 방법론을 개발하였다[10]. 나이지리아 이바단 대학교(University of Ibadan)에서는 알루미늄 산업에서 수집된 샘플 내 천연 방사성핵종(^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K)의 방사능 농도를 측정하여 직업 근로자 및 대중에게 미치는 외부피폭 방사선량평가를 수행하였다[11].

현재 국내 NORM 취급 산업체에서 발생하는 공정부산물의 처리·처분 방법으로 매립을 제시하고 있으며, 공정부산물 매립 시 공정부산물 내 천연방사성핵종이 다양한 경로를 통해 부지 주변 일반인에게 방사선학적 영향을 준다. NORM 취급 산업 주변 일반인에 대한 방사선 환경영향평가를 위한 다양한 방법론이 연구되었다. 하지만, 대부분 국제 표준이나 해외 데이터를 기반으로 평가되어 국내 특성을 반영한 적절한 평가 인자 선정에 어려움이 존재한다. 이에 따라 국내 평가 대상 산업체에 모두 적용할 수 있는 방사선 환경영향평가 방법론 및 절차를 개발하여야 한다.

본 연구의 목적은 국내 NORM 취급 산업 방사선 환경영향평가 방법론 및 절차를 개발하는 것이다. 이를 위하여, 국내·외 사례를 기반으로 평가 도구를 선정하고, 부지 설정 방법론을 제시하였다. 또한, 선원항 및 피폭시나리오를 설계하였으며, 주요 평가 인자 선정 방법론을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 평가 도구 선정 및 부지 설정

본 연구에서는 국내·외 사례를 검토하여 국내 NORM 취급 산업 방사선 환경영향평가를 위한 선량평가 도구를 선정하였다. 평가도구 선정을 위하여 국내 인산석고 산업체에 대한 방사선 환경영향평가, 브라질 우라늄 광산에 대한 방사선 환경영향평가, 호주 비행장 폐기물 저장소에 대한 방사선 환경영향평가 사례를 분석하였다[12-14].

NORM 취급 산업체에서 발생하는 공정부산물 매립에 따른 오염지역을 1차 오염 지역과 2차 오염 지역으로 구분하여 선정하는 방법론을 제시하였다. 1차 오염 지역은 방사성 물질 방출의 주요 원천이며, 방사성핵종이 토양에서 대류, 확산, 침출 등의 메커니즘으로 이동하며, 방출 및 축적을 효과적으로 모델링하기 위하여 토양층으로 가정하였다. 2차 오염 지역은 1차 오염 지역에서 방출된 방사성 물질이 이동하여 축적되는 지역으로, 이 지역을 설정하기 위해 지리적, 환경적, 그리고 수문학적 요소를 종합적으로 고려하였다. 2차 오염 지역은 대기 이동과 퇴적을 통해 방사성 물질이 축적될 가능성이 높은 농경지나 주거지, 지표수와 같은 환경 매체를 포함하며, 1차 오염 지역의 하류나 바람 방향 등에 위치하는 지역이 우선적으로 평가 대상이 되어야 한다.

2.2. 선원항 및 피폭시나리오 선정

선원항 선정 과정에서는 먼저 NORM 산업체에서 발생하는 공정부산물 등 주요 오염원의 특성을 파악하고, 방사성핵종(^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, ^{40}K)의 종류와 초기 농도를 식별해야 한다. 이후, 침출, 확산, 기체 방출 등의 메커니즘을 설정하여야 한다.

피폭시나리오 선정을 위해 RESRAD-OFFSITE 전산코드에서 고려할 수 있는 피폭경로를 분석하였다. RESRAD-OFFSITE 전산코드는 평가 대상 지역의 1차 및 2차 오염 지역에서 발생할 수 있는 세 가지 주요 피폭경로를 고려하고 있다. 이는 각각 (1) 외부 선원에 의한 외부피폭경로, (2) 방사성물질의 흡입에 의한 내부피폭경로, (3) 방사성물질 섭취에 의한 내부피폭경로로 구분된다. RESRAD-OFFSITE 전산코드에서 사용하는 피폭시나리오는 NUREG/CR-5512 Volume 1, Volume 3, NUREG-1549를 기반으로 오염 부지 인근 주민에 대한 선량평가 방법론을 제시하고 있다[15-17]. 본 연구에서는 RESRAD-OFFSITE 전산코드에서 구현이 가능한 1차 및 2차 오염 지역에서 발생할 수 있는 피폭경로를 기반으로 국내 NORM 취급 산업에서 발생할 수 있는 피폭시나리오를 선정하였다.

2.3. 피폭 방사선량평가 인자 설정

RESRAD-OFFSITE 전산코드를 활용하여 NORM 취급 산업 방사선 환경영향평가를 수행하기 위해서는 평가하고자 하는 부지별 특성자료가 확보되어야 한다. 본 연구에서는 전이계수 및 농축계수, 수리 지질학적 인자, 대기수송 인자, 섭취량 인자, 부지 배치 인자를 주요 평가 인자로 선정하였다.

먼저, 입력인자 설정은 (1) 부지 특성을 반영한 참고문헌 인용, (2) 국내 참고문헌 인용, (3) 국외 참고문헌 인용, (4) RESRAD-OFFSITE 전산코드 기본값 사용의 4단계로 구성되었다. 부지 특성을 반영한 참고문헌은 평가 대상 부지의 지질, 수문학적 특성, 대기 조건 등 환경적 특성을 나타내는 원시자료를 기반

으로 데이터 가공 및 분석을 통해 입력인자를 도출하였다. 국내 참고문헌은 원자력 관계기관에서 제시하는 선량평가 지침, 환경적 특성, 그리고 국내 주민의 생활 및 섭취 패턴과 같은 자료를 활용하였다. 특히, 섭취량 인자와 대기수송 인자는 국내 주민의 식습관과 대기 조건을 반영한 자료를 기반으로 설정하였다. 국내 자료가 부재하거나 부족한 경우에는 국외 참고문헌을 활용하였다. 국외 참고문헌은 RESRAD-OFFSITE 전산코드 매뉴얼에서 권고하는 토양 및 대기 특성과 관련된 자료와 국제 연구 사례를 참고하였다. 특히, 국외 문헌에서는 보수적인 값을 선정하여 안전성을 확보하는 데 중점을 두었다. 부지 특성과 국내·외 참고문헌에서도 입력인자를 확보하지 못한 경우, RESRAD-OFFSITE 전산코드의 기본값을 입력인자로 적용하였다.

3. 결　　과

3.1. 선량평가 도구 선정 및 부지 설정

NORM 산업체에 대한 방사선 환경영향평가 사례 분석 결과, 국내 인산석고 산업체에 대한 방사선 환경영향평가 사례에서는 RESRAD-OFFSITE 전산코드를 활용하여 피폭 방사선량과 초과 암 리스크를 평가하였다. 공정부산물의 처분으로 인한 피폭 방사선량은 4.0×10^{-4} mSv/y 이하로 일반인 선량한도보다 현저히 낮은 수준으로 나타났다. 브라질 우라늄 광산에 대한 방사선 환경영향평가 사례에서는 RESRAD-ONSITE와 RESRAD-OFFSITE 코드를 활용하여 지역 특성을 반영하는 변수들을 설정하여 방사선 환경영향평가를 수행하였다. 선량평가 결과는 2.5 mSv/y로 주요 피폭경로는 물고기 섭취, 라돈의 흡입으로 나타났다. 호주 비행장 폐기물 저장소에 대한 방사선 환경영향평가 사례에서는 RESRAD-OFFSITE 전산코드를 활용하여 작업자와 일반인에 대한 방사선학적 안전성을 평가하였다. 작업자 시나리오의 경우, 외부피폭이 3 μSv/y, ^{222}Rn의 붕괴 생성물의 흡입경로에 대한 피폭 방사선량이 1 μSv/y로 나타났으며, 일반인 시나리오의 경우 Rn-222의 붕괴 생성물의 흡입경로에 대해 6 μSv/y가 나타났다. 본 연구에서 분석한 방사선 환경영향평가 사례 모두 RESRAD-OFFSITE 전산코드를 선량평가 도구로 활용하였다. 해당 전산코드는 방사성오염이 발생한 부지의 재이용을 위한 안전성 평가 및 방사성오염이 있는 부지 인근 주민의 방사선 환경영향평가에 적용할 수 있다. 또한, 평가 대상 지역의 1차 오염 지역 내부 및 부지 외부 주민에 대한 피폭 방사선량을 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 NORM 취급 산업 방사선 환경영향평가를 위해 RESRAD-OFFSITE를 선량평가 도구로 선정하였다.

Fig. 1에 RESRAD-OFFSITE 전산코드를 활용한 이산화티타늄 생산 산업체 방사선 환경영향평가를 위해 지정한 1차 및 2차 오염지역 선정 예시를 나타내었다. 1차 오염지역은 울산 울주군 소재의 이산화티타늄 생산 산업체 내 존재하는 공정부산물이 매립된 부지로 선정하였다. 해당 매립시설은 관리형 매립시설로 시설규격으로 매립면적은 34,000 m^{2}이며 매립용량은 320,000 m^{3}로 파악되었다. 2차 오염지역은 1차 오염지역에서 대기확산

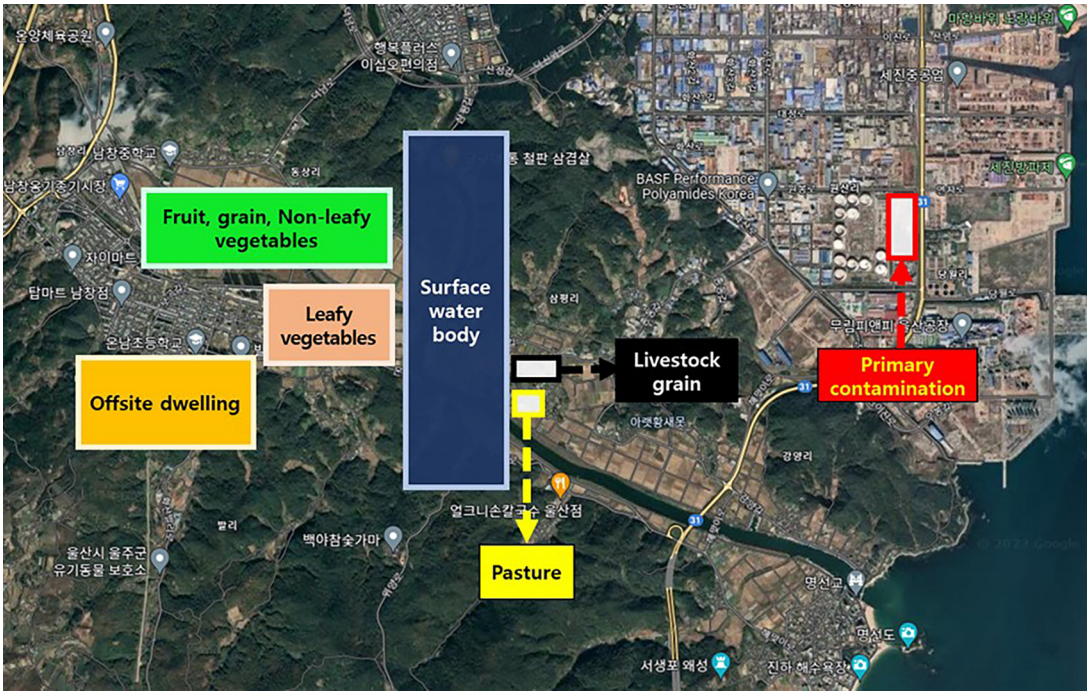

Fig. 1. Primary and secondary contamination zones designated for the environmental impact assessment of titanium dioxide production facilities.

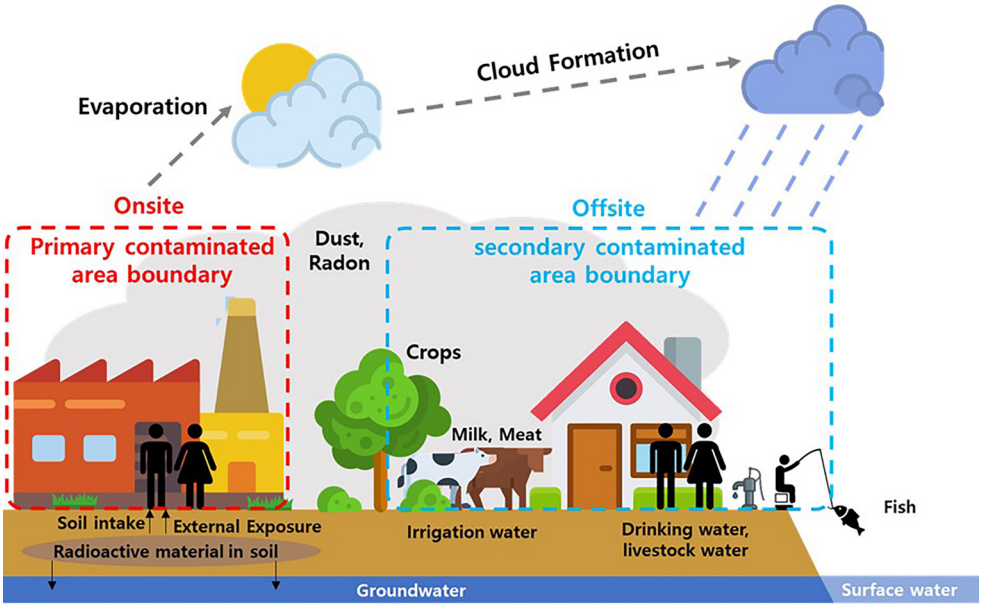

Fig. 2. Major exposure pathways considered in RESRAD-OFFSITE.

Table 1. Exposure Pathways for RESRAD-OFFSITE

Exposure Path	Exposure Scenarios			
	Resident Farmer Scenario	Urban Resident Scenario	Worker Scenario	Recreationist Scenario
External Radiation from Contamination in Soil	O	O	O	O
Inhalation of Dust	O	O	O[a]	O
Inhalation of Radon	O	O	O	O
Ingestion of Soil	O	O	O	O
Ingestion of Plant-Derived Food	O	O	X	O
Ingestion of Meat	O	X	X	O
Ingestion of Milk	O	X	X	X
Ingestion of Aquatic Food	O	X	X	O
Ingestion of Water	O	O	O	O

[a]Selection based on the characteristics of the industry

이나 지하수 유동으로 오염이 추가적으로 발생하는 지역으로 소외거주지, 지표수체, 농경지, 목축지 및 사료 경작지, 유역으로 선정하였다. 각 부지들은 공간지리정보 데이터를 포함한 지리정보시스템(QGIS), 도로교통부에서 제공하는 지적편집도를 활용하여 설정하였다.

3.2. 선원항 및 피폭시나리오 선정

평가 대상 선원항은 NORM 산업체에서 발생하는 공정부산물에서 주요한 방사성물질인 천연방사성핵종(^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th 계열 핵종 및 ^{40}K)이다. 이러한 핵종의 방사능 농도는 고순도 게르마늄 검출기(High Purity Germanium; HPGe) 검출기와 알파 스펙트로미터를 사용하여 직접 측정 및 분석된 방사능 농도를 방사선 환경영향평가 시, 평가 인자로 사용할 수 있다. NORM 산업체의 공정부산물에서 주요 방사성핵종의 방사능 농도를 측정하기 위해 HPGe 검출기와 알파 스펙트로미터를 사용한다. 측정 전, 시료는 건조 및 분쇄 등의 전처리 과정을 통해 방사성핵종의 손실을 최소화하고 균일하게 준비되며, 감마선 및 알파선 분석을 위해 표준 시료를 활용한 효율 교정과 백그라운드 교정을 수행한다. HPGe 검출기는 ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{40}K과 같은 핵종의 감마선 방출 에너지를 기반으로 방사능 농도를 측정하며, 알파 스펙트로미터는 특정 α-입자 에너지 피크를 분석해 핵종 농도를 산출한다. 각 측정값은 방사평형 상태와 국제 가이드라인(IAEA)을 고려하여 불확도를 포함해 계산되며, 이를 통해 방사능 농도를 신뢰성 있게 평가한다[18].

Fig. 2에 RESRAD-OFFSITE 전산코드에서 고려하는 주요 피폭경로를 나타내었으며, 피폭경로는 외부피폭, 흡입으로 인한 내부피폭, 섭취로 인한 내부피폭으로 구분할 수 있다. 외부피폭경로는 지면으로부터의 외부피폭을 고려한다. 흡입으로 인한 내부피폭경로는 분진, 라돈 흡입을 고려할 수 있으며, 섭취로 인한 내부피폭경로는 육류, 농산물, 우유, 수산물, 음용수, 토양 섭취를 고려할 수 있다. Table 1에 본 연구에서 선정한 피폭시나리오별 주요 피폭경로를 나타내었다. 피폭시나리오는 작업자, 일반인 등 피폭경로에 따라 다양한 대상 그룹을 포함한다. 작업자 시나리오에서는 외부 감마선 피폭과 라돈 흡입이 주요 피폭경로로 확인되었으며, 거주 농부 시나리오에서는 외부피폭이 주요 피폭경로로 확인되었다.

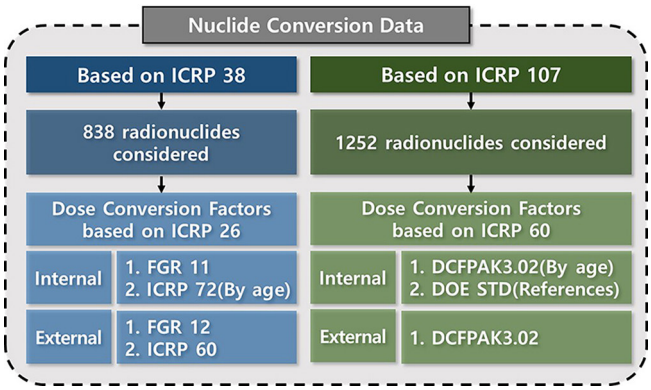

Fig. 3. Radionuclide decay data and dose conversion factors available for use in the RESRAD-OFFSITE code.

Table 2. Hydrogeological Factors and Selection Basis

No.	Hydrogeological Factor	Basis and Reference Data
1	Length of contamination parallel to aquifer flow	Set to the length parallel to aquifer groundwater flow from the main contamination source
2	Depth of soil mixing layer	RESRAD-OFFSITE (Default)
3	Mass loading of all particulates	NMED particle release factors
4	Deposition velocity of all particulates (to compute atmospheric release)	RESRAD-OFFSITE (Default)
5	Respirable particulates as a fraction of total particulates	RESRAD-OFFSITE (Default)
6	Deposition velocity of respirable particulates (to compute atmospheric release)	RESRAD-OFFSITE (Default)
7	Irrigation applied per year	Annual irrigation water quantity from the Japan Nuclear Safety Commission
8	Precipitation	KMA Weather Data Portal
9	Evapotranspiration coefficient	KMA evapotranspiration data
10	Runoff factor	RESRAD-OFFSITE (Default)
11	Slope-length-steepness factor	RESRAD-OFFSITE (Default)
12	Cover and management factor	RESRAD-OFFSITE (Default)
13	Support practice factor	RESRAD-OFFSITE (Default)
14	Fraction of primary contamination that is submerged	Managed landfills with containment barriers reduce the risk of contamination layers flooding the groundwater
15	Soil erodibility factor of clean cover	RESRAD-OFFSITE (Default)
16	Dry bulk density of clean cover	Characteristic values by soil texture
17	Erosion rate	Automatic calculation in RESRAD-OFFSITE
18	Total porosity	Characteristic values by soil
19	Effective porosity	Characteristic values by soil
20	Hydraulic conductivity of below	Characteristic values by soil
21	Field capacity	Characteristic values by soil
22	b parameter	Characteristic values by soil
23	Longitudinal dispersivity	RESRAD-OFFSITE (Default)

Table 3. Atmospheric Transport Factors and Selection Basis

Input Parameter		Selection Basis
Release height		Topographic Editing Use
Release heat flux		Conservative Setting
Anemometer height		Wind Measurement Standard Height
Ambient temperature		Climate Data for Target Region
AM Atmospheric mixing heights		EAISS-Based Landfill EIA
PM Atmospheric mixing heights		Landfill EIA
Dispersion model coefficients		Pasquill-Gifford Model
Windspeed terrain		Target Region Characteristics
Elevation of offsite location	Fruit, grain, non-leafy vegetables plot	Mapping Software Use
	Leafy vegetables plot	
	Pasture, silage growing area	
	Grain field	
	Dwelling site	
	Surface water body	
Grid spacing for areal integration		RESRAD-OFFSITE (Default)
Wind speed		Target Region Climate Data
Stability class		Target Region Characteristics Based on the Pasquill-Turner Classification

Table 4. Direct Intake Factors by Age

List	3 Months	1 Year	5 Years	10 Years	15 Years	Adult
Grain (kg/y)	28.8	84.7	105.8	132.5	160.0	160.0
Kimchi (kg/y)	0.5	9.8	27.0	48.1	62.3	89.9
Leafy vegetables (kg/y)	11.5	39.9	68.2	98.0	121.7	161.8
Fruit (kg/y)	37.5	77.0	81.3	93.9	62.3	97.0
Milk (L/y)	241.5	219.6	184.4	166.5	151.3	73.2
Beef (kg/y)	2.5	6.9	7.8	13.5	12.7	15.7
Pork (kg/y)	2.2	3.7	13.3	25.3	40.4	28.8
Poultry (kg/y)	6.4	12.8	21.2	28.4	38.0	26.6
Fish (kg/y)	3.1	11.6	10.3	11.3	16.0	32.4
Crustacea (kg/y)	0.4	2.1	4.5	6.1	6.1	8.8
Mollusks (kg/y)	0.00	0.2	3.8	5.2	6.5	6.5
Seaweed (kg/y)	2.3	2.8	2.5	2.6	3.6	6.6
Inhalation rate (m^3/y)	1,100	1,900	3,200	5,600	7,400	8,100

*Based on KINS/RG-N02.02

3.3. 피폭 방사선량평가 인자 설정

Fig. 3에 RESRAD-OFFSITE 전산코드에서 활용할 수 있는 핵종 변환 데이터 및 선량환산계수를 요약하여 나타내었다. 본 연구에서는 ICRP 107 및 ICRP 38 데이터베이스를 활용하여 핵종 변환 데이터를 설정하였으며, 각각 1,252개 및 838개의 핵종에 대한 정보를 활용할 수 있다[19,20]. 데이터 선택에 따라 평가 결과가 달라질 수 있으므로, 본 연구에서는 국내 특성을 반영하여 적합한 데이터를 선택하였다. 특히, 내부피폭 평가 시에는 연령별 섭취 및 흡입 선량환산계수를 추가적으로 고려하였다.

Table 2-6에 설정한 평가 인자의 목록과 설정자료 및 근거를 나타내었다. 설정된 주요 평가 인자는 전이계수 및 농축계수, 수리지질학적 인자, 대기수송 인자, 섭취량 인자, 부지 배치 인자,

Table 5. Indirect Intake Factors and Selection Basis

	Input Parameter	Value	Selection Basis
Nonleafy vegetables	Wet weight crop yield	1.49 kg/m^2	KINS/RG-N02.02
	Duration of growing season	0.42 y	KINS/RG-N02.02
	Foliage to food transfer coefficient	0.1	KINS/GR-199
	Weathering removal constant	18.07 y^{-1}	KINS/RG-N02.02
	Foliar interception factor for irrigation	0.25	RESRAD-OFFSITE Default
	Foliar interception factor for dust	0.25	KINS/RG-N02.02
	Root depth	1.2 m	RESRAD-OFFSITE Default
Leafy vegetables	Wet weight crop yield	3 kg/m^2	KINS/RG-N02.02
	Duration of growing season	0.16 y	KINS/RG-N02.02
	Foliage to food transfer coefficient	1	KINS/GR-199
	Weathering removal constant	18.07 y^{-1}	KINS/RG-N02.02
	Foliar interception factor for irrigation	0.25	RESRAD-OFFSITE Default
	Foliar interception factor for dust	0.25	KINS/RG-N02.02
	Root depth	0.9 m	RESRAD-OFFSITE Default
Pasture, silage	Wet weight crop yield	3 kg/m^2	KINS/RG-N02.02
	Duration of growing season	0.5 y	KINS/RG-N02.02
	Foliage to food transfer coefficient	1	RESRAD-OFFSITE Default
	Weathering removal constant	18.07 y^{-1}	KINS/RG-N02.02
	Foliar interception factor for irrigation	0.25	RESRAD-OFFSITE Default
	Foliar interception factor for dust	0.25	KINS/RG-N02.02
	Root depth	0.9 m	RESRAD-OFFSITE Default
Grain	Wet weight crop yield	0.34 kg/m^2	KINS/RG-N02.02
	Duration of growing season	0.41 y	KINS/RG-N02.02
	Foliage to food transfer coefficient	0.1	KINS/GR-199
	Weathering removal constant	18.07 y^{-1}	KINS/RG-N02.02
	Foliar interception factor for irrigation	0.25	RESRAD-OFFSITE Default
	Foliar interception factor for dust	0.25	KINS/RG-N02.02
	Root depth	1.2 m	RESRAD-OFFSITE Default
Beef Cattle intake	Water	6 L/d	KINS/RG-N02.02
	Pasture, silage	0 kg/d	-
	Grain	0.12 kg/d	KINS/GR-199
	Soil from pasture, silage	0.1 kg/d	RESRAD-OFFSITE Default
	Soil from grain	0.4 kg/d	RESRAD-OFFSITE Default
Dairy Cows intake	Water	4.2 L/d	KINS/RG-N02.02
	Pasture, silage	0 kg/d	-
	Grain	55 kg/d	KINS/GR-199
	Soil from pasture, silage	0.1 kg/d	RESRAD-OFFSITE Default
	Soil from grain	0.4 kg/d	RESRAD-OFFSITE Default

-: In Korea, feeding cattle with pasture is not practiced.

Table 6. Radon-related Factors and Selection Basis

Input Parameter	Selection Basis
Effective radon diffusion coefficient of Cover	ANL/EVS/TM-14/4
Effective radon diffusion coefficient of Contaminated zone	ANL/EVS/TM-14/4
Effective radon diffusion coefficient of Floor	RESRAD-OFFSITE Default
Thickness of floor and foundation	ANL/EVS/TM-14/4
Density of floor and foundation	RESRAD-OFFSITE Default
Total porosity of floor and foundation	RESRAD-OFFSITE Default
Volumetric water content of floor and foundation	RESRAD-OFFSITE Default
Depth of Foundation below ground level	ANL/EVS/TM-14/4
Vertical dimension of mixing	ANL/EVS/TM-14/4
Building room height	ANL/EVS/TM-14/4
Building air exchange rate	ANL/EVS/TM-14/4
Building indoor area factor	ANL/EVS/TM-14/4
Rn-222 emanation coefficient	ANL/EVS/TM-14/4
Rn-220 emanation coefficient	ANL/EVS/TM-14/4
Effective radon diffusion coefficients for secondary contaminated sites (cropland, pasture, feed crop fields, and offsite dwelling areas)	ANL/EVS/TM-14/4

Table 7. Selection Methods for Secondary Contamination Areas

Secondary Contamination Area	Selection Criteria
Residential Areas	Based on cadastral maps, areas where residents predominantly live within or near the primary contamination site are designated as residential zones for secondary contamination areas.
Surface Water Bodies	The nearest surface water bodies to the primary contamination site are investigated. Surface water areas downstream or impacted by runoff, as determined by administrative environmental impact assessments, are designated as part of the secondary contamination areas.
Agricultural Lands	Agricultural areas likely impacted by atmospheric dispersion or radionuclide deposition are delineated, prioritizing land used for farming, grazing, or food production downstream from primary contamination.
Pastures and Animal Feed Areas	Using administrative geospatial data, regions supporting livestock or animal feed are included based on their proximity and pathways for radionuclide uptake via feed.
Watersheds	Watershed areas connected to secondary contamination sites, covering all potential contamination pathways, are designated as critical zones to evaluate further contamination spread.

라돈 관련 인자로 구분된다. 먼저, 전이계수 및 농축계수는 방사성물질이 토양, 농작물, 축산물 간에 이동하는 과정을 반영하며, KINS/GR-199 및 ANL/EVS/TM-14/4에 제시된 자료를 바탕으로 설정하였다[21,22].

수리지질학적 인자는 지하수 유동과 방사성물질의 확산 경로를 분석하는 데 필수적이다. 해당 인자는 국립농업과학원의 농업토양정보시스템과 기상청의 자료를 활용하여 설정하였으며, 부지별 토성, 강수량, 수리지질 특성을 반영하였다[23,24]. 또한, 복토층, 포화층, 불포화층 입력인자의 경우, 평가 대상의 토성을 파악하여야 하며, 해당 토성에 적절한 값을 선정할 수 있다. 방사성핵종의 거동을 고려하여 평가하는 저장 기간 입력인자의 경우 KINS 규제지침 등을 활용하여 선정할 수 있다[25]. 대기수송 인자는 대기를 통해 방사성물질이 확산, 이동, 침적하는 과정을 평가하며, 직접 흡입, 재부유, 표면 침적을 통한 외부피폭 등을 고려하여 설정하였다. 주요 변수로는 풍속과 결합빈도분포가 포함되며, Pasquill-Turner 안정도 분류 방식을 통해 지역 특성을 반영한 값을 도출하였다[26]. 섭취량 인자는 주민의 나이와 식습관에 따라 방사성물질 섭취 경로를 평가하기 위해 설정되었다. 질병관리청의 국민 영양통계와 KINS에서 제공하는 가이드라인을 바탕으로 연령별 섭취량과 간접 섭취량을 반영하였다[21,25,27]. 마지막으로, 부지 배치 인자는 NORM 산업체 주변 환경의 물리적 특성과 주민 거주 형태를 반영하는 요소이다. Table 7에 2차 오염지역별 선정 방법을 나타내었다. 부지 배치 인자는 국내에 존재하는 NORM 산업체의 위치와 규모에 따라

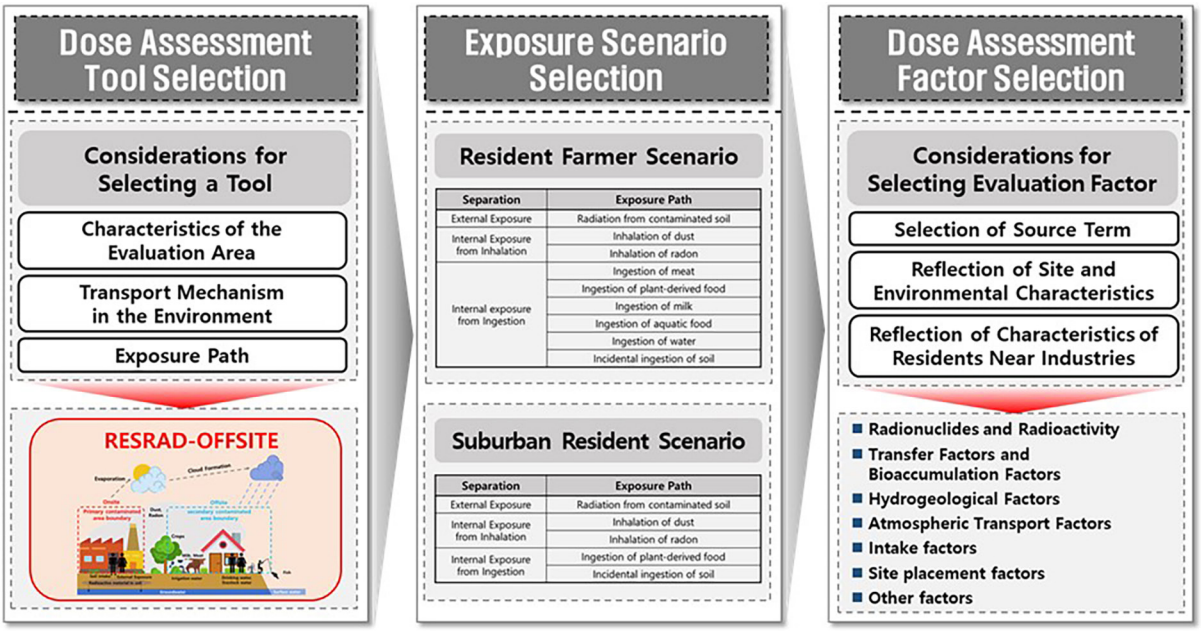

Fig. 4. 국내 NORM 취급 산업체 방사선 환경영향평가 절차 개요도

상이하기 때문에 실제 평가하고자 하는 NORM 산업체의 특성을 반영하여 부지 배치 인자를 설정하여야 한다. 이때, 지적편집도를 활용하여 실제 부지 크기와 오염 영향을 반영할 수 있으며, 주 오염원과 2차 오염 지역 간의 관계를 명확히 설정해야 한다. 라돈 관련 인자는 라돈 핵종의 특성으로 인해 추가적으로 계산에 반영하는 피폭인자이다. 라돈은 건축자재 또는 지하수로부터 건축물로 확산되거나 라돈이 포함되어 있는 지하수를 섭취하거나, 지하수를 섭취한 채소 또는 가축으로 인해 간접적인 영향을 받을 수 있는 피폭경로가 존재하기 때문에 건축물의 두께, 건물 내 격실 고도, 건물 공기 환기 속도, 건물 실내 영역 인자와 같은 건물 특성 인자뿐만 아니라 비엽채류의 라돈 유효 확산 계수, 가축 농경지 라돈 유효 확산 계수 등이 포함된다.

4. 고　　찰

본 연구에서는 국내 NORM 취급 산업체의 방사선 환경영향평가를 위한 방법론과 절차를 개발하였다. Fig. 4에 산업체 인근 주민에 대한 방사선 환경영향평가 절차 개요도를 나타내었다. 방사선 환경영향평가 절차는 (1) 선량평가 도구 및 부지 선정, (2) 선원항 및 피폭시나리오 선정, (3) 피폭 방사선량평가 인자 선정으로 구성하였다.

평가 도구와 함께 설정된 피폭시나리오와 주요 평가 인자들은 국내 NORM 취급 산업체 주변 주민의 피폭경로와 환경적 위험성을 체계적으로 분석하는 데 적합하도록 설계하였다. 전이계수 및 농축계수는 국내 농업 및 토양 특성을 반영하여 수정되었으며, 수리지질학적 인자와 대기수송 인자 역시 국내 데이터를 기반으로 설정되어 본 연구에서 제시한 방법론을 통해 국내 NORM 취급 산업체 주변의 방사선 환경영향평가를 보다 신뢰성 있게 수행할 수 있는 기반을 마련하였다.

추가적으로, 본 연구에서는 RESRAD-OFFSITE 전산코드 입력인자 선정 시, 민감도 분석 기능을 활용하지는 않았다. 하지만 이를 수행한다면 방사선 환경영향평가 시, 부지의 특성을 더욱 잘 반영하여 평가 결과의 신뢰성을 강화할 수 있을 것으로 판단된다. RESRAD-OFFSITE 전산코드는 라틴 하이퍼큐브 샘플링(Latin Hypercube Sampling, LHS)과 편상순위 상관계수(Partial Rank Correlation Coefficient, PRCC)를 기반으로 확률론적 민감도 분석을 수행할 수 있는 기능을 제공한다. 이를 통해 입력인자의 민감도를 정량적으로 분석하고, 민감도가 높은 인자에 대한 보수적인 값을 설정함으로써 평가 절차를 보다 정밀하게 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 본 연구는 방법론과 절차를 개발하는 데 초점을 맞추었으며, 이를 실제 NORM 산업체에 적용하여 방사선 환경영향을 평가하는 작업은 수행하지 않았다. 따라서, 본 연구에서 제안된 절차와 방법론의 유효성을 검증하기 위해 실제 사례 연구를 통한 적용과 결과 분석이 필요하다. 향후 연구에서는 본 연구의 결과를 바탕으로 개발된 방법론 및 절차를 실제 NORM 산업체에 적용하여 방사성물질의 이동 경로와 부지 주변 일반인의 피폭 방사선량을 정량적으로 평가하고, 이를 통해 평가 결과의 신뢰성과 실효성을 검증이 필요할 것으로 판단된다.

5. Conclusion

본 연구에서는 국내 NORM 취급 산업체에서 발생하는 방사성물질의 환경 내 이동과 부지 주변 일반인의 피폭 방사선량을 정량적으로 평가하기 위한 체계적인 방법론과 절차를 개발하였다. 이를 위해 국내·외 NORM 산업체의 사례를 검토하여 선량평가 도구를 선정하고, 국내 특성을 반영한 피폭경로와 시나리오를 설정하였다. 또한, 선원항 및 주요 평가 인자를 체계적으로 구체화하여 방사선 환경영향평가 결과의 신뢰성과 실효성을 확보하였다.

먼저, 국내·외 NORM 산업체에서 수행된 방사선 환경영향평가 사례를 조사하여 RESRAD-OFFSITE 전산코드를 선량평가 도구로 선정하였다. 조사 결과, RESRAD-OFFSITE 전산코드는 NORM 산업체에서 발생하는 방사성물질의 이동 경로와 피폭경로를 분석하는 데 유효한 도구임을 확인하였다. 특히, 1차 오염 지역과 2차 오염 지역을 구분하여 방사성 물질의 환경 내 이동 경로와 피폭경로를 평가할 수 있도록 설계되었으며, 이를 통해 NORM 산업체에서 발생하는 방사성 물질의 환경 영향을 체계적으로 분석하고, 이를 기반으로 신뢰성 있는 방법론을 제시할 수 있었다.

다음으로, 국내 NORM 취급 산업의 방사선 환경영향평가 절차를 개발하기 위해 주요 피폭경로를 정의하고, 이를 기반으로 피폭시나리오를 구성하였다. 작업자 시나리오에서는 외부 감마선 노출과 라돈 흡입이 주요 피폭경로로 나타났으며, 거주 농부 시나리오에서는 외부피폭이 주요 피폭경로로 나타났다. 또한, 부지 외 주민 시나리오는 지하수를 통한 방사성물질 이동과 라돈 흡입을 주요 경로로 나타났다. 특히, 거주 농부 시나리오는 보수적인 평가가 필요한 경우 활용할 수 있는 대표적인 시나리오로 설정하여 방사선 환경영향평가 절차의 안전성을 강화하였다.

마지막으로, 국내 NORM 산업체의 방사선 환경영향평가를 위해 주요 평가 인자를 선정하였다. 전이계수 및 농축계수는 방사성물질의 토양, 농작물, 축산물 간에 이동과 국내 토양 특성을 반영하여 설정하였다. 수리지질학적 인자는 지하수 유동과 확산 경로를 모델링하기 위해 농업토양정보시스템과 기상청 데이터를 활용하였으며, 대기수송 인자는 Pasquill-Turner 안정도 분류 방식을 기반으로 설정하였다. 섭취량 인자와 부지 배치 인자는 주민의 생활 방식과 거주 환경을 반영하였다.

본 연구에서 제안된 방사선 환경영향평가 방법론과 절차는 국내 NORM 취급 산업의 특성을 반영하여, 방사선 환경영향을 체계적으로 평가할 수 있는 기반을 마련하였다. 이는 국내 NORM 산업체에 대한 방사선 환경영향평가의 기반자료로 활용될 수 있으며, 이는 향후 국내 NORM 안전관리에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다. (No. RS-2021-KN048610)

참고문헌

1. ICRP. 2007. Scope of Radiological Protection Control Measures. ICRP Publication 104. Ann. ICRP 104.
2. IAEA. 2006. Assessing the Need for Radiation Protection measures in Work Involving Minerals and Raw Materials. IAEA Safety Report Series No. 49.
3. Waste Control Act. Article 2, No. 6.
4. ICRP. 2019. Radiological protection from naturally occurring radioactive material (NORM) in industrial processes. ICRP Publication 142. Ann. ICRP 48.
5. IAEA. 2020. Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industry.
6. Venoso G, Nuccetelli C, Carlo CD, Trotti F, Ugolini R, Trevisi R, Leonardi F and Urso L. 2024. Development of a methodology for assessing radiological dose due to use of NORM sludge as fertilizer. *Science of the Total Environment* **912**:168934. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168934.
7. Choi CK, Kim YG, Ji SW, Koo B, Chang BU and Kwang Pyo Kim. 2016. Development of Internal Dose Assessment Procedure for Workers in Industries Using Raw Materials Containing Naturally Occurring Radioactive Materials. *Journal of Radiation Protection and Research* **41**(3):291-300. https://doi.org/10.14407/jrpr.2016.41.3.291.
8. Trotti F, Liziero F, Zampieri C and Zolt SD. 2009, Impact to public and environment of NORM industries in Italy. *Radiation Protection Dosimetry* **137**(3-4):310-313. https://doi.org/10.1093/rpd/ncp241.
9. García-Talavera M, Matarranz JLM, Salas L and Ramos L. 2011. A regulatory perspective on the radiological impact of NORM industries: the case of the Spanish phosphate industry. *Journal of Environmental Radioactivity* **102**(1):1-7. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.08.007.
10. Robles B, Mora JC, Trueba C and Cancio D. 2009. The realistic dose concept applied to radiological assessments in NORM industries. *Published online by Cambridge University Press* **44**(5):581-584. https://doi.org/10.1051/radiopro/20095107.
11. Ademola JA and Olatunji MA. 2013. Evaluation of NORM and Dose Assessment in an Aluminium Industry in Nigeria. *World Journal of Nuclear Science and Technology* **3**(4):150-154. http://dx.doi.org/10.4236/wjnst.2013.34025.
12. KAERI. 2014. Establishment of Technical Bases for Securing Radiological Safety Resulting from the Disposal of Naturally Occurring Radioactive Materials. KAERI/CR-532/2013.
13. Instituto de Radioprotecao e Dosimetria. 2012. A prospective radiological risk assessment for a phosphate industry project.
14. DCCEEW. 2013. Assessment of expected maximum doses from the El Sherana airstrip containment, South Alligator River valley, Australia.

15. NRC.1992. Residual Radioactive Contamination From Decommissioning. NUREG/CR-5512 Volume 1.
16. NRC. 1999. Residual Radioactive Contamination From Decommissioning. NUREG/CR-5512 Volume 3.
17. NRC. 1998. Decision Methods for Dose Assessment to Comply With Radiological Criteria for License Termination. NUREG-1549.
18. IAEA. 2004. Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements. IAEA-TECDOC-1401.
19. ICRP. 2007. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107.
20. ICRP. 1983. Radionuclide Transformations-Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38.
21. KINS. 2000. Development of Methodology for Radiological Emergency and Environmental Assessment. KINS/GR-199.
22. ANL. 2015. Data Collection Handbook to Support Modeling Impacts of Radioactive Material in Soil and Building Structures. ANL/EVS/TM-14/4.
23. National Institute of Agricultural Sciences. 2024. AgriSoil Information System Resources.
24. Korea Meteorological Administration. 2024. Weather resources.
25. KINS. 2016. KINS/RG-N02.02.
26. ANL. 2006. Benchmarking of RESRAD-OFFSITE: Transition from RESRAD (onsite) to RESRAD-OFFSITE and Comparison of the RESRAD-OFFSITE Predictions with Peer Codes. ANL/EVS/TM/06-3.
27. Korea Disease Control and Prevention Agency. 2024. Korea National Health and Nutrition Examination Survey.
28. NRC. 1977. Regulatory Guide 1. 09.
29. NRC. 2015. User's Guide for RESRAD-OFFSITE. NUREG/CR-7189.
30. NRC. 2021. User's Manual for RESRAD-OFFSITE Code Version 4. NUREG/CR-7268.
31. Radiological Protection Institute of Ireland. 2008. Radiological assessment of NORM Industries in Ireland – Radiation doses to workers and members of the public.
32. Cowie M, Mously K, Fageeha O and Nassar R. NORM Management in the oil and gas industry. 2012. *Environmental Protection Department* **41**(3-4):318-331. https://doi.org/10.1016/j.icrp.2012.06.008.
33. García-Tenorio R, Bolivar JP, Gazquez MJ and Mantero J. 2015. Management of by-products generated by NORM industries: towards their valorization and minimization of their environmental radiological impact. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **306**:641-648. http://dx.doi.org/10.1007/s10967-015-4263-6.
34. Chen J. 2023. A Report of Pollutant Releases of Potential Radiological Concern from Major NORM Industries in Canada. *Radiation Environment and Medicine* **12**(2):111-120. https://doi.org/10.51083/radiatenvironmed.12.2_111.
35. Dal-Molin F, Fisher R, Frost D, Anderson DR and Read D. 2017. Corrigendum: Dose assessment from chronic exposure to industrial NORM in iron ore processing. *Journal of Radiological Protectio*n **37**(2):963-964. https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa8a36.
36. Jeong JT, Baik MH, Park CK, Park TJ, Ko MY and Yoon KH. 2014. A Basic Study on the Radiological Characteristics and Disposal Methods of NORM Wastes. *Korean Radioactive Waste Society* **12**(3):217-233. http://dx.doi.org/10.7733/jnfcwt.2014.12.3.217.