Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 3, pp. 195-207, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.3.195

Original article

국내 · 외 NORM 취급 산업 규제 기준 및 방사선학적 특성 분석

유승범[1] · 김주영[1] · 오가은[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Analysis of Regulation Standard and Radiological Characteristics of NORM Industry

Seung Beom Yoo[1], Ju Young Kim[1], Ga Eun Oh[1], and Kwang Pyo Kim[1,*]

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

ABSTRACT International organizations such as IAEA and EC recommend graded approach by identifying NORM industries requiring radiation protection. In Korea, single regulation rather than graded regulation for NORM industry is applied. Therefore, it consumes more manpower and costs than necessary for both regulators and workers, and is not optimized. The purpose of this study is to analyze domestic and foreign NORM industry regulatory standards and radiological characteristics for graded approach of NORM industry in Korea. Safety reports and publications such as SRS 49 and ICRP 142 published by international organizations were investigated, and domestic and foreign NORM regulatory guidelines and legislation such as Health Canada and the Act on Protective Action Guidelines Against Radiation in the Natural Environment were investigated to indicate NORM industries and regulatory standards. The radioactivity concentration of raw materials or by-products, radiation dose by industrial process of the NORM industry identified in IAEA and Korea were investigated. Nine NORM industries in Korea were identified based on the NORM industry from IAEA and KINS survey report. Foreign countries such as Canada, UK and Denmark were executing graded approach such as classification of dose level or licensing, registration, notification based on safety assessment. Radioactivity concentration of domestic and foreign NORM industries were widespread up to 200 Bq g^{-1} or higher based on industrial process and work type, and numerous NORM industries that exceeded radiation dose of 1 mSv y^{-1} were indicated. Therefore, it is necessary to consider handling materials and work types of identified NORM industry when establishing graded approach for NORM industry in Korea considering domestic situation. The results of this study are expected to be used as basic data for developing methodology of graded approach for NORM industry in Korea.

Key words: Graded approach, NORM, Radioactivity concentration, Radiation dose, Raw material

1. 서 론

천연방사성핵종 함유물질(Naturally Occurring Radioactive Material; NORM)은 ^{238}U, ^{232}Th 붕괴계열 핵종, ^{40}K 등의 천연방사성핵종을 함유하고 있는 물질을 의미한다. NORM은 전세계적으로 다양한 산업에서 원료물질로 활용되고 있다. NORM 취급 산업체는 취급 물질 및 작업 형태에 따라 피폭수준이 상이하게 나타날 개연성이 존재한다. 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA), 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection; ICRP)에서는 NORM을 취급하는 산업체에 대한 규제 고려 시 리스크 기반의 차등관리를 수행할 것을 권고하고 있다[1,2]. 국내의 경우 2012년 생활주변방사선 안전관리법을 시행하여 NORM 산업체에 대해 차등접근법 기반의 규제체계가 아닌 일괄적인 규제를 적용하고 있다. 현재 국내에 적용되고 있는 규제체계는 규제자, 사업자 입장에서 모두 필요 이상의 인력과 비용을 소모하게 되며, 규제의 최적화를 이루지 못하고 있다. 따라서 국내 NORM 취급 산업의 특성을 고려한 차등관리 체계 수립이 필요하다.

이와 관련하여 Flesch 등은 노르웨이 오염관리법 상의 방사능 오염 적용에 관한 NORM 산업 규제 체계를 제시하였으며, 국외

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

Copyright© 2024 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 30 July 2024 Revised 20 August 2024 Accepted 20 August 2024

국가들의 방사능 방출 농도 기준 및 면제기준을 분석하였다[3]. HERCA에서는 유럽 회원국별 NORM에 대한 규제해제 방사능 농도 및 피폭방사선량 기준, 국가별 안전관리 방법론을 제시하고 있다[4]. 한국원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety; KINS)에서는 NORM 취급 관련 국외 규제 현황 및 안전성 평가 기반 구축에 대한 연구를 수행하였다[5]. Michalik 등은 NORM 산업 식별을 위한 방법론을 제시하고 있다[6]. 우주희 등은 천연방사성물질 규제에 관한 국내외 국가의 접근법 분석 및 천연방사성물질에 대해 차등접근법 기반의 규제를 수행하는 국가의 사례 연구를 수행하였다[7-8]. KINS에서는 생활주변 방사선 안전관리의 효과적 수행을 위한 모나자이트 규제 방향성 및 공정부산물의 처리·처분 관련 국외 규제에 대한 분석을 수행하였다[9]. IAEA에서는 안전보고서 시리즈 34를 발간하여 오일 및 가스를 취급하는 산업과 해당 산업에서의 방사능 농도 및 피폭방사선량, 방사선 방호 측면에서의 고려사항을 제시하고 있다[10]. 유럽집행위원회(European Commission; EC)의 EC RP 122에서는 면제 및 해제의 정의, BSS 115에서 제시하고 있는 행위에 대한 일반 해제 및 특별 해제에 대한 방사능 농도 및 피폭방사선량 평가 방법론을 제시하고 있다[11]. IAEA GSG-60에서는 NORM 잔류물을 관리하기 위한 안전성 평가 방법론 및 안전관리 방안을 제시하고 있다[12].

국외의 경우 NORM 산업에 대해 차등관리 체계를 수립하여 이행하는 국가는 다수 존재하며, 국가의 특성을 반영한 차등관리 체계에 대한 연구 또한 다수 진행되었다. 국내의 경우 일괄적인 규제 체계를 적용 중이며, 이에 따른 국내·외 차등관리 체계 선행사례, 규제기준 및 산업현황을 종합적으로 분석한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 국내 실정에 적합한 차등관리 방법론 개발을 위해서는 국내·외 NORM 취급 산업 현황 및 규제기준과 방사선학적 특성에 대한 분석이 선행되어야 한다.

본 연구의 목적은 국내·외 NORM 취급 산업의 규제 기준 및 방사선학적 특성을 분석하는 것이다. 이를 위해 먼저 국제기구 및 국내·외 국가에서 안전규제가 필요한 것으로 제시하고 있는 NORM 취급 산업 및 규제기준을 조사 및 분석하였다. 그리고 NORM 취급 산업에서의 원료물질 및 공정부산물에 대한 방사능 농도와 이로 인한 피폭방사선량을 조사하여 방사선학적 특성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 국제기구 및 국내 · 외 NORM 산업 규제기준 조사

본 연구단계에서는 국제기구 및 국내·외에서 제시하는 NORM 산업 및 규제기준 조사를 위하여 해당 국가의 법령 또는 해당 국가에서 제시하고 있는 안전보고서 및 규제지침을 조사하였다.

2.1.1. 국제기구 NORM 산업 목록 및 규제기준 조사

IAEA에서 제시하고 있는 NORM 산업 및 규제기준은 SRS 49, GSR Part 3, GSG-7 문헌을 통해 조사하였다. IAEA SRS 49에서 제시하고 있는 규제 감독이나 관리가 필요한 산업 분야, NORM에 대한 면제 및 해제기준, NORM 산업체 차등관리에 관한 사항을 조사하였다[1]. IAEA GSR Part 3에서 제시하고 있는 면제 및 해제에 대한 일반기준과 핵종별 방사능 농도, 수량의 면제기준을 조사하였다[13]. 또한 천연방사선원 피폭과 관련된 작업에 차등접근법 적용에 관한 사항들을 조사하였다. IAEA GSG-7에서 제시하고 있는 GSR Part 3의 요건을 충족하기 위한 작업자 방호에 대한 지침을 조사하였다[14].

ICRP에서 제시하고 있는 NORM 산업 및 규제기준은 ICRP 142 및 104 문헌을 통해 조사하였다. ICRP 142에서 제시하고 있는 방사선방호 규제 범위의 정의 방법 및 NORM 피폭을 초래하는 활동을 조사하였다[2]. ICRP 104에서 제시하고 있는 방사선방호 규제 범위에 대한 조사를 수행하였다[15].

EC에서 제시하고 있는 NORM 산업 및 규제기준은 2013/59/Euratom, RP 95, RP 107 문헌을 통해 조사하였다. 2013/59/Euratom에서 제시하고 있는 NORM 취급 산업 분야 및 NORM 규제 관리에 차등접근법의 적용, 면제 및 규제해제 기준을 조사하였다[16]. EC RP 95에서 제시하고 있는 선별준위 및 참조준위를 이용한 피폭방사선량 기준과 이에 따른 NORM 산업 공정의 관리 방안을 조사하였다[17]. EC RP 107에서 제시하고 있는 NORM 산업의 피폭방사선량 기준에 따른 차등적인 규제체계를 조사하였다[18].

2.1.2. 국외 NORM 산업 목록 및 규제기준 조사

국외에서 제시하고 있는 NORM 산업 및 규제기준은 캐나다, 호주, 벨기에, 독일, 영국, 이탈리아, 일본, 덴마크, 노르웨이, 핀란드의 NORM 관련 안전관리 및 규제지침 보고서, 법령 등을 통해 조사하였다. 캐나다의 경우 Health Canada에서 발간한 천연방사성물질 관리 지침을 통해 조사하였으며, NORM에 의한 피폭이 발생하는 산업 예시 및 NORM 관리 기준을 조사하였다[19]. 호주의 경우 호주 방사선 방호 및 원자력안전위원회(Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency; ARPANSA)의 방사선방호 시리즈(Radiation Protection Series; RPS) 15를 통해 조사하였으며, 방사선 방호가 필요한 NORM 취급 산업 및 NORM 관리 절차, 규제 기준을 조사하였다[20]. 벨기에의 경우 Vanmarcke 등이 제시하고 있는 벨기에의 NORM 산업과 벨기에 왕실령 2001 (Royal Decree 2001)에서 제시하고 있는 NORM에 대한 일반 및 면제기준을 조사하였다[3,21]. 독일의 경우 방사선방호령(StrlSchG)을 통해 제시하고 있는 NORM 취급 산업 및 NORM 규제 기준을 조사하였다[22]. 영국의 경우 기업에너지산업전략부(Business, Energy and

Industrial Strategy; BEIS)의 방사성물질 규정에서 제시하고 있는 NORM 취급 산업 및 규제 기준을 조사하였다[23]. 이탈리아의 경우 Trevisi 등이 종합한 이탈리아 법률 및 국가 기관에서 제시하고 있는 이탈리아 내 NORM 산업체 목록 및 NORM 안전관리 규제 기준을 조사하였다[24]. 일본의 경우 원자력 규제당국(Nuclear Regulation Authority; NRA)의 핵원료물질, 핵연료물질 및 원자로의 규제에 관한 법률을 통해 NORM에 대한 관리를 수행하고 있다[25]. 해당 법의 사용 신고를 필요로 하는 핵원료물질 및 핵연료물질의 방사능 농도 및 수량 기준을 조사하였다. 핀란드, 덴마크, 노르웨이의 경우 북유럽 방사선 및 원자력 안전 보고서에서 제시하고 있는 국가별 NORM 산업 및 규제 기준을 조사하였다[26].

2.1.3. 국내 NORM 산업 목록 및 규제기준 조사

국내에서 제시하고 있는 NORM 산업은 KINS에서 수행한 실태조사 보고서를 통해 조사하였다[27-31]. 국내에서 NORM 관리를 위한 법으로는 생활주변방사선 안전관리법이 존재하며, 취급자 및 제조업자 등록기준과 원료물질 등의 등록기준을 제시하고 있다.

2.2. 국내 · 외 NORM 취급 산업체 방사선학적 특성 조사

본 단계에서는 IAEA와 국내에 존재하는 NORM 취급 산업체의 방사선학적 특성인 원료물질 또는 공정부산물의 방사능 농도 및 작업자의 피폭방사선량을 조사하였다. IAEA에서는 안전보고서 시리즈를 통해 NORM 산업의 방사선학적 특성을 제시하고 있으며, 국내 NORM 산업체에 대해서는 KINS의 실태조사 보고서 및 관련 연구를 통해 NORM 산업의 방사선학적 특성을 제시하고 있다.

2.2.1. 국제기구 NORM 산업 방사선학적 특성 조사

국제기구에서 제시하고 있는 국외 NORM 산업의 방사선학적 특성은 IAEA SRS 51, 68, 76, 78을 통해 조사하였다. IAEA SRS 51, 68, 76, 78에서는 각각 저어콘 및 지르코니아 산업, 희토류 생산을 위한 토륨 함유 광물의 산업적 이용, 이산화티타늄 및 관련 산업, 인산염 이용 및 처리 산업의 산업적 이용과 관련된 방사선 피폭으로부터 작업자 및 일반인의 방호에 대해 다루고 있다[32-35]. 해당 보고서에서는 각 산업별 취급물질의 이용 및 처리 산업, 산업공정, 공정 내 공정부산물 관리 등을 제시하고 있으며, 각 산업체 공정별 원료물질 및 공정부산물에 대한 방사능 농도 및 작업자 피폭방사선량을 조사하였다.

2.2.2. 국내 NORM 산업 방사선학적 특성 조사

국내에서 제시하고 있는 NORM 산업의 방사선학적 특성은 KINS에서 수행한 관련 연구 및 실태조사 보고서를 통해 조사하였다. 국내 석탄화력발전소, 인산염, 보크사이트, 수처리, 이산화티타늄, 실리카퓸, 포타슘화합물, 모나자이트, 저어콘 취급 산업체의 원료물질 또는 공정부산물의 방사능 농도 및 작업자 피폭방사선량을 조사하였다. 석탄화력발전소의 경우 국내 석탄화력발전소에서 분석된 유연탄의 방사능 농도 및 각 산업체별 작업자의 피폭방사선량을 조사하였다[36]. 인산염 취급 산업의 경우 인산 및 비료 생산 산업의 공정별 원료물질, 공정부산물, 소비재 내 방사성핵종의 방사능 농도 및 작업자 피폭방사선량을 조사하였다[37]. 보크사이트 취급 산업의 경우 시멘트 제조, 수산화알루미늄 생산 산업에 대한 원료물질 및 생산제품의 방사능 농도 및 산업별 작업자 피폭방사선량을 조사하였다[36,38]. 수처리 산업의 경우 수처리 시설의 수처리필터에서 분석된 천연방사성핵종의 방사능 농도 및 해당 시설 작업자의 피폭방사선량을 조사하였다[39]. 이산화티타늄 취급 산업의 경우 이산화티타늄 안료 제조 산업에 대한 공정부산물의 방사능 농도와 해당 부산물로 인해 발생하는 작업자의 피폭방사선량 평가결과를 조사하였다[40]. 실리카퓸 취급 산업의 경우 국내 유의물질 발생 사업장 실태조사 보고서를 통해 실리카퓸 유통 및 가공 산업을 대상으로 분석된 방사능 농도와 작업자 피폭방사선량을 조사하였다[29]. 포타슘 취급 산업의 경우 포타슘화합물 유통, 포타슘화합물 생산, 비료 생산, 식품첨가제 생산, 화학제품 생산, 전자제품 생산 산업에서 발생하는 제품 및 부산물의 방사능 농도 및 해당 작업별 피폭방사선량을 조사하였다[41]. 모나자이트 취급 산업의 경우 모나자이트 분쇄, 유통, 건강패드 제조, 세라믹볼 제조 산업을 대상으로 분석된 원료물질 및 부산물의 방사능 농도 및 산업별 피폭방사선량을 조사하였다[42]. 저어콘 취급 산업의 경우 내화물 제조, 용접봉 제조, 정밀금속 제조, 유약 제조, 단열재 제조, 타이어 보강재 제조 산업에 대한 방사능 농도 및 해당 산업 작업자의 피폭방사선량을 조사하였다[43].

3. 결 과

본 연구에서는 국내·외 NORM 산업 규제 기준 및 방사선학적 특성을 분석하였다. 이를 위해 국제기구 및 국내·외 NORM 산업의 목록과 규제기준을 조사하였고, 국제기구 및 국내 NORM 산업의 방사선학적 특성을 조사하였다.

3.1. 국제기구 및 국내 · 외 NORM 산업 규제기준 조사

3.1.1. 국제기구 NORM 산업 목록 및 규제기준 조사

Table 1에 국제기구에서 제시하고 있는 NORM 산업 목록을 종합하여 나타내었다. IAEA에서는 방사선방호를 고려해야 할 유의 NORM 산업체를 11가지로 분류하고 있다. ICRP 권고에서는 IAEA에서 제시하고 있는 산업체와 더불어 건축재, 유산부지(Legacy site)를 추가로 유의 NORM 산업으로 분류하고 있다. IAEA에서 권고한 11가지 산업 중 우라늄 원석 가공 및 채

Table 1. NORM Industry lists from international organizations

Classification	NORM Industry lists	
IAEA	1. Extraction of rare earth elements 2. Production and use of thorium and its compounds 3. Production of niobium and ferro-niobium 4. Mining of ores other than uranium ore 5. Production of oil and gas 6. Manufacture of titanium dioxide pigments	7. The phosphate industry 8. The zircon and zirconia industries 9. Production of tin, copper, aluminium, zinc, lead, and iron and steel 10. Combustion of coal 11. Water treatment
ICRP	1. Extraction of rare earth elements 2. Production and use of metallic thorium and its compounds 3. Mining and processing of ores (other than uranium) 4. Extraction of oil and gas 5. Manufacture of titanium dioxide 6. The phosphate processing industry	7. The zircon and zirconia industries 8. Production of metal 9. Extraction and combustion of coal 10. Water treatment 11. Building materials 12. Legacy sites
EC	1. Extraction of rare earths from monazite 2. Production of thorium compounds and manufacture of thorium-containing products 3. Processing of niobium/tantalum ore 4. Oil and gas production 5. Geothermal energy production 6. TiO_2 pigment production 7. Thermal phosphorus production 8. Zircon and zirconium industry	9. Production of phosphate fertilizers 10. Cement production, maintenance of clinker ovens 11. Coal-fired power plants, maintenance of boilers 12. Phosphoric acid production 13. Primary iron production 14. Tin/lead/copper smelting 15. Ground water filtration facilities 16. Mining of ores other than uranium ore

Table 2. Safety standard for NORM from international organizations

Classification	Exemption and clearance level		Safety standard
	Radioactive concentration (Bq g^{-1})	Radiation Dose (mSv y^{-1})	
IAEA	$^{238}U/^{232}Th$ series: 1 ^{40}K: 10	1	- Graded approach by form of notification, registration, licensing - Graded approach should be correspond exposure level, possibility to regulation
ICRP	-	1	- Graded approach should be correspond exposure level, possibility to regulation - Provided scope of radiation protection regulatory control using justification and optimization - If concentration standard is exceeded, it is necessary to decide by each case whether the application of requirement is the best protection method - Exemption when situation exceeded 1 mSv y^{-1} may not be justified if easy to manage or simple alternative
EC	$^{238}U/^{232}Th$ series: 1 ^{40}K: 10	1	- Regulation by notification, registration, licensing if higher than exemption level - Exemption from notification can be accepted if exemption is the best option - Graphical representation of the classification system based on effective dose (1, 6, 20 mSv y^{-1})

광 분야는 핵연료주기에 포함되는 산업이므로 이미 방사선방호가 이루어지고 있는 것으로 간주하였다. EC에서 제시하고 있는 NORM 산업 목록은 총 16가지로, IAEA와 ICRP에서 제시한 인산염 산업이 열에 의한 인 생산 산업, 인산염 비료 생산 산업, 인산 생산 산업으로 분류되었고, 시멘트 생산 산업, 석탄화력발전소 산업, 1차 철 생산 산업이 추가되었다.

Table 2에 국제기구에서 제시하고 있는 NORM 취급 산업 면제 및 해제기준을 종합하여 나타내었다. IAEA와 EC에서는 면제 및 해제기준으로 동일한 방사능 농도 기준을 제시하였으며, 피폭방사선량 기준은 1 mSv y^{-1}로 동일하였다. 국제기구에서는 신고, 등록, 허가 등을 통한 차등관리를 권고하고 있으며, 각 산업별 적절한 관리 기준을 적용해야 한다고 제시하고 있다.

3.1.2. 국외 NORM 산업 목록 및 규제기준 조사

Table 3에 국외에 존재하는 NORM 취급 산업을 나타내었다. 오일 및 가스 생산 산업을 포함하고 있는 국가는 캐나다, 호주, 독일, 영국, 이탈리아, 덴마크, 핀란드, 노르웨이 등 8개 국가로 나타났으며, 수처리 산업을 포함하고 있는 국가는 캐나다, 호주,

Table 3. NORM Industry lists in countries abroad

Classification	NORM Industry lists in countries aborad	
Energy generation	1. Coal-fired power plant[b), c), d), f), g), h)] 2. Geothermal energy production[b), e), f), g), h)]	3. Heat and power production plants using biofuel such as straw primarily due to potassium[g)]
Metal handling	1. Production of tin, copper, aluminium, zin, lead, iron and steel[b), c), e), f), h), i)] 2. Production and use of thorium, thoriated materials, thorium compounds handling industry[c), d), e), f), i)] 3. Metal extraction and processing[b)]	4. Extraction, use and processing of pyrochlore ores[d)] 5. Metal processing-hydrometallurgy and smelters, including Ni, Cu, Zn, Co, Fe[h)] 6. NORM-contaminated scrap metals (and Cs-137 contaminated materials)[h)]
About handling and production of material	1. Oil and gas production[a), b), d), e), f), g), h), i)] 2. Mineral/mineral sand/rare earth industry[a), b), e), f), h), i)] 3. Phosphate industry[b), c), e), f), i)] 4. TiO_2 pigment production, TiO_2 handling industry[c), f), g), h), i)] 5. Zircon handling industry[c), d), e), f)] 6. Cement production[c), f), h)] 7. Decommissioning/remediation/removal of residues or scales[d), e), g)] 8. Production and use of uranium, uranium compounds, uranium added materials[d), e)]	9. Processing of niobium/tantalum ore[d), i)] 10. Forest products and thermal-electric production[a)] 11. Bauxite industry[b)] 12. Slag heaps from coal mining[c)] 13. Use and processing of slag from the smelting of copper shale ores[d)] 14. China clay extraction[e)] 15. Processing of potassium minerals[f)] 16. Production of coating pigments for paper and board[h)] 17. Fertilizer production[h)]
About industrial process	1. Water treatment facilities[a), b), c), e), f), g), h)] 2. Mining and tunnelling[a), b), e), f), h), i)] 3. (Metal) Recycling industry [a), b), g)] 4. Building industry[b)] 5. Non-ferro industry[c)] 6. Cutting and sandblasting processing[f)]	7. Activities related to coal mine de-watering plants[e)] 8. Waste processing facilities[g)] 9. Borehole cores, geological sample materials, ore and tailings[g)] 10. Milling [h)]

a) Canada, b) Australia, c) Belgium, d) Germany, e) United Kingdom, f) Italy, g) Denmark, h) Finland, i) Norway

벨기에, 영국, 이탈리아, 덴마크, 핀란드 등 7개 국가로 나타났다. 미네랄, 미네랄샌드, 희토류 취급 산업, 석탄화력발전소, 채광 및 채굴 산업 등은 6개 국가가 포함하고 있는 산업인 것으로 나타났다. 인산염 산업, 이산화티타늄 취급 산업, 토륨 및 토륨화합물 취급 산업 등은 5개 국가가 포함하고 있는 NORM 산업인 것으로 나타났다.

Table 4에 국외 NORM 산업 규제 기준을 나타내었다. 대부분의 국가에서 NORM 규제 및 관리를 위하여 방사능 농도 및 피폭방사선량 기준 등을 통한 안전관리 방안을 채택하고 있다. 호주, 핀란드, 노르웨이에서는 방사능 농도 면제 및 해제기준으로 IAEA에서 제시한 기준을 채택하였다. 캐나다에서는 피폭방사선량을 차등적으로 구분하여 구간별 규제를 수행하고 있으며, 영국, 일본의 경우 면제 및 해제 기준으로 연간 취급 방사능량 기준을 제시하고 있다. 벨기에, 이탈리아의 경우 면제 및 해제 기준에 피폭방사선량 기준을 포함하였으며, 이탈리아의 경우 음용수 섭취를 고려한 피폭방사선량 기준을 선정하였다. 호주, 덴마크 등은 선별평가(Screening assessment), 안전성 평가 등을 통해 신고, 등록, 허가 등의 형태로 차등규제 체계를 수립하고 있는 것으로 나타났다.

3.1.3. 국내 NORM 산업 목록 및 규제기준 조사

Table 5에 국내 NORM 취급 산업 및 규제 기준을 나타내었다. 국내에서는 석탄화력발전소, 인산염, 보크사이트, 수처리, 이산화티타늄, 실리카퓸, 포타슘, 모나자이트, 저어콘의 9가지 NORM 산업이 식별되었다. 국제기구에서 제시하고 있는 산업 중 석탄화력발전소, 인산염, 수처리, 이산화티타늄, 모나자이트, 저어콘 산업이 공통적으로 존재하였다. 호주에서 제시하는 NORM 산업에는 보크사이트 취급 산업이 포함되어 있으며, 이탈리아에서 제시하는 NORM 산업에는 포타슘 산업이 포함되어 있다. 국내에 추가적으로 존재하는 NORM 산업으로 실리카퓸 취급 산업이 추가되었다.

국내에서는 허가, 등록, 신고 등의 차등접근법 기반의 관리가 아닌, 방사능 농도 및 방사능량 기준을 초과하는 사업자는 모두 원자력안전위원회에 관련 제반사항을 등록하도록 규정하고 있다. 또한 등록사항을 변경하는 경우 원자력안전위원회에 이를 신고해야 한다. 등록된 사업자는 원료물질 및 공정부산물의 국내 유통현황 정보 신고, 종사자 보호를 위한 조치관리를 취해야 함을 제시하고 있다.

3.2. 국제기구 및 국내 NORM 취급 산업 방사선학적 특성 분석

3.2.1. 국제기구 NORM 산업 방사선학적 특성 분석

Table 6~7에 IAEA에서 제시하고 있는 저어콘, 희토류, 이산화티타늄, 인산염 산업 공정별 취급 물질의 방사능 농도를 나타

Table 4. Safety standard for NORM in countries abroad

Country	Exemption and clearance level		Safety standard
	Radioactive concentration (Bq g^{-1})	Radiation Dose (mSv y^{-1})	
Canada	Derived Working Limits (DWLs)	-	Graded approach by radiation dose level of 0.3, 1, 5 mSv y^{-1}
Australia	$^{238}U/^{232}Th$ series: 1 ^{40}K: 10	-	Exemption, notification, registration, licensing by screening assessment
Belgium	^{40}K, ^{210}Pb+, ^{210}Po, $^{232}Th_{sec}$, U_{nat}: 5 ^{226}Ra+, ^{228}Th+, $^{238}U_{sec}$: 0.5	0.3	Divided exemption level for radioactivity concentration for each progeny radionuclides
Germany	$^{238}U/^{232}Th$ series: 1[a]	-	Graded approach for surveillance limit by radioactivity concentration equation
United Kingdom	$^{238}U_{sec}$, ^{226}Ra+, $^{232}Th_{sec}$, ^{228}Ra+, ^{228}Th+, $^{235}U_{sec}$, ^{227}Ac+: 1 ^{238}U+, ^{234}U, ^{210}Pb+, ^{210}Pb, ^{232}Th, ^{235}U+, ^{231}Pa: 5 ^{230}Th: 10	-	Graded approach by registration and notification based on amount of radioactive material and radioactivity concentration Additional exemption and clearance level less than 1,000 kg of radioactive material amount
Italy	$^{238}U/^{232}Th$ series: 1 ^{210}Pb+, ^{210}Pb: 5 ^{40}K: 10	Worker: 1 Public: 0.3 Consideration of drinking water: 0.1	Specific exemption for some NORM industry and residues by radioactivity concentration level
Japan	$^{238}U/^{232}Th$ series: 1[b] $^{238}U/^{232}Th$ series: 10[c]	-	Additional exemption and clearance level of $^{238}U/^{232}Th$ series: 8,000[b] and 80,000[c] Bq of radioactive material amount
Finland	$^{238}U/^{232}Th$ series: 1 ^{40}K: 10	Worker: 1 Public: 0.1	Notification, licensing by dose assessment
Denmark	$^{238}U_{sec}$, ^{226}Ra+, $^{235}U_{sec}$, ^{227}Ac+, $^{232}Th_{sec}$, ^{228}Ra+, ^{228}Th+: 1 ^{238}U+, ^{234}U, ^{210}Pb+, ^{210}Po, ^{235}U+, ^{231}Pa, ^{232}Th: 5 ^{230}Th, ^{40}K: 10	-	Licensing and notification by safety assessment Divided exemption level for radioactivity concentration for each progeny radionuclides
Norway	$^{238}U/^{232}Th$ series: 1 ^{40}K: 10	-	Graded approach for NORM industry waste management by radioactivity concentration level

a) $C(U_{max}) + C(Th_{max}) \leq 1$ Bq g^{-1}, b) Equilibrium with progeny, c) Except progeny

Table 5. NORM Industry lists and safety standard for NORM in Korea

Classification		Note	
NORM industry lists		1. Coal-fired power plant 2. Phosphate 3. Bauxite 4. Water treatment 5. Titanium dioxide	6. Silica fume 7. Potassium 8. Monazite 9. Zircon
Registration level	Radioactivity concentration (Bq g^{-1})	$^{238}U/^{232}Th$ series: 1 ^{40}K: 10	
	Amount of radioactive material (kBq y^{-1})	$^{238}U/^{232}Th$ series: 1,000 ^{40}K: 10,000	
Safety standard		- Regulation by registration if concentration and amount of radioactive material is exceeded registration level	

Table 6. Radioactivity concentration of Zircon and rare earth element industry from IAEA

Major industries		Material/Process	Radioactivity concentration (Bq g^{-1})		
			^{238}U series	^{232}Th series	^{40}K
Zircon industry	Zircon in ceramic tiles and sanitary ware	Glazes	0.068-5.08	0.03-1.22	0.27-1.2
		Ceramic tiles	0.03-0.25	0.02-0.11	0.39-1
	Manufacture of zirconia by fusion of zirconium minerals	From zircon	0-5.76	0.07-0.87	-
		From Baddeleyite	1-600	0.3-11	-
	Manufacture of zirconium compounds by chemical dissolution of zirconium minerals	-	0.0004-39	0.0003-0.69	-
	Zircon and fused zirconia in refractories	Zircon refractory	0.16-2.9	0.037-0.17	0.018-0.036
		AZS refractory	0.15-35	0.02-0.5	0-0.3
Rare earth element industry	Mining and beneficiation of bastnasite-monazite ore	-	0.02-0.08	0.212-14	-
	Mining and beneficiation of rare earth ore	Ore	0.3[a)] Max: 0.6	2.7[a)] Max: 6.4	-
		Concentrate	0.3[a)]	6.1[a)]	-
		Tailings	0.3[a)]	1.8[a)]	-
	Mining and beneficiation of heavy-mineral sand	Heavy mineral sand	0.03-0.7	0.02-14.3	-
		Heavy mineral concentrate	<0.1-13.7	0.3-7.58	-
		Monazite	0-175	7-1,000	-
		Xenotime	<50	<60	-
		Zircon	1-6.4	0.5-1.2	-
		Other heavy minerals	0.12-85	0.1-60	-
		Tailings	0.01-10	0.036-8.4	-
	Recovery of heavy minerals from tin mining residues	Amang	1-3.2	0.6-1	-
		Monazite	12-46	67-370	-
		Xenotime	37-247	13-200	-
		Zircon	4.8-62	1-88	-
		Other residues	0.02-10.5	0.04-8.2	-
	Chemical treatment of mineral concentrates	Bastnasite concentrate	2.7-57	0.2-1.6	-
		Mount weld concentrate	0.01-0.3	0.04-6.8	-
		Loparite concentrate	0.13-3.6	0.19-89	-
		Monazite concentrate	3-450	23-5,000	-
		Xenotime concentrate	130-190	34-250	-
	Extraction and purification of individual rare earths	-	-	<0.15-7.8	-
	Manufacture and use of rare earth products	Glass industry product	0.001-1	0.05-10	-
		Product from monazite	<300	<40	-

a) Average value

내었다. 저어콘 산업의 세라믹 타일, 지르코니아 제조, 지르코늄 화합물 제조, 융합 지르코니아 내화물 산업에서의 ^{238}U 계열 핵종의 최대 방사능 농도는 면제 및 해제기준인 1 Bq g^{-1}을 초과하였으며, 세라믹 타일, 지르코니아 제조 산업에서 ^{232}Th 계열 핵종의 최대 방사능 농도는 1 Bq g^{-1}을 초과하였다. 희토류원소 추출 산업에서는 바스네사이트-모나자이트 광석 채광 및 선광 작업을 제외한 모든 산업에 대해서 공정별 최대 ^{232}Th 계열 핵종의 방사능 농도는 1 Bq g^{-1}을 초과하였다. 이산화티타늄 산업의 황산염 공정에서의 물질의 방사능 농도는 1 Bq g^{-1} 미만이었지만, 공정부산물인 스케일의 방사능농도는 1 Bq g^{-1}을 초과하는 것으로 나타났다. 황산염 공정을 통한 이산화티타늄 생산 산업 이외의 ^{238}U 및 ^{232}Th 계열 핵종의 최대 방사능 농도는 모두 1 Bq g^{-1}

Table 7. Radioactivity concentration of TiO_2 and phosphate industry from IAEA

Major industries		Material/Process	Radioactivity concentration (Bq g^{-1})		
			^{238}U series	^{232}Th series	^{40}K
TiO_2 industry	Feedstock for the production of titanium dioxide and other titanium-containing products	Benilite process	-	0.08-1.2	-
		Synthetic rutile enhancement process	0.03-1.3	0.04-4	-
	Production of titanium dioxide by the sulphate process	Process materials	0.0009-0.12	0.003-0.13	-
		Process scale	13.5-415	3.9-1,644	-
	Production of titanium dioxide pigment and titanium metal by chloride process	Unreacted bed and refractory materials	<0.1-2.7	13-24	-
		Neutralization plant scale	<0.1-902	<1-1,530	-
Phosphate industry	Mining and beneficiation of phosphate ore	Phosphate ore	0.03-4.6	0.01-0.63	0.003-0.29
		Tailing	0.01-2.3	0.004-0.34	-
	Production of phosphoric acid by the wet process	Phosphoric acid	0.001-2.6	0.01-0.39	-
		Scale	<0.037-4,000	0.01-9.46	-
	Manufacture and use of ammonium phosphate fertilizers	Ammonium phosphate fertilizer	<0.005-2.6	0.002-0.22	-
	Manufacture and use of superphosphate fertilizers	Superphosphate Fertilizer	0.12-2.1	-	-
	Manufacture and use of nitrophosphate fertilizers	Nitrophosphate fertilizer	0.1-0.4	-	-
	Manufacture and use of animal feed phosphates	Animal feed phosphate	<0.01-2.1	0.179-0.426	-
	Phosphogypsum	Phosphogypsum	0.161-0.214	0.006-0.019	0.013
		Cement	0.027-0.056	0.013-0.017	0.613-0.73
	Production of elemental phosphorus by thermal processing of phosphate rock	phosphorus	0.03	-	-
		ferrophosphorus	0.03	-	-

을 초과하였다. 인산염 산업의 인산염 광물 채광 및 선광, 습식 공정에 의한 인산 생산, 인산염 비료 생산 및 사용 등의 공정에서 원료물질 및 생산품 내 함유된 ^{238}U 계열 핵종의 방사능 농도가 1 Bq g^{-1}을 초과하였다. IAEA에서는 해당 인산염 산업에 대해 신고 및 등록 형태의 인허가를 통한 규제를 제시하였다[35].

Table 8, Fig. 1에 IAEA에서 제시한 NORM 산업에서의 작업자 피폭방사선량을 나타내었다. 저어콘 산업에서는 지르콘샌드 분쇄, 지르코니아 제조 산업에서 피폭방사선량이 1 mSv y^{-1}를 초과하였다. IAEA에서 제시한 산업 중 희토류 원소 산업의 주석 채광 잔류물로부터의 중광물 회수 산업에서 작업자 총 피폭방사선량의 최대값은 7.9 mSv y^{-1}으로 나타났다. 중광물 모래 채광 및 선광, 주석 채굴 잔류물로부터의 중광물 회수, 광물 농축물의 화학적 처리, 개별 희토류 추출 및 정화 작업자의 피폭방사선량이 1 mSv y^{-1}를 초과하였다. IAEA는 해당 산업에 대해 등록 또는 허가 형태의 인허가 규제를 제시하였다[33]. 이산화티타늄 산업의 염화물공정의 이산화티타늄 안료 생산 공정에서 유효선량이 1 mSv y^{-1}를 초과하였으며, IAEA는 신고 및 등록 형태의 인허가를 통한 규제가 적절할 것으로 제시하였다[34]. 인산염 공정의 경우 작업자에 대한 피폭방사선량은 외부피폭과 내부피폭에서 모두 1 mSv y^{-1} 이하로 나타났다.

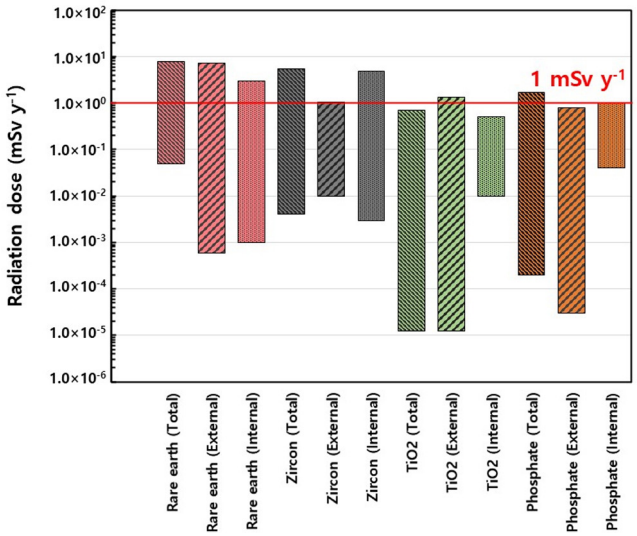

Fig. 1. Radiation dose of NORM industry from IAEA

3.2.2. 국내 NORM 산업 방사선학적 특성 분석

Table 9에 국내 NORM 산업 원료물질 및 공정부산물의 방사능 농도를 나타내었다. 국내 석탄화력발전소에서 원료물질로

Table 8. Radiation dose of NORM industry from IAEA

Major industry		Material/Process	Radiation dose (mSv y^{-1})		
			External	Internal	Total
Zircon and zirconia industry	Milling of zircon sand	-	0.067-0.4	0.04-1.9	0.11-2.1
	Zircon in ceramic tiles and sanitary ware	Sanitary ware plant	0-0.08	0.003-0.04	0.004-0.086
		Ceramic tile plant	0.012-0.2	0-0.44	0.012-0.48
	Zircon in foundries	-	<0.01-0.15	0.05-0.25	0.051-0.42
	Production of zirconia by fusion of zircon	-	0.07-1.03	0.15-4.78	0.25-5.5
Rare earth element industry	Mining and beneficiation of rare earth ore	Current mining	0.02-0.32	0.02-0.1	0.05-0.4
		After commissioning	0.2-0.5	0.02-0.2	0.3-0.8
	Mining and beneficiation of heavy-mineral sand	Dry separation plant	0.6-1	0.7-2.3	1.3-3.1
	Recovery of heavy minerals from tin mining residues	Amang plant	1.3-7.2	0.1-0.5	1.7-7.9
	Chemical treatment of mineral concentrates	Monazite processing	5<	1-5	-
	Extraction and purification of individual rare earths	-	0.7	0.6	1.9
	Manufacture and use of rare earth products	-	0.0006-0.8	0.006-0.6	<1
TiO_2 industry	Feedstock for the production of titanium dioxide and other titanium-containing products	-	0.004-0.3	<0.01-0.5	-
	Production of titanium dioxide by the sulphate process	-	0-0.000013	-	0-0.000013
	Production of titanium dioxide pigment and titanium metal by chloride process	-	<0.1-1.35	<0.1-0.5	<0.1-1.35
Phosphate industry	Mining and beneficiation of phosphate ore	Mining	0.09-0.66	0.51-0.77	0.66-1.17
		Milling	0-0.1	0.09-0.19	0.09-0.29
		Beneficiation	0-0.8	0.09-0.27	0.09-0.97
	Production of phosphoric acid by the wet process	-	0.004-0.348	0.04-0.33	0.1-0.4
	Manufacture and use of ammonium phosphate fertilizers	Dry product	-	-	0.22-0.42
		Storage	-	-	0.22-0.36
		Shipping	-	-	0.15-0.25
	Decommissioning of wet process plants and management of scrap	Decommissioning	-	-	<LLD-1.7
		Melting scrap	0.00003-0.02	0.3-0.99	0.0002-0.4
	Manufacture and use of nitrophosphate fertilizers	Nitrophosphate plant	0.3-0.6	0.006-0.3	0.34-0.74

활용되는 유연탄의 ^{238}U 및 ^{232}Th 계열 핵종, ^{40}K의 방사능 농도는 모두 등록기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 국내 인산염 산업의 인산 추출 산업에서 염화포타슘의 ^{40}K 핵종의 농도가 16 Bq g^{-1}으로 인산염 산업에서 가장 높은 방사능 농도를 가지는 것으로 나타났다. 보크사이트 및 이산화티타늄 산업체의 공정별 물질 및 공정부산물의 방사능 농도는 모든 핵종에 대해 등록기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 수처리 시설에서 조사된 수처리 필터에서 ^{238}U 계열 핵종의 최대 방사능 농도는 7.3 Bq g^{-1}로 등록기준 이상인 것으로 나타났다. 실리카퓸 유통 산업에서는 ^{238}U 계열 핵종의 방사능 농도가 1 Bq g^{-1}을 초과하였고, 가공 산업에서 ^{232}Th 계열 핵종의 방사능 농도가 1 Bq g^{-1}을 초과하였다. 포타슘 함유 물질 취급 산업에서는 포타슘화합물 생산, 비료 생산, 화학제품 생산, 식품첨가제 생산 산업에서 ^{40}K 핵종의 농도가 등록기준인 10 Bq g^{-1}을 초과하였다. 모나자이트 산업 중 세라믹볼 제조 산업을 제외한 산업체에서 ^{238}U 및 ^{232}Th 계열 핵종의 방사능 농도는 모두 등록 기준을 초과하였다. 저어콘 산업에서는 모든 산업에 대해 ^{238}U 계열 핵종의 최대 방사능 농도가 등록기준인 1 Bq g^{-1}을 초과하였으며, 용접봉 제조 산업, 타이어 보강재 제조 산업에서 ^{40}K 핵종 등록 기준인 10 Bq g^{-1}을 초과하였다.

Table 10, Fig. 2에 국내 NORM 산업 작업자 피폭방사선량을 나타내었다. 작업자 피폭방사선량은 외부피폭의 경우 최대 0.55 mSv y^{-1}인 것으로 나타났으며, 내부피폭의 경우 최대 0.38 mSv y^{-1}인 것으로 나타났다. 국내 인산염 및 이산화티타늄 산업체의

Table 9. Radioactivity concentration of NORM industry in Korea

Major industries	Material/Process		Radioactivity concentration (Bq g^{-1})		
			^{238}U series	^{232}Th series	^{40}K
Coal-fired power plant	Bituminous coal		0.002-0.02	0.003-0.021	0.014-0.08
	Fly ash		0.077-0.13	0.077-0.11	0.25-0.37
	Bottom ash		0.054-0.091	0.046-0.083	0.21-0.46
	Devulcanization gypsum		0.003-0.005	0.002-0.003	0.022-0.047
Phosphate industry	Extraction of phosphoric acid	Phosphate	0.093-1.1	0.00072-0.011	0.062-0.18
		Phosphogypsum	0.007-0.23	0.0014-0.0039	<MDA-0.024
		Potassium chloride	<MDA	<MDA	16
	Manufacture of fertilizer	Compound fertilizer	0.002-0.18	<MDA	5
Bauxite industry	Manufacture of cement	Fly ash	0.082	0.082	0.39
		Bauxite	0.34	0.39	0.095
		Cement	0.015-0.12	0.008-0.15	0.022-0.25
	Production of aluminium hydroxide	-	0.00001-0.00086	0.00013-0.00032	-
Water treatment	-		0.009-7.3	0.0027-0.094	0.031-0.085
TiO_2 industry	-		0.0015-0.12	0.0003-0.41	-
Silica fume industry	Transportation		>1	<1	-
	Weighting and mixing		<1	>1	-
Potassium industry	Transportation of potassium compound		-	-	-
	Production of potassium compound		0.008-0.19	0.011	2.1-19.9
	Production of fertilizer		-	-	2.1-16.6
	Production of chemical product		-	-	0.018-17.9
	Production of food additive		-	-	12.9-17.9
	Production of electronic product		0.007	-	0.065-9.9
Monazite industry	Monazite milling		0.0003-21.9	0.0008-213	<1.44
	Monazite transport		27.2	212	<0.78
	Manufacture of health pad		0.26-1.55	2.06-11.9	<0.14
	Manufacturing ceramic ball		0.023	0.061	0.79
Zircon industry	Manufacturing refractory		0.12-3.87	0.049-0.99	<0.18
	Production of welding rod		0.051-3.54	0.02-0.77	<11.1
	Invertment metal casting		0.2-3.58	0.089-0.68	0.12
	Manufacturing glaze		0.17-5.32	0.031-1.24	<4.67
	Manufacturing insulator		1.02-3.39	0.16-0.75	<0.017
	Manufacturing tire stiffener		<3.38	<0.74	<15.3

경우 연간 작업에 대한 피폭방사선량을 제시하고 있지 않았다. 국내 NORM 취급 산업별 공정에서 발생하는 피폭방사선량은 모두 1 mSv y^{-1}를 넘지 않는 것으로 나타났다.

4. 고 찰

본 연구에서는 국내·외에서 다루고 있는 NORM 취급 산업 및 규제기준을 조사하였고, NORM 산업체의 원료물질 또는 공정부산물로 인한 방사선학적 특성을 분석하였다. 국내 NORM 취급 산업의 경우 석탄화력발전소, 이산화티타늄 취급 산업, 저어콘 취급 산업 등 9가지 산업을 식별하였다. NORM 취급 산업체 원료물질 또는 공정부산물의 방사능 농도 및 작업자 피폭방사선량의 경우 NORM 산업의 원료물질 또는 공정별 작업 유형에 따라 상이하게 나타났다.

Table 10. Radiation dose of NORM industry in Korea

Major industries	Material/Process	Radiation dose (mSv y^{-1})		
		External	Internal	Total
Coal-fired power plant	-	0.000011-0.000053	0.06-0.19	-
Phosphate industry	-	-	-	-
Bauxite industry	Manufacturing of cement	-	-	-
	Production of aluminium hydroxide	0.04-0.46	Max: 0.054	-
Water treatment	-	0.000053-0.095	2.3×10^{-7}-6.9×10^{-6}	-
TiO_2 industry	-	-	-	-
Silica fume industry	Transportation	0.078	-	0.078
	Weighting and mixing	0.29	0.0012	0.29
Potassium industry	Transportation of potassium compound	0.00041-0.001	-	-
	Production of potassium compound	0.00091-0.43	3.92×10^{-6}-1.45×10^{-4}	-
	Production of fertilizer	0.0042-0.19	1.28×10^{-6}-1.17×10^{-4}	-
	Production of chemical product	0.00013-0.31	1.63×10^{-8}-8.65×10^{-5}	-
	Production of food additive	0.0031-0.36	0.000027-0.000051	-
	Production of electronic product	0.00024-0.0012	-	-
Monazite industry	Monazite milling	0.003-0.26	3.8×10^{-8}-0.38	0.003-0.64
	Monazite transport	0.04-0.09	-	0.04-0.09
	Manufacture of health pad	0.032-0.23	0.033-0.036	0.065-0.266
	Manufacturing ceramic ball	0.007	-	0.007
Zircon industry	Manufacturing refractory	0.01-0.33	1×10^{-7}-1.74×10^{-6}	-
	Production of welding rod	0.01-0.24	1×10^{-7}-6×10^{-6}	-
	Invertment metal casting	0.03-0.29	2×10^{-7}-9.6×10^{-6}	-
	Manufacturing glaze	0.08-0.55	2×10^{-7}-4.4×10^{-6}	-
	Manufacturing insulator	0.01-0.09	1.8×10^{-6}-4.5×10^{-6}	-

4.1. 국내 · 외 NORM 산업 규제 기준 비교 · 분석

IAEA, ICRP, EC에서 공통적으로 제시하고 있는 NORM 산업분야로는 석유 및 가스 생산 산업, 이산화티타늄 산업, 인산염 산업, 수처리 산업 등이 존재한다. 국외에서는 오일 및 가스 생산 산업을 포함하고 있는 국가가 8개로 가장 많았으며, 수처리 산업이 7개, 석탄화력발전소, 채광 및 채굴 산업을 6개 국가가 포함하여 주요 산업인 것으로 나타났다. 국외 NORM 산업은 국제기구에서 제시하고 있는 NORM 산업에 자국 산업 현황을 반영하여 제외 및 추가한 것으로 판단된다. 이에 따라 식별한 국내 NORM 산업 중 국제기구 및 국외에서 공통적으로 포함하고 있는 산업체는 석탄화력발전소, 인산염, 보크사이트, 이산화티타늄, 포타슘, 모나자이트, 저어콘 산업이 존재하며, 실리카퓸 취급 산업은 국내 산업 현황을 반영하여 추가되었다.

국내·외 NORM 산업에 대한 규제기준으로는 대부분의 국가에서 IAEA에서 제시하고 있는 방사능농도와 피폭방사선량 기반의 면제 및 해제기준을 채택하고 있는 것으로 나타났다. 하지만 캐나다의 경우 방사능 농도 기준이 아닌 방사능 농도를 환산한 유도작업한계(Derived Working Limit)를 통해 면제기준을 수립하였고, 영국과 이탈리아, 벨기에 등의 국가에서는 ^{238}U 및 ^{232}Th 계열 내 핵종별 방사능 농도기준을 상이하게 설정하였다. 피폭방사선량 측면에서 벨기에, 이탈리아 등이 면제 및 해제 기준으로 피폭방사선량 기준을 포함하였으며, 이탈리아의 경우 음용수 섭취를 고려한 피폭방사선량 기준을 선정하였다. 영국, 일본, 대한민국의 경우 방사능 농도 기준과 천연방사성물질의 방사능량을 기준으로 등록기준을 선정한 것으로 나타났다. 이는 자국 NORM 산업 특성 및 현황을 반영하여 국가별 상이한 규제기준을 채택한 것으로 판단된다.

4.2. 국내 · 외 NORM 산업 방사선학적 특성 비교 · 분석

국제기구 및 국내에서 제시하고 있는 NORM 산업체의 방사능 농도 및 피폭방사선량은 취급 물질과 공정, 작업 형태에 따라 매우 상이하게 나타났다. IAEA에서 제시한 NORM 산업의

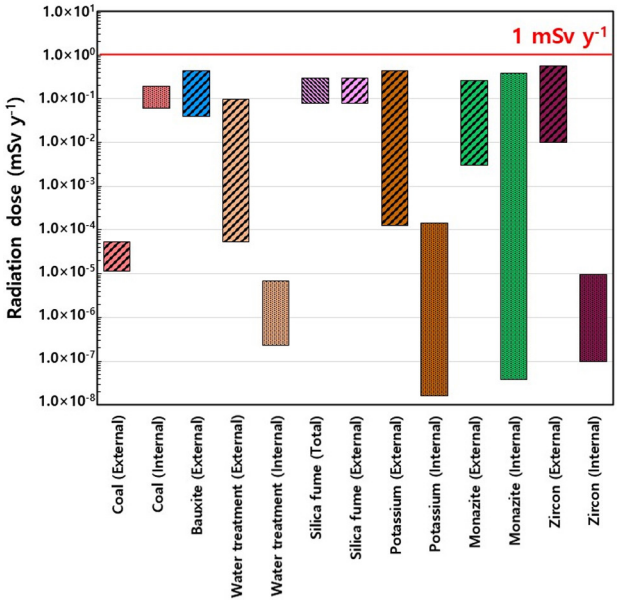

Fig. 2. Radiation dose of NORM industry in Korea

경우 면제 및 해제에 대한 방사능 농도 기준인 ^{238}U 및 ^{232}Th 계열 핵종 1 Bq g^{-1}과 ^{40}K 10 Bq g^{-1}을 초과한 산업이 다수 존재하였다. 이산화티타늄 산업의 황산염 공정의 경우 공정 제품에서의 방사능 농도는 1 Bq g^{-1} 미만이었지만, 공정부산물인 스케일의 방사능 농도는 1 Bq g^{-1}을 초과하는 것으로 나타났다. 국내 NORM 산업에서의 방사능 농도는 모나자이트 산업에서 최대가 나타났으며, 이는 모나자이트 물질 특성상 방사능 농도가 타 원료물질에 비해 가장 높기 때문인 것으로 판단된다. 이에 따라 같은 공정에서도 발생하는 원료물질 또는 공정부산물에 따라 방사능 농도에 차이가 존재하였으며, 취급 물질에 따른 안전관리 우선순위 및 관리 방안을 수립하여 차등적인 규제가 필요할 것으로 판단된다.

IAEA에서 제시하고 있는 NORM 산업 중 저어콘 산업의 지르콘 샌드 분쇄, 희토류 원소 산업의 중광물 모래 채광 및 선광, 이산화티타늄 산업의 염화물공정의 이산화티타늄 안료 생산 공정 등의 공정에서 피폭방사선량이 1 mSv y^{-1}를 초과하였으며, 취급 물질 및 공정에 따라 상이하게 나타났다. IAEA는 해당 산업체에 대해 허가, 신고, 등록 등의 적절한 안전관리 방안 제시하고 있다[32-34]. IAEA에서 제시된 산업 중 희토류 원소 산업의 중광물 모래 취급 산업에서 작업자 총 피폭방사선량이 7.9 mSv y^{-1}로 최대가 나타났다. 이는 취급하는 물질의 상태 및 작업형태에 영향을 받은 것으로 판단된다. 국내 NORM 산업체 작업자에 대한 피폭방사선량은 지르콘 내화물 제조 산업에서 0.55 mSv y^{-1}의 최대 외부피폭 방사선량이 나타났다. 따라서 국내 실정에 적합한 차등관리 방안 수립을 위해서는 국내 NORM 산업체 현황, 작업 공정 및 형태, 원료물질 또는 부산물의 방사선학적 특성 등을 종합적으로 고려하여야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내·외 NORM 취급 산업 규제 기준 및 방사선학적 특성을 분석하였다. 이를 위하여 첫 번째, 국제기구 간행물 또는 국가별 NORM 안전관리 규제지침 및 안전보고서를 통해 국내·외 NORM 산업 및 규제기준을 분석하였다. 두 번째, NORM 산업체에서 나타나는 원료물질 또는 공정부산물의 방사능 농도, 작업자에 대한 피폭방사선량을 분석하였다.

국제기구에서 제시하고 있는 NORM 산업은 11~16가지로 나타났으며, 국외 NORM 산업은 오일 및 가스 생산 산업, 수처리 산업, 석탄화력발전소 등이 주요 NORM 산업인 것으로 나타났다. 국내의 경우 모나자이트, 저어콘 산업 등 9가지 산업을 식별하였다. 국제기구에서는 NORM 산업에 대해 등록, 신고, 허가 등의 방식으로 차등관리 체계를 수립할 것을 권고하고 있으며, 해당 국가의 상황에 맞는 규제 방식을 채택할 것을 제시하고 있다. 국내 NORM 산업은 방사능 농도 및 취급량 기준의 등록을 통한 일괄적인 규제를 채택하고 있다. 반면 호주, 덴마크 등의 국가에서는 선별 평가 또는 안전성 평가를 통한 차등규제를 수행하고 있었으며, 캐나다 등의 국가에서는 피폭방사선량 기준을 구분하여 차등적인 규제체계를 수행하고 있는 것으로 나타났다.

IAEA에서 제시하고 있는 희토류, 이산화티타늄, 인산염, 저어콘 산업에서의 ^{238}U 및 ^{232}Th 계열 핵종의 방사능 농도는 대부분의 공정에서 면제 및 해제기준 이상으로 나타났다. 작업자 피폭방사선량 또한 대부분 1 mSv y^{-1}를 상회하는 것으로 나타났다. 국내 NORM 산업체 방사능 농도는 국내 모나자이트 산업 분쇄 공정에서 213 Bq g^{-1}으로 가장 높게 나타났으며, 인산염, 수처리, 모나자이트, 저어콘, 포타슘 산업체에서의 방사능 농도가 국내 NORM 등록기준 이상인 것으로 나타났다. 작업자 피폭방사선량의 경우 모두 1 mSv y^{-1} 미만인 것으로 나타났다.

본 연구결과, NORM 산업별 공정 및 취급 물질별로 방사능 농도와 피폭방사선량은 상이하게 나타났다. 이에 따라 국내 NORM 취급 산업 차등관리 방법론 개발 시 국내 NORM 산업 실정과 산업별 취급 물질 및 작업 유형에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구결과는 국내 NORM 취급 산업체 차등관리 방법론 개발을 위한 기반자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

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

참고문헌

1. IAEA. 2006. Assessing the Need for Radiation Protection measures in Work Involving Minerals and Raw Materials. IAEA Safety Report Series No. 49.
2. ICRP. 2019. Radiological protection from naturally occurring radioactive material (NORM) in industrial processes. ICRP Publication 142. Ann. ICRP 48(4).
3. Klaus Flesch, Rainer Gellermann. 2023. Regulation of NORM-industries regarding the Norwegians Pollution Control Act's application on radioactive pollution.
4. HERCA. 2021. Application of the concepts of exemption and clearance to the regulation of naturally occurring radioactive material (NORM) across HERCA countries.
5. KINS. 2014. Establishment of Technical Basis for Implementation on Safety Management of Natural Sorces. KINS/RR-1094.
6. Michalik B, Dvorzhak A, Pereira R, Lourenço J, Haanes H, Carlo CD, Nuccetelli C, Venoso G, Leonardi F, Trevisi R, Trotti F, Ugolini R, Pannecoucke L, Blanchart P, Sanchez DP, Real A, Escribano A, Fevrier L, Kallio A, Skipperud L, Jerome SM, and Popic JM. 2023. A methodology for the systematic identification of naturally occurring radioactive materials (NORM). *Science of the Total Environment*, 881. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163324.
7. Woo ZH. 2022. Analysis on the national approaches to Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) regulation. KINS/RR-2295.
8. Woo ZH. 2022. A case study on the country-specific graded approaches to NORM regulation. KINS/RR-2329.
9. KINS. 2016. Establishment of Technical Basis for Implementation on Safety Management for Radiation in the Natural Environment. KINS/ER-337.
10. IAEA. 2003. Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. IAEA Safety Report Series No. 34.
11. EC. 2000. Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption Part 1. EC RP 122.
12. IAEA. 2021. Management of Residues Containing Naturally Occurring Radioactive Material from Uranium Production and Other Activities. IAEA Specific Safety Guide No. SSG-60.
13. IAEA. 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3.
14. IAEA. 2018. Occupational Radiation Protection. IAEA General Safety Guide No. GSG-7.
15. ICRP. 2007. Scope of Radiological Protection Control Measures. ICRP Publication 104. Ann. ICRP 104(5).
16. EURATOM. 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM. European Atomic Energy Community.
17. EC. 1999. Reference levels for workplaces processing materials with enhanced levels of naturally occurring radionuclides. EC RP 95.
18. EC. 1999. Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where materials are processed which contain enhanced levels of naturally-occurring radionuclides. EC RP 107.
19. Health Canada. 2014. Canadian Guidelines for the Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM).
20. ARPNSA. 2008. Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM). Radiation Protection Series Publication No. 15.
21. Vanmarcke H, Paridaens J, Froment P, Cauteren JV, Timmermans C, Cosemans C, and Sassi F. 2008. Identification and characterization of NORM industries in Belgium.
22. Act on Protection against the Harmful Effects of Ionising Radiation. 2017. Radiation Protection Act.
23. BEIS. 2018. Scope of and exemptions from the radioactive substances legislation in England, Wales and Northern Ireland. Guidance document.
24. Trevisi R, Ampollini M, Bogi A, Bucci S, Cldognetto E, Verde GL, Leonardi F, Luzzi L, Nuccetelli C, Peroni I, Picciolo F, Pratesi G, Trotti F, Ugolini R, Venoso G, and Pugliese M. 2023. Radiological Protection in Industries Involving NORM: A (Graded) Methodological Approach to Characterize the Exposure Situations. *Atmosphere*, **14**(4):635. https://doi.org/10.3390/atmos14040635.
25. MEXT. 2009. Guideline for Ensuring Safety of Raw Materials and Products Containing Uranium or Thorium.
26. RSA. 2023. Regulatory control of naturally occurring radioactive material (NORM) in the Nordic countries. Nordic Radiation and Nuclear Safety Series No. 03.
27. KINS. 2017. Investigation and Analysis of Actual State of Safety Management for Radiation in the Natural Environment of 2016.
28. KINS. 2018. Investigation and Analysis of Actual State of Safety Management for Radiation in the Natural Environment of 2017.
29. KINS. 2019. Investigation and Analysis of Actual State of Safety Management for Radiation in the Natural Environment, 2018.
30. KINS. 2020. Investigation and Analysis of Actual State of Safety Management for Radiation in the Natural Environment of 2019.
31. KINS. 2021. Investigation and Analysis of Actual State of Safety Management for Radiation in the Natural Environment of 2020.
32. IAEA. 2007. Radiation Protection and NORM Residue Management in the Zircon and Zirconia Industries. IAEA Safety Report Series No. 51.
33. IAEA. 2011. Radiation protection and NORM residue management in the production of rare earths from Thorium containing minerals, IAEA Safety Report Series No. 68.
34. IAEA. 2012. Radiation protection and NORM residue management in the titanium dioxide and related industries, IAEA Safety Report Series No. 76.
35. IAEA. 2013. Radiation protection and management of NORM residues in the phosphate industry, IAEA Safety Report Series No. 78.
36. KINS. 2013. Development of radiological safety inspection requirements for naturally occurring radioactive materials used for industry and building. KINS/HR-1317.
37. KINS. 2013. Development of dosimetry method using cascade impactor and particle property data. KINS/HR-1271.
38. Kim HI. 2017. Study of the NORM Safety Management for Major Domestic NORM Industry.
39. KINS. 2017. Analysis of occupational exposure to workers at NORM industries in Korea. KINS/HR-1617.
40. KINS. 2017. Development of safety management technology for decommissioning of industrial facilities generating large scale NORM residues. KINS/HR-1631.
41. KINS. 2016. Analysis of radiological safety assessment and management for industry using K-40 and other naturally occurring radioactive materials. KINS/HR-1521.
42. KINS. 2016. Development of radiological safety evaluation methods for industry using monazite and other naturally occurring radioactive materials. KINS/HR-1456.
43. KINS. 2015. Development of radiological safety inspection requirements for naturally occurring radioactive materials used for mineral and oil industry. KINS/HR-1386.