Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 2, pp. 147-157, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.2.147

Original article

국내 NORM 취급 산업 차등관리 방안 적용을 위한 규제효용성 평가 방법론 및 사례 분석

최정훈[1] · 유승범[1] · 한창희[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Regulatory Impact Assessment Methodology and Case Analysis for the Application of Graded Approach for NORM Industries in Korea

Jung Hun Choi[1], Seung Beom Yoo[1], Chang Hee Han[1], and Kwang Pyo Kim[1,*]

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

ABSTRACT International organizations such as the IAEA and ICRP recommend that the impact of regulations on NORM industries should be evaluated prior to their introduction to determine the level of regulation. Regulatory impact assessment should be conducted when applying graded approach for NORM industries in Korea. Therefore, it is necessary to analyze the regulatory impact assessment methodology and cases in order to evaluate regulatory impact in accordance with regulatory characteristics and socio-economic characteristics. The objective of this study is to analyze regulatory impact assessment methodologies and evaluation cases for the application of graded approach for NORM industries in Korea. The methodologies and cases of regulatory impact assessment were examined from the safety reports of international organizations, domestic and foreign institutions. The methodologies were analyzed by the characteristics of the factors used. The cases of regulatory impact assessment were analyzed by the characteristics of the considered protection options. Considering the characteristics of the NORM industries in Korea, the cost-benefit analysis methodology, which can evaluate the impact of regulations for a single confirmed option, is considered to be the most appropriate evaluation methodology. The results of this study can be used as a basis for evaluating the impact of regulations when applying graded approach for NORM industries in Korea.

Key words: NORM, Graded approach, Regulatory impact assessment, Cost-benefit analysis

1. 서 론

규제효용성 평가(Regulatory Impact Assessment; RIA)란 규제로 인해 발생하는 사회·경제적 이익 및 기업과 개인의 부담 등을 체계적으로 검토하여, 비용과 편익이 균형을 이루는 최적의 규제 대안을 도출하기 위해 수행되는 의사결정 지원 도구이다[1]. 새로운 규제를 도입하거나 기존 규제가 강화된 상황에서 규제효용성 평가가 수행되며, 규제대상의 사회·경제적 환경특성에 따라 규제효용성 평가 방법론은 매우 상이하게 나타난다[2-4]. 천연방사성핵종 함유물질(Naturally Occurring Radioactive Material; NORM)은 국내에서 생활주변방사선 안전관리법으로 관리되고 있으며, 이에 대한 규제의 변경 시 규제효용성 평가가 수행되어야 한다. 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA) 및 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection; ICRP)에서는 NORM 산업체에 대하여 규제의 도입 전에 규제효용성 평가를 실시하여 규제 수준을 결정할 것을 권고하였다[5,6].

이와 관련하여 IAEA에서는 NORM 폐기물의 재활용과 처분에 관한 규제방안의 선택 시 비용-편익 분석 절차의 수행을 권고하였다[7]. ICRP에서는 방사선 방호의 최적화를 수행하기 위하여 비용-편익 분석을 활용하는 방안을 제시하였다[8]. 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency; EPA)에서는 우라늄 제련 폐기물, 음용수 방사성물질, 실내 라돈 등의 규제 대안의 규제 효용성을 정량화하여 비교하였다[9-11]. 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission; NRC)에서는 저준위 방사성폐기물의 규제 면제 여부를 검토하며 방사선 영향과 사회·경제적 영향을 비교하여 제시하였다[12]. 영국 사업·에너지·산업전

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 16 May 2025 **Revised** 24 June 2025 **Accepted** 24 June 2025

략부(Department of Business, Energy and Industrial Strategy; BEIS)는 NORM 폐기물 관련 규제 기준 상향에 따른 산업계 비용 절감 효과를 평가하였다[13]. 호주 방사선 방호 및 핵 안전기관(Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency; ARPANSA)에서는 NORM 산업에 규제가 항상 필요한 것은 아니라는 전제하에 규제의 필요성을 평가하며, 규제를 도입하는 경우의 비용과 편익을 다른 대응책들과 비교해야 한다는 규제효용성 평가 기반을 마련하였다[14,15]. 방사선 방호 연구 통합을 위한 유럽 공동 프로그램(European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research; EJP-CONCERT)에서는 NORM 규제 도입 전 사회·경제적 효과를 정량화하는 방안을 제시하였다[16]. Smith 등은 석유·가스 분야 NORM 규제 도입에 따른 연간 비용을 분석하였으며, 규제 도입 전 비용-편익 분석의 수행을 강조하였다[17]. Tomasko 등은 기술적 타당성 및 경제적 타당성을 고려하여 NORM 폐기물의 효율적인 처분 방안을 연구하였다[18]. Veil 등은 NORM 폐기물의 처분에 관하여 다양한 사업자가 제출한 단가를 비교 분석하여, 가격대별 효능을 간접적으로 비교하였다[19]. Zeevaert 등은 체르노빌 사고 오염지역에 대한 복원전략 선택의 효용성을 정량적 및 정성적으로 평가하였다[20]. Rosabianca Trevisi 등은 가정 및 직장의 라돈 피폭 저감 정책들에 대한 규제의 효용성을 비교하여 비용 대비 높은 건강편익을 제공하는 라돈 농도 기준을 도출하였다[21].

이처럼 NORM 취급 산업체에 대한 규제 체계의 효용성 평가를 강조한 보고서 및 연구들은 다수 존재하며, 이를 바탕으로 실제 사례에 적용한 연구 또한 다수 진행되었다. 하지만 차등관리 방안의 관점에서 국내의 NORM 취급 산업체에 대한 규제효용성 평가 방법론 및 사례 관련 연구는 부족한 실정이다. 또한 NORM 취급 산업체에 대한 차등관리 방안 적용 시 기존 규제 체계 대비 사회·경제적으로 미치는 영향을 분석하는 효용성 평가가 수행되어야 한다. 이때 규제대상의 사회·경제적 환경특성에 따라 규제효용성 평가 방법론은 매우 상이하게 나타나며 사용되는 인자 또한 상이하게 나타난다. 이에 따라 규제특성 및 사회·경제적 특성에 부합하는 규제효용성 평가를 위해서는 규제효용성 평가 방법론 및 사례에 대한 분석이 선행되어야 한다.

본 연구의 목적은 국내 NORM 취급 산업체의 차등관리 방안 적용을 위한 최적의 규제효용성 평가 방법론을 분석하는 것이다. 이를 위해 먼저 국제기구 및 국내·외에서 제시한 규제효용성 평가 방법론을 조사 및 분석하였다. 그리고 해당 방법론이 활용된 규제효용성 평가 사례를 조사하여 평가 방법론이 사용되는 사례의 특성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 규제효용성 평가 방법론 조사

본 연구단계에서는 국제기구 및 국내·외에서 제시하는 규제효용성 평가 방법론을 조사하기 위하여 국제기구와 각 국가별 문헌, 보고서, 성명서 및 지침서를 조사하였다. 해당 보고서 및 지침서에서 제시하는 규제효용성 평가 방법론의 절차 및 주요 고려사항에 대하여 중점적으로 조사하였다.

2.1.1. 국제기구 규제효용성 평가 방법론 조사

IAEA에서 제시하고 있는 규제효용성 평가 방법론은 IAEA Safety Series 67 문헌을 통해 조사하였다. 해당 문헌에서 제시하는 IAEA 모델 기반 금전계수(α) 산출 방법론은 방사성물질의 방출에 의한 건강상의 손해비용을 산출하는 대표 모델로서 현재까지 활용되고 있다. 해당 방법론의 가정사항 및 평가 인자들을 조사하였다[22].

ICRP에서 제시하고 있는 규제효용성 평가 방법론은 ICRP 55 문헌을 통해 조사하였다. 해당 문헌에서 제시하는 ICRP 모델 기반 비용-편익 분석 방법론, ICRP 모델 기반 다속성 효용분석 방법론, ICRP 모델 기반 비용-효능 분석 방법론을 조사하였다[23].

2.1.2. 국외 규제효용성 평가 방법론 조사

미국의 보건물리학회(Health Physics Society; HPS)에서 제시하고 있는 규제효용성 평가 방법론은 HPS의 일반인 선량한도와 관련한 성명서를 통해 조사하였다. 해당 성명서에서 제시하는 치명적 암에 의한 수명손실, 비치명적 손실 및 유전결함에 의한 손실의 금전계수(α)를 산출하는 HPS 방법론의 평가 절차를 조사하였다[24,25].

영국의 방사선방호원(National Radiological Protection Board; NRPB)에서 제시하고 있는 규제효용성 평가 방법론은 NRPB R-129 보고서를 통해 조사하였다. 해당 보고서에서 제시하는 방사선에 의한 손실 및 그에 따른 치료비용을 산출하여 단위집단선량의 금전계수(α)를 사용하는 NRPB 방법론의 인자들을 조사하였다[26].

2.1.3. 국내 규제효용성 평가 방법론 조사

국내 국무조정실에서 제시하고 있는 규제효용성 평가 방법론은 규제영향분석서 작성지침서를 통해 조사하였다. 해당 지침서에서는 신설 및 강화된 규제로 인하여 발생하는 추가적인 비용 또는 편익의 증가분을 계산하여 규제의 효용성을 평가하는 사회적 비용-편익 분석 방법론을 제시하고 있다. 사회적 비용-편익 분석 방법론 내 영향 집단의 비용, 편익, 순비용 등의 도출 방안과 세부 절차에 대해 조사하였다[27].

2.2. 규제효용성 평가 사례 조사

본 단계에서는 규제효용성 평가 사례를 조사하기 위하여 국제기구 및 각 국가별 보고서 및 지침서에서 제시한 규제 방호방안의 사례를 조사하였다. 앞서 조사한 일부 규제효용성 평가 방법론을 활용한 평가 사례의 절차 및 최적의 방안으로 도출된 사례에 대하여 중점적으로 조사하였다.

Table 1. Radiation risk assumptions from the IAEA Safety Series 67 model

Assumptions	Value
Average loss of healthy life from one case of radiation-induced lethal cancer	15 yerars
Loss resulting from one case of a hereditary disease that causes a severe handicap	30 years
Risk factor for induction of fatal cancer	1.25×10^{-2} (man−Sv)$^{-1}$
Risk factor for induction of severe hereditary harm in all generations	0.8×10^{-2} (man−Sv)$^{-1}$

by IAEA Safety Series 67

2.2.1. 국제기구 규제효용성 평가 사례 조사

ICRP에서 제시하고 있는 규제효용성 평가 사례는 ICRP 55 문헌을 통해 조사하였다. 해당 사례에서는 우라늄 광산 작업자들을 방호하기 위한 환기설비 설치 규제에 대해 평가했다. 평가 방법론은 ICRP 모델 기반 비용-편익 분석 방법론, ICRP 모델 기반 다속성 효용분석 방법론, ICRP 모델 기반 비용-효능 분석 방법론을 사용했으며, 평가 수행 절차 및 최적의 방호방안 도출 과정에 대해 조사하였다[23].

2.2.2. 국외 규제효용성 평가 사례 조사 조사

미국 에너지부(Department of Energy; DOE)에서 제시하고 있는 규제효용성 평가 사례는 DOE-HDBK-1215-2014 문헌을 통해 조사하였다. 해당 사례에서는 원자력관계시설에 임의의 시스템 설치의 방사선방호 규제에 대해 평가했다. 평가 방법론은 ICRP 모델 기반 다속성 효용분석 방법론을 사용했으며, 속성, 가중치 및 효용점수 산정 방안을 조사하였다[28].

덴마크 환경영향평가연구소(Environmental Assessment Institute; EAI)에서는 건물에서 발생하는 라돈의 저감을 위한 대안 정책에 대해 평가했다. 평가 방법론은 비용-편익 분석 방법론을 사용했으며, 순비용의 도출에 따른 방호방안의 적합성 여부를 조사하였다[29].

2.2.3. 국내 규제효용성 평가 사례 조사

국내 원자력안전위원회에서 제시하고 있는 규제효용성 평가 사례는 규제영향분석서를 통해 조사하였다. 해당 사례에서는 항공승무원의 안전조치 강화 규제 및 방사선발생장치 판매 시 주의사항 부착 규제에 대해 평가했다. 평가 방법론은 사회적 비용-편익 분석 방법론을 사용했으며, 비용 및 연간균등순비용의 정량적인 평가와, 규제의 시행에 따른 정성적인 평가의 비교 방안에 대해 조사하였다[30,31].

3. 결 과

3.1. 규제효용성 평가 방법론 조사

3.1.1. 국제기구 규제효용성 평가 방법론 조사

Table 1에 IAEA 모델 기반 금전계수(α) 산출 방법론에서 고려하는 방사선 위험 가정사항을 기반으로 1 man−Sv의 집단선량으로 인한 수명손실을 수식 (1)과 같이 제시하였다. 방사선으로 인한 위험 예상수명손실에 인당 국민 총생산(I) 및 인당 추가 의료서비스 비용(C)을 고려하여 방사성물질의 방출에 의한 건강상의 경제손실 금전가(α)를 수식 (2)와 같이 제시하였다.

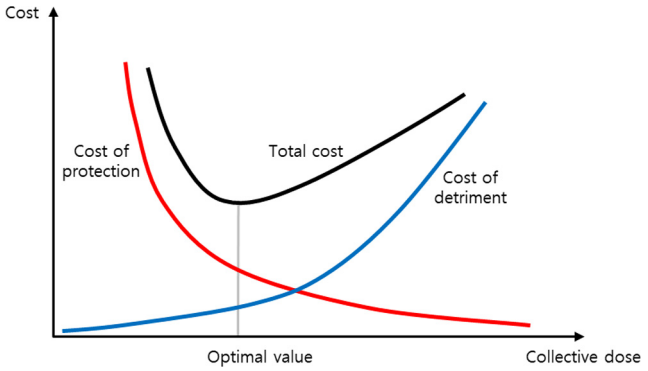

Fig. 1. Overview of cost-benefit analysis methodologies

$$(1.25\times10^{-2}\times15)+(0.8\times10^{-2}\times30)\approx0.4 \text{ year (man−Sv)}^{-1} \quad (1)$$

$$\alpha = 0.4\times I + C \quad (2)$$

α: 방사성물질의 방출에 의한 건강상의 경제손실[US $ (man−Sv)$^{-1}$]
0.4: 방사선으로 인한 위험 예상수명손실[year (man−Sv)$^{-1}$]
I: 인당 국민 총생산[US $ (man−year)$^{-1}$]
C: 인당 추가 의료 서비스 비용[US $ (man−Sv)$^{-1}$]

비치사암에 의한 인당 추가 의료 서비스 비용(C)의 경우 치사암에 비해 미미하기 때문에 무시되는 것으로 나타났다. 인당 국민 총생산 인자(I) 및 인당 추가 의료 서비스 비용(C)은 국가별로 상이하다. 이에 따라 IAEA 모델 기반 금전계수(α) 산출 방법론은 각 국가별 사회·경제적 환경특성에 부합하는 수명손실의 금전가를 도출하는 평가에 사용되는 것으로 분석하였다.

Fig. 1에 ICRP 모델 기반 비용-편익 분석 방법론의 방호비용과 손해비용을 합한 총비용에 대한 최적해의 관계를 나타내었다. ICRP 모델 기반 비용-편익 분석 기법은 방호비용과 손해비용의 합이 최소인 방안이 가장 적절하다고 판단하는 의사결정 보조기법으로 나타났다. 방호비용은 방안의 수행 시 필요한 비용이며,

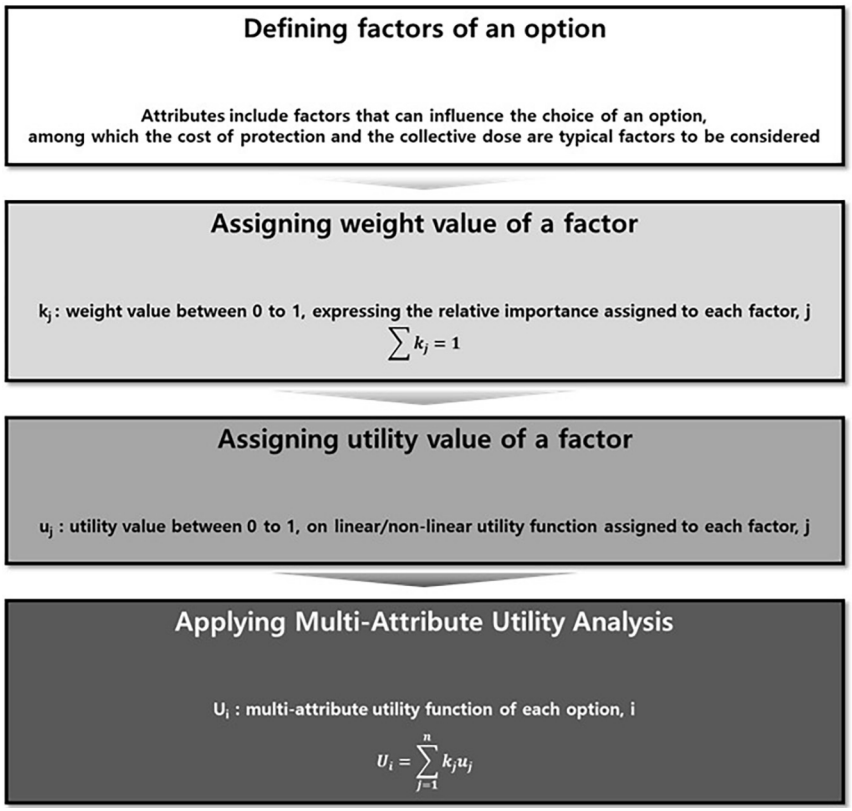

Fig. 2. Procedures for multi-attribute utility analysis

손해비용은 방안의 실행 후 피폭자가 받는 선량을 비용으로 환산한 값으로 제시되었다. 각 방안의 방호비용과 손해비용의 산정 값을 더한 결과를 나열하여 산정 값이 가장 작은 방안을 최종방안으로 선정하였다.

Fig. 2에 ICRP 모델 기반 다속성 효용분석 방법론의 절차를 나타내었다. ICRP 모델 기반 다속성 효용분석 기법은 방안에서 고려해야 하는 인자가 많거나 비용으로 정량화하기 어려운 정성적인 인자가 많은 경우에 적용하는 의사결정 보조기법으로 나타났다. 각 인자의 중요도를 나타내는 가중치 계수(k)를 활용하여 각 방안의 효용을 점수로 도출하였다. 최종적으로 총 효용의 값이 가장 큰 방안을 최적의 방안으로 선정하였다.

Fig. 3에 비용-효능 분석 방법론의 예시를 나타내었다. ICRP 모델 기반 비용-효능 분석 기법은 방안의 집합에서 비효율적인 방안을 제거하고 남은 방안을 비교하여 우위를 부여하는 의사결정 보조기법이다. 해당 방법론은 비용과 집단선량과 같은 오직 두 속성만 고려되어 다른 정량적인 의사결정 보조기법에 비해 효용성 평가의 수행에 있어서 비교적 단순한 방안으로 나타났다. 두 속성을 축으로 한 좌표계 위에 각 방호방안을 점으로 표시하고, 이들 점을 곡선으로 연결하여 비용-효능 곡선 상에서 대안 간 우위를 비교 및 평가하였다.

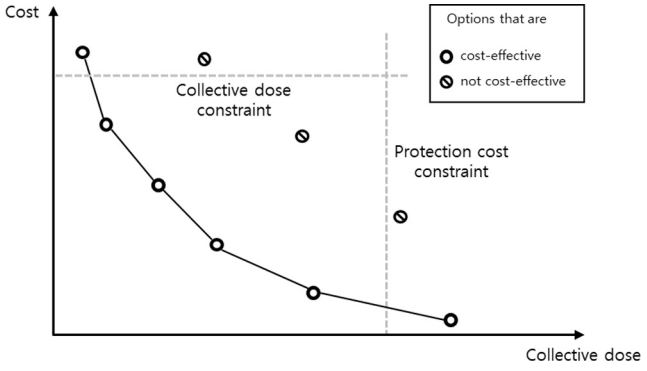

Fig. 3. A typical cost-effectiveness curve

3.1.2. 국외 규제효용성 평가 방법론 조사

미국의 HPS 방법론은 단위선량으로 인한 예상 손실을 ICRP 60의 자료를 기반으로 수식 (3)과 같이 제시하였다.

$$\alpha = LLE_{fatal\ cancer} \times fatal\ risk \times 365 \times 1.5 \times I \times k \approx \$2{,}000 \sim \$4{,}000\ Sv^{-1} \quad (3)$$

α: 예상 손실 비용 ($ Sv^{-1})

$LLE_{fatal\ cancer}$: 치사암으로 인한 기대수명손실(15 years)

fatal risk: 명목위험계수(0.05 Sv^{-1})
365: 환산계수(365 days $year^{-1}$)
1.5: 비치명적 손실 및 유전결함에 의한 손실의 합산
I: 1992년 기준 미국인의 개인당 평균 국민생산($50 day^{-1})
k: 사회조사 기반 일반적 상황에서의 총생산량의 투자 가능 비율(0.1~0.2)

비치명적 손실과 유전결함에 의한 손실 또한 ICRP 60의 명목위험계수를 활용하며, 치명적 암에 의한 수명손실의 50%로 가정하여 합산하였다. 이를 기반으로 단위선량으로 인한 손해를 정량적으로 나타내었다. 해당 방법론을 사용하여 평가할 경우에는 인자 *I* 및 *k*를 각 국가별 사회·경제적 상황에 맞게 적절히 고려하여 평가해야 할 것으로 판단된다.

Table 2에 영국의 NRPB 방법론에서 고려하는 인자 및 가정사항을 나타내었다. 해당 방법론은 치사암 및 비치사암에 의한 비용을 총 4개의 인자로 구분하여 금전가로 산출하는 것으로 나타났다. 해당 4가지 인자의 금전가를 합산하여 단위집단선량의 금전계수(α)를 수식 (4)와 같이 제시하였다.

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 \quad (4)$$

α_1: 유전적 손상에 대한 예상 손실비용[ECU (man−Sv)$^{-1}$]
α_2: 비치사암으로 인한 예상 손실비용[ECU (man−Sv)$^{-1}$]
α_3: 조기사망으로 인한 예상 손실비용[ECU (man−Sv)$^{-1}$]
α_4: 방사선유발 암에 대한 예상 치료비용[ECU (man−Sv)$^{-1}$]

3.1.3. 국내 규제효용성 평가 방법론 조사

Table 3에 국내 국무조정실에서 제시하는 규제영향분석서에 포함되어야 하는 사회적 비용-편익 분석의 정량적 인자 항목을 나타내었다. 사회적 비용-편익 분석 방법론이란 피규제자 집단 및 피규제자 이외 사회전체에 나타나는 규제영향을 분석하는 방법론으로 제시되었다. 서로 다른 시점에서 발생하는 비용과 편익을 할인하여 현재가치로 환산하는 비율인 할인율은 예비타당성 조사

Table 2. NRPB Methodology Factors and Assumptions

Factors considered	Assumptions
Expected cost of hereditary detriment	- Includes the costs of both medical care and the loss of economic output due to morbidity and mortality
Expected loss of output from non-fatal cancers	- Each cancer would result in the loss of a year's economic output
Expected loss of output from premature death	- Expected number of cancers arising from a collective dose of 1 man-Sv is uniformly distributed over the whole population - Population was divided into several age cohorts - The number of cancers expected to appear after specified time periods were calculated for both sexes using radiation induced cancer risk models and UK Life Tables, taking into account competing causes of death
Expected medical expenditure on induced cancers	

by NRPB R-129

Table 3. Social Cost-Benefit Analysis Table

Analysis Base Year	Regulatory Implementation Year	Analysis period (years)	Discount Rate (%)	Unit
-[a)]	-[a)]	-[a)]	4.5	1 million KRW Current Value
Regulatory Alternative:				
Influenced Group		Cost	Benefits	Net Cost
Unregulated Businesses · Small Businesses	Direct	-[a)]	-[a)]	-[a)]
	Indirect	-[a)]	-[a)]	-[a)]
Unregulated public		-[a)]	-[a)]	-[a)]
Non-Regulated Businesses·Small Businesses		-[a)]	-[a)]	-[a)]
Non-regulated public		-[a)]	-[a)]	-[a)]
Government		-[a)]	-[a)]	-[a)]
Total		-[a)]	-[a)]	-[a)]
Net Cost to Business		-[a)]	Annual Equalized Net Cost	-[a)]

a) need to be considered
by Regulatory Impact Analysis Guidelines

에서 사용되는 사회적 할인율인 4.5%를 적용한다. 이를 고려하여 항목별 산출공식을 통해 비용을 산정한 이후, 연간균등순비용을 수식 (5)와 같이 제시하였다. 최종적으로 순비용과 사회적 편익의 비교를 통한 규제의 타당성을 파악하는 것으로 나타났다.

$$\frac{CV_{y_0}(1+r)^{k+1}}{\frac{1+r}{r}\times\left\{1-\left(\frac{1}{1+r}\right)^{n}\right\}} \quad (5)$$

CV_{y_0} : 분석시점(y_0) 기준 순비용현재가치 총합
r: 할인율(4.5%)
n: 분석대상기간
k: 규제시행연도(분석대상기간 첫째 연도)에서 분석 기준시점 연도(y_0)를 차감한 값

3.2. 규제효용성 평가 사례 조사

3.2.1. 국제기구 규제효용성 평가 사례 조사

Table 4에 ICRP 55에서 제시하고 있는 우라늄 광산 작업자들의 방호를 위한 환기설비 설계 사례의 속성과 정량화한 값을 나타내었다. 해당 사례에서는 17명의 광부 개인선량의 분포를 광산 작업위치에 따라 피폭이 가장 높은 순서대로 그룹 I, II, III을 설정하였다. 또한 방호방안 1에서 방호방안 5로 갈수록 환기 시스템의 공기 유량 및 방호비용이 증가하는 것으로 설정하였다.

Table 5에 해당 사례에 대하여 비용-편익 분석을 수행한 결과를 나타내었다. 해당 사례에서는 금전계수 α값을 $20,000 (man-Sv)$^{-1}$로 설정하였다. 비용-편익 분석에 기초하면 방호방안 1이 최적해로 나타났다. 하지만 그룹 I의 평균선량은 작업자에 대한 선량한도인 50 mSv에 근접하므로 운영상 유연성을 제공하기 위해서는 방호방안 2가 선택될 수 있는 것으로 나타났다.

Table 6에 동 사례에 대하여 다속성 효용분석을 수행한 결과를 나타내었다. 해당 사례에서는 비용-편익 분석 방법론과 비교하기 위하여 여러 속성 중 방호비용 및 집단선량만을 속성으로 고려하였으며 각각의 가중치 계수(k)는 방안의 방호비용 범위 및 집단선량 범위를 고려하여 0.77 및 0.23으로 도출되었다. 선형 효용함수에 따른 효용점수와 가중치를 곱한 가중된 효용을 더하여 총 효용을 도출하였다. 최종적으로 총효용이 가장 높은 방호방안 1이 최적의 방안으로 평가되었다.

Fig. 4에 동 사례에 대하여 비용-효능 분석의 두 속성인 연간 방

Table 4. Data for the options considered in the uranium mine example

Factors			Protection option				
			1	2	3	4	5
Annual Protection ($)			10,400	17,200	18,500	32,200	33,500
Annual collective dose (man-Sv)			0.561	0.357	0.335	0.196	0.178
Annual average dose to workers in group	Group I	Individual	40.8	28.4	26.0	17.5	15.8
		Collective	0.163	0.114	0.104	0.070	0.063
	Group II	Individual	34.5	22.3	21.0	12.6	11.3
		Collective	0.138	0.089	0.084	0.050	0.045
	Group III	Individual	28.9	17.1	16.3	8.4	7.8
		Collective	0.260	0.154	0.147	0.076	0.070
Discomfort from ventilation			No problems	Slight	Slight	Severe	Difficult to work

by ICRP 55

Table 5. The cost-benefit analysis for the options considered in the uranium mine example

Protection options	Annual protection cost X ($)	Annual detriment cost Y ($)	Total annual cost X+Y ($)
1	10,400	11,200	21,600*
2	17,200	7,100	24,300
3	18,500	6,700	25,200
4	32,200	3,900	36,100
5	35,500	3,600	39,100

α=$20,000 (man-Sv)$^{-1}$
* best protection option
by ICRP 55

Table 6. A multi-attribute utility analysis for the two factors in the cost-benefit analysis

Protection options	Annual protection cost X ($)	Annual collective dose S (man-Sv)	Partial utilities		Utility
			u(X)	u(S)	
1	10,400	0.561	1	0	0.77*
2	17,200	0.357	0.729	0.533	0.68
3	18,500	0.335	0.677	0.590	0.66
4	32,300	0.196	0.131	0.953	0.32
5	33,500	0.178	0	1	0.23

k(X)=0.77, k(S)=0.23
* best protection option
by ICRP 55

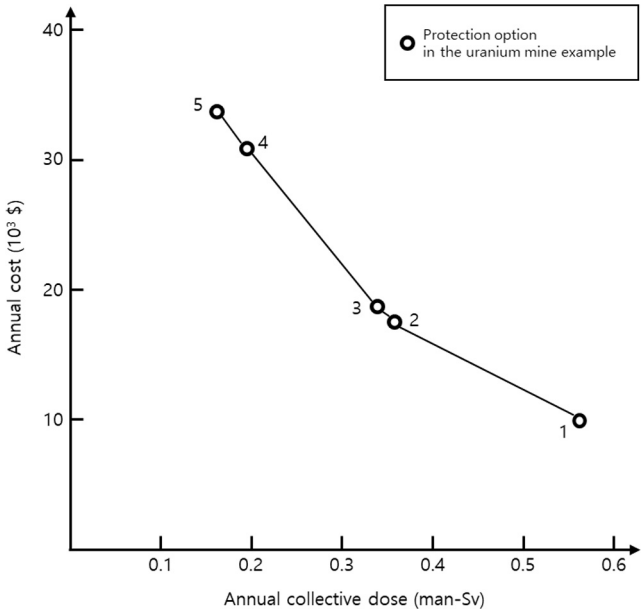

Fig. 4. The cost-effectiveness curve for the five options considered in the uranium mine example

호비용 및 연간 집단선량으로 평가한 비용-효능 곡선을 나타내었다. 우라늄 광산 예시에서 각 방호방안들의 자료는 중간값이 없이 별개로 분리되어 있지만 각 방호방안들은 연속적인 변수를 포함한 것으로 가정하고 선을 이어서 나타내었다. 비용-효능 곡선상의 방호방안들은 방호비용제약치 및 선량제약치 등의 특정 기준을 설정하여, 방호방안 1부터 5 중 특정 환경 및 상황에 부합하는 최적의 방안을 선택하는 것으로 나타났다.

3.2.2. 국외 규제효용성 평가 사례 조사

Table 7에 미국 DOE-HDBK-1215-2014 문헌에서 제시하고 있는 원자력관계시설 임의의 시스템 설치 사례에 대하여 다속성 효용분석 방법을 적용한 결과를 나타내었다. 해당 사례에서는 미국의 규제기관에서 요구하는 결정집단 내 최대개인 혹은 대표인에 대한 선량기준인 0.25 mSv $year^{-1}$ 및 기체 유출물에 대한 선량기준인 0.1 mSv $year^{-1}$를 기반으로 평가하였다. 하나의 행위가 선량한도에 근접할 정도로 평가되는 것은 적절하지 않은 사례라 평가하여 선량 조건에 따라 효용점수를 차등적으로 선정하였다. 결과적으로, 총효용 점수가 가장 높은 방호방안 3이 최적의 방안으로 평가되었다.

Table 8에 덴마크 EAI에서 수행한 건물에서 발생하는 라돈의 저감을 위한 대안 정책 사례의 비용-편익 분석 방법을 적용한 결과를 나타내었다. 덴마크의 라돈 저감을 위한 정책 사례에서 덴마크인의 생애 라돈 호흡량을 50 Bq m^{-3}으로 가정하였을 때, 매년

Table 7. Multi-attribute utility analysis in the case of facility installation of nuclear power related facilities

Protection options	Factor (weight)					Score
	Public Protection (0.4)	Worker Protection (0.25)	Environmental/ Cultural Resources (0.15)	Costs (0.1)	Schedule (0.1)	
1	Rejected	1.0	0.5	1.0	1.0	Rejected
2	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	0.725
3	1.0	0.75	1.0	0.5	0.5	0.837*
4	1.0	1.0	1.0	Rejected	Rejected	Rejected
5	0	1.0	0.5	1.0	1.0	0.5

* best protection option
by US DOE-HDBK-1215-2014

Table 8. Cost-benefit analysis of radon remediation program in Denmark

Classification of radon remediation program		Value (million €)
Cost	Test to measure the radon level	-20
	Investment and reinvestment	-118
	Operating expenditures	-3
Benefit	Value of preventing statistical fatalities	+76
	Cost of illness	+3
Net present value		-62

by Denmark Environmental Assessment Institute

Table 9. Enhanced aircrew safety measures using social cost-benefit analysis methodology

Analysis Base Year	Regulatory Implementation Year	Analysis period (years)	Discount Rate (%)	Unit
2023	2023	10	4.5	1 million KRW Current Value
Regulatory Alternative: Enhanced medical screening safeguards for aircrew				
Influenced Group		Cost	Benefits	Net Cost
Unregulated Businesses·Small Businesses	Direct	2,690.25	-	2,690.25
	Indirect	-	-	-
Unregulated public		-	-	-
Non-Regulated Businesses·Small Businesses		-	-	-
Non-regulated public		-	-	-
Government		-	-	-
Total		2,690.25	-	2,690.25
Net Cost to Business		2,690.25	Annual Equalized Net Cost	325.34

by NSSC Legislative and Administrative Notice

Table 10. A case for labeling radiation generating devices using a social cost-benefit analysis methodology

Analysis Base Year	Regulatory Implementation Year	Analysis period (years)	Discount Rate (%)	Unit
2020	2021	10	4.5	1 million KRW Current Value
Regulatory Alternative: Labeling radiation generating devices				
Influenced Group		Cost	Benefits	Net Cost
Unregulated Businesses·Small Businesses	Direct	520.82	-	520.82
	Indirect	-	-	-
Unregulated public		-	-	-
Non-Regulated Businesses·Small Businesses		-	-	-
Non-regulated public		-	-	-
Government		-	-	-
Total		520.82	-	520.82
Net Cost to Business		520.82	Annual Equalized Net Cost	65.82

by NSSC Legislative and Administrative Notice

폐암으로 인한 사망 인구는 300명으로 평가하였다. 라돈 저감 기술에 따른 저감 효과와 비용을 고려하여 라돈준위 감소로 인한 폐암사망자 수의 감소를 계산하였다. 분석결과 순비용은 음의 값으로 도출되었으며, 이는 곧 덴마크의 라돈 저감을 위한 대안이 사회·경제학적으로 부적절한 정책이라고 판단하였다.

3.2.3. 국내 규제효용성 평가 사례 조사

Table 9에 원자력안전위원회에서 수행한 항공승무원의 안전조치 강화 사례의 사회적 비용-편익 분석을 적용하여 도출된 정량적 인자 항목을 나타내었다. 사회적 비용-편익 분석 결과, 추가비용 및 연간균등순비용을 정량적으로 도출하였다. 이를 바탕으로, 정성적으로 얻어지는 항공승무원의 안전으로 인한 사회적 편익과 비교하여 해당 규제개정안은 타당한 것으로 나타났다.

Table 10에 방사선발생장치 판매 시 주의사항 부착 사례의 사회적 비용-편익 분석을 적용하여 도출된 정량적 인자 항목을 나타내었다. 이를 바탕으로 사회적 비용-편익 분석 결과, 추가비용 및 연간균등순비용을 정량적으로 도출하였다. 이를 바탕으로, 정성적으로 얻어지는 방사선발생장치 사용 종사자의 안전한 작업환경 조성으로 인한 사회적 편익과 비교하여 해당 규제개정안은 타당한 것으로 나타났다.

4. 고 찰

본 연구에서는 국제기구 및 국내·외에서 제시하는 7가지 규제효용성 평가 방법론을 조사 및 분석하였고, 일부 방법론을 활용하여 평가가 이루어진 5가지 실제 사례들을 조사 및 분석하였다. 규제효용성 평가 방법론은 금전계수(α) 산출 방법론, 비용-편익 분석 방법론, 기타 방법론으로 구분하여 비교하였다. 규제효용성 평가가 수행된 사례는 단일 방호방안 및 다중 방호방안에 대한 사례로 구분하여 비교하였다.

4.1. 국제기구 및 국내·외 규제효용성 평가 방법론 비교·분석

금전가 인자를 산출하는 금전계수(α) 산출 방법론에는 IAEA 모델 기반 금전계수(α) 산출 방법론, HPS 방법론 및 NRPB 방법론이 해당된다. 해당 방법론은 방사선으로 인하여 발생하는 조기사망, 유전결함, 수명손실 등의 인자를 의료상 치료비용 또는 경제적 손실로 환산하여 1인당 연간 국민총생산량에 해당하는 금전가를 산출하는 것으로 분석되었다. 따라서 금전계수(α) 산출 방법론은 수명손실 등과 같은 위해인자를 고려하는 방호방안을 평가하는 경우에 사용하는 것으로 판단된다.

비용-편익 분석 방법론에는 ICRP 모델 기반 비용-편익 분석 방법론 및 사회적 비용-편익 분석 방법론이 해당된다. 해당 방법론은 방호비용과 손해비용 및 편익에 해당하는 항목을 선정하여 정량적인 비용으로 비교를 수행하는 것으로 분석되었다. 따라서 비용-편익 분석 방법론은 규제 도입에 따른 비용 및 편익의 항목에 해당하는 인자를 선정하여 가치 비교를 통한 방사선 피폭을 저감하는 방호방안을 평가하는 경우에 사용하는 것으로 판단된다.

이 외 기타 방법론에는 ICRP 모델 기반 다속성 효용분석 방법론 및 ICRP 모델 기반 비용-효능 분석 방법론이 해당된다. 해당 방법론은 가중치, 효용점수 및 비용-효능 곡선 등의 인자를 사용하여 동일한 상황에서의 여러 방호방안 중 최적의 방안을 찾는 방법론으로 분석되었다. 따라서 기타 방법론은 여러 방호방안 중 최적의 방안을 도출하는 경우에 사용하는 것으로 판단된다.

4.2. 국제기구 및 국내·외 규제효용성 평가 사례 비교·분석

단일 방호방안의 효용성 평가가 이루어진 사례에는 건물에서 발생하는 영향을 저감하기 위한 대안 정책 사례, 항공승무원 건강진단 안전조치 강화 사례 및 방사선기기 판매 취급기준 강화 사례가 포함되었다. 해당 사례들은 규제의 도입에 따라 선행적으로 확정된 방호방안에 대하여 피규제자 및 사회의 손익수준을 비용-편익 분석 방법론으로 평가하는 것으로 분석되었다. 따라서 선행적으로 확정된 단일 방호방안의 타 사례에 대한 규제효용성 평가 시 비용-편익 분석 방법론을 사용함이 타당하다고 판단된다.

다중 방호방안의 효용성 평가가 이루어진 사례에는 우라늄 광산 작업자들의 방호를 위한 환기설비 설계 사례 및 원자력관계시설에 임의의 시스템 설치 사례가 포함되었다. 해당 사례들은 규제의 다중 방호방안 중 최적의 단일 방호방안을 ICRP 모델 기반 다속성 효용분석 방법론 및 ICRP 모델 기반 비용-효능 분석 방법론으로 평가하는 것으로 분석되었다. 따라서 다중 방호방안 중 최적의 단일 방호방안을 도출하는 타 사례에 대한 규제효용성 평가 시 기타 방법론을 사용함이 타당하다고 판단된다.

4.3. 국내 NORM 취급 산업 차등관리 방안 규제효용성 평가 방안 고찰

국내 NORM 취급 산업의 차등관리 방안 도입 시 규제효용성 평가 방안을 고찰하기 위하여 국내 NORM 취급 산업의 환경특성을 분석하였다. 이후, 앞서 분석한 규제효용성 평가 방법론 및 사례를 기반으로 국내 NORM 취급 산업의 환경특성에 맞는 평가 방법론을 도출하였다.

국내 대다수의 NORM 취급 산업은 피폭수준이 연간 1 mSv 미만으로 일반인 선량한도에 미치지 못하는 것으로 나타났다[32-34]. 이에 따라 국내의 NORM 취급 산업에서는 생명 손실, 치사암 및 유전적 결함 등의 방사선학적 위해가 미미할 것으로 판단된다. 생명 손실, 치사암 및 유전적 결함 등은 앞서 조사한 금전계수(α) 산출 방법론에서 사용하는 인자에 해당된다. 이에 따라 금전계수(α) 산출 방법론을 활용하여 NORM 취급 산업체에 대한 규제효용성 평가에 어려움이 존재할 것으로 판단된다. 또한 국내 NORM 취급 산업에 대한 차등관리 방안은 다중 방안 중 최적의 방안을 선택하는 것이 아닌, 확정된 단일 방안에 대하여 규제의 효용성을 평가하여야 한다. 따라서 비용-편익 분석 방법론이 국내

NORM 취급 산업의 차등관리 방안 도입에 따른 규제효용성 평가 방법론으로 적절하다고 판단하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 NORM 취급 산업의 차등관리 방안 적용을 위한 규제효용성 평가 방법론 및 사례를 분석하였다. 이를 위하여 첫 번째, 국제기구 및 국내·외에서 제시한 규제효용성 평가 방법론의 절차 및 평가인자를 분석하였다. 두 번째, 해당 규제효용성 평가 방법론을 활용한 국제기구 및 국내·외 규제효용성 평가 사례를 분석하였다. 이를 바탕으로 국내 NORM 취급 산업의 차등관리 방안 도입에 따른 최적의 규제효용성 평가 방안을 도출하였다.

국제기구 및 국내·외에서 제시하고 있는 규제효용성 평가 방법론은 금전계수(α) 산출 방법론, 비용-편익 분석 방법론, 기타 방법론으로 크게 3가지 방법론으로 분석하였다. 금전계수(α) 산출 방법론은 수명손실, 유전결함 등과 같은 위해인자를 고려하는 방호방안을 평가하는 방법론으로 나타났다. 비용-편익 분석 방법론은 방사선 피폭을 저감하는 방호방안에 대하여 정량적인 비교를 통해 평가하는 방법론으로 나타났다. 이 외 기타 방법론은 가중치, 효용점수 및 비용-효능 곡선과 같은 인자를 활용하여 최적의 방안을 평가하는 방법론으로 나타났다.

국제기구 및 국내·외에서 제시하고 있는 규제효용성 평가 사례는 단일 방호방안의 효용성 평가가 이루어진 사례 및 다중 방호방안의 효용성 평가가 이루어진 사례로 크게 2가지 사례로 분석하였다. 선행적으로 확정된 단일 방호방안의 효용성 평가는 비용-편익 분석 방법론을 통해 평가하는 것으로 나타났다. 다중 방호방안의 효용성 평가는 ICRP 모델 기반 다속성 효용분석 방법론, ICRP 모델 기반 비용-효능 분석 방법론과 같은 기타 방법론을 통해 평가하는 것으로 나타났다.

본 연구결과, 국내 NORM 취급 산업체의 환경특성 및 차등관리 단일 방호방안이라는 규제 특성을 고려하여 비용-편익 분석 방법론이 국내 NORM 취급 산업의 차등관리 방안 도입에 따른 규제효용성 평가 방법론으로 가장 적절할 것으로 판단된다. 본 연구결과는 국내 NORM 취급 산업체 차등관리 방안 도입 시 규제효용성 평가를 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. OECD. 2020. Regulatory Impact Assessment. OECD Best Practice Principles for Regulatory Policy. https://doi.org/10.1787/7a9638cb-en.
2. OECD. 2010. Guidance on Sustainability Impact Assessment. https://doi.org/10.1787/9789264086913-en.
3. OECD. 2009. Regulatory Impact Analysis: A Tool for Policy Coherence. OECD Reviews of Regulatory Reform. https://doi.org/10.1787/9789264067110-en.
4. EC. 2009. Impact Assessment Guidelines, Part III: Annexes.
5. IAEA. 2024. Policies and Strategies for the Management of NORM Residues and Wastes. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-3.4. https://doi.org/10.61092/iaea.zg6m-a7fl.
6. ICRP. 2019. Radiological Protection from Naturally Occurring Radioactive Material in Industrial Processes. ICRP Publication 142. Ann, ICRP 48(4).
7. IAEA. 2024. Holistic Approach to Management of Naturally Occurring Radioactive Material: A Case Study in Brazil. IAEA TECDOC Series No. 2071. https://doi.org/10.61092/iaea.7jjx-5ui6.
8. ICRP. 1983. Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection. ICRP Publication 37. Ann, ICRP 10(2-3).
9. EPA. 1983. Regulatory Impact Analysis of Final Environmental Standards for Uranium Mill Tailings at Active Sites. EPA 520/1-83-010.
10. National Research Council. 1999. Evaluation of Guidelines for Exposures to Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials. Washington DC, The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/6360.
11. EPA. 1999. Radon in Drinking Water Health Risk Reduction and Cost Analysis; Notice. *Federal Register* **64**(38):9560-9599.
12. US NRC. 2005. Draft Regulatory Analysis: Amendments to 10 CFR Part 20 on Radiological Criteria for Controlling the Disposition of Solid Materials. Attachment 4 to SECY-05-0054.
13. BEIS. 2017. Revised Requirements for Radiological Protection: Regulation of Public Exposures and the Justification of Practices. Impact Assessment (IA) No. BEIS017(F)-17-CNRD.
14. ARPANSA. 2012. Annual Report of the Chief Executive Officer. Annual Report 2011-12.
15. ARPANSA. 2008. Safety Guide: Management of Naturally Occurring Radioactive Material. Radiation Protection Series Publication No. 15.
16. Liland A, Goronovski A, Turcanu C, Sweeck L, Vanhoudt N, Abelshausen B. 2019. D 9.70-Framework for Socio-Economic Analysis. European Joint Programme, Concert.
17. Smith GE, Fitzgibbon T, Karp S. 1995. Economic Impact of Potential NORM Regulations. Society of Petroleum Engineers. https://doi.org/10.2118/29708-MS.
18. Veil JA, Smith KP, Tomasko D, Elcock D, Blunt D, Williams GP. 1998. Disposal of NORM Contaminated Oil Field Wastes in Salt Caverns. Argonne National Laboratory.
19. Veil JA. 1998. Options and Cost for Disposal of NORM Waste. 5th International Petroleum Environmental Conference.
20. Zeevaert Th, Bousher A, Brendler V, Gensen PH, Nordlinder S. 2001. Evaluation and ranking of restoration strategies for radioac-

tively contaminated sites. *Journal of Environmental Radioactivity* **56**(1-2):33-50. https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00046-7.
21. Trevisi R, Antignani S, Botti T, Buresti G, Carpentieri C, Leonardi F, Bochicchio F. 2022. Cost-Effectiveness Analysis to Assess the Protection of Workers from Exposure to Radon at Work: A first application to Italian retail shops. *Journal of Environmental Radioactivity* 242. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106780.
22. IAEA. 1985. Assigning a Value to Transboundary Radiation Exposure. IAEA Safety Series No. 67.
23. ICRP. 1990. Optimization and Decision Making in Radiological Protection. ICRP Publication 55. Ann, ICRP 20(1).
24. KAERI. 1997. A Study on the Radiation and Environmental Safety: Development of Radiation Protection and Measurement Technology. KAERI/RR-1739/96.
25. HPS. 1993. Radiation Dose Limits for the General Public. Scientific and Public Issue Committee Position Statement. *Health Physics Newsletter*, **21**(4):17-21.
26. EC. 1991. Radiation Protection: ALARA from Theory Towards Practice. EUR-13796.
27. OPC. Government Policy Coordination Organization. 2024. Regulatory Impact Analysis Guidelines. https://www.better.go.kr/hz.blltn.DataBlltnSl.
28. US DOE. 2014. Optimizing Radiation Protection of the Public and the Environment for Use with DOE O 458.1, ALARA Requirements. DOE-HDBK-1215-2014.
29. Petersen ML, Larsen T. 2006. Cost-benefit analyses of radon mitigation projects. *Journal of Environmental Management* **81**:19-26.
30. NSSC. 2023. Notice of Legislation on Partial Amendment to the Enforcement Decree of the Radiation Safety Management Act in Living Environments. Legislative and administrative notice. https://opinion.lawmaking.go.kr/gcom/ogLmPp/71813.
31. NSSC. 2020. Administrative notice of partial revision of the rules on technical standards for radiation safety management, etc. Legislative and administrative notice. https://www.nssc.go.kr/ajaxfile/FR_SVC/FileDown.do?GBN=X01&BOARD_SEQ=22&SITE_NO=2&BBS_SEQ=45918&FILE_SEQ=4.
32. KINS. 2023. Investigation and Analysis of Actual State of Safety Management for Radiation in the Natural Environment, 2022.
33. KINS. 2024. Investigation and Analysis of Actual State of Safety Management for Radiation in the Natural Environment, 2023.
34. KINS. 2025. Investigation and Analysis of Actual State of Safety Management for Radiation in the Natural Environment, 2024.