JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(4) : 407-420 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.407

외국의 방사성동위원소 사용시설 방사성유출물관리 차등 규제기준 비교·분석 및 국내 적용방안

김소윤[1], 정재학[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Comparative Analysis of Graded Approach in Regulations on Radioactive Effluent Control at Overseas RI Handling Facilities and Proposal to Improve Relevant Regulations in Korea

Soyun Kim[1] and Jae Hak Cheong[1,*]

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

Abstract In Korea, current regulatory standards for radioactive effluent from radioisotope (RI) handling facility still needs to adopt a graded approach per the magnitude of radioactive material and the likelihood of potential radiological impact. Also, a dose constraint for radioactive effluent has not been applied to the RI handling facility in Korea. To overcome the limitations and propose application to Korean regulations, this study comparatively analyzed regulatory standards of selected countries (United States, Germany, Finland, Sweden, and United Kingdom), reflecting the graded approach. All those countries have a single dose constraint (0.01 to 0.3 mSv y^{-1}) as a small fraction of dose limits and apply it to the RI handling facility, which uses unsealed sources. Also, radioactivity concentration limits or total radioactivity limits are derived from those constraints. In the United Kingdom (UK), the graded approach for dose assessment is adopted with the optimization threshold (0.02 mSv y^{-1}). With this threshold, the UK regulatory institute provides dose assessment methodology with conservative assumptions for screening purposes or methodology with relatively realistic assumptions for detail assessment. Based on the practices of the selected countries, this study suggests establishing a dose constraint for the RI handling facilities to apply the graded approach in Korean regulatory standards. Also, the relevant regulatory process should not place an undue burden on licensees. In line with this, the regulatory institute might consider providing a simple dose assessment tool for screening purposes or applicable discharge limits in terms of total radioactivity or radioactivity concentration to help the licensees comply with the dose constraints more easily. This study is expected to be used as the basic research to enhance the graded approach in Korean regulations on radioactive effluent control of the RI handling facility.

Key words: Radioactive effluent, RI handling facility, Discharge limit, Graded approach, Dose constraint

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Jae Hak Cheong
Tel. +82-31-201-3689 Fax. +82-31-204-8206 E-mail. jhcheong@khu.ac.kr
Received 25 November 2022 **Revised** 7 December 2022 **Accepted** 11 December 2022

1. 서 론

원자력이용시설에서는 정상운전 중에 발생한 액체 또는 기체 상태의 방사성유출물을 규제기준 이내에서 배수시설 또는 배기시설을 통해 계획적이고 통제된 상태에서 시설 외부로 배출한다. 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)의 일반안전기준에 따르면 규제기관은 계획피폭상황에 대하여 실제 사용되는 방사선원, 사용행위의 특성, 선원으로 인한 피폭 가능성과 규모에 따라 차등적 접근을 해야 한다고 권고한다[1]. 또한 IAEA의 안전기준은 방사성유출물의 배출관리를 위하여 규제기준을 연간 피폭방사선량(mSv y^{-1}), 배출 방사능 농도(Bq m^{-3}) 그리고 연간 배출되는 총 방사능(Bq y^{-1})의 단위로 설정할 수 있다고 한다. 이 중 연간 피폭방사선량 기준은 방사성유출물의 배출로 인한 방사선학적 영향을 합리적으로 가능한 낮게(ALARA) 하기 위하여 연간 유효선량 단위의 선량제약치를 설정하도록 권고하고 있으며, 이는 10 μSv를 초과하고 1 mSv 미만인 일반인 선량한도의 작은 분율에 해당하는 값이어야 한다고 제시하고 있다. 그중 0.3 mSv y^{-1}을 일반 선량제약치의 최댓값으로 제시하고 있다[2].

국내의 원자력이용시설 중에서 발전용원자로 및 관계시설, 핵연료주기시설, 핵연료물질 허가사용시설, 방사성폐기물관리시설 등으로부터 배출되는 액체 및 기체상 방사성유출물의 배출은 「원자력안전법」 제11조, 제21조, 제36조, 제46조, 제64조의 허가기준에 따른 「원자력안전법 시행령」 제174조(환경상의 위해방지)에 따라 원자력안전위원회 고시 제2019-10호 「방사선방호 등에 관한 기준」의 제6조(배출관리기준)와 Table 1에 나타난 제16조(환경상의 위해방지기준)를 통해 제한구역경계에서의 방사능 농도와 연간 피폭방사선량 기준으로 제한한다[3-5].

위 시설 외에 방사성유출물을 배출할 수 있는 개봉 방사성동위원소 허가사용시설의 허가기준인 법 제55조에서는 선량한도만을 규정하고 있을 뿐 시행령의 환경상의 위해방지기준이 적용되지 않지만, 법 제55조제1항 제1호에 따른 「방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙」(이하 방사선안전규칙)의 제23조 제3호와 제4호에 따라 배수구, 배기구 등에서 배출관리기준을 만족하도록 규정하고 있다[3-6]. 따라서, 개봉선원 허가사용시설에 대해서는 Table 1의 연간 피폭방사선량 기준이 적용되지 않는다. 또한 의료시설에서 치료목적의 방사성동위원소를 투여받은 환자의 배설물을 배출하는 경우에도 방사선안전규칙 제53조(방사성동위원소 투여환자 안전관리)와 원자력안전위원회 고시 제2019-6호 「의료분야의 방사선안전관리에 관한 기술기준」의 제13조(진료환자의 배설물)에 따라 배출관리기준 이하를 만족하여야 한다[5-7]. 이와 같이, 국내에서는 발전용원자로부터 의료시설까지 시설의 규모와 사용하는 방사성물질의 양과 무관하게 방사성유출물의 배출에 대하여 동일한 수치의 방사능 농도기준을 적용하고 있다.

국내 발전용원자로 및 관계시설은 「원자력안전법 시행규칙」 제19조에 따라 운영 중에 정기정비 기간 또는 핵연료 교체 기간마다 정기검사를 실시한다. 핵연료주기시설, 핵연료물질 허가사용시설, 방사성폐기물관리시설 등의 경우, 동일 시행규칙의 제35조, 제54조, 제92조에 따라 1년마다 정기검사를 받아야 한다. 반면, 개봉선원 허가사용시설은 시행규칙 제77조에 의해 사용하는 방사성동위원소 등의 형태, 연간 사용량, 사용 목적에 따라 정기검사 시기를 1

Table 1. Radiation dose standards for radioactive effluent from nuclear fuel cycle facilities in Korea

Target		Dose term	Dose constraint
A unit of NPP	Gas	Gamma absorbed dose	0.1 mGy y^{-1}
		Beta absorbed dose	0.2 mGy y^{-1}
		Effective dose of external exposure	0.05 mSv y^{-1}
		Skin equivalent dose of external exposure	0.15 mSv y^{-1}
		Equivalent dose of radioactive iodine, ^{3}H, ^{14}C, and particulates	0.15 mSv y^{-1}
	Liquid	Effective dose	0.03 mSv y^{-1}
		Equivalent dose	0.1 mSv y^{-1}
Site		Effective dose	0.25 mSv y^{-1}
		Thyroid equivalent dose	0.75 mSv y^{-1}

년, 3년 또는 5년으로 정하고 있다[8]. 이와 같이, 국내 규제기준은 시설별 방사선원의 사용량에 따라 정기검사에 대하여 차등적 접근을 하고 있지만 시설별로 배출되는 방사성유출물에 대한 차등적 접근은 하고 있지 않다. 또한 국내 개봉선원 허가사용시설은 운영허가를 위하여, 시행규칙의 제58조 제4항에 따른 원자력안전위원회고시 제2019-21호「방사선안전보고서 작성지침」의 제5조(세부 작성지침)에 따라, 해당 시설의 외부에 방사선 영향을 미치는 경우 일반인의 예상 피폭방사선량으로 안전성을 평가하여 기술해야 한다[8,9]. 하지만, 앞서 언급하였듯이 국내 규제기준에는 일반인 선량한도를 제외하고 해당 시설의 선량평가 결과에 대하여 직접 비교할 피폭방사선량 기준은 없다. 또한 개봉선원 허가사용시설에 대하여 발전용원자로와 같은 대형 원자력이용시설과 동일한 수치의 방사능 농도기준을 적용하고 있으므로 국제원자력기구에서 권고하는 규제의 차등적 접근이 이루어지지 않고 있다.

따라서, 이 연구는 개봉선원 허가사용시설로부터 배출되는 방사성유출물에 대하여 선량제약치를 적용하고 있지 않고 시설별 배출관리의 차등적 접근을 적용하고 있지 않은 국내 규제기준의 한계점을 보완하고자 국내 규정의 개선 방안을 논의하고자 한다. 이를 위해서 시설별 방사성유출물 배출관리에 차등적 접근을 적용하고 있는 미국, 독일, 핀란드, 스웨덴, 영국의 규제기준 현황과 그 기술적 배경을 분석하였다. 이를 통해, 이 연구는 국내 개봉선원 허가사용시설에 적용할 수 있는 방사성유출물 관리의 차등적 접근 방안을 제안하고자 한다.

2. 재료 및 방법

이 연구는 비발전 소규모 원자력이용시설(개봉선원 사용시설 등)의 유출물 관리에 관한 국제기준과 주요국의 규제기준을 조사하였다. 조사한 국제기준 및 주요국의 공통된 규제기준을 비교 및 분석한 후, 국내에 적용가능한 비발전 소규모 원자력이용시설의 차등 규제기준을 도출하여 국내 규제기준의 개선안을 제안한다. 주요 국가로는 미국, 독일, 핀란드, 스웨덴, 영국을 선정하였다. 해당 국가들의 관계 법령, 규제지침을 대상으로 규제기준을 조사 및 분석하였고 해당 규정에 관한 세부적인 설명과 개정 이유를 제시한 규제기관 또는 자문위원회의 보고서가 존재할 경우 분석 대상에 포함하였다. Table 2는 이 연구에서 조사한 국가별 규제기관과 법령, 규제지침 그리고 관련된 정부부처 또는 자문위원회를 정리한 것이다.

3. 결 과

3.1. 미국

미국의 연방 법령 10 CFR 20.1301에 따라 미국원자력규제위원회(US Nuclear Regulatory Commission, USNRC)의 인허가를 받은 모든 방사성물질로 인한 일반인의 선량한도는 총 유효선량당량 기준 연간 1 mSv이다(단, 배경방사선, 의료방사선, 의료 관련 연구에 자발적으로 참여한 개인의 배설물로써 배출된 방사성물질, 공공 하수시설로

Table 2. Research scope of this study

Country	Relevant regulatory institute	Act & Ordinance	Regulatory Guide	Relevant ministry or advisory committee
United States	USNRC	Code of Federal Regulations (10 CFR 20, 50, and 40 CFR 190)	USNRC Reg. Guide 4.20 and 8.37	EPA, ISOCRS
Germany	BfS	Radiation Protection Act, Nuclear Act, Radiation Protection Ordinance		SSK
Finland	STUK	Government Decree on Ionizing Radiation	YVL C.3, C.4, ST 6.2, SY 1/2018	
Sweden	SSM	Radiation Protection Ordinance	SSMFS 2018:1, SSMFS 2018:3	
United Kingdom	EA	The Ionising Radiations Regulations Environmental Permit Regulations		HPA, NRPB, NDAWG

배출되는 방사성물질은 선량한도 적용 범위에서 제외된다) [10]. 또한, 10 CFR 20.1302에 따라 USNRC의 허가소지자는 방사성유출물로 인한 일반인의 피폭방사선량이 선량한도를 초과하지 않음을 입증하고, 허가시설의 비제한구역경계(boundary of the unrestricted area)에서의 연간 평균 액체 및 기체 방사능 농도가 10 CFR 20 Appendix B Table 2의 핵종별 방사능 농도를 초과하지 않음을 입증해야 한다[10]. 발전용원자로에서 방사성유출물을 배출하는 경우 일반인 선량한도와 함께 10 CFR 20 Appendix B Table 2의 핵종별 방사능 농도기준과 10 CFR 50 Appendix I, 40 CFR 190.10의 연간 선량기준 미만을 준수하여야 한다[10-12]. 10 CFR 50 Appendix I와 40 CFR 190.10의 연간 선량기준은 Table 1의 국내 선량기준의 수치와 동일하지만 선량 항목별 용어가 공기 흡수선량, 유효선량, 장기등가선량이 아닌 공기 선량, 전신선량, 장기선량 또는 장기선량당량으로 국내와 다르며 추가적으로 부지 기준에 기타 장기에 대한 선량당량기준(0.25 mSv y^{-1})이 있다[11,12].

반면, 10 CFR Parts 30, 40, 60, 61, 70 (부산물 사용 허가, 선원 물질 사용 허가, 고준위 방사성폐기물 심층처분, 방사성폐기물의 육지처분, 특수핵물질 사용 허가)에 따라 선원물질(source material), 부산물(byproduct material) 또는 특수핵물질(special nuclear material)을 소유 및 사용하고 있는 시설로부터 배출되는 기체 및 액체 방사성유출물의 경우에는 Regulatory Guide 8.37에 따라 ALARA 원칙으로 배출 관리를 하고 있다는 것을 입증해야 한다[13].

발전용원자로를 제외한 시설에서 배출되는 기체 방사성유출물의 경우(밀봉선원, ^{222}Rn과 그 딸핵종 제외), 10 CFR 20.1101 (d)에 따라 일반인이 받는 최대 피폭방사선량이 총 유효선량당량 기준 0.1 mSv y^{-1}을 초과하지 않아야 한다. 이는 일반인 선량한도의 10%에 해당하는 선량제약치로써, 이를 초과하여도 강제적인 집행조치(운영 정지 등)가 이루어지지 않는다는 점에서 일반인의 선량한도와 차이가 있다. 만일 선량제약치를 초과하였다고 판단된다면, 사업자는 USNRC에 선량제약치를 초과한 사실과 원인 파악 그리고 피폭 저감을 위한 ALARA 조치 계획 및 결과를 보고해야 할 의무가 있다[10]. USNRC Regulatory Guide 4.20, Rev.1은 허가소지자가 배출하려는 기체 방사성유출물이 10 CFR 20 Appendix B Table 2의 Column 1의 공기 중 핵종별 방사능 농도기준의 10% 또는 20% 이하를 만족함으로써 선량제약치 0.1 mSv y^{-1} 이하임을 준수할 수 있다고 설명한다[14]. 국내 원자력안전위원회고시의 배출관리기준과 유사한 10 CFR 20 Appendix B Table 2의 방사능 농도기준은 각 핵종을 경구섭취 또는 흡입하였을 경우 일반인의 피폭방사선량이 선량한도에 해당하는 방사능 농도이다. 10 CFR 20 Appendix B Table 2의 Column 1의 비활성기체가 아닌 핵종들에 대한 공기 중의 방사능 농도기준($ECL_{air,i}$, Ci mL^{-1})은 식 (1)로 유도한다.

$$ECL_{air,i} = \frac{ALI_{inh,i}}{2.4\times10^{9}\times50\times3\times2} \quad (1)$$

여기서 $ALI_{inh,i}$는 방사선 작업종사자가 1년 동안 흡입하여 50 mSv y^{-1}에 해당하는 핵종 i의 연간섭취한도(Ci)이며 2.4×10^{9}는 작업종사자의 연간 작업시간 동안의 흡입량(mL), 50은 미국의 방사선작업종사자 선량한도(50 mSv y^{-1})로부터 일반인 선량한도(1 mSv y^{-1})를 유도하기 위한 인자, 3은 방사선작업종사자와 일반인의 연간 호흡량 차이를 보정하는 인자 그리고 2는 연령군별 선량환산인자 간의 차이를 보정하는 인자이다. 식 (1)에서 성인이 아닌 연령군까지 고려하기 위하여 '2'로 나누기 때문에 식 (1)을 통해 유도된 방사능 농도기준은 성인에 대해서는 1 mSv y^{-1}이 아닌 0.5 mSv y^{-1}에 해당하는 값이 유도된 것이다. 따라서, 비활성기체가 아닌 기체상 방사성유출물이 선량제약치 0.1 mSv y^{-1}의 준수 여부를 입증하기 위해서 식 (2)와 같이 $ECL_{air,i}$의 20% 미만임을 보이면 된다.

$$\sum_{i}\left(\frac{C_i}{ECL_{air,i}}\right) < 0.2 \quad (2)$$

여기서 C_i는 해당 시설에서 배출된 기체상 방사성유출물로 인한 공기 중 핵종 i의 방사능 농도(Ci mL^{-1})이다.

그리고 10 CFR 20 Appendix B Table 2의 Column 1에서 비활성기체의 공기 중의 방사능 농도기준($ECL_{NG,i}$, Ci mL^{-1})은 식 (3)을 통해 유도한다.

$$ECL_{NG,i} = \frac{DAC_{sub,i}}{50\times4.38} \quad (3)$$

여기서 $DAC_{sub,i}$는 방사선 작업종사자의 비활성기체 핵종 i의 공기 중 침적으로 인한 외부피폭이 고려된 유도공기 중 농도(Ci mL^{-1})이며 50은 일반인과 방사선작업종사자의 선량한도의 차이를 보정하는 인자이고 4.38은 일반인과 작업자의 활동시간의 차이를 보정하는 인자이다. 식 (3)을 통해 유도한 $ECL_{NG,i}$은 비활성기체에 의한 외부피폭에 의한 값으로 연령군에 따른 선량환산인자의 차이가 없으므

로 성인을 기준으로 1 mSv y^{-1}에 해당하는 값이다. 따라서, 기체유출물 내의 비활성기체 핵종들은 10 CFR 20.1101 (d)의 선량제약치 0.1 mSv y^{-1}임을 입증하기 위해서 식 (4)와 같이 $ECL_{NG,i}$의 10% 미만임을 보이면 된다.

$$\sum_i \left(\frac{C_i}{ECL_{NG,i}}\right) < 0.1 \quad (4)$$

만약, 비활성기체와 그 외의 핵종이 혼합된 경우, 핵종별 방사능 농도가 $ECL_{air,i}$ 또는 $ECL_{NG,i}$에 대하여 차지하는 비율의 합이 0.1을 넘지 않도록 한다. 또한 배기구가 여러 곳인 시설의 경우, 각 핵종별로 가장 높은 방사능 농도를 나타내는 배기구의 값을 고려할 수 있다. 식 (2)와 식 (4)의 C_i 값은 식 (5)를 통해 계산할 수 있으며 인자별로 USNRC Regulatory Guide 4.20, Rev.1에서 제공하고 있는 기본값 또는 부지 특성을 반영한 수치를 사용할 수 있다.

$$C_i = \frac{f \times \dot{Q}_i}{V} \quad (5)$$

여기서 $\dot{Q}_i$는 핵종 i의 배출률(Ci s^{-1})이고, f는 피폭 대상을 향해 부는 바람의 빈도로 지침에서 제공하는 기본값은 배출시간이 24시간 이하일 경우 1이고 24시간을 초과할 경우 0.25이다. V는 배출 지점에서의 유량(m^3 s^{-1})으로 지침에서 제공하는 기본값은 0.3이다. 또한 식에서 $\left(\frac{f}{V}\right)$ 값 대신 시설별 대기확산인자를 입력할 수 있다[14].

액체 방사성유출물의 경우, 공공 하수처리시설을 통한 배출 여부에 따라 적용하는 기준이 달라진다. USNRC의 인허가를 받은 사업자가 공공하수처리시설이 아닌 시설 또는 환경으로 배출한다면, 10 CFR 20.1302에 따라 비제한구역경계에서의 연간 평균 방사능 농도기준이 10 CFR 20 Appendix B Table 2의 Column 2의 액체 방사성유출물에 대한 방사능 농도기준($ECL_{water,i}$, Ci mL^{-1})을 충족하여야 한다.

$$ECL_{water,i} = \frac{ALI_{ing,i}}{7.3 \times 10^5 \times 5 \times 20} \quad (6)$$

여기서 $ALI_{ing,i}$ 참조인(Reference man)이 1년 동안 경구 섭취를 하여 50 mSv y^{-1}에 해당하는 방사능(Ci)이며, 7.3×10^5는 성인인 참조인의 연간 물 섭취량(mL)으로 이는 1일 동안 2 L를 섭취한다는 가정으로 유도된 값이다. 50은 미국의 방사선작업종사자 선량한도로부터 일반인 선량한도를 유도하기 위한 인자이며, 2는 연령군별 선량환산인자의 차이를 보정하는 인자이다. 식 (1)과 마찬가지로 식 (6)에서도 성인이 아닌 연령군까지 고려하기 위하여 '2'로 나누기 때문에 위 식을 통해 유도된 방사능 농도기준은 성인에 대해서는 1 mSv y^{-1}이 아닌 0.5 mSv y^{-1}에 해당하는 값이 유도된 것이다[10].

반면, 허가소지자가 해당 시설의 액체 방사성유출물을 공공 하수처리시설로 배출한다면 이로 인한 피폭은 일반인 선량한도에 포함되지 않기 때문에 10 CFR 20.2003에 따른 기준을 충족하면 된다(단, 치료를 환자의 배설물은 10 CFR 20.2003의 적용 대상에서 제외된다). 공공 하수처리시설로 배출된 방사성물질에 의한 피폭을 일반인 선량한도에 포함하지 않은 이유는, 예상되는 일반인의 피폭지점이 방사성유출물이 하수처리시설을 모두 통과한 이후의 지점이므로 이는 배출지점으로부터 물리적으로 먼 거리에 있기 때문에, 허가소지자가 선량한도 준수 목적으로 피폭방사선량을 평가할 수 있는 실질적인 방법이 없기 때문이다. 따라서, 공공 하수처리시설로 배출되는 액체 방사성유출물에 대해서 앞선 $ECL_{air,i}$, $ECL_{NG,i}$, $ECL_{water,i}$와는 별도의 방사능 농도기준인 10 CFR 20 Appendix B Table 3을 적용한다[10,15]. 10 CFR 20 Appendix B Table 3에서 규정하고 있는 공공 하수처리시설에서의 방사능 농도기준($ECL_{sewer,i}$, Ci mL^{-1})은 피폭대상의 유일한 식수원이 하수처리시설로부터 나온 물이라고 가정하고 음용수 섭취에 의해 연간 5 mSv y^{-1}에 해당하는 방사능 농도를 식 (7)을 통해 유도한 것이다[10].

$$ECL_{sewer,i} = \frac{ALI_{ing,i}}{7.3 \times 10^5 \times 10} \quad (7)$$

여기서 $ALI_{ing,i}$와 7.3×10^5은 식 (6)과 동일한 값이며 10은 미국의 방사선작업종사자 선량한도로부터 연간 5 mSv y^{-1}을 유도하기 위한 인자이다[10]. 결과적으로, 식 (7)에서 유도된 핵종별 $ECL_{sewer,i}$는 식 (6)에서 유도된 핵종별 $ECL_{water,i}$ 값보다 10배가 더 크다. 허가소지자는 공공 하수처리시설로 배출한 각 방사성 핵종의 실제 월 평균 농도를 $ECL_{sewer,i}$로 나누어 비율을 구하고, 핵종이 하나 이상일 경우 그 비율의 합(Sum of fraction)이 1을 초과하지 않도록 해야 한다.

또한, 10 CFR 20.2003은 방사능 농도기준과 함께 공공 하수처리시설에서 방사성물질이 슬러지나 고체형태로 다시 축적되는 것을 방지하기 위하여, 배출하려는 방사성물질은 물에 쉽게 용해되며 잘 희석되어야 하고 ^{3}H은 5 Ci y^{-1} (185 GBq y^{-1}), ^{14}C는 1 Ci y^{-1} (37 GBq y^{-1}) 그리고 기타

Table 3. Regulatory standard of radioactive effluent discharge control from nuclear facilities in the United States

	Target facility/effluent	Dose limit for the public	Effluent concentration limit (10 CFR 20 Appendix B)[a]	Annual dose standard	Total radioactivity
Gaseous effluent	Unit nuclear power plant	Included	Table 2 Column 1	10 CFR 50 Appendix I	N/A[b]
	Other than nuclear power plant	Included	10% or 20% of value in Table 2 Column 1	10 CFR 20. 1101(d) 0.1 mSv y^{-1}	N/A
Liquid effluent	Discharge into other than sanitary sewerage	Included	Table 2 Column 2	10 CFR 50 Appendix I (only for unit NPP)	N/A
	Discharge into sanitary sewerage[c]	Excluded	Table 3 (10 times larger than value in Table 2 Column 2)	N/A	^{3}H: 5 Ci y^{-1} ^{14}C: 1 Ci y^{-1} Sum of other radionuclides: 1 Ci y^{-1}

[a]Table numbers in this column indicate the table number in the Appendix B to 10 CFR 20 [10].
[b]Note: N/A means Not Applicable.
[c]Excreta from patients undergoing medical diagnosis or therapy with radioactive material are not subject to the standard for discharge into sanitary sewerage [10].

모든 방사성물질의 배출량 총합이 1 Ci y^{-1}을 초과하지 않도록 명시하고 있다[10,16,17].

10 CFR 20.2003 기준 적용 대상에서 제외되는 환자의 배설물을 공공 하수처리시설로 배출하는 경우에 대해서는, USNRC의 별도 규제기준은 없으며 10 CFR 20.2108의 방사성폐기물 처분에 대한 기록 요건을 준수하지 않아도 된다. 1980년대 미국 내에서 환자의 배설물을 의료시설 내의 탱크에 저장 후 공공 하수처리시설로 배출하거나 시설 내 실험실에서 분석 후 공공 하수처리시설로 배출하는 경우에 대하여, 이는 시설에서 발생한 액체 방사성폐기물의 배출이므로 10 CFR 20.2003의 요건을 준수해야 한다는 논쟁이 있었지만, 결국 법리적 해석에 따라 배출되는 물질이 "배설물"이라는 점과 그 배설물이 "방사선학적 치료를 받은 환자"로부터 발생된 것이라는 두 가지 조건이 충족될 경우, 허가소지자는 별도의 제한없이 공공하수시설로 배출할 수 있다[18].

앞서 설명한 미국의 원자력이용시설로부터 배출되는 방사성유출물에 대한 규제기준을 정리하면 Table 3과 같다.

이와 같이, 미국에서는 발전용원자로 외의 시설에서 배출하는 방사성유출물에 대하여 기체와 액체 유출물에 대하여 각각 서로 다른 기준을 적용하고 있다. 이는 기체 유출물과 액체 유출물에 대하여 각각의 기준 수립 배경이 다르기 때문이다. USNRC가 발전용원자로 외의 시설에서 배출하는 기체 방사성유출물의 선량제약치를 연간 0.1 mSv로 규정한 배경은, 과거 미국환경보호청(US Environmental Protection Agency, USEPA)에서 공포한 Clean Air Act의 NRC의 허가시설로부터 방출되는 공기 중의 방사성 핵종으로 인한 피폭방사선량은 연간 0.1 mSv를 초과하면 안 된다는 선량한도 기준에 따른 것이다. EPA의 선량한도와 NRC의 선량한도 간의 이중규제로 이어지는 문제가 발생하여 이를 해소하고자 1996년에 NRC에서 10 CFR 20.1101 (d) 선량제약치 조항을 신설하였고 USNRC Regulatory Guide 4.20을 발표하였다[19]. 반면 공공 하수처리시설로의 액체 방사성유출물 배출에 대해서는 일반인 선량한도로부터 유도한 방사능 농도의 10배까지 허용해 주는데, 이는 미국의 10 CFR 20 제정 당시부터 이어져 온 관행으로, 공공 하수처리시설로 배출된 방사성물질로 인한 피폭을 일반인 선량한도 범주에서 제외하고 별도의 기준을 적용하기 때문이다[10,15]. 이처럼 미국은 개봉선원 사용시설에서 배출하는 기체와 액체 유출물에 대하여 서로 다른 기준을 적용하지만 결과적으로 배출관리를 위한 선량제약치를 적용하거나 배출 방사능 농도를 선량한도의 10배까지 허용해 주는 등의 차등적 접근을 적용하고 있다.

3.2. 독일

독일의 일반인에 대한 유효선량한도는 방사선방호법(Radiation Protection Act) 제80조에 따라 연간 1 mSv이며 수정체 선량한도는 연간 15 mSv, 피부 선량한도는 연

간 50 mSv이다[20]. 또한 독일의 방사선방호령(Radiation Protection Ordinance) 제99조(1)에 따라 원자력시설(발전용원자로, 핵연료 가공, 처리 및 보관시설, 사용후핵연료 처리시설, 사용후핵연료 중간저장시설, 원자력시설 부지 내 방사성폐기물 중간저장시설)과 연방정부의 중앙집중식 방사성폐기물 중간저장시설 그리고 전리방사선이 발생하는 시설의 건설, 운영, 해체 기간 배출되는 방사성유출물로 인한 피폭방사선량에 대한 선량제약치는 유효선량 기준으로 0.3 mSv y^{-1}이다[21]. 방사선방호령 제100조(1)은 일반인 선량한도와 선량제약치의 준수를 위하여 허가소지자에게 피폭방사선량 평가 결과와 배출량 또는 배출 방사능 농도를 보고하도록 한다. 하지만 방사선방호령 102조(2)에 따라 원자력시설과 연방정부의 중앙집중식 방사성폐기물 중간저장시설을 제외한 시설에 대하여 배출 방사능 농도 또는 배출 방사능을 추정하지 않아도 되고, 이를 대신하여 방사선방호령 Annex 11 Part D에서 제시하고 있는 방사능 농도기준을 충족한다면 제99조(1)의 선량제약치 준수를 입증할 수 있다[21]. 현행 독일 방사선방호령 Annex 11 Part D의 Table 6은 대기 중 또는 수중에서 비활성기체를 제외한 방사성 핵종의 허용 가능한 방사능 농도기준을 제시하고 있으며, Annex 11 Part D Table 7은 대기 중에서 비활성기체의 허용 가능한 방사능 농도기준을 제시하고 있다. Annex 11 Part D Table 8은 방사성물질의 종류는 알 수 없으나, 유출물 내에 존재하지 않은 방사성 핵종을 알 경우 적용할 수 있는 대기 중 또는 수중 허용 가능한 방사능 농도를 제시하고 있다. 이 허용 가능한 방사능 농도기준은 Table 4에 나타난 것과 같이 각 시설별 배출유량에 따라 기준의 10배 이하까지 허용될 수 있다[21].

현행 허용 가능한 방사능 농도기준은 2001년 독일 방사선방호령 개정 당시 제시된 값이 그대로 사용되고 있으며 이는 Table 5에 나타난 2001년 방사선방호령의 일반인에 대한 선량제약치로부터 유도된 값이다. Table 5에 나타난 것과 같이 2001년 방사선방호령에 있던 장기등가선량 기준의 선량제약치는 2018년 방사선방호령이 개정되면서 삭제되었지만 2001년 방호령의 허용 가능한 방사능 농도기준 수치는 유지되고 있다[21,22].

허용 가능한 방사능 농도기준의 유도 방법은 다음과 같

Table 4. Application conditions for permissible concentration limit of Annex 11 Part D in German Radiation Protection Ordinance

Target radionuclide	Condition of discharge flow rate	Permissible concentration (Annex 11 Part D)[a]
Radionuclide other than noble gas in gaseous effluent	Discharge flow rate $\leq 10^4\ m^3\ h^{-1}$	Up to 10 times of value in Tables 6 and 8
	$10^4\ m^3\ h^{-1} <$ Discharge flow rate $\leq 10^5\ m^3\ h^{-1}$	Up to value in Tables 6 and 8
Noble gas in gaseous effluent	Discharge flow rate $\leq 10^4\ m^3\ h^{-1}$	Up to 10 times in value of Table 7
	$10^4\ m^3\ h^{-1} <$ Discharge flow rate $\leq 10^5\ m^3\ h^{-1}$	Up to value in Table 7
Radionuclide in liquid effluent	Discharge flow rate $\leq 10^5\ m^3\ y^{-1}$	Up to 10 times of value in Tables 6 and 8
	$10^5\ m^3\ y^{-1} <$ Discharge flow rate	Up to value in Tables 6 and 8

[a]Table numbers in this column indicate the table number in the Annex 11 Part D of 2018 Radiation Protection Ordinance in Germany [21].

Table 5. Revision of the dose constraints for the public in German Radiation Protection Ordinances

Dose constraint for the public		2001 Radiation Protection Ordinance	2018 Radiation Protection Ordinance
Effective dose		0.3 mSv y^{-1}	0.3 mSv y^{-1}
Equivalent dose	Red marrow, Uterus	0.3 mSv y^{-1}	N/A
	Breast, Esophagus, Large intestine, Liver, Lung, Stomach, Thyroid, Urinary bladder, Other organs or tissues	0.9 mSv y^{-1}	
	Bone surface, Skin	1.8 mSv y^{-1}	

다. (1) 보수적인 가정을 적용한 단순 계산 모델(Simple model)을 통해 기체 및 액체 방사성유출물 내의 핵종별로 Table 5의 선량제약치에 해당하는 방사능 농도를 계산한다. (2) 계산된 방사능 농도에 연간 기체상 방사성유출물 배출 체적($8.8\times10^8\ m^3\ y^{-1}$)과 액체상 방사성유출물 배출 체적($10^5\ m^3\ y^{-1}$)을 각각 곱하여 핵종별 방사능을 계산하고 이를 방사선방호령 Annex 11 Part A부터 Part C에서 제시하고 있는 일반적인 선량평가 모델(AVV model)에 입력하여 일반인의 피폭방사선량을 평가한다. (3) AVV model을 통해 계산된 피폭방사선량을 Table 5의 일반인 선량제약치와 비교하여 유효성 검증 및 보정을 하여 허용 가능한 방사능 농도기준을 유도한다. Table 6은 허용가능한 방사능 농도 유도 시 단순 모델과 AVV 모델에 가정되었던 사항을 나타낸다[23].

AVV model에서 계산된 각 핵종별 유효선량이 유효선량제약치 0.3 mSv y^{-1}의 10% 이하일 경우, 단순 모델을 통해 유도된 방사능 농도가 충분한 보수성을 반영하였다고 판단하고 이를 허용 가능한 방사능 농도기준으로 채택하였다. 만약 평가된 유효선량이 0.3 mSv y^{-1}의 10%를 초과하였다면, AVV 모델을 통해 계산된 각 핵종별 장기등가선량을 Table 5에 제시된 장기별 선량제약치와 비교한다. 모든 장기에 대하여(평가된 장기등가선량/장기별 선량제약치) 값이 1 이하라면 단순 모델로 유도한 방사능 농도를 그대로 허용 가능한 방사능 농도기준으로 채택한다. 만일 하나 이상의 장기에 대하여(평가된 장기등가선량/장기별 선량제약치) 값이 1을 초과한다면 단순 모델로 계산한 방사능 농도를 모든 장기의(평가된 장기등가선량/장기별 선량제약치) 값 중 최댓값으로 나누어 허용 가능한 방사능 농도 기준으로 채택한다[23]. 방사선방호령 제102조 (2)에 따르면 이렇게 유도된 Annex 11 Part D의 방사능 농도기준이 만족된다면 실질적으로 단일 시설에서 배출되는 방사성물질로 인한 영향은 10 μSv y^{-1}를 초과하지 않는다고 판단할 수 있다[21]. 이는 매우 보수적인 가정사항을 적용하여 0.3 mSv y^{-1}에 해당하는 방사능 농도를 유도하였기 때문에 만일 이 값을 충족한다면 실제로는 10 μSv y^{-1} 미만이라고 판단한다는 의미로 해석된다. 이러한 해석의 근거는 2020년 독일 연방 방사선방호국(German Federal Office for Radiation Protection, BfS)이 발표한 연구보고서에서 실제 독일 영토 내에 존재하는 의료, 연구, 산업시설로부터 배출된 방사성유출물을 조사한 결과 Annex 11 Part D의 방사능 농도기준을 준수하였고 보수적인 가정을 통해 평가한 피폭방사선량은 10 μSv y^{-1} 미만으로 나타났다는 점을 통해 추정할 수 있다[24].

이와 같이, 독일의 경우 개봉선원 사용시설에 대하여 발전용원자로와 동일한 선량제약치를 적용하지만 선량평가 또는 배출량 보고 의무를 면제해 주고 방사능 농도기준을 준수하면 선량제약치를 만족하고 있음을 판단할 수 있도록 하였다. 또한 배출하는 시설의 유량에 따라 그 농도기준의 10배까지 허용하는 유연성도 허용하고 있다.

Table 6. Assumptions to derive maximum permissible concentration limits in Germany

Target radionuclide	Simple model		AVV model
	Exposure pathway	Target dose constraint	Exposure pathway
Radionuclide other than noble gas in gaseous effluent	Inhale undiluted air at the discharge point for year	Effective dose 0.3 mSv y^{-1}	Internal exposure (ingestion of vegetable, milk, and animals, inhalation), External exposure (air submersion, ground submersion)
Noble gas in gaseous effluent	Externally exposed by undiluted air at the discharge point	γ-emitter: Effective dose 0.3 mSv y^{-1} β-emitter: Skin equivalent dose: 1.8 mSv y^{-1}	
Radionuclide in liquid effluent	Drink water at the discharge point into sewerage for a year	Effective dose 0.3 mSv y^{-1}	Internal exposure (drinking water, fish, animal, milk, vegetable grown by irrigated water), External exposure (ground submersion)

3.3. 핀란드

핀란드의 일반인에 대한 유효선량한도는 연간 1 mSv이며 수정체 선량한도는 연간 15 mSv, 피부 선량한도는 연간 50 mSv이다[25]. 핀란드의 원자력 및 방사선 규제기관(Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK)의 규제지침 YVL C.3에 따르면, 다수의 발전용원자로가 위치한 부지 또는 원자로를 보유하고 있는 원자력시설의 정상운전 중에 배출되는 방사성유출물로 인하여 개인이 받는 피폭방사선량은 0.1 mSv y^{-1}을 초과하지 않도록 하고 있으며, 이를 입증하기 위한 피폭방사선량 평가지침 YVL C.4을 제공하고 있다[26,27].

반면, STUK 규제지침 ST 6.2에 따르면 개봉선원 사용시설에서 배출하는 낮은 양 또는 낮은 체적의 기체 및 액체 방사성유출물에 대하여 각각 10 μSv y^{-1}의 일반인 선량제약치를 초과하지 않아야 한다[28]. 유효선량제약치 10 μSv y^{-1}을 초과하지 않음을 입증하는 수단은 STUK SY/1/2018에 명시된 방사선원의 규제면제기준의 방사능 기준치를 준수하는 것이다. 또한, 허가소지자는 규제기관의 승인하에 배출로 인한 일반인의 유효선량이 10 μSv y^{-1}을 초과하지 않는다는 것을 증명할 수 있는 다른 수단을 사용할 수 있다[29].

개봉선원 사용시설에서 하수시설로 액체 방사성유출물을 배출하는 경우, 각 배출별로 핵종별 규제면제 준위의 방사능을 초과하지 않고 모든 핵종의 총 배출 방사능은 100 MBq를 초과하면 안된다. 만일 하나의 시설에서 한 달 이상 연속적으로 배출하는 경우, 핵종별로 규제면제기준 방사능의 10배까지 허용 가능하지만 모든 핵종의 연간 총 배출 방사능은 100 GBq를 초과하지 않아야 한다. 단, 방사선학적 치료를 받은 환자의 배설물을 하수시설로 배출하는 경우에 대해서는 이 기준의 적용 대상에서 제외된다[28].

개봉선원 사용시설에서 대기 중으로 기체 방사성유출물을 배출하는 경우, 허가소지자는 연간 배출하는 기체 방사성유출물로 인하여 대표인이 받는 유효선량이 10 μSv y^{-1}을 초과하지 않는다는 것을 입증해야 한다. 배출이 이루어지기 전이나 새로운 방사성 핵종의 도입 이전에 규제기관에게 피폭방사선량 평가 가정사항과 계산 과정을 보고하여야 한다[28].

3.4. 스웨덴

스웨덴의 일반인 유효선량한도는 연간 1 mSv이며 수정체 선량한도는 연간 15 mSv, 피부 선량한도는 연간 50 mSv이다[30]. 또한 스웨덴 방사선안전청(The Swedish Radiation Safety Authority, SSM)의 규제지침 SSMFS 2022:14에 따라 일반인의 선량제약치는 0.1 mSv y^{-1}이다[31]. 이에 따라 원자력시설로부터 배출하는 액체 및 기체 방사성유출물로 대표인의 피폭방사선량이 유효선량 기준으로 0.1 mSv y^{-1}을 초과하지 않아야 하며 허가소지자는 이를 입증하기 위해 피폭방사선량 평가 결과를 규제기관에 보고해야 한다[32].

단, 핵연료를 사용하는 원자력 시설이 아닌 개봉선원을 사용하는 시설에서 하수처리시설로 방사성물질을 배출할 시, SSMFS 2018:3에서 제시하고 있는 규제면제 준위의 방사능 미만을 준수해야 한다. 각 배출별로 핵종별 규제면제 준위의 방사능을 초과하지 않아야 하고 만일 하나의 시설에서 한 달 이상 연속적으로 배출하는 경우, 각 핵종별로 규제면제기준 방사능의 10배까지 허용이 가능하다. 핀란드와 달리 하나 이상의 핵종을 배출할 경우에 대하여 총 방사능에 대한 기준을 제시하지 않고 규제면제 준위에 대한 분율의 합(Sum of fraction)이 1 미만임을 만족해야 한다[31,32]. 방사선학적 치료를 받은 환자의 배설물을 하수처리시설로 배출하는 경우에 대해서는 이 기준의 적용 대상에서 제외된다[31].

3.5. 영국

영국의 경우, 방사선규칙(Ionizing Radiation Regulations 2017) Schedule 3 제5조에 따라 일반인에 대한 유효선량한도는 연간 1 mSv이며 피부선량한도는 연간 50 mSv 그리고 수정체 선량한도는 연간 15 mSv이다[33]. 또한 환경허가규칙(Environmental Permitting Regulations 2016, EPR 2016) Schedule 23 Part 4에 따라 계획피폭상황에서의 개별 방사선원 또는 방사성물질을 사용, 처분하는 행위로 인한 일반인의 선량제약치는 유효선량 기준으로 0.3 mSv y^{-1}이며 동일부지 내의 다수의 선원으로 인한 유효선량제약치는 0.5 mSv y^{-1}이다[34].

영국에서의 방사성물질을 배출 또는 처분하는 행위에 대해서는 영국환경청(Environment Agency)의 승인이 필요하다. 폐기하려는 방사성물질이 EPR 2016 Schedule 23 Part 6에서 명시하고 있는 조건에 해당하는 액체 또는 기체 방사성폐기물인 경우 영국환경청의 배출 승인 절차를 면제받을 수 있다. 배출하려는 기체 방사성유출물 내의

Table 7. Exemption criteria and relevant conditions for liquid effluent discharge in the United Kingdom

No.	Target liquid effluent	Discharge conditions	Exemption criteria[a]	
(1)	Aqueous liquid uranium or thorium compound	Discharge into relevant sewer[b]	$0.5\,kg\,y^{-1}$ of uranium or thorium	
(2)	Aqueous liquid human excreta		$10^{10}\,Bq\,y^{-1}$ of ^{99m}Tc and $5\times10^{9}\,Bq\,y^{-1}$ for sum of all other radionuclides	
(3)	Not included in (1) and (2) of this table and total concentration of radioactivity should not exceed $100\,Bq\,mL^{-1}$ (Should not be diluted with the intention that the waste has a concentration below than $100\,Bq\,mL^{-1}$)	(3)-a. Directly discharge into a relevant river[b] or the sea	Concentration does not exceed the value in Column 2 of Table 7 and total amount of waste in a year does not exceed the value in Column 4 of Table 7	
		(3)-b. Discharge into a relevant sewer[b]	(3)-b-i. If, any of that waste has a concentration which exceeds the value in Column 2 of Table 7	10^{8} Bq for the sum of ^{3}H, ^{11}C, ^{14}C, ^{18}F, ^{32}P, ^{33}P, ^{35}S, ^{45}Ca, ^{51}Cr, ^{55}Fe, ^{67}Ga, ^{89}Sr, ^{90}Y, ^{99m}Tc, ^{111}In, ^{123}I, ^{125}I, ^{131}I, ^{153}Sm, ^{201}Tl, and 10^{6} Bq for the sum of all other radionuclides.
			(3)-b-ii. If, none of that waste has a concentration which exceeds the value in Column 2 of Table 7	Maximum annual radioactivity of each radionuclide in Column 3 of Table 7 or not exceeds criteria of (3)-b-(i) in this table.

[a]Table number in this column indicates the table in Part 6 of The Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2016, Schedule 23 [34].
[b]Relevant river means a river or a part of river which is not a part of the sea and has a flow rate which is not less than $1\,m^3\,s^{-1}$ at the place and time of any disposal into it of liquid radioactive waste from a sewage disposal works or directly from premises. Relevant sewer means a public sewer or a disposal main which leads to a sewage disposal works that has the main capacity to handle a minimum of $100\,m^3$ of effluent per day and discharges treated effluent only to the sea or to a relevant river [34]. If the waste producer is satisfied that these conditions have been met on first use of the exemption provisions, they can assume that these conditions will continue to be met unless information is received to indicate otherwise [35].

방사성 핵종이 ^{85}Kr만 존재하고 연간 배출되는 방사능이 10^{11} Bq를 초과하지 않으며 환기시설을 통해 배출된 후 다시 유입되지 않도록 해야 한다. 만약 ^{85}Kr이 아닌 다른 핵종이 존재하는 경우, 용기(container)가 개봉되어 있는 동안 용기 내의 고체 또는 액체 방사성 물질로부터 발생하는 기체상 물질은 환경청 배출 승인 절차가 면제된다. 단, 이 용기가 의도적으로 개봉된 경우에는 면제 대상에서 제외된다. 액체 방사성유출물에 대한 배출 승인 면제조건은 Table 7에 정리하였다[34]. 이러한 면제기준에 해당하는 액체 및 기체 방사성유출물은 허가소지자가 배출 시 폐기물에 대해 기록하고 가능한 한 폐기물의 발생을 최소화해야 한다는 전제조건 아래에서 환경청의 배출 승인 절차가 면제된다.

반면, 승인 면제 대상이 아닌 방사성유출물의 경우, 허가소지자는 배출 승인을 받기 위해 전망적(prospective) 선량평가 결과 제시를 통해 선량제약치 준수 여부를 환경청에 입증해야 한다[34]. 영국의 환경청, 식품기준청(Food Standard Agency) 그리고 보건안전청(Health Security Agency)이 공동 발표한 "방사성유출물의 배출 승인을 위한 전망적 선량평가 원칙"에 따르면 모든 원자력이용시설은 Table 8에 나타난 선량제약치 $0.3\,mSv\,y^{-1}$을 준수해야 하며 평가된 피폭방사선량 결과에 따른 차등적 평가를 실시해야 한다[36].

Table 8에 나타난 유효선량 $0.02\,mSv\,y^{-1}$은 선량최적화 기준치로, 만약 스크리닝 목적의 간단한 선량평가 결과가 $0.02\,mSv\,y^{-1}$을 초과하지 않는다면 더 상세한 선량평가를 하지 않아도 된다. 만일 이를 초과한다면 더 현실적인 또는 부지 특성화된 가정사항을 적용한 추가적인 선량평가를 하도록 하고 있다. 영국 범부처 위원회인 NDAWG (The UK's National Dose Assessment Working Group)의 지침에 따르면 개봉선원 사용시설의 경우, 전망적 선량평가 단계를 4단계로 권고하고 있다[37]. 먼저, 허가소지자가 사전에 설정한 시설의 핵종별 또는 핵종군별 배출 방사능 제한치를 GDCs (Generalised Derived Constraints)와 비교하

Table 8. The dose criteria and their application in prospective dose assessments in the United Kingdom

Effective dose criteria	Effective dose	Application to prospective dose assessment
Upper constraint on discharge of a single source	0.3 mSv y^{-1}	Dose assessment should be refined until it is considered to be sufficiently realistic or the assessed dose falls below 0.02 mSv y^{-1}
Between threshold of optimization and source constraint	0.02 to 0.3 mSv y^{-1}	
Level of dose below which dose assessment requires no further work	0.02 mSv y^{-1}	If doses are below this threshold, the dose assessment need not be refined further.

여 예상되는 피폭방사선량이 최적화 기준치를 초과하는지 판단할 수 있다. GDCs는 각 핵종별 연간 방사능(Bq y^{-1})으로, 보수적인 가정을 통해 공기, 강 또는 하수시설로 배출될 경우에 대하여 각각 유효선량 0.3 mSv y^{-1}에 해당하는 값을 유도한 것이다. 지금까지 약 50개의 방사성 핵종에 대해서 GDCs가 제시되어 있고 의료시설, 연구시설과 같은 소규모 원자력이용시설에서 배출되는 방사성폐기물에 대하여 적용하기 위해 보수적으로 유도한 제한치다. GDCs 유도 시 보수적인 가정사항을 적용하였기 때문에 GDCs를 적용하는 경우에만 최적화 기준치를 0.02 mSv y^{-1}이 아닌 0.1 mSv y^{-1}으로 설정하고 추가적인 선량평가가 필요한지의 여부를 판단한다[38]. 만약 해당 시설의 배출 방사능 제한치가 GDCs의 30%를 초과하면, 영국환경청에서 제공하는 스크리닝 목적의 피폭방사선량 평가방법론(Initial Radiological Assessment Tool, IRAT)을 적용하여 평가한다. 허가소지자는 IRAT 보고서에 제시된 DPUR (Dose Per Unit Release, mSv y^{-1} per Bq y^{-1})에 배출 방사능을 곱하여 피폭방사선량을 추정할 수 있다. IRAT는 120개의 핵종에 대하여 GDCs보다 더 현실적인 피폭 상황을 가정하여 DPUR을 유도하였다. 만약 DPUR 기본값으로 평가한 피폭방사선량이 0.02 mSv y^{-1}을 초과한다면, 허가소지자는 DPUR 유도 시 적용한 가정사항을 해당 시설에 맞게 보정하여 피폭방사선량을 다시 평가할 수 있다[39]. 만약 IRAT을 통한 피폭방사선량 평가 결과가 0.02 mSv y^{-1}을 초과한다면, 개봉선원 사용시설을 위한 일반 선량평가 방법론을 적용하여 평가한다. 해당 방법론은 앞선 GDCs나 IRAT와 섭생인자, 환경인자의 기본값은 동일하지만 각 인자별로 더 넓은 범위의 데이터도 제공하고 있기 때문에 부지 특성에 더 가까운 상세한 선량평가를 할 수 있다[40]. 마지막으로, 일반 선량평가 방법론으로 평가한 결과가 0.02 mSv y^{-1}을 초과한다면 관련 분야의 전문가를 통해 부지특성화된 피폭방사선량 평가 모델을 만들어 평가한다. 단, 부지특성화 모델로 평가하더라도 가정사항에 적절한 보수성은 유지해야 한다[36,37].

이와 같이, 영국은 발전용원자로와 개봉선원 사용시설에 대하여 동일한 선량제약치를 적용하고 있으며 배출 승인 면제 대상이 아닌 방사성유출물에 대해서는 모든 시설에 대하여 소외주민의 피폭방사선량을 평가하도록 한다. 단, 선량최적화 기준치를 적용함으로써 피폭방사선량 평가에 대한 차등적 접근을 허용하고 있다. 특히 개봉선원 사용시설에 대해서는 별도의 방사능 기준을 통해 선량평가보다 간단한 방법으로 규제기준 충족 여부를 판단할 수 있도록 하였다. 또한 규제기관이 제공하는 스크리닝 목적의 선량평가 툴은 허가소지자에게 단위 방사능당 연간 유효선량 단위의 인자를 제공하여 간단한 선량평가를 할 수 있게 하였고 구체적인 선량평가가 필요할 경우에는 소규모 시설을 위한 별도의 선량평가 방법론도 제공하고 있다.

4. 고 찰

발전용원자로와 개봉선원 사용시설의 방사성유출물 배출관리에 대한 국내 규제기준과 이 연구에서 조사한 미국, 독일, 핀란드, 스웨덴, 영국의 규제기준을 Table 9와 같이 정리하였다.

이 연구에서 조사한 국가들은 방사성유출물의 환경 배출로 인한 방사선학적 영향을 가능한 한 합리적으로 낮게 유지해야 한다는 원칙에 따라 일반인 선량한도의 작은 분율에 해당하는 유효선량 제약치를 설정하고 이를 준수하도록 규정하고 있다. 미국과 핀란드, 스웨덴의 경우 핵연료를 사용 또는 취급하는 대형 원자력이용시설과 개봉선원 사용시설 간의 다른 선량제약치를 적용하고 있다. 미국

Table 9. Regulatory standards for radioactive effluent discharge in selected countries

Target facility	Criteria	Korea	United States	Germany	Finland & Sweden	United Kingdom
Nuclear power plant	Dose constraint ($mSv\ y^{-1}$)	Multiple standards	Multiple standards	0.3	0.1	0.3
	Radioactivity concentration	√	√			
RI handling facility	Dose constraint ($mSv\ y^{-1}$)		0.1[a)]	0.3	0.01	0.3
	Radioactivity concentration	√	√	√		
	Total radioactivity		√[b)]		√	
	If patient's excreta are included in regulatory scope	√		√		√[c)]

[a)]Only for the gaseous effluent, excluding ^{222}Rn and its daughters, from the facility or equipment other than nuclear power plant and sealed container [10].
[b)]Only for the case if the liquid effluent discharged into the sanitary sewer [10].
[c)]The radioactivity concentration of patient excreta is unlimited but the annual total radioactivity is conditionally exempted from the discharge permission by the UK Environment Agency [34].

의 경우, 원자력발전소를 제외한 시설에서 발생하는 기체 방사성유출물에 대하여 총 유효선량당량 기준 $0.1\ mSv\ y^{-1}$을 선량제약치로 설정하고 발전용원자로에 적용하고 있는 공기 중의 방사능 농도기준치의 10~20%에 해당하는 값을 준수하도록 하고 있다. 그리고 공공하수시설로 배출하는 액체 방사성유출물의 경우, 별도의 방사능 농도기준을 수립하여 결과적으로 공공하수시설 외의 환경으로 배출하는 액체 유출물에 비해 10배 큰 기준을 적용하고 있다. 핀란드와 스웨덴의 경우, 기체와 액체 방사성유출물 각각에 대하여 유효선량제약치를 $10\ \mu Sv\ y^{-1}$으로 설정하고 규제면제 준위의 방사능 기준을 준수하도록 하고 있다. 반면, 개봉선원 사용시설에 대하여 발전용 원자로와 동일한 선량제약치를 적용하고 있는 독일과 영국의 경우 보수적인 가정을 통해 선량제약치에 도달할 수 있는 방사능 농도기준이나 방사능 기준을 역으로 유도하여 해당 시설에 대해서 별도로 적용할 수 있도록 하였다. 특히 영국은 원칙적으로 모든 원자력이용시설에 대하여 선량평가를 하도록 하는데, 선량제약치 $0.3\ mSv\ y^{-1}$보다 낮은 $0.02\ mSv\ y^{-1}$을 최적화 선량 기준으로 설정하고 이 기준치를 통해 차등적 평가를 허용하고 있다.

이 연구는 IAEA 안전기준의 권고와 해외 사례와 같이 국내 개봉선원 사용시설에도 일반인 선량한도의 작은 분율에 해당하는 선량제약치를 새롭게 적용할 것을 제안한다. 선량제약치 수립은 개봉선원 허가사용시설로부터 배출되는 방사성유출물로 인한 일반인의 피폭을 정량적으로 파악하고 합리적으로 가능한 한 최소화하는데 기여할 수 있을 것이다. 또한 대형 원자력이용시설과 다른 개봉선원 허가사용시설의 특성을 반영한 기준 적용을 통해 차등적 규제의 수단이 될 것이다. 단, 새로운 기준으로 인한 기존 사업자의 부담을 최소화하기 위하여 기준 준수 여부 판단 방법은 현장에 적용하기 용이한 방향으로 수립하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 예를 들어, 핀란드, 스웨덴, 영국과 같이 선량제약치에 해당하는 방사능 기준 또는 단위 방사능당 연간 피폭방사선량 인자를 유도하여 연간 예상되는 배출 방사능 추정만을 통해 선량제약치 준수 여부를 판단할 수 있도록 하는 방법이 있다. 또한 독일과 같이 사용시설의 배출유량에 따라 기준치의 10배까지 허용하는 유연성을 적용할 수 있다. 또는 미국의 10 CFR 20.1101 (d)의 선량제약치 $0.1\ mSv\ y^{-1}$과 영국의 선량최적화 기준치인 $0.02\ mSv\ y^{-1}$처럼 선량제약치의 성격을 법적으로 초과해서는 안 되는 기준치가 아닌 일반인 피폭의 최적화 목적으로 설정하는 방법도 있다. 만약, 인허가 시 스크리닝 목적의 선량평가 결과가 이러한 성격의 선량제약치를 초과할 것으로 우려가 될 경우에 대해서만 더 현실적인 가정사항을 적용하거나 부지 특성화된 선량평가를 별도로 수행하도록 하는 것도 사업자의 부담을 최소화하는 동시에 방사선 방호의 최적화에도 적절한 방안이 될 수 있다.

무엇보다 국내 개봉선원 허가사용시설에 대하여 차등접근적 규제를 적용하기 위해서는 해외 사례에서 규제기준 개정 시 진행한 순서와 같이, 규제기관 또는 관련 기관의

주도하에 개봉선원 사용시설에서 배출될 것으로 추정되는 방사성유출물과 이에 따른 피폭방사선량에 대한 연구가 선행되어야 한다. 특히 이 연구에서 조사한 국외 사례의 경우, 액체 방사성유출물을 공공 하수처리시설로 배출하였을 때 시설 작업자의 피폭에 대한 연구가 활발히 진행되어져 왔음을 알 수 있다. 미국의 경우, 과거 일부 하수처리시설에서 방사성물질이 슬러지 형태로 다시 농축되는 현상이 발견됨에 따라 10 CFR 20.2003의 '수용성'과 '확산용이성'에 대한 구체적인 조건을 USNRC의 Information Notice를 통해 공지하였고 이후 10년 동안 범부처조사위원회(ISCORS)를 설립하여 공공하수처리시설 내 농축현상에 의한 방사선학적 영향을 조사하고 해당 규제기준에 대한 논의를 진행하였다[41,42]. 또한 영국 환경청은 하수처리시설에서의 방사성 핵종의 거동에 대한 연구보고서를 지속적으로 발표해 왔으며, 영국 환경청이 제공하는 스크리닝 목적의 선량평가 툴(IRAT)은 하수처리시설의 작업자에 대하여 방사성유출물의 방사성 붕괴 없이 바로 섭취 또는 흡입에 의한 내부피폭과 슬러지에 의한 외부피폭이 발생할 수 있다는 점을 보수적으로 가정하고 있다[39].

5. 결 론

국내 개봉선원 허가사용시설에서 배출되는 액체 및 기체 방사성유출물에 대한 규제기준은 배출관리를 위한 선량제약치가 없고 시설에서 사용하는 방사성물질의 규모와 그에 따라 예상되는 피폭 위험의 정도에 따른 차등적 접근을 적용하지 않고 있다는 한계점이 있다. 이 한계점을 보완하여 개선안을 제안하고자 이 연구는 개봉선원 사용시설의 배출 규제에 차등적 접근을 적용하고 있는 미국, 독일, 핀란드, 스웨덴, 영국의 규제기준과 그 기술적 배경을 조사 및 비교·분석하였다.

해외 규제기준 분석 결과, 조사 대상 국가들은 ALARA 원칙의 준수를 위해 일반인 선량한도의 작은 분율에 해당하는 선량제약치를 설정하고 이를 준수하도록 규정하고 있다. 발전용원자로와 개봉선원 사용시설에 서로 다른 선량제약치를 설정한 미국, 스웨덴, 핀란드의 경우 각 선량제약치에 따른 방사능 농도기준이나 방사능 기준을 충족하도록 하였다. 개봉선원 사용시설에 대하여 발전용원자로와 동일한 선량제약치를 적용한 독일과 영국의 경우에도 개봉선원 사용시설의 선량제약치에 상응하는 방사능 농도기준치 또는 방사능 기준치를 적용하게 함으로써 해당 시설의 규제기준 준수 여부 판단을 용이하게 하였다. 특히 영국의 경우, 규제기관이 개봉선원 사용시설에 대한 별도의 선량평가 지침을 제공하거나 스크리닝 목적의 선량평가 툴을 허가소지자에게 제공하고 있다.

이 연구는 국내 개봉선원 사용시설에 대하여 일반인 선량한도의 작은 분율에 해당하는 선량제약치를 별도로 규정 및 적용할 것을 제안한다. 선량제약치 수립은 개봉선원 허가사용시설로부터 배출되는 방사성유출물로 인한 일반인의 피폭을 정량적으로 파악하고 합리적으로 가능한 한 최소화하는 데 기여할 수 있을 것이며 개봉선원 허가사용시설의 특성을 반영한 기준 적용을 통해 차등적 규제의 수단이 될 것이다. 미국과 영국의 사례와 같이 선량제약치를 초과해서는 안 되는 법적인 기준치가 아닌 피폭의 최적화가 이루어져야 하는 문턱치로 설정하여 스크리닝 목적의 선량평가 이후 필요하다면 추가적인 선량평가를 하도록 하는 방법도 배출 규제의 차등적 접근의 방안이 될 수 있다. 이러한 새로운 기준을 설정하기 위해서는 먼저 개봉선원 허가사용시설에서 발생하는 방사성유출물에 대한 연구가 선행되어야 한다. 또한 이 연구는 새로운 선량제약치로 인한 기존 사업자의 부담을 최소화하기 위해 현장에서의 기준 준수 여부 판단을 용이하게 하는 수단을 고려할 것을 제안한다. 이 연구의 결과는 국내 비발전 소규모 원자력이용시설에서 환경으로 배출하는 방사성유출물 관리 규제에 대한 차등적 접근 방법의 적용을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행된 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 2003017).

참고문헌

1. IAEA. 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements No. GSR Part 3.
2. IAEA. 2018. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment. General Safety Guide No. GSG-9.
3. NSSC. 2022. Nuclear Safety Act. Act No. 18972.

4. NSSC. 2021. Enforcement decree of the nuclear safety act. Presidential decree No. 31824.
5. NSSC. 2019. Standards for radiation protection, etc. Notice No. 2019-10.
6. NSSC. 2021. Technical standards for radiation safety control. Rule No. 29.
7. NSSC. 2019. Technical standards for radiation safety control of medical facility. Notice No. 2019-5
8. NSSC. 2021. Enforcement rule of the nuclear safety act. Ordinance of the Prime Minister No. 1740.
9. NSSC. 2019. Guidance for radiation safety report. Notice No. 2019-21.
10. USNRC. 2022. Standards for Protection Against Radiation. USNRC 10 CFR Part 20.
11. USNRC. 2022. Domestic Licensing of Production and Utilization facilities. USNRC 10 CFR Part 50.
12. USEPA. 2022. Environmental Radiation Protection Standards for Nuclear Power Operations. 40 CFR Part 190.
13. USNRC. 1993. ALARA Levels for Effluents from Material Facilities. Regulatory Guide 8.37.
14. USNRC. 2012. Constraint on Releases of Airborne Radioactive Materials to the Environment for Licensees Other than Power Reactors. Regulatory guide 4.20 Revison.1.
15. USNRC. 2017. Health Physics Questions and Answers- Question 201: Why is it that releases to sanitary sewers are not included in the dose limit for members of the public while other effluent releases are?. Available at: https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/protects-you/hppos/qa201.html
16. Office of the Federal Register. 1991. 10 CFR Part 20 Standards for Protection Against Radiation: Final rule. Federal Register Volume 56, Issue 98 23360-23414.
17. Office of the Federal Register. 1994. Disposal of Radioactive Material by Release into Sanitary Sewer Systems. Federal Register Volume 59, Issue 9146.
18. USNRC. 1982. Scope of exemption in 10CFR20.303 (d) for disposal of patient excreta in sanitary sewers. HPPOS-035 PDR-9111210162.
19. Office of the Federal Register. 1996. Resolution of Dual Regulation of Airborne Effluents of Radioactive Materials; Clean Air Act. Federal Register Volume 61, Issue 65120.
20. BfS. 2017. Law on Protection against the Harmful Effects of Ionising Radiation. StrlSchG.
21. BfS. 2018. Ordinance on Protection against Harmful Effects of Ionising Radiation. StrlSchV.
22. BfS. 2001. Ordinance on Protection against Harmful Effects of Ionizing Radiation. StrlSchV.
23. SSK. 2002. Recalculation of the permitted activity concentrations in the exhaust air and in the wastewater in the context of Amendment of the Radiation Protection Ordinance (Neuberechnung der zulässigen Aktivitätskonzentrationen in der Fortluft und im Abwasser im Rahmen der Novellierung der Strahlenschutzverordnung).
24. Malte G, Christian R and Stella O. 2021. Evaluation of the current status of monitoring the discharge of radioactive substances with the exhaust air and waste water in medicine and industry - project 3619S52560. Federal Office for Radiation Protection (BfS). BfS-RESFOR-176/21.
25. Ministry of Social Affairs and Health of Finland. 2018. Government Decree on ionizing radiation 22.11.2018. 2018/1034.
26. STUK. 2019. Limitation and monitoring of radioactive releases from a nuclear facility. Guide YVL C.3.
27. STUK. 2019. Assessment of Radiation Doses to the Public in the Vicinity of a Nuclear Facility. Guide YVL C.4.
28. STUK. 2017. Radioactive waste and discharges from unsealed sources. Guide ST 6.2.
29. STUK. 2018. Regulation on exemption limits. STUK SY/1/2018.
30. Ministry of Environment of Sweden. 2018. Radiation Protection Ordinance. 2018:506.
31. SSM. 2022. The Radiation Safety Authority's regulations on basic provisions for permit-required activities with ionizing radiation. SSMFS 2022:14.
32. SSM. 2018. The Radiation Safety Authority's regulations on exemptions from the Radiation Protection Act and on clearance of materials, building structures and areas. SSMFS 2018:3.
33. The Ionising Radiations Regulations 2017, UK Statutory Instruments 2017 No. 1075.
34. The Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2016, Statutory Instruments 2016 No. 1154.
35. Department for Business Energy & Industrial Strategy. 2018. Scope of exemptions from the radioactive substances legislation in England, Wales, and Northern Ireland: Guidance document.
36. EA. 2012. Principles for the Assessment of Prospective Public Doses arising from Authorised Discharges of Radioactive Waste to the Environment: Radioactive Substances Regulation under the Radioactive Substances Act (RSA-93) or under the Environmental Permitting Regulations (EPR-10).
37. Allott R, Simmonds J and McDonnell C. 2008. Guidance on initial/simple dose assessment tools. NDAWG Guidance Note 2 version 1.0 Final.
38. Harvey MP, Chen Q, Jones AL and Simmonds JR. 2010. Generalised Derived Constraints for Radioisotopes of Hydrogen, Carbon, Phosphorus, Sulphur, Chromium, Manganese, Cobalt, Zinc, Selenium, Technetium, Antimony, Thorium and Neptunium. Health Protection Agency. HPA-CRCE-004.
39. EA. 2022. Initial radiological assessment tool 2: part 2 methods and input data.
40. McDonnell CE. 2004. Radiological Assessments for Small Users. National Radiological Protection Board. NRPB-W63.
41. USNRC. 1994. Solubility Criteria for Liquid Effluent Release to Sanitary Sewerage Under the Revised 10 CFR PART 20. USNRC Information Notice 94-07.
42. ISCORS. 2005. ISCORS Assessment of Radioactivity in Sewage Sludge: Modeling to Assess Radiation Doses. NUREG-1783.