Journal of Radiation Industry 13(2) : 75~82(2019)

치료용 ^{131}I 투여 환자 배출물 관리 연구

김지영[1] · 권태은[2] · 하위호[2] · 이상경[3] · 김봉기[1,4] · 정규환[1,4,*]

[1]한국원자력안전기술원, [2]한국원자력의학원, [3]고려대학교 바이오융합공학과, [4]과학기술연합대학원대학교

Management of Patient Feces and Urine Administered with Therapeutic ^{131}I

Ji Young Kim[1], Tae Eun Kwon[2], Wi Ho Ha[2], Sang Kyung Lee[3], Bong Gi Kim[1,4] and Kyu Hwan Jeong[1,4,*]

[1]*Korea Institute of Nuclear Safety 62 Gwahak-ro Yuseong-gu Daejeon 34142, Republic of Korea*
[2]*Korea Institute of Radiological & Medical Science 75 Nowon-ro Nowon-gu, Seoul 01812, Republic of Korea*
[3]*Department of Bio-convergence Engineering, Korea University B-dong Hana-Science Building, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea*
[4]*University of Science and Technology 217, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34113, Republic of Korea*

Abstract - The domestic and foreign directions of regulation on the management of therapeutic ^{131}I administered patients and also the comparison between the measurement results of the temporary point-of-view and the emission control standards in Korea were analyzed. Considering the visit schedule of outpatients in the management of patient wastes that focus on treatment wards, all institutes have established effluents management plans and developed standard regulatory requirements that can be used as regulatory examination guidelines. The significance and limitations of the effluents control standards applied to the management of therapeutic ^{131}I administered patients in Korea were examined and compared with the U.S. effluents control standards. In international recommendations such as the European, IAEA, and ICRP, the benefits of not storing patient urine are far greater. In Korea, it is mandatory to install private toilets and storage tanks in all treatment hospitals. In 2015, it was planned to evaluate and manage the effluent concentrations of therapeutic ^{131}I administered patients considering all outpatients at all ^{131}I treatment hospitals. Regulatory agencies have drawn up regulatory guidelines that include regulatory stances, therapeutic ^{131}I administered patient's effluent assessment methods, and drainage facility management to be applied in care and testing.

Key words : Therapeutic ^{131}I administered patients, Effluents, Effluents' management, Treatment rooms, Drainage facilities, Regulatory requirements, Regulatory guidelines

서 론

국내에서 ^{131}I (반감기: 8일)을 투여한 치료 환자는 투여 용량에 따라 치료병실에 입원(>1,200 MBq, 이하 '고용량')하거나 외래(≤1,200 MBq, 이하 '저용량')에서 진료받는다. ^{131}I를 투여한 환자로부터 발생되는 배출물에 관한 관리는 국내외 방사선 방호의 주요 현안으로 국제원자력기구(IAEA; International Atomic Energy Agency)를 비롯한 해외에서는

* Corresponding author: Kyu Hwan Jeong, Tel. +82-42-868-0658, Fax. +82-42-868-0252, E-mail. jkhwan@kins.re.kr

Table 1. Comparison of domestic and U. S. regulations on effluent control standards

Korea Nuclear Safety & Security Commission (Notice No. 2017-36)	U. S. Nuclear Regulatory Commission (10 CFR 20.2003)	
Effluent control standard in drainage	Wastewater concentrations	Sewer monthly average concentrations
3.0×10^4 Bq·m^{-3} (30 Bq·L^{-1}) (Average of one week, inevitably can be replaced by an average of three months)	3.7×10^4 Bq·m^{-3} (37 Bq·L^{-1})	3.7×10^5 Bq·m^{-3} (370 Bq·L^{-1})
Apply to patients' discharged RI	NOT apply to patients' discharged RI	

Table 2. Regulation on ^{131}I administerd patient effluents of EC member countries (April 2008)

Country	Release type		Remark
	Immediate release	Delayed and attenuated	
Denmark	○		Does not regulate total radioactivity emitted. However, when released, it should be diluted to 0.1 MBq·L^{-1}.
Finland	○		Patient Effluents No release limit. 100 MBq available at any point in time, but should not exceed 100 GBq per year.
Sweden	○		No release limit (Direct discharge recommended). Even if the hospital discharges 50 GBq of ^{131}I per year, the external exposure to workers at the sewage terminal treatment plant is assumed to be at most 2 μSv
England	○	○	If prove that the dose concentration does not exceed 300 μSv per year, no need to install RI storage
Germany		○	All hospitals must have a reservoir installed and not exceed 5 Bq·L^{-1}.
Greece	○	○	The treatment room must have an RI reservoir, the concentration should not exceed 3.7 MBq·L^{-1}.
France		○	Install a toilet in the treatment room (over 740 MBq). The effluent from the nuclear medicine sewage system should be connected to the septic tank, and its length, half-life, and radioactivity should be greatly attenuated to the final discharge.

고용량 환자의 배출물이 유입되는 치료병실의 저장조 설치 및 운영 관리에 초점을 주로 두고 있다(ICRP 2004; IAEA 2009).

미국의 경우 원자력규제위원회(NRC; Nuclear Regulatory Commission)에서 배출관리기준 값을 도출하였는데(10 CFR Appendix B to Part 20) 세부적인 가정은 우리나라의 방식과 다르다. 미국의 배출관리 기준은 구체적으로 측정된 물의 농도에 연간섭취한도(ALI, 섭취)를 7.3×10^7 (ml)로 나누어 준다. 이 값은 참조인(reference man)이 연간 섭취하는 물의 양 7.3×10^5 (ml)과 종사자 연간 피폭한도 50 mSv, 연령별 차이 인자 2 및 10을 고려한 것이다. 미국의 규제요건(10 CFR 20.2003)의 배출관리기준 적용방식과 차이점은 폐수와 하수구 방출 경로를 따로 구분하고 있고, 하수구의 농도는 '월간' 농도 평균을 적용하며 RI 진료 환자의 배출물은 규제적용 대상으로 간주하지 않는 것이다.

유럽 각 나라에 대한 ^{131}I 투여 환자 배출물 규제 방법은 다음의 Fig. 1 및 Table 2와 같다.

아일랜드 방사선방호국에서는 치료병실 저장조 유무에 따라 피폭 가능성이 있는 사람의 예상피폭선량을 평가하였다. 치료병실의 저장조에 배출물을 30일 보관하는 경우, 오수 작업자는 연간 6 μSv 이하로 피폭하게 되며 일반인의 예상피폭선량은 3 μSv 이하로 면제준위 10 μSv[a)] 이하임이 확인되었다. 또한 저장조에 일정기간 보관 없이 바로 방출하는 경우, 하수종말처리장에서 근무하는 오수 처리 작업자는 연간 최대 185 μSv 정도의 피폭이 예상되며 치료병실 배관이 막히는 사고가 발생할 경우, 배관공은 약 50～70 μSv 정도 피폭될 것으로 예상되었다(Punt *et al*. 2010)

영국 환경청에서 수행한 연구 결과에 따르면, 병원 시설의 인정한도 수준으로 방사성물질을 방출한다면 하수처리 근로자는 연간 대략 0.24 mSv를 피폭하며 하수처리장 배출구 하류에서 잡힌 물고기를 많이 섭취한다고 가정한 일반인의 경우 연간 최대 0.18 mSv를 피폭할 수 있다. 이러한 결과들은

a) 면제된 행위나 선원으로 인해 어떤 일반인에게 예상되는 유효선량이 10 μSv 연간 이하라면 그 행위나 행위 내 선원은 추가적인 고려나 조건 없이 면제될 수 있다(IAEA BSS).

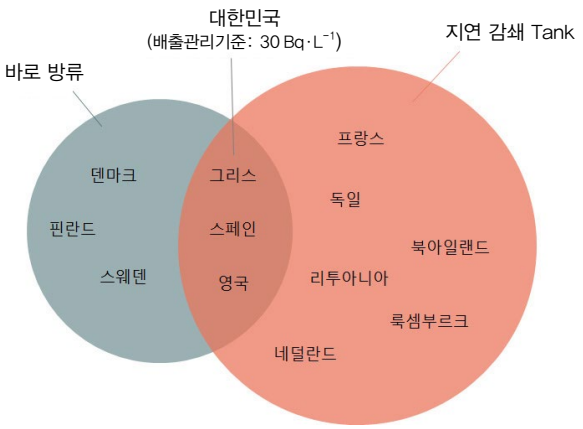

Fig. 1. Comparing effluents management method of each country.

매우 보수적인 가정에 근거한 것으로 최대 방출량에서 일반인의 피폭량은 어떠한 경우에도 연간 1 mSv를 넘지 않는 것으로 평가되었다(Punt *et al*. 2007)

한편 국제방사선방호위원회(ICRP; International Commission on Radiological Protection)는 방사성동위원소로 치료받은 환자의 소변을 따로 저장하도록 권고하지 않는 입장이다. ICRP는 소변을 저장하여 얻게 되는 이득은 거의 없으며, 하수계통으로 방출된 방사성핵종에 의해 하수계통 종사자나 일반인이 피폭되는 선량은 일반인 선량한도 보다 충분히 낮을 것으로 보고 있다. ICRP에서 소개한 영국에서의 수십 년간의 연구 결과에 따르면, 병원에서 저장조를 통한 배출량 감축은 그 비용이나 의료진의 피폭 잠재성 때문에 대부분의 병원에서 현실적이지 않은 것으로 평가되었다. 즉, 저장조는 안전을 증가시키는 인상을 주지만, 이러한 행위가 국민 전체의 보건상의 이득을 증가시키지 않는다고 기술하고 있다(ICRP 2004).

환자의 퇴원을 결정할 때 IAEA는 특히 아동 및 임신한 여성 등 환자의 생활 조건, 환자 배출물과 체액 관리 등 환자 퇴원 후 환경에 대해 병원에서 충분히 고려하여야 하며 별도의 지침을 만들어 적극적인 교육, 안내를 제공할 필요가 있다고 권고하고 있다. IAEA Draft Safety Guide DS399 (2016)에서는 특정 환자에 대해 적절한 퇴원 방사능 기준을 결정할 때, 다른 가족 구성원들로부터 격리되는 범위와 더불어 환자의 운송 및 생활 조건과, 환자의 배출물의 안전한 관리를 고려할 것을 기술하고 있다. 하지만 ^{131}I이 포함된 변 등 환자 배설물의 경우 진단 환자에 대해 수집 필요성이 없으며, 일반적인 화장실을 사용할 수 있다. 고용량을 투여하는 치료 환자의 경우, 국가마다 정책이 다르지만 원칙은 희석 또는 붕괴 방법에 따르는 것을 제안하는데, 즉 환자의 배출물을 수집 및 보관하거나 배관을 통해 지연 탱크로 모이는 배수시설을 활용할 수 있다. 그러나 대부분의 상황에서 연속적인 하수 시스템 내에서 폐기물의 방사능을 희석 및 분산시키는 것이 더 낫다고 보고 있다. 일부 하수 시스템에서는 유출물을 신속하게 처리하고 이후 강물과 혼합하거나 농사를 짓는 데 필요한 물을 논밭에 대는 관개용으로 사용하는 것을 허용하기도 한다.

국내에서는 방사성동위원소 투여 환자의 입원실에 전용 화장실을 설치하고, 진료환자의 배설물을 배출하는 경우 배출관리기준을 만족하도록 하여야 한다(원자력안전위원회 규칙 제18호 및 원자력안전위원회고시 제2017-44호). 따라서 각 병원의 방사선안전관리 및 규제기관의 규제 초점은 방사선관리구역인 고용량 환자가 입원한 치료병실과 이와 연결된 저장조 등 배수시설에 대하여 이루어져 왔다.

또한, 진료환자에게 투여하는 방사능이 고시에서 핵종별로 정한 값 이상인 경우에는 일반 환자와 격리하여 입원시키도록 규정되어 있다. 현재 약 70개에 해당되는 의료기관이 ^{131}I 투여 환자를 격리하여 입원할 수 있는 치료병실을 운영하고 있으며 ^{131}I 투여 방사능 입원 기준은 1,200 MBq (33 mCi)이다. 병원 및 환자의 특성을 고려하여 치료병실에서 1박 2일에서 3박 4일(또는 그 이상도 가능) 입원하는 기간 동안 환자가 사용하는 전용 화장실 및 세면대를 통해 배설물(소변, 대변, 침, 땀 등)이 원자력안전법으로 관리되는 전용 RI 저장조로 모이게 되며 일부 병원은 치료병실 음식물 분쇄기와 연결되기도 한다.

그러나 이러한 시설에도 불구하고 치료병실 퇴원 환자가 입원 없이 당일 핵의학과를 이용하거나 외래 환자가 후속 검사를 위해 병원에 재방문하여 일반인들이 이용하는 화장실을 사용하는 예상치 못했던 상황에 따라 병원 일반 오수에서 방사성농도가 높아질 수 있다는 우려가 제기되었다.[b] 현재 국내에서는 병원 내 환자 배출물을 원자력안전위원회 고시의 배출관리기준 값을 적용하고 있으나 환경으로 방출되었을 경우에는 음용수 기준을 적용하는 등 관리와 규제기준을 일관되게 적용되지 못하고 있다. 이러한 문제는 ^{131}I 환자 퇴원 후 검사 절차(환자의 재방문)와 관리를 미리 예상하지 못했던 사안과 맞물리게 되었고 ^{131}I 투여 환자가 병원에서 머무르며 일반 오수의 농도를 증가시킬 수 있다는 추측이 제한된 실험을 통해 확인되었다. 이에 원자력안전위원회에서는 각 병원에 치료용 ^{131}I 투여

b) ^{131}I 투여 환자가 퇴원 후에 이용하는 의료기관에 대한 언론 보도 후, 2013년도에 원안위에서는 퇴원 환자 이용 병원 실태조사(직원 예상피폭 등)를 수행한 반면, 2014년도에 환경부에서는 방류수 방사능조사를 실시하였다. 퇴원 환자 이용 병원 (서울 소재 세 군데) 및 상급종합병원(RI 허가기관 3개 기관) 방류수 및 관할 하수처리장 방류수에 대한 ^{131}I 방사능 농도를 2014년 1월부터 6월까지 매월 샘플을 채취하여 HPGe 감마선 분광시스템을 사용하여 측정하였다. 퇴원 환자 이용 병원 방류수 유입부 농도는 최대 107,500 Bq·L^{-1}까지 검출되었으며, 하수처리장은 1.09~5.86 Bq·L^{-1}으로 측정되었다. 특이한 사항은, 2개 허가 병원에서는 지선유입부에서는 최대 10 Bq·L^{-1} 미만이었으나 지선말단부에서는 배출관리기준(30 Bq·L^{-1})를 초과하는 경우가 있었으며, 1개의 상급병원에서는 지선유입부의 일반오수에서 농도가 높게 나오는 것이 확인되었다. 이는 원자력법에서 규제되고 있는 RI 저장조에서는 배출관리기준을 충분히 만족하고 있으나, 병원 내(사업소 경계) 일반 오수에서 방사능 농도가 높게 나올 수 있다는 문제점이 확인된 것이다.

환자 배출물 관리 방안 대책 수립을 요청한 바 있다.[c)]

본 연구에서는 ^{131}I를 투여한 입원 및 외래 환자 배출물에 대한 국내 병원의 상황을 고려하여 원자력안전법상의 배출관리기준을 만족하면서 최적화된 배출물 관리를 위한 평가 방안을 제안하고자 한다.

재료 및 방법

방사성동위원소 또는 방사선발생장치를 사용하려는 자는 원자력안전법 제53조에 따라 원자력안전위원회의 허가를 받아야 한다. 특히 의료진단용으로 사용하는 엑스선발생장치 등을 제외하고 방사선을 이용한 의료 진료 행위는 원자력안전법의 규제 대상이다. 원자력안전법에 따라 방사성동위원소 ^{131}I 환자에게 투여하는 허가를 득한 병원은 총 128개이다(KINS 2015).

방사성동위원소 투여 환자의 배출물(배설물을 포함한 모든 배출액) 관리는 방사선안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙 제53조(방사성동위원소 투여 환자 안전관리) 및 원자력안전위원회 고시 제2017-36호 방사선방호 등에 관한 기준 제6조에 따라 '배출관리기준'을 만족하여 배출하여야 한다. 여기서 '진료' 환자는 진단 및 치료 환자이며, '배출'은 원자력안전법 시행령 제2조에 따라 방사성물질 또는 그로 인하여 오염된 물질로서 정상운전 중에 발생한 액체 상태의 방사성물질 등을 배수시설을 통하여 계획적이고 통제된 상태에서 외부로 내보내는 것으로 정의되어 있다. '배출관리기준'은 원자력안전위원회 고시 제2017-36호 제6조(배출관리기준) 및 별표 3에 구체적으로 기술되어 있는데 배출관리기준 값이 도출될 때 적용된 가정은, 사업소 경계 배출구에서 방출되는 배출물을 일년 내내 하루 2리터(연간 0.73톤)씩 섭취할 경우에 일반인 선량한도인 1 mSv에 도달할 수 있는 값으로 성인과 유아, 아동 간의 차이를 고려한 것이다.

배수 중의 배출관리기준 도출 식은 다음과 같다.

$$\mathrm{ALI}_{\text{섭취}}\,[\mathrm{Bq}] = \frac{\mathrm{DL}\,[\mathrm{msv}]}{\mathrm{DCC}_{\text{섭취}}\,[\mathrm{msv}\cdot\mathrm{Bq}^{-1}]}$$

$$= \frac{20\,[\mathrm{msv}]}{2.2\times10^{-5}\,[\mathrm{mSv}\cdot\mathrm{Bq}^{-1}]} = 9.9\times10^{5}\,[\mathrm{Bq}]$$

$$\mathrm{DCC}_{\text{섭취},\,^{131}\mathrm{I}} = 2.2\times10^{-5}\,[\mathrm{mSv}\cdot\mathrm{Bq}^{-1}]$$

배수 중의 배출관리기준

$$^{131}\mathrm{I}\,(\mathrm{F}) = \frac{\text{연간섭취한도}\,(\mathrm{ALI})\,[\mathrm{Bq}]}{20\times2\times0.73\,[\mathrm{m}^3]} = \frac{9.09\times10^{5}}{29.2}$$

$$= 3.1\times10^{4}\,[\mathrm{Bq}\cdot\mathrm{m}^{-3}]$$

국내에서 치료목적으로 사용하는 방사성동위원소 중 ^{131}I이 전체 사용량의 99%를 차지한다. 그 외 치료가 아닌 진단 목적으로 환자에게 사용하는 대표적인 방사성동위원소 핵종은 ^{18}F, ^{99m}Tc, ^{201}Tl이 있다.

전국의 ^{131}I 허가 의료기관은 서울(30%)에 가장 많이 분포하고 있으며, 그 다음 경기도(18%), 부산(12%) 순이다. 전북, 제주, 충남은 모든 ^{131}I 허가 기관이 치료병실도 함께 운영하고 있으며, 서울은 61%, 경기도는 68%, 부산은 57%, 인천 80%가 치료병실을 운영하고 있다. ^{131}I 취득량 1위인 의료기관은 2위와 약 2배 이상 차이가 나며 국내 의료기관 전체 취득량의 10% 이상을 차지한다. 갑상선암 치료로 유명한 병원에 환자가 몰리면서 그만큼 ^{131}I 취득량이 높은 것으로 추측할 수 있다. 1위부터 상위 10위까지 병원에서 ^{131}I 취득량은 국내 전체 병원의 약 50%를 차지하며, 20위까지는 약 60%를 차지한다. 연간 취득량이 1,000 mCi (37,000 MBq) 이하인 병원은 약 30개로 집계되었다(KINS 2016). 이러한 차이를 고려할 때 의료기관에서 사용목적(진단 또는 치료)이 아닌 취득(사용)량에 따른 차등적인 규제 접근이 필요할 것으로 보인다.

^{131}I 저용량 투여 후, 환자는 검사 없이 바로 귀가한 후 며칠 이내에 병원에 재방문하여 진단 검사 또는 의사 진료를 받게 된다. 핵의학과가 오래전에 개설된 병원은 환자 전용 화장실이 없는 경우도 있으며 환자 전용 화장실이 있더라도 저장조가 연결되어 감쇄/보관을 거치지 않고 일반 오수와 섞여 배출되기도 한다. 즉, 법령상 사업소 경계에서 배출관리기준을 만족하면 문제가 없기 때문에 저장조는 반드시 필요한 시설이 아니며 희석 방법 및 여러 중요한 변수를 가정하여 배출 시점의 농도를 추정할 수 있다.

하수종말처리장의 작업자는 일반인임에도 불구하고, 병원에서 환자 배출물로 인한 예상피폭 가능성이 제일 높을 수 있다. 물론 병원에서 치료병실 저장조를 설치하였을 경우에는 하수종말처리장 작업자의 예상피폭선량이 제약치 준위 이하

c) 의료용 배수 중 방사성 농도 분석 [대한핵의학기술학회, 2005] 결과, 20개 의료기관에 대한 1개 이상의 최종배수구에서 2주간 일일 1회 동일한 시간대에 측정한 결과 7개 기관이 ^{131}I 배수 중 배출관리기준을 초과하였으며, 방사능 평균 농도는 4.21×10^{4} Bq·m^{-3}이였다. 배수 중 ^{131}I 방사능 농도가 높게 측정된 기관(병원)의 특징은, 외래 환자용 ^{131}I 저장조가 없으며 외래에서 사용하는 ^{131}I 저용량(1.11 GBq 이하) 사용량이 많거나 용량 투여 후(1.11 GBq 이상) 퇴원 시 1차 검사 후, 짧은 기간 내 2차 검사를 받기 위해 재방문하는 기관(투여 7일 후, 치료병실 퇴원 후 24일 이후) 혹은 외래용 ^{131}I 저장조가 있으나, 검사 전 소변 관리가 부족한 기관에서 높게 나타났다. 배수농도 저감화를 위해 도출된 개선방안으로는, 저용량(1.11 GBq 이하)과 고용량(1.11 GBq 이상) 투여 후 검사 시 소변을 배출하여 방광을 비우도록 되어 있는 과정에서 체내 잔류한 ^{131}I이 배출되는 것으로 확인되었으므로 배수관리기준을 준수하기 위해서는 외래 환자용 ^{131}I 저장조 마련을 요청하였다. 또한, RI 투여 환자가 2차 검사를 위해 병원에 재방문 할 경우, ^{131}I 저장조와 연결된 전용 화장실을 반드시 이용하여 병원 최종배수구에서 방사능 농도가 높아지는 것을 방지하여야 한다. 이와 관련하여 환자에게 외래용 ^{131}I 저장조와 연결된 전용 화장실을 반드시 사용하도록 안내하는 교육이 강화되었다.

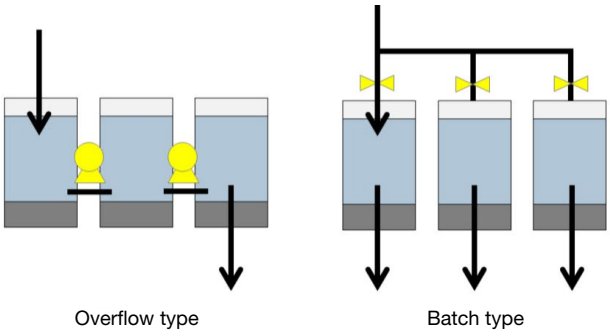

Fig. 2. Two types of storage tank (Overflow type, Batch type).

수준으로 떨어지므로 우려할 정도는 아니다. 환경부에서는 공공수역 유입 여부 조사 및 환경정책수립 기초자료 확보를 위하여 공공수역 방사성물질 측정망 운영계획을 수립하였다. 환경부 산하 국립환경과학원에서는 4대강(한강, 금강, 낙동강, 영산강)의 물환경 연구소를 통하여 측정, 분석을 이행하고 있다(환경부 2015).

낮은 농도의 방사성 유출물의 배출 관리는 '희석과 분산' 또는 '지연과 감쇄' 2가지로 구분할 수 있으며 이는 하수 시스템으로 직접 배출하거나 배출 전 감쇄를 위한 보관(저장조 사용)을 의미한다. 즉, 하수 시스템으로 배출하기 전에 감쇄를 위한 보관에는 지연 및 감쇄 원리가 적용되고 하수 시스템으로 직접 배출하는 경우에는 희석의 원리가 적용되는 것으로 볼 수 있다.

국내 ^{131}I 취급 병원의 경우, 치료병실 입원 환자의 방사성배출물은 치료병실 내 전용 화장실에 연결된 전용 저장조에 모인 후 충분히 감쇄된다. 반면 핵의학과에서 진단용으로 ^{99m}Tc, ^{18}F과 같은 핵종을 투여한 환자의 배출물은 하수 시스템으로 바로 배출이 가능하다. 이는 투여 핵종이 진단참고준위로 관리되었다는 가정 하에, 핵종의 낮은 방사능과 짧은 반감기로 인해 배출관리기준을 충분히 만족하기 때문이다. 또한 매우 낮은 방사능 유출물의 폐기나 세척수를 방출하는 경우에도 하수 시스템에 직접 배출하는 것이 가능하다.

액체폐기물 관리 절차 수립에 고려하여야 할 요인들은 유출물의 양, 방사성 핵종의 반감기, 총량 및 특정 방사능 양, 기타 유해 오염물질 여부, 유출물의 화학적 특성(예: 부식성), 선량률 및 차폐 요건이다. 앞에서 제시한 2가지 경우의 상세한 배출관리 방법은 다음과 같다(IAEA 2013).

1. 하수 시스템으로 배출하기 전 감쇄를 통한 보관법

이는 방사성 폐기물 보관 장소에서 감쇄되도록 적절한 용기에 보관하거나 감쇄탱크에 보관하는 것이다. 보관을 위해 안전한 방사성 폐기물 보관 장소에 유출물을 보관하는 적절한 용기를 사용하거나 감쇄 저장조 시스템 설치가 필요하다.

용기의 사용은 전체 부피가 작을 때, 즉 일반적으로 연간 0.5 m^3 이하이고 방사성 핵종의 반감기가 100일 이하인 경우에 가장 적절하다. 기존 사용허가 병원에서 사용의 증량이 필요하지만, 저장 탱크의 설치가 어려울 경우, 소변 수집 용기를 사용할 수도 있다.

방사능 준위가 배출관리기준을 초과하는 방사성 유출물이 대량으로 발생하는(연간 0.5 m^3 이상) 시설의 경우 '지연 및 감쇄'가 일반적으로 최상의 선택이다. 감쇄 탱크 없이 하수 시스템으로 직접 배출된다면 피폭에 가장 유의한 집단은 하수처리장 작업자이며 하수처리장에서 하수 슬러지에 있는 핵종을 재농축하여 사용하는 사례가 생길 수도 있다.

국내 병원에 설치된 저장조의 대부분은 배치 타입으로 설계되어 있으며 각 탱크에서 수위를 확인할 수 있다. 한편 Overflow 방식의 저장조는 배출수가 자동적으로 넘어가는 방식이다.

2. 하수 시스템으로 직접 배출

하수 직접 배출에 영향을 끼치는 요소는 지역 인구 및 생활습관에 대한 이해, 향후 인간의 식품원으로 사용되는 배출물을 섭취하는 동물에 대한 영향, 하수 시스템의 발전 정도, 동일한 하수 시스템으로 배출하는 설비/기관의 수, 배출 방법의 환경에 대한 영향, 대표적인 사람에 대한 선량 규제 기준 등이다.

국내 배수 중 배출관리기준은 '일주일 평균치'이며 부득이한 경우 3개월 평균치로 갈음할 수 있다. 따라서, 사업소 경계 최종 배수구에서의 일주일간 배출물 농도는 일주일간 유입된 방사능 농도를 일반 오수량으로 나누어 구할 수 있다. 이러한 배출관리기준의 평가는 실제 어떤 시점에서 측정 결과와는 차이가 날 수밖에 없으며 특히 직접 배출 시에는 측정값이 갖는 의미를 다시 고려하여야 한다.

일반인의 선량한도로부터 도출된 배출관리기준 가정을 다시 살펴보면, 방사선 방호 측면에서 어떤 특정 시점의 최대 농도가 아닌 최소 일정 기간(일주일)의 평균 농도로 규제되고 있음을 알 수 있다. 궁극적으로 어느 정도의 방사능 농도가 일반인 몸에 축적되어 연간 선량한도에 도달할 수 있는 수준인지 순간적인 측정 수치로 판단하는 것은 섣부른 접근이다. 전체 피폭 시간을 고려하지 않고 어느 한순간의 측정값에 따라 규제기관, 언론 등에서 민감하게 반응하게 되면 사업자(병원)에게 불필요한 제약이 늘어 날 수 있고 결과적으로 방사선 방호를 향상시키지 못한 채 늘어난 사회적 비용을 전 국민이 감수해야 할 수 있다.

본 연구에서는 외래 환자에 대한 배출물에 의해 사업소 최종 경계에서 배출관리기준을 만족시키기 위한 방안들을 제안하였으며 국내 기관마다 상황을 최대한 고려하여 자체적 관리 방안을 수립, 시행하였던 결과들을 분석하였다.

결 과

대한핵의학기술학회를 통해 수행된 연구 결과, 2013년도 ^{131}I 사용량 상위 20개 기관 중 7개 기관의 일반구역 사업소 경계에서 배출수 측정값이 배출관리기준 보다 높게 측정되었다(KINS 2015). 이는 계획적으로 통제되지 못한 외래환자에 의해 일반 오수에서 방사능 농도가 높아질 수 있음을 시사한다. 한편, 주기적인 시료 분석 및 연속적인 배출감시 등 실시간 측정 시스템을 갖춘 원전시설에 적용하는 규제 기준을 일반적인 병원 오수 시스템에 동등하게 적용하기는 어렵다. 병원마다 RI의 사용량, 환자 내원 일정이 각기 다르고 기존 일반 배수시설 변경 시에 소요되는 비용, 공간상의 제약 문제로 인해 하나의 관리 방안으로 적용하기 힘들다. 무엇보다 환자(사람)라는 방사선원은 통제가 어렵다는 현실적 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 ^{131}I 투여 환자(외래 환자)가 병원 내 화장실에서 배출한 배설물로 인하여 최종 배출물 중의 ^{131}I 방사능 농도는 배출관리기준(3×10^{4} Bq·m^{-3} 또는 30 Bq·L^{-1})을 만족하여야 한다. 즉, ^{131}I 투여 환자의 배출물은 배출관리기준 이하를 만족할 때 사업소 외부로 배출하여야 하며 이를 위해 병원에서는 환자 전용 화장실을 통해 RI 저장조에 모은 후 일정 기간 감쇄를 거치고 난 다음, 배출액 중의 방사능 농도가 배출관리기준 이하임을 확인하여야 한다. 이번 연구에서는 구조상 배출관리설비(저장조)의 설치가 어려운 경우, 배출관리기준을 만족하는 주당 적정 사용량을 평가하고 이에 따른 주당 환자 수를 조절하거나 재방원 일정 조정 방안 등을 통해 최종적으로 배출관리기준이 초과되지 않도록 제안하였다. 또한 배수시설을 설치하였더라도 RI 투여 환자가 해당 병원에 방문할 시에는 반드시 핵의학과 전용 화장실을 사용하도록 환자에게 사전 교육 및 안내를 강조할 것을 제안한다.

다음과 같이 RI 저장조가 핵의학과 전용 화장실과 연결 후 바로 병원 외부로 배출하는 경우를 가정해 보자.

오른쪽의 그림 3과 같이 핵의학과에 치료용 ^{131}I 투여 환자 지정 화장실이 있고 이 화장실의 배출수가 RI 저장조(기존 또는 신규)와 연결되어 있는 경우, RI 저장조는 배치타입으로 순서대로 채워지게 되며 저장조의 배수구에서 바로 최종 배출구로 연결되는 경우에는 최종 배출 시점에서 배출관리기준을 만족시킬 수 있으면 된다. 이러한 경우를 가정하여 저장조 기수, 환자 내원일, 허가량에 따라 저장조의 최종 배출 시점의 농도 계산 결과 예시는 다음의 Table 3과 같다.

이 경우에는 치료병실의 화장실과 저장조는 연결되어 있지 않고 핵의학과 화장실만 연결되었다고 가정하였다. 만일 저장조 부피로 인하여 공간상의 제약을 받아 기존 5톤, 5톤, 3톤 중 3톤을 설치하지 않고 5톤짜리 저장조 2기만 설치되었다고 가정하여 배출 시점의 농도와 배출관리기준의 농도 비율을 다시 계산한다면 배출물/배출관리기준 비율은 0.22로 계산된다. 이는 표에서 보여주는 기존 결과인 0.005 보다는 높지만 배출관리기준을 충분히 만족할 수 있는 수준이다. 따라서, 사용자는 무조건 저장조의 기수나 부피를 늘리는 것보다 적정한 수준에서 시설 공간, 비용 등을 고려하여 저장조 부피를 결정하는 것이 바람직하다.

이번에는 저장조를 1기로 줄인다고 가정하고, 환자 내원일을 2일에서 4일 후로 변경한다면 환자 몸에 남은 방사능은 급격히 감소하게 되며, 이 경우 배출물/배출관리기준 비율 계산 결과는 0.001로 상당히 감소한다. 즉, 저장조 1기만으로도 배

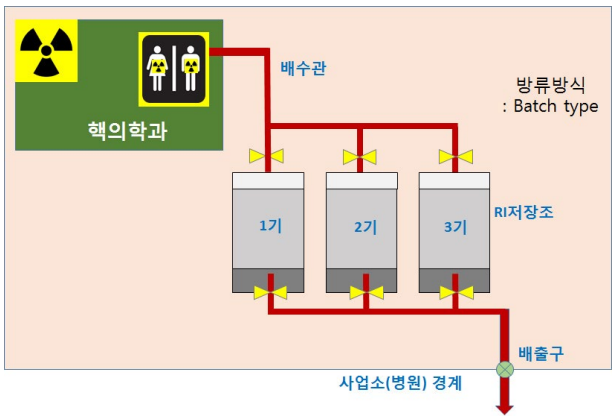

Fig. 3. RI storage tank connection diagram.

Table 3. Example of concentration calculation result at final discharge point of storage tank according to storage tank number, patient visit date, and permission amount (Storage Tank No. 1; 5,000 L, No. 2; 5,000 L, No. 3; 3,000 L Full water level 90% Assumption)

	Patients without thyroidectomy	Remark
Permission amount	1,850 GBq	Approved by each place of use
Schedule for out patient treatment	2 days after	
Per person radioactivity amount	258.9 kBq	
Number of patients per week	30 persons	
Daily amount of radioactivity	1,553,400 Bq	Per person radioactivity amount × Number of patients per day
Daily sewage amount	60 L	10 L·person^{-1} × Number of patients per day
No. 1 Tank fulling water time	75 days	Actual fulling amount/Daily amount of waste water
No. 2 & 3 Tanks fulling water time	120 days (75 + 45 days)	
No. 1 Tank concentration at the full water	3,998 Bq·L^{-1}	
No. 1 Tank effluent concentrations	0.15 Bq·L^{-1}	< Effluent control standard (30 Bq·L^{-1})
Effluent ratio to effluent control standard	0.005	< 1

Table 4. Results of recalculation of effluents/effluent control ratios by adjusting storage tank number, patient visit date, and RI usage

	Assumption		Effluent concentration ($Bq \cdot L^{-1}$)	Release rate/ Effluent control standard
1	Storage tank No. 3 → 2	No. 1 Tank ; 5,000 L (90%) No. 2 Tank ; 5,000 L (90%)	6.7	0.22
2	Schedule for out patient treatment 2 → 4 Days	No. 1 Tank ; 5,000 L (90%) No. 2 Tank ; 5,000 L (90%)	0.04	0.001
3	Schedule for out patient treatment 2 → 4 Days	No. 1 Tank ; 1,000 L (90%) No. 2 Tank ; 1,000 L (90%) No. 3 Tank ; 1,000 L (90%)	7	0.23
4	Schedule for out patient treatment 2 → 4 Days	Storage Tank No. 2 → 1 No. 1 Tank ; 5,000 L (90%)	25	0.83
5	Permission amount → 1/5; 370 Bq	No. 1 Tank ; 1,000 L (90%) No. 2 Tank ; 1,000 L (90%)	6.7	0.22

출관리기준을 충분히 만족함을 알 수 있다. 이렇듯 저장조 기수와 환자 내원일, 치료용 ^{131}I 사용량을 조정하여 배출물/배출관리기준 비율을 다시 계산한 결과는 Table 4와 같이 나타낼 수 있다.

환자 내원일을 4일로 늘리고, 저장조 부피를 1톤 3기로 가정한 결과, 농도 비율 계산결과는 0.23으로 배출관리기준을 충분히 만족함을 알 수 있으며 환자 내원일을 4일로 늘리고, 저장조를 5톤짜리 1기만 설치한다면 농도 비율은 0.83으로 역시 배출관리 기준을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. 물론, 1톤 3기를 설치하는 것이 배출물 농도 관리에는 훨씬 유리하다.

마지막으로, 연간 허가량을 1/5 수준으로 줄이고 (즉, 실제 사용량을 허가량의 1/5 수준으로 설정) 1톤짜리 저장조를 2기만 설치하는 경우에는, 배출물/배출관리기준 비율이 0.22로 계산되어 역시 배출관리기준을 충분히 만족함을 알 수 있다. 따라서, 저장조 기수, 환자 내원일, 허가량을 조정하여 배수시설의 용량을 적절하게 선정할 수 있다면 추가적인 저장조 설치 없이도 배출물 농도 관리를 보다 용이하게 할 수 있음을 보여준다.

고 찰

^{131}I 투여 환자의 배출물 규제 관리에 대한 국내 현황과 IAEA 및 ICRP의 입장, 외국 규제 사례를 볼 때 우리나라의 규제가 상당히 보수적이며, 방사선방호의 최적화 관점에서 과연 합리적으로 이루어지고 있는지 고민할 필요가 있다. 환자에 의한 배출물 문제는 결국 병원 RI 폐수나 원전 배출수와 달리 자유의지를 가진 '환자'가 방사선을 방출하는 '선원'이 되기 때문에 규제자나 사용자가 관리하는 데 어려움이 있다. 이는 ^{131}I 치료 환자가 비교적 많은 국내 현실을 고려할 때 치료병실 퇴원 후 또는 외래환자로 병원에 방문하는 환자들의 배출물에 대해서도 사업소 경계에서 배출관리기준으로 적용하는 현행 법령의 한계에 부딪히게 된다. 또한, 원전이나 RI 생산시설과 같이 실시간 모니터링을 할 수 없는 전국의 병원에서 이론적 배출관리 기준을 만족하더라도 실제 측정값과 맞지 않는 차이는 부인할 수 없는 현실적 한계이다. 국내 특성상 미국처럼 환자 배출물을 규제에 적용하지 않는 선까지는 아니더라도 외래환자에 대한 배출물 규제를 법적으로 따로 적용하는 것도 대안이 될 수 있다. 요양병원, 가정에서의 환자 배출물 농도 관리를 위해서는 사용자가 환자의 입원 연장을 가능하게 함으로써 (수가 적정 반영) 환자의 퇴원 시기를 늘리거나, 환자에 대한 철저한 교육 및 지원을 강화하는 등 규제자, 사용자, 환자(일반인)의 협력과 관심이 필요한 사안이다.

결 론

본 연구에서 제시한 평가 방법에 따라 전국의 ^{131}I 허가를 받은 모든 병원(128개)에서는 환자 배출물 관리 방안에 대한 자체적인 방안을 수립하였다. 방사성 배출물의 농도는 RI 전용 또는 일반 저장조의 용량과 기수, 환자 내원일, RI 사용량의 함수로 평가할 수 있다. 이러한 각 변수들을 적절히 조정한다면 추가적인 저장조 설치 등 기존 시설 개선 없이도 배출물 농도 관리를 현재의 법적 허용치 이내에서 달성할 수 있음을 확인하였다. 또한, 대형병원 위주로 자발적인 시설의 보강을 통해 보수적으로 원자력안전법 상의 기준을 충분히 만족함을 보였으며, RI 환자가 병원 방문 시 전용 화장실을 반드시 사용하게 하는 안내 절차를 추가적으로 마련하였다.

기본적으로 ^{131}I 투여 환자의 고농도 배출물을 보관하는 치료병실 저장조 관리 및 환자 퇴원 후 주의사항 안내가 무엇보다 중요하다. 병원에서는 방사선원이 되는 환자가 퇴원 후에 병원에 머무는 경우 예상 범위를 벗어나지 않도록 올바른 환

자 안내가 이루어져야 한다. 이러한 이유로 2015년 의료분야 고시 개정 시 환자 퇴원 후 주의사항이 기재된 지침서를 제공하고 세부 사항(7가지)이 구체적으로 반영되었으며 이는 규제기관, 병원 그리고 환자 간의 약속이자 안전문화의 기반에서 이행될 수 있을 것으로 본다.

또한 원자력안전법에서 치료용 ^{131}I 환자의 퇴원 후 배출물 규제 범위를 사업소의 배출관리기준으로 적용하는 것보다 치료병실 및 전용 화장실을 통해 모인 RI 저장조 배출 시점으로 완화하는 방안도 추후 고려할 필요가 있다.

이 논문의 내용은 저자 및 연구자들의 개인적, 학술적 견해이며 원자력안전규제기관 또는 관련기관의 공식적 규제입장이 아님을 밝힙니다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

대한핵의학회. 2009～2012. 대한핵의학회 통계.

대한핵의학회. 2015. 의료용 배수중 방사성농도 분석, KINS/HR-1408.

방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙 및 원자력안전위원회 고시.

한국원자력안전기술원. 2016. 2018. 방사선안전 통계.

환경부. 2014. 갑상선요양병원 등 방류수 방사능 조사, 경북대학교 산학협력단 위탁과제.

환경부. 2015. 환경부고시 제2015-229호 공공수역 방사성물질 측정망 운영계획.

IAEA. 2009. Release of Patients After Radionuclide Therapy. IAEA Safety Reports Series No. 63

IAEA. 2010. POSITION STATEMENT. Release of Patient after radionuclide therapy. https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content/Documents/Whitepapers/position-statement.pdf.

IAEA. 2013. IAEA TECDOC SERIES No. 1714, Management of Discharge of Low Level Liquid Radioactive Waste Generated in Medical, Educational, Research and Industrial Facilities.

IAEA. 2016. IAEA Draft Safety Guide DS 399.

ICRP. 2004. Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. ICRP Publication 94.

Punt A, Wood M and Rose D. 2007. Radionuclide Discharges Sever-A Field Investigation. Science Report-SC020150/SR2. Environment Agency.

Punt A, Kruse P and Smith K 2010. Review of Best Practice in relation to Iodine-131 Ablation Discharges to Sewer. Radiological Protection Institute of Ireland Ver. 3.1. Vol. 1.

Soren Mattssson and Christoph Hoeschen. 2012. Radiation Protection in Nuclear Medicine Springer. 10.3.

U. S. NRC. Disposal by release into sanitary sewerage. 10 CFR 20.2003, https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-2003.html.

Received: 13 May 2019
Revised: 30 May 2019
Revision accepted: 2 June 2019