

## &lt;원저&gt;

 $^{201}\text{Tl}$ 의 생산과정에서 발생한 방사성 폐기물의 제염 효율 평가허재승<sup>1)</sup>·김상록<sup>1)</sup>·김기섭<sup>1)</sup>·안윤진<sup>1,3)</sup>·김정민<sup>2)</sup><sup>1)</sup>한국원자력의학원 방사선안전관리팀·<sup>2)</sup>고려대학교 보건안전융합과학과·<sup>3)</sup>고려대학교 의학물리학과Evaluation of the Decontamination Efficiency of Radioactive Wastes Generated during the Production of  $^{201}\text{Tl}$ Jae-Seung Heo<sup>1)</sup>·Sang-Rok Kim<sup>1)</sup>·Gi-Sub Kim<sup>1)</sup>·Yun-jin Ahn<sup>1,3)</sup>·Jung-Min Kim<sup>2)</sup><sup>1)</sup>Radiation Safety & Section, Korea Institute Radiological & Medical Sciences<sup>2)</sup>Department of Health & Safety Convergence Science, Korea University<sup>3)</sup>Department of Bio-Medical Science, Korea University

**Abstract** This study was conducted for the purpose of efficient radioactive waste disposal and management. Experiment was evaluated the decontamination efficiencies of the four types decontamination materials(Water, Alcohol, Decontamination Water, Decontamination Gel) with radioactive wastes generated during radio-pharmaceutical production process at Korea Institute Radiological and Medical Sciences(KIRAMS). The radioactive waste sample used in experiment is a lead plate of the fume hood that was disposed in April, 2019. In the experimental method, radioactive waste was measured before and after decontamination using a HPGe semiconductor detector and Gamma survey meter. The measured values before and after decontamination were evaluated for decontamination efficiency as a percentage. As a result, it was confirmed that a lot of specific activity and surface dose rate was removed from the radioactive wastes. In particular, when decontamination water was used, most of the radioactivity of radioactive wastes was removed. Considering these results, if decontamination water is used in decontamination of radioactive waste, decontamination efficiency equivalent to the disposition criteria can be expected with just one decontamination treatment. In addition, in the case of water and alcohol, only on decontamination was effective in approximately 75% and 95%. Otherwise, when decontamination gel was used, it was confirmed that the largest deviation occurred among all experimental results.

**Key Words:** Radioactive Waste,  $^{201}\text{Tl}$ , Decontamination, Self Disposal, Management of Radiation Safety

**중심 단어:** 방사성 폐기물,  $^{201}\text{Tl}$ , 제염, 자체처분, 방사선안전관리

## I. 서론

한국원자력의학원(Korea Institute Radiological of & Medical Sciences; KIRAMS)은 16.5 MeV, 30 MeV, 50 MeV의 용량을 가진 Cyclotron을 이용하여  $^{18}\text{F}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ 과 같은 방사성 동위원소를 생산하고 있다. Cyclotron은 입자를 가속하는 기기로서, 방사성 동위원소는 가속되어 높은 에

너지를 가진 입자와 Target의 핵반응을 통해 생산된다[1]. 이처럼 Cyclotron은 쉽게 방사성 동위원소를 얻을 수 있다는 장점이 있으나 한편으로는 일련의 과정에서 Target 외의 주변 물질과도 쉽게 반응하기 때문에 생산 목적 외의 방사성 핵종 또한 쉽게 생산된다는 단점이 있다[2].

위의 과정에서 발생한 방사성 폐기물은 International Atomic Energy Agency(IAEA)의 권고에 따라 방사성 폐기

This study was supported by a grant of the Korea Institute of Radiological and Medical Sciences(KIRAMS), funded by Ministry of Science and ICT(MIST), Republic of Korea(No.50422-2021)

Corresponding author: Jung-Min Kim, Department of Health and Safety Convergence Sciences, Korea University, Korea University, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Republic of Korea / Tel: +82-2-3290-5685 / E-mail: minbogun@korea.ac.kr

Received 24 August 2021; Revised 28 September 2021; Accepted 4 October 2021

Copyright ©2021 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

물로 분류된다[3,4]. 현재 한국원자력의학원에서 발생하는 방사성 폐기물의 경우 모두 중·저준위 폐기물로 국내 원자력 안전법에 근거하여 자체처분의 방식으로 처분하고 있다 [5,6]. 폐기물을 자체처분하기 위해 가장 중요한 것은 폐기물이 가지고 있는 방사능을 감소시키는 것으로, 현재 원자력의 학원에서는 발생한 폐기물에 대해 저장공간에서 저장하는 방식으로 폐기물의 방사능을 감소시키고 있다. 하지만 이와 같은 방법은 방사능의 감소를 위해 긴 시간이 요구되는 경우 폐기물량이 누적되면서 사업소 내 한정된 저장 시설을 효율적으로 사용할 수 없으며, 보관 및 유지에 필요한 비용 또한 매우 많이 발생할 가능성이 있다. 대부분의 의료 폐기물의 경우 반감기가 1년 이내로 비교적 자체처분까지 보관 기간이 짧으나[7], 생산과정에서 발생하는  $^{22}\text{Na}$ (2.6027년),  $^{54}\text{Mn}$ (312일),  $^{60}\text{Co}$ (5.27년),  $^{65}\text{Zn}$ (244일),  $^{183}\text{Re}$ (70일) 등과 같은 핵종은 반감기가 의료 폐기물보다 상대적으로 길고, 자체처분을 위한 허용농도 또한 낮으므로 처분을 위해 필요한 보관 기간이 수년 또는 수십 년 이상을 요구하게 된다. 따라서 본 연구는 방사성 폐기물의 자체처분을 위한 방사성 폐기물의 방사능 감소를 목적으로 연구가 진행되었다.

## II. 대상 및 방법

본 연구는 2010년 Ruhman N의 연구를 토대로 방사성 폐기물 제염처리 전후의 오염제거율을 평가하였다[8]. Ruhman N은 6종류의 제염 물질과 핵의학과 또는 핵의학 연구실에서 유출될 가능성이 있는  $^{99\text{m}}\text{TcO}_4$ ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$  Perchnetate) 를 이용하여 오염 전과 제염 후의 오염제거율을 평가했다. 이 실험은 유사한 방법으로 Leonardi NM(2014) 및 Akchata S (2017)에 의해 사용된 적이 있다[9,10].

### 1. 시료선정

본 연구는 2019년 4월까지 한국원자력의학원의 30 MeV

Cyclotron 방사성 의약품 생산시설에서  $^{201}\text{Tl}$ 의 분배를 위해 사용한 흡 후드에 장착되어 있던 납판을 사용했다. 납판의 경우 화학적으로 안정된 물질이기 때문에 제염 시 방사화를 고려할 필요가 없고, 단순히 납판 표면에 묻은 오염을 기준으로 평가할 수 있기 때문이다.

실험에 사용된 납판은 무작위적인 위치에 대해 가로, 세로 각각 47 mm 이내의 크기로 절단되었다. 납판을 47 mm 이내로 절단한 이유는 검출기의 기하학적 효율을 고려하기 위해 핵종의 방사능 측정 시 납판과 유사한 형태의 47 mm Smear Filter Certified Reference Material(CRM)을 사용했기 때문이다.

#### 1) 물, 알코올, 제염수

물, 알코올, 제염수 100 ml를 사용하여 전면과 후면을 1분간 솔질하는 방식으로 진행되었다. 세척용 솔은 일반 가정에서 사용되는 세척용 솔을 사용하였으며, 선정 과정에서 스펀지, 철과 같은 소재는 납판을 효과적으로 세척할 수 없고, 납판 표면에 손상을 가할 수 있으므로 선정에서 제외되었다. 그리고 세척용 솔이 실험이 진행함에 따라 납판에 의해 오염될 가능성이 있으므로 세척 과정에서 모두 같은 종류의 다른 솔을 사용하였다.

실험 과정은 Stainless tray에 100 ml의 제염 시료를 채운 뒤 납판을 움직이지 않게 고정한 다음 1초당 1회를 기준으로 1분 동안 세척을 진행하였다. 세척 후 납판 표면에 잔류한 수분을 증발시키기 위해 24시간 동안 실험실 내의 환경에서 자연건조를 시행하였으며, 납판 표면의 수분이 없음을 확인한 다음 표면방사선량률과 핵종별 비방사능을 측정하였다.

#### 2) 제염젤

제염젤을 이용한 제염 방식은 납판을 깨끗하게 세척된 아크릴판에 납판의 전면이 완전히 덮일 정도로 충분한 양의 제염젤을 이용하여 밀봉했다. 이후 VanHorne-Sealy JD의

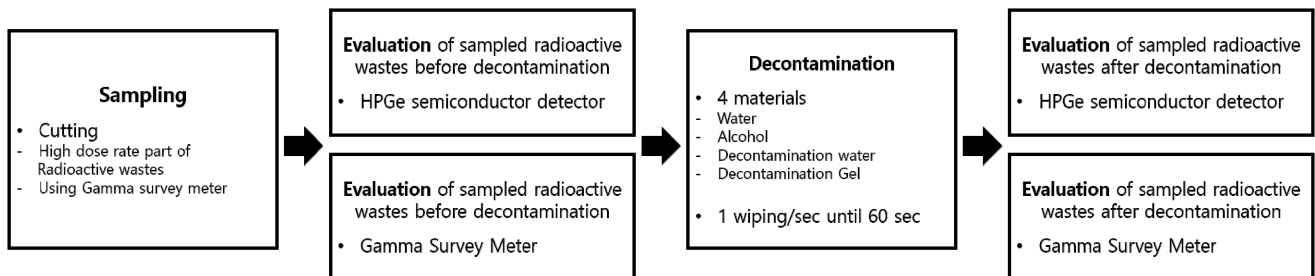


Fig. 1. Overview of experiment

실험 과정에 따라 제염젤의 고형화를 위해 실험실의 균일한 온도 환경에서 24시간 건조하였다[10]. 전면의 건조가 확인된 후 납판의 후면 또한 같은 방법으로 제염젤을 이용하여 밀봉한 다음 24시간 건조하였다. 총 48시간 동안 납판의 전, 후면을 제염젤로 밀봉한 다음 고형화 후 떼어내는 방식으로 제염 처리를 진행하였다.

2. 결과 분석

본 연구는 High Purity Germanium(HPGe) 반도체 검출기와 비례계수형 표면 오염 계측기를 이용해 얻은 값을 사용해 초기 측정값을 기준으로 제염 후 오염이 제거된 비율을 Eq. (1)을 이용하여 구하였다[11,12].

$$\% Removal (\%) = 100 - \left( \frac{A}{A_0} \times 100 \right) \dots \dots \dots Eq. (1)$$

A 제염 후 납판의 비방사능(Bq/g) 또는 표면방사선량률(count/cm<sup>2</sup>)

A<sub>0</sub> 제염 전 납판의 비방사능(Bq/g) 또는 표면방사선량률(count/cm<sup>2</sup>)

1) 표면방사선량률

오염된 납판의 표면방사선량률을 측정하기 위해 비례계수형 표면 오염 계측기(FH-40-L/FHZ 732GM, Thermo Fisher Scientific, Germany)를 사용하였다. 측정은 납판 표면의 10 cm 거리에서 1분간 측정하였다. 측정된 값에서 결과를 보수적으로 평가하기 위해 확인된 값에서 최댓값을 기

준으로 기록하였다. 추가로 샘플링된 납판의 면적이 모두 다르므로 검출기의 교정 인자(1.90)와 단위면적(cm<sup>2</sup>)을 함께 고려하여 평가하였다.

2) 방사성 핵종 및 비방사능

시료의 방사능을 측정하기 위해 HPGe 반도체 검출기(IP25-2, CANBERRA Inc, U.S)와 방사선 분광분석기(DSA-1000, CANBERRA Inc, U.S)를 이용하였다. 측정 시간은 Real Time를 기준으로 7,200초 동안 측정되었다[13].

사전실험을 통해 시료를 분석하였을 때 납판에서는 <sup>22</sup>Na, <sup>65</sup>Zn, <sup>201</sup>Tl, <sup>202</sup>Tl과 같은 핵종이 검출되었다. 결과의 분석을 위해서는 납판의 방사능 농도가 높을수록 제거율의 신뢰성을 확보할 수 있다. 본 실험이 진행된 일자가 2020년 10월로 납판이 폐기된 2019년 4월 이후 1년 6개월 이상 지났음을 고려하여 상대적으로 반감기가 긴 <sup>22</sup>Na(반감기 2.6027년)을 이용하여 제거율을 평가하였다.

III. 결과

연구에 대한 전반적인 측정 결과는 Table 1에서 보여주고 있다. 연구는 시료별 5개의 납판을 이용했으며, 제염 전후로 비방사능과 표면방사선량률을 측정 후 기록하였다. 연구 결과의 분석은 Table 1에 기록된 값과 Eq. (1)을 이용하여 제거율로 평가하였다.

Table 1. Specific Activity and Surface dose rates of before and after decontamination

Sample No.	Specific Activity		Surface dose rates	
	Pre-washing (Bq/g)	Post-washing (Bq/cm <sup>2</sup> )	Pre-washing (Bq/g)	Post-washing (Bq/cm <sup>2</sup> )
WA 1	5.44	1.22	44.28	11.64
WA 2	8.08	2.36	59.41	16.54
WA 3	5.65	1.28	34.32	8.72
WA 4	6.87	1.45	56.41	13.66
WA 5	9.58	1.53	55.04	9.90
AL 1	0.71	0.05	1.44	0.25
AL 2	0.44	0.02	0.93	0.18
AL 3	0.41	0.02	0.45	0.08
AL 4	0.73	0.02	1.54	0.24
AL 5	0.48	0.03	0.80	0.19
DW 1	1.16	0.01	0.52	0.07
DW 2	1.06	0.01	0.56	0.08
DW 3	0.93	0.01	0.51	0.06
DW 4	1.23	0.01	0.60	0.07
DW 5	2.09	0.03	1.59	0.14

Sample No.	Specific Activity		Surface dose rates	
	Pre-washing (Bq/g)	Post-washing (Bq/cm <sup>2</sup> )	Pre-washing (Bq/g)	Post-washing (Bq/cm <sup>2</sup> )
DG 1	0.39	0.72	2.39	1.70
DG 2	2.12	0.18	1.25	0.28
DG 3	1.54	0.32	0.57	0.26
DG 4	2.30	0.25	2.10	0.46
DG 5	1.50	0.12	0.69	0.17

1. 물을 이용한 사전실험 및 결과 평가

물을 이용하여 납판의 제염을 하였을 때 결과는 Fig. 2와 Fig. 3과 같다. 1차 제염 후 측정된 <sup>22</sup>Na의 제거 비율은 평균 77.73±44.73%였으며, 표면의 오염도는 평균 75.66±3.79%가 감소하였다. 2차 제염을 시행했을 경우 <sup>22</sup>Na의 제거 비율은 평균 85.60±1.93%였으며, 표면의 오염도는 평균 83.12±2.94%가 감소하였다. 마지막으로, 3차 제염을 시행했을 때 제거된 <sup>22</sup>Na의 비율은 평균 93.70±2.68%였으며, 표면의 오염도는 93.70±2.43%가 감소하였다.

2. 알코올을 이용한 제염결과 평가

알코올을 이용하여 제염 처리를 한 결과 1회의 제염만으

로도 물을 이용해 3차 제염을 한 것보다 더 높은 수준의 <sup>22</sup>Na의 방사능이 제거된 것을 Fig. 4 그리고 Fig. 5에서 보여준다. 물을 이용했을 경우 3차에서 평균 93±2.68%의 <sup>22</sup>Na가 제거되고, 표면의 오염도가 평균 93.70±2.43%가 제거되었다. 하지만 알코올의 경우 1차 제염만으로도 95.14±1.91%의 <sup>22</sup>Na가 제거되었으며, 납판 표면의 오염 또한 81.45±3.02%가 감소하였다.

3. 제염수를 이용한 제염결과 평가

제염수를 사용하여 제염 처리를 한 경우의 결과는 Fig. 6 그리고 Fig. 7과 같다. 제염수를 이용한 제염 처리의 경우 다른 3종류에 비해 납판의 오염제거 비율이 가장 높았다.

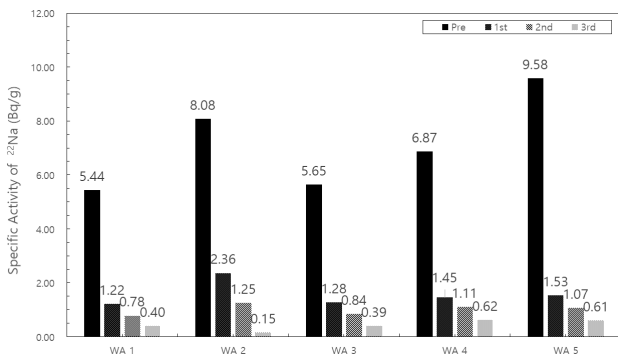


Fig. 2. Specific activity using water

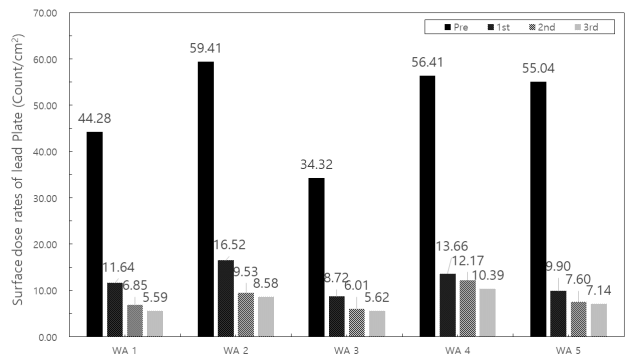


Fig. 3. Surface dose rates using water

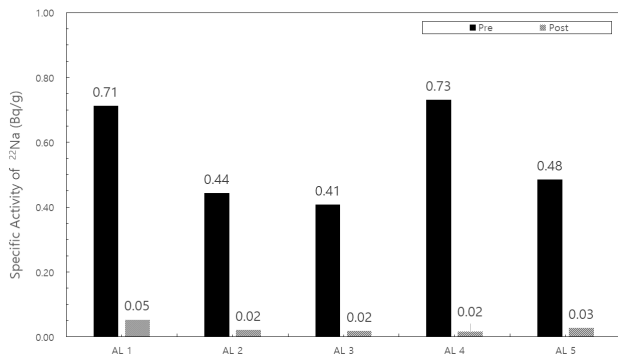


Fig. 4. Specific activity using alcohol

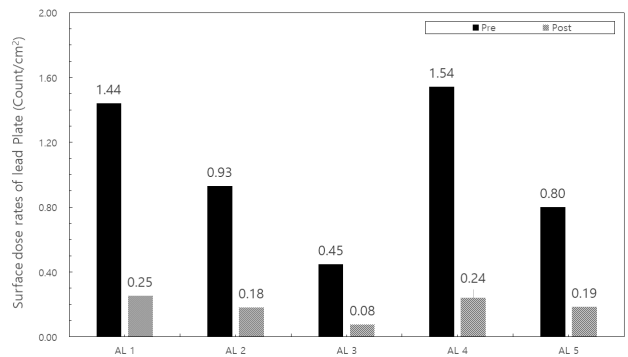


Fig. 5. Surface dose rates using alcohol

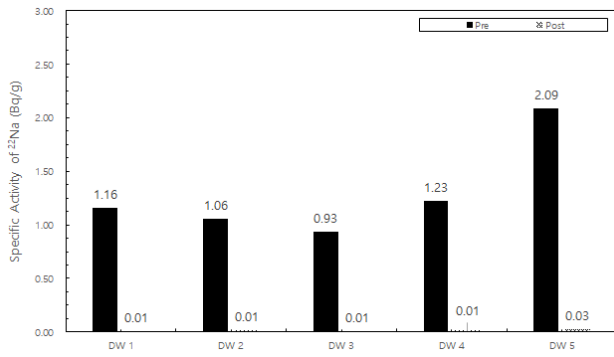


Fig. 6. Specific activity using decontamination water

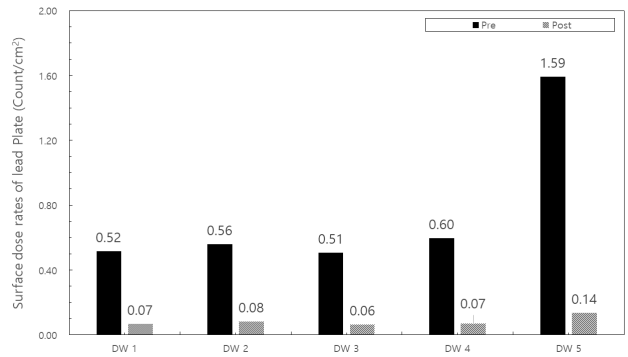


Fig. 7. Surface dose rates using decontamination water

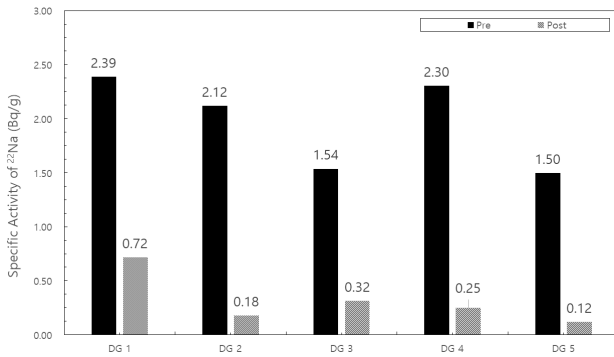


Fig. 8. Specific activity using decontamination gel

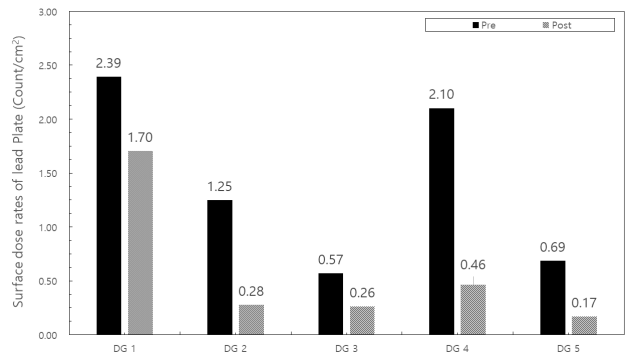


Fig. 9. Surface dose rates using decontamination gel

단 1회의 제염 처리만으로도 <sup>22</sup>Na의 방사능이 평균 98.93 ± 0.27%가 제거되었으며, 납판 표면의 오염도는 87.94 ± 2.24%가 제거되었다. 또한, 한 개의 납판을 제외하고 제염수를 이용하여 제염했을 때 <sup>22</sup>Na의 농도가 자체처분 폐기물 기준인 0.1 Bq/g 이하로 감소함을 확인하였다.

#### 4. 제염젤을 이용한 제염결과 평가

제염젤을 사용한 제염 처리를 했을 경우의 결과는 Fig. 8. 그리고 Fig. 9.와 같다. 방사성 핵종인 <sup>22</sup>Na의 제거 비율은 62.94%부터 92.11%까지 약 30% 정도의 차이가 발생하였으며, 표면 오염의 제거율은 28.78%부터 77.85%까지 약 50%의 차이가 발생하였다. 특히, 한 개의 납판에서는 모든 실험 결과 중 <sup>22</sup>Na의 비방사능과 표면 오염의 제거율이 가장 낮았다.

### IV. 고찰

본 연구에서는 한국원자력의학원(KIRAMS) 30 MeV Cyclotron 생산시설에서 방사성 의약품 생산과정 발생한

방사성 폐기물의 관리와 처분을 위해 처리방식 중 제염 처리방식을 선정하였으며, 그에 따라 4종류의 제염 물질을 이용해 오염제거율을 평가하였다. 실험 준비 단계에서 본 연구에서는 실험 물질을 인위적으로 오염시키지 않고 실제 30 MeV Cyclotron에서 의약품을 생산함으로써 인해 발생한 폐기물인 차폐용 납판이 사용되었다. 이 때문에 납판의 오염도는 절단 위치에 따라 오염도의 편차가 컸으며, 실험에 사용된 납판은 이 중 가장 오염도가 높은 위치를 기준으로 선정하여 절단되었다. 납판의 오염 과정은 Tl을 생산한 뒤 분배 및 회수하는 과정에서 수용액 상태로 후드를 오염시킨 후 수분이 증발하면서 발생하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 방사성 폐기물의 오염 형태를 유리성 오염상태로 가정하고 실험 방법을 결정하였다.

그 결과 4종류의 제염 방법 중 제염수를 이용했을 때 1회의 제염만으로도 납판이 가지고 있던 오염이 가장 많이 제거된다. 제염수의 주요 성분은 비이온성 계면활성제와 열화학물질이 첨가된 혼합물의 형태이다. 계면활성제는 친수성과 소수성의 서로 반대되는 성질을 가지고 있는 화합물로, 액체와 고체 물질의 경계면을 활성화하고 표면장력을 약하게 하여 결정적으로 두 물질 사이의 결합력을 약하게 하는 특성을 가진다[14,15]. 따라서 본 연구에서 사용된 제

염수는 납판과 납판 표면에 묻은 방사성 핵종의 경계면의 결합력을 약하게 하여 납판 표면의 방사성 핵종만 제거된 것으로 유추해 볼 수 있으며, 이를 토대로 오염 자체가 유리성 오염이었음을 유추할 수 있다.

물과 알코올은 모두 성질이 같은 극성 용매이지만 본 연구의 결과를 비교해보면 제거율의 차이는 매우 크게 나타났다. 즉, 알코올을 이용했을 경우 물을 이용했을 때보다 납판의 오염제거율이 더 높았다. 이는 납판의  $^{22}\text{Na}$ 의 경우 이온 결합 형태가 아닌 다른 형태로 납판의 표면에 오염되었을 가능성이 크다는 것을 추측해 볼 수 있다. 만약 이온결합의 형태로 납판에 오염이 되었다면 물에서 더욱 많은  $^{22}\text{Na}$ 가 용해되었어야 한다[16].

제염젤을 사용했을 경우 다른 제염 시료와 비교해서 상대적으로 결과의 편차가 크게 발생하였는데, 이러한 점은 같은 제염젤을 이용한 실험에서 편차가 발생한다고 밝힌 VanHorne-Sealy JD와 Sutton M의 연구 결과와 유사하다 [11,17]. 제염젤의 경우 제조사에서는 Zn에 사용할 때 Zn의 빠른 산화 특성으로 인해 평균적으로 약 65%의 제거 효율이 있다고 제시하였다. 따라서 본 연구와 제조사에서 밝힌 핵종별 효율을 고려해보자면, 본 연구에 사용된 납판에서  $^{65}\text{Zn}$ 이 함께 검출된 것을 토대로 Zn의 산화 반응에 따라 납판 표면에 Zn이 산화, 코팅되어 코팅된 층 아래 Na의 제거를 억제했을 것이라 추측된다. 따라서 제염젤을 사용할 계획이 있는 작업환경에서 제염을 시행할 경우 오염된 물질과 제거할 목적 핵종을 우선 고려하여 사전실험을 진행하는 것이 오염의 제거와 비용적인 측면에서 모두 효율적인 것으로 판단된다.

본 연구에 있어서 실험 결과에 가장 크게 영향을 준 것을 Human factor이다. 본 연구에서는 이 점을 최소화하기 위해 한 명의 실험자에 의해 실험이 진행되었으며, 같은 시간 내 일정 횟수의 제염하는 방식으로 계획하였다[9,12]. 하지만, 이는 실험자의 물리적 요인에 따른 결과 오차를 제어하기에는 부적절하다. 본 연구는 단순히 제염 시료 사이의 제염 효율에 대한 평가를 목표로 하였기에 이러한 물리적 요인을 무시하였다. 하지만 만약 제염 시료가 가지는 제염물의 일반화를 위해서는 성별, 나이 그리고 사용자의 신체적 특성에 따라서 Human factor가 크게 작용하기 때문에 반드시 이 점을 고려하여 평가가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

## V. 결론

본 연구에서는 2019년 한국원자력의학원 30 MeV 시설에

서 방사성 의약품을 생산하면서 발생한 중·저준위 방사성 폐기물과 4가지 종류의 제염 물질을 사용하여 초기 오염에 대한 제거율을 평가했다. 그 결과 제염수를 사용했을 경우 1회의 제염 처리만으로도 폐기물에 포함되어 있던  $^{22}\text{Na}$ 는 약 99%, 표면의 오염도는 약 88%가 제거되어 시험에 사용된 4가지의 제염 물질 중 가장 많은 오염이 제거된 것을 확인했다. 그리고 제염수 외의 제염 시료를 사용하여 제염 처리를 했을 경우 상대적으로 제염 효율은 낮았으나 대략 75~90% 수준의 오염제거 효율이 있는 것을 확인했다. 이러한 실험 결과로 본 연구에서 사용된 폐기물은 유리성 오염 형태로 유추할 수 있었으며, 그에 따른 제염 시료마다 제염 효율을 알 수 있었다. 따라서 본 연구의 목적인 방사성 폐기물의 자체처분에 대해서 간단한 제염 처리만으로도 충분히 자체처분 기준에 만족하는 수준으로 방사성 폐기물을 관리할 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다.

방사성 폐기물의 경우 매우 다양한 물리·화학적 형태로 발생한다. 본 실험과 같이 유리성 오염 형태 외에도 고착성 오염 또는 방사화된 형태로 폐기물이 상당량 발생하고 있다. 본 연구의 결과 지표는 단순히 유리성 오염에 해당하는 제염 효율이며, 만약 방사성 폐기물이 고착성 오염 또는 방사화된 경우 본 연구와 같은 제염 시료를 사용하더라도 다른 결과가 나올 것으로 생각된다. 따라서 추후 연구에서는 폐기물의 종류를 유리성 오염과 함께 고착성 오염 그리고 방사화된 폐기물에 대해 추가적인 제염 효율의 평가와 일반화 과정이 필요한 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] Vértes A, Nagy S, Klencsár Z, Lovas RG, Rosch F. Handbook of Nuclear Chemistry. 2nd ed. Netherlands: Springer; Dordrecht; 2011:1904–33.
- [2] Hwang S, Kim Y, Lee S. Evaluation of Residual Radioactivity and Dose Rate of a Target Assembly in an IBA Cyclotron. J Radiological Science and Technology. 2016;39(4):643–9.
- [3] IAEA. Application of the Concepts of Exclusion Exemption and Clearance: SAFETY GUIDE No. RS-G-1.7. VIENNA: IAEA; 2004.
- [4] IAEA. Classification of radioactive waste: General Safety Guide GSG-1. VIENNA: IAEA; 2009.
- [5] Korea Act. Nuclear Safety Act(Act No. 16575, 27. Aug, 2019., Partial Amendment). 2019a.

- [6] Korea Act, Nuclear Safety and Security Commission, Enforcement decree of the nuclear safety Act(Presidential Decree No. 29521, Feb. 8, 2019), 2019b.
- [7] Kim C, Park M, Kim G, Jung H, Jang S. Measurement and Estimation for the Clearance of Radioactive Waste Contaminated with Radioisotopes for Medical Application. *Progress in Medical Physics*. 2014;25(1):8-14.
- [8] Ruhman N, Grantham V, Martin C. The effectiveness of decontamination products in the nuclear medicine department. *J Nucl Med Technol*. 2010;38(4):191-4.
- [9] Akchata S, Lavanya K, Shivanand B. Influence of Decontaminating Agents and Swipe Materials on Laboratory Simulated Working Surfaces Wet Spilled with Sodium Pertechnetate. *Indian J Nucl Med*. 2017;32(3):173-6.
- [10] Leonardi NM, Tesán FC, Zubillaga MB, Salgueiro MJ. Radioactivity decontamination of materials commonly used as surfaces in general-purpose radioisotope laboratories. *J Nucl Med Technol*. 2014;42(4):292-5.
- [11] VanHorne-Sealy JD. Evaluating the Efficiency of Decon Gel 1101 for Removal of Cs-137, Co-60, and Eu-154 On Common Commercial Construction Materials [master's thesis]. Oregon: Oregon State University; 2008.
- [12] Gurau D, Deju R. The use of chemical gel for decontamination during decommissioning of nuclear facilities. *Radiation Physics and Chemistry* 2015;106:371-5.
- [13] Kim C, Lee S, Jang S, Kim J. Measurement of Specific Radioactivity for Clearance of Waste Contaminated with Re-186 for Medical Application. *J Radiological Science and Technology*. 2017;40(4):633-8.
- [14] Heo H. Application of the Surfactant-Enhanced soil washing to crude oil contamination soils in Kuwait [master's thesis]. Busan: Pukyong Nation University; 2015.
- [15] Rosen MJ, Kunjappu JT. Surfactants and interfacial phenomena. 4th ed. New York: Wiley; 2012: 1-34.
- [16] Pinho SP, Macedo EA. Solubility of NaCl, NaBr and KCl in Water, Methanol, Ethanol, and their Mixed Solvents. *J Chemical and Engineering Data*. 2005; 50(1):29-32.
- [17] Sutton M, Fischer RP, Thoet MM, O'Neill M, Edgington G. Plutonium Decontamination Using CBI Decongel™ 1101 in Highly Contaminated and Unique Areas at LLNL. LLNL-TR-404723. 2008.

구분	성명	소속	직위
제1저자	허재승	한국원자력의학원	연수연구원
공동저자	김상록	한국원자력의학원	선임연구원
공동저자	김기섭	한국원자력의학원	책임연구기술원
공동저자	안윤진	한국원자력의학원/고려대학교	연수연구원/석사대학원생
교신저자	김정민	고려대학교	교수