Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 2, pp. 147-153, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.2.147

Technical article

방사성 액체폐기물 처리 시설 내 공기오염에 의한 작업종사자 방사선학적 영향 평가에 대한 연구

이민호[1] · 하우범[1] · 이상헌[1] · 송종순[1,*]

[1]조선대학교 원자력공학과

A Study on the Evaluation of Radiological Effects on Workers from Air Contamination in Radioactive Waste Treatment Facilities

Min-Ho Lee[1], Woo-Beom Ha[1], Sang-Heon Lee[1], and Jong-Soon Song[1,*]

[1]Nuclear Engineering, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea

ABSTRACT Radioactive liquid waste generated during operation and overhaul is collected and reused through the radioactive liquid waste treatment system and continuous monitoring system in the nuclear power plant or discharged to the outside if it satisfies the limit within the control and monitoring. However, there are concerns about boric acid management, which controls the power output of nuclear power plants in radioactive liquid waste. Due to the behavior of boric acid, it is difficult to remove it in the existing liquid radwaste system, and the concentration of boric acid water discharged tends to be higher than the natural state of 5 ppm, so additional facilities should be considered. Therefore, this study aims to evaluate the radiological effects of radioactive waste treatment facilities that are under development and use them as a basis for managing worker exposure and evaluating the safety of facilities in the future.

Key words: Boric acid, Liquid radwaste system, Air contamination, Internal exposure

1. 서 론

국내 경수로형 원전 내 방사성 액체폐기물 처리계통에서는 원전 운영 중에 발생할 수 있는 방사선학적 영향을 방지할 목적으로 배출관리기준을 설정하고 정상운전 및 계획예방정비 기간 중 발생하는 다양한 특성의 방사성 폐액을 수집하고 방사화학분석을 통한 통제 및 감시 아래 소외환경으로 배출하는 기능을 수행하고 있다. 원전 인근 주민의 방사선 선량한도를 관리하기 위한 목적인 배출관리기준을 살펴보면, 발전소 외부의 수중 방사성물질 최대 허용농도를 초과하지 않도록 관리하고 있지만 국내 원전 배출수 수질기준 및 관리항목 내에는 원전 출력을 제어하는 용도로 사용하고 있는 붕산 사용에 관련된 법적 규제가 미비한 실정이다. 2010년 국립환경과학원 고시에 따르면 붕산을 유독물질로 지정하고 음용수에 대한 관리기준치를 1 ppm으로 설정하였으나, 일본 등 해외에서는 산업체에서 방류하는 붕산수를 산업폐수로 지정하고 배출농도를 엄격히 관리하고 있어서 붕산에 대한 규제를 강화하고 있는 추세다[1].

국내 원전의 방사성 액체폐기물 처리계통은 발전소의 건설 시기에 따라 크게 3가지 유형으로 분류하고 있으나, 붕산의 관점에서는 표준형 원전 전·후로 구분이 가능하다. 표준형 원전 이전은 증발기를 적용함으로서 붕산을 포함한 대부분의 불순물을 처리할 수 있었으나, 표준형 원전 이후에는 붕산의 거동 특성상 역삼투막 및 이온교환 수지로 제거가 어려운 문제를 가지고 있다. 이에 따라 방사성 액체폐기물을 처리하기 위하여 다양한 기술을 검토하고 적용하고 검토하고 있으며 현장적용을 통하여 기존 설비에 대한 문제점을 계속 개선하고 있다.

한편, 표준형 원전 이후에는 운영 및 설비 교체 시에 발생할 수 있는 방사성 액체폐기물 처리계통의 가동 부하를 감소시키고 성능을 향상시키기 위하여 이동형 방사성 액체폐기물 처리설비를 도입하였으나 슬러지와 같은 이물질의 포집량이 미비하고 이온교환수지, 활성탄, 여과기, 마이크로필터 컬럼 등을 사용함으로서 다량의 2차 폐기물이 발생하는 문제점이 발생하여 제한적

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

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Jong-Soon Song
Tel: +82-62-230-7165, Fax: +82-62-232-8834, E-mail: jssong@chosun.ac.kr

Received 3 May 2024 **Revised** 25 June 2024 **Accepted** 25 June 2024

으로 사용하고 있는 실정이다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 기존의 이동형 방사성 액체폐기물 처리 설비의 한계를 극복하고 실제 현장에 적용이 가능한 화학적 전처리 및 방사성핵종 제거가 가능한 소형 모듈 이동형 방사성 액체폐기물 처리 설비를 개발하고 있다.

본 연구에서는 방사성 액체폐기물 처리 설비가 있는 시설에서 방사선학적 영향을 평가하여 작업자의 피폭을 최소화하기 위한 사전연구로서 향후 소형 모듈 이동형 방사성 액체폐기물 설비를 도입하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 대상 및 방법

2.1. 방사성 액체폐기물 처리 시스템

원전을 운영하고 있는 대부분의 국가에서는 원전 사업자가 자국의 관리정책에 따라 적절한 처리방식을 선정하고 운영하고 있다[2]. 국내 원전에서 운영 중인 방사성 액체폐기물 처리 시스템의 경우 주 처리 설비로 크게 3가지 유형(증발기, 원심분리설비 및 선택성 이온교환설비 및 역삼투압설비)으로 구분할 수 있으며 국내 원전별 방사성 액체폐기물 처리 시스템 설비 현황은 Table 1과 같다.

표준형 원전 이전 방사성 액체폐기물 처리 시스템의 주 처리 설비인 증발기의 경우 Fig. 1과 같이 단일 증발설비와 이중 증발설비로 구분이 가능하다. 단일 증발설비의 경우 국내 원전에 처음 도입된 설비로서, 고리 1, 2호기, 한울 1, 2호기에 적용하였으며, 다중성 개념이 적용되지 않고 처리개념 및 단순 방출개념으로 설계되어 있다. 이중 증발설비의 경우 고리 3, 4호기, 한빛 1, 2호기 및 한울 3, 4호기 등 8기의 원전에서 적용되어 있으며, 계통의 구성은 단일 증발설비와 유사하나 처리용량을 증가시켰고 운전성 향상을 위하여 다중성 개념으로 설계되었다[3]. 표준형 원전 이전의 주 처리 설비인 증발기를 활용하는 경우 붕산을 포함한 대부분의 불순물을 처리할 수 있는 장점이 있지만 여과기 교체빈도 증가, 유입폐액 내 물질로 인한 이온교환설비 및 증발설비의 기능 저하와 같은 문제점이 있다.

표준형 원전의 경우 Fig. 2와 같이, 증발설비를 대체하여 원심분리설비 및 이온교환설비를 도입하였으며, 한빛 5, 6호기, 한울 5, 6호기에 적용하였다. 원심분리설비는 부유물질 제거효율이 우수한 정밀 여과 설비로서 선택성 이온교환 설비의 처리성능을 향상시키기 위하여 방사성 폐액의 전처리 목적으로 도입되었다. 해당 설비를 적용한 원전의 경우 이전의 증발설비와 비교하여 2차폐기물 발생량이 감소되었으며 작업자의 피폭 문제를 해소할 수 있었다.

역삼투압설비를 적용한 원전은 원심분리기를 대체하여 역삼투압설비를 도입하였으며, 신고리 1. 2호기, 신월성 1, 2호기에 적용하였다. 처리 효율성 증대와 처리된 폐액의 재사용율 증대를 위해 역삼투압설비 및 이온교환설비를 적용하였다[3,4]. 하지만 고농축액 역류로 인한 배관·기기 오염 및 탈염탑 내부 격막 손상 등에 대한 문제가 거론되고 있다.

Table 1. Status of liquid radwaste system in Korean nuclear power plants [3,4]

Nuclear power plant	Collecting method	Radioactive liquid waste processing method	Main Processing Statement	N.B.
Kori unit 1	Mixed collection	Mixed treatment	Evaporator	-
Kori unit 2				Ion exchange resin Pretreatment
Kori unit 3				-
Kori unit 4				-
Hanbit unit 1	Mixed collection	Mixed treatment	Evaporator	-
Hanbit unit 2				-
Hanbit unit 3				-
Hanbit unit 4				-
Hanbit unit 5			Centrifuge/ Ion exchange resin	-
Hanbit unit 6				-
Hanul unit 1			Evaporator	Ion exchange resin Pretreatment
Hanul unit 2				
Hanul unit 3				-
Hanul unit 4				-
Hanul unit 5			Centrifuge/ Ion exchange resin	-
Hanul unit 6				-

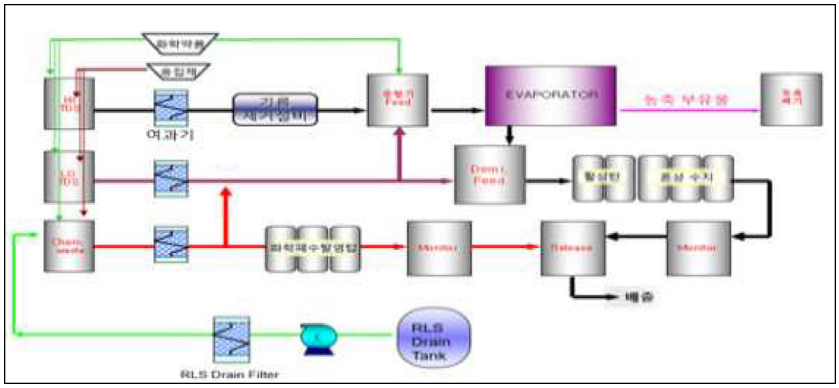

Fig. 1. Schematic diagram of a standardized before nuclear liquid radwaste system [1].

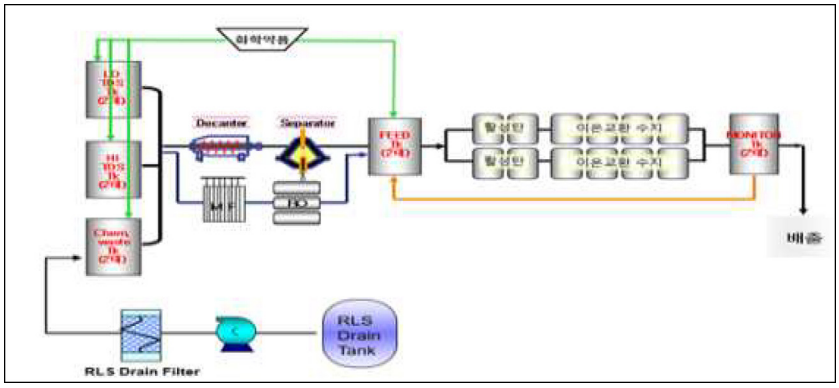

Fig. 2. Schematic diagram of a standardized nuclear liquid radwaste system [1].

2.2. 붕소함유 방사성 폐액 특성

원전에서는 방사성핵종뿐만 아니라 물리화학적 특성이 다양한 다량의 방사성폐액이 발생되며, 유입 경로에 따라 세탁폐액, 화학폐액, 고용존고형물폐액, 저용존고형물폐액 등으로 구분이 가능하다. 세탁폐액은 오염 가능지역에서 발생한 세탁수, 세면수 및 출입통제건물 바닥배수 등으로서 수집하여 방사능 준위에 따라 소외방출 및 화학폐액배수탱크로 이송한 후 처리한다. 화학폐액의 경우 복수탈염기 재생폐액과 증기발생기 취출계통 오염폐액 및 방사화학 실험실에서 발생된 폐액으로 탈염기계통으로 처리한다. 저용존고형물폐액은 방사능 준위가 낮은 폐액으로 고용존고형물탱크의 보조탱크로 사용이 가능하며 탈염기계통을 통하여 처리한다. 마지막으로 고용종·고형물폐액의 경우 방사능 준위가 높은 폐액으로 핵연료건물, 1차 보조건물, 2차 보조건물 및 방사성 폐기물 건물, 격납건물의 바닥 및 기기수 등으로서 수집된 후 이온교환기가 설치된 탈염기계통에서 처리된다[5].

경수로 원전냉각수의 붕산농도 조절과 증기발생기 계통의 누수나 부분배수에 의해 1차 냉각수계통에서 발생되는 방사성 폐액은 0.2~0.8 wt%의 붕산을 함유하고 있다. 붕산은 약산으로서 Fig. 3과 같이 pH에 따라 다양한 화합물 형태로 존재한다. pH 7 이하에서는 대부분 분자상태의 붕산으로, pH 7~10 사이에서는 B(OH)3- 및 B(OH)4-, pH 10 이상에서는 B(OH)4-로 존재한다.

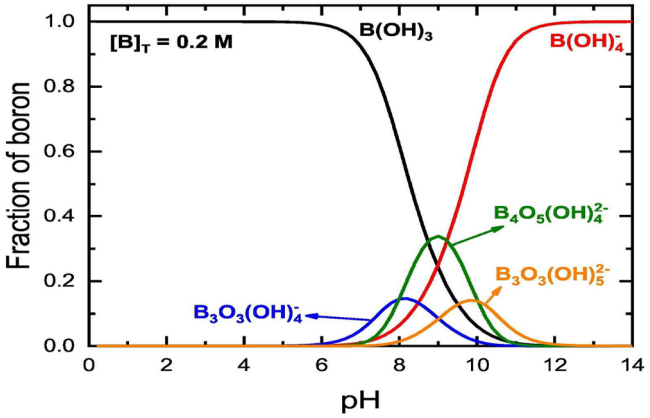

Fig. 3. Boric acid compound forms based on pH Hydrolyzed species in aqueous solution of boric acid [7].

따라서 붕산을 제거하기 위해서는 pH 7 이상에서 이온상태의 붕산을 음이온교환수지 분리관을 통과시켜 제거할 수 있다[6].

Table 2는 원전에서의 방사성폐액의 조성을 분석하여 나타낸 것으로, 발전소마다 발생되는 폐액의 조성비가 매우 다르나 그 경향은 유사함을 알 수 있다[8].

Table 2. Composition of radioactive liquid waste from domestic NPP

Classification	Main nuclide	Saeul	Hanul
Non radioactive isotope (ppm)	B	807.3	183.0
	Na	63.4	84.0
	Ca	12.0	5.2
	Mg	3.0	0.3
	Cl	21.8	0.8
	Si	-	4.8
	Fe	-	0
Specific radioative isotope ($\mu Ci\ cc^{-1}$)	^{58}Co	1.6×10^{-4}	7.1×10^{-9}
	^{60}Co	1.7×10^{-6}	1.3×10^{-7}
	^{134}Cs	3.8×10^{-5}	n.d.
	^{137}Cs	6.2×10^{-2}	n.d.

2.3. 붕소 함유 방사성 폐액 처리를 위한 소형 모듈 설비

1990년도 국내 원전에서는 액체폐기물 처리계통에 공급되는 방사성 폐액의 이물질과 방사성물질을 사전에 제거함으로서 주 처리 설비인 증발기의 가동부하를 경감시키고 비정기적으로 발생하는 폐액을 효율적으로 처리하기 위하여 이동형 폐액 처리 설비를 도입하여 운영하였다.[1)] 그러나 이전의 이동형 방사성 액체폐기물 처리설비의 경우 슬러지와 같은 이물질의 포집량이 불완전하고 2차 폐기물이 다량 발생하는 문제가 있어서 제한적으로 사용하고 있다. 또한 2차 폐기물 중 이온교환수지 및 활성탄의 경우 별도의 제염방법이 없어서 건조시킨 후 고건전성 용기에 저장해야 하기 때문에 폐기물 관리 측면에서 큰 부담이 되고 있다. 따라서 기존의 이동형 방사성 폐액 처리설비의 한계를 극복하고 실제 현장에 적용이 가능한 화학적 전처리 및 방사성 핵종 제거가 용이한 소형 모듈 이동형 방사성 액체폐기물 설비를 개발하고 있으며 설비의 개략도는 Fig. 4와 같다.

설비의 전단에는 입자성 물질 제거를 위하여 금속소결필터를 설치하였다. 금속소결필터의 경우 이온교환수지의 수명연장과 영구적으로 재사용이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 후단에는 방사성 폐액에 존재하고 있는 ^{56}Co, ^{60}Co, ^{134}Cs 및 ^{137}Cs과 같은 중성자방사화물질과 핵분열생성물질을 제거하기 위하여 실제 원전에서 사용하고 있는 이온교환수지의 특성을 Table 3에 나타내었다.

3. 평가 방법 및 입력자료

3.1. 방사선학적 영향 평가 주요인자 선정

본 연구에서는 개발중인 소형 모듈 방사성 폐액 처리 설비를 활용하여 붕소함유 방사성폐액을 처리하는 작업자에 대한 방사선학적 영향을 평가하였다. 폐액을 처리하는 시설임에 따라 외부피폭에 대한 영향보다는 누수 및 시료 증발에 의한 내부피폭

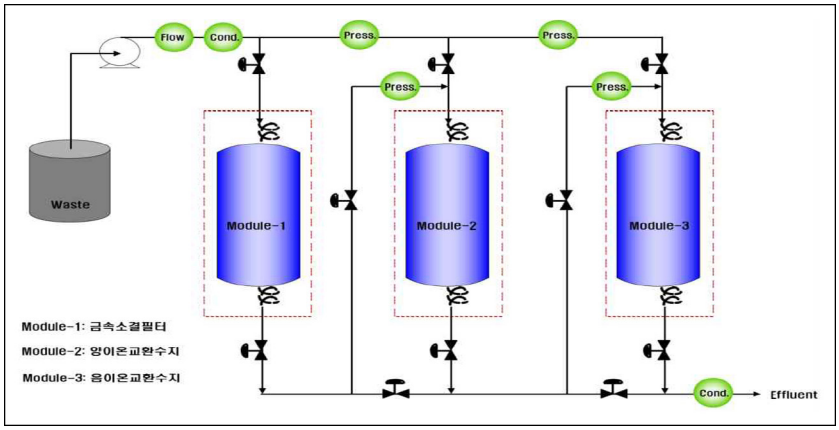

Fig. 4. Schematic diagram of small modular boron-containing radioactive waste treatment facility.

1) 중소벤처기업부, 창업성장기술개발사업 연구개발과제(S3325850) 연차보고서, 2023

Table 3. Ion exchange resin characteristic

Characteristic		Resin	
		Amberlite IRN-77	Amberlite IRN-78
Physical characteristics	Physical Form	Uniform Particle Size Spherical Beads	Uniform Particle Size Spherical Beads
	Shipping Weight	800 g L^{-1}	689 g L^{-1}
	Harmonic Mean Size	650±50 μm	650±50 μm
	Uniformity Coefficient	≤1.2	≤1.2
	Particle Size	<0.300 mm : 0.2% max >1.180 mm : 3% max	<0.300 mm : 0.2% max >1.180 mm : 3% max
	Whole Beads	98% min	95 % min
Chemical characteristics	Matrix	Plystylene DVB gel	Plystylene DVB gel
	Functional Group	Sulphonic acid	Trimethyl ammonium
	Ionic form	H+	OH-
	Total Exchange Capacity	≥1.9 eq L^{-1} (H+ form)	≥1.2 eq L^{-1} (OH+ form)
	Moisure Holding Capacity	49~55 % (H+ form)	54~60% (OH- form)
	Ionic Conversion	99% min. H+	95% min. OH+

Table 4. Source term

Radionuclide	Reaction	Half-Life	Activity
^{60}Co	$^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$	5.26 y	1.7×10^{-6} μ*Ci* cc^{-1}
^{137}Cs	FP	30 y	6.2×10^{-2} μ*Ci* cc^{-1}

가능성이 높을 것으로 보여진다. 일반적으로 내부피폭의 경우 작업자 섭취량을 산정하기에는 어려움이 있으며, 평가 방법에 따라 결과의 불확도가 매우 크다. 이에 따라 본 연구에서는 사용 시설 내 공기오염시 작업자 흡입에 의한 피폭만을 고려하여 평가하였다.

3.1.1. 선원항

원자로 냉각재에는 핵연료의 ^{235}U와 기타 다른 핵종들의 핵분열 또는 계통표면에서 트램프 핵종들의 핵분열, 원자로계통으로 유입되는 화학약품, 불순물 및 부식생성물의 방사화에 의하여 다양한 방사성핵종들이 발생한다[9]. 앞장에서 사전연구사례에서의 방사성폐액 조성을 확인하였으며, Table 4와 같이 ^{60}Co, ^{137}Cs을 선원항으로 선정하였다[8]. 다양한 핵종들이 폐액 내에 존재하고 있으나 붕소의 경우 방사성을 띄지않는 비방사성동위원소로 존재하기 때문에 평가에서 제외하였다.

비산율(d^{-1})=그룹비산율*상태 수정계수*취급방법 수정계수 (1)

연간섭취량(Bq y^{-1})=공기중 평균농도*비산율*호흡률*작업시간 (2)

3.1.2. 평가방법

본 연구에서는 폐액 처리 시설 내 공기오염에 따른 작업자 흡입에 의한 내부피폭선량을 평가하였다. 앞에서 언급한 바와 같이, 내부피폭의 경우 평가 방법에 따라 결과의 불확도가 매우 크기 때문에 다양한 피폭 시나리오 중 폐액 처리 설비가 있는 이동형 시설 내 선원분배 및 전처리 과정에서 균일하게 공기오염이 발생하였고, 이를 모두 작업자가 흡입하여 피폭이 발생하였다고 가정하였다.

선원의 분배 및 전처리 과정에서의 시료의 비산에 의한 공기오염이 발생함에 따라 아래 식에 적용하여 작업자의 내부피폭선량을 평가하였다. 비산율의 경우 Table 5, 6과 같이 사전연구에서의 그룹비산율(^{60}Co: 그룹 3, ^{137}Cs: 그룹 1)과 액상의 상태 수정계수, 화학반응 취급방법 수정계수를 적용하였다. 또한 성인 작업자의 호흡률, 연간 50주, 주당 5일, 하루 1시간 작업하여 연간작업시간을 도출하였으며 균일하게 분포함에 따라 공기중 평균농도를 적용하여 연간섭취량을 평가하였다.

4. 결　　과

소형 모듈 이동형 방사성폐액 처리 시설에서 선원분배 및 전처리 과정에서 비산에 의한 공기오염이 발생하였고 이를 모두 작업자가 흡입하였다고 평가한 결과 Table 7과 같이 ^{60}Co은 2.0×10^{-7} mSv y^{-1} 그리고 ^{137}Cs은 1.7 mSv y^{-1}로 도출되었다. 평

Table 5. Scatter rate by radioctive nuclide [10]

Classification	Nuclide	Scatter rate/day
Group 1	^{3}H, ^{14}C, ^{35}S, ^{75}Se	10^{-3}
Group 2	^{77}As, ^{103}Ru, ^{125}Sb, ^{125}I, ^{131}I, ^{137}Cs, ^{197}Hg	10^{-4}
Group 3	^{22}Na, ^{24}Na, ^{32}P, ^{33}P, ^{45}Ca, ^{51}Cr, ^{59}Fe, ^{67}Ga, ^{99}Mo-^{99m}Tc, ^{111}In, ^{147}Pm, ^{198}Au, ^{201}Tl	10^{-7}

Table 6. Modification factors for scatter rate due to handling [10]

State	Factor	State	Factor
Powder	×10	heating	×100
Liquid	×1	Chemical reaction, Machining, Animal experimentation	×10
Blocky	×0.1	General operations	×1
		Management	×0.1

Table 7. Worker internal exposure dose in case of air contamination

Nuclide	Air Concentration (Bq m^{-3})	Annual Intake (Bq y^{-1})	Effective factor (Sv Bq^{-1})	Committed effective dose (mSv y^{-1})
^{60}Co	6.3×10^{-8}	6.9×10^{-3}	2.9×10^{-8}	2.0×10^{-7}
^{137}Cs	2.3	2.5×10^{5}	6.7×10^{-9}	1.7

가결과 작업자의 법정선량한도인 5년에 100 mSv를 만족하였다.

5. 고 찰

국내 원전은 정상운전 및 계획예방정비 기간 중 발생하는 방사성 폐액을 방사성 액체폐기물 처리계통을 통해 처리한 후 배출관리 기준에 따라 소외환경으로 배출하고 있다. 그러나 원자로의 출력을 제어하는 용도로 활용하고 있는 붕산이 함유된 배출수는 원전의 수질기준 및 관리항목이 미비하여 자연상태보다 높은 경향을 보임에 따라 이에 따라 기존 액체폐기물 처리계통의 추가적인 설비로 소형 모듈 이동형 붕소함유 방사성폐액 처리 설비를 개발하고 있다. 본 연구에서는 이동형 방사성폐액 처리 시설 내 작업자의 내부피폭에 대한 영향을 평가하여 추후 설비의 도입과정에서 요구되는 방사선학적 영향에 대한 기초자료로 활용하고자 한다

6. 결 론

본 연구에서는 개발중인 소형 모듈 이동형 방사성폐액 처리 설비를 도입하기 위하여 국내 방사성 액체폐기물 처리 시스템을 분석, 원전 발생 방사성폐액 특성 조사, 작업자의 방사선학적 영향을 평가하였다. 작업자의 방사선학적 영향의 경우 방사성폐액 처리 시설임에 따라 방사성폐액 분석자료를 활용하여 내부피폭 선량을 평가하였다. 생체데이터가 아닌 사전 내부피폭 평가의 경우 이동경로 및 평가 방법에 따라 불확도가 매우 크기 때문에 소형 모듈 이동형 방사성폐액 처리 시설 내 선원분배 및 전처리 과정에서 시료의 비산에 의한 공기 오염이 발생하였고 작업자는 이를 모두 흡입하였다고 가정하였다. 작업자 내부피폭 선량평가 결과 ^{60}Co는 연간 2.0×10^{-7} mSv, ^{137}Cs에 의하여 연간 1.7 mSv의 피폭선량을 받는 것으로 도출되어 작업자의 법정선량한도를 만족하였다.

현재 이동형 방사성 액체폐기물 처리 설비를 개발 및 실제 현장에 적용하기 위한 방안을 도출하기 위한 연구가 진행중에 있다. 본 연구는 설비를 도입하기 위한 기초자료로 활용될 예정이며, 향후 개발된 설비를 활용하여 실제 현장에서의 데이터를 기반으로 평가결과를 보완할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 2022년도 중소기업벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임[S324850].

참고문헌

1. Jeong WC. 2022. A study on the Control of Boric Acid in Discharge Water of Nuclear Power Plants, Doctoral dissertation
2. Park HW. 2020. Preparation of reducing liquid radwaste and efficient treatment for decommissioning of OPR1000 in Korea, Master's thesis
3. Lee BS, Kim GJ. 2003. Experience in designing liquid radioactive waste systems for nuclear power plant in Korea. Proceeding of the Korean Radioactive Waste Society Vol. 1. Nov. 2003.

4. Choi KS, Kim SP, Kim SY. 2003. A Comparison and Study for The Processing Ability of Liquid Radioactive Waste Using Ion-Exchange Demineralizer and Evaporator. IETY Korean Nuclear Society, 2003 spring meeting of the KNS.
5. Park BY. 2011. A Study on the Improvement of Liquid Radioactive Waste Treatment System at Nuclear Power Plant By Applying Ion Exchange Method, Master's Thesis
6. Joon HK. 1992. The development of radioactive waste treatment technology (IV). KAEARI-NEMAC/RR-52/91
7. Shiv Bolan et al. 2023. Boron contamination and its risk management in terrestrial and aquatic environmental settings. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164744
8. Lee KJ, Hong DS, Hwang GH, Shin JJ, Yuk DS. 2002. Research on the Assessment Technology of the Radionuclide Inventory for the Radioactive Waste Disposal. Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/HR-470
9. Lee WS. 2016. Nuclear power plants generate radioactive waste within the liquid antimony (Sb) and removal study, Master's thesis
10. Shigeru Takada. 1983. Estimation of scattering rate of radioactive materials under various handling conditions. Radioisotopes, Vol. 32, page 260-269