JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical paper

16(4) : 497-503 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.497

앱타머 활용 해체원전 액체 방사성폐기물 처리 방사선작업종사자 피폭량 예측 및 저감 방안 도출

이민혜[1], 차길용[1], 김종현[1], 김동기[1], 윤미용[2], 김순영[1,*]

[1](주)래드코어, [2]세종대학교 바이오산업자원공학과

A Study on Reducing Worker Exposure for Post-treatment of Aptamer in Liquid Radioactive Waste Treatment from Decommissioning NPP

Minhye Lee[1], Gilyong Cha[1], Jonghyun Kim[1], Dongki Kim[1], Miyong Yun[2] and Soonyoung Kim[1,*]

[1]RADCORE, Co., Ltd., A517 BIZ Center, 17, Techno 4-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34013, Republic of Korea
[2]Department of Bioindustry and Bioresource Engineering, Sejong University, 209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05006, Republic of Korea

Abstract National R&D is being conducted to apply aptamer, which is an eco-friendly bio-material that can be combined with specific ionic elements, to the treatment of liquid radioactive waste generated from decommissioning of nuclear power plant. In this paper, we evaluated the exposure dose rate of a radiation worker and proposed reduction methods of radiation exposure in post-treatment of aptamer saturated with ionic elements after treatment of liquid radioactive waste generated from RVI's underwater cutting. The evaluation used MCNP code and considered two cases of treating liquid radioactive waste by embedding all element-specific aptamers developed for a particular element in a single column and treating liquid radioactive waste by separately embedding the aptamers developed for a particular element in an element-specific column. It was evaluated that if Co, which accounts for more than 99% of a worker's exposure, is treated separately from other elements during liquid radioactive waste treatment, it can be advantageous in terms of exposure to a worker by reducing the waste's volume and treatment time and that wearing of lead apron can reduce the dose rate by 12%.

Key words: Aptamer, Exposure dose, Radiation shielding, Liquid radioactive waste, Decommissioning

1. 서 론

원자력발전소 운영 시에 발생하는 액체 방사성폐기물은 증발, 이온교환 및 역삼투 등의 방법을 적용하여 방사성핵종 농도를 허용제한치 이하로 감소시킨 후 환경으로 방출하고 있다. 원자력발전소의 해체 시에도 다량의 액체 방사성폐기물이 발생하며, 현재까지 국내에서는 원전 해체 진행 사례가 없어 액체 방사성폐기물의 처리를 위해 다양한 방법이 검토되고 있다.

친환경 바이오소재인 앱타머(Aptamer)는 DNA나 RNA와 같은 올리고뉴클레오타이드로 구성되어 있으며, 앱타머가 가질 수 있는 다양한 염기서열 내 염기 간

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author. Soonyoung Kim
Tel. +82-42-934-4679 Fax. +82-42-710-7287 E-mail. sykim@radcore.co.kr
Received 8 September 2022 Revised 2 November 2022 Accepted 8 November 2022

상보적 결합(Complementary bond)에 의해 3차원 구조로 접힘(Folding)으로써 줄기(Stem) 및 고리(Loop) 등의 구조를 포함하는 고유의 독특한 입체구조를 갖는다[1,2]. 염기서열에 따라 형성되는 다양한 입체구조를 기반으로 하여 앱타머는 특정 분자에 친화성(Affinity)과 특이성(Specificity)을 가지고 결합할 수 있다[3]. 지금까지 단백질[4-6], 금속 이온[7-9], 세포[10] 및 미생물[11,12] 등의 다양한 표적분자와 결합할 수 있는 앱타머가 SELEX (Systematic Evolution of Ligands by EXponential enrichment) [4] 방법에 의하여 발굴되어 왔다. SELEX 방법은 선택(Selection), 분할(Partitioning) 및 증폭(Amplification)의 세 단계로 구성된다[13]. 10^{15}개 정도의 무작위 서열을 가지는 핵산 라이브러리를 준비하고, 핵산 라이브러리를 결합하고자 하는 표적분자와 반응시켜 표적분자와 결합할 수 있는 핵산만 남기고 나머지 핵산은 제거한다. 표적 결합 핵산은 결합하고 있는 표적분자와 분리하여 PCR (Polymerase Chain Reaction) 방법을 이용하여 증폭한 후, 동일한 과정을 10~15번 정도 반복함으로써 표적분자와 결합하는 최적의 핵산 서열을 발굴할 수 있다. 이와 같은 방법을 통하여 다양한 표적분자와 결합할 수 있음이 발견됨에 따라 앱타머는 약물전달 시스템[14], 신약 개발[15] 및 바이오센서[16-19]와 같이 다양한 산업분야에서 적용되고 있다.

현재 국내에서는 앱타머를 원자력 및 방사선 응용기술 분야에 적용하기 위해 특정 이온성원소에 선택적으로 결합하는 앱타머를 개발하여 원전해체 시 발생하는 액체 방사성폐기물 처리에 적용하려는 연구가 진행중이다[20]. 앱타머를 활용한 액체 방사성폐기물 처리 공정은 크게 액체 방사성폐기물 내 표적분자를 앱타머에 결합시키는 공정과 앱타머에 포집된 표적분자를 방사성폐기물로 처리하기 위해 수행되는 앱타머 후처리 공정으로 구분할 수 있으며, 표적분자와의 결합으로 포화된 앱타머 후처리를 위해 불가피하게 방사선작업종사자의 접근이 요구될 수 있다. 현재까지 원자력 및 방사선 응용기술 분야에서 앱타머를 적용한 사례는 없으므로 앱타머에 의해 포집된 방사성동위원소로 인해 종사자가 받는 영향이 평가된 사례도 없다. 따라서 앱타머 기술을 원전해체에 적용하기 전에 종사자의 예상 피폭량 평가와 이에 따른 적절한 차폐방안의 도출이 필요하다. 본 논문에서는 앱타머 후처리 시 종사자 피폭방사선량률 및 차폐방안 적용 시 피폭방사선량률을 예비평가하여 합리적인 피폭저감방안을 도출함으로써, 차후 실제 해체 현장에 앱타머를 활용한 액체 방사성폐기물 처리 공정을 적용하는 데 기여하고자 한다.

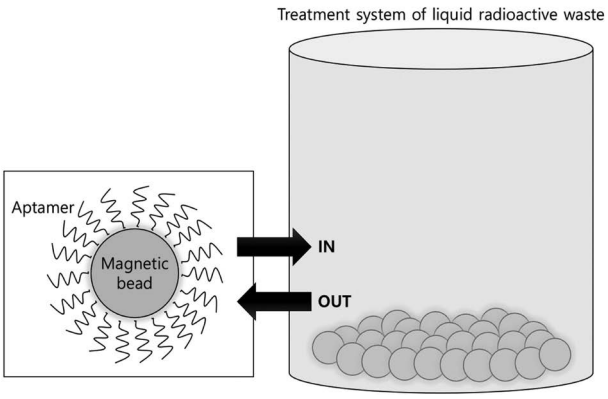

Fig. 1. Conceptual diagram of treatment system of liquid radioactive waste with a built-in aptamer-bead complex.

2. 재료 및 방법

현재 연구개발 중인 액체 방사성폐기물 처리 공정 장치는 Fig. 1과 같이 다수의 앱타머를 마그네틱 비드(Magnetic Bead)에 고정시켜 앱타머-비드 복합체 형태로 제조한 후 이를 컬럼 장치 내에 내장함으로써 표적분자와 결합으로 모든 앱타머 포화 시 앱타머-비드 복합체의 처리 및 교환이 가능하도록 설계될 예정이다. 포화된 앱타머-비드 복합체의 처리를 위해 방사선작업종사자의 접근 시 앱타머와 결합하고 있는 방사성동위원소에 의하여 방사선피폭이 발생할 수 있으며, 본 연구에서는 앱타머-비드 복합체 처리 과정에서 공기 중에 노출된 방사선원으로 인한 종사자의 피폭방사선량률을 평가하였다. 이때 앱타머는 원전해체 과정에서 발생하는 액체 방사성폐기물 내 처리 대상 이온성원소와 결합 중이며, 폐기물 내 이온성원소의 종류 및 농도를 예측하기 위해 원전해체 과정에서 액체 방사성폐기물의 발생원을 검토하여 앱타머로 처리하고자 하는 폐기물의 대표적인 발생 시나리오를 선정하고, 해당 시나리오의 폐기물 내 이온성원소의 종류 및 농도를 도출하였다.

원전 정상 출력운전과정에서 노심 핵분열반응으로 생성되는 중성자에 의한 노심 주변 구조물의 방사화(Activation)나 방사성물질 침적에 의한 표면오염(Surface Contamination)은 원전해체 단계에서도 잔류하며, 해체작

Table 1. Major nuclide's inventory in the activated RVI

Elements	# of element atoms	Radionuclides	# of radionuclide atoms	Radionuclide ratio (%)
Co	1.02×10^{17}	^{60}Co	3.05×10^{15}	2.978
Fe	7.62×10^{19}	^{55}Fe	6.36×10^{14}	0.001
Mn	1.57×10^{18}	^{54}Mn	7.78×10^{10}	0.000
Ba	2.19×10^{16}	^{133}Ba	8.97×10^{11}	0.004
Cs	7.04×10^{12}	^{134}Cs	2.33×10^{10}	0.331
Nb	5.72×10^{15}	^{94}Nb	1.86×10^{14}	3.257
Ni	1.03×10^{19}	^{59}Ni	1.24×10^{17}	1.200
Eu	1.57×10^{11}	^{154}Eu	1.47×10^{10}	9.349

업 시 오염된 구조물의 제염 및 절단 과정에서 액체 방사성폐기물이 발생한다. 표면오염은 물리적 또는 화학적 방법으로 제염되는 과정에서 2차 액체 방사성폐기물이 발생할 수 있으며, 제염이 불가능하고 비교적 방사능준위가 높은 방사화 오염의 경우 방사화된 구조물 자체를 방사성폐기물로 처분하기 위해 절단하는 과정에서 2차 액체 방사성폐기물이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 종사자의 방사선방호 측면에서 가장 보수적인 선원을 고려하기 위해 고방사능 구조물의 절단으로부터 발생하는 액체 방사성폐기물 내 방사성핵종 정보를 종사자 피폭방사선량률 평가의 선원항으로 적용하였다. 노심으로부터 가까운 구조물일수록 높은 중성자 방사화율을 보이고, 특히 국내에서는 고방사능 금속구조물인 원자로내부구조물(Reactor Vessel Internal, RVI)의 경우 절단 시 분진 등으로 발생되는 방사성물질 및 그 피폭 위험때문에 수중에서 절단할 계획이므로 절단 과정에서 RVI 재료 내 방사화핵종들이 잔류하는 액체 방사성폐기물이 발생하게 된다[21]. 따라서, 중성자 방사화된 RVI들을 수중 절단하면서 RVI 재료 내 방사성핵종량 일부가 핵종들 간 동일한 비율로 이온화되어 수중에 잔류한다는 보수적 가정의 액체 방사성폐기물 발생 시나리오를 대표 시나리오로 선정하였다.

원자로 정상 운전 기간 동안 약 30 ton의 Baffle Plate, Barrel 및 Baffle Former와 같은 RVI 구조물들이 약 1.00×10^{13} # cm^{-2} s^{-1} 이상의 중성자속에 노출되어 방사화되며, 원전해체 시 이러한 금속 구조물들은 기계적 또는 열적 방법으로 절단될 예정이다. RVI 절단에 플라즈마 아크(Plasma Arc) 방식을 사용한 국외 사례[22]를 참고하여, 본 연구에서는 절단 과정에서 발생하는 고체 배출물의 일부가 수중에서 이온화 상태로 존재하는 상황을 가정하였다. 금속 구조물의 수중 플라즈마 아크 절단을 통해 발생하는 고체 배출물 중 슬래그 및 찌꺼기를 제외한 입자 크기가 작은 부유 입자 및 에어로졸 입자는 전체 고체 배출물 중 약 1% 이하이다[23]. 본 연구에서는 RVI 절단 시 100 cm 절단길이당 0.5 cm의 절단폭으로 인해 수중에 잔존하는 0.15 ton의 금속물질 중 보수적으로 5%가 이온화되어 총 7,500 g의 RVI 구성원소가 수중에 이온상태로 존재하는 상황을 가정하였다.

또한, 수중 잔류하는 이온성원소의 종류 및 농도를 평가하기 위해 FISPACT 전산코드[24] 사용하여 원자로에서 스테인리스강 구조물인 RVI가 1.00×10^{14} # cm^{-2} s^{-1}의 중성자속으로 30년 동안 조사되고, 영구정지 이후 해체 준비 기간을 고려하여 10년 동안 붕괴된 후 RVI의 방사성핵종 재고량을 평가하였다. RVI 방사화핵종 중 종사자 피폭선량 관점에서 중요한 핵종은 ^{60}Co, ^{55}Fe, ^{133}Ba, ^{134}Cs, ^{94}Nb, ^{59}Ni, ^{154}Eu 및 ^{54}Mn이며, 해당 핵종에 대하여 평가된 RVI 단위중량(1g)당 원소 및 방사성핵종의 농도를 Table 1에 나타내었다.

앱타머-비드 복합체 후처리로 인한 종사자의 피폭방사선량률 평가에는 몬테칼로 방사선수송코드인 MCNP6 (Monte Carlo N-Particle) 전산코드[25]가 사용되었으며, 광자 핵단면적 라이브러리로 ENDF/B-VI를 기반으로 하는 MCPLIB84를 적용하였다. F4 Tally를 적용하여 종사자 접근 가능 공간에 대한 광자선속을 평가하고, ICRP 74[26]에서 제시하고 있는 광자의 선량환산계수를 입력하여 피폭방사선량률 값을 도출하였다. 앱타머가 비드에 고정되어 있음에 따라 앱타머에 결합된 방사선원은 비드 체적 내에 분포하고 있으나, 보수적인 평가를 위해 비드에 의한 차폐효과는 고려하지 않고 앱타머에 결합된 모든 방

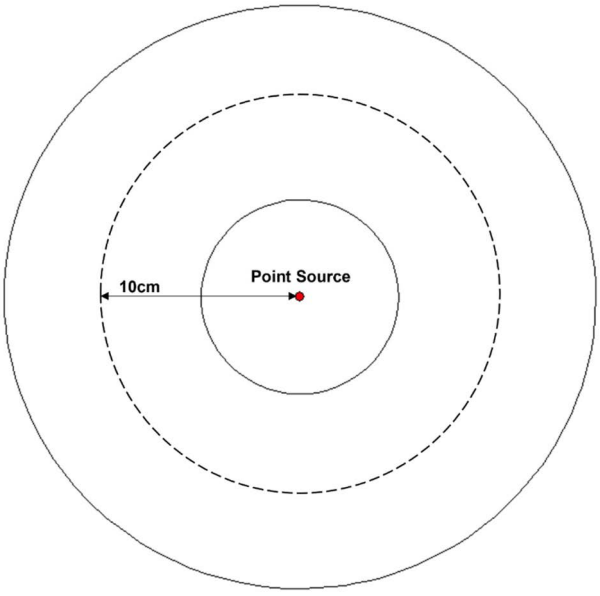

Fig. 2. MCNP modeling on the dose rate calculation by the aptamer binding radiation source.

사선원이 점선원 형태로 공기중에 존재한다고 가정하였으며, 점선원으로부터 10 cm 거리에서의 피폭방사선량률을 평가하였다. 앱타머에 의한 피폭방사선량률 평가를 위하여 Fig. 2와 같이 MCNP 전산 모델링을 수행하였으며, 계산결과의 신뢰성을 위하여 상대오차가 10% 미만이 되도록 10^6개의 입자를 시뮬레이션 하였다.

특정 원소에 선택적인 결합력을 갖도록 발굴되는 앱타머 특성에 따라 앱타머를 이용한 액체 방사성폐기물 처리 장치의 설계에는 두 가지 설계 모델이 고려되었다. 첫 번째 설계 모델은 Fig. 3과 같이 여러 특정 원소에 대해 개발된 여러 종류의 앱타머-비드 복합체를 단일 컬럼에 내장하여 액체 방사성폐기물을 처리하는 모델이고, 두 번째 설계 모델은 Fig. 4와 같이 특정 원소에 대해 개발된 앱타머-비드 복합체를 원소별로 구분된 컬럼들에 내장하여 액체 방사성폐기물을 처리하는 모델이다. 두 가지 설계 모델에 대하여 각각 종사자의 피폭 영향을 검토함으로써 방사선 방호 관점에서 최적의 설계안을 도출하고자 하였다. 이때, 두 번째 설계 모델의 경우 종사자가 구분된 컬럼에 내장되어 있는 앱타머-비드 복합체를 처리할 때, 다른 컬럼에 내장되어 있는 방사선원에 의한 영향을 받지 않음을 가정하였다.

또한, 도출된 최적 설계안을 기반으로 차폐방안 적용에 따른 피폭 저감 정도를 비교하기 위해서 차폐방안 적

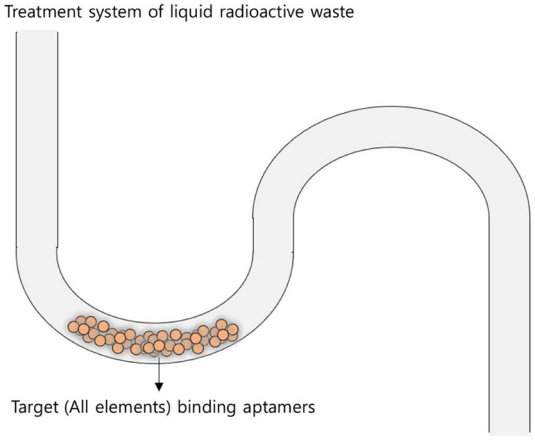

Fig. 3. Conceptual diagram of the treatment system of liquid radioactive waste - Design model 1.

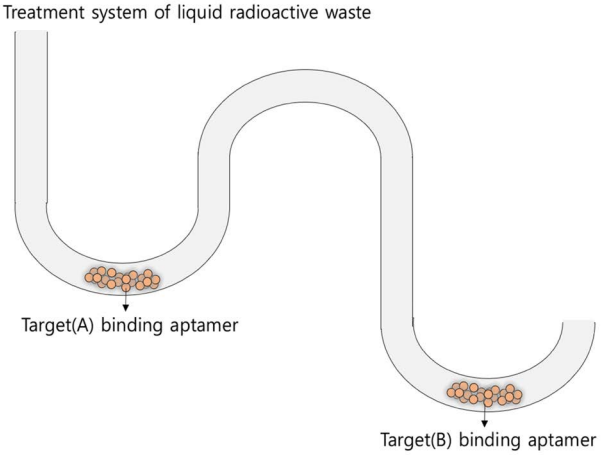

Fig. 4. Conceptual diagram of the treatment system of liquid radioactive waste - Design model 2.

용 전후의 종사자 피폭방사선량률을 비교평가하였다. 방사선 피폭 저감을 위하여 방사선작업종사자가 일반적으로 가장 많이 사용하는 방법은 납 조끼 또는 납 치마 등의 납 차폐복을 착용하는 것이며, 국내에서는 의료용으로 0.025 cm, 0.035 cm 및 0.05 cm 두께의 납 차폐복이 사용된다. 또한, 국내 원전에는 신체 전면 및 후면의 납판이 각 0.3 cm 및 0.15 cm의 두께가 되도록 설계된 중량 약 9.3 kg의 납 차폐복이 도입되었다[27]. 이러한 국내 상황을 고려하여 앱타머 처리 작업을 위해 투입되는 종사자가 0.025 cm, 0.035 cm, 0.05 cm 및 0.3 cm 두께의 납 차폐복 착용 시 전면에서 받을 수 있는 피폭선량률을 평가하였다.

Table 2. Results of dose rate calculation on the design model for liquid radioactive waste treatment

Design model	Radiation source	Dose rate (mSv h^{-1})
1	All radionuclides	8.85×10^{-1}
2	^{60}Co	8.85×10^{-1}
	^{55}Fe	1.35×10^{-4}
	^{54}Mn	4.22×10^{-5}
	^{133}Ba	1.01×10^{-5}
	^{134}Cs	8.82×10^{-6}
	^{94}Nb	7.78×10^{-6}
	^{59}Ni	1.35×10^{-6}
	^{154}Eu	1.18×10^{-6}

3. 결과 및 고찰

특정 원소에 대해 개발된 모든 원소별 앱타머를 단일 컬럼에 내장하여 액체 방사성폐기물을 처리하는 경우(Design model 1)와 특정 원소에 대해 개발된 앱타머를 원소별 컬럼에 분리 내장하여 액체 방사성폐기물을 처리하는 경우(Design model 2) 각각에 대해 차폐방안 미적용 시 방사선원으로부터 10 cm 거리의 종사자 피폭방사선량률은 Table 2와 같이 평가되었다.

평가 결과에 따르면 모든 방사선원에 의한 방사선피폭량 중 99% 이상은 ^{60}Co에 의한 피폭이다. 따라서, ^{60}Co와 같은 방사선피폭에 지배적 영향을 미치는 핵종을 다른 핵종들로부터 구분하여 처리작업을 한다면 종사자가 한 번에 처리해야 하는 포화된 앱타머-비드 복합체의 양이 현저하게 줄어들게 되어 피폭 영향이 지배적인 방사성핵종의 처리작업시간이 감소됨으로써 종사자의 전체적인 피폭량 역시 줄어들 것으로 예상된다.

Co만을 구분하여 작업한다면 주요 피폭 대상 폐기물의 부피가 약 1/900 정도로 크게 감소하고, 처리시간이 감소함에 따라 종사자가 받을 수 있는 방사선피폭량을 저감시킬 수 있다. 또한 Co 외의 방사성핵종은 모두 한 공간에서 한 번에 처리하더라도 종사자의 피폭방사선량률은 2.06×10^{-4} mSv h^{-1} 정도이며, 이는 국내 환경방사선량 수준이므로 다량의 폐기물 처리를 위해 장시간 노출되어도 문제가 없을 것으로 판단된다. 따라서, 액체 방사성폐기물 처리 시 Co 만을 분리 처리할 수 있는 장치를 설계하는 것이 종사자 피폭량 저감 측면에서 보다 유리하다.

Table 3. Results of dose rate calculation on the lead apron shielding for liquid radioactive waste treatment

Thickness (cm)	Dose rate (mSv h^{-1})	Reduction percentage (%)
0.025	8.75×10^{-1}	1.1
0.035	8.72×10^{-1}	1.4
0.05	8.67×10^{-1}	2.0
0.3	7.81×10^{-1}	11.8

또한, 피폭량 저감 측면에서 유리한 설계로 도출된 Co 분리 처리 장치 모델에 대하여 납 차폐복 착용 시 종사자의 방사선피폭 저감효과를 평가하였다. Co와 결합하고 있는 앱타머-비드 복합체 후처리 작업을 위한 종사자가 0.025 cm, 0.035 cm, 0.05 cm 및 0.3 cm 두께의 납 차폐복을 착용하는 경우, 방사선원으로부터 10 cm 거리에서의 종사자 피폭방사선량률은 Table 3과 같이 평가되었다. 0.025 cm~0.05 cm 두께의 납 차폐복 착용 시 차폐방안을 적용하지 않은 경우에 비하여 작업자 피폭을 약 1%~2% 저감시킬 수 있으며, 0.3 cm 두께의 납 차폐복 착용으로는 작업자 피폭을 약 12% 정도 저감시킬 수 있다.

한편, 고에너지 방사선에 노출되는 상황에서 납 차폐복 착용은 저에너지 방사선의 경우에 비하여 차폐효율이 감소하는 것으로 알려져 있으며, 방사선 응용기술 분야에서는 차폐 대상 핵종의 에너지를 고려하여 차폐방안을 선택하도록 제안되고 있다[28-31]. 따라서, 차후에 앱타머-비드 복합체 후처리 작업 시 납 차폐복 착용으로 인한 차폐효과와 함께 무거운 중량의 차폐복으로 인한 작업효율 감소 또는 작업시간 연장도 함께 고려하여 최적의 차폐 방안을 도출하여야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 친환경 바이오소재 앱타머를 활용한 해체원전 액체 방사성폐기물 처리 공정 적용 시 예상되는 방사선작업종사자 방사선피폭량의 저감방안을 연구하여 도출하였다. 이를 위해 앱타머를 사용하여 처리할 수 있는 해체원전 액체 방사성폐기물이 발생하는 대표적 시나리오를 선정하고, 액체 방사성폐기물 처리 장치의 설계에 고려된 두 가지 설계 모델에 대하여 종사자 피폭 영향을 평

가 및 비교하였으며, 마지막으로 앱타머-비드 복합체 후처리 작업을 위한 차폐방안을 도출하고 그 영향을 평가하였다.

액체 방사성폐기물 처리 장치 설계 시 방사선피폭에 지배적 영향을 미치는 Co를 기타 원소들과 구분하여 독립적으로 처리하도록 설계하면, Co와 기타 원소들을 함께 처리하는 경우에 비하여, 종사자가 처리해야 하는 고방사능 앱타머-비드 복합체 폐기물의 양이 약 1/900로 감소하게 된다. ^{60}Co에 의한 종사자 피폭 영향이 99% 이상으로 폐기물량과 폐기물 처리를 위한 작업시간은 비례하기 때문에 Co 만을 분리 처리할 수 있는 장치를 설계함에 따라 후처리 작업 시 종사자의 총피폭선량은 약 1/900 정도로 저감이 가능하다. Co 외의 방사성핵종으로 인한 종사자의 피폭방사선량은 국내 환경방사선량 수준이므로, 분리하여 처리되는 Co에 의한 영향이 미치지 않도록 설계된다면 Co 외의 방사성핵종을 처리하는 작업 과정에서는 별도의 차폐방안이 요구되지 않을 수 있다.

Co로 포화된 앱타머-비드 복합체의 후처리 시 0.3 cm 두께의 납 차폐복을 착용하면, 종사자는 차폐방안 미적용시 대비 약 12%의 피폭 저감효과를 얻을 수 있다. 차후에는 이러한 차폐효과와 함께 무거운 중량의 차폐복으로 인한 작업효율 감소 또는 작업시간 연장도 고려하여 최적의 차폐 방안이 도출되어야 한다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20203210100390).

참고문헌

1. Farokhzad OC, Cheng J, Teply BA, Sherifi I, Jon S, Kantoff PW, Richie JP and Langer R. 2006. Targeted nanoparticle-aptamer bioconjugates for cancer chemotherapy in vivo. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.* **103**(16):6315-6320.
2. Hasegawa H, Savory N, Abe K and Ikebukuro K. 2016. Methods for Improving Aptamer Binding Affinity. *Molecules* **21**(4):421.
3. Eilers A, Witt S and Walter J. 2020. Aptamer-Modified Nanoparticles in Medical Applications. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* **174**:161-193.
4. Tuerk C and Gold L. 1990. Systematic evolution of ligands by exponential enrichment: RNA ligands to bacteriophage T4 DNA polymerase. *Science* **249**(4968):505-510.
5. Murphy MB, Fuller ST, Richardson PM and Doyle SA. 2003. An improved method for the in vitro evolution of aptamers and applications in protein detection and purification. *Nucleic. Acids. Res.* **31**(18):e110.
6. Nonaka Y, Sode K and Ikebukuro K. 2010. Screening and improvement of an anti-VEGF DNA aptamer. *Molecules* **15**(1):215-225.
7. Hofmann HP, Limmer S, Hornung V and Sprinzl M. 1997. Ni^{2+}-binding RNA motifs with an asymmetric purine-rich internal loop and a G-A base pair. *RNA* **3**(11):1289-1300.
8. Rajendran M and Ellington AD. 2008. Selection of fluorescent aptamer beacons that light up in the presence of zinc. *Anal. Bioanal. Chem.* **390**(4):1067-1075.
9. Qu H, Csordas AT, Wang J, Oh SS, Eisenstein MS and Soh HT. 2016. Rapid and Label-Free Strategy to Isolate Aptamers for Metal Ions. *ACS Nano*. **10**(8):7558-7565.
10. Meyer C, Hahn U and Rentmeister A. 2011. Cell-specific aptamers as emerging therapeutics. *J. Nucleic. Acids.* **2011**:1-18.
11. Bruno JG and Kiel JL. 2002. Use of magnetic beads in selection and detection of biotoxin aptamers by electrochemiluminescence and enzymatic methods. *Biotechniques*. **32**(1):178-183.
12. Lee S, Kim YS, Jo M, Jin M, Lee DK and Kim S. 2007. Chip-based detection of hepatitis C virus using RNA aptamers that specifically bind to HCV core antigen. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **358**(1):47-52.
13. Zhuo Z, Yu Y, Wang M, Li J, Zhang Z, Liu J, Wu X, Lu A, Zhang G and Zhang B. 2017. Recent Advances in SELEX Technology and Aptamer Applications in Biomedicine. *Int. J. Mol. Sci.* **18**(10):2142.
14. Zhang Y, Hong H and Cai W. 2011. Tumor-targeted drug delivery with aptamers. *Curr. Med. Chem*. **18**(27):4185-4194.
15. Mukhopadhyay R. 2005. Aptamers are ready for the spotlight. *Anal. Chem.* **77**:114-118.
16. Ohk SH, Koo OK, Sen T, Yamamoto CM and Bhunia AK. 2010. Antibody-aptamer functionalized fibre-optic biosensor for specific detection of Listeria monocytogenes from food. *J. Appl. Microbiol.* **109**(3):808-817.
17. Han K, Liang Z and Zhou N. 2010. Design strategies for aptamer-based biosensors. *Sensors* (*Basel*). **10**(5):4541-4557.
18. Castillo G, Spinella K, Poturnayová A, Šnejdárková M, Mosiello L and Hianik T. 2015. Detection of aflatoxin B1 by aptamer-based biosensor using PAMAM dendrimers as immobilization platform. *Food Control*. **52**:9-18.
19. Crulhas BP, Karpik AE, Delella FK, Castro GR and Pedrosa VA. 2017. Electrochemical aptamer-based biosensor developed to monitor PSA and VEGF released by prostate cancer cells. *Anal. Bioanal. Chem*. **409**(29):6771-6780.
20. KETEP. The 3rd Notice of the New Support Project for Energy Technology R&D Program in 2020. 2020. Available online at http://www.ketep.re.kr/brdartcl/boardarticleView.do?srch_

menu_nix=24T94cYy&brd_id=BDIDX_2U0RE3CxayNmVL12M462Hn&cont_idx=1504.
21. Hwang YH, Hwang S, Hong S, Park KS, Kim NK, Jung DW and Kim CW. 2019. A study on segmentation process of the K1 reactor vessel and internals. *JNFCWT* **17**(4):437-445.
22. Yanagihara S, Ashida S and Usui H. 1990. Dismantling of JPDR internals using underwater plasma arc cutting technique operated by robotic manipulator. *J. Nucl. Sci. Technol.* **25**(11):891-894.
23. Waldie B, Pilot G, Harris W and Loyer H. 1990. Secondary emissions from underwater plasma-arc cutting of stainless steel for nuclear decommissioning. *J. Phys. Colloques* **51**(C5):C5-145-C5-151.
24. Sublet JC, Eastwood JW, Morgan JG, Fleming M and Gilbert MR. 2016. The FISPACT-II User Manual. UKAEA-R(11)11.
25. Pelowitz DB. 2013. MCNP6 USER'S MANUAL (Version1.0). LA-CP-13-00634 Rev.0.
26. ICRP. 1996. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. *ICRP* **26**(3-4).
27. Kim JI, Lee BI and Lim YK. 2013. Analysis of a Lead Vest Dose Reduction Effect for the Radiation Field at Major Working Places during Refueling Outage of Korean PWR Nuclear Power Plants. *J. Radiat. Prot. Res.* **38**(4):237-241.
28. Park MH and Kwon DM. 2007. Measurement of Apron Shielding Rate for X-ray and Gamma-ray. *JRST* **30**(3):245-250.
29. Lee SW, Kim SH, Ji BG, Lee DW, Kim JS, Kim GM, Jang YD, Bang CS, Baek JH and Lee IS. 2014. A Consideration of Apron's Shielding in Nuclear Medicine Working Environment. *J. Nucl. Med. Technol.* **18**(1):110-114.
30. Jang DG, Lee SH, Choi HS, Son JC, Yoon CY, Ji YS, Cho YI, Lee HJ and Yang SO. 2014. A study on the apron shielding ratio according to electromagnetic radiation energy. *JRST* **37**(4):247-252.
31. Bae MJ and Lee HM. 2015. A Study on Radiation Shielding Materials for Protective Garments using Monte Carlo Simulation. *J. Korean Soc. Qual. Manag.* **43**(3):239-252.