JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(4) : 427-436 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.427

중수로 원전 주변 환경 및 인체 삼중수소 방사능 모니터링에 관한 고찰

한상준[1], 이홍연[1], 김보길[1,*], 하혜경[1], 신용주[1]

[1]주식회사 알엠택, 방사능정도관리센터

A Study on the Environment and Human Tritium Radiation Monitoring around the Heavy Water Nuclear Power Plant

SangJun Han[1], HongYeon Lee[1], BoGil Kim[1,*], HyeKyung Ha[1] and YongJu Sin[1]

[1]RMTEC Co., Ltd., 25, Hanamsandancheonbyeonjwa-ro, Gwangsan-gu, Gwangju 62215, Republic of Korea

Abstract As a result of evaluating the level of tritium emitted from the nuclear power plant in the environment and the human body, it was confirmed that tritium was detected in the environmental media and human urine samples to be investigated. It was found that the tritium was clearly detected. After the operation of the Tritium Removal Facility (TRF), which was operated for the purpose of removing tritium from the Wolsong nuclear power plant, the tritium emission showed a decreasing trend, and the tritium level in the environmental media also showed a tendency to decrease accordingly. However, for precise evaluation, it was necessary to select and investigate points by distance, season, and wind direction from the nuclear power plant, but it also showed characteristics that did not reflect this. As the cycle, etc., implemented the previous environmental monitoring program as it is, there was also a limitations in not being able to reflect the changing environment. Therefore, it is necessary to review and supplement the environmental monitoring investigation plan and results so far, and by applying the supplemented investigation plan to secure valid and reliable investigation results, it is judged that it will be an appropriate measure for environmental conservation and human protection in the vicinity of the nuclear power plant.

Key words: Tritium, Radioactive investigation plan, Nuclear power plant, Environment media, Urine sample

1. 서 론

국내 원자력발전소 노형은 경수로와 중수로로 나뉘어 있으며, 경상북도 울진군, 부산광역시 기장군, 울산광역시 울주군, 전라남도 영광군은 경수로 원전을 운영하고 있고, 경상북도 경주시의 경우는 경수로와 아울러 중수로 원전을 운영하고 있다. 경수로와 중수로는 핵연료 종류 및 가동 중 핵연료 교체 여부, 냉각수 및 감속재가 경수 또는 중수를 사용하느냐에 따라 큰 차이를 보이고 있다.

그러나 무엇보다도 가장 큰 차이점은 원전 가동 중 발생하는 기체 및 액체 방사성폐기물에 포함된 방사성핵종의 환경 중 배출량이다. 중수로의 경우는 냉각수 및 감속재로 중수를 사용하기 때문에 삼중수소가 경수로에 비해 기체상으로는 약 10배, 액체상으로는 3~5배 정도 더 많이 배출을 하고 있다[1,2,7-12].

이렇게 기체 및 액체상으로 배출된 삼중수소는 환경매

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author. BoGil Kim
Tel. +82-62-236-6742 Fax. +82-62-236-6741 E-mail. bg1123@rmtec.co.kr
Received 8 November 2023 Revised 18 December 2023 Accepted 20 December 2023

체(공기, 물, 농산물, 해수 등) 또는 인체 소변 시료를 통해 영향을 조사하고 있다. 조사 결과 경수로는 대부분 환경매체에서 방사능 농도가 최소검출가능방사능(Minimum Detectable Activity, MDA) 이하를 나타내는 반면 중수로는 환경매체와 더불어 인체 소변 시료에서도 삼중수소가 검출되고 있는 것으로 나타났다[1,2].

원전 주변지역 방사선/능 조사 활동의 목적은 원자력발전소 및 방사성폐기물 처분장 주변 주민의 방사선량 추정 및 평가, 환경에서의 방사성물질의 축적경향 평가 및 예기치 않은 방사성물질 방출로 인한 주변 환경의 영향 여부를 확인하는데 있다.

국내 원자력발전소는 고리 1호기 가동 이후 현재까지 약 40여 년 동안 원전 주변 환경매체를 대상으로 조사 활동을 수행하고 있으며, 그 조사결과를 매년 공개를 하고 있다[3-5]. 이렇게 공개된 자료(2012~2021년)를 기반으로 중수로 원전 주변지역에서 검출되고 있는 삼중수소의 환경매체 거동 특성과 인체 소변 시료 조사 결과에 대해 분석하였으며, 분석 결과를 바탕으로 환경 및 인체 삼중수소 방사능 모니터링에 대해 검토·개선해야 할 사항을 고찰하였다[4].

2. 재료 및 방법

국내 원자력발전소 주변지역 환경방사선/능 조사 및 평가는 Table 1에 나타낸 바와 같이 발전사업자인 한국수력원자력(주)와 규제전문기관인 한국원자력안전기술원, 민간기관인 전국민간환경감시기구에서 수행하고 있다. 발전사업자는 운영자로서 자체 분석과 아울러 조사 결과에 대한 신뢰와 검증을 전문적인 지식과 기술을 보유한 대학과 공동으로 수행하고 있으며, 규제기관은 발전사업자 조사계획 및 결과에 대한 규제를 통해 실효성을 확인하고 있고 또한 전 국토와 비교·평가를 수행함으로써 원전과 비원전 지역의 차이를 확인하고 있다. 민간기관은 발전사업자 및 규제기관에서 수행하는 조사의 재검증을 통해 결과 신뢰성을 확인하고 있다[3-5].

원전 주변지역 조사 대상 환경매체는 Table 2에 나타낸 바와 같으며, 시료 채취 지점수는 월성 192지점, 고리 145지점, 새울 146지점, 한빛 159지점, 한울 174지점으로 전국적으로 총 816지점에 대해 시료 채취 및 조사를 수행하고 있다. 조사 대상으로는 공간선량 측정을 위한 공간감마선량률 및 집적선량과 환경매체는 공기, 빗물, 지표수, 식수, 지하수, 표층토양, 하천토양, 곡류, 채소류, 과일류, 육류, 우유, 솔잎, 쑥 14종의 육상시료와 해수, 해저퇴적물, 어류, 패류, 해조류, 저서생물 6종의 해상시료를 대상으로 조사를 수행하고 있다[4]. 그리고 조사 대상 핵종 중 삼중수소 모니터링을 위한 각 원전별 시료 채취 지점수와 조사 대상 환경매체는 Table 3과 같으며, 시료 채취 지점수는 월성, 고리, 새울, 한빛, 한울 각각 55지점, 39지점, 42지점, 37

Table 1. Radiation monitoring institutions and investigated nuclides

Monitoring institution		Nuclide to be investigated
Power generation company	KHNP + University	Gamma isotopes, Tritium, Radiocarbon, Gross beta, Strontium, Alpha isotopes
Regulation institution	KINS	
Private institution	Supervisory organization	

Table 2. Sampling points and environmental media by nuclear power plant

Division		Wolsong	Kori	Saeul	Hanbit	Hanul
Number of sampling points		192	145	146	159	174
Environment media	Spatial dose	Spatial gamma dose rate, Accumulated dose				
	Land sample	Moisture in the air, Rain, Surface water, Drinking water, Underground water, Superficial layer soil, River sediment, Grain, Vegetables, Fruits, Meat, Milk, Pine needles, Wormwood				
	Sea sample	Seawater, Sub-marine sediment, Fish, Shellfish, Seaweed, Benthos				

Table 3. Tritium monitoring status by nuclear power plant

Division	Wolsong	Kori	Saeul	Hanbit	Hanul
Number of sampling points	55	39	42	37	35
Environment media	Moisture in the air, Rain, Surface water, Drinking water, Underground water, Grain, Vegetables, Fruits, Meat, Milk, Seawater				

지점, 35지점으로 총 208지점에 대해 조사를 수행하고 있다. 환경매체는 공기 중 수분, 빗물, 지표수, 식수, 지하수, 곡류(보리, 쌀), 채소류(배추), 과일류(감), 육류, 우유, 해수 11종을 대상으로 조사를 수행하고 있다.

그리고 인체의 삼중수소 검출 및 노출은 중수로 원전 주변지역의 사회적 문제로 2010년도부터 인체 소변 시료를 대상으로 평가한 결과 인체에 존재함이 확인되었고, 이는 원전으로부터 배출된 것으로서 원전으로부터 거리가 가까운 지역이 원거리보다 상대적으로 높게 검출되는 것으로 나타났다. 이에 따라 지속적인 인체 삼중수소 노출량 및 영향 조사를 위한 장기적이고 정밀한 모니터링이 필요하다는 지적이다[6].

3. 결 과

전국 원자력발전소 주변지역 환경매체에서의 조사 대상 방사성핵종은 경수로에서는 대부분 핵종 농도가 MDA 이하 값을 나타내고 있어 조사 대상 및 조사 결과에 대해 평가 의미가 없는 반면 중수로 원전 주변지역은 삼중수소 배출량이 경수로에 비해 상대적으로 많아 환경매체 및 인체에서 검출이 되고 있어 검출된 삼중수소 방사능 조사 결과를 바탕으로 평가를 수행하였다[3,13,15].

3.1. 집적선량 (TLD) 모니터링 결과

집적선량은 환경방사선의 변동을 감시하는 목적으로 누적 감마선량에 대해 열형광선량계(Thermoluminesence Dosimeter, TLD)를 이용하여 분기별로 회수, 판독하여 결과를 확인한다[14]. 측정에 사용된 TLD 종류로는 월성, 새울 한빛은 UD-814-ASI, 고리는 TLD-700H, 한울은 TLD 100-200을 사용하여 수행하고 있다. 각 원전에서 측정한 결과를 2012년부터 2021년까지 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 월성을 제외한 고리, 새울, 한빛, 한울은 비슷한 수준을 나타내고 있으나, 월성의 경우는 경수로 지역에 비해 다소 낮게 측정됨을 알 수 있다. 이에 대해 평가한 결과 TLD를 수납하는 백엽상이 한빛의 경우는 스테인레스, 새울은 플라스틱, 월성은 철재 재질로서 각 원전마다 상이함을 알 수 있다. 특히 월성의 경우는 철재 재질뿐만 아니라 TLD를 수납하는 공간이 상대적으로 경수로에 설치된 백엽상에 비해 작고 철재 두께가 두꺼운 것으로 확인되었으며, 공기의 흐름이 ㄱ자 모양으로 되어 있어 공기 유동이 제한적인 것을 알 수 있다(Fig. 2). 또한, 집적선량을 측정하기 위해 선정된 지점을 확인한 결과 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 주변 설치 환경 및 관리 측면에서 어려운 지형과 공기 흐름의 방해가 되는 요소가 많은 곳에 설치가 되어 있었다. 이러한 요인에 의해 경수로에 비해 자연 환경 중 방사선의 모니터링 측정 결과가 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

3.2. 환경매체 삼중수소 모니터링 결과

중수로 원전 주변지역의 환경매체에 대해 삼중수소 수준을 평가하기 전에 월성원전으로부터 삼중수소 배출량 분석을 먼저 수행하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 2003년부터 2021년까지 확인한 결과 기체상으로 배출되는 삼중수소는 2004년을 최고 배출 기준으로 시간에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타냈으며 2016년부터는 감소하는 폭이 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 월성원전은 계통보호 및 방사선작업종사자 보호를 위해 냉각수와 감속재에 포함되어 있는 삼중수소를 제거하고자 삼중수소제거설비(Tritium Removal Facility, TRF)를 2007년 이전부터 시운전을 시작으로 정상 가동함에 따라 환경으로의 배출량도 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 2019년에 월성1호기 영구정지에 따라 추가적으로 감소하는 경향이 나타난 것으로 판단된다.

전체적으로 원전으로부터 배출되는 삼중수소는 가장 배출량이 많은 2004년도에 비해 약 25% 수준으로 감소되

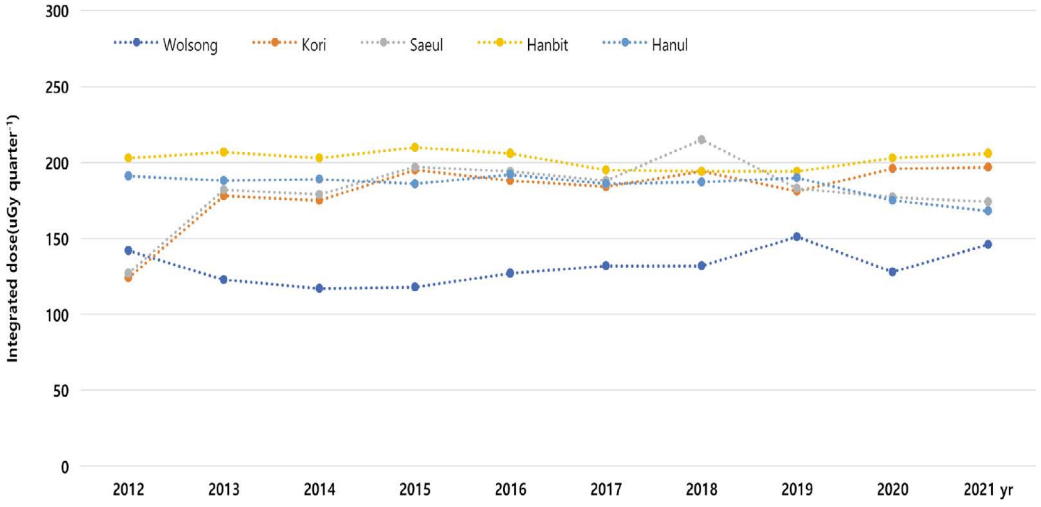

Fig. 1. Annual integrated dose by nuclear power plant.

(a) Wolsong N.P.P (b) Hanbit N.P.P (c) Saeul N.P.P

Fig. 2. Types of storage boxes by nuclear power plant.

Fig. 3. Location of storage boxes around wolsong nuclear power plant.

었음을 확인할 수 있다. 이렇게 월성원전으로부터 삼중수소 배출량이 감소함에 따라 환경매체에서 삼중수소 수준이 어느 정도 감소 또는 증가하였는지 분석을 수행하였다. 평가 대상 환경매체로는 Figs. 5~10에 나타낸 바와 같이 공기 중 수분, 빗물, 지하수, 식수, 보리, 쌀, 배추, 감에 대해 수행하였으며, 주로 호흡이나 섭취로 인해 인체에

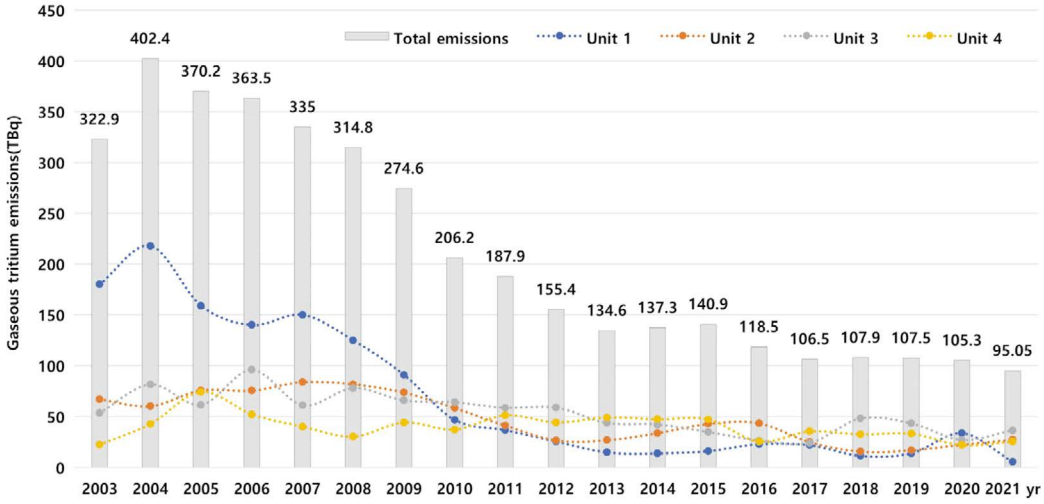

Fig. 4. Tritium gas emissions from Wolsong nuclear power plant.

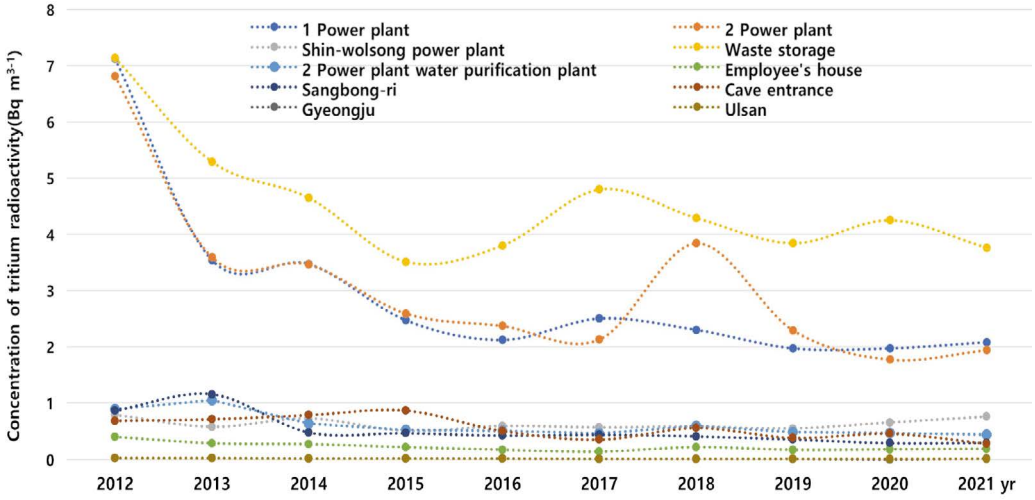

Fig. 5. Radioactive moisture tritium concentration in air.

영향을 줄 수 있는 환경매체를 대상으로 평가를 수행하였다.

먼저 공기 중 수분을 평가한 결과 폐기물 저장고와 2발전소 (1.77~6.81 Bq m^{3-1}) 및 1발전소 (1.97~7.12 Bq m^{3-1}) 부근이 가장 높게 나타났으며, 그 외 지점은 비슷한 수준 (MDA~1.05 Bq m^{3-1})으로 나타나 원전으로부터 거리가 가까울수록 삼중수소가 높게 검출되는 것을 확인할 수 있었다. 가장 높게 검출되는 지점인 폐기물 저장고의 경우는 3.51~7.14 Bq m^{3-1}의 범위 수준으로 나타났다 (Fig. 5).

빗물의 경우도 공기 중 수분과 마찬가지로 2발전소 (217~816 Bq L^{-1}) 및 1발전소 (54.8~276 Bq L^{-1}) 부근이 가장 높게 검출됐으며 그 외 주변지점은 비슷한 수준을 나타낸 반면 비교지점인 경주와 울산은 낮게 검출되거나 MDA 이하로 나타났다. 특히 빗물의 특성상 대기 중 삼중수소가 그대로 반영되어 높은 지점은 최고 816 Bq L^{-1} (2012년 2발전소) 수준까지 검출되는 경우도 있었다 (Fig. 6).

음용수에 대해서는 지하수와 식수에 대해 평가한 결과 먼저 지하수는 주변지점은 나산과 봉길을 대상으로 비교지점은 경주와 울산을 대상으로 조사를 수행하고 있었으며, 그 중 봉길 지점에서 삼중수소가 4.77~11.5 Bq L^{-1} 수준으로 나타난 반면 나산과 경주, 울산은 모두 MDA 이하를 나타냈다 (Fig. 7).

식수에 대해서는 주변지점은 봉길과 나아, 비교지점

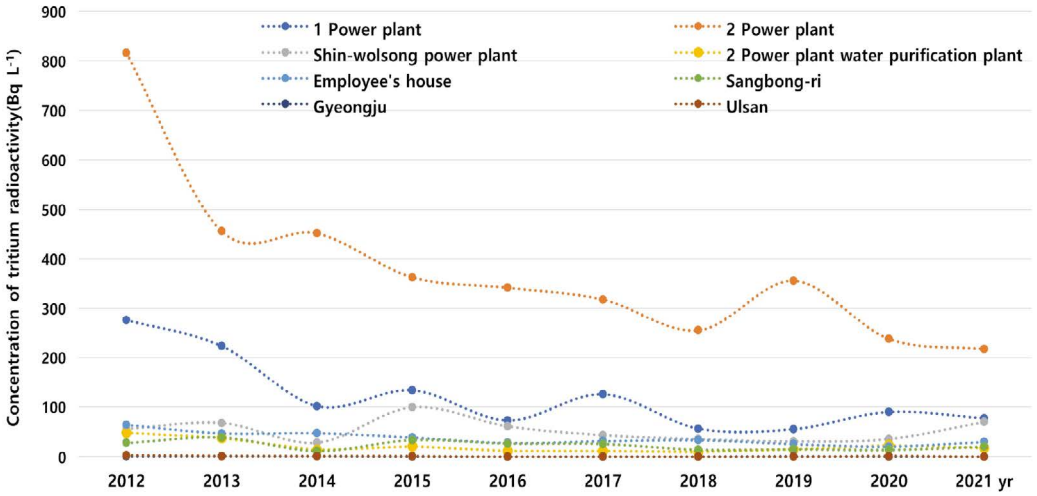

Fig. 6. Tritium radioactive concentration in rainwater.

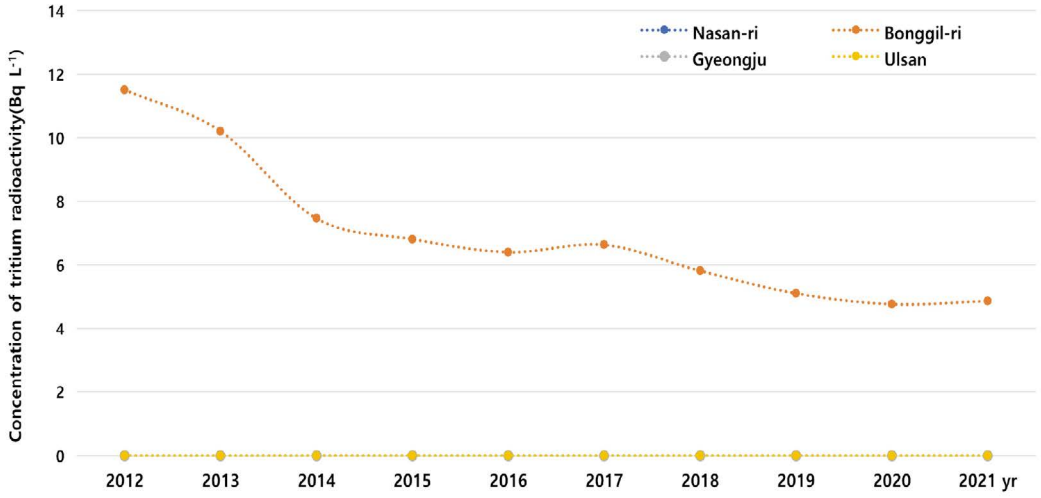

Fig. 7. Tritium radioactive concentration in underground water.

은 경주와 울산을 대상으로 조사를 수행 중이었으며 봉길과 나아 지점 모두 삼중수소가 각각 4.31~10.0 Bq L^{-1}, MDA~6.23 Bq L^{-1}로 나타난 반면 비교지점인 경주와 나아는 모두 MDA 이하로 나타났다(Fig. 8).

농산물에 대해서는 Fig. 9와 같이 보리, 쌀, 배추, 감에 대해 평가를 수행하였으며, 보리의 경우는 주변지점인 기구리에서만 4.99~27.5 Bq L^{-1}로 나타났고, 쌀도 마찬가지로 기구리에서 MDA~13.1 Bq L^{-1}로 나타난 반면 비교지점인 경주는 보리와 쌀 모두 MDA 이하를 나타냈다.

배추와 감의 경우도 보리 및 쌀과 동일하게 주변지점에서만 검출되었으며 비교지점은 모두 MDA 이하로 나타났다. 배추는 기구리에서 3.34~116 Bq L^{-1}로 나타났고, 감은 나산리에서 12.9~39.7 Bq L^{-1}로 나타났다(Fig. 10).

환경매체에서 삼중수소 거동 특성을 확인한 결과 공기중 수분과 빗물은 조사지점이 원전 소내뿐만 아니라 주변지점 및 비교지점이 많아 증가 또는 감소 경향성을 평가하는데 수월하였으나, 지하수, 식수, 보리, 쌀, 배추, 감에 대해서는 주변지점 및 비교지점이 각각 1지점씩만 조사를 수행하고 있어 단순 주변지점과 비교지점 평가만 가능할 뿐 원전으로부터 거리 및 풍향에 대한 경향성을 확인하기 어려웠다.

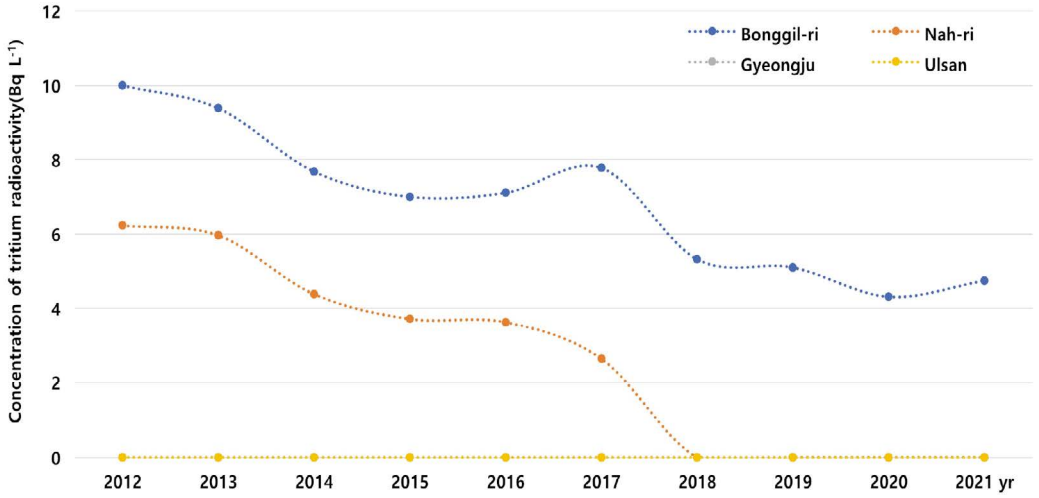

Fig. 8. Tritium radioactive concentration in drinking water.

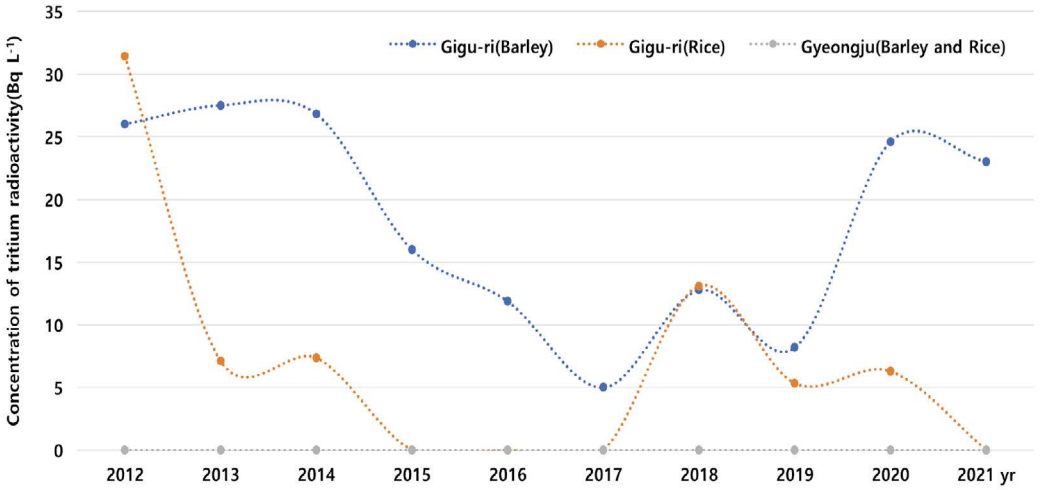

Fig. 9. Tritium radioactive concentration in barley and rice.

3.3. 중수로 원전 주변지역 인체 삼중수소 모니터링 결과

중수로 원전이 가동 중인 월성원전은 삼중수소 배출량이 경수로에 비해 상대적으로 많아 2010년도에 인체 소변 시료를 대상으로 조사를 수행한 결과 인체에 삼중수소가 노출되어 있음을 확인하였다. 이에 따라 현재까지 원전 주변지역인 양남면, 문무대왕면, 감포읍 주민을 대상으로 총 3차례의 조사를 수행한 결과 Table 4에서 보는 바와 같이 2015년도는 양남면 조사 대상 주민 100%와 문무대왕면 96.0%, 감포읍 80.0%로 검출되었으며, 2019년도는 양남면, 문무대왕면, 감포읍 각각 68.8%, 50.3%, 41.0%로 검출되었고, 2021년도에는 53.3%, 41.7%, 50.8%로 검출되었다[4]. 검출되는 삼중수소 수준은 일반인 방사선량 기준치(1 mSv y^{-1}) 이내이긴 하지만 원전으로부터 거리가 가까울수록 삼중수소 노출량이 원거리에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났다(Fig. 11).

4. 고 찰

중수로 원전인 월성원전 주변지역의 삼중수소 방사능 조사 결과를 바탕으로 조사계획 및 결과에 대해 분석한 결과 방사능농도 수준은 평상수준 또는 감소하는 경향을 나타내고 있는 것으로 나타났으나, 환경매체별 거리, 방

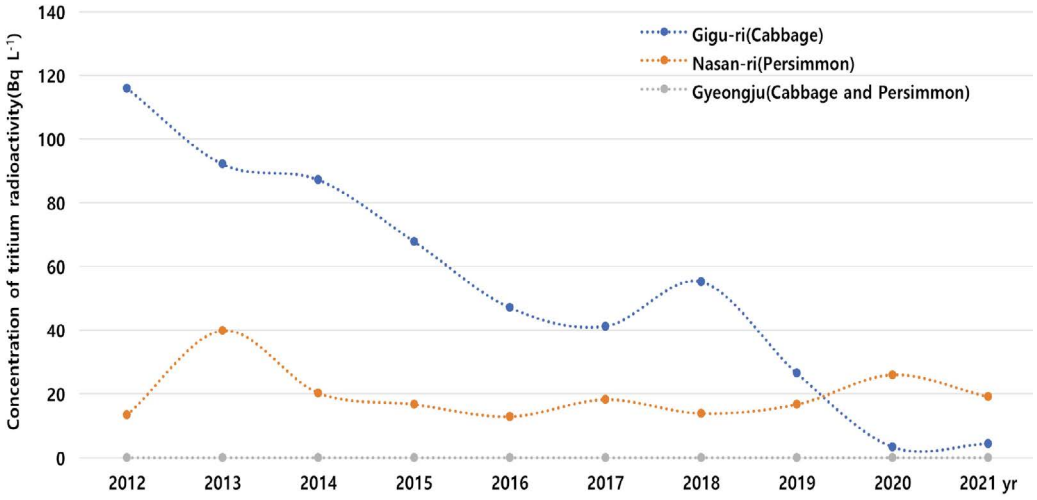

Fig. 10. Tritium radioactive concentration in cabbage and persimmon crops.

Table 4. Tritium investigation results in human urine

Investigation period (Sampling date)	2014. 6~2015. 9 (2014. 8~9)			2018. 11~2020.7 (2019. 5~6)			2021. 6~2022. 9 (2021. 8~9)		
	Radioactive concentration ($Bq\,L^{-1}$)		Detection rate (%)	Radioactive concentration ($Bq\,L^{-1}$)		Detection rate (%)	Radioactive concentration ($Bq\,L^{-1}$)		Detection rate(%)
	Mean	Max		Mean	Max		Mean	Max	
Yangnam-myeon	8.4	28.8	100.0	3.88	16.3	68.8	4.65	10.2	53.3
Munmu dawang-myeon	5.8	21.6	96.0	3.45	14.4	50.3	4.43	10.7	41.7
Gampo-eup	3.8	21.7	80.0	1.98	3.88	41.0	3.64	6.50	50.8

향, 특성 등을 반영하여 정밀한 평가를 수행하기에는 한계가 있는 것으로 나타났다.

먼저 환경매체는 월성원전으로부터 삼중수소 배출에 따라 거리가 가까울수록 방사능농도가 높고 거리가 멀수록 낮게 나오거나 MDA 이하로 검출되는 경향이 뚜렷하나 환경매체 종류별로 주변지점과 비교지점 두 지점만 조사를 수행하여 거리가 증가할수록 방사능농도 수준을 동일 방향의 거리별로 평가하기가 어려운 측면이 있었다. 또한 두 지점에 대해서는 풍향이 상이하여 거리에 따른 결과를 해석하기가 어려운 측면이 있었다. 시료 채취 지점, 시기 및 종류에 대해서는 매년 동일 지점 및 시기에 채취하는 것이 원칙이나 표층토양 및 솔잎의 경우 채취 지점의 지형 변화 및 시설 설치(공원화, 사유화, 시설물 등) 등에 따라 채취가 어려운 측면이 있었으며, 우유 시료의 경우는 운영상의 어려움에 따라 목장 폐쇄로 주변지점이 없는 비교지점만 조사를 수행하는 경우도 있었다. 그리고 수확기 또는 채취 시기(주기)에 맞게 시료를 확보해야 하는 농작물, 해양생물 등에 대해서는 자연환경 변화에 따라 적기에 채취가 어렵고 또한 동일한 시료를 조사해야 하는 상황에서 동일한 시료를 매년 확보하기가 어려운 측면도 있었다.

인체 소변 시료 중 삼중수소 수준은 2010년도 이후 현재까지 총 3차례에 걸쳐 조사를 수행한 결과 다소 낮아지는 경향을 보이긴 했으나 조사 목적 및 방법, 시기 등에 차이가 있어 뚜렷하게 감소 또는 증가하는 경향을 평가하기가 어려웠다.

이상과 같이 월성원전 주변지역 삼중수소에 대한 환경감시 및 인체 모니터링 활동 및 결과는 지속적인 주변지

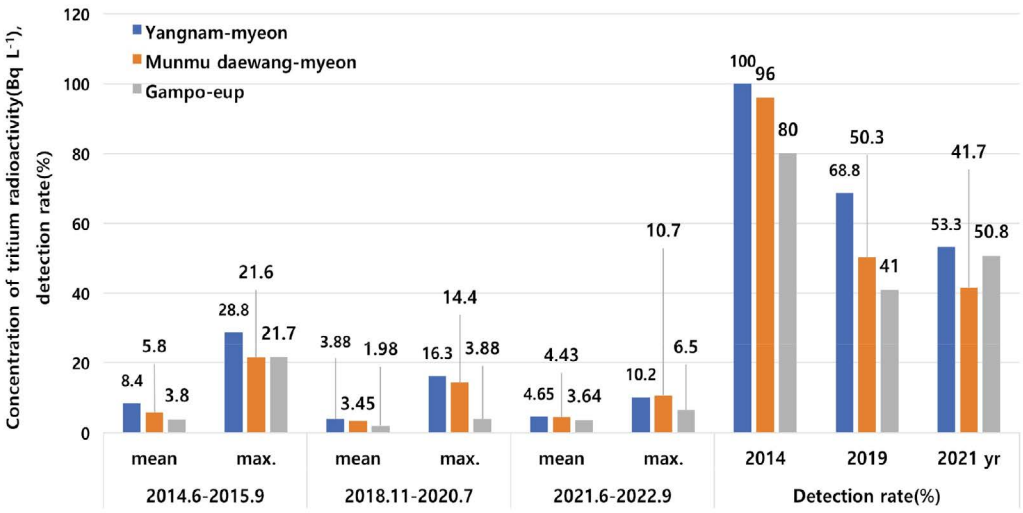

Fig. 11. Tritium investigation results in human urine.

역 방사선안전을 확인하는 최선의 방법이긴 하나, 과학적으로 정밀한 감시 및 평가를 수행하기 위해서는 변화하는 사회 및 자연환경을 반영한 체계적인 모니터링 개선 계획 수립과 이행이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 월성원전 주변지역 환경 및 인체에서의 삼중수소 거동 특성을 분석하여 모니터링 방법에 대한 개선사항을 도출하는 것에 목적이 있다. 연구 결과 월성원전 주변지역에서 검출되는 삼중수소는 기준치 이내이긴 하지만, 확인 평가가 가능한 수준으로 검출되고 있는 만큼 정밀한 환경 및 인체 모니터링을 위해서는 현재까지의 결과를 기반으로 사회, 자연, 기술 환경 등을 고려한 조사계획을 검토·보완하여 실행함으로써 향후 월성원전 주변지역 삼중수소 조사 결과에 대한 신뢰성, 타당성 및 주민 수용성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 “월성원전 주변 주민건강영향조사“ 연구 최종보고서 결과로서 환경부 조사용역(환경부 공고 제2021-722호) 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Han SJ. 2016. A Tritium Environmental Dosimetric Analysis of Domestic Nuclear Power Plants [dissertation]. Gwangju: University of Chosun.
2. Han SJ, Lee KJ, Yeom JM and Shin DY. 2015. A study and analysis on tritium radioactivity and environmental behavior in domestic NPPs. *JRPR* **40**(4):267-276. https://doi.org/10.14407/jrp.2015.40.4.267.
3. KHNP. 2012-2021. Environmental radiation survey and evaluation report around nuclear power plants.
4. KHNP. 2015. A study for the effect of tritium among residents nearby wolseong nuclear power plants.
5. KINS. 2012-2021. The Annual Report on the Environmental Radiological Surveillance and Assessment around the Nuclear Facilities.
6. KNS. 2016. Scientific analysis of the effects of tritium on the human body.
7. Jo JW, Lee SB, Nam JY, Noh EJ, Beak HW, Lee YJ, Lee JN, Choi JW and Kim SC. 2021. Evaluation of radioactive substance and measurement of harmfulness in drinking water. *JRPR* **44**(3):247-252. https://doi.org/10.17946/JRST.2021.44.3.247.
8. CNSC, INFO-0799. 2010. Health Effects Dosimetry and Radiological Protection of Tritium: Part of the Tritium Studies Project.
9. CNSC, INFO-0798. 2010. Tritium Activity in Garden Produce from Pembroke in 2007 and Dose to the Public: Part of the Tritium Studies Project.
10. CNSC, INFO-0793. 2009. Tritium Releases and Dose Consequences in Canada in 2006: Part of the Tritium Studies Project.
11. CNSC, INFO-0766. 2008. Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water: Part of the Tritium Studies Project.

12. CNSC. 2010. Dosimetry and Radiological Protection of Tritium.
13. IAEA. 2010. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments: Technical Report Series No. 472.
14. Chen J. 2006. Radiation Quality of Tritium. *Radiat. Prot. Dosim.* **122**(1-4): 546-548. https://doi.org/10.1093/rpd/ncl411.
15. Straume T. 1993. Tritium Risk Assessment. *Health Physics* **65**(6):673-682.