



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2024년 2월

석사학위 논문

국내 원자력발전소의 Carbon-14
환경배출로 인한 주변주민
피폭선량 분석 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김화평

국내 원자력발전소의 Carbon-14
환경배출로 인한 주변주민 피폭선량
분석 연구

A study on the public exposure due to carbon-14 release
to the environment from Korean nuclear power plants

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김화평

국내 원자력발전소의 Carbon-14
환경배출로 인한 주변주민 피폭선량
분석 연구

지도교수 공 태 영

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

김 화 평

김화평의 석사학위논문을 인준함

위원장 이 경 진 (인)

위 원 송 종 순 (인)

위 원 공 태 영 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	viii
제1장 서론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 연구 목적	6
제2장 연구방법	9
제3장 국내 원자력발전소에서의 ^{14}C 발생과 환경영향평가 방법론 분석 결과	13
제1절 국내 원자력발전소의 ^{14}C 발생 및 배출	13
제2절 ^{14}C 의 환경에 대한 영향평가 방법론 분석	29
제4장 국내 원자력발전소에서 환경으로 배출되는 방사성유출물 분석	39
제1절 2002년-2011년(모니터링전) 환경으로 배출되는 ^{14}C 분석	39
제2절 2012년-2021년(모니터링후) 환경으로 배출되는 ^{14}C 분석	49
제5장 국내 원자력발전소에서 환경으로 배출되는 방사성유출물에 의한 주변주민 선량분석	60
제1절 주변주민에 대한 주민선량 분석	60
제6장 ^{14}C 배출에 따른 주변주민 및 방사선환경영향	83
제1절 방사성유출물 배출량의 PWR ^{14}C 모니터링 전·후 비교 분석	83
제2절 주변주민 피폭선량의 PWR ^{14}C 모니터링 전·후 비교분석	90
제3절 PWR ^{14}C 모니터링 중요성	95

제4절 주변주민 선량감소를 위한 ^{14}C 의 배출저감 연구개발 필요성 제기	97
제7장 결론	99
참고문헌	102

표 목차

표 1.1 원자력안전위원회 고시 제2019-10호의 환경상의 위해방지를 위한 방사성유출물의 제한구역 경계에서의 연간 선량기준치	3
표 1.2 탄소 동위원소의 특성	6
표 3.1 국내 운영 중인 원자력발전소 현황	16
표 3.2 PWR의 ^{14}C 생성반응 및 반응 단면적	16
표 3.3 PWR 냉각재의 반응식에 따른 ^{14}C 발생률	17
표 3.4 PWR 노심 구조물질에서 발생하는 ^{14}C 의 발생량	19
표 3.5 PWR에서 발생하는 ^{14}C 발생률	20
표 3.6 미국 PWR에서 배출된 ^{14}C 의 화학적 형태	22
표 3.7 원자로 노형별 ^{14}C 발생량 및 배출량 비교	24
표 3.8 PHWR의 ^{14}C 주요 생성반응 및 열중성자 단면적	24
표 3.9 PHWR에서 발생하는 ^{14}C 의 발생량 및 발생 메커니즘	25
표 3.10 PHWR의 계통별 ^{14}C 의 배출량	28
표 3.11 평균 70kg 남성의 인체 구성에서 탄소 및 ^{14}C 의 함량(서양인 기준)	34
표 3.12 인체 주요 장기 내 탄소 및 ^{14}C 함량	35
표 4.1 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) 원전본부별 기체유출물 배출량	40
표 4.2 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) 원전본부별 기체유출물 평균 배출량 · 41	41
표 4.3 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) 노형별 기체유출물 평균 배출량	42
표 4.4 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) 원전본부별 액체유출물 배출량	44
표 4.5 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) 원전본부별 액체유출물 평균 배출량 · 45	45
표 4.6 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) 노형별 액체유출물 평균 배출량	46
표 4.7 2012-2021년(PWR ^{14}C 모니터링 이후) 원전본부별 기체유출물 배출량	49
표 4.8 2012-2021년(PWR ^{14}C 모니터링 이후) 원전본부별 기체유출물 평균 배출량 · 51	51

표 4.9	2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) 노형별 기체유출물 평균 배출량	51
표 4.10	2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) 원전본부별 액체유출물 배출량	54
표 4.11	2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) 원전본부별 액체유출물 평균 배출량	55
표 4.12	2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) 노형별 액체유출물 평균 배출량	56
표 5.1	2002-2011년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이전) 주변주민 피폭선량	61
표 5.2	2002-2011년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이전) PHWR 노형의 주변주민 피폭선량	63
표 5.3	2002-2011년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이전) PWR 노형의 주변주민 피폭선량	65
표 5.4	2002-2011년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이전) PHWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량	67
표 5.5	2002-2011년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이전) PWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량	67
표 5.6	2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) 주변주민 피폭선량	71
표 5.7	2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) PHWR 노형의 주변주민 피폭선량	73
표 5.8	2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) PWR 노형의 주변주민 피폭선량	75
표 5.9	2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) PHWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량	77
표 5.10	2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) PWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량	77
표 5.11	¹⁴ C의 선량과 연간 일반인 선량한도기준(1 mSv) 비교	82
표 6.1	국내 원전의 기체유출물 배출량 PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교	84
표 6.2	PHWR 노형의 기체유출물 배출량 PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교	84
표 6.3	PWR 노형의 기체유출물 배출량 PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교	85

표 6.4 국내 원전의 액체유출물 배출량 PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교	86
표 6.5 PHWR 노형의 액체유출물 배출량 PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교	87
표 6.6 PWR 노형의 액체유출물 배출량 PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교	87
표 6.7 국내 원전의 PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 주변주민 피폭선량 비교	90
표 6.8 PHWR 노형의 PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 주변주민 피폭선량 비교	91
표 6.9 PWR 노형의 PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 주변주민 피폭선량 비교	91

그림 목차

그림 3.1 1950-2010년의 자연상에 존재하는 ^{14}C 농도	2
그림 3.2 PWR 계통 내 ^{14}C 의 발생 및 제거 방출 메커니즘	20
그림 3.3 PWR 내 기체유출물 배출 계통도	23
그림 3.4 PHWR 내 ^{14}C 생성 및 배출	27
그림 3.5 기체 방사성유출물 피폭경로	30
그림 3.6 액체 방사성유출물 피폭경로	30
그림 3.7 토양, 식물, 동물 시스템의 탄소순환	22
그림 3.8 수상 환경 시스템의 탄소 순환	23
그림 3.9 체내 유입된 탄소 및 ^{14}C 의 분포 및 거동	36
그림 3.10 ^{14}CO , $^{14}\text{CO}_2$, ^{14}C -Hydrocarbon의 인체 Metabolism	25
그림 4.1 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) 원전본부별 기체유출물 평균 배출량	42
그림 4.2 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) 원전본부별 액체유출물 평균 배출량	46
그림 4.3 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) 기체 및 액체 유출물 배출량 비율 ...	48
그림 4.4 2012-2021년(PWR ^{14}C 모니터링 이후) 원전본부별 기체유출물 평균 배출량	52
그림 4.5 2012-2021년(PWR ^{14}C 모니터링 이후) 원전본부별 액체유출물 평균 배출량	56
그림 4.6 2012-2021년(PWR ^{14}C 모니터링 이후) 기체 및 액체 유출물 배출량 비율 ...	59
그림 5.1 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) 평균 주변주민 피폭선량	68
그림 5.2 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) PHWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량	68

그림 5.3 2002-2011년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이전) PWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량	69
그림 5.4 2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) 평균 주변주민 피폭선량	78
그림 5.5 2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) PHWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량	78
그림 5.6 2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후) PWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량	79
그림 6.1 기체유출물 배출량의 PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교	85
그림 6.2 액체유출물 배출량의 PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교	88
그림 6.3 PWR ¹⁴ C 모니터링 이전·이후의 기체유출물에 의한 주변주민 피폭선량 비교	92
그림 6.4 PWR ¹⁴ C 모니터링 이전·이후의 액체유출물에 의한 주변주민 피폭선량 비교	92
그림 6.5 2012-2021년(PWR ¹⁴ C 모니터링 이후)의 ¹⁴ C에 의한 주변주민 피폭선량	96

ABSTRACT

A study on the public exposure due to carbon-14 release to the environment from Korean nuclear power plants

HWAPYOUNG KIM

Advisor : Prof. Kong Tae Young, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Radioactive effluents generated by the operation of nuclear power plants (NPPs) are classified into gas and liquid effluents depending on the source term and discharge pathways. Gas and liquid effluents generated from NPPs are discharged into the environment during the operation of nuclear facilities. The discharge of radioactive effluents is controlled by three criteria: radioactivity concentration, exposure dose, and the total amount of radioactivity. Among the radioactive effluents discharged from NPPs, ^{14}C is a nuclide with a very long half-life, which is primarily involved in the dose of the public living around NPPs. Radioactive effluents discharged from Korean NPPs contain various nuclides. Korea Hydro & Nuclear Power, the operator of Korean NPPs, controls the effluent discharge. This study analyzed the radioactive effluents discharged from all Korean NPPs during each of the 10 years before (2002–2011) and after (2012–2021) ^{14}C monitoring at pressurized water reactors (PWRs). The dose of the public living around NPPs due to radioactive effluents discharged from Korean NPPs was also analyzed depending on the nuclides. It was found that ^3H accounted for a large

proportion of radioactive effluents before ^{14}C monitoring at PWRs (2002-2011). As a result, ^3H accounted for the largest proportion of public dose, with approximately 80% of the total public dose. Since ^{14}C monitoring at PWRs has been conducted (2012-2021), ^3H has still accounted for a large proportion of radioactive effluents, but ^{14}C has accounted for the dominant nuclide for the public dose, with an average of $9 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ for 10 years (2012-2021). ^{14}C has a great radiological impact on the dose to the public living around NPPs. Therefore, it is judged that further study is necessary to reduce ^{14}C discharges and the resulting dose to the public living around Korean NPPs.

제1장 서론

제1절 연구배경

방사성유출물은 원자로시설에서 환경으로 배출되는 기체 및 액체 방사성물질로 정의된다. 원자로시설에서 발생하는 방사성유출물은 발생원 또는 물리적 상태에 따라, 기체유출물과 액체유출물로 분류된다. 기체유출물(Gaseous Effluent)은 주로 냉각재 계통의 배기 및 탈기 또는 원자로 건물의 배기과정에서 발생하며, 주로 불활성기체(Noble Gas), 미립자(Particulate) 및 옥소(Iodine)등의 방사성물질을 포함한다. 액체유출물(Liquid Effluent)은 주로 냉각재 계통 폐액 또는 액체방사성폐기물을 처리하는 과정에서 발생하며, 일반적으로 용존 또는 비용존 상태의 방사성물질과 불활성기체, 미립자 및 옥소 등의 방사성물질을 포함한다[1].

방사성유출물 내에 존재하는 방사성물질의 감시 및 통제를 위한 일련의 행위를 포괄적으로 방사성유출물 관리라 한다. 일반적으로 정상운전 시 원자로시설로부터 환경으로 배출되는 유출물에 포함된 방사성물질의 수량은 매우 적으며 이에 따른 방사선학적 위해도는 낮은 수준이다[1]. 그러나 방사성유출물의 배출은 원자로시설의 운영과정에서 수반되는 일상적인 행위이며, 방사선학적 위해도와 관계없이 유출물 관리는 지속적으로 대중의 관심 대상이 되고 있다. 방사성유출물의 관리는 방사능 농도, 일반인 선량, 배출총량(방사능량) 3가지로 이뤄진다[2]. 방사능 농도에 관련한 안전규제 기준은 원자력안전법, 원자력안전법 시행령, 방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙, 원자력안전위원회 고시에서 규정하고 있다. 원자력안전법 제11조, 제20조 및 제21조에서는 건설허가 및 운영허가기준의 조건사항으로 ‘방사성물질 등에 의한 국민의 건강 및 환경상의 위해방지’를 규정하고 있다[3]. 원자력안전법 시행령 제174조 제1호에서는

원자로시설에서 배출되는 방사성물질의 농도가 원자력안전위원회가 정하는 기준을 만족해야 함을 규정하고 있다[4]. 방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙 제10조에서는 제한구역경계에서 수중 및 공기중 방사성물질의 농도가 배출관리기준을 초과하지 않아야 하며, 이를 위하여 배기 및 배수 감시설비로 농도를 감시해야 함을 규정하고 있다[5]. 원자력안전위원회 고시 제2019-10호 제6조 2항에서는 배출관리기준을 적용함에 있어 배기중 또는 배수중 방사성핵종의 허용농도는 1주간의 평균치로 하며 다만, 부득이한 경우에는 3개월간의 평균치로 같음할 수 있음을 규정하고 있다[6]. 일반인 선량에 관련한 안전규제 기준은 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙과 원자력안전위원회 고시에서 규정하고 있다. 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제 66조 3항에서는 단일 발전용원자로 및 동일 부지내 다수의 발전용원자로 운영으로 인하여 배출되는 액체 및 기체 유출물에 의한 제한구역 경계에서의 연간선량이 환경상의 위해방지를 위하여 원자력안전위원회가 정하는 제한치를 초과하지 아니하여야 함을 규정하고 있다[7]. 원자력안전위원회 고시 제2019-10호 제16조에서는 환경상의 위해방지를 위하여 유출물에 대한 연간 선량기준치를 규정하고 있다[6]. 표 1.1에 원자력안전위원회 고시인 방사선방호 등에 관한 기준에서 제시하는 환경상의 위해방지를 위한 방사성유출물의 연간 선량기준치를 나타내었다[6].

표 1.1 원자력안전위원회 고시 제2019-10호의 환경상의 위해방지를 위한 방사성유출물의 제한구역 경계에서의 연간 선량기준치

단일호기	기체	감마선에 의한 공기의 흡수선량	0.1 mSv y ⁻¹
		베타선에 의한 공기의 흡수선량	0.2 mSv y ⁻¹
		외부피폭에 의한 유효선량	0.05 mSv y ⁻¹
		외부피폭에 의한 피부등가선량	0.15 mSv y ⁻¹
		입사상 방사성물질, ³ H, ¹⁴ C 및 방사성옥소에 의한 인체 장기 등가선량	0.15 mSv y ⁻¹
	액체	유효선량	0.03 mSv y ⁻¹
		인체 장기 등가선량	0.1 mSv y ⁻¹
다수 호기 (동일부지)	유효선량		0.25 mSv y ⁻¹
	갑상선 등가선량		0.75 mSv y ⁻¹

배출총량(방사능량)에 관련한 안전규제 기준으로는 원자력안전법, 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙, 원자력안전위원회 고시에서 규제하고 있다. 원자력안전법 제20조(운영허가)에서는 액체 및 기체 상태의 방사성물질등의 배출계획서[부지별, 기간별, 핵종군별 배출총량을 포함한다]를 원자력안전위원회에 제출해야 한다고 명시되어있다[3]. 또한, 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제66조 제1항에서 발전용원자로운영자는 방사성폐기물관리계획을 수립하여 방사성폐기물 및 유출물의 발생을 최소화하고, 방사성유출물이 환경에 미치는 영향을 합리적으로 달성 가능한 낮은 수준으로(As Low As Reasonably Achievable: ALARA) 관리해야 함을 명시하고 있다[7].

방사성유출물 관리 측면에서 원자력발전소(이하 “원전”이라 한다.)의 ¹⁴C 모니터링은 원전 주변주민에 대한 방사성방호 관점에서 중요하다. 원전에서

발생되어 배출되는 방사성핵종 중 주변주민 피폭선량에 중요한 핵종은 ^{60}Co , ^{58}Co , ^{137}Cs , ^{131}I , ^3H , ^{14}C 등이다[8]. 이 중 ^{14}C 방사성핵종의 경우 순수 베타방출체로서 원전 주변주민에 대한 피폭선량 평가에서 관심의 대상이다. 2012년 이전 국내 원전에서 배출된 방사성유출물에 의한 원전 주변주민의 피폭선량에서 PWR(Pressurized Water Reactor)과 PHWR(Pressurized Heavy Water Reactor)에서 배출된 방사성유출물 중 ^3H 에 의한 피폭선량이 원전 주변주민의 전체 피폭선량의 80-90%를 차지하고 있었다. 그러나 2012년 이후 PWR ^{14}C 모니터링을 시행한 뒤 2021년까지 ^{14}C 에 의한 피폭선량이 원전 주변주민 전체 피폭선량의 약 80% 이상을 차지하고 있다. 이러한 원전 주변주민 피폭선량 결과를 고려해볼 때 원전에서 배출되는 ^{14}C 의 모니터링은 중요하다고 판단된다.

2012년 이전 ^{14}C 에 대한 모니터링을 시행하지 않았던 이유는 ^{14}C 이 자연에서 높은 준위의 백그라운드를 형성하고 있었으며, 원전에서 ^{14}C 이 배출되더라도 환경이나 일반인의 피폭선량에 미치는 영향이 미미하다고 판단하였고 원전 운영 초기에 ^3H 와 ^{14}C 같은 저준위 베타방사성물질에 의한 주변주민 피폭선량의 기여가 낮게 나타났기 때문이다[9, 10]. ^3H 의 경우 기체 유출물과 액체 유출물을 통해 배출되는 양이 많았기 때문에 지속적인 모니터링이 시행됐지만, ^{14}C 의 경우 국내 원전 중 PHWR인 월성원전에서만 1998년부터 ^{14}C 모니터링이 시행되었다. 1999년 월성원전에서 배출된 전체 방사성유출물 중 ^{14}C 이 전체 배출량의 약 0.7%를 차지하였으며, ^{14}C 에 의한 원전 주변주민에 대한 피폭선량이 30% 가까이 차지하였다[9, 11]. 이러한 이유로 국내 PWR에서도 ^{14}C 모니터링의 필요성이 언급되었다. 이후 2009년 미국에서 ^{14}C 에 대한 모니터링의 필요성을 논의하기 시작하면서 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission: NRC)의 방사성유출물 관리기준인 Regulatory Guide 1.21 개정판에 ^{14}C 모니터링에 대해 원자로시설 운영자의 자발적인 평가결과를 배경으로 모니터링 여부를 결정하도록 유도하고 있다[9, 12]. 국내에서는 2001년도에 원자력안전위원회 고시

방사선방호등에 관한 기준에 해당 시설의 설계에 적용할 기준으로 ^{14}C 에 관한 선량기준이 포함되었고, 영광 5, 6호기의 운영허가조건 후속조치로 PWR에 대한 ^{14}C 모니터링을 실행할 것을 요구하였다. 이에 따라 한국수력원자력(주)에서 환경영향조사 및 ^{14}C 배출량을 조사한 결과 ^{14}C 이 주민피폭선량에 영향을 끼치는 것을 확인하였다. 이에 따라 2009년 국내에서도 ^{14}C 배출감시 시행계획이 수립되었다. 이후 국내 PWR에서는 2012년부터 ^{14}C 의 예상배출량을 계산에 의한 간접법으로 모니터링하였으며, 2013년부터 ^{14}C 배출량을 직접 측정하는 직접법으로 모니터링하여 주변주민 피폭선량 평가가 수행되었다[13].

본 연구는 국내 원전에서 PWR ^{14}C 모니터링이 시행되지 않은 2012년 이전과 이후의 방사성유출물 배출량을 분석하고 이에 따른 원전 주변주민 피폭선량을 비교함으로써 ^{14}C 이 원전 주변주민 피폭선량에 어떠한 영향을 주었는지 분석하였다. 이를 바탕으로 본 논문에서는 국내 원전에서 배출되는 방사성유출물 중 ^{14}C 에 대한 모니터링의 중요성을 논의하고자 한다.

제2절 연구목적

^{14}C 은 반감기가 5,730년인 순수 베타방출체로 우주선 등의 자연적인 생성 요인과 핵실험 또는 원전에서의 발생과 같은 인위적인 발생 요인에 의해 생성된다. 현재 지구에는 약 1.6×10^{24} g의 탄소가 존재하는데, 이 중 0.00025%가 대기와 해양 및 생태계 사이에서 상호작용한다. 탄소는 ^{10}C 부터 ^{16}C 까지 7가지의 동위원소로 나누어진다. 표 1.2에 탄소 동위원소의 특성을 나타내었다[9].

표 1.2 탄소 동위원소의 특성

동위원소	동위원소질량 (amu)	반감기	자연존재비(%)
^{10}C	10.01700	19.3 sec	-
^{11}C	11.01114	20.4 min	-
^{12}C	12.00000	-	98.89
^{13}C	13.00335	-	1.11
^{14}C	14.00324	5,730 year	10^{-10}
^{15}C	15.00940	2.3 sec	-
^{16}C	16.00963	0.74 sec	-

표 1.2에 나타난 바와 같이 ^{12}C 와 ^{13}C 의 자연존재비는 98.89%, 1.11%로 탄소의 자연존재비 대부분을 차지한다. ^{14}C 의 자연존재비의 경우 안정원소인 ^{12}C 의 자연존재비의 $10^{-10}\%$ 에 불과하다. 자연적으로 생성되는 ^{14}C 은 대기권 상층부에서 우주선의 중성자에 의한 $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ 반응으로 인해 자연적으로 생성된다. 또한, ^{14}C 은 핵

실험과 원전에서 인위적으로 발생한다[9]. 1970년대 이전의 핵실험에 의해 ^{14}C 이 발생하였다. 핵폭발 시 방출된 중성자는 우주선과 마찬가지로 대기 중의 질소와 상호작용을 통해 ^{14}C 을 발생시켰다. 핵실험으로 인해 많은 양의 ^{14}C 이 발생했으며, 핵실험을 통해 당시 대기 중의 ^{14}C 의 양을 1% 정도 증가시켰다[14]. 이후 핵실험이 금지되면서 핵실험을 통해 발생한 ^{14}C 의 양은 감소하고 있지만, 원전에서 발생하여 대기로 배출되는 ^{14}C 의 양은 증가하고 있다. 원전에서 발생한 ^{14}C 은 원자로 내의 냉각재, 감속재 및 원자로 구조재 및 연료 물질 중 존재하는 탄소, 산소, 질소의 중성자 포획반응으로 발생한다[9]. 특히, 원전에서 배출하는 ^{14}C 의 양은 경수로보다 중수로에서 약 40-50배 많이 발생한다[8].

자연적 또는 인위적으로 생성된 ^{14}C 은 대기 중에서 주로 ^{14}CO (일산화탄소), $^{14}\text{CO}_2$ (이산화탄소), ^{14}C -Hydrocarbon($^{14}\text{CH}_4$) 3가지 형태로 존재한다[14]. 이렇게 자연적 또는 인위적으로 생성된 ^{14}C 은 지상 및 수중 경로를 통해 일반인에게 흡수된다. 지상 경로에는 식물, 동물, 토양 등이 있으며, 수중 경로에는 수중식물과 물고기, 바닷물 등이 있다.

원전에서 발생하여 배출되는 ^{14}C 은 주로 기체 유출물을 통해 배출된다[13]. 기체로 배출된 ^{14}C 은 지상 및 수중 경로를 통해 일반인에게 흡수될 가능성이 매우 크기 때문에 자연적으로 생성되는 ^{14}C 과 현재 지구상에 존재하는 ^{14}C 외 원전에서 발생하여 배출되는 ^{14}C 을 지속적으로 모니터링할 필요성이 있다. 2012년 이전 PWR ^{14}C 모니터링을 시행하지 않았던 2002년부터 2011년까지의 원전에서 배출되는 방사성 유출물 중 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량은 약 10% 미만으로 확인되고 있다. 그러나 2012년 이후 PWR ^{14}C 모니터링이 시행된 2012년부터 2021년까지의 원전에서 배출되는 방사성유출물 중 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량은 약 80% 이상으로 방사성유출물에 의한 주변주민 피폭선량의 대부분을 차지하고 있다. 따라서 본 연구는 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량이 증가함에 따라 PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전과 이후를 비교함으로써 원전에서 배출되는 방사성유출물 중 ^{14}C 에 대한 모니터링의

중요성과 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량 영향을 분석하는 데 연구목적이 있다. 이러한 연구를 통해 국내 원전 방사성유출물 관리와 주변주민 피폭선량 평가에 있어 ^{14}C 의 중요성을 인지하고 향후 ^{14}C 의 저감을 위한 국내 원전 방사선안전관리에 본 연구결과가 활용되고자 한다.

제2장 연구방법

^{14}C 은 우주선과 같은 자연적 생성요인과 핵실험 및 원전에서 발생하는 인위적인 요인에 의해 환경에 분포되어있다. 자연적으로 생성되는 ^{14}C 의 경우 우주선 중성자와 대기 중 질소의 상호작용으로 생성된다. 자연적으로 생성되는 ^{14}C 의 생성률은 약 $2.7 \times 10^4 \text{ Ci y}^{-1}$ 이다[15, 16]. 인위적인 발생 요인 중 하나인 핵실험은 핵폭발로 발생한 중성자와 공기 중 질소의 상호작용으로 ^{14}C 을 발생시켰다. 핵실험으로 인한 ^{14}C 의 발생은 핵실험이 실행되기 전보다 6배가 증가하였으며, 핵실험으로 인한 ^{14}C 의 발생량은 $1 \times 10^6 \text{ Ci}$ 이다[15, 17]. 원전에서 발생한 ^{14}C 은 원자로 내에 다양한 요인들에 의해 발생한다. ^{14}C 의 생성요인을 조사하기 위해 한국수력원자력(주)에서 발간한 원전종사자 C-14 내부피폭 선량평가 기술개발 보고서와 관련 논문인 한전 전력연구원의 “원자력시설의 Carbon-14 방사성유출물에 대한 감시배경”을 분석하였으며, 프랑스의 방사선방호 및 원자력안전연구소(Insitiute de Radioprotection et de Surete Nucleaire: IRSN)에서 발간한 “Carbon-14 and the environment”를 분석하였다. 또한, 자연적인 ^{14}C 의 생성량과 핵실험에 의해 발생한 ^{14}C 의 발생량을 알아보기 위해 Radiation and Environmental Biophysics의 “Nuclear Energy: Health Impact of carbon-14” 논문을 분석하였다.

원전에서 발생하는 ^{14}C 은 원전의 노형에 따라 발생 메커니즘과 배출경로가 다르다. 국내에서 운영 중인 원자로는 PWR과 PHWR이다. PWR에서 발생하는 ^{14}C 의 주요 생성원인으로는 감속재, 냉각재, 구조물질 및 핵연료의 중성자 포획이 있다[9]. PWR 계통 내 ^{14}C 생성 메커니즘은 원자로 내 냉각수 중에서의 발생이 있으며, 연료에서의 발생, 노심 구조재에서의 발생이 있다. PHWR에서 발생하는 ^{14}C 의 주요 생성원인은 핵연료, 감속재 계통, 1차 계통 및 환형 기체 계통이다[18]. PWHR 계통 내 ^{14}C 생성 메커니즘으로 감속재와 1차 계통에서의 발생과 환형 기체 계통에

서의 발생, 핵연료 중에서의 발생이 있다[19]. 이를 조사하기 위해 관련 보고서 및 논문들을 분석하였으며, 국내에서 운영 중인 원자로 노형을 조사하기 위해 한국수력원자력(주)의 홈페이지를 통해 국내 원전 운영현황을 조사하였다. 특히, PWR에서 발생하는 ^{14}C 의 발생 메커니즘과 주요 생성원인을 조사하기 위해 한국수력원자력(주)에서 발간한 “원전 방사선 방호기술 개발 C-14 방출해석 및 선량평가 기술개발” 보고서를 분석하였다. 또한, 중수로에서 발생하는 ^{14}C 의 발생 메커니즘과 주요 생성원인을 조사하기 위해 한국전력공사 전력연구원에서 작성한 “중수로계통에서의 C-14 생성량 평가” 논문과 미국의 Oak Ridge National Laboratory(ORNL)에서 작성한 “Carbon-14 Production in Nuclear Reactors” NUREG 보고서를 분석하였다.

자연적인 생성과 인위적인 발생으로 인해 생성된 ^{14}C 은 환경으로 이동하여 인체에 영향을 줄 수 있다. 환경상에서 ^{14}C 은 주로 3가지 형태로 존재하게 되는데, ^{14}CO , $^{14}\text{CO}_2$, ^{14}C -유기물($^{14}\text{CH}_4$)의 형태로 존재한다[14]. 그러나 ^{14}CO 와 ^{14}C -유기물의 경우 존재하는 비율이 높지 않고 대부분 $^{14}\text{CO}_2$ 형태로 지상 및 해상 경로상에서 동물과 식물과 상호작용하여 인체에 섭취 및 흡수된다[18]. ^{14}C 의 환경으로의 이동 경로는 지상 및 해상 경로이다. $^{14}\text{CO}_2$ 가 지상 및 해상 동물, 식물들과 상호작용하거나 대기 중에서 수증기와 상호작용하여 이동한다. 지상 경로에서 ^{14}C 은 동물, 식물, 토양, 대기 등을 통해 인체에 섭취 및 흡수되며, 해상 경로에서는 해양동물, 해양식물, 바닷물을 통해 인체로 섭취될 수 있다[13]. ^{14}C 의 환경으로의 이동과 환경에서의 주요 형태, 인체로의 이동 경로를 조사하기 위해 관련 보고서와 논문들을 분석하였다. 또한, ^{14}C 이 환경상에 존재하는 3가지 형태를 조사하기 위해 프랑스의 IRSN에서 기술한 “Carbon-14 and the enviroment”를 조사하였다. ^{14}C 이 환경으로 이동하는 경로를 조사하기 위해 한국수력원자력(주)에서 기술한 “원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서”와 “원전 방사선 방호기술 개발 C-14 방출해석 및 선량평가 기술개발” 보고서를 분석하였다. 환경으로 이동한 ^{14}C 이 인체로 섭

취 및 흡수되는 경로를 조사하기 위해 Nuclear Engineering and Technology(NET)의 “Radioactive effluents released from Korean nuclear power plants and the resulting radiation doses to members of the public” 논문과 미국 전력연구원(Electric Power Research Institute: EPRI)의 “Carbon-14 Background Pathway and Dose Calculation Analysis for Nuclear Power Plants” 보고서를 분석하였다.

인위적 발생 중 하나인 핵실험을 통해 발생한 ^{14}C 은 환경상에서 감소하고 있다. 그러나 원전에서 배출되는 ^{14}C 은 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 대한 모니터링이 중요시되었다. 그로 인해 2009년 이후 미국의 원자력규제위원회에서는 원전에서 배출되는 ^{14}C 에 대해 모니터링을 시행하도록 권고하였으며, 이에 따라 국내에서도 원전에서 배출되는 ^{14}C 에 대해 모니터링을 시행하였다[9, 12]. 국내 원전에서는 방사성유출물을 주기적으로 배출하고 있으며 이를 모니터링하고 있다. 국내 원전에서 배출되는 방사성유출물 중 PWR의 ^{14}C 에 대한 모니터링은 2012년부터 시행하였다[13]. 한국수력원자력(주)은 방사성유출물을 액체 및 기체 유출물로 나누고 각 유출물에 대해 핵종 및 특성별로 구분하여 관리하고 있다. 주요 핵종으로는 ^3H , ^{14}C , 불활성기체, 방사성옥소, 미립자가 있으며, 이를 원전 호기별로 관리하고 있다[13]. 국내 원전에서 환경으로 배출되는 방사성유출물의 종류 및 배출량을 파악하기 위해 한국수력원자력(주)에서 발간한 연도별 원전 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서를 분석하였다. 해당 문헌을 통해 PWR에서 ^{14}C 모니터링이 시행되지 않았던 기간과 PWR에서 ^{14}C 모니터링이 시행되었던 기간을 나누어 ^{14}C 배출량을 분석하였다.

원전에서 배출된 방사성유출물에 의해 원전주변주민의 방사선피폭이 발생한다. 따라서, 원전주변주민들의 방사선 안전을 위해 피폭선량을 관리하고 모니터링하는 것이 중요하다. 한국수력원자력(주)은 국내 원전에서 환경으로 배출되는 방사성유출물에 의한 주민피폭선량을 매년 관리하고 있다[13]. 원전에서 배출되는 방사성유출물 중 주민피폭선량에 가장 많은 비중을 차지하고 있는 핵종은 ^3H 와 ^{14}C 이다. ^3H 의 경우, 방사성유출물 배출량의 많은 부분을 차지하고 있지만, ^{14}C 에 비해 원전주

변주민의 피폭선량에 기여하는 비중이 상대적으로 낮다[13]. ^{14}C 의 경우, 방사성유출물 배출량에서 많은 부분을 차지하고 있지 않지만, 원전주변주민의 피폭선량에는 기여하는 비중은 가장 높다. 국내 원전은 이러한 원전주변주민의 피폭선량을 기체 및 액체에 의한 피폭선량으로 구분하여 관리하고 있다[20]. 국내 원전에서 환경으로 배출되는 방사성유출물에 의한 주민피폭선량을 파악하기 위해 한국수력원자력(주)에서 발간한 “원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서”를 분석하였다. 해당 문헌을 통해 PWR ^{14}C 모니터링이 시행되지 않았던 기간과 PWR ^{14}C 모니터링이 시행되었던 기간의 주민피폭선량을 분석하였다.

본 논문에서는 PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전과 이후 기간에 대한 국내 원전의 방사성유출물 배출량을 분석하여 비교하였다. 또한, 이러한 방사성유출물에 의한 주민피폭선량의 변화를 비교 분석하였다. 이를 바탕으로 국내 원전에서 배출되는 방사성유출물 중 ^{14}C 에 의한 주민피폭선량의 변화추이를 파악하고 원전에서 배출되는 ^{14}C 에 대한 모니터링의 중요성을 분석하였다.

제3장 국내 원자력발전소의 ^{14}C 발생과 방사선환경영향

평가 방법론 분석 결과

제1절 국내 원자력발전소의 ^{14}C 발생 및 환경배출

1. ^{14}C 의 생성 및 발생

^{14}C 은 반감기가 5,730년인 순수 베타방출체로 환경에서 발생하는 우주선 등의 자연적인 생성 요인과 핵실험 및 원전에서의 발생과 같은 인위적인 발생 요인에 의해 생성된다. ^{14}C 의 최대에너지는 0.156 MeV이며, 평균 에너지는 0.045 MeV이다 [9]. 현재 지구상에 존재하는 탄소는 약 1.6×10^{24} g이며, 앞선 표 1-2에 나타난 바와 같이 지구상에 존재하는 ^{14}C 은 전체 탄소 동위원소 중 1.11%를 차지하고 있다. 환경상에 자연적으로 생성되어 존재하는 ^{14}C 은 성층권 및 대류권에서의 질소 원자와 우주 중성자가 상호작용하여, 연간 약 1.4×10^{15} Bq이 생성된다[14, 21]. 자연적으로 생성되는 ^{14}C 과 달리 인위적으로 발생한 ^{14}C 은 두 가지 요인에 의해 발생한다. 그 중 첫 번째는 1970년대 이전 시행된 핵실험에 의한 발생이다. 핵실험에 의해 발생한 ^{14}C 의 양은 약 3.5×10^{17} Bq이며, 이는 핵실험 이전에 자연상 존재하는 ^{14}C 의 양을 1% 증가시켰다[14]. 두 번째 인위적 요인은 원전에서의 발생이다. 핵실험에 의해 발생한 ^{14}C 의 양은 점차 감소하고 있지만, 원전에서 발생하는 ^{14}C 은 지속적으로 증가하고 있다. 지난 60년간의 자연상에 존재하는 ^{14}C 의 농도의 변화를 그림 3.1에 나타내었다[14]. 원전에서 발생하는 ^{14}C 은 여러 요인에

의해 발생하며, 원전의 노형 및 운전방식에 따라 생성되는 양은 다르다. ^{14}C 은 체내에 흡입 및 섭취될 경우 다양한 신체적인 메커니즘을 통해 인체에 영향을 주게 된다. 특히, 순수 베타방출체로서 외부피폭보다는 내부피폭을 일으킬 수 있으며, 1980년대 캐나다 원전에서 ^{14}C 에 의한 내부피폭이 발생된 사례가 있으므로 방사선피폭의 잠재적인 핵종이라 할 수 있다[8].

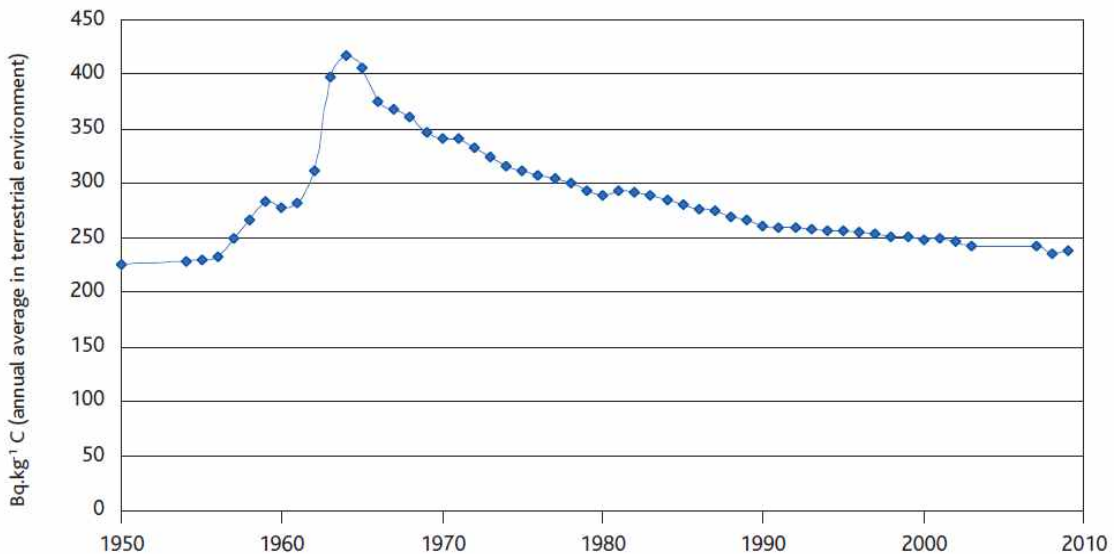


그림 3.1 1950-2010년의 자연상에 존재하는 ^{14}C 의 농도

2. 원자력발전소의 ^{14}C 발생

원전에서 발생하는 ^{14}C 은 다양한 발생 요인에 의해 발생한다. 특히, 원전의 노형과 운영방식 등에 따라 발생량과 발생 메커니즘이 달라진다. 이를 바탕으로 본 절에서는 국내 원전의 운영현황과 국내 원전에서 운영되고 있는 원전 노형에 따른 ^{14}C 의 발생 메커니즘과 화학적 배출경로를 기술하고자 한다.

가. 국내 원자력발전소의 운영현황

국내에서는 1978년 고리 1호기를 시작으로 2022년 현재, 총 24개 호기의 원전이 운영되고 있다. 국내 원전은 2022년 기준 PWR 21개 호기, PWRH 3개 호기가 운영되고 있으며, PWR인 고리 1호기와 PWRH인 월성 1호기가 영구정지된 상태이다. 국내 운영 중인 원전의 현황을 표 3.1에 나타내었다[22].

표 3.1에 나타난 바와 같이 현재 국내에서 운영되고 있는 원전 노형은 PWR과 PHWR이며, 각 노형에 따라 설비용량과 방사성유출물의 종류와 양이 다르다. 이에 따른 원전 노형별 ^{14}C 의 발생량과 발생 메커니즘, 배출경로에 차이가 존재한다. 따라서, 본 절에서는 PWR과 PHWR에서의 ^{14}C 의 발생 메커니즘과 화학적 배출경로를 기술하고자 한다.

나. 가압경수로형(PWR)의 ^{14}C 발생

PWR에서 발생하는 ^{14}C 은 질소, 산소, 탄소(^{13}C)의 안정된 원소가 포함된 핵연료, 노심 구조물질 및 냉각재 등에서 발생한다. PWR에서 발생하는 ^{14}C 의 생성반응을 표 3.2에 나타내었다[8].

표 3.1 국내 운영 중인 원자력발전소 현황

발전소명		노형	설비용량(MWe)	상업운전	
고리	2호기	PWR	650	1983.07.25	
	3호기		950	1985.09.30	
	4호기		950	1986.04.29	
신고리	1호기	PWR	1,000	2011.02.28	
	2호기		1,000	2012.07.20	
서울	1호기		1,400	2016.12.20	
	2호기		1,400	2019.08.29	
월성	2호기		PHWR	700	1997.07.01
	3호기			700	1998.07.01
	4호기	700		1999.10.01	
신월성	1호기	PWR	1,000	2012.07.31	
	2호기		1,000	2015.07.24	
한빛	1호기	PWR	950	1986.08.25	
	2호기		950	1987.06.10	
	3호기		1,000	1995.03.31	
	4호기		1,000	1996.01.01	
	5호기		1,000	2002.05.21	
	6호기		1,000	2002.12.24	
한울	1호기	PWR	950	1988.09.10	
	2호기		950	1989.09.30	
	3호기		1,000	1998.08.11	
	4호기		1,000	1999.12.31	
	5호기		1,000	2004.07.29	
	6호기		1,000	2005.04.22	

표 3.2 PWR의 ^{14}C 생성반응 및 반응 단면적

핵종	반응식	반응 단면적 (barns)	천연 존재비 (%)
^{14}N	$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$	1.81	99.635
^{13}C	$^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$	0.0009	1.103
^{17}O	$^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$	0.235	0.383

표 3.2에 나타난 바와 같이 ^{13}C 은 반응 단면적이 작고 천연 존재비가 1.103%밖에 되지 않기 때문에 ^{14}C 발생에 대한 기여도가 낮다. ^{14}N 의 경우 반응 단면적이 크며, 천연 존재비가 99.635%로 대부분을 차지하고 있다. 원자로 내에서 질소가 존재하는 경우 $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ 반응을 통해 ^{14}C 이 주로 발생한다. 단, PWR은 냉각재로 물(H_2O)을 사용하고 있으므로 물속의 용존 산소에 의해 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응으로 ^{14}C 이 발생한다. 그러나 냉각재 내 존재하는 질소의 농도에 따라 생성반응과 생성되는 양이 달라질 수 있다[18].

(1) 발생 메커니즘

원전에서의 ^{14}C 의 발생은 앞서 언급한 대로 다양한 요인들에 의해 발생한다. PWR 냉각재에서의 ^{14}C 발생은 주로 물 분자에 포함된 ^{17}O 원소에 의한 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응과 물속에 용해된 ^{14}N 에 의한 $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ 반응으로 발생한다[8, 18]. 냉각수 중의 ^{14}C 은 물 분자에 존재하는 산소 원자와 수중에 용해된 질소가 중성자와의 반응으로 주로 발생한다. 미국 전력연구원은 일반적인 PWR의 경우 중성자속을 $4.8 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 을 적용하고, 1000 MWe PWR의 냉각재를 13,400 kg로 가정하여 냉각재 내에서의 ^{14}C 의 생성량을 계산하였다. 이를 표 3.3에 나타내었다[18].

표 3.3 PWR 냉각재에서의 반응식에 따른 ^{14}C 발생률

반응식	발생률
$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$	$0.12 \text{ Ci GWe}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ ppm}^{-1}$
$^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$	$6.0 \text{ Ci GWe}^{-1} \text{ y}^{-1}$

미국 전력연구원의 계산 결과를 바탕으로 한국수력원자력은 국내 원전 중 1000

MWe 용량의 PWR인 한빛 3, 4호기에 대한 ^{14}C 의 발생량을 계산하였으며, 계산식은 다음과 같다[18].

$$Q = N_0 \cdot \sigma \cdot \Phi \cdot m \cdot t \cdot s \quad [\text{Ci y}^{-1}]$$

- 여기서, N_0 = 원자로 냉각재 내 물속의 원자농도(atoms kg^{-1} (H_2O))
 σ = 유효 열반응단면적 (barn: 10^{-24} cm^2)
 Φ = 열중성자 속(atoms cm^{-2} s^{-1})
 m = 노심 내 냉각재의 질량 (kg)
 t = 노심의 운전기간 (day)
 s = 단위환산인자(Ci atoms $^{-1}$) [1 Ci = 3.7×10^{10} Bq]

위 계산식을 통해 계산된 1.037×10^{-22} Ci atom $^{-1}$ 값과 발전소 가동률을 90%로 가정하여 계산된 ^{17}O 에 의한 ^{14}C 의 생성률은 5.85 Ci y^{-1} 이며, ^{14}N 에 의한 생성률은 0.45 Ci y^{-1} 이다. 앞서 계산한 결과를 모두 합하여 연간 PWR 냉각재에서 발생하는 ^{14}C 의 생성량은 약 6.3 Ci이다[18].

핵연료에서의 ^{14}C 의 발생은 연료, 피복재, 연료 구조물의 금속에서 발생한다. 주된 반응식은 핵연료에 포함된 ^{14}N 불순물에 의한 $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ 반응과 UO_2 핵연료 다발에 포함된 ^{17}O 에 의한 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응이다. 정상적인 PWR의 핵연료에서 발생하는 ^{14}C 은 약 15 Ci GWe^{-1} y^{-1} 이며, 삼중분열(Ternary fission)에 의해 생성되는 ^{14}C 은 0.6 Ci GWe^{-1} y^{-1} 이다. 그러나 핵연료에서의 ^{14}C 의 발생은 대부분 연료 내에 잔존해 있으므로 일반적인 방출원이 되진 않는다[8, 18].

노심 구조물질에서의 ^{14}C 의 발생은 노심 구조물질의 재료에 포함된 ^{14}N 의 방사화 반응으로 발생한다. 한국수력원자력에서 ORIGEN 2 Code를 이용하여 계산한 결과에 의하면 3년 운전을 기준으로 33,000 MWtd tU^{10} PWR 노심 구조물질에서의 발생량은 약 30-43 Ci GWe^{-1} y^{-1} 이다. PWR 노심 구조물질에서 발생하는 ^{14}C 의 발생

량을 표 3.4에 나타내었다[18].

표 3.4 PWR 노심 구조물질에서 발생하는 ^{14}C 의 발생량

재질		노심 중 재질량 ($\text{kg t}^{-1} \text{U}^{-1}$)	금속 중 질소농도 ($\text{g t}^{-1} \text{U}^{-1}$)	^{14}C 발생량 ($\text{Ci GWe}^{-1} \text{y}^{-1}$)
PWR	Zircaloy-4	235	< 18.8	9.5
	302 Stainless 강	4.2	4.2-6.7	2.1-3.4
	303 Stainless 강	37.1	37.1-59.4	18.8-30.0
	Inconel 718	12.8	-	0.0
	Microbrass 50	2.6	0.2	0.12
	Total			30-43

PWR에서는 주로 냉각재, 핵연료, 노심 구조물질에서 ^{14}C 이 발생한다. 그러나 핵연료에서의 ^{14}C 발생은 사용후핵연료 수조에서 핵연료 표면으로부터 방출될 가능성은 있지만, 핵연료 손상이 일어나지 않은 이상 대부분 연료에 잔존해 있기때문에 일반적인 방출원으로 보지 않는다[18]. 주요 발생원으로는 PWR 내 냉각재에서의 발생과 노심 구조재의 ^{14}N 의 방사화에 의한 발생이다. PWR에서 발생하는 ^{14}C 의 발생량을 정리하여 표 3.5에 나타내었다.

1) tU^{-1} : 방출연소도

표 3.5 PWR에서 발생하는 ^{14}C 의 발생률

PWR			
생성 장소	핵종	발생량 (Ci GWe ⁻¹ y ⁻¹)	반응식
냉각재	^{17}O	5.85	$^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$
	^{14}N	0.45	$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$
핵연료	^{14}N	15	$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$
	^{17}O		$^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$
	-	0.6	삼중분열 (Ternary fission)
노심 구조물질	^{14}N	30-43	^{14}N 방사화

한전 전력연구원에서 발표한 자료에 따르면, PWR 계통 내에서의 ^{14}C 은 원자로 내에서 방사화 분해로 발생한 ^{17}O 제거를 위한 체적제어계통(Volume Control Tank: VCT) 상층단의 수소 가압으로 유입된 용존 수소에 의해 원자로 계통 내에서 환원 환경으로 유지된다. 무기형태의 화합물은 유입된 용존 수소에 의해 냉각재 중 ^{14}C 과 결합하여 $^{14}\text{CH}_4$, H^{14}CHO 및 $^{14}\text{CH}_3\text{OH}$ 와 같은 유기화합물로 환원된다. 또한, 냉각재의 방사화 분해로 인한 H_2O_2 생성과 정지화학 처리기관 중 크러드(Chalk River Unidentified Deposit: CRUD) 제어를 위한 계통 내 H_2O_2 의 주입 시 산화 환경으로 전환되어 계통 내의 모든 유기 ^{14}C 화합물은 $^{14}\text{CO}_2$ -, ^{14}CO , HCO_3^- 형태의 무기 화합물로 잔존한다. 이를 그림 3.1에 도시하였다[23].

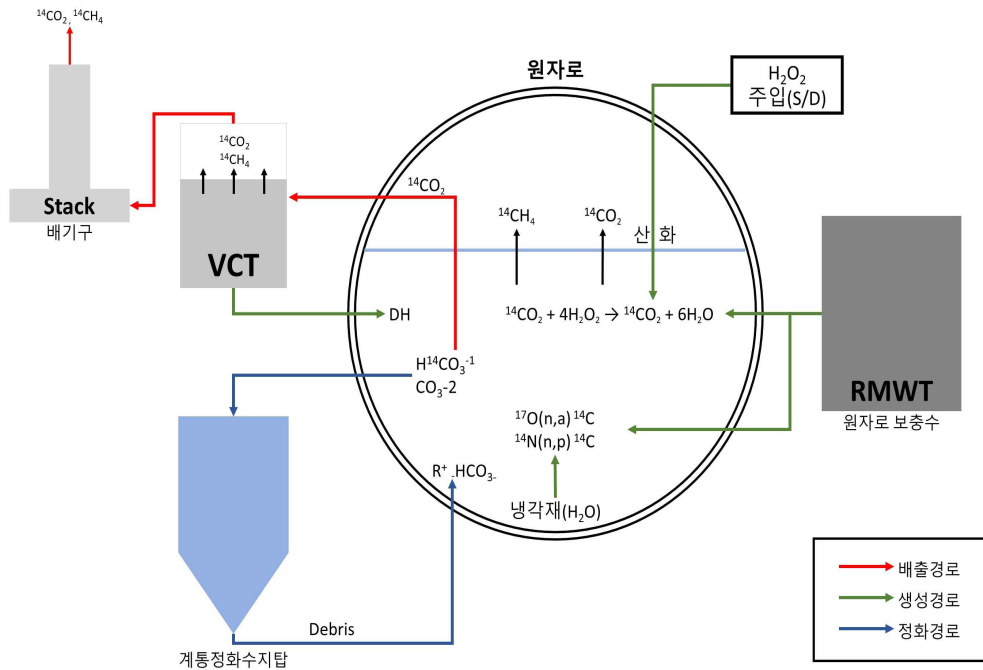


그림 3.2 PWR 계통 내 ^{14}C 의 발생 및 제거 방출 메커니즘

(2) ^{14}C 의 화학적 형태 및 배출경로

PWR 내 공기 중 방사성물질은 누설된 액체 또는 사용후핵연료저장수의 증발과 원자로 계통 내에서 생성된 기체가 누설되어 생성된다. 그중에서 PWR 내 발생한 ^{14}C 은 탄소화합물의 화학적 형태 및 환경조건에 따라 기체상으로 공기 중에 분출되거나 냉각재와 같은 물속에 용존할 수 있다. 앞선 그림 3.1에 도시한 바와 같이 계통 내 발생한 ^{14}C 은 PWR 내에서 탄소화합물의 형태로 거동하며 그 중 $^{14}\text{CO}_2$ 와 Hydrocarbon의 기체형태로 배출된다. PWR 계통 내에서 발생한 기체형태의 방사성물질은 원전 내 방사선 감시기의 감시를 통해 배기구로 배출되고 있다. PWR 내 기체유출물의 배출 계통도를 그림 3.3에 도시하였다[18]. 1980년대 미국의 PWR 2

호기에 대한 ^{14}C 방출률과 화학형 및 배출경로에 대한 분석이 진행되었다. 미국 PWR에서 배출된 ^{14}C 의 화학적 형태는 20%가 CO_2 , 80%가 C-Hydrocarbon 형태이다. 특히, 기체상에서 ^{14}C 의 주요 화학적 형태는 유기화합물의 형태이다. 또한, 미국 PWR의 ^{14}C 배출경로는 Robert. Emmett Ginna PWR의 경우 기체 감쇠 탱크가 42%를 차지하고, 격납건물 배기구가 23%, 보조건물 배기구는 35%를 차지하고 있다. Indian Point. Unit 3 PWR의 경우 기체 감쇠 탱크는 7%를 차지하고, 격납건물 배기구가 78%, 보조건물 배기구는 15%를 차지하고 있다. 이를 표 3.6에 나타내었다[26]. 일반적인 PWR에서 ^{14}C 의 배출형태가 Hydrocarbon로 이루어진 이유는 화학및체적제어계통(Chemical Volume Control System: CVCS)에 있는 체적제어탱크의 상부에 원자로 냉각재 계통(Reactor Coolant System: RCS) 내 산소를 제거하기 위해 H_2 가 가압되어 있어 H_2 와 ^{14}C 이 결합하여 Hydrocarbon 형성이 용이하기 때문이다[18].

표 3.6 미국 PWR에서 배출된 ^{14}C 의 화학적 형태

구분		Robert. Emmet Ginna PWR 490 MWe	Indian Point. Unit 3 PWR 1000 MWe
배출률(Ci GWe ⁻¹ y ⁻¹)		11.6	9.6
화학적 형태	$^{14}\text{CO}_2$	10%	26%
	$^{14}\text{CH}_4$, $^{14}\text{C}_2\text{H}_6$	90%	74%
배출경로	기체 감쇠 탱크	42%	7%
	격납건물 배기구	23%	78%
	보조건물 배기구	35%	15%

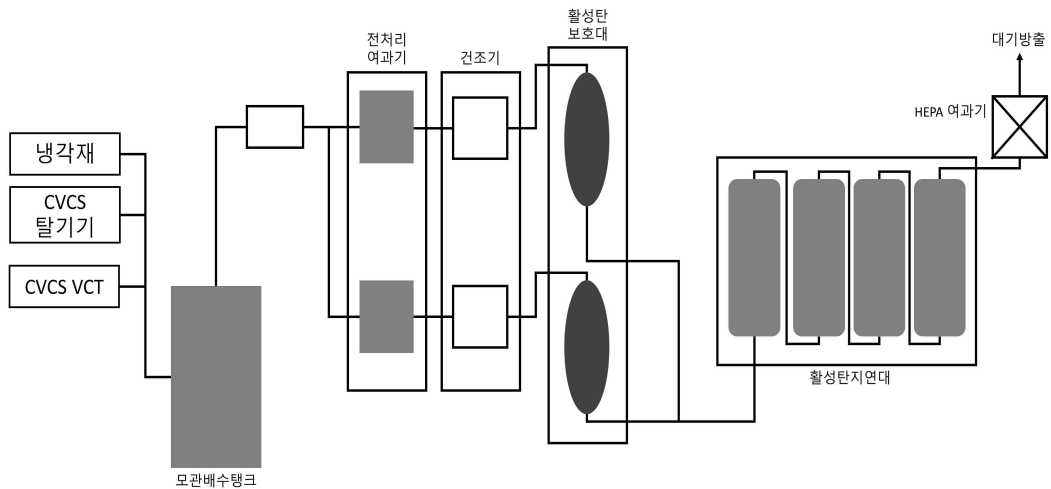


그림 3.3 PWR 내 기체유출물 배출 계통도

다. 가압중수로형(PHWR)의 ^{14}C 발생

국내에서 운영되고 있는 24개 호기 원전 중 3개 호기가 PHWR이다. 국내에서 유일하게 운영되고 있는 PHWR인 월성원전의 경우 CANDU(CANadian Deuterium Uranium)형 원자로를 운영하고 있다. 환형 기체가 CO_2 인 PHWR은 감속재의 상승 기체를 조건에 따라 외부로 방출시켜야 하므로 ^{14}C 방출량이 PWR보다 약 30-40배 정도 많다. 원자로 노형별 ^{14}C 발생량 및 배출량을 표 3.7에 나타내었다[24].

표 3.7 원자로 노형별 ^{14}C 발생량 및 배출량 비교

원자로형	발생량 (TBq GWe ⁻¹ y ⁻¹)	배출량 (TBq GWe ⁻¹ y ⁻¹)
LWR - PWR	0.7	0.4
LWR - BWR	1.0	0.4
HWR - N ₂ 환형기체	50	25 ^a
HWR - CO ₂ 환형기체	26	1 ^b

^a 환형기체가 100% 방출되는 것으로 가정

^b 생성량의 4%가 방출되는 것으로 가정

PHWR에서 ^{14}C 은 중수(D₂O)를 사용하는 감속재, 냉각재 계통과 환형기체(CO₂) 계통, 핵연료에서 발생한다. PHWR에서 ^{14}C 이 더 많이 발생하는 요인은 감속재 및 냉각재 차이에 있다. PWR에서는 감속재 및 냉각재로 경수(H₂O)를 사용하며, PHWR에서는 중수(D₂O)를 사용한다. 중수 내 ^{17}O 의 함량이 0.055%로 경수보다 0.018% 높기 때문에 PHWR에서 ^{14}C 이 더 많이 발생한다[25]. PHWR에서의 ^{14}C 주요 생성반응과 열중성자 단면적을 표 3.8에 나타내었다[19].

표 3.8 PHWR의 ^{14}C 주요 생성반응 및 열중성자 단면적

핵종	천연 존재비 (%)	반응식	열중성자 단면적 (barns)
^{17}O	0.037	$^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$	0.235
^{14}N	99.63	$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$	1.82
^{13}C	1.11	$^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$	0.0009

(1) 발생메커니즘

PHWR 내에서 발생하는 ^{14}C 은 중수(D_2O)를 사용하는 감속재 및 냉각재 계통과 CO_2 환형기체 계통, 핵연료에서 발생한다. PHWR에서의 ^{14}C 발생 메커니즘은 PWR에서와 같은 $^{17}\text{O}(\text{n}, \alpha)^{14}\text{C}$, $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$, $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)^{14}\text{C}$ 반응에 의해 발생하지만, PHWR의 경우 ^{17}O 함량이 높은 중수(D_2O)를 사용하기 때문에 $^{17}\text{O}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ 반응에 의한 ^{14}C 발생이 약 40배 더 많다[19, 24].

PHWR 내에서 발생하는 ^{14}C 의 주요 원인인 중 하나인 감속재와 1차 계통에서의 ^{14}C 의 발생은 95% 이상이 $^{17}\text{O}(\text{n}, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응으로 발생한다. 특히, 감속재 계통의 경우 260×10^6 g의 중수(D_2O)를 감속재로 사용하며, 상대적으로 높은 열중성자속을 갖고 있어 다른 계통들에 비해 ^{14}C 의 발생량이 많다. 1차 계통의 경우에는 260×10^6 g의 중수(D_2O) 중 열중성자속이 높은 지역에서의 중수(D_2O)의 양이 전체 중수의 3.1%밖에 되지 않아 감속재 계통보다는 ^{14}C 의 발생량이 상대적으로 적다. 또한, 감속재의 상승기체로 사용되는 헬륨 기체 내 불순물로 존재하는 ^{14}N 으로부터 생성되지만, 상승기체는 열중성자속이 감속재에 비해 상대적으로 낮고 ^{14}N 의 함량도 많지 않기 때문에 이로부터 발생하는 ^{14}C 의 발생량은 매우 적다. 감속재 계통에서 발생하는 ^{14}C 의 양은 90% 출력운전을 기준으로 약 17.2 TBq y^{-1} 이며, 1차 계통에서 발생하는 ^{14}C 의 양은 동일한 기준으로 약 0.3 TBq y^{-1} 이다[19].

환형기체 계통에서의 ^{14}C 은 3가지 반응으로 발생하는데, $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)^{14}\text{C}$ 반응과 $^{17}\text{O}(\text{n}, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응, $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ 반응이다. 3가지 반응 중 $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ 반응이 ^{14}C 의 발생의 주된 반응이다. 그 이유는 환형기체 계통 내에서 불순물로 ^{14}N 이 존재하며, 열중성자속이 상대적으로 높고 중성자 반응 단면적이 높기 때문이다. ^{14}N 불순물을 부피비로 각각 1,000 ppm, 5,000 ppm이 존재한다고 가정했을 때 PHWR에서 생성되는 ^{14}C 의 발생량은 약 0.01 TBq y^{-1} 과 0.05 TBq y^{-1} 이다. $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)^{14}\text{C}$ 반응과 $^{17}\text{O}(\text{n}, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응으로 발생하는 ^{14}C 의 발생량은 43 MBq y^{-1} 과 510 MBq y^{-1} 이다.

현재 국내의 PHWR인 월성 원전의 경우 환형기체를 CO₂로 사용하고, 산소를 0.5-2%를 주입하기 때문에 계통 내 존재하는 ¹⁴C은 산화된 상태인 CO₂로 존재한다 [19].

PHWR의 핵연료에 의한 ¹⁴C의 발생은 CANDU형의 핵연료인 우라늄(UO₂)에 함유된 ¹⁷O의 ¹⁷O(n, α)¹⁴C 반응으로 발생하며, 이로부터 발생하는 ¹⁴C의 발생량은 약 0.59 TBq y⁻¹이다. 또한, 핵연료의 삼중분열(Ternary fission)에 의해서도 ¹⁴C이 발생할 수 있다. 핵연료에서 발생하는 ¹⁴C의 발생량은 연료의 농축 정도, 상대 질량, 연료 중의 질소농도 등에 의해서 달라질 수 있다[19]. PHWR에서 발생하는 ¹⁴C의 발생량을 각 발생 메커니즘에 따라 정리하여 표 3.9에 나타내었다.

표 3.9 PHWR에서 발생하는 ¹⁴C의 발생량 및 발생 메커니즘

PHWR				
발생 원인	핵종	반응식	발생량 (TBq y ⁻¹)	백분율 (%)
감속재 및 1차 계통	¹⁷ O	¹⁷ O(n, α) ¹⁴ C	17.5	96.42
	¹⁴ N	¹⁴ N(n, p) ¹⁴ C	-	-
환형기체 계통(CO ₂)	¹⁴ N	¹⁴ N(n, p) ¹⁴ C	0.06	0.33
핵연료(UO ₂)	¹⁷ O	¹⁷ O(n, α) ¹⁴ C	0.59	3.25

(2) ¹⁴C의 화학적 형태 및 배출경로

PHWR 내에서 발생한 ¹⁴C은 다양한 화학적 형태로 존재한다. 특히, 중수(D₂O) 내에서 ¹⁴CO₂, ¹⁴CO, ¹⁴C-Hydrocarbon의 형태로 전환되어 각 계통에 존재하며 배출

된다. 이를 그림 3.4에 도시하였다[19, 25].

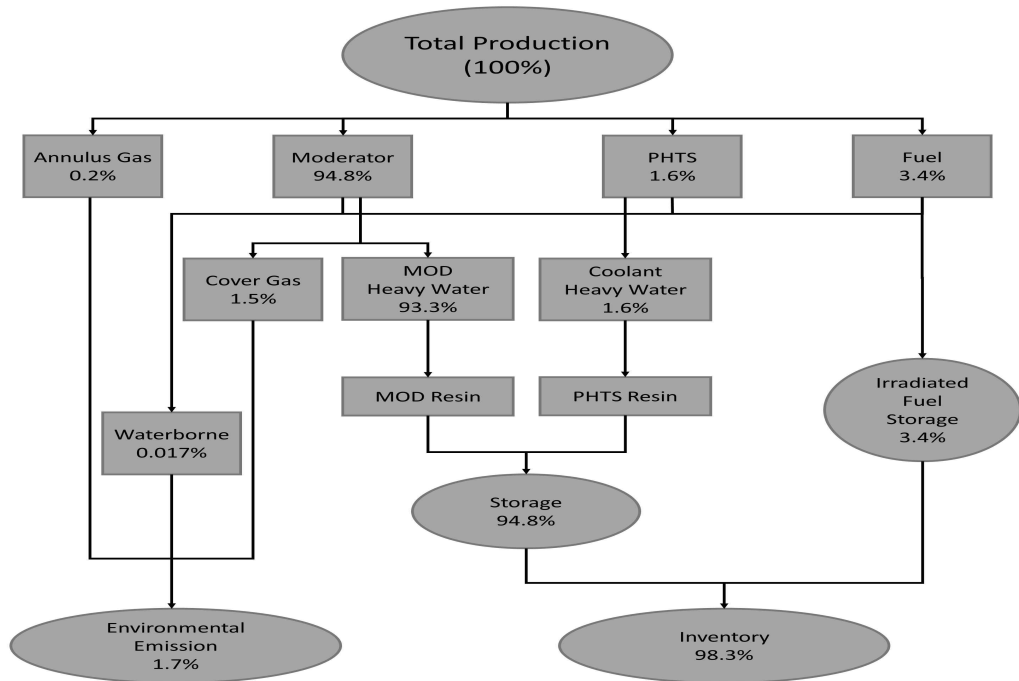


그림 3.4 PHWR 내 ^{14}C 생성 및 배출

PHWR 내에서의 ^{14}C 은 다양한 화학적 형태로 존재하지만, 그중 가장 비중이 높은 화학적 형태는 $^{14}\text{CO}_2$ 형태이다. 또한, ^{14}C 이 주로 존재하는 화학적 형태인 $^{14}\text{CO}_2$ 는 배출량의 95% 이상을 차지한다. 감속재와 1차 계통에서 발생한 ^{14}C 중 4%가 환경으로 배출되며, 환형기체 계통에서 발생한 ^{14}C 이 모두 환경으로 배출된다. 핵연료에서 발생한 ^{14}C 의 경우 연료집합체에 남게 되기 때문에 배출되는 양은 없다[19]. 이를 앞선 표 3.9에 나타낸 발생량을 바탕으로 ^{14}C 의 배출량을 표 3.10에 나타내었다. 한국전력공사 전력연구원에서 작성한 보고서에 따르면, 600 MWe 용량의 월성 원전에서 발생하는 ^{14}C 은 약 연간 400 Ci 정도 발생하여 이 중 14.4 Ci 정도가 환경으로 배출된다고 예상하였다[8, 27].

표 3.10 PHWR의 계통별 ^{14}C 의 배출량

발생 계통	발생량 (TBq y ⁻¹)	배출량 (TBq y ⁻¹)
감속재 및 1차 계통	17.5	0.7
환경기체 계통	0.06	0.06
핵연료	0.59	-

제2절 ^{14}C 의 환경영향평가 방법론 분석

1. ^{14}C 의 환경에 대한 영향

환경상의 ^{14}C 은 다양한 화학적 형태로 존재한다. 특히, 원전에서 환경으로 배출된 ^{14}C 은 주로 $^{14}\text{CO}_2$ 와 ^{14}C -Hydrocarbon 형태로 존재한다. 이렇게 환경상에 존재하는 ^{14}C 은 화학적 형태에 따라 동·식물에 흡입 및 섭취되어 인체에 영향을 미칠 수 있으며, 인체에 섭취 및 흡수된 ^{14}C 은 인체 내에서 내부피폭을 일으킬 수 있다. 따라서, 본 절에서는 ^{14}C 이 환경에서 이동 및 분배되는 경로에 관해 기술하고자 한다.

가. ^{14}C 의 환경에서의 이동 및 분배

^{14}C 의 환경에서의 이동 및 분배를 살펴보기 전에 국내 원전에서 발생하여 배출되는 방사성유출물이 환경으로 어떻게 배출되는지를 살펴볼 필요가 있다. 국내 원전에서 배출되는 방사성유출물을 기체 유출물과 액체 유출물로 나누어 분석하였다.

(1) 기체 방사성유출물의 환경 및 인체로의 이동 및 분배

원전에서 공기 중으로 배출된 기체 방사성물질은 토양 및 식물에 침적이 되며, 방사능운을 만들기도 한다. 또한, 사람의 호흡으로 인해 직접 피폭이 되기도 한다. 토양에 침적된 기체 방사성물질을 동물이 섭취하거나 식물에 침적된 방사성물질을 동물이 섭취하여 이를 사람이 섭취함으로써 기체 방사성물질에 의해 피폭을 받는

다[28]. 이를 그림 3.5에 도시하였다.

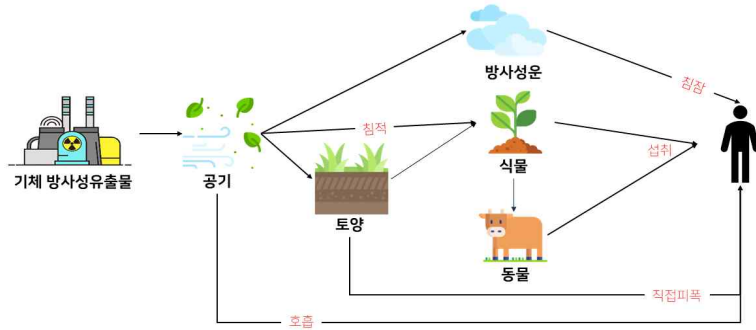


그림 3.5 기체 방사성유출물 피폭경로

(2) 액체 유출물의 환경 및 인체로의 이동 및 분배

원전에서 해양으로 배출된 액체 방사성물질은 해상(어업)활동을 통해 사람에게 직접 피폭이 되기도 하며 해수 및 어류 등 수산물, 해변으로 확산 및 이류 되어 해수에서 사람이 수영하거나 어류 등 수산물을 섭취, 해변에서의 해변활동으로 피폭을 받는다[28]. 이를 그림 3.6에 도시하였다.

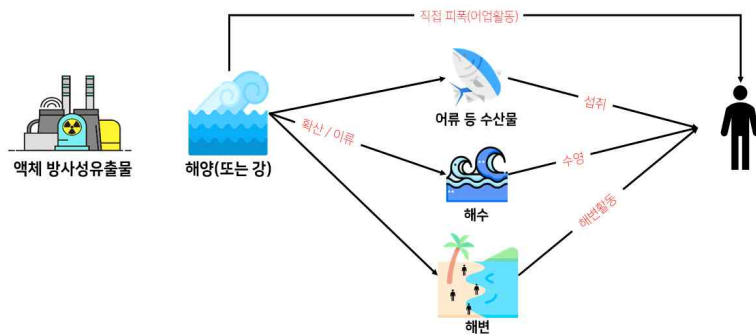


그림 3.6 액체 방사성유출물 피폭경로

(3) ^{14}C 의 환경에서의 이동경로

지상 환경에서 ^{14}C 의 이동은 평형상태의 탄소 순환을 기반으로 한다. 앞서 언급 바와 같이 ^{14}C 은 다양한 화학적 형태로 환경에 존재하고 있으므로 매우 복잡한 탄소 순환으로 이뤄진다. 대기에서의 탄소의 순환을 그림 3.7에 도시하였다[14].

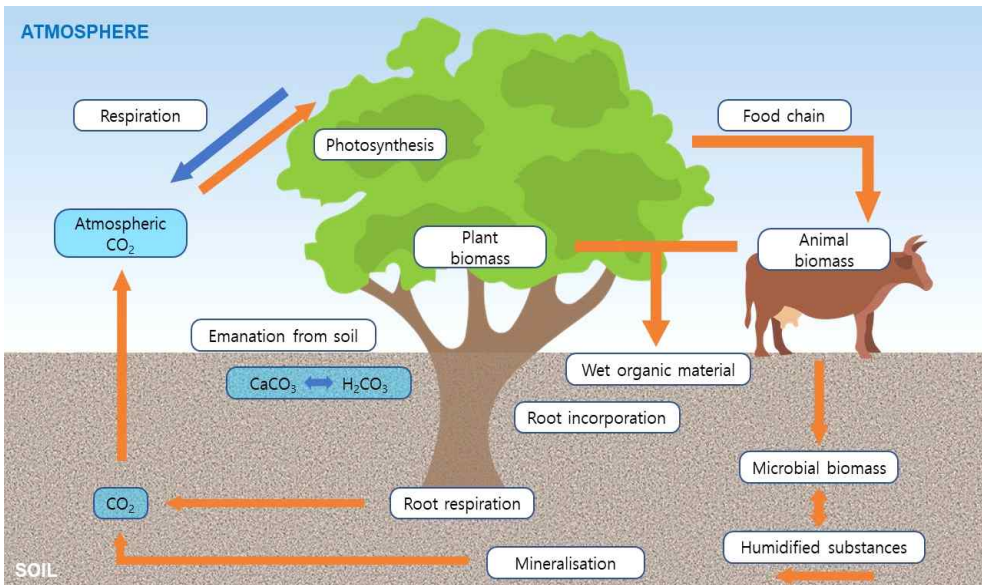


그림 3.7 토양, 식물, 동물 시스템의 탄소 순환

그림 3.7에서와 같이 탄소는 토양, 식물, 동물에 의해 지상 및 대기에서 순환한다. 기체 방사성물질에 함유되어 배출된 ^{14}C 의 다양한 형태 중 $^{14}\text{CO}_2$ 가 광합성 되어 대기 중에 토양과 식물에 침적이 된다. 또한, 토양에서의 순환 체계로 인해 토양에 있던 $^{14}\text{CO}_2$ 는 대기의 $^{14}\text{CO}_2$ 와 광합성 및 호흡을 통해 교환되며, CaCO_3 와 H_2CO_3 의 교환에 따라 $^{14}\text{CO}_2$ 가 생성된다. 식물의 경우, 대부분의 $^{14}\text{CO}_2$ 는 광합성 과정에서 잎으로 흡수된다. 식물의 호흡으로 광합성을 하는 동안 식물은 대기에서 CO_2 를 흡수하고 탄수화물로 전환된다. 이 탄수화물은 식물의 성장 등에 사용되며

나 에너지를 생산하는 데 사용되며, 이후 식물의 호흡 과정을 통해 CO_2 는 대기로 되돌아간다. 동물의 경우, ^{14}C 으로 오염된 식물을 섭취한 후 동물체 내에서 신진대사가 이뤄지며 ^{14}C 은 신체의 조직이나 기관으로 흡수된다[14, 18].

해양 환경에서의 ^{14}C 의 이동 또한 지상 환경에서와같이 평형상태의 ^{14}C 순환을 기반으로 한다. 원자력시설에서 배출된 ^{14}C 유기화합물은 해양 환경의 유기 탄소에 흡수된다. 수상 환경에서의 탄소 순환을 그림 3.8에 도시하였다[14].

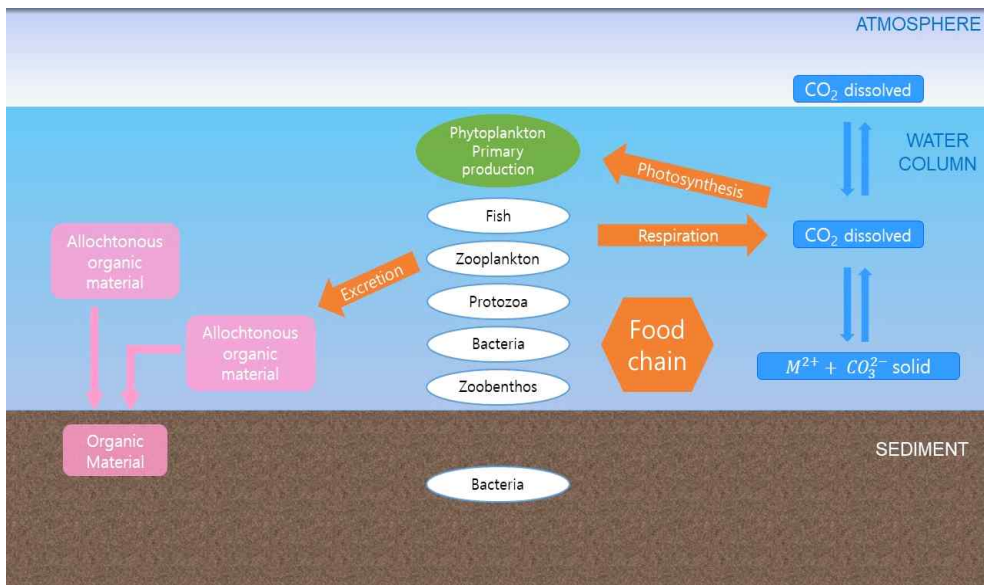


그림 3.8 수상 환경 시스템의 탄소 순환

바닷물과 퇴적물의 ^{14}C 은 유기 탄소와 무기 탄소가 주요 형태인 수상 시스템의 탄소 순환에 통합되어 있다. 수중(해양) 탄소의 98%는 용존 무기 탄소이며, 강의 탄소 중 40%는 유기 탄소이다. 대기와 수중의 CO_2 교환은 빠르게 일어나며, 특히 공기가 유입되는 물에서 CO_2 는 물에 잘 용해되기 때문에 교환이 잘 일어난다. 수상 환경의 식물에서의 ^{14}C 이동은 지상 환경의 식물과 같이 광합성에 의해 좌우된다. 광합성은 주로 고등식물(해초 및 민물 식물), 부착조류, 플랑크톤 조류, 시아노

박테리아에 의해 이뤄진다. 수중 동물의 경우, 수중식물 섭취를 통해 ^{14}C 의 이동이 이뤄진다[14, 18].

나. 국내 원자력발전소에서 배출된 ^{14}C 의 이동경로

국내 원전에서 배출된 ^{14}C 은 기체 유출물과 액체 유출물의 이동경로를 따라 환경으로 이동한다. 원전에서 배출된 ^{14}C 의 배출량과 화학적 형태는 원자로형과 발전소 운영조건에 따라 다양할 것으로 예상된다. ^{14}C 의 화학적 형태 중 $^{14}\text{CO}_2$ 가 환경에서 광합성 할 수 있는 유일한 형태이기 때문에 ^{14}C 중 $^{14}\text{CO}_2$ 가 섭취 선량에 미치는 기여도가 매우 높으며, 대기로 배출되는 다른 형태의 ^{14}C 은 CO_2 로 전환되기 전에 주변으로 확산하기 쉽기 때문에 섭취 선량에 미치는 기여도가 낮다[18].

기체 유출물에 함유되어 배출된 ^{14}C 은 광합성과 식물 호흡을 통해 순환된다. 또한, 동물이 식물을 섭취하여 ^{14}C 이 체내에 축적되거나 토양에서 식물로 전이된다[18].

2. ^{14}C 의 선량계산 방법론 분석

인체 내 ^{14}C 의 섭취 또는 흡수는 직접적으로 ^{14}C 이 함유된 식물을 섭취하거나 이를 먹고 성장한 동물을 섭취함으로써 이뤄진다. 또한, 평균적인 성인 남성의 경우 체내에 약 4000 Bq의 ^{14}C 을 함유하고 있으며, 체내에 존재하는 전체 탄소의 약 4%는 무기 탄소, 약 19%는 유기 탄소로 존재한다. 따라서, 본 절에서는 ^{14}C 의 인체 내 거동과 ^{14}C 의 화학적 형태에 따른 피폭경로에 관해 기술하고자 한다[29].

가. ^{14}C 의 인체 내 거동(Metabolism)

우리 인체 내에 탄소는 지상 환경의 약 220배, 대기환경의 약 670배가 농축되어 있다. 그러나 음식물의 구성성분을 반영하여 인체 내 탄소 농도는 음식물의 농도와 비슷하다고 볼 수 있다. 매일 300-400 g의 탄소를 흡수한다고 가정할 때, 독일의 보고서에서는 평균 70 kg의 서양인이 약 70-93 Bq d⁻¹를 섭취한다고 계산하였다[30]. 한번 섭취된 ^{14}C 은 구성조직과 신체 유지 및 에너지 저장에 활용된다. 인체를 구성하는 주요 조직의 탄소 및 ^{14}C 함량을 표 3.11에 나타내었다[30]. 75 kg의 체중을 가지고 있는 서양인의 체내에 20%인 약 14 kg의 탄소가 함유되어있다고 가정할 때의 주요 인체 장기들의 탄소 및 ^{14}C 함량을 표 3.12에 나타내었다[18, 30, 31].

표 3.11 평균 70kg 남성의 인체 구성에서 탄소 및 ^{14}C 의 함량(서양인 기준)

Constituent	Weight (kg)	Fraction of total body weight (%)	Total carbon 비율 (Bq)	^{14}C content g ⁻¹ fresh weight (Bq)
수분	42	60	0	0
단백질	14	20	1,351	0.096
지방	10.5	15	1,905	0.181
탄수화물	0.7	1	72	0.103
핵산 (nucleic acids)	0.7	1	72	0.103
무기질	3.5	5	-	-
무기탄소 (inorganic carbon)	0.5	< 1	-	-

표 3.12 인체 주요 장기 내 탄소 및 ¹⁴C 함량

Body part	H ₂ O	Dry weight (g · 100g ⁻¹ fresh weight)	Total fresh (kg)	Total carbon 비율 (Bq)	¹⁴ C content · g fresh weight ⁻¹ (kg)
근육	72.2	27.8	28	844	0.030
심장	74.8	25.2	0.4	24	0.060
뇌	77.9	22.1	1.4	48	0.034
폐	80.0	20.0	1.4	24	0.017
간	60.6	39.4	1.8	96	0.054
지라	78.5	21.5	0.2	5	0.024
신장	75.6	24.4	0.4	10	0.024
위장	81.9	18.1	1.4	24	0.017
췌장	72.2	27.8	0.07	2.4	0.034
소화샘 (gland)	72.6	27.4	-	-	-
갑상선	75.7	24.3	0.02	0.5	0.024
고환	86.6	33.4	0.04	1.4	0.036
뼈	28	72	11.9	796	0.067
피부	58	42	5.6	289	0.052
지방 (adipose)	23	77	7	941	0.134
혈장	-	-	4	48	0.012
혈액세포	65	35	4	145	0.036

독일 보고서에 따르면, 모든 사람은 서양인이 아니며 인체는 각각 다른 구조와 에너지 수요를 가지기 때문에 인체 내 탄소의 분포와 대사율은 신체 발달 상태와 체형, 성별, 섭취 습관, 건강 상태에 따라 다르다. 특히, 동양인의 경우 서양인보다 채소류의 섭취가 많아 식물에 의한 ^{14}C 섭취량은 더 많을 것이라 예상된다. 체내에 유입된 탄소의 분포 및 거동을 그림 3.9에 도시하였으며, ^{14}C 의 체내 농도는 대표적인 격실인 CO_2 HCO_3^{-1} 에서 음식물 섭취와 CO_2 흡입을 통해 결정된다[18].

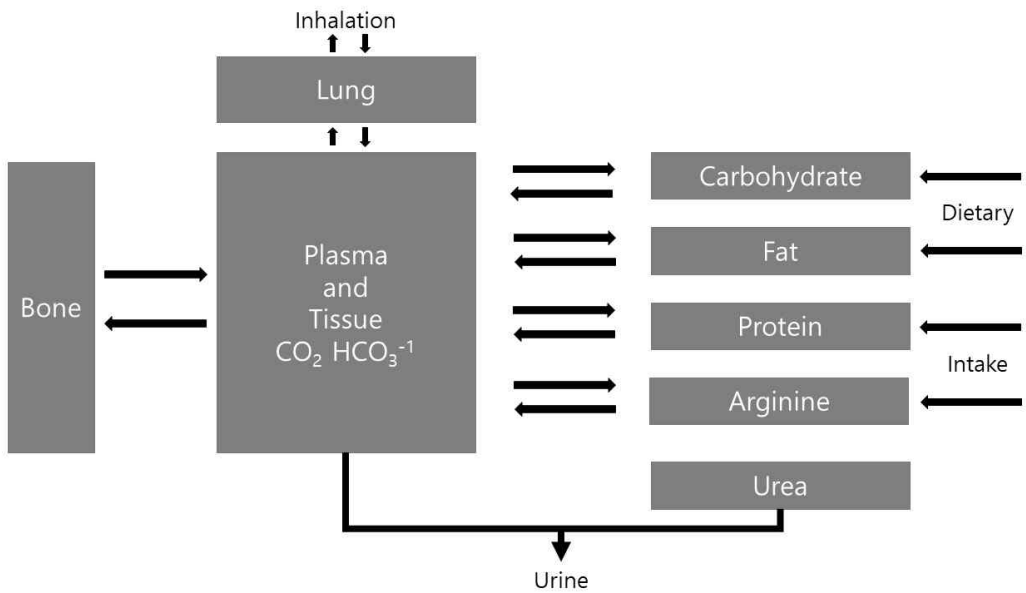


그림 3.9 체내 유입된 탄소 및 ^{14}C 의 분포 및 거동

나. ^{14}C 화학형별 피폭경로

국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection: ICRP)에서 발간한 ICRP Publication 71(방사성핵종 섭취에 의한 연령에 따른 주민 피폭선량: Part 4 호흡선량인자)에서 탄소화합물은 기체, 유기화합물 및 에어로졸

(입자상)의 세 가지 주요 형태로 흡입될 수 있음을 명시하고 있다. 기체 형태의 ^{14}C 의 경우, CO와 CO_2 에 대한 신체조직으로의 흡입 및 잔류를 고려하였다. ^{14}C 의 방출 화학 형태는 ^{14}CO , $^{14}\text{CO}_2$, ^{14}C -Hydrocarbon으로 구분하였다[18, 32].

^{14}CO 의 경우, 신체조직 내 수계(water system)에서 용해도가 낮고 주로 헤모글로빈과 결합하여 신체에 잔류하게 된다. ICRP Publication 30에서는 ^{14}CO 가 인체에 흡입될 경우 약 40%는 헤모글로빈과 결합하고, 나머지 약 60%는 방출된다고 명시하였다. 또한, 흡입된 ^{14}CO 는 인체 조직이나 장기에 일정하게 분포하고, 약 200분의 생물학적 반감기를 가지며 잔류하게 된다고 가정하였다[18, 33].

$^{14}\text{CO}_2$ 의 경우, 물속에서 확산계수가 H_2O 보다 작지만, 용해도는 약 24배 정도 크기 때문에 신체의 폐포막에서 산소보다 약 30배 빠르게 전이된다. 따라서 호흡기를 통해 흡입된 $^{14}\text{CO}_2$ 는 모두 혈액으로 전이되며 전이된 $^{14}\text{CO}_2$ 는 중탄산염(HCO_3^-) 형태로 존재한다. 또한, ICRP Publication 30에서는 호흡을 통해 인체에 흡입된 $^{14}\text{CO}_2$ 는 인체 조직이나 장기에 일정하게 분포한다는 가정으로 잔류함수를 제시하였다. 체내 흡입된 $^{14}\text{CO}_2$ 의 약 99%에 대해 5분 또는 60분의 짧은 반감기를 가지고 있으며, 나머지 1%는 체내에서 약 60,000분(약 40일)의 평균 반감기를 가지고 있다고 명시하였다[18, 33].

C-Hydrocarbon은 메탄(CH_4), 에탄, 에탄올 등 여러 형태 중 원전에서 배출되는 ^{14}C -Hydrocarbon의 배출형태가 주로 메탄 형태이다. ICRP Publication 71에서는 일반적인 환경에서 C-Hydrocarbon 대부분은 휘발성이 매우 낮기 때문에 증기 형태로 인체에 흡입될 확률은 낮다고 명시하고 있다. ICRP Publication 80에서는 흡입된 C-Hydrocarbon의 경우 약 99%가 CO_2 로 산화되고 나머지 1%가 유기분자와 결합한다고 가정하고 있다[18, 32, 34]. 이를 정리하여 그림 3.10에 도시하였다.

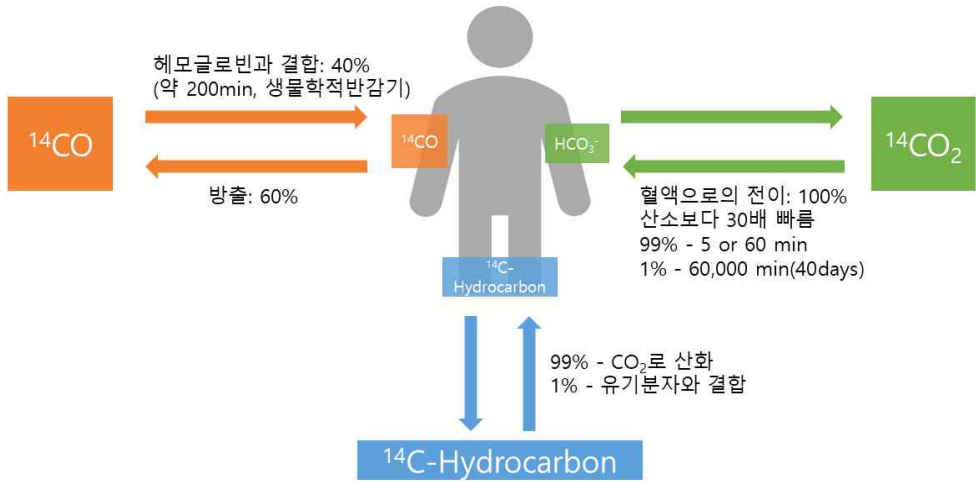


그림 3.10 ^{14}CO , $^{14}\text{CO}_2$, $^{14}\text{C-Hydrocarbon}$ 의 인체 Metabolism

(1) ^{14}C 의 화학적 형태에 따른 선량평가

한국수력원자력(주)은 중앙연구원에서 개발한 “환경 방사선평가 모델”인 KDOSE60_K2.1 전산 프로그램을 통해서 주변주민이 받을 수 있는 선량을 평가한다. 기체 방사성물질 배출에는 GAS 선량 계산 코드를 사용하며, 액체 방사성물질 배출에는 LIQ 선량 계산 코드를 사용하고, 대기확산인자에는 계산에는 XQDQWQ2 코드를 사용한다[28]. KDOSE60_K2.1은 ICRP-60 방사선 방호체계를 반영하여 여러 화학적 형태를 고려하여 종합적으로 선량평가할 수 있는 코드이다. 원전 주변에서 인공 방사능 준위는 자연 방사능 준위의 범주 내에 있기 때문에 환경 매질에서의 방사능 실측값을 이용하여 주민의 피폭선량을 계산하기엔 어려움이 있다. 이에 따라 원전에서 배출된 핵종별 배출량을 이용하여 이론적으로 주변주민 피폭선량을 계산하고 있다[35].

제4장 국내 원자력발전소에서 환경으로 배출되는 방사성유출물 분석

현재 국내에서 운영되고 있는 원전 노형은 PWR과 PHWR이며, 원전의 운전방식과 노형에 따라 방사성유출물의 양과 종류가 다르다. 또한, 원전에서 배출되는 방사성유출물은 다양한 방사성핵종들을 포함한다. 따라서, 본 절에서는 원전 본부별로 방사성유출물을 기체유출물과 액체유출물로 나누어 분석하였다. 특히, PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전과 이후로 나누어 각 유출물의 배출량을 분석하였다.

제1절 2002-2011년(PWR ^{14}C 모니터링 이전) 환경으로 배출된 ^{14}C 분석

1. 기체유출물

2012년 이전에는 ^{14}C 에 대한 모니터링이 PHWR 노형에서만 시행되었기 때문에 PWR 노형에서는 ^{14}C 의 배출량이 기록되지 않았다. 2002년부터 2011년까지의 원전 본부별 기체유출물 배출량을 표 4.1에 나타내었으며, 10년간의 원전본부별 평균 배출량을 표 4.2와 그림 4.1에 나타내었다[36-45]. 또한, PHWR과 PWR 노형에서 배출된 기체유출물의 배출량을 노형 별로 나누어 표 4.3에 나타내었다.

표 4.1 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 원전본부별 기체유출물 배출량

연도	구분	고리본부 [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	총합 [Bq]	구성비 (%)
2002	³ H	1.31×10 ¹³	3.29×10 ¹⁴	1.29×10 ¹³	5.42×10 ¹²	3.60×10 ¹⁴	62.91
	¹⁴ C	NA ^a	8.10×10 ¹¹	NA ^a	NA ^a	8.10×10 ¹¹	0.14
	불활성기체	9.85×10 ¹²	1.52×10 ¹⁴	9.61×10 ¹²	4.03×10 ¹³	2.11×10 ¹⁴	36.94
	미립자	- ^b	3.59×10 ⁵	5.76×10 ⁶	5.96×10 ⁷	6.57×10 ⁷	<0.01
	방사성 옥소	3.54×10 ⁵	2.12×10 ⁷	3.53×10 ⁸	4.15×10 ⁹	4.52×10 ⁹	<0.01
2003	³ H	1.37×10 ¹³	3.23×10 ¹⁴	1.32×10 ¹³	4.43×10 ¹²	3.54×10 ¹⁴	83.09
	¹⁴ C	NA ^a	6.49×10 ¹¹	NA ^a	NA ^a	6.49×10 ¹¹	0.15
	불활성 기체	1.06×10 ¹³	4.36×10 ¹³	1.55×10 ¹³	1.72×10 ¹²	7.15×10 ¹³	16.76
	미립자	- ^b	1.48×10 ⁶	2.82×10 ⁶	1.49×10 ⁸	1.53×10 ⁸	<0.01
	방사성 옥소	3.11×10 ⁸	5.74×10 ⁴	1.35×10 ⁷	1.74×10 ⁸	4.98×10 ⁸	<0.01
2004	³ H	2.52×10 ¹³	4.02×10 ¹⁴	1.21×10 ¹³	6.15×10 ¹²	4.46×10 ¹⁴	91.15
	¹⁴ C	NA ^a	6.51×10 ¹¹	NA ^a	NA ^a	6.51×10 ¹¹	0.13
	불활성 기체	6.02×10 ¹²	3.39×10 ¹³	5.18×10 ¹⁰	2.68×10 ¹²	4.26×10 ¹³	8.71
	미립자	2.54×10 ⁴	- ^b	1.93×10 ⁶	3.66×10 ⁶	5.61×10 ⁶	<0.01
	방사성 옥소	5.71×10 ⁶	- ^b	- ^b	6.83×10 ⁷	7.40×10 ⁷	<0.01
2005	³ H	2.89×10 ¹³	3.70×10 ¹⁴	1.29×10 ¹³	5.35×10 ¹²	4.17×10 ¹⁴	94.08
	¹⁴ C	NA ^a	4.47×10 ¹¹	NA ^a	NA ^a	4.47×10 ¹¹	0.10
	불활성 기체	3.71×10 ¹²	2.09×10 ¹³	2.48×10 ¹⁰	1.22×10 ¹²	2.58×10 ¹³	5.82
	미립자	- ^b	1.99×10 ⁷	3.10×10 ⁶	- ^b	2.30×10 ⁷	<0.01
	방사성 옥소	6.67×10 ⁴	- ^b	1.92×10 ⁵	1.06×10 ⁸	1.06×10 ⁸	<0.01
2006	³ H	4.34×10 ¹³	3.64×10 ¹⁴	1.38×10 ¹³	3.09×10 ¹³	8.81×10 ¹³	91.15
	¹⁴ C	NA ^a	5.89×10 ¹¹	NA ^a	NA ^a	5.89×10 ¹¹	0.12
	불활성 기체	6.59×10 ¹²	3.65×10 ¹³	2.72×10 ¹⁰	1.84×10 ¹¹	6.80×10 ¹²	8.73
	미립자	1.44×10 ⁶	1.06×10 ⁶	- ^b	- ^b	2.50×10 ⁶	<0.01
	방사성 옥소	2.25×10 ⁷	4.50×10 ⁵	- ^b	- ^b	2.30×10 ⁷	<0.01
2007	³ H	2.69×10 ¹³	3.35×10 ¹⁴	1.68×10 ¹³	6.55×10 ¹²	3.85×10 ¹⁴	85.26
	¹⁴ C	NA ^a	9.78×10 ¹¹	NA ^a	NA ^a	9.78×10 ¹¹	0.22
	불활성 기체	4.76×10 ¹²	5.10×10 ¹³	9.67×10 ¹²	6.73×10 ¹⁰	6.55×10 ¹³	14.49
	미립자	3.11×10 ⁵	1.48×10 ⁵	1.51×10 ¹¹	2.31×10 ⁶	1.51×10 ¹¹	<0.01
	방사성 옥소	1.80×10 ⁸	4.49×10 ⁵	2.20×10 ⁸	1.18×10 ⁷	4.12×10 ⁸	<0.01

연도	구분	고리본부 [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	총합 [Bq]	구성비 (%)
2008	³ H	1.56×10 ¹³	3.15×10 ¹⁴	1.76×10 ¹³	5.54×10 ¹²	3.53×10 ¹⁴	81.62
	¹⁴ C	NA ^a	8.05×10 ¹¹	NA ^a	NA ^a	8.05×10 ¹¹	0.19
	불활성 기체	1.97×10 ¹²	4.79×10 ¹³	2.88×10 ¹³	9.28×10 ¹⁰	7.88×10 ¹³	18.20
	미립자	- ^b	- ^b	3.34×10 ⁷	7.05×10 ⁵	3.41×10 ⁷	<0.01
	방사성 옥소	5.84×10 ⁶	- ^b	5.31×10 ⁸	7.91×10 ⁵	5.36×10 ⁸	<0.01
2009	³ H	1.28×10 ¹³	2.75×10 ¹⁴	1.35×10 ¹³	8.72×10 ¹²	3.10×10 ¹⁴	94.02
	¹⁴ C	NA ^a	3.95×10 ¹¹	NA ^a	NA ^a	3.95×10 ¹¹	0.12
	불활성기체	1.96×10 ¹²	1.38×10 ¹³	3.51×10 ¹²	5.55×10 ¹⁰	1.93×10 ¹³	5.86
	미립자	1.88×10 ⁵	- ^b	2.86×10 ⁵	1.22×10 ⁶	1.70×10 ⁶	<0.01
	방사성 옥소	2.08×10 ⁶	- ^b	5.10×10 ⁷	3.20×10 ⁵	5.34×10 ⁷	<0.01
2010	³ H	1.19×10 ¹³	2.06×10 ¹⁴	1.23×10 ¹³	9.69×10 ¹²	2.40×10 ¹⁴	95.08
	¹⁴ C	NA ^a	3.44×10 ¹¹	NA ^a	NA ^a	3.44×10 ¹¹	0.14
	불활성기체	1.73×10 ¹²	9.36×10 ¹²	4.34×10 ¹⁰	6.52×10 ¹¹	1.18×10 ¹³	4.67
	미립자	4.94×10 ⁶	4.29×10 ⁶	6.66×10 ⁵	4.05×10 ⁶	1.39×10 ⁷	<0.01
	방사성 옥소	3.54×10 ⁷	- ^b	9.31×10 ⁴	2.88×10 ⁷	6.43×10 ⁷	<0.01
2011	³ H	1.32×10 ¹³	1.88×10 ¹⁴	1.09×10 ¹³	1.02×10 ¹³	2.22×10 ¹⁴	96.82
	¹⁴ C	NA ^a	4.06×10 ¹¹	NA ^a	NA ^a	4.06×10 ¹¹	0.18
	불활성기체	1.67×10 ¹²	4.61×10 ¹²	1.73×10 ¹¹	8.14×10 ¹¹	7.27×10 ¹²	3.17
	미립자	5.47×10 ³	1.03×10 ⁶	- ^b	3.14×10 ⁸	3.15×10 ⁸	<0.01
	방사성 옥소	3.99×10 ⁵	- ^b	- ^b	8.07×10 ⁶	8.47×10 ⁶	<0.01

^a Not available

^b 최소검출한계(Lower limit of detection: LLD) 미만

표 4.2 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 원전본부별 기체유출물 평균 배출량

구분	고리본부 [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	평균 배출량 [Bq]	비율 (%)
³ H	2.05×10 ¹³	3.11×10 ¹⁴	1.36×10 ¹³	9.30×10 ¹²	8.86×10 ¹³	85.51
¹⁴ C	NA ^a	6.07×10 ¹¹	NA ^a	NA ^a	6.07×10 ¹¹	0.59
불활성기체	4.88×10 ¹²	4.13×10 ¹³	6.75×10 ¹²	4.78×10 ¹²	1.44×10 ¹³	13.90
미립자	6.91×10 ⁵	2.83×10 ⁶	1.51×10 ¹⁰	5.35×10 ⁷	3.79×10 ⁹	<0.01
방사성옥소	5.63×10 ⁷	2.22×10 ⁶	1.17×10 ⁸	4.55×10 ⁸	1.58×10 ⁸	<0.01
Total	2.54×10 ¹³	3.53×10 ¹⁴	2.04×10 ¹³	1.41×10 ¹³	1.04×10 ¹⁴	100.00

^a Not available

표 4.3 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 노형별 기체유출물 평균 배출량

구분	PHWR	비율 (%)	PWR			평균 배출량 [Bq]	비율 (%)
	월성본부 [Bq]		고리본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]		
³ H	3.11×10 ¹⁴	88.13	2.05×10 ¹³	1.36×10 ¹³	9.30×10 ¹²	1.45×10 ¹³	72.54
¹⁴ C	6.07×10 ¹¹	0.17	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
불활성기체	4.13×10 ¹³	11.70	4.88×10 ¹²	6.75×10 ¹²	4.78×10 ¹²	5.47×10 ¹²	27.43
미립자	2.83×10 ⁶	<0.01	6.91×10 ⁵	1.51×10 ¹⁰	5.35×10 ⁷	5.05×10 ⁹	0.03
방사성옥소	2.22×10 ⁶	<0.01	5.63×10 ⁷	1.17×10 ⁸	4.55×10 ⁸	2.09×10 ⁸	<0.01
Total	3.53×10 ¹⁴	100	2.54×10 ¹³	2.04×10 ¹³	1.41×10 ¹³	1.99×10 ¹³	100

^a Not available

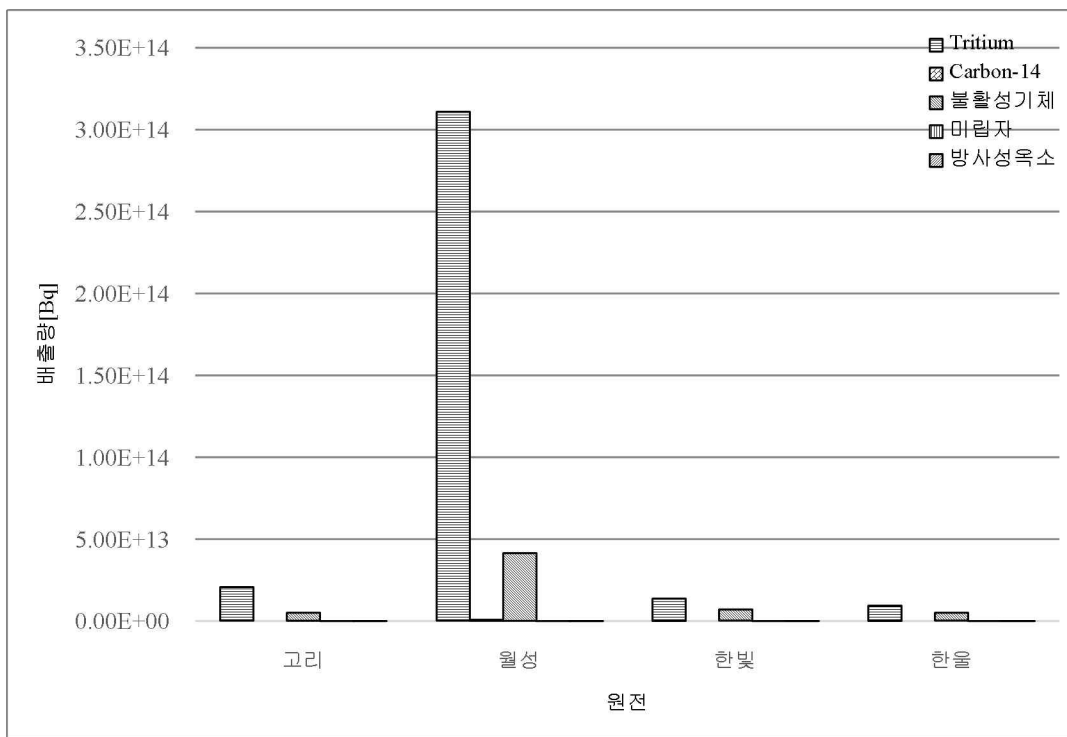


그림 4.1 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 원전본부별 기체유출물 평균 배출량

표 4.1과 표 4.2, 그림 4.1을 보면, 국내 원전에서 2002년부터 2011년까지 배출된

기체유출물의 배출량에서 가장 높은 평균 배출량을 차지하고 있는 핵종은 ^3H 이다. ^{14}C 의 모니터링 이전 ^3H 의 10년 평균 배출량은 8.86×10^{13} Bq로 다른 유출물에 비해 월등히 높은 것을 확인할 수 있다. 2012년 이전에는 국내 원전에서 배출되는 ^{14}C 에 대한 모니터링을 PHWR 노형에서만 시행했기 때문에 ^{14}C 의 배출량은 월성본부에만 기록이 되었다. 그림 4.1에서 월성 본부의 ^3H 의 배출량이 월등히 높은 것을 확인할 수 있는데, 그에 대한 이유는 감속재 및 냉각재 차이에 있다. PWR에서는 감속재 및 냉각재로 경수(H_2O)를 사용하지만, PHWR에서는 중수(D_2O)를 사용한다. 중수(D_2O)와 중성자 반응과 중수 내 ^{17}O 의 함량이 0.055%로 경수보다 0.018% 높기 때문에 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응으로 인해 PHWR에서 ^3H 와 ^{14}C 이 더 많이 발생한다[25].

표 4.3을 보면, 앞서 언급했던 바와 같이 2012년 이전 ^{14}C 배출량은 PWR ^{14}C 모니터링 시행 전에 PHWR 노형인 월성원전에서만 배출량 평가를 시행하였다. 월성원전의 ^{14}C 배출량은 10년 평균 6.07×10^{11} Bq로 10년 평균 배출량의 0.17%를 차지하였다. PWR 노형인 고리, 한빛, 한울 원전의 경우 ^{14}C 배출량은 평가되지 않았기 때문에 PWR에서 발생한 ^{14}C 배출량은 확인할 수 없었다.

2. 액체유출물

국내 원전에서 배출되는 액체유출물의 종류에는 ^3H , ^{14}C , 불활성기체, 미립자, 방사성옥소 등이 있으며, 이중 액체유출물로 배출되는 주요 핵종은 ^3H 와 미립자이다. ^{14}C 의 경우, 주로 기체 형태인 CO_2 로 배출되기 때문에 액체형태로 잘 배출되지 않는다. PWR ^{14}C 모니터링이 실행되기 이전의 2002년부터 2011년까지의 국내 원전에서 배출된 액체유출물 배출량을 표 4.4에 나타내었다[36-42]. 또한, 10년간의 액체유출물의 평균 배출량을 표 4.5에 나타내었으며, 그림 4.2에 도시하였다[36-42]. PHWR과 PWR 노형에서 배출된 액체유출물의 배출량을 노형 별로 표 4.6에 나타내었다.

표 4.4 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 원전본부별 액체유출물 배출량

연도	구분	고리본부 [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	총합 [Bq]	구성비 (%)
2002	³ H	9.27×10 ¹²	6.82×10 ¹³	3.91×10 ¹³	6.41×10 ¹³	1.81×10 ¹⁴	100
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	- ^b	7.40×10 ⁵	6.32×10 ⁵	6.79×10 ⁷	6.92×10 ⁷	<0.01
	미립자	4.32×10 ⁶	4.57×10 ⁸	8.22×10 ⁸	4.79×10 ⁷	1.33×10 ⁹	<0.01
	방사성 옥소	- ^b	1.33×10 ⁵	7.58×10 ⁶	1.47×10 ⁷	2.24×10 ⁷	<0.01
2003	³ H	9.99×10 ¹²	7.43×10 ¹³	5.51×10 ¹³	3.97×10 ¹³	1.79×10 ¹⁴	100
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성 기체	- ^b	- ^b	9.98×10 ⁵	- ^b	9.98×10 ⁵	<0.01
	미립자	1.03×10 ⁸	4.88×10 ⁸	3.92×10 ⁹	1.99×10 ⁷	4.53×10 ⁹	<0.01
	방사성 옥소	- ^b	- ^b	1.07×10 ⁵	- ^b	1.07×10 ⁵	<0.01
2004	³ H	6.43×10 ¹²	6.46×10 ¹³	5.50×10 ¹³	5.69×10 ¹³	1.83×10 ¹⁴	100
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성 기체	- ^b	- ^b	5.48×10 ⁵	- ^b	5.48×10 ⁵	<0.01
	미립자	3.34×10 ⁷	5.29×10 ⁸	2.54×10 ¹⁰	1.89×10 ⁸	2.62×10 ¹⁰	<0.01
	방사성 옥소	- ^b	7.73×10 ⁴	4.14×10 ⁵	- ^b	4.61×10 ⁵	<0.01
2005	³ H	7.45×10 ¹²	7.64×10 ¹³	4.27×10 ¹³	4.18×10 ¹³	1.68×10 ¹⁴	100
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성 기체	- ^b	- ^b	- ^b	1.03×10 ⁹	1.03×10 ⁹	<0.01
	미립자	2.42×10 ⁷	3.92×10 ⁸	1.82×10 ¹⁰	- ^b	1.86×10 ¹⁰	<0.01
	방사성 옥소	- ^b	- ^b	- ^b	2.12×10 ⁷	2.12×10 ⁷	<0.01
2006	³ H	1.55×10 ¹³	9.16×10 ¹³	5.37×10 ¹³	4.63×10 ¹³	1.16×10 ¹⁴	100
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성 기체	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b
	미립자	2.80×10 ⁷	4.37×10 ⁴	1.17×10 ¹⁰	7.39×10 ⁸	1.25×10 ¹⁰	<0.01
	방사성 옥소	- ^b	1.46×10 ⁷	- ^b	- ^b	1.46×10 ⁷	<0.01
2007	³ H	1.77×10 ¹³	7.12×10 ¹³	5.09×10 ¹³	5.59×10 ¹³	1.96×10 ¹⁴	100
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성 기체	- ^b	- ^b	2.62×10 ⁵	- ^b	2.62×10 ⁵	<0.01
	미립자	2.83×10 ⁷	6.82×10 ⁸	7.64×10 ⁸	5.82×10 ⁸	2.06×10 ⁹	<0.01
	방사성 옥소	- ^b	- ^b	1.14×10 ⁶	- ^b	1.14×10 ⁶	<0.01
2008	³ H	2.81×10 ¹³	1.15×10 ¹⁴	8.95×10 ¹³	3.92×10 ¹³	2.72×10 ¹⁴	100
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성 기체	3.36×10 ⁵	- ^b	- ^b	- ^b	3.36×10 ⁵	<0.01
	미립자	2.13×10 ⁷	7.63×10 ⁸	5.07×10 ⁸	3.74×10 ⁸	1.67×10 ⁹	<0.01
	방사성 옥소	- ^b	- ^b	2.56×10 ⁶	- ^b	2.56×10 ⁶	<0.01

연도	구분	고리본부 [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	총합 [Bq]	구성비 (%)
2009	³ H	3.19×10 ¹³	1.64×10 ¹⁴	7.56×10 ¹³	4.49×10 ¹³	3.16×10 ¹⁴	100
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성 기체	- ^b	- ^b	3.14×10 ⁶	- ^b	3.14×10 ⁶	<0.01
	미립자	3.37×10 ⁷	1.27×10 ⁹	5.07×10 ⁸	1.12×10 ⁸	1.92×10 ⁹	<0.01
	방사성 옥소	- ^b	- ^b	2.49×10 ⁷	- ^b	2.49×10 ⁷	<0.01
2010	³ H	3.27×10 ¹³	1.43×10 ¹⁴	7.03×10 ¹³	4.91×10 ¹³	2.95×10 ¹⁴	100
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성 기체	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b
	미립자	4.50×10 ⁸	1.81×10 ⁹	3.33×10 ⁷	1.10×10 ⁸	2.40×10 ⁹	<0.01
	방사성 옥소	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b
2011	³ H	4.95×10 ¹³	9.21×10 ¹³	5.70×10 ¹³	5.84×10 ¹³	2.57×10 ¹⁴	100
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성 기체	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b
	미립자	1.78×10 ⁸	1.76×10 ⁹	2.25×10 ⁸	7.33×10 ⁷	2.24×10 ⁹	<0.01
	방사성 옥소	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b

^a Not available

^b 최소검출한계(Lower limit of detection: LLD) 미만

표 4.5 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 원전본부별 액체유출물 평균 배출량

구분	고리본부 [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	평균 배출량 [Bq]	비율 (%)
³ H	2.09×10 ¹³	8.69×10 ¹³	5.89×10 ¹³	4.96×10 ¹³	5.41×10 ¹³	100
¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
불활성기체	3.36×10 ⁴	7.40×10 ⁴	5.58×10 ⁵	1.09×10 ⁸	2.75×10 ⁷	<0.01
미립자	9.04×10 ⁷	8.15×10 ⁸	6.21×10 ⁹	2.25×10 ⁸	1.84×10 ⁹	<0.01
방사성옥소	- ^b	2.10×10 ⁴	3.67×10 ⁶	3.59×10 ⁶	1.82×10 ⁶	<0.01
Total	2.09×10 ¹³	8.69×10 ¹³	5.89×10 ¹³	4.96×10 ¹³	5.41×10 ¹³	100

^a Not available

^b 최소검출한계(Lower limit of detection: LLD) 미만

표 4.6 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 노형별 액체유출물 평균 배출량

구분	PHWR	비율 (%)	PWR			평균 배출량 [Bq]	비율 (%)
	월성본부 [Bq]		고리본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]		
³ H	8.69×10 ¹³	100	2.09×10 ¹³	5.89×10 ¹³	4.96×10 ¹³	4.31×10 ¹³	99.99
¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
불활성기체	7.40×10 ⁴	<0.01	3.36×10 ⁴	5.58×10 ⁵	1.09×10 ⁸	3.65×10 ⁷	<0.01
미립자	8.15×10 ⁸	<0.01	9.04×10 ⁷	6.21×10 ⁹	2.25×10 ⁸	2.18×10 ⁸	0.01
방사성옥소	2.10×10 ⁴	<0.01	- ^b	3.67×10 ⁶	3.59×10 ⁶	2.42×10 ⁶	<0.01
Total	8.69×10 ¹³	100	2.09×10 ¹³	5.89×10 ¹³	4.96×10 ¹³	4.31×10 ¹³	100

^a Not available

^b 최소검출한계(Lower limit of detection: LLD) 미만

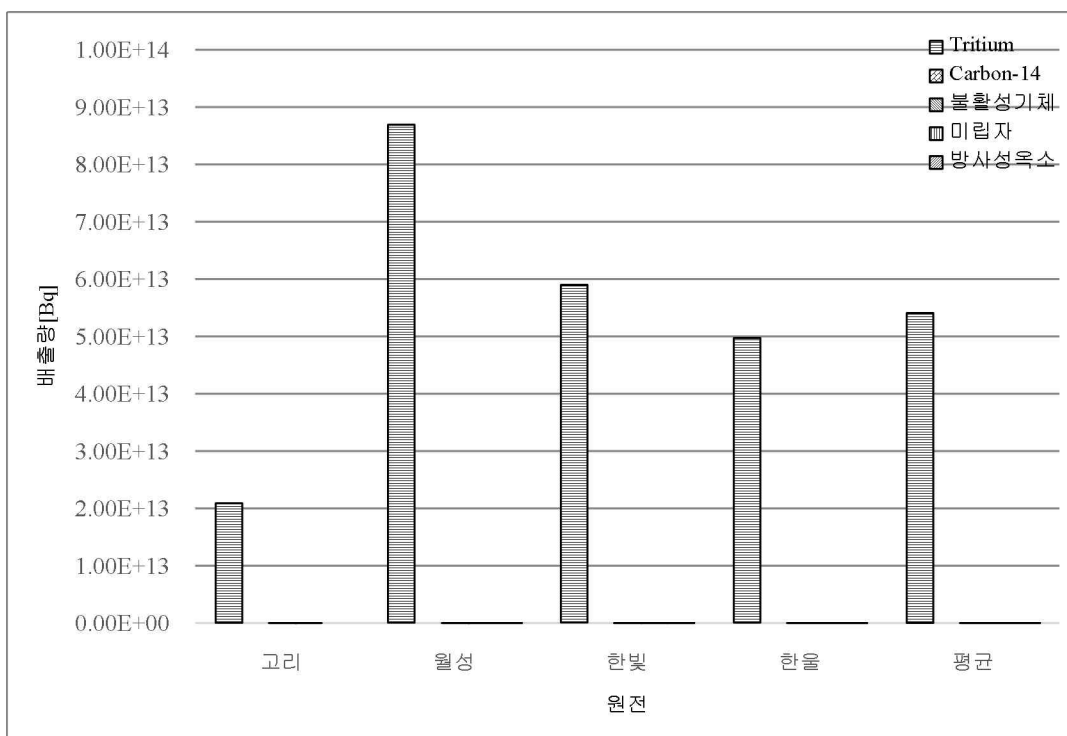


그림 4.2 2002-2011년(10년간) 원전 본부별 액체유출물 평균 배출량

표 4.4와 표 4.5, 그림 4.2를 보면, 국내 원전에서 배출된 액체유출물 중 가장 많은 배출량을 차지하고 있는 핵종은 ³H이다. ¹⁴C의 경우, 액체유출물로 배출되지 않

기 때문에 배출량을 확인할 수 없었으며, 그 외 불활성기체, 미립자, 방사성옥소는 ^3H 에 비해 매우 낮은 배출량을 가지고 있었다. PWR ^{14}C 모니터링 이전의 10년 (2002-2011년) 동안 배출된 ^3H 의 평균 배출량은 5.41×10^{13} Bq이다.

표 4.6을 보면, PWHR 노형인 월성원전에서 배출된 ^3H 배출량이 PWR 노형인 고리, 한빛, 한울 원전에서 배출된 ^3H 배출량보다 약 2배가량 더 많다. 이는 PHWR의 경우 감속재로 중수를 사용하고 있어 ^3H 의 발생량이 PWR보다 많기 때문이다. 또한, 모든 원전에서 배출된 액체유출물의 경우 타 액체 유출물보다 ^3H 배출량이 상대적으로 많으며, ^3H 배출량이 모든 액체유출물 배출량의 99.99% 이상을 차지한다.

3. 종합

PWR ^{14}C 모니터링 이전의 10년간의 국내 원전에서 배출되는 기체 및 액체 유출물의 배출량을 분석한 결과, ^3H 가 기체 및 액체 유출물의 배출량의 92.7%를 차지하였다. ^3H 는 기체유출물과 액체유출물로 배출되며, ^3H 의 최대 배출량은 2004년도에 기체유출물에서 4.46×10^{14} Bq이다. ^{14}C 의 경우 PHWR 노형인 월성 본부에서만 배출량을 평가하고 있었다. ^{14}C 배출량은 ^3H 에 비해 매우 낮은 값인 6.07×10^{11} Bq이며, 10년 평균 기체유출물의 배출량의 0.59%를 차지하였다. 또한, ^{14}C 은 기체유출물로 배출되며, 최대 배출량은 2007년도에 9.78×10^{11} Bq이다. 그 외 불활성기체, 미립자, 방사성옥소의 배출량을 분석한 결과, 불활성기체의 경우 기체유출물에서 주로 배출되었으며, 최대 배출량은 기체유출물에서 2.11×10^{14} Bq이다. 미립자는 주로 액체유출물로 배출되었다. 방사성옥소는 주로 기체유출물로 배출되었다. PWR ^{14}C 모니터링 이전의 10년간 기체 및 액체 유출물의 핵종별 배출량 비율을 그림 4.3에 도시하였다.

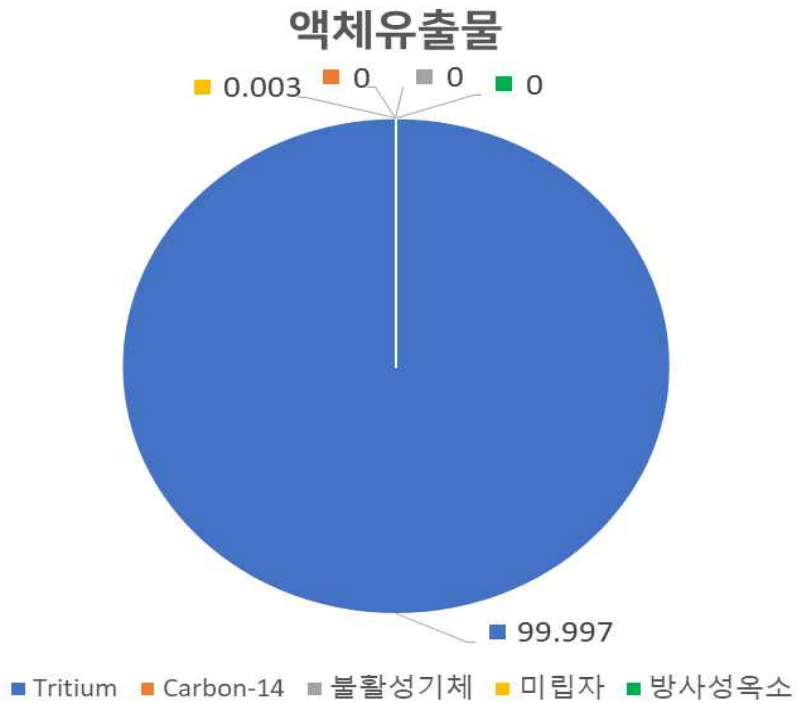
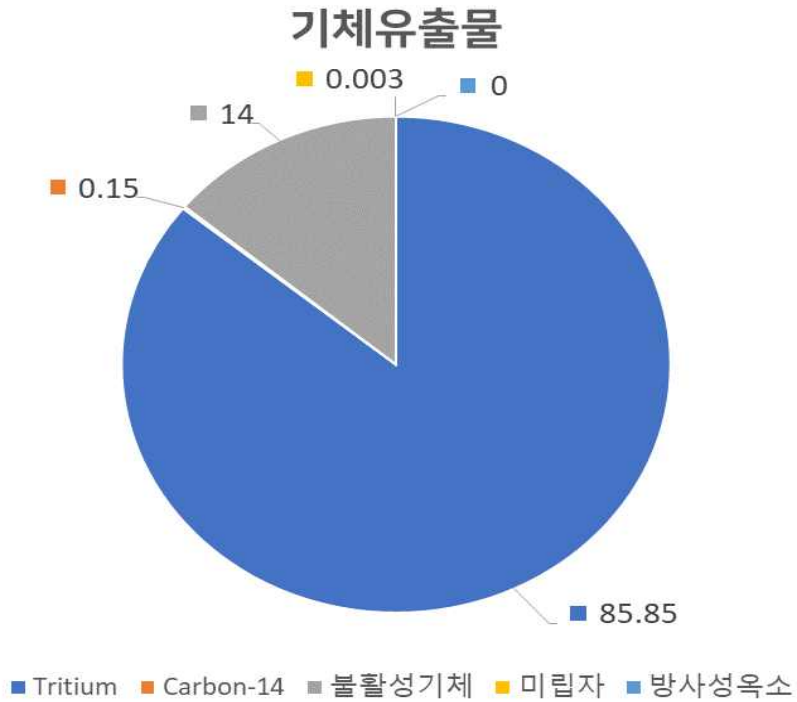


그림 4.3 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 기체 및 액체 유출물 배출량 비율

제2절 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) 환경으로 배출된 ¹⁴C 분석

1. 기체유출물

미국의 원자력규제위원회는 원전에서 배출되는 ¹⁴C의 지속적인 증가에 따라 ¹⁴C에 대한 모니터링의 중요성을 인지하고 이를 모니터링하도록 권고하였다[9, 12]. 이에 따라 국내 원전에서는 ¹⁴C에 대한 모니터링을 2012년 이후 PHWR뿐만 아니라 PWR에서도 시행하였다[46]. 따라서, 본 절에서는 2012년 이후 2021년까지 국내 원전에서 배출되는 기체 및 액체 유출물의 배출량을 분석하여 표 4.7에 나타내었다. 또한, 10년간의 평균 배출량을 표 4.8에 나타내었고, 그림 4.4에 도시하였다. 각 노형에 따른 기체유출물의 배출량을 표 4.9에 나타내었다[13, 20, 28, 47-53].

표 4.7 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) 원전본부별 기체유출물 배출량

연도	구분	고리본부 ^a [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	총합 [Bq]	핵종 구성비 (%)
2012	³ H	1.50×10 ¹³	1.55×10 ¹⁴	1.00×10 ¹³	1.15×10 ¹³	1.92×10 ¹⁴	91.19
	¹⁴ C	5.12×10 ¹¹	4.49×10 ¹¹	5.77×10 ¹¹	5.67×10 ¹¹	2.11×10 ¹²	1.00
	불활성기체	1.88×10 ¹²	1.34×10 ¹³	2.11×10 ¹¹	7.03×10 ¹¹	1.62×10 ¹³	7.71
	미립자	2.04×10 ⁵	8.53×10 ⁵	3.75×10 ⁷	1.07×10 ⁴	3.86×10 ⁷	<0.01
	방사성 옥소	9.08×10 ⁶	2.23×10 ⁵	9.52×10 ⁶	8.15×10 ⁷	1.00×10 ⁸	<0.01
2013	³ H	1.81×10 ¹³	1.35×10 ¹⁴	1.76×10 ¹³	1.25×10 ¹³	1.83×10 ¹⁴	90.02
	¹⁴ C	4.91×10 ¹¹	6.71×10 ¹¹	3.32×10 ¹¹	4.47×10 ¹¹	1.94×10 ¹²	0.95
	불활성기체	2.82×10 ¹²	1.48×10 ¹³	3.19×10 ¹⁰	1.80×10 ¹¹	1.78×10 ¹³	8.76
	미립자	7.41×10 ⁴	- ^b	5.10×10 ⁵	1.66×10 ⁶	2.24×10 ⁶	<0.01
	방사성 옥소	1.77×10 ⁶	- ^b	- ^b	- ^b	1.77×10 ⁶	<0.01

연도	구분	고리본부 ^a [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	총합 [Bq]	핵종 구성비 (%)
2014	³ H	1.54×10 ¹³	1.37×10 ¹⁴	1.72×10 ¹³	1.21×10 ¹³	5.84×10 ¹³	62.34
	¹⁴ C	3.35×10 ¹¹	1.65×10 ¹²	3.16×10 ¹¹	5.32×10 ¹¹	2.83×10 ¹²	3.02
	불활성기체	5.09×10 ¹²	2.62×10 ¹³	1.11×10 ¹²	5.26×10 ¹⁰	3.25×10 ¹³	34.64
	미립자	7.46×10 ⁶	- ^b	- ^b	8.53×10 ⁵	8.31×10 ⁶	<0.01
	방사성 옥소	2.70×10 ⁷	- ^b	2.52×10 ⁷	- ^b	5.22×10 ⁷	<0.01
2015	³ H	1.76×10 ¹³	1.41×10 ¹⁴	1.41×10 ¹³	1.27×10 ¹³	1.84×10 ¹⁴	86.28
	¹⁴ C	7.79×10 ¹¹	7.79×10 ¹¹	2.88×10 ¹¹	7.74×10 ¹¹	2.62×10 ¹²	1.22
	불활성기체	4.85×10 ¹²	2.19×10 ¹³	2.50×10 ¹⁰	7.74×10 ¹⁰	2.69×10 ¹³	12.5
	미립자	9.75×10 ⁵	4.95×10 ⁴	3.38×10 ³	2.44×10 ⁴	1.05×10 ⁶	<0.01
	방사성 옥소	1.40×10 ⁷	2.44×10 ⁷	5.98×10 ⁴	- ^b	3.85×10 ⁷	<0.01
2016	³ H	1.66×10 ¹³	1.20×10 ¹⁴	1.65×10 ¹³	1.34×10 ¹³	1.67×10 ¹⁴	91.70
	¹⁴ C	6.60×10 ¹¹	9.36×10 ¹¹	3.57×10 ¹¹	7.23×10 ¹¹	2.68×10 ¹²	1.47
	불활성기체	2.64×10 ¹²	9.65×10 ¹²	2.80×10 ¹⁰	7.74×10 ¹⁰	1.24×10 ¹³	6.83
	미립자	3.91×10 ⁴	2.85×10 ⁵	- ^b	1.51×10 ⁷	1.54×10 ⁷	<0.01
	방사성 옥소	1.54×10 ⁵	- ^b	- ^b	1.93×10 ⁵	3.47×10 ⁵	<0.01
2017	³ H	2.00×10 ¹³	1.08×10 ¹⁴	1.98×10 ¹³	1.27×10 ¹³	1.61×10 ¹⁴	95.32
	¹⁴ C	7.24×10 ¹¹	9.03×10 ¹¹	5.08×10 ¹¹	4.09×10 ¹¹	2.54×10 ¹²	1.51
	불활성기체	4.37×10 ¹¹	4.80×10 ¹²	2.76×10 ¹⁰	7.09×10 ¹⁰	5.34×10 ¹²	3.17
	미립자	- ^b	3.13×10 ⁵	- ^b	- ^b	3.13×10 ⁵	<0.01
	방사성 옥소	1.05×10 ⁴	- ^b	- ^b	- ^b	1.05×10 ⁴	<0.01
2018	³ H	1.57×10 ¹³	1.10×10 ¹⁴	1.94×10 ¹³	1.46×10 ¹³	1.75×10 ¹⁴	95.08
	¹⁴ C	1.02×10 ¹²	1.10×10 ¹²	3.94×10 ¹¹	5.09×10 ¹¹	4.04×10 ¹²	1.51
	불활성기체	2.69×10 ¹¹	3.64×10 ¹²	7.87×10 ¹¹	7.42×10 ¹⁰	5.04×10 ¹²	3.17
	미립자	2.41×10 ⁴	2.14×10 ⁶	4.32×10 ⁵	- ^b	2.62×10 ⁶	<0.01
	방사성 옥소	- ^b	- ^b	2.33×10 ⁷	- ^b	2.33×10 ⁷	<0.01
2019	³ H	2.32×10 ¹³	1.10×10 ¹⁴	1.56×10 ¹³	1.27×10 ¹³	1.85×10 ¹⁴	94.46
	¹⁴ C	7.21×10 ¹¹	1.37×10 ¹²	2.51×10 ¹¹	3.47×10 ¹¹	3.41×10 ¹²	1.74
	불활성기체	7.70×10 ¹¹	5.79×10 ¹²	1.54×10 ¹⁰	7.00×10 ¹⁰	7.42×10 ¹²	3.79
	미립자	6.21×10 ⁴	1.63×10 ⁶	1.54×10 ³	- ^b	1.76×10 ⁶	<0.01
	방사성 옥소	7.28×10 ⁴	- ^b	- ^b	- ^b	1.46×10 ⁵	<0.01
2020	³ H	1.85×10 ¹³	1.07×10 ¹⁴	1.66×10 ¹³	1.19×10 ¹³	1.72×10 ¹⁴	92.07
	¹⁴ C	6.06×10 ¹¹	2.34×10 ¹²	3.12×10 ¹¹	3.33×10 ¹¹	4.20×10 ¹²	2.24
	불활성기체	1.62×10 ¹²	7.34×10 ¹²	1.44×10 ¹⁰	5.14×10 ¹⁰	1.06×10 ¹³	5.69
	미립자	1.04×10 ⁶	- ^b	- ^b	- ^b	2.07×10 ⁶	<0.01
	방사성 옥소	2.21×10 ⁶	- ^b	- ^b	- ^b	4.42×10 ⁶	<0.01

연도	구분	고리본부 ^a [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	총합 [Bq]	핵종 구성비 (%)
2021	³ H	2.15×10 ¹³	9.78×10 ¹³	1.80×10 ¹³	1.50×10 ¹³	1.74×10 ¹⁴	88.23
	¹⁴ C	6.22×10 ¹¹	3.59×10 ¹²	3.15×10 ¹¹	3.66×10 ¹¹	5.51×10 ¹²	2.80
	불활성 기체	1.93×10 ¹²	1.37×10 ¹³	1.10×10 ¹⁰	5.72×10 ¹⁰	1.77×10 ¹³	8.98
	미립자	1.01×10 ⁶	4.66×10 ⁸	7.65×10 ³	- ^b	4.68×10 ⁸	<0.01
	방사성 옥소	1.78×10 ⁷	- ^b	- ^b	- ^b	3.55×10 ⁷	<0.01

^a 고리본부는 2016년부터 새울본부와 배출량 평가를 함께 진행 중임

^b 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

표 4.8 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) 원전본부별 기체유출물 평균 배출량

구분	고리본부 ^a [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	평균 배출량 [Bq]	비율 (%)
³ H	1.82×10 ¹³	1.10×10 ¹⁴	1.65×10 ¹³	1.29×10 ¹³	3.93×10 ¹³	89.93
¹⁴ C	6.47×10 ¹¹	1.38×10 ¹²	3.65×10 ¹¹	5.01×10 ¹¹	7.23×10 ¹¹	1.65
불활성기체	2.23×10 ¹²	1.21×10 ¹³	2.26×10 ¹¹	1.41×10 ¹¹	3.68×10 ¹²	8.42
미립자	1.09×10 ⁶	4.71×10 ⁷	3.85×10 ⁶	1.76×10 ⁶	1.35×10 ⁷	<0.01
방사성옥소	7.20×10 ⁶	2.46×10 ⁶	5.81×10 ⁶	8.17×10 ⁶	5.91×10 ⁶	<0.01
Total	2.10×10 ¹³	1.23×10 ¹⁴	1.71×10 ¹³	1.36×10 ¹³	4.37×10 ¹³	100

^a 고리본부는 2016년부터 새울본부와 배출량 평가를 함께 진행 중임

표 4.9 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) 노형별 기체유출물 평균 배출량

구분	PHWR	비율 (%)	PWR				평균 배출량 [Bq]	비율 (%)
	월성 [Bq]		고리 ^a [Bq]	신월성 ^b [Bq]	한빛 [Bq]	한울 [Bq]		
³ H	1.10×10 ¹⁴	89.08	1.82×10 ¹³	1.20×10 ¹²	1.65×10 ¹³	1.29×10 ¹³	1.22×10 ¹³	95.63
¹⁴ C	1.38×10 ¹²	1.12	6.47×10 ¹¹	8.55×10 ¹⁰	3.65×10 ¹¹	5.01×10 ¹¹	400×10 ¹¹	3.13
불활성 기체	1.21×10 ¹³	9.80	2.23×10 ¹²	4.33×10 ¹⁰	2.26×10 ¹¹	1.41×10 ¹¹	1.58×10 ¹¹	1.24
미립자	4.71×10 ⁷	<0.01	1.09×10 ⁶	4.70×10 ⁷	3.85×10 ⁶	1.76×10 ⁶	1.34×10 ⁷	<0.01
방사성 옥소	2.46×10 ⁶	<0.01	7.02×10 ⁶	2.44×10 ⁶	5.81×10 ⁶	8.17×10 ⁶	5.86×10 ⁷	<0.01
Total	1.23×10 ¹⁴	100.0	1.91×10 ¹³	1.33×10 ¹²	1.71×10 ¹³	1.35×10 ¹³	1.28×10 ¹³	100.0

^a 고리본부는 2016년부터 새울본부와 배출량 평가를 함께 진행 중임

^b 신월성 1, 2호기는 PWR이며 2012년, 2015년 각각 상업운전을 개시함

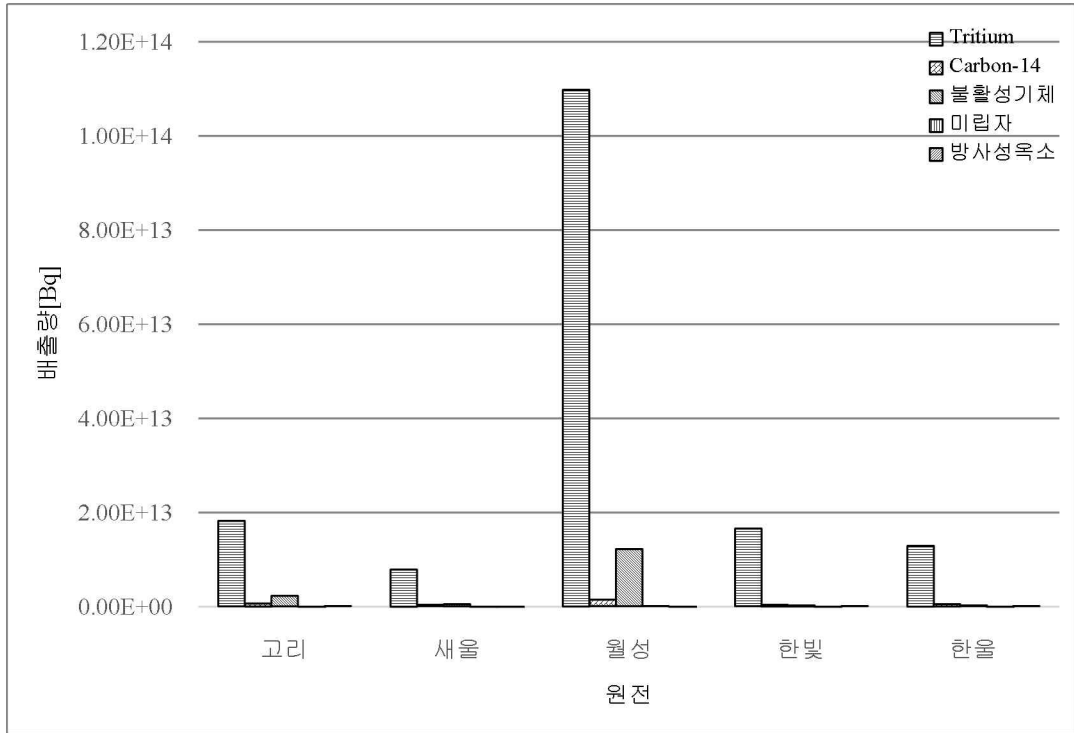


그림 4.4 2012-2021년(PWR ^{14}C 모니터링 이후) 원전본부별 기체유출물 평균 배출량

표 4.7과 표 4.8, 그림 4.4를 보면, PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후에도 10년간 가장 많은 배출량을 차지하는 핵종은 ^3H 이다. ^3H 는 PWR ^{14}C 모니터링 이전 10년간의 평균값인 8.86×10^{13} Bq 보다 4.93×10^{13} Bq 감소한 3.93×10^{13} Bq이며, 이는 배출량의 약 90%를 차지하는 값이었다. ^{14}C 의 경우, PWR에서 ^{14}C 모니터링이 시행된 이후 2012년에는 정량적 측정법으로 측정하였으며, 2013년부터 실제 측정하였다. PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후 ^{14}C 의 10년간 평균 배출량은 7.23×10^{11} Bq로 10년 평균 배출량의 1.7%를 차지하였다. 또한, 불활성기체는 10년 평균 배출량이 3.68×10^{12} Bq로 PWR ^{14}C 모니터링 이전 10년 배출량보다 1.07×10^{13} Bq이 감소하였으며, PWR ^{14}C 모니터링 이후의 10년 평균 배출량의 8.4%를 차지하였다. 그 외 미립자와 방사성옥소의 배출량은 각각 1.35×10^7 Bq과 5.91×10^6 Bq이었으며, 10년 평균 배출량에서 차지하는 비율은 0.01% 미만이었다.

표 4.9를 보면, PHWR 노형인 월성원전에서 배출된 ^{14}C 배출량이 PWR 노형인 고리, 한빛, 한울 원전에서 배출된 ^{14}C 배출량보다 많았다. PHWR에서 배출된 ^{14}C 배출량은 10년 평균 1.38×10^{12} Bq이며, PWR에서 배출된 ^{14}C 배출량은 10년 평균 4.00×10^{11} Bq로 PHWR에서 배출된 ^{14}C 배출량이 PWR에서 배출된 ^{14}C 배출량보다 약 3배 더 많았다. PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후 기체유출물 배출량의 10년 평균 배출량에서 ^{14}C 이 차지하는 비율은 PHWR에서 1.12%, PWR에서 3.1%이다.

2. 액체유출물

2012년부터 2021년까지 10년간 국내 원전에서 배출되는 액체유출물의 배출량을 분석하여 표 4.10에 나타내었다[13, 20, 28, 47-53]. 또한, 10년간의 평균 배출량을 분석하여 표 4.11에 나타내었으며, 그림 4.5에 도시하였다. PHWR과 PWR에서 배출된 액체유출물의 배출량을 노형에 따라 나누어 표 4.12에 나타내었다. [13, 20, 28, 47-53].

표 4.10 2012-2021년(PWR ^{14}C 모니터링 이후) 원전본부별 액체유출물 배출량

연도	구분	고리본부 ^a [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	총합 [Bq]	핵종 구성비 (%)
2012	^3H	6.19×10^{13}	9.27×10^{13}	7.80×10^{13}	4.44×10^{13}	2.77×10^{14}	100
	^{14}C	NA ^b	NA ^b	NA ^b	NA ^b	NA ^b	NA ^b
	불활성기체	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c
	미립자	8.20×10^8	1.45×10^9	3.63×10^8	2.52×10^7	2.66×10^9	<0.01
	방사성 옥소	- ^c	3.87×10^7	1.35×10^6	- ^c	4.01×10^7	<0.01
2013	^3H	3.87×10^{13}	6.92×10^{13}	3.47×10^{13}	3.41×10^{13}	1.77×10^{14}	100
	^{14}C	NA ^b	NA ^b	NA ^b	NA ^b	NA ^b	NA ^b
	불활성기체	- ^c	1.37×10^6	- ^c	- ^c	1.37×10^6	<0.01
	미립자	4.83×10^8	9.84×10^8	3.46×10^8	4.69×10^7	1.86×10^9	<0.01
	방사성 옥소	- ^c	1.63×10^5	- ^c	- ^c	1.63×10^5	<0.01
2014	^3H	3.96×10^{13}	4.84×10^{13}	3.72×10^{13}	5.39×10^{13}	1.79×10^{14}	100
	^{14}C	NA ^b	2.89×10^8	NA ^b	NA ^b	2.89×10^8	<0.01
	불활성기체	7.31×10^4	2.23×10^5	8.36×10^6	- ^c	8.66×10^6	<0.01
	미립자	1.42×10^8	5.00×10^8	2.28×10^9	1.02×10^8	3.02×10^9	<0.01
	방사성 옥소	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c	<0.01
2015	^3H	6.88×10^{13}	2.58×10^{13}	4.52×10^{13}	5.09×10^{13}	1.91×10^{14}	100
	^{14}C	NA ^b	2.69×10^8	NA ^b	NA ^b	2.69×10^8	<0.01
	불활성기체	- ^c	2.89×10^5	- ^c	- ^c	2.89×10^5	<0.01
	미립자	4.13×10^8	4.77×10^8	2.82×10^8	8.29×10^7	1.25×10^9	<0.01
	방사성 옥소	- ^c	2.27×10^5	- ^c	- ^c	2.27×10^5	<0.01
2016	^3H	4.54×10^{13}	2.29×10^{13}	4.00×10^{13}	7.15×10^{13}	1.80×10^{14}	100
	^{14}C	NA ^b	4.17×10^8	NA ^b	NA ^b	4.17×10^8	<0.01
	불활성기체	9.64×10^5	9.66×10^4	- ^c	- ^c	1.06×10^6	<0.01
	미립자	1.55×10^8	6.22×10^8	1.41×10^8	1.04×10^8	1.02×10^9	<0.01
	방사성 옥소	- ^c	3.05×10^5	- ^c	- ^c	3.05×10^5	<0.01
2017	^3H	5.47×10^{13}	2.45×10^{13}	4.18×10^{13}	6.75×10^{13}	1.89×10^{14}	99.99
	^{14}C	NA ^b	1.32×10^{10}	NA ^b	NA ^b	1.32×10^{10}	0.01
	불활성기체	4.57×10^6	8.59×10^4	- ^c	- ^c	4.66×10^6	<0.01
	미립자	1.36×10^8	4.20×10^8	5.80×10^8	1.31×10^8	1.27×10^9	<0.01
	방사성 옥소	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c	<0.01
2018	^3H	4.96×10^{13}	2.46×10^{13}	5.44×10^{13}	7.30×10^{13}	2.51×10^{14}	100
	^{14}C	NA ^b	5.34×10^8	NA ^b	NA ^b	5.34×10^8	<0.01
	불활성기체	1.86×10^6	- ^c	- ^c	- ^c	3.72×10^6	<0.01
	미립자	5.37×10^8	4.59×10^8	6.80×10^7	1.12×10^8	1.71×10^9	<0.01
	방사성 옥소	- ^c	6.38×10^6	- ^c	- ^c	6.38×10^6	<0.01

연도	구분	고리본부 [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	총합 [Bq]	핵종 구성비 (%)
2019	³ H	9.19×10 ¹³	3.12×10 ¹³	1.84×10 ¹³	6.34×10 ¹³	2.97×10 ¹⁴	99.98
	¹⁴ C	NA ^b	7.25×10 ¹⁰	NA ^b	NA ^b	7.25×10 ¹⁰	0.02
	불활성기체	4.18×10 ⁵	- ^c	- ^c	- ^c	8.36×10 ⁵	<0.01
	미립자	3.34×10 ⁸	7.60×10 ⁸	1.74×10 ⁸	9.08×10 ⁷	1.69×10 ⁹	<0.01
	방사성 옥소	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c
2020	³ H	4.75×10 ¹³	8.09×10 ¹³	3.15×10 ¹³	5.08×10 ¹³	2.58×10 ¹⁴	99.97
	¹⁴ C	NA ^b	6.96×10 ¹⁰	NA ^b	NA ^b	6.96×10 ¹⁰	0.03
	불활성기체	5.20×10 ⁶	2.02×10 ⁵	- ^c	- ^c	1.06×10 ⁷	<0.01
	미립자	5.84×10 ⁸	6.70×10 ⁸	6.77×10 ⁷	1.70×10 ⁸	2.08×10 ⁹	<0.01
	방사성 옥소	- ^c	- ^c	2.58×10 ⁵	- ^c	2.58×10 ⁵	<0.01
2021	³ H	8.41×10 ¹³	7.11×10 ¹³	2.35×10 ¹³	5.20×10 ¹³	3.15×10 ¹⁴	100
	¹⁴ C	NA ^b	9.30×10 ⁹	NA ^b	NA ^b	9.30×10 ⁹	<0.01
	불활성기체	6.35×10 ⁶	- ^c	- ^c	- ^c	1.27×10 ⁷	<0.01
	미립자	2.72×10 ⁸	5.48×10 ⁸	8.30×10 ⁷	1.82×10 ⁸	1.36×10 ⁹	<0.01
	방사성 옥소	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c	- ^c

^a 고리본부는 2016년부터 새울본부와 배출량 평가를 함께 진행 중임

^b Not available

^c 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

표 4.11 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) 원전본부별 액체유출물 평균 배출량

구분	고리본부 ^a [Bq]	월성본부 [Bq]	한빛본부 [Bq]	한울본부 [Bq]	평균 배출량 [Bq]	비율 (%)
³ H	5.82×10 ¹³	4.91×10 ¹³	4.05×10 ¹³	5.61×10 ¹³	5.10×10 ¹³	99.96
¹⁴ C	NA ^b	2.08×10 ¹⁰	NA ^b	NA ^b	2.08×10 ¹⁰	0.04
불활성기체	1.94×10 ⁶	2.27×10 ⁵	8.36×10 ⁵	- ^c	7.52×10 ⁵	<0.01
미립자	3.88×10 ⁸	6.89×10 ⁸	4.38×10 ⁸	1.05×10 ⁸	4.05×10 ⁸	<0.01
방사성옥소	- ^c	4.58×10 ⁶	1.61×10 ⁵	- ^c	1.18×10 ⁶	<0.01
Total	5.82×10 ¹³	4.92×10 ¹³	4.05×10 ¹³	5.61×10 ¹³	5.10×10 ¹³	100.00

^a 고리본부는 2016년부터 새울본부와 배출량 평가를 함께 진행 중임

^b Not available

^c 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

표 4.12 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) 노형별 액체유출물 평균 배출량

구분	PHWR	비율 (%)	PWR				평균 배출량 [Bq]	비율 (%)
	월성 [Bq]		고리 ^a [Bq]	신월성 ^b [Bq]	한빛 [Bq]	한울 [Bq]		
³ H	491×10 ¹³	99.96	5.82×10 ¹³	1.04×10 ¹³	4.05×10 ¹³	5.61×10 ¹³	413×10 ¹³	100.0
¹⁴ C	208×10 ¹⁰	0.04	NA ^c	NA ^c	NA ^c	NA ^c	NA ^c	NA ^c
불활성 기체	2.27×10 ⁵	<0.01	1.94×10 ⁶	1.37×10 ⁵	8.36×10 ⁵	- ^d	7.28×10 ⁵	<0.01
미립자	6.89×10 ⁸	<0.01	3.88×10 ⁸	1.38×10 ⁸	4.38×10 ⁸	1.05×10 ⁸	2.67×10 ⁸	<0.01
방사성 옥소	4.58×10 ⁶	<0.01	- ^d	- ^d	1.61×10 ⁵	- ^d	4.03×10 ⁴	<0.01
Total	491×10 ¹³	100.0	5.82×10 ¹³	1.04×10 ¹³	4.05×10 ¹³	5.61×10 ¹³	413×10 ¹³	100.0

- ^a 고리본부는 2016년부터 새울본부와 배출량 평가를 함께 진행 중임
- ^b 신월성 1, 2호기는 PWR이며 2012년, 2015년 각각 상업운전을 개시함
- ^c Not available
- ^d 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

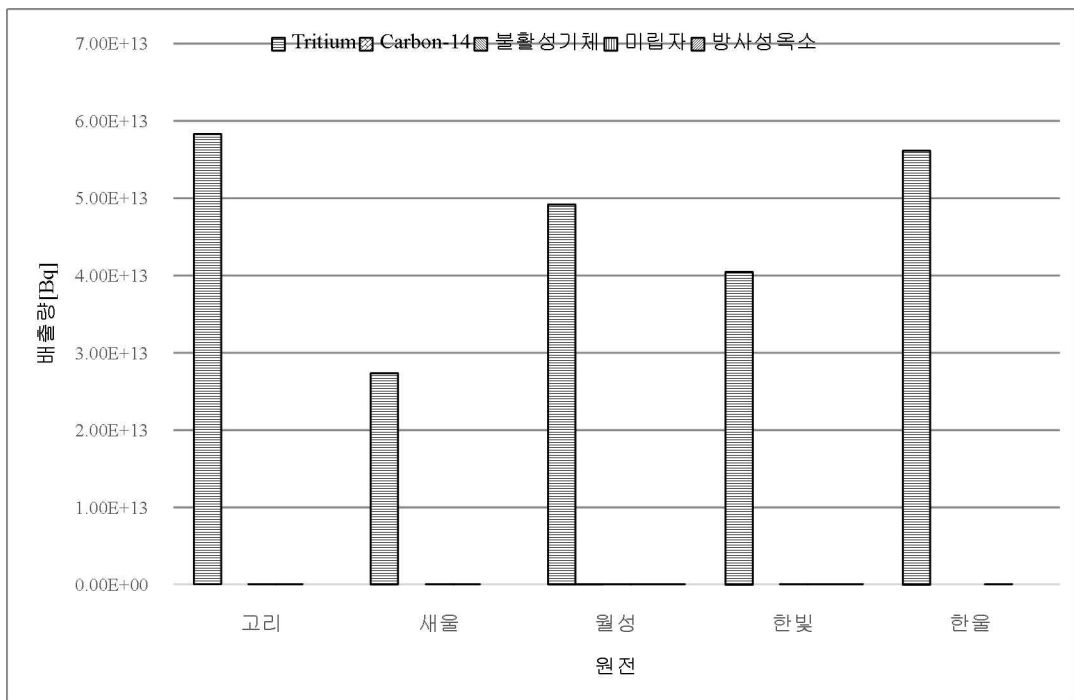


그림 4.5 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) 원전본부별 액체유출물 평균 배출량

표 4.10과 표 4.11, 그림 4.5를 보면, PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후 10년간 배출된 액체유출물에서 가장 많은 배출량을 차지한 핵종은 ^3H 이다. ^3H 는 10년간 평균 배출량이 5.10×10^{13} Bq로 10년 평균 배출량의 99.96%를 차지하였다. ^{14}C 의 경우, 월성본부에서만 액체유출물로 배출되었으며 배출량은 2.08×10^{10} Bq로 10년 평균 배출량의 0.04%를 차지하였다. 그 외 나머지 핵종인 불활성기체, 미립자, 방사성옥소의 배출량은 각각 7.52×10^6 Bq, 4.05×10^8 Bq, 1.18×10^6 Bq이며, 10년 평균 배출량의 0.01% 미만을 차지하였다. 월성본부에서 ^{14}C 이 액체유출물로 배출된 이유는 PHWR의 감속재와 냉각재 내에 ^{14}C 이 용존 ^{14}CO 형태 또는 탄산이온 형태로 존재하기 때문이다[54].

표 4.12를 보면, PHWR과 PWR 노형에서 배출된 액체유출물 중 가장 큰 비중을 차지하는 유출물은 ^3H 이며, 10년 평균 배출량의 99% 이상을 차지하고 있다. 또한, PHWR에서 배출된 ^3H 의 배출량과 PWR에서 배출된 ^3H 의 배출량은 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 그러나 PHWR 노형인 월성원전에서 ^{14}C 이 액체유출물 배출량 10년 평균 2.08×10^{10} Bq이 배출되었지만, PWR 노형인 고리, 새울, 한빛, 한울 원전에서는 배출되지 않았다. PHWR에서 배출된 ^{14}C 은 10년 평균 배출량의 0.04%를 차지한다.

3. 종합

PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후 10년간(2012-2021)의 국내 원전에서 배출되는 기체 및 액체 유출물의 배출량을 분석한 결과, PWR ^{14}C 모니터링 이전과 같이 ^3H 가 기체 및 액체 유출물 배출량의 94.98%를 차지하였다. ^3H 는 기체유출물과 액체유출물로 모두 배출되며, ^3H 의 최대 배출량은 2021년도에 3.15×10^{14} Bq이다. ^{14}C 의 경우 PWR ^{14}C 모니터링 이후 PWR과 PHWR에서 모두 배출량 평가를 진행하였다. ^{14}C 은 10년 평균 배출량의 0.04%를 차지하였으며, 최대 배출량은 2021년도에 5.51×10^{12}

Bq이다. 그 외 불활성기체, 미립자, 방사성옥소의 배출량을 분석한 결과, 불활성기체의 경우 기체유출물에서 주로 배출되며 기체유출물 10년 평균 배출량의 8.27%를 차지하였다. 불활성기체의 최대 배출량은 2014년도에 3.25×10^{13} Bq이다. 미립자와 방사성옥소는 기체 및 액체 유출물의 10년 평균 배출량에서 모두 0.01% 미만을 차지하였다. 미립자와 방사성옥소의 최대 배출량은 미립자가 2014년도에 3.02×10^9 Bq이며, 방사성옥소는 2012년도에 1.00×10^8 Bq이다. PWR ^{14}C 모니터링 이후의 10년간 기체 및 액체 유출물의 배출량 비율을 그림 4.6에 도시하였다.

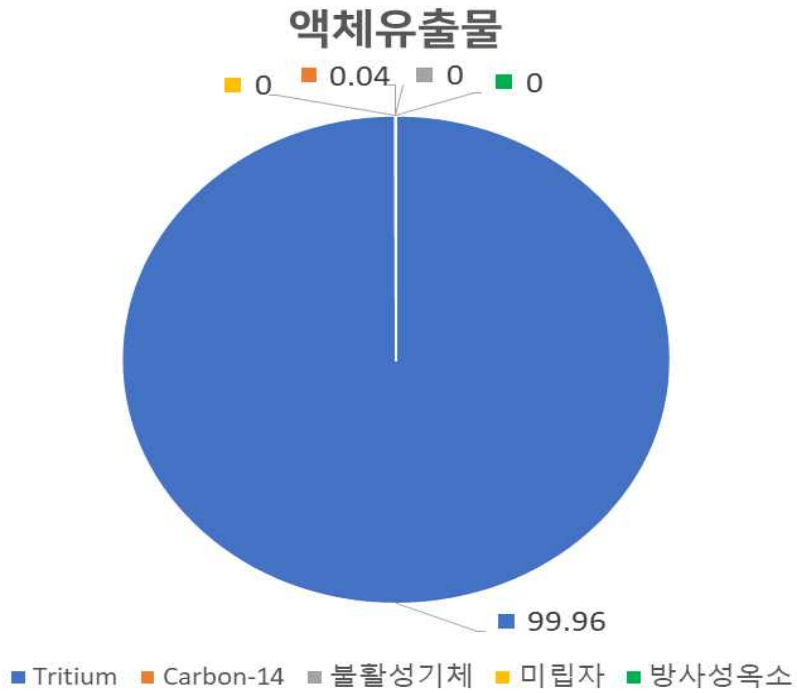
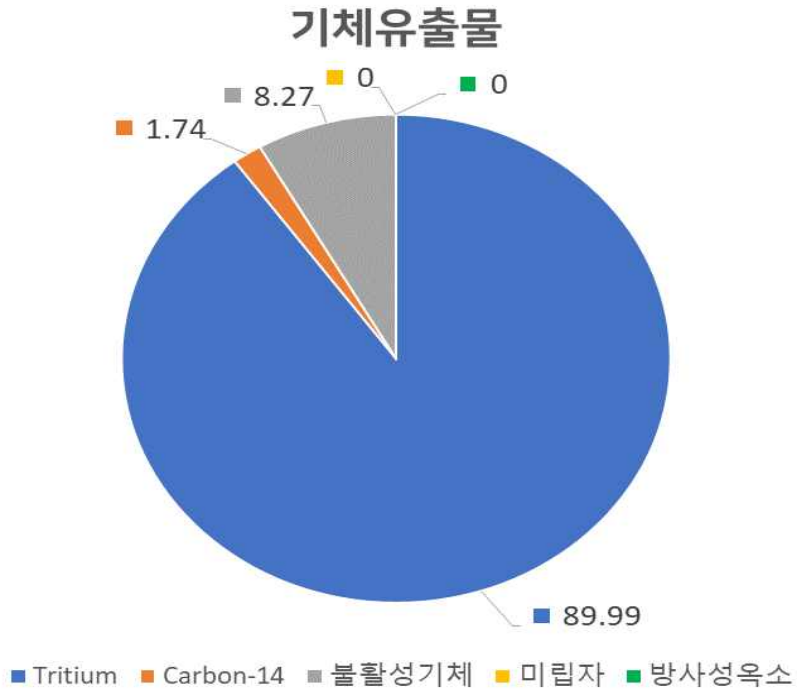


그림 4.6 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) 기체 및 액체 유출물 배출량 비율

제5장 국내 원자력발전소에서 환경으로 배출되는 방사성유출물에 의한 주변주민 피폭선량 분석

제1절 주변주민 피폭선량 분석

국내 원전에서 배출되는 방사성유출물에 의해 주변주민이 받을 수 있는 피폭을 관리하기 위해 한국수력원자력(주)은 제한구역 경계에서 주민이 받을 수 있는 선량을 계산하여 연간 보고서에 작성하고 있다. 주변주민 피폭선량 평가의 피폭연령군은 6개 군(3개월, 1세, 5세, 10세, 15세, 성인)으로 구성되어 있으며, 이 중 선량평가 결과 최대피폭이 발생한 연령군을 선량값으로 하고 있다[55]. 또한, 방사성유출물에 의한 피폭선량을 연간 일반인 유효선량 한도인 1 mSv와 비교하였다. 따라서, 본 절에서는 PWR ¹⁴C 모니터링이 시행되기 이전의 2002년부터 2011년까지의 원전 주변주민 피폭선량과 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이후의 2012년부터 2021년까지의 주변주민 피폭선량을 나누어 분석하였다[36-45, 13, 20, 28, 47-53].

1. 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 주변주민 피폭선량 분석

PWR ¹⁴C 모니터링 이전의 2002년부터 2011년까지 국내 원전에서 배출된 방사성유출물에 의한 주변주민 피폭선량을 표 5.1에 나타내었다. 또한, 10년(2002-2011) 평균 피폭선량을 그림 5.1에 도시하였다. PHWR 노형인 월성원전에서는 2012년 이전에도 ¹⁴C 모니터링을 수행하고 있었으며, 국내에서 운영 중인 노형인 PHWR와 PWR의 주변주민 피폭선량을 표 5.2와 표 5.3에 나타내었다. 또한, 각 노형에 따른 10년 평균 피폭선량을 표 5.4와 표 5.5에 나타내었고, 그림 5.2와 5.3에 도시하였다 [36-45].

표 5.1 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 주변주민 피폭선량

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2002	³ H	2.12×10 ⁻²	64.26	2.21×10 ⁻⁵	0.07
	¹⁴ C ^a	2.30×10 ⁻³	6.98	_b	_b
	불활성기체	5.03×10 ⁻³	15.28	4.34×10 ⁻¹¹	<0.01
	미립자	2.92×10 ⁻⁴	0.89	3.25×10 ⁻⁵	0.10
	방사성옥소	4.10×10 ⁻³	12.43	6.63×10 ⁻⁷	<0.01
	Total	3.29×10 ⁻²	99.83	5.53×10 ⁻⁵	0.17
2003	³ H	1.40×10 ⁻²	79.31	1.04×10 ⁻⁴	0.59
	¹⁴ C ^a	1.90×10 ⁻³	10.74	_b	_b
	불활성기체	1.00×10 ⁻³	5.68	4.69×10 ⁻¹³	<0.01
	미립자	4.19×10 ⁻⁴	2.37	1.24×10 ⁻⁴	0.70
	방사성옥소	1.04×10 ⁻⁴	0.59	4.56×10 ⁻⁶	0.03
	Total	1.72×10 ⁻²	98.69	2.33×10 ⁻⁴	1.31
2004	³ H	1.53×10 ⁻²	85.09	5.37×10 ⁻⁵	0.30
	¹⁴ C ^a	1.28×10 ⁻³	7.11	_b	_b
	불활성기체	4.38×10 ⁻⁴	2.43	1.80×10 ⁻¹²	<0.01
	미립자	1.39×10 ⁻⁶	0.01	9.06×10 ⁻⁴	5.03
	방사성옥소	6.10×10 ⁻⁶	0.03	6.67×10 ⁻⁹	<0.01
	Total	1.70×10 ⁻²	94.67	9.60×10 ⁻⁴	5.33
2005	³ H	1.14×10 ⁻²	85.72	4.70×10 ⁻⁵	0.35
	¹⁴ C ^a	6.93×10 ⁻⁴	5.23	_b	_b
	불활성기체	2.81×10 ⁻⁴	2.12	_b	_b
	미립자	7.14×10 ⁻⁶	0.05	8.19×10 ⁻⁴	6.19
	방사성옥소	3.57×10 ⁻⁵	0.27	8.90×10 ⁻⁶	0.07
	Total	1.24×10 ⁻²	93.39	8.75×10 ⁻⁴	6.61
2006	³ H	1.52×10 ⁻²	91.39	4.51×10 ⁻⁵	0.27
	¹⁴ C ^a	1.02×10 ⁻³	6.13	_b	_b
	불활성기체	2.27×10 ⁻⁴	1.36	_b	_b
	미립자	9.03×10 ⁻⁶	0.05	1.32×10 ⁻⁴	0.79
	방사성옥소	2.35×10 ⁻⁷	0.01	1.13×10 ⁻⁸	<0.01
	Total	1.65×10 ⁻²	98.94	1.77×10 ⁻⁴	1.06

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2007	³ H	2.52×10 ⁻²	86.78	5.45×10 ⁻⁵	0.19
	¹⁴ C ^a	2.47×10 ⁻³	8.51	- ^b	- ^b
	불활성기체	1.13×10 ⁻³	3.89	- ^b	- ^b
	미립자	5.96×10 ⁻⁶	0.02	5.92×10 ⁻⁵	0.20
	방사성옥소	1.20×10 ⁻⁴	0.41	5.23×10 ⁻⁸	<0.01
	Total	2.89×10 ⁻²	99.61	1.14×10 ⁻⁴	0.39
2008	³ H	1.53×10 ⁻²	62.58	4.63×10 ⁻⁵	0.19
	¹⁴ C ^a	3.27×10 ⁻³	13.41	- ^b	- ^b
	불활성기체	5.57×10 ⁻³	22.84	1.57×10 ⁻¹²	<0.01
	미립자	1.33×10 ⁻⁴	0.54	4.88×10 ⁻⁵	0.20
	방사성옥소	5.60×10 ⁻⁵	0.23	8.87×10 ⁻⁸	<0.01
	Total	2.43×10 ⁻²	99.61	9.51×10 ⁻⁴	0.39
2009	³ H	1.25×10 ⁻²	79.26	2.86×10 ⁻⁴	1.82
	¹⁴ C ^a	1.53×10 ⁻³	9.70	- ^b	- ^b
	불활성기체	2.41×10 ⁻⁴	1.53	1.50×10 ⁻¹²	<0.01
	미립자	1.04×10 ⁻⁶	0.01	1.20×10 ⁻³	7.58
	방사성옥소	1.52×10 ⁻⁵	0.10	1.11×10 ⁻⁶	0.01
	Total	1.43×10 ⁻²	90.59	1.48×10 ⁻³	9.41
2010	³ H	1.13×10 ⁻²	76.83	2.17×10 ⁻⁴	1.70
	¹⁴ C ^a	1.58×10 ⁻³	10.78	- ^b	- ^b
	불활성기체	1.76×10 ⁻⁴	1.20	4.42×10 ⁻¹⁰	<0.01
	미립자	2.98×10 ⁻⁶	0.04	1.29×10 ⁻³	9.26
	방사성옥소	2.88×10 ⁻⁵	0.19	- ^b	- ^b
	Total	1.31×10 ⁻²	89.04	1.51×10 ⁻³	10.96
2011	³ H	9.88×10 ⁻³	78.55	1.79×10 ⁻⁴	1.42
	¹⁴ C ^a	1.38×10 ⁻³	10.97	- ^b	- ^b
	불활성기체	1.25×10 ⁻⁴	0.99	- ^b	- ^b
	미립자	2.34×10 ⁻⁴	0.99	7.75×10 ⁻⁴	6.16
	방사성옥소	5.57×10 ⁻⁶	0.04	- ^b	- ^b
	Total	1.16×10 ⁻²	92.42	9.54×10 ⁻⁴	7.58

^a ¹⁴C 피폭선량 값은 PHWR인 월성원전의 피폭선량 값임

^b 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

표 5.2 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) PHWR 노형의 주변주민 피폭선량

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2002	³ H	3.54×10 ⁻³	50.99	8.31×10 ⁻⁶	0.12
	¹⁴ C	2.30×10 ⁻³	33.13	- ^a	- ^a
	불활성기체	1.06×10 ⁻³	15.27	4.19×10 ⁻¹³	<0.01
	미립자	1.00×10 ⁻⁷	<0.01	2.79×10 ⁻⁵	0.40
	방사성옥소	5.73×10 ⁻⁶	<0.01	1.06×10 ⁻⁸	<0.01
	Total	6.91×10 ⁻³	99.48	3.62×10 ⁻⁵	0.52
2003	³ H	3.57×10 ⁻³	59.48	8.73×10 ⁻⁶	0.15
	¹⁴ C	1.90×10 ⁻³	31.66	- ^a	- ^a
	불활성기체	4.98×10 ⁻⁴	8.30	- ^a	- ^a
	미립자	3.34×10 ⁻⁷	0.01	2.50×10 ⁻⁵	0.42
	방사성옥소	1.66×10 ⁻⁸	<0.01	- ^a	- ^a
	Total	5.97×10 ⁻³	99.44	3.37×10 ⁻⁵	0.56
2004	³ H	2.99×10 ⁻³	64.92	7.63×10 ⁻⁶	0.17
	¹⁴ C	1.28×10 ⁻³	27.79	- ^a	- ^a
	불활성기체	2.64×10 ⁻⁴	5.73	- ^a	- ^a
	미립자	- ^a	- ^a	6.40×10 ⁻⁵	1.39
	방사성옥소	- ^a	- ^a	6.58×10 ⁻⁹	<0.01
	Total	4.53×10 ⁻³	98.44	7.16×10 ⁻⁵	1.56
2005	³ H	2.17×10 ⁻³	72.10	9.16×10 ⁻⁶	0.30
	¹⁴ C	6.93×10 ⁻⁴	23.03	- ^a	- ^a
	불활성기체	1.20×10 ⁻⁴	3.99	- ^a	- ^a
	미립자	5.57×10 ⁻⁷	0.02	1.69×10 ⁻⁵	0.56
	방사성옥소	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a
	Total	2.98×10 ⁻³	99.13	2.61×10 ⁻⁵	0.87
2006	³ H	2.37×10 ⁻³	67.98	1.05×10 ⁻⁵	0.30
	¹⁴ C	1.02×10 ⁻³	29.26	- ^a	- ^a
	불활성기체	6.75×10 ⁻⁵	1.94	- ^a	- ^a
	미립자	2.06×10 ⁻⁷	0.01	1.83×10 ⁻⁵	0.52
	방사성옥소	2.50×10 ⁻⁸	<0.01	1.13×10 ⁻⁸	<0.01
	Total	3.46×10 ⁻³	99.17	2.88×10 ⁻⁵	0.83

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2007	³ H	3.21×10 ⁻³	55.40	1.61×10 ⁻⁵	0.28
	¹⁴ C	2.47×10 ⁻³	42.63	- ^a	- ^a
	불활성기체	7.55×10 ⁻⁵	1.30	- ^a	- ^a
	미립자	5.95×10 ⁻⁹	<0.01	2.29×10 ⁻⁵	0.40
	방사성옥소	1.85×10 ⁻⁸	<0.01	1.29×10 ⁻⁸	<0.01
	Total	5.76×10 ⁻³	99.33	3.90×10 ⁻⁵	0.67
2008	³ H	4.85×10 ⁻³	58.34	1.33×10 ⁻⁵	0.16
	¹⁴ C	3.27×10 ⁻³	39.33	- ^a	- ^a
	불활성기체	1.42×10 ⁻⁴	1.71	- ^a	- ^a
	미립자	- ^a	- ^a	3.87×10 ⁻⁵	0.47
	방사성옥소	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a
	Total	8.26×10 ⁻³	99.37	5.20×10 ⁻⁵	0.63
2009	³ H	4.02×10 ⁻³	56.68	2.51×10 ⁻⁴	3.54
	¹⁴ C	1.53×10 ⁻³	21.57	- ^a	- ^a
	불활성기체	1.01×10 ⁻⁴	1.43	- ^a	- ^a
	미립자	- ^a	- ^a	1.19×10 ⁻³	16.78
	방사성옥소	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a
	Total	5.65×10 ⁻³	79.68	1.44×10 ⁻³	20.32
2010	³ H	3.98×10 ⁻³	57.18	1.75×10 ⁻⁴	2.51
	¹⁴ C	1.58×10 ⁻³	22.70	- ^a	- ^a
	불활성기체	1.09×10 ⁻⁴	1.57	- ^a	- ^a
	미립자	5.25×10 ⁻⁷	0.01	1.12×10 ⁻³	16.09
	방사성옥소	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a
	Total	5.66×10 ⁻³	81.32	1.30×10 ⁻³	18.68
2011	³ H	2.68×10 ⁻³	55.14	8.76×10 ⁻⁵	1.80
	¹⁴ C	1.38×10 ⁻³	28.40	- ^a	- ^a
	불활성기체	5.62×10 ⁻⁵	1.16	- ^a	- ^a
	미립자	1.41×10 ⁻⁷	<0.01	6.52×10 ⁻⁴	13.42
	방사성옥소	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a
	Total	4.12×10 ⁻³	84.77	7.40×10 ⁻⁴	15.23

^a 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

표 5.3 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) PWR 노형의 주변주민 피폭선량

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2002	³ H	1.76×10 ⁻²	67.80	1.38×10 ⁻⁵	0.05
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	3.97×10 ⁻³	15.28	4.30×10 ⁻¹¹	<0.01
	미립자	2.92×10 ⁻⁴	1.12	4.59×10 ⁻⁶	0.02
	방사성옥소	4.09×10 ⁻³	15.73	6.52×10 ⁻⁷	<0.01
	Total	2.60×10 ⁻²	99.93	1.91×10 ⁻⁵	0.07
2003	³ H	1.05×10 ⁻²	89.49	9.48×10 ⁻⁵	0.81
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	5.07×10 ⁻⁴	4.34	4.69×10 ⁻¹³	<0.01
	미립자	4.19×10 ⁻⁴	3.59	9.94×10 ⁻⁵	0.85
	방사성옥소	1.04×10 ⁻⁴	0.89	4.56×10 ⁻⁶	0.04
	Total	1.15×10 ⁻²	98.30	1.99×10 ⁻⁴	1.70
2004	³ H	1.23×10 ⁻²	92.02	4.60×10 ⁻⁵	0.34
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	1.74×10 ⁻⁴	1.30	1.80×10 ⁻¹²	<0.01
	미립자	1.39×10 ⁻⁶	0.01	8.42×10 ⁻⁴	6.29
	방사성옥소	6.10×10 ⁻⁶	0.05	8.66×10 ⁻¹¹	<0.01
	Total	1.25×10 ⁻²	93.37	8.88×10 ⁻⁴	6.63
2005	³ H	9.18×10 ⁻³	89.72	3.78×10 ⁻⁵	0.37
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	1.61×10 ⁻⁴	1.57	- ^b	- ^b
	미립자	6.58×10 ⁻⁶	0.06	8.02×10 ⁻⁴	7.84
	방사성옥소	3.57×10 ⁻⁵	0.35	8.90×10 ⁻⁶	0.09
	Total	9.38×10 ⁻³	91.70	8.49×10 ⁻⁴	8.30
2006	³ H	1.28×10 ⁻²	97.59	3.46×10 ⁻⁵	0.26
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	1.59×10 ⁻⁴	1.21	- ^b	- ^b
	미립자	8.82×10 ⁻⁶	0.07	1.14×10 ⁻⁴	0.86
	방사성옥소	2.10×10 ⁻⁷	<0.01	- ^b	- ^b
	Total	1.30×10 ⁻²	98.87	1.48×10 ⁻⁴	1.13

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2007	³ H	2.20×10 ⁻²	94.60	3.84×10 ⁻⁵	0.17
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	1.06×10 ⁻³	4.54	- ^b	- ^b
	미립자	5.96×10 ⁻⁶	0.03	3.63×10 ⁻⁵	0.16
	방사성옥소	1.20×10 ⁻⁴	0.51	3.94×10 ⁻⁸	<0.01
	Total	2.32×10 ⁻²	99.68	7.47×10 ⁻⁵	0.32
2008	³ H	1.04×10 ⁻²	64.78	3.30×10 ⁻⁵	0.21
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	5.43×10 ⁻³	33.77	1.57×10 ⁻¹²	<0.01
	미립자	1.33×10 ⁻⁴	0.83	1.01×10 ⁻⁵	0.06
	방사성옥소	5.60×10 ⁻⁵	0.35	8.87×10 ⁻⁸	<0.01
	Total	1.60×10 ⁻²	99.73	4.31×10 ⁻⁵	0.27
2009	³ H	8.48×10 ⁻³	97.71	3.54×10 ⁻⁵	0.41
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	1.40×10 ⁻⁴	1.61	1.50×10 ⁻¹²	<0.01
	미립자	1.04×10 ⁻⁶	0.01	6.03×10 ⁻⁶	0.07
	방사성옥소	1.52×10 ⁻⁵	0.18	1.11×10 ⁻⁶	0.01
	Total	8.64×10 ⁻³	99.51	4.25×10 ⁻⁵	0.49
2010	³ H	7.28×10 ⁻³	95.91	4.23×10 ⁻⁵	0.56
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	6.74×10 ⁻⁵	0.89	4.42×10 ⁻¹⁰	<0.01
	미립자	2.45×10 ⁻⁶	0.03	1.66×10 ⁻⁴	2.19
	방사성옥소	2.88×10 ⁻⁵	0.38	- ^b	- ^b
	Total	7.38×10 ⁻³	97.24	2.09×10 ⁻⁴	2.76
2011	³ H	7.20×10 ⁻³	93.22	9.09×10 ⁻⁵	1.18
	¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	6.86×10 ⁻⁵	0.89	- ^b	- ^b
	미립자	2.34×10 ⁻⁴	3.03	1.23×10 ⁻⁴	1.59
	방사성옥소	5.57×10 ⁻⁶	0.07	- ^b	- ^b
	Total	7.51×10 ⁻³	97.24	2.31×10 ⁻⁴	2.76

^a Not available

^b 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

표 5.4 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) PHWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량

구분	기체유출물		액체유출물		Total	
	mSv y ⁻¹	%	mSv y ⁻¹	%	mSv y ⁻¹	%
³ H	3.34×10 ⁻³	58.49	5.87×10 ⁻⁵	1.03	3.40×10 ⁻³	59.52
¹⁴ C	1.74×10 ⁻³	30.53	NA ^a	NA ^a	1.74×10 ⁻³	30.53
불활성기체	2.49×10 ⁻⁴	4.37	4.19×10 ⁻¹⁴	<0.01	2.49×10 ⁻⁴	4.37
미립자	1.87×10 ⁻⁷	<0.01	3.18×10 ⁻⁴	5.56	3.18×10 ⁻⁴	5.57
방사성옥소	5.79×10 ⁻⁷	0.01	4.14×10 ⁻⁹	<0.01	5.83×10 ⁻⁷	0.01
Total	5.33×10 ⁻³	93.40	3.77×10 ⁻⁴	6.60	5.71×10 ⁻³	100.00

^a Not available

표 5.5 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) PWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량

구분	기체유출물		액체유출물		Total	
	mSv y ⁻¹	%	mSv y ⁻¹	%	mSv y ⁻¹	%
³ H	1.25×10 ⁻²	86.01	4.96×10 ⁻⁵	0.34	1.25×10 ⁻²	86.35
¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
불활성기체	1.19×10 ⁻³	8.19	4.90×10 ⁻¹¹	<0.01	1.19×10 ⁻³	8.19
미립자	1.10×10 ⁻⁴	0.76	2.30×10 ⁻⁴	1.58	3.40×10 ⁻⁴	2.34
방사성옥소	4.50×10 ⁻⁴	3.10	2.43×10 ⁻⁶	0.02	4.52×10 ⁻⁴	3.11
Total	1.42×10 ⁻²	98.06	2.82×10 ⁻⁴	1.94	1.45×10 ⁻²	100.00

^a Not available

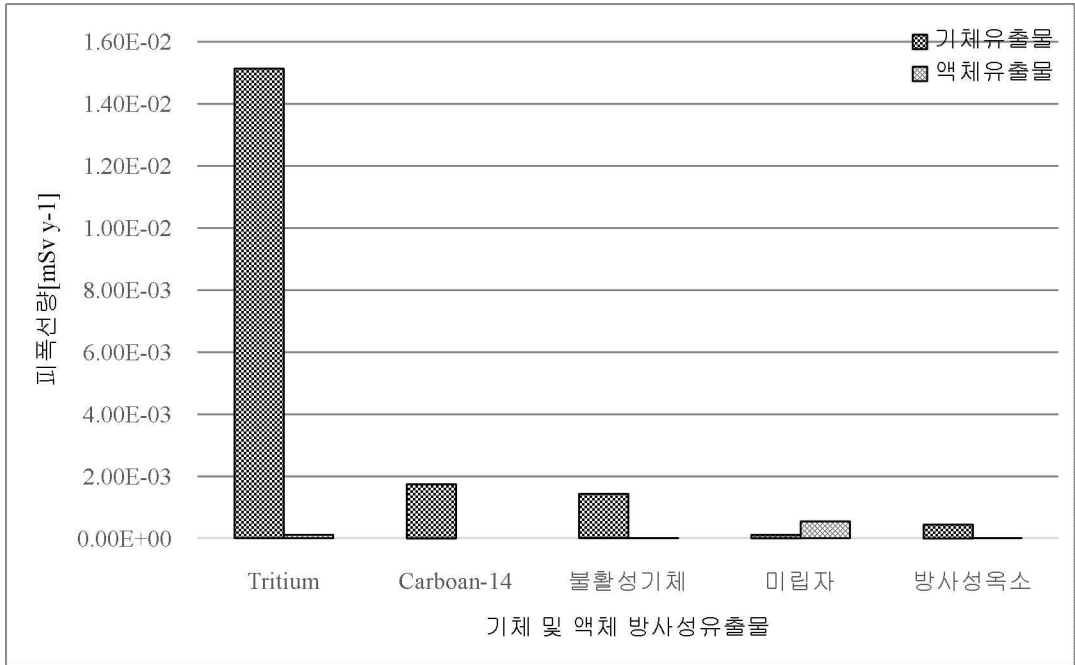


그림 5.1 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 평균 주변주민 피폭선량

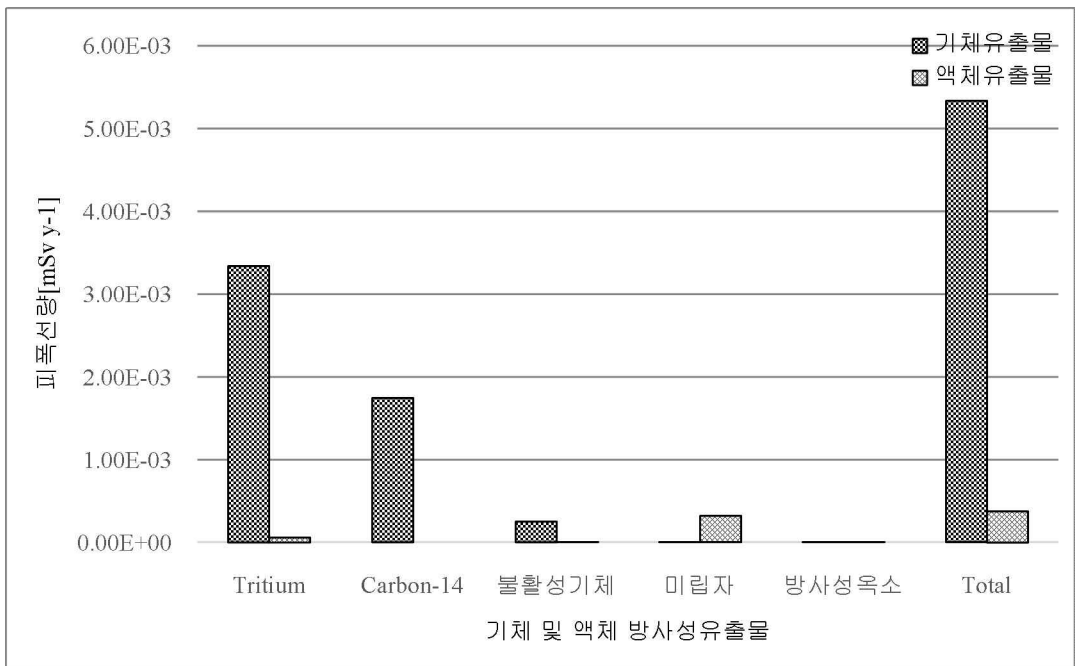


그림 5.2 2002-2011년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) PHWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량

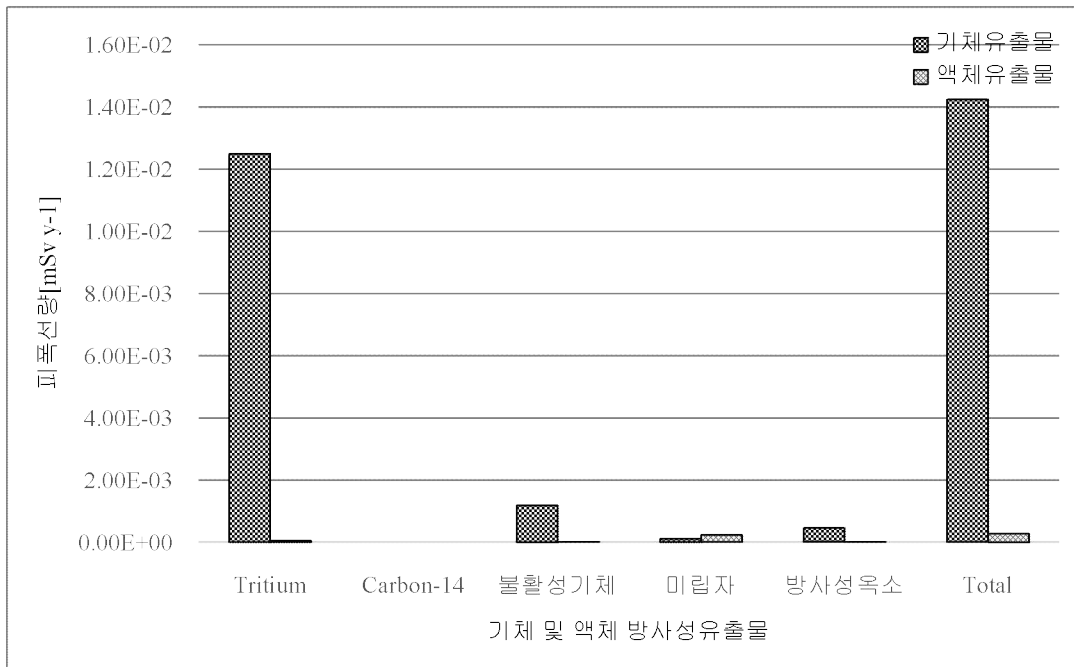


그림 5.3 PWR 노형의 PWR ¹⁴C 모니터링 이전 10년(2002-2011) 평균 주변주민 피폭선량

표 5.1과 그림 5.1을 보면, PWR ¹⁴C 모니터링 이전 10년(2002-2011) 동안 국내 원전에서 배출된 방사성유출물 중 ³H가 주변주민에게 피폭에 가장 많은 영향을 끼쳤다. ³H의 최대 피폭선량은 2007년도에 2.52×10^{-2} mSv y⁻¹이며, 10년 평균 피폭선량에서 차지하는 비율은 78.98%이다. ¹⁴C은 2008년도에 3.27×10^{-3} mSv y⁻¹으로 최대 피폭선량을 보였으며, 10년 평균 피폭선량에서 차지하는 비율은 8.96%이다. 2012년 이전에 발생한 ¹⁴C의 피폭선량 값은 PHWR 노형인 월성원전에서 나온 값으로 2012년 이전 PWR ¹⁴C 모니터링이 시행되기 이전에 평가된 피폭선량 값이다. PWR 노형보다 PHWR 노형에서 ¹⁴C이 더 많이 생성되기 때문에 PHWR 노형인 월성원전에서는 운영 초기부터 ¹⁴C 모니터링을 시행 중이었다. 불활성기체의 경우 최대 피폭선량은 2008년도에 5.58×10^{-3} mSv y⁻¹이며, 10년 평균 피폭선량에서 차지하는 비율은 5.73%이다. 그 외 미립자와 방사성옥소의 경우, 미립자의 최대 피폭선

량은 2003년도에 4.19×10^{-4} mSv y^{-1} 이며, 방사성옥소의 최대 피폭선량은 2002년도에 4.10×10^{-3} mSv y^{-1} 이다. 또한, 미립자와 방사성옥소의 10년 평균 피폭선량에서 차지하는 비율은 약 1% 미만이다.

표 5.2와 표 5.4, 그림 5.2를 보면, PHWR 노형인 월성원전에서 발생한 기체 및 액체 유출물에 의한 주변주민 피폭선량 중에 주로 기체유출물을 통해 주변주민 피폭이 발생한 것을 볼 수 있다. 기체 및 액체 유출물에 의한 주변주민 피폭선량 중 가장 큰 비중을 차지한 ^3H 는 10년 평균 피폭선량의 59.52%를 차지하였으며, 피폭선량 값은 3.40×10^{-3} mSv y^{-1} 이다. ^{14}C 의 경우 10년 평균 피폭선량 중 30.53%를 차지하였으며, 피폭선량 값은 기체유출물로 인해 발생한 1.74×10^{-3} mSv y^{-1} 이다.

표 5.3과 표 5.5, 그림 5.3을 보면, PWR 노형인 고리, 한빛, 한울 원전에서 발생한 기체 및 액체 유출물에 주변주민 피폭선량 중 가장 큰 비중을 차지한 ^3H 는 10년 평균 피폭선량의 86.35%를 차지하였으며, 피폭선량은 1.25×10^{-2} mSv y^{-1} 이다. ^{14}C 의 경우 PWR에서 ^{14}C 에 대한 모니터링이 시행되기 전이기 때문에 평가되지 않았다.

2. 2012-2021년(PWR ^{14}C 모니터링 이후) 주변주민 피폭선량 분석

PWR ^{14}C 모니터링 이후의 2012년부터 2021년까지 국내 원전에서 배출된 방사성 유출물에 의한 주변주민 피폭선량을 표 5.6에 나타내었다. 또한, 10년(2012-2021) 평균 피폭선량을 그림 5.4에 도시하였다[13, 20, 28, 47-53]. 각 노형에 따라 PWR과 PHWR의 주변주민 피폭선량을 표 5.7과 표 5.8에 나타내었다. 각 노형에 따른 10년 평균 피폭선량을 표 5.9과 표 5.10에 나타내었고, 그림 5.5와 그림 5.6에 도시하였다 [13, 20, 28, 47-53].

표 5.6 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) 주변주민 피폭선량

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2012	³ H	1.17×10 ⁻²	20.02	1.04×10 ⁻⁴	0.18
	¹⁴ C	4.53×10 ⁻²	77.59	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	6.93×10 ⁻⁴	1.19	_b	_b
	미립자	1.10×10 ⁻⁵	0.02	5.33×10 ⁻⁴	0.91
	방사성옥소	2.50×10 ⁻⁵	0.04	2.64×10 ⁻⁵	0.05
	Total	5.77×10 ⁻²	98.86	6.63×10 ⁻⁴	1.14
2013	³ H	1.05×10 ⁻²	20.65	2.40×10 ⁻⁴	0.47
	¹⁴ C	3.75×10 ⁻²	73.57	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	6.49×10 ⁻⁴	1.27	_b	_b
	미립자	2.29×10 ⁻⁶	<0.01	2.06×10 ⁻³	4.03
	방사성옥소	3.10×10 ⁻⁷	<0.01	4.04×10 ⁻⁷	<0.01
	Total	4.87×10 ⁻²	95.5	2.30×10 ⁻³	4.5
2014	³ H	1.55×10 ⁻²	10.91	7.90×10 ⁻⁵	0.06
	¹⁴ C ^c	1.25×10 ⁻¹	88.18	1.29×10 ⁻⁵	0.01
	불활성기체	6.98×10 ⁻⁴	0.49	_b	_b
	미립자	3.95×10 ⁻⁶	<0.01	3.88×10 ⁻⁴	0.27
	방사성옥소	6.52×10 ⁻⁶	<0.01	1.01×10 ⁻⁴	0.07
	Total	1.41×10 ⁻¹	99.59	5.81×10 ⁻⁴	0.41
2015	³ H	1.26×10 ⁻²	15.54	2.29×10 ⁻⁵	0.01
	¹⁴ C ^c	6.72×10 ⁻²	83.27	1.92×10 ⁻⁶	0.01
	불활성기체	9.00×10 ⁻⁴	1.11	_b	_b
	미립자	1.34×10 ⁻⁸	<0.01	3.20×10 ⁻⁵	0.04
	방사성옥소	3.19×10 ⁻⁶	<0.01	9.43×10 ⁻⁶	0.01
	Total	1.01×10 ⁻¹	99.93	5.69×10 ⁻⁵	0.07
2016	³ H	9.12×10 ⁻³	11.49	4.93×10 ⁻⁵	0.08
	¹⁴ C ^c	6.96×10 ⁻²	87.72	3.64×10 ⁻⁶	<0.01
	불활성기체	5.19×10 ⁻⁴	0.65	_b	_b
	미립자	4.85×10 ⁻⁶	0.01	3.18×10 ⁻⁵	0.05
	방사성옥소	1.97×10 ⁻⁸	<0.01	9.78×10 ⁻⁶	<0.01
	Total	7.92×10 ⁻²	99.87	8.48×10 ⁻⁵	0.13

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2017	³ H	9.38×10 ⁻³	15.04	1.83×10 ⁻⁵	0.03
	¹⁴ C ^c	5.23×10 ⁻²	83.84	1.21×10 ⁻⁴	0.21
	불활성기체	5.01×10 ⁻⁴	0.80	- ^b	- ^b
	미립자	7.82×10 ⁻⁸	<0.01	4.90×10 ⁻⁵	0.08
	방사성옥소	6.38×10 ⁻¹⁰	<0.01	- ^b	- ^b
	Total	6.22×10 ⁻²	99.68	1.88×10 ⁻⁴	0.32
2018	³ H	1.05×10 ⁻²	6.39	2.66×10 ⁻⁵	0.02
	¹⁴ C ^c	1.53×10 ⁻¹	93.33	6.25×10 ⁻⁶	<0.01
	불활성기체	3.47×10 ⁻⁴	0.21	- ^b	- ^b
	미립자	1.26×10 ⁻⁶	<0.01	4.95×10 ⁻⁵	0.04
	방사성옥소	6.25×10 ⁻⁶	<0.01	2.52×10 ⁻⁶	<0.01
	Total	1.64×10 ⁻¹	99.94	8.48×10 ⁻⁵	0.06
2019	³ H	9.27×10 ⁻³	10.58	1.81×10 ⁻⁵	0.03
	¹⁴ C ^c	7.67×10 ⁻²	87.53	6.09×10 ⁻⁴	1.03
	불활성기체	6.57×10 ⁻⁴	0.75	- ^b	- ^b
	미립자	8.60×10 ⁻⁷	<0.01	4.97×10 ⁻⁵	0.08
	방사성옥소	7.22×10 ⁻¹¹	<0.01	- ^b	- ^b
	Total	8.66×10 ⁻²	98.86	6.77×10 ⁻⁴	1.14
2020	³ H	6.95×10 ⁻³	6.03	3.46×10 ⁻⁵	0.03
	¹⁴ C ^c	1.07×10 ⁻¹	92.79	6.14×10 ⁻⁴	0.54
	불활성기체	6.33×10 ⁻⁴	0.55	- ^b	- ^b
	미립자	7.82×10 ⁻⁷	<0.01	7.15×10 ⁻⁵	0.06
	방사성옥소	2.28×10 ⁻⁷	<0.01	1.92×10 ⁻⁹	<0.01
	Total	1.14×10 ⁻¹	99.37	7.20×10 ⁻⁴	0.63
2021	³ H	9.82×10 ⁻³	5.54	4.87×10 ⁻⁵	0.03
	¹⁴ C ^c	1.66×10 ⁻¹	93.79	7.19×10 ⁻⁵	0.04
	불활성기체	9.69×10 ⁻⁴	0.55	- ^b	- ^b
	미립자	7.28×10 ⁻⁸	<0.01	5.70×10 ⁻⁵	0.04
	방사성옥소	1.90×10 ⁻⁵	0.01	1.27×10 ⁻⁶	<0.01
	Total	1.77×10 ⁻¹	99.89	1.79×10 ⁻⁴	0.11

^a Not available

^b 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

^c 2014년 이후 ¹⁴C 액체유출물에 의한 피폭선량은 PHWR인 월성원전의 피폭선량 값임

표 5.7 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) PHWR 노형의 주변주민 피폭선량

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2012	³ H	9.85×10 ⁻³	43.97	3.28×10 ⁻⁵	0.15
	¹⁴ C	1.15×10 ⁻²	51.34	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	6.71×10 ⁻⁴	3.00	- ^b	- ^b
	미립자	4.40×10 ⁻⁷	<0.01	2.58×10 ⁻⁴	1.15
	방사성옥소	- ^b	- ^b	2.61×10 ⁻⁵	0.12
	Total	2.20×10 ⁻²	98.21	3.17×10 ⁻⁴	1.41
2013	³ H	8.37×10 ⁻³	29.27	1.58×10 ⁻⁴	0.55
	¹⁴ C	1.77×10 ⁻²	61.89	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	6.23×10 ⁻⁴	2.18	- ^b	- ^b
	미립자	- ^b	- ^b	1.78×10 ⁻³	6.22
	방사성옥소	- ^b	- ^b	9.41×10 ⁻⁸	<0.01
	Total	2.66×10 ⁻²	93.01	1.94×10 ⁻³	6.78
2014	³ H	1.27×10 ⁻²	12.06	5.71×10 ⁻⁵	0.05
	¹⁴ C	9.16×10 ⁻²	86.95	1.29×10 ⁻⁵	0.01
	불활성기체	6.51×10 ⁻⁴	0.62	- ^b	- ^b
	미립자	- ^b	- ^b	2.77×10 ⁻⁴	0.26
	방사성옥소	- ^b	- ^b	6.77×10 ⁻⁷	<0.01
	Total	1.05×10 ⁻¹	99.67	3.48×10 ⁻⁴	0.33
2015	³ H	1.03×10 ⁻²	23.03	3.04×10 ⁻⁶	0.01
	¹⁴ C	3.35×10 ⁻²	74.89	1.92×10 ⁻⁶	<0.01
	불활성기체	8.67×10 ⁻⁴	1.94	- ^b	- ^b
	미립자	1.95×10 ⁻⁹	<0.01	2.44×10 ⁻⁵	0.05
	방사성옥소	3.16×10 ⁻⁶	0.01	9.43×10 ⁻⁸	<0.01
	Total	4.47×10 ⁻²	99.93	2.95×10 ⁻⁵	0.07
2016	³ H	6.84×10 ⁻³	20.76	2.97×10 ⁻⁶	0.01
	¹⁴ C	2.56×10 ⁻²	77.70	3.64×10 ⁻⁶	0.01
	불활성기체	4.72×10 ⁻⁴	1.43	- ^b	- ^b
	미립자	1.35×10 ⁻⁶	<0.01	2.90×10 ⁻⁵	0.09
	방사성옥소	- ^b	- ^b	9.78×10 ⁻⁸	0.00
	Total	3.29×10 ⁻²	99.89	3.57×10 ⁻⁵	0.11

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2017	³ H	6.16×10 ⁻³	21.93	3.53×10 ⁻⁶	0.01
	¹⁴ C	2.13×10 ⁻²	75.82	1.21×10 ⁻⁴	0.43
	불활성기체	4.71×10 ⁻⁴	1.68	_b	_b
	미립자	7.81×10 ⁻⁸	<0.01	3.65×10 ⁻⁵	0.13
	방사성옥소	_b	_b	_b	_b
	Total	2.79×10 ⁻²	99.43	1.61×10 ⁻⁴	0.57
2018	³ H	7.33×10 ⁻³	18.90	5.25×10 ⁻⁶	0.01
	¹⁴ C	3.11×10 ⁻²	80.17	6.25×10 ⁻⁶	0.02
	불활성기체	3.04×10 ⁻⁴	0.78	_b	_b
	미립자	1.14×10 ⁻⁶	<0.01	4.19×10 ⁻⁵	0.11
	방사성옥소	_b	_b	2.52×10 ⁻⁶	0.01
	Total	3.87×10 ⁻²	99.86	5.59×10 ⁻⁵	0.14
2019	³ H	5.92×10 ⁻³	15.23	4.42×10 ⁻⁶	0.01
	¹⁴ C	3.17×10 ⁻²	81.54	6.09×10 ⁻⁴	1.57
	불활성기체	5.99×10 ⁻⁴	1.54	_b	_b
	미립자	7.60×10 ⁻⁷	<0.01	4.22×10 ⁻⁵	0.11
	방사성옥소	_b	_b	_b	_b
	Total	3.82×10 ⁻²	98.31	6.56×10 ⁻⁴	1.69
2020	³ H	4.52×10 ⁻³	7.21	1.49×10 ⁻⁵	0.02
	¹⁴ C	5.69×10 ⁻²	90.75	6.14×10 ⁻⁴	0.98
	불활성기체	6.03×10 ⁻⁴	0.96	_b	_b
	미립자	_b	_b	4.61×10 ⁻⁵	0.07
	방사성옥소	_b	_b	_b	_b
	Total	6.20×10 ⁻²	98.92	6.75×10 ⁻⁴	1.08
2021	³ H	6.38×10 ⁻³	4.58	1.57×10 ⁻⁵	0.01
	¹⁴ C	1.32×10 ⁻¹	94.69	7.19×10 ⁻⁵	0.05
	불활성기체	8.92×10 ⁻⁴	0.64	_b	_b
	미립자	2.24×10 ⁻⁸	<0.01	4.57×10 ⁻⁵	0.03
	방사성옥소	_b	_b	_b	_b
	Total	1.39×10 ⁻¹	99.90	1.33×10 ⁻⁴	0.10

^a Not available

^b 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

표 5.8 2012-2021년(PWR ^{14}C 모니터링 이후) PWR 노형의 주변주민 피폭선량

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2012	^3H	1.84×10^{-3}	5.11	7.12×10^{-5}	0.20
	^{14}C	3.37×10^{-2}	93.76	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	2.22×10^{-5}	0.06	- ^b	- ^b
	미립자	1.06×10^{-5}	0.03	2.75×10^{-4}	0.76
	방사성옥소	2.49×10^{-5}	0.07	2.46×10^{-7}	<0.01
	Total	3.56×10^{-2}	99.04	3.46×10^{-4}	0.96
2013	^3H	2.17×10^{-3}	9.65	8.18×10^{-5}	0.36
	^{14}C	1.99×10^{-2}	88.65	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	2.52×10^{-5}	0.11	- ^b	- ^b
	미립자	2.29×10^{-6}	0.01	2.74×10^{-4}	1.22
	방사성옥소	3.10×10^{-7}	<0.01	3.10×10^{-7}	<0.01
	Total	2.21×10^{-2}	98.42	3.56×10^{-4}	1.58
2014	^3H	2.89×10^{-3}	9.67	2.23×10^{-5}	0.07
	^{14}C	2.67×10^{-2}	89.36	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	4.73×10^{-5}	0.16	- ^b	- ^b
	미립자	3.95×10^{-6}	0.01	1.11×10^{-4}	0.37
	방사성옥소	6.52×10^{-6}	0.02	1.00×10^{-4}	0.33
	Total	2.96×10^{-2}	99.22	2.33×10^{-4}	0.78
2015	^3H	2.24×10^{-3}	6.21	1.98×10^{-5}	0.06
	^{14}C	3.37×10^{-2}	93.62	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	3.32×10^{-5}	0.09	- ^b	- ^b
	미립자	1.15×10^{-8}	<0.01	7.58×10^{-6}	0.02
	방사성옥소	2.97×10^{-8}	<0.01	- ^b	- ^b
	Total	3.60×10^{-2}	99.92	2.74×10^{-5}	0.08
2016	^3H	2.28×10^{-3}	4.91	4.63×10^{-5}	0.10
	^{14}C	4.40×10^{-2}	94.87	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	4.72×10^{-5}	0.10	- ^b	- ^b
	미립자	3.50×10^{-6}	0.01	2.81×10^{-6}	0.01
	방사성옥소	1.97×10^{-8}	<0.01	- ^b	- ^b
	Total	4.63×10^{-2}	99.89	4.91×10^{-5}	0.11

년도	구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%
2017	³ H	3.22×10 ⁻³	9.40	1.47×10 ⁻⁵	0.04
	¹⁴ C	3.10×10 ⁻²	90.44	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	3.05×10 ⁻⁵	0.09	- ^b	- ^b
	미립자	1.01×10 ⁻¹⁰	<0.01	1.25×10 ⁻⁵	0.04
	방사성옥소	6.38×10 ⁻¹⁰	<0.01	- ^b	- ^b
	Total	3.43×10 ⁻²	99.92	2.72×10 ⁻⁵	0.08
2018	³ H	3.16×10 ⁻³	2.52	2.13×10 ⁻⁵	0.02
	¹⁴ C	1.22×10 ⁻¹	97.42	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	4.26×10 ⁻⁵	0.03	- ^b	- ^b
	미립자	1.20×10 ⁻⁷	<0.01	7.57×10 ⁻⁶	0.01
	방사성옥소	6.25×10 ⁻⁶	<0.01	- ^b	- ^b
	Total	1.25×10 ⁻¹	99.98	2.89×10 ⁻⁵	0.02
2019	³ H	3.35×10 ⁻³	6.92	1.37×10 ⁻⁵	0.03
	¹⁴ C	4.50×10 ⁻²	92.91	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	5.81×10 ⁻⁵	0.12	- ^b	- ^b
	미립자	1.00×10 ⁻⁷	<0.01	7.48×10 ⁻⁶	0.02
	방사성옥소	7.22×10 ⁻¹¹	<0.01	- ^b	- ^b
	Total	4.84×10 ⁻²	99.96	2.12×10 ⁻⁵	0.04
2020	³ H	2.43×10 ⁻³	4.65	1.97×10 ⁻⁵	0.04
	¹⁴ C	4.97×10 ⁻²	95.21	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	2.99×10 ⁻⁵	0.06	- ^b	- ^b
	미립자	7.82×10 ⁻⁷	<0.01	2.54×10 ⁻⁵	0.05
	방사성옥소	2.28×10 ⁻⁷	<0.01	1.92×10 ⁻⁹	<0.01
	Total	5.22×10 ⁻²	99.91	4.51×10 ⁻⁵	0.09
2021	³ H	3.44×10 ⁻³	9.13	3.30×10 ⁻⁵	0.09
	¹⁴ C	3.41×10 ⁻²	90.50	NA ^a	NA ^a
	불활성기체	7.72×10 ⁻⁵	0.21	- ^b	- ^b
	미립자	5.04×10 ⁻⁸	<0.01	1.13×10 ⁻⁵	0.03
	방사성옥소	1.90×10 ⁻⁵	0.05	1.27×10 ⁻⁶	<0.01
	Total	3.76×10 ⁻²	99.88	4.55×10 ⁻⁵	0.12

^a Not available

^b 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

표 5.9 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) PHWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량

구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	Total [mSv y ⁻¹]	%
³ H	7.84×10 ⁻³	14.47	2.98×10 ⁻⁵	0.05	7.87×10 ⁻³	14.52
¹⁴ C	4.53×10 ⁻²	83.60	1.44×10 ⁻⁴	0.27	4.54×10 ⁻²	83.87
불활성기체	6.15×10 ⁻⁴	1.14	- ^a	- ^a	6.15×10 ⁻⁴	1.14
미립자	3.79×10 ⁻⁷	0.00	2.58×10 ⁻⁴	0.48	2.58×10 ⁻⁴	0.48
방사성옥소	3.16×10 ⁻⁷	0.00	2.96×10 ⁻⁶	0.01	3.27×10 ⁻⁶	0.01
Total	5.37×10 ⁻²	99.20	4.35×10 ⁻⁴	0.80	5.42×10 ⁻²	100.00

^a 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

표 5.10 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) PWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량

구분	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	%	Total [mSv y ⁻¹]	%
³ H	2.51×10 ⁻³	5.45	3.16×10 ⁻⁵	0.07	2.81×10 ⁻³	6.09
¹⁴ C	4.32×10 ⁻²	93.67	NA ^a	NA ^a	4.32×10 ⁻²	93.67
불활성기체	3.65×10 ⁻⁵	0.08	- ^b	- ^b	3.65×10 ⁻⁵	0.08
미립자	2.14×10 ⁻⁶	<0.01	7.26×10 ⁻⁵	0.16	5.97×10 ⁻⁵	0.13
방사성옥소	3.83×10 ⁻⁶	0.01	1.01×10 ⁻⁵	0.02	1.39×10 ⁻⁵	0.03
Total	4.57×10 ⁻²	99.22	1.14×10 ⁻⁴	0.25	4.61×10 ⁻²	100.00

^a Not available

^b 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

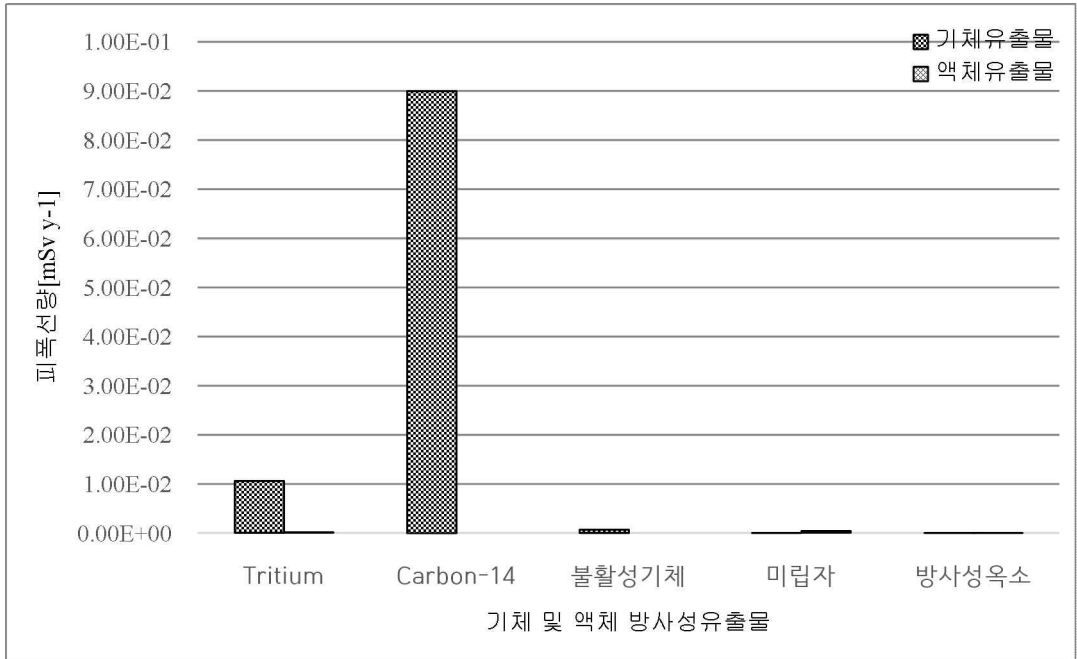


그림 5.4 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이전) 평균 주변주민 피폭선량

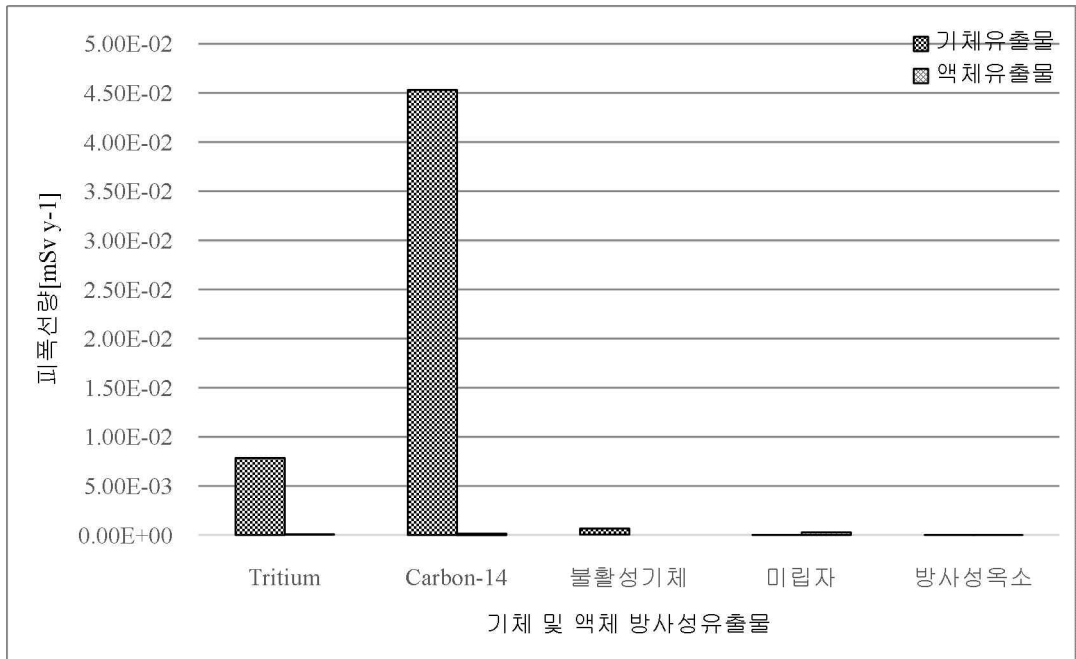


그림 5.5 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) PHWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량

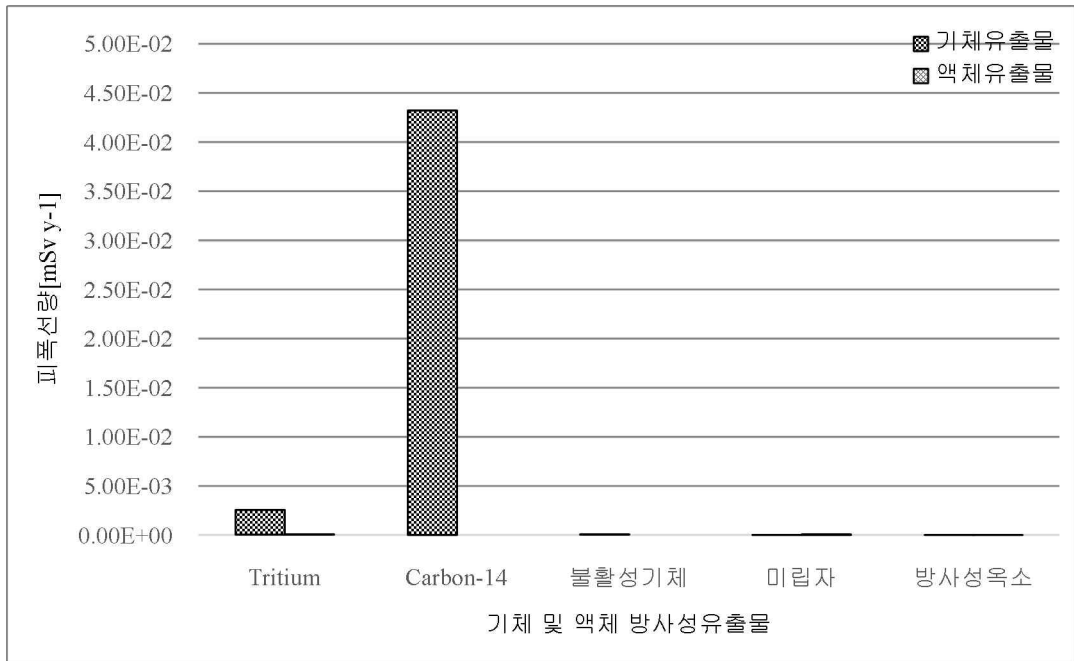


그림 5.6 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후) PWR 노형의 평균 주변주민 피폭선량

표 5.6과 그림 5.4를 보면, PWR ¹⁴C 모니터링 이후 10년(2012-2021) 동안 국내 원전에서 배출된 방사성유출물 중 ¹⁴C이 주변주민에게 피폭에 가장 많은 영향을 끼쳤다. ¹⁴C의 최대 피폭선량은 2021년도에 $1.66 \times 10^{-1} \text{ mSv y}^{-1}$ 이며, 10년 평균 피폭선량의 86.16%를 차지하였다. ³H는 2014년도에 $1.55 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 최대 피폭선량을 보였으며, 10년 평균 피폭선량의 12.22%를 차지하였다. 불활성기체의 경우 최대 피폭선량은 2021년도에 $9.69 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 이며, 10년 평균 피폭선량의 0.76%를 차지하였다. 그 외 미립자와 방사성옥소의 경우, 미립자의 최대 피폭선량은 2012년도에 $1.10 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$ 이며, 방사성옥소의 최대 피폭선량은 2012년도에 $2.50 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 이다. 또한, 미립자와 방사성옥소의 10년 평균 피폭선량의 0.01% 미만을 차지하였다.

표 5.7과 표 5.9, 그림 5.5를 보면, PHWR 노형인 월성원전의 주변주민 피폭선량에서 가장 큰 비중을 차지하는 유출물은 ¹⁴C이다. ¹⁴C 기체유출물로 인한 주변주민

피폭선량은 4.53×10^{-2} mSv y^{-1} 으로 10년 평균 기체유출물 피폭선량의 84.28%를 차지하였고, ^{14}C 액체유출물로 인한 주변주민 피폭선량은 1.44×10^{-4} mSv y^{-1} 으로 10년 평균 액체유출물 피폭선량의 33.13%를 차지하였다. 또한, ^{14}C 의 기체유출물과 액체유출물의 합산 피폭선량은 4.54×10^{-2} mSv y^{-1} 으로 전체 10년 평균 총 피폭선량의 83.87%를 차지하였다. ^3H 의 경우 기체유출물에 의한 피폭선량은 7.84×10^{-3} mSv y^{-1} 으로 10년 평균 기체유출물 피폭선량의 14.58%를 차지하였으며, 액체유출물에 의한 피폭선량은 2.98×10^{-5} mSv y^{-1} 으로 10년 평균 액체유출물 피폭선량의 6.85%를 차지하였다. 액체유출물에서 가장 큰 비중을 차지한 유출물은 미립자로 10년 평균 피폭선량은 2.58×10^{-4} mSv y^{-1} 이며, 10년 평균 피폭선량의 59.35%를 차지하였다. 그 외 나머지 유출물의 피폭선량과 10년 평균 피폭선량의 비중은 ^{14}C 과 ^3H 에 비해 매우 낮게 나왔다.

표 5.8와 표 5.10, 그림 5.6을 보면, PWR 노형인 고리, 새울, 한빛, 한울, 신월성 원전의 주변주민 피폭선량에서 가장 큰 비중을 차지하는 유출물은 ^{14}C 이다. ^{14}C 은 기체유출물로 인한 피폭선량이 4.32×10^{-2} mSv y^{-1} 으로 10년 평균 기체유출물 피폭선량의 94.41%를 차지하였다. ^3H 의 경우 기체유출물로 인한 피폭선량이 2.51×10^{-3} mSv y^{-1} 으로 10년 평균 기체유출물 피폭선량의 5.50%를 차지하였으며, 액체유출물로 인한 피폭선량은 3.16×10^{-5} mSv y^{-1} 으로 10년 평균 액체유출물 피폭선량의 27.69%를 차지하였다. 액체유출물로 인한 피폭선량 중 가장 큰 비중을 차지하는 유출물은 미립자이다. 미립자의 피폭선량은 7.26×10^{-5} mSv y^{-1} 이며, 10년 평균 피폭선량의 63.51%를 차지하였다. 전체 합산 피폭선량에서 가장 큰 비중을 차지한 유출물은 ^{14}C 이며, ^{14}C 에 의한 피폭선량은 4.32×10^{-2} mSv y^{-1} 으로 10년 평균 총 피폭선량의 93.67%를 차지하였다.

3. 종합

국내 원전에서 배출된 방사성유출물에 의한 주변주민의 피폭선량을 분석한 결과, PWR ^{14}C 모니터링이 시행되기 이전의 10년(2002-2011)에서 주변주민의 피폭선량 대부분을 차지하고 있는 유출물은 ^3H 이었으며, PWR ^{14}C 모니터링이 시행된 이후의 10년(2012-2021)에서 주변주민의 피폭선량 대부분을 차지하고 있는 유출물은 ^{14}C 이었다. 각 유출물의 최대 피폭선량과 10년 평균 피폭선량 비율을 살펴보면, PWR ^{14}C 모니터링 이전 ^3H 의 최대 피폭선량은 $2.52 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 이며, 10년 평균 피폭선량의 78.89%를 차지하였다. 그러나 PWR ^{14}C 모니터링이 시행된 이후 ^3H 의 최대 피폭선량은 $1.55 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 이며, 10년 평균 피폭선량의 12.22%를 차지하였다. ^{14}C 의 경우, PWR ^{14}C 모니터링 이전 ^{14}C 의 최대 피폭선량은 $3.27 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 이며, 10년 평균 피폭선량의 8.96%를 차지하였다. 그러나 PWR ^{14}C 모니터링이 시행된 이후 ^{14}C 의 최대 피폭선량은 $1.66 \times 10^{-1} \text{ mSv y}^{-1}$ 이며, 10년 평균 피폭선량의 86.16%를 차지하였다. 불활성기체의 PWR ^{14}C 모니터링 이전의 최대 피폭선량은 $5.57 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 이며, 10년 평균 피폭선량의 5.73%를 차지하였다. PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후 불활성기체의 최대 피폭선량은 $9.69 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 이며, 10년 평균 피폭선량의 0.76%를 차지하였다. 또한, PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전의 미립자와 방사성옥소의 최대 피폭선량은 $4.19 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$ 와 $4.10 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 이며, 10년 평균 피폭선량의 1% 미만을 차지하였다. PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후의 미립자와 방사성옥소의 최대 피폭선량은 $1.10 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$ 와 $2.50 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 이며, 10년 평균 피폭선량의 0.01% 미만을 차지하였다.

^{14}C 에 의한 피폭선량과 연간 일반인 선량한도인 1 mSv와 비교한 결과를 표 5.3에 나타내었다. 표 5.11을 보면, PWR ^{14}C 모니터링 이전인 2011년까지는 월성원전에서 배출된 ^{14}C 으로 인해 10년 평균이 일반인 선량한도의 0.18%에 미치는 것으로 나타났다. PWR ^{14}C 모니터링 이후인 2021년까지는 ^{14}C 에 의한 피폭선량이 10년 평

균 피폭선량이 일반인 선량한도의 9.01%에 미치는 것으로 나타났다. 이를 통해 ^{14}C 에 의한 피폭선량 비중이 점진적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

표 5.11 ^{14}C 의 선량과 연간 일반인 선량한도기준(1 mSv) 비교

구분		피폭선량 비율 (%)	구분		피폭선량 비율 (%)
PWR ^{14}C 모니터링 이전	2002	0.23	PWR ^{14}C 모니터링 이후	2012	4.53
	2003	0.19		2013	3.75
	2004	0.13		2014	12.50
	2005	0.07		2015	6.72
	2006	0.10		2016	6.96
	2007	0.25		2017	5.24
	2008	0.33		2018	15.30
	2009	0.15		2019	7.73
	2010	0.16		2020	10.76
	2011	0.14		2021	16.61
평균	0.18	평균	9.01		

제6장 ^{14}C 배출에 따른 주변주민 피폭선량 및 방사선 환경영향

제1절 방사성유출물 배출량의 PWR ^{14}C 모니터링 전·후 비교 분석

국내 원전에서 배출된 방사성유출물의 PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전과 이후를 비교하였다. 국내에서는 2001년도에 원자력안전위원회 고시 방사선방호등에 관한 기준에 해당 시설을 설계에 적용할 기준으로 ^{14}C 의 선량기준이 포함되었으며, 이에 따라 한국수력원자력에서 환경영향평가 및 ^{14}C 배출량을 조사한 결과 주민피폭선량에 ^{14}C 이 영향을 미치고 있었다. 이후 2009년 ^{14}C 배출 감시 시행계획이 수립되어 2012년 이후 PWR에서도 ^{14}C 모니터링이 시행되었다[46]. 기체유출물의 PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전과 이후 각 10년 평균 차이를 표 6.1과 그림 6.1에 나타내었으며, 액체유출물의 PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전과 이후 각 10년 평균 차이를 표 6.2과 그림 6.2에 나타내었다. 또한, PHWR과 PWR 노형에 따른 기체유출물과 액체유출물의 배출량을 PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전과 이후로 나누어 표 6.3, 표 6.4, 표 6.5, 표 6.6에 나타내었다.

표 6.1 국내 원전의 기체유출물 배출량 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교

구분	기체유출물(PWR, PHWR)			
	PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전 10년 평균 배출량 (2002-2011)		PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이후 10년 평균 배출량 (2012-2021)	
	배출량(Bq)	비율(%)	배출량(Bq)	비율(%)
³ H	8.86×10 ¹³	85.51	3.93×10 ¹³	89.99
¹⁴ C	6.07×10 ¹¹	0.59	7.23×10 ¹¹	1.74
불활성기체	1.44×10 ¹³	13.90	3.68×10 ¹²	8.27
미립자	3.79×10 ⁹	<0.01	1.35×10 ⁷	<0.01
방사성옥소	1.58×10 ⁸	<0.01	5.91×10 ⁶	<0.01
Total	1.04×10 ¹⁴	100.00	4.37×10 ¹³	100.00

표 6.2 PHWR 노형의 기체유출물 배출량 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교

구분	PHWR(월성원전)			
	PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전 10년 평균 배출량 (2002-2011)		PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이후 10년 평균 배출량 (2012-2021)	
	배출량(Bq)	비율(%)	배출량(Bq)	비율(%)
³ H	3.11×10 ¹⁴	88.13	1.10×10 ¹⁴	89.08
¹⁴ C	6.07×10 ¹¹	0.17	1.38×10 ¹²	1.12
불활성기체	4.13×10 ¹³	11.70	1.21×10 ¹³	9.80
미립자	2.83×10 ⁶	<0.01	4.71×10 ⁷	<0.01
방사성옥소	2.22×10 ⁶	<0.01	2.46×10 ⁶	<0.01
Total	3.53×10 ¹⁴	100	1.23×10 ¹⁴	100

표 6.3 PWR 노형의 기체유출물 배출량 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교

구분	PWR(고리, 신월성, 한빛, 한울)			
	PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전 10년 평균 배출량 (2002-2011)		PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이후 10년 평균 배출량 (2012-2021)	
	배출량(Bq)	비율(%)	배출량(Bq)	비율(%)
³ H	1.45×10 ¹³	72.54	1.22×10 ¹³	95.63
¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	4.00×10 ¹¹	3.13
불활성기체	5.47×10 ¹²	27.43	1.58×10 ¹¹	1.24
미립자	5.05×10 ⁹	0.03	1.34×10 ⁷	<0.01
방사성옥소	2.09×10 ⁸	<0.01	5.86×10 ⁷	<0.01
Total	1.99×10 ¹³	100	1.28×10 ¹³	100.0

^a Not available

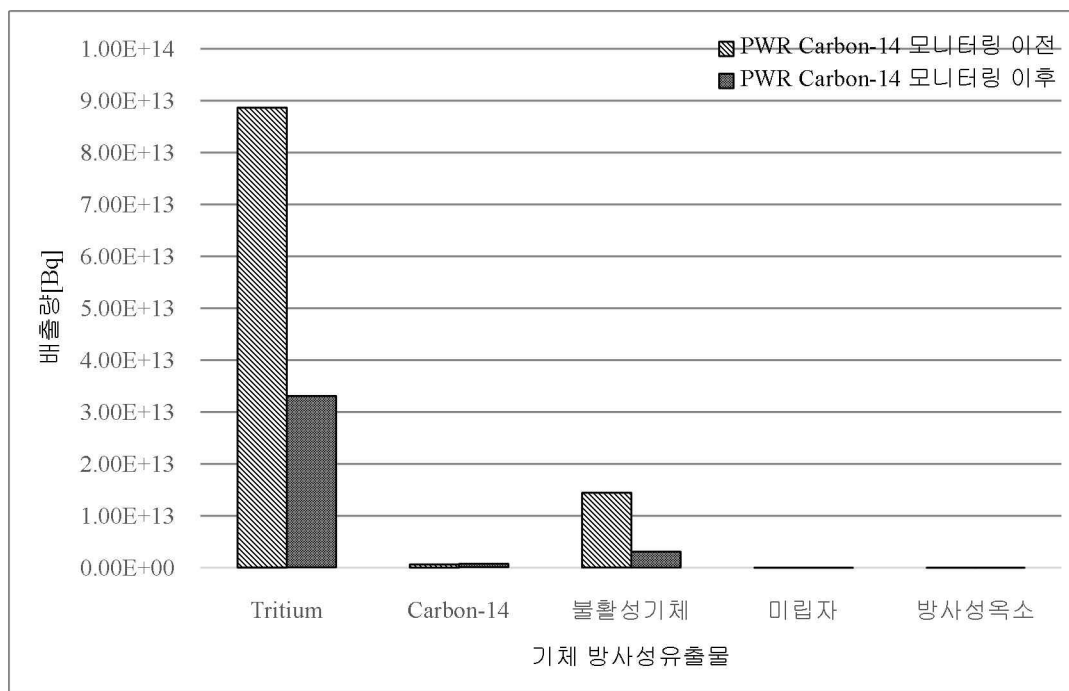


그림 6.1 기체유출물 배출량의 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교

기체유출물의 배출량을 비교한 표 6.1과 그림 6.1을 보면, ^3H 의 PWR ^{14}C 모니터링 이전(2002-2012) 배출량은 8.86×10^{13} Bq이며, PWR ^{14}C 모니터링 이후(2012-2021) 배출량은 3.93×10^{13} Bq이다. ^3H 의 배출량은 PWR ^{14}C 모니터링 이전 10년 평균 배출량보다 4.93×10^{13} Bq 감소하였다. ^{14}C 의 배출량은 PWR ^{14}C 모니터링 이전 10년 평균 배출량은 6.07×10^{11} Bq 이었으며, PWR ^{14}C 모니터링 이후 10년 평균 배출량은 7.23×10^{11} Bq로 전보다 약 1.16×10^{11} Bq이 증가하였다. 불활성기체의 경우, PWR ^{14}C 모니터링 이전 10년 평균 배출량은 1.44×10^{13} Bq 이었으며, PWR ^{14}C 모니터링 이후 10년 평균 배출량은 3.68×10^{12} Bq로 1.07×10^{13} Bq 감소하였다. 그 외 미립자와 방사성옥소의 경우, 미립자는 PWR ^{14}C 모니터링 이전보다 3.78×10^9 Bq 감소하였으며, 방사성옥소는 1.52×10^8 Bq 감소하였다.

표 6.4 국내 원전의 액체유출물 배출량 PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교

구분	액체유출물			
	PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전 10년 평균 배출량 (2002-2011)		PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후 10년 평균 배출량 (2012-2021)	
	배출량(Bq)	비율(%)	배출량(Bq)	비율(%)
^3H	5.41×10^{13}	100	5.10×10^{13}	99.99
^{14}C	NA ^a	NA ^a	2.08×10^{10}	0.01
불활성기체	2.75×10^7	<0.01	7.52×10^5	<0.01
미립자	1.84×10^9	<0.01	4.05×10^8	<0.01
방사성옥소	1.82×10^6	<0.01	1.18×10^6	<0.01
Total	5.41×10^{13}	100.00	5.10×10^{13}	100.00

^a Not available

표 65 PHWR 노형의 액체유출물 배출량 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교

구분	PHWR(월성)			
	PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전 10년 평균 배출량 (2002-2011)		PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이후 10년 평균 배출량 (2012-2021)	
	배출량(Bq)	비율(%)	배출량(Bq)	비율(%)
³ H	8.69×10 ¹³	100	4.91×10 ¹³	99.96
¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	2.08×10 ¹⁰	0.04
불활성기체	7.40×10 ⁴	<0.01	2.27×10 ⁵	<0.01
미립자	8.15×10 ⁸	<0.01	6.89×10 ⁸	<0.01
방사성옥소	2.10×10 ⁴	<0.01	4.58×10 ⁶	<0.01
Total	8.69×10 ¹³	100	4.91×10 ¹³	100.00

^a Not available

표 66 PWR 노형의 액체유출물 배출량 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교

구분	PWR(고리, 신월성, 한빛, 한울)			
	PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이전 10년 평균 배출량 (2002-2011)		PWR ¹⁴ C 모니터링 시행 이후 10년 평균 배출량 (2012-2021)	
	배출량(Bq)	비율(%)	배출량(Bq)	비율(%)
³ H	4.31×10 ¹³	99.99	4.13×10 ¹³	100.00
¹⁴ C	NA ^a	NA ^a	NA ^a	NA ^a
불활성기체	3.65×10 ⁷	<0.01	7.28×10 ⁵	<0.01
미립자	2.18×10 ⁸	0.01	2.67×10 ⁸	<0.01
방사성옥소	2.42×10 ⁶	<0.01	4.03×10 ⁴	<0.01
Total	4.31×10 ¹³	100	4.13×10 ¹³	100.00

^a Not available

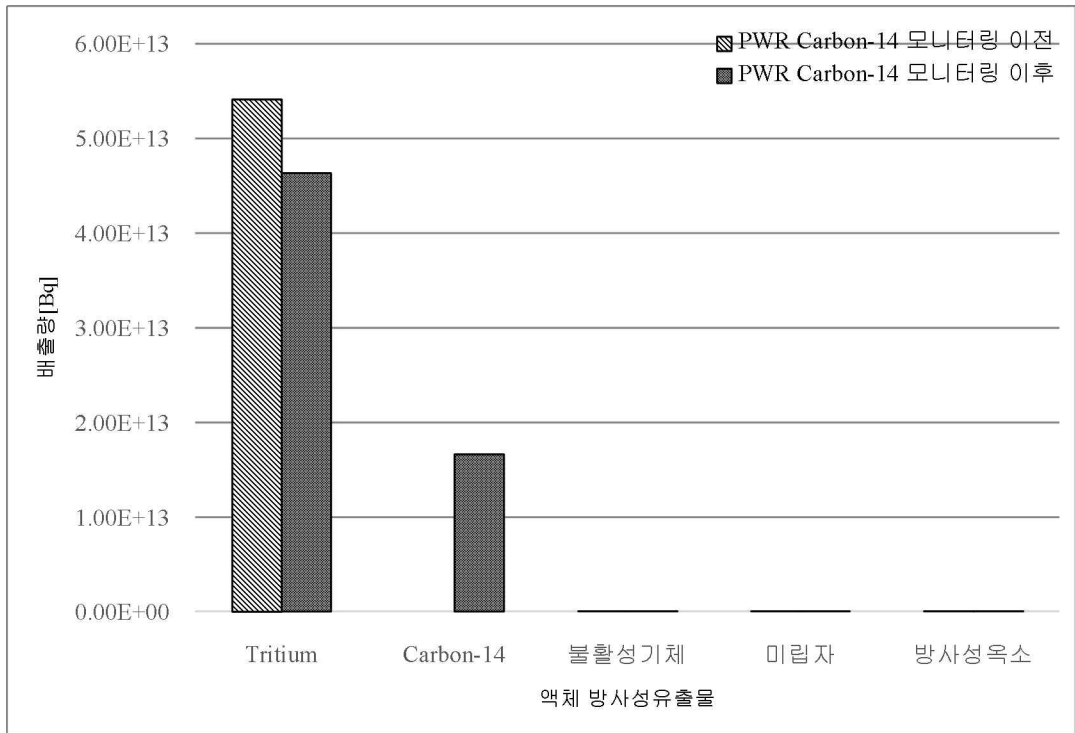


그림 6.2 액체유출물 배출량의 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 평균 비교

액체유출물의 배출량을 비교한 표 6.4과 그림 6.2를 보면, 액체유출물에서 ³H의 배출량은 PWR ¹⁴C 모니터링 이전 배출량 5.41×10^{13} Bq에서, PWR ¹⁴C 모니터링 이후 배출량 5.10×10^{13} Bq로 3.10×10^{12} Bq 감소하였다. 또한, ¹⁴C의 경우 2012년 이전에는 모니터링을 PHWR 노형에서만 진행하였기 때문에 정확한 배출량을 알 수 없어서 ¹⁴C 배출량을 비교하는 것은 불가능하였다. 그 외 액체유출물에서 불활성기체는 PWR ¹⁴C 모니터링 이전 배출량보다 2.67×10^7 Bq 감소하였으며, 미립자는 1.44×10^9 Bq, 방사성옥소는 6.40×10^5 Bq 감소하였다.

PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전과 이후의 국내 원전에서 배출된 기체 및 액체 유출물의 배출량을 종합적으로 분석한 결과, 기체유출물의 경우 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전 10년 평균 배출량이 1.04×10^{14} Bq이었으며, PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이후 총 배출량이 4.37×10^{13} Bq로 감소한 것을 확인할 수 있었다. 각 유출물의 배출

량을 살펴볼 때 ^{14}C 을 제외한 ^3H , 불활성기체, 미립자, 방사성옥소의 배출량이 감소하였지만, ^{14}C 의 배출량은 6.07×10^{11} Bq에서 7.23×10^{11} Bq로 소량 증가하였음을 확인하였다. 액체유출물의 경우, PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전 10년 평균 배출량이 5.41×10^{13} Bq이었으며, PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후 10년 평균 배출량이 5.10×10^{13} Bq로 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전에는 ^{14}C 배출량이 평가되지 않았지만, PHWR 노형인 월성원전에서 액체유출물에서 ^{14}C 배출량이 평가되어 2014년 이후 꾸준히 배출되고 있었다. ^{14}C 을 제외한 ^3H , 불활성기체, 미립자, 방사성옥소의 액체유출물 배출량은 감소하였지만, ^{14}C 배출량은 2014년 이후 평가되어 2021년까지 평균 2.08×10^{10} Bq이 배출되었다. 또한, PWR 노형과 PWR 노형의 기체유출물과 액체유출물의 PWR ^{14}C 모니터링 이전과 이후의 각 10년 평균 배출량을 비교한 결과, PWR 노형인 월성원전의 기체유출물 배출량 변화는 3.53×10^{14} Bq에서 1.23×10^{14} Bq로 소량 감소함을 확인할 수 있었으며, ^{14}C 과 미립자는 소량 증가하였고, 그 외 ^3H , 불활성기체, 방사성옥소의 배출량은 소량 감소했음을 확인하였다. PWR 노형의 경우, 2012년 이후 ^{14}C 모니터링을 시행하였기 때문에 ^{14}C 배출량 변화는 알 수 없지만, 전체 평균 배출량은 1.99×10^{13} Bq에서 1.28×10^{13} Bq로 소량 감소했음을 확인하였다. ^{14}C 의 PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후 10년 평균 배출량은 4.00×10^{11} Bq로 10년 평균 배출량의 3.13%를 차지하였다.

제2절 주변주민 피폭선량 PWR ¹⁴C 모니터링 전·후 비교 분석

국내 원전에서 배출된 방사성유출물로 인해 주변주민이 피폭될 가능성이 있기 때문에 이를 관리하기 위하여 한국수력원자력(주)은 매년 방사성유출물에 의한 주변주민 피폭선량을 계산하여 기록하고 있다. 본 절에서는 방사성유출물에 의한 주변주민 피폭선량을 PWR ¹⁴C 모니터링 이전(2002-2011)과 이후(2012-2021)로 나누어 분석한 결과를 비교하였으며, 이를 표 6.7과 그림 6.3, 그림 6.4에 나타내었다. 또한, PHWR과 PWR 노형에 따른 PWR ¹⁴C 모니터링 이전과 이후의 주변주민 피폭선량을 표 6.8과 표 6.9에 나타내었다.

표 6.7 국내 원전의 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 주변주민 피폭선량 비교

구분	PWR ¹⁴ C 모니터링 이전 10년 평균 피폭선량 (2002-2011)			PWR ¹⁴ C 모니터링 이후 10년 평균 피폭선량 (2012-2021)		
	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	비율 (%)	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	비율 (%)
³ H	1.52×10 ⁻²	1.05×10 ⁻⁴	78.2	1.05×10 ⁻²	6.42×10 ⁻⁵	10.4
¹⁴ C	1.74×10 ⁻³	NA ^a	8.9	9.00×10 ⁻²	1.44×10 ⁻⁴	88.6
불활상기체	1.42×10 ⁻³	4.91×10 ⁻¹¹	7.3	6.57×10 ⁻⁴	- ^b	0.6
미립자	1.11×10 ⁻⁴	5.38×10 ⁻⁴	3.3	2.52×10 ⁻⁶	3.32×10 ⁻⁴	0.3
방사성옥소	4.47×10 ⁻⁴	1.54×10 ⁻⁶	2.3	6.05×10 ⁻⁶	1.32×10 ⁻⁵	0.1
Total	1.89×10 ⁻²	6.45×10 ⁻⁴	100.0	1.01×10 ⁻¹	4.09×10 ⁻⁴	100.0

^a Not available

^b 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

표 6.8 PHWR 노형의 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 주변주민 피폭선량 비교

구분	PHWR(월성원전)					
	PWR ¹⁴ C 모니터링 이전 10년 평균 피폭선량 (2002-2011)			PWR ¹⁴ C 모니터링 이후 10년 평균 피폭선량 (2012-2021)		
	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	비율 (%)	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	비율 (%)
³ H	3.34×10 ⁻³	5.87×10 ⁻⁵	59.52	7.84×10 ⁻³	2.98×10 ⁻⁵	14.52
¹⁴ C	1.74×10 ⁻³	NA ^a	30.53	4.53×10 ⁻²	1.44×10 ⁻⁴	83.87
불활상체	2.49×10 ⁻⁴	4.19×10 ⁻¹⁴	4.37	6.15×10 ⁻⁴	- ^b	1.14
미립자	1.87×10 ⁻⁷	3.18×10 ⁻⁴	5.57	3.79×10 ⁻⁷	2.58×10 ⁻⁴	0.48
방사성우소	5.79×10 ⁻⁷	4.14×10 ⁻⁹	0.01	3.16×10 ⁻⁷	2.96×10 ⁻⁶	0.01
Total	5.33×10 ⁻³	3.77×10 ⁻⁴	100.0	5.37×10 ⁻²	4.35×10 ⁻⁴	100.0

^a Not available

^b 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

표 6.9 PWR 노형의 PWR ¹⁴C 모니터링 시행 이전·이후 각 10년 주변주민 피폭선량 비교

구분	PWR(고리 ^a , 신월성, 한빛, 한울)					
	PWR ¹⁴ C 모니터링 이전 10년 평균 피폭선량 (2002-2011)			PWR ¹⁴ C 모니터링 이후 10년 평균 피폭선량 (2012-2021)		
	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	비율 (%)	기체유출물 [mSv y ⁻¹]	액체유출물 [mSv y ⁻¹]	비율 (%)
³ H	1.25×10 ⁻²	4.96×10 ⁻⁵	86.35	2.51×10 ⁻³	3.16×10 ⁻⁵	6.09
¹⁴ C	NA ^b	NA ^b	NA ^b	4.32×10 ⁻²	NA ^b	98.67
불활상체	1.19×10 ⁻³	4.90×10 ⁻¹¹	8.19	3.65×10 ⁻⁵	- ^c	0.08
미립자	1.10×10 ⁻⁴	2.30×10 ⁻⁴	2.34	2.14×10 ⁻⁶	7.26×10 ⁻⁵	0.13
방사성우소	4.50×10 ⁻⁴	2.43×10 ⁻⁶	3.11	3.83×10 ⁻⁶	1.01×10 ⁻⁵	0.03
Total	1.42×10 ⁻²	2.82×10 ⁻⁴	100.0	4.57×10 ⁻²	1.14×10 ⁻⁴	100.0

^a 고리원전은 새울원전과 함께 피폭선량을 진행 중임

^b Not available

^c 최소검출한계(Lower limit detection: LLD) 미만

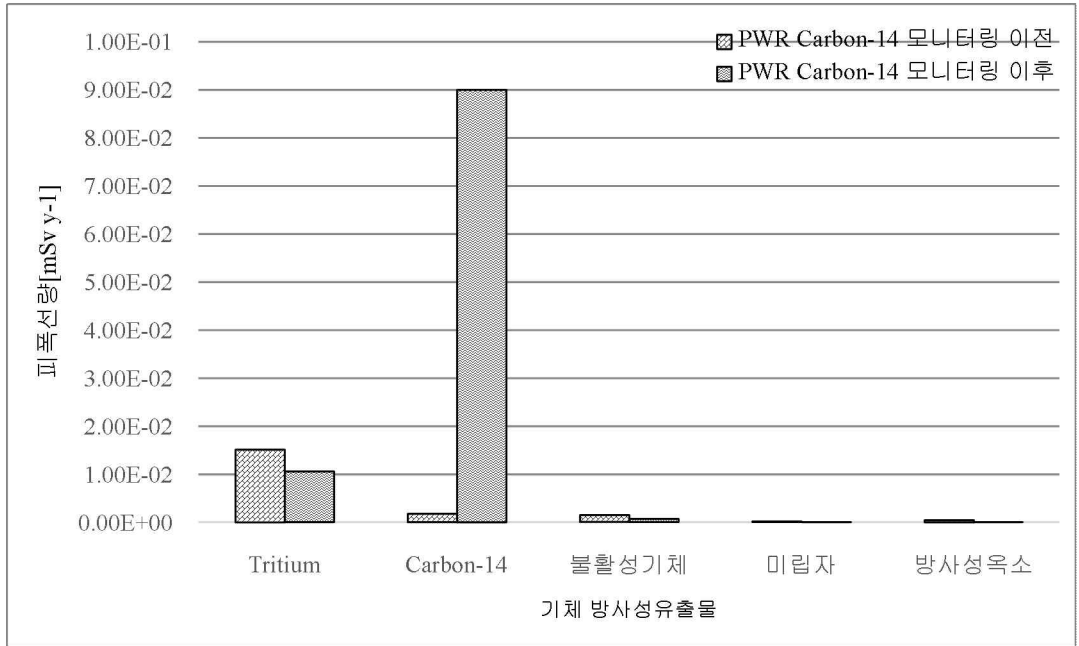


그림 6.3 PWR ¹⁴C 모니터링 이전·이후의 기체유출물에 의한 주변주민 피폭선량 비교

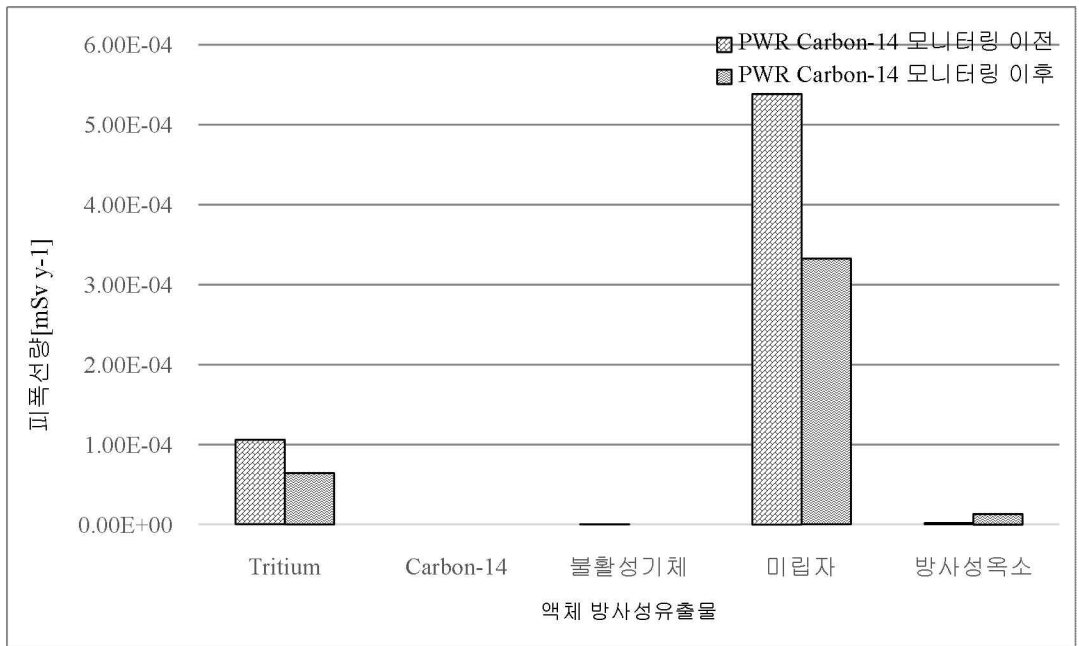


그림 6.4 PWR ¹⁴C 모니터링 이전·이후의 액체유출물에 의한 주변주민 피폭선량 비교

표 6.7과 그림 6.3을 보면, PWR ^{14}C 모니터링 이전과 이후의 기체유출물에 의한 주변주민 피폭선량 중 ^3H 에 의한 10년 평균 주변주민 피폭선량은 $1.52 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 에서 $1.05 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 $4.70 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 감소하였다. 또한, 불활성기체, 방사성옥소, 미립자의 피폭선량도 각각 $7.63 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$, $1.08 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$, $4.41 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 감소하였다. 그러나 ^{14}C 의 경우, PWR ^{14}C 모니터링 이전(2002-2011)에는 $1.74 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 이었지만, PWR ^{14}C 모니터링 이후(2012-2021) $9.00 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 $8.83 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 이 증가한 것을 확인할 수 있었다.

표 6.7과 그림 6.4를 보면, PWR ^{14}C 모니터링 이전과 이후의 액체유출물에 의한 주변주민 피폭선량 중 ^3H 에 의한 10년 평균 주변주민 피폭선량은 $1.05 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$ 에서 $6.42 \times 10^{-5} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 $4.08 \times 10^{-5} \text{ mSv y}^{-1}$ 이 감소하였으며, 미립자는 $5.38 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$ 에서 $3.32 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 $2.06 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$ 이 감소하였다. 방사성옥소의 경우, $1.54 \times 10^{-6} \text{ mSv y}^{-1}$ 에서 $1.32 \times 10^{-5} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 $1.67 \times 10^{-5} \text{ mSv y}^{-1}$ 이 증가하였다. 액체유출물에 의한 ^{14}C 의 주변주민 피폭선량의 변화량은 PWR ^{14}C 모니터링 이전에는 액체유출물의 배출량에 기재되어 있지 않아 피폭선량을 알 수 없었으며, PWR ^{14}C 모니터링 이후에는 월성본부에서만 ^{14}C 배출량이 기재되어 있어서 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량의 변화량이 확인되지 않았다.

PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전과 이후의 원전 주변주민 피폭선량의 변화를 종합적으로 분석한 결과 기체유출물에 의한 PWR ^{14}C 모니터링 시행 이전의 주변주민 피폭선량은 $1.89 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 이었으며, PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후의 주변주민 피폭선량은 $1.01 \times 10^{-1} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 약 6배가 증가하였다. 그러나 액체유출물에 의한 주변주민 피폭선량은 10년 평균 $6.45 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$ 에서 $4.09 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 1.5배 감소하였다. 또한, 주변주민 피폭선량에서 가장 큰 비중을 차지하는 유출물은 ^{14}C 이며, PWR ^{14}C 모니터링 이후 주변주민 피폭선량은 $9.00 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 10년 평균 피폭선량의 88.6%를 차지하였다.

표 6.8을 보면, PHWR 노형인 월성원전에서 PWR ^{14}C 모니터링 이전과 이후의

각각 10년 동안의 주변주민 피폭선량 중 가장 큰 변화를 보인 유출물은 ^{14}C 이다. ^{14}C 은 PWR ^{14}C 모니터링 이전 $1.74 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 에서 PWR ^{14}C 모니터링 이후 $4.53 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 26배가 증가하였다. 또한, PWR ^{14}C 모니터링 이전 액체유출물에 의한 피폭선량은 평가되지 않았지만, 2014년 이후 액체유출물의 배출량이 평가되면서 액체유출물에 의한 피폭선량이 평가되었다. PWR ^{14}C 모니터링 이후 액체유출물에 의한 피폭선량은 $1.44 \times 10^{-4} \text{ mSv y}^{-1}$ 이다. 그 외 다른 유출물인 ^3H , 불활성기체, 미립자, 방사성옥소의 경우 기체유출물과 액체유출물에 의한 주변주민 피폭선량은 소량 증가하거나 감소함을 확인하였다.

표 6.9를 보면, PWR 노형인 고리, 새울, 한빛, 한울 원전의 PWR ^{14}C 모니터링 이전과 이후의 각각 10년 동안의 평균 주변주민 피폭선량 중 가장 큰 변화를 보인 유출물은 ^{14}C 이다. ^{14}C 은 PWR ^{14}C 모니터링 이전에는 평가되지 않아 값을 알 수 없었다. PWR ^{14}C 모니터링 이후의 10년 평균 주변주민 피폭선량은 $4.32 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 기체 및 액체 유출물에 의한 피폭선량 중 93.67%를 차지하였다. PWR ^{14}C 모니터링 이전 10년 평균 주변주민 피폭선량 중 ^3H 에 의한 피폭선량이 86.35%로 가장 큰 비중을 차지하였지만, ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량이 평가된 이후 ^3H 가 차지하는 비중은 6.09%로 약 14배 감소하였다. 그 외 다른 유출물에 의한 주변주민 피폭선량은 모두 감소하였다.

제3절 PWR ^{14}C 모니터링의 중요성

국내 원자력발전소에서는 2012년 이후 PWR에서 ^{14}C 모니터링을 시행하였다. 2012년 이전 PWR에서 ^{14}C 모니터링 시행하지 않았던 이유는 ^{14}C 이 자연상에서 높은 준위의 백그라운드를 형성하고 있었으며, 원전에서 ^{14}C 이 배출되더라도 환경이나 일반인의 피폭선량에 미치는 영향이 미미하다고 판단하였기 때문이다. 또한, 원전 운영 초기에 ^3H 와 ^{14}C 같은 저준위 베타방사성물질에 의한 주변주민 피폭선량의 기여가 낮게 나타났기 때문이다[9, 10]. 그러나 2009년 이후 미국 원자력규제위원회(NRC)는 방사성유출물 관리기준인 Regulatory Guide 1.21 개정판에서 ^{14}C 모니터링에 대한 원자로시설 운영자의 자발적인 평가결과를 바탕으로 모니터링 여부를 결정하도록 유도하도록 하였다[9, 12]. 이에 따라 국내 원전에서도 PWR에서의 ^{14}C 모니터링에 대한 시행계획이 수립되었다[46]. 2009년 이전 국내 원자력발전소에서는 PHWR 원전인 월성원전에서만 ^{14}C 에 대한 모니터링을 시행하고 있었으며, 2009년 이후 PWR 원전에 대해서도 ^{14}C 에 대한 모니터링을 시행하도록 준비하여 2012년 이후 PWR 원전에서도 ^{14}C 모니터링이 시행되었다[46].

PWR ^{14}C 모니터링이 시행되기 이전인 2002년부터 2011년까지의 주변주민 피폭선량 계산 결과를 보면, ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량은 ^3H 보다 낮게 평가되었다. 그러나 2012년 이후 PWR에서 ^{14}C 모니터링이 시행된 후에는 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량은 ^3H 보다 약 9배 높은 것으로 확인되었다. PWR에서 ^{14}C 모니터링이 시행되기 이전의 10년간 평균 피폭선량은 월성원전에서 평가된 $1.74 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 이었으며, PWR에서 ^{14}C 모니터링 시행 이후의 10년간의 평균 피폭선량은 $9.00 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 약 90배 높게 평가된 것을 확인할 수 있었다. 또한, PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후의 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량을 확인한 결과 2012년 이후 점진적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 이를 그림 6.5에 도시하였다. 그림 6.5를 보면, 2012년 이후 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량은 2012년에 $4.53 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 으

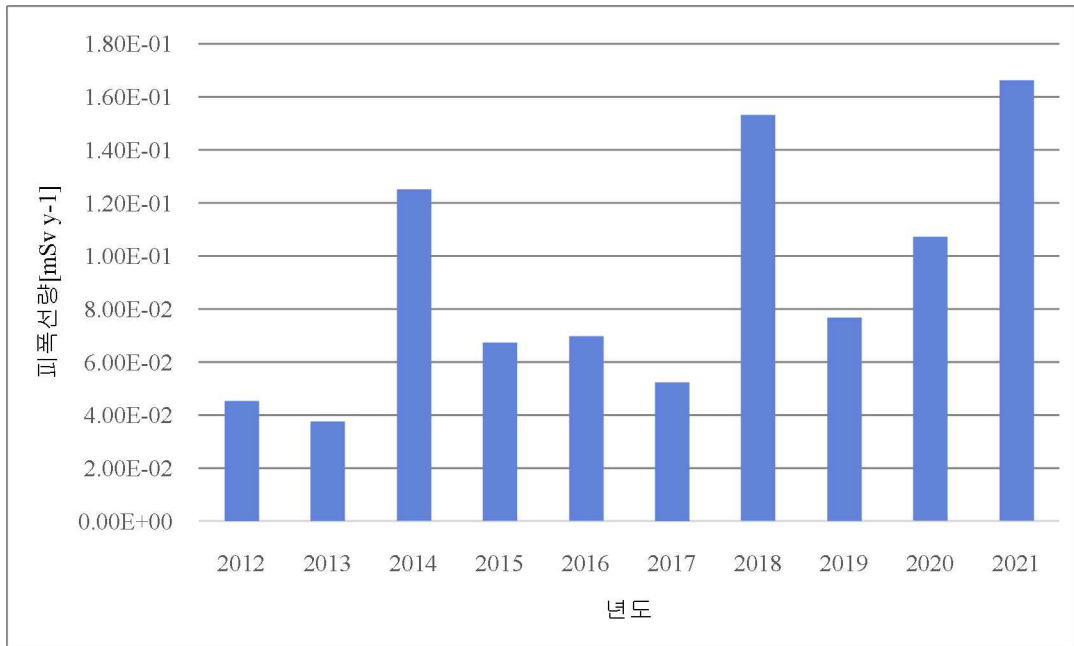


그림6.5 2012-2021년(PWR ¹⁴C 모니터링 이후)의 ¹⁴C에 의한 주변주민 피폭선량

로 가장 낮은 값을 보였으며, 2021년에 $1.66 \times 10^{-1} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 가장 높은 값을 보였다. 또한, 2021년 값인 $1.66 \times 10^{-1} \text{ mSv y}^{-1}$ 은 연간 일반인 선량한도인 1 mSv보다 현저히 낮은 값으로 원전에서 배출되는 ¹⁴C에 의한 주변주민 피폭선량은 잘 관리되고 있음을 확인하였다[13, 20, 28, 47-53]. 그러나 원전에서의 ¹⁴C 배출은 점진적으로 증가하고 있기 때문에 ¹⁴C에 대한 모니터링은 중요하다고 판단된다. 또한, 국내에서 원전을 추가로 건설하고 운전할 시 ¹⁴C 배출에 의한 주변주민 피폭선량이 증가할 우려가 있기에 국내 모든 원전에서 ¹⁴C 모니터링을 지속적으로 시행하여, ¹⁴C 배출량 관리가 필요할 것으로 판단된다.

제4절 주변주민 선량감소를 위한 ^{14}C 배출저감 연구개발 필요성 제기

국내 원전에서는 방사성 기체 및 액체 유출물을 환경으로 배출하고 있으며, 방사성유출물에는 다양한 방사성핵종이 포함되어 있기에 이를 관리하여 배출 중이다 [1]. 앞선 절에서 언급한 바와 같이 현재 국내 원전에서 배출되는 방사성 유출물 중 가장 많은 양이 배출된 핵종은 ^3H 로 배출량의 약 85% 이상을 차지하고 있다. 이에 반해 국내 원전에서 배출된 방사성유출물에 의한 주변주민 피폭선량을 분석한 결과 주변주민 피폭선량에 가장 많은 영향을 미치는 핵종은 ^{14}C 이다. ^{14}C 은 배출량에서 평균 1.74%를 차지하고 있지만, 주변주민 피폭선량의 평균 88.6%를 차지한다. 또한, ^{14}C 배출량은 PWR ^{14}C 모니터링이 시행되기 이전에는 배출량 평가가 PHWR 노형인 월성원전에서만 이뤄지고 있었으며, 2012년 이후 국내 모든 원전에서 PWR ^{14}C 모니터링이 시행되었다. 이에 더해서 국내 원전은 앞으로 추가 건설될 가능성이 있으며, ^{14}C 의 배출과 주변주민 피폭선량은 PWR에서 ^{14}C 모니터링이 시행된 2012년 이후 점진적으로 증가하고 있다[13, 20, 28, 47-53]. 이러한 이유로 모든 원전에서 지속적인 PWR ^{14}C 모니터링과 ^{14}C 배출량 및 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량 저감을 위한 연구는 필요할 것으로 판단된다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 ^{14}C 저감을 위한 연구의 필요성이 있지만, 국내에서는 명확한 ^{14}C 배출량 저감 및 주변주민 피폭선량 저감을 위한 연구가 활발히 이뤄지지 않고 있다. ^{14}C 배출량 저감과 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량 저감 연구에 관한 연구를 조사한 결과, 연구 및 개발의 필요성을 말하는 논문과 보고서가 있었지만, 실질적인 연구나 개발이 진행되지 않았다. 특히, PHWR 노형인 월성원전의 ^{14}C 저감방안에 대해 논문과 보고서가 몇몇 작성되었지만, PWR의 ^{14}C 저감방안에 관한 연구와 개발은 매우 적은 것으로 조사되었다. 국내 원전에서 배출된 ^{14}C 의 배출량은 PHWR 노형이 가장 많

왔지만, PWR 노형 또한 ^{14}C 의 배출량이 점진적으로 증가하고 있기에 ^{14}C 배출 저감과 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량 저감을 위한 연구와 개발이 이뤄져야 한다고 판단된다.

제7장 결론

원전 운영으로 인해 발생된 방사성유출물은 환경으로 배출된다. 방사성유출물은 발생원 또는 물리적 상태에 따라 기체유출물과 액체유출물로 분류된다. 방사성유출물의 배출은 원자로시설의 운영과정에서 수반되는 일상적인 행위이다. 이러한 방사성유출물 배출은 방사성유출물 관리를 통해 배출된다. 방사성유출물 관리란, 방사성유출물 내에 존재하는 방사성물질의 감시 및 통제를 위한 일련의 행위를 포괄적으로 이르는 말이다. 방사성유출물 관리는 지속적으로 대중의 관심 대상이 되고 있다. 방사성유출물의 관리는 방사능농도, 일반인 선량, 배출총량(방사능량) 3가지로 이뤄지며, 관계 법령과 고시에서 이를 정하고 있다. 원전에서 배출되는 방사성유출물 중 원전 주변주민 피폭선량에 중요한 핵종은 ^{60}Co , ^{58}Co , ^{137}Cs , ^{131}I , ^3H , ^{14}C 등이다. 이 중 ^{14}C 은 순수 베타방출체로서 원전 주변주민 피폭선량 평가에서 큰 관심의 대상이다. ^{14}C 은 반감기가 5,730년이며, 우주선 등의 자연적인 생성 요인과 핵실험, 원전에서의 발생과 같은 인위적인 발생 요인에 의해 발생한다. 자연적 또는 인위적으로 생성된 ^{14}C 은 대기 중에서 ^{14}CO , $^{14}\text{CO}_2$, ^{14}C -Hydrocarbon 3가지 형태로 존재한다. 이렇게 환경에 존재하는 ^{14}C 은 지상 및 수중 경로를 통해 일반인에게 흡입되거나 섭취된다. 원전에서 발생하는 ^{14}C 은 노형에 따라 발생량과 발생 메커니즘이 다르다. PWR의 경우 핵연료, 노심 구조물질, 냉각재에서 발생하며, PHWR의 경우 중수를 사용하는 감속재, 냉각재 계통, 환형기체 계통, 핵연료에서 발생한다. 또한, PHWR은 PWR과는 다르게 감속재와 냉각재를 중수로 사용하여 $^{17}\text{O}(n, p)^{14}\text{C}$ 반응에 의해 PWR보다 ^{14}C 발생량이 약 40배 정도 더 많다. 이에 따라 PHWR에서는 ^{14}C 이 PWR보다 약 2-3배 더 많이 배출된다.

국내 원전에서 배출된 방사성유출물은 다양한 방사성핵종들을 포함하고 있으며, 한국수력원자력(주)은 이를 관리하여 배출하고 있다. 국내 원전에서는 ^{14}C 에 대한

모니터링을 2012년 이전에는 PHWR에서만 시행하였으며, PWR에서의 ^{14}C 모니터링은 2012년 이후 시행하였다. 2012년에는 계산을 통해 간접법으로 ^{14}C 모니터링을 시행하였고, 2013년에 직접측정에 의한 직접법으로 ^{14}C 모니터링을 시행하였다. PWR ^{14}C 모니터링 이전의 원전에서 배출된 기체유출물의 배출량을 살펴보면, PWR과 PHWR에서 가장 많이 배출된 기체유출물은 ^3H 로 전체 배출량의 85.51%를 차지하고 있었다. 또한, PHWR에서 배출된 ^{14}C 의 경우 10년 평균 배출량의 0.17%를 차지하고 있었다. 이는 국내 모든 원전에서 배출된 기체유출물의 10년 평균 배출량 0.59%이다. PWR에서의 기체유출물 배출량은 ^3H 가 72.54%로 가장 많은 배출량을 차지하고 있었으며, ^{14}C 의 배출량은 평가되지 않아 알 수 없었다. PWR ^{14}C 모니터링 이후의 원전에서 배출된 기체유출물의 배출량을 살펴보면, PWR과 PHWR에서 가장 많이 배출된 기체유출물은 PWR ^{14}C 모니터링 이전과 동일한 ^3H 다. ^3H 의 10년 평균 배출량은 3.93×10^{13} Bq로 전체 배출량의 89.99%를 차지하였다. ^{14}C 의 경우 10년 평균 배출량의 1.74%를 차지하였다. PHWR에서만 배출된 ^{14}C 은 PWR ^{14}C 모니터링 이전보다 약 2배 정도 증가한 1.38×10^{12} Bq이었으며, 10년 평균 배출량의 1.12%를 차지하였다. PWR에서만 배출된 ^{14}C 은 10년 평균 4.00×10^{11} Bq이 배출되었으며 10년 평균 배출량의 3.13%를 차지하였다. 국내 원전에서 배출된 액체유출물의 배출량을 PWR ^{14}C 모니터링 이전과 이후를 살펴보면, PWR ^{14}C 모니터링 이전과 이후에서 가장 많은 배출량을 차지한 유출물은 ^3H 로 약 99% 이상을 차지한다. ^{14}C 의 경우 PWR과 PHWR에서 PWR ^{14}C 모니터링 이전에는 평가되지 않았지만, PHWR에서 PWR ^{14}C 모니터링 시행 이후인 2014년부터 평가되기 시작하였다. PHWR에서 배출된 ^{14}C 액체유출물은 10년 평균 2.08×10^{10} Bq이 배출되었으며 이는 10년 평균 배출량의 0.04%이다. PWR에서는 액체유출물로 검출되는 ^{14}C 은 없는 것으로 확인되었다.

국내 원전에서 배출된 기체 및 액체 방사성유출물은 원전 주변주민 피폭선량에 영향을 줄 수 있기에 한국수력원자력(주)은 매년 “원자력발전소 주변 환경방사능

조사 및 평가 보고서”를 통해 주변주민 피폭선량 계산결과를 발간하고 있다. PWR ^{14}C 모니터링 이전 작성된 보고서를 통해 주변주민 선량평가 결과를 분석한 결과 국내 원전에서 배출된 기체 및 액체 방사성유출물 중 주변주민 피폭선량에 가장 많은 영향을 준 유출물은 기체유출물이었으며, 이 중 ^3H 가 10년 평균 피폭선량의 78.2%를 차지하였다. 또한, ^{14}C 의 경우 PHWR에서만 모니터링이 되었으며 ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량 값을 분석한 결과 ^{14}C 의 10년 평균 피폭선량은 $1.74 \times 10^{-3} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 총 피폭선량의 30.53%를 차지하였다. PWR ^{14}C 모니터링 이후의 주변주민 선량평가 결과를 살펴보면, PWR ^{14}C 모니터링 이전과 가장 큰 차이는 ^3H 의 피폭선량 값과 ^{14}C 피폭선량 값이다. PWR ^{14}C 모니터링 이후 ^3H 에 의한 주변주민 피폭선량은 10년 평균 $1.05 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 10.4%를 차지하였지만, ^{14}C 에 의한 주변주민 피폭선량은 10년 평균 $9.00 \times 10^{-2} \text{ mSv y}^{-1}$ 으로 88.6%를 차지하였다. 국내 모든 원전에서 배출된 액체유출물의 경우 기체유출물보다 매우 낮은 피폭선량 값을 보였으며, 이로 인한 피폭선량은 원전 주변주민에게 영향을 미칠 가능성은 미미할 것으로 판단된다. 국내 원전에서 배출된 ^{14}C 의 배출량은 점진적으로 증가하고 있으며 이로 인한 주변주민 피폭선량도 증가하고 있음을 확인하였다.

^{14}C 배출량 저감과 주변주민 피폭선량 저감을 위한 연구가 중요함에도 불구하고 국내 원전에서 배출되는 ^{14}C 의 배출량 저감과 주변주민 피폭선량 저감을 위한 연구가 아직 활발히 이뤄지지 않았다. ^3H 의 배출량이 ^{14}C 에 비해 월등히 많기에 ^3H 배출 저감을 위한 연구가 학회에서 관심이 높지만, PWR ^{14}C 모니터링 이전과 이후인 2002년부터 2021년 자료를 분석한 결과, 원전 주변주민 피폭선량에 가장 많은 영향을 미치는 유출물은 ^{14}C 이기에 ^{14}C 배출 저감과 주변주민 피폭선량 저감을 위한 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] 한국원자력안전기술원. 방사성 폐기물 안전관리 통합정보 시스템, Available at <https://www.kins.re.kr/wacid>
- [2] 공태영. 국내 원자력발전소 방사성유출물 배출 감시기준 고찰, 한국방사선산업학회지, 16(1), pp. 23-30. (2022)
- [3] 대한민국. 원자력안전법, 법률 제18972호. (2023)
- [4] 대한민국. 원자력안전법 시행령, 대통령령 제33322호. (2023)
- [5] 원자력안전위원회. 원자력안전위원회규칙 제29호, 방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙. (2021)
- [6] 원자력안전위원회. 원자력안전위원회 고시 제2019-10호, 방사선방호 등에 관한 규칙. (2019)
- [7] 원자력안전위원회. 원자력안전위원회규칙 제31호, 원자로시설등의 기술기준에 관한 규칙. (2022)
- [8] 한국수력원자력(주). 원전종사자 C-14 내부피폭 선량평가 기술개발. R06NF26. (2008)
- [9] 김희근, 공태영, 정우태, 김석태. 원자로시설의 Carbon-14 방사성유출물에 대한 감시배경의 조사. 한국전력공사 전력연구원. Vol.34 NO.4, pp. 195-200. (2009)
- [10] Yim. M. S. Technical Seminar for Carbon-14 Monitoring History in the USA. North Carolina State University, Korea Electric Power Research Institute. (2008)
- [11] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 방사선관리 연보. (2008)
- [12] Nuclear Regulatory Commission. Measuring Evaluating, and Reporting Radioactive Material In Liquid and Gaseous Effluents and Solid Waste,

- Regulatory Guide 1.21. (2009)
- [13] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서.
(2012)
- [14] Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire in France. Carbon-14 and
the environment. (2010)
- [15] Robert O. Pohl. Nuclear Energy: Health Impact of Carbon-14. Laboratory of
Atomic and Solid State Physics, Cornell University, Ithaca, New York
14853, USA. 13(4): 315-27. (1976)
- [16] E. C. Freiling. Radionuclides in the Environment. American Chemical Societ.
NO. ISBN13: 9780841200944. (1970)
- [17] F. Hagemann, J.Gary Jr, L.Machta, A. Turkevich. Stratospheric Carbon-14,
Carbon Dioxide, and Tritium. Science Vol.130 Issue.3375. 1959)
- [18] 원자력환경기술원. 원전방사선 방호기술 개발 C-14 방출해석 및 선량평가
기술개발. NO. TRKO200500066541. (2005)
- [19] 강덕원, 정근호, 지준화. 중수로 계통에서의 C-14 생성량 평가.
한국원자력학회 00 추계학술발표회 논문집. (2000)
- [20] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서.
(2013)
- [21] The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic
Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. ISBN:
978-92-1-142274-0. (2008)
- [22] 한국수력원자력(주). 국내 원자력발전소 운영 현황, Available at
<https://npp.khnp.co.kr/index.khnp>
- [23] 한국전력공사 전력연구원. 경수로원전 C-14 배출감시 및 특성평가 발표자료.
(2009)

- [24] 손욱, 지준화, 강덕원, 이동훈. 월성원전의 각 호기별 ^{14}C Inventory 평가. 한국원자력학회 2002 춘계학술발표회 논문집. pp. 363-363 (2002)
- [25] 이상진, 양호연, 김경덕. 중수로 원전 ^{14}C 발생 특성 및 이온교환수지에 의한 ^{14}C 흡착탈 거동 분석. 한국방사선폐기물학회. Vol.2(1), pp. 147-157. (2004)
- [26] 김희근, 이형석, 양양희, 강덕원, 엄희문. 원전의 C-14 방출 및 이에 대한 선량평가. 한국원자력학회 2001년도 추계학술발표회요약집. pp. 303.1-303.1. (2001)
- [27] 한국전력공사 전력연구원. 중수로원전 운전 중 발생하는 C-14 감시방안 수립 최종보고서. TR.95ZJ14.J1998.11. (1998)
- [28] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2021)
- [29] Valilenko,I.Y., Bugryshev,P.F., Semenov,A.I., Istomina,A.B., Novoseltseva,V.I., "Radiocarbon(^{14}C) migration and metabolism kinetics (a review)," Journal of Hygeine, Epidemiology, Microbiology and Immunology 23 (1) : 1~10. (1979)
- [30] International Commission on Radiological Protection. "Reference Man : anatomical, physiological and metabolic characteristics," ICRP Publication No. 23. Pergamon Press. (1976),
- [31] A.M.Joseph, Holtum, Erwin, Erich Wirth, "Carbon Metabolism in Humans". ISH-97. ISBN: 3-89254-009-8. (1986)
- [32] International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 4 Inhalation Dose Coefficients. ICRP Publication 71. Ann. ICRP 25 (3-4). (1995)
- [33] International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 (Part 1). Ann. ICRP 2

(3-4). (1979)

- [34] International Commission on Radiological Protection, Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals (Addendum to ICRP Publication 53). ICRP Publication 80. Ann. ICRP 28 (3). (1998)
- [35] 조대철, 이갑복. 국내 원전주변 주민 방사선 피폭선량 평가 - 입력변수의 영향. 한국산학기술학회논문지. Vol.4, No3, pp. 223-229. (2003)
- [36] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2002),
- [37] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2003)
- [38] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2004)
- [39] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2005)
- [40] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2006)
- [41] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2007)
- [42] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2008)
- [43] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2009)
- [44] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2010)
- [45] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서.

- (2011)
- [46] Kong.T.Y, Kim.S.Y, Lee.Y.J, Son.J.K, Maeng.S.J. Radioactive effluents released from Korean nuclear power plants and the resulting radiation doses to members of the public, Nuclear Engineering and Technology. 49 1772-1777. (2017)
- [47] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2014)
- [48] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2015)
- [49] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2016)
- [50] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2017)
- [51] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2018)
- [52] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2019)
- [53] 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서. (2020)
- [54] 지준화, 고은옥, 정은수, 강덕원, 김명철. 원전 액상 폐기물 중의 C-14 방출량 평가, 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집. (2001)
- [55] 한국원자력안전기술원. 2.2 주민 피폭선량 평가, KINS/RG-NO2.02, Rev.3. (2022)