



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](#)

2015년 2월
석사학위논문

국내 PWR 원전 C-14 배출량
계산결과 비교평가 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

서 승 남

국내 PWR 원전 C-14 배출량
계산결과 비교평가 연구

A study of C-14 Release Data Comparison
in Domestic PWR Plants

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

서 승 남

국내 PWR 원전 C-14 배출량
계산결과 비교평가 연구

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

서 승 남

서승남의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

2014년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	vi
제 1 장 서 론	1
제 2 장 자연중의 ^{14}C 생성과 영향	3
제 1 절 ^{14}C 생성	3
1. 자연중의 생성반응 및 생성량	3
2. 피폭선량	4
제 2 절 ^{14}C 의 인체영향	5
1. ^{14}C 의 특성	5
2. 인체영향	5
제 3 장 원자력발전소에서의 ^{14}C 의 생성과 배출	6
제 1 절 PWR 에서의 ^{14}C 의 생성반응	6
1. 주요 생성반응과 기여인자	6
2. 생성량 계산	8
제 2 절 ^{14}C 배출량 평가	18
1. 배출경로(Release Pathway)	18
2. 물리 화학적 형태	18
3. 배출량 예측	23
제 4 장 국내·외 ^{14}C 배출감시 규제요건	27
제 1 절 국내 규제요건	27
제 2 절 주요국가 규제요건	31
제 5 장 국내 원전 ^{14}C 배출량 비교평가 결과	36
제 1 절 ^{14}C 배출감시 경위 및 방법	36
제 2 절 ^{14}C 배출량 비교평가 결과	37

제 3 절 ^{14}C 배출에 의한 주민선량 평가 결과 42

제 6 장 결론 44

참고문헌 45

감사의 글 46

표 목 차

표 2.1	Amount of Carbon in Various Exchangeable Reserviors	3
표 3.1	Carbon-14 Mass Balance for PWR	6
표 3.2	Calculated Production Rates of Carbon-14 in PWR Reactors	7
표 3.3	Example of Core Average Neutron-Flux over PWR Fuel Cycle	9
표 3.4	"Effective Cross-section" for the $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ Reaction in the PWR ..	10
표 3.5	PWR ^{14}C Production Rate from the $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ Reaction for Example Plant	10
표 3.6	"Effective Cross-section" for the $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ Reaction in the PWR ..	10
표 3.7	PWR ^{14}C Production Rate from the $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ Reaction for Example Plant	11
표 3.8	Plant Design Data for Hanbit Units 5,6	13
표 3.9	Estimate of ^{14}C Production for Domestic PWR Plants	14
표 3.10	Calculated Production of Carbon-14 in PWRs	15
표 3.11	Calculated Production Rates of ^{14}C in the Reactor Coolant	15
표 3.12	Calculated ^{14}C Production Rates for Various Types of Reactor	16
표 3.13	Summary of Calculated ^{14}C Generation Rates in Coolant at PWR	17
표 3.14	Percentage of the Total Gaseous ^{14}C Activity Detected in Various Compounds	19
표 3.15	^{14}C Gaseous Release Rate, Chemical Form and Discharge Pathways	19
표 3.16	Percentage of Various Compounds in ^{14}C Activity Detected in Release Pathway at Indian Point Unit 3	20
표 3.17	Comparison of the Chemical Forms of ^{14}C in Airborne Release from Various Types of Reactor	20
표 3.18	Diablo Canyon ^{14}C Gaseous Sampling, April 2010	21
표 3.19	Chemical Speciation of ^{14}C in Reactor Primary Coolant Water samples	21
표 3.20	Ringhals Unit 4 Process Water ^{14}C Analysis	22
표 3.21	PWR ^{14}C Source Terms	23
표 3.22	Carbon-14 Source Terms and Release Pathways at Ringhals	24
표 3.23	Summary of Observed Gaseous Release Rates at PWRs	25
표 3.24	Arisings and Releases of ^{14}C From Various Types of Reactor	25
표 3.25	Average Normalized Airborne ^{14}C Releases from PWRs and BWRs ..	26

표 4.1	ALI, DAC and DRL for Airborne ^{14}C in Korea	30
표 4.2	DRLs for Airborne ^{14}C Discharges for CANDU 600MWe in CANADA	32
표 4.3	Limitations on ^{14}C intake for Nuclear Operator(Russian Federation)	32
표 4.4	Limitations on ^{14}C intake for the General public(Russian Federation)	33
표 4.5	Airborne ^{14}C Discharge Limits at Various NPP in the UK	33
표 5.1	Sampling Points of Airborne ^{14}C for Domestic PWRs	37
표 5.2	Expected Annual Release of ^{14}C Domestic PWRs(FSAR)	38
표 5.3	Estimation of Airborne ^{14}C for Domestic PWRs	39
표 5.4	Calculated ^{14}C Release for Domestic PWRs	40
표 5.5	Summary of Measured Airborne ^{14}C Release Data for Domestic PWRs	41
표 5.6	^{14}C Release Data comparison for Domestic PWRs	42
표 5.7	Offsite Dose Calculation Results by Airborne ^{14}C Release at Hanbit Units 5,6	43

그림 목차

그림 2.1	^{14}C 의 대기중 농도변화(1955 ~ 1994)	4
그림 5.1	^{14}C 포집장치 설치 사진(한빛 제3발전소)	37

ABSTRACT

A study of C-14 Release data comparison in Domestic PWR plants

By Seo, Seung Nam

Advisor : Prof. Lee, Goung Jin, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

The radionuclide carbon-14(^{14}C) has been produced continuously in the upper atmosphere by cosmic ray interaction with nitrogen at an estimated rate of 1.5×10^{15} Bq/yr. The total global inventory of ^{14}C is estimated to be 1.28×10^7 TBq. ^{14}C is integrated into atmosphere carbon dioxide and mixed throughout the atmosphere and hydrosphere. Because carbon dioxide(CO_2) is absorbed by plants through photosynthesis, ^{14}C eventually becomes incorporated into all living organisms, including humans.

Although the production rate of ^{14}C is quite small compared to naturally producing rate, today the major ^{14}C producer is the nuclear power industry, comprising about 440 nuclear power reactors worldwide and a few fuel reprocessing plants. The total gaseous ^{14}C release from all nuclear power plants is estimated 1.1×10^{13} Bq/yr(UNSCEAR 2000).

^{14}C in the nuclear fuel cycle is produced by neutron interaction with ^{13}C , ^{14}N , ^{15}N , ^{16}O and ^{17}O , which may be in the nuclear fuels, moderator and primary coolant system of nuclear reactors.

According to the RETS(Radiological Effluents Technical Specification) there is no specific requirement to report ^{14}C in either gaseous or liquid effluents in the U.S. Since ^{14}C is a pure beta emitter, it is not identified in a mixture of radionuclides, and in general it has not been given significant consideration since the nuclear power plant release of ^{14}C has minimal impact on the world inventory of ^{14}C . In addition, its impact on local vegetation prior to its dispersion has been given little attention. Improvements in nuclear power plant effluent management practices have resulted in a decrease in the concentration of gaseous radionuclides released to the environment. As a result, ^{14}C may become a principal nuclide for the gaseous effluent pathway. Revision 2 of Regulatory Guide 1.21 issued in June 2009 introduced the 'Risk-informed' principals of the Reactor Oversight Process and included a discussion of ^{14}C as a potential principal radionuclide for effluent monitoring. It stated that radioactive effluents from commercial nuclear power plants have decreased to a point that ^{14}C is likely to be a principal nuclide in gaseous effluents. It requested that licensee evaluate whether ^{14}C is a principal radionuclide for gaseous release from their facility.

In Korea, MOST(Ministry of Science and Technology) Notice was announced in January 2001, requested nuclear power operator evaluate the amount of ^{14}C released to the environment and its impact on general public. The public dose was limited to 0.15 mSv a year by the Notice. The regulatory body asked KHNP(Korea Hydro and Nuclear Power Corporation, a licensee for nuclear power plant operation) to monitor and evaluate ^{14}C release from Hanbit units 5, 6 as a Operation License condition in June 2001. KHNP conducted a study for ^{14}C measurement and its impacts on public dose from January 2003 to December 2008, and based on this study it established a implementing program for monitoring ^{14}C in PWR plants.

Considering for the preparation such as procurement of sampling devices, measurement procedure and training personnel, theoretical estimation (calculation, Indirect method) was carried in from January 2012 to March 2013. Since then the quantity of ^{14}C releases from the PWR plants and public doses were evaluated by actual measurements(Direct method) data.

This thesis presents the results of measurements carried out on some Korean

PWR plants. Comparison study among the expected release described in FSAR(Final Safety Analysis Report), estimation using EPRI methodology and actual measurements was conducted. It is confirmed that actual measurements(Direct method) data showed far below the expected release in FSAR(about 10.4 % ~ 32.4%) and 17.7% ~ 103.5% compared to estimations.

Off-site dose calculation results using actual ^{14}C release data for Hanbit units 5 & 6 in 2013 was 2.757×10^{-3} mSv, which was about 1.84% of design limit(0.15mSv).

But the public dose contribution by gaseous ^{14}C release was extremely high, 94.4%, compared to total dose of 2.921×10^{-3} mSv. For Hanbit site, operating 6 PWRs, total public dose by gaseous effluents including ^{14}C was 5.824×10^{-3} mSv. Because the dose by ^{14}C was 5.139×10^{-3} mSv, it is assumed that the dose contribution was around 88.24%.

It is confirmed that regardless plant's design characteristics, the expected annual ^{14}C releases in gaseous pathway described in some Korean PWR FSAR are the same. It is assumed that the value of 7.3 Ci/yr which described in the FSAR was taken from revision 2 of NUREG-0017 in 1985.

제 1 장 서 론

방사성핵종인 ^{14}C 은 우주선(Cosmic Ray)의 중성자가 대기중의 질소와 반응하여 꾸준히 생성되고 있으며, 그 양은 연간 1.5×10^{15} Bq 에 이른다(UNSCEAR 2000). 생성된 ^{14}C 은 대기중의 이산화탄소(CO_2)와 결합 및 혼합되어 대기권과 해양권에 남게 된다. CO_2 는 식물의 광합성작용에 의해 식물체내로 흡수되며 먹이사슬(Food Chain)을 통해 인간을 포함한 모든 생명체에 전달된다. 대기중의 ^{14}C 존재비는 약 $1 \times 10^{-10}\%$ 정도이며, 나머지는 ^{12}C (98.9%), ^{13}C (1.1%) 이다. 대기중에는 총 $1.4 \times 10^8 \text{GBq}$ 이, 심해에는 이보다 훨씬 많은 $1.0 \times 10^{10} \text{GBq}$ 의 ^{14}C 이 존재하는 것으로 알려져 있다(IAEA 2004).

^{14}C 은 매우 약한 베타선만을 방출하기 때문에 신체 외부피폭에는 영향을 주지 않으나 긴 반감기(약 5730년)와 생명체에 쉽게 동화(Incorporation)되는 특성때문에 원자력시설에서의 배출시에도 관리가 필요하다. 원자력발전소 운영중에는 주로 냉각재와 중성자반응 [$^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$] 에 의해 생성되는데 가압경수로의 경우 생성량의 약 30% 가 CO_2 형태로 배출되는 것으로 알려져 있다. 원자력발전소에서 배출되는 ^{14}C 은 자연적으로 생성되는 양에 비해서는 훨씬 적지만 ($1.1 \times 10^{14} \text{Bq/yr}$, IAEA 2004), 지속적인 배출저감 노력으로 타 핵종의 기체 배출방사능량은 크게 줄어든데 반해 ^{14}C 의 배출방사능량과 주변주민에 대한 선량기여도가 상대적으로 증가함에 따라 주요핵종(Principal Nuclide)으로 대두되기에 이르렀다.

이에 따라 각 국에서는 ^{14}C 의 배출량평가를 의무화하기 시작했으며, 우리나라는 2001년 1월부터 이를 수행하도록 관련 고시가 개정되었다. 동 고시(방사선방호등에 관한 기준)에 따르면, ^3H , ^{14}C 등의 배출로 인한 주민의 장기등가선량은 0.15mSv/yr 이하로 제한하도록 되어 있어 배출량 평가가 불가피하게 되었다.

2001년 6월에는 한빛 5,6호기 운영허가시 규제기관에서 ^{14}C 배출감시를 요구함에 따라 2003년 1월부터 2008년 12월까지 ^{14}C 배출량 및 환경영향조사가 2차례에 걸쳐 수행되었다. 이를 토대로 2009년 5월에 ' ^{14}C 배출감시 시행계획'이 수립되었다. 시료

포집장치의 구매, 관련 절차서의 개발 등 소요 일정을 고려하여 2012년도에는 이론적 계산법(간접법)으로 ^{14}C 예상배출량을 평가하고, 2013년도부터는 실측법(직접법)으로 분석한 배출량으로 주민피폭선량을 평가하는 것으로 계획하였으나 약 3개월 지연된 2013년 4월부터 실측법에 의한 평가가 수행되었다.

본 논문에서는 직접법과 간접법에 의한 ^{14}C 배출량을 최근 1년간 자료를 이용하여 비교하였다.(간접법 : 2012.1 ~ 2012.12, 직접법 : 2013.4 ~ 2014.3). 그 결과 직접법에 의한 배출량이 간접법에 비해 발전소별로 17.7 % ~ 103.5% 수준임을 확인할 수 있었으며, 어느 경우에도 최종안전성분석보고서(FSAR)에 명시된 예상배출량(Expected Release)보다는 훨씬 낮은 수준(직접법과 비교시 10.4% ~ 32.4%)을 유지하고 있음을 확인하였다.

또한, 직접법에 의한 2013년도 ^{14}C 배출량을 기준으로 한빛 5,6호기에 대해 주민 피폭선량을 계산해본 결과 연간 $2.757 \times 10^{-3}\text{mSv}$ 으로 평가되어 설계제한치인 0.15mSv 대비 1.84% 수준으로 낮았으나 전체 기체배출로 인한 총 선량 $2.921 \times 10^{-3}\text{mSv}$ 중 차지하는 비율은 94.4%로서 매우 높은 편임을 확인할 수 있었다.

총 6개호기가 가동중인 한빛원자력본부 전체로 볼 때는 총 주민피폭선량 $5.824 \times 10^{-3}\text{mSv/yr}$ 중 ^{14}C 배출에 의한 선량이 $5.139 \times 10^{-3}\text{mSv}$ 를 차지하여 약 88.24%의 선량 기여도를 보였다.

한편, 국내 가압경수로형 원전 중 일부 원전의 FSAR에 기술된 ^{14}C 의 연간 예상 배출량이 발전소 설계특성이 고려되지 않고 동일한 값으로 기술되어 있음을 확인할 수 있었는데 바 정확한 근거자료는 찾을 수 없었으나 1985년에 발표된 미국의 PWR-GALE Code(NUREG-0017, Rev 1)를 인용한 것으로 추정된다.

제 2 장 자연중의 ^{14}C 의 생성과 영향

제 1 절 ^{14}C 생성

1. 자연중의 생성반응 및 생성량

지구 상층권에서 우주선(Cosmic Ray)중의 중성자가 대기중의 질소를 만나 ^{14}C 으로 변환[$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$] 되는데 생성률은 약 $2.5 \text{ atoms/sec-cm}^2$ 로 알려져 있다(Suess:1958). 고도 9km ~ 15km 사이에서 가장 활발하게 생성되며, 생성률은 우주선속(Cosmic Ray Flux)의 변화나 지구자기장(Earth's Magnetic Field)의 변화에 따라 차이가 크다. 이를 지구 표면적인 $5.1 \times 10^{18} \text{ cm}^2$ 를 곱하면 연간 생성률은 약 $1.55 \times 10^3 \text{ TBq}(42,000 \text{ Ci})$ 이 되며, 지구상에 존재하는 총량은 약 $1.28 \times 10^7 \text{ TBq}$ 로 추정해볼 수 있다. 연구자들에 따라 총량은 조금씩 차이가 나는데 $8.5 \times 10^6 \text{ TBq}$ (Choppin : 2002) ~ $1.17 \times 10^7 \text{ TBq}$ (Liepins & Thomas : 1988) 의 범위를 보이고 있다. ^{14}C 은 오랜기간동안 생태계에서 평형상태를 유지해왔으며, 그 농도는 약 6.89pCi/g C 정도로 관찰되었다. 대규모의 핵실험이 수행되었던 1954년까지는 적어도 15,000년동안은 이 농도를 유지해왔던 것으로 추정된다. 생성된 ^{14}C 은 여러 경로를 거쳐 생태계에서 교환되어지는데 EPRI 의 연구결과(2010 Technical Report, Estimation of Carbon-14 in Nuclear Power Plant Gaseous Effluents) 에 따르면 다음 표와 같다.

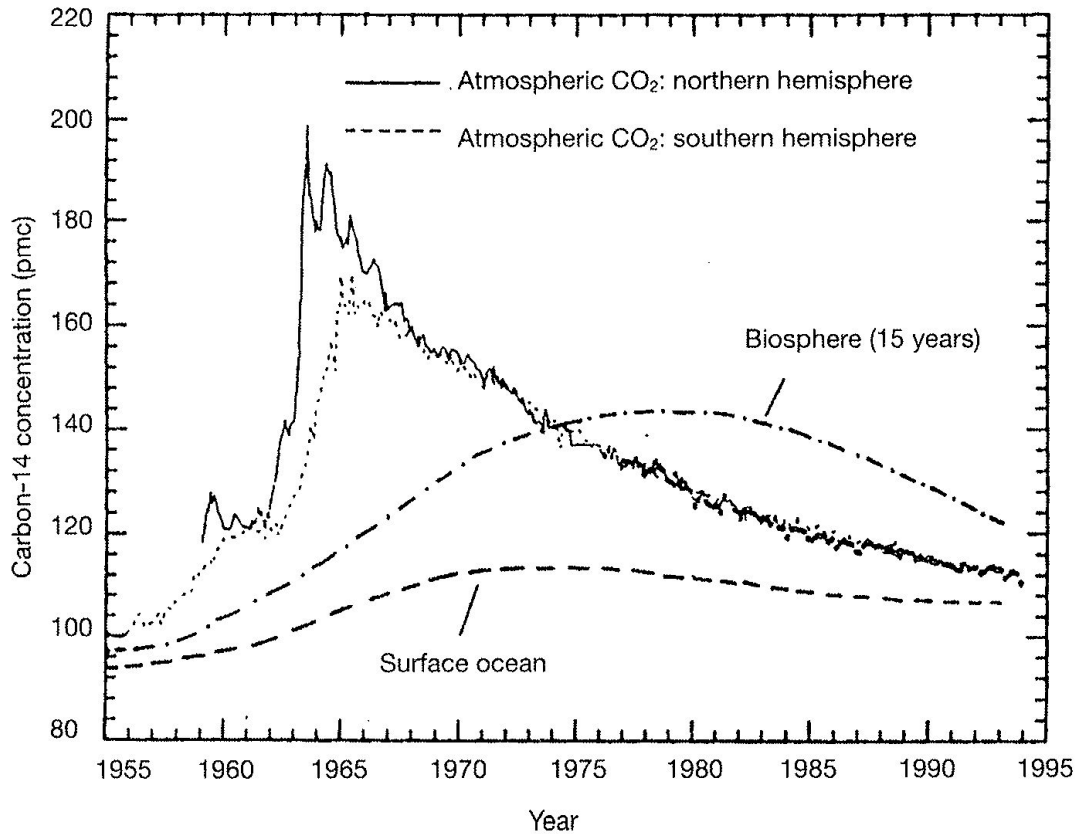
[표 2.1] Amount of Carbon in Various Exchangeable Reservoirs

Exchangeable Reservoir	Carbon Content, g/cm ² Earth Surface	% of Total
Atmospheric CO ₂	0.126	~1.6
Terrestrial Biosphere	0.06	~0.8
Humus	0.215	~2.7
Marine Biosphere	0.002	~0.03
Dissolved Organic Matter in Sea	0.533	~6.8
Total Inorganic Carbon in sea	6.94	~88.1
Total Exchangeable carbon	7.88	

해양에서의 체류시간은 약 300년 ~ 400년 정도로 추정되며, 대기중에서는 이보다 훨씬 짧은 7년 내외의 평균 체류시간을 갖는다.

자연중에 존재하는 ^{14}C 의 량(Inventory)에 두번째로 크게 기여한 것은 1950년대 ~ 1960년대에 실시된 대기권 핵실험이다. 1963년까지 핵실험으로 인해 생성된 ^{14}C 의 양은 $9.51 \times 10^6\text{Ci}$ 로 추정되는데 이는 16,000 기의 비등수형 원자로(열출력 3,597MW급)를 30년간 가동시 배출되는 양이다.

[그림 2.1] ^{14}C 의 대기중 농도변화(1955 - 1994)



2. 피폭선량

핵실험전까지는 표준인(Standard Man)의 경우 체내에는 약 3.7kBq 의 ^{14}C 이 존재하고, 이로 인한 피폭선량은 뼈에 $1.64 \times 10^{-2}\text{mSv/yr}$, 연조직과 골수에 $7.1 \times 10^{-3}\text{mSv/yr}$, 그리고 전신에는 $1.06 \times 10^{-2}\text{mSv/yr}$ 를 각각 받는 것으로 평가되었다(Raen, V.F ; 1968). 핵실험 이후 피폭선량은 증가하였는데 예측결과 그 양은 많지는 않았다.

제 2 절 ^{14}C 의 인체영향

1. ^{14}C 의 특성

^{14}C 은 매우 긴 반감기(5,730년)를 가지며, 평균수명은 8,297년이나 된다. 평균 49.5keV의 순수 베타에너지를 방출하면서 붕괴되며, 최대에너지는 156keV에 이른다. 생물학적 반감기는 12일이며, 유효반감기는 약 40일 정도이다. 최대 비방사능은 4.46Ci/g 이며, 공기중 최대비정은 24cm, 수중에서는 0.28mm, 플라스틱은 0.25mm에 불과하다.

2. ^{14}C 의 인체영향

^{14}C 은 매우 약한 베타선만을 방출하기 때문에 신체 외부피폭에는 영향을 주지 않으나 내부 흡입시에는 피폭을 고려할 필요가 있다. 체내 흡입은 호흡, 음식물 섭취, 상처 등을 통해 이루어진다. 기본적으로 인간이 섭취하는 음식물들은 대부분 식물로부터 오기 때문에 대기중의 ^{14}C 농도와 체내 존재하는 ^{14}C 의 농도는 동일하다고 보면 된다. 인체내에서의 ^{14}C 물질대사 및 동역학은 보통의 탄소(C)와 다르지 않다. 일단 호흡을 통해 $^{14}\text{CO}_2$ 가 체내에 흡입되면 폐안에 있는 공기와 빠르게 평형상태에 도달한 후 각 장기로 전달된다. 인체내의 결정장기로는 지방조직(Fat tissue)과 뼈로 알려져 있다. 체내에는 축적되지 않으나 먹이사슬 경로에는 쉽게 축적된다(물고기의 경우 축적계수가 약 5,000정도)

^{14}C 의 비 방사능(Specific Activity)은 약 230Bq/kg C 정도이며, 사람의 경우 약 16kg의 탄소가 체내에 존재하므로(ICRP 1974) 방사능량은 약 4,000Bq이 되며, 이로 인한 유효방사선피폭선량은 연간 약 12 μSv 로 계산된다.

제 3 장 원자력발전소에서의 ^{14}C 의 생성과 배출

제 1 절 PWR 에서의 ^{14}C 생성반응

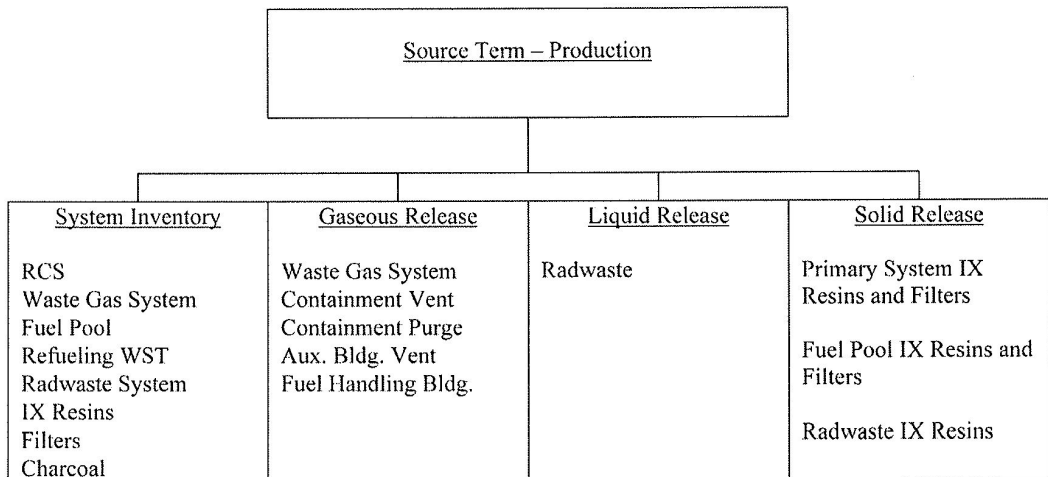
1. 주요 생성반응과 기여인자

가. 개요

^{14}C 은 운전중 주로 냉각재에서 생성되며, 생성률은 중성자속 및 질소의 유입으로 인해 연료주기에 따라 증가한다(주기말로 갈수록 생성률 증가). 생성되는 ^{14}C 은 대부분이 유기물형태이며, 메탄($^{14}\text{CH}_4$), 메탄올($^{14}\text{CH}_3\text{OH}$), 포름알데히드(H_2^{14}C), Formic acid(H^{14}COOH)등으로 구분된다. 이 중에서 가장 많은 종은 메탄으로 약 43%가 냉각재에 용해되어 있고, 체적제어탱크의 기체영역에 약 50%, 가압기 기체용역에 약 7%정도 존재한다. 생성률은 4 loop 웨스팅하우스 PWR 의 경우 $20\mu\text{Ci}/\text{min}$ (Ringhals 4, Magnusson, et al : 2005) 이며, 배출과 제거공정이 없을 경우 운전개시 약 2주이내에 $8 \times 10^{-4} \mu\text{Ci}/\text{g}$ 에 도달한다.

아래 표는 원자력발전소에서의 ^{14}C 생성과 제거 및 배출에 관한 Mass balance를 도식화한 것이다.

[표 2.2] Carbon-14 Mass Balance for PWR



나. 방사선 원항(Source Term)계산

생성률(Production Rate)은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$N_a = N_T \cdot \Sigma(\sigma_i \cdot \phi_i), \quad i = 1 \text{ to } 2 \text{ or } 3^a$$

a. In some cases there may be only 2 energy groups,
 $E \leq 0.625 \text{ eV}$ and $E > 0.625 \text{ eV}$)

where:

N_a	=	Rate of production, atoms/sec
N_T	=	Number of target ^{17}O or ^{14}N target species per kg of coolant
σ_i	=	“effective” neutron cross-section for each of the 2 or 3 energy groups, cm^2
ϕ_i	=	neutron flux for each of the 2 or 3 energy groups, $\text{neutron}/\text{cm}^2\text{-sec}$

이를 방사능단위로 환산하여 보면 단위시간당 생성되는 ^{14}C 의 방사능을 알 수 있다.

$$\text{즉, } Aa(\mu\text{Ci}/\text{sec}) = Na \cdot \lambda_a / 3.7 \times 10^4 \text{ d}/\text{sec}-\mu\text{Ci}$$

가동중인 PWR에서 ^{14}C 생성에 가장 크게 기여하는 반응은 $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$, $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$, $^{13}\text{C}(n,\gamma)^{14}\text{C}$ 로 구분할 수 있다(IAEA 2004).

- $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$: 산화연료(Oxide Fuel), 감속재, 냉각재중의 ^{17}O 이 높은 열중성자 포획단면적(약 0.24 barn, 1barn = 10^{-24} cm^2)을 가지고 있을 때 생성
- $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$: 연료, 감속재, 냉각재 중의 질소 불순물(^{14}N) 이 아주 높은 열중성자 포획단면적(약 1.82 barn)을 가질 때 생성
- $^{13}\text{C}(n,\gamma)^{14}\text{C}$: 흑연감속재를 사용하는 원자로에서 생성되며, 반응단면적이 적을 경우($0.9 \times 10^{-3} \text{ barn}$)

이 중에서 Vance(1995)의 연구결과에 의하면 다음 표에서 보듯이 $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ 반응에 의한 생성률이 가장 높은 것으로 나타났다.

[표 3.2] Calculated Production Rates of Carbon-14 in PWR Reactors

Reaction	Production Rate	Effective Cross-section (barn)
$^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$	6.0 Ci/GWe-yr	0.183
$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$	0.12 Ci/GWe-yr/ppm	1.17
$^{13}\text{C}(n,\gamma)^{14}\text{C}$	0.011 Ci/GWe-yr/ppm	0.006

* Thermal Flux : $4.8 \text{ E}+13 \text{ n}/\text{cm}^2\text{-sec}$, Coolant mass : 13,400 kg

2. 생성량 계산

앞에서 살펴본 바와 같이 ^{14}C 은 ^{17}O 이나 ^{14}N 의 방사화(중성자 반응)에 의해 생성되는데 연료중에 포함되어 있는 ^{17}O 의 방사화에 의해 연간 약 0.15 TBq/GWe 가 생성되는 것으로 추정한다(IAEA 2004). 연료중의 ^{17}O 함유량을 줄이기는 매우 어렵지만, 질소불순물은 연료제조과정에서 줄이는 것이 가능하다. Bush(1984)에 따르면, 연료내에 25ppm의 질소불순물이 있을 경우 연간 약 0.55 ~ 0.74 TBq/GWe의 ^{14}C 이 생성되나, 이를 5ppm 수준으로 낮추면 ^{14}C 생성량을 0.15 TBq/GWe까지 줄일 수 있다고 밝혔다.

냉각재에서는 용해된 질소나 암모니아가 기체형태의 ^{14}C 생성에 주로 기여한다. 따라서, 냉각재중의 질소량을 줄이기 위해 액체저장탱크의 Cover Gas 를 질소대신 알곤으로 대체하거나, pH 제어제로 Hydrazine 대신 감손 ^6Li (Lithium Hydroxide)을 사용하기도 한다. 격납건물내 공기중의 질소의 방사화로 인한 생성량은 중성자속이 작아 극히 미미하다.

생성량을 계산하기 위해서는 해당 원전에 대한 연료주기별 중성자속(Neutron Flux)과 유효반응단면적(Effective Cross-section), 냉각재 질량(Active Coolant Mass) 등의 자료를 파악해야 한다. 지금부터는 이들을 구하기 위한 방법론을 살펴보았다.

가. 중성자속

일반적으로 중성자속은 연료주기에 따라 증가하는 경향을 보이나, 열외중성자 에너지대(0.625 eV ~ 1 MeV)에서는 조금 다른 양상을 보인다.

[표3.3] 에 EPRI 연구결과(2010 Technical Report)를 정리하였다.

나. 유효반응단면적

(1) $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ 반응

[표3.4]에서 볼 수 있듯이 유효반응단면적은 열중성자 영역에서 가장 높고 (0.121 barns), 중간에너지 영역에서 가장 낮은 값(0.0291 barns)을 가진다.

중성자 에너지대를 3개 그룹으로 대별하여 $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ 반응에 의한 ^{14}C 생성률은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\text{Production Rate } (\mu\text{Ci/sec} - \text{kg}) = \frac{N \cdot [\sigma_{\text{th}} \cdot \Phi_{\text{th}} + \sigma_{\text{i}} \cdot \Phi_{\text{i}} + \sigma_{\text{f}} \cdot \Phi_{\text{f}}] \cdot 1.0\text{E} - 24 \cdot \lambda}{3.7\text{E}4}$$

여기서,

N : 1.27×10^{22} atoms $^{17}\text{O}/\text{kg H}_2\text{O}$

δ_{th} : 유효 열중성자 반응단면적, barns

Φ_{th} : 열중성자속, $\text{n}/\text{cm}^2\text{-sec}$

δ_{i} : 유효 열외중성자 반응단면적, barns

Φ_{i} : 열외중성자속, $\text{n}/\text{cm}^2\text{-sec}$

δ_{f} : 유효 속중성자 반응단면적, barns

Φ_{f} : 속중성자속, $\text{n}/\text{cm}^2\text{-sec}$

λ : ^{14}C 붕괴상수, $3.833 \times 10^{-12}/\text{sec}$

[표 3.3] Example of Core Average Neutron Flux over PWR Fuel Cycle

BOC		
Neutron Group	Group Energy	Neutron Flux (ϕ), $\text{n}/\text{cm}^2\text{-sec}$
Thermal	≤ 0.625 eV	3.55E13
Intermediate	> 0.625 eV - < 1 MeV	2.86E14
Fast	≥ 1 MeV	6.57E13
Mid-Cycle		
Neutron Group	Group Energy	Neutron Flux (ϕ), $\text{n}/\text{cm}^2\text{-sec}$
Thermal	≤ 0.625 eV	3.57E13
Intermediate	> 0.625 eV - < 1 MeV	2.24E14
Fast	≥ 1 MeV	6.54E13
EOC		
Neutron Group	Group Energy	Neutron Flux (ϕ), $\text{n}/\text{cm}^2\text{-sec}$
Thermal	≤ 0.625 eV	3.97E13
Intermediate	> 0.625 eV - < 1 MeV	2.27E14
Fast	≥ 1 MeV	6.68E13

[표3.4] "Effective Cross-section" for the $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ Reaction in the PWR

Neutron Group	Group Energy	Effective Cross-section (barn)
Thermal	$\leq 0.625 \text{ eV}$	0.121
Intermediate(I)	$> 0.625 \text{ eV} \sim < 1 \text{ Mev}$	0.0291
Fast(F)	$\geq 1 \text{ Mev}$	0.1124
I + F	$> 0.625 \text{ eV}$	0.0479

$^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ 반응에 의한 ^{14}C 생성률을 연료주기에 따라 계산해보면 다음표와 같은 결과를 얻을 수 있다.

[표 3.5] PWR ^{14}C Production Rate from the $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ Reaction for Example Plant

	Production Rate ($\mu\text{Ci}/\text{sec}\text{-kg}$)
BOC	2.544E-5
Mid-Cycle	2.392E-5
EOC	2.489E-5
Average	2.475E-5

(2) $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ 반응

$^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ 반응과 마찬가지로 유효반응단면적은 열중성자 영역에서 가장 높고(0.951 barns), 기타 에너지영역에서는 비슷한 값을 가진다.

[표 3.6] "Effective Cross-section" for the $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ reaction in the PWR

Neutron Group	Group Energy	Effective Cross-section (barns)
Thermal	$\leq 0.625 \text{ eV}$	0.951
Intermediate(I)	$> 0.625 \text{ eV} \sim < 1 \text{ Mev}$	0.0379
Fast(F)	$\geq 1 \text{ Mev}$	0.0436
I + F	$> 0.625 \text{ eV}$	0.0392

냉각재중의 질소농도에 따른 생성률은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{Production Rate } (\mu\text{Ci/sec} - \text{kg} - \text{ppm} - \text{N}) = \frac{N \cdot [\sigma_{th} \cdot \phi_{th} + \sigma_i \cdot \phi_i + \sigma_f \cdot \phi_f] \cdot 1.0E-24 \cdot \lambda}{3.7E4}$$

여기서,

N : 4.28×10^{19} atoms $^{14}\text{N}/\text{kg}-\text{ppm N}$

δ_{th} : 유효 열중성자 반응단면적, barns

Φ_{th} : 열중성자속, $\text{n}/\text{cm}^2\text{-sec}$

δ_i : 유효 열외중성자 반응단면적, barns

Φ_i : 열외중성자속, $\text{n}/\text{cm}^2\text{-sec}$

δ_f : 유효 속중성자 반응단면적, barns

Φ_f : 속중성자속, $\text{n}/\text{cm}^2\text{-sec}$

λ : ^{14}C 붕괴상수, $3.833 \times 10^{-12}/\text{sec}$

마찬가지로 상기 식에 따라 계산하여 보면, 연료주기에 따른 ^{14}C 생성률은 다음 표와 같다.

[표 3.7] PWR ^{14}C Production Rate from the $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ reaction for Example Plant

	Production Rate ($\mu\text{Ci}/\text{sec}-\text{kg}-\text{ppm N}$)
BOC	2.101E-7
Mid-Cycle	2.011E-7
EOC	2.188E-7
Average	2.100E-7

다. 냉각재 질량

냉각재질량은 ^{14}C 의 선원항(Source Term) 계산에 사용되며, 연료제조사에 따라 각각 다르다. 계산에 사용되는 냉각재 질량은 Reactor Coolant System 의 총량을 의미하는 것이 아니라 노심 상하부(from the bottom of the active core to the top of active core)를 차지하는 질량을 뜻한다.

라. ^{14}C 생성량 예측

지금까지 살펴본 ^{14}C 의 생성량 계산방법론을 국내 원전(한빛5,6호기)에 대해 적용하여 계산하면 다음과 같다. 한빛 5,6호기는 열출력 2815MW의 PWR 이며, 노심내 냉각재량 10,951kg, EFPD 는 365일을 적용하였다.

(1) $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ 반응의 경우,

$$2.41 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/sec-kg} \times \text{coolant mass}(10,951 \text{ kg}) = 0.264 \mu\text{Ci/sec} \text{ 이 되고}$$

이를 년 단위로 환산하면,

$$0.264 \mu\text{Ci/sec} \times 3.15 \times 10^7 \text{ sec/yr} = 8.54 \times 10^6 \mu\text{Ci/yr} = 8.33 \text{ Ci/yr} \text{ 가 된다.}$$

(2) $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ 반응의 경우,

$$3.68 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/sec-kg-ppm} \times N(\text{ppm}) \times \text{coolant mass}(10,951 \text{ kg}) = 4.03 \times 10^{-2} \mu\text{Ci/sec} \text{ 이 되고(단, 질소농도는 1ppm 적용)}$$

이를 년 단위로 환산하면,

$$4.03 \times 10^{-2} \mu\text{Ci/sec} \times 3.15 \times 10^7 \text{ sec/yr} = 1.27 \times 10^6 \mu\text{Ci/yr} = 1.27 \text{ Ci/yr} \text{ 가 된다.}$$

따라서, 두 가지 반응에 의해 한빛 5,6호기의 경우 각각 **9.60 Ci/yr**의 ^{14}C 이 생성 되는 것으로 계산되었다.

상기 생성률 계산시 사용된 발전소 설계특성자료는 다음과 같다.

[표 3.8] Plant Design Data for Hanbit Units 5,6

	Design Data		Remarks
Rx. Type	PWR		
Thermal Power	2,815 MWth		
Operation Duration	365 EFPD (3.15×10^7 sec/yr)		
Coolant Mass	10,951 kg		
Reaction	$^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$	$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$	
N	1.27×10^{22} 1)	7.30×10^{20} 2)	1) atoms $^{17}\text{O}/\text{kg H}_2\text{O}$ 2) atoms $^{14}\text{N}/\text{kg-ppm}$
δ_{th}	0.121 barns	0.951 barns	
Φ_{th}	3.96×10^{13}	3.96×10^{13}	n/cm ² -sec
$\delta_{\text{i+f}}$	0.0479 barns	0.0392 barns	
$\Phi_{\text{i+f}}$	2.83×10^{14}	2.83×10^{14}	n/cm ² -sec
Cf	1.0×10^{-24}	1.0×10^{-24}	cm ² /barn
λ	$3.83 \times 10^{-12}/\text{sec}$	$3.83 \times 10^{-12}/\text{sec}$	Decay Constant
Cf	3.7×10^4	3.7×10^4	dps/ μCi
Production Rate	8.33	1.27	Ci/yr
Total	9.60		Ci/yr

다음 표는 EPRI 방법론을 이용하여 국내 원전 PWR 의 ^{14}C 생성량을 계산한 결과이다.

[표 3.9] Estimate of ^{14}C Production for Domestic PWR Plants

		Rx. Power (MWth)	Coolant Mass (kg)	^{14}C Production (Ci/yr)	Remarks
Kori	#1	1,723	7,244	5.75	
	#2	1,876	6,692	5.51	
	#3	2,900	9,936	8.33	
	#4	2,900	9,936	8.33	
Hanbit	#1	2,900	9,936	8.33	
	#2	2,900	9,936	8.33	
	#3	2,825	10,951	8.55	
	#4	2,825	10,951	8.55	
	#5	2,825	10,951	9.60	
	#6	2,825	10,951	9.60	
Hanul	#1	2,905	9,981	7.93	
	#2	2,905	9,981	7.93	
	#3	2,825	10,918	8.53	
	#4	2,825	10,918	8.53	
	#5	2,825	10,951	9.60	
	#6	2,825	10,951	9.60	

한편, 1970년대 PWR에서의 ^{14}C 생성량 연구결과를 Fowler(1976)가 요약한 바에 따르면 국내 원전의 예상생성량 보다는 훨씬 많은 값을 알 수 있는데 이를 [표 3.10]에 정리해 놓았다.

또한, Magnusson(2008)이 열출력 2,775MW 급 웨스팅하우스형 PWR의 냉각재중에 생성되는 ^{14}C 를 계산한 결과를 [표 3.11]에 정리해 놓았는데 그 결과를 보면 ^{17}O 에 기인하는 것이 압도적으로 높음을 알 수 있다. 총 생성량은 9.5Ci/GWe-yr 이며, 계산시의 전체 불확도는 $\pm 20\%$, 냉각재중의 질소농도는 5.4ppm을 가정하였다.

[표 3.10] Calculated Production of Carbon-14 in PWRs

		Carbon-14 Production Rate (Ci/GW _e -yr)				
	Target	Fowler, et al. (1976)	Bonka, et al. (1974)	Hayes, et al. (1977) ^a	ERDA-1535 (1975)	Kelly, et al. (1975) ^a
PWR Fuel	O-17	4	7.1	4.0		2.7
	N-14	18	12.2	7.6		10.9
	Total	22	19.3	11.6	17 ^b	13.6
PWR Coolant	O-17	3.2	9.8	3.3		
	N-14	0.09	1.3	0.1		
	Total	3.3	11.1	3.4	6	6
PWR Sum		25	30.4	15	23	19.6

 [표 3.11] Calculated Production Rates of ¹⁴C in the Reactor Coolant

		Production Rate(Bq/s)		
Target		Thermal	Epithermal	Fission
¹⁷ O		3.4E+ 03	1.1E+ 03	5.8E+ 03
¹⁴ N		47	16	4.0

IAEA는 원자로형별 ¹⁴C 예상배출량을 계산하였는데 그 결과를 보면 가스냉각로 (GCR)와 중수로(HWR)들이 매우 많은 생성률을 보였고, 경수로와 고속증식로에서는 상대적으로 낮은 생성률을 보였다.(IAEA Technical Report Series 421, 2004)

[표 3.12] Calculated ^{14}C Production Rates for Various Types of Reactor

		Fuel	Fuel Cladding	Coolant and Moderator	Graphite Moderator	Total
LWR	PWR	480	740	260	-	1480
	BWR	470	630	190	-	1290
HWR		1,465	1,260	7,400	-	10,125
GCR	MGR	4,835	1,300	310	10,730	17,175
	AGR	620	1,180	300	3,480	5,580
	HTGR	190	-	1	3,180	3,371
FBR		200	300	-	-	500

다음 표는 EPRI 가 웨스팅하우스 및 CE 형 PWR 을 대상으로 연구한 결과 및 타 연구자들의 연구결과를 2010 Technical Report 에 종합하여 수록한 결과이다. 표에서 살펴볼 수 있듯이 냉각재중에 생성되는 ^{14}C 의 양은 1970년대 연구에서는 상당히 큰 차이를 보였으나 1990년대에 들어서면서부터는 연구자들간 큰 차이를 보이지 않고 유사함을 알 수 있다.

[표 3.13] Summary of Calculated ^{14}C Generation Rates in Coolant at PWRs

Reference	Unit	$\mu\text{Ci}/\text{MWt}\cdot\text{h}$	Ci/yr	Ci/GWe-yr	GBq/GWe-yr
Fowler(1976)				3.3	
Bonka(1974)				11.1	
Kelly(1975)	1,000MWe			6	
ERDA-1535(1975)				6	
Hayes(1977)	1,000MWe			3.4	
Davis(1977)				5	
Vance(1995)				6.12	270-410
Magnusson(2008)	Ringhals#3 2,775MWt	0.403	9.80	10.4	385
Magnusson(2008)	Ringhals#4 2,775MWt	0.411	10.0	10.6	392
EPRI(2010)	W, 4 loop 3,216MWt	0.357	10.1	9.20	340
	W, 4 loop 3,188MWt	0.360	10.1	9.28	343
	W, 4 loop 3,650MWt	0.432	13.8	11.1	411
	W, 2 loop 1,540MWt	0.387	5.23	10.0	370
	W, 2 loop 1,540MWt	0.387	5.23	9.98	369
	W, 4 loop 3,455MWt	0.396	12.0	10.2	377
	W, 4 loop 3,626MWt	0.387	12.3	9.98	369
	CE, 2,700MWt	0.467	11.1	12.0	444
	CE, 3,716MWt	0.422	13.7	10.9	403

제 2 절 ^{14}C 배출량 평가

1. 배출경로(Release Pathway)

계통에서 생성된 ^{14}C 은 일부는 수지 등에서 제거되고 나머지는 대기로 배출된다. Kunz(1985)의 연구결과에 따르면, 미국의 Ginna 원전의 경우 기체감쇄탱크를 통해서 42%, 격납건물에서 23%, 보조건물에서 35%가 각각 배출되었고, Indian Point 3호기의 경우 격납건물 78%, 보조건물 15%, 기체감쇄탱크가 7% 순으로 배출되었다.

2. 물리 화학적 형태

Roberts(2010)는 V.C Summer 원전(966MWe, PWR)에 대해 배출되는 ^{14}C 의 농도를 평가하였는데 주 배기구에서는 전체($1.39 \times 10^{-9} \mu\text{Ci/cc}$)의 2.7%($3.78 \times 10^{-11} \mu\text{Ci/cc}$), 원자로건물은 6.4%, 기체폐기물처리계통은 6.3%의 CO_2 비율을 나타냈다.

Khan, et al(1974)가 Haddam Neck 원전의 기체폐기물처리계통에서 ^{14}C 을 분석한 결과 배출되는 ^{14}C 의 화학적 형태는 Non - CO_2 였다. 한편, Kunz, et al(1974)는 3곳의 원전에서 기체감쇄탱크와 격납건물의 ^{14}C 의 화학적 형태를 분석하였다. 그 결과 배출되는 ^{14}C 의 80% 이상이 Hydrocarbon(CH_4 , C_2H_6)이었고, CO_2 와 CO는 5% 미만이었다.

아래 표는 그 결과를 정리한 것이다.

[표 3.14] Percentage of the Total gaseous ^{14}C Activity Detected in Various Compounds

Compound	Decay Tank			Containment	
	Ginna	Indian Point #1	Indian Point #2	Ginna	Indian Point #2
CH_4	66.9	74.3	84.9	57.0	58.6
C_2H_6	22.4	7.5	3.5	37.5	36.0
C_3H_8	2.4	7.2	2.7	3.9	2.3
C_4H_{10}	0.9	10.0	2.7	N/D	0.5
CO_2	4.6	0.3	3.4	1.8	2.6
CO	0.4	N/D	0.3	N/D	N/D

그 이후 Kunz(1985) 가 Ginna 원전(490MWe, PWR)과 Indian Point 3호기(1,000 MWe, PWR)에 대해 분석한 결과를 보면 CO_2 형태는 Ginna 원전에서 10%, Indian Point 3호기에서 26%의 비율을 보였다.

 [표 3.15] ^{14}C Gaseous Release Rate, Chemical Form and Discharge Pathway

Parameter	Ginna	Indian Point 3
Total Gaseous Release Rate, Ci/GWe-yr	11.6	9.6
Chemical Form		
- $^{14}\text{CO}_2$	10%	26%
- $^{14}\text{CH}_4$, $^{14}\text{C}_2\text{H}_6$, etc	90%	74%
Discharge Pathway		
- Gas Decay Tank	42%	7%
- Containment Venting	23%	78%
- Auxiliary Building Venting	35%	15%

아래 표는 Indian Point 3호기의 각 배출경로별 화학적형태의 비율을 보여주고 있는데, 발전소 배기구에서의 CO_2 형태는 34%로 측정되었다.

[표 3.16] Percentage of Various compounds in ^{14}C Activity Detected in Release pathways at Indian Point Unit 3

^{14}C Compound	% of ^{14}C Chemical Compounds		
	Decay Tank	Containment Air	Plant Vent
CH_4	62	60	46
$\text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10}$	29	32	20
CO_2	9	8	34

IAEA(Tech. Report 421, July 2004)에 따르면 원자력발전소 가동중 생성된 ^{14}C 은 80% 이상이 CO_2 형태로 배출되나 가압경수로 원전의 경우에는 그 비율이 5 ~ 25% 정도인 것으로 발표했다(나머지는 CH_4 와 C_2H_6).

다음 표는 IAEA 가 조사해서 발표한 원자로형별 ^{14}C 의 화학적 배출형태를 정리한 것이다.

[표 3.17] Comparison of the Chemical Forms of ^{14}C in Airborne Release from Various Types of Reactor

	$^{14}\text{CO}_2$	^{14}CO	^{14}C hydrocarbons
HWR(Bruce unit 7) ^{주1)}	65.5 ~ 72.8	0.2 ~ 3.7	26.7 ~ 34.4
HWR(Gentilly 2) ^{주2)}	77.9 ~ 97.5	0.01 ~ 0.09	25.0 ~ 22.0
PWR(USA, Europe)	5 ~ 25	-	75 ~ 95
BWR(USA, Europe)	80 ~ 95	-	5 ~ 20

주1) 1994년 11월 Canada AECL 에서 측정

주2) 1995년 9월 ~ 10월 Canada AECL 에서 측정

또한, Knemeyer, Wright and Cortina 가 Diablo Canyon 1,2호기에 대해 2010년 4월에 분석한 바에 따르면, 연간 6.8 Ci의 ^{14}C 이 배출되었으며, 그 중 CO_2 형태는 1.9Ci 로서 전체 배출량의 약 28%를 차지하였다.

[표 3.18] Diablo Canyon ¹⁴C Gaseous Sampling

	¹⁴ CO ₂	¹⁴ CH ₄	Particulate	Ratio
	Activity Concentration (pCi/ℓ)			CH ₄ /CO ₂
Unit #1				
CTMT Atmosphere	39.60	440.40	0.00	11.1
Plant Vent	0.18	2.12	-0.01	11.8
Waste Gas Header	3,810	2,736,190	-	718.2
Unit #2				
CTMT Atmosphere	41.2	1,538.80	-0.02	37.3
Plant Vent	1.31	0.74	0.00	0.56
Waste Gas Header	4,700	435,300	-	92.6
Gas Decay Tank 2-1	20,600	1,839,400	-	89.3

따라서, 지금까지의 연구결과를 종합하여 보면 가압경수로형 원자로에서 배출되는 ¹⁴C의 화학적형태는 5 ~ 28 % 가 CO₂ 인 것으로 정리된다.

한편, Vance, et al. (1995) 의 연구결과에 따르면, 계통내에 존재하는 ¹⁴C은 주로 유기물 형태인것으로 확인되었다. 1992년 3곳의 원자력발전소에서 냉각재 시료를 분석해 본 결과 비 방사능은 $8.05 \times 10^{-5} \sim 1.83 \times 10^{-4}$ μCi/cc 였고, 이 중 유기물비율은 57.8 % ~ 94.7% 수준이었다.

 [표 3.19] Chemical Speciation of ¹⁴C in Reactor Primary Coolant Water Samples

Plant	Sample Date	Total ¹⁴ C (μCi/cc)	Inorganic ¹⁴ C(μCi/cc)	% Organic ¹⁴ C
B	1/29/92	1.13E-04	1.65E-05	85.4
B	2/05/92	1.41E-04	7.51E-06	94.7
C	4/15/92	1.83E-04	2.80E-05	84.7
G	7/11/92	8.05E-05	3.40E-05	57.8

Magnusson 은 2002년부터 2006년까지 스웨덴의 Ringhals 3,4호기에 대해 분석한 결과 대부분이 (약 80.6 % ~ 100%) 유기물형태임을 확인하였다.

다음 표는 Ringhals 4호기에 대해 액체와 기체영역에서의 비방사능값과 유기물 형태의 비율을 분석한 결과를 정리한 것이다.

[표 3.20] Ringhals Unit 4 Process Water ¹⁴C Analysis

System	Gas Phase		Liquid Phase		Total	% Organic
	Inorganic	Organic	Inorganic	Organic		
	Activity Concentration ($\mu\text{Ci/g}$)					
R C S before IX(Jun.27)	2.43E-6	3.62E-4	1.59E-6	3.27E-4	6.93E-4	99.4
Jun 27	2.92E-6	3.49E-4	9.73E-7	3.30E-4	6.83E-4	99.4
July 5	3.08E-6	4.89E-4	1.49E-6	3.65E-4	8.59E-4	99.4
July 7	1.11E-5	3.95E-4	4.32E-7	3.54E-4	7.61E-4	98.4
RCS after IX Jun 27	4.97E-6	3.30E-4	4.78E-6	3.16E-4	6.56E-4	98.5
July 5	4.46E-6	3.08E-4	4.32E-7	3.35E-4	6.48E-4	99.2
July 5	<3.0E-8	4.89E-4	4.59E-8	3.54E-4	8.43E-4	100
S F P Before IX July 20			<9.2E-9	1.16E-7	<1.25E-7	>92.8
SFP After IX July 20			1.62E-8	6.76E-8	8.38E-8	80.6
W a s t e Water Tank			3.65E-6	1.51E-6	5.16E-6	29.4

국내의 경우 2006년부터 2008년까지 발전소 주요 배출구에서 측정 한 결과를 바탕으로 분석해본 결과 다른 나라와 다르게 무기물형태가 예상보다 높게 나왔다(D.H Lee. 2010. e-mail to EPRI). 유기물형태의 가중평균치(Weighted Average % Organic)를 보면 고리1호기의 경우 38.1%, 고리 3호기 27%, 영광5호기 49.6%, 울진 1,2호기 53.5% 를 각각 나타냈다.

3. 배출량 예측

가압경수로형 원전에서 배출되는 ^{14}C 은 대부분 기체이며, Fowler(1976)가 웨스팅 하우스형 1250MW급 원자력발전소에 대해 분석한 결과 다음 표에서 볼 수 있듯이 기체형태로 5.1 Ci/yr, 액체형태로는 $5.4 \times 10^{-3}\text{Ci/yr}$ 로 평가되어 액체상의 ^{14}C 배출은 무시할 수 있는 수준이다. IAEA 보고서(2004)에 따르면 전체배출량의 약 70 % 가 기체형태로 배출되며, 이는 생성량의 30%에 해당한다.

[표 3.21] PWR ^{14}C Source Terms

Source	Annual ^{14}C Discharge Rate	
	Ci/yr	% of Total
Gaseous		
Gaseous waste Disposal System	3.8	74.5
Condenser Air Ejector Off-gas	0.11	2.2
S/G Blowdown Tank Vent	4.5E-4	0.0088
Turbine Gland Seal	9.2E-7	0.0000018
Fuel handling Bldg Ventilation	0.69	13.5
Containment Purge	0.52	10.2
Auxiliary Bldg Ventilation	8.0E-4	0.016
Turbine Bldg Ventilation	8.7E-6	0.00017
Total	5.1	
Liquid		
CVCS	2.7E-3	
Liquid Waste Disposal Sys	1.9E-3	
S/G Blowdown	8.3E-4	
Turbine Drains	1.3E-5	
Total	5.4E-3	

한편, Magnusson(2008)이 스웨덴의 Ringhals 3,4호기(웨스팅하우스형, 2,775MWth)에서 2002년부터 2006년까지 평균배출량을 측정해본 결과, 기체형태로 70 ~ 86 %, 폐수지 등 고체폐기물로 9.1 ~ 9.9 %, 액체상으로는 0.29 ~ 0.37 % 가 각각 배출되는 것으로 확인되었다.

[표 3.22] Carbon-14 Source Terms and Release Pathways at Ringhals

	Ringhals Unit 3	Ringhals Unit 4
Basic Data^a		
Thermal Power, MWth	2,775	2,775
Energy Production, TWh/yr	7.35	7.24
Calculated ¹⁴ C Production, Bq/yr	2.83E+ 11	2.84E+ 11
	Percent of Calculated Production	
Gaseous Waste		
Stack Release	86	70
Solid Waste		
Spent resins	9.8	9.0
Filter Cartridges	0.02	0.02
Deposited on S/G Tubes	0.04	0.04
Liquid Waste		
Waste Water Tank	0.26	0.26
Ejector Condensate		0.08
Accumulation in RWST	<0.02	<0.02
Accumulation in Spent Fuel Pool	0.01	0.01
Total	97	80~87

주. a : 2002년 - 2006년 평균치

다음 표는 가압경수로형 원전에서 기체형태로 배출되는 ¹⁴C량을 NUREG 보고서에 따라 정리한 것으로 발전소에 따라 편차가 매우 큼을 알 수 있다. 특히, PWR-GALE Code 로 알려진 NUREG-0017(Rev 1, 1985)의 경우 1975년부터 1978년까지 4년간 평균배출량이 Conn Yankee원전은 연간 46 Ci를, Yankee Rowe 원전은 0.58 Ci 를 배출하는 것으로 조사되어 결과의 신뢰성이 다소 의심된다.

[표 3.23] Summary of Observed Gaseous Release Rates at PWRs

Reference	Unit	Ci/yr	Ci/GWe-yr
NUREG0017(Rev1)	Conn Yankee	46	
NUREG0017(Rev1)	Yankee rowe	0.58	
NUREG/CR-1629	Turkey Point 3,4	3.7	
NUREG/CR-0140	Ft. Calhoun	1.9	
NUREG/CR-0715	Zion 1,2	3.3	
NUREG/CR-4397	Prairie Island 1,2	3.6	
NUREG/CR-2348	Rancho Seco	3.6	
Kunz,1985	R.E Ginna		11.6
Kunz,1985	Indian Point 3		9.6

원자로형별 ^{14}C 배출량은 기체폐기물의 경우 중수로가 월등히 많고 다음이 가스냉각로, 경수로 순으로 평가되었다. 폐로시 고체폐기물까지 고려할 경우에는 가스냉각로에서도 중수로와 비슷한 양이 배출될 것으로 예상되었다(IAEA 2004). 다음 표는 원자로형별 ^{14}C 배출량을 예측한 결과를 정리한 것이다.

 [표 3.24] Arisings and Releases of ^{14}C From Various Types of Reactor

	Installed capacity (MW(e))	Gaseous waste (GBq/a)	Liquid effluent (GBq/a)	Solid waste (decommissioning) (GBq/a)
LWR-PWR	1000	129.5	1.3	647.5
LWR-BWR	1000	259.0	1.3	1165.5
HWR	600	3108	Small	703 ^a
GCR-MGR	480	373.7	Small	2982.2
GCR-AGR	660	255.3	Small	2479
GCR-HTGR	600	14.8	Small	Small
FBR	1250	0.65	Small	Small

중수로가 경수로에 비해 ^{14}C 배출량이 많은 이유는 ^{17}O 이 함유된 중수를 감속재로 사용하기 때문인데 중수로에서는 생성되는 ^{14}C 의 약 95.2% 가 감속재계통에서 생성되는 것으로 보고되고 있다.

NUREG-0017(Rev 0, 1976)에서는 가압경수로의 경우 연간 8 Ci, 비등수형 원자로의 경우 9.2 Ci 를 각각 배출하는 것으로 발표한 바 있다. (이후 Rev. 1 에서 가압경수로는 7.2 Ci 로 변경함)

UN 과학위원회의 자료를 토대로 IAEA 가 가압수형과 비등수형 원전의 기체상 ^{14}C 배출량을 정리한 결과는 다음 표와 같다.

[표 3.25] Average Normalized Airborne ^{14}C Releases from PWRs and BWRs

단위 : GBq/GWe-Yr

원자로형	1975 ~ 1979	1980 ~ 1984	1985 ~ 1989
PWR	222	345	120
BWR	518	330	450

제 4 장 국내외 ^{14}C 배출감시 규제요건

제 1 절 국내 규제요건

1958년 3월 11일 법률 제 483호에 따라 제정된 원자력법에 근간을 둔 원자력안전법(법률 제 12666호, 2014.5.21 일부개정)은 제정 목적에서 ‘방사선에 의한 재해의 방지와 공공의 안전을 도모함을 목적으로 한다’ 고 밝히고 있다. 그만큼 거의 대부분의 내용이 방사선안전관리에 초점이 맞춰져 있다.

그러나, 원자력법 제정당시에는 ‘원자력의 연구·개발·생산·이용과 관리에 관한 기본사항을 규정하여 학술의 진보와 산업의 진흥을 도모함으로써 국민생활의 향상과 인류사회의 복지에 기여하기 위하여’(제1조 목적)라고 규정하여 이용과 진흥에 중점을 둔 것임을 알 수 있다.

이처럼 원자력의 이용 측면이 강조되었으나 국제원자력기구(IAEA)의 원자력안전에 관한 협약, ‘원자력안전기관과 원자력에너지의 이용 및 진흥등과 관련된 기관의 효과적인 분리를 보증하여야 한다’ 과 기본안전원칙(BSS), ‘원자력안전기관은 그 책임을 다하기 위하여 원자력진흥조직이나 기구와 효과적으로 독립되어야 한다’ 을 준수하기 위하여 진흥과 규제를 분리하기로 하고 2011년 7월 25일 법률 제 10911호에 의거 원자력안전법을 제정하게 되었다(함철훈, 과학문화사, 2012)

방사선방호와 관련된 규정은 ‘방사선방호 등에 관한 규정(원자력안전위원회 고시 제2013-49호, 2013년 9월 9일)’ 에 명시되어 있으며, 동 고시에 배출관리기준과 환경상의 위해방지기준이 포함되어 있다.

이러한 기준들은 원자력안전법 제11조 제3호(발전용원자로 건설허가기준) 및 제21조 제3호(발전용원자로 운영허가기준)와 동법 시행령 제174조(환경상의 위해 방지), 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙(원자력안전위원회 공고 제2011-6호) 제32조 제1호 나목, 방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙(원자력안전위원회 공고 제2011-7호) 제10조 제3호(처리 및 배출)의 위임규정에 따라 작성되었다.

상기 내용을 법령, 규칙, 고시 순으로 정리하면 다음과 같다.

1. 원자력안전법

가. 법 제11조 제3호(건설허가 기준)

발전용원자로 및 관계시설의 건설로 인하여 발생하는 방사성물질 등으로부터 국민의 건강 및 환경상의 위해를 방지하기 위하여 대통령령으로 정하는 기준에 적합할 것

나. 법 제21조 제3호(운영허가 기준)

발전용원자로 및 관계시설의 운영으로 인하여 발생하는 방사성물질 등으로부터 국민의 건강 및 환경상의 위해를 방지하기 위하여 대통령령으로 정하는 기준에 적합할 것

2. 원자력안전법 시행령

가. 영 제174조(환경상의 위해방지)

국민의 건강 및 환경상의 위해를 방지하기 위한 기준은 다음 각 호와 같다.

1. 시설에서 배출되는 액체 및 기체상태의 방사성물질의 농도가 위원회가 정하는 기준에 맞을 것
2. 그 밖에 방사선 위해방지를 위하여 위원회가 정하는 기준에 맞을 것

3. 원자력안전법 시행규칙

가. 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙

(1) 제32조 제1호 나목

1. 기체 및 액체 방사성폐기물 처리시설은 다음 각 목의 기준에 적합할 것
 - 나. 제한구역 경계에서의 수중 및 공기중 방사성물질의 농도가 원자력안전

위원회가 정하는 배출관리기준의 제한값 이하가 되도록 원자로시설로부터 발생하는 방사성폐기물을 처리할 수 있을 것

나. 방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙

(1) 제10조 제3호

3. 핵연료물질 등을 처리 및 배출함에 있어 기체상의 방사성폐기물은 여과, 시간의 경과에 의한 방사능의 감쇠 또는 다량의 공기에 의한 희석 등의 방법으로 배기중의 방사성물질의 농도를 가능한 한 저하시킨 후 이를 배기시설에 의하여 배출할 것. 이 경우 제한구역 경계에서의 공기중 방사성물질의 농도가 영 제2조 제12호의 규정에 의하여 원자력안전위원회가 정하는 배출관리기준의 제한값을 초과하지 아니하도록 하여야 하며, 이를 위하여 배기구에서 배기감시설비로 배기중인 방사성물질의 농도를 감시하여야 한다.

4. 원자력안전위원회 고시(방사선방호 등에 관한 기준)

가. 제6조(배출관리 기준)

(1) 제1항 제1호, 제2호

1. 방사성물질의 종류를 알 수 있고 단일 방사성핵종일 때에는 별표3의 제1란의 해당 방사성핵종에 대한 제5란과 제8란의 농도
2. 방사성물질의 종류를 알 수 있고 2종 이상의 방사성핵종일 때에는 각 방사성핵종의 농도의 제1호에 따른 농도에 대한 각각의 비율의 합계가 1 이 되는 농도

(2) 제2항

배출관리 기준을 적용함에 있어 배기중 또는 배수중 방사성핵종의 허용농도는 1주간의 평균치로 한다. 다만, 부득이한 경우에는 3개월간의 평균치로 갈음할 수 있다.

나. 제16조(환경상의 위해방지)

(1) 제1항

- ① 영 제174조 제1호에서 “원자력안전위원회가 정하는 기준” 이란 기체 및 액체상태의 방사성물질의 제한구역 경계에서의 농도로서 별표 3의 제1란의 해당 방사성핵종에 대한 제5란 및 제8란에서 정하는 농도로 한다.

(2) 제2항 제1호(해당시설의 설계에 적용할 기준) 가목(기체상태의 방출물에 의한 제한구역 경계에서의 연간선량) 5)

- 5) 입자상 방사성물질, ^3H , ^{14}C 및 방사성옥소에 의한 인체 장기 등가선량 :
0.15 밀리시버트

(3) 제2항 제2호(동일부지 내에 다수의 시설의 운영에 적용할 기준) 가목(제한구역 경계에서의 연간 선량) 1)

- 1) 유효선량 : **0.25 밀리시버트**

^{14}C 에 대한 연간섭취한도, 유도공기중농도 및 배출관리기준은 다음과 같다.

[표 4.1] ALI, DAC and DRL for Airborne ^{14}C in Korea

핵종	흡 입				섭 취		
	화 학 적 형 태	ALI	DAC	배기중 배출관리 기준	화 학 적 형 태	ALI	배수중 배출관리 기준
		Bq	Bq/m ³	Bq/m ³		Bq	Bq/m ³
^{14}C	증기	3×10^7	1×10^4	1×10^2	표 지 유기화합물	3×10^7	1×10^6
	이산화물	3×10^9	1×10^6	1×10^4			
	일산화물	3×10^{10}	1×10^7	9×10^4			

상기 고시에서 살펴본 바와 같이 국내 원자력발전소의 경우 설계단계에서 기체 및 액체상태의 방출물에 의한 제한구역 경계에서의 연간선량한도가 규정되어 있으며, 운영단계에서는 설계요건 충족여부를 확인 평가하여야 하고 배출관리기준을 준수하여야 한다. 기체상태의 ^{14}C 배출로 인한 장기 등가선량은 제한구역 경계에

거주하는 일반인에 대하여 연간 0.15 mSv 이며, 배기중의 배출관리기준은 1×10^4 Bq/m³(CO₂ 형태) 이다.

배출관리 기준은 ‘일반인이 이러한 농도를 갖고 대기중으로 배기되는 방사성물질을 흡입할 경우에 받는 피폭선량이 일반인의 선량한도에 해당하는 유도된 수치를 의미하며, 고시에 규정된 값은 작업자의 유도공기중농도에 작업자와 일반인의 선량한도의 차이(1/20), 일반인과 작업자의 호흡률 및 활동시간의 차이(1/3), 연령군별 선량환산계수의 차이(1/2)를 가중하여 계산된 것이다.

계산에 사용된 작업자는 ICRP-23 에 제시된 표준인(Reference Man)이며, 작업 시간은 연간 2,000시간, 호흡률은 1.2 m³/hr, 선량한도는 20 mSv/yr 를 적용하였다.

제 2 절 주요국가 규제요건

IAEA 가 2004년 7월에 발간한 보고서(Management of Waste Containing Tritium and carbon-14, Technical Report Series No 421) 에 근거하여 주요국가의 14C 배출규제 요건을 살펴보았다.

1. 아르헨티나

발전소 운영중 방사성폐기물 배출로 인한 주민피폭선량으로 배출관리를 규제하며 그 내용은 다음과 같다.

- 가. Critical Group 에 대한 연간 개인선량은 0.3mSv를 초과하지 않아야 함
- 나. 단위 전기출력당 예탁집단선량은 1.5×10^{-2} Sv를 초과하지 않아야 함
 $(1.5 \times 10^{-2} \text{ Sv/MWe-yr})$

이를 위해 핵종별 유도배출기준(Derived Release Limits) 을 설정하여 운영하고 있다.

2. 캐나다

각 발전소별로 유도배출기준(Derived Release Limits) 을 설정하여 운영하고 있으며, 일반인에 대한 연간선량은 5 mSv를 초과하지 않도록 하고 있다. 따라서, 발전소의 위치에 따라 유도배출기준은 큰 차이가 있다. 주민거주지와 멀리 떨어

진 곳의 발전소는 유도배출기준치가 가까운 곳에 비해 훨씬 큰 값을 가지게 되며 아래 표는 그 예를 보여준다.(Pt. Lepreau 와 Gentilly 2호기 비교)

[표 4.2] DRLs for Airborne ^{14}C Discharges for CANDU 600MWe in CANADA

원전별	TBq/week	TBq/yr
Pt. Lepreau	3.00×10^2	1.56×10^4
Gentilly 2	1.70×10^1	8.84×10^2

3. 프랑스

^{14}C 배출과 관련한 배출제한치는 없으며, 향후 제정 예정이다.

4. 러시아

기본적으로 IAEA Safety Series No 115(1996년) 및 ICRP 권고(ICRP-60, 1990)에 따라 방사선방호기준이 수립되었다. 방호기준에 따르면, 일반인에 대한 선량한도는 연간 1mSv, 종사자에 대해서는 연간 20mSv 로 제한하고 있으며, 상기 방호기준을 만족하기 위해 연간섭취량과 방사성물질의 농도를 제한하고 있다. 특히, 배출제한치는 배출되는 모든 핵종으로 인한 복합적 영향(Combined Effect)을 고려하여 수립되었다. 또한 안전계수(Safety Factor)를 사용하여 규제를 강화하고 있는데 기존 원전은 '5'를 신규 건설 원전은 '25'를 채택하고 있다.

다음 표는 원전 종사자와 일반인에 대한 ^{14}C 의 연간섭취한도 및 허용농도를 정리한 것이다.

[표 4.3] Limitations on ^{14}C intake for Nuclear Operator(Russian Federation)

화학적 형태	선량환산계수(Sv/Bq)	연간섭취한도(Bq/yr)	허용농도(Bq/m ³)
Elementary Carbon	5.8×10^{-10}	3.4×10^7	1.4×10^4
CO ₂	6.2×10^{-12}	3.2×10^9	6.2×10^6
CO	8.0×10^{-13}	2.5×10^{10}	1.0×10^7

[표 4.4] Limitations on ^{14}C intake for the General public(Russian Federation)

화학적 형태	선량환산계수(Sv/Bq)	연간섭취한도(Bq/yr)	허용농도(Bq/m ³)
모든 형태	공기로 섭취시		
	2.5×10^{-9}	4.0×10^5	5.5×10^1
	물과 음식으로 섭취시		
	1.6×10^{-9}	6.3×10^5	2.4×10^2

5. 영국

ICRP-60 권고보다 훨씬 낮게 선량한도를 설정하여 운영하고 있으며, 특히 폐로 단계인 원전(예 : Trawsfynydd 원전)에 대해서는 매우 낮은 배출제한치를 적용하고 있다. 다음 표는 ^{14}C 의 배출제한치 및 이로 인한 주민선량한도를 정리한 것이다. 영국 규제당국에서는 가까운 시일내에 배출제한치를 변경할 예정이다.

 [표 4.5] Airborne ^{14}C Discharge Limits at Various NPP in the UK

구 분	Bradwell	Dungeness	Hinkley Point A	Oldbury	Wylfa	Szevel A	Trawsfynydd
배출제한치 (TBq/yr)	5	4	6	1.5	24.7	5	2.4
변경규제치 (TBq/yr)	0.6	5	4	5	2.3	2	0.01
주민선량제한치 ($\mu\text{Sv/yr}$)	80	165	116	191	64	174	0.22

6. 미국

미국은 원자력시설에 대한 규제가 이원화되어 있다.

원자력규제위원회(NRC)에서는 상업용 원자로, 연구용 원자로 및 핵물질에 대한 규제와 인허가 업무를 담당하며, 32개 주정부와 협약을 체결하여 운영하고 있다. 협약에 따라 주정부는 적은 양의 특정 핵물질이나 방사성동위원소, 부산물 등에 대해 규제책임을 갖는다. 에너지부(DOE, Department of Energy)는 정부 소유의 핵물질 생산 또는 처리시설, 방사성폐기물처리시설 운영자에 대해 감시감독 업무를 수행한다. 두 기관 모두 원자력시설을 규제하는 연방 규정에 따라 규제업무를 수행한다. 한편, 환경보호청(EPA, Environmental Protection Agency)에서는 환경에 대한 국가정책 및 목표를 수립하고 이를 위한 규제법령을 제정한다.

대기오염물질에 대한 국가배출기준(NESHAPS, National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants)에 따르면 모든 기체방사성폐기물 배출로 인한 주민선량은 연간 0.1mSv 로 제한하고 있으며, 수중 베타-감마방사선에 의한 전신 또는 장기 선량은 0.04mSv 로 제한된다. EPA 가 정한 ^{14}C 에 대한 음용수의 안전기준은 74Bq/ℓ (2,000 pCi/ℓ)이며(삼중수소의 경우 740Bq/ℓ), 이는 배출제한치는 아니다. 그러나 일부 연방규제기관이나 주정부에서는 이를 배출제한치로 사용하기도 한다.

가. 측정 및 보고요건

액체와 기체유출물에 대한 방사능분석 요건은 방사성유출물 기술지침서(RETS, Radiological Effluents Technical Specification)에 명시되어 있다. RETS에는 On-line 감시뿐만 아니라 시료채취 및 분석, 보고요건까지 포함되어 있으며, 반드시 분석되어야 하는 특정핵종 및 그 핵종에 대한 분석하한치(LLD)도 규정되어 있다. 그러나, ^{14}C 에 대해서는 다음과 같은 이유로 해서 액체나 기체 모두 보고요건에 해당하지 않는다.

- ^{14}C 은 순수 베타방출체이며, 혼합핵종에서 구분(찾아내기)하기 어렵다.
- 원자력발전소에서 배출되는 양이 지구상에 존재하는 ^{14}C 의 재고량(Inventory)에 주는 영향이 극히 적다(Minimal impact on the world inventory of ^{14}C)
- ^{14}C 은 배출 후 확산되기 전까지 지역 농산물에 미치는 영향이 적다.

RETS 는 원래 발전소의 운영기술지침서의 일부였으나, 원자력규제위원회에서는 1991년 Generic letter 89-01 을 통해 RETS 대신 소외주민선량계산프로그램 (ODCM, Offsite Dose Calculation Manual)을 사용할 수 있도록 허용하였다.

한편, 방사성유출물 배출량에 대한 연간 및 반기보고서는 규제지침 (Reg Guide)1.21 (Rev 2) 에 따르도록 되어 있으며, 대부분의 원자력발전소 운영 기술지침서에도 이를 준수하도록 명시되어 있다.

나. 규제지침(Reg guide 1.21) 요건

2009년 6월에 개정된 Reg Guide 1.21 (Rev 2)에서는 원자로 규제감시절차에 위험도 기반 원칙(Risk-informed Principals) 이 도입되어 ^{14}C 을 잠재적인 주요핵종(Principal Radionuclide)에 포함해야 한다는 논의가 시작되었다.

그 이유로 상업용 원자력발전소에서 배출되는 방사성유출물이 **^{14}C 이 주요핵종으로 대두될 만큼** 지속적으로 감소되어 왔다는 점을 들고 있다. 이에 따라 원전운영자는 ^{14}C 이 기체유출물중 주요핵종에 해당하는 지의 여부를 평가하도록 되었으며, 주요핵종 선정기준을 다음과 같이 제시하였다.

특정핵종의 상대적 기여도를 다음 항목 고려하여 평가

- 주민선량 : 10 CFR 50 App. I 에서 정한 설계목표치와 비교
- 방사능배출량 : 발전소에서 배출되는 타 핵종과 비교

따라서, 배출방사능량이 많거나, 주민피폭선량에 기여하는 것이 크다면 주요핵종으로 선정하여 감시해야 하며, 이 경우 ODCM 에서 정한 분석하한치를 만족하여야 한다. 액체형태로 배출되는 ^{14}C 은 기체에 비해 피폭기여도가 매우 적으므로 감시할 필요가 없다.

^{14}C 의 감시방법으로는 직접 시료를 채집하여 분석하거나, NCRP Report 81 또는 GALE Code(NUREG-0017) 를 이용한 이론적인 계산법을 사용할 수 있다.

이론적 계산법을 사용하여 배출량을 평가할 경우에는 척도인자(Scaling factor)와 핵분열률(Fission Rate)을 기반으로 하여야 하지만 정확하고 자세한 평가는 요구되지 않으며, 직접 시료를 채취하여 분석할 경우 유출물에 대한 적절한 분석과 보고가 가능하다면 분석주기는 조절이 가능하다.

제 5 장 국내원전 ^{14}C 배출량 비교평가

제 1 절 ^{14}C 배출감시 경위 및 방법

제 4 장에서 살펴본 바와 같이 국내에서는 2001년 1월 방사선방호 등에 관한 기준 (교과부 고시, 현재는 원안위 고시 제2013-49호) 에 원자력발전소의 설계기준 으로서 ^{14}C 등에 의한 주민선량한도가 포함됨으로써 법제화가 되었다고 볼 수 있다. 동 고시의 관련 조항에 따르면 ‘입자상 방사성물질, ^3H , ^{14}C 및 방사성옥소에 의한 인체 장기 등가선량’ 이 제한구역 경계에서 연간 0.15mSv를 넘지 못하도록 규정하였다. 이에 따라 ^{14}C 의 배출량 평가가 필요하게 되었으며, 규제기관에서는 2001년 6월에 영광 5,6호기 운영허가조건 후속조치로 경수로 원전에 대한 ^{14}C 배출감시 이행을 요구하였다.

원전 운영자인 한국수력원자력(주)(이하 ‘한수원’ 이라 함)에서는 2003년 1월부터 2008년 12월까지 두 차례에 걸쳐 ^{14}C 의 배출량 및 환경영향 조사를 실시하였으며, 조사결과 경수로 원전에서 연간 약 3.5 Ci의 배출과 주민선량에 영향이 있는 것을 확인하였다. 조사결과는 그해 12월 23일 규제기관에 설명되었고 한수원에서는 주민선량평가 체계를 재검토한 이후 ^{14}C 의 배출감시가 필요하다는 입장을 피력 하였다. 그러나 규제기관에서는 교과부고시를 근거로 경수로 원전에 대한 ^{14}C 배출감시 방침을 결정하고 그 이행을 촉구하게 되었다.

이에 따라 한수원에서는 ‘2012년부터 경수로 원전에 대한 ^{14}C 배출감시를 시행하는 것’을 골자로 한 ^{14}C 배출감시 시행계획을 2009년 5월에 수립하였다.

그 이후 한수원과 규제기관간 배출량 감시 및 평가방법에 대한 협의를 거쳐 (한수원에서는 미국의 사례 및 분석장비의 운영에 따른 고비용의 문제를 들어 이론적계산법에 의한 간접법을, 규제기관에서는 유럽 내 원전의 사례 및 중수로 원전의 예를 들어 직접법을 주장함) 단계별로 추진기로 하였는데 1단계는 2012년도에 간접법을 적용하고, 2단계인 2013년도 부터는 직접법을 적용하기로 하였다.

다음은 직접법 시행을 위한 세부 시행방안이다.

가. 감시주기 및 대상

(1) 감시주기 : 1회*/분기

* 매분기 첫번째 달 (1개월간 연속채집)

(2) 감시대상 : 호기별 ^{14}C 배출점유율이 큰 배기구 2 ~ 3 곳* 선정

* 연료건물(60%), 폐기물처리건물(20%), 보조건물(10%) 등으로 전체 배출량의 약 90% 차지

[표 5.1] Sampling Points of Airborne ^{14}C for Domestic PWRs

구 분	고 리		영 광(한빛)			울 진(한울)			합계
	#1,2	#3,4	#1,2	#3,4	#5,6	#1,2	#3,4	#5,6	
총배기구	3	7	7	9	9	2	9	9	55
감시대상	2	5	5	5	5	2	5	5	34

* 2014 년 현재 신고리 1발전소, 신고리 2발전소 및 월성 3발전소가 추가되었음

나. 시료채취 및 분석

(1) 시료채취 : CO_2 형태만 포집

* Hydrocarbon 은 주민선량에 미치는 영향이 CO_2 대비 약 1/10,000 수준이므로 채취 불요

(2) 시료분석 : 액체섬광계수기(Liquid Scintillation Counter)를 이용한 단순 측정법 적용

제 2 절 ^{14}C 배출량 비교평가 결과

국내 가압경수로형 원전에서는 앞 절에서 기술한 바와 같이 2012년도부터 ^{14}C 배출감시가 수행되었다. 당초 계획으로는 2012년에는 간접법으로, 2013년도부터는 직접법으로 배출감시를 수행할 예정이었으나 직접법을 적용하기 위한 장비의 구입 및 관련절차의 개발 등이 다소 지연되어 실제로는 2013년 2/4분기부터 직접법에 의한 배출감시가 수행되었다.

본 절에서는 원자력발전소 최종안전성분석보고서(FSAR)에 기술된 국내 가압

경수로형 원전의 ^{14}C 배출량 예상치와 EPRI 방법론(2010 Technical Report)을 이용하여 계산한 이론적 배출량(간접법) 및 시료를 직접 채취하여 분석한 결과(직접법)를 상호 비교 분석코자 한다.

가. 최종안전성분석보고서(FSAR) 상의 ^{14}C 예상배출량

국내 각 원자력발전소의 최종안전성분석보고서 11장(Chap. 11)에는 발전소 운영 중 발생하는 방사성폐기물관리에 관한 사항이 기술되어 있으며, 액체 및 기체 방사성폐기물의 연간 예상배출량(Expected Annual Release) 이 제시되어 있다.

다음 표는 국내 가압경수로형 원전의 ^{14}C 예상배출량을 정리한 것이다.

[표 5.2] Expected Annual Release of ^{14}C Domestic PWRs(FSAR)

(단위 : TBq/yr-2개호기)

구 분	고 리		영 광(한빛)			울 진(한울)		
	#1,2	#3,4	#1,2	#3,4	#5,6	#1,2	#3,4	#5,6
예상배출량	0.54	0.54	0.59	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54

상기 표에서 볼 수 있듯이 원자로 열출력이나 설계, 제작사 등 발전소 특성과 상관 없이 동일한 값(한빛 1,2호기 제외)을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

0.54 TBq 은 기존 단위로 환산하면 14.6 Ci 에 해당하는데 이는 NUREG-0017 Rev 2 (1985) 에서 제시한 미국 원전의 평균치 (호기당 7.3 Ci/yr)와 정확히 일치한다. 따라서, FSAR 작성시 명확한 계산결과를 이용하지 않고 PWR GALE Code 로 알려진 상기 문헌자료를 인용하여 기술한 것으로 추측되며, 이 값은 충분한 보수성이 있어 그 이후 그대로 사용한 것이 아닌가 판단된다.

나. EPRI 방법론을 이용한 ^{14}C 예상배출량 계산

미국 전력중앙연구소(EPRI, Electric Power Research Institute) 에서는 2010년 원자력발전소 기체유출물중의 ^{14}C 예상배출량 계산에 관한 보고서를 발간하였다. (Estimation of Carbon-14 in Nuclear Power Plant Gaseous Effluents)

동 보고서에 따른 방법론(생성률, 배출량 등)은 본 논문의 제3장에 상세히 기술 되어 있다.

본 절에서는 EPRI 방법론을 이용하여 국내 가압경수로형 원자력발전소에서
¹⁴C 예상배출량을 계산하였다.

다음 표는 계산결과를 정리한 것이다.

[표 5.3] Estimation of Airborne ¹⁴C for Domestic PWRs

구 분		열출력 (MWth)	냉각재 압력(kg/cm ²)	냉각재 밀도(kg/l)	냉각재 질량(kg)	¹⁴ C생성량 (Ci/yr)	¹⁴ C배출량 ^{주)} (Ci/yr)
고리	#1	1,723	158.2	0.7208	7,244	5.75	1.69
	#2	1,876	158.2	0.7096	6,692	5.51	1.64
	#3	2,900	158.2	0.7032	9,936	8.33	2.45
	#4	2,900	158.2	0.7032	9,936	8.33	2.45
한빛	#1	2,900	158.2	0.7032	9,936	8.33	2.45
	#2	2,900	158.2	0.7032	9,936	8.33	2.45
	#3	2,825	158.2	0.7016	10,951	8.55	2.51
	#4	2,825	158.2	0.7016	10,951	8.55	2.51
	#5	2,825	158.2	0.7016	10,951	9.60	2.82
	#6	2,825	158.2	0.7016	10,951	9.60	2.82
한울	#1	2,905	158.2	0.7130	9,981	7.93	2.33
	#2	2,905	158.2	0.7030	9,981	7.93	2.33
	#3	2,825	158.2	0.6994	10,918	8.53	2.50
	#4	2,825	158.2	0.6994	10,918	8.53	2.50
	#5	2,825	158.2	0.7016	10,951	9.60	2.82
	#6	2,825	158.2	0.7016	10,951	9.60	2.82

주) CO₂ 형태의 배출량만 계산

주) 기체형태 방출분율 및 CO₂ 분율은 EPRI 보고서의 최대치를 적용하여 계산

- 기체형태 방출분율 : 90 % ~ **98 %**
- CO₂ 분율 : 5 ~ **30 %**

한편, 상기 EPRI 방법론을 적용하여 간접법으로 ¹⁴C 배출량을 평가한 결과를
 다음 표와 같이 정리하였다(평가기간중 가동일수등이 적용되었으므로 상기 표에서
 계산된 이론치와는 다소 차이가 있음).

[표 5.4] Calculated ^{14}C Release for Domestic PWRs

(단위 : TBq/2개 호기)

구 분	고리1발	고리2발	한빛1발	한빛2발	한빛3발	한울1발	한울2발	한울3발
2012년	0.122	0.182	0.182	0.187	0.209	0.172	0.185	0.209
2013년 1분기	0.030	0.045	0.045	0.046	0.051	0.043	0.046	0.051

다. 시료채취 분석에 의한 ^{14}C 배출량

2013년 4월부터 아래와 같이 시료를 채취하여 액체섬광계수기를 이용하여 분석하였다.

(1) 시료채취

- (가) 매 분기초에 1개월간 시료포집장치를 소내방사선감시설비(RMS)에 연결하여 채취(그림 5.1 참조)
- (나) 시료포집장치내에는 NaOH 용액이 들어 있는 칼럼 4개가 직렬로 연결
- (다) 각 칼럼에는 NaOH 용액이 350 ~ 400 ml 씩 담겨 있음

(2) 시료분석

- (가) 4개의 CO_2 포집병의 NaOH 용액을 혼합하여 하나로 만든다.
- (나) 피펫을 이용하여 상기 시료에서 1 cc 를 취한다.
- (다) 디스펜서를 이용하여 시료병에 각테일 용액을 19 ml 주입한다.
- (라) 각테일과 시료가 잘 혼합되도록 시료병을 흔든 다음 시료를 어두운 곳에 6시간이상 보관하여 안정화시킨다.
- (마) 액체섬광계수기를 이용하여 분석한다. 이때 에너지범위는 ^{14}C 이 최대 156 keV, 평균 45 keV의 베타선을 방출하는 것을 감안하여 20 keV ~ 156 keV 로 설정하여 ^3H 에 의한 영향을 최소화한다.

[그림 5.1] ^{14}C 포집장치 설치 사진(한빛 제3발전소)



다음 표는 위 사진과 같은 ^{14}C 시료 포집장치를 이용하여 2013년 2분기부터 2014년 3분기까지 분석한 결과를 정리한 것이다.

[표 5.5] Summary of Measured Airborne ^{14}C Release Data for Domestic PWRs
(단위 : TBq/2개 호기)

구 분	고리1발	고리2발	한빛1발	한빛2발	한빛3발	한울1발	한울2발	한울3발
2013년 2분기	0.041	0.045	0.050	0.006	0.003	0.049	0.009	0.062
2013년 3분기	0.038	0.059	0.053	0.003	0.0002	0.060	0.008	0.029
2013년 4분기	0.008	0.031	0.026	0.044	0.004	0.043	0.005	0.043
2014년 1분기	0.009	0.028	0.013	0.115	0.037	0.026	0.034	0.042
2014년 2분기	0.015	0.054	0.012	0.016	0.021	0.016	0.026	0.074
2014년 3분기	0.012	0.067	0.033	0.003	0.007	0.016	0.041	0.024

라. ^{14}C 배출량 계산결과 비교

국내 가압경수로형 원전의 FSAR 에 기술된 ^{14}C 의 예상배출량(설계치)과 2012년부터 수행한 EPRI 방법론에 의거한 계산치, 그리고 2013년 2분기부터 수행한 시료의 직접 채취 분석법에 의한 결과를 상호 비교하여 보았다. 그 결과 실측치는 FSAR 에 기술된 설계치와 비교시 10.4 % 에서 32.4% 수준을 보였으며, EPRI 방법론을 적용한 간접법과는 큰 차이를 보이지 않았다. 다음 표는 3가지 방법으로 평가한 ^{14}C 배출량을 정리한 것으로 비교의 편의를 위해 1년간의 자료만을 사용하였다.(간접법 : 2012.1.1 ~ 2012.12.31, 직접법 : 2013.4.1 ~ 2014.3.31)

[표 5.6] ^{14}C Release Data comparison for Domestic PWRs

구 분	고리1발	고리2발	한빛1발	한빛2발	한빛3발	한울1발	한울2발	한울3발
FSAR	0.54	0.54	0.59	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
간접법	0.122	0.182	0.182	0.187	0.209	0.172	0.185	0.209
직접법	0.096	0.164	0.142	0.168	0.037	0.178	0.056	0.175

제 3 절 ^{14}C 배출에 의한 주민선량 평가 결과

2013년도에 배출된 기체상의 ^{14}C 에 의한 주민선량을 ODCM을 이용하여 평가하여 보았다. 자료 입수의 어려움과 경향만을 평가해 보기 위해서 이므로 한빛 5,6호기만을 대상으로 하였다. 2013년도 기체상의 ^{14}C 총 배출량은 5,6호기 합산하여 0.0579 TBq 로 집계되었으며, 이로 인한 제한구역 경계에서의 일반인에 대한 장기 등가선량은 $2.757 \times 10^{-3}\text{mSv}$ 로 평가되었다. 이 값은 원자력안전위원회 고시에서 정한 제한치(0.15mSv)와 비교시 약 1.84%에 불과하였으며, ^3H 등을 포함시켜 계산한 장기 등가선량 $2.921 \times 10^{-3}\text{mSv}$ 를 적용하여도 1.95% 수준임을 확인하였다.

그러나, ^{14}C 에 의한 장기 등가선량 기여도는 약 94.4%나 되므로 배출량 저감을 위한 연구개발노력이 필요한 것으로 판단된다. 다음 표는 이 같은 평가결과를 요약 정리한 것이다.

[표 5.7] Offsite Dose Calculation Results by Airborne ^{14}C Release at Hanbit Units 56

항 목	5호기	6호기	비 고
^{14}C 배출량(TBq)	0.030	0.0277	FSAR설계치 : 0.27/호기
EAB*에서의 농도 (mBq/m ³)	7.05	6.47	배출관리기준 : 10,000
^{14}C 에 의한 장기등가 선량(mSv)	9.244 E-04	1.833 E-03	설계제한치 : 0.15
전체 장기 등가선량(미립자, 옥소 등 포함)(mSv)	9.739 E-04	1.947 E-03	설계제한치 : 0.15

* EAB : 제한구역경계(Exclusion Area Boundary)

제6장 결 론

본 논문에서는 직접법과 간접법에 의한 ^{14}C 배출량을 최근 1년간 자료를 이용하여 비교하였다.(간접법 : 2012.1 ~ 2012.12, 직접법 : 2013.4 ~ 2014.3). 그 결과 직접법에 의한 배출량이 간접법에 비해 발전소별로 17.7 % ~ 103.5% 수준임을 확인할 수 있었으며, 어느 경우에도 최종안전성분석보고서(FSAR)에 명시된 예상 배출량(Expected Release)보다는 훨씬 낮은 수준(직접법과 비교시 10.4% ~ 32.4%)을 유지하고 있음을 확인하였다.

또한, 직접법에 의한 2013년도 ^{14}C 배출량을 기준으로 한빛 5,6호기에 대해 주민 피폭선량을 계산해본 결과 연간 $2.757 \times 10^{-3}\text{mSv}$ 으로 평가되어 설계제한치인 0.15mSv 대비 1.84% 수준으로 낮았으나 전체 기체배출로 인한 총 선량 $2.921 \times 10^{-3}\text{mSv}$ 중 차지하는 비율은 94.4%로서 매우 높은 편임을 확인할 수 있었다.

총 6개호기가 가동중인 한빛원자력본부 전체로 볼 때는 총 주민피폭선량 $5.824 \times 10^{-3}\text{mSv/yr}$ 중 ^{14}C 배출에 의한 선량이 $5.139 \times 10^{-3}\text{mSv}$ 를 차지하여 약 88.24%의 선량 기여도를 보였다. 따라서, 앞에서 살펴본 주요핵종에 해당하는 것이 확실하므로 향후 지속적인 배출량평가가 요구된다 하겠다.

한편, 국내 가압경수로형 원전 중 일부 원전의 FSAR에 기술된 ^{14}C 의 연간 예상 배출량이 발전소 설계특성이 고려되지 않고 동일한 값으로 기술되어 있음을 확인할 수 있었는데 바 정확한 근거자료는 찾을 수 없었으나 1985년에 발표된 미국의 PWR-GALE Code(NUREG-0017, Rev 1)를 인용한 것으로 추정된다.

참고문헌

- [1] Estimation of Carbon-14 in Nuclear Power Plant Gaseous Effluents. EPRI, Palo Alto,CA:2010
- [2] Technical Reports Series No. 421. Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14, IAEA, 2004
- [3] ¹⁴C Produced by Nuclear Power Reactors, Asa Magnusson, Lund University,2007
- [4] "방사선 안전관리를 위한 원자력안전법 개론" 함철훈, 과학문화사,2012한
- [5] "원자력발전소 방사선관리 연보", 한국수력원자력(주), 2013
- [6] "각 원자력발전소 최종안전성분석보고서", 한국수력원자력(주)
- [7] Carbon-14 Production in Nuclear Reactors, ORNL/NUREG/TM-12, 1977
- [8] "경수로원전 C-14 배출감시 시행계획(안)", 한국수력원자력(주), 2011.
- [9] Life cycle and management of carbon-14 from nuclear power generation, Man-Sung Yim, Elsevier Ltd, 2005.
- [10] 원자력안전법(법률 제 12666호, 2014.5.21)
- [11] 원자력안전법 시행령(대통령령 제24689호, 2014.1.1)
- [12] "원자력시설 등의 기술기준에 관한 규칙"(원자력안전위원회 공고 제2011-6호),2011.11
- [13] "방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙"(원자력안전위원회 공고 제2011-7호), 2011.11
- [14] "방사선방호 등에 관한 기준"(원자력안전위원회 고시 제2013-49호), 2013.9
- [15] "액체섬광계수기 교정 및 운영절차서"(방사선-8410), 한국수력원자력 한빛제3발전소
- [16] "Carbon-14 Production in Nuclear Reactors" Davis,W.Jr., ORNL/NUREG/TM-12,1977
- [17] "Long-Lived Activation Products in Reactor Material", Evans,J.C., et al., NUREG/CR-3474, August 1984
- [18] "Public Health Considerations of carbon-14 Discharges from the Light-Water-Cooled Nuclear Power Industry" Fowler, T.W., et al.,Technical Note ORP/TAD-76-3, U.S. EPA, July 1976
- [19] "Health Impact Assessment of Carbon-14 Emission from Normal Operations of Uranium Fuel Cycle Facilities" Fowler, T.W., et al., EPA 520/5-80-004, June 1979
- [20] "Carbon-14 Discharge at Three Light-Water Reactors", Kunz,C., Health Physics, 49, 1985

감사의 글

국내 최초의 원자력발전소인 고리 1호기 준공과 더불어 원자력과 인연을 맺은 지 어언 30년의 세월이 훌쩍 넘어갔습니다. 이제는 정리하고 제2의 인생을 준비해야 할 시점에 ‘늦었다고 생각하는 순간이 가장 빠르다’는 격언을 좇아 바쁘다는 핑계로 늘 마음뿐이었던 석사과정에 도전하였습니다. 주경야독이 결코 쉽지는 않았지만 훌륭한 교수님들의 애정 어린 지도와 같이 공부했던 회사 선배님들의 아낌없는 조언과 헌신적인 도움덕분에 여기까지 올 수 있지 않았나 생각합니다. 늦은 저녁 강의실 불을 환하게 켜놓고 같이 공부하며 격려하고, 때론 과제 해결을 위해 토론하고, 고민하며 지냈던 지난 시간들은 모두가 저에게 한순간도 잊지 못할 소중한 순간들입니다.

특히, 올해는 회사에 크고 작은 일들도 많아 학업에 전념하지 못한 점은 후회로 남게 될 것입니다. 저녁시간에 멀리 광주에서부터 강의를 해 주시기 위해 영광 원자력본부까지 방문해 주신 교수님들께는 항상 죄송스러운 마음에 편치 못했던 것도 사실이었습니다. 특히, 열정을 쏟은 강의와 늘 학생들의 입장을 먼저 배려해주신, 그리고 변변치 못한 논문을 지도해주신 이경진 교수님께는 마음 깊이 감사의 말씀을 드립니다.

논문 심사과정과 평소 학교생활을 통하여 변함없는 애정과 관심으로 격려해 주신 김진원 교수님, 나만균 교수님, 송종순 교수님 그리고 밤낮으로 학과 일에 온갖 정열을 바치시는 정운관 학과장님께도 이 기회를 빌어서 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

또한, 논문에 필요한 국내원전 관련 자료를 찾아주고 도움을 주신 김보람 주임께도 고맙다는 말을 전해드리고 싶습니다.

끝으로, 오늘의 결실이 있기까지 정신적인 지원과 영원한 동반자 역할을 해준 사랑하는 아내와 자랑스러운 아빠가 되기 위해 항상 노력하지만 늘 부족한 것이 더 많은 아빠를 믿고 의지해 준 든든한 두 아들에게도 본 지면을 통해 감사의 마음을 전해 드립니다.

2014년 10월

서 승 남

저작물 이용 허락서					
학 과	원자력공학과	학 번	20137250	과 정	석사
성 명	한글 : 서 승 남 한문 : 徐 承 男 영문 : SEO SEUNGNAM				
주 소	전남 영광군 홍농읍 상하리 한수원 사택 117-1104호				
연락처	E-mail : snseo@khnp.co.kr				
논문제목	국내 PWR 원전 C-14 배출량 계산결과 비교평가 연구				
	A study of C-14 Release Data Comparison in Domestic PWR Plants				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함. 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음. 7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. <p style="text-align: center;">동의여부 : 동의(O) 반대()</p> <p style="text-align: center;">2014년 11월</p> <p style="text-align: right;">저작자: 서 승 남 (인)</p>					
조선대학교 총장 귀하					