

# 원자력시설의 Carbon-14 방사성유출물에 대한 감시배경의 조사

김희근, 공태영, 정우태, 김석태  
한전 전력연구원

2009년 11월 16일 접수 / 2009년 11월 30일 1차수정 / 2009년 12월 4일 채택

원전에서는 많은 종류의 방사성물질이 생성되어 일부는 환경으로 방사성유출물로서 배출되고 있다. 이러한 방사성유출물 중에서 탄소 동위원소인 Carbon-14는 자연에서 이미 높은 준위의 백그라운드를 형성하고 있기 때문에, 원전에서 Carbon-14가 배출되더라도 환경이나 일반인의 피폭방사선량에 미치는 영향이 미미하여 과거에는 배출감시와 환경감시를 수행하지 않았다. 그런데, 핵연료 제조기술 발달과 운전방법 개선으로 핵연료로부터 불활성기체와 입자방사성물질의 방출이 계속 감소하고 있다. 또한 방사선계측기술의 향상에 따라 삼중수소와 Carbon-14 같은 저준위 베타방사능 핵종의 검출준위가 낮아져, 이들 핵종이 일반인 선량평가에서 미치는 비율이 상대적으로 높아지고 있다. 본 논문은 원자력시설에서 발생하는 Carbon-14에 대해 미국의 기술보고서와 논문 등을 검토하여 배출관리와 환경 영향평가에 대한 방사선감시의 기술적 배경을 조사하였다. 이를 바탕으로 Carbon-14 방사성핵종의 배출감시 방안에 대한 타당성을 제시하고자 하였다.

중심어: 원자력시설, 방사성유출물, 배출관리, 환경영향평가, 방사선감시, Carbon-14

## 1. 서론

원자력시설에서는 많은 종류의 방사성유출물이 생성되고, 일부는 환경으로 배출되고 있다. 특히 원전의 가동 초창기에는 핵연료 제조기술, 원전 운전 및 보수기술의 미숙으로 핵연료에서 생성된 불활성기체와 입자 방사성핵종이 계통내로 누설되고, 이들 방사성핵종의 일부는 방사성유출물로서 환경으로 배출되었다. 이에 따라 원전주변에 대한 피폭방사선량에서 핵연료로부터 누설된 불활성가스와 입자방사성물질에 의한 원전 주민선량의 기여가 높게 나타났다\*. 한편 원전 가동 초창기에는 삼중수소나 Carbon-14와 같은 저준위 베타방사성물질에 의한 주민선량의 기여가 낮게 나타났다. 따라서 Carbon-14의 경우 관심 핵종이 아니었고, 감시를 필요로 하지 않았다\*.

원전에서 배출되는 방사성유출물 중에서 탄소의 동위원소인 Carbon-14는 우주선에 의해 다량 생성되기 때문에 환경에서 Carbon-14의 농도가 높게 유지되고 있다. 또한 1950-1960년대 핵실험에 의해 추가적으로 Carbon-14가 많이 생성되었고, 결과적으로 이 핵종이 환

경에서 백그라운드를 더욱 높게 형성하는 계기가 되었다 [1]. 따라서 원자력시설에서 Carbon-14가 배출되더라도 환경이나 일반인의 피폭방사선량에 미치는 영향이 미미하였고, 이에 따라 과거에는 Carbon-14에 대한 배출감시와 환경감시의 필요성이 낮았다. 그런데, 핵연료 제조기술의 발달로 연소 후 방사성물질을 핵연료 내에 밀봉하는 기술이 향상되었고, 원전의 운전과 보수방법의 개선으로 계통에서 환경으로 배출되는 불활성기체나 입자 방사성물질의 방출을 획기적으로 줄일 수 있게 되었다. 이에 따라 핵연료의 결합과 상관없이 일정하게 배출되는 삼중수소나 Carbon-14와 같은 저준위 베타방사선 방출 핵종의 중요성은 상대적으로 높아지게 되었다\*. 한편 방사선계측 기술의 향상으로 삼중수소와 Carbon-14 같은 저준위 베타방사능핵종의 검출준위는 계속 낮아지고 있다.

2000년대 이후 국내원전에서 배출된 방사성유출물에 의한 원전 주민의 피폭방사선량 측면에서 경수로원전이나 중수로원전 모두 원전의 형태나 원전의 운전특성에 따라 해마다 약간씩 다르기는 하나 특별한 이벤트에 의한 방출이 없는 경우 삼중수소에 의한 피폭방사선량이 원전 주민의 전체 피폭방사선량의 80-90% 이상에 이르고 있다 [2,3]. 한편 국내 중수로원전에서 Carbon-14에 대한 배출감시를 시작한 1998년 이래 전체 방출 핵종 중에서 Carbon-14가 차지하는 비율은 0.5% 미만으로 나타나고 있다. 그런데 1999년에 월성원전에서 Carbon-14의 핵종

책임저자: 김희근, hkkim@kepri.re.kr, 한전 전력연구원  
대전시 유성구 문지동 103-16

\* Technical Seminar for Carbon-14 Monitoring History in the USA by Dr. Man Sung Yim from North Carolina State University, Korea Electric Power Research Institute, August, 2008.

방출이 전체 방출량의 약 0.7% 정도로 나타났으나 이 핵종에 의한 원전 주민에 대한 피폭방사선량은 30% 가까이 이룬 적이 있었다[2,3]. 이런 측면을 고려해볼 때 경수로 원전의 배출감시와 환경감시에서 Carbon-14을 감시할 경우 잠재적이고 중요한 핵종이 될 수 있다고 판단된다.

원전의 방사성유출물 감시와 원전 주민 선량평가에서 삼중수소와 Carbon-14 핵종은 해를 거듭할수록 그 중요성이 부각되고 있다. 따라서 본 논문은 원자력시설에서 발생하는 Carbon-14에 대해 외국의 기술 보고서와 논문을 검토하여 원전의 방사성유출물에 대한 배출관리와 환경영향평가에 대한 방사선감시의 기술적 배경을 조사하였다. 이를 바탕으로 원전의 방사성유출물 중의 하나인 Carbon-14 배출감시의 타당성을 제시하고자 하였다.

## 2. 미국의 Carbon-14 감시현황(1970-1980년대)

1970년대 미국에서는 원자력규제기관(당시 Atomic Energy Commission: AEC)이 Carbon-14에 대한 감시를 요구하지 않는 가운데 일부 원전에서 자발적으로 Carbon-14 감시를 수행하였다\*. 이 경우 Carbon-14 핵종의 생성량과 방출량은 GALE 전산코드를 이용하여 단순히 원전의 출력에 비례하여 산출하였다[4]. 이 결과에 따르면 1000 MWe급 가압경수로형(Prsssurized Water Reactor: PWR) 원전에서 연간 5-7 Ci<sup>-1</sup>, 동급의 비등경수로형(Boiling Water Reactor: BWR) 원전에서는 10 Ci<sup>-1</sup> 정도의 Carbon-14가 생성되어 방출된다고 평가하였고, 이 값을 근거로 Carbon-14의 감시를 수행하였다. 이러한 방출량 평가에 관한 내용은 1980년대 미국원자력규제위원회에서 발간된 보고서에서 동일하게 유지되었다[5].

이러한 Carbon-14의 자발적인 감시에 대해 당시 미국의 원자력규제기관은 자연에 이미 높게 존재하고 있는 높은 준위의 백그라운드 Carbon-14로 인해 원전에서 배출되는 Carbon-14의 방사선학적 위해도가 낮을 것이라는 입장을 견지하고 있었다[5]. 즉, 원전에서 방출되는 양은 연간 10 Ci 미만으로 미미하고, 특히 자연에는 우주선과 핵실험 과정에서 생성된 Carbon-14의 준위가 매우 높아서 이로 인한 피폭방사선량은 무시할 수준이라는 결론을 내리고 있었다[1,5]. 이에 비해 환경보호국(Environmental Protection Agency: EPA)에서 초창기 Carbon-14의 감시 필요성을 제기하였으나, 환경에서의 측정과 다양한 평가를 통해 감시의 실효성이 부족하다는데 공감하고 있었다. 이런 내용은 환경보호국에서 1981년에 발간된 Carbon-14의 건강영향 평가에 관한 보고서에서도 동일한 결론을 내리고 있다[6,7]. 이런 연유로 1970년대 미국 원자력규제기관의 방사성유출물에 관한 규제지침(Regulatory Guide 1.21)을 개정하는 과정에서 Carbon-14가 감시항목에 포함되지 않은 것으로 판단되었다[8].

미국 EPA 보고서는 우라늄연료주기시설(Uranium Fuel Cycle Facilities)의 정상운전으로 발생하는 Carbon-14에 의한 건강영향을 우주선과 핵실험에 의해 발생하는 Carbon-14에 의한 건강영향과 비교하여 평가하였고, 이

를 근거로 규제가 필요하지 않다는 기술적 근거를 제시하고 있다[7]. 즉, Carbon-14는 가압경수로 연료주기시설(LWR fuel cycle facility)에서 25 Ci(GW<sup>-1</sup>), 가압경수로 연료재처리시설(LWR fuel reprocessing facility)에서 830 Ci<sup>-1</sup> (18.4 Ci(GW<sup>-1</sup>)), PWR 원전에서 5 Ci(GW<sup>-1</sup>), BWR 원전에서 10 Ci(GW<sup>-1</sup>) 정도 발생하는 것으로 평가하였다. 한편 이들 시설에서 발생하는 Carbon-14 화학형으로 가압경수로 연료재처리시설과 BWR 원전은 이산화탄소, PWR 원전은 탄화수소가 주 화학형이라고 밝히고 있다. 그런데 원자력시설에서 발생하는 Carbon-14 이외에 자연에 이미 존재하는 Carbon-14 발생과 존재량이 Cosmic ray에 의해 4×10<sup>4</sup> Ci<sup>-1</sup>, 전체 인벤토리(Inventory)는 3×10<sup>8</sup> Ci 정도로 평가하고 있다. 따라서 1945년부터 1974년까지 Carbon-14가 매년 대략 10<sup>4</sup>에서 10<sup>5</sup> Ci<sup>-1</sup> 생성되었고, 인벤토리는 6×10<sup>6</sup> Ci가 생성되었던 것으로 평가하고 있다. 이러한 원자력시설에서의 누적 방출량을 그림 1에 나타내었다.

또한 EPA 보고서에서는 Killough 모델을 적용하여 일반인의 방사선학적 영향평가를 수행하였다[7,9]. 여기에 따르면 미국 원전 전체에서 발생하는 Carbon-14로 인해 일반인이 피폭 받을 수 있는 개인의 전신 생애선량(Individual whole body lifetime dose)은 약 0.002 mSv (0.2 mrem) 정도로 평가하고 있어, 우주선에 의해 생성되는 Carbon-14의 전신 생애선량인 0.91 mSv (91 mrem)와 핵실험에 의한 전신 생애선량인 0.11 mSv (11 mrem)에 비해 역시 매우 미미한 것으로 평가하고 있다. 특히 일반인 선량평가 측면에서 관심사항인 원전에서 발생하는 Carbon-14에 의한 최대 개인선량(Maximum individual dose)에 대해 PWR의 경우 0.0048 mSv<sup>-1</sup> (0.48 mrem<sup>-1</sup>), BWR의 경우 0.0086 mSv<sup>-1</sup> (0.86 mrem<sup>-1</sup>)로 평가하고 있어 Carbon-14의 방사선학적 영향이 매우 낮음을 확인하고 있다[6,7,9]. 이를 표 1과 표 2에 나타내었다.

**Table 1.** Average World Wide Individual Total Body 70y Lifetime Dose Equivalent due to Carbon-14 Releases.

Carbon-14 Source Term	Average Individual Total Body Lifetime Dose Equivalent (mSv)
US LWR Nuclear Industry Release 1976-2000	0.002
World LWR Nuclear Industry Release 1976-2000	0.0067
Cosmic Carbon-14 Produced During 1976-2000	0.028
Cosmic Carbon-14 Steady State	0.91
Nuclear Weapons Testing 1945-1974	0.11

**Table 2.** Maximum Individual Carbon-14 Total Body Dose Equivalent for LWR Facilities.

Facility	Total Body Dose Equivalent (mSv <sup>-1</sup> )
LWR Fuel Reprocessing Facility	0.016
BWR	0.0086
PWR	0.0048

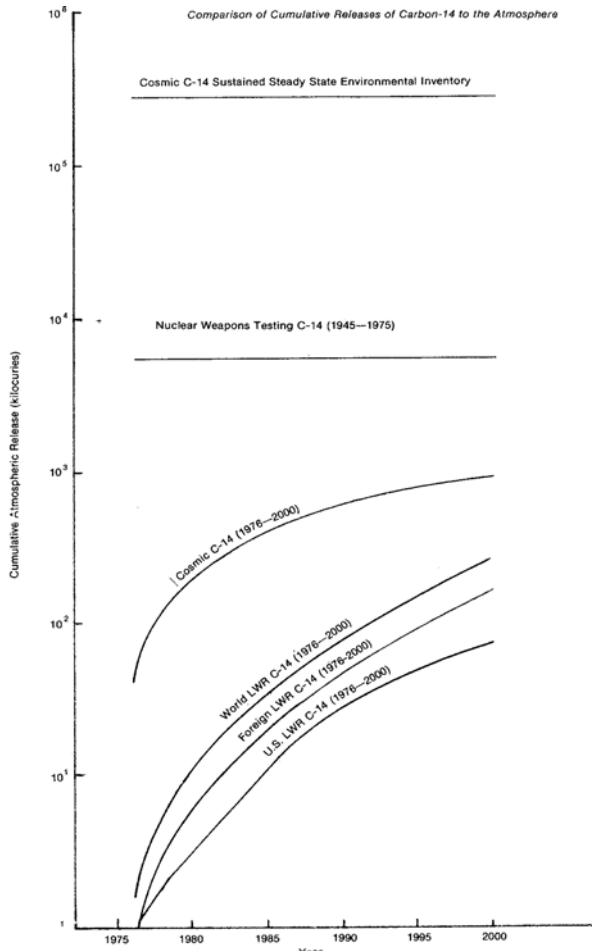


Fig. 1. Comparison of cumulative releases of carbon-14 to the atmosphere.

한편 1970-1980년대 원전 주민선량 측면에서 불활성가스와 방사화 핵분열생성물(Activation and fission product) 핵종에 의한 피폭선량이 높아 관심의 대상이었으나, 핵연료 제조기술의 향상, 원전 운전방법의 개선과 방사성유출물의 저감 노력으로 주민선량은 급격히 감소하였다. 최근 들어 원전 주민선량이 급격히 낮아지면서 핵연료 결합과 상관없이 생성되고 기술적 특성상 저감노력과 기술로 제거되지 않는 삼중수소와 Carbon-14 핵종이 주요 관심대상이 되었다\*. 특히 삼중수소에 의한 주민선량이 높게 나타나는데, 이러한 측면은 국내원전이나 세계 원전에서도 유사하게 나타나고 있다[2,3]. 따라서 주민선량평가에서 삼중수소로 오염된 음식물섭취가 주요 피폭경로로 평가되고 있다[3]. 이와 더불어 방사능 핵종분석 기술의 향상으로 이들 두 핵종에 대한 최소검출한계(Lower Limit of Detection: LLD)는 지속적으로 감소하고 있다.

### 3. 미국의 Carbon-14 감시 (1990년대 이후)

미국원전에서는 EPA나 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission: NRC)의 Carbon-14 감시배경에

대한 기술적 입장과는 독립적으로 자체적인 Carbon-14 감시를 수행하였다+[10-12]. 미국 뉴욕주에 위치한 인디안 포인트(Indian Point unit 3; IP3) 원전에서는 1980년대 Carbon-14 시범 감시결과를 주민선량 평가의 기본 값으로 입력하여 주고 있는 것으로 확인되었다+[11,12]. 한편 포트칼훈(Fort Calhoun) 원전에서는 1980년대 Carbon-14 감시를 수행하다가 USNRC와 합의하에 방사성유출물에 대한 감시를 중단하였다.†

1980년대 IP3에서는 몇 번에 걸쳐 원전 방사성유출물 중 Carbon-14의 방출량과 화학형을 측정하였다[10]. 그 결과 총 방출량은  $9.6 \text{ Ciy}^{-1}$ 이었고, 주요 방출경로는 기체 감쇄계통(Gas decay system)과 원자로 및 보조건물 배기계통(Containment & Auxiliary building ventilation system)이라고 밝히고 있다. 화학형(기체)은  $\text{CO}_2$ 가 26%, Hydrocarbon이 74%이며, 액체 방출경로는 기체 방출경로에 의한 피폭방사선량의 5% 미만이라고 결론내리고 있다. 이러한 감시결과를 매년 수행하는 주민선량에 반영하고 있다+[11,12]. 주민선량평가에서는 기본지침으로 Regulatory guide 1.21 및 1.109를 이용하였으며, 대기확산계수는  $8.96 \times 10^{-7} \text{ sm}^{-3}$ 을 사용하고, 전체 방출량( $9.6 \text{ Ci}$ ) 중 과거 측정결과를 반영한 이산화탄소의 비율 26%인 2.5 Ci를 주민선량 계산코드에 입력하였고(Default value), 그 결과 Carbon-14 섭취로 인한 원전주민 최대개인선량(Maximum individual dose)은 0.0025 mSv (0.25 mrem)라고 결론을 내리고 있다.‡

이러한 미국원전의 Carbon-14 감시에 대한 기술적 입장은 2001년 미국의 방사성유출물관리 워크샵인 RETS-REMP(Radioactive Effluent Technical Specifications and Radiological Environmental Monitoring Programs) 워크샵에 발표된 Ken Sejkora(2001) 발표 자료에 잘 나타나 있다[13]. 여기에 따르면 PWR 원전에서 약  $7.5 \text{ Ciy}^{-1}$ ( $\text{CO}_2$ : 20% 정도, Hydrocarbon: 80%), BWR 원전에서  $9.5 \text{ Ciy}^{-1}$ ( $\text{CO}_2$ : 95% 이상)로 방출되나 자연에 존재하는 Carbon-14의 높은 자연 방사선준위로 인해 방사선학적 영향은 무시하고 있다고(Insignificant dose impact) 결론짓고 있다. 또한 액체 방사성폐기물중의 Carbon-14에 의한 피폭경로와 주민선량에 미치는 영향이 기체 방사성폐기물 중의 Carbon-14에 비해 5% 이내로 매우 낮아 무시할 수준이라고 밝히고 있다.

이외에 중저준위 및 고준위 방사성폐기물처분장에서도 Carbon-14 장반감기 베타방출 방사성핵종에 의한 방사선학적 건강영향을 고려하여 감시를 수행하고 있다[14]. 특히 고준위 폐기물처분장(High-level waste disposal site)에서 Carbon-14 선량을 평가하였다. 그 결과 감시기간(약 10,000년 고려) Carbon-14 방출로 지구상 인간이 받는 집단선량은 상당하나(An appreciable global popula-

\* Technical Seminar for Carbon-14 Monitoring in World NPPs by Hee Geun Kim, Korea Electric Power Research Institute, 2001.

† Personal Communication with Steve Sandike from Indian Point Nuclear Power Plants Unit 3 about Carbon-14 Quantification and Reporting Methods, 2006.

‡ Personal Communication with Nguyen Trung from Fort Calhoun Point Nuclear Power Plants about Carbon-14 Monitoring in USA, 2001.

tion dose, 14 million person-rem), 개인선량은 매우 낮은 것으로 (0.0001 mSv or 0.01 mrem) 평가하고 있다.

최근 미국에서는 Carbon-14의 감시항목 포함여부에 대해 많은 논쟁이 있다. 오래전부터 분석 전문업체 등에서는 Carbon-14 감시 타당성을 간헐적으로 제기하여 왔다. 특히 2001년 미국 방사성유출물관리 워크샵(RETS-REMP Workshop)에서 Carbon-14 감시의 필요성이 패널토론에서 제기되었다<sup>†</sup>[15]. 이에 대해 미국 원자력규제기관의 전문가는 Carbon-14 자연방사능 준위가 너무 높아 원전에서 배출되는 Carbon-14로 인한 영향(주민선량)이 미미하고, Carbon-14 화학형이 운전조건에 따라 수시로 바뀌고 발전소별로 다양하기 때문에 주민선량 평가에서 이를 충분히 고려하기 어렵다는 입장을 밝히고 있다. 또한 원전의 배출관리 계통에서 이산화탄소와 탄화수소를 분리하여 채집(Sampling)하기 어렵기 때문에 채집결과에 대해 신뢰성이 부족하다는 의견을 제시하고 있다. 또한 공기중 이산화탄소가 식물로 전이되는 비율(전이율)을 모르기 때문에 선량평가에서 오차가 따른다는 입장이다. 특히 이산화탄소는 식물 수확기(Growing season)에만 탄소동화작용을 거쳐 식물체로 전이되기 때문에 수확기가 아닌 계절에 방출된 경우 주민선량에 전혀 기여하지 못한다는 현실적 문제점을 들고 있다. 또한 미국 원전에서 사용하는 주민선량평가지침(Regulatory guide 1.109)은 최대 개인(Maximum individual) 개념을 채택하고 있어 오염된 음식물 섭취율이 과도한 보수성을 가지고 있다는 입장을 밝히고 있다[16]. 이외 과거 1970-1980년대 방사능분석 기술이 낮아 Carbon-14 분석 결과에 신뢰성이 낮았다고 그 이유를 밝히고 있다.

한편 상기와 같이 지속적인 Carbon-14 감시의 필요성이 제기됨에 따라 2008년 Regulatory guide 1.21의 개정 초안에서 Carbon-14에 대해 감시항목으로 지정하였다<sup>‡</sup>[17]. 그러나 2009년에 개정된 지침에서는 감시항목에서 Carbon-14를 제외하였다[18]. 즉, 개정초안에서 방사성유출물에 대한 주요 감시핵종에서 Carbon-14를 포함하였으나, 최종 개정된 지침에서는 Carbon-14의 배출감시에 대한 입장과 감시핵종에 대한 포함 여부는 시설 운영자가 배출량 및 예상선량을 평가하여 결정토록 권고하고 있다. 동 규정에서는 앞에서 논의된 바 있는 핵실험과 우주선에 의한 발생량이 원전에서 발생하는 Carbon-14에 비해 훨씬 많기는 하나, 방사능 분석기술 향상과 원전 방사성유출물의 배출감소로 Carbon-14의 중요성이 부각되었음을 언급하고 있다. 한편 Regulatory guide 1.21의 확정에 따라 미국 원전에서는 Carbon-14의 감시방향을 정하기 위한 논의가 활발히 이루어지고 있다. 여기에서는 미국 IP3 원전에서 시행중에 있는 일정 Carbon-14 배출량을 주민선량 평가과정에서 고려하는 방식과 실질적이고 전면적인 Carbon-14 감시가 필요하다는 의견이 제기되고 있다. 그런데 지금까지 논의 결과는 Carbon-14 샘플링, 분석과 선량평가 등 감시의 실효성을 고려하여 IP3의 감시방식

이 유력한 대안으로 검토 중에 있다<sup>§</sup>. 이에 대해서는 좀더 지켜볼 일이라 판단된다.

#### 4. 기타 국가의 Carbon-14 감시

Carbon-14의 감시에 대해 영국의 환경청(Environmental Agency)에서는 Carbon-14 방사성유출물에 대한 배출한계를 설정하여 운영 중에 있다. 여기에서는 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection: ICRP)의 ICRP-60 방사선방호 원칙에 따라 섭취경로와 결정그룹(Critical group)을 대상으로 설정하였다. 표 3에 Carbon-14의 배출한계 설정 내용을 제시하였다[19]. 여기에 따르면 영국에서는 Carbon-14 방출제한치를 상당히 탄력적으로 운영하고 있는 것으로 판단되었다.

스웨덴 BWR 원전에서는 Oxygen-17의 방사화 반응에 의해 Carbon-14가 생성되고 있다. 그중에서 95% 이상이 CO<sub>2</sub> 형태로 방출되는데(Methane 형태: 5% 정도), 방출량은 미국의 BWR 원전과 유사한 것으로 추정하고 있다[20,21]. 또한 Forsmark 방사성폐기물처분장에서도 Carbon-14를 중요한 관심 핵종으로 인지하고 처분장 지하수 및 환경에서 Carbon-14에 대한 감시를 수행하고 있는 것으로 확인되었다[21]. 특히 BWR 원전에서 발생하는 고체폐기물중에 Cobalt-60 핵종 농도와 Carbon-14 농도 관계를 규명하여 이를 Carbon-14 생성량 평가에 이용하고 있다. 즉, Carbon-14의 농도는  $A_{C14} = 0.02A^{0.76}$  (여기에서 A는 Cobalt-60 핵종의 농도)의 관계식을 적용하고 있다[20].

또한 가압중수로 원전을 다수 운영하고 있는 캐나다에서는 Carbon-14가 경수로원전에 비해 상대적으로 많이 발생하기 때문에 방사성유출물에 대한 방출제한치를 핵종별로 정하여 운영하고 있다[22]. 특히 캐나다 원자력규제기관(Canadian Nuclear Safety Commission: CNSC)의 상위에 있는 캐나다 방사선방호자문위원회(Advisory Committee on Radiological Protection: ACRP)에서는 원전 운영자로 하여금 Carbon-14의 생성, 방출과 피폭 평가 등에 대한 종합적인 감시계획을 수립하도록 요구하였고[23], 원전 운영자는 이를 수용하여 Carbon-14 감시와 처리 등에 대한 종합적인 이행계획을 수립하여 운영 중에 있다\*\*.

한편 일본원전에서는 Carbon-14의 방사성유출물에 대한 감시를 수행하지 않고 있는 것으로 조사되었다. 다만 핵연료주기시설에서는 Carbon-14에 대한 방사성유출물에 대한 배출 감시와 환경방사능 감시를 수행중인 것으로 확인되었다<sup>††</sup>.

‡ Personal Communications with Steve Sandike from Indian Point Nuclear Power Plants and Ken Sejkora from Pilgrim Nuclear Power Plants about the Revision of Regulatory Guide 1.21, 2008.

\*\* Technical Seminar for the Management of Carbon-14 by Arif Khan from Ontario Power Generation-Nuclear (OPG-N), Korea Electric Power Research Institute, 2001.

†† Personal Communications with K. Shinohara about Carbon-14 Monitoring in Japan, 2001.

**Table 3.** Carbon-14 Discharge Limits at Various Nuclear Power Plants in the UK.

	Bradwell	Dungeness A	Hinkley Point A	Oldbury	Wylfa	Sizewell A
Existing limit(TBqy <sup>-1</sup> )	5	4	6	1.5	24.7	5
Limit in the draft authorization (TBqy <sup>-1</sup> )	0.6	5	4	5	2.3	2
Critical group dose from the draft authorization limit( $\mu$ Svy <sup>-1</sup> )	14	12	50	86	17	38
Total dose to the critical group( $\mu$ Svy <sup>-1</sup> )	80	165	116	191	64	174

## 5. 맺는 말

미국에서 1970-80년대 Carbon-14의 방사선학적 위험을 인지하고 US EPA와 US NRC에서 Carbon-14 감시의 필요성이 제기되었으나, 피폭방사선량 평가결과 규제를 요구할 수준이 아닌 것으로 나타났다. 이 결과에 의하면 BWR 원전에서 Carbon-14 배출로 인해 원전주민이 받을 수 있는 최대 개인선량(Maximum individual dose)은 0.0086 mSvy<sup>-1</sup> (0.86mremy<sup>-1</sup>)라고 평가하였다. 당시 이러한 평가결과를 반영하여 1970년대 Regulatory guide 1.21의 개정 과정에서 Carbon-14가 감시항목에서 제외되었다. 이에 따라 당시 미국의 대부분 원전에서 Carbon-14를 방사성유출물로서 감시하지 않았으며, 방출과 주민선량 평가를 연계시키지 않았다. 일부 원전에서는 1980년대 Carbon-14 측정결과를 기반으로 주민선량 평가에 연계하고 있음을 확인하였다.

최근에 미국에서는 Carbon-14의 감시 필요성을 다시 논의하기 시작하였으며, 그 결과 2009년에 발간된 NRC의 방사성유출물 관리기준인 Regulatory guide 1.21 개정판에서 Carbon-14 감시에 대해 시설운영자의 자발적인 평가결과를 근간으로 감시여부를 결정하도록 유도하고 있다. 이러한 조치에 따라 미국에서는 Carbon-14에 대한 감시여부를 결정하는데 필요한 기초조사가 관련기관을 중심으로(Nuclear Energy Institute (NEI), Institute of Nuclear Power Operations (INPO), Electric Power Research Institute (EPRI) 및 원전사업자 등) 등을 중심으로 진행 중에 있다. 따라서 국내 원전에서의 Carbon-14 감시방안의 결정에 미국 원전의 감시기술 동향을 면밀히 추적하여 반영할 필요가 있다고 판단된다. 또한 미국 이외의 국가에서의 Carbon-14의 감시동향과 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency: IAEA)의 Carbon-14 감시기술 동향에 대해서도 조사와 분석이 필요하다.

한발 더 나가다면 국내에서 국제방사선방호위원회의 2007년 방사선방호 권고인 ICRP-103을 원자력법령에 반영하기위한 검토가 진행 중에 있다. 특히 ICRP는 방사성 유출물에 의한 일반인의 선량제약치(Dose constraint)에 관련된 기본적인 지침을 제시한 바 있다. 따라서 이들 기

술보고서 등을 심층 검토하고, 이들 국제적 기준과 연계하여 상호조화를 이루는 방향으로 Carbon-14의 감시방안이 결정되어야한다고 판단된다.

## 참고문헌

1. National Council on Radiation Protection and Measurements, Carbon-14 in the Environment, NCRP Report No. 81, 1985.
2. 한국수력원자력(주), 방사선관리연보, 2008.
3. 한국수력원자력(주), 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가보고서, 2008.
4. United States Nuclear Regulatory Commission, Calculation of Releases of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents from Pressurized Water Reactors, US NRC, NUREG-0017, 1976
5. Oak Ridge national Laboratory, Carbon-14 Production in Nuclear Reactors, ORNL/NUREG/TM-12, 1977.
6. United States Environmental Protection Agency, Public Health Consideration of Carbon-14 Discharges from the Light-Water Cooled Nuclear Power Reactor Industry, US EPA, ORP/TAD-76-3, 1976.
7. United States Environmental Protection Agency, Health Impact Assessment of Carbon-14 Emissions from Normal Operations of Uranium Fuel Cycle Facilities, EPA-520/5-80-004, 1981.
8. United States Nuclear Regulatory Commission, Measuring, Evaluating, and Reporting Radioactivity in Solid Wastes and Releases of Radioactive Materials in Liquid and Gaseous Effluents from Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants, US NRC, Regulatory Guide 1.21, 1974.
9. Killough GG, Rohwer PS, A New Look at the Dosimetry of C-14 Released to the Atmosphere as Carbon Dioxide, Health Physics 1978;34:141-159.
10. Kunz C, C-14 Discharges at Three Light-Water Reactors, Health Physics 1985;49:25-35
11. Indian Point Nuclear Power Plants Unit 3, Offsite Dose Calculation Manual and Annual Radiological Environmental Operating Report, 2001.
12. Indian Point Nuclear Power Plants Unit 3, Radioactive Effluent Report (Radiological Impact on Man), Docket No. 50-286(NL-03-074), 2002.

13. Sejkora K, Carbon-14 Monitoring in the United States, Proceeding of the 10th Annual RETS-REMP Workshop, 2001.
14. United States Environmental Protection Agency, Review of the Release of Carbon-14 in Gaseous Form from High-Level Waste Disposal, US EPA, EPA-SAB-RAC-93-010, 1993.
15. 한전 전력연구원, 공무국외여행보고서 - 미국원전의 방사선감시계통 성능평가 및 경보설정 기술현황 조사, TC.00NE20.O2001.363, 2001.
16. United States Nuclear Regulatory Commission, Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50, US NRC, Regulatory Guide 1.109, Appendix I, 1977.
17. United States Nuclear Regulatory Commission, Measuring, Evaluating, and Reporting Radioactivity in Solid Wastes and Releases of Radioactive Materials in Liquid and Gaseous Effluents from Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants, US NRC, DG-1186 for Regulatory Guide 1.21, 2008.
18. United States Nuclear Regulatory Commission, Measuring, Evaluating, and Reporting Radioactivity in Solid Wastes and Releases of Radioactive Materials in Liquid and Gaseous Effluents from Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants, USNRC, Regulatory Guide 1.21, 2009.
19. International Atomic Energy Agency, Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, IAEA, Safety Series No. 19, 2001.
20. Swedish Radiation Protection Authority, Carbon-14 in Nordic BWRs - Production and Chemical Forms, SSI Report P1294.01, 2002.
21. Swedish Radiation Protection Authority, Review of C-14 Inventory for SFR Facility, SSI Report 2002:14, 2002.
22. Canadian Standards Association, Guidelines for Calculating Derived Release Limits for Radioactive Material in Airborne and Liquid Effluents for Normal Operation of Nuclear Facilities, CAN/CSA-N288.1-M87, 1987.
23. Advisory Committee on Radiological Protection of Canada, Report of a Working Group of the ACRP - The Management of Carbon-14 in Canadian Nuclear Facilities, ACRP-14, 1995.

## An Investigation on the Technical Background for Carbon-14 Monitoring in Radioactive Effluents

Hee Geun Kim, Tae Young Kong, Woo Tae Jeong, Seok Tae Kim  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - In nuclear power plants (NPPs), various radioactive materials produced during the operation are discharged as radioactive effluents to the environment. The activity of carbon-14, one of the radioactive effluents, in the environment is already high level and its effect on radiation exposure to the public and the environment is insignificant; thus, NPPs did not perform the carbon-14 monitoring in effluents in the past. By the way, effluents of noble gas and particulate radioactive materials originated from nuclear fuels has been continuously reduced due to both the advancement of manufacturing and integrity technology for nuclear fuels and the improvement of operation methods of NPPs. Futhermore, the portion of dose assessment by tritium and carbon-14 to the public has been relatively increased because the lower limit of detection for low-energy beta sources, such as tritium and carbon-14, is low due to the advancement of radiation detection technology. In this paper, the technical background for carbon-14 monitoring in nuclear facilities was investigated using United States technical reports and papers. This paper also reviews whether carbon-14 monitoring is necessary or not based on the investigated documents.

**Keywords** : Radioactive Effluent, Discharge Control, Environmental Impact Assessment, Radiation Mornitoring, Carbon-14, Nuclear Facility