

경수로 원전 계획예방정비기간 중 계통 내  $^{14}\text{C}$  거동특성 평가

양양희, 강덕원, 이갑복, 박경록\*

한전전력연구원, 대전광역시 유성구 문지로 65

\*한수원(주) 원자력발전기술원, 대전시 유성구 금병로 508

yhyang@kepri.re.kr

## 1. 개요

방사성탄소  $^{14}\text{C}$ 는 5,730년의 긴 반감기를 가지고 있으며, 호흡을 통한 인체 내의 유입과 광합성 작용을 통해 방사성탄소가 식물에 축적된 음식을 섭취할 경우 인체의 내부피폭을 일으킬 수 있다. 원자력발전소의 경우  $^{14}\text{C}$ 는  $^{14}\text{N}$ 과  $^{17}\text{O}$ 가 중성자와의 반응에 의해 대부분 생성되며, 건물 배기구를 통해 환경으로 방출된다. 원전 방사성유출물관리는 정상 운전과 계획예방정비로 크게 구분할 수 있다. 정상 운전 중 방사성유출물은 불시정지 등 특수한 상황 발생시 외에는 어느 정도 일정 수준을 유지한다고 볼 수 있다. 하지만 계획예방정비 중에는 공정별 발전소 운전 특성에 따라 방사성유출물의 방출량 등의 변화가 나타난다. 본 논문은 계획예방정비 중  $^{14}\text{C}$ 의 방출특성을 파악하기 위해 냉각재 계통수 및 사용후 핵연료 저장조수 내에 함유된 방사성탄소의 화학형과 조성을 공정별로 분석하였다. 분석결과, 원자로냉각재의 경우 계획예방정비 기간 동안의 평균 방사능도가 모든 발전소에서 정상운전과 같은 유기물형태의 방사성탄소( $^{14}\text{C}$ )가 우세하였으며, 또한 모든 발전소에서 정지화학처리 기간 중 과산화수소 주입 공정 시 방사성탄소의 화학적 형태는 무기물 형태가 지배적으로 나타났다. 사용후핵연료저장조(SFP)의 경우는 모든 발전소가 동일하게 무기물 형태의 방사성탄소가 높게 나타났다. 본 고에서는 국내 경수로 원자력발전소의 계획예방정비 기간 중의 원자로 냉각재 및 사용후 핵연료 저장조수에 대한 방사성탄소( $^{14}\text{C}$ )의 특성을 평가하고 그 결과를 기술하였다.

2. 계통 내  $^{14}\text{C}$  거동 분석

경수로 원전  $^{14}\text{C}$  방출감시 및 특성평가를 위하여 웨스팅하우스형(W형), CE형 및 프라마툼형(Framatome형) 원전의 계획예방정비기간동안 각 발전소별로 원자로냉각재계통(RCS)과 사용 후 핵연료 저장조(SFP)에서 액체시료를 채취하여 방사성탄소의 거동특성을 분석하였다. RCS 계통은 O/H 기간 중 정지화학처리 공정기간을 중심으로 시료채취 및 분석을 실시하였으며, 사용 후 연료저장조 내 시료채취 및 분석은 사용 후 연료 저장조의 연료 이동에 따른 화학적 형태 변화를 파악하기 위해 실시하였다. 웨스팅하우스형(W형) 계획예방정비기간동안의 방사성탄소 특성분석 결과는 표 1과 그림 1, 2에 각각 나타내었다. RCS 계통의 경우 계획예방정비기간동안의 화학적 형태는 모든 발전소에서 정상운전과 같은 유기물형태의 방사성탄소( $^{14}\text{C}$ )가 대체로 많이 존재하였으며, 또한 모든 발전소에서 공통적으로 정지화학처리 공정기간 중 과산화수소주입 공정 시 기상형태로 존재하는 방사성탄소의 화학적 형태는 무기물 형태가 지배적이었다. 이러한 주된 원인은 유기물형태의 방사성탄소가 산화되어  $^{14}\text{CO}_2$ 의 무기물 형태로 대부분 변화되었기 때문이다. SFP의 경우에는 모든 발전소가 동일하게 무기물 형태의  $^{14}\text{C}$ 가 지배적인 것으로 나타났다.

계획예방정비기간동안 RCS 계통수의  $^{14}\text{C}$  화학형은 정지화학 처리공정을 거치면서 상이 서로 바뀌는 것으로 나타났다. 정상운전 중에는 수소주입 운전으로 인한 환원 환경 하에 놓이기 때문에 냉각재의  $^{14}\text{C}$ 는 유기화합형을 유지하고 있다가 원자로의 냉각/감압이 이루어지는 동안 VCT를 통한 퍼지에 의해 상당량이 폐기물계통과 격납건물내로 빠져나가면서 격납건물 내는 잠시 동안 유기형의 분율이 높은 상태에 놓이게 된다. 핵연료의 인출 및 검사단계에서는 방사선작업자의 피폭선량 저감을 위한 계통 내 과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ )의 주입으로 산화 환경으로 바뀌면서 원자로냉각재는 다시 무기 형태( $^{14}\text{CO}_2$ )로 전환된다.  $^{14}\text{C}$ 의 화학형이 전환된 원자로냉각수는 핵연료의 교체기 이루어지는 동안 Reactor cavity나 핵연료저장조 내로 이동, 혼입되면서 무기 형태의 분율이 주종을 이루게 되며 이러한 환경으로 변화된 핵연료저장조수는 수 표면에서 기·액 평형반응에 의해  $^{14}\text{CO}_2$  형태로 분리되어 건물 배기구를 통해 빠져나가게 되는데 이의 확인을 위해, SFP 저장조수, 주변 공기 및 핵연료 건물 방출단에서의 시료를 분석해 본 결과, 대부분 무기형이 주종을 이루고 있는 것으로 나타났다.

표 1. RCS 및 SFP 시료의 <sup>14</sup>C 특성 분석

구분	운전상황	방사능농도 (Bq/kg)		분율 (%)		총방사능 농도
		무기물	유기물	무기물	유기물	
RCS	계통병해전	792.06	1965.19	28.7	71.3	2757
	봉산화완료후	1246.65	2859.42	30.4	69.6	4106
	VCT질소교체후	130.73	1955.46	6.3	93.7	2086
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 주입후	1544.40	32.16	98.0	2.0	1577
SFP	계통병해전	105.34	50.46	67.6	32.4	156
	연료인출	456.80	49.98	90.1	9.9	507
	연료검사	548.60	24.56	95.7	4.3	573
	연료장전	353.34	43.29	89.1	10.9	397

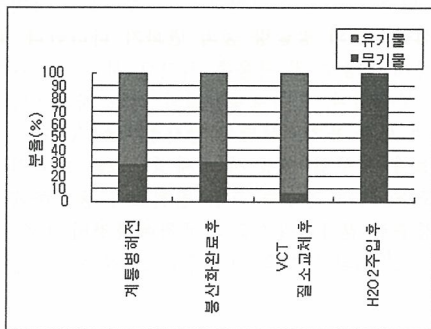


그림 1. RCS의 방사능농도 분율

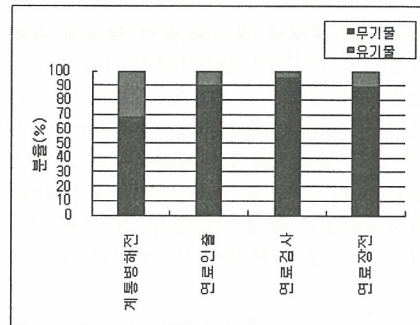


그림 2. SFP의 방사능농도 분율

### 3. 결론

국내 경수로 원전 <sup>14</sup>C 방출감시 및 특성평가를 위하여 W형, CE형 및 Framatome형 원전의 계획예 방정비기간동안 각 발전소별로 원자로냉각재계통(RCS)과 사용 후 핵연료 저장조(SFP)에서 액체시료를 채취하여 방사성탄소의 거동특성을 분석하였다. RCS 계통은 O/H 기간 중 정치화학적처리 공정기간을 중심으로 실시하였으며, 사용 후 연료저장조 내 시료채취 및 분석은 사용 후 연료 저장조의 연료 이동에 따른 화학적 형태 변화를 파악하기 위해 실시하였다. 계획예방정비기간동안의 방사성탄소 특성분석 결과, RCS 계통의 경우 계획예방정비기간동안의 화학적 형태는 모든 발전소에서 정상운전과 같은 유기물 형태의 방사성탄소(<sup>14</sup>C)가 우세하였다. 또한 정치화학적처리 공정기간 중 과산화수소주입 공정 시 기상형태로 존재하는 방사성탄소의 화학적 형태는 대상 발전소 모두 무기물 형태가 지배적이었다. 이러한 주된 원인은 유기물형태의 방사성탄소가 산화되어 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>의 무기물 형태로 대부분 변화되었기 때문이다. SFP의 경우에는 모든 발전소가 동일하게 무기물 형태의 <sup>14</sup>C가 지배적인 것으로 나타났다. 이는 핵연료의 교체시 방사선작업자의 피폭선량 저감을 위해 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)의 주입에 의한 무기화확형으로 전환된 원자로냉각수가 Reactor cavity나 핵연료저장조 내로 이동, 혼입에 의한 것으로 추측된다.

### 참고문헌

- [1] Thomas Ibach "Study on the Emission Monitoring of Radiocarbon (C-14)and general C-14 Aspects in at least 10Nuclear Power Plantswith Pressurized Water Reactors in European countries such as Germany, Switzerland, and England, September 2007.10.
- [2] Magnusson A, " <sup>14</sup>C Produced by Nuclear Power Reactors" -Generation and Characterization of Gaseous, Liquid and Solis Waste" Lund University, 2007
- [3] 강덕원 등, "Evaluation and Characterization of the Discharged Radioactive Carbon Compounds from Domestic PWRs" KEPRI, R06NS07, Oct.2008.