

## 경수로 원전 냉각재중의 $^{14}\text{C}$ Inventory 평가

양양희, 강덕원, 이갑복, 박경록\*

한전전력연구원, 대전광역시 유성구 문지로 65

\*한수원(주) 원자력발전기술원, 대전시 유성구 금병로 508

yhyang@kepri.re.kr

### 1. 개요

5,730년의 긴 반감기를 가진 방사성탄소  $^{14}\text{C}$  는 원자력발전소와 같은 인위적인 요인에 의해서도 생성되는데 최근 들어 관심의 대상이 되고 있는 중요한 핵종 중의 하나이다. 원자로 계통 내  $^{14}\text{C}$  Inventory 평가는 발생 폐기물의 영구 처리·처분 및  $^{14}\text{C}$  관리 전략 등에 중요한 정보를 제공할 수 있기 때문에 고리1호기 등 5개 호기를 대상으로 노심 운전값(열중성자속, 가동율 등)을 이용하여 경수로에 대해  $^{14}\text{C}$  생성량을 계산하였다. 해외원전(스웨덴 링할 4호기)에서는  $^{14}\text{C}$  Inventory를 계산하기 위해 (주)Alara 사에서 개발한 PwrCoolact라는 모델을 이용하여 계산하였다. 이 모델은 중성자속과 온도와 같은 차이점을 설명하기 위해 다수의 셀로 각각 나누어 설계된 모델로 냉각재의 불순물, 수화학 처리 및 정화계통의 효과 등을 고려하였고 ORIGEN-S 코드를 이용해 평형 노심에 대한 연소도 및 농축도를 고려하여 각각의 노심 코아에 대한 열중성자 속을 계산하여  $^{14}\text{C}$  Inventory를 계산한 바 있다. 본 논문에서는 발전소별로  $^{14}\text{C}$  생성량을 구하고 이 결과를 토대로 방출량과 연계시켜  $^{14}\text{C}$  Inventory를 평가한 내용을 기술하였다.

### 2. $^{14}\text{C}$ Inventory 평가 방법

가압경수로에서의  $^{14}\text{C}$ 의 Inventory란 생성된  $^{14}\text{C}$  양에서 환경으로 방출된 양을 뺀 값이며, 구체적으로는 계통 내에 머물게 되어 축적되는  $^{14}\text{C}$  양을 의미한다. 이러한  $^{14}\text{C}$ 의 Inventory는 다음과 같은 간단한 식에 의해서 표현된다.

$$[\text{Inventory}] = [^{14}\text{C} \text{ 생성량}] - [^{14}\text{C} \text{ 방출량}]$$

경수로 원전의  $^{14}\text{C}$  생성은  $\text{O}^{17}$ 과  $\text{N}^{14}$  핵종의 중성자에 의한 방사화에 의해 대부분 생성되며 원자로냉각재(RCS), 사용후 핵연료저장조(SFP) 및 핵연료재장전수탱크(RWST)에 주로 머물게 된다. 계통 내 주  $^{14}\text{C}$ 의 생성은  $\text{O}^{17}(\text{n}, \text{a})\text{C}^{14}$  반응으로 생성되며  $\text{N}^{14}(\text{n}, \text{p})\text{C}^{14}$  반응에서는 적은 양이 생성된다. 이와 같이 두 생성원으로 부터 생성되는  $^{14}\text{C}$ 의 발전소별 주기 당 생성량(Q, Bq/cycle)을 계산하고 이에 연간 가동률을 적용하여 연간  $^{14}\text{C}$ 생성량을 구하였다. 발전소별 주기 당 생성량은 영광5&6호기 최종안전성분석보고서에 기술되어 있는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$Q = \lambda t m N \sigma \phi$$

여기에서,  $\lambda$ 는 붕괴상수,  $t$ 는 노심의 운전기간,  $m$ 는 노심내 냉각재 질량,  $N$ 는 노심내 냉각재에 포함되어 있는 핵종의 농도,  $\sigma$ 는 반응단면적,  $\phi$ 는 열중성자속을 나타낸다.

### 3. 평가 결과

발전소별로  $^{14}\text{C}$  생성량을 계산하여 그 결과를 표 1에 도시하였다. 이를 살펴보면 냉각재내 원소농도 및 붕괴상수를 제외한 중성자 반응단면적(cmf), 열중성자속(n/cm<sup>2</sup>-s), 노심 냉각재량(kg), 가동시간(day)은 발전소별로 다르며 이로 인해  $^{14}\text{C}$  생성량이 서로 상이한 것으로 나타났다. 각 발전소별  $^{14}\text{C}$  생성량 대비 방출율은 고리1호기 57%, 고리3호기 104%, 영광5호기 21%, 울진1,2호기 각 36%로 나타났다. 여기서 고리3호기의  $^{14}\text{C}$  방출량이 높은 이유는 고리3,4호기의 경우 계획예방정비 또는 출력 상승운전 과정에서 발생하는 다량의 붕소희석수와 가열시 팽창되는 계통수를 붕소희석수계통 탱크(BRS Hold-up)에 저장하여 보관, 처리되어야 하나 발전소 특성 및 운영상 3,4호기에서 발생하는 잉여수를 핵연료 이송수로

(Fuel Transfer Canal)에 서로 교차 보관함으로써 핵연료 건물의  $^{14}\text{C}$  방사능농도 상승과 함께 방출량이 증가된 것으로 확인되었다. 따라서 이 부분을 제외하고 발전소 호기별로  $^{14}\text{C}$  Inventory를 평가했을 때 영광5호기가 상대적으로 높았으며, 다음으로 계통의 봉산응축수를 전량 회수하여 계통으로 재사용하고 있는 프라마툰형인 울진1,2호기가 타호기에 비해 비교적 높은  $^{14}\text{C}$  Inventory를 나타냈다.

표 1. 발전소별 냉각재 중  $^{14}\text{C}$  생성량

구분	고리1호기		고리3호기		영광5호기		울진1호기		울진2호기	
	O-17	N-14	O-17	N-14	O-17	N-14	O-17	N-14	O-17	N-14
주기당 생성율 (Ci/cycle)	4.14	0.32	5.12	0.40	6.16	2.73	5.02	0.39	5.05	0.39
연간 생성율 (Ci/yr)	3.80	0.30	3.93	0.31	4.74	2.10	3.86	0.30	3.89	0.30
생성율 (Ci/Gwe.yr)	6.34	0.49	4.14	0.32	4.74	2.10	4.07	0.32	4.09	0.32
생성율 합 (Ci/Gwe.yr)	6.83		4.46		6.84		4.38		4.41	
연간생성율 합 (Ci/yr)	4.11		4.24		6.84		4.11		4.16	

표 2. 발전소별  $^{14}\text{C}$  생성량 및 재고량

구분	고리1	고리3	영광5	울진1	울진2
이론적 생성량	4.11	4.24	6.84	4.11	4.16
실제 방출량	2.33	4.41	2.00	1.48	1.48
총 재고량	1.78	0.16	4.84	2.63	2.68

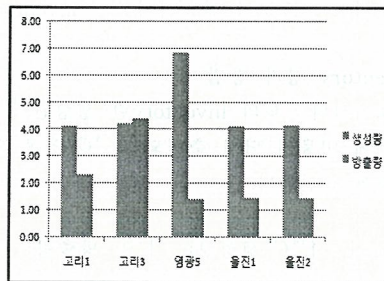


그림1. 발전소별  $^{14}\text{C}$  생성량, 방출량

#### 4. 결론

국내 경수로 원전의 냉각재 계통내의  $^{14}\text{C}$  함량을 평가하기 위해 노형별, 발전소별로  $^{14}\text{C}$  생성량을 계산하여 보았다.  $^{14}\text{C}$  함량 계산의 여러 입력변수 중 냉각재내 원소농도 및 붕괴상수를 제외한 중성자 반응단면적, 열중성자속, 노심 냉각재량, 가동시간이 노형별, 발전소별로 다르며 이로 인해  $^{14}\text{C}$  생성량도 서로 상이한 것으로 판단된다. 각 발전소별  $^{14}\text{C}$  생성량 대비 방출율은 고리3호기가 비교적 높은 것으로 나타났다. 이러한 원인은 고리3,4호기의 경우 발전소 운영 과정에서 발생하는 다량의 잉여수를 발전소 운전 특성상 핵연료 이송수로(Fuel Transfer Canal)에 서로 교차 보관함으로써 핵연료 건물의  $^{14}\text{C}$  방사능농도 상승과 함께 방출량이 증가된 것으로 판단된다. 따라서 이러한 특수성을 고려하여 발전소별로  $^{14}\text{C}$  Inventory를 평가했을 때 CE 형인 영광5호기가 타호기에 비해 상대적으로 높은 경향을 보였다. 다음으로 프라마툰형인 울진1,2호기가 타호기에 비해 비교적 높았는데 이는 계통의 봉산응축수를 회수하여 계통수로 사용하고 있기 때문인 것으로 판단되나 정확한 평가를 위해서는 평가방법 개선 등 지속적인 검토가 필요하다고 본다.