

## 유럽 원전에서의 $^{14}\text{C}$ 규제 및 감시현황

강덕원, 양양희, 이명우\*, 김현구\*, 정현주\*

한전 전력연구원,\*(주)한일종합산업

E-mail: dwkang@kepri.re.kr

중심어 : 방사성탄소( $^{14}\text{C}$ ), 검출하한치, 배기구, C-유기화합물, 방출화학형

### 서론

원전에서 발생하는 방사성탄소는 대기와 생물권에 서  $^{14}\text{CO}_2$  또는 C-유기화합물로서 존재하여 궁극적으로 호흡에 의해 직접 흡수하거나 식물체의 광합성을 통해 식물에 체류하는  $^{14}\text{C}$ 의 방사능을 함유한 음식물 섭취에 의해서 인체에 유입되어 보통 안정 동위원소 형태로 인체의 신진대사와 동일한 과정을 거치게 된다. 방사성탄소는 49.5keV( $\beta_{\text{max}}=200\text{keV}$ )라는 평균에너지 지닌 베타방출체로서 5,730년의 긴 반감기를 가지고 있다. 중성자와의 핵반응인  $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$

반응에 의해 생성되는 방사성탄소는 원자로냉각재가 주요 선원형이다. 계통수 중에 함유되어 있는 미량의 질소도  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  반응에 의해 생성되는 주요 기여 인자이다. 경수로 1GWe에서 대략  $1.5 \times 10^{15}$  Bq/yr의  $^{14}\text{C}$ 를 생성시키며 원자로냉각재에서 약 25%, 나머지는 핵연료와 구조재에서 발생된다. 지구상에서 연간  $300 \times 10^{12}$  Bq가 환경으로 방출되는 것으로 예상되며(핵연료공장 포함) Suess effect와 핵실험 영향을 고려하지 않는다면, 장기적으로 지구 평균 30%라는 방사능 피폭을 증가시키게 된다. 독일 원전에서 발전소 부지 주변의 공기 중  $^{14}\text{C}$  방출영향에 대한 평가 결과, 지역 주민에 영향을 미치는 주된 피폭원 중의 하나가  $^{14}\text{C}$ 인 것으로 나타났다. 전 세계의 방사능 피폭을 평가할 때 모든 형태의  $^{14}\text{C}$ 는 장기적으로는  $^{14}\text{CO}_2$  형태로 전환되는 것으로 가정하고 있다. 이러한 사실로 보면 발

전소에서 배기구를 통해 환경으로 방출되는  $^{14}\text{C}$  방출량과 일명 무기와 유기  $^{14}\text{C}$  라고 일컬어지는  $^{14}\text{CO}_2$ 와  $^{14}\text{CnHm}$  형태로 존재하는 모든 양을 알아야 할 필요가 있다. 또한 처분장에서의 장기적 관점에서 평가해 본 결과,  $^{14}\text{C}$ 는 산성환경에서 자체의 높은 이동성으로 인해 공중에 피폭을 미치는 결정 핵종으로  $^{14}\text{C}$ 는 30,000년 이상 처분장에서 잔존하여 공중에 영향을 미치는 핵종으로 평가되어 유럽의 처분장에서는 발전소로부터 수납되는 폐기물 중의  $^{14}\text{C}$  량을 엄격히 제한해 오고 있다. 전 유럽 원전은 대부분 ICRP-60을 수용하고 있으며 그에 따라, 원전에서 방출되는  $^{14}\text{C}$ 에 의한 주변주민의 피폭선량 평가는 결정그룹을 대상으로 평가해 오고 있다.

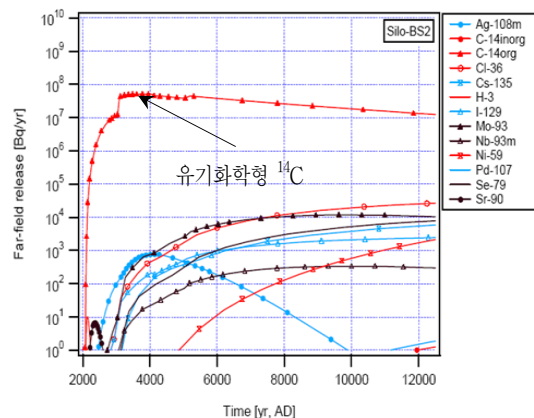


그림 1. 처분장에서의  $^{14}\text{C}$  방출을 모델링(스웨덴)

## <sup>14</sup>C 관리를 위한 주요 규정

### 1. <sup>14</sup>C의 관리 및 처분 관련 규정

독일은 심지층에 폐기물을 처분하는 방법을 택하고 있으며 현재 중·저준위 저장고인 Konrad 처분장에  $4 \times 10^{14} \text{Bq} (108 \text{Ci})$ 의 양만을 허용하고 있다. 이는  $1000 \text{GW(e).yr}$ 의 경수로 냉각재에서 나오는 <sup>14</sup>C량과 상응한다. 보통 200ℓ 폐기물 드럼당  $2.27 \times 10^8 \text{Bq}$  이상의 <sup>14</sup>C를 함유해서는 안되며 더 많은 양의 <sup>14</sup>C를 함유할 경우는 폐기물 용기의 견고성과 포장에 대한 엄격한 기준을 적용해야 한다. 드럼당  $10^9 \text{Bq}$  이상의 <sup>14</sup>C를 함유한 폐수지 및 폐 필터류들은 처분장에서 수납되지 않는다. 스위스는 <sup>14</sup>C가 함유된 방사성폐기물의 최종처분에 대한 결론을 유보한 상태이며 영국은 1GBq 당 <sup>14</sup>C 처분비용으로 1,600만원 정도 지불해야 하며 저준위 방사성폐기물 처분장에서 수납할 수 있는 연간 <sup>14</sup>C량은 10GBq로 제한하고 있다. 스웨덴은 2002년도부터 본격적인 <sup>14</sup>C 감시를 수행해 오고 있으며 발전소에서 나오는 폐수지의 처분장로의 이송은 <sup>14</sup>C량을 정확히 평가하고 입증할 수 있는 모델 수립 전까지는 일시적으로 정지상태에 있다. 현재 규제기관의 요청에 의해 만족할만한 평가기술이 도출될 때까지 지속적으로 원전 폐수지의 <sup>14</sup>C 인벤토리를 평가 중에 있다.

### 2. <sup>14</sup>C의 방출감시에 관한 규정

독일에서의 기술기준은 KTA 안전기준에 명시되어 있으며 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>의 형태와 상관이 있는 <sup>14</sup>C의 방출에 대해 상세히 평가토록 요구하고 있다. 연간, 분기별로 1GBq 방출에 대한 검출이 가능해야 하며 연간 <sup>14</sup>C 방출은 모든 화학형에 대해 검출하한치로 표시되어야 한다. 발전소 배기구를 통해 방출되는 배기량은  $180,000 \text{m}^3/\text{hr}$ 로서 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>형의 <sup>14</sup>C 검출하한치는  $2.6 \text{Bq/m}^3$ , <sup>14</sup>C 전체 방출에 따른 검출하한치는  $3.2 \text{Bq/m}^3$ 을 이끌어 낼 수 있어야 한다. 방출측정의 감시를 위해 규제기관(BfS)은 독립적인 시료채취구에서 년 1회 <sup>14</sup>C 시료에 대한 병렬측정을 실시하고 있다. 상호 비

교검증을 위해 채취시료를 2개로 나누어 1개는 BfS, 다른 한개 시료는 원자력발전소로 보내어 교차분석을 실시하고 있다. 스위스는 <sup>14</sup>C의 방출측정에 대한 규정이 마련되어 있지 않으나 발전소에서 대기로 방출되는 모든 화학형의 <sup>14</sup>C에 대해 년 단위로 측정을 요구하고 있다. 영국은 유럽연합위원회의 권고에 의해 매주 <sup>14</sup>C 분석을 수행하나 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>/non <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>로 구분하지 않고 총 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>으로만 평가한다. 핀란드는 <sup>14</sup>C 방출감시를 위해  $10 \text{Bq/m}^3$ 의 검출한계를 요구하고 있으며 시료채취는 매월 평가토록 요구하고 있다.

## 원자로 계통에서의 <sup>14</sup>C 거동분석

경수로 원자로 계통에서의 <sup>14</sup>C 거동분석은 냉각재가 환원 상태로 유지되어 운전되고 있기 때문에 상당히 많은 양이 CO, alkanes 및 hydrocarbon 형으로 함유되어 있다. 발전소에서 시간경과에 따른 가장 높은 <sup>14</sup>C 방출지점은 핵연료 재장전을 위한 1차계통 개방전이며 정치화학처리로 인한 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 주입으로 이때 유기형의 <sup>14</sup>C는 전량 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> 형으로 바뀌어 방출된다.

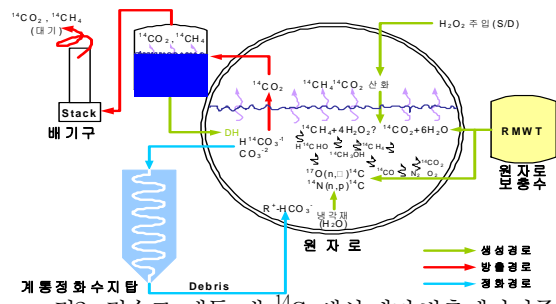


그림2. 경수로 계통 내 <sup>14</sup>C 생성, 제거, 방출메카니즘

## 결론

- 처분관점에서 원전 방출 <sup>14</sup>C에 대한 관리전략을 수립하여 방출, 제거 및 감시를 수행해 오고 있음.
- 모든 화학형의 <sup>14</sup>C는 장기적으로 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>로 전환된다고 봄
- 유럽의 전 원전은 ICRP-60수용으로 Critical Group으로 주민 피폭선량을 평가함.

### 참고 문헌

1. <sup>14</sup>C produced in Swedish NPP's -SKB-R-05-78, Dec.2005
2. General <sup>14</sup>C aspects in PWR'S, ETS 1-22 Sep.2007