

원전에서 발생하는 ^{14}C 폐기물의 관리 방안에 대한 고찰

강덕원, 이의동, 김효철, 이건화, 홍성준
 하나검사기술(주), 경기도 하남시 초이동 337-10
world2is@naver.com

1. 서론

^{14}C 는 원자로형에 따라 생성량이 크게 차이가 있으며 운전 형태 및 사용되는 계통수의 물성에 따라서도 생성되는 화학형 또한 크게 달라진다. 현재까지의 분석 결과 및 문헌상에 알려진 바에 의하면 경수로는 60~80Ci/GWey, 비등수로형은 80~100Ci/GWey, 중수로는 450Ci/GWey 정도가 원자로에서 생성되며 경수로는 배기구를 통해서 4~10Ci, 중수로는 7~15Ci, 비등수로는 8~17Ci 정도로 환경으로 방출되고 있다. 원자로로부터 방출되는 ^{14}C 의 화학형을 살펴보면 경수로는 주로 유기형탄소가 58~95%로 존재하며 비등수로형은 52~87% 중수로는 85~95% 무기형탄소로 존재하는 것으로 알려져 있다.[Vance, Cline, and Robertson, 1995]. 경수로서 ^{14}C 는 주로 methanol, methyl alcohol, acetaldehyde, ethyl alcohol 혹은 계통 내에 복합화합물로 존재하고 있다. [Matsumoto, et al., 1995] 계통수 중에 존재하는 ^{14}C 중 일부는 기체상으로 체적제어탱크(VCT)나 기체폐기물 처리계통(GRS)을 통해 배출되나 대부분은 계통수 정화용 이온교환수지나 필터에 의해 이온형태($\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$, $^{14}\text{CO}_2^-$)나 elemental C의 불용성 환원형인 무기형태로 제거된다. 중수로 및 비등수로는 약 96% 이상의 ^{14}C 가 이온형태로 감속계통 및 냉각재 정화계통의 수지에서 제거되며 경수로는 9~10% 정도가 냉각재 정화계통의 수지에서 제거된다. 발생한 폐수지나 폐필터는 고형화 물질로 안정화시키거나 고건전성 용기에 담아 처분장으로 보내어지거나 최근 들어서는 원자로 계통의 방사선량을 낮추기 위해 미세여과 필터의 사용으로 상당량의 ^{14}C 가 필터에 포집되는 것으로 확인되면서 일부 필터에 함유된 ^{14}C 는 Class C 보다 10배 정도 높아 처분장으로 반입하는데 제약을 받고 있다. 국내의 경우는 처분장 운영의 지연으로 아직까지는 처분장에 반입되는 총 방사능량의 산정 및 핵종별 방사능량의 제한 등이 결정되어 있지 않아 ^{14}C 를 함유한 폐기물에 대한 반입량 제한이라든지 핵종별 추가 처분비가 산정되어 있지는 않으나 외국은 장주기 핵종에 대해서는 핵종별 방사능량에 따라 처분비용을 산정하고 있다. 따라서 원전 운영자는 폐기물 드럼 처분시 드럼

내에 함유되어 있는 ^{14}C 량에 매우 민감하다. 이에 따라 발전사업자는 별도의 ^{14}C 관리전략을 수립하여 운영해 오고 있다. 원전에서 발생하는 방사성폐기물 중 상당량을 차지하는 폐수지 및 폐필터의 최적 처리와 처분을 위해서는 방사성 핵종의 종류와 함량을 반드시 평가해야 할 필요가 있다. ^{14}C 는 긴 반감기, 잠재적인 농도 및 환경으로의 이동성 때문에 정량화하는데 특별한 관심을 가져야 하는 방사성핵종($T_{1/2}=5730\text{years}$) 중의 하나이다. 처분된 방사성폐기물에서 ^{14}C 의 환경적인 거동은 계통 환경변화에 민감한 온도나 redox potential에 따라 상당히 다르게 평가되기 때문에 총 ^{14}C 의 방사능뿐 만 아니라 화학형 또한 매우 중요하다. 본 논문에서는 원전에서 발생하는 방사성폐기물 중 관리가 요구되는 계통 stream 에 대한 검토와 효율적인 C-14 관리방안에 대해 고찰해 보고자 한다.

2. 본론

2.1 처분관점의 폐수지/폐필터의 ^{14}C 관리

^{14}C 는 장기적 안전성 분석결과 보고서에 의하면 ^{14}C 는 자체의 높은 이동성으로 인해 공중에 방사선피폭을 주는 주요 방사성핵종이며 처분장에 보내진 ^{14}C 는 30,000년 동안 존재한다고 본다. 통상적으로 200ℓ 드럼 당 $2.3 \times 10^8 \text{Bq}$ 의 ^{14}C 를 함유해서는 안되며 더 높은 ^{14}C 함량이 포함될 경우에는 폐기물 용기 및 처리조건들의 견고성에 대한 기준을 더 엄격히 요구하고 있다. 발전소에서 발생하는 폐수지는 미국의 경우는 대부분 고건전성용기(HIC)에 담아 탈수 후 처분장으로 보내며 유럽은 시멘트나 석회 등으로 고화시켜 보내거나 발전소 내에 장기 저장 관리해 오고 있다. 일본을 포함한 일부 원전 운영국은 폐수지를 처분장으로 보내지 않고 산분해 처리하는 방안을 강구하고 있다. 해외의 처분장 운영현황을 살펴보면, 처분장에 반입되는 ^{14}C 를 포함한 7종의 핵종에 대해서는 폐기물 용기 내에 함유된 방사능량에 따라 처분비용을 산정하고 있으며 ^{14}C 는 Rd-226/Th-232 핵종과 동일하게 1MBq($2.7 \times 10^{-5} \text{uCi/cc}$)당 107,000원으로 처분장에 반입되는 핵종 중 가장 비싼 핵종 중의 하나이다. 스웨덴의 경우는 2007년 5월 이후로는 발생하는 모든 폐수지에 대해 처분장(SFR)으로 이송하는 것을 중단시켰다 주된 이유로는 현재

사용하고 있는 척도인자(Scaling Factor., SF)값에 대한 전면 재검토와 신뢰성있는 분석값임을 상호 비교를 통해 입증하라는 것이었다. 이와 같은 이유로 유럽에서는 적극적으로 ^{14}C 를 수지나 필터 등에 포집시켜 제거하는데 관심이 덜하다. 이는 붙잡아둔 ^{14}C 가 안정된 화합물로 변화할지라도 이것이 최종 처분장에 저장될 수 있을지 혹은 그 상태로 유지되고 있을지가 확신하지 못하기 때문이다. 최근의 EPRI보고서에서는, 경수로 정화계통에서 사용된 폐 필터 중의 ^{14}C 가 주요 이슈로 대두되고 있다. 왜냐하면 계통 방사선량의 저감 목적으로 미세여과필터를 사용하면서부터 일부 필터카트리지는 ^{14}C 의 농도가 예전의 필터보다 약 10배 이상 높은 Class C를 상회하고 있어 처분장에서 수납하기 위해서는 예전과는 달리 시멘트나 폴리머등의 고형화 물질로 고화시키거나 필터에 함유된 ^{14}C 농도를 희석 등의 방법으로 일정 농도 이하로 낮추어 처분장으로 보내야 된다고 기술하고 있다. 잡오체 폐기물은 대부분 원전 부지 밖의 별도의 소각장으로 보내어 소각처리를 해오고 있으며 처분장으로 반입 전 IAEA에서 권고하는 장주기 핵종(H-3, C-14, I-129, Fe-55, 등)들에 대한 Inventory 평가 명세서를 함께 처분장으로 제출하고 있다.

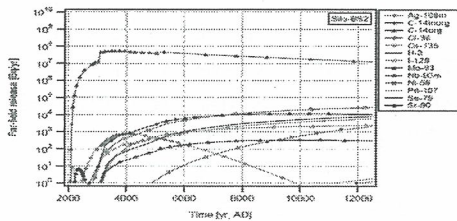


Fig. 1. Modelling of ^{14}C releasing at Disposal Site

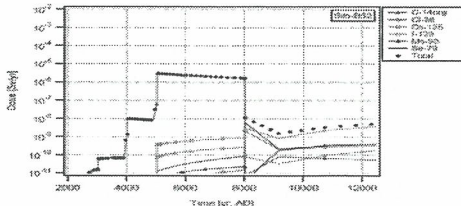


Fig. 2. Dose Rate of Critical Group

2.2. 주요 발생폐기물 Stream 별 ^{14}C 관리 방안

2.2.1. Source Term 관리

- 계통으로 유입되는 원자로보충수 및 핵연료 교체수 저장조에 용존되어 있는 질소 및 산소의 량
- 체적제어탱크(VCT)의 퍼징 및 탈기 운전
- 각종 탱크의 Cover gas 로 사용되는 질소대신 불활성기체(He, 등)로의 대체 사용

- 격납건물 내 수소재결합기 운전

- 중성자에 의해 조사된 공기의 량

2.2.2. Stack 방출 ^{14}C 폐기물

- 주민 피폭선량에 영향을 줄 수 있는 무기화합물인 $^{14}\text{CO}_2$ 의 방출량 억제를 유기형태로 배출 유도
- 필요시 방출관리가 요구되는 방출단(LRS 후단, VCT 후단, 등)에 ^{14}C Scrubber 설치 운영.

2.2.3. 사용후연료저장조(SFP) 관리

- O/H 기간 중 사용후연료 저장조를 통한 ^{14}C 방출량이 총 방출량의 50%를 상회하며 그중 90% 이상이 $^{14}\text{CO}_2$ 형태이기 때문에 집중 관리가 요구됨.
- SFP 주변 공기 중 ^{14}C 제거를 위한 이동형 ^{14}C Scrubber 설치 운영.
- $^{14}\text{CO}_2$ 형태의 기체방출 저감 목적의 pH 분무 제어법을 활용한 SFP 화학환경 분위기 제어

2.2.4. 사용후 폐수지의 ^{14}C 관리 방안

- 아직까지는 처분장과 연계된 ^{14}C 의 관리기술이 구체화되어 있지는 않으나 향후 척도인자 값의 적용 및 처분장에서의 수납을 위한 화학형별 ^{14}C 분석법과 용기내 Inventory 평가 기술이 요구됨.

2.2.5. 사용후 폐필터의 ^{14}C 관리 방안

- 계통 선량저감용 미세여과필터의 사용으로 폐필터에 포집되는 ^{14}C 의 방사능량이 처분장에서의 반입이 어려울 정도로 높아짐에 따라, 향후 처분 수납 조건을 고려한 필터 운전시간에 대한 검토와 필터를 고형화 처리하기 위한 시멘트 및 석회(lime)와의 고화조건 도출 시험 등이 요구됨.

3. 결론

향후 처분장에서의 폐기물 이송시 가장 관심을 지녀야 될 핵종 중의 하나가 ^{14}C 이다, 폐기물 처분 용기 내에 함유되는 ^{14}C 의 량은 처분비용과 직결될 뿐 아니라 주변 환경에도 영향을 미치기 때문에 발전운영자는 특별한 관심을 지닐 필요성이 충분히 있다고 본다. ^{14}C 의 방출관리를 위해서는 ^{14}C 의 생성량 자체를 줄일 수 있는 선원항 저감화 방안에 대한 검토와 방출과 retention의 상관관계를 고려한 운전 패턴에 대한 연구도 필요하다고 본다. 또한, 경제성 등을 고려한 ^{14}C 최적관리를 위한 탄력적 대응전략이 마련되어야 할 것이다.

4. 참고문헌

[1] ^{14}C produced in Swedish NPP's -SKB- R-05-78, Dec.2005.
 [2] General ^{14}C aspects in PWR'S, ETS 1-22 Sep.2007.