

## 중수로 환경방출 방사성이산화탄소 제거 장치 개발

### The Removal of Carbon-14 Scrubber for Removal of Environmental Radioactive Carbon in a Heavy Water Reactor

강덕원, 지준화, 엄희문  
한국전력공사 전력연구원

#### 요 약

중수로 원전에서 환경으로 방출되는 방사성탄소는 비록 소량이지만 반감기(5730년)가 길고 에너지(0.156MeV)가 높은 방사선을 내기 때문에 각별한 관리가 요구되는 핵종으로다른 방사성 화합물보다 각별한 관리와 감시가 요구된다. C-14은 원자로 구조의 특성상 경수로에 비해 6배 정도 많이 발생하며 방출되는 C-14의 약 90%는 감속재 계통이 차지하고 있고 주로 감속재 상층기체의 퍼지 및 배기 방출을 통해 환경으로 빠져나가게 된다. 본 연구는 발전소 계통 운전 및 중수 누설 등으로 인해 방출되는 C-14을 흡착, 제거할 수 있는 장치 개발에 초점을 맞추었으며 시험 운전 결과, C-14 제거 성능이 매우 우수한 것으로 평가되었다.

#### Abstract

The radioactive Carbon, C-14, although present in small amount, emits a high energy(up to 0.156MeV)  $\beta$  ray and has extremely long half-life(5730years). So special monitoring and management on its generation and discharge is inevitable. A PHWR, due to its own specific designs generates about six times as much C-14 as a PWR does and over 90% of the discharged C-14 comes from the Moderator system and discharged in to the environment through the process of periodic purging of the moderator cover gas system. The present study focussed on the development of effective C-14 scrubber and after production of a test facility and experiments using it, we found that our test facility is very efficient in CO<sub>2</sub> removal.

#### 1. 서 론

원자로를 가동하면서 생성되는 방사성 물질은 대부분 계통 내에 설치되어 있는 이온교환수지에 의해 제거되지만 일부 기체상으로 생성된 방사성 기체들은 극소량이지만 발전소 배기 계통을 통해 배기체 처리설비에서 제거한 다음 환경으로 내보내고 있다. 그러나, 방사성이산화탄소는 제거하기가 용이하지 않은 상태로 존재하기 때문에 별도의 정화처리 설비를 거치지 않고 원자력발전소 배기구를 통해 방출되고 있다. 일단 환경으로 방출되면 방사성탄소인 C-14은 낮은 에너지(0.156MeV)의  $\beta$ 선을 방출하여 동, 식물에 의한 호흡이나 광합성에 의한 탄소동화작용을 통해 생물체 내에 고정되고 먹이사슬의 경로를 통해 인체내에 쉽게 축적될 확률이 높기 때문에 중수로 원전에서 환경으로 방출되는 C-14은 다른 핵종보다 각별한 관리와 감시가 요구되어 진다. C-14은

경수로와 중수로형 원전 모두에서 생성 및 방출되고 있으나 원자로 구조의 특성상 중수로에서의 생성량이 경수로에 비해 약 6배 정도 많이 발생하고 있다. 중수로형 원전에서 방출되는 C-14의 약 90%는 감속재 계통이 차지하고 있으며, 방출되는 감속재 상층기체 중에는 약  $4 \times 10^{-3} \sim 6.5 \times 10^{-3}$   $\mu\text{Ci/ml}$  정도의 방사성이산화탄소가 포함되어 있다. 이러한 이유로 중수로 원전에서의 방사성탄소는 삼중수소(H-3)와 더불어 규제기관의 주요 감시 대상 물질로 분류되어 있으며 일부 발전소에서는 C-14 핵종에 대한 관리 및 감시를 보다 강화하도록 권고받고 있다. 본 연구에서는 감속재 상층기체 중에 함유되어 있는 C-14과 중수 누설 등의 비상 사태에 사용가능한 C-14 Scrubber의 제작 기술에 대해 언급하였다.

## 2. C-14 제거장치의 주요 특성

중수로 감속재계통 상층기체의 대기 방출시 제거효율을 극대화하기 위하여 연돌로 직접 방출시키지 않고 배치(Batch) 개념으로 일단 스테인레스 용기내에 내장시킨 PVC 재질의 포집백에 포집후 4개의 Column을 직, 병렬로 구성한 흡착탑을 통과시켜 원하는 농도까지 낮추도록 순환 제거 처리 후 설정된 농도값에 도달되면 연동된 방출 밸브가 자동으로 열려 발전소 연돌로 방출되도록 구성하였다.

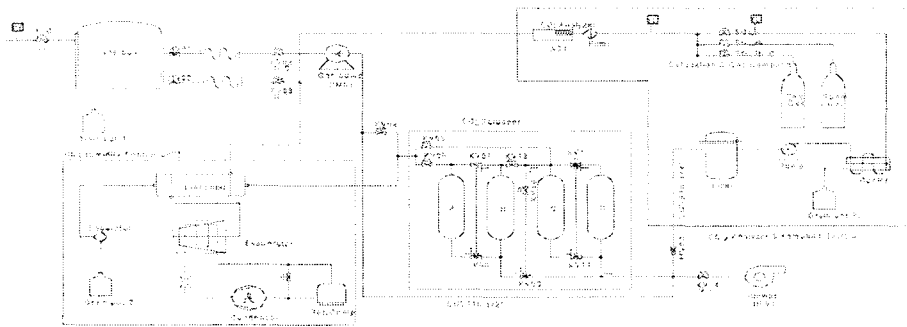


그림 1. 방사성이산화탄소 제거장치의 흐름도

## 3. 방사성 C-14 제거용 흡착제 개발

C-14이 존재하는 형태인 이산화탄소 분자는 쌍극자 모멘트를 갖지 못하고, 주로 quadrupole를 가지며 표면이 극성인 물질과 상호결합력이 강한 특성을 지니고 있기 때문에 표면이 비극성인 활성탄과 같은 물질에는 흡착능이 낮으며 흡착은 주로 표면관능기와 화학결합에 의해 이루어진다. 따라서, 최적의 제거 공정을 선택하기 위해서는 대상 공정의 특성(온도, 압력, 습도, 농도, 및 유량 유량)과 향후 장기 처분시 안정성까지 고려하여야 한다.

본 연구에서는 이제까지 개발된 CO<sub>2</sub> 제거 공정에 대한 특성 및 제거 효율과 고정화된 흡착제의 처분시 안정성에 대하여 전반적으로 고찰한 결과, 고체 흡착제를 이용한 공정이 가장 적절한 것으로 평가되어, 주로 기체상 CO<sub>2</sub>와의 화학반응에 의한 흡착 제거에 초점을 맞추어 대상 흡착제를 Li(OH)와 Ca(OH)<sub>2</sub>로 선정하였다(그림 2참조). Li(OH)의 경우에는 잠수함내에서 CO<sub>2</sub> 제거에 실제 사용되는 제품과 동일한 수준으로 제작하였다. Ca(OH)<sub>2</sub>의 경우에는 여러 가지 변수에 대한 실험을 통해 얻어진 최적의 배합비를 이용하여 펠렛형태로 자체 제작하였다. 흡착제 제조에는 Ca(OH)<sub>2</sub> 외에 바인더 물질로 PVA(Poly Vinyl Alcohol)와 PEG(Poly Ethylene Glycol) 및 물을 첨가하였으며 이들 원료를 균일하게 혼합하여 흡착제의 원료로 사용하였다. 흡착제는 혼합기를 이용하여 충분히 배합한 다음에 120 °C에서 3시간 건조시킨 후, 다시 200 °C에서 1시간, 350 °C에서 3시간동안 소성 과정을 거쳐 지름 5 mm, 길이 5 mm 크기의 원통형 펠렛으로 제작하였으며 그 형태를 그림 3에 나타내었다.

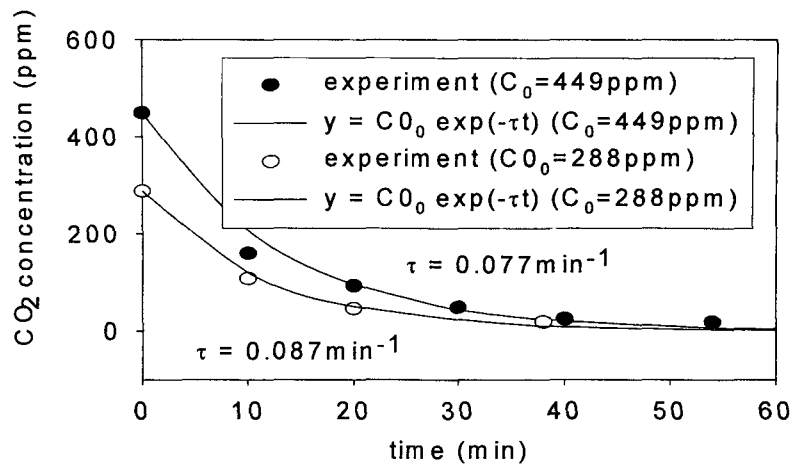


그림 2. 시간 경과에 따른 C-14 제거 성능시험 결과

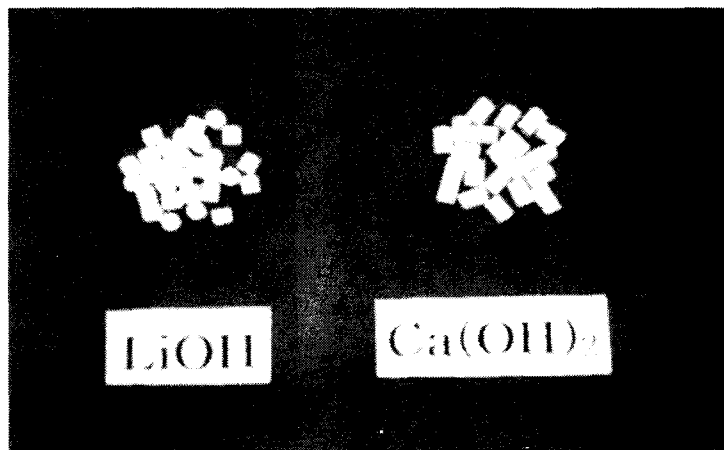


그림 3. 제조된 원통형 펠렛의 실제 사진

#### 4. <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> Scrubber 상세 설계 및 제작

##### 4.1 장치개요

그림 4에서 보여준 것처럼 시작품을 제작하여 월성원전에서 시험 운전 중인 C-14 제거설비에는 12개의 카트리지가 장착되었으며 연간 약 10,000ℓ의 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>를 처리할 수 있는 용량으로 제작하였으며 제거성능을 향상시키기 위한 효율적인 유체 흐름을 위해 직사각형 카트리지 대신 4개의 column을 직'병렬로 연결하여 독립적인 MOV(Motor Operated Valve)에 의해 운전할 수 있는 시스템으로 구성하였다.

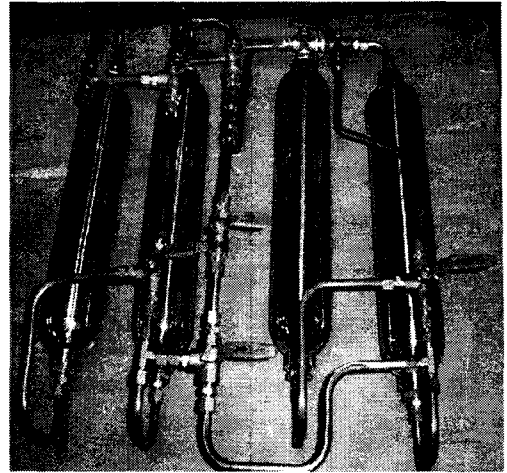
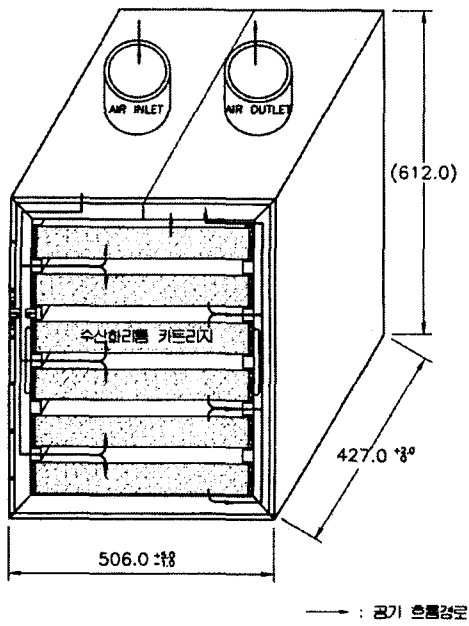


그림 4. C-14 Scrubber 전면 사진(기존형(좌)와 개량형(우))

#### 4.2 Scrubber특징 및 주요기능

C-14 제거장치는 그림 4와 같이 분리 운전이 가능한 Gas 포집용기와 Scrubber로 제작되었으며 기체 포집부는 압력을 상압으로 유지하는 신축성 포집백에 포집백의 누설에 대비해 외장은 Stainless Steel의 원통형 용기로 만들어 이중 포집 기능을 부여 하였다 또한 흡착제의 포집 효율을 극대화하기 위해 흡착 최적반응을 조절할 수 있는 온, 습도 자동조절 (25°C±10%)이 가능한 기능이 내장되어 있다. 운전은 원전원의 피폭 보호를 위해 원격 제어가 가능한 PLC 및 HMI를 이용한 원거리 통신 및 중앙제어용 Software를 개발하였다.



그림 5. C-14 제거 장치 사진

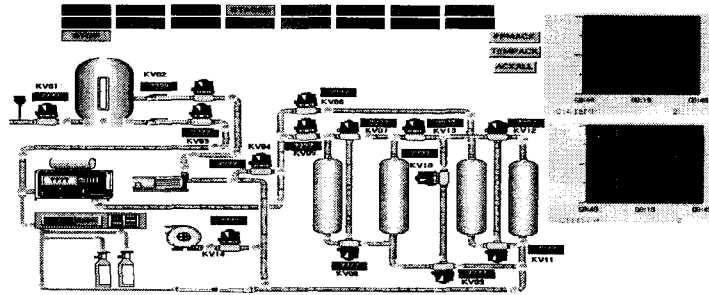


그림 6. C-14 제거 장치 통합 제어 Modelling

## 5. 결 론

중수로 감속재 계통에서 발전소 밖으로 유출되는 C-14를 제거할 수 있는 장치를 개발하여 성능 시험 운전해 본 결과 약 97% 이상의 Scrubber에 장착된 흡수재는 LiOH 나 Ca(OH)<sub>2</sub>를 펠렛형으로 제작하여 사용하였으나 흡착재의 최종 선정은 흡착능 및 처분의 안전성등을 고려하여 추후 선정할 계획이다. 누설에 대비한 이중 포집 기능이 부여된 스테인레스강 포집용기를 운전한 결과 고기밀성이 유지되는 것으로 확인 되었으며, C-14 Scrubber는 운전원의 피폭보호와 원거리 제어 운전이 가능한 중앙제어 S/W를 탑재된 보다 개선된 장치가 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. 강덕원 외 4명 “중수로 감속재 계통내 C-14 저감기술 개발보고서(00NC02)” 2003.4 한전 전력연구원
2. Experiments with a lime slurry in a stirred tank for the fixation of C-14 ORNL/TM-5757