

삼중수소 계량분배시설에서의 삼중수소 회수 및 제거

손순환, 송규민, 이숙경, 박상규*, 이재민*

한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 103-16

*(주)에네시스, 대전광역시 유성구 구암동 328번지

shshon@kepri.re.kr

1. 서론

월성원전에서 생산되는 삼중수소를 새로운 자원으로 재활용하기 위해서는 삼중수소를 계량분배하는 설비가 필요하다. 삼중수소는 국가간 수출입통제를 받는 전략물자로서, 이의 활용을 위해서는 정확한 계량관리가 필요하며, 또한 삼중수소는 수소동위원소의 하나로 약한 베타선을 방출하는 방사성 동위원소이지만, 다량을 취급하는 경우 엄격한 방사선 관리가 필요하다. 전력연구원에서는 상기 삼중수소의 자원화를 위해 국내외 관련법 및 협정을 준수할 수 있는 삼중수소 계량분배설비를 구축 중에 있다. 삼중수소 계량분배설비는 삼중수소를 계량하고, 순도를 분석한 후 저장용기 내에 금속수소화물 형태로 안전하게 저장한다. 즉, 계량용기를 이용하여 삼중수소(T_2)를 삼중수소 공급탱크로부터 1회에 일정량씩 받아 삼중수소 양을 측정하고, 가스크로마토그래프(GC)를 이용하여 순도를 분석한 후, 저장용기 내의 우라늄(U) 또는 ZrCo와 반응시켜 안전하게 저장한다. 각 저장용기는 일정량의 삼중수소를 담을 수 있도록 설계되어 있다.

삼중수소 취급설비는 삼중수소 누출 잠재성을 줄이고, 정상운전 시에는 ALARA 원칙과 선량제한체계 내에서 방사성 물질의 방출제한치를 만족해야 하며, 비정상 시에는 수용할 수 없는 상태의 방사능 누출을 저지할 수 있어야 한다. 즉, 삼중수소의 누설 방지를 위한 안전설비를 다중으로 설치해야 하며, 유사시에는 독자적인 운영이 가능하여야 한다. 삼중수소 취급설비의 1차 경계는 삼중수소가 들어있는 배관 및 기기로서, 삼중수소가 누설되지 않도록 고도의 건전성을 가져야 한다. 2차 경계는 1차 경계의 건전성이 손상되는 사건 발생시 작업자 피폭과 삼중수소 누설을 저감하기 위한 설비로, 삼중수소를 함유하고 있는 설비를 둘러싸는 2차 격실이며, 이들은 글로브박스 형태의 격실을 사용한다. 2차 격실은 내부에 들어가는 대기에 따라 불활성 기체 글로브박스과 공기 격실로 구분된다. 불활성 기체 글로브박스는 고농도 삼중수소 함유 기기를 설치하기 위해 사용하며, 불활성 기체로는 아르곤 또는 질소가 사용될 수 있다. 공기격실은 저농도 삼중수소 함유기기를 설치하기 위해 사용한다.

글로브박스 내로의 삼중수소 누설은 삼중수소 계량 및 분배계통을 운전하는 과정에서 일어난다. 글로브박스 대기 중에 존재하는 삼중수소가 정상 준위보다 높은 경우 이를 제거 회수하여 환경으로 방출되는 것을 최소화하기 위해 삼중수소회수계통이 설치되며, 본 계통에는 불활성 기체만 처리할 수 있다. 공기격실 대기 중의 삼중수소를 제거하거나 보수 또는 정상운전 중 계통에서 배기된 삼중수소를 제거 회수할 수 있는 배기기체 재결합기계통이 설치되며, 환경으로 배기되는 모든 기체들은 본 계통에서 처리된다.

2. 삼중수소 회수 및 제거계통 설계

삼중수소회수계통은 고 삼중수소 농도 함유 기기를 포함한 글로브박스 내로 삼중수소 누설사고시 글로브박스 대기를 정화하기 위하여 금속계터를 가진 폐회로 재순환계통이다. 글로브박스 내의 삼중수소농도가 설정된 준위를 초과하면 자동으로 온라인 연결되며, 글로브박스 정화계통 및 건물 배기구로 나가는 아르곤 퍼지는 차단된다. 글로브박스 대기는 시간당 글로브박스 대기를 4번 이상 교체할 수 있는 유량으로 순환하게 되며, 8시간 내에 글로브박스 내로 누출된 삼중수소의 99% 이상을 제거한다. 글로브박스 삼중수소회수계통은 공기격실 내에 설치된다. <그림 1>에 글로브박스 삼중수소회수계통의 개념도를 나타냈다.

삼중수소회수계통은 2계열로 구성되어 있어, 첫 번째 계열은 정상 운전시 계통 배기 또는 GC 운전시 배기되는 불활성 기체 중의 삼중수소를 회수하며, 두 번째 계열은 글로브박스 대기가 삼중수소로 오염될 경우 빠른 시간 안에 삼중수소를 회수한다. 각 계열은 우라늄정화기와 ZrFe 정화기가 직렬로 연결되어 있어 삼중수소를 신속하게 그리고 낮은 농도까지 제거할 수 있다. 첫 번째 우라늄정화기는 삼중수소저장능력(최대 300 scc/g)이 크고 삼중수소 반응속도가 빨라 삼중수소를 신속하게 제거하지만, 발열반

응으로 인해 우라늄의 삼중수소 분압이 증가되어 삼중수소 제거 성능에 제약이 받게 된다. 한편 ZrFe 정화기는 삼중수소 저장능력(0.8 scc/g)이 작고, 삼중수소 반응속도도 빠르지 않지만, 우라늄과 같은 제약 조건이 없어 수차례 통과시키면 원하는 저농도(0.1 mCi/m³ 이하)까지 삼중수소를 효과적으로 제거할 수 있다. 상기 금속정화기는 삼중수소와 금속의 반응을 촉진하기 위해 250℃(523K)에서 운전되며, 1회 통과시 약 90% 이상의 삼중수소를 제거할 수 있다. 삼중수소 회수계통을 통과하는 아르곤 기체를 적절히 가열하고, 냉각하기 위해 전기가열기, 온도제어기, 열교환기들이 설치된다.

배기 기체 재결합계통은 배기 기체 중의 삼중수소를 촉매상에서 산소와 반응시켜 물로 전환하여 제거함으로써 배기 기체 중 삼중수소 농도를 기준치 이하로 낮춘다. 삼중수소와 산소의 재결합 반응에 의해 생성된 삼중수소 함유 습분은 Molecular Sieve(MS) 건조기를 이용하여 -10℃의 이슬점 온도로 제습한다. 본 계통의 주요 기기는 수집탱크, 기체이송펌프, 열교환기, 촉매산화기, 기체예열기, MS 건조기(2대 병렬), 삼중수소 감시기(2대)이다. <그림 2>에 배기 기체 재결합계통의 개념도를 나타냈다.

수집된 기체는 삼중수소 농도에 따라(설정치 : 0.5 mCi/m³), 설정치 이하이면 처리없이 환경으로 배기하고, 설정치 이상이면 약 120 ℃로 가열하여 촉매(Pd)산화기로 보내진다. 촉매산화기로 유입된 수소 동위원소의 99%가 수분으로 전환되고, 처리된 기체는 MS 건조기를 통과하여 습분이 완전히 제거되며, 깨끗한 기체만 배기된다. 촉매산화기로는 대기압 부근에서 발화된 내부 수소/산소 폭발력에 견디도록 ~ 2 MPa로 설계되어 있다. 만약 건조기 하단 기체의 삼중수소 농도가 설정치(설정치 : 0.5 mCi/m³) 이상이면 다시 건조기 재순환되어 처리된다. MS 건조기는 출구측의 습분 함량이 정해진 이슬점을 초과하면 새 것으로 교체되며, 교체된 MS는 방사성폐기물로 취급 처리된다.

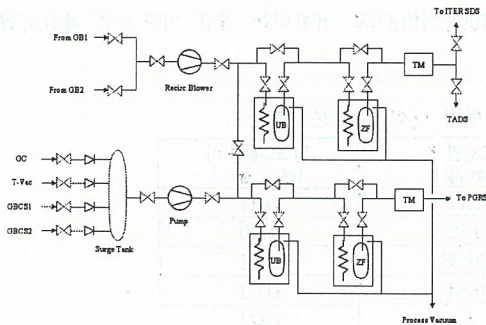


그림 1. 삼중수소 회수계통

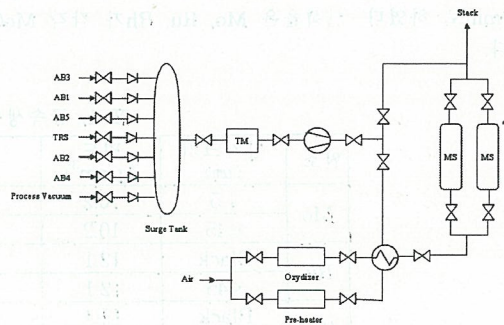


그림 2. 배기체 처리계통

3. 결론

월성원전에서 생산되는 삼중수소를 새로운 자원으로 활용하는데 필요한 삼중수소계량분배시설은 방사성동위원소 취급시설(11.1 PBq)로써 삼중수소의 누설 최소화 및 작업자 보호를 위해 2차 격실 내에 설치된다. 삼중수소 회수계통은 고농도 삼중수소 함유기체의 2차 격납을 제공하는 불활성기체 글로브박스의 대기를 처리하여 삼중수소를 제거하는 계통이며, 우라늄정화기와 ZrFe 정화기가 직렬로 연결되어 있으며, 시간당 글로브박스 대기를 4번 이상 처리할 수 있는 유량으로, 8시간 내에 삼중수소의 99% 이상을 제거할 수 있도록 설계하였다. 배기 기체 재결합계통은 공기격실 대기 중의 삼중수소를 제거하거나 계통에서 배기된 삼중수소를 제거하는데, 삼중수소를 촉매상에서 산소와 반응시켜 물로 전환시킨 후 이를 MS 건조기를 이용하여 제습한다. 삼중수소 취급에 대하여 모든 조건상에서 발생될 수 있는 누출을 고려하여 방사성 동위원소 사용시설의 안전규정을 만족할 수 있도록 설계하였다.

사 사

본 연구는 지식경제부의 전력산업연구개발사업으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] 월성원전 삼중수소 제거 시설 안전성 분석보고서 (1995).
- [2] 삼중수소 자원화 기술 개발 중간보고서 (2008).