

ITER 삼중수소 저장 및 공급시스템의 삼중수소 측정 및 재고관리 방안

송규민, 고병욱, 이계우, 손순환, 강현구*, 윤세훈*,
장민호*, 조승연*, 정기정*, 구대서**, 정홍석**, 김덕진***
한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지로 65
*국가핵융합연구소, 대전광역시 유성구 과학로 113
**한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
*** (주)코센, 경기도 성남시 중원구 상대원동 5442-1
kmsong@kepri.re.kr

1. 서론

국제핵융합실험로 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)는 핵융합연료로서 삼중수소를 리싸이클 개념으로 사용한다. 이를 위해 삼중수소를 저장, 공급, 분리, 정제, 회수할 수 있는 기능을 갖는 삼중수소 플랜트를 별도로 두고 있다. 우리나라는 이중에서 삼중수소 저장 및 공급시스템(SDS: Storage and Delivery System)의 조달을 맡고 있다. 본 계통은 타 계통에 비해 삼중수소 재고량이 상당히 많아 운전 및 정지상태에서의 삼중수소 재고량 파악이 전체 연료주기 상의 삼중수소 재고량 파악에 큰 영향을 미칠 것으로 보고 있다. 이에 본 논문에서는 SDS에서 확보하고 있는 삼중수소 측정기술의 장단점을 파악하고 이를 통해 삼중수소 플랜트 SDS 계통내 삼중수소 재고량의 모니터링과 재고관리 방안을 제시하고자 한다.

2. 본론

SDS에서 삼중수소 재고량 파악을 위해 적용할 수 있는 측정기기 및 방법으로는 삼중수소 열량계, pVT-c 측정법, in-bed 열량계, 질량유량미터(MFM: Mass Flow Meter)를 들 수 있다. SDS 삼중수소 재고관리를 위한 각각의 특징과 사용 범위 및 공정상 상호교차확인 방법은 다음과 같다.

2.1 삼중수소 열량계

삼중수소 열량계는 시료채취를 통해 측정하기 곤란한 밀봉선원 또는 폐기물 특히 삼중수소화제로 내에서 발생하는 삼중수소 붕괴열만을 감지하여 삼중수소의 재고량을 정량하는 분석장비이다. ITER에서는 삼중수소 플랜트로 입출고 되는 지점인 TLS(Tritium Loading Station)에서 사용된다. TLS 삼중수소 열량계는 2가지 경우에 적용된다. 첫째, 외부로 공급된 삼중수소를 운반·저장용기에서 꺼내지 않은 상태에서 측정이 수행되며 공급자가 제공한 인증서와의 비교를 통해 교차확인이 가능하다. 측정범위는 운반·저장용기의 용량인 70 gT 근처가 될 것이며, 정밀도(Precision, %RSD)는 0.5% 이내일 것으로 판단된다. 열량계의 측정시간은 24 시간이 소요되며, 별도의 안정화시간은 초기 운전 시 약 24 시간, 각각의 1회 측정 후 7 시간이 소요될 것으로 예상된다. 열량계 민감도 교정주기는 6개월로 보지만 운영환경에 따라 변할 수 있다. 둘째, 삼중수소를 운반·저장용기에서 SDS로 인출한 후 재사용용기 또는 폐기용기에 대한 삼중수소 재고량 측정도 삼중수소 열량계를 이용한다. 이때는 측정 범위가 1 gT 이하로 정밀도는 10% 이내로 확보할 수 있다. 측정시간은 14 시간 이내로 줄어들 것으로 예상되며 안정화 시간과 교정주기는 동일하다. 삼중수소 운반·저장용기에서 삼중수소를 인출한 후 재고량변동 값은 SDS의 pVT-c 측정법으로 측정된 삼중수소 양과 교차확인이 가능하다. 삼중수소 열량계의 교정은 삼중수소 붕괴열 모사장비를 측정셀에 넣고 수행할 수 있다.

2.2 pVT-c 측정법

pVT-c 측정법은 계통내에 기체형태로 존재하는 중수소, 삼중수소, 헬륨-3 등을 SDS에 설치된 계량탱크(pVT-c tank)와 ANS(ANalysis System)의 GC(Gas Chromatography) 혹은 Raman 분석법을 이용하여 정량·정성분석하는 방법이다. pVT-c 측정법은 ① 초기장입 및 삼중수소 보충, ② 헬륨-3 회수, ③ in-bed 열량계 교정, ④ SDS 저장용기 재생운전의 4가지 경우에 대해 적용할 예정이다. 대부분의 경우 측정범위는 0~70 gT로 예상되며, 정밀도는 계량탱크의 부피변화, 온도측정오차, 압력측정오차 및 GC(혹은 Raman) 측정오차에 의해 결정될 예정이다. ① 초기장입 및 삼중수소 보충의 경우 TLS 삼중수소 열량계에서 측정된 값과 교차확인이 가능하며, ② 헬륨-3 회수의 경우 헬륨-3 회수 후 재흡장시의 압력차(partial pressure와 동일)와 GC에서 측정된 조성비로 교차확인이 가능하나 헬륨-3의 양이 충분하지

않아 검출제한치(detection limit) 이하일 경우 불가할 수 있다. ③ in-bed 열량계 교정시 저장용기 자체에 설치될 내부히터(미정)에 의한 교정법을 이용한 교차확인만이 가능하다. ④ SDS 저장용기 재생운전의 경우 저장재로 사용하고 있는 ZrCo의 주기적 재생운전시 탈장된 삼중수소를 계량탱크에 임시로 저장할 때 pVT-c 측정법을 적용할 수 있다. 이때 측정되는 삼중수소 양은 SDS 저장용기의 이용률과 운전이력에 영향을 받는다. 이에 대한 교차확인법은 SDS 저장용기 설계 및 시운전 시 측정된 자료를 분석하여 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

2.3 in-bed 열량계

in-bed 열량계는 SDS 저장용기내 삼중수소 재고량 측정법에 적용된다. 측정시간이 24시간 정도 소요될 것으로 예상되어 운전 중에 적용하는 것은 불가하며 운전정지시나 운전에 사용되지 않는 저장용기에 대해 적용할 수 있다. 따라서 in-bed 열량계의 효율적인 적용을 위해 다수의 SDS 저장용기에 대해 적용시점, 차례, 시간 등을 관리할 수 있는 기술이 필요하다. 삼중수소 초기 장입의 경우 pVT-c 측정법이나 TLS 열량계로 측정된 삼중수소 양과 교차확인이 가능하고, 일정 운전시간경과 시엔 MFM 적산법과 교차확인을 할 수 있다.

2.4 MFM 적산법

위의 3가지 방법은 기본적으로 회분식이며 운전정지 시 혹은 운전과 무관한 상태에서 가능하다. 하지만 MFM을 이용하는 방법은 운전 중 SDS와 타 계통간에 이동한 삼중수소를 운전시간에 따라 실시간으로 적산하여 추정하는 방식이다. 삼중수소 재고량 측정오차는 MFM의 정확도에 상당히 종속적이며 현재 SDS에 적용될 MFM을 기준으로 상업에서는 1% 이내이지만 진공상태에서는 상당히 떨어질 것으로 예상된다.

2.5 삼중수소 물질수지

SDS에서의 삼중수소는 다음의 식에 의해 삼중수소 재고량이 결정된다.

$$T_{T, SDS} = T_{P, SDS} - (T_{FS} + T_{ANS} + T_{DS} + T_D) + (T_{ISS} + T_{TEP}) + (T_{I, TLS} + T_{O, TLS})$$

여기서 각 변수의 하첨자는 SDS와 연계하여 운전되는 삼중수소 플랜트의 계통(FS: Fueling system, DS: Detritiation System, ISS: Isotope Separation System, TEP: Tritium Exhaust Process)을 의미하며, D는 삼중수소 붕괴에 의해 소멸하는 것을, I와 O는 TLS를 통한 삼중수소 입출고, T와 P는 각각 현재 시점과 이전 시점을 의미한다. 실제 운전 중 타 계통과의 삼중수소 이동에 대해서는 MFM과 삼중수소 모니터(TM: Tritium Monitor)에 의존하여 재고량을 결정할 수밖에 없다. 인허가 측면에서는 TLS를 경계로 전 계통이 동일한 MBA(Material Balance Area)로 관리될 예정이지만 계통별 삼중수소 관리를 위해서는 실시간 MFM 적산법 적용과 운전정지 시 in-bed 열량계 및 pVTc-측정법에 의한 상호교차확인과 오차수정 작업이 병행되어야 할 것이다.

3. 결론 및 향후계획

국제핵융합실험로 삼중수소 플랜트 SDS의 삼중수소 재고량 관리에 적용할 삼중수소 열량계, pVT-c 측정법, in-bed 열량계, MFM에 대한 특징과 사용 범위 및 공정상 상호교차확인 방법을 기술하였다. SDS의 삼중수소 재고량 관리를 위한 물질수지식을 제시하였으며 향후 누적오차의 처리방법 및 타 계통과의 재고관리를 위한 함수관계 등이 고려되어 삼중수소 플랜트 MBA에 대한 고찰도 수행할 것이다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부 국제핵융합실험로 공동개발사업으로 수행 중에 있다.