

## 국제핵융합실험로 삼중수소 저장 및 공급계통 삼중수소 재고관리 방안

송규민, 고병욱, 손순환, 장민호\*, 윤세훈\*, 강현구\*, 조승연\*, 정기정\*, 정홍석\*\*

한수원중앙연구원, 대전시 유성구 장동 15-1

\*국가핵융합연구소, 대전시 유성구 진민동 463-1

\*\*한국원자력연구원, 대전시 대덕대로 1045

[kmsong@khnp.co.kr](mailto:kmsong@khnp.co.kr)

### 1. 서론

국제핵융합실험로(ITER, International Thermo-nuclear Experimental Reactor)는 핵융합연료로 삼중수소를 사용할 예정으로 특유의 삼중수소 연료주기를 형성한다. ITER 삼중수소 플랜트에서 이루어지는 삼중수소 연료주기는 삼중수소 저장 및 공급계통(SDS, Storage and Delivery System)을 시작으로 연료공급계통, 중성자빔주입기, 배출처리공정, 삼중수소 정제 및 회수계통과 TBM (Test Blanket Module)의 삼중수소 증식 및 추출계통 등으로 구성된다. 이 중에서 삼중수소 재고량을 가장 잘 파악할 수 있는 계통은 삼중수소 저장 및 공급계통이며 삼중수소 계측 및 계량장치가 상대적으로 많이 설치되어 있다. 본 연구에서는 ITER 삼중수소 재고관리를 위해 삼중수소 저장 및 공급계통에서 우선적으로 수행해야 하는 삼중수소 재고관리 방안을 제시하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 TLS 전용 삼중수소 열량계

TLS (Tritium Loading Station)의 삼중수소 열량계는 삼중수소 재고량 관리를 위해 가장 기본이 장비이다[1-4]. TLS 전용 삼중수소 열량계는 MBA-2 (Material Balance Area-2)로 분류되며 삼중수소 운반용기(1차 용기 및 알루미늄 용기)에서 삼중수소를 꺼내지 않고 재고량을 측정할 수 있다. 따라서 삼중수소 플랜트로 입출고 되는 삼중수소 양을 관리할 수 있다. TLS 전용 삼중수소 열량계를 이용한 삼중수소 재고관리는 크게 2가지 경우로 구분되며 각각 측정범위와 정밀도, 측정시간, 검량방법 등은 다음과 같다.

- 삼중수소 로딩 전
  - 측정범위: ~ 70 gT
  - 정밀도(%RSD): ~ 0.5%

- 측정시간: < 24 시간
- 안정화시간: ~7 시간, 초기에는 < 24 시간
- 검량법: 전기열선을 이용한 자체 검량
- 검량주기: 연 2회
- 교차측정: 삼중수소 공급처 제공 인증서와 상호교차 확인
- 삼중수소 로딩 후
  - 측정범위: ~ 1 gT
  - 정밀도(%RSD): ~ 10%
  - 교차측정: 저장용기 잔량은 SDS PVT-c 측정값과 상호교차 확인
  - 다른 항목은 삼중수소 로딩 전과 동일

#### 2.2 PVT-c 측정법

PVT-c 측정법은 MBA-1 및 SDS에서만 적용하는 측정법이다. 계량용기에 중수소와 삼중수소를 기체형태로 채우고 정량하며 ANS (Analysis System) 가스크로마토그래프(GC)로 농도를 분석하여 최종 삼중수소 재고량을 파악할 수 있다. 저장용기로 유입된 실제 삼중수소 양은 PVT-c 계량용기의 압력변화를 이용한다. PVT-c 측정법은 (1) 초기 삼중수소 로딩 혹은 보충, (2) 헬륨-3 회수, (3) in-bed 열량계 검량, (4) 저장용기 재생의 4가지 경우에 적용된다. 하지만 저장재를 ZrCo가 아닌 우라늄으로 사용할 경우 저장용기 재생운전은 적용하지 않는다. PVT-c 측정법의 측정시간은 GC에 의해 결정되며 30분~1시간 정도 소요된다. 정밀도는 온도, 부피, 압력, 농도 측정에 의해 결정되며 아직 정확하게 제시되지 않은 상태이다. 운전 (1)의 경우 TLS 열량계와 상호교차 확인이 가능하다.

#### 2.3 In-bed 열량계

SDS에 설치된 삼중수소 저장용기는 in-bed 열량계 기능을 가지고 있다. 이 방법도 MBA-1 및 SDS에서만 적용할 수 있다. 핵융합 운전 후 휴지

기(dwelling) 중 저장용기 내 삼중수소 재고량을 확인하기 위하여 in-bed 열량계를 가동할 수 있다. 현재까지 저장용기 설계와 함께 개발 중에 있는 기능으로 정밀도와 측정시간은 아직 결정되지 않았다. 측정범위는 0 ~ 70 gT, 검량방법은 저장용기에 장착된 내부 전열기를 이용하거나 PVT-c 측정법으로 계량된 삼중수소를 흡장하고 이를 기준으로 검량하는 방법이 있다. 하지만 내부 전열기를 이용하는 방법에 비해 정밀도가 낮아질 가능성이 많다. 상호교차 확인 방법으로 초기 삼중수소 로딩 시 TLS 삼중수소 열량계와 비교하는 방법이 있다.

### 2.4 MFM (Mass Flow Meter)

MFM을 이용하여 SDS에서 FS (Fuelling System)로 공급된 양을 추정하는 방법이다. 순환 운전의 경우 ISS (Isotope Separation System)에서 회수된 양을 추가하여 추정한다. MBA-1에서 적용하며 SDS 이외에 다른 계통에서도 적용할 수 있는 방법으로 운전 중에 리얼타임으로 적용할 수 있는 방법이기도 하다. 운전정지 중에 측정된 in-bed 열량계 측정값과의 상호교차 확인이 가능하다. 측정오차는 MFM의 성능에 밀접한 관계가 있다. 주어진 one-shot operation과 recycle operation 운전 이력을 파악하여 저장용기 내 삼중수소 잔량을 정확하게 추정하는 기술이 요구되며 이에 대한 절차서 개발이 추가로 필요하다.

### 2.5 물질수지

주어진 시점(P → T)에서 SDS내 삼중수소 재고량  $T_{T,SDS}$ 는 다음의 물질수지식에 의해 결정된다. 삼중수소 연료주기 각 계통은 동일한 방법으로 구한 물질수지식을 적용하며 이를 연립방정식으로 구성하여 계통별 삼중수소 재고량을 파악할 수 있다.

$$T_{T,SDS} = T_{P,SDS} - (T_{FS} + T_{ANS} + T_{DS} + T_D) + (T_{ISS} + T_{TEP}) + (T_{I,TLS} - T_{O,TLS}) \quad (1)$$

여기서 DS는 detritiation system, TEP는 tokamak exhaust process이며 D는 decay loss를 의미한다.  $T_{FS}$ 는 MFM에 의해 측정되며,  $T_{DS}$ 는 삼중수소 이온챔버로 측정된다.  $T_{ISS}$ 와  $T_{TEP}$ 은 운전방법에 따라 결정되어 유럽 및 미국과 논의되고 있는 부분으로 SDS의 PVT-c 측정법 적용을 고려하고 있다.  $T_{TLS}$ 는 TLS 전용 열량계를 이용

하여 측정하며 PVT-c 측정법으로 교차 확인할 수 있다.

### 3. 결론

국제핵융합실험로(ITER) 삼중수소 저장 및 공급계통(SDS)의 여러 운전모드에서 가능한 삼중수소 재고량 측정방법의 특징과 상호 교차확인 방법을 살펴보았으며 이를 구현하는 삼중수소 물질수지식을 제안하였다. 제안된 절차서와 물질수지식은 다른 계통과의 연계성을 고려하기 위하여 국제핵융합실험로 전담기구와 참여국의 검토가 진행 중이다. 일부 삼중수소 재고량 계측장비는 개발 중이며 정확한 정밀도와 측정시간이 결정되지 못한 상태로 구성품의 개발수준과 상세설계 진행 상황에 따라 지속적인 개정이 요구된다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 지식경제부의 국제핵융합실험로 공동개발사업(2011-0000293)으로 수행되었습니다.

### 5. 참고문헌

- [1] 송규민, 이계우, 고병욱, 손순환, 정양근, 장민호, 윤세훈, 강현구, 조승연, 정기정, 정홍석, "삼중수소 저장용기 열용량이 삼중수소 열량계 측정성능에 미치는 영향", 한국방사성폐기물학회, 2010년 추계학술대회 논문요약집, p85-86, 2010.
- [2] 송규민, 이계우, 고병욱, 이숙경, 손순환, 장민호, 윤세훈, 강현구, 조승연, 정기정, 정홍석, "펠티에 소자를 이용한 소형 열량계 특성시험", 한국방사성폐기물학회, 2010년 추계학술대회 논문요약집, p111-112, 2010.
- [3] K. M. Song, et al, "Test of a large-volume calorimeter in KEPRI tritium laboratory", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 38(3), p295-299 (2010).
- [4] 송규민, 이계우, 고병욱, 손순환, 장민호, 윤세훈, 강현구, 조승연, 정기정, 정홍석, "삼중수소 붕괴열에 의한 열량계 내 열전달 전산 해석", 한국방사성폐기물학회, 2011년 추계학술대회 논문요약집, p391-392, 2011.