

ITER 삼중수소 저장공급시스템 헬륨-3 수집계통 운전절차개발 및 게터특성분석

송규민^{1*}, 이정민¹, 고병욱¹, 윤세훈², 장민호², 강현구²

¹한국수력원자력(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

²국가핵융합연구소, 대전광역시 유성구 과학로 169번길 148

*kmsong001@khnp.co.kr

1. 서론

국제핵융합실험로(ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor)는 핵융합연료로 중수소와 삼중수소를 사용하며, 이를 위해 삼중수소 저장공급시스템(SDS, Storage and Delivery System)이 설치된다. SDS는 한국 조달품목종 하나로, 핵융합연료인 삼중수소 및 중수소를 저장하고 공급하는 기능을 한다. 또한 핵융합연료의 순도를 유지하기 위하여 SDS에 축적되는 헬륨-3를 주기적으로 제거하는 기능을 한다. 본 연구에서는 ITER SDS 헬륨-3 수집계통(He-3 collection loop)의 운전절차개념을 확립하고 구성품 중 게터의 특성을 반영하고자 한다.

2. 본론

2.1 SDS 헬륨-3 수집계통 특징

ITER SDS에 헬륨-3 수집계통의 필요성에 관한 논란이 많았다. 왜냐하면 삼중수소가 붕괴하여 생성되는 헬륨-3는 핵융합연료주기를 순환하면서 TEP (Torus Exhaust Process)의 분리막이나 ISS (Isotopes Separation System)의 초저온증류탑에서 대부분 제거되기 때문이다. 하지만 ITER의 주기적인 첫다운 기간이나 장기 운전정지 시 대부분의 삼중수소를 SDS에 저장하게 되는데, 이때 생성된 헬륨-3가 핵융합연료의 순도를 낮출 수 있기 때문에 가동 전에 미리 제거할 필요성은 여전히 존재한다. FDR-2001 등 ITER 설계 초기에 SDS 기능에 헬륨-3 수집 기능이 명시되어 있었으나 운전개시 조건이나 헬륨-3의 순도, 운전방법 등은 명확하지 않았다[1].

2.2 운전조건 및 설계요건

헬륨-3 수집계통의 운전은 독립적이기 보다 전적으로 PVT-c 계량계통의 운전 후 조건부로 개시된다. 게터용기 내 삼중수소 재고량을 수시로 확인하는 것은 SDS 기능 중에 하나인데, 이를 위해 게터용기 내부에 설치된 헬륨루프를 이용하는 in-bed 열량계 방식과 계량용기로 측정하는 PVT-c 방식이

있다. 헬륨-3 수집계통의 운전은 PVT-c 운전 시 정량분석에 의해 헬륨-3의 수집운전의 필요성이 있을 경우 진행된다. PVT-c 운전의 마지막 단계는 계량용기의 삼중수소를 다시 우라늄 게터용기로 흡장하는 운전이다. 이때 계통에 잔류하는 삼중수소의 잔량은 게터로 사용되고 있는 우라늄의 특성상 $\sim 1 \text{ mCi/m}^3$ 수준이 될 것으로 보인다. 헬륨-3 수집 시 불순물로의 삼중수소 농도요건은 $\sim 10 \text{ } \mu\text{Ci/m}^3$ 으로 한다. 하지만 처리량에 대한 요건은 미정이다. 헬륨-3 수집을 위한 순환루프 전용 펌프는 없으며, PVT-c 계량 시에 사용되는 펌프인 MBP (Metal Bellows Pump, MB-601)를 공용으로 사용하기 때문에 헬륨-3 처리량이 너무 적어 부압에서 운전가능범위를 벗어날 수도 있다. 이 경우 PVT-c 계량운전을 다른 게터용기에 적용하여 헬륨-3가 누적된 후 운전할 수도 있다.

2.3 정상운전절차서

헬륨-3 수집계통의 운전조건과 요건을 바탕으로 정상운전 절차서를 개발하였다[2]. 정상운전 절차서를 요약한 흐름도는 Fig. 1과 같다. PVT-c 삼중수소 계량운전 이후 선택적으로 헬륨-3 수집운전이 진행된다.

2.4 게터 적용 헬륨-3 수집계통 시작품 구성

SDS 헬륨-3 수집계통 설계자료 생산을 위한 시작품을 제작하였다. SDS의 저장용기와 PVT-c탱크를 이용하여 삼중수소를 비롯한 헬륨-3, 불순물의 재고량과 조성을 확인한 후 다시 저장용기에 삼중수소를 저장하고 남은 잔존 가스를 헬륨-3 회수 실험용 게터실험장치로 보내는 과정을 공급탱크로 대신하였다. 삼중수소, 헬륨-3 및 불순물을 크래커와 게터의 고온운전에 맞도록 미리 잔존가스의 온도 분위기를 형성하기 위한 목적으로 전열기를 설치하였다. 헬륨-3 회수 실험용 게터실험장치의 목적은 삼중수소와 불순물이 제거된 헬륨-3의 회수이다. 따라서 크래커와 게터를 지속적으로 순환하면서 헬륨-3의 회수가 가능하도록 MBP(Metal Bellows

Pump)와 수집탱크를 설치하였다. 삼중수소, 헬륨-3, 불순물의 조성을 GC로 분석할 수 있도록 샘플러를 공정의 단계별로 분석이 가능하도록 연결하여 일정 시간간격으로 측정할 수 있도록 하였다.

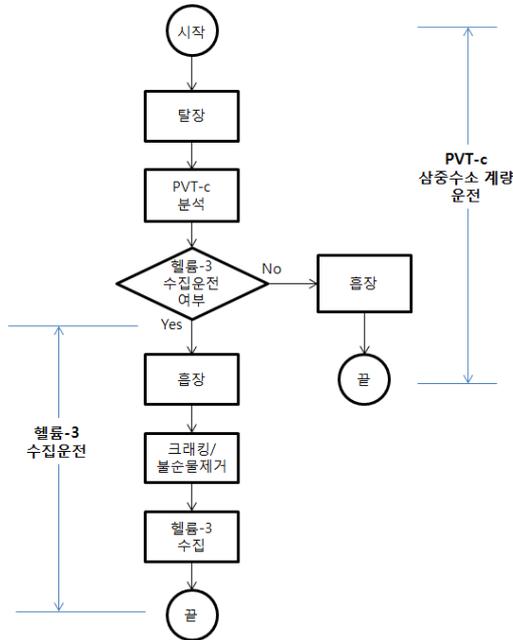


Fig. 1. Operation flow chart of He-3 collection loop.

2.5 게터 특성 및 분말화

SDS 우라늄 베드에서 탈장된 삼중수소는 일부 CQ₄의 형태로 존재한다. CQ₄의 형태의 삼중수소를 제거하기 위하여 우선 크래커를 전단에 설치한다. 크래커로서 ZrMnFe (ST-909)를 선정하였다. CQ₄는 ZrMnFe 베드를 통과하면서 탄소는 잡히고 삼중수소만 기체형태로 남는데 삼중수소는 후단의 Zr₂Fe 베드로 제거한다. ZrMnFe와 Zr₂Fe 게터의 특징은 Table 1에서 볼 수 있다.

헬륨-3에서 삼중수소를 제거하기 위하여 Zr₂Fe (ST198) 게터를 사용한다. Zr₂Fe는 최대 5몰의 삼중수소를 흡장시킬 수 있다. 하지만 일정량 이상을 흡장할 경우 분말화가 진행된다. Figure 3은 250~400°C에서 반복흡탈장 후 분말화된 Zr₂Fe의 사진이다. 분말의 사이즈는 약 5 μm 수준이나 흡탈장이 반복되면 더 작은 사이즈로 분쇄될 가능성이 크다. ST198의 분말화가 진행되는 농도는 10 torr·L/g으로 알려져 있다. 이를 기준으로 한다면, 실제 헬륨-3에서 삼중수소를 제거할 때 삼중수소 농도는 ~1 mCi/m³ 즉, 1E-7 g/g-ST198 수준으로 헬륨-3 수집운전을 약 1000회 정도하여야 분말화가 진행될 것으로 예상된다. 하지만 일부는 흡장량 제한치 이전에 진행될 수 있기 때문에 게터반응기 전후단에 분말사이즈보다 작은 필터를 설치하여야 한다.

Table 1. Characteristics of cracker and getters

Alloy	ZrMnFe (ST 909)	Zr ₂ Fe (ST 198)
Activation Temperature	>400 °C, >24hr	>400 °C, >24hr
Reaction Temperature for Hydrogen Isotope	After Activation	After Activation
Reaction Temperature for Hydrogen Isotope	No	200 °C
Storing Capacity for Hydrogen Isotope	50 Torr L/g → powder	50 Torr L/g → powder
Regenerate Temperature	No	500 °C
Operating Temperature	300~600 °C	200~350 °C

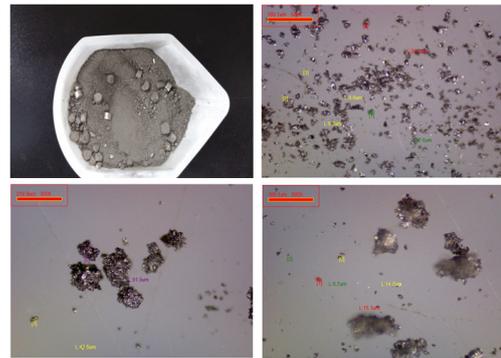


Fig. 2. Powderization of ST198 during the adsorption.

3. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 ITER 핵융합연료의 순도유지를 위해 SDS에서 생성되는 헬륨-3를 주기적으로 제거하기 위한 헬륨-3 수집시스템의 운전조건, 설계조건 및 공정개발 시 주요 구성품인 반응기의 게터특성을 살펴보았다. 향후 운전조건에 따른 설계자료 생산을 통해 ITER SDS에 적합한 헬륨-3 수집시스템의 개발을 완료할 예정이다.

4. 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부와 산업통상자원부의 국제핵융합실험로 공동개발사업(NRF 2012-000333) 및 국가핵융합연구소의 지원으로 수행되었다.

5. 참고문헌

- [1] ITER, "Design Description Document", WBS 32C, N 32 DDD 34 01-07-03(Rev0.1) (2007).
- [2] K. Song, "Standard Operating Procedure of the SDS", 32C-SOP-3100 (2013).