

총 설

국제핵융합실험로 삼중수소 연료주기

송규민[†] · 손순환 · 정홍석* · 윤세훈** · 정기정**

한수원(주) 중앙연구원
305-343 대전시 유성구 유성대로 1312번길 70
*한국원자력연구원
305-353 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111
**국가핵융합연구소
305-333 대전시 유성구 과학로 169번길 148
(2012년 3월 12일 접수, 2012년 4월 15일 채택)

Tritium Fuel Cycle of the International Thermonuclear Experimental Reactor

Kyu-Min Song[†], Soon Hwan Sohn, Hongsuk Chung*, Sei-Hun Yun** and Ki Jung Jung**

Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., Central Research Institute, 70-1312-gil Yusong-daero, Yusong-gu, Daejeon 305-343, Korea

*Korea Atomic Energy Research Institute, 111-989-gil Daeduk-daero, Yusong-gu, Daejeon 305-353, Korea

**National Fusion Research Institute, 148-169-gil Kwahak-ro, Yusong-gu, Daejeon 305-333, Korea

(Received 12 March 2012; accepted 15 April 2012)

요 약

국제핵융합실험로(ITER)가 2019년까지 7개국의 공동개발사업으로 건설될 예정이다. ITER의 핵융합연료주기는 핵융합진공용기, 삼중수소 플랜트, 연료공급부로 구성되어 있다. 이중에서 삼중수소 플랜트는 핵융합연료주기를 위한 중수소와 삼중수소의 저장, 공급, 분리, 제거, 회수 등의 기능을 제공한다. 삼중수소 플랜트는 외부에서 중수소와 삼중수소를 공급받아 저장·공급하는 SDS, 토카막배출처리의 TEP, 수소동위원소 분리의 ISS, 삼중수소수 및 대기 처리의 WDS-ADS, 정성·정량분석의 ANS 등으로 구성된다. 이 논문에서는 삼중수소 플랜트를 구성하는 주요 공정에 대한 기능 및 설계요건을 기술하였다. 한국은 SDS 개발에 참여하고 있으며 월성원전 삼중수소 제거설비(WTRF) 건설 및 운전경험을 통해 WDS 대한 기술을 일부 확보하였다. 향후 ISS 및 TEP에 대한 기술확보를 위한 여러 분야에서의 참여 확대를 기대하고 있다.

Abstract – International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) will be constructed in 2019 according to the JIA (Joint Implementation Agreement) of 7 countries. The ITER fusion fuel cycle consists of fusion vacuum vessel, tritium plant and fuelling system. The tritium plant provides the functions of storage, delivery, separation, removal and recovery of the deuterium and tritium used as fusion fuels for the ITER. The tritium plant systems supply deuterium and tritium from external sources and treat all tritiated fluids from ITER operation through Storage and Delivery System (SDS), Tokamak Exhaust Processing (TEP), Isotope Separation System (ISS), Water Detritiation System & Atmosphere Detritiation System (WDS & ADS) and Analysis System (ANS). In this paper, the functions and design requirements of the major systems in the tritium plant and the status of R&D are described. Korean party is developing the SDS for ITER tritium plant and partially attaining the WDS technology through the construction and operation experience of the Wolsong Tritium Removal Facility (WTRF). Now it is expected that researchers in other fields such as chemical engineering take part in the development of upcoming technologies for ISS and TEP.

Key words: ITER, Fusion, Tritium, Fuel Cycle, Isotope Separation, Detritiation, Storage and Delivery System

1. 서 론

인류는 ‘지구에서 핵융합에너지의 실용적 생산이 가능한가?’라는 질문에 답하기 위하여 지난 반세기에 걸쳐 핵융합에 대한 기초연구

를 수행하여 왔다. 그리고 이제 과학기술적 타당성을 실증하기 위하여 한국, 미국, 유럽연합, 중국, 러시아, 일본, 인도의 7개국이 모여 국제핵융합실험로(ITER) 공동개발사업을 진행 중에 있다[1]. ITER는 International Thermonuclear Experimental Reactor의 약자이며 라틴어로 ‘길(Way)’이라는 뜻으로 핵융합에 이르는 길을 ITER를 통해 도달하고자 하는 의미를 내포하고 있다. ITER는 상용로나 데모로가 아닌 연구를 위한 실험로의 하나로 핵융합로 개발을

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kmsong@khnp.co.kr

[‡]이 논문은 KAIST 홍원희 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

Table 1. Status and inventory of tritium handling facilities

Facility	Location	Max. Inventory [g]	Throughput	Status	Function
DTRF	Darlington Canada	–	360 kg-D ₂ O/hr	Operational	Tritium removal
WTRF	Wolsong Korea	–	100 kg-D ₂ O/hr	Operational	Tritium removal
TSTA	Los Alamos USA	100	> 1 kg-T	Decommissioned	Fuel Cycle Tests
TFTR	Princeton USA	5	~ 100 g-T	Decommissioned	Tokamak
JET	Culham UK	20	~ 100 g-T	Operational	Tokamak
TPL	Tokai Japan	60	–	Operational	Fuel Cycle Tests
TLK	Karlsruhe Germany	40	160 g-T	Operational	Fuel Cycle Tests
TriMAS	Daejeon Korea	30	–	Operational	Tritium Application

으로 운영 중에 있다. WTRF의 개발, 설계, 건설, 운전 과정에서 핵융합로 삼중수소 연료주기 기술의 일부에 해당되는 탈삼중수소 기술과 삼중수소 저장기술을 확보한 바 있다. 하지만 핵융합로에 적용하기 위해서는 탈삼중수소 기술의 경우 공정 최적화를 통한 복합 공정구성을 고려하여야 한다. 또한 삼중수소 저장은 WTRF와 달리 신속한 흡탈장이 수시로 가능하여야 한다. 삼중수소 농축을 위한 초저온 증류공정과 삼중수소 폐기물 처리분야 등은 최근 관심을 갖고 착수하고 있는 단계이다.

Table 1은 세계적으로 삼중수소를 취급하고 있는 설비의 위치와 재고량 등을 보여주고 있다. 이 중에서 우리나라의 WTRF와 캐나다의 DTRF는 중수로를 위한 삼중수소 제거설비이며 다른 대부분의 설비들은 핵융합연료주기를 포함한 다양한 연구를 수행하기 위해 삼중수소를 취급하고 있는 설비들이다. 미국 Los Alamos National Lab.의 TSTA (Tritium Systems Test Assembly)는 핵융합로에서 요구되는 삼중수소 공정시스템의 안전성과 기술개발을 위해 이용된 바 있다. 한국수력원자력(주) 중앙연구원(KHNP CRI)은 WTRF에서 생산되는 삼중수소의 소량분배와 삼중수소 자발광체, 삼중수소 배터리, 삼중수소 열량계 개발 등 삼중수소를 이용한 연구를 위해 삼중수소 실험실을 운영 중에 있다[13-19].

3. 삼중수소 연료주기 시스템

삼중수소 연료주기를 구성하는 계통의 개념도는 이미 Fig. 1에서 보여준 바와 같다. 핵융합연료인 중수소와 삼중수소를 SDS에 저장해 두었다가 FS (Fuelling System)와 NBI (Neutral Beam Injector)로 공급된다. 토러스에서 핵융합반응을 하고 미반응한 혼합기체는

RP/CP (Roughing Pump/Cryogenic Pump)로 외부로 배출되는데 TEP와 ISS를 거치면서 중수소와 삼중수소가 분리회수되어 다시 SDS로 공급된다. WDS에서 잔량의 중수소와 삼중수소가 회수되며 ANS (ANalysis System)에서 정성·정량 분석을 수행한다. FS와 NBI는 SDS에서 공급된 기체를 용도에 따라 토크마크에 공급해주는 기능을 한다. 삼중수소를 취급하고 있어 대부분의 계통구성품은 GB (Glove Box)에 설치되며, GB는 GDS (Glovebox Detritiation System)와 VDS (Ventilation Detritiation System)를 통해 외부로 배출되는 배기체의 삼중수소농도를 제어하고 회수하기도 한다.

3-1. SDS

SDS는 삼중수소 플랜트에서 한국이 맡아 설계하고 조달하는 계통이다[20-22]. SDS는 토카막에서 핵융합을 위해 필요한 중수소 및 삼중수소의 연료뿐만 아니라 다른 여러 가지 목적으로 필요로 하는 Ar, He, Ne, N₂, O₂ 등의 기체를 FS와 NBI로 공급해 주는 기능을 한다. 중수소 및 삼중수소 연료공급속도는 최대 200 Pa·m³/s를 유지하여야 한다. 우라늄 저장재로부터 삼중수소의 충분한 탈장속도를 얻어야 하므로 상당히 어려운 설계요건 중에 하나이다. 삼중수소 저장용기는 8~12시간 ±3%의 오차로 삼중수소 재고량도 측정할 수 있어야 한다. 삼중수소 붕괴로 생산되는 헬륨-3을 회수하는 기능을 포함한다. Fig. 2는 SDS를 간략하게 나타낸 흐름도이다. 오른쪽의 TLS (Tritium Loading Station or Tritium Depot)를 통해 삼중수소가 공급되며中间的 SDS에서 계량, 저장 및 공급기능을 한다. 왼쪽은 SDS에서 ISS로부터 공급받고 FS로 공급하는 중수소와 삼중수소의 흐름을 나타내고 있다. 중수소와 삼중수소를 제외한 순환하지 않는 다른 기체도 SDS 계통에 포함되어 있으나 삼중수소 플랜트 건물

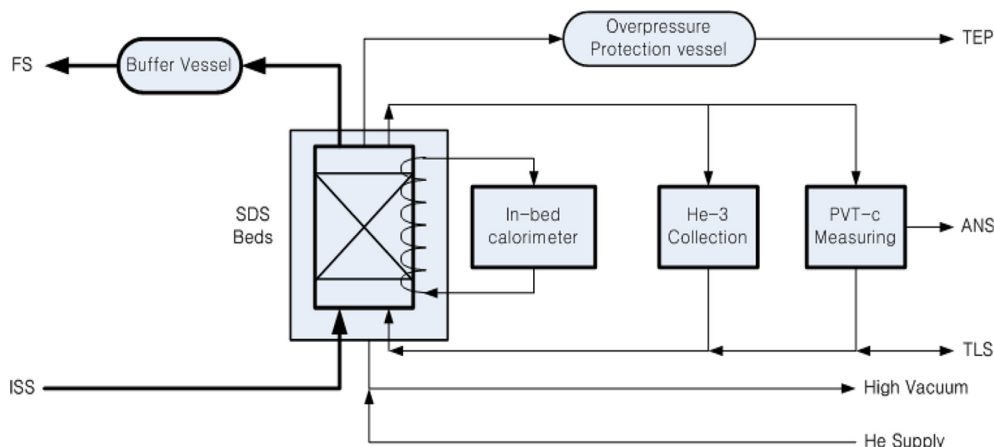


Fig. 2. Conceptual flow diagram of SDS.

외부에 설치된 가스공급시설로부터 SDS의 불순물 제거장치를 거쳐 토카막으로 바로 공급된다.

SDS는 삼중수소에 적합한 재료로 설계되어야 하며 대부분의 장비가 글로브박스에 설치된다. 총 10^{-8} Pa·m³/s 이하의 누설율을 유지해야 하며 각각의 구성품은 10^{-9} Pa·m³/s 이하의 누설율을 유지해야 한다. GB의 누설율은 0.1 vol%/h 이하여야 한다. SDS의 최대 운전압력은 약 125 kPa이지만 FS와 NBI로 공급되는 배관은 90 kPa 이하로 유지해야 한다. 토카막까지 기체를 이송하기 위한 배관의 경로가 길어 충분한 압력차가 되는지 그리고 공급유속을 동시에 만족할 수 있는지 여부의 계산이 필요하다. 삼중수소 재고량은 구성품당 70 g 이하로 제한한다.

운전 방식에 따라 다르지만, 삼중수소 저장 및 공급을 위한 저장용기는 약 20~70개가 필요한 것으로 분석하고 있다. ISS에서 이송된 중수소 또는 삼중수소를 빈 용기(empty bed)에 선택하여 저장하며, FS에서 필요로 할 때 버퍼용기를 통해 공급한다. 현재 저장재로 우리늄을 적용하여 개발 중에 있다. SDS 저장용기는 삼중수소 재고량 파악을 위해 in-bed 열량계 기능을 갖는다[23,24]. 삼중수소 붕괴열은 저장용기 내부에 설치된 헬륨루프 열교환기에서 순환되는 헬륨으로 열전달이 이루어지고 온도차를 측정하여 삼중수소 재고량을 파악한다. PVT-c 용기를 이용한 측정법도 유효하다. 이 방법으로 초기 TLS에서 이송된 삼중수소의 양을 측정하는데 주로 사용하며, SDS 저장용기로부터 삼중수소를 탈장할 경우에도 적용할 수 있다. 부피를 알고 있는 계량용기에 삼중수소를 채워 압력변화와 온도를 측정하여 정량하며, 시료를 채취하여 ANS로 보내 GC 분석으로 중수소와 삼중수소의 조성을 알아낼 수 있다. 삼중수소의 반감기는 약 12.5년으로 베타붕괴 후 헬륨-3으로 변환된다. 저장재내에서 삼중수소가 붕괴하여 발생한 헬륨-3은 저장용기의 흡탈장 성능 저하를 유발할 수 있다. 따라서 SDS는 주기적으로 헬륨-3을 제거하여 수거하는 기능이 필요하다. 헬륨-3 회수는 삼중수소를 탈장한 후 다시 흡장시키면서 흡장되지 않고 잔류하는 헬륨-3로부터 불순물을 제거하는 방법으로 이루어진다. 탈장 시에는 열선을 이용하여 저장재를 가열하며 이중용기 단열을 위해 진공배기를 한다. 반대로 냉각 시에는 헬륨을 공급하여 자연대류에 의한 냉각을 유도한다. 삼중수소 저장용기는 이러한 다양한 기능을 갖추어야 하므로 설계, 제작과 운전이 복잡하다.

SDS 운전은 토카막의 운전에 따라 종속적이다. 450초 플라즈마 샷 운전은 회분식 운전으로 SDS에서 토카막으로 단 1회 연료가 공급되며 이어 휴지 1,300초와 다시 플라즈마 샷이 반복되는 공정운전(Burn and Dwell)으로 진행된다. 따라서 운전 전 토카막에서 필요로 하는 핵융합연료를 삼중수소 저장용기에서 꺼내 버퍼용기에 채운 상태로 유지한다. 하지만, 3,000초 플라즈마 샷 운전은 삼중수소 순환 운전으로 SDS에서 토카막으로 공급된 연료가 삼중수소 연료주기를 구성하는 다른 계통들에서 분리회수과정을 거쳐 SDS로 되돌아온다.

핵융합반응 연료기체인 중수소와 삼중수소를 제외한 다른 기체 Ar, Ne, He, N₂, O₂는 핵융합반응을 정지하기 위해 주입되는 기체이다. 이를 FPSS (Fusion Power Shut-down System)라고 부르며, 3 초 이내에 200 Pa·m³의 유량이 주입되어야 한다.

3-2. TLS

TLS는 SDS에서 필요로 하는 삼중수소를 공급해 주는 기능을 한

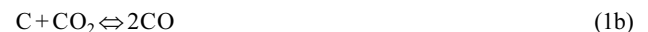
다. 즉, 외부에서 삼중수소 공급용 저장용기로 이송된 삼중수소를 계량하고 계통 내 장기저장용 저장용기로 옮겨 SDS에서 필요로 할 때 공급한다. 삼중수소 공급용 저장용기의 삼중수소 재고량은 TLS 전용 열량계를 이용하여 측정한다. TLS는 TTP (Tritium Transport Package)의 해체조립을 위한 전용공간, 열량계 전용룸, 해체제거용 GB와 삼중수소 흡탈장 GB로 구성된다. 모든 GB는 VDS에 연결되어 삼중수소가 외부로 방출되는 것을 방지한다. 또한 계통에서 GB로 삼중수소가 방출될 경우 GDS를 통해 삼중수소를 회수한다. 삼중수소를 운반용기에서 탈장하기 위해 가열로가 설치된다. 삼중수소 이송을 위한 펌프는 없으며 삼중수소 이송이나, 배관의 배기를 위한 구동력은 SDS에 설치된 펌프를 이용하거나 유틸리티의 진공 배기용 배관을 이용한다.

3-3. TEP

TEP는 토카막에서 나오는 핵융합반응 생성물, 미반응물, 부산물을 일차적으로 처리하는 계통이다[3-5,8]. 삼중수소를 분리하여 조성에 따라 ISS와 SDS로 보낸다. 계통 내 정성 및 정량분석은 ANS로 수행한다. 정상운전 이외에 토카막 세정 등의 후처리 운전 시 배출되는 중수소, 헬륨 및 메탄 등을 처리한다. TEP 배출가스 내 삼중수소 함량은 극도로 낮아야 하며, VDS를 통해 하루 0.1 mgT (약 1 Ci) 보다 낮은 양이 배출되어야 한다. TEP의 삼중수소 제거율은 10⁸을 요구한다.

TEP에서 다른 불순물로부터 수소동위원소 기체를 분리하기 위해 촉매와 막으로 구성된 CAPER 시스템을 이용한다. CAPER란 말은 촉매의 CAlyst와 투과의 PERmeation으로 조합한 단어이다. 말 그대로 촉매를 통해 메탄에서 수소동위원소만을 잘라내고 막을 통해 분리한다. CAPER는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 수소동위원소의 회수율을 높이기 위해 3단계로 구성되어 있다. CAPER는 2개의 투과막과 1개의 촉매반응기 그리고 마지막 단계에 PERMCAT이란 촉매가 담겨진 투과막으로 구성된다. PERMCAT에서는 Fig. 4에서처럼 팔라듐 계열의 막을 통해 수소(protium)와 중수소 간 또는 삼중수소 간의 치환반응을 통해 중수소와 삼중수소의 회수율을 증가시킨다. CAPER에서 일어나는 치환반응은 식 (1-a~d)와 식 (2-a, b)에서 알 수 있다. 식 (1-a~d)는 촉매단에서 일어나는 반응식이며 식 (2-a, b)는 PERMCAT에서 촉매에 의해 일어나는 교환반응식이다. 여기서 Q는 수소동위원소로 H, D, T 중의 하나를 의미한다.

Chemistry of the 2nd step: (Q=H, D, T)



Chemistry of the PERMCAT:



3-4. ISS

ISS는 TEP와 WDS에서 분리된 수소동위원소 혼합기체를 초저온 증류와 평형반응을 이용하여 원하는 성분과 조성으로 정제하는 계통이다[3-5,8,9]. ISS에서는 초저온증류법을 이용하므로 상당량의

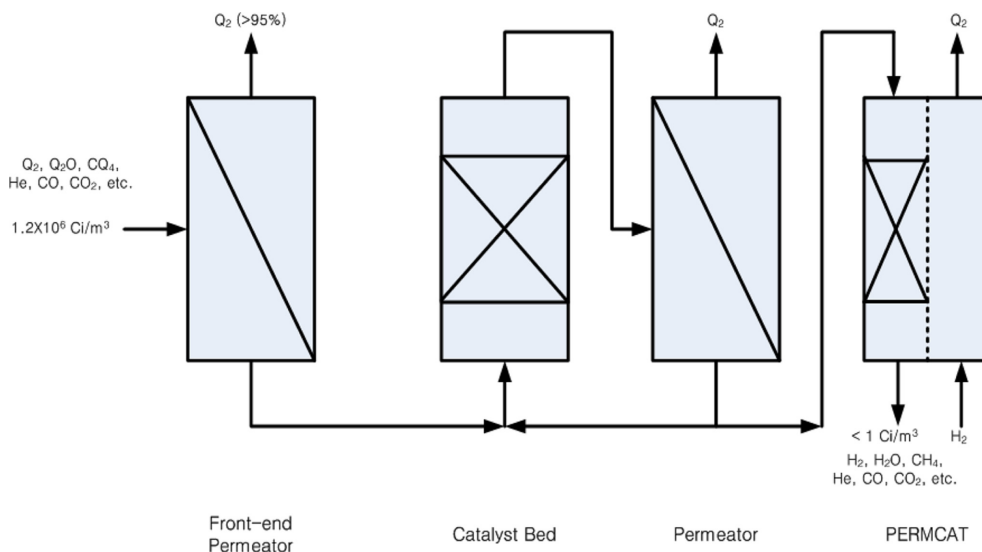


Fig. 3. Three stage tokamak exhaust processing (CAPER).

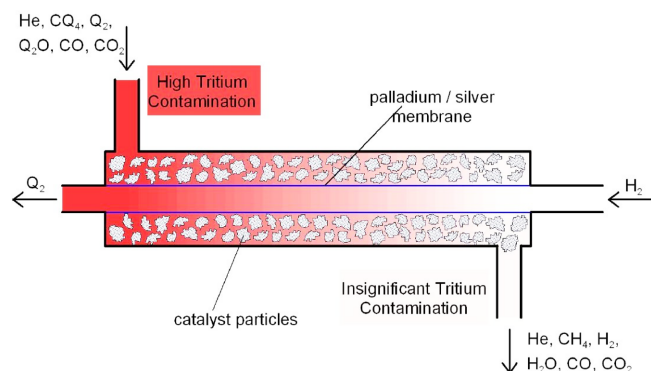


Fig. 4. Schematic flow diagram of the 3rd step CAPER.

수소동위원소체들이 액화되며 체류시간도 길어 운전 중 삼중수소 재고량이 가장 높은 공정이다. 15~20 K의 초저온에서 운전하기 위해 헬륨냉동기가 사용된다. 헬륨냉동기의 용량은 1,800 W 정도이다. ISS에서 취급되는 성분은 6개의 수소동위원소체로 H₂, HD, HT, D₂, DT, T₂이다. ISS는 원하는 조성의 D₂, DT, T₂를 생산하기 위해 총 4개의 증류탑으로 구성되며 여러 개의 평형반응기(Equilibrators)를 설치한다. 평형반응기에서는 2HD \leftrightarrow H₂+D₂, 2HT \leftrightarrow H₂+T₂, 2DT \leftrightarrow D₂+T₂의 가역반응이 일어난다. 평형반응을 위한 촉매로 백금을 사용하며 평형반응상수는 Table 2와 같다. 저온에서 D₂와 T₂의 생성측면에서 유리하나 반응속도가 느려 일반적으로 상온에서 반응시킨다. 증류탑 인출단 위치를 최적화하여 평형반응기로 공급되는 조성을 맞추면 원하는 분자결합 형태로 반응을 유도하여 D₂와 T₂를 최대한 많이 회수할 수 있도록 한다[25]. 이 과정에서 냉열회수를 위해

Table 2. Equilibrium constant of H, D, T reaction

Equilibrium constant	Temperature [K]				
	273.1	298.1	400	500	600
[HD] ² /[H ₂][D ₂]	3.18	3.25	3.48	3.62	3.72
[HT] ² /[H ₂][T ₂]	2.42	2.56	2.97	3.24	3.44
[DT] ² /[D ₂][T ₂]	3.79	3.82	3.88	3.92	3.94

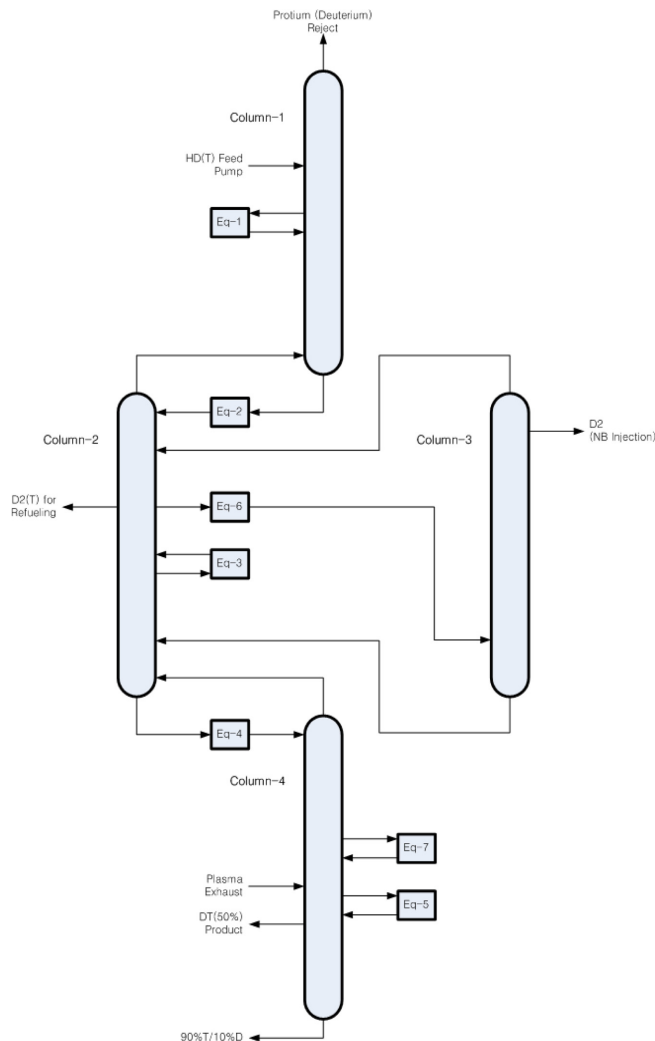


Fig. 5. Schematic flow diagram of ISS.

증류탑과 평형반응기 사이에 열교환기가 설치된다. ISS의 증류탑 배열과 평형반응기의 위치 개념도를 Fig. 5에서 볼 수 있다. 증류탑

-1에 공급되는 HD(T) 흐름은 WDS의 전기분해조에서 공급되며 대부분 H로 이루어져 있다. TEP에서 공급되는 Q₂ 흐름은 증류탑-4로 공급되며 대부분은 D와 T로 구성되어 있다.

ISS 설계는 삼중수소와 중 수소 재고량 최소화를 고려한다. 초저온 유지가 불가능한 상황에서 액화수소가 기화되어 발생하는 부피 팽창과 압력증가를 고려한 안전설계가 이루어진다. 운전 중에는 삼중수소가 열교환기를 통해 헬륨냉매 배관으로 유입되는지 여부를 감시한다. 증류탑을 둘러싼 CB (Cold Box)가 단열을 위해 진공이 유지되고 있는지와 증류탑이나 배관으로부터 삼중수소가 누출되는지도 감시한다.

3-5. WDS

WDS는 삼중수소 플랜트 여러 계통에서 발생한 삼중수소화수 및 중수소화수의 회수기능을 하며, 교환반응을 위해 ISS에서 수소를 공급받는다. 따라서 ISS와 밀접한 연계성을 가지며, 중수소(삼중수소) 회수법으로 WTRF에서 동일한 원리로 적용한 액상촉매교환공정(LPCE, Liquid Phase Catalytic Exchange)으로 하거나[10,12] 전기분해와 조합한 CECE (Combined Electrolysis and Catalytic Exchange)를 적용한다[26]. WDS로 보내는 삼중수소수(HTO, DTO)나 중수소수(HDO)는 VDS의 분자체에서 회수된 것으로 탈삼중수소를 10⁸을 설계요건으로 한다. WDS에서 스택으로 방출되는 수소 내 삼중수소 농도는 약 700 Bq/m³ 이하가 된다. 이러한 공정 구성을 Fig. 6의 WDS 공정개략도에서 볼 수 있다.

WDS의 전기분해조는 전기분해로 발생하는 수소와 산소를 막을 이용하여 분리하고 전기분해에 필요한 전해질로 고체 고분자를 사용하여 재고량을 최소화한다. WDS의 특징 중의 하나는 삼중수소 연료주기 계통 중 유일하게 액체를 취급하는 것과 WDS로 액체가 공급되지만 생산되지는 않는다는 점이다. 즉, WDS로 공급된 액체

는 모두 전기분해되어 기체로 ISS에 보내지거나 외부로 방출된다. 전기분해조는 삼중수소 농도가 액체상태로 높아지는 장치이다. 삼중수소는 산화상태(HTO)가 기체(HT)에 비해 위험도가 10,000 배 정도 높기 때문에 안전성을 고려한 설계가 필요하다. 특히 전기분해조에서 사용하는 전해질은 부식원인을 제공할 수 있어 누설가능성이 상대적으로 높아 이에 대한 기술적 검토가 요구된다.

3-6. ANS

ANS는 온라인으로 채취되어 여러 계통으로부터 이송된 시료를 가스크로마토그래프(GC)로 정성·정량분석을 하는 계통이다. 수소 동위원소체 분석은 시료채취량을 줄이고 측정시간을 단축하기 위해 초저온 마이크로 GC를 이용하며, 그 밖의 다른 성분들의 분석은 일반 GC를 이용한다. 분석장비는 VDS로 연결된 별도의 글러브박스(GB, Glove box)에 설치된다.

ANS는 정성·정량분석을 통해 삼중수소 플랜트의 운전제어를 위한 정보를 제공해 준다. 배관을 흐르는 유체의 정성·정량분석을 통해 플랜트 운전이 정상적으로 수행되고 있는지 알 수 있으며, PVT-c 방법과 병행하여 성분별 재고량을 알 수 있다. 또한 계통별 공급·생산물의 조성비교를 통해 운전 중 각 계통의 성능을 확인할 수 있다.

3-7. 삼중수소 제거 및 방출 시스템

ICRP-60 및 원자력법에서 삼중수소 형태에 따른 허용한도를 제시하고 있다. 배출기체 중 삼중수소 농도는 원소형태의 경우 7×10⁷ Bq/m³, 수분형태(HTO 등)의 경우 5×10³ Bq/m³으로 제한한다. 취급시설이 있는 방의 경우 원소형 삼중수소 농도는 1×10¹⁰ Bq/m³, 수분형태의 경우 8×10⁵ Bq/m³으로 제한한다. 이러한 규정에 따라 삼중수소 취급설비의 설계요건이 결정된다. 삼중수소 연료주기의 대부분 계통은 GB 내에 설치되며, GB는 정상운전 중 GDS (Glovebox Detritiation System)에 의해 계통에서 방출될지 모르는 삼중수소를 회수한다. 삼중수소 농도가 높아 계통의 이상이 있다고 판단될 경우 S-VDS (Standby-VDS)가 작동된다. GB가 있는 방은 N-VDS (Normal-VDS)에 의해 삼중수소가 외부로 방출되는 것을 방지하지만 삼중수소 농도가 높을 경우에는 자동으로 밸브가 차단되고 S-ADS (Standby-ADS)가 작동한다. 탈삼중수소계통(DS, Detritiation System)의 공정 원리는 모두 유사하다. 미량의 삼중수소는 재결합기(Recombiner)를 이용하여 제거가 용이한 산화물형태로 만들고 흡착을 이용하여 회수한다.

4. 삼중수소 연료주기 운전상태

4-1. 정상 운전 상태

핵융합연료주기의 대부분을 맡고 있는 삼중수소 플랜트는 정상 운전 중에 핵융합반응에 필요한 중수소 및 삼중수소를 공급하고 동시에 토카막에서 배출되는 혼합가스로부터 중수소 및 삼중수소를 분리·정제하여 저장하고 순환시킨다. 운전온도는 초저온으로 운전되는 ISS에서 최저 15 K, WDS에서 70~80 °C, SDS에서 삼중수소 탈장 시 350 °C 정도가 된다. 외부에서 공급된 삼중수소의 탈장 시에는 이보다 더 높은 온도에서 운전될 수 있다. Table 3와 4에서 보듯이 토카막에 공급되는 유량은 3,000초 플라즈마 운전 시 삼중수소 67 Pa·m³/s, 중수소 53 Pa·m³/s, 중수소/삼중수소 혼합기체 120 Pa·m³/s이다. 운전방식은 450초 1회성 운전, 3,000초 연속운전, 1,000초의 하이브

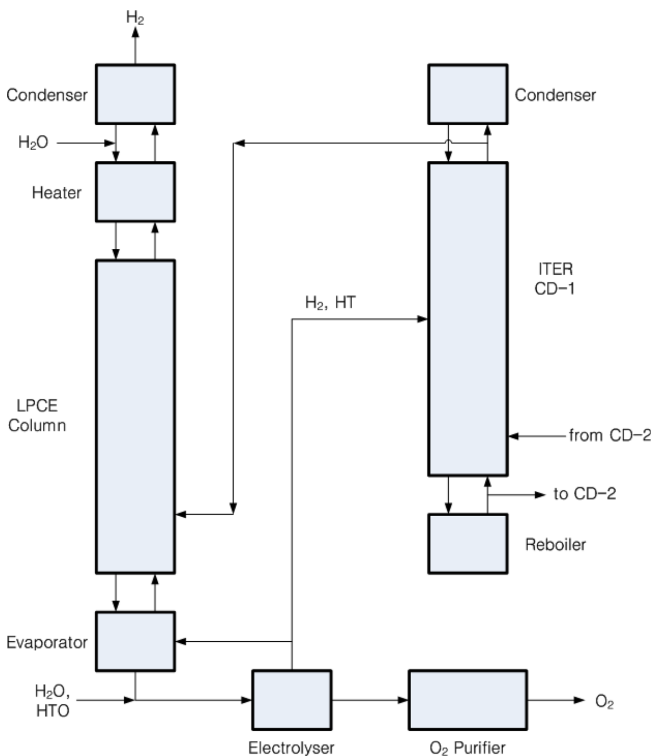


Fig. 6. Schematic flow diagram of LPCE and CD.

Table 3. Fuelling requirements of T2 and D2 to FS

Scenarios	Fuelling requirements, [Pa·m ³ /sec]		
	DT ¹⁾	T ₂ ²⁾	D ₂ (T) ³⁾
Inductive: 200 Pa·m ³ /sec for 450 sec	200	111	89
Hybrid: 160 Pa·m ³ /sec for 1000 sec	160	89	71
Non-inductive: 120 Pa·m ³ /sec for 3000 sec	120	67	53

¹⁾D:T=1:1, DT consists of T₂ and D₂(T)²⁾90% tritium and 10% deuterium³⁾>99% deuterium, <0.5% H₂, <0.5% non-Q₂, <0.03% He**Table 4. Fuelling requirements of D2 to NBI**

Injector	Type	D ₂ for DT phase, [Pa·m ³ /sec]	Pressure, [MPa]	etc.
HNBI	Ion source	3.6	0.3	D ₂
	Neutralizer source	19	0.09	D ₂ (T)
DNBI	Ion source	—	0.3	H ₂ (7.6Pa·m ³ /sec)
	Neutralizer source	5	0.09	D ₂ (T)
Total	Three HNBI & one DNBI	10.8		D ₂
		62		D ₂ (T)

리드 운전으로 구분할 수 있는데, 3,000초 연속운전의 경우 삼중수소가 재순환되면서 운전되므로 삼중수소 연료주기를 구성하는 계통이 유기적으로 작용한다. NBI는 가열용(HNBI)과 진단용(DNBI)으로 구별하며, SDS에서 FS로 공급된 중수소 일부가 사용된다. SDS에서 FS와 NBI를 통해 토카막으로 중수소와 삼중수소가 공급되고, 토카막에서 핵융합반응 후 배출되는 여러 가지 혼합기체를 TEP, ISS, WDS에서 분리회수하여 다시 SDS로 보내주는 운전이 수행된다.

4.2. 비정상/사고 상황

여기서는 삼중수소 플랜트의 비정상/사고 상황에 대해 중요한 몇 가지를 기술하고자 한다.

4.2-1. 초저온계통 단열 및 저온 유지기능 상실

ISS의 초저온증류탑은 CB라는 밀폐된 단열용기에 설치되어 있다. 또한 CB는 단열을 위해 진공이 유지되고 있다. 하지만 CB 벽면의 균열이나 진공배기배관의 밸브손상으로 단열 유지기능이 상실될 경우 외부에서 CB로 유입된 공기 중 수분이 얼어 CB 및 초저온증류탑의 손상을 가져올 수 있다.

헬륨냉동기의 고장으로 초저온증류탑으로 헬륨냉매의 이송이 불가능할 경우 초저온증류탑은 저온유지에 어려움이 있다. 하지만 CB의 손상이 없어 단열이 유지된다면 초저온증류탑의 내부온도가 상승하는데 소요되는 시간이 상당히 많이 소요된다. 따라서 헬륨냉동기 고장으로 인한 저온 유지기능 상실의 경우, 초저온증류탑을 운전정지하고 안전조치를 취하는데 충분한 시간이 있다.

4.2-2. 삼중수소 누출

삼중수소 1차 저장용기 및 배관에서 삼중수소가 누출될 경우 일단 GB 내에 머무르게 된다. GB는 GDS를 이용하여 정상적으로 누출되는 삼중수소를 회수하는 동시에 TM (Tritium Monitor)를 이용하여 상시 삼중수소 농도를 감시하고 있다. 만약 삼중수소가 누출되어 농도가 증가하면 GDS의 차단밸브가 작동되고 S-VDS의 밸브가 열려 삼중수소 농도가 다시 내려갈 때까지 운전된다. 삼중수소 농도가 낮아지면 원인을 찾아 보수가 이루어진다.

4-2-3. 연료공급라인 파단

연료공급배관의 압력은 90 kPa 이하로 유지되고 있지만 파단되어 FS 및 NBI에 중수소 및 삼중수소가 공급되지 않을 경우 SDS의 연료공급라인에 있는 펌프가 정지하고 차단밸브가 작동한다. SDS 버퍼탱크에 있는 중수소 및 삼중수소는 저장용기로 다시 흡장되어 안전하게 보관된다.

5. 삼중수소 측정과 재고량 예측

5-1. 삼중수소 열량계

삼중수소 열량계는 저장용기 내 삼중수소를 꺼내지 않고 봉괴열을 측정하여 삼중수소 재고량을 알아내는 측정장비이다[27-30]. 삼중수소 열량계는 SDS와 TLS에서 사용된다. SDS는 삼중수소 저장용기 내부에 헬륨루프를 설치하여 봉괴열을 측정할 수 있는 자체 열량측정 기능(in-bed calorimetry)이 있다. TLS의 경우 외부에서 공급된 저장-운반용기 내 삼중수소 재고량을 측정하거나, 계통으로 삼중수소를 공급한 후 저장용기에 잔류하는 삼중수소 재고량을 측정하는 전용 열량계가 있다. SDS 삼중수소 저장용기는 탈부착이 용이하지 않아 자체 측정기능이 있는데 헬륨흐름식을 적용한다. TLS는 삼중수소 운반용기를 대상으로 하며 항온식이나 등온식 혹은 단열식 등을 적용한다. Fig. 7은 한국수력원자력(주) 중앙연구원의 삼중수소 실험실에 설치된 삼중수소 열량계이다[29]. 삼중수소 봉괴열을 측정하기 위한 열유량센서로 펠티에소자를 적용하였다. 측정범위는 3 mW~20 W로 삼중수소 0.01~50 gT 정도에 해당된다.

5-2. PVT-c 방법

기체상태방정식, $PV=nRT$ 를 이용하는 방법으로 계량용기의 부피는 미리 측정한다. 용기 내 온도와 압력을 측정하여 계량용기 내 삼중수소 재고량을 계산하고 농도는 시료를 채취하여 ANS에 있는 GC를 이용하여 알아낸다. 이 방법은 SDS에서 적용하고 있는 방법이다.

5-3. 삼중수소 모니터(TM)

TM은 삼중수소가 봉괴할 때 발생하는 베타선을 이온챔버에서 감지하여 삼중수소 농도를 측정하는 장비이다. 계통 내 기체흐름라인에

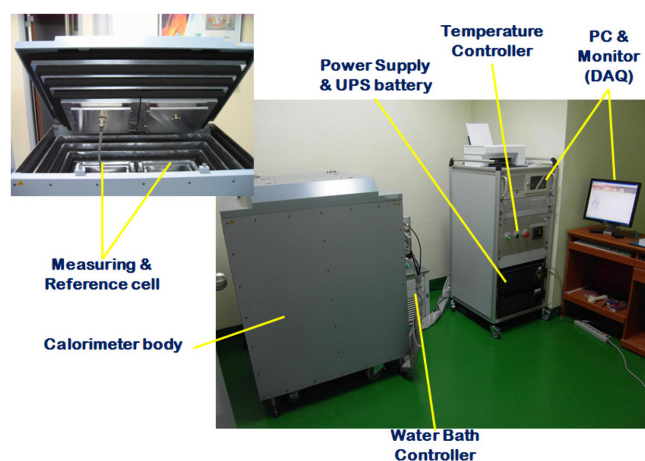


Fig. 7. A calorimeter installed in KHNP tritium laboratory.

이온챔버를 연결하여 온라인으로 측정할 수도 있으며, GB나 외부 공간에 설치하여 삼중수소의 누설여부를 모니터링 할 수 있다 [31,32]. WTRF에는 삼중수소 농도 측정과 누설여부를 모니터링 하기 위해 삼중수소 측정범위 및 정밀도를 고려하여 Tyne, OTC (Overhoff Technology Corporation), Canberra 제품으로 구분하여 설치한 바 있다. ITER의 경우에도 배관과 GB를 구분하여 TM을 적용할 것이며 삼중수소 모니터링 정보를 공유할 수 있는 중앙관리시스템을 구축할 예정이다.

5-4. 기타 측정장비

이 밖에 마이크로 GC, radio-GC, LSC (Liquid Scintillation Counter) 등 삼중수소를 측정하기 위한 장비들이 있다. ANS에 있는 마이크로 GC는 액체질소조에 수소동위원소 분리용 컬럼을 넣고 흡탈착 속도차를 이용하여 정성·정량 분석하는 장비이다.

5-5. 삼중수소 재고량 예측

주어진 시점(P→T)에서 SDS 내 삼중수소 재고량 $T_{T,SDS}$ 는 식 (3)의 물질수지식에 의해 결정한다. 삼중수소 연료주기 각 계통은 동일한 방법으로 구한 물질수지식을 적용하며 이를 연립방정식으로 구성하여 계통별 삼중수소 재고량을 파악할 수 있다[33].

$$T_{T,SDS} = T_{P,SDS} - (T_{FS} + T_{ANS} + T_{DS} + T_D) + (T_{ISS} + T_{TEP}) + (T_{I,TLS} - T_{O,TLS}) \quad (3)$$

여기서 아래첨자 SDS, FS, ANS, DS, ISS, TEP, TLS는 각 계통을, D는 decay loss를 의미한다. T_{FS} 는 MFM (Mass Flow Meter)으로 T_{DS} 는 삼중수소 이온챔버로 측정한다. T_{ISS} 와 T_{TEP} 은 운전방법에 따라 변동성이 있어 담당국인 유럽연합 및 미국과 논의되고 있는 부분이다. T_{TLS} 는 TLS 전용 열량계를 이용하여 PVT-c 측정법으로 교차 확인이 가능하다.

6. 맺음말

핵융합연료주기 주공정의 다양한 기능과 현재 적용하고 있는 기술에 대하여 ITER 삼중수소 플랜트에 적용된 사례를 중심으로 소개하였다. 국제핵융합실험로 ITER는 2019년까지 건설을 완료하고 이후 약 30년간 다양한 운전을 통해 핵융합기술을 확보할 것이다. 운영기간동안 핵융합연료주기를 위해 삼중수소 플랜트 운전이 함께 이루어지며 많은 계통에 대한 개선과 핵융합 상용화를 위한 설계자료가 생산될 예정이다. 우리나라는 삼중수소 연료주기 기술에 있어서 삼중수소 제거기술 개발과 월성원전 TRF 건설 및 운전 경험을 통해 상당부분 확보한 바 있다. 특히 ITER 삼중수소 플랜트의 WDS에 해당되는 WTRF의 LPCE 공정은 우리나라가 세계 최초로 상용화한 설비이다. 삼중수소 저장 및 공급기술의 SDS는 ITER 공동기술개발 한국사업을 통해 국가핵융합연구소를 주축으로 개발 중에 있다. 따라서 핵융합연료주기를 구성하는 계통 중 WDS, SDS, TLS는 일차적으로 국산화가 가능하다. TEP와 ISS 등은 고순도 수소생산공정에 적용하고 있는 고성능 분리막이나 증류공정에서 확보한 시뮬레이션 기술 등이 활용될 수 있는 분야이기도 하다. 그 밖에 다른 기술도 핵융합에너지개발 로드맵을 통해 확보해 나가고 있지만 아직 미약한 단계로 원자력분야 산학연 이외에 타 분야의 참여확대가 필요하다.

감 사

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

참고문헌

1. ITER Joint Implementation Agreement(2006).
2. http://www.nfri.re.kr/Contents/NFBoard/boardde.php?bo_table=NF008&wr_id=324, Announcement (2012-2) of ITER Korea Domestic Agency in NFRI.
3. ITER IDM Document (ITER_D_2X6K67), Plant Description (PD), Chap. 10 Fuel Cycle and Radiological Monitoring(2009).
4. Babineau, D., Maruyama, S., Pearce, R., Glugla, M., Bo, L., Rogers, B., Willms, S., Piazza, G., Yamanishi, T., Yun, S. H., Worth, L. and Shu, W., "Review of the ITER Fuel Cycle," *IAEA FEA 2010*, 2010.
5. Glugla, M., Babineau, D., D. Bo, D., Maruyama, S., Pearce, R., Piazza, G., Rogers, B., Willms, S., Yamanishi, T. and Yun, S.-H., "Review of the ITER D-T Fuel Cycle Systems and Recent Progress," *9th International Conference on Tritium Science and Technology, Tritium 2010*, Nara, Japan, Oct. 24-29, 2010.
6. Maruyama, S., Yang, Y., Pitts, R. A., Sugihara, M., Putvinski, S., Carpentier- Chouchana, S., Li, B., Li, W., Baylor, L., Meitner, S. J., Day, C., Labombard, B. and Reinke, M., "ITER Fuelling System Design and Challenges Gas and Pellet Injection and Disruption Mitigation," *IAEA FEC 2010*, 2010.
7. Konishi, S., Glugla, M. and Hayashi, T., "Fuel Cycle Design for ITER and Its Extrapolation to DEMO," *Fus. Eng. Des.*, **83**, 954-958(2008).
8. Glugla, M., Antipenkov, A., Beloglazov, S., Caldwell-Nichols, C., Cristescu, I. R., Cristescu, I., Day, C., Doerr, L., Girard, J.-P. and Tada, E., "The ITER Tritium System," *Fus. Eng. Des.*, **82**, 472-487(2007).
9. Yoshida, H., Kveton, O., Koonce, J., Holland, D. and Haange, R., "Status of the ITER Plant Design," *Fus. Eng. Des.*, **39-40**, 875-882(1998).
10. Ahn, D. H., Paek, S. W., Kim, K. R., Jeong, H. S., Choi, H. J., Kim, J. K., Kang, H. S., Lee, H. S., Kim, W. S. and Song, K. M., "Design of the Liquid Phase Catalytic Exchange Column for the Wolsong Tritium Removal Facility," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, May 27-28(2001).
11. Song, K. M., Lee, S. J., Lee, S. K., Sohn, S. H., Eum, H. M. and Kim, C. S., "Prediction of Tritium Level Reduction of Wolsong NPPs by Heavy Water Detritiation with WTRF," *Fus. Sci. Techn.*, **48**, 290-293(2005).
12. Song, K. M., Sohn, S. H., Kang, D. W., Paek, S. W. and Ahn, D. H., "Installation of Liquid Phase Catalyst Exchange Columns for the Wolsong Tritium Removal Facility," *Fus. Eng. Des.*, **82**, 2264-2268(2007).
13. Lee, M., Paek, S., Kim, K. R., Ahn, D. H., Yim, S. P., Chung, H., Choi, H. J., Choi, J. W., Shon, S. H. and Song, K. M., "Safety Evaluation of Type B Transport Container for Tritium Storage Vessel," *J. Korean Rad. Waste Soc.*, **5**(2), 155-169(2007).
14. Paek, S., Lee, M., Kim, K.-R., Ahn, D.-H., Song, K. M. Sohn, S. H., "Development of a 100 kCi Tritium Transport Vessel," *IEEE*

- Trans. on Plasma Sci.*, **38**(3), 278-283(2010).
15. Choi, W. S., Kim, K. Y., Seo, K. S., Lee, M. S., Paek, S., Sohn, S. H. and Song, K. M., "Analysis of Structural Integrity of Tritium Transport Package through the Drop Test," *Korea Radioactive Waste Society*, Nov. 6-7(2008).
 16. Sohn, S. H., Song, K. M., Lee, S. K., Lee, K. W. and Ko, B. W., "Tritium Assay and Dispensing in TriMARS," *9th International Conference on Tritium Science and Technology, Tritium 2010*, Nara, Japan, Oct. 24-29(2010).
 17. Sohn, S. H., Song, K. M., Lee, S. K., Lee, K. W. and Ko, B. W., "Tritium Assay and Dispensing of KEPRI Tritium Lab.," *KNS Spring*, May 18-23(2009).
 18. Song, K. M., Lee, K. W., Ko, B. W. and Sohn, S. H., "Performance Test of the Tritium Calorimeter," *Korea Radioactive Waste Society*, June 17-19(2009).
 19. Song, K. M., Lee, K. W., Ko, B. W., Sohn, S. H. and Chung, Y. G., "A Twin Cell Calorimeter for the Tritium Accountancy," *Korea Radioactive Waste Society*, Nov. 6-7(2008).
 20. Chung, H. S., Shim, M. H., Ahn, D. H., Lee, M. S., Hong, C. S., Yoshida, H., Song, K. M., Kim, D. J., Jung, K. J. and Cho, S. Y., "Korea's Activities for the Development of ITER Tritium Storage and Delivery Systems," *Fus. Sci. Techn.*, **54**(1), 18-21(2008).
 21. Chung, H., Shim, M. H., Jin, H. S., Lee, J. K., Ahn, D. H., Yoshida, H., Kim, K. G., Song, K. M., Kim, D. J., Chang, M. H., Kang, H. G., Yun, S. H. and Cho, S. Y., "Korea's Progress on the ITER Tritium Systems," *Fus. Eng. Des.*, **84**, 599-603(2009).
 22. Cho, S., Chang, M. H., Yun, S. H., Kang, H. G., Chung, H., Shim, M. H., Song, K. M., Jin, H. S., Koo, D., Sohn, S. H., Glugla, M. and Jung, K. J., "ITER Storage and Delivery System R&D in Korea," *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, **38**(3), 425-433(2010).
 23. Lee, E. S., Cho, S. Y., Ahn, M. Y., Kim, D. H., Chang, M. H., Chung, H. S., Shim, M. H., Song, K. M., Sohn, S. H., Kim, D. J. and Yoshida, H., "Accuracy Assessment of the In-bed Calorimetry Employed in ITER SDS," *Fus. Eng. Des.*, **83**(10-12), 1424-1428(2008).
 24. Kang, H. G., Lee, E. S., Cho, S. Y., Chang, M. H., Yun, S. H., Ahn, M. Y., Jung, K. J., Chung, H., Shim, M. H., Song, K. M. and Yoshida, H., "Thermo-hydraulic Analysis on In-Bed Calorimetry in a Thin Double-Layered Annulus Metal Hydride Bed," *Fus. Eng. Des.*, **84**, 989-992(2009).
 25. Song, K. M., Sohn, S. H. and Kim, K. S., "Effect of Side Stream Equilibrator of Hydrogen Isotopes in Cryogenic Distillation," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Oct. 24-25, 343-348(1997).
 26. Paek, S. W., Ahn, D. H., Choi, H. J., Kim, K. R., Lee, M. S., Yim, S. P., Chung, H. S., Song, K. M. and Sohn, S. H., "The Performance of a Trickle Bed Reactor Packed with a Pt/SDBC Catalyst Mixture for the CECE Process," *Fus. Eng. Des.*, **82**, 2252-2258(2007).
 27. Hubinois, J.-C., Godot, A., de Boyer, S., Coindet, G. and Colarday, A., "Large Volume Calorimetry: A Technique to Quantify Tritium," *8th International Conference on Tritium Science and Technology, Tritium 2007*, P3-22, Rochester, NY, Sep. 16-21, 2007.
 28. West, D. S., Frame, K. J., Thompson, J. and Ticknor, L. O., "Evaluation of a New Tritium Calorimeter at Los Alamos National Laboratory," *Fus. Sci. Tech.*, **54**(1), 178-181(2008).
 29. Song, K. M., Ko, B. W., Lee, K. W. and Sohn, S. H., "Test of a Large Volume Calorimeter in KEPRI Tritium Laboratory," *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, **38**(3), 295-299(2010).
 30. Song, K. M., Kim, K. S., Sohn, S. H., Kang, D. W., Cho, S. Y. and Chung, H. S., "Availability Study and Design of the Tritium Calorimeter for ITER," *Korea Radioactive Waste Society*, Nov. 16-17(2006).
 31. Song, K. M., Lee, K. W., Sohn, S. H., Lee, D. H., Ihm, H. and Sohn, C. H., "Development of the Tritium Monitoring System," *Korea Association for Radiation Protection*, Apr. 23-24(2009).
 32. Song, K. M., Ko, B. W., Lee, K. W., Lee, S. K., Sohn, S. H., Lee, D. H., Ihm, H. and Lee, S. Y., "Tritium Monitoring System for the Tritium Laboratory Management," *Korea Association for Radiation Protection*, Nov. 18-20(2009).
 33. Song, K. M., Ko, B. W., Sohn, S. H., Chang, M. H., Yun, S. H., Kang, H. G., Cho, S., Jung, K. J. and Chung, H., "Tritium Accountancy of Storage and Delivery System in ITER," *Korea Radioactive Waste Society*, Dec. 13-14(2011).
 34. Song, K. M., "Overview of ITER Tritium Fuel Cycle," *Information Exchange Workshop for Fusion and Fission, KNS Autumn*, Dec. 26-28(2011).