

ITER 사업의 삼중수소 연료주기 기술

윤세훈^{1†} · 장민호¹ · 강현구¹ · 김창석¹ · 조승연¹ · 정기정¹ · 정흥석² · 송규민³

¹국가핵융합연구소 ITER 한국사업단, ²한국원자력연구원, ³한국수력원자력 중앙연구원

Tritium Fuel Cycle Technology of ITER Project

SEIHUN YUN^{1†}, MINHO CHANG¹, HYUNGOO KANG¹, CHANGSHUK KIM¹, SEUNGYON CHO¹,
KIJUNG JUNG¹, HONGSUK CHUNG², KYUMIN SONG³

¹ITER Korea, National Fusion Research Institute, Daejeon,305-333, Korea

²Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 305, 353, Korea

³KHNP Central Research Institute, Daejeon,305-343, Korea

Abstract >> The ITER fuel cycle is designed for DT operation in equimolar ratio. It involves not only a group of fuelling system and torus cryo-pumping system of the exhaust gases through the divertor from the torus in tokamak plant, but also from the exhaust gas processing of the fusion effluent gas mixture connected to the hydrogen isotope separation in cryogenic distillation to the final safe storage & delivery of the hydrogen isotopes in tritium plant. Tritium plant system supplies deuterium and tritium from external sources and treats all tritiated fluids in ITER operation. Every operation and affairs is focused on the tritium inventory accountancy and the confinement. This paper describes the major fuel cycle processes and interfaces in the tritium plant in aspects of upcoming technologies for future hydrogen and/or hydrogen isotope utilization.

Key words : ITER fuel cycle(ITER 연료주기), Tokamak exhaust processing(토카막 배출가스 처리공정), Isotope separation system(수소동위원소 분리시스템), Storage and delivery system(저장 및 공급시스템), Detritiation system(탈삼중수소시스템), Fueling system(연료공급시스템)

1. 서 론

ITER(국제핵융합실험로) 연료 주기는 세 개의 주요 부분, 즉 진공용기·삼중수소 플랜트·연료공급 및 공급 방법(fuelling & wall conditioning)으로 구분되며, 세부적으로는 Fig. 1과 같이 12개의 시스템으로, 연료 공급 방식을 세분화시키는 경우 총 19개의 세부 시스템으로 구성된다¹⁻³⁾. Fig. 1에서는 ITER 연료

주기를 토카막플랜트와 삼중수소플랜트로 구분하고 삼중수소플랜트의 주요 공정을 7개로 소개하고 있다. ITER 연료 주기는 연료와 불순물 입자를 토카막으로 공급하여 안정한 플라즈마 운전을 목표로 하며 토로스(torus)에서 나오는 모든 배출가스 처리공정을 포함하고 있다. ITER는 중수소와 삼중수소의 동량(equimolar) 운전을 설계하고 있으며 토카막의 플라즈마 형성에 펠릿 주입시스템(pellet injection system)과 가스 유입시스템(gas puffing system)으로 연료를 주입한다. ITER 연료로는 H₂, D₂ 및 DT를 공급하며, 불순물로는 Ne, Ar 및 N₂를 공급한다¹⁻⁷⁾. 토로스를 거친 미반응 삼중수소와 반응가스는 초저온 배출을

[†]Corresponding author : shyun@nfri.re.kr

[접수일 : 2012.1.26 수정일 : 2012.2.15 게재확정일 : 2012.2.24]

Copyright © 2012 KHNES

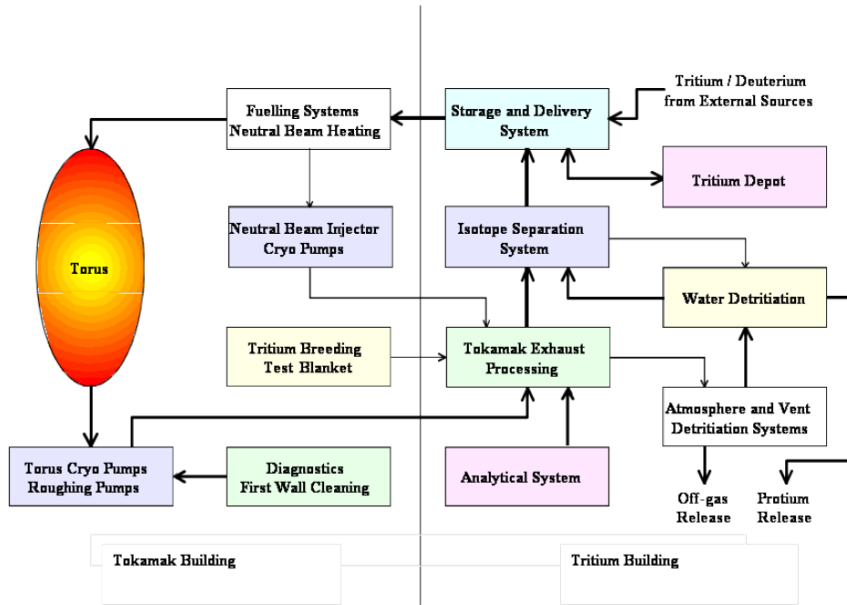


Fig. 1 Block diagram of ITER fuel cycle¹⁾

통해 삼중수소플랜트로 공급되며, 토카막 배출가스 처리공정(TEP), 수소동위원소 분리시스템(ISS) 및 수소동위원소 저장 및 공급시스템(SDS)를 거쳐 다시 토카막에 공급되는데, 이를 통칭하여 핵융합 연료주기라 한다. 이외에 주요 공정으로는 대기상의 삼중수소 오염가스 처리공정(ADS)과 삼중수소수 처리공정(WDS) 공정이 있다.

본고에서는 삼중수소를 취급하기 위한 ITER 연료주기의 주요 공정 기술들을 설명하고자 한다.

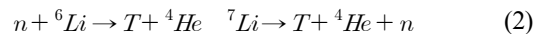
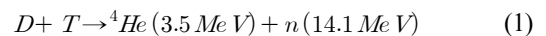
2. ITER 연료 주기

2.1 핵융합 연료 및 삼중수소의 격리^{1,3,6)}

ITER에서는 핵융합 연료로 중수소와 삼중수소를 사용한다. 중수소는 지구상의 물에 0.016% 존재하는 수소동위원소인데 반해, 삼중수소는 인위적으로 만들어지는 수소동위원소이다. 삼중수소는 베타선을 방출하며 반감기 12.3년을 가지는 방사능물질로 이를 사용하기 위해서는 적합한 격리시설(tritium confine-

ment)을 갖추어야 한다. Fig. 2와 Fig. 3는 ITER 토카막 공정의 삼중수소 격리를 위한 개념도를 보여준다. Fig. 2에서는 ITER 운전 시 삼중수소플랜트에 2차, 3차로 삼중수소를 격리시킬 수 있는 공조시스템과 배출시스템(HVAC)의 공정도를 보여주고 있으며, Fig. 3에서는 토카막플랜트의 삼중수소 격리구조를 나타내고 있다.

ITER의 핵융합 공정은 Fig. 4로 단순히 설명할 수 있으며 중수소와 삼중수소의 핵융합 반응과 삼중수소 증식은 식 (1)과 식 (2)로 나타낸다.



1GW의 핵융합 에너지를 1년간 얻기 위해서는 56kg의 삼중수소를 소모하게 되며 삼중수소 증식시스템(TBM)의 실증장치를 가지는 ITER 운전(500 GW)에 20~25kg의 삼중수소가 필요하다.

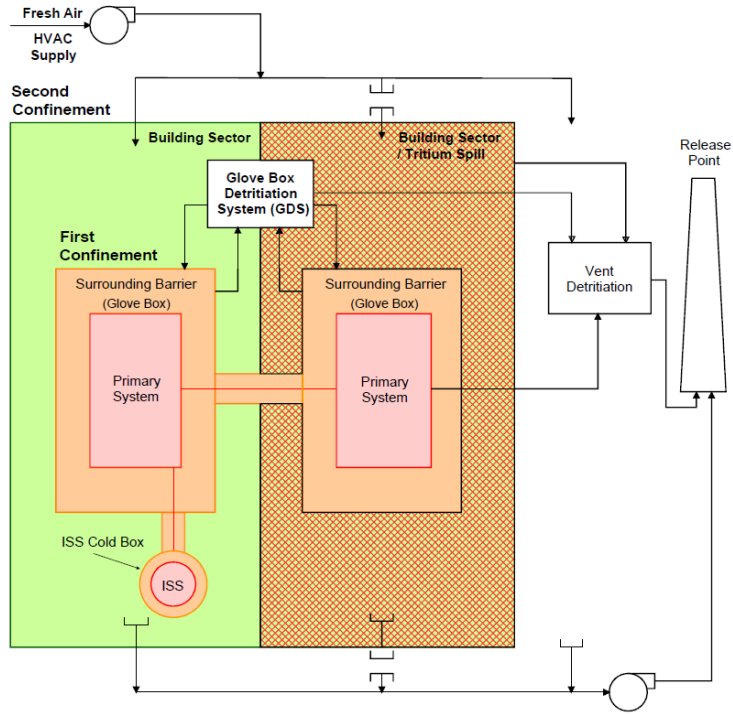


Fig. 2 ITER ventilation and confinement concept^{1,3)}

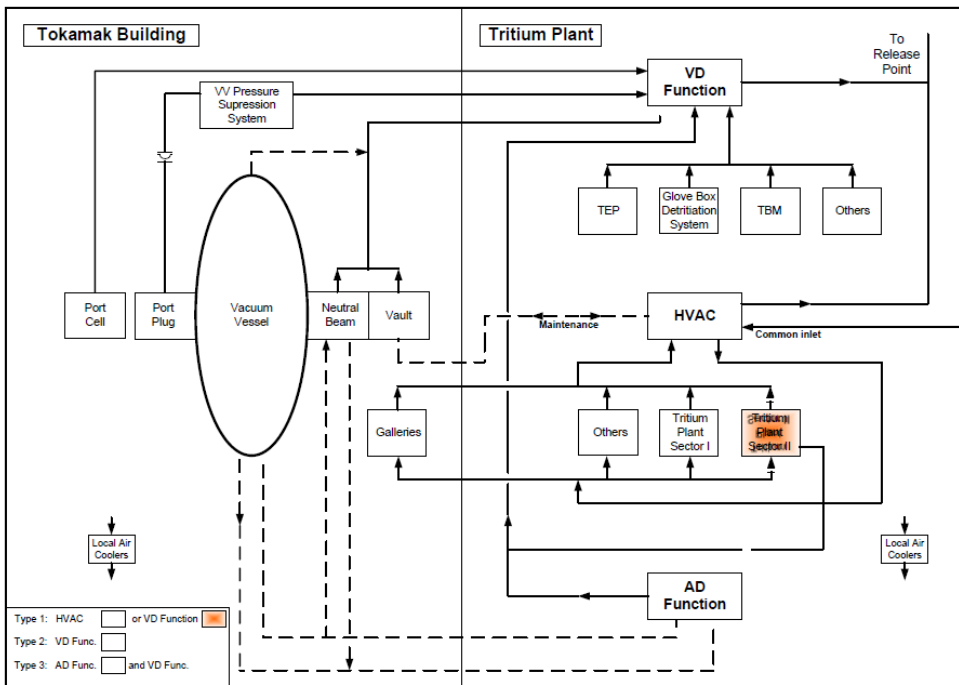


Fig. 3 ITER tokamak complex confinement^{1,3,6)}

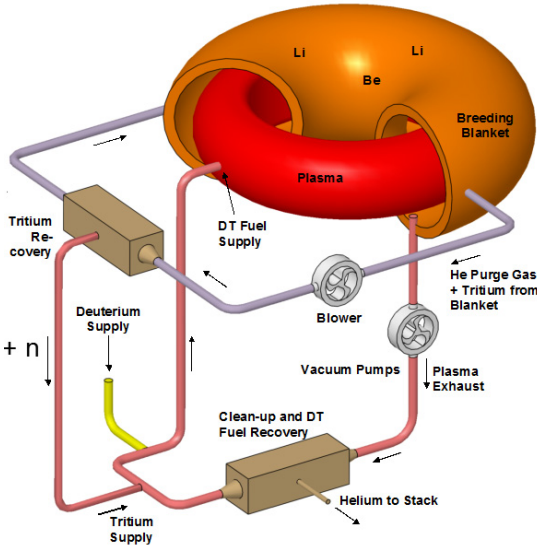


Fig. 4 Inner and outer fuel cycle of fusion reactor³⁾

2.2 연료 공급 및 공급 방법

2.2.1 연료공급시스템 (FS)²⁻⁴⁾

ITER의 연료공급시스템은 Fig. 1에서는 연료공급 시스템/중성입자빔가열로 단순하게 나타내고 있는데 반해 연료공급의 기능면에서 세분화하면, 펠릿 주입 시스템, 가스 유입시스템 및 분열 완화시스템(disruption mitigation system)으로 나뉘며 각각은 다음과 같은 기능이 요구된다.

- (1) 가스 유입시스템(GIS)
 - 플라즈마 밀도 제어 및 He 제거
 - 가열/진단용 중성입자빔 주입기로 H₂/D₂ 공급
 - 방사형 냉각, 플라즈마 분리 제어 등
- (2) 펠릿 주입시스템(PIS)
 - 플라즈마 밀도 제어용 수소동위원소 펠릿
 - ELM 불안정성 제어
 - 불순물 이동 및 방사형 냉각 목적의 불순물 아이스 펠릿 주입 등
- (3) 분열 완화시스템(DMS)
 - 분열완화 및 전자이탈 억압을 위한 대량이며 신속한 입자 주입

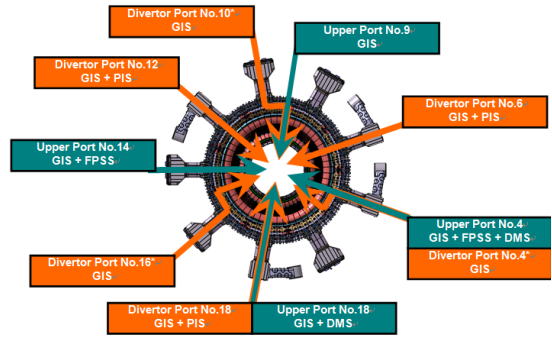


Fig. 5 Toroidal distribution of fuelling system²⁻⁴⁾

2.2.2 연료공급방법(Wall Conditioning)

ITER의 연료 공급 시스템은 다시 3가지 연료 공급방법에 따라 토카막으로 공급되며 다음과 같은 기능을 가져야 한다(Fig. 5).

- (1) 가스 유입시스템
 - 상부 포트: 균등한 토로이드 분포를 위해 4개의 가스밸브 박스(GVB) 설치
 - 배출 포트: 6GVB
- (2) 펠릿 주입시스템
 - 3개의 배출 포트를 GIS와 같게 설치
 - DT 플라즈마 운전에 6개의 주입시스템 설치
- (3) 분열 완화시스템
 - 상부에 2개 포트 설치

2.3 진공시스템 (Vacuum System)¹⁻³⁾

ITER의 진공시스템은 연료주기의 한 파트를 구성하며 다음 5가지 형태로 진공시스템에 적용되는 핵융합 요소 기술이다.

- (1) 토로스 극저온펌프
 - 토로스의 배출
 - 과잉의 연료 가스, 불순물, He을 펄스로 배출
 - 진공용기의 누설감지 등
- (2) 극저온용기 펌프(Cryostat Cryopumps)
 - 토로스 극저온펌프와 동일
- (3) 중성입자빔 극저온펌프
 - 중성입자빔 용기의 배출

- 휴지시간(dwell time) 과잉가스와 불순물이송
 - 중성입자빔 진공용기의 누설감지 등
- (4) 러핑펌프시스템
- 극저온펌프의 러핑펌프(토로스, 중심빔, 서비스 진공시스템, 진단 등의)
 - 모든 토로스 배출가스를 삼중수소플랜트로 이송
- (5) 서비스 펌프시스템

2.4 삼중수소 연료주기 및 플랜트^{2,3)}

ITER 연료주기의 주요 관점인 중수소와 삼중수소의 연료주기흐름은 Fig. 6에 잘 나타나 있다.

Fig. 6는 중수소, 삼중수소 및 불순물 가스의 연료주기 상의 흐름과 삼중수소플랜트시스템 내 상호관계를 나타낸다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 ITER 운전에서 삼중수소의 순환공정은 두 구간으로 구분된다. 삼중수소 순환공정 π 에서는 저장 및 공급시스템(SDS)에서 유입된 삼중수소 및 중수소가 토카막플랜트의 연료공급시스템(FS)을 거쳐 플라즈마 상태에서 핵융합반응에 참여하고, 계속해서 미반응가스와

불순물가스를 비롯한 중수소, 삼중수소의 복합 생성 가스는 토로스의 디버터를 통해 토카막플랜트에서 삼중수소플랜트로 이송되며 여러 단계의 수소동위원소 정제공정을 거친다. 토카막배출처리공정(TEP)에서는 수소동위원소와 기타 불순물가스가 분리되고, 동위원소분리공정(ISS)에서는 초저온증류를 통해 삼중수소와 중수소가 분리된다. 분리된 수소동위원소는 저장 및 공급시스템과 연료공급시스템으로 다시 순환되는 것이 삼중수소 순환공정 π 이다. 이 과정에서 삼중수소에 오염되거나 삼중수소화된 폐가스와 폐수는 탈삼중수소공정으로 이송된다. 삼중수소 순환공정 π 에서는 별도의 탈삼중수소공정이 형성되며 이 설비는 모두 삼중수소플랜트에 설치된다. 이곳에서 탈삼중수소가 완성된 수소동위원소는 대기로 배출되고, 분리된 삼중수소는 다시 삼중수소 순환공정 π 으로 공급되는 것이 삼중수소의 격리와 관리를 유지하는 ITER의 운전기본이다.

ITER의 삼중수소 연료주기에 참여하는 국가 중 FS는 중국(CN)·미국(US)이, SDS는 한국(KO)이, TEP은 미국(US)이, ISS 및 WDS는 유럽(EU)이, ADS는

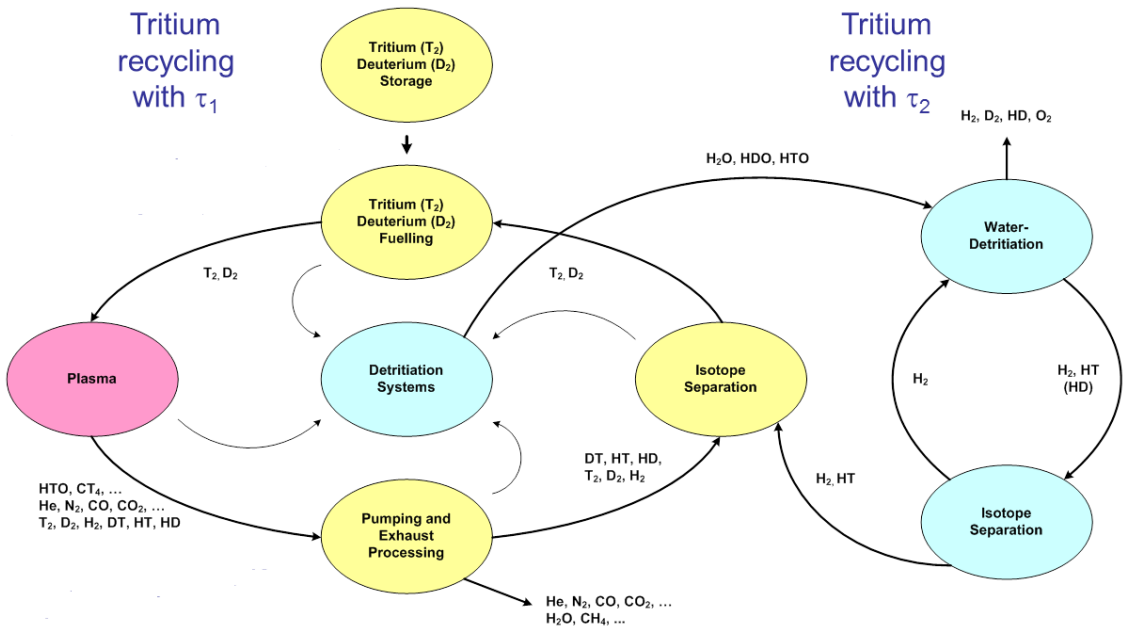


Fig. 6 ITER tritium deuterium loop^{1,3)}

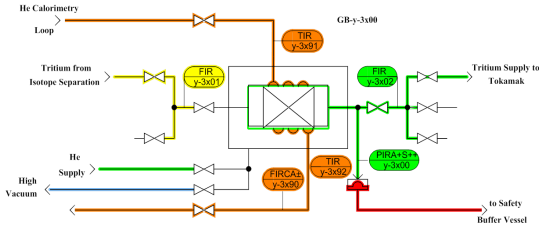


Fig. 7 Typical hydride storage bed configuration (SDS)^{3,6)}

일본(JA)이 조달하며 담당하게 된다. 다음에는 2001년⁷⁾ 이후 ITER 조달 참여국 각각의 삼중수소플랜트 시스템 개발 내용을 소개한다.

3. 삼중수소플랜트 시스템

3.1 저장 및 공급시스템(SDS)^{1,3,6,8,9)}

ITER의 SDS는 KO가 조달한다. 삼중수소 및 삼중수소 함유 수소동위원소를 금속수소화물로 저장하는 특징이 있다. 수소동위원소의 연료 외에도 기타 불연 가스 공급시스템을 포함한다. 연료공급시스템으로 연계되는 기능뿐만 아니라 TEP, ISS와도 긴밀한 인터페이스를 형성하게 되며, 특히 He circulation을 통한 in-bed calorimetry로 삼중수소의 재고를 파악함으로써 ITER의 삼중수소 총량관리와 격리배출을 효과적으로 다룰 예정이다(Fig. 7). (H. Chung 등^{8,9)}의 보고 참고.)

3.2 토카막 배출가스 처리공정(TEP)^{3,6)}

ITER의 TEP은 US가 조달한다. 중수소, 삼중수소를 연료로 사용하는 토로스 배출가스에는 플라즈마 접촉 재료로부터 발생한 탄소를 포함하는 CO, CO₂, CQ₄ 성분을 비롯하여 HTO, T₂, D₂, H₂, DT, HT, HD 등의 다양한 불순물gas와 일부 불활성gas가 포함될 수 있다. 이들 혼합gas로부터 수소동위원소를 분리시키는 공정이 TEP이다. TEP에는 C, CQ₄ 가스를 산화시켜 CO, CO₂의 가스 형태와 Q₂O, HQO 형태의

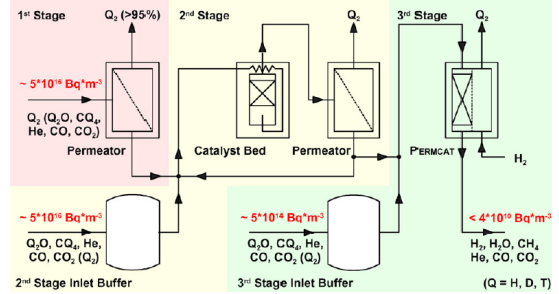


Fig. 8 Block diagram of tokamak exhaust processing system^{1,6)}

물을 형성시키는 산화(oxidation)공정 및 이들 복합 가스에서 수소동위원소만을 배출시키는 투과(permeation)공정이 복합적으로 구성되는데, 이 두 가지가 기본 요소기술이다. Fig. 8은 TEP의 개략도이다.

3.3 동위원소 분리시스템(ISS)^{1,3,6)}

ITER의 ISS는 EU가 조달한다. ISS는 TEP과 수처리공정(WDS)에서 정제된 수소동위원소를 극저온중류로 삼중수소, 중수소 및 혼합수소가스로 분리시키는 공정이다. ITER WDS도 EU가 조달한다. Fig. 9에서 나타낸 바와 같이 삼중수소와 중수소 및 배출 가스는 각각 SDS와 WDS로 보내진다. Fig. 10은 ISS와

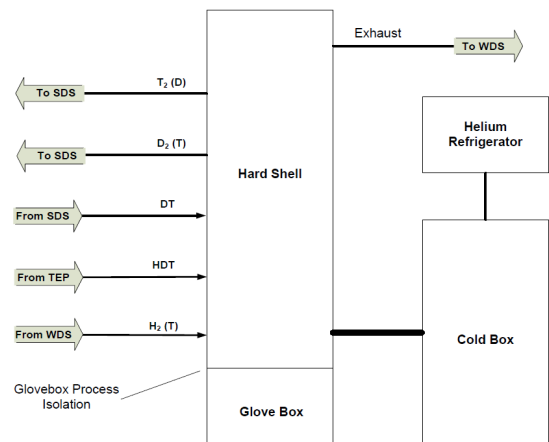


Fig. 9 Tritium isotope separation system (ISS)¹⁾

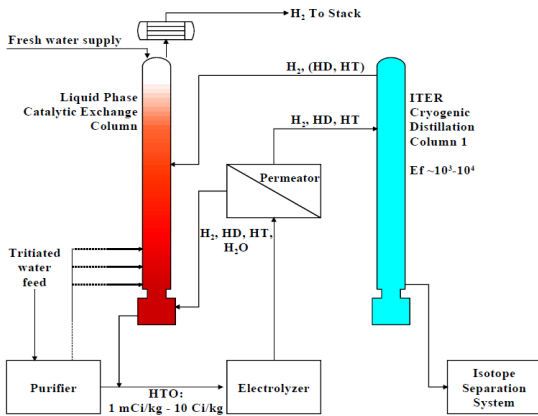


Fig. 10 Block diagram of water detritiation (WDS)^{1,3,6)}

WDS가 연계된 공정도이다. DS에서는 액상 또는 기상 촉매교환(LPCE 또는 VPCE) 반응을 통해 발생시킨 수소동위원소 가스를 PERMCAT 촉매 막을 통과 시킴으로써 삼중수소수의 탈삼중수소 공정을 유도하고, 이어 앞서 설명한 ISS에서의 수소동위원소의 분리를 통해 삼중수소의 재순환을 이끌어 내는 것이다.

3.4 대기의 삼중수소처리(ADS/DS)^{1,3,5,6)}

ITER의 ADS는 JA가 조달한다. Fig. 11은 삼중수

소플랜트에서 발생하는 다양한 배출가스를 처리하는 공정을 보여주고 있다. DS에서는 많은 부분이 모듈화되어 있고 서로 교환이 가능하다. ITER 설계 기준에는 가스 상의 삼중수소 또는 공기에 함유된 삼중수소의 탈삼중수소화 반응에 촉매 리콤바이너를 적용하거나 molecular sieve dryer 방식의 적용을 검토하고 있다. DS에 유입되는 가스의 구성에 진공 배출가스, HVAC, 토카막 상부 배출, 중성입자빔 용기 배출, 포트셀 및 글로브박스 배출, 핫셀 및 다양하게 삼중수소와 접촉한 배출가스 등이 포함된다. ITER DS의 설계기준은 정상운전의 경우는 물론이고 비정상운전의 경우에도 삼중수소를 함유한 대기방출 가스를 적절히 처리할 수 있는 안정적인 기능 확보를 우선시하고 있으며 또한 미래를 위한 의무사항이 될 것이다. Fig. 11은 이러한 개념도이다.

3.5 삼중수소 재고 및 관리^{1,3,5,6)}

ITER 운전에서 삼중수소의 재고 파악(tritium inventory accountancy)은 중요한 의미를 가진다. 토로스 핵융합 반응에서 삼중수소의 소모를 정확히 파악하기 어렵고, 마찬가지로 진공용기 벽에 침투된 삼중수

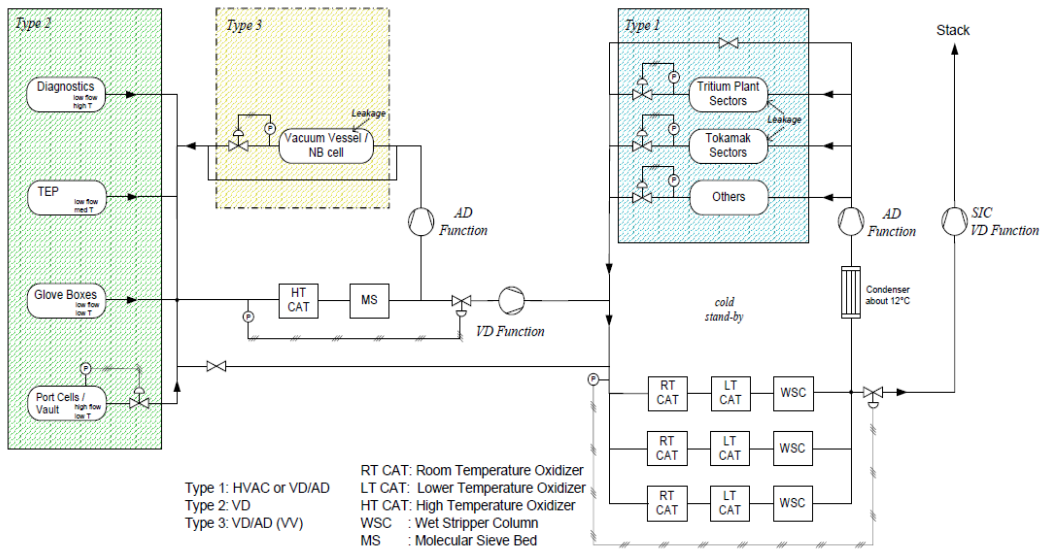


Fig. 11 Block diagram of detritiation system (ADS)^{1,3,5,6)}

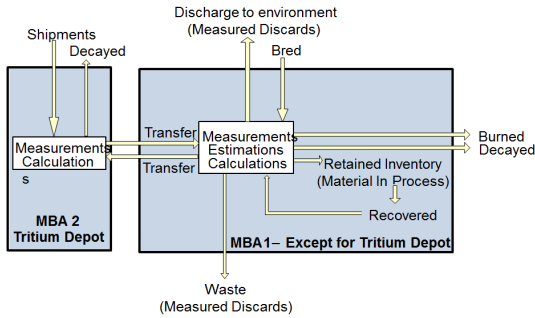


Fig. 12 Conceptual drawing of material balance area in ITER²⁾

소의 양을 정량적으로 예측하기 어렵기 때문이다. 그렇지만, ITER에 투입된 삼중수소의 총량을 관리하여 삼중수소의 외부 방출을 최대한 방지하고, 이를 통해 삼중수소를 플랜트 내에 격리시키는 운전을 꾀하여야 할 필요성은 있을 것이다^{1,3,5,6)}. Fig. 12에 나타내는 바와 같이 ITER의 삼중수소 관리에는 두 구간의 MBA 설정이 필요하다. MBA 1(mass Balance area)은 외부로부터 ITER 플랜트로 삼중수소를 공급하거나 외부로 배출하는 출발점인 depot 한 구간만 해당되며, 따라서 나머지 삼중수소 연료주기 전체는 MBA 2에 해당된다. 모든 삼중수소는 연료주기를 따라 순환되는 과정에 삼중수소플랜트의 SDS를 거치게 된다. 앞서 설명한 바와 같이 SDS에서 중요한 기능의 하나인 삼중수소의 계량, 즉 재고 파악을 통해 전체 삼중수소 연료주기의 올바른 운전과 삼중수소 격리 운전의 적합성이 검증될 것이고 또한 핵융합 운전의 안정성 확인의 척도가 될 것이다.

4. 결 론

ITER 연료주기의 핵심은 중수소와 삼중수소를 동량 운전하는 것으로 삼중수소의 통제와 격리 운전이 중요하다. 모든 세부기술은 삼중수소의 회수와 외부 배출을 최소화시키는 기술로 집약된다. 연료공급시스템, 토카막배출가스 처리공정, 수소동위원소 분리시스템, 수소동위원소 저장 및 공급시스템, 삼중수소 재고 및 관리 등 삼중수소플랜트를 구성하는 일련의

주요 공정기술들이 삼중수소 제어기술로 집약된다. 본고에서는 향후 수소 및 수소동위원소의 이용 가능성을 넓힐 수 있도록 ITER의 삼중수소 연료주기를 구성하는 세부공정 기술들의 개념을 소개하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. ITER IDM Document (ITER_D_2X6K67), Plant Description (PD), Chap. 10 Fuel Cycle and Radiological Monitoring (2009).
2. D. Babineau, S. Maruyama, R. Pearce, M. Glugla, L. Bo, B. Rogers, S. Willms, G. Piazza, T. Yamanishi, S.H. Yun, L. Worth, and W. Shu, "Review of the ITER Fuel Cycle," IAEA FEC 2010, 2010.
3. M. Glugla, D. Babineau, L. Bo, S. Maruyama, R. Pearce, G. Piazza, B. Rogers, S. Willms, T. Yamanishi, and S.-H. Yun, "Review of the ITER D-T Fuel Cycle Systems and Recent Progress," Tritium 2010, Nara, Japan, 2010.
4. S. Maruyama, Y. Yang, R.A. Pitts, M. Sugihara, S. Putvinski, S. Carpentier-Chouchana, B. Li, W. Li, L. Baylor, S.J. Meitner, C. Day, B. laBombard, and M. Reinke, "ITER Fuelling System Design and Challenges—Gas and Pellet Injection and Disruption Mitigation," IAEA FEC 2010, 2010.
5. S. Konishi, M. Glugla, and T. Hayashi, "Fuel Cycle Design for ITER and Its Extrapolation to DEMO," Fusion Engineering and Design, Vol. 83, 2008, pp. 954-958.
6. M. Glugla, A. Antipenkov, S. Beloglazov, C. Caldwell-Nichols, I.R. Cristescu, I. Cristescu, C. Day, L. Doerr, J.-P. Girard, and E. Tada, "The

- ITER Tritium System,” Fusion Engineering and Design, Vol. 82, 2007, pp. 472-487.
7. H. Yoshida, O. Kveton, J. Koonce, D. Holland, and R. Haange, “Status of the ITER Plant Design”, Fusion Engineering and Design, Vol. 39-40, 1998, pp. 875-882.
 8. H. Chung, M. Shim, H. Yoshida, H. Jin, J. Lee, D.-H. Ahn, K.-K. Kim, K.-M. Song, D.J. Kim, M.H. Chang, H.-G. Kang, S.-H. Yun, S. Cho, “Korea's Progress on the ITER Tritium System,” Fusion Engineering and Design, Vol. 84, 2009, pp. 599-603.
 9. H. Chung, D. Chung, D. Koo, J.S. Lee, M. Shim, S. Cho, K.J. Jung, S.-H. Yun, “Storage and Delivery of Hydrogen Isotopes,” Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 22, No. 3, 2011, pp. 372-379.