

수소동위원소 저장 계량 장치 특성 연구

김연진^{1,2} · 정광진^{1,2} · 구대서² · 박종철² · 전민구² · 윤세훈³ · 정흥석^{1,2†}

¹과학기술연합대학원대학교, ²한국원자력연구원, ³국가핵융합연구소 ITER한국사업단

Characteristics of a Hydrogen Isotope Storage and Accountancy System

YEANJIN KIM^{1,2}, KWANGJIN JUNG^{1,2}, DAESOO GOO², JONGCHUL PARK², MIN-GU JEON²,
SEI-HUN YUN³, HONGSUK CHUNG^{1,2†}

¹Korea University of Science and Technology, Gajeongro 217, Yuseong, Daejeon, 34113, Korea

²KAERI, 989-111 Deadeokdaero, Yuseong, Daejeon 34057, Korea

³NFRI, 113 Gwahakro, Yuseong, Daejeon 34133, Korea

Abstract >> Global energy shortage problem is expected to increase driven by strong energy demand growth from developing countries. Nuclear fusion power offers the prospect of an almost infinite source of energy for future generations. Hydrogen isotope storage and delivery system is a important subsystem of a nuclear fusion fuel cycle. Metal hydride is a method of the high-density storage of hydrogen isotope. For the safety storage of hydrogen isotope, depleted uranium (DU) has been widely proposed. But DU needs a safe test because It is a radioactive substance. The authors studied a small-scale DU bed and a medium-scale DU bed for the safety test. And then we made a large-scale DU bed and stored hydrogen isotopes in the bed. Before the hydriding/dehydriding, we tested it's heating and cooling properties and carried out an activation procedure. As a result, Reaction rate of DU-H₂ is more rapid than the other metal hydride ZrCo. Through the successful storage result of our large bed, the development possibility of the hydrogen isotope storage technology seems promising.

Key words : Metal hydride(금속수소화물), Hydriding(수소화, 흡장), Dehydriding(탈수소화, 탈장), DU(감손우라늄), Hydrogen isotope(수소동위원소), Nuclear fusion(핵융합)

Nomenclature

DU : depleted uranium

H₂ : hydrogen

HMI : Human Machine Interface

SDS : Storage and Delivery System

U : uranium

UH₃ : uranium hydride

PG : pressure gauge

VG : vacuum gauge

TC : thermo couple

RTD: resistance temperature detector

TMP: turbo molecular pump

RP : rotary pump

PT : pressure transmitter

HT : heater

SV : set value

PV : process value

HE : heat exchanger

[†]Corresponding author : hschung1@kaeri.re.kr

Received : 2015.9.23 in revised form : 2015.12.9 Accepted : 2015.12.30

Copyright © 2015 KHNES

1. 서 론

세계 경제 규모의 확대에 따라 에너지 수요량은 지속적으로 증가하고 있다. 하지만, 우리나라는 대부분의 에너지를 수입에 의존하기 때문에 차세대 에너지원 개발이 시급하다. 그 중 핵융합 에너지는 차세대 에너지원으로서 수소동위원소인 중수소와 삼중수소를 연료로 사용한다. 때문에, 원활한 핵융합 발전을 위해 핵융합 연료를 빠르고 안정적으로 저장 할 수 있는 수소동위원소 저장장치의 개발이 요구되어왔다¹⁻¹⁸⁾. 핵융합 발전에서는 금속 저장재에 수소동위원소를 화학적으로 흡장하여 안정적인 상태의 금속수소화물로 만드는 수소 저장방법을 사용한다. 수소저장금속으로는 DU를 사용한다. DU는 다른 금속인 ZrCo에 비해 반응성이 높고 고온에서 불균일화가 일어나지 않기 때문이다¹⁻¹⁷⁾. 본 논문에서는 흡장 및 탈장 실험에 앞서 안정성과 정확성을 확보하기 위한 대형 DU 베드의 특성평가 및 시운전을 다룬다^{2,5,12)}.

2. 실험준비

2.1 실험장비

수소 흡·탈장 장비는 대형 DU 베드, 260 L 탱크, 로타리 펌프, 터보분자펌프, 매니폴드, DAQ 및 인베르터로 구성되어, 이는 Fig. 1과 같다. 1893.75 g의 DU

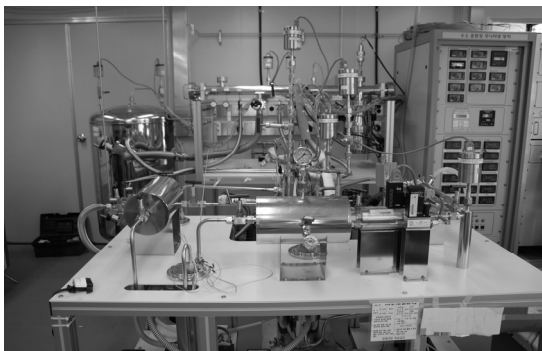


Fig. 1 DU Bed Hydriding and dehydriding system

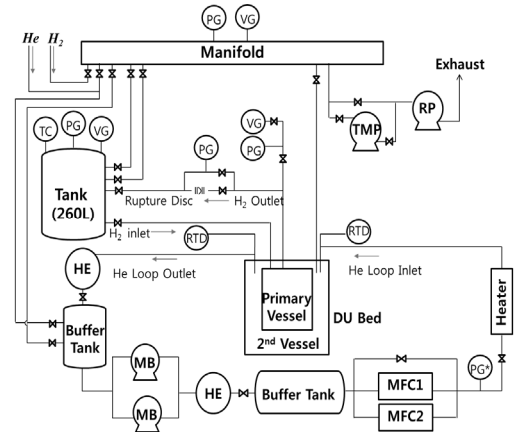


Fig. 2 storage and delivery system schematic diagram

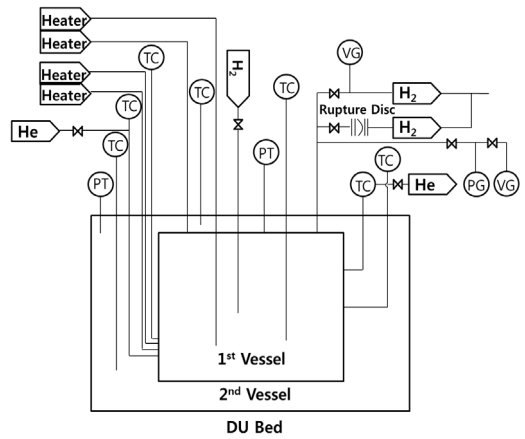


Fig. 3 DU Bed schematic diagram

가 저장재로 사용되었다.

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 전체 수소 흡·탈장 장비모식도와 DU 베드의 모식도이다.

2.2 베드 시스템 흡·탈장 라인 체적 계산

흡·탈장 실험 시, 베드에 흡장된 수소량을 정확히 계량을 위하여 260 L 탱크의 체적 외에 흡장 및 탈장 라인의 체적을 계산하였다. Fig. 4에 흡장라인과 탈장라인을 각각 표시하였다. 윗부분이 탈장, 아랫부분이 흡장라인이다. 라인의 내경, 외경은 10.7 mm와 12.7 mm, 라인의 길이는 각각 246 cm과 507 cm이다. 계산된 체적

은 아래와 같다.

$$\text{흡장} : (0.535 \text{ cm})^2 \times \pi \times 246 \text{ cm} = 221.0916 \text{ cm}^3$$

$$\text{탈장} : (0.535 \text{ cm})^2 \times \pi \times 507 \text{ cm} = 455.6644 \text{ cm}^3$$

2.3 SDS DU 베드 HMI시스템 개발

HMI시스템이란 Human Machine Interface의 줄임말로 사람과 기계사이의 인터페이스를 말한다. SDS DU 베드의 효율적인 데이터수집과 제어를 위해서 개발되었다. 개발에 사용된 소프트웨어는 National Instruments의 LabVIEW이다. HMI시스템을 통해 압력, 온도 등의 측

정값을 실시간으로 컴퓨터로 전송 및 저장 가능하며, 가열기의 온도를 조절하는 기능도 포함한다.

첫 번째 화면은 Fig 5에 나타난 바와 같이 장비의 모식도상에서 압력계와 온도계를 읽을 수 있도록 하였다. 데이터 저장버튼을 누르면 실시간으로 저장이 가능하며, 저장을 시작한 순간부터의 누적 시간을 표시해주는 기능을 포함하고 있다.

실시간으로 저장된 데이터는 두 번째 화면에서는 Fig. 6과 같이 즉시 그래프로 그려볼 수 있어서 실험 시 진행사항을 한 눈에 볼 수 있다는 장점이 있다. 그래프 위에 관찰하려는 대상을 변경할 수 있는 메뉴가 있다.

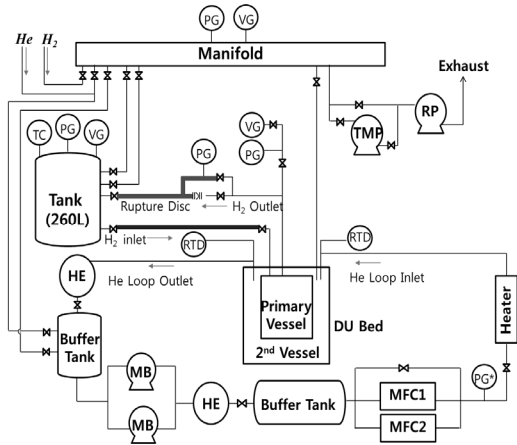


Fig. 4 DU bed tubings for volume measurement

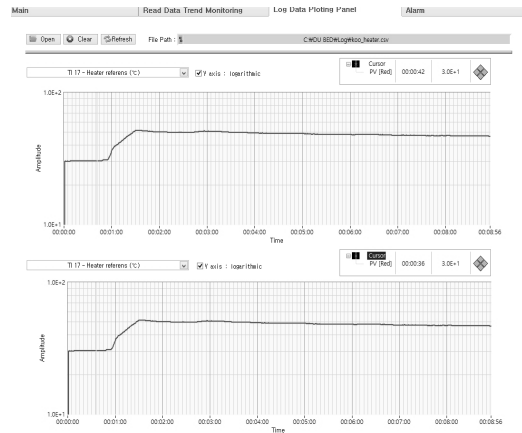


Fig. 6 HMI readout data monitoring

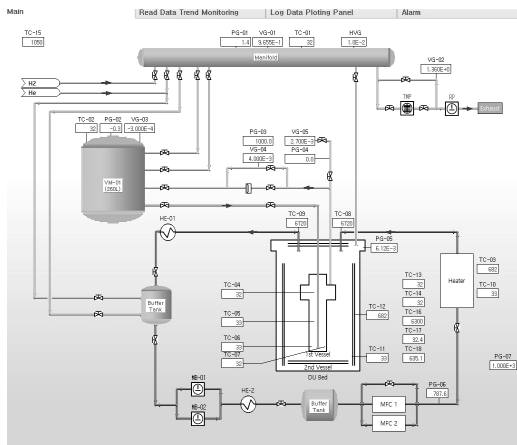


Fig. 5 DU bed storage and delivery HMI system

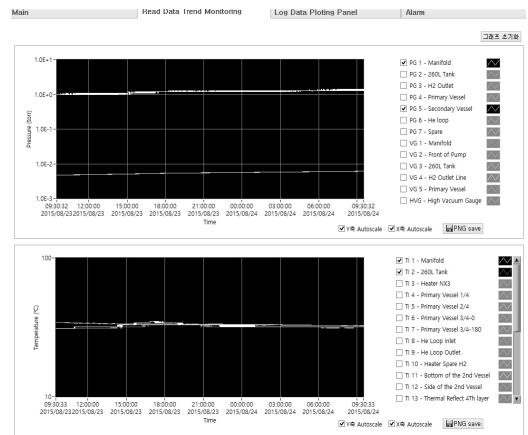


Fig. 7 HMI log data plotting

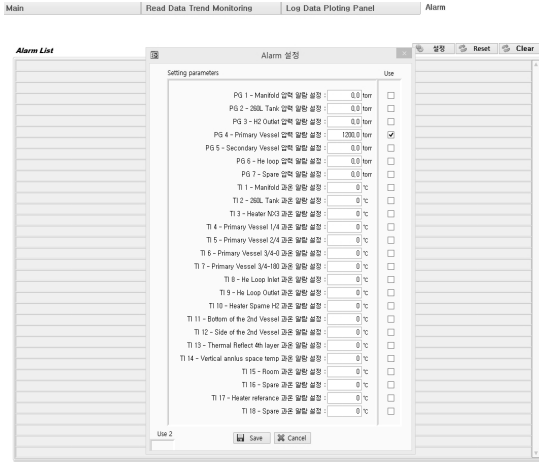


Fig. 8 HMI alarm notation

데이터 값은 세 번째 화면에서 로그 범위로도 표현할 수 있다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 두 개의 좌표가 있고, 한 좌표 상에 여러 개의 데이터를 동시에 선택 가능하여, 다수의 데이터를 비교할 수 있다. 메뉴에서 그려진 그래프들은 저장 가능하다. 오른쪽에는 보고자 하는 압력, 온도들을 선택할 수 있는 탭이 있다.

네 번째 화면은 사용자가 정해진 압력과 온도 하에서 알람이 울리는 상황을 설정할 수 있도록 하여 안전성을 확보할 수 있게 하였다. Fig. 8에서 나타난 바와 같이 허용치의 압력 및 온도를 입력하고 저장버튼을 누르면 알람이 발동된다.

3. HMI 시스템을 통한 히터 제어 시험

HMI 시스템을 활용한 가열기 제어의 정밀도와 베드의 자연냉각 소요시간을 확인하기 위해 본 시험을 수행하였다. 열손실을 최소화하기 위해 가열 전에 1차 용기, 2차 용기, 매니폴드 및 모든 라인은 진공상태로 만들었으며, 이 진공상태는 전 시험과정에서 유지되었다. 1차 용기 외벽에 브레이징 되어 설치된 가열기에 의해 1차 용기는 10분간 100°C까지 가열된 후 10분간 그 온도가 유지되며, 이 후 베드의 자연냉각이 진행되었다. 그 결

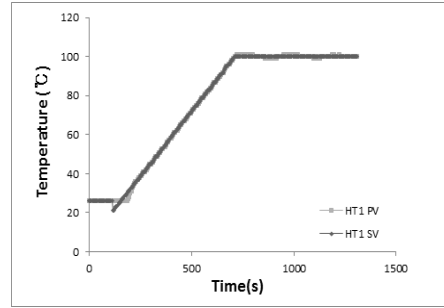


Fig. 9 Variation of the temperature of the DU bed during heating

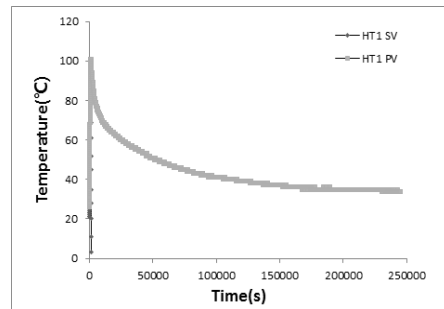


Fig. 10 Variation of the temperature of the DU bed as a function of time

과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. HT1 SV와 HT2 PV는 각각 온도 제어 값과 실제 온도 값을 나타낸다. 다음에 결과에 따라 가열기의 온도제어가 원활히 작동함을 알 수 있다.

Fig. 10은 가열과 냉각의 전 과정을 나타낸 그래프이다. 베드를 자연냉각 하였을 때, 100°C에서 상온수준의 온도로 돌아오기까지 56시간 이상의 긴 시간이 소요됨을 확인하였다.

4. HSC를 이용한 SDS DU Bed 반응 모사

흡장 및 탈장 시, 온도에 따른 반응성을 확인하기 위하여 Outotec사의 HSC를 사용하였다.¹⁹⁾ 우리나라와 수소의 흡장 반응식은 아래와 같다.



온도에 따른 대략적인 깁스 자유에너지의 부호변환점(zero crossing)을 확인하기 위해 1식을 적용하여 0°C에서 1000°C까지 100°C 간격으로 계산하였다. 400°C와 500°C 사이에서 부호 변환점이 확인되었다. 더욱 정확한 부호 변환점을 찾기 위해 온도 범위를 좁혀 재계산하였다. Table 1은 깁스 자유에너지를 400°C에서 410°C까지 1°C간격으로 계산한 결과이다.

Fig. 11은 표의 결과를 그래프로 그린 것이다.

계산된 깁스 자유에너지의 값에 기초하여 402°C까지는 감손우라늄과 수소가 정반응을 일으켜 금속수소화물을 형성하는 흡장반응을 하고 403°C부터는 역반응을 일으켜 금속수소화물이 감손우라늄과 수소로 분리되는 탈장반응을 하는 것으로 확인된다. 이는 감손우라늄을 저장재로 사용하는 수소동위원소 저장 장치가 흡장을

위해서는 402°C이하의 온도를 유지하고 탈장을 위해서는 403°C이상의 온도를 유지할 수 있는 기능을 갖춰야 함을 뜻한다.

5. 결 론

수소동위원소 저장기술은 아주 중요한 기술로써 다방면에서 끊임없이 연구되어지고 있는 분야이다. 핵융합 발전에서는 금속수소화물 형태로 저장하는 방법을 사용하는데, DU가 그 저장재료로 쓰이고 있다. 핵융합 발전의 연료로는 중수소와 삼중수소가 쓰이게 되는데, 현재 저장기술은 기초실험단계에 있기 때문에 중수소와 삼중수소의 동위원소인 수소를 이용하여 실험을 진행하고 있다. 향후 본 연구결과를 반영하여 국제핵융합실험로에서는 토카막에서 수소 및 중수소실험을 거쳐 삼중수소 핵반응을 실현할 계획이다. 저자는 DU 소형 베드와 중형 베드에서의 안정성 검증을 거쳐 대형베드에서 수소 흡장 및 탈장 실험을 진행할 예정이다. 따라서 본 논문에서는 시운전 준비 현황을 정리하였다. 실험장비, 라인별 볼륨측정, 실험장비의 관리, 그리고 HMI 시스템 설계현황을 차례로 서술하고, 설계가 완료된 HMI시스템을 사용하여 SDS DU 베드의 데이터를 측정하고, 제어하는 과정을 테스트하였다. 또한 HSC 프로그램을 이용하여 실제와 동일한 조건으로 DU와 수소반응을 모사하여 적절한 실험환경을 도출해 내었다. Reaction equation module을 이용하여 앞으로 진행될 수소 흡장 실험에서는 402°C 이하의 온도에서, 탈장실험은 403°C이상에서 이루어져야 함을 확인하였다. 이로써 DU 베드 장비의 가동준비를 완료하였다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 국제핵융합실험로 공동개발사업(NRF-2009-007065) 및 국가핵융합연구소의 지원으로 수행되어졌습니다.

Table 1 Gibbs free energy as a function of temperature

Temp(°C)	ΔG(Kcal)
400.000	-0.118
401.000	-0.070
402.000	-0.022
403.000	0.026
404.000	0.074
405.000	0.121
406.000	0.169
407.000	0.217
408.000	0.265
409.000	0.313
410.000	0.361

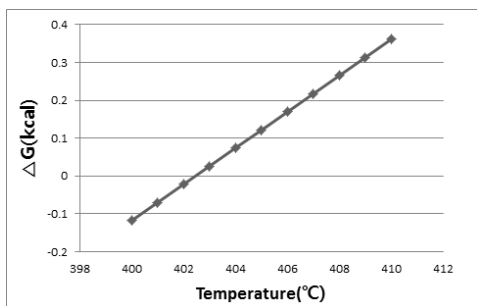


Fig. 11 Variation of the Gibbs free energy as a function of temperature

References

1. M. Sim, H. Chung, S. Paal, M. Lee, K. Kim, S. Paal, et al., Characteristics of ZrCo Alloy for the storage of Hydrogen Isotope, *Journal of the Korea Physical Society*, Vol. 49, 2006, pp. S369-S373.
2. H. Chung, D. Chung, J. Lee, D. Koo, J. Lee, C. Lee, et al., Fusion tritium research facilities in KAERI, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 87, 2012, pp. 448-453.
3. D. Chung, D. Jeong, D. Koo, H. Yoshida, K. Song, M. Chang, et al., Fusion fuel gas recovery and delivery characteristics on a tray-type ZrCo bed, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 86, 2011, pp. 2233-2236.
4. H. Chung, M. Shim, H. Yoshida, H. Jin, J. Lee, D. Ahn, et al., Korea's progress on the ITER tritium systems, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 84, 2009, pp. 599-603.
5. M. Shim, H. Chung, S. Cho, and H. Yoshida, Disproportionation characteristics of a zirconium-cobalt hydride bed under ITER operating conditions, *Fusion Science and Technology*, Vol. 53, 2008, pp. 830-840.
6. M. Shim, H. Chung, H. Yoshida, K. Kim, S. Cho, et al., Experimental Study on the Delivery Rate and Recovery Rate, *Fusion Science and Technology*, Vol. 54, 2008, p. 27.
7. M. Shim, H. Chung, H. Yoshida, H. Jin, J. Lee, K. Song, et al., Hydriding/dehydriding characteristics on fast heat transfer response ZrCo bed for ITER, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 84, 2009, pp. 1763-1766.
8. M. Shim, H. Chung, H. Yoshida, H. Jin, M. Chang, S. Yun, et al., Initial test results of a fast heat transfer response ZrCo hydride bed, *Fusion Science and Technology*, Vol. 56, 2009, pp. 856-860.
9. S. Yun, M. Lee, K. Park, Y. Oh, S. Cho, M. Chang, et al., Compressibility study during hydride reaction of ZrCo, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 86, 2011, pp. 2282-2285.
10. H. Kang, S. Cho, M. Lee, S. Yun, M. Chang, H. Chung, et al., Fabrication and test of thin double-layered annulus metal hydride bed, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 86, 2011, pp. 2196-2199.
11. S. Cho, M. H. Chang, S. H. Yun, H. G. Kang, H. Chung, K. M. Song, et al., ITER storage and delivery system R&D in Korea, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 38, No. 3, 2010, pp. 425-433.
12. D. Chung, J. Lee, D. Koo, H. Chung, K. Kim, H. Kang, M. Chang, et al., Hydriding and dehydriding characteristics of small-scale DU and ZrCo beds, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 88, 2013, pp. 2276-2279.
13. H. Chung, D. Chung, D. Goo, J. Lee, M. Shim, et al., Storage and Delivery of Hydrogen Isotopes, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 3, 2011, pp. 372-379.
14. D. Goo, H. Chung, D. Chung, J. Lee, S. Yun, et al., Hydrogen Isotopes Accountancy and Storage Technology, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 1, 2012, pp. 49-55.
15. H. Chung, H. Kang, M. Chang, S. Cho, W. Kim, J. Nam, et al., Safety Analysis of a Hydrogen Isotopes Process, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 3, 2012, pp. 219-226.
16. J. Lee, J. Park, D. Koo, D. Chung, H. Chung, et al., Rapid Cooling Performance Evaluation of a ZrCo bed for a Hydrogen Isotope Storage, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 24, No. 2, 2013, pp. 128-135.
17. J. Park, J. Lee, D. Goo, H. Chung, et al., Hydrogen Absorption/Desorption and Heat transfer Modeling in a Concentric Horizontal ZrCo Bed, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 24, No. 4, 2013, pp. 295-301.
18. S. Yun, M. Chang, H. Kang, C. Kim, S. Cho, et al., Tritium Fuel Cycle Technology of ITER Project, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 1, 2012, pp. 56-64.
19. Outotec, HSC Chemistry 6.0 User's Guide (2006).