

감손 우라늄 베드 수소 탈장 성능

구대서¹ · 김연진² · 윤세훈³ · 정흥석^{4†}

¹한국원자력연구원 원전제염해체기술개발부, ²UST, ³국가핵융합연구소 ITER한국사업단,
⁴핵주기공정개발부

Dehydrating Performance in a Depleted Uranium Bed

DAESEO KOO¹, YEANJIN KIM², SEI-HUN YUN³, HONGSUK CHUNG^{4†}

¹KAERI, 989-111 Daedeokdaero, Yuseong, Daejeon, 34057, Korea

²Korea University of Science and Technology, Gajeongro 217, Yuseong, Daejeon, 34113, Korea

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

⁴KAERI, 989-111 Daedeokdaero, Yuseong, Daejeon, 34057, Korea

Abstract >> It is necessary to store and supply hydrogen isotopes for Tokamak operation. A storage and delivery system (SDS) is used for storing hydrogen isotopes as a metal hydride form. We designed and fabricated a depleted uranium (DU) bed to store hydrogen isotopes. The rapid storage of hydrogen isotopes is very important not only for safety reasons but also for the economic design and operation of the SDS. The delivery rate at the desorption temperatures without the operation of a dry pump was analyzed in comparison with that with the operation of the dry pump. The effect of the initial desorption temperatures on the dehydrating of the DU without the operation of the dry pump was measured. The effect of the initial desorption temperatures on the dehydrating of DU with the operation of the dry pump was also measured and analyzed. The primary pressure on the desorption temperatures without the operation of the dry pump was analyzed in comparison with that with the operation of the dry pump. The temperature gradient of the coil heater and the primary vessel was also analyzed. Our results will be used to develop pilot scale hydrogen isotope processes. It was confirmed that dehydrating of a medium-scale DU bed has enabled without the operation of the dry pump.

Key words : Dehydrating(탈장), Uranium bed(우라늄 베드), Hydrogen isotope(수소동위원소), Hydriding(흡장), Nuclear fusion(핵융합)

Nomenclature

SDS : storage and delivery system

DU : depleted uranium

Pa : pascal

kPa : kilo pascal

H/U : hydrogen/uranium

vs. : versus

1. 서 론

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

Received : 2016.1.29 in revised form : 2016.2.18 Accepted : 2016.2.22

Copyright © 2016 KHNES

수소 저장·공급용기는 금속수소화 형태로 수소동위원소를 저장하는데 사용 된다¹⁻⁶⁾. 수소 동위원소저

장 공급 목적은 중수소와 삼중수소의 핵융합 반응을 위하여 중수소와 삼중수소를 저장하고 공급을 위한 것이다⁷⁻¹¹⁾. 핵융합기술을 개발하기 위하여 토카막 운전을 위한 수소 동위원소를 저장하고 공급하는 것이 요구된다. 삼중수소 급속흡장은 수소 저장공급용기 안전과 설계 및 경제적 운전측면에서 매우 중요하다. 수소 동위원소의 저장과 공급과 탈장 위하여 우라늄 베드가 널리 제안되고 있다¹²⁻¹⁷⁾.

본 연구에서는 저자 등의 연구¹⁸⁻²⁴⁾ 및 최근 발표²⁵⁾를 바탕으로, 중소형 우라늄 베드 탈장 특성을 평가하기 위하여 수소 동위원소저장·공급용기를 설계하고 제작하였다. 드라이 펌프를 사용하는 경우와 드라이 펌프를 사용하지 않는 경우의 수소 동위원소저장·공급용기 탈장온도에 따른 수소 탈장률을 분석하였다. 드라이 펌프를 사용하는 경우와 드라이 펌프를 사용하지 않는 경우의 수소 동위원소저장·공급용기 탈장온도에 따른 수소 탈장특성을 분석하였다. 드라이 펌프를 사용하지 않는 경우의 수소 동위원소저장·공급용기 탈장온도에 따른 일차용기 압력과 드라이 펌프를 사용한 경우의 일차용기 압력 특성을 분석하였다. 또한 수소 동위원소저장·공급용기 탈장온도에 따른 1차 용기 탈장온도구배 및 히터온도구배 특성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 우라늄 베드 모형을 나타낸 것이고 Fig. 2는 우라늄 베드 단면을 나타낸 것이다. 우라늄 베드는 1차 용기, 열 차폐체 및 2차용기로 구성되어 있다. 1차 용기 내에 수소 동위원소 저장재인 우라늄이 191.1 g 저장되어 있다. 1차 용기 내압 설계치는 4000 kPa이다. 1차 용기 진공 설계치는 1.3332×10^{-7} kPa이다. 2차 용기 내압 설계치는 500 kPa이다. 2차 용기 진공 설계치는 1.3332×10^{-7} kPa이다. 1차용기의 열



Fig. 1 Front view

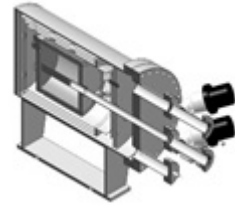


Fig. 2 Sectional view

전달을 향상하고 수소 동위원소 탈장온도에 의한 우라늄과 철간 용융반응을 방지하기 위하여, 1차 용기 내에 구리 원통을 브레이징 하였다. 수소 동위원소 탈장을 위하여 1차 용기 외면에 흡을 가공하여 코일히터 (2kW × 2)를 설치하였다. 코일히터와 1차 용기 외면 간 열전달을 촉진하기 위하여 브레이징을 수행하였다.

코일히터의 외경은 6.35 mm이고 코일히터 피복재는 SUS 316이다. 수소측정 탱크에서 수소 동위원소를 1차 용기 내로 넣기 위한 다공성 금속분말 필터 유입배관(material: 316L)을 사용하였다. 1차 용기에 저장된 수소동위원소를 수소측정 탱크로 배출하기 위한 다공성 금속분말 필터 유출배관(material: 316L)을 사용하였다. 수소 동위원소를 저장하는 우라늄 온도를 측정하기 위하여 1차 용기 내에 열전대(diameter: 1/8 inch, sheath: SUS316, K-type)를 설치하였다. 코일히터 온도를 측정하기 위하여 1차 용기 벽 내에 설치하였다. Fig. 3은 우라늄 베드 내부구조를 나타낸 것이다.

2.2 측정방법

Fig. 4는 우라늄 베드 수소 동위원소 흡·탈장 시스템이다. 이 시스템은 우라늄 베드, 수소측정탱크, 매니폴드, 온도/압력 모니터링 패널, 히터온도제어 패널,

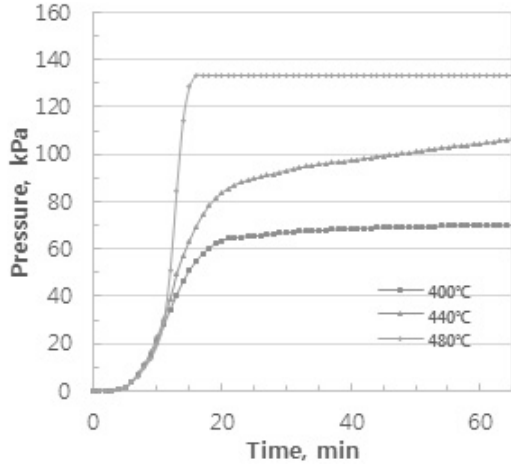


Fig. 6 Pressure vs. temperature without a dry pump

온도가 높은 것의 탈장이 탈장온도가 낮은 것의 탈장보다 다소 탈장이 빠르게 진행하였다.

Fig. 6은 드라이 펌프를 사용하지 않는 경우 탈장 온도에 따른 우라늄 베드 1차 용기 압력을 나타낸 것이다. 수소탈장 10분부터 1차 용기 압력이 급하게 증가하다가 탈장 20분부터 압력증가가 둔화하는 경향을 보였다. 탈장온도 400°C 및 480°C 결과는 탈장 약 15분부터 우라늄 베드 1차 용기 압력증가가 둔화하는 경향을 보인 반면, 440°C 결과는 압력이 증가하는 양상을 보였다. 이는 그 온도제어가 오 작동되어 실험 진행 중 다시 440°C로 온도를 제어 한 것에 기인한 것으로 생각된다.

3.2 드라이 펌프를 사용하는 경우 탈장온도에 따른 수소탈장 특성

Table 2는 우라늄 베드 수소 탈장 85%에서 수소 탈장온도에 따른 수소 탈장률 및 탈장시간을 나타낸 것이다. 탈장온도가 증가함에 따라, 수소 탈장률은 점차 증가 하였으나 탈장시간은 대체로 감소하는 경향을 나타내었다.

드라이 펌프를 사용한 경우 탈장온도에 따른 우라늄 베드 수소 탈장률은 드라이 펌프를 사용하지 않

Table 2 Effect of desorption temperature on delivery rates with a dry pump

Temperature (°C)	Delivery (85%)	
	Rate (Pa·m ³ /sec)	Time (min)
400	1.909	22.3
420	1.968	21.5
440	1.930	22.4
460	2.306	18.5
480	2.867	14.7

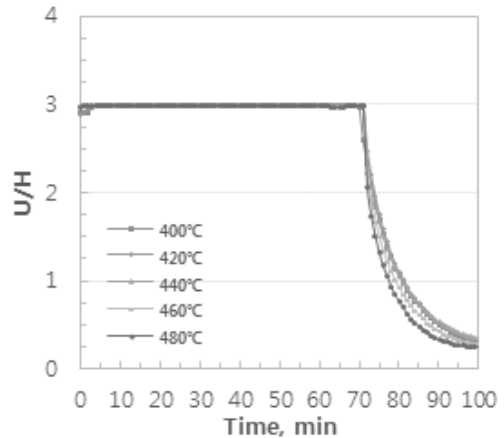


Fig. 7 Atomic ratio on temperature with a dry pump

는 경우의 수소 탈장률보다 다소 크게 나타났다.

Fig. 7은 드라이 펌프를 사용한 경우 탈장온도에 따른 우라늄에 대한 수소비율 (H/U)을 나타낸 것이다. 각 수소탈장온도에서 70분 가열 후, 우라늄 베드 1차 용기 밸브 열어 탈장을 수행하였다. 모든 탈장온도에서 1차 밸브를 여는 순간부터 10분 내 수소 탈장이 빠르게 진행하다가, 탈장온도가 높은 것의 탈장이 탈장온도가 낮은 것의 탈장보다 다소 탈장이 빠르게 진행하였다.

Fig. 8은 드라이 펌프를 사용한 경우 탈장온도에 따른 우라늄 베드 1차 용기 압력을 나타낸 것이다. 수소탈장 10분부터 1차 용기 압력이 급하게 증가하다가 탈장 20분부터 압력증가가 둔화하는 경향을 보였다. 드라이 펌프를 사용경우와 사용하지 않는 경우에 대하여, 우라늄 베드 수소 탈장온도가 증가함에 따라

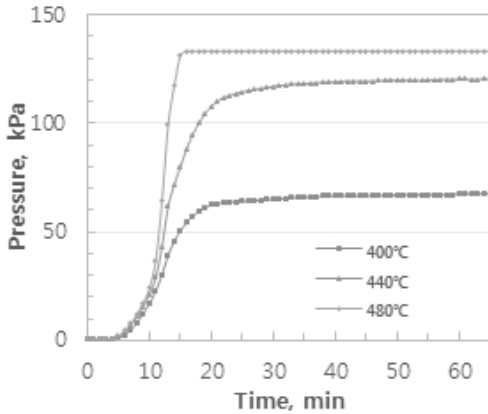


Fig. 8 Pressure vs. temperature with the dry pump

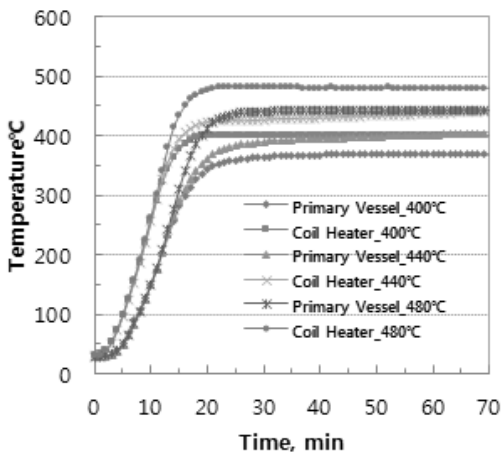


Fig. 9 Temperature of the primary vessel and coil heater

1차 용기 압력은 증가하였으며, 두 경우의 1차 용기 압력 증가는 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 9는 중소형 우라늄 베드 탈장온도에 따른 코일히터 및 1차 용기 온도를 나타낸 것이다. 중소형 우라늄 베드 탈장온도(400, 440, 480°C)에 따른 1차 용기 온도구배는 각각 0.28, 0.30, 및 0.33°C/min 였다. 탈장온도가 증가함에 따라 온도구배가 증가하는 경향을 나타내었다.

중소형 우라늄 베드 탈장온도(400, 440, 480°C)에 따른 코일히터 온도구배는 각각 0.35, 0.37, 및 0.40°C/min 였다. 중소형 우라늄 베드 탈장온도가 증가함에 따라, 온도구배는 증가하는 경향을 나타내었다.

코일히터 온도구배는 1차 용기 온도구배보다 다소 컸다. 그 이유는 코일히터의 열전달이 1차 용기의 열전달 보다 크기 때문이라 생각되었다.

4. 결 론

중소형 우라늄 베드 성능을 분석하기 위하여 중소형 우라늄 베드를 설계하고 제작하였다. 드라이 펌프를 사용한 경우의 수소 탈장률과 드라이 펌프를 사용하지 않는 경우의 수소탈장률을 비교하고 분석하였다. 중소형 우라늄 베드 탈장온도가 증가함에 따라 탈장률은 점차 증가하였으나, 탈장시간은 대체로 감소하는 경향을 나타내었다. 드라이 펌프를 작동한 경우의 중소형 우라늄 베드 탈장률은 드라이 펌프를 작동하지 않는 경우의 탈장률 보다 다소 크게 나타났으나, 드라이 펌프를 작동한 경우의 중소형 우라늄 베드 탈장시간은 드라이 펌프를 작동하지 않는 경우의 탈장시간 보다 다소 짧게 나타났다. 드라이 펌프를 작동하지 않는 경우와 드라이 펌프를 작동한 경우의 중소형 우라늄 베드 탈장온도에 따른 수소 탈장특성을 분석하였으며, 탈장온도가 높은 경우가 탈장온도가 낮은 경우 보다 탈장속도가 다소 빠르게 나타났다. 드라이 펌프를 사용한 경우의 탈장온도에 따른 1차 용기 압력특성과 드라이 펌프를 사용하지 않는 경우의 1차 용기 압력 특성을 분석하였는데, 중소형 우라늄 베드 탈장온도가 증가할수록 1차 용기 압력이 증가하는 경향을 나타내었다. 중소형 우라늄 베드 코일히터의 온도구배와 1차용기의 온도구배를 분석 하였는데, 탈장온도가 증가함에 따라 온도구배가 증가하는 경향을 나타내었다. 중소형 우라늄 베드 코일히터의 온도구배가 1차 용기 온도구배 보다 다소 크게 나타났다. 이는 코일히터의 열전달이 1차용기의 열전달보다 양호한 것으로 판단되었다. 따라서 드라이 펌프를 작동한 경우의 중소형 우라늄 베드 탈장률과 드라이 펌프를 작동하지 않는 경우의 탈장률이 유사하게 나타나므로, 중소형 우라늄 베드 수소

탈장은 드라이 펌프를 사용하지 않아도 가능함을 확인하였다.

후 기

이 연구는 미래창조과학부(2009-0070685) 자금편성에 따라 한국연구재단을 통하여 국가핵융합연구소 및 국가 R&D 프로그램 지원으로 수행되었다.

References

1. H. Chung, D. Chung, J. Lee, D. Koo, J. Lee, C. Lee, K. Seo, J. Yoon, E. Lee, D. Lee, H. Kang, M. Chang, S. Cho, S. Yun, C. Kim, K. Jung, P. Camp, S. Willms, D. Ahn, H. Lee, "Fusion Tritium Research Facilities in KAERI", Fusion Engineering and Design, Vol. 87, 2012, pp. 448-453.
2. H. Chung, M. Shim, H. Yoshida, H. Jin, J. Lee, D. Ahn, K. Kim, K. Song, D. Kim, M. Chang, H. Kang, S. Yun, S. Cho, "Korea's Progress on the ITER Tritium Systems", Fusion Engineering and Design, Vol. 84, 2009, pp. 599-603.
3. M. Glugla, A. Antipenkov, S. Beloglazov, C. Caldwell-Nichols, I.R. Cristescu, I. Cristescu, C. Day, L. Doerr, J.-P. Girard, E. Tada, "The ITER Tritium Systems", Fusion Engineering and Design Vol. 82, 2007, pp. 472-487.
4. M. Glugla, A. Busigin, L. Doerr, R. Haange, T. Hayashi, O. Kveton, R. Laesser, D.K. Murdoch, M. Nishi, R.-D. Penzhorn, H. Yoshida, "The Tritium Fuel Cycle of ITER-FEAT", Fusion Engineering and Design Vol. 76, 2001, pp. 349-353.
5. D. Chung, J. Lee, D. Koo, H. Chung, K. Kim, H. Kang, M. Chang, P. Camp, K. Jung, S. Cho, S. Yun, C. Kim, H. Yoshida, S. Paek, H. Lee, "Hydriding and Dehydriding Characteristics of Small-Scale DU and ZrCo Beds", Fusion Engineering and Design Vol. 88, 2013, pp. 2276-2279.
6. S. Cho, M. H. Chang, S. H. Yun, H. G. Kang, H. Chung, K. M. Song, D. Koo, Y. Kim, J. Lee, S. H. Sohn, K. Kim, and K. J. Jung, "ITER Storage and Delivery System R&D in Korea," IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 38, 2010, pp. 425-433.
7. D. Koo, J. Park, H. Chung, "Experimental Reproducibility Analysis in DU Hydriding", 2014 Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 2014.
8. S. Paek, D. Ahn, K. Kim, S. Yim, H. Chung, "Characteristics of Titanium Sponge for The Storage of Hydrogen Isotopes: II. Hydriding Properties, J. Ind. Eng. Chem., Vol. 10, 2004, pp. 539-543.
9. H. Kang, K. Song, D. Kim, "Fabrication and Test of Thin Double-Layered Annulus Metal Hydride Bed, Fusion Engineering and Design, Vol. 86, 2011, pp. 2196-2199.
10. T. Hayashi, T. Suzuki, M. Yamada, W. Shu, T. Yamanishi, "Safe Handling Experience of a Tritium Storage Bed," Fusion Engineering and Design Vol. 83, 2008, pp. 1429-1432.
11. S. Paek, D. Ahn, K. Kim, and H. Chung, "Characteristics of Reaction Between Hydrogen Isotopes and Depleted Uranium", J. Ind. Eng. Chem., Vol. 8, 2002, pp. 12-16.
12. W. T. Shmayda, A. G. Heics and N. P. Kherani, "Comparison of Uranium and Zirconium Cobalt for Tritium Storage, J of the Less-Common Metals, Vol. 162, 1990 pp. 117-127.
13. G. L. Powell and W. L. Harper, The Kinetics of the Hydriding of Uranium Metal, J. of the Less-Common Metals, (1991) 116-123.
14. M. Shim, H. Chung, S. Cho, H. Yoshida, "Disproportionation Characteristics of a Zirconium-Cobalt Hydride Bed under ITER Operating Conditions", Fusion Science and Technology, Vol. 53, 2008, pp. 830-840.
15. S. Yun, M. Lee, K. Park, Y. Oh, S. Cho, M. Chang, H. Kang, K. Jung, H. Chung, D. Koo, K. Song, D. Kim, "Compressibility Study During Hydride Reaction of ZrCo", Fusion Engineering and Design, Vol. 86, 2011, pp. 2282-2285.

16. R. D. Penzhorn, M. Devillers and M. Sirch, "Evaluation of ZrCo and Other Getters for Tritium Handling and Storage", *J. of Nuclear Materials* Vol. 170, 1990, pp. 217-231.
17. S. Konishi, T. Nagasaki, N. Yokokawa, Y. Naruse, "Development of Zirconium-Cobalt Beds for Recovery, Storage and Supply of Tritium, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 10, 1989, pp. 355-358.
18. H. Chung, D. Chung, D. Koo, 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.
19. D. Koo, 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.
20. 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.
21. 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.
22. J. Park, J. Lee, D. Koo, 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.
23. 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.
24. Y. J. Kim, K. J. Jung, D. S. Koo, J. C. Park, M. G. Jeon, S. H. Yun, H. S. Chung, "Characteristics of a Hydrogen Isotope Storage and Accountancy System", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 26, No. 6, 2015, pp. 541-546.
25. D. S. Koo, J. C. Park, S. H. Yun, S. W. Paek, D. H. Ahn, H. S. Chung, "Dehydriding Performances of a Medium-Scale DU Bed", *Symposium on Fusion Engineering*, Austin, USA, 2015.