

## 우라늄 베드 초기온도 및 헬륨농도의 수소 흡장 영향

구대서<sup>1</sup> · 김연진<sup>2</sup> · 정광진<sup>2</sup> · 윤세훈<sup>3</sup> · 정흥석<sup>4†</sup>

<sup>1</sup>한국원자력연구원 원전제염해체기술개발부, <sup>2</sup>UST, <sup>3</sup>국가핵융합연구소 ITER한국사업단, <sup>4</sup>핵주기공정개발부

### Hydriding Performance in a Uranium Bed depending on the Initial Bed Temperatures and Helium Contents

DAESEO KOO<sup>1</sup>, YEANJIN KIM<sup>2</sup>, KWANGJIN JUNG<sup>2</sup>, SEI-HUN YUN<sup>3</sup>, HONGSUK CHUNG<sup>4†</sup>

<sup>1</sup>KAERI, 989-111 Daedeokdaero, Yuseong, Daejeon, 34057, Korea

<sup>2</sup>Korea University of Science and Technology, Gajeongro 217, Yuseong, Daejeon, 34113, Korea

<sup>3</sup>NFRI, 113 Gwahakro, Yuseong, Daejeon 34133, Korea

<sup>4</sup>KAERI, 989-111 Daedeokdaero, Yuseong, Daejeon, 34057, Korea

**Abstract** >> Korea has been developing nuclear fusion fuel storage and delivery system (SDS) technologies including a basic scientific study on hydrogen storage. To develop nuclear fusion technology, it is necessary to store and supply hydrogen isotopes needed for Tokamak operation. SDS is used for storing hydrogen isotopes as a metal hydride form. The rapid hydriding of tritium is very important not only for safety reasons but also for the economic design and operation of the SDS. In this study, we designed and fabricated a medium-scale getter bed of depleted uranium (DU). The hydriding of DU has been measured by varying the initial temperature (100 - 300°C) of the DU getter bed to investigate the influence of the cooling temperature. Furthermore, we analyzed the effect of a helium blanket on the hydriding performance with 0 - 12% helium content in hydrogen.

**Key words** : Hydrogen isotopes(수소 동위원소), Depleted uranium(손상우라늄), Hydriding(흡장), Cooling temperature(냉각온도), Helium blanket(헬륨블랑켓)

### Nomenclature

SDS : storage and delivery system

DU : depleted uranium

Pa : pascal

kPa : kilo pascal

H/U : hydrogen/uranium

### 1. 서 론

신속한 삼중수소 저장 및 공급을 위하여 원자핵 융합을 위한 삼중수소 저장용기가 필요하다<sup>1-8)</sup>. 안정된 금속 tritide 는 삼중수소를 고 밀도로 저장 위하여 잠재력을 가진 재료로 생각 된다<sup>9)</sup>. 삼중수소의 저장과 공급 및 수소 동위원소의 흡장을 위하여, 손상 우라늄이 널리 제안 되었다<sup>10-11)</sup>. 원자핵 융합 기술개발을 위하여 토카막 운전을 위한 수소 동위원소의 저장과 공급이 필요하다. 삼중수소 저장 및 공급 시스템(storage and delivery system)은 수소 동위원소를

<sup>†</sup>Corresponding author : hschung1@kaeri.re.kr

Received : 2016.4.5 in revised form : 2016.4.29 Accepted : 2016.4.30

Copyright © 2016 KHNES

금속 하이드라이드 형태로 저장하는데 사용된다. 삼중수소의 빠른 흡장을 위하여, 삼중수소 저장 및 공급 시스템의 안전성이나 경제적인 설계가 매우 필요하다<sup>12-17)</sup>.

본 연구에서는 우라늄 베드 삼중수소 저장용기 개발을 위하여, 중소형 우라늄 베드를 설계하고 제작하였다. 우라늄 베드의 초기온도에 대한 수소 동위원소 흡장 및 탈장특성을 측정하였다. 우라늄 베드의 초기온도 및 헬륨 농도 영향에 따른 수소의 흡장 및 탈장특성을 측정하고 그 결과를 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

### 2.1 실험장치<sup>1)</sup>

수소동위원소 흡장 및 탈장 시스템은 우라늄 베드, 수소압력 측정탱크, 수소 공급 및 배기 위한 매니폴드, 온도 및 압력 모니터링 패널, 손상 우라늄 베드 히터 제어 패널, 데이터 획득장치, 헬륨 및 수소가스 배기를 위한 펌프(dry, rotary, turbo molecular) 로 구성된다. Fig. 1은 손상우라늄 베드 모형을 나타낸 것이다. 1차 용기 내에 수소 동위원소 저장재인 우라늄이 191.1 g 저장되어 있다. 베드내의 우라늄은 공기에 의하여 산화되어 수소동위원소의 저장성능이 저하되고 사고를 유발 할 수 있기 때문에, 우라늄 베드 내에 진공을 유지하도록 해야 한다. 우라늄 베드의 1차 용기의 열전달을 향상하고 우라늄 베드의 탈장온도에 의한 우라늄과 철간 용융반응을 방지하기 위하여, 우라늄 베드의 1차 용기 내에 구리 원통을 브레이징 하였다. 또한 우라늄 베드의 코일히터와 1차 용기의 외면간의 열전달을 촉진하기 위하여 브레이징을 수행하였다. 수소 동위원소의 탈장을 위하여 1차 용기의 외면에 흡을 가공하여 코일히터(2kW × 2)를 설치하였다.

수소압력측정 탱크에서 우라늄 베드의 1차 용기내로 수소 동위원소를 공급하기 위하여 다공성 금속분

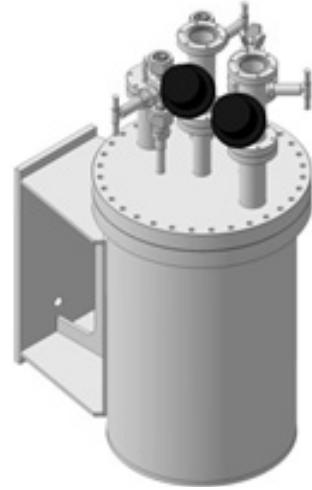


Fig. 1 A model of a DU bed

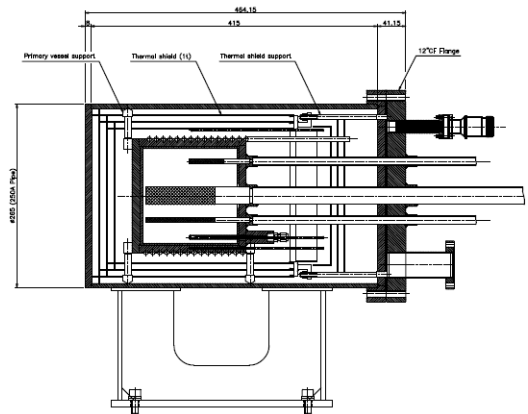


Fig. 2 A DU bed assembly

말의 필터 유입배관(material: 316 L)을 사용하였다. 또한 우라늄 베드의 1차 용기에 저장된 수소동위원소를 수소측정 탱크로 배출하기 위하여 다공성 금속 분말의 필터 유출배관(material: 316 L)을 사용하였다. 수소 동위원소를 저장하는 우라늄 베드의 온도를 측정하기 위하여 1차 용기 내에 열전대를 설치하였다<sup>1)</sup>. Fig. 2는 우라늄 베드의 내부구조를 나타낸 것이며 우라늄 베드의 1차 용기, 2차 용기 및 열 차폐체로 구성된다. 1차 용기에서는 수소동위원소의 흡장과 탈장이 수행되고, 2차 용기는 우라늄 베드의 수소 탈장 수행할 때에 높은 우라늄 베드의 온도를 냉각하



Fig. 3 A experimental apparatus of a DU bed<sup>1)</sup>

기 위하여 사용된다. 또한 열 차폐체는 우라늄 베드의 히터 가열시 그 열이 우라늄 베드의 2차 용기로 전달을 방지하여 안전을 유지하기 위하여 사용된다. Fig. 3은 우라늄 베드 수소 동위원소 흡탈장 시스템 사진이며, 수소압력 측정탱크, 수소 공급 및 배기 위한 매니폴드, 온도 및 압력 모니터링 패널, 우라늄 베드 히터 제어 패널, 데이터 획득장치 등으로 구성된다.

## 2.2 측정방법

본 실험을 수행하기 전에 우라늄 베드를 30분 동안 450°C 까지 승온하고 그 후 450°C에서 5시간 진공 처리과정을 수행 하였다. Fig. 4는 우라늄 베드의 진공 처리과정을 수행 할 때의 우라늄 분말, 열차폐체 및 히터의 온도를 나타낸 것이다. 수소압력측정 탱크에 수소 1 bar를 충전하여 실온에서 우라늄 베드에 수소 흡장하였다. 수소 흡장 후 우라늄 베드로부터 수소압력측정 탱크로 수소 탈장을 수행하였으며, 그 절차는 먼저 우라늄 베드를 실온에서 탈장온도 40°C까지 10분 동안 예열하고, 그 온도에서 60분 가열 하였다. 마지막으로 수소 유출배관의 밸브를 열어 우라늄 베드의 1차 용기에서 탈장하는 수소를 수소 측정 탱크에 저장하였다. 우라늄 베드의 초기온도에 대한 영향을 살펴보기 위하여 우라늄 베드를 가열하여

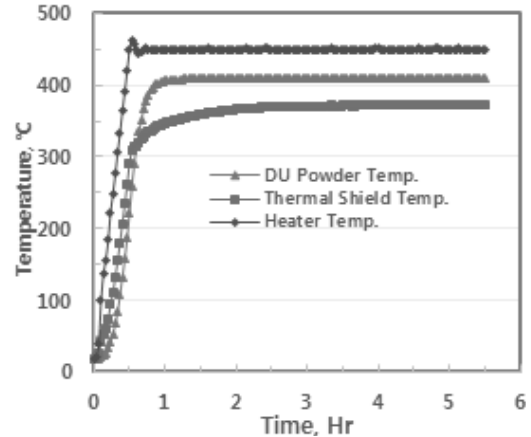


Fig. 4 Vacuum annealing for dehydrating

초기온도를 100°C, 200°C 및 300°C 도로 조절하고 앞에서 언급한 실온에서의 흡장 및 탈장과 같은 실험을 수행하였다. 한편 헬륨농도의 영향을 조사하기 위하여 먼저 농도 6%의 헬륨(수소 1 bar (760 torr)의 6% 헬륨 혼합)을 우라늄 베드에 흡장하였으며, 탈장은 앞에서 언급한 바와 같은 과정으로 수행 하였다. 마지막으로 우라늄 베드의 수소 유출배관의 밸브를 열어 1차 용기에서 탈장하는 수소가스 수소 측정 탱크에 저장하였다. 헬륨 농도 9% 및 12% 실험도 헬륨 농도 6%의 실험과 같은 절차로 수행하였으며, 측정자료는 Labview (v. 8.6) 사용하여 저장하고 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 토의

### 3.1 베드 초기온도에 따른 수소흡장/탈장 특성

Table 1은 우라늄 베드 초기온도에 따른 수소 동위원소 흡장률 및 탈장률을 나타낸 것이다. Table 1에서 초기온도가 증가함에 따라 흡장률과 탈장률은 감소하는 경향을 나타내었으며 흡장률이 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 우라늄 베드의 초기온도가 증가함에 따라 90% 흡장 및 탈장이 이뤄지는 시간은 각각 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 우라늄 베

**Table 1** Hydriding/dehydriding rates at different initial temperatures of the DU bed

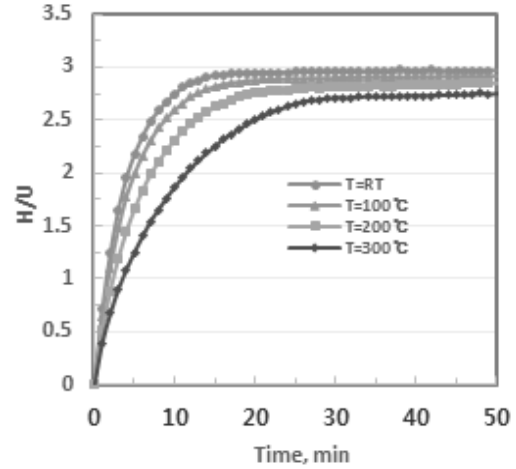
Temperature (°C)	Hydriding (90%)		Dehydriding (90%)	
	Rate (Pa·m <sup>3</sup> /sec)	Time (min)	Rate Pa·m <sup>3</sup> /sec)	Time (min)
RT	5.085	9.35	1.061	44.75
100	4.057	11.73	1.040	45.56
200	2.733	17.33	1.010	46.91
300	1.681	28.41	0.913	51.91

드의 초기온도가 낮은 조건에서 수소 동위원소 흡장을 수행하는 것이 수소 동위원소 흡장률을 향상시키는 방안임을 알 수 있다.

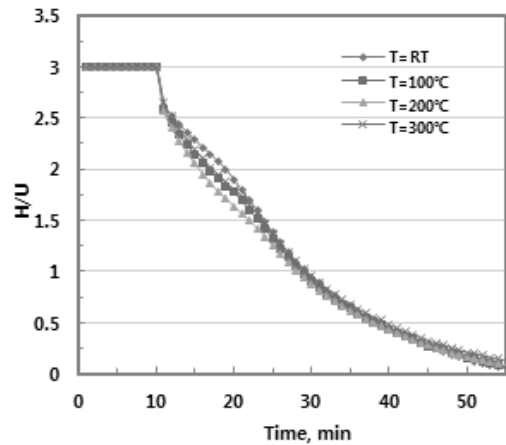
Fig. 5는 우라늄 베드 초기온도에 따른 수소 동위원소 흡장특성을 나타낸 것이다. 흡장 5분 동안 급격하게 흡장되었으며, 그 후 흡장속도가 점차 느려졌고 흡장 25분 이후부터 평형상태로 진입하였다. 초기온도가 증가할수록 흡장속도는 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 우라늄 베드의 초기온도가 낮은 조건에서 수소 동위원소 흡장을 수행하는 것이 수소 동위원소 흡장률을 향상할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 우라늄 베드 초기온도에 따른 수소 동위원소 탈장특성을 나타낸 것이다. 10분간 우라늄 베드의 히터를 예열한 후, 우라늄 베드의 수소 유출배관 밸브를 연 순간부터 탈장은 10분 동안 급격하게 진행하였으며, 탈장 30분 경과 후 탈장속도가 점차 줄어들어 탈장 55분 정도에서 탈장은 거의 완료국면으로 진행하였다. 우라늄 베드 초기온도에 따른 탈장의 변화는 탈장 10분 및 15분 정도에서 다소 특성차이를 보였으나, 그 이후 거의 차이가 없었다.

이와 같이 우라늄 베드 초기온도에 따른 수소 동위원소의 흡장속도와 흡장률은 큰 영향을 받음을 확인하였다. 따라서 핵융합로에 연료를 주기적으로 공급하기 위하여, 우라늄 베드의 수소 동위원소의 탈장 후 높은 우라늄 베드 온도를 실온으로 급냉하는 것이 요구된다고 판단된다.



**Fig. 5** Effect of DU bed initial temperature on the hydriding rate



**Fig. 6** Effect of DU bed initial temperature on the dehydriding rate

### 3.2 헬륨 농도에 따른 수소흡장/탈장 특성

Table 2는 헬륨 농도에 따른 수소 동위원소 흡장률 및 탈장률을 나타낸 것이다. Table 2에서 헬륨농도가 증가함에 따라 흡장률과 탈장률은 감소하는 경향을 나타내었으며, 탈장률은 아주 느리게 감소하였다. 헬륨 9% 및 12%에 대한 수소흡장과 수소탈장은 헬륨 농도 영향으로, 90% 수소흡장과 90% 수소탈장이 수행되지 않았다. 헬륨 농도가 증가함에 따라 흡장시간과 탈장시간은 각각 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 7에서 우라늄 베드의 헬륨농도가 증가함

**Table 2** Hydriding/dehydriding rates at different Helium concentration

Helium (%)	Hydriding (90%)		Dehydriding (90%)	
	Rate (Pa·m <sup>3</sup> /sec)	Time (min)	Rate (Pa·m <sup>3</sup> /sec)	Time (min)
0	5.374	8.90	1.122	42.25
3	4.682	9.60	1.097	43.26
6	2.523	17.88	1.089	43.55
9*	-	-	-	-
12*	-	-	-	-

\* : 헬륨 농도 영향으로 90% 수소흡장, 90% 수소탈장되지 않음

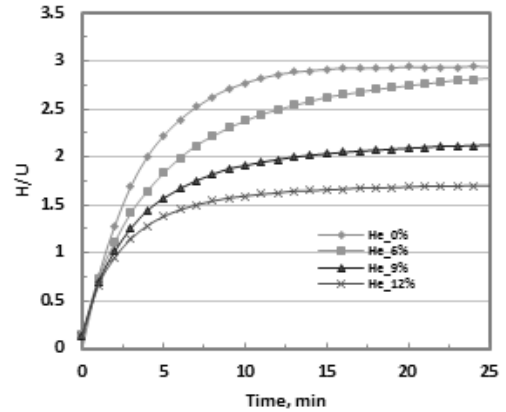
에 따라 흡장성능은 감소하는 경향을 나타내었으며, 우라늄 베드에서 헬륨이 존재하지 않는 조건에서 수소흡장을 수행하는 것이 적절함을 알 수 있다.

Fig. 8은 우라늄 베드 내 헬륨 농도에 따른 수소 동위원소 탈장 결과를 나타낸 것이다. 탈장 10분 동안 우라늄 베드의 히터를 예열한 후, 우라늄 베드의 수소 유출배관 밸브를 연 순간부터 수소탈장은 약 20분 동안 급격하게 진행하였으며, 그 후 수소탈장속도가 점차 감소하였다. 우라늄 베드 내 헬륨농도가 감소할수록 수소탈장 성능이 양호함을 알 수 있다.

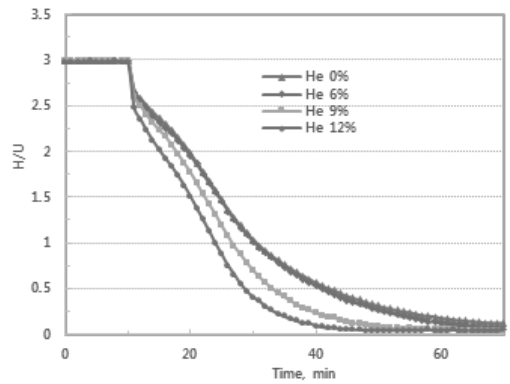
따라서 우라늄 베드의 헬륨 농도에 따른 수소 동위원소 흡장률과 흡장속도는 큰 영향을 받음을 확인하였다. 수소 동위원소 흡장 및 탈장 성능을 제고하기 위하여, 우라늄 베드 내 금속 tritide에 의한 헬륨 발생을<sup>9)</sup> 억제하는 것이 필요하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

우라늄 저장재를 사용한 삼중수소 저장용기개발을 위하여중소형 우라늄 베드를 설계하고 제작하였다. 우라늄 베드의 초기온도에 따른 수소흡장 및 탈장특성을 측정하고 분석하였다. 우라늄 베드의 초기온도에 따른 수소 흡장률과 흡장속도는 큰 영향을 받음을 확인하였다. 핵융합로에 연료를 주기적으로 공급하여 우라늄 베드의 흡장성능을 제고하기 위하여, 우라늄 베드의 탈장 후 높은 우라늄 베드의 온도를 실온으로



**Fig. 7** Effect of Helium concentration on the hydriding rate



**Fig. 8** Effect of Helium concentration on the dehydriding rate

급냉하는 것이 필요하다고 생각된다. 또한 헬륨 농도에 따른 우라늄 베드의 수소 흡장 및 탈장특성을 측정하고 분석하였다. 우라늄 베드의 헬륨 농도에 따른 수소 흡장률과 흡장속도도 큰 영향을 받음을 확인하였다. 우라늄 베드의 수소 동위원소 흡장 및 탈장 성능을 제고하기 위하여, 우라늄 베드 내 금속 tritide에 의한 헬륨발생을 억제하는 것이 필요하다고 생각된다.

#### 후 기

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

## References

1. D. Koo, Y. Kim, S. Yun, H. Chung, "Dehydriding Performance in a Depleted Uranium Bed", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, 2016, pp. 22-28.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. M. Shim, H. Chung, H. Yoshida, H. Jin, J. Lee, K. Song, M. Chang, H. Kang, S. Yun, S. Cho, "Hydriding/Dehydriding Characteristics on Fast Heat Transfer Response ZrCo bed for ITER", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 84, 2009, pp. 1763-1766.
7. M. Shim, H. Chung, H. Yoshida, H. Jin, M. Chang, S. Yun, S. Cho, "Initial Test Results of a Fast Heat Transfer Response ZrCo Hydride Bed", *Fusion Science and Technology*, Vol. 56, 2009, pp. 856-860.
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, No. 4, 2004, pp. 539-543.
9. R. Lässer, "Tritium and Helium-3 in Metals", 1989, pp. 112-114.
10. 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.
11. G. L. Powell and W. L. Harper, "The Kinetics of the Hydriding of Uranium Metal", *J. of the Less-Common Metals*, 1991, pp. 116-123.
12. 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.
13. 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.
14. H. Kang, Soo, 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.
15. 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.
16. 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, No. 3, 2010, pp. 425-433.
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.