

수평식 이중원통형 ZrCo 용기 내 수소 흡탈장 및 열전달 모델링

박종철¹ · 이정민¹ · 구대서¹ · 윤세훈² · 백승우¹ · 정흥석^{1†}

¹한국원자력연구원 핵주기공정개발부, ²국가핵융합연구소 ITER한국사업단

Hydrogen Absorption/Desorption and Heat Transfer Modeling in a Concentric Horizontal ZrCo Bed

JONGCHEOL PARK¹, JUNGMIN LEE¹, DAESOO KOO¹, SEI-HUN YUN²,

SEUNGWOO PAEK¹, HONGSUK CHUNG^{1†}

¹KAERI, 989-111 Daedeokdaero, Yuseong, Daejeon 305-353, Korea

²NFRI, 113 Gwahakro, Yuseong, Daejeon, 305-353, Korea

Abstract >> Long-term global energy-demand growth is expected to increase driven by strong energy-demand growth from developing countries. Fusion power offers the prospect of an almost inexhaustible source of energy for future generations, even though it also presents so far insurmountable scientific and engineering challenges. One of the challenges is safe handling of hydrogen isotopes. Metal hydrides such as depleted uranium hydride or ZrCo hydride are used as a storage medium for hydrogen isotopes reversibly. The metal hydrides bind with hydrogen very strongly. In this paper, we carried out a modeling and simulation work for absorption/desorption of hydrogen by ZrCo in a horizontal annulus cylinder bed. A comprehensive mathematical description of a metal hydride hydrogen storage vessel was developed. This model was calibrated against experimental data obtained from our experimental system containing ZrCo metal hydride. The model was capable of predicting the performance of the bed for not only both the storage and delivery processes but also heat transfer operations. This model should thus be very useful for the design and development of the next generation of metal hydride hydrogen isotope storage systems.

Key words : Nuclear fusion(핵융합), Hydrogen storage bed(수소저장용기), Metal hydride(금속수소화물), Zirconium cobalt(지르코늄 코발트), Modeling(모델링)

1. 서 론

현대 사회에서 에너지 문제는 매우 심각하며, 각 국마다 에너지를 얻기 위한 기술들을 개발하기 위해 많은 투자가 이뤄지고 있고 연구개발에도 박차를 가

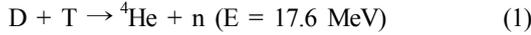
하고 있는 실정이다. 이러한 차세대 에너지원들 중, 핵융합 에너지는 여러 각국이 관심을 가지고 있으면서, 국제적인 공동연구가 이루어지고 있는 분야이다. 핵융합 발전은 기존의 핵분열 발전과는 달라 고준위 폐기물을 전혀 발생시키지 않기 때문에 차세대 원자력 에너지원으로써 각광을 받고 있다. 핵융합발전의 원료로는 수소의 동위원소인 중수소 (deuterium, D) 와 삼중수소 (tritium, T)가 사용이 되는데 일반적으로는 중수소와 삼중수소가 융합하여 헬륨이 나오는

[†]Corresponding author : hschung1@kaeri.kr

[접수일 : 2013.7.3 수정일 : 2013.8.13 게재확정일 : 2013.8.31]

Copyright © 2013 KHNES

다음의 반응이 이루어진다¹⁾.



수소는 기체이기 때문에 일정 용기에 많은 양을 보관할 수 없을 뿐만 아니라 폭발의 위험성이 있기 때문에, 저장의 한 방법으로 수소 저장 합금을 이용하여 수소를 저장시키는 방법을 사용한다. 수소 저장 합금에는 U, ZrCo 등 여러 가지가 있는데^{2,7,8, 19-23)} 본 논문에서는 ZrCo에 의한 수소 흡탈장 및 열전달현상을 모델링작업을 통해 모사(Simulation)해 보았다. 수소 저장 합금의 특징은 상온에서는 수소를 흡장하였다가 온도가 올라가게 되면 수소를 탈장시켜 배출해낸다는 것이다. 즉 온도를 높이고 낮춤으로서 수소를 저장시켰다 다시 배출시킬 수 있는데, 이 과정에서 가열 및 냉각 기술이 중요하게 된다. 가열기술의 경우 히터를 사용하는 것이 일반적이지만, 냉각 기술의 경우 아직 정형화 된 방법은 없는 실정이다.

따라서 본 논문에서는, 수치적인 모델링 기법을 통하여, 수평적 베드에 대한 흡장 및 탈장 시의 열 및 물질전달 현상에 대한 분석을 수행하였다.

2. 이중원통형 저장용기 수치 모델링

2.1 모델링의 가정

실제 수평형 베드 내부(Fig. 1)¹⁸⁾를 보면 단순한 기하학계로 이루어져 있지 않기 때문에, 해석하기가 매우 까다롭다. 하지만 본 해석에서는 정확도를 기하고자 최대한 내부의 기하학 모형을 계산 항에 포함시켰다. 또한, 해석을 용이하게 하고자 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 수소 기체는 이상기체로 간주한다.
- 2) ZrCo는 다공성 매체로 간주한다.
- 3) 따라서 다공성 매체의 물질 및 열전달 식에 따른다.
- 4) 헬륨의 밀도, 점도, 열전도도 등은 온도에 대한 함수로 나타냈다³⁾. 단, 열용량 값은 상수로 처리하

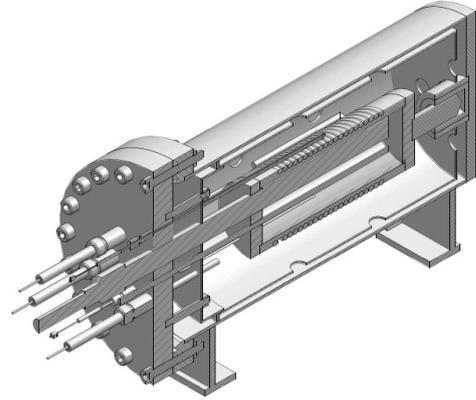


Fig. 1 Bed configuration

였다. 여기서 헬륨은 이차용기 내부에 충전되며, 일차용기를 신속히 냉각하여 다음 사이클의 수소를 흡장하기 용이하도록 하는 역할을 한다. 일차용기 내부에는 수소저장금속인 ZrCo가 들어 있다. 수소는 ZrCo에 흡장되며, 이 때 발열량은 일차용기와 이차용기 사이에 충전된 헬륨을 통한 열전달로 제거 된다. 이차용기는 전체 용기의 외벽을 구성한다. 수소의 탈장은 일차용기 외벽에 브레이징된 열선 가열로 수행되며, 이때는 열손실을 최소화 하기 위해 이차용기 내부의 헬륨은 제거 되어 진공을 유지한다(Fig. 1).

5) 전도에 의한 열 손실 값은 무시하였다.

위와 같은 가정에 따라 모델링 및 해석을 진행하였다.

2.2 흡장 및 탈장에 관한 보존 방정식

일반적으로 금속수소화합물의 경우, 분체이거나 파우더 형태인 경우가 많은데, 때문에 해석할 때, 다공성 매체로 해석하게 된다. 일반적으로 수소의 흡탈장에 사용되는 식들은 다음과 같다^{4,5)}.

- Hydrogen in absorption :

$$\phi \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (V_g \cdot \rho_g) = -\dot{m} \quad (2)$$

- Hydrogen in desorption :

$$\phi \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla (V_g \cdot \rho_g) = \dot{m} \quad (3)$$

여기에서 V_g 의 경우 Kozeny-Carman Equation으로 알려진 다음의 식으로 구한다⁷⁾.

$$V_g = -\frac{K}{\nu} \cdot \nabla P, \quad K = \frac{D_p^2 \cdot \phi}{180(1-\phi)^2} \quad (4)$$

여기서 D_p 는 입자의 직경, K 는 투과도, ϕ 은 공극률, ν 는 동점도를 나타낸다.

우변의 \dot{m} 항의 경우, 다음의 식으로 나타내어진다^{4,5,9)}.

- In absorption :

$$\dot{m} = C_a \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \ln\left(\frac{P_f}{P_e}\right) \rho_g^2 \quad (5)$$

- In desorption :

$$\dot{m} = C_d \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \frac{P_f - P_e}{P_e} \rho_g \quad (6)$$

여기에서, E_a 와 E_d 는 각각 흡장과 탈장시의 활성화 에너지, C_a 와 C_d 는 각각 흡장과 탈장시의 속도 상수 값, R 은 기체상수, T 는 절대 온도, P_f 는 최종 압력, P_e 는 평형 압력, ρ_g 는 기체의 밀도를 나타낸다. 평형 압력(P_e)은 흡장 반응에는 Devillers¹⁶⁾의 식, 그리고 탈장 반응에는 Yoo⁵⁾의 식을 이용하여 산출하였다.

2.3 수평형 이중원통 베드의 열전달

2.3.1 복사 열전달

1차 용기와 2차 용기 사이에 아무런 매체도 없을 때에는 복사의 형태로 1차 용기에서 2차 용기로 열이 전달되게 된다. 복사의 기본 식은 다음과 같다¹⁰⁾.

$$Q = AF\epsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (W) \quad (7)$$

(7)의 식은 원통의 양 옆면의 복사를 구하는 식으로 사용하였다. F 는 view factor라고 하는 복사 인자이며, 본 논문에서는 Cengel¹⁰⁾을 참조하여 F 값을 구하였다. 원통의 둘레면 부분의 복사 열전달 식은 다음의 식을 이용하였다.

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1} + \frac{1}{A_1F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2\epsilon_2}} \quad (W) \quad (8)$$

위의 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\rho C_p V \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1} + \frac{1}{A_1F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2\epsilon_2}} \quad (W) \quad (9)$$

2.3.2 대류 열전달

대류 열전달의 경우 내부를 평행한 concentric cylinder로 설정하였다. Concentric cylinder의 경우 열전달 식은 다음과 같다¹⁰⁾.

$$\dot{Q} = \frac{2\pi k_{eff}}{\ln(D_o/D_i)} (T_i - T_o) \quad (10)$$

식 (10)에서 k_{eff} 는 다음의 식 (11)로 구할 수 있다.

$$\frac{k_{eff}}{k} = 0.386 \left(\frac{\text{Pr}}{0.861 + \text{Pr}} \right)^{0.25} (F_{cyl} Ra_L)^{0.25} \quad (11)$$

기하학적 인자인 F_{cyl} 는 식 (12)로 구할 수 있다.

$$F_{cyl} = \frac{[\ln(D_o/D_i)]^4}{L_c^3 (D_i^{-0.6} + D_o^{-0.6})^5} \quad (12)$$

식 (11)은 $0.7 \leq \text{Pr} \leq 6000$, 그리고 $100 \leq F_{cyl} Ra_L \leq$

10⁷의 범위에서 사용되어진다. 만약 $F_{cyl}Ra_L \leq 100$ 이면, 자연 대류의 흐름은 무시할 수 있을 정도로 작아져 $k_{eff}=k$ 가 된다.

3. 해석 결과 및 토론

3.1 수소 흡장 모델 모사 결과

식 (5)와 (6)을 압력에 대한 식으로 다시 쓰면 다음과 같이 된다⁹⁾.

- In absorption :

$$\dot{m} = C_a \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \ln\left(\frac{P_f}{P_e}\right) P^2 \quad (13)$$

- In desorption :

$$\dot{m} = C_d \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \frac{P_f - P_e}{P_e} P \quad (14)$$

따라서 식 (2)와 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- Hydrogen in absorption :

$$\phi \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla(V_g \cdot P) = -\dot{m} \quad (15)$$

- Hydrogen in desorption :

$$\phi \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla(V_g \cdot P) = \dot{m} \quad (16)$$

여기서 $V_g=0$ 이므로 위의 식을 압력에 대하여 풀면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

- Hydrogen in absorption :

$$P = \left(\frac{1}{P_o} + \frac{C_a}{\phi} \ln\left(\frac{P_f}{P_e}\right) t \right)^{-1} \quad (17)$$

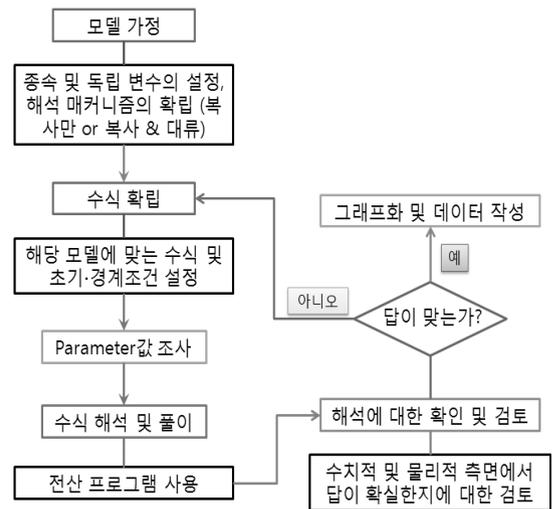
- Hydrogen in desorption :

$$P = P_o \left(1 - \exp\left(-\frac{C_d}{\epsilon} \cdot \frac{P_f - P_e}{P_e} \cdot t\right) \right) \quad (18)$$

Table 1 Physicochemical properties(Set-Set value, Calculated value)

Description	Value	Ref.
냉각 초기온도(T ₀)	500°C	Set.
최종 온도(T _f)	25°C	Set.
흡장 속도 상수(C _a)	2.0316x10 ⁻⁵ /kPa•s	Calc.
탈장 속도 상수(C _d)	1.411x10 ⁻⁴ /s	Calc.
활성화 에너지(E)	13100J/mol	Calc.
수소의 비열(C _{p,g})	14.89kJ/mol•K	[11]
ZrCo의 비열(C _{p,m})	0.63kJ/mol•K	[12]
ZrCo의 열전도도(k _m)	3.013W/m•K	[12]
ZrCoH2.8 열전도도(k _{mh})	0.524W/m•K	[12]
ZrCo의 공극률(φ)	0.629	[13]
Steel의 밀도(ρ _{steel})	8000kg/m ³	[14]
Steel의 비열(C _{p,steel})	0.502kJ/mol•K	[14]
Steel의 열전도도(k _{steel})	15.9W/m•K	[14]
Emissivity(ε)	0.54	[15]

Table 2 Modeling procedure



여기에 근거하여 수소 흡장 및 탈장의 과정을 모델링(Table 1, 2) 하면 Fig. 2와 같은 그래프가 나오게 된다. 여기에서, 흡장시 초기 압력은 102.548kPa, 평형 압력은 1.7116×10³Pa¹⁶⁾이며, 탈장 시 최종 압력은 83.778kPa, 평형 압력은 7378.5Pa⁵⁾이다. 흡장의 경우 90% 흡장되는데 142초, 99% 흡장되는데 1562초가 걸릴 것으로 계산되었으며, 탈장의 경우 90%

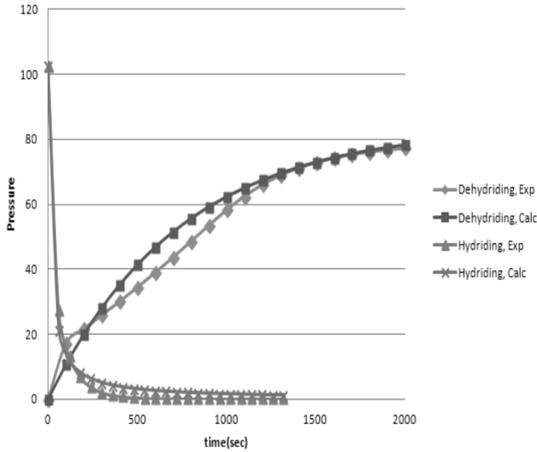


Fig. 2 Experimental and simulated performance of the bed

탈장되는데 1691.83초, 99% 탈장되는데 3383.67초가 걸릴 것으로 계산되어졌다. 흡장의 경우 처음에는 매우 빠르게 진행되다가 어느 순간을 지난 이후부터는 매우 느리게 진행이 되는 반면, 탈장의 경우에는 그 정도가 완만하다는 것을 그래프를 통해 볼 수 있다.

한편, Fig. 2의 실험 데이터와의 비교에서 볼 수 있듯이 흡장과 탈장 모두 실제 실험 결과와 상당히 잘 일치한다는 것을 알 수 있었다. 이 때 일치의 척도는 결정계수(coefficient of determination) R^2 값으로 표현되는데 R^2 값이 1이면 완벽한 일치, 0.98 이상이면 사실상 일치함을 나타낸다. 흡장의 경우, R^2 값이 0.994였고, 탈장의 경우는 0.988이었는데, 이는 실험결과와 모델링 결과가 매우 잘 일치한다는 것을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

3.2 수평형 이중원통 베드의 열전달 모델링 결과

수평형 이중원통 내부의 열전달에 대한 모델링은 크게 복사에 의한 경우와 대류에 의한 경우, 두 가지로 나누어서 진행하였다. 대류의 경우 이중 원통 사이의 공간에 He가스가 $P=380\text{torr}$ 와 $P=760\text{torr}$ 의 압력으로 채워져 있을 때를 가정하여 모델링을 진행하였다. 이전의 연구에서 수직형 베드에서의 열전달 모델링을 수행한 결과 실험값과 매우 잘 들어맞는다는

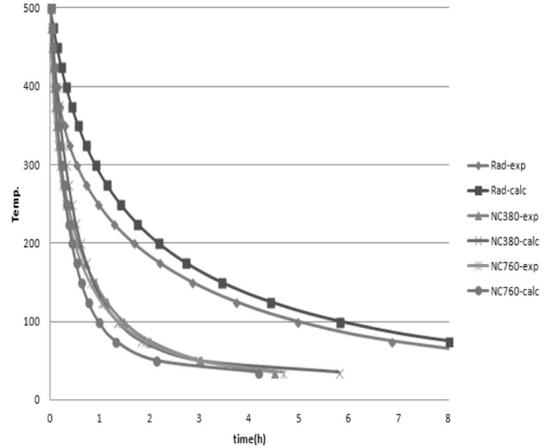


Fig. 3 Cooling temperature transient

결론을 얻었기 때문에 기하학적 배열과 크기에서만 차이가 난다는 점에서 실제와 거의 차이가 없을 것으로 판단하고 있다. 다만, 수직형 베드와 수평형 베드의 경우, 같은 이중 원통이라 하더라도, 기하학적인 차이로 인해 경험식이 전혀 다르게 되므로 여기에서 주의를 해야 한다.

복사와 자연대류에 의한 냉각 그래프를 Fig. 3에 도시하였다. 그래프에서 알 수 있듯이, 실험값과 모델링 값이 상당히 정확하게 일치하는 것을 알 수 있다. 복사, 380 및 760torr 에서의 자연대류에서 각각의 R^2 값을 보면, 0.998, 0.973, 0.983으로 상당히 정확하게 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 위의 그래프를 보면 복사에 의해서만 냉각이 이루어질 때 가장 냉각이 느리게 진행되어지며, 헬륨압력이 760torr일 때, 냉각속도가 가장 빠른 것으로 나타났다. 실제로 복사에 의해서만 냉각이 이루어질 경우 35°C까지 냉각되는데 걸리는 시간은 17.06시간으로 계산되어졌으며, $P_{He}=380\text{torr}$ 에서 자연대류에 의한 냉각이 더해졌을 때에는 5.8시간, $P_{He}=760\text{torr}$ 에서는 4.18시간으로 계산되어졌다. 계산 결과로 봤을 때, 이중원통의 냉각에서는 복사에 의해서는 냉각이 거의 되지 않고, 자연대류에 의해서 대부분의 냉각이 이루어지는 것으로 조사되었다. 이는 온도가 매우 높은 조건이 아니라면, 복사에 의해서는 일반적으로 냉각이 매우 더

디게 이루어진다는 것을 보여주는 것이다.

4. 결 론

수평원통형 bed에서 ZrCo에 의한 수소 흡탈장에 대한 모델링을 수행하였다. 수소 흡장에서는 수소 압력의 시간당 변화율이 압력의 제곱에 비례하였으며, 탈장에서는 압력 값에 비례하는 것으로 분석되었다. 이를 바탕으로 모델링을 진행한 결과, 수소 흡장시에는 90% 흡장되는데 2.4분, 99% 흡장되는데 26분이 걸리는 것으로 계산되었고, 탈장 시에는 90% 탈장되는데 28분, 99% 탈장되는데 56분이 걸리는 것으로 산출 되었다. 흡장의 경우 탈장에 비해 초기에 훨씬 더 빠르게 진행되어지다 일정 시점 이후에는 매우 느리게 진행되어지는 것을 볼 수 있었으며 이에 반해 탈장은 비교적 천천히 진행되는 것으로 밝혀졌다.

수평형 이중원통형 베드의 열전달에 의한 냉각 모델링에서는 복사만으로 냉각되어질 때 35°C까지 냉각되는데 17.1시간이 걸리는 것으로 조사되었으며, 1차 용기와 2차 용기 사이에 He을 380torr의 압력으로 채워 자연대류에 의한 냉각 메커니즘을 더하면 5.8시간이 걸리는 것으로 계산되어졌다. 압력을 760torr로 올리면 4.2시간으로 냉각시간이 단축되는 것으로 밝혀졌다. 이는 대부분의 열전달이 복사보다는 자연대류에 의해 이루어진다는 것을 말해주는 결과라고 할 수 있다. 또한 본 모델링에서는 전도에 의한 열손실은 무시하였으므로, 이를 고려하면 냉각 시간은 조금 더 단축될 수 있다고 생각된다.

모델링 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치하였으며, 향후 본격적인 수소저장용기 설계용 프로그램에의 활용이 기대된다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부와 산업통상자원부의 국제핵융합실험로 공동개발사업 (NRF 2013- 000137) 및 국가핵융합연구소의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. K. S. Krane, "Introductory Nuclear Physics", John Wiley & Son, 1988 pp. 529-530
2. M. Shim, H. Chung, H. Yoshida, H. Jin, J. Lee, K. Song, M. Chang, H. Kang, S. Yun, and S. Cho, "Hydriding/dehydriding Characteristics on Fast Heat Transfer Response ZrCo Bed for ITER", Fusion Engineering and Design, Vol. 84, 2009, p. 1763
3. H. Petersen, "The Properties of Helium : Density, Specific Heats, Viscosity, and Thermal Conductivity at from 1 to 100 bar and from room temperature to about 1800K", Danish Atomic Energy Commission Research Establishment Risø Report, No. 224, 1970, pp. 1-45.
4. F. Yang, X. Meng, J. Deng, Y. Wang, and Z. Zhang, "Identifying heat and mass transfer characteristics of metal hydride reactor during adsorption-Parameter analysis and numerical study", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, 2008, pp. 1014-1022.
5. H. Yoo, J. Ko, S. Yun, M. Chang, H. Kang, and W. Kim, "A numerical investigation of hydrogen desorption phenomena in ZrCo based hydrogen storage beds", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, 2013, pp. 6226-6233.
6. T. Förde, E. Næss, and V.A. Yartys, "Modelling and Experimental results of heat transfer in a metal hydride store during hydrogen charge and discharge", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, 2009, pp. 5121-5130.
7. R. D. Penzhorn, M. Devillers, and M. Sirch, "Evaluation of ZrCo and other getters for tritium handling and storage", Journal of Nuclear Materials, Vol. 170, 1990, p. 217-231.
8. M. Shim, H. Chung, H. Yoshida, K. Kim, S. Cho, E. Lee, and M. Chang, "Experimental Study on the Delivery Rate and Recovery Rate of ZrCo Hydride for ITER Application", Fusion Science and Technology, Vol. 54, 2008, p. 27.
9. R. D. Penzhorn and M. Sirch, "Hydrogen Sorption

- Rate by Intermetallic Compounds Suitable for Tritium Storage”, *Fusion Technology*, Vol. 28, 1995, pp 1399-1403.
10. Y. A. Çengel. “Heat Transfer : A Practical Approach” 2nd Ed. John Wiley & Son Inc. 2007.
 11. Y. Wang, X. C. Adroher, J. Chen, X. G. Yang, and T. Miller, “Three- dimensional modeling of hydrogen sorption in metal hydride hydrogen storage beds”, *Journal of Power Sources*, Vol. 194, 2009, pp. 997-1006.
 12. M. Shim, H. Chung, H. Yoshida, S. Cho, D. Kim, and M. Ahn, “Heat analysis on the initial reference design of ZrCo hydride beds for ITER”, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 83, 2008, pp. 1433-1437.
 13. H. Kang, S. Cho, S. Yun, M. Chang, H. Chung, and D. Koo. “Fabrication and test of thin double-layered annulus metal hydride bed.”, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 86, 2011, pp. 2196 -2199.
 14. W. D. Callister and D. G. Rethwisch, “Material Science and Engineering - SI version” 8th Ed. John Wiley and Son Inc. 2011.
 15. H. G. Kraus, “Experimental Measurement of Stationary SS 304, SS316L and 8630 GTA Weld Pool Surface Temperatures.” *Welding Research Supplement* July. 1989. pp. 269s-279s.
 16. M. Devillers, M. Sirch, S. Bredendiek-Kämper, and R. D. Penzhorn, “Characterization of the ZrCo-Hydrogen System in View of Its Use for Tritium Storage.” *Chemistry of Materials*, 1990. 2. pp. 255-262.
 17. M. Devillers, M. Sirch, and R. D. Penzhorn. “Solubility of hydrogen and deuterium in ZrCo.” *Journal of Nuclear Materials*, 207, 1993, 53-61.
 18. 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, and H. Leea Hydriding and dehydriding characteristics of small-scale DU and ZrCo beds, *Fusion Eng. Des.* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.04.004>.
 19. H. Chung, D. Chung, D. Koo, J. Lee, M. Shim, S. Cho, K. Jung, S. Yun, “Storage and Delivery of Hydrogen Isotopes”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 3, 2011, pp. 372-379.
 20. H. Chung, K. Kang, M. Chang, S. Cho, W. Kim, J. Nam, D. Kim, K. Song, S. Paek, D. Koo, D. Chung, J. Lee, C. Kim, K. Jung and S. Yun, “Safety Analysis of a Hydrogen Isotopes Process”, *Trans. of the Korean Society of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 3, 2012, pp. 219-226.
 21. D. Koo, H. Chung, D. Chung, J. Lee, S. Yun, S. Cho and K. Jung, “Hydrogen Isotopes Accountancy and Storage Technology”, *Trans. of the Korean Society of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 1, 2012, pp. 49-55.
 22. S. Yun, M. Chang, H. Kang, C. Kim, S. Cho, K. Jung, H. Chung and K. Song, “Tritium Fuel Cycle Technology of ITER Project”, *Trans. of the Korean Society of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 1, 2012, pp. 56-64.
 23. J. Lee, J. Park, D. Koo, D. Chung, S. Yun, S. Paek, and H. Chung, “Rapid Cooling Performance Evaluation of a ZrCo bed for a Hydrogen Isotope Storage”, *Trans. of the Korean Society of Hydrogen Energy*, Vol. 24, No. 2, 2013, pp. 128-135.