

수소저장합금을 이용한 수소저장 기술

박충년

전남대학교 신소재공학부

Hydrogen Storage Technologies Using Hydrogen Storage Alloys

Choong-Nyeon Park

Dept. of Materials Science and Engineering, Chonnam National University
300 Yongbong-Dong, Puk-Ku, Kwangju 500-757, KOREA

Abstract

In this paper it has been compared briefly the hydrogen storage using hydrogen storage alloys with other technologies and introduced the general properties of hydrogen storage alloys. The recent research trends and activities related to hydrogen storage alloys were given here.

1. 서 론

수소는 에너지 매체로서 다른 에너지 매체가 갖지 못한 몇가지 중요한 장점을 가지고 있다. 그 장점을 열거하면 공해가 없다는 점, 중량당 에너지 밀도가 높다는 점, 지구의 70%를 차지하는 물을 분해하여 제조할 수 있어 자원이 무한하다는 점, 대체에너지를 이용하여 쉽게 제조할 수 있다는 점, 장기 저장이 가능하다는 점, 열 및 전기화학적 에너지로의 변환이 용이하고 효율이 높다는 점 그리고 수소의 연소 생성물인 물을 바로 수소 생산의 원료로 사용할 수 있어 자원의 재활용이 가능하다는 점등이다. 그러나 수소는 상온·상압에서 기체로 존재하기 때문에 체적당 에너지 밀도가 매우 낮고 저장·운반이 불편하다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 사용하기 편리하고 경제적인 수소저장 기술의 개발은 수소에너지의 실용화를 위해 우선 해결해야할 중요한 과제이다.

본고에서는 지금까지 개발 사용되어온 수소저장 기술을 간략히 비교 소개하고, 특별히 수소저장 합금을 이용한 수소저장 기술에 대해 수소저장 합금의 기초적 물성, 지금까지 개발된 여러 수소저장 합금의 종류와 특성 및 수소저장 합금에 대한 연구 동향을 중심으로 개괄적인 소개를 하고자 한다.

2. 수소 저장 방법과 저장 특성

지금까지 사용되어온 수소저장 방법을 대별하면 표1과 같으며, 각 수소저장 방법과 수소저장 합금의 종류에 따른 수소저장 용량 및 특성을 표 2에 실었다. 표 1과 2에서 알 수 있듯이 수소저장 합금을 이용한 수소저장 방법은 다른 방법들에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 수소저장 합금의 무게 때문에 중량당 저장 밀도가 낮고, 합금

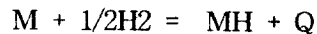
가격이 높으며, 수소 흡수·방출 사이클링에 따른 합금의 퇴화 때문에 사용 횟수가 제한적이라는 것이 아직 문제점으로 남아 있다. 이에 따라 수소저장 특성이 우수한 수소저장 합금을 개발하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

3. 수소 저장 합금의 물성

3.1 수소저장 합금의 수소 저장 원리

수소저장 합금이란 다량의 수소를 가역적으로 흡수(저장)·방출(사용)할 수 있는 능력을 보유한 합금을 말하고, 금속수소화물(metal hydride:MH)이란 수소저장합금과 수소의 화합물로서 수소저장 합금이 수소를 흡수하면 금속수소화물이 된다. 이는 금속이 산소와 반응하여 금속산화물(metal oxide)이 생성되는 것과 같은 개념이다. 이 둘의 차이점은 상온·상압 부근에서 금속산화물은 너무 안정하여 분해하기 어렵는데 반해, 금속수소화물은 분해 즉 수소 방출이 매우 용이하다는 것이다. 따라서 금속산화물은 산소저장 재료로 이용하기 어려우나 금속수소화물은 수소저장 재료로 이용이 가능하다.

수소 저장 합금(M)과 수소 가스가 반응하여 고상의 금속 수소화물(metal hydride:MH)을 형성하는 반응에 대한 반응식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



위 반응은 가역적이고 금속 수소화물의 형성 시에는 반응열Q를 방출하고 분해 시(수소방출 시)에는 반응열 Q를 흡수하게 된다.

3.2 수소저장 합금의 종류

일반적으로 순금속과 수소의 친화력은 다음 주기율표상(표 3)에 나타난 것처럼 3가지로 분류할 수 있다. 즉, 수소의 친화력이 매우 커서 안정한 수소화물을 형성하

는 원소, 수소와의 친화력은 있으나 수소화물을 형성하기 위해서는 매우 높은 수소압력이 필요한 발열반응형 원소 그리고 수소와의 친화력이 거의 없는 흡열반응형 원소가 그것이다. 어떤 금속이 수소저장 재료로 사용되기 위해서는 상온, 상압 부근에서 수소를 가역적으로 흡수, 방출할 수 있어야 한다. 그런데 순금속 수소화물은 너무 안정하고, 다른 순금속들은 수소와의 친화력이 너무 약해 수소저장 재료로 사용하기 어렵다. 따라서 수소저장 합금은 수소와의 친화력이 매우 큰 원소와 친화력이 약한 원소로 구성된 금속간화합물(intermetallic compound)인 경우가 대부분이다.

수소저장 합금의 종류는 매우 다양하나 실용성이 있는 합금을 대별하면 다음의 표 4와 같다.

3.3 압력-조성 등은 곡선 및 수소화 반응에 대한 열역학

수소 저장 합금에 수소 가스가 흡수 또는 방출되는 과정에서 system 내의 수소 가스 압력에 대응되는 합금 내의 평형 수소 농도가 존재하며 이를 도표화한 것이 압력-조성 등은 곡선(pressure-composition isotherm curve)이다. 그림 1은 대표적인 압력-조성 등은 곡선의 개략도를 나타낸 것이다. 수소 압력은 log scale로 표시한 atm 단위이고, 수소 농도는 금속 원자 수에 대한 수소 원자 수의 비(H/M)로 나타낸다. α 상 영역은 금속 내에 수소가 고용체(α)를 형성하면서 흡수되는 단계로서 수소 압력과 수소 농도는 대략 Sivert 법칙을 만족한다. 수소 압력이 더욱 증가하여 고용된 수소가 포화 상태에 이르게 되면 α 상에서 β 상(금속수소화물)으로의 상변태가 일어나며 두 상이 공존하게 된다. 이 $\alpha + \beta$ 영역에서는 수소 압력이 일정하게 유지된 채 β 상의 생성이 지속된다. 이때의 수소 압력을 평탄압력(plateau pressure) 또는 금속수소화물 생성 반응에 대한 평형 수소 압력(P_{eq})이라 부른다. β 상 영역은 상변태가 완료된 후 수소가

다시 β 상 내에 고용된다. 일반적으로 수소 저장 합금의 최대 수소 저장 용량은 β 상에서의 수소 농도로 나타내며, 유효수소저장 용량은 평탄영역에서의 β 상과 α 상의 수소 저장 용량의 차로 나타낸다. 한편, 금속 수소화물 생성 시와 분해시의 평형 수소 압력은 일치하지 않고 생성시의 압력이 높게 되는 hysteresis 현상이 존재한다. 이 hysteresis 현상은 수소 흡수·방출 시 필연적으로 수반되는 격자의 팽창 및 수축에 의한 전위(dislocation)의 생성, 이동 및 불순물에 의한 고착 등 비가역적인 내부 원자 이동에 의해 야기되며 합금의 종류와 조성, 온도에 따라 그 크기가 크게 다르다.

수소 고용이 한계에 이른 α 상(MH α)과 수소 가스가 반응하여 금속수소화물 β 상(MH β)을 형성하는 반응식은 다음과 같이 주어진다.



위 반응에 대한 평형 반응식은

$$\begin{aligned} \Delta G &= \frac{2}{\beta - \alpha} (G_{\text{MH}\beta} - G_{\text{MH}\alpha}) - G_{\text{H}_2} \\ &= \Delta G^\circ - RT \ln P_{\text{eq}} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } \Delta G^\circ &= \frac{2}{\beta - \alpha} (G_{\text{MH}\beta} - G_{\text{MH}\alpha}) - G_{\text{H}_2}^\circ \\ &= \Delta H^\circ - T \Delta S^\circ \end{aligned}$$

따라서 일정한 온도 T에서 반응 (2)의 평형 수소 압력 (평탄압력: P_{eq})은 표준 Gibbs free energy 변화(ΔG°) 또는 표준 반응 enthalpy(ΔH°) 및 entropy(ΔS°) 값에 따라 결정된다. 즉,

$$\ln P_{\text{eq}} = \frac{\Delta G^\circ}{RT} = \frac{\Delta H^\circ}{RT} - \frac{\Delta S^\circ}{R}$$

R: gas constant (3)

수소저장 합금의 수소화 반응은 발열 반응이므로 반응열(ΔH°)은 '-'이다. 따라서 평탄압력(P_{eq})은 온도가 증가함에 따라 증가한다. 또한 일반적으로 고체의 엔트로피는 기체의 엔트로피에 비해 매우 작으므로 수소화 반응에 대한 표준 엔트로피 변화값(ΔS°)은 수소저장 합금의 종류와 무관하게 다음과 같이 거의 일정하다.

$$\Delta S^\circ = \frac{2}{\beta - \alpha} (S_{MH\beta} - S_{MH\alpha}) - S^\circ_{H_2} \approx -S^\circ_{H_2} = -130.5 \text{ J/molH}_2 \cdot \text{K} \quad [1]$$

그림 2에 수소저장 합금의 평탄압력으로부터 수소화 반응에 대한 표준 엔탈피 변화값 (ΔH°)과 표준 엔트로피 변화값 (ΔS°)을 구하는 van't Hoff plot을 나타내었다.

3.4 수소저장 합금의 수소 흡수·방출 과정 및 반응 속도

일반적으로 수소저장합금의 수소 저장 과정을 살펴보면 그림 3과 같이 4단계의 과정을 거쳐 수소를 저장하게 된다.[2] (1)단계는 수소가 합금표면으로 이동해가는 mass transfer의 과정이고 (2)단계는 합금표면에 다다른 수소분자가 수소원자로 분리되어 chemisorption하는 과정이다. (3)단계는 수소가 금속수소화물상(β)을 통하여 확산하는 과정이며 (4)단계는 금속수소화물상(β)과 아직 수소화 반응이 일어나지 않은 상(α)의 계면에서 $\alpha + H_2 \rightarrow \beta$ 의 화학반응(상변태)을 하는 과정이다.

수소가스에 의한 첫 수소화 반응 속도는 합금의 종류, 조성, 표면 산화 상태, 분말의 입도, 온도 및 수소 압력에 따라 크게 변한다. 대개 공기 중에서 분쇄하여 상당 시간 방치한 합금 분말은 표면이 산화되어 수소 분자가 원자로 분리되어 흡착하는 dissociative chemisorption이 크게 억제된다.[3] 이 상태에서의 첫 수소화 반응은 수 시간에서 수 일이 소요되거나 또는 수소화가 불가능한 경우도 있다. 따라서 활성화 열처리를 행하여 표면의 산화 피막을 제거하거나 파괴함으로써 그리고 촉매 효과가 큰 Ni 등 천이 금속을 석출시킴으로써 수소 흡수 속도를 빠르게 해 준다. 열처리 온도는 대개 AB₅계 합금의 경우 100-400°C, AB₂계와 AB계 합금은 400°C 이상, A₂B계 합금은 300-400°C이다. 일단 수소화 반응이 어느 정도 진행되면 격자팽창에 의해 합금이 파괴되어 산화가 일어나지 않은 깨끗한 표면이 생성됨에 따라 수소화 반응속도는 가속

화 된다. 이 후 상온에서 수 차례의 수소 흡수·방출 사이클링을 반복함으로써 분말 입도의 미세화를 통한 깨끗한 표면적의 증가로 인해 수소 흡수·방출에 대한 활성화 효과를 극대화시킨다. 활성화가 충분히 일어난 합금의 수소화·탈수소화 반응의 율속 단계는 열전달 속도가 충분히 큰 경우 대개 dissociative chemisorption으로 알려져 있고,[4] 열전달 속도가 충분히 크지 않거나 합금의 양이 많을 경우 반응열의 방출, 즉 열전달이 율속 단계가 된다. Dissociative chemisorption이 율속 단계일 경우 수소화·탈수소화 반응 속도는 가해진 수소압력과 평탄압력의 차에 비례하게 된다.[4]

3.5 수소 흡수·방출 사이클링에 따른 수소저장 합금의 퇴화

수소저장 합금에 수소를 흡수시켰다가 방출하는 사이클을 반복하면 합금의 수소저장 용량, 평탄압력, 평탄 영역의 기울기(sloping) 및 평탄압력의 분리 등 수소저장 특성이 변하게 된다. 특히 수소저장 용량의 감소는 합금의 사용 수명을 제한하는 바람직하지 않는 합금의 퇴화로 간주된다. 합금의 퇴화는 그 퇴화 요인에 따라 내부적 퇴화(intrinsic degradation)와 외부적 퇴화(extrinsic degradation)로 구분된다.[5] 내부적 퇴화는 수소저장합금이 매우 안정한 수소화합물과 천이금속으로 상분해를 일으킴으로써 발생한다. 상 분해가 일어나는 이유는, 수소저장합금은 수소와 친화력이 매우 큰 원소(La, Ti, Zr, Ca 등)와 친화력이 적은 원소(천이금속)와의 합금으로서 수소가 없는 상태에서는 합금이 안정한 편이나 수소가 존재하게 되면 수소 친화력이 큰 원소가 수소와 결합한 안정한 수소화합물과 천이금속으로 분해되는 것이 열역학적으로 더 안정하기 때문이다.[6] 이러한 상분해 현상은 수소저장합금이 수소를 흡수할 때 방출되는 반응열에 의해 그리고 수소 흡수·방출 시 수반되는 격자 변형에 의해 촉진된다. 외부적 퇴화는 수소저장 합금과 수소가스

중에 존재하는 불순가스와의 반응에 의해 야기된다. 수소가스 중에는 O_2 , H_2O , CH_4 , CO_2 , CO 등 미량의 불순가스가 존재한다. 이들 불순가스는 수소저장 합금과의 친화력이 수소의 그것 보다 더 강하기 때문에 합금 표면에 MO_x , $M(OH)_x$, MCO (M =수소화물 형성 원소) 등의 화합물을 생성하는데 이들 화합물들은 수소저장 능력이 없다. 따라서 수소 흡수·방출 사이클링이 반복되면 합금 분말이 미세화되고 표면적이 매우 커져 표면 산화로 인한 수소저장 용량의 감소는 증가하게 된다. 일반적으로 수소저장합금이 수소를 흡수할 때 격자 부피의 팽창율이 큰 합금일수록 파쇄가 잘 일어나 외부적 퇴화 속도가 빠르다.

3.5 수소저장합금의 응용

수소저장합금의 이용분야는 상당히 넓다. 즉, 수소저장합금의 수소저장성을 이용하는 방법, 수소저장합금이 수소를 흡수, 방출할 시 발생하는 열량을 이용하는 방법, 수소를 에너지원으로 이용하는 방법, 수소의 정제에 이용하는 방법 등을 통해 많은 분야에 응용할 수가 있다. 이와 같은 수소저장합금의 응용분야를 표 5에 요약해 놓았다.

4. 연구 동향

수소저장 합금에 대한 연구는 세월이 흐르면서 주 분야가 바뀌어 왔다. 1970년대에는 수소에너지 저장에 대한 연구가 주류를 이루었으나, 1980년대에 이르러서는 열펌프, 수소 아축기, 수소 분리 및 정제 등 수소화·탈수소화 반응 특성을 이용하는 연구가 인기를 끌었다. 그러다 1990년대에는 Ni-MH 2차전지의 음극재료로서 전극용량 및 사이클 수명을 늘리기 위한 합금 개발 및 표면처리 기술 개발 연구가 거의 대부분을 차지하였다. 그러나 1990년대 후반 Li 2차 전지가 본격 실용화되면서 Ni-MH 전지에 대한 연구 열풍이 점차 식어가고 있다.

한편, 최근에 이르러 휴대용 연료전지 개발이 각광을 받기 시작하면서 연료전지용 수소 저장 용기로서 수소저장 합금 개발에 대한 연구가 활기를 띠고 있다. 수소저장 합금이 휴대용 연료전지의 수소저장 용기로서 실용성을 갖기 위해서는 수소저장 용량이 최소 3 wt%를 넘어야 하는 것으로 인식되고 있다. 따라서 최근의 연구는 주로 본래 수소저장용량이 큰 Mg계와 BCC 고용체 합금 및 이온화합물(알카리금속화합물)에 집중되고 있다. Mg계 합금은 수소저장용량은 매우 높으나 수소 방출 온도가 250-300°C로 너무 높아 이를 낮추는데 주력하고 있고, BCC 고용체 합금은 최대 수소 저장용량은 3 wt% 이상으로 높는데 α 상에 고용되어 방출이 어려운 수소량이 거의 1 wt% 정도로 높아 이 수소의 방출 압력을 높이는 것이 과제이다. 알카리금속의 이온화합물은 수소저장용량은 다른 어떤 재료보다도 높으나 합성방법이 까다롭고 물과 반응시켜야 수소가 발생하며 비가역적이라는 문제가 있다. 따라서 수소화물의 용이한 제조 기술 및 가역적 분해 기술의 개발이 주요 연구 대상이다.

5. 결론

수소저장 합금을 이용한 수소저장 기술은 현재 기술적 측면에서는 실용화 단계에 이르렀으나 중량당 수소저장 용량이 수요자의 요구에 미치지 못해 아직 범용화되지 못하고 있는 실정이다. 그럼에도 불구하고 수소저장 합금이 수소저장 재료로서의 응용 가능성이 높은 것은 수소가스 폭발에 대한 안전성이 그 어느 재료보다도 높고, 합금의 종류가 다양해 성능이 우수한 합금의 개발 가능성이 크다는 것이다. 또한 차세대 전지로 각광을 받게 될 휴대용 연료전지의 실용화가 점차 가까이 다가옴에 따라 이에 부응할 수소저장 수단으로서 고용량 수소저장 합금의 개발이 절실히 필요한 상황이다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 지정 전남대학교
고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터의
연구비 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감
사드립니다.

6. 참고문헌

1. 大角泰章, “水素吸藏合金”, 아그네기술센
타, 동경, 일본(1997) 54

2. J. Y. Lee, S. M. Byun, C. N. Park, J.
K. Park, J. of Less-Common Met.,
87:149-164(1982)

3. Choong-Nyeon Park, Jai-Young Lee,
J. of Less-Common Met., 96:177-182(1984)

4. Choong-Nyeon Park, Jai-Young Lee,
J. of Less-Common Met., 91:189-201(1983)

5. Geun Hong Kim, M. S. Thesis,
KAIST (1986)

6. G. D. Sandrock and P. D. Goodell, J.
Less-Common Metals, 104:159-173(1984)

Table 1 수소 저장 방법과 특성

수소 저장 방법	특 성
기체 수소	<ul style="list-style-type: none"> · 고압(150 기압) 가스용기(50 리터, 55 kg) · 체적당 및 중량당 저장 밀도가 낮다.
액체 수소	<ul style="list-style-type: none"> · -253 ℃, 상압 · 10-14 kw/kg H₂의 액화 에너지 소요 · 증발을 최소화하기 위한 특수 단열용기 필요 · 장기 보관 시 수소 손실 · 체적당 및 중량당 저장밀도가 높다.
활성화 탄소	<ul style="list-style-type: none"> · 저온에서 활성화 탄소의 표면에 수소를 흡착 · 저온 유지 장치(77K) 필요 · 체적당 및 중량당 저장밀도 낮다.
수소 저장 합금	<ul style="list-style-type: none"> · 체적당 수소 저장 밀도가 높다. · 중량당 수소저장밀도가 낮다. · 안전성이 높다. · 수소의 순도가 향상된다. · 수소저장합금의 가격이 높다. · 저장 횟수가 제한적-합금의 퇴화

Table 2 각종 수소저장 방법에 따른 수소저장 용량 및 저장 특성

저장 방법	체적 밀도 ($10^{22}\text{H}/\text{cm}^3$)	체적밀도 비	중량당 수소저장 용량	수소방출압력 과 온도
표준상태의 수소가스	5.4×10^{-3}	1	100.0	
수소 펌프(150기압, 47 리터)	0.8	150	1.2	
액체수소(20K)	4.2	800	100.0	
MgH ₂	6.6	1222	7.6	1(297 ℃)
TiH ₂	9.1	1685	4.0	1(>600 ℃)
VH ₂	10.5	1944	3.8	4(40 ℃)
ZrH ₂	7.3	1352	2.2	1(>600 ℃)
LaH ₃	6.9	1278	2.1	1(1100 ℃)
Mg ₂ NiH ₄	5.6	1037	3.6	1(250 ℃)
TiFeH _{1.9}	5.7	1056	1.8	3(20 ℃)
LaNi ₅	6.2	1148	1.4	2(20 ℃)
MmNi _{4.5} Mn _{0.5} H _{6.6}	6.1	1130	1.5	3(20 ℃)
MmNi _{4.5} Al _{0.25} Co _{0.25} H _{3.4}	4.8	889	1.2	6(20 ℃)

Table 3. Periodic table for hydride forming elements

이온결합		금속결합										공유결합						
1A	2A											3B	4B					
3 Li	4 Be	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> 원자번호 기호 상징 </div>										5 B	6 C					
LH	BeH											B ₂ H ₆						
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si					
NaH	MgH ₂	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B		15 P	16 S						
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V						24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge
KH	CaH ₂	ScH ₂	TiH ₂	VH VH ₂						ZnH ₂	GaH ₂	GeH ₄						
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb						42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn
RbH	SrH ₂	YH ₂ YH ₃	ZrH ₂	NbH NbH ₂						Tc	Ru	Rh	PdH	Ag	CdH	InH InH ₃	SnH ₄	
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	81 Tl	82 Pb
CsH	BaH ₂	below	HfH ₂	TaH	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	HgH ₂	TlH TlH ₃	PbH ₄					

lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
	LaH ₂ LaH ₃	CeH ₂ CeH ₃	PrH ₂ PrH ₃	NdH ₂ NdH ₃	Pm	SmH ₂ SmH ₃	EuH ₂	GdH ₂ GdH ₃	TbH ₂ TbH ₃	DyH ₂ DyH ₃	HoH ₂ HoH ₃	ErH ₂ ErH ₃	TmH ₂ TmH ₃	YbH ₂ YbH ₃	LuH ₂ LuH ₃
actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk						
	AcH ₂	ThH ₂ ThH ₃	PaH ₃	UH ₃	NpH ₂ NpH ₃	PuH ₂ PuH ₃	AmH ₂ AmH ₃	CmH ₂	BkH ₂						

Hydride formers for H₂ storage materials

Exothermic hydride formers

Alloying elements

Table 4 Classifications of various hydrogen storage alloys

Alloy System	Typical Alloys	H Storage Capacity (wt%)	Specific Properties
AB ₅	LaNi ₅ , MmNi ₅	1.2-1.6	low capacity
AB ₂	(Zr,Ti)(Mn,V) ₂	1.7-2.0	difficult activation
AB	TiFe, TiCo,	1.1-2.0	difficult activation
A ₂ B	Mg ₂ Ni, Mg ₂ Cu	2.7-5.5	High temperature
A	Mg	7.6	Too high temperature, slow reaction
BCC solid solution	Ti-V-Cr, Ti-V-Mn	1.6-2.0	Slow reaction
Ionic compound	LiAl	10.6-21.2	H ₂ production by reacting with water

Table 5 Utilization of hydrogen storage alloys

Application	examples of Application
Hydrogen storage	<ul style="list-style-type: none"> * hydrogen storage tank for fuel cell, H₂-car * storage of deuterium and tritium
Energy transformation	<ul style="list-style-type: none"> * Heat pump, heat storage equipment * Chemical engine, H₂ compressor
Separation of hydrogen	<ul style="list-style-type: none"> * separation of hydrogen, deuterium and tritium,
Battery material	<ul style="list-style-type: none"> * Ni-MH battery
Catalytic material	<ul style="list-style-type: none"> * hydrogenation reaction of organic compound
Sensor	<ul style="list-style-type: none"> * temperature sensor, temperature switch

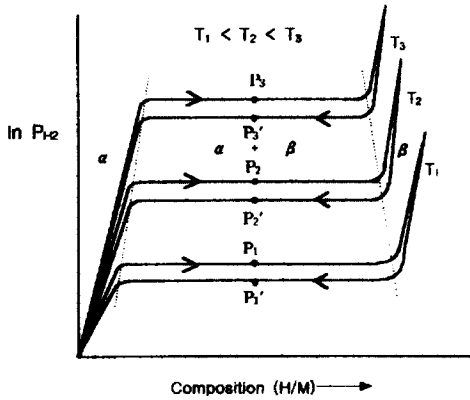


Fig. 1. Typical pressure - composition isotherm in metal-hydrogen system.

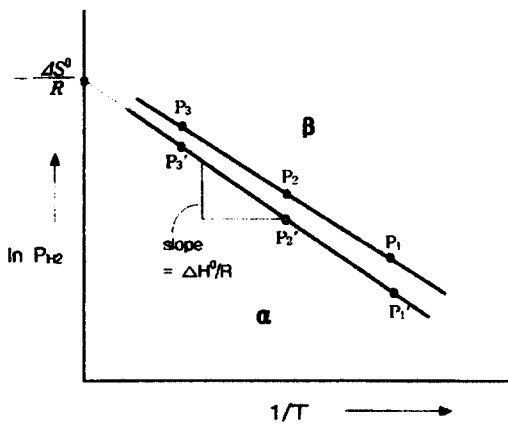
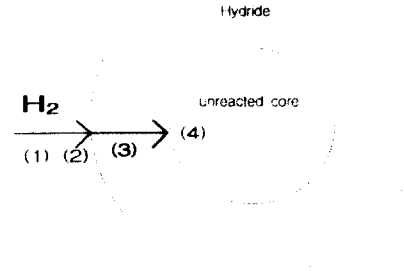


Fig. 2 Van't Hoff plot($M + H_2 \rightleftharpoons MH_2$)



- (1) mass transfer of hydrogen molecules
- (2) dissociative chemisorption of hydrogen molecules on the sample surface
- (3) diffusion of hydrogen atoms through the hydride
- (4) chemical reaction at this interface (α/β)

Fig. 3 Schematic diagram for hydrogen absorption process in hydrogen storage alloy