

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560847

研究課題名(和文)高純度水素精製用5族金属系合金膜の機能設計 - 耐水素脆性と水素透過能の向上にむけて

研究課題名(英文)Functional Design of Group 5 Metal-based Alloy Membranes for Hydrogen Purification toward the Improvement of the Resistance to Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Permeability

研究代表者

湯川 宏 (Yukawa, Hiroshi)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50293676

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「Nb系水素透過合金の設計指針」を広く5族金属(V, Ta)へ展開し、耐水素脆性と水素透過能の特性を向上した5族金属系水素分離膜の新たな設計指針を得ることを目的に研究を行った。

水素の化学ポテンシャルに基づく拡散方程式を展開し、水素透過能の新しい表現を導出した。また、水素化特性、水素の拡散性および水素脆性に及ぼす合金効果を定量的に明らかにした。その結果、水素透過能の新しい表現に基づく水素透過金属膜の設計指針を提案した。

種々のV系水素透過合金の設計を行い、水素透過能の新しい表現に基づく設計指針に従って、優れた耐水素脆性と高い水素透過能を両立した合金膜が設計できることを示した。

研究成果の概要(英文)：The concept for alloy design on Nb-based hydrogen permeable membrane has been expanded widely to group 5 metals, V and Ta, in order to obtain new guideline for the development of novel alloys with higher hydrogen permeability and stronger resistance to hydrogen embrittlement.

A new description of hydrogen permeation has been derived from the diffusion equation based on hydrogen chemical potential. Also, the hydriding properties, hydrogen diffusivity and hydrogen embrittlement have been evaluated quantitatively for V- and Ta-based alloys. As a result, a new concept for alloy design has been proposed based on the new description of hydrogen permeation.

Some V-based hydrogen permeable alloys have been designed and their properties have been examined. It is demonstrated that hydrogen permeable alloy membranes can be designed and developed with the aid of the new concept for alloy design, which exhibit high hydrogen permeability together with strong resistance to hydrogen embrittlement.

研究分野：水素分離金属膜

キーワード：水素透過膜 耐水素脆性 水素透過能 バナジウム タンタル 固溶水素濃度 合金効果 合金設計

## 1. 研究開始当初の背景

ニオブ(Nb)は、水素透過能や高温での機械的性質にも優れているため、高純度水素精製の次世代水素分離膜として高いポテンシャルを有している。しかし、Nb 膜は水素雰囲気に曝すと水素によって激しく脆化して脆性破壊してしまうことが問題である。

この問題の解決に向けて、研究代表者らはこれまでに、高温水素雰囲気中の Nb 膜の機械的性質を調査してきた[1]。その結果、水素濃度の増加に伴って Nb 膜が延性から脆性へと遷移する特異な現象を見出した。このとき、水素化物の析出や相転移が起こっていないことが水素中その場 XRD 測定により確認されている。

研究代表者らは、これらの知見に基づいて『Nb 系水素透過合金の設計指針』[2]を提唱し、水素脆化することなく実用 Pd-Ag 合金を凌駕する高い水素透過性能を発揮する新規 Nb 合金の開発に成功してきた[3]。

しかしながら、これまでに開発された Nb 系合金は、延性-脆性遷移の水素濃度の観点から、負荷出来る水素圧力が最大でも 0.1MPa(約 1 気圧)程度と低いことが課題である。このため、より高い水素圧力環境下での耐水素脆性の改善と水素透過能の更なる向上が必要である。

## 2. 研究の目的

Nb と同じ 5 族金属であるバナジウム (V) とタンタル (Ta) についてその水素化特性を比較すると (図 1 [4])、平衡水素圧は、Nb < Ta < V の順に変化し、固溶水素濃度の抑制効果は、V や Ta の方が Nb よりも優れている。すなわち、「合金設計の指針」に基づけば、V や Ta をベースとする合金は、Nb 合金よりも固溶水素濃度を抑制する効果が大きく、高い水素圧力環境下でも優れた耐水素脆性を発揮すると期待される。さらに、負荷できる水素圧力が増加すれば、水素透過速度の向上も期待できる。

本研究では、「合金設計の指針」を広く 5 族金属 (V, Ta) へ展開し、耐水素脆性と水素透過能の向上を目指した 5 族金属系水素分離膜の新たな設計指針を得ることを目的とする。

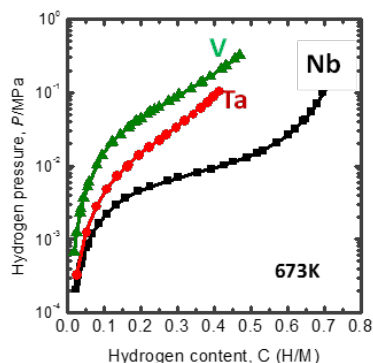


図1 純V、純Nb、純Taの 673K におけるPCT曲線

## 3. 研究の方法

### (1)水素透過能の新しい表現

化学ポテンシャル勾配を駆動力とする拡散方程式を水素透過膜に適用し、水素透過能の新しい表現を導出するとともに、水素脆化を回避しつつ高い透過流速が得るための合金設計の指針を確立する。

### (2)水素化特性に及ぼす合金効果の定量評価

水素の溶解と拡散は、水素透過能を決める基本的なパラメータである。特に、圧力-組成-等温 (PCT) 曲線から得られる情報は、水素透過能を理解する上で最も重要である。そこで、純 V、純 Ta およびその合金について水素化特性を系統的に調べ、実際に水素が透過する条件下(温度・圧力)での固溶水素濃度とそれに及ぼす合金効果を明らかにする。

### (3)水素拡散の易動度に及ぼす合金効果の評価

純 V、純 Ta およびその合金の膜について水素透過試験を行う。得られた結果を水素の化学ポテンシャルの観点から解析する。

### (4)水素脆性の定量評価

純 V、純 Ta およびその合金の膜を作製し、水素中その場 SP 破壊試験により水素脆化の定量評価を行う。特に、項目(2)の水素化特性に及ぼす合金効果の解析結果を活用し、水素脆化を水素濃度の観点から解析し、延性-脆性遷移水素濃度(DBTC)[1]を決定する。水素脆化を起こさないための条件を明らかにするとともに、DBTC に及ぼす合金効果を検証する。

### (5)新規 V 系水素分離膜の最適設計

上記の成果を総合的に解析し、水素の溶解と拡散および水素透過能の基本物性のデータベースを構築するとともに、耐水素脆性と水素透過能の向上を目指した V 系水素分離膜の最適設計を行う。

## 4. 研究成果

### (1)水素透過能の新しい表現

金属膜の水素透過能は通常、フィックの法則とジューバルツ則に基づいて、水素透過係数  $\phi$  を用いて評価される。しかしながら、5 族金属系合金は通常の使用条件下ではジューバルツ則が成立しない[5]。このため、従来の解析法では 5 族金属系合金膜の水素透過能を正しく評価できないことが問題である。

厳密に言えば、水素の拡散は濃度勾配ではなく、水素の化学ポテンシャル勾配を駆動力としていると考えられている。化学ポテンシャルに基づく拡散方程式は以下のように表される。

$$J = -cB \frac{d\mu}{dx} \quad (1)$$

ここで、 $c$  は水素濃度、 $B$  は水素原子の拡散の易動度、 $d\mu/dx$  は膜中の厚さ方向における微小領域の化学ポテンシャル勾配である。水素透過反応が定常状態の場合、易動度  $B$  の水素濃度依存性が無視できると仮定すると、次式が得られる。

$$J = \frac{B}{L} \int_{c_2}^{c_1} c \frac{d\mu}{dc} dc \quad (2)$$

PCT 曲線は金属内に固溶した水素原子と気相の水素分子との平衡を示しており、化学ポテンシャルは次式で表される。

$$\mu = \frac{1}{2} \mu_g = \frac{1}{2} \left\{ \mu_g^0 + RT \ln \left( \frac{P}{P^0} \right) \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\mu_g$ 、 $\mu_g^0$  はそれぞれ気相の水素分子の化学ポテンシャル、標準化学ポテンシャル、 $R$  は気体定数、 $T$  は絶対温度、 $P^0$  は標準水素圧力 (101325Pa) である。(3)式を(2)式に代入することで、次式が得られる。

$$J = \frac{RTB}{2L} \int_{c_2}^{c_1} c \frac{d \ln P}{dc} dc \quad (4)$$

(4)式中の  $d \ln P / dc$  は PCT 曲線の勾配を反映しており、PCT 曲線を解析することで得られる。そこで、(4)式の積分項を、PCT 曲線を解析して得られる項として、PCT 因子 ( $f_{\text{PCT}}$ ) と定義した。

$$f_{\text{PCT}} = \int_{c_2}^{c_1} c \frac{d \ln P}{dc} dc \quad (5)$$

以上のように、水素の化学ポテンシャルに基づく拡散方程式から出発して、水素透過能の新しい表現を導出することができた。

純 Nb 膜、Nb 合金膜および Pd 系合金膜などの一連の透過試験を行い、(4)式の妥当性を確認した。

### (2)水素化特性に及ぼす合金効果の定量評価

V-5mol%W および Ta-5mol%W 合金の PCT 曲線をそれぞれ図 2 および図 3 に示す。比較のために純 V および純 Ta の 673K における PCT 曲線も図中に示す。図より明らかなように、W の添加ともなって平衡水素圧が上昇している。つまり、PCT 曲線の傾きが増大し、全体が左上にシフトしている。その結果として、水素圧力に対する固溶水素濃度が低下していることがわかる。

また温度が上昇することによって PCT 曲線がさらに立ち上がっていることが分かる。これにより固溶水素濃度が抑制されより高い水素圧力を負荷しても水素脆化を起こさないことが期待される。

図 2 および図 3 より、延性-脆性遷移水素濃度 (DBTC=0.2(H/M)) に注目すると、Ta-5mol%W 合金では 773K において 0.15MPa までの水素圧力が負荷できる。一方 V-5mol%W 合金では、773K において 0.3MPa までの水素を負荷できることが分かる。

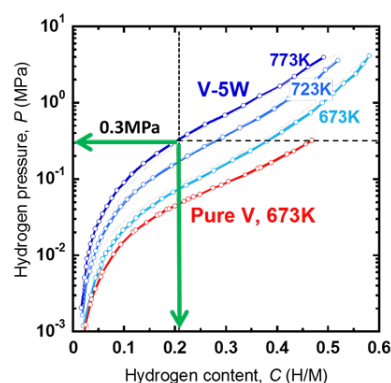


図2 V-5mol%W 合金の PCT 曲線

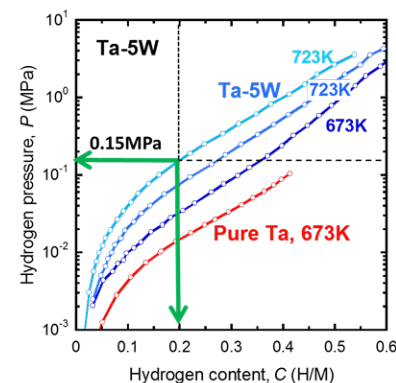


図3 Ta-5mol%W 合金の PCT 曲線

### (3)水素拡散の易動度に及ぼす合金効果の評価

種々の V-X 合金について水素透過試験を行い、(4)式に基づいて解析した。いずれの場合も水素透過流束  $J \cdot L$  と PCT 因子  $f_{\text{PCT}}$  の間には原点を通る直線関係が得られた。直線の傾きより各合金の易動度  $B$  を見積もった。また  $B$  のアレニウスプロットより、活性化エネルギー  $E$  と振動数項  $B_0$  を求めた。図 4 に易動度の活性化エネルギーと振動数項の関係を示す。V-Al 系の高濃度合金を除いて、 $B_0$  の対数と  $E$  の間に直線関係が得られ、メイヤー・ネルデル則が成立することが明らかになった。合金化により  $B_0$  と  $E$  がバランスを保って変化するため、易動度  $B$  はアレニウスプロットにおいて、ある温度で純 V と交差し、低温では合金効果によって水素の拡散性が向上する。高濃度の V-Al 合金がメイヤー・ネルデル則から外れる理由は不明である。

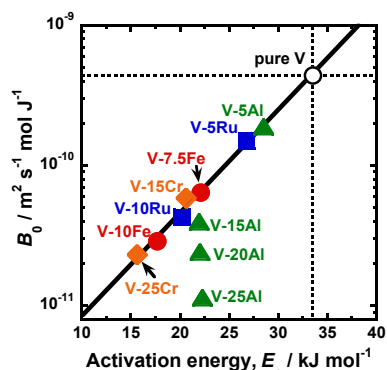


図4 活性化エネルギーと振動数項の関係

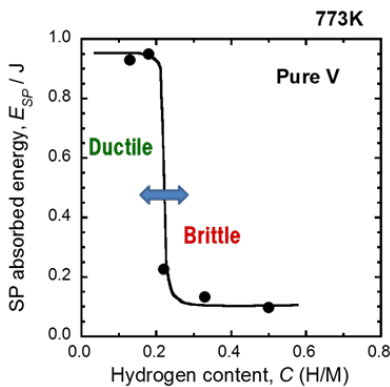


図5 純Vの固溶水素量とSP吸収エネルギーとの関係

#### (4)水素脆性の定量評価

図5に純Vの水素中その場SP試験の結果を示す。ここではSP吸収エネルギーと固溶水素濃度の関係を示している。図より、純VでもNbと同様に延性から脆性へ遷移する水素濃度(DBTC)がおよそ0.2(H/M)に存在することが明らかになった。純Taでも同様であった。また、V-5WおよびV-5Mo、Ta-5W合金の結果より、DBTCに対する合金は小さいことが分った。

#### (5)新規V系水素分離膜の最適設計

水素透過能の新しい表現に基づく水素透過金属膜の設計指針の模式図を図6に示す。一次圧を $P_1$ とすると、PCT曲線が(i)の場合、固溶水素濃度がDBTCを大きく超過し、合金膜は水素によって脆化する。そこで、合金化によってPCT曲線を(ii)のように立ち上げる必要がある。この場合、同じ一次圧下でも固溶水素濃度をDBTC以下に抑制することができる。さらに、PCT曲線の傾きが大きくなることで、PCT因子が増大し、水素透過流束の向上に寄与する。

一方、(iii)のようにPCT曲線が立ち上がり過ぎると、曲線の傾きは大きくなるものの、(4)式の積分項の積分区間と水素濃度が大幅に減少し、PCT因子が小さくなってしまう。

合金設計の指針に基づいて新規V系合金膜の最適設計を行った。ここでは、V-Al系合金に適用した例を述べる。水素透過の条件を

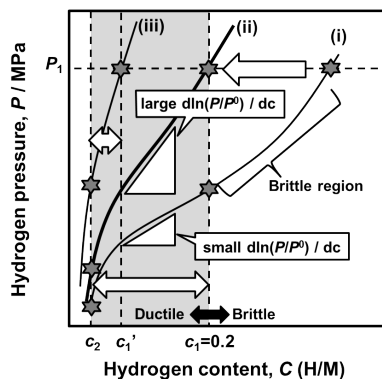


図6 合金設計の指針の模式図

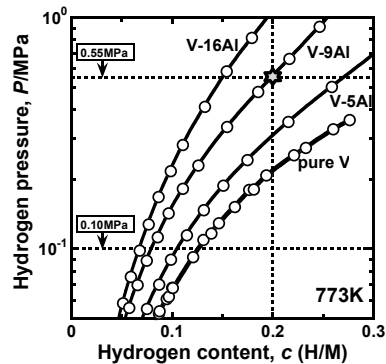


図7 V-Al合金の500℃におけるPCT曲線

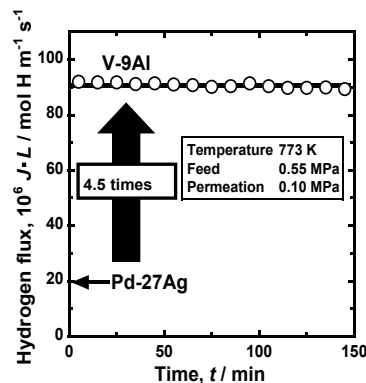


図8 設計合金の水素透過流束の経時変化

500℃、一次圧/二次圧を550kPa/100kPaと設定した場合について、最適なV-Al合金を設計した。

図7は、V-Al合金の500℃におけるPCT曲線である。V-5mol%Al合金は純Vよりも曲線が立ち上がっているものの、設定した圧力条件に対して立ち上がり方が不十分であり、図6における曲線(i)に対応する。

一方、V-16mol%Al合金は、PCT曲線が立ち上がり過ぎており、図6における曲線(iii)に対応する。これに対して、V-9mol%Al合金は、一次圧が550kPaの時に固溶水素濃度が0.2(H/M)となり、図6における曲線(ii)に対応する。この場合、与えられた圧力条件においてPCT因子が最大となり、高い水素透過流束が期待できる。

そこで、V-9mol%Al合金について水素透過試験を行った。その結果を図8に示す。縦軸は膜圧 $L$ で規格化した水素透過流束である。図に示すように、V-9mol%Al合金膜は、500℃、一次圧/二次圧=550kPa/100kPaの条件下において極めて高い水素透過流速を示している。比較のために、実用Pd-27mol%Ag合金膜について同条件下で得られる水素透過流束の計算値を図中に示した。V-9mol%Al合金膜はPd-27mol%Ag合金膜と比較して約4.5倍もの高い水素透過流束が得られている。

透過試験後に、Heガスを用いたリーク試験を行った。さらに、試料をセルから取り出して表面状態を観察した。いずれの場合もガスリークの原因となるクラックは認められなかった。すなわち、水素透過能の新しい表現

に基づく設計指針に従って、優れた耐水素脆性と高い水素透過能を両立した合金膜が設計できることが示された。

#### <引用文献>

- [1] Y.Matsumoto, H.Yukawa and T.Nambu, Metallurgical J., LXIII (2010), 74-78.
- [2] H.Yukawa, T.Nambu, Y.Matsumoto, et al., Mater. Trans., 49 (2008) 2202-2207.
- [3] 湯川宏, 南部智憲, 松本佳久, 燃料電池, 10 (2010) 99-105.
- [4] R.Lasser, P.Meuffels R.Feenstra, KFA Julich Report No. Jul-2183
- [5] G.X.Zhang, H.Yukawa, T.Nambu et al., Int'l J. Hydrogen Energy, 35 (2010), 1245-49.

#### 5. 主な発表論文等

##### 〔雑誌論文〕(計 13 件)

1. Y.Matsumoto, H.Yukawa and T.Nambu, Boundary Determination for Ductile-to-Brittle Transition of Group 5 Metals in Hydrogen Environment, Proc. 3rd Int'l Small Sample Test Techniques (SSTT 2014), in press. 査読有
2. Y.Nakamura, H.Yukawa, A.Suzuki, T.Nambu, Y.Matsumoto and Y.Murata, Alloying effects on hydrogen permeability of V without catalytic Pd overlayer, J. Alloys Compd, in press. 査読有
3. A.Suzuki, H.Yukawa, T.Nambu, Y.Matsumoto and Y.Murata, Analysis of hydrogen mobility in Nb-based alloy membranes in view of new description of hydrogen permeability based on hydrogen chemical potential, J. Alloys Compd., in press. 査読有
4. A.Suzuki, H.Yukawa, T.Nambu, Y.Matsumoto and Y.Murata, Consistent description of hydrogen permeability through metal membrane based on hydrogen chemical potential, Int'l J. Hydrogen Energy, 39 (2014), 7919-7924. 査読有
5. H.Yukawa, C.Tsukada, T.Nambu and Y.Matsumoto, Hydrogen Solubility and Permeability of V-W-Mo Alloy Membrane for Hydrogen Separation and Purification, J. Alloys Compd, 580 (2013), S386-S390. 査読有
6. K.Tsuchimoto, H.Yukawa, T.Nambu, Y.Matsumoto and Y.Murata, Design of Nb-W-Mo Alloy Membrane for Hydrogen Separation and Purification, J. Alloys Compd, 580 (2013), S391-S396. 査読有
7. 松本佳久, 湯川宏, 南部智憲, その場小型パンチ試験による 5 族水素透過膜の延性-脆性遷移水素濃度 (DBTC) 解析, 日本金属学会誌, 77 (2013), 585-592 査読有
8. H.Yukawa, T.Nambu and Y.Matsumoto, Design and development of Nb-W-Mo alloy membrane for hydrogen separation and purification, Defect and Diffusion Forum, 333 (2013), 61-71. 査読有
9. Y.Matsumoto, H.Yukawa and T.Nambu, Determination of Ductile-to-Brittle Transition Hydrogen Concentrations for V and Nb Alloys using in-situ Small Punch Test, Proc. 2nd Int'l Small Sample Test Techniques (SSTT 2012), (2012), 132-137. 査読有

##### 〔学会発表〕(計 33 件)

1. 鈴木飛鳥, 井尻俊介, 湯川宏, 村田純教, 水素の化学ポテンシャルに基づく Pd 系合金膜の水素透過能の解析, 日本金属学会 (2015)、東京大学.
2. H.Yukawa: High hydrogen permeability through bare V membranes without Pd overlayer, 11th Asia-Pacific Conf. on Materials Processing, Auckland, New Zealand, July 6-11.2014.
3. H.Yakawa, T.Nambu and Y.Matsumoto, High hydrogen flux through bare vanadium membrane without Pd overlayer, 14th Int'l Symp. on Metal-Hydrogen Systems (MH 2014), 20-25 July 2014. Manchester, UK.
4. A.Suzuki, H.Yakawa, T.Nambu, Y.Matsumoto and Y.Murata, Analysis of hydrogen mobility in Nb-based alloy membranes in view of new description of hydrogen permeability based on hydrogen chemical potential, 14th Int'l Symp. on Metal-Hydrogen Systems (MH 2014), 20-25 July 2014. Manchester, UK.
5. 鈴木飛鳥, 湯川宏, 村田純教, 水素の化学ポテンシャルに基づく Pd 系合金膜の水素透過能の解析, 日本金属学会 (2014)、名古屋大学.
6. 中村祐貴, 鈴木飛鳥, 湯川宏, 村田純教, V 系水素透過合金膜の水素拡散性に及ぼす Mo および W の影響, 日本金属学会 (2014)、名古屋大学.
7. 湯川宏, 水素透過能の新しい解析法とその応用, 水素透過材料の機能活用に関する研究会 (2014)、名古屋大学.
8. 湯川宏, 鈴木飛鳥, 村田純教, 水素の化学ポテンシャルに基づく水素透過能の統一的表现とその応用, 日本金属学会 (2014)、東京工業大学.
9. 鈴木飛鳥, 湯川宏, 村田純教, 水素の化学ポテンシャルに基づく純ニオブ膜の水素透過能の解析, 日本金属学会 (2014)、東京工業大学.
10. 南部智憲, 湯川宏, 松本佳久, バナジウム膜の耐久性に及ぼす表面処理プロセスの影響, 日本金属学会 (2014)、東京工業大学.
11. 鈴木飛鳥, 湯川宏, 村田純教, 純 Nb 膜における水素透過能の化学ポテンシャルに基づく解析, 水素若手研究会 第 8 回研究会, (2013), 北海道大学.
12. 南部智憲, 湯川宏, 松本佳久, 高機能水素透過合金の設計開発と水素製造技術への展開, 日本金属学会, (2013), 金沢大学.

13. 松本佳久, 湯川宏, 南部智憲, Ta 水素透過膜の延性-脆性遷移水素濃度解析と合金設計への展開, 金属学会九州支部大会, (2013), 熊本県民交流館パレア.
14. 湯川宏, 鈴木飛鳥, 南部智憲, 松本佳久, 水素の化学ポテンシャルに基づくニオブ系合金膜の水素易動度の定量評価, 日本金属学会. (2013), 東京理科大学.
15. 松本佳久, 湯川宏, 南部智憲, タンタル水素透過膜の延性-脆性遷移水素濃度 (DBTC) 解析, 日本金属学会, (2013), 東京理科大学.
16. H.Yukawa, T.Nambu and Y.Matsumoto, Hydrogen Solubility and Permeability of V-W-Mo Alloy Membrane for Hydrogen Separation and Purification, International Symposium on Metal-Hydrogen Systems (MH2012), (2012), Kyoto.
17. 湯川宏, 南部智憲, 松本佳久, Pd コーティングフリー V-W 合金膜の水素透過能, 日本金属学会, (2012), 愛媛大学.

〔図書〕(計3件)

1. H.Yukawa, T.Nambu and Y.Matsumoto, Chap.13. Hydrogen permeable metal membrane for hydrogen separation and purification, Advances in hydrogen production, storage and distribution, Eds.: A Basile and A Iulianelli, Woodhead Publishing, (2014) 341-367. ISBN 0-85-709768-7
2. Y.Matsumoto, H.Yukawa and T.Nambu, Chap.12. Quantitative evaluation of hydrogen embrittlement for group 5 metals, Advances in hydrogen production, storage and distribution, Eds.: A Basile and A Iulianelli, Woodhead Publishing, (2014) 317-340. ISBN: 0-85-709768-7
3. H.Yukawa, T.Nambu and Y.Matsumoto, Niobium-based Alloys as Hydrogen Permeable Membrane for Hydrogen Separation and Purification, Niobium: Chemical Properties, Applications and Environmental Effects, Editor: Nadya Gotsiridze- Columbus, Nova Science Publishers, (2013), 99-122. ISBN: 978-1-62-808257-9

〔産業財産権〕

○出願状況(計7件)

名称: 水素分離装置および水素分離方法  
 発明者: 湯川宏, 南部智憲, 松本佳久 他2名  
 権利者: 名古屋大学、高専機構、他1機関  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2014-191939  
 出願年月日: 2014年9月19日  
 国内外の別: 国内

名称: 水素分離装置及びその運転条件設定方法  
 発明者: 湯川宏, 南部智憲, 松本佳久 他2名  
 権利者: 名古屋大学、高専機構、他1機関  
 種類: 特許

番号: 特願 2014-061961  
 出願年月日: 2014年3月25日  
 国内外の別: 国内

名称: 水素分離膜の処理方法、水素分離方法及び水素分離膜  
 発明者: 湯川宏, 南部智憲, 松本佳久 他2名  
 権利者: 名古屋大学、高専機構、他1機関  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2014-056759  
 出願年月日: 2014年3月19日  
 国内外の別: 国内

名称: 水素分離膜及び水素分離方法  
 発明者: 湯川宏, 南部智憲, 松本佳久 他2名  
 権利者: 名古屋大学、高専機構、他1機関  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2013-46770  
 出願年月日: 2013年3月8日  
 国内外の別: 国内

名称: 水素分離方法  
 発明者: 湯川宏, 南部智憲, 松本佳久 他3名  
 権利者: 名古屋大学、高専機構、他1機関  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2013-49020  
 出願年月日: 2013年3月12日  
 国内外の別: 国内

○取得状況(計1件)

名称: 2段式水素分離型改質器  
 発明者: 湯川宏, 南部智憲, 松本佳久 他5名  
 権利者: 名古屋大学、高専機構、他1機関  
 種類: 特許  
 番号: 登録査定(特願 2014-045870)  
 出願年月日: 2014年3月10日  
 取得年月日: 2015年3月30日  
 国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等  
[http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100001948\\_ja.html](http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100001948_ja.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

湯川 宏 (Hiroshi Yukawa)  
 名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号: 50293676

(2)研究分担者

南部 智憲 (Tomonori Nambu)  
 鈴鹿工業高等専門学校・材料工学科・准教授  
 研究者番号: 10270274

(3)研究分担者

松本 佳久 (Yoshihisa Matsumoto)  
 大分工業高等専門学校・機械工学科・教授  
 研究者番号: 40219522