

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月25日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560731

研究課題名（和文） 金属水素分離膜のAEウェーブレット解析による構造ヘルスマニタリングと脆化機構解明

研究課題名（英文） Structural health monitoring of metallic hydrogen separation membranes using AE wavelet analyses

研究代表者

松本 佳久（MATSUMOTO YOSHIHISA）

大分工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：40219522

研究成果の概要（和文）：温度や水素圧力等の環境負荷を水素分離膜に与え、その静的膜破壊時のき裂発生・進展時の特徴をAE原波形解析にて把握した。また、各種Nb合金、V合金およびTa合金などのbcc単相水素分離膜の構造ヘルスマニタリングに本手法が適用可能であり、統合耐久性評価システムとして有効に機能することを確認した。さらに、Pd/熱拡散防止酸化物中間層/5族金属構造のパフォーマンスチューンド合金膜を提案し、構築した耐久性評価試験を行って、その推奨負荷水素圧力を提示した。

研究成果の概要（英文）：Environmental loads, such as temperature and a hydrogen pressure, were given to the metallic hydrogen separation membrane, and the characteristics of the crack initiation and propagation at the time of the static membrane fracture were understood in the present investigation by AE original waveform analyses. This approach could be applied to the structural health monitoring of bcc single phase hydrogen separation membranes, such as various Nb-, V- and Ta-based alloys, and the effectiveness as an integrated durability evaluation system was confirmed. Furthermore, the performance tuned alloy membranes of hybrid structure were proposed, and above durability evaluation tests were performed, and the recommendation applied hydrogen pressures were shown for practical applications.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：水素、新エネルギー、燃料電池、金属物性、構造・機能材料、水素透過、水素脆化、AE

1. 研究開始当初の背景

水素エネルギー社会への迅速な転換に向けて、高純度水素の分離・精製技術の確立が喫緊の課題となっている。Pd-Ag合金に代表

される水素分離膜合金は7N（99.99999%）以上の超高純度水素を容易に得ることができるが、パラジウム（Pd）が希少資源で高価なことに加え、将来の水素需要を確保するた

めの精製速度が十分ではなく、また膜としての耐久性にも問題があることが指摘されている。一方、メタン改質反応のメンブレンリフォーマーにこれら非 Pd 系合金膜を用いる場合、823K 以下の温度で長寿命であることに加えて、高い水素透過フラックスを得るために薄い膜への加工性と、高水素圧力下における耐水素脆性が重要である。体心立方 (bcc) 系金属は水素の拡散の活性化エネルギーが小さく、拡散係数も大きいことが知られているが、バナジウム (V) やニオブ (Nb) などの 5 族金属は水素を多量に固溶して体積膨張し、水素放出の際に体積変化による材料割れが生じやすいため、そのままでは使えない。そこで扱い易さと水素透過性能を併せ持つ合金の探索が行われており、これまでに単相の V 合金や Nb 合金、複相の Nb-Ti-Ni 合金、アモルファス Zr-Ni 合金、Nb 系金属ガラスなどの合金膜が開発・提案されている。しかし、これら合金膜の水素吸収に伴う膜変形の観察は水素透過前後の目視評価に留まっており、水素雰囲気下での変形・破壊過程のその場解析は検討されておらず、また固溶水素量と水素脆化の関係を定量的に扱った研究も無かった。

2. 研究の目的

本課題は、水素透過性能が高い程、水素吸収・放出に伴う体積変化による材料割れが問題となっている、水素分離膜の体積変化時の歪集中や材料疲労と固溶水素濃度との関係をアコースティックエミッション (AE) の原波形解析を用いて調べ、脆化機構解明に繋げることで水素透過能と耐水素脆性および耐久性を備えた水素分離膜合金の設計・評価指針を得ることを目指しており、この目的の達成のため、以下の四点に重点を置いた。

- (1) AE センサ、プリアンプ、ディスクリミネータ、データレコーダで構成される AE その場膜破壊検出装置を設計・製作し、in-situ SP 試験治具を備えた水素透過試験装置 (気相法) に付加する。
- (2) 収録した時間軸データを基にした AE 原波形解析に加えて、四重極質量分析計を用いたガス分離係数測定による分離性能評価を行うハイブリッドシステムを構築する。
- (3) メンブレンリフォーマー内を想定した疑似応力状態下での膜強度変化を捉えるため、PCT 曲線を基にして固溶水素濃度を把握した上で、種々の水素透過試験条件下で水素脆化その場膜強度測定を行い、耐水素脆性についての限界固溶水素濃度を系統的に把握する。また、膜強度特性と構造転移特性との関係から金属と水素の相互作用を検討し、固溶水素脆化機構を探求する。
- (4) 水素分離管を模擬した三次元応力状態の膜試料について、断面中立軸近傍に応力・固

溶水素濃度緩和空間層を作り、外表面にかけて固溶水素濃度を抑制したパフォーマンス・チューニングされたニオブ合金膜を創製し、構造ヘルスマonitoringにより耐久性評価を行い、候補金属膜として提案する。

3. 研究の方法

本課題の研究方法の具体的内容を以下に列挙する。

- (1) アコースティックエミッション (AE) その場膜破壊検出装置を設計・製作して水素透過ハイブリッドその場膜強度測定システムに付加する。
- (2) 水素透過試験時の供給ガス、透過ガスの四重極質量分析計による in-situ ガス分析、拡散係数測定法を検討する。
- (3) Nb あるいは Nb 合金の 573K~823K における水素圧力-組成-等温線 (PCT 曲線) を求め、曲線上の各固溶水素濃度状態において、in-situ 小型パンチ (SP) 試験ならびに AE 解析を行い、変形・破壊過程の特徴を把握する。また試験後に SEM 観察を行って、破面性状やすべり挙動との対応を検討する。
- (4) 固溶水素濃度と延性-脆性遷移との関係を基にして AE カウントレート (発生率) およびピーク周波数分布の時間変化を詳細に検討 (AE 原波形解析) し (図 1)、可動転位密度と塑性歪との対応を調べることで固溶水素脆化機構の解明のアプローチを行う。
- (5) メンブレンリフォーマー内を考慮した熱サイクル、負荷水素圧力変動サイクルを Nb および Nb 合金膜に与え、静的な膜破壊を AE 解析にて把握したものについての組織観察を行い、微細組織の変化を詳細に調べる。
- (6) メンブレンリフォーマー内の水素分離管を模擬した三次元応力状態の膜試料について、断面中立軸近傍に応力・固溶水素濃度緩和空間層を作り、外表面にかけて固溶水素濃度をさらに抑制して水素脆化割れやき裂感受性を低減させた、パフォーマンスチューンド Nb 合金膜を設計し、製作する。また、本研究で構築したその場膜破壊検出装置を用いた耐久性評価試験を行って、水素選択透過性能と長期安定性を有する合金膜の提案と推奨負荷水素圧力を提示する。

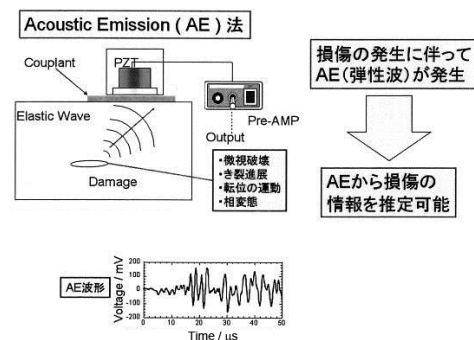


図 1 AE 原波形を用いた損傷解析 (概念図)

4. 研究成果

本研究課題は、AE その場膜破壊検出装置付強度測定システムに四重極質量分析計を加え、ガス分離性能を評価するための拡張を行うこと、また、メンブレンリアクター内想定擬似応力状態で水素分離膜の強度評価と AE 原波形解析による局所変形・破壊解析を行い、それらの情報を金属薄膜の創製と耐久性向上に活用することを目指したものである。研究期間全体を通して得られた主な成果を以下に列挙する。

- (1) AE センサ、プリアンプ、ディスクリミネータで構成されるアコースティック・エミッション (AE) その場膜破壊検出装置を設計・製作して水素透過ハイブリッドその場膜強度測定システムに付加した。
- (2) 水素透過試験時の供給・透過ガスの四重極質量分析計による in-situ ガス分析、拡散係数測定法を検討した。また、ガス分離性能およびガス分析機能の組込が完了した。
- (3) ニオブ (Nb) あるいは Nb 合金の 573K~773K における水素圧力-組成-等温線 (PCT 曲線) を求め、曲線上の各固溶水素濃度状態において in-situ 小型パンチ (SP) 試験ならびに AE 解析を行い、水素分離膜の変形・破壊過程の AE 解析手法を確立した。そして AE 原波形のウェーブレット解析あるいは短時間フーリエ変換による時間一周波数解析を用いた膜合金の変形・破壊時の特徴が抽出可能となった。また、純 Nb や純バナジウム (V)、およびそれらの合金の耐水素脆性についての限界固溶水素濃度を系統的に把握することに成功した (図 2)。
- (4) SP 試験の変形・破壊時に発生する AE 信号は微弱で検出が困難であったため、本研究では高温水素雰囲気その場引張試験時に生じる超音波を捉える方法を選択した。そして、固溶水素濃度と延性-脆性遷移との関係を基にして AE 発生率およびピーク周波数分布の時間変化を検討して、塑性歪との対応を調べた。

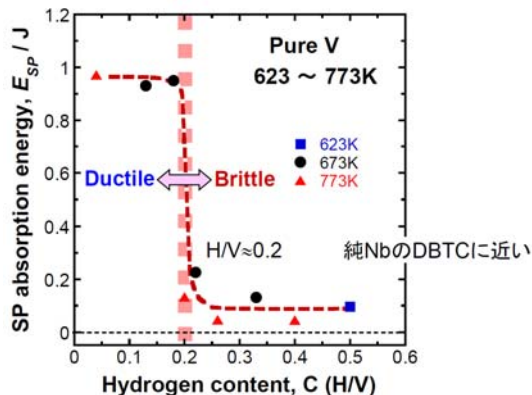


図 2 純バナジウムの固溶水素濃度と SP 吸収エネルギーの関係

- (5) 733K, 真空中の純 Nb の引張試験時の公称応力-歪の変化に対応した AE 信号のイベント発生箇所について、原波形の時間一周波数解析を行った結果、転位移動や固着転位の開放による AE 信号は概ね 200kHz の間に分布していた (図 3) が、同試料に水素圧力を負荷して、典型的な脆性破壊の様相を示す固溶水素量 $H/Nb=0.28$ とした場合、300kHz 付近のより高い周波数成分を有する AE 信号が発生した。これが Nb の水素脆化によるき裂の発生と進展の特徴であることを捉え、脆化機構考察に向けた一つの知見が得られた。
- (6) 高温での真空中や水素雰囲気中の純 Nb や Nb-5mol%W 合金、V 系合金のき裂進展挙動や転位運動に起因した特徴的な周波数成分も評価可能であることを確認した。また、本システムにより、水素脆化によるき裂の発生と進展、および水素透過膜の健全性のセンシングが可能となった。
- (7) 四重極質量分析計によるガス分析システムを構築した後、圧延等による薄膜化により高流量が得られた水素分離膜について、膜割れが原因である水素リーク発生の検出が可能となり、上記 AE 解析とのリンクにより統合耐久性評価システムとしてこれが有効に機能することを確認した。
- (8) Pd/熱拡散防止酸化物中間層/5 族金属 (応力・固溶水素濃度緩和空間層としても機能) の構造により耐水素脆性を有する長時間水素透過性能が維持可能な、パフォーマンスチューンド合金膜の数種を設計・製作した。また、その場膜破壊検出装置を用いた耐久性評価試験を行って、新しい bcc 単相合金膜の提案とその推奨負荷水素圧力を提示した。

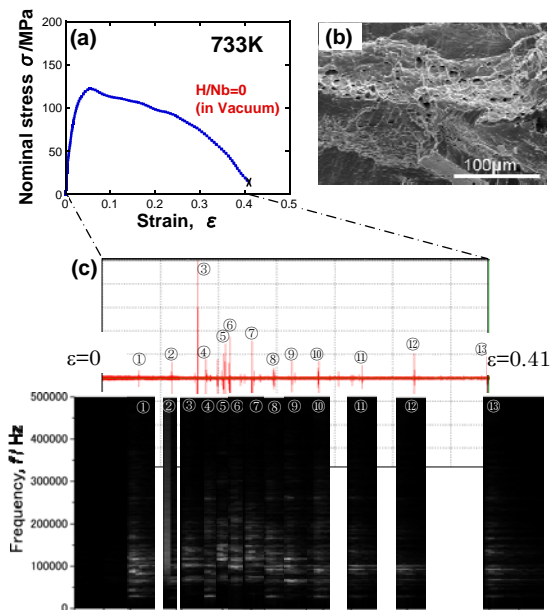


図 3 733K, 真空中の純 Nb の引張試験時発生 AE 原波形解析; (a) 公称 $\sigma - \epsilon$ 線図, (b) 破面 SEM 像, (c) 時間一周波数解析

尚、従来の研究では V や Nb ベースの固溶体単相合金や、複相組織を有する Nb-Ti-Ni 合金の例のように最適合金設計や組織制御による総合性能の達成に目が向けられてきた。しかし、水素透過フラックスが高い程、水素吸収・放出に伴う体積変化による歪集中や材料疲労で材料割れが顕著に起こることも指摘されており、熱サイクルや水素圧力変動サイクルが負荷される膜の耐久性向上の観点からも構造ヘルスマモニタリングは重要であった。

本研究課題により、延性を長時間維持可能な限界固溶水素濃度が把握され、水素固溶度と耐水素脆性の相反する要求を同時に満たした耐久性のある水素分離膜合金の設計指針が明確化されたため、これが今後の非 Pd 水素分離膜の実用化に向けた材料開発に繋がる重要な研究成果であると言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Y. Awakura, T. Nambu, Y. Matsumoto and H. Yukawa, Hydrogen solubility and permeability of Nb-W-Mo alloy membrane, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, (2011), pp. S877-S880, 査読有, DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.10.133
- ② H. Yukawa, T. Nambu and Y. Matsumoto, V-W alloy membranes for hydrogen purification, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, (2011), pp. S881-S884, 査読有, DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.09.161
- ③ H. Yukawa, T. Nambu and Y. Matsumoto, Ta-W Alloy for Hydrogen Permeable Membranes, *Advanced Materials for Hydrogen Energy Applications*, *Material Transactions*, Vol. 52, (2011), pp. 610-613, 査読有, DOI: 10.2320/matertrans.MA201007
- ④ 湯川宏, 松本佳久, 南部智憲, 高純度水素を分離・精製するためのニオブ系固溶体合金膜の開発, *OHM*, Vol. 10, (2010), pp. 2-3, 査読無, <http://www.ohmsha.co.jp/ohm/201010h.htm>
- ⑤ Y. Matsumoto, H. Yukawa and T. Nambu, Quantitative Evaluation of Hydrogen Embrittlement of Metal Membrane Detected by in-situ Small Punch Test under Hydrogen Permeation, *Metallurgical Journal*, Vol. LXIII, (2010), pp. 74-78, 査読有, <http://www.hutnickelisty.cz/en/index.php/file-of-numbers-and-volumes/7-yearofedition2010>
- ⑥ H. Yukawa, M. Morinaga, T. Nambu and Y. Matsumoto, A new concept for alloy design

of Nb-based hydrogen permeable alloys with high hydrogen permeability and strong resistance to hydrogen embrittlement, *Materials Science Forum*, Vol. 654-656, (2010), pp. 2827-2830, 査読有, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.2827

- ⑦ 湯川宏, 南部智憲, 松本佳久, 高い水素透過性と優れた耐水素脆性を両立したニオブ系固溶体合金膜の開発, *燃料電池*, Vol. 10, (2010), pp. 99-105, 査読無, <http://www.fcdic.com/ja/kikanshi/VOL10-1.pdf>
- ⑧ 渡邊直, 湯川宏, 南部智憲, 松本佳久, 張国興, 森永正彦, 水素透過膜用 Nb-W-Ta 合金の水素雰囲気中における機械的性質と水素透過能, *日本金属学会誌*, Vol. 73, (2009), pp. 742-746, 査読有, <http://www.jim.or.jp/journal/j/pdf3/73/09/742.pdf>
- ⑨ N. Watanabe, H. Yukawa, T. Nambu, Y. Matsumoto, G. X. Zhang and M. Morinaga, Alloying effects of Ru and W on the resistance to hydrogen embrittlement and hydrogen permeability of niobium, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 477, (2009), pp. 851-854, 査読有, DOI: 10.1016/j.jallcom.2008.10.164

[学会発表] (計 38 件)

- ① 松本佳久, 湯川宏, 南部智憲, 5 族系水素透過合金の延性-脆性遷移水素濃度解析と合金設計への展開, 日本金属学会 2011 年秋期 (第 149 回) 大会講演概要(S4・12), 沖縄コンベンションセンター及びカルチャーリゾートフェストーネ, 2011.11.7.
- ② H. Yukawa, T. Nambu and Y. Matsumoto, Design of Nb-based alloy membranes for hydrogen purification (P21), *Proc. of ICCMR 10*, St. Petersburg, Russia, 2011.6.21.
- ③ Yoshihisa Matsumoto, Hiroshi Yukawa and Tomonori Nambu, Quantitative Evaluation of Hydrogen Embrittlement of Metal Membrane Detected by in-situ Small Punch Test under Hydrogen Permeation, 1st International Conference SSTT, Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and Other Miniature Testing Techniques, (SSTT2010), Ostrava, Czech Republic, 2010.8.31-9.2.
- ④ Y. Matsumoto, H. Yukawa and T. Nambu, Ductile-to-Brittle Transition Hydrogen Concentrations of V and Nb for Hydrogen Permeation, *Proc. of Materials Science and Engineering 2010 (MSE2010)*, Technische Universität Darmstadt, Germany, 2010.8.24-26.

- ⑤ H. Yukawa, T. Nambu, Y. Matsumoto, M. Morinaga, V-W Alloy Membranes for Hydrogen Purification, International Symposium "Metal-Hydrogen Systems. Fundamentals and Applications", Chemistry Department Lomonosov Moscow State University, 2010.7.19.
- ⑥ 大西宏幸, 都甲紘千, 湯川宏, 南部智憲, 松本佳久, 純ニオブ膜の水素透過流束に及ぼす表面状態の影響と水素雰囲気中における引張特性, 日本金属学会・日本鉄鋼協会・軽金属学会九州支部共催平成 22 年度合同学術講演大会講演概要集 (P52), 熊本大学工学部黒髪南キャンパス, 2010.6.5.
- ⑦ 松本佳久, 湯川宏, 南部智憲, 5 族金属水素透過膜の延性-脆性遷移固溶水素濃度, 日本金属学会・日本鉄鋼協会・軽金属学会九州支部共催平成 22 年度合同学術講演大会講演概要集 (A10), 熊本大学工学部黒髪南キャンパス, 2010.6.5.
- ⑧ 松本佳久, 湯川宏, 張国興, 森永正彦, 南部智憲, Nb, V および V-W 水素透過膜の延性-脆性遷移固溶水素濃度, 日本金属学会 2010 年春期 (第 146 回) 大会講演概要 (55), 筑波大学筑波キャンパス, 2010.3.28.
- ⑨ 湯川宏, 森永正彦, 南部智憲, 松本佳久, 優れた水素透過性能と耐水素脆性を両立させたニオブ系水素透過合金, 6th Int'l Hydrogen & Fuel Cell Expo (FC EXPO 2010), 第 6 回国際水素・燃料電池展, 東京ビッグサイト東展示棟, (FCA-2 会場), 2010.3.4.
- ⑩ H. Yukawa, M. Morinaga, T. Nambu and Y. Matsumoto, Nb-based Hydrogen Permeable Alloys with High Hydrogen Permeability and Strong Resistance to Hydrogen Embrittlement, Proc. of the 3rd International Conference on Structure, Processing and Properties of Materials 2010 (SPPM 2010), Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET), Dhaka, Bangladesh, 2010.2.25.
- ⑪ 嶋一成, 南部智憲, 松本佳久, 湯川宏, 張国興, 森永正彦, 低水素圧力条件に特化したニオブ系水素透過膜合金の設計方法, 日本金属学会 2009 年秋期 (第 145 回) 大会講演概要 (585), 京都大学吉田キャンパス, 2009.9.16.
- ⑫ 松本佳久, 水素製造・精製用非 Pd 系水素透過合金の設計と創製, M&M 研究会, サンメッセ鳥栖, 2009.7.31.

[産業財産権]

○出願状況 (計 16 件)

名称: 水素分離膜, その製造方法及び水素製造装置
 発明者: 松本佳久, 南部智憲, 湯川宏, 森永

正彦, 黒川英人
 権利者: 国立高等専門学校機構, 名古屋大学, 東京瓦斯(株)
 種類: 特許
 番号: 特願 2012-067204
 出願年月日: 平成 24 年 3 月 23 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: 松本佳久, 南部智憲, 湯川宏, 黒川英人, 金子祐大
 権利者: 国立高等専門学校機構, 名古屋大学, 東京瓦斯(株)

種類: 特許
 番号: 特願 2012-054650
 出願年月日: 平成 24 年 3 月 12 日
 国内外の別: 国内

名称: 水素分離膜及び水素分離装置
 発明者: 松本佳久, 南部智憲, 湯川宏
 権利者: 国立高等専門学校機構, 名古屋大学, 東京瓦斯(株)

種類: 国際特許
 番号: PCT/JP2012/055766
 出願年月日: 平成 24 年 3 月 7 日
 国内外の別: 外国

名称: 水素分離膜
 発明者: 松本佳久, 南部智憲, 湯川宏, 森永正彦, 黒川英人
 権利者: 国立高等専門学校機構, 名古屋大学, 東京瓦斯(株)

種類: 国際特許
 番号: PCT/JP2011/070368
 出願年月日: 平成 23 年 9 月 7 日
 国内外の別: 外国

名称: 水素分離膜, その製造方法及び水素製造装置
 発明者: 松本佳久, 南部智憲, 湯川宏, 森永正彦, 黒川英人
 権利者: 国立高等専門学校機構, 名古屋大学, 東京瓦斯(株)

種類: 特許
 番号: 特許, 特願 2011-084665
 出願年月日: 平成 23 年 4 月 6 日
 国内外の別: 国内

名称: 水素分離膜及び水素分離装置
 発明者: 松本佳久, 南部智憲, 湯川宏, 森永正彦, 黒川英人
 権利者: 国立高等専門学校機構, 名古屋大学, 東京瓦斯(株)

種類: 特許
 番号: 特許, 特願 2011-48582
 出願年月日: 平成 23 年 3 月 7 日
 国内外の別: 国内

名称：水素分離方法及び装置
発明者：松本佳久，南部智憲，湯川宏，森永正彦，黒川英人
権利者：国立高等専門学校機構，名古屋大学，東京瓦斯(株)
種類：特許
番号：特許，特願 2010-213773
出願年月日：平成 22 年 9 月 24 日
国内外の別：国内

名称：水素分離膜
発明者：松本佳久，南部智憲，湯川宏，森永正彦，黒川英人
権利者：国立高等専門学校機構，名古屋大学，東京瓦斯(株)
種類：特許
番号：特許，特願 2010-213772
出願年月日：平成 22 年 9 月 24 日
国内外の別：国内

名称：水素分離膜および水素分離法
発明者：松本佳久，南部智憲，湯川宏，森永正彦，黒川英人，西井匠，白崎義則，安田勇
権利者：国立高等専門学校機構，名古屋大学，東京瓦斯(株)
種類：国際特許
番号：PCT/JP2010/065788
出願年月日：平成 22 年 9 月 14 日
国内外の別：国内

名称：5 A 族金属系水素分離膜を用いた水素分離システム
発明者：松本佳久，南部智憲，森永正彦，湯川宏，安田勇，白崎義則，黒川英人，西井匠
権利者：国立高等専門学校機構，名古屋大学，東京瓦斯(株)
種類：特許
番号：特許，特願 2010-007613
出願年月日：平成 22 年 1 月 16 日
国内外の別：国内

名称：2 段式水素分離型改質器
発明者：松本佳久，南部智憲，森永正彦，湯川宏，安田勇，白崎義則，黒川英人，西井匠
権利者：国立高等専門学校機構，名古屋大学，東京瓦斯(株)
種類：特許
番号：特許，特願 2010-007516
出願年月日：平成 22 年 1 月 15 日
国内外の別：国内

名称：Nb 膜，周期律表 5 A 族金属合金膜を使用した水素分離システム

発明者：松本佳久，南部智憲，森永正彦，湯川宏，安田勇，白崎義則，黒川英人，西井匠
権利者：国立高等専門学校機構，名古屋大学，東京瓦斯(株)
種類：特許
番号：特許，特願 2010-007428
出願年月日：平成 22 年 1 月 15 日
国内外の別：国内

名称：V-W 系合金膜からなる水素分離膜及び水素分離法
発明者：松本佳久，南部智憲，森永正彦，湯川宏，安田勇，白崎義則，黒川英人，西井匠
権利者：国立高等専門学校機構，名古屋大学，東京瓦斯(株)
種類：特許
番号：特許，特願 2009-212550
出願年月日：平成 21 年 9 月 14 日
国内外の別：国内

名称：Nb-W-Mo 系合金膜からなる水素分離膜及び水素分離法
発明者：松本佳久，南部智憲，森永正彦，湯川宏，安田勇，白崎義則，黒川英人，西井匠
権利者：国立高等専門学校機構，名古屋大学，東京瓦斯(株)
種類：特許
番号：特許，特願 2009-212357
出願年月日：平成 21 年 9 月 14 日
国内外の別：国内

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.oita-ct.ac.jp/kikai/matumoto/sub7.html>

6. 研究組織
- (1)研究代表者
松本 佳久 (MATSUMOTO YOSHIHISA)
大分工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号：40219522
- (2)研究分担者
湯川 宏 (YUKAWA HIROSHI)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50293676
南部 智憲 (NAMBU TOMONORI)
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)連携研究者
なし