

JAERI-Research
98-002



JP9802026



ISプロセス高効率化のための水素分離膜に関する研究
— 多孔質 α -アルミナチューブを基膜とした製膜方法 —

1998年1月

黄 甲鎮* · 小貫 薫 · 清水三郎

29 - 17

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

R

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

I Sプロセス高効率化のための水素分離膜に関する研究
—多孔質 α -アルミナチューブを基膜とした製膜方法—

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

黄 甲鎮*・小貫 薫・清水 三郎

(1998年1月5日受理)

I Sプロセスの水素発生工程におけるヨウ化水素分解の高効率化のため、水素分離膜の製作技術の研究を行った。細孔径が100nmと10nmの α -アルミナチューブを基膜として用い、テトラエチルオルソシリケート(TEOS)を原料とする化学蒸着法(CVD)によりシリカを析出させる方法で水素分離膜を製膜した。製作した水素分離膜では、シリカの析出により細孔が緻密に閉塞され、ガスは活性化拡散機構により透過した。600°Cにおける窒素に対する水素の選択性は、細孔径が100nmの基膜の場合5.2、細孔径が10nmの基膜の場合160を示した。

Studies on Hydrogen Separation Membrane for IS Process
— Membrane Preparation with Porous α - Alumina Tube —

Gab-Jin HWANG*, Kaoru ONUKI and Saburo SHIMIZU

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
(Tokai Site)
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 1998)

It was investigated the preparation technique of hydrogen separation membrane to enhance the decomposition ratio of hydrogen iodide in the thermochemical IS process. Hydrogen separation membranes based on porous α -alumina tubes having pore size of 100 nm and 10 nm were prepared by chemical vapor deposition using tetraethylorthosilicate (TEOS) as the Si source. In the hydrogen separation membrane, its pore was closed by the deposited silica and then the permeation of gas was affected by the hindrance diffusion. At 600°C, the selectivity ratios (H_2/N_2) were 5.2 and 160 for the membranes based on porous α -alumina tube having pore size of 100 nm and 10nm, respectively.

Keywords: Inorganic Membranes, Silica-alumina Membranes, Chemical Vapor Deposition,
Gas Separations, Permeance, Hydrogen Permselectivity

* Student Research Fellow

目 次

1. 緒 言	1
2. 実 験	2
2.1 製膜実験装置及び方法	2
2.2 透過実験	3
3. 結果及び考察	4
3.1 CVD反応条件の影響	4
3.2 膜の評価	5
4. 結 論	7
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	2
2.1 Experimental Apparatus and Method for Membrane Modification	2
2.2 Permeation Experiment	3
3. Results and Discussion	4
3.1 Chemical Vapor Deposition Condition	4
3.2 Membrane Evaluation	5
4. Conclusions	7
Acknowledgement	7
References	7

1. 緒 言

太陽光・原子力のような一次エネルギーを用いて水から水素を製造する方法の一つとして熱化学水素製造プロセスが提案され、ヨウ素とイオウによる IS プロセス¹⁾、カルシウムと鉄と臭素による UT-3 プロセス²⁾の研究が進められている。

原研では、約 1,000°C の熱が得られる高温ガス炉を熱源とする IS プロセスの研究を進めており、閉サイクル運転実証などの成果を挙げている³⁾。しかし、IS プロセスには、ヨウ化水素の平衡分離率が低い(約 20%)という問題点がある。ヨウ化水素の低い平衡分離率は、プロセスでの循環物質使用量の増大をもたらし、さらに熱効率を低下させる。これを避けるためには、水素発生工程におけるヨウ化水素分解の高効率化が必要である。

無機膜による混合ガスの分離法は、相変化を伴わないため、潜熱によるエネルギーロスがなく、省エネルギー分離法として注目されており⁴⁾、IS プロセスのヨウ化水素分解工程の高効率化にも有効な技術である⁵⁾。

最近、耐熱性、耐腐食性に優れていると考えられる多孔質セラミックスに化学蒸着法(CVD)あるいはゾルゲル法等により、薄膜をコーティングし、水素を選択的に分離する水素分離膜を作製する研究が盛んに進められており、多数の研究報告が行われている⁶⁻¹⁵⁾。その中で、化学蒸着法(CVD)は製作工程が単純で簡単だということで期待されている。

Gavalas ら⁴⁾は SiH_4 の CVD で、S.Kim ら⁵⁾と M.Tsapatis ら⁶⁻⁷⁾は SiCl_4 の CVD で、C.E.Megiris ら⁸⁾は TPS(Triisopropylsilane)の CVD で、H.Y.Ha ら⁹⁾は TEOS(Tetraethylorthosilicate)の CVD で、Vycor ガラス(細孔径 4nm)にシリカを化学蒸着し、窒素に対する水素の選択性が 500 以上の水素分離膜の製作に成功している。しかし、基膜である Vycor ガラス自体の水素の透過速度が約 10^{-8} mol/Pa \cdot m² \cdot s のオーダーであるため、実用的な透過速度を得ることはできない¹⁰⁾。J.C.S.Wu ら¹⁰⁾は TEOS の CVD で、 α -アルミナチューブ(細孔径 200nm)にゾルゲル法で γ -アルミナ層(細孔径 4nm)をコーティングした後、シリカを化学蒸着し、水素の透過速度が 2.18×10^{-6} mol/Pa \cdot m² \cdot s(600°C)で、窒素に対する水素の選択性が 12.6~72 の水素分離膜の製作に成功している。また、S.Yan ら¹¹⁾は Wu らと同様な基膜(細孔径 7nm)と方法で、水素の透過速度が 10^{-7} ~ 10^{-8} mol/Pa \cdot m² \cdot s のオーダーで、窒素に対する水素の選択性が 1000 以上の水素分離膜の製作に成功している。しかし、これらの水素分離膜は水蒸気雰囲気の数時間曝露すると、選択性及び透過速度が減少する問題点がある。G.Xomeritakis ら¹²⁾は PdCl_2 の CVD で、 α -アルミナチューブ(細孔径 200nm)にゾルゲル法で γ -アルミナ層(細孔径 4nm)をコーティングした後、パラジウムを化学蒸着し、水素の透過速度が 10^{-6} ~ 10^{-7} mol/Pa \cdot m² \cdot s のオーダーを持つパラジウム膜の製作に成功している。しかし、パラジウム膜は、HI 分解環境下では、膜上に黒い粉が生じ、選択性及び透過速度が悪くなるという問題点がある¹³⁾。

このように、CVD 法を用いたシリカ系の無機分離膜は有望と考えられるが、透過速度と選択性を両立させた製膜は行われていない。

そこで、本研究では、水素の透過速度が 10^{-6} mol/Pa \cdot m² \cdot s のオーダーである安価な α -アルミナ多孔質チューブを基膜とし、安全性に優れた TEOS を反応原料とする CVD 法を表面改質手

法として取り上げ、CVD 反応条件の検討を行った。

2. 実 験

2.1 製膜実験装置及び方法

基膜として、 α -アルミナ多孔質チューブ(ノリタケ(株)製、外径 5.5mm、内径 3.5mm、長さ 250mm、気孔率 36%、平均細孔径 100nm)と、このチューブの表面を処理して、平均細孔径を小さくしたものをを用いた。表面処理膜は、支持層の上に平均細孔径 80 nm の第 2 層、最表面に平均細孔径 10 nm の第 3 層 (γ -アルミナ) を有する三層構造である。製膜実験では、基膜のガス透過部(長さ 7mm ~15mm)以外を封着ガラスでシールした。

Fig. 1 に CVD 反応装置を示す。

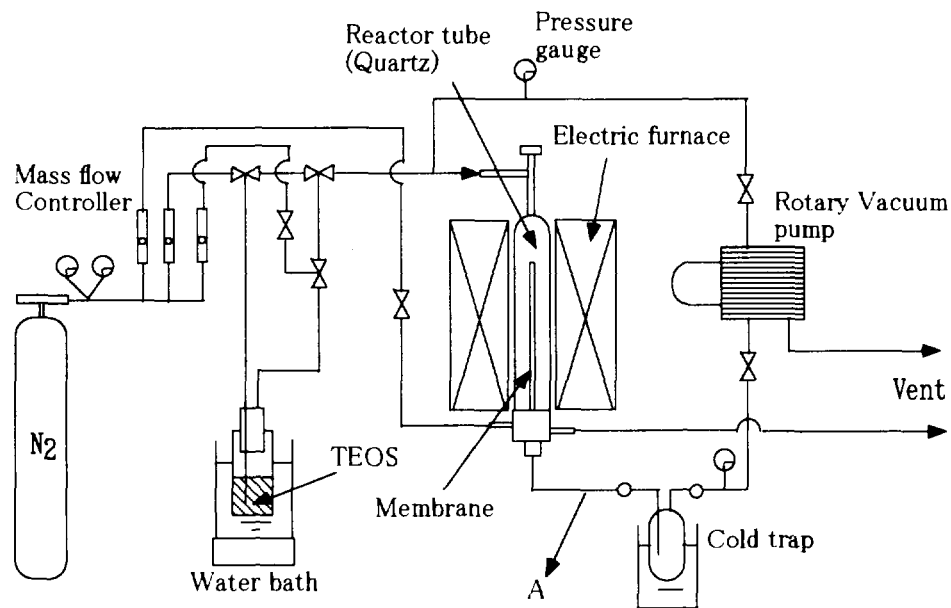


Fig.1 Schematic diagram of chemical vapor deposition apparatus

CVD 処理は、基膜を反応管(石英ガラス製、O.D 20mm、I.D 18 mm、長さ 500 mm)内に固定し、常圧下で、窒素ガスをキャリアーガスとして TEOS を導入することにより行った。

反応条件のパラメーターである CVD 反応温度、キャリアーガス流速、TEOS 濃度については、前年度の陽極酸化膜の製膜条件と従来の研究報告例を参考にして予備実験を行い、600°C の CVD 反応温度、1 l/min のキャリアーガス流速、0.303~0.526% 付近の TEOS 濃度を標準条件として用いた。また、基膜の内部を減圧にして反応気体を基膜の内部に吸引し、細孔内部へシリカを均一に析出させる方法¹⁾についても検討した結果、有効性が認められたので採用することにした。さらに、CVD 反応における酸素の影響を調べた結果、600°C の高温条件では酸素の影響がほとんど見られなかったため、TEOS の熱分解のみによる CVD 反応を行うことにした。

CVD 処理に際しては、減圧側の圧力をモニターし、基膜のマクロ孔が TEOS の熱分解で生成する

シリカによって閉塞されることに伴う圧力低下がそれ以上見られなくなった時、TEOS の供給を停止し、CVD 処理を終了した。また、一定時間ごとに TEOS の供給を停止し、次節に述べる方法で、ヘリウムおよび窒素ガスの透過速度を測定した。CVD 処理した膜は、室温で保存した。

2.2 透過実験

製膜中にはヘリウム、窒素ガスの透過速度を測定し、CVD 処理に伴うガス透過特性の変化をモニターした。また、製膜後には、水素、ヘリウムおよび窒素ガスの透過速度を室温から 600°C の範囲で測定することにより膜の評価を行った。

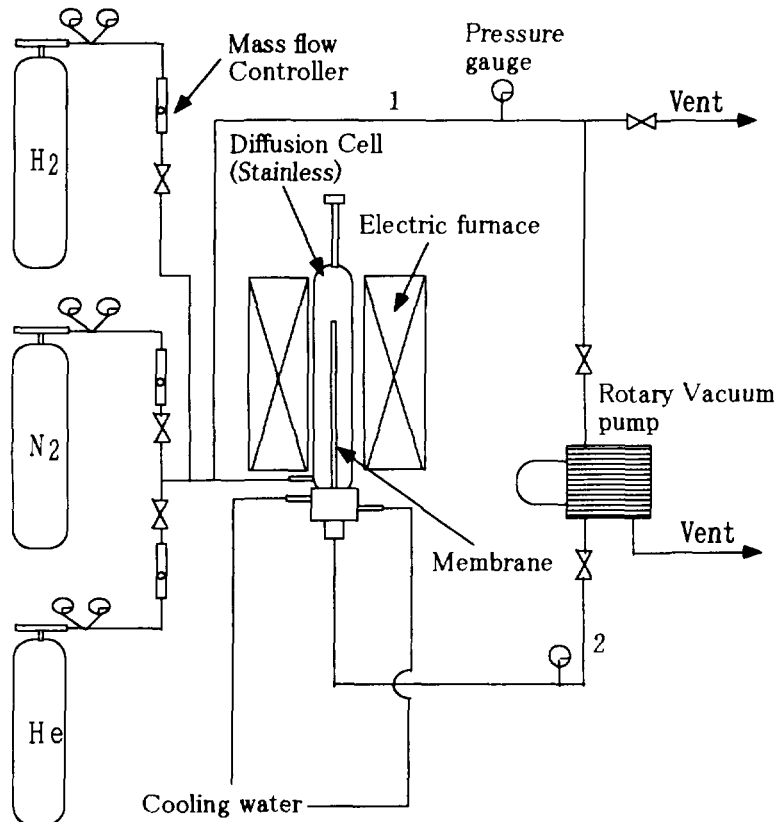


Fig.2 Experimental apparatus for the permeation test.

Fig.2 に透過実験装置を示す。

製膜中の透過速度測定は、Fig.1 の CVD 反応管にて行った。製膜後の測定は、より高精度のステンレス拡散セル(0.D 40 mm、I.D 38 mm、長さ 500 mm)を用いて行った。

透過速度は圧力上昇法⁵⁾により以下の手順で測定した。

Fig.2 のライン 1 と 2 を真空に引いた後、ライン 1 の排気を止め、試験ガスを流し 1 気圧とした。次いで、ライン 2 の排気を止め、その時の圧力上昇の経時変化を記録計に記録した。気体の透過速度 (Q) は、(1) 式により算出した。

$$Q \text{ (mol/Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s)} = (K / A \Delta P) (dP / dt) \dots (1)$$

ここで、 ΔP は膜の両側の圧力差、 A は膜の有効面積、 K は校正係数である。

3. 結果及び考察

3.1 CVD 反応条件の影響

Table 1 に CVD 反応条件とヘリウム、窒素ガスの透過速度を示す。

反応管内の線速度を M1 膜と比べ 4 倍に早くして製膜した M2 膜の場合、窒素とヘリウムガスの透過速度は大きくなったが、窒素に対するヘリウムの選択性は約 1/2 に減少した。TEOS の流速を M1 膜と比べ小さくして製膜した M3 膜の場合も、窒素とヘリウムガスの透過速度は大きくなったが、窒素に対するヘリウムの選択性は約 1/2 に減少した。また、線速度、TEOS の流速を M1 膜より 3.5 倍以上にした膜の場合、CVD 反応が 50 時間を超えても、窒素に対するヘリウムの選択性は低い値であった。Fig.1 の A の排気ラインを M1 膜の製膜時と比べ太くし、排気速度を増大して製膜した M4 の膜の場合、窒素とヘリウムガスの透過速度は大きくなり、窒素に対するヘリウムの選択性は少し増加する傾向を示した。これにより、製膜において、排気速度を増大する方法は膜の選択性及び透過速度の面で、有利であると考えられる。

細孔径が 10 nm であり、M4 膜と同様の条件で製膜した M5 膜の場合、M4 膜と比べ 1/3 の CVD 反応時間で、ヘリウムガスの透過速度は M4 膜とほぼ同等の値を示し、窒素ガスの透過速度は M4 の 1/30 の値を示した。また、選択性も M4 膜と比べ 34 倍以上の値を示した。

Table 1. Reaction condition of chemical vapor deposition (CVD) and permeances of gases (He, N₂).

Membrane	Pore size [nm]	Flow rate of N ₂ gas [ml/min]	Flow rate ^a of TEOS [ml/min]	Linear velocity [m/s] × 10 ²	Deposition time [hr]	Permeance ^f [mol/Pa m ² s] × 10 ⁹		Selectivity (He/N ₂) ^d = 2.64
						He	N ₂	
M1	100	1500	5.34	7.7	22	6.12	0.743	8.24
M2	100	1500	5.34	31 ^b	40	12.6	3.25	3.88
M3	100	1500	3.08	7.7	32	18.2	5.07	3.6
M4 ^c	100	1500	5.34	7.7	32	12.2	0.799	15.3
M5 ^e	10	1500	5.34	7.7	10	13.9	0.0268	518

a The flow rate was controlled by changing the bath temperature.

b Linear velocity was varied by using reactor tube of O.D 10mm, I.D 9mm.

c The same condition with M1 except the evacuation rate. Higher evacuation rate was achieved by changing vacuum line.

d Selectivity by knudsen diffusion mechanism.

e The evacuation condition was the same with M4.

f Permeance was measured in diffusion cell at 600°C.

Fig.3 に CVD 反応時間とヘリウム、窒素ガスの透過速度関係の一例を示す。

細孔径が 100 nm の基膜の場合、ヘリウム、窒素ガスの透過速度は、CVD 反応時間の経過とともに徐々に減少する傾向を示し、31 時間以上ではほぼ変化が見られなくなった。

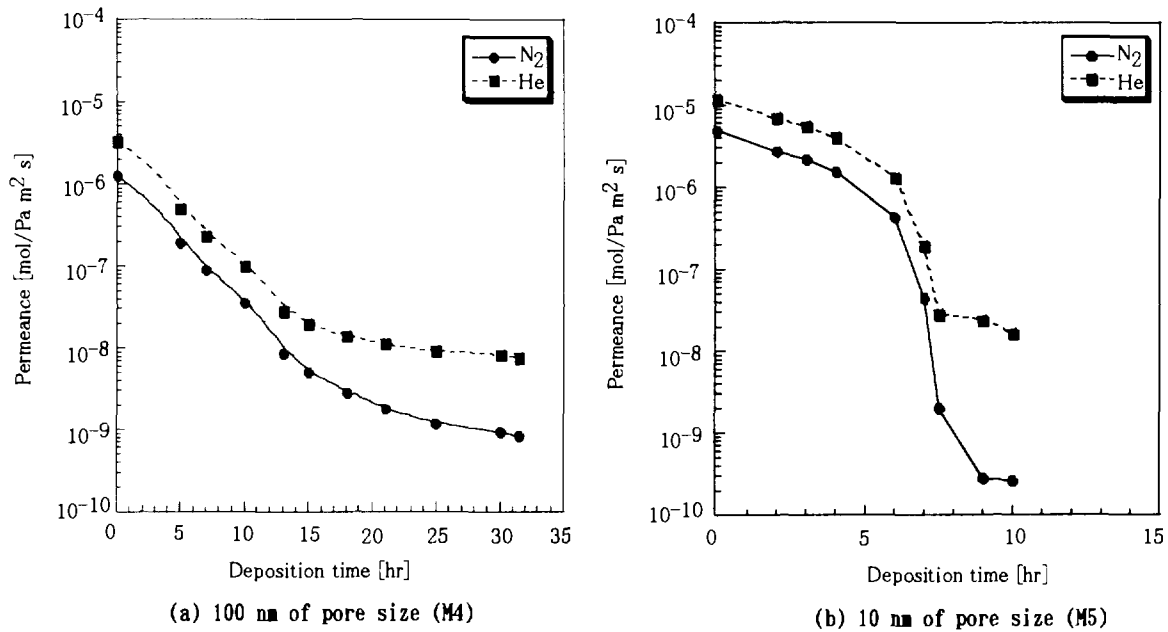


Fig.3 The relationship between permeances of gases (He, N₂) and deposition time in reactor (quartz tube) at 600°C.

細孔径が 10 nm の基膜の場合、ヘリウムガスの透過速度は、6 時間の CVD 反応時間までは、時間の経過とともに徐々に減少する傾向を示し、6 時間から 7 時間 30 分の間では急激に減少し、その以上ではほぼ同等の値を示した。また、窒素ガスの透過速度は、6 時間の CVD 反応時間までは、時間の経過とともに徐々に減少する傾向を示し、6 時間から 9 時間の間では急激に減少し、その以上ではほぼ同等の値を示した。

細孔径が小さい基膜の場合、細孔径が大きい基膜より短時間で CVD を行うことができ、かつ選択性を持つ膜の製膜が可能であった。

無機分離膜の適用において、選択性がやや低くても透過速度が大きい方が気体の分離や精製に有利な場合もあるとされている⁽¹⁾。Fig.3 を見るとわかるように、CVD による無機膜の作製は、CVD 反応時間を調節することによりガス透過速度及び選択性の調節が可能であると考えられる。

3.2 膜の評価

Fig.4 に M4 と M5 膜での水素、ヘリウムおよび窒素ガスの透過速度の温度依存性を示す。

M4 と M5 膜のヘリウムと水素ガスの透過速度は、温度の増加に伴い増加する傾向を示した。一般に、多孔質セラミックス基膜のマクロ孔が TEOS の熱分解で生成するシリカによって緻密に閉塞されると、ガスは活性化拡散機構により流れ、温度の増加とともに透過速度も増加するとされている⁽¹⁾。これにより、M4 と M5 膜の細孔はほぼシリカによって閉塞され、活性化拡散によりガスが透過すると推測できる。

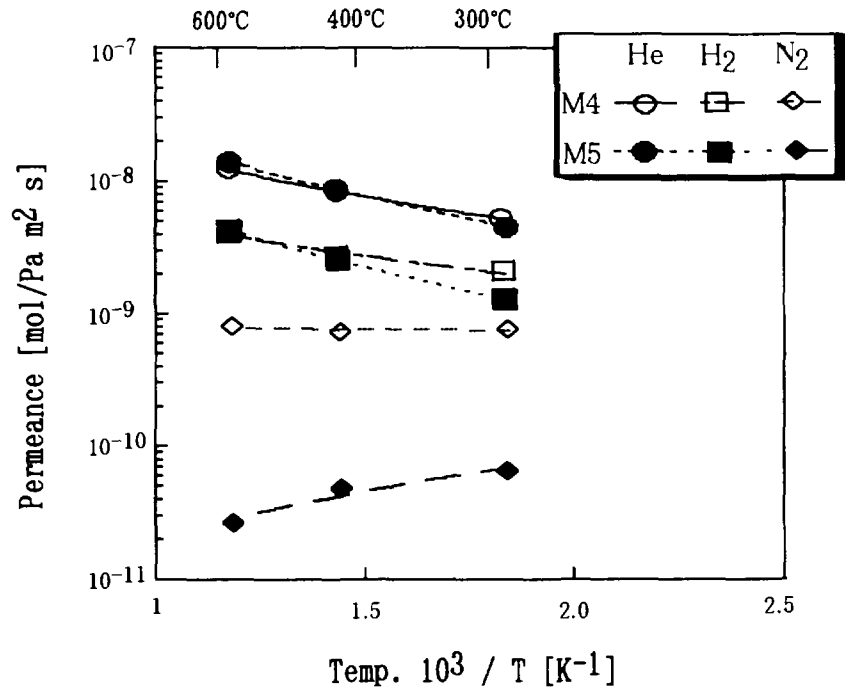


Fig.4 The change of permeances of gases by changing temperature.

M4 膜では、窒素ガスの透過速度の温度依存性はなく、比較的大きな透過速度であった。M5 膜では、温度の増加により透過速度は減少していく傾向が見られた。

M4 と M5 膜について、(2)式によりヘリウムと水素の活性化エネルギーを算出した。

$$P = Q \exp [-E_a / (RT)] \dots (2)$$

ここで、Q は膜の無定形構造と関係する係数、 E_a は活性化エネルギー、R は気体定数、T は絶対温度である。

300~600°Cにおける活性化エネルギーは、M4 膜の場合、水素は 8.71、ヘリウムは 10.8 kJ/mol を示し、M5 の膜の場合、水素は 15.3、ヘリウムは 14.0 kJ/mol を示した。M5 膜での水素の活性化エネルギーは、現在報告されている論文らと比べほぼ同等の値であることが分かった。

600°Cにおいて、M4 膜と M5 膜での窒素に対する水素の選択性は、それぞれ 5.18、160 を示し、Knudsen 流れの 3.74 以上であった。

一般に、ガスの膜透過が活性化拡散機構による場合、分子径による分子ふるい効果(Kinetic diameter: 水素 2.83 Å、ヘリウム 2.6 Å、窒素 3.8 Å)が発現するとされている¹⁰⁾。ヨウ化水素の分子径が 4.21 Åであることを考えると、M4 膜と M5 膜では、ヨウ化水素に対する水素の選択性はより大きくなると推測できる。

以上、入手が容易である細孔径の大きい基膜を用いてもほぼ緻密にシリカ膜が形成され、水素に対する選択性を示す分離膜の製膜ができることを見出した。また、細孔径が小さい基膜を用いることにより、より優れた選択性を持つ水素分離膜の製膜ができることを明らかにした。

アルミナチューブを用いて製膜した水素分離膜は、前年度の陽極酸化膜の結果¹¹⁾と比べ選択性

はほぼ同等の性能を示したが、高温での適用の面では有利であると考えられる。

4. 結 論

- (1) 細孔径が 100 nm の基膜を用い、窒素に対する水素の選択性が 5.18 を示す分離膜の製膜ができた。
- (2) 細孔径が 10 nm の基膜を用い、窒素に対する水素の選択性が 160 を示す分離膜の製膜ができた。
- (3) 製作した水素分離膜での水素の活性化エネルギーは 8.71~15.3 kJ/mol を示した。
- (4) 細孔径が小さい基膜の方が大きい基膜より製膜しやすいことを確認した。

謝辞

実験装置の製作において、御協力頂いた池野谷和彦氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) K.Onuki, H.Nakajima, M.Futakawa, I.Ioka, S.Shimizu, Proc. 8th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, 1803-1808, Kyoto, Japan, Sep. 30 - Oct. 4, (1997)
- (2) M. Sakurai, M.Aihara, N.Miyake, A.Tsutsumi, K.Yoshida, Int. J. Hydrogen Energy, 17(8), 587-592 (1992)
- (3) 中島隼人、池野谷和彦、小貫薫、清水三郎、化学工学会誌、in Press
- (4) G.R.Gavalas, C.E.Megiris and S.W.Nam, Chem. Eng. Sci., 44(9),1829-1835 (1989)
- (5) S.Kim and G.R.Gavalas, Ind. Eng. Chem. Res., 34, 168-176 (1995)
- (6) M.Tsapatis, S.Kim, S.W.Nam, G.Gavalas, Ind. Eng. Chem. Res., 30, 2152-2159 (1991)
- (7) M.Tsapatis, G.Gavalas, J. Membrane Sci., 87, 281-296 (1994)
- (8) C.E.Megiris, J.H.E.Glezer, Ind. Eng. Chem. Res., 31, 1293-1299 (1992)
- (9) H.Y.Ha, S.W.Nam, S.-A.Hong, W.K.Lee, J. Membrane Sci., 85, 279-290 (1993)
- (10) J.C.S.Wu, H.Sabol, G.W.Smith, D.L.Flowers, P.K.T Liu, J. Membrane Sci., 96, 275-287 (1994)
- (11) S.Yan, H.Maeda, K.Kusakabe, S.Morooka, Ind. Eng. Chem. Res., 33, 2096-2101 (1994)
- (12) G.Xomeritakis, Y.S.Lin, J. Membrane Sci., 120, 261-272 (1996)
- (13) M.Naiko, K.Nakahira, Y.Fukuda, H.Mori, J.Tsubaki, J. Membrane Sci., 129, 263-269 (1997)
- (14) R.S.A.de Lange, J.H.A.hekkink, K.Keizer, A.J.Burggraaf, J. Membrane Sci., 99, 57-75 (1995)
- (15) H.Ohya, H.Nakajima, N.Togami, H.Ohashi, M.Aihara, S.Tanisho, Y.Negishi, Int. J. Hydrogen Energy, 22 (5), 509-515 (1997)

- (16) 草壁克己、諸岡成治、化学工業、52-59、1994年9月号
- (17) N.Ito, Y.Shindo, H.Kakuta, H.Yoshitome, Int. J. Hydrogen Energy, 9(10), 835-839 (1984)
- (18) 草壁克己、諸岡成治、化学工業、43-50、1994年10月号
- (19) J.Yeheskel, D. Leger, P.Courvoisier, Adv. Hydrogen Energy, 2(1), 569-594 (1979)
- (20) T.Okubo, H.Inoue, AIChE J., 35 (5), 845-848 (1989)
- (21) K.Onuki, H.Nakajima, S.Shimizu, J.Chemical Engineering of Japan, 30 (2), 359-362 (1997)

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E.C.閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ¹⁹	1.63377 × 10 ²⁰	4.45050 × 10 ²⁶	3.82743 × 10 ²⁰	1.51857 × 10 ²²	1.18171 × 10 ¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15°C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

—Sプロセス高効率化のための水素分離膜に関する研究 — 多孔質 α -アルミナチューブを基膜とした製膜方法 —