

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03855

研究課題名(和文)革新的シリカ膜の開発と触媒膜型反応器によるプロセス強化

研究課題名(英文)Development of novel SiO₂-based membranes and their application to catalytic membrane reactors for process intensification

研究代表者

都留 稔了(Tsuru, Toshinori)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授

研究者番号：20201642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、シリカ多孔質膜の製膜技術をベースとして、(1)分離機能の発現と機能向：各種製膜材料とプロセッシングによる、多孔質シリカ系分離層の高選択性・高透過性化、(2)膜反応機能の発現：反応触媒と分離膜を組み合わせた膜反応器の開発および膜型反応試験(各種脱水素反応・脱水反応、およびエステル交換反応)への応用を行ない、(3)膜型反応システム評価：最適操作条件など膜型反応のシステム評価、を行うことで、膜反応器によるプロセス強化を実験的および理論的に明らかとすることを研究目的とする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、水素製造のみならずオレフィンなど有用物質製造、エステル交換反応、さらにはCO₂有効利用システムなどの多様な反応系において、膜反応器の検討を行った。また、膜反応シミュレーションにおいても、各種反応システムのモデル解析を行い、分離と反応の組合せた膜反応器の有用性およびプロセス強化が可能であることを明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：Based on the membrane technology of porous silica membranes, this research aims to (1) develop and improve the separation functionality: improvement of the selectivity and permeability of the porous silica separation layer by using various membrane materials and preparation processing, (2) develop the membrane reaction functionality: development of a membrane reactor combining a reaction catalyst and separation membrane and its application to membrane reactions (dehydrogenation and dehydration reactions, and transesterification reactions), and (3) evaluate the membrane reactor systems: evaluation of the system of membrane reaction such as optimum operating conditions. This research will clarify the process intensification by membrane reactors experimentally and theoretically.

研究分野：化学工学 膜工学

キーワード：膜反応器 シリカ 触媒 反応 膜分離 脱水素反応 水素化反応 エステル交換反応

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

分離機能を有する膜と反応と組み合わせた膜型反応器は、膜分離が開発された 1960 年代にすでに提案され、一体化による装置コンパクト化だけでなく、選択的引抜による平衡シフトによる反応率・選択性向上、さらには反応温度の低温化(100~300°C)などの抜本的なプロセス強化が期待されている。これまでの研究は、水素の溶解選択に基づくパラジウム膜を用い、CH₄水蒸気改質反応などでの水素製造に集中している。パラジウム膜は高価であるだけでなく、高温(~600°C)でのカーボン固溶化や酸性ガスによる膜劣化が指摘されている。さらに、水素のみが膜透過するため、脱水反応などへの応用ができず、膜型反応への応用が限定的である。近年、ゼオライトやシリカなどの多孔質無機分離膜の開発が格段の進化を遂げている。ゼオライト膜に関しては小孔径ゼオライトの製膜ははまだ困難であり、H₂とCO₂などの小分子混合物の分離は実質的に不可能である。一方、シリカ膜は細孔径を広範囲に制御可能であり、申請者は構造化アルコキシドによる細孔径の精密制御と高透過性化に成功し、カチオン(Ni, Co)ドープによる水熱安定性の向上およびアニオン(F)による精密細孔制御技術を世界に先駆けて報告した。また、製膜プロセスにおいても、世界に先駆けて減圧および大気圧プラズマ CVD 法によるシリカ膜の開発にも成功した。これらシリカ系新規多孔質膜の高機能化(高選択透過性化)と耐性向上とともに、多孔質膜の機能を生かした膜反応器システムの可能性を明らかにする段階にある。

申請者は、これまでにメタン水蒸気改質反応¹⁾、エネルギーキャリアーとしてのメチルシクロヘキサン²⁾およびアンモニアの脱水素反応³⁾による水素製造に関して膜型反応器の有用性を明らかとしてきた。今後は、化学反応の多様性を考慮すると、水素製造のみならず、オレフィンや芳香族など有用物質製造や脱水反応、さらにはCO₂有効利用などの多様な反応系に展開・実証してゆく段階にあると確信している。

2. 研究の目的

本研究は、シリカ多孔質膜の製膜技術をベースとして、(1)分離機能の発現と機能向:各種製膜材料とプロセスによる、多孔質シリカ系分離層の高選択性・高透過性化、(2)膜反応機能の発現:反応触媒と分離膜を組み合わせた膜反応器の開発および膜型反応試験(各種脱水素反応・脱水反応、およびエステル交換反応)への応用を行い、(3)膜型反応システム評価:最適操作条件など膜型反応のシステム評価、を行うことで、膜反応器によるプロセス強化を実験的および理論的に明らかとすることを研究目的とする。

具体的には、(1)分離機能に関しては、多孔質シリカ膜を各種前駆体を用いてゾルゲル法および熱 CVD 法により製膜を行った。FTIR や窒素吸着などの各種キャラクタリゼーションを行い、特にアモルファスシリカの Molecular-Net Sieving 機構発現の評価としてフロー型蒸気吸着分光解析法(フローEP)及び陽電子消滅寿命法(PALS)について検討した。(2)の膜反応特性に関しては、プロパン脱水素反応によるプロピレン合成反応に注目した。さらに、これまでにほとんど報告例の無いエステル交換反応への膜反応器への適用を行った。(3)に関しては、脱水素反応と水素化反応とを膜を隔てて両側で同時に進行させる複合型反応システムの特性について、数値シミュレーションによる特性予測を中心として検討した。反応系としては、エネルギーキャリアとして注目されているメチルシクロヘキサン脱水素反応、および今後回収CO₂の利用技術として重要となるメタン化反応での評価を行った。脱水素反応は吸熱反応であり、水素化反応は発熱反応であるので、複合型システムにおける熱利用の状況についても留意した。

3. 研究の方法

(1)(2)シリカ膜の分離および反応機能の発現

熱 CVD 法シリカ膜:プロパン脱水素反応に用いるシリカ膜には、水素を選択的に引抜可能となる細孔径の小さな CVD シリカ膜が適する。分離層と触媒層が一体化された触媒膜を用いて、プロパン脱水素反応膜反応試験を行った。管状 α -アルミナ支持体にアルミナ(+Ga)ゾルもしくはシリカゾルを塗布した。触媒担持は、基材に H₂PtCl₆ および SnCl₂ を含浸させ、焼成することで作製した。熱 CVD は、600°Cにて 5~60 min、基材の外側にシリカ源蒸気(Dimethyldimethoxysilane)を供給し、基材内側に O₂ を供給して作製した。プロピレン脱水素膜反応試験は、600°Cにて、基材内側に C₃H₈ を 5~50mLmin⁻¹ で供給し、外側を N₂ スweepして行った。

ゾルゲル法:エステル交換反応として、酢酸メチル(MA)とn-ブタノール(BuOH)から、酢酸ブチル(BA)生成反応(MA + BuOH \rightleftharpoons BA + MeOH)を研究対象とした。エステル交換反応系で MeOH は最も分子径が小さく MeOH 選択除去が有利となるが、分子径 0.38 nm 程度の MeOH を高透過させるためには比較的ルーズな膜構造が必要となる。これまでに架橋型アルコキシシランの架橋基で細孔径制御を行うスパーサー法による細孔径制御を提案しているが、特に三重結合を持つアセチレンで架橋した 1,2-bis(triethoxysilyl) acetylene (BTESA) 膜に着目し、その製膜条件の最適化と溶媒透過性評価、さらに膜反応器への適用としてバッチ反応器(Batch-MR)および工業化に適するフロー膜反応器である、連続混合槽型膜反応器 (CST-MR)およびプラグフロー膜反応器(PF-MR)に応用した。

Molecular-Net Sieving 材料の特性評価とスクリーニング:新規分離膜材料開発に資する、シリカ系薄膜中のサブナノからナノスケールサイズの細孔構造解析の高度化及び細孔構造の視点から見た焼結メカニズム解明のため、フロー型蒸気吸着分光解析法(フローEP)及び陽電子消滅寿命法(PALS)をプラズマ誘起化学気相堆積法(PECVD)により作製したモデル薄膜の細孔構造解析に応用した。

(3) 膜反応器システム評価

図1は、メチルシクロヘキサン (MCH) の脱水素反応(C_7H_{14}
 $C_7H_8 + 3H_2$, $H^0=205$ kJ/mol)と CO_2 のメタン化反応
 $(CO_2+4H_2 \rightarrow CH_4+2H_2O, H^0=-165$ kJ/mol)とを水素透過膜
(Pd-Ag 膜)を隔てて組み合わせた複合型触媒反応システム
である。反応システムは、Pd-Ag 膜を内部に設置した二重円
筒管型の反応器構造を想定しており、内側(Channel#1)では
 CO_2 メタン化反応が、外側 (Channel#2)では MCH の脱水素
反応が同時に進行するシステムである。Channel#1 と
Channel#2 内の触媒充填密度は 1200 $kg\ m^{-3}$ とし、反応器は
内管 8 mm, 外管 16 mm, 触媒層長さPd-Ag 膜長さはとも
に 100 mmである。反応温度は 300 °C, Channel#1のメタン化原料供給量は 100 ml/min ($CO_2/N_2=20/80$),
Channel#2 の MCH 供給量は 300 ml/min(MCH/ $N_2=30/70$ or $H_2/N_2=80/20$)とした。各流路 (Channel#1
と Channel#2) 内の物質収支式と熱収支式を連立させた現象論方程式を、境界条件と膜透過速度を考
慮した数値法解析で求めた。また、MCH 脱水素とメタネーションのそれぞれの反応速度式は文献報告
^{4, 5)}のものを使用した。

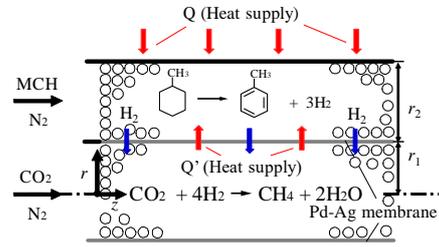


図1 解析した複合型触媒システム

4. 研究成果

(1)(2)シリカ膜の分離および反応機能の発現

熱 CVD シリカ膜においては、まず、触媒含浸基材が熱
CVD に及ぼす影響を調査した。触媒担持の有無における
基材の性能は、 H_2 透過率が $2.0-3.5 \times 10^{-6}$ $mol\ m^{-2}\ s^{-1}\ Pa^{-1}$ と
同レベルであった。次に、熱 CVD 膜の製膜を行った。 H_2 透
過率 $9.9-16 \times 10^{-7}$ $mol\ m^{-2}\ s^{-1}\ Pa^{-1}$, $H_2/N_2=71,000$ と触媒未担
持基材と同レベルであり、高い水素分離性能を示した。触
媒担持は熱 CVD に大きな影響を及ぼさないことが明らか
になった。次に、触媒複合型シリカ膜による膜反応器試験を
行った結果を図2に示す。膜外側の N_2 スweepがなく、水
素引き抜きしなかった場合と比較して、プロパン転化率は
 10% から 13% へ、プロピレン収率は 7.1% から 9.9% へ向上し
た。以上、触媒複合型熱 CVD 膜を用いた膜反応器試験に
て、水素の引き抜きによりプロパン転化率およびプロピレン
収率の向上が確認できた。

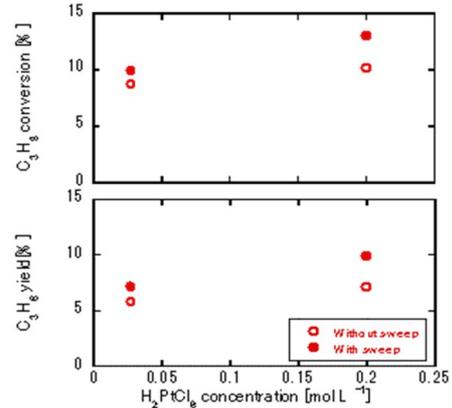


図2 プロパン脱水素反応の膜反応器試
験での触媒含浸濃度と反応性の関係

ゾルゲルシリカ膜の細孔径制御として、ゾル調製時の酸モル
比および焼成温度が重要であることが判明した。図3には焼成
温度 $300^\circ C$, 酸モル比 0.1 とした場合の BTESA 膜の MeOH と
MA, BuOH, BA の混合系 (MeOH 10wt%) における、MeOH
に対する分離係数および MeOH 透過流束の温度依存性を
示す。BuOH および BA において分離係数はそれぞれ 400
および 1000 以上を示し、高い分離性が確認できた。また、
分離係数の温度による変化は小さく、高温でも高い分離性
を示した。MeOH 流束はいずれの系においても温度が上昇
すると増加する傾向を示した。これは温度が上昇することで
透過駆動力となる MeOH の分圧が上昇したためである。各
種分離系による透過流束は活量に影響されており、MeOH
と異なる官能基を持つエステルとの混合ではより高い流束を
示した。高温ではより MeOH を引抜くことで高い膜反応器性
能を示す可能性が示唆された。

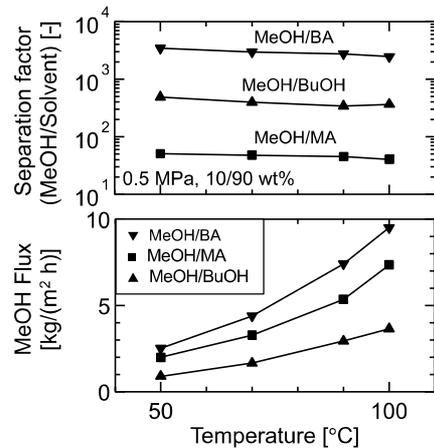


図3 浸透気化特性の温度依存性
(供給圧 500 kPa)

図4に MA-BuOH 反応系における $60^\circ C$, $100^\circ C$ での BA 収率の経時変化を示す。引抜きなしの場合、
 $60^\circ C$ では平衡に達するのに $5\sim 6$ h 程度要するのに対し、 $100^\circ C$ では 1.5 h で平衡に達し、反応速度が大
幅に向上していることがわかる。引抜きありの場合、反応速度が向上したこ
とで 1.5 h 後には引抜きの効果が表れており、また 10 h 後には平衡値から
 40% 向上して 90% 程度まで達した。収率の向上は反応速度だけでなく、図3
に示されるように MeOH の透過速度も向上したためである。図中の計算線は
反応条件および2成分PVでの膜性能を用いたシミュレーションを示すが、
いずれの温度においても良く一致して

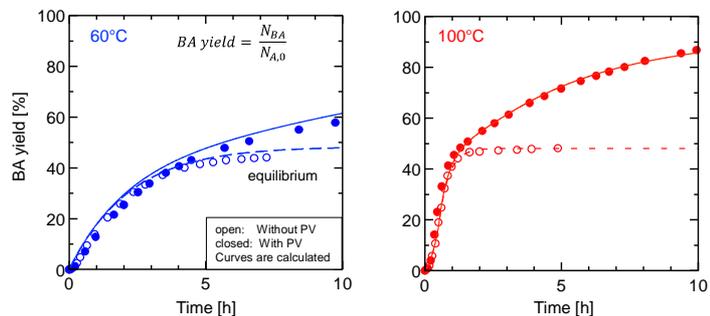


図4 BA 収率の経時変化 (MA/BuOH = 1, 供給圧
 500 kPa, 温度 60 (左), 100 (右))

いた。図5には、同一の膜を用いて、
反応装置形式を Batch-MR, CST-MR

および PF-MR として用いたときの BA 収率の供給流量依存性を示す。いずれの反応系においても供給流量が小さいほど反応器内の滞留時間が長くなり、膜反応に有利となった。槽型反応器である Batch-MR と CST-MR では、実験中に得られた同一の MeOH 透過率 (Permeance-1: $P_{\text{MeOH}}=3 \times 10^{-7}$ mol/(m² s Pa), $\alpha_{\text{MA}}=50$, $\alpha_{\text{BuOH}}=50$, $\alpha_{\text{BA}}=200$) を用いて計算した値と実験値がほぼ一致していた。なお, Batch-MR での供給流量は, 仕込みモル数を反応時間で除することで, 流量に換算した⁶⁾。Batch-MR と PF-MR では理論的に同一の反応条件では同じ性能を示すはずであるが, 実験値では PF-MR の収率は Batch-MR の実験値および計算線よりも大幅に低い値を示した。攪拌の不可能な PF-MR では濃度分極の影響により Batch-MR と比べて低 MeOH 透過率を示したためと考えられる。なお, PF-MR での実験値 MeOH 透過率 (Permeance-2: $P_{\text{MeOH}}=0.5 \times 10^{-7}$ mol/(m² s Pa), $\alpha_{\text{MA}}=10$, $\alpha_{\text{BuOH}}=20$, $\alpha_{\text{BA}}=60$) を用いた場合, 計算値は実験値と同等の値を示したことから, 液相反応器では, 攪拌によって分極の影響を小さくすることが膜反応器性能の向上に重要であることが示唆された。

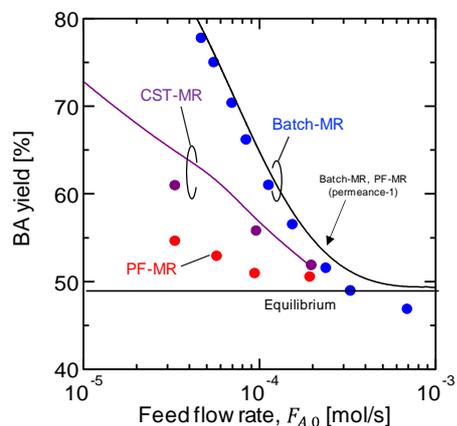


図5 バッチ式 (Batch-MR), 完全混合槽 (CST-MR), およびプラグフロー式反応器 (PF-MR) の BA 収率の供給流量依存性 (MA/BuOH = 1, 供給圧 500kPa, 100)

シリカ系分離膜のモデル試料として PECVD で作製した空隙率の異なる多層構造をもつ多孔質シリカ膜の細孔構造の深さプロファイル解析を PALS で試みた。シリカ積層膜は, 正ケイ酸エチル (TEOS) とシクロヘキサン前駆体による有機シリカ複合膜を 550°C で焼成したシリカ HP 膜 (厚さ 360nm, 空隙率 25%) 上に, 酸素で希釈した TEOS 前駆体によるシリカ LP 膜 (厚さ 580nm, 空隙率 5%) を堆積し, 作製した。PALS による深さ方向解析によりシリカ HP 膜とシリカ LP 膜に対応する深さ領域でそれぞれ 1.2nm と 0.6nm のマイクロ孔が存在することが確認できた。次に, ミクロ多孔質シリカ膜形成直後の細孔構造の安定性をフローEP により評価した。シリカ均一膜は, 正ケイ酸エチルをネットワーク前駆体としてシクロヘキサンと混合して堆積した有機シリカ複合膜 (約 400nm 厚) を 600°C で焼成することにより作製した。図 6 に示すように, 大気中での細孔構造の経時依存性をフローEP で評価した結果, 最初の 30 日間で, 空隙率は初期値の 36% から 27% まで 9%, また膜厚に関しては, 約 380 nm から約 350 nm まで相対値で約 8%, それぞれ低下した。細孔構造は経時的に常温でもサブナノスケールで緻密化することがわかった。この緻密化は大気中の水分子が細孔表面に吸着した後, シリカ粒界中のマイクロ孔を拡散し, 親水性末端シラノール基が重縮合を引き起こしたことに起因すると推察される。

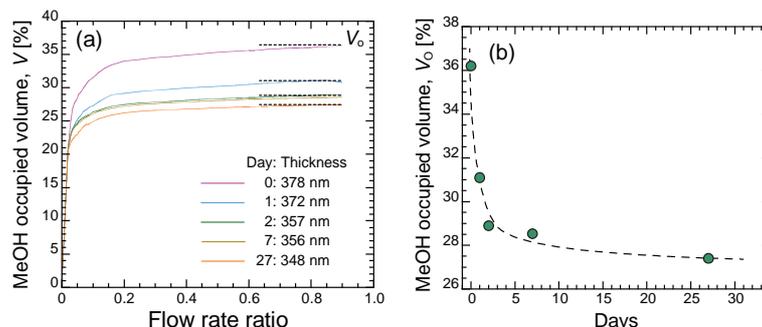


図6 (a) フローEP によるメタノール吸着等温線 (26) および (b) 飽和吸着量 (空隙率 V_0) の経時依存性

(3) 膜型反応システム評価: 脱水素 / 水素化の複合型触媒システムの特性予測

図7は, 内側 Channel#1 の CO₂ 転化率と温度分布の管断面平均であり, 入口からの無次元距離で示した。実線は Channel#2 に MCH を供給した場合, 破線は水素のみ (H₂/N₂=90/10) を流した場合の結果である。図から, 水素のみを供給した場合は Pd 膜を通過した H₂ で CO₂ のメタン化反応が入口付近で迅速に進行し, 距離約 20% からほぼ 100% に近い転化率となった。しかし, それに伴う入口付近の急激な温度上昇 (約 150°C) が確認できた。一方, MCH を供給して脱水素反応を併発した場合には入口付

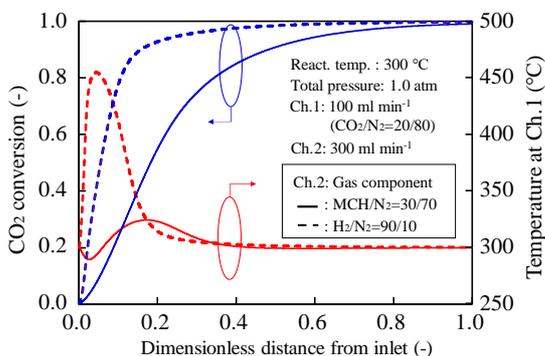


図7 吸/発熱複合型触媒反応システムの特性

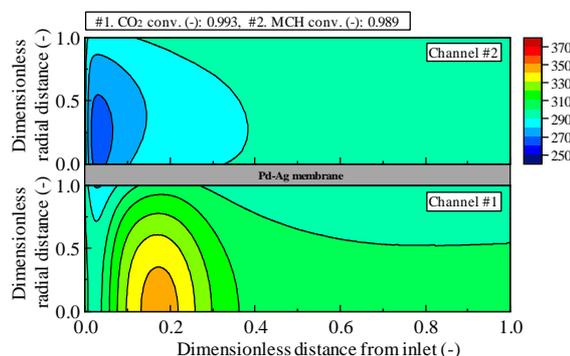


図8 システム内温度分布の等高線図

近の急激な温度上昇は見られず，加えて温度の上昇幅もかなり小さいことがわかる。転化率の上昇も緩やかな上昇曲線を描き，出口ではほぼ 100%である。運転操作における負荷の小さい反応状態が発現している。

図 8 は，CO₂メタン化と MCH 脱水素反応との組み合わせシステムにおける温度分布の等高線図である。入口付近において，内側 Channel#1 では約 270°Cの領域が，外側 Channel#2 では約 350°Cの領域の形成が見られるが，それぞれ設定温度 300°Cよりもあまり大きな温度差ではないことがわかる。この結果から，膜を介した水素化と脱水素反応の組み合わせは，互いの反応エネルギーの相互利用が図れ，運転操作の負荷低減をもたらすものと考えられる。

本研究では，水素製造のみならずオレフィンなど有用物質製造，エステル交換反応，さらには CO₂有効利用システムなどの多様な反応系において，膜反応器の検討を行った。また，膜反応シミュレーションにおいても，各種反応システムのモデル解析を行い，分離と反応の組合せた膜反応器の有用性およびプロセス強化が可能であることを明らかにすることができた。

引用文献

- 1) T. Tsuru et al., *AIChE J.* 50 (2004) 2794–2805
- 2) G. Li, *AIChE J.* 59 (2013) 168–179
- 3) L. Meng et al., *AIChE J.* 61 (2015) 1628 – 1638
- 4) M. Usman *et al.*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51 (2012) 158-170.
- 5) J. Ducamp *et al.*, *Canad. J. Chem. Eng.*, 95 (2017) 241-252.
- 6) T. Sato, *Chem. Eng. J.* 429 (2022) 132188

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計40件（うち査読付論文 39件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tanizume Shusei, Maehara Sota, Ishii Katsunori, Onoki Takamasa, Okuno Takuya, Tawarayama Hiromasa, Ishikawa Shinji, Nomura Mikihiro	4. 巻 254
2. 論文標題 Reaction of methanol to olefin using a membrane contactor on a silica substrate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 117647 ~ 117647
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2020.117647	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fukuhara Choji, Matsui Yoshito, Tanebayashi Masaki, Watanabe Ryo	4. 巻 5
2. 論文標題 A novel catalytic reaction system capturing solid carbon from greenhouse gas, combined with dry reforming of methane	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal Advances	6. 最初と最後の頁 100057 ~ 100057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ceja.2020.100057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hirata Nozomu, Watanabe Ryo, Fukuhara Choji	4. 巻 282
2. 論文標題 Performance characteristics of auto-methanation using Ru/CeO ₂ catalyst, autonomously proceeding at room temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fuel	6. 最初と最後の頁 118619 ~ 118619
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fuel.2020.118619	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Dwiratna Bralin, Hirao Kazuaki, Watanabe Ryo, Fukuhara Choji	4. 巻 53
2. 論文標題 High Performance of a Structured Ni-Based Catalyst for Autothermal Dry Reforming of Methane	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN	6. 最初と最後の頁 304 ~ 312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1252/jcej.20we062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jonjaree Thapanee, Sintuya Paweenut, Srifa Atthapon, Koo-amornpattana Wanida, Kiatphuengporn Sirapassorn, Assabumrungrat Suttichai, Sudoh Masao, Watanabe Ryo, Fukuhara Choji, Ratchahat Sakhon	4. 巻 -
2. 論文標題 Catalytic performance of Ni catalysts supported on CeO ₂ with different morphologies for low-temperature CO ₂ methanation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Catalysis Today	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cattod.2020.08.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Qing, Yokoji Makoto, Nagasawa Hiroki, Yu Liang, Kanezashi Masakoto, Tsuru Toshinori	4. 巻 612
2. 論文標題 Microstructure evolution and enhanced permeation of SiC membranes derived from allylhydridopolycarbosilane	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Membrane Science	6. 最初と最後の頁 118392 ~ 118392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.memsci.2020.118392	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Anggarini Ufafa, Yu Liang, Nagasawa Hiroki, Kanezashi Masakoto, Tsuru Toshinori	4. 巻 5
2. 論文標題 Metal-induced microporous aminosilica creates a highly permeable gas-separation membrane	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Chemistry Frontiers	6. 最初と最後の頁 3029 ~ 3042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1QM00009H	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Qing, Yu Liang, Nagasawa Hiroki, Kanezashi Masakoto, Tsuru Toshinori	4. 巻 248
2. 論文標題 Tuning the microstructure of polycarbosilane-derived SiC(O) separation membranes via thermal-oxidative cross-linking	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 117067 ~ 117067
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2020.117067	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Qing, Yu Liang, Nagasawa Hiroki, Kanezashi Masakoto, Tsuru Toshinori	4. 巻 103
2. 論文標題 High performance molecular separation ceramic membranes derived from oxidative cross linked polytitanocarbosilane	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the American Ceramic Society	6. 最初と最後の頁 4473 ~ 4488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/jace.17108	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yu Xin, Wang Qing, Nagasawa Hiroki, Kanezashi Masakoto, Tsuru Toshinori	4. 巻 10
2. 論文標題 SiC mesoporous membranes for sulfuric acid decomposition at high temperatures in the iodine-sulfur process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 41883 ~ 41890
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0RA06919A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gong Genghao, Mamoru Murata, Nagasawa Hiroki, Kanezashi Masakoto, Hu Yunxia, Tsuru Toshinori	4. 巻 588
2. 論文標題 Vapor-permeation dehydration of isopropanol using a flexible and thin organosilica membrane with high permeance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Membrane Science	6. 最初と最後の頁 117226 ~ 117226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.memsci.2019.117226	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nagasawa Hiroki, Eguchi Kosuke, Kanezashi Masakoto, Tsuru Toshinori	4. 巻 685
2. 論文標題 Infrared-spectroscopic porosimetry: Development and application for characterization of hundred-nanometer-thick porous thin films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 299 ~ 305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2019.06.038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ren Xiuxiu, Tsuru Toshinori	4. 巻 9
2. 論文標題 Organosilica-Based Membranes in Gas and Liquid-Phase Separation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Membranes	6. 最初と最後の頁 107 ~ 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/membranes9090107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miura Kazuya, Watanabe Ryo, Fukuhara Choji	4. 巻 696
2. 論文標題 Theoretical study of oxygen adsorption energy on supported metal cluster using d-band center theory and HSAB concept	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Surface Science	6. 最初と最後の頁 121601 ~ 121601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.susc.2020.121601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Ryo, Hirata Nozomu, Miura Kazuya, Yoda Yuta, Fushimi Yuya, Fukuhara Choji	4. 巻 587
2. 論文標題 Formation of active species for propane dehydrogenation with hydrogen sulfide co-feeding over transition metal catalyst	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Catalysis A: General	6. 最初と最後の頁 117238 ~ 117238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcata.2019.117238	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ohashi Tomokazu, Someya Sae, Mori Yoshihiko, Asakawa Tetsuo, Hanaya Makoto, Oguri Motohiro, Watanabe Ryo, Fukuhara Choji	4. 巻 589
2. 論文標題 Deactivation factor of CuCl ₂ -KCl/Al ₂ O ₃ catalyst for ethylene oxychlorination in a commercial-scale plant	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Catalysis A: General	6. 最初と最後の頁 117205 ~ 117205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcata.2019.117205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukuhara Choji, Ratchahat Sakhon, Kamiyama Asuka, Sudoh Masao, Watanabe Ryo	4. 巻 48
2. 論文標題 Auto-methanation Performance of Structured Ni-type Catalyst for CO ₂ Transformation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 441 ~ 444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.190025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ISHII Katsunori, SHIBATA Ai, TAKEUCHI Toshichika, YOSHIURA Junko, URABE Takumi, KAMEDA Yosuke, NOMURA Mikihiro	4. 巻 62
2. 論文標題 Development of Silica Membranes to Improve Dehydration Reactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Petroleum Institute	6. 最初と最後の頁 211 ~ 219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1627/jpi.62.211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hubadillah Siti Khadijah, Dzarfan Othman Mohd Hafiz, Sheikh Abdul Kadir Siti Hamimah, Jamalludin Mohd Riduan, Harun Zawati, Abd Aziz Mohd Haiqal, Rahman Mukhlis A., Jaafar Juhana, Nomura Mikihiro, Honda Sawao, Iwamoto Yuji, Fansuri Hamzah	4. 巻 9
2. 論文標題 Removal of As(iii) and As(v) from water using green, silica-based ceramic hollow fibre membranes via direct contact membrane distillation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 3367 ~ 3376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8RA08143C	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukuhara Choji, Ratchahat Sakhon, Suzuki Yuji, Sudoh Masao, Watanabe Ryo	4. 巻 48
2. 論文標題 Auto-methanation of Carbon Dioxide: A Novel Route for Transforming CO ₂ over Ni-based Catalyst	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 196 ~ 199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.180894	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福原長寿	4. 巻 61
2. 論文標題 物質・熱移動の促進による触媒反応場のプロセス強化 (PI)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 触媒	6. 最初と最後の頁 9-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Anisah Sofiatun, Kanezashi Masakoto, Nagasawa Hiroki, Tsuru Toshinori	4. 巻 212
2. 論文標題 Hydrothermal stability and permeation properties of TiO ₂ -ZrO ₂ (5/5) nanofiltration membranes at high temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 1001 ~ 1012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2018.12.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yu Xin, Nagasawa Hiroki, Kanezashi Masakoto, Tsuru Toshinori	4. 巻 6
2. 論文標題 Improved thermal and oxidation stability of bis(triethoxysilyl)ethane (BTESE)-derived membranes, and their gas-permeation properties	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 23378 ~ 23387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8TA07572G	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanezashi Masakoto, Murata Masaaki, Nagasawa Hiroki, Tsuru Toshinori	4. 巻 3
2. 論文標題 Fluorine Doping of Microporous Organosilica Membranes for Pore Size Control and Enhanced Hydrophobic Properties	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 8612 ~ 8620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.8b01370	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Anisah Sofiatun、Puthai Waravut、Kanezashi Masakoto、Nagasawa Hiroki、Tsuru Toshinori	4. 巻 564
2. 論文標題 Preparation, characterization, and evaluation of TiO ₂ -ZrO ₂ nanofiltration membranes fired at different temperatures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Membrane Science	6. 最初と最後の頁 691 ~ 699
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.memsci.2018.07.072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yu Liang、Kanezashi Masakoto、Nagasawa Hiroki、Tsuru Toshinori	4. 巻 8
2. 論文標題 Role of Amine Type in CO ₂ Separation Performance within Amine Functionalized Silica/Organosilica Membranes: A Review	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1032 ~ 1032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app8071032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Inde Hiroki、Kanezashi Masakoto、Nagasawa Hiroki、Nakaya Toshimi、Tsuru Toshinori	4. 巻 3
2. 論文標題 Tailoring a Thermally Stable Amorphous SiOC Structure for the Separation of Large Molecules: The Effect of Calcination Temperature on SiOC Structures and Gas Permeation Properties	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 6369 ~ 6377
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.8b00632	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Moriyama Norihiro、Nagasawa Hiroki、Kanezashi Masakoto、Tsuru Toshinori	4. 巻 207
2. 論文標題 Pervaporation dehydration of aqueous solutions of various types of molecules via organosilica membranes: Effect of membrane pore sizes and molecular sizes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Separation and Purification Technology	6. 最初と最後の頁 108 ~ 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.seppur.2018.06.021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nagasawa Hiroki, Yamamoto Yuta, Kanezashi Masakoto, Tsuru Toshinori	4. 巻 51
2. 論文標題 Atmospheric-Pressure Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Hybrid Silica Membranes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN	6. 最初と最後の頁 732 ~ 739
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1252/jcej.17we195	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshimoto Shigeru, Ito Kenji, Hosomi Hiroyuki, Takeda Masaaki, Tsuru Toshinori	4. 巻 7
2. 論文標題 Subnanopore structural change of time-elapsd silica PECVD films elucidated by slow positron annihilation and ellipsometric porosimetry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JJAP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 1125051-1125055
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAPCP.7.011205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Moriyama Norihiro, Nagasawa Hiroki, Kanezashi Masakoto, Ito Kenji, Tsuru Toshinori	4. 巻 86
2. 論文標題 Bis(triethoxysilyl)ethane (BTESE)-derived silica membranes: pore formation mechanism and gas permeation properties	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Sol-Gel Science and Technology	6. 最初と最後の頁 63 ~ 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10971-018-4618-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yu Liang, Kanezashi Masakoto, Nagasawa Hiroki, Moriyama Norihiro, Tsuru Toshinori, Ito Kenji	4. 巻 64
2. 論文標題 Enhanced CO2 separation performance for tertiary amine-silica membranes via thermally induced local liberation of CH3Cl	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIChE Journal	6. 最初と最後の頁 1528 ~ 1539
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aic.16040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanezashi Masakoto、Matsutani Takuya、Nagasawa Hiroki、Tsuru Toshinori	4. 巻 549
2. 論文標題 Fluorine-induced microporous silica membranes: Dramatic improvement in hydrothermal stability and pore size controllability for highly permeable propylene/propane separation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Membrane Science	6. 最初と最後の頁 111 ~ 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.memsci.2017.11.072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishii Katsunori、Nomura Mikihiro	4. 巻 12
2. 論文標題 The Evaluation of Counter Diffusion CVD Silica Membrane Formation Process by In Situ Analysis of Diffusion Carrier Gas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Membranes	6. 最初と最後の頁 102 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/membranes12020102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsunori Ishii , Mikihiro Nomura	4. 巻 2
2. 論文標題 PORE SIZE CONTROL OF SILICA MEMBRANES BY COUNTER DIFFUSION CVD METHOD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SEATUC journal of science and engineering	6. 最初と最後の頁 15 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishii Katsunori、Nagataki Yuhei、Yoshiura Junko、Saito Yuta、Nagataki Takaya、Nomura Mikihiro	4. 巻 54
2. 論文標題 Development of Hydrogen Permselective Membranes for Propylene Production	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN	6. 最初と最後の頁 260 ~ 265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1252/jcej.20we082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 WATANABE Ryo, HIRATA Nozomu, YODA Yuta, FUKUHARA Choji	4. 巻 65
2. 論文標題 Dehydrogenation of Lower Alkanes Using H ₂ S	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Petroleum Institute	6. 最初と最後の頁 50 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1627/jpi.65.50	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Ryo, Yokoyama Chikamasa, Miyagi Yuichi, Kayaki Shota, Ohshio Nobuyasu, Fukuhara Choji	4. 巻 630
2. 論文標題 Synthesis of C ₄ - and C ₅ -olefins by novel alkane dehydrogenation with H ₂ S co-feeding	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Catalysis A: General	6. 最初と最後の頁 118442 ~ 118442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apcata.2021.118442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ratchahat Sakhon, Surathitimethakul Sethanat, Thamungkit Anyanee, Mala Phanatchakorn, Sudoh Masao, Watanabe Ryo, Fukuhara Choji, Chen Season S., Wu Kevin C.-W., Charinpanitkul Tawatchai	4. 巻 121
2. 論文標題 Catalytic performance of Ni/CeO ₂ catalysts prepared from different routes for CO ₂ methanation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers	6. 最初と最後の頁 184 ~ 196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jtice.2021.04.008	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sato Takaaki, Nagasawa Hiroki, Kanezashi Masakoto, Tsuru Toshinori	4. 巻 429
2. 論文標題 Enhanced production of butyl acetate via methanol-extracting transesterification membrane reactors using organosilica membrane: Experiment and modeling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 132188 ~ 132188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2021.132188	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計33件(うち招待講演 22件/うち国際学会 24件)

1. 発表者名 Choji Fukuhara, Yoshito Matsui, Masaki Tanebayashi, Ryo Watanabe
2. 発表標題 Process Intensification of synthesis-Gas Production System Combining with Carbon Capturing Process
3. 学会等名 26th International Symposium on Chemical Reaction Engineering (ISCRE 26) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Choji Fukuhara
2. 発表標題 Innovative Chemical Reaction System Contributing to Reduction and Utilization of Greenhouse Gas
3. 学会等名 17th Taiwan-Japan Joint Symposium on Catalysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Tanebayashi, Shuzo Hatano, Ryo Watanabe, Choji Fukuhara
2. 発表標題 Novel methane-dry-reforming process with solid carbon capture
3. 学会等名 18th Japan-Korea Symposium on catalysis (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Choji Fukuhara, Asuka Kamiyama, Mikito Itoh, Ryo Watanabe
2. 発表標題 Process Intensification (PI) of Transforming CO ₂ by Auto-Methanation with Structured Catalyst System
3. 学会等名 The XXIV International Conference on Chemical Reactors (CR-24) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村幹弘
2. 発表標題 コンタクター型膜反応器によるプロセス強化
3. 学会等名 化学工学会第52回秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Tsuru
2. 発表標題 Silicon-Based Amorphous Membranes with Molecular-Net-Sieving: Application to Molecular Separation in Gas and Liquid Phase Separation
3. 学会等名 The Material Research Meeting 2021 (MRM2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mikihiro Nomura
2. 発表標題 Essential properties of ceramic substrates for zeolite membranes - standardization for industrialization-
3. 学会等名 Korean Membrane Society 30th Anniversary Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福原長寿
2. 発表標題 触媒反応工学と常温作動のメタン化技術が拓くCO2資源化プロセスの強化(PI)
3. 学会等名 化学工学会第51回秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Choji Fukuhara
2. 発表標題 Innovative Chemical Reaction System Contributing to Issue of CO2 Reduction and Utilization
3. 学会等名 日本化学会化学系学協会東北大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 都留稔了
2. 発表標題 オルガノシリカ膜による有機溶媒混合物の逆浸透分離
3. 学会等名 日本膜学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshinori Tsuru
2. 発表標題 Organosilica and SiC-based membranes: Development and application to selective removal of water vapor from steam/gas mixtures at moderate-to-high temperatures
3. 学会等名 The 16th International Conference on Inorganic Membranes (ICIM 16) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshinori Tsuru
2. 発表標題 Organosilica-based ceramic membranes for organic solvent reverse osmosis (OSRO): Experimental verification and theoretical prediction
3. 学会等名 International Congress on Membranes & Membrane Processes 2020 (ICOM2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshinori Tsuru
2. 発表標題 Silicon-Based Membranes with Molecular-Net-Sieving Properties: Application to gas and liquid phase separation
3. 学会等名 2020 Dalian University of Technology-Overseas Partner Universities Series Online Exchange Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshinori Tsuru
2. 発表標題 Silica-Based Membranes with Molecular-Net-Sieving Properties: Application to gas and liquid phase separation for Sustainable Development Goals (SDGs)
3. 学会等名 The 26th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2019), (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshinori Tsuru
2. 発表標題 Development of Silica-based membranes and Applications to Catalytic Membrane Reactors,
3. 学会等名 The 14th International Conference on Catalysis in Membrane Reactors (ICCMR14) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 都留稔了
2. 発表標題 様々な水源に対応できるRobust膜の開発と環境・エネルギーへの展開
3. 学会等名 高知大学研究拠点プロジェクト「革新的な水・バイオマス循環システムの構築」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Choji Fukuhara, Sakhon Ratchahat, Masao Sudoh, Ryo Watanabe
2. 発表標題 Auto-methanation of carbon dioxide with oxidation: a novel route for CO ₂ transformation over supported metal catalyst
3. 学会等名 The 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Choji Fukuhara, Sakhon Ratchahat, Asuka Kamiyama, Masao Sudoh, Ryo Watanabe
2. 発表標題 Auto-methanation of carbon dioxide: a novel route for CO ₂ transformation over Ni-based catalyst
3. 学会等名 The 8th Asia-Pacific Congress on Catalysis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Choji Fukuhara, Ryo Watanabe, Sakhon Ratchahat, Asuka Kamiyama, Masao Sudoh
2. 発表標題 Auto-methanation over structured Ni-type catalyst for process intensification of carbon dioxide transformation
3. 学会等名 6th european conference on environmental applications of advanced oxidation processes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Choji Fukuhara, Sakhon Ratchahat, Yuji Suzuki, Masao Sudoh, Ryo Watanabe
2. 発表標題 Auto-methanation of carbon dioxide over Ni-based catalyst: a novel route for CO ₂ transformation with oxidation
3. 学会等名 6th european conference on environmental applications of advanced oxidation processes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Ito
2. 発表標題 Na-22 based low-energy AMOC measurements for chemical analysis of the free-volume holes in hydrocarbon-silica hybrid thin films
3. 学会等名 15th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques and Applications (SLOPOS-15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikihiro Nomura
2. 発表標題 Gas permeation through silica membranes prepared by using a counter diffusion chemical vapor deposition
3. 学会等名 9th International Symposium on Inorganic Membranes (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsunori Ishii, Mikihiro Nomura
2. 発表標題 Deposition mechanism of the silica hybrid membranes prepared by counter diffusion CVD method
3. 学会等名 12th Conference of Aseanian Membrane Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsunori Ishii, Mikihiro Nomura
2. 発表標題 Development of hydrogen permselective membranes for propylene production
3. 学会等名 5th International Symposium on Innovative Materials for Processes in Energy Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Choji Fukuhara, Ryo Watanabe, Sakhon Ratchahat, Masao Sudoh
2. 発表標題 A powerful CO ₂ methanation reactor with Ni/CeO ₂ structured catalyst: estimation of mass and heat transfer profiles
3. 学会等名 23rd International Conference on Chemical Reactors (Ghent, Belgium) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sakhon Ratchahat, Masao Sudoh, Yuji Suzuki, Ryo
2. 発表標題 Advantage of structured catalyst system for CO ₂ methanation under extremely high flow rate (Florence, Italy)
3. 学会等名 The 25th International Symposium on Chemical Reaction Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikihiro Nomura, Ayumi Ikeda, Katsunori Ishii, Manami Yoshida, Yosuke Kameda, Junko Yoshiura
2. 発表標題 Design of the hydrogen permselective membranes prepared by using a counter diffusion CVD method
3. 学会等名 11th Conference of Aseanian Membrane Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikihiro Nomura
2. 発表標題 Improvement of gas separation properties through MFI membranes
3. 学会等名 The workshop at Nanjing Tech University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tsuru
2. 発表標題 Silica-Based Membranes with Molecular-Net-Sieving Properties: Development and Applications
3. 学会等名 International Symposium on Advanced Membranes & Sustainable Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 都留稔了
2. 発表標題 多孔性セラミック膜の開発と各種分離プロセスへの応用
3. 学会等名 中国四国地区化学工学懇話会特別講演 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tsuru
2. 発表標題 Membrane Technology for Sustainable Development Goals: Application to water and energy
3. 学会等名 MIRAI workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 都留稔了
2. 発表標題 シリカ系多孔質分離膜の高度化と触媒膜反応器への応用
3. 学会等名 化学工学会秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 都留稔了
2. 発表標題 ゾルゲル法による触媒膜の開発と触媒膜型反応への応用
3. 学会等名 第3回東日本キャタリシスセミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計6件

1. 著者名 福原長寿（執筆者計76名）	4. 発行年 2020年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 375
3. 書名 脱石油に向けたCO2資源化技術	

1. 著者名 都留稔了，松田弘幸，日秋俊彦ほか執筆者計76名	4. 発行年 2019年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 600
3. 書名 分離プロセスの最適化とスケールアップの進め方	

1. 著者名 都留稔了，草壁克己，宮原 稔，田中大輔ほか執筆者計98名	4. 発行年 2019年
2. 出版社 (株)技術情報協会	5. 総ページ数 639
3. 書名 PCP/MOFおよび各種多孔質材料の作り方，使い方，評価解析	

1. 著者名 金指正言, 長澤寛規, 都留稔了 (監修: 中尾真一・喜多英敏)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 CMC 出版	5. 総ページ数 11
3. 書名 ゾル-ゲル法によるシリカ系膜の水素透過特性 (二酸化炭素・水素分離膜の開発と応用)	

1. 著者名 Stephen Gray, Toshinori Tsuru, Yoram Cohen, Woei Jye Lau	4. 発行年 2018年
2. 出版社 CRC book	5. 総ページ数 600
3. 書名 Advanced Materials for Membrane Fabrication and Modification	

1. 著者名 福原長寿 (執筆計53名)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 344
3. 書名 有機ハイドライド・アンモニアの合成と利用プロセス	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>広島大学 大学院 工学研究科 分離工学研究室 https://home.hiroshima-u.ac.jp/membrane/ 芝浦工業大学 分離システム工学研究室 https://t-web.shibaura-it.ac.jp/search/detail.php?f_hashval=0c4d88eef353b47f275dc5b465009ec7</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	福原 長寿 (Fukuhara Choji) (30199260)	静岡大学・工学部・教授 (13801)	
研究分担者	野村 幹弘 (Nomura Mikihiro) (50308194)	芝浦工業大学・工学部・教授 (32619)	
研究分担者	伊藤 賢志 (Ito Kenji) (90371020)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関