

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01691

研究課題名（和文）精密合成高分子を用いた有機ネットワーク制御によるイオン液体含有ゲルの超高強度化

研究課題名（英文）Development of highly tough gel containing ionic liquid using structure controlled polymer by precision polymerization

研究代表者

神尾 英治 (Kamio, Eiji)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30382237

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、大量のイオン液体を含有する無機/有機ダブルネットワーク（DN）イオンゲルの強度発現機構の解明と更なる高強度化を目的とする。精密重合により合成した有機ネットワークを有するDNイオンゲルを作製し、その力学特性を評価した。また、古典的ゴム弾性論に基づく強度発現機構の理論的検討を行い、有機ネットワークの役割を解明した。さらに、新規DNイオンゲルを創製するとともに、DNイオンゲル薄膜を作製し、その優れたCO₂選択透過性能を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無機ネットワークと有機ネットワークが絡まり合ったダブルネットワーク（DN）内にCO₂を選択的に溶解するイオン液体を大量に含有する高強度DNイオンゲルについて、その高強度発現に寄与する有機ネットワークの構造と役割を、実験と古典的ゴム弾性理論に基づき解明した。DNイオンゲルの強度発現に関する原理原則の理解は、高イオン液体含有率のゲル薄膜の創製に繋がる学術的意義の大きい成果である。また、得られた知見に基づき創製された高速且つ高選択的CO₂分離が可能なイオンゲル薄膜は、地球温暖化の抑制に貢献可能なCO₂分離材料であり、社会的意義が大きい成果である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to elucidate the toughening mechanism of inorganic/organic double network (DN) ion gels containing a large amount of an ionic liquid. In addition, based on the toughening mechanism, further increase of the toughness of the DN ion gel was performed. DN ion gels with a well-designed organic network synthesized by living radical polymerization were prepared and their mechanical properties were evaluated. In addition, based on the classical rubber elasticity theory, the toughening mechanism was theoretically investigated, and the role of the organic network of the inorganic/organic double-network on the toughening mechanism was clarified. Furthermore, a novel DN ion gel was fabricated, the DN ion-gel thin membrane was fabricated, and the highly selective and fast CO₂ permeation performance was demonstrated.

研究分野：膜工学、分離工学、材料化学

キーワード：ゲル イオン液体 高強度ゲル ダブルネットワーク CO₂分離膜

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

CO₂分離膜のCO₂透過速度の向上には、CO₂拡散性に優れた膜材料の超薄膜化が有効である。しかし、優れた拡散性を有する材料は脆く、超薄膜化が可能な機械的強度を有する材料は拡散性に乏しい。そのため、高拡散性と超薄膜化の両立は困難である。拡散性に特化すると、大量のイオン液体を含有する高強度イオンゲルは高いCO₂溶解性とCO₂拡散性を有する優れた拡散分離媒体であり、イオン液体のポテンシャルを最大限引き出すことができる疑似液体材料である。申請者らは、高強度ゲルとして知られるダブルネットワークハイドロゲル(DNゲル)に学び、無機/有機DNイオンゲルを創製した。DNイオンゲルは、荷重の印加に伴う有機ネットワークの変形により無機ネットワークの部分的破壊が起こり、それに伴うエネルギー散逸により高強度を発現する。また、ゲルのマクロな破壊を抑制する「隠れ長」として、有機ネットワークは高強度発現の本質的な役割を担うが、有機ネットワークのエネルギー散逸に対する寄与については十分に理解されていなかった。

2. 研究の目的

DNイオンゲルの更なる高強度化に対して、有機ネットワークの役割を理解することは本質的に重要である。すなわち、マクロな破壊を抑制する「隠れ長」として機能する有機ネットワークがDNイオンゲルの強靱化に対してどのように寄与するのかを理解することにより、DNイオンゲルの更なる高強度化が期待できる。そこで、本研究では、精密重合高分子による有機ネットワークの構造制御により、無機/有機DNイオンゲルの高強度発現に寄与する有機ネットワークの構造や物性とゲル強度(Young率、破断歪み、破断エネルギーおよび散逸エネルギー)の関係を明らかにすることを第一の目的とした。また、高強度イオンゲル膜のCO₂透過速度をさらに上げるために、イオン液体含有量の増大し、そのCO₂分離膜材料としてのポテンシャルを最大化することを第二の目的とした。

3. 研究の方法

無機/有機DNイオンゲルの機械的強度に及ぼす有機ネットワークの役割の解明に関する検討では、イオン液体として1-butyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide ([Bmim][Tf₂N])を用いた。一方、高強度DNイオンゲルを膜材料とする高性能CO₂分離膜の創製に関する検討では、カチオンが1-ethyl-3-methylimidazolium([Emim])、アニオンにはシアノ基を有するtetracyanoborate ([B(CN)₄]), tricyanomethanide ([C(CN)₃]), dicyanamide ([N(CN)₂])を有する[Emim][B(CN)₄], [Emim][C(CN)₃], [Emim][N(CN)₂]を用いた。シリカ粒子ネットワークは、イオン液体中におけるtetraethyl orthosilicate (TEOS)のゾルーゲル反応、またはシリカナノ粒子(Aerosil 200)の自己凝集により形成した。有機ネットワークは可逆的付加-開裂連鎖移動(RAFT)重合により合成したpoly(N,N-dimethylacrylamide-co-N-succinimidyl acrylate) (poly(DMAAm-co-NSA))のジアミンによる架橋、チオール末端およびマレイミド末端のtetra-armed polyethylene glycol (tetra-PEG)のクリック反応、またはイオン液体中におけるN,N-dimethylacrylamideのフリーラジカル重合により形成した。一方、半結晶性高分子を1stネットワークとするDNイオンゲルの調製には、半結晶性高分子としてpoly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP)、ポリアミド/PEG共重合体であるPebax 1657、およびポリビニルアルコール(PVA、けん化度99%)を用いた。

DNイオンゲルの力学特性は万能試験機による一軸延伸試験およびサイクル延伸試験により評価した。また、高強度発現に及ぼす有機ネットワークの役割に関する検討では、古典的ゴム弾性論に基づく理論解析により、DNイオンゲルの力学特性を評価した。一方、作製したDNイオンゲル膜のCO₂透過性能は、CO₂/N₂ = 50/50 mol/molのCO₂/N₂混合ガスを用い、大気圧下、30℃でのCO₂およびN₂透過係数をスイープ法により評価した。

4. 研究成果

本研究では、無機/有機DNイオンゲルの機械的強度に及ぼす有機ネットワークの効果を明らかにすることを第一の目的としている。密閉モールド内におけるゲル調製、開放系でのゲル調製、NSA導入率の異なるpoly(DMAAm-co-NSA)を用いた架橋度の異なるゲル調製、および種々希釈率のゲル前駆体溶液を用いたゲル調製など、様々な条件下で無機/有機DNイオンゲルおよびpoly(DMAAm-co-NSA)SNイオンゲルを調製し、そのYoung率と破断歪みを評価した。有機ネットワークの構造に関するパラメータで整理するために、作製したイオンゲルの水中平衡膨潤率を評価指標とした。作製したイオンゲルをエタノールに浸漬し、イオン液体を除去した後、エタノールを水で置換することにより、ゲルネットワークを水中における平衡膨潤状態とし、その重量を測定、その後、乾燥させることによりネットワークの重量を測定し、それら重量から膨潤度を決定した。無機/有機DNイオンゲルおよびpoly(DMAAm-co-NSA)SNイオンゲルのYoung率および

び破断歪みと水中平衡膨潤率の関係を図 1 に示す。SN イオンゲルでは当然の結果であるが、DN イオンゲルについても、その調製条件に依らず、Young 率と破断歪みは膨潤率に明確な依存性を示した。DN イオンゲルの Young 率と破断歪みは SN イオンゲルよりも大きい。これは無機ネットワークの影響である。すなわち、硬くて脆い無機ネットワークは DN イオンゲルの Young 率を増大させるとともに、エネルギーの印可に伴いクラスター状に破壊された無機ネットワークは多重架橋点として有機ネットワークをつなぎとめるため、その破断歪みも増大させる。注目すべきは、DN イオンゲル、SN イオンゲルともに、Young 率と破断歪みが水中平衡膨潤率、つまり有機ネットワークの有効架橋密度に依存性を示していることである。すなわち、有機ネットワークも Young 率と破断歪みの増大に寄与していることが明らかとなった。破断歪みに対する有機ネットワークの寄与は、前述の通り、クラスター状に破壊された無機ネットワークをつなぎとめることである。一方で、Young 率に対する有機ネットワークの寄与については明確な理由が不明であった。本研究では、その理由を考察するために、アフィンネットワークモデルに基づく古典的ゴム弾性論と Flory-Rehner 式を用いた解析を行った。

まず、種々条件にて調製した SN イオンゲルに対して解析を行った結果を図 2 に示す。実線が χ パラメータをフィッティングパラメータすることで引いた理論線である。理論線は全ての実験点に良好に相関している。また、 χ パラメータは 0.44 と決定され、PDMAAm に対して報告されている χ パラメータと良い一致を示した。このことから、有機ネットワークの Young 率を理論的に説明することができた。

さらに、DN イオンゲルの Young 率と有機ネットワークの有効架橋密度の関係について検討した結果を図 3(a) に示す。ここで、DN イオンゲルの力学特性に対する有機ネットワークの有効架橋密度の寄与については、有機ネットワークの有効架橋密度が増大することで、有機ネットワークと無機ネットワークのトポロジカル的な絡まり合いが変化すると考えた。つまり、有機ネットワークの有効架橋密度が増大すると無機ネットワークとの絡まり合いが増大し、その結果、DN イオンゲルの弾性に寄与する無機ネットワークの割合が増えると考えた。DN イオンゲルの弾性に寄与する無機ネットワークの割合は図 3(b) に実線で示されているとおりである。この無機ネットワークのゲル弾性に対する寄与率と有機ネットワークの有効架橋密度の関係性を考慮に入れた DN イオンゲルの Young 率と有機ネットワークの有効架橋密度の

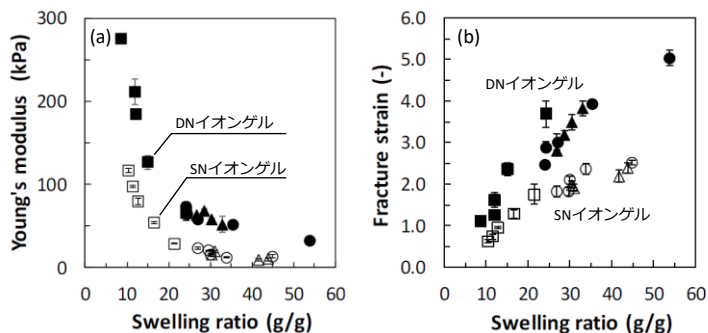


図 1 種々ゲル化条件下（密閉系、開放系、種々架橋度、種々希釈率）における DN および SN イオンゲルの (a) ヤング率と膨潤度および (b) 破壊ひずみと膨潤率の関係。

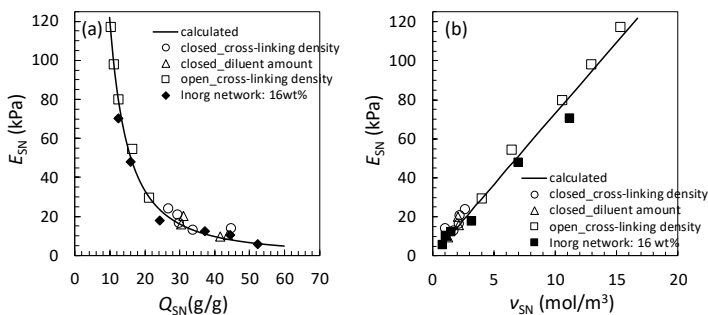


図 2 種々ゲル化条件下（密閉系、開放系、種々架橋度、種々希釈率、ネットワーク含有率: 20 wt%および 16 wt%）における SN イオンゲルのヤング率と (a) 膨潤度および (b) 有効架橋密度の関係。実線：古典的ゴム弾性論に基づく理論計算結果。

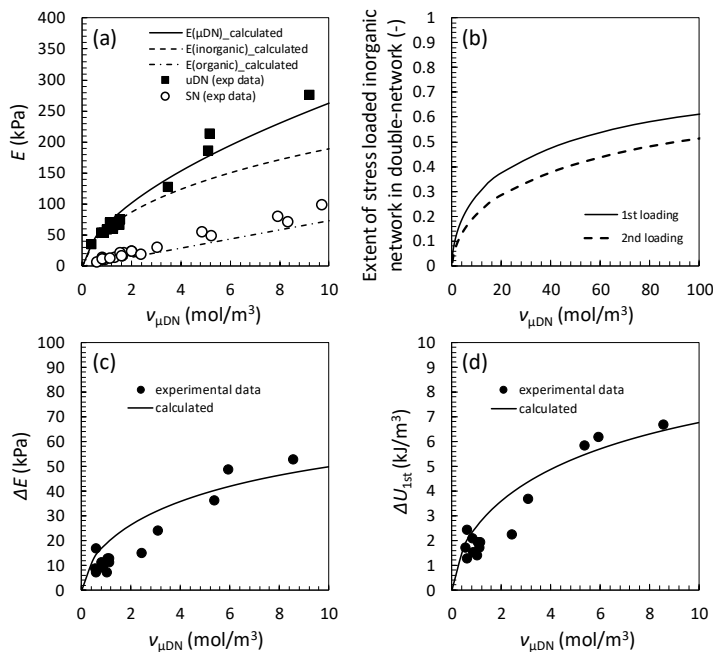


図 3 DN イオンゲルの (a) ヤング率および (b) 弾性率に寄与する無機ネットワークの割合と有機ネットワークの有効架橋密度の関係。DN イオンゲルのサイクル延伸試験における 1st サイクル時の (c) Young 率変化および (d) 散逸エネルギーと有機ネットワークの有効架橋密度の関係。

関係性を考慮に入れた DN イオンゲルの Young 率と有機ネットワークの有効架橋密度の

関係は図 3 に実線で示されている通りであり、実験点と良好な相関が得られた。また、図 3 より、DN イオンゲルの Young 率は主に無機ネットワークにより決定されていることも明らかとなった。一方、同様の古典的ゴム弾性理論をサイクル延伸による DN イオンゲルの弾性率の変化および散逸エネルギーに対しても適用した。結果はそれぞれ図 3(c) および(d)に示した。理論計算線は実験点に良好に相関していることから、サイクル延伸時における Young 率の変化やエネルギー散逸は無機ネットワークの破壊が原因であること、および、無機ネットワークに絡まり合った有機ネットワークが無機ネットワークの破壊に寄与していることが明らかとなった。

以上の検討より、有機ネットワークは無機/有機 DN イオンゲルの力学特性に大きな影響を及ぼしており、隠れ長の役割だけでなく、無機ネットワークの破壊を誘発するための媒体であることが明らかとなった。従って、有機ネットワークの設計は DN イオンゲルの強度増大に極めて重要であると結論できる。

本研究では、無機/有機 DN イオンゲルの力学特性に及ぼす有機ネットワークの影響について、上述の理論的考察に加え、実験的な検討も行った。その一例を図 4 に示す。図 4 に示されているのは、DN イオンゲルの力学特性 (Young 率、破断歪み、破断応力、および破断エネルギー) に及ぼす有機ネットワーク原料 (poly(DMAAm-co-NSA)) の分子量の影響である。分子量が大きい架橋性高分子を用いることで、Young 率が增大していることが見て取れる。理論的検討から得られた知見に基づくと、有機ネットワークの分子量の増大により無機ネットワークと有機ネットワークの絡まり合いが強くなり、その結果、ゲル弾性に寄与する無機ネットワークの割合が増大したことが原因であると考えられる。図 4 に示した結果より、強靱な DN イオンゲルを調製するためには、分子量の大きい架橋性高分子の使用が効果的であることが明らかとなった。

一方で、上記で明らかとなった有機ネットワークの重要性を鑑み、無機/有機 DN イオンゲルと同様の高強度化メカニズム (エネルギー散逸機構) を発現させることで、新規な高強度イオンゲルの創製を行った。その高強度イオンゲルは、半結晶性高分子を犠牲的結合とし、CO₂ 選択吸収性イオン液体を大量に含有する。犠牲的結合として機能する 2nd ネットワークには、多くの有効架橋点を有し、極めて良く伸びる均一網目を形成可能な tetra-PEG を用いた。その DN (IPN) イオンゲルの破断歪みと tetra-PEG 含有率の関係を図 5 (a) に示す。破断歪みは、DN イオンゲルの調製条件に依らず、tetra-PEG 含有率の増大とともに増大すること、また、tetra-PEG SN イオンゲルの破断歪みと同じ傾向を示すことが明らかとなった。また、創製したイオンゲルのサイクル延伸試験では明確なヒステリシスが確認され、エネルギー散逸機構に基づく強靱化が達成されていることも確認された。創製したイオンゲルは半結晶性高分子を 1st ネットワークとする世界初の DN イオンゲルであり、有機ネットワークの設計により創製されたものである。加えて、半結晶性高分子を犠牲的結合とする DN イオンゲルは更なる高強度化も達成しており、図 5 (b) に示すように、PVA/PDMAAm をダブルネットワークとする DN イオンゲルはイオン液体含有率が 80 wt% でもその破断エネルギーは約 1500 kJ/m³ と非常に強靱である。この破断エネルギーは無機/有機 DN イオンゲルの 3 倍以上であり、本研究では、極めて強靱なイオンゲルの創製に成功したと言える。

最後に、無機/有機 DN イオンゲルおよび半結晶性高分子を犠牲的結合とする DN イオンゲルを薄膜成型し、その CO₂ 透過速度に関する検討成果をそれぞれ図 6 および図 7 に示す。イオンゲル薄膜を有する CO₂ 分離膜は、多孔質支持膜上にポリジメチルシロキサンから成る中間層を形成し、その上にスピニング法によりイオンゲル薄膜を形成することで、薄膜複合膜として作製した。いずれの高強度イオンゲルも、その CO₂ 透過係数はイオン液体含有率の増大とともに指数関数的に増大することを見出した (図 6 (a) および図 7 (a))。一方で、CO₂/N₂ 透過選択性についてはイオン液体含有率に依らず一定であり (図 6 (b) および図 7 (b))、イオン液体の CO₂/N₂ 溶解選択性により決定されることを明らかにした。創製した DN イオンゲル薄膜の CO₂ 透過速度と CO₂/N₂ 透過選択性の関係を、イオンゲル薄膜とポリジメチルシロキサン中間層に対する直列透過抵抗モデルにより解析したところ (図 6 (c) および図 7 (c) の実線)、理論線は実験点に良好に相関した。この結果は、欠陥の無いイオンゲル薄膜が作製できたことを意味する。

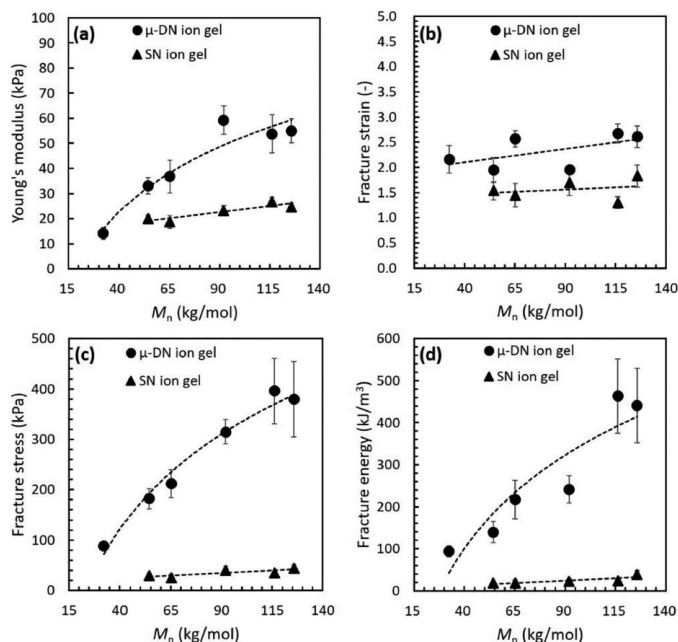


図 4 種々分子量の poly(DMAAm-co-NSA)を用いて調製した無機/有機 DN および poly(DMAAm-co-NSA) SN イオンゲルの機械的特性。●, ▲: 密閉系で調製した DN および SN イオンゲル。

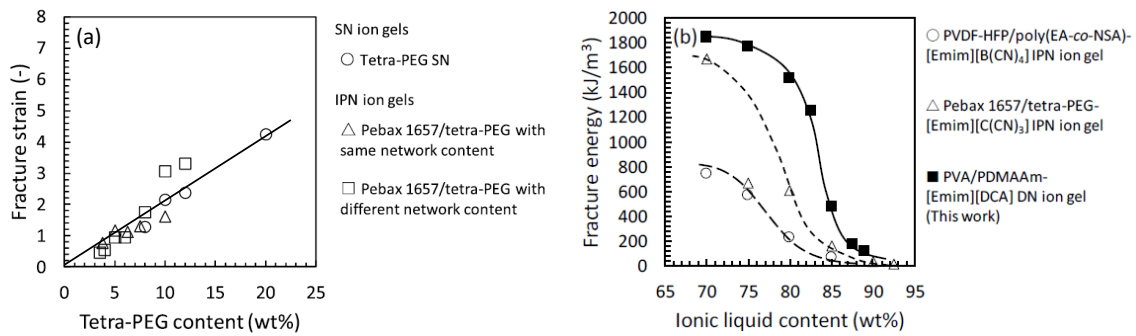


図 5 (a)tetra-PEG SN イオンゲルおよび半結晶性高分子(PVDF-HFP)と tetra-PEG をネットワークとする DN イオンゲルの破断歪みと tetra-PEG ネットワーク含有率の関係, (b)半結晶性高分子を 1st ネットワークとする DN イオンゲルの破断エネルギーとイオン液体含有率の関係。

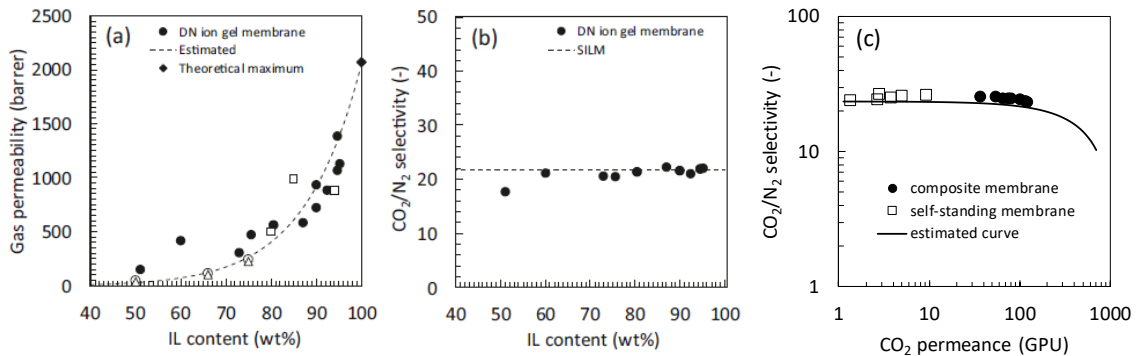


図 6 無機/有機 μ DN イオンゲル膜の(a) CO₂ 透過係数とイオン液体含有率, (b) CO₂/N₂ 透過選択性とイオン液体含有率, (c) CO₂/N₂ 透過選択性と CO₂ 透過速度の関係。

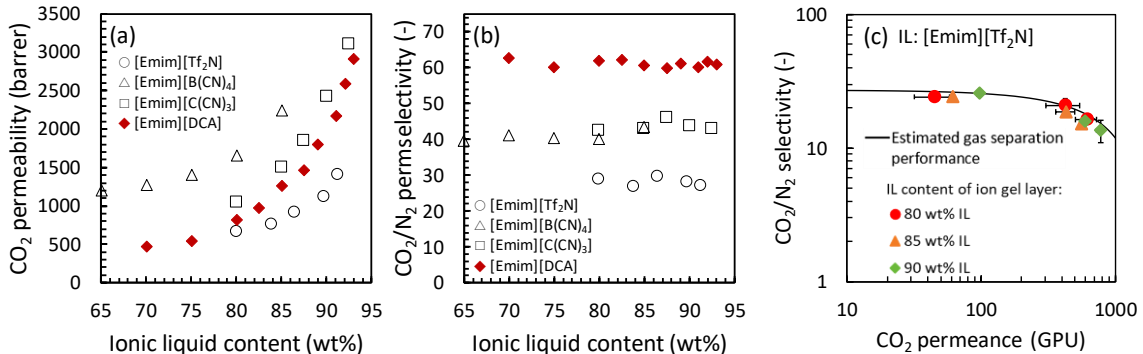


図 7 半結晶性高分子を 1st ネットワークとする DN イオンゲル膜の(a) CO₂ 透過係数および(b) CO₂/N₂ 透過選択性とイオン液体含有率の関係, (c) CO₂/N₂ 透過選択性と CO₂ 透過速度の関係。

本研究で創製した最薄のイオンゲル薄膜は厚みが 600 nm であり、[Emim][Tf₂N] を 90 wt% 含有する (図 7(c))。薄膜複合膜としての CO₂ 透過速度は 778 GPU に達したが、CO₂/N₂ 透過選択性は 15 であった。この複合膜としての CO₂ 分離性能には、中間層の影響が強く反映されていることを直列透過抵抗モデルにより解析から明らかにした。モデル解析より推定されたイオンゲル薄膜のみの CO₂ 透過速度は 1860 GPU、CO₂/N₂ 透過選択性も 27 に達しており、非常に高性能な CO₂ 分離機能層であることを確かめている。

より優れた CO₂ 分離性能を有する [Emim][DCA] や [Emim][C(CN)₃] を 90 wt% 以上含有する DN イオンゲルの超薄膜化と高性能中間層の創製による高速高選択的 CO₂ 透過性 DN イオンゲル薄膜複合膜の創製が今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kamio Eiji, Minakata Masayuki, Nakamura Hinako, Matsuoka Atsushi, Matsuyama Hideto	4. 巻 18
2. 論文標題 Tough ion gels composed of coordinatively crosslinked polymer networks using ZIF-8 nanoparticles as multifunctional crosslinkers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 4725 ~ 4736
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2SM00410K	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 Zhang Jinhui, Kamio Eiji, Matsuoka Atsushi, Nakagawa Keizo, Yoshioka Tomohisa, Matsuyama Hideto	4. 巻 663
2. 論文標題 Fundamental investigation on the development of composite membrane with a thin ion gel layer for CO ₂ separation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Membrane Science	6. 最初と最後の頁 121032 ~ 121032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.memsci.2022.121032	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 Yasui Tomoki, Zheng Yong, Nakajima Tasuku, Kamio Eiji, Matsuyama Hideto, Gong Jian Ping	4. 巻 55
2. 論文標題 Rate-Independent Self-Healing Double Network Hydrogels Using a Thixotropic Sacrificial Network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 9547 ~ 9557
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.2c01425	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 Matsuoka Atsushi, Taniguchi Shu, Kamio Eiji, Matsuyama Hideto	4. 巻 60
2. 論文標題 Fundamental Investigation of the Rate-Determining Step of CO ₂ Permeation through Ion Gel Membranes Containing Amino-Acid Ionic Liquid as the CO ₂ Carrier	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Industrial & Engineering Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 7397 ~ 7405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.iecr.1c00615	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 Zhang Jinhui, Kamio Eiji, Matsuoka Atsushi, Nakagawa Keizo, Yoshioka Tomohisa, Matsuyama Hideto	4. 巻 60
2. 論文標題 Development of a Micro-Double-Network Ion Gel-Based CO ₂ Separation Membrane from Nonvolatile Network Precursors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Industrial & Engineering Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 12640 ~ 12649
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.iecr.1c01529	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 Zhang Jinhui, Kamio Eiji, Kinoshita Masayuki, Matsuoka Atsushi, Nakagawa Keizo, Yoshioka Tomohisa, Matsuyama Hideto	4. 巻 60
2. 論文標題 Inorganic/Organic Micro-Double-Network Ion Gel-Based Composite Membrane with Enhanced Mechanical Strength and CO ₂ Permeance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Industrial & Engineering Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 12698 ~ 12708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.iecr.1c02228	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 Zhang Jinhui, Kamio Eiji, Matsuoka Atsushi, Nakagawa Keizo, Yoshioka Tomohisa, Matsuyama Hideto	4. 巻 61
2. 論文標題 Novel Tough Ion-Gel-Based CO ₂ Separation Membrane with Interpenetrating Polymer Network Composed of Semicrystalline and Cross-Linkable Polymers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Industrial & Engineering Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 4648 ~ 4658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.iecr.1c04800	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 Kamio Eiji, Yoshioka Tomohisa, Matsuyama Hideto	4. 巻 56
2. 論文標題 Recent Advances in Carbon Dioxide Separation Membranes: A Review	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Engineering of Japan	6. 最初と最後の頁 2222000 ~ 2222000
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00219592.2023.2222000	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 He Shengnan, Kamio Eiji, Zhang Jinhui, Matsuoka Atsushi, Nakagawa Keizo, Yoshioka Tomohisa, Matsuyama Hideto	4. 巻 685
2. 論文標題 Development of an ion gel membrane containing a CO ₂ -philic ionic liquid in interpenetrating semi-crystalline and crosslinkable polymer networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Membrane Science	6. 最初と最後の頁 121912 ~ 121912
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.memsci.2023.121912	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 He Shengnan, Kamio Eiji, Matsuoka Atsushi, Nakagawa Keizo, Yoshioka Tomohisa, Matsuyama Hideto	4. 巻 695
2. 論文標題 Development of a double-network ion gel membrane composed of a CO ₂ -philic ionic liquid, semi-crystalline polymer network, and tetra-armed polyethylene glycol network	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Membrane Science	6. 最初と最後の頁 122482 ~ 122482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.memsci.2024.122482	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42件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 神尾英治, 瀬川純平, 松岡 淳, 吉岡朋久, 中川敬三, 松山秀人
2. 発表標題 4分岐PEGネットワークを有するイオンゲル膜のCO ₂ 選択透過性能
3. 学会等名 日本膜学会第44年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jinhui ZHANG, Eiji KAMIO, Atsushi MATSUOKA, Keizo NAKAGAWA, Tomohisa YOSHIOKA, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Development of a composite membrane with ultrathin ion gel layer for efficient CO ₂ separation
3. 学会等名 The 13th Conference of the Aseanian Membrane Society (AMS13) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Eiji KAMIO, Jumpei SEGAWA, Atsushi MATSUOKA, Tomohisa YOSHIOKA, Keizo NAKAGAWA, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Tetra-armed Poly(ethylene glycol) Network-based Ion Gel Membrane for CO2 Separation
3. 学会等名 The 13th Conference of the Aseanian Membrane Society (AMS13) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神尾英治, Zhang Jinhui, 松岡 淳, 松山秀人
2. 発表標題 相互侵入網目構造を有するイオン液体含有高強度ゲルのCO2分離膜への応用
3. 学会等名 第71回高分子討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Eiji KAMIO
2. 発表標題 Ionic liquid-based tough gel membrane for CO2 separation
3. 学会等名 The 16th Regional Conference on Environmental Engineering 2022 (RCEnvE2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 室賀 丈, 神尾英治, 松岡 淳, 中川敬三, 吉岡朋久, 松山秀人
2. 発表標題 CO2分離複合薄膜の中間層への使用を指向した高CO2透過性ポリジメチルシロキサン膜の開発
3. 学会等名 膜シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shengnan HE, Eiji KAMIO, Jinhui ZHANG, Atsushi MATSUOKA, Keizo NAKAGAWA, Tomohisa YOSHIOKA, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Development of an ion gel membrane containing a CO ₂ -philic ionic liquid in interpenetrating semi-csystalline and crosslinkable polymer networks
3. 学会等名 膜シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神尾英治, Jinhui ZHANG, Shengnan HE, 松岡 淳, 中川敬三, 吉岡朋久, 松山秀人
2. 発表標題 半結晶性高分子と架橋性高分子の相互侵入網目を有するイオンゲル膜のCO ₂ 透過性能
3. 学会等名 膜シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村祥吾, 中村日向子, 神尾英治, 松岡 淳, 中川敬三, 吉岡朋久, 松山秀人
2. 発表標題 MOF/高分子複合ネットワークイオンゲル膜のCO ₂ 透過性能
3. 学会等名 第25回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林 寛, Zhang Jinhui, 神尾英治, 松岡 淳, 中川敬三, 吉岡朋久, 松山秀人
2. 発表標題 高CO ₂ 選択吸収性イオン液体含有高強度ゲル膜の創製
3. 学会等名 第25回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 秋田紗希, Zhang Jinhui, 神尾英治, 松岡 淳, 中川敬三, 吉岡朋久, 松山秀人
2. 発表標題 イオンゲル分離機能層と多孔性支持膜で構成される薄層複合膜の創製
3. 学会等名 第25回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shengnan HE, Eiji KAMIO, Jinhui ZHANG, Atsushi MATSUOKA, Keizo NAKAGAWA, Tomohisa YOSHIOKA, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Development of an ion gel membrane composed of a CO ₂ -philic ionic liquid and an interpenetrating semi-crystalline and cross-linkable polymer network
3. 学会等名 化学工学会第88年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 室賀 丈, 神尾英治, 松岡 淳, 中川敬三, 吉岡朋久, 松山秀人
2. 発表標題 高CO ₂ 透過性を有するポリジメチルシロキサン膜の開発とCO ₂ 分離複合膜の中間層への応用
3. 学会等名 化学工学会第88年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jinhui ZHANG, Eiji KAMIO, Atsushi MATSUOKA, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Inorganic/organic micro-double-network ion gel-based composite membrane with enhanced mechanical strength and CO ₂ permeance
3. 学会等名 日本膜学会第43年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神尾 英治, 南方 雅之, 松岡 淳, 松山 秀人
2. 発表標題 ナノ粒子/高分子複合ネットワーク形成によるイオン液体含有ゲルの高強度化
3. 学会等名 第70回高分子討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jinhui ZHANG, Eiji KAMIO, Atsushi MATSUOKA, Keizo NAKAGAWA, Tomohisa YOSHIOKA, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Novel tough ion gel-based CO2 separation membrane with interpenetrating polymer network
3. 学会等名 化学工学会第52回秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南方 雅之, 神尾 英治, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 ナノ粒子/高分子複合ネットワーク形成による高強度イオンゲルの創製
3. 学会等名 化学工学会第52回秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jinhui Zhang, Eiji Kamio, Atsushi Matsuoka, Hideto Matsuyama
2. 発表標題 An interpenetrating polymer network-based tough ion gel membrane for CO2 separation
3. 学会等名 膜シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬川純平, 神尾英治, 松岡淳, 吉岡朋久, 中川敬三, 松山秀人
2. 発表標題 Tetra-PEGイオンゲルを用いた高性能二酸化炭素分離膜の開発
3. 学会等名 膜シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村 日向子, 神尾 英治, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 MOF/高分子複合ネットワークイオンゲルの強度とネットワーク構造に関する基礎的検討
3. 学会等名 第24回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 室賀 丈, 神尾 英治, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 架橋密度制御によるポリジメチルシロキサン膜のガス透過性能の改良
3. 学会等名 第24回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀬川 純平, 神尾 英治, 松岡 淳, 吉岡 朋久, 中川 敬三, 松山 秀人
2. 発表標題 二酸化炭素分離のためのTetra-PEGイオンゲル薄膜の開発
3. 学会等名 化学工学会第87年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jinhui Zhang, Eiji Kamio, Atsushi Matsuoka, Keizo Nakagawa, Tomohisa Yoshioka, Hideto Matsuyama
2. 発表標題 Development of a high CO2 permeance composite membrane with an ion gel layer
3. 学会等名 化学工学会第87年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Saki AKITA, Zhang Jinhui, Eiji KAMIO, Atsushi MATSUOKA, Keizo NAKAGAWA, Tomohisa YOSHIOKA, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Development of thin film composite membrane composed of ion gel-based CO2 separation layer and porous support membrane
3. 学会等名 13th the International Congress on Membranes and Membrane Processes (ICOM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Maho Kawabata, Eiji Kamio, Atsushi Matsuoka, Keizo Nakagawa, Tomohisa Yoshioka, Hideto Matsuyama
2. 発表標題 Development of an ion gel-based facilitated transport membrane containing an ionic liquid with acetate anion
3. 学会等名 13th the International Congress on Membranes and Membrane Processes (ICOM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hinako Nakamura, Eiji Kamio, Atsushi Matsuoka, Keizo Nakagawa, Tomohisa Yoshioka, Hideto Matsuyama
2. 発表標題 Development of thin ion gel membrane using gel precursor solution containing a surfactant
3. 学会等名 13th the International Congress on Membranes and Membrane Processes (ICOM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jou Muroga, Eiji Kamio, Atsushi Matsuoka, Keizo Nakagawa, Tomohisa Yoshioka, Hideto Matsuyama
2. 発表標題 Development of thin film composite membrane composed of ion gel layer and loosely cross-linked polydimethylsiloxane gutter layer
3. 学会等名 13th the International Congress on Membranes and Membrane Processes (ICOM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ying-Cheng CHEN, Seiya ANDO, Eiji KAMIO, Atsushi MATSUOKA, Keizo NAKAGAWA, Tomohisa YOSHIOKA, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Fundamental investigation on the effect of humidity on the CO2 permeability of ionic liquid-based facilitated transport membranes
3. 学会等名 13th the International Congress on Membranes and Membrane Processes (ICOM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kan Kobayashi, Eiji Kamio, Atsushi Matsuoka, Keizo Nakagawa, Tomohisa Yoshioka, Hideto Matsuyama
2. 発表標題 Highly CO2 selective ion gel membrane composed of CO2-philic ionic liquid and semi-crystalline polymer network
3. 学会等名 13th the International Congress on Membranes and Membrane Processes (ICOM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shogo Kimura, Hinako Nakamura, Eiji Kamio, Atsushi Matsuoka, Keizo Nakagawa, Tomohisa Yoshioka, Hideto Matsuyama
2. 発表標題 Tough ion gel membrane with composite network composed of ZIF-8 nanoparticles and cross-linkable polymer
3. 学会等名 13th the International Congress on Membranes and Membrane Processes (ICOM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Eiji Kamio, Zhang Jinhui, Eiji KAMIO, Atsushi MATSUOKA, Keizo NAKAGAWA, Tomohisa YOSHIOKA, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Development of thin film composite membrane with ion gel layer composed of semi-crystalline and cross-linkable polymers
3. 学会等名 13th the International Congress on Membranes and Membrane Processes (ICOM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 室賀 丈, 神尾 英治, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 低架橋度ポリジメチルシロキサン中間層を利用した高CO ₂ 分離性能を有するイオンゲル複合膜の開発
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村 日向子, 神尾 英治, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 界面活性剤による濡れ性制御に基づくイオンゲル薄膜調製法に関する基礎的検討
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 陳 盈蓁, 安藤 誠也, 神尾 英治, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 アミノ酸イオン液体型促進輸送膜のCO ₂ 透過性に及ぼす湿度の影響
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川端 真帆, 神尾 英治, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 半結晶性高分子を犠牲結合とするダブルネットワークイオンゲル創製に関する基礎的検討
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神尾 英治, 安藤 誠也, 陳 盈蕪, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 アミノ酸イオン液体をCO ₂ キャリアとする促進輸送膜を備えた膜モジュール性能に関する考察
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 室賀 丈, 神尾 英治, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 高気体透過性ポリジメチルシロキサンを中間層として利用したイオンゲル薄膜複合膜の開発
3. 学会等名 「日本膜学会第45年会」・「膜シンポジウム2023」合同大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神尾 英治
2. 発表標題 イオン液体型促進輸送膜のDACプロセスへの適用性に関する考察
3. 学会等名 「日本膜学会第45年会」・「膜シンポジウム2023」合同大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大橋鴻樹, 神尾英治, 松岡淳, 中川敬三, 吉岡朋久, 松山秀人
2. 発表標題 グリシン促進輸送膜のCO2選択透過性能に及ぼすガス性状の影響に関する基礎的検討
3. 学会等名 第26回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高田健斗, 神尾英治, 松岡淳, 中川敬三, 吉岡朋久, 松山秀人
2. 発表標題 ブロック鎖の鎖長比が異なるトリブロックコポリマーを用いた高延性イオンゲルの創製
3. 学会等名 第26回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 宮本昂, 神尾英治, 松岡淳, 中川敬三, 吉岡朋久, 松山秀人
2. 発表標題 PDMS-PEG系界面活性剤の添加によるPDMS膜表面親水性の改善
3. 学会等名 第26回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 秋田 紗希, 神尾 英治, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 イオン液体含有ゲル層と多孔性支持膜から構成される薄層複合CO2分離膜の創製
3. 学会等名 化学工学会第89年会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Eiji Kamio	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 694
3. 書名 Ionic liquid-based membranes for gas separation, 60 Years of the Loeb-Sourirajan Membrane	

1. 著者名 神尾英治, 松岡 淳	4. 発行年 2023年
2. 出版社 化学工学会 関東支部	5. 総ページ数 178
3. 書名 CO2分離膜, 最近の化学工学71 カーボンニュートラルに貢献する触媒・反応工学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

イオン液体型ガス分離膜の開発 http://www2.kobe-u.ac.jp/~matuyama/cx14HP/research/research-summary-gas-sep-i.html

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------