

令和 6 年 5 月 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01694

研究課題名(和文) 超臨界含浸法による金属担持PCP創製へ向けたバルク及びナノ空間物性の基盤構築

研究課題名(英文) Physical properties in the bulk and nano spaces for preparing metal-supported porous coordination polymers using supercritical fluid deposition method

研究代表者

宇敷 育男 (Ushiki, Ikuo)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授

研究者番号：30734850

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超臨界含浸法による金属担持PCP(多孔性配位高分子)創製プロセスの設計に向けて、溶質の超臨界CO₂への溶解度(バルク空間物性)及びPCPのナノ細孔内への溶質吸着平衡(ナノ空間物性)両者に関する定量的把握について検討した。摂動論型状態式であるPC-SAFT式及び熱力学的吸着等温式であるDubinin-Astakhov式を用いて、超臨界CO₂中における溶質溶解度・吸着平衡の測定・モデリングをモデル担体及びモデル溶質に対して実施した結果、超臨界含浸法による金属担持PCP創製プロセスの設計に向けた定量的基盤を獲得することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属資源の供給リスクや需要拡大による価格高騰を背景に、多くの反応において役立つレアメタルやレアアースを効果的に利用することが我が国の生存戦略として不可欠となっています。そのため、多孔質材料に触媒金属を埋め込む技術の重要性が増しています。本研究課題では、地球上に豊富に存在する二酸化炭素(CO₂)を超臨界状態(臨界温度31℃、臨界圧力7.4 MPa以上の温度・圧力状態)にした流体を利用して、高性能な金属含浸多孔質材料を作製する方法(超臨界流体含浸法)について、そのプロセスの効率的な設計を目指して研究を行い、研究成果を得ました。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated the quantitative understanding of both solubility of solutes in supercritical CO₂ (bulk space properties) and adsorption equilibrium of solutes in nanopores of PCP (nanospace properties) for the design of a process to prepare metal-supported PCP (porous coordination polymer) by supercritical impregnation method. The solubility and adsorption equilibria of solutes in supercritical CO₂ were measured and modeled for model supports and solutes using the PC-SAFT perturbation theory equation of state and the Dubinin-Astakhov thermodynamic adsorption isotherm for model solutes. The results provide a quantitative basis for the design of a process for the creation of metal-supported PCP by the supercritical impregnation method.

研究分野：化学工学，超臨界流体工学，基礎物性，化学工学熱力学

キーワード：超臨界CO₂ PC-SAFT Dubinin-Astakhov式 ナノ空間物性 吸着 多孔性配位高分子 バルク空間物性 PCP

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

当研究グループではこれまで、超臨界状態(臨界温度 31°C, 臨界圧力 7.4 MPa 以上の温度・圧力状態)の二酸化炭素(CO₂)に溶質を溶解させ、これを極めて高い比表面積かつ均一なナノ細孔を有する多孔性配位高分子(PCP)に含浸させることにより、高性能の金属担持触媒を創製する方法論(超臨界含浸法)を提案してきた。本プロセスの設計へ向けては溶質の超臨界 CO₂ への溶解度(バルク空間物性)及び PCP のナノ細孔内への溶質の吸着平衡(ナノ空間物性)両者に関する定量的理解が必須である。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究課題では、超臨界含浸法による金属担持 PCP 創製プロセスの設計へ向けた、超臨界 CO₂ 中におけるバルク及びナノ空間物性に関する定量的基盤の構築を目的とした。

3. 研究の方法

(超臨界 CO₂ 中の溶質溶解度(バルク空間物性)の熱力学的モデリング)

超臨界 CO₂ 中における溶質溶解度については、その状態式によるモデリングが必須である。本研究では摂動論に基づく熱力学的状態式である PC-SAFT (perturbed chain - statistical associating fluid theory)[1]に着目し、超臨界 CO₂ 中における溶質溶解度のモデリング及び推算を検討した。この際の対象は、超臨界含浸プロセスにおけるモデル溶質であるフェロセンおよびサルサレートとした。

PC-SAFT は、Eq. (1)のように無次元残余 Helmholtz エネルギー a^{res} の和として表現され、剛体球が連結した剛体球鎖 $a^{\text{hard chain}}$ を基準項とし、分散力(van der Waals 力)の影響を摂動項 $a^{\text{dispersion}}$ により考慮する。

$$a^{\text{res}} = a^{\text{hard chain}} + a^{\text{dispersion}} \quad (1)$$

CO₂に関するPC-SAFTの純成分パラメーター m_i (セグメント数)、 σ_i (セグメント径)及び u_i (分散エネルギー)は Diamantonis and Economou [2]の値を用いた。一方、フェロセンおよびサルサレートに関するPC-SAFTパラメーターは報告されておらず、また純物質の飽和物性からの決定も極めて困難であった。そこで本研究では当研究グループによる既往の研究事例[3-5]に基づき、異なる性質を持つ一般的な各種の有機溶媒に対する対象溶質の飽和溶解度を測定した上で、平均相対偏差ARD(Eq. (2))を目的関数として、 m_i , σ_i , u_i をフィッティングパラメーターとしたPC-SAFTによる相関(Eqs. (3)-(6)[6])を行った。

$$\text{ARD} = \frac{1}{ND} \sum \frac{|y_{i,\text{exp}} - y_{i,\text{calc}}|}{y_{i,\text{exp}}} \times 100 \quad (2)$$

$$y_i = \frac{1}{\gamma_i(m_i, \sigma_i, u_i)} \exp \left\{ - \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \frac{\Delta H^f}{RT} \right\} \quad (3)$$

$$\mu_i^{\text{res}} = kT \left(\frac{\partial (Na^{\text{res}})}{\partial N_i} \right)_{T, V, N_{j \neq i}} \quad (4)$$

$$\ln \varphi_i = \frac{\mu_i^{\text{res}}}{kT} - \ln Z \quad (5)$$

$$\gamma_i = \frac{\varphi_i}{\varphi_{i,0}(y_i \rightarrow 1)} \quad (6)$$

更に相関で決定した純成分パラメーターを Eq. (7)[6]に適用することで超臨界 CO₂ 中の溶質溶解度を推算した。

$$y_i = \frac{P^{\text{sub}}}{\varphi_i^{\text{scf}}(m_i, \sigma_i, u_i) P} \exp \left[(P - P^{\text{sub}}) \frac{v^{\text{solid}}}{RT} \right] \quad (7)$$

$$u_{ij} = (1 - k_{ij}) \sqrt{u_i u_j} \quad (8)$$

なお計算において Eqs. (3), (7)中の溶質の融解エンタルピー ΔH^f , 融解温度 T_m , 昇華圧 P^{sub} 及び固体モル密度 v^{solid} は文献値[7-11]を用い, Eq. (8)の Lorentz–Berthelot 結合則における溶媒–溶質間の相互作用パラメーター k_{ij} は0とした.

(超臨界 CO₂ 中の溶質吸着平衡(ナノ空間物性)の測定とモデリング)

固定層吸着法に基づく装置[12, 13]により, CO₂ とモデル溶質である揮発性有機化合物 (VOC) の混合流体を, PCP である MOF-177 または ZIF-8 が充填された吸着カラムに流通させ, 出口 VOC 濃度を FID シグナルとして経時的に記録することで得られた破過曲線から吸着平衡を測定した. 実験条件は温度 313~353 K, 圧力 10.0~20.0 MPa, VOC モル分率 1.8×10^{-3} ~ 15.4×10^{-3} , CO₂ 流量 700 cm³ (SATP)/min とし, 吸着質である VOC には, アセトン, ヘキサン, トルエンを用いた. Table 1 に本研究で用いた PCP の物性値を示す.

Table 1. 対象とした PCP の物性値

Adsorbent	Specific surface area [m ² /g]	Pore volume [cm ³ /kg]
MOF-177	3779	1520
ZIF-8	2006	670

吸着平衡の熱力学的モデリングにおいて, 吸着ポテンシャル理論に基づくモデルである DA 式(Eqs. (9)-(10))を用いた. 吸着質のバルク相から吸着相への駆動力を表現する Eq. (9)中のフガシティーの計算には Peng-Robinson 式を用い, この際の CO₂-溶質間の異種分子間相互作用パラメーター k_{ij} は対応する気液平衡データ[14-16]から決定した. 吸着平衡の相関は, Eq. (1)中のパラメーター $W_{0,VOC}$ (吸着剤の溶質飽和吸着容量), E_{VOC} (吸着剤-溶質間の相互作用パラメーター)をフィッティングパラメーターとし, 実験値との平均相対偏差 ARD が最小となるように行った.

$$q_{VOC} = \frac{\rho_{VOC}^{ads} W_{0,VOC}}{M_{VOC}} \exp \left\{ - \left(\frac{\varepsilon_{VOC}}{E_{VOC}} \right)^n \right\} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{VOC} = RT \ln \left[\frac{f_{VOC}^s(T)}{f_{VOC}(T, P, y_{VOC})} \right] \quad (10)$$

4. 研究成果

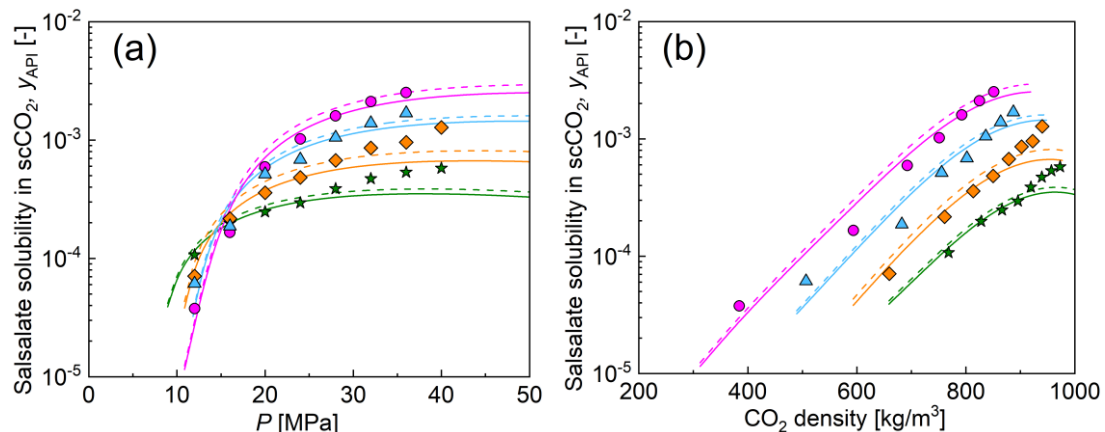


Fig. 1. 温度 338 K (●), 328 K (▲), 318 K (◆), および 308 K (★)における(a)圧力または(b)CO₂密度に対する超臨界 CO₂ 中におけるサルサレート溶解度[17]の計算結果. 破線:PC-SAFT による推算結果(k_{ij} = 0), 実線:PC-SAFT による相関結果 (k_{ij} :フィッティングパラメーター)

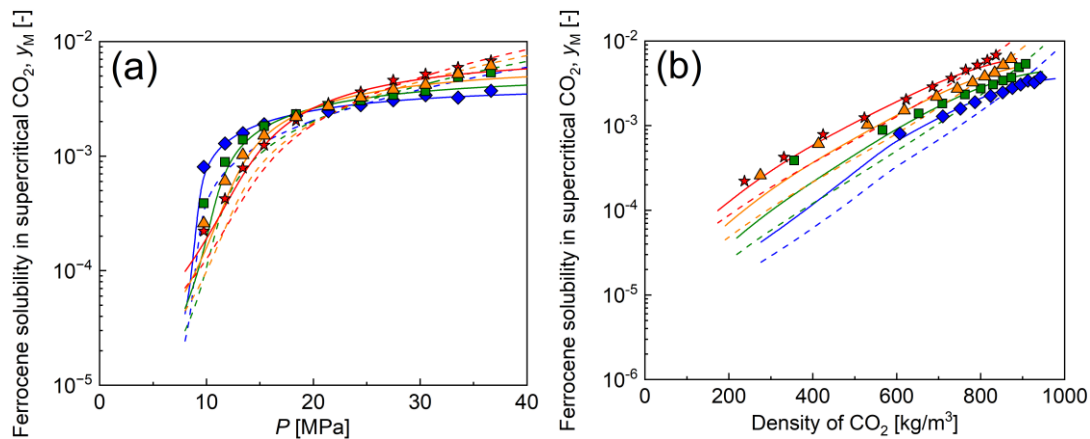


Fig. 2. 温度 343 K (★), 333 K (▲), 323 K (■), 313 K (◆)における(a)圧力または(b)CO₂密度に対する超臨界 CO₂ 中におけるフェロセン溶解度[18]の計算結果. 破線:PC-SAFT による推算結果($k_{ij} = 0$), 実線:PC-SAFT による相関結果(k_{ij} :フィッティングパラメーター)

Fig. 1 および Fig. 2 に, PC-SAFT 式による超臨界 CO₂ へのサルサレート及びフェロセンの溶解度推算結果を示す. 本結果より, PC-SAFT を用いて溶質溶解度の傾向を異種分子間相互作用パラメーター $k_{ij}=0$ としても表現可能であった.

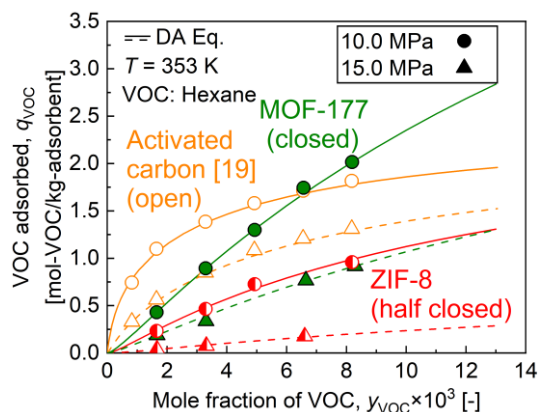


Fig. 3. 温度 353K の超臨界 CO₂ 中における ZIF-8, MOF-177 および活性炭[19]へのヘキサン吸着平衡の圧力依存性.

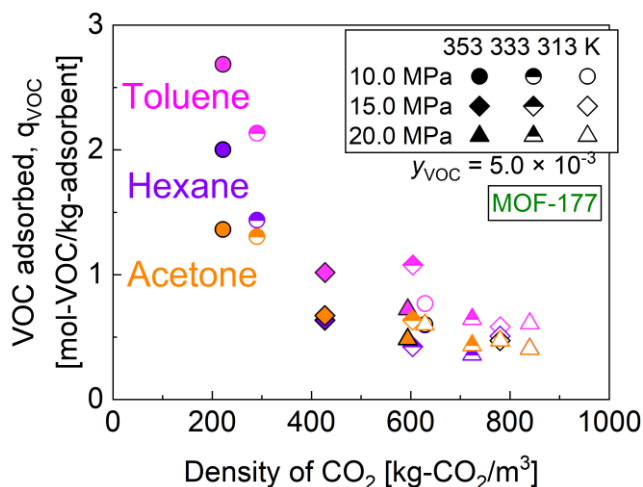


Fig. 4. 超臨界 CO₂ 中における MOF-177 へのトルエン, ヘキサン, およびアセトンの平衡吸着量の CO₂ 密度依存性(温度 313~353 K, 圧力 10.0~20.0 MPa, 溶質モル分率 5.0×10^{-3}).

Fig. 3 に, 温度 353K の超臨界 CO₂ 中における ZIF-8 および MOF-177 へのヘキサンの吸着平衡の圧力依存性および Dubinin-Astakhov (DA) 式によるモデリング結果を示す. また Fig. 4 に超臨界 CO₂

中における MOF-177 へのトルエン、ヘキサン、およびアセトンの平衡吸着量の CO_2 密度依存性を示す。Figs. 3, 4 より溶質吸着量は圧力増加・温度減少に伴い減少し、活性炭[19]を吸着剤とした場合と同様の傾向であった。これは圧力増加・温度減少に伴い CO_2 密度が増加した結果、バルク相 CO_2 への溶質の溶解性及び吸着相において溶質と競争吸着する CO_2 量が増加したためと考える。また Fig. 3 より、ヘキサンの吸着量は MOF-177>ZIF-8 の順になった。これは、吸着量に大きな影響を及ぼすと考えられる比表面積及び細孔容積の値(Table 1)に関して、MOF-177 の方が ZIF-8 に比べ 2 倍程度大きいことに起因する結果と考察する。また Fig. 3 の実線に示すように Dubinin-Astakhov (DA) 式は吸着平衡を良好に相関可能であった。

以上のように、本研究課題では摂動論型状態式である PC-SAFT 式及び熱力学的吸着等温式である Dubinin-Astakhov 式を用いて、超臨界 CO_2 中における溶質の溶解度(バルク空間物性)及び吸着平衡(ナノ空間物性)の定量的把握およびモデリングを実施し、超臨界含浸法による金属担持 PCP 創製プロセスの設計に向けた定量的知見を獲得することができた。

<引用文献>

- [1] J. Gross, G. Sadowski, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40 (2001) 1244-1260.
- [2] N.I. Diamantonis, I.G. Economou, *Energy Fuels*, 25 (2011) 3334-3343.
- [3] I. Ushiki *et al.*, *J. Supercrit. Fluid.*, 164 (2020) 104909.
- [4] I. Ushiki *et al.*, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 52 (2019) 243-252.
- [5] I. Ushiki, *Rev. High Press. Sci. Technol.*, 29 (2019) 187-193.
- [6] J.M. Prausnitz *et al.*, *Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria*, 3rd Edition, Prentice Hall, Upper saddle river, New Jersey, 1998.
- [7] J.J. Moura Ramos *et al.*, *J. Phys. Chem. B*, 108 (2004) 7955-7962.
- [8] M. Habgood *et al.*, *Cryst. Growth Des.*, 13 (2013) 1771-1779.
- [9] B. Greener *et al.*, *Angewandte Chemie International Edition*, 39 (2000) 3601-3604.
- [10] C.M. Lousada *et al.*, *The Journal of Physical Chemistry A*, 112 (2008) 2977-2987.
- [11] M.J.S. Monte *et al.*, *J. Chem. Eng. Data*, 51 (2006) 757-766.
- [12] I. Ushiki *et al.*, *Fluid Phase Equilib.*, 513 (2020) 112556.
- [13] I. Ushiki *et al.*, *J. Supercrit. Fluid.*, 166 (2020) 105018.
- [14] Y. Sato *et al.*, *Fluid Phase Equilib.*, 296 (2010) 25-29.
- [15] H.J. Ng, D.B. Robinson, *J. Chem. Eng. Data*, 23 (1978) 325-327.
- [16] Y.H. Li *et al.*, *J. Chem. Eng. Data*, 26 (1981) 53-55.
- [17] S. Zabihhi *et al.*, *J. Chem. Thermodyn.*, 152 (2021) 106271.
- [18] C.M. Cowey *et al.*, *J. Chem. Eng. Data*, 40 (1995) 1217-1221.
- [19] I. Ushiki *et al.*, *J. Supercrit. Fluid.*, 146 (2019) 30-37.

<記号>

a : 無次元 Helmholtz エネルギー
 E_{voc} : 相互作用エネルギー
 f_{voc} : フガシティー
 k_B : Boltzmann 定数
 m : セグメント数
 n : 定数
 N : 分子数
 ND : データ数
 M_{voc} : モル質量
 P : 圧力
 q_{voc} : 吸着量
 R : 気体定数
 T : 温度
 u : 分散エネルギー
 v : 固体モル体積
 V : 体積
 $W_{0,\text{voc}}$: 飽和吸着容量
 W : 吸着量
 Z : 圧縮因子
 y : モル分率
 y_{voc} : バルク相モル分率
 ϵ_{voc} : 吸着ポテンシャル,
 γ : 活量係数
 ϕ : フガシティー係数
 σ : セグメント径
 μ : 化学ポテンシャル

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 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Azim Mahmoud Magdy, Ushiki Ikuo, Miyajima Azusa, Takishima Shigeki	4. 巻 186
2. 論文標題 Modeling the solubility of non-steroidal anti-inflammatory drugs (ibuprofen and ketoprofen) in supercritical CO ₂ using PC-SAFT	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Supercritical Fluids	6. 最初と最後の頁 105626 ~ 105626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.supflu.2022.105626	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 Azim Mahmoud Magdy, Ushiki Ikuo, Miyajima Azusa, Takishima Shigeki	4. 巻 189
2. 論文標題 Estimating the solubility of salsalate in supercritical CO ₂ via PC-SAFT modeling using its experimental solubility data in organic solvents	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Supercritical Fluids	6. 最初と最後の頁 105725 ~ 105725
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.supflu.2022.105725	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 Ushiki Ikuo, Ueno Yuji, Takishima Shigeki, Ito Yasuyuki, Inomata Hiroshi	4. 巻 189
2. 論文標題 Adsorption equilibria of ester VOCs (ethyl and butyl acetates) on activated carbon in supercritical CO ₂ : Measurement and modeling by the Dubinin-Astakhov equation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Supercritical Fluids	6. 最初と最後の頁 105719 ~ 105719
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.supflu.2022.105719	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 Ushiki Ikuo, Miyajima Azusa, Fujimitsu Ryo, Takishima Shigeki	4. 巻 196
2. 論文標題 Modeling cobalt (III) acetylacetonate and iron (III) acetylacetonate solubilities in supercritical CO ₂ with PC-SAFT based on experimentally-determined solid-liquid equilibria in organic solvents	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Supercritical Fluids	6. 最初と最後の頁 105882 ~ 105882
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.supflu.2023.105882	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 Ushiki Ikuo, Fujimitsu Ryo, Takishima Shigeki	4. 巻 56
2. 論文標題 Modeling the Solubility of Ferrocene in Supercritical CO2 via PC-SAFT Using Solubilities Data Measured in Organic Solvents	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Engineering of Japan	6. 最初と最後の頁 2236655-2236655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00219592.2023.2236655	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 Tahara Yuto, Azim Mahmoud Magdy, Takishima Shigeki, Ushiki Ikuo	4. 巻 203
2. 論文標題 Measurement and modeling of adsorption equilibria of ketone VOCs on activated carbon in supercritical CO2	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Supercritical Fluids	6. 最初と最後の頁 106079 ~ 106079
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.supflu.2023.106079	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 Matsumoto Eisuke, Azim Mahmoud Magdy, Takishima Shigeki, Ushiki Ikuo	4. 巻 56
2. 論文標題 Adsorption Equilibria of Propyl Acetate on Activated Carbon Under Supercritical CO2 Conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Engineering of Japan	6. 最初と最後の頁 2256366-2256366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00219592.2023.2256366	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 該当する

1. 著者名 Hiraga Yuya, Ushiki. Ikuo	4. 巻 398
2. 論文標題 Prediction of ionic liquid solubilities in supercritical CO2+co-solvent systems using Peng-Robinson equation of state with accurate critical temperature	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Molecular Liquids	6. 最初と最後の頁 124324 ~ 124324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.molliq.2024.124324	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 Ushiki Ikuo, Kawashima Hirotaka, Kihara Shin-ichi, Takishima Shigeki	4. 巻 181
2. 論文標題 Solubility and diffusivity of supercritical CO2 for polycaprolactone in its molten state: Measurement and modeling using PC-SAFT and free volume theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Supercritical Fluids	6. 最初と最後の頁 105499 ~ 105499
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.supflu.2021.105499	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 Ushiki Ikuo, Ota Saki, Kihara Shin-ichi, Takishima Shigeki	4. 巻 194
2. 論文標題 CO2 solubility and diffusivity in poly(vinyl acetate) studied using the PC-SAFT and free volume theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Supercritical Fluids	6. 最初と最後の頁 105836 ~ 105836
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.supflu.2022.105836	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11件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Mahmoud Magdy Azim, Ikuo Ushiki, Azusa Miyajima, Shigeki Takishima
2. 発表標題 A novel approach to estimate the solubilities of non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) in supercritical carbon dioxide by PC-SAFT equation of state,
3. 学会等名 APCChE2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本 栄祐, 宇敷 育男, 木原 伸一, 滝島 繁樹,
2. 発表標題 超臨界CO2雰囲気におけるエステル系VOC吸着平衡の測定及びモデリング
3. 学会等名 化学工学会第53会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宇敷 育男
2. 発表標題 高機能性吸着剤再生プロセスに向けた超臨界CO2雰囲気下におけるVOC吸脱着挙動の測定及び推算
3. 学会等名 広島大学大学院 先進理工系科学研究科設立3周年記念行事（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ikuo Ushiki
2. 発表標題 Physical properties of metal precursors in the bulk and nano spaces for design of supercritical fluid deposition processes
3. 学会等名 Korea-Taiwan-Japan Joint Symposium on Chemical Engineering 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上野 祐治, 宇敷 育男, 木原 伸一, 滝島 繁樹, 伊藤 康孝, 猪股 宏,
2. 発表標題 高機能性活性炭再生プロセスに向けた超臨界CO2中におけるエステル系VOC吸着平衡の測定及びモデリング
3. 学会等名 第52回化学工学会秋季大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇敷 育男
2. 発表標題 超臨界流体含浸プロセスの設計へ向けたバルク及びナノ空間物性の定量的把握とモデリング
3. 学会等名 化学工学会東北支部 第29回若手の会セミナー講演（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ikuo Ushiki, Ryo Fujimitsu, Azusa Miyajima, Shigeki Takishima
2. 発表標題 Predicting the solubilities of acetylacetonate-type metal precursors in supercritical CO ₂ : Thermodynamic modeling using PC-SAFT
3. 学会等名 9th International Symposium on Molecular Thermodynamics and Molecular Simulation
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇敷 育男
2. 発表標題 機能性ポリマーに対する超臨界CO ₂ の溶解度・拡散係数の測定及びモデリング
3. 学会等名 第25回新技術交流会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宇敷 育男
2. 発表標題 機能性ポリマーに対する超臨界CO ₂ 溶解度の測定およびPC-SAFT状態式によるモデリング
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本 海利, 宇敷 育男
2. 発表標題 超臨界流体法によるメソポーラスシリカへの薬剤含浸プロセスの検討
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 田原 悠斗, 宇敷 育男
2. 発表標題 超臨界CO2雰囲気下におけるケトン系VOC吸着平衡の測定及びモデリング
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

広島大学研究者総覧 https://seeds.office.hiroshima-u.ac.jp/profile/ja.8a86a47bd9407b1f520e17560c007669.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
研究分担者	松山 清 (Matsuyama Kiyoshi) (40299540)	福岡工業大学・工学部・教授 (37112)	

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