Mon. May 24, 2021

Room-A

Award lecture&Special lectures

Award lecture

Chair:Takahiko Takewaki(Mitsubisi Chemical Corp.)
3:00 PM - 3:45 PM Room-A (online-a)

[S01] Novel preparation of highly dispersed metal and metal oxide catalysts and MOF, and their application to petrochemical processes

○Takanori Miyake[1] （1. Kansai University, Faculty of Environmental and Urban Engineering）

3:00 PM - 3:45 PM

Award lecture&Special lectures

Special lectures

Chair:Msahiko Matsukata(Waseda Univ.)
4:00 PM - 6:00 PM Room-A (online-a)

[S02] Carbon Pricing in the world and its prospects in Japan

○Toshi, H. Arimura[1] （1. Faculty of Political Science and Economics, Waseda University）

4:00 PM - 5:00 PM

[S03] Exploitation and exploration of DX in the manufacturing industry

○Naohiko Uramoto[1] （1. Mitsubishi Chemical Holdings Corp.）

5:00 PM - 6:00 PM

©The Japan Petroleum Institute

Award lecture&Special lectures

Award lecture

Chair:Takahiko Takewaki(Mitsubisi Chemical Corp.)

Mon. May 24, 2021 3:00 PM - 3:45 PM Room-A (online-a)

[S01] Novel preparation of highly dispersed metal and metal oxide catalysts and MOF, and their application to petrochemical processes

○Takanori Miyake[1] （1. Kansai University, Faculty of Environmental and Urban Engineering）

3:00 PM - 3:45 PM

©The Japan Petroleum Institute

石油学会 第63回年会（第69回研究発表会）

高分散担持金属・酸化物触媒および金属有機構造体の新規調製法の開拓と石油化学関連プロセスへの応用

（関西大・環境都市工）三宅 孝典（みやけ たかのり）

1．緒言

石油化学と深い関係のある酸化・部分酸化・選択酸化反応、酸化的塩素化・アセトキシル化反応、水素化・水素化分解反応、脱水素反応、フィッシャートロプシュ合成、リフォーミング反応、脱ハロゲン化水素反応、オリゴマー化、カップリング反応など、極めて広範な反応の触媒開発に携わってきた。また、水熱合成、ソルボサーマル合成などの手法を駆使し、ゼオライト、金属有機構造体（MOF）などの機能性材料を調製し、触媒、イオン交換材料等に応用し、新規な機能を見出してきた。研究内容は多岐にわたっているが、その中で特色あるいくつかについて以下に紹介する。

2．材料合成

(1) 多くの反応で活性炭などの炭素質の担体が用いられている。しかしながら、多くの場合、活性炭の製造方法に起因し、比表面積は高いものの、その細孔径は約1nmであり、反応基質の細孔内拡散に課題があった。これに対し、汎用のアルミナやシリカ等にフェノール樹脂などの高分子化合物を含浸、熱処理し、炭素質を細孔壁面に残すことで、炭素質部分のミクロ細孔と担体のメソ細孔のバイモーダル担体を得た。これを担体とした触媒は、活性炭の性質を持つ上に、拡散抵抗の小さい高活性な触媒となり得ることを実証した[1]。用いる高分子材料を含窒素、含塩素などに変えることで、残存する炭素質の性質を変えられることも明らかにした。実際の炭素質は必ずしも担体表面を単層あるいは多層で覆っているわけではなく、スポンジ状のものも混在していると考えている。(2) 担持触媒においては、一般に触媒成分の高い分散度が高活性につながる。担体上での金属や酸化物の分散性を向上させるため、含浸時にキレート剤を使用することなどが知られている。これに対し、高表面積の担体への含浸段階で、金属イオンと錯形成するシクロデキストリンを用いることで、高分散担持触媒を調製する方法を共同開発した。調製した触媒は、メタンの二酸化炭素によるドライリフォーミングで高い性能を発揮した[2]。金属イオンとシクロデキストリンで錯体が形成されていることはマススペクトルで確認している。(3) バナジウム系酸化物が多くの部分酸化反応の触媒として用いられているが、原料に比べて酸化生成物の反応性が高いため、高活性な酸化触媒では完全酸化が進みやすい。低分散なバナジウム触媒においては、バナジウム酸化物がクラスターやバルク構造となっており、多くの格子酸素が吸着種の完全酸化に使われ、これが部分酸化生成物の選択性を低くしている。このような仮説に基づき、バナジウムを単・高分散させた触媒を、ポリオールを添加剤としてバナジウム源とシリカ源を混合しゾルゲル法で調製した。得られた触媒は、パラフィンの部分酸化においてオレフィンを高選択的に与えた[3]。(4) マイクロリアクターが有機合成や無機合成に応用されている。キャピラリーチューブを利用し、限られた空間内で原料を熱分解すれば、従来にない機能性物質が得られると考え、無機酸化物合成に応用した。その結果、キャピラリーチューブの細孔径よりもチューブの材質が、得られる酸化物微粒子の形態やサイズに大きな影響を及ぼすことを見出した[4]。

以上のように、新しい方法論の工夫により、従来から知られている組成であっても、機能性の高い材料の開発が可能であることを示した。

3．機能の発現

(1) 工業的なアセトキシル化反応の多くが日本で開発されてきた。エチレン、プロピレン、ブタジエンのアセトキシル化反応である。これらは基質や生成物の分子量が小さく沸点が低いため、気相反応による触媒プロセスとして開発されてきた。これに対し、ベンゼンとトルエンのアセトキシル化反応を液相で検討し、工業的な性能を持つ触媒とそのプロセスを開発した。ベンゼンやトルエンでは、生成物の分子量が高くなり、沸点が高くなるため気相では活性低下が著しかった。これは、反応温度において触媒表面からの生成物の脱離が遅くなり、炭素質となって蓄積したためと考えた。そこで、反応を液相で行うことで炭素質の蓄積を抑制し、十分な耐久性を持つ合金触媒を世界で初めて開発できた。触媒の耐久性には合金（金属間化合物）であることの安定性とともに、溶解による金属種のロスを防ぐため、Pd等を酸化させないことがポイントであった。このため、酸化剤である酸素と、還元剤になり得るトルエンの物質量比が鍵であった[5]。(2) すでに多くのゼオライトが知られ、接触分解、不均化、アルキル化等の触媒や、分離材として工業的に用いられている。

Copyright(C) The Japan Petroleum Institute 2021 All rights reserved.

イオン交換能についてもA型ゼオライトが洗剤添加成分として用いられてきた。放射性セシウムやストロンチウムのイオン交換にモルデナイト等が用いられているが、これまで注目されてこなかったMerlinoiteやEngelhard Titanosilicate（ETS）、RHO型ゼオライトが、ナトリウムやカリウム等の妨害イオン共存下でも、セシウムやストロンチウムの高い除去性能を有することを初めて見出した[9]。基本的には、カチオンが通過できる細孔径と、イオン交換サイト数に関係するSi/Al比がポイントではあるが、ゼオライトによっては低Si/Al比にした場合に、細孔内に存在する交換カチオンが多くなるのでセシウムの交換に制約が生ずることもわかった。(3) 有機金属構造体（MOF）は、触媒やその担体、分離材等として最近多くの注目を集めている。MOFはゼオライト同様の数オングストロームの細孔を持つため、この細孔内を有効に活用することを検討した。その結果、細孔内にNiを錯化により導入し、これを触媒とすることでエチレンから高収率でブテンが得られることを見出した。また、Pdを導入した触媒では、鈴木-宮浦クロスカップリング反応が進行し[7]、さらに、core-shell構造とt-Boc化による細孔径の微調整により共役ジエンの位置選択的水素化を達成した。キシレン混合物からパラキシレンを分離する新規省エネプロセスが求められている。現在は、パラキシレンの晶析、あるいは、X型ゼオライトによる吸着により分離されている。種々のMOFを用いたキシレンの分離においては、これまで細孔内拡散速度の違いに基づく分離が検討されていたが、MOFの分子ふるい作用によりパラキシレンを分離できることを初めて見出した(図)[8]。本検討においては、X線的に、また、比表面積的には問題ない同じMOFであっても、分離性能が異なる現象に苦労した。キシレン異性体の分子サイズの違いが0.5オングストローム程度しかないため、わずかな欠陥であっても分離性能に違いが見られた。また、細孔内への拡散速度と、キシレンとMOFの接触時間の関係から、MOFの粒径も影響することを定性的に把握している。(4) 還元的酸化反応の概念を提唱した。分子状酸素によりプロピレンからプロピレンオキシドを合成する反応は、高難度酸化反応の一つであった。これに対し、酸素の活性化を還元剤存在下で行うことにより活性酸素種を発現させ、それを用いれば目的生成物を室温付近の温和な条件下で高選択的に得られることを世界で初めて実証した[9]。即ち、Pd触媒上で酸素-水素から過酸化水素をin situで合成し、生成した過酸化水素によりチタノシリケートゼオライト上でプロピレンをエポキシ化できることを見出した。この反応方式は世界で大きな注目を集めた独自性の高い技術である。

以上のように、材料や反応としては既知のものであっても、その新しい用途を開拓し、新しい反応方式を世界に先駆けて見いだすことが可能である。

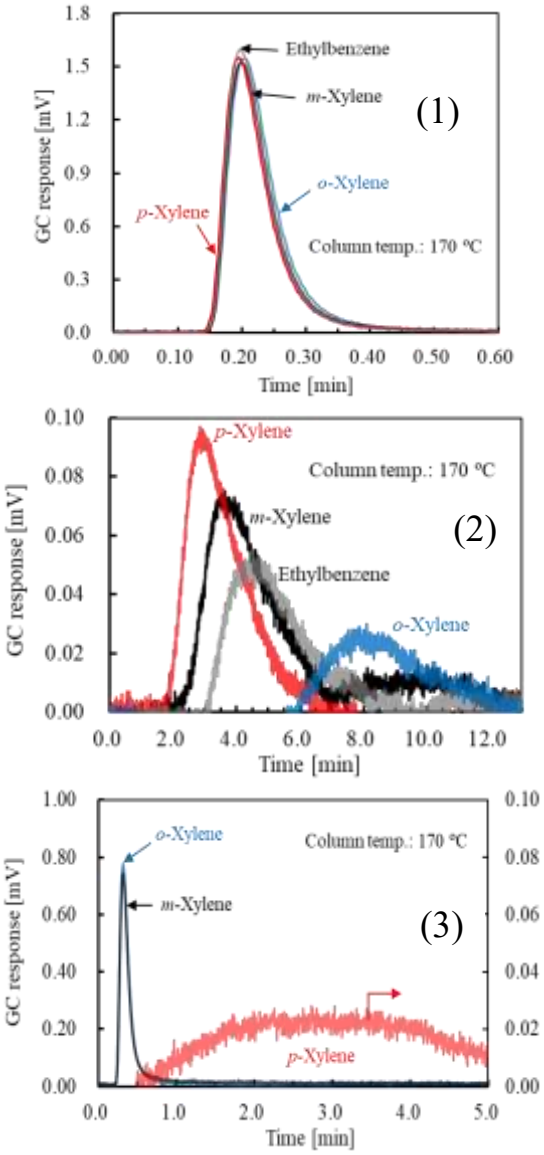

図　種々のMOFによるキシレンの分離
Linker: (1) 4,4'-Biphenyldicarboxylic acid, (2) Terephthalic acid, (3) Fumaric acid

1) 三宅孝典ら、特開平5-105513
2) H. Liu et al., *Catal. Commun.*, 28, 168-173 (2012)
3) K. Fukudome et al, *Catal. Today*, 203, 10-16 (2013)
4) T. Miyake et al., *J. Mater. Sci.*, 40(18), 5011-5013 (2005)
5) T. Miyake et al., *Topics in Catal.*, 13, 243-248 (2000)
6) Y. Kakutani et al., *RSC Advances*, 7, 30919-30928 (2017)
7) T. Sawai et al., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, 57(1), 58-64 (2014)
8) Yonezawa A. et al., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, 64(3), 1-8 (2021)
9) 佐藤 晶ら、特許第3044836号

Copyright(C) The Japan Petroleum Institute 2021 All rights reserved.

Award lecture&Special lectures

Special lectures

Chair:Msahiko Matsukata(Waseda Univ.)

Mon. May 24, 2021 4:00 PM - 6:00 PM Room-A (online-a)

[S02] Carbon Pricing in the world and its prospects in Japan

○Toshi, H. Arimura[1] （1. Faculty of Political Science and Economics, Waseda University）

4:00 PM - 5:00 PM

[S03] Exploitation and exploration of DX in the manufacturing industry

○Naohiko Uramoto[1] （1. Mitsubishi Chemical Holdings Corp.）

5:00 PM - 6:00 PM

©The Japan Petroleum Institute

世界のカーボンプライシングの動向と日本における展望

（早稲田大学・政治経済学術院*）○有村俊秀（ありむらとしひで）

1．背景

気候変動対策として、日本も脱炭素社会に向けて舵を切った。そこで政策手段として注目されているのが、カーボンプライシング（CP）である。経済学的にみると気候変動は、温室効果ガスがもたらす外部不経済である。温室効果の原因である二酸化炭素に価格付けをして、市場に内部化することによって問題を解決することができる。炭素に価格を付けることになることから、カーボンプライシング（CP）と呼ばれる。

CP には、課税方式による環境税・炭素税方式と、排出量取引（Emissions Trading Scheme: ETS）がある。ETS では、政府が全体の排出量を決め、排出する許可証を政府が発行し、排出者に付与する。排出枠が不足すれば市場で購入すればよいし、削減に成功し余剰枠が発生すれば、市場で売却すればよい。

炭素税でも ETS でも、排出削減に成功した事業者は金銭的なメリットが生まれる。そのため対象者は排出削減に努力し、価格メカニズムを通じて、社会全体の削減費用を抑制できるのが、CP の強みである。

CP の１つである炭素税は、まず、北欧で導入された。1990年、フィンランドで導入されたのを皮切りに、欧州各国で導入された。北米でもカナダのブリティッシュ・コロンビア州等では、税が導入されている。近年では、新興国や途上国でも導入されている。例えば、メキシコでは、2014年に炭素税が導入された。南米でもチリが炭素税を導入した。アジアでもシンガポールが導入するなど、世界的な広がりを見せている。

日本でも2012年に、石油石炭税を活用する形で、地球温暖化対策のための税として、１トンあたり289円の炭素税が導入された（図１）。

もう１つの CP である ETS は、炭素税に遅れ2005年に欧州で導入された。2008年以降本格導入され、世界の ETS のモデルとなってきた。対象は発電部門、製造業が対象であった。欧州の ETS に続き、米国では州レベルの ETS、地域温室効果ガスイニシアティブ（RGGI）が2009年に北東部の10州の発電部門を対象として導入された。2013年にはカリフォルニア州で経済の主要部門をカバーする ETS が導入された。カナダ・ケベック州で ETS が導入され、カリフォルニアと国際リンクされた。今はメキシコでも検討されている。

アジアでも ETS が導入されている。世界最大の排出国の中国では、2013年から北京、上海など７地域で試行的制度が導入され、今では電力部門から全国展開された。韓国でも2015年に ETS が導入されている。

一方、日本では2010年度に環境省の審議会で ETS が議論されたが、導入は見送られた。しかし、地方レベルでは ETS が導入された。東京都が日本で初めて2010年に導入し、2011年に埼玉県が続いている。Arimura & Matsumoto(2020)は東京・埼玉の ETS の事後検証を実施している。国レベルでは、脱炭素宣言を受け、環境省、経済産業省で CP の検討が進められている。

2．カーボンプライシングの役割と論点

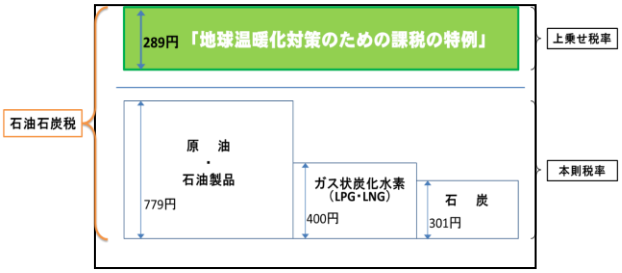

図１．地球温暖化対策税（環境省資料より）

CP には様々な役割が期待されている。第一義には、価格効果が期待される。炭素排出の大きい製品やサービスの価格が上昇し、それによって、消費者、企業の行動変容が期待される。具体的には、供給サイドで、石炭から天然ガスへの転換、そして、再生可能エネルギーの普及が期待される。需要サイドでは、省エネ行動の促進や、省エネ投資の促進が期待される。

炭素税では（あるいは排出枠のオークションでも）税収が発生するので、その使い方も重要になってくる。現在の地球温暖化対策税のように、省エネ・脱炭素投資や再エネ促進に税収を使うという考え方が王道である。ただし、この場合、政府が補助金を賢く使えることが、効率的な削減の前提になる。

これに加えて、税収を一般財源として、既存税の削減に使い、経済の活性化を目指す二重の配当という考え方もある（有村他、2018）。Takeda and Arimura (2021)では、炭素税を法人税減税に用いれば、技術進歩のない新古典派の経済モデルでも、排出削減と経済成長の両立が可能であることが示されている。

新たな CP の導入にあたっては、実行炭素価格に注目し、既存の燃料税（石油石炭税等）も含めた効率的な炭素価格が重要になってくる。その場合、二酸化炭素１トン当たりでみた場合に優遇されている、石炭に新たな課税を行うという考え方もある（図１）。

参考文献

1) 有村俊秀, 武田史郎, 尾沼広基 (2018) 炭素価格の二重配当－環境と経済の同時解決に向けて－. 環境経済・政策研究, 11(2), 73～78.
2) Arimura, T, & Matstumoto, S. ed. (2020) “Carbon Pricing in Japan“ Springer https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-15-6964-7
3) Takeda, S., Arimura, T.H. (2021) A computable general equilibrium analysis of environmental tax reform in Japan with a forward-looking dynamic model. Sustain Sci. https://doi.org/10.1007/s11625-021-00903-4

*arimura@waseda.jp

Copyright(C) The Japan Petroleum Institute 2021 All rights reserved.

製造業における DX の深化と探索

三菱ケミカルホールディングス
浦本直彦

人工知能、IoT、データ分析などのデジタル技術を活用し、顧客や社会にとっての新しい価値の創出を目指すデジタルトランスフォーメーションが現在注目を集めている。その波は、製造業にも押し寄せており、研究開発、製造部門、事業部門、共通部門などにおいて様々な活動が進められている。本稿では、化学会社を主要事業会社に持つ三菱ケミカルホールディングスにおける DX の活動とそこで得られた知見を紹介する。

DX には、複数の意味合いがある。良く使われる定義は、経済産業省が公開している DX を推進するためのガイドライン（DX 推進ガイドライン)のものであり、DX を「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立すること」と定義している[1]。また、DX を説明するものとしてよく用いられるのが、デジタイゼーション、デジタライゼーション、そして DX という 3 つの段階である。デジタイゼーションをアナログからデジタルへの変換（デジタル化)、デジタライゼージョンをデジタル化された情報を活用して新しい価値を生み出すこと、そして最終段階として、あたらしいビジネスモデルや製品を生み出す活動が DX であるとするのが一般的である。

前述のように、DX の定義として、「新たなビジネスモデル」や「業務の変革」という言葉が並び、Uber や Amazon のような欧米の新興企業が引き合いに出される。しかし、Uber や Amazon のように既存ビジネスを持たない企業がデジタル技術を最大限に活用し競争力の高いサービスを提供するのと違い、多くの製造業においては、既存のビジネスが存在する。既存のビジネスを全て捨てて新しいビジネスモデルを構築するということは考えにくく、既存ビジネスを維持成長させながら、新しい製品やサービス、ビジネスモデルの構築を探る、という戦略が現実的である。前者の場合、例えば、製造トラブルを最小限にする、新製品の研究開発期間を短縮する、グローバルサプライチェーンの最適化を行う、といった業務プロセスそのものが大きく変革するわけではないが大きな効果や価値を持つものが典型的な例となる。

一方で、モノ売りからコト売りへの変化、環境問題やサーキュラーエコノミーに対応する新しいエコシステムの構築など、業務プロセスそのものの大きな変化を伴う取り組みや、今までにない価値を創出するための活動も、抜本的な改革のために必要不可欠である。また、COVID19 に代表される、全く予期していなかった大きな社会の変化が確実に起こる時代になり、変化に強い体幹と柔軟に対応できる俊敏さ（アジリティー)が必要になってきている。

そのような観点で、筆者は、DX には連続的 DX と非連続的 DX の 2 種類があると考えている（あるいは持続的 DX と破壊的 DX)。現在注目を浴びている「両利きの経営」になぞ

Copyright(C) The Japan Petroleum Institute 2021 All rights reserved.

らえると、前者が深化、後者が探索に相当する。深化と探索のどちらか一方に注力するのではなく、両方を戦略的に進めていくことが重要である。そのバランスはそれぞれの企業が置かれた状況に応じて変化するものであり、継続的な活動の中で定期的に捉えなおす必要があるだろう。

連続的 DX は、業務プロセスそのものが大きく変わるわけではないが、コスト削減、マーケット投入までの時間の短縮などの観点で、大きな価値を産むものである。非連続 DX は、新しいサービスやビジネスモデルの構築など業務プロセスが大きく変わる活動である。また、量子コンピューティングなど、実用化には時間がかかるかもしれないが、これまでの研究開発製造のやり方を大きく変える可能性がある技術の適用も含まれる。連続的 DX が非連続 DX に繋がらないと DX でない、という見方はとらず、高い(競争的)価値を継続的に生み出すことを DX の目的としている。

DX の推進においては、経営層の強い意志とリーダーシップが必要であることは言を俟たないが、特に大規模な企業においては、いかに現場が DX を自分事として捉え、初めは小さくとも何かを変えるための活動を始めるかが肝要である。最初の一歩を支援するために、筆者は、MCHC デジタルメソッドと呼ばれる DX を推進吸うための方法論やツールを構築し社内外に共有している。以下にメソッドを構成するアセットを紹介する。

- デジタルプレイブック; 新しいビジネスソリューション構築のための部品集である。各事業部門が異なる製品群や顧客層を持っている場合、単一のソリューションではカバーできないため、核となるアイデアを事業部門ごとに組み合わせることで、新しい価値を生み出すことを目的としている。
- デジタルテクノロジーアウトルック: 主要デジタル技術を、自社にとってどのようなインパクトがあるかの示唆と、その技術をどのように自社に取り込むかの立ち位置を示したものである。
- 機械学習プロジェクトキャンパス: データ分析プロジェクトを行う際に、検討すべき指針（例，プロジェクトの目的、成功基準、データ詳細、システム化の方針など)を明確化するためのツール。社外にも無償公開されている [2]。
- デジタル成熟度インデックス：複数の観点から DX の取り組みを評価するための指標。
- デジタルプロジェクトレシピ：DX プロジェクトで用いる様々な技術を使う上でのベストプラクティスをまとめたもの。
- コミュニティ: 重要技術に関する Center of Excellence (CoE)や社内草の根コミュニティの支援。現在、マテリアルズ・インフォマティクス、テキストマイニング、数理最適化、画像分析の 4 つの CoE が活動している。
- Digital University: デジタル人材の教育プログラム。想定レベルや職種に応じて複数のプログラムを提供している。DX の基礎を学ぶための教材を元に、書籍[2]を刊行している。

Copyright(C) The Japan Petroleum Institute 2021 All rights reserved.

筆者が所属するデジタルトランスフォーメーショングループは、2017 年より活動を開始している。当初は社内に同様の組織はなく、我々が DX に関する活動を主導することが多かったが、時間とともにグループ内各社に DX 推進組織が立ち上がり、我々の活動も前述の MCHC メソッドを活用ながら、より困難な課題、組織や会社をまたがる活動、そして社会的な価値の創出に向けて、トップダウン、ボトムアップ両面から変革のための活動を続けている。2021 年 2 月に開催された三菱ケミカルホールディングス事業説明会において、DX のビジョンと重点領域を示す「DX グランドデザイン」を公開し、グループ会社全体の変革パワーを最大化するための活動にも取り組んでいる。

DX は、デジタル技術の単なる適用ではなく、企業のビジネスと組織の変革のための道筋である。社内外の組織と一緒に、その歩みを継続していきたい。

参考文献

[1] デジタルトランスフォーメーションを推進するための ガイドライン （DX 推進ガイドライン）Ver. 1.0, https://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181212004/20181212004-1.pdf

[2] 機械学習プロジェクトキャンパス, https://www.mitsubishichem-hd.co.jp/news_release/pdf/190718.pdf

[3] 志度 昌宏, 三菱ケミカルホールディングス 先端技術・事業開発室 DX グループ, “DX の教養 デジタル時代に求められる実践的知識”, インプレス, 2021

Copyright(C) The Japan Petroleum Institute 2021 All rights reserved.