

深共晶溶媒について

岡村 浩之

1 はじめに

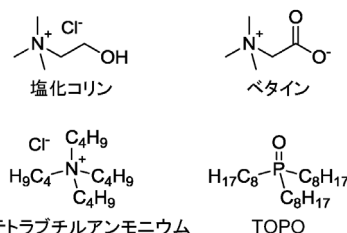
深共晶溶媒 (deep eutectic solvents, DESs) は、水素結合のような強い分子間相互作用が働く 2 種類以上の物質から構成される液体の総称であり、近年、新たな媒体として注目されている¹⁾²⁾。深共晶溶媒に関する初期の研究は、2001 年に Abbott らによって報告され、塩化コリン (塩化 (2-ヒドロキシエチル) トリメチルアンモニウム; 分解温度 302 °C) と塩化亜鉛 (融点 293 °C) を 1 : 2 のモル比で混合すると、融点が 23~25 °C の液体が得られることを見いだした³⁾。Abbott らは 2003 年には、塩化コリンと尿素 (融点 133 °C) を 1 : 2 のモル比で混合すると、融点が 12 °C まで低下し、室温で液体となることを明らかにし、「深共晶溶媒」という用語を考案した⁴⁾。これらの先駆的な研究以降、深共晶溶媒に関する研究開発が活発に行われるようになり、これまでに多くの深共晶溶媒が報告されてきた。深共晶溶媒は、水や有機溶媒などの分子液体とは異なる魅力的な特性を有することから、分離化学⁵⁾、蓄電池⁶⁾、触媒⁷⁾、医薬品⁸⁾などの幅広い分野で注目を集めている。本稿では、深共晶溶媒の分類と特徴、調製方法について解説し、液液抽出媒体および固液抽出媒体、次世代蓄電池の電解液として利用した最近の研究について紹介する。深共晶溶媒の定義に関しては「深 (deep)」を含めさまざまな議論があるものの、ここでは広い意味で共晶効果により融点が低下し、室温で液体となる物質を深共晶溶媒とみなす。なお、深共晶溶媒については、城田による本誌のミニファイル⁹⁾のほか、和文の成書¹⁰⁾も出版されているので併せて参照されたい。

2 深共晶溶媒の分類と特徴

2.1 深共晶溶媒の分類と構成成分

前項において、先駆的な研究例として二つの深共晶溶媒を紹介したが、一般的に深共晶溶媒は、構成成分の種類と組み合わせによって、大きく 5 種類に分類される。表 1 に深共晶溶媒の分類と組み合わせを示す。また、図 1 に代表的な深共晶溶媒構成成分の化学構造を水素結合受容体と水素結合供与体に分けて示す。

水素結合受容体



水素結合供与体

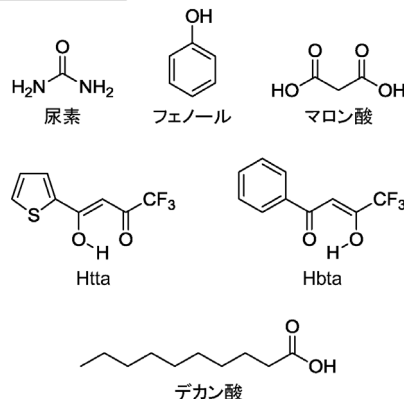


図 1 代表的な水素結合受容体と水素結合供与体の化学構造

表 1 深共晶溶媒の分類と組み合わせ

型	組み合わせ	一般式	例 (モル比)	文献
I	有機ハロゲン化物塩 + 金属ハロゲン化物塩	$\text{Cat}^+ \text{X}^- *1 *2 + \text{MX}_y *3$	塩化コリン + ZnCl_2 (1 : 2)	3)
II	有機ハロゲン化物塩 + 金属ハロゲン化物塩水和物	$\text{Cat}^+ \text{X}^- + \text{MX}_y \cdot z\text{H}_2\text{O}$	塩化コリン + $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1 : 1)	11)
III	有機ハロゲン化物塩 + 水素結合供与体	$\text{Cat}^+ \text{X}^- + \text{HBD} *4$	塩化コリン + 尿素 (1 : 2)	4)
IV	金属ハロゲン化物塩 + 水素結合供与体	$\text{MX}_y + \text{HBD}$	ZnCl_2 + 尿素 (1 : 3.5)	12)
V	水素結合受容体 + 水素結合供与体	$\text{HBA} *5 + \text{HBD}$	$\text{TOPO} *6$ + フェノール (1 : 1)	13)

*1 Cat^+ : 有機カチオン, *2 X^- : ハロゲン化物イオン, *3 M: 金属カチオン, *4 HBD: 水素結合供与体, *5 HBA: 水素結合受容体, *6 TOPO: トリオクチルホスフィンオキシド

I型は、有機ハロゲン化物塩と金属ハロゲン化物塩の混合物であり、前述の塩化コリンと塩化亜鉛（モル比1：2）からなる深共晶溶媒³⁾が該当する。この深共晶溶媒は、第四級アンモニウムカチオンと ZnCl_3^- アニオンによって形成されることから、クロロアルミネート系イオン液体と類似したタイプであると考えることができる。II型は、有機ハロゲン化物塩と金属ハロゲン化物塩水和物の混合物であり、塩化コリンと塩化マグネシウム六水和物（モル比1：1）からなる深共晶溶媒¹¹⁾が該当する。I型の深共晶溶媒の種類は限られているが、金属ハロゲン化物塩水和物を用いることで、深共晶溶媒の範囲を拡大することができる。多くの金属塩水和物は比較的安価であり、空気や水に対して安定であることから、大規模な工業プロセスでの利用が可能と考えられる。III型は、有機ハロゲン化物塩と非イオン性の水素結合供与体の混合物であり、前述の塩化コリンと尿素（モル比1：2）からなる深共晶溶媒⁴⁾が該当する。これまでにさまざまな水素結合供与体が研究されており、アミド、カルボン酸、アルコールを用いると深共晶溶媒を形成することが報告されている。このタイプの深共晶溶媒は利用可能な水素結合供与体が多く、汎用性が高いと言える。IV型は、金属ハロゲン化物塩と非イオン性の水素結合供与体の混合物であり、塩化亜鉛と尿素（モル比1：3.5）からなる深共晶溶媒¹²⁾が該当する。III型の有機ハロゲン化物塩の代わりに金属ハロゲン化物塩を利用することができ、これらはIV型に分類される。塩化亜鉛は、アセトアミド、エチレングリコール、1,6-ヘキサジオールとも深共晶溶媒を形成することが知られている¹²⁾。V型は、非イオン性の水素結合受容体と水素結合供与体の混合物であり、トリオクチルホスフィンオキシド（TOPO）とフェノール（モル比1：1）からなる深共晶溶媒¹³⁾が該当する。分子性物質のみで構成されることから、新しいタイプの深共晶溶媒として考えられている。このタイプの深共晶溶媒は、構成成分として金属抽出剤を組み込むことで、溶媒抽出への利用が有望視されている⁵⁾。

以前は、有機ハロゲン化物塩や金属ハロゲン化物塩からなるI～IV型の深共晶溶媒の報告が多かったが、近年では、非イオン性の水素結合受容体と水素結合供与体からなるV型の深共晶溶媒が多く報告されている。また、クエン酸とスクロース、グルコースと酒石酸の組み合わせのように、天然物から調製できる深共晶溶媒も報告されており、このような深共晶溶媒は天然深共晶溶媒（natural deep eutectic solvents, NADESs）と呼ばれることもある¹⁴⁾。現在では、I～V型に属さない新たな深共晶溶媒も報告されており、3成分の混合物からなる深共晶溶媒も多数報告されている。

2・2 深共晶溶媒の特徴

深共晶溶媒は、各構成成分と比較して融点が大幅に低下し、室温において液体となる点が大きな特徴である。深共晶溶媒の融点は、構成成分の混合比率によって大きく変化し、共晶点組成において最も低い値を示す。室温で液体となる点においては、イオン液体と同様であるが、イオン液体はカチオンとアニオンから構成される塩であるのに対して、深共晶溶媒は水素結合などの分子間相互作用が働く2種類以上の物質から構成される混合物である。

深共晶溶媒は一般的に、蒸気圧が低く、難燃性で、高い熱安定性を有するなど、イオン液体と類似した性質を持ち、環境調和型溶媒として注目されている。また、構成成分の組み合わせと混合比率によって物性を調節可能である。深共晶溶媒は親水性のものが多く、長鎖アルキル基を有する化合物などの水に難溶な物質から構成される深共晶溶媒は疎水性を示し、水-深共晶溶媒の二相系を構築することができる。一般的に粘性が高く、電気伝導度は低いものが多いが、近年、高い電気伝導度を有する新たな深共晶溶媒¹⁵⁾¹⁶⁾も報告されている。

3 深共晶溶媒の調製

深共晶溶媒は、調製が容易であり、2種類以上の物質を混合し、必要に応じて加熱するだけで、目的物を得ることができる。最も一般的な調製方法は、不活性ガス雰囲気下などで、深共晶溶媒の構成成分を混合し、均一な液体が形成されるまで加熱攪拌することである。溶媒を添加する必要はなく、調製後の精製も不要である。イオン液体では、有機ハロゲン化物塩の合成やイオン交換反応に加えて、精製や乾燥が必要となることから、深共晶溶媒はイオン液体よりも調製が容易であるという大きなメリットがある。

その他の調製方法としては、粉碎法、真空蒸発法、凍結乾燥法などがある。粉碎法では、不活性ガス雰囲気下などで、二つ以上の固体成分を乳鉢に入れ、透明で均一な液体になるまで粉碎する。真空蒸発法では、構成成分を水などの分子溶媒に溶解した後、真空下で分子溶媒の大部分を蒸発させ、乾燥させることで深共晶溶媒を得る。凍結乾燥法では、構成成分を水に溶解した後、これらの溶液を混合し、凍結乾燥させることで均一な液体を得る¹⁷⁾。深共晶溶媒の調製に水などの分子溶媒を使用した場合は、分子溶媒の残留や分子溶媒に含まれる不揮発性不純物の混入が不可避であるため注意が必要である。

4 深共晶溶媒の応用

4・1 液液抽出媒体としての利用

化学工業における分離精製プロセスにおいて、液液抽出（溶媒抽出）は重要な役割を担っている。しかしながら、溶媒抽出で使用される有機溶媒は、揮発性、可燃

性、毒性といった問題点を抱え、環境や人体への影響が懸念されていることから、安全性が高く環境負荷の小さい溶媒の利用が求められている。このような背景から、有機溶媒に代わる抽出媒体として深共晶溶媒を利用する研究が数多く行われている。

深共晶溶媒を溶媒抽出における抽出媒体として利用するためには、水と混和せず二相を形成する必要がある。金属イオンの溶媒抽出においては、中性配位子 TOPO から構成される疎水性深共晶溶媒を用いた研究が多く報告されている^{13)18)~23)}。Gilmore らは、TOPO とフェノールをさまざまなモル比で混合させることで深共晶溶媒の調製を試み、TOPO のモル分率 (χ_{TOPO}) が 0.1 から 0.6 の範囲において室温で液体となるとともに、疎水性を示し、水と二相を形成することを明らかにした¹³⁾。TOPO とフェノールのモル比が 1 : 1 ($\chi_{\text{TOPO}} = 0.50$) の深共晶溶媒を用いて、0.01, 1.00, 3.00 mol dm⁻³ 硝酸水溶液からの硝酸ウラニル (VI) の抽出を検討した結果、いずれの硝酸濃度においても振とう後の水相中の硝酸ウラニル (VI) 濃度は 0.50 ppm 以下となり、硝酸ウラニル (VI) を定量的に深共晶溶媒相に抽出できることを示した。また、Byrne らは、TOPO と 18 種類の水素結合供与体を混合することで、室温で液体となる組み合わせを調べた¹⁸⁾。液体となった TOPO とマロン酸 (モル比 2 : 1) からなる深共晶溶媒を用いて、塩酸水溶液からのガリウム (III) の抽出を検討した結果、水相の塩酸濃度の増加とともにガリウム (III) の抽出率が増加し、塩酸濃度が 4 mol dm⁻³ 以上で定量的に抽出できることを明らかにした。さらに、1 mol dm⁻³ を超えるガリウム (III) を抽出可能であり、抽出容量が従来の有機溶媒系よりも約 3 桁高いことも示した。

溶媒抽出において、陰イオン性配位子と中性配位子などの 2 種類の抽出剤を併用した協同効果により、金属イオンの抽出分離能が大幅に向上することが知られている。TOPO は代表的な協同効果試薬であり、 β -ジケトンなどの陰イオン性配位子と組み合わせると協同効果が発現することがある。Hanada らは、TOPO と 2-テノイルトリフルオロアセトン (Htta) あるいはベンゾイルトリフルオロアセトン (Hbta) を 1 : 2 のモル比で混合すると、室温で液体の深共晶溶媒を形成することを明らかにし、これらの深共晶溶媒を用いてリチウム、ナトリウム、カリウムイオンの抽出分離能を評価した¹⁹⁾。TOPO と Htta (モル比 1 : 2) からなる深共晶溶媒による抽出は、Li >> Na > K の順であり、リチウムを選択的に抽出分離できるとともに、トルエンを用いた Htta と TOPO の協同効果抽出系よりも低 pH 側で抽出可能であることを見いだした。TOPO と Hbta (モル比 1 : 2) からなる深共晶溶媒を用いても同様の抽出挙動を示すことを明らかにした。

Cruz らは、TOPO とデカン酸のモル比が 1 : 1 の深共

晶溶媒を用いて、ニッケル水素電池酸浸出液からの希土類金属の抽出を研究した²⁰⁾。浸出液として 2.0 mol dm⁻³ 硫酸、メタンスルホン酸、硝酸の 3 種類を検討し、硝酸を用いるとマンガン、コバルト、ニッケル、ランタン、セリウムなどが含まれる浸出液の中から、ランタンとセリウムを選択的に深共晶溶媒相に抽出分離でき、水相と深共晶溶媒相の質量比が 1 : 8 のとき、抽出率はそれぞれ 96 %、98 %であることを示した。また、Guidugli らは、TOPO と水素結合供与体のプロパノール、メントール、オクタン酸をさまざまなモル比で混合した深共晶溶媒を調製し、水溶液からのセリウム (III) の抽出特性を評価した²¹⁾。深共晶溶媒中の水素結合供与体のモル分率が増加すると、すべての深共晶溶媒においてセリウム (III) の抽出率が低下し、TOPO のモル分率が増加すると抽出率は増加した。このことから、これらの系では、抽出において TOPO が重要な役割を果たすことが示された。TOPO と水素結合供与体のモル比が 1 : 1 の深共晶溶媒を用いて、水素結合供与体の種類の比較を行ったところ、プロパノール (94.4 %) > メントール > オクタン酸 (68.2 %) の順となり、プロパノールで最も高い抽出率を示した。

4・2 固液抽出媒体としての利用

使用済み工業製品に含まれるレアメタルをリサイクルする際には、高濃度の無機酸を使用してレアメタルを浸出させ、溶媒抽出などの湿式法を用いて目的物質を分離回収する。しかしながら、このような従来の湿式分離プロセスでは、浸出および溶媒抽出で大量の高濃度無機酸と有害な有機溶媒を使用するため、これらの化学薬品を使用しない代替技術の開発が求められている。近年、金属リサイクルで使用される無機酸および有機溶媒の代替として、深共晶溶媒を利用する研究が行われている。

Hanada らは、前述の TOPO と Hbta (モル比 1 : 2) および TOPO とデカン酸 (モル比 1 : 1) からなる深共晶溶媒を用いて、リチウムイオン電池正極材料からのリチウム、コバルト等の抽出を研究した²²⁾。はじめに、これらの深共晶溶媒を用いて、リチウム、マンガン、コバルト、ニッケルの液液抽出挙動を調べ、TOPO とデカン酸よりも TOPO と Hbta からなる深共晶溶媒の方がこれらの金属に対する抽出能が高く、後者による抽出は pH 1 から始まり、Mn > Co > Ni >> Li の順であることを示した。正極活物質であるコバルト酸リチウムからの浸出において、これらの深共晶溶媒をそのまま用いた場合は、リチウムとコバルトの浸出はごくわずかであったが、TOPO と Hbta からなる深共晶溶媒に少量の水を添加すると、これらの金属の浸出能は向上した。さらに、アスコルビン酸を添加すると浸出能がより向上し、0.15 mol dm⁻³ の添加において浸出率はリチウムが 93.0 %、コバルトが 90.6 %であった。三元系正極材 NMC111 や

正極材ブラックマスからの浸出についても検討しており、最適条件においてリチウム、マンガン、コバルト、ニッケルを高効率で浸出できることを明らかにした。

この深共晶溶媒は、希土類金属の溶媒抽出および溶解にも利用できる。Hanada らは、TOPO と Hbta (モル比 1 : 2) からなる深共晶溶媒に加えて、アルキル鎖長の短いトリブチルホスフィンオキシド (TBPO) と Hbta (モル比 1 : 2) からなる深共晶溶媒を調製し、液液抽出および溶解媒体として用いて、鉄、コバルト、ネオジウム、ジスプロシウムの分離を検討した²³⁾。TOPO と Hbta からなる深共晶溶媒を用いた金属酸化物の溶解においては、液液抽出では分離が困難であったネオジウムを選択的かつ定量的に溶解分離可能であり、TBPO と Hbta からなる深共晶溶媒では、酸化ネオジウムと酸化ジスプロシウムの両方を定量的に溶解でき、アルキル鎖長の異なる種々の有機酸を添加することで選択性を制御できることを明らかにした。

Cao らは、カプロラクタム、尿素、ギ酸 (モル比 3 : 1 : n ; $n = 1.9, 2.4, 3.2, 4.8$) からなる三成分系深共晶溶媒を開発し、リチウムイオン電池の正極活物質であるコバルト酸リチウムからの金属の抽出を研究した²⁴⁾。リチウムは深共晶溶媒に選択的に浸出でき、最適条件下で 99 % を超える浸出率が得られることを示した。一方、コバルトはギ酸によって還元されて紫色の $\text{NH}_4\text{Co}(\text{HCOO})_3$ を形成することで深共晶溶媒の底部に沈殿し、直接回収可能であることを明らかにした。さらに、三元系正極材 NCM523 および NCM622 からの浸出も検討し、最適条件においてリチウム、マンガン、コバルト、ニッケルの浸出率は、NCM523 が約 90 %、NCM622 が 82 % 以上であり、 $\text{NH}_4\text{M}(\text{HCOO})_3$ ($\text{M} = \text{Ni, Co, Mn}$) の沈殿物を回収できることも示した。

4.3 蓄電池電解液としての利用

持続可能な社会の実現に向けて、再生可能エネルギーの普及とエネルギー貯蔵技術の高度化が喫緊の課題となっている。エネルギー貯蔵の中心的な役割を担う蓄電池は、高性能化、安全性向上、低コスト化が求められており、これらの課題解決に向けて、次世代蓄電池の開発が進められている。蓄電池の構成要素の一つである電解液は、蓄電池において重要な役割を果たしており、近年、次世代蓄電池の電解液として深共晶溶媒を用いた研究が行われている。

Liu らは、過塩素酸亜鉛六水和物 ($\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、ブタンジニトリル、塩化リチウム (LiCl) (モル比 4 : 25 : 1) からなる三成分系深共晶溶媒をメタクリルオキシエチルスルホベタインおよびアクリル酸ヒドロキシエチルモノマーと混合し、紫外線重合を行うことで、深共晶溶媒ベースのゲル電解液を調製し、 $-20 \sim 70^\circ\text{C}$ の幅広い温度範囲で作動する水系亜鉛イオン電池の開発に成

功した²⁵⁾。この電解液により、界面副反応および亜鉛デンドライト形成が効果的に抑制され、優れたサイクル安定性を示すことも明らかになった。また、Cao らは、塩化コリンとエチレングリコール (モル比 1 : 2) からなる深共晶溶媒を用いて、 $\text{Fe}(\text{III})/\text{Fe}(\text{II})$ および $\text{Zn}(\text{II})/\text{Zn}$ レドックス対をそれぞれ正極活物質および負極活物質とした非水系亜鉛-鉄レドックスフロー電池を研究した²⁶⁾。クーロン効率は 50 サイクル以上にわたって約 100 % を維持し、優れたサイクル安定性を示すことを明らかにした。

Sheng らは、硝酸リチウム (LiNO_3) と *N*-メチルアセトアミド (モル比 1 : 4) からなる深共晶溶媒を調製し、リチウム-酸素電池の電解液として利用した²⁷⁾。この電解液は、強力な水素結合相互作用により 3.2 mol dm^{-3} という高い LiNO_3 濃度を可能にし、リチウム金属負極との親和性を向上させるだけでなく、効率的な酸化メディエーターとしても機能し、電池は優れたサイクル安定性を示すことを明らかにした。また、Huang らは、ナトリウムビス (フルオロスルホニル) イミド (NaFSI) と 2-シアノ-3-エトキシアクリル酸エチルを 1 : 2 あるいは 1 : 3 のモル比で混合した新規深共晶溶媒を開発し、炭酸ビニレンをモノマーとして用いて深共晶溶媒ベースのゲル電解液を作製して、ナトリウム金属電池に利用した²⁸⁾。モル比 1 : 3 の深共晶溶媒を用いたゲル電解液により、ナトリウムイオンの脱溶媒和と輸送が促進されるとともに、電極/電解液界面の安定性が向上し、優れた長期サイクル安定性を示すことを明らかにした。

5 おわりに

本稿では、深共晶溶媒の基礎から応用までを最近の論文とともに紹介した。深共晶溶媒に関する論文は近年急激に増加しており、学術界において高い関心を集めている。しかしながら、現在でも未解明な点が多く、深共晶溶媒の可能性を最大限に引き出すためには、基礎研究のさらなる深化が必要不可欠である。分析化学分野では、液体クロマトグラフィー、ガスクロマトグラフィー、キャピラリー電気泳動における分離媒体としても利用されており、その他にもさまざまな手法への応用が期待されている。さらに、深共晶溶媒はその特異的な性質から、従来の液体では困難であった分離や分析を可能にし、既存の分析化学手法の高度化や新たな分析化学手法の開発に貢献する可能性を秘めている。今後、深共晶溶媒が多くの研究で活用されることを期待している。本稿が深共晶溶媒研究の推進と分析化学の発展の一助となれば幸いである。

文 献

- 1) E. L. Smith, A. P. Abbott, K. S. Ryder : *Chem. Rev.*, **114**, 11060 (2014).

- 2) B. B. Hansen, S. Spittle, B. Chen, D. Poe, Y. Zhang, J. M. Klein, A. Horton, L. Adhikari, T. Zelovich, B. W. Doherty, B. Gurkan, E. J. Maginn, A. Ragauskas, M. Dadmun, T. A. Zawodzinski, G. A. Baker, M. E. Tuckerman, R. F. Savinell, J. R. Sangoro : *Chem. Rev.*, **121**, 1232 (2021).
- 3) A. P. Abbott, G. Capper, D. L. Davies, H. L. Munro, R. K. Rasheed, V. Tambyrajah : *Chem. Commun.*, **2001**, 2010.
- 4) A. P. Abbott, G. Capper, D. L. Davies, R. K. Rasheed, V. Tambyrajah : *Chem. Commun.*, **2003**, 70.
- 5) N. Schaeffer, I. C. M. Vaz, M. S. Pinheiro, F. Olea, T. Hanada, S. Dourdain, J. A. P. Coutinho : *Green Chem.*, **27**, 4438 (2025).
- 6) Z. Liu, F. Feng, W. Feng, G. Wang, B. Qi, M. Gong, F. Zhang, H. Pang : *Energy Environ. Sci.*, **18**, 3568 (2025).
- 7) E. Guzmán : *ChemCatChem*, **17**, e202500522 (2025).
- 8) E. Chevé-Kools, Y. H. Choi, C. Roullier, G. Ruprich-Robert, R. Grougnet, F. Chapeland-Leclerc, F. Hollmann : *Green Chem.*, **27**, 8360 (2025).
- 9) 城田秀明 : ぶんせき (*Bunseki*), **2025**, 99.
- 10) 馬場由成 (監修) : “深共晶溶媒の開発と応用”, (2025), (シーエムシー出版).
- 11) H. Wang, Y. Jing, X. Wang, Y. Yao, Y. Jia : *J. Mol. Liq.*, **163**, 77 (2011).
- 12) A. P. Abbott, J. C. Barron, K. S. Ryder, D. Wilson : *Chem. Eur. J.*, **13**, 6495 (2007).
- 13) M. Gilmore, É. N. McCourt, F. Connolly, P. Nockemann, M. Swadźba-Kwaśny, J. D. Holbrey : *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **6**, 17323 (2018).
- 14) R. Craveiro, I. Aroso, V. Flammia, T. Carvalho, M. T. Viciosa, M. Dionísio, S. Barreiros, R. L. Reis, A. R. C. Duarte, A. Paiva : *J. Mol. Liq.*, **215**, 534 (2016).
- 15) H. Shirota, M. Koyakkat, M. Cao, M. Shimizu, S. Asakura, H. Kawamoto, K. Moriyama : *J. Mol. Liq.*, **372**, 121176 (2023).
- 16) M. Koyakkat, K. Moriyama, S. Asakura, H. Kawamoto, H. Shirota : *J. Mol. Liq.*, **384**, 122250 (2023).
- 17) M. C. Gutiérrez, M. L. Ferrer, C. R. Mateo, F. del Monte : *Langmuir*, **25**, 5509 (2009).
- 18) E. L. Byrne, R. O'Donnell, M. Gilmore, N. Artioli, J. D. Holbrey, M. Swadźba-Kwaśny : *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **22**, 24744 (2020).
- 19) T. Hanada, M. Goto : *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **9**, 2152 (2021).
- 20) K. A. M. L. Cruz, F. R. P. Rocha, M. C. Hespanhol : *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **12**, 6169 (2024).
- 21) L. F. Guidugli, T. Reza : *Ind. Eng. Chem. Res.*, **63**, 12582 (2024).
- 22) T. Hanada, M. Goto : *Green Chem.*, **24**, 5107 (2022).
- 23) T. Hanada, N. Schaeffer, M. Katoh, J. A. P. Coutinho, M. Goto : *Green Chem.*, **26**, 9671 (2024).
- 24) S. Cao, Y. Ma, L. Yang, L. Lin, J. Wang, Y. Xing, F. Lu, T. Cao, Z. Zhao, D. Liu : *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **11**, 16984 (2023).
- 25) Q. Liu, J. Li, D. Xing, Y. Zhou, F. Yan : *Angew. Chem. Int. Ed.*, **64**, e202414728 (2025).
- 26) X. Cao, X. Wang, X. Xue : *ChemSusChem*, **18**, e202401604 (2025).
- 27) C. Sheng, W. Li, H. Zhou, P. He : *Chem. Commun.*, **61**, 7265 (2025).
- 28) Y. Huang, G. Qiu, Z. Tai, Y. Liu : *ChemSusChem*, **18**, e202500417 (2025).



岡村 浩之 (OKAMURA Hiroyuki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所先端基礎研究センター
(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白
方2番地4). 金沢大学大学院自然科学研
究科物質科学専攻博士後期課程修了。博士
(理学), 第一種放射線取扱主任者。《現在
の研究テーマ》深共晶溶媒およびイオン液
体を用いた物質分離。《主な著書》“深共晶
溶媒の開発と応用”, (分担執筆), (シーエ
ムシー出版)。

E-mail : okamura.hiroyuki@jaea.go.jp