

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24550077

研究課題名(和文)再生可能な天然由来水素源と水素の常温常圧水中での相互変換

研究課題名(英文) Interconversion between Naturally-derived Hydrogen Donors and Hydrogen with Renewability at Room Temperature under Atmospheric Pressure in Water

研究代表者

末延 知義 (Suenobu, Tomoyoshi)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90271030

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：化石燃料代替の方策として、再生可能な持続性資源を用いた小規模分散型電力供給網が期待されている。その燃料電池の燃料に用いられる高純度水素の貯蔵・供給源として、1つの触媒で可逆的に水素の貯蔵と発生を行うことが可能な有機金属錯体触媒系の開発を行った。水素貯蔵媒体としては、再生可能な天然由来の水素源を用い、その酸化体と還元体との可逆的変換に伴う水素化・脱水素化反応により、常温常圧水中で水素の貯蔵と発生を可能にした。触媒系は、水素化・脱水素化を担う遷移金属錯体と、光エネルギーにより電子伝達を促進する光増感剤、水素発生を担う金属錯体やナノ微粒子などで構成し、水素の活性化や脱水素化分子機構の解明を行った。

研究成果の概要(英文)：It is highly required to replace fossil fuels by sustainable, renewable, and clean energy resources such as hydrogen (H₂). In spite of the availability and usefulness of H₂, storage and transportation of H₂ are seriously difficult, because H₂ gas is explosive and its volumetric energy density is quite low. In high-pressure H₂ tank systems, energy-consuming cryogenically-cooling equipment is required to store pressurized hydrogen in a liquid form. Hence, low-cost and energy-efficient storage of hydrogen is definitely needed for stationary and portable applications in the hydrogen-delivery infrastructure in a small-scale micro-grid for the electric power supply in the near future. In this context, catalytic dehydrogenation and hydrogenation reactions of organic and inorganic molecules, especially naturally-derived compounds, in a reversible way have been studied and made possible from the viewpoint of a hydrogen donor as sustainable and renewable energy resources.

研究分野：錯体化学、光化学、光機能材料

キーワード：触媒・化学プロセス 水素 二酸化炭素排出削減 再生可能エネルギー 金属錯体 分散型電力供給網
光エネルギー変換 反応機構

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災の未曾有の大災害に端を発した全国規模での電力供給不足では、自然エネルギーを利用する電源の多様化と分散型電源や電力貯蔵システムを有する小規模電力供給網（マイクログリッド）の必要性を国民1人1人が思い知らされることとなった。2011年8月26日には「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」が成立し、今後、日本で自然エネルギーの普及やマイクログリッドの整備を大きく推進させる足がかりとなるものと考えられる。それは、被災地の復興のみならず環境エネルギー問題解決にも直結すると考えられる。日本はエネルギー消費大国として化石燃料に依存することの無い、環境と調和したエネルギー社会への早期の転換が迫られている。化石燃料代替クリーンエネルギー源として、水素(H₂)は最も有望視されている。中でも水素燃料電池は、従来の化石燃料に依存する火力発電などに比べてエネルギー発生効率が極めて高く、既に乗用車エンジンなどへの実用化が始まっている。しかし、水素は極低温まで気体状態であるためエネルギー密度は小さく、常温常圧で爆発性を有するために、安全に貯蔵、運搬することは従来の技術では困難であり、輸送貯蔵コストが普及のボトルネックになる。エネルギー供給産業の新戦略として、電力消費地のマイクログリッド内に水素貯蔵・供給源を含めることで輸送コストを下げることが考えられており、従来想定されていた太陽光・風力、マイクロガスタービン、燃料電池などの発電施設や、蓄電のための大容量電池やキャパシタに加えて、水素貯蔵・供給施設が不可欠と考えられていた。従って、小規模で安全に水素貯蔵・供給を実現できる、再生可能で住環境に適合した新材料や環境負荷の小さな触媒系の技術開発が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、常温常圧水中で再生可能な天然由来の水素源を酸化して水素を発生させ、逆に常温水中で、常圧水素によって還元的に天然由来の水素源に戻すことができる新規な水素貯蔵・発生触媒系の構築を目的とする。水素貯蔵媒体としては、アルコール類や糖類、ポリフェノール類、各種有機補酵素やギ酸などを用いた。これらの酸化体と還元体との可逆的変換に伴う水素化・脱水素化反応により、水素の貯蔵と発生を行う。触媒系は、水素化・脱水素化を担う遷移金属錯体と、可視光エネルギーを利用して電子伝達を促進するルテニウム錯体や光電荷分離分子などの光増感剤、水素発生を担う白金やニッケル金属ナノ微粒子などで構成するものとし、これらをメソポーラスシリカなどに固定化することで触媒回収、再利用を可能とする。これらの触媒を用いて大気圧の水素を貯蔵できる

ようにする。水酸基を多く有する単糖類やオリゴ糖、ポリフェノールなどは、同様に水素源、水素貯蔵媒体となることが期待される。天然由来の各種水素源の脱水素化と水素化触媒反応の触媒能を評価して至適 pH を決定し、触媒反応機構を解明できる。本申請研究の様に、水中常圧常温という厳しい条件で、再生可能な天然由来の水素源を利用し、1つの触媒で水素発生・貯蔵の両方を実現しようとする研究は国の内外で例が無く、金属錯体触媒による水素化・脱水素化分子機構の基礎を解明し、高効率な実用水素発生・貯蔵触媒系の構築に適用しようとする試みは未踏領域における先駆的研究となり、同時に地球環境エネルギー問題の解決にもつながり、社会貢献も大いに期待される。

3. 研究の方法

常温常圧水中で水素分子と反応することで、金属ヒドリド種や低原子価金属種が生成可能な有機金属錯体を開発した。そのための、新規配位子合成と各種金属中心を有する錯体合成を行い、構造解析や分光分析により同定を行った。還元された各種金属錯体を各種天然由来の水素源の酸化体と pH の異なる水中で反応させて反応性を比較し、水素貯蔵が可能となる組み合わせを探索した。一方、この錯体と天然由来の水素源（還元体）との反応で水素発生が可能となる pH を決定した。水素発生が起こらない場合でも、各種無機・有機光増感剤や光触媒と、白金などの金属ナノ微粒子を組み合わせることで、光水素発生の可能となる反応条件を調べた。天然由来の水素源と水素との相互変換が可能となる触媒反応条件を調べ、反応中間体活性種の分光検出を行い、反応機構を解明した。これら触媒系をメソポーラスシリカに固定化して触媒反応を検討した。錯体の同定は、NMR、IR、ESI-MS、TOF-MS 等の既存設備により行なった。天然由来水素源の酸化体、還元体濃度の定量は ¹H-NMR により行い、発生水素量の定量には窒素をキャリアガスとする GC を用いた。水素同位体の定性・定量分析は GC を用いて行い、カラム部を液体窒素温度で冷却し、キャリアガスとしてネオンガスを用いた。触媒活性種の過渡吸収分光分析にはストップドフロー分光光度計、ナノ秒・フェムト秒レーザー時間分解分光光度計を用いた。

4. 研究成果

(1) 脂肪族アルコールを還元剤とする NAD⁺ の 4 位選択的還元反応による NADH の生成 [C, N]シクロメタル化有機イリジウム錯体は、各種脂肪族アルコールとの水中反応でヒドリド錯体に変換されることを見いだした。このヒドリド錯体と β-ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド（酸化型：NAD⁺）の反応

で、適切な pH を選択することで、脂肪族アルコールによる NAD⁺の還元反応が進行し、1,4-NADH が選択的に生成した。すなわち、異なる天然由来水素源の間の相互変換が可能となることがわかった。これは、アルコールと NADH の相互変換を司るアルコール脱水素酵素 (ADH) の機能モデルの世界初の例である。

(2) 常温常圧水中における pH 選択的な NADH と H₂ の相互変換

弱酸性条件下 (pH 6.5)、[C, N]シクロメタル化有機イリジウム錯体の水溶液に β-ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド (酸化型: NAD⁺) を添加し、常温で常圧 H₂ を吹き込むと NAD⁺が位置選択的に還元され、pH 選択的に NADH (還元型) が生成することを見出した。この反応では、金属錯体の水素還元により生成するヒドリド錯体が NAD⁺を還元する。一方、常温酸性条件下 (pH 4.1)、金属錯体により NADH が触媒的に酸化され、H₂ と NAD⁺が等モル生成することを見出した。この反応では、NADH が金属錯体をヒドリド還元して生成したヒドリド錯体が、プロトンと反応して水素が発生する。これは H₂ と再生可能な天然由来水素源 NADH の触媒的相互変換を行った初めての例であり、pH 選択的に反応が進行する。反応中間体の検出や反応速度論解析により反応機構を明らかにした。

(3) 脂肪族アルコールによる金属錯体の還元反応と光[C, C]シクロメタル化、触媒的水素発生

[C, N]シクロメタル化有機イリジウム錯体とイソプロパノールの中反応が常温で進行し、ヒドリド錯体が生成した。この水溶液に光照射 (λ > 340 nm) を行うと、フェニルピラゾリル配位子由来の、プロトン 1 つ分に相当するシグナル (δ = 8.00 ppm) が消失し、[C, C]シクロメタル化ヒドリド錯体を生じることがわかった。光励起状態において、ピラゾリル環の 180 度回転が起きていると考えられる。この錯体は、常温塩基性水中で、アルコールから量論量以上の水素を発生させる触媒となる。この際、触媒毒となる CO は副生しない。常温水中という穏和な条件下での、再生可能な天然由来の脂肪族アルコールからの触媒的水素発生に初めて成功した。

(4) 常温常圧水中でのフラビン補酵素類縁体を用いた水素と酸素からの過酸化水素生成

触媒量の [C, N]シクロメタル化イリジウム錯体と補酵素類縁体であるフラビンモノヌクレオチド (FMN)、Sc(NO₃)₃ を含む水溶液 (pH 2.8) に水素と酸素に吹き込むことにより、H₂O₂ が触媒的に生成することを見出した。触媒回転数は反応時間 4 時間で 841 回に達し、収率も 19%と、これまでに見出さ

れている不均一触媒系と比べても非常に効率の良い触媒系であることが分かった。さらに、ストップフロー法による反応中間体の分光検出や反応速度論解析によりその反応機構を明らかにした。本反応では、金属錯体の配位子カルボキシル基が脱プロトン化し、金属中心が水素化還元されて、ヒドリド錯体が生じ、これが FMN を還元して FMNH₂ となり、これが酸素を還元すると同時に FMN が再生して触媒反応が進行する。この系に Sc(NO₃)₃ を添加することで、H₂O₂ の生成効率が著しく向上した。本反応系は、均一系で水素と酸素から H₂O₂ を触媒的に得ることができた初めての例である。(Angew. Chem., Int. Ed. 誌の表紙を飾った。)

(5) 高水素貯蔵密度固体有機物の脱水素化反応

[C, N]シクロメタル化金属錯体を触媒として用いることで、固体有機物高分子であるパラホルムアルデヒドの脱水素化反応が水中で進行して、水素発生することを見出している。この反応では、パラホルムアルデヒドが水中に溶解することでメタンジオールとなり、メタンジオール錯体の β-水素脱離によって生じたギ酸が更に脱水素されることで、ホルムアルデヒド換算で 1 分子あたり 2 分子の水素が発生する。反応量論を決定し、中間体錯体の分光検出を行い、その速度論から触媒反応機構を明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- 1 Bottom-up and top-down methods to improve catalytic reactivity for photocatalytic production of hydrogen peroxide from water and dioxygen with a ruthenium complex and water oxidation catalysts, Yusuke Isaka, Satoshi Kato, Dacho Hong, Tomoyoshi Suenobu, Yusuke Yamada, and Shunichi Fukuzumi, *J. Mater. Chem. A*, **3**, 12404-12412 (2015).
- 2 Catalytic hydrogen production from paraformaldehyde and water with an organoiridium complex, Tomoyoshi Suenobu, Yusuke Isaka, Satoshi Shibata, and Shunichi Fukuzumi, *Chem. Commun. (Cambridge, U. K.)*, **51**, 1670-1672 (2015).
- 3 Size-selective incorporation of donor-acceptor linked dyad cations into zeolite Y and long-lived charge separation, Shunichi Fukuzumi, Akinori Itoh, Kei Ohkubo, and Tomoyoshi Suenobu, *RSC Adv.*, **5**, 45582-45585 (2015).

- 4 Influence of pH on the decay of β -carotene radical cation in aqueous Triton X-100: A laser flash photolysis study, Ali El-Agamey, Maha A. El-Hagrasy, Tomoyoshi Suenobu, and Shunichi Fukuzumi, *J. Photochem. Photobiol. B*, **146**, 68-73 (2015).
- 5 Catalytic oxidation of formic acid by dioxygen with an organoiridium complex, Tomoyoshi Suenobu, Satoshi Shibata, and Shunichi Fukuzumi, *Catal. Sci. Technol.*, **4**, 3636–3639 (2014).
- 6 Long-Lived Charge Separation and Applications in Artificial Photosynthesis, Shunichi Fukuzumi, Kei Ohkubo, and Tomoyoshi Suenobu, *Acc. Chem. Res.*, **47**, 1455–1464 (2014).
- 7 Formation of Long-Lived Charge-Separated State of 9-Mesityl-10-methylacridinium Cation Incorporated into Mesoporous Aluminosilicate at High Temperatures, Shunichi Fukuzumi, Akinori Itoh, Tomoyoshi Suenobu, and Kei Ohkubo, *J. Phys. Chem. C*, **118**, 24188–24196 (2014).
- 8 Direct Synthesis of Hydrogen Peroxide from Hydrogen and Oxygen by Using a Water-Soluble Iridium Complex and Flavin Mononucleotide, Satoshi Shibata, Tomoyoshi Suenobu, and Shunichi Fukuzumi, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **52**, 12327–12331 (2013). **Selected as a “Front Cover”**: *Angew. Chem., Int. Ed.*, **52**, 12195 (2013).
- 9 Assembly and Stepwise Oxidation of Interpenetrated Coordination Cages Based on Phenothiazine, Marina Frank, Jakob Hey, Ilker Balcioglu, Yu-Sheng Chen, Dietmar Stalke, Tomoyoshi Suenobu, Shunichi Fukuzumi, Holm Frauendorf, and Guido H. Clever, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **52**, 10102–10106 (2013).
- 10 Hydrogen storage and evolution catalysed by metal hydride complexes, Shunichi Fukuzumi, and Tomoyoshi Suenobu, *Dalton Trans.*, **42**, 18–28 (2013). (Perspective)
- 11 The long-lived electron transfer state of the 2-phenyl-4-(1-naphthyl)quinolinium ion incorporated into nanosized mesoporous silica-alumina acting as a robust photocatalyst in water, Yusuke Yamada, Aakifumi Nomura, Kei Ohkubo, Tomoyoshi Suenobu, and Shunichi Fukuzumi, *Chem. Commun. (Cambridge, U. K.)*, **49**, 5132–5134 (2013).
- 12 Production of hydrogen peroxide as a sustainable solar fuel from water and dioxygen, Satoshi Kato, Jieun Jung, Tomoyoshi Suenobu, and Shunichi Fukuzumi, *Energy Environ. Sci.*, **6**, 3756–3764 (2013).
- 13 Redox-induced reversible metal assembly through translocation and reversible ligand coupling in tetranuclear metal sandwich frameworks, Tetsuro Murahashi, Katsunori Shirato, Azusa Fukushima, Kohei Takase, Tomoyoshi Suenobu, Shunichi Fukuzumi, Sensuke Ogoshi, and Hideo Kurosawa, *Nat. Chem.*, **4**, 52-58 (2012).
- 14 Catalytic interconversion between hydrogen and formic acid at ambient temperature and pressure, Yuta Maenaka, Tomoyoshi Suenobu, and Shunichi Fukuzumi, *Energy Environ. Sci.*, **5**, 7360-7367 (2012).
- 15 Water-soluble mononuclear cobalt complexes with organic ligands acting as precatalysts for efficient photocatalytic water oxidation, Dachao Hong, Jieun Jung, Jiyun Park, Yusuke Yamada, Tomoyoshi Suenobu, Yong-Min Lee, Wonwoo Nam, and Shunichi Fukuzumi, *Energy Environ. Sci.*, **5**, 7606-7616 (2012).
- 16 Mechanistic Borderline of One-Step Hydrogen Atom Transfer versus Stepwise Sc³⁺-Coupled Electron Transfer from Benzyl Alcohol Derivatives to a Non-Heme Iron(IV)-Oxo Complex, Yuma Morimoto, Jiyun Park, Tomoyoshi Suenobu, Yong-Min Lee, Wonwoo Nam, and Shunichi Fukuzumi, *Inorg. Chem.*, **51**, 10025-10036 (2012).
- 17 Efficient catalytic interconversion between NADH and NAD⁺ accompanied by generation and consumption of hydrogen with a water-soluble iridium complex at ambient pressure and temperature, Yuta Maenaka, Tomoyoshi Suenobu, and Shunichi Fukuzumi, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 367-374 (2012).
- 18 Hydrogen Evolution from Aliphatic Alcohols and 1,4-Selective Hydrogenation of NAD⁺ Catalyzed by a [C,N] and a [C,C] Cyclometalated Organoiridium Complex at Room Temperature in Water, Yuta Maenaka, Tomoyoshi Suenobu, and Shunichi Fukuzumi, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 9417-9427 (2012).

- 19 Formation of a long-lived electron-transfer state in mesoporous silica-alumina composites enhances photocatalytic oxygenation reactivity, Shunichi Fukuzumi, Kaoru Doi, Akinori Itoh, Tomoyoshi Suenobu, Kei Ohkubo, Yusuke Yamada, and Kenneth D. Karlin, *Proc. Natl Acad. Sci. U. S. A.*, **109**, 15572-15577 (2012).

[学会発表] (計 16 件)

- 1 Tomoyoshi Suenobu, Kinetics and Mechanisms of Hydrogen Storage and Evolution in Water Catalyzed by Metal Complexes, The 11th Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience – 2015 (KJFP-2015), June 27, 2015 (Invited Lecture); Jeju, Korea
- 2 Yusuke Isaka, Dachao Hong, Tomoyoshi Suenobu, Yusuke Yamada, and Shunichi Fukuzumi, Enhancement in Photocatalytic Efficiency for Production of Hydrogen Peroxide as a Solar Fuel from Water and Dioxygen, 27th International Conference on Photochemistry (ICP 2015), June 28-July 3, 2015 (accepted); Jeju, Korea
- 3 Yusuke Isaka, Kohei Oyama, Tomoyoshi Suenobu, Yusuke Yamada, and Shunichi Fukuzumi, Photocatalysis of Transition Metal Complexes for Production of Hydrogen Peroxide from Water and Dioxygen Utilizing Molecularly Defined Water Oxidation Catalysts, PACIFICHEM 2015, December 15-20, 2015 (accepted); Hawaii, USA;
- 4 井坂 祐輔・間瀬 謙太郎・末延 知義・福住 俊一, ルテニウム(II)錯体と酸化タンゲステンへの同時光照射による水の酸化と共役した過酸化水素生成、第 27 回配位化合物の光化学討論会, 2015 年 8 月 7 日~8 月 9 日(予定), 佐渡インフォメーションセンター (新潟県)
- 5 中川 達央・末延 知義・花田 啓明・福住 俊一, 新しい過渡吸収測定法 RIPT 法の開発と遷移金属錯体の過渡吸収・発光同時測定、第 27 回配位化合物の光化学討論会, 2015 年 8 月 7 日~8 月 9 日(予定), 佐渡インフォメーションセンター (新潟県)
- 6 井坂 祐輔・末延 知義・山田 裕介・福住 俊一, シアノ架橋遷移金属多核錯体を水の酸化触媒として用いる水と酸素からの過酸化水素の光触媒生成反応, 日本化学会第 90 春季年会, 2015 年 3 月 26 日, 日本大学 (千葉県)
- 7 井坂 祐輔・末延 知義・山田 裕介・福住 俊一, サイズ制御したナノ粒子触媒を用いた水と酸素からの過酸化水素生成光触媒反応, 第 26 回配位化合物の光化学討論会, 2014 年 8 月 6 日, 首都大学東京 (東京都)
- 8 柴田 悟志・末延 知義・福住 俊一, 有機イリジウム錯体を触媒として用いる常温水中における補酵素 NADH によるユビキノン補酵素類縁体の還元反応, 日本化学会第 94 春季年会, 2014 年 3 月 27 日, 名古屋大学 (愛知県)
- 9 井坂 祐輔・末延 知義・福住 俊一, 高い太陽光エネルギー変換効率を有する水と酸素からの過酸化水素生成光触媒反応, 日本化学会第 94 春季年会, 2014 年 3 月 27 日, 名古屋大学 (愛知県)
- 10 柴田 悟志・末延 知義・福住 俊一, 有機イリジウム錯体を触媒とする含水溶媒中におけるギ酸による酸素の 2 電子および 4 電子還元反応, 日本化学会第 94 春季年会, 2014 年 3 月 27 日, 名古屋大学 (愛知県)
- 11 柴田 悟志・末延 知義・福住 俊一, 有機イリジウム錯体およびフラビン補酵素類縁体を触媒として用いる常圧水素と酸素からの過酸化水素生成反応機構, 錯体化学会 第 63 回討論会, 2013 年 11 月 2 日, 琉球大学 (沖縄県)
- 12 加藤 慧・末延 知義・福住 俊一, 有機イリジウム錯体または水酸化イリジウム共存下での水を電子源とする酸素の光還元反応による選択的過酸化水素生成, 日本化学会 第 93 春季年会, 2013 年 3 月 25 日, 立命館大学 草津キャンパス (滋賀県)
- 13 柴田 悟志・末延 知義・福住 俊一, 有機イリジウム錯体を触媒として用いる常温常圧水中におけるフラビン補酵素類縁体の水素による還元と選択的過酸化水素生成, 日本化学会 第 93 春季年会, 2013 年 3 月 25 日, 立命館大学 草津キャンパス (滋賀県)
- 14 柴田 悟志・末延 知義・福住 俊一, 常温水中における有機イリジウム錯体およびフラビン補酵素類縁体を触媒として用いる水素と酸素からの選択的過酸化水素生成反応, 第 45 回 酸化反応討論会, 2012 年 11 月 17 日, 名古屋市立大学病院 (愛知県)
- 15 Satoshi Kato, Tomoyoshi Suenobu, Shunichi Fukuzumi, Acceleration effect of rare-earth metal ions on selective formation of hydrogen peroxide in photocatalytic reduction of dioxygen by water as an electron source, International Symposium on Rare Earths in 2012, 2012 年 11 月 08 日, 沖縄ハーバービュークラウンプラザ (沖縄県)
- 16 Tomoyoshi Suenobu, Toward Catalytic Interconversion between Hydrogen and Chemical Fuels with Metal Complexes

at Ambient Temperature, 錯体化学会
第62回討論会 シンポジウム (招待講
演), 2012年9月21日, 富山大学 五福
キャンパス (富山)

[図書] (計4件)

- 1 Kinetics and Mechanisms of Reduction of Protons and Carbon Dioxide Catalyzed by Metal Complexes and Nanoparticles, Shunichi Fukuzumi, Tomoyoshi Suenobu, and Yusuke Yamada, *In* "Organometallics and Related Molecules for Energy Conversion (Green Chemistry and Sustainable Technology Series)", Wai-Yeung Wong (ed.) Chap. 11, pp 313-345, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2015).
- 2 Artificial Photosynthesis, 末延 知義, 「実践・化学英語リスニング(1) 物理化学編」 Chap. 3, Part 3; 化学同人 (2014).
- 3 CO₂還元触媒, 末延 知義・福住 俊一 「人工光合成 –システム構築に向けての最新技術動向と展望–」第6章; シーエムシー出版株式会社 (2014).
- 4 ソーラー燃料としての過酸化水素, 末延 知義・福住 俊一 「人工光合成 –システム構築に向けての最新技術動向と展望–」第10章; シーエムシー出版株式会社 (2014).

[その他]

ホームページ等

<http://www-etchem.mls.eng.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末延 知義 (SUENOBU, Tomoyoshi)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 90271030