



低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

固体高分子形燃料電池用非白金触媒の特徴と課題

平成28年3月

Carbon-Based Catalysts for Fuel Cells Application

Strategy for Technology Development

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2015-PP-04

概要

自動車用燃料電池等に実用化されている固体高分子形燃料電池は低温作動で立ち下げが容易などの利点はあるものの、高価な白金を触媒に使う必要があり、コストや資源の面でも大きな課題がある。この問題を解決するために、非白金触媒で酸素還元触媒である鉄フタロシアニンや炭素繊維等を高温で炭化した含窒素カーボン（カーボンアロイ）や窒素ドーパカーボンなどの利用が注目されている。本稿では、これらの炭素系触媒を中心とした世界的な研究の動向を明らかにし、それぞれの触媒の特徴や課題をまとめ、研究開発の方向性を示す。

Summary

Non-noble metal catalysts for the electrochemical reduction of oxygen (ORR) have attracted much attention because their potential to reduce the fuel cell cost. In this report, some developing carbon-based catalysts are reviewed to show the trend of the research and reveal the key issues for further investigation. Due to their structure's complexity, so far the active sites are still not clarified. Quantitative characterizations and controlling of the metal and nitrogen, carbon defects with comparable electrochemical data are important for developing the catalysts.

目次

概要

1. 緒言	1
2. 燃料電池の空気極における反応	2
3. 非白金触媒の研究開発の動向	3
4. 非白金触媒の研究開発の課題	5
5. まとめ	6
参考文献	6

1. 緒言

固体高分子形燃料電池は自動車用や定置用の高効率発電デバイスとして実用化されたが、その本格的な普及に向けて低コスト・長寿命化が最も重要な課題だといえる。そのため、電極触媒に用いられる白金に代わる高い酸素還元特性と安定性を有する新触媒の開発が必要不可欠である。近年、高い酸素還元活性を持つ非白金触媒として、国内の研究では、ポリビニルコバルトフタロシアニン又は鉄フタロシアニンやポルフィリンなどを原料として高温で炭化した含窒素カーボン（カーボンアロイ） [1,2] や酸窒化物系材料 [3,4] が高い酸素還元特性を持つ触媒として注目されている。一方、海外の研究では、Fe-N-C 系触媒や窒素ドーパされたカーボンナノチューブ/グラフェンなどの炭素系非白金触媒の研究が注目されている [5-13]。しかし、いずれの触媒もナノ炭素が含まれており、遷移金属が含まれているケースも多く、構造が非常に複雑であるため酸素還元の活性メカニズムはまだ解明されていない。本稿では、固体高分子形燃料電池用の炭素系触媒を中心とした研究動向の調査を行い、それぞれの触媒の特徴や課題をまとめ、研究開発の方向を提案する。

2. 燃料電池の空気極における反応

燃料電池の空気極での酸素還元反応（ORR:Oxygen Reduction Reaction）は、一般に 2 電子反応と 4 電子反応が考えられている。2 電子反応の場合は、電極にある活性サイトに吸着後、解離せずに電子を受け取り、プロトンと反応し過酸化水素（ H_2O_2 ）を形成する。一方で、4 電子反応の場合は水（ H_2O ）が生成され、酸素同士の結合は反応過程において切断される必要がある。表 1 に、酸素や水素の酸化還元反応とその標準電位¹⁾を示す。2 電子と 4 電子反応ではそれぞれ 0.7V、1.23V の起電力が得られる。

一般には、Pt 触媒がほぼ 4 電子反応であるのに対し、炭素系触媒の表面においては 2 電子反応であることがこれまで知られている。低温（100℃付近）で作動する固体高分子形燃料電池の空気極において、過電圧が大きいため通常 Pt 触媒でも酸素還元反応の開始電圧（Onset 電圧）が 1.23V (vs.RHE)²⁾ より小さく 1V 付近であると報告されている [7]。Onset 電圧は、回転電極³⁾を用いた電圧のリニアスイープによる電流測定で評価することが一般的であり、Onset 電圧が 1.23V に近ければ近いほど反応過電圧が低く触媒の活性が高いことを意味する。また、ここでは略するが、反応種の物質移動による電流への影響を利用して、回転電極により反応電子数を評価できる [7,10]。

表 1 酸性とアルカリ性における酸素と水素の酸化還元反応

	反応	電位 (vs.SHE)
酸性	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$	1.229
	$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0.7
	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.76
	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2$	0.0
アルカリ性	$\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \leftrightarrow 4\text{OH}^-$	0.401
	$\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{HO}_2^- + \text{OH}^-$	-0.065
	$\text{HO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow 3\text{OH}^-$	0.867
	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0.828

¹⁾ 標準水素電極（standard hydrogen electrode, SHE）を基準として測定された電位（vs. SHE）。

²⁾ 可逆水素電極（reversible hydrogen electrode, RHE）を基準として測定された電位（vs. RHE）。RHE とは、測定対象の電極が入っている溶液の pH と同じ pH の電解質溶液を用いた水素電極。

³⁾ 回転電極法には、回転ディスク電極（Rotating Disk Electrode, RDE）法や回転リングディスク電極（Rotating Ring Disk Electrode, RRDE）法があり、電極反応の 3 つの過程、①反応物質の電極表面の物質輸送、②電極表面での電荷移動反応、③生成物の電極表面の逸散のうち、①と③の物質移動速度を制御し、②の電極活性を定量的に解析できる。

3. 非白金触媒の研究開発の動向

燃料電池の低コスト・長寿命化に向けて、白金に代わる高い酸素還元特性と安定性を有する新触媒の開発が必要不可欠であり、様々な代替触媒が研究されているが、前述のように、炭素の表面には2電子反応しか進まないと考えられており、また酸性電解液では非常に活性が低いため、燃料電池の電極触媒として応用することは考えられなかった。しかし、近年の研究では、窒素含有炭素であるカーボンアロイ [1,2] や窒素ドーピングカーボンナノチューブが高い触媒活性を持ち4電子反応であると報告されている [7]。一方で、金属や金属酸化物が重要な役割をする M-C-N (M:Fe,Co) 系触媒 [5] や Ta-CNO 触媒 [4] も高い活性を持つことが知られている。本稿では、これらの炭素ベースの触媒に着目し、活性サイトの種類によって、1)メタルフリー炭素系触媒と2)非白金金属/炭素複合触媒に大きく分けてまとめた。それぞれのタイプの触媒において代表的なものを表2と表3に示す。ここで、特記すべきことは、メタルフリー炭素系触媒は触媒材料に金属原料が含まれていなくても、不純物が混入されている可能性がある。また、表2において、筆者の研究グループによる欠陥を持つ純カーボンナノチューブ(CNT)触媒 [14] 以外は全て窒素ドーピングが施されており、反応も殆んど4電子反応であると報告されている。

表2 メタルフリー炭素系触媒の研究例

材料	作製方法	特性	性能評価
N doped Single walled CNT 文献 [10]	SiO ₂ 触媒、CVD 成長 (CH ₄ :H ₂ :NH ₃ =2:2:1) NSWCNT (直径 ~ 2.5nm)	不純物：不明 窒素含有量：3.6 at% ^{*1} Pyridinic-N (83%), Pyrrolic-N (17%)	回転電極 (酸性電解液) Onset 電圧 ~0.5 V vs. Ag/AgCl (~0.7 V vs. RHE) 4 電子反応
Ar annealed defect MWCNT 文献 [14]	MWCNT の表面上に欠陥構造を形成させた後、不活性雰囲気中で加熱 (900°C, Ar) Ar900-defect MWCNT (直径 ~ 15 nm)	Fe after CV (0.0027 at%) ^{*2} Co after CV (なし) 窒素含有量：なし	回転電極 (酸性電解液) Onset 電圧 ~0.743 V vs. RHE 2 電子反応 <発電試験 (触媒量 =1.85 mg/cm ²) > OCV ^{*3} ~ 0.74V, 最大出力密度：~110 mW/cm ²
N doped CNTs 文献 [11]	アルミナテンプレートにおける N 含有ポリマーの熱分 (850°C, Ar)	不純物：不明 窒素含有量：8.4 at% ^{*1} Pyridinic-N(62%) Graphitic-N(33%) Pyrrolic-N(5%)	回転電極 (酸性電解液) PMVI の熱分解試料 Onset 電圧 ~ 0.455 V vs. Ag/AgCl (~0.66 V vs. RHE)
N-doped ordered Mesoporous graphitic array 文献 [13]	シリカテンプレートにおける、N 含有芳香族 (PDI, perylenetetracarboxyl diimide) の熱分解 (600, 750, 900°C)	不純物：不明 窒素含有量：2.3 at% ^{*1} Graphitic-N (70.9%) Pyridinic-N (28.1%)	回転電極 (アルカリ性電解液) PDI annealed at 900 °C, Onset 電圧 -0.13 V vs. Ag/AgCl (~0.84 V vs. RHE) 4 電子反応
N doped graphene 文献 [12]	Cu 上に N 含有芳香族を用いた CVD により作製 (400-600°C, 雰囲気：Ar+Pyridine or Julolidine) Ar+Pyridine → Pyridinic-N (90%) Ar+Julolidine → Graphitic-N(80%)	不純物：不明 窒素含有量： Pyridine-NG: 2.7 at% ^{*1} Julolidine-NG: 2.3 at% ^{*1}	回転電極 (アルカリ性電解液) いずれも Onset 電圧 ~ -0.3V vs. Ag/AgCl (~0.67 V vs. RHE) Pyridinic-N = > 4 電子反応 Graphitic-N = > 2 電子反応

*¹ at% ; atomic% .

*² CV; CV 測定 (Cycle voltanametry)

*³ OCV; Open Circuit Voltage (開放起電力)

表 3 非白金金属 / 炭素複合触媒の研究例

材料	作製方法	特性	性能評価
CNT/Graphene complexes 文献 [7]	二層 CNT (double walled CNT) を用いて表面を酸化することによって作製 (酸化剤: $\text{KMnO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$, 65°C)	Fe before wash (0.24 at%) Fe after wash (0.03 at%) 窒素含有量: 5.3 at%	回転電極 (酸性 & アルカリ性電解液) Onset 電圧 (酸性) ~ 0.89 V vs. RHE Onset 電圧 (アルカリ性) ~ 1.05 V vs. RHE 4 電子反応
Vertically aligned CNT 文献 [8,9]	還元雰囲気 ($\text{Ar}:\text{H}_2:\text{NH}_3$) における Fe(II)Phthalocyanine の熱分解 ($800\text{-}1000^\circ\text{C}$) 基板: Quartz glass plate VACNT (直径 ~ 20 nm)	不純物: 不明 窒素含有量: 2.9 at% Pyridinic-N (45%) Pyrrolic-N (15%) Graphitic-N (21%) Pyridine oxide-NO (19%)	回転電極 (酸性 & アルカリ性電解液) Onset 電圧 (酸性): ~ 0.8 V vs. RHE Onset 電圧 (アルカリ性) ~ 1.0 V vs. RHE 4 電子反応 < 発電試験 (触媒量 = 0.16 mg/cm^2) > OCV ~ 0.85 V, 最大出力密度: 320 W/g (~ 50 mW/cm^2)
PANI-M-C 文献 [5]	熱分解 (polyaniline + carbon black + 金属塩 (FeCl_3 or $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)) N_2 雰囲気, $400\text{-}1000^\circ\text{C}$	金属含有量: Fe and Co (量不明) (熱分解後、酸による金属の洗浄が行われた) 窒素含有量: 不明	回転電極と発電 (酸性電解液) Onset 電圧 ~ 0.93 V vs. RHE 4 電子反応 < 発電試験 (触媒量 = 4 mg/cm^2) > OCV ~ 0.95 V, 最大出力密度: 550 mW/cm^2
ナノシェルカーボン (カーボンアロイ) 文献 [1]	熱分解 (furan 樹脂 + 金属錯体 (acetylacetonates & phthalocyanines based)) $600\text{-}1000^\circ\text{C}$	金属含有量: Fe and Co (量不明) 窒素含有量: 0.8 at% Pyridinic-N (25%) Pyrrolic-N (44%) Graphitic-N (24%) Pyridine oxide-NO (7%)	回転電極と発電 (酸性電解液) CoP1000 (pyrrolicized in 1000°C) Onset 電圧 (酸性) ~ 0.8 V vs. RHE < 発電試験 (触媒量 = 3.8 mg/cm^2) > OCV ~ 0.78 V, 最大出力密度: 210 mW/cm^2
Ta-CNO 文献 [4]	(1) Ta_2CN (Tantalum carbonitride) を焼成 (Ta_2O_5 + carbon black) N_2 雰囲気, 1600°C (2) Ta_2CN を 1000°C , $\text{N}_2:\text{H}_2:\text{O}_2$ (97,5:2:0.5) 雰囲気中でアニール	金属含有量: (1) Ta: 50.1 at% (2) 不明 窒素含有量: (1) 24.5 at% (0 ~ 0.7 at%) (2) 不明 Ta-CNO の表面が炭素に被覆されており、炭素は欠陥を形成する重要な因子と説明されている。	回転電極 (酸性電解液) Onset 電圧 ~ 0.9 V vs. RHE

表 2 と 3 を比較してわかることを以下にまとめる。

- ①メタルフリー炭素系触媒は酸性電解液において、非白金金属 / 炭素複合触媒と比べて Onset 電圧が低い。すなわち活性が低い。また、非白金金属 / 炭素複合触媒においては、酸性電解液における触媒活性は、アルカリ性電解液より低い [7-9]。
- ②窒素の含有量は数 at% (atomic%) 程度であり、図 1 に示すように炭素に組み込まれる構造によって、Pyridinic-N、Pyrrolic-N、Graphitic-N に分けられるが、どのような構造がよいかはまだ明らかになっていない。



図 1 炭素中にある N の構造

また、欠陥を持つ純 CNT 触媒においては、酸性溶液中において 2 電子反応ではあるが、メタルフリーの触媒の中で窒素ドーピングなしでも、ドーピングされた触媒より高い Onset 電圧 (0.74 V vs.RHE) が得られた [14]。

- ③非白金金属 / 炭素複合触媒の場合、不純物の評価はあまり定量的にされていないが、不純物含有量は僅かな量で十分である。その中でも、CNT を炭素材料として用いた触媒には、通常 CNT の生成に使われる Fe などの不純物が含まれているので、そのレベルで活性が得られた [7]。
- ④非白金金属 / 炭素複合触媒の炭素の構造は非常に複雑で、湾曲したグラフェンやシェル構造を持つものが殆どである。また、不活性雰囲気や還元雰囲気 (NH₃, H₂) 下で高温焼成することが重要である。

4. 非白金触媒の研究開発の課題

以上、述べたように炭素系触媒は近年盛んに研究されており、性能も大幅に向上された。反応の Onset 電圧から見ると白金に極めて近い結果が得られている [7]。しかし、構造が非常に複雑であり触媒中の不純物 / 窒素 / 酸素の構造や組成などの定量が容易ではない故に、反応メカニズムがまだ明らかになっておらず、研究者の中でも意見が分かれている。Fe や Co などの金属や窒素ドーピングが活性を支配する因子と考えられるが、酸素還元活性サイトが何かはまだ解明されていない。Fe などの金属が原料に含まれる非白金金属 / 炭素複合触媒においては、Fe-N、Fe-C-N[5]、Ta-CNO 触媒で酸素欠陥 [4] と様々な活性サイトが提案されている。一方で、メタルフリーの触媒では窒素ドーピングによりカーボンの電子密度の揺らぎが酸素吸着を促進し、反応に寄与すると説明されている。更に窒素ドーピングなしでも、高い Onset 電圧が得られることから炭素の構造欠陥 (Topological defects) による電子の揺らぎが反応に寄与すると考えられる。

一方、触媒の性能を表す電流密度については、まだ炭素系触媒の反応メカニズムを解明する段階で十分な開放起電力が得られないため、発電実験を行う研究が少なく実用化された白金との比較は難しい。その中で発電性能の最も高い Fe-C-N 触媒 [5] については、2015 年の米国 DOE の Annual Progress Report により、0.86V で電流密度が 44mA/cm² (触媒量 : 4mg/cm²) に達したと報告された [15]。DOE のカソード触媒の目標 (44mA/cm², 0.9V) に近いが、白金と同じ性能を達成するためには更に活性サイトを増やす必要がある。現状では触媒として白金の数十倍の重さの炭素が発電に用いられているが、白金系の触媒にも担体として炭素を用いており、Pt のコストは炭素の 100 倍以上高いのでコストの面では十分にメリットはある。しかし、炭素触媒の活性点密度が低い場合は電極を厚くする必要があり、濃度過電圧の上昇や水のフロディング (flooding) などの問題が生じる。したがって、高性能を持つ非白金触媒の実現には活性点の質と密度を制御する必要がある。

5. まとめ

炭素系触媒においては様々な活性サイトが存在していると考えられるが、高活性高耐久性を実現するにはこれまでの炭素系触媒で得られた結果を基に、それぞれの触媒の類似点や相違を整理し、メカニズムの解明と発電試験による実証が必要である。以下に技術開発課題をまとめる。

- ①炭素触媒の高活性化の鍵は、構造制御にある。メカニズムの解明のためには様々な構造を持つ炭素触媒の構造を形成させる必要があり、酸化や窒素ドーブなど、炭素欠陥の形成メカニズムの解明と新規制御手法の開発が重要である。触媒の相違を比較検討するために物性の評価（表面積、欠陥、不純物、N/O の濃度）を詳細に行う必要がある。
- ②異なる触媒を比較・評価するために、回転電極による酸化還元反応電流の測定などの電気化学評価法をより確立することが重要である。回転電極の場合は通常電極上にある、触媒分散液の量から計算した数十 μg の触媒を測定することになるので、電極に載せた電極膜のモルフォロジなども炭素の特性によって最適化する必要がある。
- ③回転電極によって、触媒の活性のスクリーニングをした上で、触媒を用いた発電特性、耐久性の評価が不可欠である。特に電流密度において、回転電極では評価できる触媒の量が少なく誤差も大きいので、発電セルによって性能を確認し基礎研究にフィードバックすることが重要である。また、発電セルにおいて、炭素材料の種類（カーボンブラック、CNT、グラフェン）などによって、形成された電子伝導ネットワークも異なるので、その最適化も重要な課題と考えられる。

参考文献

- [1] J. Ozaki, S. Tanifuji, A. Furuichi, and K. Yabutsuka, “Enhancement of oxygen reduction activity of nanoshell carbons by introducing nitrogen atoms from metal phthalocyanines,” *Electrochimica Acta*, vol. 55, no. 6, pp. 1864-1871, 2010.
- [2] M. Kobayashi, H. Niwa, Y. Harada, K. Horiba, M. Oshima, H. Ofuchi, K. Terakura, T. Ikeda, Y. Koshigoe, J. Ozaki, S. Miyata, S. Ueda, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, and K. Kobayashi, “Role of residual transition-metal atoms in oxygen reduction reaction in cobalt phthalocyanine-based carbon cathode catalysts for polymer electrolyte fuel cell,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 20, pp. 8346-8351, 2011.
- [3] A. Ishihara, S. Doi, S. Mitsushima, and K. Ota, “Tantalum (oxy) nitrides prepared using reactive sputtering for new nonplatinum cathodes of polymer electrolyte fuel cell,” *Electrochimica Acta*, vol. 53, no. 16, pp. 5442-5450, 2008.
- [4] A. Ishihara, M. Tamura, Y. Ohgi, M. Matsumoto, K. Matsuzawa, S. Mitsushima, H. Imai, and K. Ota, “Emergence of Oxygen Reduction Activity in Partially Oxidized Tantalum Carbonitrides: Roles of Deposited Carbon for Oxygen-Reduction-Reaction-Site Creation and Surface Electron Conduction,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 117, no. 37, pp. 18837-18844, 2013.
- [5] G. Wu, K. L. More, C. M. Johnston, and P. Zelenay, “High-Performance Electrocatalysts for Oxygen Reduction Derived from Polyaniline, Iron, and Cobalt,” *Science*, vol. 332, no. 6028, pp. 443-447, 2011.
- [6] G. Wu, M. Nelson, S. Ma, H. Meng, G. Cui, and P. K. Shen, “Synthesis of nitrogen-doped onion-like carbon and its use in carbon-based CoFe binary non-precious-metal catalysts for oxygen-reduction,” *Carbon*, vol. 49, no. 12, pp. 3972-3982, 2011.
- [7] Y. Li, W. Zhou, H. Wang, L. Xie, Y. Liang, F. Wei, J. C. Idrobo, S. J. Pennycook, and H. Dai, “An oxygen

- reduction electrocatalyst based on carbon nanotube-graphene complexes,” *Nature Nanotech.*, vol. 7, pp. 394-400, 2012.
- [8] K. Gong, F. Du, Z. Xia, M. Durstock, and L. Dai, “Nitrogen-Doped Carbon Nanotube Arrays with High Electrocatalytic Activity for Oxygen Reduction,” *Science*, vol. 323, no. 5915, pp. 760-764, 2009.
- [9] J. Shui, M. Wang, F. Du, and L. Dai, “N-doped carbon nanomaterials are durable catalysts for oxygen reduction reaction in acidic fuel cells,” *Science Advances*, vol. 1, no. 1, p. e1400129, 2015.
- [10] D. Yu, Q. Zhang, and L. Dai, “Highly Efficient Metal-Free Growth of Nitrogen-Doped Single-Walled Carbon Nanotubes on Plasma-Etched Substrates for Oxygen Reduction,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 132, no. 43, pp. 15127-15129, 2010.
- [11] C. V. Rao, C. R. Cabrera, and Y. Ishikawa, “In Search of the Active Site in Nitrogen-Doped Carbon Nanotube Electrodes for the Oxygen Reduction Reaction,” *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 1, no. 18, pp. 2622-2627, 2010.
- [12] S. Yasuda, L. Yu, J. Kim, and K. Murakoshi, “Selective nitrogen doping in graphene for oxygen reduction reactions,” *Chem. Commun.*, vol. 49, no. 83, pp. 9627-9629, 2013.
- [13] R. Liu, D. Wu, X. Feng, and K. Müllen, “Nitrogen-Doped Ordered Mesoporous Graphitic Arrays with High Electrocatalytic Activity for Oxygen Reduction,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 49, no. 14, pp. 2565-2569, 2010.
- [14] K. Waki, R. A. Wong, H. S. Oktaviano, T. Fujio, T. Nagai, K. Kimoto, and K. Yamada, “Non-nitrogen doped and non-metal oxygen reduction electrocatalysts based on carbon nanotubes: mechanism and origin of ORR activity,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 7, no. 6, pp. 1950-1958, 2014.
- [15] Piotr Zelenay, H. Chung, U. Martinez, E. Holby, U. Tylus, G. Purdy: DOE Hydrogen and Fuel Cells Program, FY 2015 Annual Progress Report (V.A.7 Non-Precious Metal Fuel Cell Cathodes: Catalyst Development and Electrode Structure Design), V43-V50.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

固体高分子形燃料電池用非白金触媒の特徴と課題

平成 28 年 3 月

Carbon-Based Catalysts for Fuel Cells Application
Strategy for Technology Development,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2016.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 特任研究員 脇 慶子 (Keiko WAKI)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2016 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
