

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22510107

研究課題名（和文）

分子性架橋の電極接合界面のナノ物性に関する理論的研究

研究課題名（英文）

Theoretical study on nano-physics of the interfaces between the molecular bridge and the electrode surfaces

研究代表者

中西 寛 (NAKANISHI HIROSHI)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：40237326

研究成果の概要（和文）：

分子性架橋と電極表面間の接合界面のナノ物性を、密度汎関数法を基にした第一原理計算を用いて調査し、得られた知見から分子性架橋の機能性を発現させる接合界面のデザインを実施した。見出した好適な接合界面の構成は、接合界面の強度増強のため、架橋分子の末端を複数の 2 配位の窒素とし、電気伝導性を良好にするためにその配位座が向かう電極表面をチタンとするものである。

研究成果の概要（英文）：

We investigated the nano-physics of the interfaces between the molecular bridge and the electrode surfaces with the aid of the first-principles simulations, and design the interface structure to developing the molecular bridge devices. In the preferred interface structure, the bridge molecule is terminated by the nitride atoms, whose coordination positions face the titanium electrode surface.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：ナノ構造物性、分子性架橋、接合界面、第一原理計算

1. 研究開始当初の背景

これまでの研究、基盤研究（C）H19-21 年度「分子性架橋のナノ構造およびナノ物性発現機構に関する理論的研究」等で原子架橋・分子性架橋の機能性の潜在的可能性を追求することができてきた。次なるステップに進むためには、電極と架橋分子との接合界面の

問題をクリアしなければならない段階に達していた。一分子を機能性デバイスとして用いるには、特にエレクトロニクスパーツとして用いる場合には、分子を安定に固定し、かつ電極とオーミックコンタクトをとらなければならない。分子はもともとそれ自身で安定であるため、電極に安定かつ再現性よく

保持することは難しい。また分子と電極との電気伝導性は、ポテンシャル障壁のあるホッピング伝導であった。接合部の構造が安定しない状況下でのホッピング伝導は、トンネル電流領域の電極・分子間距離の変化に敏感に依存するため、デバイス開発はもとより、分子の機能性の実験的確認・調査は困難を極めていた。

2. 研究の目的

本研究では、分子性をもつ架橋の終端分子構造に着目し、接合界面のナノ物性を研究し、機能性発現のための理想的な接合界面のデザインを目指す。分子と金属電極表面との理想的な接合界面のデザインは、製造時を含め省電力で期待される有機分子を活用したライフサイクル全般の省電力高機能電子デバイス技術はもとより、有機太陽電池の fill factor や有機 EL の発光効率の向上等、有機半導体テクノロジーによる創エネルギー技術にも寄与するナノ物性領域の学術的基礎研究である。

3. 研究の方法

まず、これまで機能性を調査してきた鉄ポルフィリン分子を架橋分子とし、実験で用いられている安定かつ清浄な表面が比較的容易に得られる金を電極表面材料候補とした。鉄ポルフィリン分子を金(111)と $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ の2面の間でサンドイッチし、ポルフィリン分子面を両金表面に垂直配置した構造の分子性架橋系をモデルケースとして、第一原理シミュレーションを用いて接合界面のナノ物性を調査する。そこから得られた知見を活用してより好適な接合界面構成および構造のデザインを試み、第一原理シミュレーションで、デザインを検証する。

その際、多角的に接合界面のデザイン自由度の知見を得るため、様々な固体表面上の吸着原子、吸着分子系の構造、酸素欠陥を有する酸化物と金属の接合界面、および、それらから成る様々な反応系のダイナミクスを第一原理シミュレーションおよび第一原理量子ダイナミクスシミュレーションを援用して調べ、上記デザインに生かす。

4. 研究成果

前節に示したモデルシステム：鉄ポルフィリン分子-金電極表面系において、接合界面のナノ物性を、密度汎関数法を基にした第一原理シミュレーションにて調査した、その結果と、様々な表面吸着系のナノ物性調査結果を総合して、以下に示す手順で分子性架橋の機能性を発現させる接合界面のデザインを実施した。

(1) 架橋分子の終端デザイン

①窒素終端 (配位座)

電極表面の金属原子と分子との親和性を考え、配位子の配位座を模してポルフィリン終端に窒素原子を配置したところ、金表面上で安定に分子が接合する構造を見いだせた。しかし、接合部位となった窒素原子のフェルミレベル近傍での電子準位は失われていた。さらに電子に対する有効ポテンシャルを調べたところ、すべての終端窒素原子と電極表面金原子の間に、高いポテンシャル障壁が見いだされた。この接合界面の特性は、電子デバイスとしては好ましくない。

②炭素終端 (π 電子系)

次にポルフィリン分子から終端水素を除いて、 π 電子系をもつ炭素原子を金表面と接する配置で調べたところ、終端炭素原子には、フェルミレベル近傍で電子準位が残存し、また有効ポテンシャルにおいても、窒素終端で見られた障壁に、一部に孔ができていたことが見いだされた。この炭素原子終端構造は、電気伝導性を有する接合界面構造として有力であると考えられる。

(2) 電極金属表面の最適化

架橋分子の終端デザインにおいて、複数の配位座によるキレート効果を狙った窒素終端 (図1) により、分子保持能は確保できることを生かし、不良であった電気伝導性を電極表面金属材料の最適化で改良する。

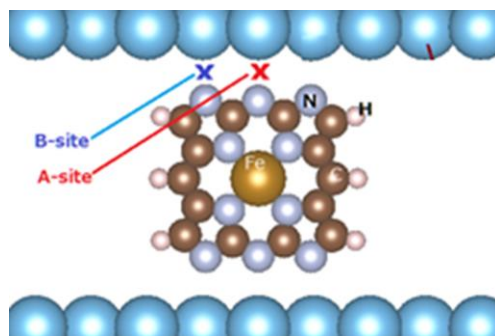


図1、金属表面に挟まれた窒素終端分子の原子配置

① 鉄電極表面

カーボンナノチューブ (CNT) の生成核ともなる触媒材料の鉄を電極表面材料の候補として調査した。

窒素終端に変更した鉄ポルフィリン様分子 (図1) を金属表面で挟んだ分子性架橋構造系で、密度汎関数理論に基づく第一原理計算で、シミュレーションを行い、系内における電子が受ける有効ポテンシャルを算出した。金の場合、接合界面におけるポテンシャル障壁はフェルミレベルより計って+0.6eV @A-site~+1.3eV@B-site であったものが、鉄表面では、B-site では、+0.3eV と低く、さらに A-site で-0.5eV と、フェルミレベルより低くなり、電気伝導にポテンシャル障壁は無くなった。

② チタン電極表面

電気伝導性においてカーボンナノチューブと良好な接合界面を形成するチタンを、電極側材料候補として調査を実施した。鉄の場合と同じく電子が受ける有効ポテンシャルを算出したところ、A-site で-2.6eV、B-site で-1.6eV と、両 site ともフェルミレベルより障壁が低くなり、すべての接点で電気伝導にポテンシャル障壁は無くなった。電極が金の場合には消失していたフェルミレベル近傍の分子末端の電子準位が、チタンの d 電子準位との混成により復活したためである。この場合、電極と架橋分子間に複数伝導チャンネルが開けるため、鉄の場合よりも、さらに高い電流強度が期待できる。

(3) まとめ

本研究により分子性架橋の機能を発揮できる接合界面構造の有力候補をデザインすることができた。具体的には架橋分子における電極金属表面との接合端を窒素末端として複数の配位座によるキレート効果で、接合を強化し、また電極材料をチタン、もしくは電極表面をチタンコートすることにより電気伝導性においても良好な接合界面特性を有することがわかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 49 件)

- ①Ryan Lacdao Arevalo, Mary Clare Sison Escano, Hideaki Kasai, Computational mechanistic study of borohydride electrochemical oxidation on Au₃Ni(111), The Journal of Physical Chemistry C, 査読有, 117 巻, (2013), 3818-3825, 10.1021/jp311904k
- ②Abdulla Sarhan, Ong Yi Ching, Hiroshi Nakanishi, Katsuyuki Fukutani, Hideaki Kasai, Dihydride Structures of Deuterium on Germanium (001) Surfaces, Journal of Applied Physics, 査読有, 113 巻, (2013), 023703 (7 pages), 10.1063/1.4774097
- ③Ryan Lacdao Arevalo, Mary Clare Sison Escano, Andrew Yu-Sheng Wang, Hideaki Kasai, Structure and stability of borohydride on Au(111) and Au₃M(111) (M = Cr, Mn, Fe, Co, Ni) surfaces, Dalton Transactions, 査読有, 43 巻, (2013), 770-775, 10.1039/C2DT32226A
- ④Febdian Rusydi, Mohammad Kemal Agusta, Adhitya Gandaryus Saputro, Hideaki Kasai, A first principle study on Zinc-porphyrin interaction with O₂ in Zinc-Porphyrin(Oxygen) complex, Journal of Physical Society of Japan, 査読有, 81 巻, (2012) 124301 (11pages), 10.1143/JPSJ.81.124301
- ⑤Mohammad Kemal Agusta, Hideaki Kasai,

Theoretical study on hydrazine chemisorption on transition metal surfaces, Journal of Physical Society of Japan, 査読有, 81 巻, (2012), 124705 (9pages), 10.1143/JPSJ.81.124705

- ⑥Triati Dewi Kencana Wungu, Mohammad Kemal Agusta, Adhitya Gandaryus Saputro, Hermawan Kresno Dipojono, Hideaki Kasai, First principles calculation on the adsorption of water on lithium-montmorillonite (Li-MMT) Journal of Physics Condensed Matter, 査読有, 24 巻, (2012), 475506, 10.1088/0953-8984/24/47/475506
- ⑦Abdulla Sarhan, Mamoru Sakaue, Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Electron-Vibron Interaction Effects on Scanning Tunneling Microscopy Current through Melamine Adsorbed on Cu(100), Journal of Physical Society of Japan, 査読有, 81 巻, (2012), 10471 (7pages), 10.1143/JPSJ.81.104711
- ⑧Susan Menez Aspera, Hideaki Kasai, Hirofumi Kishi, Nobuyoshi Awaya, Shigeo Ohnishi, Yukio Tamai, Realization of the Switching Mechanism in Resistance Random Access Memory (RRAMTM) Devices: Structural and Electronic Properties Affecting Electron Conductivity in Half-nium Oxide-Electrode, Journal of Electronic Materials, 査読有, 42 巻, (2012), 143-150, 10.1007/s11664-012-2270-8
- ⑨Hirofumi Kishi, Allan Abraham Bustria Padama, Ryan Lacdao Arevalo, Joaquin Lorenzo Valmorina Moreno, Hideaki Kasai, Masahi Taniguchi, Mari Uenishi, Hirohisa Tanaka, Yasuo Nishihata, A theoretical study of the reactivity of Cu₂O(111) surfaces: the case of NO dissociation, Journal of Physics: Condensed Matter, 査読有, 24 巻, (2012), 262001, 10.1088/0953-8984/24/26/262001
- ⑩Hirofumi Kishi, Ferensa Oemry, Tien Quang Nguyen, Shinichi Kunikata, Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Hiroyoshi Maekawa, Kazuo Osumi, Study of NO Oxidation Reaction over the Pt Cluster Supported on γ -Al₂O₃(111) surface, Current Applied Physics, 査読有, 12 巻 (2012), S110-S114, 10.1016/j.cap.2012.05.003
- ⑪Mary Clare Escaño, Elod Gyenge, Ryan Arevalo, Hideaki Kasai, Reactivity descriptors of borohydride interaction with metal surfaces, The Journal of Physical Chemistry C, 査読有, 115 巻, (2011), 19883-19889, 10.1021/jp207768e
- ⑫Hirofumi Kishi, Abdulla Ali Abdulla Sarhan, Mamoru Sakaue, Susan Meñez Aspera,

Melanie Yadao David, Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Yukio Tamail, Shigeo Ohnishi, Nobuyoshi Aways, Controllability of Electrical Conductivity by Oxygen Vacancies and Charge Carrier Trapping at Interface between CoO and Electrodes, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 50巻, (2011), 071101

(6 pages), 10.1143/JJAP.50.071101

⑬Triati Dewi Kencana Wungu, Susan Meñez Aspera, Melanie Yadao David, Hermawan Kresno Dipojono, Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Absorption of Lithium in Montmorillonite: A Density Functional Theory (DFT) Study, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 査読有, 11巻, (2011), 2793-2801, 10.1166/jnn.2011.3913

⑭Hermawan Kresno Dipojono, Adhitya Gandaryus Saputro, Susan Menez Aspera, Hideaki Kasai, Density functional theory study on the interaction of O₂ molecule with Cobalt-(6)Pyrrole clusters, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 50巻, (2011), 055702 (5 pages), 10.1143/JJAP.50.055702

⑮Mary Clare Escaño, Tien Quang Nguyen, Hideaki Kasai, Molecular and electronic tuning of Si/CNT hybrid system, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 50巻, (2011), 045701 (5 pages), 10.1143/JJAP.50.045701

⑯Do Ngoc Son, Bach Thanh Cong, Hideaki Kasai, Hydronium Adsorption on 00H Recovered Pt(111) Surface: Effects of Electrode Potential, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 査読有, 11巻, (2011), 2983-2989, 10.1166/jnn.2011.3903

⑰Susan Aspera, Melanie David, Hideaki Kasai, First principles study of the Adsorption of Water Molecule on Tri-s-triazine based Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄), Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 49巻, (2010), 115703-115712, 10.1143/JJAP.49.115703

⑱Tien Quang Nguyen, Mary Clare Escaño, Hideaki Kasai, Nitric Oxide adsorption effects on metal phthalocyanines, Journal of Physical Chemistry B, 査読有, 79巻, (2011), 10017-10021, 10.1021/jp1035426

⑲Yuji Kunisada, Hirofumi Kishi, Fajarisandi Dimas, Melanie Yadao David, Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Takuma Asari, Shigeo Hayashi, Adsorption properties of BF₄⁻ anions on grapheme, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 49巻, (2010), 02BB04-06,

10.1143/JJAP.49.02BB04

⑳Mohammad Kemal Agusta, Melanie Yadao David, Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Hydrazine(N₂H₄) adsorption on Ni(100)-Density functional theory investigation, Surface Science, 査読有, 604巻, (2010), 245-251, 10.1016-j.susc.2009.11.012

[学会発表] (計 177 件)

①Tran Phan Thuy Linh, Mamoru Sakaue, Musa Alaydrus, Triati Dewi Kencana Wungu, Susan Menez Aspera, Hideaki Kasai, Tatsumi Ishihara, Takahiro Mohri, First-principles Study on Oxygen Vacancy Migration in Alkaline-earth Doped Monoclinic Lanthanum Germanate, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 2013. 3. 27-2013. 3. 30, 神奈川工科大学, 厚木市 (神奈川県)

②三輪邦之, 坂上 護, 笠井 秀明, 走査トンネル顕微鏡発光における電子・分子振動・プラズモンのダイナミクス, 日本物理学会第68回年次大会, 2013. 3. 26-2013. 3. 29, 広島大学 東広島キャンパス (広島県)

③Kuniyuki Miwa, Mamoru Sakaue, Hideaki Kasai, Interplay between dynamics of molecule and surface plasmons in scanning tunneling microscope induced light emission, American Physical Society March Meeting 2013, 2013. 3. 18-2013. 3. 23, Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, USA

④Kuniyuki Miwa, Mamoru Sakaue, Hideaki Kasai, Interplay between dynamics of molecule and surface plasmons in scanning tunneling microscope induced light emission, American Physical Society March Meeting 2013, 2013. 3. 18-2013. 3. 23, Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, USA

⑤三輪邦之, 坂上護, 笠井秀明, 表面プラズモンに誘起される分子振動励起, 53rd Annual Symposium of the Vacuum Society of Japan, 2012. 11. 14-2012. 11. 16, 甲南大学 (兵庫県)

⑥R. L. Arevalo, M. C. S. Escano, H. Kasai, Structure and stability of borohydride on Au(111) and Au₃M(111) surfaces, 5th International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, 2012. 10. 22-2012. 10. 24, 大阪大学中の島センター (大阪府)

⑦Triati Dewi Kencana Wungu, Hideaki Kasai, Structural Stability and Electronic Structure Analysis on the Influence of Water Adsorbed on Lithium-Montmorillonite: A Density

Functional Theory Study, 5th International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, 2012.10.22-2012.10.24, 大阪大学中之島センター (大阪府)

⑧Adhitya G. Saputro, Hideaki Kasai, A Density Functional Theory Study on the Water and Anion Formation Reaction on Co-Ppy Cluster, 5th International Symposium on Atomically Controlled, Fabrication Technology, 2012.10.22-2012.10.24, 大阪大学中之島センター (大阪府)

⑨Mary Clare Escano, Elod Gyenge, Ryan Arevalo, Hideaki Kasai, Changes in borohydride structures on Os with respect to catalyst, water co-adsorption and electric field, 5th International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, 2012.10.22-2012.10.24, 大阪大学中之島センター (大阪府)

⑩Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Quantum simulation for proton and muon on solid surfaces and in subsurfaces, International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD), 2012.10.11-2012.10.13, 大阪大学 (大阪府)

⑪三輪邦之, 坂上護, 笠井秀明, Molecular Electronic and Vibrational Dynamics Induced by Surface Plasmons, International Symposium on Computics: Quantum Simulation and Design (ISC-QSD), 2012.10.11-2012.10.13, 大阪大学 (大阪府)

⑫三輪邦之, 坂上護, 笠井秀明, Vibrational Dynamics of Molecules Induced by Surface Plasmons, Vibrations at Surfaces, 2012.9.24-2012.9.28, ニチイ学館 神戸ポートアイランドセンター (兵庫県)

⑬Adhitya Gandaryus, Hideaki Kasai, A DENSITY FUNCTIONAL THEORY STUDY ON THE ADSORPTION OF O₂ AND H₂O₂, MOLECULES ON THE Co-NX CLUSTERS, 6th International Fuel Cell Workshop, 2012.8.2-2012.8.3, 甲府富士屋ホテル (山梨県)

⑭Mary Clare Escano, Tien Quang Nguyen, Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Controlling oxidation on platinum by spin manipulation, Nanotech2012, 2012.6.18-2012.6.22, スタンプフォード大学 Santa Clara, California U. S. A.

⑮Tien Quang Nguyen, Mary Clare Sison Escano, Hideaki Kasai, Porphyrins and macrocycles: From basics to applications, ECS 221st Meeting, 2012.5.6~2012.5.10, Washington State Convention Center, Seattle,

Washington, USA

⑯Abdulla Sarhan, Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Electronic structure changes in the Pt/NiO/Pt capacitor-like ReRAM system: O vacancy effect, International Symposium on Materials Science and Innovation for Sustainable Society Eco-materials and Eco-innovation for Global Sustainability (ECO-MATES 2011), 2011.11.28-2011.11.30, Hotel Hankyu Expopark, Osaka

⑰Abdulla Sarhan, Mamoru Sakaue, Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Electron-Vibron Interaction Effect on Current Transport through Adsorbed Melamine on Cu(100), Fourth International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, 2011.10.31-2011.11.2

⑱Hiroshi Nakanishi, The first principles simulation code for the muon and proton on the solid surface, in the subsurface and bulk, Quantum Simulations and Design International Focus Workshop, 2011.9.27-2011.9.29

⑲Hideaki Kasai, Susan Meñez Aspera, Hirofumi Kishi, First Principles Study of the Switching Mechanism in Resistance Random Access Memory Devices, 2011 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, SISPAD2011, 2011.9.8-2011.9.10, Hotel Hankyu Expo Park, Osaka, JAPAN

⑳笠井秀明, 計算機マテリアルズデザイン先端研究事例, 第1回マルチスケールマテリアルモデリングシンポジウム(第16回分子動力学シンポジウム) (招待講演), 2011.5.23-2011.5.24, 大阪大学 (大阪)

㉑Abdulla Ali Abdulla Sarhan, Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Effect of the Electron-phonon interaction on Transport through Adsorbed Melamine Molecule on Cu Surface, 第1回マルチスケールマテリアルモデリングシンポジウム(第16回分子動力学シンポジウム), 2011.5.23-2011.5.24

㉒Abdulla Sarhan, Hiroshi Nakanishi, Hideaki Kasai, Modeling of Electron Transport through Adsorbed Melamine Molecule on Cu(100) Surface, The 27th European Conference on Surface Science, 2010.9.3-2010.8.29, Groningen, the Kingdom of the Netherlands

㉓Hiroshi Nakanishi, Computational Materials Design of Molecular Bridge Systems for Potential Applications as Nano-Electronics Devices [invited], International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced

Materials (Global COE Program) & Third International Conference on Nanospintronics Design and Realization, 3rd-ICNDR, 2010. 5. 30-2010. 6. 4, Osaka, Japan

④Joaquin Moreno, Melanie David, Tanglaw Roman, Hideaki Kasai, A Theoretical Study on the Reaction of Hydrogen Peroxide with Fe-filled Single-walled Carbon, International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials (Global COE Program) & Third International Conference on Nanospintronics Design and Realization, 3rd-ICNDR, 2010. 5. 30-2010. 6. 4, Osaka, Japan

⑤中西寛, 磁性制御による表面反応デザインと量子ダイナミクス [招待], 山田科学振興財団 新規プログラム (若手研究者の分野交錯研究推進プログラム) 研究会「ナノスケールの原子構造および電子状態とその変化の理論的設計」, 2010. 8. 31-2010. 9. 1, 国際高等研究所、日本

⑥中西寛, 笠井秀明, Feポルフィリン分子と金属電極表面との接合界面構造, 日本物理学会2010年秋季大会会, 2010. 9. 23-2010. 9. 26, 大阪府立大学 (大阪)

[図書] (計3件)

①岸浩史, 國貞雄治, 笠井秀明, 化学同人, 未来を拓く元素戦略 持続可能な社会を実現する化学, (2013), 202(pp. 124-130)

②笠井秀明, 岸浩史, 大阪大学出版会, 抵抗変化メモリの知的材料設計, (2012), pp. 74

③笠井秀明, 坂上護, シュプリンガー・ジャパン,

「密度汎関数法の発展 マテリアルデザインへの応用」

第Ⅲ部応用編 第6章 表面反応, ナノ構造の制御, (2011), pp. 293-310

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

①物質中の原子・分子の量子状態推定方法, 笠井秀明, 中西寛, 国立大学法人大阪大学, 特許、特願2012-16133, 2012/1/30, 国内

②不揮発性メモリセル、これを備える不揮発性メモリ装置および遷移金属酸化物の選定方法, 笠井秀明, 中西寛, 岸浩史, 国立大学法人大阪大学, 特許、特願2012-008516, 2012/1/18, 国内

③窒素酸化物浄化触媒, 笠井秀明, 中西寛, 岸浩史, 国立大学法人大阪大学, 特許、特願2011-160286, 2011/07/21, 国内

[その他]

ホームページ等

Kasai Laboratory
<http://www.dyn.ap.eng.osaka-u.ac.jp/web/publications.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中西 寛 (NAKANISHI HIROSHI)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号：40237326

(2) 研究分担者

笠井 秀明 (KASAI HIDEAKI)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：00177354