

平成30年6月8日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04183

研究課題名(和文) エレクトライド材料の水素吸蔵放出能を利用した水素化・脱水素触媒の開発

研究課題名(英文) Development of hydrogenation and dehydrogenation catalysts using electride with hydrogen storage ability

研究代表者

北野 政明 (Kitano, Masaaki)

東京工業大学・元素戦略研究センター・准教授

研究者番号：50470117

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、水素吸蔵放出特性を持つ電子化物や水素化物に金属ナノ粒子を担持した触媒を用い、水素化・脱水素反応を促進することを検討した。C12A7エレクトライド担持Ru-Fe触媒を用いることで、不飽和アルデヒドの選択水素化を効率よく進行させることに成功した。また、Ca₂NHやCa(NH₂)₂担持Ru触媒は、低温でのアンモニア合成に対し優れた触媒性能を示した。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we have focused on the hydrogenation or dehydrogenation reactions over electride (or hydride) supported metal nanoparticle catalysts. And the relationship between the catalytic activity and the hydrogen storage ability was investigated. C12A7 supported Ru-Fe bimetallic catalyst exhibited high activity for selective hydrogenation of unsaturated aldehydes. Ca₂NH and Ca(NH₂)₂ supported Ru catalysts showed excellent activity for low-temperature ammonia synthesis.

研究分野：触媒化学

キーワード：エレクトライド 水素化物 選択水素化 アンモニア合成

1. 研究開始当初の背景

水素化反応は化学工業において重要な反応が多く、エチレン中のアセチレンを除く選択的水素化や、燃料・燃料添加剤として利用されるメタノールの合成、人工肥料の原料や窒素含有有機化合物の原料となるアンモニア合成などが挙げられる。一方、脱水素反応では、ポリスチレン原料であるスチレンをエチルベンゼンの脱水素により得る反応のようにパラフィン部位からオレフィンを合成する反応が主である。また近年、水素エネルギーキャリアとしてメチルシクロヘキサンが注目されており、脱水素によってトルエンとともに水素を得ることができる。これら多くの反応において、Pt, Pd, Ru のような貴金属を金属酸化物などの担体に高分散状態に担持したものがよく使われている。これらの担体による効果は、反応基質の吸着促進や、担持金属種の粒子径制御などの構造的因子を支配するものが大部分であり、担持金属種の電子構造を変化させる効果は少なく、アルカリ金属もしくはアルカリ土類金属酸化物などの電子的促進剤を担持金属種近傍に共担持することで、担持金属種の電子状態を変化させている。

2. 研究の目的

本研究では、 $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (C12A7) エレクトライドなどの電子化物や、骨格中に H^- イオンを含む水素化物を触媒担体として用い、担体の水素吸蔵放出能や電子供与能を利用し、水素化・脱水素反応を促進することを目的としている。電子化物や水素化物は、骨格内に生じる電子の仕事関数が小さく、その表面に担持された金属ナノ粒子の電子状態に大きな影響を与えると考えられる。さらに、担体中に取り込まれた H^- イオンは、比較的低温で以下の反応により担体外に放出され空隙に電子が生じたり ($\text{H}^- \rightarrow \text{H}^0 + \text{e}^-$)、逆に空隙に水素が H^- イオンが取り込まれたりする反応 ($\text{H}^0 + \text{e}^- \rightarrow \text{H}^-$) が可逆的に進行する。この特長を生かし、担持金属-担体界面付近で生じる水素の吸蔵・放出特性によって各種水素化、脱水素反応を促進することを本研究の目的とした。また C12A7 骨格に対する異元素置換や、ケージ内のアニオン種の制御、高表面積化などによって、この水素吸蔵・放出特性を制御し高性能な触媒開発も検討した。

3. 研究の方法

CaO と $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ を 11:7 の比率で混合し、 1300°C で 10 時間加熱することで複合酸化物 ($12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ と $\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ の混合物) を得た。これと金属 Ca を混ぜ、真空下で 1100°C で加熱することで C12A7:e を合成した。Ca₂N は、Ca₃N₂ と金属 Ca の混合物を圧縮成型し、石英ガラス中に入れ真空状態で 800°C 50 時間以上加熱し、急冷することで得られる。Ca(NH₂)₂ は、金属 Ca を約 -50°C の液体アンモニア中に溶解させ、 100°C に加熱

することで得られる。Ru の担持は、物理混合した Ru₃(CO)₁₂ や Ru(acac)₃ と各種担体材料とを真空下で加熱することで行った。アンモニア合成反応は、固定床流通式反応装置を用いて行った。生成ガスは、希硫酸でトラップし、イオンクロマトグラフで分析した。キャラクタリゼーションは、SEM, STEM, XRD, XPS, FT-IR などにより行った。

4. 研究成果

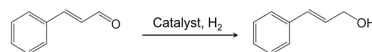
4.1. C12A7 担持金属触媒による選択水素化

不飽和アルデヒドやキノリンなどの複素環式化合物の選択水素化は、医薬品中間体や香料などの高付加価値な有用化学品の製造に重要な反応である。我々は、Ru-Fe 合金ナノ粒子を C12A7:e に担持した触媒が不飽和アルデヒドの選択水素化に、Ru 担持高表面積 C12A7 触媒がキノリンの選択水素化を高効率に進行させることを見いだした。

表 1 に各種触媒を用いて不飽和アルデヒドであるシンナムアルデヒドから、不飽和アルコールであるシンナミルアルコールを合成する反応を行った結果を示す。Ru のみを担持した C12A7:O²⁻ や C12A7:e⁻ では、転化率・選択性ともに低いことがわかる。一方、Ru-Fe を担持した C12A7:e⁻ では転化率・選択性ともに 96% 以上の値を示した。同じように、Ru-Fe 合金を他の担体に担持しても、同様の高い選択性は得られず、C12A7:e⁻ の電子濃度が高くなるほど選択性が向上した。また、Ru/C12A7:e⁻ と Fe/C12A7:e⁻ を物理混合したものは、このような高い活性は得られないことから、C12A7:e⁻ の電子供与性と、Ru-Fe 合金ナノ粒子の両方が高活性・高選択性に寄与していることがわかる。Ru-Fe/C12A7:e⁻ 触媒は、繰り返し利用しても触媒活性、選択性ともに低下せず安定であることも示された。

図 1 に Ru-Fe/C12A7:e⁻ 触媒の電子顕微鏡像を示す。直径 10 nm 以上の比較的大きな金属ナノ粒子が C12A7:e⁻ 上に担持されており、元素マッピング像から、Fe と Ru が同一粒子内

表 1 各種触媒による選択水素化



Entry	Catalyst	Conv. [%]	Sel. [%]
1 ^a	Ru/C12A7:e ⁻	32.9	82.2
2 ^c	Fe/C12A7:e ⁻	-----	-----
3	Ru/C12A7:e ⁻ + Fe/C12A7:e ⁻	48.8	89.9
4	Ru-Fe/C12A7:e ⁻	96.2	96.7
5 ^b	Ru/C12A7:O ²⁻	28.1	52.6
6	Ru-Fe/C12A7:O ²⁻	91.9	72.3
7	Ru-Fe/Al ₂ O ₃	84.3	74.3
8	C12A7:e ⁻	-----	-----
9	blank	-----	-----

反応条件：シンナムアルデヒド(8 mmol), 触媒(100 mg), 水素(2.0 MPa), 反応温度(130°C), 反応時間(12 h)

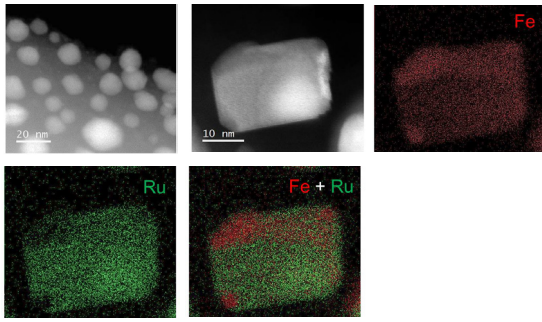


図1 Ru-Fe/C12A7:e触媒の電子顕微鏡像

に均一に分散している様子が観察された。COを触媒表面に吸着させた時のIRスペクトルから、C12A7:eからRu-Fe粒子への電子移動が確認され、エレクトライドによる電子供与効果が、触媒活性に重要な役割を果たしていることが示唆された。

推定される反応機構は、以下の通りである。不飽和アルデヒド分子が、触媒表面に垂直に配位した形で吸着することで、不飽和アルデヒドのC=O結合を選択的に水素化していると考えられる。このとき、やや正に帯電したFeサイトがルイス酸的に作用することで、カルボニル酸素と直接相互作用する。また、エレクトライドからの電子供与効果によって合金ナノ粒子が電子リッチな状態となるためC=C部位との電子的な反発により、そのような吸着状態を生み出していると考えられる。また、C12A7:e表面が塩基として働き、金属ナノ粒子との界面で、水素分子がヘテロ開裂($H_2 \rightarrow H^+ + H^-$)することによって、選択性が向上している可能性も考えられる。

水熱合成法により作製したC12A7(HT-C12A7)は、 $50 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 程度の表面積を有し、固相法で合成したもの($1 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$)より遙かに高い表面積を持つ。これにRuを担持すると、粒径2 nm程度の微粒子状で分散させることができ、キノリンなどの複素環式化合物の選択水素化を効率よく進行させる。他の金属酸化物にRuを固定化した触媒よりも遙かに高い活性を示した(図2)。HT-C12A7は、高い塩基性を示し、ナノケージ構造に由来する水素吸蔵特性により水素のヘテロ解離を促進し、高い選択性を示すことが明らかとなった。

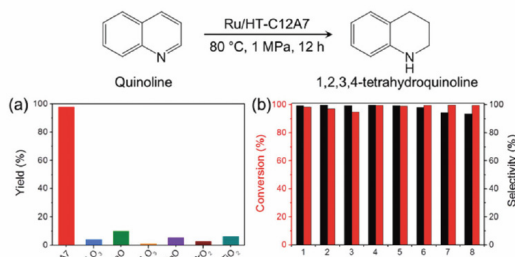


図2 Ru/HT-C12A7によるキノリンの選択水素化

4.2. Ca₂NH担持Ru触媒によるアンモニア合成

Ca₂NH([Ca₂N]⁺H⁻)をRu触媒の担体として用いると、Ru/C12A7:e触媒よりもさらに低温で高いアンモニア合成活性を示すことを見いだした。Ca₂NHは正に帯電した[Ca₂N]⁺骨格の正電荷を保障する形でH⁻イオンが存在する物質であり、2次元エレクトライドである[Ca₂N]⁺e⁻を水素雰囲気中で加熱することにより得られる。一方、同じ結晶構造を有し、同じ元素から構成されたCaNH(HはH⁺として存在)にRuを担持した触媒ではほとんど活性を示さないことから、H⁻イオンが高い触媒活性に寄与していると考えられる。また、Ru/Ca₂NHのアンモニア合成の活性化エネルギーは、 60 kJ mol^{-1} でありRu/Ca₂NHの約半分である(図3)。DFT計算によりCa₂NHの仕事関数は、約2.8eVであることが示され、さらにH⁻欠陥をもつCa₂NHでは仕事関数が2.3 eVと

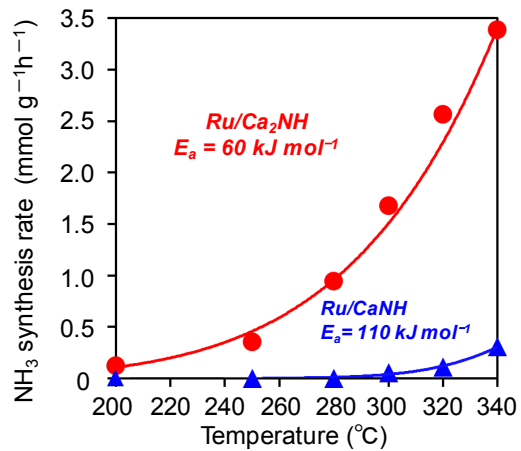


図3 Ru/Ca₂NHやRu/CaNHによるアンモニア合成

いう低い値を示すことが明らかとなった。また、Ca₂NH中のH⁻イオンのDOSは、フェルミエネルギーより-2eVほど深い位置に存在し、安定であるためヒドリド欠陥を形成エネルギーは、1 eV程度となる。一方、表面にRuが存在すると、RuとH⁻イオンが結合を形成するため、H⁻イオンのDOSは、フェルミエネルギーから-0.5 eV程度の浅い位置にまで移動する。このことにより、ヒドリド欠陥を形成エネルギーは、約半分程度となる。このようにRu-Ca₂NH界面付近に低仕事関数の電子が形成されることで、Ruへの電子供与効果が得られていると考えられる。実際に、Ru/Ca₂NHを触媒としてN₂交換反応を行うと、その反応速度はRu/CaNHの30倍であり、活性化エネルギーは約半分であることがわかった。従って、Ca₂NHからの電子供与によりN₂解離反応のエネルギー障壁は大幅に低減されることが示された。反応メカニズムを明らかにするために、N₂とD₂からのアンモニア合成を行ったところ、反応初期にNH₃が優先して生成されることが分かった。この結果から、Ca₂NH骨格中に含まれるH⁻イオンがNH₃生成に関与しており、反応中に水素の吸蔵放出を繰り返しながらアンモニア合成反応を促進してい

ることが明らかとなった(図 4)。

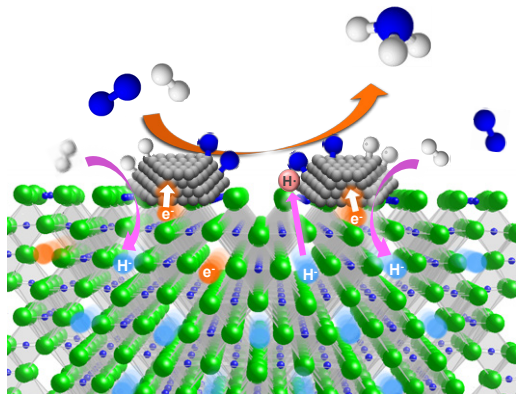


図 4 Ru/Ca₂NH 上でのアンモニア合成の反応機構

以上のように、骨格にH⁺イオンを含む材料に優れた促進効果があることが明らかとなったが、Ca₂NH 以外にもアニオンサイトがH⁺イオンのみから形成されるCaH₂やLnH₂(Ln=La, Ce, Y)もRuと組み合わせることで低温での優れたアンモニア合成活性を示すことが明らかとなった^{9,10}。近年、我々だけでなく骨格中にヒドリドイオンを含む材料(LiH, BaH₂, BaTiO_{3-x}H_x, TiH₂)を用いた低温アンモニア合成の研究が盛んに行われている。

4.3. Ca(NH₂)₂担持 Ru 触媒によるアンモニア合成

カルシウムアミド(Ca(NH₂)₂)にRuナノ粒子を固定化した触媒が、300℃以下の低温領域で、優れたアンモニア合成活性を示すことを発見した。Ca(NH₂)₂は、Ca²⁺とNH₂⁻イオンからなるイオン結晶であり、金属Caを液体アンモニア中に溶解させ、100℃程度で加熱することにより容易に得ることができる。この物質は、300℃程度で加熱するとアンモニアを放出しながら分解する熱的に不安定な物質である。一方、この物質とRuやCoなどと共存させることで安定なアンモニア合成触媒として機能することがわかった。さらに、Baを3%添加したCa(NH₂)₂にルテニウムを固

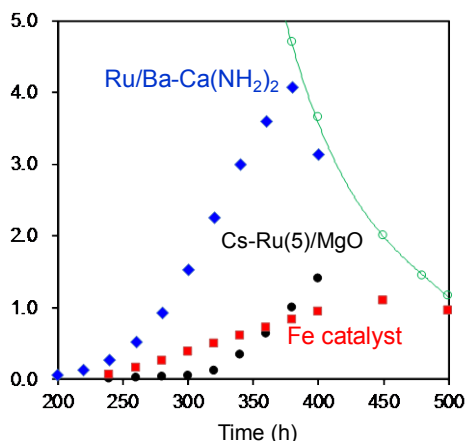


図 5 Ru/Ba-Ca(NH₂)₂によるアンモニア合成

定した触媒(Ru/Ba-Ca(NH₂)₂)が、300℃以下の低温領域で、従来のRu触媒の100倍、工

業鉄触媒よりも数倍高い触媒活性を示すことを発見した(図 5)。Ru/Ba-Ca(NH₂)₂は700時間(約1ヵ月)以上に亘り反応を行っても触媒活性はほとんど低下せず極めて安定に働く触媒であることも明らかにした。本触媒では、NH₂欠陥が表面に形成されやすいだけでなく、反応中に自己組織的に担体がメソポーラス構造に変化するとともに、コアシェル構造のBa-Ruナノ粒子が形成されることで高い触媒活性が発現することを明らかにしている。さらに、本触媒はアンモニアの脱水素反応に対しても優れた触媒活性を示すことも明らかにした。

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. Kazuhisa Kishida, Masaaki Kitano*, Yasunori Inoue, Masato Sasase, Takuya Nakao, Tomofumi Tada, Hitoshi Abe, Yasuhiro Niwa, Toshiharu Yokoyama, Michikazu Hara, Hideo Hosono*, "Large Oblate Hemispheroidal Ruthenium Particles Supported on Calcium Amide as Efficient Catalysts for Ammonia Decomposition", *Chem. Eur. J.* in press (2018). **Hot paper**, DOI: 10.1002/chem.201800467 査読有
2. Masaaki Kitano, Yasunori Inoue, Masato Sasase, Kazuhisa Kishida, Yasukazu Kobayashi, Kohei Nishiyama, Tomofumi Tada, Shigeki Kawamura, Toshiharu Yokoyama, Michikazu Hara, Hideo Hosono, "Self-organized Ruthenium-Barium Core-Shell Nanoparticles on a Mesoporous Calcium Amide Matrix for Efficient Low-Temperature Ammonia Synthesis", *Angew. Chem. Int. Ed.* 57, 2648-2652 (2018). DOI: 10.1002/anie.201712398 査読有
3. Yutong Gong, Jiazhen Wu, Masaaki Kitano, Junjie Wang, Tian-Nan Ye, Jiang Li, Yasukazu Kobayashi, Kazuhisa Kishida, Hitoshi Abe, Yasuhiro Niwa, Hongsheng Yang, Tomofumi Tada, Hideo Hosono, "Ternary intermetallic LaCoSi as a catalyst for N₂ activation", *Nat. Catal.* 1, 178-185 (2018). DOI: 10.1038/s41929-017-0022-0 査読有
4. Tian-Nan Ye, Yangfan Lu, Jiang Li, Takuya Nakao, Hongsheng Yang, Tomofumi Tada, Masaaki Kitano, Hideo Hosono, "Copper-Based Intermetallic Electride Catalyst for Chemoselective Hydrogenation Reactions", *J. Am. Chem. Soc.* 139, 17089-17097 (2017). DOI: 10.1021/jacs.7b08252 査読有
5. Hitoshi Abe, Yasuhiro Niwa, Masaaki Kitano, Yasunori Inoue, Masato Sasase, Takuya

- Nakao, Tomofumi Tada, Toshiharu Yokoyama, Michikazu Hara, Hideo Hosono, "Anchoring Bond Between Ru and N Atoms of Ru/Ca₂NH Catalyst: Crucial for the High Ammonia Synthesis Activity", *J. Phys. Chem. C* 121, 20900–20904 (2017). DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b07268 査読有
6. Jiazhen Wu, Yutong Gong, Takeshi Inoshita, Daniel C. Fredrickson, Junjie Wang, Yangfan Lu, Masaaki Kitano, Hideo Hosono, "Tiered Electron Anions in Multiple Voids of LaScSi and Their Applications to Ammonia Synthesis", *Adv. Mater.* 29, 1700924 (2017). DOI: 10.1002/adma.201700924 査読有
 7. Jiang Li, Masaaki Kitano*, Tian-Nan Ye, Masato Sasase, Toshiharu Yokoyama, Hideo Hosono*, "Chlorine-Tolerant Ruthenium Catalyst Derived Using the Unique Anion-Exchange Properties of 12CaO·7Al₂O₃ for Ammonia Synthesis", *ChemCatChem* 9, 3078-3083 (2017). DOI: 10.1002/cctc.201700353 査読有
 8. Michikazu Hara, Masaaki Kitano, Hideo Hosono, "Ru-Loaded C12A7:e⁻ Electride as a Catalyst for Ammonia Synthesis", *ACS Catal.* 7, 2313-2324 (2017). DOI: 10.1021/acscatal.6b03357 査読有
 9. Tian-Nan Ye, Jiang Li, Masaaki Kitano*, Hideo Hosono*, "Unique nanocages of 12CaO·7Al₂O₃ boost heterolytic hydrogen activation and selective hydrogenation of heteroarenes over ruthenium catalyst", *Green Chem.* 19, 749-756 (2017). DOI: 10.1039/C6GC02782B 査読有
 10. Yasukazu Kobayashi, Masaaki Kitano, Shigeki Kawamura, Toshiharu Yokoyama, Hideo Hosono, "Kinetic evidence: the rate-determining step for ammonia synthesis over electride-supported Ru catalysts is no longer the nitrogen dissociation step", *Catal. Sci. Technol.* 7, 47-50 (2017). DOI: 10.1039/C6CY01962E 査読有
 11. Yasunori Inoue, Masaaki Kitano, Kazuhisa Kishida, Hitoshi Abe, Yasuhiro Niwa, Masato Sasase, Yusuke Fujita, Hiroki Ishikawa, Toshiharu Yokoyama, Michikazu Hara, Hideo Hosono, "Efficient and Stable Ammonia Synthesis by Self-Organized Flat Ru Nanoparticles on Calcium Amide", *ACS Catal.* 6, 7577–7584 (2016). DOI: 10.1021/acscatal.6b01940 査読有
 12. Takuya Nakao, Tomofumi Tada, Masaaki Kitano, Masato Sasase, Hideo Hosono, "The Key Indicator for the Control of Metal Particle Sizes on Supports from First Principles and Experimental Observation", *J. Phys. Chem. C* 120, 21879-21887 (2016). DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b03400 査読有
 13. Hiroshi Mizoguchi, Masaaki Okunaka, Masaaki Kitano, Satoru Matsuishi, Toshiharu Yokoyama, Hideo Hosono, "Hydride-Based Electride Material, LnH₂ (Ln = La, Ce, or Y)", *Inorg. Chem.* 55, 8833-8838 (2016). DOI: 10.1021/acs.inorgchem.6b01369 査読有
 14. Tian-Nan Ye, Jiang Li, Masaaki Kitano*, Masato Sasase, Hideo Hosono*, "Electronic interactions between a stable electride and a nano-alloy control the chemoselective reduction reaction", *Chem. Sci.* 7, 5969-5975 (2016). DOI: 10.1039/C6SC01864E 査読有
 15. Masaaki Kitano, Yasunori Inoue, Hiroki Ishikawa, Kyosuke Yamagata, Takuya Nakao, Tomofumi Tada, Satoru Matsuishi, Toshiharu Yokoyama, Michikazu Hara, Hideo Hosono, "Essential Role of Hydride Ion in Ruthenium-based Ammonia Synthesis Catalysts", *Chem. Sci.* 7, 4036-4043 (2016). DOI: 10.1039/C6SC00767H 査読有
 16. Hitoshi Abe, Yasuhiro Niwa, Masaaki Kitano, Yasunori Inoue, Youichi Murakami, Toshiharu Yokoyama, Michikazu Hara, Hideo Hosono, "High Oxidation Tolerance of Ru Nanoparticles on 12CaO·7Al₂O₃ Electride", *J. Phys. Chem. C* 120, 8711-8716 (2016). DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b00983 査読有
 17. Yangfan Lu, Jiang Li, Tomofumi Tada, Yoshitake Toda, Shigenori Ueda, Toshiharu Yokoyama, Masaaki Kitano, Hideo Hosono, "Water Durable Electride Y₅Si₃: Electronic Structure and Catalytic Activity for Ammonia Synthesis", *J. Am. Chem. Soc.* 138, 3970-3973 (2016). DOI: 10.1021/jacs.6b00124 査読有
 18. Shinji Kanbara, Masaaki Kitano, Yasunori Inoue, Toshiharu Yokoyama, Michikazu Hara, Hideo Hosono, "Mechanism Switching of Ammonia Synthesis Over Ru-loaded Electride Catalyst at Metal-Insulator Transition", *J. Am. Chem. Soc.* 137, 14517–14524 (2015). DOI: 10.1021/jacs.5b10145 査読有
 19. Md Jafar Sharif, Masaaki Kitano, Yasunori Inoue, Yasuhiro Niwa, Hitoshi Abe, Toshiharu Yokoyama, Michikazu Hara, Hideo Hosono, "Electron Donation Enhanced CO Oxidation over Ru-Loaded 12CaO·7Al₂O₃ Electride Catalyst", *J. Phys. Chem. C* 119, 11725-11731 (2015). DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b02342 査読有
- [学会発表] (計 17 件)
1. Masaaki Kitano, "Development of new solid catalysts containing high-density electrons or hydride ions for ammonia synthesis", Nankai University, 2018
 2. 北野政明, 高活性アンモニア触媒 Ru/Ca-N-H 系化合物における水素の振る

- 舞い, 第 14 回 水素量子アトムクス研究会, 2017
3. 北野政明, エレクトライドの電子物性と触媒特性, 東工大元素戦略拠点シンポジウム, 2017
 4. 北野政明, エレクトライド触媒によるアンモニア合成の新技術—固体触媒からのアプローチ, 第 7 回化学フェスタ, 2017
 5. 北野政明, Ca-N-H 系化合物を担体を利用した低温アンモニア合成, 第 120 回触媒討論会, 2017
 6. 北野政明, 電子化合物およびヒドリド化合物を触媒に利用した水素化反応, 第 55 回触媒研究懇談会, 2017
 7. 北野政明, エレクトライドおよびヒドリドを利用した低温アンモニア合成, 第 2 回固体化学フォーラム研究会, 2017
 8. 北野政明, カルシウム窒化物を担体として利用した低温高活性アンモニア合成触媒, 2016 年度量子ビームサイエンスフェスタ, 2017
 9. Masaaki Kitano, "Electride catalysts for ammonia synthesis and chemical reactions", The 1st International Symposium on Novel Materials for Next Generation Electronics and Catalysis, 2017
 10. 北野政明, Application of inorganic electrifieds for ammonia synthesis, 第 23 回京都大学 iCeMS 国際シンポジウム, 2017
 11. Masaaki Kitano, Yasunori Inoue, Takuya Nakao, Tomofumi Tada, and Hideo Hosono, "Ammonia synthesis over Ru-loaded Ca₂NH: Effect H⁻ ion on the catalytic performance", 13th European Congress on Catalysis(Europacat 2017), 2017
 12. Masaaki Kitano, "Ammonia synthesis using inorganic electride catalysts", PCOSS-ICAT Joint International Symposium on Catalysis Science for Sustainable Society, 2016
 13. 北野政明, 無機エレクトライドの電子供与能を利用した触媒反応, 平成 28 年度触媒学会・触媒工業協会交流サロン, 2016
 14. Masaaki Kitano, "Inorganic electride as a catalyst for ammonia synthesis", 第 46 回石油・石油化学討論会, 2016
 15. 北野政明, 無機エレクトライド担持ルテニウム触媒の開発, 第 118 回触媒討論会, 2016
 16. 北野政明, エレクトライドの触媒反応への応用, 第 151 回電子セラミックプロセス研究会, 2015
 17. Masaaki Kitano, "Ruthenium-Loaded 12CaO·7Al₂O₃ Electride as a New Catalyst for Ammonia Synthesis", The 2nd Uppsala University – Tokyo Tech Joint Symposium, Materials Session, Tokyo Institute of technology (Tokyo), 2015

〔図書〕(計 1 件)

1. 原亨和, 北野政明, 細野秀雄, 高活性なアンモニア合成用触媒, アンモニアを用いた水素エネルギーシステム(監修:小島由継), シーエムシー出版, 78-86, (2015).

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計 1 件)

名称:アンモニア合成触媒及びアンモニア合成方法
発明者:細野秀雄、原亨和、北野政明、金聖雄、松石聡、横山壽治、林文隆、戸田喜丈
権利者:東京工業大学
種類:特許権
番号:日本特許第 5820817 号
取得年月日:2015/10/9
国内外の別:国内

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.mces.titech.ac.jp/authors/kitano/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北野政明 (KITANO, Masaaki)
東京工業大学・元素戦略研究センター・准教授
研究者番号:50470117