

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03460

研究課題名(和文) アンモニアの常温常圧合成のための高効率プラズマ触媒反応法の開発

研究課題名(英文) Development of highly efficient plasma-catalyzed reaction for ammonia synthesis at atmospheric pressure

研究代表者

岩本 正和 (Iwamoto, Masakazu)

早稲田大学・理工学術院・その他(招聘研究員)

研究者番号：10108342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,300,000円

研究成果の概要(和文)：窒素分子を大気圧非平衡プラズマで活性化し、非加熱条件下でアンモニアに変換する反応は以前から知られていた。我々は内部電極として金属細線を用いると高い触媒活性が発現し、金属表面に吸着した窒素原子の不安定性と活性序列が一致することを見出した。また、棒状電極を用いて発生させたプラズマ空間にNi担持Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を充填すると触媒活性がさらに向上することも究明した。常温常圧ワンパスでNH<sub>3</sub>収率は6%以上に達した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アンモニアNH<sub>3</sub>は水素社会のエネルギーキャリアーとして注目されている。現行法であるハーバー・ボッシュHB法は多くのエネルギーを消費しており(CO<sub>2</sub>を排出しており)、改良/代替法の登場が待たれている。このため固体触媒、錯体触媒、電気化学、プラズマの分野でより効率的な合成法の開発が競争的に展開されている。我々はプラズマ法を研究した。これまでのプラズマ法ではHB法に活性な触媒成分がそのまま採用されることが多かったが、我々は研究の途上で内部金属電極が良い触媒となることを見いだした。次いで、Ni担持アルミナ等がこの反応の良い触媒となることを究明した。本研究の収率6%はこれまでの最高の成績である。

研究成果の概要(英文)：The activation of nitrogen molecules in atmospheric-pressure non-thermal plasma and conversion of them to ammonia under unheated conditions has widely reported. The present study revealed that high catalytic activity could be achieved when a fine metal wire was used as the internal electrode. The instability of nitrogen atoms adsorbed on the metal surface well agreed with the order of catalytic activity. It was also clarified that the catalytic activity is further improved by filling the plasma space generated by using the rod-shaped electrode with Ni-supported Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The NH<sub>3</sub> yield reached 6% or more with one pass at normal temperature and pressure.

研究分野：固体触媒化学

キーワード：アンモニア プラズマ法 固体触媒反応 電極

### 1. 研究開始当初の背景

アンモニア NH<sub>3</sub> は水素社会のエネルギーキャリアーとして注目されている。現行合成法であるハーバー・ボッシュ HB 法は多くのエネルギーを消費しており、改良あるいは代替法の登場が待たれている。このため固体触媒法、錯体触媒法、電気化学法、プラズマ法の分野で多くの研究が行われ、より効率的な合成法の開発競争が展開されている。我々はプラズマ法によるアンモニア合成にトライした。これまでのプラズマ法アンモニア合成では HB 法に活性な金属成分がそのまま触媒として採用されることが多かった。例えば、多孔質アルミナ管に Ru を担持した触媒では 2% 前後の収率が報告されている。しかし、この反応系の場合、多孔質アルミナ管の管壁細孔を生成物の NH<sub>3</sub> が通過するようにセットされており、反応ガスの流速が上がらないという弱点があった。

### 2. 研究の目的

我々はまず活性化窒素分子の電子状態について考察した。窒素分子の電子状態を図 1 にまとめている。(a) は中性の N<sub>2</sub> であり、N-N 間は三重結合になっている。固体触媒法、錯体触媒法、電気化学法のいずれにおいても触媒側から電子一つを N<sub>2</sub> に供給するのが反応開始時の活性化法である (図 1 (b))。この電子は反結合性軌道に入るので、N-N 間は 2.5 重結合に低下する。高温プラズマでは原子核と電子が分離することが多い

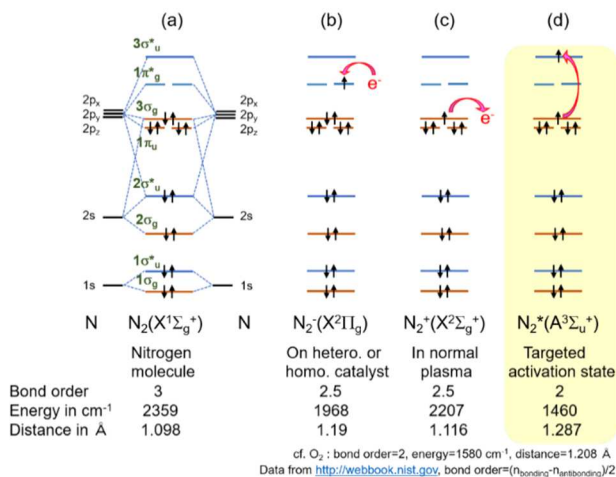


図 1. 活性化法と励起窒素分子の電子状態の関係

が、本研究では非平衡プラズマを用いるので、通常は結合性軌道から電子が一つ脱離し、図 1 (c) のように 2.5 重結合になる。これに対し、極めてソフトなプラズマ活性化によって N<sub>2</sub> 分子内でのみ電子励起が進むように工夫できれば、図 1 (d) の状態を実現できる。この状態では結合性軌道の電子が反結合性軌道に打ち上げられているので、N-N 間は 2 重結合まで低下する。量子科学計算によると N-N 間の結合力は酸素分子と同等レベルまで低下する。この状態は N<sub>2</sub>\* と表される。我々は、プラズマ活性化によってこの N<sub>2</sub>\* を効率よく調製する方法、さらにそれを触媒によって効率よく NH<sub>3</sub> に転換する方法の開発を目指した。

### 3. 研究の方法

プラズマ法アンモニア合成実験は石英製反応管を用いて常温常圧で実施した。反応管の外側に網状の電極を巻き付け、内部には細線状あるいは棒状電極を設置した。内部電極を高電圧側、外部電極をアース側とし、1-7kV の電圧を印加した。実際の実験では石英管の径、肉厚、外部電極の取付状態等によってプラズマ発生状況や NH<sub>3</sub> 収率が大きく変化したので、これらの外的要因は極力同一になるようにした。反応管内部には H<sub>2</sub> と N<sub>2</sub> を任意の比率で混合したガスを流した。反応管出口ガスを希硫酸水中に吹き込み、伝導度計とイオンクロマトで NH<sub>3</sub> 濃度を定量した。

### 4. 研究成果

#### (1) プラズマ活性化法の最適化<sup>1)</sup>

まず、プラズマ発生のための電力印加法と NH<sub>3</sub> 合成活性の関連を調べた。NH<sub>3</sub> 収率と周波数あるいは電圧の関係は比較的単調であった。一方、パルスシーケンスと NH<sub>3</sub> 収率の関係は複雑であった。単調正弦波、単調正弦波の 50% 発振、ランダム正弦波、減衰正弦波の中で減衰正弦波が最

適であると判断し、213kHzの減衰正弦波を1-7kV、20-50kHz間隔で発振することとした。

次に、プラズマ活性化中の窒素種の反応性を検討した。プラズマ発光スペクトル例を図2左に示している。発光線は主に $N_2^*$ 、 $N_2^+$ 由来であった。この発光スペクトル強度と $NH_3$ 合成活性の関係を図2右にまとめている。横軸は印加電圧である。 $N_2^*$ の生成(●)、 $NH_3$ 合成(■)ともに3kVから始まり、その後は電圧上昇とともにほぼ直線的に増加する。図2右の相関から我々は $N_2^*$ を $NH_3$ 合成の活性中間体と結論した。

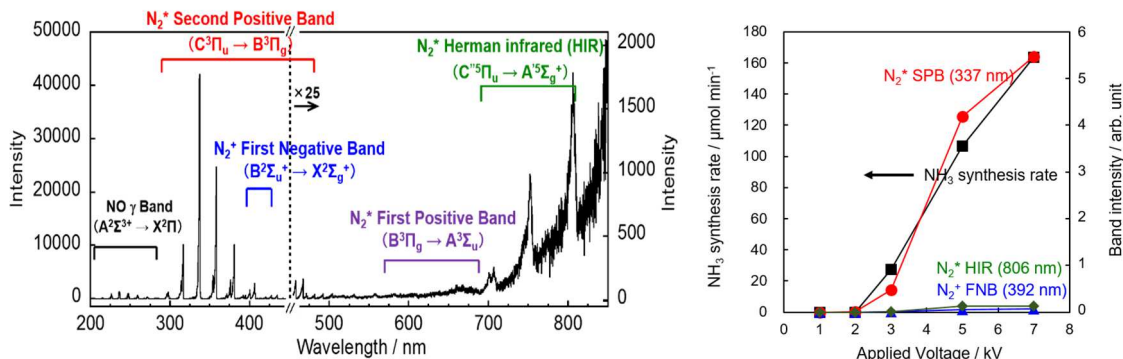


図2. 銅細線電極使用時の $N_2$ プラズマの発光スペクトル(左)およびスペクトル強度と $NH_3$ 生成速度の関連(右)。●発光スペクトル強度(337nm)、■ $NH_3$ 生成速度。

最後に、活性化窒素種の生成量が内部金属電極種によって変化するかどうかを調べた。窒素活性種の発光強度、各窒素種の相対強度、プラズマ発生に必要な電力量は金属種によってそれほど変化しなかった。内部金属電極表面の作用によって活性化窒素種が発生しているのではなく、大気圧非平衡プラズマ発生条件中に分子状窒素を置けばそのプラズマ条件に特有の活性化過程が生じることを示している。逆に言うと、プラズマ発生条件の制御によって活性化窒素種の生成状態をコントロールできることになり、プラズマ発生法の最適化、低電力化を図れる可能性が示唆された。

(2) 内部電極として金属細線を用いた場合の触媒活性<sup>2),3)</sup>

本研究の途上で、電極表面が黒くなり、反応管内部に赤褐色の銅が付着すること、同時に触媒活性が徐々に向上することに気づいた。一方、使用前の内部電極表面は平滑であったが、使用後は凹凸の多い形状に変化していることが明らかになった。内部電極表面の銅原子がプラズマ照射によって反応管内壁に転移し、金属表面が触媒として機能していると考えた。この推定の妥当性を確認するため、無電解めっきで反応管内壁に銅をあらかじめ付着させてから実験したところ $NH_3$ 収率が向上した。これらの結果に基づいて、内部電極の大表面積化のために細線状電極を用いたところ、 $NH_3$ 収率が大きく向上した。

細線電極金属の $NH_3$ 生成活性は図3に示したように金属種に大きく依存した。活性制御因子を解明するため量子化学計算を試みた。計算にはDFT計算プログラムGaussian09を用い、金属表面の最小単位として $M_3$ (Mは金属原子)クラスターを考えた。そのクラスター上で生成した $M_3N$ の安定性をDFT計算したところ、図3左の相関が得られた。横軸は $M_3N$ の安定性、縦軸は各金属の初期 $NH_3$ 合成活性を表面積で規格化した値である。 $M_3N$ 中間体が安定であるほど(左側ほど)反応性が低下する相関関係が得られた。

図3左の相関関係は、 $M_3N$ 構造が不安定なほど中間体の反応性が高くなり、 $NH_3$ 生成速度が向上することを示している。次に、水素化された各中間体の安定性を元素ごとに計算した。結果を図3右に示している。この計算ではCASTEPを使用し、金属の無限(111)表面に対して(2x2x3)スーパーセルを用いた。いずれの金属上でもN原子は $M_3$ で構成されるポケット上あるいはその近傍に吸着し、妥当な中間体構造を示した。図3右では便宜上プラズマ活性化された $N_2^*$ の保有

エネルギーの半分（一原子相当分）を反応開始時のエネルギーレベルと仮定している。図から明らかのように、 $M_3N \rightarrow M_3NH \rightarrow M_3NH_2 \rightarrow M_3 + NH_3$ の反応経路で窒素原子が $NH_3$ に転換される場合、Ag、Au、Cu、Pt、Pd では中間体のエネルギーレベルが一度も $NH_3$ よりも下になることがない。これに対し、Ti、Fe、Mo、W、Al 等では中間体のエネルギーレベルが $NH_3$ よりもかなり下になり（＝中間体が安定化してしまい）、 $NH_3$ として脱離させるためには相当のエネルギーを供給する必要があることがわかる。現時点で各金属の触媒活性を定性的に説明できるルートを提案できていると考えている。

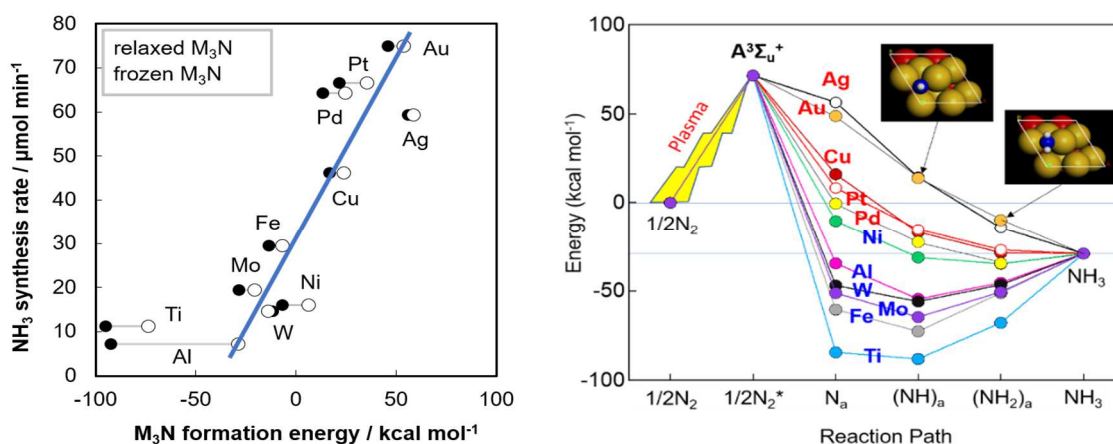


図 3.  $M_3N$  形成エネルギーと  $NH_3$  生成速度の関係(左)および金属表面での窒素原子の水素化反応のエネルギープロファイル(右)。それぞれ Gaussian09 および CASTEP で計算。

### (3) 金属酸化物をプラズマ空間に充填した場合の触媒活性<sup>4)</sup>

金属酸化物をプラズマ空間中で  $NH_3$  合成触媒として利用する試みはこれまでも報告されている<sup>5)</sup>。本研究では  $N_2^*$  の反応に適した金属酸化物触媒は従来の HB 法触媒 ( $N_2$  を活性化できる触媒) とは大きく異なっていると考え、Ni/ $Al_2O_3$ <sup>5)</sup> に焦点を当てることにした。触媒は含浸法で調製し、空气中 773–1073K で焼成した。Ni の担持量は特に断らない限り 5wt% とした。担体には  $\gamma-Al_2O_3$  を用いた。担体として用いた  $\gamma-Al_2O_3$  上でも有意の  $NH_3$  生成が認められた。この活性は Ni 担持によりさらに向上した。これに対し、Fe や Ru の担持は合成活性を大きく低下させた。アルミナの結晶系や表面積は触媒活性にそれほど影響しなかった。また、Ni の担持量を 0.5–20wt% の範囲で変化させたが、活性はほぼ一定であった。XRD、XPS、触媒色の変化から Ni は  $NiO$  および  $NiAl_2O_4$  として  $Al_2O_3$  上に担持された後、プラズマ反応中に前者が金属 Ni に還元され活性点を形成していると結論した。

### (4) 速度論的検討<sup>1), 2), 4)</sup>

上記触媒上で速度論的検討を行った。まず  $H_2$  と  $N_2$  の分圧に対する依存性を測定した（依存性をそれぞれ  $\alpha$ 、 $\beta$  で示す）。 $H_2/N_2=3$  が  $NH_3$  合成の量論比であるが、ほとんどの触媒上で  $H_2/N_2=0.5-2$  で  $NH_3$  生成速度が最大になった (Ni/ $Al_2O_3$  の例を図 4 左に示す)。 $H_2$  に比べて  $N_2^*$  (まだ二重結合) の反応への関与が困難であり、 $N_2$  濃度が相対的に高いところで最適値が現れるのであろう。金触媒では  $\alpha(Au)=1.50$ 、 $\beta(Au)=1.46$  であった。銅が反応管内壁に飛散付着した後は  $\alpha^s(Cu)=0.77$ 、 $\beta^s(Cu)=1.16$  であった。金と銅で次数がかなり異なることが特徴的である。一方、酸化物では  $\alpha(\gamma-Al_2O_3)=1.59$ 、 $\beta(\gamma-Al_2O_3)=0.82$ 、 $\alpha(Ni/\gamma-Al_2O_3)=1.12$ 、 $\beta(Ni/\gamma-Al_2O_3)=0.99$  であった。これらの値は HB 法の鉄触媒の  $\alpha(Fe)=1.5-2.2$ 、 $\beta(Fe)=0.9-1.2$  あるいは Ru-Cs/MgO 触媒の  $\alpha(Ru-Cs)=-0.43$ 、 $\beta(Ru-Cs)=1.0$  と大きく異なっていた。これらの相違がどのような原因によるものかは、今後の詳細な反応機構解析と併せて解明する必要がある。

プラズマ反応部の滞留時間と  $NH_3$  生成速度との関係を定量的に測定し、 $NH_3$  生成速度  $r_0$  と  $NH_3$



分解速度定数  $k_d$  を求めた ( $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$  の例を図 4 右に示す)。金触媒では  $r_0(\text{Au})=0.212 \text{ min}^{-1}$ 、 $k_d(\text{Au})=8.4 \text{ min}^{-1}$  であった。銅触媒では  $r_0^*(\text{Cu})=0.268$ 、 $k_d^*(\text{Cu})=8.9$  が得られた。一方、酸化物触媒では  $r_0(\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3)=0.73$ 、 $k_d(\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3)=8.4$ 、 $r_0(\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3)=1.10$ 、 $k_d(\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3)=8.4$  であった。酸化物系触媒の  $\text{NH}_3$  生成速度  $r_0$  がかなり大きい。また、プラズマ法アンモニア合成における  $\text{NH}_3$  の分解速度定数はほとんど一定であることも結論できる。これはアンモニア分解が金属電極を触媒として進んでいるのではなく、プラズマ気相で進行していることを示している。この考察は  $\text{NH}_3$  分解反応をプラズマ条件下で測定した結果<sup>3)</sup>からも支持された。ガス流速を落として  $\text{NH}_3$  が生成しやすいように反応させると、窒素基準  $\text{NH}_3$  収率は常温常圧で 6.3% に達した (図 4 右)。

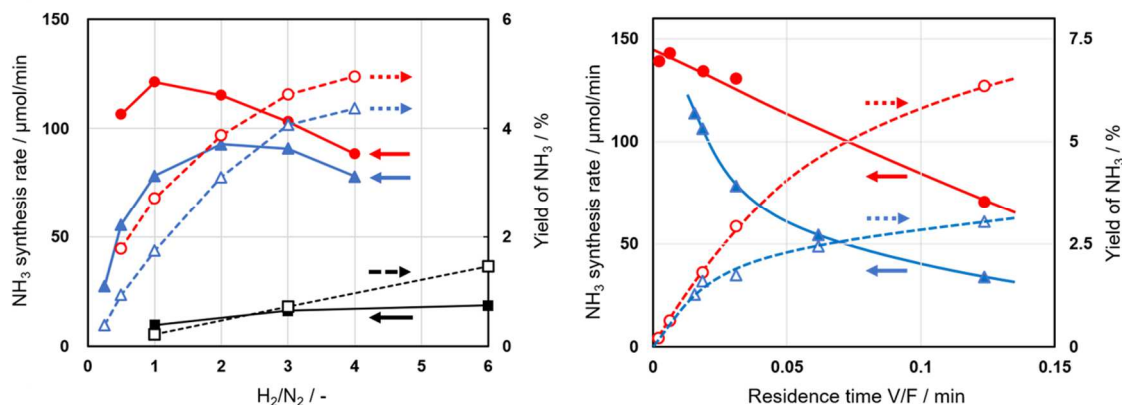


図 4.  $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  触媒上での  $\text{NH}_3$  生成反応の  $\text{H}_2/\text{N}_2$  比依存性(左)、触媒層滞留時間依存性(右)。四角: Cu 金属棒のみ、三角:  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、丸:  $\text{Ni}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。

#### (5) まとめ

以上、旧来型のプラズマ法アンモニア合成法を変革し、活性窒素種の選定、活性種発生法の工夫、内部電極金属触媒の機能、酸化物触媒の充填効果を検討した。本研究により、常温常圧で非平衡論的アンモニア合成<sup>6)</sup>が可能で、活性化中間体は  $\text{N}_2^*$  と考えられること、活性序列は  $\text{Au} > \text{Pt} > \text{Pd} > \text{Ag} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Mo} > \text{Ni} > \text{W} > \text{Ti} > \text{Al}$  の順であることが明らかになった。アルミナ系触媒あるいはそれに Ni を担持した触媒はさらに高い活性を示した。これらの触媒では滞留時間が長い場合、ワンパスでの  $\text{NH}_3$  収率は 6% 超に達し、常温常圧の  $\text{NH}_3$  収率としてはこれまでにない高い値が得られた。今後は金属酸化物への第二成分添加等による  $\text{NH}_3$  合成活性の向上、反応機構の詳細な解析等が必要である。また、プラズマ法アンモニア合成の最大の泣き所である電力消費量の低減についても  $\text{N}_2$  活性化機構の効率化を通じて解決を図る必要がある。

#### 引用文献

- 1) Aihara, K.; Iwamoto M. et al., *M. Chem. Commun.*, **2016**, 52, 13560.
- 2) Iwamoto, M.; Akiyama, M. et al., *T. ACS Catal.* **2017**, 7, 6924.
- 3) Akiyama M.; Iwamoto, M. et al., *Inter. J. Hydrogen Energy*, **2018**, 43, 14493.
- 4) Iwamoto, M; Horikoshi, M. et al., *Catalysts*, **2020**, 10, 590.
- 5) 例えば, Zheng, W.; *Appl. Catal. B: Env.*, **2008**, 80, 98. Muroyama, H. et al., *Appl. Catal. A: Gen.*, **2012**, 443, 119. Sato, K. et al., *Inter. J. Hydrogen Energy*, **2017**, 42, 6610.
- 6) Mehta, P.; Hicks, J. C. et al., *ACS Catal.*, **2020**, 10, 6726.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Akiyama, K. Aihara, T. Sawaguchi, M. Matsukata, M. Iwamoto	4. 巻 43
2. 論文標題 Ammonia decomposition to clean hydrogen using non-thermal atmospheric-pressure plasma	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 14493-14497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2018.06.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Deguchi, H. Yamano, S. Takenouchi, M. Iwamoto	4. 巻 8
2. 論文標題 Enhancement of catalytic activity of Pd-PVP colloid for direct H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> synthesis from H <sub>2</sub> and O <sub>2</sub> in water with addition of 0.5 atom% Pt or Ir	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Catalysis Science & Technology	6. 最初と最後の頁 1002-1015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7cy01890h	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Iwamoto, A. Shimatai, M. Honda, M. Matsukata	4. 巻 6
2. 論文標題 Depolymerization of Cellulose with Superheated Steam: Remarkable Obstruction Effects of Sodium and High Reactivity of Crystalline Cellulose	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Sustainable Chem. Eng.	6. 最初と最後の頁 6570-6576
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssuschemeng.8b00375	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岩本正和, 松方正彦	4. 巻 6
2. 論文標題 バイオエタノールを原料とする新しいプロピレン接触合成法の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ファインケミカル	6. 最初と最後の頁 7-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Iwamoto, M. Akiyama, K. Aihara, T. Deguchi	4. 巻 7
2. 論文標題 Ammonia Synthesis on Wool-Like Au, Pt, Pd, Ag, or Cu Electrode Catalysts in Nonthermal Atmospheric-Pressure Plasma of N <sub>2</sub> and H <sub>2</sub>	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Catal.	6. 最初と最後の頁 6924 - 6929
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.7b01624	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Iwamoto, K. Aihara, R. Hashimoto, M. Horikoshi, T. Sawaguchi, M. Matsukata	4. 巻 投稿中
2. 論文標題 Higher activity of Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> over Fe/ or Ru/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> for catalytic ammonia synthesis in non-thermal atmospheric-pressure plasma of N <sub>2</sub> and H <sub>2</sub>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Catalysts	6. 最初と最後の頁 590-603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/catal10050590	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Iwamoto, K. Tanaka, B. Suzumura, K. Kitazume, H. Suzuki, H. Teduka	4. 巻 11
2. 論文標題 Conversion of nitrogen oxide to ammonia using propene in the presence of excess oxygen and water vapor over TiO <sub>2</sub> -supported Ag catalysts: Converting harmful exhaust gas into resources	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Catal.	6. 最初と最後の頁 投稿中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩本正和	4. 巻 68
2. 論文標題 規則性ナノ多孔体におけるNO除去活性点の創出	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 1 - 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 出口隆、岩本正和	4. 巻 50
2. 論文標題 反応機構と工業プロセスに関わる反応動力学	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ファインケミカル	6. 最初と最後の頁 55 - 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩本正和	4. 巻 1
2. 論文標題 プラズマ触媒反応によるアンモニアの常温常圧合成	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 有機ハイドライド、アンモニアの合成と利用プロセス	6. 最初と最後の頁 263-270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 M. Iwamoto, M. Akiyama, K. Aihara, T. Deguchi
2. 発表標題 Wool-like Au, Pt, Pd, Ag, or Cu electrodes as active catalysts for ammonia synthesis in nonthermal atmospheric-pressure plasma of N <sub>2</sub> and H <sub>2</sub>
3. 学会等名 TOCAT 8 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 相原敬吾、堀越正孝、澤口登美子、松方正彦、岩本正和
2. 発表標題 プラズマ法アンモニア合成におけるNi/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の高い触媒活性
3. 学会等名 第122回触媒討論会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 岩本正和
2. 発表標題 ハーバーボッシュ法の革新を目指して - 新しいアンモニア合成法実現へ向けての私たちの試行錯誤
3. 学会等名 物理化学トークショー in 愛媛 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Iwamoto, K. Aihara, R. Hashimoto, M. Horikoshi, T. Sawaguchi, M. Matsukata
2. 発表標題 Higher activity of Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> over Fe/ and Ru/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> for catalytic NH <sub>3</sub> synthesis in non-thermal atmospheric-pressure plasma of N <sub>2</sub> and H <sub>2</sub>
3. 学会等名 EuropaCat 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Akiyama, K. Aihara, M. Tanaka, T. Deguchi, M. Iwamoto
2. 発表標題 Catalytic activity of metal electrodes for ammonia synthesis from N <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> in atmospheric-pressure non-thermal plasma
3. 学会等名 6th Korea-Japan Symposium on Catalysis (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Akiyama, K. Aihara, T. Deguchi, M. Tanaka, M. Iwamoto
2. 発表標題 Catalytic ammonia synthesis from N <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> on metal electrodes in atmospheric-pressure non-thermal plasma
3. 学会等名 Europacat 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩本正和
2. 発表標題 外部アンモニアの供給を必要としないアンモニア選択還元法の開拓
3. 学会等名 化学工学会第49秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩本正和
2. 発表標題 アンモニアフリー脱硝はどこまでできたか
3. 学会等名 文部科学省元素戦略プロジェクト研究拠点形成型 第11回公開シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Iwamoto, M. Akiyama, K. Aihara, T. Deguchi
2. 発表標題 Wool-like Au, Pt, Pd, Ag, or Cu electrodes as active catalysts for ammonia synthesis in nonthermal atmospheric-pressure plasma of N <sub>2</sub> and H <sub>2</sub>
3. 学会等名 Tocat8（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ガスの製造装置	発明者 岩本正和、相原啓吾、橋本、加藤讓	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2017-039631	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------