

# 研究報告書

## 「ゼロエミッションを実現するアンモニア燃焼触媒の物質設計と応用」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 25 年 11 月～平成 29 年 3 月

研究者: 日隈 聡士

### 1. 研究のねらい

本研究では、NH<sub>3</sub> をカーボンフリーな石油代替燃料として位置づけ、次世代燃焼器へ広く利用する上で重要となる燃焼触媒の材料設計を確立する。希薄 NH<sub>3</sub>-空気混合気を低温から触媒表面によって反応開始し、安定な気相希薄燃焼状態を誘発するために、高活性と高耐熱性を併せもつ材料を創出する。Thermal NO<sub>x</sub> および Fuel NO<sub>x</sub> の生成を抑え、N<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O のみ生成するゼロエミッションを達成するための貴金属フリーの触媒を設計する。作動状態にある触媒の局所構造を解析し、触媒作用を詳細に解明するとともに、触媒設計にフィードバックしてさらなる高性能化を図る。従来には研究例がほとんどない NH<sub>3</sub> 燃焼触媒の基礎から応用に至る系統的な物質設計の学理を確立して、将来の NH<sub>3</sub> 燃料構想を実現する礎となる知見を創出し、再生可能エネルギー高度利用社会の実現に貢献する。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

化石燃料の枯渇や地球温暖化への対策、さらには原子力発電代替をも視野に入れた再生可能エネルギー高度利用社会への移行は、先進諸国に共通する最重要課題である。H<sub>2</sub> はクリーンな二次エネルギーの候補であるが、液化が困難であるため、貯蔵・輸送し易い液体キャリアへの変換が必須となる。中でも Haber-Bosch 法による大規模製造が適用可能な NH<sub>3</sub> は H<sub>2</sub> 密度が高い上、液化が容易である(1 MPa 未満、室温)。

一方、本研究では H<sub>2</sub> エネルギーキャリアである NH<sub>3</sub> の燃料としての高い可能性に注目した。NH<sub>3</sub> は燃焼熱 380 kJ·mol<sup>-1</sup> の可燃性ガスで、ガソリンや軽油等の代替燃料として自動車、航空機、船舶、火力発電や製鉄所等、内燃・外燃機関で幅広く利用できる。NH<sub>3</sub> 燃焼によって生成する Thermal NO<sub>x</sub> 濃度はガソリン燃料燃焼によって生成する濃度とほぼ等しい。一方、短所としては Fuel NO<sub>x</sub> を生成する危険性が高く、燃焼性ならびに燃焼速度が低い点が挙げられる。

以上の欠点を補い、NH<sub>3</sub> のクリーン燃料としての可能性を高めるために触媒燃焼法の適用を着想した。触媒燃焼とは予混合した燃料-空気混合物を触媒層に供給して生じる表面反応によって安定化された気相希薄燃焼状態を言い、体積燃焼速度を高め、NO<sub>x</sub> 生成を劇的に低減する画期的な技術として天然ガス燃料等を対象に 1990 年代までに活発に研究された。しかしながら、NH<sub>3</sub> 燃料に対する研究例は皆無であり、触媒設計には基礎的知見の集積が望まれる。特に Thermal NO<sub>x</sub> 濃度は低くても、Fuel NO<sub>x</sub> を生成するリスクがあるため、これを回避する触媒設計が強く求められる。本研究では、これまでの触媒設計に関する知見と技術を総動員し [5. 論文 1.,2.参照]、新しい発想を取り入れて高性能な NH<sub>3</sub> 燃焼触媒の材料設計に挑戦する。

以上より本研究で開発する燃焼触媒の目標性能を『NH<sub>3</sub> 燃焼開始温度: 200 °C 以下』、『N<sub>2</sub>O・NO 選択率: 2% 以下』、『耐久性・耐熱性: 900 °C × 500 h 処理後も性能維持』とした。

## (2) 詳細

### 研究テーマ A 『遷移金属酸化物の NH<sub>3</sub> 触媒燃焼特性評価』

NH<sub>3</sub> の低温燃焼と NO<sub>x</sub> および N<sub>2</sub>O の生成抑制に有効な遷移金属酸化物を探索した。金属酸化物の NH<sub>3</sub> 触媒燃焼特性は、固定床流通反応装置を用いて昇温法で測定した(10 °C·min<sup>-1</sup>, 1.0% NH<sub>3</sub>, 0~18% O<sub>2</sub>, He balance, 0.1 MPa, W/F = 5.0 × 10<sup>-4</sup> g·min·cm<sup>-3</sup>)。酸素過剰率は  $\lambda = (\rho_{O_2}/\rho_{NH_3})_{exp.}/(\rho_{O_2}/\rho_{NH_3})_{stoichiom.}$  で表した。

量論比( $\lambda = 1$ )における触媒を用いない NH<sub>3</sub> 燃焼反応は、約 500 °C から開始したが、モデル触媒の Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いると約 270 °C から反応が開始した。主な遷移金属酸化物の NH<sub>3</sub> 燃焼活性を Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と比較すると、Ag<sub>2</sub>O > MnO<sub>2</sub> > Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> > Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > CuO > Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≈ V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> > NiO の序列を示した。得られた NH<sub>3</sub> 転化率が 10% に達する温度(T<sub>10</sub>)を、金属酸化物(M<sub>x</sub>O<sub>y</sub>)から酸素(O)を 1 mol 放出する際のエンタルピー変化( $\Delta H^\circ : M_xO_y \rightarrow M_xO_{y-1} + 1/2O_2$ )に対してプロットした(図 1)。その結果、高活性を示した金属酸化物ほど  $\Delta H^\circ$  は低い傾向にあったことから、NH<sub>3</sub> 燃焼活性は金属-酸素間結合強度に依存すると推定される。すなわち、NH<sub>3</sub> 触媒燃焼は CH<sub>4</sub> 燃焼と同様、Mars-van Krevelen 機構として進行する可能性が示唆される。酸素過剰条件( $\lambda = 24$ )においても、類似の相関が認められた。

一方、生成物選択性については、金属酸化物と Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 触媒のいずれの場合でも、熱力学的予測(N<sub>2</sub> 生成反応)に反して NO の生成が認められた。しかしながら、酸化銅(CuO<sub>x</sub>)の NO 選択率は金属酸化物の中で最も低い値を示した[5. 論文 3. 参照]。

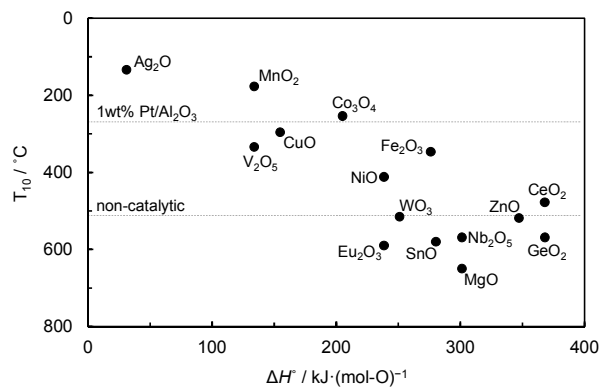


図 1 金属酸化物の NH<sub>3</sub> 燃焼活性(T<sub>10</sub>)とその酸化物(M<sub>x</sub>O<sub>y</sub>)から酸素(O)を 1 mol 放出する際のエンタルピー変化( $\Delta H^\circ : M_xO_y \rightarrow M_xO_{y-1} + 1/2O_2$ )の相関。

### 研究テーマ B 『CuO<sub>x</sub>/10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10A2B)触媒の開発』

高 N<sub>2</sub> 選択性を示した CuO<sub>x</sub> に着目し、種々の担体に担持した CuO<sub>x</sub> の NH<sub>3</sub> 触媒燃焼( $\lambda = 2$ )の活性および生成物選択性を系統的に調べたところ、ホウ酸塩(10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 10A2B)担持 CuO<sub>x</sub> 触媒が他の担持触媒に比べて、高活性と高 N<sub>2</sub> 選択性を示すことを見出した。そこで耐熱性を調べるため、空气中 900 °C × 100 h 処理後(aged)の CuO<sub>x</sub>/10A2B の局所構造と NH<sub>3</sub> 触媒燃焼特性を検討した。

図 2 に CuO<sub>x</sub>/10A2B(aged)の HAADF-STEM/EDX 像を示す。結晶性の高い約 50 nm の 10A2B 上に数 nm のクラスター状粒子が高分散しており、EDX 分析よりその

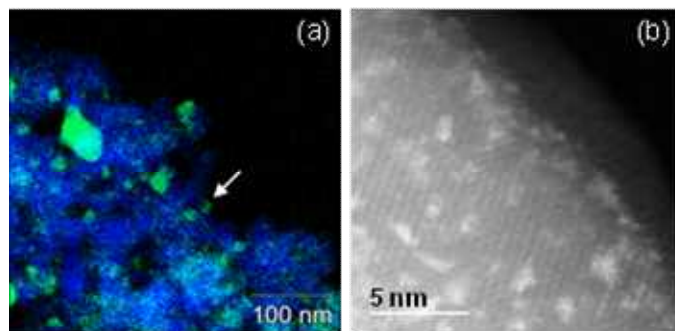


図 2 CuO<sub>x</sub>/10A2B(aged)の(a)EDX 像(青: Al-K, 緑: Cu-L)と(b)白矢印で示す箇所の HAADF-STEM 像。

組成は Cu を含んでいると推定された。XRD および XAFS による構造解析結果を考慮すると、調製後の CuO が熱処理によって 10A2B と固相反応を引き起こし、CuAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>を形成する過程で分散・析出したと推察される。同様な粒子は CuO<sub>x</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(aged)でも認められたが、CuO<sub>x</sub>/10A2B(aged)ではこの他 20 nm 以上に凝集した CuO<sub>x</sub> 粒子も確認された。

表 1 に担体と熱処理前後の担持触媒の触媒特性をまとめて示す。Cu 粒子が微細なほど T<sub>10</sub> が低い傾向が認められ、高分散 CuO<sub>x</sub> が NH<sub>3</sub> 低温燃焼に有効であり、配位不飽和(*cus*)となるため Cu<sup>2+</sup>の割合が減少したと考えられる。高 N<sub>2</sub> 選択率を示した熱処理前後の CuO<sub>x</sub>/10A2B は、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に比べて NH<sub>3</sub> 吸着量が多いのに対して、NO および CO<sub>2</sub> 吸着量は低い値を示した。

表 1 担体と熱処理前後の担持触媒の触媒特性

Catalyst	Phase	T <sub>10</sub> a / °C	T <sub>90</sub> a / °C	Selectivity at T <sub>90</sub> a / %			S <sub>BET</sub> / m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	Reduction temperature b / °C	Cu dispersion c / %	Cu particle size c / nm	Cu <sup>2+</sup> /Cu d / %	Desorbed gas e / mmol·m <sup>-2</sup>		
				N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	NO						NH <sub>3</sub>	NO	CO <sub>2</sub>
10A2B	10A2B	575	819	91	<1	9	78	—	—	—	—	1.5	0.044	0.10
CuO <sub>x</sub> /10A2B	CuO/10A2B	307	474	97	2	1	77	210	27	3.9	55	2.1	0.025	0.07
CuO <sub>x</sub> /10A2B(aged)	CuAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /10A2B	325	536	96	3	1	56	215	11	9.7	66	1.3	0.015	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	536	818	78	<1	22	173	—	—	—	—	1.1	0.054	0.38
CuO <sub>x</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	303	476	92	6	2	149	185	43	2.4	34	1.3	0.050	0.27
CuO <sub>x</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (aged)	CuAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /α, γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	295	450	91	8	1	102	155	56	1.8	37	0.4	0.063	0.11

<sup>a</sup> NH<sub>3</sub> 転化率が 10% および 90% に達する温度。 <sup>b</sup> H<sub>2</sub>-TPR より求めた還元温度。 <sup>c</sup> H<sub>2</sub>-TPR より求めた Cu の分散度と粒子径。 <sup>d</sup> Cu 2p XPS より求めた酸化状態。 <sup>e</sup> NH<sub>3</sub>, NO および CO<sub>2</sub>-TPD より求めた脱離量。

NH<sub>3</sub>-NO-O<sub>2</sub> 反応特性についても調べたところ、熱処理前後の 10A2B がより幅広い温度域で高い NO 転化率を示した。これは NH<sub>3</sub> 燃焼の過程で、NH<sub>3</sub> 酸化によって生成する NO が NH<sub>3</sub> とさらに反応することで高い N<sub>2</sub> 選択率を達成することを示唆する。

一方、N<sub>2</sub>O 生成過程については、NH<sub>3</sub> 酸化反応や NH<sub>3</sub>-NO 反応において、N<sub>2</sub>O は NH(imide) と NO との反応より生成するとこれまで報告されている。in-situ FT-IR を用いて触媒上の NH<sub>3</sub> の吸着形態を調べると、CuO<sub>x</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では NH の存在が認められたが、CuO<sub>x</sub>/10A2B では認められなかったことから N<sub>2</sub>O の生成挙動と一致した。

以上の結果より、担持 CuO<sub>x</sub> 触媒の NH<sub>3</sub> 触媒燃焼の反応機構は図 3 のように推定される。CuO<sub>x</sub> が微細なほど低温燃焼活性が認められたことから、高分散状態の CuO<sub>x</sub> (*cus* Cu) が NH<sub>3</sub> 低温燃焼に有効であると考えられる。NH<sub>3</sub> 燃焼の際に NO を副生するが、未燃の NH<sub>3</sub> とさらに反応することで N<sub>2</sub> へ還元される。CuO<sub>x</sub>/10A2B の場合、高い NH<sub>3</sub> 吸着能と活性な Cu<sup>2+</sup> によって NH<sub>3</sub>-NO 反応を促進して高 N<sub>2</sub> 選択性を達成する。これに対して CuO<sub>x</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の場合、NH<sub>3</sub> の解離吸着によって生成した NH と NO の反応によって N<sub>2</sub>O を生成すると推定される。

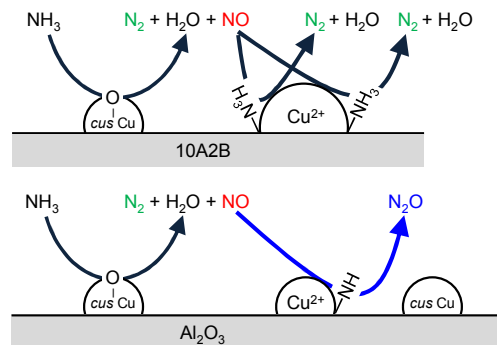


図 3 担持 CuO<sub>x</sub> 触媒の NH<sub>3</sub> 燃焼反応機構。

本テーマ B で開発した CuO<sub>x</sub>/10A2B の触媒性能は、『NH<sub>3</sub> 燃焼開始温度(T<sub>10</sub>): 307 °C』、『T<sub>90</sub> における N<sub>2</sub>O・NO 選択率: 2%・1%』、『耐久性・耐熱性: 900 °C × 500 h 処理後も性能維持』である [5. 論文 4., 特許 1. 参照]。

### 研究テーマ C 『CuO<sub>x</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 触媒の開発』

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系担体に担持した CuO<sub>x</sub>が高 N<sub>2</sub> 選択性、Ag が高活性を示すことを明らかにしたため、NH<sub>3</sub> 低温燃焼と高 N<sub>2</sub> 選択性の両立を目的として CuO<sub>x</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を調製し、その NH<sub>3</sub> 触媒燃焼特性を評価した。

Ag を先に逐次含浸した CuO<sub>x</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> について、HAADF-STEM/EDX 観察した(図 4)。調製後の触媒では CuO<sub>x</sub> と Ag は近接して担体全体に高分散しており、Ag の平均粒子径は 3.2 ± 1.0 nm となった。一方、CuO<sub>x</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(aged)では、Ag は 10 nm 以上に粒子成長し、近接している CuO<sub>x</sub> と Ag の割合は減少した。

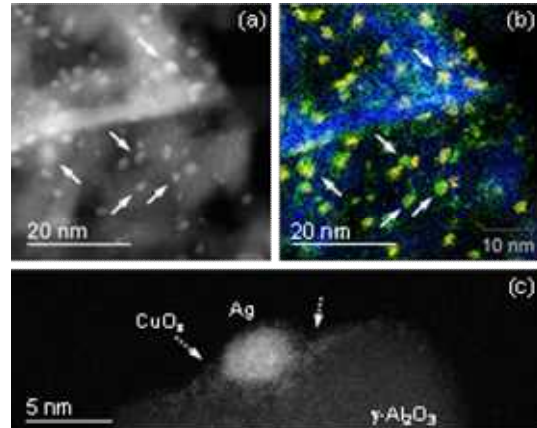


図 4 CuO<sub>x</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の (a) HAADF 像, (b) EDX 像 (青: Al-K, 緑: Cu-L, 黄: Ag-L) と (c) 高倍率で観察した HAADF 像。

調製後の CuO<sub>x</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は、CuO<sub>x</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> より高活性を示したが、Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> よりは低活性となった。一方、熱処理後では S<sub>BET</sub> の著しい低下と Ag 粒子成長のため活性劣化した。NH<sub>3</sub> 燃焼活性と XAFS より求めた Ag-Ag の配位数の相関について着目すると、高活性を示した触媒ほど配位数は低い傾向にあった。すなわち、高分散な Ag が NH<sub>3</sub> 低温燃焼を促進すると推察される。中でも、CuO<sub>x</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が高活性(T<sub>10</sub>: 212 °C)と高 N<sub>2</sub> 選択性(98%)を両立した。

図 5 に調製後の触媒について、N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O および NO 選択率の反応温度依存性を示す。CuO<sub>x</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の NH<sub>3</sub> 転化率曲線は、CuO<sub>x</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> より低温側にシフトし、Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に類似している。CuO<sub>x</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は NH<sub>3</sub> 燃焼が完結

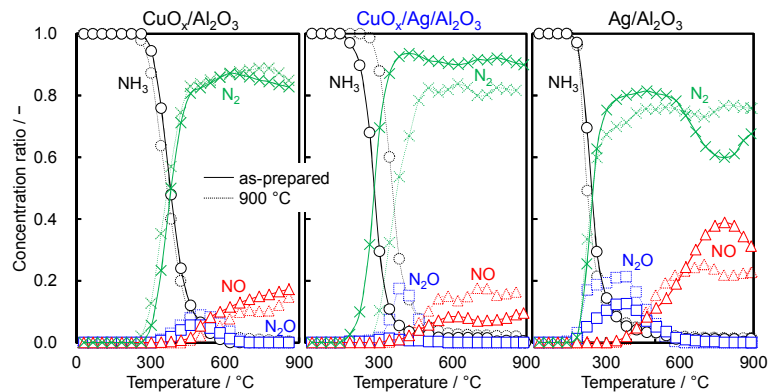


図 5 熱処理前後の担持触媒の NH<sub>3</sub> 触媒燃焼反応特性. 反応条件: 1.0% NH<sub>3</sub>, 1.5% O<sub>2</sub>, λ = 2, He balance, W/F = 5.0 × 10<sup>-4</sup> g·min·cm<sup>-3</sup>.

する温度以上で NO が生成するが、CuO<sub>x</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は NH<sub>3</sub> 燃焼完結後も NO 生成を抑制し、高 N<sub>2</sub> 選択性を示した。このような特性は 900 °C 熱処理後と物理混合触媒で認められなかったことから、高い N<sub>2</sub> 選択性を達成するためには CuO<sub>x</sub> と Ag は近接して担体全体に高分散している必要があると推察された。

本テーマ C で開発した CuO<sub>x</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の触媒性能は、『NH<sub>3</sub> 燃焼開始温度(T<sub>10</sub>): 212 °C』、『T<sub>90</sub>における N<sub>2</sub>O・NO 選択率: 2%・1%以下』、『耐久性・耐熱性: 800 °C × 100 h 処理後も性能維持』である。

以上のように本研究によって、ゼロエミッションを実現するために必要な物質設計指針を得ることができ、その指針に従って触媒を最適化できれば更に高性能な NH<sub>3</sub> 燃焼触媒を創出できると考えられる[5. 論文 5, 特許 2. 参照]。

### 3. 今後の展開

これまで得られてきたゼロエミッションを実現するための物質設計指針に基づき、今後も高性能な NH<sub>3</sub> 燃焼触媒の開発を進める。触媒成分としては CuO<sub>x</sub> を基軸として、第二成分に Ag 等の添加と組成比の最適化を図り、特異な相乗効果を発現させる。担体成分としては Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> をベースに酸性質を高めるために有効な複合酸化物を適用し、その高比表面積・多孔化を検討する。

一方、開発した触媒の応用については、従来型のマイクロガスタービンだけでなく、特許を取得した『NH<sub>3</sub> 燃焼熱を利用した NH<sub>3</sub> 分解 H<sub>2</sub> 製造法』への用途を提案した。今後、実用化するために燃焼分野の研究者を含む産学連携によって触媒燃焼器の開発に向けた研究に着手し、世界を先導する画期的なエネルギー技術として展開する。特に JST 主体の『新技術説明会』や『マッチングプランナー』等を通して、積極的に共同研究に繋げる。

加えて、H<sub>2</sub>O を含まない NH<sub>3</sub> の触媒燃焼のみならず、H<sub>2</sub>O に溶解させた NH<sub>3</sub> エネルギーキャリアを想定した触媒燃焼反応についても着手する。また、NH<sub>3</sub> 燃料電池等からの排出が想定される slip NH<sub>3</sub> 酸化(浄化)触媒へ応用についても検討する。

以上のように本研究で得られた成果は、燃料用途としての NH<sub>3</sub> 利用だけでなく本領域の戦略目標である『エネルギーキャリア(NH<sub>3</sub>)の利用のための革新的基盤技術の創出』に貢献するものとなり、今後も基礎から応用に至る一貫した研究を進める。

### 4. 評価

#### (1) 自己評価

(研究者)

研究目的の達成状況: 本研究で掲げた目標性能の『NH<sub>3</sub> 燃焼開始温度: 200 °C 以下』、『N<sub>2</sub>O・NO 選択率: 2% 以下』、『耐久性・耐熱性: 900 °C × 500 h 処理後も性能維持する』を概ね満足する新規 NH<sub>3</sub> 燃焼触媒の創出に成功したと考える。課題は残されているが、本研究でゼロエミッションを実現するために必要な物質設計指針を得ることができ、その指針に従って触媒を最適化すれば更に高性能な NH<sub>3</sub> 燃焼触媒を創出できると考えられる。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況): 研究費は NH<sub>3</sub> 触媒燃焼反応特性を評価するために必要なガス分析器を中心に執行した。複数の反応特性評価システムを構築することにより、研究の進捗を高めることができた。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果(今後の見込みを含む): 本研究で得られた成果は、燃料用途としての NH<sub>3</sub> 利用だけでなく、本領域の戦略目標である『エネルギーキャリア(NH<sub>3</sub>)の利用のための革新的基盤技術の創出』に貢献するものとなった。今後も基礎から応用に至る一貫した研究を進め、先進諸国に共通する最重要課題である再生可能エネルギー高度利用社会への構築に向けて本研究を進める。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

本研究ではエネルギーキャリアとして注目される NH<sub>3</sub> の燃料としての高い可能性に注目し、クリーンな燃焼の可能性を高めるために触媒燃焼法の適用を着想した。これまでアンモニア燃焼触媒に関する研究例が少ない中、本研究では高性能な NH<sub>3</sub> 燃焼触媒の材料設計指針を

明らかにした。燃焼触媒の開発を低温での NH<sub>3</sub> 燃焼開始、低 N<sub>2</sub>O・NO 生成量、耐久性・耐熱性という視点から評価した。数種の遷移金属酸化物触媒では貴金属より高い NH<sub>3</sub> 燃焼活性を示すことが見出された。また酸化銅(CuO<sub>x</sub>)が低い NO 選択率を示したことから、種々の担体に担持した CuO<sub>x</sub> の NH<sub>3</sub> 触媒燃焼(空燃比 λ = 2)の活性および生成物選択性を系統的に調べたところ、ホウ酸塩(10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・2B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 10A2B)担持 CuO<sub>x</sub> 触媒が他の担持触媒に比べて、高活性と高 N<sub>2</sub> 選択性を示すことを見出した。CuO<sub>x</sub>/10A2B の触媒性能は、NH<sub>3</sub> 燃焼開始温度、低い N<sub>2</sub>O 及び NO 生成量、十分な耐熱性という点で優れていた。さらに高い触媒性能を有する CuO<sub>x</sub>/Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を開発した。以上のように本研究によって、ゼロエミッションを実現するために必要な物質設計指針を得ることができ、さらに高性能な NH<sub>3</sub> 燃焼触媒の活性の要因を明確にした点は重要である。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. <u>Satoshi Hinokuma</u> , Hayato Kogami, Noriko Yamashita, Yasuo Katsuhara, Keita Ikeue, Masato Machida Subnano-particle Ge catalyst prepared by pulsed arc-plasma process <i>Catalysis Communications</i> , Vol. 54, 81–85 (2014).
2. <u>Satoshi Hinokuma</u> , Noriko Yamashita, Yasuo Katsuhara, Hayato Kogamia, Masato Machida CO oxidation activity of thermally stable Fe–Cu/CeO <sub>2</sub> catalysts prepared by dual-mode arc-plasma process <i>Catalysis Science &amp; Technology</i> , Vol. 5, 3945–3952 (2015) <b>Inside Front Cover</b> .
3. <u>Satoshi Hinokuma</u> , Hiroki Shimanoe, Shun Matsuki, Michihisa Kawano, Yusuke Kawabata, Masato Machida Catalytic Activity and Selectivities of Metal Oxides and Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> for NH <sub>3</sub> Combustion <i>Chemistry Letters</i> , Vol. 45, 179–181 (2016).
4. <u>Satoshi Hinokuma</u> , Shun Matsuki, Yusuke Kawabata, Hiroki Shimanoe, Saaya Kiritoshi, Machida Masato Copper Oxides Supported on Aluminium Oxide Borates for Catalytic Ammonia Combustion <i>The Journal of Physical Chemistry C</i> , Vol. 120, 24734–24742 (2016).
5. <u>Satoshi Hinokuma</u> , Yusuke Kawabata, Shun Matsuki, Hiroki Shimanoe, Saaya Kiritoshi, Masato Machida Local Structures and Catalytic Ammonia Combustion Properties of Copper Oxides and Silver Supported on Aluminum Oxides <i>The Journal of Physical Chemistry C</i> , Vol. 121, 4188–4196 (2017).

### (2) 特許出願

研究期間累積件数：2 件

1.  
発 明 者： 日隈 聡士, 町田 正人

発明の名称: アンモニア燃焼触媒の製造方法、及びアンモニア触媒燃焼によって生成する熱の利用方法

出願人: 熊本大学

出願日: 2015/8/6

出願番号: 特願 2015-156425

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

<招待講演>

1.

発表者: 日隈 聡士

題目: 資源およびエネルギー問題を解決する高分散担持金属触媒の物質設計

学会名: 第4回九州若手セラミックフォーラム & 第44回窯業基礎九州懇話会

発表日: 2014/9

2.

発表者: Satoshi Hinokuma

題目: Ammonia as a Green and Sustainable Fuel

学会名: WPI-I<sup>2</sup>CNER-EnMaCh, Joint International Symposium,

発表日: 2016/2

<受賞>

1.

受賞名: XAFS 夏の学校 2015 ポスター賞

受賞者: 吉田 右, 狩野 旬, 押目 典宏, 日隈 聡士, 加藤 和男, 新田 清文, 水牧 仁一朗, 池田 直, 藤井 達生, 大久保 智子, 上田 剛慈

題目: 強誘電体と接合した金属微粒子の局所構造解析

受賞日: 2015/9

2.

受賞名: 熊本大学 研究活動表彰

受賞者: 日隈 聡士

題目: ゼロエミッションを実現するアンモニア燃焼触媒の物質設計と応用

受賞日: 2015/11, 2016/11

3.

受賞名: 第117回触媒討論会 触媒学会優秀ポスター発表賞

受賞者: 川畑 悠介, 松木 駿, 島ノ江 明生, 日隈 聡士, 町田 正人

題目:  $10\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$  担持酸化銅の局所構造とアンモニア触媒燃焼特性

受賞日: 2016/3

4.

受賞名: 2016 Joint RCBJSF-IWRF conference, Young Scientist Award

受賞者: Tasuku Yoshida, Jun Kano, Norihiro Oshime, Satoshi Hinokuma, Yusuke Tamenori, Kazuo Kato, Kiyofumi Nitta, Masaichiro Mizumaki, Naoshi Ikeda, Tatsuo Fujii, Tomoko Okubo, Takeji Ueda

題 目: Valence Anomaly of Palladium Oxide Particles on BaTiO<sub>3</sub>  
受 賞 日: 2016/6

5.  
受 賞 名: The 55th Symposium on Basic Science of Ceramics, Best Presentation Award  
受 賞 者: Satoshi Hinokuma  
題 目: Local structures and catalytic ammonia combustion properties of copper oxides supported on aluminium oxide borates  
受 賞 日: 2017/1

<著作物>

1.  
著 者: 日隈 聡士  
題 目: アークプラズマ法を用いる高分散担持触媒の設計  
雑 誌 名: Catalysts & Catalysis, Vol. 58, No. 3, 127-130 (2016).

2.  
著 者: 日隈 聡士  
題 目: 高窒素選択性を示すアンモニア燃焼触媒の開発  
雑 誌 名: 化学工業 6 月号 , Vol. 67, 28-34 (2016).