

LDHs 構造を有するメタネーション触媒による 耐水性向上の研究

Enhancement of Water Resistance by Methanation Catalysts with LDHs Structure

米田 英昭¹

Hideaki YONEDA

飯嶋 洋平¹

Yohei IJIMA

柳澤 和貴¹

Kazuki YANAGISAWA

吉田 潤平¹

Junpei YOSHIDA

要 旨

ABSTRACT

合成メタン製造プロセスの高効率化を目指し、水蒸気とCO₂の共電解反応から得られた合成ガスをメタン化する触媒を新たに開発し原料ガス中における水蒸気の許容割合、すなわち耐水性の検討をおこなった。流通法による活性評価の結果、層状複水酸化物を利用したNiAl-LDHsは0.1 MPa、300℃の条件でCOとH₂からなる合成ガスからメタンを生成する際に高い触媒反応性を示す結果が得られた。また、共電解リアクタと組み合わせた合成メタン製造プロセスで懸念される水蒸気を含む合成ガスのメタン化反応を実験し、水蒸気が20%含まれる場合までは、含まない場合と同等のCO転化率とCH₄選択率を維持し、従来の金属担持触媒に対して優位性をもつことを確認した。

In order to enhance the efficiency of the synthetic methane production process, the authors developed an innovative catalyst that converts synthesis gas (syngas) obtained from the co-electrolysis reaction of water vapor and CO₂ into methane, and studied the allowable proportion of water vapor in the source gas, i.e., water resistance. Evaluation of the activity using the continuous-flow method showed that NiAl-LDHs utilizing layered double hydroxides exhibited higher catalytic reactivity for the generation of methane from syngas consisting of CO and H₂ at 0.1 MPa and 300°C. In addition, the authors experimented with the methane conversion reaction of syngas containing water vapor, which is an issue in the synthetic methane production process, when combined with a co-electrolysis reactor. The results showed that when up to 20% water vapor was present, CO conversion and CH₄ selectivity were equivalent to cases without water vapor, and the catalyst exhibited enhanced performance compared to the conventional metal-supported catalysts.

1. まえがき

近年、二酸化炭素(CO₂)を有用な化学物質に変換することは、二酸化炭素の分離回収と有効利用を支える観点から注目されている⁽¹⁾。その中でも、ガス燃料となる合成メタンの製造については国内外で注目されており、日本国内においては、経済産業省が主導するメタネーション事業やガス会社、自動車関連会社でも取組がすすめられている⁽²⁾。

合成メタンの生成方法には大きく三種類あり、一つはバイオガス由来のCO₂からメタンを製造する手法、残り二つ

はPower to Gas(P2G)によるメタン製造(メタネーション)技術である。P2Gの一つ目は、Fig. 1(a)で示す大気や工場排ガス等から回収したCO₂と常温の水を電解して得られる水素(H₂)を原料として、触媒を用いた熱化学反応でメタンを製造するサバティエ反応(Sabatier reaction)である。二つ目は、Fig. 1(b)で示すCO₂と高温の水蒸気(H₂O)の同時電解反応である共電解(Co-electrolysis)により合成ガス(Syngas)すなわち一酸化炭素(CO)とH₂の混合物を得て、この合成ガスを原料に触媒を用いた熱化学反応でメタンを製造する革新的メタネーションと呼ばれる手法である⁽³⁾。

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: hideaki_yoneda@jp.honda

本研究では反応経路以外のエネルギー消費が少なく、高効率なメタン製造が期待できる革新的メタネーションの検討を進めている⁽⁴⁾。

革新的メタネーションの具体例として、Fig. 2の破線内に示すシステムを検討している⁽⁴⁾。このシステムは、最終目的物であるメタンを生成するために、上流に高い電解効率が期待できる固体酸化物型電解セル (Solid Oxide Electrolysis Cell: SOEC) を積層した共電解リアクタを備え、下流にメタネーションで発生する熱を有効利用できる熱化学式リアクタ (メタネーションリアクタ) を備えており、共電解リアクタで得られた合成ガスをメタンに変換する構成となっている。

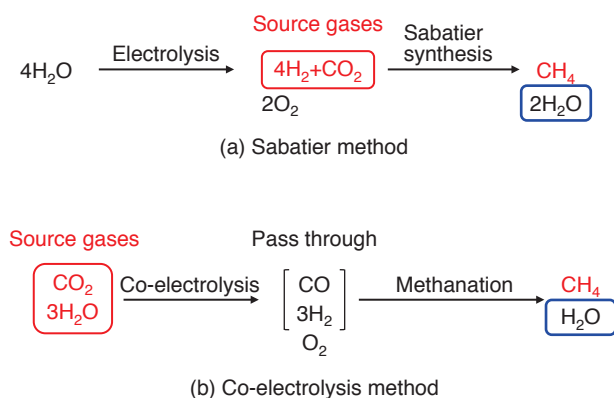


Fig. 1 Comparison of methane synthesis processes

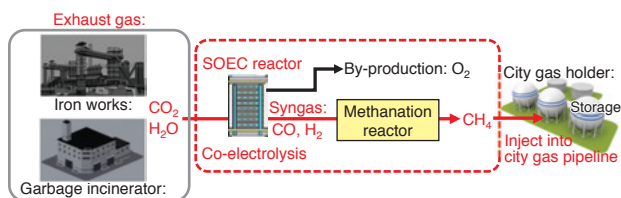


Fig. 2 Co-electrolysis methanation system via syngas

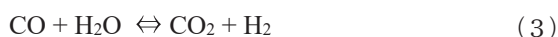
2. メタン製造の高効率化

2.1. 合成メタンの製造プロセス

共電解リアクタでは、燃料極 (fuel electrode) において式 (1)、(2) に示す反応が同時に起こり、原料ガスと電子 (e^-) から CO、 H_2 および酸素イオン (O^{2-}) が生成される。



さらに副反応として式 (3) に示す水性ガスシフト反応 (water gas shift reaction) も並行して発生する。



酸素極 (oxygen electrode) では、式 (4) に示すように O^{2-} から酸素 (O_2) を生成する。



合成ガスを原料とするメタネーションでは、式 (5) に示すように 1 モルの CO に対し 3 モルの H_2 が必要である。CO: H_2 の割合調整は、共電解リアクタでの電解反応およびその入口の CO_2 、 H_2O の流量コントロールによって実現されることが望ましい。



2.2. メタネーションの運転課題

共電解リアクタは複数の固体酸化物型電解セルが積層された構造であり、積層したセルの間を原料ガスが通り抜ける際、セルと接触したガスが電解反応によって CO、 H_2 に変換される。すなわち、セルと接触しない原料ガスは反応せず未反応ガスとしてリアクタの外に排出される。また、原料ガスの枯渇などで発生する過電圧によるセルの破損を予防するため、合成ガス生成過程では原料ガスである CO_2 と H_2O を 5 から 20% を吹き抜けさせて使用されることが多い。したがって、吹抜けて変換されなかったガスも未反応のまま残留成分として合成ガス中に残る⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。上記の残留成分中の H_2O である水蒸気は、触媒活性低下の要因となるため、通常はメタネーションリアクタの手前で分離して取り除かれることが多い。過去に検討された革新的メタネーションプロセスでは、共電解リアクタ後の生成ガス中の水蒸気の割合は 16 から 19% と想定され、メタネーションリアクタの前にドレンを設け水蒸気を冷却、液化、分離することで水蒸気の割合を 5 から 6% まで下げてメタネーションリアクタに供給していた⁽⁸⁾。分離に伴う消費エネルギーは最大 58 kW とされ、システムエネルギー効率の数% を占めていた。本研究では残留成分中の水蒸気を分離するエネルギーを削減するとともに、プロセス全体の小型化やコスト低減のために、革新的メタネーションシステムに適した耐水性に優れた触媒を開発することに取り組んだ。

3. 触媒開発のねらい

メタネーション触媒に求められる性能は三つあり、三つのうち二つは式 (5) に示す反応に関係するものである。まず一つ目が、原料ガスである CO がメタンを始めとする他の物質に変換された割合を示す転化率。そして、二つ目が、変換後の物質が目標生成物であるメタンに変換されている割合を示す選択率である。生成した合成メタンは再びガス燃料として利用するため、CO 転化率と CH_4 選択率は高いことが望まれる。加えて、メタネーションにおいて H_2O は、先の共電解リアクタでの未反応分だけでなく、式 (5) に示すようにメタネーションの副生成物として触媒周辺に常に存

在しており、共電解リアクタで得た CO を式 (3) の水性ガスシフト反応によって CO_2 に戻してしまう。これによって、プロセスに入った CO_2 は有用な化学物質に変換されないままプロセスから排出されてしまう。そこで、本研究では触媒に求める三つ目の性能として、水蒸気が混入しても水性ガスシフト反応が発生しない、混入を許容する割合 (耐水性) が高いこととした。

まとめると、下記三つの性能を有することが望まれる。

- (1) CO 転化率が高いこと
- (2) CH_4 選択率が高いこと
- (3) 水蒸気混入に対する許容割合 (耐水性) が高いこと

従来メタネーション触媒においては、共沈法または含浸法で調整された Ni ベースの触媒が、比較的低コスト、高活性、メタンの選択性が高いため広く使用されている⁽⁹⁾。含浸法で調製される触媒の活性は、通常、担体の基本的な性質と調製方法に依存している。担体については SiO_2 、 ZrO_2 、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 CeO_2 などのさまざまな担体が検討されている⁽¹⁰⁾。しかしながら、これらの担体はその多孔質構造から H_2O を吸着しやすく、吸着すると触媒の活性サイトを覆い活性が低下する課題があるため、メタネーションリアクタの上流で H_2O をドレンなどで分離し取り除く必要がある。そこで、本研究では、一般にハイドロタルサイトとも呼ばれる層状複水酸化物 (Layered Double Hydroxide: LDHs) の H_2O を既に含む構造に着目し検討をおこなった。LDHs は Fig. 3 に示すように二次元の層状の構造になっており⁽¹¹⁾、調製可能な金属カチオン比、ホストとゲスト間で構成された層のさまざまな相互作用、高比表面積など、構造に高い多様性があることがよく知られている⁽¹²⁾。さらに、LDHs のそれぞれの層の間には H_2O の分子が含まれており、 H_2O の吸着サイトは既に埋まっている状態であるため、新たに水蒸気が混入した際も吸着することなく撥水性を有し従来の担持触媒に比べて優位性を持つと考えた。また、LDHs の構造をとることで従来の $\text{Ni-}\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 触媒 (少量のニッケルイオンが Ni^{3+} の形でアルミナとの混合酸化物の形成をサポートする) よりも多くの還元可能な Ni 種 (Ni^{2+} から Ni^0) を含む高分散の Ni ナノ粒子をはるかに多く含むことができるため⁽¹³⁾、反応サイトを増やし CO_2 転化率と CH_4 選択率を高めることができると考えた。このため、

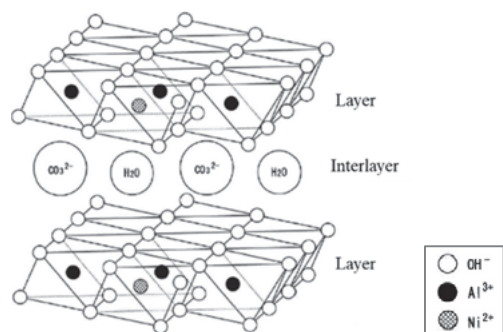


Fig. 3 LDHs structure model

LDHs は水素発生反応、光電気化学水酸化プロセスへの適用や機能性触媒としても期待されている^{(14), (15)}。

本研究では、従来手法の共沈法と含浸法で調製した触媒と、開発した Ni を活性金属とする LDHs 触媒を比較し、LDHs 触媒の性能と特徴およびシステムに与える効果を述べる。

4. 実験方法

4.1. 触媒調製

4.1.1. Ni 共沈触媒の調製

Ni ベースの共沈触媒は、以下の手順によって調製した。 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を蒸留水に溶解させ、得られた溶液を Na_2CO_3 溶液 (1 mol/L, 室温) と一緒に 2 mL/min のゆっくりとしたはやさでピーカーに滴下した。この際 80°C で混合物の pH 値を 8.5 に保った。その後、沈殿物を室温で 24 時間放置し、続いて濾過および洗浄をおこない、沈殿物から残留 Na_2CO_3 を完全に除去した。次に、沈殿物を空气中 60°C で 12 時間乾燥させた。最後に、そこから $2^\circ\text{C}/\text{min}$ で昇温し、 550°C にて 4 時間保持して焼成した。

4.1.2. Ni 担持触媒の調製

Ni を含浸法によって担体に担持した触媒は、以下の手順によって調製した。市販の担体 (SiO_2 、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 ZrO_2 、 CeO_2) を 550°C で 4 時間焼成し表面の不純物成分を除去した後、調製した担体に湿潤含浸法で Ni を導入した。 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を脱イオン水に溶解し、担体に均一に含浸させた。それぞれの触媒は Ni の重量が全体に対し 20 wt% となるように調製した。続いて、得られた混合物を室温で 1 時間真空にさらし、その後空气中 60°C で 12 時間乾燥させた。最後に、そこから $2^\circ\text{C}/\text{min}$ で昇温し、 550°C にて 4 時間保持して焼成した。

4.1.3. NiAl -LDHs の調製

Ni ナノ粒子を高分散させ反応サイトを増やすために、 NiAl -LDHs は尿素を用いた水熱合成法によって合成した。まず、2.18 g の $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ と 0.94 g の $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ を 60 ml の脱イオン水と一緒に溶解させた。これとは別に、6 g の尿素を 60 ml の脱イオン水に溶解した。それぞれの溶液を室温でかくはん速度 300 rpm で 30 分間かくはんした後に、両溶液を混合しさらに 5 分間かくはんした。その後、この混合物を二つの 100 ml のテフロンでコーティングしたステンレス鋼オートクレーブに密封し、 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ で昇温し、 120°C にて 12 時間保持した。この間はかくはんせず静置した。続いて調製した沈殿物を遠心分離法によって溶液の pH が中性になるまで毎回 200 ml の脱イオン水で洗浄した。得られた生成物を空气中 60°C で 12 時間乾燥させた。最後に、乾燥した触媒は酸素との結合によって構造が崩れることを避けるため、窒素雰囲気中で $2^\circ\text{C}/\text{min}$ で昇温し、 500°C にて 4 時間保持して焼成した。

4.2. 触媒のキャラクタリゼーション

4.2.1. 比表面積

調製した触媒の比表面積の測定には、Micromeritics 社製 3Flex 比表面積・多孔質物理吸着アナライザーを用いて N₂ 物理吸着により測定した。測定に先立ち、すべてのサンプルは、真空中 250℃ で 10 時間、表面汚染物質を除去する前処理をおこなった。

4.2.2. X 線回折法による構造解析

調製した触媒の結晶構造を確認するため、株式会社リガク製の RINT 2400 システムの X 線回折装置を用いて X-Ray Diffraction (XRD) 測定をおこなった。

4.3. 触媒活性評価

触媒活性評価は、Fig. 4 に示す内径 8 mm の固定床反応器で流通法にて実施した。反応管への触媒充填は以下の手順に沿っておこなった。最初に適切な量の石英ウールを充填し、次に 2 g の石英砂と 400 から 850 μm の粒径に調製した 0.25 g の触媒を混合したものを注ぎ、さらに反応中にガスを予熱するために 2 g のガラスビーズを追加し、最後に再び上面に石英ウールを充填した。

還元処理として反応の前に触媒を、H₂ を 40 ml/min で 8 時間、400℃ で還元した。各触媒の活性については 0.1 MPa, 20 mL/min, H₂/CO = 3.0 で 8 時間、300℃ に維持した後に計測した。

生成したガスは、株式会社島津製作所製の熱伝導度型検出器 (Thermal Conductivity Detector: TCD) GC-2014AT と、水素炎イオン化検出器 (Flame Ionization Detector: FID) GC-2014AF を備えた三つのオンラインガスクロマトグラフによって検出した。TCD は上流で CO₂ を、下流では H₂ をそれぞれ計測しており、FID は CO および炭化水素を計測している。

なお、CO 転化率は式 (6)、CH₄ および CO₂ の選択率は式 (7)、(8)、また CH₄ の収率は式 (9) に基づいて算出した。式 (6) の Ar は内部標準物質として使用している。ここで式 (6) は CO を有用物に変換した割合であり、式 (7) は変換された全炭化水素と CO₂ のうち CH₄ の割合を、

式 (8) は CO₂ の割合を示す。式 (9) は反応物のうち目的生成物の CH₄ が得られた割合を示す。

$$CO \text{ conversion } [\%] = \frac{\text{Area}\left(\frac{CO}{Ar}\right)^{in} - \text{Area}\left(\frac{CO}{Ar}\right)^{out}}{\text{Area}\left(\frac{CO}{Ar}\right)^{in}} \times 100 \quad (6)$$

$$CH_4 \text{ selectivity } [\%] = \frac{n(CH_4)}{n(\text{Total hydrocarbon} + CO_2)} \times 100 \quad (7)$$

$$CO_2 \text{ selectivity } [\%] = \frac{n(CO_2)}{n(\text{Total hydrocarbon} + CO_2)} \times 100 \quad (8)$$

$$CH_4 \text{ yield } [\%] = CO \text{ conversion} \times CH_4 \text{ selectivity} \times 100 \quad (9)$$

n: [C-mol/h]

5. 実験結果と考察

5.1. 比表面積, XRD 測定結果

調製した触媒の比表面積の結果を Fig. 5 に示す。NiAl-LDHs は、20 wt% Ni/SiO₂ より比表面積が低い、それ以外の担体を用いた場合と比べると同等以上であった。

調製した NiAl-LDHs の XRD 結果を Fig. 6 に示す。37 degrees, 43 degrees, 62 degrees のピークの位置は LDHs 上の Ni の酸化物 NiO に帰属するものであり、ピークが明確にあることから Ni ベースの LDHS が調製できていることを示している。

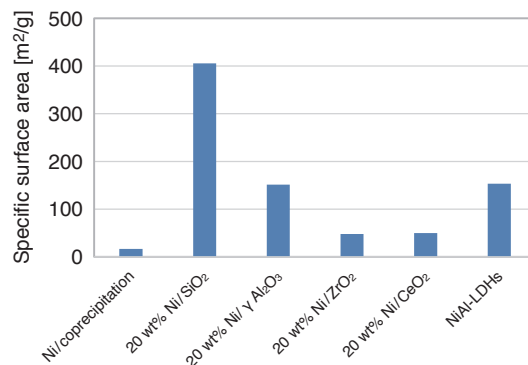


Fig. 5 Comparison of specific surface area

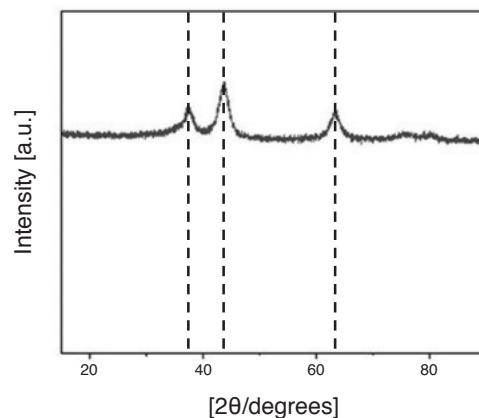


Fig. 6 XRD measurement result of NiAl-LDHs

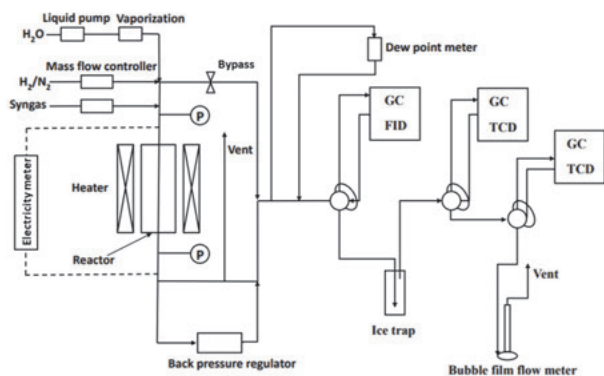


Fig. 4 Reaction devices diagram of fix-bed reactor

Table 1 Results of methane synthesis processes

Catalysts	CO conversion [%]	Selectivity [%]						CH ₄ yield [%]
		CO ₂	CH ₄	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅ ⁺	
Ni-coprecipitation	55.9	0	97	2.8	0.3	0	0	54.2
20 wt% Ni/SiO ₂	99.5	2.9	93.7	2.9	0.4	0	0	93.2
20 wt% Ni/γAl ₂ O ₃	92	0.4	87.9	7.4	3.3	0.8	0.2	80.9
20 wt% Ni/ZrO ₂	82.2	0.1	89.7	7.1	2.5	0.4	0.1	73.7
20 wt% Ni/CeO ₂	47	7	50.6	15.1	14.1	5.7	7.5	23.8
NiAl-LDHs	100	0.2	99.8	0	0	0	0	99.8

5.2. 触媒活性

Ni を用いた担体の異なる触媒と NiAl-LDHs の CO 転化率、選択率および収率の比較を Table 1 に示す。まず、NiAl-LDHs 以外では 20 wt% Ni/SiO₂ が他の触媒と比べて優れた活性を示し、CO 転化率 99.5%、CH₄ 選択率 93.7%、収率 93.2% であった。ただし、CH₄ 以外に CO₂ の生成も見られた。一方、NiAl-LDHs は、CO 転化率 100%、CH₄ 選択率 99.8%、収率 99.8% となり最も高い値を示した。NiAl-LDHs は 20 wt% Ni/SiO₂ より比表面積が低いにも関わらず活性が高く、メタネーションに優れた触媒であることを示した。

5.3. 反応特性

NiAl-LDHs について、温度を変えて合成ガスのメタネーション特性を評価した。温度以外の反応条件は、触媒活性実験と同じ条件とした。各温度の結果を Fig. 7 に示す。温度が 250℃ 以下では CO 転化率、CH₄ 選択率ともに低く、275℃ で CO 転化率は 100% に達し、CH₄ 選択率は 300℃ で 100% に達した。一般にメタネーション反応では、Ni ベース触媒の場合、温度は 250 から 500℃^{(10),(12)}、圧力は 0.1 から数 MPa で高い反応性を示すことが多いが、発熱反応のため低温高压が有利とされている。本研究で開発した NiAl-LDHs では、反応温度はそれらと同等の値を示す一方で、反応圧力では、0.1 MPa で上記結果が得られたことから低温低压で高活性であり、加压エネルギーを抑えられる有利な特性が確認できた。

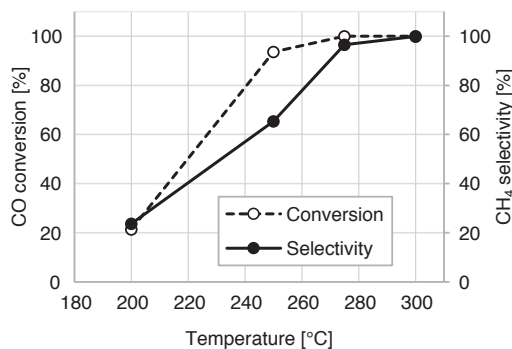


Fig. 7 Reaction characteristics of NiAl-LDHs

5.4. 原料ガスへの水混入時の影響

触媒活性実験と同じ条件に、合成ガス中に供給する水蒸気の割合は、式 (10) に基づいて算出した。

$$\text{Water vapor proportion} [\%] = \frac{F_{H_2O}(\text{gas})}{(F_{H_2O}(\text{gas}) + F_{\text{syngas}})} \quad (10)$$

Fig. 8 に示すように、水蒸気の割合が増えるにしたがって比較対象である 20 wt% Ni/SiO₂ は CO 転化率が減少、水蒸気の割合が 20% の時には CO 転化率は 50% に低下した。一方、NiAl-LDHs の CO 転化率は、水蒸気の割合が 20% から 65% まで増加した場合でも 100% 近くを維持していた。また、LDHs の CH₄ 選択率は、Fig. 9 に示すように

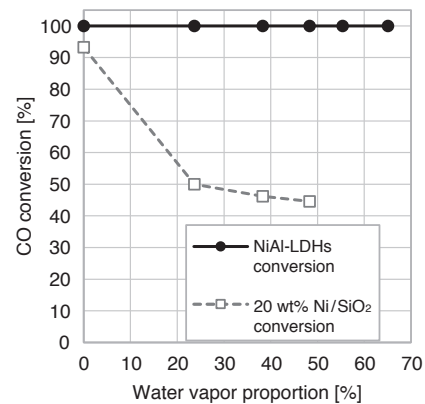


Fig. 8 Conversion of each catalyst with water vapor

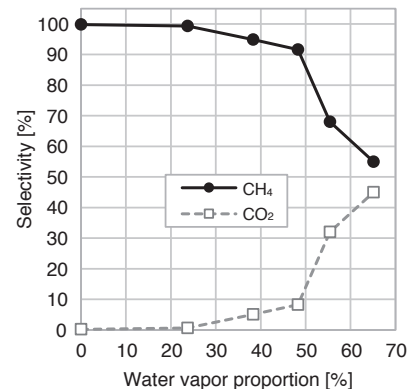


Fig. 9 Selectivity of NiAl-LDHs when mixed with water vapor

水蒸気の割合が 20% までは混入が無い場合と同等の選択率を示し、20% から徐々に低下しはじめ水蒸気の混入量が 65% に達したときには CH_4 選択率は 55% になった。 CH_4 の選択率低下に伴い CO_2 の選択率が増加したことから、NiAl-LDHs が許容できる水分の割合を越えると水性ガスシフトが起きていたと考えられる。以上のことから、従来の担持触媒よりも耐水性を有することが示され、原料ガス中の水蒸気の許容割合は 20% であることがわかった。

本研究で開発した NiAl-LDHs の採用により、原料ガスに残留する水蒸気を除去する必要がなくなり、消費エネルギーを最大 58 kW 削減できる可能性がある。

6. まとめ

合成メタン製造プロセスの高効率化を目指し、合成ガスからメタンを生成する熱化学触媒として NiAl-LDHs を開発し以下の結果を得た。

- (1) NiAl-LDHs は、0.1 MPa、300℃ の環境下で CO 転化率 100%、 CH_4 選択率はほぼ 100% となり、比較触媒の中で同等の CO 転化率を示す 20 wt% Ni/ SiO_2 に対しても CH_4 選択率および CH_4 収率で優位性を有していることがわかった。
- (2) NiAl-LDHs と Ni ベースの比較触媒である 20 wt% Ni/ SiO_2 の原料ガス中の水蒸気の許容割合を比較した結果、20 wt% Ni/ SiO_2 は水蒸気が混入するとだちに CO 転化率と CH_4 選択率が低下したのに対し、NiAl-LDHs は 20% まで低下せず活性を維持し、優れた耐水性を有することがわかった。

以上より、今回開発した NiAl-LDHs を用いることで、今後の高効率なメタン製造プロセスの構築に向けてメタネーションリアクタの上流の脱水工程の省エネルギー化や小型化によるプロセスの高効率化、プロセス費用の低減が期待できる。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁: 令和 5 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2024), 第 8 章カーボンニュートラル実現に向けた水素・アンモニアの導入拡大, p. 252-254, (2024), https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2024/pdf/whitepaper2024_all.pdf, (参照 2025/01/13)
- (2) 資源エネルギー庁: 第 9 回 メタネーション推進官民協議会, 資料 4-2 (メタネーション取組マップ 2023), https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/009_04_02.pdf, (参照 2025/01/13)
- (3) 資源エネルギー庁: 第 27 回 総合資源エネルギー調

査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 ガス事業制度検討ワーキンググループ, 資料 3-1 (合成メタン (e-methane) について), https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/gas_jigyo_wg/pdf/027_03_01.pdf, (参照 2025/01/13)

- (4) 毛里昌弘, 柳澤和貴, 牧美里, 吉田潤平: カーボンリサイクルメタン合成を目的とした二酸化炭素と水蒸気の共電解反応条件の検討, Honda R&D Technical Review, Vol. 34, No. 1, p. 71-79
- (5) 島田寛之, 山口十志明, 荒木拓人, 水澤竜也, 森昌史, 藤代芳伸: 2. 固体酸化物形電解セルを用いた共電解技術の開発, Electrochemistry, 84 巻, 8 号, p. 611-615, (2016), doi: 10.5796/electrochemistry.84.611
- (6) 荒木拓人, 水澤竜也: 3. SOEC を用いた水蒸気電解システムの定常サイクル計算, Electrochemistry, 84 巻, 8 号, p. 616-619, (2016), doi: 10.5796/electrochemistry.84.616
- (7) 松永健太郎, 吉野正人, 渡邊久夫: 固体酸化物形電解セルを用いた水素製造システム及び電力貯蔵システム, 東芝レビュー Vol. 71, No. 5, p. 41-45, (2016), https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2016/05/71_05pdf/b04.pdf, (参照 2025/01/13)
- (8) 水藤文健, 永田陽平, 荒木拓人, 柳澤和貴, 毛里昌弘, 牧美里, 吉田潤平: 社会インフラ CO_2 源に残留する空気成分による SOEC 共電解システムエネルギー効率への影響, 自動車技術会論文集, 53 巻, 5 号, p. 973-978, (2022), doi: 10.11351/jsaeronbun.53.973
- (9) Meng, F., Li, X., Li, M., Cui, X., Li, Z.: Catalytic performance of CO methanation over La-promoted Ni/ Al_2O_3 catalyst in a slurry-bed reactor, Chemical Engineering Journal, Vol. 313, p. 1548-1555, (2017), doi: 10.1016/j.cej.2016.11.038
- (10) Yang, X., Wang, X., Gao, G., Wendurima, Liu, E., Shi, Q., Zhang, J., Han, C., Wang, J., Lu, H., et al.: Nickel on a macro-mesoporous $\text{Al}_2\text{O}_3@ZrO_2$ core/shell nanocomposite as a novel catalyst for CO methanation, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, Issue 32, p. 13926-13937, (2013), doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.08.083
- (11) 特開 2024-063277
- (12) He, F., Zhuang, J., Lu, B., Liu, X., Zhang, J., Gu, F., Zhu, M., Xu, J., Zhong, Z., Xu, G., et al.: Ni-based catalysts derived from Ni-Zr-Al ternary hydrotalcites show outstanding catalytic properties for low-temperature CO_2 methanation, Applied Catalysis B:

- Environmental, Vol. 293, Article 120218, (2021), doi: 10.1016/j.apcatb.2021.120218
- (13) He, L., Lin, Q., Liu, Y., Huang, Y.: Unique catalysis of Ni-Al hydrotalcite derived catalyst in CO₂ methanation: cooperative effect between Ni nanoparticles and a basic support, Journal of Energy Chemistry, Vol. 23, Issued 5, p. 587-592, (2014), doi: 10.1016/S2095-4956(14)60144-3
- (14) He, H., Xiao, J., Liu, Z., Yang, B., Wang, D., Peng, X., Zeng, L., Li, Z., Lei, L., Qiu, M., et al.: Boosting the hydrogen evolution of layered double hydroxide by optimizing the electronic structure and accelerating the water dissociation kinetics, Chemical Engineering Journal, Vol. 453, Part 1, Article 139751, (2023), doi: 10.1016/j.cej.2022.139751
- (15) 森本和也: 層状複水酸化物の合成とその機能性材料への応用, 岩石鉱物科学, 48 巻, 1 号, p. 46-50, (2019), doi: 10.2465/gkk.190130

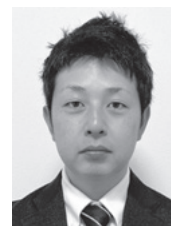
■ 著 者 ■



米田 英昭



柳澤 和貴



飯嶋 洋平



吉田 潤平