

Technical Evaluation of Hydrogen Production from Modeled Ethanol Fermentation Liquid using Ni-based Industrial Catalyst

Masaki TAJIMA^{*1‡}Ryouya ASANO^{*2}Ryouto TANAKA^{*3}Yuto TAKATANI^{*4}Yusuke YANO^{*4}

Ni 系工業触媒を用いた模擬エタノール発酵液成分からの水素製造に関する技術評価

田島正喜^{*1‡}浅野涼也^{*2}田中峻登^{*3}高谷侑翔^{*4}矢野裕介^{*4}

Abstract

Assuming ethanol fermentation liquid without dehydration processes, a modeled 8.95% ethanol fermentation liquid was prepared. A steam reforming reaction was attempted using this liquid as the raw material with a natural gas steam reforming Ni-based industrial catalyst, and a high hydrogen yield of over 80% was obtained at reaction temperatures of around 600°C. Organic impurities in the liquid did not inhibit hydrogen production, and high concentration hydrogen gas was obtained. In addition, the high hydrogen yield was almost the same as that of the same concentration ethanol liquid of 8.95% obtained by heat distillation of fermentation solution from waste molasses, suggesting that this model can be used as a hydrogen production method from biomass in regions with large amounts of biomass as a raw material for ethanol fermentation. The hydrogen produced is expected to be used to fuel cell trains in rural areas where lignocellulosic biomass is abundant.

Keywords: Ni-based Industrial Catalyst, Ethanol Fermentation, Hydrogen Production, Steam Reforming

キーワード: Ni 系工業触媒, エタノール発酵, 水素製造, 水蒸気改質

1. 緒言

地球温暖化対策が喫緊の課題となっているなかにあつて、利活用時に二酸化炭素を発生させないエネルギー源として水素エネルギーが注目されて久しい。しかし、水素エネルギー社会を成立させるには未だ多くの課題があり、供給インフラ構築は未完の状況にある。インフラの形成過程では、水素製造時の二酸化炭素発生をいかに少なく、また最終的には実質ゼロにすることが課題となる。

二酸化炭素の発生の少ない水素製造方法に、太陽光や風力発電といった再生可能エネルギー電力を用いた水の電気分解による手法がある。これに対して、バイオマスからの化学反応による水素製造方法が確立できれば、将来的にCCS (Carbon dioxide Capture and Storage) 技術と組み合わせることで (BECCS : Bioenergy with CCS) バイオマスが光合成によって吸収した大気中の二酸化炭素を地中に隔離でき、バイオマスの利活用をカーボンニュートラルから

カーボンポジティブに変換可能なシステムとなり得、再生可能エネルギーの電力利用に比べ、二酸化炭素削減にはより有効な手段と言える¹⁾。

バイオマスからの水素製造によって首都圏や日本各地に水素ステーションを形成する可能性に関しては、既報で論じた²⁻³⁾。加えてこの論文をもとに、バイオマスのうち都市型である下水汚泥からの水素ステーションを、福岡市の中部水処理センターに国土交通省の「B-DASH プロジェクト」にて建設し、運用を含め、筆者及びその関係者により実現させてきている⁴⁻⁵⁾。この取り組みは、バイオマスからの商用規模水素ステーションの実現として、本邦のみならず世界的にも初の試みであったため国内外の関心を得、いくつかの受賞の栄を得てきた。

本報では、下水汚泥とは異なる含水率の少ないリグノセルロース系バイオマスからエタノールを経由した水素製造方法の確立を目指して、エタノール発酵液の液成分（以降、発酵液成分と定義する）を原料に想定した水素製造試

*1 Tottori University of Environmental Studies
Professor, Faculty of Environmental Studies, 1-1-1 Wakabadaikita,
Tottori-shi, Tottori, 689-1111, Japan
‡e-mail: taji-msk@kankyo-u.ac.jp

*2 KEC Company Ltd., Quality Assurance Division

*3 Kanden Engineering Corporation, System Solution Dept.

*4 Yazaki Corporation, Environment Dept.

Received: January 22 2025, Accepted: May 13 2025

*1 公立鳥取環境大学 環境学部環境学科 教授
(〒689-1111 鳥取市若葉台北一丁目1番1号)

‡e-mail: taji-msk@kankyo-u.ac.jp

*2 株式会社ケーイーシー 品質保証課

*3 かんでんエンジニアリング システムソリューション部

*4 矢崎総業株式会社 環境部

(原稿受付: 2025 年 1 月 22 日, 受理日: 2025 年 5 月 13 日)

験の結果を報告する。本報の結果により、下水汚泥の賦存が多い都市部とは異なり、稲わらや麦わら等、リグノセルロース系バイオマスが多く賦存する地方部での水素供給インフラ形成に資するシステムを提案する。

2. リグノセルロース系バイオマスからの水素製造とバイオエタノール利活用の現状と課題

木質や草本系のリグノセルロース系バイオマスを原料とした水素製造方法は数々提案されてきたが、そのいずれの手法とも主に副次的に生成するタール等によるシステムに対する阻害によって商用規模のプラントは成立していない⁶⁾。

一方、これらリグノセルロース系バイオマスを原料とするエタノールの製造技術は研究、開発されてきている⁷⁻⁹⁾。製造されたエタノールは、日本では、アンチノック剤である ETBE (エチルターシャルブチルエーテル) の原料として使用され、ガソリンに添加される。原料となる無水エタノールを得るためには、発酵液から不純物除去の後、数回の蒸留と脱水工程を経て、水分を極力除去する必要がある。この水分除去にはプロセス全体の約 47% のエネルギーを要することもあり⁹⁾、製造エタノールの経済性を悪化させている。この様に、リグノセルロース系バイオマスからのバイオエタノール製造は、技術的には成立するものの、主に経済的な要因で実現できていないのが現状である¹⁰⁾。

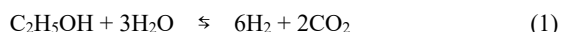
エタノールの水蒸気改質によって水素を製造する事は数々報告されているが、それらは無水エタノールの水蒸気改質反応を対象にしており、含水率の高いエタノール発酵液成分を対象にしているものはない¹¹⁻¹²⁾。

そこで本報では、脱水工程の必要ない、エタノール発酵液成分を原料として想定した、エタノールの水蒸気改質法による水素製造の技術的可能性を調査し、その実現可能性を評価した。

3. バイオエタノール発酵液成分からの水素製造試験

3.1 エタノールの水蒸気改質による水素製造

エタノールの水蒸気改質反応によって以下の式から H_2 を得る事ができる。



また、同時に副反応として以下の反応が進行する可能性がある。



3.2 試験装置

試験に用いた装置の概要を Fig. 1 に示す。流通式連続反応装置であり、原料のエタノール水溶液はマイクロフィードポンプによって 0.1 mL/min で送り出され、触媒層にダウンフローで導かれる。原料液は事前加熱され蒸発器で気

化されるが、同時に不活性な窒素ガス 10 mL/min をキャリアとして随伴導入する。反応管内部には温度測定用の内管が設置されており、反応管長さは 340 mm、外管径は 12.7 mm、内管径は 3.18 mm である。電気ヒーターによる反応管の温度分布を事前測定したうえ、触媒はその均一温度帯域に高さ 6 cm、3.6 g を充填するが、その位置を保持するために触媒層下にジルコニアボールを 15.4 cm の高さに充填する。使用した触媒は、天然ガスの水蒸気改質に広く用いられている、酸化カルシウム添加アルミナ担持ニッケル系の工業触媒 (クラリアント触媒社製) を使用した。直径 $\times$ 高さ = 3.2 mm $\times$ 3.2 mm の円筒状の形状である。なお、キャリアガスを含む原料ガス流量は、触媒が天然ガスの水蒸気改質触媒であることから、工業的な天然ガスからの水素製造装置 (三菱化工機製 HyGeia-A) の空塔速度と同一として設定してある。

触媒は水素製造試験を行う前に、500°C にて水素流量 50 mL/min の条件で 90 分間、担持された酸化ニッケルを還元処理し金属ニッケルとして触媒活性を発現させて用いた。

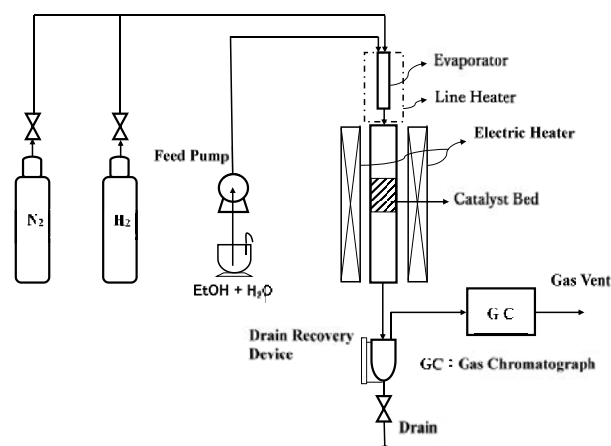


Fig. 1 Evaluation Apparatus for H_2 Production from Ethanol Solution

なおこの水素による事前還元は、触媒の詰め替え時のみ実施し、以降触媒を酸化させないように窒素雰囲気下で保持すれば、触媒は連続的に試験に供し活性を維持できる。したがって、還元水素量は生成される水素量に対して無視できるくらいの少量であるといえる。

反応管下部より出た改質ガスはドレイン回収装置によって未反応成分が液化されて取り除かれる。残りの生成ガスはガスクロマトグラフ (Agilent 7890A) に導入され成分分析され各成分濃度が決定される。分析手法およびデータの繰り返し性は、日本規格協会、JIS K 0123 (ガスクロマトグラフィー質量分析通則) に準拠した¹³⁾。

3.3 エタノール水溶液による改質試験

エタノール発酵液中のエタノール濃度を想定した原料エタノール水溶液を、容積比 $C_2H_5OH : H_2O = 1:12$ (エタノール濃度 7.7% 水溶液) として事前調整し、試験に供した。エタノールは試薬特級 (和光純薬工業社製) を用いた。

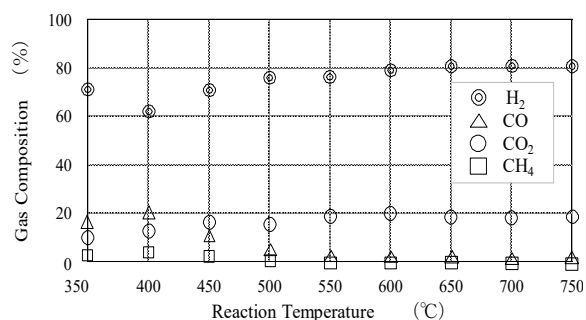


Fig. 2 Composition of Produced Gas of Reaction with 7.7% Aqueous Ethanol Solution at Each Reaction Temperature

反応温度を 350～750℃まで、50℃刻みで変化させた時の各温度における生成ガスの組成割合を Fig. 2 に示す。なお、本図は、キャリアの窒素ガスは除き、修正百分率法で示した。

反応温度 350～500℃近辺までの低温度域では、生成ガス中に主生成ガスである水素、二酸化炭素とともに一酸化炭素、メタンが観測されたが、反応温度が 550℃以上になると、それぞれ、シフト反応及びメタンの水蒸気改質反応によって消費され、水素及び二酸化炭素に転化される。以降、750℃までの高温域では、生成ガス中の水素濃度はほぼ 80% で一定となった。

次に、本試験での各反応温度における水素収率の変化を Fig. 3 に示す。ここで言う水素収率とは、(1)式で生成する水素量(化学量論量)に対し、各反応温度で得られた水素量の割合(%)を水素収率として定義した。水素収率は反応温度とともに上昇し、550℃で 85% となり以降反応温度が上昇してもほぼ一定を維持した。

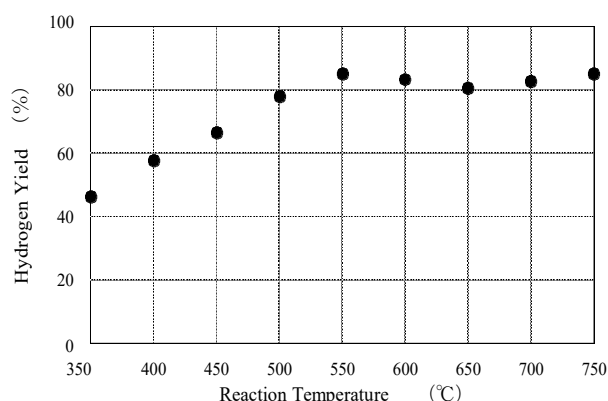


Fig. 3 Hydrogen Yield of Reaction with 7.7% Aqueous Ethanol Solution at Each Reaction Temperature

エタノールの水蒸気改質反応(1)式は吸熱反応であるとともに、原料水溶液中には化学量論量の 4 倍の水が含まれていることから、反応温度は極力低温である事が望ましい。Fig. 2 及び Fig. 3 の結果から、本条件による水素製造のた

めの最適反応温度は、550℃近辺にあると予想された。

4. 発酵液成分中のエタノール以外の有機不純物に対する水素製造への影響調査

4.1 エタノール発酵液成分中のエタノール以外の有機不純物の特定

川原は、リグノセルロース系バイオマスである廃木材を原料としたバイオエタノール中の微量有機不純物に関して、その成分と濃度範囲を特定している¹⁴⁾。

発酵液成分中にはエタノール以外に 14 種の有機不純物成分があげられているが、そのうち主な高濃度成分を Table 1 に示す。

Table 1 The Average Concentration of Organic Impurities in Ethanol Fermentation Liquid from Woody Biomass

	Concentration(g/L)
Acetic Acid (CH_3COOH)	1.117 $\pm$ 1.305
Methanol (CH_3OH)	0.664 $\pm$ 0.267
Ethyl Butyrate ($\text{C}_3\text{H}_7\text{COOC}_2\text{H}_5$)	0.701 $\pm$ 1.305
Butyric Acid ($\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$)	0.521 $\pm$ 0.359
1-Butanol ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OH}$)	0.145 $\pm$ 0.287

4.2 酢酸水溶液による改質試験

エタノール発酵液成分中の有機不純物のうち、最も高濃度である酢酸水溶液への本触媒の耐性をみるため、水蒸気改質試験を実施した。

原料水溶液は、3.3 節で記した試験におけるエタノール水溶液と同一の C/H 比を採用して調整した。酢酸水溶液濃度は、7.6% となる。酢酸試薬は試薬特級(和光純薬工業製)を用いた。反応温度を変化させた時の生成ガス成分割合(キャリアガス窒素を除いた修正百分率法で記載)および水素収率の変化を Fig. 4 に示す。

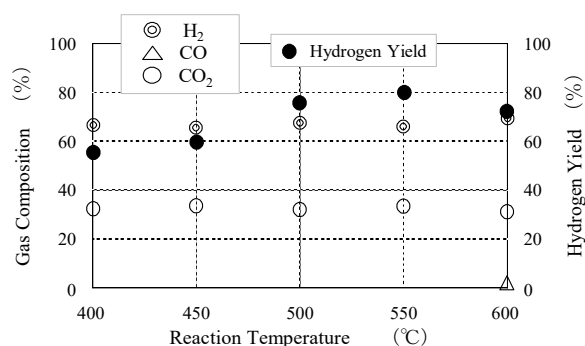


Fig. 4 Produced Gas Composition and Hydrogen Yield of Reaction with Aqueous Acetic Acid Solution

なお水素収率は、エタノール水溶液の改質試験と同様に、導入した酢酸の水蒸気改質反応(5)式によって生成する水

素の化学量論量に対する各反応温度で得られた水素量の割合 (%) とした。

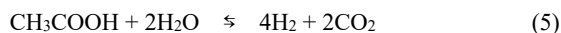


Fig. 4 より、酢酸水溶液を原料とすると反応温度 500℃ 付近から水素収率は 80% 程度と最大値をとり、安定することがうかがえる。この水素収率が最大値を取る温度は、エタノール水溶液を原料とする場合の 550℃ と同一であり、酢酸水溶液においても約 80% の高い水素収率が得られていることから、天然ガス改質用の Ni 系工業触媒が、エタノール発酵液中の最も高濃度の有機不純物成分である酢酸の水溶液を原料としても、有効に水素を製造しうることが判明した。

4.3 模擬エタノール発酵液成分からの水素製造評価

前述の川原による既往論文での不純物情報に加え、当方は廃糖蜜を原料としたバイオエタノール発酵液を入手し、その液成分中の有機酸不純物分析を実施した。本発酵液は、日本ガーリック株式会社から入手したサトウキビ由来の廃糖蜜を、出芽酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) を発酵菌として pH を 4.5 に乳酸でコントロールし、温度 32℃ で 1 週間程度発酵させたものである。本液を遠心分離機にかけ大まかな固形不純物を除去した後、0.45 μm のシリンジフィルターを用いてろ過した液を、有機酸を分離可能なカラムを用いてガスクロマトグラフで分析した。有機酸分析データを高濃度成分から順に Table 2 に示す。

Table 2 The Concentration of Organic Acid in Ethanol Fermentation Liquid from Waste Molasses

	Concentration(g/L)
Acetic Acid (CH_3COOH)	1.09
Isobutyric Acid ($((\text{CH}_3)_2\text{CHCOOH})$)	0.86
Valeric Acid ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$)	0.38
Butyric Acid ($\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$)	0.29
Isovaleric Acid ($((\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{COOH})$)	0.18
Propionic Acid ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$)	0.18

測定された酢酸および酪酸の濃度は、Table 1 中のそれぞれの物質含有量の濃度範囲内にあることがうかがえる。Table 1 と Table 2 は発酵原料物質がそれぞれ廃木材、廃糖蜜と異なっているが、データの濃度範囲が同等であることから、エタノール以外の不純物としてこれらの数値を参照することとした。

そこで、Table 1 の有機不純物の最大値量および Table 2 の酢酸、酪酸 (Table 1 との共通物質) を除く有機酸量のそれぞれ 3 倍量を、エタノール水溶液に添加した溶液を作製し、この溶液を模擬エタノール発酵液成分として改質試験を行った。3 倍量を添加したのは、より不純物の影響を顕著にみるためである。なお、この際のエタノール水溶液濃度は、8.95% としている。エタノール濃度の、7.7% から 8.95% への変更に関しては後述による。エタノールに添加

した試薬は、メタノールが試薬特級 (和光純薬工業製)、酪酸エチル、酪酸、プロピオン酸、イソ酪酸、イソ吉草酸が和光特級 (和光純薬工業製)、吉草酸が和光 1 級 (和光純薬工業製)、1-ブタノールが特級 (ナカライテスク社製) を用いた。

各反応温度における生成ガス成分割合および水素収率の変化を Fig. 5 に示す。水素収率は、不純物は添加しているものの、導入エタノールが (1) 式で反応した時の生成水素の化学量論量に対する得られた水素量の割合 (%) として記載した。エタノール水溶液を原料液とした場合 (Fig. 2) に比較して 600~650℃ 域での生成メタン量が幾分多くある。この温度域ではメタンの水蒸気改質反応は進行しにくいことがうかがえる。水素収率は 600℃ 付近で最大値に達した。

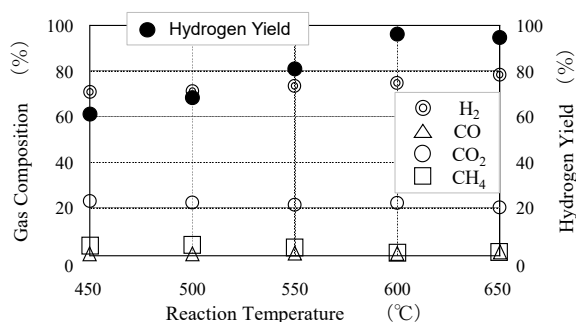


Fig. 5 Gas Composition and Hydrogen Yield of Reaction with Modeled Ethanol Fermentation Liquid

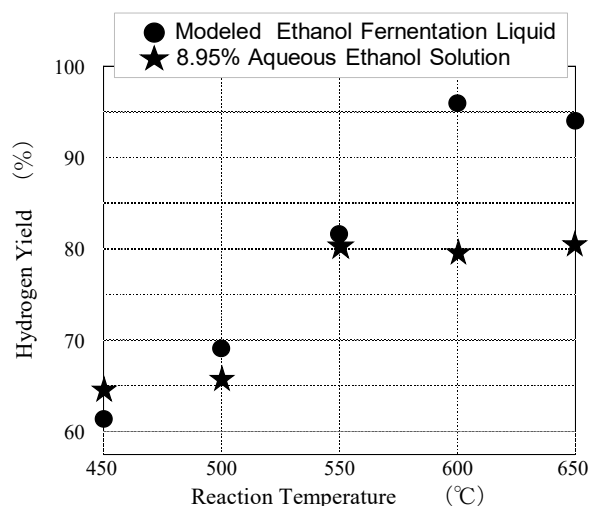


Fig. 6 Comparison of Hydrogen Yield with Modeled Ethanol Fermentation Liquid and 8.95% Aqueous Ethanol Solution

次に 8.95% エタノール水溶液と、模擬エタノール発酵液成分それぞれを原料液とした場合の水素収率の反応温度変化を Fig. 6 に比較して示す。

8.95% のエタノール水溶液の改質試験では、7.7% 水溶液

と濃度が比較的近いので、水素収率は 550℃付近で最大値を示している。これに対し、疑似エタノール発酵液成分の改質試験では 550℃以上の反応温度でも水素収率は上昇し、600℃近辺で約 95%まで上昇した。添加した有機不純物成分の影響が反応温度がより高温側で見られている。Fig. 4 より、最大有機不純物成分である酢酸水溶液での改質試験では最大水素収率を与える反応温度は 550℃であったが、模擬エタノール発酵液成分での改質試験では 600℃と高温にシフトしていることは、酢酸以外のその他の有機不純物成分の影響が強く出ていると考えた。

5. 廃糖蜜を用いたエタノール発酵蒸留液からの水素製造

前述、4.3 節で記述した廃糖蜜からのエタノール発酵液を用い、水素製造試験を試みた。前処理として、6,000 rpm で 6 分間遠心分離し、ADVANTEC No. 131 濾紙（保留粒子径 3 μm）で濾過することで発酵液中の固形物を除去した後、改質試験を行ったところ、本原料液導入直後に反応管前圧力が上昇しキャリアガス流量が低下する事象が発生した。試験を中止した後装置を分解して点検したところ、反応管前段の蒸発器付近で微小固形物が固着している事が判明した。

固形物は上記のような物理的な方法では完全に除去することは困難であったため、前処理として、発酵液中のエタノールが全量回収可能な、「アルコール分析用タイマー付き蒸留器」（塚本鑛吉商店製、4 本立て、1 本につき 400W ヒーター）を用いて蒸留を行った。本装置は発酵液中の酒類エタノール濃度を測定するのに主に用いられており、タイマーにて時間管理され残留量が約 30%程度となるよう加熱蒸留を行った後冷却することでエタノール成分を全量回収することが可能である。得られた蒸留液中のエタノール濃度を、エタノール振動式密度計で測定したところ 8.95%であった。

この蒸留液を原料液として 3.2 節の試験装置を用い同一条件で改質試験を行った結果を Fig. 7 に示す。Fig. 5 と比

較すると水素収率は、450～550℃の低温域は異なるものの、600℃以上の反応温度において同様に 80%以上の高収率を示している。また同温度域でのガス組成中の水素濃度も 80%程度と同様に高いレベルである。本触媒が模擬エタノール発酵液成分だけでなく、実際の発酵液を用いた原料液の改質においても高い水素製造能力を有していることが示された。

6. 水素生成に対するエネルギー収支

水素収率向上のための昇温にかかる投入エネルギーと、増量した水素生成により得られたエネルギーの収支を考察する。昇温にかかる投入エネルギーは、導入原料流量×原料中の各成分の定圧比熱で計算できる。導入原料流量が、窒素 10 cc/min、エタノール水溶液 0.1 cc/min および導入原料中の各成分の定圧モル比熱が、窒素 29.0、水蒸気 33.6、エタノール蒸気 73.6（それぞれ J/mol・K）より、昇温にかかる投入エネルギーは、0.184 J/min・K と計算される。

Fig. 5 に示す模擬エタノール発酵液成分試験結果では、450 から 550℃への 100℃の昇温によって水素収率は 60%から 80%へ 20%向上していることがうかがえる。生成水素によって得られたエネルギーは、高位発熱量基準で 53.4 J/min であるので、投入エネルギー/生成エネルギー = $18.4/53.4 = 1/2.9$ となり、投入エネルギーは水素生成によって得られるエネルギーの約 1/3 であることが分かる。

また Fig. 7 に示す廃糖蜜を用いたエタノール発酵蒸留液試験結果では、550 から 600℃の 50℃昇温によって水素収率は 60%から 80%まで同様に 20%向上している。この場合の投入エネルギー/生成エネルギー比は、上記計算を参照に約 1/6 であると見積もれる。したがって不純物がより多いと思われる廃糖蜜を用いたエタノール発酵蒸留液の方が少ないエネルギーでより多くの水素エネルギーを生成していると評価できる。

7. 結言

リグノセルロース系バイオマスからの水素製造を指向するにあたり、エタノール発酵液成分を原料と想定して試験液を試薬より調合し、天然ガス改質用 Ni 系工業触媒を用いて改質試験を行った。発酵液成分中のエタノール濃度を想定した低濃度のエタノール水溶液（エタノール濃度 7.7%）を原料に改質試験を行ったところ、生成ガス中約 80%と高濃度で水素が得られ、反応温度 550℃で水素収率は 80%に達した。エタノール発酵液成分中に混入している炭化水素を特定し、それら不純物を混合した模擬エタノール発酵液成分を作成しこれを原料液として同様に改質試験を行ったところ、600℃とより高温側で水素収率約 95%を達成し、これら炭化水素不純物の存在下でも本触媒は高い水素製造能力を示した。加えて、廃糖蜜から生成された発酵液を加熱蒸留して得た溶液を用いた試験でも 600℃

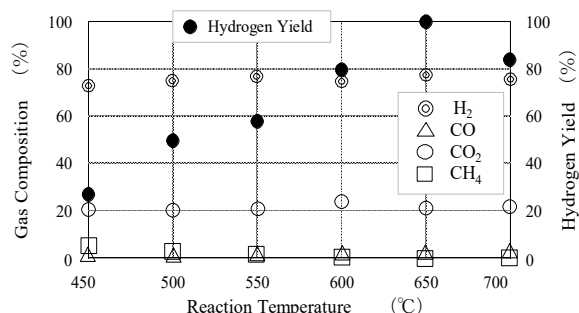


Fig. 7 Production Gas Composition and Hydrogen Yield of Reaction with Liquid Obtained by Heat Distillation of Fermentation Solution from Waste Molasses

以上で模擬エタノール発酵液成分と同様に高い水素製造能力を示した。

この水素製造手法を活用するアプリケーションとして、稲わら、麦わら等バイオマスが多く賦存する地方部での製造水素の、非電化鉄道における燃料電池電車への供給が考えられる。地方部においては、水素エネルギーの活用アプリケーションとして期待されている燃料電池自動車の普及拡大は現状遅れている。一方、過疎化が進むような地域では公共交通機関としての鉄道の役割は大きい、非電化路線が多く、これら路線へのディーゼル車導入により走行中に多くの二酸化炭素を排出している。2050年での温室効果ガスの排出を実質ゼロとする日本の環境目標に対して、地方部の鉄道輸送では対応できるソリューションが乏しい現況にある。燃料電池ハイブリット電車は現在JR東日本が2030年度での実用化を目指して開発段階にある¹⁵⁾。

筆者らは、鳥取県米子市と境港市を結ぶ境線において、この開発中の燃料電池電車の仕様をもとに、大山北麓に多く賦存する稲わらを原料として、本稿に示すバイオエタノールからの水素製造方法を用いた水素供給の、量的及び経済的実現可能性の検討結果を今後報告する予定である。

謝辞

本試験装置を譲渡、寄付いただいた九州大学水素エネルギー国際研究センターに、また、共同研究者である三菱化工機株式会社研究開発部の諸氏に感謝申し上げます。

大阪府立都島工業高等学校理数工学科の瀬戸義雄教諭からは廃糖蜜からのエタノール発酵液を提供頂いた。ここに記して謝辞を述べたい。

参考文献

- 1) M. Tajima, Hydrogen Production from Biomass for Sustainable Energy Supply, R. Takai, S. Koda (ed.), Rethinking the Sustainable Development Goals, 85-98 (2020), Nakanishiya Shuppan Co. Ltd., Kyoto
- 2) M. Tajima, S. Yokoyama, K. Imou, Estimation for the Creation of Hydrogen Stations with Various Biomass Resources, Journal of Japan Solar Energy Society, **34**(6), 87-94(2008)
- 3) M. Tajima, S. Yokoyama, K. Imou, Potential Study for Creation of Hydrogen Stations with Various Biomass, Journal of Japan Solar Energy Society, **35**(5), 63-69 (2009)
- 4) 田島正喜, 燃料電池自動車専用水素を下水から製造し供給する-水素リーダー都市プロジェクト, 産官学連携ジャーナル, **11**(9), 16-19 (2015) (DOI: 10.1241/sangakukanjournal.11.9_16)
- 5) 田島正喜, 下水汚泥等からの水素製造に関する研究—バイオマスからの水素ステーション形成の考え方—, 再生と利用, **39**(147), 15-21 (2015)
- 6) 山地憲治編, 水素エネルギー社会, 61-65 (2008), エネルギー・

資源学会, 大阪

- 7) 副島敬道, 山本哲史, 瀧寛則, 屋脊下亮, 非食用バイオマスからのエタノール転換技術, 大成建設技術センター報, **42**(61), 1-5 (2009)
- 8) 木本浩介, 木質系原料からのバイオエタノール製造プロセス, 三井造船技報, **201**, 24-29 (2010)
- 9) 北海道立総合研究機構林産試験場, 北海道に適した新たなバイオマス資源の導入促進事業資料 3, 木質バイオマスからのエタノール生産実証調査, 79-86 (2011), 北海道開発局開発監査部開発調査課, 札幌
- 10) バイオ燃料生産拠点確立事業検証委員会報告書, 1-7 (2014), 農林水産省食料産業局, 東京
- 11) K. Hirata, K. Katagiri, T. Maeda et al., Hydrogen Production by Ethanol-Steam Reforming Using Cu/ZnO/Al₂O₃ Catalyst, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B, **79**(808), 2587-2591 (2013) (DOI: 10.1299/jpes.5.218)
- 12) N. Hashimoto, M. Shoyama, Evaluation of Ceramics Supported Ni Catalysts Designed for Steam Reforming of Ethanol, Reports of the Mie Prefecture Industrial Research Institute, **1**(38), 32-36 (2014)
- 13) JIS K 0123, General rules for gas chromatography / mass spectrometry, 44 (2018), Japanese Standard Association, Tokyo
- 14) M. Kawahara, Study of the Behaviors of Organic Impurities in Distillation Column of Bioethanol Production Plant from Waste Wood, Dissertation, Graduate School of Engineering, Yokohama National University, 29-34 (2016)
- 15) ハイブリット車両（燃料電池）試験車両の開発, JR 東日本ホームページ, (accessed Dec. 1 2024), <https://www.jreast.co.jp/development/theme/energy/energy04.html>