

令和2年度
グリーンLPガスの生産技術開発に
向けた研究会調査報告

グリーンLPガスの生産技術開発に向けた研究会 報 告 書

令和3年5月12日



巻頭言

宇宙から見ると、物質の面で閉鎖系である地球において、これまで私たちは有限な化石資源を採掘し、これをエネルギー源として暮らしてきました。一方で地球の持続性を担保するためには、いずれは化石資源利用からの脱却が望まれます。このような中、各国でグリーンディールが喧伝され、わが国も 2050 年カーボンニュートラルに向けて、大きく舵を切ろうとしています。

5 千万人近いひとびとの日々の暮らしを支える LPG においても、グリーン化は喫緊の課題です。グリーン LPG を考える上では、炭素源をバイオマスに頼るか、廃棄物に頼るか、あるいは回収二酸化炭素に頼るしかありません。いずれも現時点では技術的にも社会的にも非常に難しいものではありませんが、だからといって、私たちはグリーン化と言うミッションに向けて歩みを止めるわけにはいきません。今回、日本 LP ガス協会並びに経済産業省資源エネルギー庁が音頭をとって、グリーン LPG を考える研究会を立ち上げ、このような報告をまとめることができた事は、この分野の技術革新にとって大きな礎となるでしょう。

皆で知恵を寄せ合い、新たな世界に向けて進んでまいりましょう。

2021 年 3 月

グリーン L P ガスの生産技術開発に向けた研究会
座長 関根 泰
(早稲田大学 先進理工・応用化学 教授)

はじめに

世界的な気候変動対策や、環境・エネルギーに関する課題への取組みの高まりを受け、日本政府は令和 2 年 10 月 26 日の菅義偉首相の所信表明演説で、日本国内の温室効果ガスの排出を 2050 年までに「実質ゼロ」（カーボンニュートラル）にする方針を表明した。カーボンニュートラルとは、CO₂やメタン等の温室効果ガスの排出量を、森林吸収や排出量取引等で吸収される量を差し引いて全体としてゼロにすることであり、政府はこれまで「2050 年までに 80%削減」としてきた目標を、明確な年限を示した上で、ゼロという数値目標に大きく踏み込んだことに対し、内外から評価が示されている。

このような環境問題に対する政府の動きの前段階で、日本 LP ガス協会（以後「日協」と略称）は国連の推奨する持続可能な開発目標である SDGs への取組みを、「LP ガスが果たす環境・レジリエンス等への長期貢献について」（日協 SDGs）という小冊子にまとめ、令和 2 年 6 月対外的にリリースした。この中では、SDGs の 17 の目標の内、SDG7（エネルギーをみんなに、そしてクリーンに）、SDG9（産業と技術革新の基盤をつくろう）、SDG11（住み続けられるまちづくりを）、SDG13（気候変動に具体的な対策を）の 4 項目に焦点を絞り、LP ガスが長期的に社会に対して果たすべき役割が示されている。

特にカーボンニュートラルに関わる部分においては、SDG7 では、過去において日協が取り組んだ LP ガスにバイオマス液体燃料（DME）を混合する方式やバイオマス分散発電に LP ガスを有効利用する検討が行われたことを示し、SDG9 では先鋭的に行われている人工光合成や都市ガス業界が進めているメタネーションの動向の他、プロパネーション¹（LP ガス合成）についても検討を進める方向性を示した。又、SDG13 では高効率機器の普及や近年 SO_x規制の問題から導入の進んでいる LPG 燃料船についても言及した。

しかしながら、これまでも少なからず国際社会や政府が進めるカーボンニュートラルに向けた動きがあったにもかかわらず、LP ガス自体をグリーン化する検討については、LP ガス業界はこれまで具体的な取組みを行っておらず、方向性を定めることに対しても十分な知見を得ていたとは言えなかった。このため、経済産業省資源エネルギー庁石油流通課とも協議の上で、令和 2 年 11 月より「グリーン LP ガスの生産技術開発に向けた研究会」を産官学連携で、日協内に立ち上げ、LP ガスのグリーン化に向けたシーズを多方面から知ることによって、令和 2 年度末までに LP ガス産業がとりうるカーボンニュートラルへの方向性を明らかにすることとした。

「グリーン LP ガスの生産技術開発に向けた研究会」では、現有既存の技術に加え、実現可能性のある先見的な技術にも焦点を当て、LP ガスがカーボンニュートラル社会で果たすべき姿についても活発に議論されたことにより、これまでの知見を遥かに上回る理解を業界として得ることが出来た。

本報告書は、これまで「グリーン LP ガスの生産技術開発に向けた研究会」で進められた議論の整理とそこから導き出される方向性を総括し、今後 LP ガス業界が 2050 年以降も重要なガス体エネルギーとして LP ガスが消費者から選ばれ続けるための道筋を提示するものである。

¹ プロパネーション、ブタネーション：メタネーションに対する LP ガス合成の総称。2020 年日本 LP ガス協会が SDGs を刊行した際に造語した。

目 次

第一章 総論	5
1. 研究会の目的	7
2. 研究会委員名簿	8
3. 研究会におけるプレゼンテーション内容	9
4. 研究会基調講演プレゼンテーション	10
第二章 メタネーション	13
2-1 メタネーションの概要	15
2-2 メタネーションの実証試験について	18
2-3 SOEC メタネーション	21
2-4 メタネーション技術の整理	26
第三章 グリーン LP ガスの生産技術	27
3-1 LP ガス合成の概要	29
3-2 FT 合成	29
3-3 DME 合成	33
3-4 家畜ふん尿からの LP ガス合成	43
3-5 LP ガス合成	48
3-6 LP ガス合成技術の整理	53
第四章 LP ガスのグリーン化に必要な原料	57
4-1 水素	59
4-2 バイオマス	62
4-3 廃棄物ガス化	65
4-4 バイオガスプラント	69
4-5 LP ガスのグリーン化に必要な原料の整理	71
第五章 LP ガスのグリーン化の海外の動向及び他の業界からの期待	73
5-1 欧州におけるバイオ LP ガスの動向	75
5-2 米国におけるカーボンニュートラルの動向	78
5-3 地産地消エネルギーによる地域のカーボンニュートラル化	81
第六章 まとめ	85

第一章 総論

第一章 総論

1. 研究会の目的

LP ガス（液化石油ガス: liquefied petroleum gas）は、プロパン（ C_3H_8 ）・ブタン（ C_4H_{10} ）等を主成分とし、圧縮することにより常温で容易に液化できるガス体燃料（気体状の燃料）である。

LP ガスの原料ソースは原油随伴、天然ガス随伴及び石油精製由来がこれまでの主流であったが、米国を中心としたシェール革命により、シェールオイル、シェールガス随伴由来の LP ガスが現在では主流になりつつある。

上記の通り、LP ガスは組成、ソースの点から見れば含炭素のガス体エネルギーである上に化石由来の燃料であり、言葉通りの脱炭素化には追随はできないが、本質的には他の化石燃料と比べ低炭素排出でその他の排出もクリーンである上に、災害時にはその分散型の特長を発揮する強靱性が評価されていることから、将来どのような社会環境になったとしても、必要且つ欠くことの出来ない重要なエネルギーであり続けると期待されている。

世界的な潮流に対応した日本政府のカーボンニュートラルに向けたエネルギー産業への働きかけは加速度的に進んでいる。令和 2 年 12 月には令和 2 年度の補正予算として 10 年間の 2 兆円規模のグリーンイノベーション基金事業が発足した。

特に都市ガス業界では二酸化炭素と水素及び再生可能電力からメタンを合成するメタネーション技術の開発・実証が低炭素化の切り札として広く喧伝され、多方面でその方向性が認められている。LP ガス業界に目を向けてみると、「はじめに」で述べた通り、過去において LP ガスのバイオ化について一定の検討が行われたものの、残念ながら現在までその具体的な検討が継承されることはなかった。

LP ガスのエネルギーとしての比類なき優位性については論を待たないが、現在のカーボンニュートラルに向けた急速なうねりの中で、LP ガスだけが現在の時点でグリーン化への積極的な対応を示さないことは、急速に転換・変貌する国のエネルギー政策の中で現状のまま足踏みすることに他ならず、将来も約束されている優位性を現時点で切り捨て、将来の貴重な存在価値を自ら損なうことになりかねない。

このような観点からも、将来も LP ガスが消費者に選ばれるエネルギーであるために、LP ガス産業としてグリーン化に向けて活用できる技術を可能な限り明らかにし、その中のフィージビリティのあるものを選択し、できる限り速やかに社会実装する方向性を内外に示すことこそが、LP ガス産業全体が今示すべき唯一の選択肢である。

LP ガスのカーボンニュートラル化には、LP ガス或いはそれを代替するエネルギー自体をグリーン化するアプローチと、LP ガスを消費する機器、設備環境を低炭素化するアプローチがあり、当然ながら両方の複合的な組み合わせによってカーボンニュートラルを 100%に近づける必要がある。本研究会の目標は前者の検討のみを対象とし、専門家の様々な方面からの分析を結集した上で、この分野でのグリーン化の方向性を具体的に示すことである。

2. 研究会委員名簿：

＜委員会委員＞

早稲田大学 先進理工・応用化学
経済産業省資源エネルギー庁石油流通課

〃 〃 〃

国立研究開発法人産業技術総合研究所
(一社) 全国 LP ガス協会

〃 〃

日本 LP ガス協会

〃 〃 調査部会

〃 〃 品質部会

関根泰教授 (座長)

橋爪優文企画官

家田和幸課長補佐

坂西欣也領域長補佐

村田光司専務理事

田中敏雅常務理事

吉田栄専務理事

熊野匡昭部会長 (ENEOS グローブ)

東修平部会長 (岩谷産業)

＜オブザーバー＞

大阪ガス(株)イノベーション本部エネルギー技術研究所
国際石油開発帝石(株)再生可能エネルギー・電力事業本部
(株)サイサン技術開発部

国立研究開発法人産業技術総合研究所
エネルギー・環境領域省エネルギー研究部門

千代田化工建設(株)地域環境プロジェクト事業本部
(一社) 全国 LP ガス協会

アストモスエネルギー(株)

ジクシス(株)

(株)ジャパンガスエナジー

大西久男副理事

巽孝夫テクニカルコンサルタント

小出達弥部長

小熊光晴総括研究主幹

安井誠本部長補佐

笠間英樹保安・業務 G 長

浜口達弥企画開発部副部長

上林稔環境設備保安部長

久松勝之販売促進部長

＜事務局＞

日本 LP ガス協会

〃 〃 企画グループ

〃 〃 技術グループ

上平修参与

三木田裕彦グループリーダー

久保田誠副主事

3. 研究会におけるプレゼンテーション内容：

＜第一回研究会：2020年11月20日（金） 10：00～12：00＞

- ・「非在来型触媒でエネルギーの環境と未来をつくる」： 関根座長
- ・「メタネーション関連技術および産総研の取り組み紹介」： 産業技術総合研究所望月主任研究員
- ・「バイオ燃料開発を巡る日本 LP ガス協会のこれまでの動向」： 日本 LP ガス協会三木田企画 G L

＜第二回研究会：2020年12月17日（木） 10：00～12：00＞

- ・「水素社会の実現に向けて」： 岩谷産業（株）津吉取締役
- ・「FT 合成について」： 千代田化工建設（株）安井理事
- ・「CO₂－メタネーション技術の現状と課題」： 国際石油開発帝石（株）
若山シニアコーディネーター

＜第三回研究会：2021年1月22日（金） 10：00～12：30＞

- ・「SOEC メタネーションと C1～4 成分併産への挑戦」： 大阪ガス（株） 大西エグゼクティブリサーチ
- ・「バイオマスからの DME 等のクリーン燃料の製造技術に関する産総研の取組み」
： 産業技術総合研究所 坂西領域長補佐
- ・「JFE エンジニアリングにおける廃棄物ガス化技術及びバイオマスプラント」
： JFE エンジニアリング（株）岩崎首席
理事、宮田アクアチムリーダー
- ・「グリーンイノベーション基金について」： 経済産業省石油流通課橋爪企画官

＜第四回研究会：2021年2月26日（金） 10：00～12：30＞

- ・「地産地消エネルギーによる地域のカーボンニュートラル化」： 大成建設(株) 新領域推進室白石様
- ・「高効率 LPG 合成プロセスの開発」： HiBD 研究所 藤元代表理事
(東京大学名誉教授)
- ・「グリーンイノベーション基金について」： 経済産業省石油流通課橋爪企画官

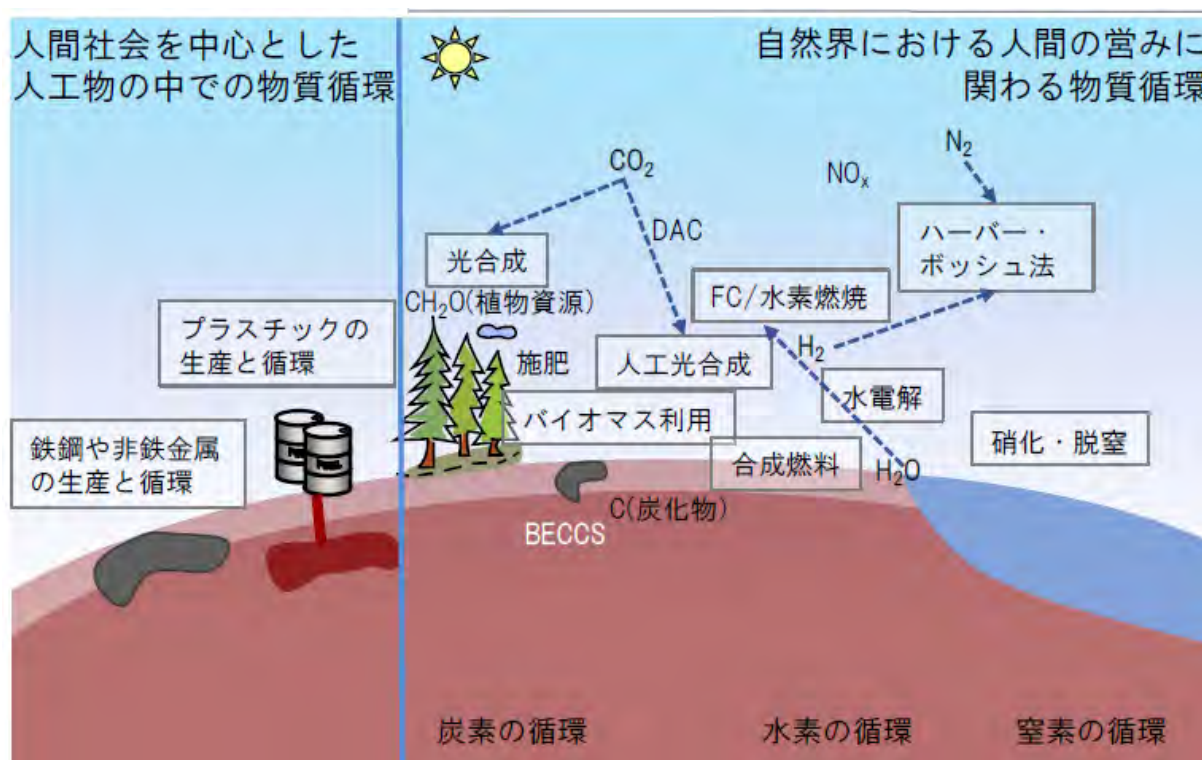
＜第五回研究会：2021年3月25日（木） 10：00～12：00＞

- ・「家畜のふん尿から新しいエネルギーを創出する技術を開発」： 古河電工(株)営業統括室本間部長、
研究開発本部先端技術研究所福島部長
- ・「DME 混合による LP ガスの低炭素化」： 日本 DME 協会大野理事長他

4. 研究会基調講演プレゼンテーション：（関根座長）

「非在来型触媒でエネルギーと環境の未来をつくる」

宇宙から見れば地球は閉鎖系であるが、そのことを忘れて地球 3 億年の遺産である化石エネルギーを燃やして CO_2 に変えている。この CO_2 を元に戻す循環には人間社会を中心とした物質循環と自然界の循環があるが、人間界のものは人工的に行うことが可能なため比較的容易に対応出来るものの、自然界で循環して戻すのは自然と人工的な循環を相互に関与させなければならない。



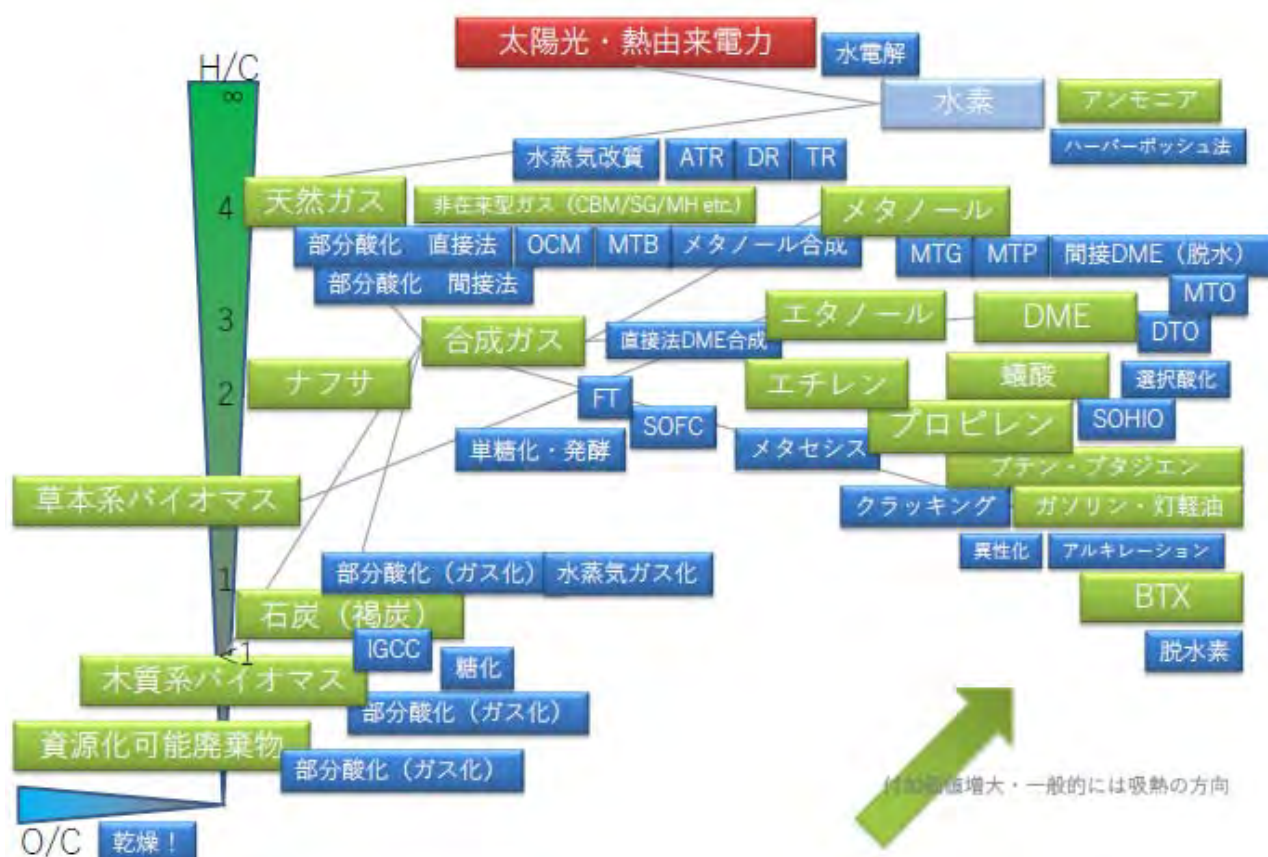
（関根座長資料より抜粋）

図1 自然界での循環と人工物の循環

世界的にも循環や社会への貢献に向けての ESG 投資が主力になり、化石エネルギーへの投資は座礁資産²と見做されている。エネルギー資源は H/C 比率の高い石炭・石油・ガスが、燃焼効率の良さから多く使われてきたが、これらだけに依存することは出来ない。O/C 比率の高いバイオマスや二酸化炭素の利活用はこれから重要になる。又、炭素の循環を考えれば水素だけに依存する訳にも行かないし、貯蔵・輸送が困難な水素は別の形、即ちアンモニアや LP ガスで貯蔵し、運ぶべきである。

エネルギー（主要化学品）は一物一価（同一価格）であり、同じ規格のものであれば、誰が作ろうが同じであり、安いものが入れば太刀打ち出来ない。エネルギーであれば熱量がその基準となる。

² 座礁資産：座礁資産とは、市場環境や社会環境が激変することにより、価値が大きく毀損する資産。特に最近注目されているのが石炭、石油、天然ガスなど化石燃料資産。現在、化石燃料は重要なエネルギー源と考えられており価値のある資産だが、気候変動対応により二酸化炭素排出量削減をしなければならない状況となるとエネルギー源として活用できなくなり、資産価値が大きく下がると考えられている。



(関根座長資料より抜粋)

図2 各種化学反応のプロセスと原料・生成物

最近資源エネルギー庁から出た総合エネルギー統計によれば、一次エネルギー総量は 20.49×10^{18} J/年であり、この内約 4 割の 7.4×10^{18} J/年が燃料として使われており、LP ガスは自動車用途で 0.03×10^{18} J/年であるものの、民生用途は 0.2×10^{18} J/年は大きな量であり、この LP ガス民生部門のグリーン化は大変だという認識が必要である。

プロピレンを水素化してプロパン、ブタンを作るという考え方もあるが、価格の高いものを組み合わせて、安いものを作るというのは避けたい。P2G(Power to Gas)³の様に風力発電からの水素でメタンを作ることも出来るが、現在のメタネーションの技術そのままプロパン、ブタンを作ることは出来ない。

アメリカでは Electrofuel という考え方があり、バクテリアを利用して電気と二酸化炭素と水素から炭化水素を作る ARPA-E プロジェクトがオバマ政権で始まったが、トランプ就任後研究が打ち切れ、バイデン新大統領は選挙公約で ARPA-C (C は Climate と Carbon 両方の頭文字) として再開意思を示している。MIT (マサチューセッツ工科大学) では再生可能エネルギー由来の水素と炭化水素を使って嫌気バクテリアからアセテートを作り、その後そのアセテートと好気バクテリアから C_4 程度の油を作る検討も進んでいる。これら反応に使うバクテリアは遺伝子操作で性能が高められ、暗中嫌気で地下でも反応を進めることも出来、プラントの場所を選ばないため実現のポテンシャルは高く、フィージビリティも高いと見ている。

又、UCLA (カリフォルニア大学ロサンゼルス校) ではバクテリアを電極につけることで、再生可能エネルギー由来の

³ P2G(Power to Gas) : 余剰電力を水素に変換して貯蔵・利用する方法

電力と二酸化炭素から出来たギさんアセテートをバイオ燃料にする試みも進められている。CAPEX から見ると
厳しい部分はあると思われる。

- アメリカDOE（エネルギー省）の
ARPA-Eプログラムの重点分野の一つ
- Electrofuellは、従来のバイオ燃料の10倍の
効率を目指して検討が進められている
- 13のプロジェクトに対して3年で40億の
ファンド
- 多くはバクテリアを利用して、電気と
二酸化炭素と水素から合成燃料を得る試み
- 高温タイプや好気嫌気併用など多くの
パターンあり



（関根座長資料より抜粋）

図3 バイオ系燃料合成の新潮流 Electrofuel

関根研究室では、低温で非在来型の触媒プロセスで化学品を作る合成、例えば、エチレンをメタンから作るとかアンモニアを作る研究を進めている。本年 1 月には二酸化炭素と水素から低温・常圧でイオニクス制御によって反応させるメタネーションを発表し、メディアに大きく取り上げられた。2020 年 10 月には「低温での二酸化炭素のメタン化技術の開発」で ICEF のトップ 10 イノベーションに選ばれた。

第二章 メタネーション

第二章 メタネーション

一般社団法人日本ガス協会（以後「ガス協会」と略称）は、「カーボンニュートラルチャレンジ 2050」～2050年ガスのカーボンニュートラル化による脱炭素社会への貢献～を 2021 年 3 月に発表し、この中で以下 3 点の取組みを行うことで、カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現に向け、積極的に貢献することを表明している。

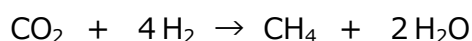
- ①需要側の取組みである「徹底した天然ガスシフト・天然ガス高度利用」による着実な CO₂ 削減
- ②並行して、**メタネーション**や水素利用等、供給側のイノベーションによる「ガス自体の脱炭素化」
- ③併せて、優れた国内技術の海外展開などの「海外貢献」による世界の CO₂ 削減への貢献や「CCUS に関する技術開発やその活用等」

ガス協会が目指す方向性は LP ガス業界が求めるものと基本的には同じであり、「ガス自体の脱炭素化」であるメタネーションの動向を理解した上で、我々（LP ガス業界）が進むべきプロパネーション、ブタネーション（LP ガス合成）にもその実践を活用する必要がある。

研究会ではメタネーションの研究開発に携わった産業技術総合研究所（以後、「産総研」と略称）と、現在メタネーションの実証試験を行っている国際石油開発帝石（以後「INPEX」と略称）にプレゼンテーションをいただき、更にはその発展型とも言える「SOEC メタネーション」技術について、大阪ガスよりご紹介をいただいた。

2-1 メタネーションの概要（産総研プレゼンテーションより）

メタネーションは 1911 年に仏の化学者サバティエが発見した二酸化炭素と 4 倍の水素とからメタンを合成（サバティエ反応⁴）する技術であり、300～500℃の発熱を伴う反応である。



日本では 1993 年東北大学橋本名誉教授によってグローバルに二酸化炭素リサイクル構想が提案され、実用化の検討が行われた。

現在、進められているメタネーション合成技術は、NEDO の「次世代火力発電等技術開発／次世代火力発電基盤技術開発／CO₂ 有効利用技術開発」補助金を使って、発電・化学分野等から回収した CO₂ と再エネ由来水素等からメタンを合成する開発が行われたものであり、INPEX、日立造船(Hitz)、名古屋大学と共に産業技術総合研究所（以後「産総研」と略称）が研究に寄与した。

⁴ サバティエ反応：水素と二酸化炭素を高温高压状態に置き、ニッケルを触媒としてメタンと水を生成する化学反応。フランスの化学者ポール・サバティエが発見した。この反応は発熱反応であり、反応器の触媒に 300℃近くの大きな温度勾配が生じる、また 300℃近くの低温では十分な反応速度が確保できないのに注意する必要がある。

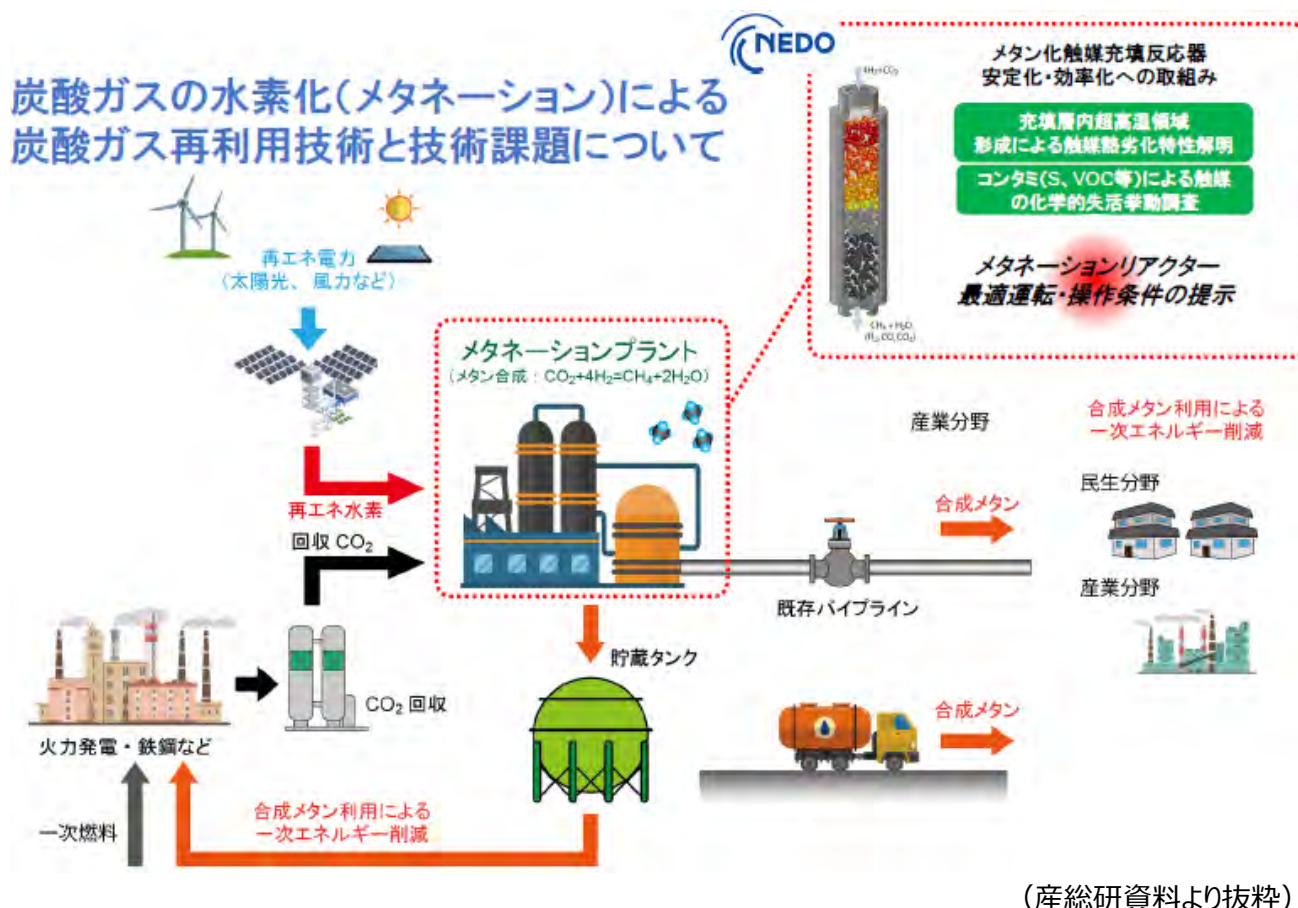


図 4 炭酸ガスの水素化（メタネーション）による炭酸ガス再利用技術と技術課題について

メタネーション技術の課題の一つは、高温の発熱反応であり、非常に選択性が高く活性も高い触媒で一気に反応が起きることで、600～700℃の急激な熱上昇が生じるため、触媒性能低下やシンタリング⁵が発生する。又、CO₂に様々な不純物、特に硫化水素分を含む場合には触媒の急激な失活が見られるため、純度の高いCO₂の調達にも課題はある。石炭火力からのCO₂は硫黄化合物、特に硫化水素分が高いと見ている。

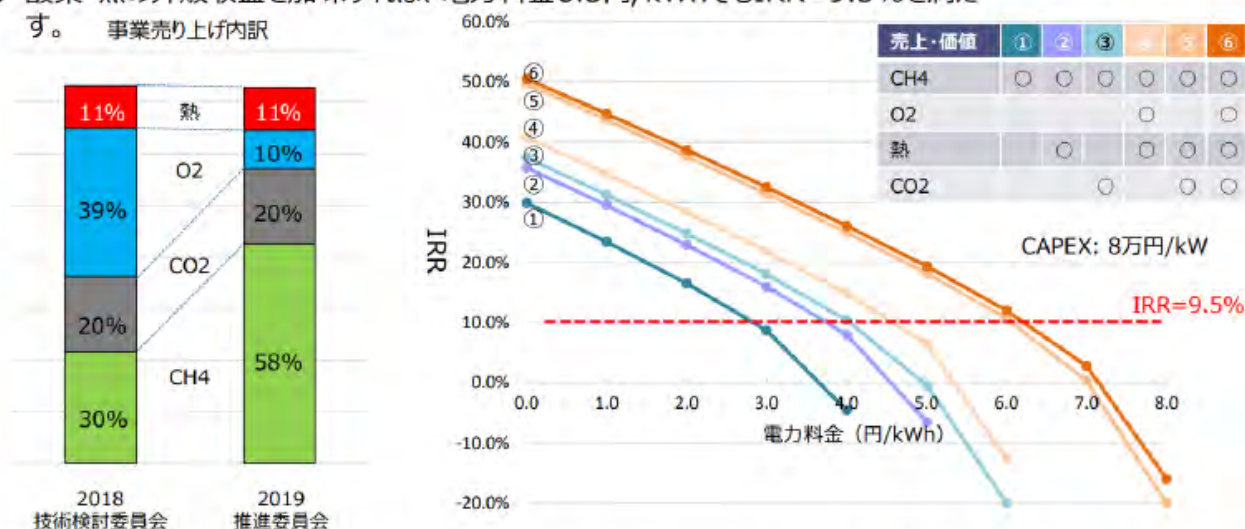
反応進行直後に700℃近い発熱が発生する問題については、活性の低い触媒から高い触媒を傾斜的に配置することで、一定の抑制ができることが判っており、硫黄化合物の問題については圧力を上げることで失活を抑制できることが判っている。

又、現在 INPEX と日立造船が新潟長岡で進めている8NM³/hの実証プラントでは、通常の電源からの水電解で水素が製造されているが、今後は風力・太陽光等の再生可能電源から製造するものと思われる。

しかしながら、現在の検証で進められている経済性評価では、60,000NM³-CO₂/hで事業が行われ、IRR9.5%を満たすには電力料金が2～3円/kWh弱であることが条件であり、現在2030年度の再エネ電力価格が7円/kWhとして示されていることから見ると、相当に野心的な戦略が必要と思われる。

⁵ シンタリング：触媒等粉末状の固体をその融点よりも低温度で加熱した場合に、粒子が結合し、高い硬度をもつ物体が形成され、触媒反応が失活する現象。

- ◆ 60,000 Nm³/h事業の収益性評価
- ◆ メタン販売だけでも電力料金が3円/kWh弱であればIRR=9.5%を満たす。
- ◆ 酸素・熱の外販収益を加味すれば、電力料金6.3円/kWhでもIRR=9.5%を満たす。 事業売り上げ内訳



- ◆ PV2030+のロードマップ（2004年策定）における2030年の再エネ価格7円/kWhを試算に適用すると、国内生産モデルはIRR=9.5%を満たせない。ただし、2004年から状況は大きく変わっており、導入量・価格共に野心的な戦略が必要。
- ◆ CO₂メタネーションの事業化には、電気代は2-3円/kWh以下が望ましい。

<https://www.nedo.go.jp/content/100902796.pdf>

（産総研資料より抜粋）

図5 メタネーションのプロセス適用性・経済性評価

メタネーションの欠点はメタンしか出来ないことであり、メタンは他の燃料との混和なく 100%で使われることは少ない。都市ガス用途でも LP ガスを熱量調整で使うことが必要である。

プロパン、ブタンはメタノール／エタノールを経由してでも、エチレン／プロピレンからでもプロパン、ブタンの様な C₃、C₄ を作ることも出来るが、高付加価値なものから低付加価値のものを作ることは抵抗がある。二酸化炭素を分解して得られた一酸化炭素をと水素から FT 合成⁶で作るという可能性もある。

FT 合成も古い技術であり第一次世界大戦に開発され、メタンから WAX まで合成可能な反応であるが、重合反応であるだけに炭化水素を特定し、選択的に作るのはむづかしく、軽油を選択的に合成できるのも 35～40% である。プロパン、ブタンを作ろうとしても選択性は連鎖成長確率を 0.3 にする必要があり、メタンも同時に出来てしまう。

FT 法は二酸化炭素やバイオマスからの合成で再エネとして様々な炭化水素が作れる利点はあるものの、欠点は採算をとるためには大規模な設備投資が必要となることである。

⁶ フィッシャー・トロプシュ法（Fischer-Tropsch process, FT 法）は一酸化炭素と水素（合成ガス）から触媒反応を用いて液体炭化水素を合成する一連の過程。触媒としては鉄やコバルトの化合物が一般的である。この方法の主な目的は、石油の代替品となる合成油や合成燃料を作り出すこと。

2-2 メタネーションの実証試験について（INPEX プレゼンより）

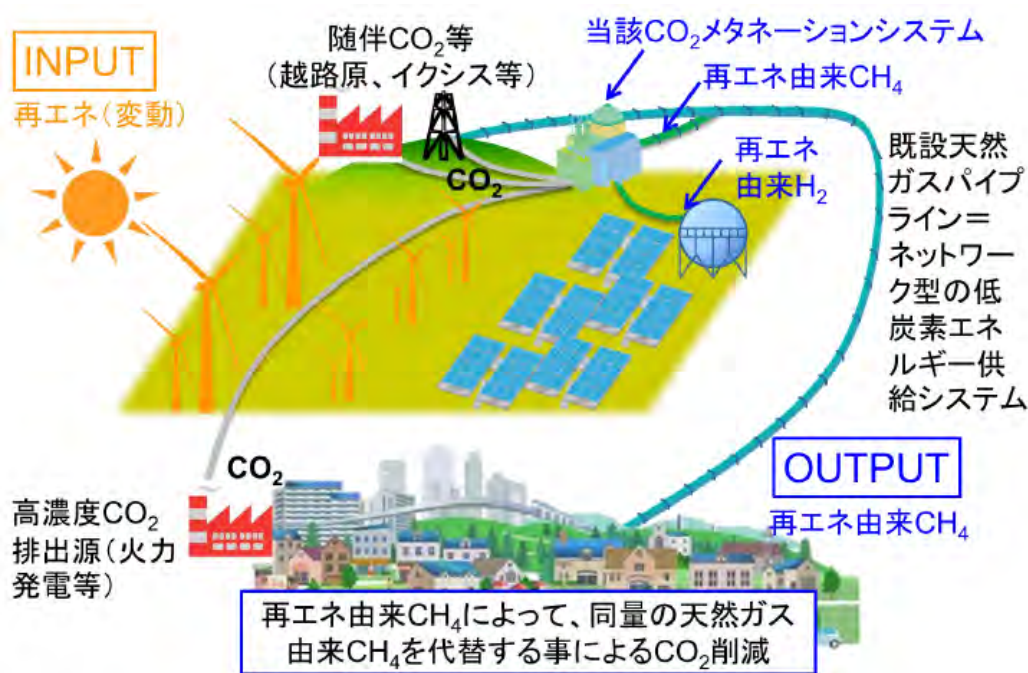
INPEX では、ビジョン 2040 を受けた中期経営計画の中に、再エネの取り組み強化と電気、水素、メタンのバリューチェーンの構築を目標としている。これは電気、水素、メタンの 2 次エネルギーとしてのバリューチェーンであり、電気、水素は使用時の CO₂ 排出ゼロであり、電気、メタンは既存インフラが充実し、水素、メタンは貯蔵が容易という特徴がある。INPEX はこれまでは 1 次エネルギーのメタンを供給していたが、2 次エネルギーのメタンを供給して、このバリューチェーンを結ぶ一環として CO₂-メタネーションがあるということである。

これまで、再エネの大量導入は、既存の電力インフラに依存していたが、メタネーションによって天然ガスインフラによる再エネ導入が可能となる。将来的には水素インフラの整備が出来れば、両インフラからの水素供給が可能となる。

経済産業省の 2050 年に向けたガス事業の在り方研究会において、熱量調整用 LP ガスのグリーン化をどうするのかについて問われている。又、これまで行ってきた NEDO 事業においても、メタンの高熱量化も議論されており、INPEX においても LP ガスのグリーン化は課題と認識している。

メタンには天然ガス由来、再エネ由来、バイオガス由来のものがおり、バイオマス由来は製造時に CO₂ を吸収しているため燃焼時に CO₂ を排出してもニュートラルと見られている。一方、再エネ由来のメタンも、再エネ電力を利用して CO₂ が固定化されているため、カーボンニュートラルとの扱いが妥当であるが、現在再エネ由来のメタンはカーボンニュートラルと認められておらず、この部分の制度設計が必要となってくる。

将来の CO₂ は大気中からのキャプチャーか若しくはバイオマスにしなければならないという動きが特に欧州から出てきており、そもそも大気中の CO₂ は化石燃料を燃やした結果ではあるものの、そのまま化石燃料としての CO₂ を使うのは許されないという議論が増えてきている。IEA でも合成燃料製造用の CO₂ は、バイオマス由来か大気中からキャプチャーした CO₂ でなければならないとされている。欧州とはエネルギー需給構造が大きく異なる我が国においては、独自且つ国際的に認められる制度設計が必要である。



(INPEX 資料より抜粋)

図6 CO₂メタネーション技術の概念図

技術を見てみると、再エネ電力からメタンを製造する各段階でエネルギーロスが生じる。最初、電力から水素を作る段階で水電解すると熱が生じてロスが生じ、輸送でもロスが生じる。メタネーション合成でも発熱反応のため熱ロスが生じ、各段階で出る熱や副産物を有効利用しなければならない。

中東アブダビでは 1.3 円/kWh の太陽光発電が世界最安値で提示されているが、水素製造にかかわる電気分解槽は、日本の SIP⁷では5万円/kW、米国では 3.4 万円/kW、欧州では 7.7 万円/kW と未だ高い目標価格であり、METI の望む既存のメタン価格に到達することは難しい。

メタンを再エネや水素のエネルギーキャリアにした場合、メタネーションの部分は新設設備になるものの、ほぼ既存のインフラが使えるため天然ガスのサプライチェーンはそのまま有効活用できる。ユーザー側でもボイラーなどの変更なしに低炭素化が可能である。

INPEX としては、再エネ由来の電力で作られた水素と天然ガスに随伴する CO₂ をメタネーションシステムでメタンにし、これを INPEX が持っている天然ガスパイプラインを使って再エネ由来メタンとして供給することである。

どこで CO₂ を削減するかについては、再エネ由来メタンが同量の天然ガス由来メタンを代替することで、削減された天然ガスから排出される CO₂ を削減するという考え方である。

現在の実証プラントは新潟県長岡市の INPEX 長岡鉱場越路原プラントの敷地内に 8 Nm³-CO₂/h 規模で建設されており、これから段階的にスケールアップを実施していく予定である。400 Nm³-CO₂/h へのスケールアップは、現在検討中である。プラントに供給される原料は長岡の天然ガス田から随伴する CO₂ と水電解から発生した水素である。

反応器の中の諸反応のメカニズム解析は、産総研、名古屋大学にお願いしている。産総研には触媒の被毒メカニズムの検討、名古屋大学には反応器の中のシミュレーションをしてもらっている。これらの情報をフィードバックして、スケールアップ設計に反映すると同時に、全体を俯瞰した経済性・適用性検討を INPEX にて行っている。

メタネーション設備は奥行 10m、幅 20m、高さ 10m であり、電気分解槽が上にあるのは、安全設計の離隔距離が取れなかったためである。稼働中の天然ガスプラントの敷地内に設置したことから、レイアウト上このような形となった。これで出来た水素を裏側のコンテナに移送し、昇圧・混合した後に反応に使う。

⁷ SIP(Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program) : 総合科学技術・イノベーション会議(CSTI) が司令塔機能を発揮して、府省の枠や旧来の分野を超えたマネジメントにより、科学技術イノベーション実現のために創設した国家プロジェクト。



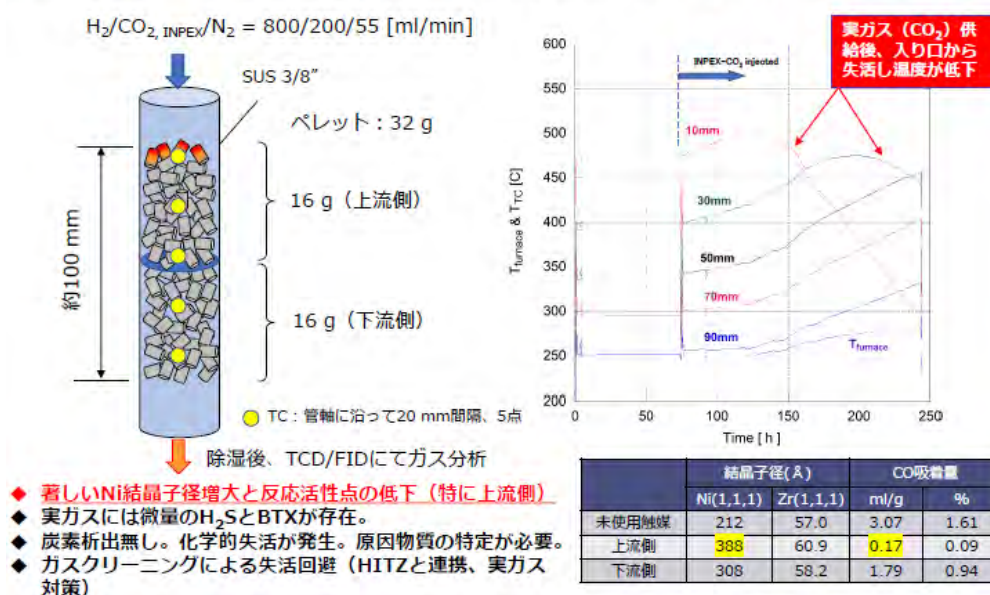
（INPEX 資料より抜粋）

図7 メタネーション試験設備

触媒を 500℃と 600℃に水素雰囲気下で加熱後、メタネーション反応を行った。500℃では活性はあるものの、600℃では活性低下しており、シンタリングも生じている。Ni 触媒であり Ni の濃度が高いために熱で Ni が凝縮することが分かっている。

INPEX の実際の随伴 CO₂ ガスを配って導入試験を行ったが、発熱後触媒が失活して反応活性が落ちてきた。INPEX のガスには微量の硫化水素と BTX⁸が入っているため、それが悪さをしているのではないかと考えられている。ガスクリーニングが必要となるが触媒被毒とトレードオフの関係にある。

随伴CO₂直接導入実験（INPEX越路原プラントからの実ガス）



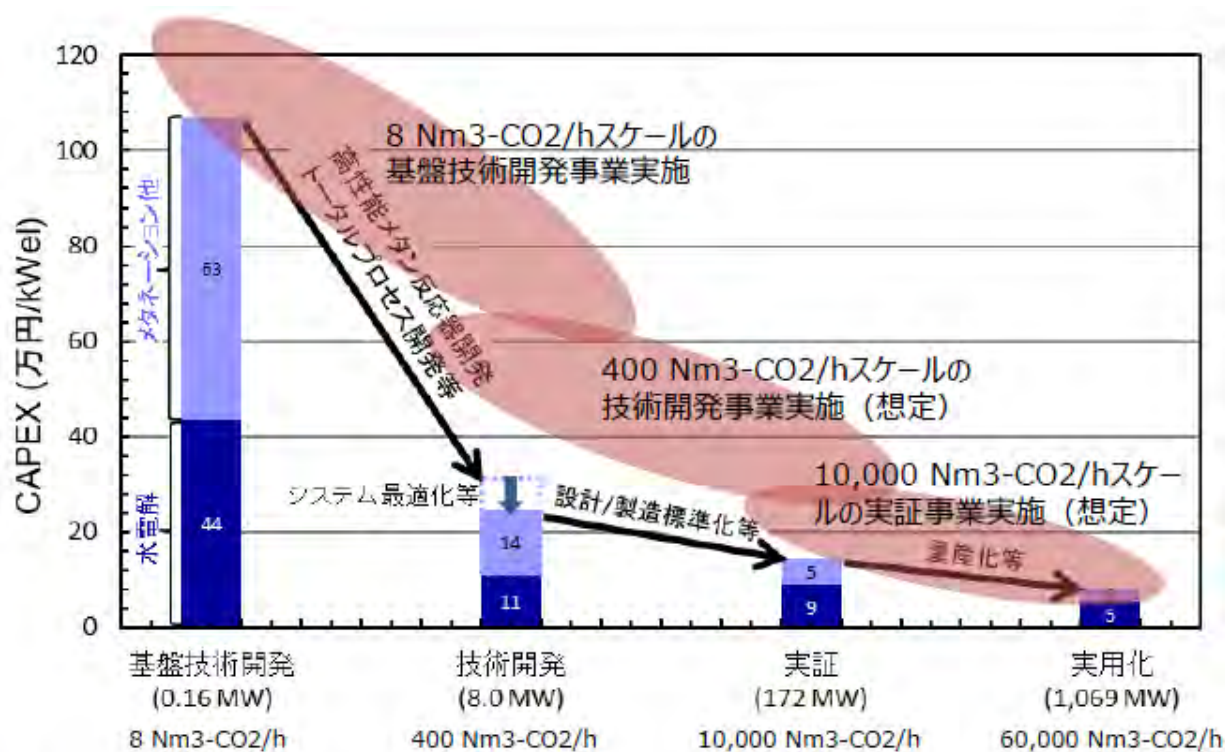
（INPEX 資料より抜粋）

図8 触媒活性マネジメント技術(AIST/NU)

⁸ BTX: 芳香族炭化水素のベンゼン、トルエン、キシレンの総称。

経済性検討では、メタンだけではなく、熱も売るのが、酸素も売るのがを加味し、メタンを含む全て外販することを条件に計算すると、メタンの外販だけでは電気代は 3 円/kWh、全てが売れて 6 円/kWh 程度を許容できると試算されている。このため中東、豪州における安価な太陽光発電の活用を検討している。

プロセスの経済性評価では量産化すればメタネーション設備が CAPEX 3 万円/kW で出来ることが目標となっている。



- ◆ スケールアップによるCAPEXの低減イメージ図
- ◆ 事業を進めていく中で、課題やコスト削減対象が明確となり、徐々に削減していけるイメージ

(INPEX 資料より抜粋)

図8 プロセス適用性・経済性評価 (INPEX/Hitachi)

事業スケールであるが、将来的に 6 万 Nm³- CO₂/ h を低コストで出来るのかをもう一度反応器から見直している最中である。この目的に到達するための技術開発や実証を行うために開発を進めている。

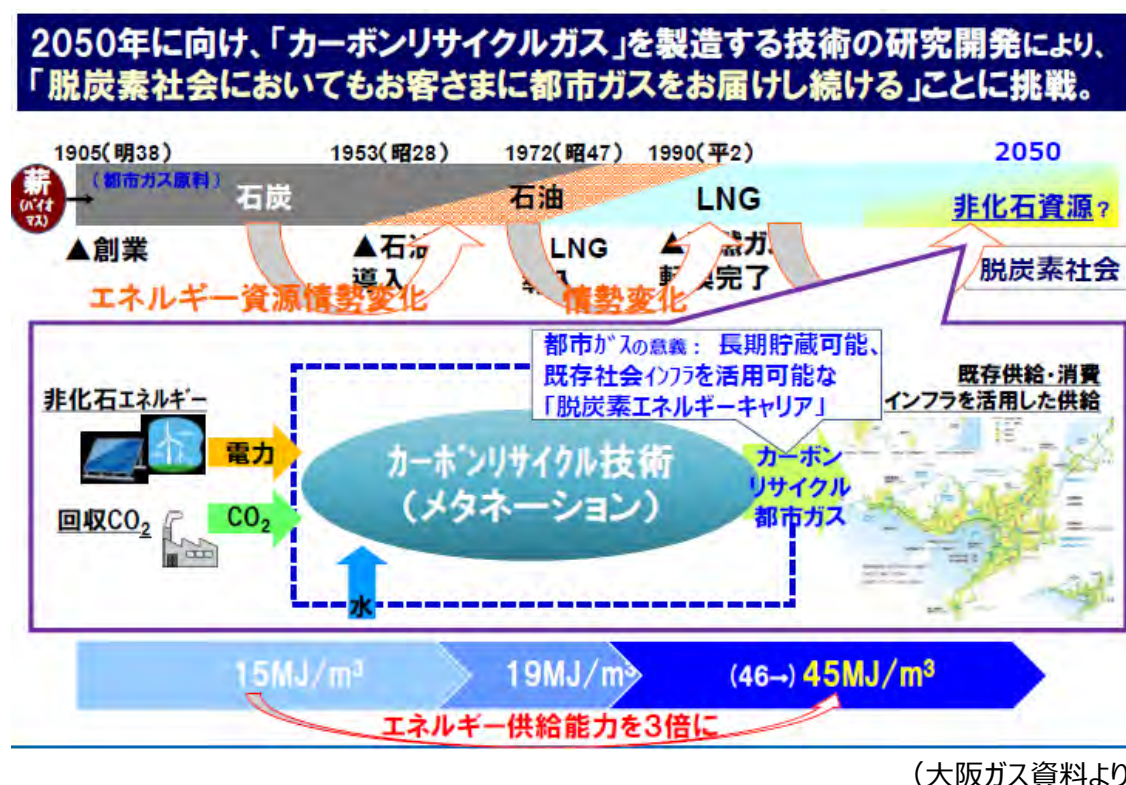
6 万 Nm³- CO₂/ h のプラントとは年間 100 万トンの CO₂ を処理するということである。スケール毎に費用を書いているが、これは電解槽とメタネーション設備の目標コストであり、各種 BOP⁹を含んでいない。

⁹ BOP(Balance of Plant) : メタネーションや電解槽を稼働させるための補器類を指す。

2-3 SOEC メタネーション（大阪ガスプレゼンテーションより）

都市ガス業界はエネルギー情勢の変動に応じて変貌を遂げてきたが、数年前より 2050 年に向けて非化石資源への切り替えを意識した取り組みを始めている。その中の様々な取り組みの一つとして、カーボンリサイクル技術による低炭素・脱炭素ガスを製造する技術の研究開発によって、脱炭素社会においても都市ガスを必要とされるお客様に、供給し続ける手段を確立する挑戦をしている。

電力部門では、全量非化石電源化するという姿、更には参考値として再エネの構成比率 50～60%を意識してシナリオを考えていこうとしている。燃料の脱炭素化については、化石由来から非化石由来への転換をはかることを指針とした脱炭素化が示されている。



(大阪ガス資料より抜粋)

図9 都市ガスの脱炭素イノベーションへの挑戦

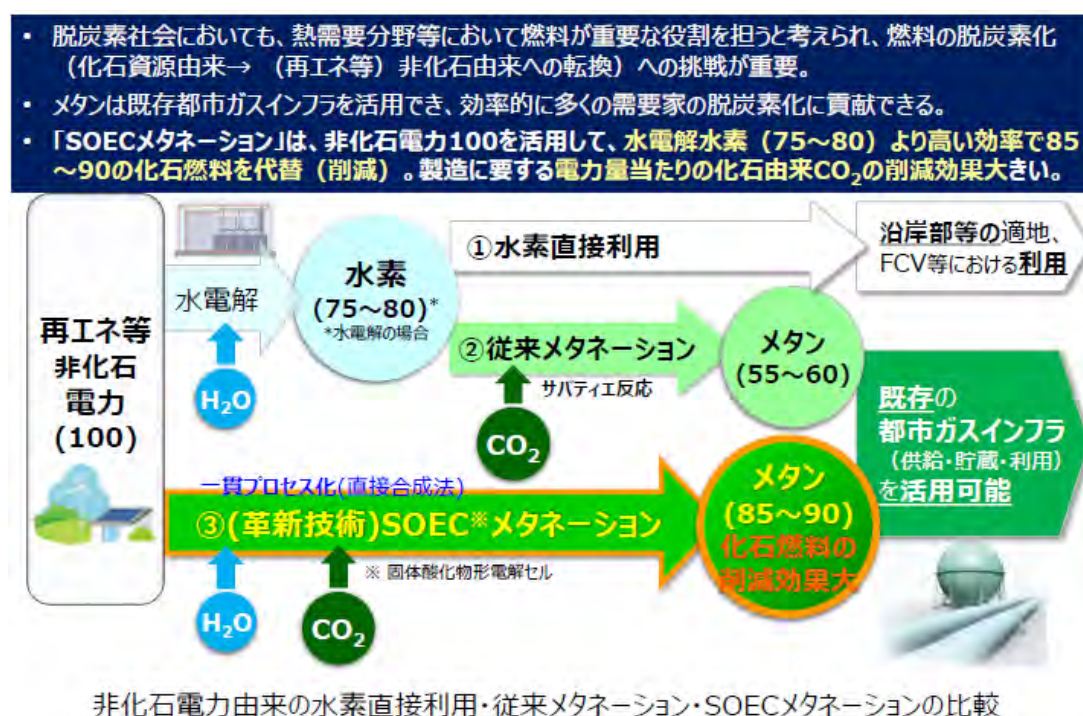
再エネ由来の水素は沿岸部等の適地や、FCV 等の利用は進むものと考えており、この分野にもガス事業者が貢献することを考えている一方で、我々の既存の供給インフラの有効活用を考え、メタネーション、つまり回収してきた CO₂と製造した水素からの合成メタンの供給への挑戦を将来に向けて進めている。

2025 年に大阪で開催される大阪・関西万博が予定されており、大阪ガスは生ごみによるバイオガス中の残存 CO₂を再エネ由来の水素によってメタネーションすることによって、メタン純度の高いものにアップグレーディング¹⁰する様なデモンストレーション（実証）を提案している。

¹⁰ アップグレーディング：品質の悪い石油等を品質の良い付加価値の高い石油等に変換する操作。

SOEC¹¹メタネーションだが、従来のメタネーション、すなわち一旦再エネから作った水素を更にメタネーション（サバティエ反応）によって変換するというものに対比すると、再エネ等の非化石電力から水とCO₂を原料として、あたかも直接合成するかのように、一貫プロセス化することで変換効率を高めるものである。

SOECメタネーションの効率は、非化石電力100を使って、水電解水素の場合には75～80のものが将来出来るであろうと言われているものよりも高く、100の再エネ電力から85～90の化石燃料を代替、或いは削減効果を持つものを作り出すことが出来る。言い換えれば、製造に要する電力量当たりの化石由来のCO₂削減効果が非常に大きいということであり、水素を上回る効果を期待できる、更に既存のインフラを活用することも出来るメリットが出せるポテンシャルがある技術である。



非化石電力由来の水素直接利用・従来メタネーション・SOECメタネーションの比較

(大阪ガス資料より抜粋)

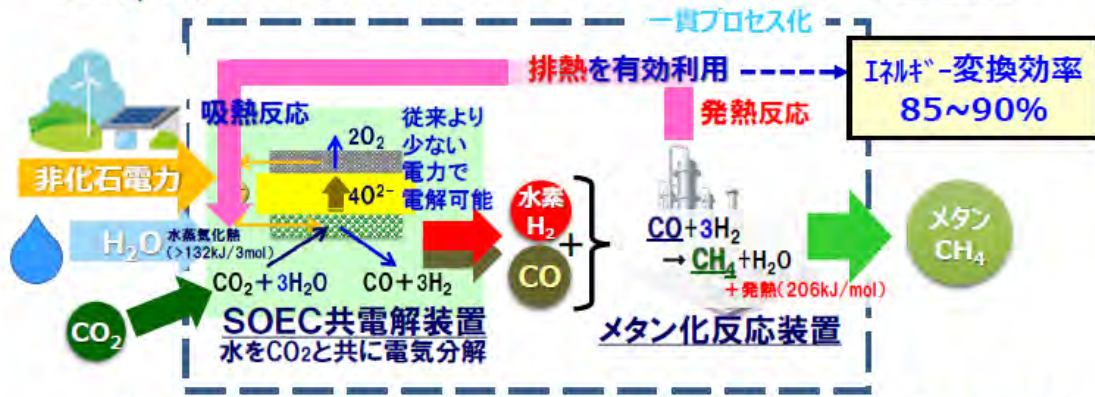
図10 都市ガスの脱炭素「SOECメタネーション」

SOECメタネーションの装置構成は電気分解素子であるSOECを内蔵した電解装置とメタン化触媒を内蔵したメタン合成装置の二つで構成されており、様々な排出源から回収してきたCO₂を再利用する形で活用し、水を加熱して水蒸気として電解装置の中に導入する。

SOEC電解装置に再エネ等の非化石電力を投入することによって、CO₂、H₂Oからそれぞれ一原子ずつの酸素を抜いてやることで、結果的にCOと水素に変換されるというものである。これをメタン合成装置に導入するとメタン化触媒の表面上で中間体形成が進み、それを分解することでメタンと水の分子が生成される。このメタンについては、ガス供給インフラに注入し、水はもう一度リサイクルする。

¹¹ SOEC : Solid Oxide Electrolysis Cell (固定酸化物形電解セル)

- ・ SOEC*1を用いて、水蒸気をCO₂と共に非化石電力等により電気分解(共電解)することによって水素とCOを生成し、メタン化反応によりCH₄を合成するもの。 *1 Solid Oxide Electrolysis Cell : 固体酸化物形電解セル



- ・ メタン化反応(発熱反応)で発生する熱をSOEC共電解反応(吸熱反応)に有効利用することが可能であり、共電解に必要な電力を削減できるため、エネルギー変換効率が高い

(大阪ガス資料より抜粋)

図 11 革新的メタネーション「SOEC・メタン反応技術」

この反応の中で特徴的なことは、メタン化触媒は発熱反応であり、この反応排熱を水の気化に上手く回すことによって、全体の変換効率を高めることが出来ることで、これがこのシステムの特徴である。プロセス全体としての高い効率（投入電力 100 に対して得られるメタンのエネルギー量が 85～90 という非常に高いもの）が期待できる。

CO₂ 単体でも SOEC を使えば酸素を引っこ抜いて CO に変換すること自体は可能であるが、CO₂ 単独の電解と比較すると水を共存させた「共電解」の状態では電圧が低く、より低電圧で高い電流が得られる。これは電極の中で、所謂逆シフト反応（生成した水素が CO₂ と反応して CO を生成する）が起きているため、これが寄与している。CO₂ の逆シフトによる CO への変換を、共電解の場合はこれを高温のセル側で行いサバティエ反応の場合は、より低温なメタン化の反応の中で行うという点異なる。

高温で装置を動かすことで比較的低電圧で電解が出来、通電したときに生じるジュール熱を反応の吸熱にうまく回せることで、熱自立運転が可能となるのが特徴であり、更にはメタン化の排熱を水蒸気に使うことで全体として投入電力を最小化することが出来る。

将来、再エネが電源構成中 46% 導入されると、出力制御率は 32% となるとの試算もある。将来、スポット市場で卸売取引が拡大されることを想定すると、価格がゼロに近づく時間帯が相当発生することになる。これを上回る 50～60% の再エネが入ってくるとなると、更に大きな余剰が発生する可能性があり、これを有効に使うという将来を我々は意識すべきである。

SOEC メタネーションはまだ研究段階であり 2040 年代には商用化を目指しているものの、将来この技術が実現することで、以下の 4 点が期待できる。

- ① 従来のメタネーションには水素の調達が必要であることに対して、将来再エネが大量導入されると**脱炭素電源の供給過剰になる時間帯の電力を有効活用**できる可能性があること
- ② 電解水素より**エネルギー変換効率が高い**こと。

- ③ランニングコストの大半は電力代が占めるが、従来のメタネーションに比べて**電力の使用量が少ない**こと
将来的に再エネ電力の供給過剰時間帯のコストの抜本的な低下が期待出来れば、現行の L N G に近い製造コストも期待できると考えている。
- ④現行の都市ガス **45MJ に近い熱量のカーボンリサイクルガスの合成**も技術的には可能であること

SOEC 共電解メタネーションプロセスは右から左に逆に見ると、エネファーム TypeS という燃料電池の中で進むプロセスの逆反応である。このためこれまで培ってきた SOFC 技術、触媒技術を応用し、メタンだけでなく、増熱成分 (C_2 、 C_3 、 C_4) まで FT 合成¹²を使って選択的に併産する技術の研究成果もこれに乗せていきたいと考えている。

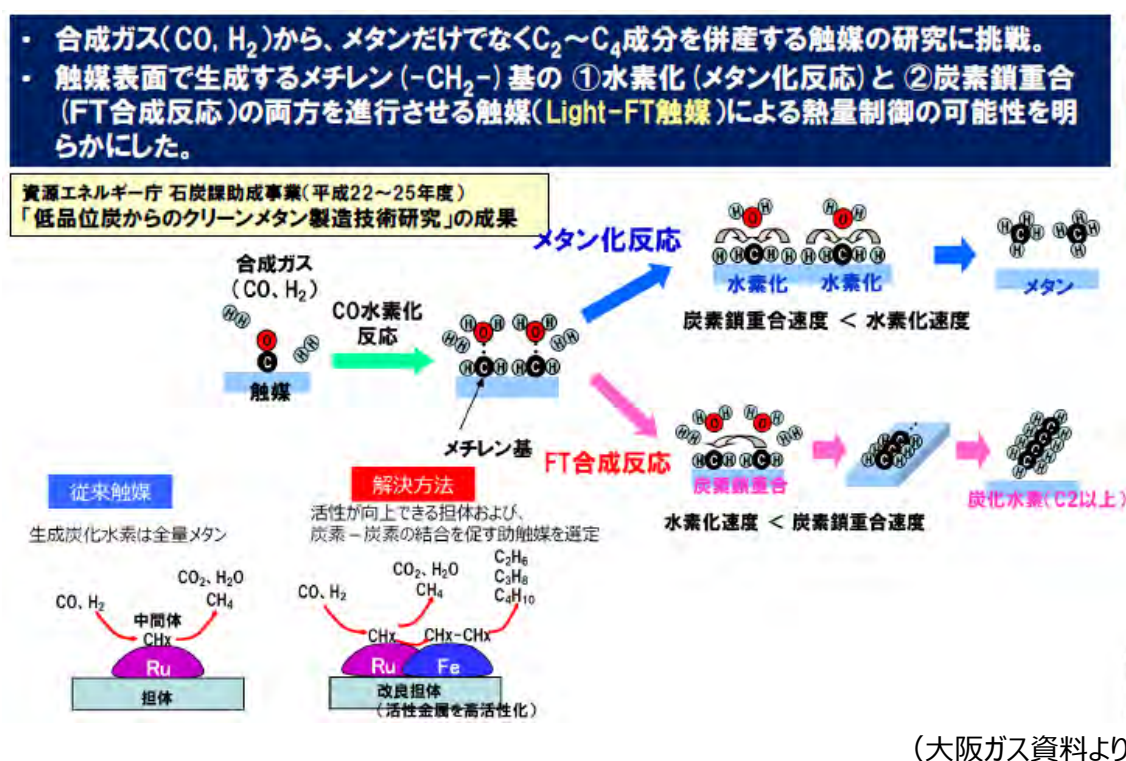
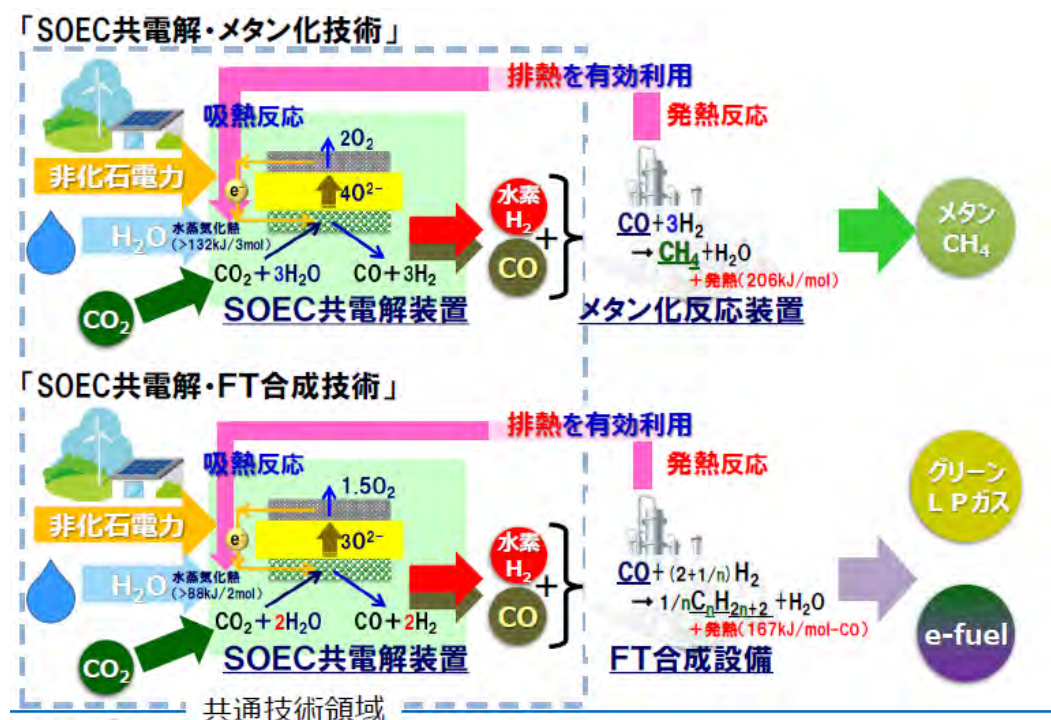


図 12 メタン+増熱成分併産への挑戦

SOEC の原料となる合成ガス (CO と水素) を作るというところまでは、出口がメタンであろうが、石油業界の目指す e-Fuel¹³であろうが、LP ガスでも共通の領域と考えられる。更に、この合成ガスをスタートとして後段側の成分に応じた触媒・反応条件を選択すると、都市ガス、LP ガス以外にも様々なものが得られる。カーボン数が少ない領域では、**グリーン LP ガスにも繋がる**かもしれない。

¹² FT 合成 (フィッシャー・トロプシュ (Fischer-Tropsch) 合成: 一酸化炭素と水素 (合成ガス) から触媒反応を用いて液体炭化水素を合成する一連の過程。触媒としては鉄やコバルトの化合物が一般的である。この方法の主な目的は、石油の代替品となる合成油や合成燃料を作り出すこと。

¹³ e-fuel: 再生可能エネルギーで発電した余剰電力の貯蔵・利用方法の一つで、余剰電力により製造した水素や、その水素と濃縮回収した二酸化炭素やバイオガス中の二酸化炭素を原料として合成・製造したカーボンニュートラルな燃料のこと



(大阪ガス資料より抜粋)

図 13 本技術開発に関連する当社の保有技術と取組み

又、SOEC に投入するのを水だけにすると水素が得られる、ひいてはアンモニアにも繋がる。もしかすると SOEC の高温電解技術は、様々な非化石電力由来の非化石燃料、化学品の高効率合成の鍵になるのではないかと考えている。

実用化を考えるに当たり、後段側については実プラント化の経験があるし、それぞれの業界で経験のあるものを組み合わせることになるが、SOEC の部分を大きく出来るのか、安くできるのかが、実用化において大きな課題となる。

この技術は、メタン以外にも様々な多様なものの高効率な合成を、発熱反応と SOEC の入り口の吸熱を上手く組み合わせることで、エネルギー変換効率を高く出来るという特長を活かしたものにそれぞれ展開が可能と考えており、様々な業界との連携を深めたいと考えている。

2-4 メタネーション技術の整理

メタネーション技術は CO_2 と水素からワンパスで目的生産物のメタンを作ることに特化した触媒による反応であり、プロパン、ブタンを選択的に製造することは出来ない。

又、メタネーション合成反応は著しい発熱反応であるために制御が難しいことと、原料となる CO_2 と水素を独立して調達するには 化石由来の原料に依存せざるを得ず、再生可能なソースから安定的、大量に調達することは現実的には困難と思われる。特に、再生可能電力を用いた水電解による水素の調達はメタネーションのボトルネックになる可能性が大きいと思われる。このため、メタネーション合成の延長線上にグリーン LP ガスの製造を置くことへの期待は出来ない。

しかしながら、SOEC 共電解メタネーションは、過剰となる安価な再生可能電源を大前提としていることと、2040 年まで開発が必要な技術であるという認識は持たねばならないものの、水（水蒸気）と CO_2 からメタンを製造する革新的なプロセスであり、その上に、水と CO_2 を改質して得られる合成ガス（ CO + 水素）から FT 反応で C_2 、 C_3 、 C_4 を得るという可能性も示唆している。

このことから、グリーン LP ガスの製造を我々が今後進める中で、SOEC 共電解メタネーションの開発と連携しながら、そのプロセスから得られるであろう LP ガスも、LP ガスのグリーン化構想の中に有機的に取込む必要があると考える。

第三章 グリーン LP ガスの生産技術

第三章 グリーン LP ガスの生産技術

前述の通り、都市ガス業界ではメタネーションによるメタンの合成がカーボンニュートラルの解決法としてクローズアップされている。LP ガスにおいても、理論上は種々の技術によって再生可能原料から LP ガス合成（プロパネーション、ブタネーション）することが出来ることは知られているものの、LP ガスに特定した合成技術を現時点で商用化検討しているところはなく、まとまった形での考察が加えられることはなかった。

研究会においては、前述のメタネーションの現状と課題を知ることを皮切りに、現在まで進められてきた FT 合成、LP ガス 合成技術、及び現在開発中の技術に焦点を当てて、社会実装に向けた展開が可能化の考察を行うと共に LP ガスに性状の似た再生可能原料から製造される DME（ジメチルエーテル）の状況についても考察を加えた。

3-1 LP ガス合成の概要

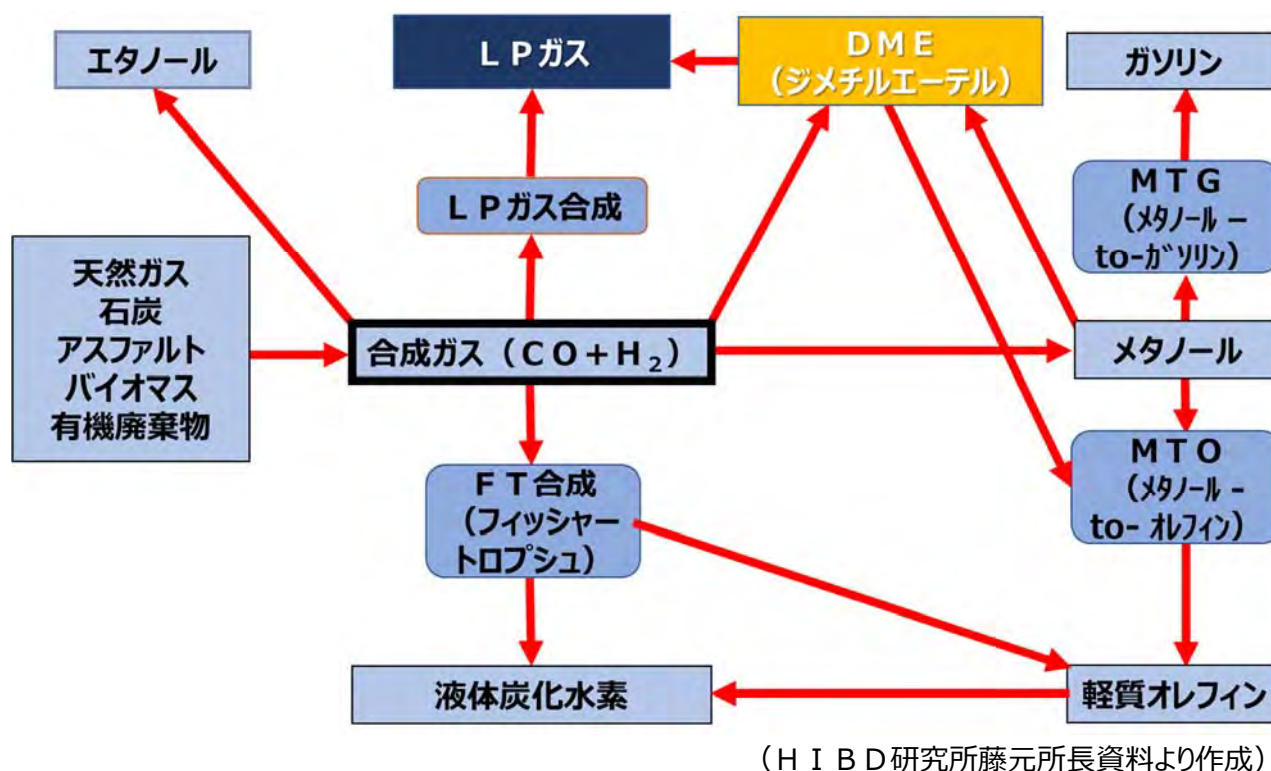


図 14 合成ガスを通じた合成燃料

天然ガス、石炭、アスファルト、バイオマス、有機廃棄物といった原料から、色々な方法でガス化すると合成ガス（CO と水素）になる。CO と水素が出来ると、これからは色々なものが合成出来る。合成ガスから直接 LP ガスに行くルート、直接或いはメタノールを経由して DME に行くというルートもある。

3-2 FT合成（千代田化工建設プレゼンテーションより）

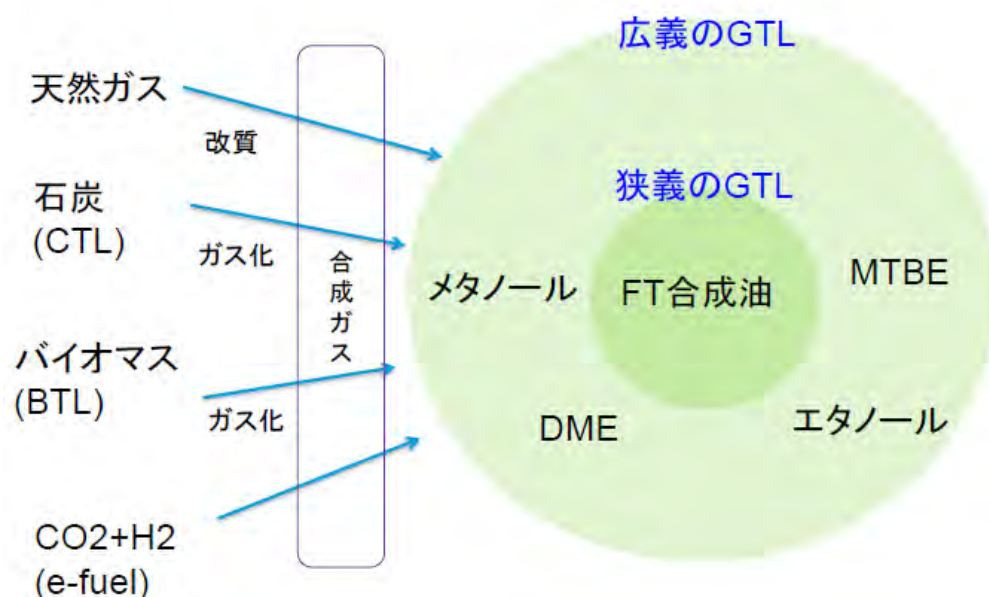
1902 年サバティエが一酸化炭素と水素からメタン合成をスタートし、FT 合成は 1924 年にフィッシャーとトロプシュにより炭化水素を合成したことによる。FT 合成は「困ったときの FT 合成」と言われ、石油の戦いであった第二次世界大戦では石炭から人造石油を作る目的で技術開発が進んだ。1936 年や 1944 年には日本、ドイツでもプラントが作られ、石炭から油が作られた。

戦後、アパルトヘイトで石油が入らない南アではサソール(SASOL)が、国内に豊富な石炭から油を作り始め、シェルやエクソンモービルも研究を行ってきた。今大きなプラントを持っているのはサソールとシェルである。

日本も 2000 年以降、ジャパン GTL¹⁴が経済産業省と JOGMEC の支援を受けて、民間 6 社で GTL プラント・プロセスを開発した。これはサソールやシェルはライセンスを外に出さなかったため、日本独自のプロセスを持たねばならない状況にあったためである。2005 年以降は米国のシェールガスを使った GTL への期待はあったが、長期的な油価の低迷等により残念ながらストップしている。しかしながら、「困ったときの FT 合成」の言葉通り、昨今 CO₂ の有効利用という一つの手段として再び脚光を浴びている。

FT 合成の原料は CO と水素（合成ガス）であり、C-O の結合を切って C-H の結合を繋いでいくのが FT のプロセスであり、触媒は鉄系、コバルト系が主体であり、目的生産物（油）・原料によって触媒の適正がある。

FT よりも GTL という言葉を使うケースが多い。天然ガスから液体の油を作るのが GTL であり、石炭をガス化して油を作るのが CTL¹⁵、バイオマスをガス化して液体燃料を作るのが BTL¹⁶であり、最近では CO₂ と水素から e-fuel という名前で、FT 合成を介して液体燃料を作ろうという動きが石油産業より出てきている。



（千代田化工建設資料より抜粋）

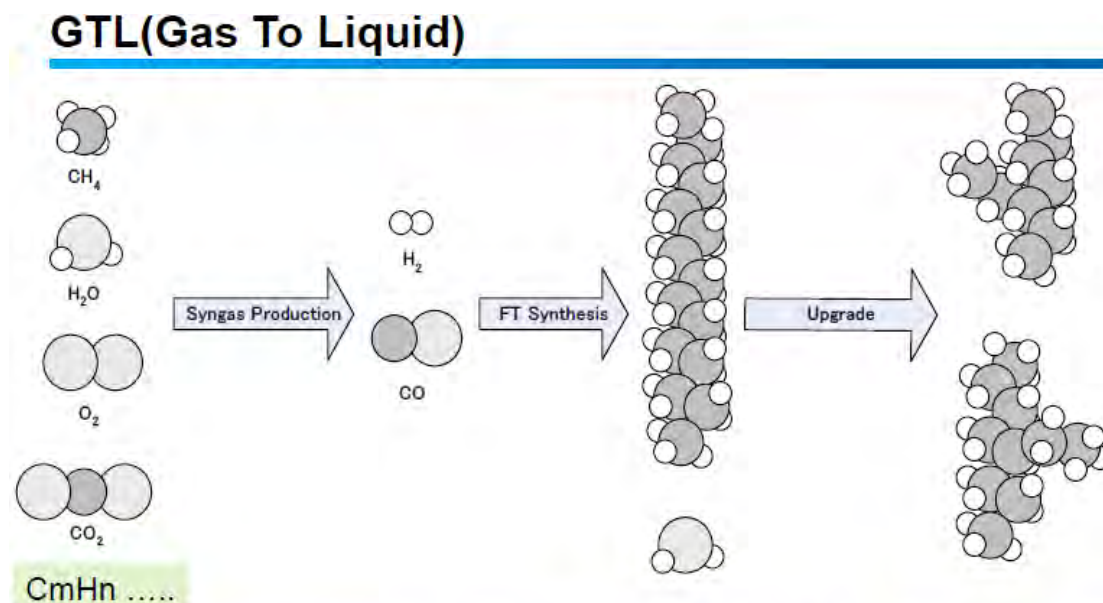
図 15 GTL (Gas To Liquid) ①

¹⁴ GTL（天然ガス液化；Gas To Liquids）：天然ガスを一酸化炭素と水素に分解後、分子構造を組み替えて液体燃料等を作る技術

¹⁵ CTL（石炭液化；Coal To Liquids）：石炭を液体の炭化水素に変形させる化学的工程。

¹⁶ BTL（バイオマス液化；Biomass To Liquids）：バイオマスをガス化しそれを合成して液化した燃料油

広義の GTL はメタノール、DME、MTBE、エタノールがあるが、狭義では FT 合成油という位置づけである。GTL はメタン、水、酸素、CO₂ を一度合成ガス（水素と CO）にして、FT 合成によって C と H のチェーンにした上で、分解して目的生産物（今までであれば軽油、灯油）にするのが一般的である。



GTL:天然ガス(CH₄が主成分)から合成ガス(H₂とCOの混合ガス)を製造し、さらにFT合成により液体Hydrocarbonを作る技術
⇒ 合成ガスは、バイオマスなどからも製造できる＝多様な原料が使える

(千代田化工建設資料より抜粋)

図 16 GTL (Gas To Liquid) ②

FT 反応は CO と二倍の水素からカルベン¹⁷と呼ばれる CH₂ を繋げていく反応である。触媒の上で CO と水素から CH₂ を作ってこれに CO と水素から CH₃-CH₂、更に伸びて CH₃-CH₂-CH₂ という形で連鎖的に成長させる。

生成物分布は連鎖成長確率 (α) で表現され、上記の連鎖成長とそれを脱離するための水素化脱離反応の二つをパラメータとしたものであり、今まで GTL/FT 合成は、出来るだけ長連鎖の油、 $\alpha = 0.9$ 以上を目標に触媒開発、プロセス開発がなされてきた。一方、C₃、C₄ で言えば α は 0.6 程度であり、WAX を生成させずに LP ガスを取ろうとすると一定のナフサ+の成分が出来てしまう。これが FT 合成の特長であり、問題点である。 α をコントロールして目的留分を作る触媒の開発については、今まで LP ガス目的で行っていないので開発要素があると思う。

連鎖成長確率をどの様にコントロールするかにはいろいろな説がある。大きい粒子の触媒は高価になるので出来るだけ小さな触媒で長いチェーンを作ろうというのがこれまでの研究の方向性であったが、LP ガスが主体となると、又別の考え方が必要になる。

¹⁷ カルベン (carbene) : 価電子を六個しか持たず、電荷を持たない、二配位の炭素のことである。或は、そのような炭素を持つ化学種の総称である。

FT合成反応

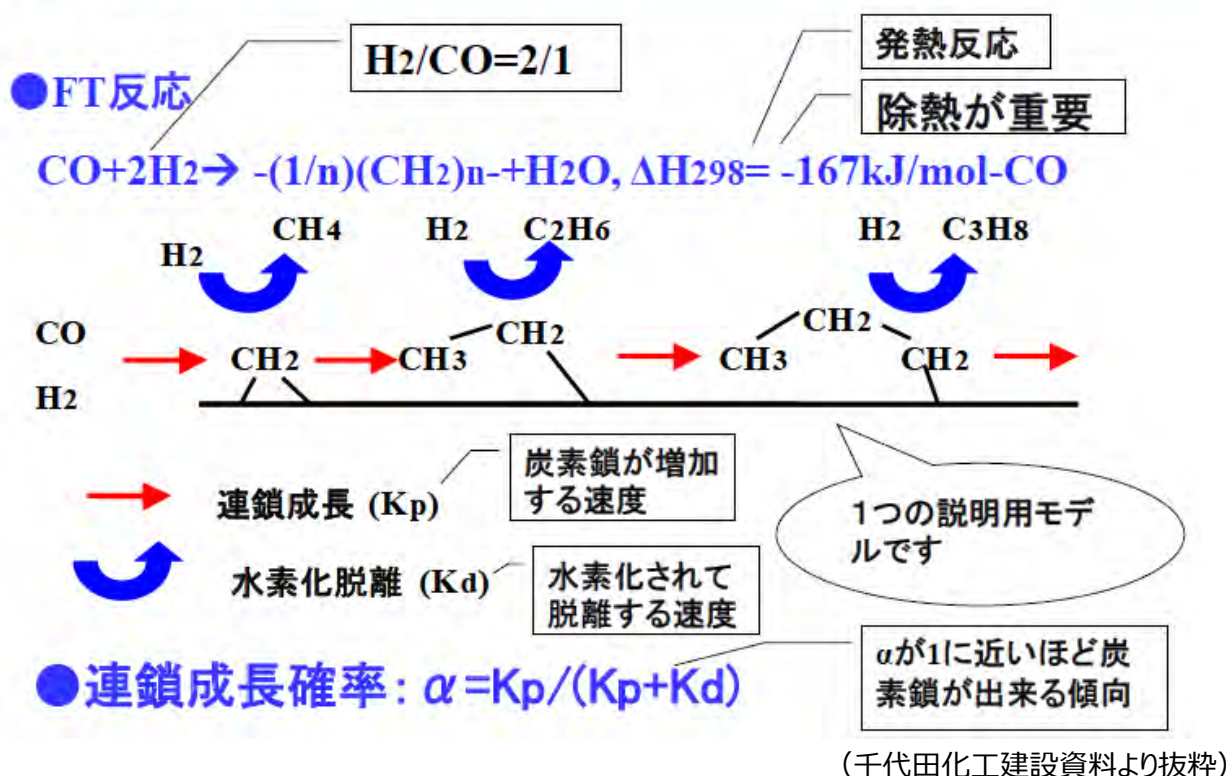


図 17 FT合成反応①

LP ガスをターゲットにした FT 合成は、 $\alpha = 0.6$ 程度の触媒を開発し、プロセスはコストを抑えるために、既存のリファイナリー或いはナフサクラッカー¹⁸が共有出来れば新規の設備投資を抑制する事が可能である。併産する重質成分は水素化分解¹⁹することで LP ガス化することは出来る。一方、オレフィンの比率は結構高いので、これをどうするのかも課題となる。

FT 合成では水が副生する。CO と H_2 から出来る水が触媒活性を低下させる。反応器の中は水と油があり、反応器の流動状態が悪いと触媒劣化の要因になり、劣化した触媒は入れ替える必要性が生じる。

FT 合成は一般に設備費が高くなるが、前述の通り製品に分布が出来てしまうため、反応をある程度抑えながら目的の生成物が最大になる様にリサイクルをする必要があるため、CAPEX の大きい投資となる。

又、FT 合成は非常に大きな発熱反応であり、これをどうコントロールかが運転の肝になる。更に原料はガスで、生成物は液体、触媒は固体という三相の反応をどの様にハンドリングするか、反応器設計の重要な観点である。

¹⁸ ナフサクラッカー：ナフサを高い温度で熱分解して、エチレン、プロピレン、ベンゼン、トルエンなどの石油化学工業の基礎原料を生産する装置

¹⁹ 水素化分解：炭化水素を高温・高圧下、水素気流の中で触媒を用いて分解し、より軽質の炭化水素に転化させること。水素化分解法は近年、石油需要の軽質化に対応し注目されている方法の一つ

- 理論的に、 $C_1 \sim C_\infty$ の炭化水素が生成(Schulz-Flory 分布)
 - ⇒ ・有用留分(灯・軽油)の収率が低い
 - ・重質分を水素化分解して灯・軽油に変換することがほぼ必須

➡ 選択性のある触媒の開発
- FT合成反応で副生する水により、触媒活性が低下
 - ➡ 触媒の改良
 - ➡ 運転中の触媒の連続的入れ替え
- ワンパスのCO Conversionは50～60%程度
 - ⇒ 未反応分をリサイクルすることにより、Total CO Conversionを上げるのが一般的(80～90%程度まで)＝プロセスが複雑化
- 反応器の単位容積当たりの油の生成量が小さい
 - ⇒ 大型の反応器

➡ 設備費の増大

(千代田化工建設資料より抜粋)

図 18 FT合成反応②

3-3 DME合成（日本DME協会プレゼンテーションより）

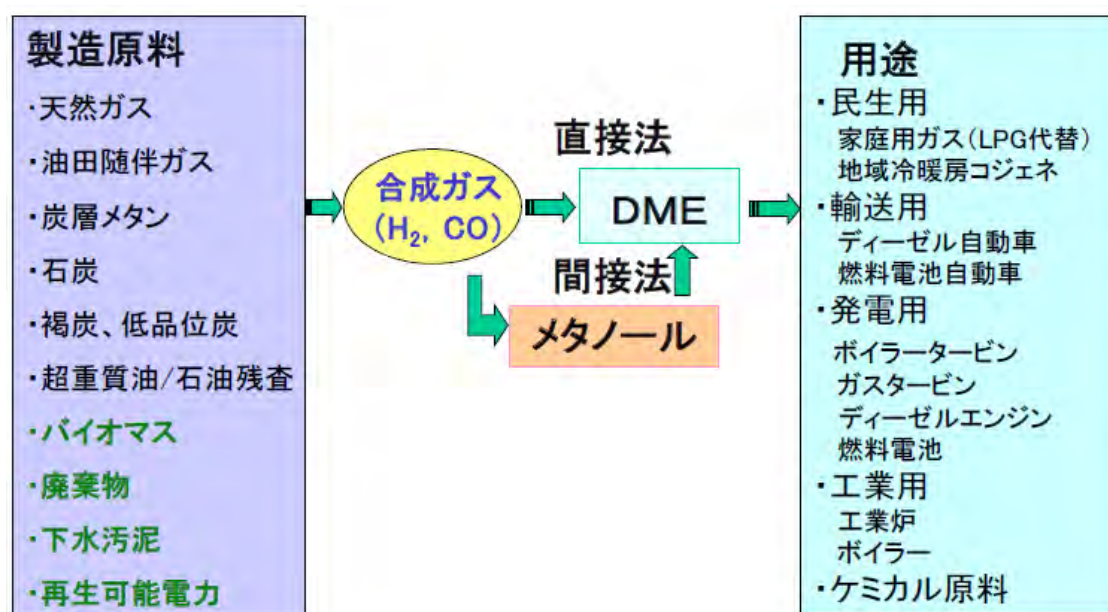
DME は常圧では-25℃、常温では 6 気圧で液化出来、プロパンとブタンの間であるため、LP ガスの貯蔵・流通技術が基本的にはそのまま使える。LP ガスとの混和性も良く、LP ガス機器については 10%の混合までなら使えることが色々な試験で分かっている。それ以上の混合で使うと若干 LP ガスと燃焼特性が違ふことと、機器の調整が必要になるが、逆に言うと、調整すれば既存機器でも使えるということである。

DME は最初メタノール合成の不純物であったが、フロンガスが使えなくなった頃に噴射剤として使うために開発された。噴射剤であるため、大気中に放出されることから、安全性についてアメリカで熱心に研究されたが、健康面、安全性には特に問題が出ないという結果が示されている。

燃焼についてはむしろメタンガスに近くプロパンからは離れている。又、DME はセタン価²⁰が高くディーゼル燃料として使うと PM が出ないため、ディーゼル燃料の環境負荷を低減することについても大きく着目されている。又、DME は比較的低温で改質することで水素が容易に得られるため、貯蔵・輸送面でも DME を水素キャリアとして使うことも可能である。

DME はいくつかのゴム類を腐食し、長時間の使用でボロボロになることがある。このため、LP ガス機器で使うことを前提に数々の試験が行われた結果、交換という方法で解決出来る目途がたっている。

DME は色々な原料、天然ガス、炭層メタン、石炭等から製造出来る。インドネシアでは灯油の代わりに LP ガスを使う動きの中で、LP ガスの輸入に外貨が必要なことから石炭をガス化して DME を作って LP ガスに混ぜる事業が現在進んでいる。スマトラ島では 140 万トンの DME 製造プロジェクトが始まっている。



（日本DME協会資料より抜粋）

図 19 DMEの原料と用途

²⁰ セタン価：軽油のディーゼルエンジン内での自己着火のしやすさ、ディーゼルノックの起こりにくさ(耐ノック性・アンチノック性)を示す数値であり、軽油の着火性を表す。

これら原料以外にも低炭素という意味ではバイオマスや再生可能電力から合成ガス（CO、水素）を作って DME を直接合成するか、或いは一旦メタノールを作ってそのメタノールを脱水²¹することで DME は製造され、用途としては民生用、輸送用、発電用等に使うことが出来る。

DME が着目された大きな理由は、中東サウジの CP（コントラクトプライス）による LP ガスの売り手市場に LP ガス業界が対抗する手段として、LP ガス代替エネルギーという武器を持ちたいという考えがあった。もう一つの理由は石炭発電での環境負荷を考え、産炭国で石炭から DME を作り、クリーンな燃料となった DME を輸入した方が環境的に良いという観点から経済産業省の補助を得て開発した経緯がある。

石炭や未利用の天然ガス、バイオマスから DME 製造する側の技術が開発されたが、使用する側の技術についても多方面で試験が行われた。DME は LP ガスと同様の性質があるということで、LP ガスと混合して使い、既存の LP ガス機器が使えれば最も効率的であるということで、数々の試験が行われた。

DME の蒸発はプロパンとブタンの間であり、LP ガスのボンベから蒸発するガス組成が LP ガスと DME を混合した場合にどれ位変動するかも大きな課題であり、試験が行われた。結果、10%の混合程度であれば、ボンベの使い始めから使い終わりまで、殆どガス組成の変動はないことが分かっている。ボンベから気化器で強制気化させれば全く問題は無いが、家庭で自然気化することを前提とすれば 10%の混合では問題は生じない。加えて、ガス機器側でも 10%混合程度では既存機器が使えることも分かった。LP ガスのインフラ機器、アセンブリーの転用についても検証が行われたが、シール材、パッキン等を交換すれば適応可能であるという結果が得られている。

目的：DMEを燃料として実用化を図るための基盤整備として、LPガスインフラを使用して、DMEの貯蔵、輸送、供給に係る転用可能性を検証する。

1 転用の可能性調査

供給インフラ主要部である外航船、輸入基地、内航船、タンクローリーの転用について、法規上の課題、部分的な改造を要する場合の内容、コスト試算、課題検討が行われた。タンクローリーを除いて、部分的改造により転用は可。

2 主要装置・機器の実証試験設備における転用可能性調査

供給インフラにおける主要装置・機器について、改造、評価試験等により転用可否を調査

インフラ主要装置・機器の転用可能調査結果

装置・機器名	改造、評価試験の内容	転用可否
貯 槽	附属バルブのシール部ゴム材料NBRをテフロンに変更	可
ローディングアーム	スィベルジョイント、Y型弁シール部ゴム材料NBRをテフロンに変更、2000時間連続運転試験	可
液送ポンプ {遠心式、キャンドモータ型}	シール用OリングNBRをクロロブレンゴム、PTFE、パーフロロエラストマーのいずれかに変更、約1000時間連続運転試験	可
コンプレッサー	シール用OリングをPTFE、又はパーフロロエラストマーに変更 1500～1900時間作動試験	可
ペーパライザ {蒸気式、空温式}	弁の要部をPTFEに変更、380～463時間連続運転試験	可
ディスペンサー	弁類シール部ゴム材：フッ素ゴムをHNBR、PTFE又はパーフロに変更 ホース：SUSフレキシブルチューブor内層ポリアミドホースに変更	可
容器充填機	性能評価試験を行った結果、DMEはプロパンに対し充填速度が20～30%早くなった。	可

（日本DME協会資料より抜粋）

図 20 LPガスインフラのDME転用可能性に関する調査研究

²¹ 脱水（Dehydration）：分子内或いは分子間から水分子が脱離することで進行する化学反応。

DME はスプレー等の化学品で使われていたものの、燃料として使うということに関して、燃料規格、国際規格の検討が行われた。ディーゼルエンジン向けの自動車燃料規格についても同様に検討が行われ、規格が出来ている。安全性についても、実際に燃焼試験等が行われ、結論的には従来の LP ガスと同様の安全性であり、同様に注意をしていけば問題は無いことが判っている。

新潟の二社の食品会社では LP ガス及び A 重油から DME に燃料転換した。A 重油からの転換には燃料タンクを DME 用に追加しなければならなかったが、LP ガスからの転換ではそのまま LP ガスタンクが流用出来た。熱量を調整するため、ボイラーのバーナーチップを少し大きくする軽微な調整が必要であったものの、試験結果は良好であった。

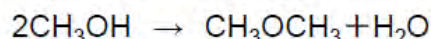
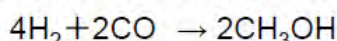
ガスタービン燃料としての実証も行った。DME はガス燃料としては天然ガスに近いので、実際にはガスタービンメーカーが試験を行い、三菱化学の工場では 4MW のタービンを動かし、熱効率とか環境性を検証したうえで天然ガスと同様であるという結果を得ている。

DME はセタン価が高い。国土交通省主導で PM、NOx 問題の解決のため、ディーゼル自動車メーカーが研究を行い、エンジン開発、走行テストが進み、最終的には 2015 年国土交通省で「DME を使ったディーゼル自動車の型式認定」を取得した。普及に対して残る問題は DME が安く入るのか、DME を供給するスタンドが整備されているのかが課題である。スタンドに関する技術的な問題は解決されている。LP ガスの流通系統の中で、LP ガススタンドのところに DME タンクを一つ置けば、DME と LP ガスの混合が可能になる。LP ガススタンドの需要拡大にも繋がるかもしれない。

DME を製造する技術としては水素と CO からメタノールを作り、メタノールを脱水して DME を作る間接合成法があり、三菱ガス化学等が実際に DME を製造しているものの、水素と CO から直接 DME を作った方が効率が良いのではないかとということで、直接合成法が開発された。直接合成法は JFE が主に開発を行い、経済産業省のサポートを得て技術を完成した。韓国では、日本の開発を参考にして、韓国ガス公社（現在の KOGAS）が固定床のプロセスを開発した。

[従来の製造法]

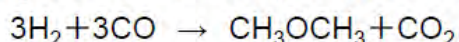
- ・メタノール合成とメタノール脱水の2ステップ法(間接合成法)



- ・ライセンサー: 三菱ガス化学、ルルギ、トプソ、西南化工研究設計院など

[燃料用DMEの新規合成法]

- ・合成ガス($\text{H}_2:\text{CO}=1:1$)から直接合成(1ステップ法)



- ・ライセンサー:

スラリー床プロセス: JFEが開発(レンファッドが継承)

固定床プロセス: 韓国KOGASが開発

(日本DME協会資料より抜粋)

図 21 DME の製造方法

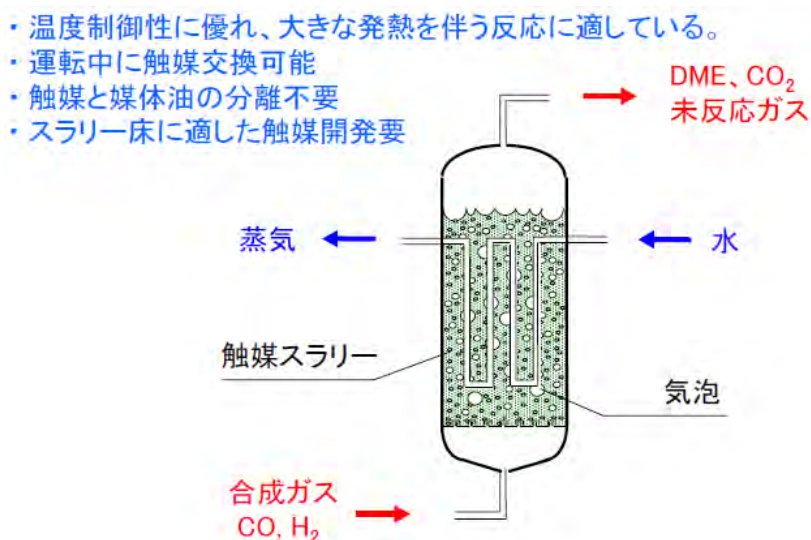
合成を行うとなると、反応平衡、触媒活性、反応器の温度制御をどうするのか等の課題があり、100%の合成が不可能なことから生じる未反応ガスのリサイクルや分離の問題もある。又、目的生産物と副生物の分離の問題もあることから、これらを総合的に考える必要がある。ある特定の触媒で反応するというのはスターティングポイントであるものの、それを実際の生産プロセスに繋げるためには、色々検討が必要である。

メタノール合成 ($2\text{CO} + 4\text{H}_2 \rightarrow 2\text{CH}_3\text{OH}$) からメタノール脱水 ($2\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) すると水が発生するため、水生ガスシフト反応 ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$) が生じ、これらの反応が同時に起こると、DME 合成 ($3\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{CO}_2$) 反応となるが、メタノール合成とメタノール脱水反応だけで良いのではないかと、ここでハルダートプソー²²がもう一つの DME 合成 ($2\text{CO} + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) を提唱したが、ここで問題なのは、この反応では DME に水が副生することである。

反応生成物 (DME と水) とみ反応ガスの分離は、基本的には冷やして分離するのだが、冷やすと凍ってしまうことと、水が来ると触媒がすぐに劣化してしまう問題が生じる。ヨーロッパでも DME を作る技術が開発されており、副生する水をゼオライトで吸収させているが、水を吸収するとゼオライトは使えなくなってしまう。いくつかの反応器を並列し、交互に高温ガスで水を飛ばすこともやっているが、ベンチスケールの話であり、これがモノになるかはこれからの開発次第である。

DME 合成とメタノール合成を比較すると DME の方が低圧で反応率が高い。水素と一酸化炭素の比率に対して反応率がどうかについては、反応式に一致しているところが一番高い。CO、水素 1 : 1 の DME 合成 ($3\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{CO}_2$) 反応の平衡転化率が一番高く、ハルダートプソーの DME 反応 ($2\text{CO} + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) よりも高い。

DME 合成は発熱反応であり、反応熱の除去が非常に大きな問題である。熱の除去がうまくいかないと、反応器の中の温度が上がって、触媒が熱によってダメになってしまう問題である。スラリー床は不活性の油の中に粉の触媒をココアの様に懸濁しているもので、その中で反応が起きると、反応熱は媒体油に吸収される。媒体油は温度が上がるが、熱交換のチューブが入っているので、それによって熱が外部に除去される。



(日本DME協会資料より抜粋)

図 22 J F Eスラリー床DME合成反応器概念図

²² ハルダートプソー (Haldor Topsoe) : 工業触媒を展開するデンマークの会社。

DME 直接合成の特徴は、触媒がメタノール反応と脱水とシフト反応の三つの機能を持つものであり、平衡反応率が高く、スラリー床で高反応性を示す触媒が開発されていることである。又、反応器がスラリー床で伝熱特性が良く、水の副生が微量であるため DME を高効率で冷却分離出来る。副生する CO_2 をどうやって除去するかについては、結果的に CO_2 は生成物の DME に溶けて反応系から出て行く。

藤元先生が東京大学におられた時、触媒研究をピーカースケールで行っておられ、その後、小型のベンチスケール試験を NKK の社内で行った。それ以上の規模になると非常にお金がかかるため、5 トン／日の大型ベンチプラント試験は北海道釧路の太平洋炭鉱の坑内ガスを使って行った。

但し、これから得られる合成ガスは窒素を多量に含み、一般的な合成ガスとは言えなかったため、その後は一般的な CO 、水素が必要ということで石炭のガス化ガスや天然ガスを改質したガスを想定し、次の 100 トン／日プラントでは石油資源開発の苫小牧が有する LNG プラントから LNG を釧路までタンクローリーで運んで使った。釧路の 100 トン／日プラントは、巨額な費用の分担のため 10 社のコンソーシアムで DME 開発という会社を作り、運転を行った。



北海道釧路で、有限会社DME開発(10社のコンソーシアム)により運転された。

(日本DME協会資料より抜粋)

図 23 DME 100 トン／日実証プラント

プラントのフローだが、天然ガスを酸素とスチームで改質して CO 、水素を作り、その後 DME を製造した後、気液分離をして未反応ガスはリサイクルする流れである。生成物は三つの蒸留塔で、 CO_2 は DME に溶けて出てくるので原料系に戻し、二つの蒸留塔で DME を精製した。

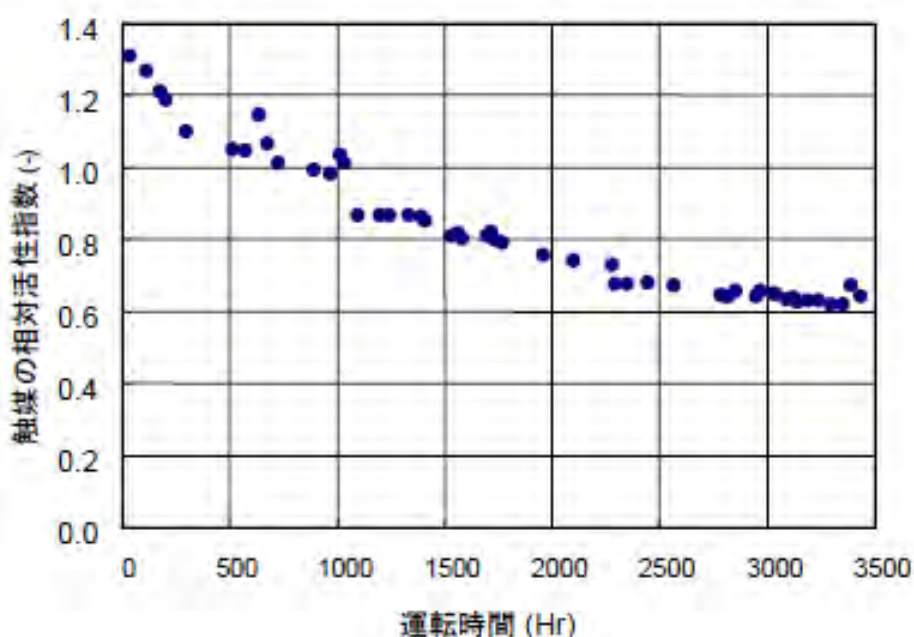
2003 年から 2006 年まで実際に 5 回の運転をして 20,000 トンの DME を作った。作った DME は各種の利用機器試験に使われた。開発目標値が設定されていたが、どれもクリアすることが出来、DME の純度も 99.8wt% をクリアし、ISO 規格を満たすことができた。連続運転も目標の 3 か月を超える 5 か月の運転を行った。

反応器の中のスラリーの温度分布も熱電対で計測したが、設定反応温度 260℃、270℃、280℃でいずれも

フラットな温度分布が実現されていた。W/F の W は触媒量、F は通過ガス量を示すが、通過ガス量に対してある程度触媒量を増やすことで反応率は上がるがそれ以上になると飽和してしまう。1kg/日のラボスケールから100トン/日の実証機の規模まで触媒量を維持することで反応が50～60%進むことが確認され、スケールアップには重要なデータである。

100トン/日のプラント規模だが、長期運転では60トン/日に下げて運転を行った。原料となるLNGの値段が高く、予算の制約上、出力を絞って運転した。運転中落雷があって停電し、プラントは一時停止したが、スムーズに回復した。

触媒は段々劣化するが、5か月の劣化程度を見ると1年間は使える触媒であると考えている。この検証では、プラントの反応試験をするだけでなく、スケールアップのパラメータをとり、スケールアップの技術的な基盤を確立した。



(日本DME協会資料より抜粋)

図 24 DME 合成触媒の活性変化

100トン/日プラントの経済産業省の事後評価では、しっかりとした商用化技術が出来たと評価をいただいたが、実際の事業展開については政策的な誘導が必要であるとも示唆された。

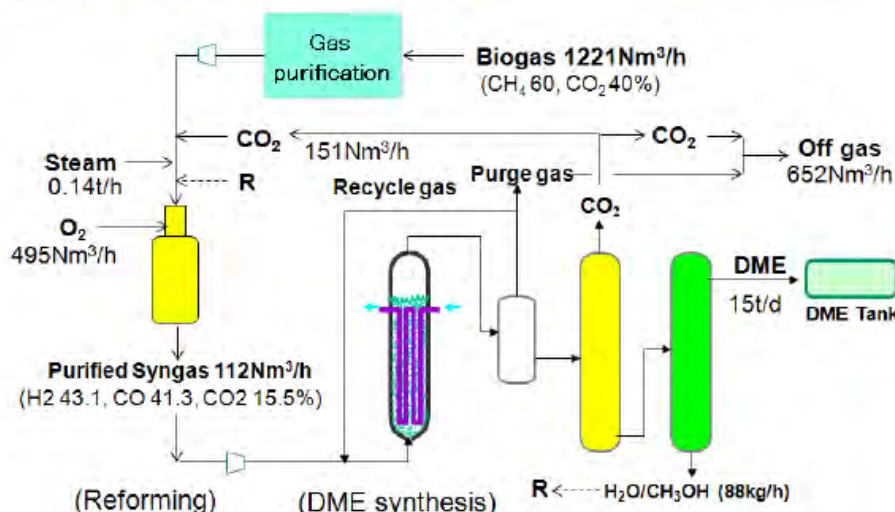
国内のバイオマス資源からDMEを作るということになると、一般廃棄物や下水汚泥は別の目的のために自治体が回収しているが、木質バイオマスは間伐材等があるが収集する必要がある。

又、固形の廃棄物或いは木質バイオマスは、ガス化してDMEを製造することになる。下水汚泥、食品廃棄物の様なものは、メタン発酵でガス体になり、それを改質して合成ガスにしてDMEを製造することになる。

バイオガスは下水汚泥或いは食品廃棄物、家畜の排せつ物等色々なものからメタン発酵で出てくる。基本的な組成はメタン60%、CO₂40%であり、主に処理施設の発電、ボイラー燃料として使用されている。

バイオガスから DME を製造する場合、メタン 60%、CO₂40%の原料ガスを改質して CO、水素にして、それから DME を合成し、CO₂ と水を分離することになる。バイオガス 1,340Nm³/h から、15 トン/日の DME が生産される。このバランスのフローでは大体年間の生産量は 5,000 トンになる。

- ・人口25万人の都市で発生する下水汚泥と食品残渣のメタン発酵により生成するバイオガス(1340Nm³/h)から、15トン/日のDMEが製造される。
- ・冷ガス効率:68.6% ・熱効率:55.5%



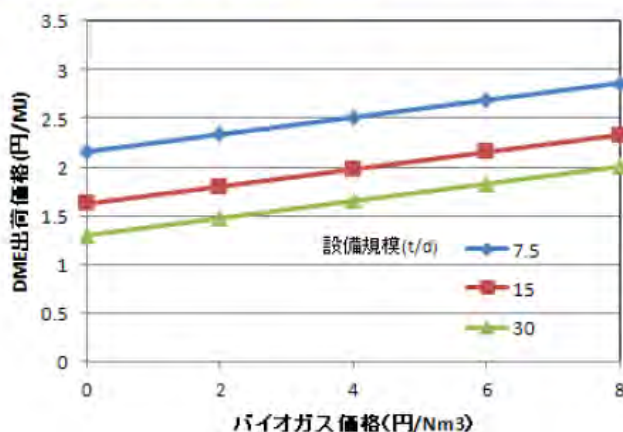
(日本 D M E 協会資料より抜粋)

図 25 バイオガスからの DME 製造

バイオガスからの DME 生産は原料バイオガス量に依存するが、原料バイオガス量が 500 万、1,000 万、2,000 万 Nm³/年である場合、一日当たりの DME 生産量が各々 7.5、15、30 トンとなる。東京都の森ヶ崎水再生センターの場合、バイオガス量が 1,570 万 Nm³/年であり、DME に換算すると一日当たり約 23 トンと推計される。

経済計算をする時の DME の出荷価格を 2～3 円/MJ としている。これは LP ガスの卸売価格である 100～160 円/kg からの価格レンジであり、プラントの規模が 15 トン/日とすると、バイオガスが 2 円/Nm³でも経済性が成り立つのではないかとと思われる。

- ・バイオガス原料DMEの出荷価格は、設備規模が大きいほうが低い。
- ・国内のLPガス卸売価格(100-160円/kg)(2.1-3.4円/MJ)と比較し、基本的に経済性はあると判断される。



日本 D M E 協会資料より抜粋)

図 26 バイオガス原料 DME の経済性評価例

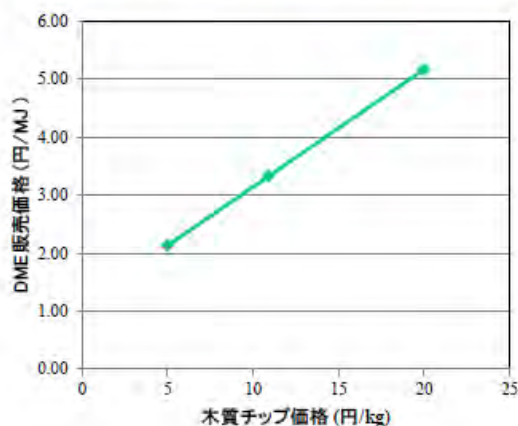
経済性を評価するに当たって、比較対照している国内の LP ガスの卸売価格 2.1～3.4 円/MJ は、シェールガス由来のものも入ってきており、MJ 当りの価格とするとこれの半分か程度の価格のものが入ってきているので、もう少し下のレベルを基準としたほうが良いとの考え方もあるが、国内の流通の中でいくぐらいがターゲット価格になるのかを考え、国内の消費地に近いところで製造する時のコスト目標をイメージした。

木質バイオマスは木材工業、製紙等の国内の木材資源、輸入資源があり、マクロではあるが年間 300 万トン程度の国内未利用バイオマス資源はあると想定される。国内では木質バイオマスを使った発電設備が出来ており、原料の入手、コストから海外よりペレットや PKS²³を輸入して使うこともある。木質バイオマスは輸入材であると 22 円/kg、国産材だと 14 円/kg という価格であり、DME 製造工場のゲート渡し価格は分からない。

湿分 40%の木質チップ 700 トン/日から DME を製造すると 150 トン/日が得られるが、木質の場合、原料に適したガス化プロセスを使わないと中々ちゃんと動かない。ここでは生成したガスが、ガス化炉内を下からガスが上がってくるアップドラフト炉の例を示しているが、木質をガス化すると出てくる灰分やタールの処理が必要になってくる。

木質チップ原料の場合の経済評価だが、運転員がガス化炉 2 名 + DME 製造側が 2 名の合計 4 名が 1 シフトに必要で、計 4 シフトの 16 名に技術者 2 名の合計 18 名が必要となる。この前提で計算すると、チップの価格が 10 円/kg であれば、DME 出荷価格 3 円/MJ になるのではないかと推計しているが、工場ゲート渡しのチップの価格が経済性に大きく影響を及ぼす。

・木質チップ原料DMEの出荷価格は、原料チップ価格の影響が大きい。
国内のLPガス卸売価格(100-160円/kg)(2.1-3.4円/MJ)と比較し、
10円/kg以下の原料の入手が必要になる。



日本DME協会資料より抜粋)

図 27 木質チップ原料DMEの経済性評価例

木質系については、ガス化設備から DME 製造プロセスまでの設備費及び運転費を考えて経済計算をしている。後は木質バイオマスをいくらで入手できるかであり、逆有償であれば一般廃棄物をガス化して DME を製造することも考えられるが、固形廃棄物或いは固体の原料をガス化するためには、ガス化設備のコストが効いてくる。バイオガスからやる場合については、メタン発酵の施設或いは下水汚泥を処理している施設が既にあると、下水汚泥の減容化を目的にしてメタン発酵をやっている。そこから出てくるガスは現状発酵槽の加温、一部は発電等に

²³ PKS(Palm Kamel Shell) : パーム椰子殻、パーム椰子の殻の部分で、パーム油を生産する過程で発生する農作物残さ廃棄物。

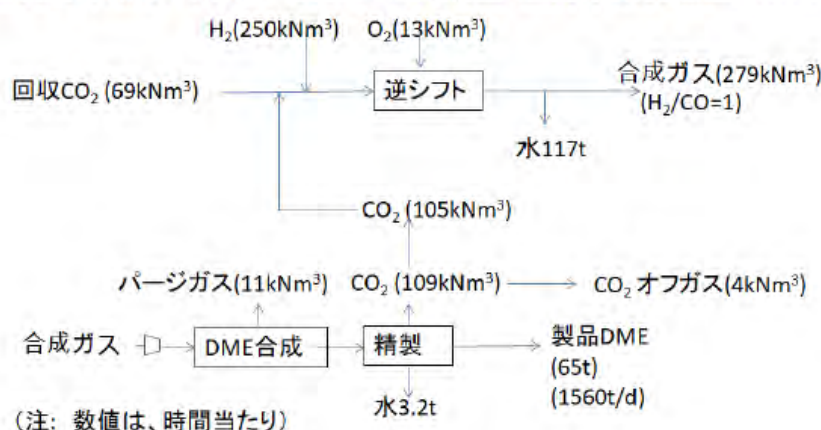
使われているので、ガスの価格をどう評価するかは状況によって変わってくる。いずれにせよ設備費の中には発酵槽の設備は入っておらず、そこから出てくるメタンガスを清浄化して DME を作るのであり、メタン発酵設備ありきのところを応用するという考え方で経済計算を行っている。

バイオマスからの DME を考えた時にどのようなビジネスモデルが考えられるかというと、木質原料の輸送は高コストであり、原料が調達しやすい立地に工場を作り、LP ガスに混合する必要がある。地産地消レベルでは原料の調達とコストの問題がある場合、木質バイオマスを大規模に輸送し、使える立地（輸入或いは国内）で作るということも考えられる。

再生可能電力を運びやすい燃料に変えるという考え方は e-fuel²⁴とも言われるが、CO₂ の利用には水素が必要になる。水素を安定的に調達するには風力発電ということになる。陸上風力、海上風力のポテンシャルについては、中国、ロシアでは陸上風力のポテンシャルが高く、オーストラリアでは、陸上設置の土地が広く、人口が 2,000 万人程度と少ないので、電力の国内需要が小さく、余剰の陸上風力のポテンシャルは大きい。日本でも最近洋上風力の検討中であり、コストが安くなれば洋上風力のポテンシャルは高くなる。

回収 CO₂ と水素から DME 合成用の合成ガスを作ることは、CO₂ と水素を逆シフト反応させて、CO と水（水蒸気）に転換し、生成する水を分離することであり、水素 250 千 Nm³/h であれば、1,500 トン/日の DME が出来るというバランスになる。逆シフト反応は 900℃ 程度の温度で反応させないとメタンが出来てしまう。CO/水素の比率は温度によって影響され、800～900℃ では CO/水素比は大体 1 : 1 になる。この比率は DME 合成に適している。

- ・回収CO₂とDME合成の副生CO₂に、再生可能水素を混合し、逆シフト反応させて、合成ガスを得る。
- ・合成ガスを5MPaに昇圧し、DMEを合成する。合成されたDMEは、副生するCO₂を分離・精製される。DME生産量は、65t/h(1560t/d)。
- ・DME製造の冷ガス効率：製品DME発熱量/風力水素発熱量=68.1%



(日本DME協会資料より抜粋)

図 28 回収CO₂とH₂からのDME製造プロセスフロー

²⁴ e-fuel : 再生可能エネルギーで発電した余剰電力の貯蔵・利用方法の一つで、余剰電力により製造した水素や、その水素と濃縮回収した二酸化炭素やバイオガス中の二酸化炭素を原料として合成・製造したカーボンニュートラルな燃料のこと。なかでも、水電解により製造した水素や、その水素と二酸化炭素からメタネーションにより合成したメタンなどの気体燃料として貯蔵・利用する方法は、Power to Gas (PtG, P2G)とも呼ばれる。

海外で 1,000MW h の再生可能電力による水電解で水素を作り、出来た DME を船で日本に輸入することも考えられる。発電所から出た CO₂ を回収して CO₂ 輸送船で DME 生産地に運び、その船で DME を持ってくることも可能である。国内の回収 CO₂ と国内の再生可能水素であれば、国内で DME を作ることも可能である。

水電解装置は高いものの、経済計算をしてみると電力価格のインパクトが大きく、設備価格は大きな要因ではない。電力価格が 2.5 円／kWh 以下でないと、LP ガス価格と対抗できない。オーストラリア等電力価格が安いところか、洋上風力の発展によって電力価格が下がらない限り難しい。

燃料 DME は LP ガスに性状が似ていることから LP ガスに 10%程度混合することは可能であり、製造技術も利用可能な段階である。又、再生可能資源についての説明をしたが、単一資源から作るのは大変に難しい。種々の条件を検討した上で、やりやすいところから始めるのが適切かと考える。

低炭素と言っても使う側の庶民との間の認識に温度差がある。国の支援がないと中々前に進めるのは難しいのではないかと考える。DME はどうしてこれまで実用化しなかったかは、天然ガスもあり、石油もあり、LP ガスもある中で安ければ良いという状況の中で、新エネルギーとしての DME のマーケットが無かったということであり、エネルギー業界の誰も最初のビジネスリスクを冒さなかった。これまでの日本のエネルギー業界は買えば良い、安ければ良いという考えであったが、現在の様に低炭素・脱炭素の動きになってきた時に、バイオマスや再生可能水素等の違った観点からものを見る考え方に変わるだろうと思われる。どの業界がこれらのコストを負担するのか、日本国が背負うのか、業界が夫々背負うのか、技術の問題以外に今後は国の政策が大きな役割を持つと考える。

3-4 家畜ふん尿からのLPガス合成（古河電工プレゼンテーションより）

電気が自由に使えない国や、地域に対して、電線ケーブルを通じて電気が当たり前のように使える暮らし、更に通信ケーブルを使って人々が繋がる暮らしを実現するための社会インフラを通じて、安全・安心で快適な生活の「あたりまえ」の生活に貢献することを目的に古河電工は事業を進めている。この「あたりまえ」が多くの社会課題によって脅かされているため、その社会課題の解決に古河電工は力を入れている（図29）。



（古河電工資料より抜粋）

図 29 社会基盤を守るための新しい社会基盤

近年自然災害は身近なものになっており、犠牲者も多い。これまで築き上げてきた社会インフラにも非常に大きな被害が出ている。特に近年は雨の被害が甚大であり、古河電工のインフラ製品にも被害が出ており、これらを守るということもミッションであると考えている。このため、社会課題、特に自然災害やそれに繋がるような地球温暖化に貢献したいということで、適応するような防災・減災事業や、社会課題の根本を断つ、或いは緩和するような事業を進めている。（図30）



（古河電工資料より抜粋）

図 30 社会課題の解決

古河電工は、上述した自然災害や温暖化の問題に貢献するため、技術を磨きつつ、社会課題の深掘りを進めた。古河電工はコア技術であるメタル・ポリマー技術をベースに、新規構造触媒の開発を進めている。更に、開発触媒を用いて、家畜ふん尿から生じる温室効果ガスを原料に、地産地消、貯蔵・輸送が可能な液化石油ガス（LP ガス）を製造する新しい触媒プロセスを開発している。この技術の実現により、脱炭素社会型の新しい地域社会の基盤を構築したいと考えた（図 3 1）。この新しい社会基盤は下記の社会課題に貢献できると考えている。

【社会課題① 深刻な温暖化】

地球温暖化、温室効果ガスにおいて注目したのは家畜のふん尿である。排出されている温室効果ガスを CO₂ に換算すると畜産業から排出される CO₂ 量は車等の交通機関から排出される CO₂ 量と同等といわれている。見方を変えれば、家畜ふん尿は一つに集めることが出来るため、資源として活用が出来るのではと考えた。

社会課題② 自然災害】

家畜のふん尿の有効利用方法としてバイオガス発電が普及している。しかし、災害時のインフラ状況によっては発電した電気は輸送困難な場合がある。対して、LP ガスは災害にも強いエネルギーであるため、家畜のふん尿から得られるバイオガスを LP ガスに変換することで、一般家庭・産業での利用の他に災害が起きた時のエネルギーとして利用できるという大きなビジョンを研究所で考案した。

【社会課題③ 人口増加による食糧問題】

畜産業を営む方々からは、牛・豚を増頭したいと考えた時、家畜ふん尿による異臭・水質汚染（畜産環境問題）により、事業拡大が困難という意見がある。この問題に対するソリューションも提供出来れば、間接的には食料問題にも貢献が出来ることとなる。

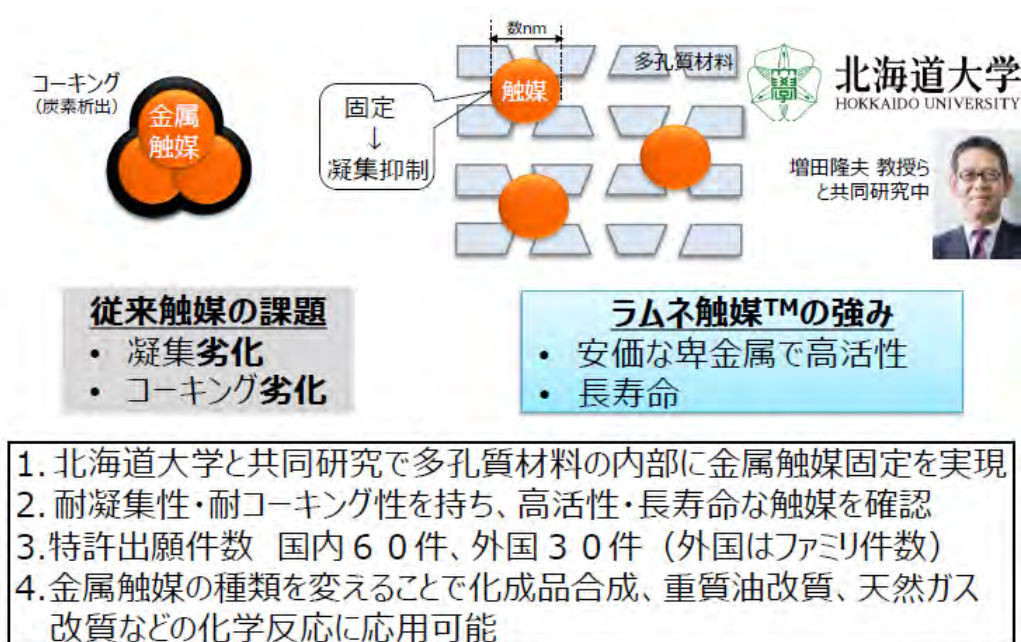
古河電工は①深刻な温暖化、②自然災害、③人口増加による食料問題の三つの社会課題に対して貢献するソリューションとして、家畜ふん尿から発生する温室効果ガスを LP ガスに変換する技術を開発している。



（古河電工資料より抜粋）

図 31 社会課題を解決したい

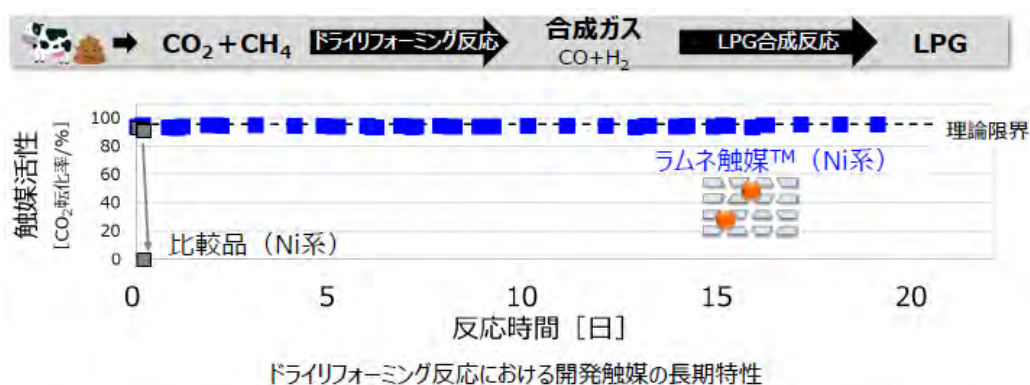
家畜ふん尿から発生する温室効果ガスを LP ガスに変換するための鍵が触媒である。従来触媒は触媒粒子の凝集やコーキング（炭素成分が触媒表面に付着する現象）等により活性が低下する問題がある。古河電工は、北海道大学の増田隆夫副学長らと共同で、触媒粒子を多孔質の材料の中に固定した新規構造触媒を開発し、従来触媒の問題を解決できることを見出した。なお、開発触媒の構造が、飲み物のラムネの構造に類似（ビー玉が瓶の中で固定されている状態）していることからラムネ触媒と命名した。実験の結果、触媒凝集が抑制できるため安価な卑金属で高い活性を示し、触媒寿命も比較触媒（Ni 系）と比べて向上することが分かっている。（図 3 2）。



（古河電工資料より抜粋）

図 32 温室効果ガスのエネルギー化～鍵は「触媒」～

家畜のふん尿から得られたバイオガスを LPG に変換するためには、ドライリフォーミング反応と LPG 合成反応の 2 段階の反応が必要になる。ドライリフォーミング反応の場合、比較触媒（Ni 系）は、コーキングにより 1 日以内に触媒活性が低下した。対して、ラムネ触媒（Ni 系）は比較品と比べて良好な活性を長期間維持した（図 3 3）。なお、図 33 では 20 日程度と記載しているが、実験的には約 3 か月反応を継続しても活性は理論限界（平衡転化率）と同等であることを確認している。



1. 二酸化炭素とメタンから合成ガスへ変換する
ドライフォーミング反応で優れた触媒寿命を確認。
2. LPG合成反応でも良好結果を確認。
3. 技術に加え、ビジネスモデルに関連する特許も出願。

(古河電工資料より抜粋)

図 33 温室効果ガスのエネルギー化～開発触媒の性能～

LP ガス合成反応においても、ラボスケールであるが良好な結果が得られている。社内試算結果では、家畜のふん尿から得られたバイオガスを原料に LP ガスを合成するプロセスにおいて、ある程度の経済効率性も得られることが分かっている（2020 年 12 月 2 日 プレスリリース済）。なお、LP ガス合成反応の詳細については知財上の理由により、詳細は非開示とした。

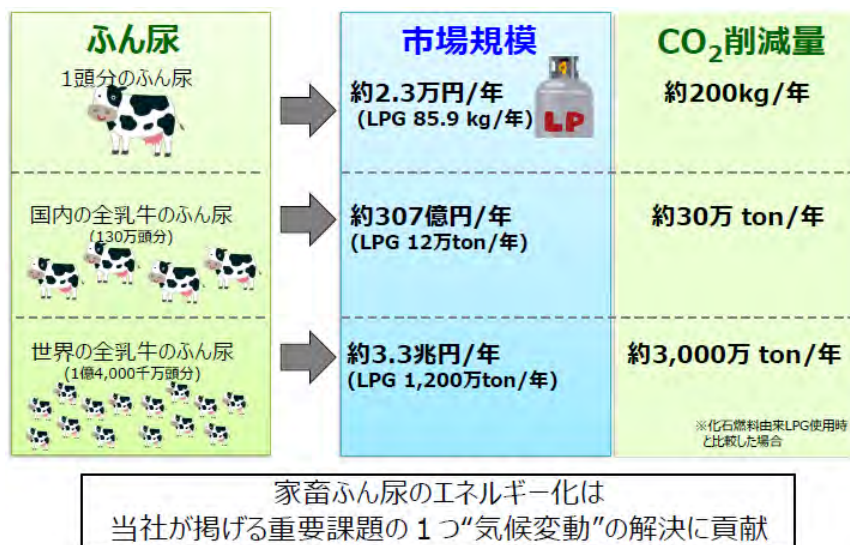
バイオガス（メタンと二酸化炭素の混合ガス）から合成ガス（水素と一酸化炭素の混合ガス）に改質するドライフォーミング反応（前段）は吸熱反応であり、LP ガス合成反応（後段）は発熱反応である。その前段の吸熱と後段の発熱反応を接近させて熱効率を高くすることを考えている。どこまで理想的に構築できるかはこれから実証する必要があるが、実際には吸熱分が足らず外からエネルギーを加えなければならない部分も出てくる。トータル的にはそれ程大きなコストにならないのではないかと試算している。

後段の LPG 合成反応では、 C_1 から C_7 までの成分ができる。 C_1 と C_2 は量が少ないため再利用可能だが、 C_5 以上は分離する必要があり、できる限り C_4 以下の成分だけにしよう条件を検討している。

メタン発酵により得られたバイオガスを利用する場合、サルファーを含めた微量成分が触媒の被毒を引き起こす可能性がある。前段側で処理することを構想しているが、今後は実運用を想定した模擬ガスにより検証を進める予定。

ラボデータではあるが、1 頭の乳牛から得られる LP ガス量と CO_2 削減量を試算した。乳牛一頭分のふん尿から LP ガスを製造する場合、年間 LP ガスは末端価格で 2.3 万円分（約 86kg/年）となり、年間約 200kg の CO_2 削減効果が見込める。更に、国内の全ての乳牛（130 万頭）に適用すると、年間の LP ガス生産は 307 億円（約 12 万トン）、 CO_2 の削減量は約 30 万トンとなる。これらの量は全体から見ると大きなインパクトにならないかもしれないが、先ずはこの様なところからしっかりと進めたいと考えている。この動きを世界まで広げることが出来れば、ある程度まとまった数字になる。更に、乳牛だけでなく豚とか肉牛に範囲を広げることで更にまとまった

インパクトのある数字にしていきたい。



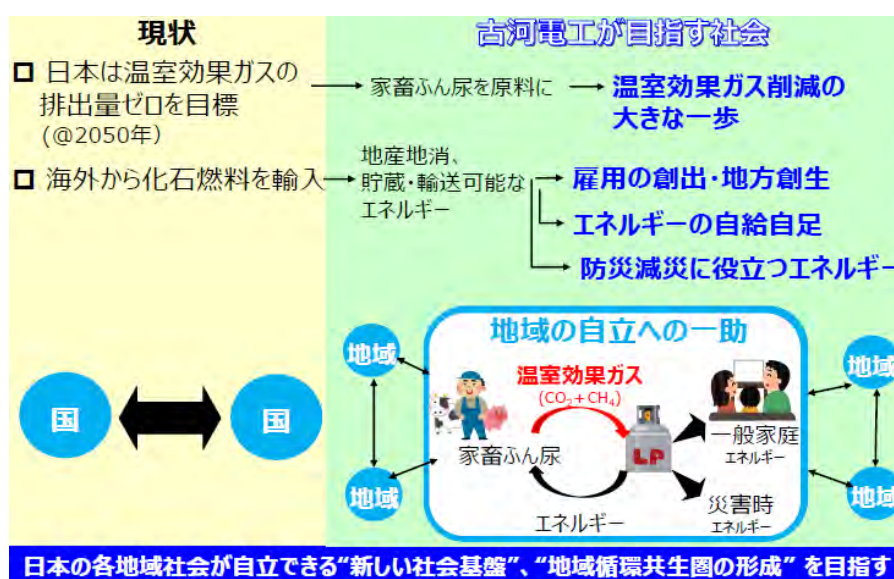
(古河電工資料より抜粋)

図 34 市場規模・CO₂削減量

バイオガスから製造したLPガスはカーボンニュートラルである。化石燃料から得られたLPガスがバイオガス由来LPガスに置き換わった場合、その分CO₂排出量は減少すると考えてCO₂削減量を算出している(図34)。

下水汚泥、食品等の有機廃棄物もメタン発酵の原料として活用できると考えている。今回古河電工がプレスリリース等で乳牛に着目した理由は、畜産業を営む方々からふん尿処理に関する声が強く、これを起点に始めたこともあり、乳牛で試算し、検証を進めているためである。

レジリエンス性の高いLPガスを供給するだけでなく、コロナで分断型社会が強制されている現状にもこの考え方は対応出来ると考えており、国同士の大きなやり取りで発展してきた社会から、改めて地域に目を向ける社会基盤を我々としては提案したい。温室効果ガス削減への貢献、地域での新しい雇用、エネルギーの自給自足に貢献していきたい。例えば家畜ふん尿が大量にとれる地域において、その地域が自立できる社会基盤の構築を目指している(図35)。



(古河電工資料より抜粋)

図 35 自立できる地域の新しい循環型の社会基盤

今後は 2030 年の実用化に向けて、2023 年までに小型試験機による基礎データ収集、2025 年までにフィールド実証試験を行う予定である。

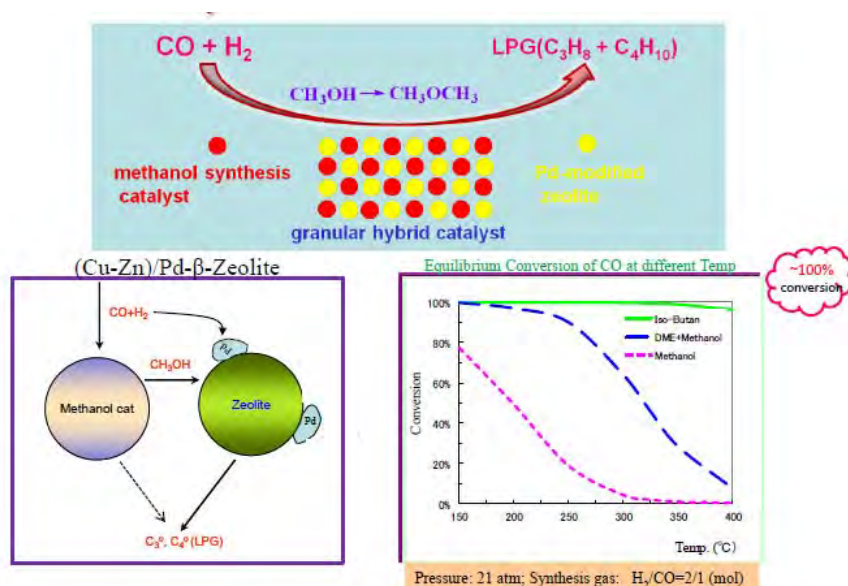
3-5 LP ガス合成 (HiBD 研究所プレゼンテーションより)

LP ガス合成は20年近く前から10年間位研究してきた技術開発であり、DME 合成と姉妹関係にある合成技術である。

LP ガス合成と DME 合成は、実はほとんど同じである。歴史的に言うと、DME 合成は合成ガス (CO + 水素) を一つの反応器の中でメタノール合成と DME 合成を同時に行って合成するか、炭化水素合成をやるかというだけの違いである。メタノール合成触媒上に出来たメタノールを DME に変換するか、或いは炭化水素に変換するかの違いであり、触媒にはメタノール触媒とゼオライト²⁵を使ったが、開発当初はそれを物理的に混合するという粗っぽい操作で行った。

ゼオライトを使った合成試験の最中、ゼオライトが劣化してくると炭化水素の代わりに DME が出来てしまったので、メタノールの転換触媒を DME に特化した触媒にしたことで、DME の合成技術のプロジェクトが開始された。

DME に関して言うと、触媒はメタノール触媒とゼオライト触媒であるがゼオライトでなくとも他のメタノール脱水²⁶触媒でも構わない。この場合にはオレフィンも結構出てくる。その後触媒の改良を重ねて、メタノール触媒と改良ゼオライト (Pd²⁷を使った) でやるとパラフィンとして正に LP ガスである C₃, C₄ の混合物が出てくる。これが LP ガスの合成技術となる。



(HiBD 資料より抜粋)

図 36 LP ガス合成メカニズム

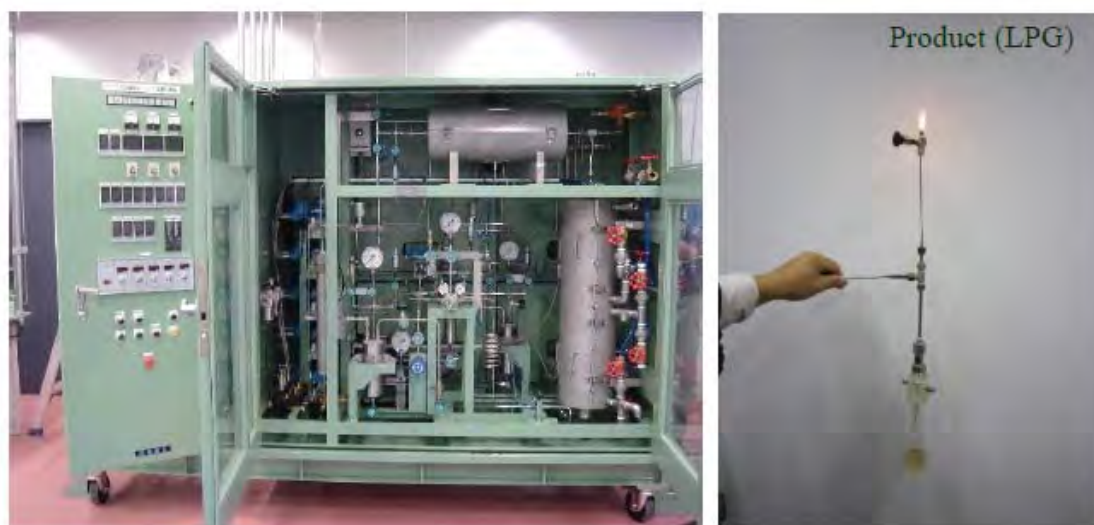
²⁵ ゼオライト (沸石 (ふっせき)、zeolite) とはミクロ多孔性の結晶性アルミノケイ酸塩であり、細孔径は 0.3~1 nm である。分子ふるい、イオン交換材料、触媒および吸着材料として利用され、工業的に重要な物質となっている。組成式は一般に $M^{n+}_x/n Al_x Si_y O_{2x+2y}^{x-} \cdot z H_2O$ で表される。天然に存在する鉱物グループでもあるが、現在では自然界から採掘されるもの以外に、様々な構造および物性を持つゼオライトが人工的に合成されている。

²⁶ 脱水：主に有機化合物から水分子の割合で水素原子と酸素原子を除くこと

²⁷ パラジウム (palladium) は原子番号 46 の元素。元素記号は Pd。白金族元素の 1 つ。貴金属にも分類される。常温、常圧で安定な結晶構造は、面心立方構造 (fcc)。銀白色の金属 (遷移金属) で、比重は 12.0、融点は 1555 °C (実験条件等により若干値が異なることあり)。酸化力のある酸 (硝酸など) には溶ける。希少金属の 1 つ。

触媒を詰めたチューブの中に加圧状態で原料ガスを挿入し、出来たものを分析したが、 CO_2 から行くとメタノールと一部 CO が出来ることが分かった。逆に CO から行っても CO_2 が出来る反応があり（ CO シフト反応²⁸）、 CO_2 と CO は可逆的でありどちらからでもメタノールが出来、出来たメタノールはメタノール脱水触媒、或いは水素化脱水触媒を使えば色々なものになる。

CO_2 から行っても生成物は圧力を上げれば、2 MPa あたりでは炭化水素が良く出来るのと同時に CO も出てしまう。この条件では CO と CO_2 は可逆的で行ったり来たりが可能であるため、 CO_2 でスタートすれば CO とメタノール、更に炭化水素となるし、 CO から行けばメタノールが出来るし、 CO_2 も副生する。生成物についても CO_2 から行っても、 CO から行ってもほとんど同じであるが、 CO から行った方が若干ブタン分が多く発生する。



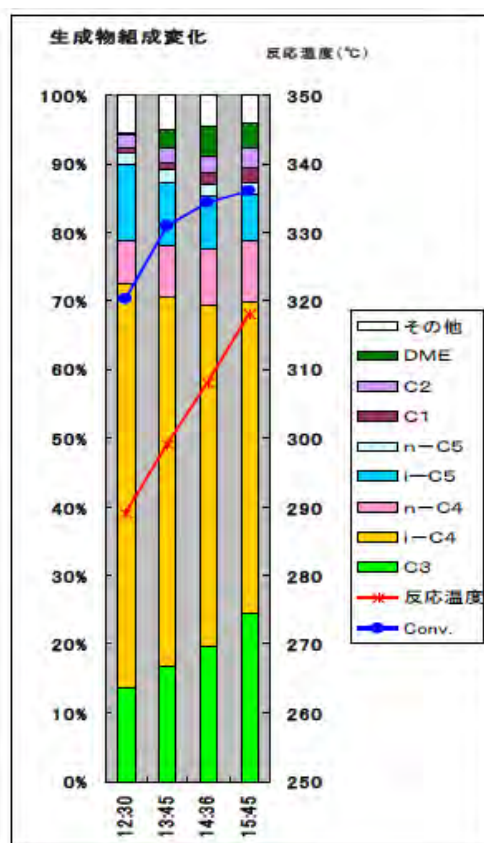
A bench plant (~100ml catalyst bed) was operated successfully to show 1.0kg/day LPG production.

（HiBD 資料より抜粋）

図 37 LP ガス合成ベンチプラント

生成物はプロパンとブタンが全体の 80～85%、状況によっては 90% 近くであり、これはいずれのケースでも変わらない。反応が進むに従ってプロパンが減少するという現象も起こっている。又、より高沸点の C_6 以上のものも減少し、最終的には全てブタンに集中してくる現象が生じた。これはこの LP ガス合成がブタン合成のプロセスであることを示していると考えられる。

²⁸ CO シフト反応（水性ガスシフト反応）：一酸化炭素と水蒸気から二酸化炭素と水素を生成する反応。反応式は、生成物側（右側）へ向かって発熱反応となる。



100g catalyst

反応条件: 触媒 Cu-Zn/ゼオライト 100g
(Si/Al=37, 比率 0.7/1)
充填長 90cm
W/F=6、圧力 3MPa

生産速度(g/d)

温度	290℃	300℃	310℃	320℃
C1	5.4	9.3	14.3	21.6
C2	12.3	18.1	23.6	28.9
C3	92.4	139.5	179.0	226.2
DME	2.9	35.7	63.5	52.4
i-C4	394.7	439.2	443.5	417.2
n-C4	41.3	61.3	72.4	81.9
i-C5	73.9	74.4	69.9	60.9
n-C5	12.4	14.9	15.8	15.2

LPG	528.3	640.1	694.9	725.3
C3~C5	614.6	729.4	780.6	801.4
HC	635.2	792.5	882.1	904.3

(HiBD 資料より抜粋)

図 38 ベンチプラントの反応成果

その中で特徴的なことは、反応の滞留時間が長くなるとノルマルブタンと比較してどんどんイソブタンの比率が高くなる。一番多い所ではその比率は 33、34 であり、ノルマルブタンよりもイソブタンが 30 倍以上余計に出来、段々に増えてくる。通常の平衡値が大体 1 : 1 なので、化学平衡よりも遥かにイソブタンの方に寄ってしまっている。反応温度は 260～280℃で炭化水素のうち 8 割程度が C₃、C₄ であり、C₅以上が約 20%、C₁、C₂ がせいぜい 2～3%くらいであった。

触媒は 400℃の低温再生が可能であることが分かった。何回低温再生を行っても触媒の活性が落ちないし、再生処理を行うことで安定性が強くなる。反応時間 1,200 時間を目途に実際に再生を行ったが、活性は少し落ちるものの、少しずつ温度を上げると 2,000～2,400 時間までは再生なしで使える。そこで少し活性が落ちた触媒を再生すると、触媒の活性が上昇すると同時に生成物の中の DME もなくなった。1,200 時間の低温再生を 3 回行っても触媒の活性の低下は発生しなかったため、実用化に近づく触媒開発は出来ている。

バイオマス原料に対しても、CO₂ からでも高収率で LP ガスが合成出来る。温度は厳しい条件ではある。又、ドライガス²⁹が 1～2%と非常に少なく、ガスをリサイクルする場合には有効である。

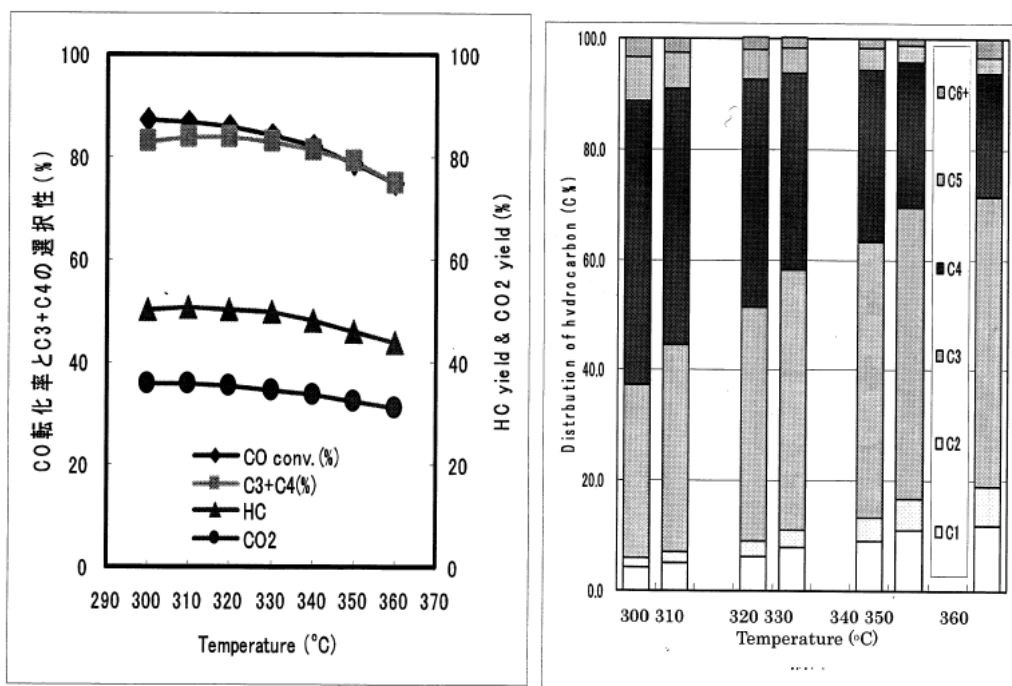
CO、CO₂ の混合ガスでも、どちらからでも LP ガス合成は出来る。又、分岐パラフィン特にイソブタンも選択的に出来、触媒も温度を上げることで再生なしで 2,000 時間使え、再生も 3～4 回出来、ほぼ 8,000 時間即ち 1 年間は触媒をつけたままで反応を続けられる。

²⁹ ドライガス：メタンを主成分とするもので、プロパンより重い炭化水素成分をまったく含まないか、含んでもごく少量のものをいう。常温・常圧で液状に凝縮する成分を含まないことから、このようによばれる。

＜研究会後追加コメント＞：藤元先生より

研究会では主生成物がブタンであることを説明し、プロパンは条件がそろえば、ある程度生成するとの説明にとどめたが、下記の如くある条件ではプロパンの生成も可能である。

Cu-Zn/Pd-β触媒を使い、280～370℃の温度範囲で実験を行った。その結果は図 39 に示しているが、温度の上昇と共に、触媒の活性は低下した。特に高い温度ではプロパンの選択率は高いが、メタンとエタンの選択率も高い。320℃以下が望ましい反応温度である。

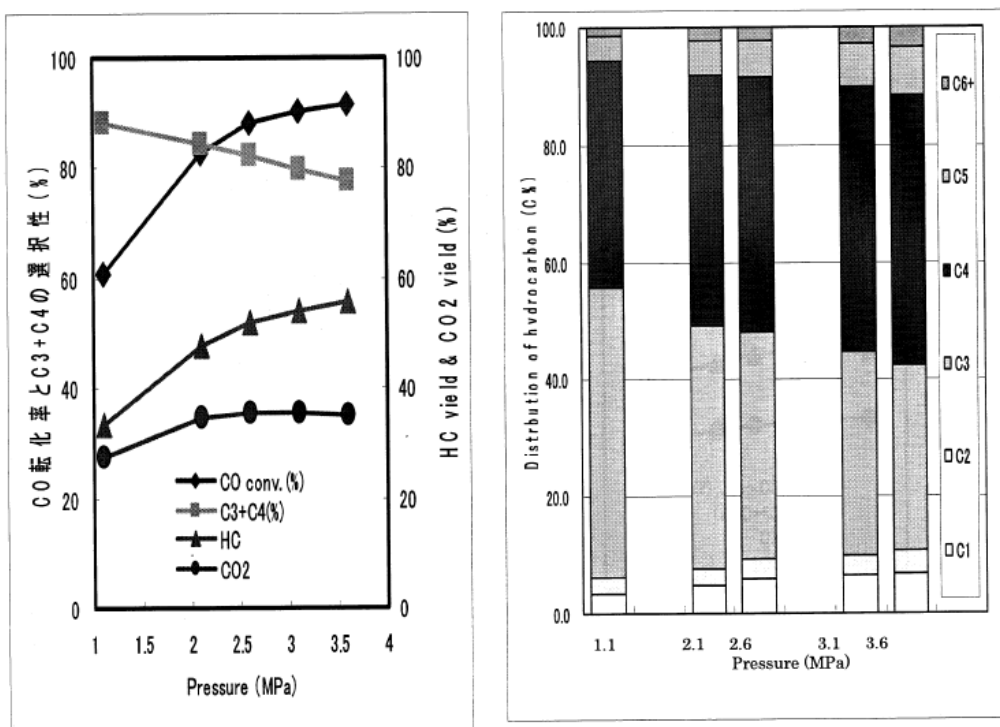


(HiBD 資料より抜粋)

図 39 反応温度の影響

(反応条件：2.1MPa、8.9g.h/mol、64.4% H_2 /28.4CO/4.1% CO_2 /3.1%Ar)

又、1～4MPa の圧力範囲で反応圧力効果をテストした。その結果は図 40 に示しているが、反応圧の上昇と共に、CO 転化率、炭化水素の収率が上昇し、炭化水素中のプロパンが低下する。2～3MPa 程度の圧力が好ましい反応圧と考えられる。



(HiBD 資料より抜粋)

図 40 反応圧力の影響

(反応条件 : 320℃、8.9g.h/mol、64.4% H_2 /28.4CO/4.1% CO_2 /3.1%Ar)

この様に温度と圧力（及び触媒）を選択すると、ドライガス及びナフサの生成を低いレベルにキープしつつ、プロパンもブタンに匹敵する重量収率で得られる結果が出ている。このため、本法は L P ガス合成法として、より柔軟なプロセスと見做すことが出来る。

3-6 LPガス合成技術の整理

千代田化工建設よりは FT 合成の全般状況と課題について広範囲な考察をいただいた。日本 DME 協会からは過去において実証した DME 合成の技術を踏まえた現状について経済計算を交えて説明いただいた。古河電工よりは家畜ふん尿からの LP ガス合成について現状の進捗の説明を受け、LP ガスのグリーン化の方向を示していただいた。HiBD 研究所（藤元所長）よりは、過去において研究された LP ガス合成法について詳細な説明をいただき、LP ガス合成の可能性について明確な方向性が示された。

<FT 合成について>

FT 合成は液体炭化水素を作る反応であるものの、プロパン、ブタンを選択的に生成することは出来ず、連鎖成長確率（ α ）0.6 以外の 0.4 の部分はプロパン、ブタン以外の炭化水素がどうしても生成される。

連鎖成長確率を上げるためには適合する触媒の開発が相応に必要であり、開発出来たとしても若干の連鎖成長確率増加に留まると思われる。又、プロパン、ブタン以外の成分については水素化分解（クラッキング）することで炭素の連鎖を切り、再度プロパン、ブタンに分解することは出来るが、既存設備を活用する選択肢はあるとしても設備投資が大きすぎる。

加えて、大型の FT 合成設備を稼働するために今後再生可能原料から得られた CO と水素を使うとしても、その大量の原料の調達には一定の困難が生じるものと想定される。

このため、理論上は FT 合成による LP ガスの製造はできるとされるものの、目的生産物の生成効率が低く、グリーン化可能性も低いと、今後の LP ガスグリーン化への適合は困難と思われる。

<DME 合成について>

DME 合成は既に 100 トン／日規模の実証プラントが建設された実績があり、LP ガス混焼を含め技術的な蓄積がありフィージビリティが検証されているが、LP ガス自体が最終生産物ではなく、あくまでも LP ガスとの混合或いは純 DME を LP ガス用途の代替とする使われ方となる。

しかしながら、LP ガスのグリーン化の社会実装を早い段階で実現するためには、例え本質的な LP ガスグリーン化でなくとも、実現可能性の極めて高い DME によるグリーン化要素を排除するわけにはいかない。

過去における DME の製造実証は一部木質チップを原料に合成されたが、本格的には各種バイオで実証されたことはなく、バイオ或いは再生可能原料からの DME 製造については、直接原料となる合成ガスの製造や改質について、一定の技術開発要素はあると思われる。

又、CO₂ と水素より CO と水（水蒸気）を生み出す水性逆シフト反応は、CO₂ リカバリーの有効な手段であり、この技術の開発についても、主要な開発目標となるとと思われる。

このため、バイオマス或いは再生可能原料からのグリーン DME 合成は、LP ガス業界に求められているカーボンニュートラルの方向性に合致するものであり、今後積極的に追及すべきと考える。

<家畜ふん尿からの LP ガス合成について>

現在のところ、バイオガスからの後段の反応である LP ガス合成については、特許申請の関係上明示はされていないものの、プロパン、ブタンに特化する LP ガス反応が確立出来ているということであり、今後の進展を注視したい。

又、家畜から排出されるふん尿は処理が必須であり、そこから排出されるメタンを LP ガスに転換して、地域創生に繋げるという考え方は、LP ガスが 2050 年以降も選ばれるエネルギーとして存続するために必要な立脚点であり、同時に LP ガスの需要維持・拡大に繋がると思われる。

技術的な側面の議論が出来ておらず、現在の時点で明確な評価は出来ないものの、後述の LP ガス合成技術とともに、LP ガスのグリーン化に向けて必要な技術になると思われる。

<LP ガス合成について>

LP ガス合成は DME 合成技術開発と共に開発された技術であり、約 10 年前に日本ガス合成と北九州市立大学とが 1kg/日規模の実験室レベルの実証を行った。この技術が開発された当時は、シェールガス革命によって石油、LP ガスの供給の安定性がより一層高まり、LP ガス合成への必要性が希薄であったこともあり、業界から興味を示されることなく、在野に眠っていた。

本研究会の発足に伴い、開発者である藤元薫名誉教授（東京大学、北九州市立大学）よりこの技術のプレゼンテーションを行っていただいたことにより、現在業界が求めるグリーン化に資する技術であることが再確認された。

LP ガス合成の概要は、その他合成技術と同じ原料の合成ガスをメタノール合成触媒とゼオライト触媒を充填した反応器に通すことにより LP ガスが得られるというプロセスである。LP ガス反応の収率は 90%を超える高効率であるが、基本的に反応器の中では $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$ の反応が亢進的に進み、ブタン、特にイソブタンの収率がほとんどを占める。

ブタンを中心とした合成以外、プロパンに特化した合成も本研究の中で行われている。触媒と圧力・温度の条件が整えばプロパンに特化した合成が出来るという結果が出ているが、これもブタン中心の合成と同じくスケールアップした研究が今後必要であることは言うまでもない。

この LP ガス合成技術は、LP ガスグリーン化の潮流の中では比類の無い技術であり、業界での研究・開発が必要である。又、特にプロパンに特化した合成技術は LP ガス業界の理想であり、今後の開発を含めた研究を進め、実用化に向けて追求すべきと考える。

第四章 LP ガスのグリーン化に必要な原料

第四章 LP ガスのグリーン化に必要な原料

4-1 水素（岩谷産業プレゼンテーションより）

日本の水素市場は年間約 150 億 m^3 であるが、ほとんどはユーザーが自分で作って自分で消費しており、外販しないパイピング水素といった自家消費であり、ほとんど外には出てこない。外販に出てくるのは大体 1～2%と言われており、その中で岩谷は 70%のシェアを占めている。

主な自家消費の用途は石油精製やアンモニアの製造で、外販されている水素は電子部品、半導体、熱処理、太陽電池、光ファイバー等に使われている。防錆の還元用途や光ファイバー等では酸素と水素を燃やす熱源として使っている。

供給形態は、圧縮水素、液体水素、オンサイトに分かれる。酸素・窒素も同じ歴史をたどっており、元々は圧縮して瓶で運んでいたが、量が増えると運ぶ効率が悪すぎるということで液化が始まった。水素以外のガスも液化で運ばれており、日本では岩谷だけが水素を液化水素という形で運んでいる。全世界的に見ると、アメリカやヨーロッパ等デリバリーの距離が長いところは液化水素で運ばれている。日本は圧縮水素でも運べるという距離感であり液化は進んでこなかったが、2006 年に液体水素プラントを稼働させたことで、全国的な配送を開始した。オンサイト・パイピング供給は需要家のところに水素発生装置を置き供給するという方法である。

ハイドロジェンカウンシル³⁰は「**水素の 7 つの役割**」をまとめている。

①「大規模な再生可能エネルギーの統合と発電が可能」

大規模に展開するには蓄電池・電気だけでは無理があるところを水素でやることにメリットがある。

②「セクター（各グループ）や地域をまたいだエネルギーの分配」

ここが致命的に電気と異なる。再生可能エネルギーから電気が作られても、電気では出来ないことがある。

③「システムの信頼性を高めるためのバッファーとして機能」

①と密接に関連する。

④「運輸部門の低炭素化」

運輸部門は FCV（燃料電池自動車）から今後は船、飛行機にも広がる。直近で大きなマーケットになるのはトラック、電車等と思われる。

⑤「産業用エネルギーの低炭素化」

産業用のエネルギー、脱硫、鉄鋼等電気では出来ないことを水素にすることで脱炭素化出来るのが大きなメリットである。又、現在わざわざ水を分解して水素を作っているのを、再生可能エネルギーから作ることで脱炭素化する。

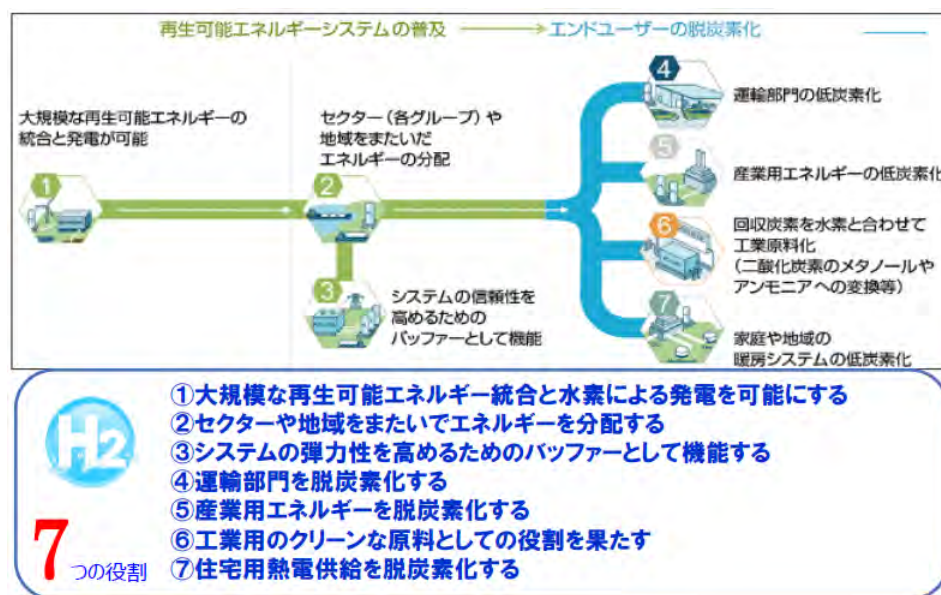
⑥「回収炭素を水素と合わせて工業原料化（二酸化炭素のメタノールやアンモニアへの転換等）」

⑦「家庭や地域の暖房システムの低炭素化」

これらの用途には電気で出来ることと、出来ないものがある。これは最も LP ガスに関連するところで、家庭用エネルギー、暖房用に水素を使うことであり、ヨーロッパでは水素を都市ガスに 10%程度混ぜる取り組みも

³⁰ ハイドロジェンカウンシル(水素協議会：Hydrogen Council)：エネルギーが転換に向け水素技術の重要な役割について長期的なビジョンを示す C E O レベルの国際的な諮問機関であり、2017 年 1 月に設立した。

始まっている。日本では天然ガスを使う前に水素の入った都市ガスを使っていた割には、ガス中に水素を入れることには抵抗がある。

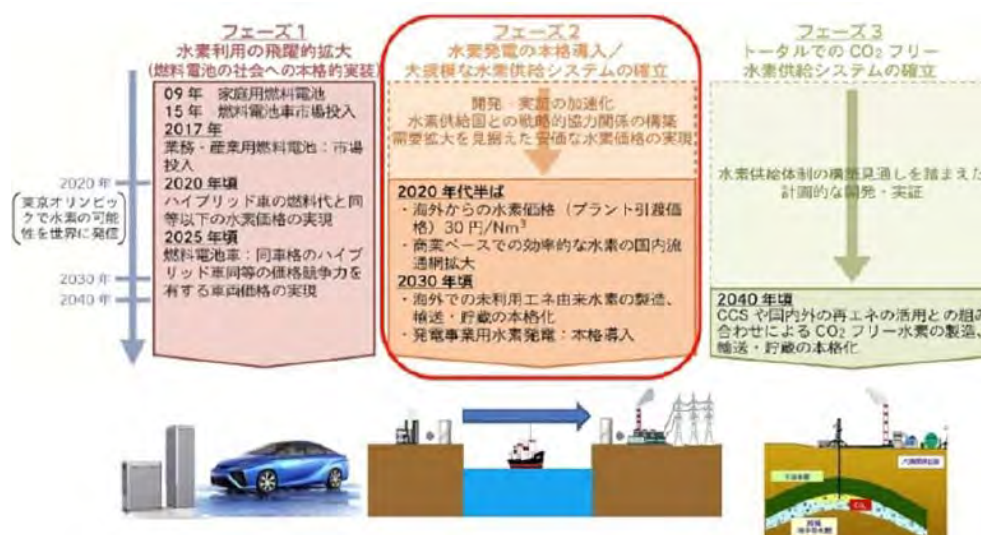


（岩谷産業資料より抜粋）

図 41 水素の7つの役割

水素・燃料電池戦略ロードマップではフェーズ3に分けられており、既に現時点でフェーズ2に移行する時期に来ている。フェーズ1は開始の段階で分かりやすいが、フェーズ2では日本の水素エネルギーの大前提は海外から水素を持ってくることになっている。水素を脱炭素化するためには化石燃料から作るのでは意味がなく、日本で作ろうとすると再生可能エネルギーが沢山必要となり、その上に風力発電や太陽光（日照時間が短い）が難しいことから日本における大規模な再生可能エネルギーの調達は困難であるために、ロードマップ上では2030年頃に水素を海外から持ってくるということになっている。

フェーズ3は海外から大規模なCO₂フリー水素供給が実現出来ることで、安価な水素が供給され大規模な利用が広がることにより、一般に水素が浸透するというイメージになっている。



（岩谷産業資料より抜粋）

図 42 水素・燃料電池戦略ロードマップ

これから進めるべきは、CO₂フリー水素であり、褐炭＋CCS、石油＋CCS 或いは太陽光で作ったものを液化水素船に寄せ、ターミナルで受け入れた後に発電所で使うことであり、今着々と実証が進められている。

水素ステーションでは水素価格 100 円/m³で水素が売られており、ガソリンで走る車の燃費と同じレベルであり、成立するレベルではあるものの、水素 100 円で電気を作ると 60 円の電気になってしまう。この電気価格はだれも買わないレベルである。2030 年には 30 円程度の水素が出来る予測であり、これで電気を作ると 18 円程度になり、せめてこの段階に至るまでは発電・電気として使いようがない。このため、現状一番コストが合いやすいのが水素ステーションということになる。

今、全国で 160 か所の水素ステーションがあり、本来であればこの段階で FCV が 40,000 台、2030 年には 80 万台、水素消費で言えば 80 億m³と予測しているが、発電所一か所の消費量が 30 億m³であり、実は水素ステーションで使われる水素量は少ない。水素の認知を深められるということと、水素の価格が通りやすいということから、水素ステーションから水素事業は始まっている。

2030 年までに水素のサプライチェーンを海外からつなぐという一丁目一番地の事業が HySTRA 事業である。オーストラリアの褐炭（未成熟の石炭）は水分が多いものの埋蔵量は多く、それから水素を作る段階で出てくる CO₂ は、その場（オーストラリア）で地中に埋め戻すことで CO₂ フリーの水素を作り出し、それを液化して日本に持ってくることを計画している。



図 43 HySTRA事業

今の段階は、水素運搬の実験船が進水し、試運転を始めたところであり、来年の 3～6 月にはオーストラリアに水素を取りに行く予定となっている。神戸空港の北側には受け入れタンク設備が完成しており、運用を始めている。しかしながら、これらの設備は実際の運用から見ると遥かに小さい規模であり、サプライチェーンが成立することを

ミニチュアレベルで成立させようという実証である。この実証は 3 年程度続き、その後は実用化実証が進められることになる。実証には岩谷の他、川崎重工、シェルがかかわり、JPower は現地で水素製造にかかわっている。

岩谷は再生可能エネルギーから水素を作ることについて全世界的に情報を集めており、オーストラリアの Fortescue という会社と一緒に水素を作ろうという計画を最近プレスリリース³¹した。風力だけでなく、カナダ、ノルウェーの水力やサウジ等中東の太陽光にも注視している。中東は効率良く太陽光発電が出来、いずれは化石エネルギーから太陽光にシフトしたいという考えを持っており、そこで水素を作るという検討も進んでいる。

再生可能エネルギーから作る場合、ブルーとかグリーンとかの言葉はあるが、最終的に目指すべきはグリーンであると考えており、この部分において、取り組み方、考え方を整理しなければならない。

2030 年にはこれらのサプライチェーンを繋ぎたいと考えているが、インフラ投資が巨大である。発電用途に 30 億 m³ を供給するためには、恐らく 1～2 兆円のインフラ投資が必要になる。政府の新しい方針に 300 万トンの水素製造の話が出ているが、2030 年には難しいレベルと思う。但し、この様なレベルで水素化を進めるには、今までとは全く違うレベルのインフラ投資が必要となることも認識しなければならない。

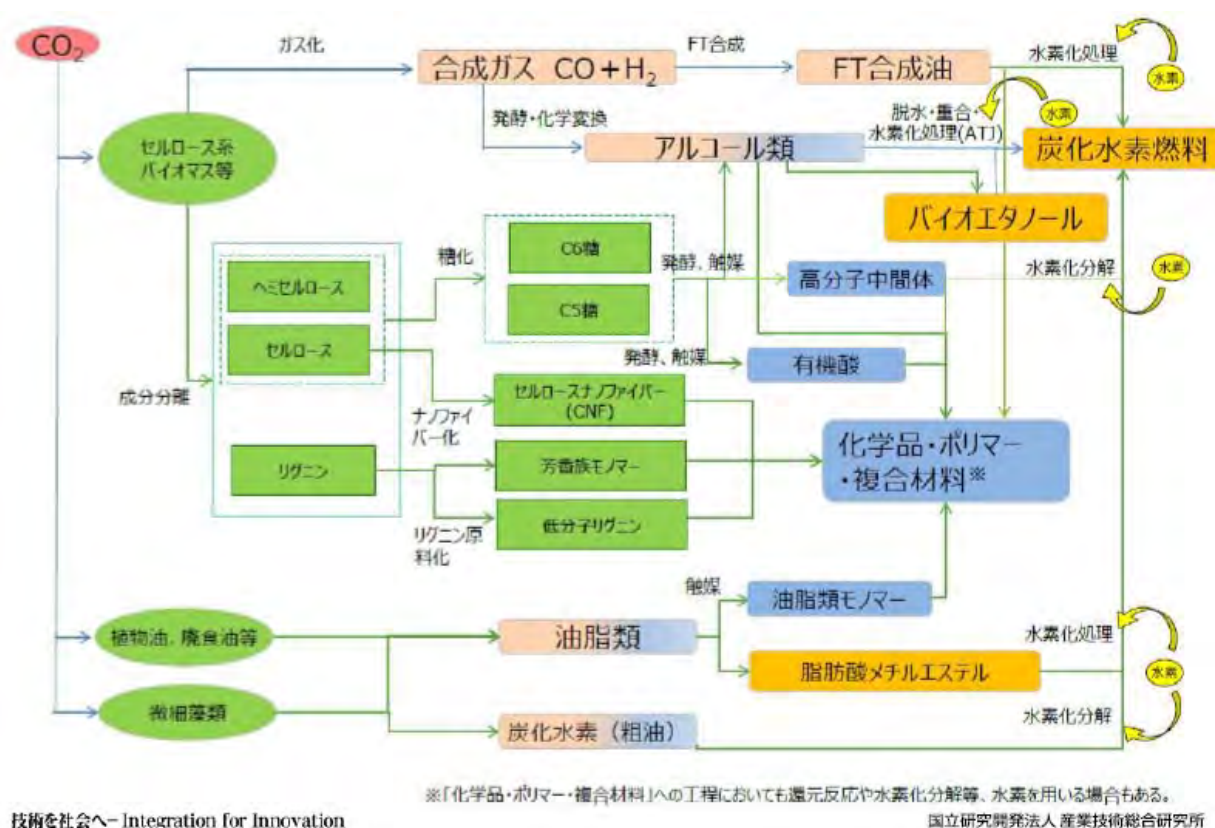
グリーン化に向けて全ての業態が水素化を進めると、とてつもない水素が必要になる。逆にとてつもない量を使わないと海外から持ってくる水素のコストは成立しない。もしかすると 100 年後にはグリーン水素の奪い合いが生じるかもしれない。これは石油の枯渇問題と同じではないかと思う。水素を莫大に使うためには国内の生産ではだめで、海外からのサプライチェーンが必要になる。

³¹ 岩谷産業 HP : http://www.iwatani.co.jp/img/jpn/pdf/newsrelease/1379/20201214_news_jp1.pdf

4-2 バイオマス（産総研プレゼンテーションより）

カーボンリサイクルの中でバイオ由来燃料を説明すると、セルロース系非食用バイオマスを活用して、一つは合成ガスから FT 合成することであり、DME もそれで作ることが出来る。又、セルロース³²、ヘミセルロース³³、グルコース³⁴、キシロース³⁵からバイオエタノールを作ること出来る。非食用セルロース系バイオエタノール（NEDO セルロース革新）も産総研は実施してきており、微細藻類由来バイオディーゼルに関しては、つくば大学等と連携して、バイオジェット燃料の触媒を活用した要素技術について協力している。

バイオマスの利用技術だが、バイオリファイナリーということで液体燃料やケミカル、最近はセルロースナノファイバーやバイオプラスチック、リグニン³⁶の利用がある。



（産総研資料より抜粋）

図 44 CO₂利用のフロー図（バイオ由来燃料・化学品）

バイオマスは再生可能資源であり、またバイオマスの基本骨格は CH₂O の倍数、グルコースは C₆H₁₂O₆ なので、ガス化すると CO と水素の比が 1 : 1 と DME 合成に適した合成ガスが出来ることが注目される。メタノール製造や

³² セルロース：分子式 (C₆H₁₀O₅)_n で表される炭水化物（多糖類）である。植物細胞の細胞壁および植物繊維の主成分で、天然の植物質の 1/3 を占め、地球上で最も多く存在する炭水化物である。

³³ ヘミセルロース：植物細胞壁に含まれる、セルロースを除く水に対して不溶性の多糖類の総称。

³⁴ グルコース：分子式 C₆H₁₂O₆ を持つ単純な糖である。ブドウ糖とも呼ばれる。

³⁵ キシロース：C₅H₁₀O₅、分子量 150.13 の糖で、単糖、五炭糖及びアルドースに分類される。

³⁶ リグニン：高等植物の木化に関与する高分子のフェノール性化合物であり、**木質素**とも呼ばれる。「木材」を意味するラテン語 *lignum* から命名された。

FT 炭化水素合成では水素：CO 比を 2 ～ 3 にしなければならない。

Fatty Acid Methyl Ester（バイオディーゼル）を作るときに、グリセリンが副生するので、これをグリーンプロパンの原料にする話もヨーロッパではあるが、グリセリンから作るには 1,2-プロパンジオールとか 1,3-プロパンジオールを作るケミカル生産の方が付加価値が高い。

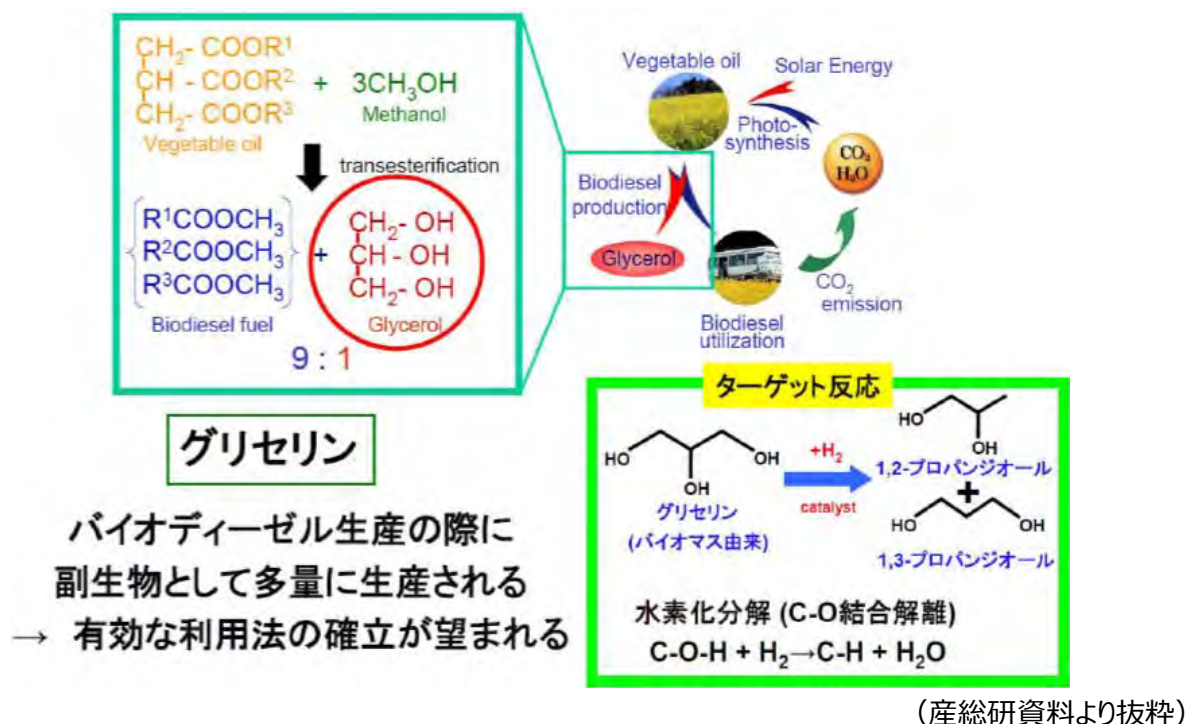


図 45 グリセリン水素化分解によるプロパンジオール製造

バイオマスのガス化は、CO と水素が大体 1：1 で、メタン、CO₂、水も少し出来てくる。産総研が 10 年近く前に行った DME 合成は、L P ガスやディーゼル燃料代替を目的とした。総括反応は、 $3\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3$ (DME) + CO₂であり、発生した CO₂は活性炭を上手く使って吸収・除去することで高濃度化した。この CO₂の除去技術によって、CO₂フリーの DME を製造し、かつ発生した CO₂をガス化剤や農業等で再利用すればネガティブエミッションにも繋がる。

産総研は元々 BTL の研究でディーゼル経由の製造を目的として FT 合成を実施していたが、出来る限り中間留分（ジェット燃料を含む C₁₀～C₂₀のもの）を選択的に作れないかということで、その後も NEDO プロジェクト等で研究を続けた。その結果、ガス化ガスをシフトコンバーター等を用いて FT 合成用に水素：CO 比を 2 に調整して FT 反応を行い、新しいスラリー床³⁷型 FT 反応装置を改造し、比較的炭素数の短い中間留分を作ること成功した。

³⁷ スラリー床（反応器）：微粒子状の触媒が液体中に懸濁しているスラリー（泥漿）のなかを、反応ガスが気泡となって上昇する間に反応する形式の反応器。合成ガスから DME を合成する反応や、フィッシャー-トロプシュ合成などの発熱反応では、熱容量が大きく熱伝導率の大きな油を媒体液に用いることで反応器の温度制御が容易になる。また、装置の構造も簡略化されるなどのメリットがある。

固定床ダウンドラフト型
ガス化炉



スクラバー



脱硫・脱湿・
脱CO₂装置



圧縮機・ガスホルダー



合成ガス充填ボンベ



木材供給速度: ~40 kg/h
酸素富化空気: 28 O₂-vol.%
ガス化温度: 800-1000 °C

産総研 中国センター(呉)
BTLベンチ試験装置
(第二種高圧ガス製造設備)

(産総研資料より抜粋)

図 46 スケールアップしたバイオマスガス化設備での研究

最近ではユーグレナが藻類から、三菱重工グループや富山大学が BTL でバイオジェット燃料を作る研究が行われている。

バイオマスから作るにはメタノールや DME (含酸素燃料) が有望だが、セルロース系バイオマスからのエタノールがガソリンブレンド用以外に ジェット燃料(ATJ³⁸)やエチレン、C₃、C₄ (プロピレン、ブテン) 原料基材としても注目されてきている。

また、メタン発酵をするとメタンが 60%、CO₂が 40%出来るが、その CO₂をドライリフォーミングして合成ガスを作ることも期待されている。今回、グリーン LP ガスの代表として DME を紹介したが、バイオマス資源量やコストの問題はあるものの有望なオプションの一つではないかと考えている。

³⁸ ATJ (Alcohol To Jet) : 触媒技術を利用してバイオエタノールからジェット燃料を製造すること

4-3 廃棄物ガス化（JFE エンジニアリングプレゼンテーションより）

ごみ焼却施設、広くは廃棄物の焼却の方式には色々あり、大まかに分類すると、主流のストーカ炉は火格子の上にごみを投入してじっくりと燃やし切るといふ横型炉の方式であり、JFE エンジニアリングは約 180 施設の納入実績がある。さらに、ユーザーの要望に基づきガス化溶融炉もある。当社はシャフト式直接溶融炉（高温ガス化直接溶融炉）を 11 施設納入しており、ガス化改質溶融炉（出てきた可燃性のガスを回収するタイプ）も 5 施設の実績がある。

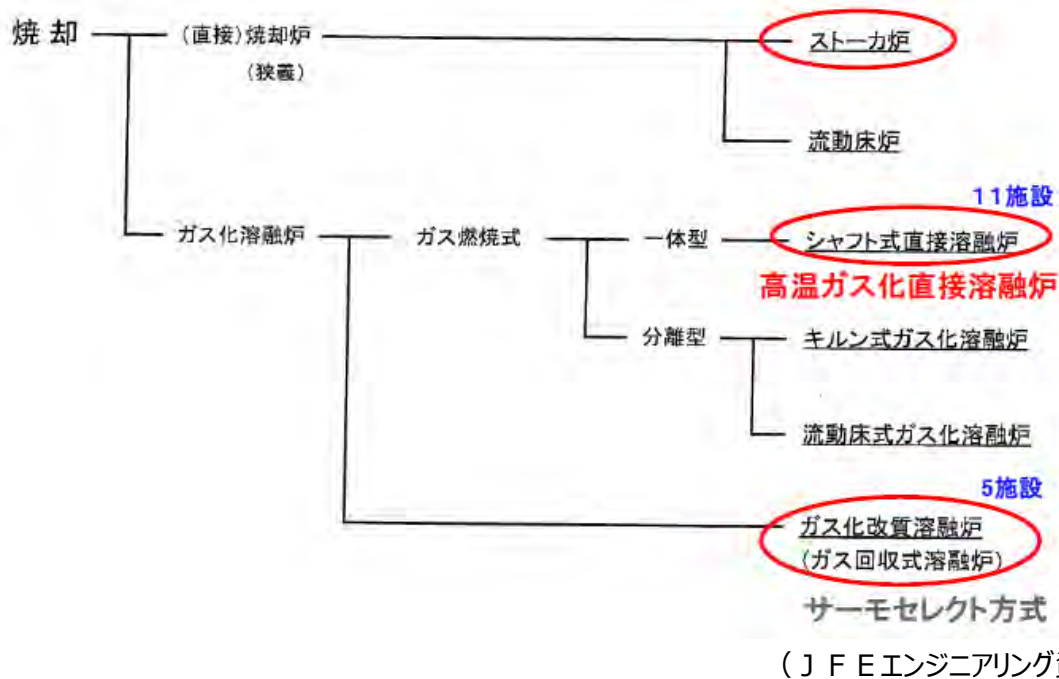


図 47 廃棄物焼却方式の分類

高温ガス化直接溶融炉の最大の特徴はコークスベッド式のシャフト炉（縦型炉）であり、この技術は鉄鋼会社であるグループ会社の JFE スチールの製鉄技術、特に高炉技術を適用したものである。縦型炉の上部から廃棄物とコークス、それから添加物として石灰石等を投入し、炉の底部で高温処理をする。炉の底部の側壁には羽口という処理するためのガスを送り込む供給口がある。このプロセスにおいては、通常の空気に純酸素を少し添加して酸素濃度を約 30%に高めた酸素富化空気を送り込んで、炉底部で高温処理する。

廃棄物から発生した可燃性ガスは炉上部から次の燃焼室へ移行する。高温処理されて溶けた廃棄物に含まれる不燃性の灰分、金属分は溶融スラグ、メタルとして炉底部から回収する。

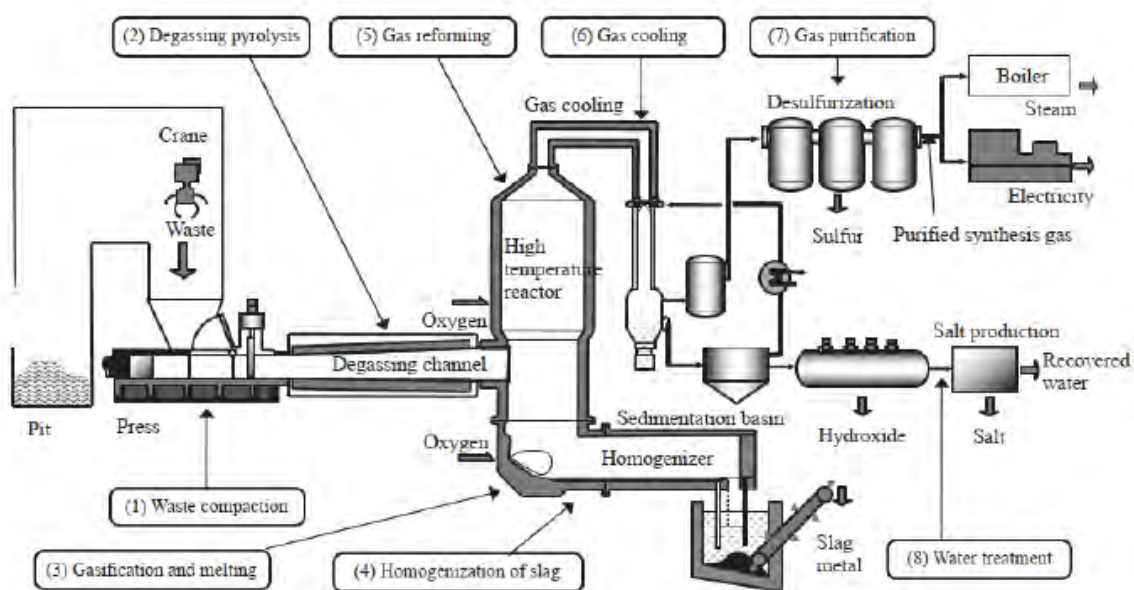
ごみの方に着目すると、都市ごみの場合は概ね水分が 50%程度含まれており、ごみが炉上部から投入されると、高温部で水分蒸発し、その後揮発分が熱分解して可燃性ガスが発生する。炉の底部の方ではコークスとごみ由来の固定炭素分が燃焼して、その熱が着熱して廃棄物に含まれる不燃物、灰分、金属分が溶け出し、炉底部から溶融スラグ、メタルとして回収される。

プロセスフローとしては、ごみピットから導かれたごみがガス化溶融炉本体の上部から投入され、発生した可燃性ガスは続く燃焼室で完全燃焼する。高温ガス化直接溶融炉はあくまでも廃棄物焼却施設の一環として進めてきた

ものであり、可燃性ガスはここで完全燃焼し、ボイラーで熱回収し蒸気で発電を行っている。

「ごみピット」、「ボイラー」、「排ガス処理設備」は都市ごみ焼却施設では通常の一般的な構成である。違うのは炉形式によって、ガス化溶融炉から燃焼室にかかるゾーンであり、ここに例えば主力商品であるストーカ炉であれば炉本体がここに入るし、他のガス化溶融炉のタイプであるとガス化溶融炉から燃焼室に関する部分にそれぞれ特徴を持った炉が入る構成になる。

「ガス化改質溶融炉」は可燃性ガス（合成ガス）を回収するタイプであり、サーモセレクト方式と呼んでいる。サーモセレクト方式はスイスのサーモセレクト社から技術導入したもので、中央にある縦型・L字型の部分がガス化改質炉本体である。



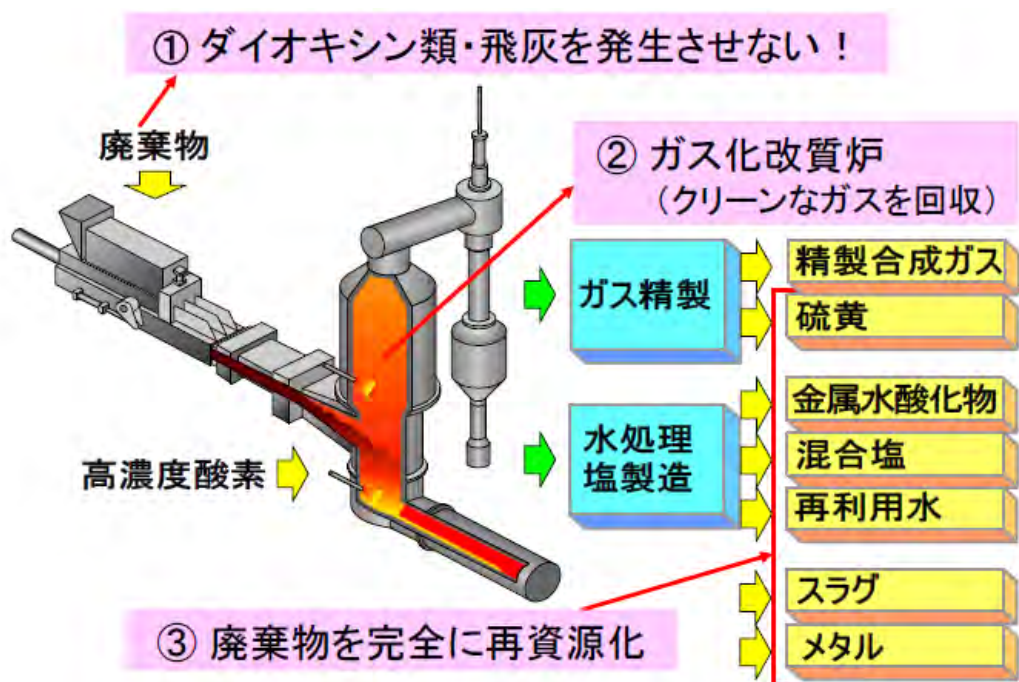
（J F E エンジニアリング資料より抜粋）

図 48 J F E サーモセレクト方式プロセスフロー

ガス化改質炉本体の底部は、ごみの充填層が形成され、そこに高純度の酸素が送り込まれる。そこで、酸素によって高温処理をし、灰分、金属分等はここで溶融し、溶融スラグ・メタルとして回収される。

ガス化改質炉の上部は、概ね 1,200℃に昇温され、ここで廃棄物からの可燃性ガスが改質され、炉上部より回収される。炉上部から出ていった可燃性の合成ガスは大量の水で 100℃以下程度まで一気に冷却される。冷却した後は、ガス精製され、冷却使用水の水処理が続く、かなり大型のプロセスとなっている。

サーモセレクト方式の特長は、他の方式に比べ飛躍的にダイオキシン類を発生させないことと、色々な成分が濃縮してしまう飛灰（フライアッシュ）を発生させないことであり、当時一番の売りであった。更に、ガス化改質炉でクリーンなガスが回収できるとともに、ガス精製、大量の冷却水処理に付随して色々な副生成物が出てくる。これを再資源化して外部に提供することで、環境保全と有効なガスの回収、更に再資源化という三位一体のトータルメリットで受け入れられた。



(J F E エンジニアリング資料より抜粋)

図 49 J F E サーモセレクト方式のコンセプト

回収された精製合成ガスの組成であるが、一般的な都市ごみだと、水素、CO、CO₂ がそれぞれ 30%程度の組成となっている。因みに、ダイオキシン類の含有率が他のプロセスに比べるとゼロの数が2つ～3つ程多い。

Component		Concentration
H ₂	(%)	30.7
CO	(%)	32.5
CO ₂	(%)	33.8
N ₂	(%)	2.3
Dioxins	(ng-TEQ/m ³)	0.000 39
Dioxins (O ₂ :12%換算値)	(ng-TEQ/m ³)	0.000 09

(J F E エンジニアリング資料より抜粋)

図 50 生成ガスの組成

サーモセレクト方式の納入実績は5施設・プラントであり、1件目の事業主体は現在 JFE エンジニアリングの関連会社である J&T 環境、4件目は JFE スチールの製鉄所の構内に建設されている。生成したガスは製鉄所に供給して有効利用されている。2件目と3件目は、生成したガスはガスエンジンの発電に有効利用されており、5件目のオリックス資源循環殿ではガスエンジン、ボイラー燃焼の併設型で発電されている。

サーモセレクト方式は平成 18 年（2006 年）を最後に残念ながら普及・拡大がストップした状態である。その最大の原因は、大きなメリットがあり魅力的なプラントではあるものの、非常に重装備でごみ焼却施設としてはかなりコストがかかってしまうことがネックになった。主力のストーカ炉、他のガス化熔融炉の方式に比べ、どうしても

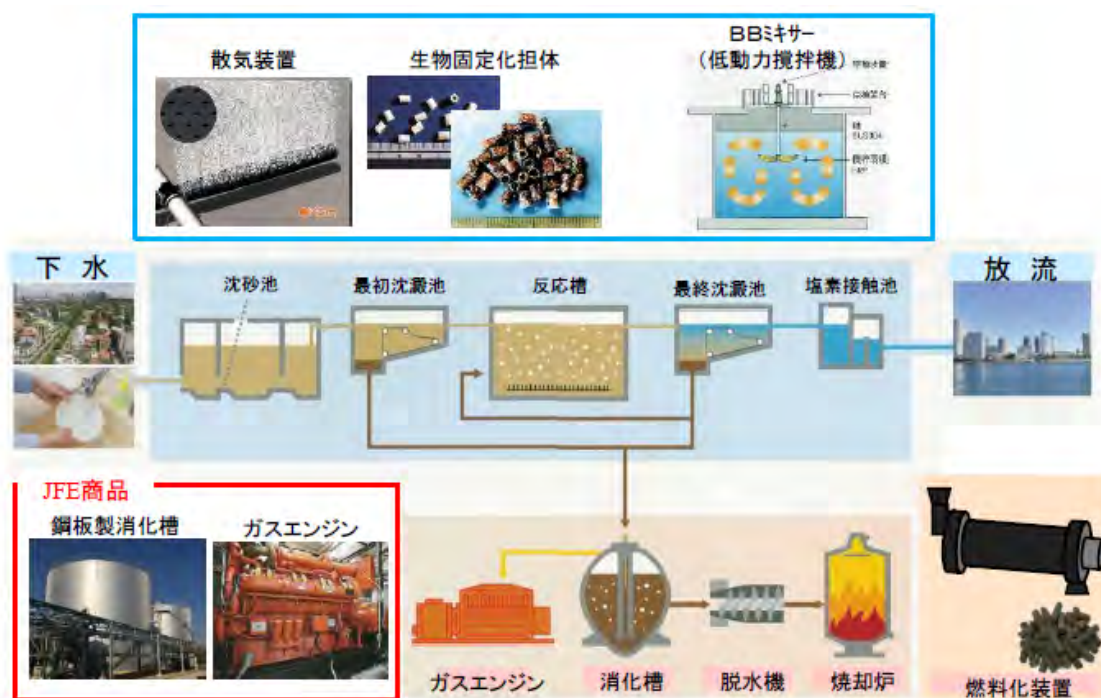
プラントコスト、運営費がかさんでしまうということで、残念ながら 2006 年以降の普及はストップしている。

JFE エンジニアリングでは、今後の脱炭素社会の構築に向け、廃棄物由来のガス製造プラントについて、現在さらに検討を進めている段階である。

4-4 バイオガスプラント（JFE エンジニアリングプレゼンテーションより）

下水処理は「沈砂池」、「最初沈殿池」で元々下水に入っている固形物を沈殿除去する。「最初沈殿池」では生ごみに近い成分は沈殿除去され、上澄みを「反応槽」で空気と接触させて、好氣的に酸化分解し、CO₂ にしてしまうという処理である。

そこから出てきた混合液を「最終沈殿池」で又、固液分離を行う。ここで出てくる下に沈むものは「反応槽」で活動した微生物の塊となるので、これは発酵にはあまり適していない。「最終沈殿池」の上澄みを塩素滅菌して放流し、消化槽である程度減容化された固形物は脱水して焼却されるか、燃料化されるのが下水処理のメインフローとなる。

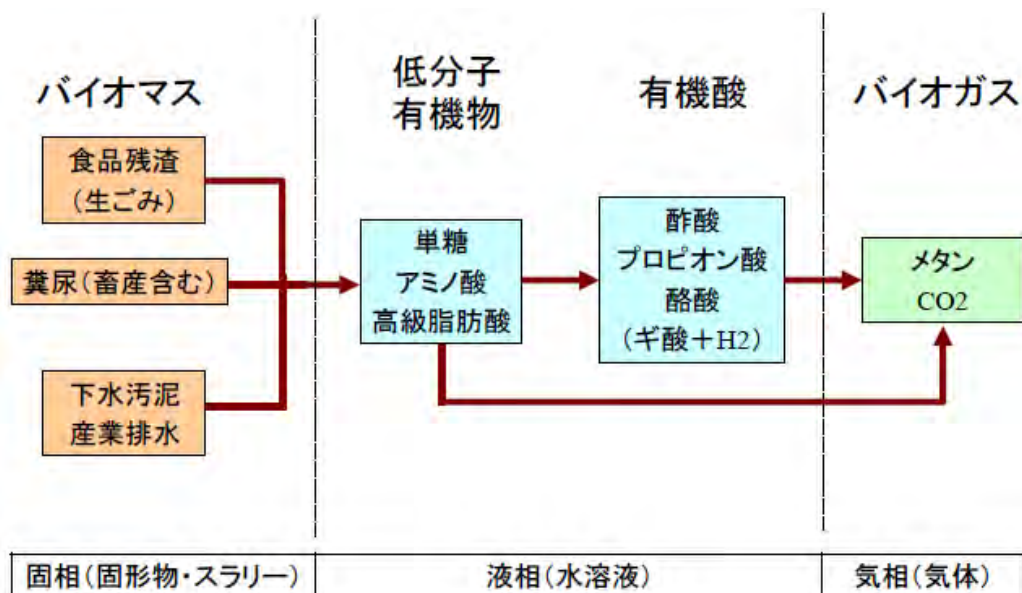


（JFE エンジニアリング資料より抜粋）

図 51 下水処理基本フロー

「最初沈殿池」と「最終沈殿池」から出てきた固形物は「消化槽」に入れる。「消化槽」は元々メタン発酵槽であるが、「消化」という言葉があらわす通り、処理側からすれば出てきた固形物を消す、廃棄物を減らすというプロセスであり、ガスを採るとか、エネルギー回収するという考え方は無かった。

バイオガスプラントの原料はバイオマスであり、下水汚泥や畜産の糞尿や、食品残渣、生ごみといったものを発酵させる。液相と書かれている水溶液の部分がメタン発酵槽であり、槽内で発酵が進む。これは乾式でも、湿式でも同じである。



(J F E エンジニアリング資料より抜粋)

図 52 バイオガス生成反応

発酵では低分子化された単糖とかアミノ酸とか高級脂肪酸等を中間生成物として、最後バイオガスとしてガス化されて気相に出てくる。出てくるガスはメタン 60%、CO₂40%程度の割合である。

中間生成物からのバイオガス組成の推定

低分子有機物	化学式	メタン発酵	$\frac{\text{CH}_4}{\text{CH}_4+\text{CO}_2}$
単糖	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 3\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2$	50%
パルチミン酸 (高級脂肪酸の一例)	$\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$	$2\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH} + 14\text{H}_2\text{O} \rightarrow 23\text{CH}_4 + 9\text{CO}_2$	72%
プロピオン酸	$\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$	$4\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 7\text{CH}_4 + 5\text{CO}_2$	58%
酢酸	CH_3COOH	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	50%

実プラントの実績

原料／バイオマス	$\frac{\text{CH}_4}{\text{CH}_4+\text{CO}_2}$	その他 H ₂ S、N ₂
下水汚泥(包括委託)	57～62%	H ₂ S: 1000ppm N ₂ : <1%
下水汚泥+生ごみ+し尿(PFI事業)	59～61%	
生ごみ(PFI事業)	60～65%	H ₂ S: 1200ppm
産業廃棄物(民間事業)	60～63%	データなし

(J F E エンジニアリング資料より抜粋)

図 53 バイオガス組成

原料が下水汚泥であっても生ごみであってもメタンが概ね 60%となっている。生ごみは、炭水化物系が増えるとメタンが少し増えるというイメージはある。その他、利用するのに邪魔となる硫化水素がどうしても出てくるため、後処理で取る。

出てきたバイオガスを、FIT 発電している例を示す。メタン発酵でガス化されたものを脱硫塔で硫化水素を落とし、

ガスタンクに貯めておき、それを使って温水を作ったりしてメタン発酵槽の温度を一定に保っている。FIT 前は余剰ガス燃焼装置で燃やしてしまうのが通常のやり方であったが、FIT 後は発電をするということで発電部分が追加され、ガス供給ユニットの後にシロキサン³⁹除去装置を経てガスエンジン発電機につなげ発電している。

JFE エンジニアリングの関わる事業の中で、日本最大級の横浜市ガス発電 PFI 事業の発電量は 4,500 k W のメガワット級であり、豊橋の混合メタン発酵事業では、下水汚泥 470 トン、生ごみ 60 トンを混ぜて、メタン発酵、発電を行っている。又、豊中市では自治体がメタン発酵した消化ガス（メタンガス）を買い取って、発電する事業を 1,000 k W 程度だが行っている。長岡では生ごみのメタン発酵、発電の事業を PFI 事業で行っている。

民間では JFE のグループ会社である J&T 環境、J バイオフードといった会社が、産廃、事業系廃を集めてメタン発酵して、バイオガス発電する事業を行っている。

³⁹ シロキサン：酸化シリカ、シャンプー等に入っているシリコンのガスであり、エンジン等に悪影響を及ぼす。

4-5 LP ガスのグリーン化に必要な原料の整理

本章では LP ガスのグリーン化に必要な原料について、水素、バイオマス、廃棄物からのガス、下水汚泥等のバイオガスについて考察した。

<水素について>

水素はグリーン化が期待されるエネルギー全ての原料となる物質であり、今後のカーボンニュートラル化に向けてのカギを握ることは間違いない。水素に求められる役割の中には、LP ガスと同じく「産業用エネルギーの低炭素化」や「家庭や地域の暖房システムの低炭素化」がある上に、「回収炭素を水素と合わせ工業原料化」することも含まれており、水素以外のエネルギーの合成に果たす役割は大きい。

水素・燃料電池戦略ロードマップでは、日本における大規模な再生可能エネルギーの調達が困難であることを鑑み、2030 年頃から水素を海外から持って来ることを前提としている。現状、製造過程で出る CO₂を地中に埋め戻すことでカーボンバランスをとり、オーストラリアの褐炭から作られた水素を輸入するプロジェクトが進んでいるが、グリーン化に向けた更なる取組みが必要になるかもしれない。

高炉の水素還元膨大な量の輸入水素が使われ、都市ガスのメタネーションにも膨大な水素が使われるとなると、将来的には水素の取り合いが生じることが懸念される。

<バイオマスについて>

バイオマスについては産総研より総合的なバイオマス利用の現状から見た分析をいただいた。バイオマス、特に欧州で進められているバイオディーゼル生産に副生するグリセリンからの LP ガス合成については、プロパン、ブタンを合成するよりも、化学的な付加価値の高い 1,2-プロパンジオールとか 1,3-プロパンジオールを作る方が現実的との指摘をいただいた。その上で、バイオマスから燃料合成をするのであれば、発生する合成ガスの組成から見ても、含酸素燃料である DME 或いはメタノールの合成が有望であるとの示唆であった。

JFE エンジニアリングからは、廃棄物焼却炉から出る合成ガスの利用と下水汚泥等の発酵の際に発生するバイオメタンの利用についての考察をいただいた。

<廃棄物焼却炉からの排出ガスについて>

廃棄物焼却炉から出る合成ガスの利用については、自治体で恒常的に発生する都市ごみ等の燃焼から出る排出ガスの有効利用であり、今後の LP ガス合成の原料としては普遍的に存在するものであり、有望であると思われる。

JFE は焼却炉のプラントメーカーでありながら、関係会社において自社工場内に焼却炉を設置して事業運営も行っている。今後、LP ガスのグリーン化に向けて原料を調達する場合の有力な選択肢として、連携を密にしておきたい。

＜下水汚泥からの発酵メタンについて＞

下水汚泥等の発酵によって生じるバイオメタンは、どの自治体においても処理が必要なものであり、同様にグリーン LP ガスの原料として有望と思われる。有効利用出来ていない下水汚泥発酵メタンも全国各地に存在すると思われ、全国的に展開すべき LP ガスのグリーン化にとって、地産地消を実現できる原料となる可能性が高い。

又、焼却炉ガス及び発酵メタン共に現在は FIT 制度を使った発電に使われることで一定の収入を得ているが、今後の卒 FIT による買取価格の低減により採算が取れなくなる事業の増加が想定される。このため、これらの廃棄物の今後の有効利用の担い手は、グリーン LP ガスの製造が最も適しているとも考えられる。

第五章 LP ガスのグリーン化の海外の動向 及び他の業界からの期待

第五章 LP ガスのグリーン化の海外の動向及び他の業界からの期待

LP ガスのグリーン化の動きは日本に留まらず、海外特に欧州においては盛んに検討されている。研究会においても欧州を中心とした動向の検討も行われた。又、LP ガスがグリーンイノベーション化された社会の中で期待されている役割についても、建設業界からのご発表をいただいた。

5－1 欧州におけるバイオ LP ガスの動向（欧州 LP ガス協会リーフレットより）

バイオ LP ガスは使用上や性能上は従来の LP ガスと同じであり、今のカーボンフットプリントを 80%低下することが出来る。長期的に見れば、バイオ LP ガスは新たな製造プロセスの開発によってカーボンニュートラルとなる潜在力を有している。

バイオ LP ガスは、例えば工業用と同様に輸送や発熱、非都市部での調理用を含むがこれらに限定されない分野での脱炭素化にコスト効果のある解決法である。2018 年から、欧州の市場では小規模ながら利用が始まっており、数量を増やしている。

水素化精製植物油（**HVO**：Hydrotreated Vegetable Oil）のディーゼルやその他の副産物としてのバイオ LP ガスは持続可能な航空燃料となるハイドロ加工エステル及び脂肪酸（**HEFA**：Hydro-processed Esters and Fatty Acids）より作られる。但し、欧州の **HVO/HEFA** の能力だけでは、2050 年までに産業界が出したコミットメントに適合するバイオ LP ガス量は十分ではない。

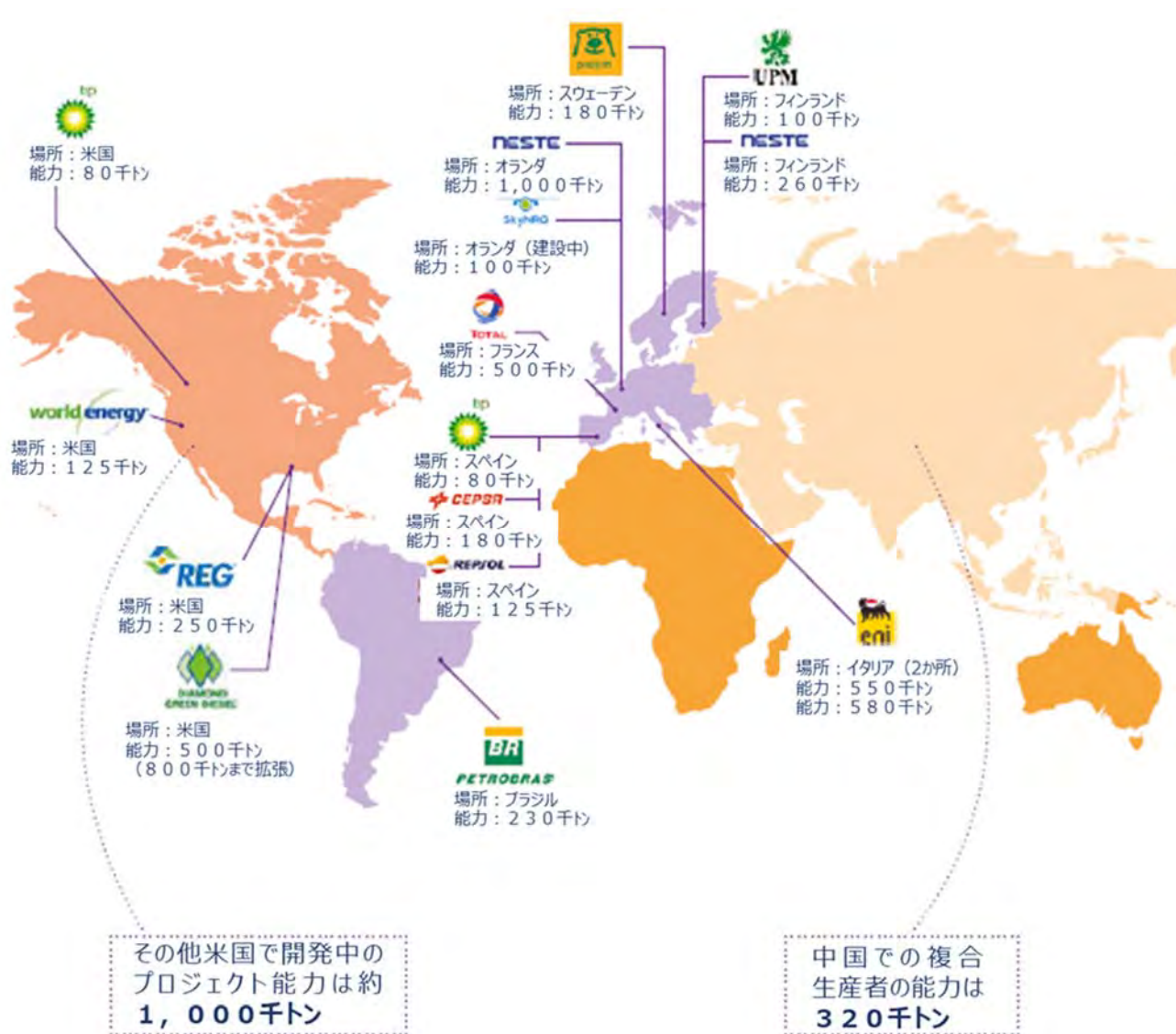
バイオ LP ガスを生産することの出来る見込みのある技術は何通りかある。しかしながら、これらの道筋は現在十分に成熟しておらず、商業的にも利用できる状態にない。これらは、調査研究或いはデモプラントの規模から成長するには、まだまだ時間と資源が必要である。バイオ LP ガスの生産技術を更に発展させるには、予測可能で魅力的な投資の流れが必要である。但し、バイオ LP ガスがエネルギー分野で変化する中でポリシーメーカー及び生産者となる企業の自覚が欠如しているのが現状であり、LP ガス産業の懸念は増している。

バイオ LP ガスの量を増加させる生産設備の新たな投資に対し、必要且つ安定した政策のフレームワークを開発するため、我々は欧州と国家の政策決定者や、持続可能な液体燃料／バイオガスの生産者及びその他のステークホルダーと欧州縦断で、意見交換を続ける用意があるが、そこに至るには、以下の様な重要な政策介入や産業行動が個別には必要となる。

- ・バイオ LP ガスが、欧州の政策フレームワークと制度の中で認識されなければならない。
- ・将来短い期間で LP ガスとバイオ LP ガスに移行するためには、欧州と国の政策で顧客に対してインセンティブを提供すべきである。
- ・低炭素液体燃料と再生可能ガスの生産者がバイオ LP ガスを生産し安定するためには、欧州と国の政策でインセンティブを提供すべきである。

以下の会社は現在も欧州でバイオ LP ガスを生産している。

- ・ENI（イタリア）
- ・グローバルバイオエナジーズ（フランス）
- ・NESTE（オランダ）
- ・PREEM（スウェーデン）
- ・REPSOL（スペイン）
- ・TOTAL（フランス）



(欧州 L P ガス協会リーフレットより抜粋)

図 54 バイオ LP ガスの生産

バイオ LP ガスは合成燃料の副産物として、複合的な製造プロセスの中ではマイナーな生産物である。バイオ LP ガスの可能な合成ルート（そしてその開発の状況）は、次頁に示す伝統的且つ先進的な化学プロセス、生化学的プロセス及びその他に属するものである。この内のただ一つのプロセスが既に欧州で商用化している。それは **HVO（水素化精製植物油）のディーゼル生産**である。



技術及びプロセス		潜在的バイオLPガス生産（燃料全体で）			技術段階	既存の生産者、プロジェクト例
バイオ精製						
脂質水素化処理	バイオ精製工場はバイオマスを広範囲な製品とエネルギーキャリアに転換する。バイオ精製工場ではエタノールや砂糖を発酵で生産している。この様なアルコールは更に注入用ジェット燃料に転換することが出来る。バイオLPガスはこのプロセスの副産物である。	7%	デモ/ パイロット 段階	ENI(イタリア)、Groenland(デンマーク)、PREEM(スウェーデン)、Repsol(スペイン)、Total(フランス)		
エステル交換	今日の殆どのバイオLPガスは水素化精製植物油(HVO)の副産物として生産されている。ここでは植物油は、再生可能ディーゼルや航空機燃料を生産するために水素で処理される。	70%	商用 段階	Huileberg(スウェーデン)		
発酵	FAMEバイオディーゼルとグリセリンは油のエステル交換を経由して生産することができる。グリセリンは原料として使われ、水素と反応することでバイオLPガスを生成することができる。	100%	パイロット 段階	Byogy(米国)、Gevo(米国)、UOP(米国)、Vertimass(米国)		
熱分解						
	熱分解は無酸素状態での熱分解プロセスである。急速熱分解では、バイオマスはバイオLPガスやオイルを含む蒸気、IPU、水、ガスが発生する分解をすぐに起こす。次のステップでは、冷却と収集後、濃い茶色の可動性の液体、即ち熱分解油が形成される。触媒の分解を経由して、バイオLPガスに転換される。	5%	デモ段階	BTG(フランス)、Gas Technology Institute(イリノイ)、UPM(スウェーデン)		
ガス化						
バイオマスの加熱ガス化 (メタネーションに続く)	ガス化は、閉鎖した反応器(ガス化装置)の中で外部から供給された酸化物質(空気、水、二酸化炭素等)を加えて、バイオマスの粒子を合成ガスと揮発物質、灰に完全に熱分解するものである。メタネーションを経由した合成ガスは、SNGに転換される。更にバイオLPガスに合成することも出来る。	20%				
水素分解によるフィッシュトリアシ(FT)合成	選択的には、合成ガスはフィッシュトリアシ(FT)合成で使われる前に不純物を除去するクリーニング段階を経由する。FTプロセスは触媒を使って合成ガスから液体燃料を製造することである。その中間生産物はFTガスとして知られる炭化水素の固体混合物である。その後、LPガスと同様にグリセリン、ディーゼル、ジェット燃料の様な燃料を製造する為に触媒分解プロセスを経由する。	5%	商用/ デモ段階	Total(フランス)、Cadent(英国)、Enerkem(カナダ)、Fulcrum(米国)、Red Rock(米国)によるバイオLP燃料プロジェクト		
合成ガスからのメタノール合成	合成ガスは同じようにメタノールに合成することが出来る。次の段階で、メタノールはグリセリンの製造に使うことが出来る。バイオLPガスはこのプロセスの重要な数量を占める副産物である。	8%				
嫌気性消化						
バイオガスのオリゴマー化	嫌気性消化は発酵のプロセスであり、肥料、食物残渣、下水汚泥や産業廃棄物の様な有機原料がバイオガスと製品としての消化液に変化する密閉発酵槽で発酵が生じる。	90%	調査/ 開発段階	Alcon(米国)、PlasMerica(米国)		
Power-to-X						
電気より得られた水素を使ったCO2メタネーション	Power-to-Xは捕集したCO2と再生可能電力で水分解した水素をガス化し又は更なる合成で燃料に転換する技術である。合成ガスとメタノールは更にLPガスに合成出来る。	10%	調査/ 開発段階	[Nordic Blue Crude(ノルウェー)、Sunfire(ドイツ)、Synhellon(スイス)、Repsol(スペイン)]		
合成ガスのFT合成	再生可能LPガスは同様に、合成燃料(e-fuel)用に合成ガスとフィッシュトリアシ合成する際の副産物である。	10%				
合成ガスからのメタノール合成	合成メタノールは再生可能電力で作られた水素と捕集されたCO2を使って製造することが出来る。更にグリセリンとバイオLPガスを副産物として製造する原料としても使用出来る。	10%		Carbon Recycling International(CRI)(アイスランド)		

(欧州LPガス協会リーフレットより抜粋)

図 55 バイオLPガスへの道筋

今後 30 年で欧州の非ケミカル LP ガス需要は、今日の 16 百万トンから 25～30%減退するであろう。この下落は、以下に示した 2050 年の欧州のエネルギー全般トレンドにより説明することが出来る。

- ・最終的なエネルギー消費は約 1/3 に減退するであろう。
- ・電化は輸送、暖房、冷房分野においてははっきりと主に液体燃料代替として勃興する。
- ・ガス体燃料消費は減退するが、液体燃料ほど激しくない。
- ・固体燃料はほとんど消滅する。

この予測には、LP ガスが競合する燃料と置き換わる可能性やそれによって得られるマーケットシェアを考慮していないが、欧州議会は建物の暖房用の油と石炭の需要は、2020 から 2030 年に約 70%減退すると予測している。農村地区の商業、工業暖房の更なる脱炭素化は、LP ガスと共に達成することが可能である。短期的から中期的には、LP ガスは低いカーボンフットプリントと汚染物質の対排出によって、オフグリッドの家庭、商業、工業用の暖房油や石炭を代替すると予測される。

LP ガス 8～12 百万トンに相当する将来の需要は、欧州において以下のソースよりバイオ LP ガスとして全量製造されることとなる。：

- ・ほぼ 9 百万トンはバイオ精製工場、熱処理、ガス化及び power-to-X 技術（生成業者のオペレーション）から得られる。
- ・これ以外の 3.5 百万トンはバイオガスの転換によって得ることが出来る。
- ・上記オプションが失敗した場合、ガス産業のグリセリン-to-プロパンやアルコール-to-ジェットの道筋からの power-to-X プラント或いは輸入によってバイオ LP ガスを調達する選択肢もある。
- ・短期、中期的にはバイオ LP ガスの相当量は主に脂質のバイオ精製、バイオガス転換、バイオマスのガス化から得られる。

power-to-X 技術が欧州委員会により 2030 年に欧州市場に参入すると予測されているということは、即ち 2050 年までにバイオ LP ガスの適正なレベルの量を確保するために、LP ガス産業には持続可能で再生可能なガス体、液体燃料の生産に成功するための全ての技術が必要であることを示している。

5-2 米国におけるカーボンニュートラルの動向（Oberon 社プレゼンテーションより）

カリフォルニア州（以下、「加州」と略称）の政策で以下の5点が決定している。

- ①上院法案第 32 号：2030 年までに温室効果ガス 40%を削減すること。
- ②上院法案第 1383 号：メタンの削減
- ③ブラウン／ニューサム知事の行政命令⁴⁰
- ④上院法案第 1505 号：再生可能水素指令
- ⑤低炭素燃料基準を 2030 年まで延長する。

DME はゼロエミッション自動車への道筋を示すものであり、低コストな輸送体制と燃料充填所での水素への転換を可能にする。地域における燃料の地産地消を生み出す廃棄物の利用機会を作り出す。メタンはパイプラインへの注入以外、大気中に放出されることから、DME に変換されるべきである。再生可能原料である下水汚泥や食品廃棄物から DME が作られることで、温室効果ガスを著しく削減することが出来る。

2020 年 9 月 24 日 DME 法案 AB2663 が加州ニューサム知事により署名された。これは、将来の先進的な加州の温暖化対策のリーダーシップと化石燃料からの離脱を定める 7 つの法案の内の一つである。又、他の代替燃料と DME を競合させるための減税も行われている。加州の DME に対する販売使用税はプロパン、CNG、LNG に競合出来る様に、ディーゼル代替或いはプロパンと混合される場合のいずれも、ガロン⁴¹当たり 18 セントから 6 セントに減税されている。

⁴⁰ ブラウン知事の行政命令：2018 年 9 月加州ブラウン知事は 2045 年までに州内の全電力をクリーンエネルギーで賄うことを義務付けた法案に署名した。

ニューサム知事の行政命令：2020 年 9 月加州ニューサム知事は州内の新車乗用車と小型トラックに排ガスを出さない「ゼロエミッション」車にすること等を命じる知事令に署名した。

⁴¹ ガロン (gallon)：3.785 リットル



(Oberon 社プレゼン資料より抜粋)

図 56 DME の製造 (Oberon の小規模製造プロセス)

2020 年夏、Oberon のオペレーションチームは、9 名のオペレーターを追加し、2021 年に rDME⁴²を生産する準備に入っている。



(Oberon 社プレゼン資料より抜粋)

図 57 DME の製造 (加州政府のサポートによりスケールアップ)

rDME は輸送用燃料としてプロパンの二酸化炭素排出原単位を大きく削減する方法となる。加州だけで見ても、6,000～7,000 台の自動車（プロパン 25 百万ガロン）、49,000 台のフォークリフト（プロパン 40 百万ガロン）がプロパンで走っている。

CARB⁴³は 2030 年までに、加州の低炭素燃料基準（LCFS : Low Carbon Standard）の中に、燃料供給において 20%の二酸化炭素排出原単位（CI : Carbon Intensity）削減を求める修正を加えた。

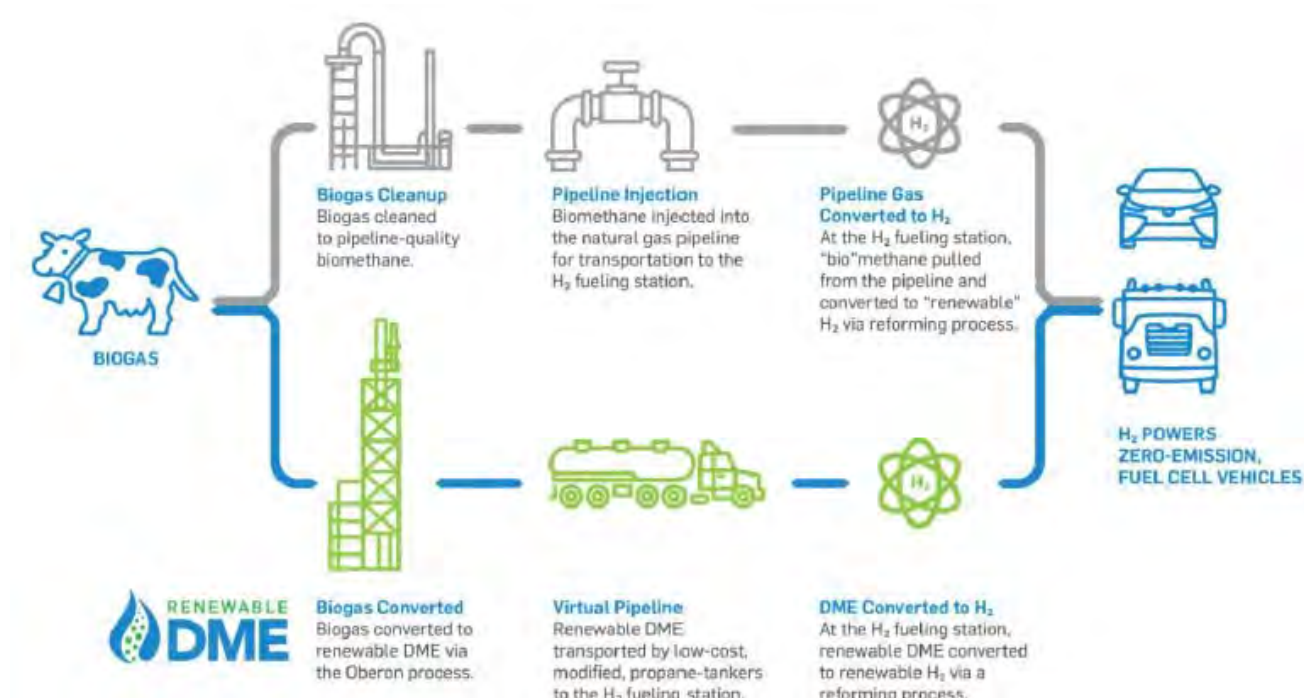
⁴² rDME : 再生可能 DME (renewable DME)

⁴³ CARB : カリフォルニア航空資源委員会 (California Air Resources Board)

輸送機器に使われているプロパンの二酸化炭素排出原単位は 83 であり、2030 年までに許容可能なレベルを超える可能性がある。CARB は最近 Oberon プロセスで毎日出てくるバイオガス（二酸化炭素排出原単位 -150）から作られる rDME の排出原単位が-278 であると計算している。

メタンの排出をカーボンネガティブ燃料や排出ガスゼロに転換するには DME が適切である。再生可能原料から製造される場合、再生可能 DME は 68～101%の温暖化ガスの低減に寄与する。CARB はバイオガスから作られた DME の二酸化炭素排出原単位は、ディーゼルの 95 に対して-278 であると試算している。

毎日出てくる廃棄物から作る rDME を 5%混合するだけで、プロパンの二酸化炭素排出減退は 83 から 65 に削減することが可能になる。20%まで混合すれば、rDME／プロパン混合の二酸化炭素排出原単位は 11 になる。



(Oberon 社プレゼン資料より抜粋)

図 58 DME のパワー（水素キャリアとしての DME）

5-3 地産地消エネルギーによる地域のカーボンニュートラル化 (大成建設プレゼンテーションより)

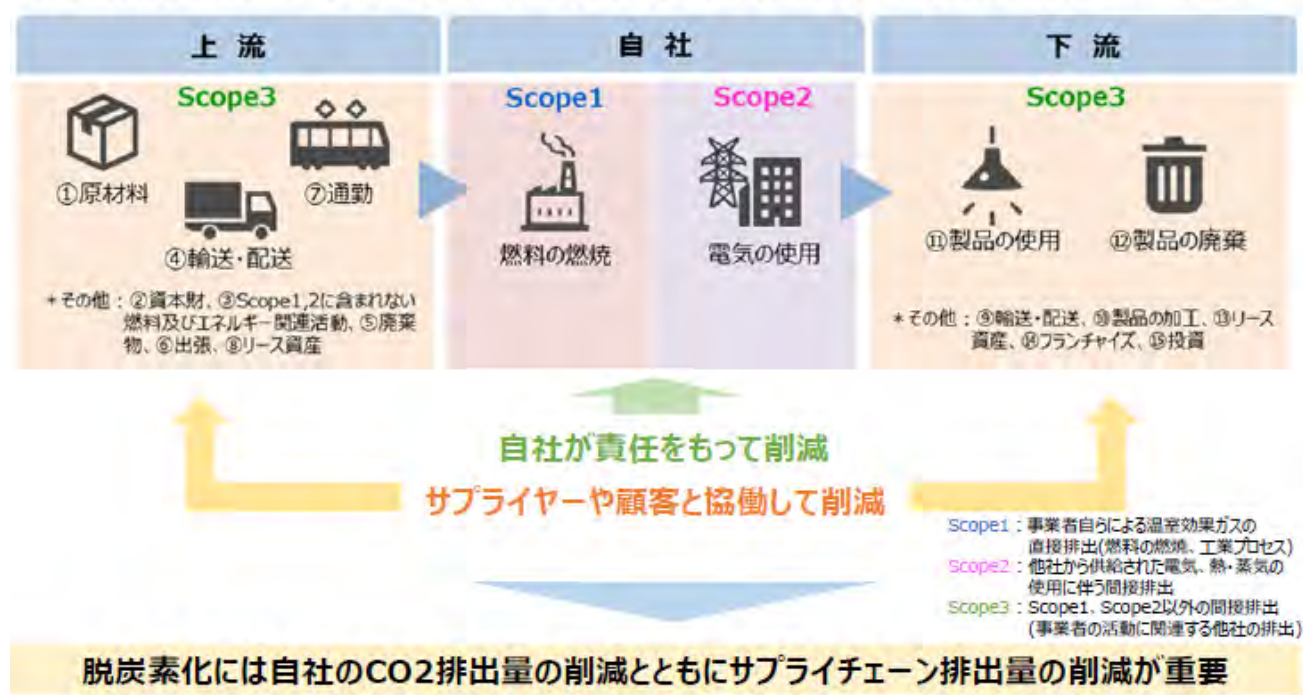
日本 LP ガス協会が発表した資料の中の、「LP ガス産業の再生可能エネルギー利用への取り組み」を見て、LP ガスとバイオガスの親和性が高いと考え、昨年末日本 LP ガス協会とコンタクトを取った。LP ガスを使用する側の視点より話題提供する。

サプライチェーン排出量とは、事業者の原料調達、製造、物流、販売、廃棄等一連の流れ全体における組織の活動に伴って発生する温室効果ガスの排出量のことを示している。燃料の燃焼等の直接排出量を Scope1、電気の使用などエネルギー起源の間接排出量を Scope2 とし、その他の間接排出量を Scope3 として構成している。カーボンニュートラルな社会の実現には、サプライチェーン全体の温室効果ガスの排出量を把握して、管理することが重要視されており、Scope3 の取り組みは加速させなければならない。

Scope1 と 2 は自社が責任を持って削減し、Scope3 はサプライヤーとお客様と一緒に削減することをグループとして取り組むことを目指している。

◆ サプライチェーン排出量とは

事業者自らの排出だけでなく、事業活動に関するあらゆる排出を合計した排出量を示す (環境省資料より)



(大成建設資料より抜粋)

図 59 カーボンニュートラルに対する当社の取り組み

2050 年の環境目標達成に向けて、環境負荷低減活動 (TAISEI Sustainable Action : TSA) を行っている。活動は全社員が参加し、環境負荷低減効果のある技術、取り組みを展開するものである。TSA アクションリストを作成し、低燃費の建設重機を使うとか、LED の照明を導入する等、それぞれの職場で出来ることを推進し、CO₂ の削減に寄与する活動を行っている。

環境省が提唱している「地域循環共生圏」⁴⁴とは、環境と経済、社会の課題を踏まえて、複数課題の統合的な解決という SDGs の考え方も活用して提唱されている概念であるが、この中で五つのキーワードに注目している。中でも我々が積極的に取り組んでいるのは、「災害に強いまちづくり」という部分と、「自立分散型のエネルギーシステムの構築」という部分である。

社会全体のCO2排出削減に貢献する ～地域循環共生圏～

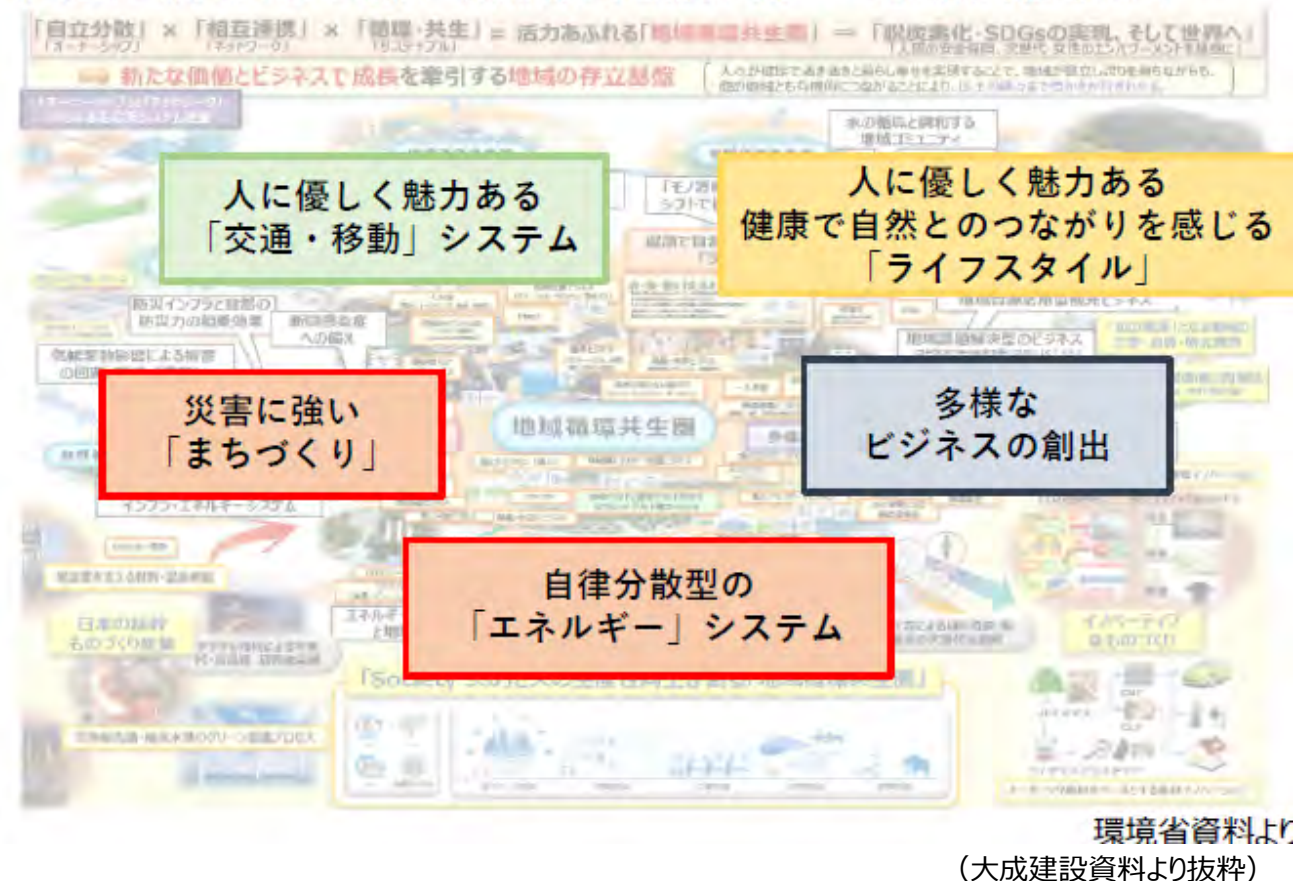


図 60 地域循環共生圏の実現に向けて

地域循環共生圏の実現に向けて、これを目指す取り組みは、地方部をターゲットに考え、太陽光発電施設や、バイオガスプラントといった個々の対応はこれまで行ってきたものの、それらの技術や事例等を繋ぎ合わせて、地域内の資源やエネルギーを循環させることと、地方からの農作物、木材、有機資源、エネルギー等を都市部に提供する機会の増加を連携する取り組みを行うことで、地域内の活性が生まれ、地方創成の道筋が出来ると考えている。この様な流れに寄与する企業活動を実施したいと考えている。

特に地方部においては、LP ガスが持つ分散型エネルギーの特長を活かすことで、地域循環共生圏の実現に繋がると考えている。

北海道におけるバイオガスプラントは FIT の開始によって、かなりプラント建設の計画が進んだ。しかし、現在は再エネ事業が拡大したことで、系統電源の容量に制約が発生し、新規のバイオガス設備の FIT 発電事業計画が中断しているという課題が生じている。一方で、原料となる糞尿は日々発生するため、酪農家における糞尿処理

⁴⁴ 地域循環共生圏：それぞれの地域にある、異なる再生可能な資源（自然、物質、人材、資金等）を循環させて有効利用し、地域の特徴によって補完し合うことで、地域の活力を最大化させて持続可能な自立・分散型の社会を形成するというコンセプト

は必至である。

このような背景がある中で、バイオガスを系統連系が可能な地域まで運んで発電に使用することが出来るとか、バイオガスに新たな活用方法を見出して利用することが出来れば、バイオガスを地産地消のエネルギーとして利用が加速されることで、CO₂ 削減にも繋がり、地方創成、地域循環共生圏に繋がると考え、この分野での取り組みを進めている。

日本 LP ガス協会の SDGs では、「LP ガス産業の再生可能エネルギーへの取り組み」で以下の2点が検討されている。

①LP ガスのバイオマス液体燃料混合方式

②LP ガスのバイオマス分散発電への 有効活用

これらを産官学連携で進めて、LP ガスの方向性を探る取り組みを日本 LP ガス協会は進めている。

我々が目指す方向性は、日本 LP ガス協会が考えている方向性と寄り添うことが出来るのではないかと考えている。LP ガスは平時でも緊急時でも社会に貢献が出来る分散型エネルギーであり、化石燃料の中でも GHG の排出が比較的低いという特長がある。当社は地域循環共生圏の実現に貢献すべく、自律分散型のエネルギーとカーボンニュートラルを目指した地域づくりと災害に強いまちづくりに着目して事業を進めており、この分野で LP ガス業界と合致するところがあるのではないかと考えている。

第六章 まとめ

まとめ（課題と今後の方向性）

昨年 11 月から各月(通算 5 回)の研究会開催が開催出来たことにより、多方面に亘る検討を行うことが出来た。

特にガス体エネルギーとして先行している都市ガスのメタネーション技術の理解をきっかけに、最新の FT 合成、DME 合成、LP ガス合成を始めとする幅広い分野に亘る技術のシーズを集積することによって、分散型エネルギーとして優れた特性を持つ LP ガスが今後も引き続き我が国の基幹エネルギーとして存在し続け、選択され続けるために必要なカーボンニュートラル化（グリーン化）に向けた技術開発面での道筋や課題が整理出来たことは、本研究会での成果であったと言える。

● 研究会で確認された技術情報

- ・当研究会ではグリーン LP ガスの製造技術に係る各技術の利点・課題を整理した。このうち、メタン製造を目的とするメタネーション技術の応用に関しては、原料となる CO_2 と水素からのメタン (CH_4) 合成反応に特化した触媒を使用することや、合成そのものがメタンで止まってしまうプロセスであること、また著しい発熱反応であること等により、LP ガス製造にそのまま応用することは、困難であることが判明した。
- ・又、FT 合成については、石油との関連性が強く、汎用性の高い技術であるものの、 C_3 、 C_4 の連鎖成長確率が 0.6 であるというプロセス技術的な制約を越えることが困難であり、さらに CO_2 から CO への逆シフト反応を行う必要があるなど、目的生産物として C_3 、 C_4 を選択的に求めるには、技術開発上のハードルが高いことが明らかになった。
- ・メタネーションの発展形である SOEC 共電解メタネーションからは、LP ガスの併産も可能なことが示されたが、将来的なグリーン LP ガスの有効な手段として期待出来るものの、2030 年に向けた早期の社会実装に間に合わせるには、基礎研究の分野を含め、種々の課題があることが確認された。
- ・こうしたなか、バイオ原料からの DME 合成(グリーン DME)については、合成方法は LP ガス合成に近似するものの、LP ガスとは組成の異なる含酸素燃料 (CH_3OCH_3) であり、グリーン DME と LP ガスを混和することにより、LP ガスの低炭素化を図ることが可能であることが確認された。
- ・又、 CO 乃至は CO_2 と水素を原料として用い、同一反応塔内でのメタノールから DME への改質を経て、LP ガス合成（プロパネーション、ブタネーション）を行うことは技術的にも可能であることが、過去の実証研究からも確認された。

● 実証化を進める上での課題

- ・LP ガス合成に関しては、主たる生産物がプロパンではなく、ブタン（イソブタン）となり、異性化反応によってノルマル化は可能ながら、プロパンへの置換は困難であることが判った。ただし、プロパンを主たる

目的生産物とする合成技術も一定の触媒、温度・圧力の条件下で生成可能であることも基礎研究レベルでは実証出来ているため、今後さらに研究を進める必要がある。

- ・又、グリーン DME についても、社会実装に際しては、バイオマス或いは再生可能資源等の原料の経済性検討と選択、原料から生成する合成ガス（CO と水素）の改質技術や、実際に LP ガスと混合する際のインフラ検証等の課題を解消して行く必要がある。

● 研究会を通じた今後の方向性

- ・プロパンのグリーン化については、即効性のある形での手段が当面存在しない中で、グリーン DME とプロパンの混合方式は、社会が求める速やかな社会実装に向けた有効策であると考えられる。
- ・欧州や米国においても、バイオ原料由来の LP ガス合成技術開発が進められており、又、バイオ原料からの LP ガス製造は LP ガスとバイオガスの複合的な地産地消を求める方法として重要であり、地域循環共生圏の構築と共に注視する必要がある。しかしながら、2050 年に向けても相当量の LP ガス需要が残ると見通されるなかで、原料調達面での制約等により、バイオ原料に基づくグリーン化だけで LP ガス需要量全体のカーボンニュートラル化を図ることは、困難が予想される。
- ・従って、2050 年以降も社会が必要とする LP ガスを持続可能なエネルギーとして責任を持って供給し続けるためにも、グリーン DME と共に、カーボンフリーの LP ガス合成（プロパネーション、ブタネーション）による技術開発を並行して進め、社会実装に繋げていくアプローチが極めて重要となる。

本研究会には多方面からの情報提供とご協力をいただいた。コロナ禍により幾度かオンライン開催を余儀なくされるなど、様々な制約を受けながらも、数多くの貴重なプレゼンテーションを行っていただいた関係者の方々、研究会を纏め上げていただいた座長の早稲田大学関根教授、行政面からのアドバイスをいただいた経済産業省石油流通課 橋爪企画官、家田課長補佐に、深く感謝を申し上げたい。

以 上

グリーン LP ガスの生産技術開発に向けた研究会報告書

令和 3 年 5 月 1 2 日 発行

日本 LP ガス協会

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-14-1

郵政福祉琴平ビル 4 F



日本 LP ガス協会

2021 年 5 月 1 2 日
＜無断転載を禁じる＞