

令和2年度質の高いエネルギーインフラの海外展開に向けた
事業実施可能性調査事業委託費

サウジアラビア王国・CO₂ to Chemical 生成事業実施可能性調査事業

報告書

[公表版]

令和3年8月

三井物産株式会社

株式会社野村総合研究所

This page is intentionally left blank

目次

1	本事業全体の背景と目的	1
1.1.	事業目的	1
1.2.	事業内容	1
1.2.1.	CO ₂ to Chemical プラントの概念設計に必要な情報収集、調査、分析等	1
1.2.2.	CO ₂ to Chemical プラントの概略設計	1
1.2.3.	CO ₂ to Chemical プラント全体としての経済性検討	1
1.2.4.	ファイナンス及び事業実施体制の検討	2
1.2.5.	本事業実施によるCO ₂ の排出抑制量の試算	2
1.2.6.	サウジ側カウンターパートとの週例ワークショップならびに報告会の実施	2
1.2.7.	今後の方針検討	2
2	CO ₂ to Chemical (メタノール生成) プラントの概略設計に必要な情報収集、調査、分析等	3
2.1.	本パートの調査内容	3
2.2.	メタノール市場に関するサウジアラビア王国市場及び国際需給市場分析	4
2.2.1.	メタノール市場の分析	4
2.2.2.	グリーンメタノールの市場分析	9
2.2.3.	本FSにおけるグリーンメタノール生産量と価格設定の考察	12
2.3.	サウジアラビア王国のメタノール及び関連分野の製造環境等の現状分析	13
2.3.1.	サウジアラビアにおける石油化学産業の現状とインフラの整備状況	13
2.3.2.	二酸化炭素の入手可能性	13
2.3.3.	水素の入手可能性	14
2.3.4.	再生可能エネルギー由来の電力の入手可能性	14
2.3.5.	サウジアラビア政府等によるニーズ	15
2.4.	法令等許認可・簡易環境社会配慮手続き等	17
2.4.1.	用地確保の手続き	17
2.4.2.	投資規制	17
2.4.3.	税制	20
2.4.1.	自国民雇用義務「サウダイゼーション」	21
2.4.2.	安全・環境規制等	22
3	CO ₂ to Chemical プラントの概略設計	24
3.1.	本パートの調査内容	24
3.2.	水の電気分解による水素製造	24
3.2.1.	グリーン水素の概要	24
3.2.2.	グリーン水素製造における技術的選択肢	26
3.2.3.	実現のための課題	30
3.3.	CO ₂ と水素によるメタノール製造	32
3.3.1.	メタノールの製造方法	32
3.3.2.	技術的選択肢	33
3.3.3.	本事業にとって適切な技術の選択	36

3.3.4.	実現のための課題.....	39
3.3.5.	三井化学での RITE 開発触媒を用いた実証検証.....	45
3.3.6.	まとめ.....	49
3.4.	淡水化.....	50
3.4.1.	サウジアラビアにおける淡水化市場.....	50
3.4.2.	本調査が対象とするプラントの上水の調達方法.....	50
3.5.	ソーラー発電.....	51
3.5.1.	サウジアラビアにおける再生可能エネルギー電力事情.....	51
3.5.2.	技術的選択肢.....	52
3.5.3.	実現のための課題.....	54
3.5.4.	まとめ.....	54
3.6.	プラントの概略設計全体像.....	55
3.6.1.	水電解設備・メタノール製造設備の立地.....	57
3.6.2.	メタノールの製造方法と規模・原料、グリーン仕様.....	57
3.6.3.	電力の調達方法.....	58
3.6.4.	CO ₂ の調達方法.....	59
3.6.5.	水素の製造・調達と副生酸素の扱い.....	59
4	CO₂ to Chemical 事業の実現可能性検討.....	61
4.1.	本パートの調査内容.....	61
4.2.	経済性検討.....	61
4.2.1.	CO ₂ to Chemical プラント全体としての経済性検討 概要.....	61
4.2.2.	経済性検討の手法：見込み損益計算書の作成.....	61
4.2.3.	見込み損益計算書の売上項目.....	61
4.2.4.	プラント設備費の詳細（ケース 1 およびケース 2）.....	62
4.2.5.	プラント運営費の詳細（ケース 1 およびケース 2）.....	62
4.2.6.	経済性の検討.....	63
4.2.7.	感度分析.....	64
4.2.8.	経済性検討の課題.....	65
4.2.9.	将来経済性検証に影響を与えうるポジティブな要素.....	66
4.2.10.	今後経済性検証に影響を与えうるネガティブな要素.....	66
4.3.	ファイナンスの検討.....	67
4.3.1.	資金調達の前提条件.....	67
4.3.2.	負債総額.....	68
4.3.3.	備考.....	68
4.4.	本事業実施による CO ₂ の排出抑制量の試算.....	69
4.4.1.	本事業実施による CO ₂ 排出量.....	69
4.4.2.	通常メタノールの CO ₂ 排出量.....	69
4.4.3.	本事業実施による CO ₂ 排出抑制量.....	70
5	サウジ側カウンターパートとの週例ワークショップならびに報告会の実施.....	71
6	今後の方針の検討.....	73

6.1. 今後のスケジュール.....	73
6.2. 事業実施体制の検討.....	73

図表目次

図表 2.2.1 世界のメタノール市場規模（単位：10 億米ドル）	4
図表 2.2.2 世界のメタノールの需給（単位：百万 t）	4
図表 2.2.3 国別生産量（単位：百万 t）	5
図表 2.2.4 地域別需要量（単位：百万 t）	5
図表 2.2.5 メタノール価格の推移	6
図表 2.2.6 企業別メタノール生産量（2019 年）	6
図表 2.2.7 大手メタノール企業の国籍と生産量	7
図表 2.2.8 サウジアラビアのメタノール市場規模.....	7
図表 2.2.9 サウジアラビアのメタノールの需給（単位：百万 t）	8
図表 2.2.10 メタノール需給に影響する要素.....	8
図表 2.2.11 グリーンメタノールの種類.....	9
図表 2.2.12 世界のグリーンメタノール市場規模（単位：10 億米ドル）	10
図表 2.2.13 世界のグリーンメタノール需要（単位：100 万 t）	10
図表 2.2.14 地域別グリーンメタノール需要（2020 年推定値）	11
図表 2.2.15 アジアの国別グリーンメタノール需要（2020 年推定値）	11
図表 2.3.1 「Circular Carbon Economy Program」に係る取り組みと推進主体.....	15
図表 2.4.1 最低資本金・現地資本の最低出資割合が設定されるライセンス	18
図表 2.4.2 外資参入に関する分野毎のネガティブリスト（2020 年現在）	19
図表 2.4.3 業種・企業規模別別サウジアラビア人の雇用割合とカテゴリー	22
図表 3.2.1 水素 1Nm ³ あたりの温室効果ガス排出量.....	24
図表 3.2.2 CertifHy Green H ₂ の定義.....	25
図表 3.2.3 入力電力の変動への耐性比較	27
図表 3.2.4 水素製造技術の比較.....	28
図表 3.2.5 水素製造技術の評価.....	29
図表 3.2.6 水素製造プラントの系統.....	30
図表 3.3.1 典型的なメタノール合成フロー図（東洋エンジニアリング法）	33
図表 3.3.2 技術的選択肢の概要.....	34
図表 3.3.3 MRF-Z [®] 反応器の概要図.....	35
図表 3.3.4 適切なプラント方式の選択.....	37
図表 3.3.5 MRF-Z [®] 反応器内での温度と MeOH 濃度のプロファイル.....	38
図表 3.3.6 触媒の抜き出し方式(東洋エンジニアリング).....	38
図表 3.3.7 CO ₂ のエネルギー準位と触媒反応.....	39
図表 3.3.8 メタノール合成の反応熱.....	40
図表 3.3.9 CO,CO ₂ からのメタノール合成反応の平衡転化率.....	40

図表 3.3.10	銅系触媒のメタノール合成活性.....	41
図表 3.3.11	銅系以外の触媒のメタノール合成活性.....	42
図表 3.3.12	Cu/ZnO 系触媒上でのメタノール合成反応.....	42
図表 3.3.13	RITE 開発触媒 (Cu/ZnO/ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ /SiO ₂) の各成分の役割.....	43
図表 3.3.14	RITE 評価装置の反応諸元.....	43
図表 3.3.15	RITE におけるメタノール 50Kg/日の固定床装置のフロー図.....	44
図表 3.3.16	RITE 開発触媒の反応評価結果.....	44
図表 3.3.17	RITE ベンチ試験の選択率 (単位 mol%)	45
図表 3.3.18	RITE 触媒と市販触媒の比較.....	45
図表 3.3.19	三井化学 大阪工場における CO ₂ からメタノール製造の実証設備.....	46
図表 3.3.20	三井化学における工程図.....	46
図表 3.3.21	パイロット装置による実証試験結果.....	49
図表 3.5.1	REPDO が実行する再生可能エネルギーによる発電所開発プロジェクト.....	51
図表 3.5.2	グリーン電力の調達方法の選択肢.....	52
図表 3.6.1	プラントの概略図 (ケース 1)	55
図表 3.6.2	プラントの概略図 (ケース 2)	55
図表 3.6.3	プラント概略総括表.....	56
図表 3.6.4	プラントの想定立地場所.....	57
図表 3.6.5	プラントの立地候補地の比較.....	57
図表 3.6.6	ケース 1・2、その他のシナリオの比較.....	59
図表 3.6.7	水素製造の概要.....	60
図表 4.2.1	プラント設備の必要キャパシティと必要設備費 (ケース 1、ケース 2)	62
図表 4.2.2	プラント運営費項目 ケース 1 およびケース 2	63
図表 4.2.3	経済性が成立しうるケース別条件 (10 万 t ケース)	64
図表 4.2.4	経済性が成立しうるケース別条件 (100 万 t ケース)	65
図表 4.2.5	想定されるポジティブな影響および根拠と見積り.....	66
図表 4.2.6	想定されるネガティブな影響.....	67
図表 4.3.1	資金調達的前提条件と負債総額.....	67
図表 4.4.1	本事業実施による CO ₂ 排出量 (年間)	69
図表 6.1.1	今後のスケジュール.....	73

略語表

報告書での表記	正式名称	日本語名称 (意味)
ASME	American Society of Mechanical Engineers	アメリカ機械学会
CAPEX	Capital expenditure	資本的支出
CCUS	Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage	分離・貯留した CO ₂ の利用
CIF	Cost Insurance and Freight	運賃保険料込み条件
CNOOC	China National Offshore Oil Corporation	中国海洋石油
COP21	2015 United Nations Climate Change Conference	第 21 回気候変動枠組条約締約国会議
CPC	Customs Procedure Code	通関手続きコード
CTO	Chief Technology Officer	最高技術責任者
ECA	Export Credit Agency	輸出信用機関
EPC	Engineering, Procurement, Construction	設計・調達・建設
FCH JU	The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking	燃料電池水素共同実施機構
FH2R	Fukushima Hydrogen Energy Research Field	福島水素エネルギー研究フィールド
FS	Feasibility study	実現可能性検証
GAMEP	General Authority for Meteorology and Environment Protection	気象環境保護庁
GCC	Gulf Cooperation Council	湾岸協力会議
GHG	Greenhouse gas	温室効果ガス
GO	Guarantee of Origin	発電源証明
HIT	Heterojunction with Intrinsic Thin-layer	ヘテロ接合型太陽電池
IEEJ	The Institute of Energy Economics, Japan	一般財団法人 日本エネルギー経済研究所
IPP	Independent Power Producer	独立系発電事業者
IRR	Internal Rate of Return	内部収益率
JBIC	The Japan Bank for International Cooperation	国際協力銀行
JM	Johnson Matthey	ジョンソン・マッセイ社
JSC	Joint Stock Company	株式会社
KAEC	King Abdullah Economic City	アブドラ国王経済都市
LIBOR	London Interbank Offered Rate	ロンドン銀行間取引金利
LLC	Limited Liability Company	有限責任会社
MEWA	Ministry of Environment, Water and Agriculture of Saudi Arabia	環境・水資源・農業省
MOWE	Ministry of Water and Electricity	水電力省

NEDO	The New Energy and Industrial Technology Development Organization	新エネルギー・産業技術総合開発機構
OPEX	Operating Expenditure	運営支出
P2C	Power to Chemicals	CO ₂ から有益な化成品・燃料を作り出すこと
PED	Pressure Equipment Directive	欧州圧力容器機器指令
PEMEC	Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer Cell	固体高分子形水電解装置
PSA	Pressure Swing Adsorption	圧力変動吸着法
PV	Photovoltaic power generation	太陽光発電
RCJY	Royal Commission for Jubail and Yanbu	ジュベイル・ヤンブー王立委員会
RE100	Renewable Energy 100%	自然エネルギー100%での事業活動を行う宣言をした企業連合
REPDO	Renewable Energy Project Development Office	再生可能エネルギープロジェクト開発室
RITE	Research Institute of Innovative Technology for the Earth	公益財団法人 地球環境産業技術研究機構
SABIC	Saudi Basic Industries Corporation	サウジアラビア基礎産業公社
SAGIA	Saudi Arabian General Investment Authority	サウジアラビア総合投資庁
SAIBOR	Saudi Arabian Interbank Offered Rate	サウジアラビア銀行間取引金利
SAR	Saudi Arabian Riyal	サウジアラビアリヤル
SASO	Saudi Standards, Metrology and Quality Organization	サウジアラビア標準化公団
SDGs	Sustainable Development Goals	持続可能な開発目標
SOEC	Solid Oxide Electrolyzer Cell	固体酸化物形水電解装置
TSO	Scientific and Technical Office	駐在員事務所
VAT	Value-added tax	付加価値税
WERA	Water & Electricity Regulatory Authority	水・電力規制庁
WTO	World Trade Organization	世界貿易機関

化学記号一覧

化学記号	名称
Al_2O_3	酸化アルミニウム
Ar	アルゴン
CH_3OH	メタノール
CH_4	メタン
CO	一酸化炭素
CO_2	二酸化炭素
CuO	酸化銅
H_2	水素
KOH	水酸化カリウム
H_2O	水
Na_2CO_3	炭酸ナトリウム
SiO_2	二酸化ケイ素
ZnO	酸化亜鉛
ZrO_2	酸化ジルコニウム

1 本事業全体の背景と目的

1.1. 事業目的

温室効果ガス排出削減に向けた動きは、世界的な潮流となっている。2015年に国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）において合意された「パリ協定」では、世界の平均気温上昇を2℃より十分に下回る水準に抑える（2℃目標）とともに、1.5℃に抑える努力を継続（1.5℃努力目標）し、21世紀後半に人為的に排出する二酸化炭素量を実質ゼロとする必要があるとしている。また、持続可能な開発目標（SDGs）のゴール13は「気候変動及びその影響を軽減するための緊急対策を講じる」とされている。

これを受け、サウジアラビアでは、2019年12月にエネルギー大臣に就任したアブドルアジズ・アルサウド王子や国営石油会社サウジアラムコのアルクウェイターCTO等により、温室効果ガス排出削減に向けて二酸化炭素排出量の削減に努めるとともに資源として活用する社会を目指す“Circular Carbon Economy”を、国を挙げて推進する旨が公の場で繰り返し発言されている。

“Circular Carbon Economy”の実現手段の一つであるCO₂ to Chemical生成事業については、油井や石油化学プラントから排出されるCO₂を活用し化学品の原材料として利用するという、CO₂の排出削減に貢献する技術である。本事業では、主にCO₂から化学品の原材料となるメタノールの生成に関し、調査・検討するものであり、これは商業レベルで実現すれば世界初となるものの、必要となる個別の技術要素は概ね確立されている。一方、経済性については、昨今のサウジアラビアの財務状況やサウジ・ビジョン2030に示される大方針（財政の健全性確保）を踏まえると、CO₂ to Chemical生成事業についても商業化に向けた独立採算が必要となっている。

以上を踏まえ、本調査事業においては、サウジアラビアにおけるCO₂ to Chemical生成事業について、その概略設計を実施した上で、経済性や実現可能とする方法について明らかにすることを目的とする。

1.2. 事業内容

1.2.1. CO₂ to Chemical プラントの概念設計に必要な情報収集、調査、分析等

CO₂ to Chemical プラントの概念設計に必要な基本情報として、下記の情報収集と分析を実施した。

- ① メタノール市場に関するサウジアラビア王国市場及び国際需給市場分析
- ② サウジアラビアのメタノール及び関連分野の製造環境等の現状・期待分析
- ③ 法令等許認可・簡易環境社会配慮手続き等

1.2.2. CO₂ to Chemical プラントの概略設計

(1) の前提条件整理を踏まえて、プラントに必要な技術要素毎に、技術的・経済的に適切な技術や規模等を選定し、プラントの概略設計を実施した。

1.2.3. CO₂ to Chemical プラント全体としての経済性検討

上記同様、各社の協力の下、CAPEX及びOPEXを算定し、IRRを算出することで経済性を分析した。事業規模については、年間10万tのメタノール製造を想定した。経済性検討にあたっては、CO₂処理費用や副生物の販売も想定した。

1.2.4. ファイナンス及び事業実施体制の検討

本事業の実現に必要なファイナンスを検討した。

1.2.5. 本事業実施によるCO₂の排出抑制量の試算

本事業実施によるCO₂排出抑制量を試算した。

1.2.6. サウジ側カウンターパートとの週例ワークショップならびに報告会の実施

本事業実施にあたり、サウジ側カウンターパートと、2021年1月から6月にかけて、週例ワークショップを実施し、情報の交換、検討経過の共有と協議、検討結果の報告等を実施した。

1.2.7. 今後の方針検討

以上の検討結果を踏まえ、今後の方針として、今後のスケジュールおよび事業実施体制を検討した。

2 CO₂ to Chemical（メタノール生成）プラントの概略設計に必要な情報収集、調査、分析等

2.1. 本パートの調査内容

CO₂ to Chemical プラントの概念設計に必要な基本情報の収集と分析を行った。調査項目と概要は下記のとおりである。

① (2.2) メタノール市場に関するサウジアラビア王国市場及び国際需給市場分析

事業可能性を検討するにあたり、まずメタノール市場全体のサウジアラビア王国及び国際市場の需給を把握した。

次に、いわゆるグリーンメタノールの市場分析を実施した。本事業の検討対象プラントは、CO₂と水を原料とすることから、グリーンメタノールと位置づけられる（詳細後述）。RE100 等の大企業等の環境志向の高まりの中で、グリーンメタノールについては一般のメタノールと比較した特別な需給が期待される。低炭素・脱炭素の国際動向等を踏まえ、グリーンメタノール市場の推移を把握したうえで、将来の需給と本事業の脱炭素メタノールの製造規模を想定した。

② (2.3) サウジアラビア王国のメタノール及び関連分野の製造環境等の現状・期待分析

サウジアラビア王国のメタノール及び関連分野のインフラの現状の実態把握、相手国政府等のニーズを整理した。

③ (2.4) 法令等許認可・簡易環境社会配慮手続き等

実証・本番プラントの建設に当たって、整備可能な土地の確保に加えて、当該場所での建設・操業等に際して必要となる政府法令等許認可手続きや環境社会配慮上の留意点等について整理した。

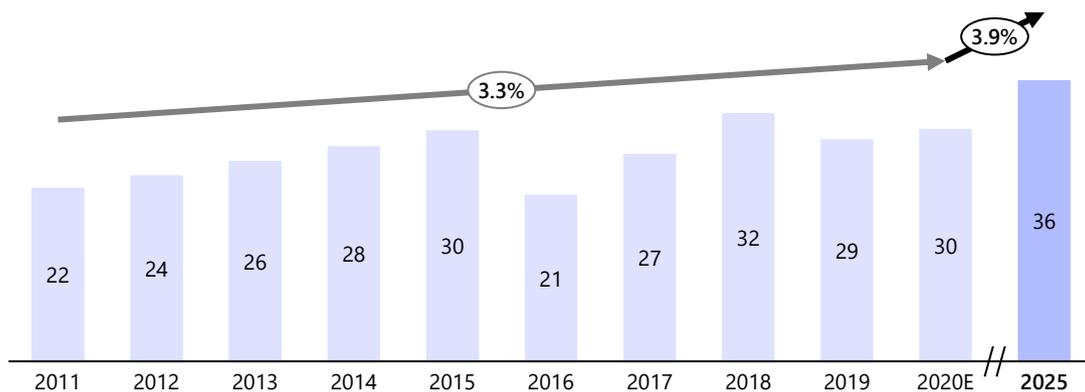
2.2. メタノール市場に関するサウジアラビア王国市場及び国際需給市場分析

2.2.1. メタノール市場の分析

世界のメタノールの市場規模（需要ベース）の推移を下図に示す。メタノール市場は需要の増加に牽引され、2011年から2020年まで、年率3.3%ペースで伸びてきた。

将来の成長率は年率3.9%で、アジアにおけるメタノールとその誘導体の需要の増加、EUでの代替燃料の推進に牽引されると予想される。

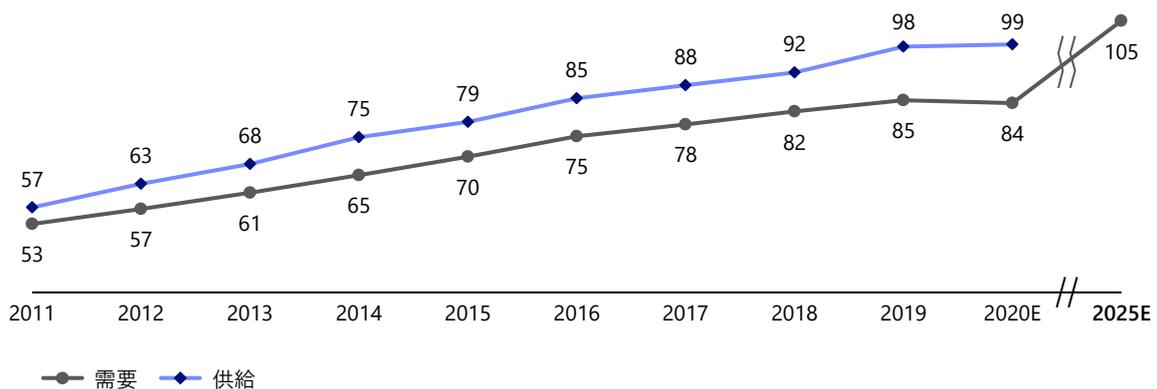
図表 2.2.1 世界のメタノール市場規模（単位：10億米ドル）



出所) Mordor Intelligence reports, Methanol Market Services ASIA より NRI 作成

世界のメタノール市場は、世界最大の生産国であり消費国である中国における生産能力の増強により供給過剰となっている。中国に立地するメタノールからオレフィンを製造するプラントがメタノール需要の増加の理由となっている。

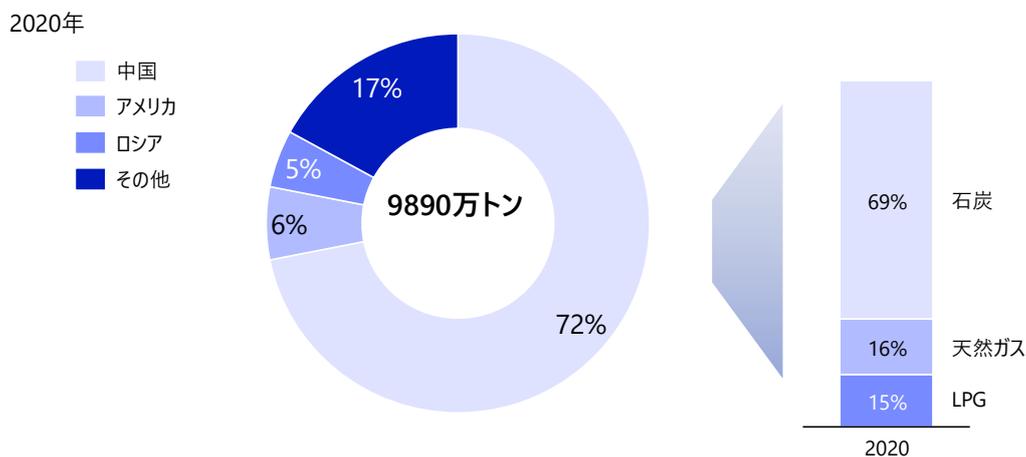
図表 2.2.2 世界のメタノールの需給（単位：百万 t）



出所) Mordor Intelligence reports, Methanol Market Services ASIA より NRI 作成

下図は、国別生産量の割合を示す。原料となる石炭が豊富であることから、中国が世界最大の生産国となっており、72%を占める。中国におけるメタノール生産量のうち、石炭由来メタノールが69%を占める。

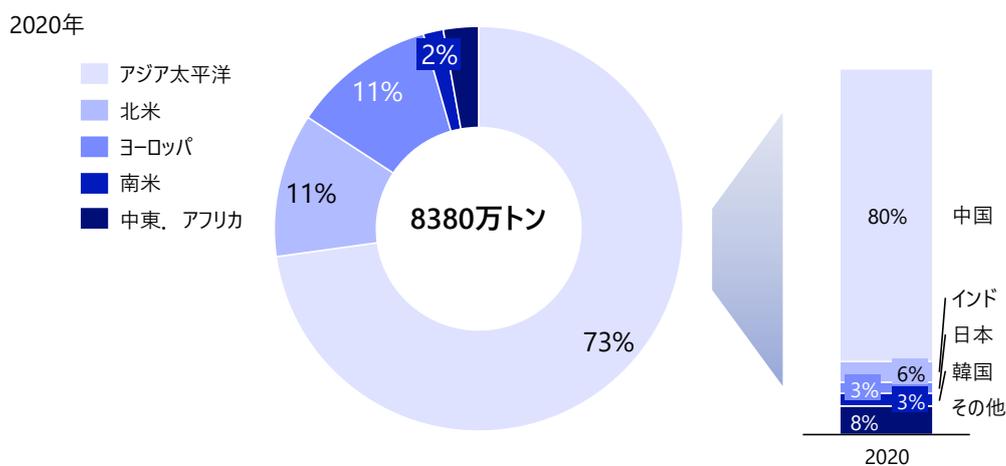
図表 2.2.3 国別生産量（単位：百万 t）



出所) Mordor Intelligence, Multidisciplinary Digital Publishing Institute レポートより NRI 作成

下図は、地域別需要量の割合を示す。アジア太平洋地域が全世界の需要の73%とメタノールの需要をリードしている。(同地域が、年率5%で最も急速に成長するとも予想されている)。アジア太平洋地域の消費量の80%を中国が占める。

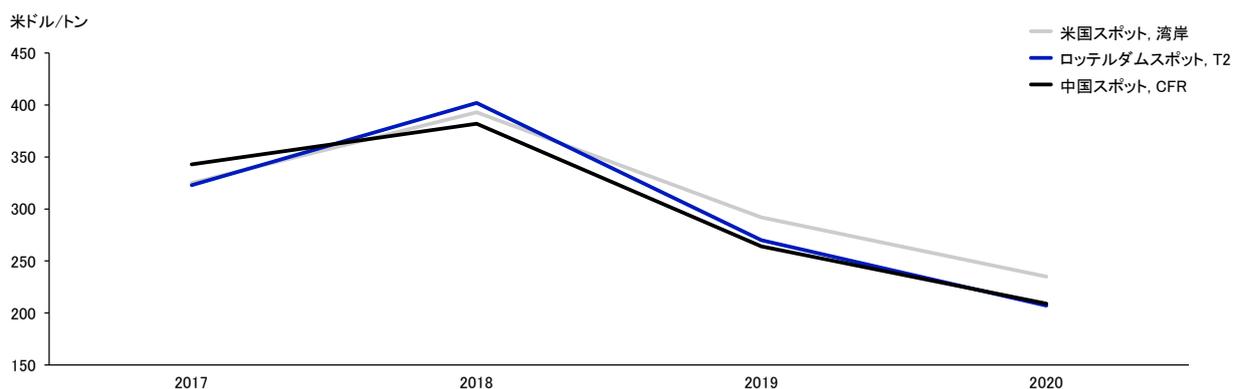
図表 2.2.4 地域別需要量（単位：百万 t）



出所) Mordor Intelligence, Multidisciplinary Digital Publishing Institute レポートより NRI 作成

価格は、石油価格、米中貿易摩擦、COVID-19等の影響を大きく受け、乱高下してきた。2017年から2018年にかけては、中国におけるメタノールからオレフィンを生産する工場が増加したことによる需要の増加、最大手であるメタネックス社（カナダ）のプラントが立地する最大輸出国トリニダード・トバゴによる供給の混乱、米国トランプ政権によるインフラへの投資計画が、ポリマー、コーティング、接着剤、溶剤等の需要増を引き起こすとの期待等の影響で、価格は上昇した。2018年以降は、イランの生産能力増強、米中貿易戦争による需要への悪影響、COVID-19の世界的流行などの要因が組み合わさって、下落している。

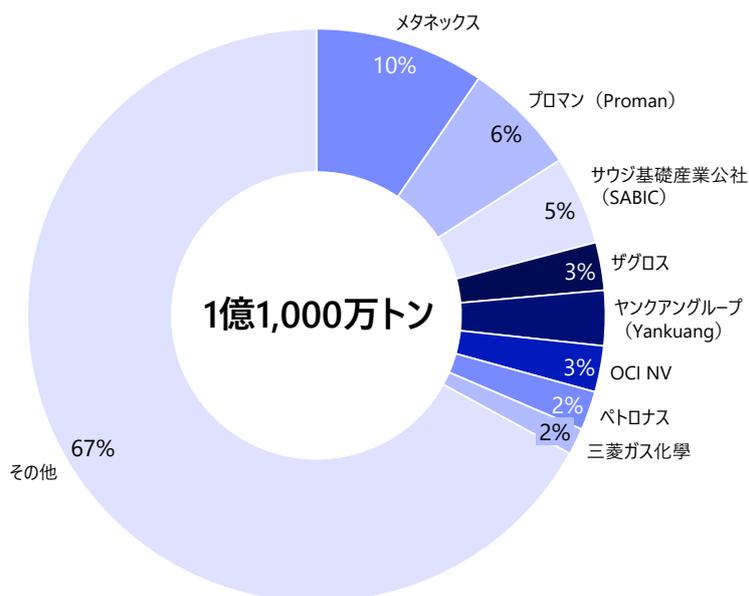
図表 2.2.5 メタノール価格の推移



出所) MMSA(Methanol Market Services ASIA)価格指数、HIS 報告書等資料より NRI 作成

下図・表は、企業別メタノール生産量を示す。大手8社が世界の生産量の33%を占めるに過ぎず、業界内にプレーヤーの多い構造となっている。

図表 2.2.6 企業別メタノール生産量 (2019年)



出所) Mordor Intelligence reports, Methanol.org より NRI 作成

図表 2.2.7 大手メタノール企業の国籍と生産量

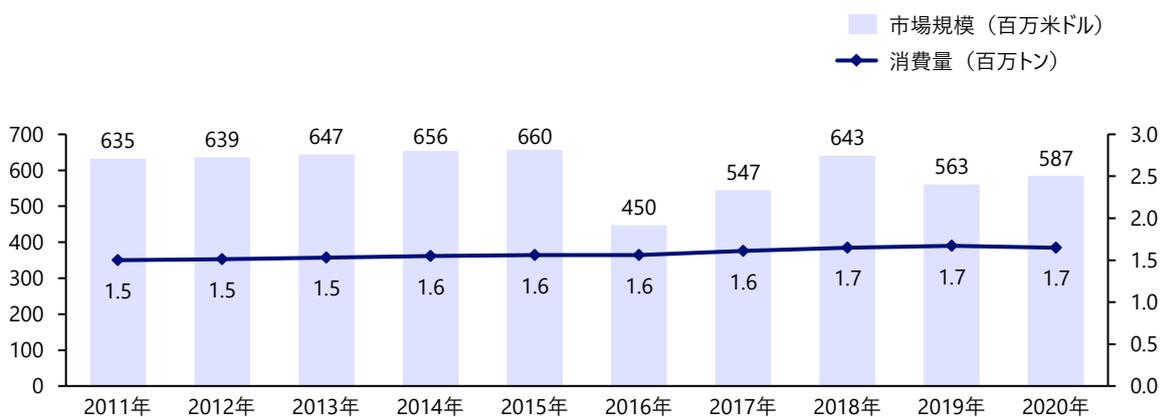
企業名	国	生産力
メタネックス	カナダ	総生産能力 10.5 mmtpa の最大のメタノール生産企業
プロマン (Proman)	スイス	総生産能力 7 mmtpa、生産能力 5 mmtpa の第 2 位企業
サウジ基礎産業公社 (SABIC)	サウジアラビア	3 つの合弁事業により、合計 5.5 mmtpa の生産能力
ザグロス	イラン	生産能力 3.38 mmtpa で第 4 位企業
ヤンクアングループ (Yankuang)	中国	約 3 mmtpa の総生産能力
OCI NV	オランダ	約 2.9 mmtpa の総生産能力
ペトロナス	マレーシア	約 2.4 mmtpa の総生産能力
三菱ガス化学	日本	約 1.6 mmtpa の総生産能力

その他、フェアウェイメタノール LLC、アトランティック・メタノール・製造、リヨンデルバーゼル、CNOOC キングボードケミカル等がある

出所) Mordor Intelligence reports, Methanol.org より NRI 作成

本事業が立地する予定のサウジアラビアのメタノール市場は、金額ベースでは単価の変動により上下しているが、量的にはこの 10 年で 150 万 t から 170 万 t に拡大している。

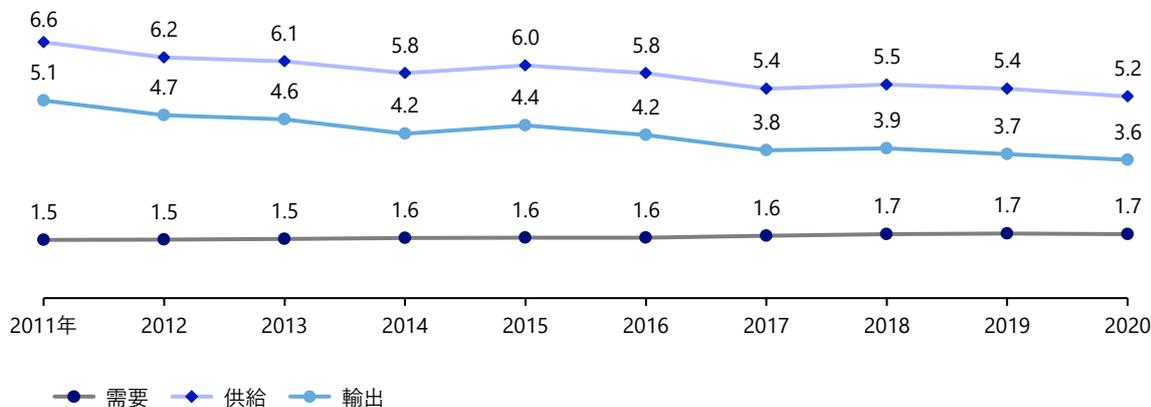
図表 2.2.8 サウジアラビアのメタノール市場規模



出所) Mordor Intelligence reports, Trendeconomy.com より NRI 作成

サウジアラビアにおけるメタノールの供給はこの10年で660万tから520万tに減少している。供給の減少の推移と同様の傾向で、輸出も510万tから360万tに減少している。競合となるトリニダード・トバゴ、イランによる輸出が増加していることが主要な要因と考えられる。

図表 2.2.9 サウジアラビアのメタノールの需給 (単位: 百万t)



出所) Mordor Intelligence reports, Trendeconomy.com より NRI 作成

世界市場の今後の見通しについては、一部エタノールによる置換の可能性はあるものの、環境に優しい燃料への需要やオレフィン等の誘導体の需要がけん引し、メタノールの需要を増加させることが予想される。

図表 2.2.10 メタノール需給に影響する要素

成長の原動力	課題
1. 中国、米国、その他のアジア各国での石油化学部門の拡大 ✓ メタノールは、プラスチック、肥料、包装、衣料、医療用品、洗剤などの様々な用途に用いられる ✓ 中国と米国は短期的な成長が見込まれる一方、アジアと中東は長期的な成長が見込まれる 2. 環境対応型メタノール燃料の需要拡大 ✓ 環境対応型メタノールをベースとする燃料は、従来の燃料と比較してCO、CO ₂ の排出が少ない 3. オレフィン製造におけるメタノールの使用拡大 ✓ プラスチック産業が急速に成長する中で、プロピレンやエチレンをはじめとする軽質オレフィンの世界的な需要は、その原料となるメタノールの需要を成長させると予想される	1. エタノール燃料またはバイオエタノールは、メタノールベースの燃料の潜在的な代替品となる可能性がある ✓ エタノールは、メタノールに比べて毒性が弱く、より高いエネルギー密度を有すると考えられる 2. 石油化学産業はコロナ禍の悪影響を受けている ✓ 需要・供給とも、コロナ禍の影響を受け減少している

出所) Mordor Intelligence reports 等より NRI 作成

2.2.2. グリーンメタノールの市場分析

グリーンメタノールには複数の種類があり、概ね下表の3つに整理される。

第一は、リニューアブルメタノールである。原料としてCO₂回収プラントで回収されたCO₂と、再生可能エネルギーにより製造した水素を用いる、最も「脱炭素」の条件の厳しいグリーンメタノールである。本調査により事業化を目指すのは、この種類のグリーンメタノールに近い。

第二は、バイオメタノールである。こちらは、原料として都市廃棄物や農業廃棄物、パルプ工場の残留物などのバイオマスを原料として使用する。

第三は、ローカーボンメタノールである。原料は従来の天然ガス等を用いるが、プラントのプロセスの中で生成されたCO₂を回収し、原料の一部として使用される。「脱炭素」の条件が最も緩く容易であり、明確な基準はなく、メーカー各社が独自にブランディングしている状況である。現状、市場に出回っているグリーンメタノールの大部分はこの種類である。

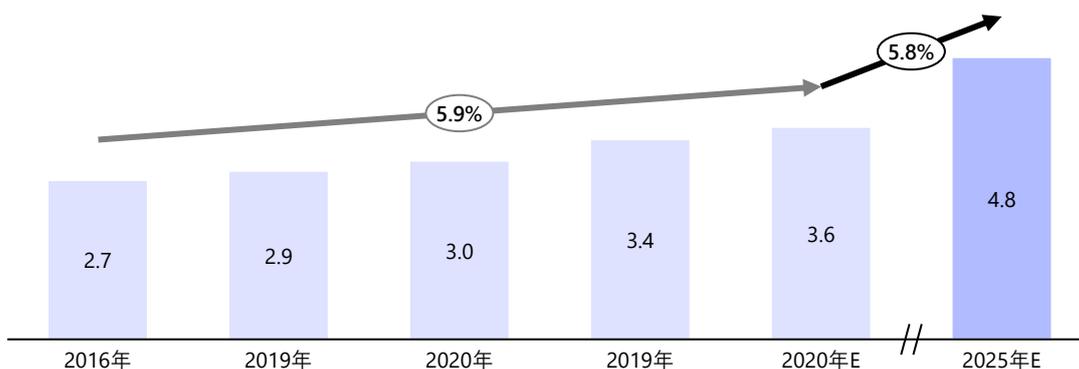
図表 2.2.11 グリーンメタノールの種類

グリーンメタノールの種類	原料、製造方法	主要な製造企業
1. リニューアブル メタノール	CO ₂ 回収プラントにより直接回収されたCO ₂ 、再生可能エネルギーにより製造された水素を用いて精製する	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Carbon Recycling International (アイスランド) ✓ Innogy (ドイツ)
2. バイオ メタノール	都市固形廃棄物、農業廃棄物、パルプ工場の残留物などのバイオマス	<ul style="list-style-type: none"> ✓ BASF(ドイツ) ✓ OCI NV(オランダ) ✓ Enerkem(カナダ) ✓ Nordic Green (デンマーク)
3. ローカーボン メタノール	天然ガス等、従来の燃料 後の段階で、プロセスで生成されたCO ₂ が回収され、再利用されて低炭素メタノールが生成される	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Methanex (Canada) ✓ SABIC (Saudi Arabia) ✓ QAFAC (Qatar)

出所) Methanol.org report 等より NRI 作成

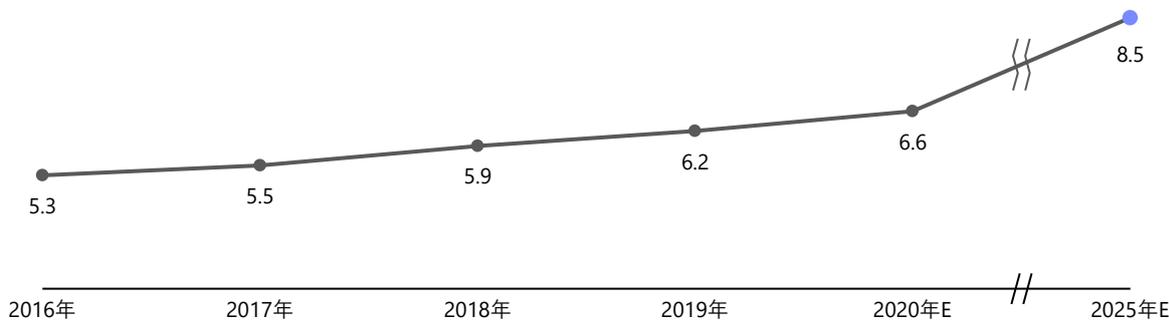
世界のグリーンメタノールの市場規模の合計は、年々増加しており、2025年に向けて年率5.8%で成長すると予想されている。もっとも、このうちほとんどがバイオマスメタノールかローカーボンメタノールと考えられ、リニューアブルメタノールの市場はまだほぼ立ち上がっていないとの声もあり、その市場規模は限られると考えられる。例として、Carbon Recycling International 社によるリニューアブルメタノール”Volcalnol”の生産量は、年間4千tと公表されている¹。

図表 2.2.12 世界のグリーンメタノール市場規模（単位：10億米ドル）



注) リニューアブルメタノール、バイオメタノール、ローカーボンメタノールの合計
出所) Market Allied Research Report 等より NRI 作成

図表 2.2.13 世界のグリーンメタノール需要（単位：100万t）

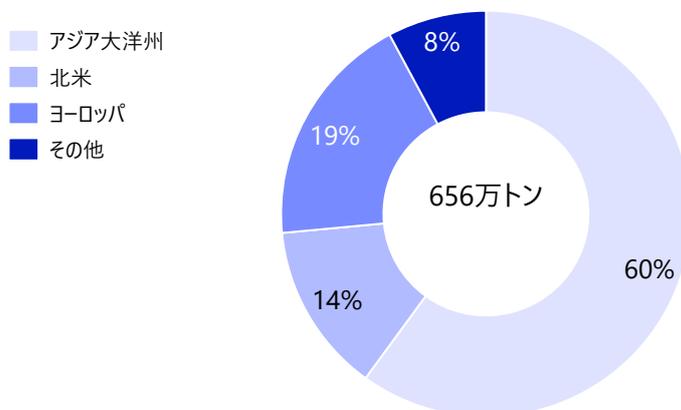


注) リニューアブルメタノール、バイオメタノール、ローカーボンメタノールの合計
出所) Market Allied Research Report 等より NRI 作成

¹ Carbon Recycling International 社ウェブサイト (<https://www.carbonrecycling.is/projects#project-goplant>)

地域別にグリーンメタノールの需要を見ると、アジア太平洋地域が最大であり、約 60%を占める。

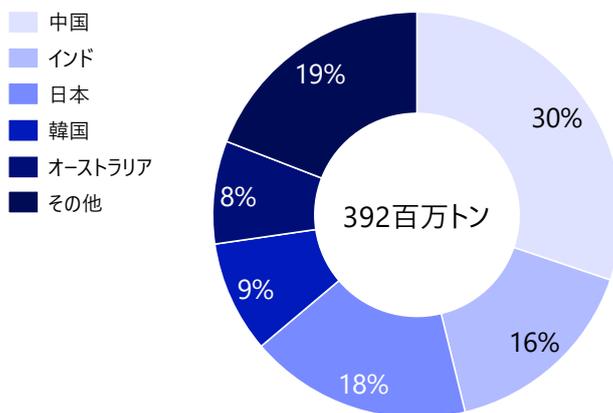
図表 2.2.14 地域別グリーンメタノール需要 (2020 年推定値)



注) リニューアブルメタノール、バイオメタノール、ローカーボンメタノールの合計
出所) Market Allied Research Report 等より NRI 作成

アジア太平洋地域における需要を国別に見ると、中国が 30%を占め、最大である。メタノールの大手メーカーは、再生可能なメタノールの利用を促進するために中国と提携していることが背景にある。例えばバイオメタノールのエネルケム社 (ドイツ) は、2035 年までに中国に 100 か所のバイオ燃料施設を建設する契約に署名している。

図表 2.2.15 アジアの国別グリーンメタノール需要 (2020 年推定値)



注) リニューアブルメタノール、バイオメタノール、ローカーボンメタノールの合計
出所) Market Allied Research Report 等より NRI 作成

グリーンメタノールのうち、リニューアブルメタノールにあたる前述の”Volcanol” (Carbon Recycling International 社製) の価格と通常のメタノール価格を比較すると、”Volcanol”の直近の価格は 600 米ドル/t と推定され、通常のメタノールの概ね 3 倍程度となっている。

2.2.3. 本 FS におけるグリーンメタノール生産量と価格設定の考察

以上の通常のメタノールとグリーンメタノールの市況を踏まえ、本 FS で対象とするグリーンメタノール製造プラントの規模と価格設定を考察する。

プラントの規模については、前述のとおり、グリーンメタノール全体では 660 万 t の市場となっておりと予測されるものの、多くがバイオメタノールとローカーボンメタノールと見込まれる。本 FS の対象とする CO₂ 由来のメタノールに最も近いリニューアブルメタノールについては、前述の“Volcanol”で年間 4,000t と、製造規模はまだ小さい。

今後、自動車燃料向けにグリーンメタノールの需要が増加することも想定されるが、2025 年段階で 850 万 t と予想されているグリーンメタノール全体（リニューアブルメタノール、バイオメタノール、ローカーボンメタノールの合計）の市場規模の内、CO₂ 由来のメタノールはその 10%前後と想定し、最大で 85 万 t 程度の市場となっていると想定するのが現実的であると考えられる。以上から、本 FS では、市場規模の 10%強となる年間 10 万 t を、プラントの生産能力として設定する。

次に価格については、FS の中でコストの積み上げと収益性の前提により、投資可能な水準の価格を検討することになるものの、前述した“Volcanol”の直近の推定価格水準である 600 米ドル/t が一つの目安になる。

2.3. サウジアラビア王国のメタノール及び関連分野の製造環境等の現状分析

本パートでは、サウジアラビアのメタノール及び関連分野のインフラの現状の実態把握、サウジアラビア政府等のニーズの把握を行った。まず 2.3.1 では、サウジアラビアにおける石油化学産業の現状とインフラの整備状況を整理したうえで、2.3.2 以降で本事業実現のために特に必要となる要素（二酸化炭素、水素、再生可能エネルギー由来の電力の入手可能性）について整理した。最後に、サウジアラビア政府によるニーズについても検討した。

2.3.1. サウジアラビアにおける石油化学産業の現状とインフラの整備状況

サウジアラビアにおいては、世界一レベルの埋蔵量を誇る原油と随伴ガスを原料として用いる石油化学産業が盛んであり、石油化学産業の売上高は 170 億サウジリヤル（約 5 兆円）である²。

サウジアラビアの石油化学産業の中核を担うのは、2020 年にサウジアラムコのグループ会社となったサウジアラビア基礎産業公社（以下、SABIC）である。同社の子会社（100%子会社の他、三菱化学や三菱ガス化学、後述の日本・サウジアラビアメタノール等日系を含む海外企業との合弁企業が多数）を通じ、現在製造している化学品の量は 5 千万 t に上る。

メタノールについては、1983 年 7 月に日本・サウジアラビア王国企業合弁会社サウジ・メタノール・カンパニー（AR-RAZI : SABIC と日本・サウジアラビアメタノールの合弁会社）を通じてアルジュベイル地区にて天然ガス原料の 63 万 t 規模のメタノール製造設備が建設されて以降、数次の増設を経て 2008 年 5 月には 500 万 t 体制に至っている。

このようにメタノールを含む石油化学産業の盛んなサウジアラビアでは、その基礎インフラとなる石油化学コンビナートへの投資も積極的に行われており、国営石油化学コンビナートの開発・運営主体であるジュベイル・ヤンブー王立委員会（Royal Commission for Jubail and Yanbu : RCJY）により、東海岸のアルジュベイル、ラスアルヘイル、西海岸のヤンブー等で大規模な開発が行われている。また、サウジアラムコが実施する事業では、従業員のコミュニティを含むインフラについてもセットで開発されており、ラービグやラストヌーラといった主要な製油所の周辺地域においては、生活インフラ・工業インフラが充実している。

石油化学プラント向けのサポート産業についても充実しており、EPC 各社、プラントメンテナンス、プラント設備やそのメンテナンス工場等が多数立地している。関連する日系企業も進出しており、日揮、千代田化工（EPC 大手）、山九（プラントメンテナンス・物流）、横河電機（計装機器・プラントコントロールセンター）、三菱パワー（ガスタービンのメンテナンス）、クボタ（エチレンクラッキング向け鋳鋼部品）、アズビル（コントロールバルブ）、荏原製作所（ポンプ）、ダイキン（空調）、東レ、東洋紡（水処理用膜）、日立製作所（電力向けガス開閉器）等がその例である。

以上から、本事業を実施するための基礎インフラについては、十分整っていると結論付けられる。

2.3.2. 二酸化炭素の入手可能性

本事業では、メタノール製造の原料として、現地で排出される二酸化炭素の活用を想定していることから、現地で入手できるかがポイントとなる。

² 2016 年実績。InvestSaudi ウェブサイト (<https://investsaudi.sa/en/sectors-opportunities/chemicals>)

現地における二酸化炭素排出源としては、発電所や工場等があり、すでに回収も行なわれていることから、本事業で活用可能な二酸化炭素を十分に調達可能であることを確認している。

2.3.3. 水素の入手可能性

本事業では、二酸化炭素とともに水素を合成してメタノールを製造する。

水素については、現地で入手可能性が高いのは、製油所、工場等で発生する副生水素であり、現在燃料等として活用されていることから、本事業で活用可能な水素を十分に調達可能であることを確認している。

なお、サウジアラビアでの大規模水素製造プロジェクトとして、北西部・エジプトとの国境近くに計画されている大規模都市開発プロジェクトである NEOM において、米国 AirProducts 社とサウジアラビアの ACWA Power 社による現地太陽光エネルギーを活用した水素・アンモニア製造の計画が 2020 年 7 月に発表されている。本件は後述する本事業の立地場所（東部州ラストヌーラ）とはかなり距離があり、陸上輸送、パイプラインのいずれを考へても投資額が膨大となることが予想されることから、本事業向けの水素供給源としては想定しない。

2.3.4. 再生可能エネルギー由来の電力の入手可能性

本事業では、メタノールの原料として使用する水素の半分を、再生可能エネルギー（太陽光を想定）由来の電力を用いて水を電気分解することにより製造することを想定している。このために、安価な再生可能エネルギーの取得可能性が重要な観点となる。

日射量の豊富なサウジアラビアは、気候的にソーラー発電に大変向いている。世界銀行グループ等が公表している Global Solar Atlas (<https://globalsolaratlas.info/>) の分析によれば、サウジアラビア国内の平均期待発電量は 5.16kWh/m² であり、日本（同 3.45kWh/m²）の 1.5 倍となっている。活用可能な国土の大きさ（日本の 5.5 倍）を合わせて考えると、このポテンシャルはさらに大きくなる。

この高いポテンシャルを背景に、サウジアラビアでは 2030 年までに約 59GW の再生可能電源の開発を行う目標が 2019 年 1 月に発表されている。計画実行状況は 2020 年時点で設置・稼働済の発電所はソーラー発電設備による IPP 案件での 400MW 分のみであるが、エネルギー省・REPDO（Renewable Energy Project Development Office）による Auction 形式での再生可能電源による発電事業入札（Round2・3）が実行されており、現時点で公表されている入札案件による開発容量は 3.4GW と計画されている。

第三者のソーラー発電所等からグリーン電力を調達するには、グリーン証書の制度の存在が必要となる。現状、当該制度は存在しないものの、サウジアラビア政府関係者より、グリーン証書電力の制度が将来整備される可能性がある旨のコメントを得ている。

したがって、本事業の水素製造に必要な再生可能エネルギー由来の電力の調達は、自前でソーラー発電所を建設するか、現地の既存のソーラー発電所等から、サウジアラビア電力等現地の電力会社を通じてグリーン証書電力として購入することが選択肢として検討可能である。

2.3.5. サウジアラビア政府等によるニーズ

本事業で製造するメタノールは、二酸化炭素と水素を原料とし、活用する水素製造にはグリーン電力を活用する想定であること、また、通常メタノール・プラントよりも小規模なプラントになることもあり（通常メタノール・プラントの生産能力は年間100万t超が通常であるのに対し、本事業で検討するプラントは年間10万t規模）、通常メタノールと比べて製造原価は必然的に高くなる。このことから、現地政府からインセンティブや支援を得ることが重要となるが、そのためには、相手国が二酸化炭素の活用やカーボンニュートラル、サーキュラーエコノミーといったグリーン政策に対し積極的な姿勢を示していることが必須条件となる。

この点、サウジアラビアでは、2016年に発表した長期国家ビジョンである「Vision 2030」では脱石油依存経済を掲げ、再生エネルギーの導入目標を示し、ビジョンの実現プログラムとして「再生エネルギープログラム」を立ち上げている。

また、2020年11月にサウジアラビアが議長国としてホストしたG20では、「Circular Carbon Economy Program」を発表している。これは、削減、再利用、リサイクル、除去という4つの方法を用いて排出量を管理するアプローチである。エネルギー、産業、水、農業、観光などの各部門で社会的・経済的発展を達成するというVision 2030の目的と調和させながら環境への悪影響を抑制し、大気中への排出を減らしながら、炭素排出量の蓄積を減らすだけでなく、リサイクルなどを通じてその恩恵を受けることを目的とした取り組みである。

本プログラムの取組内容としては、①技術の展開（優先順位の高いイニシアチブ：CCUS（二酸化炭素回収・有効利用・貯留）、水素、CO₂の再利用・リサイクルなど）の実証と展開）、②政策と資金調達（排出管理の規制の枠組みを設計し、特定のユースケースの制度とインセンティブを導入する）、③研究開発（戦略的な関連技術に研究開発の優先順位を設定し、国内の利害関係者間の実装を調整する）、④国際的な取り組み（国際的な取り組みの枠組み（G20、COP等）やスケールアップ・研究開発に関わる国際合意の推進等）が挙げられる。また、具体的なプロジェクトと主な推進主体は下表のとおりである。

図表 2.3.1 「Circular Carbon Economy Program」に係る取り組みと推進主体

区分	取り組み	推進主体
削減 (reduce)	水素製造、e 燃料	サウジアラムコ
	NEOM イノベーション・商業化ハブ	サウジアラムコ、SABIC、NEOM
	液体燃料の置換え	淡水化公社 (SWCC)
再利用 (reuse)	原油回収率向上 (EOR)	サウジアラムコ
	セメント製造プロジェクト	サウジアラムコ
	合成施設	リサイクル投資公社 (SIRC)
リサイクル (recycle)	CO ₂ の化学原料化(尿素、メタノール)	SABIC
	CO ₂ のオレフィン化	サウジアラムコ
	ポリプロピレンカーボネートの合成	サウジアラムコ

除去 (remove)	費用対効果の高い炭素回収	アブドラ国王科学技術大学 (KAUST)、サウジアラムコ
	植林	サウジ交通省、工業団地公社 (MODON) 等
	モバイル炭素回収	サウジアラムコ

出所) KAPSARC 資料よりコンソーシアム作成

具体的なプロジェクトも複数動いており、2.3.3 にて取り上げた水素・アンモニア製造プロジェクト「Helios Green Fuels Project」に加え、日本企業等も関わっている、炭化水素と CO₂ の活用して製造したブルーアンモニアの輸送実験も実施されている³。

以上から、本事業は、サウジアラビアの長期国家ビジョンである「Vision 2030」、その一環として推進される「Circular Carbon Economy Program」とも方向性が合致する。このことから、本事業の実現に必要なサウジアラビア政府他からの支援については、受けられる可能性が十分であると判断できる。

³ https://eneken.ieej.or.jp/press/press201216_jp.pdf

2.4. 法令等許認可・簡易環境社会配慮手続き等

ここでは、本事業の実現にあたり必要となる政府法令等許認可手続きや環境社会配慮上の留意点等について整理を行った。具体的には、用地確保の手続き、投資規制、税制、自国民雇用義務、および安全・環境規制について整理した。

2.4.1. 用地確保の手続き

本事業の用地確保先となる産業用地としては、主に、①王立委員会などが管理する工業用地（石化コンビナート）、②前述の NEOM や経済都市（KAEC 等）の経済都市、③工業用地や特定の都市開発に紐づかない土地の3パターンが考えられる。

このうち、①②については、当該用地を管理する経済都市の開発・運営主体が、用地確保のための手続きや必要となる書類のリストがあり、当該手順に従うことになる。③については、用地により、Municipality や土地のオーナーとの交渉となるが、海外からの投資の窓口となるサウジアラビア投資省に橋渡し・調整を依頼することが入口となる。

外国人投資家は、「非サウジアラビア投資家の不動産所有及び不動産に関する法律」により、次の条件の下で、ライセンス当局（内務省）の承諾を得ることを条件に、必要な不動産（土地含む）を購入・所有することができる。⁴

- ✓ 専門的、技術的、または経済的事業活動を実施するための利用
- ✓ SAGIA の外国投資ライセンスを取得したプロジェクトに従事する従業員の個人住宅用不動産としての利用
- ✓ 適法な滞在許可証（イカマ）を有する個人の住居のための利用

もともと、工業団地や経済都市内の用地は通常購入できず、賃貸するのが一般的である。

本事業の検討では、後述する通りメタノール・プラントは東部州・ラストヌーラへの立地を想定する（上記パターン③）。また、ソーラー発電所については北西部サカーカ周辺を想定する（上記パターン③）。いずれも、具体的に土地を確保する段階で、諸条件を相対で交渉することとなる。

2.4.2. 投資規制

ここでは、本事業に関わる主要な投資規制として、外国投資ライセンスの取得ならびに禁止業種についての情報を整理する。

2.4.2.1. 外国投資ライセンスの取得

外国人投資家がサウジアラビアで投資活動を行う際は、サウジアラビア投資省が発行する外国投資ライセンスを取得する必要がある。参入を希望する業種によって取得が求められるライセンスが異なるが、主要な形態は以下の5形態である。⁵

- ① Joint Stock Company : 株式会社

⁴ ジェトロウェブサイトより。https://www.jetro.go.jp/world/middle_east/sa/invest_02.html

⁵ ジェトロウェブサイトより。https://www.jetro.go.jp/world/middle_east/sa/invest_09.html

公開、非公開のいずれの形態も可。

- ② Limited Liability Company (LLC) : 有限責任会社
1人以上の株主(法人、個人のいずれでも可) 出資による設立も可。
- ③ Foreign Company Branch : 外国企業の支店
事業内容が親会社の事業内容に限定される。
- ④ Scientific and Technical Office (TSO) : いわゆる駐在員事務所
商業活動を行うことができず、収益を得ることができない。
- ⑤ Temporary License for the Performance of a Government /Semi-Government Contract : 商業仮登記
政府/政府関係機関からの受注に対して同契約期間限定の投資ライセンス。

以上の内、本事業のような製造業の選択肢としては①Joint Stock Company : 株式会社か、②Limited Liability Company (LLC) : 有限責任会社が通常である。

外国投資ライセンスには、下表に示す通り、業種により現地資本の最低出資割合が設定されているものがあるものの、本事業の想定する製造業は規制業種に該当しないため、100%日本からの出資も認められる。最低資本金は、JSCは50万サウジリヤル(約1,500万円)と規定されている一方、LLCの場合は該当する基準はない。

図表 2.4.1 最低資本金・現地資本の最低出資割合が設定されるライセンス

No.	ライセンス分類	最低資本金 (サウジリヤル)	現地資本の最低出資割合
1	現地パートナーとの商業	約 2,667 万 外資の保有資本は 2,000 万以上、パートナーの出資割合は 75%以内	25%
	100%外資による商業	3,000 万	-
2	情報通信業	-	40%
3	付加価値通信業	-	30%
4	保険業	-	40%
5	再保険業	-	40%
6	不動産金融業	-	40%
7	不動産開発	投資総額 3,000 万以上 (土地代と建設費込み) : 土地と建物はメッカ又はメディナ以外でなくてはならない	-
8	建設プロジェクトの管理、設計及びEPC 契約の受注	-	25%
9	公共交通機関 (都市部のバス輸送)	50 万	30%
10	公共交通機関	50 万	20%

	(都市部のメトロ輸送)		
11	株式会社 (Joint Stock Company)	50 万	-
12	株式会社 (Joint Stock One Person Company)	500 万	
13	その他の交通サービス	1,000 万	
14	デジタル仲介業	200 万	
15	債権回収代行業	1,000 万	

出所) サウジアラビア投資省「サービスマニュアル - 第8版」

ライセンス取得にあたり、業種毎に上記の制限以外にも満たすべき条件や必要な手続きが設定されている場合がある。本事業が該当する製造業のライセンス取得にあたっては、産業・鉱物資源省から承認を得ること、ならびに気象・環境保護庁 (GAMEP) から環境規制上の許可を得ることが条件となっている。環境規制については後述する。

2.4.2.2. 外資参入禁止業種 (ネガティブリスト)

外資に対する規制緩和が段階的に行われる中で、非サウジアラビア人によるネガティブリストに属するセクターへの投資は依然として厳格に制限されている (下表)。

本事業で実施する予定のメタノール等製造・販売、水素製造、発電はいずれもネガティブリストには含まれないため、実現は可能と判断される。

図表 2.4.2 外資参入に関する分野毎のネガティブリスト (2020 年現在)

セクター	内容
産業セクター	✓ 石油の探鉱、採掘、生産。但し、鉱業部門に関するサービスを除く。 International Industrial classification に掲載されているコードは (CPC 5115+883)
サービスセクター	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 軍事部門に便宜を図るサービス ✓ 警備、探偵サービス ✓ メッカとメディナにおける不動産投資 ✓ 大巡礼 (ハッジ) や小巡礼 (ウムラ) に関する観光客向けオリエンテーション及びガイドサービス ✓ 人材斡旋、採用サービス ✓ 委託代理店業 (CPC 621) ✓ 漁業

出所) サウジアラビア投資省「サービスマニュアル - 第8版」

2.4.3. 税制⁶

ここでは、経済性に関わる要素として、サウジアラビアにおける税制について整理する。具体的には、法人所得税、個人所得税、消費税、源泉徴収税、関税と国際貿易協定について取り上げる。

2.4.3.1. 法人所得税

サウジアラビアの会社(又は外国会社の支店)は、ザカート・税・関税局 (Zakat, Tax and Customs Authority) に登録することが義務付けられている。

会社持分を有するサウジアラビア及びGCC国民には、2.5%の宗教上の課税であるザカートが課せられる。ザカートは「ザカータブル・ベース」に基づいており、会社の持分数等を要素とする計算式により決定される。外国人パートナー又は持分者、及び恒久的施設を通じてサウジアラビアで事業を行う非居住者が服する法人税率は、通常、純利益に対して20%である。

2.4.3.2. 個人所得税

なし (外国人に対する個人所得税も、1975年以降廃止されている)。

2.4.3.3. 消費税

2018年1月1日に5%の付加価値税 (VAT) を導入し、2020年7月に15%に引き上げられた。

2.4.3.4. 源泉徴収税

サウジアラビアに恒久的施設を有しない非居住者が、サウジアラビアを源泉とする所得を得た場合は、源泉徴収税の課税対象となり、次に掲げる税率に基づいて、所得総額に源泉徴収税が課税される。

- ✓ マネジメント・フィー：20%
- ✓ ロイヤルティーまたは利益：15%
- ✓ 賃貸料、航空券代金または航空もしくは海上貨物運賃、国際電気通信サービス料金：5%
- ✓ その他支払い：15%

2.4.3.5. 関税と国際貿易協定

関税率は、商品の種類及び数量に応じて異なる。関税は輸入品に対し、通常、運賃・保険料込み条件 (CIF) 送り状価額の5%の割合で適用される。但し、一部の物品にはより高い関税が課せられる場合もある。多くの基本消費財は非課税である。

サウジアラビアはWTO加盟国であり、地域的には、湾岸協力会議 (GCC) と大アラブ自由貿易地域の加盟国となっている。

⁶ 本節は、原則下記に拠った。ジェトロ (https://www.jetro.go.jp/world/middle_east/sa/invest_04.html#block2)
Al Tamimi & Company (<https://www.tamimi.com/wp-content/uploads/2019/04/Doing-Business-in-Saudi-Arabia-Japanese-1.pdf>)

サウジアラビアは、日本を含む 40 カ国との間で所得と資本（DTA）の二重課税を回避するための二国間租税条約と、日本を含む 23 カ国との間で、締結国間の企業の投資を促進するための投資協定を締結している。

2.4.1. 自国民雇用義務「サウダイゼーション」

サウジアラビア政府は、増加する若年層の雇用対策として、「サウダイゼーション」と呼ばれる、一連のサウジアラビア人雇用義務の強化政策を実施している。

2011 年 6 月には、労働省（現労働・社会発展省）が、サウジアラビア人雇用比率の低い企業にペナルティーを科すルール「ニタカート・プログラム」を発表し、すべての企業（地場・外資を問わず）は、サウジアラビア人雇用義務基準に従う必要がある。

同プログラムでは、各企業が業種と企業規模に応じたサウジアラビア人の雇用割合（%）によって 5 段階で評価され、その評価に基づいて企業にペナルティーが付与されるというもの。新規査証の発給不可、既存の外国人労働者の労働許可更新不可などのペナルティーは企業活動に影響を与えるため、サウジアラビア国内の企業はニタカート・プログラムを順守し、可能な限りペナルティーのない高位に評価される必要がある。

下図は、製造業の業種・企業規模別別サウジアラビア人の雇用割合とカテゴリーを示している。企業活動に影響を受けない” Medium Green” カテゴリーに位置づけられるためには、例えば、製造業（化学製品）の 6~49 名の従業員で構成される” Small B” の規模の事業体であれば、全従業員に占めるサウジアラビア人の雇用比率が 15%を超える必要がある。金融、サービス産業等高いサウダイゼーション比率を要求される分野より比較的低い基準ではあるものの、今後、要求度の強化が予想されている。

図表 2.4.3 業種・企業規模別別サウジアラビア人の雇用割合とカテゴリー

Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Size	Activity
Platinum band		High green band		Medium green band		Low green band		Yellow band		Red band			
100%	25%	24%	21%	20%	15%	14%	10%	9%	6%	5%	0%	Small B	 Manufacturing - metal manufacturing, chemical and transport industries, general manufacture of consumer goods and others
100%	30%	29%	25%	24%	21%	20%	16%	15%	7%	6%	0%	Medium A	
100%	30%	29%	25%	24%	21%	20%	17%	16%	8%	7%	0%	Medium B	
100%	30%	29%	25%	24%	21%	20%	17%	16%	8%	7%	0%	Medium C	
100%	37%	36%	32%	31%	27%	26%	22%	21%	11%	10%	0%	Big	
100%	37%	36%	32%	31%	27%	26%	22%	21%	11%	10%	0%	Giant	
100%	24%	23%	20%	19%	14%	13%	10%	9%	6%	5%	0%	Small B	 Manufacturing - food, plastic, textile, building materials, carpentry and machinery, household appliances and accessories
100%	29%	28%	24%	23%	20%	19%	16%	15%	7%	6%	0%	Medium A	
100%	29%	28%	24%	23%	20%	19%	17%	16%	8%	7%	0%	Medium B	
100%	29%	28%	24%	23%	20%	19%	17%	16%	8%	7%	0%	Medium C	
100%	36%	35%	31%	30%	26%	25%	22%	21%	11%	10%	0%	Big	
100%	36%	35%	31%	30%	26%	25%	22%	21%	11%	10%	0%	Giant	
100%	38%	37%	31%	30%	21%	20%	12%	11%	8%	7%	0%	Small B	 Petrochemical, coal and rubber industries
100%	45%	44%	39%	38%	32%	31%	25%	24%	8%	7%	0%	Medium A	
100%	45%	44%	39%	38%	32%	31%	25%	24%	8%	7%	0%	Medium B	
100%	45%	44%	39%	38%	32%	31%	25%	24%	8%	7%	0%	Medium C	
100%	80%	79%	69%	68%	57%	56%	45%	44%	20%	19%	0%	Big	
100%	80%	79%	69%	68%	57%	56%	45%	44%	20%	19%	0%	Giant	

注1) 企業規模による分類：Small A: 従業員数5人以下（最低1人のサウジ人の雇用が必要）；Small B: 同6-49人；Medium A: 同50-99人；Medium B: 同100-199人；Medium C: 同200-499人；Large: 同500-2999人；Giant: 3000人以上

注2) ”Yellow” カテゴリーは2020年1月より撤廃され、”Red”カテゴリーと同等の扱いとなっている。また、2021年12月より業種の分類の再編が予定されている。

出所) サウジアラビア投資省

2.4.2. 安全・環境規制等

ここでは、プラント設備の安全基準と環境規制について整理する。

2.4.2.1. 安全基準

プラント設備の安全基準については、設備毎にサウジアラビア標準化公団（SASO）（例えば、スチームボイラーについてはSASO 1338が安全基準を、同1585がメンテナンス等について定めている）や、海外規格（ASME等）や欧州圧力容器機器指令（PED）2014/68/EU等を各事業者の判断で実施している状況である。グリーンメタノールや水素製造プラントのために特筆すべき規制や基準はなく、石油化学プラント一般の安全基準に則る。

電力については、規制当局である水・電力規制庁（WERA）が、電力事業者に対してライセンスを発行しているほか、ソーラーパネル等発電設備についてはSASOが「太陽光発電システムに関する技術規制（Technical Regulation for Solar Photovoltaic Systems）」（第2版、2020年3月発行）にて基準を設けている。

2.4.2.2. 環境規制

サウジアラビアの産業に関わる環境規制と当局については、概ね次の構造となっている。

まず、サウジアラビア全土の環境規制を管掌するのは、環境・水資源・農業省（MEWA）傘下の気象環境保護庁（GAMEP）であり、同庁が前身の気象環境保護庁時代に制定した「一般環境規則及びその実施細則（General Environmental Regulations and its Rules for Implementation）」（2001年）が、環境・排出基準や環境影響評価、違反した場合の罰則等も定めている。

上記規則が、サウジアラビア国内における基本的な環境規制となるものの、工業都市等に立地する場合は、工業都市の管理当局が別途環境規制・基準を有しており、当該都市の管理機関の承認を得る必要がある。例えば、ジュベイルの石油化学コンビナートに立地しようとする場合、その開発・管理主体であるジュベイル・ヤンブー王立委員会が「王立委員会環境規制（Royal Commission Environmental Regulations）」（2015年）排気や排水の基準や報告手続きを定めている。同規制は、排出源毎に規制の対象となる物質や量について詳細な基準を設けている。

本事業においては、メタノール及び水素製造プラントはラスタヌーラへの立地（工業都市外）を想定し、また、後述ケース1で整備を予定するソーラー発電所についてもサカーカの一般用地への立地を想定することから、GAMEPの環境規制の対象となる可能性が高い。化学プラント、ソーラー発電所とも、GAMEPが環境への影響の程度によりカテゴリ1～3に区分している内、影響が最も大きいとされる「カテゴリ3」に位置づけられており、認証を受けた外部コンサルタントを起用しての環境影響評価が必須となる点に留意する必要がある。

3 CO₂ to Chemical プラントの概略設計

3.1. 本パートの調査内容

本パートでは、本 FS の対象となるプラントの主要な技術要素となる水の電気分解による水素製造、CO₂ と水素によるメタノール製造、ソーラー発電、淡水化について、サウジアラビアに立地する際の諸条件を踏まえた技術的選択肢、実現の課題等について整理する。

3.2. 水の電気分解による水素製造

3.2.1. グリーン水素の概要

3.2.1.1. グリーン水素の考え方

パリ協定に基づき、日本政府は、温室効果ガスの排出量を対 2013 年度比で 2030 年（中期）までに 26% 削減し、2050 年（長期）までに 80% 削減する目標を掲げ、さらに、2020 年 10 月には菅義偉首相が所信表明演説において 2050 年で実質ゼロを目指すという、より一層踏み込んだ目標を掲げた。また、世界各国の目標としては、欧州委員会が 2050 年のカーボンニュートラル経済の実現を目指す「A clean planet for all」というビジョンを公表し、中国においても 2060 年を目指した表明を行っている。

このようなカーボンニュートラルの目標の達成へのシナリオとして水素の活用が描かれている。水素は、そのものからエネルギーを取り出す際には、CO₂ を発生することのないクリーンな物質である。一方で、水素の製造手段としては、鉄鋼や苛性ソーダなど他の製造プロセスからの副生や、化石燃料改質、水電解、バイオマス由来、熱分解、光触媒など様々な手法があり、CO₂ 排出量の有無や発生量の差異がある（下図）、カーボンニュートラルに対する影響が様々なものがあるといえる。

図表 3.2.1 水素 1Nm³あたりの温室効果ガス排出量



出所) みずほ情報総研会社「ライフサイクルを考慮した水素の温室効果ガス排出量に関する評価報告書」(2016 年 12 月)

このうち、CO₂を製造時に排出しない水素については、CO₂フリー水素、グリーン水素といった呼び方が存在するが、現時点では明確な定義はない。概念としては水素製造時にCO₂が発生しない水素のことを指すものとされている。

なお、日本国内における水素に関する認証としては、愛知県が行っている「低炭素水素」としての認証があり、以下の通りである。

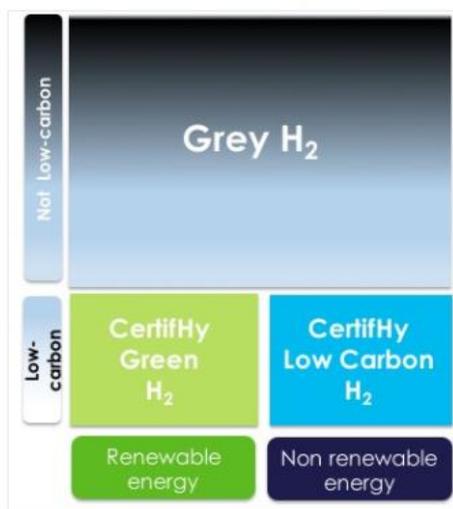
愛知県 低炭素水素の考え方

- | |
|---|
| <p>(ア) 再生可能エネルギー電気又はバイオガス（もしくは環境価値）から製造された水素</p> <p>(イ) 再生可能エネルギー電気（又は環境価値）による食塩水の電気分解により苛性ソーダ及び塩素を製造する過程において副次的に生産される水素</p> <p>（ここでいう環境価値とは、J-クレジット、グリーン電力証書、再生可能エネルギー電位の環境価値）</p> |
|---|

一方で、欧州ではグリーン水素および低炭素水素の「定義」を行うとともに、これらの水素の認証スキーム（Guarantee of Origin (GO)）の構築に向けたプロジェクト「CertifHy」が2015年から実施されている。この水素保証においては、取引プラットフォームにつながるものである。なお、このプロジェクトにおいては、天然ガス改質による水素製造時のCO₂排出量（91.6g-CO₂/MJ）をベンチマークとして、60%以上排出が低いものをプレミアム水素として認証を行う。プレミアム水素のうち製造源に応じて“Green H₂”“Low Carbon H₂”に分類されている。

図表 3.2.2 CertifHy Green H₂ の定義

The definition of Green and Low carbon Hydrogen



出所) CertifHy ウェブサイト

今後、P2C (Power to Chemical) における原料水素の認証は必要と考えられることから、本稿におけるグリーン水素の定義は、CertifHy の示す Green H₂ の定義に準拠したものとする。

3.2.2. グリーン水素製造における技術的選択肢

3.2.2.1. 再生可能エネルギーを元とした水素製造方法

再生可能エネルギーを元とした水素製造では、水の電気分解によって水素を製造する。現在実用化されている水電解装置の種類として、アルカリ形水電解装置、固体高分子形水電解装置（PEMEC）の2種類がある。また今後期待される水電解装置として固体酸化物形水電解装置（SOEC）も存在する。

アルカリ形水電解と PEMEC とを比較すると、一般に PEMEC は同じ面積に流す電流（電流密度）がアルカリ形水電解に比べて高い為、電解槽を小型化できるほか、生成水素中に不純物としての電解質が混入しにくく、比較的簡易な構造で高純度の水素を得られるといった特徴がある。一方で、触媒等に高価な材料を利用することから、現時点においては PEMEC の水素製造におけるコストは比較的高いと考えられている。

一般に水電解装置は、温度が高い方が理論電解電圧は低くなることから高効率となる。この特徴を利用した高効率水電解装置が固体酸化物形水電解装置（SOEC）となる。

3.2.2.2. 電気分解の再生可能エネルギーとの組み合わせに対する比較検討

グリーン水素製造を行うことに対して、最適な組み合わせを検討する為、制約条件や再生可能エネルギーとの親和性の観点から比較検討を行う。

1) 技術的特徴

アルカリ形水電解、PEMEC、SOEC を比較する上で、大きく異なる面として、電解質、および水素原料としての水の供給方式の違いがある。

アルカリ形水電解においては、電解質として強いアルカリ性を示す KOH（水酸化カリウム）溶液を用いる。水素を製造すると電解液中の水が消費されるため、KOH 溶液の濃度が上昇する。このため、水素製造時には外部から水素原料としての純水を適宜供給し、KOH 溶液の濃度を一定に保つ必要がある。また、生成した水素中に水蒸気や KOH 溶液のミストが混入しないように、出口水素の純度管理をしなければならない点を特徴として考慮する必要がある。

次に PEMEC は、電解質に水素イオン透過性を有する固体高分子膜を用いるため、アルカリ形水電解のように電解質溶液の濃度管理や生成水素の不純物管理の必要は無いが、水素原料としての純水の供給は同様に必要であり、供給水の精製コストは考慮する必要がある。

最後に SOEC については、電解質に酸素イオン透過性を有するセラミックを用いることから、電解質の管理は基本的には不要だが、運転温度が 600°C 以上と高温のため、水素原料としての水是水蒸気として供給する必要がある。

2) 単機容量

一般に製造規模が大きくなればなるほど、コストは低下していく。この為、単一のシステム規模、つまり単機容量の大きさについては比較検討する必要がある。現時点では、アルカリ形水電解、PEMEC、SOEC の順に大型化が進んでいる。大手水電解メーカーの現時点でのラインナップとしては、2030 年時点で、アルカリ形水電解と PEMEC は 100MW 級、SOEC は 50MW 級がそれぞれ最大と見込まれる。

3) 必要な電力量

2020年における水電解に必要な電力は、アルカリ形水電解で5.0kWh/Nm³、PEMECで4.8kWh/Nm³、SOECは3.8kWh/Nm³とされている。今後、各メーカーの技術革新により、高効率化が進められると考えられており、2030年時点ではアルカリ形水電解は4.3kWh/Nm³、PEMECは4.5kWh/Nm³、SOECは3.6kWh/Nm³（ただしSOECについては200°C程度の蒸気が供給される前提）と見通されている。⁷

4) 純度

次に、生産物である水素の純度について比較を行う。電解槽からの出口水素純度は、すでに上市されている製品ベースで比較すると、アルカリ形水電解では99.99～99.999%、PEMECは～99.999%、SOECは～99.99%となっており、水電解装置の種類による差はほとんど見られない。水素純度に対する要求条件は、水素の使用用途によって違うことから、使用用途の要求条件に応じて、精製プロセスについての考慮が必要となる。

5) 入力電力の変動への耐性

最後に、再生エネルギーとの組み合わせを検討するにあたり、入力電力の変動について考慮する必要がある。再生可能エネルギーは、主にソーラー発電、風力発電等があるが、いずれも発電量としては、自然条件に由来するものであり大きく変動する。入力電力の急激な変動に対して、それぞれの水素製造方法でのフィールド実証試験、またはPVの変動出力を電気入力とした模擬による水素製造試験が実施されており、変動への追従の可能性は示されている。しかし、電解槽後の出口側生産量が大きく変動してしまうことからその後の工程等の考慮が必要である。

アルカリ形水電解やPEMECに関する変動入力の影響については、下図の通りいずれも認められるものの、PEMECの方がアルカリ形水電解に比べ、変動入力に対する特性が優れていると報告されている。

図表 3.2.3 入力電力の変動への耐性比較

	アルカリ型	PEM型
容量	～数MW	～数MW
作動圧力	数気圧	数十気圧
負荷変動率	定格の15%～100%	定格の0%～160%, 200%
起動時間	1～10分	1秒～5分
停止時間	1～10分	数秒
負荷変動速度（上げ）	0,2%～20%/秒	100%/秒
負荷変動速度（下げ）	0,2%～20%/秒	100%/秒

出所) IEEJ「時間軸を踏まえた Power to Gas のビジネスモデル— 調整力の提供、複数用途への活用、再エネ主力電源化への貢献」(2018年8月)

他方、SOECの変動入力応答性についての公表データは多くない。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「水素利用等先導研究開発事業/高効率水素製造技術の研究/高温水蒸気電解システムの

⁷アルカリ形水電解及びPEMEC:2020年6月8日経済産業省『水素・燃料電池戦略ロードマップの達成に向けた対応状況』、SOEC:2018年10月17日 Fraunhofer『Mission Innovation Berlin』講演資料「Industrialization of Water Electrolysis in Germany: Towards a GW Industry for a Successful Transition of the Energy Sector towards Renewable Energies」より算出

研究」(2014年度～2017年度)では、複数のセルスタックを集積したマルチスタック試験機を試作し、水素製造速度は印加する電流の変化に追従して変化し、スタック出口から流量計までの体積相当分の遅れで追従することを確認されている。

6) 実績

プロジェクトの実現性を検討するにあたり、現在までの実績、事例を以下に示す。再生可能エネルギーを元にした水素製造における国内最大級の実績として NEDO が行っている「福島水素エネルギー研究フィールド (Fukushima Hydrogen Energy Research Field) FH2R」がある。この施設は 10MW のアルカリ形水電解装置を備えている。

次に、PEMEC の実績としては、オーストリアのリンツで、燃料電池水素共同実施機構 (FCH JU) の資金提供によりシーメンス (Siemens) が 6MW の PEM 電解装置を供給している。

SOEC については各社開発を進めているが、最も先行する EU の MultiPLHY というプロジェクトでは、2.7MW (225KW を実証し 12 連結を想定) が実施されている。

図表 3.2.4 水素製造技術の比較

	アルカリ形水電解	PEMEC	SOEC
原料水、溶液	純水及び KOH 溶液	純水	水蒸気
プラント実績	～10MW	～6MW	～2.7MW
稼働温度	～80℃	～80℃	700～1000℃
電解効率 (2020 年目標)	5.0kWh/Nm ³	4.8kWh/Nm ³	3.8kWh/Nm ³
電解効率 (2030 年目標)	4.3kWh/Nm ³	4.5kWh/Nm ³	3.6kWh/Nm ³
水素純度	～99.999%	～99.999%	～99.99%
変動入力	対応可能	対応可能 (アルカリ形より応答性が良い)	検証段階
技術の成熟度	成熟段階 (1920 年代から工業用途に利用)	成熟途上段階 (アルカリの課題解決に向けて後発で開発されている)	研究開発段階 (次世代の高効率電解装置として開発)

出所) コンソーシアム作成

3.2.2.3. サウジアラビアにおけるメタノール製造に対する検討

前節における比較を元に、サウジアラビアにおけるメタノール製造に対する最適検討を行う。本件におけるグリーン水素に対する考慮すべき条件は以下の通り。

- ・原料水、溶液の種類
- ・システム規模
- ・電解効率
- ・水素純度
- ・変動入力への応答性

・大型プラントの導入実績

上記を踏まえたうえでの電解方法についての評価は以下の通りとなる。以下の評価を踏まえ、今回採用する水電解装置においては大型のプラント建設が最も先行しているアルカリ形水電解を第一候補として検討を進める。

図表 3.2.5 水素製造技術の評価

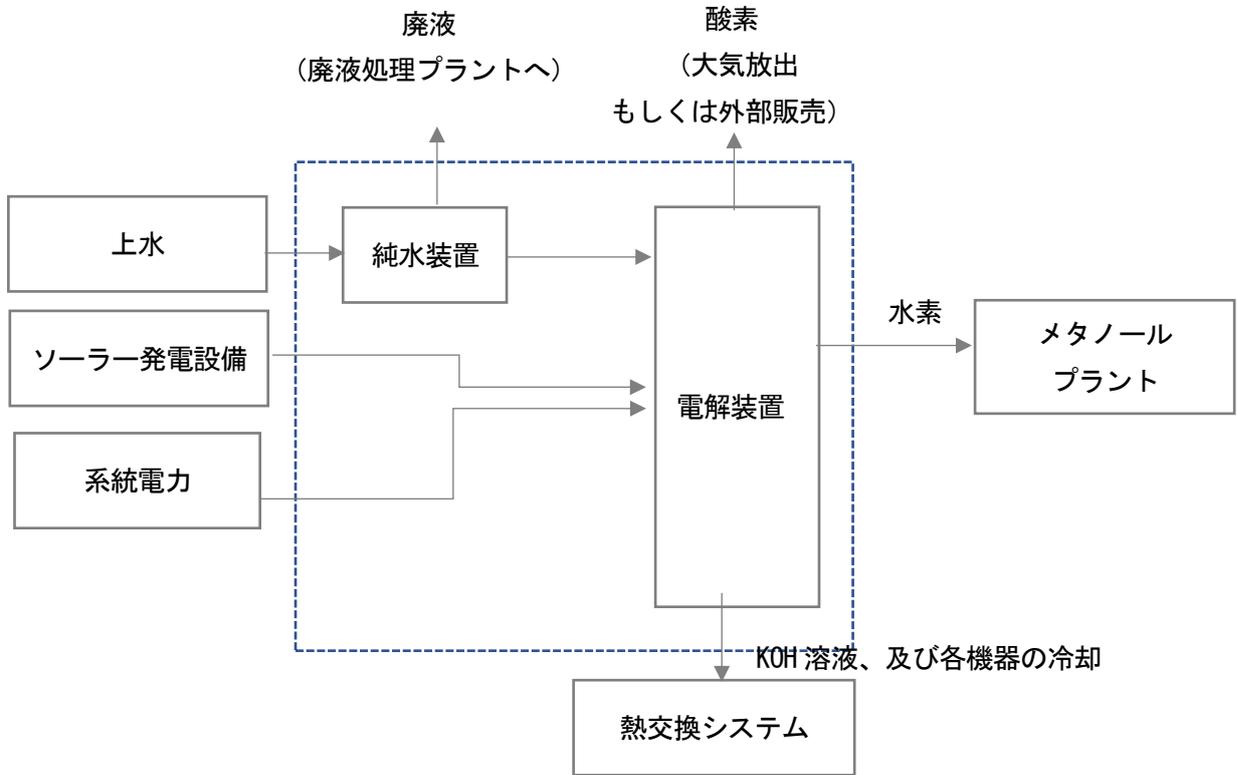
	アルカリ形水電解	PEMEC	SOEC
原料水、溶液 今回の条件： 海水淡水化プラントからの淡水	○	○	○
システム規模 今回の条件：14,000～48,550Nm ³ /h (70MW～243MW)	◎	○	△
電解効率 今回の条件：電力コスト削減のため 高効率が求められる	○	○	◎
水素純度 今回の条件：99.90%以上	◎	◎	◎
変動入力 今回の条件： 定格での受電	○	◎	○
実績 今回の条件： 大型のプラント実績	◎	○	△

出所) コンソーシアム作成

3.2.2.4. 本件における水電解プラント仕様

14,000~48,550Nm³/h の水素製造を行うアルカリ形水電解装置（70MW~243MW）を活用した水素製造プラントの系統を以下の通り示す。

図表 3.2.6 水素製造プラントの系統



出所) コンソーシアム作成

3.2.3. 実現のための課題

以下では、実証等の段階で検証する必要のある課題について整理する。

3.2.3.1. ハードウェアの観点

現在世界最大規模の水電解プラントが 10~20MW であるのに対し、今回のように年産 10 万 t のメタノール・プラントを建設する場合には 70~240MW 級のプラントを建設、運転する必要があり、設備の大型化に対する技術的な課題への対処が求められる。また、再生エネルギーとの接続により大容量の直流電力を交流へ変換するにあたり、設備運転の観点での技術確立も要求される。以下、構成要素ごとに主な課題をまとめる。

- 入力側（水素製造に必要なリソース）
 - 供給水の確保、純度管理
 - 入力電力（太陽光等）の管理や接続についての対応
- （電力の安定性、開閉装置に対するエンジニアリング、直交変換、

- ノイズ対策など)
 - バックアップ電力（系統電力・蓄電池など）との連携
 - 電解装置本体
 - 規模の大型化（電極面積の拡大、スタック大型化＋並列化）
 - 電解効率の向上（電解ユニット本体＋補機）
 - 出力側（製造した水素の貯蔵・活用に必要なりソース）
 - 水素供給ラインの設置
 - 水素貯蔵装置の設置（オプション）
 - メタノール製造プラントとの連携
 - プラント全体
- ⇒十分な設置場所の確保
- 立地環境におけるプラント健全性維持に必要な施策の具体化
 - ◇ 昼夜の温度差、外部からの異物侵入防止（砂塵など）
 - ◇ 季節の影響（温度、湿度、風雨等）
 - ◇ 地盤の健全性、設置プラントの高度 他

3.2.3.2. 制御・運用方法の観点

入力電力の変動、水処理プラントとの連動制御、メタノール・プラントとの連動制御等、様々な負荷や需要変動に耐えうる制御思想の確立が必要となる。

- 入力（供給電力・水）の制御
 - 再生可能エネルギー（P Vなど）の出力予知
 - 水処理・供給プラントの連動制御
 - 系統電力・蓄電池などとの連携による入力安定化
- 出力（水素製造量）の制御
 - メタノール製造プラントで求められる水素量の予測
 - 水素過不足に対するバッファ機構（水素貯蔵装置）の管理
- メンテナンス
- 故障等の際のシステム保護
- 安全管理・非常事態対応

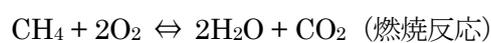
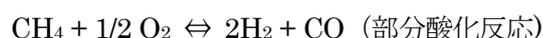
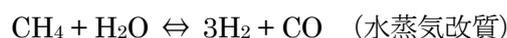
3.3. CO₂と水素によるメタノール製造

3.3.1. メタノールの製造方法

工業的にメタノールが製造される以前は、メタノールは木精ともいわれるように、木材の乾留中に木炭やタールとともに得られるのが唯一であった。メタノールは 1661 年 R.Boyle によって発見されたと言われるが、1834 年に J.B.A. Dumas と E.M. Peligot によって分離確認された。1913 年 BASF 社は H₂ と CO の混合ガス（水性ガス）を高温高压下、各種金属酸化物上へ通じてメタノールを含む混合アルコール類の生成を認め、1923 年には工業化に成功した。

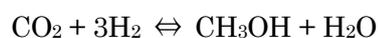
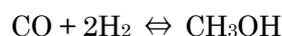
一方日本では、1924 年東京工業試験所においてメタノール合成研究が始められた。1932 年には合成工業が設立されて、彦島に 5t/d の規模でメタノール・プラントが建設され工業化に成功した。1952 年日本瓦斯化学工業(現三菱ガス化学)は、新潟で算出される天然ガスを原料として日本初の天然ガスによるメタノール合成の工業化を完成した。1966 年までのメタノール合成が 15～20Mpa の高压であったのに対して、ICI 社は Cu 系の触媒を使用し低压合成の工業化に成功した。以後は低压合成法である 5～10MPa が主流となっている。

天然ガスからのメタノール製造では、通常、以下に示す反応のいずれかの組み合わせによって、まず合成ガスを製造する。



したがって、メタノール合成用のガスは H₂、CO、CO₂、H₂O そして未反応の CH₄ から構成される。部分酸化の場合は、酸素中に不純物として存在する N₂ と Ar が合成ループの不活性成分として CH₄ に加わる。

一方、CO₂からのメタノール合成の場合、排出源より回収された CO₂と、水の電気分解で生成した H₂がメタノール合成用のガスとして利用される。メタノール合成は、Cu/ZnO 系（銅-酸化亜鉛系）の触媒を使用し、5～10 MPa、220～300℃の運転領域で下記の発熱反応を行わせる。

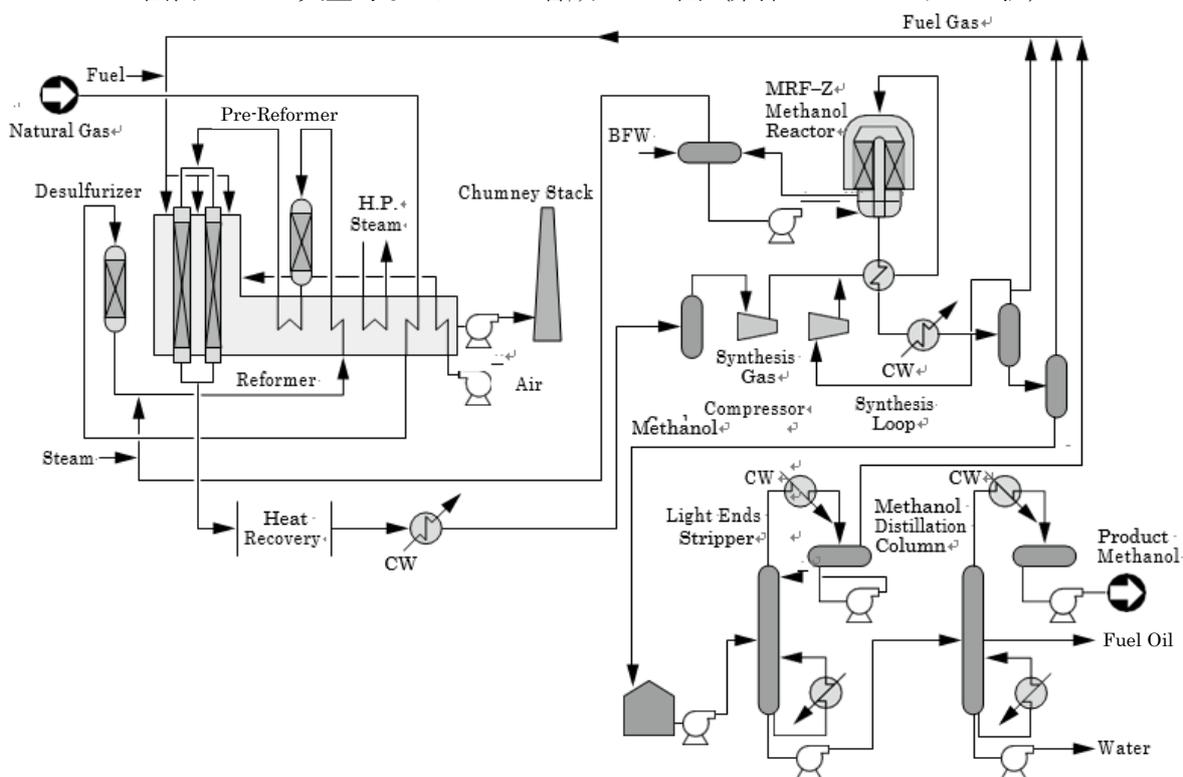


すなわち、 $R=(\text{H}_2-\text{CO}_2)/(\text{CO}+\text{CO}_2)$ と定義すれば、R は化学両論比を表し、R=2.0 がメタノール合成上の化学両論量である。R はメタノール設計上重要なパラメーターであり、上述の合成触媒の運転範囲では平衡上メタノールへの転嫁率が極めて低く、未反応ガスを反応器に再循環させる必要があり、循環圧縮機を含む合成ループが構築される。このとき、合成ループ設計にあたり、転化率、循環比、パージ量を総合的に判断することが不可欠となる。

3.3.2. 技術的選択肢

従来のメタノール合成プロセスの典型的なプロセスの1例として、東洋エンジニアリング法のプロセスフローを下図に示す。メタノールプロセスは、原料処理系、合成ガス製造系、熱回収系、メタノール合成系、メタノール蒸留系に概略分けることができる。その中で、各プロセスの大きな違いがあるのは、合成ガス製造系とメタノール合成系である。CO₂からのメタノール合成の場合、メタノール合成の原料となる合成ガスを製造する必要はないので、ここではメタノール合成系に焦点を当てる。メタノール合成系は各社とも、プロセスフローには大差はなく、原料であるCO₂とH₂を所要の圧力まで上げるための合成ガスコンプレッサー、メタノール反応器、ワンパスでの反応転化率が低いため未反応ガスをリサイクルするための合成ループ、粗メタノール中の軽沸分をカットするライトエンドストリッパー、重質分をカットし、塔頂から製品メタノールを得るためのメタノール蒸留塔からなる。

図表 3.3.1 典型的なメタノール合成フロー図（東洋エンジニアリング法）



出所) 公益社団法人石油学会『新版 石油化学プロセス』(2018)

合成系において、特徴的と言えるのは、ライセンスが独自の合成反応器を有しており、反応器の形式に伴い熱回収システムを有していることである。下表に代表的なメタノール製造技術ライセンス5社が採用する反応器の形式をまとめて示す。

図表 3.3.2 技術的選択肢の概要

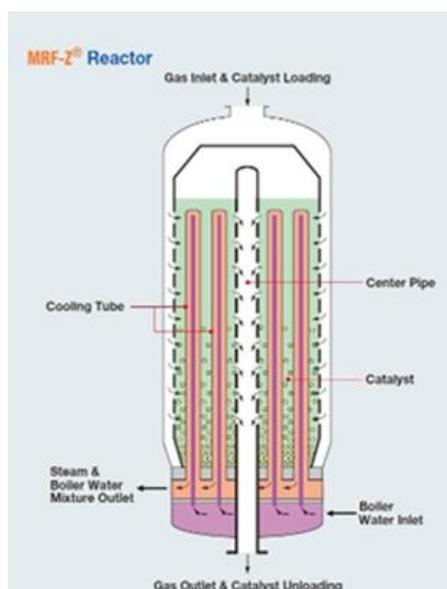
	TOYO	本邦 A 社	海外 B 社	海外 C 社	海外 D 社
反応器名称	MRF-Z®	A	B	C	D
熱回収	有 (スチーム生成)	有 (スチーム生成)	有 (スチーム生成)	有 (スチーム生成)	有 (スチーム生成)
ガス流れ	半径方向	軸流方向	半径方向	軸流方向	軸流方向
触媒充填	シェル側	環状二重管	シェル側	チューブ側	チューブ側
ΔP (圧力損失)	低い	非常に高い	低い	高い	高い
流れ方向	外円→中央管	内管→外円	中央管→外円	塔頂→塔底	塔頂→塔底
チューブ	冷却バイヨネットチューブ	ダブルチューブ (反応後ガスによる 反応前ガス加熱)	冷却シングルチューブ マニホール付	シングルチューブ	シングルチューブ
反応器 1 基あたりの最大生産量実績	3,000 t/d	1,670 t/d	2,500 t/d	1,670 t/d	1,500 t/d

出所) コンソーシアム作成

3.3.2.1. 東洋エンジニアリング (TOYO) 式

東洋エンジニアリングは、MRF-Z®反応器と呼ばれる、ガスが半径方向に流れるラジアルフロー式のシェル・チューブ型反応器を採用している。MRF-Z®反応器は、シェル側に触媒を充填し、外側から中央管に向かって反応ガスを供給し、触媒層内に多段の冷却管を配列して反応熱をスチーム発生により除去するスチーム発生型反応器である。特徴として、触媒層の圧力損失が低く、未反応ガスの再圧縮エネルギーを削減することで、用役費を低く抑えることができる。触媒量に関しても、他社の反応器と比べ少量であるため、用役費を低く抑えることができる。さらに、シェル側に触媒が充填されているため、触媒交換が容易であり、高い保全性を有している。また、チューブ漏れが発生したとしても、機械的に栓をすることで連続運転が可能であるため、運転性も優れている。反応器 1 基当たりの最大生産量の実績としては、オマーンに建設した 3,000t/d のメタノール・プラントが挙げられる。

図表 3.3.3 MRF-Z®反応器の概要図



出所) 東洋エンジニアリング

3.3.2.2. 本邦 A 社式

本邦 A 社式は、軸流式のシェル・チューブ型反応器を採用している。環状二重管に触媒を充填し、二重管の内部から外側に反応ガスを供給し、その外円部に冷却水を循環させることで反応熱をスチーム発生により除去するスチーム発生型反応器である。特徴として、他社の反応器と比較して触媒層の圧力損失が最も高く、未反応ガスの再圧縮にエネルギーを多く必要とするため、用役費が高くなる。さらに、チューブ側に触媒が充填されているため、触媒交換作業が煩雑になり、安全性が低いことが挙げられる。また、チューブ漏れが発生したとしても、機械的に栓をすることで連続運転が可能であるため、運転性は優れている。反応器 1 基当たりの最大生産量の実績としては、1,670 t/d 相当となっている。

3.3.2.3. 海外 B 社式

海外 B 社式は、ラジアルフロー式のシェル・チューブ型反応器を採用している。シェル側に触媒を充填し、中央管から外側に向かって反応ガスを供給し、触媒層内にマニホール付きの冷却管を配列して反応熱をスチーム発生により除去するスチーム発生型反応器である。特徴として、触媒層の圧力損失が低く、未反応ガスの再圧縮エネルギーを削減することで、用役費を低く抑えることができる。一方、触媒量に関しては、他社の反応器よりも大量に必要とするため、用役費が高くなる傾向がある。さらに、シェル側に触媒が充填されているため、触媒交換が容易であり、高い安全性を有している。一方、チューブ漏れが発生した場合、マニホールが制約となりチューブ修理のために触媒を一度全て取り出さなければならない。反応器 1 基当たりの最大生産量の実績としては、2,500 t/d 相当となっている。

3.3.2.4. 海外 C 社式

海外 C 社は、軸流式のシェル・チューブ型反応器を採用している。チューブ側に触媒を充填し、反応器上部から底部に向かって反応ガスを供給し、その外円部に冷却水を循環させることで反応熱をスチー

ム発生により除去するスチーム発生型反応器である。特徴として、触媒層の圧力損失が高く、未反応ガスの再圧縮にエネルギーを多く必要とすること、また、触媒量に関しても、他社の反応器よりも大量に必要とするため、用役費が高くなる傾向がある。チューブ側に触媒が充填されているため、触媒交換作業が煩雑になり、安全性が低いことが挙げられる。一方、チューブ漏れが発生したとしても、機械的に栓をすることで連続運転が可能であるため、運転性は優れている。反応器 1 基当たりの最大生産量の実績としては、1,670 t/d 相当となっている。

3.3.2.5. 海外 D 社式

海外 D 社は、軸流式のシェル・チューブ型反応器を採用している。チューブ側に触媒を充填し、反応器上部から底部に向かって反応ガスを供給し、その外円部に冷却水を循環させることで反応熱をスチーム発生により除去するスチーム発生型反応器である。特徴として、触媒層の圧力損失が高く、未反応ガスの再圧縮にエネルギーを多く必要とし、また、触媒量に関しても、他社の反応器よりも大量に必要とするため、用役費が高くなる傾向がある。さらに、チューブ側に触媒が充填されているため、触媒交換作業が煩雑になり、安全性が低いことが挙げられる。一方、チューブ漏れが発生したとしても、機械的に栓をすることで連続運転が可能であるため、運転性は優れている。反応器 1 基当たりの最大生産量の実績としては、1,670 t/d 相当となっている。

3.3.3. 本事業にとって適切な技術の選択

3.3.3.1. プラント方式の選定の際に考慮すべき条件

3.3.2 に記載のように、CO₂からのメタノール合成において、メタノール合成系、メタノール蒸留系のプロセスフロー自体に大きな違いはなく、プラント方式を選定する上で比較評価すべきは反応器のタイプである。触媒をシェル側に詰めるか、チューブ側に詰めるかによって、反応器数、触媒量、用役費、運転性・安全性などに違いがある。メタノールリアクター設計において、キーテクノロジーとなるのは、触媒自体が固有で持つ反応速度、活性の経時変化、反応熱の除熱である。CO₂からのメタノール合成反応の詳細については、3.3.4 実現のための課題に記載するが、メタノール合成反応は発熱反応であり、高压低温ほど平衡濃度が高くなる。従来合成ガス (CO, CO₂, H₂, H₂O) からのメタノール合成と比較すると反応熱は小さいが、依然効果的な熱除去が必要である。

メタノール合成プロセスでは、通常、Cu/ZnO 系触媒が使用される。CO₂含有量の高い原料ガスからのメタノール合成においては、メタノールと共に生成する水によると思われる触媒活性低下が、合成ガスからのメタノール合成に比べて非常に大きいと言われている。従来合成ガスベースの触媒よりも交換頻度が高い可能性があり、触媒の入れ替え作業への考慮が不可欠である。

3.3.3.2. 適切なプラント方式の選択

3.4.3.1 に記載の通り、CO₂からのメタノール合成においては、効果的な熱除去ができること、触媒の入れ替え作業が容易であることが重要である。プラントの方式選定の際に考慮すべき諸条件を踏まえ、技術的選択肢を評価する。

図表 3.3.4 適切なプラント方式の選択

	TOYO	本邦A社	海外B社	海外C社	海外D社
反応器名称	MRF-Z®	A	B	C	D
触媒の必要 充填量	最も低い	中程度	高い	高い	高い
用役費	低 ΔP 低	高 ΔP 高	低 ΔP 低	高 ΔP 高	高 ΔP 高
運転性・安全性	非常に良い 触媒を容易に充填、 取出し可能。冷却用 チューブがリークし た場合、機械的に栓 をすることが可能。	有望 触媒が充填されたチ ューブが多数あるの で、充填、取出しが 面倒。触媒充填チュ ーブがリークした場 合、機械的に栓をす ることが可能。	良い 触媒を容易に充填、 取出し可能。 マニホールドがある ため、チューブリー クが起きた際は、触 媒を全て取り出し補 修する。	有望 触媒が充填されたチ ューブが多数あるの で、充填、取出しが 面倒。触媒充填チュ ーブがリークした場 合、機械的に栓をす ることが可能。	有望 触媒が充填されたチ ューブが多数あるの で、充填、取出しが 面倒。触媒充填チュ ーブがリークした場 合、機械的に栓をす ることが可能。

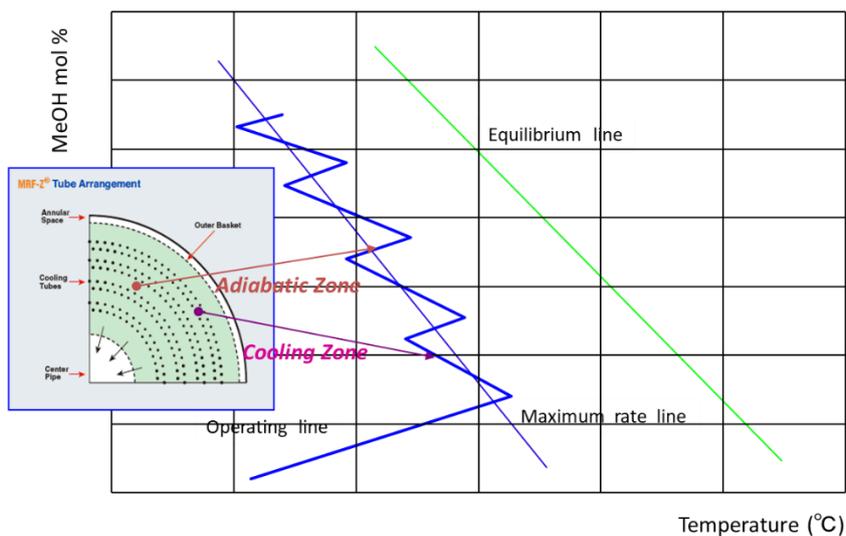
出所) コンソーシアム作成

1) 反応熱の効果的な除去:

反応器は、2つのタイプに大別される。(1)触媒をチューブ側に詰め、冷媒をシェル側に流すタイプ、(2)触媒をシェル側に詰め、冷媒をチューブ側に流すタイプである。(1)の場合、その構造上充填できる触媒量に限りがあるものの、熱除去が容易であるため、リアクター内の温度プロファイルはほぼ等温となる。一方で、(2)の場合、充填できる触媒量は多いが、除熱に制限がある。

下図に、反応器内の温度プロファイルを示す。とある圧力における、温度とメタノールの平衡濃度の関係は、緑線で示される。それに対し、実機においては触媒充填量に限りがあるため、平衡よりも低いメタノール濃度が得られることとなる。青字で示した線が最大反応速度線であり、この線に沿った温度プロファイルを取ると、触媒量が小さくなる。(2)のタイプを採用している場合、触媒層と冷却層を繰り返す多層構造であり、冷却層のチューブ本数を調節することで各層での細かな除熱量の調整が可能となり、少ない触媒量での設計が可能である。特に、本FSにおいては、メタノール合成触媒として長寿命化の観点からCu/ZnO系触媒にZrO₂(酸化ジルコニウム)を添加しており、通常のCu/ZnO系の触媒と比較すると高価であるため、今後は高活性・長寿命・低コスト触媒で少ない触媒量で設計することが重要と言える。

図表 3.3.5 MRF-Z[®]反応器内での温度と MeOH 濃度のプロファイル

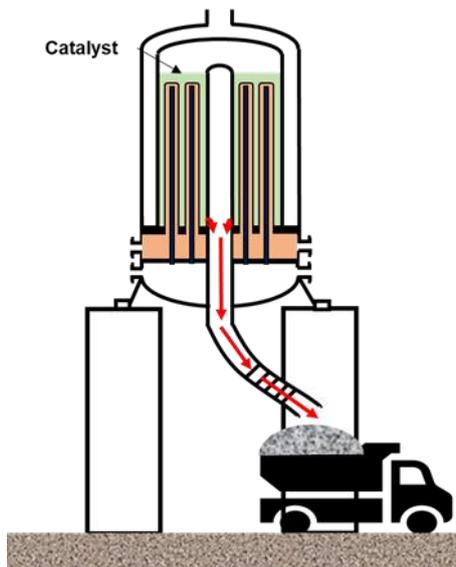


出所) 東洋エンジニアリング

2) 触媒の交換方式 :

触媒の交換方式についても上記と同様に、チューブ側に触媒を詰める場合と、シェル側にチューブを詰める場合で大きく異なる。チューブ側に触媒を詰める場合、リアクター上部より、1本ずつバキューム抜き出しをすると予想されるが、シェル側に触媒を詰める場合は、下図のように反応器のボトム部から触媒を抜き出すことが可能である。

図表 3.3.6 触媒の抜き出し方式(東洋エンジニアリング)



出所) 東洋エンジニアリング

以上の、CO₂ からのメタノール合成において、プロセス選定する上で重要となる、必要触媒量・触媒交換のしやすさといった観点からの評価結果を踏まえ、MRF-Z[®]リアクターが最も適切との結論となる。

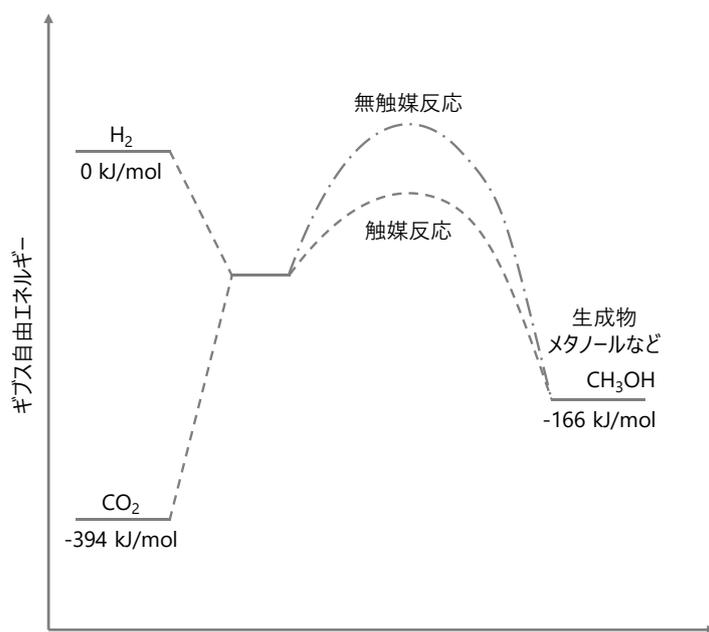
3.3.4. 実現のための課題

CO₂を原料とするメタノール合成の技術的課題の一つは、触媒の高活性化及び長寿命化である。

CO₂は、炭化水素などを燃焼した際の最終生成物の一つであり、反応性の低い非常に安定な物質である。エネルギーからみた物質の安定性は、それぞれの物質のもつ自由エネルギーで表すことができる。CO₂の自由エネルギーは、 $\Delta G_0 = -394 \text{ kJ/mol}$ であり、メタノール (-166 kJ/mol) やメタン (-51 kJ/mol) に比べてエネルギー準位が低く、非常に安定である。従って、安定なCO₂からエネルギー準位の高いメタノールなどのアルコールを合成するためには、触媒を用いてCO₂を活性化させる必要がある。

一般に、化学反応が進む際の反応速度は、反応が進む際のエネルギー障壁の高さによって決まる。エネルギー障壁が高すぎる場合、反応はほとんど進行しないが、触媒を使用することでエネルギー障壁が低くなり反応は進行しやすくなる。触媒の種類によって反応経路が変わるため、触媒設計は特に重要である。原料とするメタノール製造における技術的課題の一つは、触媒の高活性化及び長寿命化である。現在、メタノール合成は、CH₄ガスなどを水蒸気改質して得られる合成ガス（一酸化炭素（CO）、水素（H₂））を原料としているのに対し、CO₂を原料とするメタノール製造法は、工場等や大気中から回収・精製・濃縮したCO₂と同時に、反応に必要な水素を準備する必要がある。現在、太陽光などの再生可能エネルギーなどの電源を用いて水の電気分解などで調達したグリーン水素などを原料として用いる事が検討されている。

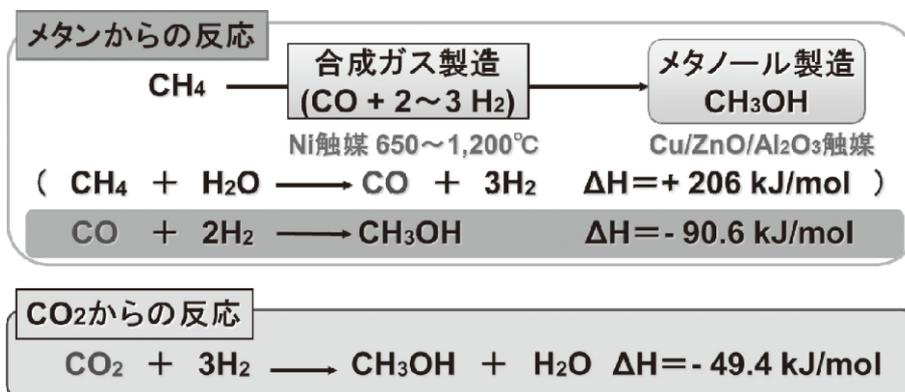
図表 3.3.7 CO₂のエネルギー準位と触媒反応



出所) 三井化学作成

CH₄ ガスから合成ガスを経由したメタノール合成反応及び CO₂ を原料とするメタノール合成反応は、両反応とも発熱反応のため熱力学的には低温・高圧の反応条件のほどメタノール合成は有利に進む。

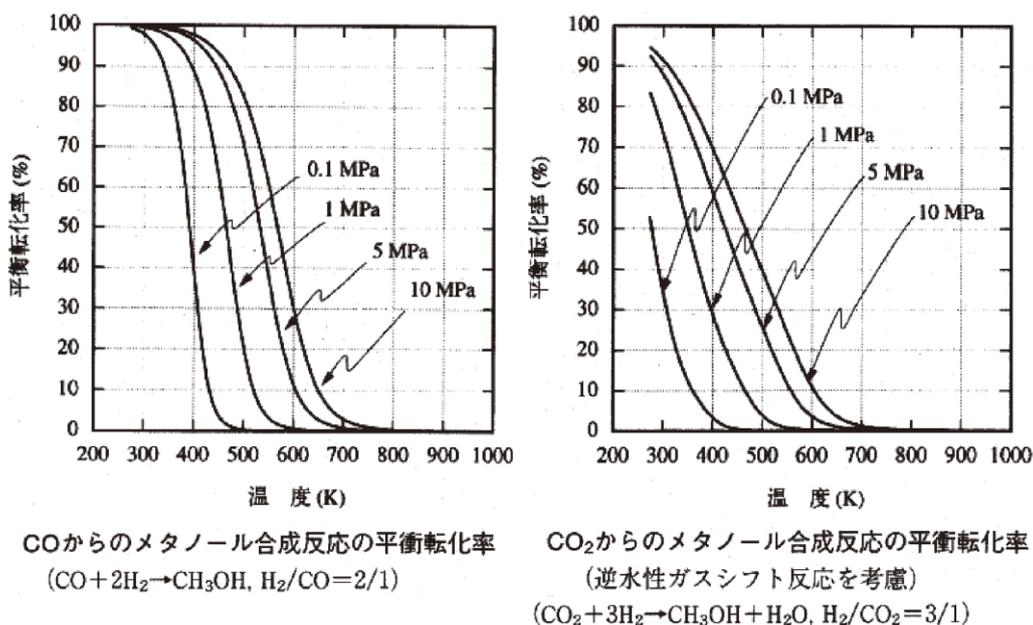
図表 3.3.8 メタノール合成の反応熱



出所) エネルギー・資源 Vol.38 (2017)

2つの反応を同じ温度で比較すると、CO₂ を原料とする反応は、合成ガスを原料とする反応に比べてメタノールへの平衡転化率は 1/2 以下になり、効率的に反応を行う上で不利と言える。例えば、反応温度 500°C、反応圧力 5MPa の条件下では合成ガスを原料とする場合の平衡転化率が 80%程度に達するのに対し、CO₂ を原料とする場合、平衡転化率は 30%程度しかない。一方、同じ反応圧力 5MPa でも反応温度 300°Cでは、平衡転化率が 90%程度となる。そのため、CO₂ を原料とするメタノール合成では、低温で反応を進行させ得る、より高活性な触媒が求められる。

図表 3.3.9 CO,CO₂からのメタノール合成反応の平衡転化率



出所) 日本エネルギー学会誌 第74巻第3号

重要なポイントとして、CO₂ を原料とするメタノール合成反応では、メタノールと当モルの水が副生されるが、一般的に使用されているメタノール合成触媒 Cu/ZnO/Al₂O₃ 系は、水の存在下において失活しやすい傾向にあり、触媒寿命が短くなる傾向にある。

以上の事により、CO₂ を原料とするメタノール製造触媒には、既存のメタノール合成触媒より高活性であり、かつ耐水性に優れた性能が要求される。

3.3.4.1. CO₂ を原料とするメタノール合成触媒

CO₂ を原料とするメタノール合成触媒の開発は 1990 年頃から多くの研究機関で活発に行われてきた。開発のベースとなったのは既存のメタノール合成触媒として使用されている Cu/ZnO/Al₂O₃ 系で、低温での反応活性を向上させると同時に、反応中に副生する水に対する触媒の耐久性を高める為、触媒の改良検討が行われてきた。また、銅系以外の金属触媒を用いたメタノール合成触媒の研究もされている。

図表 3.3.10 銅系触媒のメタノール合成活性

触媒 (組成、重量比)	触媒量 (g)	調製法	温度 (K)	圧力 (Mpa)	原料組成 (H ₂ /CO ₂)	空間速度 (1g ⁻¹ h ⁻¹)	転化率 (%)	選択率 (%)	収率 (%)	備考
Cu/ZnO (30:70、モル比)	2.45	共沈法	523	7.5	70:30	6.1	不明	不明	10.0	
Cu/ZnO/Al ₂ O ₃ (50:45:5)	1	共沈法	523	5	75:25	18	不明	不明	(11.2)	
Cu/ZnO/ZrO ₂ (50:25:25)	1	共沈法	523	5	75:25	18	不明	不明	(9.64)	
Cu/ZnO/Ga ₂ O ₃ (50:25:25)	1	共沈法	523	5	75:25	18	不明	不明	(11.5)	
CuO/ZnO/Al ₂ O ₃ (40:40:20)	1	共沈法	493	3	75:25	12	11.5	71.1	8.18	
CuO/ZnO/Al ₂ O ₃ /Cr ₂ O ₃ (43:20:34:3)	1	共沈法	513	3	75:25	20	12.8	53.1	6.80	
CuO/ZnO/Cr ₂ O ₃ (24:56:20、モル比)	1	共沈法	523	5	75:25	3	25.6	63.3	16.2	
Cu/ZnO/Al ₂ O ₃ (47:47:6、モル比)	1.8m ℓ	共沈法	513	1.3	75:25	2.6	48.3	57.9	28.0	SV=3600h ⁻¹
Cu/ZnO/ZrO ₂ (21:24:55、モル比)	1.8m ℓ	共沈法	493	1.3	75:25	6.3	20.5	68.3	14.0	SV=3600h ⁻¹
Cu-ZnO/TiO ₂ (30:30:40)	不明	共沈法	513	1	75:25	9.2	15.4	21.9	3.37	
CuO/ZnO/La ₂ O ₃ (50:40:10)	0.3	共沈法	573	11	75:25	2	29.5	55.5	16.4	
			623	11	75:25	6.5	31.3	64.2	20.1	
4wt%-La/CuO/ZnO/Cr ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ (25:42:1:32)	1.8m ℓ (2.2g)	均一ゲル化法	523	5	75:25	3.85	28	75	21.0	SV=4700h ⁻¹ CuO/ZnO/Cr ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ と La ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ を混合
6wt%-Pd/CuO/ZnO/Cr ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	不明	均一ゲル化法	523	8	75:25	3.85	33	85	28.1	SV=4700h ⁻¹
CuO/ZrO ₂ (5:95)	0.05	加水分解法	573	3.2	90:10	72	不明	~30	(3.94)	エアロゲル触媒、SV=30000h ⁻¹
CuO/ZnO/ZrO ₂ (5:5:90)	0.05	加水分解法	573	3.2	90:10	72	不明	~64	(4.21)	エアロゲル触媒、SV=30000h ⁻¹
CuO/ZrO ₂ (40:60)	0.7	共沈法	513	5	75:25	17.1	9.7	68	6.6	
CuO/ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ (36:54:10)	0.7	共沈法	513	5	75:25	17.1	不明	不明	8.0	
CuO/ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ (28:42:30)	0.7	共沈法	513	5	75:25	17.1	不明	不明	9.0	
Cu/ZrO ₂	0.3	共沈法	533	1.5	76:23	2.66	8.1	50.7	4.11	
Cu/ZrO ₂	0.3	Cu ₂ Zr ₃ を活性化	533	1.5	76:23	2.66	9.1	41.6	3.79	anorphous Cu ₂ Zr ₃ を553Kで活性化
Cu/La ₂ Zr ₂ O ₇	0.5	共沈法	573	6	75:25	4	不明	不明	(27.3)	
5Wt% Cu/Mo ₂ C	1	含浸法	493	6	75:25	3	4.0	31.5	1.26	
5Wt% Cu/SiO ₂	1	含浸法	553	6	75:25	3	17.1	23.9	4.09	

出所) 日本エネルギー学会誌 第 74 巻第 3 号

図表 3.3.11 銅系以外の触媒のメタノール合成活性

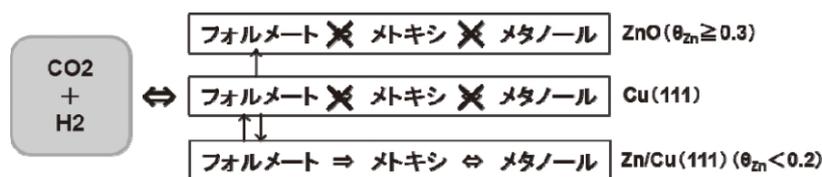
触媒 (組成、重量比)	触媒量 (g)	調製法	温度 (K)	圧力 (Mpa)	原料組成 (H ₂ /CO ₂)	空間速度 (1g ⁻¹ h ⁻¹)	転化率 (%)	選択率 (%)	収率 (%)	備考
Mo ₂ C	1	含浸法	493	6	75:25	3	4.6	17.7	0.81	
1.5wt% Re/CeO ₂	1.8m ℓ	含浸法	473	0.5	75:25	1.59	4.0	56.3	2.25	SV=6000h ⁻¹
7wt% Re/ZrO ₂	不明	含浸法	493	1	50:50	2.02	6.31	10.8	0.68	SV=2200h ⁻¹
Fe ₃ C	1	含浸法	493	6	75:25	3	2.8	24.3	0.68	
12% Fe-Amorphous Carbon	不明	含浸-熱分解	648	5	80:20	20	49	0.444	0.22	
3wt% Rh/Nb ₂ O ₅	不明	含浸法	453	1	75:25	2.4	2.1	18.2	0.38	
5wt% Pd/La ₂ O ₃	0.5	含浸法	623	12	75:25	4	10.8	56.2	6.07	
5wt% Li-Pd/SiO ₂	0.5	含浸法	623	12	75:25	4	21.7	32.5	7.05	
1wt% Pd/SiO ₂	不明	含浸法	548	0.95	75:25	不明	3.9	1.98	0.08	SV=3000~6000h ⁻¹
1wt% Pd/TiO ₂	不明	含浸法	548	0.95	75:25	不明	0.8	9.5	0.08	SV=3000~6000h ⁻¹
4wt% Pd/CeO ₂	0.5	含浸法	533	3	75:25	2.24	5.2	84.7	4.40	
Pd/ZrO ₂	0.3	amorphous Pd ₁ Zr ₂ を反応ガスで活性化	483	1.5	75:25	2.66	13.4	37.4	5.01	(N ₂ 除く)
2wt% Pt/ZrO ₂	不明	含浸法	533	1	50:50	2.2	5.7	2.5	0.14	
5atom% Au/ZnO	1m ℓ	共沈法	523	0.8	75:25	3	2.4	50.0	1.20	
10wt% ZnO/ZrO ₂	2	含浸法	633	1	75:25	0.28	6.1	41.6	2.50	

出所) 日本エネルギー学会誌 第74巻第3号

3.3.4.2. 反応メカニズムの推定

CO₂を原料とするメタノール合成の反応機構は、Cu/ZnO系触媒において表面科学による実用触媒の研究でいくつかの解析がなされている。すなわち、Cu/ZnO系の触媒においてCu(111)上のZnが水素化され易い高活性のフォルメート(中間体)の形成を促進し、Znによりフォルメートの水素化が促進される。そしてZn/Cu(111)表面でのみ生成したCu-Zn上のギ酸イオンがメトキシ種を経てメタノールを生成するとされている。

図表 3.3.12 Cu/ZnO系触媒上でのメタノール合成反応



出所) 資源環境技術研究所 NIRE ニュース

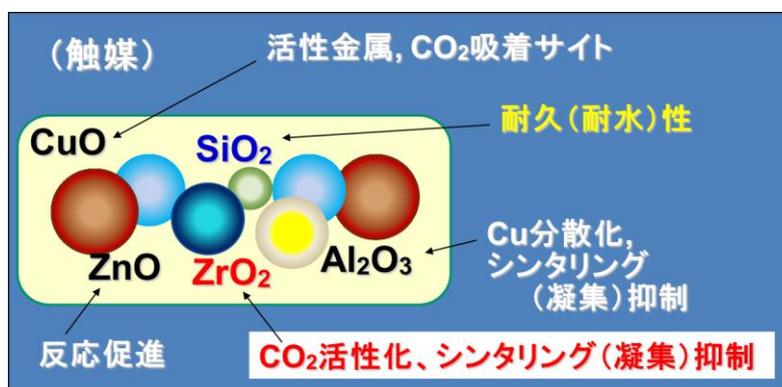
更に、表面科学的手法と第一原理計算を併用した分子線実験により、反応性が高いフォルメート生成のメカニズムなどが解明されており、Cu表面のフォルメートの分解・脱離の解明も研究されている。

3.3.4.3. RITEでの触媒開発の取り組み

CO₂を原料とするメタノール合成の研究は1980年頃から行われているが、1923年に工業化され一般的に使用されている合成ガスからのメタノール合成に比べるとその歴史は浅い。1990-2000年の期間にCO₂を原料とするメタノール合成触媒の開発は国家プロジェクト(公益財団法人 地球環境産業技術研究機構(RITE):

Research Institute of Innovative Technology for the Earth:以後RITEと略す)で実施された。このRITEプロジェクトは、固定発生源からのCO₂を大量かつ連続的に回収し、さらに回収したCO₂をH₂と反応させることによりメタノールを製造するプロセスを開発するものであった。メタノール合成触媒として知られているCu/ZnO/Al₂O₃系触媒をベースとして、更なる低温での活性向上及び耐水性の向上を目的とし、触媒の高活性化・長寿命化に向けた開発が進められた。Cu/ZnO/Al₂O₃系触媒をベースに、任意成分としてZrO₂、Ga₂O₃、PdOなどを添加、また微量のSiO₂を添加し多元系からなる耐水性に優れた触媒開発が進められ、最終的にはZrO₂やSiO₂を含有したCu/ZnO/ZrO₂/Al₂O₃/SiO₂触媒(以後 RITE触媒と略す)の開発に至っている。RITE触媒中のCuの役割は、CO₂が反応時に吸着する活性金属であり、ZnOは反応を促進する物質である。ZrO₂は、更なるCO₂の活性化の役割と同時に活性種のCuのシタリング(凝集)を抑制することに役立っている。更に、SiO₂を少量添加する事により耐久性を向上させている。また、Al₂O₃は、活性金属のCu高分散化に寄与していると考えられている。

図表 3.3.13 RITE 開発触媒 (Cu/ZnO/ZrO₂/Al₂O₃/SiO₂) の各成分の役割



出所) RITE 報告書をベースに三井化学作成

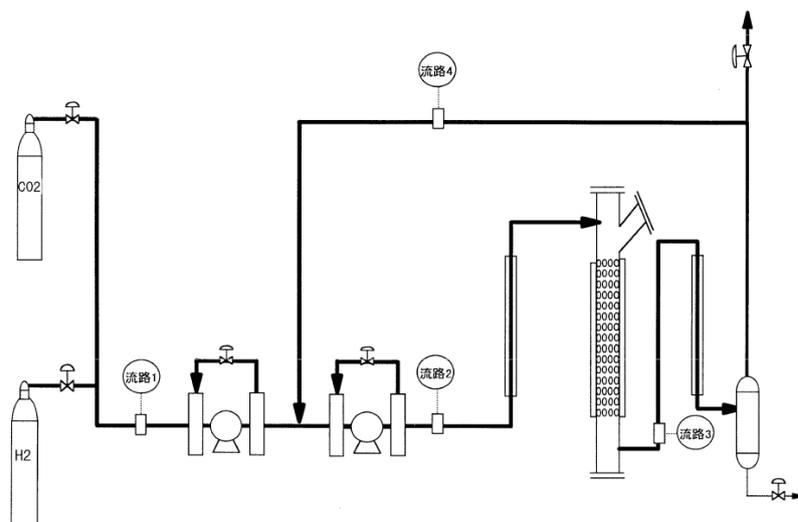
RITE 触媒は、ラボの実験装置を用いて調製された。触媒の評価は、メタノール製造能力 50Kg/日のパイロットスケールの固定床装置を用いて、CO₂ と H₂ のボンベガスを用いて生成メタノールの収量、選択率及び触媒の耐久性の評価が行われた。評価装置の反応諸元および固定床装置のフロー図は以下のとおりである。

図表 3.3.14 RITE 評価装置の反応諸元

メタノール生成量	5 0 Kg/日
原料ガス	CO ₂ ,H ₂ (ボンベガス)
反応管	単管 3 8 φ x 4 0 0 0L
触媒	形状 3 φ x 3mm H ペレット
反応温度	2 0 0 ~ 3 0 0 °C
反応圧力	3 ~ 1 2 MPa
反応ガス量	1 5 ~ 6 0 Nm ³ /h

出所) RITE 報告書

図表 3.3.15 RITE におけるメタノール 50Kg/日の固定床装置のフロー図



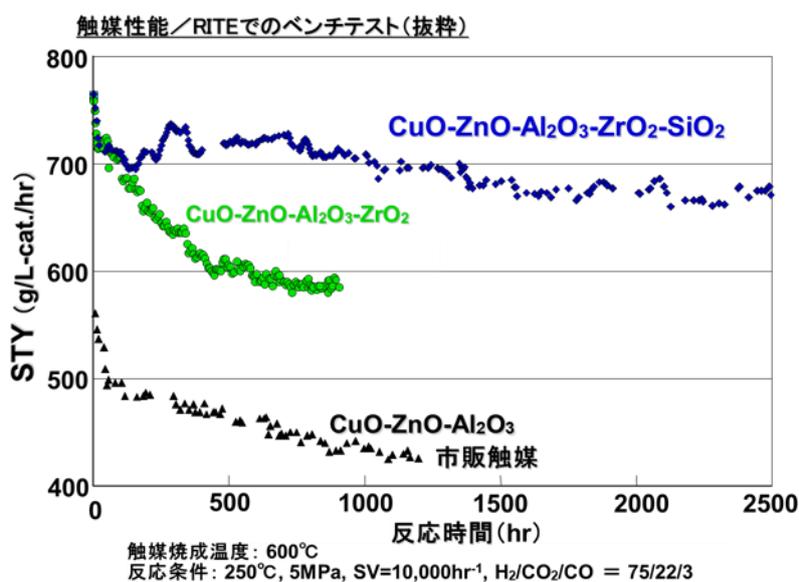
出所) RITE 報告書

RITEにおけるCO₂を原料とするメタノール合成触媒開発の成果概要は以下の通りである。

- ① 開発触媒 (Cu/ZnO/ZrO₂/Al₂O₃/SiO₂) にて、反応温度 250°C、反応圧力5MPa, SV 10,000/hの条件で、メタノール収量550 g・MeOH/L・Cat・Hr以上、メタノール選択率 99.8mol%以上を達成。
- ② リサイクル系で3,500 h の長期安定活性を確認。
- ③ 模擬条件で10,000 h 以上の触媒耐久性を確認。

下図に既存のメタノール製造触媒 (CuO/ZnO/Al₂O₃) とともに、RITE開発触媒の活性経時変化を示す。

図表 3.3.16 RITE 開発触媒の反応評価結果



出所) RITE 報告書

RITE触媒によるメタノール合成では、ギ酸メチルなどの副生物の生成も低く抑える事ができ、メタノール選択率99.72%と所期の目標値を達成している。

図表 3.3.17 RITEベンチ試験の選択率 (単位 mol%)

組成	Cu/ZnO/ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ /SiO ₂
メタノール	99.72
メタン	0.02
エタン	0.00
ジメチルエーテル	0.11
ギ酸メチル	0.15

反応条件：触媒量=3L、反応温度 250℃、圧力 5MPa

反応ガス流量 30NM³/h (SV=10,000/h)

出所) RITE 報告書

以上、RITE 触媒は、触媒組成及び触媒調整法の検討により、市販メタノール触媒と比較してメタノール純度もほぼ同じで高活性、長寿命を達成している。

図表 3.3.18 RITE 触媒と市販触媒の比較

	RITE 触媒	市販メタノール触媒
組成	Cu/ZnO/ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ /SiO ₂	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃
活性 (1000Hr 後)	700g/L-cat./hr	450g/L-cat./hr
メタノール純度	99.8mol%	99.6 mol%

反応温度 250℃、圧力 5MPa、SV=10,000/h

出所) 三井化学作成

3.3.5. 三井化学での RITE 開発触媒を用いた実証検証

3.3.5.1. 工場実ガスを使用したメタノールの実証検証

1999年に終了した RITE プロジェクトでは、触媒性能としての開発目標は達成してはいたものの、あくまでも模擬ガス (CO₂ と H₂ のボンベガス) を原料としたものであり、且つ小スケールでの成績であった為、実用化のためにはスケールアップを含めた更なる検討が必要であった。

2009年、三井化学は、この RITE の成果をベースとして実機に適用する際の課題に備えるべく、RITE で開発された触媒の工業的製法の確立を行った。更に、工場から排出されるガスを用いた実用プロセスデータ取得の検討を行うため、同社の大阪工場内にメタノール 100t/年の実証パイロット設備を設置し、実用化に向けての各種データの取得を行った。実証検証の課題は以下のとおりである。

- ① RITE 開発触媒の工業的製造法の確立
 - ② 工場から排出される CO₂ 及び副生水素の実ガスを用いた実証プラント建設。各種運転データの取得、プラントの安全・安定運転及び①にて製造した工業触媒の性能評価
- 課題①の触媒の工業的造法の確立については後述する。

図表 3.3.19 三井化学 大阪工場におけるCO₂からメタノール製造の実証設備



出所)三井化学作成

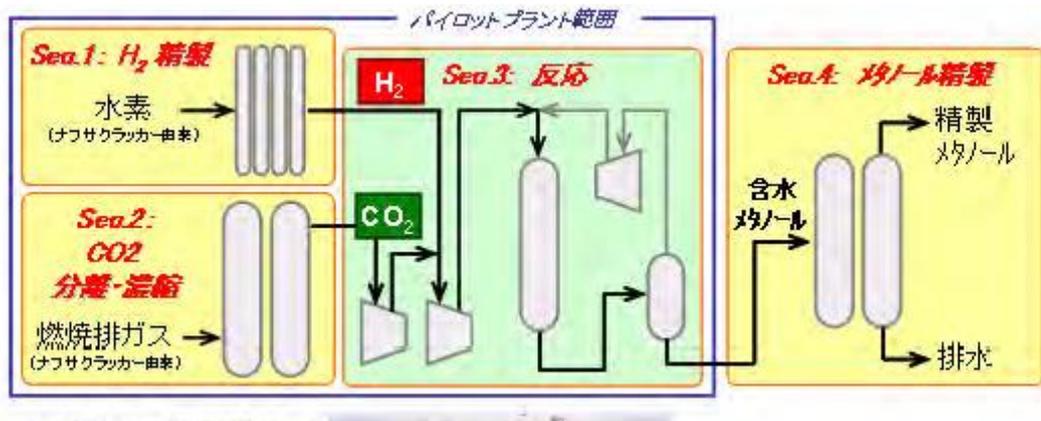
実証パイロット設備において原料となるガスは三井化学大阪工場内のナフサクラッカー由来の水素及び燃焼排ガスCO₂を用いた。水素に関しては、パイロット設備に水素精製工程を設置し、高純度化した後に使用した。

燃焼ガス中のCO₂濃度は低濃度であるため、燃焼廃ガスをそのまま使用することはできない。そのため、燃焼廃ガス中のCO₂は、分離・濃縮工程を設置して使用した。

三井化学にて実施した実証パイロット設備の概要を示す。Sec.1の水素精製工程からSec.3のメタノール合成までを連続設備とし、Sec.4については別途連続蒸留試験を行い実施した。

- Sec.1 水素精製工程
- Sec.2 CO₂分離・濃縮工程
- Sec.3 メタノール合成工程
- Sec.4 メタノール精製工程

図表 3.3.20 三井化学における工程図



出所)三井化学作成

1) Sec.1 水素精製工程

実証検証に用いる水素は、ナフサクラッカーからの副生水素を精製して使用した。工業的水素の精製方法は、吸着法 (PSA 法)、吸収法、深冷分離法、膜分離法が一般的に用いられている。

吸着法は、各種ガスの吸着剤への吸着性能の差を利用する方法であり、工業的に最も利用されている。吸着-脱着 (吸着剤の再生) の二つの基本的な工程反復サイクルで運転を行い、吸着工程で不純物は吸着剤に吸着除去され、高純度の水素を得ることが可能である。

実証パイロット設備においては、触媒毒となりうる物質の除去も可能であることから吸着法 (PSA 法) を採用した。

2) Sec.2 原料CO₂分離・濃縮工程

CO₂ の分離・回収技術の開発は、吸収法、吸着法、膜分離法、深冷分離法など、今もなお盛んに実施も含めて検討されている。実証パイロット設備においては、工業化実績があり、且つ大型化可能なプロセスであるアミン系吸収剤を採用した。CO₂ の分離・濃縮の原理は、アミン系吸収剤と反応する CO₂ のみ吸収液中に取り込み、その後、放散させて CO₂ を回収する方式である。この手法を使用する場合、吸収剤のアミン類及びその副生物、燃焼排ガス中に含まれる成分(O₂,SO_x,NO_x 等)が回収 CO₂ 中に存在すると触媒毒になり触媒性能に影響を及ぼす可能性があるので十分に留意が必要である。

3) Sec.3 メタノール合成工程

実証パイロット設備におけるメタノール合成用反応器の設計に関しては、反応器形式の選定及び反応器設計用データの取得が可能な型式及び仕様であることが要求される。反応器型式選定のポイントは除熱方法および許容触媒層圧損である。CO₂ を原料とするメタノール合成反応は発熱反応であり除熱が必要である。メタノール合成の既存法においては、除熱も考慮した多管式反応器やラジアルフロー反応器が用いられているが、反応熱及び反応速度等を含め、最適パフォーマンスが得られる除熱・温度制御方法を選定しなければならない。許容触媒層圧損及び循環系の負荷(昇圧動力、ガス量等)、触媒の固結、破砕などによる圧力増の影響についても検討する必要がある。

実証検証においては、反応器設計用データの採取が可能であり、スケールアップが可能となる反応器として単管反応器を採用した。使用する触媒に関しては、工業的な手法で製造した RITE 触媒を使用し、触媒の性能測定を実施した。

4) Sec.4 メタノール精製工程

メタノールを精製する場合、水やその他不純物を分離する必要がある。メタノールの精製工程においては蒸留分離法を用いる事ができる。実証パイロット設備において、蒸留工程は設置せず、実証パイロット設備から採取したメタノールと水の混合物を別途、蒸留試験を実施して品質の確認を実施した。

3.3.5.2. RITE 触媒の工業的製造法及び活性化処理

三井化学においてRITE開発触媒の組成をベースに触媒の量産化技術の検討を実施した。触媒の製造工程は、沈澱工程、洗浄工程、乾燥・焼成・成型工程及び活性化処理工程がある。

1) 沈澱、熟成工程

触媒の性能・寿命に大きく影響を与える重要な工程で、設計された各金属組成の精密沈澱を実施し、目的とする結晶構造を構築する工程である。RITE触媒の製造にあたっては出発原料となるCu、Zn、Zrなどの金属塩を用いNa₂CO₃などの中和剤を使用し、前駆体の形成を制御しながら最終生成物となる組成を共沈法によって製造した。

2) 洗浄、ろ過工程

触媒中に不純物などが存在すると触媒性能は低下する事は知られている。従って、沈殿用の中和剤として用いたNa₂CO₃由来の残存Na分を十分に洗浄し除去を行った。

3) 乾燥・焼成・成型工程

(公表不可)

4) 活性化処理工程

(公表不可)

3.3.5.3. 実証検証の結果

1) RITE 触媒の工業的製法の確立

工業触媒の製造は、触媒量産設備を用いて製造技術の確立を実施した。工業的に製造した RITE 開発触媒の代表的な値を以下に示す。

■触媒組成(重量パーセント)

Cu : ZnO : ZrO₂ : Al₂O₃ : SiO₂
40 : 30 : 25 : 5 : 少量

■触媒形状 3mmΦ x 3mm H Tablet

2) 工場から排出 CO₂ 実ガスを用いた工業触媒の性能評価結果

三井化学において、工場から排出される実ガスを用いた実証試験では、触媒の挙動に関するデータ及び RITE でのベンチ試験結果と同程度のメタノール純度に関するデータを取得する事ができた。精製したメタノールに関しては、既存の水性ガスを原料として製造されているメタノールと遜色ない純度であることを確認する事ができ、反応経時データなどを含め、概ね目標通りの成果を得る事ができた。また、実用化プロセスの最適設計に必要な各種データの取得を行い、工業化に必要なプロセスをほぼ確立する事ができた。

図表 3.3.21 パイロット装置による実証試験結果

生成物		組成		
		三井化学 ^{a)}	RITEベンチ ^{b)}	工業生産 ^{c)}
メタノール	CH ₃ OH	99.97 wt%	99.6 wt%	99.59 wt%
ギ酸メチル	HCOOCH ₃	213 ppm	330 ppm	700 ppm
高級アルコール(C ₂ -C ₄)	ROH	55 ppm	30 ppm	530 ppm
炭化水素(C ₆ -C ₁₀)	C _n C _m	—	—	50 ppm
ジメチルエーテル	(CH ₃) ₂ O	—	—	230 ppm

a) 実証試験(水を除く)

b) 反応条件: 触媒=Cu/ZnO/ZrO₂/Al₂O₃/Ga₂O₃、原料ガス=H₂(3)/CO₂(1)

c) 合成ガスから工業的に製造されているメタノールの純度
(ICIの資料から引用)

出所) 三井化学作成

3.3.5.4. 触媒開発の今後の課題

GHG削減の要求拡大及びCO₂を炭素源として使用するカーボンリサイクルの動きが盛んになり、CO₂からのメタノール合成も実用化の方向に進んでいる。実用化に向けた最大の課題は、再生エネルギーを利用して製造するグリーン水素の安価、大量供給である。

一方、大型プラントでの採用に向け触媒の更なる低コスト化、高性能化も必要になってくる。RITE 開発触媒は、従来の Cu/ZnO/Al₂O₃ 触媒より性能及び耐久性について優れているものの、CO₂を活性化し、触媒の活性成分の Cu のシンタリング（凝集）低減の為、高価な ZrO₂ を 25%含有し、触媒原材料費に占める割合の約 7 割程度を占めている。今後は、実証パイロット試験結果及び触媒量産化技術を活用して ZrO₂ のような高価な原材料を低減した上で触媒の低コスト化を図り、更なる触媒の高活性化及び高寿命化への対応が必要になってくる。

3.3.6. まとめ

本章では、メタノール合成法のプラント概要、RITE で開発された CO₂を原料とするメタノール合成触媒の概要及び三井化学大阪工場に設置した実証パイロット設備にて、同工場から排出される実ガスをを用いたメタノール合成の実証試験結果について記述した。

メタノール合成反応は、発熱反応であり低温・高圧ほど平衡は進みやすい為、反応器の選定は非常に重要になる。東洋エンジニアリング社の MRF-Z[®]反応器はラジアルフロー式のシェル・チューブ型反応器を採用しており、触媒層の圧力損失は低く、エネルギー効率も良い。また触媒の交換においても反応器の構造から多管式反応器に比べ、触媒の拔出し、充填が容易である特徴がある。

三井化学は、2009 年に工業化技術を確立した RITE 触媒を使用して実証プラント設備の建設、安全性も含めて実証試験でのメタノール製造のノウハウ・実績を保有している。

以上から、本検討においては、東洋エンジニアリング社の MRF-Z[®]反応器に、実績のある ZrO₂ を含有する RITE 触媒を用いた CO₂を原料とするメタノール製造の事業実施可能性について検証する。

3.4. 淡水化

3.4.1. サウジアラビアにおける淡水化市場

サウジアラビアは世界最大の淡水化市場である。サウジアラビアの水資源は約 18,000 百万 m³/年 (2010 年) と推定されるが、その大部分が枯渇の懸念がある資源であった。これらの地下水を保護するために、淡水化市場は増大の一途をたどっている。

1970 年代以降の急速な人口増加により、サウジアラビアの水需要は大幅に増加した。水電力省 (Ministry of Water and Electricity (MOWE)) によると、水需要は 2010 年から 2060 年の間に 3 倍になると予測されている。もともと、上水の大部分は地下水により供給されていたものの、地下水の枯渇が懸念されることから 2015 年以降、同資源の保護を目的として、農業における水利用には制限が設けられている。また、年々淡水化による上水供給量が増加しており、Global Water Intelligence による 2015 年時点の予測によれば、2023 年の供給能力は日量約 1,000 万 m³になると予想されている。

3.4.2. 本調査が対象とするプラントの上水の調達方法

本調査で対象としているメタノール・プラントにおける上水の必要量は、メタノール生産量 10 万 t のケースで年間約 10.5 万 m³ (13.2 m³/h) と、新規の淡水化プラント等を設置するには使用量が小さい。また、上記の通りサウジアラビアでは年々淡水化プラントが増加しており、安価で十分な量を調達できる見通しである。

以上から、本検討においては、淡水化プラントの建設は想定せず、上水を外部から調達して膜処理し、純水にして使用する前提とする。

3.5. ソーラー発電

3.5.1. サウジアラビアにおける再生可能エネルギー電力事情

サウジアラビアでは2015年6月に国内開発計画である「Vision2030」を発表、石油依存経済の脱却、外資導入、民活等を柱とした国内産業多角化本格化に向けて取組中である。発電セクターでは現在国内に存在する約68GWに対して、人口増や上記Vision2030に基づく開発計画推進を前提に、今後10年間で約50GWの新規開発を予定する。また、これまで主燃料だった石油消費を減少させる為、再生可能エネルギーによる調達の主となる見通しである。

Vision 2030 発表時点では2020年迄に約3.5GW、2023年迄に9.5GWをREのみで段階的に開発する計画を立てていたものの、その後複数回の目標改訂を行っており、2030年までに約59GWのRE電源開発を行う目標が2019年1月に発表された。

他方、計画実行状況は2020年時点で設置・稼働済の発電所はソーラー発電設備によるIPP案件での400MW分のみであるが、陸上風力によるIPP案件による400MW分ならびにエネルギー省・REPDO (Renewable Energy Project Development Office) によるAuction形式での再生可能電源による発電事業入札(Round2-3)が実行されており、同入札による開発容量は3.4GWと見込まれている。前述目標の達成には、今後毎年数GW単位での開発・運転開始が必要となるため、より開発が加速していくものと見込まれる。もっとも、Round3以降はコロナ禍の影響により新規検討が停滞している。

図表 3.5.1 REPDO が実行する再生可能エネルギーによる発電所開発プロジェクト

Round	地域/発電源	容量
1	Sakaka / PV	300MW
	Dumat Al-Jadal / Wind	400MW
2	Rafha / PV	20MW
	Madinah / PV	50MW
	Qurayat / PV	200MW
	Rabigh / PV	300MW
	South Jeddah / PV	300MW
	Al-Faisaliah / PV	600MW
3	Yanbu / Wind	850MW
	Al-Rass / PV	300MW
	Saad / PV	300MW
	Wadi Al-Dawasir / PV	70MW
	Layla / PV	40MW
	Umm Huwayd or Khor Duweihin / Nuclear	2,800MW

出所) 「中東湾岸地域における電源開発の現状～クリーンエネルギー化の流れ」

(『中東協力センターニュース』2019年10月号)

他方、現時点では制度化されていないものの、上記 RE 電源開発の更なる加速の目的も含め、Green 証書の発行制度導入も検討されているとの情報もある。⁸

また、日照環境から、最も効率が良いエリアは北西部（サカーカ、NEOM）であり、REPDO が推進する Auction に於いても同国中部・北西部を中心に開発を進められている状況である。

日射量状況に関しては、特に北西部で 6kWh/m² 以上の発電量が期待でき、日射環境が非常に良好である。

3.5.2. 技術的選択肢

3.5.2.1. ソーラー発電の設置の有無

3.5.1 で整理した通り、サウジアラビアでは今後、ソーラー発電を含むグリーン電力の入札が実施されており、直近はコロナ禍の影響で停滞しているとはいえ、現状 3.4GW 分の入札が実施されていることに伴い、証書電力の制度が今後導入される可能性も高い。このことから、水電解を行うためのグリーン電力の調達方法としては、①ソーラー発電所を自前で開発すること、②証書電力としてグリッドから調達することの 2 通りが選択肢となる。

それぞれのメリット・デメリット、ならびにリスクは下表のとおり整理できる。

図表 3.5.2 グリーン電力の調達方法の選択肢

	①自前でソーラー発電所を開発	②証書電力としてグリッドから調達
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ✓ OPEX を抑えられる 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ CAPEX を抑えられる ✓ 安定した電力の供給を 24 時間受けられる。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ✓ CAPEX が大きくなる ✓ 昼間のみ発電可能なため、メタノール製造を 24 時間可能とするためには、夜間に使用する水素を昼間のうちに製造する必要があるため、その分の余分な発電容量と水素の貯蔵手段（タンク等）が必要。 ✓ 立地場所が水電解設備からは遠隔地となることから（後述）、既存のグリッドを利用するの託送が必要となる（費用もかかる） 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ OPEX が大きくなる（証書電力のプレミアムを含む）
リスク	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 既存のグリッドが、託送電力量に耐えられるか 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ グリーン証書の制度が現状なく、計画があるとはいえ導入に不確実性あり

出所) コンソーシアム作成

⁸ サウジアラビア政府関係者ヒアリングによる。

本 FS においては、上記両方のケースを経済性評価の対象として検討する。

3.5.2.2. ソーラー発電の種類と本事業にとって適切な技術の選定

ここでは、①自前でソーラー発電所を開発する場合に適用する技術について考察する。

ソーラー発電の方式には、シリコン系の Poly-crystalline、Mono-crystalline、HIT 等の方式があるのに加え、非シリコン系のタイプも存在し、単価や発電効率等の特長に違いがある。

この内、中東地域では、大規模な敷地の確保を前提とし、パネル当たりの単価が安価な Poly-crystalline が採用されることが通常である。

上記事情を踏まえ、本件でも今日の中東地域内で一般的となっている以下設備構成でのソーラー発電設備の建設を前提とする。

PV panel :	Poly-crystalline PV module, (330W)
Inverter:	2,500kVA / 1,500V
Tracker:	Horizontal single axis tracker

上記仕様での設備建設費用は凡そ USD 640/kWh と見込まれることから、同単価を基に経済性検証時に設備建設金額を算出する。

また、設置場所での気象並びに日射量条件は以下のとおり想定する。

Annual global horizontal irradiation:	2,282.9 kWh/m ² /a
Annual diffuse horizontal irradiation:	732.7 kWh/m ² /a
Annual average ambient dry bulb temperature:	21.0°C

3.5.2.3. ソーラー発電設備の立地

ここでは、①自前でソーラー発電所を開発する場合の立地について考察する。

上述のとおり、ソーラー発電において最も効率が良いエリアは北西部（サカーカ、NEOM）であり、REPDO が推進する Auction に於いても同国中部・北西部を中心に開発を進められている状況である。一方、水電解設備、メタノール製造プラントは、東部州・ラスタヌーラに立地予定である（後述）。したがって、立地地域の選択肢としては、①北西部（プラントからは遠隔地）、②東部州（ラスタヌーラのプラント近辺）の 2 通りとなる。この内、①北西部については 6kWh/m² 以上の発電量が期待できるのに対し、②東部州（ラスタヌーラ近辺）の期待発電量は 4.5kWh/m² 前後と、大幅に下がり（北西部の 75%程度）、CAPEX が 25%増すこととなる。また、ラスタヌーラ近辺は多くのプラントが立地していることもあり、必要な規模の用地を確保できるか不透明である上、その場合の土地単価についても割高になることが予想される。このことから、プラントからは遠隔地となり、グリッドを用いての託送を前提としても、北西部に立地することに合理性が認められる。

以上から、本検討では、①自前でソーラー発電所を開発する場合の発電所立地地域は、北西部を前提とする。

3.5.3. 実現のための課題

経済性での検証とは別に、技術的及び現時点でのサウジアラビアでの現状を加味した場合、各ケースで以下が課題となる。

①自前でソーラー発電所を開発する場合

- ✓ メタノール・プラント側の設備容量により変動するもののメタノール・プラント側容量が 10 万 t/年間の際には最大約 250MWh/h の電力が送電される必要あり、その経路となる北部地域～東海岸沿い地域間の送変電設備の現容量がそれに耐えうる事が必須である。仮に容量不足となった場合は、送電線容量増強の新設となり莫大なコストが追加となる懸念がある。
- ✓ 北部での発電後の送電に際して、東海岸沿いの送変電設備から受電した場合に相対で発電/受電の相殺が可能な計測制度の施工が必須である。

②証書電力としてグリッドから調達

- ✓ 導入の動きはあるものの、グリーン証書発行・買電の制度が未整備であり、同制度の施行が必須条件となる。
- ✓ 証書料金が電力料金に上乗せされる。その金額次第では経済性を確保できなくなる懸念がある。

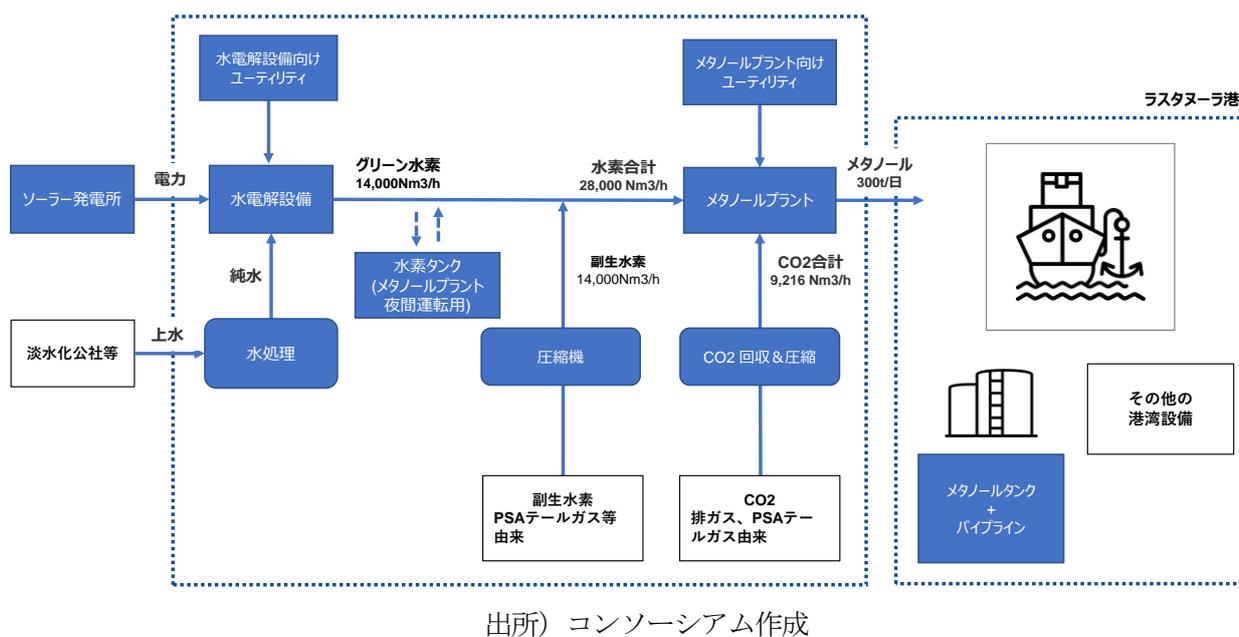
3.5.4. まとめ

①ソーラー発電所を自前で開発、②証書電力としてグリッドから調達とも、前項までに検討した通りメリット・デメリット・リスク（課題）があることから、これら 2 つのケースを対象として、経済性の検証を行う。

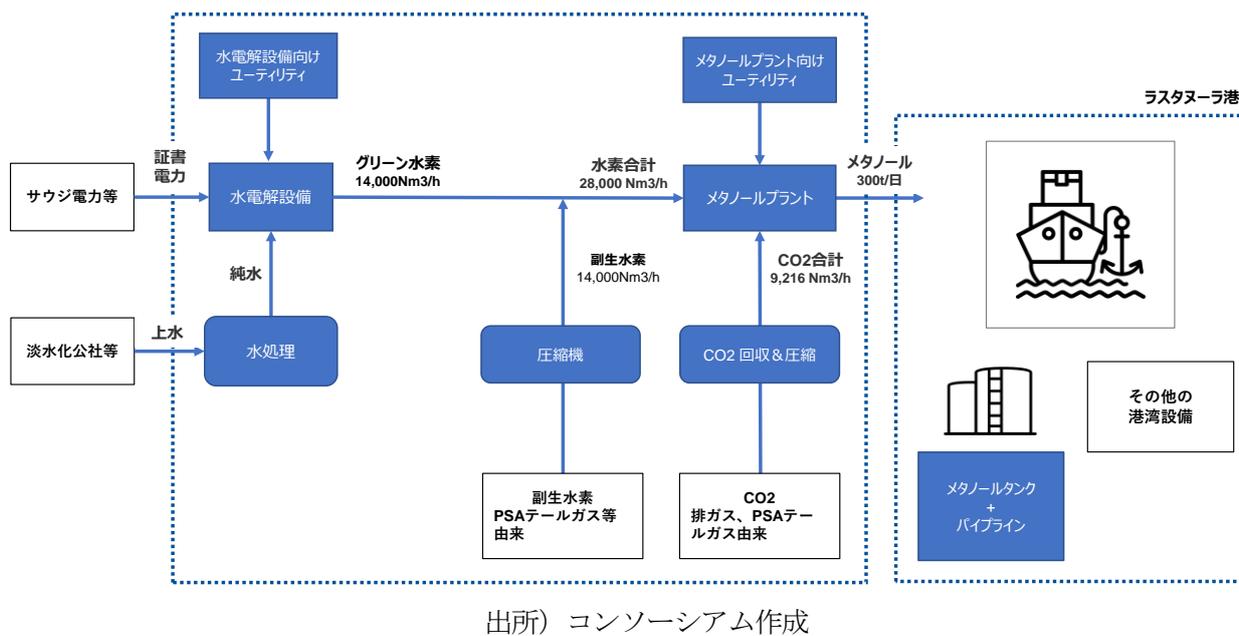
3.6. プラントの概略設計全体像

以上の技術的側面の考察を踏まえ、本 FS の対象とするプラントならびに諸条件は、以下に示す概略図・概要表のとおりとする。2 つのケースを想定しているが、これは電力の供給方法の違いによるものである。

図表 3.6.1 プラントの概略図（ケース 1）



図表 3.6.2 プラントの概略図（ケース 2）



図表 3.6.3 プラント概略総括表

		ケース 1	ケース 2
立地			
	水電解、メタノール・プラント等	ラストヌーラ	
	ソーラー発電所	北西部	—
メタノールの製造			
	製造規模 (年間)	10 万 t (日量 300t)	
	適用技術 (プラント)	MRF-Z®型反応器	
	適用技術 (触媒)	RITE 触媒 (ZrO ₂ 含有)	
	原料	CO ₂ 、水素 (グリーン水素:副生水素=1:1)	
	グリーン仕様	CO ₂ の排出がネット 0 となるメタノール (「カーボンニュートラル・メタノール」と仮称する)	
水電解向け電力の調達			
	調達方法	ソーラー発電所 (自前)	グリーン証書電力を 購入
	設置する発電所の規模	243MW	—
	グリーン証書電力購入量	—	70MWh/h
CO ₂ の調達			
	調達量	435t/日	
水素の製造・調達			
	必要水素量	28,000Nm ³ /h	
	副生水素調達量	14,000Nm ³ /h	
	水電解プラント規模	242,750kW	70,000kW
	水素製造能力	48,550Nm ³ /h	14,000Nm ³ /h
	適用技術	アルカリ形水電解	
	必要純水量	約 10.5 万 m ³ /年	
	純水調達方法	上水を外部調達し、プラント内施設で純水にして使用	
	副生酸素量	13.5 万 t/年	

出所) コンソーシアム作成

以下、項目・要素別に条件等を整理する。

3.6.1. 水電解設備・メタノール製造設備の立地

水電解設備・メタノール製造設備立地場所は、東海岸の製油所ならびに積出港のあるラスタヌーラと想定とする。

図表 3.6.4 プラントの想定立地場所



出所) コンソーシアム作成

検討の段階では、ラスタヌーラに加えてジュベイル、リヤドを候補として検討した。積出港との距離、副生水素や CO₂ の入手可能性等を総合的に勘案した結果、ラスタヌーラを対象とすることとした。

図表 3.6.5 プラントの立地候補地の比較

	ラスタヌーラ	ジュベイル	リヤド
積出港との距離	◎ ラスタヌーラ港至近	◎ ジュベイル港至近	× 陸路で東部州へ要運搬
CO ₂ 入手可能性	◎ 現地製油所等より入手	△ ラスタヌーラからパイプラインで要運搬	◎ 現地製油所より入手
副生水素入手可能性	◎ 現地製油所等より入手	△ ラスタヌーラからパイプラインで要運搬	◎ 現地製油所より入手

出所) コンソーシアム作成

3.6.2. メタノールの製造方法と規模・原料、グリーン仕様

本プラントで製造する最終製品であるメタノールの生産規模は、2.2 の検討結果を踏まえ、10 万 t/年とする。なお、4 章ではプラント規模拡大による経済性への影響の感度分析を目的とし、100 万 t/年とした場合の考察も加える。

本プラントで製造するメタノールの原料は、現地で調達する CO₂ と、グリーン電力を用いた水の電気分解により製造されるグリーン水素に加えて、現地で調達する副生水素を用いる。これは、100%グリーン水素とすると電気分解装置の投資額が大きくなってしまうこと、現地に入手可能な副生水素が存在することから、これを活用するものである。

本プラントで製造するメタノールの製造においては、原料として活用する（削減する）CO₂ と、副生水素の活用やメタノール製造等で使用する電力等による CO₂ 排出量とをバランスさせ、CO₂ 排出量を実質ゼロとする。これを、本 FS では「カーボンニュートラル・メタノール」と仮称する。

投資額を抑えながら「カーボンニュートラル・メタノール」を実現するため、グリーン水素と副生水素の割合は、1 : 1 とする。

メタノールの製造における適用技術は、3.2 で検討した通り、プラント設備では MRF-Z®型反応器を用い、触媒は ZrO₂ を含有する RITE 触媒を用いる想定とする。

本プラントにおいて製造されたメタノールは、パイプラインを通じてラスタヌーラ港に輸送し港内に設置するタンクに貯蔵する。同港を通じて、サウジアラビア国外に全量輸出するものと想定する。

3.6.3. 電力の調達方法

電力の調達は、3.5 における検討を踏まえ、下記の通りケース 1 とケース 2 の 2 通りを検討する。

ケース 1 は、ソーラー発電所を本プラントの一部として設置する想定である。OPEX を抑えられる反面、前述の通り、ソーラー発電所設置場所は、北西部の発電効率が高いことから、北西部に設置の上、ラスタヌーラ（東南部）までサウジ電力の配電会社 National Grid 社が有するグリッドを通じて託送する必要があること、発電所の規模は 240MW とサウジアラビア国内最大級に近い規模のソーラー発電所の設置が必要であること、広大な土地が必要であること等が課題となる。また、ソーラー発電所は昼間しか発電できないため、メタノール・プラントを 24 時間稼働させるには昼間に水素を多く製造し、タンクに貯めておく必要があることから、水電解設備に製造能力を大きくする必要があることも課題である。

ケース 2 は、サウジ電力等よりグリーン証書電力を購入することで必要量 (70MWh/h) を調達する想定である。この方法を用いると、ソーラー発電所の CAPEX を抑えられること、また、昼夜を問わず電力の供給を受けられることから、水素プラント、メタノール・プラントとも 24 時間稼働させられることから無駄がなくなるメリットがある反面、グリーン証書電力の制度がサウジアラビアに未だ存在しない点がリスクである。

これ以外に、ケース 1 の応用として、昼間に発電した電力を蓄電することも想定したが、蓄電池の投資コストが大きく、経済性へのインパクトが大きいことが予想されたため、検討ケースからは除外した。

図表 3.6.6 ケース1・2、その他のシナリオの比較

	ケース1	ケース2	ケース1応用
電力の調達方法	ソーラー発電所を自前でサウジアラビア国内北西部に設置	グリーン証書電力を購入	ソーラー発電所を自前で設置
夜間対応の方法	夜間に使用する水素を昼間に製造し、水素タンクにて貯蔵	24時間給電可能のため、特段の対応は不要	夜間に使用する水素製造に用いる電力を蓄電池にて貯蔵
課題	大規模なソーラー発電所と、水電解装置に余剰能力が必要となるため、必要面積とCAPEXが大きくなる	グリーン証書電力の制度導入が必要（現状未導入）	蓄電池のCAPEXが大きすぎるので、現実的でない
経済性検討対象	○	○	×

出所) コンソーシアム作成

3.6.4. CO₂の調達方法

排ガス・PSA テールガス由来のCO₂をラストヌーラ製油所周辺にある設備より調達する想定とした。現地で入手可能なCO₂の組成（純度等）は、メタノール製造に必要な条件を満たしていることを確認している。

調達したCO₂は本プラント内に設置する圧縮設備で必要な圧力に圧縮し、メタノールの原料として用いる想定である。あわせて、経済性改善のため、CO₂の処理費用を得る前提とした。

CO₂の必要量（調達量）は、日量435tである。

3.6.5. 水素の製造・調達と副生酸素の扱い

年10万tのメタノール製造には、28,000Nm³/hの水素が必要となる。

本検討では、この内半分（14,000Nm³/h）を現地石油・ガス生成設備から回収する副生水素（PSA テールガス由来等）で賄う想定とする。現地で調達可能な副生水素の組成（純度等）は、メタノール製造に必要な条件を満たしていることを確認している。

調達した副生水素は本プラント内に設置する圧縮設備で必要な圧力に圧縮し、メタノールの原料として用いる想定である。

水電解により製造する水素量は、残りの14,000Nm³/hとする。3.2の検討結果より、活用する技術はアルカリ形水電解装置を想定する。

水電解プラントの規模・能力については、電力の調達方法（上述ケース1・2）により異なる。

必要電力量をソーラー発電で賄うため、夜間に必要となる水素を昼間に製造するケース1では、必要な能力は242,750kW（水素製造能力48,550Nm³/h）となる。

一方、証書電力の24時間給電を前提とするケース2では70,000kW（水素製造能力14,000Nm³/h）となる。

水電解には純水が必要となる。水素 1Nm³ 当たりの必要純水量は約 0.00094m³ であることから、本水電解プラントで使用する純水量は年間約 10.5 万 m³ となる。これは、淡水化プラントを新規に整備するほどの規模ではないことから、淡水化公社等から上水を調達し、プラント内の水処理施設で純水にして使用する。

図表 3.6.7 水素製造の概要

	ケース 1	ケース 2
電力の調達方法	ソーラー発電所を自前で設置	グリーン証書電力を購入
プラント規模	242,750kW	70,000kW
水素製造能力	48,550Nm ³ /h	14,000Nm ³ /h
夜間対応の方法	夜間に使用する水素を昼間に製造し、水素タンクにて貯蔵	24 時間給電可能のため、特段の対応は不要
純水の調達方法	淡水化公社等から上水を調達し、プラント内の処理施設で純水にして使用	
適用技術	アルカリ形水電解	

出所) コンソーシアム作成

水電解のプロセスにおいては酸素が副生される（年間約 13.5 万 t）。本副生酸素は工業ガスとして、外部に販売するものと想定する。

4 CO₂ to Chemical 事業の実現可能性検討

4.1. 本パートの調査内容

本パートでは主に CO₂ to Chemical プラント全体としての経済性検討結果について記述する。

経済性検討では、まずプラント全体像から各設備の費用（Capex）および運営費（Opex）を算出し、それを基に見込み損益計算書の作成を行った。また、グリーンメタノールの売上単価や電力料金の変化、10万tの製造キャパシティが100万tになった場合に収支がどう変化するか等の感度分析を実施することにより、現実的にどのような条件下で経済性が成立するのかを模索した。

加えて、市場環境の変化等で将来的に本プラント運営に影響を与えるポジティブな要素・ネガティブな要素についても調査した（定量化し経済性検証の数値として反映できない部分については、定性的な情報のみにとどめている。）

またプラントの経済性検討に付随した資金調達プランに加え、生産されるグリーンメタノールが、どの程度 CO₂ 排出量を抑制できるのかの試算を行った結果についても記述する。

4.2. 経済性検討

4.2.1. CO₂ to Chemical プラント全体としての経済性検討 概要

前章の概略設計等に基づき、売上・コストと収益性等の算定を実施した。事業規模については、2.2 で検討したグリーンメタノールの市場規模の見通し等から、年間10万tのメタノール製造を想定した。経済性の検討に当たっては、事業規模・コスト・収入等の算出を実施した。

4.2.2. 経済性検討の手法：見込み損益計算書の作成

経済性検討は、3.6 で整理したプラント概略の内容に従い、見込み損益計算書のドラフト（想定される売上及び費用項目等の枠を入力したもの）を作成した上で、それぞれの項目に対し知見を有するコンソーシアム参画企業の協力のもと検証を進めた。

経済性検討の起算点はプラント建設のマイナス4年時点とし、プラント建設後20年後までを想定し試算した。

見込み損益計算書は大きく2つのケースに分けて試算を行った。ケース1は必要な電力を、ソーラー発電所を北西部に立ててグリッドを通じて東海岸の水素製造プラントまで託送した場合の試算であり、ケース2はソーラー発電所を建てずに、グリッドからグリーン証書電力を購入した場合の試算である（※各ケースについての実現可能性検証、課題については3.5.2節を参照されたい）。

見込み損益計算書の項目構成としては、売上、営業費用、営業外費用（支払利息）、税引き前当期純利益、租税公課（法人税）、税引き前当期純利益である。営業費用は大きく「プラント設備費」と「プラント運営費」に分かれる。各費用の詳細項目については4.2.4 および4.2.5に記載する。

4.2.3. 見込み損益計算書の売上項目

本検討における見込み損益計算書の売上項目の構成は、グリーンメタノール販売による収入のほか、CO₂ 処理による収入、発生する O₂ を販売した場合の収入を含む。

グリーンメタノール販売に拠る収入は、メタノール製造量（年間 10 万 t 想定）に販売単価を掛けたもので算出している。販売単価に関しては Vulcanol の 2020 年時点での価格である 600USD/t を参考にしている。（参照：図表 2.3.6 グリーンメタノールの価格推移）

CO₂処理による収入はグリーンメタノール製造に必要な年間のCO₂処理量(144,589t-CO₂/y)に対し、処理費用単価（30USD/t-CO₂）を乗じたものである。

発生する O₂ を販売した場合の収入は、グリーンメタノール製造で発生する年間の見込み酸素製造量（135,804t/y）に対し、酸素販売価格（60USD/t）を掛けたものである。

それぞれの売上項目の合計値はメタノール価格 600USD/t の場合、年間 72,485,914USD である。

4.2.4. プラント設備費の詳細（ケース 1 およびケース 2）

プラント設備の主な構成は、ソーラー発電設備、水電解装置（およびユーティリティ設備）、水素タンク、純水化装置、CO₂回収設備（PSA テールガス用コンプレッサーを含む）、メタノール製造設備（およびユーティリティ設備）、メタノール貯蔵タンクおよび輸送パイプラインである。

上記の費用項目を計上し、ケース 1 では合計約 547MUSD、ケース 2 では約 314MUSD を見込む。

図表 4.2.1 プラント設備の必要キャパシティと必要設備費（ケース 1、ケース 2）

主な設備・コンポーネント	ケース 1		ケース 2	
	キャパシティ	設備費 (Capex)	キャパシティ	設備費 (Capex)
太陽光発電設備	243 MW		-	
水電解装置	242.7MW		70MW	
水素タンク	206,000Nm ³		-	
ユーティリティ設備（水電解装置）	Water cooling system, N2 generation		Water cooling system, N2 generation	
純水化装置	315.6m ³ /day		315.6m ³ /day	
CO ₂ 回収設備 （PSAテールガス用コンプレッサー含む）	282 t-CO ₂ /day Chemical Absorption		282 t-CO ₂ /day Chemical Absorption	
メタノール製造設備	100,000 MTPY		100,000 MTPY	
ユーティリティ設備（メタノール製造設備）	Boiler for steam, Water cooling system, N2 generation, etc.		Boiler for steam, Water cooling system, N2 generation, etc.	
メタノール貯蔵タンクおよび輸送用パイプライン	For Methanol production capacity		For Methanol production capacity	
合計	Total	Approx. 547 M USD	Total	Approx. 314 M USD

出所)見込み損益計算書よりコンソーシアム作成

4.2.5. プラント運営費の詳細（ケース 1 およびケース 2）

プラント運営費の主な構成は、土地代、水処理セクション、ソーラー発電セクション、CO₂回収セクション、水電解セクション、メタノール製造セクション、メタノール輸送セクション、販売費・一般管理費である。

年間のプラント運営費全体の合計値としては、ケース1が約38百万USDを見込み、ケース2では約44百万USDを見込む（※触媒交換が必要な年度の運営費合計値）

図表 4.2.2 プラント運営費項目 ケース1およびケース2

プラント運営費 項目	ケース1	ケース2	単位
	年額	年額	
土地代			USD
工業用地の土地単価			USD/m2/y
土地の広さ			m2
純水化セクション			USD
太陽光発電セクション			USD
CO2回収セクション			USD
CO2 (燃料として)			USD
メンテナンス資材費			USD
水電解装置セクション			USD
水素タンク			USD
水道代			USD
証書電気代 (USD 0.03/kWhと想定)			USD
人件費 (運営管理)			USD
メンテナンス資材費 (定期点検の人件費含む)			USD
メタノール製造セクション			USD
触媒・薬品コスト (耐用期間3年)			USD
ユーティリティ費 (Fuel)			USD
電気代			USD
水道代			USD
人件費 (\$40/h)			USD
メンテナンス資材費			USD
メタノール輸送セクション			USD
圧送電気代			USD
メンテナンス資材費			USD
積み出し港使用量 (プラント建設地決定後算定)	TBD	TBD	USD
販売費・一般管理費	TBD	TBD	USD
運営委託費 (人件費など)	TBD	TBD	USD
広告宣伝費 (展示会参加など)	TBD	TBD	USD
合計 (※触媒交換が必要な年度の運営費合計値)	約 -38 Mil	約 -44 Mil	USD

出所) 見込み損益計算書よりコンソーシアム作成

4.2.6. 経済性の検討

以上の前提を踏まえ、IRR 分析による経済性の検討を行った。ここでは、経済性が成立する条件をIRR10%以上とし、これを実現しうるメタノールの価格水準を求めた。

本分析の結果、ケース1の場合はメタノールの販売価格 850USD/t、ケース2の場合は 640USD/t でIRRが10%以上となることが判明した。これらの水準は、2.2節でグリーンメタノールの販売価格の目

安とした 600USD/t を上回る。特に、ケース 1 の 850USD/t という水準は、現在の市況との乖離が大きく、現実的でない。一方で、ケース 2 の 640USD/t については、現在の市況をやや上回る程度となったことから、依然厳しいながらも希望を残す結果となった。

図表 4.2.3 経済性が成立しうるケース別条件（10 万 t ケース）

項目	ケース 1	ケース 2
メタノール販売価格 (20年固定)	USD 850 /MT	USD 640 /MT
CO ₂ 処理価格	USD 30/t-CO ₂	USD 30/t-CO ₂
O ₂ 販売価格	USD 60/t-O ₂	USD 60/t-O ₂
エクイティIRR (プロジェクト-IRR)	10.0% (7.43%)	10.2% (7.5%)

出所) 見込み損益計算書よりコンソーシアム作成

4.2.7. 感度分析

感度分析として、メタノールの製造規模を 10 万 t から 100 万 t にスケールアップした場合、スケールメリットによりどの程度経済性が向上するかについての分析を行った。

スケールメリットの具体的な中身は下記の通りである。

- 設備費
 - 単純に 100 万 t ケースで設備費を 10 倍にするのではなく、設備の効率化により 10 万 t 設備費×10 (100 万 t)^{0.7} (0.7 乗則) の数値を下記費用項目に適応した。
 - ◇ 純水化装置
 - ◇ CO₂ 回収設備
 - ◇ 水素タンク
 - ◇ メタノール輸送用のパイプライン
 - ◇ 水電解装置のユーティリティ設備
- 運営費
 - 下記費用項目が、当初 10 万 t のケースでは設備費の 3% で計上していたものを、100 万 t のケースではスケールメリットにより 2% に縮小されると見込んだ。
 - ◇ メンテナンス資材費 (水電解セクション)
 - ◇ 水素タンク
 - ◇ メンテナンス資材費 (メタノール輸送セクション)

上記検討の結果、製造規模 100 万 t のケースにおいては、スケールメリットが働くことによりケース 1 では売上価格が 460USD/t の場合、また、ケース 2 では、同 295USD/t で IRR10%を達成できるとの分析結果となり、いずれも現在のグリーンメタノールの市況を下回る結果となった。

図表 4.2.4 経済性が成立しうるケース別条件 (100 万 t ケース)

項目	ケース1	ケース2
メタノール販売価格 (20年固定)	USD 460 /MT	USD 295 /MT
CO ₂ 処理価格	USD 30/t-CO ₂	USD 30/t-CO ₂
O ₂ 販売価格	USD 60/t-O ₂	USD 60/t-O ₂
エクイティIRR (プロジェクト-IRR)	10.2% (7.65%)	10.4% (7.68%)

出所) 見込み損益計算書よりコンソーシアム作成

4.2.8. 経済性検討の課題

感度分析を含む経済性検討の結果、一定条件の下であれば経済性が成り立ちうるものが判明したものの、実現に向けた課題も存在している。

本検討の基本ケースとなる製造規模 10 万 t のケースでは、ケース 2 の証書電力を購入する場合の方が経済性の成り立つ可能性が高いものの、依然として IRR10%以上を達成するにはメタノールの売上価格が 640USD/t に達する必要がある。参考となるグリーンメタノールの販売単価に関しては Volcanol の 2020 年時点での価格である 600USD/t であるが、それと比較すると依然上回る。

また感度分析として検討した、製造規模 100 万 t のケースについては、ケース 1、ケース 2 においても販売価格 600USD/t で IRR10%以上を達成することが判明しているものの、大量の副生水素が必要 (140,000 Nm³/h) であること、グリーンメタノールの需要量にリスクがあること (生産した量に対し売り先が十分にあるのか)、各種主要設備が想定通りにスケールメリットが発揮された価格帯で製造・建設実現できるか、という点が課題に挙がる。

さらに、ケース 1 については、100 万 t ケースでの水電解装置のキャパシティが 2.4GW となり、現在の実績を踏まえると非現実的な規模感である。また、水電解装置だけではなく、ソーラー発電設備も含めると膨大な設備費がかかる見込みである。加えてこれらの設備の規模に比例して CO₂ 供給源のとなる施設の近くに巨大な用地を確保しなくてはならない点も、実現を阻む要因である。

また、ケース 2 では、100 万 t のメタノール製造に必要な大量のグリーン証書電力を確保できるかどうかは課題となる。

4.2.9. 将来経済性検証に影響を与えるポジティブな要素

経済性検討は現時点での市場環境や技術をベースとした試算であり、プラント建設期間 4 年+運用期間 20 年間で将来的に状況が変化していく可能性が高い。

ポジティブな要素としてケース 1、ケース 2 と共通して考えられるのは、①技術の改善とコモディティ化による水電解装置設備コストの低減、②プラント運営の最適化による人件費の削減、③プラント運営の最適化による水電解装置およびメタノール製造装置のメンテナンス資材費の削減、④CO₂ 回収設備から PSA テールガス設備の代替によるコスト削減、⑤メタノール製造設備が拡大した場合のスケールメリットの 5 つである。

これらに加え、ケース 1 については①オーバーホール期間中に電力や水素を販売することによる売上増、②土地を無料で借用できた場合のコスト削減の 2 つがポジティブな要素として加わる。

ケース 2 については、IPP からの安価なグリーン電力供給によるコスト削減の可能性が、ポジティブな要素として加わる。

図表 4.2.5 想定されるポジティブな影響および根拠と見積り

ケース別	想定されるポジティブな影響	根拠と見積り
共通	①技術の改善とコモディティ化による水電解装置設備コストの低減	水電解装置設備が2030年には現在の価格の1/5になると予想されている。
	②プラント運営の最適化による人件費の削減	プラント運営が将来的に一部自動化されれば、人件費のコストダウンに貢献する。
	③プラント運営の最適化による水電解装置およびメタノール製造装置のメンテナンス資材費の削減	現在は水電解装置およびメタノール製造装置の各メンテナンス資材費は設備費の3%として試算しているが、将来的にプラント運営が最適化され、2%として試算できた場合、以下の通りである。 メタノール製造設備：（非公表） 水電解装置（非公表）
	④CO ₂ 回収設備からPSAテールガス設備の代替によるコスト削減	将来的にCO ₂ 回収設備から、PSAテールガス設備へ代替を行った場合、コスト削減の余地がある。
	⑤メタノール製造設備が拡大した場合のスケールメリット	メタノール製造設備の規模がより大きくなれば、プラント建設コストにおいてスケールメリットが働く可能性がある。
ケース 1	①オーバーホール期間中に電力や水素を販売することに抛る収益	オーバーホール期間（30日間）の間に電力や水素を販売する場合の予想収益は下記の通り 電気：（非公表） H ₂ ：（非公表）
	②土地を無料で借用できた場合のコスト削減	年間5.04MUSDのコストダウンが期待できる。
ケース 2	①IPPからの安価なグリーン電力供給によるコスト削減	グリーン電力価格の低下は、コスト削減効果が大きい。

出所) コンソーシアム作成

4.2.10. 今後経済性検証に影響を与えるネガティブな要素

経済性検証に今後影響与えるネガティブな要素としては、ケース 1 とケース 2 に共通して①変動金利から固定金利への変換による支払い利息増（※ファイナンスの検討に関しては後述）、②一部の費用項目が事業ローンの範囲外となるリスク、③メタノール価格・需要量の変動によるコスト増、④輸出・輸送施設の費用未計上、⑤販売費・一般管理費コストの未計上等が挙げられる。

図表 4.2.6 想定されるネガティブな影響

ケース別	ネガティブな影響	詳細
共通	①変動金利から固定金利への変換による利息増	現在の推定では事業ローンの変動金利を固定金利の数値として試算している。 (ファイナンスの検討に関しては後述)
	②一部の費用項目が事業ローンの範囲外となるリスク	いくつかの費用項目に関して、事業ローンがカバーしきれない部分が発生するリスクがある。
	③メタノール価格・需要量の変動によるコスト増	メタノール販売価格は現在固定で試算されている
	④輸出・輸送施設の費用の未計上	プラント運営費における「積み出し港使用料」について現在未計上であり、Ras tanura港エリアの輸送施設の手配に追加費用がかかる可能性がある
	⑤販売費・一般管理費の未計上	運営委託費や広告・宣伝費(展示会参加など)を含んだ販売費・一般管理費については現段階では未計上である。

出所) コンソーシアム作成

4.3. ファイナンスの検討

4.3.1. 資金調達的前提条件

上記の経済性分析にあたり、以下のファイナンス条件を想定した。概要は以下のとおりである。

- ✓ 負債比率については、一般的な7割(自己資本3割)を想定した。
- ✓ ECA(輸出信用機関)と市中銀行の比率は、JBICの基準に基づき6対4とした。
- ✓ ECAの金利はLIBOR+0.59%(JBICウェブサイトより引用)にUS LIBORの0.2%(NBDウェブサイトより引用)を加算したもので、合計の金利は0.79%を適用した。
- ✓ 市中銀行の金利はSAIBOR+2%を想定(金融機関ヒアリングにより)、SAR SAIBOR(NBDウェブサイトより引用)は1%を想定し、適用金利を3%と想定した。
- ✓ なお、USD LIBORとSAR SAIBORはどちらも6か月の金利を使用している。

図表 4.3.1 資金調達的前提条件と負債総額

自己資本比率	負債 70%/自己資本 30%
ECA / 市中銀行比率	ECA 60% / 市中銀行 40%
ECAの標準金利	US Libor + 0.59% (US LIBOR(6か月): 0.2%, 合計0.79%)
市中銀行の金利	SAIBOR + 2% (SAIBOR(6か月): 1%, 合計 3%)
負債総額	ケース1: 約383MUSD ケース2: 約220MUSD ※負債総額は設備投資費の7割と想定。

出所) コンソーシアム作成

4.3.2. 負債総額

先述の前提条件を適用すると、ケース1の場合、事業ローンは計約 383MUSD となる。
ケース2の場合、同約 220MUSD となる。

4.3.3. 備考

資金調達の前提条件における金利は変動金利 (LIBOR/SAIBOR) の数値を固定金利として置いているため、固定金利で再計算する必要がある。

また、貸し手 (銀行) との交渉によっては設備すべてを事業ローンでカバーできない可能性がある。

4.4. 本事業実施によるCO₂の排出抑制量の試算

本節では、本事業で製造するCO₂排出量が実質ゼロとなるメタノール（以下、「カーボンニュートラル・メタノール」と仮称）と通常のメタノールの排出量とを比較することで、本事業実施によるCO₂排出抑制量を試算する。前提とするメタノール製造量は、概念設計同様、10万t/年とする。

4.4.1. 本事業実施によるCO₂排出量

本プラントで製造するメタノールの製造においては、原料として活用する（削減する）CO₂と、副生水素の活用やメタノール製造等で使用する電力等によるCO₂排出量とをバランスさせ、CO₂排出量を実質ゼロ以下とする想定である。

本事業によるCO₂の活用量と排出量を試算したところ、下表のとおり、本事業で製造される「カーボンニュートラル・メタノール」は、CO₂活用量が排出量をやや上回った。CO₂活用量は144,589tであるのに対し、排出量は計142,941tとなり、合計で1,648tのマイナスとなる見通しである。

図表 4.4.1 本事業実施によるCO₂排出量（年間）

大項目	項目	記号	数値	単位	出所	
CO ₂ 活用量（削減量）	メタノール製造量	a	100,000	t/y	前提条件	
	メタノール生産に使用するCO ₂ 原単位	b	1.446	t-CO ₂ /t-Methanol	コンソーシアム試算	
	CO ₂ 活用量	c=a*b	144,589	t/y-CO ₂		
CO ₂ 排出量	副生水素	副生水素使用量	d	9,935	t/y-H ₂	コンソーシアム試算
		化石燃料改質水素の排出量原単位	e	9.56	t-CO ₂ /t-H ₂	コンソーシアム試算
		副生水素使用によるCO ₂ 排出量	f=d*e	94,993	t/y-CO ₂	
	プラント運転（電力）	メタノールプラントの電力使用量	g	51,148,800	kWh/y	コンソーシアム試算
		ガス発電原単位	h	0.000415	t-CO ₂ /kWh	環境省
		発電によるCO ₂ 排出量	i=g*h	21,227	t/y-CO ₂	
	プラント運転（ボイラー）	メタノールプラントのボイラーで消費する燃料ガス量	j	503,496	mmbtu/y	コンソーシアム試算
		天然ガス燃焼によるCO ₂ 排出量原単位	k	0.05307	t-CO ₂ /MMBTU	EIA
		ボイラーによるCO ₂ 排出量	l=j*k	26,721	t/y-CO ₂	
		CO ₂ 総排出量	m=f+i+l	142,941	t/y-CO ₂	
	CO ₂ ネット排出量					
		CO ₂ ネット排出量（総排出量－活用量）	n=m-c	-1,648	t/y-CO ₂	

出所) コンソーシアム作成

4.4.2. 通常のメタノールのCO₂排出量

IPCCガイドラインのメタノール排出係数デフォルト値として0.67と設定されていることから、本検討においても0.67を使用する。通常のメタノールを年間10万t製造した場合の排出量は、

$$0.67 \times 10 \text{ 万 t} = 6.7 \text{ 万 t}$$

である。

4.4.3. 本事業実施による CO₂ 排出抑制量

本事業実施による CO₂ 排出抑制量は、「カーボンニュートラル・メタノール」製造による CO₂ 活用量と、通常メタノールの CO₂ 排出量との合計により、年間 68,648t と試算される。

CO₂ 排出抑制量の計算

「カーボンニュートラル・メタノール」10万t製造による CO₂ 活用量 = 1,648t …… a

通常メタノール10万t製造による CO₂ 排出量 = 67,000t …… b

「カーボンニュートラル・メタノール」製造により、排出が抑制（活用）される CO₂ 量と、通常の方法でメタノールを製造した場合に排出される CO₂ 量との和を本事業実施による CO₂ 排出抑制量と捉えると、

本事業実施による CO₂ 排出抑制量 : $a + b = 1,648t + 67,000t = \underline{68,648t}$

5 サウジ側カウンターパートとの週例ワークショップならびに報告会の実施

本調査を進めるにあたり、サウジ側カウンターパートと、2021年1月から6月にかけて、週例ワークショップを実施し、情報の交換、検討経過の共有と協議、検討結果の報告等を実施した。以下にその概要を整理する。

サウジ側カウンターパートとのワークショップ各回の概要

回	日時	Agenda
1	2021年 1月22日	<ul style="list-style-type: none"> ・サウジ側 Working level 担当者 Assign 依頼、今後の協議スケジュール検討 ・サウジ側から提供され得る CO₂ 組成提供の依頼
2	1月27日	<ul style="list-style-type: none"> ・サウジ側提供情報の確認(CO₂ 組成)
3	2月3日	<ul style="list-style-type: none"> ・CO₂ 組成、Design basis 協議 ・プラントの立地候補地の協議
4	2月10日	<ul style="list-style-type: none"> ・ラストヌーラで入手可能な副生水素等の確認
5	2月16日	<ul style="list-style-type: none"> ・入手可能な水素利活用協議 ・CO₂ 排出量計算に関するサウジアラビア国内制度・計算基準有無の確認
6	2月25日	<ul style="list-style-type: none"> ・CO₂ 回収及びメタノール・プラント立地候補地に関する意見交換
7	3月2日	<ul style="list-style-type: none"> ・メタノール・プラントの規模、立地候補地の協議
8	3月9日	<ul style="list-style-type: none"> ・メタノール・プラント立地候補地の継続協議
9	3月17日	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の立地候補地のコスト比較結果の共有、FS 上のプラント立地想定協議 ・水電解設備用の工業用水の調達協議
10	3月24日	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の立地候補地の条件比較 ・水電解設備用の電力をソーラー発電設備からではなく、グリーン証書電力で賄う事の可否、制度化見通しの協議
11	4月1日	<ul style="list-style-type: none"> ・FS 検討上での主要技術紹介 (メタノール・プラント、触媒、電解設備) ・CAPEX 試算結果の共有・協議
12	4月8日	<ul style="list-style-type: none"> ・ソーラー発電を活用した場合、グリーン証書電力を活用した場合の CAPEX 試算結果共有・協議
13	4月13日	<ul style="list-style-type: none"> ・電解設備コストの見直し、副生水素活用比率増加による CAPEX への影響の共有・協議
14	4月21日	<ul style="list-style-type: none"> ・電解設備単価低減・副生水素比率 50%にした場合の経済性試算結果の共有・協議。炭素税の影響を追加 ・今後の検討方針についての協議
15	4月27日	<ul style="list-style-type: none"> ・OPEX 試算結果の共有、協議
16	5月6日	<ul style="list-style-type: none"> ・OPEX 最適化検討内容の共有・協議
17	5月19日	<ul style="list-style-type: none"> ・プロジェクトファイナンスによる収益性向上内容の検証・共有 ・検討しうる触媒コストの削減見込みの検討・共有
18	6月3日	<ul style="list-style-type: none"> ・メタノール・プラント規模 10 万 t/年の前提の下、ソーラー電力活用、証書電力活用の 2 ケースにおける経済性検証の結果共有・協議

19	6月10日	・メタノール・プラント規模 100 万 t/年の場合の経済性検討結果の共有・協議
20	6月24日	(報告会) ・サウジ側カウンターパート要請の感応度分析結果反映後の経済性検証結果の共有・協議

ワークショップ最終回を報告会とし、下記内容を報告・協議した。

- ✓ 前回のサウジ側カウンターパートの要請に基づき、メタノール・プラント製造規模 100 万 t/年の前提下で証書電力活用ケースでの証書電力代、電解設備の設備単価、触媒コストの 3 点を感応度検証した結果、証書電力のケースに於いては証書電力代が一定価格を下回れば通常のメタノールの市場価格と同等金額までの価格低減が可能な見込みである事を確認。他方、触媒コスト・電解設備単価に関しては証書電力活用ケースに於いては大きな影響が発生しないことも検証された。
- ✓ これら結果に基づき、本事業検証としては完了とするも、サウジ側カウンターパートに対しては引き続き改善余地が考えられる費用項目、また実現に向けての継続協議を要請した。
- ✓ サウジ側カウンターパートよりは、これまでの検証に関する謝辞と共に、CO₂ 処理におけるメタノール製造という形での対応に前向きな反応とコメントを得た。

6 今後の方針の検討

以上の検討結果を受けて、今後のスケジュールと実施体制につき検討した。

6.1. 今後のスケジュール

今後のスケジュールについては、継続検討の結果次第ではあるが、概ね以下の通り想定する。なお、本スケジュールの実現のためにはこれまでの検討で上がった課題の解決が条件となる。

図表 6.1.1 今後のスケジュール

実施時期	実施内容
2021 年度内	サウジ側カウンターパートとの継続検討 (需要側の側面も加え、継続協議)
2022 年度	(サウジ側カウンターパートとの継続協議の結果、実証プラント FS 実施に合意が得られた場合) 実証プラント FS、設計
2023-24 年度	実証プラント建設
2025-26 年度	実証プラント運営、検証
2027 年度～	本格展開

出所) コンソーシアム作成

(上記スケジュール実現に向けて解決すべき課題)

- ✓ 当該メタノール需要の確保と価格水準について、見通しが立つこと
- ✓ (ケース1の場合) グリッドの送電能力が十分確保されること、加えて、電力託送の制度も併せて確立されること。
- ✓ (ケース2の場合) グリーン証書電力の制度の導入、安価な電力価格の実現
- ✓ 水素製造コストの低減(現状、本検討で想定している電解設備単価水準に到達するのは2030年と予想されており、それ以前に下げる方策の検討が必要)
- ✓ 二酸化炭素、副生水素が必要量確保できること
- ✓ (メタノール製造プラント規模が100万t/年とした場合) 各種主要設備が想定通りにスケールメリットが発揮された価格帯で製造・建設実現できること、必要十分なファイナンス組成及び本検討で適用した水準での借入規模と金利が実現されること。

6.2. 事業実施体制の検討

事業実施体制については、本格展開のタイミングで市況や技術動向を見ながら改めて検討することとなるが、現時点では以下の通り想定している。

- ✓ 事業実施・運営(投資)主体: 三井物産(+可能性として、サウジ資本)
- ✓ メタノール・プラント、ユーティリティ等のEPC: 本邦エンジニアリング会社

- ✓ 二酸化炭素、副生水素供給：現地製油所等
- ✓ 触媒供給：本邦化学メーカー
- ✓ 水素プラント：国内外のメーカーを対象に検討
- ✓ ソーラープラントの建設・運営（ケース1の場合）：サウジ国内の大手ソーラー発電所開発事業者を軸に検討（価格競争力の側面から）
- ✓ ファイナンス：3割自己資本（上記事業実施主体による出資）、7割融資を想定。融資部分は、JBIC等のECA、日本・サウジ両国の市中銀行を視野に検討

なお、継続検討の結果、実証プラントを建設する場合の体制については、スコープや条件、予算等を踏まえて具体的に検討することとなる。また、実証段階のファイナンスについても、その内容や座組等に従い、実施の段階で活用可能な資金調達手段を検討することとする。

(以上)

(二次利用未承諾リスト)

報告書の題名 サウジアラビア王国・CO₂
to Chemical 生成事業実施可能性調査事業報告書

委託事業名 令和2年度質の高いエネルギーインフラの海外展開に向けた事業実施可能性調査事業委託費

受注事業者名
三井物産株式会社、株式会社野村総合研究所

頁	図表番号	タイトル
4	図表 2.2.1	世界のメタノール市場規模
4	図表 2.2.2	世界のメタノールの需給
5	図表 2.2.3	国別生産量
5	図表 2.2.4	地域別需要量
6	図表 2.2.5	メタノール価格の推移
6	図表 2.2.6	企業別メタノール生産量
7	図表 2.2.7	大手メタノール企業の国籍と生産量
7	図表 2.2.8	サウジアラビアのメタノール市場規模
8	図表 2.2.9	サウジアラビアのメタノールの需給
8	図表 2.2.10	メタノール需給に影響する要素
9	図表 2.2.11	グリーンメタノールの種類
10	図表 2.2.12	世界のグリーンメタノール市場規模
10	図表 2.2.13	世界のグリーンメタノール需要
11	図表 2.2.14	地域別グリーンメタノール需要
11	図表 2.2.15	アジアの国別グリーンメタノール需要
24	図表 3.2.1	水素 1Nm ³ あたりの温室効果ガス排出量
25	図表 3.2.2	CertifHy Green H ₂ の定義
27	図表 3.2.3	入力電力の変動への耐性比較
28	図表 3.2.4	水素製造技術の比較
29	図表 3.2.5	水素製造技術の評価
30	図表 3.2.6	水素製造プラントの系統
32	-	3.3.1. メタノールの製造方法 本文
33	図表 3.3.1	典型的なメタノール合成フロー図 (東洋エンジニアリング法)
39	図表 3.3.7	CO ₂ のエネルギー準位と触媒反応
40	図表 3.3.8	メタノール合成の反応熱
40	図表 3.3.9	CO, CO ₂ からのメタノール合成反応の平衡転化率
41	図表 3.3.10	銅系触媒のメタノール合成活性
42	図表 3.3.11	銅系以外の触媒のメタノール合成活性
42	図表 3.3.12	Cu/ZnO系触媒上でのメタノール合成反応
43	図表 3.3.13	RITE開発触媒 (Cu/ZnO/ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ /SiO ₂) の各成分の役割
43	図表 3.3.14	RITE評価装置の反応諸元
44	図表 3.3.15	RITEにおけるメタノール50Kg/日の固定床装置のフロー図
44	図表 3.3.16	RITE開発触媒の反応評価結果
45	図表 3.3.17	RITEベンチ試験の選択率 (単位 mol%)
45	図表 3.3.18	RITE触媒と市販触媒の比較
46	図表 3.3.19	三井化学 大阪工場におけるCO ₂ からメタノール製造の実証設備
46	図表 3.3.20	三井化学における工程図
49	図表 3.3.21	パイロット装置による実証試験結果