

令和2年度燃料安定供給対策に関する調査  
(製油所の競争力に係る技術動向に関する調査)  
調査報告書

令和3年3月



一般財団法人石油エネルギー技術センター  
Japan Petroleum Energy Center (JPEC)

## 目 次

1. 事業名	.....	1
2. 事業目的	.....	1
3. 事業内容および実施方法	.....	1～3
4. 実施結果	.....	3
5. 実施期間	.....	3
6. 添付資料	.....	4

## 調査報告書

### 1. 事業名

令和2年度燃料安定供給対策に関する調査事業（製油所の競争力に係る技術動向に関する調査）

### 2. 事業目的

日本の石油の安定供給を将来にわたり確保していくためには、国内に製油所等の供給インフラを維持していく必要がある。供給を担う民間企業が国内の石油需要減少等の厳しい経営環境にある中、国内供給インフラを経済合理的かつ効率的に維持していくためには、国内外の市場で競合する他国企業・製品との比較において、日本企業・製品の国際競争力を高め、経営基盤を強化していかなければならない。

係る中、近年、特に国内企業の国際競争力強化に大きな影響を与える可能性のある課題として、緊迫する中東情勢により一層高まっている原油調達の中東依存リスク、需要減少等の厳しい経営環境においても強く求められる気候変動面での社会的要請に係る経営リスクなどがあげられる。

本調査は、上記の認識を踏まえ、諸外国における原油調達の現状や精製処理技術、バイオリファイナリー導入に係る技術や事業戦略等に係る調査・分析を行い、国内石油産業の国際競争力向上のための政策立案に役立てることを目的とする。また、調査結果について、国民、国内企業、団体、研究機関に対して情報を発信することで、石油産業の国際競争力強化の促進を図る。

### 3. 事業内容

#### (1) 日本の原油の多角化に向けた諸外国の原油輸入先及び油種構成等に関する調査

国内石油産業の原油輸入は、その大半を中東諸国に依存している。こうした傾向は、これまでの歴史的経緯や経済性の観点等を背景としているが、エネルギー安全保障の面からはリスクも存在する。一方で、世界的には原油輸入国・地域を多角化してきている国もみられ、それが国際競争力強化につながっている可能性がある。

このような背景事情のもと、以下の調査を実施した。

○諸外国（中、韓、印、米、仏、蘭、伊）における原油輸入国の推移及び経年変化の背景（需要構造の変化や政策的な取組など）、各国の主要な製油所の設備構成や製品得率の変化について、調査を実施した。

○上記調査を実施の上、輸入原油の変化に対応した製油所装置（新設や改造など）、精製技術（原油のブレンド、温度・圧力の管理、触媒など）等について分析を実施した。

○これらの調査を踏まえ、原油輸入先の多角化が石油企業（又は製油所）の国際競争

力に与える影響について、定量的に分析した。

上記調査の結果を踏まえ、日本において原油輸入国・地域の多角化を図るために必要な精製装置（改造技術を含む）・精製技術について、国内導入にあたっての課題等を整理するなど、国内への適用可能性を検討した。

#### （2）バイオリファイナリーの導入及び事業戦略等に関する調査

既存の製油所をバイオ原料等の非化石資源を原料とするバイオリファイナリーへの転換に関する技術等について、以下の調査を実施し、バイオリファイナリーの国際競争力について検討した。

○バイオリファイナリーへの転換に必要な設備の改造に係る技術、原料（廃油、獣脂等）別の処理技術等について調査を実施した。

○既にバイオリファイナリーを導入している企業（ENI、NESTE等）について、バイオリファイナリーが成立している社会的要因（原料調達方法や生産した燃料の評価など）を踏まえた上で、バイオリファイナリーの位置付けを含めた事業戦略等を調査し、他企業との戦略の違いや業績に与えている影響、ESG（Environment, Social, Governance）のような視点ではどのように評価されているかなど、比較を行った。

○これらの調査を踏まえ、国内製油所への導入の可能性について調査・分析を実施する。具体的には、原料調達・精製・販売の3つの段階における事業環境等の違いを考慮し、コスト評価及び課題分析を行った。

#### （3）国際競争力強化に資する技術・事業動向調査

日本企業の国際競争力の強化のため、国際競争力強化につながるが見込まれる最新の技術や事業等の調査・分析を実施した。

具体的には、ガソリン需要の減少に伴う余剰基材のケミカル原料化に係る最適化・効率化技術や、原油から最大限ケミカル原料を得る「Crude Oil to Chemicals (COTC)」プロセスの我が国導入に係る技術課題等の調査・分析、AI/IoT技術等の最新テクノロジーを用いたサプライチェーン全体（原油調達、精製プロセス、石油製品輸送など）の最適化・効率化や、安全性の確保（稼働信頼性の向上）に関する調査等について、海外企業における研究開発や導入実績等を踏まえつつ実施した。

#### （4）海外主要国の競争力に関する石油精製技術動向等調査

上記の他、海外主要国（欧州（独、仏、伊）、米国、アジア（中、韓、印）等）における精製技術及び石油精製・石油化学設備に係る投資状況等の最新の動向について、継続的に調査した。

#### (5) 石油精製に係る競争力技術動向に関する調査の情報発信

日本と米国、中国等における石油精製業関連の企業、団体又は政府が出席する合同会議を開催（海外及び国内で1回以上）する予定であったが、今般の新型コロナウイルスの感染防止の観点から、現地海外長期出張員事務所を活用した電話によるヒアリングや資料等による情報収集・意見交換を行った。

また、上記の情報については、資源エネルギー庁が別途実施する「令和2年度燃料安定供給対策に関する調査事業（石油精製に係る環境規制等に関する調査）」（以下、「環境調査事業」という。）受託者側とも共有し、情報収集や意見交換を行った。

本事業において収集を行った製油所の競争力に係る技術動向等に関する情報を、国民、国内企業、団体、研究機関に対して情報発信するため、資源エネルギー庁が別途実施する環境調査事業受託者へ情報収集した結果を報告し、当該事業において定期的に電子メールやインターネットで情報を発信させた。

#### (6) 調査方法

事業内容の調査に当たっては、主として以下の方法により実施した。

##### ① 海外現地調査

- ・欧州、米国、中国への調査員の長期派遣などにより、現地企業、団体、研究機関、政府への電話によるヒアリング及びWebセミナーへの参加を実施し、詳細な情報の収集・緻密な分析調査を実施した。

##### ② インターネット・文献等による調査

- ・海外主要国における石油産業に係る環境規制の実態等について、各種報道、文献、報告書、プレスリリース、白書などの資料から調査を実施した。

##### ③ その他

- ・調査の実施に当たって、担当者に対し、原則1か月に1回以上面会して、調査内容の進捗報告及び意見交換等を行った。
- ・担当者から随時行われる質問事項への対応を迅速に行うとともに、仕様書の調査項目に関連するもので、取りまとめを行う上で補完的に調査を実施すべき事項については、調査を実施した。
- ・既存の調査がある場合、そのデータを活用（整理して使用）することを前提としつつ、必要に応じて現地等で同様の調査を行った。

#### 4. 実施結果

別添調査報告書のとおり

#### 5. 実施期間

令和2年4月1日から令和3年3月31日まで

6. 添付資料

添付1：日本の原油の多角化に向けた諸外国の原油輸入先及び油種構成等に関する調査

添付2：バイオリファイナリーの導入及び事業戦略等に関する調査

添付3：国際競争力強化に資する技術・事業動向調査

(サプライチェーン(原料・製品の供給)最適化・効率化に資する

最新デジタル技術の調査)

添付4：国際競争力強化に資する技術・事業動向調査

(安全性の確保(稼働信頼性の向上)に関する調査)

添付5：石油精製に係る競争力技術動向に関する調査の情報発信

以上

# 日本の原油の多角化に向けた諸外国の原油 輸入先及び油種構成等に関する調査

令和2年度燃料安定供給対策に関する調査事業  
(製油所の競争力に係る技術動向に関する調査)

令和3年3月



一般財団法人石油エネルギー技術センター

Japan Petroleum Energy Center (JPEC)

## はじめに

本報告書は、一般財団法人石油エネルギー技術センターが、経済産業省資源エネルギー庁から委託を受けて、令和2年度燃料安定供給対策に関する調査事業（製油所の競争力に係る技術動向に関する調査）の一部として実施した、「日本の原油の多角化に向けた諸外国の原油輸入先及び油種構成等に関する調査」についてとりまとめたものである。

日本の石油の安定供給を将来にわたり確保していくためには、国内に製油所等の供給インフラを維持していく必要がある。供給を担う民間企業が国内の石油需要減少等の厳しい経営環境にある中、国内供給インフラを経済合理的かつ効率的に維持していくためには、国内外の市場で競合する他国企業・製品との比較において、日本企業・製品の国際競争力を高め、経営基盤を強化していかなければならない。

係る中、近年、特に国内企業の国際競争力強化に大きな影響を与える可能性のある課題として、緊迫する中東情勢により一層高まっている原油調達の中東依存リスク、需要減少等の厳しい経営環境においても強く求められる気候変動面での社会的要請に係る経営リスクなどがあげられる。

国内石油産業の原油輸入は、その大半を中東諸国に依存している。こうした傾向は、これまでの歴史的経緯や経済性の観点等を背景としているが、エネルギー安全保障の面からはリスクも存在する。一方で、世界的には原油輸入国・地域を多角化してきている国もみられ、それが国際競争力強化につながっている可能性がある。このような背景事情のもと、調査を実施した。

調査報告書をまとめるにあたっては、経済産業省や、石油元売会社等の有識者からなる「情報収集調査研究会」での議論等も踏まえながらまとめた。本報告書の取りまとめにあたり、様々な形でご協力いただいた関係者各位に感謝申し上げる次第である。

本調査が、我が国石油産業の今後の経営基盤強化の一助となれば幸いである。

令和3年3月

一般財団法人 石油エネルギー技術センター

# 目次

1. 目的
2. 調査方法
3. 主要原油輸入国の原油輸入先の動向
  - 3.1 原油輸入国および地域別の比較
  - 3.2 各国別の原油輸入先の推移
    - 3.2.1 欧州(ドイツ、スペイン、イタリア、オランダ、フランス、ベルギー)
    - 3.2.2 米国
    - 3.2.3 インド
    - 3.2.4 中国
    - 3.2.5 韓国
    - 3.2.6 日本
  - 3.3 考察
4. 製油所装置構成分析
  - 4.1 競争力指標分析(ネルソン指数、残油処理装置装備率、石化品製造能力率)
  - 4.2 主要原油輸入国の製油所装置構成の推移
5. 原油調達のフレキシビリティ
  - 5.1 検討方法
  - 5.2 各国・代表製油所の精製マージン
6. 国内への低炭素燃料混合処理の適用可能性
  - 6.1 前提
  - 6.2 検討結果と課題
7. まとめ

## 図リスト

- 図 2 調査の流れ
- 図 3.1 原油輸入（地域別）：2018 年
  - 図 3.2.1.1 ドイツの原油輸入先推移
  - 図 3.2.1.2 オランダ原油輸入先推移
  - 図 3.2.1.3 スペイン原油輸入先推移
  - 図 3.2.1.4 イタリア原油輸入先推移
  - 図 3.2.1.5 フランス原油輸入先推移
  - 図 3.2.1.6 ベルギー原油輸入先推移
- 図 3.2.2 米国原油輸入先推移
- 図 3.2.3 インド原油輸入先推移
- 図 3.2.4 中国原油輸入先推移
- 図 3.2.5 韓国原油輸入先推移
- 図 3.2.6 日本原油輸入先推移
- 図 3.7.1 日欧米輸入原油平均 API 推移
- 図 3.7.2 欧州各国輸入原油平均 API 推移
- 図 4.1.1 ネルソン指数による分類
- 図 4.1.2 地域毎のネルソン指数比較（製油所数）
- 図 4.1.3 地域毎のネルソン指数比較（割合）
- 図 4.1.4 地域毎の石化品製造能力率比較（製油所数）
- 図 4.1.5 地域毎の石化品製造能力率比較（割合）
- 図 4.1.6 特徴的な製油所と日本（平均）の位置づけ
- 図 4.2.1 ドイツの製油所装置構成推移
- 図 4.2.2 オランダの製油所装置構成推移
- 図 4.2.3 スペインの製油所装置構成推移
- 図 4.2.4 イタリアの製油所装置構成推移
- 図 4.2.5 フランスの製油所装置構成推移
- 図 4.2.6 ベルギーの製油所装置構成推移
- 図 4.2.7 米国の製油所装置構成推移
- 図 4.2.8 インドの製油所装置構成推移
- 図 4.2.9 中国の製油所装置構成推移
- 図 4.2.10 韓国の製油所装置構成推移
- 図 4.2.11 韓国の石油製品生産比率
- 図 4.2.12 韓国 Onsan 製油所の装置構成推移
- 図 4.2.13 シンガポールの製油所装置構成推移
- 図 4.2.14 日本の製油所装置構成推移
- 図 5.2 残渣油処理装置能力と精製マージンの関係
- 図 5.3 中東からの調達原油比率と API の関係

図 6 e-fuel 共処理（水素化分解装置）ケースの検討  
図 6.1 我が国製油所モデル

表リスト

- 表 3.1 原油輸入国比較：2018 年
- 表 4.1 地域毎の製油所数
- 表 4.2 装置の複雑度指数
- 表 4.3 石化品製造装置
- 表 4.1.1 地域毎のネルソン指数比較（製油所数）
- 表 4.1.2 地域毎の石化品製造能力率比較（製油所数）
- 表 4.1.3 地域別の競争力指標の平均値（160KBD 以上の製油所対象）
- 表 4.1.4 主要国の競争力指標の平均値（160KBD 以上の製油所対象）
- 表 4.2.1 主要原油輸入国の製油所装置構成比較
- 表 4.2.2 主要原油輸入国の製油所装置構成比較（装置基準）
- 表 5.1.1 ドイツの石油製品需給（千 BD）
- 表 5.1.2 ドイツ製油所全体の各所精製装置能力（千 BD）
- 表 5.1.3 ドイツ製油所生産バランスの分析結果（実勢ケース）
- 表 5.1.4 ドイツ製油所生産バランスの分析結果（原油選択重質化ケース）
- 表 5.1.5 ドイツ製油所の各種原油、原料油および製品コストと価格の設定
- 表 6.2.1 我が国製油所生産バランスの分析結果（実勢ケース）
- 表 6.2.2 我が国製油所生産バランスの分析結果（E-Fuel100 万 BD 処理ケース）
- 表 6.2.3 E-fuel 生産物の各石油製品への割合

## 1. 目的

日本の石油の安定供給を将来にわたり確保していくためには、国内に製油所等の供給インフラを維持していく必要がある。供給を担う民間企業が国内の石油需要減少等の厳しい経営環境にある中、国内供給インフラを経済合理的かつ効率的に維持していくためには、国内外の市場で競合する他国企業・製品との比較において、日本企業・製品の国際競争力を高め、経営基盤を強化していかなければならない。

係る中、近年、特に国内企業の国際競争力強化に大きな影響を与える可能性のある課題として、緊迫する中東情勢により一層高まっている原油調達の中東依存リスク、需要減少等の厳しい経営環境においても強く求められる気候変動面での社会的要請に係る経営リスクなどがあげられる。

本調査は、上記の認識を踏まえ、諸外国における原油調達の現状や精製処理技術に係る調査・分析において製油所の設備構成等の調査を行うことを目的とする。

## 2. 調査方法

調査の流れを図 2 に示す。原油輸入先の推移、世界製油所の競争力指標分析を実施後、代表国及び特徴ある製油所を抽出し、装置構成および需給より、原料調達のフレキシビリティの比較検討を、原油の軽質化、重質化に伴う精製マージン変化を LP モデルで評価した。原油輸入先と数量については、欧州各国は、EU/EUROPEAN COMMISSION

EU crude oil imports and supply cost/Crude oil imports and supply cost over time/Crude oil imports history を、米国は、EIA、Crude Oil Input Qualities/Download Series History、日本は、経済産業省/石油統計/統計表一覧/年報 (Yearbook)、韓国は、韓国石油公社ホームページの「石油需給統計」、中国は、CEIC (登録データ) 等から入手した。製油所の装置構成・能力データは、ICIS Supply & Demand Database、IHS Database のデータを使用した。主要国の石油製品需給については、ICIS Supply & Demand Database 等から収集した。

原油調達のフレキシビリティに関しては、国を 1 つの製油所とみなし、2020 年の需給を元に実勢を求め、原油選択 (軽質化原油主体か重質油原油主体かどれくらいの幅で対応できるフレキシビリティがあるか) の幅を探るために、実勢での API 値をもとに軽質化、重質化いずれかの方向に降らして精製マージンが最適化になるように評価した。さらに、既存装置の最大活用の観点から、我が国における製油所において、FCC 装置に E-fuel 原料を共処理 (Co-processing) した場合の精製マージンの変化についても検討を行った。

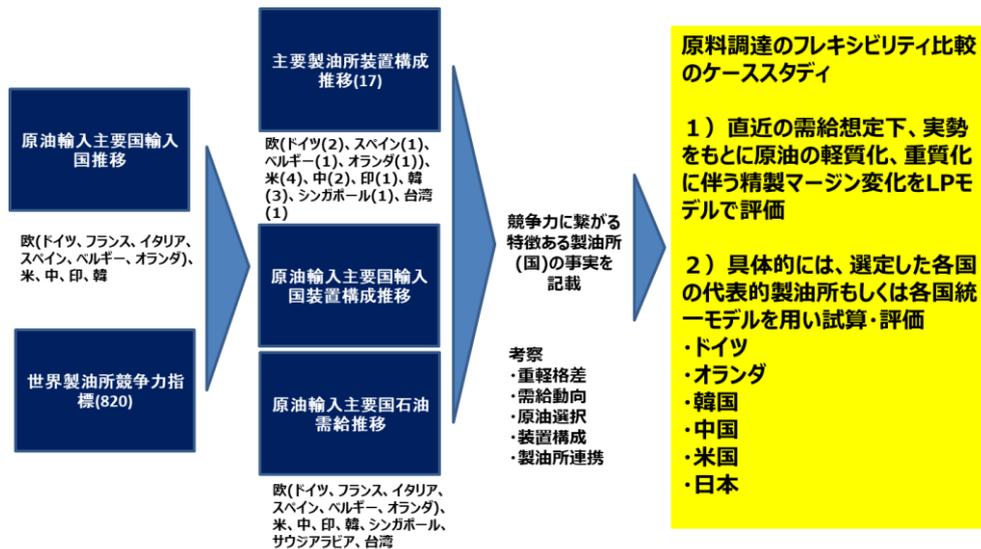


図 2 調査の流れ

### 3. 主要原油輸入国の原油輸入先の動向

以下に、主要原油輸入国の原油輸入先の動向を示す。

#### 3.1 原油輸入国および地域別の比較

主要原油輸入国である欧州（欧州；ドイツ、オランダ、スペイン、イタリア、フランス、ベルギー）、中国、米国、インド、中国、韓国、日本について、原油輸入先毎および地域別毎（中東、アジア、北米、南米、旧ソ連、欧州、アフリカ）の比較を、表 3.1、図 3.1 に示す。

地域性により、欧州の中東比率は、約 5～40%と低く、ロシアとの結びつきが大きい。アジア（インド、韓国、日本）の中東比率は、60%以上と高い。米国は、カナダがメインである。地域毎での比較では、欧州では、スペインが、アジアでは、中国が、バランスがとれている。

地理的因子、歴史的因子等で国によって差があるが、あらためて、日本の中東依存が際立っている。

表 3.1 原油輸入国比較：2018 年

【原油輸入国比較】2018年

順位	ドイツ	オランダ	スペイン	イタリア	フランス	ベルギー	インド	韓国	日本	中国	米国
1	ロシア	ロシア	ナイジェリア	アゼルバイジャン	カザフスタン	ロシア	イラク	サウジアラビア	サウジアラビア	ロシア	カナダ
2	ノルウェー	英国	メキシコ	イラク	サウジアラビア	サウジアラビア	サウジアラビア	クウェート	UAE	サウジアラビア	サウジアラビア
3	カザフスタン	ノルウェー	サウジアラビア	サウジアラビア	ロシア	ナイジェリア	西アフリカ	イラク	カタール	アンゴラ	メキシコ
4	リビア	イラク	リビア	リビア	ナイジェリア	英国	中南米	UAE	クウェート	イラク	イラク
5	ナイジェリア	ナイジェリア	カザフスタン	イラン	アルジェリア	ノルウェー	UAE	カタール	ロシア	オマーン	ベネズエラ
6	英国	クウェート	イラン	ロシア	リビア	米国	クウェート	米国	イラン	ブラジル	コロンビア
7	米国	米国	イラク	カザフスタン	イラン	イラク	メキシコ	イラン	イラク	イラン	エクアドル
8	アゼルバイジャン	サウジアラビア	ブラジル	ナイジェリア	ノルウェー	カザフスタン	その他中東	カザフスタン	米国	クウェート	ナイジェリア
9	イラク	メキシコ	アンゴラ	アルジェリア	米国	ベネズエラ	米国	ロシア	オマーン	UAE	ブラジル
10	サウジアラビア	イラン	ノルウェー	米国	イラク	メキシコ		イギリス	バーレーン	コロンビア	ロシア
中東比率	6	18	25	37	24	21	65	76	88	43	19

輸入割合が10%以上の国

\* 欧州各国について域内を含む

出所：各種資料を元に JPEC 作成

## 原油輸入先比較(地域毎)：2018年

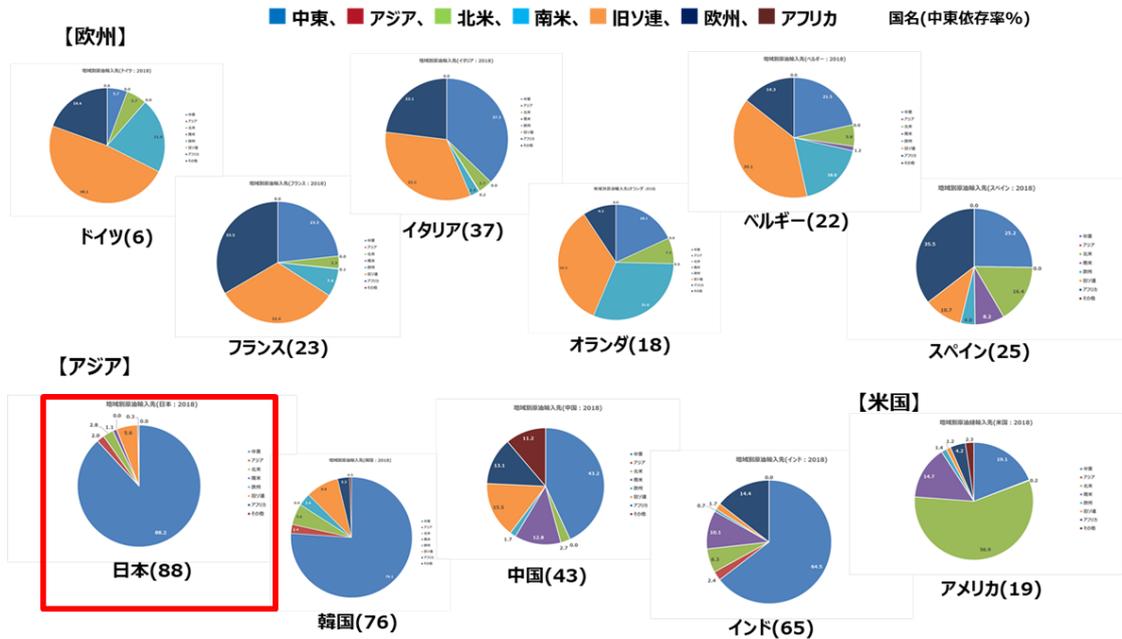


図 3.1 原油輸入（地域別）：2018年

出所：各種資料を元に JPEC 作成

### 3.2 各国別の原油輸入先の推移

各国別の原油輸入先の推移を以下に示す。

#### 3.2.1 欧州（ドイツ、オランダ、スペイン、イタリア、フランス、ベルギー）

ドイツの原油輸入先の推移を、図 3.2.1.1 に示す。ドイツの原油輸入先は、ロシアがメインで約 30～40%を占めているが、直近は、30%を割って減少傾向である。米国からの輸入が 6%まで増加している。リビアからの輸入は、一時 2%以下に減少するも 10%以上に回復している。その他、アルジェリアからの輸入は、徐々に減少している。

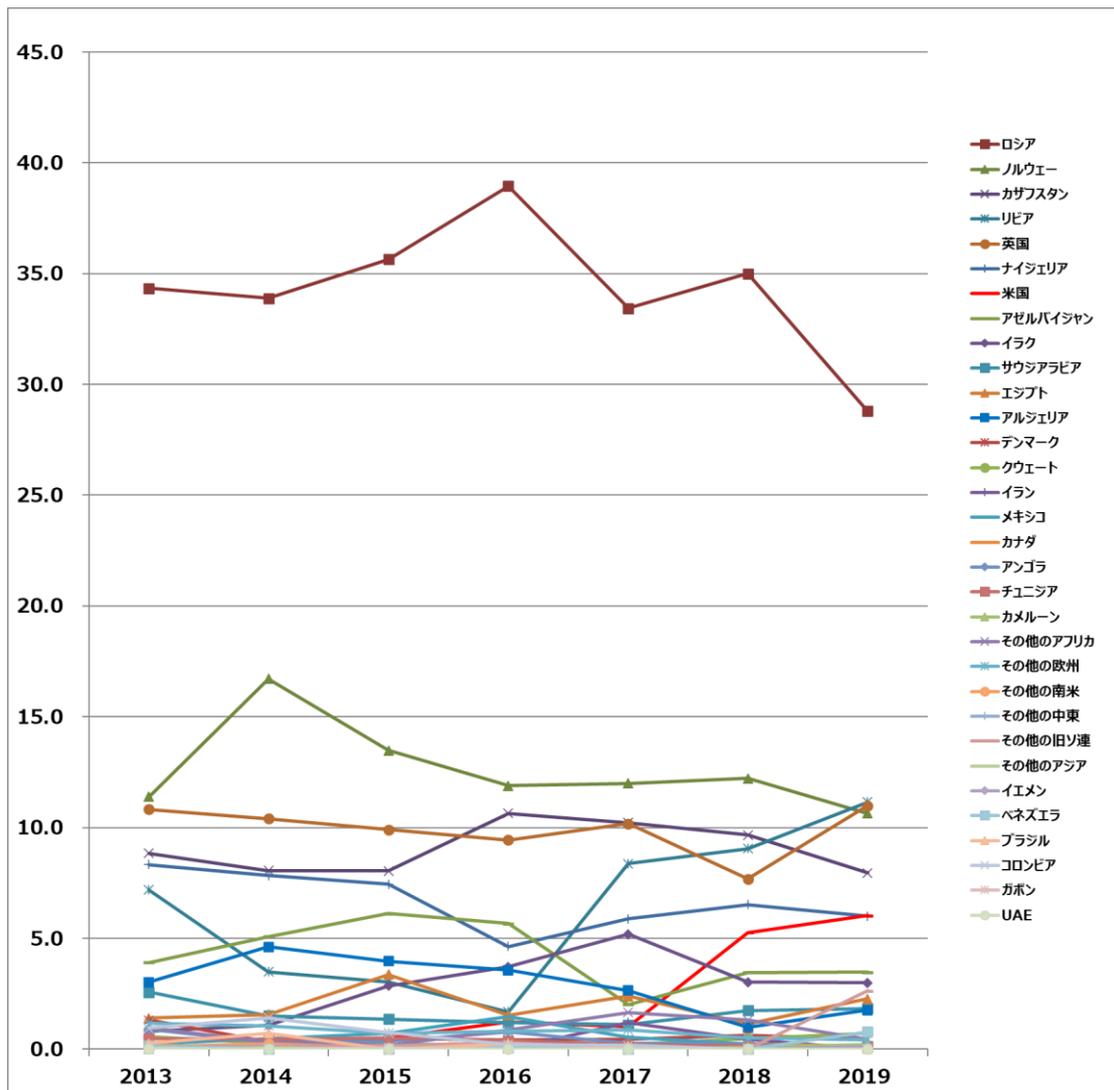


図 3.2.1.1 ドイツの原油輸入先推移

出所：EUROPEAN UNION OPEN DATA を元に JPEC 作成

オランダの原油輸入先の推移を、図 3.2.1.2 に示す。オランダの原油輸入先もドイツと同様にロシアがメインである。2014年に減少後、一旦回復するものも、近年は、再び減少して直近 30%を割っている。英国からの輸入は、15%前後で安定的に推移している。米国からの輸入が直近増加しており、9%近くまで達している。また、イラク、ノルウェー、クウェートからの輸入も近年安定している。

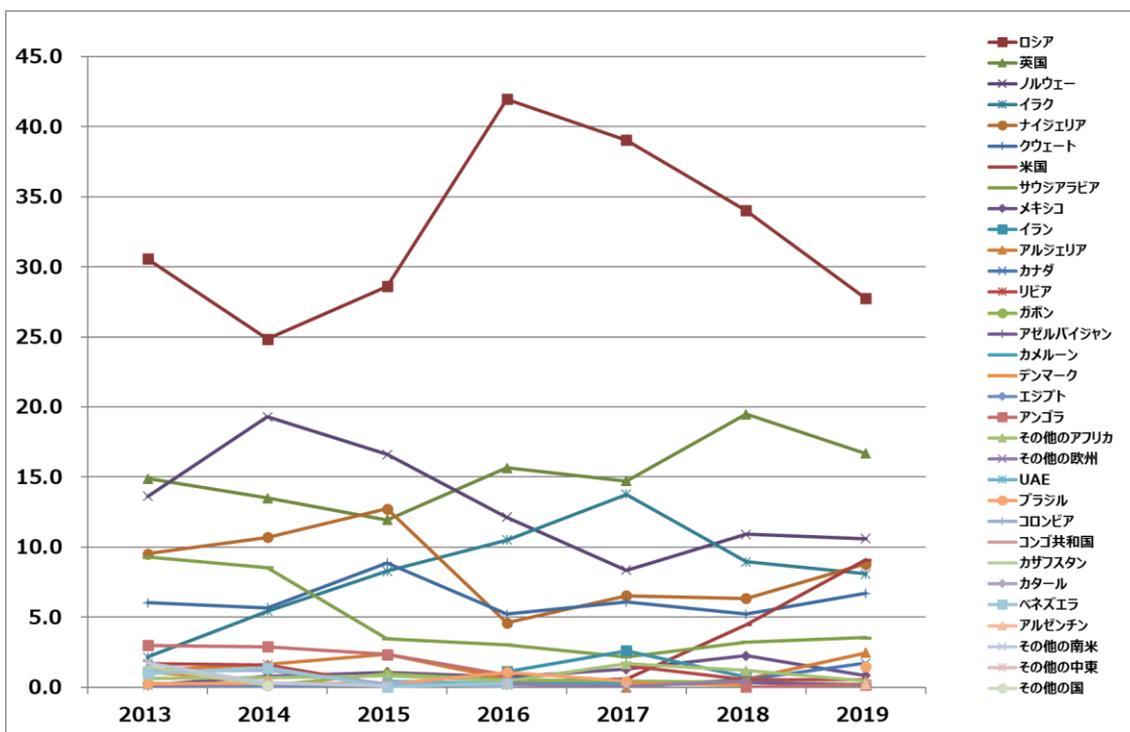


図 3.2.1.2 オランダの原油輸入先推移

出所：EUROPEAN UNION OPEN DATA を元に JPEC 作成

スペインの原油輸入先の推移を、図 3.2.1.3 に示す。上位の輸入国であるナイジェリア、メキシコ、サウジアラビアが 10～20% とバランスよく安定している。一方、ロシアは、2013 年の 14% から直近数% と急激にシェアが低下している。直近、リビアが急激にシェアアップ（数% から 13%）しており、カザフスタン、イラクも順調に増加している。米国からの輸入は、3% 程度である。イランからの輸入は、2018 年でストップしている。スペインの平均 API が、30 と他の欧州国に比べ低く（後述）、要因は、主にメキシコのマヤ原油による。直近、カナダ原油に触手を伸ばしている。

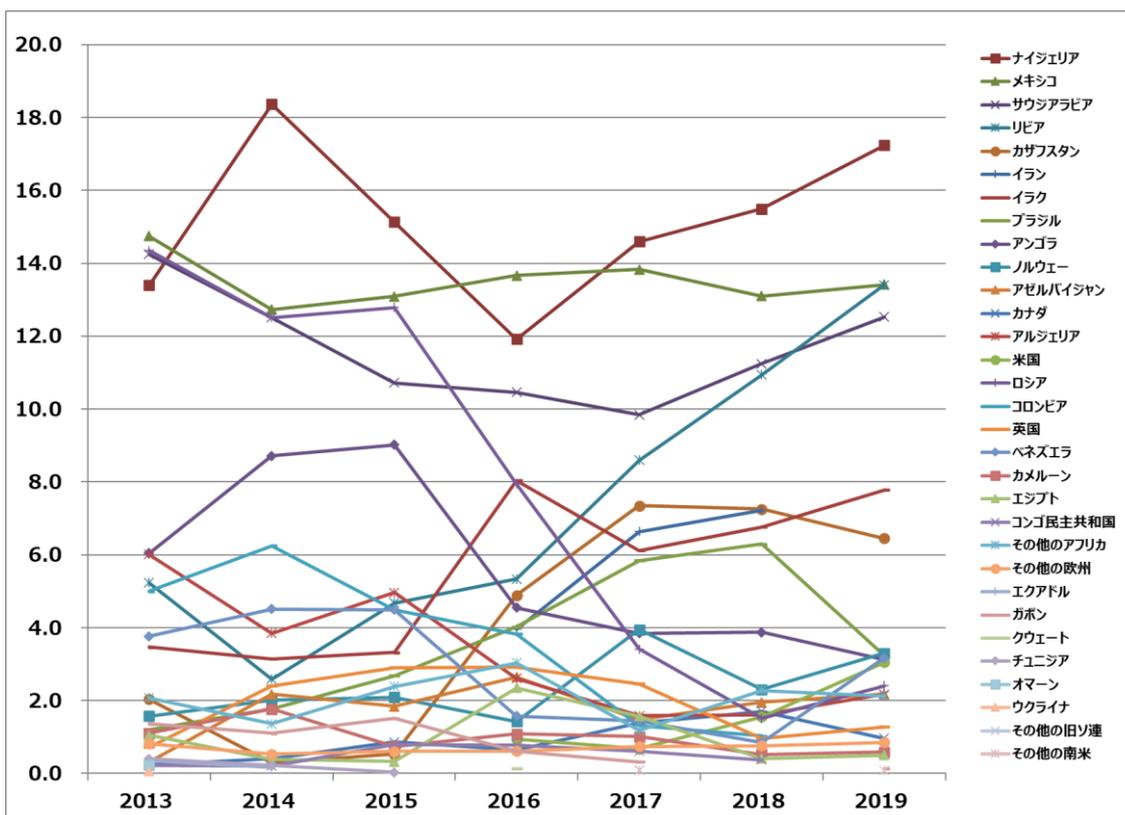


図 3. 2. 1. 3 スペインの原油輸入先推移

出所：EUROPEAN UNION OPEN DATA を元に JPEC 作成

イタリアの原油輸入先の推移を、図 3. 2. 1. 4 に示す。イタリアの原油輸入先は、アゼルバイジャン、サウジアラビア、リビア、ロシア、イラクが 10～20%と安定的に推移している。カザフスタン、ナイジェリアも 5%前後で安定している。米国は、2%程度である。イランからの原油輸入は、一時 10%前後あったものの 2018 年でストップしている。

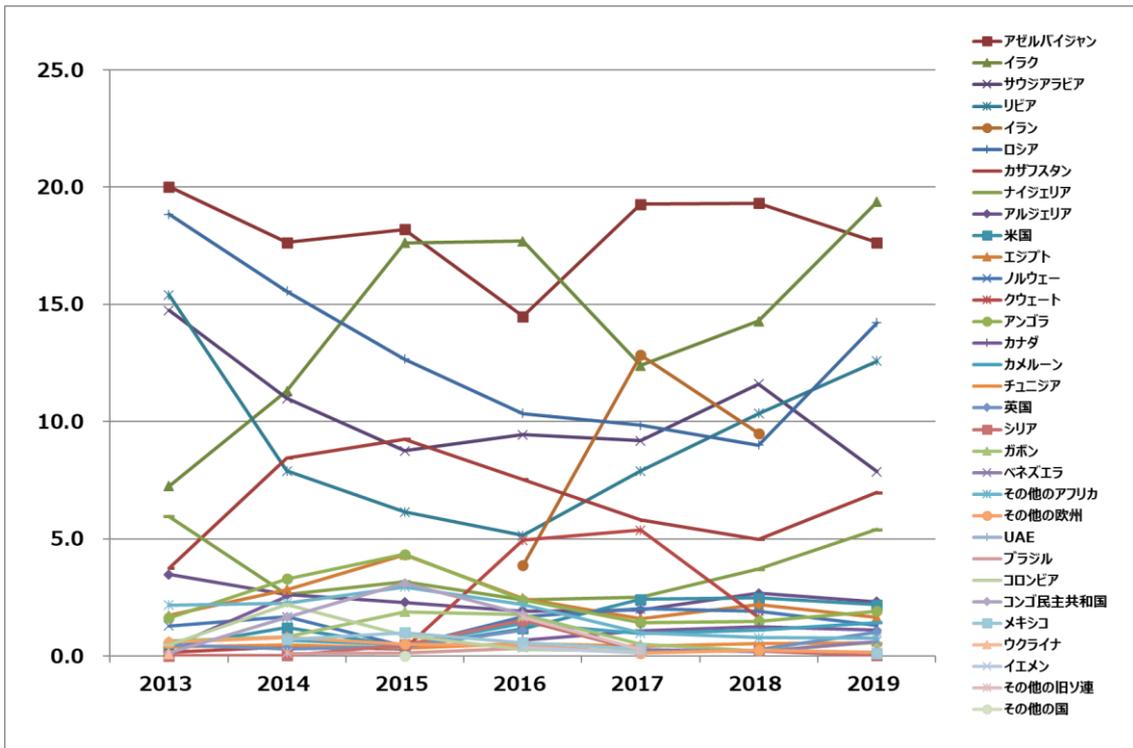


図 3.2.1.4 イタリアの原油輸入先推移

出所：EUROPEAN UNION OPEN DATA を元に JPEC 作成

フランスの原油輸入先の推移を、図 3.2.1.5 に示す。フランスの原油輸入先は、カザフスタン、サウジアラビア、ロシア、ナイジェリア、アルジェリアがメインで 10～20%で推移している。アルジェリアが、2013 年に比較してシェアを 6%から 12%に拡大させている。米国からの原油輸入が、最近、9%まで急拡大している。

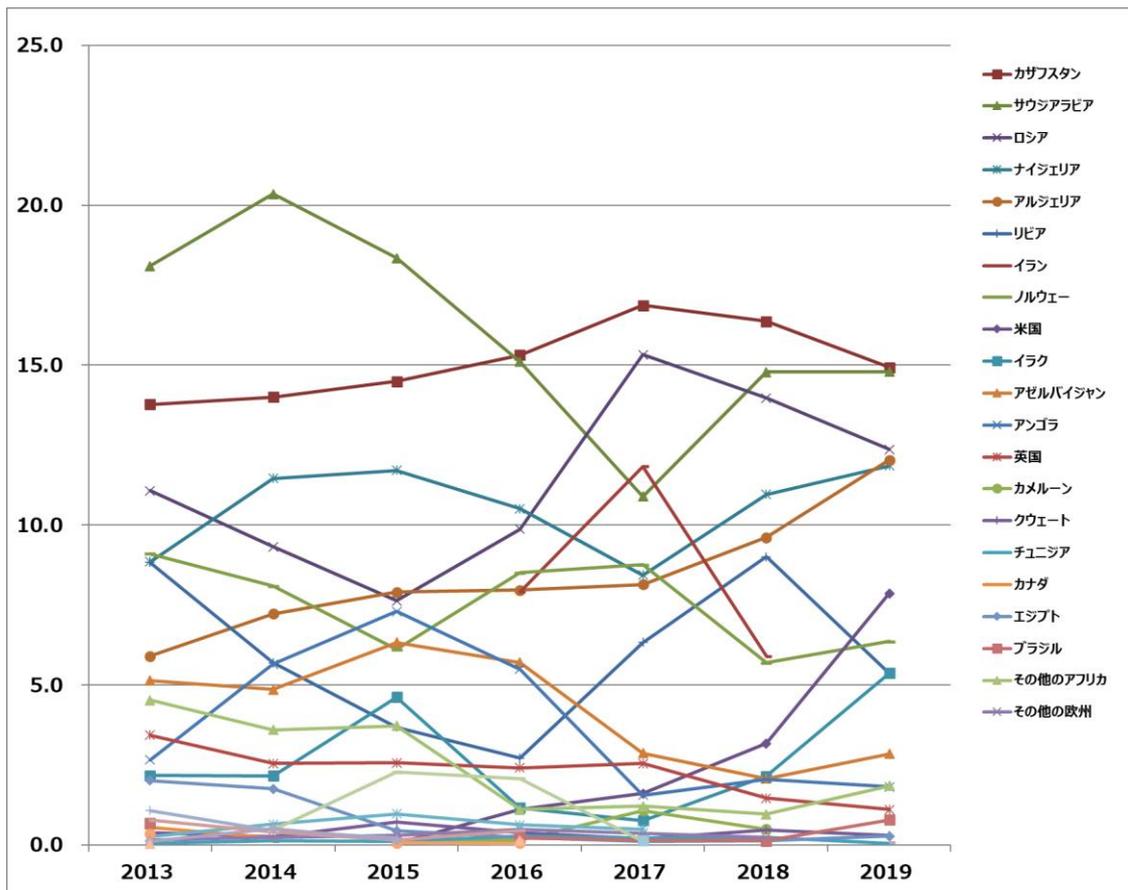


図 3.2.1.5 フランスの原油輸入先推移

出所：EUROPEAN UNION OPEN DATA を元に JPEC 作成

ベルギーの原油輸入先の推移を、図 3.2.1.6 に示す。ベルギーの原油輸入先は、ロシアがメインであるが、2014 年以降減少後、回復するも、近年減少して直近 30%を割っていて、オランダと同様な動きをしている。サウジアラビア、ナイジェリアからの輸入は、安定的に推移している。米国からの輸入が直近、10%まで増加していて、カザフスタンも同様に 9%まで、イラクも 6%まで増加している。

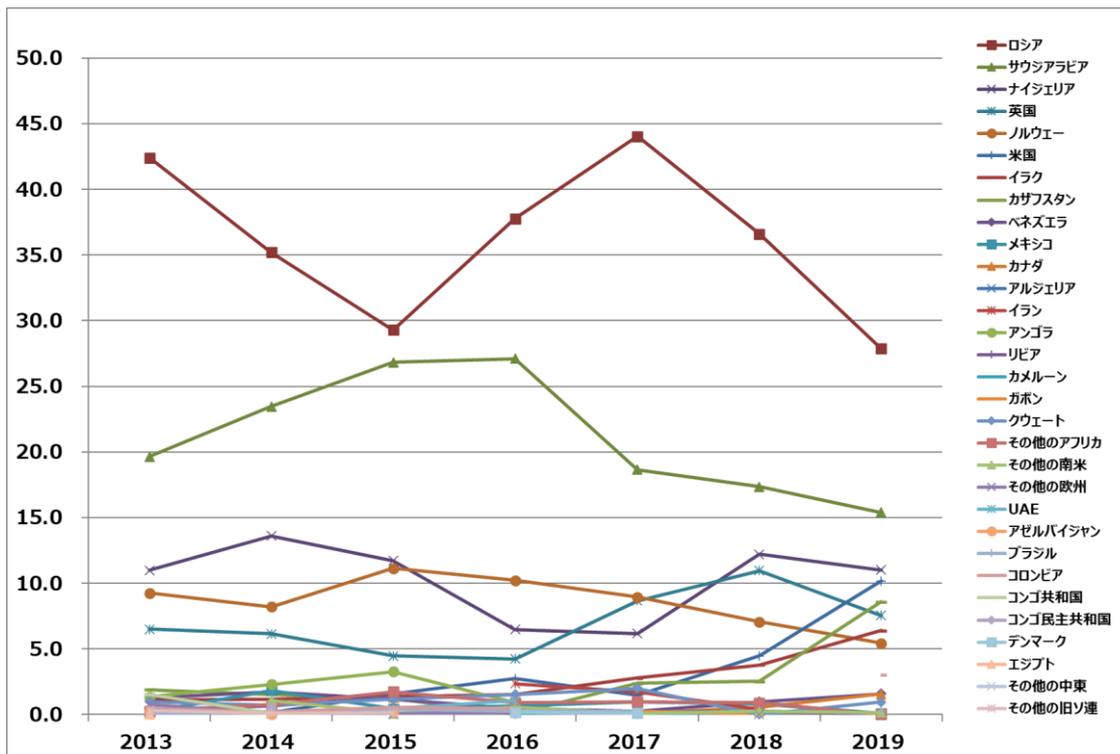


図 3.2.1.6 ベルギーの原油輸入先推移

出所：EUROPEAN UNION OPEN DATA を元に JPEC 作成

原油輸入に関する 2 件の報告が欧州よりある。1 つめは、ケンブリッジ計量経済学研究所からの報告(Oil Dependency in the EU)<sup>1)</sup>で、欧州の海外原油の輸入依存体質が、英国離脱により加速されるということ、2 つめは、フランス気候関連シンクタンク Shift Project の報告<sup>2)</sup>(世界製油所関連最新情報 2020 年 7 月号)で、現在の主な原油輸入国の原油供給が減ることにより、欧州地域の将来的な輸入原油不足が起きることに対して警鐘を鳴らしたものである。

### 3.2.2 米国

米国の原油輸入先の推移を、図 3.2.2 に示す。米国の原油輸入先は、カナダからの原油輸入が主であり、60%近くまで継続的にシェアが拡大している。サウジアラビア、メキシコからの輸入は、10%前後で安定的に推移している。ベネズエラについては、制裁により大幅に減少している。

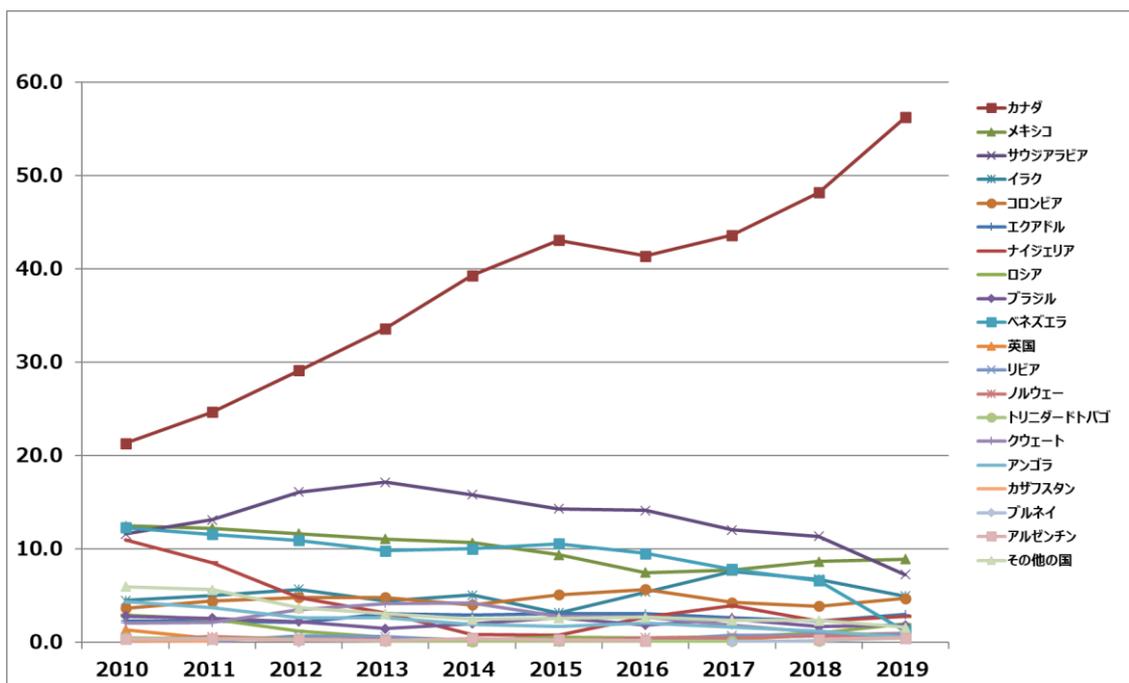


図 3.2.2 米国の原油輸入先推移

出所：EIA データを元に JPEC 作成

### 3.2.3 インド

インドの原油輸入先の推移を、図 3.2.3 に示す。インドの原油輸入先は、イラク、サウジアラビア、UAE、クウェートをはじめとして 60～70%で推移（中東諸国の中の比率は、安定している）しておる。以下、西アフリカ(ナイジェリア)、中南米(ベネズエラ)と続いており、メキシコからの輸入は安定している。米国は、2%まで輸入が増加している。EIA の直近(2019;EIA)のデータでは、イラク 22%、サウジ 19%、UAE9%、クウェート 5%、イラン 2%（中東地域で 59%）、ナイジェリア 8%、ベネズエラ 7%、米国 4%、メキシコ 4%等(出所：ClipperData)となっている。製油所に対しては、2020 年 4 月までに EuroVI 排出基準と同等の石油製品を生産するという新しい政府の要件に準拠するために製油所施設をアップグレードしている。

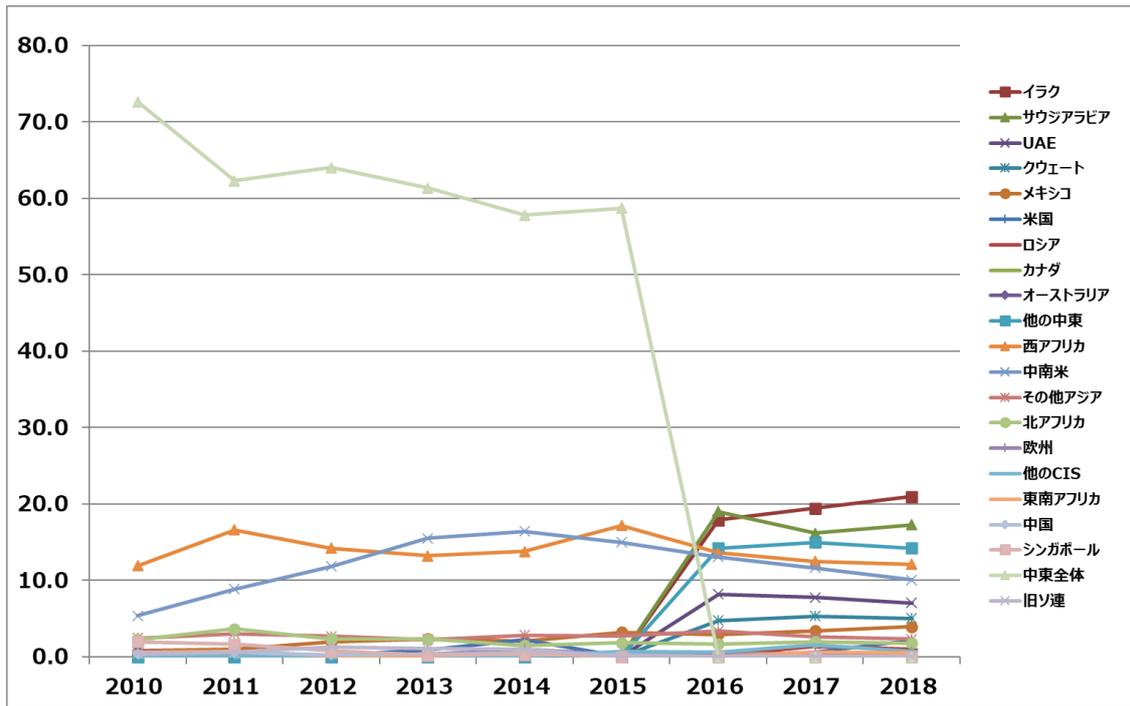


図 3.2.3 インドの原油輸入先推移

出所：PAC ホームページ資料を元に JPEC 作成

### 3.2.4 中国

中国の原油輸入先の推移を、図 3.2.4 に示す。中国の原油輸入先は、サウジアラビアが最大の輸入先で、20%弱から減少傾向から、直近増加傾向にある。ロシア、イラク、ブラジルはシェアが拡大傾向にあるが、アンゴラは、逆に低下している。

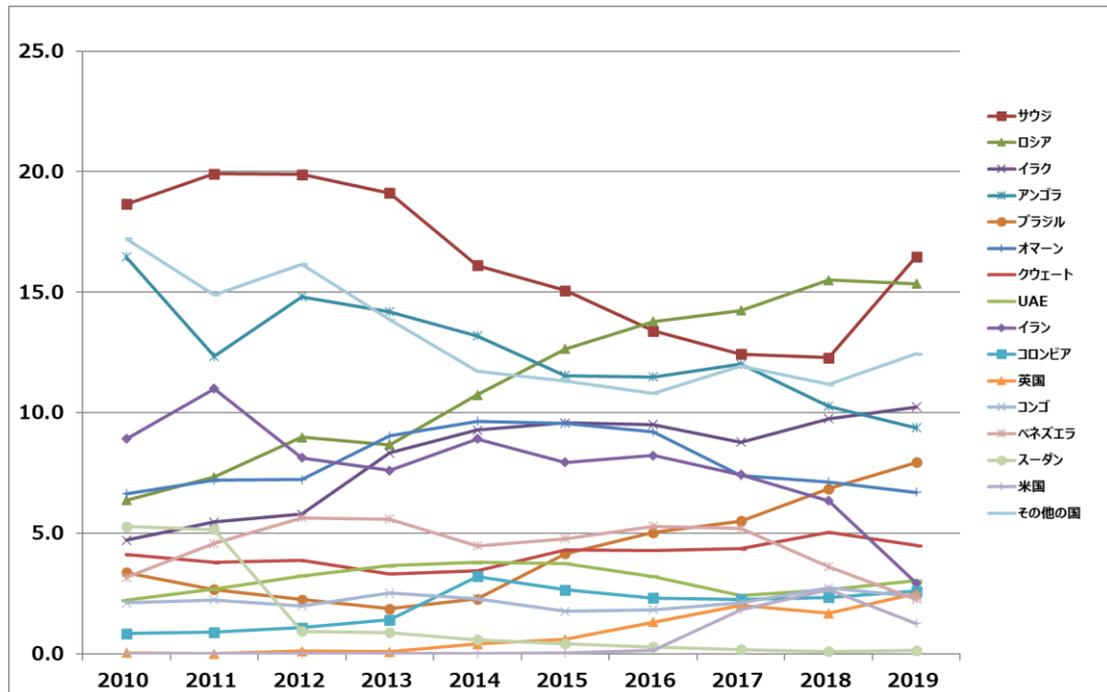


図 3.2.4 中国の原油輸入先推移

出所：CEIC 登録データを元に JPEC 作成

### 3.2.5 韓国

韓国の原油輸入先の推移を、図 3.2.5 に示す。韓国の原油輸入先は、サウジアラビアが主体であり、クウェート、イラク、UAE、カタール、(イラン)6ヶ国で70～80%のシェアを占めている。米国からの輸入は、6%近くまで増加しており、同様にカザフスタンも5%まで増加している。ロシア、英国からの輸入は、3～4%前後で安定している。アルジェリア、ガボン、赤道ギニア、ナイジェリアなどアフリカからの輸入も3～4%で推移している。直近(2019;EIA)のデータで、米国からの輸入は、14%まで増加している。ナフサ生産用のコンデンサースプリッターの原料としてコンデンセートの輸入に大きく依存している韓国は、イランからのコンデンセートの多くを米国からの供給に置き換えている。米国とカザフスタンからの軽質スイート原油の購入を増やして、同様のイラングレードに取って代わるだけでなく、2020年から始まる国際海事機関のバンカー燃料に関する新しい低硫黄規制に対応している。また、原油輸入先の多様化を図るために、中東地域からの輸送コストよりも追加的に必要となる多様化対象地域の輸送費を補填する制度(韓国は、中東以外の国から原油とコンデンセートを輸入する精製会社の運賃割戻し)を2021.2まで延長している。

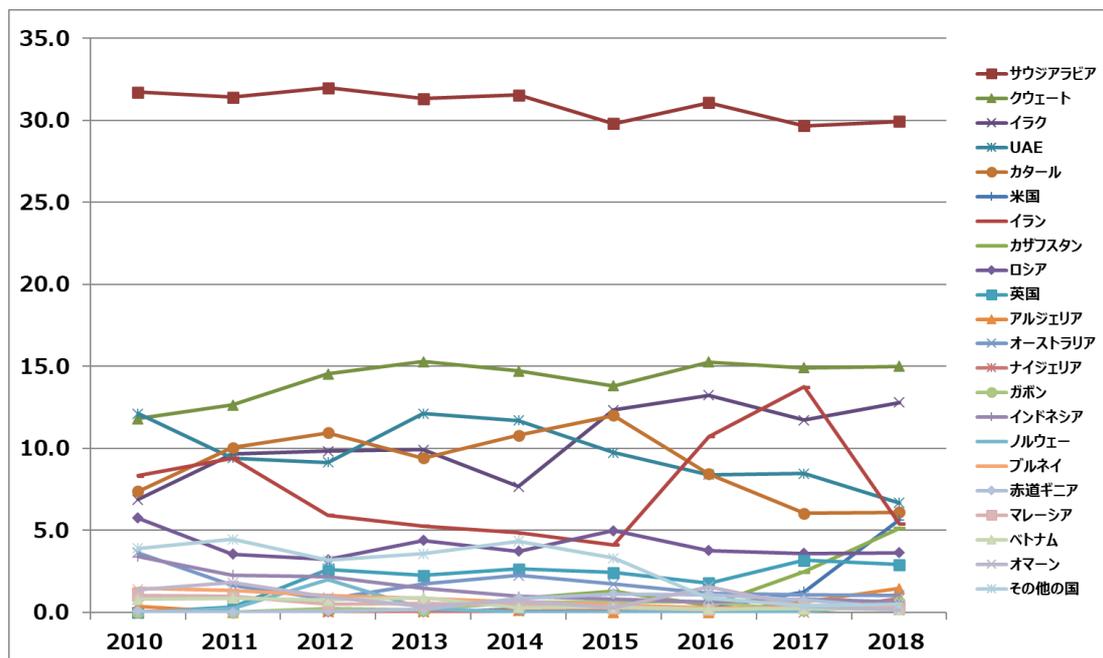


図 3.2.5 韓国の原油輸入先推移

出所：韓国石油公社ホームページ資料を元に JPEC 作成

### 3.2.6 日本

我が国の原油輸入先の推移を、図 3.2.6 に示す。我が国の原油輸入先は、サウジアラビア、UAE の 2 国で 50～60% を占め、中東依存率は、常に 80% を超えて高い依存率を示している。米国からの輸入は、2% 程度にとどまっている。

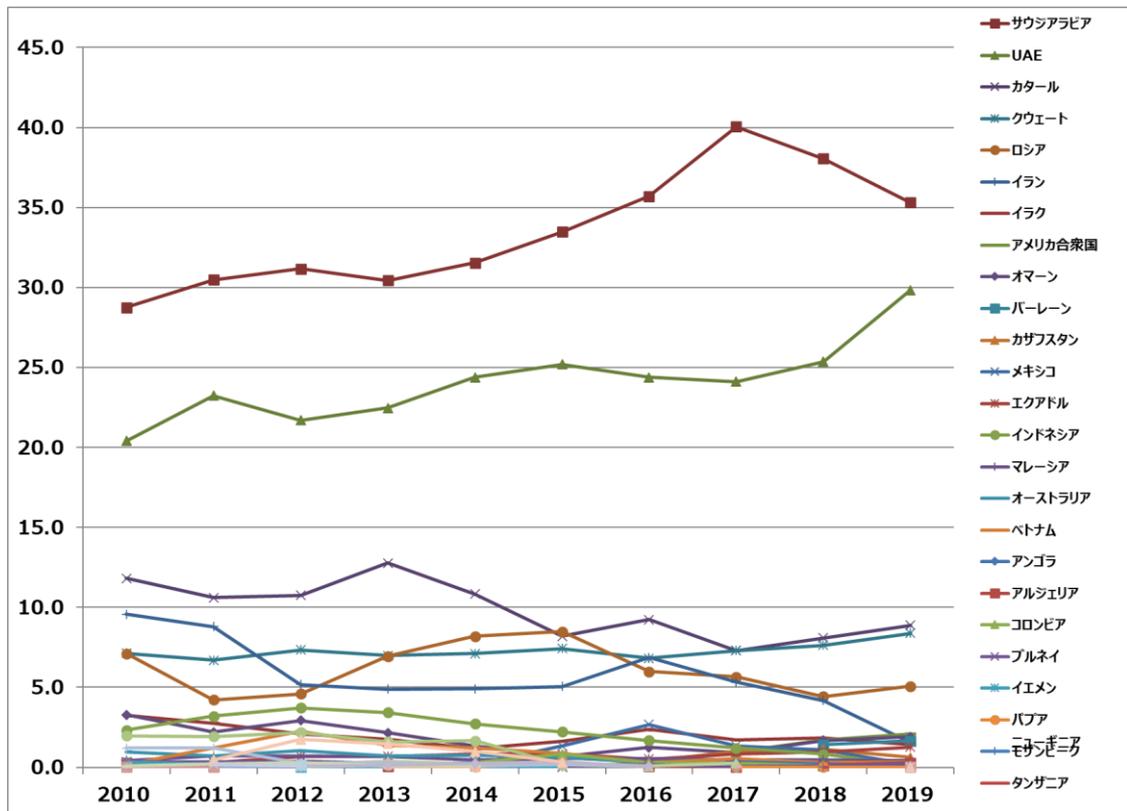


図 3.2.6 日本の原油輸入先推移

出所：経済産業省/石油統計/統計表一覧資料を元に JPEC 作成

### 3.3 考察

コロナによる世界的な需給変化、地球環境改善（ゼロエミッションに代表される）における様々な変化等不透明な状況にある中ではあるが、引き続き、我が国においては、原油調達の安定供給に向けての努力が求められる。

#### 【参考】各国輸入原油平均 API 推移

参考までに日欧米の各年毎および欧州各国の API の推移を図 3.3.1、図 3.3.2 に示す。近年、米国は、原油が軽質化する方向にある。欧州については、国において API が異なることがわかる。

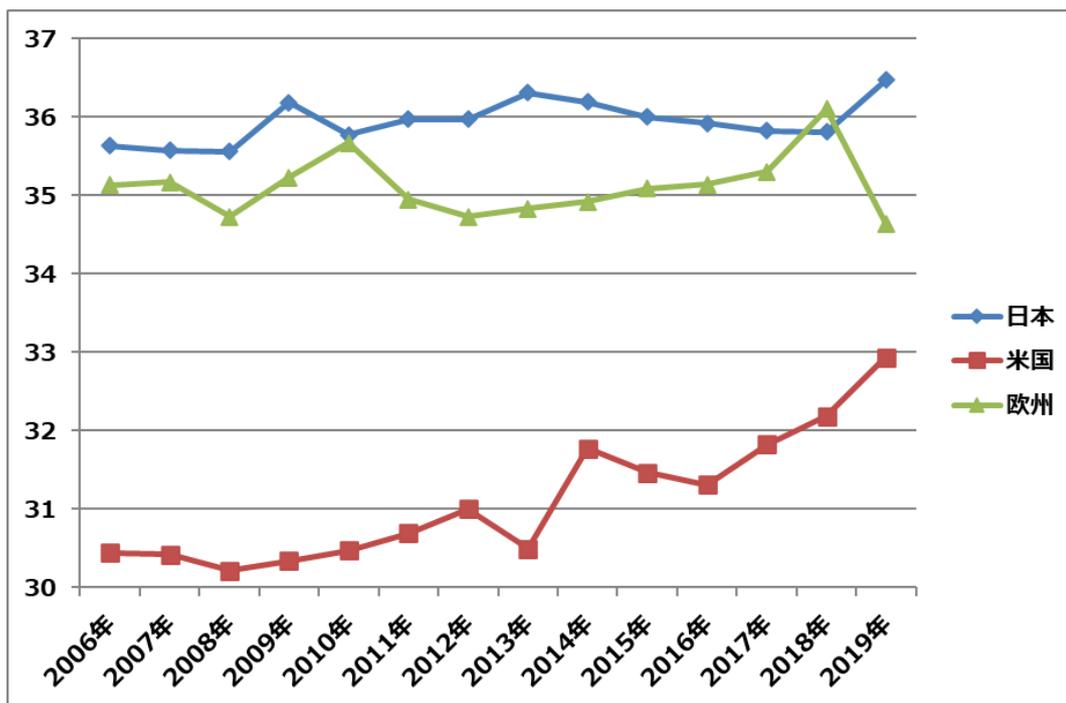


図 3.3.1 日欧米の各年毎の API の推移

主所：各種資料を元に JPEC 作成

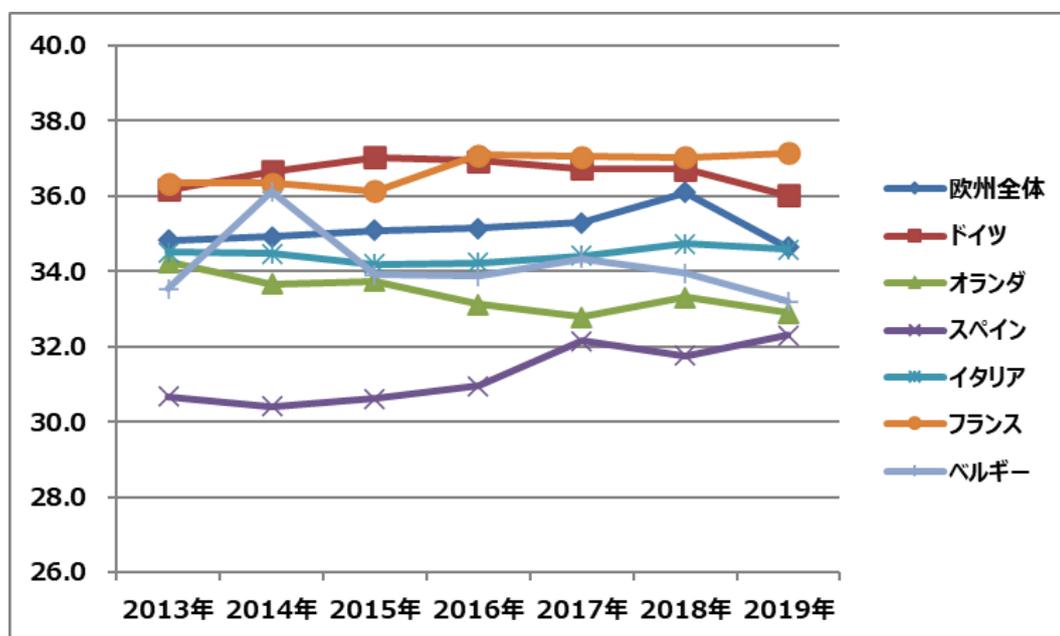


図 3.3.2 欧州各国の API の推移

出所：各種資料を元に JPEC 作成

#### 4. 製油所装置構成分析

本調査においては、世界の製油所 820 箇所を以下に示す 3 つの競争力指標（ネルソン指数、残油処理装置装備率、石化品製造能力率）でリスト化し、装置構成推移等を比較検討した。尚、対象となる製油所は常圧蒸留装置（CDU）を有し原油処理ができる製油所とした。表 4.1 に、地域毎の製油所数を示す。

表 4.1 地域毎の製油所数

地域名	製油所数	製油所数 (原油処理あり)
ASIA AND PACIFIC	93	83
AFRICA	51	45
EUROPE	109	101
FORMER USSR	72	71
MIDDLE EAST	65	58
NORTH AMERICA	166	160
NORTH EAST ASIA	240	230
SOUTH & CENTRAL AMERICA	72	72
合計	868	820

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に E N E O S 総研作成

定義した競争力指標の詳細を以下に記す。

\*競争力指標；

・ネルソン指数(NI)：

ネルソン指数 (Nelson Complexity Index) は、米国の石油学者 Wilbur L. Nelson が 1960 年 OGJ 誌で初めて提唱した原油常圧蒸留装置 (CDU) の能力と比した製油所の 2 次転換装置 (SCU) の能力を計る指標である。

CDU 複雑度指数を 1.0 と置き、建設コスト等を基に各 SCU の指数を評価し、この指数に、CDU の処理能力と比べた SCU の通油能力の比率を掛け合わせ、得られた指数の合計に CDU の数値も含めて製油所全体の複雑度を表す。

各装置の複雑度指数は、表 4.2 のとおりである。

表 4.2 装置の複雑度指数

常圧蒸留装置（コンデンセート蒸留装置含む）	1.00
減圧蒸留装置	2.00
軽質・中間・重質留分脱硫装置	2.50
接触改質装置	5.00
接触分解装置	6.00
接触分解装置（サーマルクラッキング）	2.50
アルキレーション装置	10.00
水素化分解装置	6.00
ポリマー化装置	10.00
異性化装置	15.00
コーカー装置	6.00
ビスブレイカー装置	2.75
溶剤脱れき装置	1.50
残渣油ガス化装置	12.00
スラリー床水素化分解装置	6.00
アスファルト装置	1.25
潤滑油装置	60.00

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に E N E O S 総研作成

・残油処理装置装備率：

経済産業省のエネルギー供給構造高度化法（第2次告示）の次式から算出する。

$$\text{残油処理装置装備率（\%）} = \frac{\text{残油処理装置の能力（KBD）}}{\text{常圧蒸留装置の能力（KBD）}}$$

残油処理装置：残油流動接触分解装置(RFCC)、残油熱分解装置(コーカー等)、残油水素化分解装置(H-OIL)、流動接触分解装置(FCC)、重油直接脱硫装置(直脱)、溶剤脱れき装置(SDA)

なお、常圧蒸留装置にはコンデンセート蒸留装置を含む。

・石化品製造能力率

石化品をプロピレン、芳香族（ベンゼン、トルエン、キシレン）として、常圧蒸留装置の能力に対する石化品の製造能力の比率で表す。

石化品製造能力率（\%）

$$= \frac{\text{石化品製造装置の能力（トン/年）}}{\text{常圧蒸留装置の能力（トン/年）}}$$

石化品製造装置の能力は表 4.3 の装置の合計とする。なお、常圧蒸留装置にはコンデンセート蒸留装置を含む。原油比重はアラビアンライト原油 API 34° (0.855) で計算する。

表 4.3 石化品製造装置

プロピレン製造	Refinery grade propylene (FCC, HS-FCC, Coker, Steam Cracker)
ベンゼン製造	Reformate, Transalkylation, Pygas, HDA, TDP, Coke Oven, Transalkylation, STDP
トルエン製造	Reformate - Distilled, Reformate - Extracted, Pygas, Styrene, Coal
パラキシレン製造	Parex (Light), Parex (Heavy), Amoco, Chevron, ARCO, Eluxyl, Krupp, Other
混合キシレン製造	Reformate - Distilled, Reformate - Extracted, Pygas, TDP, STDP, Transalkylation, TDP, STDP, Coal☒

4.1 競争力指標分析（ネルソン指数、残油処理装置装備率、石化品製造能力率）

ネルソン指数、石化品製造能力率について、対象 820 製油所について地域的な分布（製油所数および割合）を、図 4.1.2、図 4.1.3、図 4.1.4、図 4.1.5、表 4.1.2、表 4.1.2 に示す。

ネルソン指数に関しては、“A review of refinery complexity applications”<sup>3)</sup>の中で、図 4.1.1 のように数値によって製油所の分類がなされている。

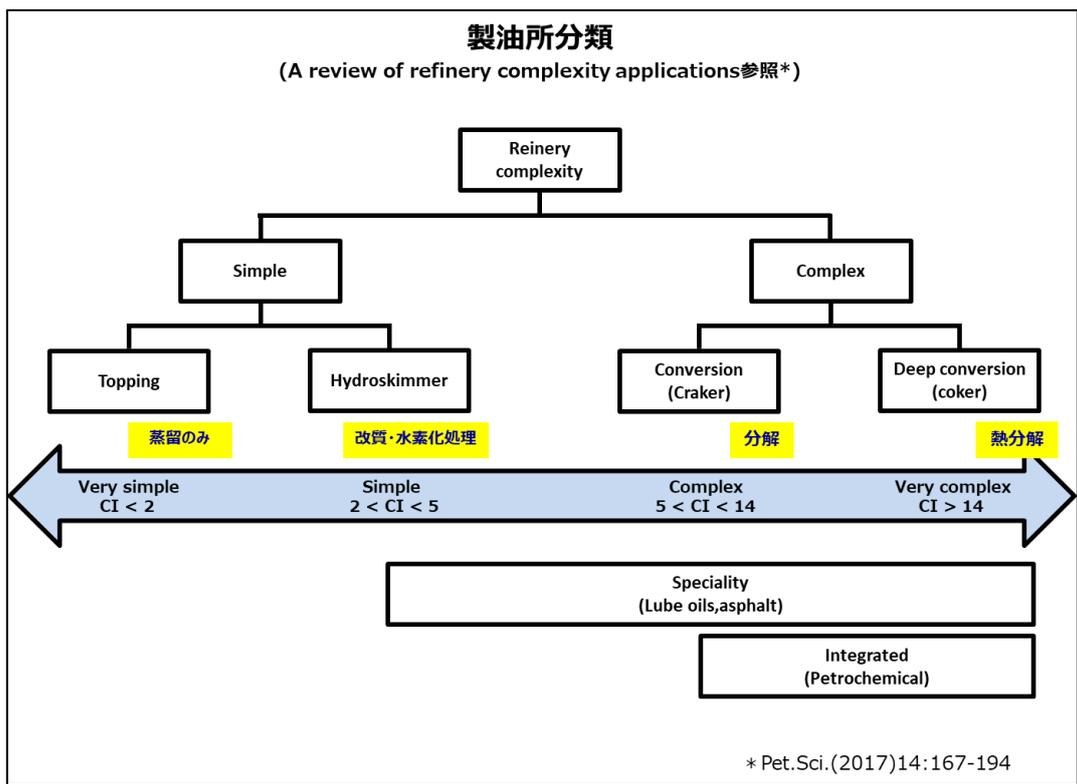


図 4.1.1 ネルソン指数による分類

ネルソン指数が小さいほど、例えば蒸留精製のための単純な製油所であり、指数が大きくなるほど、二次装置等を備えた高度に複雑化した製油所といえる。地域的に比較すると、北米、北東アジア地域に特にネルソン指数の大きい、高度に複雑化した製油所が集中している。逆に、中南米、アフリカ、旧ソ連地域は、シンプルな製油所が多い。

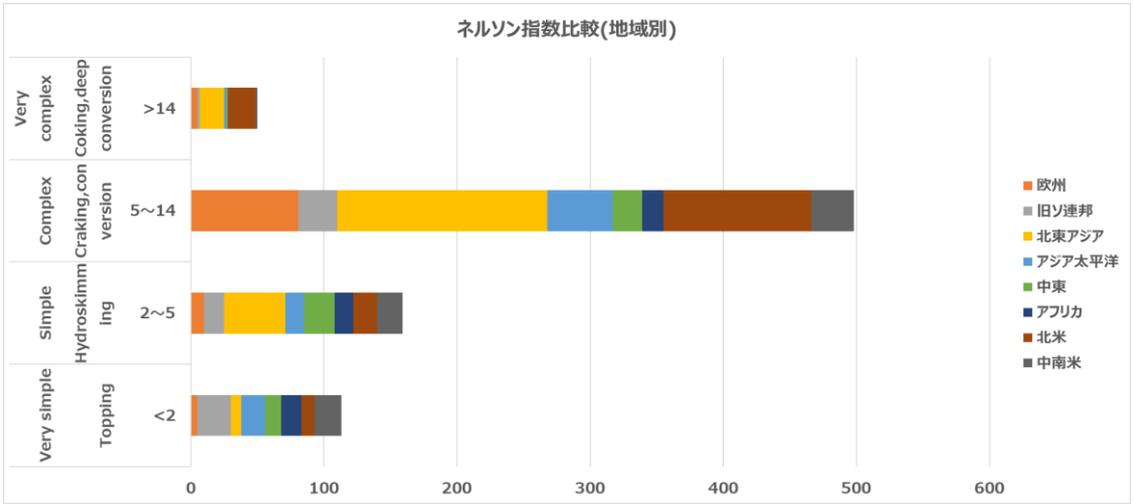


図 4.1.2 地域毎のネルソン指数比較 (製油所数)

出所：ENEOS 総研データを元に JPEC 作成

表 4.1.1 地域毎のネルソン指数比較（製油所数）

ネルソン指数(製油所数)											
分類	タイプ	NI	全体	欧州	旧ソ連邦	北東アジア	アジア太平洋	中東	アフリカ	北米	中南米
Very simple	Topping	<2	113	5	25	8	18	12	15	10	20
Simple	Hydroskimming	2~5	159	10	15	46	14	23	14	18	19
Complex	Cracking,conversion	5~14	498	81	29	158	49	22	16	111	32
Very complex	Coking,deep conversion	>14	50	5	2	18	2	1	0	21	1
	計		820	101	71	230	83	58	45	160	72
Speciality	Lube oils,asphalt	>5	524	86	30	174	51	23	16	111	33
Integrated	Peterochemical	>10	159	14	5	60	8	2	0	66	4

出所：ENEOS 総研データを元に JPEC 作成

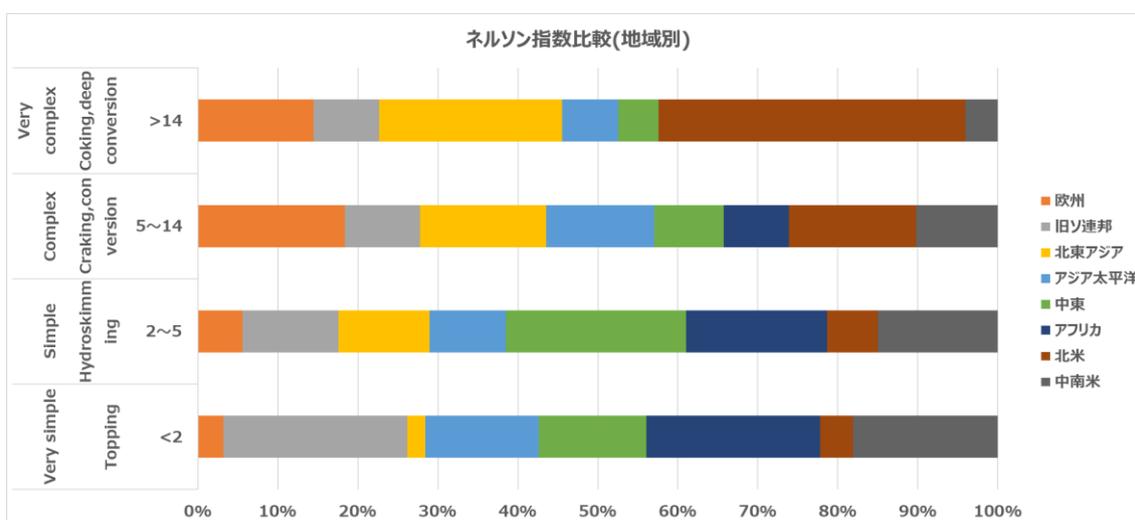


図 4.1.3 地域毎のネルソン指数比較（割合）

出所：ENEOS 総研データを元に JPEC 作成

次に、石化品製造能力率について比較した。石化品製造能力比率 0~4%は、燃料油特化型に製油所、4~12%は、石化品生産も指向した製油所といえる。

また、12%以上は、石化品生産に特化または石化品製品を主力にした製油所といえ、北東アジアに多く存在している。

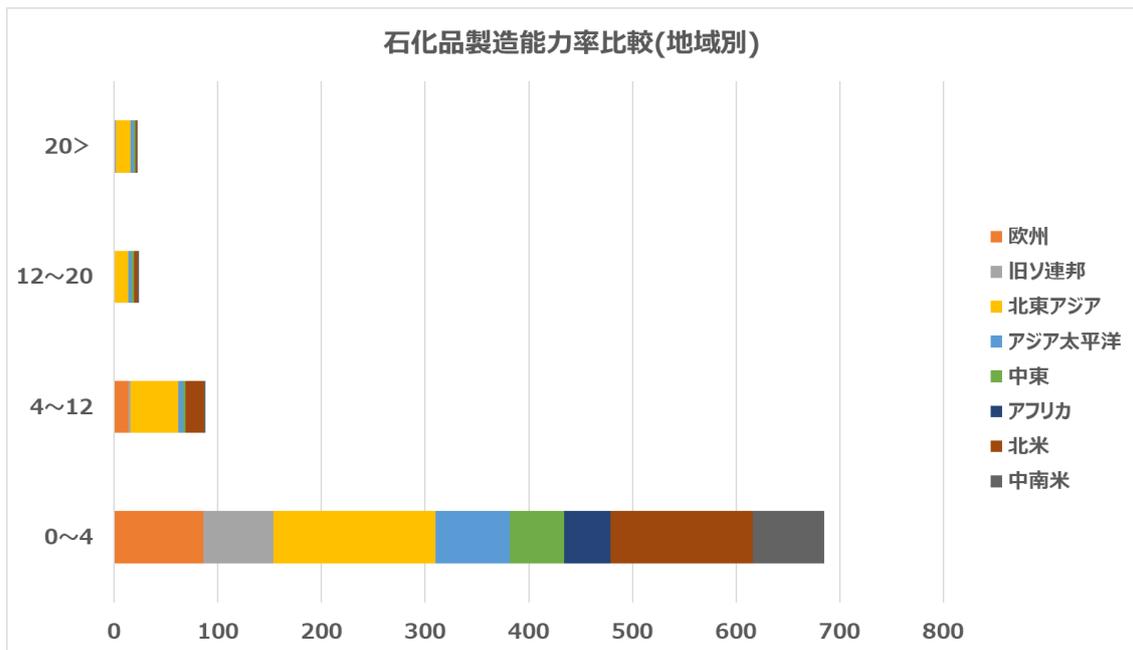


図 4.1.4 地域毎の石化品製造能力率比較（製油所数）

出所：ENEOS 総研データを元に JPEC 作成

表 4.1.2 地域毎の石化品製造能力率比較（製油所数）

石化品製造能力率(製油所数)

能力率(%)	全体	欧州	旧ソ連邦	北東アジア	アジア太平洋	中東	アフリカ	北米	中南米
0~4	685	86	68	156	72	52	45	137	69
4~12	88	14	2	46	5	2	0	18	1
12~20	24	0	0	14	3	2	0	4	1
20>	23	1	1	14	3	2	0	1	1
合計	820	101	71	230	83	58	45	160	72

出所：ENEOS 総研データを元に JPEC 作成

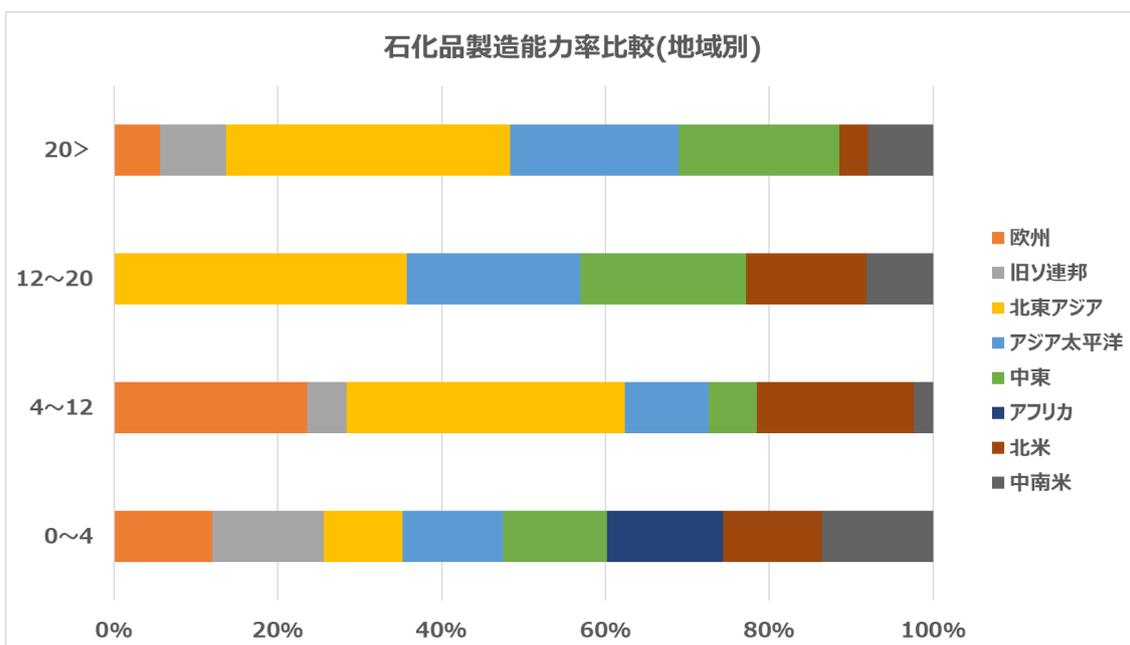


図 4.1.5 地域毎の石化品製造能力率比較（割合）

出所：ENEOS 総研データを元に JPEC 作成

さらに、石化品製造能力率について、製油所レベルで特長的な製油所と平均化した日本の製油所との比較を図 4.1.6 に示す。特に石化品製造能力率 50%を超える製油所は、化成品製造を主目的とした FUJIAN FUHAI CHUANG PETROCHEMICAL、HENGLI PETROCHEMICAL 等の中国の最新製油所である。

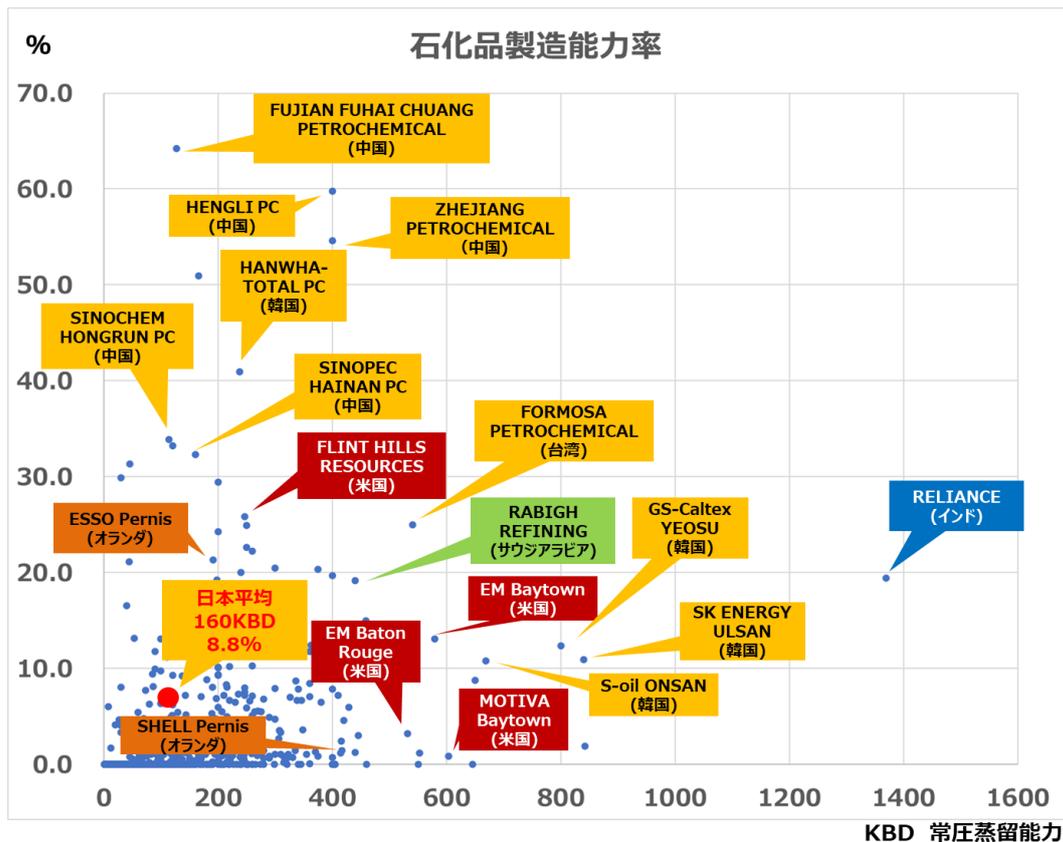


図 4.1.6 石化品製造能力率で特徴的な製油所と日本（平均）の位置づけ

出所：ENEOS 総研データを元に JPEC 作成

分析において、小規模製油所には特殊な装置構成の製油所が多く、地域別や国別の製油所の特徴をよりはっきりみるために小規模製油所を除いて評価した。

そこで、日本の製油所の常圧蒸留装置能力の平均値である 160KBD 以上の世界の製油所を対象として平均値を求めた。地域別の平均値を表 4.1.3 に、原油輸入実績上位を中心とした主要国別の平均値を表 4.1.4 に示す。比較のために、新たに台湾、サウジアラビア、UAE を追加した。

表 4.1.3 地域別の競争力指標の平均値（160KBD 以上の製油所対象）

	残油処理装置装備率(%)	石化品製造能力率(%)	ネルソン指数
ASIA AND PACIFIC	26.8	7.2	7.8
AFRICA	10.6	1.5	7.3
EUROPE	23.7	2.7	8.4
FORMER USSR	11.7	1.4	6.5
MIDDLE EAST	20.4	2.8	7.5
NORTH AMERICA	50.0	3.9	10.9
NORTH EAST ASIA	47.4	11.7	9.0
SOUTH & CENTRAL AMERICA	43.3	1.1	7.4

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に ENEOS 総研作成

残油処理装置装備率は、北米、北東アジア、中南米地域が高く、重質油に対応した装置構成といえる。石化品製造能力率の比較では、北米（中南米含む）地域が低く、ガソリン主体の生産運営を実施しているといえる。一方、石化品製造能力率は、北東アジア・アジア太平洋地域が高い。欧州地域および中東地域の残油処理装置装備率は高くないが、この理由としては、これらの地域は比較的減圧軽油水素化分解装置の能力が大きく、残油処理装置装備率には含めていないことが影響していると考えられる。ネルソン指数に関しては、北米地域が最も高い。

表 4.1.4 主要国の競争力指標の平均値（160KBD 以上の製油所対象）

	残油処理装置装備率(%)	石化品製造能力率(%)	ネルソン指数
中国	48.9	11.6	9.3
日本	52.4	8.5	9.6
韓国	28.8	17.3	6.8
台湾	52.9	11.3	7.7
インド	31.7	4.5	8.4
シンガポール	7.6	7.4	6.8
サウジアラビア	12.8	3.7	6.4
UAE	9.8	1.0	9.7
ドイツ	21.9	3.9	7.8
イタリア	20.3	0.6	8.5
フランス	13.7	2.7	9.0
スペイン	18.9	2.5	7.4
オランダ	18.3	8.1	6.4
ベルギー	41.7	5.1	8.1
USA	52.6	4.6	11.4

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に ENEOS 総研作成

国単位で見ると、残油処理装置装備率は、米国、台湾、日本、中国（韓国は、常圧蒸留装置にコンデンセート蒸留装置を含めているため 10%弱数値が低くでている）が高く、欧州では、ベルギーが高い（コーカー装置、特に重油直接脱硫装置の装備率が高いため）。石化品製造能力率は、韓国、中国、台湾、日本と高い。欧州の中では、オランダが高い。

#### 4.2 主要原油輸入国の製油所装置構成の推移

主要原油輸入国の 2020 年の製油所装置構成比較（各装置毎に順位で色付けたものを含む）を表 4.2.1、4.2.2 に、主要原油輸入国の製油所装置構成の推移を、図 4.2.1～4.2.14 に示す。また、競争力強化のための原油多角化の観点から、その可能性について特記的な製油所（韓国）の例を紹介する。なお、製油所装置構成推移の図の縦軸は、石化品製造や残油処理に関連して重要と考える装置の常圧蒸留装置に対する能力比率を表している。

表 4.2.1 主要原油輸入国の製油所装置構成比較 (2020 年 ; %)

	日本	中国	韓国	台湾	インド	シンガポール	サウジアラビア	UAE	ドイツ	イタリア	フランス	スペイン	オランダ	ベルギー	USA
常圧蒸留装置	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
コンデンセート蒸留装置	1.0	0.7	23.1	0.0	0.1	12.6	7.7	64.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
減圧蒸留装置	45.3	58.2	17.4	48.7	57.8	25.5	44.1	10.6	46.2	39.9	46.2	40.4	31.6	39.9	48.8
溶剤脱れき装置	1.1	1.4	3.3	1.1	1.9	0.0	1.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.5	0.8	6.2	2.5
コーカー装置	3.2	14.0	1.2	18.2	13.4	0.0	7.5	3.7	5.3	0.0	0.0	9.6	3.1	10.3	15.9
ビスブレーカー装置	0.0	0.9	0.0	3.0	1.7	10.6	3.8	0.0	6.7	10.1	8.0	7.2	6.8	6.4	0.1
半再生式接触改質装置	8.9	0.8	0.8	0.6	2.3	3.0	2.7	2.4	6.7	6.9	12.4	10.6	4.8	7.0	7.0
連続再生式接触改質装置	10.0	11.3	1.5	9.5	5.2	7.7	9.2	7.7	9.0	6.5	1.8	1.4	6.9	7.2	13.0
芳香族用接触改質装置	2.5	6.2	17.5	1.7	1.5	4.1	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.1
流動接触分解装置(FCC)	18.8	8.0	1.8	15.3	7.8	0.0	4.4	0.0	15.4	16.9	16.8	12.6	8.6	16.8	28.0
重油(残油)流動接触分解装置(RFCC)	10.2	20.1	16.4	3.8	20.8	6.2	5.2	15.8	1.1	6.0	0.0	0.0	0.7	0.0	2.2
完全分解型VGO水素化分解装置	1.2	9.2	7.5	6.8	4.4	5.4	15.2	8.9	8.6	2.4	6.8	9.2	15.8	0.0	11.1
減圧軽油(VGO)[マイルド]水素化分解装置	1.8	4.8	1.3	4.2	3.7	3.9	1.0	7.1	2.1	16.7	4.3	7.9	0.0	8.0	0.8
(減圧)残油水素化分解装置	1.6	0.8	2.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0	1.7	0.0	0.7
ナフサ脱硫装置	26.8	16.2	22.7	15.5	8.8	24.0	23.1	28.2	21.8	18.8	23.0	16.1	23.5	24.6	24.6
ガソリン脱硫装置	12.6	16.4	4.8	4.6	2.4	0.0	2.0	10.6	2.6	5.8	0.7	1.8	0.0	7.2	17.4
灯油・軽油脱硫装置	58.8	38.9	32.4	40.1	24.3	38.3	36.7	45.2	42.6	38.3	42.9	35.8	33.0	42.8	34.4
重油間接脱硫(減圧軽油)装置	20.9	5.0	0.0	15.0	3.6	0.0	7.1	0.0	10.9	1.2	3.2	1.8	0.0	12.0	15.9
重油直接脱硫装置(直脱)((常圧)残油脱硫装置)	14.5	8.3	16.8	0.0	2.6	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.7	0.7
アルキレーション装置	3.0	3.0	3.1	1.9	0.3	0.7	2.2	4.6	1.4	1.9	1.8	1.2	1.2	2.2	6.9
イソブタン用異性化装置	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	2.9	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
C5-C6用異性化装置	0.8	0.7	0.0	2.9	0.1	0.0	3.3	6.1	3.9	3.3	1.8	2.9	0.7	0.5	3.8
アスファルト装置	1.5	4.4	1.7	1.7	5.1	2.7	1.3	0.0	3.8	1.8	3.9	3.2	0.4	5.4	3.8
潤滑油製造装置	1.2	1.5	4.2	0.6	1.0	4.0	0.6	1.4	0.7	1.2	1.8	1.3	0.0	0.0	1.3
重質残油ガス化装置	0.3	0.6	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.0	1.7	2.6	0.0	0.0	0.8	0.0	0.1
ポリガソリン用ポリマー装置	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3

出所：E N E O S 総研データを元に JPEC 作成

表 4.2.2 主要原油輸入国の製油所装置構成比較（各装置毎に順位で色付け）

	日本	中国	韓国	台湾	インド	シンガポール	サウジアラビア	UAE	ドイツ	イタリア	フランス	スペイン	オランダ	ベルギー	USA
常圧蒸留装置	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
コンデンセート蒸留装置	1.0	0.7	23.1	0.0	0.1	12.6	7.7	64.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
減圧蒸留装置	45.3	58.2	17.4	48.7	57.8	25.5	44.1	10.6	46.2	39.9	46.2	40.4	31.6	39.9	48.8
溶剤脱れき装置	1.1	1.4	3.3	1.1	1.9	0.0	1.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.5	0.8	6.2	2.5
コーカー装置	3.2	14.0	1.2	18.2	13.4	0.0	7.5	3.7	5.3	0.0	0.0	9.6	3.1	10.3	15.9
ビスプレーカー装置	0.0	0.9	0.0	3.0	1.7	10.6	3.8	0.0	6.7	10.1	8.0	7.2	6.8	6.4	0.1
半再生式接触改質装置	8.9	0.8	0.8	0.6	2.3	3.0	2.7	2.4	6.7	6.9	12.4	10.6	4.8	7.0	7.0
連続再生式接触改質装置	10.0	11.3	1.5	9.5	5.2	7.7	9.2	7.7	9.0	6.5	1.8	1.4	6.9	7.2	13.0
芳香族用接触改質装置	2.5	6.2	17.5	1.7	1.5	4.1	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.1
流動接触分解装置(FCC)	18.8	8.0	1.8	15.3	7.8	0.0	4.4	0.0	15.4	16.9	16.8	12.6	8.6	16.8	28.0
重油(残油)流動接触分解装置(RFCC)	10.2	20.1	16.4	3.8	20.8	6.2	5.2	15.8	1.1	6.0	0.0	0.0	0.7	0.0	2.2
完全分解型VGO水素化分解装置	1.2	9.2	7.5	6.8	4.4	5.4	15.2	8.9	8.6	2.4	6.8	9.2	15.8	0.0	11.1
減圧軽油(VGO)[マイルド]水素化分解装置	1.8	4.8	1.3	4.2	3.7	3.9	1.0	7.1	2.1	16.7	4.3	7.9	0.0	8.0	0.8
(減圧)残油水素化分解装置	1.6	0.8	2.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0	1.7	0.0	0.7
ナフサ脱硫装置	26.8	16.2	22.7	15.5	8.8	24.0	23.1	28.2	21.8	18.8	23.0	16.1	23.5	24.6	24.6
ガソリン脱硫装置	12.6	16.4	4.8	4.6	2.4	0.0	2.0	10.6	2.6	5.8	0.7	1.8	0.0	7.2	17.4
灯油・軽油脱硫装置	58.8	38.9	32.4	40.1	24.3	38.3	36.7	45.2	42.6	38.3	42.9	35.8	33.0	42.8	34.4
重油間接脱硫(減圧軽油)装置	20.9	5.0	0.0	15.0	3.6	0.0	7.1	0.0	10.9	1.2	3.2	1.8	0.0	12.0	15.9
重油直接脱硫装置(直脱)((常圧)残油脱硫装置)	14.5	8.3	16.8	0.0	2.6	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.7	0.7
アルキレーション装置	3.0	3.0	3.1	1.9	0.3	0.7	2.2	4.6	1.4	1.9	1.8	1.2	1.2	2.2	6.9
イソブタン用異性化装置	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	2.9	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
C5-C6用異性化装置	0.8	0.7	0.0	2.9	0.1	0.0	3.3	6.1	3.9	3.3	1.8	2.9	0.7	0.5	3.8
アスファルト装置	1.5	4.4	1.7	1.7	5.1	2.7	1.3	0.0	3.8	1.8	3.9	3.2	0.4	5.4	3.8
潤滑油製造装置	1.2	1.5	4.2	0.6	1.0	4.0	0.6	1.4	0.7	1.2	1.8	1.3	0.0	0.0	1.3
重質残油ガス化装置	0.3	0.6	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.0	1.7	2.6	0.0	0.0	0.8	0.0	0.1
ポリガソリン用ポリマー装置	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3

各装置/常圧蒸留装置\*100(%) ■：第一位、■：第二位、■：第三位、■：第四位

出所：ENEOS総研データを元に JPEC 作成

以下に、各国の装置構成の特長を記す。

- ・コンデンセート蒸留装置は、韓国の構成比の高さが目立つ。ナフサ代替等石油化学品製造に力点が置かれていることがわかる。
- ・コーカー装置に関しては、米国、アジア勢の構成比が高く、一方、ビスブレーカー装置に関しては、欧州製の構成比が高い。
- ・芳香族用接触改質装置に関しても、韓国の構成比の高さが目立つ。
- ・FCC/RFCC装置に関しては、RFCC装置については、アジア勢の構成比が高い。
- ・水素化分解装置に関しては、欧州勢の構成比が高い。
- ・脱硫装置に関しては、各国・地域の需要状況を反映して、米国、中国等が、ガソリン脱硫装置の構成比が高い。重油直接脱硫装置いわゆる直脱装置は、日本、中国、韓国の装置構成比が高く、欧州では、ベルギーの構成比の高さが際立っている。

次に、主要原油輸入国の製油所装置構成の推移を示す。



図 4.2.1 ドイツの製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に ENEOS 総研作成

ドイツは、2007～2009 年にかけて、減圧軽油水素化分解装置、ビスブレイカーの  
 増設が行なわれている。

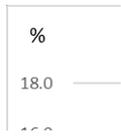
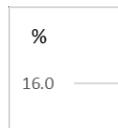


図 4.2.2 オランダの製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に ENEOS 総研作成

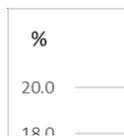
オランダは、2018年より、減圧軽油水素化分解装置の能増が行われている。



#### 図 4.2.3 スペインの製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE等を元にENEOS総研作成

スペインは、2009年～2012年にかけて、減圧軽油水素化分解装置・コーカー装置の大幅能増が行われている。



#### 図 4.2.4 イタリアの製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE等を元にENEOS総研作成

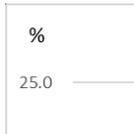


図 4.2.5 フランスの製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に ENEOS 総研作成

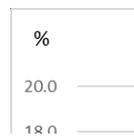


図 4.2.6 ベルギーの製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に ENEOS 総研作成

ベルギーは、2016年より、コーカー・ビスブレイカー、減圧軽油水素化分解装置の能増がなされている。

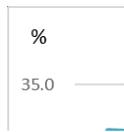


図 4.2.7 米国の製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に ENEOS 総研作成

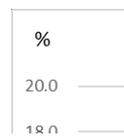


図 4.2.8 インドの製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に ENEOS 総研作成

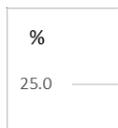


図 4.2.9 中国の製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に ENEOS 総研作成

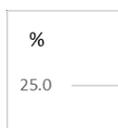


図 4.2.10 韓国の製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に ENEOS 総研作成

韓国の場合、コンデンセート蒸留装置の能力比率が、2010年より急激に増加している。この動きに連動して、韓国の石油製品生産比率において2009年頃からナフサ生産比率が増加している（図4.2.11参照）。また、コンデンセート蒸留装置の能力比率上昇に伴い、芳香族用接触改質装置の能力比率も上昇して石化品生産の増強がなされている。

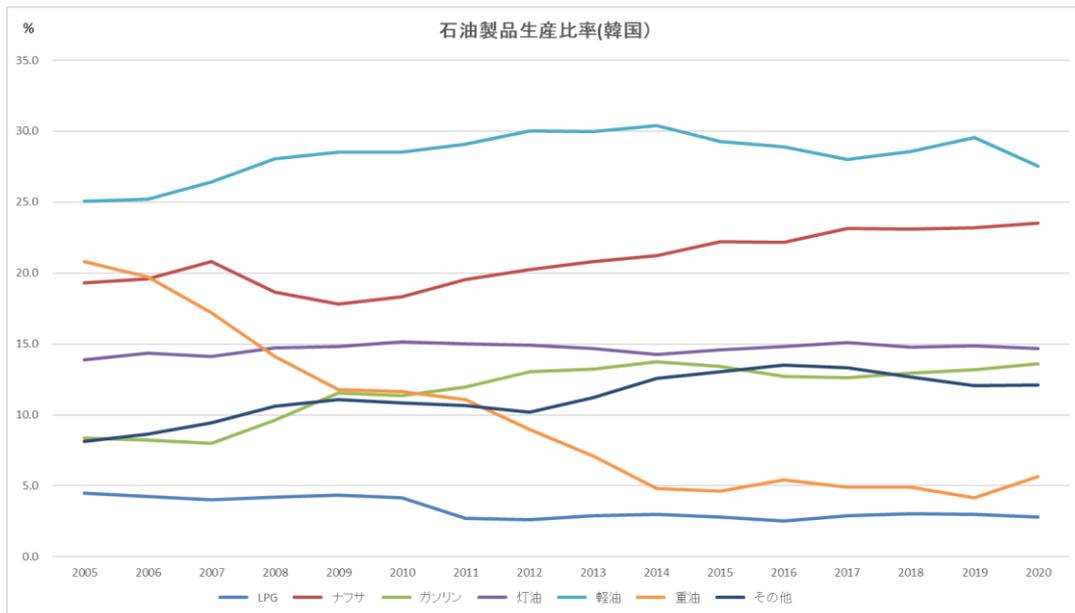


図 4.2.11 韓国の石油製品生産比率

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に ENEOS 総研作成

製油所の例として、韓国の Onsan 製油所（韓国 S-Oil）の装置構成推移を、図 4.2.12 に示す。2011年に石化品製造能力増強のためコンデンセート蒸留塔と芳香族用接触改質装置を増強している。また、2018年に重質油対応のため重油直接脱硫装置と残油流動接触分解装置を増強している

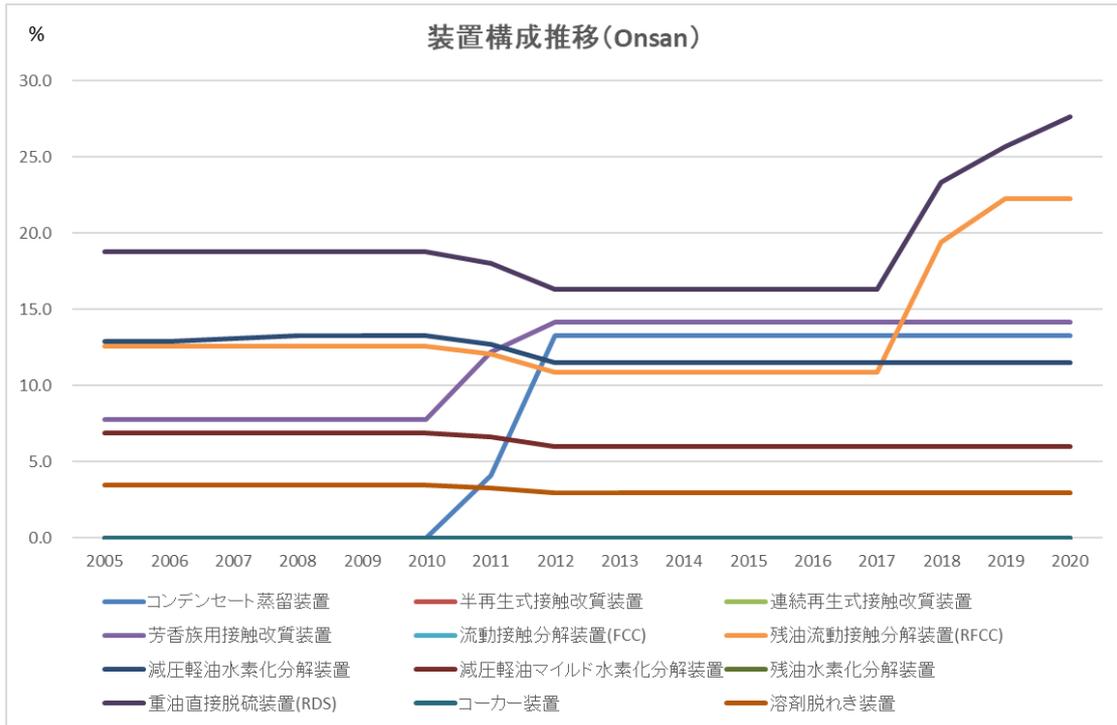


図 4.2.12 韓国 Onsan 製油所の装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に E N E O S 総研作成

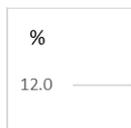


図 4.2.13 シンガポールの製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元に E N E O S 総研作成

%  
25.0

図 4.2.14 日本の製油所装置構成推移

出所：ICIS SUPPLY&DEMAND DATABASE 等を元にENEOS 総研作成

日本は、2014.1～2014.3の高度化法1次告示、続く、2014.4～2017.3の高度化法2次告示、2017.7の高度化法3次告示による重質油分解装置向上、残油処理装置向上、減圧蒸留残渣油の処理率向上の義務付けにより、常圧蒸留装置の削減や、重質油分解装置の新設・増強等が実施されることにより、FCC/RFCC等装置向上しているのがわかる。

## 5. 原油調達フレキシビリティ

原油原料調達フレキシビリティの比較検討を実施した。

### 5.1 検討方法

検討方法について記述する。主要原油輸入国のドイツ、オランダ、米国、韓国、中国、日本、参考としてシンガポールを含めた7ヶ国について、2020年の石油製品生産および製油所装置構成状況をもとに、生産する石油製品が実勢に合うよう、装置稼働率もできるだけ100%になるように前提をおいて、実勢のケースとして計算を実施した。結果、実勢時の推定API値を基準に、原油を軽質化または重質化させた場合について計算を行った。精製マージンが最適になるように精製マージン変化を求めた。

例としてドイツの場合を示す。ドイツ製油所の生産状況（2020年）について、次の情報を踏まえて分析した。

表 5.1.1 ドイツの石油製品需給（千BD）

製品名	需要量 A	生産量 B	B/A*100
LPG	115	100	87
ナフサ	309	159	52
ガソリン	255	507	199
灯油	101	102	101
軽油	881	880	100
重油	60	103	172
その他	161	273	170
合計	1882	2124	113

注）石油製品需給データとしては、別に需要量と生産量の差の値もあるが、表中の両値の差と一致しない。当検討においては、表記の両値を踏まえ、分析することとした。

表 5.1.2 ドイツ製油所全体の各所精製装置能力（千 BD）

装置名	能力 KBD
原油常圧蒸留	2,066
減圧蒸留	955
重質ナフサ接触改質	324
重油流動接触分解	341
減圧軽油水素化分解	177
減圧軽油脱硫	268
常圧残渣油直接脱硫	0
減圧残渣油直接脱硫	0
コーカー	145
アルキレーション	29

注) 表記中の装置分類は我が国製油所の分析例と同様とすることとした。

残渣油水素化関連装置能力は枠内融通可能とした。コーカー装置には、重質残油ガス化装置の 11 千 BD を含めて記載した。

ドイツの石油製品需給バランスにおける特徴は、安定供給確保面で着目されるガソリンおよび灯軽油についてそれらの生産量が需要量に対しそれぞれ 2 倍および 1 倍で、合計すると 1.2 倍となっている。すなわち、平常時における輸出比率が対需要量比 20%程度となっている。また、石化原料であるナフサ需要量に対する生産量比率は 52%である。

装置能力面では、重質ナフサ接触改質装置にはその BTX 生産能力面に影響する装置分類として連続再生方式と固定床方式等がある。当分析においては前者装置能力を 255 千 BD および後者について 69 千 BD、合計 324 千 BD として想定することとした。また、重油流動接触分解装置にも、減圧軽油を原料とする装置と常圧残渣油を原料とする装置があり、それらの想定によって製油所のバランスは大きく変動する。当分析においては重油脱硫装置能力（減圧軽油脱硫についてはあるが、常圧残渣脱硫能力無し）の状態も勘案し、前者の装置能力を 318 千 BD（比較的高硫黄減圧軽油を脱硫した原料の処理を主体とする）とし、後者については 23 千 BD（低硫黄重油処理を想定）とし、合計 341 千 BD として想定することとした。コーカー装置に含めて記載した重質残油ガス化装置能力は、フレキシコーカー能力 36 千 BD として想定し、高硫黄および低硫黄の減圧残渣油（アスファルト）処理を行うデイレードコーカー能力を 109 千 BD（内、低硫黄残渣油を処理する電極用コーク生産用 54 千 BD）と想定することとした。

ドイツ製油所生産バランスの分析結果（実勢ケース）を表 5.1.3 に示す。

表 5.1.3 ドイツ製油所生産バランスの分析結果（実勢ケース）

ドイツ製油所		独製油所	
原油分類名 処理量 千BD・比率%	推計生産状況	製品等名 生産量 千BD	推計生産状況
超軽質油・コンデンセート	269	プロパン	53
アラビアンエクストラライト	965	プロピレン (PP)	31
アラビアンライト	0	ブタン・ブテン	74
アラビアンミディアム	1	ナフサ	245
アラビアンヘビー	0	ガソリン	507
低硫黄原油（米産含む）	831	BTX (B)	82
合計 千BD	2066	ジェット・灯油	101
超軽質油・コンデンセート	13	軽油・A重油	900
アラビアンエクストラライト	47	潤滑油ベースオイル	20
アラビアンライト	0	アスファルト	0
アラビアンミディアム	0	低硫黄船舶用等C重油	94
アラビアンヘビー	0	高硫黄C重油・コークス	35
低硫黄原油（米産含む）	40	合計	2,142
合計 %	100	同上製品等別の対原料油得率%	99.0
天然ガス(35)・ETBE(63) 千BD	98	プロパン	2.5
参考(原油比重 API度)	40.1	プロピレン (PP)	1.4
主要装置名（能力千BD）	稼働率%	ブタン・ブテン	3.4
原油常圧蒸留（2066）	100	ナフサ	11.3
減圧蒸留（955）	53	ガソリン	23.4
重質ナフサ接触改質（324）	100	BTX	3.8
重油流動接触分解（341）	100	ジェット・灯油	4.7
減圧軽油水素化分解（177）	100	軽油・A重油	41.6
減圧軽油脱硫（268）	44	潤滑油ベースオイル	0.9
常圧残渣油直接脱硫（0）	-	アスファルト	0.0
減圧残渣油直接脱硫(0)	-	低硫黄船舶用等C重油	4.3
コーカー（145）	100	高硫黄C重油・コークス	1.6
アルキレーション（29）	100	合計	99.0
精製マージン 百万\$/年	5641	参考(PP+BTX)	5.2
精製マージン \$/BBL	7.5	参考(PP+BTX+N)	16.6

ガソリン、ジェット・灯油および軽油・A重油の生産量は、「ドイツの石油製品需給データ」と比較して、ガソリン、ジェット・灯油については調和し、軽油・A重油について+20千BD（+2%）なり、これらの主要製品についてはほぼ整合する生産バランスが得られた。また、装置稼働状況については、常圧蒸留装置（2066千BD）はフル稼働で、減圧蒸留および減圧軽油脱硫を除く各装置もフル稼働状態となった。なお、欧州におけるバイオ燃料活用進展を踏まえ、ここではETBE（他のバイオ燃料も含めて想定）のガソリンへの混合比率を10から12.5%の範囲と想定した。

一方、原油選択状態については表に示すように、全原油に占める比率としては、超軽質原油は13%、中東系軽質原油は47%および欧米産軽質原油は40%となり、原油比重は約40API度と比較的軽質となった。ここでは超軽質原油選択について、残渣油処理装置群がフル稼働で有る限り許しているため、比較的大きいものとなり、全体の原油比重を軽質化させたと考えられる。

次に原油選択重質化を行った場合の生産バランスを表5.1.4に示す。

表 5.1.4 ドイツ製油所生産バランスの分析結果（原油選択重質化ケース）

ドイツ製油所 原油分類名 処理量 千BD・比率%	既存製油所 推計生産状況	独製油所 製品等名 生産量 千BD	既存製油所 推計生産状況
超軽質油・コンデンセート	457	プロパン	63
アラビアンエクストラライト	32	プロピレン (PP)	31
アラビアンライト	0	ブタン・ブテン	75
アラビアンミディアム	1450	ナフサ	178
アラビアンヘビー	0	ガソリン	507
低硫黄原油（米産含む）	127	BTX (B)	82
合計 千BD	2066	ジェット・灯油	101
超軽質油・コンデンセート	22	軽油・A重油	881
アラビアンエクストラライト	2	潤滑油ベースオイル	20
アラビアンライト	0	アスファルト	0
アラビアンミディアム	70	低硫黄船舶用等C重油	19
アラビアンヘビー	0	高硫黄C重油・コークス	27
低硫黄原油（米産含む）	6	合計	1,985
合計 %	100	同上製品等別の対原料油得率%	91.5
天然ガス(40)・ETBE(63) 千BD	103	プロパン	2.9
参考(原油比重 API度)	35.2	プロピレン (PP)	1.4
主要装置名 (能力千BD)	稼働率%	ブタン・ブテン	3.5
原油常圧蒸留 (2066)	100	ナフサ	8.2
減圧蒸留 (955)	79	ガソリン	23.4
重質ナフサ接触改質 (324)	100	BTX	3.8
重油流動接触分解 (341)	100	ジェット・灯油	4.7
減圧軽油水素化分解 (177)	100	軽油・A重油	40.6
減圧軽油脱硫 (268)	100	潤滑油ベースオイル	0.9
常圧残渣油直接脱硫 (0)	-	アスファルト	0.0
減圧残渣油直接脱硫(0)	-	低硫黄船舶用等C重油	0.9
コーカー (145)	83	高硫黄C重油・コークス	1.2
アルキレーション (29)	100	合計	91.5
精製マージン 百万\$/年	4255	参考(PP+BTX)	5.2
精製マージン \$/BBL	5.6	参考(PP+BTX)	13.4

実勢ケースと同様にガソリン、ジェット・灯油および軽油・A重油の生産量は、「ドイツの石油製品需給データ」と比較して、主要製品（ガソリン、ジェット・灯油および軽油・A重油）について、整合する生産バランスが得られた。一方、原油選択状態については表に示すように、全原油中の比率は超軽質原油 22%、中東系軽質原油は 2%、中東系重質原油は 70%および欧州軽質原油は 6%となり、原油比重は約 35API 度へ重質化した。また、装置稼働状況については、常圧蒸留装置（2066 千 BD）はフル稼働で減圧蒸留、減圧軽油脱硫およびコーカーを除く各装置もフル稼働状態となった。コーカー稼働を下げた要因は、高硫黄原油での重質化が図られたため低硫黄減圧残渣油原料が減少したことである。なお、ドイツ製油所にはアスファルト製造装置も有り、この原料を独製油所が生産する場合にはさらに重質な原油選択が行われることになる。

精製マージンを算定するに当たっての「コストおよび販売価格」を表 5.1.5 のように想定することとした。結果、ドイツ製油所の場合、実勢ケースで、精製マージン 7.5\$/BBL、API 40.1、原油選択重質化ケースにおいて、精製マージン 5.6\$/BBL、API 35.2 の値を得た。同様なことを、オランダ、米国、中国、韓国、シンガポール（星）、日本（日本の場合は、2030 年を想定）各国製油所で実施した。

表 5.1.5 ドイツ製油所の各種原油、原料油および製品コストと価格の設定

原油・原料油関連	\$/バレル	製品関連	\$/バレル
超軽質油・コンデンセート	68	プロパン	46
アラビアンエクストラライト	68	プロピレン (PP)	85
アラビアンライト	66	エタン・ブタン・ブテン	46
アラビアンミディアム	64	ナフサ	63
アラビアンヘビー	62	ガソリン	81
低硫黄原油	71	BTX (B)	116
米州原油	68	ジェット・灯油	79
E-FUEL	66	軽油・A重油	79
軽質ナフサ	63	潤滑油ベースオイル	79
ガソリン基材 (RN)	52	アスファルト	52
ETBE・エタノール	66	低硫黄船舶用重油	72
重油原料	66	高硫黄C重油	52
天然ガス	46	高硫黄コークス	28
		電極用コークス	79

## 5.2 各国・代表製油所の精製マージン

原油原料調達フレキシビリティの比較検討の結果を、図 5.2 に示す。横軸に残渣油処理装置能力（残渣油処理装置能力を常圧蒸留装置で割った比率）に縦軸に 1BBL 当たりの精製マージンを示している。青印は、実勢ケース時の値で、黄土色が、原油調達を変化（重質化または軽質化）させた時の値を表す。残渣油処理装置能力が大きい程、精製マージンが増加する相関がある。

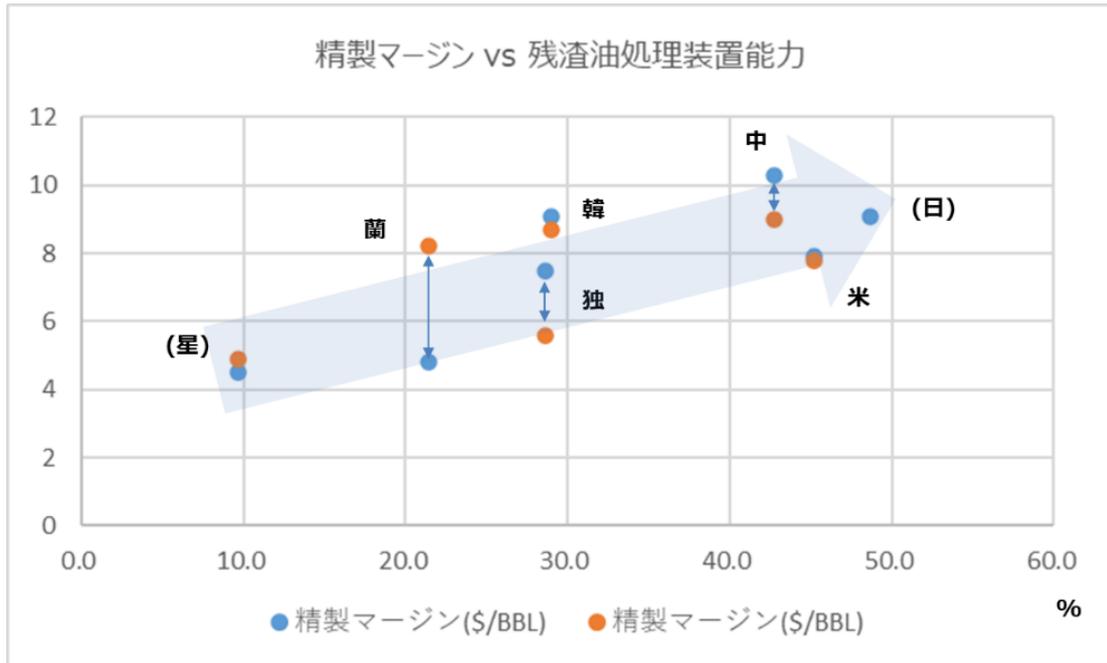


図 5.2 残渣油処理装置能力と精製マージンの関係

### 5.3 考察

これら 7 ヶ国の原油調達状況を示すべく、図 5.3 に中東系原油の調達割合（全原油処理量に対する比率）を X 軸に、全処理原油平均比重を Y 軸にプロットした（なお、2020 年の我が国の値は実測値に基づく）。

我が国の位置は、図に示すように、最も中東系原油調達率が高く、従来からこの中東原油依存度を下げることが課題とされて来た。一方、全処理原油平均比重は日米中の、最も重質な原油処理可能なグループに入っており、原油加工能力の高さに支えられて、付加価値面での国際競争力は比較的高いと考えられる。実勢の調達原油比重は 7 ヶ国中、平均的な調達状況にあり、我が国製油所は比較的軽重質原油をフレキシブルに選択出来る状況を確保していると考えられる。

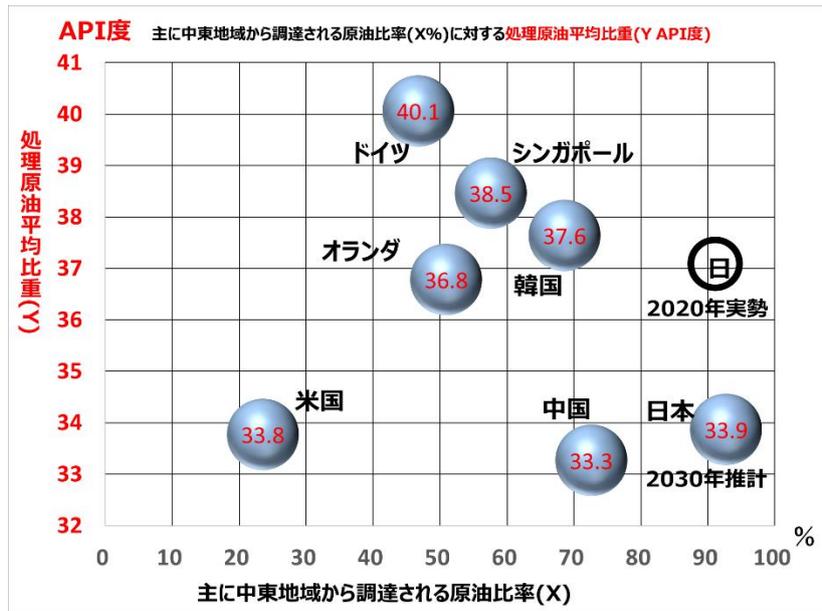


図 5.3 中東からの調達原油比率と API の関係

6. 国内への低炭素燃料混合処理の適用可能性

世界的に環境問題に対する関心は年々高まっており、地球温暖化対策として二酸化炭素の削減は各国の主要な課題となりつつある。二酸化炭素の排出に関しては、原油種を考慮した原油の採掘から装置構成の異なる製油所での生産における炭素強度の評価が、オープンツールソース (PRELIM:Petroleum Refinery Life Cycle Inventory Model) を用いた研究として報告<sup>4)</sup>されている。

製油所においては、操業の最適化による二酸化炭素の低減のほか、燃料については、水素、バイオ、合成燃料といった低炭素の新燃料が想定され、燃料品質安定のため、製油所での混合処理する Co-processing 技術が検討され始めている。さらには、プラスチックを原料に戻し再利用するプラスチック循環も検討されているおり、ケミカルリサイクルでは製油所での処理が想定され、新しい製油所の在り方が模索されようとしている。欧州においては、FT-Wax を水素化分解装置で軽油を中心に製造するケーススタディも検討されている<sup>5) 6)</sup>。

今回、製油所の最大活用を目的に、再生可能エネルギーを活用した合成燃料 (E-Fuel) の処理による併産生産について検討した。

# E-fuels integration in refineries

## Refinery 2050 modelling exercise: limited e-fuel case

Extra CO<sub>2</sub> imported from other industrial sites  
(Industrial symbiosis - 75%)

As a reference, future estimate investment: ~ 450-650 M€ for a 400 t/d plant (~2.2-2.5 €/l<sub>2050</sub> equivalent)

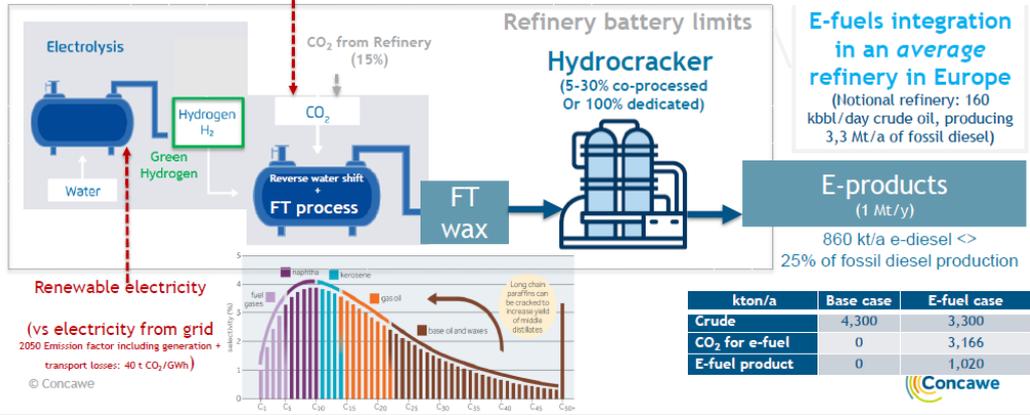


図 6 e-fuel 共処理（水素化分解装置）ケースの検討

出所：ERTC Conference Warsaw, 4 7th Nov 2019

### 6.1 検討方法

我が国製油所モデル（図 6.1）を活用して、2030 年の需要想定(昨年度調査事業<sup>6)</sup>て実施)をもとに、実勢ケースにおける生産バランスを求めた。次に、FCC 装置前（➡矢印部分）に E-Fuel (VGO 相当) 全量を、約 100 万 BD 投入した場合（E-Fuel100%の場合）を想定して計算を実施した。さらに、投入した E-Fuel が、ガソリン、プロピレン等の主要製品にどの程度含まれているかについても計算を実施した。

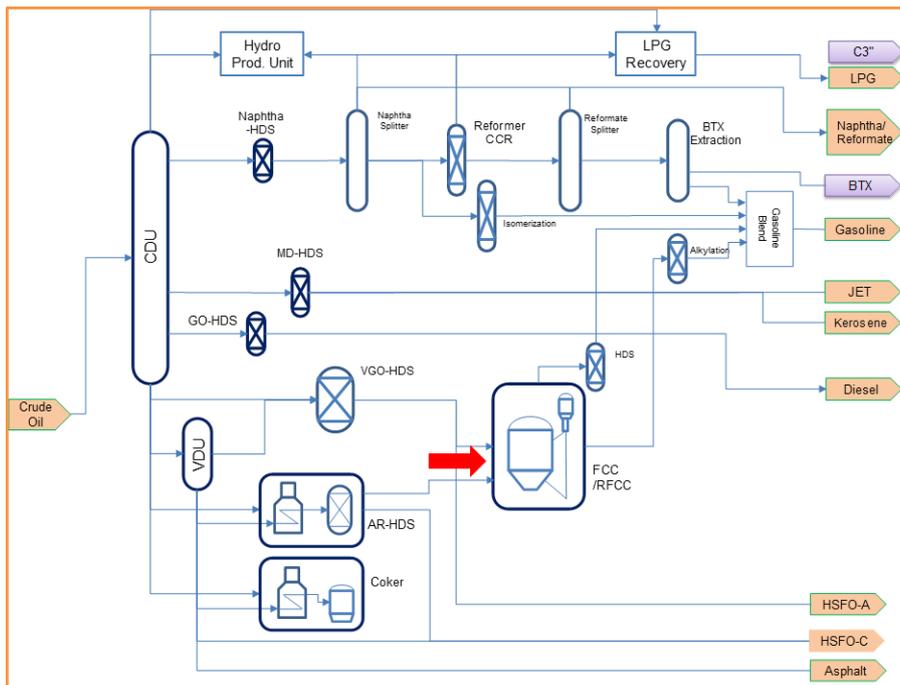


図 6.1 我が国製油所モデル

## 6.2 検討結果と課題

実勢ケースの検討結果を、表 6.2.1 に、E-Fuel (VGO 相当)100 万 BD 投入ケース (実際は、98.3 万 BD を投入、残りの 1.7 万 BD は、低硫黄船舶用重油用の基材として使用する場合を想定)を、表 6.2.2 に示す。ガソリン、ジェット・灯油および軽油・A 重油の生産量は、「我が国の石油製品需給データ」の生産量と比較して、ガソリン (BTX 含) は、ジェット・灯油についておよび軽油・A 重油の順に 10%, 8% および 10% 多くなり、これらの主要製品を合わせた数量について 9% 増となる生産バランスが得られた。

一方、原油選択状態については表に示すように全原油に占める比率は、超軽質原油と中東系軽質原油は 18%、中東系中質原油は 76%、中東系重質原油は 2% および低硫黄原油は 4% となり、原油比重は 34API 度となった。実勢の我が国製油所処理原油平均比重は 37API 度程度であり、ここで推計された比重は比較的軽質となった。この要因としては、LP モデルによる推計を行っており、その目的関数が付加価値最大として設定されていることから、よりコストの割安な重質原油選択を限界まで求めたことと考えられる。また、装置稼働状況については、常圧蒸留装置 (3519 千 BD) はフル稼働で、減圧蒸留および減圧軽油脱硫を除く各装置もほぼフル稼働状態となった。なお、ETBE のガソリンへの混合比率を 5 から 10% の範囲と想定した

表 6.2.1 我が国製油所生産バランスの分析結果（実勢ケース）

我が国製油所(2030年)		我が国製油所(2030)	
原油分類名 処理量 千BD・比率%	推計生産状況	製品等名 生産量 千BD	推計生産状況
超軽質油・コンデンセート	47	プロパン	99
アラビアンエクストラライト	588	プロピレン (PP)	85
アラビアンライト	1763	ブタン・ブテン	21
アラビアンミディアム	912	ナフサ	496
アラビアンヘビー	74	ガソリン	701
低硫黄原油（米産含む）	136	BTX (B)	254
合計 千BD	3519	ジェット・灯油	510
超軽質油・コンデンセート	1	軽油・A重油	983
アラビアンエクストラライト	17	潤滑油ベースオイル	40
アラビアンライト	50	アスファルト	51
アラビアンミディアム	26	低硫黄船舶用等C重油	127
アラビアンヘビー	2	高硫黄C重油・コークス	120
低硫黄原油（米産含む）	4	合計	3,487
合計 %	100	同上製品等別の対原料油得率%	97.7
ETBE(49) 千BD	49	プロパン	2.8
参考(原油比重 API度)	33.9	プロピレン (PP)	2.4
主要装置名 (能力千BD)	稼働率%	ブタン・ブテン	0.6
原油常圧蒸留 (3519)	100	ナフサ	13.9
減圧蒸留 (1559)	67	ガソリン	19.7
重質ナフサ接触改質 (683)	100	BTX	7.1
重油流動接触分解 (983)	92	ジェット・灯油	14.3
減圧軽油水素化分解 (144)	100	軽油・A重油	27.6
減圧軽油脱硫 (891)	68	潤滑油ベースオイル	1.1
常圧残渣油直接脱硫 (504)	87	アスファルト	1.4
減圧残渣油直接脱硫 (35)	100	低硫黄船舶用等C重油	3.6
コーカー（ユリカL含:141）	85	高硫黄C重油・コークス	3.4
アルキレーション (105)	100	合計	97.7
精製マージン 百万\$/年	12133	参考(PP+BTX)	9.5
精製マージン \$/BBL	9.4	参考(PP+BTX+ナフサ)	23.4

ここでは、E-Fuel（低硫黄減圧軽油相当品と想定）約 100 万 BD を我が国製油所が、従来原油と併行処理する場合の生産バランスを分析することとした。ガソリン、ジェット・灯油および軽油・A 重油の生産量は、「我が国の石油製品需給データ」の生産量と比較して、ガソリン（BTX 含）は、ジェット・灯油についておよび軽油・A 重油の順に 8%増、5%減および 5%減となり、これらの主要製品を合わせた数量については調和する生産バランスが得られた。

一方、原油選択状態については表に示すように全原油に占める比率は、超軽質原油 19%、中東系軽質原油は 57%、中東系中質原油は 18%および低硫黄原油は 5%となり、原油比重は 40API 度となった。この原油軽質化の主要因は、E-Fuel の大規模処理による、製油所への重油留分投入増加であると考えられる。

また、装置稼働状況については、常圧蒸留装置（3519 千 BD）は 74%稼働で、減圧蒸留および減圧軽油脱硫・常圧残渣油直接脱硫・コーカーを除く各装置はほぼ 100%

ル稼働状態となった。E-Fuel は重油流動接触分解装置へ直接投入される原料となるため、また原油処理量が減少したため残渣処理装置の稼働率が減少したと考えられる。

なお、当 E-Fuel の大規模処理によって低硫黄船舶用重油も増産される。世界全体での低硫黄船舶用重油需要規模は 4 百万 BD と大きく、特に中国貿易用船舶への重油供給規模は大きい。我が国に寄港する船舶への供給可能量は 100 万 BD を越えるとも言われているので、シンガポール港への輸出も合わせると、この増産される船舶用重油は国際市場で吸収され得ると推定される。今回は、モデルケースでかつ E-Fuel を FCC・RFCC のみに 100% 投入する極端なケースであったが、混合処理の場合や FCC・RFCC への処理に加えて、水素化分解装置での処理を行うことにより、ジェット燃料等への E-Fuel 化も可能になると考えられる。

表 6.2.2 我が国製油所生産バランスの分析結果 (E-Fuel100 万 BD 処理ケース)

我が国製油所(2030年)		我が国製油所(2030年)	
原油分類名 処理量 千BD・比率%	推計生産状況	製品等名 生産量 千BD	推計生産状況
超軽質油・コンデンセート	504	プロパン	93
アラビアンエクストラライト	1477	プロピレン (PP)	91
アラビアンライト	406	ブタン・ブテン	57
アラビアンミディアム	57	ナフサ	450
アラビアンヘビー	12	ガソリン	701
低硫黄原油 (米産含む)	136	BTX (B)	235
合計 千BD	2592	ジェット・灯油	464
超軽質油・コンデンセート	19	軽油・A重油	848
アラビアンエクストラライト	57	潤滑油ベースオイル	40
アラビアンライト	16	アスファルト	51
アラビアンミディアム	2	低硫黄船舶用等C重油	659
アラビアンヘビー	0	高硫黄C重油・コークス	109
低硫黄原油 (米産含む)	5	合計	3,798
合計 %	100	同上製品等別の対原料油得率%	104.3
E-Fuel(1000)・ETBE(49) 千BD	1049	プロパン	2.6
参考(原油比重 API度)	40.2	プロピレン (PP)	2.5
主要装置名 (能力千BD)	稼働率%	ブタン・ブテン	1.6
原油常圧蒸留 (3519)	74	ナフサ	12.3
減圧蒸留 (1559)	38	ガソリン	19.3
重質ナフサ接触改質 (683)	92	BTX	6.4
重油流動接触分解 (983)	100	ジェット・灯油	12.8
減圧軽油水素化分解 (144)	100	軽油・A重油	23.3
減圧軽油脱硫 (891)	34	潤滑油ベースオイル	1.1
常圧残渣油直接脱硫 (504)	21	アスファルト	1.4
減圧残渣油直接脱硫 (35)	100	低硫黄船舶用等C重油	18.1
コーカー (ユリカ含:141)	37	高硫黄C重油・コークス	3.0
アルキレーション (105)	100	合計	104.3
精製マージン 百万\$/年	16300	参考(PP+BTX)	9.0
精製マージン \$/BBL	17.2	参考(PP+BTX+ナフサ)	21.3

投入した E-Fuel (VGO 相当) 100 万 BD が、各石油製品にどのように振り分けられたかについて表 6.2.3 に示す。主要製品において、プロピレンの全量、石化ナフサの 34%、ガソリンの 54%、BTX の 24%、軽油の 6%、A 重油の 10%、低硫黄船舶用 C 重油の 27% が、投入 E-Fuel 由来であることが示された。

表 6.2.3 E-fuel 生産物の主要石油製品への割合

主要製品名	生産量(P)	e-fuel起源基材(e)	割合(e/P*100)
プロピレン(PP)	91	91	100
石化ナフサ	450	155	34
ガソリン	701	372	53
BTX(B)	235	56	24
ジェット	262	0	0
灯油	202	0	0
軽油	721	47	6
A 重油	127	12	10
低硫黄船舶用 C 重油	659	179	27
小計	3,449	911	26

## 7. まとめ

- ・主要原油輸入国である欧州（欧州；ドイツ、オランダ、スペイン、イタリア、フランス、ベルギー）、中国、米国、インド、中国、韓国、日本の原油輸入先および地域別毎（中東、アジア、北米、南米、旧ソ連、欧州、アフリカ）の比較において、地域性により、欧州の中東比率は、約 5～40% と低く、ロシアとの結びつきが大きい。アジア（インド、韓国、日本）の中東比率は、60% 以上と高い。米国は、カナダがメインである。地域毎では、欧州では、スペインが、アジアでは、中国は、バランスがとれている。地理的因子、歴史的因子等で国によって差があるが、あらためて、日本の中東依存が際立っている。
- ・残油処理装置装備率は、北米、北東アジア、中南米地域が高く、重質油に対応した装置構成といえる。石化品製造能力率の比較では、北米（中南米含む）地域が低く、ガソリン主体の生産運営を実施しているといえる。一方、石化品製造能力率は、北東アジア・アジア太平洋地域が高い。ネルソン指数に関しては、北米地域が最も高い。
- ・残渣油処理装置能力が大きい程、精製マージンが増加する相関がある。我が国の位置は、全処理原油平均比重は日米中の、最も重質な原油処理可能なグループに入っており、原油加工能力の高さに支えられて、付加価値面での国際競争力は比較的高いと考えられる。実勢の調達原油比重は 7ヶ国中、平均的な調達状況にあり、我が国製油所は比較的軽重質原油をフレキシブルに選択出来る状況を確保していると考えられる
- ・既存装置の活用において、低炭素燃料として期待できる E-Fuel の併産処理を検

討し、従来の原油処理だけでなく、併産処理の可能性が示された。今回は、モデルケースでかつ E-Fuel を FCC・RFCC のみに 100% 投入する極端なケースであったが、混合処理の場合や FCC・RFCC への処理に加えて、水素化分解装置での処理を行うことにより、ジェット燃料等への E-Fuel 化も可能になると考えられる。

- ・製油所の競争力指標として、今回、石化品製造能力率というものを定義したが、環境対応の面から、製油所から二酸化炭素をどの程度排出しているかという炭素強度に関する指標が、今後重要になるものと思われる。

- 1) <https://www.camecon.com/what/our-work/oil-dependency-in-the-eu/>
- 2) <https://theshiftproject.org/en/article/eu-oil-depletion-2030-study/>
- 3) Mark J. Kaiser, "A review of refinery complexity applications", Pet. Sci. (2017) 14:167-194
- 4) Liang Jing, "Carbon intensity of global crude oil refining and mitigation potential" Nature Climate Change, Vol10, June 2020, 526-532
- 5) Concawe Report no.9/19 "Refinery 2050:Conceptual Assessment."
- 6) ERTC Conference Warsaw, 4 7 th Nov 2019, Concawe, E-fuels:Understanding the technology.Challenges and potential opportunities
- 7) JPEC-2019P-07 "将来的の国内外における需要構造変化に向けた国内製油所の石化シフトの可能性に関する調査"

#### 関連資料等

##### 原油輸入に関連する資料

- 1) JPEC-2015P-03-01 未利用原油（含む非在来型原油）の輸入可能性および精製課題調査-輸入可能性調査 -
- 2) 石油・天然ガスレビュー, 2017. 9 Vol. 51. No. 5 石油精製技術と石油需給動向～現状と今後の見通し～

##### 製油所の装置構成に関連する資料

- 1) JPEC-2016P-05 アジアを中心とする各国製油所別の装置能力や装置構成等調査と競争力強化に向けた方策検討に関する調査報告書
- 2) JPEC-2017P-08 海外製油所の輸出コスト、タンク、タンカー、輸出インフラ等の調査、政府支援策の調査による国内製油所との比較調査報告書
- 3) JPEC-2017P-03 国内外製油所の残差油（ボトム）有効利用対策の現状と商業化に向けた課題調査 調査報告書

無断転載・複製を禁ず

一般財団法人石油エネルギー技術センター  
〒105-0011 東京都港区芝公園 2-1-1  
電話 03-5402-8502

# バイオリファイナリーの導入及び 事業戦略等に関する調査

令和 2 年度燃料安定供給対策に関する調査事業  
(製油所の競争力に係る技術動向に関する調査)

令和 3 年 3 月



一般財団法人石油エネルギー技術センター  
Japan Petroleum Energy Center (JPEC)

## 目 次

要旨	1
1. 調査の概略	2
1.1 調査の背景	2
1.2 調査の目的	2
1.3 調査の方法	2
2. バイオリファイナリーへの転換技術	4
2.1 HVO 製造技術	5
2.2 Co-processing 技術	8
3. バイオリファイナリー導入済み/計画の石油企業の事業戦略	23
3.1 欧州の動向	23
3.2 北米の動向	31
4. 先進バイオ燃料等含酸素燃料の製造技術開発	37
4.1 製造技術動向	37
4.2 欧米の合成燃料スタートアップ企業	46
5. バイオリファイナリー導入に係る政策支援動向	48
5.1 欧州の動向	48
5.2 北米の動向	52
6. サプライチェーンを考慮した事業性評価	63
6.1 製造拠点	63
6.2 製造コスト	64
6.3 原料調達	67
7. まとめ	74

## 要 旨

GHG 削減対策の一環として、製油所設備を活用したバイオ燃料製造技術が欧米で展開されている。

廃食油やセルロース系バイオマス原料油を水素化精製装置や FCC 装置で処理し、再生可能ディーゼルやサステナブルジェット燃料として流通が始まっている。

特に、**co-processing** では、現行の石油留分とバイオマス由来原料油を混合処理する技術として実用化への取り組みが進んでいる。

欧米石油会社では輸送用燃料の低炭素燃化のためにバイオ燃料増産の戦略を打ち出ししており、2020 年、欧州では Total が新たに既存製油所をバイオリファイナリーに完全転換を発表したのに加え、BP や Repsol も製油所での再生可能ディーゼルの製造拡大のプロジェクトを公表した。北米、特に加州においては、Phillips 66 の製油所の完全転換が発表される等、独立系製油所で HVO 製造プロジェクトが相次いで立ち上がっている。

先進バイオ燃料等含酸素燃料の製造技術動向は、メタノールが先行して実証プラントが稼働しているものの、DME、OME、DMC 等は、研究開発段階にある。

e-fuel 等の研究開発は欧州が先行していたが、米国でも合成燃料のスタートアップ企業が登場するなど世界的な研究トレンドとなっている。

バイオリファイナリー導入に係る政策支援動向として、欧州では、再生可能エネルギー指令により各国にバイオ燃料の導入義務を課しているもの、実行にあたってのインセンティブの仕組みは国毎に異なっており、バイオ燃料配合に応じた燃料税の減免やクレジットの売買等が行われている。米国ではバイオ燃料の導入促進のため、連邦と州政府がそれぞれ独自のクレジット制度を設け、事業者へのインセンティブとしている。

再生可能ディーゼルとなる HVO 製造能力は現在、欧州に集中しており、欧州石油大手も加わって世界をリードしている。米国の製油所でのバイオ燃料製造は、政府の導入インセンティブもあり、2020 年に数多くのプロジェクトが独立系石油会社からアナウンスされたものの、装置改造終了までに時間がかかるため、現時点では欧州より少量である。しかし、公表された計画が全て実現すると 2025 年には欧州を超える生産能力に達するとみられている。

アジア地域での生産の伸びは、シンガポールの Neste 工場の拡張と中国での生産拡大によるものである。中国のバイオ燃料需要増加は、現在の廃食油等原料の海外輸出を抑え国内で燃料製品化が進むことになるため欧州での HVO 生産に影響が出ることも考えられる。

IEA がバイオ燃料製造コスト試算を行った結果、米国やブラジルで大量に生産されている第一世代バイオエタノールが最も低コストであり、HVO 製造コストは、試算の前提状況に幅があるものの比較的低コストになるとの結果となった。

バイオ燃料導入を推進する EU は、再生可能ディーゼル製造用原料となる UCO を域内で調達できないため、世界各地からの輸入に依存している。2020 年の輸入比率は 6 割を超えており、そのうちアジアからが 65% を占める状況であった。IEA の見通しでは、世界のバイオ燃料需要が伸び続ける場合、現在見込んでいる各国のバイオマス賦存量で賄うことが難しくなる可能性があり、今後、新たなバイオマス資源の確保と活用手段を開拓する必要がある。

## 1. 調査の概略

低炭素社会に向け、従来の化石燃料の需要が減少するとの見通しの中、製油所の機能を最大活用するとの観点から、既存設備を利用したバイオ燃料の取り組みが欧米で進んでいる。

本調査では、気候変動対策に取り組みつつ製油所の競争力を確保するために海外の石油企業に取り組んでいるバイオリファイナリー導入に係る技術や事業戦略等に係る調査・分析を行った。

### 1.1 調査の背景

欧米では、GHG 排出量の大幅削減政策の下、バイオ燃料の混合義務化等再生可能エネルギー利用促進政策が進められている。

そのため、輸送用燃料の需要減退の流れが続くとの見通しの中、製油所を活用したバイオ燃料製造のプロジェクトが欧米で展開されている。

バイオ燃料製造の動きは、バイオ専門企業だけでなく、製油所への展開もすすんでおり、欧州だけでなく米国の製油所にも広がりつつある。

### 1.2 調査の目的

既存の製油所をバイオマス原料等の非化石資源を原料とするバイオリファイナリーへの転換に関する技術、欧米の製油所でのエネルギー転換戦略におけるバイオリファイナリーの導入による環境政策と事業戦略の動きを調査し、今後の我が国のバイオ燃料導入政策の議論に資する情報収集・分析を行う。

### 1.3 調査の方法

バイオリファイナリーに関する技術や政策の情報源として、下記の国際的なエネルギー機関、業界団体の公表レポートをウォッチすると共に、エネルギー関連調査会社やバイオ関連団体のウェブ会議からの発信情報を入手し、調査分析に供する。

- ・国際エネルギー機関(IEA) Bioenergy Taskforce

IEA Bioenergy 部門では、現在 14 のタスクフォースが設けられている。

このうち本調査に係る 5 つのタスクフォースに注目し発信情報を収集した。

Task 33 Gasification of Biomass and Waste

Task 34 Direct Thermochemical Liquefaction

Task 39 Commercialising Conventional and Advanced Transport Biofuels from Biomass and Other Renewable Feedstocks

Task 40 Deployment of biobased value chains

Task 42 Biorefining in a Circular Economy

- ・欧州技術プラットフォーム(European Technology and Innovation Platform, ETIP)

- ・国際サステナビリティ炭素認証システム(International Sustainability Carbon Certification System, ISCC)
- ・欧州委員会 CORDIS (Community Research and Development Information Service)
- ・欧州技術プラットフォーム(European Technology and Innovation Platform, ETIP)
- ・欧州代替燃料技術フォーラム (ART Fuels Forum) ・
- ・米国エネルギー省エネルギー情報局(EIA)
- ・米国エネルギー省エネルギー効率・再生可能エネルギー部(EERE)
- ・米国農務省海外農業サービス局(USDA FAS)
- ・加州政府大気資源局(California Air Resources Board, CARB)
- ・加州エネルギー委員会(California Energy Commission. CEC)
- ・再生可能燃料協会(Renewable Fuels Association, RFA)
- ・全米バイオディーゼル協会(National Biodiesel Board, NBB)
- ・カナダ天然資源省(Natural Resources Canada, NRCan)
- ・カナダ・バイオマス・エネルギー・ネットワーク(Biomass Energy Network, BEN)
- ・その他、専門誌、情報サイト

## 2. バイオリファイナリーへの転換技術

バイオマス由来液体を製油所の水素化精製装置や FCC 装置で処理することにより、現行のガソリン、軽油、ジェット燃料と同類の炭化水素化合物に変換できる。これはドロップイン(drop-in)バイオ燃料と呼ばれ、含酸素化合物バイオ燃料よりもブレンドの制約を受けにくいと、欧州を中心に導入が進んでいる。

しかし、次世代バイオ燃料製造は、バイオマス原料種によりプロセス技術に課題が残っており、現状は 3 つの技術ステージに整理できる。

### (1) 商業ステージ

水素化処理と言われるもので、天然植物油、獣脂、魚油、廃食油、および製紙産業のトール油などの低品位バイオマス由来原料を水素化処理した HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) は次世代バイオ燃料に位置づけられている。

製油所の製造水素を活用し、植物油等油脂の水素化処理を行う技術は 2000 年代から研究が始まっており、フィンランドの石油会社 Neste 等、既に商業レベルで製品供給が行われている。

製油所は脱硫用の水素化精製装置を有しており、バイオマス由来液体処理用に、既存タワーの改造か、または専用タワーを建設することとなる。原油処理を停止し、二次装置だけを稼働して、バイオ燃料専用工場に転換した事例もある。

### (2) 導入普及ステージ

製油所での原油処理を行いつつ、HVO 等のバイオマス原料を二次装置（水素化脱硫装置、流動接触分解装置）に投入して減圧軽油（VGO）等と混合処理し、バイオ燃料配合燃料を製造する”co-processing”と呼ばれるプロセス事例が欧米で普及しつつある。

投入バイオマス由来液体として、HVO 以外にもセルロース系草木由来のバイオ原油 (bio oil 又は bio crude) と呼ばれる前処理油を投入することも可能であるが、バイオ原油はその由来により性状や物性が異なるため、装置面での改造だけでなく運転面でのあらたな対応も必要となる。

### (3) 研究開発ステージ

バイオ燃料の供給拡大を図るため、油脂だけでなく木質系や有機廃棄物系のバイオマスから輸送用燃料を製造するバイオ原油の製造研究が注目されている。

製油所装置へ投入とする 2 つの前処理法技術、熱分解法 (Pyrolysis) と水熱液化法 (Hydrothermal liquefaction, HTL) は 2010 年代から欧米で研究が行われており、現在各種プロジェクトが進行中である。

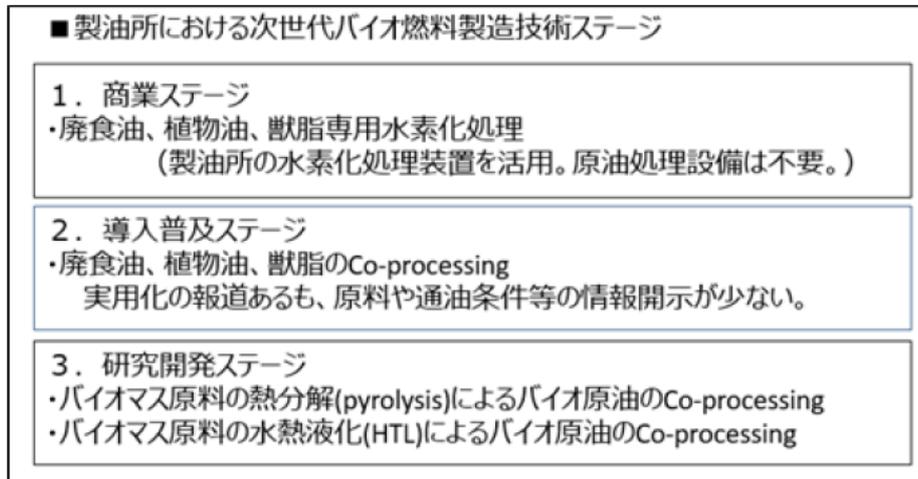


図 2-1 次世代バイオ燃料製造の技術ステージ

## 2.1 HVO 製造技術

植物油等油脂を水素化処理した基材（再生可能ディーゼルと同義）を製造するプロセスは、既に実用化が図られており、製油所外の水素化処理装置を新設するケースと製油所内の脱硫用水素製造装置を改造して転用するケースがある。

最初に HVO 製品を商業化したフィンランド Neste は世界の約 30% の製造能力を占める。欧州勢だけでなく米国の石油会社等の製造拠点も増加している。

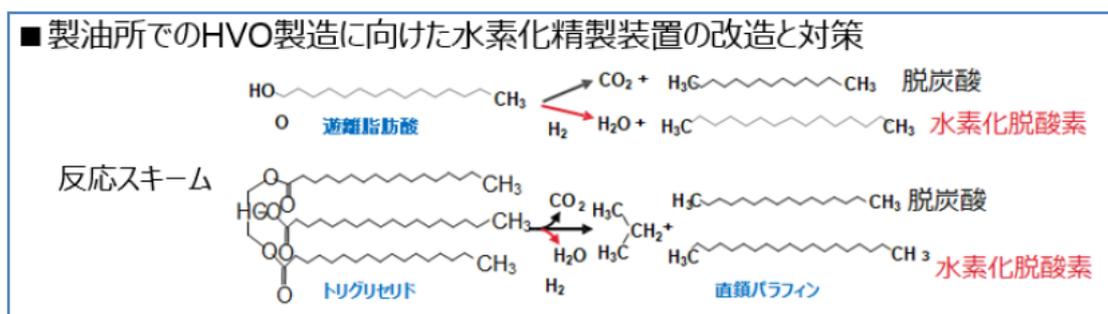


図 2-2 HVO 製造の反応スキーム

表 2-1 HVO 製造プロセスライセンス

ライセンス	プロセス名
UOP/Eni (米国/イタリア)	Ecofining
Haldor Topsoe (デンマーク)	HydroFlex
Neste (フィンランド)	NextBTL
Axens (フランス)	Vegan

(出所)各社報道をもとに JPEC 作成

この中で、Axens の Vegan 技術は後発ではあり、最近受注実績を積んでいる。動植物油脂やセルロース系バイオマス原料から再生可能ディーゼルやサステナブルジェ

ット燃料を製造するため、水素化・脱炭酸タワーと水素化異性化タワーの2段階プロセスとなっている。

現在は Total で運転実績があり、PKN Orlen と Repsol は建設段階である。

2015年10月	Total La Mède(ラメード) 製油所
2019年12月	PKN Orlen Płock(プウォック)製油所
2020年11月	Repsol Cartagena(カルタヘナ)製油所

製油所内の既存の水素化精製装置を改造して HVO 製造用に転換する際の具体的な技術課題と対処法についての情報開示が少ないが、米国のエンジニアリング会社 Burns & McDonnell 社が受注した実績をまとめた報告書が公開されたため、その内容を以下に抜粋した。

#### エンジニアリング会社 Burns & McDonnell(本社:ミズーリ州カンザス) の報告

典型的な再生可能ディーゼル変換プロジェクトは、約2年、新設の半分。関連設備(電力、水、廃棄物、ユーティリティ、およびフレアシステム)が既に製油所に存在するため投資額の抑制が可能なメリットがあるが、下記の課題への対応が必要

##### > 高い発熱

石油ディーゼルの脱硫反応よりも発熱量が多いため、この熱回収用のリサイクル能力が重要。5万bpdで稼働する水素化処理装置は、再生可能ディーゼルに変換した場合、5,000bpdの原料処理に留まる。

##### > 緊急減圧システム

高い反応熱放出のため、リサイクルおよびクエンチシステムが故障した場合に反応を安全に管理するための緊急減圧システムが必要。反応器を急速減圧してフレアにし、反応を停止する。

##### > 水素消費

水素を多量に消費するため水素容量が過剰な製油所は、転換プロジェクトに特に適している。水素製造能力に余力がない場合は追加の水素プラントの建設に予算を組む必要がある。

##### > フィードトレインの材質

遊離脂肪酸を多く含む原料は、腐食性の環境を作り出す可能性がある。水素不足による装置のガムや汚れ発生、水素追加による機器が高温水素侵食(HTHA)の可能性があり、フィード側の金属種の交換や液体リサイクルとフレッシュフィードと別々の予熱トレインの設置も有効。

##### > 水と二酸化炭素の生成

石油水素処理装置よりも大量の水と二酸化炭素を生成し、反応器の下流で潜在的な炭酸腐食を引き起こすため、反応塔エフルエント空気冷却システム (REAC)では、冶金のアップグレードが必要になる場合がある。

たとえば、水が製油所のサワーウォーターストリッパーに送られると、水処理方法と再利用に影響を与える可能性がある。

##### > ヒートトレース

植物油と動物性脂肪は外気温度でワックス状になり固化するため、トラックや鉄道車両への積み込み、水素化処理装置への投入には、油脂を液化するためにパイプ、タンク、容器の温度を上げる蒸気または電気のヒートトレースシステム(熱追跡システム)が必要。

油脂処理による水素消費量の増大が大きいため、水素製造能力に余力がない製油所では、水素発生装置の増設事例も必要となってくる。

炭酸腐食については、図 2-3 のフロー図に示したように、特に、空冷式熱交換器に多く発生するとのことである。

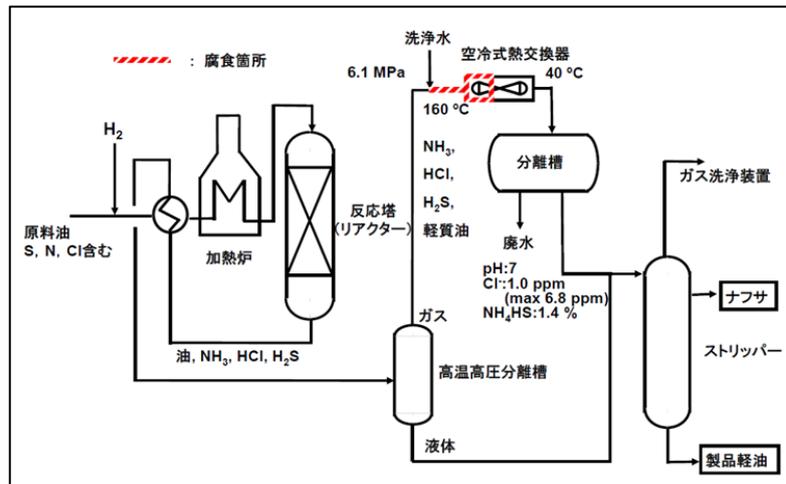


図 2-3 軽油深度水素化脱硫装置の概略図

(出所) 早稲田大学大学院「石油精製プラントにおけるアンモニウム塩による炭素鋼の腐食機構  
 解明及び新防食設計案の提案」 2012年7月

## 2.2 Co-processing 技術

既存の FCC や水素化処理装置を利用したバイオマス原料の co-processing によるドロップインバイオ燃料の製造は、HVO 専用設備よりも投資額を抑えた上で、製油所の GHG 削減対策技術の一つとして欧米での導入が進んでいる。

これまでの co-processing の研究の結果は、原料種等の変動要因から製品留分得率など結果に一貫性がないとの指摘もある。そのため、今後の技術的課題解決に向けては、サステナビリティを確保した原料調達を行うことは勿論、性状安定性が悪く、貯蔵安定性も不良な熱分解油や植物油の対策、原料中の不純物（アルカリ金属分）に起因する触媒劣化対策が必要となる。

さらに、バイオ燃料は通常原油より高価なため、油価が現状よりさらに下落した時のコスト高への対応も必要となる。

解決策としては、バイオマス原料の投入量を少量とすとか、投入する熱分解油を事前にアップグレードしておくとかが提案されている。

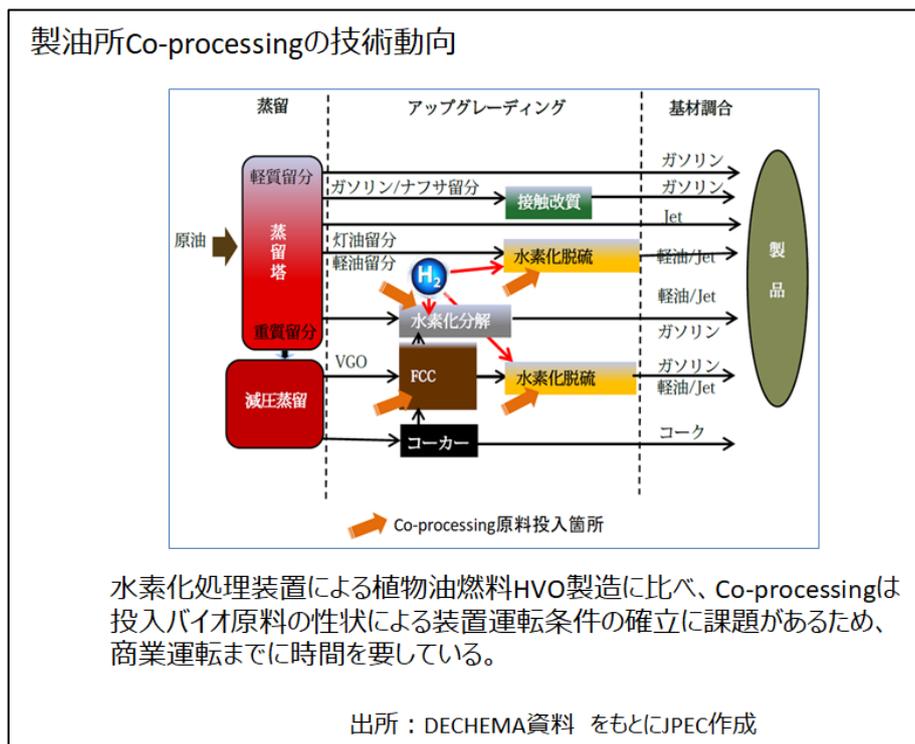


図 2-4 製油所 co-processing フロー

国際エネルギー機関（International Energy Agency, IEA）内に設けられている Bioenergy Task39 では、co-processing 技術について調査を行っており、製油所の装置に投入するバイオマス原料油を 4 つに分類（油脂、熱分解油、水熱液化油、フィッシャー・トロップシュ（FT）液体）し、それらの特徴について整理している（表 2-2）。

表 2-2 製油所プロセス向けバイオマス原料油の特徴と要件

油種	バイオ原料油の特徴	製油所での処理
植物油 (Vegetable oils) 獣脂 (Tallow) 廃食油 (Used Cooking Oil, UCO)	トリグリセリドと遊離脂肪酸脂肪酸 脂肪酸の鎖長に関してある程度の不均一性があるが、 化学的には均一 軽油留分範囲の炭素化合物 酸素11%酸素、Heff/C比 1.8 廃油には、酸性度に影響する遊離脂肪酸が占めるが、 汚染物質も含む 金属や無機化合物を含む	酸素の除去 熱分解または接触分解による低分子化 水素精製処理等のアップグレーディング バイオジェット燃料製造には低温流動性を改善するための異性化 分解生成物の分留
熱分解油 (pyrolysis bio-oils)	最大400種類の成分 酸素含有量40%以上 リグニンの分解によるさまざまな芳香族種 高水分含有量 (>20%) 触媒熱分解や部分水素化熱分解の前処理品は熱分解のみよりも低酸素含有量 (18~24wt%)	酸素の除去 熱分解または接触分解 芳香族化合物の水素化分解 アップグレード油の分留
水熱液化油 (HTL bio-oils)	低酸素含有量 (範囲: 6-18%) 低水分含有量 (<10%)	酸素除去 重質分の分解 芳香族の水素化分解
フィッシャー・トロプシュ (FT) 液体	高温FTでは、ガソリンに適したより低分子量を生成 低温FTは、ディーゼル範囲の長鎖分子を生成	分留が必要 分解異性化が必要な場合あり

(出所) IEA Bioenergy Task 39

### 2.2.1 動食用油バイオマス原料の co-processing

欧州での co-processing の比率は HVO 生産の 10 数%との推算がされているものの、co-processing は製油所内部の情報のため、各社からの情報公開に制約がある。

本調査では、製油所を活用した次世代バイオ燃料製造技術として、再生可能ディーゼル (サステナブルジェット燃料を含む) の製造技術に焦点をあて調査を行った。

表 2-3 欧米で co-processing 運転実績のある製油所

国	石油会社	製油所
スウェーデン	Preem	Göteborg製油所
スペイン	Cepsa	Tenerife製油所
		La Rabida製油所
	Repsol	—
ポルトガル	Galp	Sines製油所
アイルランド	Irving Oil	Whitegate製油所
英国	Phillips 66	Humber製油所
米国	Marathon Petroleum	Martinez製油所* (2018年、Tesoroから買収)

\* : 2020 年 8 月、同製油所閉鎖を公表後、2021 年 3 月、バイオリファイナリーへの転換発表  
(出所)各社報道をもとに JPEC 作成

今後の co-processing 計画では、輸送用バイオ燃料導入義務化が進む北米西海岸の製油所での実施が注目される。

表 2-4 欧米で co-processing 運転準備中又は検討中の製油所

地域	国	石油会社	製油所	備考
欧州	スウェーデン	Neste	Porvoo製油所	—
	オーストリア	OMV	Schwechat製油所	—
	ギリシャ	Hellenic Petroleum	Aspropyrgos製油所	—
	スウェーデン	Preem	Lysekil製油所	熱分解油製造プラントを外部に 新設。2021年末稼働予定
	ポーランド	PKN ORLEN	非公表	—
北米	米国	PBF Energy	加州Martinez製油所 (2019年Shellから買収)	FCCでのco-processing予定
		BP	ワシントン州Cherry Point製油所	—
		Chevron	加州El Segundo製油所	FCCでのco-processing予定
	カナダ	Parkland Fuels	ビクトリア州Burnaby製油所 (2017年Chevronから買収)	—

(出所) 各社報道をもとに作成

Co-processing の研究は 2000 年代に入ってから欧米で多く行われた。

米国では、エネルギー省に属する国立再生エネルギー研究所 (The National Renewable Energy Laboratory, NREL 等) が中心となり、ブラジルとの二国間共同研究として、Petrobras 製油所でのパイロットプラントによるバイオ原油製造法と水素化精製装置及び FCC での実証を 2015 年に終了している。

これまでの co-processing の研究事例のレビューでは、原料種が異なった時の製品留分得率の変動が何に起因しているか、一貫性のある説明ができていないとの指摘もあるなど、解明すべき技術課題は依然残っている。

加えて、性状安定性、貯蔵安定性、バイオマス原料中のアルカリ金属等の不純物 (水素化精製触媒の劣化を引き起こす) の対策が必要となる。また、バイオ燃料は通常、鉱油由来製品より高価なため、油価が下落した時の製造コスト対策も必要となる。

このような状況を踏まえ、米国 NREL では、あらたにパイロットプラントを建設し 2016 年 10 月からプロジェクトを進めている。また、EU の Horizon2020 研究プロジェクトでも産学による共同研究が進められている。

## 2.2.2 バイオ原油の co-processing

木本系や草本系のセルロース系バイオマス由来原料を前処理装置にてバイオ原油 (又はバイオオイル) に液化し、製油所装置にて co-processing する技術として、2 つの技術分野として、熱分解法と水熱液化法の研究が進んでいる。

IEA では、2 種の技術を直接熱化学液化法 (Direct Thermochemical Liquefaction) とよんでおり、その技術進捗についてはバイオマスの国際会議での情報交換や専門雑誌でのレビューも行われている。

## ■ Co-processing用バイオ原油（バイオオイル）製造技術開発(文献調査)

### 注目技術

- ・急速熱分解 Fast Pyrolysis (FP)
- ・水熱液化 Hydrothermal liquefaction (HTL)

### <FP/HTL専門家会議>

- ・欧州 **EC Expert Workshop**: Potential of Hydrothermal Liquefaction (HTL) routes for biofuel production  
2019/11/19 @Brussels
- ・米国 **tcbiomassplus2019** – The International Conference on Thermochemical Conversion Science: Biomass & Municipal Solid Waste (MSW) to ReNewable Gas (RNG), Biofuels & Chemicals  
2019/10/7-9 | The Hyatt Regency O'Hare | Rosemont, IL

### <バイオマス技術国際会議>

- ・米国 **ABLC 2020** – Advanced Bioeconomy Leadership Conference  
2020/7/8-10 virtual
- ・欧州 **e-EUBCE 2020** – 28th European Biomass Conference and Exhibition  
2020/7/6-9 virtual

### <ジャーナル>

"Continuous Hydrothermal Liquefaction of Biomass: A Critical Review", Daniele Castello, Thomas Helmer Pedersen and Lasse Aistrup Rosendahl, **Energies** 2018, 11(11), 3165;  
<https://doi.org/10.3390/en11113165>

図 2-5 バイオ原油の製造技術開発に関する国際会議

### (1) 熱分解法 (Pyrolysis)

バイオマスを無酸素下で、毎秒 100℃以上で高速加熱（450～600℃）の後、熱分解蒸気を急速凝縮すると、熱分解油を 60～75%の収率で得られる。

熱分解油は、従来の熱および発電用途（ボイラー、炉、タービンなどの固定ユニット）が一般的であったが、あらたに、低炭素の輸送用液体バイオ燃料の製造原料となるバイオ原油としての利活用が検討されている。

バイオ原油と鉱油との co-processing では、水素化精製処理装置を利用した場合は軽油留分が、FCC を利用した場合はガソリン留分やバイオ LPG が主に生成される。

熱分解法プロセスの開発は、石油精製プロセスをライセンスしているエンジニアリング会社をパートナーとして事業化を推進している。

表 2-5 熱分解法プロセスライセンサー

ライセンサー	パートナー	プロセス
Ensyn Technologies (カナダ)	UOP (米国)	急速熱分解
Anellotech (米国)	Axens (フランス)	触媒熱分解
GTI (米国)	Shell Catalysts & Technologies (英国)	IH2 プロセス (水素化熱分解/水素転換統合型)
BTG (オランダ)	TechnipFMC (英国)	急速熱分解

出所：各種資料をもとに JPEC 作成

表 2-6 バイオマスの熱処理による化学成分

	一般的な熱分解 (450~500℃)	高温熱分解 (600~650℃)	一般的な水蒸気ガス化 (700~800℃)	高温水蒸気ガス化 (900~1000℃)
化 学 成 分	Acids	Benzenes	Naphthalenes	Naphthalenes
	Aldehydes	Phenols	Acenaphthalenes	Acenaphthalene
	Ketones	Catechols	Fluorenes	Fluoranthene
	Furans	Naphthalenes	Phenanthrenes	Phenanthrenes
	Alcohols	Biphenyls	Benzaldehydes	Pyrene
	Complex oxygenates	Phenanthrenes	Phenols	Acephenanthrylene
	Phenols	Benzofurans	Naphthofurans	Benzanthracenes
	Guaiacols	Benzaldehydes	Benzanthracenes	Benzopyrenes
	Syringols			226 MW PAHs
	Complex phenolics			276 MW PAHs

(出所) Thermal Valorisation of biomass and synthetic polymer waste. Upgrading of the Pyrolysis Oils, July 2006 Cellulose Chemistry and Technology 40(7)

また、原油と各バイオマス原料油の元素構成の比較を表 2-7 に示した。

表 2-7 原油とバイオマス原料油の元素構成比較

元素	原油	水熱液化油	植物油(大豆油)	急速熱分解油	触媒急速熱分解油
C, wt%	83~86	81.4	77.6	55~65	72
H, wt%	11~14	8.7	11.7	5~7	6.4
O, wt%	<1	9.8	10.4	28~40	21.5
S, wt%	<4	0.01	0.0006	<0.05	—
N, wt%	<1	0.095	0.0011	<0.4	0.02

(出所) IEA Bioenergy Task 39

FT 合成法以外によるバイオ中間体は酸素含有量が多いことが特徴であり、この酸素原子の除去プロセスが必要となる。

さらに、熱分解法でも、加熱の速度や温度により生成物の組成に大きく影響することがわかっている。

このように、バイオマス由来の原料は通常の原油処理とは異なる技術対応が求められるため、今後の低炭素液体燃料の生産拡大に向けて欧米で研究が広がっている。

そのため、製油所での **co-processing** に必要な技術や運転ノウハウを蓄積することが必要となる。

## (2) 水熱液化法 (Hydrothermal liquefaction, HTL)

この技術は、反応温度 250~550℃、圧力 5~25MPa の亜臨界から超臨界領域で、反応時間 20~60 分のバイオマス液化反応である。生成するバイオ原油は、熱分解バイオ原油の約 2 倍のエネルギー密度と原油に近い発熱量を有し、水熱液化法に必要なエネルギーも熱分解法より少ないことを優位点としている。しかし、熱分解法よりも技術課題が多いことから大型装置の建設には至っていない。

北欧や北米での研究事例が多いが、いずれもパイロット研究レベルであり、ライセンス

ーとして活動が盛んな企業は豪欧米の5社である(表2-8)。

地域のバイオマス資源に応じた技術開発を行っており、Steeper Energy や Bio2Oil は豊富な森林資源を活用するプロセスを開発している。

Genifuel や Eni は、食品廃棄物等バイオ系都市廃棄物からのバイオ原油製造を狙っている。

表 2-8 水熱液化法プロセスライセンサー

ライセンサー	プロセス名
Licella (豪州)	Cat HTR process
Steeper Energy (デンマーク)	Hydrofraction
Genifuel (米国)	HTP process
Eni (イタリア)	W2F process
Bio2Oil (デンマーク)	—

(出所) 各種資料をもとに作成

<p>■水熱液化法(hydrothermal liquefaction process, HTL)の利点</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・バイオ原油の発熱量33.6~36.9MJ/kg vs. 原油 38.2MJ/kg</li> <li>・製造条件 <ul style="list-style-type: none"> <li>反応温度 250~550℃、 圧力 5~25MPa (亜臨界~超臨界)</li> <li>反応時間 20~60分 (高速プロセスのケース)</li> <li>亜臨界~超臨界</li> <li>水+触媒 (炭酸塩等)</li> </ul> </li> <li>・注目プロセス <ul style="list-style-type: none"> <li>デンマーク<b>Steeper Energy</b> <i>Hydrofraction</i>プロセス</li> <li>CI 15CO<sub>2</sub>eq/MJ vs. 軽油 93.55CO<sub>2</sub>eq/MJ</li> </ul> </li> <li>・HTLバイオ原油は熱分解バイオ原油の約2倍のエネルギー密度</li> <li>・熱分解FP法は高含水量のバイオマス処理にエネルギーを要するのに比べ、HTLプロセスは有利</li> </ul>
---

図 2-6 水熱液化法の利点

水熱液化法の研究をレビューし、反応条件をプロットした(図2-7)。

デンマーク Steeper Energy は、カナダでのデモンストレーションに取り組んでおり、現時点では超臨界領域で最も高温高圧な反応条件となっている。

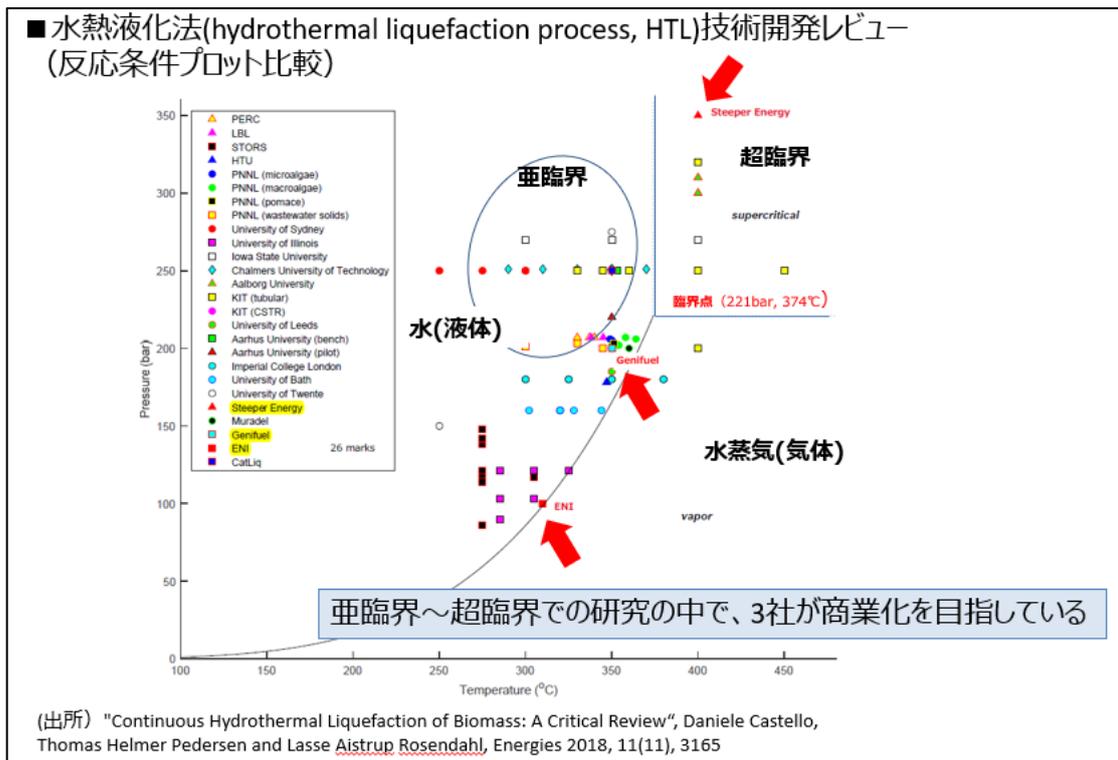


図 2-7 水熱液化法の反応条件プロット

また、水熱液化法は現在石油精製プロセスには含まれていないが、製油所の触媒技術を展開できる分野であり、熱分解法よりもエネルギー効率が良いことから GHG 排出を抑えながらバイオ燃料を製造していく技術として今後の技術進展が期待できる。

表 2-9 製油所プロセスと水熱液化法の比較

方法	条件	プロセス概要	利点	短所
水素化処理	中温・低压反応、水素と触媒(硫化CoMoアルミナ又はNiMoアルミナ触媒使用)	原油に含まれる酸素は、水素を加えることにより、水分、CO <sub>2</sub> 、COとして除去	比較的低コスト、商業化済み	触媒の活性劣化や反応器の目詰まりを引き起こす高いコークス形成、低品質な燃料性状、低収率
水素化分解	高温・高压反応、H <sub>2</sub> と二元触媒(NiMo/ゼオライト等)を使用	水素化処理に加えて、クラッキングが同時に発生し、より炭素数が少ない低分子量成分に変換	形質留分	コスト高、触媒の活性劣化や反応器の目詰まりを引き起こす高いコークス形成、装置が複雑
超臨界流体(SFC)	中温・高压反応、貴金属触媒(Pd, Ru, Pt等)と有機溶媒(アルコール等)	熱分解油とSFCの間の化学反応により、熱分解油の溶解性を促進	性状改善良好、高収率	溶媒と触媒のコストが高く、エネルギー消費量が多い

(出所) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174520300416>

### 2.2.3 北米政府機関での技術検討

#### (1) 米国 DOE 国立研究所

##### ①国立再生可能エネルギー研究所 (National Renewable Energy Laboratory, NREL)

2010年代にブラジル Petrobras の製油所に松材チップの急速熱分法によるバイオ原油

製造のパイロットプラントを建設し、FCC での VGO との co-processing 共同研究を実施した。

Co-processing におけるバイオマス原料の装置への影響と生成物分布に関する研究を同研究所内に評価プラントを新設し、研究を継続中。経済性評価については、PNNL と共同研究を実施した。

(出所)

<https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/66606.pdf>

<https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/76131.pdf>

## ② パシフィックノースウエスト国立研究所(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)

湖沼の藻類や木材チップ等廃棄物バイオマス資源をバイオ原油に変換するプロセス開発を実施中。

独自の水熱液化 HTL 技術を開発済みであり、米国 Genifuel 社にライセンス済み。

(出所)

[https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-29861.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-29861.pdf)

<https://www.pnnl.gov/news-media/okeechobee-blooms-biocrude>

## (2) 米国加州大気資源局 (CARB)

同州の LCFS 規制に対応するバイオ燃料製造技術検討の一環で、ワーキンググループを設置し、2017年5月に”Co-processing of Low Carbon Feedstocks in Petroleum Refineries”ドラフト版を取りまとめ、技術的な課題を指摘している。。

同報告では、Co-processing は、既存の精製、輸送、保管、流通のインフラを活用できるため魅力的であり、低炭素炭化水素燃料の生産コストを削減する機会を提供できる。しかし、技術的および市場の課題は残っていると以下を指摘している。

- ・熱分解と植物油の安定性が低いため、原料の保管と取り扱いに関する懸念がある。
- ・生物起源原料の腐食性とアルカリ金属などの不純物の存在は、プロセス機器を腐食させ、触媒を毒して製造コストを上昇させる可能性がある。
- ・原油価格が低い時期に生物材料のコストが比較的高くなると、co-processing の経済的競争力に影響を与える可能性がある。
- ・触媒の活性劣化と金属材質に関連する課題は、生物起源原料の使用を少量とするか、熱分解油をアップグレードしたものとする等のプロセス改善が必要である。

さらに、co-processing 技術の展開を促進するには、低炭素燃料の質量定量化と co-processing による GHG 排出量に対する robust 理論的な算出方法が重要と加えている。

(出所)

[https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/lcfs\\_meetings/053017draft\\_discussion\\_paper\\_coprocessing.pdf](https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/lcfs_meetings/053017draft_discussion_paper_coprocessing.pdf)

(3) カナダ天然資源省(Natural Resources Canada, NRCan)国立研究所

① CanmetENERGY Devon (アルバータ州 Devon)

全国 4 カ所ある Canmet 研究所の一つであり、バイオ燃料研究の一環として、製油所でのバイオ原油の co-processing 研究を実施中。

具体的なテーマとして以下が含まれる。

- ・バイオ原油のアップグレード/前処理プロセス開発
  - 独自開発の新規熱分解法 (Thermo-Catalytic Reforming, TCR)
  - 水熱液化法
- ・新規廃棄物資源開拓 (農業廃棄物、都市固形廃棄物)
- ・製油所の異なるユニットでのバイオ原油の co-processing
- ・製油所の運営と製品の品質への影響
- ・ファウリングと腐食
- ・詳細な化学組成分析
- ・原料の加工性、混和性、安定性
- ・技術経済評価と LCA 評価

(出所)The Biomass Energy Network (BEN) Virtual Bioenergy Symposium

<https://www.bc-smart.ca/wp-content/uploads/2020/08/August-19-2020-Virtual-Bioenergy-Symposium-Presentation-by-CanmetENERGY-Devon.pdf>

② CanmetMATERIALS (オンタリオ州 Hamilton)

カナダで最大規模の国立研究所は、アルバータ大学と共同で最近のバイオ原油の FCC 装置による co-processing 研究動向レビューを行い、2020 年 12 月 30 日に公表した。

“Advancing the application of bio-oils by co-processing with petroleum intermediates: A review”

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174520300416>

FCC へバイオ原油投入前のアップグレード処理として、急速熱分解をしたバイオ原油 (CPO)、触媒を使って接触熱分解したバイオ原油 (CPO)。急速熱分解油を水素化脱酸素処理したバイオ原油 (HDO オイル) の 3 種のフローを想定し、技術課題を洗い出した。

FCC までのフロー図 2-8 に示した。

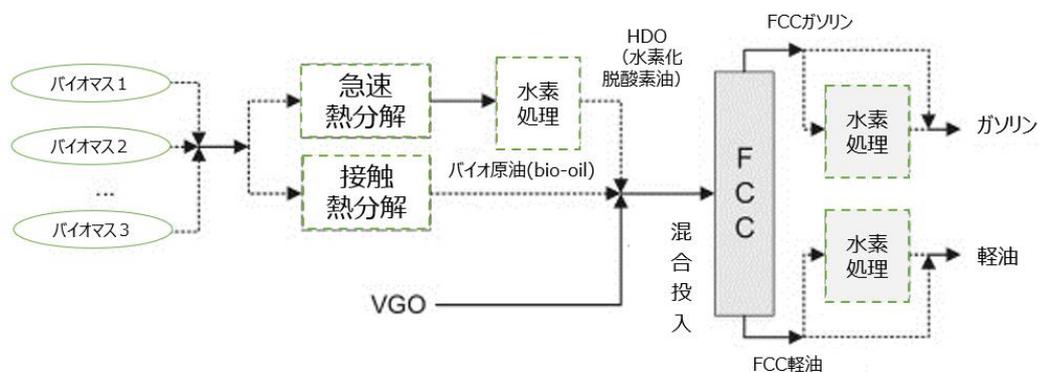


図 2-8 バイオ原油と VGO の FCC co-processing フロー

また、FCC に投入する減圧軽油(VGO)と熱分解油等バイオ原油の一般性状を比較した(表 2-10)。

いずれのバイオ原油も VGO に比べ、水分が多く、酸素を大量に含んでいるため、強い酸性物質となる。

表 2-10 バイオ原油種と VGO の性状比較

性状	熱分解油	CPO (接触熱分解 バイオ原油)	HDO (水素化脱酸素 バイオ原油)	VGO
含水率、wt%	15-30	8.3-11	2.1-15.9	0.1-0.6
pH	2-3.2	3.71	2.23	-
比重	1.1-1.3	-	0.93	0.85-0.94
粘度@ 50°C、cP	40-100	-	45	180
発熱量、MJ/kg	16-23.6	-	25-35	40
元素組成、wt%				
C	54-58	66-73.1	63.0-75.0	85-87.5
H	5.5-7.0	6.4-7.4	8.1-10	11-12.4
O	35-40	19.5-27	13.4-28.0	0.3-1
N	0-0.4	<0.1	0.4	0.04-0.3
S	0-0.05	<0.2	<0.01	0.08-2.02
灰分	0-0.85	-	1.17	0.1

今回のレビューのから今後検討すべき事項を 4 つに整理した。

a) バイオ原油の性状把握の重要性

バイオ原油は高酸素含有であるため、極性が高くなる。これは、バイオ原油を従来の燃料と単純に混合導入できない根本的な原因である。バイオ原油の性状安定性は、精製原料の組成に直接影響し、その結果、製品の収率と品質に影響を与えるためには **co-processing** に適したバイオ原油を探求する必要がある。

松材由来の熱分解油は、油の収量が多く、重合化合物の含有量が少ないため、米国で燻製用チップの材料となるメスキート材や小麦の殻から製造された油と比較して、FCC の **co-processing** に適していることがわかった。それでも、バイオマスの種類と変換プロセスが **co-processing** に与える影響を定量的にできていないため、バイオ原油性状に関する研究が重要である。

b) 触媒設計の重要性

FCC 等製油所プロセスで使用する触媒性能の維持は、精製業者にとって不可欠な考慮事項であり、**co-processing** の前にバイオ原油のマイルドな脱酸素を行うかどうかにかかわらず、バイオ原油中に残る酸素化合物は精製触媒に悪影響を及ぼす。また、バイオ原油中のアルカリ金属は、触媒の酸性度を中和し、活性の損失を引き起こす可能性がある。

このように、市販の触媒はバイオ原油を含む原料の処理にはうまく機能しない可能性がある。

米国 DOE NREL とペトロブラスの共同研究の SIX パイロットプラントで、5wt%の熱分解油を VGO と同時処理した場合、24 時間の運転後に触媒の失活は観察されなかったが、触媒の活性寿命を評価するには、より長期の試験が必要である。

水素供与体となる鉱油中の炭化水素化合物からバイオ原油中の含酸素化合物への水素移行は、モデル化合物（テトラリン-フェノール/シリンゴール/トリメトキシベンゼン）を使用した FCC 平衡触媒で研究が行われた。その結果では、FCC 触媒の水素移動活性は、より多くの液体燃料を生成するバイオ原油の脱酸素化に有利に働いたが、オレフィン成分が同時にパラフィンに変換され、ガソリンのオクタン価が低下することとなった。

このことから、バイオ原油中の酸素化合物に水素を選択的に移動できる触媒を設計することは、バイオ原油の co-processing に取り組む上で非常に重要となる。

さらに、製油所で使用している触媒と互換性のある触媒機能を向上することは、触媒活性の維持と最終燃料製品へのバイオマス由来の生体起源炭素の取り込みを増加することにつながる。製品供給に影響を及ぼす触媒の化学的性質を把握することが重要である。

#### c) 腐食解析と防止策の重要性

精製業者が原料にバイオ原油を利用する際に、常圧蒸留装置のファウリングと腐食の懸念について指摘した。バイオ原油の酸性度と金属汚染物質による腐食は、既存の精製装置でバイオ原油を含む原料を処理するための新たな技術課題となる。

しかし、バイオ原油の co-processing における腐食に関しては、非常に限られた研究しか行われていない。FCC 装置では、ライザーとフィード移送ラインは、バイオ熱分解油中の有機酸と水によって腐食される可能性がある。バイオ原油の灰分を構成するアルカリおよびアルカリ土類金属は、熔融塩腐食を引き起こす可能性がある。一般的に存在する腐食物質である H<sub>2</sub>S を除いて、原料中の窒素化合物はシアン化物 (C-CN) に変換され、金属表面の保護的な役割を担っている硫化物スケールを剥離してしまうため腐食を加速する。

反応器の材料（炭素鋼）を考えると、腐食の観点からバイオ原油にどれだけ耐性を有するかは別の研究課題となる。

#### d) 原料調製の重要性

水素化脱酸素プロセスで完全に除去できないバイオ原油には大量のフェノール化合物が含まれているため、20wt%を超えるバイオ原油を同時投入すると、コークスの形成が非常に増加する。

コークスの堆積は FCC 触媒の失活を加速するため、投入原料中のバイオ原油の増加を制約することとなる。研究によると、堆積した遷移金属 (Ni および V) は、フェノール分子を吸着および変換するルイス酸サイトを、重金属はブレンステッド酸サイトを塞ぐ可能性があり、原料の変換効率が低下する要因となる。そのため、プロセス性能を最適化するには、コークス堆積を抑えるような原料調製が必要となる。

上記を踏まえ、FCC 装置による co-processing 研究のレビューの結論を次のように述べ

ている。

・ **Co-processing** は、設備投資を最小限に抑えるためにすでに整備されている数兆ドルのインフラストラクチャを利用することにより、輸送用燃料に再生可能炭素を導入するための準備が整った経路を提供する。

・ 石油ベースの原料と木材由来の熱分解油 10wt%未満の **co-processing** では、複数のフィード噴射ノズルを備えれば **FCC** の商業運転が可能である。

・ 木材由来バイオ原油と **VGO** 等留分との相溶性を改善するには、基本的に 2 つのオプションがある。

接触熱分解プロセスによるバイオ原油の高品質化

粗悪なバイオ原油のアップグレードのため熱的または触媒的プロセスを追加

この他にも、**co-processing** 用バイオ原油製造研究では、加溶媒分解や **HTL** などの他のプロセスを使用した農業や藻類バイオマスなどの廃棄物からの熱分解法も検討されており、今後の研究として、原料の収率改善や生成物の選択率の向上、プロセスコストの削減を目指し、石油原料との適合性が高いバイオマス原料の探索、バイオ原油変換率が高く、水素移動の選択性に優れ、寿命が長い **co-processing** 用触媒の開発や腐食メカニズムの解明、腐食防止方法の検討に取り組む必要があると締めくくっている。

**CanmetMATERIAL** 研究所がレビューした過去の研究論文から、直近 3 年間に公開され、今後の研究に参考になるとして選定したものを表 2-11 にリストとして列挙した。

表 2-11 バイオ原油と石油留分の FCC co-processing に関する最近の研究報告

No.	バイオマス原料	バイオ原油原料	石油原料	バイオ原油投入比、wt%	FCC触媒	触媒対油(C/O)の質量比	反応装置	反応温度、°C	結果	URL
1	松材	水素未処理および水素化処理された熱分解液	VGO	10	平衡触媒(E-cat)	5-8	パイロットスケールFCCライザー	525	バイオ原油10wt%以下であればco-processingではガソリンとLCOは、VGOのみを処理する場合と同様の性状。水素、コーク、LPGの収率は下がる。水素化処理した熱分解バイオ原油を使うと生物起源炭素が最終製品に取り込まれやすい。	<a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382018312736">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382018312736</a>
2	松材・麦わら	麦わらからの水素未処理の熱分解液とFPO(急速熱分解油)	北海原油常圧残渣	20	部分的に不活性化した市販RFCC触媒	2.5-4	小型活性評価装置(MAT)	525	農業廃棄物由来のバイオ原油は木材ベースのバイオ原油と比較して、co-processing原料としては好ましくなかった。窒素耐性触媒開発が必要。	<a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236119316667">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236119316667</a>
3	稲わら	高速熱分解油の水素化脱酸素油	VGO	5-20	E-cat	2.5-3.5	短接触MAT (SCT-MAT)	520	C/O比<3.5のバイオ原油では、VGO転換率はわずかに低下した。高いC/O比でのみ、5-15 wt%のバイオ原油をco-processingしても液収量は影響を受けなかった。	<a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221334371930675X">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221334371930675X</a>
4	モデル化合物	芳香族(Phenol, syringol, trimethoxybenzene)	テトラリン	50	E-cat	3	流動床、バッチCREC*ライザー、シミュレータ実験用反応器	500	種々の酸素含有モデル化合物をフィードに導入した後、テトラリン変換の大幅な減少が観察され、LPGおよびC11+炭化水素の収率が高くなり、コークスの収率が低くなった。	<a href="https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.9b01133">https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.9b01133</a>
5	モデル化合物	フェノール類(Guaiacol)	n-ヘプタン	1.2	Ni (またはV) 含浸USY	-	バイレックス固定床反応器	450	リグノセルロース系バイオマス由来バイオ原油に多量に含まれるフェノール化合物の一つであり、燃料性状に悪影響を及ぼすと言われている。本研究では特にNi系触媒を使用した場合にn-ヘプタンの転換率が減少し、オクタン価成分に影響した。	<a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236119317260">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236119317260</a>
6	微細藻類	HTL(水熱液化)原油	Heavy VGO	10	-	2.5-5	SCT-MAT	520	C/O比に関係なく転換率が減少した。HVGOのみを処理した場合に比べ、コークスおよびデカントオイル(DCO)の収率が高く、ガソリンの収率が低くなった。	<a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382018320265">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382018320265</a>

\*カナダ・ウェスタンオンタリオ大学 Chemical Reactor Engineering Centre 開発装置

### 2.2.3 バイオ燃料の定量分析

鉱油燃料中のバイオ燃料の比率は、規制遵守に係るため、既に **co-processing** による場燃料が流通している欧州で、改めてその定量性について問題が提起されている。

#### (1) 欧州委員会ワークショップでの議論

欧州でもバイオ燃料の配合率の定量法について議論が行われており、本年 6 月に開催された欧州委員会主催ワークショップでは、**co-processing** によるバイオ燃料が EU 加盟国間で流通が拡大することに備え、現在は加盟国独自に行っている分析法を EU で統一できるかの議論を行ったが、意見は一致しなかった。**Co-processing** を得たバイオ燃料の絶対量は少ないため、基本、その国内の流通に限られていたが、今後生産量が増加し、EU 内で流通するようになると定量性は各国の義務量の算出に影響することとなる。そのため、引き続き検討が行われることとなっている。

■ バイオリファイナリー導入に係る課題

- ・ 欧州委員会主催 **Co-processing** 会議 (6月19日 webinar)
- 現状では域内での測定法は統一されていないため、共通のバイオ配合量測定法の必要性について議論

EU加盟国	方 法
フランス	収量増加分
フィンランド	高濃度バイオ由来品は C14測定
ドイツ	C14 測定
イタリア	収量増加分
ポーランド	収量増加分
スペイン	収量増加分

バイオ燃料を扱う業界団体 (FuelsEurope, EBB, EWABA) は C14 測定を支持の立場であるが、スペイン石連 AOP と代替燃料団体 Art Fuels Forum は導入反対の立場を表明しており、共通分析法規格化には時間がかかる見込み。  
米国加州では、先行して C14 測定法が義務化されている。

図 2-9 欧州各国の生物起源炭素の定量法

生物起源炭素は、**co-processing** の効率を測定するための重要な指標であり、検討されている方法には、<sup>14</sup>C 同位体分析、物質収支アプローチ (炭素の物質収支と生成物の収量に基づく)、安定炭素同位体比 (<sup>13</sup>C / <sup>12</sup>C)、エネルギー含有量法がある。

ASTM D6866 “Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis” に続く <sup>14</sup>C 測定は、化石炭素とバイオ炭素を区別するための適切な方法です。

ただし、バイオマス原料の割合が 10wt% 未満の場合、再生可能な炭素を決定することは信頼できない可能性がある。この方法の幅広い適用は、コストが高く、オンサイトでの可用性が不足しているという制約を受ける。

## (2)加州大気資源局（CARB）での議論

CARB が定期的開催する LCFS ワーキンググループ会議<sup>1</sup>では、2017 年 2 月にディスカッション・ペーパー“Co-processing of Low Carbon Feedstocks in Petroleum Refineries”<sup>2</sup>をとりまとめ、製油所に導入する際の課題として、生物起源炭素の認証法に関する論点を盛り込んでいる。

加州 LCFS は、生物起源炭素の定量法として放射性同位体である炭素 14 (<sup>14</sup>C) 測定<sup>3</sup>による分析法を導入済みである。鉱油とバイオ原油の混合処理による製品中のバイオ比率の特定は、米国連邦の RIN 規制にも関わってくるものであるが、連邦としての分析法の統一は行われていない。

加州大気資源局は、燃料製品中の生物起源炭素を定量化するための物質収支ベースのアプローチをサポートしている。

例えば、FCC ユニットでの物質収支は±2%以内で適切に制御でき、パイロットスケールからのデータを外挿して商用スケールのデータを予測することができるとしている。

一方、米国のバイオディーゼル燃料メーカー Renewable Energy Group (REG) は、燃料製品中のバイオマス由来燃料の含有量を確定するための検証可能な定量化を提供するという点で、物質収支法は不十分であると主張しており、最終製品での生物起源炭素を測定して決定する必要があると指摘している。

このように、欧米における co-processing の定量性評価法については情報収集を継続する必要がある。

---

<sup>1</sup> [https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/lcfs\\_meetings/lcfs\\_meetings.htm](https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/lcfs_meetings/lcfs_meetings.htm)

<sup>2</sup> [https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/lcfs\\_meetings/020717\\_staffdiscussionpaper.pdf](https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/lcfs_meetings/020717_staffdiscussionpaper.pdf)

<sup>3</sup> 加速器質量分析装置 (AMS) を用いてバイオマス製品中のバイオマス由来炭素 <sup>14</sup>C 濃度を測定する。<sup>14</sup>C は、地表では <sup>14</sup>C/<sup>12</sup>C ≒ 10<sup>-12</sup> 比で存在し、半減期が 5730 年。遺跡の年代測定に用いる方法と同様。

### 3. バイオリファイナリー導入済み/計画の石油企業の事業戦略

#### 3.1 欧州の動向

ガソリン車よりもディーゼル車が普及している欧州では、バイオ燃料の混合義務化については、第一世代バイオ燃料である FAME 混合軽油が主流であったが、今後は配合量の制約を受けることになる。代わって、エンジンへの影響が少なく、サステナビリティに優れ、製油所の水素化精製装置を利用して製造できる再生可能ディーゼルの生産が増加している。

再生可能ディーゼルには、植物油を水素化処理した HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) や廃食油、獣脂の廃棄物系油脂原料の水素化品があり、欧州域内だけでなく世界的な原料調達により製造が可能となる (表 3-1)。

中でも Neste は、早くから HVO 製造に着手し、自国フィンランドの Porvoo 製油所だけでなく、原料集約拠点のオランダ・ロッテルダムやシンガポールに専用の水素化精製装置を新設し、現時点は、世界で最大の HVO 供給者として欧州だけでなく、米国や豪州に供給を始めている。

表 3-1 欧州の HVO 製造製油所一覧

国	石油会社	参加製油所	HVO生産能力 (千トン/年)
フランス	Total	La Mede製油所	500
スペイン	BP	Castellon製油所	80
	Cepsa	San Roque製油所	43
		La Rabida製油所	43
イタリア	ENI	Porto Marghera製油所	314
		Gela製油所	600
ポルトガル	Galp	Sines製油所	72
オランダ	Neste	Rotterdam製油所	1,000
フィンランド	Neste	Porvoo製油所	580
	UPM	Lappeenranta製油所	100
スウェーデン	PREEM	Göteborg製油所	800
	ST1	Göteborg製油所	200

出所：欧州委員会

バイオ燃料に関する 2020 年の報道から、石油会社の製油所活用に関する戦略を以下列挙した。また、専門誌等で報道された情報を表 3-3 にまとめた。

(1) BP

2020年9月の同社戦略イベント bp week にて、今後のバイオエネルギービジネスのアウトラインが公表された。

バイオマスの発電や燃料化に取り組んでおり、HVO 製造を今後年産 6 千バレルまで増強し、再生可能ディーゼル・ジェット燃料の供給を強化するとしている。対象となる製油所についてはすべて開示されていないが、米国ワシントン州の Cherry Point 製油所では再生可能ディーゼル製造が新たに開始された。

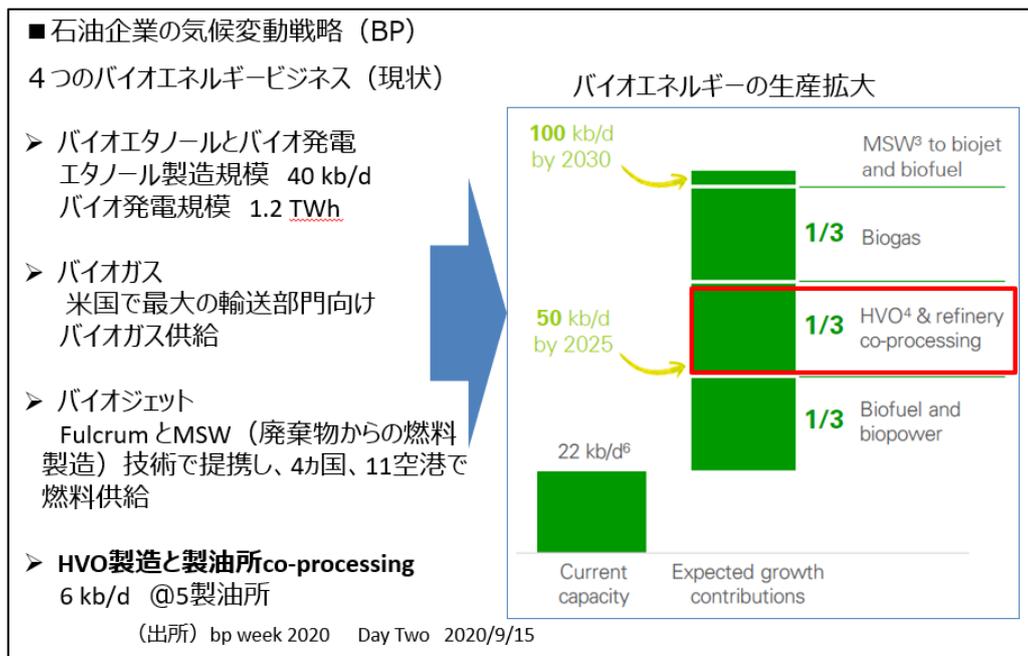


図 3-1 BP のバイオエネルギービジネス戦略

(出所) BP 公表資料をもとに JPEC 作成

(2) Total

2020年9月の同社 Investor Day にて、2050年ネット・ゼロ戦略の一環として、バイオ製油所を活用したバイオ燃料製造プロジェクトについて報告された。バイオリファイナリーへの完全転換の製油所、既存製油所での co-processing の拡大、製油所内にバイオプラントを新設するなど、欧州、米国、韓国で事業展開を計画している。

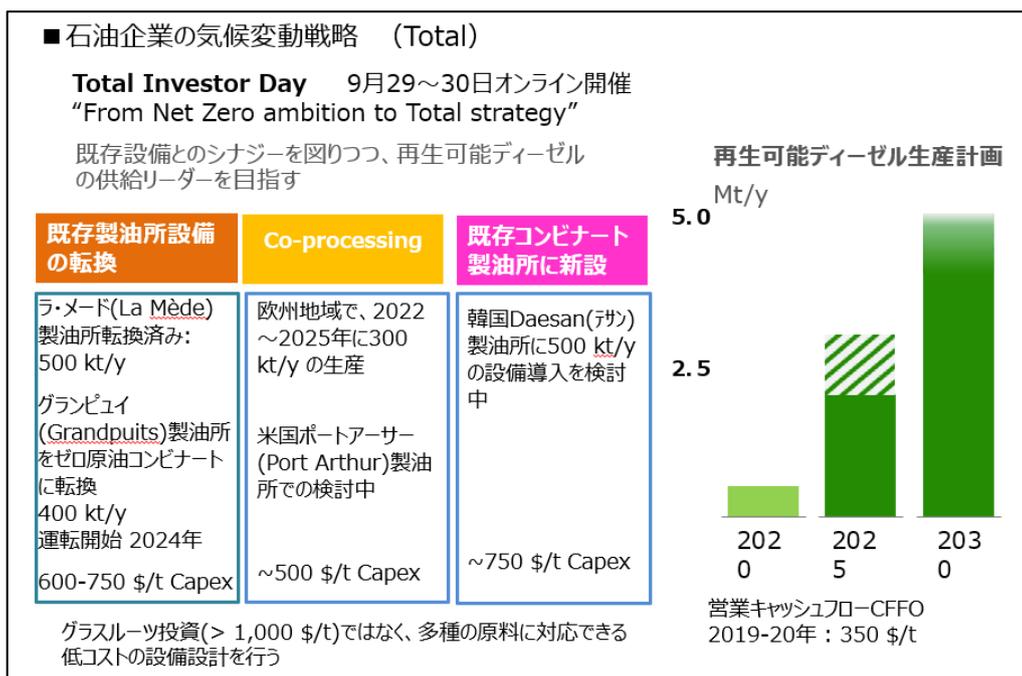


図 3-2 Total 製油所での今後のバイオ燃料製造

(出所) Total 公表資料をもとに JPEC 作成

特に、フランス Grandpuits 製油所のゼロ原油プラットフォームプロジェクトは、同社の再生可能エネルギービジネスを集約化したものであり今後の事業展開が注目される。

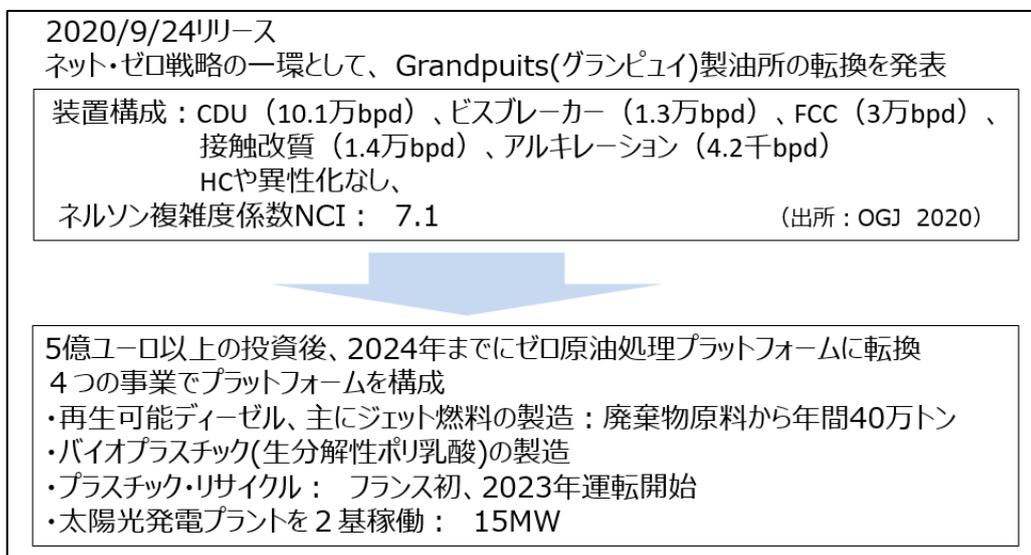


図 3-3 Total の製油所完全転換計画

### (3) Eni

2021年2月の同社戦略イベントにて、精製事業からバイオ燃料等再生可能エネルギー事業を分離し、リテール事業と統合した新事業体を立ち上げると発表した。

2050年ネット・ゼロ戦略として、他の欧州石油大手と同様に、再生可能エネルギー事業の中でのバイオ製品を強化するとして、これまで2カ所の国内製油所をバイオリファインリー専門工場に完全転換したのにつき、順次、転換を図るとしている。

加えて、資本参加している海外製油所でのバイオ燃料製造にも取り組む計画であり、アラブドバイにバイオリファイナーリー新設、ケニア Mombass 製油所の完全転換計画が公表された。

#### (4) Repsol

同社の戦略では、製油所の縮小や完全転換ではなく、再生可能エネルギーやカーボンリサイクルを組み合わせたエネルギーの供給基地としての転換ビジョンを提示している。

既に、自社の 5 製油所すべてでバイオ燃料の co-processing 実績があり、再生可能ディーゼルやバイオジェットの専用プラント建設の計画も打ち出された。

さらに、全製油所でグリーン水素製造を行うとしており、特に、コンビナート地域にある Bilbao 製油所では、合成燃料 e-fuel 製造が計画されており、同社の次世代製油所のモデルとなっている。

表 3-2 Repsol の製油所でのバイオ燃料等含酸素燃料製造の取り組み

会社	製油所 (所在地)	CDU * (万bpd)	バイオ燃料製造 (廃食油処理を含む)	グリーン水素製造・利用	E-fuel製造
Repsol (全製油所)	Cartagena (スペイン カルタヘナ)	22	○ Co-processing実績 2020年、バイオジェット試験製造 バイオディーゼル製造専用5千bpdプラント を新設、2023年稼働予定 (2020/10/22 リリース)	○ (ビジョンに記載あるが追加情報なし) (2020/11/26 new Strategic Plan発表)	×
	La Coruna (スペイン ア・コルニャ)	12	○ Co-processing実績	○ (ビジョンに記載あるが追加情報なし)	×
	Puertollano (スペイン プエルトルャノ)	15	○ Co-processing実績 2020年、バイオジェット試験製造 (2020/8/3 リリース)	○ (ビジョンに記載あるが追加情報なし)	×
	Tarragona (スペイン タラゴナ)	18.6	○ Co-processing実績	○ (ビジョンに記載あるが追加情報なし)	×
	Petronor Bilbao (スペイン ビルバオ) (Repsol子会社)	22.0	○ Co-processing実績	○ 100MW電解槽建設計画 パートナー (ノルウェー-HydrogenPro, スペ インAriema) (2021/1/8 HydrogenProリリース)	○ 2024年、50bpdパイロット装置稼働 フェーズ1 予算 60百万€// (2020/6/15 リリース)

\* 製油所精製能力は Oil & Gas Journal 等を参考

#### (5) OMV

オーストリア唯一の製油所、Schwechat 製油所は、同国の気候変動対策の重要拠点となっており、2050年までに製油所操業でのネット・ゼロを目指すとしている。

欧州石油大手に後れを取っているものの、製油所での HVO 製造、廃食油メチルエステル化 UCOME、HVO と VGO の co-processing の準備段階であるのに加え、敷地外でのセルロース系バイオエタノールの試験運転も開始した。

同製油所では廃プラスチックリサイクルやバイオガス、e-fuel 製造も立ち上げるとしており、EU だけでなく同国政府の補助を受け事業を進めるとしている。

#### (6) Neste

同社は、2035年までにカーボンニュートラルな生産に到達するという気候変動への取り組みを 2020年3月に発表する以前からバイオ燃料製造・販売事業へのシフトを行ってきた。表 3-3にあるように、この1年余の報道の中でも、同社のバイオ燃料関連報道が群を抜いていた。

現在、フィンランド、オランダ、シンガポールの製造拠点から欧米市場へ販路を拡大している。バイオ燃料の中でも廃食油等を原料としたドロップインの再生可能ディーゼルとサステナブルジェット燃料は GHG 削減にも貢献することから、同社品のニーズは益々高まっており、現在、シンガポールの拡張工事が行われており、ロッテルダム工場の増強については 2021 年~2022 年に最終投資決定がなされると報じられた。

バイオ燃料からさらなる低炭素燃料製造に取り組むため、2020 年 3 月には e-fuel 製造向けの高温電気分解技術を有するドイツ Sunfire 出資し、2021 年 2 月には、フィンランド技術研究センター（VTT Technical Research Centre of Finland）と Neste が主導し、フィンランドでの e-fuel 燃料開発に投資することとなった。

#### (7) Preem

スウェーデン最大の石油会社である Preem は、Gothenburg（ヨーテボリ）と Lysekil（リュースヒール）の 2 製油所の転換に動いており、Gothenburg では再生可能ディーゼル製造の専用プラントを導入し、バイオ燃料製造工場にシフトしている。

また、Lysekil は計画していた重油分解プロジェクトをキャンセルし、大規模な水の電気分解によるグリーン水素製造の可能性調査を行っている。この調査は 2021 年夏までに完了する予定であり、グリーン水素の生産だけでなく、製油所の将来の電力供給についての検討も含まれている。

2021 年 1 月の同社とスウェーデンの大手電力会社・エネルギー会社 Vattenfall（バッテンフォール）の共同声明によると、グリーン水素をバイオ燃料製造向けに製造するとしている。事業性があると判断された際には、次のステップとして、Lysekil 製油所に電解槽施設（200~500 MW スケール）を建設する計画立案に移行する。

表 3-3 欧州石油会社のバイオ燃料事業に係る最近の報道 (1/3)

石油会社	国/地域	報道日時	概要	URL
BP	豪州	2020年1月1日	西オーストラリアのKwinana製油所(14.6万bpd)を再生可能ディーゼルとSAF製造工場に完全転換を検討	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/11/02/bp-looking-at-renewable-diesel-and-saf-conversion-at-kwinana-refinery-in-western-australia/">https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/11/02/bp-looking-at-renewable-diesel-and-saf-conversion-at-kwinana-refinery-in-western-australia/</a>
BP	米国	2020年8月6日	BPのグリーンシフトにより米国ワシントン州Cherry Point製油所での再生可能ディーゼルの製造装置導入	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/08/06/bps-green-shift-could-focus-heavily-on-vertically-integrated-renewable-diesel/">https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/08/06/bps-green-shift-could-focus-heavily-on-vertically-integrated-renewable-diesel/</a> <a href="https://www.forbes.com/sites/edhirs/2020/08/05/bps-strategic-shift-to-renewables/#6af2361bd6b1">https://www.forbes.com/sites/edhirs/2020/08/05/bps-strategic-shift-to-renewables/#6af2361bd6b1</a>
Eni	イタリア	2020年2月10日	Eni子会社のVersalisは買収したCrescentinoバイオリアファイナリーでバイオマス発電所を再開し、2020年下期にバイオエタノール生産	<a href="https://bioenergyinternational.com/biochemicals-materials/versalis-restarts-biomass-power-plant-at-crescentino-biorefinery-and-expects-bioethanol-production-later-this-year">https://bioenergyinternational.com/biochemicals-materials/versalis-restarts-biomass-power-plant-at-crescentino-biorefinery-and-expects-bioethanol-production-later-this-year</a>
Eni	イタリア	2020年3月2日	Eniのバイオ燃料の長期戦略で2023年からバーム油を含まない年間500万トンのバイオ精製能力の増強	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/03/02/eni-says-crescentino-revamp-will-be-up-and-running-by-h1-2020/">https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/03/02/eni-says-crescentino-revamp-will-be-up-and-running-by-h1-2020/</a> <a href="http://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2020/02/long-term-strategic-plan-to-2050-and-action-plan-2020-2023.html">http://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2020/02/long-term-strategic-plan-to-2050-and-action-plan-2020-2023.html</a>
Eni	アブダビ	2020年9月18日	Eniはアブダビにバイオリアファイナリーの建設を提案	<a href="https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/09/eni-proposes-building-biorefineries-in-abu-dhabi">https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/09/eni-proposes-building-biorefineries-in-abu-dhabi</a>
Eni	イタリア	2020年10月28日	Eniは既存製油所のバイオリアファイナリーへの転換を加速してHVOを製造	<a href="https://www.argusmedia.com/en/news/2154451-italys-eni-sees-more-biorefinery-conversions">https://www.argusmedia.com/en/news/2154451-italys-eni-sees-more-biorefinery-conversions</a>
Eni	イタリア	2020年11月12日	人工LEDライトを使用した微生物類の培養による二酸化炭素の生物固定のための実験プラントを立ち上げ	<a href="https://bioenergyinternational.com/research-development/eni-develops-an-innovative-technology-to-biofixate-carbon-dioxide-using-led">https://bioenergyinternational.com/research-development/eni-develops-an-innovative-technology-to-biofixate-carbon-dioxide-using-led</a> <a href="https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2020/11/eni-aviluppa-tecnologia-bio-fissazione.html">https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2020/11/eni-aviluppa-tecnologia-bio-fissazione.html</a>
Eni	ケニア	2020年12月21日	ケニア Mombasa製油所(7.9万bpd)のHVO製造バイオリアファイナリーへの完全転換を支援	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/12/21/eni-looking-to-convert-mombasa-refinery-to-hvo-among-other-biofuel-projects/">https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/12/21/eni-looking-to-convert-mombasa-refinery-to-hvo-among-other-biofuel-projects/</a> <a href="https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2020/12/eni-kenya-incontro.html">https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2020/12/eni-kenya-incontro.html</a>
INA (MOLグループ)	クロアチア	2020年6月23日	ハンガリーMOLグループのクロアチア石油・ガス会社INAはセルロース系エタノール製造プラント建設に250万ユーロの投資を計画	<a href="https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/06/croatian-oil-firm-ina-aims-for-282-million-biorefinery-investment?id_85186630">https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/06/croatian-oil-firm-ina-aims-for-282-million-biorefinery-investment?id_85186630</a> <a href="https://bioenergyinternational.com/markets-finance/ina-requests-strategic-investment-status-for-sisak-biorefinery-plant">https://bioenergyinternational.com/markets-finance/ina-requests-strategic-investment-status-for-sisak-biorefinery-plant</a>
Neste	オランダ	2020年2月3日	NesteブランドのMY Renewable Dieselがオランダ市場で販売開始	<a href="https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/neste-rolls-out-renewable-diesel-on-dutch-market?utm_campaign=&amp;utm_content=C%26ENA_NEWS_port-in-action_NB_februari-2020_EN&amp;utm_medium=email&amp;utm_source=Eloqua&amp;elqTrackId=86CC7DEB21580022CC647C6732EB1099&amp;elq_d=692770ac34870a7aa4b614fe78ff&amp;elqaid=641&amp;elqat=1&amp;elqCampaignId=335">https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/neste-rolls-out-renewable-diesel-on-dutch-market?utm_campaign=&amp;utm_content=C%26ENA_NEWS_port-in-action_NB_februari-2020_EN&amp;utm_medium=email&amp;utm_source=Eloqua&amp;elqTrackId=86CC7DEB21580022CC647C6732EB1099&amp;elq_d=692770ac34870a7aa4b614fe78ff&amp;elqaid=641&amp;elqat=1&amp;elqCampaignId=335</a>
Neste	フィンランド	2020年3月6日	ドイツの高温電解技術開発会社Sunfire社へ出資、Power-to-X技術を推進	<a href="https://www.neste.com/release-and-news/climate-change/neste-invests-sunfire-leading-technology-developer-high-temperature-electrolysis-and-power-x">https://www.neste.com/release-and-news/climate-change/neste-invests-sunfire-leading-technology-developer-high-temperature-electrolysis-and-power-x</a>
Neste	フィンランド	2020年3月11日	TechnipFMCは Neste が有する NEXBTL 技術の事業展開で提携	<a href="https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/03/technipfmc-partners-with-neste-for-future-nexbt-technology-based-projects">https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/03/technipfmc-partners-with-neste-for-future-nexbt-technology-based-projects</a>
Neste	フィンランド	2020年3月11日	米国の使用済み食用油の収集業者およびリサイクル業者 Mahoney Environmental (Mahoney) とその関連会社を100%買収で合意	<a href="http://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/03/11/neste-to-acquire-us-based-ucollector-and-recycler-to-secure-feedstock-supplies/">http://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/03/11/neste-to-acquire-us-based-ucollector-and-recycler-to-secure-feedstock-supplies/</a> <a href="https://www.neste.com/release-and-news/circular-economy/neste-acquire-mahoney-environmental-strengthen-its-growth-strategy-and-position-renewable-raw">https://www.neste.com/release-and-news/circular-economy/neste-acquire-mahoney-environmental-strengthen-its-growth-strategy-and-position-renewable-raw</a>
Neste	フィンランド	2020年3月31日	Nesteは再生可能ディーゼルの輸出が今後10年間で現在の4倍の2千トンに急増するとし、同社のシンガポール、ロッテルダムで生産増強を計画	<a href="http://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/03/31/neste-sees-renewable-diesel-exports-soaring-to-20m-tons-over-next-decade/">http://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/03/31/neste-sees-renewable-diesel-exports-soaring-to-20m-tons-over-next-decade/</a> <a href="https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/oil/033020-neste-expects-global-renewable-diesel-demand-to-surge-over-next-decade">https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/oil/033020-neste-expects-global-renewable-diesel-demand-to-surge-over-next-decade</a>
Neste	米国	2020年5月4日	Nesteの米国の使用済み食用油の収集業者およびリサイクル業者 Mahoney Environmental (Mahoney) の買収が米国当局によって承認	<a href="https://biofuels-news.com/news/nestes-deal-authorized-by-us-authorities/">https://biofuels-news.com/news/nestes-deal-authorized-by-us-authorities/</a>
Neste	オランダ	2020年5月7日	ロッテルダム港湾で再生可能廃棄物やバイオ残渣を貯蔵、保管、精製するCount Terminal Rotterdam社を買収	<a href="http://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/05/07/neste-acquires-count-terminal-rotterdam/">http://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/05/07/neste-acquires-count-terminal-rotterdam/</a> <a href="https://www.neste.com/release-and-news/renewable-solutions/neste-acquired-count-terminal-rotterdam-strengthen-its-growth-strategy-renewable-raw-materials">https://www.neste.com/release-and-news/renewable-solutions/neste-acquired-count-terminal-rotterdam-strengthen-its-growth-strategy-renewable-raw-materials</a>
Neste	フィンランド	2020年5月24日	COVID-19の不確実性があるにもかかわらず、Nesteは再生可能エネルギーの生産記録を達成	<a href="https://translate.google.com/translate?hl=ja&amp;sl=en&amp;tl=ja&amp;u=http%3A%2F%2Fwww.biofuelsdigest.com%2Fhdigest%2F2020%2F05%2F24%2Fnest-og-renewables-help-protect-neste-in-2020-even-with-covid-19-uncertainty-neste-hits-renewables-production-record%2F&amp;anno=2&amp;sandbox=1">https://translate.google.com/translate?hl=ja&amp;sl=en&amp;tl=ja&amp;u=http%3A%2F%2Fwww.biofuelsdigest.com%2Fhdigest%2F2020%2F05%2F24%2Fnest-og-renewables-help-protect-neste-in-2020-even-with-covid-19-uncertainty-neste-hits-renewables-production-record%2F&amp;anno=2&amp;sandbox=1</a>
Neste	フィンランド	2020年6月18日	原油の消費削減する新しいソリューション(林業や農業廃棄物、都市ごみ、藻類、廃プラ、CO2等従来利用が困難であった大量原料)を開発	<a href="https://www.neste.com/release-and-news/sustainability/neste-develops-new-solutions-to-decrease-use-of-crude-oil/">https://www.neste.com/release-and-news/sustainability/neste-develops-new-solutions-to-decrease-use-of-crude-oil/</a> <a href="https://www.neste.com/release-and-news/sustainability/neste-develops-new-solutions-to-decrease-use-of-crude-oil-and-increases-research-and-development-finland#~:text=Neste%20launches%20a%20new%20research%20oil%20and%20tackle%20climate%20change.">https://www.neste.com/release-and-news/sustainability/neste-develops-new-solutions-to-decrease-use-of-crude-oil-and-increases-research-and-development-finland#~:text=Neste%20launches%20a%20new%20research%20oil%20and%20tackle%20climate%20change.</a>
Neste	オランダ	2020年6月24日	現地ロジ会社と協力しマクドナルドのフライドポテトの回収油からMY Renewable Diesel製造	<a href="https://biofuels-news.com/news/oil-from-mcdonalds-french-fries-to-be-converted-into-renewable-diesel/">https://biofuels-news.com/news/oil-from-mcdonalds-french-fries-to-be-converted-into-renewable-diesel/</a>
Neste	米国	2020年7月8日	自社シンガポール工場で製造したMY Renewable Jet Fuel (SAF)の最初のバッチをパイプライン経由でサンフランシスコ空港に納品	<a href="https://www.greencarcongress.com/2020/07/20200708-neste.html?utm_source=feedburner&amp;utm_medium=feed&amp;utm_campaign=Feed%3A+greencarcongress%2FTrBK+%28Green+Car+Congress%29">https://www.greencarcongress.com/2020/07/20200708-neste.html?utm_source=feedburner&amp;utm_medium=feed&amp;utm_campaign=Feed%3A+greencarcongress%2FTrBK+%28Green+Car+Congress%29</a> <a href="https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/07/07/neste-delivers-saf-to-sf-via-pipeline/">https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/07/07/neste-delivers-saf-to-sf-via-pipeline/</a>
Neste	米国	2020年7月24日	カリフォルニア州に100%再生可能ディーゼル販売の4つの給油所を開設	<a href="https://www.greencarcongress.com/2020/07/20200724-neste.html?utm_source=feedburner&amp;utm_medium=feed&amp;utm_campaign=Feed%3A+greencarcongress%2FTrBK+%28Green+Car+Congress%29">https://www.greencarcongress.com/2020/07/20200724-neste.html?utm_source=feedburner&amp;utm_medium=feed&amp;utm_campaign=Feed%3A+greencarcongress%2FTrBK+%28Green+Car+Congress%29</a>
Neste	フィンランド	2020年9月14日	Naantali製油所をターミナルと港湾事業、Porvoo製油所をバイオco-processingとプラリサイクル事業に再編する案を検討中と発表	<a href="https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/09/neste-plans-restructure-of-refinery-operations-in-finland">https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/09/neste-plans-restructure-of-refinery-operations-in-finland</a> <a href="https://www.neste.com/release-and-news/oil-products/neste-plans-restructure-of-refinery-operations-in-finland-and-starts-cooperation-negotiations">https://www.neste.com/release-and-news/oil-products/neste-plans-restructure-of-refinery-operations-in-finland-and-starts-cooperation-negotiations</a>
Neste	フィンランド	2020年10月6日	Nesteは2030年までに顧客の温室効果ガス排出量を年間少なくとも2千万トン削減し、2035年までにカーボンニュートラルな生産を達成すると宣言	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/10/06/neste-commits-to-carbon-neutral-production-by-2035/">https://www.biofuelsdigest.com/hdigest/2020/10/06/neste-commits-to-carbon-neutral-production-by-2035/</a> <a href="https://www.wbcsd.org/Overview/News-Insights/Member-spotlight/Neste-on-a-journey-to-a-carbon-neutral-future">https://www.wbcsd.org/Overview/News-Insights/Member-spotlight/Neste-on-a-journey-to-a-carbon-neutral-future</a>

表 3-3 欧州石油会社のバイオ燃料事業に係る最近の報道 (2/3)

石油会社	国/地域	報道日時	概要	URL
Neste	日本	2020年10月26日	Nesteと全日本空輸(ANA)がアジアでの持続可能航空燃料の最初の供給で協力	<a href="https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/10/neste-and-all-nippon-airways-ana-collaborate-on-first-supply-of-sustainable-aviation-fuel-in-asia?id=85186630">https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/10/neste-and-all-nippon-airways-ana-collaborate-on-first-supply-of-sustainable-aviation-fuel-in-asia?id=85186630</a>
Neste	オランダ	2020年11月3日	ロッテルダムのNesteバイオリアファイナリーに隣接する食用油製造会社Bunge Loders Croklaanを買収	<a href="https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/10/neste-to-acquire-bunges-refinery-plant-in-rotterdam?id=85186630">https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/10/neste-to-acquire-bunges-refinery-plant-in-rotterdam?id=85186630</a> <a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/11/03/neste-acquires-bunge-loders-croklans-rotterdam-refinery-to-process-feedstock/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/11/03/neste-acquires-bunge-loders-croklans-rotterdam-refinery-to-process-feedstock/</a>
Neste	フィンランド	2020年11月30日	Naantali製油所は2021年3月操業停止しターミナル化、Porvoo製油所をco-processingとブライサイクル事業に再編を決定	<a href="https://www.neste.com/releases-and-news/oil-products/neste-has-concluded-co-operation-negotiations-concerning-restructuring-its-refinery-operations">https://www.neste.com/releases-and-news/oil-products/neste-has-concluded-co-operation-negotiations-concerning-restructuring-its-refinery-operations</a>
Neste	オランダ	2020年12月1日	アムステルダム・スキポール空港SAFの供給を促進するためのAircraft Fuel Supply BV (AFS)社に出資	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/12/01/neste-buy-minority-stake-in-schiphol-fuel-storage-company-to-facilitate-supply-of-saf/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/12/01/neste-buy-minority-stake-in-schiphol-fuel-storage-company-to-facilitate-supply-of-saf/</a>
Neste	米国	2021年1月12日	Nesteは米国ジェット燃料販売大手のAvfuelとMY Renewable Jet Fuel(SAF)販売で戦略的提携に合意	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/01/12/neste-and-avfuel-team-up-to-supply-saf-in-the-us/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/01/12/neste-and-avfuel-team-up-to-supply-saf-in-the-us/</a> <a href="https://www.neste.com/releases-and-news/aviation/neste-and-avfuel-create-strategic-partnership-sustainable-aviation-fuel">https://www.neste.com/releases-and-news/aviation/neste-and-avfuel-create-strategic-partnership-sustainable-aviation-fuel</a>
Neste	オランダ	2021年1月20日	オランダの環境団体Milieudefensieが公表したNesteのバイオ燃料がサステナブルでないとのレポートに対し、Nesteが調査を実施	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/01/20/neste-investigation-finds-not-truth-to-allegations-of-unsustainable-supply-chain/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/01/20/neste-investigation-finds-not-truth-to-allegations-of-unsustainable-supply-chain/</a> <a href="https://www.neste.com/releases-and-news/sustainability/investigations-have-not-found-evidence-support-milieudefensie-report-allegations-serious">https://www.neste.com/releases-and-news/sustainability/investigations-have-not-found-evidence-support-milieudefensie-report-allegations-serious</a>
Neste	フィンランド	2021年2月8日	Neste再生可能燃料は2020年に販売した地域でGHG排出量を1,000万トン削減	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/02/08/nestes-fuels-reduced-ghg-emissions-by-10m-tons-in-2020/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/02/08/nestes-fuels-reduced-ghg-emissions-by-10m-tons-in-2020/</a>
Neste / Shell Aviation	フィンランド	2020年9月23日	NesteとShell Aviationは持続可能航空燃料の市場供給拡大で合意	<a href="https://biofuels-news.com/news/neste-and-shell-sign-agreement-to-increase-supply-of-sustainable-aviation-fuel/">https://biofuels-news.com/news/neste-and-shell-sign-agreement-to-increase-supply-of-sustainable-aviation-fuel/</a> <a href="https://www.neste.com/releases-and-news/aviation/neste-and-shell-sign-agreement-increases-supply-sustainable-aviation-fuel">https://www.neste.com/releases-and-news/aviation/neste-and-shell-sign-agreement-increases-supply-sustainable-aviation-fuel</a>
OMV	オーストリア	2020年7月29日	エネルギー製品の代替原料として廃ラブリ、廃棄物系バイオ、e-fuel、バイオガスの比率の向上を決定	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/07/29/omv-to-shift-towards-alternative-feedstocks-for-energy-products/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/07/29/omv-to-shift-towards-alternative-feedstocks-for-energy-products/</a> <a href="https://www.csrwire.com/press-releases/45501-OMV-Takes-Next-Steps-Towards-Reducing-Carbon-Footprint">https://www.csrwire.com/press-releases/45501-OMV-Takes-Next-Steps-Towards-Reducing-Carbon-Footprint</a>
OMV	オーストリア	2020年12月15日	OMVはSchwechat製油所でのHVOコプロセッシングに投資しています	<a href="https://www.argusmedia.com/es/news/2169195-omv-invests-in-hvo-coproducting-at-schwechat-refinery?backToResults=true">https://www.argusmedia.com/es/news/2169195-omv-invests-in-hvo-coproducting-at-schwechat-refinery?backToResults=true</a> <a href="https://www.omv.com/en/news/201215-omv-invests-around-eur-200-mn-in-biofuel-production-at-schwechat-refinery">https://www.omv.com/en/news/201215-omv-invests-around-eur-200-mn-in-biofuel-production-at-schwechat-refinery</a>
OMV	オーストリア	2020年12月21日	AustroCelHalleinはHalleinプラントでの木質バイオエタノール製造に成功し、長期購入先のOMVへの初納品が完了	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/12/21/omvc-receives-first-deliver-of-wood-based-ethanol-from-austrocel-hallein/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/12/21/omvc-receives-first-deliver-of-wood-based-ethanol-from-austrocel-hallein/</a>
PKN Orlen	ポーランド	2020年9月10日	2030年までに種々のバイオ燃料(HVO, co-HVO, UCOME, セルロース系バイオエタノール等)の生産を50万トン増強	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/09/10/pkn-orklen-looks-to-boost-biofuel-production-by-500000-tons-by-2030/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/09/10/pkn-orklen-looks-to-boost-biofuel-production-by-500000-tons-by-2030/</a>
Preem	スウェーデン	2020年3月12日	PreemがGothenburg製油所向けにTopsoeのHydroFlex技術を選定	<a href="https://bioenergyinternational.com/technology-suppliers/preem-selects-topsoes-hydroflex-solution-for-gothenburg-refinery">https://bioenergyinternational.com/technology-suppliers/preem-selects-topsoes-hydroflex-solution-for-gothenburg-refinery</a>
Preem	スウェーデン	2020年9月28日	Preemは再生可能燃料の生産を優先するためにLysekil製油所の重油分解プロジェクトを中止	<a href="https://www.oqi.com/refining-processing/refining/article/14184264/preem-cancels-lysekil-refinery-project-to-prioritize-renewables-production">https://www.oqi.com/refining-processing/refining/article/14184264/preem-cancels-lysekil-refinery-project-to-prioritize-renewables-production</a>
Preem	スウェーデン	2020年11月12日	Lysekil製油所で再生可能燃料の生産開始	<a href="http://biomassmagazine.com/articles/17517/renewable-fuel-production-begins-at-preems-refinery-in-lysekil">http://biomassmagazine.com/articles/17517/renewable-fuel-production-begins-at-preems-refinery-in-lysekil</a> <a href="https://www.preem.com/in-english/press/">https://www.preem.com/in-english/press/</a>
Preem	スウェーデン	2021年1月21日	Gothenburg製油所での再生可能ディーゼル生産を40%増強	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/01/21/preem-boosts-renewable-diesel-production-40/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/01/21/preem-boosts-renewable-diesel-production-40/</a>
Repsol	スペイン	2020年8月3日	Puertollano製油所でスペイン初の航空バイオ燃料の製造に成功	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/08/03/repsol-produces-first-batch-of-aviation-biofuel-in-spain/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/08/03/repsol-produces-first-batch-of-aviation-biofuel-in-spain/</a> <a href="https://www.repsol.com/en/press-room/press-releases/2020/repsol-produces-airplane-biofuel-for-the-first-time-in-spain.cshtml">https://www.repsol.com/en/press-room/press-releases/2020/repsol-produces-airplane-biofuel-for-the-first-time-in-spain.cshtml</a>
Repsol	スペイン	2020年11月10日	Cartagena製油所にスペイン初の先進バイオ燃料技術Axens Veganプラント建設の契約締結	<a href="https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/11/repsol-lets-contract-for-spains-first-advanced-biofuels-plant">https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/11/repsol-lets-contract-for-spains-first-advanced-biofuels-plant</a> <a href="https://www.repsol.com/en/press-room/press-releases/2020/repsol-to-build-spains-first-advanced-biofuels-plant-in-cartagena.cshtml">https://www.repsol.com/en/press-room/press-releases/2020/repsol-to-build-spains-first-advanced-biofuels-plant-in-cartagena.cshtml</a>
Shell	米国	2020年1月7日	Shell AviationとWorld Energyはサンフランシスコ空港でルフトハンザにSAFの複数年供給契約を締結	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/01/07/shell-aviation-world-energy-to-supply-sustainable-aviation-fuel-to-lufthansa-at-sfo-ink-multi-year-collaboration/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/01/07/shell-aviation-world-energy-to-supply-sustainable-aviation-fuel-to-lufthansa-at-sfo-ink-multi-year-collaboration/</a>
Shell	カナダ	2020年2月13日	Shell Venturesは、アルバータ大学のスピナウト新興企業Forge Hydrocarbonsに3千万カナダドルを投資しバイオ燃料プラント建設を支援	<a href="http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/02/13/shell-ventures-invests-c30-million-in-university-of-alberta-lipid-to-hydrocarbon-spin-off/">http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/02/13/shell-ventures-invests-c30-million-in-university-of-alberta-lipid-to-hydrocarbon-spin-off/</a>
Shell	カナダ	2020年2月13日	Shell Canadaは、カナダのケベック州の廃棄物からの低炭素燃料製造会社Varennes Carbon Recyclingに投資する契約を締結	<a href="http://www.shell.com/energy-and-innovation/new-energies/new-energies-media-releases/shell-invests-in-quebecs-first-waste-to-low-carbon-fuels-plant.html">http://www.shell.com/energy-and-innovation/new-energies/new-energies-media-releases/shell-invests-in-quebecs-first-waste-to-low-carbon-fuels-plant.html</a>
Shell	米国	2020年10月8日	コロラド州Red RockとShellがセルロース系燃料の売買契約で合意	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/10/08/red-rock-and-shell-agree-cellulosic-fuel-purchase-and-sale-agreement/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/10/08/red-rock-and-shell-agree-cellulosic-fuel-purchase-and-sale-agreement/</a> <a href="https://www.aviationpros.com/gse/fueling-equipment-accessories/fuel-distributors-suppliers-manufacturers/press-release/21157577/shell-aviation-red-rock-and-shell-sign-agreement-to-market-and-distribute-low-carbon-sustainable-aviation-and-diesel-fuel">https://www.aviationpros.com/gse/fueling-equipment-accessories/fuel-distributors-suppliers-manufacturers/press-release/21157577/shell-aviation-red-rock-and-shell-sign-agreement-to-market-and-distribute-low-carbon-sustainable-aviation-and-diesel-fuel</a>
Shell	オランダ	2020年12月18日	アムステルダム・スキポール空港で、Shell and NesteのSAF供給契約(2020年9月に発表)に基づいて、最初の顧客DHLにSAFを供給が決定	<a href="https://biofuels-news.com/news/shell-to-supply-saf-to-dhl-at-schiphol/">https://biofuels-news.com/news/shell-to-supply-saf-to-dhl-at-schiphol/</a>

表 3-3 欧州石油会社のバイオ燃料事業に係る最近の報道 (3/3)

石油会社	国/地域	報道日時	概要	URL
Shell	英国	2021年1月20日	ShellのFT技術を利用したVelocysのAltaltoSAFプロジェクトからShellが離脱	<a href="https://biofuels-news.com/news/shell-bails-out-of-altalto-saf-project/">https://biofuels-news.com/news/shell-bails-out-of-altalto-saf-project/</a>
Shell	ブラジル	2021年1月26日	ShellはECBグループがパラグアイに建設予定のバイオリファイナリーの再生可能ディーゼルとジェット燃料の2024年からの複数年購入契約を締結	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/01/26/ecb-group-signs-500m-liter-saf-and-hvo-offtake-contract-with-shell/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/01/26/ecb-group-signs-500m-liter-saf-and-hvo-offtake-contract-with-shell/</a> <a href="https://www.ecbgroup.com/hr/en/news/52/ecb-group-signs-biofuel-purchase-and-sale-agreement-for-more-than-25-billion-litres-with-shell">https://www.ecbgroup.com/hr/en/news/52/ecb-group-signs-biofuel-purchase-and-sale-agreement-for-more-than-25-billion-litres-with-shell</a>
Shell	オランダ	2021年2月8日	アムステルダム・スキポール空港で、KLMがShell研究センターで製造したSAFを配合し初飛行	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/02/08/klm-first-to-fly-passenger-flight-partially-on-synthetic-kerosene/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/02/08/klm-first-to-fly-passenger-flight-partially-on-synthetic-kerosene/</a> <a href="https://news.klm.com/world-first-in-the-netherlands-by-klm-shell-and-dutch-ministry-for-infrastructure-and-water-management-first-passenger-flight-performed-with-sustainable-synthetic-kerosene/">https://news.klm.com/world-first-in-the-netherlands-by-klm-shell-and-dutch-ministry-for-infrastructure-and-water-management-first-passenger-flight-performed-with-sustainable-synthetic-kerosene/</a>
Shell	中国	2021年2月10日	ShellがJiaaoEnprotechから15万トンのバイオディーゼルを1億5500万ドルで購入契約	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/02/10/shell-to-buy-150000-tons-of-biodiesel-from-jiaao-enprotech-for-155m/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/02/10/shell-to-buy-150000-tons-of-biodiesel-from-jiaao-enprotech-for-155m/</a> <a href="https://www.yicai.com/news/china-jiaao-enprotech-leaps-on-usd155-million-biodiesel-deal-with-shell-unit">https://www.yicai.com/news/china-jiaao-enprotech-leaps-on-usd155-million-biodiesel-deal-with-shell-unit</a>
Shell Aviation	米国	2020年7月8日	Amazon Airは、World Energyが製造しShell Aviationが供給するSAFを購入契約を締結	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/07/08/amazon-air-teams-with-shell-aviation-on-saf-buy-contract/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/07/08/amazon-air-teams-with-shell-aviation-on-saf-buy-contract/</a>
Total	フランス	2020年2月1日	2020年末現在、フランス国内でのTotal E85(エタノール 60~85%)ステーションが前年の270カ所から750カ所に増加	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/02/01/total-passes-750-e85-stations-in-france/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/02/01/total-passes-750-e85-stations-in-france/</a>
Total	フランス	2020年9月28日	Grandpuits製油所(10 1万bpd)の原油処理を停止し2024年までにゼロ原油プラントフォームに完全に転換転換を発表	<a href="https://www.ogj.com/refining-processing/refining/operations/article/14184245/total-converting-grandpuits-refinery-into-zero-crude-plant-by-2024">https://www.ogj.com/refining-processing/refining/operations/article/14184245/total-converting-grandpuits-refinery-into-zero-crude-plant-by-2024</a> <a href="https://www.total.com/media/news/communities/energy-transition-total-is-investing-more-than-eu500-million-to-convert-its">https://www.total.com/media/news/communities/energy-transition-total-is-investing-more-than-eu500-million-to-convert-its</a>
Total	フランス	2020年11月14日	Grandpuits製油所のバイオリファイナリー転換後、持続可能性ジェット燃料製造のためにHoneywell UOP Ecofining技術の導入を公表	<a href="https://bioenergyinternational.com/technology-suppliers/total-selects-honeywell-uop-ecofining-for-grandpuits-zero-crude-plant/">https://bioenergyinternational.com/technology-suppliers/total-selects-honeywell-uop-ecofining-for-grandpuits-zero-crude-plant/</a>

### 3.2 北米の動向

米国では、ガソリンや軽油へのバイオ燃料配合の義務化を進めてきたものの、ガソリンは軽油需要の2倍、石油製品需要の半分を占めることから、自国のコーンエタノールをエネルギー燃料としてガソリンに配合する政策に重点が置かれてきた。そのため、FAME生産はエタノールの2%程度であり、さらに次世代バイオ燃料の製造はベンチャーでわずかに生産されている状況である。

加州は、連邦に先駆けて独自に導入した気候変動対策のひとつとして、2010年に施行となった低炭素燃料基準（LCFS）規制により、石油製品の製造や販売を手掛ける会社はバイオ燃料の供給・調達が必須となっている。

製油所の装置構成を見た場合、バイオエタノール製造は発酵プロセスであり、製油所の既存設備の活用は難しく、またFAME製造も化学品製造プロセスのため製油所での対応が難しい。しかし、植物油や廃食油等油脂の水素化プロセスは、製油所の水素化精製装置を活用することができ、加州に市場を持つ石油会社は再生可能ディーゼルの製造に照準をあてている（表3-4）。

表3-4 加州市場に向けた製油所での再生可能ディーゼル製造に関する最近の報道

石油会社	製油所	備考
Global Clean Energy	加州Bakersfield製油所	2020年5月公表
HollyFrontier	ワイオミング州Cheyenne製油所	2020年6月公表
	ニューメキシコ州Navajo製油所	2019年10月公表 バイオ原料前処理装置新設
CVR Energy	オクラホマ州Wynnewood製油所	2020年8月公表
Marathon Petroleum	ノースダコタ州Dickinson製油所	2020年7月公表 2020年末までに転換完了
World Energy	加州Paramount製油所	稼働中(2018年3月Delek US Holdingsから買収)

出所：各社報道をもとにJPEC作成

加州市場に再生可能ディーゼルの供給を行う石油会社として、Valero Energyは、同州ではなく、ルイジアナ州の子会社Diamond Green Diesel社にて油脂調達と水素化処理を行う体制を取っている。

また、Global Clean Energyは加州に所有するBakersfield製油所（閉鎖中）の一部を再稼働して再生可能ディーゼルの製造するとし、ExxonMobilと5年間のオフテイク契約を本年8月に締結した。

さらに、加州の燃料規制の動きは、北米西海岸のカナダ・ビクトリア州にも波及しており、バンクーバー近郊にあるParkland社Burnaby製油所（元Chevron所有）では、再生可能ディーゼルの製造準備を進めている。

2020年に製油所でのバイオ燃料製造に関する報道がなされた石油会社について概要を以下に記す。

表 3-5 加州向け再生可能ディーゼル製造者

■ バイオリファイナリー導入石油会社の戦略調査（米国）  
加州の再生可能ディーゼルマーケットへの供給会社

企業名	場所	生産能力 (百万ガロン/年)	設備投資額 (百万ドル)	百万ガロン/年当 りの設備投資額	稼働時期
Neste	Singapore	340	850	2.5	Yes
REG	Geismar, LA	75	175	2.333333	Yes
Diamond Green Diesel (Valero)	Norco, LA	275	不明	—	Yes
Ryze Renewables (2 facilities)	Reno, NV	168	250	1.488095	H2 2020
Marathon	Dickinson, ND	183	470	2.568306	Q4 2020
CVR Energy	Wynnewood, OK	107	100	0.934579	Q3 2021
Diamond Green Diesel Expansion	Norco, LA	400	1100	2.75	H2 2021
Marathon Petroleum	Martinez, CA	736	不明	—	2022
HollyFrontier	Cheyenne, WY	90	340	3.777778	Q1 2022
BKRF	Bakersfield, CA	153	365	2.385621	Q1 2022
HollyFrontier	Artesia, NM	110	360	3.272727	H1 2022
Neste Expansion	Singapore	440	1600	3.636364	Q1 2023
Phillips 66	Rodeo, CA	800	750	0.9375	Q1 2024*
Diamond Green Diesel (Valero)	Port Arthur, TX	400	不明	—	投資判断待ち
Omega Green Diesel	Paraguay	250	800	3.2	投資判断待ち

4577

\*2021年Q2に120 mmgyの生産開始 (出所) Stratas Advisors等をもとに作成

(1) Phillips 66

米国全土に 9 カ所、約 170 万 BPD の精製能力を有する同社は、加州 LCFS 対応のため、西海岸製油所の機能の大幅見直しを発表した。

英国の子会社製油所での再生可能ディーゼル製造プラント新設も行った。

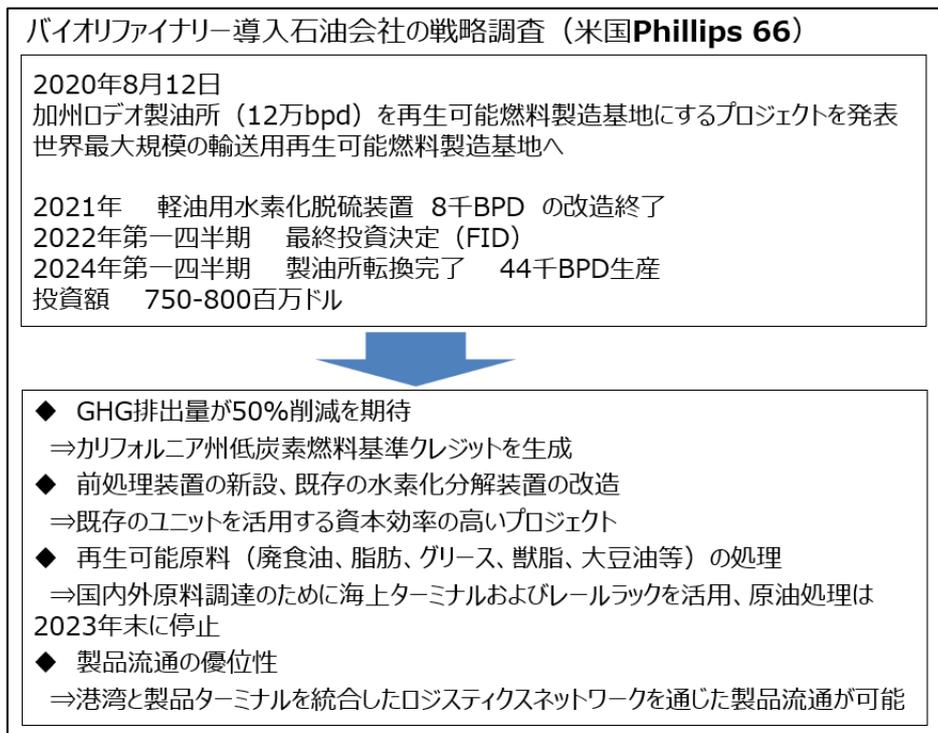


図 3-4 Phillips 66 の製油所完全転換計画

## (2) ExxonMobil

遺伝子工学を取り入れた藻類バイオ燃料製造の長期的な研究開発に取り組んでいるが、自社製油所を活用した HVO 等バイオ燃料製造は行わず外部からの基材調達で対応している。

## (3) Chevron

加州 El Segundo 製油所での co-processing によるバイオ燃料の製造を計画を 2020 年初めに発表したが、2021 年 3 月の Investor Day の発表でも、まだ準備段階としている。加州以外の製油所でのバイオ関連投資の計画はない。同社の戦略として、バイオ燃料専門会社に出資を行い、次世代バイオ燃料を調達する計画としている。また、バイオ等再生可能エネルギー分野の研究については、子会社の Chevron Technology Ventures を通じて、スタートアップへの出資を行っている。

## (4) Marathon Petroleum

米国独立系製油所の買収により国内最大の 300 万 BPD を超える精製能力を有する同社は、2020 年に、16 カ所の製油所の転換を次々と発表した。加州市場向けの再生可能ディーゼル製造のために、米国西部にある製油所のバイオリファイナリーへの転換計画の発表が相次いだ。

## (5) CVR Energy

中西部に 2 カ所、約 20 万 BPD の製油所を有する小規模精製会社であるが、両製油所に再生可能ディーゼル製造プラントの導入を発表した。

## (6) HollyFrontier

同社も米国西部に 6 カ所、52 万 BPD の製油所を有するが、再生可能ディーゼル製造用工場への完全転換も含め、複数製油所でバイオ燃料製造を計画している。

## (7) Global Clean Energy

同社の加州 Bakersfield 製油所は何度かの買収を経て操業停止となっているが、バイオリファイナリーへの完全転換を進めており、ExxonMobil と長期オフテーク契約を予定している。

## (8) Parkland Fuel

加州 LCFS 規制にならい、カナダ西部のブリティッシュコロンビア州等が類似の法規制の導入を進めているため、バイオ燃料の自国製油所での製造として 2020 年に co-processing の実証試験に成功し、今後、製造を拡大するとしている。

カナダの製油所でのバイオ燃料製造の動きは鈍く、バイオ燃料配合を進めるには米国からの輸入で賄う必要がある。既に、米国西北部にある製油所は加州向けだけでなく、カナダ向けの再生可能ディーゼル製造を事業計画に含めているとの報道もある。

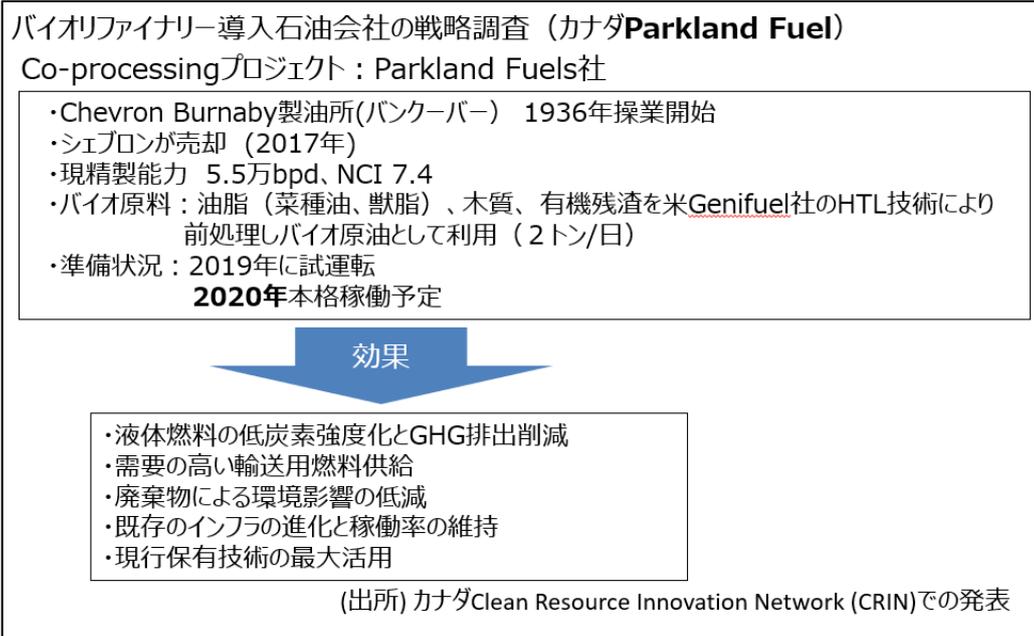


図 3-5 カナダ Parkland 製油所での co-processing の取り組み

表 3-6 北米石油会社のバイオ燃料事業に係る最近の報道 (1/2)

石油会社	国/地域	報道日時	概要	URL
Chevron	米国	2020年3月3日	加州El Segundo製油所(26.9万bpd)のFCCでバイオ原料のco-processを計画	<a href="https://www.snglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/oil/030320-refinery-news-chevron-to-co-process-biofeed-at-el-segundo-fcc">https://www.snglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/oil/030320-refinery-news-chevron-to-co-process-biofeed-at-el-segundo-fcc</a>
Chevron	米国	2020年10月8日	乳製品バイオメタンを自動車用に再生可能天然ガス(RNG)のJV事業を計画	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/10/08/brightmark-and-chevron-form-dairy-rng-jv/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/10/08/brightmark-and-chevron-form-dairy-rng-jv/</a> <a href="https://www.businesswire.com/news/home/20201007005196/en/Chevron-Brightmark-Partner-on-Dairy-Biomethane-Fuel-Projects">https://www.businesswire.com/news/home/20201007005196/en/Chevron-Brightmark-Partner-on-Dairy-Biomethane-Fuel-Projects</a>
Chevron Lummus Global	日本	2020年7月22日	Chevron LummusGlobalが日本でのバイオ燃料プロジェクトの立ち上げを発表	<a href="https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/07/chevron-lummus-global-announces-successful-startup-of-biofuels-project?id=85186630">https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/07/chevron-lummus-global-announces-successful-startup-of-biofuels-project?id=85186630</a>
Chevron Lummus Global	米国	2020年2月19日	ASTMはApplied Research Associates (ARA)とChevron Lummus Global (CLG) が作成した持続可能な航空燃料(SAF)製造手順を承認	<a href="https://biofuels-news.com/news/sustainable-aviation-fuel-production-pathway-authorized-by-astm/">https://biofuels-news.com/news/sustainable-aviation-fuel-production-pathway-authorized-by-astm/</a>
CVR Energy	米国	2020年8月5日	オクラホマ州Wynnewood製油所(7.5万bpd)に1億ドルの再生可能ディーゼル設備導入を検討中	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/08/05/cvr-energy-exploring-100m-renewable-diesel-facility-at-wynnewood-refinery/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/08/05/cvr-energy-exploring-100m-renewable-diesel-facility-at-wynnewood-refinery/</a>
CVR Energy	米国	2020年11月4日	カンザス州 Coffeyville製油所(13.2万bpd)での再生可能ディーゼルプロジェクトを計画	<a href="https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/10/cvr-energy-plans-potential-renewable-diesel-project-at-coffeyville?id=85186630">https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/10/cvr-energy-plans-potential-renewable-diesel-project-at-coffeyville?id=85186630</a>
CVR Energy	米国	2020年12月21日	オクラホマ州Wynnewood製油所での再生可能ディーゼルユニットプロジェクトの全面承認を発表	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/12/21/cvr-energy-announces-full-board-approval-for-wynnewood-renewable-diesel-unit-project/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/12/21/cvr-energy-announces-full-board-approval-for-wynnewood-renewable-diesel-unit-project/</a> <a href="https://www.globenewswire.com/news-release/2020/12/21/2148582/0/en/CVR-Energy-Announces-Full-Board-Approval-for-Wynnewood-Renewable-Diesel-Unit-Project.html">https://www.globenewswire.com/news-release/2020/12/21/2148582/0/en/CVR-Energy-Announces-Full-Board-Approval-for-Wynnewood-Renewable-Diesel-Unit-Project.html</a>
CVR Energy	米国	2021年1月27日	オクラホマ州Wynnewood製油所(7.5万bpd)に再生可能ディーゼル生産にHaldorのHydroFlexテクノロジーを選定	<a href="https://biofuels-news.com/news/cvr-energy-selects-haldor-topsoes-hydroflex-technology-for-renewable-diesel-production/">https://biofuels-news.com/news/cvr-energy-selects-haldor-topsoes-hydroflex-technology-for-renewable-diesel-production/</a>
ExxonMobil	米国	2020年1月6日	ExxonMobilのR&D副社長は、2020年以降のバイオ燃料の研究でのパートナーシップの重要性を指摘	<a href="http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/01/06/exxonmobil-points-to-biofuels-in-the-way-ahead-for-2020/">http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/01/06/exxonmobil-points-to-biofuels-in-the-way-ahead-for-2020/</a>
ExxonMobil	米国	2020年8月11日	Global Clean Energy Holdingsの加州Bakersfield製油所で生産の再生可能ディーゼルを5年間、525百万ガロンのオフテック契約を締結	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/08/11/exxon-inks-525-million-gallon-5-year-renewable-diesel-offtake-deal-with-global-clean-energy-holdings/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/08/11/exxon-inks-525-million-gallon-5-year-renewable-diesel-offtake-deal-with-global-clean-energy-holdings/</a> <a href="https://www.prnewswire.com/news-releases/orion-energy-gcm-grosvenor-and-voval-close-a-365-million-strategic-capital-partnership-with-bakersfield">https://www.prnewswire.com/news-releases/orion-energy-gcm-grosvenor-and-voval-close-a-365-million-strategic-capital-partnership-with-bakersfield</a>
ExxonMobil	米国	2020年8月19日	NREL国立研究所との藻類バイオ燃料の共同研究が研究開発が進展中	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/08/19/nrel-partnership-with-exxonmobil-making-progress-on-algae-fuels/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/08/19/nrel-partnership-with-exxonmobil-making-progress-on-algae-fuels/</a>
ExxonMobil	英国	2020年9月10日	FAME配合バンカー燃料のトライアル運航に成功、ロッテルダム港で販売開始	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/09/10/exxonmobil-to-expand-biofuel-bunkering-after-successful-trial/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/09/10/exxonmobil-to-expand-biofuel-bunkering-after-successful-trial/</a> <a href="https://www.exxonmobil.com/en/marine/technicalresources/press-releases/marine-bio-fuel-oil">https://www.exxonmobil.com/en/marine/technicalresources/press-releases/marine-bio-fuel-oil</a>
Global Clean Energy Holdings	米国	2020年6月9日	加州Bakersfield製油所にデンマークHaldor Topsoe社のHydroFlex再生可能ディーゼル技術を選定	<a href="http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/06/09/haldor-topsoes-hydroflex-chosen-for-bakersfield-refinery-revamp/">http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/06/09/haldor-topsoes-hydroflex-chosen-for-bakersfield-refinery-revamp/</a> <a href="https://blog.topsoe.com/global-clean-energy-holdings-selects-haldor-topsoes-hydroflex-for-revamp-of-refinery-for-renewable-fuel-production">https://blog.topsoe.com/global-clean-energy-holdings-selects-haldor-topsoes-hydroflex-for-revamp-of-refinery-for-renewable-fuel-production</a>
Global Clean Energy Holdings	米国	2020年5月12日	Global Clean Energy HoldingsはDelek US Holdings子会社のAlon Bakersfield製油所を買収し、18~20か月かけてバイオリアファイナリーへの転換を計画	<a href="http://www.biomasomagazine.com/articles/17036/california-refinery-to-be-converted-to-produce-renewable-diesel">http://www.biomasomagazine.com/articles/17036/california-refinery-to-be-converted-to-produce-renewable-diesel</a>
Grön Fuels LLC	米国	2020年12月15日	ヒューストンのインフラ資産運用会社FidelisInfrastructureの子会社GrönFuelsは、数十億ドル規模のルシアン州バイオ施設向けにHaldor Topsoe技術を選定	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/12/15/below-zero-the-worlds-largest-renewable-diesel-project-just-phase-one-of-a-9-year-journey-to-a-massive-carbon-negative-park-at-the-port-of-baton-rouge/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/12/15/below-zero-the-worlds-largest-renewable-diesel-project-just-phase-one-of-a-9-year-journey-to-a-massive-carbon-negative-park-at-the-port-of-baton-rouge/</a> <a href="https://blog.topsoe.com/gr%C3%B6n-fuels-llc-select-haldor-topsoes-hydroflex-renewable-fuels-and-h2bridge-bio-hydrogen-technologies-with-biorea-">https://blog.topsoe.com/gr%C3%B6n-fuels-llc-select-haldor-topsoes-hydroflex-renewable-fuels-and-h2bridge-bio-hydrogen-technologies-with-biorea-</a>
HollyFrontier	米国	2020年6月1日	HollyFrontierがワイオミング州Cheyenne製油所(5.2万bpd)を再生可能ディーゼル生産用に完全転換を計画	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/06/01/hollyfrontier-to-convert-cheyenne-refinery-to-renewable-diesel-production/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/06/01/hollyfrontier-to-convert-cheyenne-refinery-to-renewable-diesel-production/</a> <a href="https://www.hollyfrontier.com/investor-relations/press-releases/Press-Release-Details/2020/HollyFrontier-Announces-Expansion-of-Renewable-Business/default.aspx">https://www.hollyfrontier.com/investor-relations/press-releases/Press-Release-Details/2020/HollyFrontier-Announces-Expansion-of-Renewable-Business/default.aspx</a>
HollyFrontier	米国	2020年1月29日	デンマークTopsoeがHollyFrontierのニューメキシコ州Artesia製油所(10万bpd)に再生可能ディーゼルユニットHydroFlexのライセンス供与	<a href="https://www.biofuels-news.com/news/topsoe-to-license-fuel-technology-to-hollyfrontiers-renewable-diesel-unit/">https://www.biofuels-news.com/news/topsoe-to-license-fuel-technology-to-hollyfrontiers-renewable-diesel-unit/</a> <a href="https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/01/hollyfrontier-select-solution-to-reduce-cost-of-compliance-with-renewable-fuels-blending">https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/01/hollyfrontier-select-solution-to-reduce-cost-of-compliance-with-renewable-fuels-blending</a>
HollyFrontier	米国	2020年10月9日	HollyFrontierがワイオミング州Cheyenne製油所(5.2万bpd)の転換のためテキサス州IAGとプロジェクトマネジメント契約を締結	<a href="https://www.ogc.com/refining-processing/refining/article/14185024/hollyfrontier-lets-contract-for-wyoming-refinery-conversion?utm_source=OGJ_Refining&amp;utm_medium=email&amp;utm_campaign=CPS201020080&amp;e_cid=4870A2282056H9Y5D_omeda%7C4870A2282056H9Y&amp;olv_enc_id=4870A2282056H9Y">https://www.ogc.com/refining-processing/refining/article/14185024/hollyfrontier-lets-contract-for-wyoming-refinery-conversion?utm_source=OGJ_Refining&amp;utm_medium=email&amp;utm_campaign=CPS201020080&amp;e_cid=4870A2282056H9Y5D_omeda%7C4870A2282056H9Y&amp;olv_enc_id=4870A2282056H9Y</a>
Marathon Petroleum	米国	2020年2月4日	加州向けの再生可能ディーゼル製造プロジェクトを複数製油所で計画	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/02/04/marathon-petroleum-deep-into-rd-conversion-projects/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/02/04/marathon-petroleum-deep-into-rd-conversion-projects/</a>
Marathon Petroleum	米国	2020年7月20日	オハイオ州のバイオディーゼルプラントDuonix Beatriceを買収し、2021年からノースダコタ州Dickinson製油所(1.9万bpd)向けの原料の前処理を開始	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/07/20/marathon-petroleum-buys-duonix-beatrice-to-pretreat-rd-feedstock/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/07/20/marathon-petroleum-buys-duonix-beatrice-to-pretreat-rd-feedstock/</a> <a href="https://beatrice.dailysun.com/news/local/ohio-company-purchases-beatrice-biodiesel-plant/article_b3bc710f-6e2f-5a90-a2ed-13bfa89e7a37.html#tracking-source_home-top-story-1">https://beatrice.dailysun.com/news/local/ohio-company-purchases-beatrice-biodiesel-plant/article_b3bc710f-6e2f-5a90-a2ed-13bfa89e7a37.html#tracking-source_home-top-story-1</a>
Marathon Petroleum	米国	2020年8月3日	加州Martinez製油所(16.1万bpd)とニューメキシコ州Gallup製油所(2.7万bpd)を製油所にバイオリアファイナリーへの転換を決定	<a href="https://www.ogc.com/refining-processing/refining/article/14180915/marathon-permanently-idles-two-us-refineries">https://www.ogc.com/refining-processing/refining/article/14180915/marathon-permanently-idles-two-us-refineries</a>
Marathon Petroleum	米国	2020年10月7日	加州Martinez製油所(16.1万bpd)の再生可能ディーゼル工業への完全転換の認可申請	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/10/07/marathon-energy-applies-for-permits-to-convert-martinez-refinery-to-renewable-diesel/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/10/07/marathon-energy-applies-for-permits-to-convert-martinez-refinery-to-renewable-diesel/</a> <a href="https://www.marathonpetroleum.com/Newsroom/Company-News/Marathon-seeks-permits-for-Martinez-renewable-diesel-project/">https://www.marathonpetroleum.com/Newsroom/Company-News/Marathon-seeks-permits-for-Martinez-renewable-diesel-project/</a>
Marathon Petroleum	米国	2020年11月3日	ノースダコタ州Dickinson製油所での再生可能ディーゼルの生産開始	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/11/03/marathon-petroleum-starting-up-dickinson-north-dakota-renewable-fuels-facility/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/11/03/marathon-petroleum-starting-up-dickinson-north-dakota-renewable-fuels-facility/</a>

表 3-6 北米石油会社のバイオ燃料事業に係る最近の報道 (2/2)

石油会社	国/地域	報道日時	概要	URL
Parkland Fuel	カナダ	2020年10月5日	カナダ低炭素燃料基準政策に合わせParkland Burnaby製油所が再生可能ディーゼルの製造をしているが、国内供給が十分ではないため、米国からの供給に依存の可能性	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/10/05/canadian-refiners-may-be-too-low-to-take-up-lefs-opportunity-as-us-gears-up/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/10/05/canadian-refiners-may-be-too-low-to-take-up-lefs-opportunity-as-us-gears-up/</a> <a href="https://www.agcanada.com/daily/t-c-soil-refiners-press-on-renewable-diesel-for-canadian-market">https://www.agcanada.com/daily/t-c-soil-refiners-press-on-renewable-diesel-for-canadian-market</a>
PBF Energy	米国	2020年2月18日	PBF Energyは、ShellのMartinez製油所(15万bpd)の買収を完了、Shellが提案していた再生可能ディーゼル製造の可能性を継続検討	<a href="http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/02/18/pbf-energy-looking-at-possibility-with-shell-to-repurpose-martinez-refinery-into-renewable-diesel-production/">http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/02/18/pbf-energy-looking-at-possibility-with-shell-to-repurpose-martinez-refinery-into-renewable-diesel-production/</a> <a href="https://www.nrnews.com/news-releases/pbf-energy-completes-acquisition-of-martinez-refinery-creates-west-coast-system-300997298.html">https://www.nrnews.com/news-releases/pbf-energy-completes-acquisition-of-martinez-refinery-creates-west-coast-system-300997298.html</a>
PBF Energy	米国	2021年2月11日	ルイジアナ州Chalmette製油所(19万bpd)に再生可能ディーゼル製造装置の導入を検討	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/02/11/pbf-energy-looking-to-add-renewable-diesel-production-to-chalmette-refinery/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/02/11/pbf-energy-looking-to-add-renewable-diesel-production-to-chalmette-refinery/</a> <a href="https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/agriculture/021121-pbf-energy-considering-renewable-diesel-project-at-chalmette-louisiana-refinery">https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/agriculture/021121-pbf-energy-considering-renewable-diesel-project-at-chalmette-louisiana-refinery</a>
Phillips 66	米国	2020年1月21日	ワシントン州Ferndale製油所(10万bpd)とバイオ会社REGの再生可能ディーゼル製造プラント建設検討を行ってきたが手続き長期化のため中止を判断	<a href="https://biofuels-news.com/news/renewable-energy-group-phillips-66-pull-plug-on-renewable-diesel-plant-in-washington/">https://biofuels-news.com/news/renewable-energy-group-phillips-66-pull-plug-on-renewable-diesel-plant-in-washington/</a> <a href="https://www.rigzone.com/news/phillips-66-and-reg-scrap-renewable-diesel-project-22-jan-2020-160859-article/">https://www.rigzone.com/news/phillips-66-and-reg-scrap-renewable-diesel-project-22-jan-2020-160859-article/</a>
Phillips 66	米国	2020年2月10日	地方自治体はPhillips66とREGによる再生可能ディーゼルプロジェクトの中心に反対	<a href="http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/02/10/local-authorities-push-back-against-phillips-66-and-regs-cancellation-of-renewable-diesel-project/">http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/02/10/local-authorities-push-back-against-phillips-66-and-regs-cancellation-of-renewable-diesel-project/</a>
Phillips 66	米国	2020年8月12日	加州サンフランシスコ製油所(12万bpd)を世界最大の再生可能ディーゼル製造所に完全転換を発表	<a href="https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/08/12/phillips-66-to-build-worlds-largest-renewable-diesel-sustainable-aviation-fuel-plant/">https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/08/12/phillips-66-to-build-worlds-largest-renewable-diesel-sustainable-aviation-fuel-plant/</a> <a href="https://investor.phillips66.com/financial-information/news-releases/news-release-details/2020/Phillips-66-Plans-to-Transform-San-Francisco-Refinery-into-Worlds-Largest-Renewable-Fuels-Plant/default.aspx">https://investor.phillips66.com/financial-information/news-releases/news-release-details/2020/Phillips-66-Plans-to-Transform-San-Francisco-Refinery-into-Worlds-Largest-Renewable-Fuels-Plant/default.aspx</a>
Phillips 66	英国	2020年11月18日	英国Humber製油所がUCOからの再生可能バイオディーゼル製造モジュールを導入し、生産量を3000bpdに増強	<a href="https://www.ogci.com/refining-processing/refining/construction/article/14187738/phillips-66s-humber-refinery-advances-renewables-projects">https://www.ogci.com/refining-processing/refining/construction/article/14187738/phillips-66s-humber-refinery-advances-renewables-projects</a> <a href="https://www.phillips66.com/newsroom/2020-humber-ucgo">https://www.phillips66.com/newsroom/2020-humber-ucgo</a>
Suncor / Shell	カナダ	2021年1月7日	Shellとカナダの精製業者Suncorは、ケベック州Varennesに廃棄物由来バイオ燃料プラントを建設するためにEnerkemと提携	<a href="https://biofuels-news.com/news/refiners-in-new-partnership-to-build-quebec-biofuels-plant/">https://biofuels-news.com/news/refiners-in-new-partnership-to-build-quebec-biofuels-plant/</a>
Valero Energy	米国	2021年1月29日	Valero出資の出資テキサス州Port ArthurのDiamond Green Diesel社が再生可能ディーゼルプラント拡張工事を加速	<a href="https://biofuels-news.com/news/valeros-new-renewable-diesel-plant-makes-progress/">https://biofuels-news.com/news/valeros-new-renewable-diesel-plant-makes-progress/</a>

## 4. 先進バイオ燃料等含酸素燃料の製造技術開発

### 4.1 製造技術動向

最近、「再生可能電力から作る液体燃料」いわゆる e-Fuel の開発が進んでいる。商用、実証段階や研究開発にあるものの中でいくつか実証段階にはあるものの、まだまだ、実証段階にあるものは少ない状況である。その中で生産される液体燃料は、現在のガソリン、軽油にドロップイン可能な炭化水素系燃料が中心であり、含酸素系としては、メタノールが主である。

e-Fuel の開発状況については、当センターが実施した令和元年度の燃料安定供給対策に関する調査事業（石油産業に係る環境規制等に関する調査）である GHG 排出量削減効果が期待される次世代液体燃料の製造スキームや将来見通しの調査（e-Fuel）<sup>4</sup>にて、最新の製造開発動向をまとめており、以下に概要を紹介する。CO<sub>2</sub> を原料として以下のフローを示している。

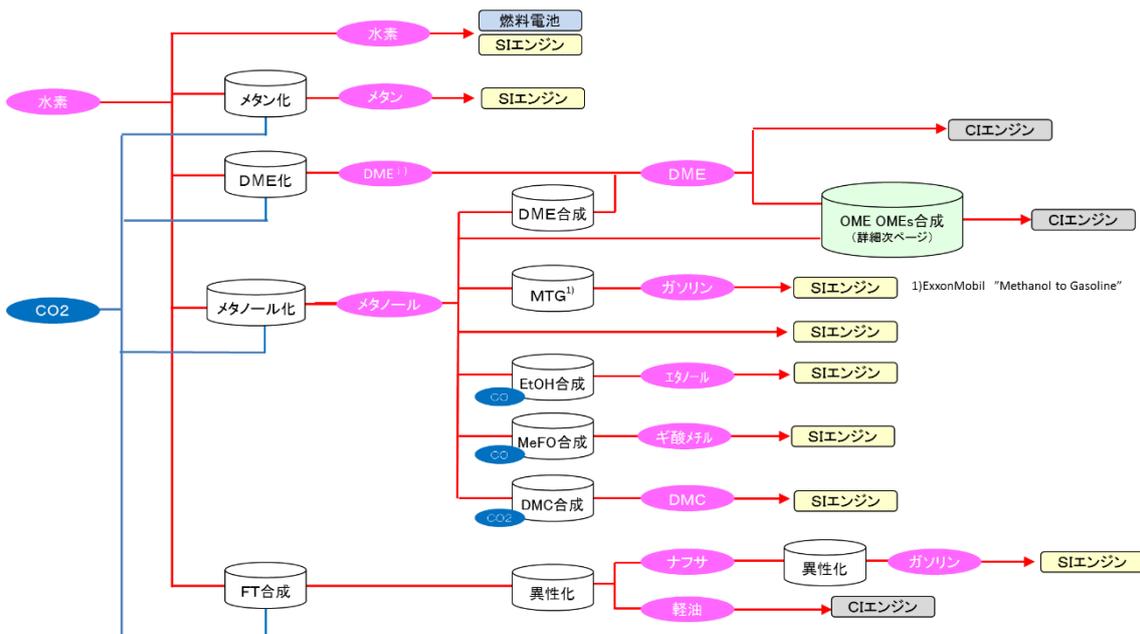


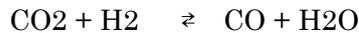
図 4-1 燃料合成 (e-Fuel) プロセスと主な運用先 (各種資料をもとに ENEOS 総研[旧 JX リサーチ]が作成)

現状、既存の製造方法で実用化が最も進んでいるのが、フィッシャー・トロプシュ (FT) 合成によるガソリン・軽油の製造である。製造方法としては、CO<sub>2</sub> を水素で還元することで合成ガスに変換し、合成ガスを原料に FT 反応で炭化水素を製造するものであり、CO<sub>2</sub> を CO に変換する逆シフト反応を含めて C1 化学の中心的テーマとして多くの実績を持っている。さらに合成した燃料は、既存のインフラ設備が活用でき、実用面から含酸素化合物

<sup>4</sup> JPEC-2019P-03「GHG 排出量削減効果が期待される次世代液体燃料の製造スキームや将来見通しの調査 (e-Fuel)」

に比較して優位にあると言える。

逆シフト反応



FT 合成



FT 合成は、1926 年にドイツにて Fischer が石炭合成ガスから液体燃料を合成したことに始まる。その後、Sasol(南アフリカ)、Shell を中心に石炭や天然ガスを原料として、固定流動床、多管熱交換型固定床や懸濁床の反応器を用いて、南アフリカ、マレーシア、カタール、中国で工業化されている。

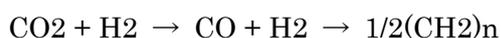
日本においても日本 GTL 技術研究組合が設立され、2002 年北海道、2009 年新潟とパイロット運転が行われた。触媒活性金属としては、Fe,Ni,Co,Ru が知られており、CO が水素化されたカルベン (-CH<sub>2</sub>-) が生成して直線的な連鎖重合により αオレフィン、水素化によりパラフィンが生成する。生成物は、Schulz-Flory 分布に沿ったカーボン組成になる。

Fe は高温 (350°C) で用いられ主にガソリン成分が生成されるが、形質オレフィンや含酸素化合物が複製する。Co は高活性であるため低温 (250°C) で用いられディーゼル油やワックスが製造される。Shell の SMDS では、メタンの副生を抑えるためにカーボン数の多い重質油成分を多く生成させ、ワックスを分離した後に水素化分解によりディーゼル燃料が製造されている。FT 反応では副生するメタンと CO<sub>2</sub> の生成を抑制し、ワックスを生成しないとき Schulz-Flory 分布に拘らない選択的 FT 合成が含まれており、近年の開発動向の主流となっている。

前段の逆シフト反応は、シフト反応の逆反応であり吸熱反応である。また、条件によりメタネーションが競合反応として進行する。逆シフト反応は吸熱反応で高温が有利であり、高温での耐熱性が要求される。また高温域では副反応として CO と水素から水素ロスにつながるメタンが生成しやすいのでこれを抑制する必要がある、これらを満足する触媒の開発が進められているが、ほぼ完成された技術である。



最近では、CO<sub>2</sub> と水素 (H<sub>2</sub>) から直接液体燃料を製造する技術 (直接合成) の開発も進められている。



一方、含酸素化合物であるが、一部実用化されたものもあるが、実績も少なく、どの化合物を既存の液体燃料にドロップイン（直接混合）できるかも含めて研究開発段階である。

メタノールは、CO<sub>2</sub> を逆シフト反応により CO に変換してから水素と反応させるのが主流であったが、CO<sub>2</sub> を用いると CO を用いたよりも反応速度が 20 倍速いこと等の理由で CO<sub>2</sub> から直接メタノールを製造する反応が主流となってきている。

メタノールの製造法



平衡上不利な CO の場合は従来の触媒より活性の高い触媒が要求される。

CO と水素によるメタノール合成では、実用化に向けた動きもかなり進んでおり、パイロットプラントを経て、2012 年には、アイスランドの Reykjavik にある CRI (Carbon Recycle International) が 4,000 トン/年の CO<sub>2</sub> を原料としたメタノール実証プラントを建設し、2015 年には 130 万 L/年のプラントを稼働させている。

DME の製造法には、間接法と直接法がある。

間接法の DME は、メタノールを原料として脱水反応で製造されている。本法は既存のメタノール合成技術と脱水技術の組み合わせであり、成熟技術といえる。代表的な技術提供者に三菱瓦斯化学、東洋エンジニアリング、Lurgi（ドイツ）があげられる。

DME の製造法（間接法）



合成ガスから直接製造する技術については Haldor Topsoe, Air Products and Chemicals が開発を行っている。日本では JFE を中心に技術開発プロジェクトが進められた。新たに設立された研究法人有限会社ディーエムイー開発により実施され、商用プラントへのスケールアップ技術が確立されたが、その後の工業生産には至っていない。

DME の製造法（直接法）



DMC は、ガソリンにドロップイン可能な液体燃料として知られている。カーボンリサイクル的には、酸性触媒の下で二酸化炭素とメタノールから合成することで生成することができる。環境特性では、ガソリンへの 20% 混合試験では排ガス低減効果が確認されている。CO, HC も低減が同様に確認されている。燃料としてはコスト的が高く。反応条件（高温・

高圧が必要) も厳しいことからプロセスにブレークスルーが必要である。

#### DMC の製造法



オキシメチレンエーテル (通称 OME、OMEn、 $\text{CH}_3(\text{CH}_2\text{O})_n\text{CH}_3$ ) は、粒子状物質と  $\text{NO}_x$  の排出を削減するためのディーゼル燃料として有望である。OME の生産に関しては、高度に最適化されたプロセスはまだ実現されていない。ここでは OME の合成の 3 つの方法を示す。

第 1 の方法は、ジメトキシメタン (DMM) およびトリオキサンからの合成である。

イオン交換樹脂 Amberlyst36 とゼオライトが酸性触媒として使用おり、ゼオライト BEA25 は最高の触媒活性を示す。

第 2 の方法は、メタノールとホルムアルデヒドから合成するものである。

上述と同様に、イオン交換樹脂 Amberlyst36 とゼオライトが酸性触媒として使用おり、高性能で安定性の高い触媒となっている。

第 3 の方法は、ジメチルエーテル (DME) とトリオキサンの合成で OME を製造する方法である。

軽油としての特性は、添加剤を追加し空燃比を調整することで環境特性は高い。一方で既存のエンジンに適合は可能であるが高濃度の場合は専用車が必要となる。ただし粘度、セタン価が低いために 100% で使用すると燃焼不良になる。添加剤を用いることにより改善の可能性はある。

メタノールからの炭化水素 (ガソリン) を製造する ExxonMobil 社の開発した MTG (Methanol to Gasoline) プロセスは、1985 年ニュージーランドで工業化されたが、石油価格の低迷した 1997 年に稼働を停止している。MTG (Methanol to Gasoline) プロセスはすでに完成された技術であり、多くの実績を上げているが、上記したように含酸素化合物については実績も少なく、どの化合物を既存の液体燃料にドロップイン (直接混合) できるかも含めて研究開発段階である。

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY より、“Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer-Tropsch-fuels: a review” と題して総説が出ている。そこでは、e-Fuel としてメタノール、ジメチルエーテル (DME)、FT 合成による燃料が、熱力学、触媒、商用反応器の設計とプロセス、および製品のアップグレード等の面からまとめられている。そのうち、含酸素系のメタノールについてベンチ、パイロット、実証プラントについて表 4-1、DME については、直接合成技術が表 4-2 にまとめられている。

表 4-1 Bench,pilot and demo plants for CO2 to methanol processes

Institute/company, country,year	capacity [kg d-1]	Reactor volume[l]	T[°C]	p[bar]	GHSV [×103h-1]	Carbon efficiency[%]	Recycle [ratio]	Description
Lurgi AG Germany, 1994/2020	n.a.	n.a.	250	80	10.5	94.0-96.5	Yes[4.5]	Heated water jacket
NITE,RITE Japan, 1996/1998	0.9	0.05	250	50	18	n.a.	Yes	Reactor immersed in a sand bath
	50	4.6	[200-275] 250	50	10	n.a.	Yes	Oil cooled reactor
Centre for Solar Energy and Hydrogen Research [ZSM]Germany,1996	6.1	0.4	[230-270] 260	[30-70] 80	[5-20] 8.1	23	No	Electrical heated jacket
	Korea Institute of Science and Technology[KIST] Korea,1994/2004	75	8.1	250-300	51/61	n.a.	66.9-70.5	Yes	Prior RWGS reactor [electrical heated] and four SRC in parallel
Mitsui Chemicals Inc. Japan,2009	n.a.	n.a.	250	30	7.9	53	Yes[1]	Minipilot-plant
	274	n.a.	250	50	10	72-88	Yes [2.6-3.2]	Pilot plant
Northern Arizona University[NAU]USA, 2009/2014	<0.5	0.05-0.08	240	69-97	3.3-8.3	2.6-14.3	No	Electrical heated jacket
	1.6	0.15	240[/260]	90	1 [0.6-12.0]	40	Yes	Mobile test rig, electrolysis,electrical heated reactor jacket
Silicon Fire AG Switzerland,2010	40	n.a.	265	80	n.a.	n.a.	n.a.	Pilot plant
Carbon Recycling International[CRI] Island,2012	12000	n.a.	250	100	n.a.	n.a.	Yes	Commercial plant converting CO2 from geothermal flue gas
CRI,MHI Germany, 2019	1000	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Integrated in a coal power plant

出所 : Vincent Dieterich, Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer-Tropsch-fuels: a review, Energy Environ. Sci., 2020, 13, 3207--3252

表 4-2 Overview of direct DME synthesis technologies

	Haidor Topsoe	KOGAS	JFE	Air products
H <sub>2</sub> /CO	2	0.8-1.5	1	0.5-0.7
Reactor design	Adiabatic fixed bed	Tubular SRC	Slurry	Slurry
p[bar]	37-42	30-60	50[30-70]	52
T[°C]	240-330	260[200-300]	260[240-280]	250
GHSV	n.a.	2000-10000h <sup>-1</sup>	4000 sl per kgcat per h	6000 sl per kgcat per h
Catalyst MeOH/DME	Cu-based/aluminosilicate	CuO/ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> AlPO <sub>4</sub> /γ-alumina	CuO/ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> γ-alumina	CuO/ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> γ-alumina
Catalyst ratio[MeOH:DME]	n.a.	0.8-4:1	2:1[0.75-20:1]	95:5[80:20]
Product[DME purity %]	MeOH/DME mixture	99.6	>99.5%[99.9]	MeOH/DME mixture
Recycle ratio	4-5	n.a.	1.6-1.8	n.a.
CO conversion[per pass]	40-70	67	50-60	19-24[21-31]
Overall CO conversion[%]	94-97	n.a.	94-96	n.a.
H <sub>2</sub> O selectivity[%]	18-28	n.a.	1.3	<1
DME selectivity[%]	74-76	60-70	91	61-67[40-80]
Plants	1993:50kg per d Bench	2003:50kg per d Bench 2008:10t per d Demo	1995:50kg per d Bench 1997:5t per d Pilot 2003:100t per d Demo	1991:4-6t per d Pilot 1999:8-9t per d Demo

出所 : Vincent Dieterich, Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer-Tropsch-fuels: a review, Energy Environ. Sci., 2020, 13, 3207--3252

OME、DMC に関しては、NEDO にて実施された「次世代火力発電等技術開発／次世代火力発電技術推進事業／CO<sub>2</sub> からの液体燃料製造技術に関する開発シーズ発掘のための調査」の合成液体燃料のポテンシャル評価において、炭化水素系及び含酸素の系 E-fuel に関して、S+3E の観点で既存の液体燃料と同様に流通させるための技術的課題の整理がなされている。

含酸素の系 E-fuel として、特に欧州で積極的に研究が行われている OME と DMC に着目し、その性状や燃焼特性について調査を行っている。合成液体燃料ポテンシャル評価結果のまとめの中で、環境性（CO<sub>2</sub> 排出量）、経済性（燃料コスト）の比較では、エネルギー総合工学研究所での定量解析<sup>3)</sup>が行われおり、その概要が記載されている（図 4-2、図 4-3）、また、含酸素系合成燃料（OME、DMC）は Soot フリーという大幅な燃焼性向上の可能性や WtT-CO<sub>2</sub> 排出量や燃料コスト面でポテンシャルを有しているとしている。

FT 合成燃料 (CO<sub>2</sub> 削減)  
 OME, DMC (CO<sub>2</sub> 削減)  
 再生可能エネルギー由来水素等を利用 (CO<sub>2</sub> 削減)  
 再生可能エネルギー由来水素等を利用 (CO<sub>2</sub> 削減)  
 再生可能エネルギー由来水素等を利用 (CO<sub>2</sub> 削減)

図 4-2 FT 合成燃料と OME,DMC との CO<sub>2</sub> 排出量の比較（原料 CO<sub>2</sub> の負担率 0.5）

出所：一般財団法人エネルギー総合工学研究所 再生可能エネルギー由来水素等を活用する低環境負荷な内燃機関自動車用燃料に関する調査報告書 炭化水素編

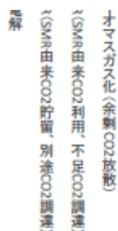


図 4-3 FT 合成燃料と OME,DMC との燃料コストの比較

出所：一般財団法人エネルギー総合工学研究所 再生可能エネルギー由来水素等を活用する低環境負荷な内燃機関自動車用燃料に関する調査報告書 炭化水素編

OME に関して、内燃機関シンポジウム<sup>5</sup>において、実機相当雰囲気における OME-軽油混合燃料の噴霧特性および燃焼特性が、茨城大、いすゞ中研から、エンジン内を想定した高温高圧場での噴霧特性を、定容燃焼容器を用いた調査結果として報告されている。

- ・噴霧特性：燃焼容器内を 6 MPa、920K とし、OME 混合軽油を 50MPa で噴射した結果、噴霧の到達距離に変化はなかった。OME は密度が大きく距離が伸びることが想定されたが、蒸発性が良く、噴霧角が拡大する方向に影響したと考えられる。OME 混合により噴霧面積が拡大すること、OME の理論空気量が小さいこと等から噴霧内の等量比は軽油より希薄（リーン）になると考えられる。

- ・着火特性：定容燃焼容器で観察された着火遅れ期間は OME の混合増により短くなり、CFR セタン価とは異なる傾向を示した。混合気形成と燃料の自着火特性により決まると考えられ、数値解析や RCM、ショックチューブによる解明も有効である。

- ・燃焼特性：OME100 の火炎輝度は低く、酸化過程で煤の生成が少ないことが示唆された。OME 混合軽油の火炎輝度は軽油と同程度であった。

又、軽油に OME を混合した場合の自動車に使用されているゴム部材への影響や既存エン

<sup>5</sup> 第 31 回内燃機関シンポジウム：

講演番号 70 実機相当雰囲気における OME-軽油混合燃料の噴霧特性および燃焼特性 茨城大 佐々木氏、樋熊氏、境田氏、田中氏、金野氏、いすゞ中研 瀬戸氏、石川氏

講演番号 71 軽油への OME 混合が燃料性状とディーゼル機関性能に及ぼす影響 いすゞ中研 森田氏、岡本氏、瀬戸氏、小松氏、石川氏

ジンに適用した場合の期間特性や排気特性に及ぼす影響の報告もされている。

- ・燃料性状への影響：OME の混合により低位発熱量が低下した。また、密度上昇や動粘度の低下がみられ 20 容量%以上の混合で既存燃料の規格外となった。
- ・ゴム部材への影響：OME の混合により引張強度が低下、体積膨張率が増加した。過去のバイオ燃料の燃料ホース抜けの検討結果を参考にすると許容上限混合量は 10%程度と見込まれる。(OME のゴム材への浸透が原因と推定される)
- ・機関性能、排気特性：OME 混合によりエンジントルクが低下した、混合燃料の体積発熱量の低下と相関があった。Soot、HC および CO が低下した、含酸素燃料であることに起因すると考察される。一方で熱効率が低下した、同一トルクを得るために燃料噴射期間が伸びたがセタン価が高く、燃焼が活発化し、筒内温度が上昇したことから冷却損失が増加したことが原因と推定される。今後は CFD モデルなどで解析を行う必要としている。

## 4.2 欧米の合成燃料スタートアップ企業動向

### (1) 欧州

ドイツのユーリッヒ総合研究機構は、欧州の Power-to-X プロジェクトの 2020 年～2020 年 6 月までに発表されたパイロット試験規模以上のプロジェクトの分析を行い、2020 年 9 月に公表した。

その中で、e-fuel 等輸送用合成燃料プロジェクトについても整理しており、ドイツの取り組みが先行していることが明らかとなった。

#### ■ 欧州のPower-to-Xプロジェクトの推移

ドイツ ユーリッヒ総合研究機構 エネルギー・気候研究所による分析結果

##### <対象プロジェクト>

2000年以降のTRL5以上のデモ運転プロジェクト（立ち上げ、終了、計画）を対象  
2020年6月の時点で、欧州20か国で合計220件

##### <まとめ>

- ・プロジェクト数ではドイツが圧倒
- ・プロジェクトに使う電解槽タイプは、PEMがアルカリ電解を上回る
- ・燃料関連プロジェクトが最多、うち独・仏・英が7割
- ・2030年に向けては燃料及び産業向けプロジェクトの立ち上げが具体化

(出所) ドイツ ユーリッヒ総合研究機構 エネルギー・気候研究所（2020年9月25日公表）  
“Review of Power-to-X Demonstration Projects in Europe, Frontiers in Energy Research”  
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.00191/full>

図 4-4 欧州の合成燃料研究動向分析

2021 年に入りサステナブルジェット燃料製造をアナウンスしたスタートアップ企業を列記した。情報開示は限定的であるが、プラント建設の実現性について継続した情報収集が必要である。

#### バイオ等含酸素燃料製造（欧米のe-fuelスタートアップ企業）

##### 欧州

###### ■ スイスSynhelion（2016年設立）

ETH Zurich (Zurich Polytechnic University) からスピノフし2016年設立  
(Climeworksも同機関から2010年にスピノフ)

2019年6月13日 (Eni リリース)

再エネ利用による低炭素燃料製造Sun-to-Liquidに関し協力契約締結

2021年2月8日 インタビュー報道

チューリッヒ空港でスイス航空、ルフトハンザに燃料供給予定

民間ファンドを活用

開発ロードマップ

2023 年 第1 号デモプラント稼働

2025 年 プラント2 か所建設

2030 年 スイスのジェット燃料需要の半分を供給

###### ■ オランダSynker（2021年2月9日発表）

2021年2月8日の欧州持続可能な航空燃料会議 (SAF) で立ち上げられたスタートアップ企業  
アムステルダム空港でのSAF供給

パートナー：アムステルダム港、SkyNRG、Royal Schiphol Group、KLM

2027 年 商業用プラント完成、年間5 万トン生産

図 4-5 欧州で注目の e-fuel スタートアップ企業

## (2)米国

加州 LCFS にもとづく低炭素燃料製造として、2つの e-fuel スタートアップがアナウンスを行った。

ドイツ国内ではアウディやポルシェの e-fuel への取り組みが行われているが、ドイツ BMW は米国の Prometheus Fuels に投資したことは新たな国際的なカーメーカーの動きとして注目される。加州での市場投入は計画より遅れているが、2021年夏に実現するか注視する必要がある。

一方、2021年1月の Infinium のアナウンスが、資金確保に目途がついたことにより、今後の情報開示が待たれるところである。

本格的な動きからはドイツの評価が供給サステナブルジェット燃料製造をアナウンスしたスタートアップ業を列記した。情報開示は限定的であるが、プラント建設の実現性について継続した情報集が必要である。

バイオ等含酸素燃料製造（欧米のe-fuelスタートアップ企業）
米国加州
■ <b>Infinium</b> パートナーの三菱重工も日本でプレスリリース（2021/1/27） アマゾン気候誓約基金とパートナー企業の資金によりElectrofuels™の実用化 情報開示が少ない（独自のCO2Cat™触媒で合成ガスを生成し、FT技術で燃料化） <a href="https://infiniumco.com/infinium-closes-funding-to-decarbonize-transportation-sector-with-electrofuels-solution/">https://infiniumco.com/infinium-closes-funding-to-decarbonize-transportation-sector-with-electrofuels-solution/</a> <a href="https://www.mhi.com/jp/news/21012701.html">https://www.mhi.com/jp/news/21012701.html</a>
■ <b>Prometheus Fuels</b> @Santa Cruz, CA 2020年6月、BMWのベンチャーファンド（BMW i Ventures）が12.5百万ドル出資 2021年1月 米国CES（Consumer Electronics Show）にてBMWが公表 （2020年10月の加州政府への報告では、2021年初めの認可が下りれば） 2021年夏 <u>ガソリン製造・販売</u> 2022年 <u>ジェット燃料製造</u>
<b>技術の特徴</b> オークリッジ国立研究所からの技術移管による電解技術を活用 水中でCO2のPEM電解によりアルコール経由で炭化水素合成（FT合成使わず） 水中の未反応アルコール分離には自社分離膜技術を適用 <a href="https://www.prometheusfuels.com/">https://www.prometheusfuels.com/</a> <a href="https://www.bmwventures.com/">https://www.bmwventures.com/</a> <a href="https://www.prometheusfuels.com/news/ces-2021-prometheus-defines-the-future-of-fuel/">https://www.prometheusfuels.com/news/ces-2021-prometheus-defines-the-future-of-fuel/</a>

図 4-6 米国で注目の e-fuel スタートアップ企業

## 5. バイオリファイナリー導入に係る政策支援動向

### 5.1 欧州の動向

#### 5.1.1 需要動向

EUの輸送用バイオ燃料需要の中で、バイオディーゼルは8割を占めている。

廃棄物由来メチルエステル化したバイオ燃料（UCOME、TME）は、廃食油UCOをメチルエステル化したUCOMEや獣脂をメチルエステル化したTMEの需要量は2011年から2019年で約3倍となった。

しかし、REDII規制により、2021年からはUCOMEとTMEの需要量は陸上輸送用バイオ燃料の1.7%の上限が設けられる。実質、ディーゼル燃料基材の規制である。

一方、HVOはドロップインバイオ燃料であるためメチルエステル化品のような配合制約を受けないこと、加えて、FAMEや廃棄物由来バイオ燃料よりも高いマージンが得られることから、2030年に向けたバイオ燃料導入義務量達成に向けHVOの増産が必要となっている

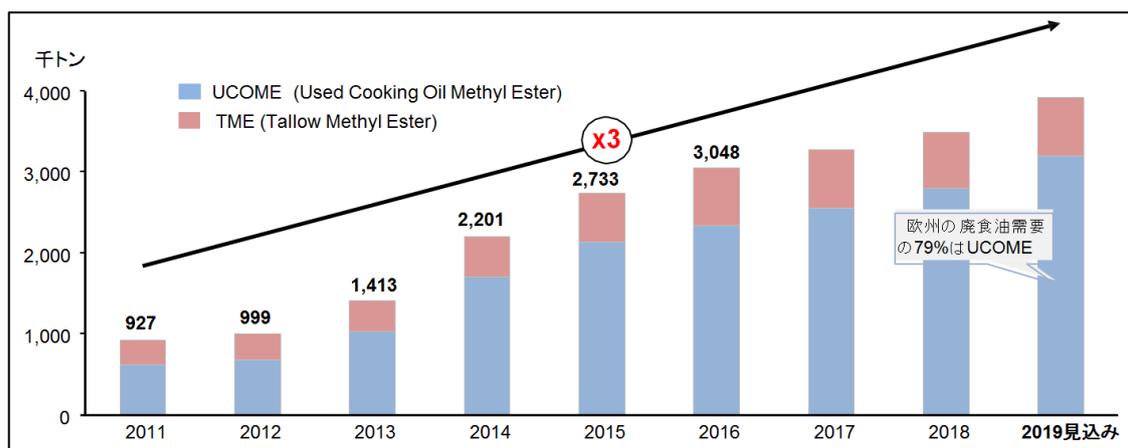


図 5-1 廃棄物由来メチルエステル化バイオ燃料の需要実績

(出所) 欧州委員会、Greenea 社資料

EUのディーゼル燃料需要は2020年をピークに漸減するとの見通しが立てられており、現行規制の見直しがない状況下では廃棄物由来メチルエステル品の需要も減少に転ずるとみられる。

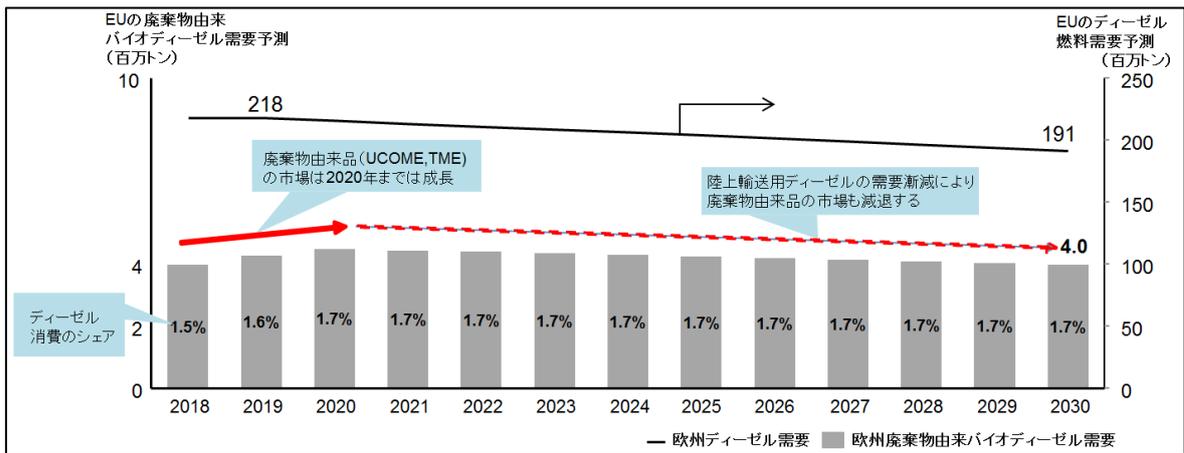


図 5-2 廃棄物由来バイオ燃料の需要見通し

(出所)欧州委員会、Greenea 社資料

地中海沿岸 4 か国(イタリア、スペイン、ポルトガル、ギリシャ)では、2010 年から EU プロジェクトとして廃食油 UCO をバイオディーゼル燃料として再利用する実証試験行われ、これをモデルに EU 全域に展開されることとなった。

EU での UCO 調達可能量を増やす策については、フランスの UCO ブローカー Greenea が国際クリーン交通委員会 (International Council on Clean Transportation, ICCT) からの委託調査としてまとめた EU における家庭用 UCO 収集システムの開拓状況分析レポート “Analysis of the current development of household UCO collection systems in the EU”(2016/6/14)<sup>6</sup>でまとめられている。このレポートでは、2015 年時点の EU 全域の世帯から年間約 5 万トンの UCO が収集されていることから、潜在的には年間 80 万~90 万トンのレベルの UCO が発生していると推定し、今後、加盟国が積極的な回収を行うことで、2030 年までに年間 20 万トンの回収が可能と試算している。

・水素化植物油 (HVO) のシェア

EU の輸送用バイオ燃料の比率は現在 12%までとなっており、このうち廃食油由来 HVO は 15%を占める状況となっている。

現在、Neste、Eni、Total 等が UCO からのドロップインバイオ HVO の商業運転を行っている。

HVO は UCOME や FAME よりマージンが大きく、GHG 削減効果も大きいため、今後の需要増加が見込まれている。

・経済性と GHG 削減効果

UCO や獣脂は手間がかかる家庭からの小口回収ではなく、食品工場や精肉加工工場から大量の回収を想定した場合、価格と GHG 削減効果では、バージンの植物油からよりも

6

[https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Greenea%20Report%20Household%20UCO%20Collection%20in%20the%20EU\\_ICCT\\_20160629.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Greenea%20Report%20Household%20UCO%20Collection%20in%20the%20EU_ICCT_20160629.pdf)

UCO や獣脂のような廃棄物由来原料が圧倒的に優位にあると言われている。

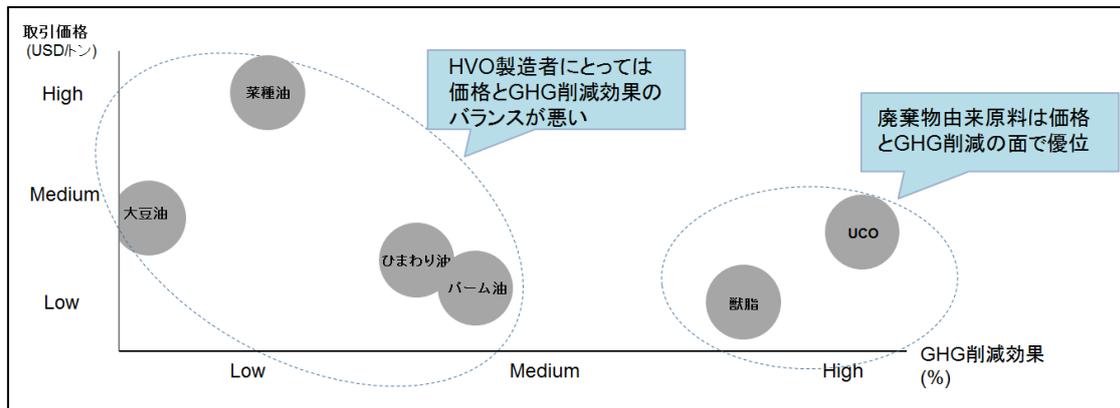


図 5-3 バイオディーゼル原料価格と GHG 削減効果の関連性

HVO は UCO や獣脂から製造され、GHG 削減効果については化石燃料軽油よりも優れているが、HVO 製造に使う原料種により大きな差がある。例えば、表 3-3 では、廃食油由来はパーム油由来よりも 8 割近く GHG 発生が少ないと評価されている。

### 5.1.2 バイオ燃料導入に係る税制支援

EU はバイオ燃料導入目標を義務化して GHG の削減目標に合意しているが、各国のガソリンや軽油の燃料税がバラバラのように、バイオ燃料の優遇税制の仕組みも国によって異なる<sup>7</sup>。

とはいえ、各国が独自に決定できるのではなく、EU のバイオ燃料導入促進に寄与するか否かの観点で欧州委員会の審査が必要となる。

#### ①英国

持続可能な再生可能燃料を供給した際に発行されるクレジット（Renewable Transport Fuel Certificate, RTFC）の売買制度により導入促進を図っている。

#### ②ドイツ

連邦アイミッション防止法（Bundes-Immissionsschutzgesetz, BImSchG）による温室効果ガス割り当てにより、石油供給事業者に対して一定量のバイオ燃料の導入を義務付けている。

2015 年のバイオ燃料割り当て法改正で GHG の削減が義務化され、石油供給事業者はバイオ燃料の供給比率（熱量ベース）ではなく、自社が供給する燃料の GHG 排出削減率が義務付けられた。

そのため、ガソリン、ディーゼル、バイオ燃料の使用にあたり、化石燃料の基準値に対

<sup>7</sup> 平成 31 年度資源エネルギー庁委託調査「バイオ燃料を中心とした我が国の燃料政策の在り方に関する調査」

[https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2019FY/000446.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000446.pdf)

して GHG 削減率が定められ、満たさない場合はペナルティが課される制度となっているため、排出削減率の高い廃食油への転換が図られている

### ③フランス

2005 年の金融法第 32 条により、ガソリンとディーゼルに対する汚染事業統合税 (la Taxe générale sur les activités polluantes, TGAP) が導入され、ガソリン、ディーゼルの売上高に対して課税されることとなった。

その後、バイオ燃料を配合した輸送用燃料に対しては TGAP と石油製品内国消費税 (La taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques, TICPE) の免税措置を実施することにより、バイオ燃料の導入量を拡大してきた。

TICPE は 2015 年に終了したが、TGAP はバイオ燃料の導入目標を達成した事業者に対して免税措置が講じられており、事実上の導入義務付けとなっている。

例えば、2017 年は、ディーゼルの販売量に占めるバイオ燃料の割合が 7.7%を超えた場合に TGAP は免税され、目標未達の場合は、未達分に応じて課税された。

2010 年の TGAP 改正により、年間目標の達成に向けて、廃棄物や残渣由来のバイオ燃料は 2 倍計上されるようになったが、この措置の導入により、2011 年に大量の廃棄物・廃棄物由来バイオ燃料の輸入に繋がってしまったため、現在は上限が設定されている。

### ④スウェーデン

バイオ燃料に対してはエネルギー税や 1991 年導入の CO2 税の減税が行われ、EU の再生可能エネルギー指令に基づく持続可能性基準の達成を図っていたが、この減税は補助金にあたるとして欧州委員会から禁止の指示があり、2018 年から税率が変更された。

表 5-1 スウェーデンの燃料税率変更

バイオ燃料の種類		エネルギー税 (2018/7以前→以後)	CO2 税 (2018/7 以前→以後)
バイオディーゼル (FAME)	低濃度 B7	36%免除→100%課税	100%免除→100%課税
	高濃度~100%	63%免除→100%免除	100%免除→100%免除
バイオエタノール	E10	88%免除→100%課税	100%免除→100%課税
	E85	92%免除→100%免除	100%免除→100%免除
バイオガス、 バイオDME	自動車用燃料用途	100%免除→100%免除	100%免除→100%免除

(出所) Government Offices of Sweden, Sweden's fourth progress report on the development of renewable energy pursuant to Article 22 of Directive 2009/28/EC

### 5.1.3 EU 技術支援政策

ドロッパインバイオ燃料の需要をみたすために、原料となるバイオマスの多様化を進める技術開発が進められている。

欧州政府が支援するバイオ燃料研究には、石油大手も参画しており、製油所技術も展開されている。

廃食油等水素化処理だけで燃料化できるバイオマス原料に対し、木質セルロース系バイオマスからの燃料化の技術は工業化に至っておらず、製油所等で処理できるバイオ原油(バイオオイル)を製造する水熱液化法プロセスの開発が注目されている。

Repsol、Eni 等欧州石油大手もプロジェクトメンバーとして研究に参画している。

下図の 2 プロジェクトは 2020 年に終了し、成果が公表される予定となっている。

<p>■ 政府技術支援政策</p> <p><b>EC Expert workshop: Potential of Hydrothermal Liquefaction (HTL) routes for biofuel production (2019/11/19開催)</b></p> <p>欧州H2020の複数のバイオ燃料プロジェクトの中でHTLプロセス開発を含むプロジェクトチームの情報交換の場</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Heat-to-fuel, European H2020 project</li><li>2. NextGenRoadFuels, European H2020 project</li><li>3. <b>4Refinery</b>, European H2020 project</li><li>4. <b>HyFlexFuel</b>, European H2020 project</li><li>5. Waste2Road, European H2020 project</li><li>6. Bio4Fuels, Norwegian FME</li></ol> <p>この中に、Repsol、MOL、Eniが参画。</p> <table border="1"><tr><td><p><b>✓4REFINERY project</b></p><p>パートナー：ルウェー-SINTEF, フランスCNRS, オランダBTG, フィンランドVTT, スペインRepsol, デンマークAalborg大学, 英国E4Tech, ハンガリー-MOL</p><p>開発期間：2017/5/1~2021/4/30 (4か年)</p><p>EU助成：€5,965,474</p></td></tr><tr><td><p><b>✓HyFlexFuel project</b></p><p>パートナー：ドイツ航空宇宙研究機関バウハウス・ルフトファールト(Bauhaus Luftfahrt), ドイツバイオマス研究センター(DBFZ), デンマークAarhus大学, Aalborg大学, スイスPaul Scherrer Institut, ドイツHohenheim大学, ベルギーOrganic Waste Systems, イタリアENI, デンマークHaldor Topsoe, フランスArttic</p><p>開発期間：2017/10/1~2021/9/30 (4か年)</p><p>EU助成：€5,038,344</p></td></tr></table>	<p><b>✓4REFINERY project</b></p> <p>パートナー：ルウェー-SINTEF, フランスCNRS, オランダBTG, フィンランドVTT, スペインRepsol, デンマークAalborg大学, 英国E4Tech, ハンガリー-MOL</p> <p>開発期間：2017/5/1~2021/4/30 (4か年)</p> <p>EU助成：€5,965,474</p>	<p><b>✓HyFlexFuel project</b></p> <p>パートナー：ドイツ航空宇宙研究機関バウハウス・ルフトファールト(Bauhaus Luftfahrt), ドイツバイオマス研究センター(DBFZ), デンマークAarhus大学, Aalborg大学, スイスPaul Scherrer Institut, ドイツHohenheim大学, ベルギーOrganic Waste Systems, イタリアENI, デンマークHaldor Topsoe, フランスArttic</p> <p>開発期間：2017/10/1~2021/9/30 (4か年)</p> <p>EU助成：€5,038,344</p>
<p><b>✓4REFINERY project</b></p> <p>パートナー：ルウェー-SINTEF, フランスCNRS, オランダBTG, フィンランドVTT, スペインRepsol, デンマークAalborg大学, 英国E4Tech, ハンガリー-MOL</p> <p>開発期間：2017/5/1~2021/4/30 (4か年)</p> <p>EU助成：€5,965,474</p>		
<p><b>✓HyFlexFuel project</b></p> <p>パートナー：ドイツ航空宇宙研究機関バウハウス・ルフトファールト(Bauhaus Luftfahrt), ドイツバイオマス研究センター(DBFZ), デンマークAarhus大学, Aalborg大学, スイスPaul Scherrer Institut, ドイツHohenheim大学, ベルギーOrganic Waste Systems, イタリアENI, デンマークHaldor Topsoe, フランスArttic</p> <p>開発期間：2017/10/1~2021/9/30 (4か年)</p> <p>EU助成：€5,038,344</p>		

図 5-4 欧州政府支援による製油所活用バイオ燃料製造プロジェクト

(出所)

<http://www.besustainablemagazine.com/cms2/expert-workshop-potential-of-hydrothermal-liquefaction-htl-routes-for-biofuel-production/>

プロジェクト web サイト

<https://www.sintef.no/projectweb/4refinery/objectives/>

<https://www.hyflexfuel.eu/>

## 5.2 北米の動向

連邦のバイオ燃料規制 RFS より厳しい加州 LCFS は、EU の再生可能エネルギー指令に

あるバイオ燃料義務化よりも厳格な制度設計と情報開示が行われている。

加州にある石油会社は LCFS の遵守ができない場合事業継続が難しくなるため、大きな事業転換を図りつつある。

本項では、北米西海岸、特に加州に焦点を当て、低炭素燃料の規制と導入に係る税制優遇制度をまとめた。

さらに、製油所での低炭素燃料製造に係る州政府への申請書類についても調査を行った。

### 5.2.1 加州のディーゼル燃料需給動向

バイオ燃料の導入に積極的な加州では、先進バイオ燃料の推進団体である California Advanced Biofuels Alliance (CABA) がとりまとめたレポート “A Roadmap for Eliminating Petroleum Diesel in California by 2030”<sup>8</sup>を踏まえ、2019年2月6日、州知事は、2030年までに加州から石油系ディーゼルをなくことは可能との発言を行い、注目を浴びた。

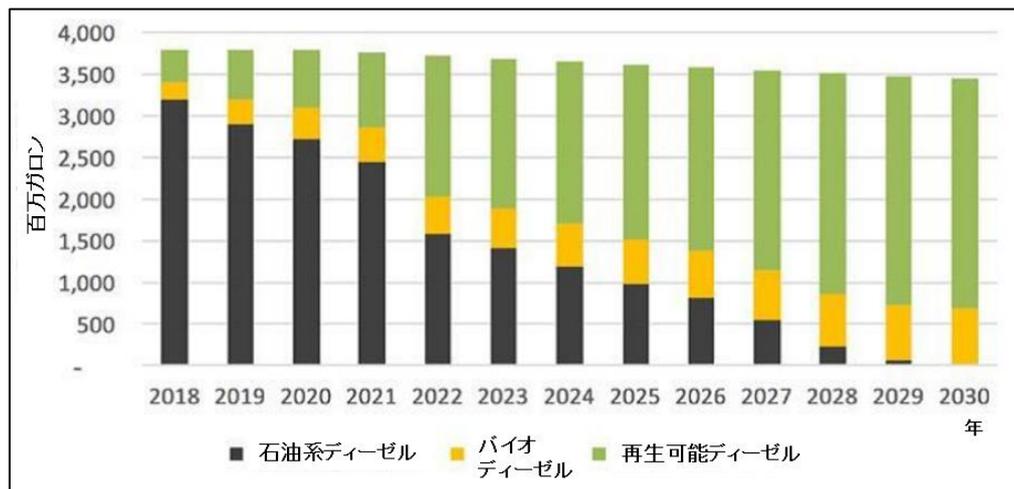


図 5-5 加州の輸送用軽油需要見通し

(出所) California Advanced Biofuels Alliance

このレポートでは、バイオディーゼルや再生可能ディーゼルをサステナブルディーゼルとし、石油系ディーゼルよりも GHG 発生が 71%削減されるとしている。

2010年に加州で1%以下だったサステナブルディーゼルは、2018年には約15%を占めていたが、石油系ディーゼルがすべてサステナブルディーゼル（バイオディーゼル20%、再生可能ディーゼル80%）に置き換わる2030年までには、2億6300万トンのGHG排出が削減できるとしている。

但し、国産あるいは輸入の動植物系油脂原料の調達競争が激化する可能性もあるため、現在の計画されている米国内のプロジェクトがすべて立ち上がるかは状況を見守る必要がある。(図 5-6)

<sup>8</sup> <https://www.caadvancedbiofuelsalliance.org/a-2030-roadmap>

シンガポールで再生可能ディーゼルを製造している Neste は、米国へ輸出したバイオ燃料を加州で販売した際にもクレジットの権利があるため、トラック向け軽油販売拠点を開設し 2019 年より事業展開を図っている。

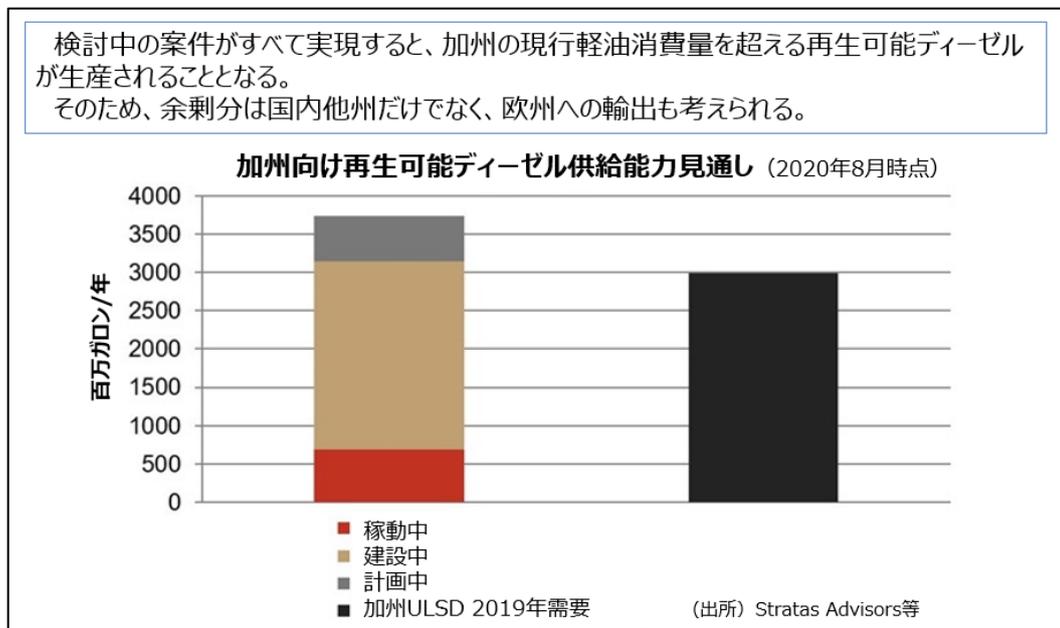


図 5-6 加州向け再生可能ディーゼルの供給能力

### 5.2.2 米国加州の燃料規制

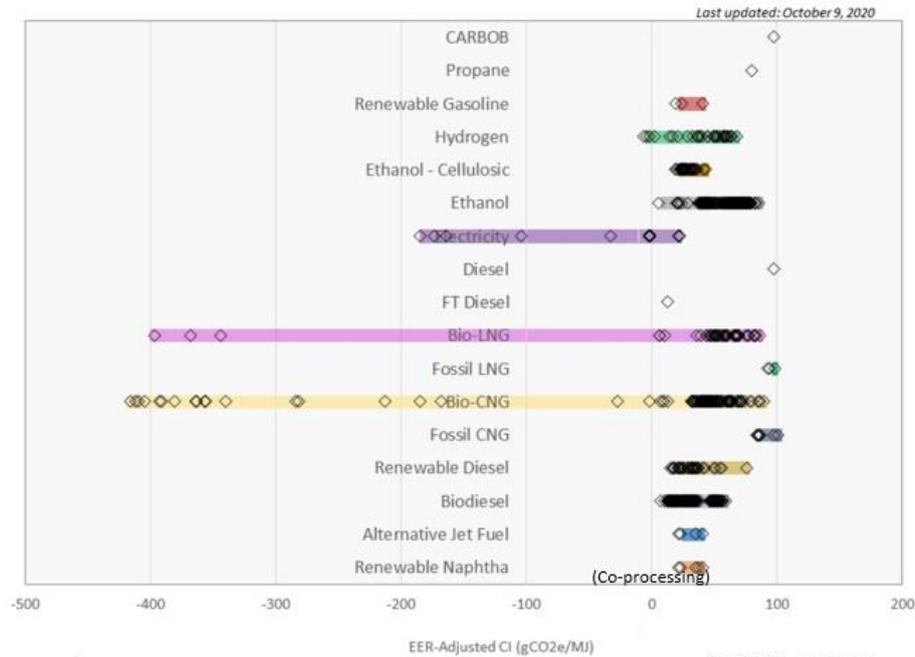
加州では LCFS 規制によってバイオディーゼルの需要が増えており、2018 年の加州再生可能ディーゼル（次世代バイオディーゼルを指す）のシェアは 10.2%であったが、2019 年上期には 17.2%にまで跳ね上がった。<sup>9</sup>

加州では、主独自モデル輸送用燃料の炭素強度 CI スコアを算出しており、定期的に見直しをして情報開示を行っている。

加州の酸素化合物配合用ガソリン基材 (CARBOB) と輸送用ディーゼル燃料の炭素強度をそれぞれ 100 とし、CO<sub>2</sub> 排出の増減量を示している。いずれの燃料種も製造法毎で LCA 評価が異なるため、CI 値の幅がある。(図 5-7)

<sup>9</sup> <https://www.argusmedia.com/ja/news/2052092-renewable-diesel-makes-inroads-in-california>

■ 加州が決定した製造法を考慮した燃料種の炭素強度CI (CO<sub>2</sub>e/MJ)  
Carbon Intensity Values of Current Certified Pathways (2020)



\*Energy Economy Ratio (EER) 燃費換算係数 (出所) CARB

図 5-7 加州算出の燃料種別炭素強度 CI

加州LCFSに基づく炭素強度CIの評価は、都度見直しが行われている。  
エタノールは製造法の改良により、CIが減少し続けている。  
バイオディーゼル (FAME)と再生可能ディーゼルのCIは年度により変動があるが、  
CIの数値はエタノールの半分以下である。

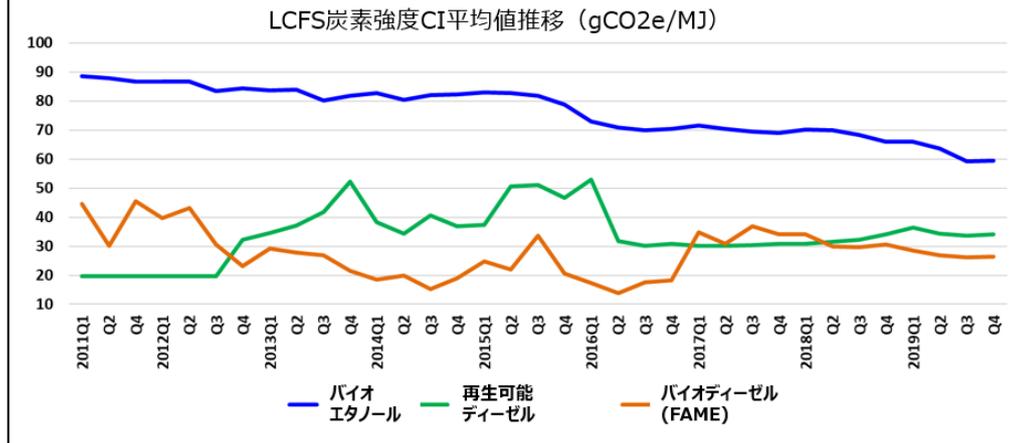


図 5-8 炭素強度 CI の見直し状況

■ 加州2030年までのLCFS(ガソリン、軽油) の炭素強度CI削減20%目標と達成状況

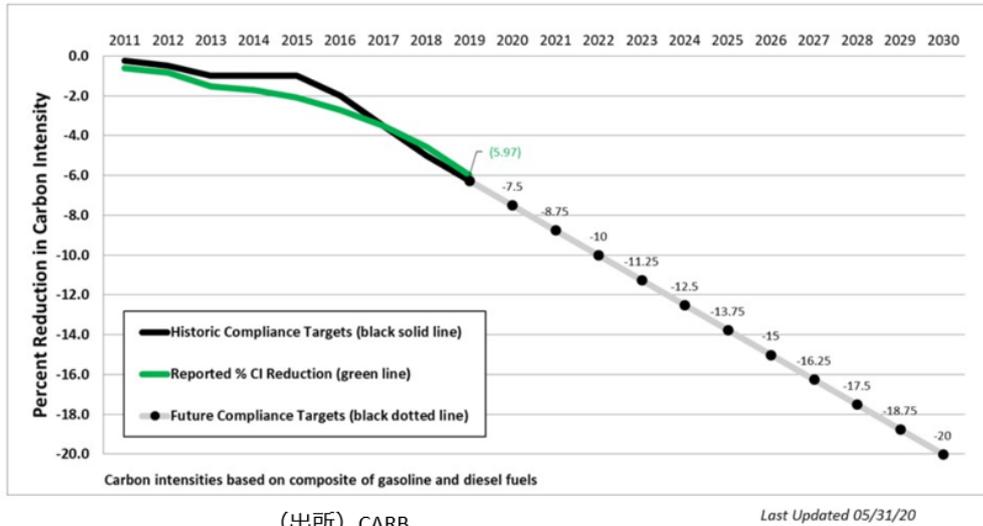


図 5-9 加州 LCFS による炭素強度 CI の削減実績推移と目標

炭素強度 CI と LCFS クレジットとの関係を図 5-9 に整理した。

石油系ガソリンとディーゼルを炭素強度 100 として、数値が低いほど GHG 発生が少なくなる指標である。

図では UCO から製造したバイオディーゼル・再生可能ディーゼルの CI 値が 21 と鉱油の 1/5 となり、反対に LCFS クレジット発生は最高額となっている。

このクレジットを獲得することが燃料製造者のインセンティブとなる。

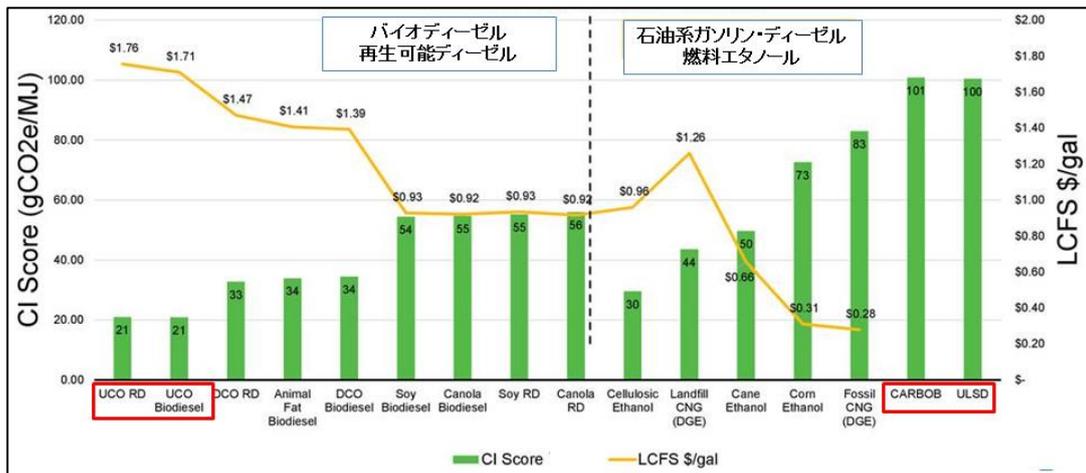


図 5-4 加州 LCFS の燃料種 CI スコアとクレジット

(出所) CARB、Renewable Energy Group (REG) <sup>10</sup>

10

<https://seekingalpha.com/article/4302907-renewable-energy-group-inc-2019-q3-results-earnings-call-presentation>

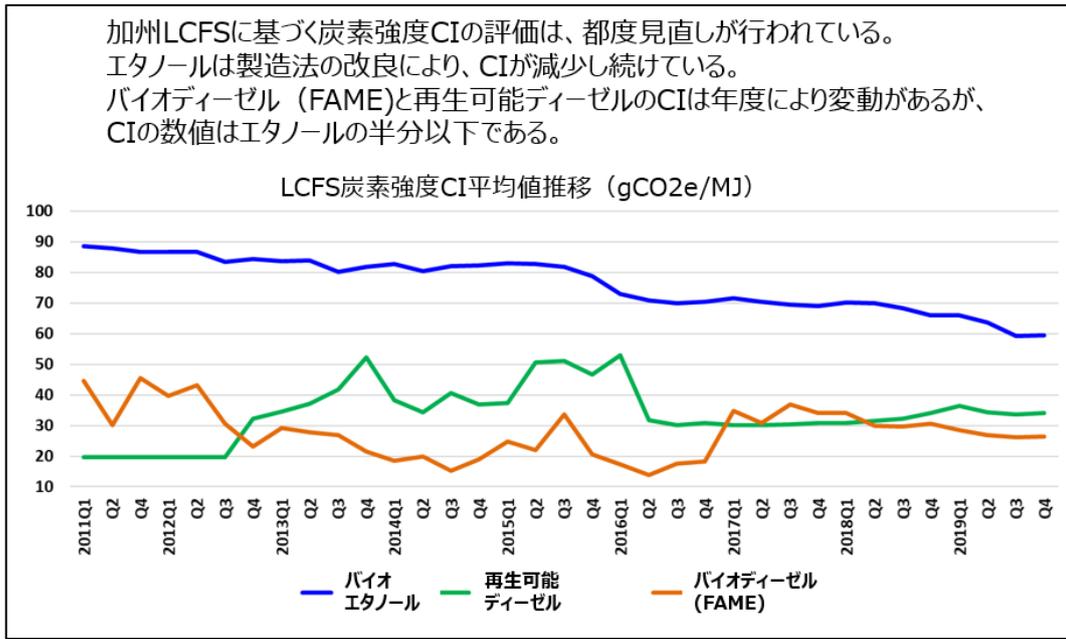


図 5-9 加州 LCFS に基づく炭素強度の見直し履歴

### 5.2.3 バイオ燃料導入に係る米国加州の税制支援

加州の輸送用燃料に配合されるバイオ燃料基材に対し、現在、米ガロン当たり 3 種の税額控除 (Tax Credit、クレジット) が提供されている。

クレジットは、市場取引で変動する連邦 RFS Credit と加州 LCFS Credit、時限制度の連邦 BTC からなる。

BTC は第一世代エタノールには付与されないが、次世代バイオ燃料であるセルロース系エタノールと再生可能ディーゼルに付与され、3 種のクレジットを合計すると再生可能ディーゼルの場合は、製造・販売すると 3.43 ドルの税額控除となる。

加州では、バイオ燃料供給・販売者は最大3種のCreditを享受できる。

	連邦 RFS Credit	加州独自 LCFS Credit	連邦 BTC (Blenders Tax Credit)
コーンエタノール	\$0.30/gallon	\$0.58/gallon	0
セルロース系エタノール	\$1.10/gallon	\$1.57/gallon	\$1.00/gallon
再生可能ディーゼル	\$0.85/gallon	\$1.57/gallon	\$1.01/gallon

・RIN市場、LCFS市場にて、GHG削減効果に応じて、Credit額は変化する  
 ・連邦BTC約\$1/gallonは直接減税であり、投資回収計画に大きく寄与する  
 ・なお、BTCは2022年末までの時限制度

(出所) DigestConnect webinar (2020/8/21) をもとに作成

図 5-11 次世代バイオ燃料の税額控除

バイオ製造専門メーカーが新設の製造プラントや大気・排水処理のオフサイト系設備を一式建設するには大きな資本が必要であるが、製油所であれば既存インフラを活用できるため再生可能ディーゼル燃料製造は投資を抑えて事業転換が図れることも経営的な魅力となっている。

① RFS クレジット

表 5-2 連邦 RFS による燃料タイプと要求 GHG 削減率

■ 連邦RFSによるGHG削減効果別の燃料コード

D4はバイオマス由来ディーゼルタイプとし、GHG削減効果が50%以上の再生可能ディーゼルが含まれる。

バイオ燃料の分類の仕方は加州LCFSとは異なる。

RIN Dコード	燃料タイプ	要求GHG削減率	燃料
D3/D7	Cellulosic Biofuels	>60%	Cellulosic ethanol, cellulosic naphtha, cellulosic diesel, Renewable CNG/LNG, etc.
D4	Biomass-based Diesel	>50%	Biodiesel, renewable diesel, etc.
D5	Advanced Biofuels	>50%	Sugarcane ethanol, renewable heating oil, biogas, etc.
D6	Renewable Fuel	20%以下	Corn ethanol, etc.

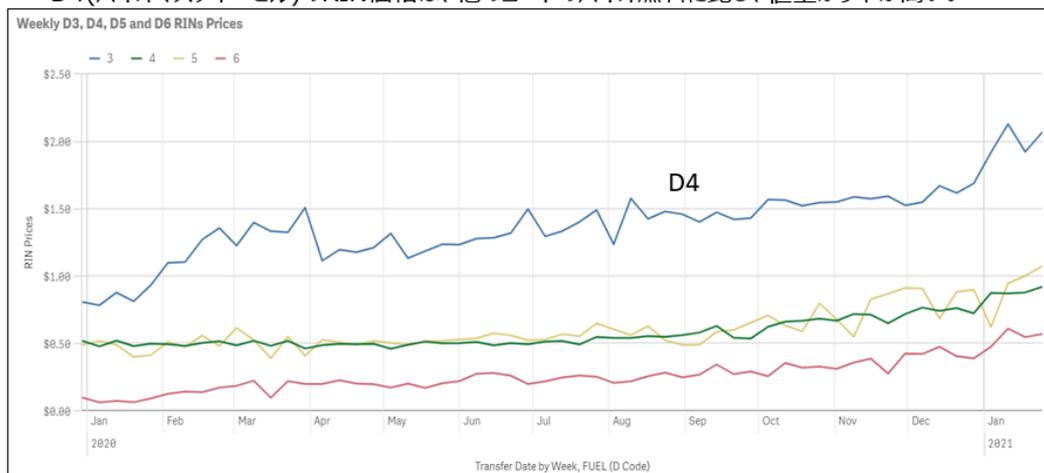
(出所) EPA

RIN の市場価格も燃料タイプにより変動幅が異なり、生産量が少ないバイオディーゼルの高値の取引となっている。

■ 連邦RFS RIN市場価格動向

バイオ燃料種毎にRIN市場でのクレジット価格が変動する。

D4(バイオマスディーゼル)のRIN価格は、他のコードのバイオ燃料に比し、値上がり率が高い。



2021/2/10 EPA更新

<https://www.epa.gov/fuels-registration-reporting-and-compliance-help/rin-trades-and-price-information>

図 5-12 連邦 RIN 市場価格推移

② 加州 LCFS クレジット

ガソリン配合用バイオエタノールと FAME バイオディーゼルに対し、再生可能ディーゼルの販売量が 2019 年から大きく伸びてた。

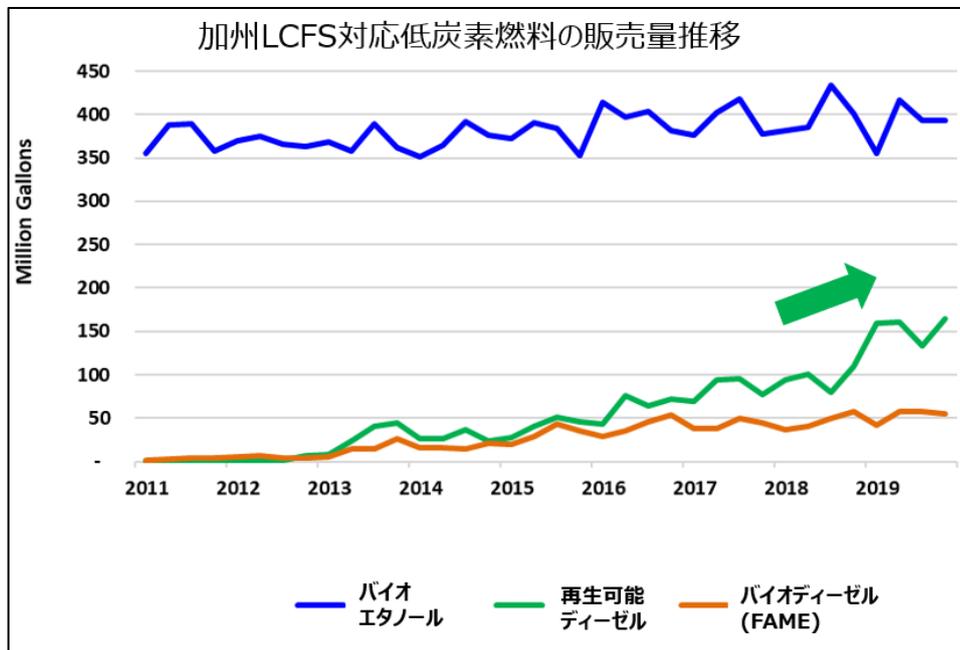


図 5-13 加州 LCFS 燃料の販売量推移

2019 年の再生可能ディーゼル販売量はバイオエタノールの 4 割にとどまるが、クレジット単価が高いため、バイオエタノールのそれを上回った。

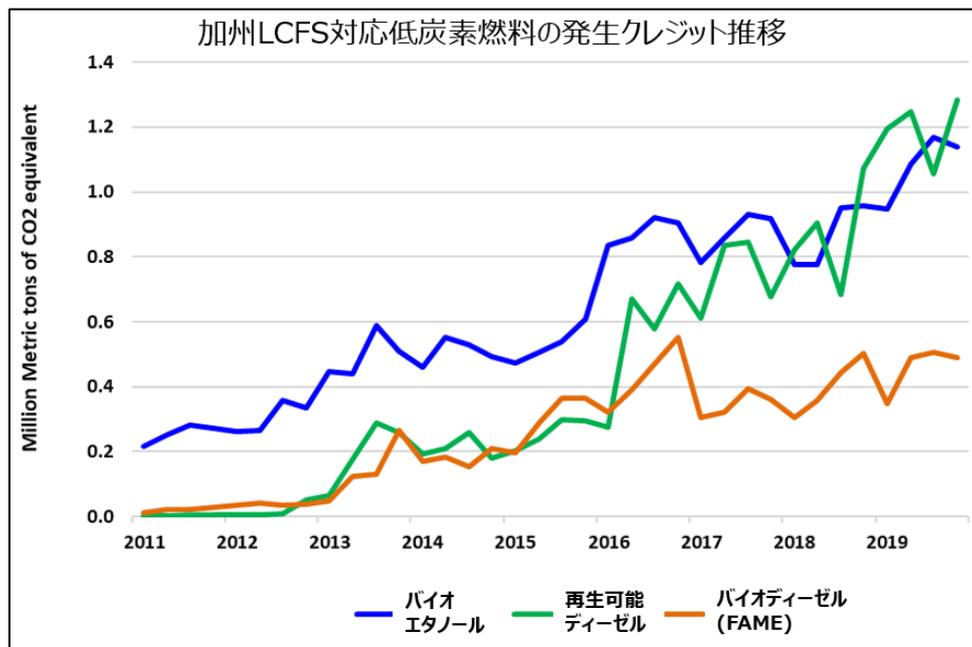


図 5-14 加州 LCFS 燃料の発生クレジット推移

### ③ 連邦 BTC

連邦 BTC が 2022 年末までのため、多くの米国独立製油所が製油所の改造を早期に完了し、供給体制を構築する動きにある。

例えば、年間 1 億ガロン (6,500BPD 相当) のバイオ燃料生産量に対し、1 億ドルの Tax Credit が享受できるため、設備投資を早期に回収できることとなる。

#### 5.2.3 加州技術開発支援

加州のエネルギー技術支援プログラムは、加州エネルギー委員会 (California Energy Commission, CEC) <sup>11</sup>が取り仕切っている。

低炭素輸送用燃料に関する実用化支援を目的に、Fuels and Transportation Funding<sup>12</sup> の中には、EV 等 Clean Transportation Program (毎年最大 100 百万ドルのファンド枠を設定) と低炭素燃料の工業規模の生産を支援する Low Carbon Fuel Production Program (固定的なファンド額の設定はない)、州内の旧型ディーゼルエンジンのスクールバスを低公害の新型バスに置き換えるプログラムがある。

そのほか、再生可能電力等のクリーンエネルギーの実用化の支援を目的に Renewable Energy Funding、加州の大学等の研究支援を行う Research Funding が用意されている。

これら州独自のプログラムは DOE 等連邦政府の支援プログラムに先行するものもあり、特に気候変動に関する技術の議論は先行しており、2030 年に向け、州内での CCS や直接空気回収 DAC 技術のデモンストレーションのロードマップの検討段階にある。

また、加州で再生可能燃料の製造、販売をする際には、会社別に炭素強度を算出し、CARB に申請を行う必要がある。

製油所装置を利用したバイオ燃料 (再生可能ディーゼル、サステナブルジェット燃料、再生可能 LPG 等) を製造する際には、運転データの提出が求められ、その値をもとに CARB が審査、パブコメを募集する手順となる。

申請すると CARB の Tier 2 Pathway Applications サイトにて資料が公開され、パブリックコメントの期間が設けられる。<sup>13</sup>

ただし、申請書類中の数値はすべてマスキングされるため、原料や製造法に係る詳細な情報開示はない。

事例として、Sinclair と BP の 2 件の製油所の提出書類をサンプルとして列記した。

---

<sup>11</sup> <https://www.energy.ca.gov/>

<sup>12</sup> <https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/clean-transportation-program>

<sup>13</sup> <https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/lcfs-pathways-requiring-public-comments>

(事例 1) Sinclair Wyoming Refining Company :

再生可能ディーゼル専用プラントによる副生ガスに関する申請

2019 年 12 月 11 日公開

[https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/fuelpathways/comments/tier2/b0047\\_cover.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/fuelpathways/comments/tier2/b0047_cover.pdf)

[https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/fuelpathways/comments/tier2/b0047\\_report.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/fuelpathways/comments/tier2/b0047_report.pdf)

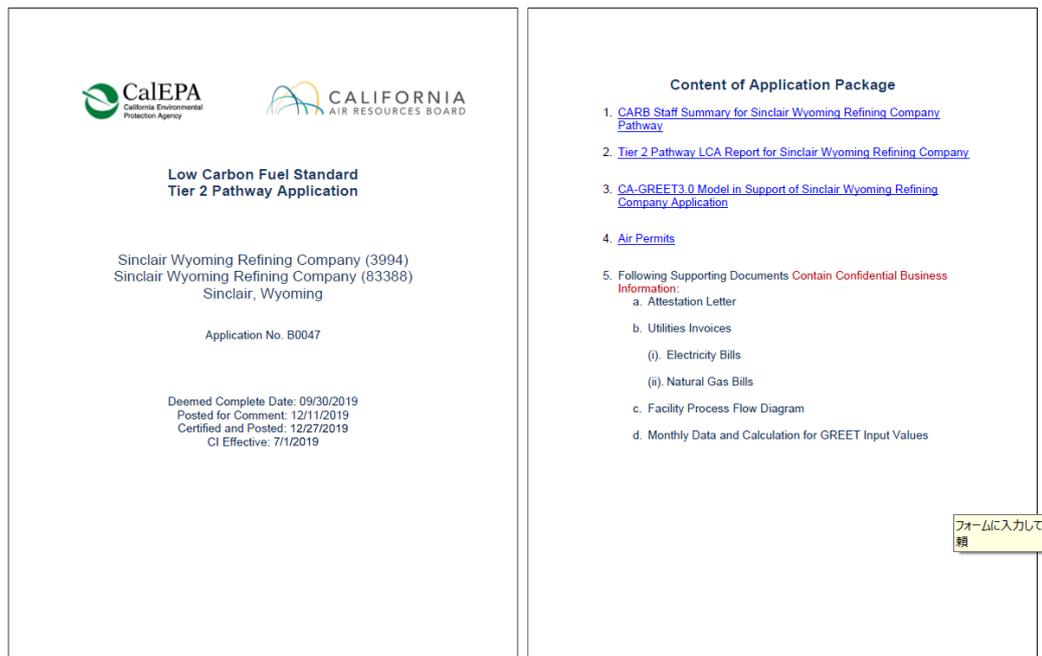


図 5-14 LCFS 申請書サンプル

(事例 2) BP Cherry Point Refinery :

獣脂の co-processing による再生可能ディーゼル製造に関する申請

2019 年 11 月 18 日公開

[https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/fuelpathways/comments/tier2/b0018\\_cover.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/fuelpathways/comments/tier2/b0018_cover.pdf)

[https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/fuelpathways/comments/tier2/b0018\\_summary.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/fuelpathways/comments/tier2/b0018_summary.pdf)

[https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/fuelpathways/comments/tier2/b0018\\_report.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/fuelpathways/comments/tier2/b0018_report.pdf)

### 5.2.5 カナダの低炭素燃料政策

米国加州の動きは北米各州の低炭素燃料の導入促進政策に影響を与えており、加州 LCFS と類似したクレジット売買を含む法案、Clean Fuel Standard (CFS) がカナダで 2020 年 9 月に発表され、議会の可決を経て 2021 年末に施行予定となっている。

カナダは2050年までに正味ゼロの排出量に達すると宣言しており、CFSはその政策の重要な部分を担うこととなる。

CFSは、ガソリン、ディーゼル、灯油などの液体燃料のサプライヤーに、製品中の炭素の量を徐々に削減することを求めている。

燃料ごとにWTWのLCA評価を行って炭素強度削減目標が設定され、2022年から始まり、2030年まで毎年目標を増加することとしている。

政府は当初、気体燃料と固体燃料も規制することを計画していたが、議論を経て、液体だけに狭めた。

CFSの対象となるのは、カナダで液体燃料を製造または輸入する会社、再生可能エネルギーや水素などの石油ベースの燃料以外の代替燃料を供給する企業や電気自動車の充電に関与する企業も含まれ、クレジットを獲得できる。

燃料の炭素強度を削減オプションとして、バイオ燃料を製品にブレンドすることが義務付けられており、州により配合率は異なるが、今後、増加する方向にある。

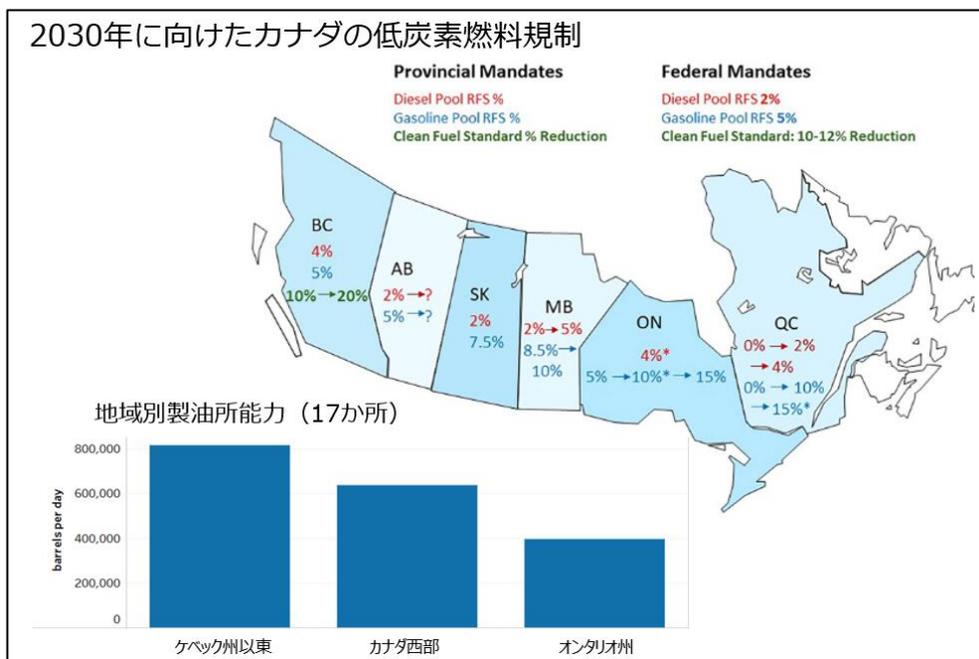


図 5-15 カナダ各州の低炭素燃料規制状況

(出所)カナダエネルギー規制当局 (The Canada Energy Regulator, CER)

<https://www.cer-rec.gc.ca/en/index.html>

<https://www.canadianfuels.ca/resources/driving-to-2050-the-role-of-transportation-fuels-in-canadas-low-carbon-future/>

<https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/12/how-does-canadas-clean-fuel-standard-policy-work>

## 6. サプライチェーンを考慮した事業性評価

本章では、製油所を活用して製造可能な再生可能ディーゼルやサステナブルジェット燃料に焦点を当てサプライチェーンに係る事項につき最新動向をとりまとめた。

### 6.1 製造拠点

現在の製造拠点は欧州に集中しており、石油大手も加わって HVO の製造で世界をリードしている。

米国は製油所でのバイオ燃料製造は、政府の導入インセンティブもあり、2020年に数多くのプロジェクトがアナウンスされたものの、稼動までに時間がかかるため、現時点では欧州より少量である。

しかし、公表された計画が全て実現すると 2025 年には欧州を超える生産能力に達するとみられている。米国では、製油所での生産よりも、大手のバイオ燃料専門メーカーが製品供給を行っていることも欧州と異なる事業者構造と言える。

アジア地域での生産の伸びは、シンガポールの Neste 工場の拡張と中国での生産拡大によるものである。中国の生産拡大は、現在の廃食油等原料の海外輸出を抑えて国内で燃料製品化することになるため、欧州での HVO 生産に影響が出ることも考えられる。

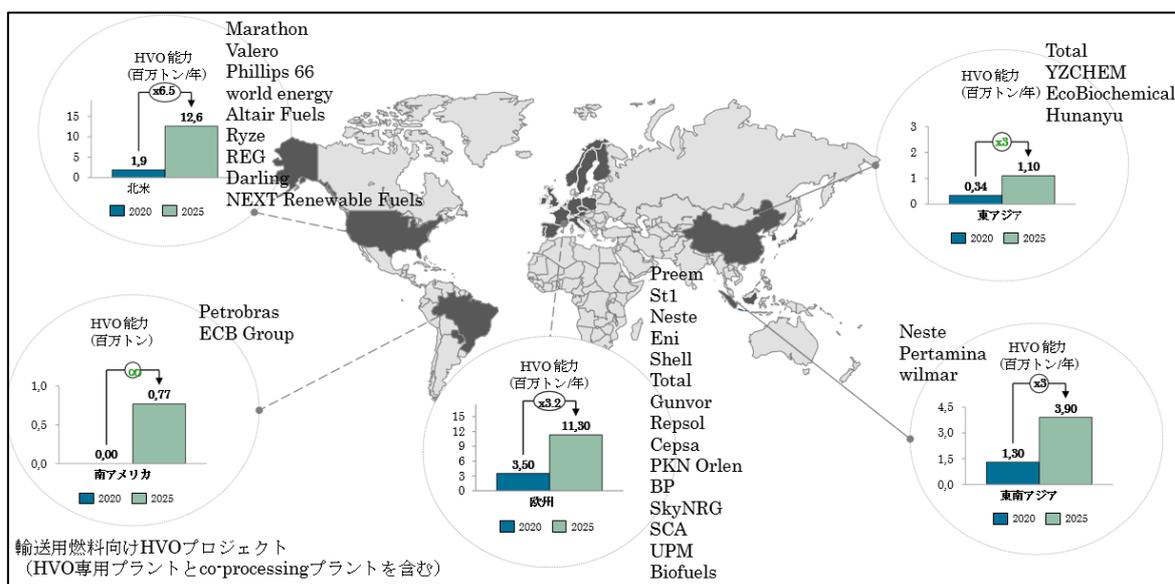


図 6-1 世界の再生可能ディーゼル製造能力分布

(出所) Greenea Analysis 等資料をもとに作成

HVO 製造においては、自動車用軽油留分だけでなくジェット燃料留分も生成するため、ジェット燃料の供給も手掛ける場合がある。

サステナブルバイオジェット（SAF）の調達は 2025 年に向けた航空業界 ICAO の重要案件となっているが、SAF 供給事業者には ASTM 規格や ISCC 等のサステナブル認証が求められるため、時間とコストの負担が大きい。しかし、航空会社とのオフテーク契約が成立すれば、製品供給ルートが確立でき、供給量に応じた安定的な事業収益が得られる利点もある。

Neste が欧米やアジアでのグローバルな供給体制を構築しているが、その他メーカーは地域的な供給事業を計画している。

そのため、世界大手の航空会社は複数の SAF 事業者とのオフテーク契約の締結に動いている。

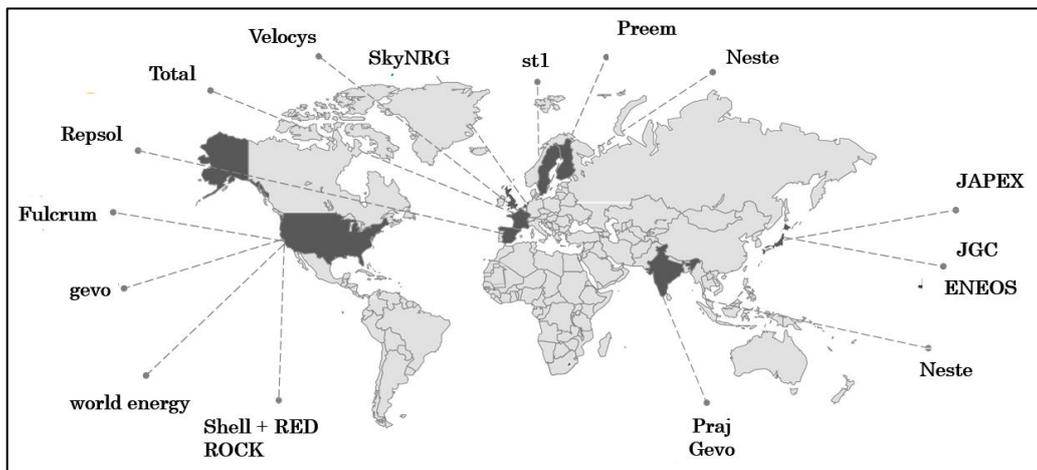


図 6-2 世界のバイオジェット生産拠点

## 6.2 製造コスト

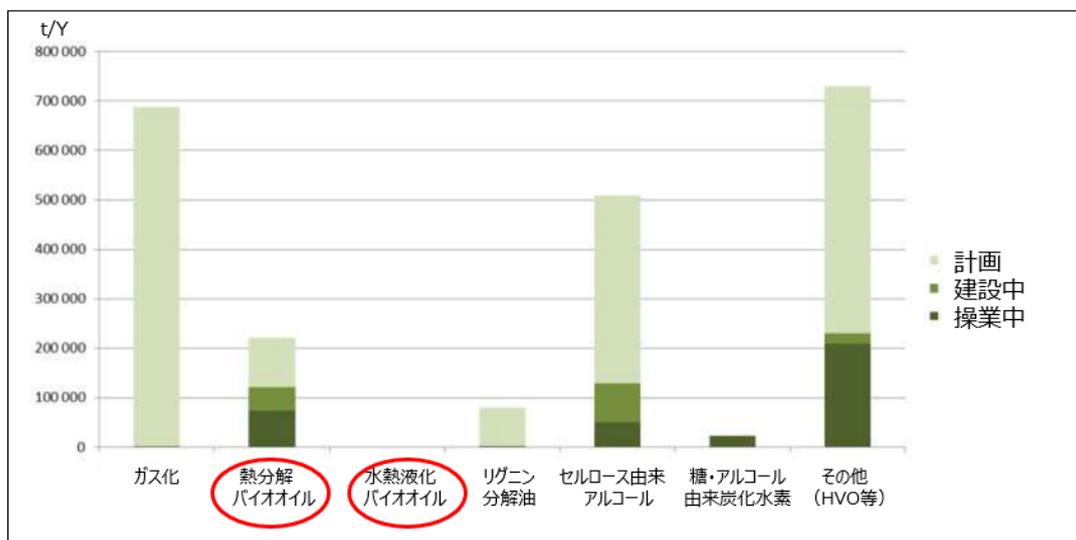
欧州のバイオ燃料政策に対応するため、欧州をベースとする IEA や欧州技術プラットフォーム(ETIP)は、製造に係る様々のスタディーを実施している。

バイオ燃料製造プロセス毎の今後の生産能力も通しをまとめた図 6-3 では、HVO の製造規模が群を抜いている。co-processing 等の原料に使用する熱分解や水熱液化によるバイオ原油の製造プラントについては、熱分解法の計画伸びがあるものの、水熱液化プラントは克服すべき技術課題が多いためかグラフには表れていない。

## ■ 欧州でのバイオ燃料製造設備建設計画

(ガス化、熱分解、水熱液化、リグニン分解、アルコール転換、アルコールからの炭化水素変換)

現状では、ガス化・FT合成プロセスの計画が多数。バイオ原油を製造する熱分解や水熱液化は開発途上のため建設計画で見劣りするが、将来技術として期待されている。



(出所) ETIP Bioenergy

図 6-3 欧州でのバイオ燃料生産能力の見通し

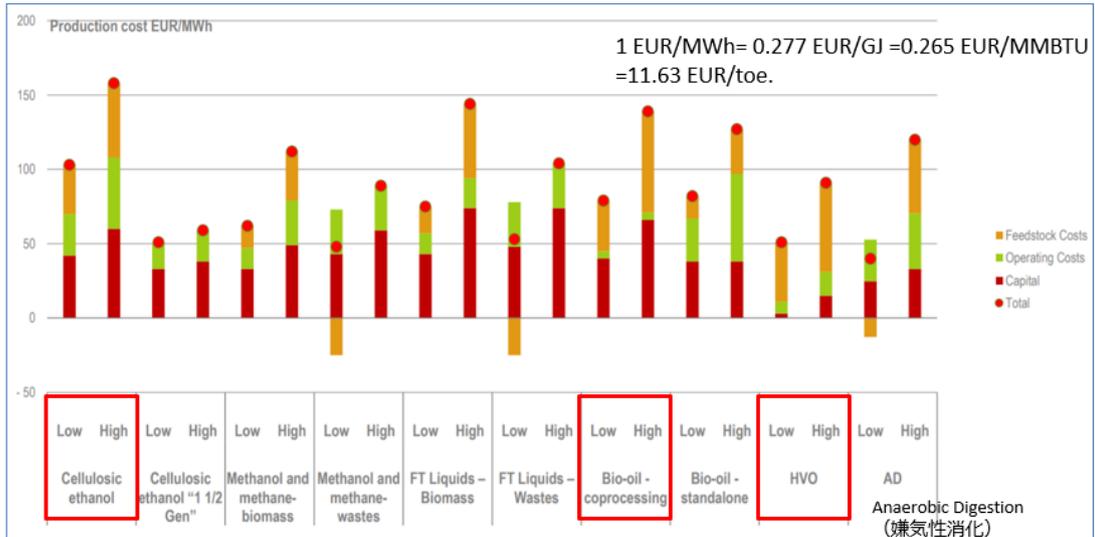
この状況を踏まえ、IEA はバイオ燃料製造コストの内訳を設備投資額、原料代、操業コストとし、試算を行った (図 6-4)。

米国やブラジルで大量に生産されている第一世代のバイオエタノールが最も低コストとなっており、HVO 製造コストは、試算の前提状況に幅があるものの比較的 low コストとの分析結果となった。

バイオ原油については、co-processing 用とスタンドアロン設備では前者のコストがやや高いとの結果になっている。廃食油だけの coprocessing ではなく、バイオ原油のアップグレードを含めた試算のためとみられるが、詳細な分析は別途行う必要がある。

■ IEAによるバイオ燃料製造コスト比較

水素化植物油製造が他のバイオ燃料に比し、設備投資が格段に少ない



(出所) IEA Potential for cost reduction for advanced biofuels

図 6-4 バイオ燃料製造装置コスト比較 (その 1)

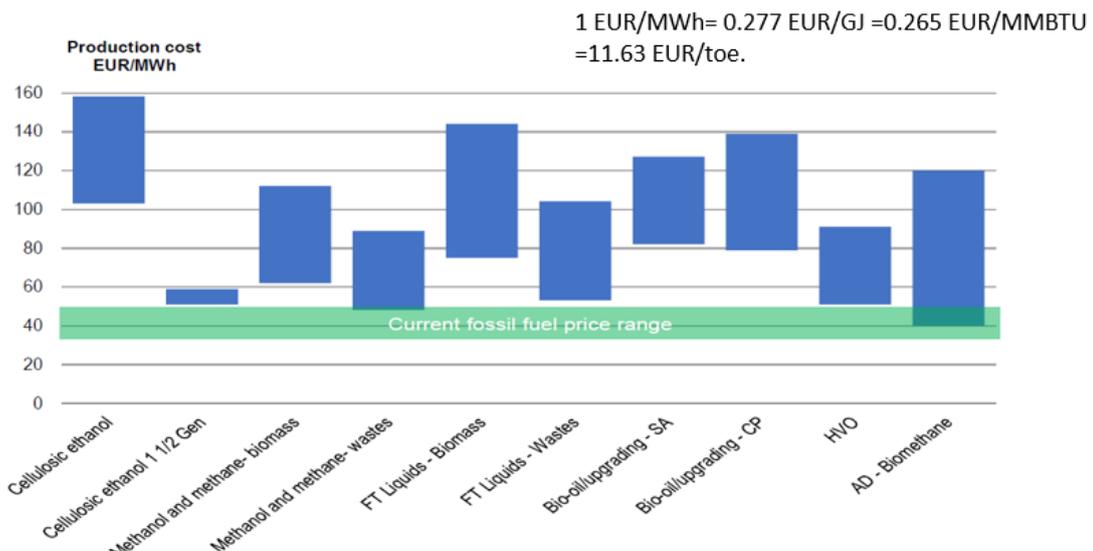
各プロセスコスト試算の High と Low の差で整理すると図 6-5 となる。

バイオガスの一部の製造法は現行の化石燃料コストと競争力があるのを除くと、バイオ燃料の製造コストを製品に転嫁した場合は値上げが避けられないこととなる。

製油所での製造には適していない、発酵プロセスを含むセルロース系バイオエタノールのコストが最も高いと示されている。

■ IEAによるバイオ燃料製造コスト比較

セルロース系エタノールが最も技術ハードルが高い



(出所) IEA Potential for cost reduction for advanced biofuels (equivalent to 40 - 70 USD/BBL)

図 6-5 バイオ燃料製造コスト比較 (その 2)

### 6.3 原料調達

EU を中心とした再生可能ディーゼルとサステナブルジェット燃料の大半は動植物系廃食油（UCO と略）から製造されており、グローバルな物流動向を以下に提示した。

バイオ燃料用 UCO の供給地域である欧米とアジアにおける 2019 年の UCO の潜在量と回収量を図 6-6 に示した。UCO は国内消費後の廃食油や国内消費や輸出向け食肉加工油脂も含まれている。インドでは 5% 程度の回収率、中国の回収は 2 割程度にとどまっているが、欧米では高い回収率となっている。

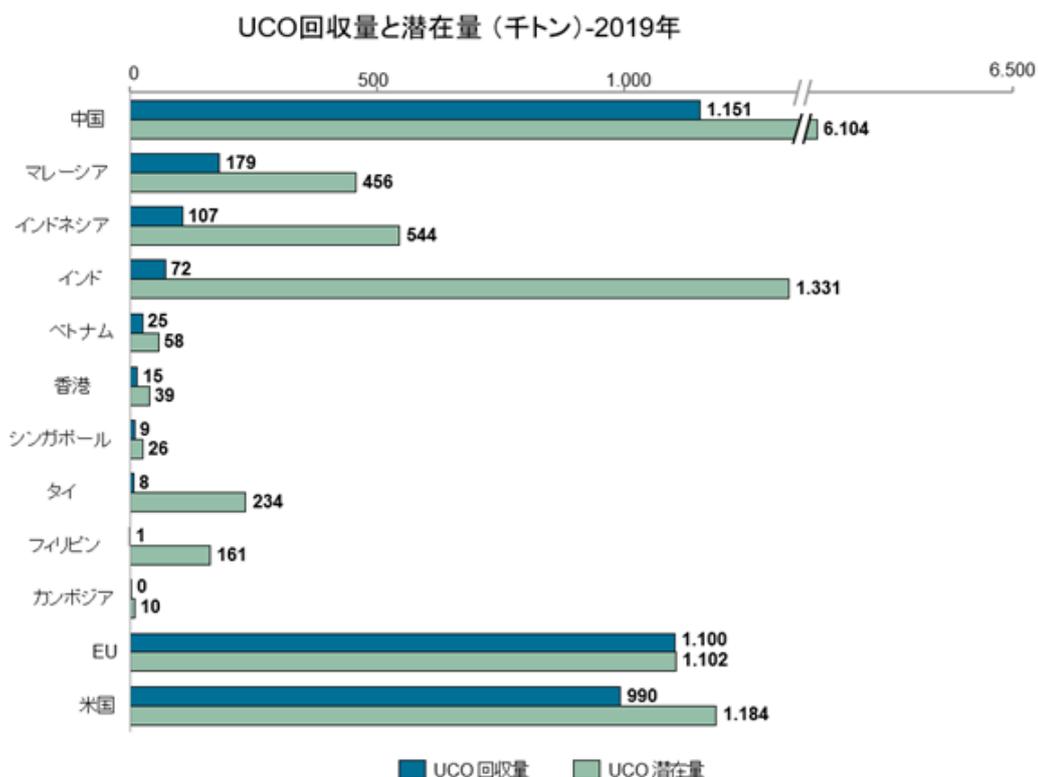


図 6-6 各国の UCO 回収量と潜在量

(出所) Greenea Analysis 等資料をもとに作成

次に、バイオ燃料用 UCO の国際的な輸出入動向を図 6-7 に示した。

EU はバイオ燃料導入を推進するものの、原料は域内で調達できないため、世界各地からの輸入に依存している。2020 年の輸入比率は 6 割であり、そのうちアジアからが 65% を占める状況であった。

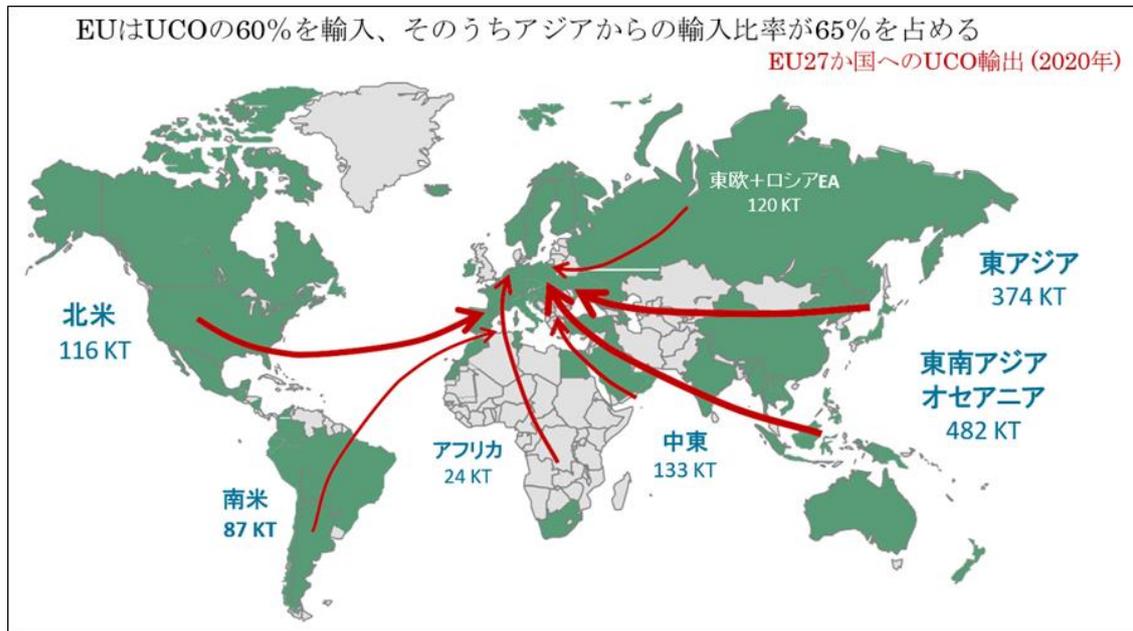


図 6-7 世界の UCO 原料の流通状況

図 6-8 にあるように、EU の UCO 輸入は、これまでの中国品からマレーシア品やその他新規参入国にシフトしている。中国国内での UCOME の生産拡大により UCO 原料を国内回しとしたため、EU への輸出が 2020 年に大きく減少した。

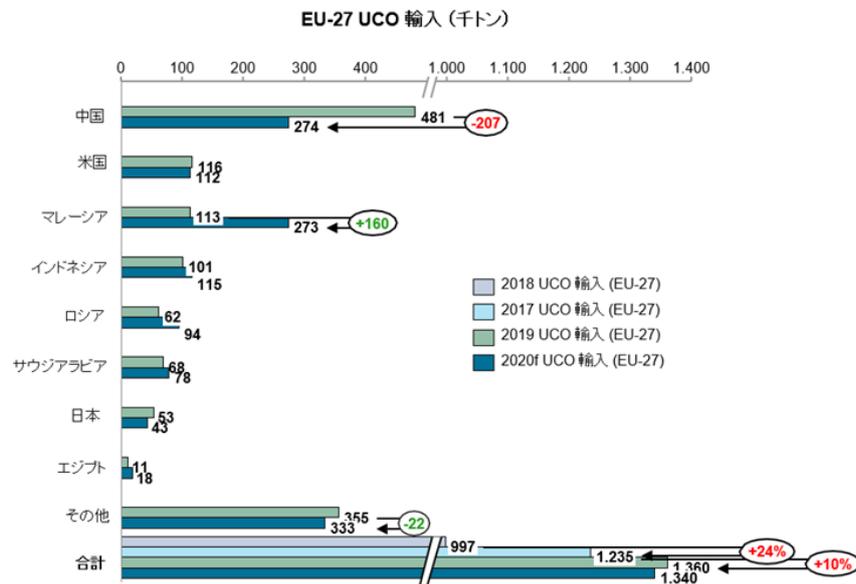


図 6-8 EU の UCO 輸入動向

中国から EU への UCOME は約 30 万トン増加した一方、パーム油メチルエステル(PME)は EU がサステナビリティの観点から推奨していないため、輸入が減少した

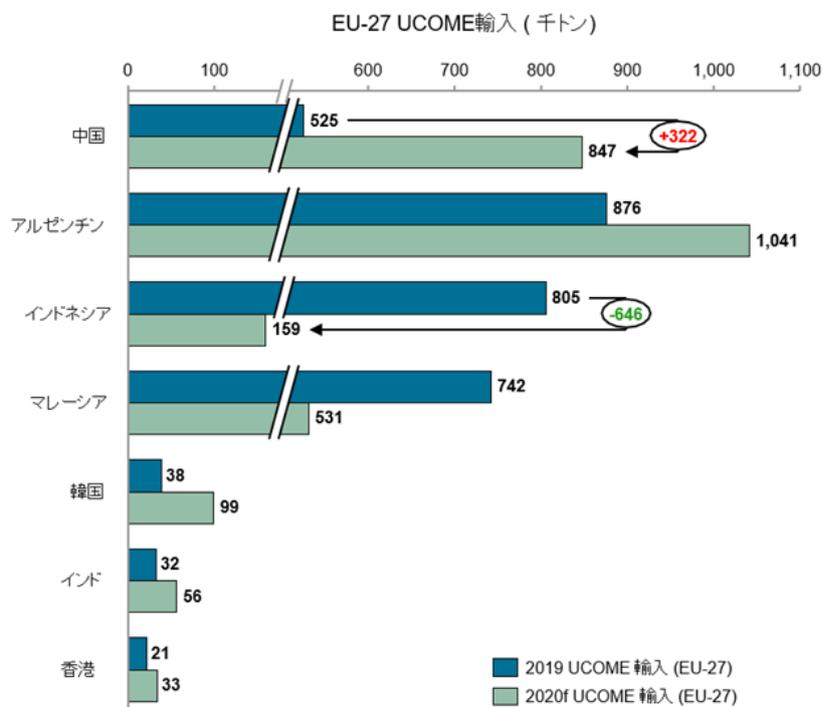


図 6-9 EU の UCOME 輸入動向

図 6-6 にもあったように、欧州での UCO 回収量の伸びのペースが落ちており、限界に近づいていることがわかる。

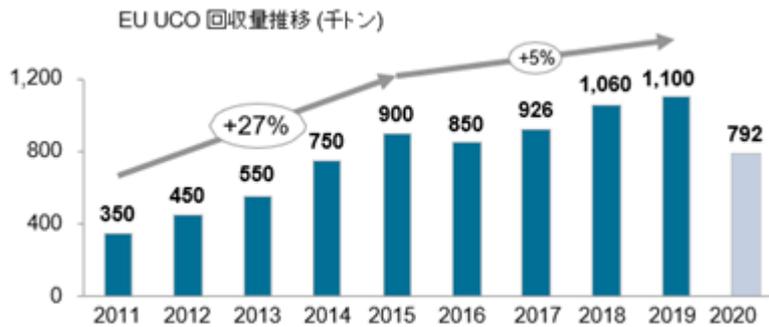


図 6-10 EU の UCO 回収量推移

そのため、EU の UCO 需要増加に伴い、輸入量が年々増加することとなった。

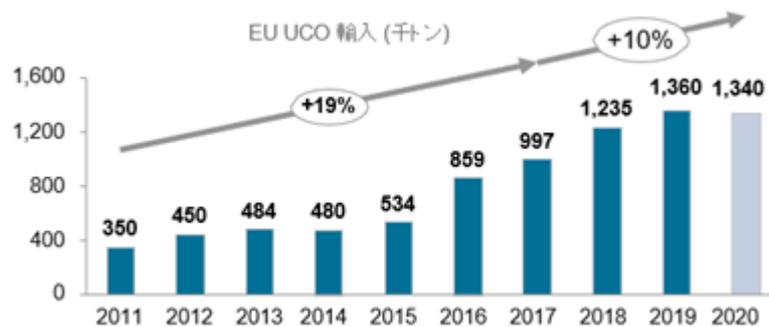


図 6-11 EU の UCO 輸入量推移

図 6-7 にあった米国から EU への UCO の輸出については、米国内、特に加州での第一世代バイオディーゼル用 UCOME の需要が高まったことにより、UCOME の原料となる UCO の輸出がわずかながら減少し始めている。カナダも含めた北米で、第一世代から次世代バイオ燃料へのシフトが進む場合には米国 UCO の EU への輸出減少は加速することになる。



図 6-12 米国の UCOME 需要と EU への UCO 輸出量推移

米国加州 LCFS による再生可能ディーゼルの需要が高まっていることで、中国は米国加州向けに第一世代バイオディーゼル用 UCOME の輸出を拡大した一方で、UCOME の原料 UCO の回収率が伸びなかったため、米国への対応を優先し、EU 市場への UCO 輸出を抑えることとなった。

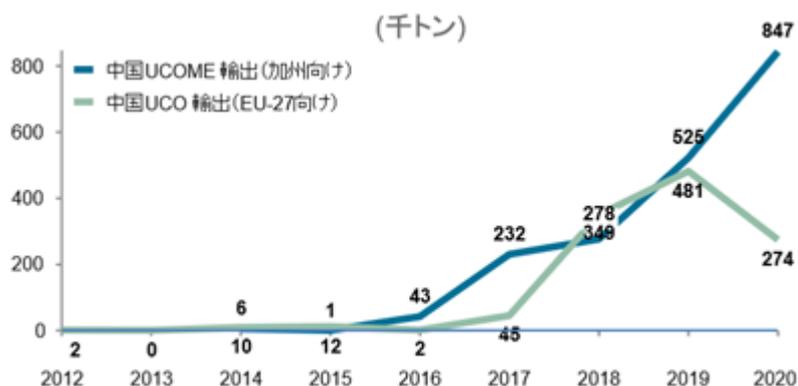


図 6-13 中国から米国および EU への UCO 輸出動向

欧州北西部での HVO 取引価格は、Covid-19 の危機にもかかわらず、HVO 製造事業者が増加しているため、2020 年 9 月まで市場に連動しておらずほぼ定額で取引されてきたが、9 月以降は価格透明性が高まった。従来軽油、UCO、UCOME 間のスプレッドはほぼ一定を維持している。

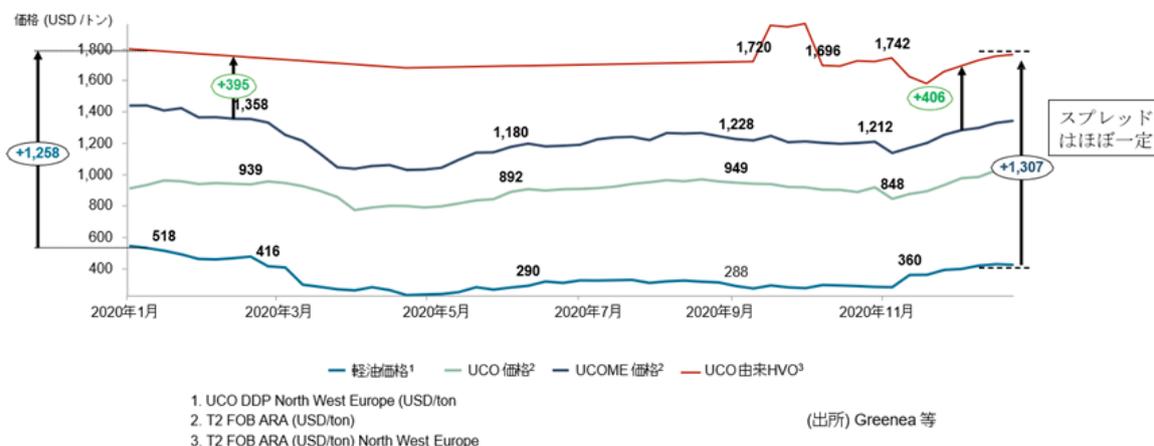


図 6-14 欧州北西部でのバイオディーゼル用原料価格の推移

### 6.3.2 今後のバイオマス賦存量の見通し

世界の HVO 需要が伸びるとなった場合、現在見込んでいる各国のバイオマス原料だけでは全量を賅えず、原料不足が生ずる可能性もある。

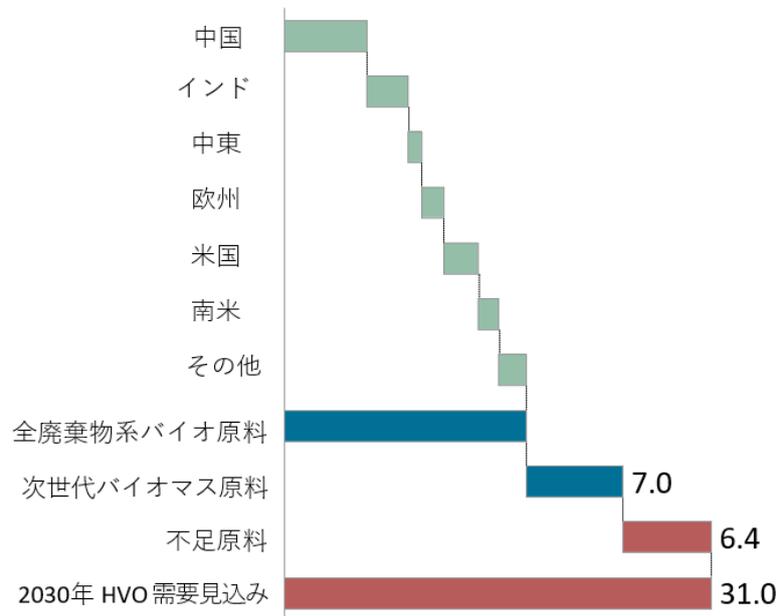
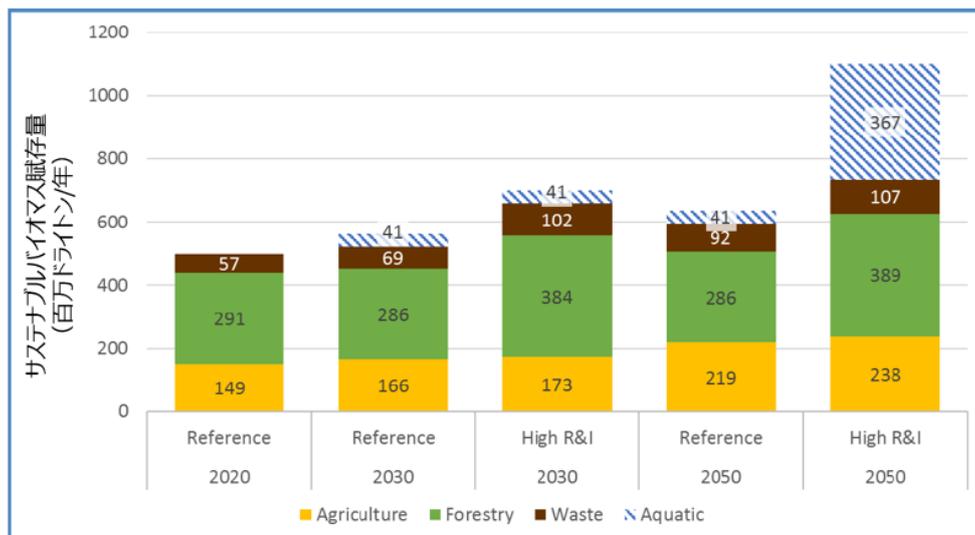


図 6-15 2030 年の世界の廃棄物系バイオマス原料需要 (百万トン)

IEA では、2050 年のバイオマス原料の確保は、農業、森林、廃棄物だけでは賅えず、水界（陸水域、海域）の藻類等のバイオマスの利用が鍵になるとしている。

#### ■ 欧州のエネルギー用サステナブルバイオマスの賦存量見込み

2050年に向けバイオ燃料増産には、藻類バイオマスの確保が鍵になるとしている。



(出所) EC Research and Innovation perspective of the mid- and long-term Potential for Advanced Biofuels in Europe

図 6-16 欧州のサステナブルバイオマス賦存量見通し

第一世代・次世代バイオ燃料の原料となる HVO や UCOME 市場の懸念事項として、バイオ燃料用原料油のトレーダーは今後の事業投資の際に以下のような点に留意すべきと報告している。

- ・ より高いブレンドウォール基準の脅威

B10、B20、B30、B100、E85 が市場に浸透しており、EU と米国加州で HVO の調達が増える可能性がある。

- ・ EU のパーム油の段階的廃止による第一世代 FAME の価格上昇

EU 諸国で始まるパーム油と大豆油の輸入禁止はバイオディーゼル価格への圧力を強めていく可能性がある、

- ・ 欧州のバイオマス原料輸入依存度の高まり

廃棄物ベースの原料輸入はすでに 6 割を超えて世界から調達しているため、さらなる域外からの原料輸入は難しい。

- ・ 欧州各国の新たな法制化

欧州では国によっては原料調達の観点から、HVO を促進せず次世代バイオ燃料としてバイオガスやバイオメタノールを支援の動きがある。

さらに、代替エネルギーとして、水素や再生可能エネルギー電力の利用促進を計画しているため、バイオ燃料の需要の見通しがずれる可能性がある。

- ・ 欧州のディーゼル燃料の衰退

ディーゼル燃料の需要減退と電気自動車の普及を踏まえ、投資家の行動変化が予想される。

- ・ 取引マージンの削減

欧州とアジアでは、今年、少なくとも 3 つの新しいトレーディング会社がバイオ燃料と原料の事業に参画するとみられ、競争によりマージン低下の圧力が強まる可能性がある。

- ・ 才能あるトレーダーが参入しない

バイオ原料およびバイオ燃料のトレーダー市場規模は石油市場に比べれば小さいため、経験豊富なトレーダーが新規に参入する可能性が低い。

バイオ燃料市場は低炭素燃料市場の一部であり、今後、e-fuel 等の新たな燃料の市場展開により輸送用車両の利用に影響するため、バイオ燃料のサプライチェーンに影響する可能性があるため、他の燃料種も含め市場動向を注視していくことが必要である。

## 7. まとめ

GHG 削減対策の一環として、製油所設備を活用したバイオ燃料製造技術が欧米で展開されている。

廃食油やセルロース系バイオマス原料油を水素化精製装置や FCC 装置で処理し、再生可能ディーゼルやサステナブルジェット燃料として流通が始まっている。

特に、**co-processing** では、現行の石油留分とバイオマス由来原料油を混合処理する技術として実用化への取り組みが進んでいる。

欧米石油会社では輸送用燃料の低炭素燃化のためにバイオ燃料増産の戦略を打ち出ししており、2020 年、欧州では Total が新たに既存製油所をバイオリファイナリーに完全転換を発表したのに加え、BP や Repsol も製油所での再生可能ディーゼルの製造拡大のプロジェクトを公表した。

北米、特に加州においては、Phillips 66 の製油所の完全転換が発表される等、独立系製油所で HVO 製造プロジェクトが相次いで立ち上がっている。

先進バイオ燃料等含酸素燃料の製造技術動向は、メタノールが先行して実証プラントが稼働しているものの、DME、OME、DMC 等は、研究開発段階にある。

e-fuel 等の研究開発は欧州が先行していたが、米国でも合成燃料のスタートアップ企業が登場するなど世界的な研究トレンドとなっている。

バイオリファイナリー導入に係る政策支援動向として、欧州では、再生可能エネルギー指令により各国にバイオ燃料の導入義務を課しているもの、実行にあたってのインセンティブの仕組みは国毎に異なっており、バイオ燃料配合に応じた燃料税の減免やクレジットの売買等が行われている。

米国ではバイオ燃料の導入促進のため、連邦と州政府がそれぞれ独自のクレジット制度を設け、事業者へのインセンティブとしている。

再生可能ディーゼルとなる HVO 製造能力は現在、欧州に集中しており、欧州石油大手も加わって世界市場をリードしている。

米国の製油所でのバイオ燃料製造は、政府の導入インセンティブもあり、2020 年に数多くのプロジェクトが独立系石油会社からアナウンスされたものの、装置改造終了までに時間がかかるため、現時点では欧州より少量である。しかし、公表された計画が全て実現すると 2025 年には欧州を超える生産能力に達するとみられている。

アジア地域での生産の伸びは、シンガポールの Neste 工場の拡張と中国での生産拡大によるものである。中国のバイオ燃料需要増加は、現在の廃食油等原料の海外輸出を抑え国内で燃料製品化が進むことになるため欧州での HVO 生産に影響が出ることも考えられる。

IEA がバイオ燃料製造コスト試算を行った結果、米国やブラジルで大量に生産されている第一世代バイオエタノールが最も低コストであり、HVO 製造コストは、試算の前提状

況に幅があるものの比較的低コストになるとの結果となった。

バイオ燃料導入を推進する EU は、再生可能ディーゼル製造用原料となる UCO を域内で調達できないため、世界各地からの輸入に依存している。2020 年の輸入比率は 6 割を超えており、そのうちアジアからが 65% を占める状況であった。

IEA の見通しでは、世界のバイオ燃料需要が伸び続ける場合、現在見込んでいる各国のバイオマス賦存量で賄うことが難しくなる可能性があり、今後、新たなバイオマス資源の確保と活用手段を開拓する必要がある。

以上、気候変動政策の下での欧米製油所でのバイオ燃料製造への取り組みについて動向調査を行った。

近年、欧米の製油所は、バイオ燃料だけでなく再生可能エネルギーと調和する様々なプロジェクトを提案している。

巨大な市場を有する欧米の石油産業の動きは、我が国の石油産業が競争力を確保する重要な示唆を与えることが期待されるため、今後も継続した情報収集と分析を行っていく。

無断転載・複製を禁ず

一般財団法人石油エネルギー技術センター  
総務部調査情報グループ  
〒105-0011 東京都港区芝公園2-11-1  
電話 03-5402-8502

JPEC-2020P-04

# サプライチェーン（原料・製品の供給）最適化・効率化に資する最新デジタル技術の調査

令和2年度燃料安定供給対策に関する調査事業  
（製油所の競争力に係る技術動向に関する調査）

令和3年（2021年）3月



一般財団法人石油エネルギー技術センター

## 目 次

1. 背景、目的 .....	3
2. 最新デジタル技術・ツール類の調査内容、方法等 .....	4
(1) 攻め所、狙いや調査の基本方針	
(2) 調査項目、内容	
(3) 調査結果の活用イメージ	
(4) 調査方法	
3. 最新デジタル技術・ツール類の調査結果 .....	6
(1) 全般	
(2) スケジューリング関連技術・ツール類	
(3) 関連技術・ツール類	
(4) その他	
4. 製油所サプライチェーン最適化・効率化に係る技術課題、留意事項等 .....	16
(1) スケジューリングツール類について	
(2) 製油所デジタルトランスフォーメーション(DX)に向けて	
(3) 製油所サプライチェーンの最適化・効率化に向けて	
5. まとめ .....	19

参考文献

## 1. 背景、目的

既存の石油精製装置と石化製造装置を最大限に活用し、高効率なケミカル・シフト（日本版 COTC の実現による石化製品収益最大化）を実現するためには、原油の入荷から石化製品の出荷までのスケジューリングを統合的に適時最適化する最先端のデジタル技術、ツール類が必要である。海外の先端企業やライセンサーにおいては、近隣諸国の需要動向を踏まえ、以前から適時に製品製造計画、出荷計画等の作成、改訂を行い、収益改善を図っている。

一方、日本においては、スケジューリング業務の複雑性や高度な経験、専門知識が必要である等の理由から、ベテラン社員依存型の体制で業務を遂行する等、経営のメスが入り難かった分野であった。しかしながら、業種に依らず人材不足が深刻化する中、デジタル技術の活用環境が整備されつつあり、最先端のデジタル技術が人材不足解消の切り札と期待されている。

経済産業省から委託された「令和2年度燃料安定供給対策に関する調査事業（製油所の競争力に係る技術動向に関する調査）」の一環として、石油業界が高効率なケミカル・シフトを実現し、石化製品の収益最大化による経営基盤強化のために、原油の入荷から石化製品の出荷までのスケジューリングを統合的に適時最適化する最先端のデジタル技術、ツール類の活用可能性について調査を行った。

また、グリーンリファイナリー化を目指して他国に対する国際競争優位性を高めるため、原油の入荷から石化製品の出荷までのスケジューラーの高度化、拡張性等に係る技術課題を明らかにすることは、国際的な競争環境が激化している中、これまでも増して重要である。更には、日本政府が打ち出した 2050 年のカーボンニュートラルの実現には、製油所サプライチェーン全体の最適化により CO<sub>2</sub> の排出量を最大限に削減することが非常に重要であり、本調査がその一助になれば幸いである。

## 2. 最新デジタル技術・ツール類の調査内容、方法等

### (1) 攻め所、狙いや調査の基本方針

原油の入荷から石化製品の出荷までの幾つかのスケジューリングにおいて、特に、原油通油スケジューリング、装置稼働スケジューリング、製品混合スケジューリング、製品・半製品入出荷スケジューリングに適用が可能な最新デジタル技術、ツール類について調査を行う。

また、最新デジタル技術、ツール類の対象が製油所単独、製油所・石油化学工場コンプレックス、会社全体、地域連携、日本全体への拡張、展開等を視野に入れて、特に、拡張性に係る技術課題についても整理する。これらの結果は、各企業、最終的には、日本全体の国際競争優位性を高めることに繋がると考える。

### (2) 調査項目、内容

石化製品の収益最大化による経営基盤強化のために、原油の入荷から石化製品の出荷までのスケジューリングを統合的に適時最適化する最先端のデジタル技術、ツール類の活用可能性について調査する。

具体的には、原油通油スケジューリング、装置稼働スケジューリング、製品混合スケジューリング、製品・半製品入出荷スケジューリング等について、今回の目的に合致する市販ツール類、最新デジタル技術(ソフトウェア、ハードウェア)をリストアップする。また、他国に対する国際競争優位性を高めるため、特に、原油の入荷から石化製品の出荷までのスケジューラーの高度化、拡張性等に係る主要な技術課題について整理する。尚、個々の技術課題の深堀り調査までは、行わないことにした。

### (3) 調査結果の活用イメージ

最先端のデジタル技術、ツール類の活用可能性に関する調査結果については、石油各社に紹介すると共に意見交換により更なる深化、高度化に係る課題、期待感等を明らかにしたい。本調査の結果は、経済産業省と共有化すると共に、今後の調査事業企画の一助になればと考える。

### (4) 調査方法

石化製品の収益最大化による経営基盤強化のために、原油の入荷から石化製品の出荷までのスケジューリングを統合的に適時最適化する最先端のデジタル技術、ツール類の活用可能性について、複数の大手ベンダーに対して、インタビュー調査をした。

インタビュー調査の中で、原油通油スケジューリング、装置稼働スケジューリング、製品混合スケジューリング、製品・半製品入出荷スケジューリング等について、今回の目的に合致する市販ツール類、最新デジタル技術等に係る情報を入手した。また、スケジューラーの高度化、拡張性等に係る主要な技術課題を抽出した。尚、個々の技術課題の深堀り調査は、行わない

こととした。

また、スケジューリングツール以外の周辺技術・ツール類についても可能な限りソフトウェアベンダーにインタビュー調査を行い、製油所サプライチェーン全体最適化に資する情報も調査した。

尚、今回の主要調査の攻め所、成果イメージを図1に示した。

「日本版COTCの加速化に向けた石化製品収益最大化に係る技術課題調査」の一環として、適時スケジューリングツール類に資する技術課題調査を行う。

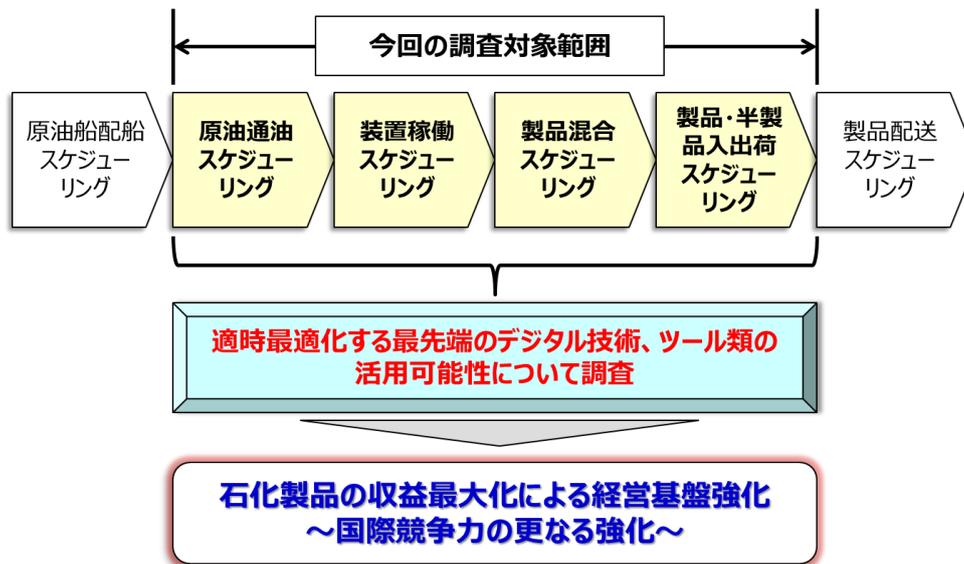


図1 本調査の攻め所、成果イメージ

### 3. 最新デジタル技術・ツール類の調査結果

#### (1) 全般

今回は、図2に示した対象範囲を調査の対象として、国内・外企業5社との面談により、最新技術やツール類に関する情報を入手すると共に5社を含めて計10社について公開情報を入手し、スケジューリングツールや最新技術について、調査した。

尚、入手した資料は、本報告書の末尾に参考文献として、企業毎の資料のタイトルリストを記載した。

調査の結果、原油通油スケジューリング、装置稼働スケジューリング、製品混合スケジューリング、製品・半製品入出荷スケジューリングは、既に複数の企業から各々のスケジューリングツールを製品として販売がされていることが判った。

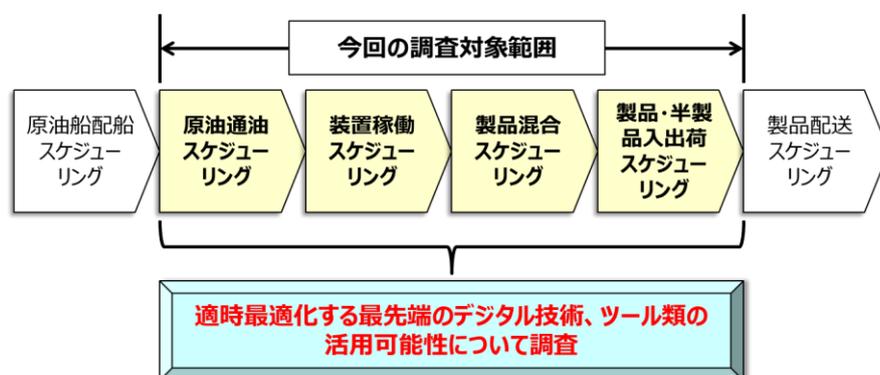


図2 今回の調査対象範囲

また、スケジューリングツール以外の生産系、制御系、保守系、出荷系等に係るデジタルツール類も色々な企業からリリースされていることも判った。

#### (2) スケジューリング関連技術・ツール類

今回調査した企業の中から、主に横河電機(株)のグループ会社であるKBC、(株)アスペンテックジャパンのスケジューリングツール類について、詳細に記述する。

KBCからは、Visual MESA Supply Chain Scheduling (VM-SCS) がリリースされており、生産計画の実行を支援するスケジューリングツールと位置付けている。製油所プロセス、タンクヤードや物流上の制約を考慮し、生産計画を原料供給から製品ロジスティクスまでのエンドツーエンドの実行可能なスケジュールに変換することにより、生産計画とのギャップ最小限化、品質ギブアウェイの最小限化、ブレンドコストの削減、滞船料の削減等が特徴であると紹介している。

このVM-SCSは、石油精製分野に限らず、石油化学、LNGプロセスやタンクターミナル等において、物流とユニットオペレーションの両方のシミュレーションモデルを用いて、将来の在庫や

マテリアル特性を予測、可視化を行う。予測は、計画変更、プラントデータをフィードバックして常に最新の状態を維持するものである。もし、制約違反が検出された場合のアラート機能も保有している。

このシミュレーションモデルは、原料受入、栈橋・パイプライン、生産ユニット、タンクヤード、ブレンディング、製品ターミナルを含むサプライチェーン全体をカバーし、サプライチェーンで相互に関連する作業の整合性、計画実現の可能性の検証も可能なモデルとなっている。

### Entire supply cha

- Scheduling cru
- Ship and jetty s
- Pipeline operat
- Movements in t
- Refinery and pe
- Feedstock and
- Product shipm

出所) VISUAL MESA™ SUPPLY CHAIN SCHEDULING

### Crude oil, gasoli

- Multi-product constraints an
- Crude oil, gaso
- Asphalt, heati
- Component t
- Blending to p

出所) VISUAL MESA™ SUPPLY CHAIN SCHEDULING

また、この VM-SCS は、ERP の様な基幹系システム、プラント情報管理システム(PIMS)、ラボ情報管理システム(LIMS)、アカウンティングシステム等、他のシステムとの連携や統合が可能で、製油所の計画系に限らず幅広い業務に活用が可能なツールであることから、経営ツールに位置付けられるのではないかと考える。

(株)アスペンテックジャパンは、ソリューションカテゴリーを3種類に分け、概念設計、基本設計や装置設計等のエンジニアリング、予測、スケジューリング、運転管理・MES、高度制御等の製造&サプライチェーン、保全、プラント保守・保全等のアセットパフォーマンス管理に係る

ソリューションをリリースしている。それらの代表的なソリューションの構成や位置付けは、図3に示されている。



図3 AspenTech 社のデジタル技術・ツール類の構成、位置付け等について

具体的なスケジューリングツールとしては図4に示す様に、市況とプラントの運転条件の最適化、原油選択の最適化、製造現場への生産目標の提供等の生産計画に係るスケジューリングツール、製造スケジューリングツール、組織横断的な需要予測、ネットバック価格の計算等のサプライチェーン計画ツール、オフサイト物流、保管、在庫の最適化に係るツール等がある。



図4 AspenTech 社のスケジューリング類

他のツール類、例えば、デジタルツインと連携することで価値最大化に資する生産プロセスの動的最適化、生産目標を達成するための生産工程のデジタル制御等が図られ、機器性能やプロセス性能の健全性の監視、装置の計画外停止の予測と解決等により資産の信頼性向上が図られる等、分野を超えた最適化が期待される。・・・図5参照 (AspenTech 社資料を引用)



図5 製造最適化ワークフローについて

その他としては、独・DASSAULT SYSTEMS 社が単一プラットフォームで各種計画を立案・最適化する総合計画ソフトウェアを提供している(図6を参照)。

#### 計画を立案

© Dassault Systemes | Confidential Information | 11222020 | ref. 3DS\_Document\_2019

8

図6 DASSAULT SYSTEMS 社の総合計画ソフトウェアについて

これは、基幹システムの ERP や製造実行システム(MES)と連携し、単一プラットフォーム上で計画の立案から最適化まで行えることが特徴である。この単一のプラットフォームで要員、製造、ロジスティクスの計画を立案、最適化が出来る。計画は、長期から短期までをカバーし、計また、画間を連携して全体最適化を実現している。

石油・ガス分野で Quitiq がカバーする領域について図7に示したが、上流部門から中下流部門まで幅広くカバー出来ることも特徴であろう。

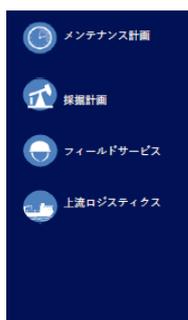


図7 DASSAULT SYSTEMS 社の Quitiq がカバーする領域(Oil & Gas)について

また、Quitiq の最適化エンジンは、計画者との協働を前提にデザインされており、計画者の意思決定を尊重している。自動パラメータ調整機能を有し、柔軟なハードウェア構成により、業務稼働要件に合致したパフォーマンスを実現出来る等、高い柔軟性と拡張性が特徴である。更に、Quitiq には、経路最適化アルゴリズム、局所探索法、数理計画法等、数多くの著名なアルゴリズムが搭載されている。

### (3) 関連技術・ツール類

上述したスケジューリングツールに制御ツールを組合せて、製油所の全体最適化を目指したツール類もある。例えば、AspenTech 社は、図8に示すツール類を紹介している。

図8中に記載のある GDOT とは、Generic Dynamic Optimization Technology の略で、生産計画と高度制御の連携による生産最適ソリューションと位置付けられる。また、GDOT の中の最新 APC 技術は、次世代高度制御(AI を取り入れた DMC3)であり、従来の線形型モデルでは限界であった予測範囲を拡大することを Deep Learning による非線形性を持たせた技術によ

り実現している。

例えば、GDOT の様な技術を活用することで、リアルタイムで装置の制約(装置能力の限界)を可視化することが出来ていないことに起因する生産計画のマージン(余裕代)の存在、リアルタイムで装置間連携が出来ていない為、全体最適化が図られていない等々の課題を解決出来る可能性がある。

- サイト制御



図8 計画系モデルを活用した製油所全体最適化との取組みについて

製油所を取り巻く様々な変動や外乱等に適切に対応するには、計画系のツール類だけではなく、運転系や制御系のツール類を活用、連動させることにより、製油所機能の最大限発揮に繋がると考えられる。これらのツールを活用しつつ、静的な部分最適化ではなく、動的な全体最適化に繋げていくのが最大の課題だと考えられる。導入済みのツールと新たに導入するツールとの繋ぎ込み、既設ツールの更新・置き換え等、より広い視野からツール類やシステム全体の設計が重要になるであろう。

昨今の製油所は、これまでの様に燃料油の製造が第一目的であったが、国内燃料油需要の大幅な落ち込み、将来的にはガソリン需要の大部分が消失し兼ねない環境が想定される為、石油化学製品や化学品製造を第一目的とする等、位置付けが大きく変わると考えられる。従って、その様な環境変化に対応すべく、計画系から運転系、制御系のツール類や全体システムもそれらの目的に応じて変更することが必要となる。図9や図10には、Honeywell 社の製油所マネジメントや業務プロセスのスコープが紹介されており、参考になると思う。

図9 Honeywell 社が提示する製油所パフォーマンスマネジメント



図10 Honeywell 社が提示する製油所と化学プラントにおける業務プロセス

#### (4)その他

計画系ツールの連動により製油所の最適化に資するツールとしては、制御系のツールがある。例えば、フィードバック型の制御系ツール類は、これまでも幾つか知られているが、ストリー

ムデータを活用してリアルタイムにフィードフォワード的な制御が出来る実用的なツールは、余り知られていない。しかしながら、石油企業において導入実績がある後者のツールとしては、米国・FogHorn 社のソフトウェア(図11を参照)がある。



**FOGHORN**

図11 FogHorn 社のストリーミングデータを活用する制御ツールについて

ストリーミングデータをリアルタイムで収集、クレンジング、モデル作成を行うことは、他社でも行っているが、リアルタイムで時間軸が異なる様々なストリーミングデータを推論モデルに入力し、その場でリアルタイムに解析、予測することは他社では出来ていないと考えられ、これがこのツールの特長と考えられる。

また、製油所操業時の意思決定を支援し、操業効率向上に資する最新のツールとして、米国・Beyond Limits 社の ROA(Refinery Operations Advisor)がある。英国・BP 社が資本参画し、該社の複数製油所にて導入実績があり、操業効率化により収益向上に繋げている(図12及び図13を参照)。このツールは、AI 技術を活用しているが、一般的な Black box 型の AI(数値 AI)が多い中、人間の知識や経験をシンボリック AI として組み込んだ White box 型の AI であり、コグニティブ AI と呼ばれている。



図12 Beyond Limits 社の ROA (Refinery Operations Advisor) について



図13 Beyond Limits 社の ROA による最適化モデルについて

これまでの最適化モデルは、計画及びスケジューリング、オペレーション、システム制御で構成されているがオペレーション部分は、人による意思決定が支配しており、必ずしも最適化が出来ていなかった。一方、ROA による最適化モデルは、これまでと同様に計画及びスケジューリング、オペレーション、システム制御で構成されているが、人の意思決定ループをデジタル化すると共に最適化するものである。ROA による意思決定のループを制御ループの上位に構築した点が特長で、この最適化ループが絶えず回って、最適化の精度を高め続けている。

該社の最適化ツールは、デジタルツインそのものではなく、デジタルツインに人間の知識や経験を組み込んだデジタルトリプレットツールであると考えられる。このデジタルトリプレットツールを導入すれば、既に顕在化している人手不足、ベテランからの技術伝承の遅れ、若手の確保、早期育成の困難さ等、人的な経営課題の解決に資すると期待され、石油企業での積極的な活用が期待される。

これまで紹介してきた計画系ツール類と運転系や制御系ツール類、そして、外部情報を組み込んで全体を連動させて、一体的な活用により製油所機能を最大限に発揮させようとする相当量のビッグデータをリアルタイムで処理することになる。その様な場合、クラウドコンピューティングだけではなくエッジコンピューティングで消費される電力量は、無視することは出来ないレベルだと思う。例えば、LeapMind(株)は、ディープラーニングに或る量子化技術を適用することで、モデルが軽量化され容量と計算量を大幅に削減しつつ、性能の劣化は最小限に抑えると言う“極小量子化技術(Extremely low bit quantization)”を開発している。この様な技術を活用して、電力消費量を抑えることも製油所DX、サプライチェーンの最適化・効率化には、重要なことだと考える。

## 4. 製油所サプライチェーン最適化・効率化に係る技術課題、留意事項等

### (1) スケジューリングツール類について

サプライチェーン全体最適化を達成する為に、スケジューリングツールを含めてパッケージ化されたソフトウェア類は、複数社から市販されており、基本的に調達が可能であると考えられる。しかしながら、先ず、それらのツールやソフトウェアの境界領域の繋ぎ込みを如何に行うのが課題であるとする。例えば、ベンダーが異なるツール類を如何に連動させて、目標とする機能を発揮させるのが課題になり、API (Application Programming Interface) の選定が特に重要である。

また、それぞれのツールやソフトウェアの精度向上も課題だと考える。既に各社は、様々な取組みにより、或るレベルの精度で制御や管理を行っているので、更なる精度向上は、重要な課題であり、精度向上が図られれば、強みになると思われる。ツールやソフトウェア、システム全体を定期的にメンテナンスすることが必要なことは、当然のことである。

更には、予測と実体の乖離を減らすリアルタイムでの自動修正等も課題だと考える。ツール、ソフトウェアによっては、静的なフィードバック型の応答や制御に留まっていることがあるが、全体最適化を図ろうとすると動的なフィードフォワード型の応答や制御が不可欠と考えられる。その様な場合、オンラインでダイナミックデータを処理するデータリコンシリエーション技術の活用も必要になると考える。

以上の様な課題は、ソフトウェアだけではなく、ハードウェア (例えば、クラウドコンピューティング、エッジコンピューティングの組み合わせ、棲み分け等も含む) も含めて総合的に対応することが必要だと考えられる。

### (2) 製油所デジタルトランスフォーメーション (DX) に向けて

日本の石油会社を取り巻く環境変化が更に激化する中、製油所 DX は、必須な方向性だと考える。石油会社が、欧米中の競合他社に伍するには、追い付くだけではなく、何らかの違いが必要だと考える。しかしながら、既にサプライチェーン全体を最適化するソフトウェアは存在しているので、先行者が手にしているソフトウェアではない別の武器が必要になる。グローバルな競争の勝ち負けは、アウトプットの質であり、そのアウトプットの質は、インプットの質で決まる筈である。それが武器になると考える。

例えば、図14に製油所デジタルトランスフォーメーションの基本アーキテクチャ (例) を示したが、サプライチェーン全体最適化の精度向上に資する計画、制御、予測等の高精度ストリーミングセンサデータ、それらに影響を及ぼす高精度ストリーミングデータ (例えば、混合原油性状詳細データ、ロジスティクスデータ、気象・海象データ、周辺国の燃料油や石化製品需給データ、事故・災害情報等) をリアルタイムに取捨選択・統合したデータをインプットすることで質が高まると考える。即ち、如何に有用なデータを適切なタイミングで統合して活用するかが鍵だと考える。

## 製油所DXの基本アーキテクチャ（例）

**“サプライチェーンにおけるGreen Refinery機能&アセット全体最適化”**  
 ～様々な環境変化、状況変化への高ロバスト製油所網の構築による  
 エネルギー安定供給、脱炭素化への貢献及び石化品供給比率最大化～

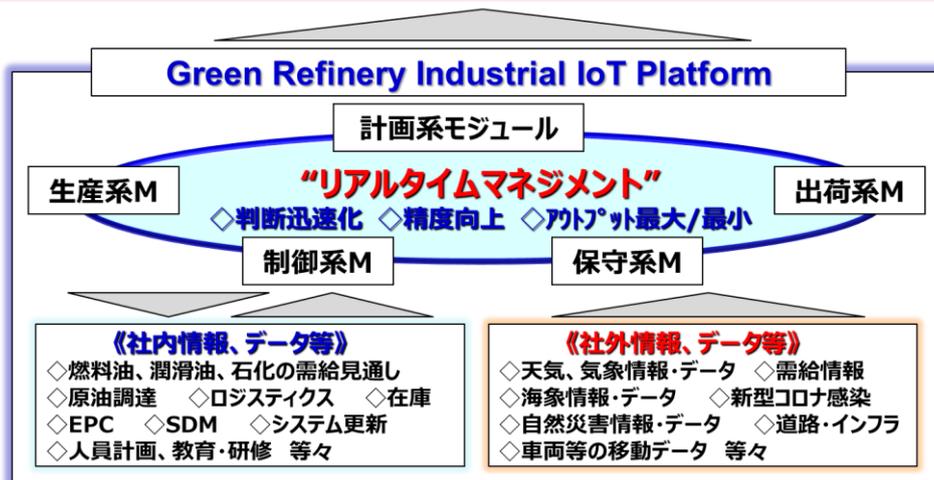


図14 製油所デジタルトランスフォーメーションの基本アーキテクチャ(例)

### (3) 製油所サプライチェーンの最適化・効率化に向けて

前述した様な取組みは、一企業だけで対応することは、容易ではなく時間が掛かると思われるので、企業や業界の壁を取り払って、地域内連携や A11 JAPAN で取り組むことが重要ではないかと考える。要するに、エコシステム的な取組みを行い、その成功例を日本国内に広く展開させるのが好ましいと考える。

例えば、図15に製油所DXエコシステム実現化構想(例)を示したが、非常に多くのデータや情報をインプットし、複数のベンダーが提供する特長あるツールやソフトウェアを有機的に連携、連動させることが出来れば、製油所サプライチェーンの最適化・効率化に繋がると考えられる。

# 製油所DXエコシステム実現化構想 (例)

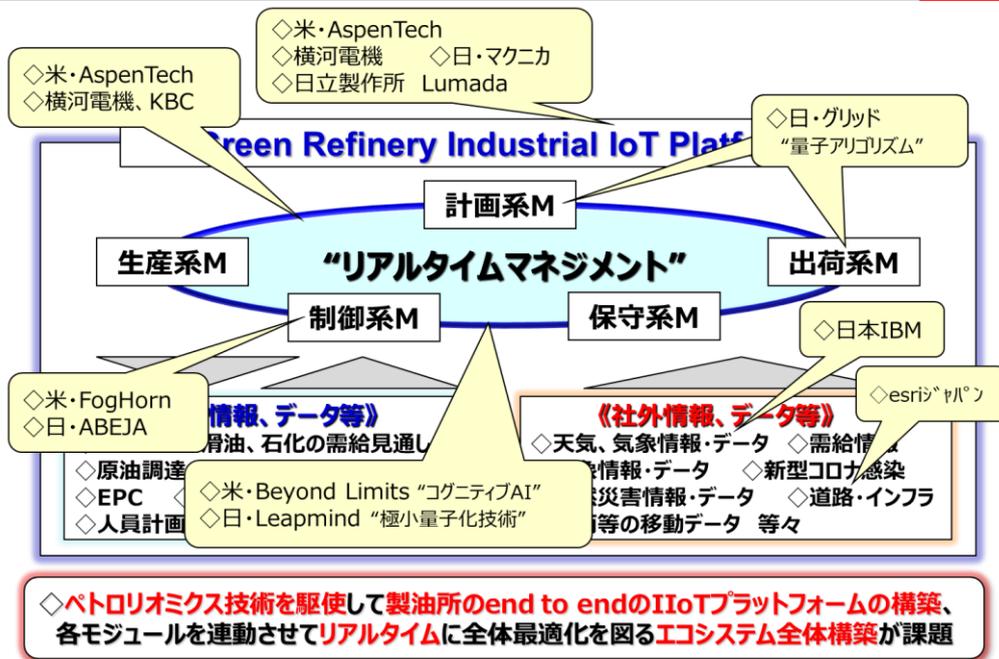


図15 製油所DXエコシステム実現化構想(例)

また、個社の企業経営を考えた時、製油所は単なるコストセンターではなく、収益を創造するプロフィットセンターと位置付けることも出来ると思う。その場合、如何に資産を効果的、効率的に活用するかと言ったアセットパフォーマンスマネジメント的な観点が必要になると思う。その様な観点からもデジタル技術を活用して、製油所をリアルタイムで「見える化」し、継続的に改善し続けることにより競争力が更に高まるものと期待する。単独製油所に限定せず、複数の製油所間、更には、他社の製油所や石化工場等とも連携、連動することに繋がれば、真の意味でのデジタル変革(DX)的な取組みになると考えられる。

## 5. まとめ

- (1) サプライチェーン全体最適化を達成する為に、スケジューリングツールを含めてパッケージ化されたソフトウェア類(生産系、制御系、ロジスティクス系等を含む)は、複数社から市販されており、基本的に調達が可能であると考えられる。先ず、それらのツールやソフトウェアの境界領域の繋ぎ込みを如何に行うのが課題であると考えられる。例えば、ベンダーが異なるツール類を如何に連動させて、目標とする機能を発揮させるのが課題になり、API の選定が特に重要である。
- (2) また、それぞれのツールやソフトウェアの精度向上も課題だと考えるし、予測と実体の乖離を減らすリアルタイムでの自動修正等も課題だと考える。ツール、ソフトウェアによっては、静的なフィードバック型の応答や制御に留まっていることがあるが、製油所全体の最適化を図ろうとすると動的なフィードフォワード型の応答や制御が不可欠と考えられる。
- (3) 製油所デジタルトランスフォーメーションを推進し、国際競争力を更に高める為には、サプライチェーン全体最適化の精度向上に資する計画、制御、予測等の高精度ストリーミングセンサーデータ、それらに影響を及ぼす高精度ストリーミングデータ(例えば、混合原油性状詳細データ、ロジスティクスデータ、気象・海象データ、周辺国の燃料油や石化製品需給データ、事故・災害情報等)をリアルタイムに取捨選択・統合してデータをインプットする等、サプライチェーン全体に係るデータの質を高めることが鍵である。
- (4) 製油所DXエコシステム実現化構想(例)で示した様に、非常に多くのデータや情報をインプットし、複数のベンダーが提供する特長あるツールやソフトウェアを有機的に連携、連動させることが出来れば、製油所サプライチェーンの最適化・効率化に繋がると考えられる。デジタル技術を活用して、製油所をリアルタイムで「見える化」し、継続的に改善し続けることにより競争力が更に高まるものと期待する。また、単独製油所に限定せず、複数の製油所間、更には、他社の製油所や石化工場等とも連携、連動することに繋がれば、真の意味でのデジタル変革(DX)的な取組みになると考えられる。

なお、製油所においてDXを推進する為のポイントを図16に示したので、参照して貰いたい。製油所におけるDX活動が先行している企業では、DX推進の意義、目的について関係者で共有化し、特に、製造現場のメンバーが納得、腹落ちしてから開始することが成功の大きな要因だと考えられる。また、経営トップの旗振りは、当然だと考えられるが、得られる果実については、活動を推進しないと見えてこない部分がある為、活動の企画段階で費用対効果について厳しく求めず、活動しながら小さいながらも成果が見えて来るものであり、活動を続けることが将来の大きな成果に繋がるとの強い思いを持って、組織が一丸となって継続的に活動することがDX活動を成功させる道だと考える。

# 製油所におけるDX活動推進のポイント

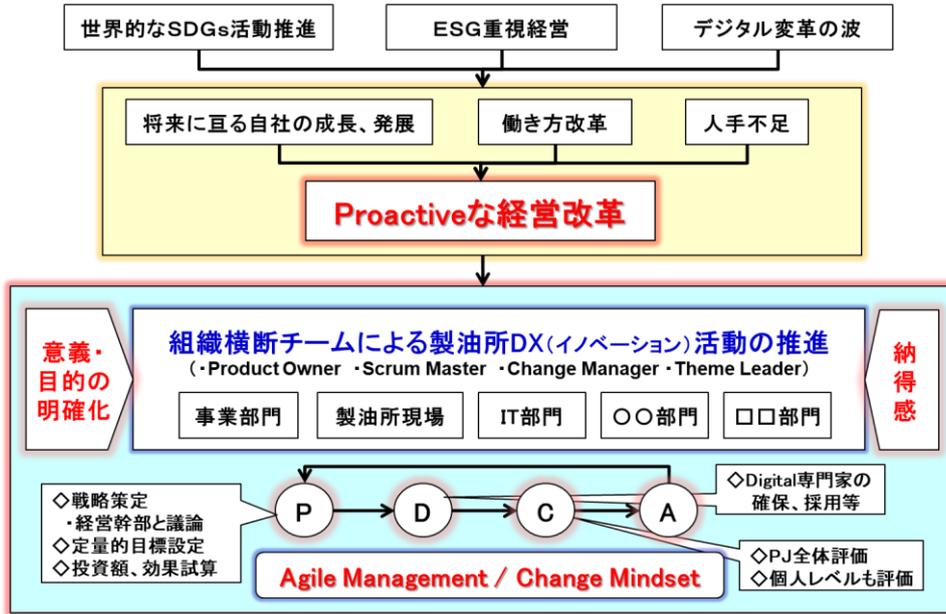


図16 製油所におけるDX活動推進のポイント

以上

## 【参考文献タイトルリスト】

### 1. AspenTech

- ① aspenONE® Supply & Distribution for Refining & Marketing
- ② Aspen Petroleum Scheduler™
- ③ Aspen-PIMS™
- ④ デジタルツインとスマートエンタープライズ
- ⑤ AspenTech Case study  
【CEPSA】 Streamlines Scheduling Workflows With Integrated Refinery Scheduling and Blending
- ⑥ AspenTech Case study  
【MARATHON】 Up-grades Refineries to Full Refinery Scheduling With Aspen Petroleum Scheduler™
- ⑦ Avoid Unwanted Maintenance Events & Increase Uptime with Aspen Mtell “Prescriptive Maintenance” @INCHEM TOKYO 2019
- ⑧ 生産計画と高度制御の連携による生産最適ソリューション 最新の AI 機能と融合した高度制御機能
- ⑨ 「自律型 APC システムと垂直統合型のオペレーション最適化自動制御紹介」石油学会熊本大会～新時代を創る石油とエネルギー～(第 50 回石油・石油化学討論会)講演資料

### 2. アズビル

- ① 製造オペレーションマネジメント入門～ISA-95 が製造業を変える～  
◆事例による説明(2015.3.16)

### 3. Beyond Limits

- ① Beyond Conventional AI - Proven in Space Now Available on Earth
- ② Refinery Operations Advisor

### 4. ダッソーシステムズ

- ① DELMIAQuintiq のご紹介 (2019.10.17)

### 5. FogHorn

- ① EDGE AI/ML FOR INDUSTRIAL IOT (2020.1)

### 6. GRID

- ① 最適化ソリューション User's Voice 【出光興産株式会社】

## 7. Honeywell

- ① The Honeywell Connected Plant
- ② Leveraging the Cloud to Drive Operational Excellence (2018.2)
- ③ Honeywell Process Solutions～HPS INTRODUCTION MARKET OVERVIEW AND TECHNOLOGY UPDATE～ (2017.5)

## 8. Schneider Electric & AVEVA

- ① EcoStruxure for Power & Process (ONLINE IRPC EURASIA 3-4 JUNE 2020)
- ② Wonderware California “Aveva/Wonderware 2020 Norcal Roadshow”
- ③ APM デジタルトランスフォーメーション～AVEVA の統合にとらわれないソリューション～ (2019.12)
- ④ How to enable a good Digital Transformation (2019.9.26)
- ⑤ Digital Acceleration in the Downstream Oil and Gas Industry

## 9. 横河電機株式会社及びグループ企業

- ① 製造オペレーションマネジメント入門～ISA-95 が製造業を変える～(2015.3.16)  
(横河ソリューションサービス株式会社)
- ② デジタルデータを活用した技能継承ほか(2015.7.8)
- ③ 生産スケジューラー ASPLANNER™ (設備から作業員まで、生産リソースの適正化を支援)  
(横河ソリューションサービス株式会社)

## 10. 《KBC》

- ① North American Refinery Saved Over USD 2Million／Year
- ② Visual MESA™ Supply Chain Scheduling TECHNICAL DATASHEET
- ③ Operationalizing a Digital Twin UPM(Unit Performance Monitoring) Enabled Through Integration of Petro-SIM and PI
- ④ 2020 AFPM SUMMIT Excellence in Plant Performance

無断転載・複製を禁ず

一般財団法人石油エネルギー技術センター  
〒105-0011 東京都港区芝公園 2-1-1  
電話 03-5402-8502

# 安全性の確保（稼働信頼性の向上） に関する調査

令和 2 年度燃料安定供給対策に関する調査事業  
（製油所の競争力に係る技術動向に関する調査）

令和 3 年 3 月



一般財団法人石油エネルギー技術センター  
Japan Petroleum Energy Center (JPEC)

## 目次

1. 調査の背景、目的.....	6
2. 調査の内容 .....	6
2.1. 保安（安全）データ PF .....	8
2.1.1. テキストマイニング・ベイジアンネットによる解析トライアル.....	9
2.1.2. 技術資料を基にしたオントロジー構築トライアル.....	10
2.2. 保全（解析モデル）PF.....	14
3 調査結果 .....	17
3.1. 保安（安全）データ PF .....	17
3.1.1. テキストマイニングとベイジアンネットによる解析トライアル.....	17
3.1.2. 技術資料を基にしたオントロジー構築トライアル .....	29
3.1.3. 解析技術の連携利用 .....	46
3.1.4. 保安（安全）データ PF の課題と実用化の方策.....	47
3.2. 保全（解析モデル）PF .....	48
3.2.1. PF の具体的な仕様 .....	48
3.2.2. PF による効率化の定量評価 .....	50
3.2.3. PF 自走化に向けての課題・実用化の方策 .....	54
別添資料 1：ベイジアンネット解析トライアル .....	57
別添資料 2：オントロジー構築トライアル.....	57

## 図表番号

図 1	保安および保全情報を効率的に活用するためのプラットフォーム	6
図 2	スマート保安を実現したプラントの将来像	7
図 3	保安（安全）データ PF 概略構成	8
図 4	トライアル取り進め体制	9
図 5	トライアルでの配管維持規格選定理由	11
図 6	鉄鋼プロセスのオントロジーの例	12
図 7	機能オントロジーの模式図	13
図 8	一般的なオントロジーと機能オントロジーの比較	14
図 9	Connected Industries プラント保安分野の取組み	15
図 10	保全（解析モデル）プラットフォーム	15
図 11	Type2：緩やかな結びつき型（解析モデルを価値として共有する仕組み）	16
図 12	WG 体制および議論した内容	16
図 13	解析トライアルの手順	17
図 14	事故・ヒヤリハット・劣化事例に登場する単語の相関	18
図 15	単語の再分類	19
図 16	利用イメージ	20
図 17	単語の分類木	22
図 18	「オリフィス」から推論	23
図 19	「オリフィス」で推論した事例ランキング	23
図 20	「オリフィス」で推論した単語ランキング	24
図 21	単語を追加して推論	24
図 22	単語を追加して推論した事例ランキング	25
図 23	単語を追加して推論した単語ランキング	25
図 24	さらに単語を追加して推論	26
図 25	単語を減らして推論	26
図 26	「死亡」からの推論	27
図 27	「プロピレン」を追加して推論	27
図 28	「プロピレン」「デコーキング」を追加して推論	28
図 29	関連する事例のランキング	28
図 30	機能オントロジーの概念図	30
図 31	対策の分解木	30
図 32	不具合の分解木と対策の分解木の対応付けの例	31
図 33	掘り下げた不具合の分解木	31
図 34	不具合の分解木の掘り下げ	32
図 35	分解木と事故事例やヒヤリハット事例の紐づけ	32

図 36	配管維持規格の構成の分解木表現	34
図 37	「4 章 検査の計画を立てる」の構成の分解木表現	34
図 38	「4.配管系の管理 4.1 一般」の分解木	35
図 39	「5.1 腐食・エロージョンの検査」の分解木	35
図 40	高温硫化腐食に関する部分の分解木	36
図 41	高温硫黄腐食の部分の分解木	37
図 42	分解木と事例の対応付け（事例 2、32）	38
図 43	分解木と事例の対応付け（事例 1、31、98）	39
図 44	メカニズムと事例の対応付け	39
図 45	「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」（クリープ損傷）の分解木	40
図 46	「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」（疲労）の分解木	40
図 47	対策の分解木と事例の対応付け	41
図 48	配管維持規格の分解木の構成	42
図 49	鋼板の強化機構の分解木（①本来果たすべき機能）	43
図 50	鋼板の強化機構の分解木（本来果たすべき機能+不具合の分解木）	43
図 51	鋼板の強化機構の分解木（本来果たすべき機能+不具合+対策の分解木）	44
図 52	不具合事例、メカニズムの重要性の評価	45
図 53	「テキストマイニング・ベイジアンネット」と「オントロジー」の連携した利用例	46
図 54	「保安（安全）情報 PF」での連携利用	47
図 55	今後の取り組み案	48
図 56	PF 全体構成	49
図 57	補正予算事業概要	49
図 58	PF 全体イメージ	49
図 59	データ収取 PF システム構成イメージ	50
図 60	配管検査計画時の作業フロー	51
図 61	RBM 導入開始時の効率化	52
図 62	RBM 導入後・運用中の効率化	52
図 63	プラント保安分野 AI 信頼性評価ガイドライン（取組・目的）	55
図 64	信頼性評価の 3 品質	56
表 1	トライアルに用いた各事例の分類項目	10
表 2	選択した単語	21
表 3	配管維持規格（JPI-8S-1-2018）の内容	33
表 4	データ収取部分の PF による効率化	51
表 5	解析モデル利用時の PF 活用による効率化	53
表 6	AI 解析におけるデータ準備時 PF 活用による効率化	54

表 7 CUI 予測モデル利用時の検査範囲・点数および検査費用削減効果 .....	54
---	----

## 安全性の確保（稼働信頼性の向上）に関する調査

### 1. 調査の背景、目的

#### 【背景認識】

- 安定操業を維持するために基本となる、人財確保、技術伝承が共通の問題となっている。
- 保安（安全関係）情報は、テキストデータとして蓄積されているため、必要な情報の検索や、複数の事例や状況を関連付けた解析は、ベテランの知恵や経験に依存している部分が大きく、今後対応が困難となる事が予想される。
- 保全（メンテナンス）分野においては、腐食等の解析モデル開発が進み、実用化に向けての取り組みがはじまっているが、解析のためのデータ収集や標準化（クレンジング）が個別対応等、システム化が未達であり、利用促進面で停滞が懸念されている。

#### 【調査の目的・意義】

- 日本企業の国際競争力の強化のため、国内製油所の安全性確保（信頼性の向上）に資する、保安（安全関係）情報の活用 および 保全（メンテナンス）情報の活用に関する技術を調査し、その製造現場への適応有効性について具体的事例等を利用して実証調査を行う。

### 2. 調査の内容

#### 保安・保全情報活用技術調査

令和元年度、石油業界で必要とされる、保安・保全情報活用のためのプラットフォーム（以下 PF）の機能と構成について検討するとともに、保安情報の AI 等の新技術を用いた情報分析の効率化や高度化を行っている事例について調査を行い、必要とされる PF について検討した<sup>1</sup>。図 1 に保安および保全情報を効率的に活用するための PF（保安（安全）データ PF、保全（解析モデル）PF）について示す。

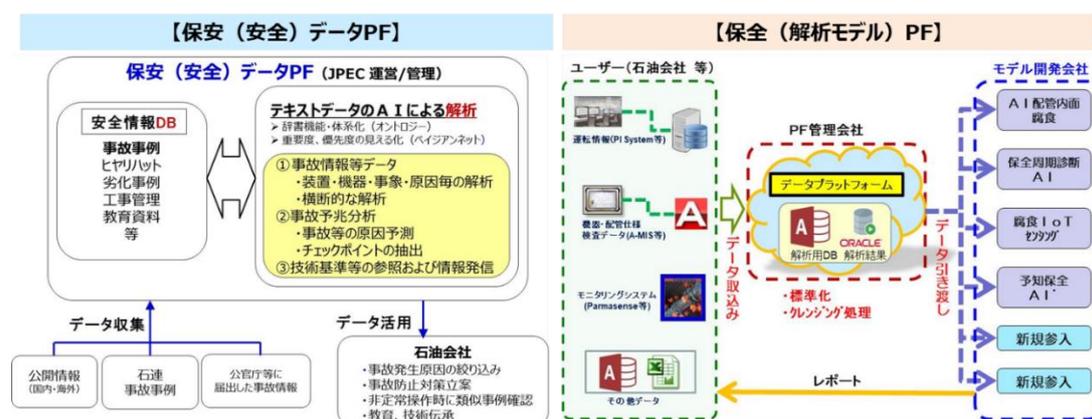


図 1 保安および保全情報を効率的に活用するためのプラットフォーム

<sup>1</sup> 令和元年度燃料安定供給対策に関する調査事業（製油所の競争力に係る技術動向に関する調査）調査報告書 [https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2019FY/000376.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000376.pdf)

一方、経済産業省は、令和2年7月に「スマート保安官民協議会 高圧ガス保安部会」を開催し、スマート保安推進に向けて、先進的な取組を行う事業者と共に官民アクションプラン（高圧ガス保安分野 スマート保安アクションプラン）を策定し、その中で、スマート保安が実現するプラントの将来像を提示している<sup>2</sup>（図2）。具体的には、スマート保安技術の導入の前提となる企業組織の変革のあり方（1.スマート化に向けた企業組織の変革）と、プラントのスマート化（2.情報の電子化、3.現場作業効率化、4.意思決定の高度化）についてあるべき姿を示している。図1に示した各PFは、スマート保安が実現するプラントの将来像を実現するためにも有効に活用できると思われる。例えば、保安（安全）データPFは、図2中の「3.現場作業効率化 3-1.知識データベースの活用」、保全（解析モデル）PFは、「4.意思決定の高度化 4-1.異常検知による事故・故障等の未然防止、4-2.予兆検知によるO&M改善、4-3.運転・点検の自動化」のためのツールとなると考える。

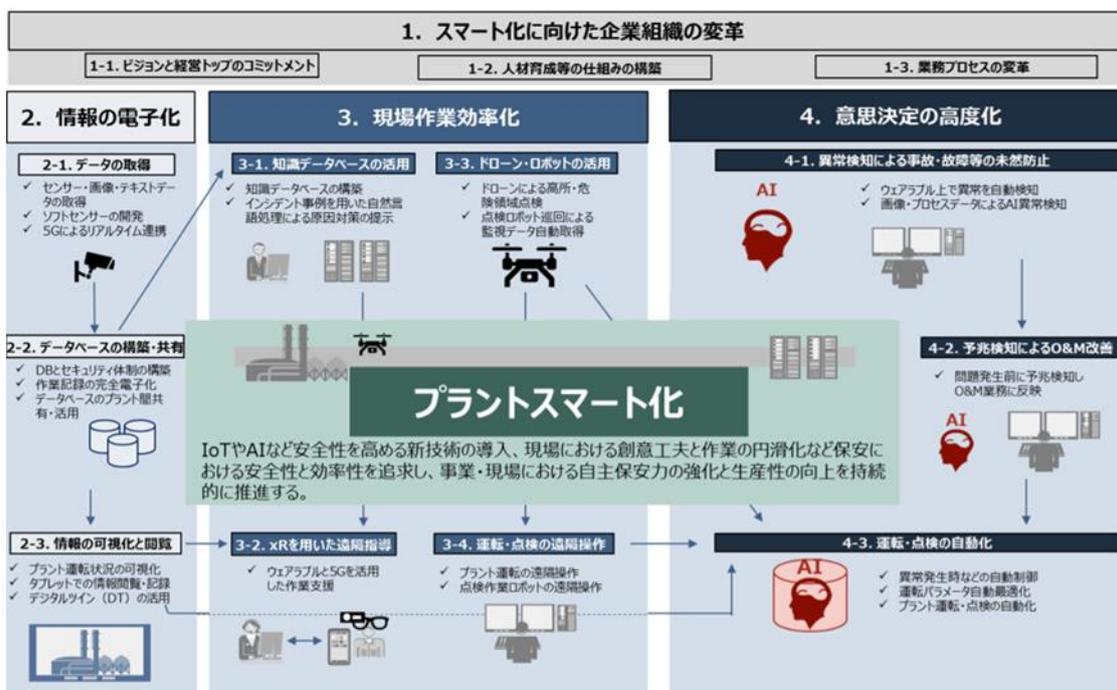


図2 スマート保安を実現したプラントの将来像

本調査では、「保安（安全）データPF」および「保全（解析モデル）PF」について、製造現場への適用有効性について調査を行うことを目的に、以下の調査を行った。

<sup>2</sup> 高圧ガス保安分野スマート保安アクションプラン

[https://www.meti.go.jp/shingikai/safety\\_security/smart\\_hoan/koatsu\\_gas/pdf/action\\_plan.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/safety_security/smart_hoan/koatsu_gas/pdf/action_plan.pdf)

## 2.1.保安（安全）データPF

近年、IoTやAI等の新技術が急速に進化・発展したことから、これらの技術を活用したスマート保安が推進され、様々なツールの開発が試みられている。令和元年度には、安全関係情報の解析に資する技術と他産業での事例を調査するとともに、石油産業が求めている安全確保の仕組みを調査し、「保安（安全）データプラットフォーム」の概略構成を取りまとめた（図3）。

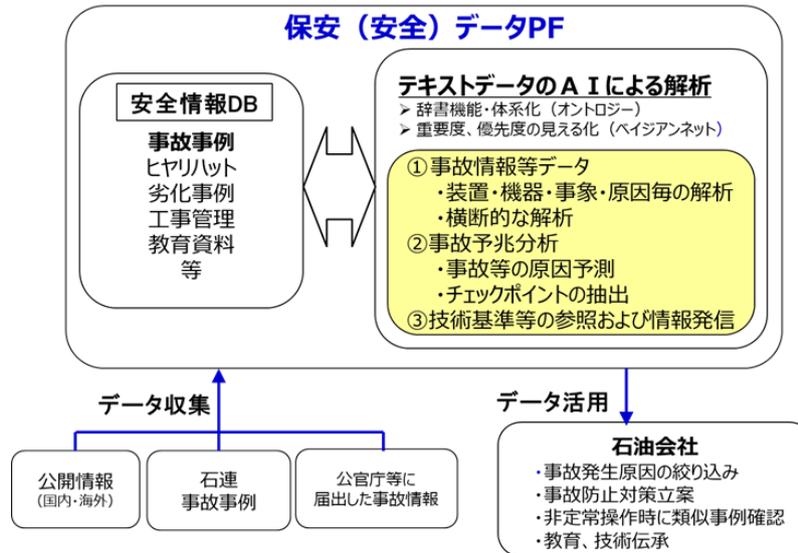


図3 保安（安全）データPF 概略構成

本調査では、昨年度の調査を受けて、PF実現に向けたキーテクノロジーであるテキストマイニング、ベイジアンネット、オントロジーに注目し、以下2.1.1、2.1.2のトライアルを実施し、解析技術の原理検証を行うとともに、その有効性と今後の取り組みについて検討した。

検討に当たっては、石油会社からなる「安全安心研究会」およびテキスト情報解析技術に関する有識者からなる「保安情報解析WG」を設置し取り進めた。（図4）。

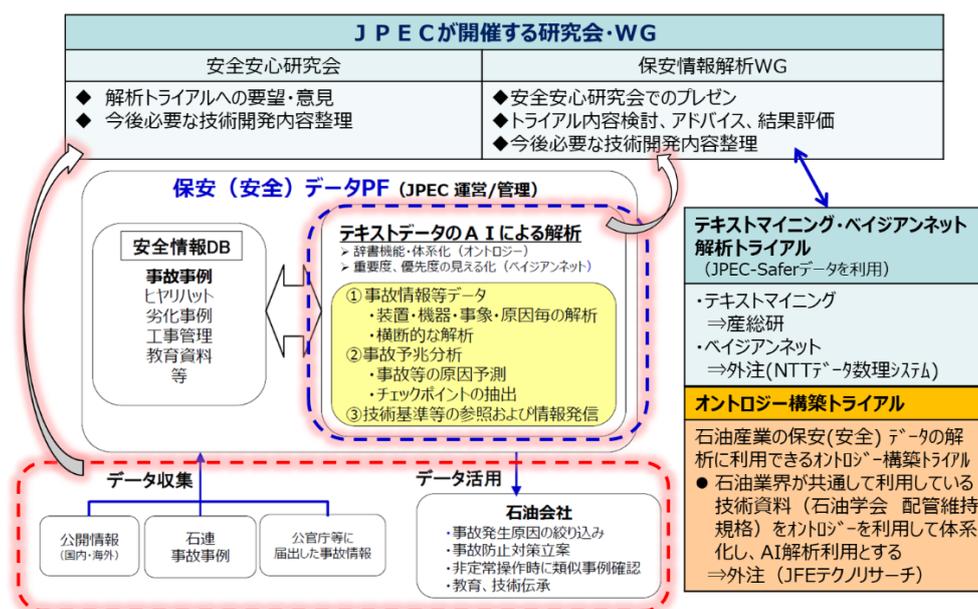


図 4 トライアル取り進め体制

### 2.1.1. テキストマイニング・ベジアンネットによる解析トライアル

石油各社では、以前より過去の事事故例等を整理蓄積し、プラントの安全操業（稼働信頼性）に活かすための取組が行われている。一般的には各事例を、専門家やベテランにより解析し、発生装置、原因、対策などを整理し DB 化して利用している。これらの方法は、個別事事故例について詳細内容の理解や、簡単な事例毎の分類を行うには有効であるが、多数の事例間の繋がり/関係性について解析し、利用者に「潜在的リスク」、「対応法」などに対する「気づき・ヒント」を提示し、トラブル未然防止・拡散防止へ有効利用することは難しいと考える。

一方、各事例の報告内容（テキスト情報）をテキストマイニングにより解析・整理した情報を利用してベジアンネットにて確率推論を行う事により、人手では処理しきれない情報量においても、コンピューター処理により、各事例の繋がり/関係性の効果的解析が期待される。例えば、IoT を活用した新産業モデル創出基盤整備事業（NEDO H29～30）「運転データ等による異常検知・事故予測システム（鳥取大学・NEC・筑波大・産総研）」<sup>3</sup>では、製油所のヒヤリハット事例と JPEC-Safer 事事故例データを用いた解析にテキストマイニングやベジアンネットを利用している。

本調査では、テキスト情報で蓄積されたデータのコンピューターによる解析の可能性をトライアルすることに主眼を置き、各事例のテキスト情報を、情報整理のために利用されている分類項目の枠を取り払い、単語が入った袋（bag of words : BoW）と見なして利用した。表 1 にトライアルで利用した JPEC-Safer（JPEC 所有の事事故例等 DB）にある、「事事故例」「ヒヤリハット事例」「劣化事例」の各分類項目を示す。トライアルでは、表 1 で示した分類項目での枠を取り払い、1 件毎の事例に含まれる単語を BoW として取り扱っている。

<sup>3</sup> [https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai\\_201906/20190000000306.html](https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201906/20190000000306.html)

解析は先ず、コンピューターによる解析が容易な語彙的情報（単語）に注目し、テキストマイニングにより解析を行うために有効な単語を抽出し、抽出した単語を利用してページアネット解析を行う事により各事例のテキスト情報をネットワークで表現し、事故要因、作業で発生する異変の原因や進展事象などの推論についてトライアルを行った。

尚、テキストマイニングによる「登場する単語の関係性整理」および「主要な単語の抽出と分類」は、保安情報解析 WG 委員である産業技術総合研究所人工知能研究センター 中田委員にて実施いただき、ページアネットを用いた各単語の「因果関係をグラフ化して関係性を定量的に評価（確率推論）」は、(株)NTT データ数理システムに委託し実施した（別添資料 1）。

表 1 トライアルに用いた各事例の分類項目

項目	事故事例			ヒヤリハット事例			劣化事例			
	項目名	テキスト	コード化	項目名	テキスト	コード化	項目名	テキスト	コード化	
事例番号	事例番号	...	...	事例番号	...	...	事例番号	...	...	
タイトル	タイトル	必須	...	タイトル	必須	...	タイトル	必須	...	
発生年月日（曜日）	発生年月日（曜日）	...	必須	発生年月	...	必須	発生年月	...	任意	
発生時刻	発生時刻	...	任意	発生時刻	...	任意	...	...	...	
気象条件	気象条件	任意	...	気象条件	...	任意	気象条件	...	任意	
発生場所	発生場所（国）	...	任意	...	...	...	...	...	...	
発生場所	発生場所（都道府県、州、都市など）	...	任意	...	...	...	...	...	...	
プロセス	プロセス	...	必須	...	...	...	...	...	...	
事象	事故事象 概要	必須	...	ヒヤリハット事象	必須	必須	損傷形態	...	任意	
	事故事象 経過	必須	必須				...	...	...	
	事故事象 原因	必須	...				損傷原因	...	任意	
	起因事象	必須	必須				...	...	...	
事象の要因	進展事象	必須	必須	ヒヤリハットの発生要因	任意	必須	...	...	...	
	進展事象の要因	任意	必須	...	...	...	...	...	...	
発生時の運転・作業状況	事故発生時の運転・作業状況	任意	必須	ヒヤリハット発生時の運転・作業状況	任意	必須	運転条件、運転（使用）期間	任意	...	
現場経験年数	起因事象に関係した人の現場経験年数	任意	任意	現場経験年数	任意	任意	...	...	...	
関連した装置/系統	起因事象に関連した装置/系統	任意	必須	発生装置/発生系統	任意	必須	発生装置・系統	任意	必須	
	発生装置/系統	任意	必須					...	...	...
関連した機器	起因事象に関連した機器	任意	必須	ヒヤリハットに関連した機器	任意	必須	発生機器、機器仕様	任意	必須	
	発生機器	任意	必須					発生部位	...	任意
運転条件	運転条件	任意	...	運転条件	任意	...	...	...	...	
主要流体	主要流体	任意	...	主要流体	任意	...	主要流体	任意	...	
材質	材質	任意	...	材質	任意	...	材質	任意	...	
被害状況	被害状況（人的）	任意	...	...	...	...	...	...	...	
	被害状況（物的）	任意	...					...	...	...
	被害状況（環境）	任意	...					...	...	...
	被害状況（住民）	任意	...					...	...	...
検出・発見時期	事故の検出・発見時期	任意	必須	ヒヤリハットの検出・発見時期	任意	必須	損傷発見時期	任意	...	
検出・発見方法	事故の検出・発見方法	任意	必須	ヒヤリハットの検出・発見方法	任意	必須	...	...	...	
拡大阻止策・処置	重大事故への拡大阻止・処理	任意	...	拡大阻止策・処置	任意	必須	対応（補修含め）	必須	...	
想定重大事象	想定重大事故	任意	...	測定重大事象	任意	必須	予想外・想定外の事象	任意	...	
再発防止策	再発防止策	必須	...	発生防止策	必須	...	再発防止のための教訓	任意	...	
教訓	教訓	任意	...	教訓	任意	...	...	...	...	
重要度分類	...	...	...	重要度分類 安全	任意	必須	...	...	...	
				重要度分類 運転・安全	任意	必須	...	...	...	
				重要度分類 環境	任意	必須	...	...	...	
				重要度分類 水平展開	任意	必須	...	...	...	
安全専門家からのコメント	安全専門家からのコメント	任意	...	安全専門家からのコメント	任意	...	...	...	...	
添付資料（図・表など）	添付資料（図・表など）	任意	...	添付資料	任意	...	...	...	...	
参考資料（文献など）	参考資料（文献など）	任意	...	...	...	...	参考資料（文献など）	任意	...	
キーワード	キーワード	任意	...	キーワード	任意	...	...	...	...	

### 2.1.2. 技術資料を基にしたオントロジー構築トライアル

オントロジーとは本来、哲学用語で「存在に関する体系的な理論」のことであるが、知識処理の分野では知識システムを構築する際に用いられる基本概念の体系的記述を意味し、知識の体系化や共有化などに活用されている。

例えば、IoT を活用した新産業モデル創出基盤整備事業（NEDO H29~30）「運転データ等による異常検知・事故予測システム（鳥取大学・NEC・筑波大・産総研）」<sup>3</sup>では、製油所のヒヤリハット事例解析に化学理論を体系化した理論オントロジーを用いている。また、産総研 人工知能研究センタ

ーで行われている「オントロジーを用いた知識構造化支援システム研究」<sup>4</sup>では、オントロジーを用いて、熟練者の知識、マニュアル（業務知識）を構造化して、AIに学習させて活用する取組がある。

石油業界では、知識の体系化や共有化に利用できるものの一つとして、「石油学会維持規格」<sup>5</sup>が考えられる。現在の石油学会維持規格は、テキスト情報として紙媒体で提供されており（人が読み、学習/利用するための形態）、コンピューター解析に利用できる形態となっていないが、以下に示す特徴から、石油学会維持規格を用いてオントロジーを構築する事で、日常点検作業・事故事例解析・リスクアセスメント等に有効に活用できると考えた。

- ・ 石油精製事業所における設備性能を維持し、事故の防止及び保安の確保を図るため、石油業界に広く用いられている（各社基準に反映されている）。
- ・ 維持規格内容が各社にて周知徹底されている事を示すため、設備維持管理士認定のための評価試験が石油学会により実施されている。
- ・ 石油学会維持規格は、石油業界に必要な「保安・保全に関する知識」の業界共通の技術資料であり、定期的に改訂が行われ最新事項についてもフォローされている。
- ・ 石連から提供される事故情報<sup>6</sup>が紐づけられている。

トライアルでは、石油学会維持規格の中から「配管維持規格」を選定し、オントロジー構築を行い、その利用方法について検討した。「配管維持規格」の選定理由について図5に示す。

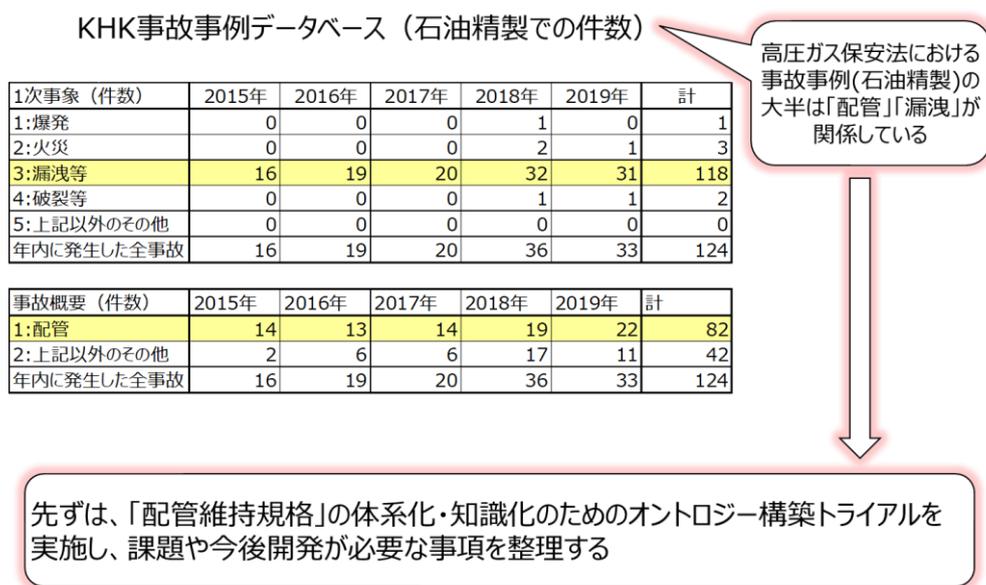


図5 トライアルでの配管維持規格選定理由

<sup>4</sup> <https://www.airc.aist.go.jp/sirt/ad69583561f81df46c3291bd74bd105d1b3fda68.pdf>

<sup>5</sup> 公益社団法人石油学会が発行する「石油・石油化学工業用装置関係 JPI 規格」で、石油精製事業所における設備等の性能を維持し、事故の防止及び保安の確保を図ることを目的とした規格 <https://www.sekiyu-gakkai.or.jp/jp/kankou/kikaku/8m.html#JPI-8S-1-2018>

<sup>6</sup> [https://www.paj.gr.jp/paj\\_info/20200722\\_02.pdf](https://www.paj.gr.jp/paj_info/20200722_02.pdf)

本トライアルで適用するオントロジーは機能オントロジー<sup>7, 8</sup>とよばれるものに属する。一般的なオントロジーは図 6 に示すように、対象分野で使用される概念、語彙の定義を行い、それらの関係を記述するものである。オントロジーとは元々は哲学で「存在論」を意味し、対象となるものに関する知識を一貫的、統一的に記述するため、それに必要な概念（語彙）をまとめたものであり、知識の体系化、共有化に活用されている。

これに対し、図 7 に模式図を示すように、機能オントロジーは対象分野のより具体的な知識を記述するものであり、機械が果たすべき機能を分解し、因果関係の連鎖としてツリー状に表現するもので機能分解木と呼ばれている。同様の記述方法は、人の行為の記述にも適用されており、行為分解木と呼ばれている。機械や人が何をしなければならないかを体系的に記述することができるので、構造化されたマニュアルとも呼ばれている。機能オントロジーを用いることにより、教科書やマニュアルのまる覚えではなく、行為の目的を理解させることにより気付きを与え、応用力を高めることができる。また、機能と方式を分離して記述することにより、設計者の意図を明確化し、他の方式の発想を支援することもできるのが特徴である。

右図で、上にあるものほど上位の概念になる。  
 青線で結ばれているものは、下位概念が上位概念の一例であり、'is a'とよばれる関係を示す。  
 赤線で結ばれているものは、下位概念が上位概念を構成する要素であり、'part of'とよばれる関係を示す。

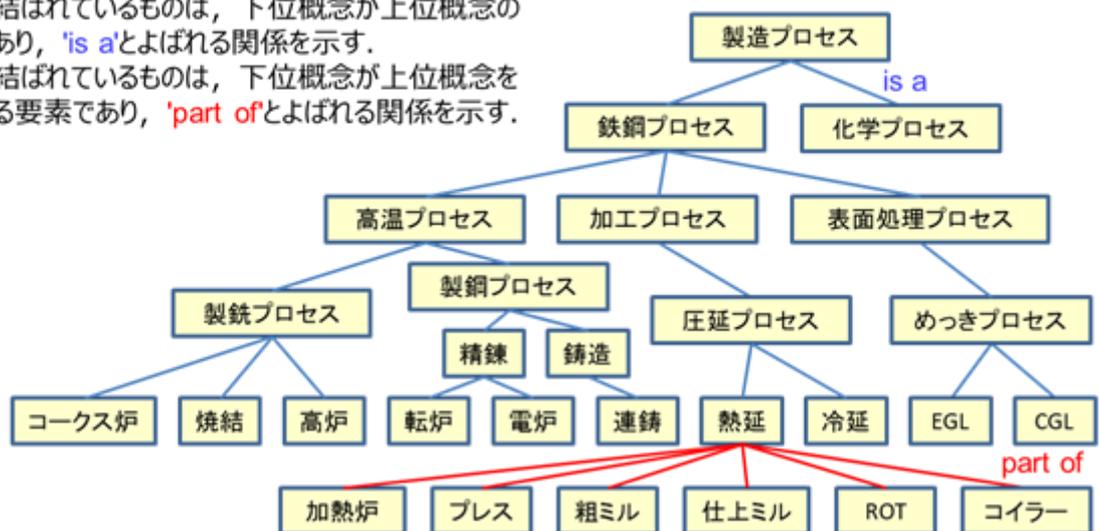


図 6 鉄鋼プロセスのオントロジーの例

<sup>7</sup> 来村、溝口： オントロジー工学に基づく機能的知識体系化の枠組み、人工知能学会誌、Vol. 17、No. 1、pp. 61-72、2002.

<sup>8</sup> 来村ら： オントロジーに基づく機能的知識の体系的記述とその機能構造設計支援における利用、人工知能学会誌、Vol. 17、No. 1、pp. 73-84、2002.

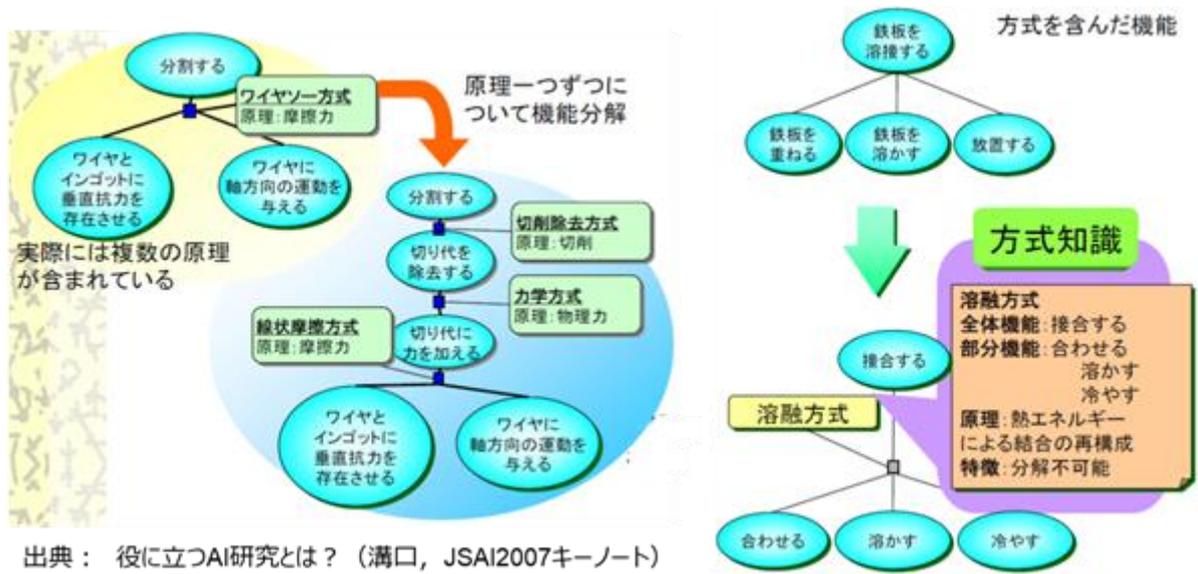
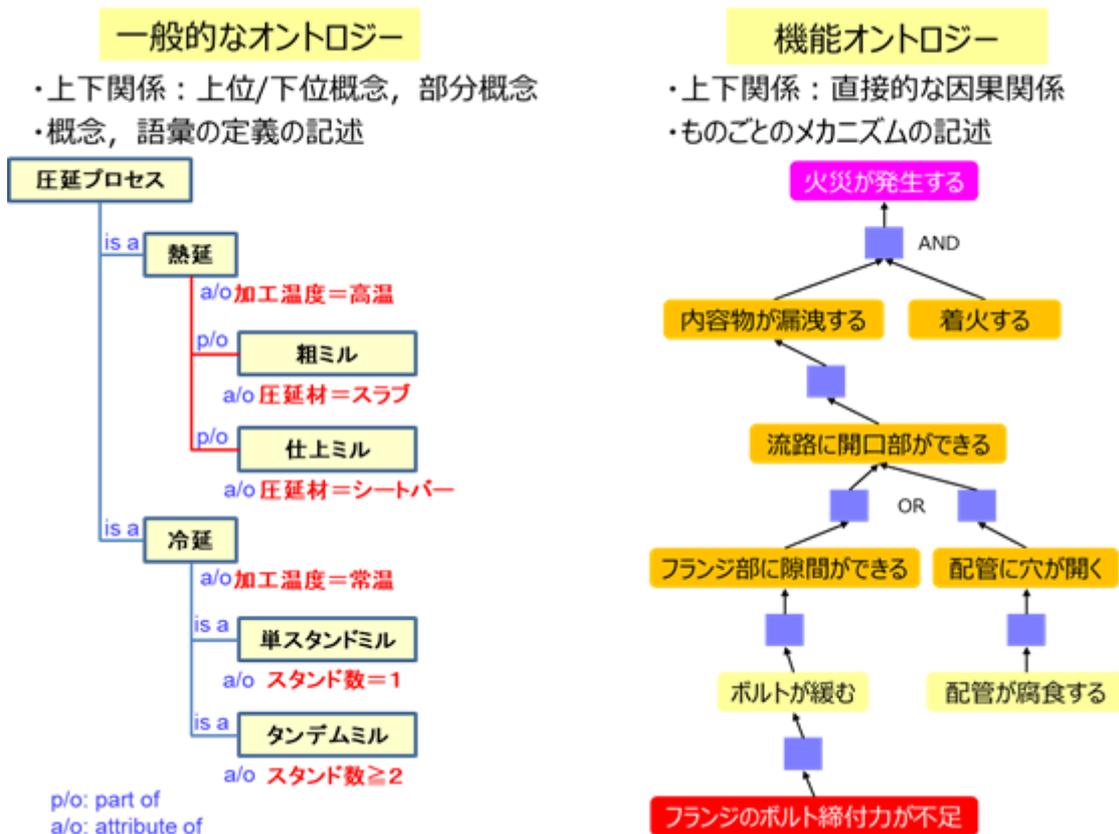


図 7 機能オントロジーの模式図

一般的なオントロジーと機能オントロジーの比較を図 8 に示す。前者では、ツリーの中にちりばめられているノードの上下関係は is-a、part-of など概念の上位/下位、包含関係を示している<sup>9</sup>が、機能オントロジーでは下方が原因、上方が結果であり、直接的な因果関係の連鎖としてのものごとのメカニズムを分解木として記述する。また、同様の方法で、設計、施工、保安、保全のような人の行為を分解して記述することもできる。

尚、技術資料を基にしたオントロジー構築トライアルは、J F E テクノリサーチ株式会社に委託して行った（別添資料 2）。

<sup>9</sup> 古崎：ドメインオントロジーの構築と利用、情報知識学会誌、Vol. 19、No. 4、pp. 296-305、2009.



## 2.2. 保全（解析モデル）PF

経済産業省が進める、Connected Industries プラント保安分野の取組み<sup>10</sup>（図 9）に対応して、設備信頼性にかかわるデータを活用するための、保全（解析モデル）PF（図 10）の構築について検討する（本 PF では、基本的にデータ共有（教師用データ）は行わない）。PF でのデータ取り扱いについての基本的イメージは、プラットフォームの類型（平成 28 年度 IoT 推進のための新産業モデル創出基盤整備事業（自主保安高度化に向けた実証事業）報告書<sup>11</sup>「図 6-2 ビッグデータ解析技術の社会的仕組みの類型化」にある Type 2: 緩やかな結びつき型（解析モデルを価値として共有するしくみ）に相当する（図 11））。但し、将来的には、ユーザー（石油会社等）間でのデータ共有についても検討が必要であり、例えば、「解析モデル会社⇄データ共有を行うユーザー」間での契約により対応する方法も考えられる。

<sup>10</sup> <https://www.meti.go.jp/press/2017/10/20171002012/20171002012-1.pdf>

<sup>11</sup> [https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/H28FY/000427.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H28FY/000427.pdf)

令和元年度は、PF 構築にむけて、「PF の利用方法（PF の全体構成、PF イメージ）」および「PF の管理体制（PF の管理組織）」について調査<sup>12</sup>を行い（以下「令和元年度調査」）、「今後の課題・取り進めの提言」として、「PF の具体的仕様」「PF による効率化評価」および「実用化自走化に向けての課題」について更に調査が必要であるとした。本調査では、令和元年度の WG 提言内容をベースに PF 自走化に向けて調査を行った。

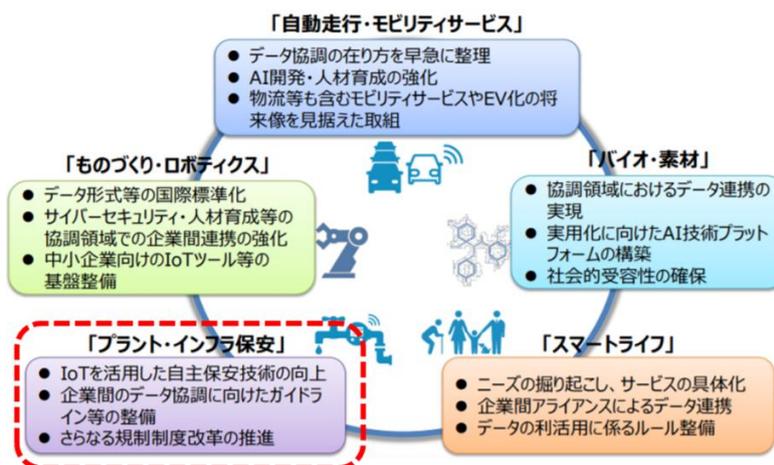


図 9 Connected Industries プラント保安分野の取組み

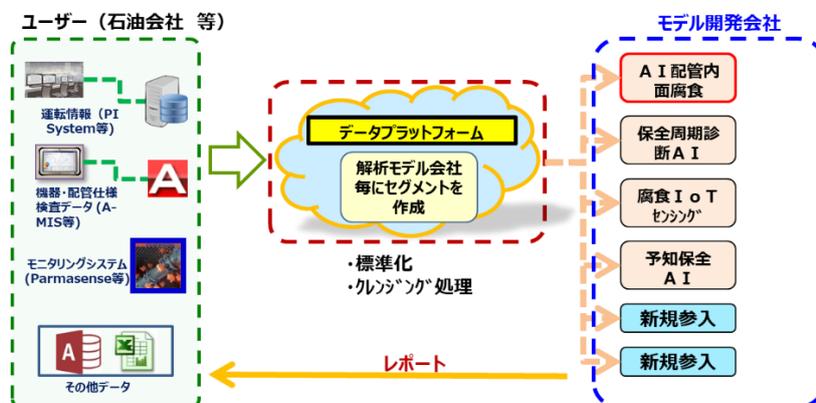


図 10 保全（解析モデル）プラットフォーム

<sup>12</sup> 令和元年度燃料安定供給対策に関する調査事業（製油所の競争力に係る技術動向に関する調査）調査報告書（[https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2019FY/000376.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000376.pdf)）

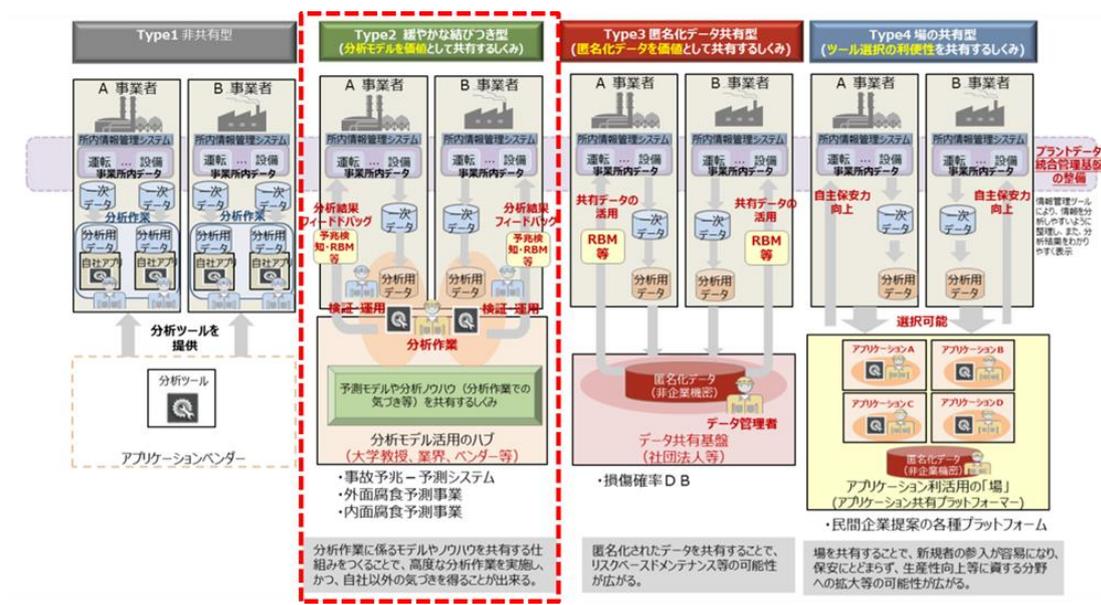


図 11 Type2：緩やかな結びつき型（解析モデルを価値として共有する仕組み）

具体的には、解析モデル会社による WG を設置し、PF 運用にあたって検討を行った。WG は、令和元年度に引き続き、H29～30 年度 NEDO 事業（IoT 技術を活用した新たな産業保安システムの開発）のモデル開発会社等で、プラットフォーム利用の可能性のある会社を委員<sup>13</sup>とし、更に令和 2 年度は PF システム開発を行う会社<sup>14</sup>も加えた。

WG の体制および議論した内容を図 12 に示す。また、本 WG の内容については、JPEC 安全安心研究会にて石油会社に情報提供を行っている。



図 12 WG 体制および議論した内容

13 日揮(株)、(株)IMC、(株)ベストマテリア、旭化成(株)、千代田化工建設(株)

14 (株)インフォキューブ LAFLA

### 3 調査結果

#### 3.1.保安（安全）データ PF

##### 3.1.1. テキストマイニングとベイジアンネットによる解析トライアル

###### (1) トライアルの手順

図 13 に解析トライアルの手順を示す。

解析用データとして、JPEC-Safer（JPEC 所有の事故事例等 DB<sup>15</sup>）より、事故事例（423 件）、ヒヤリハット事例（319 件）、劣化事例（153 件）を用いた（事故事例のみ HP にて公開中<sup>16</sup>）。

解析に当たっては、2.1.1 で記載した通り、テキスト情報で蓄積されたデータのコンピューターによる解析の可能性をトライアルすることに主眼を置き、各事例のテキスト情報を、情報整理のために利用されている分類項目の枠を取り払い単語が入った袋（bag of words : BoW）と見なして利用した。

解析用データはテキストマイニングにより、「登場する単語の関係性整理」を行い、「主要な単語の抽出と分類」を行う。抽出された単語を利用して、ベイジアンネットを用い、各単語の「因果関係をグラフ化して関係性を定量的に評価（確率推論）」した。

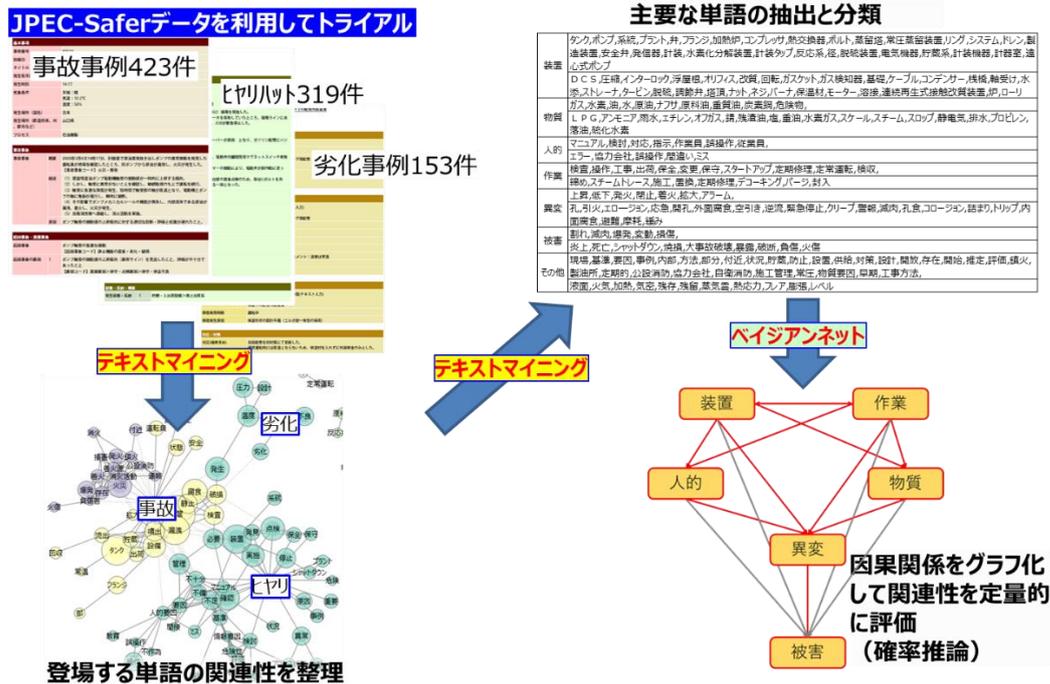


図 13 解析トライアルの手順

<sup>15</sup> <http://report.pecj.or.jp/qssearch/RRS/%E4%B8%80%E8%88%AC/2011%E5%B9%B4%E5%BA%A6%E4%B8%80%E8%88%AC/JPEC-2011TS-01.pdf>

<sup>16</sup> [https://www.pecj.or.jp/safer-support/case\\_list/](https://www.pecj.or.jp/safer-support/case_list/)

(2) テキストマイニングによる解析

1) 事故事例、ヒヤリハット事例、劣化事例に登場する単語の特徴の把握

テキストマイニングにより、事故・ヒヤリハット・劣化の各事例に登場する単語の傾向を解析したところ、事故・ヒヤリハット・劣化の各事例に登場する単語は、その内容にそれぞれ特徴があり、各事例を跨いでの解析を行うには工夫が必要な事がわかった（図 14）。

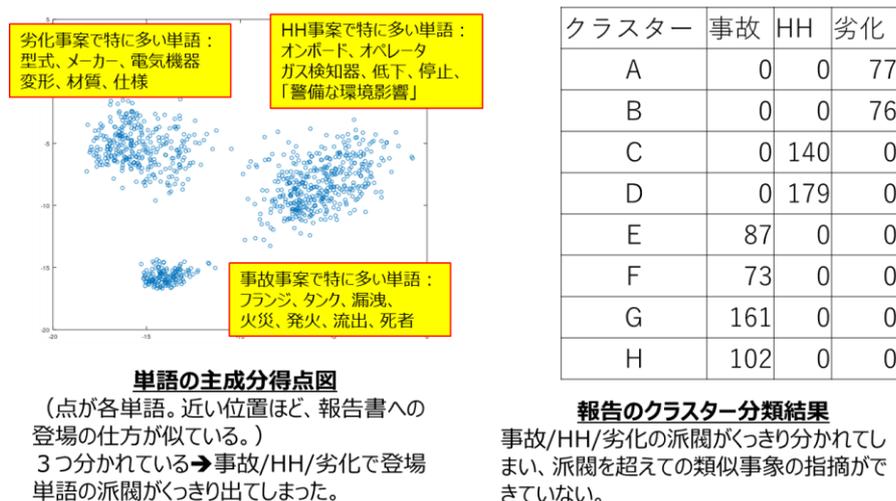


図 14 事故・ヒヤリハット・劣化事例に登場する単語の相関

このため、事故・ヒヤリハット・劣化の各事例で、内容が似ている事例であっても、抽出して利用する単語によっては、その傾向の違いから、共通性を見抜けない（解析できない）事になり、ベイジアンネット分析にとっても障害となる。

2) 事故・ヒヤリハット・劣化事例に登場する単語の再分類（登場する単語の偏りの除去）

上記 1) での課題である、事故・ヒヤリハット・劣化の各事例の単語の偏りを除去するため、「事故・ヒヤリハット・劣化の各カテゴリーへの依存度が高い単語や定型文の削除」および「事故・ヒヤリハット・劣化の各カテゴリーで共通して利用されている単語の利用」等を行い、単語の再分類を行った。再分類により、事故・ヒヤリハット・劣化の各事例の共通性について解析可能な偏りのない分類とする事ができた（図 15）。

グループ	事故	HH	劣化	代表的単語
A	0	0	77	型式, メーカー, 電気機器, 絶縁, 摩耗, 変形, ユーティリティ設備, 原油予熱系, ケーブル, 運転中, 常圧蒸留装置, 電動機,
B	0	0	76	温度, 圧力, 型式, メーカー, 材質, 摩耗, 運転中, 損傷, 摂氏, 変形, 静機器, S U S, 想定, 仕様, エロージョン,
C	0	140	0	環境影響, 海洋, 社会, 生産, 地域, 危険, プラント, 影響, 軽微, 運転, 機器停止, 対処, オペレータ, 有効,
D	0	179	0	環境影響, 海洋, 社会, ガス検知器, 生産, 計器, 地域, 危険, プロセス, プラント, パネル, オンボード, 影響, 監視, 軽微, 運転,
E	87	0	0	天候, 湿度, 気温, 流出, 負傷者, 死者, 噴出, 漏洩, 回収, 常温, 常圧, タンク, 摂氏, 貯蔵, 機能喪失,
F	73	0	0	負傷者, 死者, 噴出, 漏洩, 腐食, 劣化, 現場パトロール, 定常運転, 異臭, 五感, 目視, ルーチン, 異音, 破損, 検査,
G	161	0	0	爆発, 着火源, 火災, 発火, 負傷者, 死者, 存在, 着火, 異臭, 五感, 鎮火, 異音, 目視, 振動, 消火活動,
H	102	0	0	爆発, 火災, 存在, 発火, 鎮火, 負傷者, 死者, 着火源, 消火活動, 運転員, 温度, 噴出, 漏洩, 損害, 緊急停止,



### カテゴリ依存の強い単語・定型文の除去

グループ	事故	HH	劣化	代表的単語
A	7	31	110	割れ, 系統, 電気機器, ポンプ, 損傷, 常圧蒸留装置, 検査, 設計, 蒸留塔, 水, 変更, 低下, 遠心式ポンプ
B	44	39	33	検査, 水素, 重質油, 水素化分解装置, 供給, 設計, ガス, 減内, 反応系, 事例, 保全, 内部, 熱交換器
C	20	164	1	プラント, 基準, 操作, 事例, 変動, 低下, 弁, 現場, 検討, ガス, 保全, 系統, マニュアル
D	17	48	5	発信器, 計装タプ, 指示, 基準, プラント, 現場, 弁, 操作, 変動, 要因, 低下, 保全, 対策
E	82	34	4	貯蔵, 出荷, タンク, 油, 検査, 保全, 防止, 保守, 開始, 設置, 弁, 事例, 検討
F	61	0	0	貯蔵, タンク, 出荷, 存在, 発火, 貯蔵系, 鎮火, 爆発, 変動, 着火, 検討, 推定, 防止
G	127	3	0	ガス, 発火, 存在, 爆発, 系統, 着火, 保全, 操作, 検討, 要因, 現場, 防止, 基準
H	65	0	0	発火, 存在, 公設消防, 鎮火, 自衛消防, 水素, 推定, 付近, 操作, 着火, 防止, 基準, ガス

図 15 単語の再分類

また、再分類（図 15 の下表）グループ G については、ヒヤリハット事例と共通する単語が登場する事故事例の数が多い傾向にある。つまり、グループ G のヒヤリハット事例は、事故に進展する可能性が高い事例であると推定される。この様に、テキストマイニングによる解析より、事故に進展するパターンが多いと推定されるヒヤリハット事例抽出に利用できる可能性がある。該当する 3 件のヒヤリハット事例は、別紙 2 報告書番号 32、128、196 であり、以下に概要を示す。

- ＜ 3 2 ＞ ガス回収装置。定期修理で火気使用工事中 H C 混入ドレン抜き。定期修理中に、ガス回収装置の圧縮機気液分離槽を開放するため仕切板挿入作業に際し工事作業員が滞留していたドレン（H C 混入）を排出していた。近傍では、既に火気使用工事を行っていた。
- ＜ 1 2 8 ＞ ハンドホール開放時残留水噴出。槽撤去の工事にあたって、槽の上部から内部を確認したところ、仕切板の上流側に残留水が見られた。この残留水を槽の上部から回収するためバキューム車の手配を行った。その後、仕切板下流側の残留水の状況を確認するためドレン弁を開放したところ、残留水が出てこなかったことから、仕切板下流側の残留水はドレン弁のレベルより下にあると判断。ハンドホールの下部を開放した時、残留水が噴出し、作業員の体に降りかかった。
- ＜ 1 9 6 ＞ 減圧蒸留装置加熱炉オフガスバーナー清掃時、間違っ燃料ガスバーナー掃除に着手。作業員は取り外し範囲を指で指示された。オフガスバーナー取り外しが終わる頃、まだ燃料バーナーも清掃対象と思い込んでいたため、燃料ガスバーナー側配管のフランジを緩めにかかった。シューという音がしたので、ボルトを締める余裕もなく飛び退き、近くの製油係員へ連絡して元弁を閉止してもらった。

### (3) ベイジアンネットによる解析

#### 1) 利用イメージ

事事故例等のテキスト情報のベイジアンネットを利用した解析の「利用イメージ」を想定し、解析の方向性を明確化した。図 16 に利用イメージを示す。

現在、製造現場でのタブレット等のモバイルツール利用について、国内外各社で検討が進められている。モバイルツールをより有効に利用するためには、そこに表示させる情報が重要となる。今回のベイジアンネット解析の利用イメージとして、現場巡視・作業時に関連したリスク情報に定量的に表示させることを想定した。

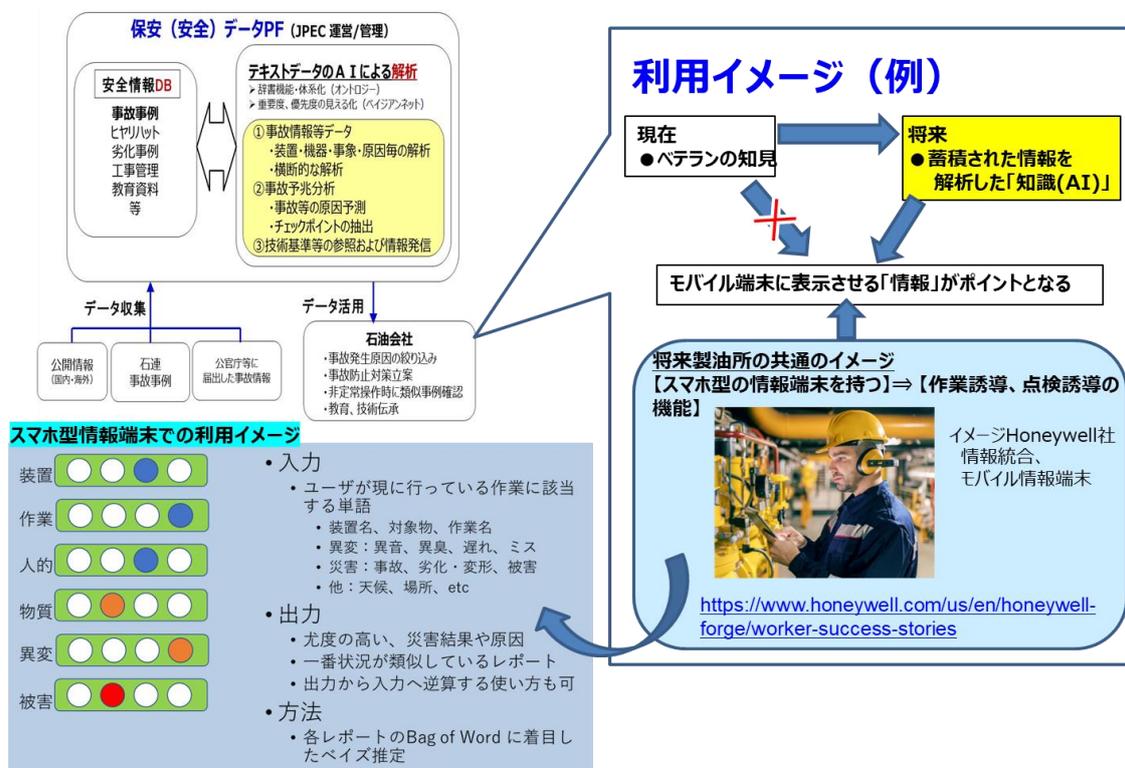


図 16 利用イメージ

#### 2) 解析対象単語の選択

解析対象とする単語は、以下の二通りの方法で選択した。

選択した単語を表 2 に示す。

- ① 上記 (2) における単語の分類結果を参考に、今回使用した「事事故例 (423 件) ・ヒヤリハット事例 (319 件) ・劣化事例 (153 件) に含まれる単語より、登場する事例数 (登場文書数 : DF (Document Frequency)) をベースに、100 単語を選択
  - ✓ 一般語 : 50 個 (160 ≤ DF ≤ 300)
  - ✓ 専門用語 : 50 個 (71 ≤ DF ≤ 131)

- ② 単語の分類木（図 17）を作成し、各共起の集合を代表する単語を抽出し、分類木の先端部分にくる単語をベースに 100 単語を選択（分類木の幹部分の単語は、多くの事例に登場する単語であるが、どの事例でも登場し易い一般的な単語であり、各事例固有の現象を代表していないが、先端部分にくる単語は各事例の固有の現象を代表していると考えられるため）※①選定にて「協力会社」「誤操作」が重複しているため、実際に追加した単語は 98 語となる

表 2 選択した単語

分類	単語
装置	① タンク,ポンプ,系統,プラント,弁,フランジ,加熱炉,コンプレッサ,熱交換器,ボルト,蒸留塔,常圧蒸留装置,リング,システム,ドレン,製造装置,安全弁,発信器,計装,水素化分解装置,計装タブ,反応系,径,脱硫装置,電気機器,貯蔵系,計装機器,計器室,遠心式ポンプ
	② D C S,圧縮,インターロック,浮屋根,オリフィス,改質,回転,ガasket,ガス検知器,基礎,ケーブル,コンデンサー,栈橋,軸受け,水添,ストレーナ,タービン,脱硫,調節弁,塔頂,ナット,ネジ,バーナ,保温材,モーター,溶接,連続再生式接触改質装置,炉,ローリ
物質	① ガス,水素,油,水,原油,ナフサ,原料油,重質油,炭素鋼,危険物,
	② L P G,アンモニア,雨水,エチレン,オフガス,錆,残渣油,塩,重油,水素ガス,スケール,スチーム,スロップ,静電気,排水,プロピレン,落油,硫化水素
人的	① マニュアル,検討,対応,指示,作業員,誤操作,従業員,
	② エラー,協力会社,誤操作,間違い,ミス
作業	① 検査,操作,工事,出荷,保全,変更,保守,スタートアップ,定期修理,定常運転,検収,
	② 締め,スチームトレース,施工,置換,定期修理,デコーキング,パージ,封入
異変	① 上昇,低下,発火,閉止,着火,拡大,アラーム,
	② 孔,引火,エロージョン,応急,開孔,外面腐食,空引き,逆流,緊急停止,クリープ,警報,減肉,孔食,コロージョン,詰まり,トリップ,内面腐食,避難,摩耗,緩み
被害	① 割れ,減肉,爆発,変動,損傷,
	② 炎上,死亡,シャットダウン,焼損,大事故破壊,暴露,破断,負傷,火傷
その他	① 現場,基準,要因,事例,内部,方法,部分,付近,状況,貯蔵,防止,設置,供給,対策,設計,開放,存在,開始,推定,評価,鎮火,製油所,定期的,公設消防,協力会社,自衛消防,施工管理,常圧,物質要因,早期,工事方法,
	② 液面,火気,加熱,気密,残存,残留,蒸気雲,熱応力,フレア,膨張,レベル

図 17 単語の分類木

#### (4) 活用方法

##### 1) ベイジアンネットモデルで推論した結果の表現方法

上記 (3) 2) で選択した 198 語の単語を利用し、構造学習によりベイジアンネットモデル (以下 BN モデル) を構築し、推論を行いたい単語を入力すると、関連性の高い単語や事例がランキングをつけて表示されるものとした。

具体的手順を以下に示す。

- ① BN モデルに単語をエビデンスとして入力して推論⇒エビデンス以外の全ての単語の事後確率値 (出現確率) を計算
- ② 推論で算出された事後確率値から各単語のスコアを計算⇒単語毎のスコアを事例単位で集計する。集計値が高い方が予測との一致度が高い。

- ③ ②の各事例のスコアの他、表 2 に示した分類ごとの事後確率ランキング、各事例の単語スコアランキングを作成

2) 利用の具体例

<原因からの推論>

表 2 で「装置」に分類した「オリフィス（（流体の流量調節や測定などの用途で開口した穴））」を入力単語（エビデンス）とした時の例を以下に示す。

- ① 「オリフィス」をエビデンスとして、関連する事例、単語を抽出（図 18）

（図 19：関連する事例のランキング、図 20：関連する単語のランキング）

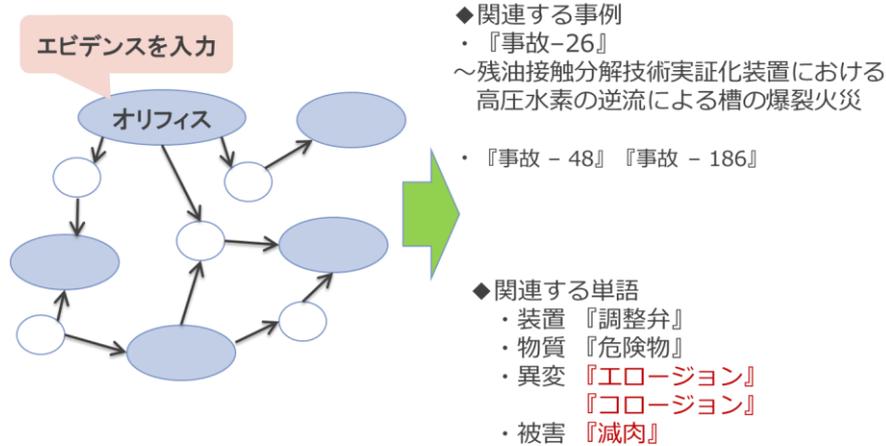


図 18 「オリフィス」から推論

事例の種類と番号	各事例に出現する単語のうち関連性が高いもの(1~5位)					事例のスコア
name	rank_1	rank_2	rank_3	rank_4	rank_5	1.スコア
1 Accident-26	1_装置_オリフィス	0_その他_付近	1_装置_弁	0_その他_存在	0_その他_自衛消防	104.778
2 Accident-48	1_装置_オリフィス	1_装置_調節弁	0_その他_付近	1_装置_発信器	1_装置_計装タツプ	100.504
3 Accident-186	1_装置_オリフィス	0_その他_付近	1_装置_弁	0_その他_自衛消防	5_異変_緊急停止	94.691
4 Accident-42	1_装置_オリフィス	1_装置_調節弁	0_その他_付近	1_装置_弁	0_その他_存在	94.522
5 Accident-181	1_装置_オリフィス	0_その他_付近	5_異変_エロージョン	5_異変_コロージョン	5_異変_緊急停止	88.758
6 Accident-1	1_装置_オリフィス	0_その他_付近	1_装置_発信器	1_装置_計装タツプ	0_その他_存在	85.746
7 Hiyari-171	1_装置_オリフィス	1_装置_調節弁	6_被害_減肉	0_その他_付近	1_装置_発信器	80.529
8 Accident-216	1_装置_計装機器	1_装置_弁	0_その他_存在	5_異変_緊急停止	5_異変_閉止	76.538
9 Hiyari-169	1_装置_オリフィス	1_装置_調節弁	6_被害_減肉	5_異変_エロージョン	5_異変_コロージョン	73.175
10 Accident-149	1_装置_調節弁	0_その他_付近	1_装置_発信器	1_装置_計装タツプ	1_装置_弁	73.085

図 19 「オリフィス」で推論した事例ランキング

	単語	スコア
	A1 - 1. A13▼	
1	1_装置_オフィス	46.166
2	1_装置_調節弁	5.234
3	1_装置_計装機器	1.911
4	1_装置_発信器	1.633
5	1_装置_計装タップ	1.611

	単語	スコア
	A1 - 1. A13▼	
1	2_物質_危険物	1.316
2	2_物質_静電気	1.229
3	2_物質_プロピレン	1.187
4	2_物質_アンモニア	1.159
5	2_物質_スロップ	1.149

	単語	スコア
	A1 - 1. A13▼	
1	3_人的_作業員	1.148
2	3_人的_誤操作	1.141
3	3_人的_指示	1.115
4	3_人的_間違い	1.090
5	3_人的_マニュアル	1.074

	単語	スコア
	A1 - A13 -	
1	4_作業_検査	1.296
2	4_作業_操作	1.209
3	4_作業_保全	1.016
4	4_作業_変更	1.006
5	4_作業_保守	1.031

	単語	スコア
	A1 - 1. A13▼	
1	5_異変_エロージョン	2.468
2	5_異変_コロージョン	2.047
3	5_異変_発火	1.414
4	5_異変_緊急停止	1.372
5	5_異変_閉止	1.343

	単語	スコア
	A1 - 1. A13▼	
1	6_被害_減肉	3.827
2	6_被害_焼損	1.268
3	6_被害_爆発	1.251
4	6_被害_火傷	1.248
5	6_被害_暴露	1.240

図 20 「オフィス」で推論した単語ランキング

② 「オフィス」に関連する事例の抽出（入力する単語を追加）（図 21）

上記①にて関連する単語としてスコアが高かった「エロージョン」「コロージョン」「減肉」を入力単語として追加する事により、「オフィス」のみをエビデンスとした場合と異なり、追加した単語もエビデンスとして加えた場合の状況について再計算され、再度スコアの高い事例、単語が抽出される。

（図 22：関連する事例のランキング、図 23：関連する単語のランキング）

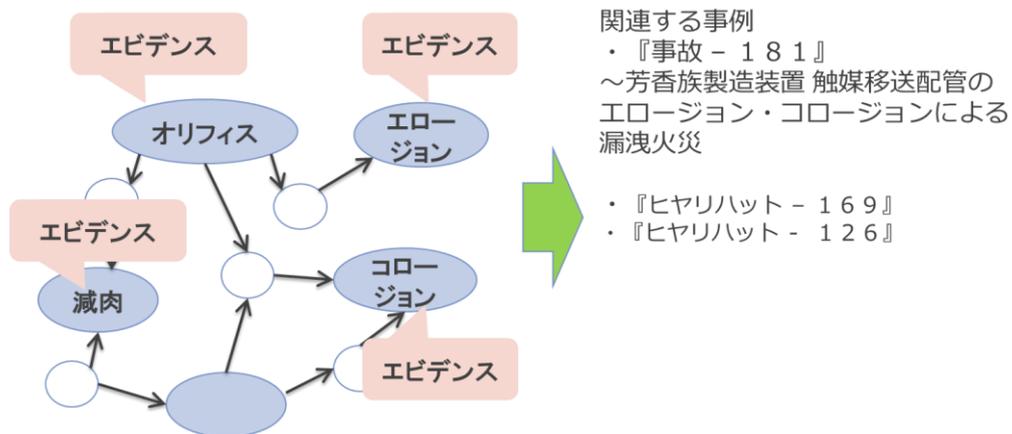


図 21 単語を追加して推論

事例の種類と番号

各事例に出現する単語のうち関連性が高いもの(1~5位)

事例のスコア

id	name	rank_1	rank_2	rank_3	rank_4	rank_5	1.スコア
180	Accident-181	1_装置_オフィス	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	2_物質_ガス	1_装置_計装	131.991
591	Hiyan-169	1_装置_オフィス	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_瀉肉	1_装置_調節弁	129.437
548	Hiyan-126	1_装置_オフィス	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_瀉肉	6_被害_シャットダウン	122.915
27	Accident-27	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_瀉肉	1_装置_計装機器	2_物質_ガス	106.206
94	Accident-95	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_瀉肉	4_作業_操作	2_物質_硫化水素	102.530
350	Accident-409	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_瀉肉	2_物質_ガス	4_作業_操作	101.441
26	Accident-26	1_装置_オフィス	1_装置_弁	5_異変_閉止	2_物質_ガス	0_その他_フレア	101.158
48	Accident-48	1_装置_オフィス	1_装置_調節弁	1_装置_発信器	1_装置_計装タブ	1_装置_弁	97.508
42	Accident-42	1_装置_オフィス	1_装置_調節弁	1_装置_弁	5_異変_閉止	0_その他_付近	93.296
278	Accident-286	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_瀉肉	2_物質_ガス	1_装置_ガス検知器	92.516

図 22 単語を追加して推論した事例ランキング

単語

スコア

	A1	1. A13
1	1_装置_オフィス	46.166
2	1_装置_調節弁	5.234
3	1_装置_計装機器	1.911
4	1_装置_発信器	1.633
5	1_装置_計装タブ	1.611

	A1	1. A13
1	2_物質_危険物	1.316
2	2_物質_静電気	1.229
3	2_物質_プロピレン	1.187
4	2_物質_アンモニア	1.159
5	2_物質_スロップ	1.149

	A1	1. A13
1	3_人的_作業員	1.148
2	3_人的_調操作	1.141
3	3_人的_指示	1.115
4	3_人的_間違い	1.090
5	3_人的_マニュアル	1.074

	A1	A13
1	4_作業_検査	1.296
2	4_作業_操作	1.209
3	4_作業_保全	1.016
4	4_作業_変更	1.006
5	4_作業_保守	1.031

	A1	1. A13
1	5_異変_エロージョン	2.468
2	5_異変_コロージョン	2.047
3	5_異変_発火	1.414
4	5_異変_緊急停止	1.372
5	5_異変_閉止	1.343

	A1	1. A13
1	6_被害_瀉肉	3.827
2	6_被害_焼損	1.268
3	6_被害_爆発	1.251
4	6_被害_火傷	1.248
5	6_被害_暴露	1.240

図 23 単語を追加して推論した単語ランキング

③ 『オフィス』に関連する事例の抽出（さらに単語を追加）（図 24）

上記②にて関連する単語としてスコアが高かった「硫化水素」を入力単語として更に追加する事により、更にエビデンスを増やした条件で再計算され、再度スコアの高い事例、単語が抽出される。

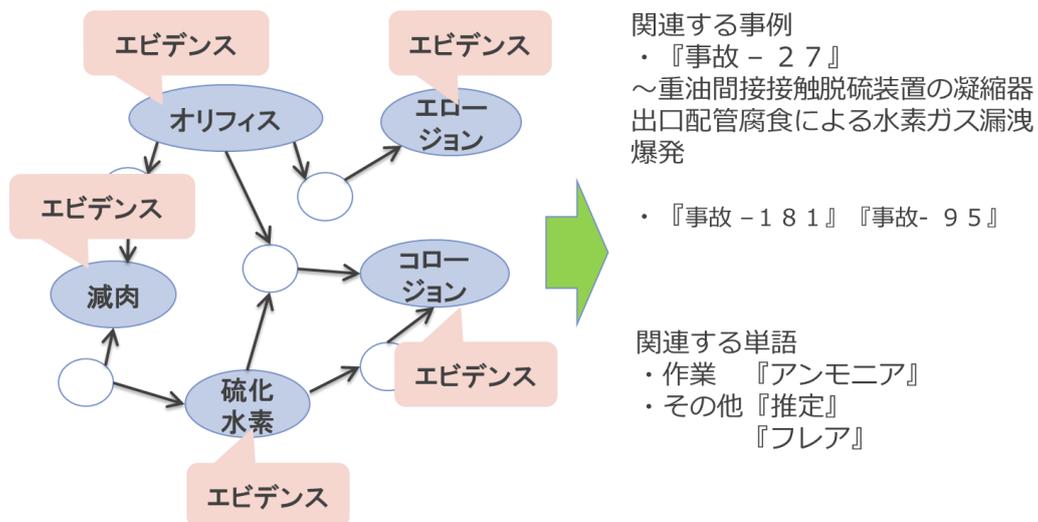


図 24 さらに単語を追加して推論

④ 『オリフィス』に関連する事例の抽出（単語を減らす）（図 25）

上記③にてエビデンスに用いた単語から、「エロージョン」「コロージョン」「減肉」といった異変に関する単語を減らし、物質としての「硫化水素」に焦点を当てた場合の推論を行うこともできる。また、「オリフィス」のエビデンスから外し、異変である、「エロージョン」「コロージョン」「減肉」をエビデンスとして、異変から遡って、関連する原因（装置、物質、人的、作業）等について推論することも可能でありベイジアンネットによる解析の利点でもある。

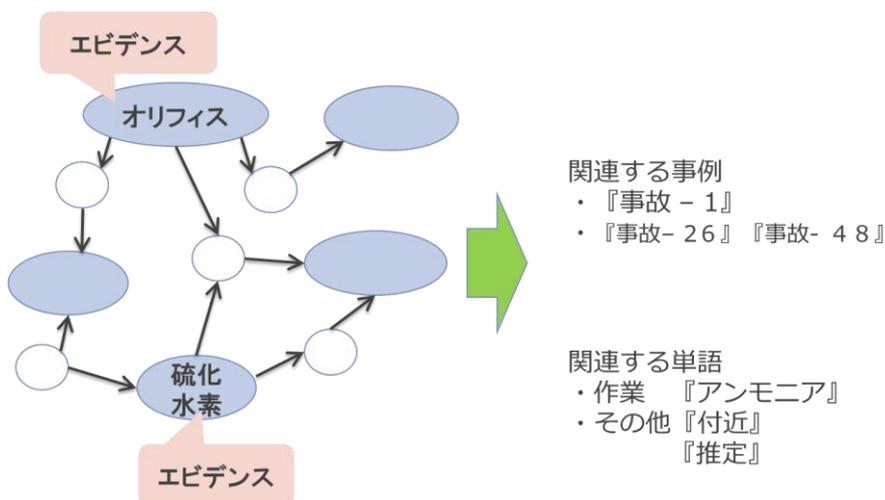


図 25 単語を減らして推論

<結果からの推論>

表 2 で「被害」に分類した「死亡」を入力単語（エビデンス）とし、事故の「結果」にした時の例を以下に示す。

- ① 被害『死亡』を入力単語とし、関連する事例の抽出を行う（図 26）。

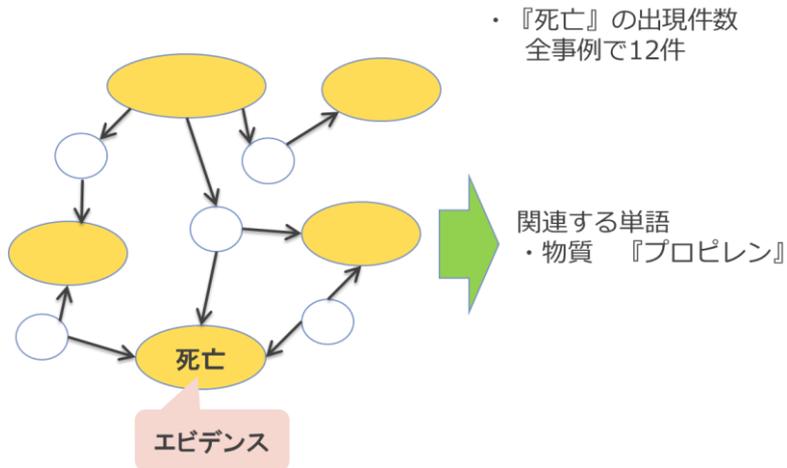


図 26 「死亡」からの推論

- ② 『死亡』に関連する事例の抽出（『プロピレン』を追加）（図 27）

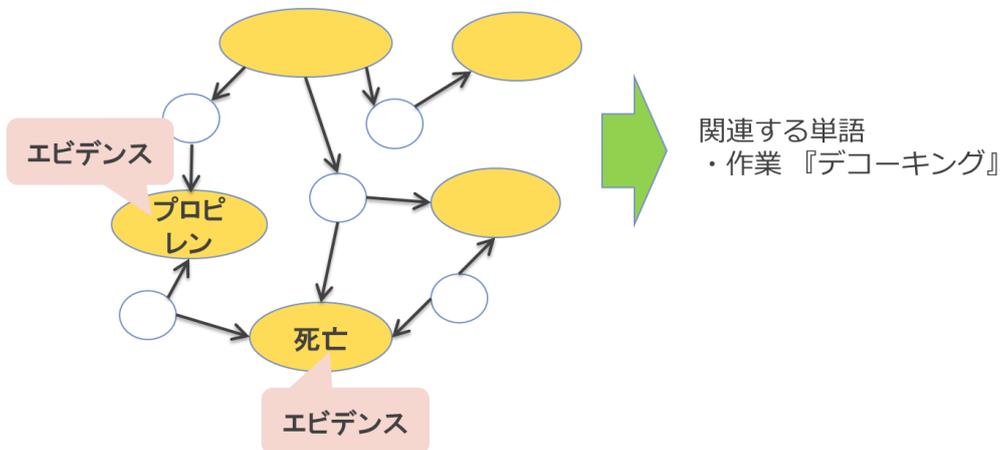


図 27 「プロピレン」を追加して推論

- ③ 『死亡』に関連する事例の抽出（『プロピレン』『デコーキング』を追加）（図 28）  
関連する事例のランキングを図 29 に示す。

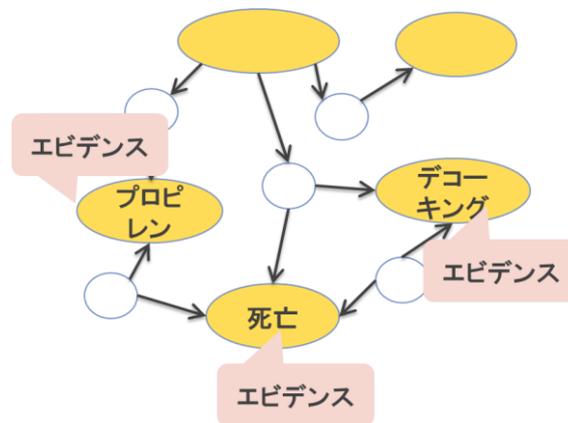


図 28 「プロピレン」「デコーキング」を追加して推論

事例の種類と番号	各事例に出現する単語のうち関連性が高いもの(1~5位)							事例のスコア
id	name	rank 1	rank 2	rank 3	rank 4	rank 5	1.スコア	
215	Accident-216	4_作業_デコーキング	2_物質_プロピレン	6_被害_死亡	2_物質_エチレン	1_装置_製造装置	231.351	
185	Accident-186	4_作業_デコーキング	2_物質_エチレン	3_人的_間違い	1_装置_炉	1_装置_製造装置	163.408	
187	Accident-188	4_作業_デコーキング	2_物質_エチレン	1_装置_炉	1_装置_製造装置	2_物質_ナフサ	153.485	
44	Accident-44	4_作業_デコーキング	3_人的_間違い	1_装置_炉	1_装置_バーナ	1_装置_加熱炉	144.909	
17	Accident-17	4_作業_デコーキング	1_装置_炉	1_装置_バーナ	6_被害_火傷	1_装置_加熱炉	143.326	
93	Accident-94	4_作業_デコーキング	1_装置_炉	1_装置_バーナ	1_装置_加熱炉	6_被害_爆発	138.349	
36	Accident-36	2_物質_プロピレン	3_人的_間違い	6_被害_負傷	0_その他_火気	0_その他_鎮火	133.841	
200	Accident-201	4_作業_デコーキング	2_物質_エチレン	1_装置_炉	1_装置_製造装置	2_物質_ナフサ	128.845	
262	Accident-265	2_物質_プロピレン	6_被害_死亡	6_被害_負傷	1_装置_製造装置	6_被害_大事故	124.895	
195	Accident-196	4_作業_デコーキング	2_物質_エチレン	3_人的_間違い	1_装置_炉	1_装置_製造装置	124.280	

事件事例 216 ~

『エチレン製造装置アセチレン水素化塔の暴走反応・大規模火災』

図 29 関連する事例のランキング

### 3) 利用方法まとめ

以下に利用方法の検討結果についてまとめた。

- 調査対象の単語を入力し、ベイジアンネットモデルで推論により入力単語に関連性の高い事例 及び 単語を抽出できることを示した。
- 抽出した結果から、更に入力語を増やして推論を行うことでより関係が高い事例の抽出を行うことができる。
- 対象とする単語を追加することで、探索範囲を広げることができる。
- ベイジアンネットモデル自動作成により、当初は見えなかった項目間のつながりに気が付くなど、新しい知見が得られる可能性がある。
- 事例を調査する際など、関連度の高い事例や単語を優先できるので効率的に調査を行うことができる。

## (5) 課題と必要な技術開発項目

今回のトライアルでは単語の意味や関連性等の情報は無視して解析を行った事により、複数事例について横断的な解析が可能であることがわかった。但し、単語が意味する情報が解析に反映されていないため、より詳細な解析を行うためには、単語に関する情報を付与する仕組みが必要となる。例えば、以下に示す、「簡易的なオントロジー」を利用して情報を付加する事により、解析の精度・有効性の向上が期待できる。今後は、「簡易的なオントロジー」の作成・利用についての検討が必要である。

<簡易的なオントロジーの例>

- 語義の情報の付与（同義語、反意語、多義語、上位/下位後関係）
- 単語の化学的な意味：薬品機能、装置機能、化学反応
- 故障の形態：～停止、～漏れ
- 出来事概念：出来事  $X \Rightarrow$ 「A が B に X する」、因果関係（C は X の原因）

### 3.1.2. 技術資料を基にしたオントロジー構築トライアル

#### (1) トライアルの手順

設備や操業のトラブルとその対策の記述に優れたものとして、以下①～③の3種類の分解木から構成するものを検討した。

- ① 設備が本来果たすべき機能の分解木
- ② 設備の不具合の分解木
- ③ ②に対して人が行うべき対策の分解木

これらの分解木を記述し、互いに関連付けることによってトラブル防止の対策を明らかにする事ができる。なお、①～③は必ずしもすべてを作成する必要はなく、対象に応じて選択する。今回対象とした配管維持規格では、①に相当する部分がなかったので、②と③で構成するものとした。

図 27 の概念図では、フランジボルトの不具合と配管の腐食を原因として火災が生じるまでのメカニズムを記述している。この分解木で、「流路に開口部ができる」という事象は、「フランジ部に隙間ができる」または「配管に穴が開く」のいずれかで生起されるものなので、方式ノードを2つ用いて OR であることを示している。一方、「火災が発生する」には、「内容物が漏洩する」と「着火する」が共に起きたときに生じるものなので、方式ノード1つに集約し、AND であることを示している。また、対策のノードをいくつか設け、それによってどの不具合のノードが解消できるかを示している。図 30 では省略しているが、対策は③の対策の行為分解木として別途分解して詳述することができる。例えば、ボルトの適正締付力や点検方法を分解木として記述できる。



図 30 機能オントロジーの概念図

対策の分解木の例を図 31、それを図 30 の不具合の分解木に対応付けた例を図 32 に示す。

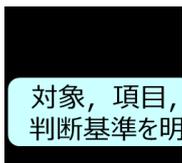


図 31 対策の分解木



図 32 不具合の分解木と対策の分解木の対応付けの例

また、不具合の分解木は図 33 のように掘り下げることができ、図 34 のように分解木をクリックするなどにより詳細な部分まで参照可能となる。



図 33 掘り下げた不具合の分解木



図 34 不具合の分解木の掘り下げ

蓄積された事故事例やヒヤリハットの情報は、図 35 のように不具合の分解木の枝に紐づけることができるので、類似した事故やその対策の検索、原因の分類や重大性の評価などの解析に用いることができる。

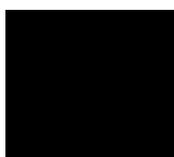


図 35 分解木と事故事例やヒヤリハット事例の紐づけ

## (2) オントロジー構築

石油学会の配管維持規格（JPI-8S-1-2018）<sup>17</sup>の目次を参考に、その内容を表 3 まとめた。本トライアルでは、3 章の用語の定義を除く表 1 のすべてについて分解木<sup>18</sup>を作成した。

表 3 配管維持規格（JPI-8S-1-2018）の内容



### 1) 配管維持規格の構成の分解木表現

配管維持規格の構成の分解木表現を図 36 に示す。本トライアルで EXCEL シート上に構築した分解木では各ノードにリンクを設けることにより、それをクリックすることで、例えば図 37 のように各章の分解木の主要部を開くことができ、さらにそれをクリックすることで詳細を見ることができるようになる。

---

<sup>17</sup> 引用文献：公益社団法人石油学会が発行する石油学会規格 配管維持規格（石油学会規格 番号：JPI-8S-1-2018）

<sup>18</sup> 分解木は配管維持規格（JPI-8S-1-2018）の記載内容を参考に作成

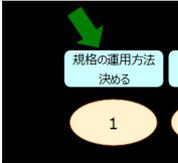


図 36 配管維持規格の構成の分解木表現

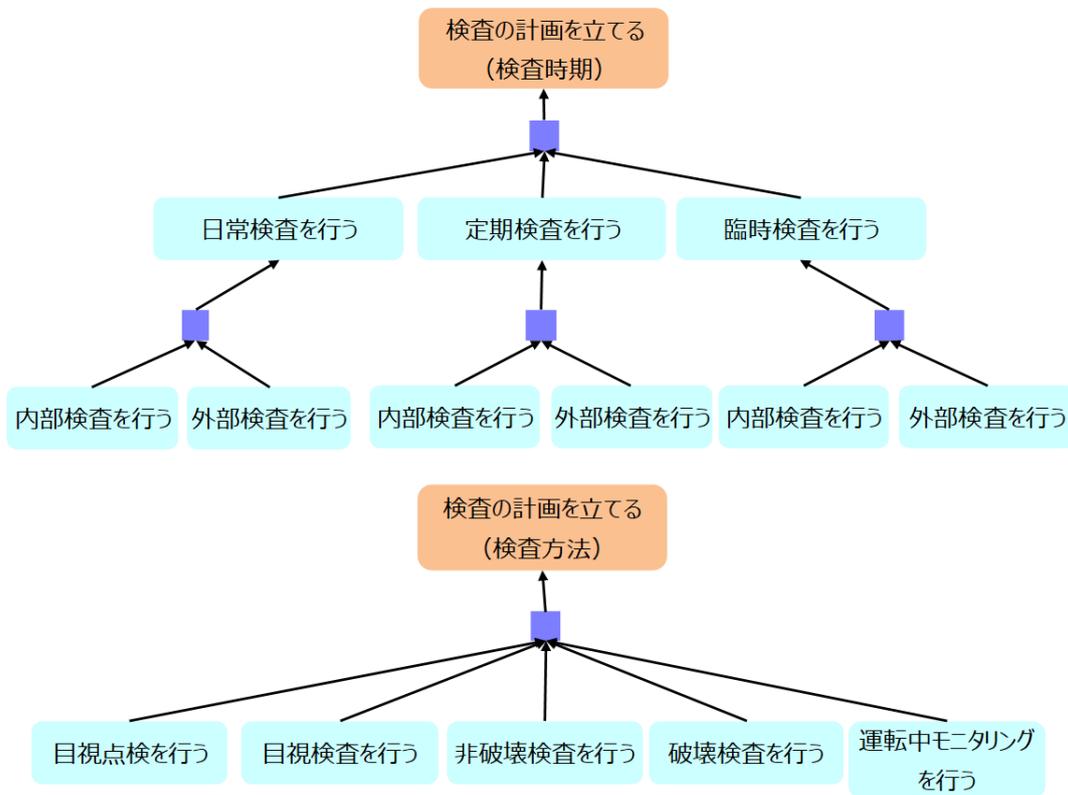


図 37 「4 章 検査の計画を立てる」の構成の分解木表現

2) 不具合の分解木と事例の対応付けの例

具体的な不具合の分解木の 2 つの例について説明する。「4. 配管系の管理 4.1 一般」の分解木を図 38 に示す。

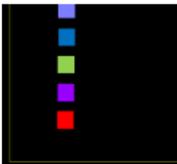


図 38 「4.配管系の管理 4.1 一般」の分解木

「5.1 腐食・エロージョンの検査」の分解木を図 39 に示す。

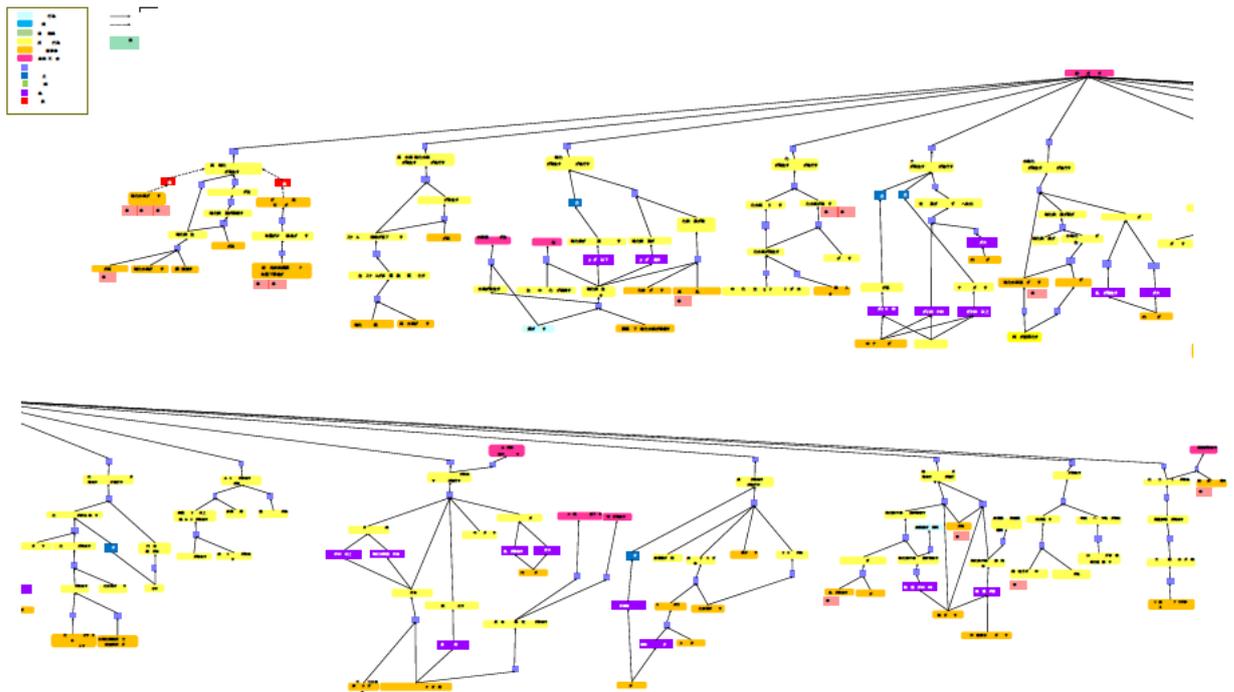


図 39 「5.1 腐食・エロージョンの検査」の分解木

高温硫化物腐食に関する部分の分解木を図 40 に示す。

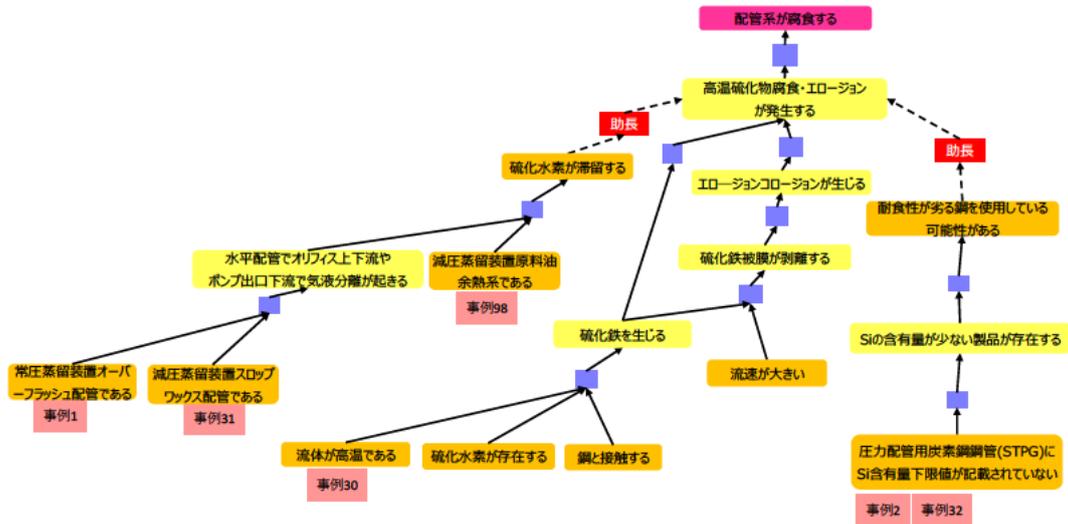


図 40 高温硫化腐食に関する部分の分解木

図 40 では、事事故事例をノードの近くに置いている。実際のシステムでは、これらのボタンをクリックすることで、当該事例が生じたメカニズムだけを抽出して表示するようにする。例えば、図 41 に示した事例 30 では、高温硫化物腐食が生じる主たるメカニズムとともに、寿命評価を行う部位が不適切だったことが要因であるため、主たるメカニズムを表示するとともに、検査箇所の選定に関連した分解木にリンクし、さらに事故の報告書にリンクを張り、クリックすることで参照可能とする。

逆に、事例 DB からメカニズムや検査箇所の選定に関する分解木を参照することも可能である。

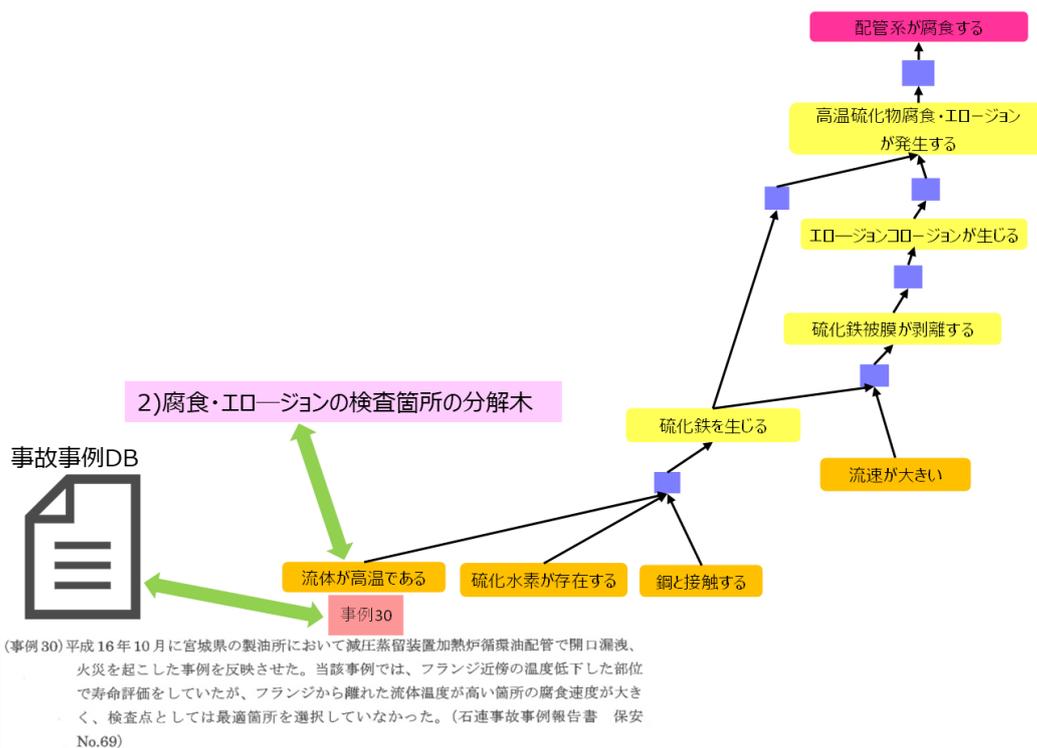


図 41 高温硫黄腐食の部分の分解木

同様に、図 42 に示す事例 2、32 では、主たる腐食メカニズムに加えて耐食性が劣る鋼の使用がそれを助長していたことが要因であるため、関連する分解木の枝を抽出して示している。

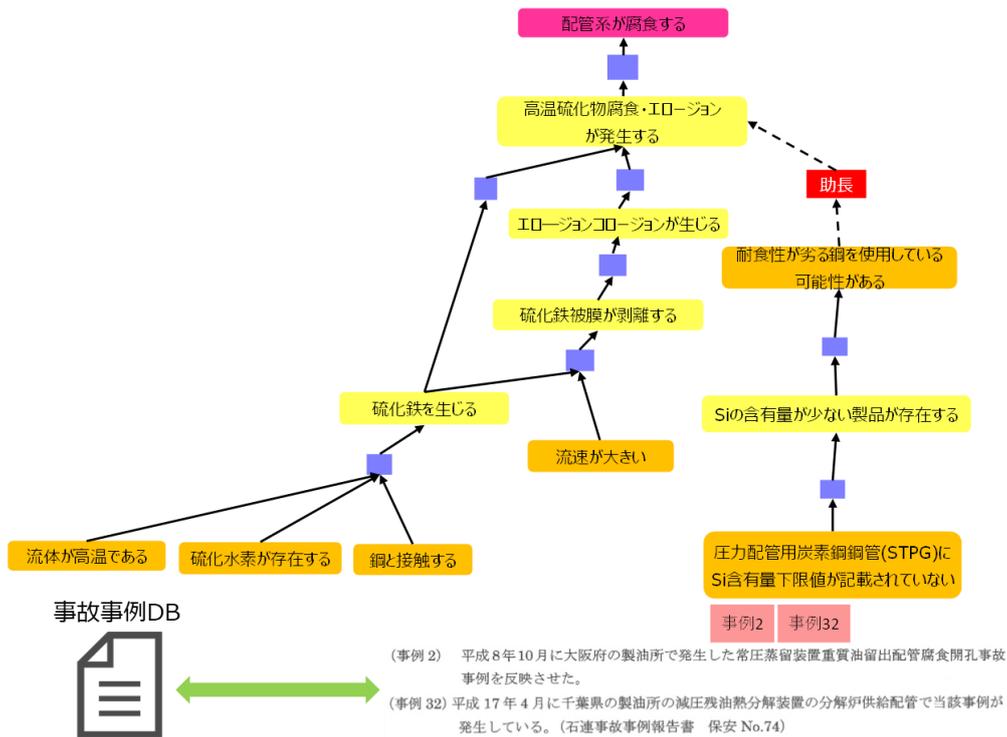


図 42 分解木と事例の対応付け (事例 2、32)

また、図 43 に示す事例 1、31、98 では、主たるメカニズムに加えて硫化水素が滞留する部位であったことが助長しているので、それらの分解木の枝を抽出し、報告書にリンクする。分解木では、具体的な発生部位に共通することとして、腐食性ガスが滞留する部分であると記述されているので、これらの事例の部位でなくても、滞留する場合には気を付けるべきであるという気付けきを与えられ、応用力を高められる。これが本技術の重要なポイントである

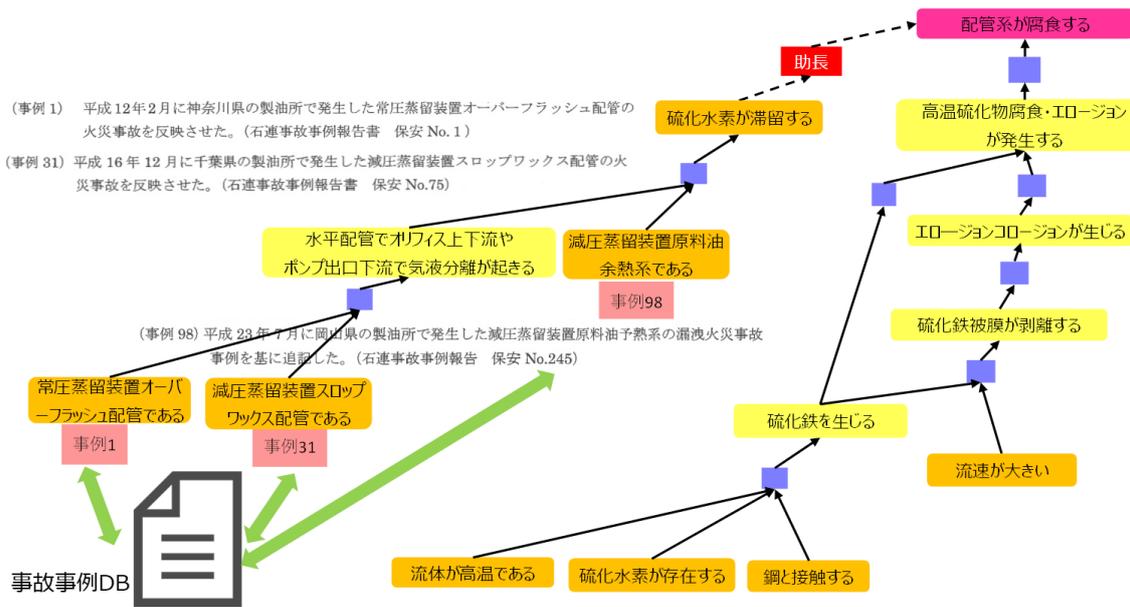


図 43 分解木と事例の対応付け（事例 1、31、98）

また、多くの事例が主たるメカニズムに加えてそれを助長するメカニズムが働いているので、図 44 のように、事例のリンクはその両方の分解木のノードに置くのがよい。

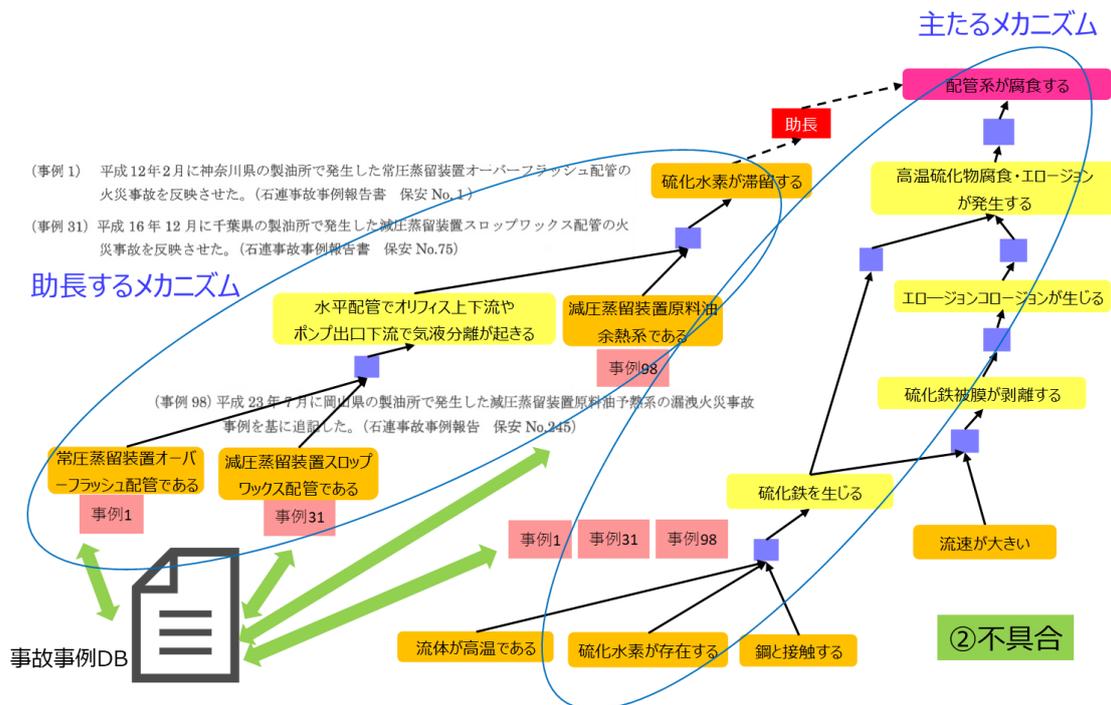


図 44 メカニズムと事例の対応付け

3) 対策の分解木と事例の対応付けの例

具体的な対策の分解木の2つの例について説明する。「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」(クリープ損傷)の分解木を図45に示す。

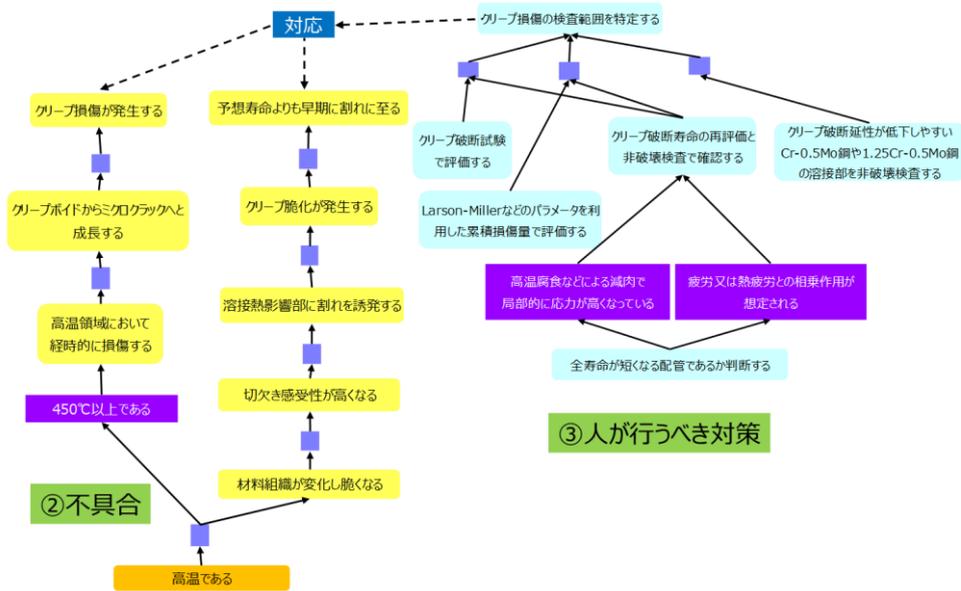


図 45 「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」(クリープ損傷)の分解木

「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」(疲労)の分解木を図46に示す。

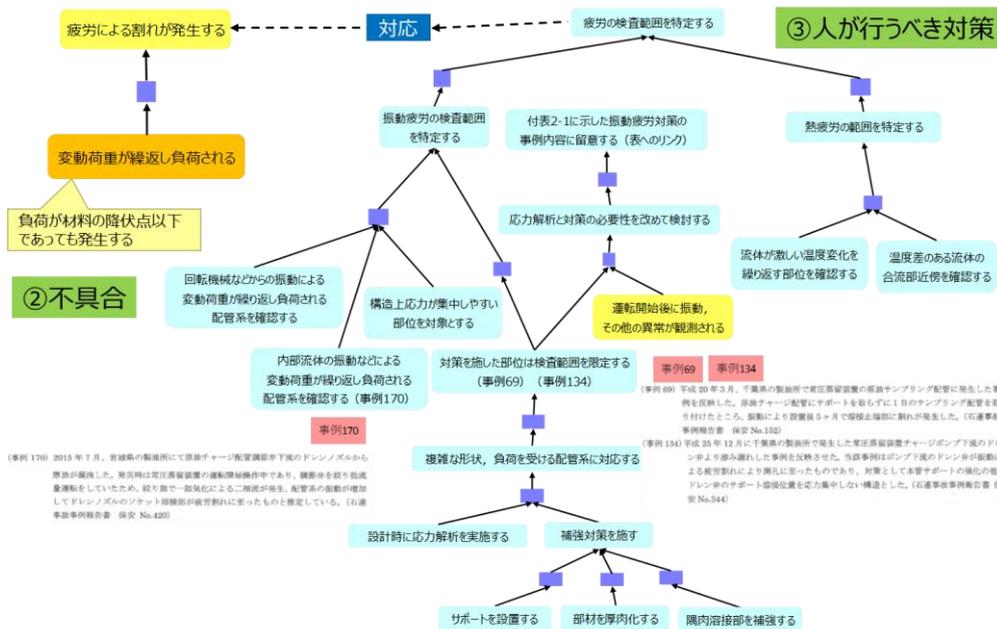


図 46 「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」(疲労)の分解木





図 48 配管維持規格の分解木の構成

本技術を①設備が本来果たすべき機能を含むような別の維持規格に適用することも可能であるが、ここでは、鉄鋼材料の分解木を例に挙げて設備本来の機能、不具合、対策の分解木の対応付けについて説明する。

図 49 は鋼の強化機構の分解木であり、鉄鋼材料が本来果たすべき機能の分解木である。これに、元素を添加することによる副作用としての不具合を追記したものが図 50、さらにそれを防止するための対策を加えたものが図 51 のようになる。

このように、3 種類の分解木を用いることにより、本来のメカニズムを理解した上で、起こり得る不具合をあらかじめ想定して対策を取っておくことが可能となる。

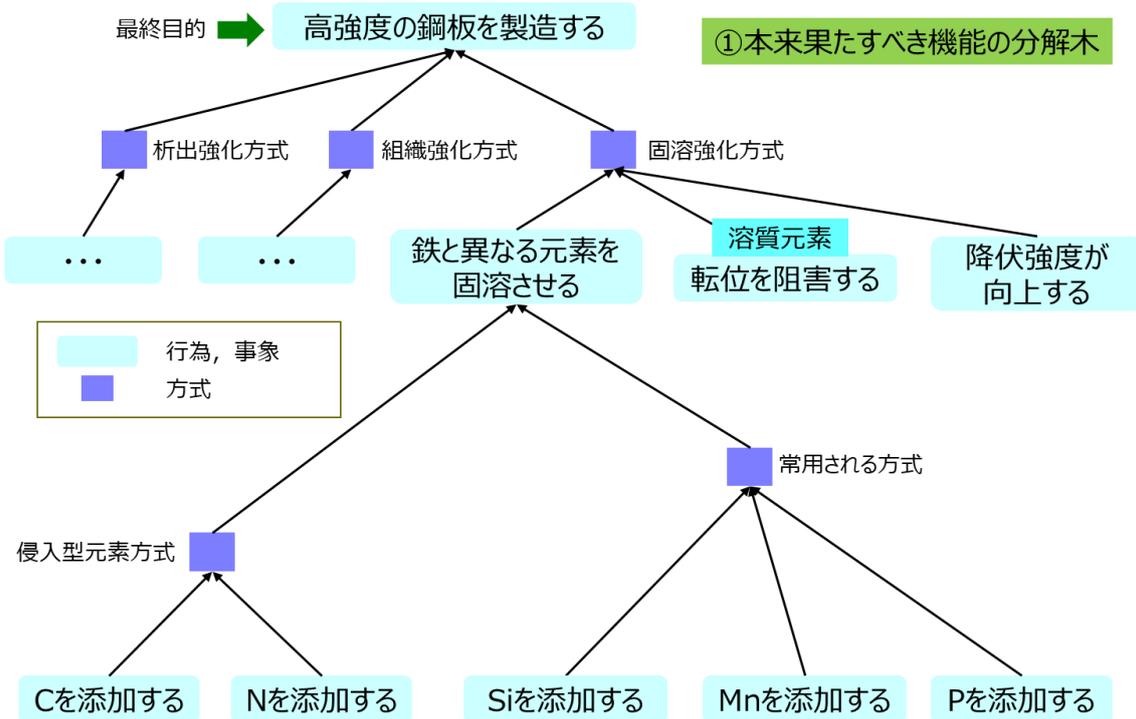


図 49 鋼板の強化機構の分解木 (① 本来果たすべき機能)

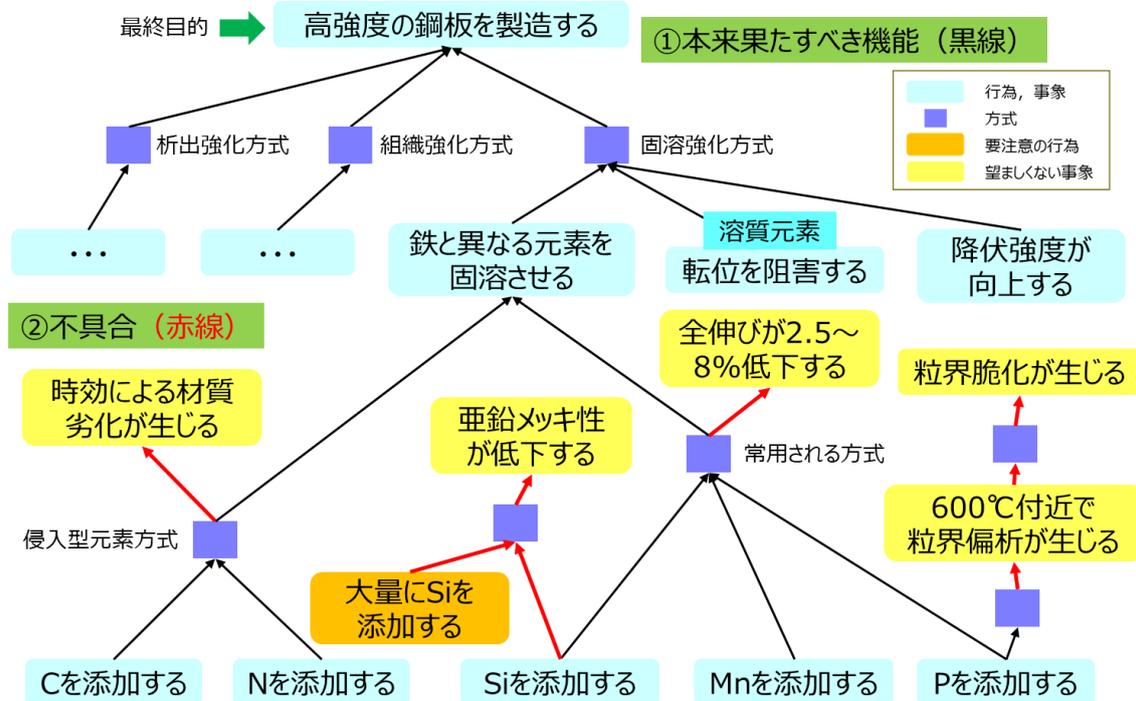


図 50 鋼板の強化機構の分解木 (本来果たすべき機能+不具合の分解木)

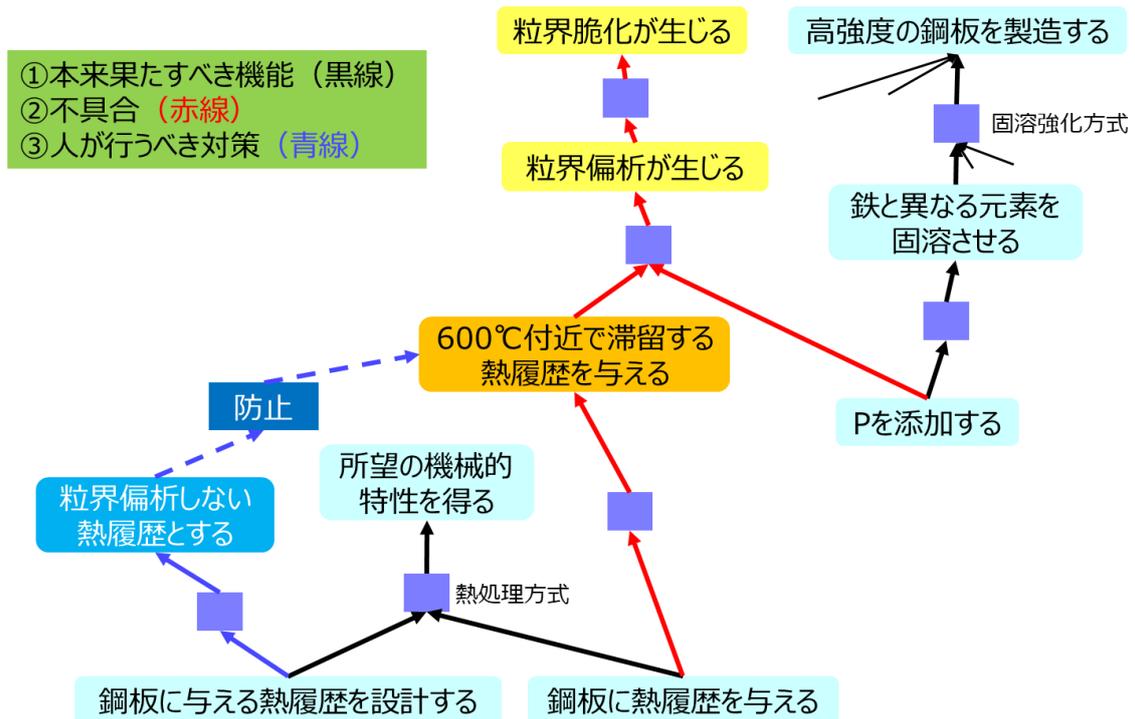


図 51 鋼板の強化機構の分解木（本来果たすべき機能+不具合+対策の分解木）

### (3) 活用方法

本技術では、知識をコンパクトに集約し、体系化することができる。これによって以下が可能となる。

- 専門家、熟練者の知見、経験、ノウハウを整理し、保存、伝承、共有化する
- 教育に活用する。例えば、体系化された構造化マニュアルとして利用し、詳細は元の文書にリンクを張って参照できるようにする
- 現場の作業手順、注意点、トラブルシューティングなどのガイダンスとして利用する（現場での活用のため、可搬性、操作性に優れたタブレットで分解木を閲覧するシステムの開発が可能）

また、分解木を用いてトラブル事例の整理・解析を行うことができる。データベースに蓄積された事故事例やヒヤリハットを対応する分解木の枝に紐付けることにより、分解木とデータベースを相互に参照可能し、類似した事故やその対策の検索、原因の分類や重要性の評価などの解析に利用する。

不具合の分解木は、設備の設計・施工の不備や劣化などの根源的な原因から、設備の破損、故障、事故のような望ましくない、あってはならない最終的な帰結に発展するまでのメカニズムを記述したものである。データベースに蓄積された事故事例やヒヤリハットの情報は、不具合の分解木の枝のいずれかに紐づけることができる。もし対応する枝が存在しない場合には、それがこれまでにない

メカニズムで生じたことになり、分解木に新たな枝を追加する必要があることになる。類似した事故やその対策の検索、原因の分類や重要性の評価などの解析に用いることができる。

図 52 は、不具合の分解木を事例と対応づけることにより、不具合事象、メカニズムの重要性の評価に用いる例を示したものであり、対応する事例の数によってノードとノードを結ぶ線（リンク）の太さを変えて表示している。これにより、重要なメカニズムを明瞭に可視化することができる。

また、不具合の分解木には、その対策の分解木が関連付けられており、事例は対策の分解木にも対応付けることができる。対策の分解木では、設備の設計・施工、保安・保全、作業上の注意点などが具体的に記述されるので、利用者の熟練度によらず適切な対策を取ることができるようになる。

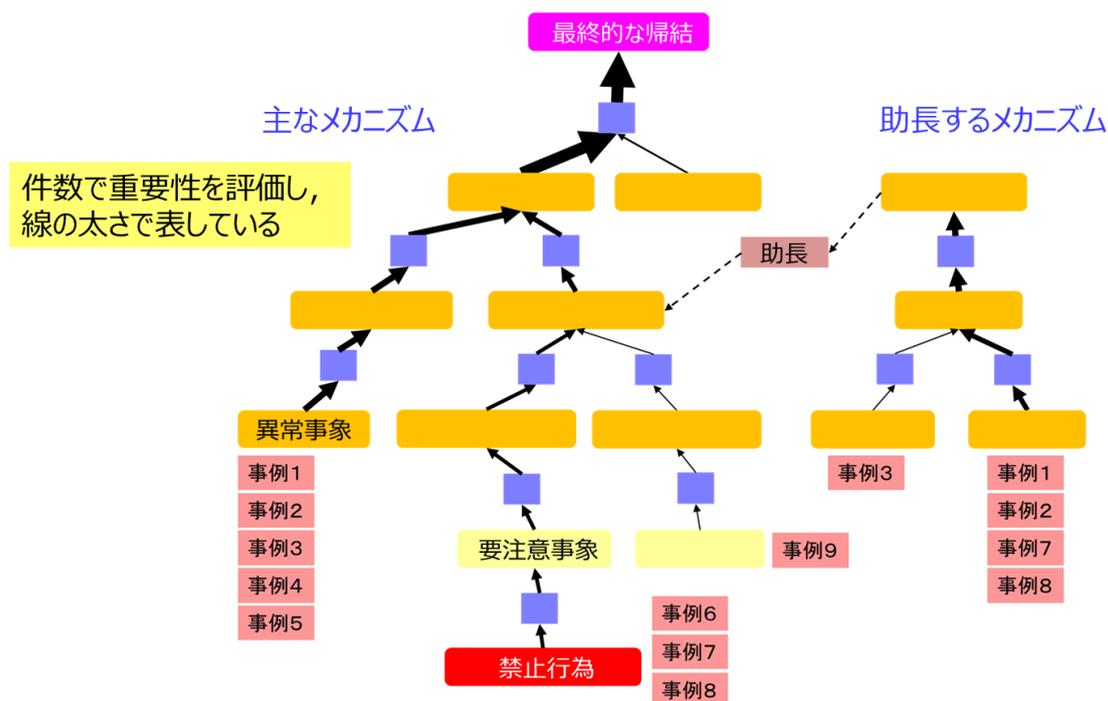


図 52 不具合事例、メカニズムの重要性の評価

#### (4) 課題と必要な技術開発項目

石油学会の配管維持規格を対象としてオントロジー構築トライアルを行い、機能オントロジーが記述可能であることを示した。また、オントロジーに事象事例等を紐づけることにより、技術的情報に基づいた「気づき」を得る事が出来、更に派生する現象や根本原因の考察にも利用可能となり、操業、保全、教育など、各フェーズで利用可能（技術的情報に基づいているため）となる事がわかった。更に、システム化により、現場でタブレット等を用いて利用する事も期待できる。

一方、今回のオントロジー構築トライアルは、機能オントロジーを記述し、その利用方法について考察する事を主眼としており、実利用を想定したシステム化の検討までは行っていない。今後は、ユーザーの期待する利用方法等を参考にした検討が必要である。

また、機能オントロジーの作成や各事例との紐づけに加えて、新規情報追加によるオントロジーのアップデートは、現時点では人手での対応となる。継続的に運用していくためには、オントロジーの維持管理についても、その体制や効率化のための技術（自動化技術）を含めて検討が必要である。

### 3.1.3. 解析技術の連携利用

今回トライアルを実施した、「テキストマイニング・ベイジアンネットによる解析」では、事件事例等のテキスト情報をそのまま解析する事により、気掛かり事項について、端的にヒントを提示できる事に特徴として挙げられる。一方、「オントロジー構築」による解析では、オントロジーにより体系化された技術情報をベースにした詳細な解析が可能となる点が特徴として挙げられる。

例えば、それぞれのトライアルで、「オリフィス」に関連した事例について解説している部分がある（図24、図44）。「テキストマイニング・ベイジアンネットによる解析」で推論されたキーワードである「コロージョン」「エロージョン」「硫化水素」「減肉」については、「オントロジー構築」により作成した高温流物腐食に関する分解木にも登場しており、両者を組み合わせる事により「原因・結果のキーワード抽出」に加えて、それに対する「理論的な関係性・関連事項」を補完する情報についても合わせて得ることができる（図53）。この様に、「保安（安全）情報PF」においては、両者を連携させた利用（図54）についても検討が必要と考える。

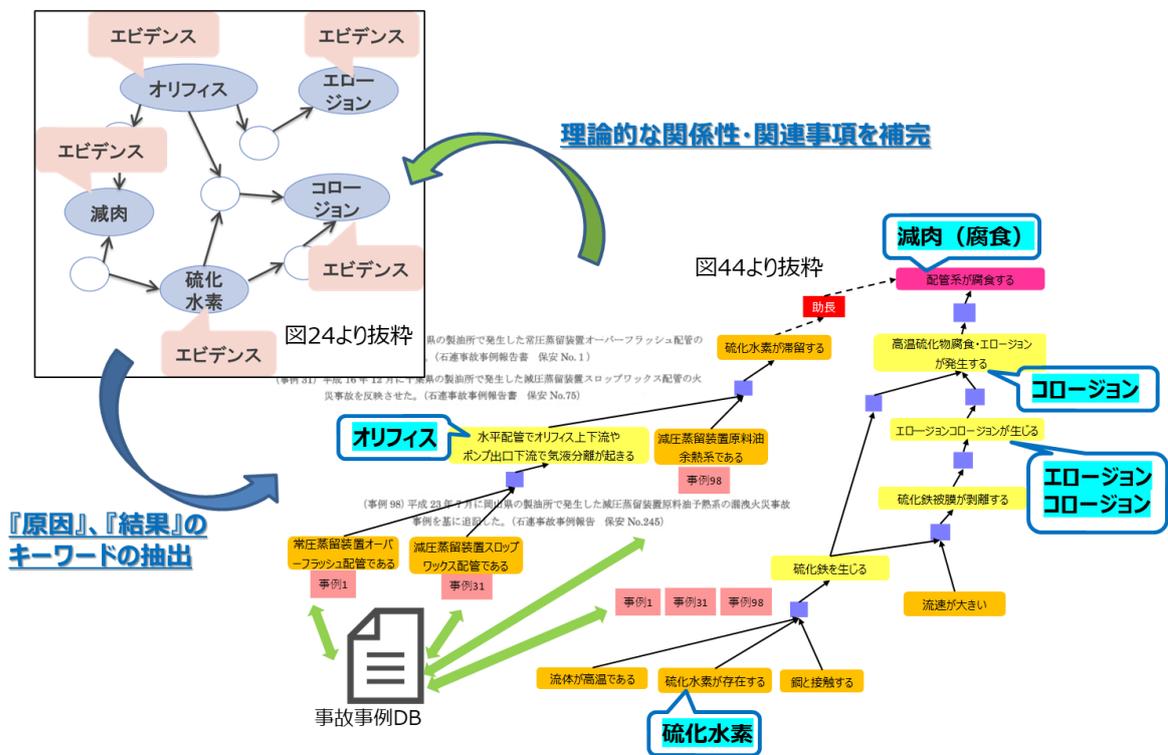


図 53 「テキストマイニング・ベイジアンネット」と「オントロジー」の連携した利用例

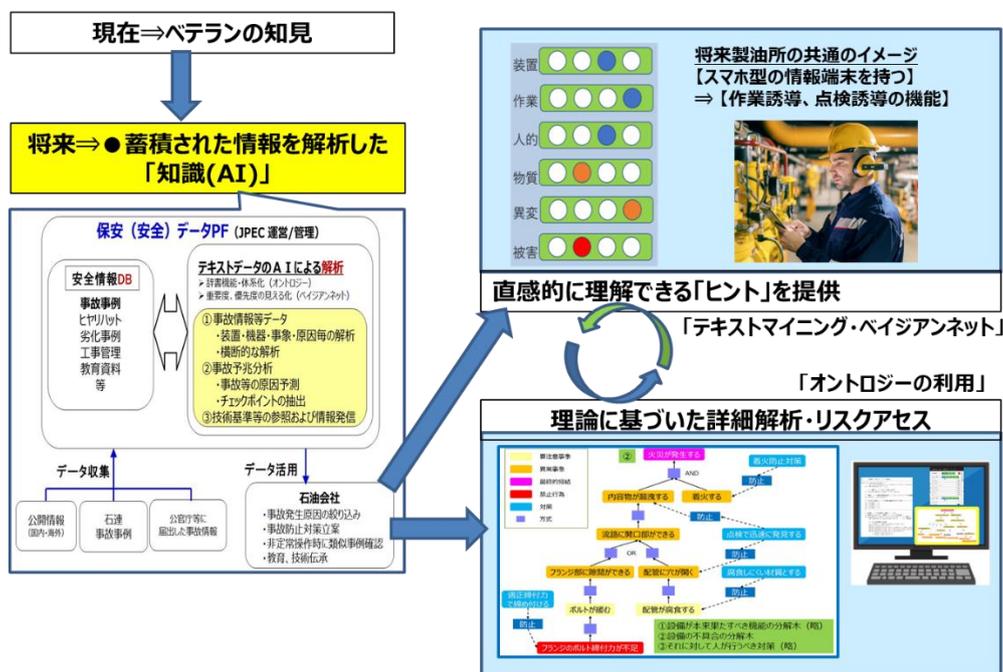


図 54 「保安（安全）情報 PF」での連携利用

### 3.1.4. 保安（安全）データ PF の課題と実用化の方策

本調査では、PF で利用する解析技術として想定している「テキストマイニング・ベイジアンネット」「オントロジー」についてトライアルを行い、その有効性について確認したが、実際に PF 上での実利用を想定しての検討は未着手である。

PF 実用化のためには、今後以下についての取組が必要である。

- 解析技術：解析ツール（テキストマイニング・ベイジアンネット・オントロジー）を PF に活用するための検討（活用のための創意工夫）
- PF 全体構成：システム化のための課題抽出と構築のための計画作成
- データ採取の仕組：石連データ、公的データ（データ共有事業者認定の取得により入手）利用の検討

図 55 に今後の取り進め案を示す。令和 3 年度は、トライアルを行った技術を活用した全体構成について、利用時だけでなく、維持管理にも大きな労力が掛からない仕組みとする事を基本とし、上記の「解析技術」「PF 全体構成」「データ採取の仕組」について検討し、令和 4 年度からは、PF の試作と課題抽出を行い、PF 公開にむけての実作業へと繋げていく事が必要である。

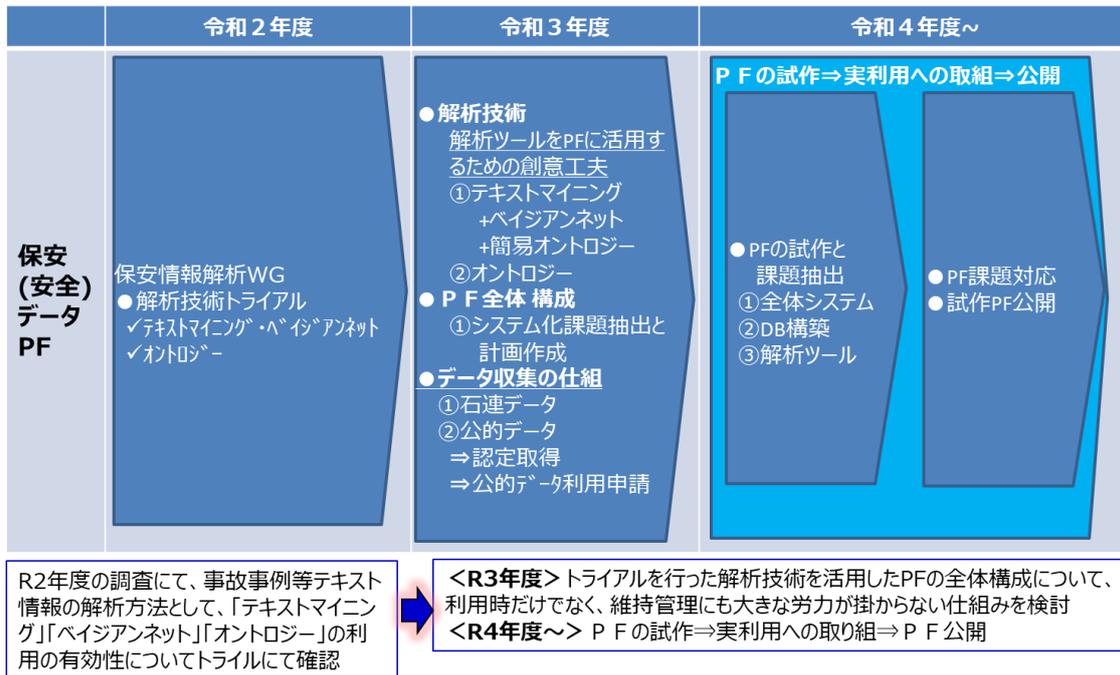


図 55 今後の取り進め案

### 3.2. 保全（解析モデル）PF

#### 3.2.1. PFの具体的な仕様

令和元年度調査でまとめたPF全体構成（図56）をベースに、PFの具体的な仕様について検討した。尚、検討にあたっては、「令和2年度補正予算産業保安高度化推進事業 運転データを活用した配管内面腐食AI予兆診断システム構築事業」<sup>19</sup>で、日揮(株)・(株)インフォキューブ LAFLAにて利用しているPFの仕組みの活用を想定した（図57 補正予算事業概要、図58 PF全体イメージ、図59 データ収集PFシステム構成イメージ）。

<sup>19</sup> \*5 [https://www.fdma.go.jp/relocation/neuter/topics/fieldList4\\_16/pdf/r02/01/s\\_hiryu5.pdf](https://www.fdma.go.jp/relocation/neuter/topics/fieldList4_16/pdf/r02/01/s_hiryu5.pdf)

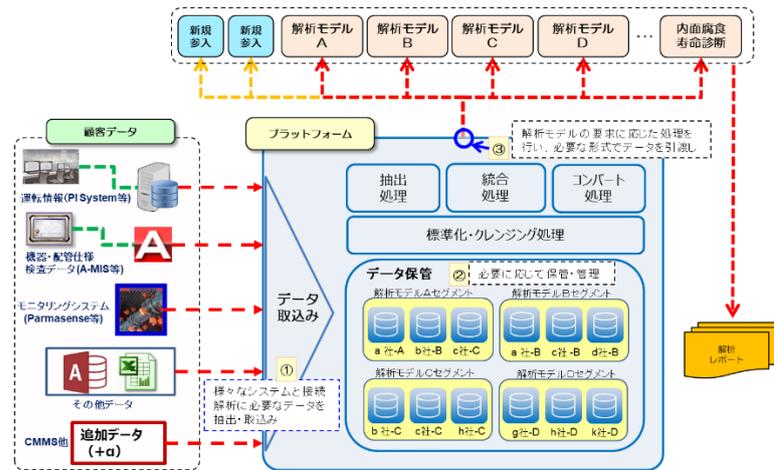


図 56 PF 全体構成

事業者名	日揮 株式会社(幹事事業者)、株式会社インフォキューPLAFLA (コンソーシアム事業者)
事業概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>石油精製・石油化学業界では、AIによる腐食疲労等劣化を原因とした事故の未然防止や、ベテラン保全員の減少に対する業務サポートが求められている課題となっている。</li> <li>データ収集から解析、予兆診断、検査・工事計画のサポートまでをワンストップで提供、設備保全現場の効率化・省力化に貢献し、併せて事業継続計画 (BCP) への対応を目的とした、配管内面腐食AI予兆診断システムを開発する。</li> <li>本実証後は、「データ収集システム」を機能強化し、他事業者・他業界のプラントデータと種々の解析モデルを繋ぐ「業界標準プラットフォーム」としての展開を目指す。</li> </ul>
配管保全工程におけるAI適用範囲	<p>実証するAIの適用範囲と役割</p> <p>データ収集・クレンジング</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>AI予兆診断・保全計画に必要なデータを人手に頼らず、リモート環境でも実施可能な、効率的なデータ収集システムを開発する。</li> <li>データクレンジングに関する判断基準をAI予兆診断モデルに取り込むことで、保全員の経験に寄らない、バツキの無い判断を提供する。</li> </ul> <p>データ解析・データ評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>運転環境の変動と配管肉厚(腐食率)データをインプット・学習させることにより、配管内面腐食を予測・予兆診断が出来るAIモデルを開発する。</li> <li>運転環境の変動を監視する事で、急激な腐食が予測される場合にはアラートを出すなど、トラブルを未然に防ぐことが出来るAI予兆診断システムを構築する。</li> </ul> <p>検査・工事計画</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>AIリコメンド機能による信頼性の高い配管検査・工事計画のサポートを提供。若手保全員であっても、高精度の判断が可能になる。</li> </ul> <p>検査・工事</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aを用いてサポートをすることにより、若手保全員であっても、高精度の判断が可能になり、ベテラン保全員の判断ロジックを取入れることで技術伝承にも繋がる。</li> </ul>
期待される効果	<p>【保安力向上効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>運転変動を取入れたAI予兆診断を行う事により、漏洩トラブルを未然に防ぐことが可能。</li> <li>腐食速度に影響を及ぼす運転パラメータを明確化することで、運転の効率化を図りつつ、運転精度の向上が可能。</li> </ul> <p>【現場作業の省力化・無人化】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>AI予兆診断システムがリモートでデータ収集・解析することにより、有事の際にも遠隔で腐食状況の予測が可能。</li> </ul>
実証事業完了後の事業イメージ	<p>JPEC</p> <p>日揮</p> <p>A社 A解析モデル | AI解析モデル | B社 B解析モデル</p> <p>業界標準PF</p> <p>石油会社 a社 | 石油会社 b社 | 石油会社 c社</p> <p>[A解析モデル利用] [AI解析モデル利用] [B解析モデル利用]</p> <p>【業界への働きかけ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>石油エネルギー技術センターと連携を行い、業界への働きかけを実施</li> <li>他設備・他事業者・他業界への拡張</li> <li>自社設備から対象範囲の拡大を検討、最終的には他業界および、海外への進出も図る</li> </ul>

図 57 補正予算事業概要

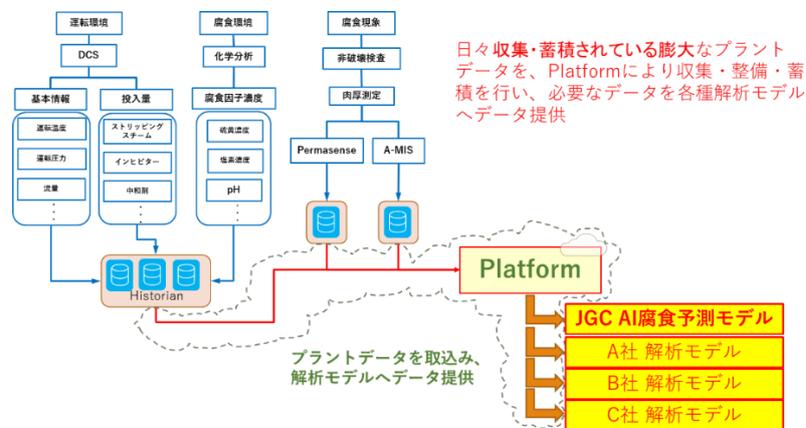


図 58 PF 全体イメージ

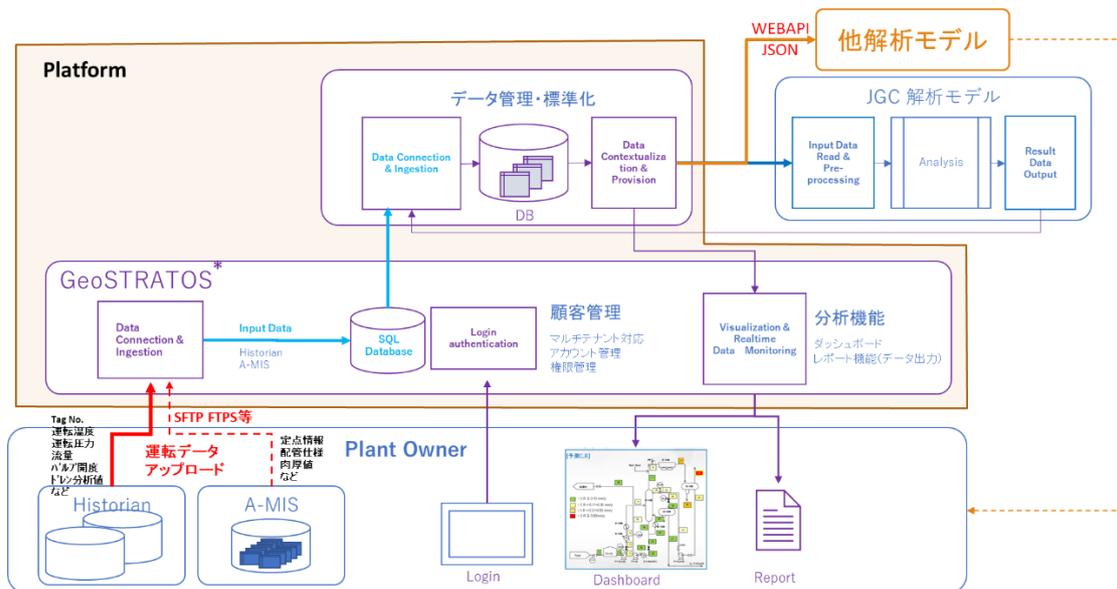


図 59 データ取得 PF システム構成イメージ

\* : GeoSTRATOS (株インフォキューブ LAFLA 開発の IoT プラットフォーム)

### 3.2.2. PF による効率化の定量評価

上記 3.2.1 で示した PF の利用を想定し、WG 委員各社が個別に評価した結果を以下にまとめた。

#### (1) 内面腐食解析モデル (日揮)

図 60 に、製油所での配管検査計画作成時に内面腐食解析モデルを利用した場合のフローを示す。PF を利用する事により「データ収集」部分の作業が自動化により効率的に行う事が可能となる。

表 4 に、図 60 の「データ収集」の部分について、以下の前提での期待される効率化についてまとめた。

- ✓ 灯軽油脱硫装置を想定 (系統フロー図 3 枚、スプール図面 200 枚、200 ラインを想定)

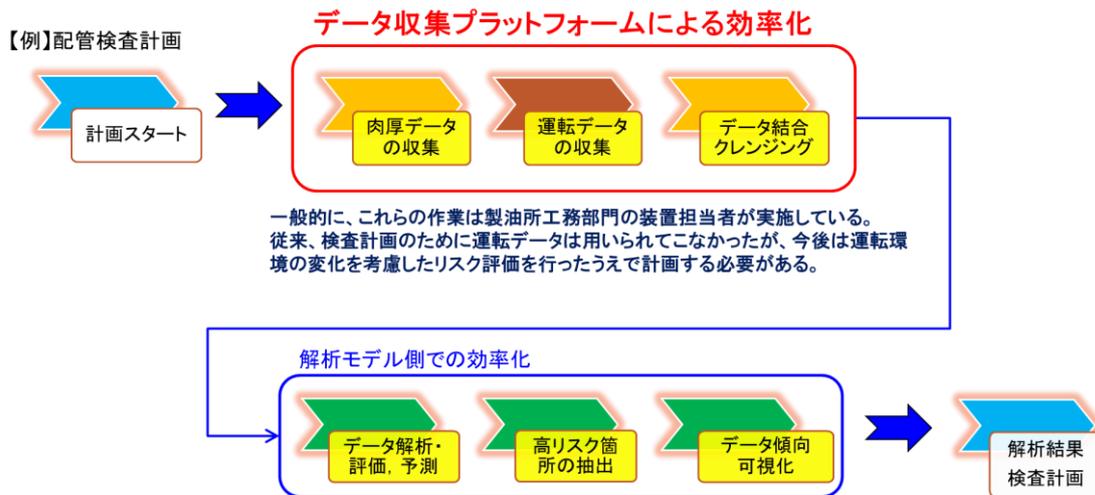


図 60 配管検査計画時の作業フロー

表 4 データ取得部分の PF による効率化

	肉厚データの収集	運転データの収集	データ結合	データクレンジング
作業内容	設備管理システムから範囲を指定して吐出し	PI SystemなどのHistorianよりデータ収集；Tag情報が必要であったり別途運転課に依頼が必要な場合もあり	肉厚データと運転データのタイムスタンプの整合を取り、運転データの平均化や標準偏差などを算出したうえで結合などの作業が必要	肉厚計測値のクレンジング作業
コスト・MH	4 Hrs.	40Hrs.	160 Hrs.	40 Hrs.
プラットフォーム活用	解析装置、範囲を指定して解析メニューを選択	← 予め装置や機器to機器に紐づいたTag情報をもっており、装置や範囲指定を行うのみでTag情報の抽出が可能	← 肉厚データと運転データのタイムスタンプの整合を取り、自動的に結合	← 予め用意されたロジックに基づき自動クレンジング
コスト・MH	0.2 Hrs.	0 Hrs.	0 Hrs	0 Hrs

PF 利用により「肉厚データの収集」「運転データの収集」「データの結合」「データクレンジング」の作業がほぼ完全に自動化され、製油所工務担当者の大幅な工数削減が期待される。

(2) RBM (Risk Based Maintenance) 解析モデル (IMC)

RBM 解析モデル利用においては、「導入開始時」(図 61) と「導入後・運用中」(図 62) に分けて、以下の前提での期待される効率化についてまとめた。

- ✓ 1 プラント (構成機器：約 250 機器) を想定  
導入開始時のデータ収集及び整理作業の大幅削減が期待されることに加えて、導入後・運用中においても、ほぼ作業の自動化が期待される。

RBMの例：①RBM導入開始時

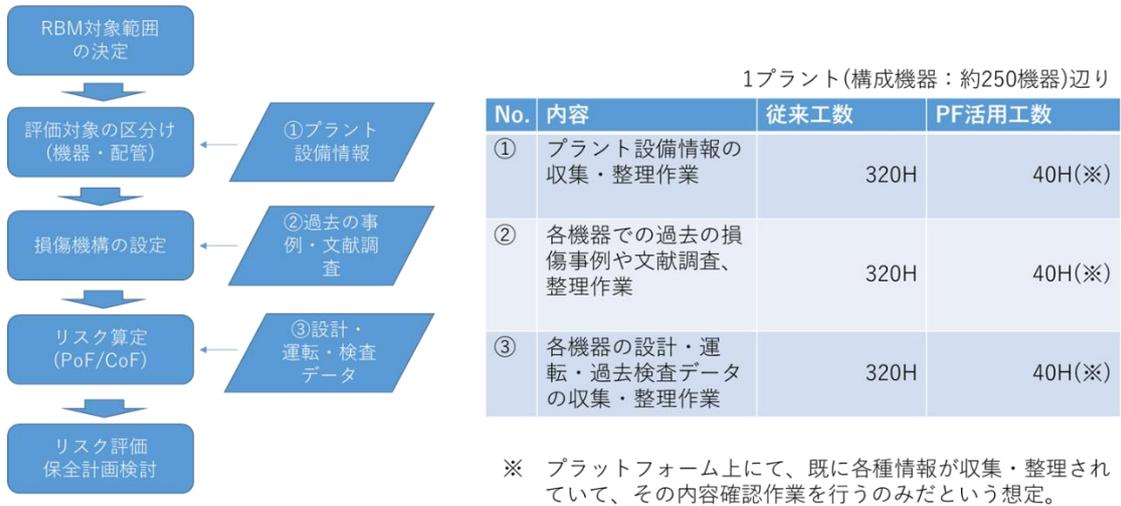


図 61 RBM 導入開始時の効率化

RBMの例：②RBM導入後・運用中

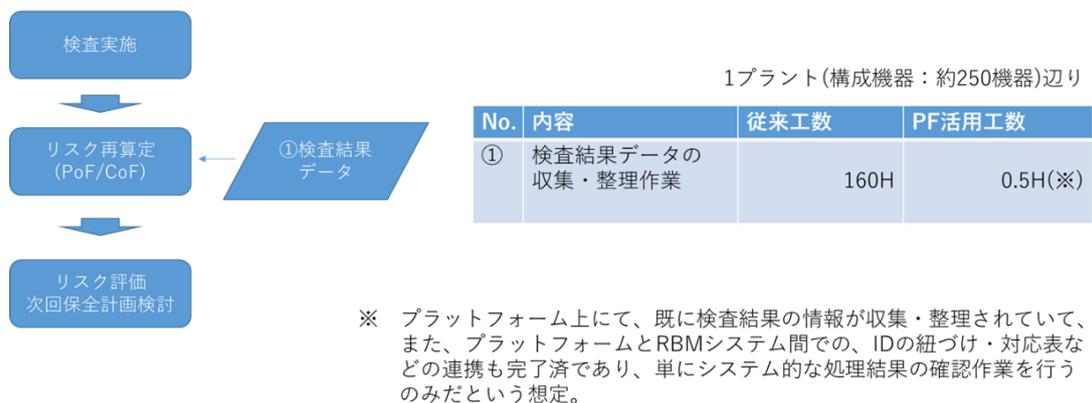


図 62 RBM 導入後・運用中の効率化

(3) RBM 時に利用する損傷機構解析モデル（ベストマテリア）

RBM 実施において懸念される損傷機構を AI を用いて判定し、RBM ソフトを作動させるための解析モデル利用時の効率化について、以下の前提にて各工程での効率化についてまとめた（表 5）。

- ✓ 評価部位 500 を想定

PF 利用による効率化は、「設計・運転・保全データ収集」と「データクレンジング」の部分に相当し、大幅な効率化が期待される。また AI 解析と組み合わせる事で更なる効率化が期待される。

表 5 解析モデル利用時の PF 活用による効率化

	設計・運転・保全データ 収集	データクレンジング	損傷機構判定	リスク評価
従来の作業 内容	設備台帳、運転・保全 管理システムなどから専 門家が読めるような紙、 pdfなどの媒体に出力	専門家の要求に応じ たデータ整理	専門家による判 断	RBMソフト内のテクニカルモ ジュールによるリスク算定
コスト (MH)	600hr	250hr	250hr	250hr
プラットフォー ム活用におけ る作業内容	データ入力フォーマットが 明確になることによって、 収集作業量は減少させ られる。	AIの入力フォーマット に整合させることでク レンジングができるた め、作業は削減され る。	AIが判断	損傷機構判断が正確になり、 繰り返し作業がなくなることで作 業量が減らせる。(RBMソフト がプラットフォームにあれば、作業 がさらに効率化される)
コスト (MH)	400hr	100hr	50hr	150hr

(4) 腐食シミュレーション・オンライン腐食モニタリングデータ AI 解析（千代田化工建設）

AI 解析におけるデータ準備時の効率化について、以下の前提での期待される効率化について  
まとめた（表 6）。

- ✓ オンライン腐食モニタリング点数： 10
- ✓ プロセスパラメータ項目数： 10-20
- ✓ 組成・分析データ項目数： 5 -10
- ✓ 配管系図面・データ： 一式
- ✓ 取得データ期間： 4 年

「データ収集作業」および「データ可視化確認・クレンジング」工程において PF 活用による効率化  
が期待される。データ収集作業には、製油所でのデータ収集作業の部分は含めていないが、製油  
所側の作業は PF 活用により大幅に削減されると想定される。データ可視化確認・クレンジングに  
おいては、各解析モデルによりアプローチが異なる事が想定されるため、PF 活用による大幅な効率  
化は期待できない可能性もあり、検討が必要である。

表 6 AI 解析におけるデータ準備時 PF 活用による効率化

No.	作業項目	作業時間		備考
		PFなし	PF使用	
0	解析準備（予備調査、遂行説明・工程・必要データ依頼など）	-	-	PF利用で工数の変化なし。
1	データ収集作業	3-5MD	2-4MD	PFなしの作業：条件設定、必要データリスト作成、製油所殿にデータ収集依頼。 PFありの作業：条件設定、必要データリスト作成 製油所殿でのデータ収集作業時間含まず（この部分の製油所殿のMH削減効果は非常に大きいと想像します）。
2	データ輸送	0 MD	0 MD	国内ではBOXやBiz storageを経由してデータを授受しています。
3	データ可視化確認、クレンジング	25-35MD	20-30MD	初期可視化、初期クレンジング（外れ値・抜けデータ処理、タイムスタンプ合わせ） 解析の目的に応じてクレンジングや可視化のアプローチ違うため、結局は生値からデータをみて処理することになり、大きな時間削減とならないと思われる。

(5) CUI（Corrosion Under Insulation）予測モデル（旭化成）

CUI 予測モデルにおいては、PF 活用による効率化についての評価ではなく、実際の検査事例での予測モデル活用による効率化について示した<sup>20</sup>（表 7）。

予測モデル活用により、検査範囲・点数の削減、検査費用の削減が確認されている。PF 活用により予測モデルに入力するデータの準備時の効率化が達成されれば、更なるユーザー側での工数削減が期待される。

表 7 CUI 予測モデル活用時の検査範囲・点数および検査費用削減効果

会社	事業所	配管数	検査範囲・点数削減%		検査費用k¥		検査費用削減%
			直管	その他部位	実績費用	適用後費用	
A		9	29	14	157,573	136,818	13
C	C1	21	20	2	16,485	未算定	-
	C2	47	3	4	-	未算定	-
D		81	5	18	34,273	未算定	-

3.2.3. PF 自走化に向けての課題・実用化の方策

(1) PF 自走化に向けての課題

PF の自走化のためには、PF 運営費用を調達する事が必要となる。一つの方法として、PF を利用する解析モデル開発会社から PF 使用料を徴収し PF 運営費用に充てる事が考えられる。

<sup>20</sup> 平成 29 年度—平成 30 年度成果報告書「IoT を活用した新産業モデル創出基盤整備事業／研究開発項目[2]IoT 技術を活用した新たな産業保安システムの開発／各種データ（設備、運転、点検、テキスト、環境、熟練従業員のノウハウ 等）の活用により保安を高度化するシステムの構築のうち実機検査データ解析に基づいた保温材下腐食発生予測モデルの開発」より

その為には、複数の解析モデルが顧客を獲得し商業的に実用化されていることが必要である。しかし、現時点では実証段階の解析モデルが多く、PF 開発や運営のための費用を負担する事は困難な状況である。

一方、上記 2) 「PF 利用による効率化の定量評価」より、PF 利用による解析モデル利用時の大幅な効率化・低コスト化が期待されることから、まずは PF 開発や運用の仕組み構築を実現し、先行して各解析モデルの普及を促進する方法も考えられる。但し、そのためには、PF 構築を支援する補助金等の利用が必要となる。

PF 自走化のためには、各解析モデルの商業化のタイミングに合わせて、補助金等の有効利用も視野にいれての検討する事が必要である。

## (2) PF 実用化の方策

### ➤ 共通データプロファイルの作成

PF の実用化のためには、複数の解析モデルが広くユーザーに受け入れられ、それらの効率的利用のための PF が、解析モデル開発会社およびユーザー（石油会社等）の両者から求められている事が必要である。但し、PF 構築に対するニーズや環境が熟成するまでの間に、実用化に向けて取り進めておく事が有効な部分もあると考える。

AI 技術の進展により、多くの会社がプラント保安分野の解析モデルを提案しているが、その普及には課題も指摘されている。石油コンビナート等災害防止 3 省連絡会議（経済産業省、総務省消防庁、厚生労働省）は 2020 年 11 月 17 日に「プラント保安分野 AI 信頼性評価ガイドライン<sup>21</sup>（以下ガイドライン）」と「事例集」を策定し、A I 技術の利用促進支援している（図 63）。

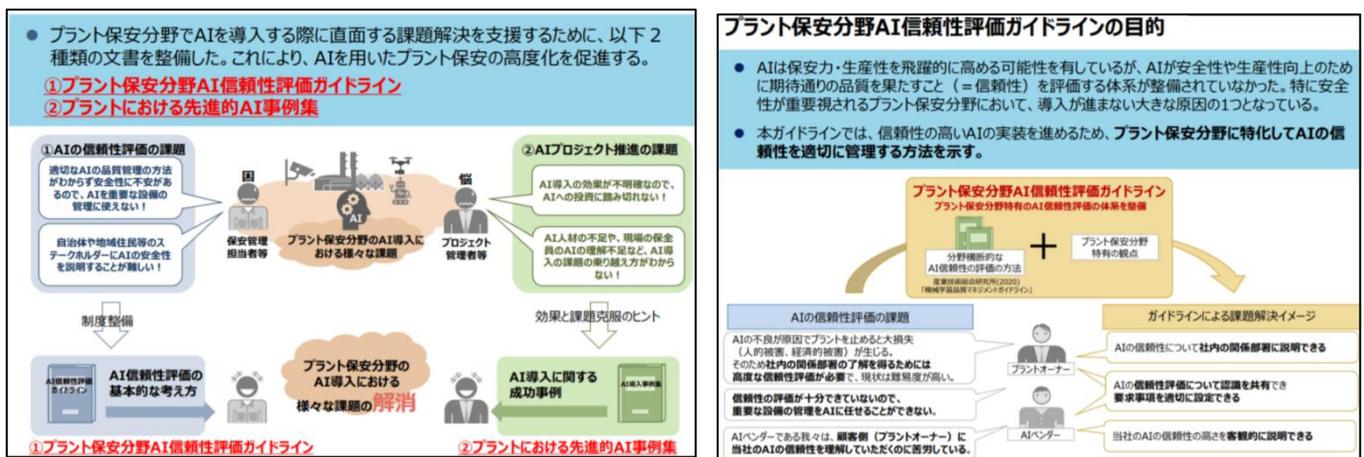


図 63 プラント保安分野 AI 信頼性評価ガイドライン（取組・目的）

ガイドラインでは、信頼性評価の 3 品質として、「利用品質」「外部品質」「内部品質」をあげている（図 64）。

<sup>21</sup> <https://www.meti.go.jp/press/2020/11/20201117001/20201117001-1.pdf>

JPECにて検討している「保全（解析モデル）プラットフォーム」は、ユーザーの保有する「データ」を、「収集・標準化・クレンジング」し、解析モデル会社に効率的に提供する事を主目的としており、ガイドラインの上げる3品質の内、「内部品質」を担保することが求められる。

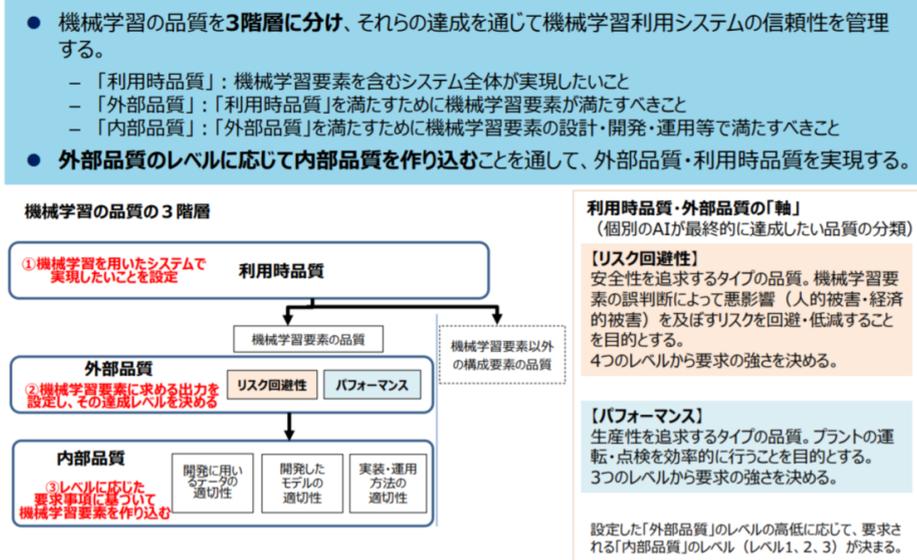


図 64 信頼性評価の3品質

PFで扱うデータの品質に対し、ガイドラインの「内部品質」に適合している事が、PF運営者により評価出来る仕組みとなっていれば、PFと連携を図る解析モデルに対しても、更にはモデルを利用するユーザーに対しても、安心してPFが利用できるものとなる可能性がある。内部品質を適切に管理する方法の一つとして、PFに取り込むデータの標準化・クレンジング過程において、PF運営者にて策定した共通データプロファイルを各解析モデル会社で共有して利用する事が考えられる。共通データプロファイルの例としては、JPECがNEDO事業（IoTを活用した新産業モデル創出基盤整備事業 各種データ（設備、運転、点検、テキスト、環境、熟練従業員のノウハウ等）の活用により保安を高度化するシステムの構築及び保安の高度化を実現する製油所向けプラットフォームの開発（2018～2019））にて作成した「製油所向けプラットフォームデータプロファイル」が挙げられる。本プロファイルは「配管腐食に係るデータ」について作成したものであり、活用にあたっては、その内容についてデータを利用する解析モデル開発会社およびユーザーと更なる調整が必要となる。また、配管腐食以外の解析にも対応したデータプロファイルの作成も検討が必要である。

PFの自走化には、各解析モデルの自走化が前提となるが、それを待つだけでなく、PF運営者によるガイドラインを用いた「内部品質」の評価等、PF利用者のニーズについて調査検討し、解析モデル利用促進を支援していく事も有効であると思われる。

別添資料 1 : ベイジアンネット解析トライアル

別ファイル参照

別添資料 2 : オントロジー構築トライアル

別ファイル参照

無断転載・複製を禁ず

一般財団法人石油エネルギー技術センター  
〒105-0011 東京都港区芝公園2-1-1  
電話 03-5402-8502

## 別添資料 1

### 「ベイジアンネット解析トライアル」

- ※ (株)NTT データ数理システムに「事故・安全情報等のベイジアンネットワークを用いた解析トライアル」として委託して実施

# 目次

1. 概要.....	2
1.1. トライアルのゴールイメージ .....	2
1.2. ベイジアンネットワークとは .....	2
1.3. 用語の整理.....	3
2. 本トライアルの解析対象とする事例データについて .....	4
2.1. 抽出した単語の一覧.....	4
3. ベイジアンネットワークの構築と評価 .....	6
3.1. ベイジアンネットワークの構築.....	6
3.2. モデルの精度検証.....	7
3.3. 各モデルの性能評価 .....	8
3.4. モデルのブラッシュアップ .....	8
4. (適用例 1) 階層モデルを利用した推論 .....	10
4.1. (具体例) [被害] の原因を探る .....	10
4.2. ナイーブベイズモデルへの適用.....	10
5. (適用例 2) 事例抽出プログラム .....	12
5.1. 事例抽出プログラムの構成 .....	12
5.2. プログラムで利用する BN について .....	13
5.3. 単語スコアの算出方法と改善 .....	14
5.4. 出力結果 .....	14
5.5. 具体例の紹介 .....	15
(1) 装置から関連する単語・事例を探る .....	15
(2) 『死亡』に関連する事例の抽出 .....	18
6. まとめ .....	19
6.1. 今後の課題・展望.....	19

# 1. 概要

国内の石油会社では膨大な事故事例やヒヤリハット報告書を DB に保有している。それらは膨大なテキスト情報として蓄積されるため、有効活用には至っていない。本トライアルではベジアンネットワークを利用して、これらのテキスト情報から事故・安全情報等の解析トライアルを実施する。

## 1.1. トライアルのゴールイメージ

最終的なゴールは蓄積された事故事例といった報告書を解析しモデル化することにより、状況を指定することで事故や安全に関して有益な情報を取り出すことである。

例えば現場の状況に類似するレポートを抽出する、または発生した事象について、過去の事例から原因を探して表示する、などが期待される動作である。

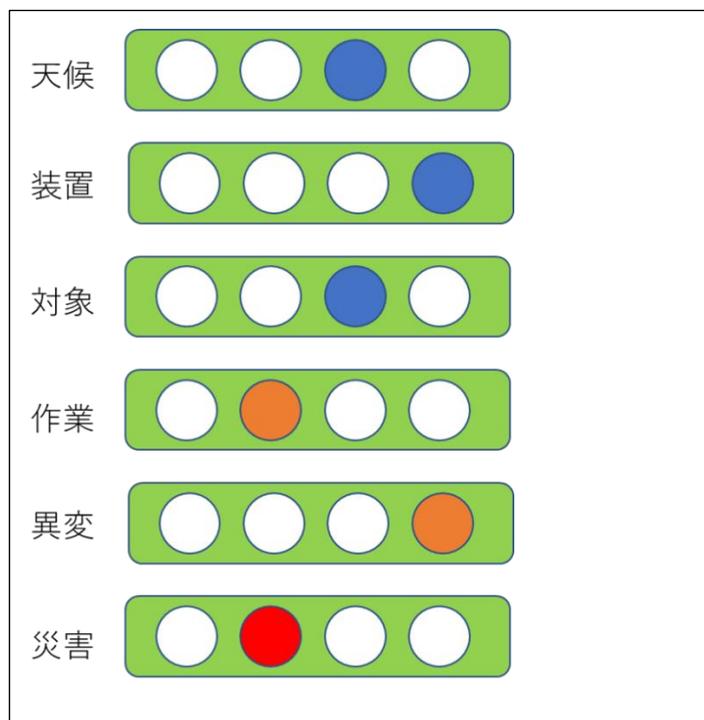


図 1 ゴールのイメージ

## 1.2. ベジアンネットワークとは

ベジアンネットワーク(以下 BN) はノードを確率変数とする非循環有向グラフと定義される。変数間の確率的な依存関係は矢印で表現される。それぞれのノードには親ノードとの条件付き確率分布が定義されている。

BN に観測値を入力すると、その条件での他のノードの確率値を更新することができる。例えば肺がんモデルで[喫煙者]に“はい”という値を入力すると、[肺がん]に罹患している確率が計算できる。確率更新はネットワーク全体で伝搬する。先の例では [喫煙者] に入力された条件で [肺がん]の確率が更新され、さらに[レント

ゲン検査] や [呼吸困難] にも伝搬する。

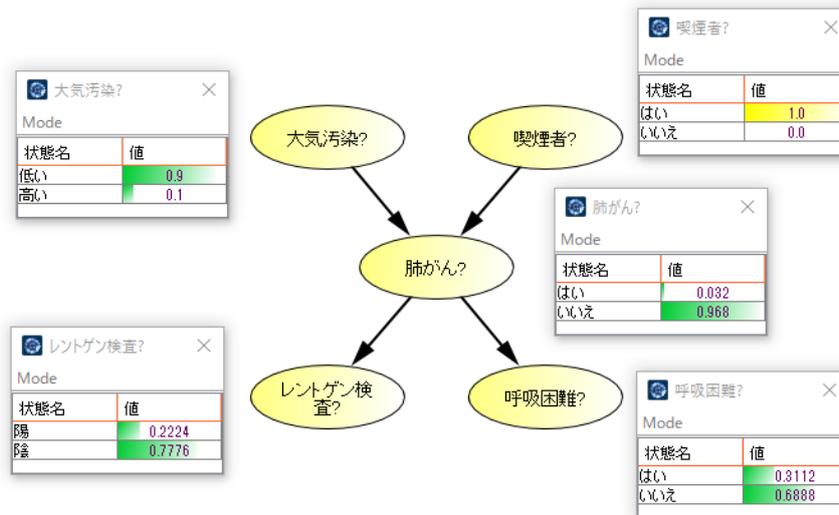


図 2 ベイジアンネットワークの例 (肺がんを推論するモデル)

確率の伝搬は矢印を遡る向きでも発生する。例えば [レントゲン検査] が”陽性” の場合の [肺がん]に罹患する確率を計算できる。

BN は変数間の依存関係のみを前提としており、本来はそれらの変数の因果関係を表現するものではない。しかしながら近年では因果関係を模倣した BN も提案されており、因果関係を表現するモデルとしても利用がされている。

### 1.3. 用語の整理

主に BN の解析の用語についてまとめる。

- ◇ エビデンス  
BN で予測を行う場合に入力する観測値 (確定値)
- ◇ 事前確率  
エビデンスを入力する前の各ノードの確率値
- ◇ 事後確率  
エビデンスを入力した後の各ノードの確率値
- ◇ リフト値  
事後確率 と事前確率の比
- ◇ 目的変数  
確率推論・予測の対象となる変数
- ◇ 説明変数  
エビデンスとなる変数

## 2. 本トライアルの解析対象とする事例データについて

JPEC が所有する事故・安全情報を解析の対象とする。具体的には『事故・ヒヤリハット・劣化』の3種類の事例をテキストで記述した819件の報告書である。以下に事例データのイメージを示す。

### ◆ 事件事例の報告例

事例番号	1
タイトル	〇〇作業中の爆発火災
発生日	×年×月×日
発生場所	△△
プロセス	石油精製
事故の概要	〇〇作業中、弁が閉まらずLPGが漏れ出し△時に火災が発生した。 .....

### ◆ ヒヤリハット事例の報告例

事例番号	10
タイトル	〇〇装置のチューブの腐食
発生日	×年×月×日
装置1	△△
装置2	..
ヒヤリハットの概要	製品の△成分が上昇したが、〇〇装置の内部漏洩であることを特定した...

図 3 報告書のイメージ

テキスト情報はそのままでは解析ができないので、まずはテキストから単語を抽出する。報告書全体には9313種の単語が含まれるが、次の単語を分析対象とする。

- ・一般の辞書に載っている言葉のうち、意味がありそうなもの：  
名詞、サ変名詞、固有名詞、組織名、ナイ形容動詞、未知語、名詞 C
- ・一般の辞書に載っていない専門用語は手動で指定。1,019種。
- ・とりあえず、100種  
DF(登場文書数)で選別  
一般語：50個。  $160 \leq DF \leq 300$   
専門用語：50個。  $71 \leq DF \leq 131$

選択した単語を列として報告書と単語の有無行列を作成し、これをBNでの解析用のデータとする。

### 2.1. 抽出した単語の一覧

事件事例などの報告書から抽出した単語を次の6カテゴリに分類する。また6分類に当てはまらない単語は[その他]に分類する

分類	単語
①装置	タンク, ポンプ, 系統, プラント, 弁, フランジ, 加熱炉, コンプレッサ, 熱交換器, ボルト, 蒸留塔, 常圧蒸留装置, リング, システム, ドレン, 製造装置, 安全弁, 発信器, 計装, 水素化分解装置, 計装タップ, 反応系, 径, 脱硫装置, 電気機器, 貯蔵系, 計装機器, 計器室, 遠心式ポンプ
②物質	ガス, 水素, 油, 水, 原油, ナフサ, 原料油, 重質油, 炭素鋼, 危険物
③人的	マニュアル, 検討, 対応, 指示, 作業員, 誤操作, 従業員
④作業	検査, 操作, 工事, 出荷, 保全, 変更, 保守, スタートアップ, 定期修理, 定常運転, 検収
⑤異変	上昇, 低下, 発火, 閉止, 着火, 拡大, アラーム
⑥被害	割れ, 減肉, 爆発, 変動, 損傷
その他	現場, 基準, 要因, 事例, 内部, 方法, 部分, 付近, 状況, 貯蔵, 防止, 設置, 供給, 対策, 設計, 開放, 存在, 開始, 推定, 評価, 鎮火, 製油所, 定期的, 公設消防, 協力会社, 自衛消防, 施工管理, 常圧, 物質要因, 早期, 工事方法,

### 3. ベイジアンネットワークの構築と評価

本章では BN の構築および予測精度の観点で評価したことについて述べる。単語有無行列を入力データとして学習を行い、単語をノードとし依存関係にある単語がリンクするネットワークモデルを構築する。

#### 3.1. ベイジアンネットワークの構築

本トライアルでは『階層構造モデル』『全候補モデル』『ナイーブベイズモデル』の 3 種類のモデルを構築した。それぞれのモデルは次のような特徴があることが知られている。

##### ◇ 階層構造

原因（説明変数）から結果（目的変数）が発生する因果関係を表現するモデル。目的変数に対して、全ての説明変数の同時確率を計算する。それぞれの説明変数と目的変数との依存関係を分析することに適している。

##### ◇ 全候補

機械学習によりネットワーク構造を探索したモデル。因果関係の仮説はなくデータから算出されるスコアのみでモデルの構造を推定する。

##### ◇ ナイーブベイズ

説明変数間をそれぞれ独立と仮定したモデル。目的変数に対して、個々の説明変数の影響を独立に目的変数に与える。説明変数の数が多い場合にも対応ができ、また、少ないサンプル数であっても、比較的精度の良いモデルを作成することが可能である。

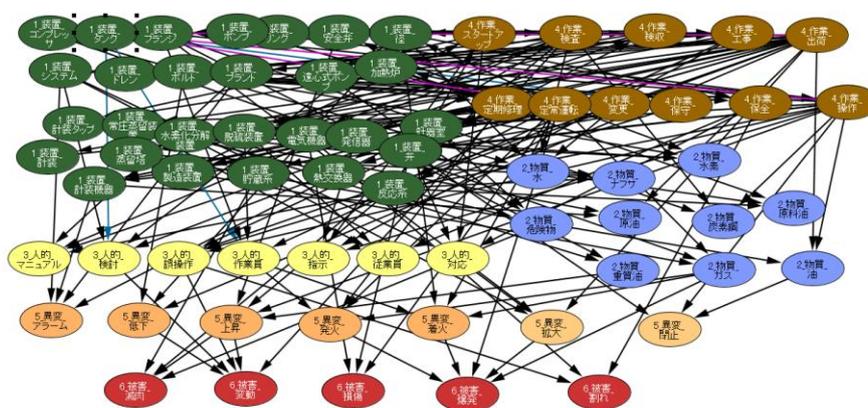


図 4 階層モデル

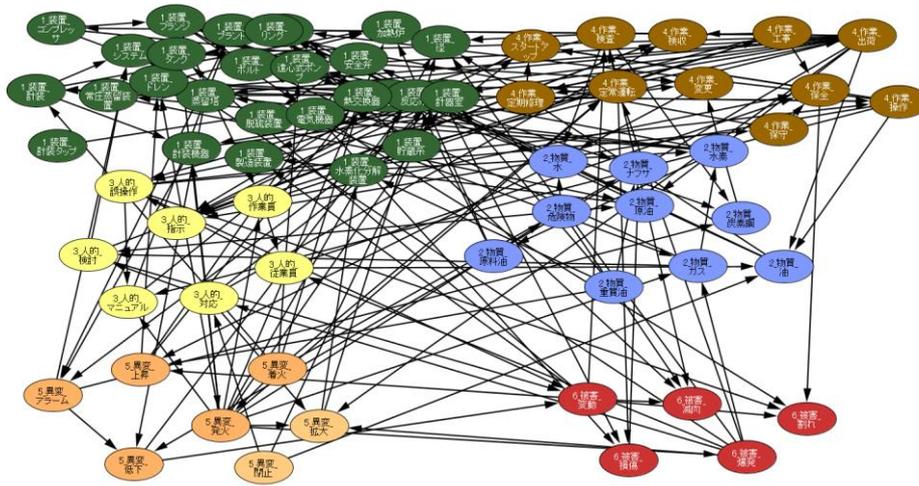


図 5 全候補モデル

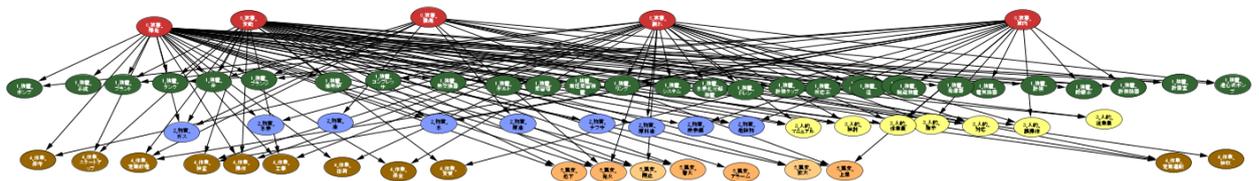


図 6 ナイーブベイズモデル ([被害] を目的変数とする)

### 3.2. モデルの精度検証

予測精度の観点で BN の性能を評価する目的で、精度検証を行った。モデルの精度検証の手順を以下に示す。

1. 検証データから一行を取り出す。
2. 1 のデータから説明変数の値をエビデンスとしてモデルに与え他の変数の事後確率値を計算する。事後確率が最大となる値をその変数の予測値とする。
3. 目的変数の予測値が 1 で取り出した値と一致していれば『正解』とする
4. 全ての検証データで 1~3 を行い、全体の正解率を算出する。

検証のシナリオ(目的変数と説明変数の組み合わせ) は次のようにした。

- ・ 目的変数：分類 1~6 から一つを選択
- ・ 説明変数：分類 1~6 のうち目的変数でないものすべて

検証用のデータは、モデルを構築した『単語有無行列』から 次のように “0” を除外して “1” のみを残したデータを使う。

1_装置_タンク	1_装置_ポンプ	2_物質_ガス
0	0	1
0	0	0
0	0	1
0	1	0
1	0	1



1_装置_タンク	1_装置_ポンプ	2_物質_ガス
		1
		1
	1	
1		1

各モデルの精度検証から以下の結果が得られた。

目的変数	データ件数	階層		全候補		ナイーブベイズ	
		正解データ数	正解率	正解データ数	正解率	正解データ数	正解率
1_装置	3351	689	0.206	549	0.164	724	0.216
2_物質	1438	479	0.333	553	0.385	726	0.505
3_人的	1144	239	0.209	302	0.264	595	0.520
4_作業	2045	722	0.353	504	0.246	822	0.402
5_異変	1191	379	0.318	485	0.407	728	0.611
6_被害	752	213	0.283	283	0.376	381	0.507

### 3.3. 各モデルの性能評価

精度検証の結果からは、ナイーブベイズ構造のモデルが3パターンの構造のうち最も予測精度が良かった。

#### ◇ 『階層』モデルと『全候補』モデルの比較

『階層』モデルと『全候補』モデルを比較すると、[装置][作業]は『階層』モデルの方が良く、[物質][人的][異変][被害]は『全候補』モデルの方が良い結果であった。『階層』モデルの[装置][作業]はいずれも階層の最上位の階層である。この分類についてはナイーブベイズと類似した構造になっているため予測精度が良いことも納得できる。一方で他の分類においては『全候補』モデルの方が良かった。このことから、今回のデータにおいては構造に制約を設けるより、機械学習のみで構造を探索する方が精度の良いモデルを得られる。

#### ◇ ナイーブベイズモデルの問題点

単純に一つまたは複数のエビデンスから目的変数に対する予測するのであれば、ナイーブベイズモデルが最も適している。ただしナイーブベイズモデルは説明変数間にリンクがないため、これらの変数同士の依存関係を表現することができない。また目的変数を予め決めて作ったモデルである。このため分類間を横断的に推論するようなケースには適していない。

### 3.4. モデルのブラッシュアップ

全探索モデルの予測精度を改善するために報告書から抽出する単語の種類を100語から198語に増やした。以下に追加した単語を示す。

分類	単語
①装置	DCS, 圧縮, インターロック, 浮屋根, オリフィス, 改質, 回転, ガスケット, ガス検知器, 基礎, ケーブル, コンデンサー, 棧橋, 軸受け, 水添, ストレーナ, タービン, 脱硫, 調節弁, 塔頂, ナット, ネジ, バーナ, 保温材, モーター, 溶接, 連続再生式接触改質装置, 炉, ローリ

②物質	LPG, アンモニア, 雨水, エチレン, オフガス, 錆, 残渣油, 塩, 重油, 水素ガス, スケール, スチーム, スロップ, 静電気, 排水, プロピレン, 落油, 硫化水素
③人的	エラー, 協力会社, 誤操作, 間違い, ミス
④作業	締め, スチームトレース, 施工, 置換, 定期修理, デコーキング, パージ, 封入
⑤異変	孔, 引火, エロージョン, 応急, 開孔, 外面腐食, 空引き, 逆流, 緊急停止, クリープ, 警報, 減肉, 孔食, コロージョン, 詰まり, トリップ, 内面腐食, 避難, 摩耗, 緩み
⑥被害	炎上, 死亡, シャットダウン, 焼損, 大事故破壊, 暴露, 破断, 負傷, 火傷
その他	液面, 火気, 加熱, 気密, 残存, 残留, 蒸気雲, 熱応力, フレア, 膨張, レベル

単語を追加したデータより再度のモデル構築と精度検証を実施した。精度検証の結果について、以前のモデル(単語 100 語版)と比較したものを示す。

目的変数	単語 100 語			単語 追加		
	データ件数	正解データ件数	正解率	データ件数	正解データ数	正解率
1_装置	3351	549	0.164	4446	1085	0.244
2_物質	1438	553	0.385	1773	872	0.492
3_人的	1144	302	0.264	1401	625	0.446
4_作業	2045	504	0.246	2786	1037	0.372
5_異変	1191	485	0.407	2027	921	0.454
6_被害	752	283	0.376	1577	721	0.457

## 4. (適用例 1) 階層モデルを利用した推論

階層モデルは単語分類の因果関係を元に構築している。階層モデルを利用することで、事象が発生する順序に従って推論を行うことができる。また逆に最終的に発生する事象から原因を遡るような推論も可能である。ここでは[被害]を出発点として、各階層を遡ることで原因を探索する例を紹介する。

(※ モデルの因果関係が正しいかどうかは慎重な検討を要するが、今回はその検討は行わない)

### 4.1. (具体例)[被害]の原因を探る

分類[被害]に含まれる単語から『爆発』に着目する。まずは『爆発』をエビデンスとして推論する。1つ上の階層[異変]に含まれる単語のうち『着火』の事後確率(ここではリフト値で評価)が最大となる。続いて『着火』をエビデンスとして1つ上の階層について推論を行う。これを一番上の階層まで繰り返すと、『爆発』⇒『着火』⇒『ガス』『作業員』⇒『フランジ』『装置』『コンプレッサ』『ボルト』『定常運転』『作業』『工事』のように階層ごとに原因を遡ることができる。

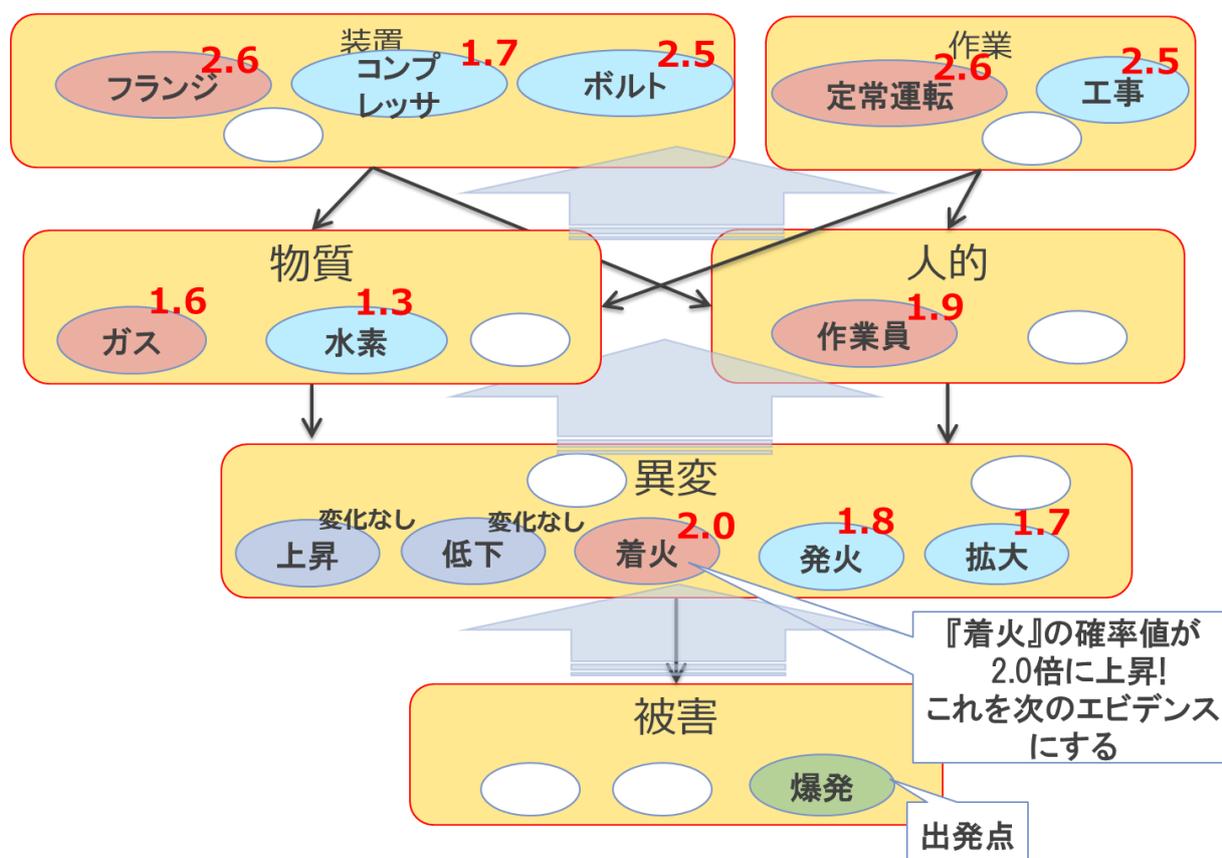


図 7 階層モデルでの推論例

ここでのポイントは対象とする単語の1つ上の階層に対して推論を行い、その階層に含まれるもので事後確率値(リフト値)が大きい単語を見つける。そして見つけた単語をエビデンスとして、さらに1つ上の階層の推論を行うことである。このように階層ごとの推論を順番に行うことで、着目した現象について、直接的な原因だけではなく、それらを引き起こす一連の事象についての探索が可能となる。

### 4.2. ナイーブベイズモデルへの適用

ナイーブベイズモデルは各分類別に予測モデルを構築している。階層ごとに逐次予測を行うのであれば、予

測の対象とするモデルを切り替えることで、4.1 と同様な推論を行うことが可能である。(本トライアルでは実施していないが、ナীবベースを適用することでより精度のよい推論ができる可能性がある)

## 5. (適用例 2) 事例抽出プログラム

構築した BN に単語をエビデンスとして入力すると、エビデンス以外のすべての単語の事後確率が計算できる。この事後確率値は入力単語との関係の強さを表すものと考えられる。BN モデルは報告書に含まれる単語の有無情報によって構築される。このことから算出される各単語の事後確率は、入力単語と同じ事例で出現する確率を示している。

事後確率を入力した単語との関係を定量的に表現する指標とし、その指標により入力単語に関連する単語や事例を抽出するプログラムについて説明する。またプログラムを使った利用例も紹介する。

### 5.1. 事例抽出プログラムの構成

事例抽出プログラムを BayoLinkS で実装した。以下はプログラムの処理フローを表す。

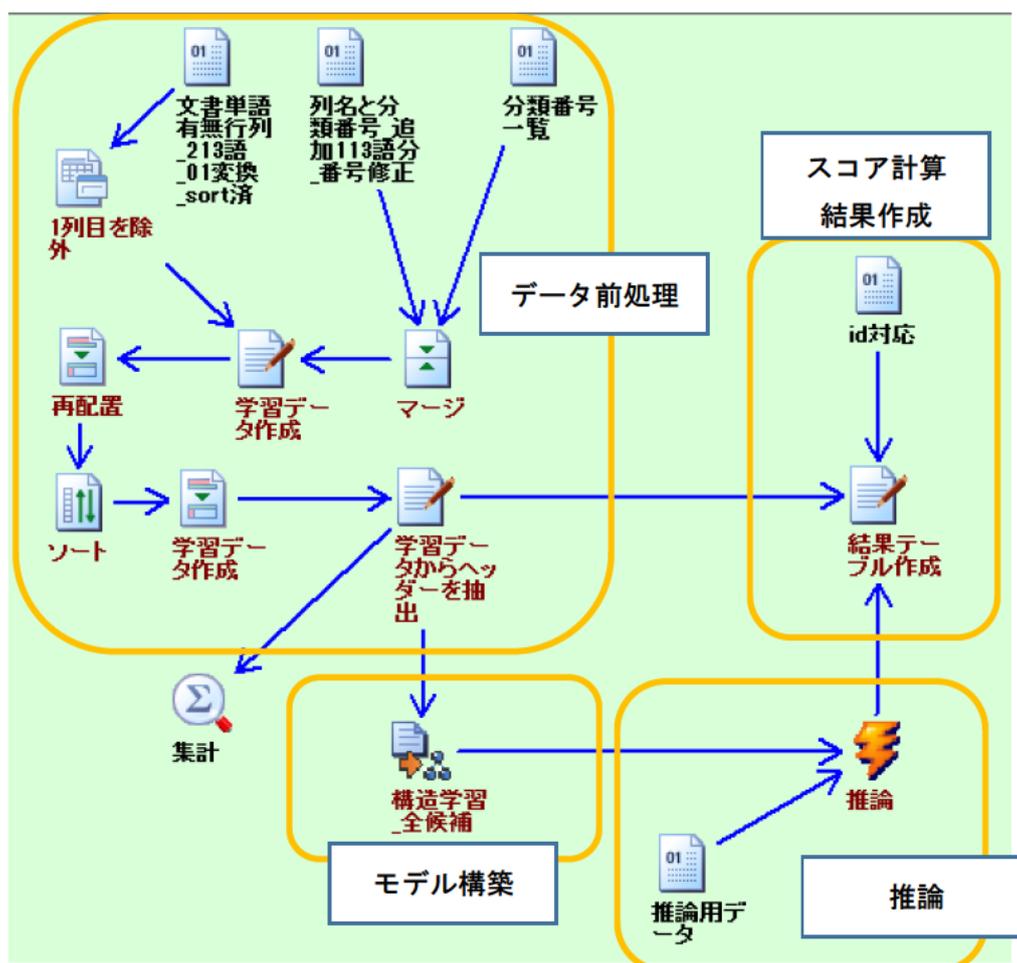


図 8 事例抽出プログラムの処理フロー



図 9 推論する単語を選択する画面

◇ データ前処理

単語有無行列について列名に分類番号を付与するなどの処理を行う。

◇ モデル構築

前処理済の学習データから構造学習により『全候補モデル』を構築する。

◇ 推論

BN で推論を実行する。複数の単語を選択することができる。

◇ スコア計算・結果作成

推論によって算出される事後確率値から単語スコアと事例スコアを算出する。また事例のスコアランキングと単語ランキングテーブルを作成する。

## 5.2. プログラムで利用する BN について

プログラムでは『3.4 モデルのブラッシュアップ』で構築した全候補モデルにより推論を行う。全候補モデルは、事例に出現する単語の依存関係を情報量基準で探索したモデルである。このため主観的な仮説をもとに作った階層構造と比較して、単語同士の依存関係を事例に近づけることができる。階層構造は推論する際の確率伝搬(エビデンス情報の伝達)が階層間で順番に行われる。一方で事例の中では依存関係があるのに、それらが所属する階層が遠く離れていれば、情報が伝達されない可能性がある。このプログラムでは単語分類の枠を超えて横断的な推論を実施するために、全候補モデルを選択する。

### 5.3. 単語スコアの算出方法と改善

単語のスコアは BN モデルで算出される事後確率値を適用する。以下は事後確率(単語スコア) と事例スコアの例である。

単語	事後確率
ナフサ	0.6
発火	0.2
水素	0.3

事例ID	ナフサ	発火	水素
1	1	0	0
2	1	1	1
3	0	0	1

スコア
0.6
1.1
0.3

ただし、事後確率をそのまま単語スコアに適用すると問題点がある。事後確率値が大きい単語はもともと事前確率も大きい傾向がある。このような”事前確率が大きい単語”はどの報告書にも出現しがちな単語であるため、抽出されてもメリットが少ない。この問題を回避するため、事後確率の代わりにリフト値を使う。リフト値は事後確率を事前確率の比であるため、事後確率が小さいものであっても対象単語と関係が深いものを評価しやすくなる。

単語	事後確率	事前確率	リフト値
ナフサ	0.6	0.5	1.2
発火	0.2	0.1	2.0
水素	0.3	0.05	6.0

ID	ナフサ	発火	水素
1	1	0	0
2	1	1	1
3	0	0	1

スコア
1.2
8.2
<b>6.0</b>

### 5.4. 出力結果

事例抽出プログラムは『単語スコアテーブル』と『事例スコアテーブル』を出力する。『単語スコアテーブル』は分類ごとにテーブルを作る。また『事例スコアテーブル』は事例のスコアだけではなく、その事例に含まれる単語でスコアの高いもの上位 5 件も出力する。

単語		スコア	
1	1_装置_オフィス	46.166	1. A13▼
2	1_装置_調節弁	7.259	
3	1_装置_計装機器	2.229	
4	1_装置_発信器	1.956	
5	1_装置_計装タップ	1.925	
1	2_物質_ガス	1.465	1. A13▼
2	2_物質_硫化水素	1.213	
3	2_物質_スロップ	1.185	
4	2_物質_LPG	1.155	
5	2_物質_アンモニア	1.121	
1	3_人的_指示	1.166	1. A13▼
2	3_人的_誤操作	1.154	
3	3_人的_マニュアル	1.089	
4	3_人的_ミス	1.070	
5	3_人的_エラー	1.060	
1	4_作業_パージ	1.248	1. A13▼
2	4_作業_操作	1.245	
3	4_作業_スタートアップ	1.074	
4	4_作業_封入	1.050	
5	4_作業_置換	1.048	
1	5_異変_コロージョン	29.774	1. A13▼
2	5_異変_エロージョン	23.024	
3	5_異変_閉止	1.500	
4	5_異変_避難	1.252	
5	5_異変_警報	1.218	
1	6_被害_減肉	10.218	1. A13▼
2	6_被害_爆発	1.228	
3	6_被害_炎上	1.112	
4	6_被害_焼損	1.097	
5	6_被害_負傷	1.078	

図 10 単語ランキングテーブルの例

事例の種類と番号	各事例に出現する単語のうち関連性が高いもの(1~5位)					事例のスコア	
id	name	rank_1	rank_2	rank_3	rank_4	rank_5	1.スコア
180	Accident-181	1_装置_オフィス	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	2_物質_ガス	1_装置_計装	131.991
591	Hiyari-189	1_装置_オフィス	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_減肉	1_装置_調節弁	129.437
548	Hiyari-126	1_装置_オフィス	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_減肉	6_被害_シャットダウン	122.915
27	Accident-27	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_減肉	1_装置_計装機器	2_物質_ガス	106.206
94	Accident-96	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_減肉	4_作業_操作	2_物質_硫化水素	102.530
350	Accident-409	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_減肉	2_物質_ガス	4_作業_操作	101.441
26	Accident-26	1_装置_オフィス	1_装置_弁	5_異変_閉止	2_物質_ガス	0_その他_フレア	101.158
48	Accident-48	1_装置_オフィス	1_装置_調節弁	1_装置_発信器	1_装置_計装タップ	1_装置_弁	97.508
42	Accident-42	1_装置_オフィス	1_装置_調節弁	1_装置_弁	5_異変_閉止	0_その他_付近	93.296
278	Accident-286	5_異変_コロージョン	5_異変_エロージョン	6_被害_減肉	2_物質_ガス	1_装置_ガス検知器	92.516

図 11 事例ランキングテーブルの例

## 5.5. 具体例の紹介

事例抽出プログラムの具体例を二つ紹介する。

### (1) 装置から関連する単語・事例を探る

まずは装置『オリフィス』を対象として関連する事例や単語を抽出してみる。

『オリフィス』をエビデンスとして推論を実行すると、事例と単語のランキングテーブルが出力される。事例ランキングの上位で抽出される単語は『弁』『調節弁』『計装タップ』などのオリフィスに関連する装置である。一方で単語スコアをカテゴリ別にみると、異変カテゴリで『エロージョン』『コロージョン』が上位にランクされた。

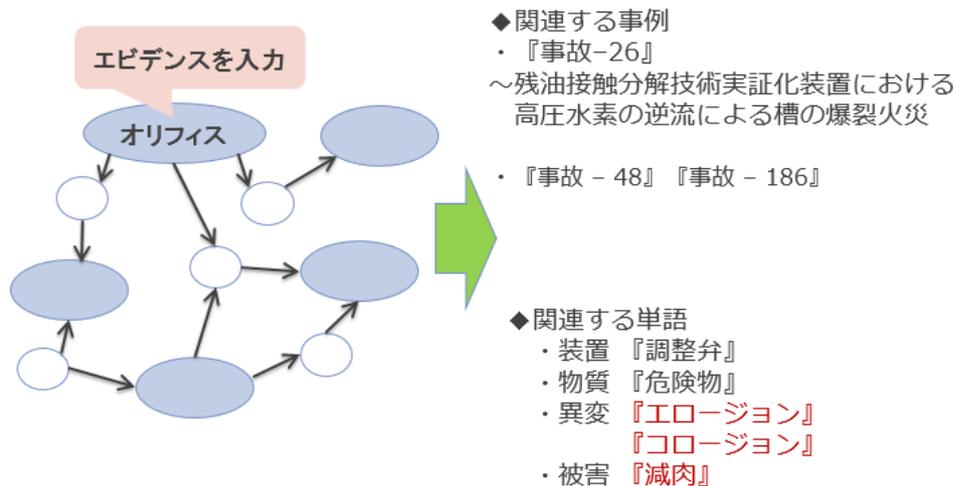


図 12 『オリフィス』から推論

事例の種類と番号      各事例に出現する単語のうち関連性が高いもの(1~5位)      事例のスコア

name	rank_1	rank_2	rank_3	rank_4	rank_5	1.スコア
1 Accident-26	1_装置_オリフィス	0_その他_付近	1_装置_弁	0_その他_存在	0_その他_自衛消防	104.778
2 Accident-48	1_装置_オリフィス	1_装置_調節弁	0_その他_付近	1_装置_発信器	1_装置_計装タップ	100.504
3 Accident-186	1_装置_オリフィス	0_その他_付近	1_装置_弁	0_その他_自衛消防	5_異変_緊急停止	94.691
4 Accident-42	1_装置_オリフィス	1_装置_調節弁	0_その他_付近	1_装置_弁	0_その他_存在	94.522
5 Accident-181	1_装置_オリフィス	0_その他_付近	5_異変_エロージョン	5_異変_コロージョン	5_異変_緊急停止	88.758
6 Accident-1	1_装置_オリフィス	0_その他_付近	1_装置_発信器	1_装置_計装タップ	0_その他_存在	85.746
7 Hi-yari-171	1_装置_オリフィス	1_装置_調節弁	6_被害_減肉	0_その他_付近	1_装置_発信器	80.529
8 Accident-216	1_装置_計装機器	1_装置_弁	0_その他_存在	5_異変_緊急停止	5_異変_閉止	76.538
9 Hi-yari-169	1_装置_オリフィス	1_装置_調節弁	6_被害_減肉	5_異変_エロージョン	5_異変_コロージョン	73.175
10 Accident-149	1_装置_調節弁	0_その他_付近	1_装置_発信器	1_装置_計装タップ	1_装置_弁	73.085

単語	スコア
1 1_装置_オリフィス	46.166
2 1_装置_調節弁	5.234
3 1_装置_計装機器	1.911
4 1_装置_発信器	1.633
5 1_装置_計装タップ	1.611

A1	1. A13
1 2_物質_危険物	1.316
2 2_物質_静電気	1.229
3 2_物質_プロピレン	1.187
4 2_物質_アンモニア	1.159
5 2_物質_入ロップ	1.149

A1	1. A13
1 3_人的_作業員	1.148
2 3_人的_誤操作	1.141
3 3_人的_指示	1.115
4 3_人的_間違い	1.090
5 3_人的_マニュアル	1.074

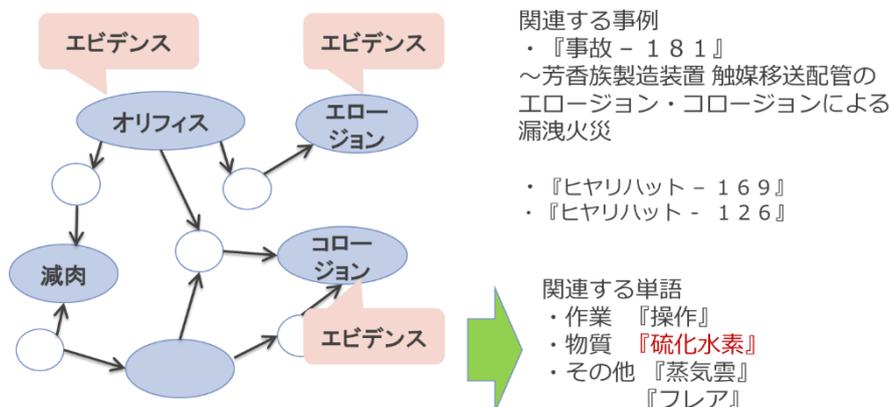
A1	A13
1 4_作業_検査	1.296
2 4_作業_操作	1.209
3 4_作業_保全	1.016
4 4_作業_変更	1.006
5 4_作業_保守	1.031

A1	1. A13
1 5_異変_エロージョン	2.468
2 5_異変_コロージョン	2.047
3 5_異変_発火	1.414
4 5_異変_緊急停止	1.372
5 5_異変_閉止	1.343

A1	1. A13
1 6_被害_減肉	3.827
2 6_被害_焼損	1.268
3 6_被害_爆発	1.251
4 6_被害_火傷	1.248
5 6_被害_暴露	1.240

図 13 『オリフィス』で推論した事例ランキングと単語ランキング

単語ランキング上位の『エロージョン』『コロージョン』『減肉』に注目して、これらの単語を追加して推論を実行する。すると『オリフィス』の他に『エロージョン』『コロージョン』も含む事例を抽出することができる。事例ランキング 1 位の[事故-181]は、エロージョン・コロージョンといった異変による水素ガスの漏洩事故の事例である。『オリフィス』は異変の防止策として言及される。カテゴリ別に単語を見ると[物質] カテゴリの『硫化水素』のランクが上昇する。『硫化水素』は最初の推論(『オリフィス』のみ)ではランキングでは下位であったが追加した単語との関連により抽出されたとみられる。



さらに『硫化水素』を追加すると事例で[事故-27]が抽出される。[事故-27]は管の腐食により水素ガスが漏洩した事例である。硫化水素は腐食の原因物質の1つとして挙げられており、『エロージョン』『コロージョン』は腐食による異変である。なお『オリフィス』はこの事例では出現しない。

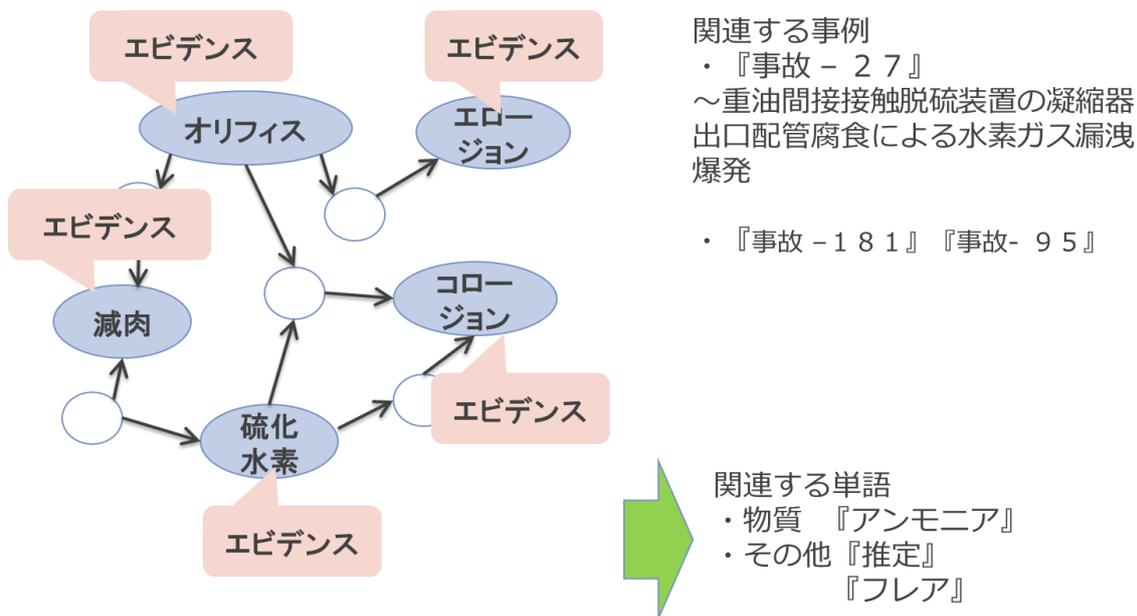


図 14 単語を追加して推論

ここで見つかった『硫化水素』と『オリフィス』の関係に注目し、これらの二つの単語のみで推論すると『事故-1』といった事例が抽出できる。これは常圧蒸留装置の配管腐食による漏洩火災の事例である。『オリフィス』は事故に関連した機器の1つであり、また『硫化水素』は腐食の原因物質である。なお[事例-1]には、『エロージョン』『コロージョン』は出現しない。

ここで示したように、推論結果で上位の単語を追加して推論を行うことにより関連する事例や単語を絞り込んで

探索を行うことができる。また探索の過程において当初は想定しなかった単語が見つかる場合もあり、これを追加することで探索範囲を広げることができる。

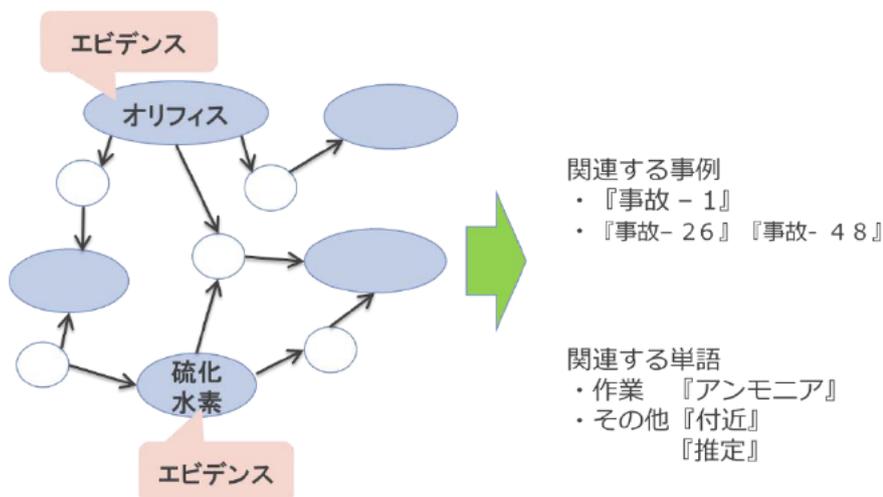


図 14 『オリフィス』『硫化水素』の推論

## (2) 『死亡』に関連する事例の抽出

続いて被害『死亡』に関連する単語と事例を抽出した例を紹介する。なお『死亡』の出現件数は全報告書で 53 件である。まずは『死亡』のみをエビデンスとして推論する。事例ランキングを見るとスコアの高い事例から抽出される単語は、『暴露』『火傷』『負傷』など被害を表すものが多い。ここでは『死亡』の要因を探りたいので、物質で 1 位にランクされた『プロピレン』に注目する。『プロピレン』を追加して推論すると作業から『デコーキング』が抽出される。

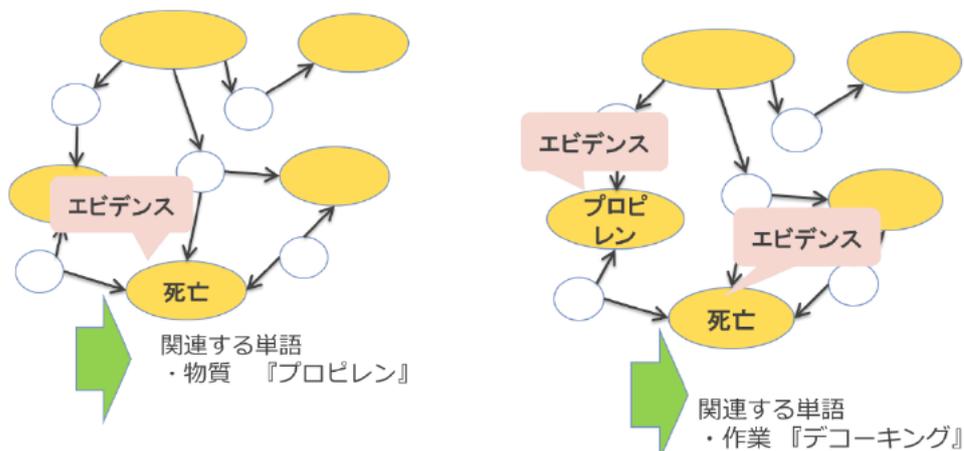


図 15 『死亡』の推論

『死亡』『プロピレン』『デコーキング』をエビデンスとして推論すると、事例ランクの 1 位として[事故-216]が抽出される。[事故-216]は『デコーキング』作業での操作ミスによりエチレンが炎上し、消火活動において死亡事故が発生した事例である(プロピレンは炎上の直接の原因ではない)。実は『死亡』と『デコーキング』の両方が出現する事例はこの[事故-216]のみである。『デコーキング』作業が直接的に『死亡』に関わることは多くないと思われる。プロピレンについても同様である(『死亡』が発生するのは 2 件のみ)。ここで抽出された事

例ランキング(図 17)において 2 位以下のものは『デコーキング』や『プロピレン』は含まれるが、『死亡』は含まれていない。ただし『死亡』との関連が高い単語(被害『火傷』『負傷』など)が出現する事例も上がっている。これらの周辺の事例を読み解くことにより、(現状では起きてないが)『プロピレン』や『デコーキング』が要因となる『死亡』につながる事故を検討できる可能性もある。

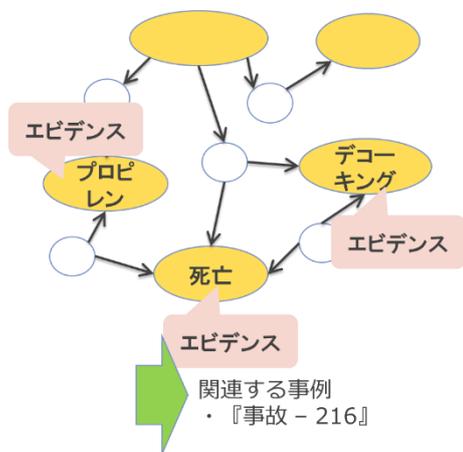


図 16 『死亡』『プロピレン』『デコーキング』で推論

事例の種類と番号	各事例に出現する単語のうち関連性が高いもの(1~5位)						事例のスコア
id	name	rank_1	rank_2	rank_3	rank_4	rank_5	1.スコア
1	215 Accident-216	4_作業_デコーキング	2_物質_プロピレン	6_被害_死亡	2_物質_エチレン	1_装置_製造装置	231.351
2	185 Accident-186	4_作業_デコーキング	2_物質_エチレン	3_人的_間違い	1_装置_炉	1_装置_製造装置	163.408
3	187 Accident-188	4_作業_デコーキング	2_物質_エチレン	1_装置_炉	1_装置_製造装置	2_物質_ナフサ	153.485
4	44 Accident-44	4_作業_デコーキング	3_人的_間違い	1_装置_炉	1_装置_バーナ	1_装置_加熱炉	144.909
5	17 Accident-17	4_作業_デコーキング	1_装置_炉	1_装置_バーナ	6_被害_火傷	1_装置_加熱炉	143.326
6	93 Accident-94	4_作業_デコーキング	1_装置_炉	1_装置_バーナ	1_装置_加熱炉	6_被害_爆発	138.349
7	36 Accident-36	2_物質_プロピレン	3_人的_間違い	6_被害_負傷	0_その他_火気	0_その他_鎮火	133.841
8	200 Accident-201	4_作業_デコーキング	2_物質_エチレン	1_装置_炉	1_装置_製造装置	2_物質_ナフサ	128.845
9	262 Accident-265	2_物質_プロピレン	6_被害_死亡	6_被害_負傷	1_装置_製造装置	6_被害_大事故	124.895
10	195 Accident-196	4_作業_デコーキング	2_物質_エチレン	3_人的_間違い	1_装置_炉	1_装置_製造装置	124.280

図 17 『死亡』『プロピレン』『デコーキング』の事例ランキング

## 6. まとめ

本トライアルでは事故やヒヤリハットなどの報告書を解析し、報告書の含まれる単語をノードとするベイジアンネットワークを構築した。BN は性質が異なるものを 3 種類構築し、それらの性能を精度検証によって評価した。構築した BN について、それぞれのモデルの性質に適した利用例を二つ紹介した。『階層』モデルについては階層(単語の分類)ごとに順次推論を行う例を紹介した。また『全探索』モデルを使って、入力した単語に関連する事例や単語を抽出するプログラムも紹介した。

### 6.1. 今後の課題・展望

#### ◇ モデルの性能と選択について

モデルの精度検証の結果からは、最も良いナイーブベイズ構造でも予測精度は 5 割程度であった。ただし『全候補』モデルについては、解析対象とする単語を増やすことで予測精度を 1~2 割程度、改善することができ

た。他のモデルについては試していないが、予測精度が改善するものと思われる。

#### ◇ 単語の扱いについて

報告書は実際には『事象』『要因』『機器』『被害状況』『防止策』『専門家のコメント』のような項目で内容が整理されている。今回はそれらの項目は考慮せず、単語を全て同じレベルで扱った。このことは項目に縛らず、報告書全体で横断的な解析ができたという点では成果があったと思われる。

しかし、例えば『事象』（実際に発生した現象）と『専門家のコメント』（経験・知見から・実際には発生していない）など分けて扱った方が良さそうな項目もある。分けて扱うことでよりの確な結果が得られる可能性もある。

#### ◇ オントロジーとの関わり

オントロジーは、報告書の記述内容を事故の要因や防止策をツリー構造で表現する手法である。BN との関わりとして以下を提案する。

1. オントロジーで体系化された事象を BN で模倣することで、オントロジーに確率的な遷移を導入できる。ただし BN のノードに定義される条件付き確率値をどのように定義するかは、検討が必要である。
2. 全候補の BN は単純にデータの依存関係のみで解析を行う。これまで見落としていた結果が抽出できれば、オントロジーに活かせる可能性がある。

## 別添資料 2

### 「オントロジー構築トライアル」

※ JFE テクニサーチ(株)に「事故・安全情報等の解析のためのオントロジー構築トライアル」として委託して実施

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. オントロジーと機能オントロジー .....	2
3. 機能オントロジーの概念 .....	4
4. 配管維持規格の内容 .....	8
5. 配管維持規格の構成の分解木表現 .....	9
6. 不具合の分解木と事例との対応付けの例 .....	10
7. 対策の分解木と事例との対応付けの例 .....	16
8. 設備本来の機能, 不具合, 対策の分解木の対応付け .....	19
9. 活用方法 .....	22
10. まとめ .....	24

## 1. はじめに

この報告書は、「事故・安全情報等の解析のためのオントロジー構築トライアル」の実施結果をまとめたものである。

技術の概要は、以下のようになる。

- ・機能オントロジー（分解木）により設備機能や人の行為に関する知識を整理，記述
- ・機能オントロジーは，下記の3要素から構成し，それらの関係も記述する
  - ①設備が本来果たすべき機能の分解木
  - ②設備の不具合の分解木
  - ③それに対して人が行うべき対策の分解木
- ・機能オントロジーを下記のように活用する
  - ・知識・技術の保存，共有，伝承
  - ・教育，現場作業のガイダンス
  - ・テキストデータの検索，解析

本トライアルでは，石油学会の配管維持規格を対象として上記の技術を適用することにより機能オントロジーを試作し，各項目について記述が可能であることを示した。

また，機能オントロジーを事故・安全情報などの検索や解析に活用する方法をご提案した。

以下，その詳細について説明する。

## 2. オントロジーと機能オントロジー

本トライアルで適用するオントロジーは機能オントロジー<sup>1), 2)</sup>とよばれるものに属する。一般的なオントロジーは図1に示すように、対象分野で使用される概念、語彙の定義を行い、それらの関係を記述するものである。オントロジーとは元々は哲学で「存在論」を意味し、対象となるものに関する知識を一貫的、統一的に記述するため、それに必要な概念（語彙）をまとめたものであり、知識の体系化、共有化に活用されている。

これに対し、図2に模式図を示すように、機能オントロジーは対象分野のより具体的な知識を記述するものであり、機械が果たすべき機能を分解し、因果関係の連鎖としてツリー状に表現するもので機能分解木と呼ばれている。同様の記述方法は、人の行為の記述にも適用されており、行為分解木と呼ばれている。機械や人が何をしなければならないかを体系的に記述することができるので、構造化されたマニュアルとも呼ばれている。機能オントロジーを用いることにより、教科書やマニュアルのまる覚えではなく、行為の目的を理解させることにより気付きを与え、応用力を高めることができる。また、機能と方式を分離して記述することにより、設計者の意図を明確化し、他の方式の発想を支援することもできるのが特徴である。

右図で、上にあるものほど上位の概念になる。  
 青線で結ばれているものは、下位概念が上位概念の一例であり、'is a'とよばれる関係を示す。  
 赤線で結ばれているものは、下位概念が上位概念を構成する要素であり、'part of'とよばれる関係を示す。

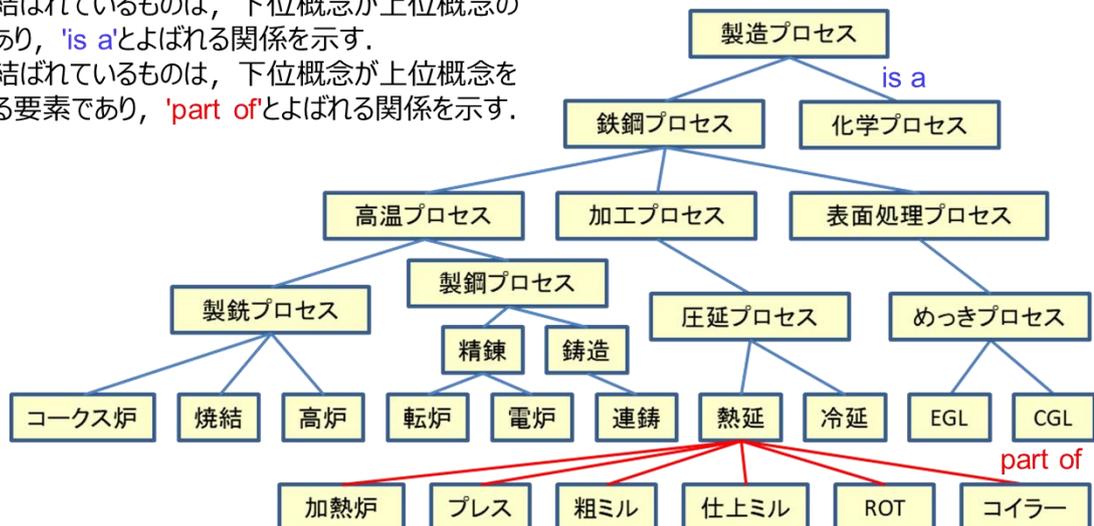


図1 鉄鋼プロセスのオントロジーの例

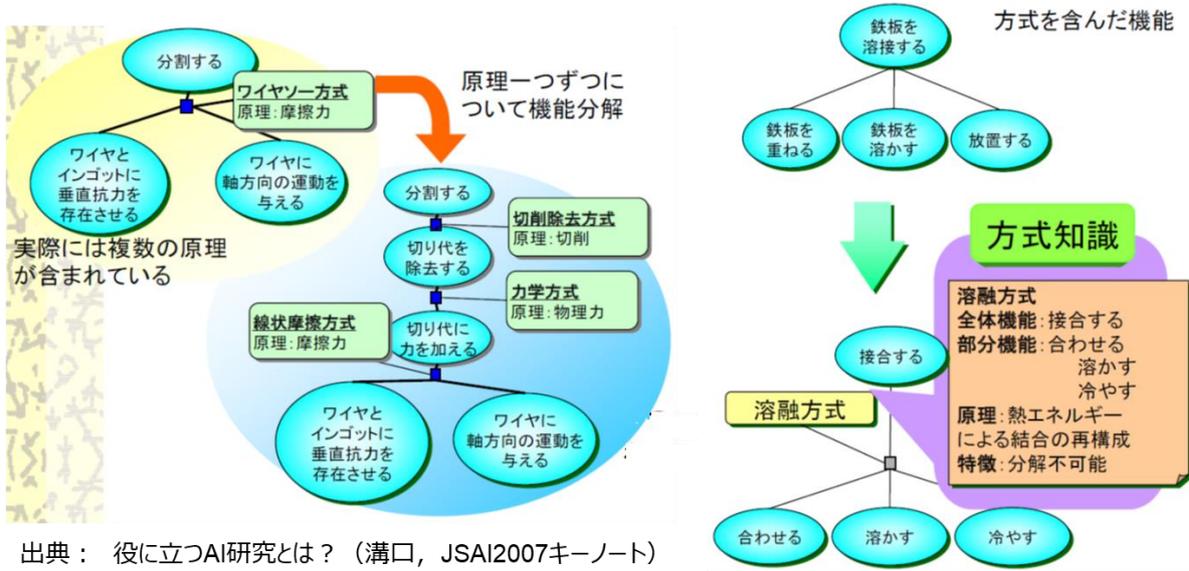


図2 機能オントロジーの模式図

一般的なオントロジーと機能オントロジーの比較を図3に示す. 前者では, ツリーの中にちりばめられているノードの上下関係は is-a, part-of など概念の上位/下位, 包含関係を示しているが, 機能オントロジーでは下方が原因, 上方が結果であり, 直接的な因果関係の連鎖としてものごとのメカニズムを分解木として記述する. また, 同様の方法で, 設計, 施工, 保安, 保全のような人の行為を分解して記述することもできる.

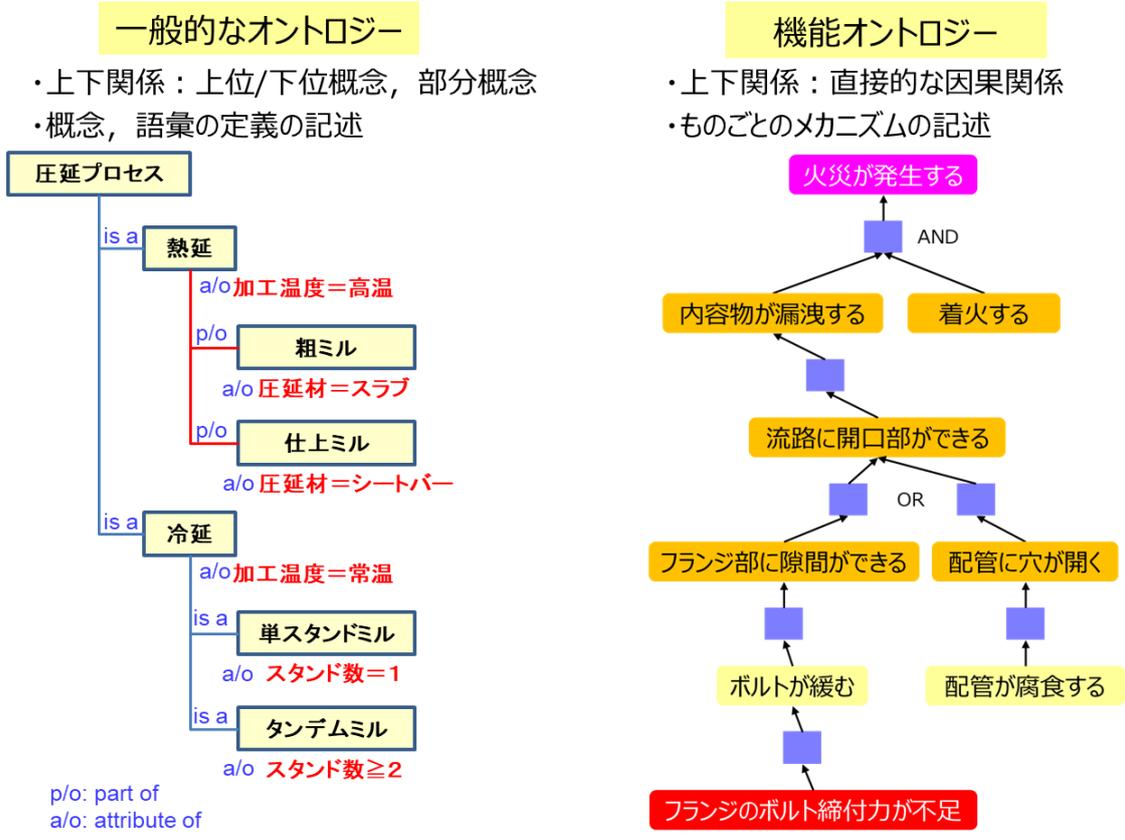


図3 一般的なオントロジーと機能オントロジーの比較

### 3. 機能オントロジーの概念

機能分解木の記述に独自のアイデアを加えることにより、特に設備や操作のトラブルとその対策の記述に優れたものとしている。すなわち、図4に示すように、以下の3種類の分解木から構成する。

- ①設備が本来果たすべき機能の分解木
- ②設備の設計・施工の不備や劣化から端を発し、それが破損、故障、事故のような望ましくない、あってはならない事象に発展するメカニズムを記述した不具合の分解木
- ③それに対して人が行うべき対策、設備の保安・保全の行為の分解木

これらの分解木を記述し、互いに関連付けることによってトラブル防止の対策を明らかにする。なお、①～③は必ずしもすべてを作成する必要はなく、対象に応じて選択する。対象とした配管維持規格では、①に相当する部分がなかったので、②と③で構成した。

図4の概念図では、フランジボルトの不具合と配管の腐食を原因として火災が生じるまでのメカニズムを記述している。この分解木で、「流路に開口部ができる」という事象は、「フランジ部に隙間ができる」または「配管に穴が開く」のいずれかで生じられるものなので、方式ノードを2つ用いてORであることを示している。一方、「火災が発生する」には、「内容物が漏洩する」と「着火する」が共に起きたときに生じるものなので、方式ノード1つに集約し、ANDであることを示している。また、対策のノードをいくつか設け、それによってどの不具合のノードが解消できるかを示している。図4では省略しているが、対策は③の対策の行為分解木として別途分解して詳述することができる。例えば、ボルトの適正締付力や点検方法を分解木として記述できる。

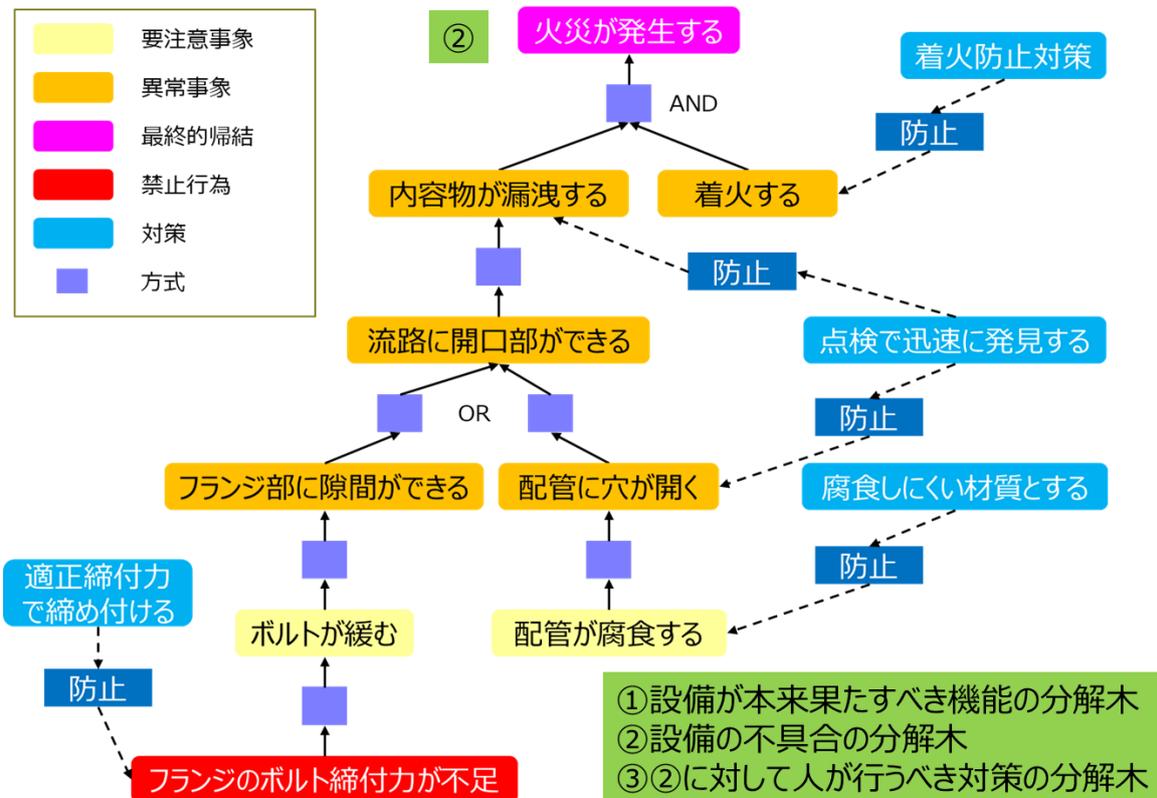


図4 ご提案する機能オントロジーの概念図

対策の分解木の例を図5，それを図4の不具合の分解木に対応付けた例を図6に示す。

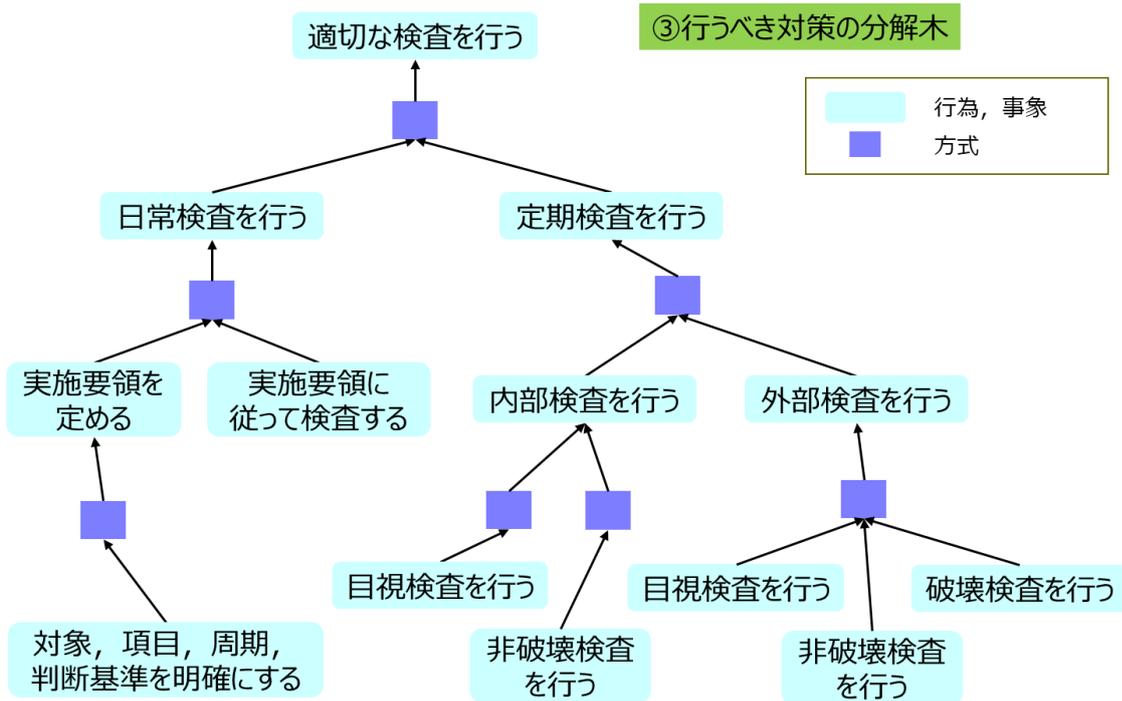


図5 対策の分解木の例

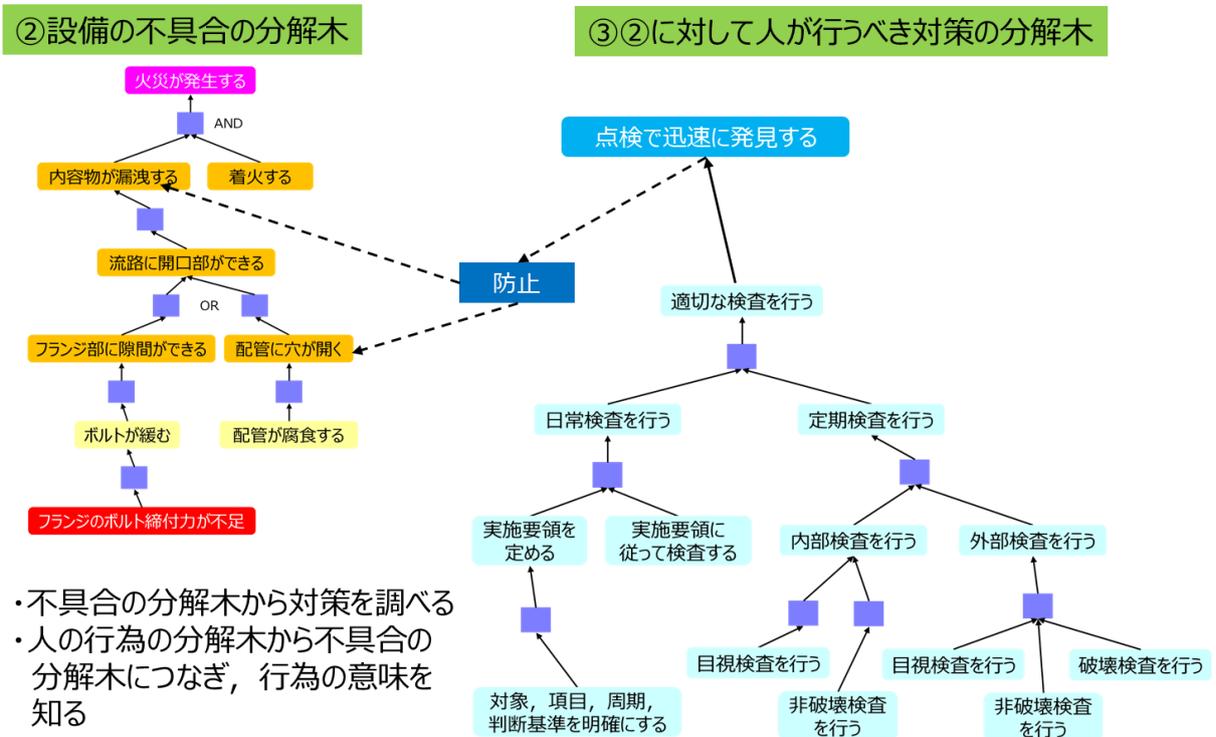


図6 不具合の分解木と対策の分解木の対応付けの例

また、不具合の分解木は図7のように掘り下げることができ、図8のように分解木をクリックするなどにより詳細な部分まで参照可能となる。

②設備の不具合の分解木  
(不具合が生じるメカニズム)

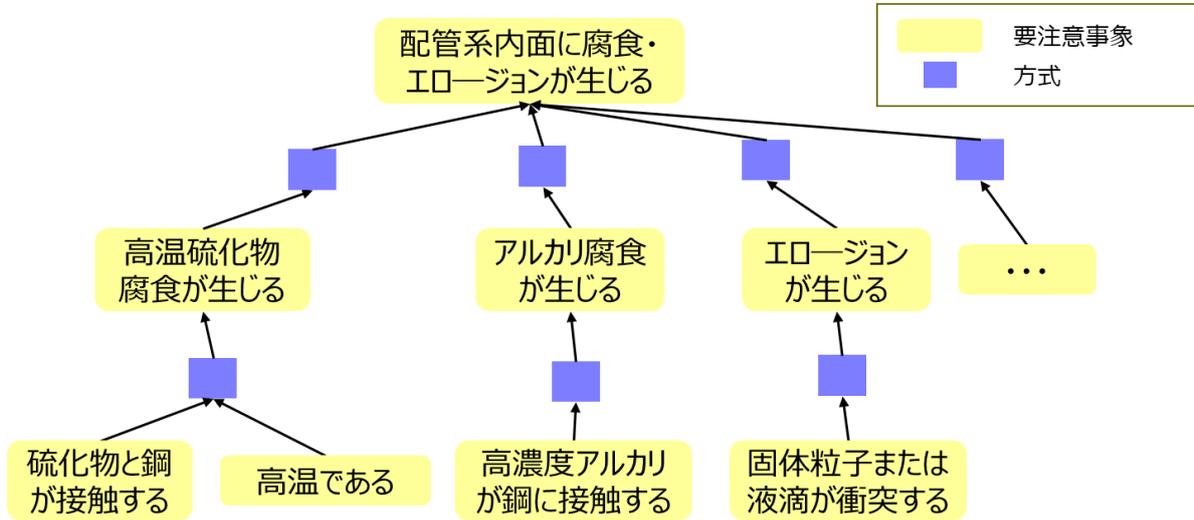


図7 掘り下げた不具合の分解木

②設備の不具合の分解木

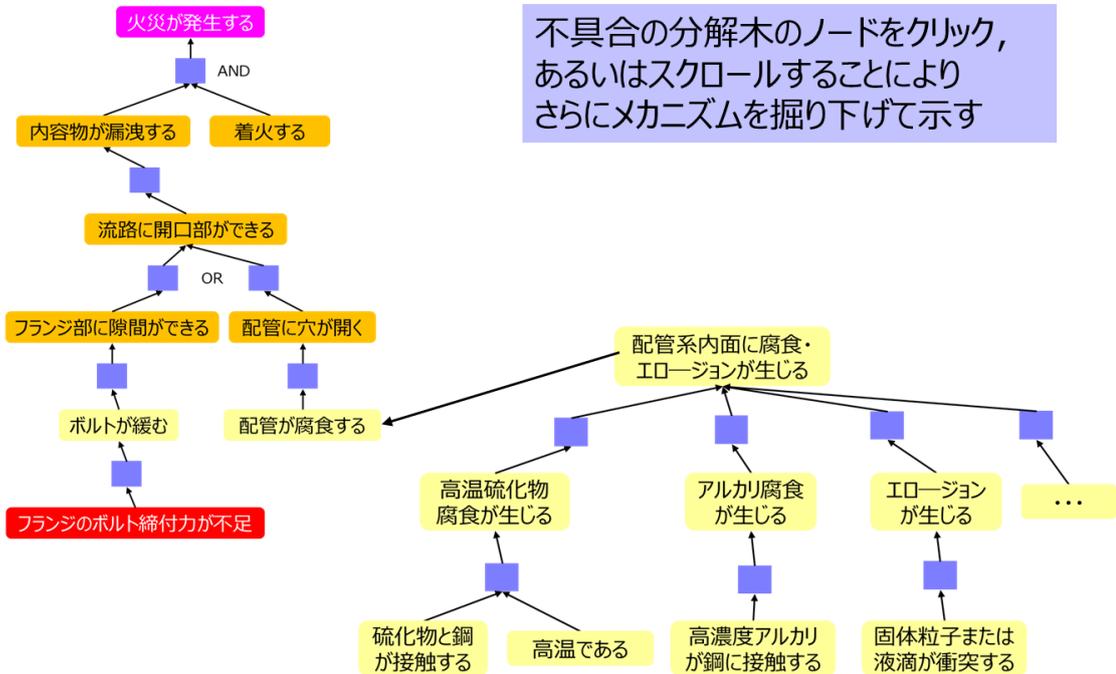


図8 不具合の分解木の掘り下げ

蓄積された事故事例やヒヤリハットの情報は、図9のように不具合の分解木の枝に紐づけることができるので、類似した事故やその対策の検索、原因の分類や重大性の評価などの解析に用いることができる。

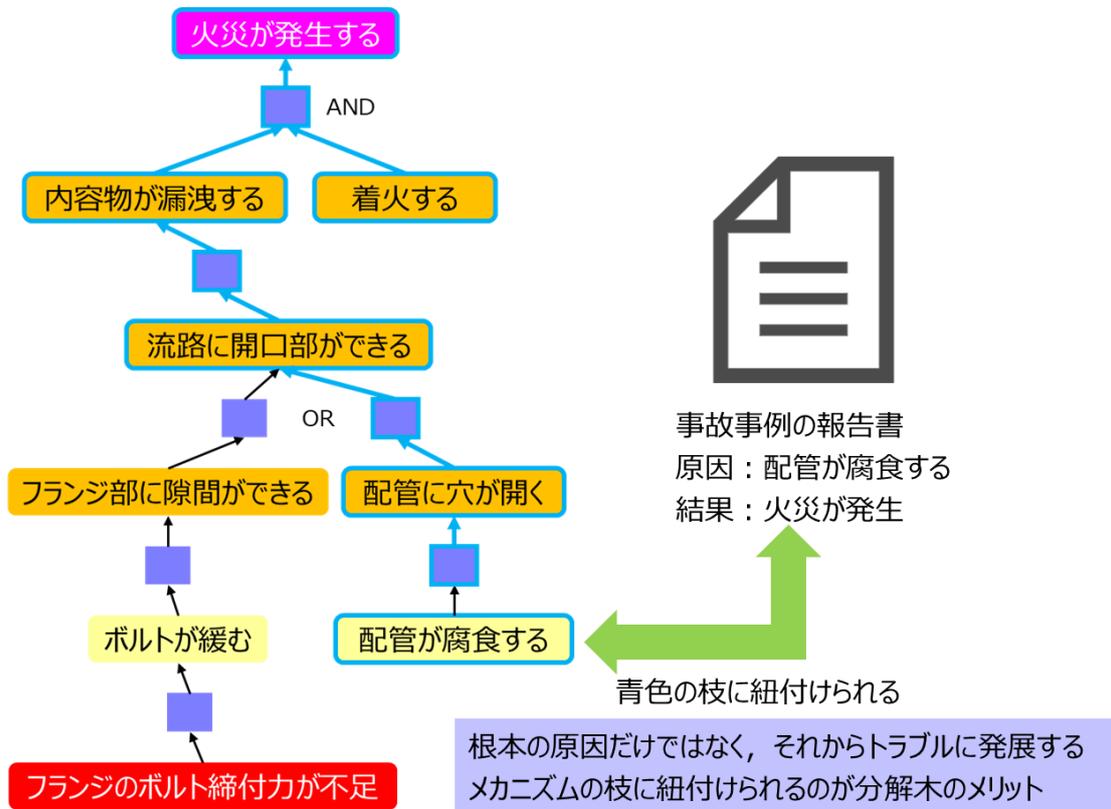


図9 分解木と事故事例・ヒヤリハットとの紐付け

## 4. 配管維持規格の内容

石油学会の配管維持規格（JPI-8S-1-2018）<sup>a)</sup>の目次を参考に、その内容を表1まとめた。本トリアルでは、3章の用語の定義を除く表1のすべてについて分解木をEXCELシート上で作成した。尚、本トリアルでの分解木は配管維持規格の記載内容を参考に作成している。

表1 配管維持規格の内容

章	節	項	ページ	章	節	項	ページ
1.	総則		1	6.	補修などの管理		33 ~ 34
	1.1	目的	1		6.1	一般事項	34
	1.2	適用範囲	1		6.2	溶接補修	34
	1.3	規格の改訂	1		6.2.1	施工管理	34
2.	関連法規及び規格類		1		6.2.2	有害なはずの確認・除去	34
	2.1	関連法規	1		6.2.3	設計	35
	2.2	引用規格	1		6.2.4	予熱	35
3.	用語の定義		2 ~ 4		6.2.5	溶接後熱処理	35
4.	配管系の管理		5		6.2.6	溶接補修部の検査	35
	4.1	一般	5		6.3	環境遮断材の補修	35
	4.2	検査の計画	5 ~ 6		6.4	応急補修	35
	4.3	検査の区分	6		6.4.1	溶接補修	36 ~ 37
	4.3.1	日常検査	6		6.4.2	非溶接補修	38
	4.3.2	定期検査	6		6.5	耐圧気密試験	38
	4.3.3	臨時検査	7		6.5.1	試験方法	38
	4.4	内部検査及び外部検査	7		6.5.2	試験条件	38 ~ 39
	4.4.1	内部検査	7		6.6	総合気密試験	39
	4.4.2	内部検査周期	7		6.7	長距離配管における気密試験	40
	4.4.3	外部検査	7 ~ 8		6.8	フランジ・ボルト締付管理	40
	4.5	検査の方法	8		6.8.1	締付方法及び手順	40
	4.5.1	目視点検	8		6.8.2	ガスケット管理	40
	4.5.2	目視検査	8 ~ 9	7.	変更管理		41
	4.5.3	非破壊検査	9	8.	長期連続運転のための改善		41
	4.5.4	破壊検査	9	9.	検査機器、資材管理		41
	4.5.5	運転中のモニタリング	9 ~ 10		9.1	検査機器の管理・校正	41 ~ 42
	4.6	防食管理	10		9.2	資材管理	42 ~ 43
	4.7	検査準備及び安全	11	10.	記録、報告とデータ管理		43
5.	腐食・劣化損傷の検査		12		10.1	記録と報告	43
	5.1	腐食・エロージョンの検査	12		10.2	データの管理・活用と技術基準の管理	43
	5.1.1	検査箇所の選定	12 ~ 21	11.	参考文献		43
	5.1.2	検査の方法	21 ~ 22				
	5.1.3	検査点の目的と設定	22 ~ 23				
	5.1.4	検査データの評価解析と周期の設定	23 ~ 25				
	5.2	劣化損傷の検査	26				
	5.2.1	劣化損傷検査の範囲	26 ~ 28				
	5.2.2	劣化損傷の検査方法及び検査結果の評価	28 ~ 29				
	5.2.3	劣化損傷の検査周期	30				
	5.3	付属品、特定配管及び埋設配管などの検査	31				
	5.3.1	配管付属品などの検査	31 ~ 32				
	5.3.2	特定配管の検査	32 ~ 33				
	5.4	製作時欠陥の顕在化	33				

## 5. 配管維持規格の構成の分解木表現

配管維持規格の構成の分解木表現を図10に示す。本トライアルでEXCELシート上に構築した分解木では各ノードにリンクを設けてあるので、それをクリックすることにより、例えば図11のように各章の分解木の主要部を開くことができ、さらにそれをクリックすることで詳細を見ることができるようになっている。

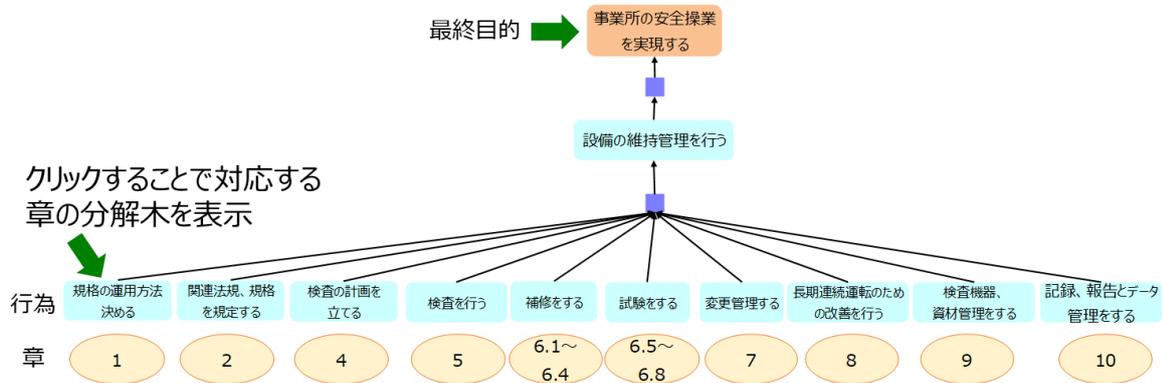


図10 配管維持規格の構成の分解木表現

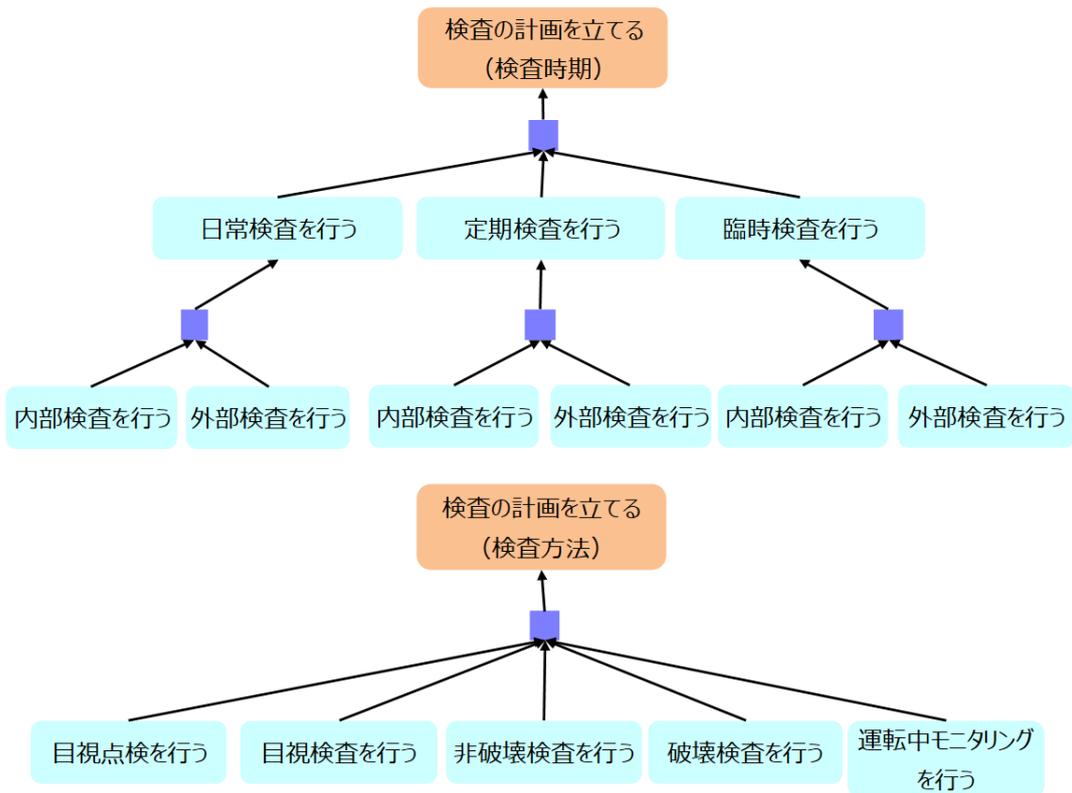


図11 「4章 検査の計画を立てる」の構成の分解木表現

## 6. 不具合の分解木と事例の対応付けの例

具体的な不具合の分解木を2つの例について説明する。「4. 配管系の管理 4.1 一般」のテキストの抜粋を図1 2, その分解木を図1 3に示す.



図1 2 「4. 配管系の管理 4.1 一般」の抜粋  
(配管維持規格 (JPI-8S-1-2018) 5 ページより抜粋)

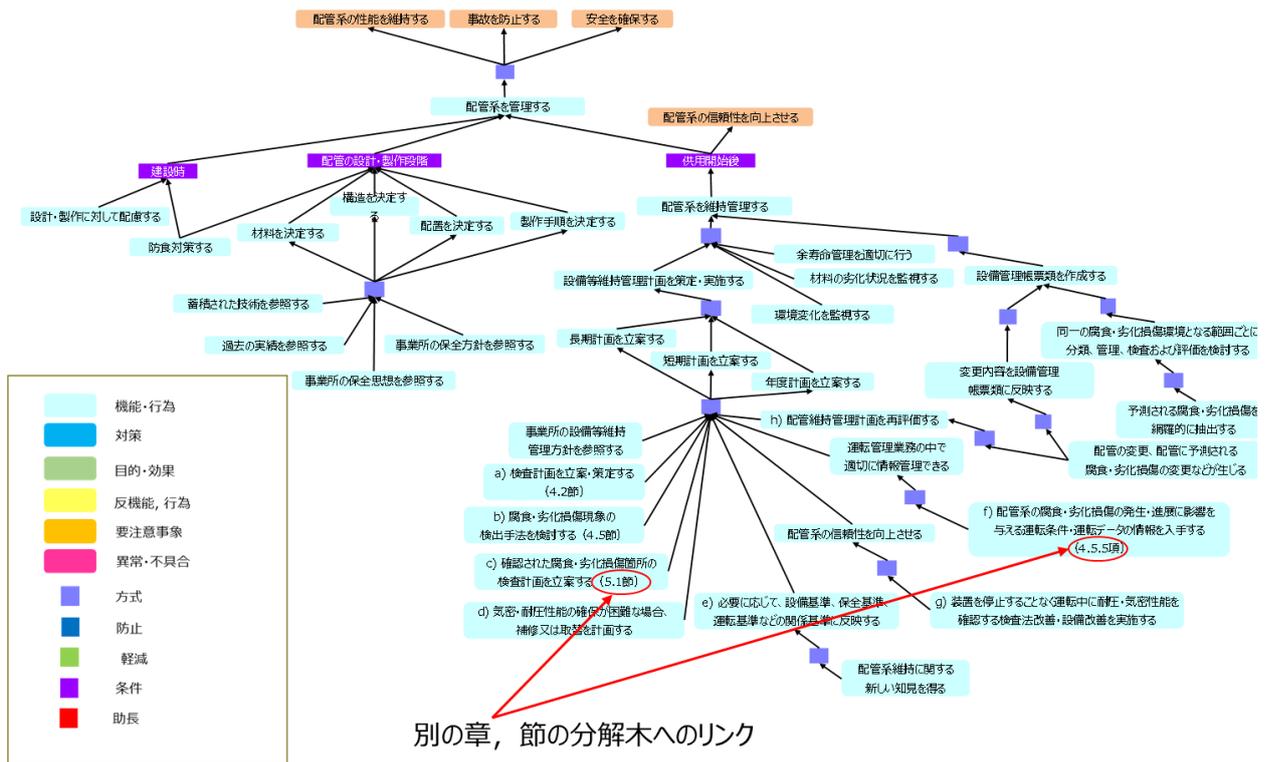


図13 「4. 配管系の管理 4.1 一般」の分解木

「5.1 腐食・エロージョンの検査」のテキストの抜粋を図14, 分解木を図15に示す。

検査箇所を  
エロージョンの検査

1) 腐食・エロージョンの検査  
腐食・エロージョンの発生を防止する。

— 高温・高圧を起すなど  
の検査

図14 「5.1 腐食・エロージョンの検査」の抜粋  
(配管維持規格 (JPI-8S-1-2018) 12 ページより抜粋)

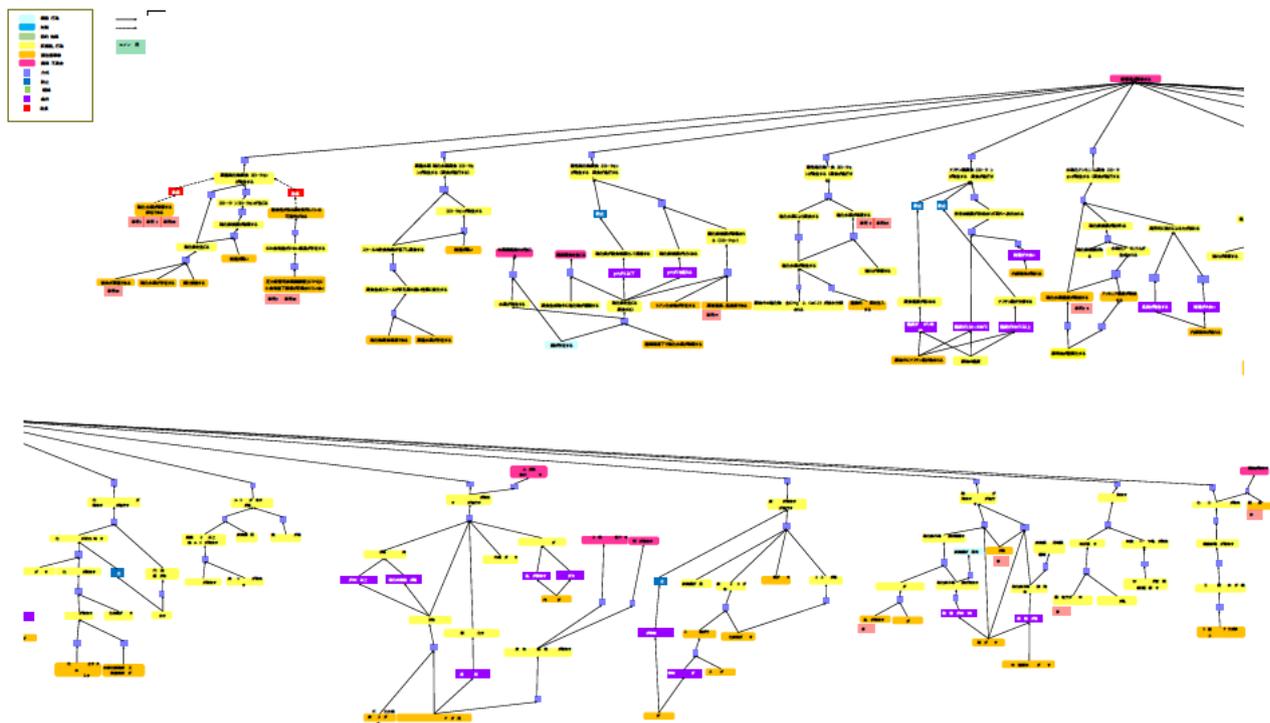


図15 「5.1 腐食・エロージョンの検査」の分解木

高温硫化物腐食に関する部分のテキストの抜粋を図16，分解木を図17に示す。

**高温硫化物腐食** 高温硫化物腐食は、高温状態にて主に硫化水素が鋼と直接化学反応を起し硫化鉄を生ずる腐食であり、蒸留、脱硫、分解装置の張込み系、反応系の高温部などに発生する。水素化脱硫装置の反応系では、水素が投入される上流側に発生する。検査点の選定に際しては、一般的に流体温度が高いほど腐食速度が大きくなるが、フランジ部近傍では放熱による温度低下が生じ腐食速度が低下するため、実際の温度に留意することが必要である（事例30）。流速が大きいと硫化鉄皮膜が剥離し、エロージョンコロージョンが発生する。また、高温硫化物腐食の発生可能性がある常圧蒸留装置オーバーフラッシュ配管、減圧蒸留装置スロップワックス抜出し配管などの水平配管では、流量計のオリフィスプレートの上下流やポンプ出口下流で気液分離が起り、硫化水素が配管上部に滞留し、腐食が発生した事例もあるので、腐食性ガスの滞留部にも注意が必要である。（事例1）（事例31）また、減圧蒸留装置原料油予熱系の滞留部（予熱加熱炉出口トランスファーラインドレンノズル）においても減肉事例があり（事例98）、当該系においては注意が必要である。

なお、圧力配管用炭素鋼鋼管（STPG）には、Siの含有量下限値が規定されていないため、Siの極端に少ない製品が混在していることがある。Siの極端に少ない製品の場合には高温硫化物腐食に対する耐食性が劣るので、高温硫化物腐食環境でSTPGを使用する場合は、注意する必要がある。（事例2）（事例32）

図16 「5.1 腐食・エロージョンの検査」から高温硫化物腐食の部分の抜粋  
 （配管維持規格（JPI-8S-1-2018）12ページより抜粋）

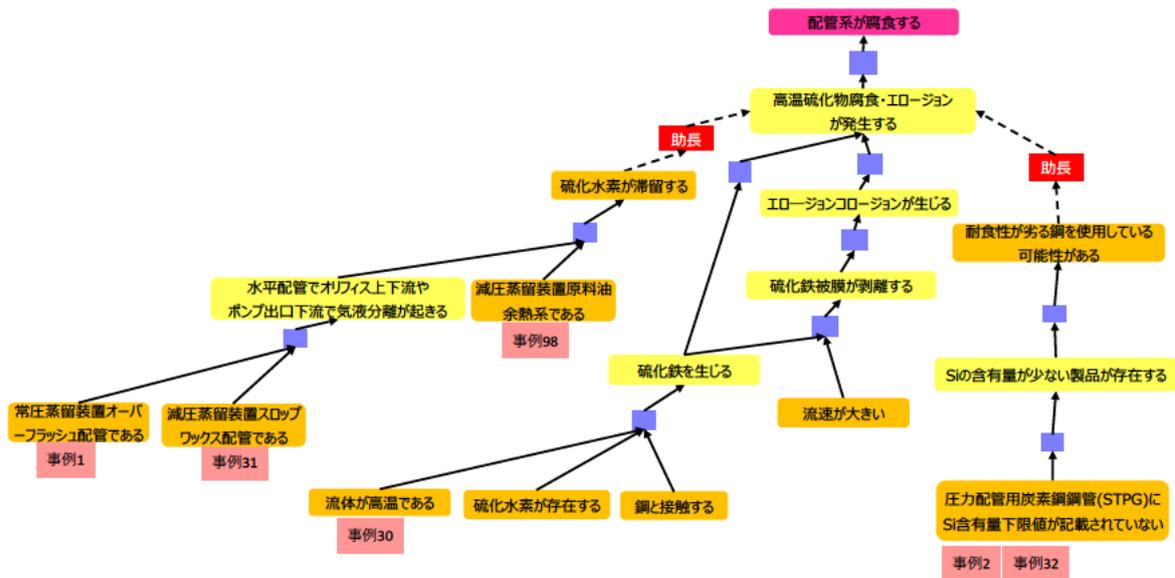


図 1 7 高温硫化物腐食の部分の分解木

図 1 7 では、事事故例をノードの近くに置いている。実際のシステムでは、これらのボタンをクリックすることで、当該事事故例が生じたメカニズムだけを抽出して表示するようにする。例えば、図 1 8 に示した事例 30 では、高温硫化物腐食が生じる主たるメカニズムとともに、寿命評価を行う部位が不適切だったことが要因であるため、主たるメカニズムを表示するとともに、検査箇所を選定に関連した分解木にリンクし、さらに事故の報告書にリンクを張り、クリックすることで参照可能とする。逆に、事例 DB からメカニズムや検査箇所を選定に関する分解木を参照することも可能である。

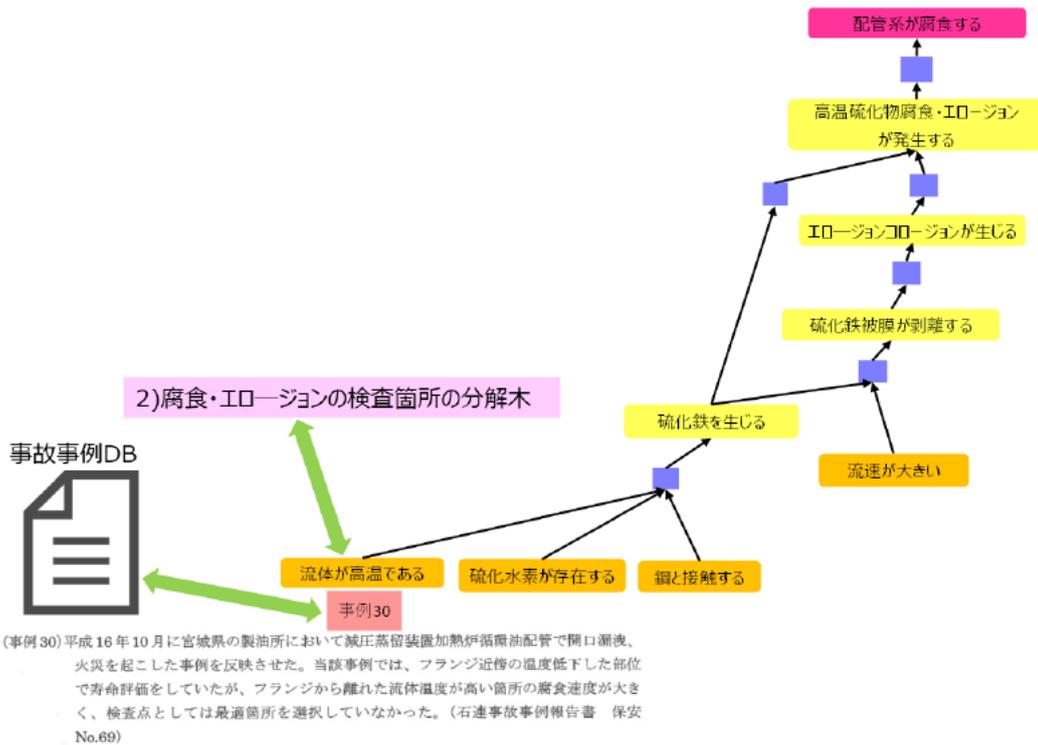


図 1 8 分解木と事例の対応付け (事例 30)

同様に、図19に示す事例2, 32では、主たる腐食メカニズムに加えて耐食性が劣る鋼の使用がそれを助長していたことが要因であるため、関連する分解木の枝を抽出して示している。

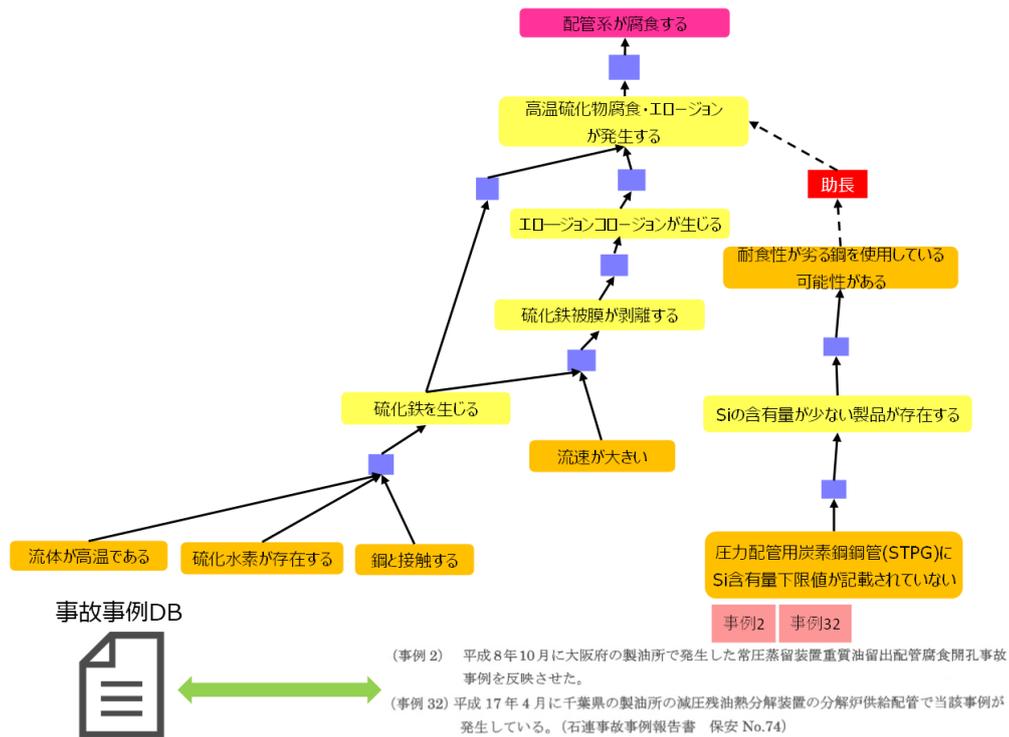


図19 分解木と事例の対応付け (事例2, 32)

また、図20に示す事例1, 31, 98では、主たるメカニズムに加えて硫化水素が滞留する部位であったことが助長しているので、それらの分解木の枝を抽出し、報告書にリンクする。分解木では、具体的な発生部位に共通することとして、腐食性ガスが滞留する部分であると記述されているので、これらの事例の部位でなくても、滞留する場合には気を付けるべきであるという気付きを与えられ、応用力を高められる。これが本技術の重要なポイントである。

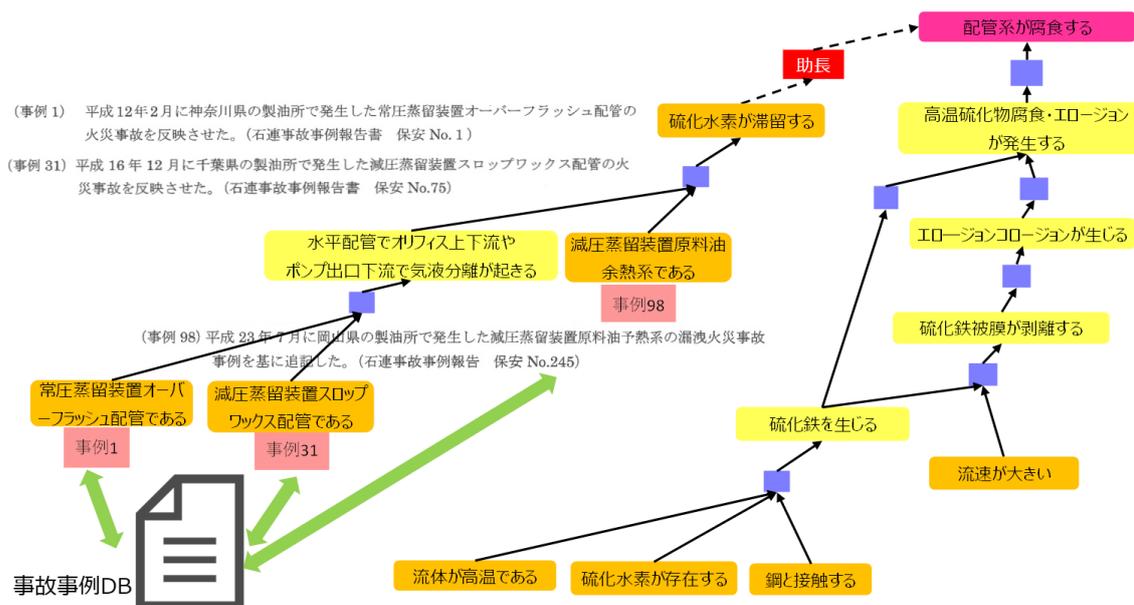


図20 分解木と事例の対応付け (事例1, 31, 98)

また、多くの事例が主たるメカニズムに加えてそれを助長するメカニズムが働いているので、図 2 1 のように、事例のリンクはその両方の分解木のノードに置くのがよい。

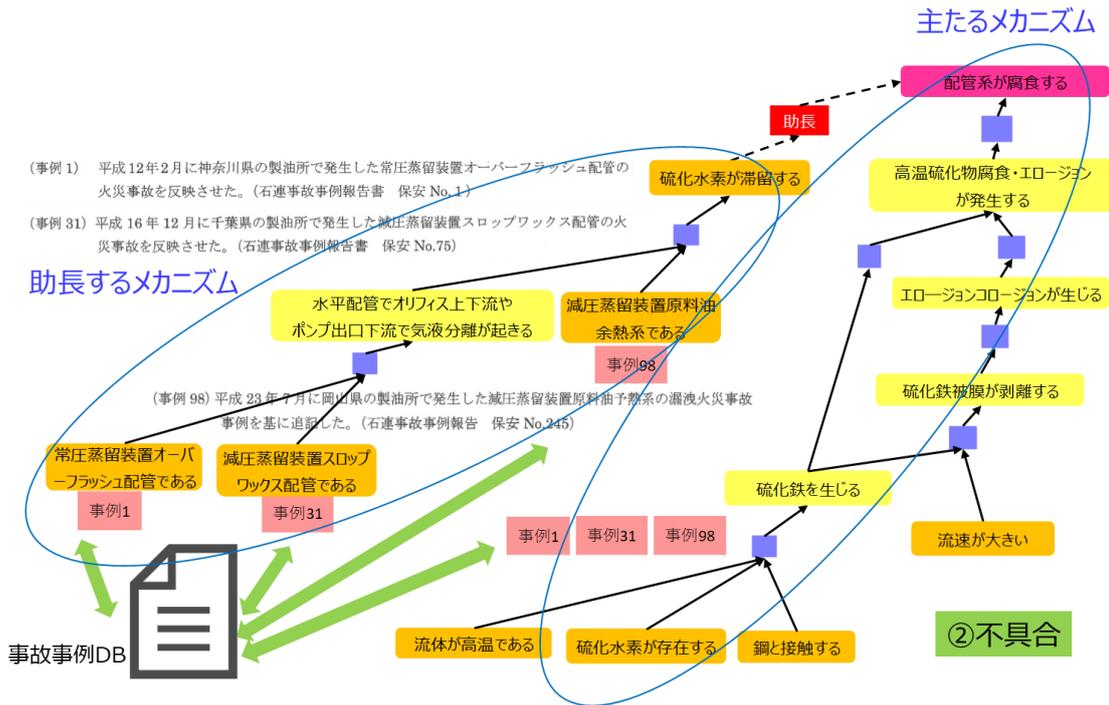


図 2 1 メカニズムと事例の対応付け

## 7. 対策の分解木と事例の対応付けの例

具体的な対策の分解木を2つの例について説明する。「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」のテキストの抜粋（クリープ損傷）のテキストの抜粋を図22，その分解木を図23に示す。

**2) クリープ損傷** クリープ損傷は、高温クリープ領域（低合金鋼の場合 450℃以上）における経時的な損傷であり、クリープポイドからマイクロクラックへと成長し、最終的に破損に至る現象である。この現象は、非常に長時間をかけて進展するため、一般的に採用されているクリープ破断試験による評価や Larson-Miller などのパラメータを利用した累積損傷量の計算で安全サイドの評価ができる。ただし、次のようなケースでは全寿命が短くなることがあるので、クリープ破断寿命の再評価と非破壊検査などによって確認する。

- － 高温腐食などによる減肉で、局部的に応力が高くなっている配管
- － 疲労又は熱疲労との相乗作用が想定される配管

クリープ損傷の一種であるクリープ脆化は、材料組織上の変化によって脆くなるため、切欠き感受性が高くなり、溶接熱影響部などに割れを誘発する現象である。クリープ脆化の場合、予想寿命よりも早期に割れにいたるケースがあるので、特にクリープ破断延性が低下しやすい 1Cr-0.5Mo 鋼や 1.25Cr-0.5Mo 鋼の溶接部は、非破壊検査によって確認する。

図22 「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」のテキストの抜粋（クリープ損傷）  
 （配管維持規格（JPI-8S-1-2018）26～27 ページより抜粋）

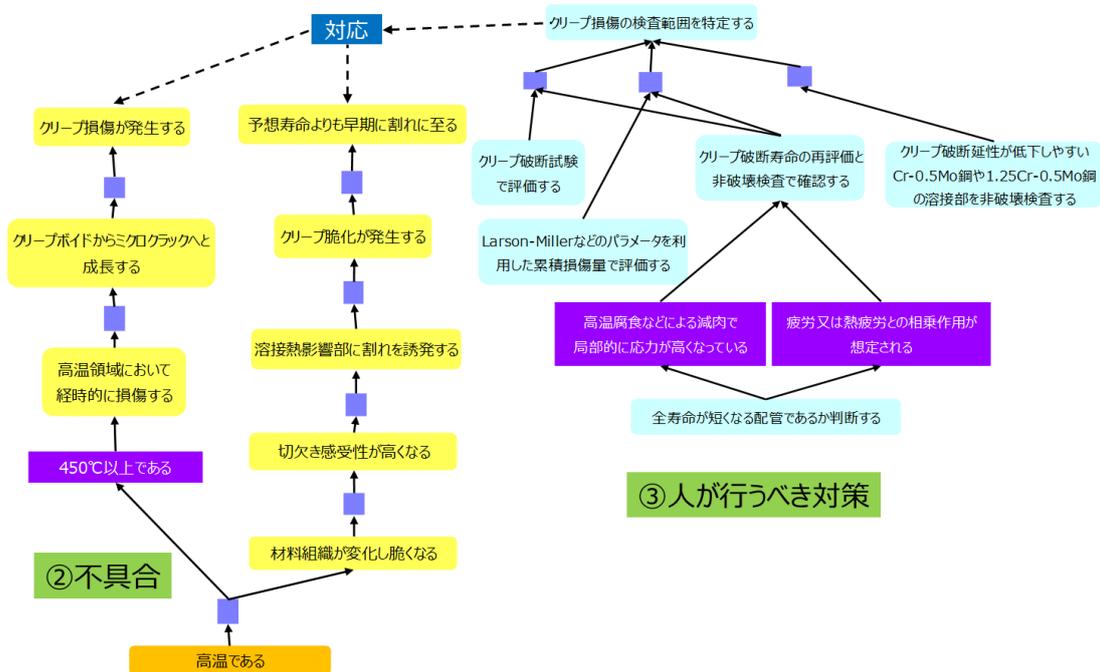


図23 「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」（クリープ損傷）の分解木

「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」のテキストの抜粋（疲労）のテキストの抜粋を図 2 4，その分解木を図 2 5 に示す。

**c) 疲 勞**

**1) 振動疲労** 構造部材に変動荷重が繰り返し負荷され続けた場合、材料の降伏点以下の応力で疲労による割れを発生することがある。回転機械などからの振動や内部流体の脈動（事例170）などによって変動荷重が繰り返し負荷される配管系で、構造上応力が集中しやすい部位は、検査の対象となる。ただし、適切なサポートの設置、部材の厚肉化、隅肉溶接部の補強などの応力緩和策によって、検査範囲を限定できる。（事例69）（事例134）

複雑な形状、負荷を受ける配管系は、通常、設計段階で応力解析が実施され、その結果によって適切なサポートなどの補強対策が施されているが、運転開始後に振動、その他の異常が観測された場合には、応力解析と適切な対策の必要性を改めて検討する。対策を実施する場合には付表 2-1 に示した振動疲労対策の事例内容に留意する。

**2) 熱疲労** 流体が激しい温度変化を繰り返すことによって、構造部材が繰り返し熱応力を受けて疲労し、割れを発生することがある。温度差のある流体の合流部近傍では局部的にこの現象が生じ、熱疲労割れを発生することがある。

図 2 4 「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」のテキストの抜粋（疲労）  
 （配管維持規格（JPI-8S-1-2018）28 ページより抜粋）

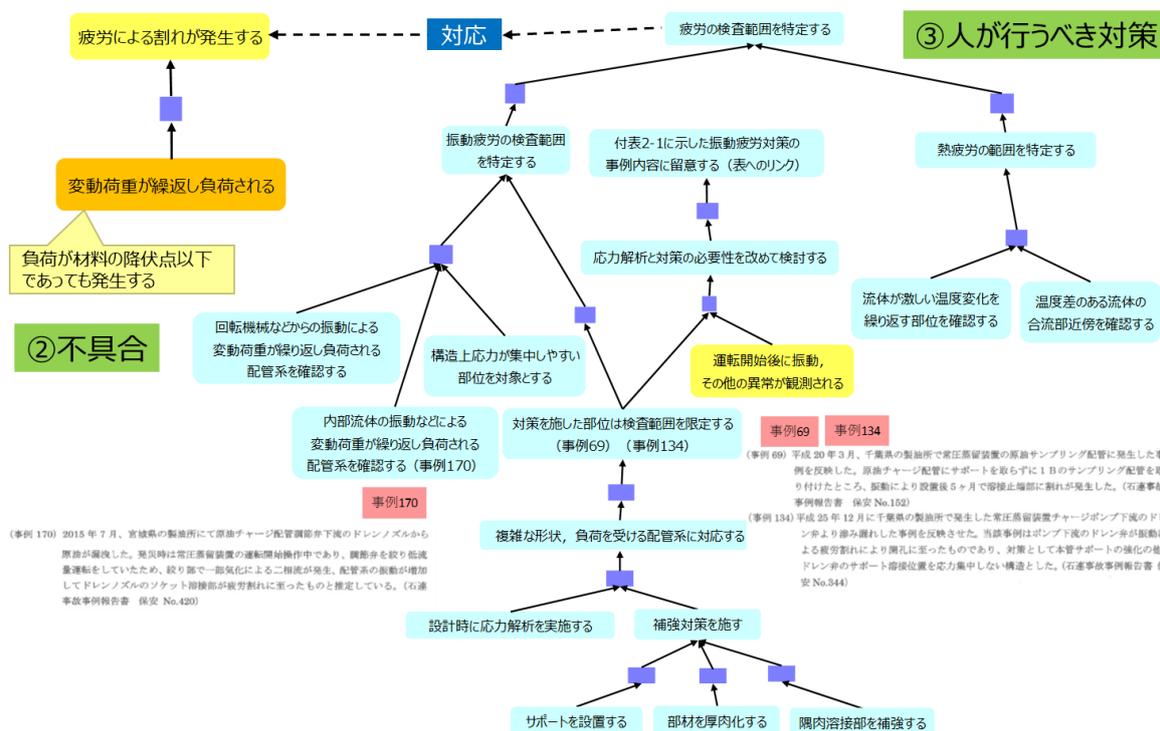


図 2 5 「5.2.1 劣化損傷検査の範囲」(疲労)の分解木

これらの対策の分解木についても、不具合の分解木の場合と同様に図 2 6 に示すように事例と対応付けることが可能である。

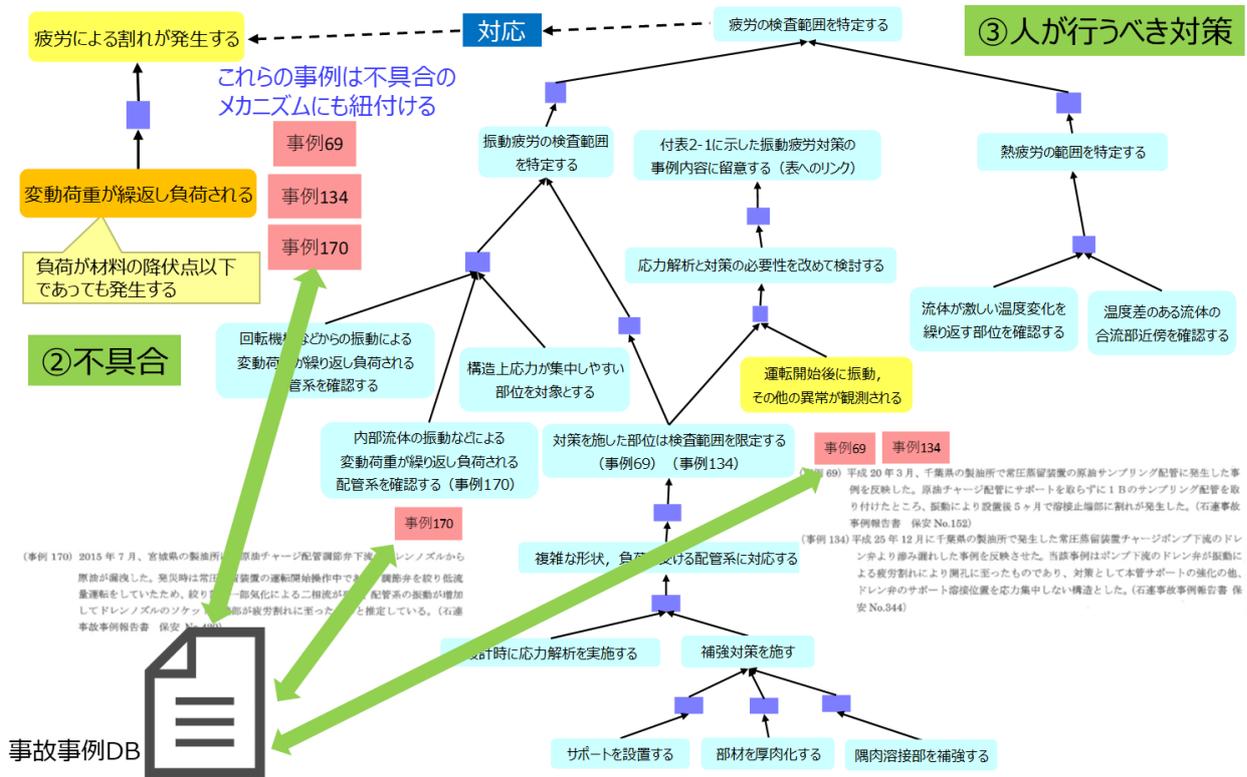


図 2 6 対策の分解木と事例の対応付け

## 8. 設備本来の機能, 不具合, 対策の分解木の対応付け

配管維持規格には、①設備が本来果たすべき機能に相当する記述はないので、分解木の構成としては図27に示すように、不具合の分解木と、検査や補修などの対策の分解木を記述して対応付けることになる。

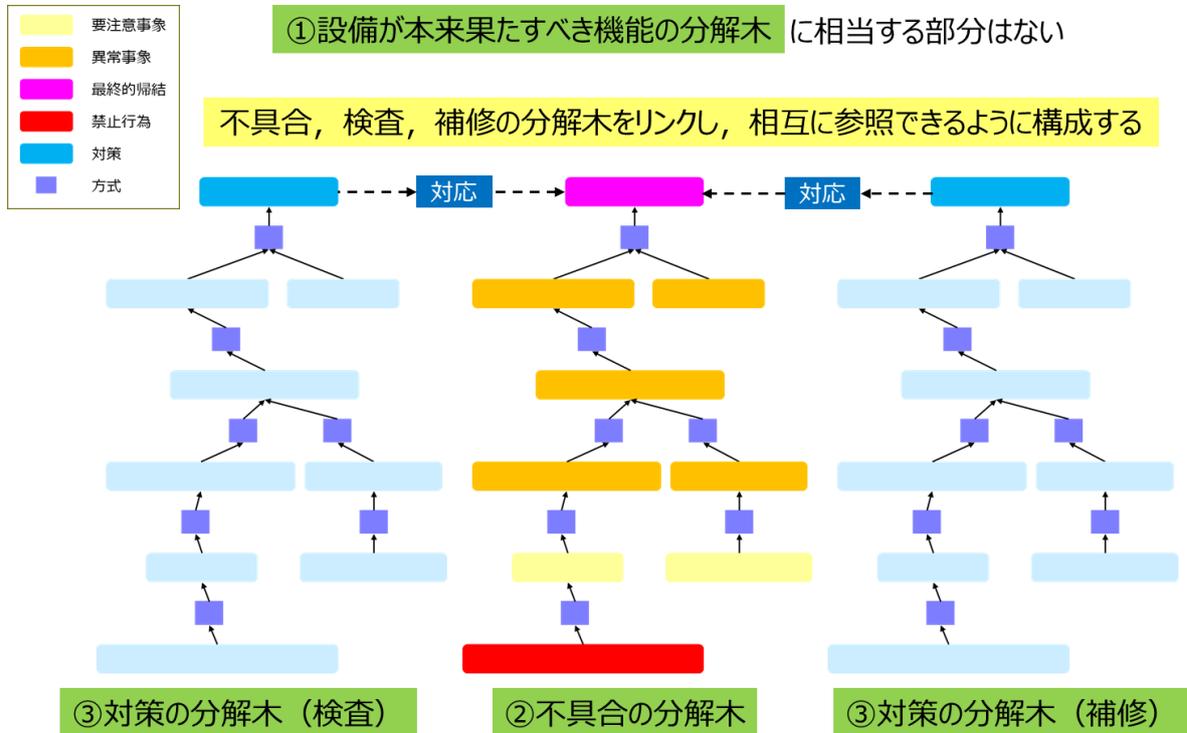


図27 配管維持規格の分解木の構成

本技術を①設備が本来果たすべき機能を含むような別の維持規格に適用することも可能であるが、ここでは、鉄鋼材料の分解木を例に挙げて設備本来の機能, 不具合, 対策の分解木の対応付けについて説明する。

図28は鋼の強化機構の分解木であり、鉄鋼材料が本来果たすべき機能の分解木である。これに、元素を添加することによる副作用としての不具合を追記したものが図29, さらにそれを防止するための対策を加えたものが図30のようになる。

このように、3種類の分解木を用いることにより、本来のメカニズムを理解した上で、起こり得る不具合をあらかじめ想定して対策を取っておくことが可能となる。

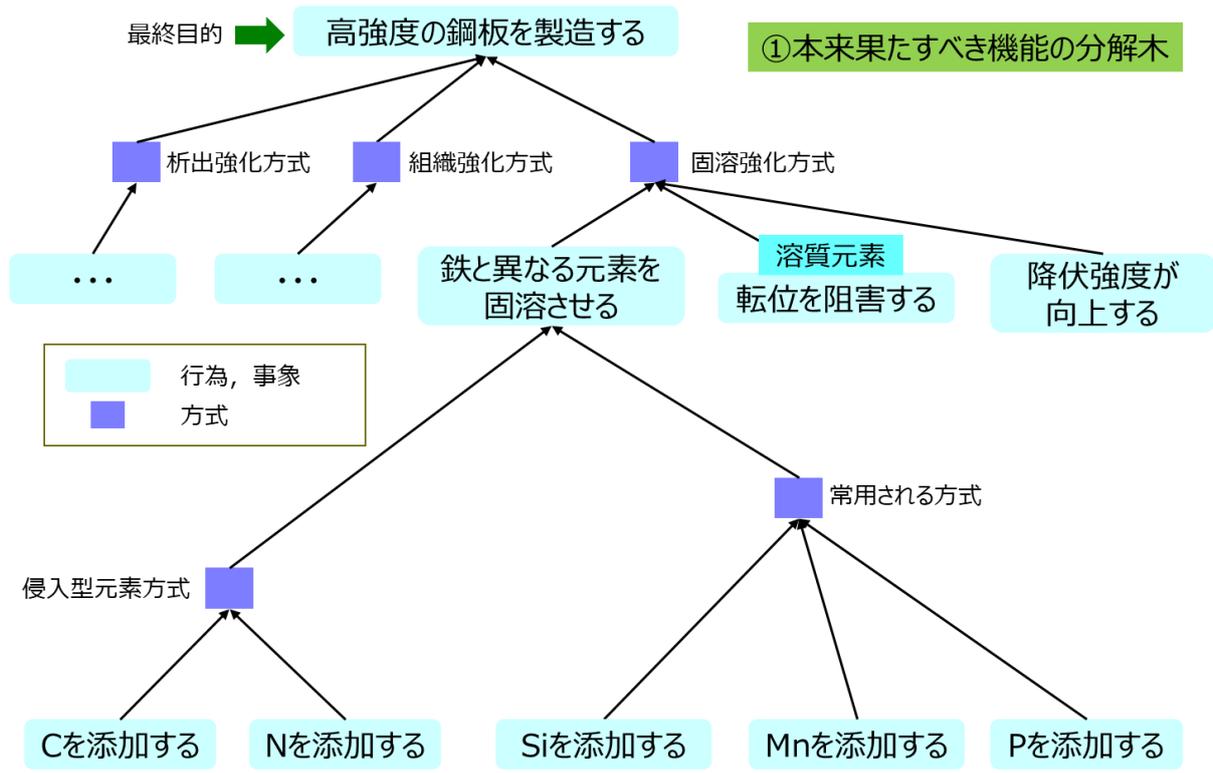


図 2 8 鋼板の強化機構の分解木 (①本来果たすべき機能)

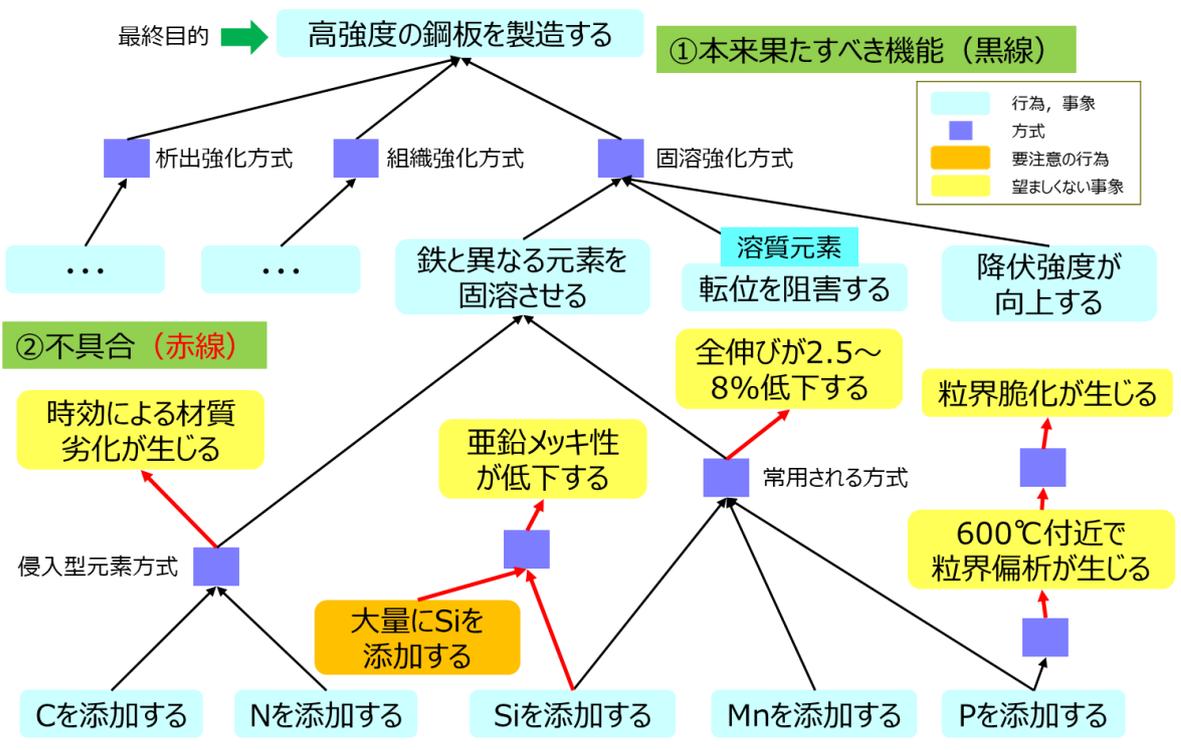


図 2 9 鋼板の強化機構の分解木 (本来果たすべき機能+不具合の分解木)

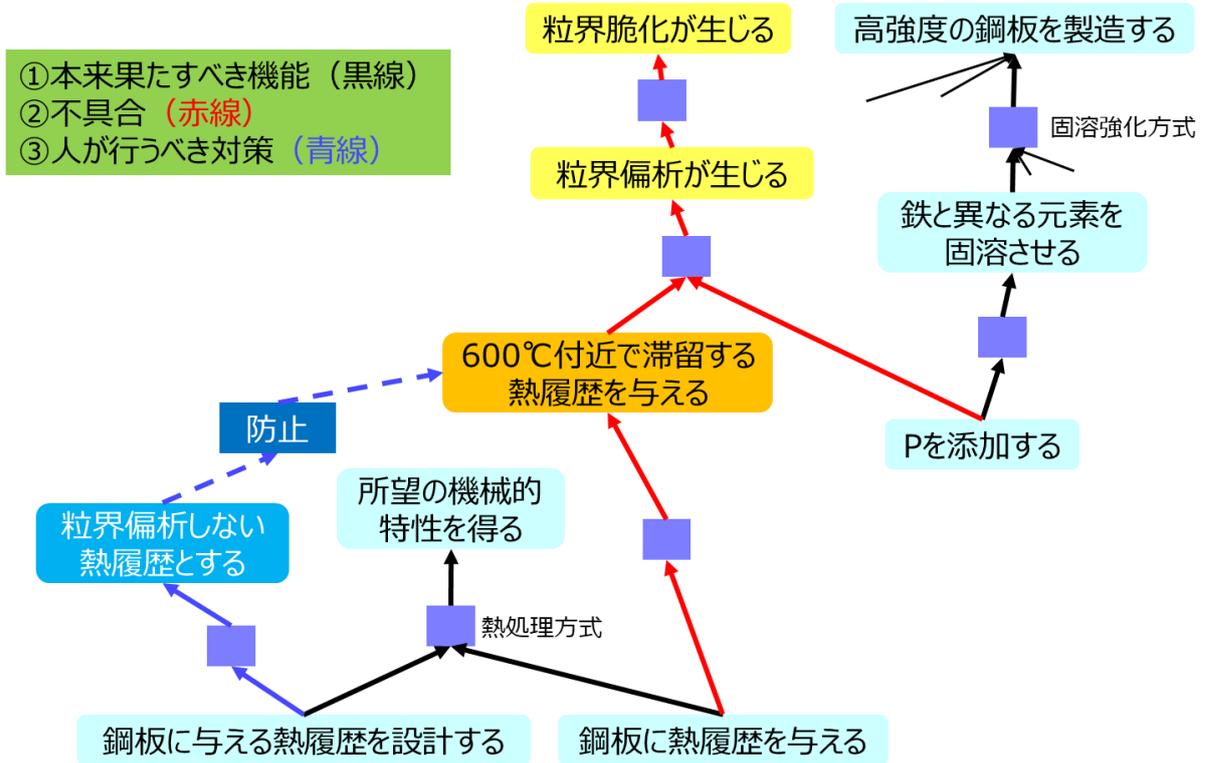


図30 鋼板の強化機構の分解木  
 (本来果たすべき機能+不具合+対策の分解木)

## 9. 活用方法

本技術では、知識をコンパクトに集約し、体系化することができる。これによって以下が可能となる。

- ・ 専門家、熟練者の知見、経験、ノウハウを整理し、保存、伝承、共有化する
- ・ 教育に活用する。体系化された構造化マニュアルとして利用し、詳細は元の文書にリンクを張って参照できるようにする
- ・ 現場の作業手順、注意点、トラブルシューティングなどのガイダンスとして利用する

現場での活用のため、可搬性、操作性に優れたタブレットで分解木を閲覧するシステムを開発中である。キーワード検索から枝を抽出してハイライト表示する、大きな枝から末端までをスムーズに表示するなど、見せ方の工夫を行う予定である。

また、分解木を用いてトラブル事例の整理・解析を行うことができる。データベースに蓄積された事故事例やヒヤリハットを対応する分解木の枝に紐付けることにより、分解木とデータベースを相互に参照可能し、類似した事故やその対策の検索、原因の分類や重要性の評価などの解析に利用する。

不具合の分解木は、設備の設計・施工の不備や劣化などの根源的な原因から、設備の破損、故障、事故のような望ましくない、あってはならない最終的な帰結に発展するまでのメカニズムを記述したものである。データベースに蓄積された事故事例やヒヤリハットの情報は、不具合の分解木の枝のいずれかに紐づけることができる。もし対応する枝が存在しない場合には、それがこれまでにないメカニズムで生じたことになり、分解木に新たな枝を追加する必要があることになる。類似した事故やその対策の検索、原因の分類や重要性の評価などの解析に用いることができる。

図3-1は、不具合の分解木を事例と対応づけることにより、不具合事象、メカニズムの重要性の評価に用いる例を示したものであり、対応する事例の数によってノードとノードを結ぶ線（リンク）の太さを変えて表示している。これにより、重要なメカニズムを明瞭に可視化することができる。

また、不具合の分解木には、その対策の分解木が関連付けられており、事例は対策の分解木にも対応付けることができる。対策の分解木では、設備の設計・施工、保安・保全、操業上の注意点などが具体的に記述されるので、利用者の熟練度によらず適切な対策を取ることができるようになる。

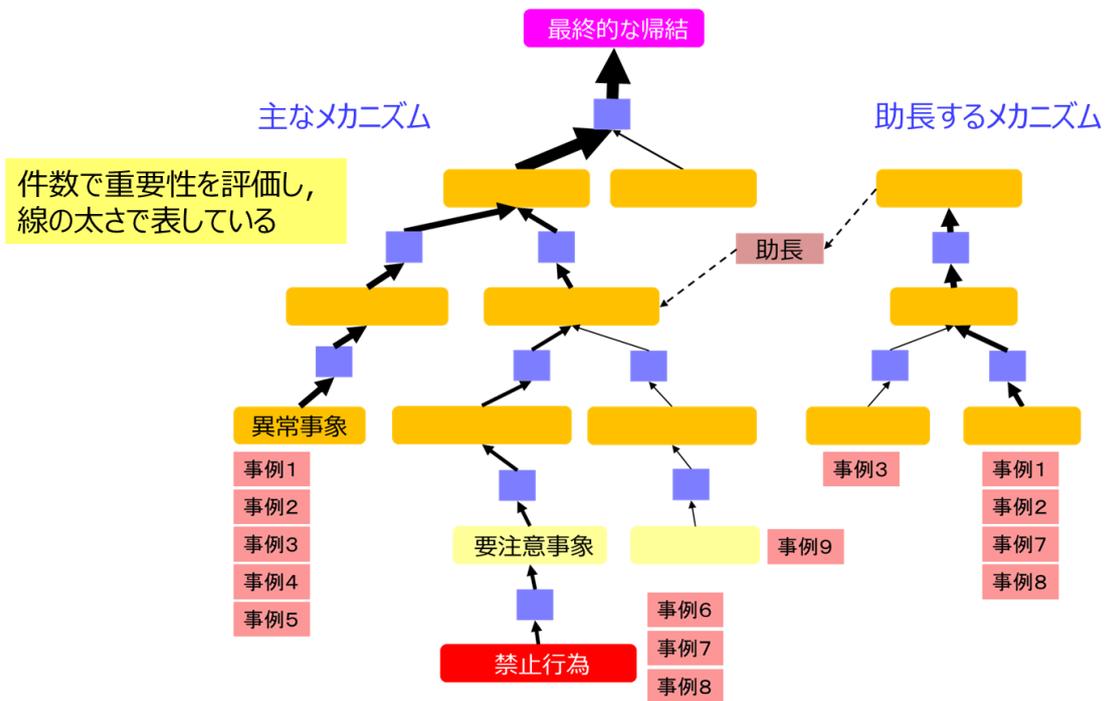


図3 1 不具合事象，メカニズムの重要性の評価

## 9. まとめ

本報告書では、機能オントロジーによる知識・技術の保存、伝承、共有化についてご提案し、石油学会の配管維持規格を対象として試作した結果について述べた。

本報告書に取り上げた例で示すように、各章のさまざまな内容を本技術で記述可能であることを示した。

機能オントロジーの特長として、マニュアルのまる覚えではなく、行為の目的を理解させることができること、因果関係の連鎖としてメカニズムを記述することで気付きを与えることができ、応用力を高められることが挙げられる。これを活かして教育、現場作業のガイダンス、蓄積された文書情報の整理・解析への活用が可能であり、設備設計、施工、操業、保全の各フェーズで参照することでポイントを確認し、ミスを防止することが可能となる。

また、事件事例、ヒヤリハットのデータベースとのリンクによる分解木の活用による事故原因、メカニズムの分析や重要性の評価についても本文中で詳述した。

### 参考文献

- 1) 來村，溝口： オントロジー工学に基づく機能的知識体系化の枠組み，人工知能学会誌，Vol. 17, No. 1, pp. 61-72, 2002.
- 2) 來村ら： オントロジーに基づく機能的知識の体系的記述とその機能構造設計支援における利用，人工知能学会誌，Vol. 17, No. 1, pp. 73-84, 2002.
- 3) 古崎： ドメインオントロジーの構築と利用，情報知識学会誌，Vol. 19, No. 4, pp. 296-305, 2009.

### 引用文献

- a) 公益社団法人石油学会が発行する石油学会規格 配管維持規格（石油学会規格番号：JPI-8S-1-2018）

# 石油精製に係る競争力技術動向調査に 関する調査の情報発信

- 国際会議（日中韓石油技術会議） -

令和2年度燃料安定供給対策に関する調査事業  
(製油所の競争力に係る技術動向に関する調査)

令和3年3月



一般財団法人石油エネルギー技術センター

Japan Petroleum Energy Center (JPEC)

## 1. はじめに

(1) JPEC は、かねてより中国および韓国の最新石油関連技術の情報収集・情報交換を、中国とは1990年代初頭より、韓国とは2005年より2国間で個々に実施していた。

近年では経済産業省からの石油精製に関する諸外国における技術動向・規制動向等の調査・分析事業の一環として、両国の石油精製関連情報の収集に努めている。

2007年より3か国一同に開催することとなり、「第1回日中韓技術交流会議」を東京にて実施し、2020年で13回目の開催となる。

### 日中韓関連の技術交流会履歴 (1994年-2019年)

開催年	対象国	開催日時	会議名称	開催地	交流先他	
1994	平成6	中国	9.20-22	第5回日中石油精製研究・技術交流会	中国・九江	石油学会主催 (PEC支援)
		中国	12.20-22	第1回日中石油情報交流セミナー	北京	SINOPEC・CNPC
1995	平成7	中国	9.11-12	第2回日中石油情報交流セミナー	東京	CNPC
		中国	9.18-19		東京	SINOPEC
		中国	11.27-28	第6回日中石油精製研究・技術交流会	東京	石油学会主催 (PEC支援)
1996	平成8	中国	11.6	第3回日中石油情報交流セミナー	北京	CNPC
		中国	11.7		北京	SINOPEC
1997	平成9	中国	9.16	第4回日中石油情報交流セミナー	東京	CNPC
		中国	9.17		東京	SINOPEC
		中国	10.20-22	第7回日中石油精製研究・技術交流会	北京	石油学会主催 (PEC支援)
1998	平成10	中国	11.24-25	第8回日中石油精製研究・技術交流会	東京	石油学会主催 (PEC支援)
1999	平成11	中国	10.12	石油製品品質管理セミナー	中国・茂名	中国石化品質協会
2000	平成12	中国	10.16-18	第9回日中石油精製研究・技術交流会	上海	石油学会主催 (PEC支援)
		中国	12.12	情報交流セミナー	北京	SINOPEC
2001	平成13	中国	3.5	設備診断技術交流会	上海	SINOPEC
2005	平成17	中国	9.7	第1回PetroChina・JPEC石油技術交流会	上海	PetroChina
		中国	9.9	第1回SINOPEC・JPEC石油技術交流会	上海	SINOPEC
		韓国	9.28-29	第1回日韓石油技術交流セミナー	東京	K-Petro
2006	平成18	中国	3.6-7	第2回PetroChina・JPEC石油技術交流会	北京	PetroChina
		中国	3.9-10	第2回SINOPEC・JPEC石油技術交流会	北京	SINOPEC
		韓国	10.24-26	第2回日韓石油技術交流セミナー	韓国	K-Petro
2007	平成19	中国・韓国	12.3-5	第1回日中韓石油技術会議	東京	中国石油学会・K-Petro
		韓国	12.6	第3回日韓石油技術交流セミナー	東京	K-Petro
2008	平成20	韓国	10.29	第4回日韓石油技術交流セミナー	ソウル	K-Petro
		中国・韓国	11.26-28	第2回日中韓石油技術会議	中国・海南島	中国石油学会・K-Petro
2010	平成22	韓国	1.21	第5回日韓石油技術交流会議	東京	K-Petro
		中国・韓国	5.25-27	第3回日中韓石油技術会議	韓国・慶州	中国石油学会・K-Petro
2011	平成23	中国・韓国	2.22-24	第4回日中韓石油技術会議	東京	中国石油学会・K-Petro
2012	平成24	中国・韓国	9.4-5	第5回日中韓石油技術会議	中国・大連	中国石油学会・K-Petro
2013	平成25	中国・韓国	9.4-6	第6回日中韓石油技術会議	韓国・麗水	中国石油学会・K-Petro
2014	平成26	中国・韓国	10.28-30	第7回日中韓石油技術会議	日本・東京	中国石油学会・K-Petro
2015	平成27	中国・韓国	10.21-23	第8回日中韓石油技術会議	中国・北京	中国石油学会・K-Petro
2016	平成28	中国・韓国	6.28-30	第9回日中韓石油技術会議	韓国・蔚山	中国石油学会・K-Petro
2017	平成29	中国・韓国	10.31-11.2	第10回日中韓石油技術会議	日本・東京	中国石油学会・K-Petro
2018	平成30	中国・韓国	11.5-8	第11回日中韓石油技術会議	中国・広州	中国石油学会・K-Petro
2019	平成31	中国・韓国	11.11-14	第12回日中韓石油技術会議	韓国・ソウル	中国石油学会・K-Petro

(2) 議論するテーマは、製油所の運営効率化や、石油精製・触媒等の最新技術、燃料品質管理、環境に対する取り組み内容、としている。

2020年の13回目となる同会議では、精製技術だけではなく、脱炭素に向けた新燃料油の開発や製油所でのCO2排出量削減策などを折り込んだ、以下のテーマで研究発

表を日本にて実施することとなっていた。

- ① 石油精製技術と開発
- ② 燃料の品質管理と環境問題
- ③ 代替燃料と次世代車のトレンド
- ④ 製油所における「AI」活用技術
- ⑤ 製油所における石油化学変換技術

(3) しかしコロナウイルス感染拡大防止の観点から、海外からの受け入れや多人数が出席しての会議開催の見送りがされている中で、同会議を実施することは困難となった。

そこで2020年については、各国から上記(2)の①～⑤のテーマに沿った研究発表資料を持ち寄り、紙面での情報交換を実施する運びとなった。

今年度については、以下添付資料をもって「日中韓石油技術会議」とする。

本調査が、我が国石油産業の今後の経営基盤強化の一助となれば幸いである。

以 上

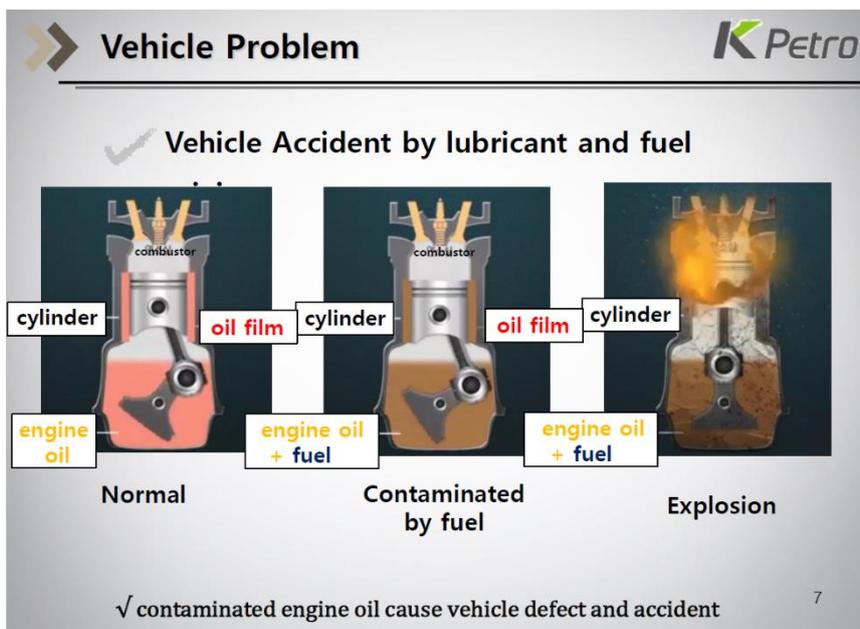
令和3年3月

一般財団法人石油エネルギー技術センター

■ 日中韓石油技術会議：資料概要

1. 燃料による汚染されたエンジンオイルの分析（韓国）

- (1) エンジンオイルは、燃料またはエンジンシステムの欠陥により燃料と混合する可能性がある。
- (2) 大量の燃料で汚染されたエンジンオイルは、オイルや車両の機能に問題を引き起こすため、燃料混合によってエンジンオイルの機能がどのように変化するか、その特性を調査した。
- (3) 燃料を含むエンジンオイルは、燃料を含むエンジンオイルは、低い引火点、流動点、密度、動粘度、およびコールドクランキングシミュレーター値を示す。



- (4) 燃料を含んだエンジンオイルは、4 ボールテストで潤滑性の値が低くなった。
- (5) エンジンオイル中の燃料を測定するために、SIMDIST によって GC パターンを調査した。  
燃料は、SIMDIST のエンジンオイルよりも早い保持時間で検出された。SIMDIST を使用して燃料含有量の定量分析を行うことができた。  
SIMDIST 法は、燃料油の混合によるオイルの汚染状態を診断するのに役立つことが判明した。

## Analysis of SIMDIST



SIMDIST Analyzer  
(Thermo, Trace GC Ultra)

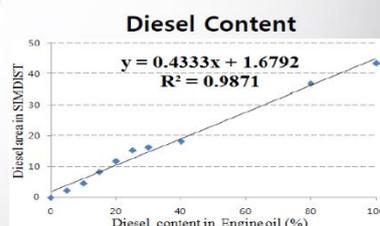
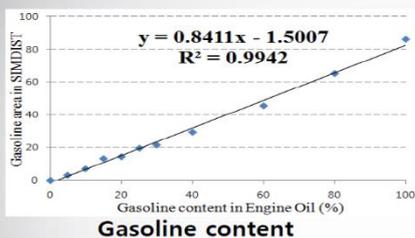
- The boiling range distribution of petroleum fractions provides an insight into the composition of feedstocks and products related to petroleum refining processes.
- The gas chromatographic simulation of this determination can be used to replace conventional distillation methods for control of refining operation.

Manufacture	Thermo
Model	Trace GC Ultra
Test Method	ASTM D 2887
Column	10 m * 0.53 mm ID * 0.88 μm
Oven Temp.	Initial ; 40 °C, 1 min hold Increase ; 15 °C/min to 360 °C, 10 min hold
Detector	FID (370 °C)

√ need to alternative analytic tool when tiny sample

23

## Quantitative Analysis of fuel by SIMDIST



√ possible to quantitative analysis for fuel content in engine oil

28

## 2. GHG および硫黄酸化物削減可能性をもつ船舶用バイオ燃料の開発 (韓国)

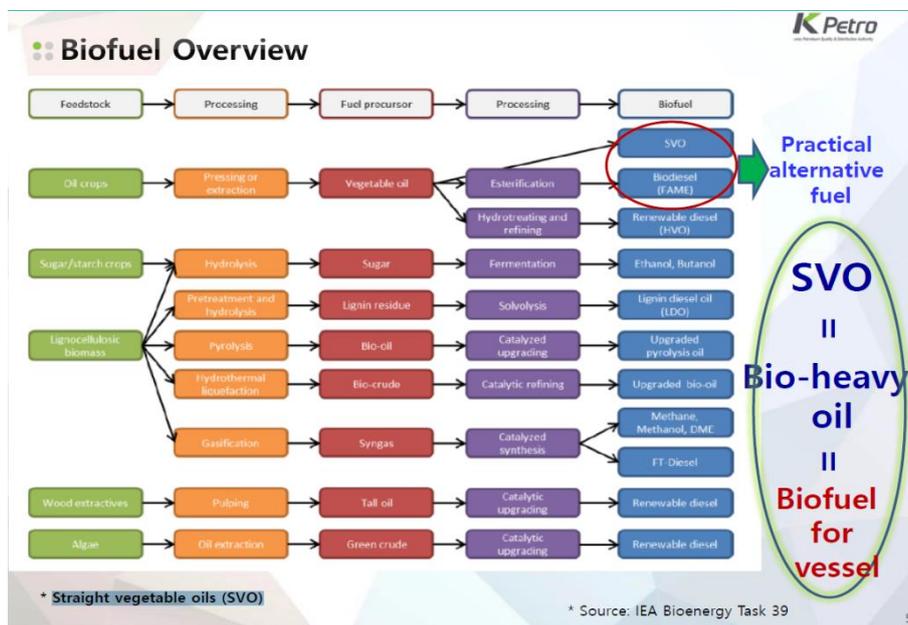
- (1) 2020 年の船舶燃料油の硫黄分規制に伴い、全船舶は①低硫黄燃料の利用、②スクラバーの設置、③LNG 船への切り替え、を中心とした対応策を余儀なくされる。
- (2) カーボンニュートラルの特性を持つバイオディーゼル燃料が注目される。燃焼させても大気中の CO<sub>2</sub> 濃度が増えない為、低炭素社会の実現に貢献する。

■FAME と SVO の2種類のバイオディーゼル燃料

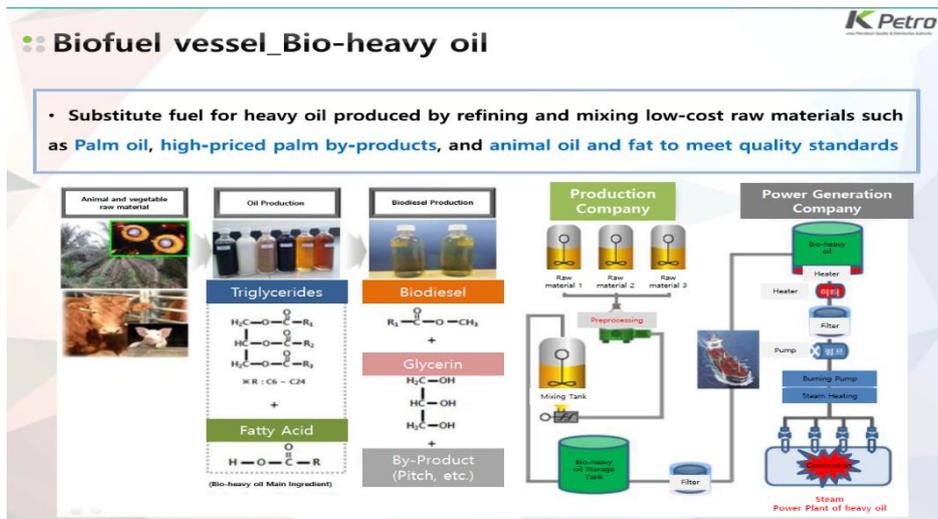
「FAME (脂肪酸メチルエステル)」と「SVO (ストレートベジタブルオイル)」は、いずれも原料は同じ廃食油 (植物油) だが、生成プロセスが異なる。

- FAME は植物油にメタノールを添加し、エステル交換反応させて生成。副産物としてできるグリセリンなどの不純物除去の精製工程が必要だが、軽油と同等の燃焼性を有す。
- SVO は不純物を取り除いただけの植物油 (廃食油)。常温で粘性が高い (軽油の約10倍) ため、用途は限定的だが、生成プロセスが少ないことが特長。

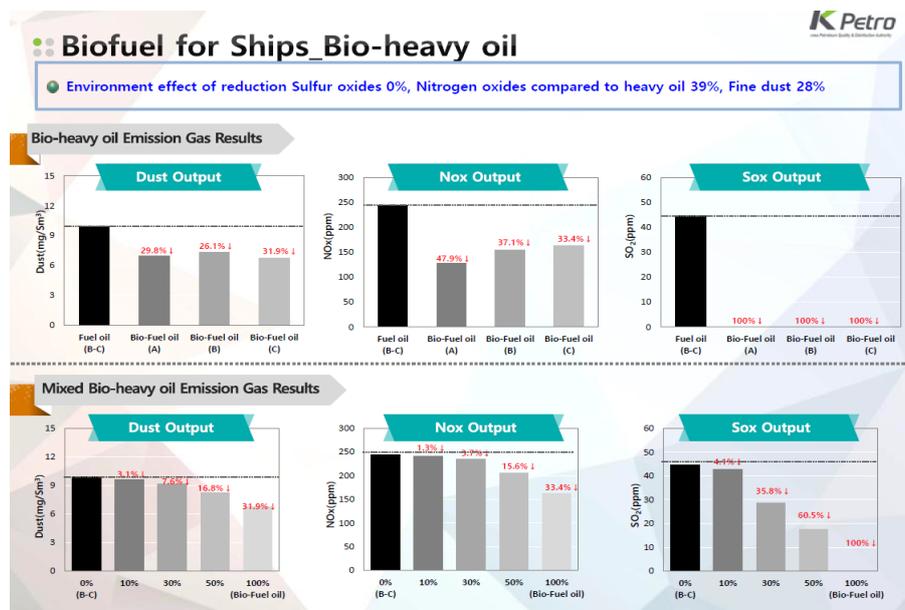
船舶用燃料として、この2つのバイオ燃料に注目した。



- (3) 低硫黄の船舶燃料として、パーム油、高価なパーム副産物、動物油脂などの低コストの原材料を精製して混合し、品質基準を満たす重油の代わりに燃料を使用する。



(4) 「バイオ燃料」と「重油とバイオ燃料との混合」の環境効果（硫黄酸化物、た窒素酸化物、微粉末）



(5) 試験結果

- ① 船舶用バイオ燃料としてのバイオヘビーオイルの品質評価による完全な適用性  
-船舶品質基準の IS08217 基準に準拠するための要件を改善する必要
- ② 船舶用バイオ燃料としての小型船舶エンジンへのバイオ重油の適用の完全な検証  
-船舶の燃料と船舶のバイオ燃料を混合する場合、バイオ燃料の性能は船舶用燃料と類似  
-Sox、PM、THC の排出削減効果
- ③ 品質とエンジン性能の評価を通じて、船舶のバイオ燃料としてのバイオ重油の適用性を確認した

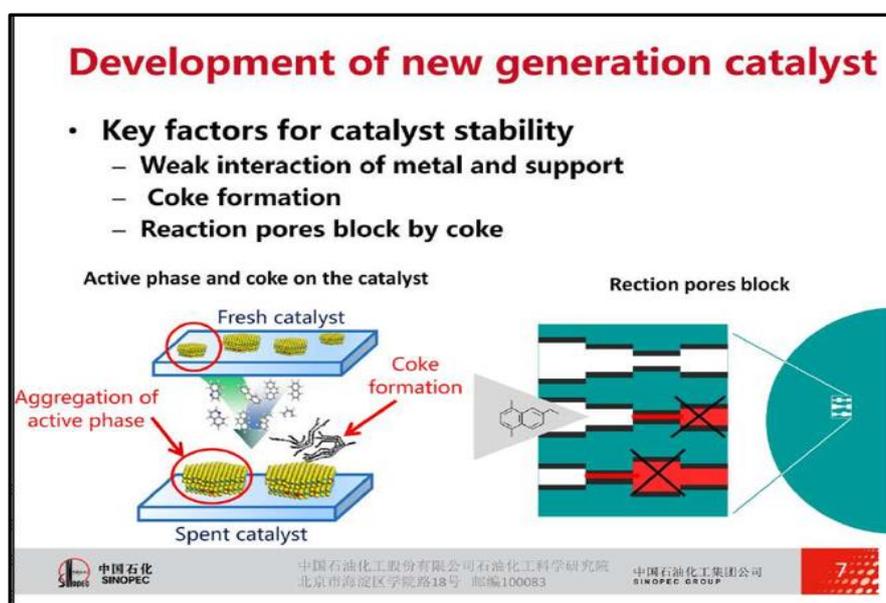
### 3. RIPP の新世代ディーゼル水化触媒（中国）

- (1) 脱炭素戦略が社会的責任となっている今、産業界においてクリーンディーゼルの需要は非常に高まっている。

クリーンディーゼルの製造戦略は、新しいプロセス、操作の重症度、新規反応器内部、触媒など、多くの側面から検討する必要がある。最も経済的で効率的なソリューションは、より活性で安定した触媒を開発すること。

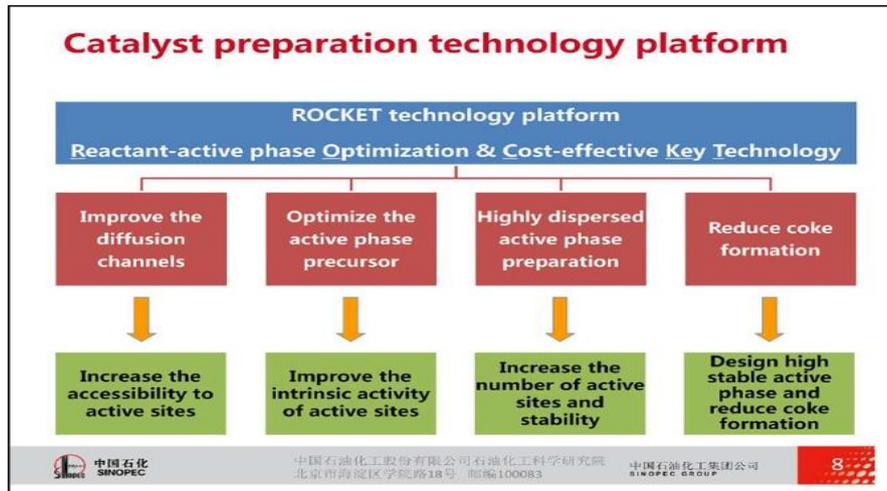
- (2) 触媒安定性は、コークスによる金属および支持相互作用、コークス形成および反応孔ブロックから考えることができる。

金属と支持の弱い相互作用は、活性相の凝集につながる可能性がある。反応期間中は、コークスを触媒上に形成することができる。一方、反応孔は気孔によって遮断され、気孔中の活性部位は反応物によってアクセスできない。

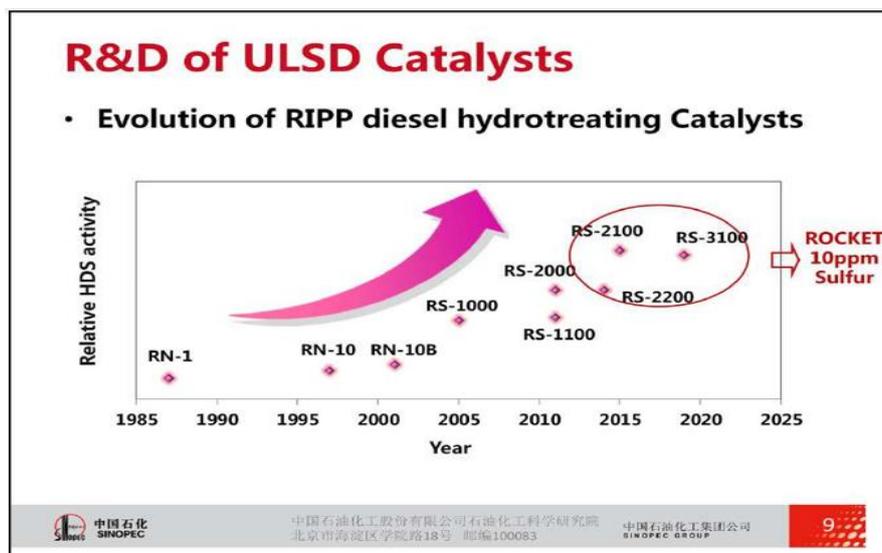


- (3) 高い活性と安定性を持つ触媒を調製するために、ROCKET 技術プラットフォームは、リ反応活性相最適化と呼ばれる RIPP に設置した。

プラットフォームでは、diffusion チャンネルを改善し、アクティブなサイトへのアクセス性を高めるためのメソッドが取られた。アクティブなフェーズ前駆体が最適化され、アクティブサイトの本質的な活動が改善された。高分散活性相を形成し、活性部位の数と安定性を増加させるために、調製が改善された。コークスの形成はまた高い安定した活性相を設計することによって減らすことができるし、コークス形成を減らすことができる。



(4) 以下スキームは、RIPP ディーゼルハイドロ処理触媒の e の渦を示す。RS-2100、RS-2200 および RS-3100 はロケット技術を基にした最新の触媒であり、10 ppm の硫黄を作り出すことができる。RS-2100、RS-2200、RS-3100 各々触媒の特性を試験した。



(5) 試験結果

- ① 触媒活性と安定性の重要な要素の深い理解、ROCKET 技術プラットフォームが確立された。
- ② RIPP の最新の ULSD 触媒は以下の利点を持つ
  - 低充填密度と低コスト
  - 高い HDS、HDN 活動および高い安定性
- ③ RIPP 触媒は、製油所のさまざまな仕様と要件を満たすことができた

#### 4. LTAG/LTA テクノロジーを使用した FCC 製品スレートの最適化に関するベストプラクティス (中国)

(1) 中国市場では、①ディーゼル需要の減少、②高い RON のガソリンの継続的な成長、③より高付加価値の化学物質へのシフト、が主流となっている (ガソリンに対する軽油比率が低下している)。

(2) 石油精製プロセス内において、減圧軽油や残油を原料に、主としてガソリンや中間留分を製造するプロセスとして、流動接触分解装置がある。このプロセスの製品のうちガソリンより高沸点の留分は循環油または分解軽油と呼ばれる。

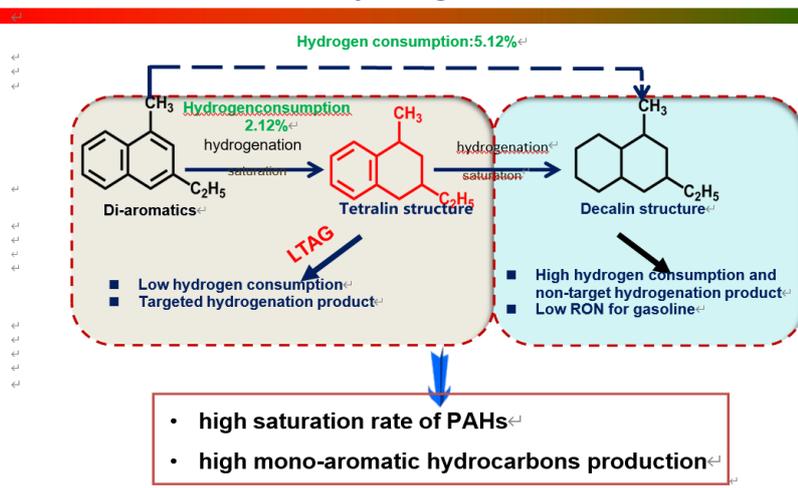
分解軽油のうち軽質な留分 (沸点範囲 220 ~ 430 °C 程度) は流動点が低く、中間留分製品とすることができるため、分解軽質軽油として留出される。これを、ライト・サイクル・オイルと呼ぶ。

この LCO 以下に有効活用するかが課題

(3) LTAG は、LCO 水素化処理と接触分解を統合することにより、劣った LCO を高 RON ガソリンと BTX に変換するプロセス。

LTAG の重要なポイントは、H - LCO 変換ゾーンを設計し、水素化処理および FCC ユニットの動作パラメーターを最適化すること。

#### Selective Hydrogenation of LCO<sup>←</sup>



(4) LTA は、LCO ハイドロトリートメントと触媒割れを統合することにより、劣った LCO を高光芳香族に変換する新しいプロセス。LTA は芳香族、特に BTX 生産を最大にする。

【LTA の技術的な特徴】

- ① LCO 選択的水素化の独自の触媒と組み合わせた独自のプロセス
- ② PAH のより高い飽和率とモノリング芳香族の選択性。
- ③ 水素化処理された LCO の分解のための反応と操作の最適化

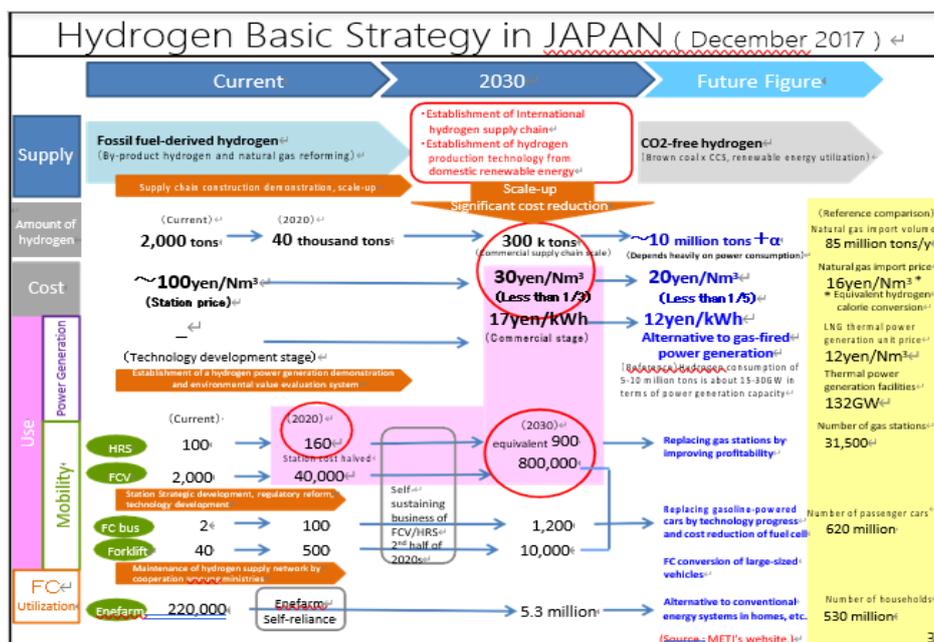
(5) サマリー

- ① 製品スレート調整のための柔軟な FCC 技術は、市場の鍵となる
- ② LTAG 技術は、中国で広く適用される水素化と触媒分解プロセスを統合することによって、劣った LCO を高い RON のガソリンに変換することができる
- ③ LTA は、LCO ハイドロトリートメントと触媒割れを統合することにより、芳香族、特に BTX 生産のための新開発技術

5. 日本における水素政策と HFS に関する規制改革に向けての JPEC の活動（日本）

(1) 日本に水素社会を構築するために、経済産業省の経済産業省は約 2 年前に水素の基本戦略を発表した。

この戦略において重要な数値は、2030 年の水素の量が 300kton、HFS での水素の価格が 25cents / Nm<sup>3</sup> にほぼ等しい 30yen / Nm<sup>3</sup>、HFS の数が約 900、FCV が 80 万になること。2020 年末の HFS 数のそれほど遠くない将来の目標は 160 になる。

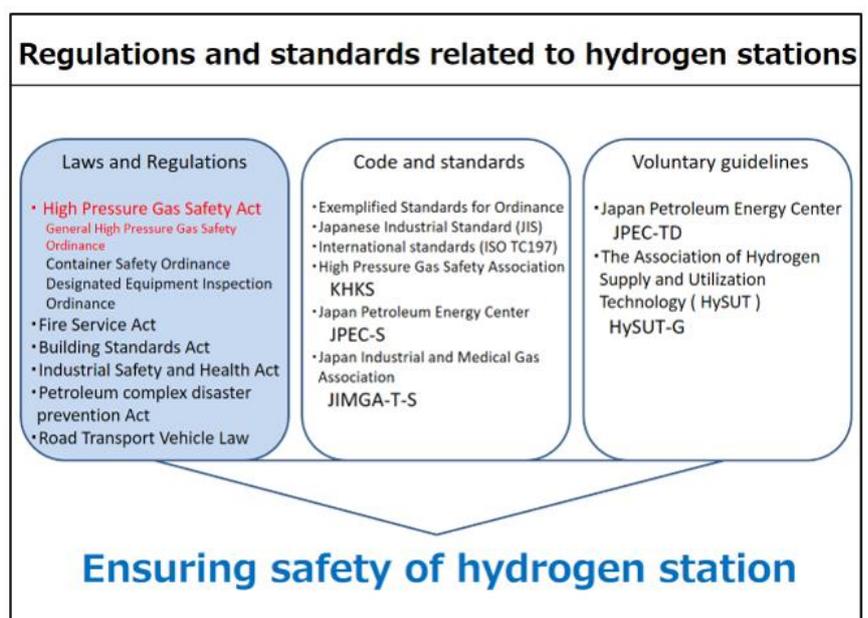


(2) METI は、水素基本戦略を確実に達成するために、2019 年 3 月に水素・燃料電池戦

略ロードマップを発表した。このロードマップでは、HFS 建設費を 3 億 5 千万円から 2 億円へ削減するなど、具体的なコスト目標と研究目標を示した。これは 3 百万ユーロから 1.5 百万ユーロに削減したことにほぼ等しく、HFS の運用コストは年間 34 百万円から 15 百万円に削減される。これらは年間 30 万ユーロから年間 120 万ユーロにほぼ等しくなる。

(3) 次に「日本における水素ステーションの法規及び基準体系」を説明する。

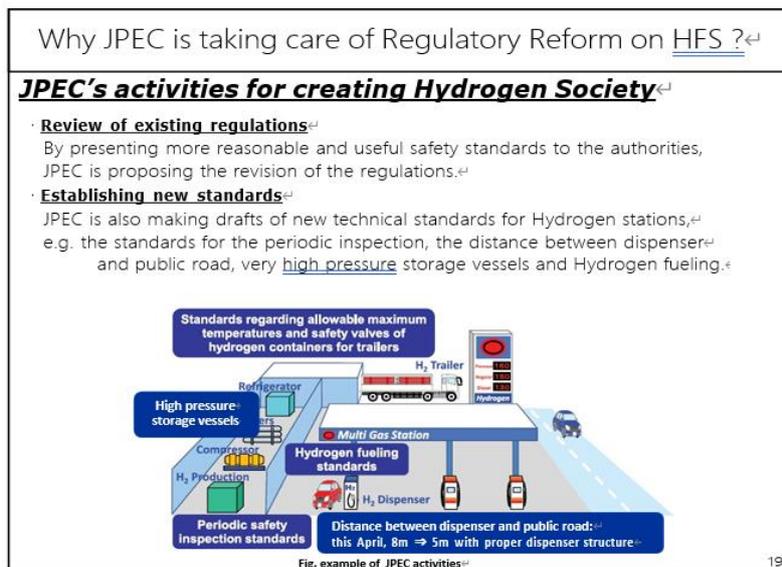
これは、「法規（法律・省令）」、「技術基準・規格」、「自主ガイドライン」からなる水素ステーションに関わる規制・基準等を示したもの。これらの規制、基準が水素ステーションの安全確保に役立っている。



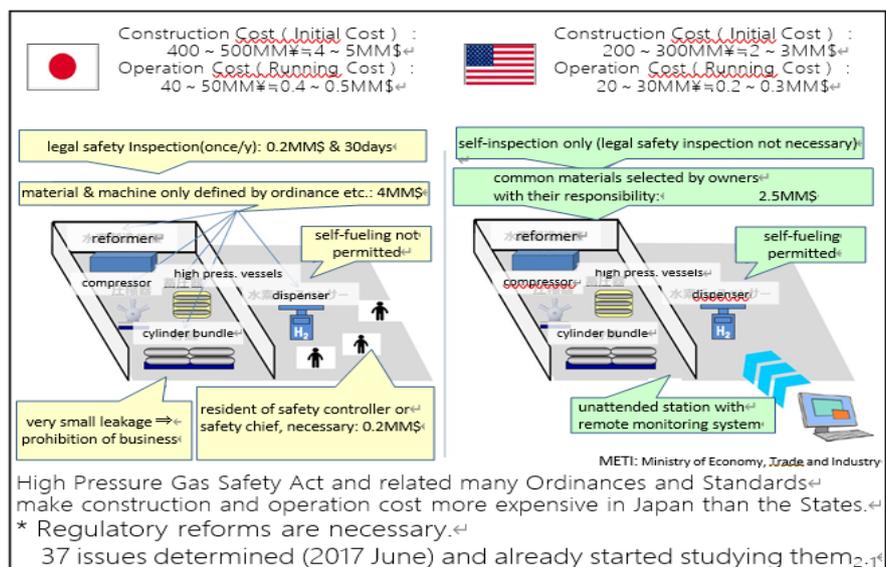
(4) そして、水素社会づくりのための JPEC の活動について説明する。

まず、既存の規制を確認。より合理的で有用な安全基準を当局に提示することにより、JPEC は現在の規制の改訂を提案している。

第二に、新しい基準を確立している。 JPEC はまた、HFS の新しい技術基準、たとえば HFS、超高压貯蔵容器、燃料供給プロトコルなどの定期検査の基準の草案を作成している。



- (5) 現在 JPEC も携わっている「NEDO プロジェクト」のコンセプトを以下に示す。  
 日本では、建設費と運営費が米国よりもはるかに高い。この違いの理由は、高圧ガス安全法および関連する多くの条例と基準を遵守することによるもの。  
 これらのコストを安くするために、経済産業省は6月に取り組むべき37の問題を決定した。いくつかの問題はすでに研究を2017年より開始している。



- (6) 私たちはすでに「無人ステーションの実現」、「新しいリスク評価に基づくコンポーネントの再検討」の2つの問題に対処し始めている。これらは37の規制改革問題に含まれている。

以上

無断転載・複製を禁ず

一般財団法人石油エネルギー技術センター

総務部調査情報グループ

〒105-0011 東京都港区芝公園2-1-1

電話 03-5402-8502

# 石油精製に係る競争力技術動向調査に 関する調査の情報発信

- 国際会議（日米合同連絡会議） -

令和2年度燃料安定供給対策に関する調査事業

令和3年3月



一般財団法人石油エネルギー技術センター

Japan Petroleum Energy Center (JPEC)

## 1. はじめに

- (1) 事業名「令和2年度燃料安定供給対策に関する調査事業」の一環として、米国石油精製業における政策・技術開発動向や、石油・エネルギー業界の動向を調査するために、DOEをはじめとする米国エネルギー関連政府機関、米国石油精製業関連団体、及び在米本邦関連機関等との間で連絡会議を実施する。
- (2) 議論するテーマは、それぞれの政府機関、業界団体、民間石油会社によって、以下のとおりのJPEC側からの質問を用意し、先方に回答いただく形式で行う。

### 米国エネルギー省 (DOE)

1. 2050年等の長期を見据えた環境対策面で、EV以外の代替燃料で技術開発や実証研究に力を入れているものは何か？
2. 製油所へのAIやIoT導入に関するDOEの補助事業で、Manufacturing USA または National Network for Manufacturing Innovation (NNMI) で行っている研究内容は何か？
3. BETOの廃棄物、廃プラスチックなどからの再生可能エネルギーまたは材料生産技術の研究開発動向（特に、廃プラスチックを燃料に変換する技術）
4. 自動車用燃料として、e-fuelのようなアルコール以外の再生可能液体燃料に関する研究開発は行っているか？

### 米国エネルギー情報局 (EIA)

1. 米国におけるEV、または省エネ車の中長期的な供給のシナリオは？
2. 政権交代によるベネズエラ原油、イラン原油の輸出入シナリオは（PADD3における重質高硫黄原油の代替油は、欧州からのHSFOの輸入が続くのか）？
3. COVID-19の影響により、世界各地でジェット燃料が供給過剰になっているが、米国の短期的なジェット燃料の需要予測はどうか（国内線向けと国際線向けの割合は）？
4. 再生可能ディーゼル・ジェット燃料の生産の長期シナリオは？

### 環境保護庁 (EPA)

1. 米国のパリ協定への再加入による石油業界のGHG削減目標はどのようになるのか？
2. SAFE基準かCAFÉ規制へ逆戻りかの今後の見通しは？
3. 再生可能ディーゼル・ジェット燃料のGHG削減効果をどのように評価するか？
4. EVのGHG削減効果をどのように評価するか？

### 米国石油協会 (API)

1. 政権交代によるベネズエラ原油、イラン原油の輸出入シナリオは（PADD3における重質高硫黄原油の代替油は、欧州からのHSFOの輸入が続くのか）？
2. SAFE基準かCAFÉ規制へ逆戻りかの今後の見通しと、ガソリン、軽油の需要への影響は（加州等の動向も含む）？
3. COVID-19の影響により、世界各地でジェット燃料が供給過剰になっているが、米国のジェット燃料の需要はどうか？
4. 西海岸でのバイオリファイナリーの導入及び事業戦略などが、今後その他の地域に広がる可能性はあるのか？
5. Shellの製油所売却や閉鎖は、APIにとって影響は大きいのか？Shellの環境戦略について協会としてどのように受け止めているのか？

### 米国燃料石油化学製造者協会 (AFPM)

1. 米国のシェールオイルとベネズエラ、イランへの制裁の見通しを考慮して、原油や石油製品の輸出入は今後どのように変化していくと思うか？
2. COVID-19の影響により、世界各地でジェット燃料が供給過剰になっているが、米国の

ジェット燃料の需要はどうか？

3. 米国のガソリン需要は、内燃機関の燃費の改善、EV の増加、環境問題の影響を受けるか？（米国のガソリン需要はいつピークに達すると予測しているか？）
4. 石化シフト、エチレン・プラントなどに対する投資動向は、COVID-19 で変化したか？

#### 再生可能燃料協会（RFA）

1. バイオリファイナリーの導入及び事業戦略が西海岸を中心に進められているが、今後は全土に広まるのか？
2. 再生可能ディーゼル・ジェット燃料の生産動向と今後の見通しは？
3. セルロース系エタノールは、自動車燃料として可能性があるのか？

#### 米国農務省（USDA）

1. 再生可能なバイオディーゼルの国内生産の状況と事業化の動向は？
2. セルロース系バイオ燃料の生産量増加の見込みは？
3. Higher Blends Infrastructure Incentive Program（HBIIP）の取り組み状況は（特に軽油の B20 導入の可能性について）？

#### メジャー石油会社

1. COVID-19 の影響で、ガソリンと軽油はほぼ回復したようであるが、ジェット燃料の需要が減少したときは、製油所はどのように対応したのか？
  2. 製油所への AI や IoT 導入には、どのような分野が優先されるか（リアルタイム分析、生産効率化、自動運転・省人化など）？
  3. 製油所を閉鎖してバイオリファイナリーに転換する動きが、西海岸や PADD3 で出始めているが、このような動きは拡大するのか？
  4. バイオリファイナリー以外にも、廃棄物、廃プラスチックを燃料に変換する技術を導入する可能性はあるか？
  5. 製油所の CO2 削減対策はどのように進めるつもりか？将来的には CCUS なども導入する可能性はあるのか？
- (3) しかし、コロナウィルス感染拡大により、海外出張ができなくなったため、現地へ出向いて対面での合同会議の実施は不可能となった。

今年度については、代替案として、JPEC 米国長期出張員事務所およびワシントン D.C. に事務所を有する、INTERNATIONAL TECHNOLOGY AND TRADE ASSOCIATES, INC. (ITTA 社) が、政府機関、業界団体、民間石油会社に対して、上記の質問事項を電話でインタビューする形式で実施した。なお、米国は 2021 年 1 月 21 日より、バイデン政権に移行したため、政府機関の人事異動が落ち着くのを待って、インタビューは 3 月初旬に実施した。

実際にワシントン D.C. に出張して会議を行う場合は、面談する相手が質問事項に対して専門外で回答できない場合は、専門分野について別の角度からの質問をするなど、臨機応変な対応ができる。しかし、JPEC 米国長期出張員事務所および ITTA 社は、質問事項に答えられそうな方にインタビューを試みるものの、回答いただけなかった質問に対しては、同事務所および ITTA 社の所有するデータで考察することとした（残念ながら回答いただけなかった質問がいくつか存在したため、それらの内容については抜粋のうえ、第 3 章に記すことにした）。

以下のインタビュー結果と情報提供の結果をもって「日米合同連絡会議」とする。

本調査が、我が国石油産業の今後の経営基盤強化の一助となれば幸いである。

以 上

令和 3 年 3 月

一般財団法人石油エネルギー技術センター

## 2. インタビュー結果

### 2. 1. 米国エネルギー省 (DOE)

バイオエネルギー技術オフィス (BETO) の所属で、特に e-fuel と再生可能輸送用燃料についての専門家である Alison Goss Eng 氏に連絡し、以下の回答を得た。

質問 1. 2050 年等の長期を見据えた環境対策面で、EV 以外の代替燃料で技術開発や実証研究に力を入れているものは何か？

回答：

DOE の Bioenergy Technologies Office (BETO) は、代替燃料における、さまざまなプログラムがあるが、特定の量が自動車燃料へ置き換わることは予測していない。とはいえ、BETO は次の戦略的目標を達成するために研究開発活動を調整している。

- ・ 2025 年までに、ジェットエンジンでテストするための 5,000～10,000 ガロン (18,925～37,850 リットル) の代替ジェット燃料を準備するプロジェクトを完了し、航空産業における正味の二酸化炭素排出量の大幅な削減に貢献する。
- ・ 2030 年までに、エンジン効率を高め、ライフサイクルにおける GHG 排出量の少ない燃料を使用する、エンジンと燃料の共同最適化を検討し、車両あたりの石油消費量が 30%削減されることを実証する (石油からの GHG は 50%以上削減)。
- ・ 2030 年までに、副産物の有無にかかわらず、ガス換算で 1 ガロンあたり 3 ドルの総生産コストで、藻類ベースのバイオ燃料の実証規模の生産を検証する。
- ・ 2040 年までに、共同最適化された燃料とエンジンの導入により、輸送車両の GHG 排出量がさらに 9%～14%削減されることを実証する。
- ・ 2040 年までに、バイオ燃料が米国の輸送用燃料市場の 25%を占めることを可能にする、大規模なバイオマス生産と変換を可能にする。
- ・ 2040 年までに、研究開発を通じて、石油化学製品の 7%をバイオ製品に置き換えることをサポートする。

質問 2. 製油所への AI や IoT 導入に関する DOE の補助事業で、ManufacturingUSA または National Network for Manufacturing Innovation (NNMI) で行っている研究内容は何か？

回答：

Eng 氏は AI や IoT のようなデジタル関係は専門外であるため、回答は得られなかった。

JPEC および ITTA 社の保有資料では、米国エネルギー省 (DOE) は、クリーンエネルギーとスマート製造技術の研究開発に対して、今後 5 年間で約 1 億 5,000 万ドルを割り当てた。大学、連邦政府機関、官民企業が参加する、非営利の米国研究機関のネットワークである National Network for Manufacturing Innovation (NNMI) が中心となってプロジェクトを実施する。

質問 3. BETO の廃棄物、廃プラスチックなどからの再生可能エネルギーまたは材料生産技術の研究開発動向 (特に、廃プラスチックを燃料に変換する技術)。

回答：

Eng 氏は廃棄物、廃プラスチックの再利用は専門外であるため、回答は得られなかった。

JPEC および ITTA 社の保有資料では、2020 年度、埋立地や環境から熱可塑性プラスチックの排出を防ぐための、バイオ最適化テクノロジーに関する研究を、国立研究所のコンソーシアム (NREL, LANL, ORNL, MIT, MSU, CSU) として開始する。

質問 4. 自動車用燃料として、e-fuel のようなアルコール以外の再生可能液体燃料に関する研究開発は行っているか？

回答：

DOE の BETO は、他の DOE オフィス（水素および燃料電池技術オフィスなど）やさまざまな国立研究所と連携して、e-fuel に関するさまざまな分野の研究開発を行っている。特に、アルゴンヌ国立研究所（ANL）は、この研究分野で比較的活発に活動している。ANL の研究者は、2 つの主要な方法で大型輸送からの排出量を削減する上での e-fuel が果たすことができる役割に注目している。

最初に、研究者は e-fuel の生産プロセスと、それが環境とコストに与える影響を分析している。それらは、再生可能な電気が発電されてから、1 ガロンまたは 1 バレルの e-fuel が生成されるまでの、プロセス全体をモデル化している。ANL のシニアサイエンティストである Amgad Elgowainy 氏は、コストと環境目標、そして研究開発目標と目標の製品を決定するために、この分析は必要と述べている。

次に、研究者は e-fuel をエンジンでどのように使用できるかを調査している。e-fuel 独自の特性がエンジン効率に影響を与えるかどうか、ひいては e-fuel が炭素強度に影響を与えるかどうかを決定する。この点に関して、研究者は、燃料の各成分が窒素酸化物や粒子状物質などの大気汚染物質排出に影響を与える可能性について調査する。ANL の研究者は、e-fuel がドロップイン燃料なので消費は簡単であるが、炭化水素の組成がわずかに異なる可能性があるため、燃焼性能の評価に参加すると述べている。

## 2. 2. 米国エネルギー情報局（EIA）

Estella Shi 氏（バイオディーゼルとバイオリファイナリーのトレンド）、Peter Colletti 氏（長期ジェット燃料予測）、Kevin Hack 氏（短期ジェット燃料予測と米国原油輸入）に連絡し、以下の回答を得た。

質問 1. 米国における EV、または省エネ車の中長期的な供給のシナリオは？

回答：

3 名ともこの質問は専門外であるため、回答は得られなかった。

JPEC および ITTA 社の保有資料には、この分野のデータはなかった。

質問 2. 政権交代によるベネズエラ原油、イラン原油の輸出入シナリオは（PADD3 における重質高硫黄原油の代替油は、欧州からの HSFO の輸入が続くのか）？

回答：

3 名ともこの質問は専門外であるため、回答は得られなかった。

後述する米国石油協会（API）で回答が得られた。

質問 3. COVID-19 の影響により、世界各地でジェット燃料が供給過剰になっているが、米国の短期的なジェット燃料の需要予測はどうか（国内線向けと国際線向けの割合は）？

回答：

2020 年は、石油製品の中でジェット燃料の消費量が特に急減し、EIA は、世界のジェット燃料消費量が 2022 年末まで 2019 年のレベルを下回ったままであると想定している。表 1 は、米国のジェット燃料の短期的な需要予測を示す。

表 1 米国のジェット燃料の短期的な需要予測

EIA Short Term Outlook for U.S. Jet Fuel Consumption: 2021 – 2022				
Million Barrels per Day				
	2019	2020	2021	2022
12/20	1.74	1.09	1.54	NA
01/21	1.74	1.08	1.41	1.71
02/21	1.74	1.08	1.39	1.70
03/21	1.74	1.08	1.40	1.73

EIA は、2020 年の米国の液体燃料の消費量は平均で 1,810 万バレル/日であり、2019 年の消費レベル (2,020 万バレル/日) から 250 万バレル/日 (12%) 減少したと推定している。COVID-19 のパンデミックによる交通量の減少により、2020 年の第 2 四半期の消費量は 1,610 万バレル/日に減少し、1986 年以来のどの四半期よりも最低レベルになった。

EIA からは、「米国の航空会社のフライトの大部分は国内線である」との回答があった。

JPEC および ITTA 社が入手したデータに基づく、現在のジェット燃料需要の約 3 分の 1 が国際線で消費されているとされているが、ITTA 社の分析では、COVID-19 前の条件下では、ジェット燃料の半分弱が国際線で消費されていたと推定している。

EIA のコンタクト先は、EIA では国内のジェット燃料生産の予測を明示的に追跡していないと述べていた。ただし、EIA は供給される製品の観点から、ジェット燃料消費の長期的な予測を提供している。EIA の AEO2021 で公表されている Excel データによると、ジェット燃料の国内供給量は、2020 年の 108 万 b/d から 2021 年には 154 万 b/d に増加すると予想している。2021 年以降、ジェット燃料の供給は、2026 年に 170 万 b/d、2033 年に 182 万 b/d、2037 年に 190 万 b/d、2042 年に 201 万 b/d、2050 年に 219 万 b/d に増加すると予想している。

質問 4. 再生可能ディーゼル・ジェット燃料の生産の長期シナリオは？

回答：

EIA は、バイオディーゼルと再生可能ディーゼルの 2 種類の再生可能ディーゼル燃料について長期予測を行っている。どちらのタイプも同じ原料 (大豆などの植物油、動物性脂肪、およびリサイクルグリースのような、生物学的起源の再生可能な有機非化石材料) から製造され、実質的には同じ製品である。ただし、2 つの燃料の主な違いは、それらが異なる方法で製造されていることである。

バイオディーゼル生産では、原料をメタノールと反応させて、長鎖脂肪酸のモノアルキルエステルまたは脂肪酸メチルエステル (FAME) を生産する。

再生可能ディーゼル生産では、水素化処理と呼ばれるプロセス中で、原料が水素と反応する。

もう 1 つの違いは、再生可能ディーゼルには酸素が含まれていないのに対し、バイオディーゼルには酸素が含まれていることである。また、米国では再生可能ディーゼルは、バイオディーゼルよりも生産量が少ない。

EIA の報告の要件においては、バイオディーゼルは B100 と指定されており、ASTM (D 6751) の規格の要件を満たしている。再生可能ディーゼルは、石油系軽油の ASTM (D975) の規格に適合している。使用するために石油系軽油と混合する必要はなく、どちらの燃料も、米国の再生可能燃料基準プログラムで要求されるバイオ燃料の消費レベルを満たす。

EIA は、バイオディーゼル生産の長期シナリオについて、図 1 に示す予測について、次のように述べた。モデルは経済的なものに基づいて意思決定を行う線形計画法であるため、価格が重要な役割を果たす。原油価格が高いシナリオでは、軽油の価格が高いほど、バイオディーゼルの競争力が高まる。ただし、低価格シナリオでは、バイオディーゼルは、再生可能燃料基準 (RFS) やカリフォルニアの低炭素燃料基準などの規制によってサポートされているため、ほとんど増加しない。計算モデルでは、RFS の影響は軽微であり、バイオディーゼルの増産には、一定レベルの製造量が必要である。そのため、バイオディーゼルの製造量レベルの決定には、軽油への混合義務などの政策が大きな役割を果たす。

## 2. 3 環境保護庁 (EPA)

Sarah Dunham 氏と Bill Charmley 氏 (CAFE 規制および SAFE 規則などを担当) に連絡し、以下の回答を得た。

質問 1. 米国のパリ協定への再加入による石油業界の GHG 削減目標はどのようなのか？

回答：

1月20日、バイデン大統領は、EO 13990（公衆衛生と環境の保護と気候危機に取り組むための科学の回復）を発行し、気候変動への取り組みと矛盾するトランプ時代の環境規制の見直しを求めた。

質問 2. SAFE 基準か CAFÉ 規制へ逆戻りかの今後の見通しは？

回答：

EO 13990の中で、トランプ時代のSAFE車両規則を「一時停止、改訂、または撤回することを検討する」ようにEPAに指示した。さらに、EPAは、規則のパート1およびパート2を「通知のために公開し、提案された規則を一時停止、改訂、または取り消すことをコメントするように検討する」ように指示された。

バイデン政権になり、EPAの管理者はMichael Regan氏となり、新しいリーダーシップの下で、現在、SAFE車両規則を改訂するための法的および規制戦略に取り組んでいる。

新しい燃費基準に関するEPAでの議論は、現在「密室」で行われている。通常、EPAは、規制上の考慮事項に関する情報を予定より早く（2021年7月前には）公開はしない。しかし、バイデン政権下でのEPAは、2020年8月にカリフォルニア州と6つの自動車メーカーが合意した自主基準の採用を検討する可能性がある。カリフォルニア州との協定は、オバマ政権下で最初に提案された2025年ではなく、2026年までにフリート全体で平均54.5マイル/ガロンの燃費を目指している。

ただし、SAFE車両規則およびカリフォルニア州との協定に基づいて設定された燃費基準は2026年までしかない。2021年～2026年の燃費基準のレビューに加えて、バイデン政権下のEPAは、2026年以降の新しい燃費基準を作成する必要があるが、法的課題に直面する可能性が高く、長い年月がかかるともいわれている。

質問 3. 再生可能ディーゼル・ジェット燃料の GHG 削減効果をどのように評価するか？

回答：

2名ともこの質問は専門外であるため、回答は得られなかった。

JPEC および ITTA 社の保有資料には、この分野のデータはなかった。

質問 4. EV の GHG 削減効果をどのように評価するか？

回答：

2名ともこの質問は専門外であるため、回答は得られなかった。

JPEC および ITTA 社の保有資料には、この分野のデータはなかった。

## 2. 4 米国石油協会（API）

Andrew Van Eyck氏に連絡し、回答を求めた。ただし、Eyck氏は、いくつかの質問に対して、APIの機密性に基づいてコメントを拒否した。

質問 1. 政権交代によるベネズエラ原油、イラン原油の輸出入シナリオは（PADD3における重質高硫黄原油の代替油は、欧州からのHSFOの輸入が続くのか）？

回答：

2020年の大統領選挙中、当時の候補者であったバイデン氏は、ベネズエラの政治的变化を強制する効果はなく、ベネズエラの人々に害を及ぼすとして、トランプ政権の制裁政策を批判した。この批判にもかかわらず、ベネズエラに対するバイデン政権の政策は、制裁と首都カラカスでみられる政治的变化に関しては、ほぼ同様である。

3月8日のホワイトハウスにおけるメディア向けブリーフィングで、匿名のバイデン政権の高官は、バイデン大統領は「制裁の解除を急いでいない」と述べ、「米国は圧力を高め続け

るだろう。ニコラス・マドゥロ大統領の政府が「自由で公正な選挙」につながる国内の政敵との真の「誠実な」対話を開くことによって、米国の信頼を回復するまで、その圧力を多国間で拡大するつもりである。」と述べた。

イランの原油生産量は過去 30 年間、300 万～400 万 b / d の間で変動している。いくつかの予測は、米国の制裁が解除された場合、イランは 2023 年までに原油生産を 4 00 万 b / d 以上に増やす可能性があることを示している。

独立した評価機関の最近の報告によると、2021 年 1 月、米国の制裁にもかかわらず、イランの石油輸出は 2020 年 10 月の推定で 49 万 b / d から 2021 年 1 月に 71 万 b / d に増加した。

イランは、中国を含む米国の制裁を回避しようとしている国々を経由して、少量の原油を海外市場に輸出し続けている。イランから中国への公式の原油輸入はほぼゼロであるが、非公式の輸入は大幅に増加している。最近の報告によると、2020 年から 2021 年 2 月までの間に、中国はイランから平均 30 万 6,000 b/d の原油を密輸した。イランは 2020 年の最初の 5 か月間、マレーシアのチャネルを通じて、中国に 6 万 b / d を出荷し、クアラルンプールの公式輸出額において 5 億ドル/月の不足を説明する偽造書類を提出した。イランの荷送人は定期的に船舶の位置情報を提供するトランスポンダーをシャットダウンし、原油の出所を隠して船から船へ燃料を移送している。

質問 2. SAFE 基準か CAFÉ 規制へ逆戻りかの今後の見通しと、ガソリン、軽油の需要への影響は（加州等の動向も含む）？

回答：

API は、利害関係者間で進行中の議論がデリケートな性質であることを考慮して、SAFE 基準を継続するか、CAFE 規制に戻すかに関する、バイデン政権の取り組みに明確な公的立場をまだ明確にしていない。

質問 3. COVID-19 の影響により、世界各地でジェット燃料が供給過剰になっているが、米国のジェット燃料の需要はどうか？

回答：

2021 年 1 月の API の月次統計レポートによると、軽油の需要は前年のレベルを上回った、ガソリン、ジェット燃料、重油は前年比で 2 桁の割合で減少した。

2021 年 1 月のジェット燃料の供給量は 120 万 7 千 b/d であった。これは、2020 年 12 月から 2.3%の減少であったが、2020 年 1 月のレベル（167 万 3 千 b / d）を 27.9%下回った。これは、Flightradar24 による航空機のフライトデータと一致しており、12 月から 1 月にかけてフライト数が減少したことに起因する。

図 1 に米国の製油所におけるジェット燃料の出荷量を示す。2020 年 1 月は 185 万 5 千 b/d であったが、2021 年 1 月には 124 万 8 千 b/d であり、32.7%減少した。

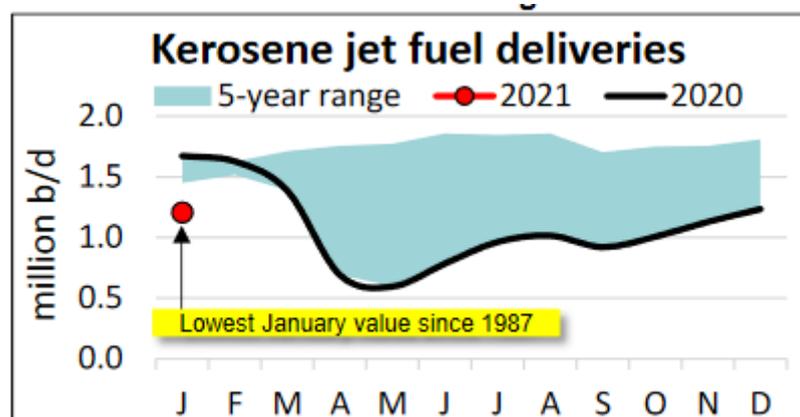


図 1 米国の製油所におけるジェット燃料の出荷量

質問 4. 西海岸でのバイオリファイナリーの導入及び事業戦略などが、今後その他の地域に広がる可能性はあるのか？

回答：

API は、この問題に関する最近の情報を公開していない。

質問 5. Shell の製油所売却や閉鎖は、API にとって影響は大きいのか？ Shell の環境戦略について協会としてどのように受け止めているのか？

回答：

これは API にとって非常にデリケートなトピックスである。Shell は気候変動政策に関する API の立場に対しては、不満の立場である。API の気候変動政策は、Exxon Mobile や Chevron などの API に影響力のある米国メジャーの要望に則っており、Shell や BP のような欧州のメジャーのメンバーが不満を持っている。

API が年次報告書を発表してからわずか 2 日後の 2021 年 1 月 15 日、Total は、気候変動政策、特に API の過去の炭素価格設定とメタン排出規制に対する意見の食い違いにより、API を脱会した。現在の Total の企業戦略は、会社を再生可能エネルギーの主要な販売者に移行することに焦点を合わせている。Total は API から撤退した後、CEO の Patrick Pouyanné 氏が、「1 世紀以上にわたって、私たちの業界の発展に対する API の多大な貢献を認めている。」との声明を発表した。

一方、Shell と BP は、気候変動政策に対する API のスタンスに対して不満を感じていたが、API にとどまり気候変動政策に関する方針を調整するよう組織に影響を与えることを決定した。

2021 年 2 月 26 日、API は温室効果ガス排出の社会的コストに関する声明を発表し、関連する規制の最終決定に焦点を当てたバイデン政権の省庁間グループと協力することに関心を示し、「新規および既存の発生源に対するメタンの直接規制」への支持を表明した。

## 2. 5 米国燃料石油化学製造者協会 (AFPM)

チーフインダストリーアナリストの Susan Grissom 氏に連絡した。Grissom 氏は、質問に回答するとともに、質問に関する AFPM の声明、インタビュー記事、年次報告書を紹介してくれた。

質問 1. 米国のシェールオイルとベネズエラ、イランへの制裁の見通しを考慮して、原油や石油製品の輸出入は今後どのように変化していくと思うか？

回答：

AFPM は、輸入原油の入手可能性またはその欠如に関する評価または声明を公表していない。

質問 2. COVID-19 の影響により、世界各地でジェット燃料が供給過剰になっているが、米国のジェット燃料の需要はどうか？

回答：

COVID-19 のパンデミックは、燃料消費量に大幅で一時的な変化を引き起こし、ガソリンと軽油で需要の一部減少があり、ジェット燃料では大幅な需要の下落が発生した。

世界の他の多くの地域では、石油精製の見通しは楽観的ではないが、米国の製油所は歴史的に生産能力の 95% で操業してきた（現在は、製油所は精製能力よりはるかに低い稼働率で運営されている）。その結果、米国の製油所は、ガソリン、軽油、その他の燃料を費用対効果の高い方法で供給している。短期的な見通しは、パンデミックに依存が続くが、長期的な見通しには大きな期待が持てる。

質問 3. 米国のガソリン需要は、内燃機関の燃費の改善、EV の増加、環境問題の影響を受けるか？（米国のガソリン需要はいつピークに達すると予測しているか？）

回答：

残念ながら 2020 年の夏は、米国の電力網の限界を痛々しいほど痛感した。カリフォルニアでの計画停電は、現在の電力需要を確実に処理できない、電力網の劇的な欠陥をさらけ出した。バージニア州でも、住宅用電力網が在宅勤務者の増加に対応するため、2020 年の夏は何度も停電が発生した。このように、すでに限界である電力システムに、数百万台の電気自動車を充電するという大きな負担を追加することは、成功するかどうかはわからない。

EV は現在、米国の小型トラックの約 2%しか占めておらず、EV が輸送ネットワークでより重要な役割を果たすことができるようになる前に、充電インフラの不足など、明らかに対処しなければならない多くの技術がある。

そして、最近では水素燃料に関する取材を多数受けるが、現実には、水素や他の代替燃料が実現可能な供給量からはまだほど遠い。さらに、そのような大規模な燃料の移行は、消費者に大幅なコストの負担増加を強いることになる。

また、EV は、バッテリーの主要コンポーネントの製造に使用される石油化学製品を化石燃料に依存している。さらに、2019 年に米国で生成された電力の 60%以上が化石燃料に依存していたため、ほとんどの EV は化石燃料から生成された電力に依存してバッテリーを充電することになる。

質問 4. 石化シフト、エチレン・プラントなどに対する投資動向は、COVID-19 で変化したか？

回答：

エチレンとプロピレンは、6 つの主要な石油化学製品の中で最も需要度の高い 2 つである。これら 2 つで世界の石油化学需要のほぼ 3 分の 2 を占めている。今日の米国は、世界のエチレン生産能力において誰もが認めるリーダーであり、市場全体の 20%を占めている。2015 年以降、米国はエチレンの純輸出国であり、当面はその状態が続くと予想している。

米国は世界のプロピレン生産において、1 位の中国より生産量ははるかに少ないが、2 位で約 16%を生産している。

2019 年には、米国で 32 の石油化学プロジェクトが立ち上がり、140 億ドルの投資があった。2021 年までに合計 290 億ドルを超える追加投資が計画されている。AFPM は、米国の石油化学製品の総生産能力の伸びが、2019 年の 8,900 万メートルトンから、2027 年には 9,600 万メートルトンに増加すると予測している。

## 2. 6 再生可能燃料協会 (RFA)

Robert White 氏 (米国の再生可能燃料の状況と見通し) と Ann Lewis 氏 (バイオリファイナリーへの転換) に連絡し、以下の回答を得た。

質問 1. バイオリファイナリーの導入及び事業戦略が西海岸を中心に進められているが、今後は全土に広まるのか？

回答：

西海岸沿い、特にカリフォルニア州で、いくつかの製油所がバイオリファイナリーに転換を計画している理由は、カリフォルニア州の低炭素燃料基準 (Low Carbon Fuel Standard : LCFS) によるものである。LCFS の下では、低炭素燃料 (エタノール、バイオディーゼル、再生可能ディーゼルなど) の製造販売は、低炭素燃料の混合基準をクリアできない他の企業に対して、販売できるクレジットが発生する。

オレゴン州は、2016 年に LCFS を導入した。クリーン燃料プログラムとも呼ばれ、2025 年までに、ガソリンと軽油の炭素強度を 10%削減する標準段階である。

カナダのブリティッシュコロンビア州は、2010 年に LCFS を導入した。2020 年までにガソリンと軽油の炭素強度を 10%削減するという標準段階である。さらに同州は、2030 年までに 20%削減を要求することを約束した。

短期的には、西部州以外の一部の製油所が、バイオリファイナリーに転換される可能性がある。

2020 年 6 月、Holly Frontier 社はワイオミング州のシャイアン製油所を 2022 年までに再

生可能なディーゼルプラントに転換する計画を発表した。

2020年8月、Marathon Petroleum Corporation は、2つの製油所を再生可能なディーゼルプラントに転換すると発表した。カリフォルニア州マルチネス近郊の16万6,000b/dの製油所と、ノースダコタ州の1万9,000 b/dの製油所である。

2020年8月、フィリップス 66 はカリフォルニア州サンフランシスコ近郊の12万b/dのロデオ製油所を2024年までに世界最大の再生可能燃料プラントに転換する計画を発表した。このプラントは、ガソリン、軽油、ジェット燃料を再生可能燃料として製造する。

長期的には、LCFS政策が他の州で採用された場合、または連邦税額控除が拡大された場合、バイオリファイナリーへの転換は西部の州を超えて拡大する可能性がある。

質問2. 再生可能ディーゼル・ジェット燃料の生産動向と今後の見通しは？

回答：

持続可能な航空燃料（Sustainable aviation fuel、SAF）は、従来のジェット燃料と比較して、正味のライフサイクルでCO<sub>2</sub>排出量を削減できる。SAFは、ASTM D7566に規定された規格に適合するように製造された非石油系合成ジェット燃料基材として、現在一般的に使用されている用語である。これらの燃料は、以前は再生可能ジェット燃料、代替ジェット燃料、再生可能航空燃料、代替航空燃料、航空バイオ燃料、バイオジェット燃料、または持続可能な代替ジェット燃料と呼ばれていた。

SAFを従来のジェット燃料と混合すると、ASTM D1655に適合し、既存の航空機やインフラで使用できるようになる。

SAFは市販されており、2016年からロサンゼルス国際空港でユナイテッド航空によって使用され、2018年からサンフランシスコ国際空港でも使用されている。1つの国内SAF生産施設がロサンゼルスで稼働しており、いくつかは建設中または計画中である。

EIAのAnnual Energy Outlook 2021に記載されているように、米国のバイオディーゼル生産量は2020年の11万b/dから2023年には13万b/dに増加し、2050年までは、そのレベルを維持すると予想されている。

質問3. セルロース系エタノールは、自動車燃料として可能性があるのか？

回答：

現在、セルロース系エタノールの生産量は、RFSに基づく以前の見積もりや法的要件をはるかに下回っている。高い生産コストに加えて、セルロース系エタノールは、コーンスターチなどの他の低コストのエタノール原料との激しい競争に直面し続けている。

RFAによると、コーンスターチは米国のエタノール生産能力の約94%を占めている。セルロース系バイオマスは、バイオエタノール生産で、僅か0.5%しか占めていない。

さらに、米国でのセルロース系エタノールの生産は、連邦政府からの融資保証と研究開発資金に大きく依存してきた。生産コストが低下し、他のバイオエタノールと競合できるようにならない限り、セルロース系エタノールの商業化は厳しい。

## 2. 7 米国農務省（USDA）

Anthony Crooks氏（Higher Blends Infrastructure Incentive Program 担当）と Anthony Radich氏（再生可能燃料の予測と商業化調査の担当）に連絡し、以下の回答を得た。

質問1. 再生可能なバイオディーゼルの国内生産の状況と事業化の動向は？

回答：

図2に示すように、2019年、米国のバイオディーゼル生産量は約17億ガロンで、2018年の18億ガロンから減少した。

2020年の初めには、91のバイオディーゼル生産施設が米国にあった。米国のバイオディーゼル生産能力の半分以上は、主にアイオワ、ミズーリ、イリノイのある中西部（PADD 2）にある。バイオディーゼル生産の上位15州のうち、9州は中西部にあり、銘板の総容量は15億ガロン/年である。ロッキー山脈地域（PADD 4）を除いて、他のほとんどの地域には、少

なくとも 12 のバイオディーゼル生産施設がある。

2020 年の年末時点で、米国には 4 つの再生可能ディーゼルプラントが稼働していた。ルイジアナ州に 2 つの施設があり、年間 9,000 万ガロンを生産できる。

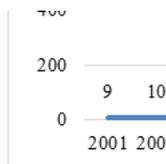


図 2 米国のバイオディーゼル生産量

質問 2. セルロース系バイオ燃料の生産量増加の見込みは？

回答：

再生可能燃料基準 (RFS) は、米国で販売される輸送用燃料に、セルロース系バイオ燃料、バイオマスベースのディーゼル燃料、次世代バイオ燃料などの再生可能燃料の最小混合量を要求する連邦プログラムである。RFS では、再生可能燃料を輸送用燃料に混合する量を毎年増加することになっており、2022 年までに 360 億ガロンに増加することになっている。

EPA が RFS プログラムを管理しており、法定量と燃料の入手可能性に基づいて、各カテゴリの混合量の要件を決定している。しかし、実際のセルロース系バイオ燃料の生産量は、法律が可決されたときに設定された予想を下回っている。たとえば、2020 年には、法令は 105 億ガロンのセルロース系バイオ燃料を要求していたが、EPA は目標量を 5 億 9000 万ガロンに下方修正した。当初の目標未達成は、民間投資の不足、後方支援の課題、技術の後退、連邦政府からの支援の不均衡など、いくつかの要因によるものである。

質問 3. Higher Blends Infrastructure Incentive Program (HBIIP) の取り組み状況は（特に軽油の B20 導入の可能性について）？

回答：

USDA は、E15 やバイオディーゼル (B20) などより、さらに高いブレンド比率に対応するためのインフラ整備プログラム (HBIIP) を設立した。USDA は、輸送用燃料供給およびバイオディーゼル流通施設に、最大 1 億ドルの助成金を提供する。HBIIP により、2020 年に輸送用燃料のエタノール市場は、150 億ガロンに成長したと予想されている。

2020 年 5 月 5 日、USDA は HBIIP 資金の最初の申請受付を開始した。最初の申請期間は 2020 年 5 月 15 日～2020 年 8 月 13 日であった。USDA は、HBIIP 資金の 2 回目の申請受付を 2020 年 12 月 21 日～2021 年 1 月 19 日に実施した。これにより、約 2,200 万ドルが以下の事業で利用可能になる。

- E15 など、エタノールの混合量が 10%を超える高混合燃料を適格に扱う給油所、コンビニエンスストア併設給油所、大型スーパーマーケット給油所、フリート施設、および同様の事業体。
- B20 など、5%を超えるバイオディーゼルを混合した軽油を適格に扱うためのターミナル施設、貯蔵所、および輸送のパートナー。

Crooks 氏によると、USDA は 2021 年には、これ以上の資金提供を予定していないとのことであった。

## 2. 8 メジャー石油会社 (Chevron)

Chevron のワシントンオフィスにある、連邦問題、ダウンストリーム&ケミカルズのマネージャーである Jason Larrabee 氏に連絡した。ただし、Larrabee 氏は政府業務の専門家であり、いくつかの質問について回答する能力は必ずしもなかった。

質問 1. COVID-19 の影響で、ガソリンと軽油はほぼ回復したようであるが、ジェット燃料の需要が減少したときは、製油所はどのように対応したのか？

回答：

Chevron は 2020 年にジェット燃料の生産を明らかに削減したが、製油所の生産をどのように調整したかについては、回答は得られなかった。

質問 2. 製油所への AI や IoT 導入には、どのような分野が優先されるか(リアルタイム分析、生産効率化、自動運転・省人化など)？

回答：

Chevron の 2021 年以降の主な重点分野は、部門の枠を超えた統合オペレーションセンターを活用し、デジタルテクノロジーソリューションを設計および展開し、データ分析機能を進化させることにより、生産性と効率の機会をさらに追求することである。この点で、Chevron は、製油所の効率を高め、顧客への時間通りの配達を確保し、マーケティングおよび販売ツールとプロセスの継続的なデジタル化を目指している。

Chevron は、上流部門から最終顧客までのバリューチェーン全体を通じて、製品価値を最大化する革新的なソリューションを継続的に模索している。バリューチェーン最適化(オプティマイザー) デジタルソリューションは、シェブロン戦略的およびデジタル上の最優先事項の 1 つである。より迅速な計画、変化する市況への迅速な対応、多くの情報に基づいた取引と契約の選択のために、相互接続されたデータを使用してリアルタイムで価値に基づく意思決定を可能にする。

Chevron は、パスカグーラ製油所で温室効果ガス監視ツールの試験運用を開始した。これにより、施設はさまざまな運用モードの影響を評価し、低炭素ソリューションを追求できる。また、熱交換器監視ツールを拡張して、世界中の 10 の商業施設で熱交換器のパフォーマンスを向上させた。

さらに、シェブロンでは、エンジニアリング標準を、書類からデジタルデータに変更する。これにより、ワークフローの改善、プロジェクトの目的に合わせたパッケージ化、コンプライアンスの強化、変更の管理、および競争力の予測を担保する学習機能を備え、新しい分析機能が可能になる。

質問 3. 製油所を閉鎖してバイオリファイナリーに転換する動きが、西海岸や PADD3 で出始めているが、このような動きは拡大するのか？

回答：

カリフォルニア州のエルセグンド製油所は、バイオ原料から再生可能燃料を生産できるように主要な装置を変更した。これにより、Chevron は、カリフォルニア州のエルセグンド製油所およびリッチモンド製油所で、Tier 3 適合ガソリン、IMO2020 に適合した低硫黄船舶燃料、再生可能ディーゼルなどの低炭素燃料を生産するための取り組みを続けている。

質問 4. バイオリファイナリー以外にも、廃棄物、廃プラスチックを燃料に変換する技術を導入する可能性はあるか？

回答：

2020年10月、ChevronはCPChemの高度なリサイクル技術を使用して、プラスチック廃棄物からポリエチレンの商業規模の生産を米国で初めて達成した。Chevronは、商業規模で低炭素ソリューションを提供できるテクノロジーに投資することで、エネルギー転換への重点分野の1つと位置付けている。ただし、廃プラスチックなどから燃料を製造する技術については言及しなかった。

質問 5. 製油所のCO2削減対策はどのように進めるつもりか？将来的にはCCUSなども導入する可能性はあるのか？

回答：

過去10年間で、ChevronはCCUSの研究、開発、展開に10億ドル以上を投資してきた。

2020年、Chevronは米国エネルギー省(DOE)から、燃焼後のガスからCO2を回収する技術を試験的に導入するための資金を授与された。この技術は、カリフォルニア州にあるシェブロンのカーン川施設でテストされる。同社は、パイロットプラント規模である、年間10,000トンの炭素回収装置の設計、建設、試運転、テストを計画している。2020年6月、ChevronはフィールドトライアルのためのFEED作業を開始した。このパイロットCCUSプロジェクトは、2022年に試運転される予定である。

2020年、Chevronはシンガポール国立研究財団とのコンソーシアムに参加し、シンガポールで最初のエンドツーエンドの脱炭素化プロセスを開発することを計画していると発表した。このコラボレーションは、低炭素経済と将来の商業開発につながる可能性のある、高度に統合されたエネルギー効率の高いCCUSシステムの開発を加速することを目的としている。

### 3. 情報提供調査結果

#### 3.1 DOEの廃棄物、廃プラスチックなどからの再生可能エネルギーまたは材料生産技術の研究開発動向

DOEの再生可能エネルギーの研究開発は、国立エネルギー技術研究所(NETL)とオークリッジ国立研究所(ORNL)に集中している。

特に、炭素利用(カーボンリサイクル)プログラムに関して、DOEはCO2および他の炭素副産物や水を、高効率で経済的、かつ環境に優しい方法で高価値製品に変換するための技術開発を目指している。NETLが主導するDOEの「炭素利用プログラム」は、燃料、有機及び無機化学品、廃食品や飼料、建築材料、資源増進回収(たとえば、石油、ガス、水、及び地熱エネルギー)、エネルギー貯蔵、廃水処理など、可能性のある多くの製品および用途を包含している。

炭素利用プログラムは、以下の3つの研究を扱っている。

- ・ 藻類を用いた炭素取り込み – バイオマスの培養および農業や水産養殖システムにおけるCO2の利用。藻類システムで生産されたバイオマスは、燃料、化学品、魚・動物・人間の食糧、土壌サプリメント、および他の特殊品・優良品に加工や変換ができる。
- ・ 燃料および化学品への変換 – 最終製品としての燃料やブレンド基材から汎用化学品・特殊化学品・精製化学品まで多岐にわたる高付加価値有機製品へのCO2変換。変換経路には熱化学、電気化学、電子化学、光化学、非平衡プラズマ化学反応、および微生物分解による方法が含まれる。多くの変換経路は、これらのシステムを推進するために必要なエネルギーを低減するために、触媒または統合プロセスを必要とする。この経路は、廃棄炭素を合成燃料、化学品、プラスチック、および炭素繊維のような固体炭素製品などの製品に変換できる。

- 無機材料への鉱物化 – カーボネートセメントおよび骨材、または重炭酸塩および関連無機化学品などの無機製品を生産する CO<sub>2</sub> の反応。二酸化炭素は、発電プラント、鉄鋼、および他の産業からの産業廃棄物を含むアルカリ性反応剤により鉱物化する。カーボネート材料は、特に建設産業への利用に関して、CO<sub>2</sub> の有効な長期的貯留選択枝になる可能性がある。

DOE の炭素利用ポートフォリオでは、プロジェクトの大半が燃料および有機化学品への CO<sub>2</sub> 変換に重点を置いている。

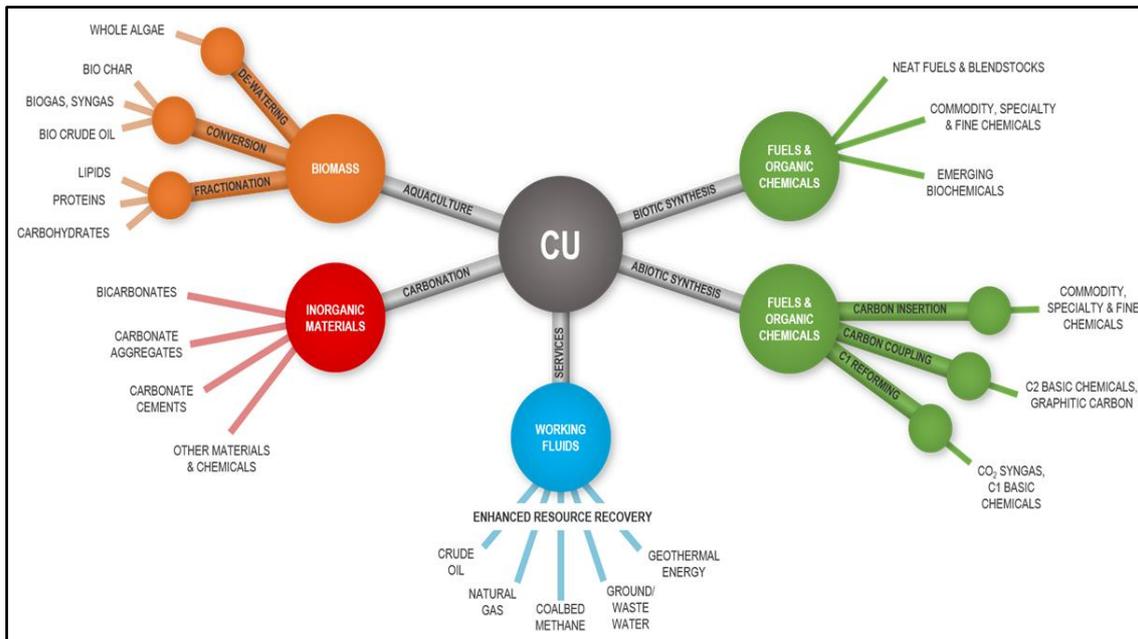


図 3 DOE の炭素利用プログラムの概略

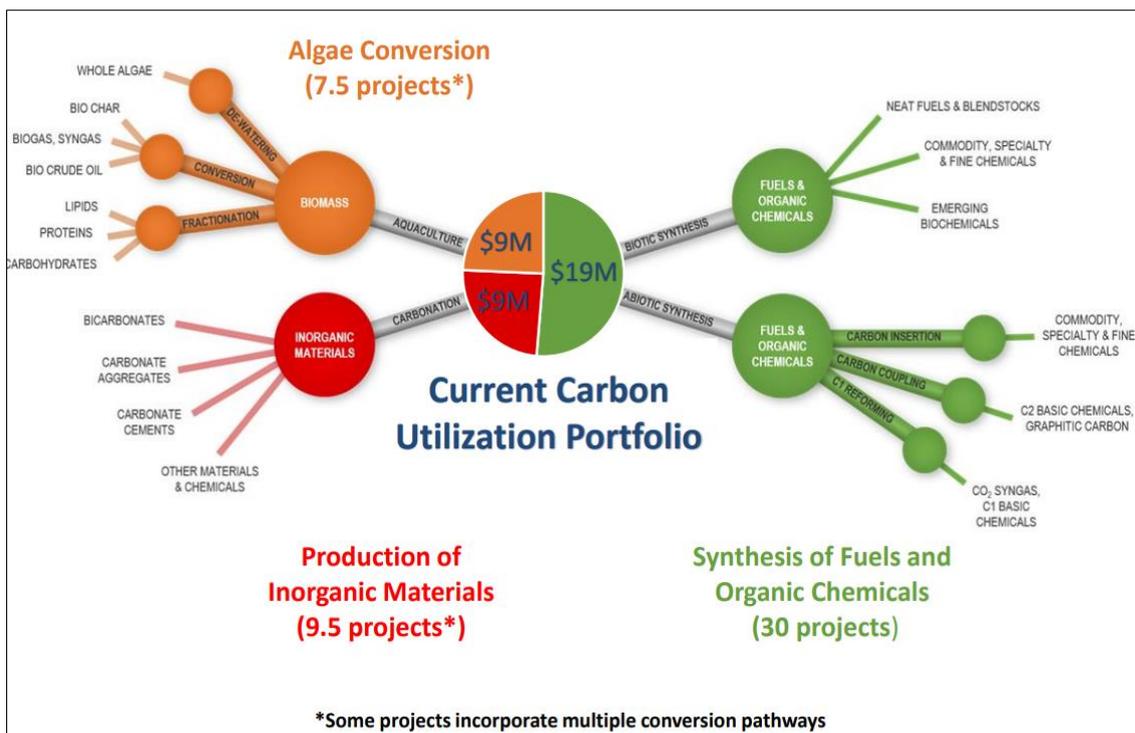


図4 DOEの炭素利用ポートフォリオの概略

### 3. 2 米国における EV、または省エネ車の中長期的な供給のシナリオ

2010 年、米国の北東部と中部大西洋岸に位置する数州の環境規制機関および運輸部局が、運輸部門からの炭素排出を削減するための協調取組みを促進する目的で、運輸気候イニシアティブ（Transportation Climate Initiative : TCI）を立ち上げた。

2020 年 12 月 21 日、マサチューセッツ州、コネティカット州、ロードアイランド州の知事、ならびにコロンビア特別区市長は、運輸部門にキャップ・アンド・トレードプログラムを課す新たな TCI プログラム（TCI-P）を発表した。

TCI-P は、ガソリン、軽油の大規模供給業者に対し、TCI-P に参加している管轄区で販売する燃料の燃焼による汚染に関して「排出枠」の購入を定めるものである。当初は基準となる 2023 年の年間 CO<sub>2</sub> 予算から始まって、排出枠は毎年同量ずつ、2032 年までに 30%減少する。2023 年の基準 CO<sub>2</sub> 年間予算は以下の通りである。

- ・ コネティカット州：13,497,957 トン
- ・ コロンビア特別区：877,715 トン
- ・ マサチューセッツ州：24,467,216 トン

各管轄区は、プログラム収益の投資方法を独立して決定する。しかし、各管轄区の収益の少なくとも 35%は、環境的不平等の問題への対処（運輸システムが不十分な地域社会や汚染負担の大きい地域社会が、このプログラムで公平に利益を受けるための方法など）に向けられる。投資の例としては以下が含まれる。

- ・ 公共交通の信頼性を改善する。
- ・ 既存の道路や橋を修復し、運輸インフラの気候変動に対する回復力を高める。
- ・ 田園地域および低所得層地域に関して高速インターネットを拡大する。
- ・ スクールバスや路線バスを電化する。
- ・ 郊外および田園地域に新たな高速バス路線を開設する。
- ・ 港および貨物施設の電化により大気汚染を低減する。
- ・ 安全な自転車通行帯、遊歩道および歩道を拡張する。
- ・ 電気自動車および低排出車に関して消費者リベート（払戻し）を提供する。
- ・ 州を跨いだ電気自動車の充電ルートを開発する。
- ・ 混雑緩和のため、継続的テレワークに関する優遇措置を提供する。

2021 年には、参加管轄区は地域排出プログラムを実施するために必要な法的手順を取るとされる。実際、運輸部門に関する地域キャップ・アンド・トレードプログラム

への参加には、州立法府の支援を要する。目標は 2022 年の TCI-P 実施である。他の TCI 参加州も、将来この新プログラムに加わるチャンスがあると思われる。

### 3. 3 政権交代によるベネズエラ原油、イラン原油の輸出入シナリオは（PADD3 における重質高硫黄原油の代替油は、欧州からの HSFO の輸入が続くのか）

2019 年 1 月に米国政府はベネズエラ産原油輸出に経済制裁を課し、また IMO 2020 硫黄分規制が近づくに伴って高硫黄船舶燃料（HSFO）の価格が低下したため、メキシコ湾岸の精製業者は 2019 年以降、ベネズエラ産原油の代替として、ロシアからの HSFO の輸入を増やした。ベネズエラから原油の供給がなくなったことで、米国のコーカーを有する製油所向けの重質/高硫黄原油の市場は逼迫した。

2020 年の OPEC+ の原油減産により、サウジアラビア、イラク、クウェートからの高硫黄原油が市場から姿を消した（米国産軽質低硫黄原油は、米国のコーカーを有する製油所にはあまり合わない）。

米国の精製業者の多くは、HSFO と軽質原油のブレンドも行って、イラクからの重質原油輸入減少とベネズエラ産重質原油の欠如を補っている。2020 年、米国の全体的な半製品輸入が減少する中、HSFO の輸入は 2011 年以降で最も高いレベルまで増加した。

米国の HSFO の輸入のほぼ全てが、メキシコ湾岸に位置する PADD 3 の複合型製油所である。表 2 に、米国向け半製品の供給上位 5 ヶ国を示す。米国向け半製品供給国のうち、これらの上位 5 カ国が、この製品の米国輸入の大部分を占めている。上位 5 カ国が占める割合は、2019 年が最低で 72%、2020 年が最高で 85%であった。

近年、米国の精製業者によるロシア産 HSFO の輸入が増加していることから、ロシアは米国市場向け半製品供給国として 1 位にとどまっている。

2020 年、アルジェリアは 2 位の座をメキシコに明け渡し、供給国上位 5 カ国からも外れた。最近の報告によると、アルジェリアは慢性的な管理の悪さと、何年もの過小投資により、石油・ガスの輸出が大幅に低下している。

表2 米国向け半製品の供給上位5カ国

単位：100万BPD										
	2016	Qty	2017	Qty	2018	Qty	2019	Qty	2020*	Qty
1	Russia	.315	Russia	.272	Russia	.235	Russia	.301	Russia	.392
2	Algeria	.122	Algeria	.120	Algeria	.095	Algeria	.056	Mexico	.036
3	Belgium	.041	Belgium	.042	UAE	.050	Belgium	.046	Egypt	.018
4	France	.012	Netherlands	.021	Belgium	.043	Egypt	.040	Ecuador	.015
5	Norway	.010	Norway	.020	Canada	.021	Canada	.020	Belgium	.011
<b>Top Five Total</b>		<b>.500</b>		<b>.475</b>		<b>.444</b>		<b>.463</b>		<b>.472</b>
<b>Total Unfinished Imports</b>		<b>.606</b>		<b>.634</b>		<b>.611</b>		<b>.645</b>		<b>.555</b>
* Through November 2020.										
Source: EIA.										

無断転載・複製を禁ず

一般財団法人石油エネルギー技術センター  
総務部調査情報グループ

〒105-0011 東京都港区芝公園2-1-1

電話 03-5402-8502



- 1 Introduction.....
- 2 Analysis of Contaminated Engine Oil by Fuel.....
- 3 Conclusion.....

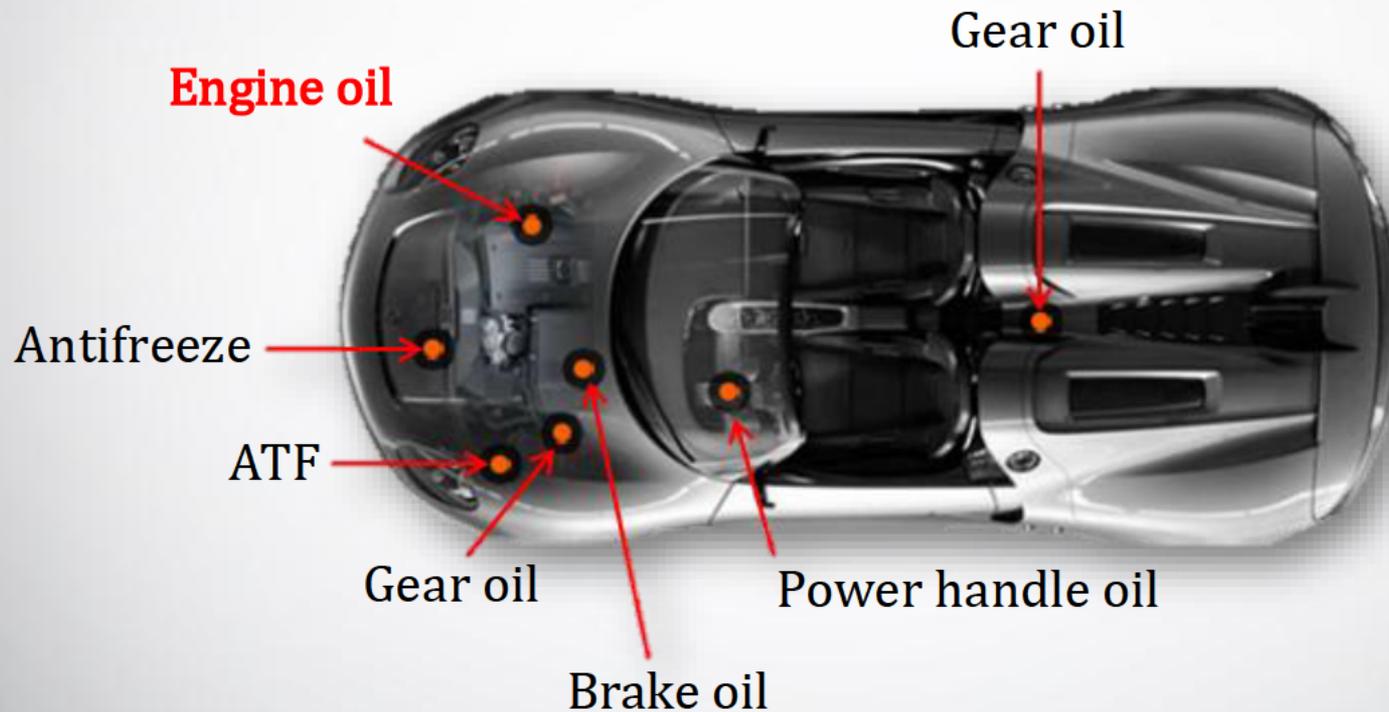
The background features a blurred image of an electric vehicle charging station. A prominent blue horizontal bar spans across the middle of the image. The number '01' is displayed in a large, light grey font on the left side, partially overlapping the blue bar.

01

# Introduction



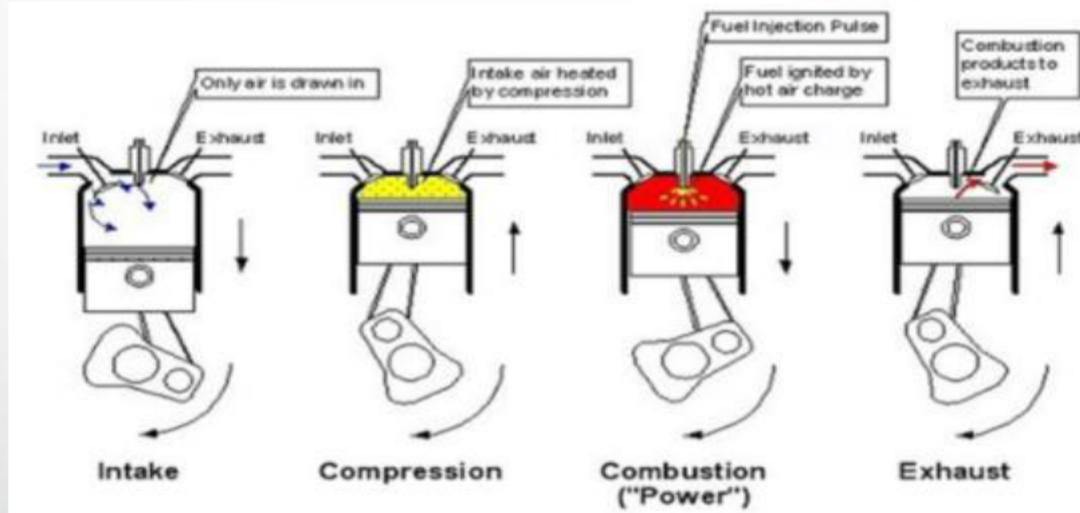
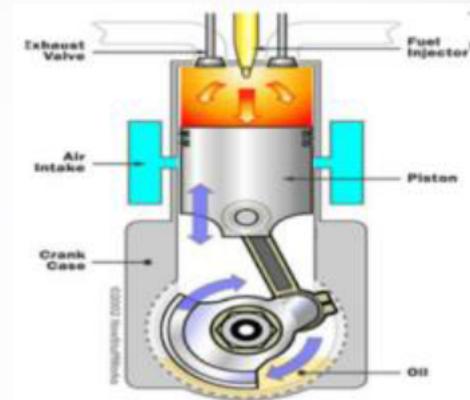
## ✓ Lubricating oils for passenger vehicles



✓ Use much engine oil due to exchange regularly



## ✓ Engine Structure



✓ Engine oil function : lubricant, cooling, sealing, detergent....



# Specification of Engine Oil



## Specification of Engine Oil in Korea

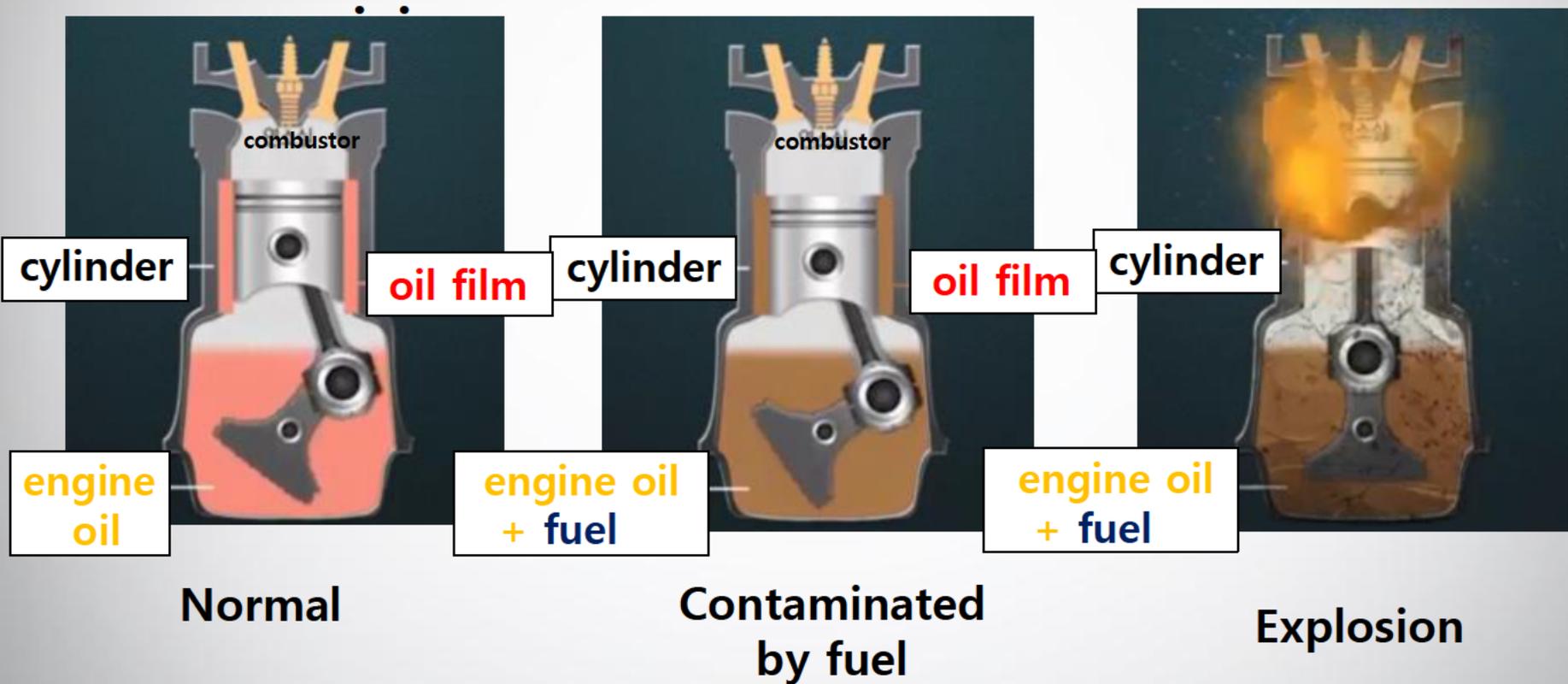
Grade Test Item	Grade SAE0W	Grade SAE5W	Grade SAE10W	Grade SAE15W	Grade SAE20W	Grade SAE25W	Grade2 0 SAE20	Grade30 (SAE30)	Grade40 (SAE40)	Grade5 0 (SAE50)	Grade60 (SAE60)
Flash Point(°C)	min 170	min 170	min 170	min 175	min 180	min 185	min 180	min 190	min 195	min 200	min 205
Cold Cranking Viscosity (Pa.s)	max 6.20 (-35°C)	max 6.60 (-30°C)	max 7.00 (-25°C)	max 7.00 (-20°C)	max 9.50 (-15°C)	max 13.00 (-10°C)	-	-	-	-	-
Kinematic Viscosity (100°C,mm <sup>2</sup> /s)	min 3.8	min 3.8	min 4.1	min 5.6	min 5.6	min 9.3	5.6 ~ 9.3	9.3 ~ 12.5	12.5 ~ 16.3	16.3 ~ 21.9	21.9 ~ 26.1
Viscosity Index	min 85	min 85	min 85	min 85	min 85	min 85	min 85	min 85	min 85	min 85	min 85
Pour Point(°C)	min -35.0	min -30.0	min -25.0	min -22.5	min -22.5	min -17.5	min -12.5	min -10.0	min -7.5	min -5.5	min -2.5
Oxidation Stability (165.5°C, 24h)	ratio of Viscosity	max 1.5	Max 1.5	max 1.5	Max 1.5	max 1.5	max 1.5	max 1.5	max 1.5	max 1.5	max 1.5
	Increase of TAN (mgKOH/g)	Max 1.6	Max 1.6	Max 1.6	Max 1.6	Max 1.6	max 1.6	max 1.6	max 1.6	max 1.6	max 1.6
	Lacquer	Light	light	light	light	light	light	light	light	light	light

*\*Source : Business act for quality standard inspection method and inspection fee for petroleum product*

√ Need to use suitable grade of engine oil for vehicle



## Vehicle Accident by lubricant and fuel



✓ contaminated engine oil cause vehicle defect and accident

02

## Analysis of Contaminated Engine oil by Fuel



# Analysis of Engine oil by fuel mixing

Engine Oil	Fuel (Diesel, Gasoline)
100%	0%
95%	5%
90%	10%
85%	15%
80%	20%
75%	25%
70%	30%
0%	100%

**Engine oil : Hyundai MOBIS, Premium DPF, 5W30**

**Diesel : Winter season, Vehicle diesel**

**Gasoline : Vehicle gasoline**



√ prepare contaminated engine oil by certain percentage fuel



## Determination of Kinematic Viscosity and Viscosity

I n d e x



- Viscosity is a measure of the resistance of a fluid which is being deformed by either shear or tensile stress. In everyday terms (and for fluids only), viscosity is "thickness" or "internal friction".

- Viscosity index (VI) is an arbitrary measure for the change of viscosity with temperature. It is used to characterize lubricating oil in the automotive industry. The viscosity of liquids decreases as temperature increases. The viscosity of a lubricant is closely related to its ability to reduce friction.

**Kinematic Viscosity Tester  
(CANNON Instrument, CAV2100)**



# Analysis of kinematic viscosity

Test Item	Kinematic Viscosity (mm <sup>2</sup> /s)		Viscosity Index
	40 °C	100 °C	
Engine oil	69.83	11.79	165.3
E:D=95:5	57.22	10.35	171.8
E:D=90:10	46.13	8.981	179.6
E:D=85:15	38.70	7.956	185.2
E:D=80:20	31.12	6.898	191.6
E:D=75:25	26.80	6.233	195.1
E:D=70:30	20.91	5.256	201.4
Diesel	2.245	1.039	10404.9

- E ; Engine oil, D ; Diesel

√ shows decrease Kinematic Viscosity under large diesel %



# Analysis of kinematic viscosity

Test Item	Kinematic Viscosity (mm <sup>2</sup> /s)		Viscosity Index
	40 °C	100 °C	
Engine oil	18.71	11.79	165.3
E:G=95:5	32.94	9.425	181.1
E:G=90:10	23.20	7.515	206.3
E:G=85:15	16.78	6.151	236.3
E:G=80:20	12.13	5.384	301.4
E:G=75:25	9.174	9.621 (at 50°C)	273.1
E:G=70:30	18.71	7.717 (at 50°C)	433.8
Gasoline	-	-	-

- E ; Engine oil, G ; Gasoline

✓ shows decrease Kinematic Viscosity under large gasoline %  
✓ But irregular results at 40 °C due to heterogeneity



## ✓ Determination of Flash point & Density



**Flash Point Tester  
(TANAKA, ACO-T601)**



**Density Analyzer  
(Anton Paar, DMA 5000)**

- The flash point of a volatile material is the lowest temperature at which it can vaporize to form an ignitable mixture in air. Measuring a flash point requires an ignition source. At the flash point, the vapor may cease to burn when the source of ignition is removed.
- The density is relate with viscosity, pour point and flash point.



Test Item	Flash point (°C)	Density (mg/mL)
Engine oil	226	0.85143
E:D=95:5	212	0.85084
E:D=90:10	176	0.84957
E:D=85:15	148	0.84845
E:D=80:20	137	0.84700
E:D=75:25	124	0.84596
E:D=70:30	116	0.84420
Diesel	68	0.82690

- Flash point was checked by COC (Cleveland open cup) method

√ shows decrease Flash point and Density under large diesel %



Test Item	Flash point (°C)	Density (mg/mL)
Engine oil	226	0.85143
E:G=95:5	205	0.84642
E:G=90:10	93	0.84103
E:G=85:15	-13 <sup>a</sup>	0.83560
E:G=80:20	-18 <sup>a</sup>	0.82994
E:G=75:25	Below -20 <sup>a</sup>	0.82463
E:G=70:30	Below -20 <sup>a</sup>	0.81909
Gasoline	Below -20 <sup>a</sup>	0.74054

<sup>a</sup> Flash point was checked by rapid equilibrium instrument

√ shows decrease Flash point and Density under large gasoline %



## Cold Cranking Viscosity and Dynamic



**ity**- The CCS was invented (USP 3350922) and developed by Dr. Dae Sik Kim of Esso Research and Engineering Company in 1964. CCS simulates rheological process of "an average engine" during cold starting. The Starter motor was replaced with a small series wound universal motor, a typical sewing machine motor, and the engine, with a specially designed cold cylinder and an insulated cylindrical rotor with a pair of parallel flats

Auto Cold Cranking Simulator  
(Cannon Instrument, CCS-2100)

## Determination of Pour point



-Pour Point; the lowest temperature at which it will pour or flow under low temperature.

Pour/Cloud Point Tester  
(TANAKA, MPC-602)

# Analysis of cold environmental Characteristics

Test Item	Pour point (°C)	CCS (mPa·s)
Engine oil	-42	6197
E:D=95:5	-45	4466
E:D=90:10	-45	3011
E:D=85:15	-48	2134
E:D=80:20	-48	1512
E:D=75:25	-48	1237
E:D=70:30	-51	821
Diesel	-51	93

√ shows decrease Pour point and CCS under large diesel %

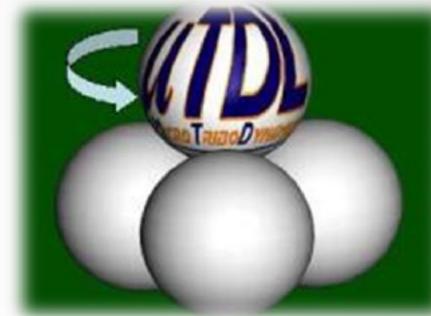
# Analysis of cold environmental Characteristics

Test Item	Pour point (°C)	CCS (mPa·s)
Engine oil	-42	6197
E:G=95:5	-46	2561
E:G=90:10	-51	1188
E:G=85:15	-56	624
E:G=80:20	Below -65	346
E:G=75:25	Below -65	245
E:G=70:30	Below -65	196
Gasoline	Below -65	-

√ shows decrease Pour point and CCS under large gasoline %



## ✓ Determination of Wear scar



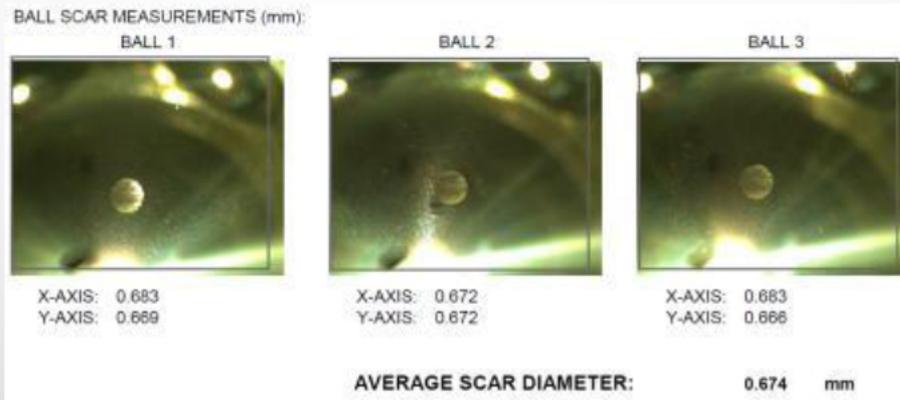
Friction & Wear Tester (Falax)  
Lubricant, Grease, Diesel Lubricity

- Four ball wear tests are outlined in ASTM D 226, as well as others, and are used for testing different lubricants. In each, three hard steel balls are locked in position while a fourth ball is rotated against the three others. Light loads are applied for the wear test producing a circular wear scar on each ball, and the average wear scar diameter is determined for comparison.



# Analysis of lubricity

Test Item	Wear Scar (mm)
Engine oil	494
E:D=95:5	500
E:D=90:10	502
E:D=85:15	502
E:D=80:20	507
E:D=75:25	508
E:D=70:30	511
Diesel	674



√ shows increase wear scar under large diesel %



## ✓ Determination of Oxidation stability



Oxidation Stability tester  
(Yoshida, ISOT-D8)



TAN Analyzer  
(Metrohm, 805 Dosimat)

- Oxidation is the most predominant reaction of a lubricant, It is responsible for numerous lubricant problems-including viscosity increase, varnish, sludge and sediment formation, additive depletion, base oil breakdown, filter plugging, loss in foam control, acid number increase, rust formation and corrosion.
- The Total Acid Number (TAN) is the amount of KOH in mg that is needed to neutralize the acids in 1 g of oil. It is an important quality measurement of petroleum product. The TAN value indicates to the petroleum product the potential of corrosion problems.



# Analysis of Oxidation Stability

Test Item	Oxidation Stability (165 °C, 24 h)		
	Ratio of viscosity	Ratio of TAN	Lacquer
Engine oil	0.94	0.28	No attachment
E:D=95:5	1.10	-0.26	No attachment
E:D=90:10	1.21	0.45	No attachment
E:D=85:15	1.23	-0.54	No attachment
E:D=80:20	1.32	0.36	No attachment
E:D=75:25	1.56	0.11	No attachment
E:D=70:30	1.64	0.64	No attachment
Diesel	1.84	0.81	Attachment

√ shows decrease oxidation stability under large diesel %  
√ Also neat diesel shows lacquer which is oxidation adduct



**SIMDIST Analyzer**  
(Thermo, Trace GC Ultra)

- The boiling range distribution of petroleum fractions provides an insight into the composition of feedstocks and products related to petroleum refining processes.
- The gas chromatographic simulation of this determination can be used to replace conventional distillation methods for control of refining operation.

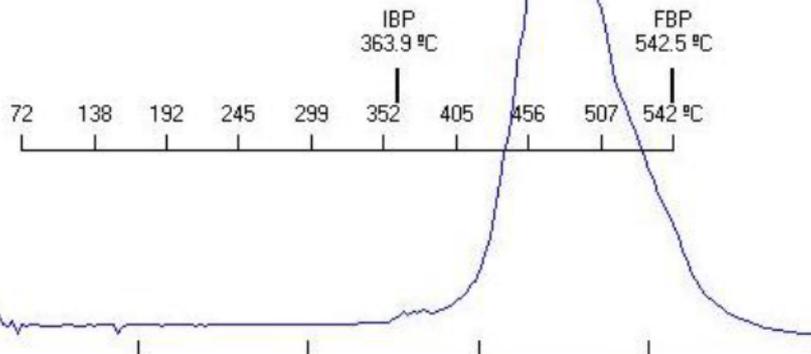
<b>Manufacture</b>	<b>Thermo</b>
Model	Trace GC Ultra
Test Method	ASTM D 2887
Column	10 m * 0.53 mm ID * 0.88 $\mu$ m
Oven Temp.	Initial ; 40 °C, 1 min hold Increase ; 15 °C/min to 360 °C, 10 min hold
Detector	FID (370 °C)

√ need to alternative analytic tool when tiny sample

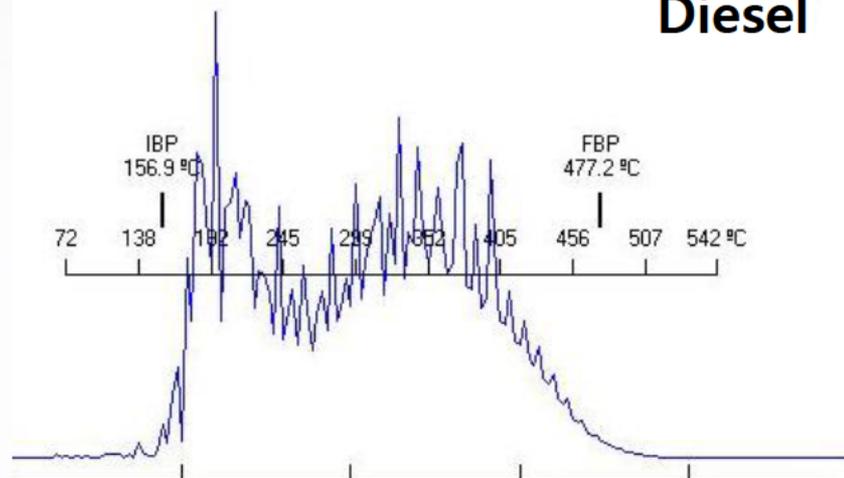


# Analysis of SIMDIST

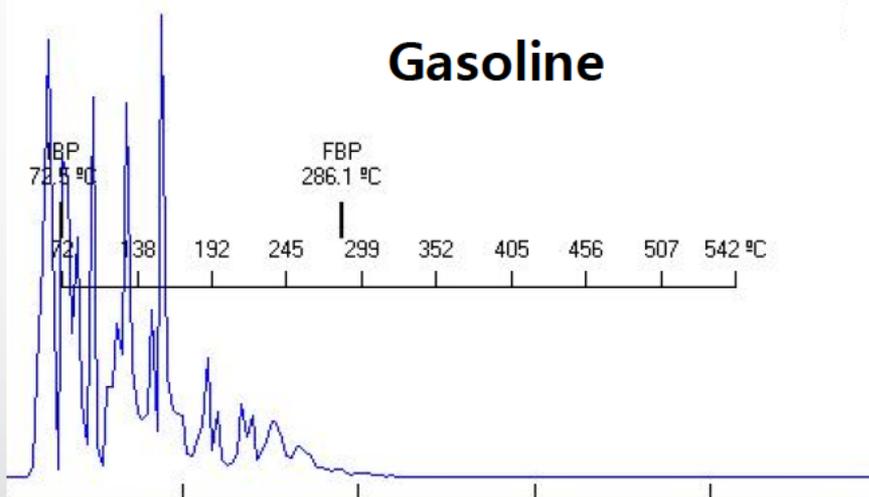
## Engine oil



## Diesel



## Gasoline

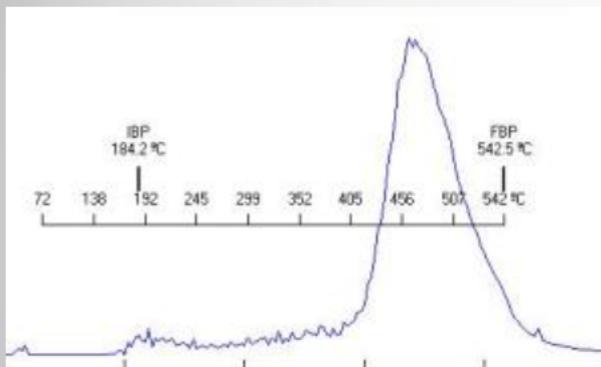


✓ each sample shows typical pattern chromatogram by SIMDIST

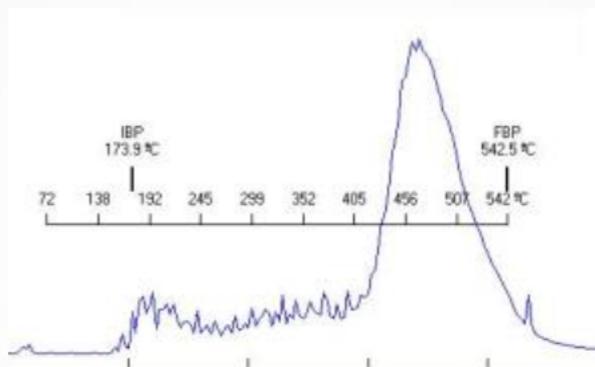


# Analysis of SIMDIST

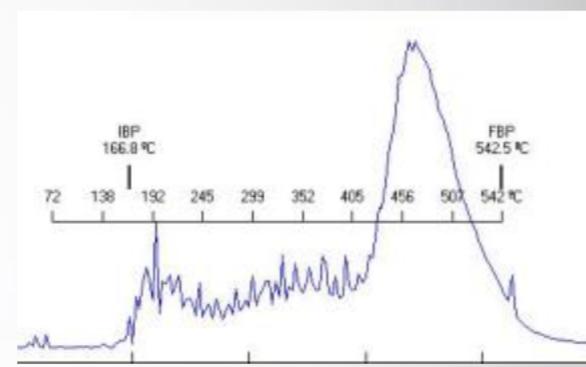
**E:D=90:10**



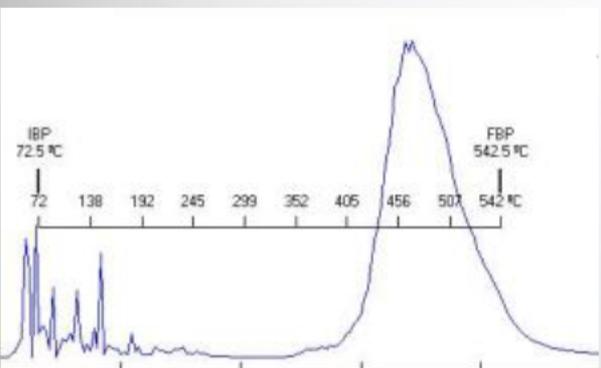
**E:D=80:20**



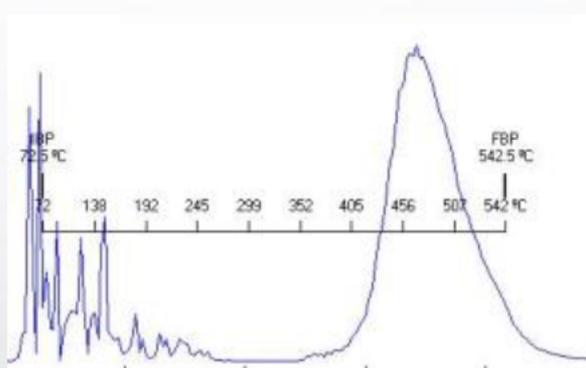
**E:D=70:30**



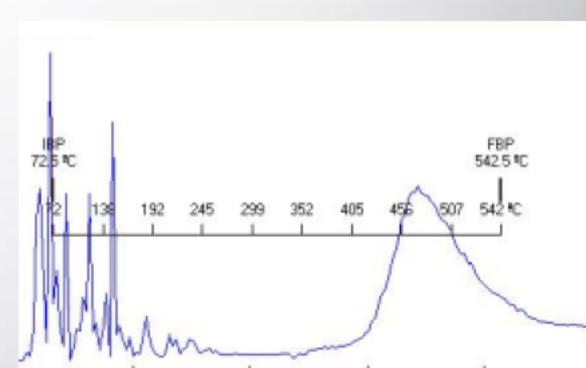
**E:G=90:10**



**E:G=80:20**



**E:G=70:30**



√ increase fuel area part on chromatogram under large fuel %



# Analysis of SIMDIST

Engine oil	IBP(°C)	10% (°C)	50%(°C)	90%(°C)	FBP(°C)
Engine oil	412.2	446.1	481.0	524.0	542.5
E:D=95:5	292.4	431.6	478.6	524.2	542.5
E:D=90:10	254.0	412.0	477.2	524.0	542.5
E:D=85:15	241.5	365.1	472.1	521.2	542.5
E:D=80:20	237.6	333.7	469.7	520.0	542.5
E:D=75:25	237.6	339.1	467.6	519.2	542.5
E:D=70:30	226.7	323.0	464.6	517.9	542.5
Diesel	121.5	265.9	340.2	420.4	529.9

- ✓ possible to check the IBP, 10, 50, 90 and FBP
- ✓ also possible to check the fuel ratio on each range

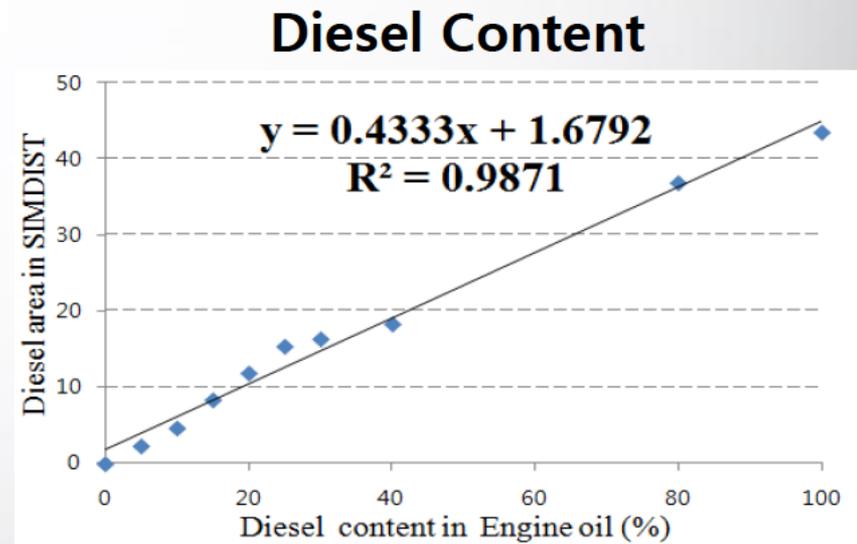
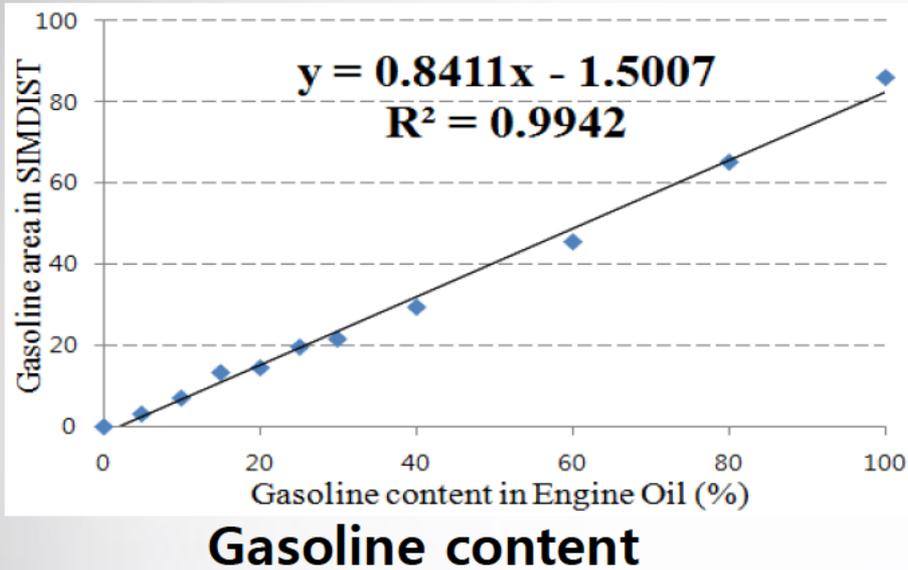


# Analysis of SIMDIST

Engine oil	IBP(°C)	10% (°C)	50%(°C)	90%(°C)	FBP(°C)
Engine oil	412.2	446.1	481.0	524.0	542.5
E:G=95:5	72.5	430.9	476.1	522.8	542.5
E:G=90:10	72.5	407.4	473.8	522.2	542.5
E:G=85:15	72.5	143.5	467.9	519.2	542.5
E:G=80:20	72.5	143	468.7	519.3	542.5
E:G=75:25	72.5	123.9	465.3	518.5	542.5
E:G=70:30	72.5	120.4	464.2	524.1	542.5
Gasoline	72.5	76.3	129.3	217.7	286.1

- ✓ possible to check the IBP, 10, 50, 90 and FBP
- ✓ also possible to check the fuel ratio on each range

# Quantitative Analysis of fuel by SIMDISK Petro



✓ possible to quantitative analysis for fuel content in engine oil

03

Conclusion



# Summary & Conclusion

---

- » Engine oil can be mixed with fuel by defect of fuel or engine system..
- » The engine oil contaminated by large fuel, it make a problem for oil and vehicle function.
- » We investigated the engine oil functional property by fuel mixing.
- » The engine oil which involved fuel show low flash point, pour point, density, kinematic viscosity and cold cranking simulator value.
- » The engine oil which involved fuel show low lubricity value under four ball test.
- » We investigated the GC pattern by SIMDIST for determination of fuel in engine oil.
- » The fuel was detect at earlier retention time than engine oil in SIMDIST.
- » It was possible to quantitative analysis of fuel content using SIMDIST .
- » SIMDIST method will be use for diagnosis of oil condition such as fuel contamination.



---

# Thanks for your attention!



If you have any question, please contact to me.

E-mail : [yklam92001@kpetro.or.kr](mailto:yklam92001@kpetro.or.kr)

# Development of biofuel for ships capable of and g



# Contents



I Study Background

---

II Review of biofuel for ships (Quality, Engine)

---

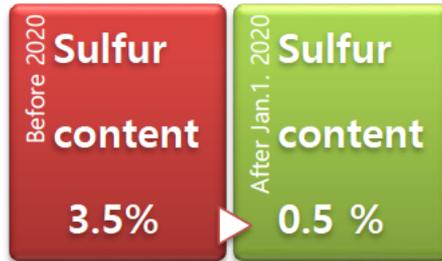
III Conclusion

---

# 1 Study Background

## The regulation of sulfur content of vessel fuel(IMO)

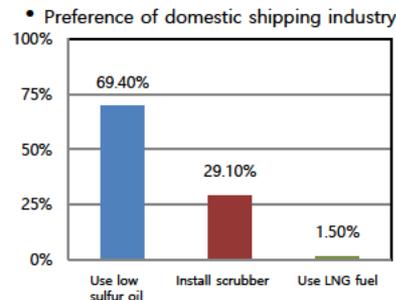
### Main contents



\* In the case of ECA region, 0.1% sulfur content has been regulated since 2015.

### Domestic status (South Korea)

- Marine Environment Management Act. Article 44.
  - > A heavy oil 2.0%,
  - B heavy oil 3.0%
  - C heavy oil 3.5%
  - > Revision to 0.5% of all fuels
- Government response
  - > Establishment of low carbon energy self-reliant green port
  - > Establishment of domestic port Greenport



## Regulatory countermeasures

### Low sulfur-oil usage

- Use low-sulfur oil such as MGO, Blending Fuel
- Operable with existing ship system
- Problems caused by increased fuel cost, fuel replacement

### Scrubber installation

- Available with existing high-sulfur oil
- Commercialization stage, Low operation expense
- Huge initial investment cost, Incomplete of Nox reduction

### LNG fuel usage

- Reduction of air pollutants and marine emission pollution
- Competitiveness of high fuel price
- High initial installation cost, LNG bunkering terminal shortage

Biofuel + Vessel-fuel = Low-sulfur fuel oil

# Reactive fuel for IMO 2020 Sox Regulation

# Regulation of Domestic and Foreign Sox and Response

## Regulation of International Sox (IMO 2020)

Previous Sulfur content less than **3.5%**

2020年

Now Sulfur content less than **0.5%**

## Regulation of Korea domestic (Marine Environment Management Act&Port Air Quality Act)

Previous Sulfur content less than **3.5%**

Outer ECA

Jan. 2020.\*

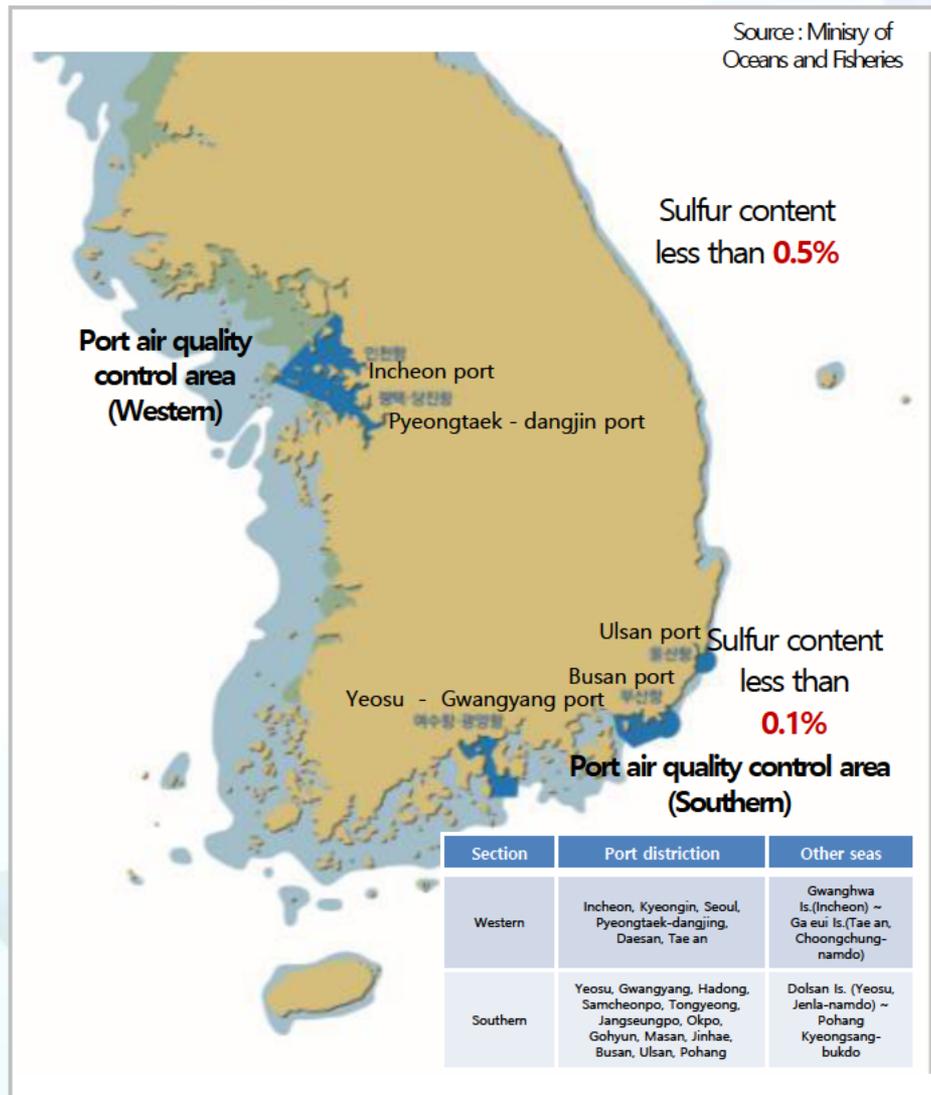
Now Sulfur content less than **0.5%**

Internal ECA

Sep. 2020.\*\*

Sulfur content less than **0.1%**

\* Domestic vessels will be applied from 2021. \*\* Ships for at anchor and moored



# Biofuel Overview

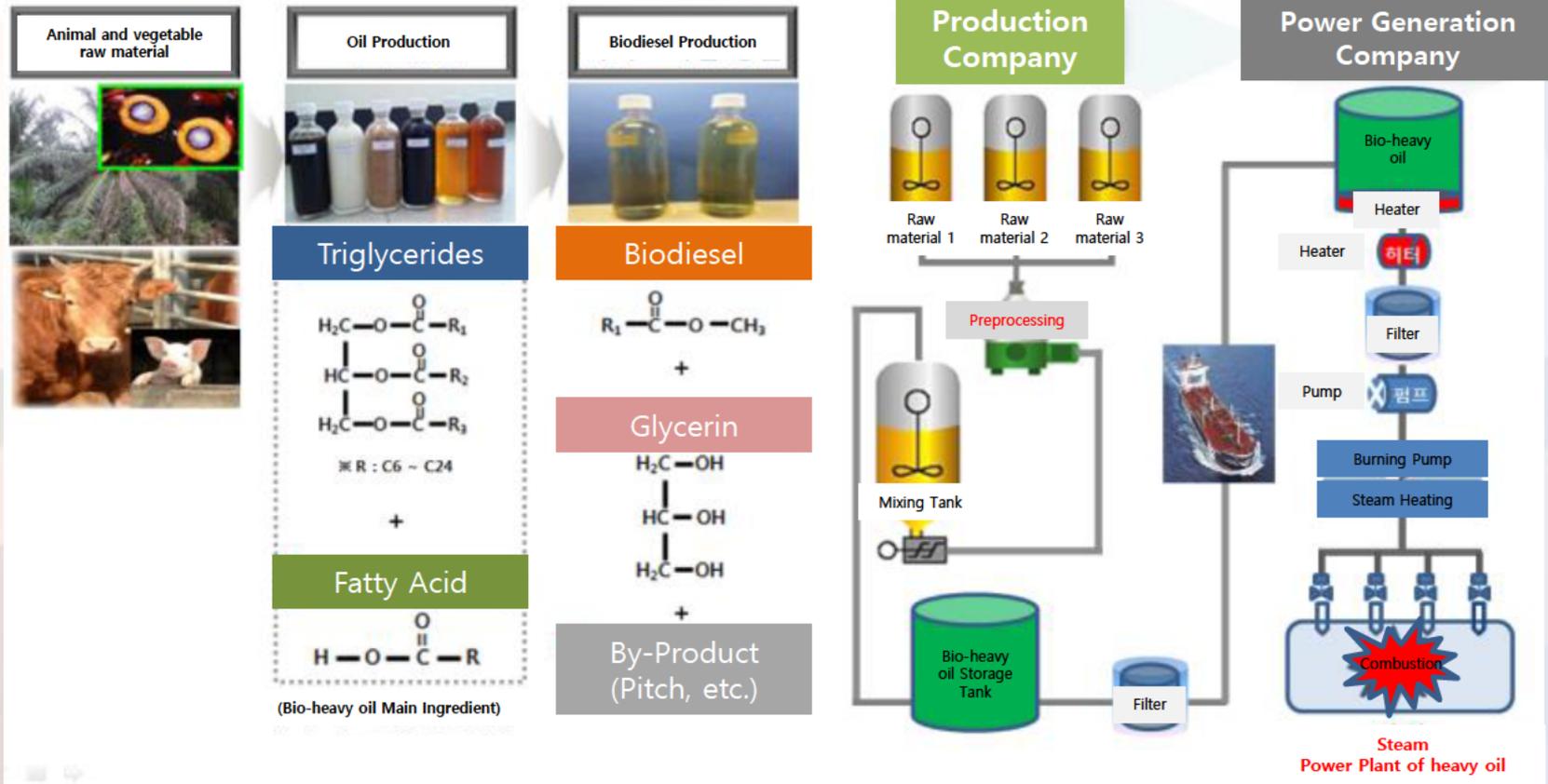


\* Straight vegetable oils (SVO)

\* Source: IEA Bioenergy Task 39

# ● Biofuel vessel\_Bio-heavy oil

- Substitute fuel for heavy oil produced by refining and mixing low-cost raw materials such as **Palm oil, high-priced palm by-products, and animal oil and fat** to meet quality standards



# Quality Standards of Bio-heavy oil

## Quality Standard of Bio-heavy oil for Power Generation (March. 15<sup>th</sup>. 2019)

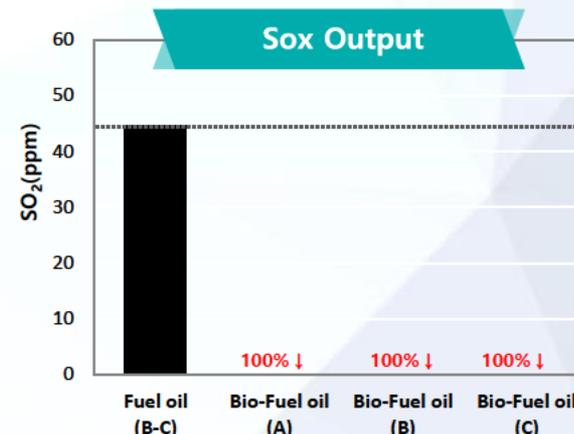
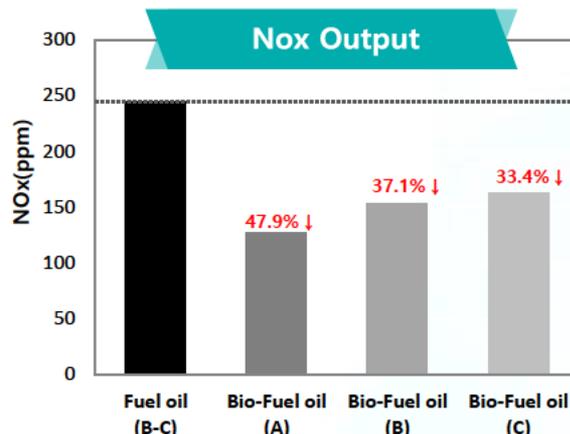
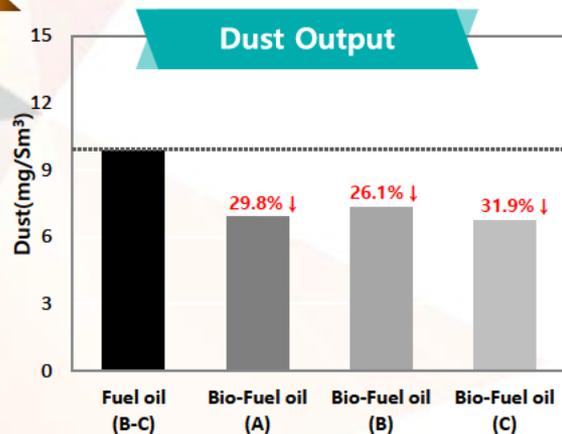
Implementation of full-scale quality standards reflecting test supply business and commercialization research results

Test Item	Unit	Quality Standard			Note
		Enforcement Standard (Jan. 2 <sup>th</sup> .2014)	Current Standard (Dec.16 <sup>th</sup> .2016)	Full-supply Standard (Mar.15 <sup>th</sup> .2019)	
Flash Point	°C	Over(or) 70	Over(or) 70	<b>Over(or) 70</b>	
Viscosity(50°C)	mm <sup>2</sup> /s	<b>20~100</b>	<b>15~80</b>	<b>15~80</b>	- First Revision (December.16 <sup>th</sup> .2016)
Carbon Residual	Weight%	<b>Under(or) 10</b>	<b>Under(or) 10</b>	<u>Under(or) 5</u>	
Ash	Weight%	Under(or) 0.10	Under(or) 0.10	<b>Under(or) 0.10</b>	
Sulfur	Weight%	<b>Under(or) 0.05</b>	<b>Under(or) 0.1</b>	<b>Under(or) 0.05</b>	- First Revision (December.16 <sup>th</sup> .2016)
Copper Corrosion (50°C, 3h)	-	Under(or) 1	Under(or) 1	<b>Under(or) 1</b>	
Pour Point	°C	<b>Under(or) 27.5</b>	<b>Under(or) 27</b>	<b>Under(or) 27</b>	- First Revision (December.16 <sup>th</sup> .2016)
Density(15°C)	kg/m <sup>3</sup>	Under(or) 991	Under(or) 991	<b>Under(or) 991</b>	
Water	Weight%	<b>Under(or) 0.2</b>	<b>Under(or) 0.3</b>	<b>Under(or) 0.30</b>	- First Revision (December.16 <sup>th</sup> .2016)
Acid Value	mg KOH/g	Under(or) 25	Under(or) 25	<b>Under(or) 25</b>	
Alkali Metal	Na	<b>mg/kg</b>	<b>Under(or) 70</b>	<b>Under(or) 70</b>	<u>Under(or) 50</u>
	Ca	mg/kg	Under(or) 30	Under(or) 30	<b>Under(or) 30</b>
	K	<b>mg/kg</b>	<b>Under(or) 70</b>	<b>Under(or) 70</b>	<u>Under(or) 50</u>
Iodine Number	g/100g	Under(or) 120	Under(or) 120	<b>Under(or) 120</b>	
Nitrogen	Weight%	Under(or) 0.3	Under(or) 0.3	<b>Under(or) 0.3</b>	
Vanadium	mg/kg	Under(or) 50	Under(or) 50	<b>Under(or) 50</b>	
Si+Al+Fe	mg/kg	Under(or) 200	Under(or) 200	<b>Under(or) 200</b>	
Prosphorus	<b>mg/kg</b>	<b>Under(or) 100</b>	<b>Under(or) 100</b>	<u>Under(or) 30</u>	- Reinforcement of standards based on facility and environmental impacts
Water and Sediment	Weight%	Under(or) 0.5	Under(or) 0.5	<b>Under(or) 0.5</b>	
Total Heating Value	Kcal/kg	Over(or) 9,000	Over(or) 9,000	<b>Over(or) 9,000</b>	

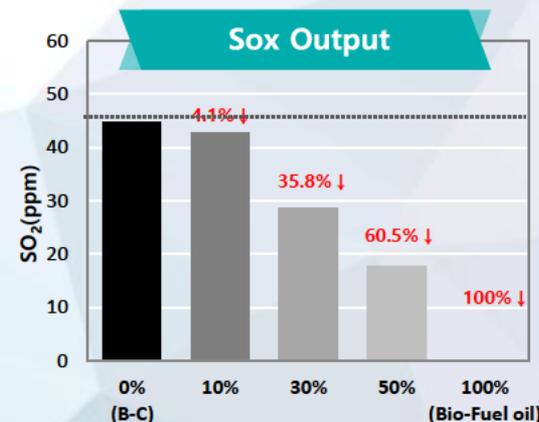
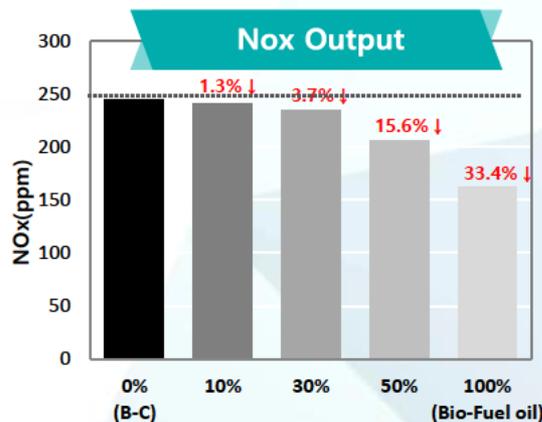
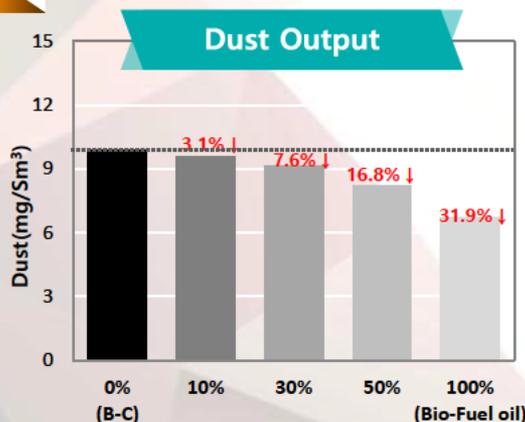
# Biofuel for Ships\_Bio-heavy oil

Environment effect of reduction Sulfur oxides 0%, Nitrogen oxides compared to heavy oil 39%, Fine dust 28%

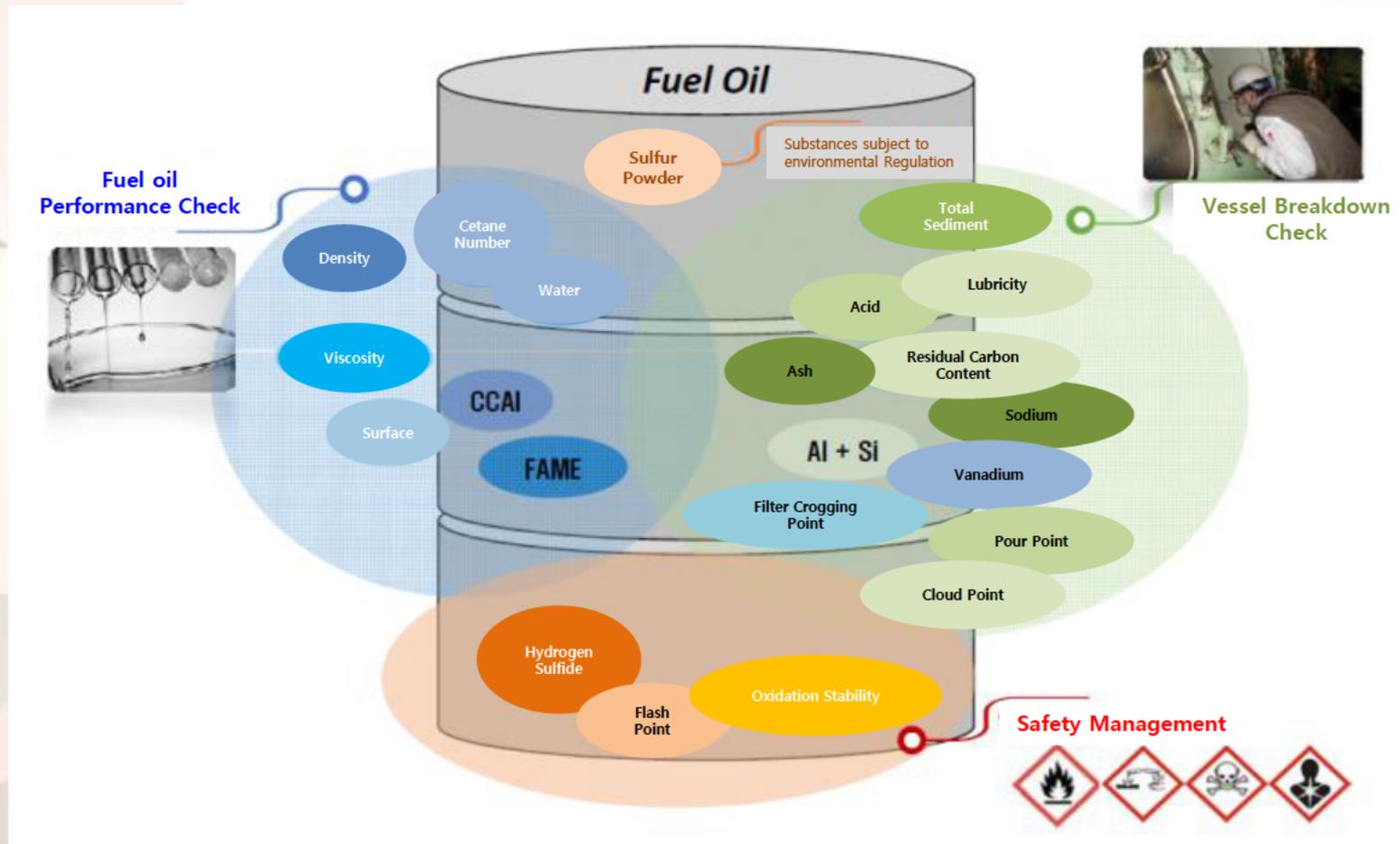
## Bio-heavy oil Emission Gas Results



## Mixed Bio-heavy oil Emission Gas Results

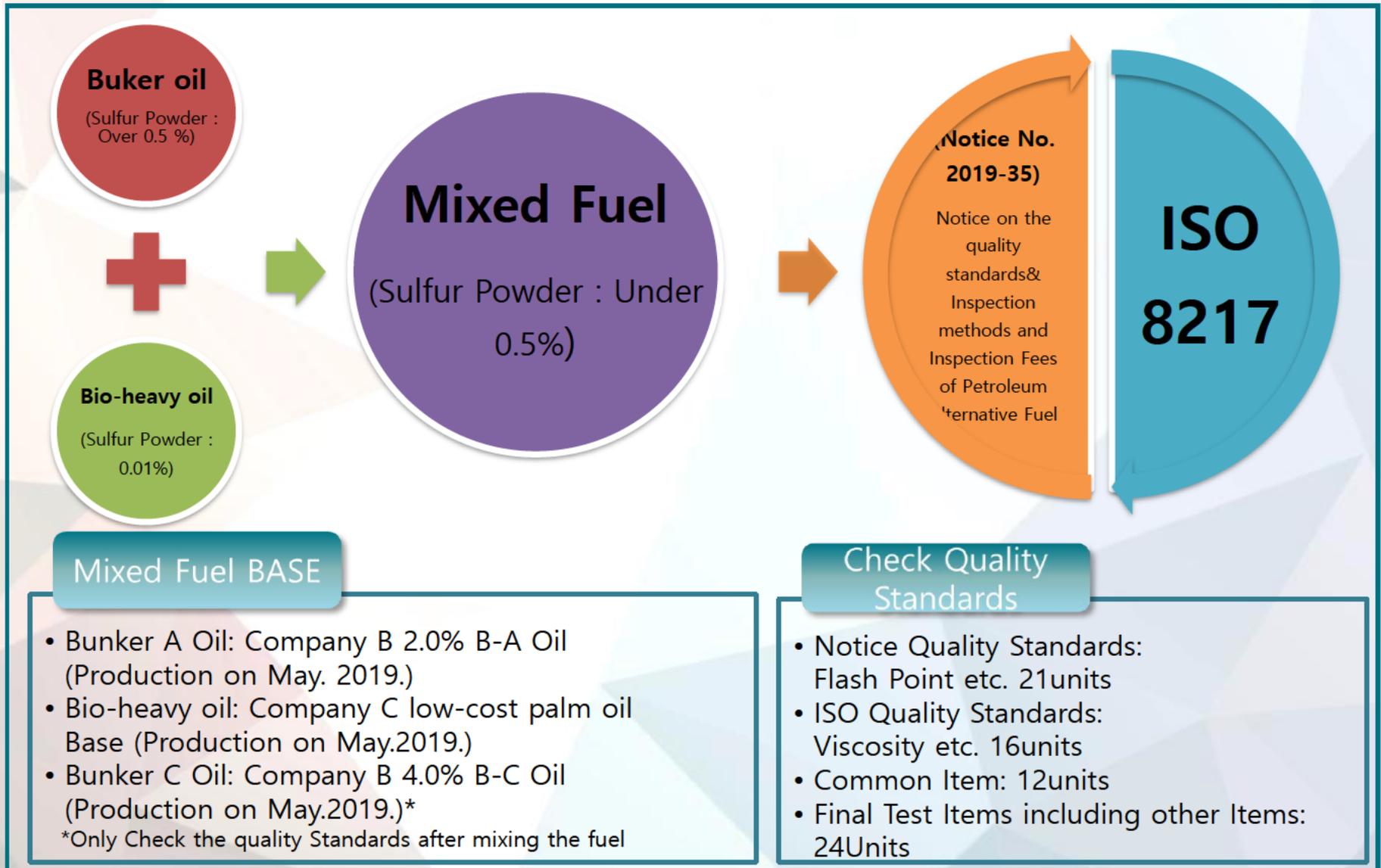


## 2 Review of biofuel for ships Quality Evaluation



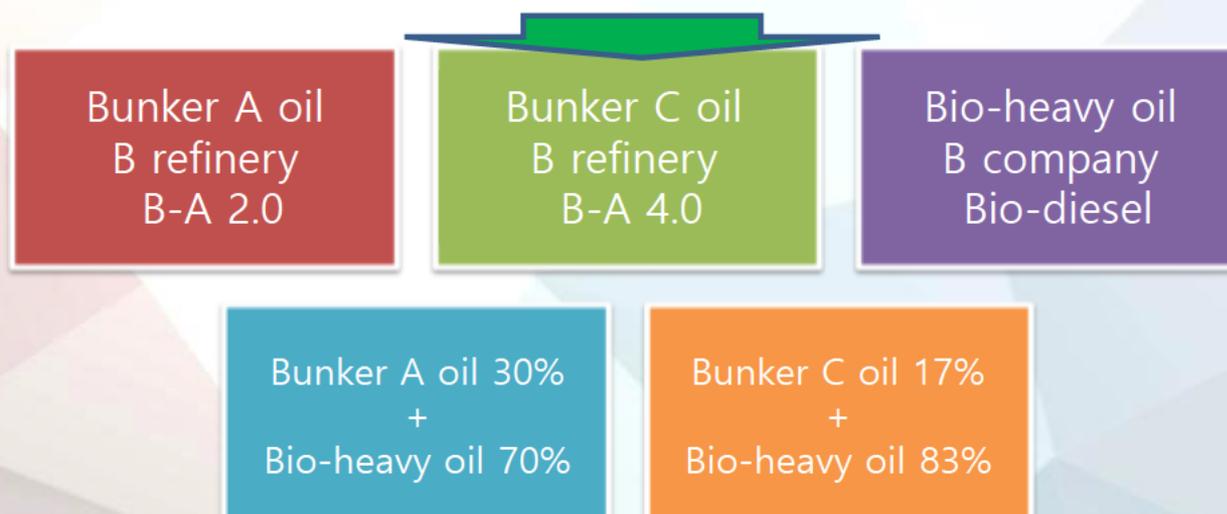
**Verification** of the application of biofuel for Ships  
by optimizing the quality of bio-heavy oil for  
power generation

# Quality Evaluation of Biofuel for Ships



# Selection of Biofuel Quality Assessment Fuel for Ships

Division	Domestic Standard (Petroleum and Petroleum Alternative Fuel Business Act)	International Standard (ISO8217)	Purpose
MGO (Marine Gas Oil)	Diesel for Ships	DMX, DMA, DMZ, DFA, DFZ, DMB, DFB	- Main Engine Fuel for Small Ships - Starting Fuel for Medium-sized Shps
MDO (Marine Diesel Oil)	<u>A Heavy oil</u>	<u>RMA 10</u>	- Main Engine Fuel for Medium-sized Ships - Generator Fuel for Large Ships
MFO (Marine Fuel Oil)	B Heavy oil	RMB 30	- Main Engine Fuel for Large Ships
	<u>C Heavy oil</u>	RMD 80, RME 180, RMG 180, 380, 500, 700, <del>RMK 380, 500, 700</del>	



# Analysis Result of Biofuel for Ships Quality Optimization Fuel

Test Item	Unit	Quality Standard for Ships	Test Methods for Ships	Quality Standard For Development	Test Methods for Development	2019-7-15	2019-7-15	2019-5-22	2019-7-15	2019-7-15	
						B-A	B-C	Bio-heavy oil 100%	B-A 30% Bio-heavy oil 70%	B-C 17% Bio-heavy oil 83%	
Flash Point(PM)	°C		KS M ISO 2719	Over(or) 70	KS M ISO 2719	83	91	234	99	133	
Viscosity(50°C)	mm <sup>2</sup> /s	Variety by oil type	KS M ISO 3104	Over(or) 15 ~ Under(or) 80	KS M ISO 3104	7.224	325.4	29.17	19.5	44.01	
Viscosity(100°C)	mm <sup>2</sup> /s	-	KS M ISO 3104	-	KS M ISO 3104	2.559	31.71	8.48	6.029	12.05	
Carbon Residual Powder	Weight %	2.5~Under(or) 20	KS M ISO 10370	Under(or) 5	KS M ISO 10370	2.97	16.66	0.27	1.31	3.90	
Sulfur	Weight %	Legal Standard	KS M ISO 14596	Under(or) 0.05	KS M ISO 8754	1.578	2.832	0.008	0.425	0.460	
Ash	Weight %	0.04~0.15	KS M ISO 6245	Under(or) 0.10	KS M ISO 6245	0.004	0.030	0.010	0.011	0.007	
Copper Corrosion(50 °C, 3 h)	-			Under(or) 1	KS M ISO 2160	1a	1a	1a	1a	1a	
Pour Point	°C	0~30/6~30	KS M 3016	Under(or) 27	KS M 3016	-12.0	0.0	6.0	-3.0	0.0	
Density(15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	920~Under(or) 1010	KS M 12185	Under(or) 991	KS M 12185	924.1	984.9	915.9	918.7	927.9	
Water	Weight %	Volume% 0.30~Under(or) 0.50	KS M ISO 3733	Under(or) 0.30	KS M 0100	0.0321	0.1481	0.0305	0.0405	0.0845	
Acid Value	mg KOH/g	Under(or) 2.5	ASTM D 664	Under(or) 25	KS M ISO 6618	1.09	2.31	0.16	0.46	1.24	
Alkali Metal	Na	mg/kg	50~Under(or) 100	IP501	Under(or) 50	EN 14108	1.4836	12.5975	0.0493	0.9398	2.8267
	Ca	mg/kg			Under(or) 30	ASTM D 7111	0.409	1.734	0.220	0.244	0.461
	K	mg/kg			Under(or) 50	EN 14109	0.7583	1.1353	0.2680	0.8015	0.7544
Iodine Number	g/100 g			Under(or) 120	KS M 0065	51	77	59	53	57	
Nitrogen (Chemical emission method)	mg/kg			Under(or) 0.3	KS M 2112	0.096	0.314	0.001	0.029	0.057	
Vanadium(V)	mg/kg	50~Under(or) 450	KS M ISO 14597	Under(or) 50	ASTM D 7111	15.650	105.800	Under 0.001	5.573	19.080	
Total Heating Value	kcal/kg			Over(or) 9,000	KS M 2057	10,306	10,136	9,376	9,658	9,521	
Water and Sediment	Volume %			Under(or) 0.5	KS M ISO 3734	Under 0.025	Under 0.025	Under 0.025	Under 0.025	Under 0.025	
Si+Al+Fe	mg/kg	25~Under(or) 60 (Except for Iron)	KS M ISO 10478	Under(or) 200	ASTM D 7111	1.573	24.321	0.067	1.206	3.930	
Phosphorous(P)	mg/kg			Under(or) 30	ASTM D 7111	Under 0.001	Under 0.001	0.747	0.442	0.346	
Storing Acid Number (Potential Difference)	mg KOH/g		ASTM D 664	Under(or) 0	ASTM D 664	0	0	0	0	0	
CCAI	-	850~Under(or) 870	KS M ISO 8217			849	847	811	821	816	
H <sub>2</sub> S	mg/kg	Under(or) 2.00	IP 570			0	0	0	0	0	

Satisfying the Quality Standard of all Items of mixed oil

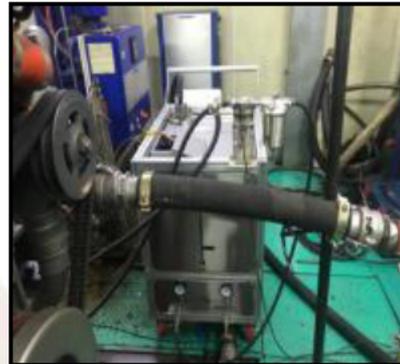
	Common Item
	Development Item
	Ship Item
	Add tional Item

# 3 Review of biofuel for ships Engine Evaluation

## Test Engine(DD6CAM) Spec.



Division	Detail Spec.
Maximum Power	430 PS(@2,000RPM)
Displacement	12.92L
No. of Cylinder	6
Bore x Stroke	133 x 155
Compression Ratio	17 : 1
Inhaler Type	Turbo charged with cooler
Cooling System	Forced lubrication with gear pump
Weight	1,560Kg



# Performance Evaluation Engine Test Mode

## Test Fuel Temperature Setting

Sample Viscosity (mm <sup>2</sup> /s)	Temperature(°C)		
	Bunker A oil	Bunker A oil 30% + Bio-heavy oil 70%	Bio-heavy oil
3	90	147	173
5	64	116	131
10	38	75	91
15	27	59	73
20	20	49	63

※ Engine rated temperature is shaded color 'Orange'

Bunker A oil	Bio-heavy oil	Mixed oil
• 38°C	• 73°C	• 49°C
• 64°C	• 91°C	• 59°C
		• 75°C

## Engine Test Mode Setting



ENGINE TEST METHOD  
ISO 8178(EMISSION ENGINE TEST  
METHOD)  
E2, E3, D2 MODE

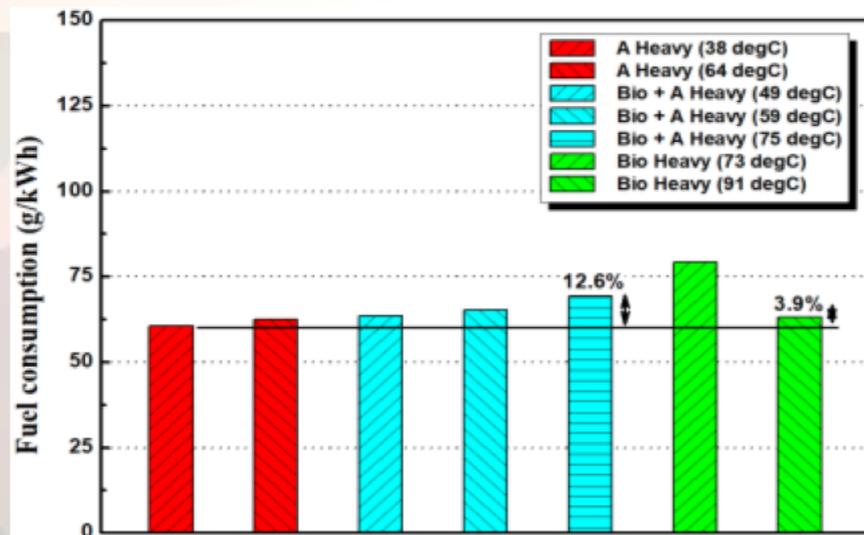
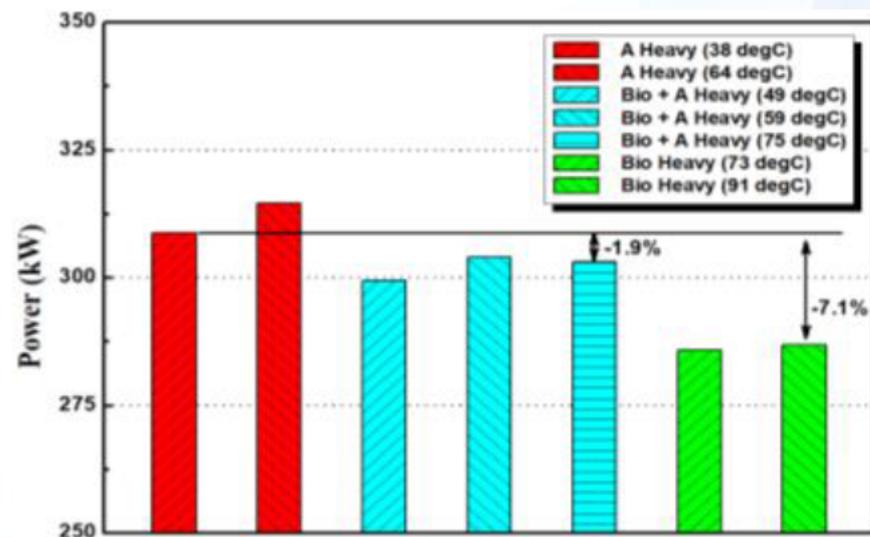
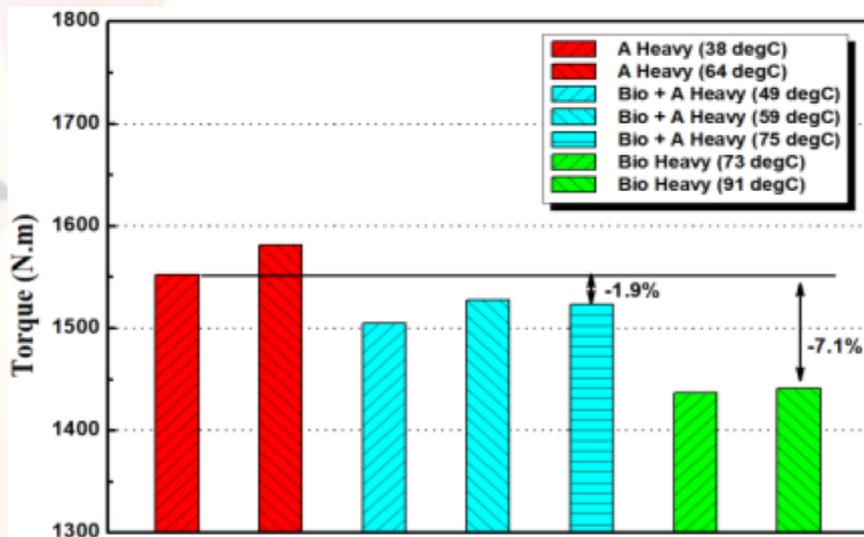
E3 mode D2 mode

- Test twice for each mode
- Fuel consumption per test
- Basic test by diesel before test start

E2 mode and D2 mode are **the same**  
**Speed load** carrying-mode

# Test Results of Performance Evaluation Engine(Performance)

Engine Performance Full-load Test Result

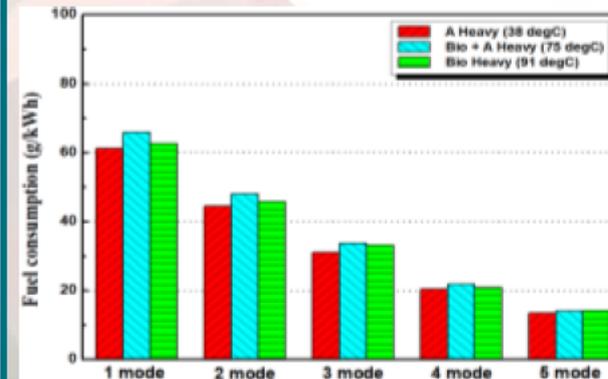
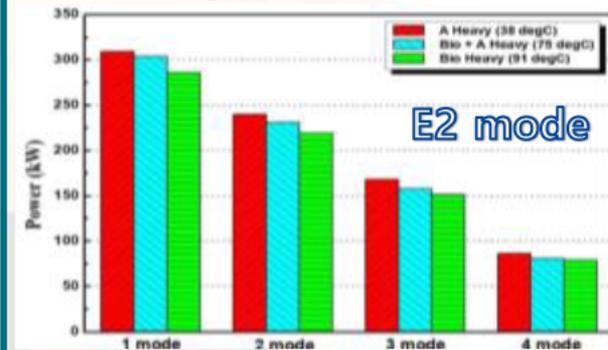
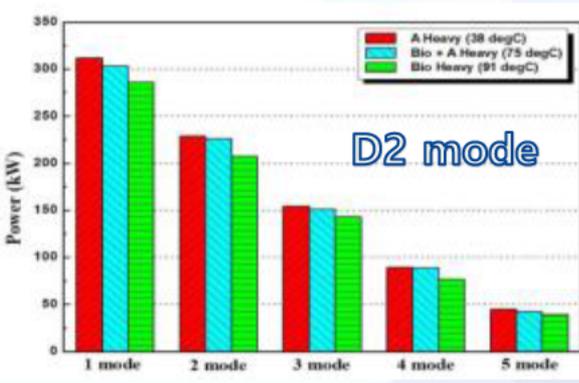
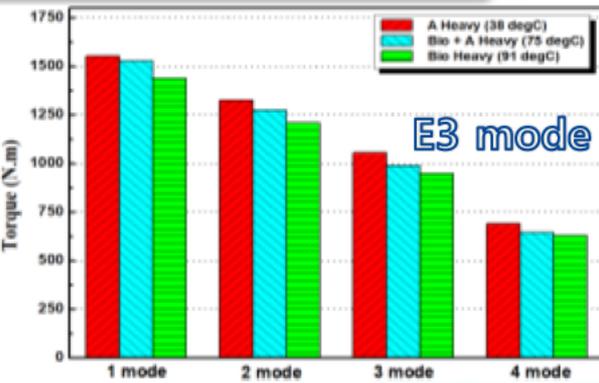


Differences in engine torque, output, and fuel consumption are shown by the difference in fuel calorific value

Depending on the fuel viscosity, the injection timing and consumption Characteristics are improved, thereby Improving engine performance

# Test Results of Performance Evaluation Engine(Performance)

Engine Performance Partial-load Test Result

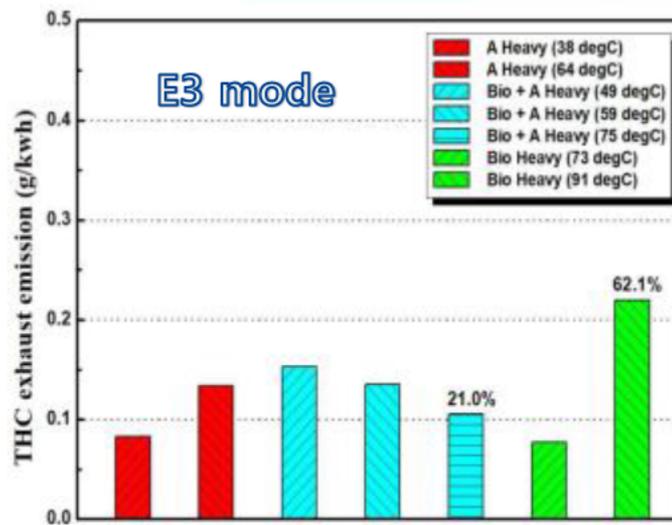
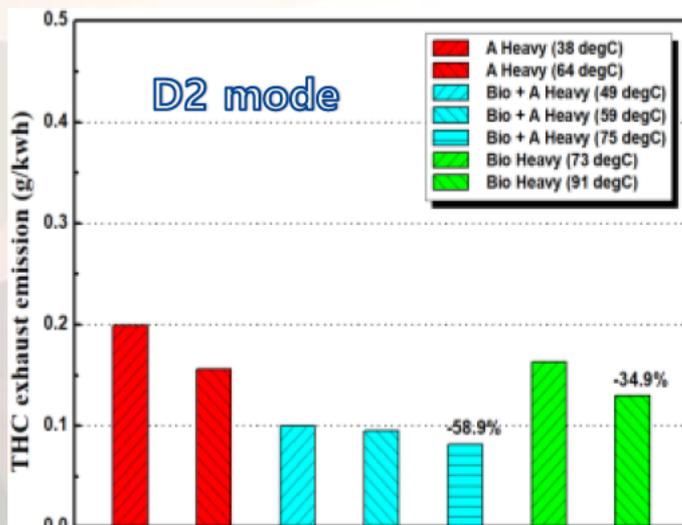
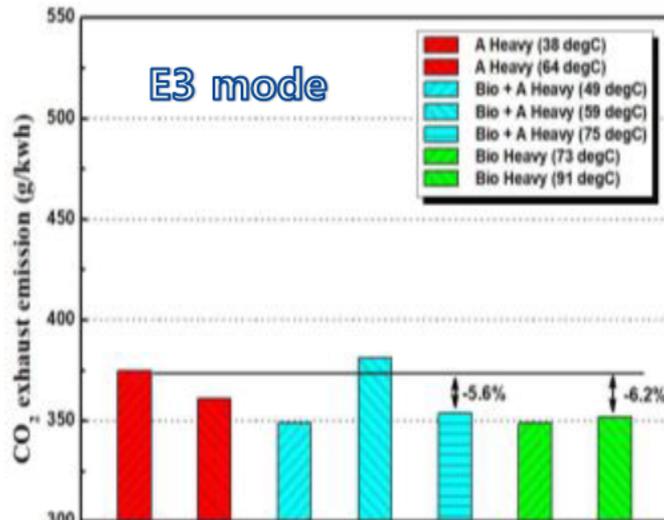
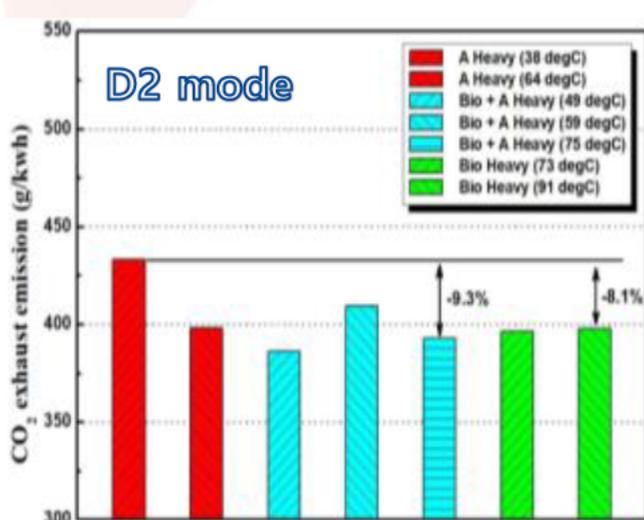


Same characteristic results for partial-load as for full-load

Comparing the fuel consumption Ratio of mixed fuel to bio-heavy oil, Bio-heavy oil is less consumed Due to the characteristics of oxygenated oil

# Test Results of Performance Evaluation Engine(Emission Gas)

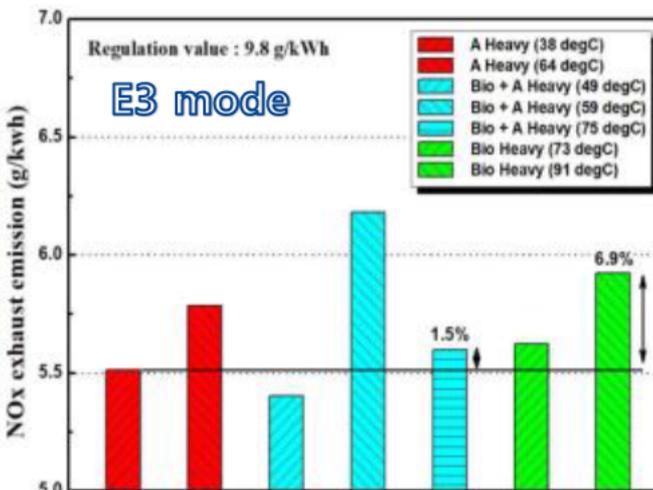
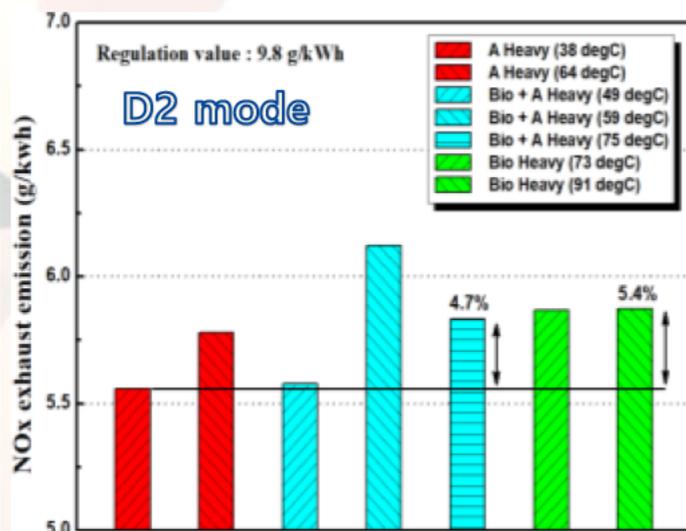
## Engine Emission Gas Test Result



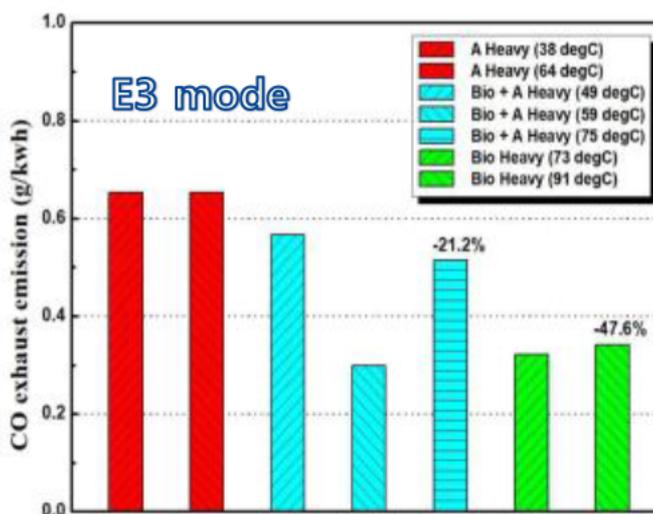
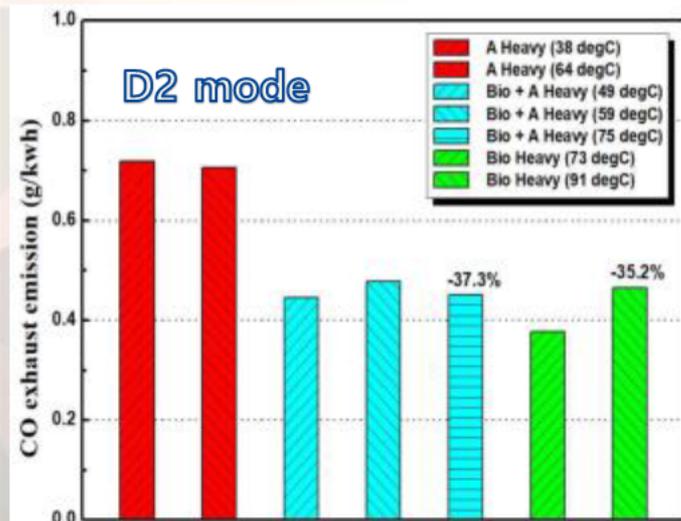
Same reduction of CO<sub>2</sub>, THC as biofuel engine test results

# Test Results of Performance Evaluation Engine(Emission Gas)

## Engine Emission Gas Test Result



Same **increase of Nox**  
And **reduction of CO** as biofuel  
Engine test result



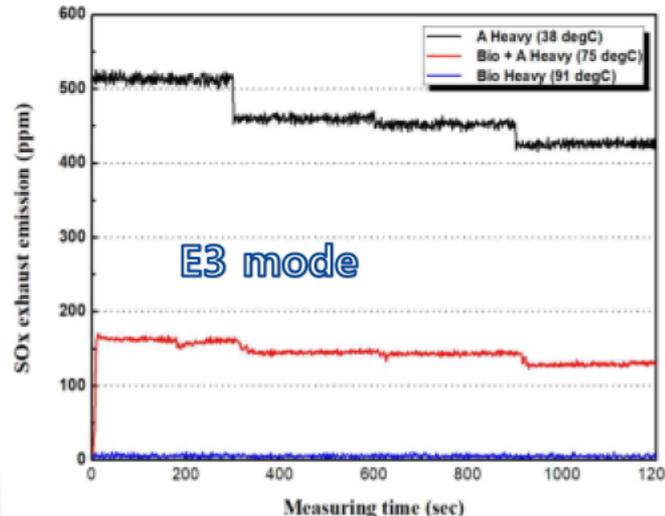
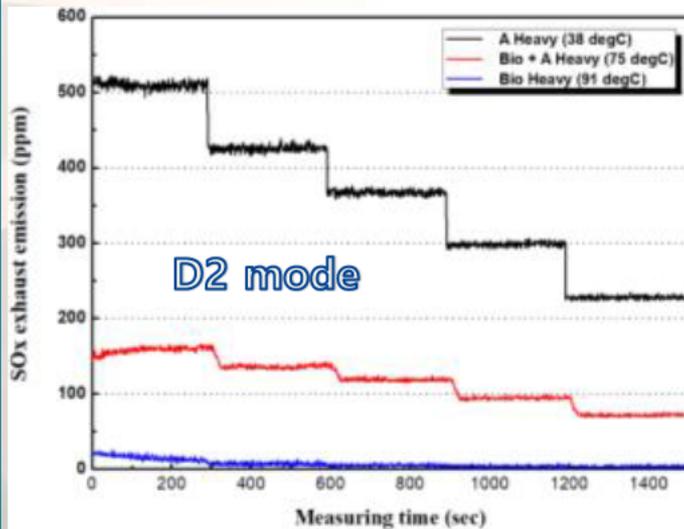
Similar trends in  
Emissions of **mixed fuel** and  
**bio-heavy oil**

# Test Results of Performance Evaluation Engine(Emission Gas)

## Engine Emission Gas Test Result

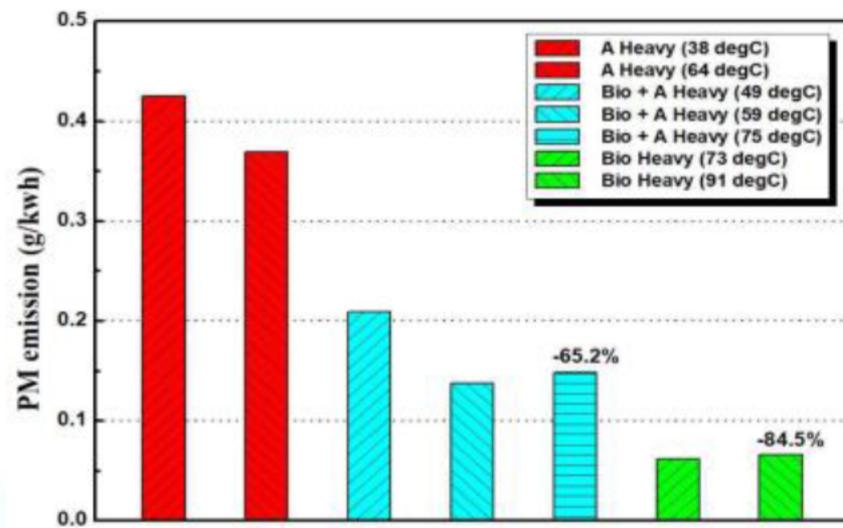
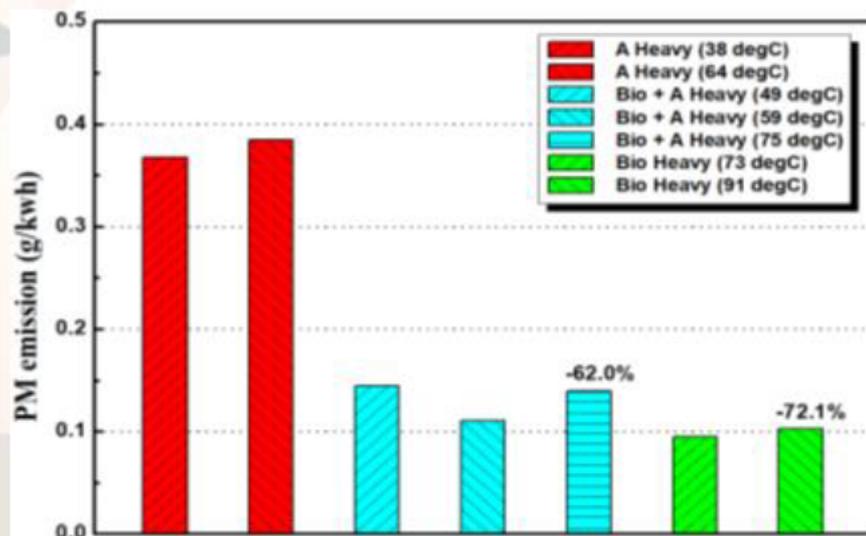


Sox is the same result as the sulfur content of the fuel



# Test Results of Performance Evaluation Engine(Emission Gas)

## Engine Emission Gas Test Result



**PM**, being reviewed for regulation,  
Also produces **less bio-heavy oil**

# Corrosion Test of Mixed Fuel for Metal

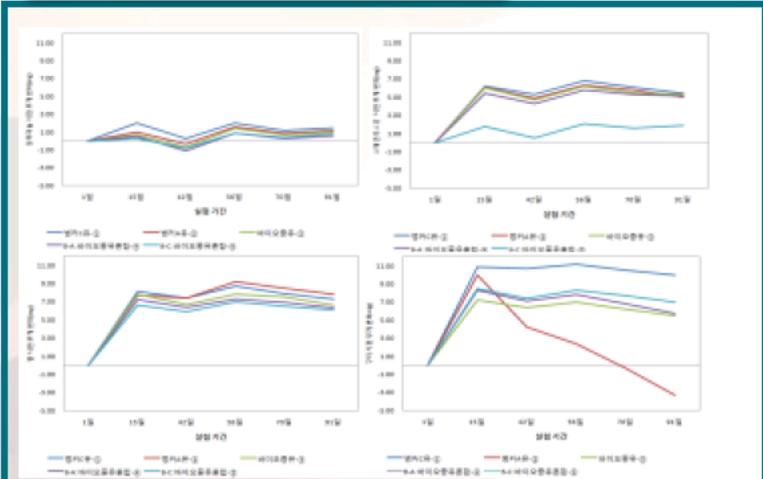


Copper  
Iron  
Stainless steel  
Aluminum

\*Bunker C oil  
Bunker A oil  
Bio-heavy oil  
Bunker A+  
Bio-heavy oil  
Bunker C+  
Bio-heavy oil

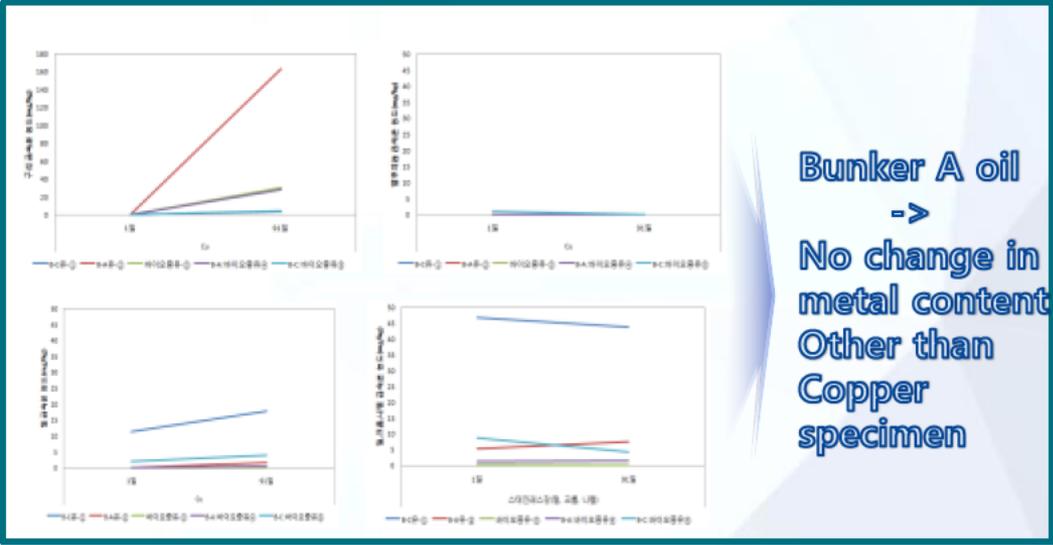
**60°C**  
**91 days**  
**Exam**

## Change in Weight of Metal



Almost no change within  
10mg of change rate

## Check Metal Powder



Bunker A oil  
->  
No change in  
metal content  
Other than  
Copper  
specimen

## Visual Confirmation of Corrosion



Bunker A oil->No change in appearance other than  
copper specimen

## Conclusion

- Complete applicability through quality evaluation of bio-heavy oil as biofuel for ships
  - Need to improve the requirements for conforming to ISO 8217 standards for ship quality standard
- Complete verification of application of bio-heavy oil to small ship engine as biofuel for ships
  - When mixing ships fuel with ships biofuel, biofuel performance is similar compared to marine fuel
  - Emission reduction effect of Sox, PM, THC
- Confirm the applicability of bio-heavy oil as a biofuel for ships through quality and engine performance evaluation

# Thanks for your attention!



*Korea Petroleum Quality &  
Distribution Authority*

If you have any question, please contact to me.  
E-mail : [jun119ggg@kpetro.or.kr](mailto:jun119ggg@kpetro.or.kr)



# New generation diesel hydrotreating catalyst of RIPP

RIPP , SINOPEC

2020.10

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
SINOPEC RESEARCH INSTITUTE OF PETROLEUM PROCESSING

New generation diesel hydrotreating catalyst of RIPP

- 1、 Introduction**
- 2、 Technology platform**
- 3、 R&D of ULSD catalysts**
- 4、 Application of ULSD catalysts**
- 5、 Conclusion**

**Contents**  
目 录

Content

# Introduction

- Environmental regulations impose more and more stringent limitation on sulfur and polyaromatics hydrocarbons (PAHs) content

## Standards for automobile diesel in China

Quality Standard	China-IV	China-V	China-VI
Start year	2015	2017	2019
Sulfur (ppm) (max.)	50	10	10
PAHs /(w%) (max. )	11	11	7
Density/(kg/m <sup>3</sup> )	810~850	810~850	810~845

## ULSD production: A great challenge for catalyst activity

Sulfur content/ppm	HDS activity/%	Temperature /°C
500	100	Base
350	130	+7
200	190	+17
100	300	+29
50	420	+38
10	More	More



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

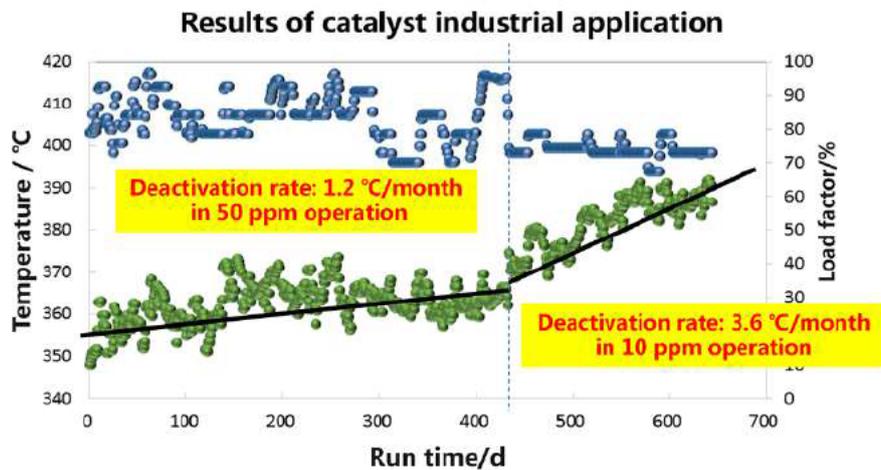
中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

3

Introduction

# Introduction

- Fast deactivation causes great challenge to the refineries



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

4

The industrial application shows that deactivation rate of catalyst is greatly increased for the production of diesel from 50 ppm S to 10 ppm S, which bring great challenge to the refineries

# Introduction

- **Strategy for producing clean diesel**



**Most economic and efficient solution**

**– To develop more active and more stable catalysts!**



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

5

Strategy for producing clean diesel can be considered from many aspects, including new process, operation severity, novel reactor internals and catalyst. The most economic and efficient solution is to develop more active and more stable catalysts

## Development of new generation catalyst

- **Key factors for catalyst activity**

- **Number of active sites**
- **Intrinsic activity of active sites**
- **Accessibility to active sites**

Activation energy : to describe the energy required to reach the transition state; is related to the properties of catalyst active sites.

Arrhenius equation:

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$$

Frequency factor : collision frequency; is related to the Diffusion of reactant molecules and numbers of active sites



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

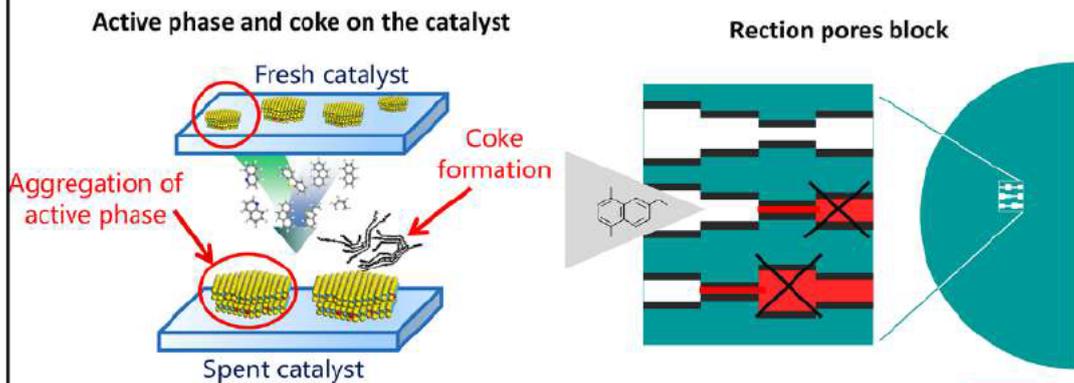
中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

6

Based on arrhenius equations, key factors to increase the catalyst activity can be considered from number of active sites, intrinsic activity of active sites and accessibility to active sites. Activation energy is related to the properties of catalyst active site. Frequency factor is related to the diffusion of reactant molecules and numbers of active sites.

## Development of new generation catalyst

- **Key factors for catalyst stability**
  - Weak interaction of metal and support
  - **Coke formation**
  - **Reaction pores block by coke**



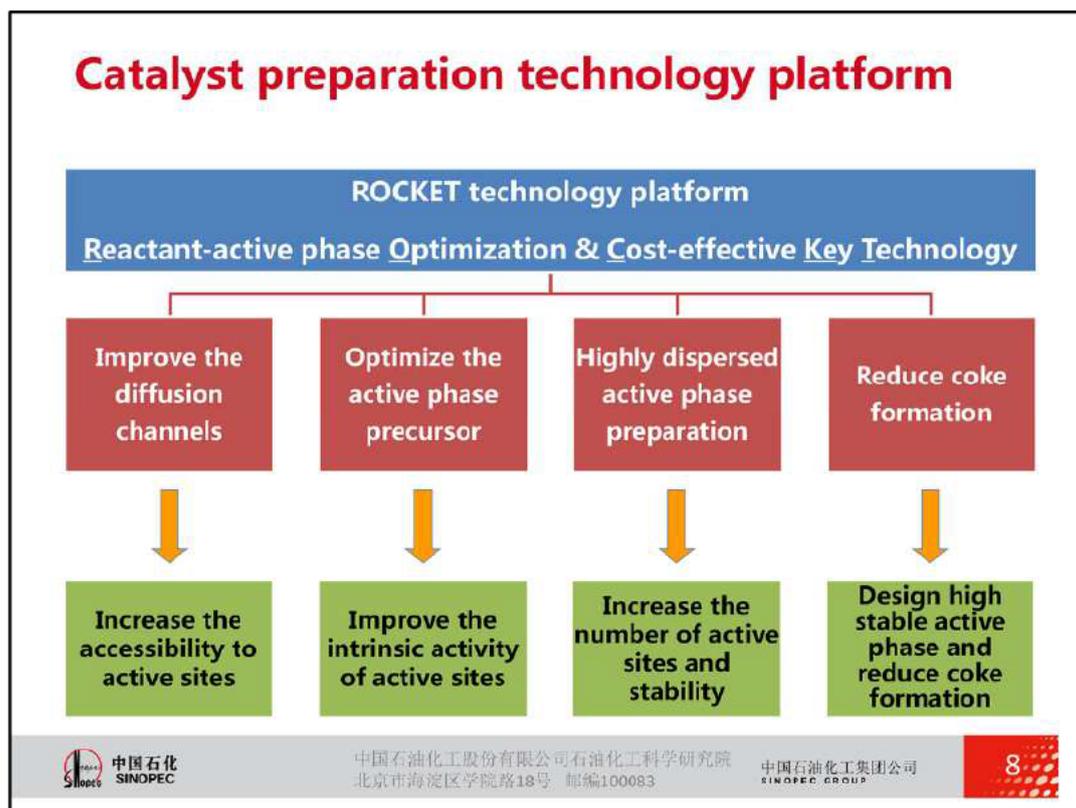
中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

7

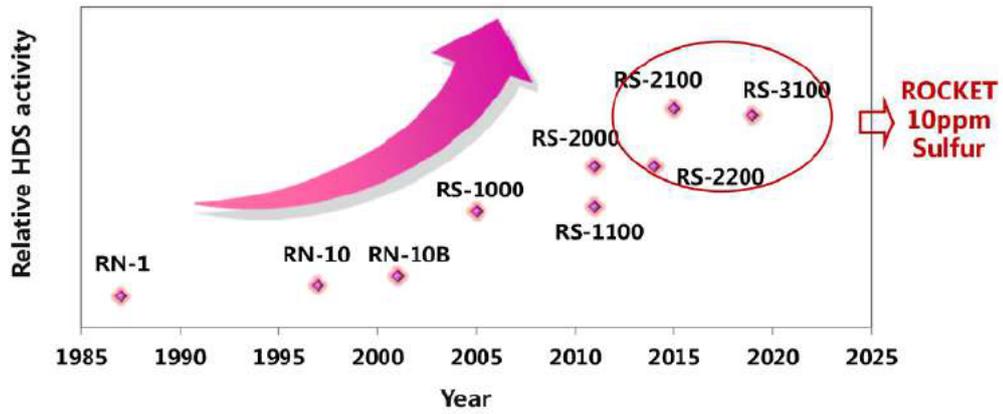
The catalyst stability can be considered from metal and support interaction, coke formation and reaction pores block by coke. Weak interaction of metal and support can lead to aggregation of active phase. Duration the reaction, the coke can be formed on the catalyst. On the other hand, the reaction pores can be blocked by pores and the active sites in the pores can no be accessed by the reactants.



In order to prepare the catalyst with high activity and stability, ROCKET technology platform was established in RIPP, which called Reactant-active phase Optimization & Cost-effective Key Technology. In the platform, methods were taken to improve the diffusion channels and increase the accessibility to active sites. The active phase precursor was optimized and the intrinsic activity of active sites was improved. The preparation was improved to form highly dispersed active phase and therefore increase the number of active sites and stability. The coke formation also can be reduced by designing high stable active phase and reduce coke formation.

# R&D of ULSD Catalysts

- Evolution of RIPP diesel hydrotreating Catalysts



This scheme shows the evolution of RIPP diesel hydrotreating catalysts. RS-2100, RS-2200 and RS-3100 are the latest catalysts based on ROCKET technology and can produce 10 ppm sulfur.

## Latest generation of ULSD catalysts

Catalyst	Highly active ULSD catalyst RS-2100	High cost-effective ULSD catalyst RS-2200	Highly stable ULSD catalyst RS-3100
Metal system	NiMo	CoMo	NiMo
Feature	High HDS High HDN Improve Cetane number	High DDS Low H <sub>2</sub> consumption	High HDS High HDA High stability Low density
Application	Moderate / high pressure hydrotreaters with secondary processed diesel	Low / moderate pressure hydrotreaters with straight run diesel	Moderate / high pressure hydrotreaters with secondary processed diesel



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP



This table show the detail metal system, typical feature and application of RS-2100, RS-2200 and RS-3100.

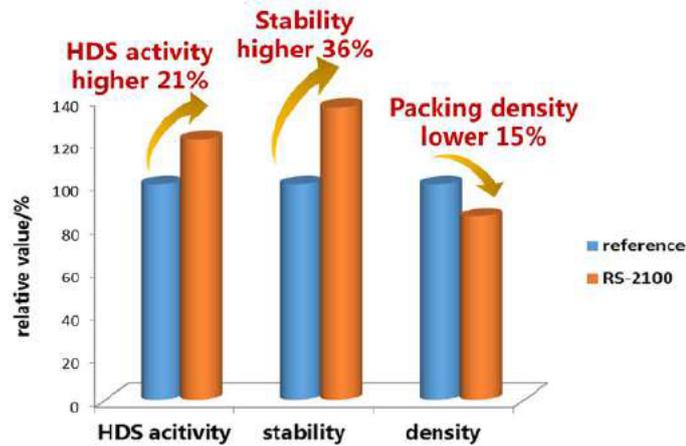
- 1、 Introduction
- 2、 Technology platform
- 3、 R&D of ULSD catalysts
- 4、 **Application of ULSD catalysts**
- 5、 Conclusion

Contents  
目 录

content

## RS-2100 catalyst for clean diesel

- RS-2100 showed high HDS activity, stability and low packing density



Feed : 80%SRGO+20%LCO , density:0.85g/m<sup>3</sup> , Nitrogen:237ppm , Sulfur:10500ppm



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

12

Compared to the reference catalyst, RS-2100 displays 21% higher HDS activity, 36% higher stability and 15% lower packing density. So it has high cost-effective and strong market competitiveness

## RS-2100 catalyst for clean diesel

- RS-2100 can deal with various feedstocks

Feed No.		Feed 1	Feed 2	Feed 3	Feed 4
Feed	Feed processed	SRGO/LCO	SRGO/LCGO	SRGO/LCO	SRGO/LCO
	Composition , wt%	80/20	80/20	50/50	30/70
	Density(20°C)/(g/cm <sup>3</sup> )	0.8500	0.8388	0.8865	0.9100
	Sulfur/%	1.050	1.15	0.802	0.563
Operating Condition	Nitrogen/ppm	237	375	503	794
	Hydrogen pressure/Mpa	6.4	6.4	6.4	6.4
	Temperature/°C	base	base+10	base+15	base+15
Product	LHSV/ h <sup>-1</sup>	1.5	1.5	1.5	1.5
	Sulfur /ppm	6.5	5.4	9.1	8.3
	Nitrogen/ppm	0.6	0.6	2.7	2.5



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

13

This table shows the performance of RS-2100 when producing various feedstocks. Four kinds of diesel with different composition were tested. The S in the product can be decreased lower than 10 ppm. The results suggests that RS-2100 has good adaptability.

## Commercial application of RS-2100

- RS-2100 catalyst was commercially applied in 3700 kt/a diesel hydrotreater of a Sinopec Y refinery in Sept. 2015

Feed	43%SRGO+24%LCN+18%LCGO+15%LCO	
Feed rate/ ( t/h )	120	
Hydrogen pressure/MPa	7.2	
Reactor inlet temperature/°C	306	
WABT/°C	367	
LHSV/h <sup>-1</sup>	1.7	
Properties	feed	Refined Diesel
Sulfur/ppm	9000~10000	8



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

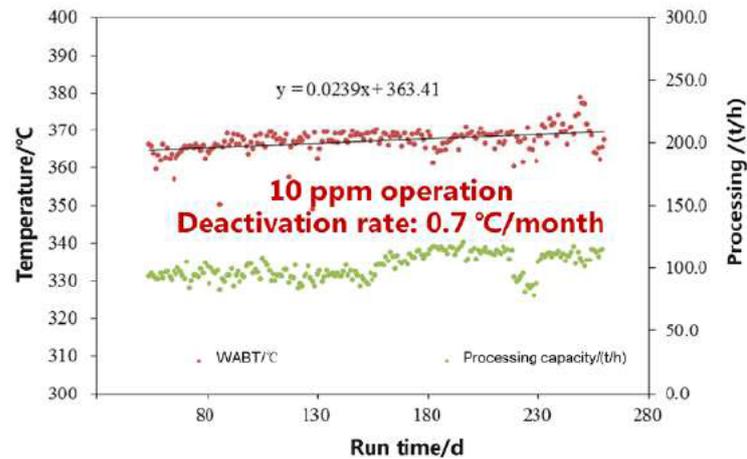
中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

14

RS-2100 catalyst was commercially applied in 3700 kt/a diesel hydrotreater of a Sinopec Y refinery in Sept. 2015. The feed contain 43%SRGO+24%LCN+18%LCGO+15%LCO. The sulfur content can be decreased to 8 ppm from 9000~10000.

## Commercial application of RS-2100

- Production of China V diesel
  - In 8 months application in Y refinery with China V diesel



The figure shows the variation of WABT and processing capacity with time on stream in 8 month. It shows that RS-2100 catalyst exhibits very good stability of 0.7 °C/month deactivation rate

## Commercial application of RS-2100

- Applied in 2400 kt/a diesel hydrotreater of a Sinopec C refinery in May 2017

Feed	81%SRGO+7%LCN+7%LCGO+5%LCO	
Feed rate/ ( t/h )	180~220	
Hydrogen pressure/MPa	6.0	
WABT/°C	335~355	
LHSV/h <sup>-1</sup>	1.2	
Properties	feed	Refined Diesel
Sulfur/ppm	3000~6000	< 10



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

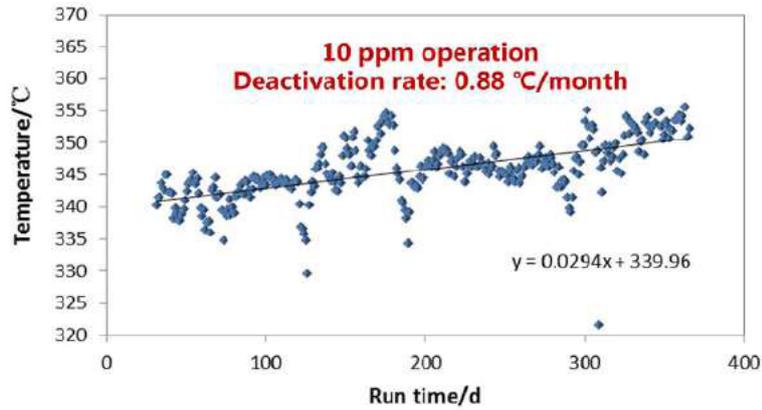
中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

16

RS-2100 catalyst was commercially applied in 2400 Kt/a diesel hydrotreater of a Sinopec C refinery in May, 2017. The feed contains 81%SRGO+7%LCN+7%LCGO+5%LCO. The clean diesel with sulfur lower than 10 ppm can be produced.

## Commercial application of RS-2100

- Production of China V diesel



**RS-2100 catalyst demonstrated excellent HDS performance and stability**



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

17

In more than 1 years application in C refinery with National V diesel, RS-2100 catalyst exhibits very good stability of 0.88 °C/month deactivation rate

## RS-2200 catalyst for clean diesel

- **Excellent HDS activity**
- **Low H<sub>2</sub> consumption**
- **High stability**
- **Good cost performance**



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

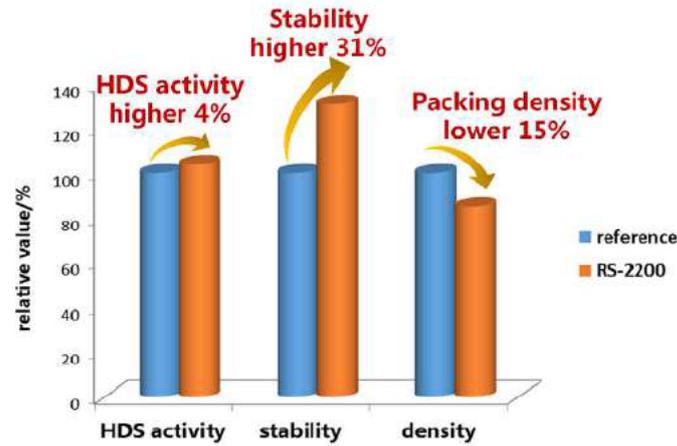
中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

18

RS-2200

## RS-2200 catalyst for clean diesel

- Activity of RS-2200 (Bench)



Feed : 85%SRGO+15%LCO , density:0.8588g/m<sup>3</sup> , Nitrogen:220ppm , Sulfur:12000ppm



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

19

Compared to the reference catalyst, RS-2200 displays 4% higher HDS activity, 31% higher stability and 15% lower packing density. RS-2100 shows high cost-effective ratio and strong market competitiveness

## RS-2200 catalyst for clean diesel

- RS-2200 exhibited lower hydrogen consumption

Reaction temperature, °C	Base	Base+10
<b>Product sulfur, ppm</b>		
Reference	6	4
RS-2200	7	3
<b>Chemical hydrogen consumption, %</b>		
Reference	0.76	0.85
RS-2200	0.57	0.63
<b>Relative hydrogen consumption, %</b>		
Reference	100	100
RS-2200	75	74



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP



This table shows the performance of hydrogen consumption of RS-2200. Comparing to reference catalyst, relative hydrogen consumption was 25% lower. It suggests that RS-2200 can produce 10 ppm sulfur diesel with low hydrogen consumption. It can save cost and increase the profit for the refinery.

## RS-2200 catalyst for clean diesel

- RS-2200 is adaptable to various feedstocks

Feed No.		Feed 1	Feed 2	Feed 3	Feed 4
Feed	Feed processed	SRGO/LCO	SRGO/LCO	SRGO/LCO	SRGO/LCGO
	Composition , wt%	85/15	70/30	50/50	85/15
	Density(20°C)/(g/cm <sup>3</sup> )	0.8588	0.8613	0.8902	0.8481
	Sulfur/%	1.20	1.14	0.84	1.26
	Nitrogen/ppm	220	325	495	599
Operating Condition	Hydrogen pressure/Mpa	6.4	6.4	6.4	6.4
	Temperature/°C	Base	Base	base+15	base+15
	LHSV/ h <sup>-1</sup>	1.5	1.5	1.5	1.5
Product	Sulfur /ppm	7.0	6.0	6.4	5.0
	Nitrogen/ppm	<0.2	<0.2	0.8	0.8
	Density(20°C)/(g/cm <sup>3</sup> )	0.8301	0.8391	0.8580	0.8270



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

21

This table shows that RS-2200 can process various kinds of feedstocks to produce clean diesel with sulfur content lower than 10 ppm. RS-2200 is adaptable to various feedstocks

## Commercial application of RS-2200

- Applied in 600 kt/a diesel hydrotreater of a Sinopec J refinery from Sept. 2014

$P_{H_2}$ , MPa	4.6	
WABT, °C	359	
LHSV, h <sup>-1</sup>	1.74	
H <sub>2</sub> S in system, ppm	34500	
Properties	Feedstock	Refined diesel
Density(20°C), kg/m <sup>3</sup>	0.849	0.838
Sulfur, ppm	3960	5.3
Nitrogen, ppm	83	8.9



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

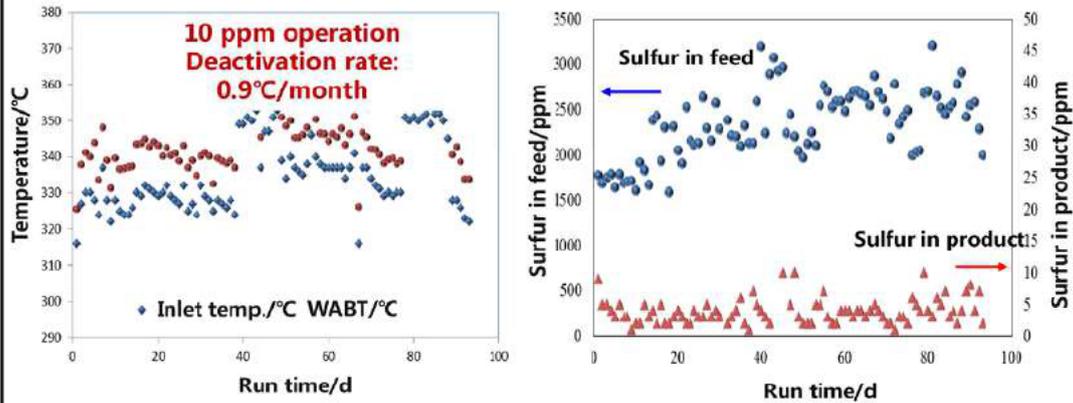
中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

22

RS-2200 has been applied in 600 kt/a diesel hydrotreater of a Sinopec J refinery from Sept. 2014. The feedstock can be treated from 3960 ppm sulfur to diesel lower than 10 ppm even the H<sub>2</sub>S in system is 34500 ppm, which was very severe condition.

## Commercial application of RS-2200

- Production of China V diesel with RS-2200



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

23

The left figure shows that the variation of reaction temperature with time on stream when producing 10 ppm sulfur diesel. The deactivation rate is 0.9°C/month.

## Commercial application of RS-2200

- Applied in I refinery, from Oct. 2019
  - Objective S content: 35ppm

$P_{H_2}$ , bar	33	
WABT, °C	356.7	
LHSV, h <sup>-1</sup>	1.73	
H <sub>2</sub> /oil	130	
Properties	Feedstock	Refined diesel
Density(20°C), g/cm <sup>3</sup>	0.8325	0.8224
Sulfur, ppm	8660	30-36
Nitrogen, ppm	53.5	0.66
FBP, °C	365.4	360



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

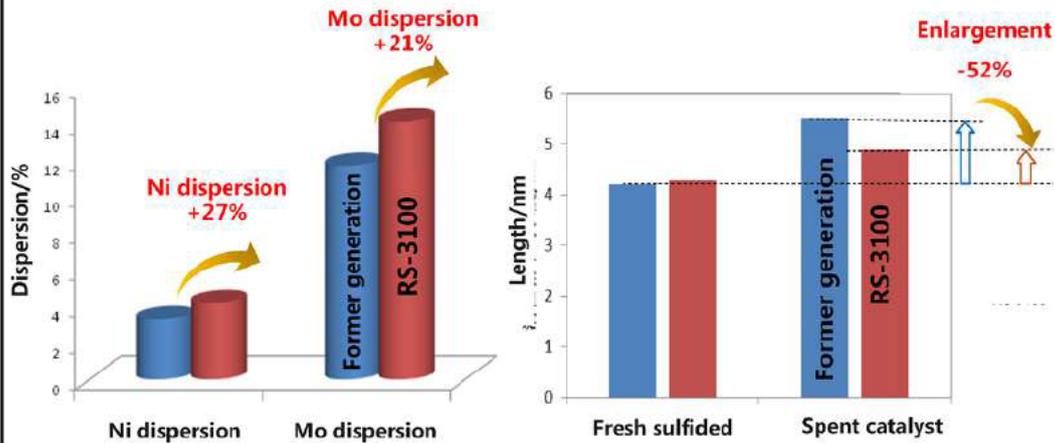
中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

24

RS-2200 has been applied in I refinery from Oct. 2019. Even at lower hydrogen pressure and very low H<sub>2</sub>/oil ratio, the content of sulfur can be reduced to 30-36 ppm.

# RS-3100 catalyst for clean diesel

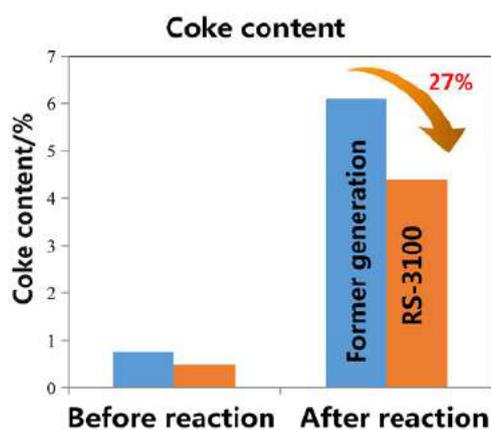
- Active phase in RS-3100 showed good dispersion and stability



The dispersion Ni species in sulfided RS-3100 increased from 27% compared to former generation catalyst, while Mo species are increased 21%. In spent catalyst, the slab length in RS-3100 and former generation catalyst are increased. The enlargement of slab length in RS-3100 is 52% lower than that in former generation catalyst.

## RS-3100 catalyst for clean diesel

- Coke formation is significantly decreased



On the other hand, coke formation is significantly decreased in RS-3100 compared to former generation catalysts. The results suggest that RS-3100 has good stability.

## RS-3100 catalyst for clean diesel

- RS-3100 shows good activity as RS-2100

Feedstock	SRGO+20%LCO
H <sub>2</sub> /MPa	6.4
LHSV/h <sup>-1</sup>	1.5
H <sub>2</sub> /oil ratio	300
Temperature/°C	360
S content /(ppm)	
RS-2100	6.1
RS-3100	8.3
PAS/%	
RS-2100	5.5
RS-3100	5.8



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

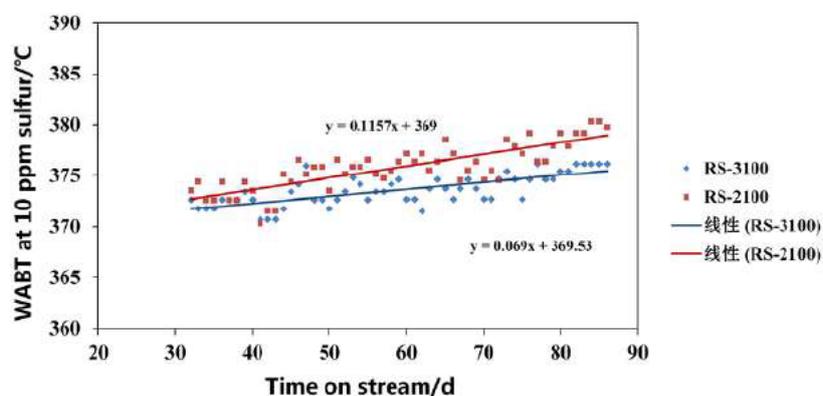
中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

27

The catalytic evaluation shows that RS-3100 can reduce the sulfur in SRGO+20%LCO to around 6 ppm. And it shows good activity as RS-2100.

## RS-3100 catalyst for clean diesel

- RS-3100 shows good stability for 10ppm diesel production



Feedstock : SRGO + 20%LCO , S: 1.089% , N: 321ppm



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

28

This figure shows the WABT at 10 ppm sulfur are varied with time on stream. The feedstock contains 1.089% S and 321 ppm and N. RS-3100 shows much lower deactivation rate than RS-2100

## Commercial application of RS-3100

- **Production of China VI diesel in Sinopec refinery from Apr. 2020**
  - **Dense loading density: 0.707 t/m<sup>3</sup>**
  - **Blended with 50-55% secondary processing diesel**

$P_{H_2}$ , MPa	7.1	
WABT, °C	349	
LHSV, h <sup>-1</sup>	1.2	
H <sub>2</sub> /oil	500	
Properties	Feedstock	Refined diesel
Sulfur, ppm	5100	6.4
Nitrogen, ppm	445	0.66
Polyaromatics	16.6	4.2



中国石化  
SINOPEC

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

29

RS-3100 has been applied in Sinopec refinery from Apr. 2020 for the production of China VI diesel. The density loading is 0.707 t/m<sup>3</sup> which is much lower than former generation catalyst. The catalyst can produce China VI diesel with the feedstock blended with 50-55% secondary processing diesel.

## Conclusion

- **In-depth understanding of the key factors of catalyst activity and stability, ROCKET technology platform was established**
- **RIPP latest ULSD catalysts are featured with**
  - Low packing density and low cost
  - High HDS, HDN activity and high stability
- **RIPP catalysts can meet various specifications and requirements for refineries**



中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

30

Conclusion

## Acknowledgement

- We gratefully acknowledge the generous contributions and support of our team and corporation



中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
北京市海淀区学院路18号 邮编100083

中国石油化工集团公司  
SINOPEC GROUP

31

Acknowledgement



中国石化  
SINOPEC

# Best Practice for Optimizing FCC Product Slate with LTAG/LTA Technology

RIPP, Sinopec

2020.10

中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院  
SINOPEC RESEARCH INSTITUTE OF PETROLEUM PROCESSING

**1. Background**

**2. LTAG Technology**

**3. LTA Technology**

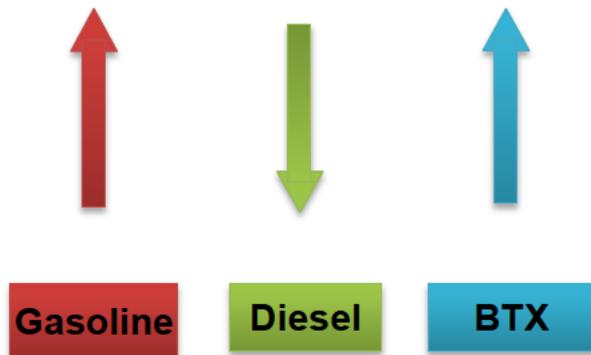
**4. Summary**

**Contents**  
目录



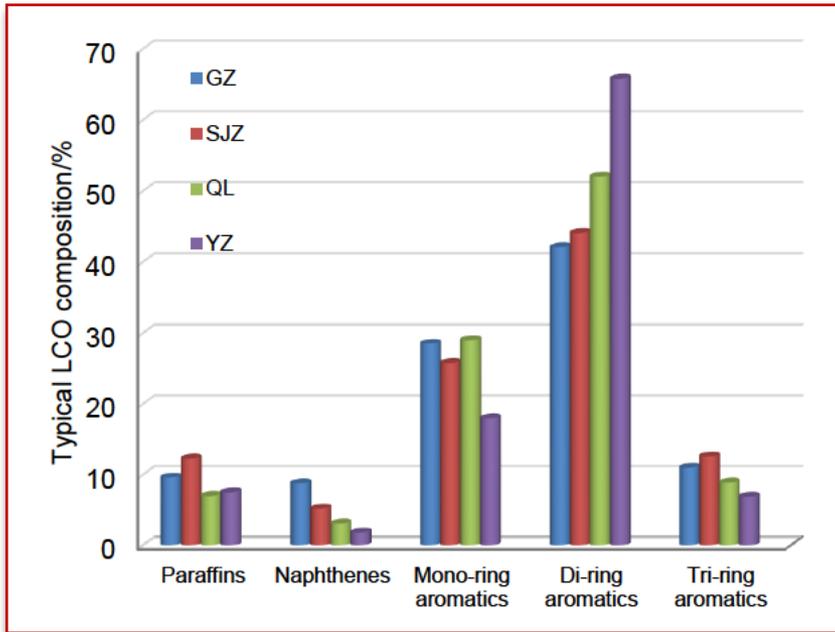
# China Refining Trends

## Fuels & Chemicals Demand



- Diesel demand declining
  - Continued growth in gasoline with high RON
  - Shift to more greater added-value chemicals
- 
- The ratio of diesel to gasoline is declining in China market

# Chinese Fuel Specification Trends



Items	GB19147-2016 China			
	China III	China IV	China V	China VI
Sulfur/( $\mu\text{g/g}$ ) $\leq$	350	50	10	10
Polycyclic aromatics/% $\leq$	11	11	11	7
Cetane value $\geq$	49	49	51	47-51
Cetane value index $\geq$	46	46	46	43-46
Density(20°C)/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	810-850	810-850	810-850	810-845 790-840

**LCO is hard to be used as blending component of diesel because of its poor quality**

# How to Efficiently Use LCO ?



Converting LCO into high RON gasoline might be an effective way to decrease the ratio of diesel to gasoline and to enhance the production of FCC naphtha



**LCO**

*Hydrocracking*

*Diesel*  
*Naphtha*

*Hydroreating-  
Catalytic Cracking  
Integration*

*Gasoline*  
*BTX*

**1. Background**

**2. LTAG Technology**

**3. LTA Technology**

**4. Summary**

Contents  
目录



# LTAG—LCO To Aromatics and Gasoline



- LTAG is a process which converts inferior LCO into high RON gasoline and/or BTX by integrating LCO *hydrotreating* and *catalytic cracking*
- The key points in LTAG are to design a H-LCO conversion zone and optimize the operating parameters of hydrotreating and FCC units



**A finalist of Best Refining Technology by “hydrocarbon processing” in 2018**

HP

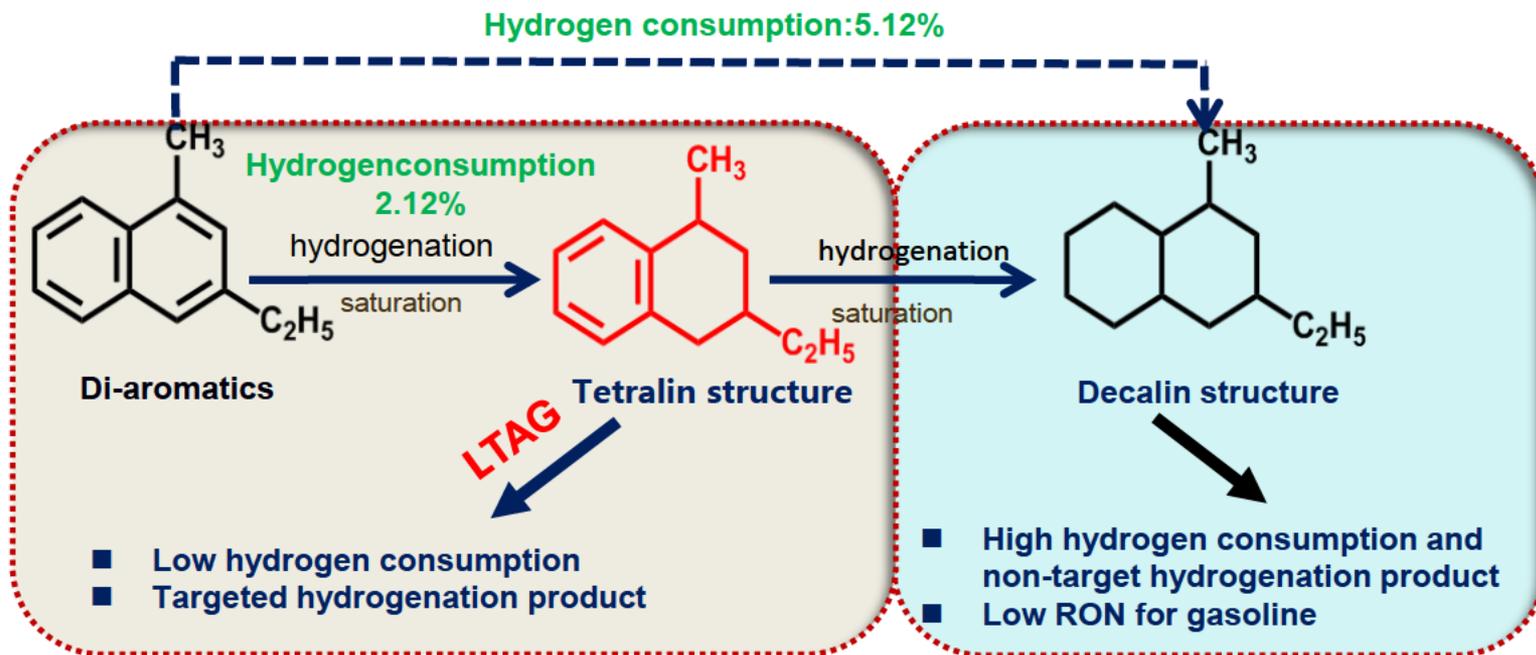
Special Focus

Clean Fuels

J. GONG, A. MAO, J. LONG, J. ZHANG, X. CHANG  
and J. TANG, Sinopec Research Institute of Petroleum  
Processing, Beijing, China

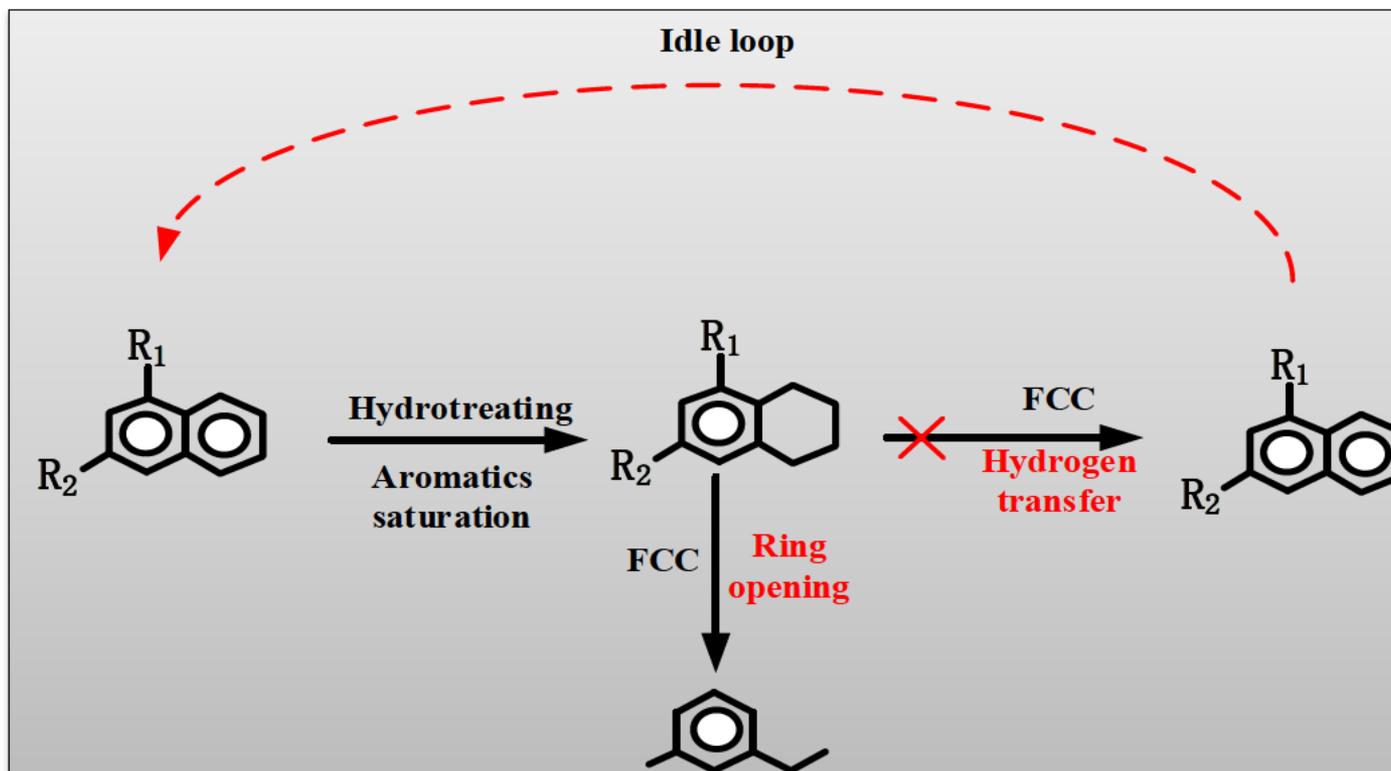
Convert LCO to gasoline with a high RON

# Selective Hydrogenation of LCO



- high saturation rate of PAHs
- high mono-aromatic hydrocarbons production

# Selective Catalytic Cracking of Mono-aromatics



Reaction Type	FCC	LTAG
Hydrogen transfer reaction ratio, %	80%	28%
Ring opening reaction ratio, %	20%	72%

# LTAG Process Description

## Flexible Operation Modes:

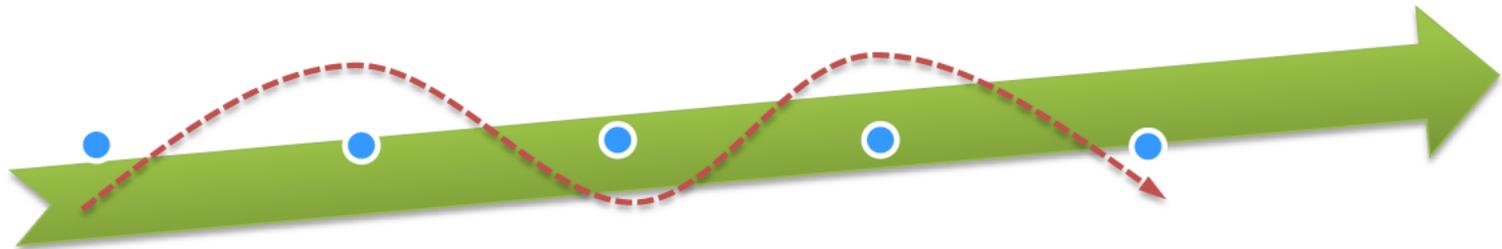
- Mode I —For High RON Gasoline/BTX
- Mode II— For High RON Gasoline

# LTAG Technical Features

- High gasoline selectivity (~80%)

## Mode I

- High RON (>94)
- Olefin content about 5 vol% in gasoline



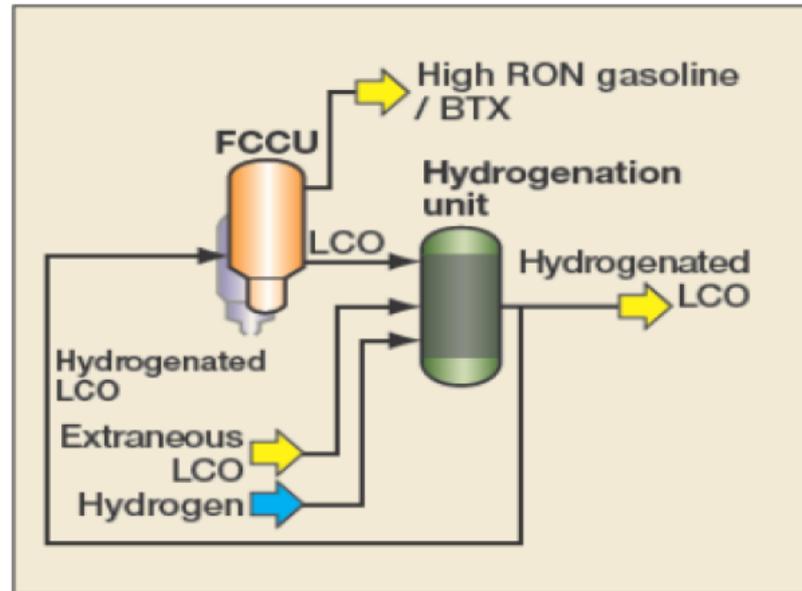
- High once-through LCO conversion (>70%)

- Low hydrogen consumption (2%~2.5%)

## Mode II

- FCC gasoline olefin content reduced by 4~5 %
- RON increased by 0.5~1.0

# LTAG Mode I: For High RON Gasoline/BTX



Process flow diagram (Mode I)

## FCC Feedstocks

- Hydrotreated LCO

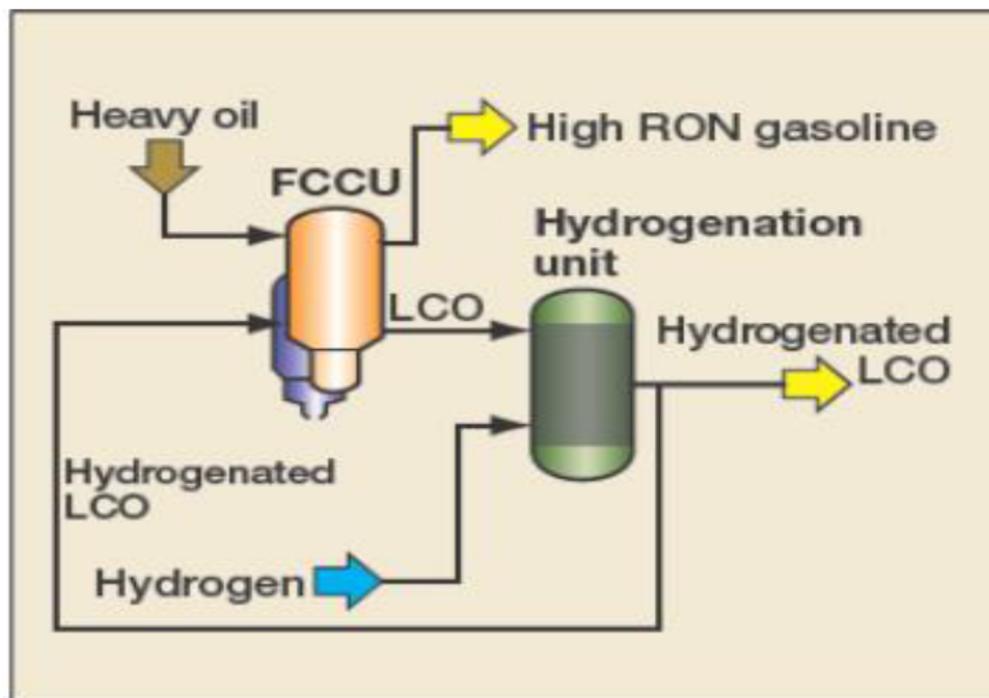
## Catalysts

- FCCU: proprietary catalyst HAC
- Hydrotreating Unit: RN-32L

## Products

- High RON Gasoline/ BTX

# LTAG Mode II: For High RON Gasoline



Process flow diagram (Mode II)

## FCC Feedstocks

- VGO/AR/VR

## Catalysts

- FCCU: Conventional catalysts
- Hydrotreating Unit: RN-32L

## Products

- Gasoline with higher RON

# LTAG Commercial Experience

26 Units on Stream

Refinery	FCC Cap. Mt/a	Start time
Shijiazhuang	0.9	2015
Fujian	2.3	2016
Anqing	2.0	2016
-----	-----	-----
Qilu	2.6	2017
Jinling	3.5	2017
-----	-----	-----
Shanghai	3.5	2018
Jinan	1.2+0.8	2018
-----	-----	-----
Zhanjiang	1.5+0.5	2019

# LTAG Commercial Experience

## LTAG Mode II Applied in Shijiazhuang Refinery

Items	FCC	FCC+LTAG	Delta
Heavy oil rate, t/h	86.6	86.12	
Product slates, wt%			
Dry gas	3.46	4.35	
LPG	18.33	20.85	+2.33
Gasoline	42.95	59.03	+16.02
LCO	21.25	0.94	-20.13
Slurry	4.73	4.61	
Coke	8.79	9.73	
Total liquid yields	82.53	80.82	
Gasoline properties			
RON/MON	92.6/82.0	93.2/82.7	+0.6
Olefins, v%	20.3	16.2	-4.1

# Full View of LTAG FCC Unit



**1. Background**

**2. LTAG Technology**

**3. LTA Technology**

**4. Summary**

**Contents**  
目录



# LTA—LCO To Aromatics

- **LTA is a novel process which converts inferior LCO into high light aromatics by integrating LCO hydrotreating and catalytic cracking**
- **LTA is for max. light aromatics, especially BTX production**

# LTA Technical Features

- A unique process combined with proprietary catalyst of LCO selective hydrogenation
- Higher saturation rate of PAHs and selectivity of mono-ring aromatics
- Optimizing reaction & operation for cracking of hydrotreated LCO
- Employing a special designed zeolite catalyst for catalytic cracking of hydrotreated LCO

# LTA Commercial Demonstration

- Commercial trial of LTA technology was successfully carried out in hydrotreating unit with capacity of 0.705Mt/a and catalytic cracking unit with capacity of 0.70Mt/a in 2019, in Yangzi, China
- Heat-balance operation of reaction and regeneration system itself was realized

H-LCO density(20°C),(kg·m <sup>-3</sup> )	921.0
Gasoline yield,%	>64%
C6~C8 aromatics yields,%	>23%
Gasoline RON	>98

# A Commercial LTA Unit



**1. Background**

**2. LTAG Technology**

**3. LTA Technology**

**4. Summary**

Contents  
目录



# Summary

- **Flexible FCC technology for product slates adjustment are the key for Market!**
- **LTAG technology is to convert inferior LCO into gasoline with high RON by integrating the hydrogenation and catalytic cracking process which applied widely in China**
- **LTA is a newly developed technology for max. light aromatics, especially BTX production by integrating LCO hydrotreating and catalytic cracking**
- **Professional technical service can be provided by SINOPEC**

# Thanks for your attention

[www.sinopec.com](http://www.sinopec.com)



中国石化  
SINOPEC

# Hydrogen Policy in Japan and JPEC's Activities for Regulatory Reform on HFS

## Abbreviation List

HFS: Hydrogen Fueling Station

FCV: Fuel Cell Vehicle

METI: Ministry of Economy, Trade and Industry

NEDO: New Energy and Industrial Technology  
Development Organization

Nov. 2020

JAPAN PETROLEUM ENERGY CENTER  
Hydrogen Energy Research DEPT.  
Takayuki Ninomiya

# Contents

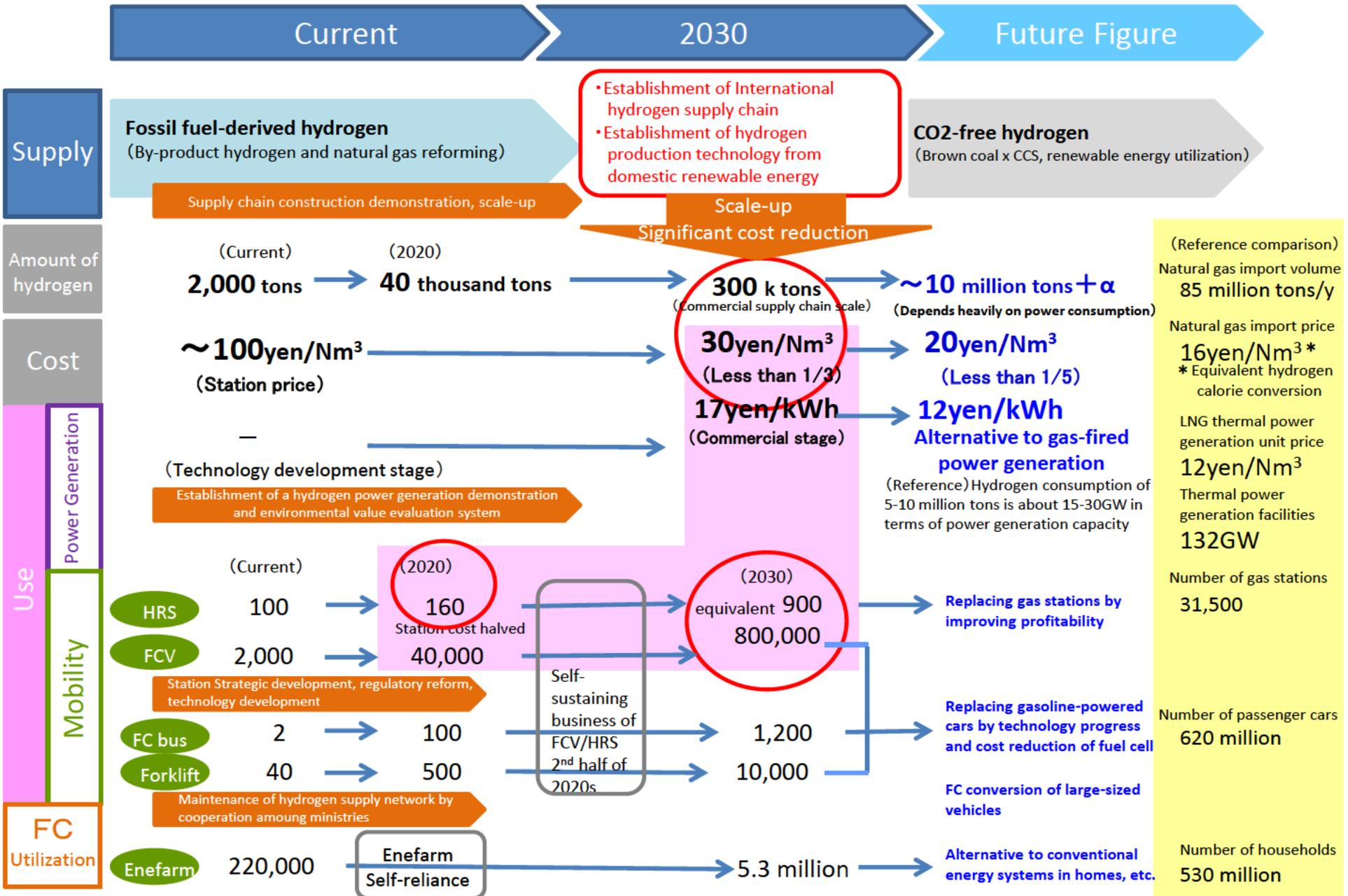
---

I Hydrogen policy in Japan

II Legal System for HFS in Japan

III JPEC's Activities for Regulatory Reform on HFS

# Hydrogen Basic Strategy in JAPAN (December 2017)



(Source : METI's website.)

# Present Hydrogen Stations Distribution in Japan (August 2019)

Total 134HFS including 23 stations under planning

	Okayama	Hiroshima	Yamaguchi	Tokushima	Kagawa
ST	1	3	1	2	1
Planning					

	Gifu	Shizuoka	Aichi
ST	6	3	27
Planning	1	1	7

	Hokkaido	Miyagi	Fukushima	Niigata
ST	1	1	3	1
Planning				

	Fukuoka	Shiga	Oita	Kagoshima
ST	10	1	1	1
Planning	1			

	Ibaraki	Tochigi	Gunma	Saitama	Chiba	Tokyo	Kanagawa	Toyama	Yamanashi
ST	1	1	1	10	4	20	14	1	1
Planning		1	1	2		6	1		

	Mie	Shiga	Kyoto	Osaka	Hyogo	Wakayama
ST	2	1	3	9	2	1
Planning			1	1		

■ Opened  
■ Planning

At the Hydrogen Energy Ministerial Meeting 2018, representatives from 21 countries, regions and institutions around the world who are actively engaged in the global use of hydrogen at the ministerial session gathered together to discuss issues and policies for the realization of an international hydrogen society. They discussed the direction. As a result, they shared the recognition of the importance of cooperation in each country and announced the “Tokyo Statement” consisting of the following four items as a chairman's statement under the common recognition of each country.

## Tokyo Statement

1. Collaboration on Technologies and Coordination on Harmonization of Regulation, Codes and Standards.
2. Promotion of Information Sharing, International Joint Research and Development Emphasizing Hydrogen Safety and Infrastructure Supply Chain.
3. Study and Evaluation of Hydrogen’s Potential across Sectors including its Potential for Reducing both CO<sub>2</sub> Emissions and Other Pollutants.
4. Communication, Education and Outreach

# The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells (2019.3)

- In order to achieve goals set in the Basic Hydrogen Strategy,

① **Set of new targets to achieve (Specs for basic technologies and cost breakdown goals), establish approach to achieving target**

② **Establish expert committee to evaluate and conduct follow-up for each field.**

	Goals in the Basic Hydrogen Strategy	Set of targets to achieve	Approach to achieving target
Use	Mobility	FCV 200k by 2025 800k by 2030 2025 <ul style="list-style-type: none"> <li>Price difference between FCV and HV (¥3m → ¥0.7m)</li> <li>Cost of main FCV system (FC ¥20k/kW → ¥5k/kW, Hydrogen Storage ¥0.7m → ¥0.3m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regulatory reform and developing technology</li> </ul>
		HRS 320 by 2025 900 by 2030 2025 <ul style="list-style-type: none"> <li>Construction and operating costs (Construction cost ¥350m → ¥200m, Operating cost ¥34m → ¥15m)</li> <li>Costs of components for HRS (Compressor ¥90m → ¥50m, Accumulator ¥50m → ¥10m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consideration for creating nation wide network of HRS</li> <li>Extending hours of operation</li> </ul>
		Bus 1,200 by 2030 Early 2020s ※In addition, promote development of guidelines and technology development for expansion of hydrogen use in the field of FC trucks, ships and trains.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vehicle cost of FC bus (¥105m → ¥52.5m)</li> </ul>	Increasing HRS for FC bus
	Power	Commercialize by 2030 2020 <ul style="list-style-type: none"> <li>Efficiency of hydrogen power generation (26% → 27%) ※1MW scale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Developing of high efficiency combustor etc.</li> </ul>
	FC	Early realization of grid parity 2025 <ul style="list-style-type: none"> <li>Realization of grid parity in commercial and industrial use</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Developing FC cell/stack technology</li> </ul>
Supply	Fossil Fuel + CCS	Hydrogen Cost ¥30/Nm3 by 2030 ¥20/Nm3 in future Early 2020s <ul style="list-style-type: none"> <li>Production: Production cost from brown coal gasification (¥several hundred/Nm3 → ¥12/Nm3)</li> <li>Storage/Transport : Scale-up of Liquefied hydrogen tank (thousands m<sup>3</sup> → 50,000m<sup>3</sup>) Higher efficiency of Liquefaction (13.6kWh/kg → 6kWh/kg)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Scaling-up and improving efficiency of brown coal gasifier</li> <li>Scaling-up and improving thermal insulation properties</li> </ul>
	Green H2	System cost of water electrolysis ¥50,000/kW in future 2030 <ul style="list-style-type: none"> <li>Cost of electrolyzer (¥200,000m/kW → ¥50,000/kW)</li> <li>Efficiency of water electrolysis (5kWh/Nm3 → 4.3kWh/Nm3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Designated regions for public deployment demonstration tests utilizing the outcomes of the demonstration test in Namie, Fukushima</li> <li>Development of electrolyzer with higher efficiency and durability</li> </ul>

## **For HFS Construction Cost Reduction**

- Expanding the Sort & Range of Metal Material for Hydrogen Station
- Improvement of the Design Method of High Pressure Storage Vessels

## **For HFS Operation Cost Reduction**

- Realization of an Unattended Station
- Reconsideration of Safety Components based on New Risk Assessment Method

## The future of hydrogen

1. Hydrogen can help tackle various critical energy challenges.
2. Hydrogen is versatile.
3. Hydrogen can enable renewables to provide an even greater contribution.

## 4 Challenges to overcome

1. Producing hydrogen from low-carbon energy is costly at the moment.
2. The development of hydrogen infrastructure is slow and holding back widespread adoption.
3. Hydrogen is almost entirely supplied from natural gas and coal today.
4. Regulations currently limit the development of a clean hydrogen industry.

## 7 key recommendations to scale up hydrogen

1. Establish a role for hydrogen in long-term energy strategies.
2. Stimulate commercial demand for clean hydrogen.
3. Address investment risks of first-movers.
4. Support R&D to bring down costs.
5. Eliminate unnecessary regulatory barriers and harmonize standards.
6. Engage internationally and track progress.
7. Focus on four key opportunities to further increase momentum over the next decade.

(1) Make the most of existing industrial ports to turn them into hubs for lower-cost, lower-carbon hydrogen. (2) Use existing gas infrastructure to spur new clean hydrogen supplies. (3) Support transport fleets, freight and corridors to make fuel-cell vehicles more competitive. (4) Establish the first shipping routes to kick-start the international hydrogen trade.

# Contents

---

I Hydrogen policy in Japan

II Legal System for HFS in Japan

III JPEC's Activities for Regulatory Reform on HFS

# Regulations and Standards related to Hydrogen Stations

## Laws and Regulations

- **High Pressure Gas Safety Act**  
**Ordinance on Safety of General High Pressure Gas**  
Ordinance on Safety of Gas Containers  
Designated Equipment Inspection  
Ordinance
- Fire Service Act
- Building Standards Act
- Industrial Safety and Health Act
- Petroleum Complex Disaster Prevention Act
- Road Transport Vehicle Law

## Codes and Standards

### Regal

- Exemplified Standards for Ordinance
- Japanese Industrial Standard (JIS)
- International standards (ISO TC197)

### Industry Voluntary

- The High Pressure Gas Safety Institute  
KHKS
- Japan Petroleum Energy Center  
JPEC-S
- Japan Industrial and Medical Gas Association  
JIMGA-T-S

## Industry Voluntary Guidelines

- Japan Petroleum Energy Center  
JPEC-TD
- The Association of Hydrogen Supply and Utilization Technology (HySUT)  
HySUT-G

高圧ガス保安法 と  
一般高圧ガス保安規則 のこと

# Ensuring safety of Hydrogen Station

# Ordinance on Safety of General High Pressure Gas

## Article 7-3 Overview

---

### Technical standards for Stationary Hydrogen Stations

#### ■ Item 1 (Technical Standard for Suburban Stations)

- No. 1 General Provisions Article 6 (Appropriate Safety Distance etc.)
- No. 2 Distance between dispenser and public road
- No. 5 Safe filling method for vehicles (maximum filling pressure)

#### ■ Item 2 (Technical Standard for Urban Stations)

- No. 2 Distance between high-pressure gas equipment and site boundary
- No. 3 Distance between dispenser and public road
- No. 4 Install a fire barrier around the station
- No. 18 Flame detector installed in accumulator
- No. 25 Breakaway device installed in dispenser

#### ■ Item 3 (Common Method for Fueling Hydrogen)

- No. 4 Fueling hydrogen safely  
(Pressure Ramp Rate: JPEC-S 0003 Technical standard for fueling protocol)

# Regulations and Standards related to Hydrogen Stations

## Laws and Regulations

- **High Pressure Gas Safety Act**  
Ordinance on Safety of General High Pressure Gas  
Ordinance on Safety of Gas Containers  
Designated Equipment Inspection Ordinance
- Fire Service Act
- Building Standards Act
- Industrial Safety and Health Act
- Petroleum Complex Disaster Prevention Act
- Road Transport Vehicle Law

## Codes and Standards

### Regal

- **Exemplified Standards for Ordinance**
- Japanese Industrial Standard (JIS)
- International standards (ISO TC197)

### Industry Voluntary

- The High Pressure Gas Safety Institute  
KHKS
- **Japan Petroleum Energy Center**  
JPEC-S
- Japan Industrial and Medical Gas Association  
JIMGA-T-S

## Industry Voluntary Guidelines

- Japan Petroleum Energy Center  
JPEC-TD
- The Association of Hydrogen Supply and Utilization Technology (HySUT)  
HySUT-G

一般高圧ガス保安規則例示基準  
のこと

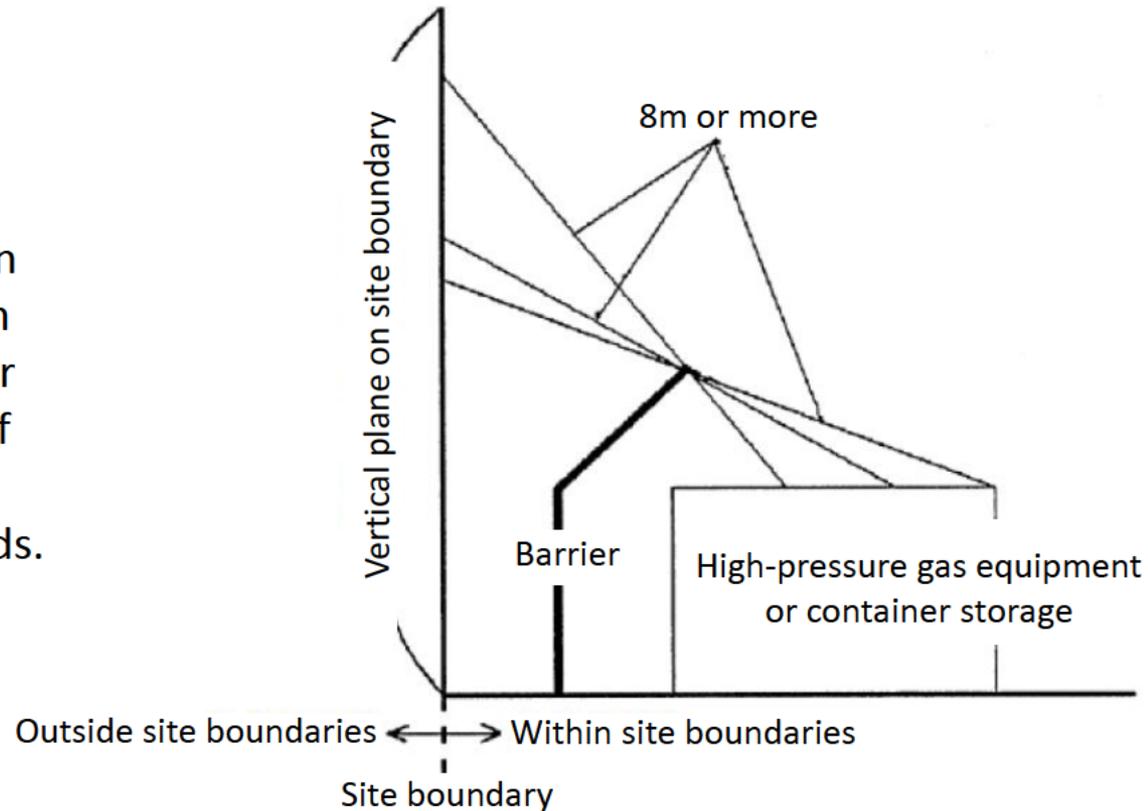
# Ensuring safety of Hydrogen Station

# Example of Exemplified Standards

56 -2. Measures equivalent to having a prescribed distance from the site boundary  
(Compressed hydrogen stand / Mobile compressed hydrogen stand)

## Overview:

For a hydrogen fueling station, measures equal to or greater than having a prescribed distance from the outer surface of the dispenser body to the road boundary line of public roads shall install a barrier that meets the following standards.



# Regulations and Standards related to Hydrogen Stations

## Laws and Regulations

- High Pressure Gas Safety Act  
Ordinance on Safety of General High Pressure Gas  
Ordinance on Safety of Gas Containers Designated Equipment Inspection Ordinance
- Fire Service Act
- Building Standards Act
- Industrial Safety and Health Act
- Petroleum Complex Disaster Prevention Act
- Road Transport Vehicle Law

## Codes and Standards

### Regal

- Exemplified Standards for Ordinance
- Japanese Industrial Standard (JIS)
- International standards (ISO TC197)

### Industry Voluntary

- The High Pressure Gas Safety Institute  
KHKS
- Japan Petroleum Energy Center  
JPEC-S
- Japan Industrial and Medical Gas Association  
JIMGA-T-S

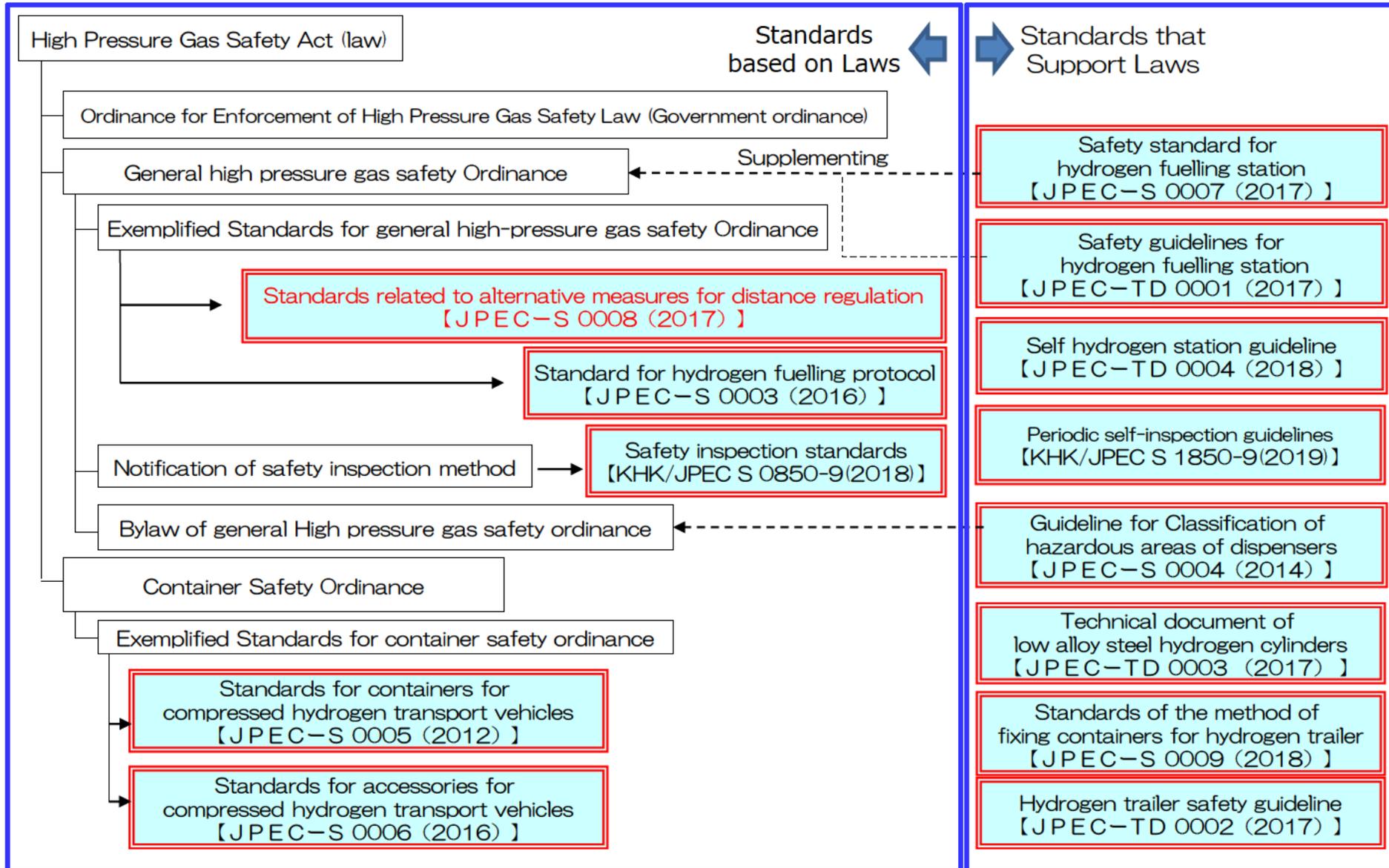
## Industry Voluntary Guidelines

- Japan Petroleum Energy Center  
JPEC-TD
- The Association of Hydrogen Supply and Utilization Technology ( HySUT )  
HySUT-G

**Ensuring safety of Hydrogen Station**

# Industry Standards for Hydrogen Infrastructure Industry

## Legislation and Standards System and Industry Standards and Guidelines



# Example of Exemplified Standards revised in March 2018

56 -2. Measures equivalent to having a prescribed distance from the site boundary  
(Compressed hydrogen stand / Mobile compressed hydrogen stand)

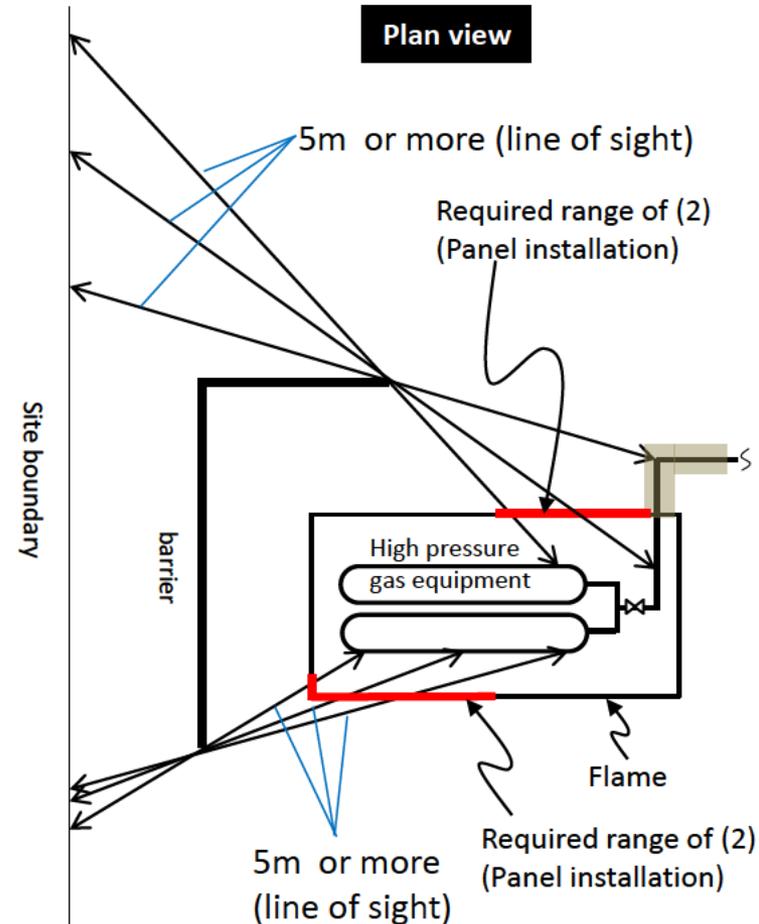
## Alternative Measures :

Source: "JPEC-S 0008 (2017)" cited in this example

- (1) Barriers should be installed between the site boundary and the high-pressure gas equipment to ensure a line-of-sight distance of 5 m or more.
- (2) Cover the necessary range of the side and top of the frame with high-pressure gas equipment with panels made of noncombustible material such as steel plates. The panels can be equipped with ventilation louvers. (Hereinafter omitted)



Reduction the safety distance



**Former regulation : 8m (based on Hydrogen diffusion concentration)**

**⇒ New regulation with alternative measures: 5m (based on radiation heat of jet-flame)**

# Contents

---

I Hydrogen policy in Japan

II Legal System for HFS in Japan

III JPEC's Activities for Regulatory Reform on HFS

# Why JPEC is taking care of Regulatory Reform on HFS ?

---

- ✓ JPEC is a technical center, established by Japanese petroleum and other related companies, to execute common tasks for the petroleum industry.
  - ✓ Petroleum industry already has a strong infrastructure to deliver liquid energy (including LPG and LNG), has unloading and loading facilities for liquid energy in oil refineries and also has a lot of experience in treating Hydrogen at refineries and operating gas stations.
  - ✓ Petroleum industry has a large potential to supply Hydrogen.
- ⇒ Based on these backgrounds, since 2003, JPEC has been executing technical research and development for the Hydrogen society from the stance of regulations and standards.

# Why JPEC is taking care of Regulatory Reform on HFS ?

## JPEC's activities for creating Hydrogen Society

### • Review of existing regulations

By presenting more reasonable and useful safety standards to the authorities, JPEC is proposing the revision of the regulations.

### • Establishing new standards

JPEC is also making drafts of new technical standards for Hydrogen stations, e.g. the standards for the periodic inspection, the distance between dispenser and public road, very high pressure storage vessels and Hydrogen fueling.

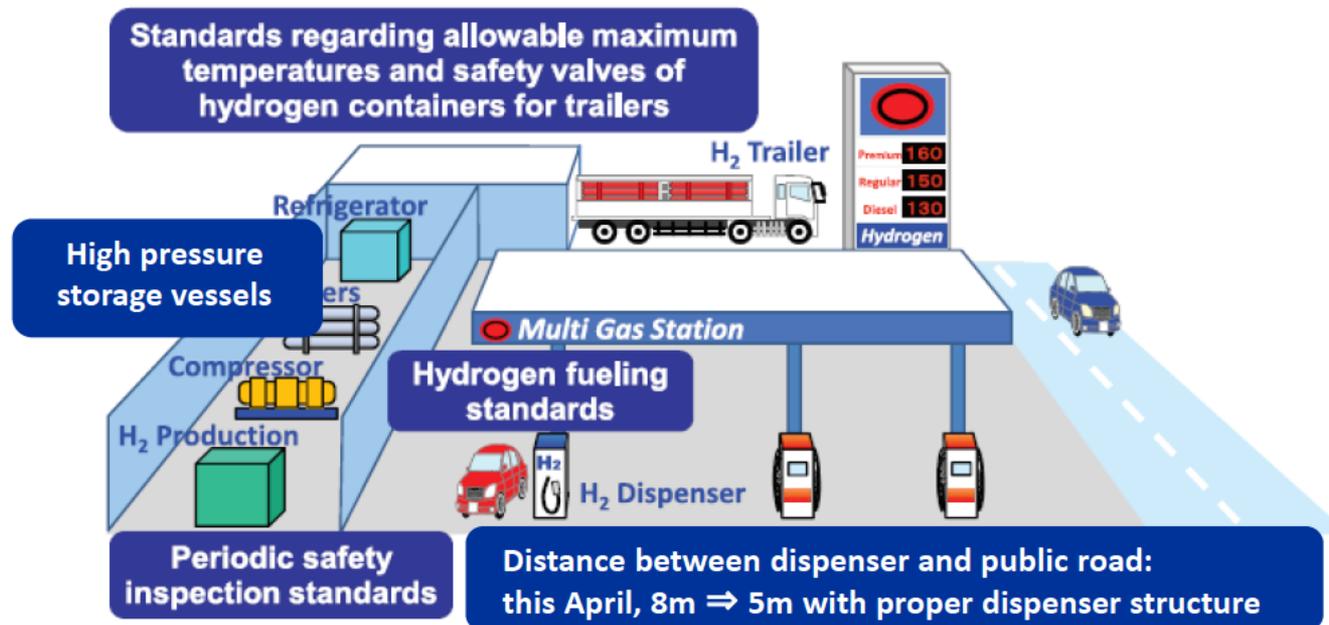
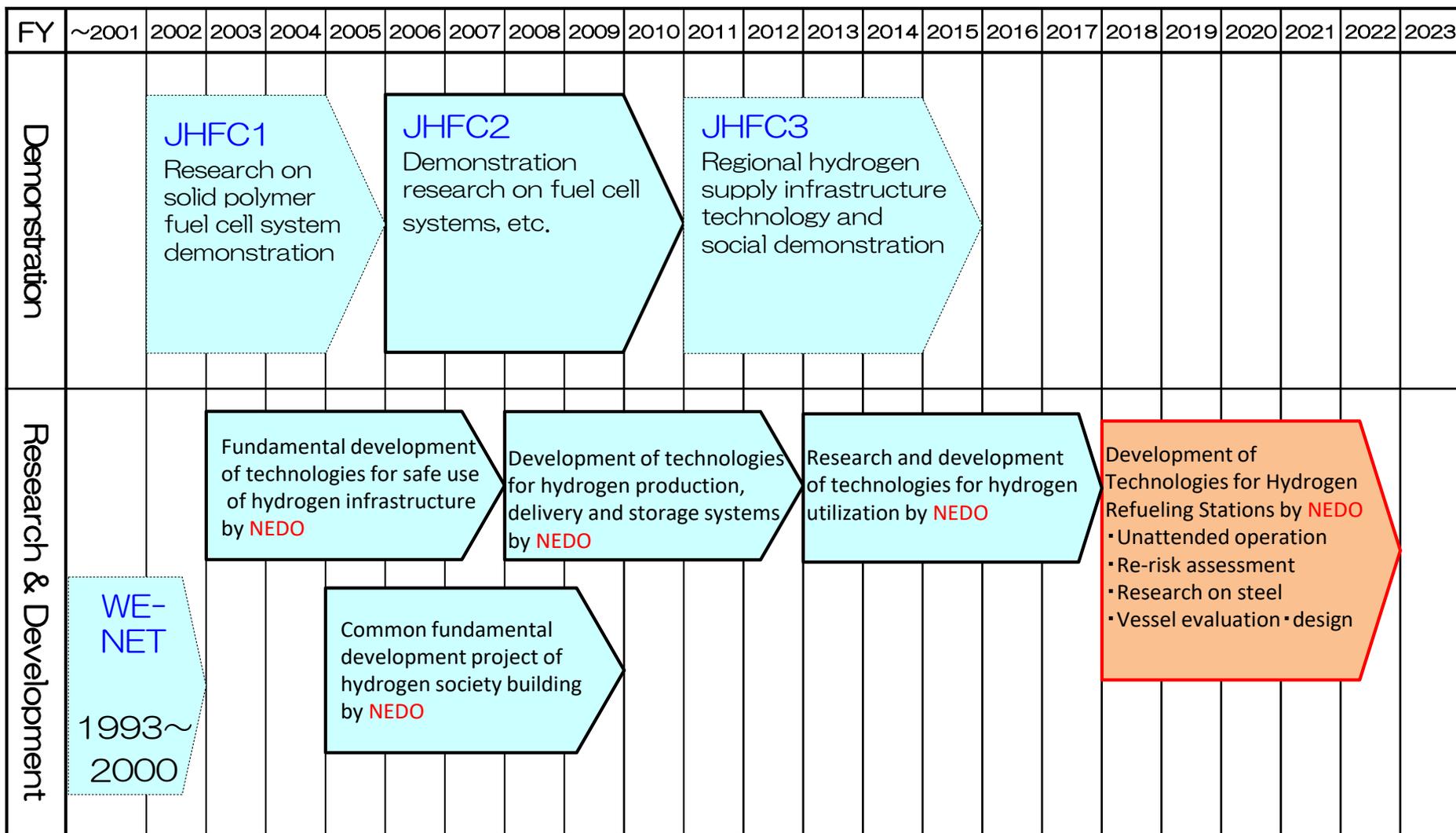


Fig. example of JPEC activities

# FCV/Hydrogen Infrastructure National Project in Japan



WE-NET : World Energy- NETwork

JHFC : Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project

NEDO : New Energy and Industrial Technology Development Organization

Solid line : Projects in which JPEC participated



Construction Cost (Initial Cost) :  
400~500MM¥ ≒ 4~5MM\$  
Operation Cost (Running Cost) :  
40~50MM¥ ≒ 0.4~0.5MM\$



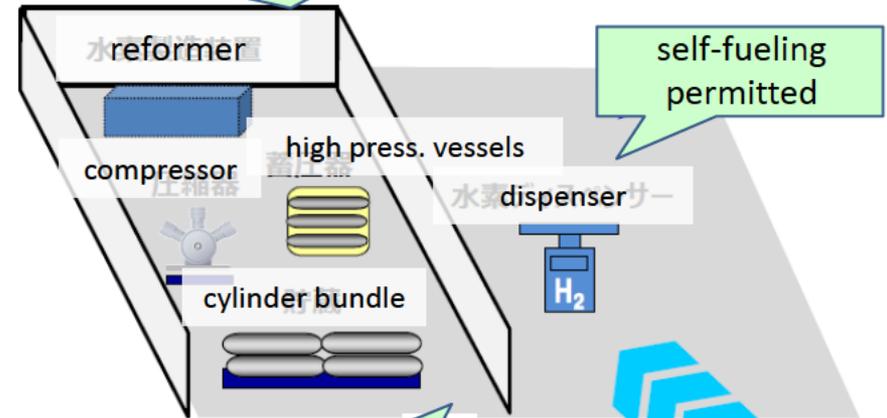
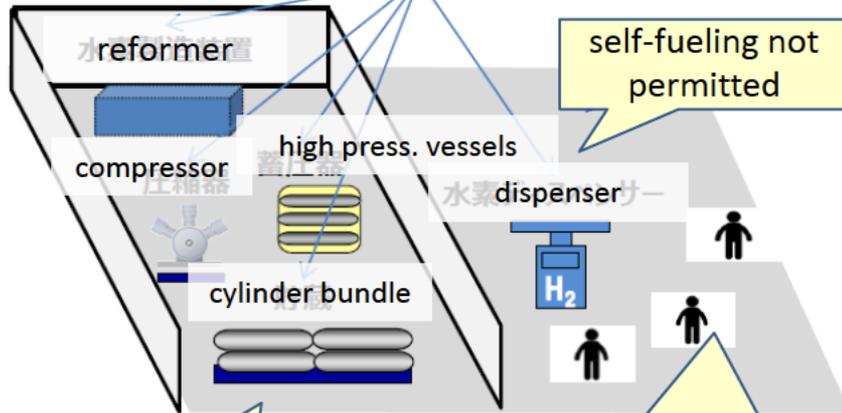
Construction Cost (Initial Cost) :  
200~300MM¥ ≒ 2~3MM\$  
Operation Cost (Running Cost) :  
20~30MM¥ ≒ 0.2~0.3MM\$

legal safety inspection(once/y): 0.2MM\$ & 30days

self-inspection only (legal safety inspection not necessary)

material & machine only defined by ordinance etc.: 4MM\$

common materials selected by owners  
with their responsibility: 2.5MM\$



METI: Ministry of Economy, Trade and Industry

High Pressure Gas Safety Act and related many Ordinances and Standards make construction and operation cost more expensive in Japan than the States.  
=> Regulatory reforms are necessary.

37 issues determined (2017 June) and already started studying them<sub>21</sub>

# JPEC's present Activities

---

## • Realization of an Unattended Station

By introducing new understanding of high pressure gas safety act as never before and new remote monitoring and control system, we can realize an Unattended Station.

⇒ "Ordinance on Safety of General High Pressure Gas" defined an unattended station on Aug. 6<sup>th</sup> 2020.

## • Reconsideration of Components based on New Risk Assessment Method

By introducing quantitative evaluation in the procedure of risk-assessment replacing the concept of "absolute safety" to ALARP, we can find some excess components for safety in Hydrogen Stations.

ALARP: "as low as reasonably practicable"

⇒ Probably some excess components for safety (e.g. safety valves) will be disappear in the next several years

These two issues are included in 37 regulatory reform issues

# Thank you for your Attention!!

This presentation is based on results obtained from projects (JPNP18011) commissioned by NEDO.

# Prospect of Petroleomics as a Tool for Changing Refining Technologies

Japan Petroleum Energy Center (JPEC) and partners have been developing “Petroleomics” as a new refining technology since 2011. Petroleomics can be a technology to achieve the ultimate method based on molecular reaction models with molecular level analyses of heavy oil. After the fundamental stage taking five years, our petroleum informatics database includes more than 25 million chemical structures of heavy oil components constructed with the aid of Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry (FT-ICR MS). Subsequently, reaction modeling studies were applied to residue hydrodesulfurization (RDS) and the aggregation model for asphaltenes to sediments, both of which are particularly important subjects in heavy oil upgrading. Our Petroleomics project is now in the application stage to attempt three major investigations: a molecular database of crude oils including unconventional oils, total optimization of RDS and residue fluid catalytic cracking (RFCC) operations with reaction modeling, and the mechanism of asphaltene aggregation responsible for fouling and plugging in some heavy oil upgrading processes. Further progress in Petroleomics is expected to achieve practical applications in refineries, such as advanced performance diagnosis, operational optimization, and catalyst and process development.

## Keywords

Petroleomics, Heavy oil, Molecular database, Reaction modeling, Asphaltene aggregation

## 1. Introduction

Modern analytical methods have allowed considerable progress in the field of refining technology. Conventional gas chromatography (GC) can provide both qualitative and quantitative information about almost all chemical species contained in gasoline (naphtha). GC methods identified the most refractory sulfur compound in gas oil (diesel) as 4,6-dimethyldibenzothiophene using a selective sulfur detector, sulfur chemiluminescence detector (SCD) in the early 2000s, and two-dimensional gas chromatography (2D-GC or GC × GC) provided details on the chemical species distributions at the molecular level in the range from lighter paraffin to complex naphthenic tri-aromatics<sup>1)</sup>. These analytical techniques have helped to achieve improvements in both regulations and refining processes for clean fuels, such as lower benzene content in gasoline and ultra-low sulfur content in gasoline and diesel<sup>2)</sup>. However, heavy oils, such as vacuum gas oil (VGO) and vacuum residue (VR), had not been investigated at the molecular level until quite recently, mainly because of their com-

plexities. Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry (FT-ICR MS) as ultrahigh resolution MS was first applied to petroleum analysis in 1994<sup>3)</sup>, and has been extensively used at the National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL) to investigate heavy oils, leading to a new methodology for petroleum called “Petroleomics”<sup>4)–6)</sup>.

Almost all crude oil was imported into Japan, especially from the Middle East (total 87.3 %, 39.4 % from Saudi Arabia and 24.8 % from United Arab Emirates in 2017), so efficient utilization of petroleum has been the most crucial issue in the oil industry. In particular, noble use of petroleum has been the top target, especially at Japan Petroleum Energy Center (JPEC), requiring the technological enhancement of heavy oil upgrading. The conventional approach for process studies, for example RDS unit, has considered heavy oils as simplified lumping models and overall reaction rates for several major reactions, such as hydrodemetallization (HDM) and hydrodesulfurization (HDS), simply because limited information was available on heavy oil components at the molecular level.

The Petroleomics approach based on molecular level feed and product information and statistical analysis can investigate the heavy oil upgrading process using molecular kinetics models, with the potential for molec-

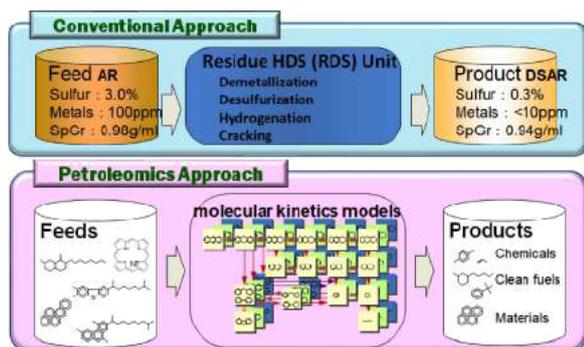


Fig. 1 Innovation in the Heavy Oil Upgrading Process Based on the Petroleomics Approach

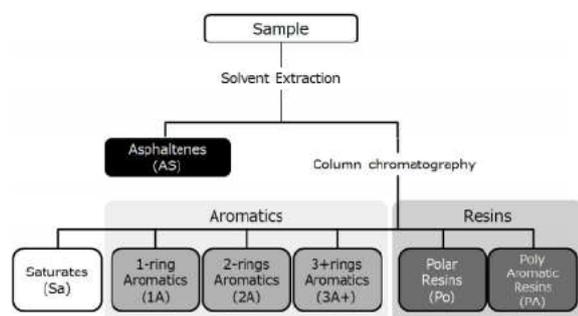


Fig. 2 Schematic Image of Fractionation Procedures for Heavy Oil Samples

ular level selectivity of products as shown in Fig. 1.

## 2. Design and Construction of Heavy Oil Component Database at the Molecular Level

As a fundamental stage, the study from FY2011 to FY2015 began to build an oil component database at the molecular level based on structural analyses with FT-ICR MS to introduce the informatics approach to petroleum by combining structural and physical properties.

### 2.1. Analytical Procedures

#### 2.1.1. Sample Preparation

Direct measurement with FT-ICR MS of crude oil samples easily causes under/overestimates of heavy oil components due to their different ionization efficiencies. Therefore, heavy oil should be separated into several fractions based on the chemical structures of the sample. The extended SARA (saturate, aromatic, resin and asphaltene) fractionation method is routinely used at JPEC before FT-ICR MS measurements as shown in Fig. 2, where heavy oil samples, such as atmospheric residue (AR) or vacuum residue (VR), were separated into seven fractions by column chromatography: saturates (Sa), one-, two-, three- or higher ring aromatics (1A, 2A, 3A+), polar and polyaromatic resins (Po, PA), and asphaltenes (AS)<sup>7</sup>.



Fig. 3 Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry (FT-ICR MS)

#### 2.1.2. FT-ICR MS Measurements and Ionization Methods

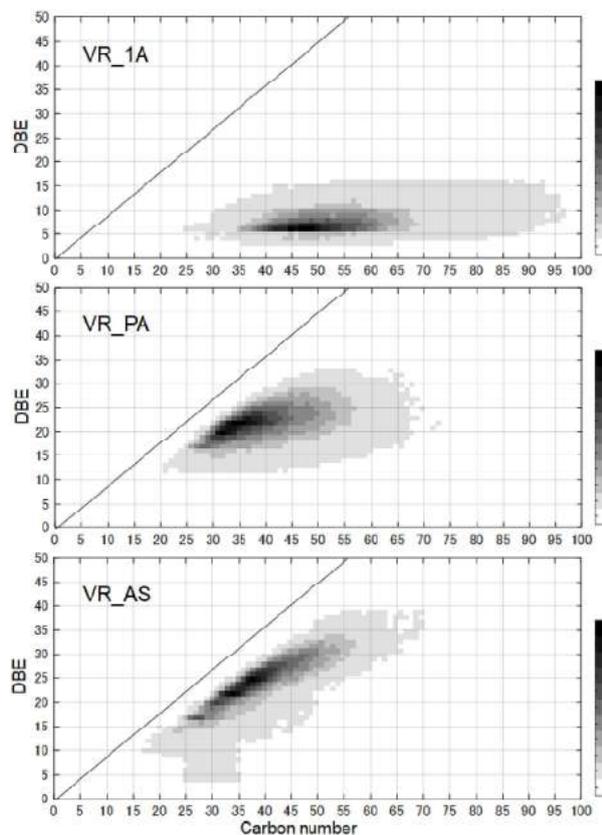
All MS measurements were performed using a FT-ICR MS (solarix 12T, Bruker Japan K.K.) equipped with a 12 T refrigerated actively shielded superconducting magnet (Fig. 3). Atmospheric pressure photoionization (APPI)<sup>8</sup> was used to ionize the 1A, 2A, 3A+, and Po fractions, which contain aromatic species as the main component that are ionized effectively by APPI. The heavier PA and AS fractions were ionized by laser desorption ionization (LDI)<sup>9</sup>, because of poor ionization with APPI for these low volatilities. Ag-cationization and laser desorption ionization (Ag-LDI)<sup>10</sup> were used to ionize for Sa fraction containing paraffins. All MS analyses were performed in positive ion mode.

Figure 4 shows the DBE (double bond equivalent) versus carbon number plots of 1A, PA, AS from a VR sample, where the DBE values represent the number of rings plus the number of double carbon bonds in a given molecular formula. DBE values can be calculated using the following equation<sup>11</sup>:

$$\text{DBE} = c - h/2 + n/2 + 1$$

for elemental formulas of  $C_cH_hN_nO_oS_s$ .

In Fig. 4, the range of carbon number remarkably decreased in the order of 1A, PA, AS, indicating that petroleum molecules contained in 1A have longer alkyl side chains than PA and AS. The range of DBE values of 1A, PA, AS were 3-16, 12-33, and 4-38, respectively. The distribution of AS was aligned on the line of planar aromatic limit<sup>12</sup>, and the trend was clearer than for PA. This suggests that AS contains highly condensed (polycyclic) aromatic species with shorter alkyl side chains than PA. The DBE versus carbon number plot is one of the most important visualization methods to obtain deep insight into such FT-ICR MS data.



Diagonal line indicates the planar aromatic limit.

Fig. 4 DBE vs. Carbon Number Plots of 1A, PA and AS Fractions from a VR Sample

### 2. 1. 3. Core Structure Estimation Using Collision Induced Dissociation (CID)

In the measurements with collision induced dissociation (CID), ions passing the quadrupole mass analyzer (Q1) were sent into the collision cell. The Q1 was opened and all parent ions were subjected to CID, because mass isolation of each ion is not practical for highly complex mixture such as heavy oil sample. Under this condition, parent ions decompose into constituent core structures, with each core structure consisting of a combination of aromatic, naphthenic and hetero-atom rings, as fragment ions.

Figure 5 shows the distributions of 1A, PA, and AS fractions from a VR sample before and after CID. The distributions of VR-1A before and after CID were located almost in the same range of DBE. Therefore, VR-1A contains single-core molecules as the main component. In contrast, the distributions of PA and AS showed remarkable shift in the lower DBE direction. In particular, the high DBE range of VR-AS (DBE: 26-38) needs at least two cores to explain the structure. It is suggested that VR-PA and VR-AS contain both single- and multi-core molecules. This information can be utilized to reconstruct residue molecules

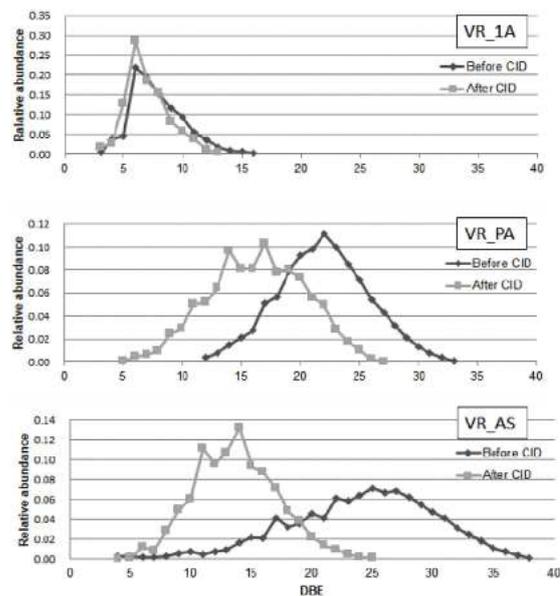


Fig. 5 Distributions of 1A, PA and AS from a VR Sample before and after Collision Induced Dissociation (CID)

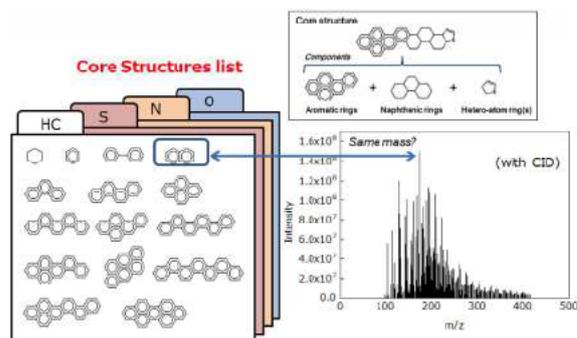


Fig. 6 Concept of Structure Estimation Method with Collision Induced Dissociation (CID)

as input. Figure 6 shows the concept of the structure estimation method with CID. More detailed explanation is given in our publication elsewhere<sup>13</sup>.

### 2. 1. 4. Data Analysis

MS peak detection, internal calibration and assignment of elemental formulas were performed with Composer software (Sierra Analytics, Inc.), and other procedures are detailed elsewhere<sup>14,15</sup>. The chemical structure of each oil molecule can be defined by a combination of core structures, bridge and side chains, where the order of combination of each component is not considered and so all derivatives (isomers) are treated as the same component.

### 2. 2. Petro-informatics Database

A comprehensive database for petroleum molecules was constructed containing information about the known chemical structure and physical properties. Definition of the chemical structure allows calculation

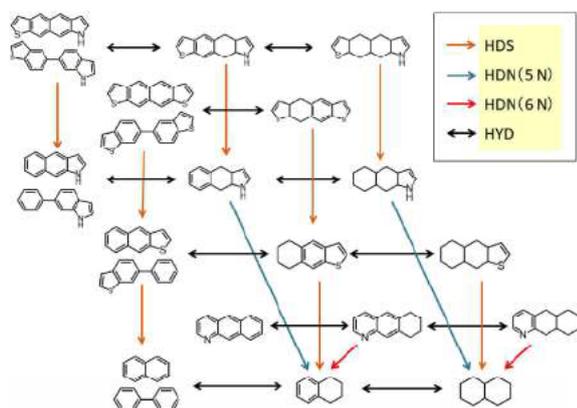


Fig. 7 HDS, HDN and Hydrogenation (HYD) Reaction Networks of Two-ring Cores<sup>16)</sup>

of some bulk properties. Physicochemical properties such as boiling and melting points are obtained using the group contribution method. Other thermochemical properties such as formation energy and heat capacity are obtained from quantum chemistry calculations. Extensive efforts to construct the database for all petroleum molecules are ongoing, and the number of registered molecules has exceeded 25 million.

### 2. 3. Molecular-based Reaction Modeling for RDS and Asphaltene Aggregation

RDS was selected for the first application of the Petro-Informatics Database as a platform for reaction modeling. Reaction behavior of involved cores was investigated using the chemical structure description data of cores during the RDS reaction. As a result, 1233 types of cores were selected as dominant species accounting for over 95 mol% of the feed and products, and reaction networks for these cores were proposed consisting of 2107 reaction pathways<sup>16)</sup>. For example, reaction pathways of two ring cores with S and N are shown in Fig. 7. The second application was the asphaltene aggregation modeling as described in the next section.

### 3. Application to Practical Uses of Petroleomics in Refineries

The second stage of the Petroleomics project began in FY2016. Based on the technologies developed in the fundamental stage, application and utilization technologies are being developed for practical uses of Petroleomics in refineries, where our developed technologies may be useful for performance diagnoses, as well as operational optimization, and new catalyst and process development, as shown in Fig. 8. Some of main subjects in progress are explained as follows.

#### 3. 1. Crude Oil Database with Petroleomics

Lighter crude oils are preferred in Japan with average 36.0° API gravity (S: 1.45 wt%), and a feasibility study for processing heavier crude oils, such as unconventional

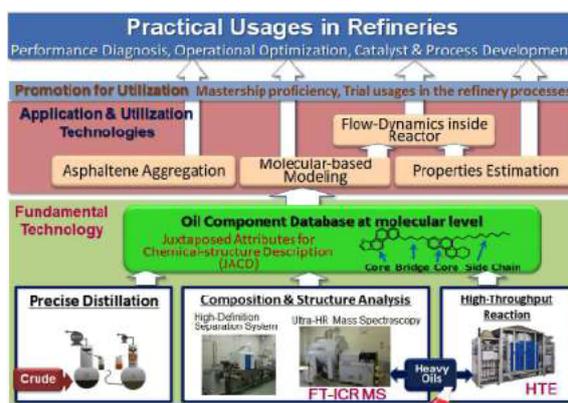


Fig. 8 Systematic Progress in Petroleomics Technologies

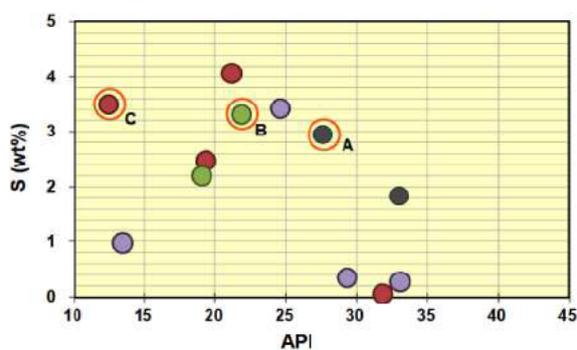


Fig. 9 Current Lineup of Crude Oils in the Database Established with Petroleomics

oils (oil sands) and heavy oils, will be essential, so we initiated to create a crude oil database with Petroleomics. A total of 12 selected crude oils have been processed up to 2018 and are listed in Fig. 9.

Carbon number *versus* DBE plots as heavy component distribution diagrams are shown in Fig. 10 for three atmospheric residues (AR, cut at 360 °C). AR of Crude-B contained more components with higher DBE values at carbon number around 35 than AR of Crude-A, indicating more polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) with 6-10 aromatic rings and fewer side chains. In contrast, AR of Crude-C contained components widely distributed from PAH to 1-3 ring aromatics with many side chains. Crude-B and Crude-C contained much higher amounts of nitrogen-containing components than AR of Crude-A. HDS and HDN reactivities of these ARs are now being investigated based on their compositions.

#### 3. 2. Total Optimization of RDS and RFCC Operations with Molecular-based Reaction Modeling

RDS kinetic reaction modeling was developed as described in Section 2. 3.<sup>16)</sup> and was subsequently applied to the simulated evaluation of the molar fraction distribution of main core components inside the RDS

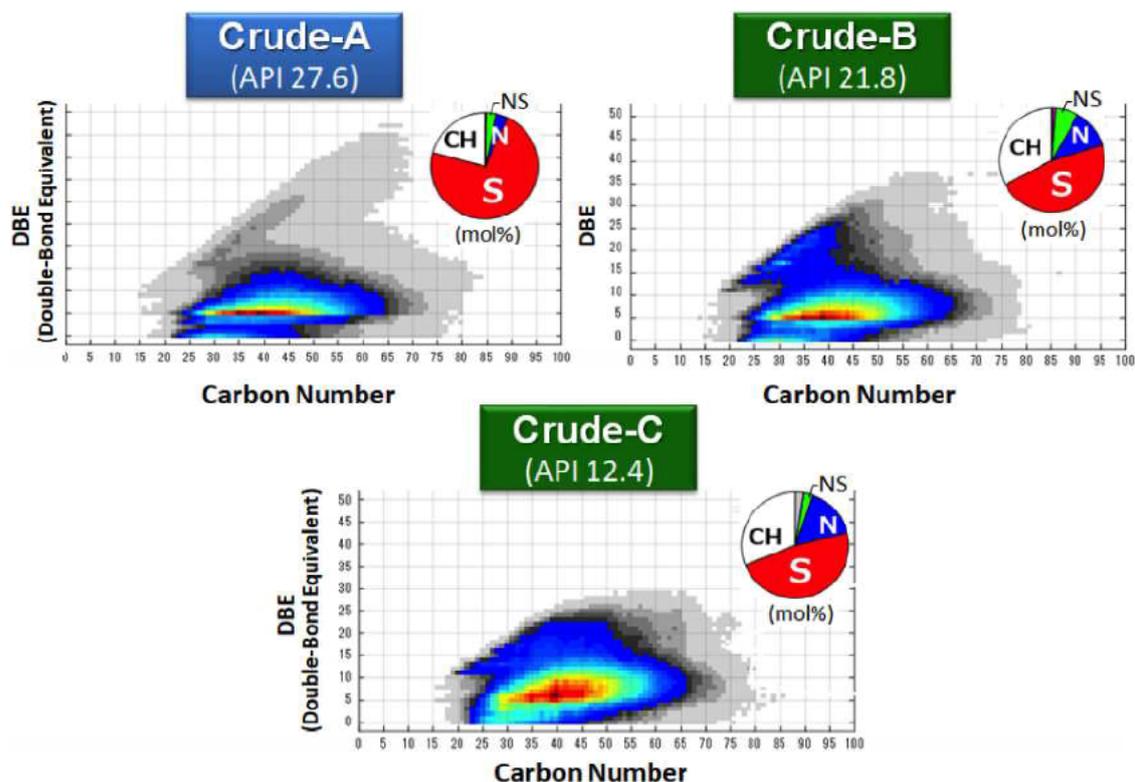


Fig. 10 Carbon Number —DBE Distribution Plots for Some Atmospheric Residues with Composition Ratios (mol%) in Pie Charts—

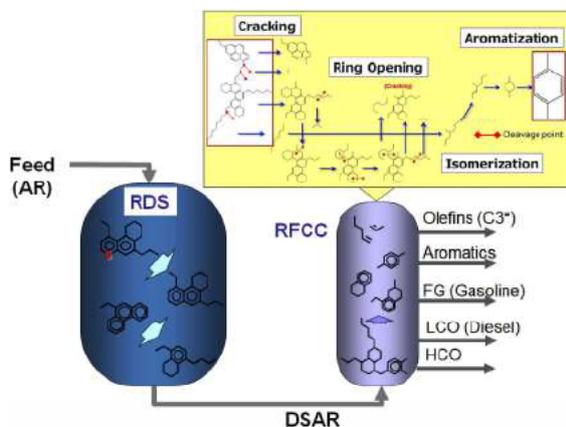


Fig. 11 Schematic Image of Molecular-based Reaction Modeling for RDS-RFCC

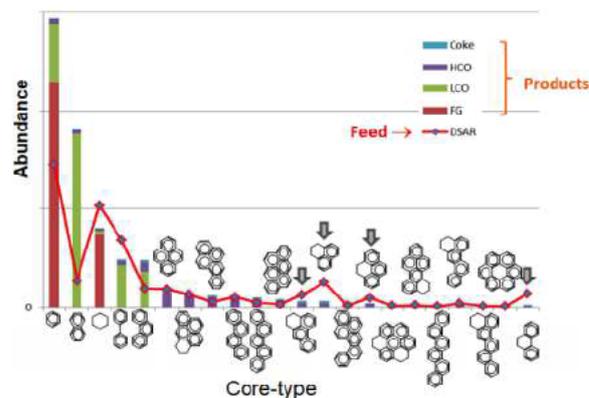


Fig. 12 Comparative Diagrams for 22 Major Types of Core

reactor from the feed to the desulfurized AR (DSAR) products. The study of molecular-based reaction modeling is now being expanded to the RFCC process as illustrated in Fig. 11, in which fundamental reactions in RFCC are considered<sup>17</sup>.

Figure 12 shows comparative diagrams for 22 types of core components found in the RFCC feed and products, in which these cores account for 98 % of all cores in RFCC products. One and two ring aromatic cores are the majority in the products, which are formed through aromatization of paraffins, dehydrogenation

and ring-opening reactions. In contrast, PAH cores with more than four aromatic rings undergo very little change in quantity except for some cores with a naphthenic ring, indicating that catalytic cracking only occurs at the hydrogenated naphthenic ring. Figure 13 shows comparative diagrams for different numbers of rings (aromatic + naphthenic) in the RFCC feed and products. One- and two-ring cores increased in the RFCC product, whereas more than three-ring cores decreased.

Two possible reactions could account for the decreases in quantity of three- and higher ring core, ring opening

by cracking of the naphthenic ring, decreasing the number of rings, or aromatization and coke-formation by dehydrogenation. Being applied in the same procedure as for the RDS reactions, most molecular components in DSAR as a feed for RFCC and their products were analyzed. The reaction networks of one- to six-ring cores for RFCC were obtained as shown in Fig. 14. By fitting reaction rates to experimental data, the following reaction trends were obtained; ring opening is in the order of three-ring > four-ring > five-ring, and ring opening rate was higher for cores with more naphthenic rings among aromatic + naphthenic cores with the same number of rings (aromatic + naphthenic). Our reaction network modeling of RFCC is now being expanded to both coking reactions and aliphatic chain reactions<sup>18</sup>.

### 3.3. Mechanism of Asphaltene Aggregation

The aggregation model for asphaltenes (AS) to sediments, which are the primary causes of fouling and plugging, was developed as the Multi-Component Aggregation Model (MCAM). The model consists of

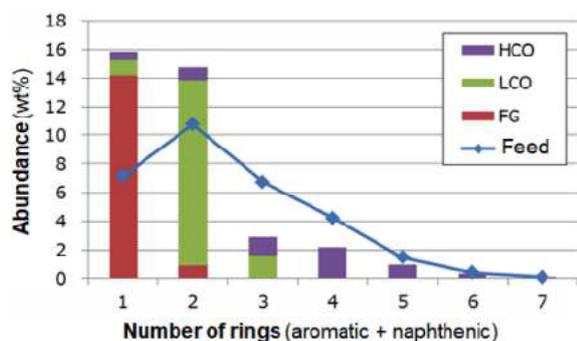
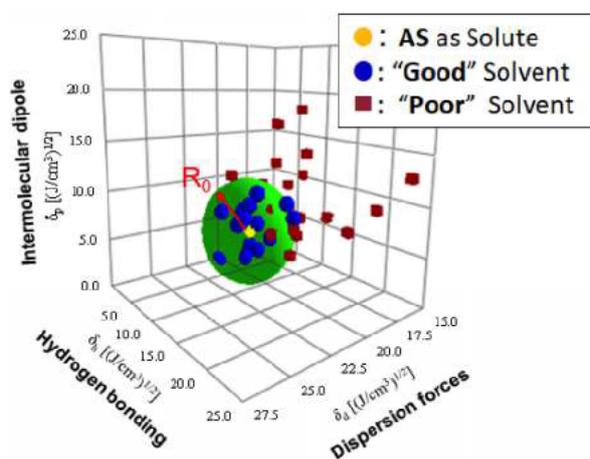


Fig. 13 Comparative Diagrams for Different Numbers of Aromatic + Naphthenic Rings between the RFCC Feed and Products

the Hansen solubility parameter (HSP)<sup>19</sup> and has been developed by a joint research group between Kansai University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) and JPEC<sup>20,21</sup>. All molecular-based heavy oil components in AS can be attributed to a specific HSP value from its compositional data. Figure 15 shows the HSP of AS extracted from VR of Canadian oil sand bitumen (CaAs) in a 3D diagram as an example<sup>20</sup>. The radius of the sphere is called the interaction radius  $R_0$ . Quantitative evaluation of the solubility can be determined using the  $R_a$  value, meaning the distance of the HSPs for both substances.

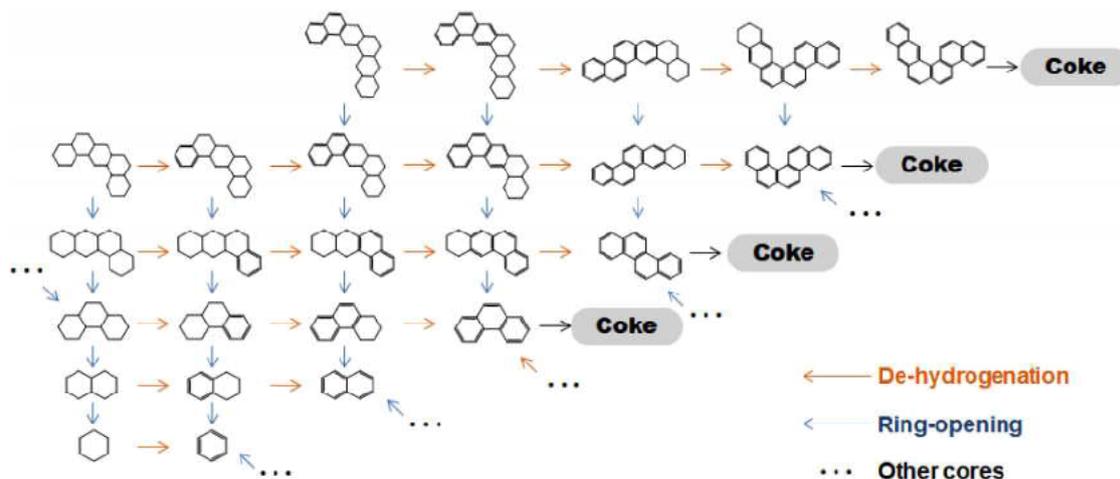
$$R_a = \left[ 4(\delta_{d1} - \delta_{d2})^2 + (\delta_{p1} - \delta_{p2})^2 + (\delta_{h1} - \delta_{h2})^2 \right]^{1/2}$$

Quantitative evaluation of solubility can be represented



Blue circles are "good" solvents, and red cubes are "bad" solvents<sup>20</sup>.

Fig. 15 Hansen Solubility Parameter (HSP) of Canadian AS (CaAs) as a Solute in a 3D Diagram with HSPs of Organic Solvents



Hydrogenation reactions of aromatic rings are omitted.

Fig. 14 Developing Reaction Networks of One- to Six-ring Cores for RFCC, with Just 25 Representatives of 70 Cores

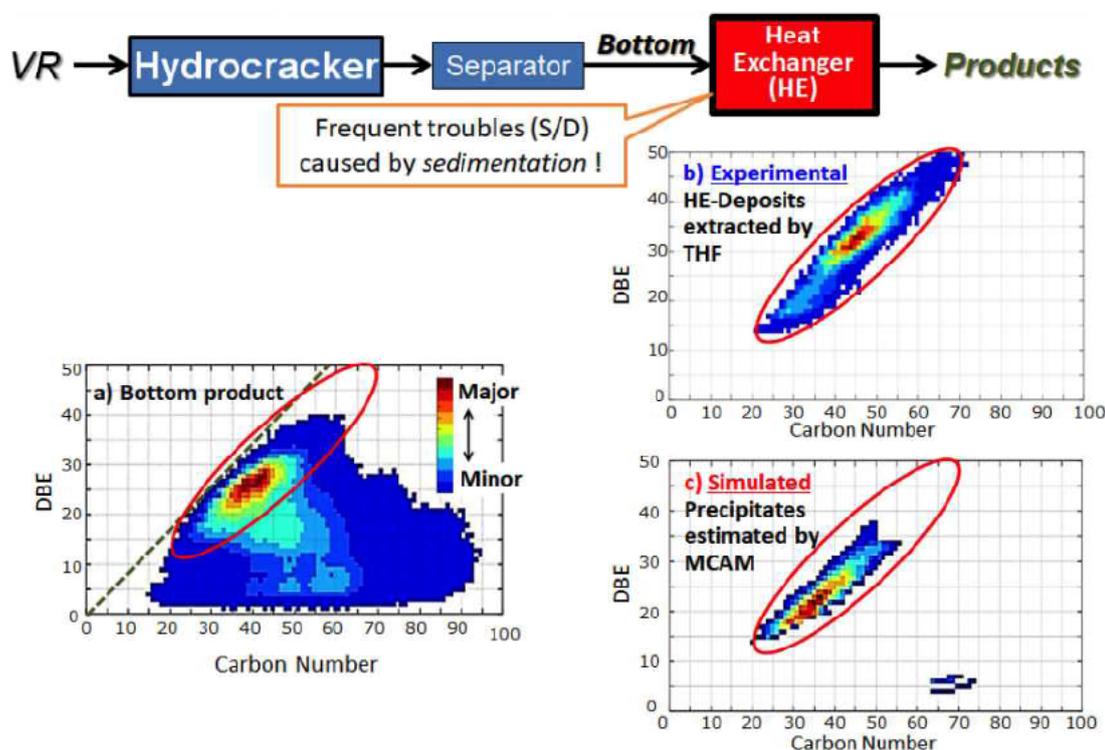
Table 1 Hansen Solubility Parameters and Solubility Score of CaAs in Some Organic Solvents<sup>20)</sup>

Solute	$\delta_d$ [(J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> ]	$\delta_p$ [(J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> ]	$\delta_h$ [(J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> ]	$\delta_t$ [(J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> ]	$R_0$ [(J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> ]
As (CA)	19.1	4.2	4.4	20.1	6.1

Solvent	$\delta_d$ [(J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> ]	$\delta_p$ [(J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> ]	$\delta_h$ [(J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> ]	$\delta_t$ [(J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> ]	$R_a$ [(J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> ]	RED $R_a/R_0$	Score
Bromobenzene	19.2	5.5	4.1	20.4	1.3	0.22	1
Toluene	18.0	1.4	2.0	18.2	4.3	0.70	1
Benzene	18.4	0.0	2.0	18.5	5.0	0.83	1
THF	16.8	5.7	8.0	19.5	6.0	1.0	1
Cyclohexane	16.8	0.0	0.2	16.8	7.5	1.2	0
Acetone	15.5	10.4	7.0	19.9	9.9	1.6	0
Pentane	14.5	0.0	0.0	14.5	11.0	1.8	0
Ethanol	15.8	8.8	19.4	26.5	17.0	2.8	0

$$\delta_t^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_a^2.$$



a) DBE plot of the experimental data for the bottom product, b) DBE plot of the experimental data for deposits in the heat exchanger extracted by THF, and c) DBE plot of the simulated precipitates estimated from components in the bottom product by MCAM.

Fig. 16 Precipitates Estimated for the Resid Hydrocracker by MCAM

by the  $R_a$  value. With a small difference in HSP between solute and solvent ( $R_a < R_0$ ), the solute is likely to be soluble in the solvent. Thus, the degree of solubility can be determined by relative energy difference ( $RED = R_a/R_0$ ). HSPs and solubility score of CaAs in some organic solvents are listed in **Table 1**. Bromobenzene was determined as the best solvent for CaAs.

Distribution of specific components between soluble, aggregate and precipitate phases can now be determined by the degree of AS aggregation (Dagg) as a function of the HSP values of the component and liquid phase, concentrations and temperature<sup>21)</sup>. In addition, HSP

values have been precisely determined for a series of synthetic AS model compounds using experimental solubility testing<sup>22)</sup>.

The developed AS aggregation model is now being applied for some refinery tasks, such as the degree of sediment estimated from the feed compositions in some heavy oil upgrading processes, and crude oil stability after mixing (miscibility) in a storage tank. A successful example is a case study of precipitates (sediment) estimation in the heat exchanger located after the ebullated-bed resid hydrocracking unit, as shown in **Fig. 16**.

#### 4. Conclusion

Our Petroleomics project is reviewed from the fundamental stage started in FY2011 to the ongoing application stage. The crude oil database based on Petroleomics is expanding in terms of both quality and quantity and is expected to become invaluable as a shared resource for dramatic progress in operational reliabilities and productivities in refineries.

#### Acknowledgment

This project has been supported by the Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), and carried out by the Japan Petroleum Energy Center (JPEC) and joint research groups as a technological development project for Petroleomics.

#### References

- 1) "GC×GC Handbook, Fundamental Principles of Comprehensive 2D GC," Shimadzu Corp., C146-E177 (2012).
- 2) Toulhoat, H., Raybaud, P., "Catalysis by transition metal sulphides," Editions Technip, (2013).
- 3) Hsu, C. S., Liang, Z., Campana, J. E., *Anal. Chem.*, **66**, 850 (1994).
- 4) Rodgers, R. P., Marshall, A. G., "Asphaltenes, Heavy Oils and Petroleomics," Springer, New York (2007), pp. 63-89.
- 5) Marshall, A. G., Rodgers, R. P., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **105**, (47), 18090 (2008).
- 6) Hsu, C. S., Hendrickson, C. L., Rodgers, R. P., McKenna, A. M., Marshall, A. G., *J. Mass Spectrom.*, **46**, 337 (2011).
- 7) Torii, T., Tanaka, R., Shibata, M., Higashidate, M., Tanaka, K., Miyabayashi, K., Miyake, M., 40th Petroleum-Petrochemicals Symposium of Japan Petroleum Institute, Kobe, (2010), C02.
- 8) Purcell, J. M., Hendrickson, C. L., Rodgers, R. P., Marshall, A. G., *Anal. Chem.*, **78**, (16), 5906 (2006).
- 9) Cho, Y., Witt, M., Kim, Y. H., Kim, S., *Anal. Chem.*, **84**, 8587 (2012).
- 10) Mennito, A. S., Qian, K., *Energy & Fuels*, **27**, (12), 7348 (2013).
- 11) McLafferty, F. W., Turecek, F., "Interpretation of Mass Spectra, 4th edition," University Science Books, Sausalito, USA (1993).
- 12) Hsu, C. S., Lobodin, V. V., Rodgers, R. P., McKenna, A. M., Marshall, A. G., *Energy & Fuels*, **25**, (5), 2174 (2011).
- 13) Teratani, S., Katano, K., Tanaka, R., Nakamura, T., Inomata, I., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **62**, (6), 272 (2019).
- 14) Katano, K., Suzuki, T., Tanaka, R., *Prep. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Energy and Fuels*, **60**, (2), 532 (2015).
- 15) Katano, K., Suzuki, T., Tanaka, R., *Prep. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Energy and Fuels*, **61**, (2), 694 (2016).
- 16) Hagiwara, K., Gonda, T., Fujinaga, H., Tanaka, R., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **59**, (5), 219 (2016).
- 17) Shimada, I., Takizawa, K., Fukunaga, H., Takahashi, N., Takatsuka, T., *Fuel*, **161**, 207 (2015).
- 18) Takahashi, Y., Hayasaka, T., Nakamura, T., 49th Petroleum-Petrochemicals Symposium of Japan Petroleum Institute, Yamagata, (2019), 2C13.
- 19) Hansen, C. M., "Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook," 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL (2007).
- 20) Sato, T., Araki, S., Morimoto, M., Tanaka, R., Yamamoto, H., *Energy & Fuels*, **28**, 891 (2014).
- 21) Morimoto, M., Sato, T., Araki, S., Tanaka, R., Yamamoto, H., Sato, S., Takanohashi, T., *Energy & Fuels*, **29**, 2808 (2015).
- 22) Morimoto, M., Fukatsu, N., Tanaka, R., Takanohashi, T., Kumagai, H., Morita, T., Tykwinski, R. R., Scott, D. E., Stryker, J. M., Gray, M. R., Sato, T., Yamamoto, H., *Energy & Fuels*, **32**, 11296 (2018).



**International Technology and Trade Associates, Inc.**

1200 18th Street NW – Suite 1002

Washington, D.C. 20036

Tel: (202) 828-2614 • Fax: (202) 828-2617

<http://www.itta.com>

**Subject: Interview Project**

**Date: March 12, 2021**

ITTA surveyed selected U.S. agencies and industry organizations on various topics related to the U.S. energy sector. This ITTA REPORT provides information collected through several interviews and independent research.

The report is organized as follows:

- **Section A – U.S. Energy Information Administration (EIA)**
- **Section B – American Petroleum Institute (API)**
- **Section C – American Association of Fuel Petrochemical Manufacturers (AFPM)**
- **Section D – Major Oil Company: Chevron**
- **Section E – U.S. Department of Energy (DOE)**
- **Section F – U.S. Environmental Protection Agency (EPA)**
- **Section G – U.S. Department of Agriculture (USDA)**
- **Section H – Renewable Fuels Association (RFA)**

We hope this report and associated attachment for the groups listed above are helpful to you. Please do not hesitate to contact ITTA if you have any questions or comments about the report.

**A. U.S. Energy Information Administration (EIA)**

ITTA contacted various EIA experts who contributed responses below, including **Estella Shi** (Biodiesel and biorefinery trends), **Peter Colletti** (Long-term jet fuel forecasts) and **Kevin Hack** (Short-term jet fuel forecasts and U.S. crude oil imports).

*Due to the impact of COVID-19, jet fuel is oversupplied all over the world. What is the short-term demand forecast for jet fuel in the United States?*

<b>EIA Short Term Outlook for U.S. Jet Fuel Consumption: 2021 – 2022</b>				
<b>Million Barrels per Day</b>				
	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>
12/20	1.74	1.09	1.54	NA
01/21	1.74	1.08	1.41	1.71
02/21	1.74	1.08	1.39	1.70
03/21	1.74	1.08	1.40	1.73

Source: EIA Short Term Energy Outlooks December 2020 – March 2021

**January 2021 STEO:** EIA’s January 2021 Short Term Energy Outlook (STEO) presents EIA’s first short-term forecast for jet fuel demand in the United States for 2021. Please see attached January STEO.

- “Among petroleum products, jet fuel consumption fell particularly sharply in 2020, and EIA assumes that global jet fuel consumption will remain below its 2019 level through the end of 2022. EIA expects jet fuel consumption to return to pre-pandemic levels more quickly in China and the United States than in most other regions.” (page 5)
- “EIA estimates that in 2020, U.S. consumption of liquids fuels averaged 18.1 million b/d, down 2.5 million b/d (12%) from 2019 consumption levels. Reduced travel because of the COVID-19 pandemic drove consumption in the second quarter of 2020 down to 16.1 million b/d, the lowest level for any quarter since 1986.” (page 5)
- “Total liquids consumption then increased, reaching approximately 18.5 million b/d in the fourth quarter of 2020, down from 20.6 million b/d in the fourth quarter of 2019.” (page 10)
- “Although EIA forecast liquids fuels consumption to increase from 2020, consumption in 2021 is forecast to remain lower than 2019 levels of 20.5 million b/d largely because consumption of transportation fuels including gasoline, distillate, and jet fuel is expected to remain lower than 2019 levels.” (page 10)
- “EIA forecasts consumption in 2022 to almost return to 2019 levels; forecast gasoline and jet fuel demand that is less than 2019 levels is offset by distillate and hydrocarbon gas liquids (HGL) consumption that is forecast to be greater than 2019 levels.” (page 10)

Please see the attached PDF copy of the January 2021 STEO.

EIA Quarterly Forecasts for U.S. Jet Fuel Consumption: 2021 and 2022											
Million Barrels per Day											
	2021				2022				Year		
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	2020	2021	2022
01/21	1.26	1.39	1.51	1.48	1.57	1.71	1.77	1.78	1.08	1.41	1.71
02/21	1.22	1.38	1.50	1.47	1.57	1.70	1.77	1.77	1.08	1.39	1.70
03/21	1.20	1.39	1.52	1.50	1.60	1.73	1.79	1.79	1.08	1.40	1.73

Source: EIA Short Term Energy Outlooks for January, February, and March 2021

**March 2021 STEO:** In the March STEO, “EIA reduced expectations for jet fuel consumption in 2021 in response to lower than expected first-quarter flight activity, along with reduced air travel expectations from the **International Civil Aviation Organization [ICAO]** during the second quarter of 2021.” (page 10) However, “EIA forecasts consumption in 2022 to almost return to 2019 levels; forecast gasoline and jet fuel demand that is less than 2019 levels is offset by distillate and hydrocarbon gas liquids (HGL) consumption that is forecast to be greater than 2019 levels.” (page 10)

Please see the attached PDF copy of the March 2021 STEO.

Regarding its reasoning behind these jet fuel forecasts, EIA stated the following:

- “Unlike Europe and Asia, there does not seem to have been as substantial an impact on U.S. air travel since the start of 2021. We do expect to see some hesitance in returning to air travel through the spring of 2021, but otherwise we see it largely continuing to grow closer to 2019 levels through the end of the year.”
- “This forecast operates under the assumptions that travel restrictions and government guidance are eased with increasing domestic vaccination rates, and consumer comfort gradually increases as customers feel safer about air travel.”
- “Again, we are also using the ICAO’s short term regional forecast as additional guidance through the end of 2Q 2021. On a medium-term, annualized basis, **we are expecting jet fuel demand to remain below 2019 levels for a few years after 2021.** That issue is covered in more detail in the 2021 Annual Energy Outlook.”

The relevant AEO2021 statements concerning air travel are the following:

- “In the Reference case, U.S. passenger air travel demand decreases by nearly two-thirds in 2020 and returns in 2025 to 2019 levels; bus passenger travel demand decreases by nearly half in 2020 and returns in 2031 to 2019 levels; and light-duty vehicle (LDV) travel returns to 2019 levels by 2024.” (page 5)
- “After air load factors return to 2019 levels in 2024, the trend in energy intensity per passenger mile returns to a steady decline as rail, air, and bus modes adopt energy-efficient technologies and practices.” (page 10)

Please see the attached PDF copy of the AEO2021 Narrative.

In addition, EIA offered the following explanation: “To be clear, the statement included in the January STEO text suggests that China and the United States are both expected to return to pre-pandemic levels more quickly than other regions, such as Europe, the rest of Asia, Latin America, etc. That said, we have generally seen a faster recovery in Chinese air travel than in the United States.”

- “Recent reported small-scale outbreaks in China, combined with concern over travel during the Lunar New Year both contributed to renewed measures to contain the virus in January and February.”
- “However, the top-down nature of the shutdowns, combined with the rate of recovery seen in most of 2020 leads us to believe that China is likely to also recover relatively quickly from these shutdowns as well.”
- “EIA also uses the ICAO’s COVID 19 impact reports as guidance for the jet outlook in the STEO forecast. Their report currently extends through the second quarter of 2021, though it does not provide a country level forecast, and instead operates primarily on a regional basis. That said, Chinese is the largest single jet market in their Asia/Pacific region.”<sup>1</sup>

*We also would like to know the ratio of jet fuel demand for domestic and international flights in US?*

According to EIA, “the majority of U.S. airline flights are domestic. Based upon the data available to us, we generally see about one-third of present jet fuel demand is consumed for international flights, though we estimate that can be closer to just under half under “normal” pre-COVID conditions.”

EIA contacts further offered, “the U.S. **Bureau of Transportation Statistics** publishes data on Revenue Passenger Miles (RPM) and Available Seat Miles (ASM), broken out by Domestic and International, as well as total flight numbers by carrier. It is generally worth noting that RPM, ASM and flight numbers show a higher percentage in domestic vs. international. Higher jet fuel demand estimates relative to these indicators are driven by flight distances and efficiency calculations, such that international and transoceanic flights are generally more fuel intensive than domestic flights.

*What is the long-term scenario for renewable diesel and jet fuel production?*

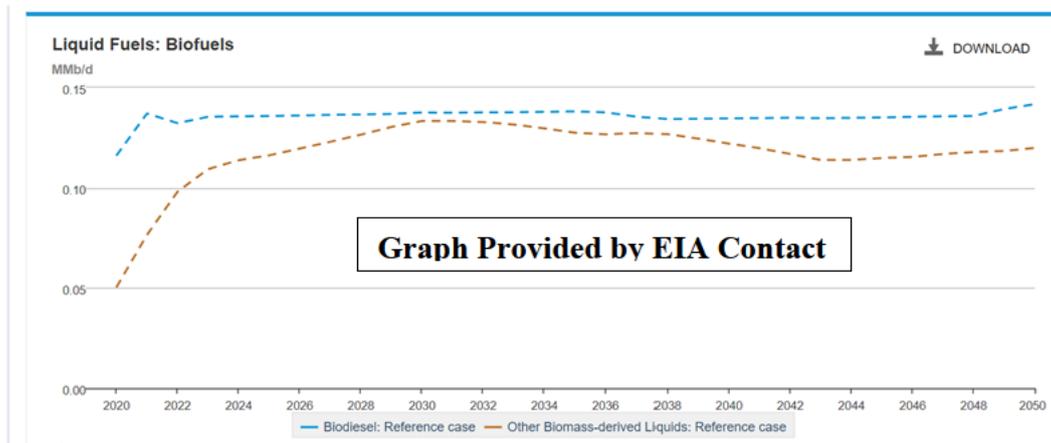
**Types of Renewable Diesel:** EIA makes long-term projections for two types of renewable diesel fuel: Biodiesel and Renewable diesel. Both types are made from the same feedstock: renewable organic non-fossil material of biological origin (e.g., soybean, canola, or other vegetable oils; animal fats; and recycled grease). As such, biodiesel and renewable diesel are virtually the same product. However, the key difference between the two fuels is that they are produced by different methods.

- In biodiesel production, the feedstock is reacted with methanol to produce mono-alkyl esters of long chain fatty acids or fatty acid methyl esters (FAME). In renewable diesel production, the feedstock is reacted with hydrogen during a process called hydrotreating.

---

<sup>1</sup> <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Economic-Impacts-of-COVID-19.aspx>

- Another difference is that renewable diesel has no oxygen in it, whereas biodiesel does. Renewable diesel also has lower production volumes than biodiesel in the United States, which has created supply issues.
- For EIA reporting requirements, biodiesel is designated B100, and meets the requirements of American Society for Testing Materials ASTM (D 6751). Renewable diesel meets ASTM D975 specification for petroleum diesel.
- It does not require blending with petroleum diesel for its use. Both fuels qualify for meeting the biofuels consumption levels required by the U.S. Renewable Fuel Standard Program.



**EIA Forecast for Renewable Diesel:** According to the Reference Case scenario in EIA’s Annual Energy Outlook 2021, “EIA projects that the percentage of biofuels (including, ethanol, biodiesel, and other biomass) blended into the U.S. fuel pool (gasoline and diesel) will increase and slowly grow across the entire projection period [through 2050].”

- AEO 2021 states: “In the High Oil Price case, the share of biofuels consumed in the United States rises to a greater percentage as higher prices for gasoline and diesel make biofuels more competitive.” (page 30)
- “The share of biofuels in the Low Oil Price case remains relatively unchanged when compared with the Reference case because of regulations... For example, the LCFS [California’s Low Carbon Fuel Standard] encourages the use of biomass-based diesel because renewable diesel has one of the lowest carbon intensities of the approved pathways for LCFS compliance.” (page 30)

According to the AEO 2021 Excel data file for Table 11, domestic U.S. biodiesel production is expected to rise from 110,000 barrels per day (b/d) in 2020 to 130,000 b/d in 2023 and stay at that level throughout the forecast period ending in 2050. (A copy of this file is attached.)

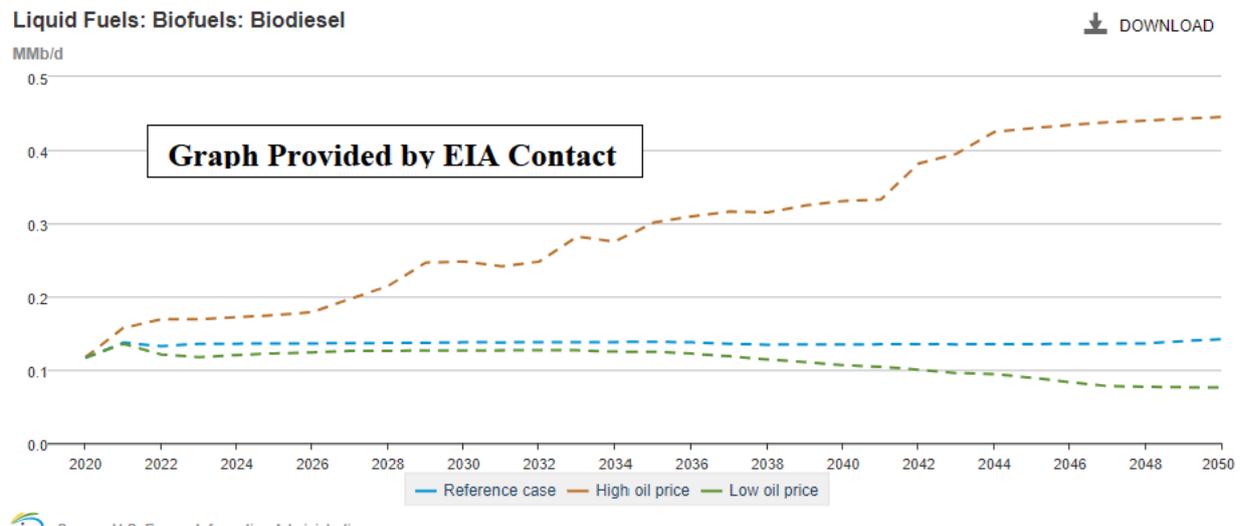
Domestic production of biomass liquid fuels, which includes biomass diesel, is forecast to grow from 30,000 b/d in 2020 to 70,000 b/d in 2022, 100,000 b/d in 2023, 110,000 b/d in 2030, 100,000 b/d in 2033, and 90,000 b/d from 2039 through 2050.

- AEO 2021 states: “Biomass-based diesel, for the most part, tracks overall diesel demand. Biomass-based diesel is supported by policy including the renewed

biodiesel mixture tax credit, and so it is likely to continue to gain market share through 2050. EIA projects diesel demand in the Reference case to almost return to pre-COVID levels in 2021, but never quite reach 2019's peak. (page 31)

- EIA expects biodiesel to grow slightly, maintaining a steady level of production through 2050. Several new renewable diesel plants have been announced this year, both domestically and overseas. A few domestic refineries have shuttered to convert to renewable diesel production, or they have made plans to do so in the near future, contributing to projected increases in renewable diesel supply.” (page 31)

EIA said that biomass diesel is the driving factor in the projected rise in biomass-derived liquid fuels to 2030 (The graph above was provided to ITTA by EIA and contains the data from Table 11): “There have been several announcements of new renewable diesel plants within the past year, and so with the added capacity coming online in the near-term, we see renewable diesel driving that growth in ‘other biomass-derived liquids.’”



EIA further stated, “Prices do play a role, as the model is a linear program that makes decisions based on what is economic. For example, if you look at the side cases, you can see the effect that oil price has on renewable fuel. In the High Oil Price scenario, higher prices for diesel make biofuels more competitive. However, in the Low Price scenario, the biodiesel remains relatively unchanged, as it is supported by regulations such as the Renewable Fuel Standard or California’s Low Carbon Fuel Standard. In the model, the RFS is a minimum level that must be met, requiring a certain level of renewable fuel—so policy mandates do play a large role in determining biofuels levels.”

**Jet Fuel:** Our EIA contact confirmed that EIA does “not explicitly track projections for domestic jet fuel production.” However, EIA does provide a long-term proxy measure for jet fuel consumption in term of “product supplied.” According to EIA’s AEO2021 Excel data file for Table 11 (Reference Case), domestic product supplied of jet fuel (kerosene type only) is expected to increase from 1.08 mb/d in 2020 to 1.54 mb/d in 2021. Beyond 2021, jet fuel product supplied is expected to increase to 1.70 mb/d in 2026, 1.82 mb/d in 2033, 1.90 mb/d in 2037, 2.01 mb/d in 2042, and 2.19 mb/d in 2050.

## B. American Petroleum Institute (API)

ITTA contacted **Andrew Van Eyck** of the **American Petroleum Institute**. However, API declined to comment based on the sensitivity of some of the questions. The information in this section is based on official API statements, additional information provided by EIA, and ITTA's own research and insights.

*What is the import / export scenario of Venezuelan crude oil and Iranian crude oil due to the change of government?*

**Outlook for Venezuela:** During the 2020 election, then-candidate Biden criticized the Trump Administration's sanctions policy as ineffective in forcing political change in Venezuela, but effective in harming the people of Venezuela. Despite this criticism, the Biden Administration's policy toward Venezuela is largely similar regarding sanctions and the political changes it expects to see in Caracas.

- In ITTA's assessment, the Biden Administration will continue to maintain harsh sanctions that have blocked virtually all Venezuelan oil exports to the U.S. market by banning U.S. entities from entering into financial transactions with Venezuelan state-owned oil company **PDVSA**. The Biden Administration also recognizes **Juan Guaido** as the interim president in continuity with the previous administration's policy.
- During a White House background briefing for the media on March 8, an unnamed senior Biden Administration official said that President Biden "is in **no rush to lift sanctions**" and that "the United States is going to continue to increase the pressure, and it is going to expand that pressure multilaterally" until the government of President **Nicolas Maduro** restores U.S. confidence by opening genuine "good faith" dialogue with domestic political opponents that leads to "free and fair elections."
- The senior administration also stated, "As I said before, there is no rush to lift sanctions, and—you know, unless the Maduro regime demonstrates that it is ready to sit down at the table and takes measures that demonstrate to the international community, to the Venezuelan interim government that this time is going to be different." (<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/press-briefings/2021/03/08/background-press-call-by-senior-administration-officials-on-venezuela/>)
- Also, on March 8, the Biden Administration announced that it granted temporary protected status to Venezuelans already living in the United States for 18 months, a bipartisan request from elected officials representing southern Florida regions. The Trump Administration ignored this request during its tenure. The order will affect up to 340,000 Venezuelans currently living in the United States.

Until the Maduro government demonstrates a genuine commitment to political reform that is endorsed by the international community, the Biden Administration will continue to maintain oil sanctions on Venezuela.

- The changes the administration needs to see are (1) Maduro's engagement with opposition leader Guaido and his followers in the Venezuelan Congress and (2) acceptance of an international monitoring of free and fair elections.
- In our observation, there have been no official statements indicating that Maduro or Guaido are ready and willing to commence dialogue. At this time, they are locked in a sustained impasse.
- Until the political situation in Caracas starts moving in the direction Washington wants to see it go, U.S. sanctions on Venezuelan oil exports will remain in effect.

**Outlook for Iran:** Iranian crude oil production has fluctuated during the past 30 years, between 3.0 and 4.0 mb/d. Iran maintains the potential to produce up to 4 million barrels per day of crude oil. Some forecasts indicate that Iran could increase its crude oil production to over 4 mb/d by 2023 if U.S. sanctions were lifted.

- The volume of Iranian crude oil exports has fluctuated greatly from a high of 900,000 b/d and a low of 100,000 b/d per month since the restoration of U.S. sanctions in 2018.
- To break free from U.S. sanctions, recent reports indicate that Iran has approached Asian refiners to gauge interest in its crude oil.
- While the countries of actual interest are unclear, China, India, Japan, and South Korea all are previous major buyers of Iranian crude oil.
- Recent reports based on independent assessments say that in January 2021, Iranian oil exports increased despite U.S. sanctions, from an estimated 490,000 b/d in October 2020 to 710,000 b/d in January 2021.
- This monthly variation makes any prediction concerning Iranian crude oil exports difficult to make as long as U.S. sanctions remain in effect. Another uncertainty is how strongly the Biden Administration will enforce U.S. sanctions.

Iran has adopted several methods designed to bypass U.S. sanctions to sell its crude oil in foreign markets: smuggling, transponder tampering, and lightering.

**Smuggling:** Iran continues to export small quantities of crude oil to foreign markets via countries attempting to bypass U.S. sanctions, including China.

- China remains Iran's major customer and may have 30 million barrels of unrefined Iranian oil for use as domestic demand increases.
- In December 2020, China imported 9.06 million b/d of crude oil from all sources, a decline from 11.04 mb/d in November, but continues to stockpile crude oil.
- The 2021 Chinese oil import quota increased 18 percent from 2020, which coincides with Iran's reported efforts to increase oils sales in 2021.
- Official Iranian-sourced crude oil imports to China are nearly zero, but unofficial arrivals have increased significantly. During 2020 through February 2021, China secretly imported an average of 306,000 b/d of crude oil from Iran, according to recent reports.

- Iran shipped 60,000 b/d for the first five months of 2020 through to China through channels in Malaysia, with the latter providing falsified paperwork that may explain the \$500 million/month shortfall in Kuala Lumpur's official export values.

**Transponder Tampering and Lightering:** Iranian shippers routinely shut down their transponders and engage in ship-to-ship transfers to conceal crude oil origins.

- On January 24, 2021, Indonesian coast guard units intercepted and seized Panamanian-flagged, *MT Freya* and Iranian-flagged LVCC tankers transporting Iranian crude oil. The vessels had shut off their transponders. The Iranian-flagged *MT Horse* was nearly full.
- During 2020, Iran delivered at least five vessels filled with gasoline to Venezuela, also through the disabling of transponders.
- On January 27, Liberia-flagged *Achilleas* VLCC was seized by the United States after having been discovered with Iranian oil. It underwent lightering via a UAE port and was en route to Muscat, Oman.

*What is the outlook for the return to SAFE standards or CAFE regulations and the impact on demand for gasoline and diesel fuel (including trends in California)?*

API has not yet articulated a clear public stance/position on the Biden Administration's efforts to revise the Safer Affordable Fuel Efficient (SAFE) Vehicle and Corporate Average Fuel Efficiency (CAFE) regulations given the sensitive nature of *ongoing* discussions among stakeholders.

**Outlook for the SAFE Vehicle Rule:** On January 20, 2021, President Biden issued Executive Order (EO) 13990 ("Protecting Public Health and Environment and Restoring Science to Tackle the Climate Crisis"), calling for a review of Trump-era environmental regulations deemed inconsistent with policies advocated to address climate change.

- The Biden EPA is now working on a legal and regulatory strategy to revise and strengthen the Trump-era Safer Affordable Fuel Efficient (SAFE) Vehicles Rule.
- **Legal Strategy:** On February 1, 2021, the Environmental Protection Agency (EPA) and the **National Highway Traffic Safety Administration** (NHTSA) asked the federal court overseeing the SAFE Vehicles Rule lawsuit to pause the litigation as the agencies work to implement EO 13990.
- **Regulatory Strategy:** According to EO 13990, the EPA/NHTSA are directed to revise Part 1 of the SAFE Vehicles Rule by **April 2021** and Part 2 by **July 2021**.

**Outlook for the CAFE Rule:** In ITTA's assessment, it is possible that the Biden Administration may adopt the voluntary fuel efficiency standards reached by California and six automakers in August 2020.

The California agreements aim to achieve Obama-era fuel economy standards in 2026, rather than in 2025 as originally proposed under Obama.

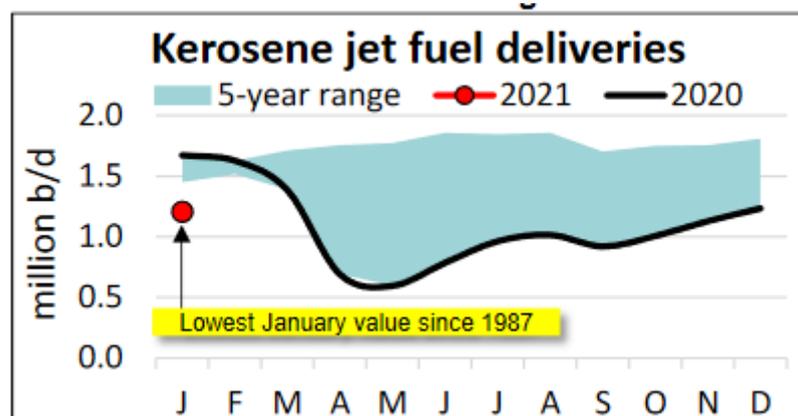
- This amounts to an average fleet-wide fuel economy of 54.5 miles per gallon (MPG) by 2026.

- Notably, though, the fuel economy standards set under the SAFE Vehicles Rule and under the California agreement only extend to 2026.
- The Biden Administration will need to set new standards that extend beyond 2026 – an effort that could take years and encounter significant legal challenges.

It is difficult to forecast the impact on fuel demand from regulations that are likely to be changed in ways that are currently unclear. EIA’s Annual Energy Outlook 2016 (AEO2016) published its last detailed assessment of the impact of CAFE rules on U.S. gasoline demand:

- “With corporate average fuel economy (CAFE) and greenhouse gas (GHG) emissions standards included in the Reference case, new light-duty vehicles (LDV) average 47 miles per gallon in 2025. The improvement in vehicle efficiency more than offsets an increase in total LDV vehicle miles traveled (VMT), which leads to a decline in motor gasoline consumption.”
- “In contrast, diesel fuel consumption continues to grow as VMT increases because of a smaller fuel efficiency improvement in freight trucks than in LDVs. Consumption of diesel fuel grows by about 0.7 million barrels per day (b/d) from 2015–40, while motor gasoline consumption falls by 2.3 million b/d.”

*Due to the impact of COVID-19, jet fuel is oversupplied all over the world. What about the demand for jet fuel in the United States?*



API publishes statistical reports based on its own data (not EIA) concerning consumption of refined fuels. However, API only makes a small number of these reports readily available to the public.

- According to API’s **Monthly Statistical Report for January 2021**, “Distillates/diesel fuel demand also exceeded its year-ago level, but motor gasoline, jet fuel and residual fuel oil each decreased year-on-year by double-digit percentages.” (page 1)
- Kerosene-type (K-type) jet fuel deliveries were 1.207 mb/d in January 2021, “which was an unusually mild seasonal decrease of 2.3 percent from December but 27.9 percent below the level of January 2020 [1.673 mb/d]. This was consistent with high-frequency data from **Flightradar24** that showed a drop-off in flights from December as well as a continued gap versus activity in January 2020.” (Page 3)

- According to the reports statistical table, U.S. refinery production of K-type jet fuel was 1.248 mb/d in January 2021 compared to 1.855 mb/d in January 2020, a decrease of 32.7 percent. (page 8)

Please see the attached PDF copy of API's Monthly Status Report for January 2021. Flightrader24 data can be accessed at this link: <https://www.flightradar24.com/data/statistics>

*Around the west coast, the business of closing refineries and converting them to biorefinery has begun. Is there a possibility that there will be a shift to biorefinery in other regions in the future?*

API has not published any recent information concerning this issue. However, our own research and our recent conversations with EIA experts offer the following perspective:

- According to EIA contacts, "EIA updates production capacities for biodiesel, renewable diesel, ethanol on an annual basis, but tracking for biodiesel is new and only goes back to 2019."
- "As far as EIA's forecasts are concerned, they are based on an assessment of industry production facilities, actual and planned. EIA's forecast model also includes supportive policies: Renewable Fuel Standard, LCFS (California only), and the biomass-based diesel blender tax credit, which goes through 2022."

According to ITTA research, some refinery companies have announced plans to convert existing refineries into renewable diesel facilities. These facilities include:

- **HollyFrontier:** In June 2020, the company announced plans to convert its Cheyenne, Wyoming refinery into a renewable diesel plant by 2022.
- **Marathon Petroleum Corporation:** In August 2020, MPC said it would convert two of its refineries into renewable diesel plants: The 166,000-b/d refinery near Martinez, California, and its 19,000-b/d refinery in North Dakota by the end of 2020.
- **Phillips 66:** In August 2020, the company announced plans to convert its 120,000-b/d Rodeo refinery near San Francisco, California, into the world's largest renewable fuels plant by 2024. This plant will produce diesel, gasoline, and jet fuel from renewable sources of feedstock.

In our assessment, the effort to convert existing refineries in California is not surprising due to that state's LCFS policy. Policies of this type are absent in the Gulf Coast refinery region, which probably explains why there has been no similar trend in that area.

*Shell has announced that they will sell or close their refineries in the future. What does the API think of Shell's environmental strategy?*

This is a very sensitive topic for API due to the fact that Shell is 'unhappy' with API's positions on climate policy, which tend to adhere more to the wishes of large, influential U.S. API members like **ExxonMobil** and **Chevron** in contrast to the views of the large European members like **Shell** and **BP**.

- In January 2021, just two days after API released its annual report, **Total** terminated its membership due to a clash of views over climate policy, specifically API's past opposition to carbon pricing and the regulation of methane emissions. Total's corporate strategy is now focused on transforming the company into a major seller of renewable energy.
- After withdrawing from API, Total CEO **Patrick Pouyanné** stated that his company "acknowledges the API's considerable contribution, for over a century, to the development of our industry. Nevertheless, as part of our Climate Ambition...we are committed to ensuring, in a transparent manner, that the industry associations of which we are a member adopt positions and messages that are aligned with those of the (company) in the fight against climate change."

Reports at the time indicated that the Shell and BP felt similar frustrations over API's stance on climate change policy, but the companies decided to remain in API to try and influence the organization to adjust course on climate policy.

- On February 11, 2021, Shell announced a new policy designed to phase out oil production and reduce output of traditional fuels by 55 percent by 2030 and to reduce net carbon intensity 45 percent by 2035 and 100 percent by 2050.
- On February 26, API released a statement on the social cost of greenhouse gas emissions, expressed interest in working with the Biden Administration's interagency group focused on finalizing relevant regulations, and stated its support for the "direct regulation of methane for new and existing sources."

Please see the attach MS Word copy of API's statement of February 26, 2021, for details.

### **C. American Association of Fuel Petrochemical Manufacturers (AFPM)**

ITTA contacted **Susan Grissom**, Chief Industry Analyst, for American Fuel and Petrochemical Manufacturers. Ms. Grissom referred us to AFPM statements, interviews and annual reports on these issues. The information in this section combines official AFPM statement and comments as well as additional relevant information from EIA and API.

*Shale oil is too light for the PADD3 refineries. On the other hand, Venezuelan crude oil cannot be imported due to the economic sanctions. Will the imports and exports trends of U.S. crude oil and petroleum products change in near future?*

AFPM does not publish any assessments or statements concerning the availability, or lack thereof, of imported crude oils. However, contacts at EIA offered the following thoughts in response to this question:

- “It can be hard to isolate the changing trends in the refinery industry right now because of the obvious ‘COVID elephant in the room,’ which has imposed substantial downward pressure on refinery runs through the course of the year. The lower runs number also translates to reduced crude oil imports.”
- “Taking a quick look at the data, it looks like Canada and Mexico are still the major suppliers of U.S. crude oil in 2020, and heavy-grade imports by region to PADD 3 are still most heavily weighted to Canada and Other Americas. In the case of Canada, it may also be worth noting that, while pipeline volumes remain a politically contentious issue, a large volume of Canadian crude oil still reaches the U.S. by rail.”
- Outside Canada and Mexico, the trade press reports that Brazil, Colombia, and Ecuador may also be potential sources of replacement heavy crude in the absence of Venezuelan imports, but EIA data does not necessarily show an increase in topline import volume or percentage shares for these countries in 2020.”
- “The pattern same holds true for Russia that total crude imports decreased on both an import volume and share of imports basis. Still, that may be more due to the topline reduction in crude oil demand due to COVID-19 than any issue with the viability of those crudes as feedstock.
- “There is also the possibility of blending unfinished heavy gas oils and residuum with lighter crude grades to reach a target gravity. While heavy gas oil refinery net inputs decreased on average in 2020, residuum inputs increased, and Russia remained the largest supplier of residuum in 2020.”

*Due to the impact of COVID-19, jet fuel is oversupplied all over the world. What about the demand for jet fuel in the United States?*

AFPM also does not make any public forecasts concerning petroleum demand. However, in an interview with Susan Grissom published on October 20, 2020, she stated the following about the anticipated recovery of demand for refined fuel products:

**Question:** *What about the arguments that the COVID-19 pandemic has kickstarted an irreversible decline for refined products?*

*Susan Grissom: The COVID-19 pandemic has precipitated significant, but transitory, changes in fuel consumption, eliminating some gasoline and diesel demand and a great deal of jet fuel demand — but the world will evolve from this point.*

- *The argument that this is somehow a “new normal” is not reasonable. As Valero CEO Joe Gorder recently stated, the way we’ve all been living for the past six months is not the way most people want to continue living. Once the underlying driver of the pandemic has been ameliorated, it’s reasonable to believe that most people will largely return to their pre-pandemic lifestyle preferences.*
- *Moreover, changes associated with COVID-19 haven’t led to major shifts in consumer demand from refined fuels to alternatives. Rather, because people have not been moving around in vehicles as much in recent months, less energy has been consumed for transportation. That said, EIA data show gasoline and diesel consumption have returned to more than 90 percent of pre-COVID levels. So, gasoline and diesel demand are coming back — and we’re not even driving to work and school like before.*

Please see the attached PDF copy of Susan Grissom’s October 20, 2020 interview.

*In consideration of the improved fuel economy of internal combustion engines and the widespread use of electric vehicles, when do you expect U.S. gasoline demand to peak?*

As best we could determine, AFPM has not published any predictions concerning peak U.S. gasoline demand. However, in AEO2021, EIA forecasts that motor gasoline consumption in the U.S. transportation sector will peak in 2022:

- “Because most light-duty vehicles [LDVs] have internal combustion engines, motor gasoline remains the major transportation fuel through 2050 as personal travel returns to pre-pandemic per-driver levels in the longer term.” (24)
- “After pandemic response-related demand losses in 2020, consumption of motor gasoline in transportation peaks in about 2022 as fuel economy improvements partially offset travel growth. Motor gasoline use slowly trends lower thereafter as a result of further fuel economy improvements in new LDVs relative to travel growth, as well as increasing sales of energy-efficient alternative-fueled vehicles that further displace motor gasoline use.” (24)
- In contrast, EIA “projects diesel demand in the Reference case to almost return to pre-COVID levels in 2021, but never quite reach 2019’s peak.” (30)

*Has COVID-19 changed the investment trend for the petrification shift of refineries and the construction of new ethylene plants?*

AFPM’s annual report for 2020 discusses the petrochemical industry some detail. It did not make any predictions concerning the deployment of new ethylene plants. However, the report makes several statements relevant to the current state of the U.S. petrochemical industry and presents a brief outlook for the future:

- “Ethylene and propylene are the two most in-demand of the six primary petrochemicals. Together they account for nearly two-thirds of the global

petrochemical demand. The United States today is the undisputed leader in global ethylene capacity with 20% of the total market and will remain a net producer as planned U.S. projects come online. Since 2015, we've been a net exporter of ethylene and are expected to remain so for the foreseeable future." (page 9)

- "The United States produces about 16% of global propylene capacity, second only to China. Although produced in much smaller quantities, we are also net exporters of toluene and xylene, with 14% and 7% of global capacity." (page 9)
- "In 2019, there were 32 active and completed petrochemical projects in the United States, with investments of \$14 billion. Additional investments are planned, which through 2021, total over \$29 billion.<sup>8</sup> As this construction ramps up and new facilities open, thousands of new jobs will be created." (page 10)
- AFPM expects U.S. total petrochemical capacity growth to increase from 89 million metric tons in 2019 to 96 million metric tons in 2027. (page 10)

Please see the attached PDF copy AFPM's **2020 Annual Report** for details.

In contrast to AFPM, API's quarterly industry outlooks occasionally present aggregate data concerning the deployment of new petrochemical plants. In its Industry Outlook for Q1 2020, API assessed that there were 36 petrochemical projects under construction worth an estimated \$108 billion. In its most recent Industry Outlook (Q4 2020), API presented the same data for petrochemical plants.

Please see the attached PDF copies of **API's Industry Outlooks** for Q1 and Q4 2020 for details.

## **D. Major Oil Company: Chevron**

ITTA contacted **Jason Larrabee**, Manager, Federal Affairs, Downstream & Chemicals, at Chevron's Washington office. However, Jason Larrabee is a government affairs specialist who was not necessarily competent to discuss detailed questions concerning the refinery adaptations to the decline in jet fuel demand, the deployment of advanced digital and automation technologies at Chevron refineries, or the plans of Chevron's competitors concerning the deployment of biorefineries.

Moreover, on March 9, Chevron CEO **Michael Wirth** announced significant changes to the company's corporate strategy: "higher returns, lower carbon."

- Overall, Chevron plans to increase its oil and gas output 20 percent by 2025 to about 3.7 mb/d, featuring an aggressive increase in its Permian Basin business toward 1.0 mb/d.
- Chevron intends to spend about \$3.5 billion per year in its U.S. shale assets, which is more than the \$2 billion it plans to spend on low carbon technology through 2028.
- Chevron's low-carbon strategy is focused on stripping carbon out of its oil and gas production by increasingly powering operations with renewables, reducing methane emissions, and gas flaring.
- Chevron is also funding several early-stage low carbon technologies, including carbon capture and sequestration (CCUS).

Please see the attached MS Word copy of Chevron's March 9 press release and the PDF copy of its **Climate Change Resilience** strategy.

*It seems that the demand of gasoline and diesel fuel in US have almost recovered due to the influence of COVID-19, but how did the refineries respond when the demand for jet fuel decreased?*

Chevron clearly reduced production of jet during 2020, but it did not specify how it adjusted its refinery's output. (See the attached **2020 Supplement** its 2019 annual report for statistical data.)

*What fields are prioritized for the introduction of AI and IoT to refineries (real-time analysis, production efficiency, autonomous driving, labor saving, etc.)?*

Chevron is deploying digital technologies at numerous facilities. The 2020 Supplement to its 2019 Annual Report did not identify any refineries, but noted other examples:

"Through a greater focus on data analytics, the company has been able to gain further insights into its performance. Key focus areas for 2021 and beyond are pursuing further productivity and efficiency opportunities by utilizing cross-functional integrated operations centers, designing and deploying digital technology solutions and advancing data analytics capabilities." (page 12)

In this regard, "Chevron is also investing in digital solutions across the business to increase efficiency at the company's plants, ensure on-time delivery to customers and improve

the customer experience. One example of this work is the ongoing digitalization of the company's marketing and sales tools and processes.” (page 46)

- “Chevron continuously seeks innovative solutions that maximize product value through the entire value chain from wellhead to end customer. The Value Chain Optimization (Optimizer) digital solution is among Chevron's top strategic and digital priorities. The Optimizer leverages an end-to-end cloud-based application that utilizes models with built-in scenario-planning capabilities.”
- “It generates insights that lead to faster planning, accelerated responses to changing market conditions and improved transparency for better-informed trading and contracting choices. This ecosystem helps promote an enterprise-wide forward view of the value chain and enables value-based decisions in real time through the use of interconnected data.” (page 49)

Chevron also highlighted the deployment of digital tools to support operations and project development at multiple sites in 2020:

- “Began piloting a greenhouse gas monitoring tool at the Pascagoula refinery that allows facilities to evaluate impacts of different operational modes and pursue lower-carbon solutions. (page 18)
- “Scaled a heat exchanger monitoring tool to improve heat exchanger performance across 10 business units globally.” (page 18)
- “Implemented condition-based monitoring of electrical assets at Tengiz and enabling remote access to operations and event logs to help identify and prevent power issues at Big Foot, Mafumeira Sul and other key assets.” (page 18)
- “Deployed predictive flow models to help Indonesia avoid oil congealment in pipelines and improve returns.” (page 18)
- “Developed new offshore platform monitoring tools in the Gulf of Mexico, including a new hurricane impact assessment tool to compare forecasts to design conditions.” (page 18)
- “Transformed Chevron's engineering standards from documents into digital knowledge assets enables better workflows for design, fit-for-purpose packaging of specifications for projects, and new analytical capabilities for enhancing compliance, managing changes and applying lessons learned to ensure competitiveness and predictability.” (page 18)

Chevron reported the following concerning its deployment of digital technologies at its **TengizChevroil** joint venture in Kazakhstan,

- Process engineering experts developed a virtual plant model for TCO using ‘virtual tags’ from process simulations to help optimize the processing plants. This model is automatically synced to real-time field data and helps operators proactively capture hidden optimization opportunities.” (page 29)
- “Leveraging proprietary knowledge of flow conditions, TCO completed a multiyear campaign to develop and deploy three-phase separation slug catchers that eliminate the need for downstream crude dehydrators, avoid capital expenditures and

shutdowns associated with construction and improve the operational performance at a high-volume facility.” (page 29)

- “Using data analytics, automated performance monitoring and event notification, operators are enabled to drive better decision making, which has led to increased throughput, optimized maintenance and turnaround scopes and lower-carbon emissions.” (page 29)

Chevron similarly highlighted its digital deployment efforts at the **Wheatstone** LNG and offshore gas field in Australia:

- “Smart Facilities are a key enabler of assets operating more efficiently – and more autonomously – in the years ahead. They rely on digital twin technology to rapidly expose data, relationships, conditions, trends and insights for an operating facility.
- “A digital twin of the Wheatstone platform has been created to optimize the planned 2021 maintenance turnaround. The solution aggregates hundreds of terabytes of data, including laser point cloud surveys, drone-acquired photos, engineering and design systems of record, operational procedures, and equipment and process data collected from tens of thousands of sensors in real time. Comprehensive data integration allows the digital twin to transform essential workflows, such as work orders, the planning of process system isolations, and the management of safety-critical equipment.”
- “The result enables significantly reduced time and effort to plan for the turnaround, eliminating the need for most site visits and vastly improving collaboration between different work teams. Digital twins are positioning Chevron for future sustained success and competitive advantage across the enterprise, enabling the operation of true Smart Facilities with optimized safety, reliability and efficiencies. (page 33)

*Movements to close refineries and switch to biorefinery have begun to appear on the west coast and PADD3. Will such movements expand?*

According to the 2020 Supplement to its 2019 Annual Report: “Chevron continues to innovate to produce lower-carbon fuels, including Tier 3 gasoline, IMO lower-sulfur fuel oil, and renewable diesel blending at the El Segundo and Richmond Refineries in California. In addition, the El Segundo Refinery has modified key units to enable production of renewable fuels from biofeedstocks.” (page 43)

*Is there a possibility that the refinery will introduce technology to convert waste and/or waste plastic into fuel in the future?*

In 2020, Chevron achieved the first U.S. commercial-scale production of polyethylene from mixed-waste plastics using **CPChem**’s advanced recycling technology. However, there no indications in the supplement concerning the conversion of waste plastics into fuel.

- “In October 2020, CPChem announced it successfully achieved first commercial scale production of polyethylene using advanced recycling technology, making it the first company in the U.S. to announce circular polyethylene production at this scale. Advanced recycling, or chemical recycling, converts plastic waste to liquids that can become new petrochemicals, also known as circular polymers.” (page 48)

- “This development is an important milestone for CPChem and could reduce waste from plastics, create innovation, and highlight how plastics can be recycled efficiently and economically. It also supports one of Chevron’s energy transition focus areas by investing in technologies that can deliver low-carbon solutions at a commercial scale.” (page 48)

*How are you going to proceed with CO2 reduction measures at refineries? Is there a possibility that CCUS will be introduced in the future?*

According to the 2020 Supplement to its 2019 Annual Report: “Chevron has invested over \$1 billion in carbon capture and storage projects in Australia and Canada. At Gorgon [Australia], Chevron has sequestered more than 4 million tons of CO<sub>2</sub>, providing valuable insights and experience in designing and operating a commercial-scale carbon storage facility.”

At the **Athabasca Oil Sands Project** (AOSP) near Fort McMurray, Alberta, Chevron holds a 20-percent nonoperated working interest:

- “Bitumen is extracted from the oil sands and transported by pipeline to the Scotford Upgrader near Edmonton, Alberta, where it is upgraded into synthetic oil using hydroprocessing technology.” (page 21)
- “CO<sub>2</sub> emissions from the upgrader are reduced by the Quest carbon capture and storage facilities. In 2020, average net daily synthetic oil production was 54,000 barrels, and carbon intensity was reduced by capturing 188,000 net tons of CO<sub>2</sub> through Quest.” (page 21)
- “Total CO<sub>2</sub> captured through Quest since inception in 2015 is approximately 1.2 million net tons.” (page 21)

In addition, Chevron is moving ahead with plans to deploy a CCUS pilot project at its **Kern River** facility in California and is also working with Singapore on the accelerated deployment of an end-to-end decarbonization process:

- “Over the last decade, Chevron has invested more than \$1 billion in CCUS research, development and deployment. In 2020, Chevron was awarded funding by the U.S. **Department of Energy** to pilot technology that captures CO<sub>2</sub> from post-combustion gas. The technology will be tested at Chevron’s **Kern River** facility in California, where the company plans to design, construct, commission and test a pilot-scale carbon capture plant.” (page 9)
- In March 2020, Chevron completed the pre-Front End, Engineering and Design (FEED) feasibility and design study for this pilot project, a 10,000-ton-per-year carbon capture unit. In June 2020, Chevron commenced FEED work for a field trial and gained DOE funding support. This pilot CCUS project is expected to be commissioned in 2022. (page 20)
- “In mid-2020, Chevron joined a consortium with the **Singapore National Research Foundation** that plans to develop the first end-to-end decarbonization process in Singapore. This collaboration is aimed at accelerating the development of a highly integrated, energy-efficient CCUS system that can lead to a lower-carbon economy and future commercial developments.” (page 9)

## **E. U.S. Department of Energy (DOE)**

ITTA reached out to the following DOE experts at the Bioenergy Technologies Office (BETO), specifically **Alison Goss Eng** on BETO's research efforts in e-fuels and sustainable transportation fuels.

*We are interested in from BETO's Efforts in CO2 Utilization and Plastics, A Circular Carbon Economy, Advanced Algal Systems (AAS). If these technologies are established in future, what percentage of automobile fuel can be replaced?*

DOE's Bioenergy Technologies Office (BETO) does not project the specific amount of automobile fuel replacement from its various programs. That said, BETO does align its R&D activities to achieve the following strategic goals:

- By **2025**, complete projects that will result in 5,000-10,000 gallons of alternative jet fuel for testing in jet engines to contribute to significant net carbon emissions reductions from the aviation industry.
- By **2030**, demonstrate a 30% reduction in per-vehicle petroleum consumption resulting from co-optimized fuels and engines that have increased engine efficiency and use lower life-cycle GHG emissions fuels (>50% reduction from petroleum).
- By **2030**, verify demonstration-scale production of algae-based biofuels at total production cost of \$3 per gallon of gas equivalent (gge) (\$2014), with or without coproducts.
- By **2040**, demonstrate an additional 9%–14% reduction in transportation fleet GHG emissions resulting from the deployment of co-optimized fuels and engines.
- By **2040**, enable large-scale biomass production and conversion that allows biofuels to constitute 25% of the U.S. transportation fuel market.
- By **2040**, through R&D, support replacing 7% of petrochemicals with bioproducts.

Please see attached BETO strategic plan for more detail.

*Are you conducting research and development on renewable liquid fuels other than alcohol, such as e-fuel, as fuels for automobiles?*

DOE's BETO coordinates with other DOE offices (such as the **Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office**) and various national laboratories to conduct R&D on various areas regarding e-fuels.

Notably, **Argonne National Laboratory (ANL)** is relatively active in this research area:

- E-fuels and heavy transportation: ANL researchers are looking at the role that e-fuels can play in reducing emissions from heavy duty transportation in two major ways.
  - First, the researchers are analyzing the e-fuel production process and its impact on the environment and cost. They model the entire process from when electricity is generated to when a gallon or a barrel of e-fuel is

produced. According to ANL senior scientist **Amgad Elgowainy**: “We do modeling to look at how low carbon the e-fuel can be, what the costs will be and what the different costs drivers are to inform DOE and industry stakeholders on whether e-fuels can satisfy their cost and environmental targets, and to guide their R&D and product decisions.”

- Second the researchers are investigating how e-fuels can be used in engines. They determine whether the unique features of the fuel affect engine efficiency, and in turn the carbon intensity of the e-fuels. In this regard, the researchers investigate whether components within the fuel might affect criteria air pollutant emissions such as nitrogen oxides and particulate matter. According to ANL researcher **Doug Longman**: “If e-fuels are in the category of drop-in fuels, consumption of them would be straightforward, but some of these more novel fuels or processes might have a slightly different composition of hydrocarbons, and that’s where we’d get involved to assess combustion performance.”
- CO<sub>2</sub> to ethanol: A research team, led by ANL and Northern Illinois University, discovered a new electrocatalyst that converts CO<sub>2</sub> and water into ethanol with high energy efficiency, high selectivity for the desired final product, and low cost.
  - Because CO<sub>2</sub> is a stable molecule, transforming it into a different molecule is normally energy intensive and costly. However, according to **Di-Jia Liu** (a senior chemist at ANL): “We could couple the electrochemical process of CO<sub>2</sub>-to-ethanol conversion using our catalyst to the electric grid and take advantage of the low-cost electricity available from renewable sources like solar and wind during off-peak hours.”
  - Because the process runs at low temperature and pressure, it can start and stop rapidly in response to the intermittent supply of the renewable electricity.
  - The team’s research benefited from two DOE Office of Science User Facilities at Argonne — the Advanced Photon Source (APS) and Center for Nanoscale Materials (CNM) — as well as Argonne’s Laboratory Computing Resource Center (LCRC).

## F. U.S. Environmental Protection Agency (EPA)

ITTA reached out to EPA experts such as **Sarah Dunham** and **Bill Charmley** (CAFE regulations and SAFE Vehicles Rule).

*What is the outlook for the return to CAFE regulations or continue to SAFE standards?*

President Biden has signaled his intent to review dozens of Trump-era environmental regulations, to include fuel economy standards finalized under the Trump Administration's SAFE Vehicles Rule.

- On January 20, Biden issued **EO 13990** ("Protecting Public Health and Environment and Restoring Science to Tackle the Climate Crisis"), seeking to review Trump-era environmental regulations that are inconsistent with addressing climate change.
- Specifically, EO 13990 directs the EPA to "consider suspending, revising, or rescinding" the Trump-era SAFE Vehicles Rule. In addition, the EPA is directed to "shall consider publishing for notice and comment a proposed rule suspending, revising, or rescinding" Part 1 and Part 2 of the rule.

The Biden EPA, under the new leadership of Administrator **Michael Regan**, is now working on a legal and regulatory strategy to revise the SAFE Vehicles Rule.

- Legal strategy: On February 1, 2021, the Biden EPA and the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) asked the federal court overseeing the SAFE Vehicles Rule lawsuit to pause the litigation as the agencies work to implement EO 13990.
- Regulatory strategy: According to EO 13990, the EPA/NHTSA are directed to revise Part 1 of the SAFE Vehicles Rule by **April 2021** and Part 2 by **July 2021**.

*If it will be return to CAFE regulations, will the regulation value be the same as the one announced in August 2012?*

Discussions at the EPA regarding the *specific level* of potentially new fuel economy standards are currently "*behind closed doors*." Typically, the EPA will not release information on regulatory considerations ahead of schedule (in this case, April 2021 and July 2021).

That said, it is possible that the Biden EPA may consider adopting the voluntary standards reached by **California** and six automakers in August 2020.

- The California agreements aim to achieve Obama-era fuel economy standards in 2026, rather than in 2025 as originally proposed under Obama.
- This amounts to an average fleet-wide fuel economy of **54.5 miles per gallon** (MPG) by 2026.

Notably, though, the fuel economy standards set under the SAFE Vehicles Rule and under the California agreement only extend to 2026. In addition to reviewing fuel economy standards for model years 2021-2026, the Biden EPA will also need to start to consider new

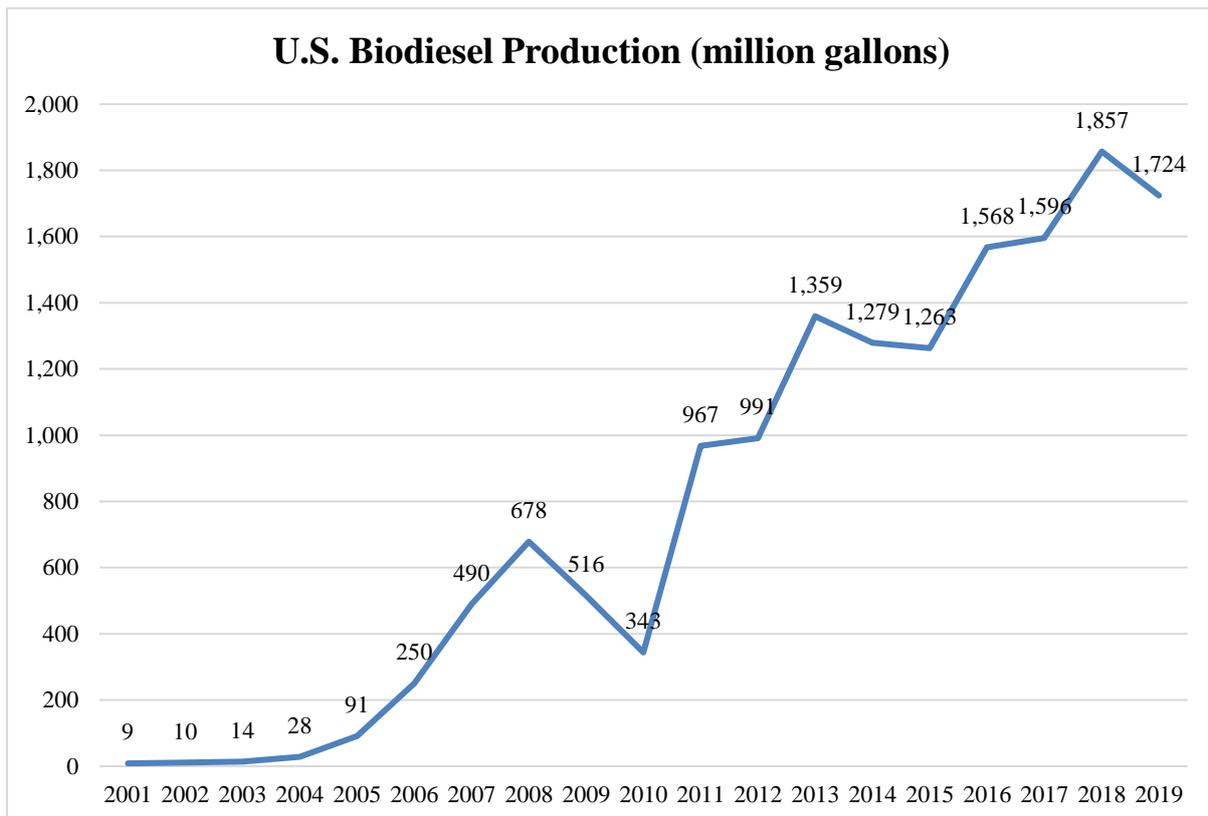
standards that extend **beyond 2026** – an effort that could take years and encounter further legal challenges.

## G. U.S. Department of Agriculture (USDA)

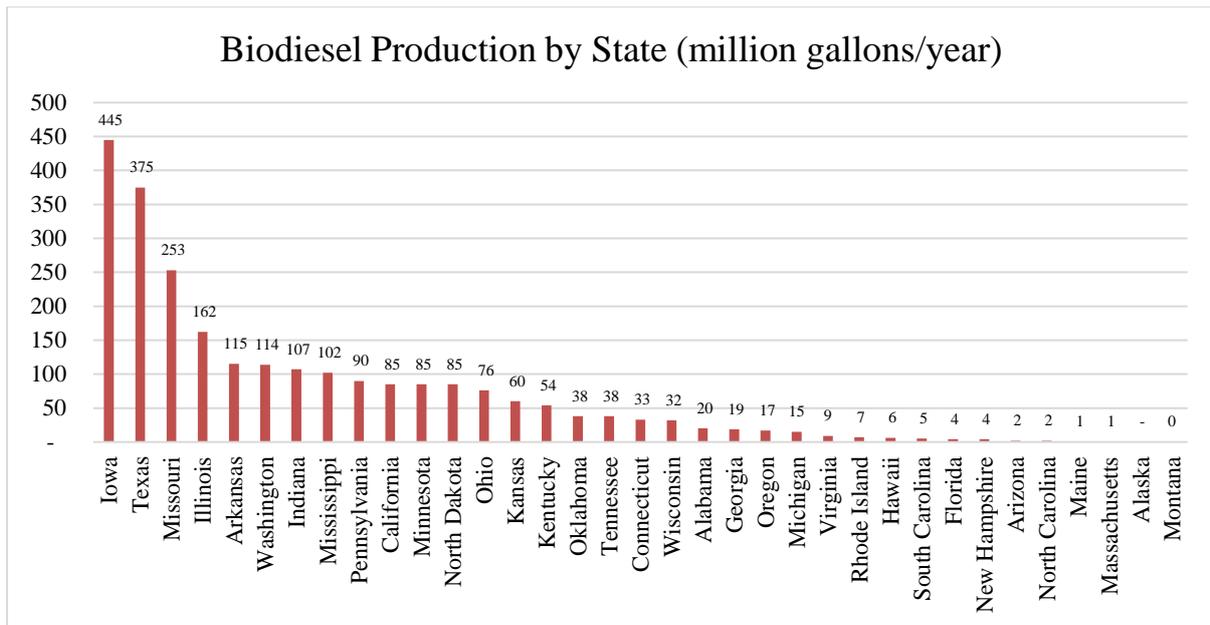
ITTA reached out to USDA experts **Anthony Crooks** (Higher Blends Infrastructure Incentive Program) and **Anthony Radich** (Renewable fuels forecasts and commercialization trends).

*What is the status of domestic production of renewable biodiesel in US and trends in commercialization?*

In 2019, U.S. biodiesel production reached around 1.7 billion gallons, down from 1.8 billion gallons in 2018.



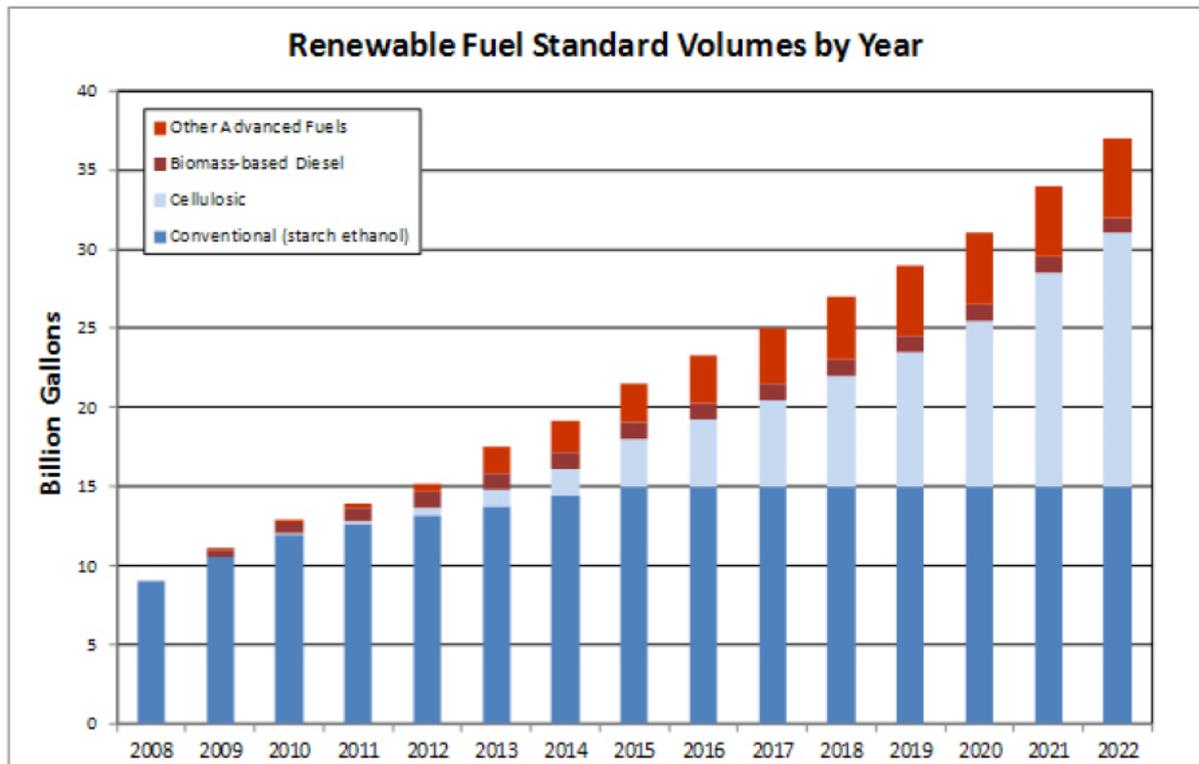
Specifically, **Iowa, Texas, Missouri, and Illinois** are the top leaders in U.S. biodiesel production. At the start of 2020, 91 biodiesel production facilities were in the United States. More than half of the nation's biodiesel production capacity is in the Midwest (Petroleum Administration for Defense District, or PADD, 2), mainly in Iowa, Missouri, and Illinois. Of the top 15 biodiesel-producing states, 9 are in the Midwest, and they have a total nameplate capacity of 1.5 billion gal/year. Most other regions have at least a dozen biodiesel production facilities, except for the Rocky Mountain region (PADD 4).



At the end of 2020, there were four operational renewable diesel plants in the United States: two facilities in **Louisiana**, capable of producing 90 million gallons per year (MMgy) and 275 MMgy, a newly commissioned 184 MMgy plant in **North Dakota**; and a 4 MMgy unit in **Kansas**.

*What is the prospect of increased production of cellulosic biofuels?*

The Renewable Fuel Standard (RFS) is a federal program that requires transportation fuel sold in the United States to contain a minimum volume of renewable fuels, such as cellulosic biofuel, biomass-based diesel, advanced biofuel, and total renewable fuel. The RFS requires renewable fuel to be blended into transportation fuel in increasing amounts each year, escalating to **36 billion gallons** by 2022.



The EPA administers the RFS program and establishes the volume requirements for each category based on legislated volumes and fuel availability. On December 19, 2019, EPA finalized volume requirements under the RFS program for 2020 for cellulosic biofuel, biomass-based diesel, advanced biofuel, and total renewable fuel, and biomass-based diesel for 2021. The final volume requirements are listed in the table below.

Final Volume Requirements					
	2019	2020 Statutory Volumes	2020 Proposed Volumes	2020 Final Volumes	2021 Final Volumes
Cellulosic biofuel (billion gallons)	0.42	10.50	0.54	0.59	n/a
Biomass-based diesel (billion gallons)	2.1	≥1.0	n/a	2.43	2.43
Advanced biofuel (billion gallons)	4.92	15.00	5.04	5.09	n/a
Renewable fuel (billion gallons)	19.92	30.00	20.04	20.09	n/a

Notably, the annual cellulosic biofuel volume target established by Congress is *not* being met. Actual cellulosic biofuel production volumes are below the expectations set when the law was passed.

- For instance, in 2020, the statute requires 10.5 billion gallons of cellulosic biofuel.
- EPA set the 2020 target volume at 590 million gallons for 2020.

- This shortfall is due to several factors, including lack of private investment, logistical challenges, technology setbacks, and uneven support from the federal government.

*What is the status of the higher blends infrastructure incentive program (HBIIP) (especially about the possibility of introducing diesel fuel B20)?*

USDA designed the **Higher Blends Infrastructure Incentive Program** (HBIIP) to increase availability of higher blends of ethanol, such as E15 and biodiesel (B20). USDA will provide up to **\$100 million** in grants to transportation fueling and biodiesel distribution facilities. HBIIP is expected to grow the ethanol market to 15 billion gallons in 2020.

On May 5, 2020, USDA opened the first application window for HBIIP funding. The first application window opened on May 15 and closed on August 13, 2020.

USDA noted the second application window for HBIIP funding opened for 30 days on December 21, 2020 and closed on January 19, 2021.

Approximately **\$22 million** is made available to:

- Fueling stations, convenience stores, hypermarket fueling stations, fleet facilities, and similar entities with capital investments) for eligible implementation activities related to higher blends of fuel ethanol greater than 10 percent ethanol, such as E15 or higher; and
- Terminal operations, depots, and midstream partners, for eligible implementation activities related to higher blends of biodiesel greater than 5 percent biodiesel, such as B20 or higher.

According to Mr. Crooks, USDA does not anticipate any more funding for 2021.

## H. Renewable Fuels Association (RFA)

ITTA reached out to the following RFA experts: **Robert White** (Status and outlook of US renewable fuels) and **Ann Lewis** (Biorefinery conversions).

*Around the west coast, the business of closing refineries and converting them to biorefinery has begun. Is there a possibility that there will be a shift to biorefinery in other regions in the future?*

The reason why so many refineries along the West Coast, particularly in **California**, are converting to biorefineries is because of California's low carbon fuel standard (LCFS). Under the LCFS, low-carbon fuels (such as ethanol, biodiesel, and renewable diesel) generate credits that can be sold to other companies for compliance. Other jurisdictions in the region have adopted similar LCFS policies.

- **Oregon** began implementing a LCFS in 2016. Otherwise known as the Clean Fuels Program, their standard phases in a 10% reduction in the carbon intensity of gasoline and diesel by 2025.
- **British Columbia** began implementing a LCFS in 2010. Their standard phases in a 10% reduction in the carbon intensity of gasoline and diesel by 2020. The province has committed to requiring a 20% reduction by 2030.

In the short-term, it is possible that some refineries outside of western states may be repurposed and converted to biorefineries. So far, for refineries outside of the West Coast, this has been determined on a project-by-project basis. For example:

- **HollyFrontier**: In June 2020, the company announced plans to convert its Cheyenne, Wyoming refinery into a renewable diesel plant by 2022.
- **Marathon Petroleum Corporation**: In August 2020, MPC said it would convert two of its refineries into renewable diesel plants: The 166,000-b/d refinery near Martinez, California, and its 19,000-b/d refinery in North Dakota by the end of 2020.
- **Phillips 66**: In August 2020, the company announced plans to convert its 120,000-b/d Rodeo refinery near San Francisco, California, into the world's largest renewable fuels plant by 2024. This plant will produce diesel, gasoline, and jet fuel from renewable sources of feedstock.

In the long-term, biorefinery conversion *could* expand beyond western states if similar LCFS policies are adopted by other states or if federal tax credits are expanded.

*What are the production trends and future supply outlook for renewable diesel and jet fuel?*

Sustainable aviation fuel (SAF) is a fuel derived from renewable resources that enables a reduction in net life cycle CO<sub>2</sub> emissions compared to conventional fuels.

- SAF is the preferred, now commonly used term for non-petroleum synthesized jet fuel components produced to the definitions in **ASTM D7566**. These fuels were previously referred to as renewable jet fuel, alternative jet fuel, renewable aviation

fuel, alternative aviation fuel, aviation biofuel, biojet fuel, or sustainable alternative jet fuel.

- When SAF is blended with conventional jet fuel, it meets **ASTM D1655**, which allows it to be used in existing aircraft and infrastructure.
- SAF is commercially available and has been used by **United Airlines** at Los Angeles International Airport since 2016 and San Francisco International Airport since 2018. One domestic SAF production facility operates in Los Angeles and several are under construction or planned.
- The United States consumed **2.4 million gallons** of SAF in 2019.
- As of 2018, there was one SAF plant with a capacity of **42 million gallons**. Notably, **World Energy**, which owns five biodiesel plants in the U.S. and two in Canada, announced a \$350 million investment to fully convert a recently acquired refinery in Paramount, California to produce 330 MMgy of renewable fuels including SAF, renewable diesel, renewable gasoline and propane from inedible agricultural wastes. The conversion is scheduled for completion in 2023.

As noted in the EIA's Annual Energy Outlook 2021, U.S. biodiesel production is expected to rise from 110,000 barrels per day (b/d) in 2020 to 130,000 b/d in 2023 and stay at that level throughout the forecast period ending in 2050.

- As of 2018, there were four commercial renewable diesel plants with a combined capacity of **356 million gallons**.
- The United States continues to import renewable diesel, largely from production facilities in **Singapore**.
- Nearly all renewable diesel is used in California due to the state's Low Carbon Fuel Standard.

*Is cellulose ethanol a potential alternative fuel for automotive in the future?*

Currently, cellulosic ethanol production volumes are far below previous estimates and legislative requirements under the RFS. In addition to high production costs, cellulosic ethanol continues to face steep competition from other lower-cost ethanol feedstocks, such as corn starch.

- According to the RFA, corn starch accounts for roughly 94% of U.S. ethanol production capacity.
- Cellulosic biomass accounts for around 0.5% of capacity.

Additionally, cellulosic ethanol production in the U.S. has been heavily dependent on loan guarantees and R&D funding from the federal government. Unless production costs can decline and compete other forms of ethanol, cellulosic ethanol will continue to face commercialization challenges.

We hope that this report is helpful. Please do not hesitate to contact ITTA with any questions or comments you may have.