

令和5年度海運 CO2 排出削減のための燃料転換に関する調査研究

附属書4
(燃料シナリオの詳細設定)

1. 燃料シナリオ全体の考え方

昨年度調査において燃料シナリオの供給量は IEA 提示資料の World Energy Outlook(以下 WEO)の Net Zero by 2050(以下 NZE)シナリオを採用した。しかし、この供給量については需要量相当であると仮定した推計となっているため、厳密には供給可能ポテンシャルの値としてふさわしくないと判断した。よって今年度は特に海運燃料として利用可能と考えられるバイオ燃料を原料供給可能量の観点から供給ポテンシャルと入手性の上限を設定すると共に、該当燃料について複数のシナリオを設定することとした。

一部燃料区分の追加と、主にバイオ燃料における原料量・供給量とコストの関係については後述する。

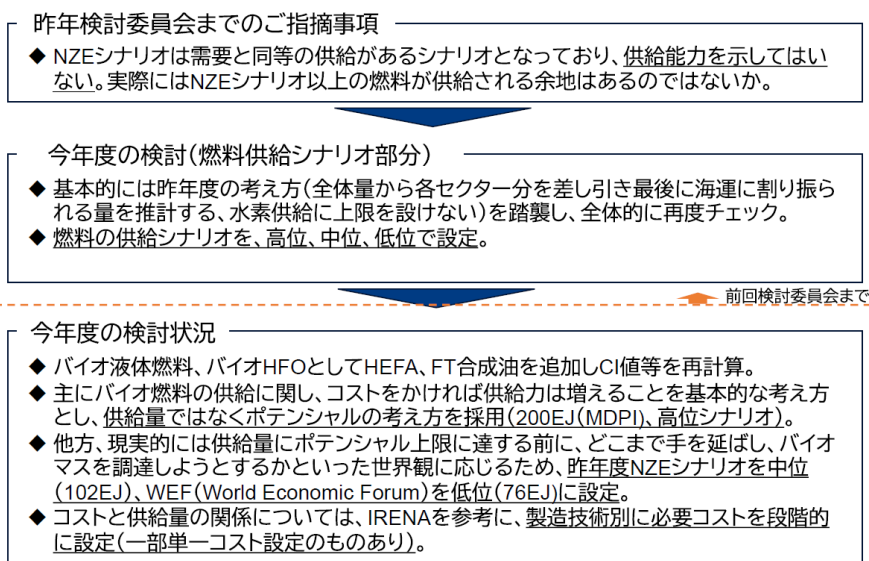


図 1-1 本年度検討の燃料シナリオ全体の考え方

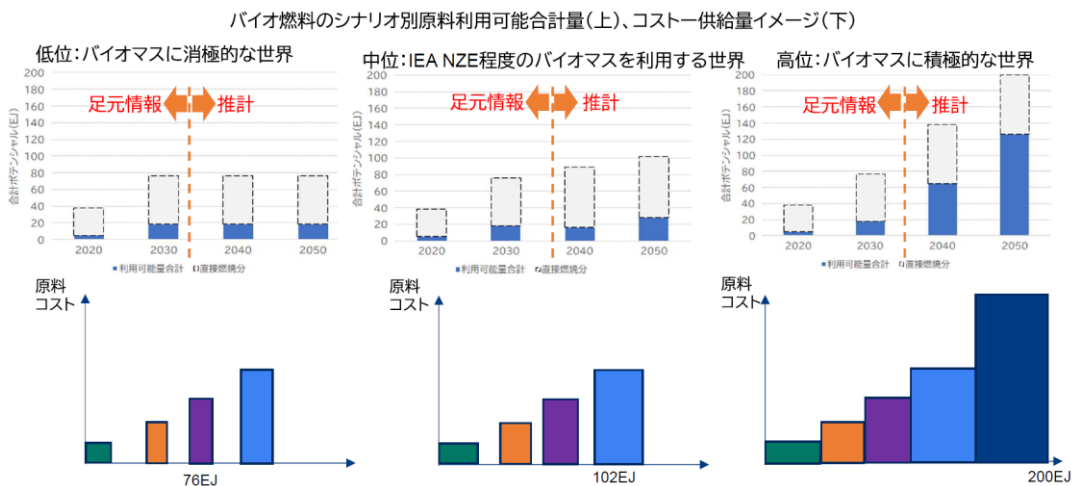
2. 供給ポテンシャルに関する検討

2.1 今年度の検討(高位、中位、低位の考え方)

前述の通り今年度調査ではバイオ燃料の供給量を高位、中位、低位と複数シナリオ検討するにあたり、その意味するところは受け手によってイメージが異なる可能性があることから、以下のように世界観を設定した。また各シナリオの違いはバイオ燃料の入手性(アベイラビリティ)のみで、存在するポテンシャルは World Bioenergy Association(以下 WBA)でエネルギー用途として回収可能と見込まれているバイオマス原料量200EJで共通とし、2050年までに各シナリオでどこまでバイオマスを利用しようとする世界かを設定した。

- 高位:世に存在するバイオマス資源を最大限の投資をもって調達・利用しようとする世界。
- 中位:IEA NZE シナリオを実現する際に必要なバイオマスは使用する、調達する世界。
- 低位:IEA NZE より少量のバイオマスを利用し、ネットゼロ達成のために水素・アンモニアにより依存する世界。

バイオ原料別のコスト区分については後述する。一方で、水素・アンモニアは昨年度検討同様制約をシナリオ間共通で設けないこととし、合成燃料は水素側の制約を設けず、原料CO₂をバイオ燃料固定排出源由来、産業/工場由来、DAC 由来から取得するものと設定した。



※破線枠は直接燃焼分を示し、バイオ燃料には使用不可、コスト別量についてはイメージであり詳細は 2.2.2(6)(7)にて記載。

図 2-1 バイオ燃料のシナリオ別原料利用可能合計量

出所)World Economic Forum(以下 WEF)、IEA WEO、WBA、IRENA 資料等より MRI 作成

2.2 燃料シナリオ概要(更新版)

本年度検討における複数シナリオの前提条件を下表に記載した。

表 2-1 本年度検討におけるシナリオ設定

| 項目 | 試算方法・考え方・設定方法等 | 低位 | 中位 | 高位 | |
|-----------------------|--|--|--|------------------|--|
| 対象燃料* | LSFO、LNG、HEFA(バイオディーゼルと共通)*、FT合成油*、バイオメタン、バイオメタノール、合成メタン(ブルー/グリーン)、合成メタノール(ブラウン/ブルー/グリーン)、液化水素(グレー/ブルー/グリーン)、アンモニア(グレー/ブルー/グリーン) | | | | |
| 燃料供給ポテンシャル(燃料入手性シナリオ) | 考え方 | ((各原料利用可能量)-(直接燃焼分))×(燃料種別変換率) | | | |
| | 原料利用可能量 | 足元はIEAデータより38EJ程度 全シナリオの2030年値は76EJ程度 2050年値は右記で線形増加 | World Economic Forum(以下WEF) 76EJ | IEA NZE 102EJ | MDPI, Biomass Potential and Utilization in Worldwide Research Trends 下限値200EJ |
| | 直接燃料分 | IEA NZEシナリオの固体利用分を想定 | IEA NZE (2030年以降横ばい) | IEA NZE | |
| | 燃料変換率 | ICCT(HEFA、FT合成油)、ETSAP(ガス化メタノール合成)、JEFMA(メタン発酵)等の文献から設定 | | | |
| | コスト別設定 | IRENAカーブ、IEAに基づき利用可能総量76EJ、102EJを境目に、各原料のコストを階段状に切り分け該当コストに該当する利用可能量を試算。原料102EJ以上の水準の高コスト原料は高位シナリオでの利用可能。 | | | |
| | 水素・アンモニア・合成燃料 | 考え方 | ブラウン合成メタノール・グレー水素・グレーアンモニアのポテンシャルは設定しない。 | | |
| | 水素 | ブルー/グリーン水素ポテンシャル合計値は制約なし。 | | | |
| | アンモニア | ブルー/グリーンアンモニアポテンシャル合計値は制約なし。 | | | |
| | 合成燃料 | 原料CO2はバイオ液体燃料利用固定排出源由来、バイオ直接燃焼由来、(産業由来・DAC由来)を想定 | バイオ液体/バイオ直接燃料由来CO2:原料賦存量から計算 産業由来CO2:IEA NZE DAC由来CO2:IEA NZE | | |
| | 海運分野へ割振り | 昨年度設定方法((全セクター量)-(産業・民生等や陸上輸送・航空輸送分)の余り分)を踏襲。分野の排出量は国際機関データを参照し、設定 | | | |
| 燃料コスト | CAPEX、OPEXや電力単価、水電解費用、原料輸送額等を積上げた設定方法を踏襲。 | 大まかな考え方は共通。昨年度データ踏襲、電力排出係数等はIEA NZEシナリオベースにし、 | | | |
| WtW値(TtW/WtT) | 燃料製造プロセススペースの工程別積上を行った昨年度の設定方法を踏襲。原料H2等・投入エネルギーの単位炭素強度を供給ポテンシャル採用シナリオを踏まえて設定。 | ●バイオ燃料の原料コストはIRENAカーブを参考にポテンシャル増加に伴うコスト階段を原料別に設定。 ●HEFA/FT合成油のWtWはCORSIAを採用。 ●合成燃料の産業由来・DAC由来のCO2コストはIRENA設定 | | | |

原料ポテンシャルを踏まえた燃料の供給量のシナリオを設定した燃料は下記の通り。

- バイオ燃料
 - HEFA(バイオディーゼル) ←カテゴリー新規追加
 - FT 合成油 ←カテゴリー新規追加
 - バイオメタン
 - バイオメタノール
- 合成燃料
 - 合成メタン(ブルー/グリーン)
 - 合成メタノール(ブラウン/ブルー/グリーン)

HEFA と FT 合成油はバイオディーゼルに近い物性を持っているが製造方法が大きく異なるため本年度調査で新たにカテゴリーとして追加した。各燃料のパートにて供給量の試算手法と考え方の詳細を記載する。

水素(グレー/ブルー/グリーン)、アンモニア(グレー/ブルー/グリーン)については制約が大きいと考えられるバイオ燃料の供給上限を設定するため、前述の通り量の制約を設けないものとする。

各燃料のコストと WtW 値(CI 値)については量制約の有無によらず、昨年度調査値に加えて一部追加調査を行った。本報告書では主に昨年度検討からの変更事項について記載するものとする。

2.3 バイオ燃料の供給アベイラビリティ

1) 各バイオマス液体燃料の供給アベイラビリティ推計フロー

各バイオマス燃料種の国際海運分野における供給量推計フローは下記の通り。

- ① 全セクターへの各種バイオマス燃料供給量を試算。各原料利用可能量から直接燃焼分を差し引き、原料種別に各燃料への製造方法別の変換率を乗算したもの。(詳細な考え方は次項目を参照)
- ② 海運以外の分野におけるバイオマス液体燃料需要量を IEA NZE シナリオベースで試算し、その試算結果を全体供給量から差し引くことで、海運への燃料供給ポテンシャルを算定。さらに、海運のうち国際海運分を抽出し、供給ポテンシャルとする。

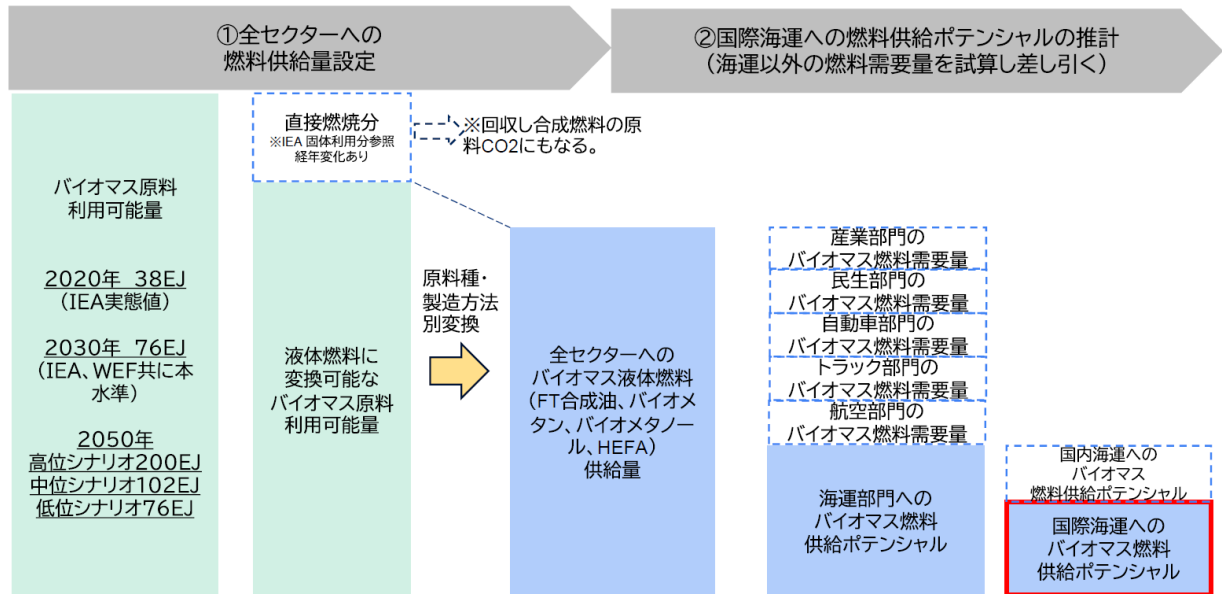


図 2-2 バイオマス液体燃料の供給アベイラビリティ推計の考え方

出所)MRI 作成

2) バイオマス燃料の全セクター供給ポテンシャル試算フロー

昨年度検討においてはバイオメタン、バイオメタノール、バイオ HFO(バイオディーゼルと共通)のポテンシャルは IEA NZE シナリオ数値を参照し、該当需要を満たす量を設定した。今年度は図 2-のフロー図の通り。

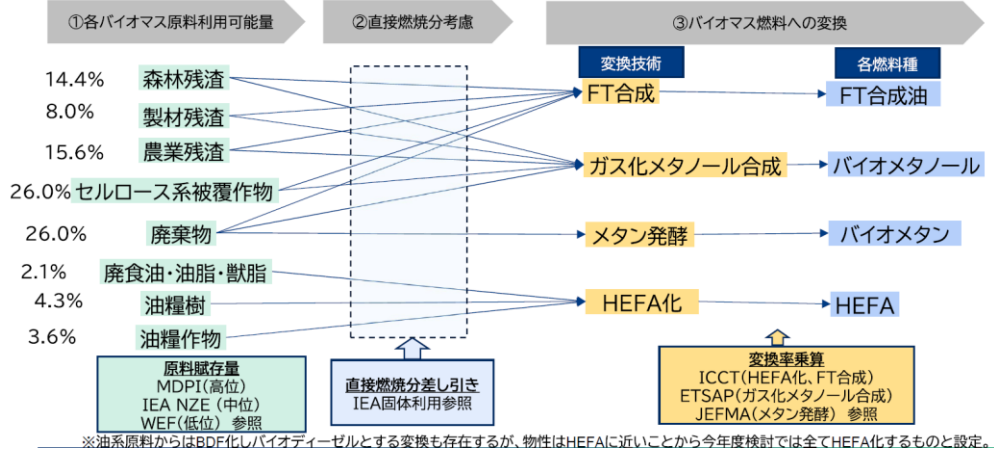


図 2-3 各バイオマス液体燃料の供給アベイラビリティ推計の流れ

出所)MRI 作成

1. バイオマス各原料利用可能量を各シナリオ(高位:WBA 200EJ 中位:IEA NZE 102EJ 低位:WEF 76EJ)から設定(総量のみ判明しているシナリオは各原料への振り分けを下記 WEF の値を参考に按分)

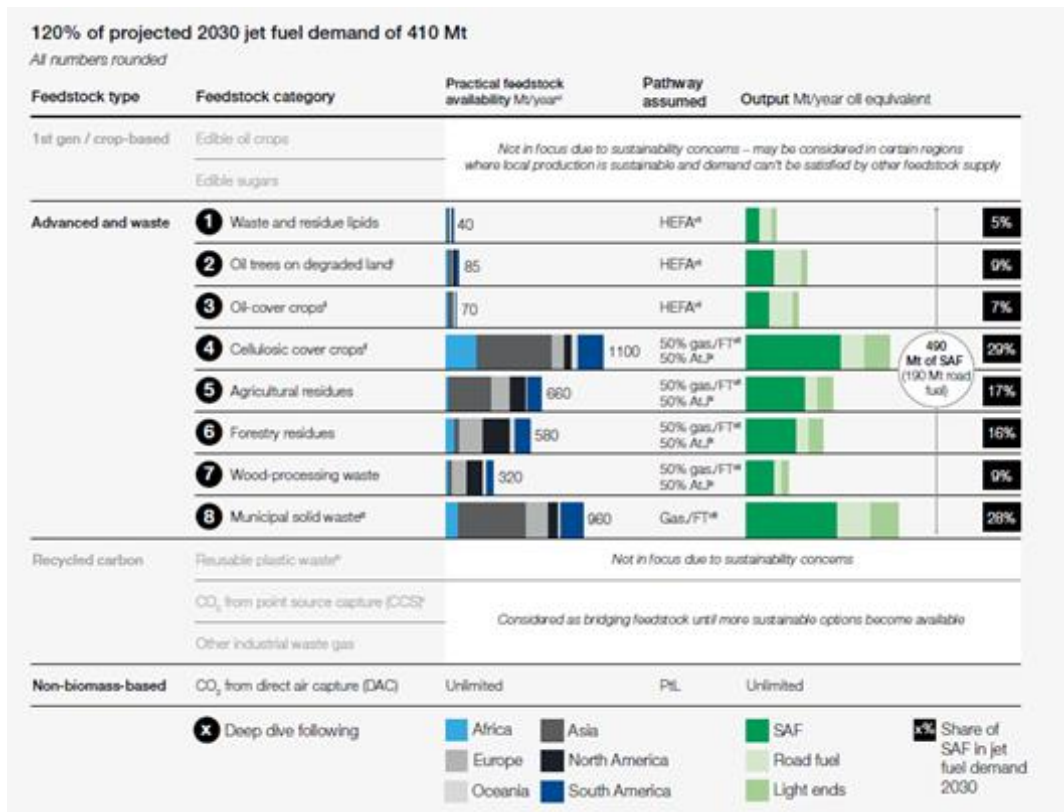


図 2-4 WEF における 2030 年のバイオマスポテンシャルと SAF 製造ポテンシャル

出所)World Economic Forum, https://www3.weforum.org/docs/WEF_Clean_Skies_Tomorrow_SAF_Analytics_2020.pdf

2. 上記のうち固体燃料分・直接燃焼分は IEA NZE シナリオの下記の値を採用し、バイオマス燃料の原料として利用することができないため差し引き。

表 2-1 IEA NZE シナリオにおける固体燃料量

| | Net Zero Emissions by 2050 Scenario (EJ) | | | | | | Shares (%) | | | CAAGR (%) 2021 to: | |
|-------------------------------------|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------|-------------|
| | 2010 | 2020 | 2021 | 2030 | 2040 | 2050 | 2021 | 2030 | 2050 | 2030 | 2050 |
| Total energy supply | 542 | 592 | 624 | 561 | 524 | 532 | 100 | 100 | 100 | -1.2 | -0.5 |
| Renewables | 45 | 69 | 74 | 172 | 307 | 373 | 12 | 31 | 70 | 9.9 | 5.8 |
| Solar | 1 | 5 | 5 | 34 | 87 | 124 | 1 | 6 | 23 | 23 | 11 |
| Wind | 1 | 6 | 7 | 28 | 67 | 85 | 1 | 5 | 16 | 17 | 9.1 |
| Hydro | 12 | 16 | 16 | 21 | 27 | 30 | 2 | 4 | 6 | 3.2 | 2.3 |
| Modern solid bioenergy | 24 | 33 | 36 | 58 | 73 | 74 | 6 | 10 | 14 | 5.5 | 2.6 |
| Modern liquid bioenergy | 2 | 4 | 4 | 12 | 14 | 12 | 1 | 2 | 2 | 12 | 3.6 |
| Modern gaseous bioenergy | 1 | 1 | 1 | 7 | 12 | 15 | 0 | 1 | 3 | 21 | 8.8 |
| Other renewables | 3 | 4 | 5 | 13 | 26 | 34 | 1 | 2 | 6 | 12 | 7.1 |
| Traditional use of biomass | 25 | 24 | 24 | - | - | - | 4 | - | - | n.a. | n.a. |
| Nuclear | 30 | 29 | 30 | 43 | 59 | 63 | 5 | 8 | 12 | 3.8 | 2.6 |
| Unabated natural gas | 115 | 139 | 146 | 105 | 34 | 14 | 23 | 19 | 3 | -3.6 | -7.8 |
| Natural gas with CCUS | 0 | 0 | 0 | 8 | 21 | 27 | 0 | 1 | 5 | 38 | 15 |
| Oil | 173 | 172 | 183 | 143 | 76 | 40 | 29 | 26 | 7 | -2.7 | -5.1 |
| <i>of which non-energy use</i> | 25 | 29 | 31 | 34 | 32 | 29 | 5 | 6 | 5 | 1.1 | -0.2 |
| Unabated coal | 153 | 157 | 165 | 86 | 15 | 2 | 26 | 15 | 0 | -7.1 | -14 |
| Coal with CCUS | - | 0 | 0 | 3 | 13 | 14 | 0 | 1 | 3 | 91 | 29 |
| Electricity and heat sectors | 200 | 228 | 242 | 246 | 311 | 381 | 100 | 100 | 100 | 0.2 | 1.6 |
| Renewables | 21 | 37 | 40 | 107 | 228 | 293 | 17 | 43 | 77 | 12 | 7.1 |
| Solar PV | 0 | 3 | 4 | 27 | 69 | 97 | 1 | 11 | 26 | 25 | 12 |
| Wind | 1 | 6 | 7 | 28 | 67 | 85 | 3 | 11 | 22 | 17 | 9.1 |
| Hydro | 12 | 16 | 16 | 21 | 27 | 30 | 6 | 8 | 8 | 3.2 | 2.3 |
| Bioenergy | 5 | 9 | 10 | 18 | 33 | 38 | 4 | 7 | 10 | 6.5 | 4.6 |
| Other renewables | 2 | 4 | 4 | 13 | 31 | 44 | 2 | 5 | 12 | 15 | 8.9 |
| Hydrogen | - | - | - | 3 | 7 | 7 | - | 1 | 2 | n.a. | n.a. |
| Ammonia | - | - | - | 1 | 3 | 3 | - | 0 | 1 | n.a. | n.a. |
| Nuclear | 30 | 29 | 30 | 43 | 59 | 63 | 13 | 17 | 17 | 3.8 | 2.6 |
| Unabated natural gas | 47 | 55 | 57 | 40 | 1 | 1 | 24 | 16 | 0 | -3.8 | -14 |
| Natural gas with CCUS | - | - | - | 1 | 3 | 4 | - | 0 | 1 | n.a. | n.a. |
| Oil | 11 | 7 | 8 | 2 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | -13 | -17 |
| Unabated coal | 91 | 99 | 107 | 47 | 0 | 0 | 44 | 19 | 0 | -8.6 | -33 |
| Coal with CCUS | - | 0 | 0 | 2 | 8 | 9 | 0 | 1 | 2 | 89 | 28 |
| Other energy sector | 51 | 59 | 61 | 65 | 72 | 75 | 100 | 100 | 100 | 0.6 | 0.7 |
| Biofuels conversion losses | - | 5 | 6 | 14 | 16 | 13 | 100 | 100 | 100 | 10 | 2.7 |
| Low-emissions hydrogen | | | | | | | | | | | |
| Production inputs | - | 0 | 0 | 14 | 41 | 58 | 100 | 100 | 100 | 126 | 35 |
| Production outputs | - | 0 | 0 | 9 | 28 | 42 | 100 | 100 | 100 | 131 | 37 |
| For hydrogen-based fuels | - | - | - | 2 | 9 | 14 | - | 23 | 34 | n.a. | n.a. |
| For other energy sector | - | - | - | 0 | 0 | 0 | - | 5 | 1 | n.a. | n.a. |

出所)IEA, “World Energy Outlook 2022”に MRI 加筆

3. 各原料種量に対してそれぞれ対応した FT 合成油、バイオメタン、バイオメタノール、HEFA に変換可能な製造方法別の変換率を乗算。※なお、各原料から複数の製造方法を選択可能(複数バイオ燃料へ転換可能)な場合、同量ずつ原料賦存量が割り振られると設定。

3) シナリオ別原料ポテンシャル量の考え方

3シナリオ共通で 2030 年までは WEF の2030年合計原料利用可能量相当76EJ まで延伸するものと仮定。2031年以降、中位シナリオ、高位シナリオにおいて原料アベイラビリティはそれぞれ最大102EJ、200EJ と増加するが、2050年に向かって高位シナリオほどバイオマスを積極的に利用する世界になっていくものと考え、安価・高価問わずバイオマス原料の使用可能量が拡大していくと設定した。

但し、差し引かれる直接燃焼分について、中位、高位シナリオの直接燃焼分は 2.3 2)で記載した通り IEA NZE シナリオに従い 2040 年までに大きく増加する傾向にあるため2040年頃まで低位シナリオと中位シナリオのバイオマス液体燃料に利用可能な原料量はほぼ共通である(低位シナリオは直接燃焼分を2030年相当で維持するものとする)。しかし、この直接燃焼分は合成燃料の原料 CO2 として利用されるため、バイオマス原料量が総合では減少していない点に注意が必要である。

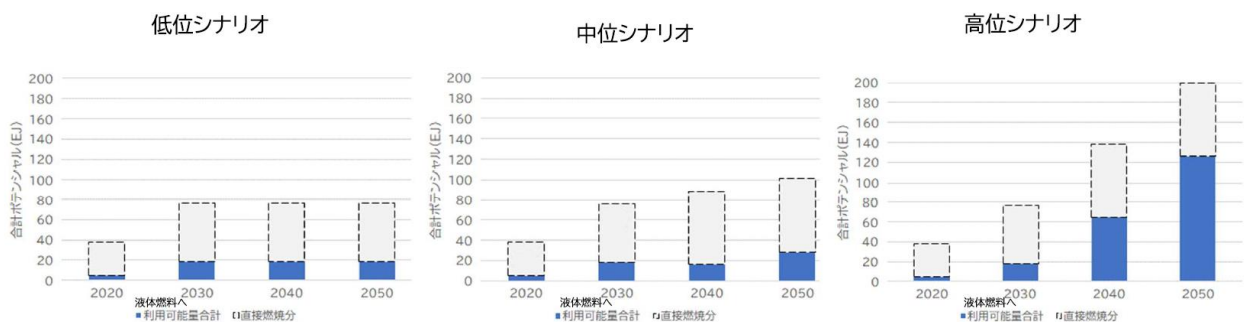


図 2-5 シナリオ別原料利用可能合計量

※各数値については表 2-3,2-4,2-5にて記載

出所)MRI 作成

4) バイオマス試算フローに基づいたバイオマス液体燃料量試算

本節 2.3 2)にて記載したフローに基づきバイオマス原料からバイオマス液体燃料への変換を行った手順についてその過程を下記に詳細に述べる。

1. 各シナリオのバイオマスアベイラビリティ原料合計量(2.3 2)記載)の各年断面(2030年、2040年、2050年)を WEF における原料量割合(2.3 2)に記載)で熱量変換前に振り分け、線形補完。
2. 各シナリオの固体燃料分・直接燃焼量(2.3 3)破線枠に記載)を IEA NZE シナリオにおける「Modern solid bioenergy」の量を元に採用し、上記原料量割合で振り分け、差し引く。※但し、低位シナリオではバイオマスアベイラビリティが2031年以降増加しないため2030年値で横置き。
3. 各原料に応じた利用可能な変換経路に残存している原料量を経路数に同量で振り分け、試算を実施した。※後程原料コスト別試算を踏まえたグラフを2.3 6)にて掲載するためグラフは割愛。

(燃料量算定式): $((\text{原料アベイラビリティ}) - (\text{固体利用} \cdot \text{直接燃焼分})) \times (\text{変換効率})$ を同種燃料別に集計

なお、同じ製造方法・製造燃料であっても原料によって変換効率が異なる場合があるため注意が必要。

シナリオ別のバイオマス液体燃料製造量試算は表 2-3、表 2-2、表 2-5の通り。

表 2-3 低位シナリオにおけるバイオマス液体燃料製造量試算

| 原料種 (EJ) | 2030年 | | 2040年 | | 2050年 | | 変換方法 | 変換効率 |
|--------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------|
| | 全供給 量 | 直接燃 料量 | 全 供 給量 | 直接燃 料量 | 全 供 給量 | 直接燃 料量 | | |
| 森林残渣 | 11.0 | 4.8 | 11.0 | 4.8 | 11.0 | 4.8 | FT 合成 | 46.89% |
| | | | | | | | ガス化メタノール合成 | 55% |
| 製材残渣 | 6.1 | 2.6 | 6.1 | 2.6 | 6.1 | 2.6 | FT 合成 | 46.89% |
| | | | | | | | メタノール合成 | 55% |
| 農業残渣 | 11.9 | 5.1 | 11.9 | 5.1 | 11.9 | 5.1 | FT 合成 | 45% |
| | | | | | | | メタノール合成 | 55% |
| セルロー ス系被覆 作物 | 19.8 | 8.6 | 19.8 | 8.6 | 19.8 | 8.6 | FT 合成 | 45% |
| | | | | | | | ガス化メタノール合成 | 55% |
| 廃棄物 | 19.9 | 8.6 | 19.9 | 8.6 | 19.9 | 8.6 | FT 合成 | 13.7% |
| | | | | | | | ガス化メタノール合成 | 55% |
| | | | | | | | メタン発酵 | 51% |
| 廃食油・油 脂・獣脂 | 1.6 | 1.2 | 1.6 | 1.2 | 1.6 | 1.2 | HEFA 化 | 91.58% |
| 油糧樹 | 3.3 | 2.5 | 3.3 | 2.5 | 3.3 | 2.5 | | |
| 油糧作物 | 2.7 | 2.1 | 2.7 | 2.1 | 2.7 | 2.1 | | |
| 合計 | 76.3 | 58 | 76.3 | 58 | 76.3 | 58 | — | |

| 燃料別量(EJ) | 2030年 | 2040年 | 2050年 |
|----------|-------|-------|-------|
| HEFA | 1.68 | 1.68 | 1.68 |
| FT 合成油 | 2.89 | 2.89 | 2.89 |
| バイオメタン | 0.81 | 0.81 | 0.81 |
| バイオメタノール | 4.09 | 4.09 | 4.09 |
| 合計 | 9.46 | 9.46 | 9.46 |

出所)MRI 作成

表 2-4 中位シナリオにおけるバイオマス液体燃料製造量試算

| 原料種 (EJ) | 2030年 | | 2040年 | | 2050年 | | 変換方法 | 変換効率 |
|--------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------|
| | 全供給 量 | 直接燃 料量 | 全 供 給量 | 直接燃 料量 | 全 供 給量 | 直接燃 料量 | | |
| 森林残渣 | 11.0 | 4.8 | 12.9 | 10.5 | 14.7 | 10.7 | FT 合成 | 46.89% |
| | | | | | | | ガス化メタノール合成 | 55% |
| 製材残渣 | 6.1 | 2.6 | 7.1 | 5.8 | 8.1 | 5.9 | FT 合成 | 46.89% |
| | | | | | | | メタノール合成 | 55% |
| 農業残渣 | 11.9 | 5.1 | 13.9 | 11.4 | 15.9 | 11.5 | FT 合成 | 45% |
| | | | | | | | メタノール合成 | 55% |
| セルロー ス系被覆 作物 | 19.8 | 8.6 | 23.1 | 18.9 | 26.5 | 19.2 | FT 合成 | 45% |
| | | | | | | | ガス化メタノール合成 | 55% |
| 廃棄物 | 19.9 | 8.6 | 23.2 | 19.0 | 26.6 | 19.3 | FT 合成 | 13.7% |
| | | | | | | | ガス化メタノール合成 | 55% |
| | | | | | | | メタン発酵 | 51% |
| 廃食油・油 脂・獣脂 | 1.6 | 1.2 | 1.9 | 1.5 | 2.1 | 1.5 | HEFA 化 | 91.58% |
| 油糧樹 | 3.3 | 2.5 | 3.9 | 3.2 | 4.4 | 3.2 | | |
| 油糧作物 | 2.7 | 2.1 | 3.2 | 2.6 | 3.7 | 2.6 | | |
| 合計 | 76.3 | 58 | 89.1 | 73 | 102 | 74 | — | |

| 燃料別量(EJ) | 2030年 | 2040年 | 2050年 |
|----------|-------|-------|-------|
| HEFA | 1.68 | 1.48 | 2.57 |
| FT 合成油 | 2.89 | 2.55 | 4.42 |
| バイオメタン | 0.81 | 0.72 | 1.24 |
| バイオメタノール | 4.09 | 3.61 | 6.26 |
| 合計 | 9.46 | 8.35 | 14.5 |

出所)MRI 作成

表 2-5 高位シナリオにおけるバイオマス液体燃料製造量試算

| 原料種 (EJ) | 2030年 | | 2040年 | | 2050年 | | 変換方法 | 変換効率 |
|--------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------|
| | 全供給 量 | 直接燃 料量 | 全 供 給量 | 直接燃 料量 | 全 供 給量 | 直接燃 料量 | | |
| 森林残渣 | 11.0 | 4.8 | 20.0 | 10.5 | 28.9 | 10.7 | FT 合成 | 46.89% |
| | | | | | | | ガス化メタノール合成 | 55% |
| 製材残渣 | 6.1 | 2.6 | 11.0 | 5.8 | 15.9 | 5.9 | FT 合成 | 46.89% |
| | | | | | | | メタノール合成 | 55% |
| 農業残渣 | 11.9 | 5.1 | 21.5 | 11.4 | 31.1 | 11.5 | FT 合成 | 45% |
| | | | | | | | メタノール合成 | 55% |
| セルロー ス系被覆 作物 | 19.8 | 8.6 | 35.9 | 18.9 | 51.9 | 19.2 | FT 合成 | 45% |
| | | | | | | | ガス化メタノール合成 | 55% |
| 廃棄物 | 19.9 | 8.6 | 36.0 | 19.0 | 52.1 | 19.3 | FT 合成 | 13.7% |
| | | | | | | | ガス化メタノール合成 | 55% |
| | | | | | | | メタン発酵 | 51% |
| 廃食油・油 脂・獣脂 | 1.6 | 1.2 | 2.9 | 1.5 | 4.2 | 1.5 | HEFA 化 | 91.58% |
| 油糧樹 | 3.3 | 2.5 | 6.0 | 3.2 | 8.7 | 3.2 | | |
| 油糧作物 | 2.7 | 2.1 | 4.9 | 2.6 | 7.2 | 2.6 | | |
| 合計 | 76.3 | 58 | 138 | 73 | 200 | 74 | — | |

| 燃料別量(EJ) | 2030年 | 2040年 | 2050年 |
|----------|-------|-------|-------|
| HEFA | 1.68 | 5.97 | 11.6 |
| FT 合成油 | 2.89 | 10.3 | 19.9 |
| バイオメタン | 0.81 | 2.89 | 5.58 |
| バイオメタノール | 4.09 | 14.6 | 28.2 |
| 合計 | 9.46 | 33.7 | 65.2 |

出所)MRI 作成

(参考)各原料種別の製造効率に関する整理

HEFA,FT 合成における製造効率は下記の ICCT 文献から試算することができる。

表 2-6 ICCT 資料におけるバイオマス原料別燃料製造効率一覧

Table 1: Feedstock conversion pathways (adapted from Pavlenko et al., 2019)

| Feedstock | Conversion pathway | Yield (tonnes liquid fuel/tonne feedstock) | Source |
|--------------------------------|----------------------|--|------------------------------------|
| Waste oils | HEFA | 0.9 | GREET, 2018; Pearlson et al., 2013 |
| Ag residues | Gasification-FT | 0.2 | GREET, 2018 |
| Forestry residues | Gasification-FT | 0.22 | GREET, 2018 |
| Municipal and industrial waste | Gasification-FT | 0.07 | GREET, 2018 |
| Cover crops | Gasification-FT | 0.2 | GREET, 2018 |
| Flue gas | ATJ (ethanol-to-jet) | 0.46 | Tao et al., 2017 |
| Electrofuels | PtL | - | |

出所)ICCT, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Sustainable-aviation-fuel-feedstock-eu-mar2021.pdf> より MRI 作成
 上記は重量ベース効率のため下記データから発熱量換算を行った結果が 2.2(3)4)の変換効率である。

表 2-7 本調査検討における HEFA,FT 合成の原料別燃料製造効率

| ガス化 FT 合成効率 | 原料発熱量(MJ/t) | FT 合成油発熱量(MJ/t) | 変換効率(重量) | 変換効率(熱量) |
|-------------|-------------|-----------------|----------|----------|
| HEFA | 39,800 | 40,500 | 0.9 | 0.9158 |
| 農業残渣・セルロース系 | 18,000 | | 0.2 | 0.45 |
| 森林残渣 | 19,000 | | 0.22 | 0.4689 |
| 廃棄物 | 20,700 | | 0.07 | 0.137 |

出所)各種文献値より MRI 作成

ガス化メタノール合成の製造効率は IRENA と ETSAP データによると下記の通りであり、55%と設定。

表 2-8 ETSAP、IRENA におけるガス化メタノール合成の製造効率

Table 3 - Summary Tables - Key Data and Figures on Bio-methanol Production

| Overview of indicative data for (bio-)methanol production from literature | | | | | |
|---|---------------------------------------|---|--|-----------------------------|---|
| Feedstock | Maximum single plant capacity (kt/yr) | Estimated production cost ^a (EUR/t methanol) | Non-renewable energy use ^b (GJ/t) | Efficiency ^c (%) | Greenhouse gas emissions ^d (t CO ₂ -eq/t) |
| Coal | 220 (China) | 150-300 | > 35 | 50-60% | n.a. |
| Natural gas | 1,900 (Trinidad & Tobago) | 100-250 | 29-37 | 60-70% | 0.8 |
| Wood | 400 (proposed) | 160-940 | n.a. | 50-60% | 0.6 |
| By-product/waste streams | 200 (Netherlands) 400 (proposed) | 200-500 | n.a. | 50-60% | 0.6 |
| CO ₂ | 1.6 (Iceland) 40 (proposed) | 500-900 | n.a. | n.a. | n.a. |

a) Estimates based on Figure 2.
 b) Values for conventional methanol from UNIDO (2010); for bio-methanol, non-renewable energy use is highly dependent on source of process energy (steam and electricity).
 c) Biedermann et al. (2006); Hansen (2005); Bromberg and Cheng (2010). Efficiency is defined as the ratio of the process outputs to the fuel inputs (based on lower heating values).
 d) Cradle-to-factory gate emissions indications from Majer and Grøngroft (2010). The value for wood refers to short rotation coppice, whereas the value for waste streams refers to logging residues.

| Data Projections | | Typical projected international values and ranges | | | | |
|------------------------------|--|--|----------------|---------------------------------------|-----------------|--|
| Technology Variant | Coal | Natural gas | Wood | By-product/ waste | CO ₂ | |
| Current regional application | China | Global; major production hubs in Chile, MENA region, Russia, Trinidad & Tobago | Canada, Sweden | Netherlands, Sweden | Iceland | |
| Global capacity | Around 90 plants globally; production of 45 million tonnes in 2009, with 60 million tonnes expected in 2015 | | | Around 200,000 metric tonnes per year | | |
| Lifetime/capacity factor | >25 years / 85% | | | | | |
| Technology expectations | Gasification efficiency is expected to improve by 5-10% through technology innovation, but limited efficiency improvements expected in the syngas-to-methanol step | | | | | |

出所)ETSAP/IRENA, https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/I09IR_Bio-methanol_MB_Jan2013_final_GSOK.pdf

廃棄物のメタン発酵効率は jefma(<https://www.jefma.or.jp/jefma/53/pdf/metan.pdf>)により 51%と設定。

5) バイオマス液体燃料の他部門需要

前述の通り、本調査検討において海運分野で利用可能バイオマス液体燃料量は全セクター量から他部門需要を差し引いたものである。但し、固体燃料分・直接燃焼分と本項目の他部門需要は別量であり、固体燃料分・直接燃焼分は 2.2(3)2)で記載した通り原料の状態では差し引いた後に、燃料製造量を試算している。本項目で述べるのは、原料状態ではなくバイオマス液体燃料の状態での他部門使用量のことである。

他部門需要は陸上(産業・民生・陸上輸送)と航空部門での合計だが、IEA NZE シナリオの数値を採用したものが図 2-6 の左図である。本シナリオの他部門需要が2040年以降減少傾向に転じているのは、IEA NZE シナリオにおいて、輸送部門の中でバイオ HFO(HEFA/FT 合成油)の主要な消費先であった自動車部門の電動化が進むことで、液体燃料の需要量が減少するためである。

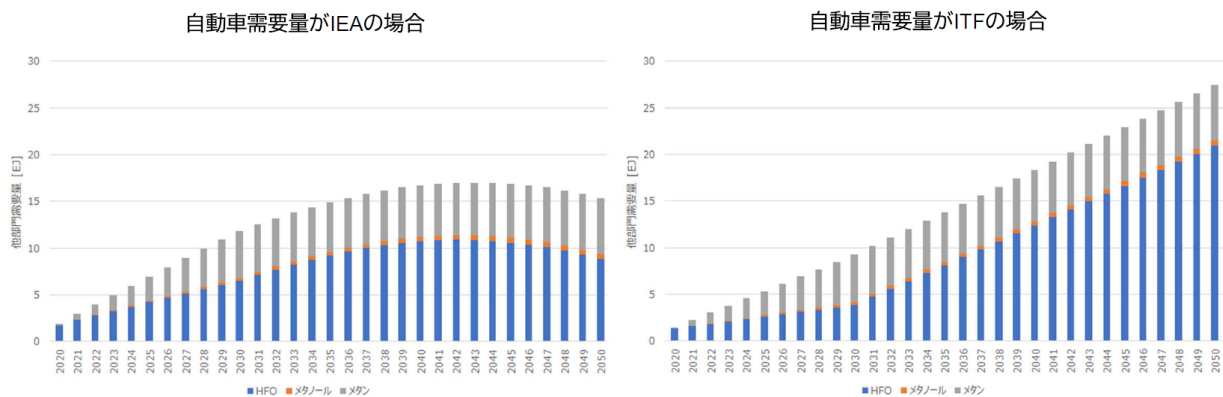
なお、高位シナリオの他部門需要量を設定するにあたり、IEA NZE シナリオ以外のパターンとして自動車・トラック分の需要量 International Transport Forum(以下 ITF)の Transport Outlook 2021 のシナリオを採用した場合を設ける。本シナリオにおいては、特にトラック需要において電動化が進まずにバイオ HFO(HEFA/FT 合成油)の需要が交通需要と共に進捗し続ける絵姿である。以降は主に ITF シナリオ採用時を検討する。

上記のどちらのシナリオでもバイオメタノールはバイオ HFO、バイオメタンと比較して非常に少量である。

なお、他部門需要においてバイオマス液体燃料の中でも安価な物から利用されるとし、残存したものが内航海運・国際海運部門で利用されるとする。より細かなデータについては別添エクセルファイルを参照。2030,2040,2050 年の他部門バイオマス燃料需要量合計値は表 2-9、経年変化は図 2-6 の通り。

表 2-9 バイオマス液体燃料の他部門需要量

| 他部門需要 (EJ) | 2030 年 | | 2040 年 | | 2050 年 | |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 自動車 IEA | 自動車 ITF | 自動車 IEA | 自動車 ITF | 自動車 IEA | 自動車 ITF |
| バイオ HFO | 6.5 | 3.9 | 10.8 | 12.4 | 8.8 | 20.9 |
| バイオメタノール | 0.3 | | 0.44 | | 0.58 | |
| バイオメタン | 5.1 | | 5.5 | | 6.0 | |
| 合計 | 11.9 | 9.2 | 16.7 | 18.4 | 15.4 | 27.5 |



○ITFは将来的に、よりバイオマスを自動車で積極的に利用する世界である一方、直近でのバイオマス利用の伸びは小さい。
 ○IEAはNZE達成に向け将来的な電動化を進めるため、バイオマスを利用するのは前倒し傾向にあり、将来は減衰する。

図 2-6 バイオマス液体燃料の他部門需要量

出所)IEA、ITF シナリオを元にMRI作成

6) バイオマス原料価格の設定

2 で述べた通り、本調査検討において、バイオマス原料は供給制約を設けているため、種類次第で同種内であっても調達量が一定量(閾値)を越えると、さらに調達をするためのコストが増加するという考え方を採用する。製造されるバイオマス価格の設定方法における原料コストは IRENA の文献を参考に設定した。

具体的には図 2-の通り、原料別に階段状の調達費用となっている。製材残渣や廃棄物の調達は安価であり、農業残渣や森林残渣、セルロース系被覆作物が続くが、農業残渣セルロース系被覆作物については同種の中で作物種や国内調達・輸入調達の違いによって複数のコストが考えられることが示されている。上記を踏まえて、本調査検討においては簡便のため、原料コストをある程度絞った階層数を設定する必要があり、2.5,5.5,8.5,12,20USD/GJ の 5 段階を設定することとした。

また HEFA については IRENA 文献に存在しないため、WEF 資料から油脂の原料価格を抜粋した。

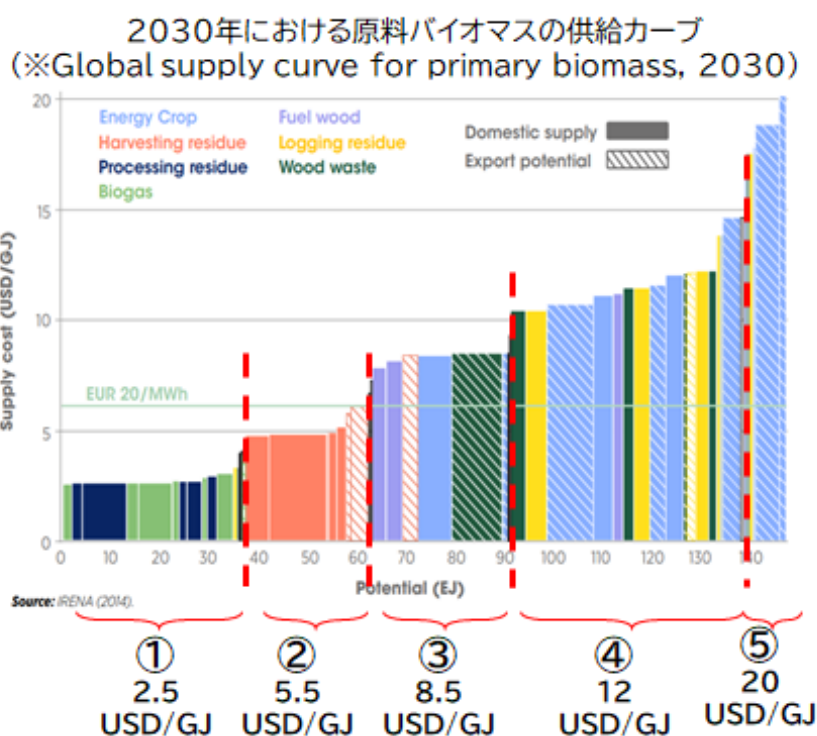


図 2-7 バイオマス原料別調達量とコストの関係(IRENA)

出所)IRENA“INNOVATION OUTLOOK RENEWABLE METHANOL” https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf に MRI 加筆

本調査検討においては図 2-6 に示すような全バイオマス原料の中で安価なものから利用・製造するというのではなく、各燃料製造に対応した各原料の中で安価なものから順に利用するものと仮定する。これは廃棄物や製材残渣と比較して高価な森林残渣やセルロース系被覆作物であっても、バイオマスとしての用途がそれぞれ存在しているため、燃料製造においても同様だと考えられるためである。

本調査検討で検討している各段階に該当する原料を上図から確認した上で、バイオ燃料の製造技術別に利用される原料をさらに確認し、各製造方法で採用する原料価格を下表のように決定した。

表 2-10 原料別の原料価格と階層の整理

| 原料名(※IRENAでの原料名) | バイオマス原料価格(USD/GJ) | | | | |
|--------------------------|-------------------|----------|----------|---------|---------|
| | ① 2.5 | ② 5.5 | ③ 8.5 | ④ 12 | ⑤ 20 |
| 農業残渣(Harvesting Residue) | | ○ | ○ | | |
| 製材残渣(Processing Residue) | ○ | | | | |
| 森林残渣(Logging residue) | | | | ○ | |
| セルロース系被覆作物(Energy Crop) | | | ○ | ○ | ○ |
| 廃棄物(Biogas) | ○ | | | | |
| 原料名(※WEFでの原料名) | 油脂① | 油脂② | 油脂③ | | |
| 油脂(Used Cooking Oil) | 15.1 | 19.5 | 23.9 | | |

※HEFA の原料である油脂については、IRENA 文献に記載が無いため、World Economic Forum から原料価格を引用し、3 段階に設定。原料コストは高いが HEFA は製造コストが 3 で示す通り安価である
 出所)IRENA“INNOVATION OUTLOOK RENEWABLE METHANOL” [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA Innovation Renewable Methanol 2021.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA%20Innovation%20Renewable%20Methanol%202021.pdf) と WEF 資料より MRI 作成

また低位、中位、高位シナリオの違いとして、バイオマスのアベイラビリティがあるが、それぞれのシナリオで各原料をどの程度まで調達可能とするかを次の考え方を元に表 2-11 の通り設定した。

- コスト 1 段階：全シナリオ共通で全量調達可。
- コスト 2 段階：低位シナリオで 1 段階目のみ、中位・高位シナリオで全量調達可。
- コスト 3 段階：低位シナリオで 1 段階目のみ、中位シナリオで 2 段階目まで、高位シナリオで全量調達可。

表 2-11 製造方法別の利用原料コスト対応表(表 2-6 と対応)

| 原料名(※IRENAでの原料名) | 製造方法別の利用原料 | | | |
|--------------------------|-------------|-------------|-----------|---------------|
| | ガス化メタノール合成 | FT合成 | バイオガス | HEFA |
| 農業残渣(Harvesting Residue) | ②/②③/②③ | ②/②③/②③ | — | — |
| 製材残渣(Processing Residue) | ①/①/① | ①/①/① | — | — |
| 森林残渣(Logging residue) | ④/④/④ | ④/④/④ | — | — |
| セルロース系被覆作物(Energy Crop) | ③/③④/③④⑤ | ③/③④/③④⑤ | — | — |
| 廃棄物(Biogas) | — | — | ① | — |
| 油脂(Used Cooking Oil) | — | — | — | ①/①② /①②③ |
| 低位シナリオで採用した原料価格→ | ①～④の 4段階 | ①～④の 4段階 | ①の 1段階 | 油脂① の1段階 |
| 中位シナリオで採用した原料価格→ | ①～④の 4段階 | ①～④の 4段階 | ①の 1段階 | 油脂①、② の2段階 |
| 高位シナリオで採用した原料価格→ | ①～⑤の 5段階 | ①～⑤の 5段階 | ①の 1段階 | 油脂①～③ の3段階 |

出所)MRI 作成

7) バイオマス燃料のコスト段階別ポテンシャル

シナリオ別の各バイオマス燃料の全セクター供給量と国際海運分野に投入可能な燃料量を試算した。2.3 6)で示したコスト段階に各原料量を割振った後、各原料に対応した製造方法による変換を行い、2.3 4)で示した量よりさらに細かくコスト別に整理したのが下記の全セクターのバイオマス燃料量である。

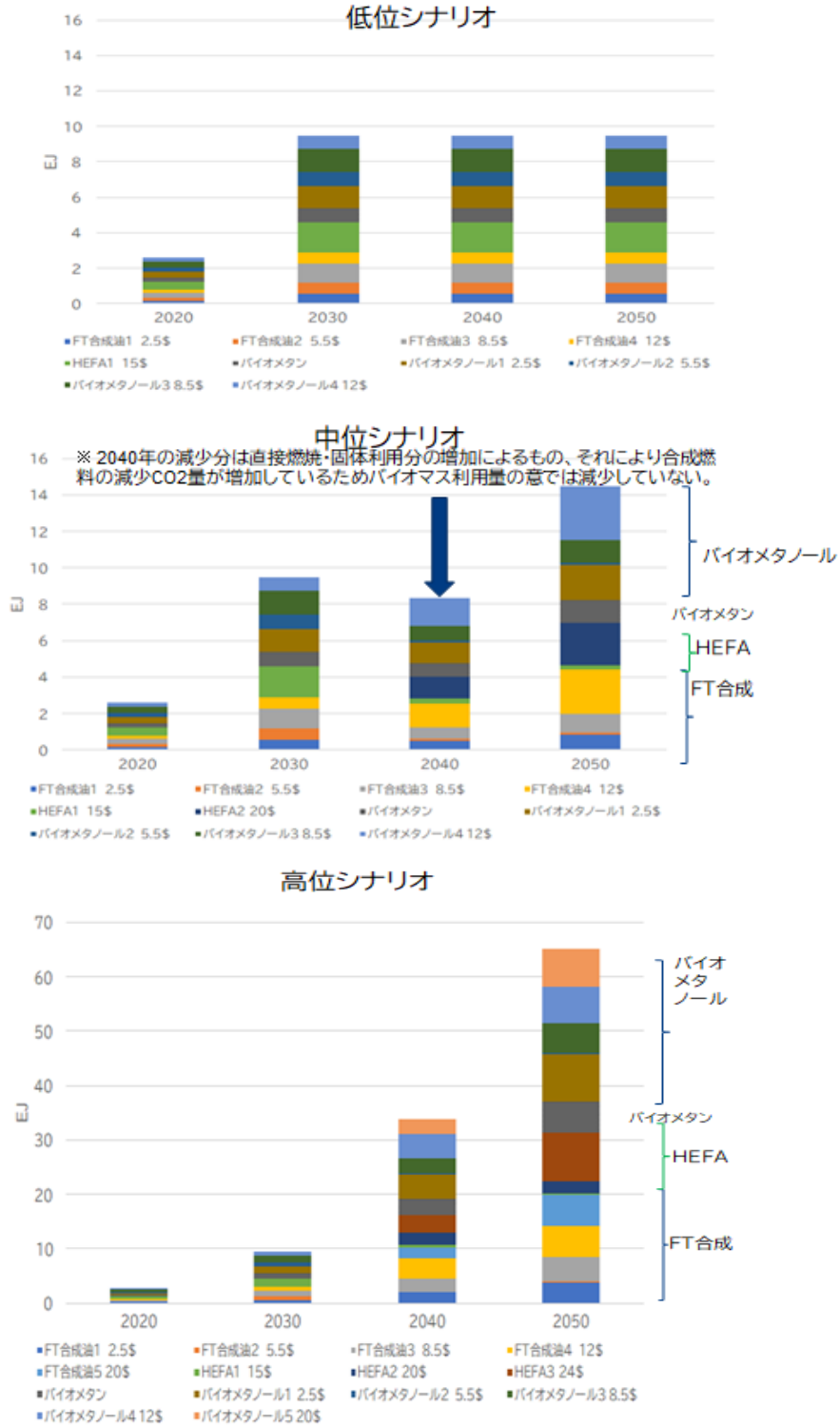


図 2-8 全セクターにおける原料コスト別バイオマス液体燃料ポテンシャル

全セクターにおけるバイオマス液体燃料は製造経路が多い FT 合成油、バイオメタノールの方が、原料が限定されているバイオメタンや HEFA と比較してシナリオによらず大きくなっている。

また高位シナリオは 2050 年にエネルギー利用可能なバイオマス原料 200EJ 全てを調達可能とするため、IEA NZE シナリオにおける直接燃焼分 74EJ 以外の原料を変換しても、合計 65.2EJ と非常に大きな値となっている。一方で中位シナリオは 2050 年に原料 102EJ(IEA NZE シナリオ相当)、低位シナリオ(WEF 相当)は原料 76EJ であり、固体利用・直接燃焼分を差し引き後にバイオマス液体燃料に変換するとそれぞれ14.5EJ、9.5EJ 程度という結果であった。

またこれらの燃料内訳を原料コスト別に考えた場合、前述の通りより多くのバイオマスを活用しようとする高位シナリオにおいて、安価なバイオマス原料量が増加するだけでなく、各燃料の原料種の中で最も高価な 20\$/GJ 以上(HEFA では 24\$/GJ)の量が大きく増加し、その分中位シナリオとの大きな差となった。

また、次に図 2-2 のフロー図の通り(下記に再掲)、上記で試算した全セクターでの原料コスト別バイオマス液体燃料量から 2.3 5)で記載した他部門需要量を差し引き、海運分野での利用可能量を算定した後、内航海運分野(23%)と国際海運分野(77%)(※昨年度同様で比率固定)に振り分けることで、本調査検討に必要な国際海運分野で利用可能なバイオマス液体燃料を算出した。

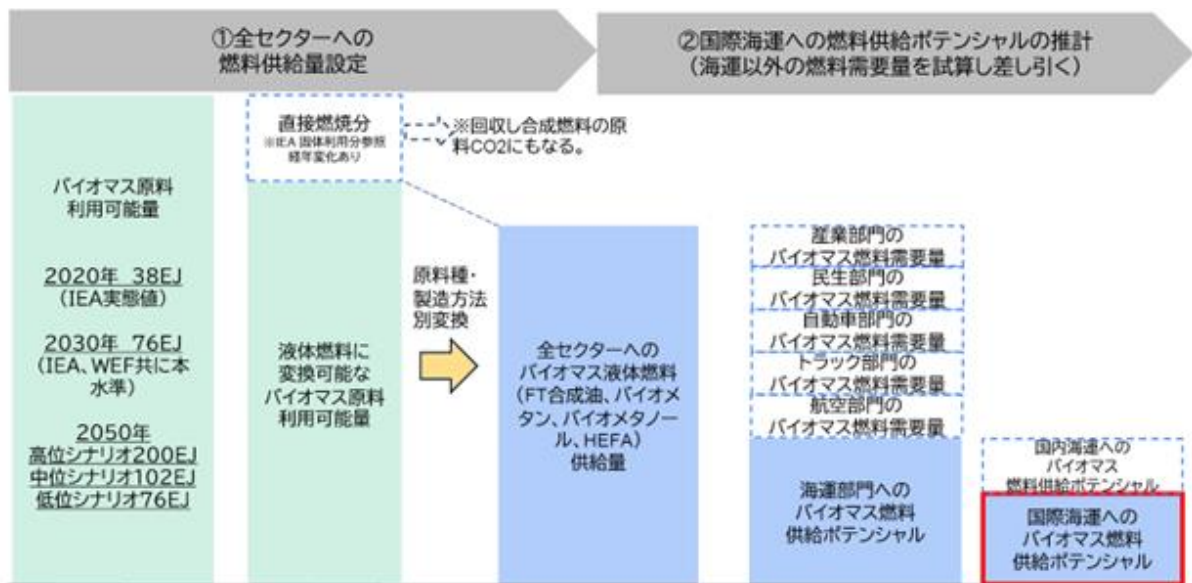


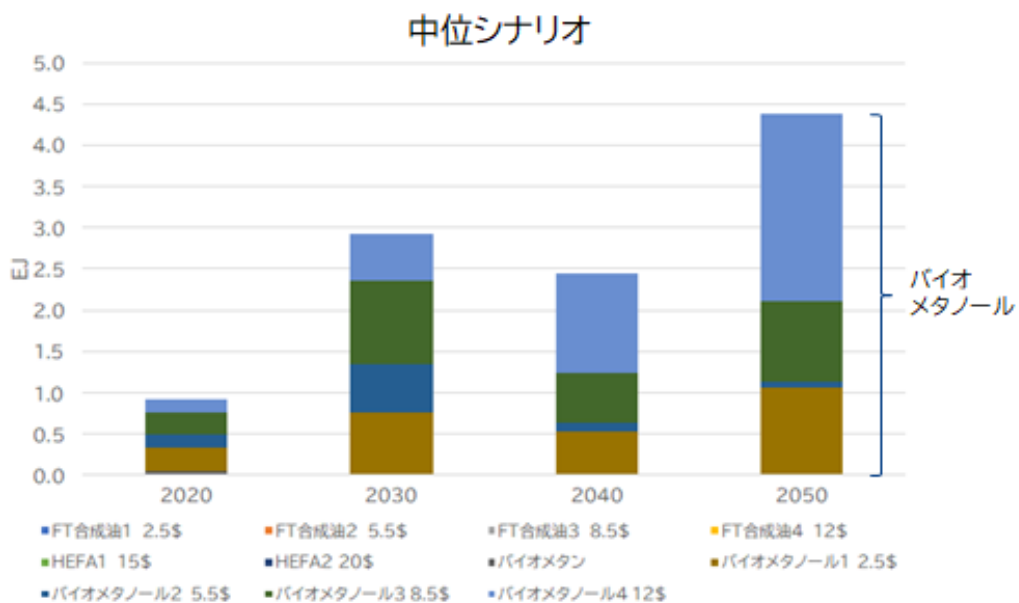
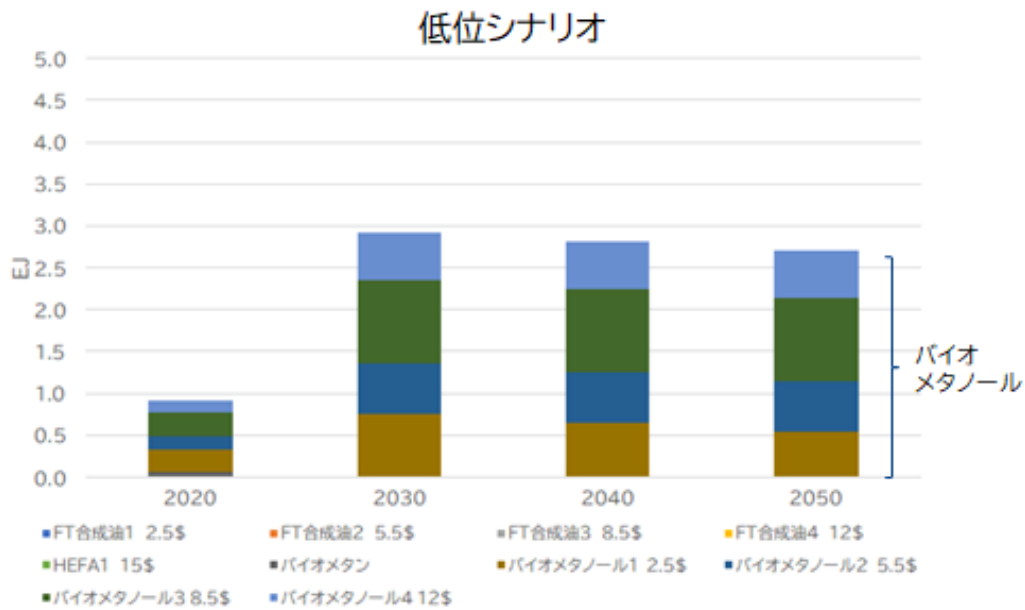
図 2-2(再掲) バイオマス液体燃料の供給アベイラビリティ推計の考え方

他部門需要量を差し引く際に、それぞれの用途で海運分野以外の他部門で燃料コストが安価なものから順に使用されると想定した。

- HEFA、FT 合成油は性質が近いバイオ HFO という括りで捉え、同用途であるとして、燃料コストが安価な HEFA から使用され、FT 合成油が海運分野に回ってきやすい。しかし、中位・低位シナリオでは他部門需要で全て消費され、高位シナリオのみ FT 合成油でも原料コストが 12\$/GJ 以上の高価なものが残存した(ITF シナリオ採用時 2050 年 8.1EJ)。
- バイオメタンは原料が廃棄物のみであり全量が小さく、安価であるため海運分野には全てのシナリオにおいて割り振られる以前に他部門で消費された。
- 一方、バイオエタノールは IEA NZE シナリオにおける他部門需要が発電、化学、自動車分野等での一部利用に留まり、バイオ HFO・バイオメタンと比較して非常に小さいため、全シナリオで最も海運分

野に残される量が多かった。(2050 年低位シナリオ 2.7EJ、中位シナリオ 4.4EJ、高位シナリオ 21.3EJ)

以上を含めた各バイオ燃料の原料コスト別量の積み上げグラフは図 2-9 の通り示すことができる。これをバイオマス液体燃料のインプットデータとする。詳細データについては別添のエクセルデータを参照。



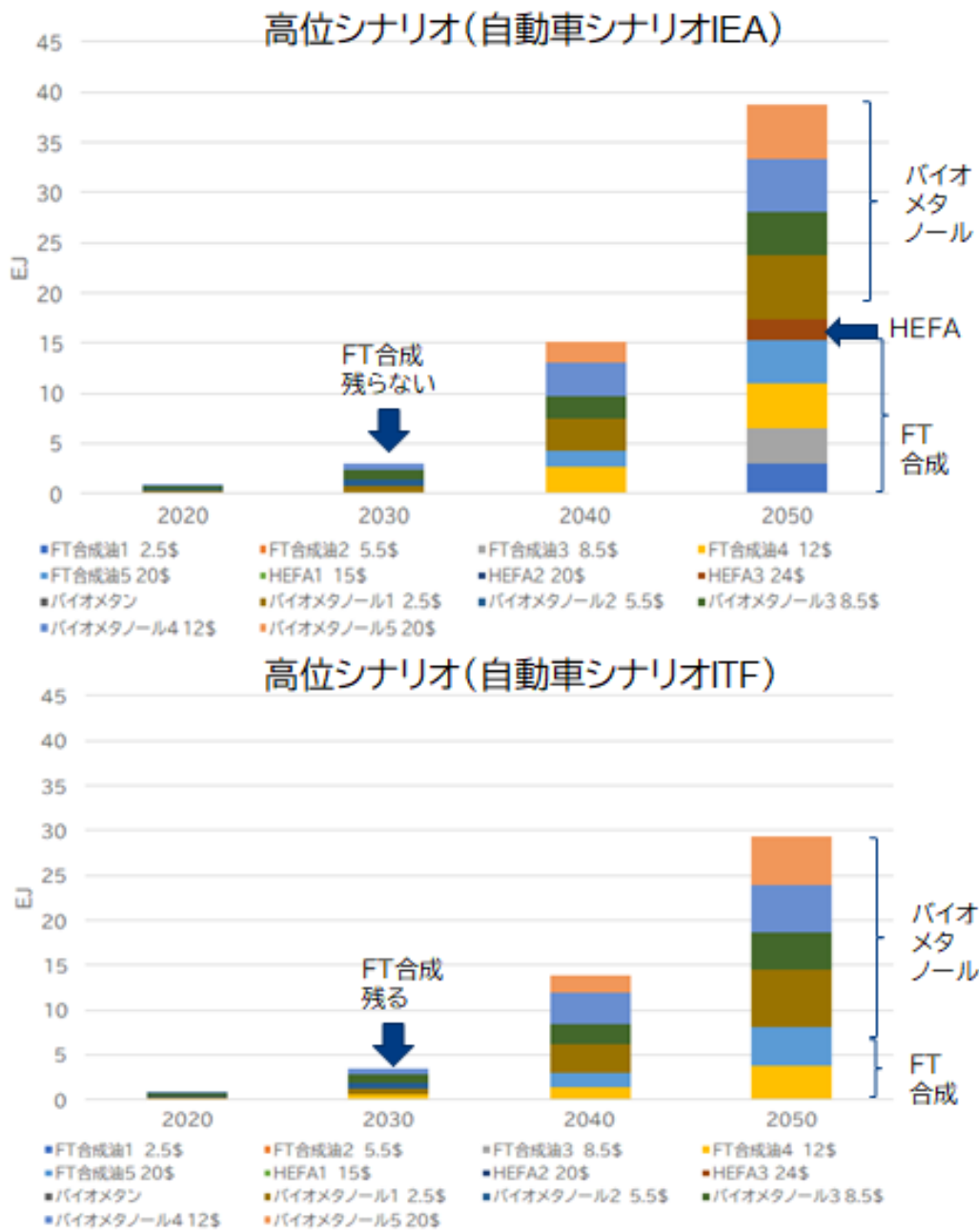


図 2-9 国際海運分野における原料コスト別バイオマス液体燃料ポテンシャル

出所)MRI 作成

2.4 水素、アンモニアの供給ポテンシャル推計

本年度検討では、水素系燃料として以下の燃料を定義した。

- 水素
- アンモニア
- 合成メタン
- 合成メタノール

これら水素系燃料はすべて水素から合成されることから、水素のマスバランスを考慮した供給ポテンシャルを検討する必要性が挙げられる。しかし、本調査研究において、水素の製造源となる水、さらに水電解用の電力について、供給制約がないと仮定した為、水素のマスバランスを考慮しないこととした。

一方、合成メタン・合成メタノールについてはバイオ燃料・産業排ガス・DAC などから回収される CO2 のマスバランスを考慮する必要がある。

上記二つの検討から、水素・アンモニアについては供給ポテンシャルの制約を設けず、合成メタン・合成メタノールについては供給ポテンシャルの制約を設けた。(合成メタン・合成メタノールの供給ポテンシャルの制約については 2.5 にて詳細を記述する。)

水素・アンモニア燃料種の国際海運分野における供給量推計フローは下記の通り。※昨年度踏襲

1. 全セクターへの原料ブルー/グリーン水素、ブルー/グリーンアンモニア供給量を各文献から参照。
2. 海運以外の分野における燃料需要量を主に IEA のシナリオから試算し、その試算結果を全体供給量から差し引くことで、海運への燃料供給ポテンシャルを算定。さらに、海運のうち国際海運分を抽出し、供給ポテンシャルとする。

※但し、上述の通り、実際にはポテンシャルの制約は設けない。

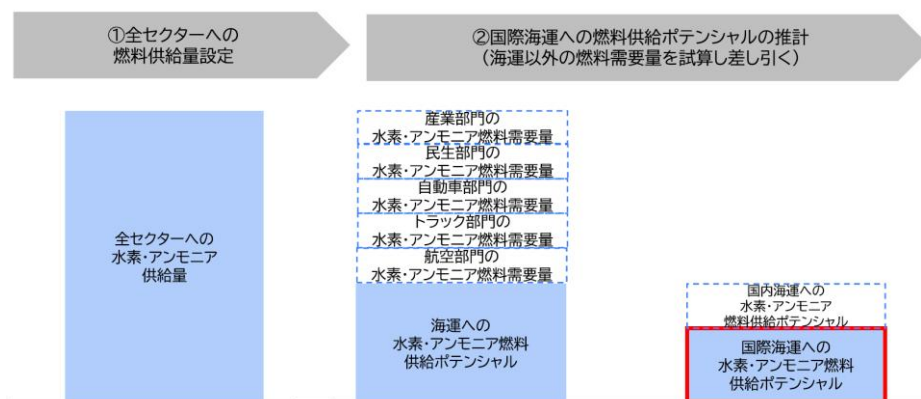


図 2-1 水素・アンモニア燃料の供給ポテンシャルの考え方

出所)MRI 作成

2.5 合成燃料の供給ポテンシャル推計

本調査研究では、バイオ燃料由来の CO₂、産業排ガス由来の CO₂、DAC 由来の CO₂ を使用する合成燃料を対象として、供給ポテンシャルを推計した。

具体的には、以下の燃料について、供給ポテンシャルを設定している。

- 合成メタン
- 合成メタノール

また、各燃料の供給ポテンシャルの推計・振り分けフローの考え方としては、まず、全セクター向けに供給される燃料を全体の供給量として設定し、そこから産業・民生・運輸(航空・自動車・トラック・国内海運)といった国際海運以外のセクターにおける当該燃料の需要量を試算し、これを全体の供給量から差し引くことにより、最終的に残った供給量が海運セクターに回ってくることとした。

更に、水素マスマバランスについて制約を置かないことから、合成燃料で使用されるグリーン水素量・ブルー水素量についても供給ポテンシャルの制約がない。そこで、コスト・CI 値からモデルにて利用形態を選択し、ブルー系合成燃料・グリーン系合成燃料の供給ポテンシャルを推計した。

1) 合成燃料の供給ポテンシャル推計・振り分けフロー

- 合成系燃料種の国際海運分野における供給量推計フローは下記の通り。
 1. バイオ液体燃料固定排出源由来 CO₂・バイオ固体燃料由来 CO₂・産業排ガス由来 CO₂・DAC 由来 CO₂ 量から、メタン/メタノールの合成に使われる CO₂ 量に按分し、変換効率を考慮した上で合成メタン/合成メタノールの全セクターへの供給量を算定。
 2. 海運以外のセクターでの合成メタン/合成メタノールの需要量を IEA のシナリオから算定し、全セクターへの合成メタン/合成メタノール供給量から差し引くことで、海運への合成メタン/合成メタノール供給量を算定。さらに、海運のうち国際海運分を抽出し、供給ポテンシャルとする。ただし、DAC由来の合成燃料はすべて、国際海運に供給されるとした。
 3. 上記の通り算出した合成メタン/合成メタノールについて、ブルー合成メタン/合成メタノールもしくはグリーン合成メタン/合成メタノールに変換して利用するオプションを想定し、コストや CI 値によりモデルで利用形態を選択。

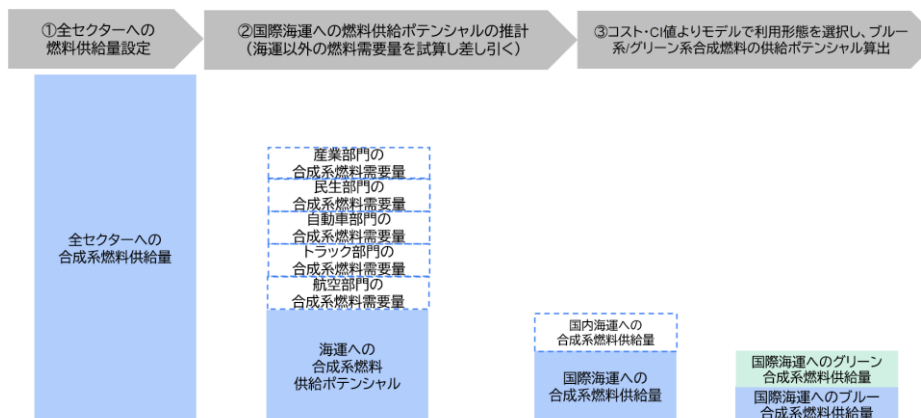


図 2-2 合成系燃料の供給ポテンシャル推計の考え方

2) 合成燃料の供給ポテンシャル推計詳細

- ① 原料 CO₂ の由来となる原料を特定する。
- ② バイオ原料由来の CO₂ 回収量については、各燃料について産業部門に供給される燃料量と木質バイオマスとして直接燃焼される燃料量に対して、EU RED2、IPCC のガイドラインを参考に算出した排出係数と CO₂ 回収率を乗ずることで算出した。ただし、木質バイオマスの供給量が低位シナリオのみ異なるため、低位シナリオの CO₂ 回収量が他シナリオと異なる。

産業由来 CO₂ 回収量は IEA NZE シナリオに基づき、産業部門での合成メタン・合成メタノール・LSFO・LNG 燃料の使用量に対して、EU RED2、IPCC のガイドラインを参考に算出した排出係数、資源エネルギー庁や環境省の CCS・CCUS 事業に関する会議資料¹に基づき設定した回収率(2050 年に 99.7%まで上昇)を乗ずることで算出した。ただし、産業由来 CO₂ は足元では回収されず、2040 年以降も EU-ETS と同様、回収されないこととした。

DAC 由来 CO₂ 回収量については、IEA NZE シナリオ(図 2-13)を参照した。またそれぞれの回収 CO₂ 量、表 2-5、2-6、2-7 に記載している年度の間中値については線形補間にて算出した。

- ③ ②で算出した回収 CO₂ 量の半分は合成メタンに変換される CO₂ 量とし、合成メタンへの変換効率²(0.6)と発熱量から、バイオ原料由来・産業由来・DAC 由来の合成メタン量を算出した。残りの半分は合成メタノールに変換される CO₂ 量とし、合成メタノールへの変換効率²(0.4)と発熱量から、バイオ原料由来・産業由来・DAC 由来の合成メタノール量を算出した。また、表 2-5、2-6 に記載している年度の間中値については線形補間にて算出した。

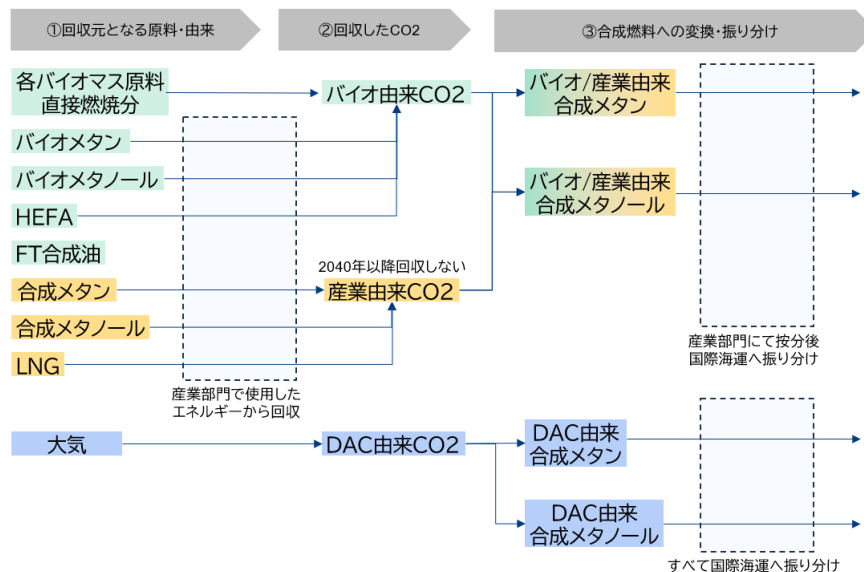


図 2-3 原料由来別 CO₂ 回収と合成系燃料の各部門への振り分け方

出所)MRI 作成

なお、本調査検討において、水素は合成燃料の原料としての必要量が供給される設定のため、制約にはなら

¹ 資源エネルギー庁、グリーンイノベーション戦略推進会議兼グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループ「CCUS/カーボンリサイクル関係の技術動向」https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/001_07_03.pdf, 2020年6月
環境省、CCUSの早期社会実装会議(第3回)～これまでの歩みと脱炭素化に向けた展望～資料、「環境配慮型CCS実証事業一分離回収技術について」, <https://www.env.go.jp/content/900440484.pdf>, 2021年8月

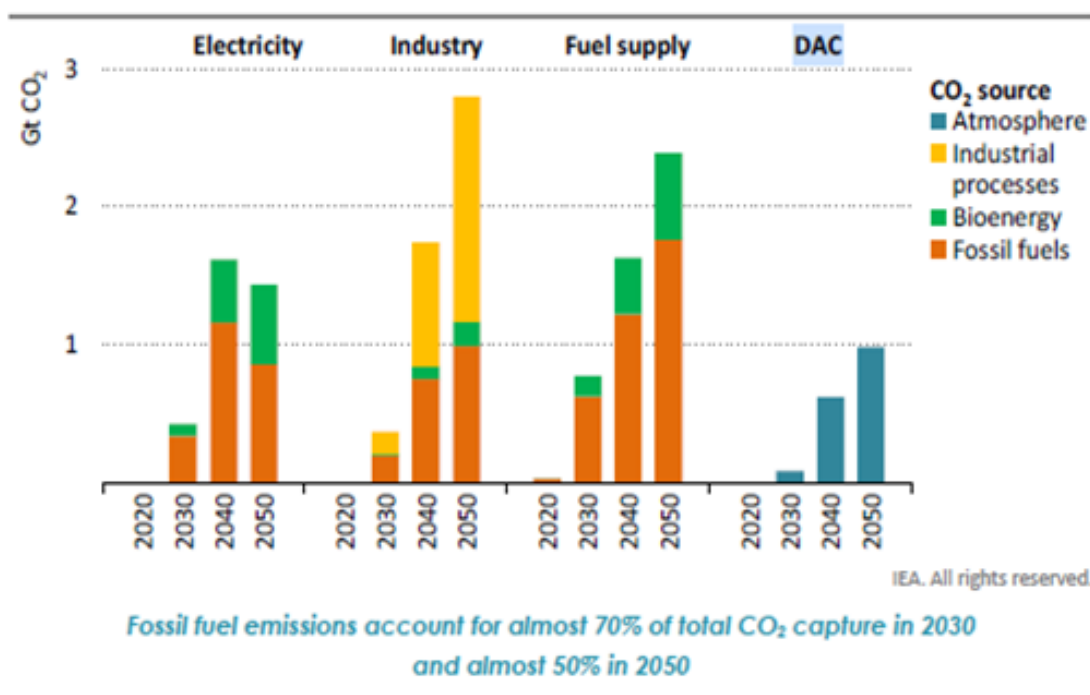
² 資源エネルギー庁、グリーンイノベーション基金事業「CO₂等を用いた燃料製造技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画、<https://www.meti.go.jp/press/2021/01/20220120005/20220120005-2.pdf>, 2022年1月

ず、原料 CO₂ が制約条件となるが、バイオマス燃料由来・産業由来ガスが非常に大きい量があるため、下記で試算した量は少なくとも 15EJ 以上で海運分野の需要量を上回るため量の制約はなく、コスト・WtW に従って導入される。

2.7.3 CCUS applied to emissions from fossil fuels

A total of 7.6 Gt CO₂ is captured in 2050 in the NZE, almost 50% of which is from fossil fuel combustion, 20% is from industrial processes, and around 30% is from bioenergy use with CO₂ capture and DAC (Figure 2.30). The use of CCUS with fossil fuels provides almost 70% of the total growth in CCUS to 2030 in the NZE. Yet the prospects for the rapid scaling up of CCUS are very uncertain for economic, political and technical reasons. Here we look at the implications for reaching net-zero emissions in 2050 if fossil fuel CCUS does not expand beyond existing and planned projects.

Figure 2.30 ▶ CCUS by sector and emissions source in the NZE



Note: DAC = direct air capture.

図 2-4 IEA NZE シナリオにおける部門別 CO₂ 回収量(DAC の項目を参照)

出所)IEA, "Net Zero by 2050"に MRI 加筆

表 2-12 高位シナリオ・中位シナリオにおける回収CO2量と製造された合成燃料量試算

| 由来別CO2量 | | 2030年 | | | 2040年 | | | 2050年 | | | 排出係数 |
|---------|--------------|----------|-------|---------------|----------|-------|---------------|----------|-------|---------------|-------|
| | | 原料燃料[EJ] | 回収率 | 回収CO2 [GtCO2] | 原料燃料[EJ] | 回収率 | 回収CO2 [GtCO2] | 原料燃料[EJ] | 回収率 | 回収CO2 [GtCO2] | |
| バイオ原料由来 | バイオメタン | 2.00 | 0.666 | 0.073 | 3.50 | 0.831 | 0.160 | 5.00 | 0.997 | 0.275 | 0.055 |
| | バイオメタノール | 0.09 | 0.666 | 0.002 | 0.299 | 0.831 | 0.008 | 0.507 | 0.997 | 0.017 | 0.034 |
| | HEFA | 0 | 0.666 | 0 | 0 | 0.831 | 0 | 0 | 0.997 | 0 | 0.081 |
| | FT合成油 | 0 | 0.666 | 0 | 0 | 0.831 | 0 | 0 | 0.997 | 0 | 0.073 |
| | 木質バイオマス直接燃焼分 | 58 | 0.666 | 4.1826 | 73.0 | 0.831 | 6.57 | 74 | 0.997 | 7.99 | 0.108 |
| 産業由来 | 合成メタン | 0 | 0.666 | 0 | 0 | 0.831 | 0 | 0 | 0.997 | 0 | 0.055 |
| | 合成メタノール | 0.507 | 0.666 | 0.011 | 0.507 | 0.831 | 0.014 | 0.507 | 0.997 | 0.017 | 0.034 |
| | LSFO | 34.0 | 0.666 | 1.75 | 28.0 | 0.831 | 1.80 | 22.0 | 0.997 | 1.70 | 0.077 |
| | LNG | 29.0 | 0.666 | 1.06 | 20.0 | 0.831 | 0.916 | 11.0 | 0.997 | 0.604 | 0.055 |
| DAC | | — | — | 0.12 | — | — | 0.62 | — | — | 0.98 | — |

| 由来別燃料量(EJ) | | 2030年 | 2040年 | 2050年 |
|--------------|---------|-------|-------|-------|
| バイオ原料由来/産業由来 | 合成メタン | 38.6 | 34.1 | 45.2 |
| | 合成メタノール | 20.5 | 18.1 | 24.0 |
| DAC由来 | 合成メタン | 0.64 | 2.87 | 4.78 |
| | 合成メタノール | 0.34 | 1.52 | 2.54 |

出所)各種資料より MRI 作成

表 2-13 低位シナリオにおける回収CO2量・合成燃料量試算

| 由来別CO2量 | | 2030年 | | | 2040年 | | | 2050年 | | | 排出係数 |
|---------|--------------|----------|-------|---------------|----------|-------|---------------|----------|-------|---------------|-------|
| | | 燃料原料[EJ] | 回収率 | 回収CO2 [GtCO2] | 燃料原料[EJ] | 回収率 | 回収CO2 [GtCO2] | 燃料原料[EJ] | 回収率 | 回収CO2 [GtCO2] | |
| バイオ原料由来 | バイオメタン | 2.00 | 0.666 | 0.073 | 3.50 | 0.831 | 0.160 | 5.00 | 0.997 | 0.275 | 0.055 |
| | バイオメタノール | 0.09 | 0.666 | 0.002 | 0.299 | 0.831 | 0.008 | 0.507 | 0.997 | 0.017 | 0.034 |
| | HEFA | 0 | 0.666 | 0 | 0 | 0.831 | 0 | 0 | 0.997 | 0 | 0.081 |
| | FT合成油 | 0 | 0.666 | 0 | 0 | 0.831 | 0 | 0 | 0.997 | 0 | 0.073 |
| | 木質バイオマス直接燃焼分 | 58 | 0.666 | 4.1826 | 58.0 | 0.831 | 5.22 | 58.0 | 0.997 | 6.26 | 0.108 |
| 産業由来 | 合成メタン | 0 | 0.666 | 0 | 0 | 0.831 | 0 | 0 | 0.997 | 0 | 0.055 |
| | 合成メタノール | 0.507 | 0.666 | 0.011 | 0.507 | 0.831 | 0.014 | 0.507 | 0.997 | 0.017 | 0.034 |
| | LSFO | 34.0 | 0.666 | 1.75 | 28.0 | 0.831 | 1.80 | 22.0 | 0.997 | 1.70 | 0.077 |
| | LNG | 29.0 | 0.666 | 1.06 | 20.0 | 0.831 | 0.916 | 11.0 | 0.997 | 0.604 | 0.055 |
| DAC | | — | — | — | 0.12 | — | — | 0.62 | — | — | 0.98 |

| 由来別燃料量(EJ) | | 2030年 | 2040年 | 2050年 |
|--------------|---------|-------|-------|-------|
| バイオ原料由来/産業由来 | 合成メタン | 38.6 | 29.1 | 35.8 |
| | 合成メタノール | 20.5 | 15.5 | 19.0 |
| DAC由来 | 合成メタン | 0.64 | 2.87 | 4.78 |
| | 合成メタノール | 0.34 | 1.52 | 2.54 |

出所)各種資料より MRI 作成

前述の通り合成燃料内のブルー/グリーンへの配分についてはコストや WtW によってモデルで決定される。

3. 燃料コスト

本調査における燃料コストは下記の考えに基づき試算を行っている。昨年度と共通であり、具体的にはCAPEX(原料コスト等)、OPEX、系統/再エネ電力炭化、水電解費用、原料/燃料輸送・貯蔵コスト等を積上げることで試算する設定方法を踏襲した。本節では昨年度検討と比較して追加的に設定した点について記載する。昨年度から変更されていない要素や詳細な算定に関しては別添エクセルデータ参照。

下記概要は昨年度調査検討の水素・アンモニアのコスト試算のプロセスである。一部製造燃料(メタン、メタノール)の単位発熱量に誤りがあったため修正を行った。

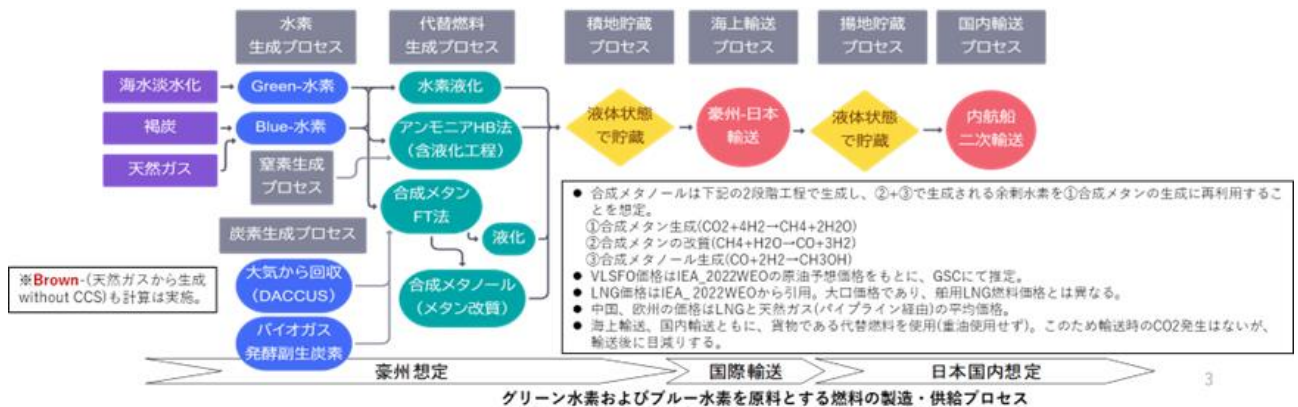


図 3-1 水素・アンモニアにおける燃料コスト試算の考え方

出所)令和4年度検討資料より

上記に加えてバイオマス、合成燃料のコスト試算については原料調達アベイラビリティに差異を設けた際に原料や燃料を追加したことを踏まえ、それに応じて主にCAPEXの原料コストが変更となっている。

3.1 バイオマス

2.3 6),7)を参照。原料コストを閾値として原料ポテンシャルを算出したため該当の項目に記載済み。それぞれの原料単位発熱量、製造燃料単位発熱量に応じて試算を行った。

3.2 合成燃料

合成メタンと合成メタノールは昨年度固定されていた原料 CO₂ のコストについて細分化を行った。具体的に合成燃料の元となる CO₂ 価格の設定方法は IRENA の文献を参考に下表の通り設定した。

- 産業由来・バイオマス由来 CO₂ 価格: IRENA の文献から2020年及び2050年の平均 CO₂ 価格を引用し、2030年、2040年の価格を線形で推計を行った。バイオ燃料の固定排出源由来の価格についても同値を使用した。

表 3-1 産業由来・バイオマス由来 CO₂ のコスト

| 産業由来CO ₂ 価格 | | | | 2020年 |
|--|--|--|--------|--|
| Table 23. Cost of CO ₂ from various sources | | | | 2050年 |
| Source or technology | CO ₂ concentration in exhaust (%) | Estimated cost of CO ₂ (USD/t CO ₂) | | Source |
| | | Today | 2050 | |
| Fossil carbon | | | | |
| Coal power plant | 12-14 | 43-97 | 46-55 | Iriam, 2017; IEA, 2012; Rubin et al., 2015 |
| Coal power plant with oxy-combustion | Close to 100 | 52-75 | 52 | Iriam, 2017; IEA, 2012 |
| Natural gas power plant | 3-5 | 80-89 | 43 | Iriam, 2017; IEA, 2012 |
| Iron and steel | 20-30 | 55-77 | 40-65 | Iriam, 2017; Leeson et al., 2017 |
| Cement | 15-30 | 35-125 | 20-103 | Iriam, 2017; Leeson et al., 2017 |
| Natural gas purification | 2-65 | 15-25 | 20 | Iriam, 2017; Leeson et al., 2017 |
| Ammonia synthesis | Up to 100 | 20-25 | 24 | Iriam, 2017; Leeson et al., 2017 |
| 産業由来CO ₂ 価格 (USD/t-CO ₂) | | 2030年 | 2040年 | 2050年 |
| | | 53.2 | 48.3 | 43.4 |

出所) IRENA “INNOVATION OUTLOOK RENEWABLE METHANOL” https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf に MRI 加筆

- DAC 由来 CO2 価格:2020年の価格は、昨年度を踏襲し、低炭素社会戦略センターの文献から DAC の CAPEX、OPEX を引用し推計。2050年にかけて、IRENA の文献から引用した2050年の価格に線形で低減すると仮定し、2030年、2040年の DAC 由来の CO2 価格を推計した。

表 3-2 DAC 由来 CO2 コスト

| DAC由来CO2価格 | | | | |
|------------------------------------|---------------------|-----------|--|------------|
| 表 3 DAC コスト (DAC : 896 kt/y) | | | | |
| 建設費 | 123,000百万円 (1230億円) | | | |
| 運転人員 | 20名 (5名/直 × 4直) | | | |
| 固定費 | | 費用 (¥/kg) | | 備考 |
| 設備対応 | 18,450百万円/y | 20.6 | | 年経費率 0.15 |
| 人員対応 | 100百万円/y | 0.1 | | 労務費 5百万円/人 |
| 小計 | | 20.7 | | |
| 実動費 | | | | |
| CH ₄ | 8.84MJ/kg | 13.3 | | 単価 1.5円/MJ |
| CaCO ₃ など | | 1.4 | | |
| 小計 | | 14.7 | | |
| 計 (円/kg-CO ₂) | | 35.4 | | |
| 貯留コスト (円/kg-CO ₂) | | 1.3 | | 陸地から圧入ケース |
| DAC+貯留 コスト (円/kg-CO ₂) | | 36.7 | | |

2020年

| Table 23. Cost of CO ₂ from various sources | | | | |
|--|--|--|--------|--|
| Source or technology | CO ₂ concentration in exhaust (%) | Estimated cost of CO ₂ (USD/t CO ₂) | | Source |
| | | Today | 2050 | |
| DAC | 0.042 in air concentrated to close to 100 | 300-600 | 50-150 | Fasihi et al., 2019; Keith et al., 2018; Sanz-Pérez et al., 2016 |

2050年

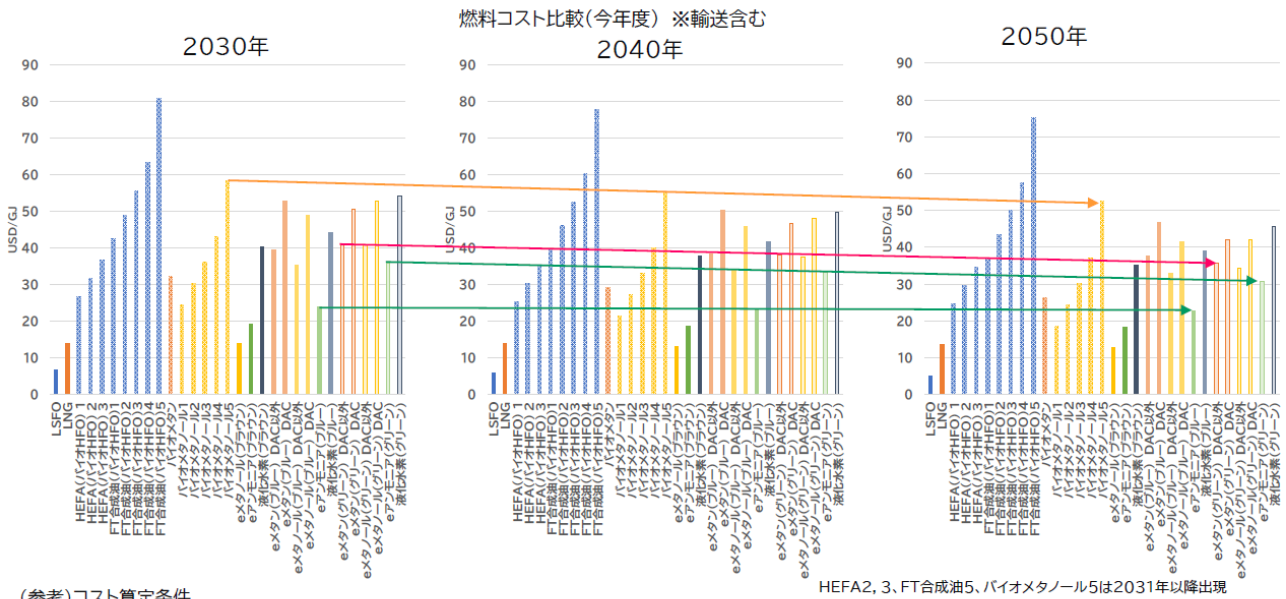
| DAC由来CO2価格 (USD/t-CO2) | 2030年 | 2040年 | 2050年 |
|------------------------|-------|-------|-------|
| | 259 | 179 | 100 |

出所) 国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター“二酸化炭素の Direct Air Capture (DAC) 法のコストと評価”

3.3 燃料コスト一覧

以上を踏まえて対象とした燃料コスト(製造後輸送コスト含む)は下記の通り。なお、下記年以外のコストは、CAPEX、OPEX を積み上げ算定する際に用いた値のそれぞれを 2030、2040、2050 年値から線形補完を行うことで設定した。詳細は別添エクセルデータを参照。

● 輸送分を含む燃料コストは以下の通り。(シナリオ共通)



(参考)コスト算定条件

- ニュートラルカーボンを含めて原料入手性に制限が無く、原料価格や再生可能電力価格がNZEに基づき将来大きく減少するというシナリオに基づく。
- 製造・供給プロセス：今回は豪州で代替燃料を生成・貯蔵→日本へ輸送→国内貯蔵・二次輸送→各船舶へバンカリング(※地域間の生成コスト差については、要すれば解析可能。)
- 全てのプロセスで使用される電力は再生可能電力(一部Grid 電源)と仮定。R-燃料においては熱供給も同様(100%熱変換、heat pumpなら100%近い効率)。一方、f-燃料生成における反応に必要な熱供給は天然ガス(または褐炭)の燃焼による。ただし、CCS付き。
- 再生可能電力の価格(USD/kWh)は、IEA予測に基づき漸減。
- 将来における技術革新により製造工程においてCAPEX、OPEX共に効率改善が見込まれると予想。

図 3-2 本年度調査検討における燃料コスト一覧

出所)各種資料を元に MRI 作成

4. CI 値、WtW 値

WtW 値(CI 値)についても昨年度検討と同様の考え方を採用した。具体的には、IEA NZE シナリオで得られるデータを元に、燃料製造プロセスベースの工程別積上を行った。その中で一部単位発熱量等の修正や新規追加燃料のため各種文献より追加を行った。詳細な前提条件については下記の通りである。また昨年度から変更されていない要素や算定の詳細は割愛。

- 生産、輸送プロセスに基づき、燃料生産時のエネルギーフロー、マテリアルフローに基づき算出した。
- IEA の NZE シナリオに基づき、系統電力の CO₂ 排出原単位は 2040 年にゼロとなると設定した。
- バイオ系燃料の原料生成において、土地利用改変による排出量(dLUC, iLUC とも)は考慮していない。
- バイオ燃料の WtT 排出量は、精製時などの電力使用および原料収集のためにコンバインや輸送機関等で用いられる化石燃料に限定されるが、これらの燃料も 2050 年時点では全て再エネ由来電力化されていると設定した。
- 上記の通り、燃料生産に係るエネルギーがゼロ排出化されるシナリオのため、いずれのグリーン系、バイオ系燃料も、2050 年へ向かってカーボンニュートラル化が可能となると設定した。

次に TtW の GHG 強度の考え方は以下の通りである。

- 回収 CO₂ については、一次利用時に排出量はカウント済と仮定した。

4.1 CI 値(WtT 排出量)の追加

主に昨年度検討の数値をそのまま採用しているが前述の通り、本年度新たにバイオマス液体燃料(バイオ HFO)に HEFA、FT 合成油が対象として追加されたため、これらの CI 値について検討した。

●2020 年時点:

OCORSIA のデフォルトライフサイクル排出量の表 4-2 における HEFA、FT 合成油(2020 年)のうち、対象地域を全世界とする値の平均値を採用し、表 4-1 の通りとした原料の違いは捨象。

○他バイオ燃料と同様に、土地利用改変による排出量(dLUC, iLUC ともに)は考慮していない。

○昨年度の考え方を踏襲し、国内外輸送排出量を上乘せ。

●2050 年時点:他バイオ燃料と同様に、全て再エネ由来電力化されていると想定し、ゼロと設定。

●2020 年から 2050 年にかけて線形で減少すると設定。

表 4-1 HEFA、FT 合成油の WtW 採用値

| WtW 値(gCO ₂ -eq/MJ) | 2020 年 | 2030 年 | 2040 年 | 2050 年 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| HEFA | 18.6 | 12.5 | 6.2 | 0 |
| FT 合成油 | 7.1 | 5.0 | 2.5 | 0 |

表 4-2 CORSIA における HEFA、FT 合成油の CI 値

Table 2. CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels produced with the Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) Fuel Conversion Process

| Region | Fuel Feedstock | Pathway Specifications | Core LCA Value | ILUC LCA Value | LS _f (gCO ₂ e/MJ) |
|----------------------|----------------------------|--|----------------|----------------|---|
| Global | Tallow | | 22.5 | 0.0 | 22.5 |
| Global | Used cooking oil | | 13.9 | | 13.9 |
| Global | Palm fatty acid distillate | | 20.7 | | 20.7 |
| Global | Corn oil | Oil from dry mill ethanol plant | 17.2 | | 17.2 |
| USA | Soybean oil | | 40.4 | 24.5 | 64.9 |
| Brazil | Soybean oil | | 40.4 | 27.0 | 67.4 |
| Global | Soybean oil | | 40.4 | 25.8 | 66.2 |
| EU | Rapeseed oil | | 47.4 | 24.1 | 71.5 |
| Global | Rapeseed oil | | 47.4 | 26.0 | 73.4 |
| Malaysia & Indonesia | Palm oil | At the oil extraction step, at least 85% of the biogas released from the Palm Oil Mill Effluent (POME) treated in anaerobic ponds is captured and oxidized. | 37.4 | 39.1 | 76.5 |
| Malaysia & Indonesia | Palm oil | At the oil extraction step, less than 85% of the biogas released from the Palm Oil Mill Effluent (POME) treated in anaerobic ponds is captured and oxidized. | 60.0 | 39.1 | 99.1 |

Table 1. CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels produced with the Fischer-Tropsch Fuel Conversion Process

| Region | Fuel Feedstock | Pathway Specifications | Core LCA Value | ILUC LCA Value | LS _f (gCO ₂ e/MJ) |
|--------|--|--|-----------------|----------------|---|
| Global | Agricultural residues | Residue removal does not necessitate additional nutrient replacement on the primary crop | 7.7 | 0.0 | 7.7 |
| Global | Forestry residues | | 8.3 | | 8.3 |
| Global | Municipal solid waste (MSW), 0% non-biogenic carbon (NBC) | | 5.2 | | 5.2 |
| Global | Municipal solid waste (MSW) (NBC given as a percentage of the non-biogenic carbon content) | | NBC*170.5 + 5.2 | | NBC*170.5 + 5.2 |
| USA | Poplar (short-rotation woody crops) | | 12.2 | -5.2 | 7.0 |
| Global | Poplar (short-rotation woody crops) | | 12.2 | 8.6 | 20.8 |
| USA | Miscanthus (herbaceous energy crops) | | 10.4 | -32.9 | -22.5 |
| EU | Miscanthus (herbaceous energy crops) | | 10.4 | -22.0 | -11.6 |

出所) CORSIA “CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels” https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20June%202022.pdf

4.2 WtW 値一覧

本年度検討における WtW 値は下記の通り。詳細な計算は割愛。

WtW GHG強度(2030年、2040年、2050年)
※実践部分はWtW、破線部分はTWを表す

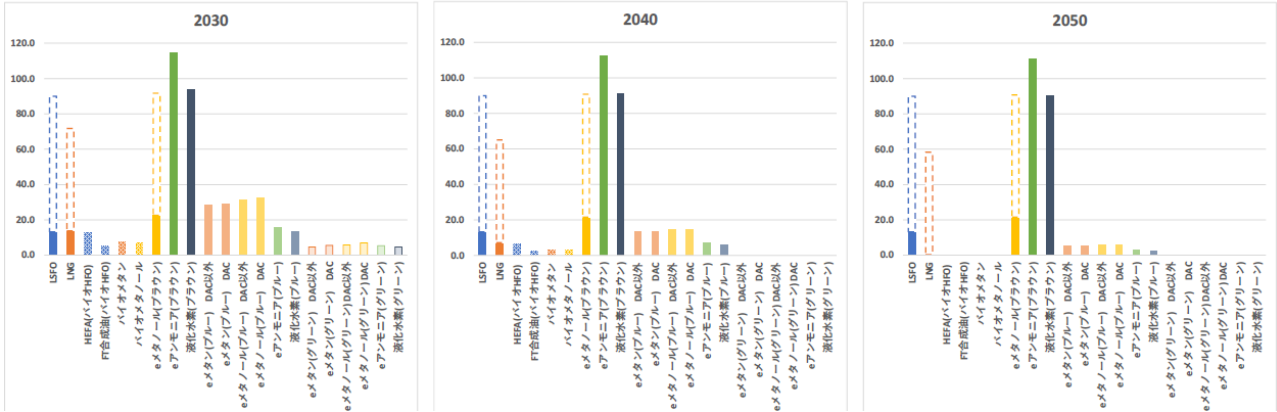


図 4-1 WtW 値(CI 値)

出所)各種資料より MRI、運輸総合研究所作成