

## 1. 発電に用いられる再生可能エネルギー

2021年の国際エネルギー機関(IEA)のRenewable Power報告書によると、2020年の世界の発電能力に占める再生可能エネルギーの割合は約29%で2010年の1.45倍となっているが、2050年のNetZeroを達成するためには2030年には、約61%と2022年の2.1倍としなければならない。そのためには2030年までは年平均12%近く再生可能エネルギーを増加させなければならない(図1-1)<sup>1)</sup>。

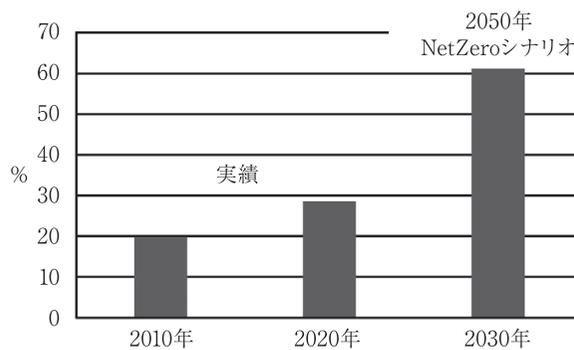


図1-1 世界の発電に占める再生可能エネルギーの割合【IEA資料<sup>1)</sup>を基に著者作成】

## 2. 世界の発電に用いられる再エネ能力

IEAは2050年にNetZeroを実現するには、2030年の世界の電力に用いられる再生可能エネルギーの発電量を、水力は5,870 TWh、風力は8,008 TWh、太陽電池は6,970 TWh、バイオマスは1,407 TWh、地熱は330 TWh、集光型太陽発電は204 TWhが必要と予想している(表1-1)<sup>1)</sup>。

表1-1 再エネによる世界の発電内訳(TWh)<sup>1)</sup>

年	2010	2020	2030
水力	3,443.3	4,418	5,870
風力	342.6	1,592	8,008
太陽電池	63.8	821	6,970
バイオマス	392	718	1,407
地熱	68.1	94	330
集光型太陽発電	0	0	204

## 1. 世界の水素需要推移

2018年の世界の水素需要は7,390万トンであった。石油精製向けが3,820万トン(51.7%)，アンモニア製造向けが3,150万トン(42.6%)，その他が420万トン(5.7%)である。この20年間で石油精製需要が増加している(図2-1)。

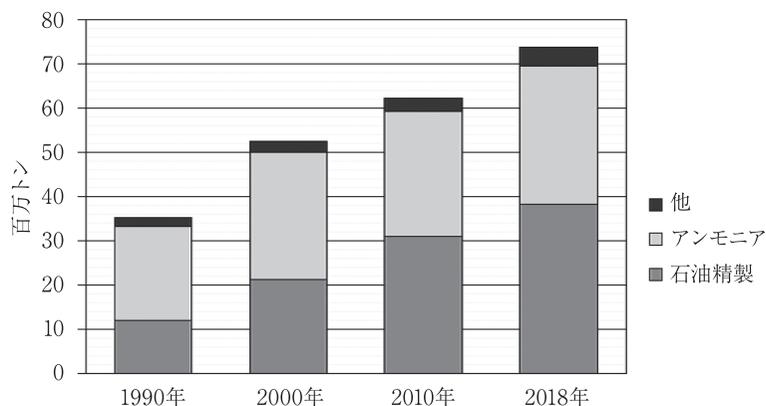


図2-1 世界の水素需要推移【IEA資料<sup>1)</sup>を基に著者作成】

## 2. 2050年の水素需要

IEAのNetZeroの報告書によると2050年には水素の需要の半分は鉄鋼と化学原料，運輸部門で，30%は海運および発電用のアンモニア，航空機用の合成燃料，およびガスネットワークに混合される合成メタンなどの水素ベースの燃料であり，17%は，太陽光発電と風力発電のバランス電源として使用される。全体として，水素ベースの燃料は2050年の世界の最終エネルギー需要の13%を占めることになる。化学産業の原料として使用されているアンモニアは，水素よりも輸送コストが低く，エネルギー密度が高いため，さまざまなエネルギー用途の燃料としても使用され，2050年に出荷される世界のエネルギーの45%を占める。合成燃料は，2050年には世界の航空燃料需要の1/3を賄う。また，水素とCO<sub>2</sub>から製造される合成メタンによって，建物，産業，運輸部門でのネットワーク供給ガス需要の10%が満たされる。世界の電解水素の容量は，現在の約0.3 GWから2030年までに850 GWとなり，2050年までに3,600 GWに達する。一方，原子力(3%)とCCUSによる化石燃料(2%)を含む再エネ電解(95%)に用いられる電力は，2050年には世界の電力の約20%(15,000 TWh)となり，CCUSによる水素製造に用

## 1. 炭素税と排出量取引制度

EUでは2005年から排出量取引制度が導入された。排出量取引制度は、国又は地域が全体の排出量の上限を設定し、上限を超えた排出企業は排出量と排出枠の売買量を決定する方法である。炭素税は、各国が独自で排出量に課税しているものである。既に、炭素税の導入は35の国や地域、排出量取引制度は29の国や地域で行われている。炭素税の価格は、スウェーデンは\$137(約17,800円)/トン・CO<sub>2</sub>、スイスは\$101(約13,100円)/トン・CO<sub>2</sub>、フランスは\$52(約6,800円)/トン・CO<sub>2</sub>、英国は\$25(約3,300円)/トン・CO<sub>2</sub>などであるが、これは、排出量取引と別に定めたもので、これらの国は炭素税も排出量取引制度のどちらも導入している。EUは、今後、域内品だけでなくCO<sub>2</sub>排出量に応じた輸入品への国境炭素税の導入を予定している。

中国は2013年から一部の省で導入を開始したが、2021年から全国で排出量取引が開始され、現在50~60元(約1,000~1,200円)/トン・CO<sub>2</sub>で取引されている。2025年には71元(約1,400円)/トン・CO<sub>2</sub>、2050年には167元(約3,300円)/トン・CO<sub>2</sub>まで上昇すると予想されている<sup>1)</sup>。

注) 日本の炭素税は289円/トン・CO<sub>2</sub>である。

## 2. EUの排出量取引額推移と予測

EUの排出量取引における炭素価格は、ロシアのウクライナ侵攻により2022年は€80(約10,400円)/トン・CO<sub>2</sub>に上昇している。ロシアからの天然ガスの供給減少に対応するため、EUは天然ガスの使用量を過去5年間の平均ガス消費量比で15%削減することを決めているが、代わりに石炭火力が増加するために炭素価格の高値が続いている。更に2030年にはCO<sub>2</sub>排出量を1990年比で55%削減しなければならず、€130(約16,900円)/トン・CO<sub>2</sub>まで上昇すると予測されている。2005年から導入されたEUの排出量取引制度(EU-ETS)による年平均取引額の推移と予測を示す(図3-1)<sup>2)</sup>。

## 1. アンモニア

### 1.1 アンモニア製造プラント

ハーバーとボッシュらによって発見され工業化された空中窒素固定法(ハーバー・ボッシュ法: HB法)によるアンモニア合成技術は人類を飢餓から救った画期的な技術であった。世界のアンモニア生産量は、毎年約2.3%の増加を続け、2020年の世界の生産量は、約1億4,400万トンと推定される。中国では石炭のガス化によって製造される水素を原料に用いているが、世界的には主に天然ガスの水蒸気改質によって得られる水素と空气中的窒素から製造されている。そのため原料の水素を得るために多量のCO<sub>2</sub>が生成される。CO<sub>2</sub>の発生量は1.5~1.6/トン・NH<sub>3</sub>で、アンモニア製造におけるCO<sub>2</sub>の発生量は全世界で人為的に排出されるCO<sub>2</sub>の1.2%に相当する<sup>1)</sup>。

### 1.2 アンモニアの生産量

世界のアンモニアの生産量は増加の一途を辿っている。世界の主なアンモニア生産国は、生産量順位で中国、ロシア、米国、インドである。世界のアンモニア生産量推移と予測を示す(図4-1)<sup>2)</sup>。

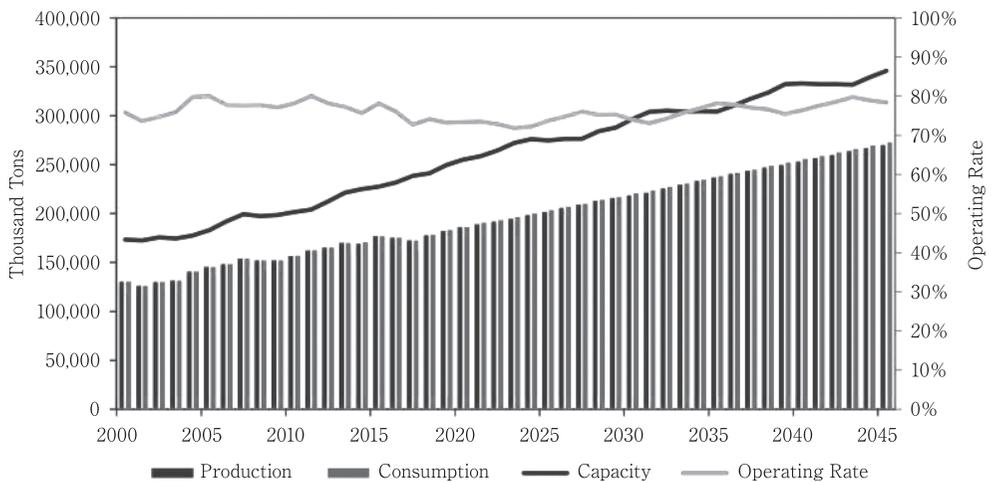
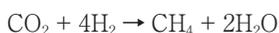


図4-1 世界のアンモニア生産量推移と予測<sup>2)</sup>

## 1. メタン

メタンは天然ガスの主要な成分である。天然ガスは石油よりも安価で埋蔵量も多く、近年ではシェールガスが世界各地で確認されている。メタンは石炭や石油に比べて燃焼時のCO<sub>2</sub>の発生量が少ないため、石炭や石油の代替燃料としての利用が進んでいる。しかし、天然ガスは化石資源であり、その利用は地球温暖化の原因であるCO<sub>2</sub>を排出してしまうため、メタンは化石資源の天然ガスからではなく、廃棄物を発酵して製造されるバイオガスや、バイオマスを経由して合成した合成ガスを用いてメタネーションによって合成する方法、又はCO<sub>2</sub>と再エネ電解水素からメタネーション反応で合成されるようになってきた。

バイオマス → 発酵 → バイオメタン



## 2. バイオガス

### 2.1 欧州のグリーンメタン戦略

欧州はエネルギーを安価に供給できるように20年以上にわたって天然ガスグリッドを欧州全体に張り巡らせてきた。中東やロシア、北アフリカから天然ガスをパイプラインで導入し、発電や暖房だけでなくアンモニアやメタノール合成などの化学産業にも利用してきた。この欧州の天然ガスグリッドを図5-1に示す<sup>1)</sup>。

欧州がバイオメタンを推進するのは、温暖化のためのCO<sub>2</sub>削減とともに、潜在的にロシアの天然ガスに頼りたくないという理由もある。欧州は、家畜糞尿や都市ごみなどを発酵させてバイオメタンを製造することに力を入れ、バイオメタンを燃料とした発電には固定価格買取制度(FIT: Feed-in Tariff)を適用し、優遇策を図ってきた。その結果、農村部では農業残渣だけでなくトウモロコシの収穫前の青トウモロコシ、都市部では生ごみや家庭の枯れ枝まで集荷して発酵槽に投入してメタン発酵が行われるようになった。メタン発酵ではメタンが約60 vol%, CO<sub>2</sub>が約40 vol%, 他に微量の硫黄化合物やNH<sub>3</sub>, シロキサンなどの不純物が含まれているガスが発生するので、硫化水素やシロキサンなどの不純物だけ除去し、CO<sub>2</sub>は混合したまま発電燃料に用いられている。欧州バイオガス協会(EBA: European Biogas Association)によると2019年末、欧州には18,943ヶ所のバイオガスプラントがあり、158億m<sup>3</sup>(167 TWh)のバイオガスが生産されている。

一方、バイオガスからのバイオメタンの生産量は、2019年にはこれまでにない増加率で増え、

## 1. バイオエタノール

### 1.1 バイオエタノールの製法

バイオエタノールは糖を原料として酵素による発酵法で製造されている。原料の糖は、米国はコーン、ブラジルはサトウキビを原料としている。原料の糖は可食資源であるため、非可食資源であるコーンストーパーや麦わらなどのセルロースを原料として、セルラーゼによる発酵法が工業的に生産され始めている。しかし、非可食資源原料は集積などのインフラが整っていないため可食資源原料エタノールよりもコストが高く、需要は伸びていない。バイオエタノールの製法を表6-1に示す。

表6-1 バイオエタノールの製法

原料	製法	開発会社	用途
サトウキビ/コーン	発酵法	多数	ガソリンブレンド, ETBE, エチレン
ヘミセルロース	発酵法	多数	ガソリンブレンド
木材 (ポプラ)	酢酸発酵+酢酸メチルの水素化	Zea2	ガソリンブレンド
一酸化炭素	古生菌による発酵	LanzaTech	ガソリンブレンド, 航空機燃料
都市ごみ	ガス化 (メタノール経由)	Enerkem	ガソリンブレンド

### 1.2 バイオエタノールの需要

世界的に、主にガソリンブレンドとして用いられているバイオエタノールの生産量は約1,300億Lである。米国をはじめとして多くの国がガソリンにエタノールを10%混合したE10ガソリンを用いるようになったが、バイオエタノール原料が可食資源であり、増産するには膨大な耕地が必要であることや第二世代のエタノールはコストが高いこと、更に、ガソリン車の需要が減少することなどから、今後の需要は増加しないと予測されている(図6-1)<sup>1)</sup>。

## 1. グリーン液体燃料の製法

グリーン液体燃料は、バイオマス又は再生可能エネルギーから得られる水素とCO<sub>2</sub>から製造されるCO<sub>2</sub>フリーの液体燃料である。海外ではガソリンブレンドとして用いられている。液体燃料であるバイオディーゼル油は、パーム油や菜種油、ひまわり油、廃食油、獣脂などの油脂をメチルエステル化(FAME：脂肪酸メチルエステル)して製造されている。更に、油脂を水素化分解した次世代のディーゼル油といわれるHVO(Hydrogenated Vegetable Oil)が製造されるようになった。パルプ工場で発生する黒液からはトール油が回収できるが、バイオディーゼル油はトール油を水素化分解することによっても一部得られている。廃材などのバイオマスは、ガス化し合成ガスとしてからFT合成によりバイオディーゼル油を生産することもできる。また、究極の技術といえる大気中のCO<sub>2</sub>と再エネ水素からメタノール経由やFT合成によってグリーン燃料が製造されつつある。グリーン燃料と製法を表7-1に示す。

表7-1 グリーン燃料と製法

燃料	原料	製法	製品	備考
ガソリン	油脂	水素化分解	ガソリン	HVO副生油
	メタノール	MTG	ガソリン	ExxonMobilがプロセスを開発、ライセンス
	CO/H <sub>2</sub>	FT合成	ガソリン	FT副生油
	CO/H <sub>2</sub>	TIGAS	ガソリン	グリーン合成ガス利用、Topsoeがプロセスを開発、ライセンス
ディーゼル油	油脂	エステル交換	FAME	油脂のメチルエステル油
		水素化	HVO	水素化油脂
	廃材	ガス化/FT合成	HVO	
	廃材	熱分解	ディーゼル燃料	水素化
	CO/H <sub>2</sub>	FT合成	FT油	再エネ水素原料
航空燃料	油脂	水素化	HVO	水素化油脂
	アルコール	ATJ	航空燃料	アルコールの二量化
	CO/H <sub>2</sub>	FT合成	航空燃料	都市ごみのガス化再エネ水素原料

## 1. バイオナフサ

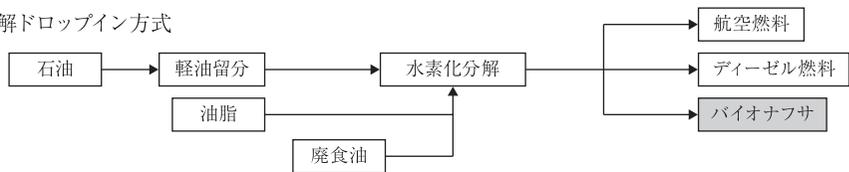
### 1.1 バイオナフサの製法

バイオナフサは、水素化ディーゼル油(HVO : Hydrogenated Vegetable Oil)の副産物である。HVO生産時にバイオナフサは約5%副生する。石油精製では油脂をドロップインで残油の水素化分解装置に混合投入すると、水素化分解装置の運転条件や用いられる触媒によって異なるが、5~10%のナフサ留分が得られるので投入分に見合うバイオナフサが得られることになる。また、クラフトパルプ製造時に副生する黒液からトール油を回収し、水素化分解することによっても製造することができる(図8-1)。

油脂の水素化分解



油脂の水素化分解ドロップイン方式



製紙副生物

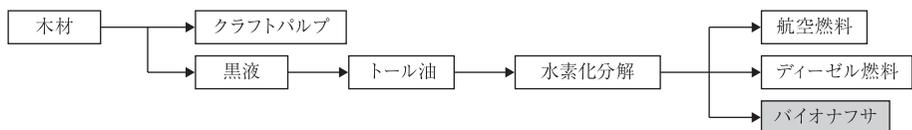


図8-1 バイオナフサの製法

### 1.2 バイオナフサの生産量

バイオナフサは、HVOの副生成物であることと、原料はパーム油や菜種油、ヒマワリ油などの可食資源であり、増産するには広大な耕地面積が必要であることなどから、今後大幅な増産は期待できない。IEAの予測する2026年の世界のバイオディーゼルの生産量は、脂肪酸メチルエステル(FAME)が500万kL/年、HVOは470万kL/年、SAF(Sustainable Aviation Fuel)が50万kL/年である<sup>1)</sup>。バイオナフサの生産量は、HVOとSAFの合計520万kLの5~10%とすると26~52万kL/年である。HVOは、航空燃料としての需要が増加すると考えられ