

環境省委託

令和 3 年度

次世代燃料における基礎的調査業務

報告書

2022 年 3 月

一般財団法人日本自動車研究所

《調査担当者一覧》

担当部署：	環境研究部
Project Manager：	伊藤晃佳
Project Chief：	柏倉桐子
第 1 章担当：	1.1 項 鈴木徹也
	1.2 項 柏倉桐子
第 2 章担当：	2.1 項 鈴木徹也、三石洋之、金成修一
	2.2 項 鈴木徹也、三石洋之、金成修一
	2.3 項 新井雅隆
	2.4 項 鈴木徹也
	2.5 項 新井雅隆
	2.6 項 新井雅隆
第 3 章担当：	柏倉桐子
第 4 章担当：	4.1 項 鈴木徹也
	4.2 項 柏倉桐子

概 要

1. 本調査の背景と目的

「2050 年カーボンニュートラル宣言」に伴い、「グリーン成長戦略」が発表され、2050 年カーボンニュートラルを目指す上では、動力源となるエネルギーのカーボンニュートラル化が必要とされている。中でも既存のインフラに使える従来のガソリンや軽油以外の次世代燃料（e-fuel 等）については、その利活用のための取り組みが推進されている。一方で、このような次世代燃料が自動車排出ガスに与える影響は明らかになっていない。このことから、基礎的な調査業務として、我が国や諸外国における次世代燃料の動向を調査するとともに、次世代燃料が自動車の排出ガスに及ぼす影響調査を実施し、燃料の性状に関する許容限度及び自動車の燃料に含まれる物質の量の許容限度の検討を行うことを目的とする。

2. 次世代燃料の国際動向等調査

日本及び諸外国における次世代燃料及び次世代燃料対応車について、市場、政策、技術等の観点で、IEA（国際エネルギー機関）や IRENA（国際再生可能エネルギー機関）等の国際機関、各国政府、業界団体、調査会社等の報告書や論文、統計等から動向等を調査した。

次世代燃料の調査に関して、比較のために一部の項目について既存燃料も対象とした。ここで、既存燃料はガソリン、軽油、CNG、LPG を対象とし、次世代燃料はバイオエタノール、バイオディーゼル、バイオメタン、合成燃料（e-fuel）、水素、アンモニアを対象とした。調査項目は、既存燃料及び次世代燃料に関する需給（生産、消費、輸入、輸出、コスト等）動向及び品質確保に係る動向、次世代燃料に関する政府や自治体の方針や法令等に関する規制動向、次世代燃料に関する研究・技術開発動向である。研究・技術開発動向については、燃料のカーボンニュートラル動向を概観するため、CO₂回収の動向も含めた。

次世代燃料対応車の調査に関して、調査項目は、普及動向、政府や自治体の方針や法令等に関する規制動向、研究・技術開発動向、次世代燃料が自動車の排出ガスに及ぼす影響である。普及動向については、自動車のカーボンニュートラル動向を概観するため、電源構成や電動車の動向も含めた。

調査対象地域は、日本及び諸外国である。諸外国は、米国、欧州、中国を基本とし、必要に応じて他の国も対象とする方針とした。ただし、燃料種によっては、需給動向や情報量等の理由でこの限りではなく、調査の趣旨を鑑みて適切に対象国を選定した。

本調査から、次世代燃料及び次世代燃料対応車の普及や規制等の動向は、国・地域によって様々であることが明らかとなった。また、次世代燃料や次世代燃料対応車の研究・技術開発動向が、将来の見通しも含めて整理された。カーボンニュートラル達成に向け、

国・地域の実情に応じた次世代燃料及び次世代燃料対応車の導入推進が求められる。

3. 次世代燃料による排出ガス試験

本試験は次世代燃料が自動車の排出ガスに及ぼす影響について知見を得る事を目的に排出ガスおよび燃料の性状を調査した。供試燃料には廃食油を水素化分解して作成された Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) を用いた。本調査で用いた HVO は JIS 2 号軽油 (JIS 2 号) の規格を満足しており、市井のガソリンスタンドで一般に向けて試験販売された実績がある。主な特徴としては、セタン価が高い、密度が低い、芳香族分がほぼ含まれない、分岐アルカンが多い、などが挙げられる。供試車両は国内で販売されているディーゼル貨物車 (車両総重量 8.0 t、総排気量 5.1 L、DPF および尿素 SCR システム搭載) を選定し、レンタカーで調達した。試験サイクルは WHVC モードで、冷機始動あるいは暖機始動でそれぞれ 3 回ずつ試験を実施した。排出量の算出は冷機始動と暖機始動の他、それぞれに重みづけをした値 (combine) も算出した。

HVO による排出量を評価するため、同じ車両を用いた他の調査業務から JIS 2 号軽油 (JIS 2 号) と国内認証試験用軽油 (認証軽油) を用いた際の排出量と比較し、HVO が一般の自動車で利用されることを想定して HVO と JIS 2 号の結果を中心に考察した。JIS 2 号を用いた排出量を基準とし、HVO を用いた排出量の変化を概要表に纏めて示す。冷機始動及び暖機始動、combine において HVO の排出量が高くなった測定項目は、PM 及び PN であった。ただし、PM 排出量は JIS 2 号と比較して高くなっても排出量は極低濃度であった。PN は冷機始動において試験サイクル中に特異的に高い排出ピークが見られた。また、PM 中の炭素成分は暖機始動で高くなった。反対に、冷機始動及び暖機始動、combine において HVO の排出量が低くなった測定項目は、CO₂、THC、NH₃、HCHO であった。

概要表 JIS 2 号に対する供試 HVO を用いた排出量の変化

調査対象		供試HVOによる排出傾向（対 JIS 2号）		
		冷機始動	暖機始動	combine
粒子状物質	PM	↑ ※	↑ ※	↑ ※
	PN	↑	↑	↑
	炭素成分	→	→	→
ガス状物質	一酸化炭素（CO）	→	→	→
	二酸化炭素（CO ₂ ）	↓	↓	↓
	全炭化水素（THC）	↓	↓	↓
	非メタン炭化水素（NMHC）	→	→	→
	窒素酸化物（NO _x ）	→	→	→
	一酸化二窒素（N ₂ O）	→	→	→
	アンモニア（NH ₃ ）	↓	↓	↓
	ホルムアルデヒド（HCHO）	↓	↓	↓

↑ : 増加 → : 変化無し ↓ : 減少

※ 各燃料の排出量を比較したグラフにおいて最大・最小値を示すエラーバーの範囲が他の燃料のエラーバーと重なっていることや、フィルターへの捕集量が極微量でトンネルブランクの影響が大きいことから、増加はしても排出量レベルは極微量と判断される。

目 次

第 1 章 本調査の目的と内容	1
1.1 背景及び目的	1
1.2 調査内容	1
1.2.1 次世代燃料の国際動向等調査	1
1.2.2 次世代燃料による排出ガス試験	1
第 2 章 次世代燃料の国際動向等調査	2
2.1 既存燃料及び次世代燃料の需給動向	2
2.1.1 ガソリン	2
2.1.1.1 日本	2
2.1.1.2 米国	4
2.1.1.3 欧州	6
2.1.1.4 中国	8
2.1.1.5 インド	9
2.1.1.6 南米	10
2.1.1.7 アフリカ	11
2.1.2 軽油	13
2.1.2.1 日本	13
2.1.2.2 米国	14
2.1.2.3 欧州	14
2.1.2.4 中国	15
2.1.2.5 インド	16
2.1.2.6 南米	17
2.1.2.7 アフリカ	17
2.1.3 CNG	18
2.1.3.1 日本	18
2.1.3.2 米国	22
2.1.3.3 欧州	23
2.1.4 LPG	25
2.1.4.1 日本	25
2.1.4.2 米国	29
2.1.4.3 欧州	31
2.1.5 バイオエタノール	32
2.1.5.1 日本	33
2.1.5.2 米国	35

2.1.5.3 欧州	38
2.1.5.4 中国	40
2.1.5.5 ブラジル.....	42
2.1.5.6 インド	45
2.1.6 バイオディーゼル.....	47
2.1.6.1 日本	48
2.1.6.2 米国	49
2.1.6.3 欧州	51
2.1.6.4 中国	54
2.1.6.5 インドネシア	56
2.1.6.6 ブラジル.....	58
2.1.7 バイオメタン.....	60
2.1.7.1 日本	60
2.1.7.2 米国	61
2.1.7.3 欧州	62
2.1.7.4 中国	63
2.1.7.5 ブラジル.....	64
2.1.8 合成燃料	65
2.1.9 水素	66
2.1.9.1 日本	68
2.1.9.2 米国	70
2.1.9.3 欧州	70
2.1.9.4 中国	71
2.1.10 アンモニア.....	72
2.1.10.1 日本	75
2.1.10.2 米国	75
2.1.10.3 欧州	76
2.2 既存燃料及び次世代燃料の品質確保に係る動向.....	77
2.2.1 ガソリン	77
2.2.1.1 日本	77
2.2.1.2 米国	78
2.2.1.3 欧州	79
2.2.1.4 中国	80
2.2.1.5 インド	80
2.2.1.6 ブラジル.....	81
2.2.1.7 アフリカ.....	83

2.2.2 軽油	85
2.2.2.1 日本	85
2.2.2.2 米国	85
2.2.2.3 欧州	86
2.2.2.4 中国	87
2.2.2.5 インド	88
2.2.2.6 ブラジル.....	89
2.2.2.7 アフリカ.....	91
2.2.3 CNG.....	92
2.2.3.1 日本	92
2.2.3.2 米国	94
2.2.3.3 欧州	94
2.2.3.4 中国	95
2.2.3.5 インドネシア	96
2.2.4 LPG.....	97
2.2.4.1 日本	97
2.2.4.2 米国	97
2.2.4.3 欧州	98
2.2.4.4 中国	99
2.2.5 バイオエタノール.....	99
2.2.5.1 日本	99
2.2.5.2 米国	100
2.2.5.3 欧州	101
2.2.5.4 中国	102
2.2.5.5 ブラジル.....	103
2.2.5.6 インド	104
2.2.6 バイオディーゼル.....	105
2.2.6.1 日本	105
2.2.6.2 米国	106
2.2.6.3 欧州	108
2.2.6.4 中国	109
2.2.6.5 インドネシア	110
2.2.6.6 ブラジル.....	111
2.2.7 バイオメタン.....	112
2.2.7.1 日本	112
2.2.7.2 米国	112

2.2.7.3 欧州	112
2.2.7.4 中国	113
2.2.7.5 ブラジル	114
2.2.8 合成燃料	114
2.2.9 水素	114
2.2.9.1 日本	116
2.2.9.2 米国	116
2.2.9.3 欧州	116
2.2.9.4 中国	117
2.2.10 アンモニア	118
2.2.10.1 日本	118
2.3 次世代燃料の研究・技術開発動向	119
2.3.1 バイオ及び合成燃料	119
2.3.1.1 バイオエタノール	124
2.3.1.2 バイオディーゼル	125
2.3.1.3 バイオメタン	129
2.3.1.4 合成燃料	131
2.3.1.5 水素	136
2.3.1.6 アンモニア	139
2.3.2 CO ₂ 回収	140
2.4 次世代燃料対応自動車の普及動向	146
2.4.1 現在及び将来の電源構成	146
2.4.2 次世代燃料対応自動車及び電動車の普及動向	149
2.4.2.1 次世代自動車の普及動向	149
2.4.2.2 次世代自動車普及に向けた取り組み	153
2.4.2.3 バイオ燃料普及に向けた取り組み	157
2.5 次世代燃料対応自動車の研究・技術開発動向	161
2.5.1 次世代燃料に対応する自動車技術	161
2.5.2 バイオエタノール	164
2.5.3 バイオディーゼル	168
2.5.4 バイオメタン	174
2.5.5 合成燃料	175
2.5.6 水素	176
2.5.7 アンモニア	181
2.6 次世代燃料が自動車の排出ガスに及ぼす影響とその対策	184
2.6.1 内燃機関の性能向上対策	184

2.6.2 バイオエタノール	186
2.6.3 バイオディーゼル	191
2.6.4 バイオメタン	198
2.6.5 合成燃料	199
2.6.6 水素	204
2.6.7 アンモニア	207
第3章 次世代燃料による排出ガス試験	209
3.1 調査の目的	209
3.2 調査内容	209
3.2.1 供試車両	209
3.2.2 供試燃料の性状	210
3.2.3 試験設備と準備・設定	215
3.2.4 試験サイクル	216
3.2.5 調査項目	217
3.2.6 試験方法	218
3.3 調査結果	219
3.3.1 CO の排出量と排出挙動	219
3.3.2 THC 及び NMHC の排出量と THC の排出挙動	222
3.3.3 NO _x 、NO、NO ₂ の排出量と NO _x の排出挙動	226
3.3.4 PM の排出量	230
3.3.5 PN の排出量と排出挙動	232
3.3.6 PM 中の炭素成分の排出量	236
3.3.7 CO ₂ の排出量と排出挙動	239
3.3.8 N ₂ O の排出量	242
3.3.9 NH ₃ の排出量	243
3.3.10 HCHO の排出量	244
第4章 まとめ	245
4.1 次世代燃料の国際動向等調査	245
4.2 次世代燃料による排出ガス試験	245
付録1 燃料品質規格の国別一覧	247
付録2 次世代燃料による排出ガス試験の排出量及び測定値	249
付録3 トンネルブランク	260
付録4 PM 中炭素成分の測定方法	261

表 目 次

表 2.1-1	副生水素供給ポテンシャル	69
表 2.1-2	アメリカの、輸入・輸出量、消費量など	76
表 2.2-1	日本の品質確保法によるガソリンの強制規格 ⁸⁷	77
表 2.2-2	米国のガソリン規制 ⁸⁷ (ガロンベース)	78
表 2.2-3	米国のガソリン規制 ⁸⁷ (平均値ベース)	78
表 2.2-4	米国のガソリン硫黄分 ⁸⁷	78
表 2.2-5	EU のガソリン規制 ⁸⁷	79
表 2.2-6	中国のガソリン規制の変遷と主要項目 ⁸⁸	80
表 2.2-7	インドのガソリン規制の変遷 ⁸⁹	81
表 2.2-8	ブラジルのガソリン規制 ⁸⁹	82
表 2.2-9	日本の品質確保法による軽油の強制規格 ⁸⁷	85
表 2.2-10	米国の軽油規制 ^{※87}	86
表 2.2-11	EU の軽油規制値 ⁸⁷	86
表 2.2-12	中国の軽油規制値の変遷 ⁹²	87
表 2.2-13	インドのガソリン、軽油規制値の導入時期 ⁸⁹	88
表 2.2-14	インドの軽油規制値の変遷 ⁸⁹	89
表 2.2-15	ブラジルの軽油の燃料基準 ⁸⁹	90
表 2.2-16	都市ガスの区分	92
表 2.2-17	都市ガス 13A の成分の一例	93
表 2.2-18	ANR Pipeline Company が規定する輸送可能なガスの品質 (2019 年抜粋) ...	94
表 2.2-19	EASEE gas が推奨する欧州共通ガス品質	95
表 2.2-20	GB 18047-2017 の品質規格	96
表 2.2-21	247.K/10/DJM.T/2011 の品質規格	96
表 2.2-22	LPG 規格 (JIS K 2240 : 2013) の概要	97
表 2.2-23	EN 589:2018 品質規格	98
表 2.2-24	GB 19159-2012 の品質規格	99
表 2.2-25	日本のエタノール混合ガソリンの品質規格	100
表 2.2-26	米国のガソリン混合用 (E1~E15) エタノールの品質規格	100
表 2.2-27	米国のエタノール混合ガソリン (E51~E83) の品質規格	101
表 2.2-28	EU のガソリン混合用エタノールの品質規格 (EN 15376)	101
表 2.2-29	中国のエタノール混合ガソリン (E10) の品質規格 (国 6)	102
表 2.2-30	中国のエタノール混合ガソリン (E85) の品質規格	103
表 2.2-31	ブラジルの燃料用エタノールの品質規格	103
表 2.2-32	インドのガソリン (E10 を含む) の品質規格	104

表 2.2-33	日本のバイオディーゼルの品質規格	105
表 2.2-34	米国のバイオディーゼル（B6～B20）の品質規格 ¹²⁰	106
表 2.2-35	米国のバイオディーゼル（B100）の品質規格 ¹²¹	107
表 2.2-36	EU のバイオディーゼル（B100）の品質規格	108
表 2.2-37	中国のバイオディーゼル（B5）の品質規格（国 6）	109
表 2.2-38	インドネシアのバイオディーゼル（B20）の品質規格	110
表 2.2-39	ブラジルのバイオディーゼル（B100）の品質規格	111
表 2.2-40	米国のバイオメタンの品質規格（American Biogas Council の例）	112
表 2.2-41	EU の自動車用天然ガス及びバイオメタンの品質規格	113
表 2.2-42	中国の自動車用バイオメタンの品質規格	113
表 2.2-43	ブラジルのバイオメタンの品質規格	114
表 2.2-44	燃料電池自動車用水素燃料仕様（ISO 14687）	115
表 2.2-45	Hy4Heat プロジェクト（英国）の水素燃料基準案	116
表 2.2-46	中国の自動車用混合ガス（水素・天然ガス）の品質規格	117
表 2.2-47	中国の自動車用液化水素の品質規格	118
表 2.3-1	各部門における脱炭素燃料のニーズ ¹⁴³	122
表 2.3-2	FAME と HVO の比較（文献より作成）	126
表 2.3-3	ディーゼル軽油、FAME、HVO の性状比較（文献 ¹⁵⁰ より作成）	127
表 2.3-4	バイオガス、バイオメタン、天然ガスの比較（文献より作成）	130
表 2.3-5	フィッシャー・トロプシュ合成プロセスの反応（文献より作成）	133
表 2.3-6	CO ₂ の回収技術（文献より作成）	141
表 2.3-7	建設段階、開発後期段階と開発早期段階の CCS 施設 ¹⁷⁵	143
表 2.3-8	DAC プラント（2020）	145
表 2.4-1	電動乗用車の販売台数推移	150
表 2.4-2	欧州における電動乗用車の販売台数推移	150
表 2.4-3	電動バンの販売台数推移	152
表 2.4-4	欧州における電動バンの販売台数推移	152
表 2.5-1	次世代燃料に対応する自動車の技術課題	162
表 2.5-2	エタノールの特性（文献より作成）	165
表 2.5-3	エタノール混合ガソリン（E85）に起因するバルブと燃焼室堆積物（100 時間運 転）の低減のための添加剤の開発	168
表 2.5-4	ディーゼル軽油、FAME、HVO、GTL の燃料特性（文献より作成）	169
表 2.5-5	DME と OMEs の燃料性状（文献より作成）	173
表 2.5-6	水素内燃機関、水素燃料電池、及びディーゼル機関を用いた大型バスのエネル ギー効率	176
表 2.5-7	水素、無鉛ガソリン、ディーゼル軽油の燃焼特性値の比較（文献より作成）	

.....	177
表 2.5-8 アンモニアと気体燃料の燃焼特性値（文献より作成）	181
表 2.6-1 内燃機関の性能向上のための主要な対策	185
表 2.6-2 各種のエタノール混合ガソリンの特性	188
表 2.6-3 菜種油（Rapeseed oil）とディーゼル軽油（Gas oil）の燃料性状の比較	191
表 2.6-4 バイオエステル混合軽油の特性	193
表 2.6-5 ディーゼル軽油、HVO、及び 2-エチルヘキサノール（C ₈ H ₁₈ O）と RME を混合 した HVO の燃料性状	196
表 2.6-6 GTL 及び GTL 混合軽油の燃料特性	200
表 2.6-7 e-fuel の運輸部門での導入予測	202
表 2.6-8 気体及び液体の e-fuel の発熱量と開発状況 ²⁵²	203
表 2.6-9 種々の燃料の開発環境と GHG 低減	203
表 3.2-1 供試車両の諸元	209
表 3.2-2 供試燃料の性状	212
表 3.2-3 シャシ・ダイナモメータ等の試験設備諸元	216
表 3.2-4 調査項目の一覧	217
表 3.2-5 調査項目と測定方法の概要	218
表 4.2-1 JIS 2 号に対する供試 HVO を用いた排出量の変化	246

図 目 次

図 2.1-1	日本の原油需給動向	3
図 2.1-2	日本の原油の輸入先	3
図 2.1-3	日本の 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹	4
図 2.1-4	ガソリン販売価格	4
図 2.1-5	米国の原油需給動向 ¹	5
図 2.1-6	米国の 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹	5
図 2.1-7	米国のガソリン販売価格	6
図 2.1-8	EU-28 の原油需給動向 ¹	7
図 2.1-9	EU-28 の 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹	7
図 2.1-10	EU-28 のガソリン販売価格	8
図 2.1-11	中国の原油需給動向 ¹	9
図 2.1-12	中国の 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹	9
図 2.1-13	インドの原油需給動向 ¹	10
図 2.1-14	インドの 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹	10
図 2.1-15	南米の原油需給動向 ¹	11
図 2.1-16	南米の 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹	11
図 2.1-17	アフリカの原油需給動向 ¹	12
図 2.1-18	アフリカの 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹	12
図 2.1-19	日本の 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹ （再掲）	13
図 2.1-20	日本の軽油販売価格 ³	13
図 2.1-21	米国の 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹ （再掲）	14
図 2.1-22	米国の軽油販売価格 ⁴	14
図 2.1-23	EU-28 の 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹ （再掲）	15
図 2.1-24	EU-28 の軽油販売価格 ⁵	15
図 2.1-25	中国の 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹ （再掲）	16
図 2.1-26	インドの 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹	16
図 2.1-27	南米の 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹ （再掲）	17
図 2.1-28	アフリカの 1 日あたりの燃料種別消費量 ¹ （再掲）	18
図 2.1-29	LNG の輸入先（2019 年度）	18
図 2.1-30	LNG の供給国別輸入量の推移	19
図 2.1-31	天然ガスの価格の年次推移	19
図 2.1-32	天然ガスの国産、輸入別の供給量	20
図 2.1-33	天然ガスの用途別消費量の推移 ¹²	21
図 2.1-34	LNG 輸入価格の推移	22

図 2.1-35	米国の天然ガス産出量.....	22
図 2.1-36	米国の天然ガス消費量 ¹⁴	23
図 2.1-37	欧州の天然ガス産出量 ¹⁴	23
図 2.1-38	欧州の天然ガス消費量 ¹⁴	24
図 2.1-39	天然ガスの輸入経路（2010 年）.....	24
図 2.1-40	LP ガスの輸入先（2019 年度）.....	25
図 2.1-41	LP ガスの価格の推移.....	26
図 2.1-42	日本の LP ガス需要動向.....	27
図 2.1-43	家庭業務用需要量と消費者世帯数と販売事業者数の推移 ¹⁷	28
図 2.1-44	LP ガス自動車及び LP ガススタンドの推移 ¹⁷	29
図 2.1-45	北米の LP ガス生産量.....	29
図 2.1-46	北米の LP ガス消費量.....	30
図 2.1-47	米国の LP ガス価格（MB 価格）の推移.....	30
図 2.1-48	欧州の LP ガス生産量 ¹⁸	31
図 2.1-49	欧州の LP ガス消費量 ¹⁹	31
図 2.1-50	欧州主要国の自動車用 LP ガス価格の推移.....	32
図 2.1-51	バイオエタノールの国・地域別生産量推移.....	33
図 2.1-52	日本の燃料用バイオエタノールの需給動向.....	34
図 2.1-53	バイオ ETBE の輸入量と単価の推移.....	34
図 2.1-54	ETBE 転換用エタノールの輸入量と単価の推移.....	35
図 2.1-55	米国の燃料用バイオエタノールの需給動向.....	36
図 2.1-56	米国の燃料用バイオエタノールの輸出入量推移.....	36
図 2.1-57	米国の燃料用バイオエタノールの国別輸出量推移.....	37
図 2.1-58	米国のガソリンとバイオエタノール（E85）の価格推移.....	37
図 2.1-59	EU-28 の燃料用バイオエタノールの需給動向.....	38
図 2.1-60	EU-28 の燃料用バイオエタノールの国別消費量推移.....	39
図 2.1-61	EU-28 の燃料用バイオエタノールの輸出入量推移.....	39
図 2.1-62	EU-28 の燃料用バイオエタノールの価格推移.....	40
図 2.1-63	中国の燃料用バイオエタノールの需給動向.....	41
図 2.1-64	中国の燃料用バイオエタノールの国別輸入量推移.....	41
図 2.1-65	ブラジルの燃料用バイオエタノールの需給動向.....	42
図 2.1-66	ブラジルの含水エタノール（E100）及び無水エタノール（ガソリン混合用）の 生産量推移.....	43
図 2.1-67	ブラジルの自動車用燃料消費量の推移.....	43
図 2.1-68	ブラジル（サンパウロ州）の自動車用燃料価格の推移.....	44
図 2.1-69	ブラジルの燃料用バイオエタノールの輸出入量推移.....	45

図 2.1-70	インドのバイオエタノールの需給動向	45
図 2.1-71	インドのバイオエタノールの輸出入量推移	46
図 2.1-72	インドのバイオエタノールの国別輸入量推移	46
図 2.1-73	インドのバイオエタノールの国別輸出量推移	47
図 2.1-74	バイオディーゼルの国・地域別生産量推移	48
図 2.1-75	日本のバイオディーゼルの需給動向	49
図 2.1-76	日本のバイオディーゼルの製造コスト推移	49
図 2.1-77	米国のバイオディーゼルの需給動向	50
図 2.1-78	米国のバイオディーゼルの輸出入量推移	51
図 2.1-79	軽油とバイオディーゼル（B20、B99/B100）の価格推移	51
図 2.1-80	EU-28 のバイオディーゼルの需給動向	52
図 2.1-81	EU-28 のバイオディーゼルの国別消費量推移	52
図 2.1-82	EU-28 のバイオディーゼルの国別輸入量推移	53
図 2.1-83	EU-28 のバイオディーゼル種類別生産量推移	53
図 2.1-84	欧州のバイオディーゼルの価格推移	54
図 2.1-85	中国のバイオディーゼルの需給動向	55
図 2.1-86	中国のバイオディーゼルの国別輸入量推移	55
図 2.1-87	中国のバイオディーゼルの国別輸出量推移	56
図 2.1-88	インドネシアのバイオディーゼルの需給動向	57
図 2.1-89	インドネシアのバイオディーゼルの国別輸出量推移	57
図 2.1-90	インドネシアのバイオディーゼルと軽油の市場インデックス価格推移	58
図 2.1-91	ブラジルのバイオディーゼルの需給動向	59
図 2.1-92	ブラジルのバイオディーゼルの平均価格推移	59
図 2.1-93	バイオメタンの地域別生産量推移	60
図 2.1-94	日本のバイオメタン生産量推移	61
図 2.1-95	米国のバイオメタン生産量推移	61
図 2.1-96	欧州のバイオメタン国別生産量推移	62
図 2.1-97	欧州主要市場におけるバイオメタンのセクター別消費量シェア（2019 年）	62
図 2.1-98	欧州におけるバイオメタン生産量の見通し	63
図 2.1-99	中国のバイオメタン生産量推移	64
図 2.1-100	ブラジルのバイオメタン生産量推移	64
図 2.1-101	各種 e-fuel のコスト	66
図 2.1-102	世界の用途別水素需要（2000～2020 年）	67
図 2.1-103	国際公約及びカーボンニュートラルでの用途別水素需要（2020～2050） ⁷³	67
図 2.1-104	日本の水素生産量	68
図 2.1-105	水素製造拠点とその供給量	69

図 2.1-106	米国のアンモニア生産に対する水素需要予測（2017 年～2024 年）	70
図 2.1-107	欧州における 2030 年と 2050 年の水素需要予測	71
図 2.1-108	中国の水素生産量の構成と地域分布（2019 年）	71
図 2.1-109	中国の FCV 保有台数 ⁸⁰	72
図 2.1-110	世界全体のアンモニア生産状況	73
図 2.1-111	世界のアンモニア消費量	73
図 2.1-112	世界の地域別アンモニア需給バランスの推移（2005 年～2013 年）	74
図 2.1-113	日本のアンモニア消費量（2019 年）	75
図 2.2-1	西アフリカにおけるガソリンの硫黄分規制値 ⁹¹	83
図 2.2-2	南アフリカにおけるガソリンの硫黄分規制値 ⁹¹	84
図 2.2-3	西アフリカの軽油の硫黄分規制値 ⁹¹	91
図 2.2-4	南アフリカの軽油の硫黄分規制値 ⁹¹	91
図 2.3-1	バイオマス燃料の種類（文献より作成）	119
図 2.3-2	合成液体燃料の製造プロセスと種類	120
図 2.3-3	合成液体燃料の製造プロセスと触媒（文献より作成）	121
図 2.3-4	カーボンリサイクルと燃料	122
図 2.3-5	バイオエタノールと合成エタノール（文献より作成）	124
図 2.3-6	バイオエステル（FAME）の生成プロセス（文献より作成）	125
図 2.3-7	HVO（hydrotreated vegetable oil）の生成プロセス（文献より作成）	126
図 2.3-8	ディーゼル軽油、FAME、HVO、HVO 混合軽油の蒸留曲線	128
図 2.3-9	HVO の組成（ガスクロマトグラフ）	128
図 2.3-10	HVO または FAME のディーゼル軽油への混合割合とセタン価 ¹⁵²	129
図 2.3-11	HVO または FAME のディーゼル軽油への混合割合とセタン指数	129
図 2.3-12	水素と関連する e-fuel の生成ルート（文献より作成）	131
図 2.3-13	PtX と生成物（文献より作成）	132
図 2.3-14	我が国における合成燃料と e-fuel の考え方	132
図 2.3-15	フィッシャー・トロプシュ合成プロセスと生成物（文献より作成）	134
図 2.3-16	F-T 合成を用いた e-fuel 製造プロセスのエネルギーとマテリアルの流れ	134
図 2.3-17	オランダにおける e-fuel の導入スケジュール	135
図 2.3-18	我が国の合成燃料の開発スケジュール（文献より抜粋作成）	135
図 2.3-19	水素の生産プロセス（文献より作成）	136
図 2.3-20	資源別の水素の製造割合（文献より作成）	137
図 2.3-21	水素の用途（文献より作成）	137
図 2.3-22	世界の水素生産量予測（文献より作成）	138
図 2.3-23	e-水素を中核にしたエネルギー・ネットワーク（文献より作成）	139
図 2.3-24	CO ₂ フリー・アンモニアのサプライチェーン	140

図 2.3-25	操業段階、建設段階、開発後期段階の商用 CCS 施設	142
図 2.3-26	空気中からの CO ₂ 回収プロセス（文献より作成）	144
図 2.4-1	日本の 2019 年度と 2030 年度の電源別発電量	146
図 2.4-2	米国の 2050 年までの電源別発電量推移	147
図 2.4-3	欧州の 2050 年までの電源別発電量推移	148
図 2.4-4	中国の 2050 年までの発電量と電源構成	149
図 2.4-5	電動乗用車の販売台数シェア推移	151
図 2.4-6	欧州における電動乗用車の販売台数シェア推移	151
図 2.5-1	次世代燃料の分類	161
図 2.5-2	燃焼場における局所当量比と燃焼温度の関係(ϕ -T map)	163
図 2.5-3	燃料の反応性をもとにした種々の着火方式のコンセプト（文献より作成） ..	164
図 2.5-4	RCCI 燃焼のコンセプト（文献 ²⁰⁴ より作成）	164
図 2.5-5	ガソリン及びエタノール混合ガソリンの ASTM 蒸留曲線	166
図 2.5-6	エタノール混合ガソリンと機関性能	167
図 2.5-7	急速圧縮装置（5.065 MPa、724 K）を用いた高圧、高温下におけるディーゼル 蒸発噴霧の到達距離の測定	170
図 2.5-8	バイオエステル機関の堆積物（250 時間運転）	171
図 2.5-9	ディーゼル軽油と HVO の噴霧の到達距離の実験値と推定値の比較	172
図 2.5-10	自動車用燃料としてのバイオメタンの精製プロセス	174
図 2.5-11	F-T プロセスと水素分解で合成された炭化水素	175
図 2.5-12	車載燃料として評価した場合の水素のエネルギー密度（文献より作成） ...	178
図 2.5-13	内燃機関への水素の供給方式（文献より作成）	178
図 2.5-14	水素の投入位置と投入エネルギーの関係（文献より作成）	179
図 2.5-15	吸気管噴射方式の水素予混合ガソリン機関	180
図 2.5-16	吸気管噴射方式の水素予混合ガソリン機関の性能 ²²⁹	180
図 2.5-17	アンモニア予混合ガソリン機関	182
図 2.5-18	アンモニア-DME 直噴ディーゼル機関	182
図 2.5-19	船用ディーゼル機関におけるアンモニアの混焼（文献より作成）	183
図 2.6-1	乗用車 100 km 走行に必要な燃料の製造時を含めた総エネルギーと 1 km 走行時 の総 GHG 排出量の関係（文献より作成）	186
図 2.6-2	エタノール混合ガソリンと NO _x 排出特性	187
図 2.6-3	各種エタノール混合ガソリンの蒸留特性 ²⁴⁰	188
図 2.6-4	各種のエタノール混合ガソリンを用いた場合の排出物特性 ²⁴⁰	189
図 2.6-5	3 種類の機関を用いたエタノール混合ガソリンと PM 排出量の関係	190
図 2.6-6	PM の粒径分布に与えるエタノール混合ガソリンの影響	190
図 2.6-7	菜種油（Rapeseed oil）とディーゼル軽油（Gas oil）を用いたディーゼル機関（機	

械式燃料噴射) の Soot と SOF の排出傾向 ²⁴³	192
図 2.6-8 バイオエステル混合軽油を用いた場合のディーゼル機関の排出ガス特性 ²⁴⁴	193
図 2.6-9 バイオエステルの混合割合とディーゼル機関の平均的な排出ガス特性の変化	194
図 2.6-10 100%HVO と 30%HVO 混合ディーゼル軽油の排出ガスと燃費のディーゼル軽 油 (EN-590) の場合を基準にした低減率	195
図 2.6-11 HVO の混合割合とディーゼル機関の平均的な NO _x と PM の削減率	195
図 2.6-12 NO _x と PM に及ぼす燃料と EGR 及び噴射パターンの影響 ²⁴⁸	197
図 2.6-13 PM の粒径分布に及ぼす燃料と EGR 及び噴射パターンの影響 ²⁴⁸	198
図 2.6-14 火花点火機関で CNG とガソリンを使用した場合の排出ガス特性	199
図 2.6-15 GTL 及び GTL 混合軽油とディーゼル機関の出力と熱効率 ²⁵⁰	200
図 2.6-16 GTL 及び GTL 混合軽油とディーゼル機関の排出ガス ²⁵⁰	201
図 2.6-17 ドイツの e-fuel 導入計画	204
図 2.6-18 水素混焼を行った場合のガソリン機関 (75%WOT) の排出ガス特性	205
図 2.6-19 火花点火式の水素直噴機関の NO _x 低減対策としての EGR	205
図 2.6-20 水素 RCCI 燃焼の NO 低減に及ぼす水素の効果	206
図 2.6-21 水素 RCCI 燃焼の煙濃度 (smokiness) 低減に及ぼす水素の効果 ²⁵⁹	206
図 2.6-22 アンモニア火花点火における未燃のアンモニアと NO _x 排出濃度の関係	207
図 2.6-23 アンモニア火花点火におけるアンモニアの N ₂ 希釈と NO _x 排出濃度の関係 ²⁶⁰	208
図 3.2-1 供試車両の概観	210
図 3.2-2 供試燃料の蒸留曲線	213
図 3.2-3 HVO 燃料と JIS 2 号軽油の GC-FID 分析クロマトグラム	213
図 3.2-4 JIS 2 号の GC×GC 分析クロマトグラムと分析結果	214
図 3.2-5 供試 HVO の GC×GC 分析クロマトグラムと分析結果	215
図 3.2-6 WHVC の車速パターン	217
図 3.3-1 CO 排出量 (g/kWh) の比較	219
図 3.3-2 CO 排出量 (g/km) の比較	220
図 3.3-3 CO の排出挙動 (冷機始動)	220
図 3.3-4 CO の排出挙動 (暖機始動)	221
図 3.3-5 THC 及び NMHC 排出量 (g/kWh) の比較	222
図 3.3-6 THC 及び NMHC 排出量 (g/km) の比較	223
図 3.3-7 THC の排出挙動 (冷機始動)	224
図 3.3-8 THC の排出挙動 (暖機始動)	225
図 3.3-9 NO _x 、NO、NO ₂ 排出量 (g/kWh) の比較	226
図 3.3-10 NO _x 、NO、NO ₂ 排出量 (g/km) の比較	227

図 3.3-11	NO _x の排出挙動（冷機始動）	228
図 3.3-12	NO _x の排出挙動（暖機始動）	229
図 3.3-13	PM 排出量（mg/kWh）の比較	230
図 3.3-14	PM 排出量（mg/km）の比較	230
図 3.3-15	HVO 燃料を用いた WHVC 冷機始動の PM 捕集フィルター	231
図 3.3-16	PN 排出量（#/kWh）の比較	232
図 3.3-17	PN 排出量（#/km）の比較	232
図 3.3-18	PN の排出挙動（冷機始動）	233
図 3.3-19	PN の排出挙動（暖機始動）	234
図 3.3-20	PM 排出量に対する PN 排出量の関係	235
図 3.3-21	PM 中炭素成分排出量（mgC/kWh、）の比較	237
図 3.3-22	PM 中炭素成分排出量（mgC/km）の比較	238
図 3.3-23	CO ₂ 排出量（g/kWh）の比較	239
図 3.3-24	CO ₂ 排出量（g/km）の比較	239
図 3.3-25	CO ₂ の排出挙動（冷機始動）	240
図 3.3-26	CO ₂ の排出挙動（暖機始動）	241
図 3.3-27	N ₂ O 排出量（mg/kWh）の比較	242
図 3.3-28	N ₂ O 排出量（mg/km）の比較	242
図 3.3-29	NH ₃ 排出量（mg/kWh）の比較	243
図 3.3-30	NH ₃ 排出量（mg/km）の比較	243
図 3.3-31	HCHO 排出量（mg/kWh）の比較	244
図 3.3-32	HCHO 排出量（mg/km）の比較	244

付 録 表 目 次

付録表 1-1	ガソリン	247
付録表 1-2	軽油	248
付録表 2-1	サイクル仕事量当たりの規制及び規制関連物質排出量	250
付録表 2-2	走行距離当たりの規制及び規制関連物質排出量	251
付録表 2-3	希釈空気中の規制及び規制関連物質の測定濃度	252
付録表 2-4	希釈排出ガス中の規制及び規制関連物質の測定濃度	253
付録表 2-5	サイクル仕事量当たりの PM 中炭素成分排出量	254
付録表 2-6	走行距離当たりの PM 中炭素成分排出量	255
付録表 2-7	PM 中炭素成分の希釈空気測定濃度	256

付録表 2-8	PM 中炭素成分の希釈排出ガス測定濃度.....	257
付録表 2-9	N ₂ O、NH ₃ 、HCHO の排出量.....	258
付録表 2-10	N ₂ O、NH ₃ 、HCHO の希釈空気及び希釈排出ガス測定濃度.....	259
付録表 4-1	炭素成分測定装置の分析条件	261

付 録 図 目 次

付録図 2-1	試験前トンネルブランクに対する各試験日のトンネルブランク及び試験サイクル試料（燃料は HVO）、トラベルブランクの比較	260
---------	---	-----

第1章 本調査の目的と内容

1.1 背景及び目的

「2050 年カーボンニュートラル宣言」に伴い、「グリーン成長戦略」が発表され、2050 年カーボンニュートラルを目指す上では、動力源となるエネルギーのカーボンニュートラル化が必要とされている。中でも既存のインフラに使える従来のガソリンや軽油以外の次世代燃料（e-fuel 等）については、その利活用のための取り組みが推進されている。一方で、このような次世代燃料が自動車排出ガスに与える影響は明らかになっていない。このことから、基礎的な調査業務として、我が国や諸外国における次世代燃料の動向を調査するとともに、次世代燃料が自動車の排出ガスに及ぼす影響調査を実施し、燃料の性状に関する許容限度及び自動車の燃料に含まれる物質の量の許容限度の検討を行うことを目的とする。

1.2 調査内容

1.2.1 次世代燃料の国際動向等調査

諸外国における次世代燃料にかかる動向等を調査し、日本国内の動向との比較検討を行い考察する。また、調査を行った諸外国等において、e-fuel 等の製造に必要とされている二酸化炭素（CO₂）の回収技術の取組状況、自動車のカーボンニュートラル化の動向及び現在・将来の電源構成を調査し、日本国内の動向との比較検討を行い考察する。更に、次世代燃料が自動車の排出ガスに及ぼす影響や自動車の技術的な特徴及び排出ガス低減対策について、報告されている文献等を調査し、取りまとめる。

1.2.2 次世代燃料による排出ガス試験

次世代燃料が自動車の排出ガスに及ぼす影響調査を実施し、燃料の性状と排出ガスの影響を考察する。調査対象車両は国内で販売されているディーゼル車（貨物車）1 台である。供試燃料については、一般のディーゼル車が使用しても安全上問題が無い次世代燃料を選択する。排出ガス量の調査対象物質は、規制物質である一酸化炭素（CO）、非メタン炭化水素（NMHC）、窒素酸化物（NO_x）、粒子状物質（PM）の他、全炭化水素（THC）、CO₂、固体粒子数（PN）、一酸化二窒素（N₂O）、アンモニア、ホルムアルデヒド及び PM 中の炭素成分とする。また、CO、NO_x、THC、CO₂ 及び PN については時系列データを取得する。排出ガス測定試験は WHVC モードに準拠して実施し、3 回の排出ガス測定を行う。

第2章 次世代燃料の国際動向等調査

本章では、IEA（国際エネルギー機関）や IRENA（国際再生可能エネルギー機関）等の国際機関、各国政府、業界団体、調査会社等の報告書や論文、統計等、一般に入手できる資料に基づき調査を行った。調査対象地域は、日本及び諸外国である。諸外国は、輸送用燃料消費量の世界に占めるシェアが大きい米国、欧州、中国を基本とし、必要に応じて他の国も対象とする方針とした（例えば、バイオエタノールでは生産量の多いブラジルとインドを追加）。ただし、燃料種によっては、需給動向や情報量等の理由でこの限りではなく、調査の趣旨を鑑みて適切に対象国を選定した。

2.1 既存燃料及び次世代燃料の需給動向

本節では需給動向として、生産量、消費量、（国別）輸入量、（国別）輸出量、価格等を整理する方針とした。ただし、燃料種や国によっては、不要な項目（例えば輸出していない）があったり、情報が乏しく確認できなかった場合もあり、必ずしも全ての項目を網羅しているわけではないことに留意されたい。

2.1.1 ガソリン

本項では、各地域のガソリン需給動向を整理した。対象地域は消費量が多い日本、米国、欧州、中国に加えて、近年、経済成長に伴う自動車台数の増加により、今後消費量が増加する可能性があるインド、南米、アフリカを対象とした。

2.1.1.1 日本

日本の原油の需給動向を図 2.1-1、輸入先を図 2.1-2、ガソリンを含む石油燃料の 1 日あたりの消費動向を図 2.1-3、販売価格を図 2.1-4 に示す。日本は原油の確認埋蔵量は無いため、基本的に全て海外からの輸入に依存している。輸入先のうち、上位 4 か国は中東であり、85%を占める。ガソリンは 2000 年代前半をピークに減少に転じており、これはガソリン車の燃費が改善されている影響もあると考えられる。2020 年にはガソリンは 1 日あたり 774 千バレル消費されており、原油全体の約 2 割強を占める。

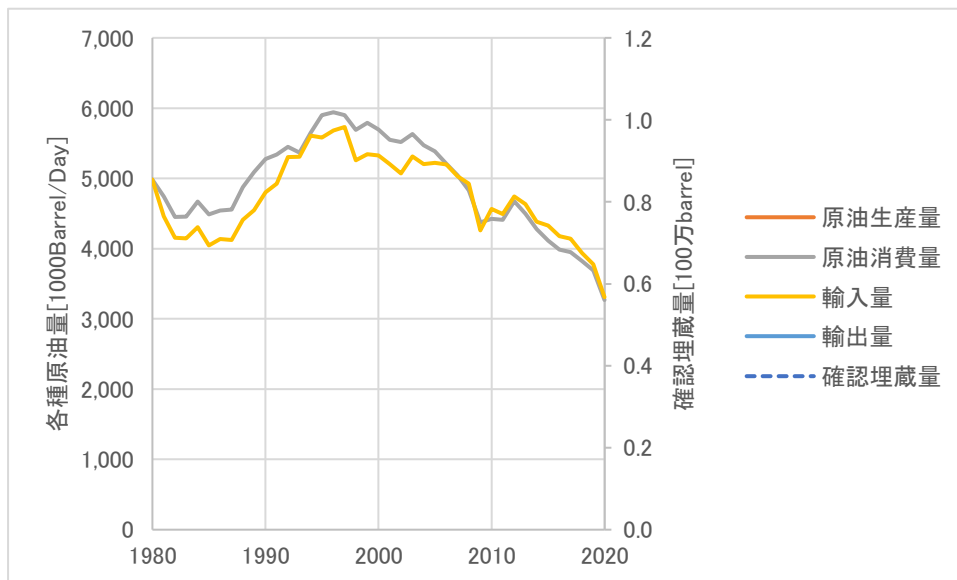


図 2.1-1 日本の原油需給動向¹

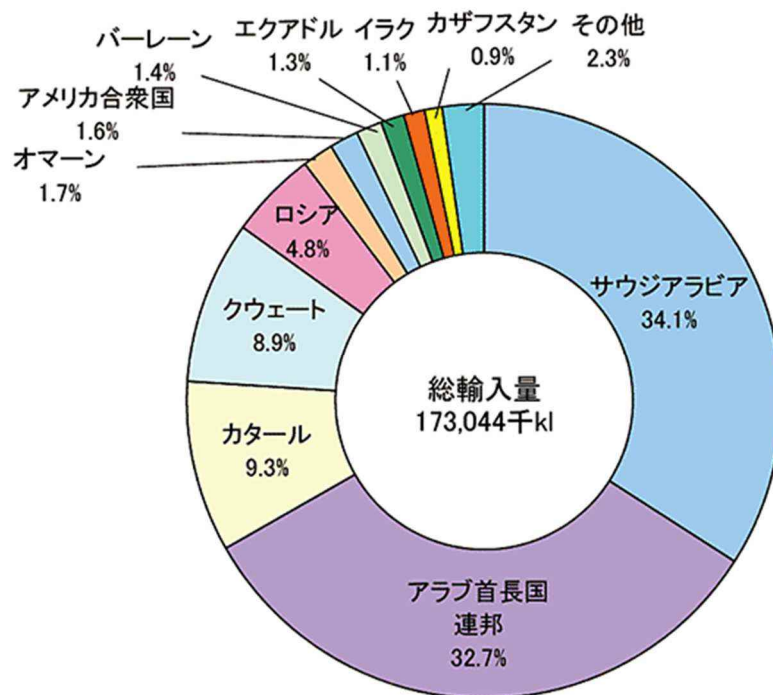


図 2.1-2 日本の原油の輸入先²

¹ Bernard Looney, Bp Statistical Review of World Energy 2021 | 70th edition (2021)
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> [2022.1.14 閲覧]

² 資源エネルギー庁, 令和2年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2021)
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/pdf/> [2022.1.14 閲覧]

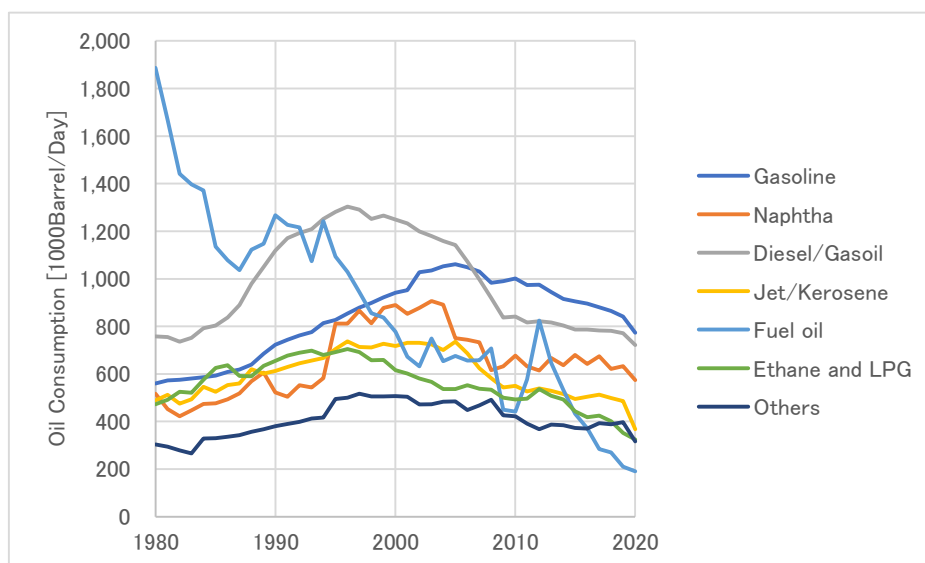


図 2.1-3 日本の1日あたりの燃料種別消費量¹

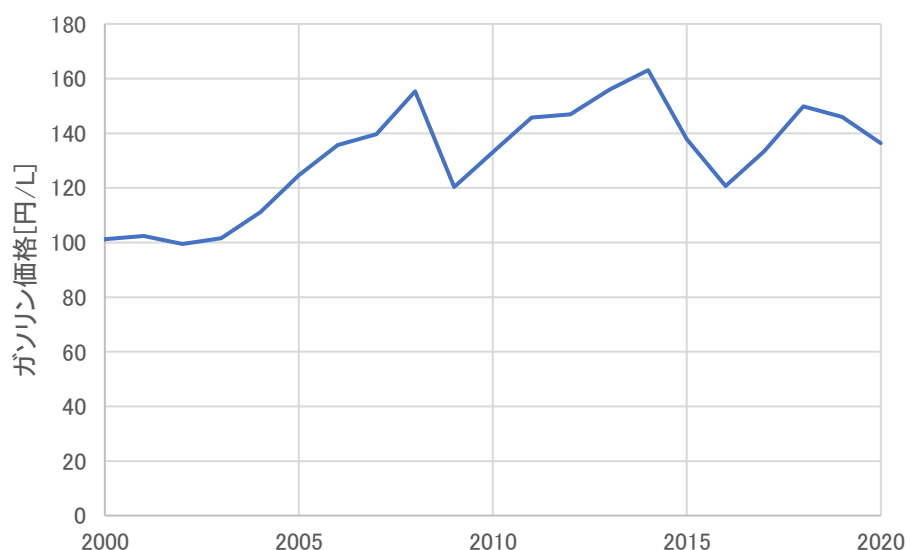


図 2.1-4 ガソリン販売価格³

2.1.1.2 米国

米国の原油の需給動向を図 2.1-5、ガソリンを含む石油燃料の1日あたりの消費動向を図 2.1-6、ガソリン価格を図 2.1-7 に示す¹。米国は一定の確認埋蔵量があるものの、1日あたりで見ると、生産量よりも消費量が多く、輸出も一定量行っているが、輸入量の方が多いたことが分かる。また、近年確認埋蔵量が増加しているが、これはオイルシェールの影響によるものであると考えられる。ガソリン消費量は2005年をピークに減少し、2020年

³ 資源エネルギー庁 石油価格調査

https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/results.html

ではガソリンは 1 日あたり 7,222 千バレル消費されており、原油全体の約 4 割強を占める。

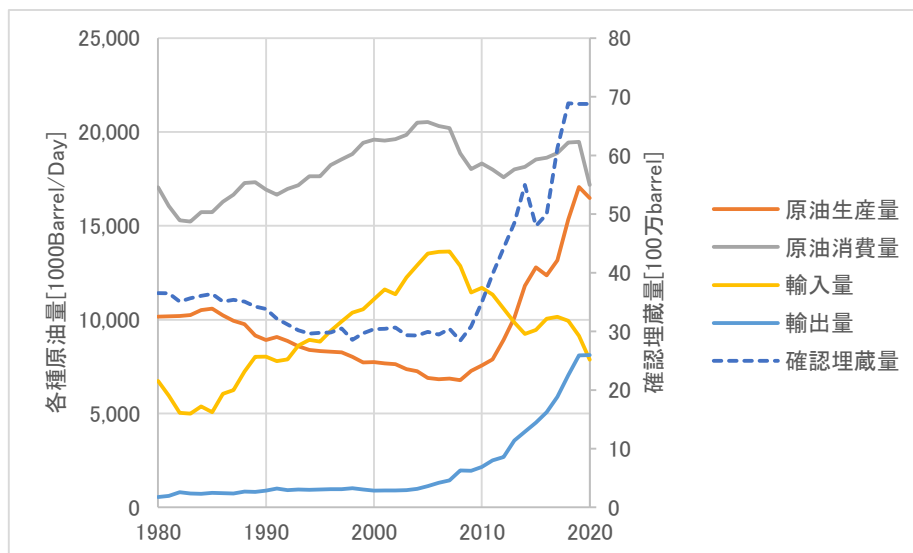


図 2.1-5 米国の原油需給動向¹

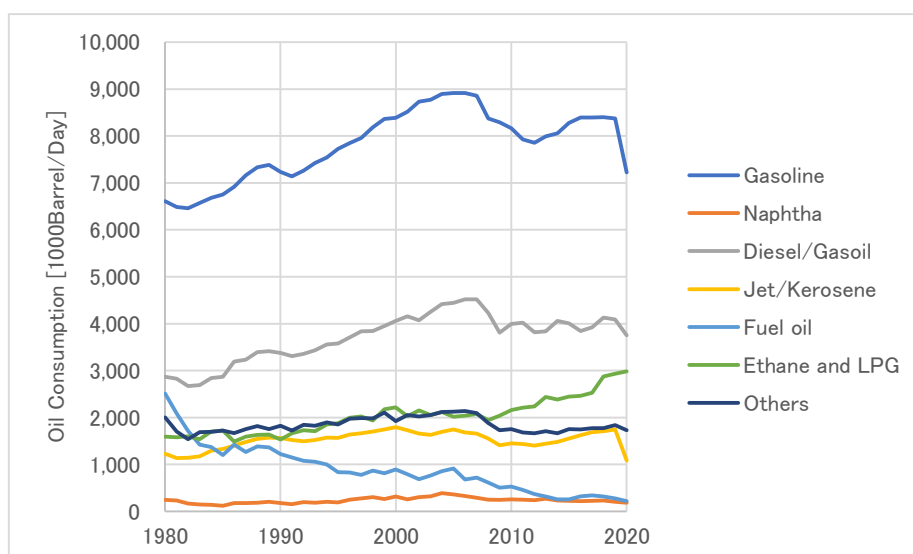


図 2.1-6 米国の 1 日あたりの燃料種別消費量¹

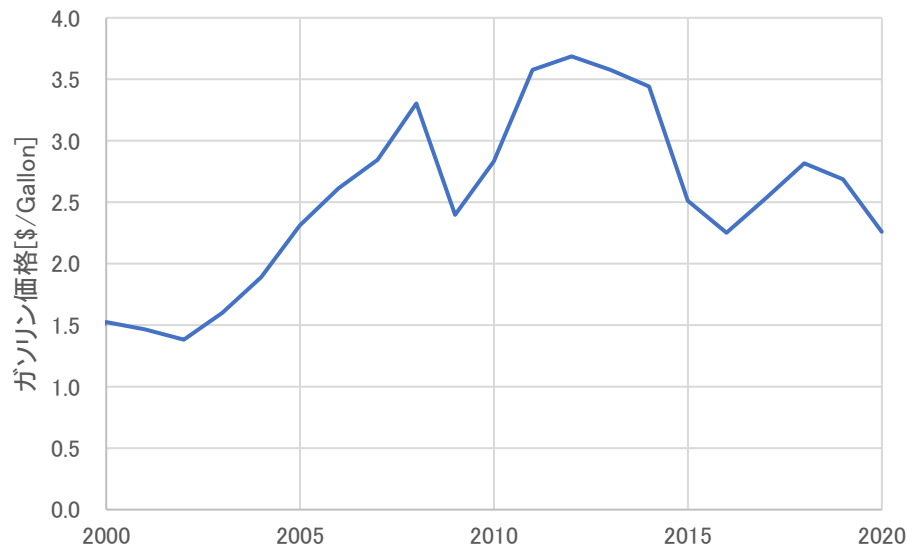


図 2.1-7 米国のガソリン販売価格⁴

2.1.1.3 欧州

EU（ここでは英国も含めた EU-28）の原油の需給動向を図 2.1-8、ガソリンを含む石油燃料の 1 日あたりの消費動向を図 2.1-9、ガソリン価格を図 2.1-10 に示す¹。EU はイタリア、ルーマニアなどの一部の国で一定の確認埋蔵量があるものの、1 日あたりで見ると、生産量よりも圧倒的に消費量が多い。また、一部の国では輸出を行っており、2020 年の EU では 2,742 千バレルとなるが、輸入量は 12,611 千バレルと約 5 倍と圧倒的に多いことが分かる。ガソリンは 2000 年をピークに減少傾向となり、2020 年における 1 日あたりガソリン消費量は 1,377 千バレル消費されており、原油全体の約 1 割強を占める。日本や米国などは新車の 2% がディーゼル車であるのに対し、EU は 50% 以上とガソリン車よりもディーゼル車が普及しているため、ガソリンの消費割合が低いと推測される。

⁴ Energy Information Administration
https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=EMM_EPM0_PTE_NUS_DPG&f=M.U.S.

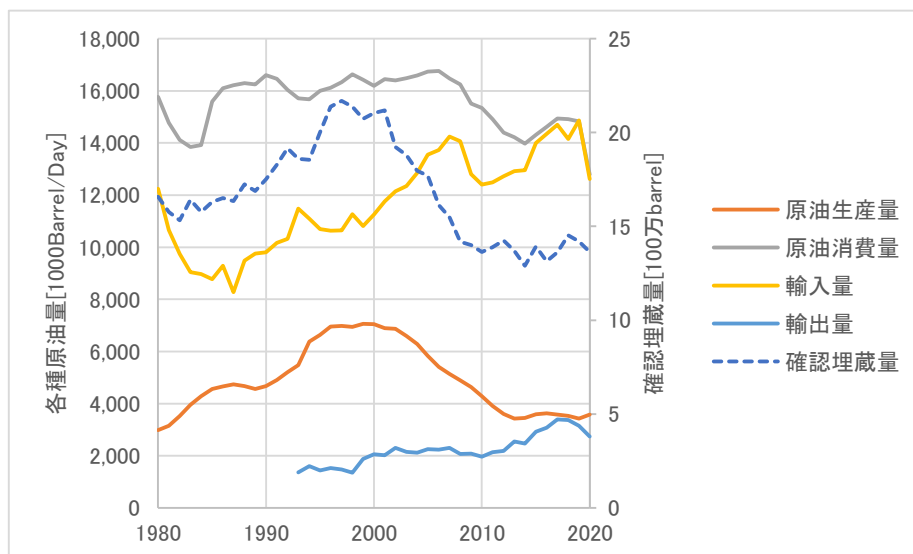


図 2.1-8 EU-28 の原油需給動向¹

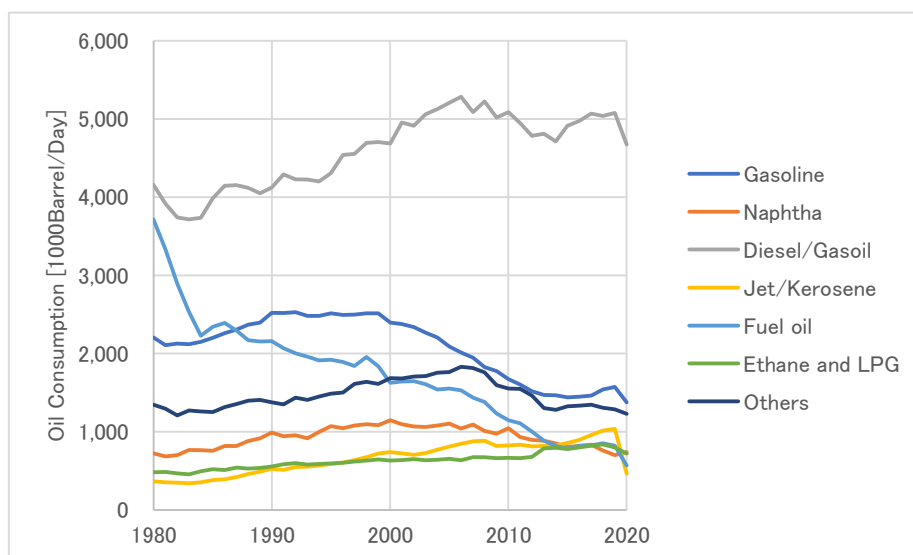


図 2.1-9 EU-28 の 1 日あたりの燃料種別消費量¹

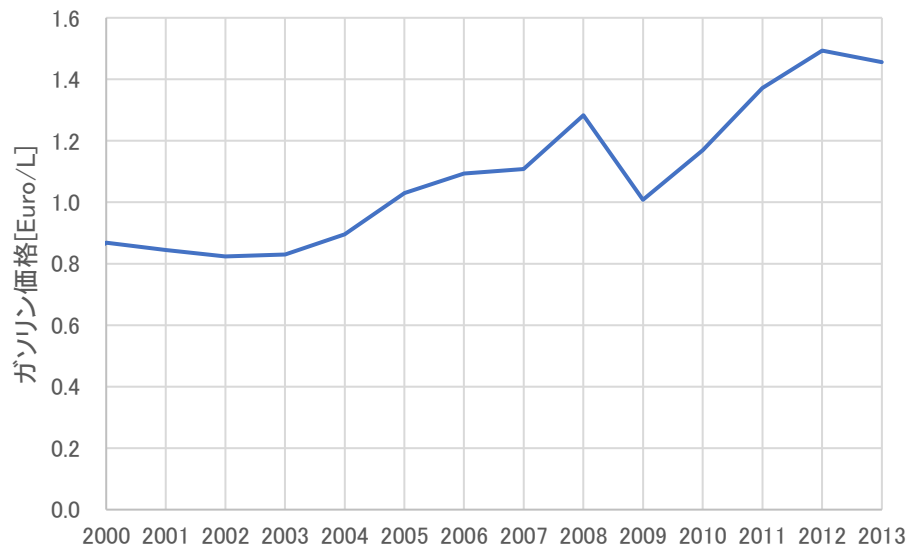


図 2.1-10 EU-28 のガソリン販売価格⁵

2.1.1.4 中国

中国の原油の需給動向を図 2.1-11、ガソリンを含む石油燃料の 1 日あたりの消費動向を図 2.1-12 に示す¹。中国は一定の確認埋蔵量があるが、近年、確認された 1 億トン以上の産地として、オルドス盆地、渤海湾盆地（陸上）、ジュンガル盆地の 3 カ所が挙げられる。1 日あたりで見ると、生産量よりも消費量の方が多く、2020 年は 12,865 千バレル輸入している。ガソリン消費量はアフリカと同様に 2020 年を除くと増加傾向が続き、2020 年の 1 日あたりのガソリン消費量は 2,942 千バレル消費されており、原油全体の 2 割強を消費している。ガソリンの販売価格は、0.99 ドル/L（2019）⁶となっているが、経年変化は原油価格と連動するものと考えられる。

⁵ European Environment Agency :

<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/fuel-prices-and-taxes/assessment-3>

⁶ IEA <https://www.iea.org/articles/fuel-economy-in-china>

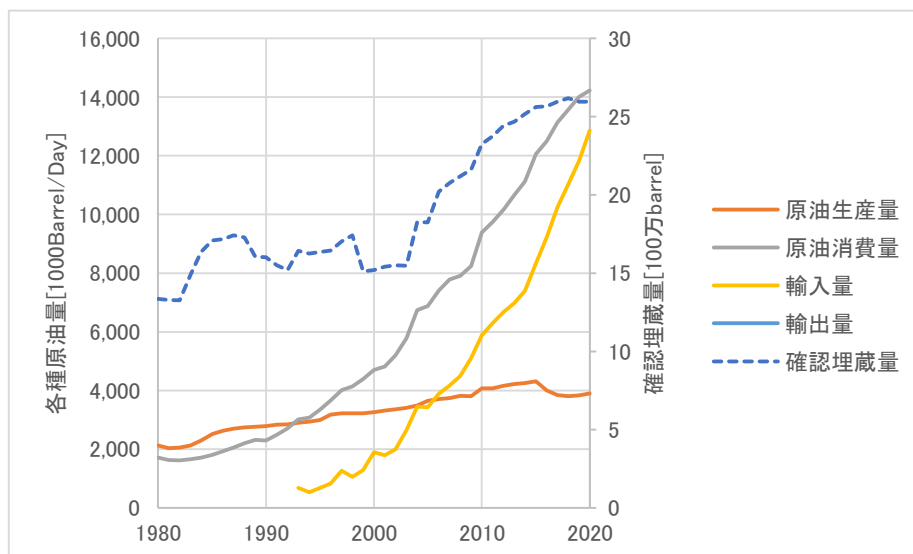


図 2.1-11 中国の原油需給動向¹

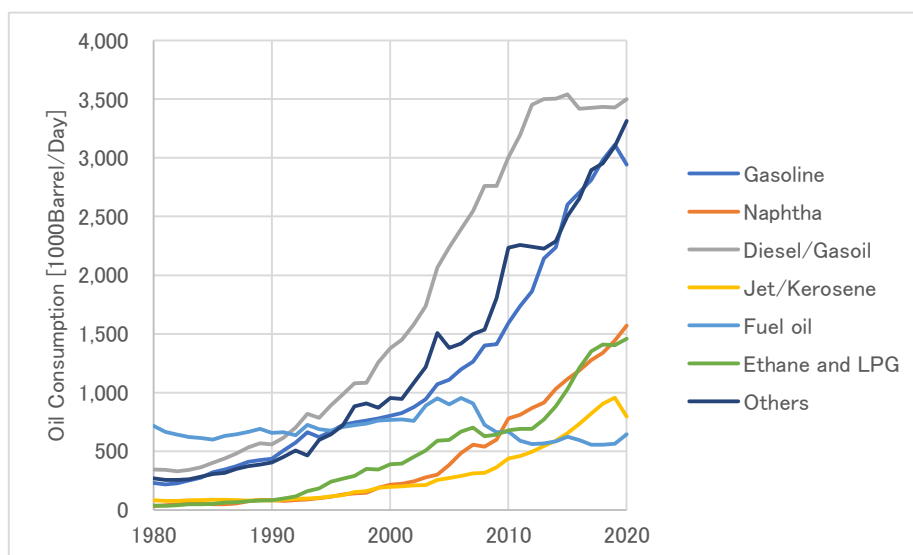


図 2.1-12 中国の1日あたりの燃料種別消費量¹

2.1.1.5 インド

インドの原油の需給動向を図 2.1-13、ガソリンを含む石油燃料の1日あたりの消費動向を図 2.1-14 に示す¹。インドは一定の確認埋蔵量があるが、1日あたりで見ると、生産量よりも消費量の方が多く、輸出も行っているが、圧倒的に輸入量が多く、2020 年は 5,030 千バレル輸入している。2020 年の1日あたりのガソリン消費量は 553 千バレル消費されており、原油全体の1割強を消費している。ガソリンの販売価格は、エジプトで 105.5Rp/L (2021) となっているが、経年変化も原油価格と連動するものと考えられる。

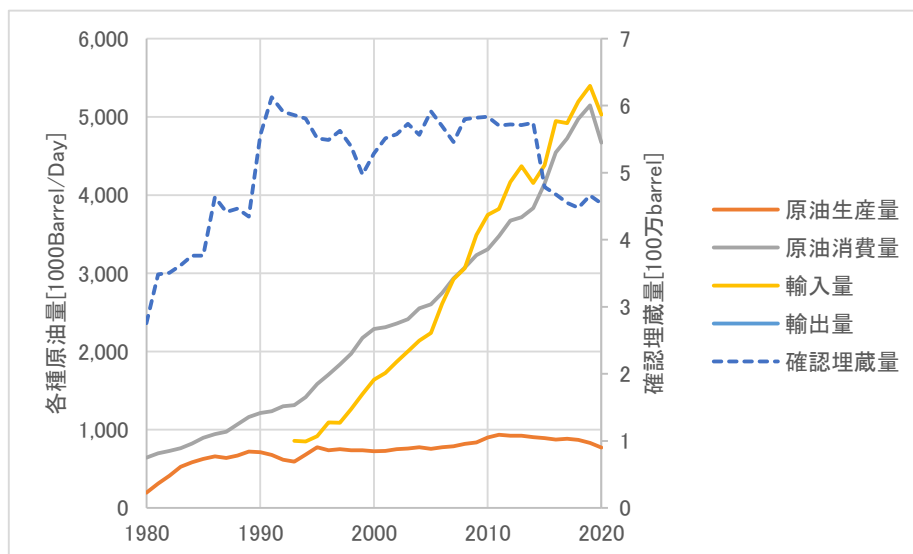


図 2.1-13 インドの原油需給動向¹

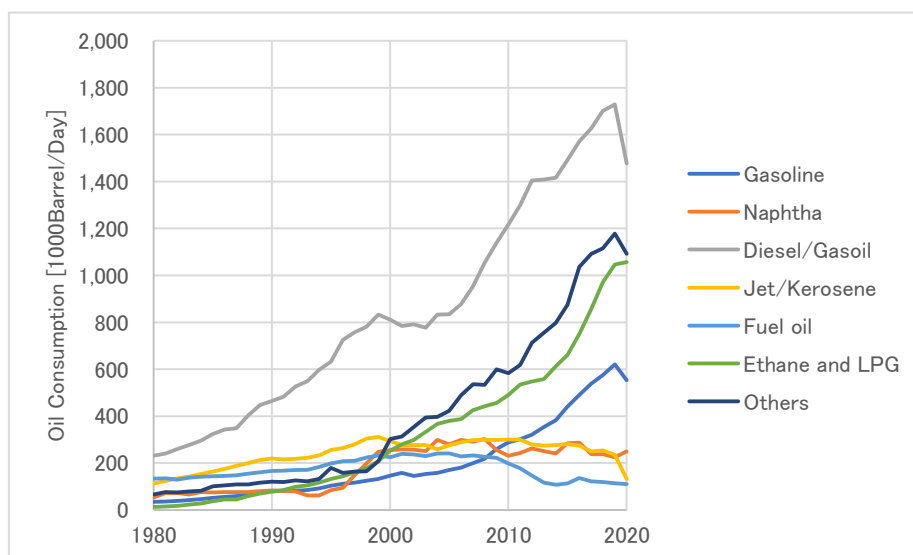


図 2.1-14 インドの1日あたりの燃料種別消費量¹

2.1.1.6 南米

南米の原油の需給動向を図 2.1-15、ガソリンを含む石油燃料の1日あたりの消費動向を図 2.1-16 に示す¹。南米はベネズエラなどで一定の確認埋蔵量がある。2007 年～2010 年にかけて急増し、2010 年以降安定する。この要因として、ベネズエラのオリノコベルトに賦存する重質油を加算したためである。1 日あたりで見ると、消費量よりも生産量の方が多く、2020 年では 3,455 千バレル輸出している。ガソリン消費量は、2014 年をピークに減少傾向に転じ、2020 年のガソリン消費量は 1 日あたり 1153 千バレル消費されており、原油全体の約 2 割強を占める。南米のガソリンの販売価格は、チリで 1.07 ドル/L (2021)、

ブラジルで 4.22 ドル/L (2020) となっており、各国の税制等によりばらつきはあるが、経年変化は原油価格と連動するものと考えられる。

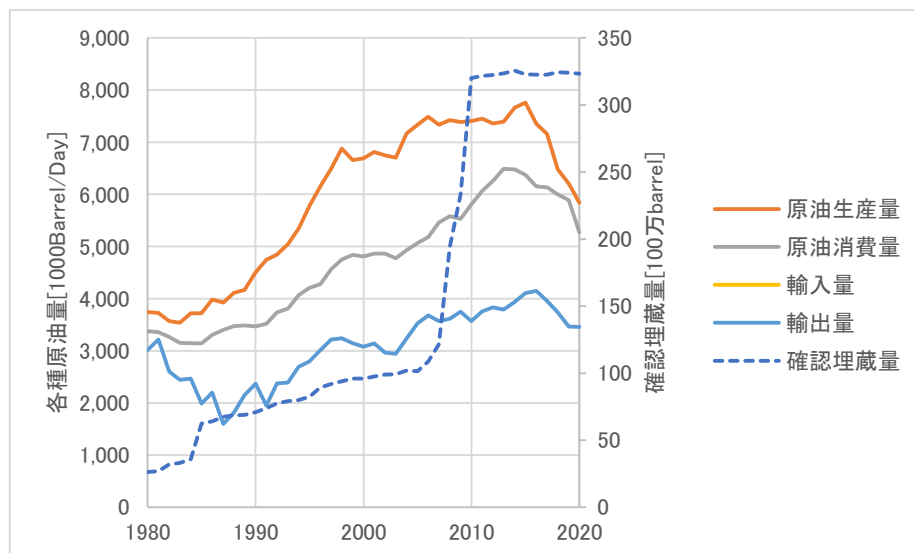


図 2.1-15 南米の原油需給動向¹

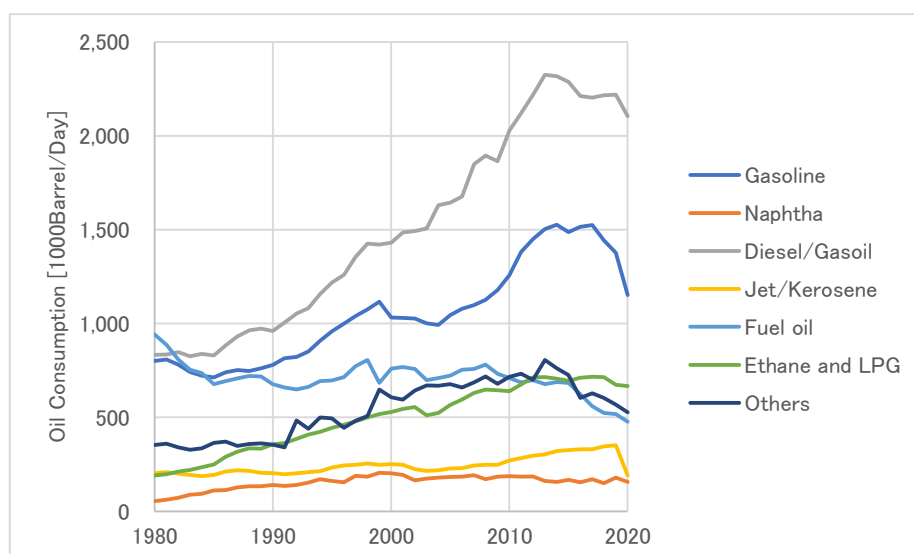


図 2.1-16 南米の 1 日あたりの燃料種別消費量¹

2.1.1.7 アフリカ

アフリカの原油の需給動向を図 2.1-17、ガソリンを含む石油燃料の 1 日あたりの消費動向を図 2.1-18 に示す¹。アフリカはリビア、ナイジェリアなどで一定の確認埋蔵量があり、近年は深海油田を中心とした新規油田の生産開始により生産量が大幅に拡大している。1 日あたりで見ると、消費量よりも生産量の方が多く、2020 年では 5,794 千バレル輸出して

いる。消費量では、エジプトが最も多く、2 番目の南アフリカと併せて、アフリカ全体の約 3 割を占める。ガソリン消費量は COVID-19 の影響により 2020 年は一時的に減少しているが、基本的には増加傾向が続いていると考えられる。2020 年のガソリン消費量は 1 日あたり 999 千バレル消費されており、原油全体の約 3 割弱を占める。アフリカのガソリンの販売価格は、エジプトで 0.53 ドル/L (2021)⁷となっているが、各国の税制等によりばらつきはあるものと考えられ、経年変化も原油価格と連動するものと考えられる。

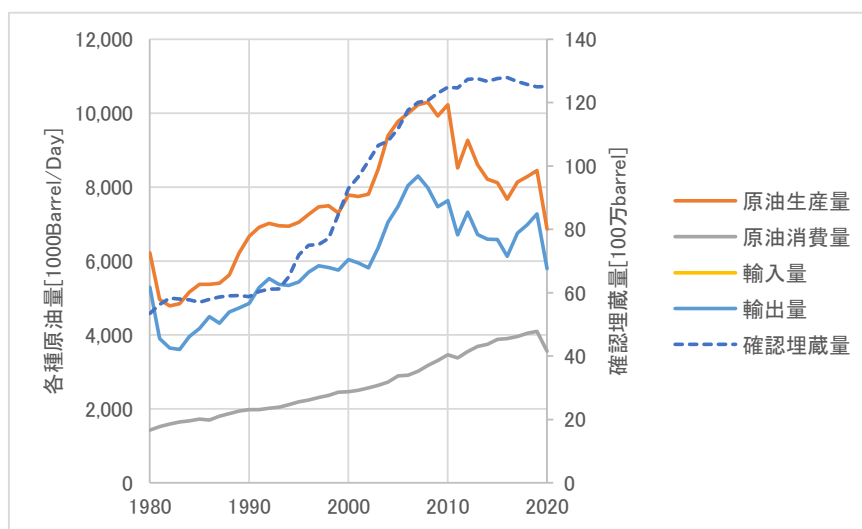


図 2.1-17 アフリカの原油需給動向¹

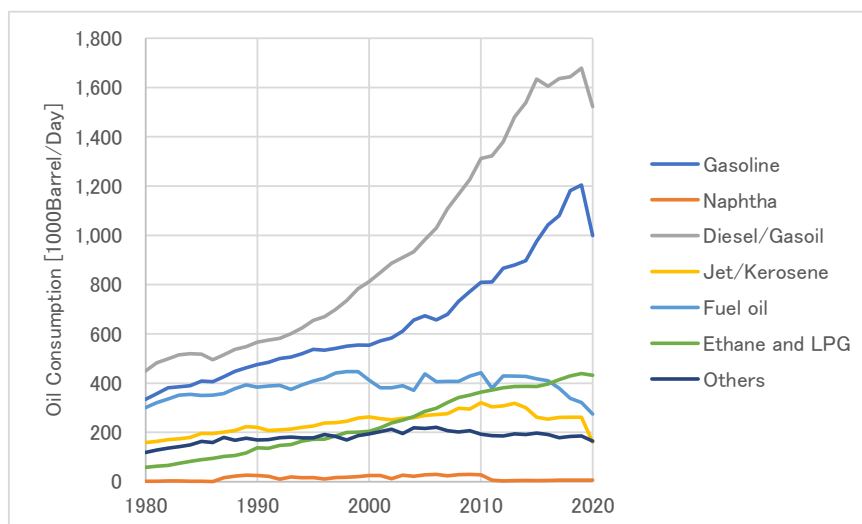


図 2.1-18 アフリカの 1 日あたりの燃料種別消費量¹

⁷ TRADING ECONOMY <https://tradingeconomics.com/egypt/gasoline-prices>

2.1.2 軽油

本項では、各地域の軽油需給動向を整理した。対象地域はガソリンと同様に消費量が多い日本、米国、欧州、中国に加えて、近年、経済成長に伴う自動車台数の増加により、今後消費量が増加する可能性があるインド、南米、アフリカを対象とした。

2.1.2.1 日本

日本の軽油を含む石油燃料の1日あたりの消費動向を図 2.1-19、軽油の販売価格を図 2 図 2.1-20 に示す¹。軽油消費量は 1990 年代後半をピークに徐々に低下し、2020 年の1日あたりの軽油消費量は722千バレルとなり、原油全体の2割強を占める。2020年はCOVID-19の影響により、一時的な落ち込みがあるものと考えられるが、近年の傾向としては緩やかな減少傾向となっている。

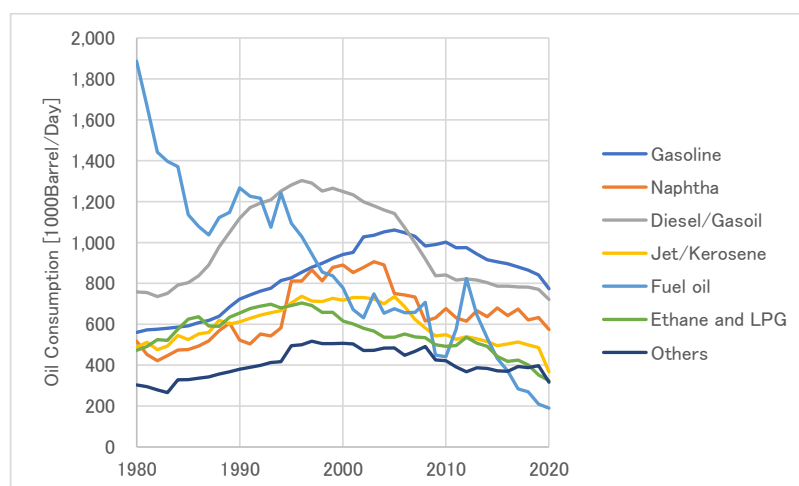


図 2.1-19 日本の1日あたりの燃料種別消費量¹（再掲）

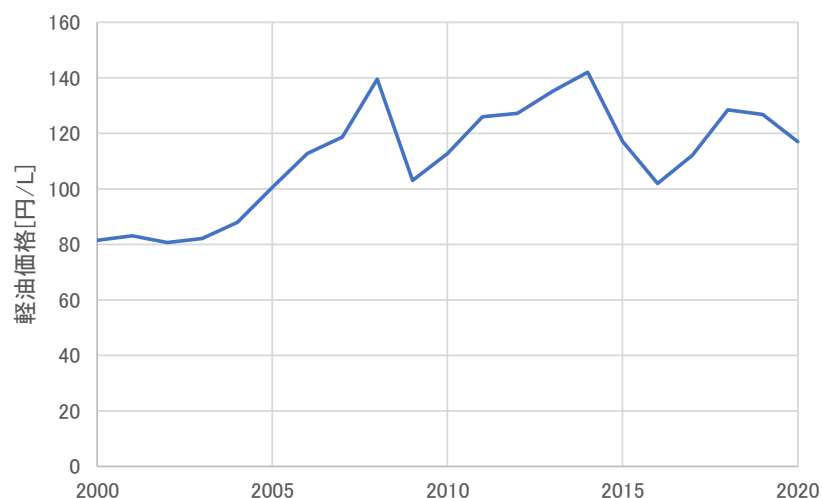


図 2.1-20 日本の軽油販売価格³

2.1.2.2 米国

米国の軽油を含む石油燃料の 1 日あたりの消費動向を図 2.1-21、軽油の販売価格を図 2.1-22 に示す¹。米国の軽油消費量は 2000 年代前半にかけて増加しているが、それ以降は、4,000 千バレル付近を推移している。2020 年は COVID-19 の影響により、一時的な落ち込みがあるものと考えられるが、2020 年の 1 日あたりの軽油消費量は 3,756 千バレルとなり、原油全体の 2 割強を占める。

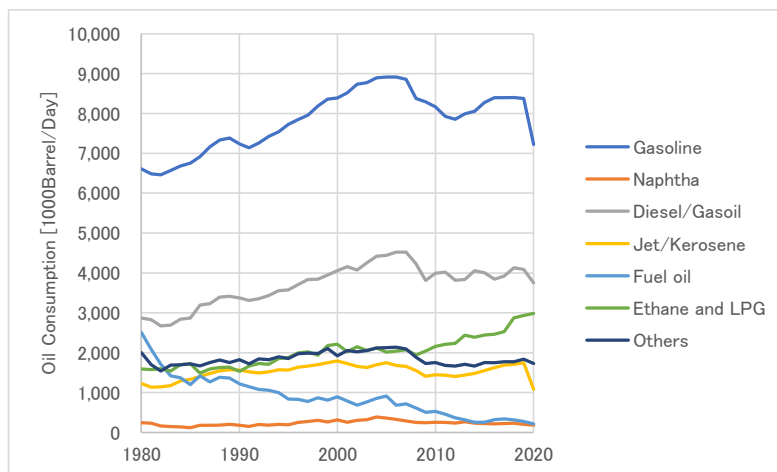


図 2.1-21 米国の 1 日あたりの燃料種別消費量¹（再掲）

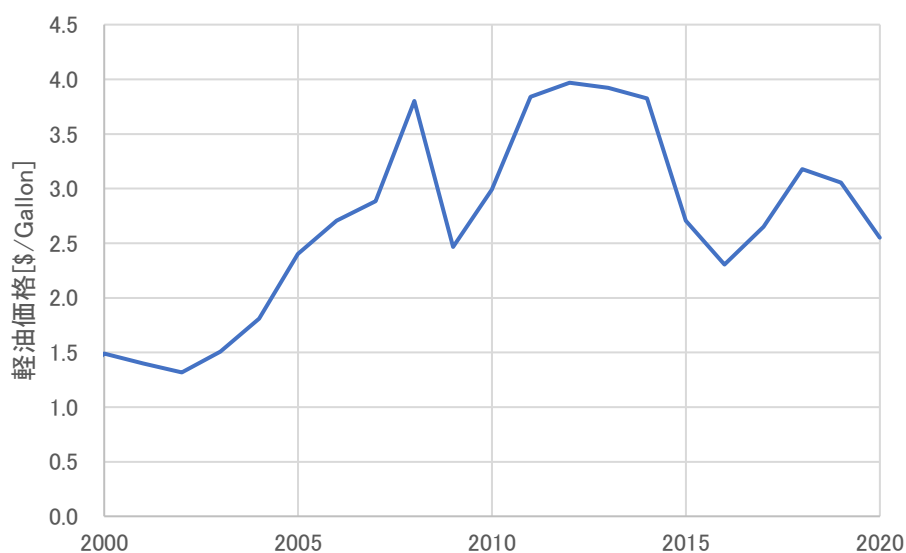


図 2.1-22 米国の軽油販売価格⁴

2.1.2.3 欧州

EU（ここでは英国も含めた EU-28）の軽油を含む石油燃料の 1 日あたりの消費動向を図 2.1-23、軽油の販売価格を図 2.1-24 に示す¹。軽油消費量は 2000 年代前半をピークに

その後は減少に転じている。2020 年は COVID-19 の影響により、一時的な落ち込みがあるもと考えられるが、2020 年における 1 日あたりの軽油消費量は 4,673 千バレルとなり、原油全体の 4 割強を占める。

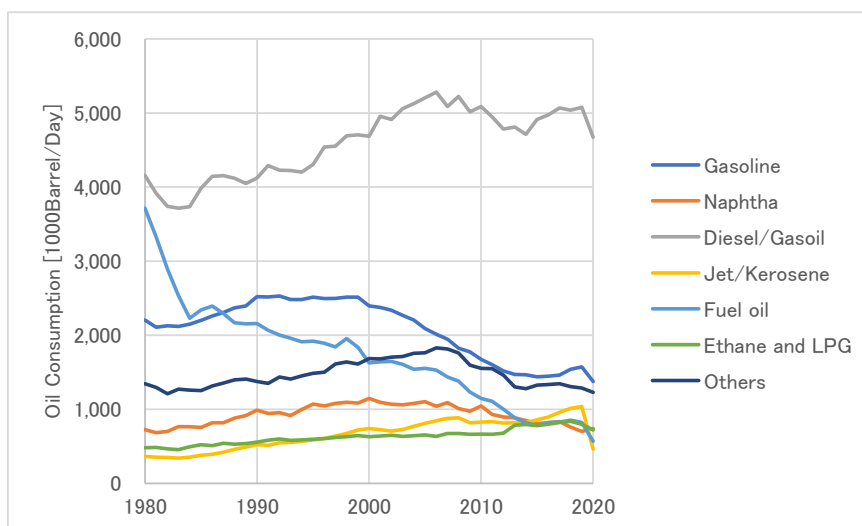


図 2.1-23 EU-28 の 1 日あたりの燃料種別消費量¹ (再掲)

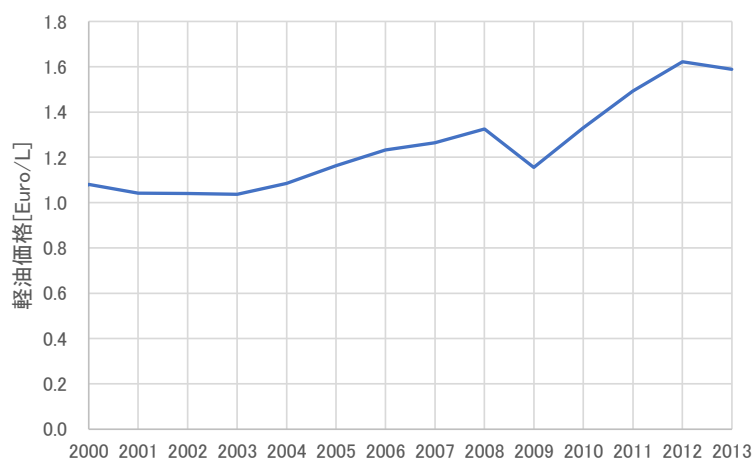


図 2.1-24 EU-28 の軽油販売価格⁵

2.1.2.4 中国

中国の軽油を含む石油燃料の 1 日あたりの消費動向を図 2.1-25 に示す¹。2012 年まで急激に増加するが、それ以降は 3,500 千バレル付近で推移する。2020 年における 1 日あたりの中国の軽油消費量は 3,501 千バレルとなり、原油全体の 3 割弱を占める。中国の軽油販売価格は 0.81 ドル/L (2016)⁸となっており、経年変化は原油価格と連動するものと考えられる。

⁸ KNOEMA <https://knoema.com/>

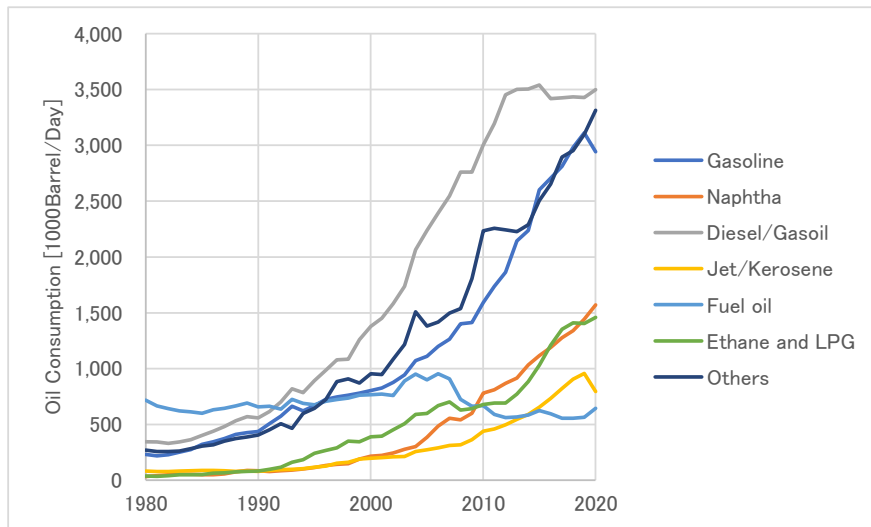


図 2.1-25 中国の 1 日あたりの燃料種別消費量¹ (再掲)

2.1.2.5 インド

インドの軽油を含む石油燃料の 1 日あたりの消費動向を図 2.1-26 に示す¹。インドの軽油消費量は急激に増加するが、2020 年は COVID-19 の影響により減少した。2020 年におけるインドの 1 日あたりの軽油消費量は 1,477 千バレルとなり、原油全体の 3 割強を占める。インドの軽油販売価格はブラジルでは 94.2 ルピー/L (2021)⁹となっており、経年変化は原油価格と連動するものと考えられる。

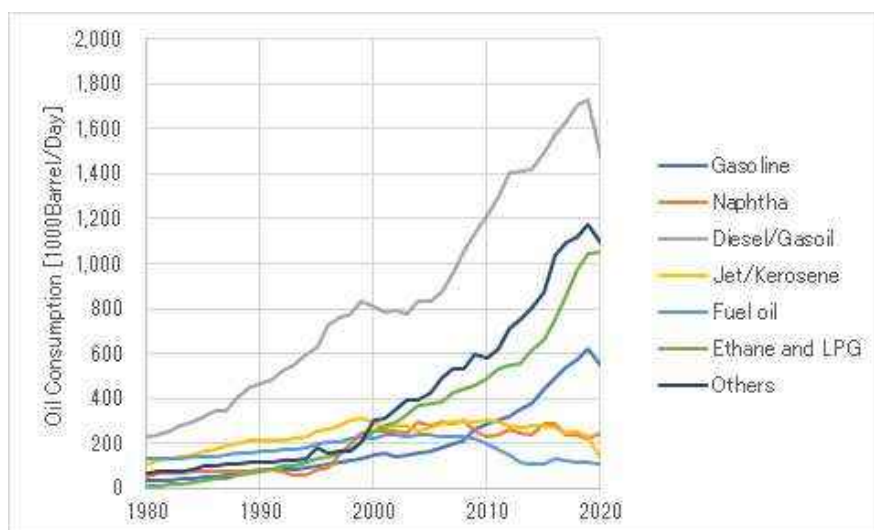


図 2.1-26 インドの 1 日あたりの燃料種別消費量¹

⁹ PRS <https://prsindia.org/theprsblog/petrol-and-diesel-prices>

2.1.2.6 南米

南米の軽油を含む石油燃料の1日あたりの消費動向を図2.1-27に示す¹。急激に軽油の消費量が増加するが、2014年には減少に転じる。2020年はCOVID-19の影響により、一時的な落ち込みがあるもとと考えられるが、2020年における南米の1日あたりの軽油消費量は2,104千バレルとなり、原油全体の4割弱を占める。南米の軽油販売価格はブラジルでは0.95ドル/L(2016)⁸となっており、各国の販売価格は税制にてばらつきがあると考えられ、経年変化は原油価格と連動するものと考えられる。

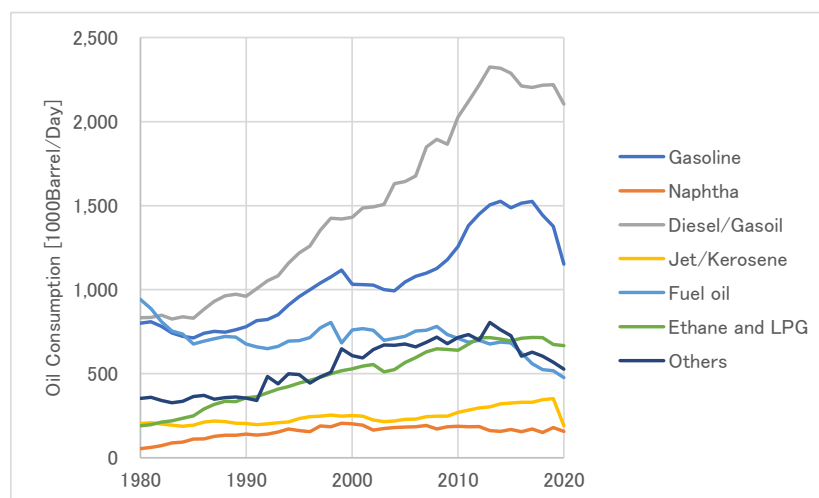


図 2.1-27 南米の1日あたりの燃料種別消費量¹ (再掲)

2.1.2.7 アフリカ

アフリカの軽油を含む石油燃料の1日あたりの消費動向を図2.1-28に示す¹。2016年までは軽油消費量は大幅に増加するが、それ以降は増加量が緩やかとなり、2020年はCOVID-19の影響により減少した。2020年における1日あたりのアフリカの軽油消費量は1,522千バレルとなり、原油全体の4割強を占める。アフリカの軽油販売価格はエジプトでは0.16ドル/L(2016)⁸となっており、各国の販売価格は税制にてばらつきがあると考えられ、経年変化は原油価格と連動するものと考えられる。

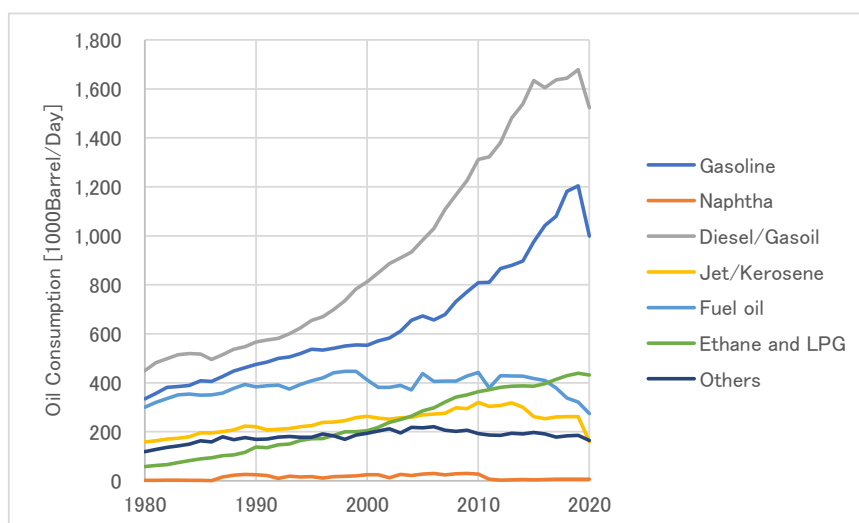


図 2.1-28 アフリカの 1 日あたりの燃料種別消費量¹（再掲）

2.1.3 CNG

本項では、日本、米国、欧州の需給動向について整理した。なお、中国については中国全土を示す適切な統計が無かったため整理対象から外した。

2.1.3.1 日本

日本の LNG（液化天然ガス）の輸入先を図 2.1-29 に、供給国別輸入量の推移を図 2.1-30 にそれぞれ示す。

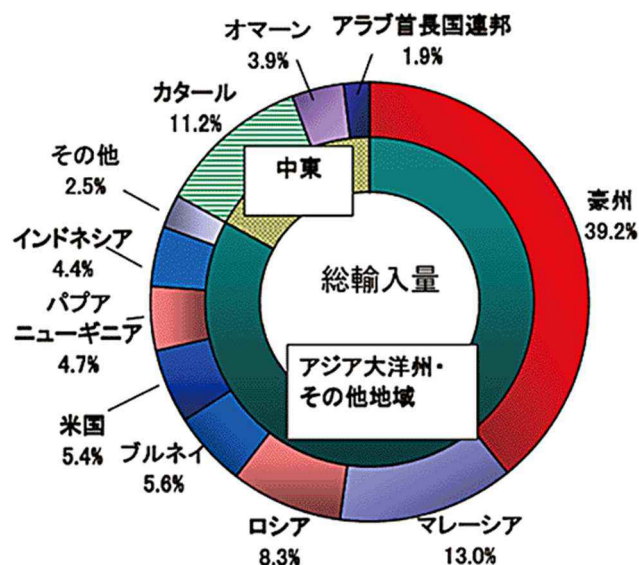


図 2.1-29 LNG の輸入先（2019 年度）¹⁰

¹⁰ 一次エネルギーの動向 <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/2-1-3.html>

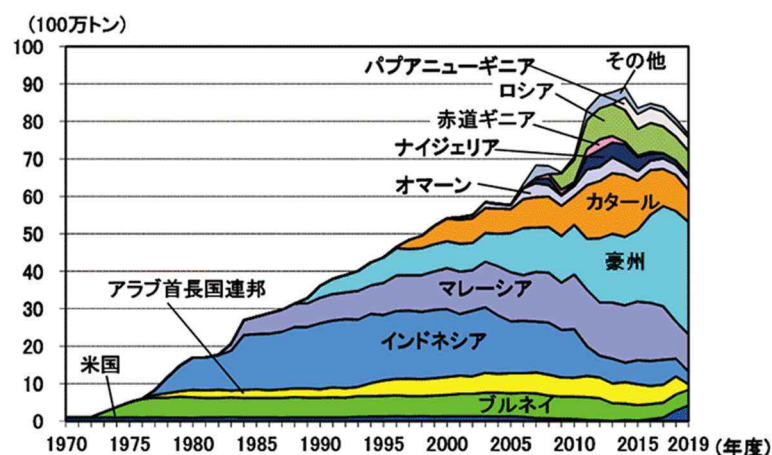


図 2.1-30 LNG の供給国別輸入量の推移¹⁰

2019 年度の天然ガスの輸入先は、豪州が最も多く、39.2%を占めている。推移については、1970 年度以降米国、インドネシア、アラブ首長国連邦、マレーシア、豪州、カタールと順次輸入が開始されてきている。

次に、天然ガスのコストの推移を図 2.1-31 に示す。天然ガスのコストは、2000 年頃から上昇し始め、米国では 2000 年以前の価格に戻りかけたが、日本と欧州では高い状態が続いている。



mmbtu $\equiv$ 天然ガス 25m³

図 2.1-31 天然ガスの価格の年次推移¹¹

CNG (Compressed Natural Gas／圧縮天然ガス) は、メタンを主成分とする天然ガスを圧縮したガスで、CNG 車用の燃料は、天然ガスの熱量を 13A などの熱量規定に適合するよ

¹¹ <https://pps-net.org/statistics/gas#>

うにプロパンやブタンなどを混ぜることで調整、漏洩検知のための付臭剤を添加し、家庭にも供給される都市ガス（13A）を燃料とする。したがって、日本の CNG 車の燃料は、正確には天然ガスではなく圧縮した都市ガスである。

天然ガスの主成分であるメタンの臨界点は -82.6°C （沸点は -161.6°C ）であり、それ以上の温度では圧縮しても液化しないが、日本では熱量調整のために、圧縮することで容易に液化するプロパン、ブタンを含んだ都市ガスを圧縮して自動車用燃料として搭載する CNG 車が普及している。CNG 車では都市ガスを 200 倍程度に圧縮して搭載しているが、物流を支えるトラックなどの長距離走行車両用としては、利便性をさらに向上させるため、同程度の燃料搭載スペースで、燃料搭載量をさらに増やして航続距離を伸ばしたいといったことへの期待がある。そこで、天然ガスを 600 倍程度に高密度化できる液化天然ガス（LNG: Liquefied Natural Gas）を大型貨物車用燃料として搭載する LNG トラックの実証走行試験が開始されている。天然ガスを自動車用燃料とする際には、圧縮搭載する CNG と低温液化搭載する LNG を選択、使用することになる。そのような背景の中で、以下では原料となる天然ガスの国産天然ガスも含めた需給状態について整理する。

日本の天然ガスの国産・輸入別供給量を図 2.1-32 に示す。天然ガスを輸送する際には、主にパイプライン、圧縮ガス、液化ガスから選択するが、地上輸送については 3 種から選択できるものの、周囲を海に囲まれた日本が天然ガスを輸入する際には、貯蔵密度が最大となる液化ガス、つまり LNG タンカーを用いることになる。一方、欧米ではパイプラインを使用した輸送が一般的になっている。LNG タンカーによる輸送では、天然ガスを液化する過程で各成分の融点の違いから性情を安定させられる効果もある。ただし、CNG 車用燃料を製造する際には、輸入時の液化行程で消費するエネルギーに加えて、CNG（実際には高圧都市ガス）を製造する工程でも圧縮に要するエネルギーが必要になる。

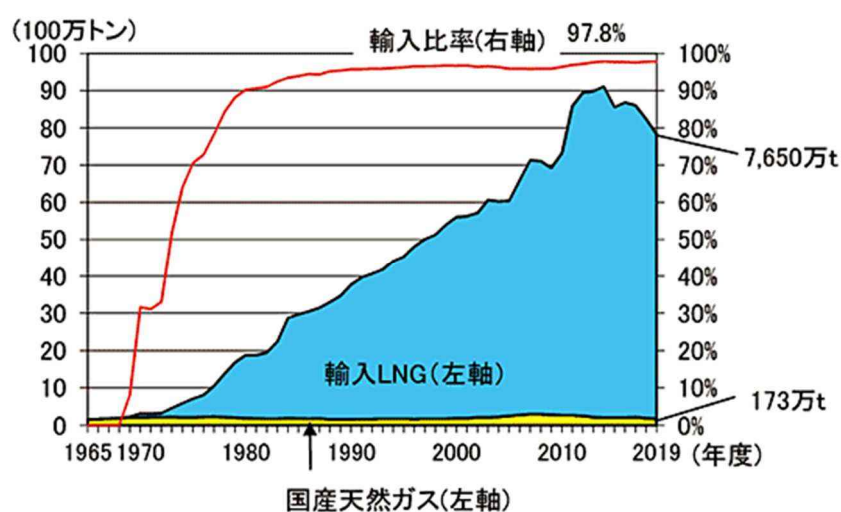


図 2.1-32 天然ガスの国産、輸入別の供給量¹²

¹² 経済産業省「エネルギー生産・需給統計年報」、「資源・エネルギー統計」、「電力調査統計月報」、「ガ

天然ガスの国内生産量と輸入量は、国内生産量が横ばいの中で、1970年代から輸入量が増え始め、東日本大震災が発生した2011年の電力不足による緊急輸入時をピークに減少に転じ、2019年は7,650万トンまで低下している。2019年の供給量のうち、国内生産量は173万トンで、輸入が97.8%を占めている。

用途別の日本の天然ガス消費量の年次推移を図2.1-33に示す。天然ガスの用途別消費量の推移は、電力用、都市ガス用とも類似の比率で変遷し、2019年の比率は電力用59.6%、都市ガス用33.8%、その他6.7%となっており、電力用LNGの割合が6割を占めている。CNG車の燃料は都市ガスを圧縮・充填し使用するため、都市ガス用LNGに含まれる。なお、近年のCNG車の年間燃料消費量は100トン以下で推移しているが、明確に示す資料は確認できなかった。電力用LNGは、東日本大震災で原子力発電所が停止した2011年の消費量の増加に直結し、現在もLNG消費量の変動は電力用LNGの影響で増減を繰り返している。

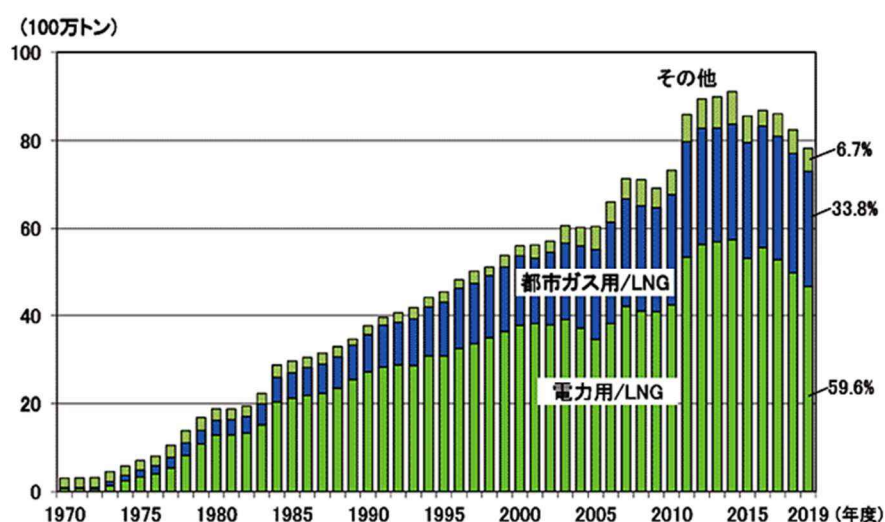


図 2.1-33 天然ガスの用途別消費量の推移¹²

日本のLNG輸入価格の推移を図2.1-34に示す。LNGと原油の輸入価格の年度毎の変動は類似の傾向にあるが、LNGの輸入価格と原油の輸入価格を同一熱量（1,000 kcal）あたりの価格で比較すると、2003年までは両者に差異はみられなかったが、2003年以降はLNGの方が安価になっている。

ス事業統計月報」、財務省「日本貿易統計」を基に作成
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/2-1-3.html> [2022.3.8 閲覧]

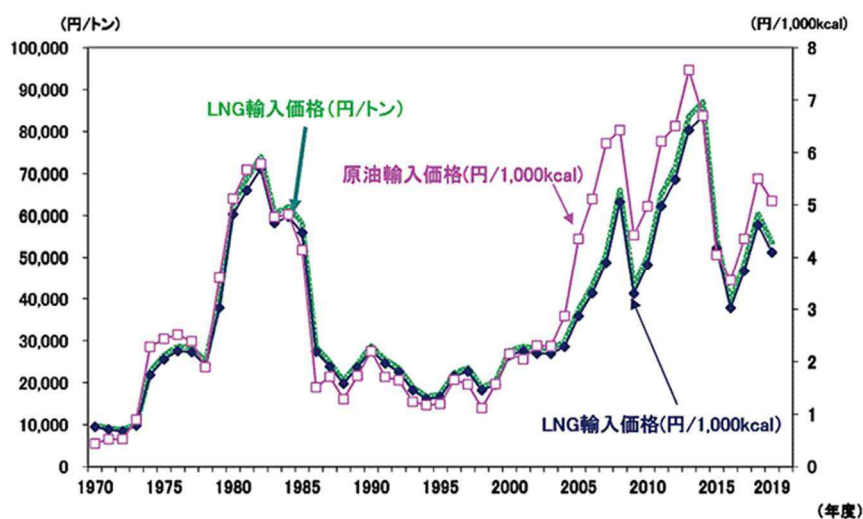


図 2.1-34 LNG 輸入価格の推移¹³

2.1.3.2 米国

米国の天然ガスの 2010 年から 2020 年までの需給状態を図 2.1-35（産出量）、図 2.1-36（消費量）にそれぞれ示す。天然ガスの産出量は、2010 年の約 5,800 億 m^3 から 2019 年の約 9,300 億 m^3 まで増加傾向にある。消費量は、2010 年の約 6,500 億 m^3 から 2019 年の約 8,500 億 m^3 まで増加傾向にあるが、産出量よりも増加の度合いは小さい。需給については、2014 年までは産出量に対して消費量の方が多く、2018 年以降は産出量が多くなっており、米国内では供給過剰、つまり 2018 年以降は輸出できる状態に転じている。天然ガスの価格は、先の図 2.1-31 に示す。

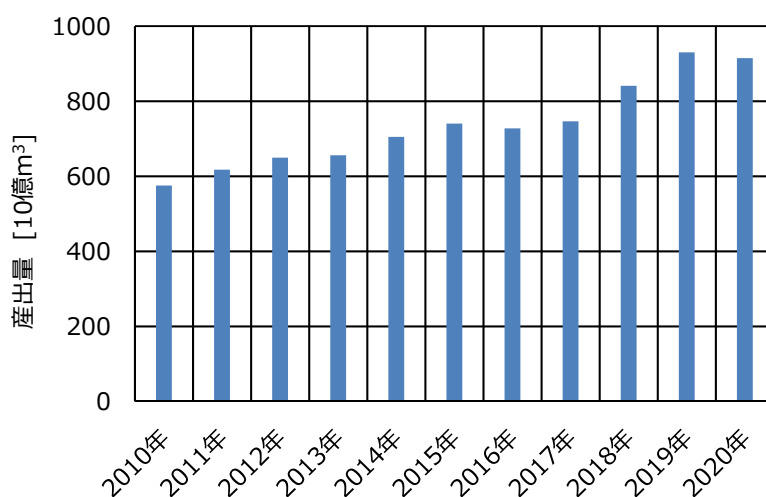


図 2.1-35 米国の天然ガス産出量¹⁴

¹³ 財務省「日本貿易統計」を基に作成 <https://www.customs.go.jp/toukei/info/> [2022.3.8 閲覧]

¹⁴ Statistical Review of World Energy 2021, BP（米国～EU 欧州グラフ）

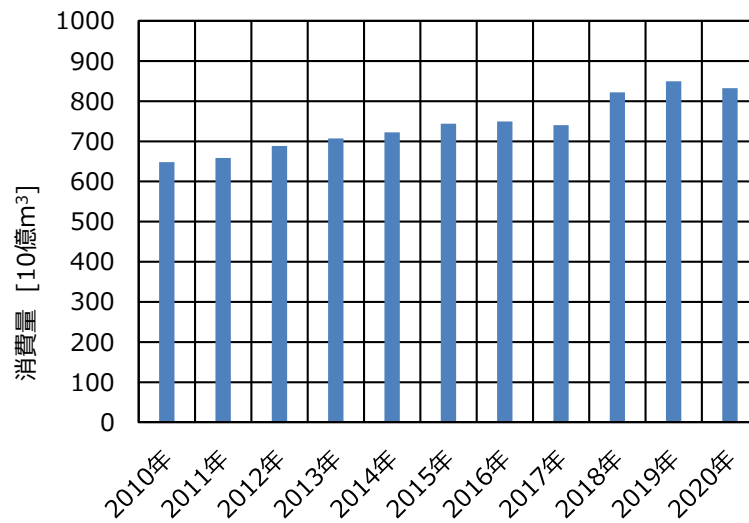


図 2.1-36 米国の天然ガス消費量¹⁴

2.1.3.3 欧州

欧州の2010年から2020年までの天然ガスの需給状態を整理し、図 2.1-37 に産出量を、図 2.1-38 に消費量をそれぞれ示す。天然ガスの産出量は、2010年の約3,100億 m^3 から2020年の約2,200億 m^3 まで減少傾向にある。消費量は、2010年の約6,200億 m^3 を最大として5,000億 m^3 までの間で増減を繰り返している。需給バランスとしては、欧州内での産出量では消費を賄うことができず、半分以上を輸入に頼っている。天然ガスの価格は、先の図 2.1-31 に示す。

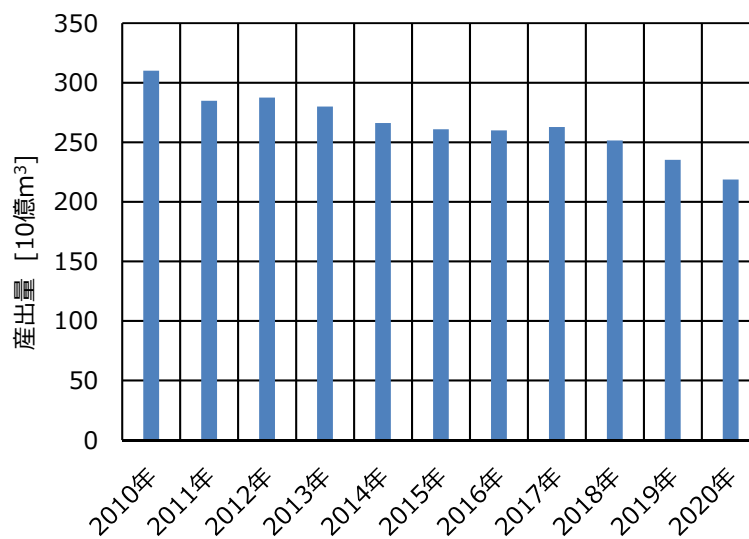


図 2.1-37 欧州の天然ガス産出量¹⁴

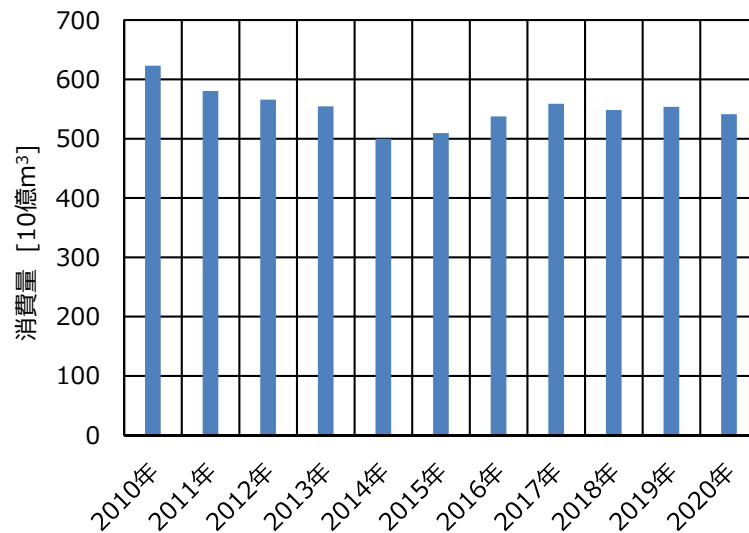


図 2.1-38 欧州の天然ガス消費量¹⁴

欧州の天然ガスの輸入経路を図 2.1-39 に示す。ノルウェー産出の天然ガスは図 2.1-37 の欧州の産出量に含まれる。図 2.1-39 が示す主たる欧州の天然ガスの輸入経路及び方法は、ロシアからのパイプライン輸入と大西洋側からの LNG タンカーによる輸入によるもので、その 2 系統により欧州の天然ガス輸入量をほぼ賄っている。2010 年では、欧州で消費する天然ガスのうち、30%程度がロシアからの輸入になっている。

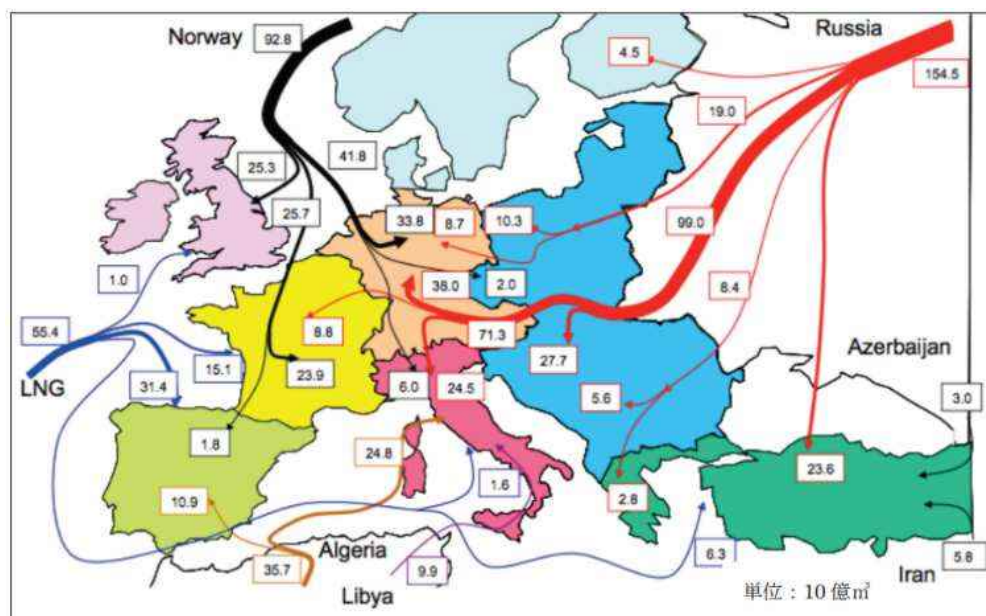


図 2.1-39 天然ガスの輸入経路（2010 年）¹⁵

¹⁵ 海外のガス事業の状況

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/kihon_seisaku/gas_system/pdf/013_04_00.pdf [2022.3.8 閲覧]

2.1.4 LPG

LPG（LP ガス）はプロパン、ブタンを主成分とする液化石油ガス（Liquefied Petroleum Gas）で、常温でも 1 MPa（10 気圧）以下で液化でき、容器による輸送が容易で可搬性に優れた燃料である。本来は無臭のガスであるが、都市ガスと同様に漏洩検知のため付臭がしてある。LP ガスの比重は空気より重く（空気の 1.5 倍程度）、漏れた場合には下方に滞留する。天然ガスを熱量調整して、都市ガスを製造する際の熱量増加用にも用いられる。自動車用燃料としては、日本国内ではタクシーなどがオートガススタンドで LPG を充填し、燃料として用いている。本項では、日本、米国、欧州の需給動向について整理した。

なお、中国については中国全土を示す適切な統計が無かったため整理対象から外した。

2.1.4.1 日本

日本の LP ガスの輸入先を図 2.1-40 に示す。2019 年度は、米国が 72.6%を占め、豪州、カナダを含めた輸入先は約 85%となっている。

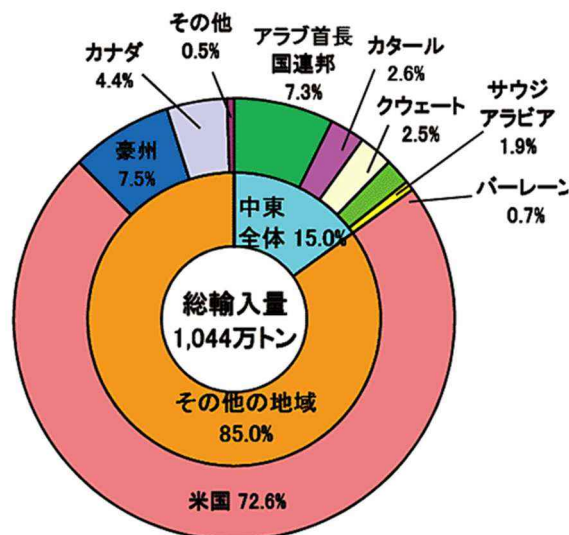


図 2.1-40 LP ガスの輸入先（2019 年度）¹⁰

LP ガスの価格の推移を図 2.1-41 に示す。LP ガスの主成分であるプロパンとブタンの価格に CP（契約価格：Contract Price）を使用し、プロパンとブタンの価格推移と、国内の家庭用小売価格の推移を示している。プロパンとブタンの価格は、年ごとの変動はあるものの、明確な価格上昇はみられない。一方、小売価格は増加傾向が続いている。

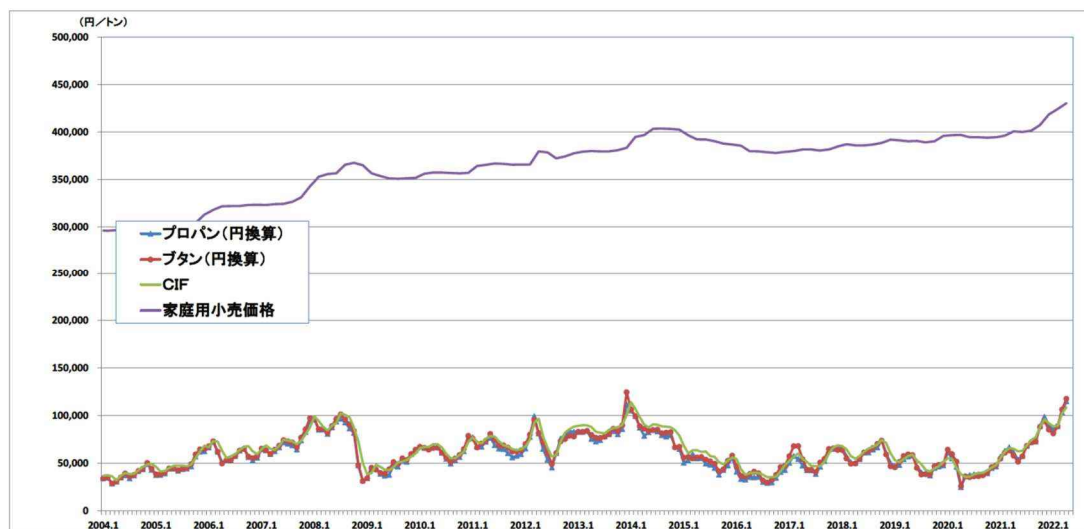


図 2.1-41 LP ガスの価格の推移¹⁶

日本の LP ガス需要動向を図 2.1-42 に示す。日本の LP ガス輸入量に占める国別割合（左上）は、2014 年では中東（カタール、クウェート、UAE、サウジアラビア）が 70%、北米・豪州が 30%程度だったが、2020 年には米国が 67%、豪州・カナダ他が 24%になっている。中東依存度の推移（左下）は、2007 年度にピークの 91%に達したが、その後減少に転じ、2019 年度の依存度は 14%に低下している。用途別需要量の推移（右上）から、2014 年度以降の需要は 1,400 万トン程度で推移し、家庭業務用が 45%を占め、自動車用は 5%弱を占めている。また、天然ガスから都市ガスを製造する際の熱量調整用として 5%程度が使われている。LP ガスの需要推移（右下、1989 年～）については、1996 年度の 19,703 千トンを最大量にしてから減少が続いており、2019 年度は 13,932 千トンになっている。

¹⁶ <https://oil-info.icej.or.jp/documents/data/LPGPRICE.pdf>

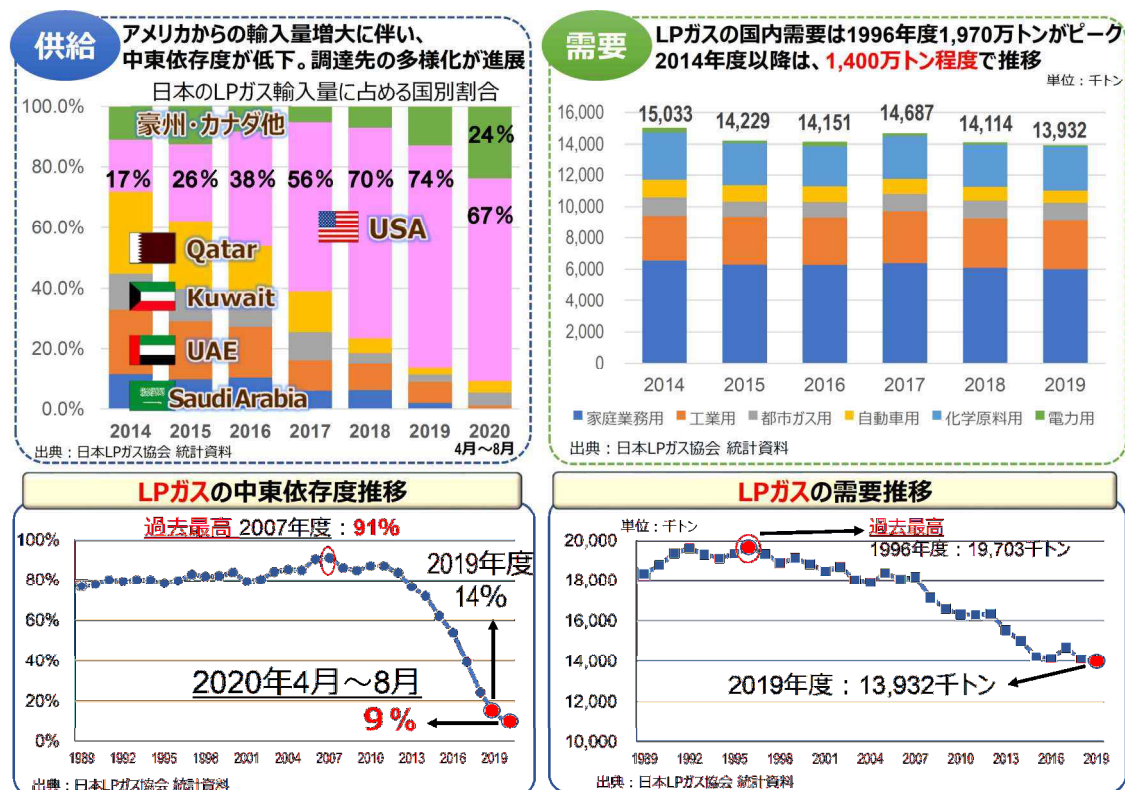


図 2.1-42 日本の LP ガス需要動向¹⁷

最も使用割合の大きい家庭業務用について、家庭業務用需要量と消費者世帯数と販売事業者数の推移を図 2.1-43 に示す。家庭業務用需要量は、平成 17 年の約 8,000 千トンから 15 年間で 25%減少している。消費世帯数は 15 年間で 12%程度の減少なので、各家庭での消費量が減少していることになるが、省エネによるものか、あるいは都市ガス、電力、石油等への使用エネルギーの変化によるものかといった原因は不明である。販売事業者数は 15 年間で 30%以上減少しているが、需要量の減少にともなう事業者数の減少と考えられる。

最も使用割合の大きい家庭業務用の消費低迷にともなう事業者数の減少は、オートガススタンドの維持にも関係してくることから、LP ガス自動車の台数、オートガススタンド数、消費量についても、推移を図 2.1-44 で整理する。

¹⁷ LP ガス業界の現況について、(一社) 全国 LP ガス協会

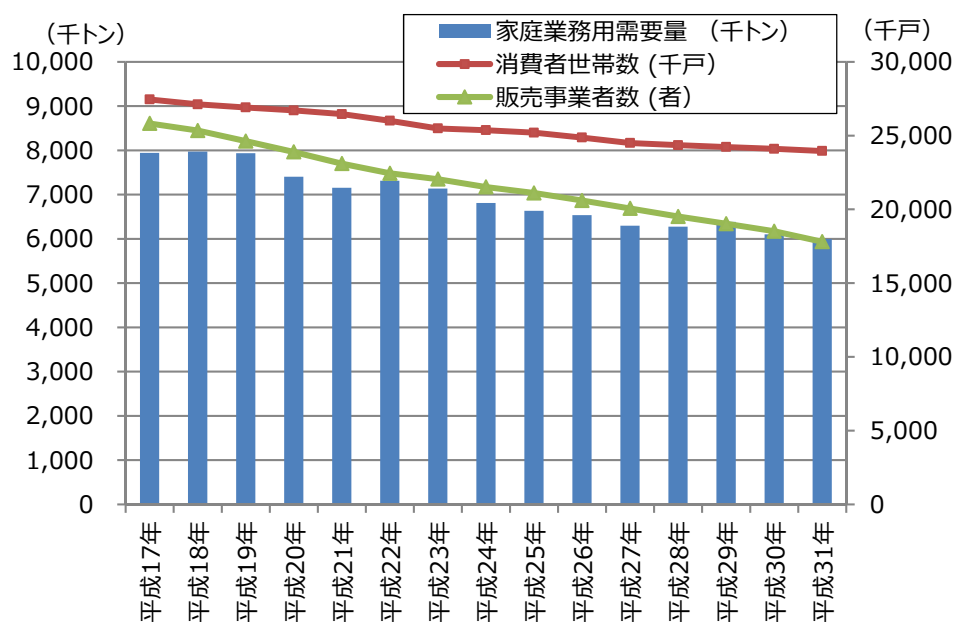


図 2.1-43 家庭業務用需要量と消費者世帯数と販売事業者数の推移¹⁷

LP ガス自動車及びLP ガススタンドの推移を図 2.1-44 に示す。車両保有台数は 15 年間で 35%程度減少して 19 万台程度になっている。一方、LP ガス消費量は 50%以上減少しており、家庭業務用の消費減少幅よりも大きくなっている。LP ガス消費量の減少が車両の燃費向上によるものかといった原因は不明である。オートガススタンドの箇所数は、平成 31 年度（令和元年度、2019 年度）には 1,400 箇所弱に減少し、一箇所のガススタンドで平均 135 台の顧客数でビジネスを行っている状態である。将来的にはオートガススタンドの経営が難しくなる可能性があり、LP ガスを燃料とする車両によりもたらされる環境等への好循環が失われる可能性がある。なお、ガソリンスタンドの経営が成立するのは、一般的には一箇所のガソリンスタンドで 2,000 台の車両が必要と言われている。オートガススタンドの平均 135 台の顧客数では経営難が予想され、今後も減少する可能性が高い。

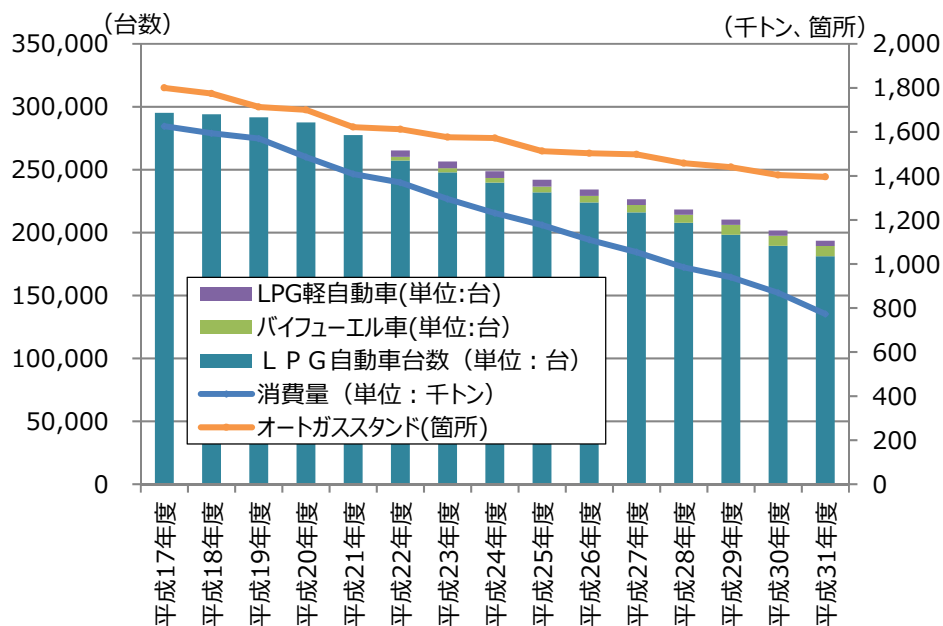


図 2.1-44 LP ガス自動車及び LP ガススタンドの推移¹⁷

2.1.4.2 米国

北米（アメリカ、カナダ）の LP ガス生産量を図 2.1-45 に示す。2004 年から 2019 年までの北米の LP ガス生産量は、2011 年までほぼ横ばいの約 5,000 万トンで、2012 年以降は増加傾向にあり、2019 年には 1 億トンになっている。

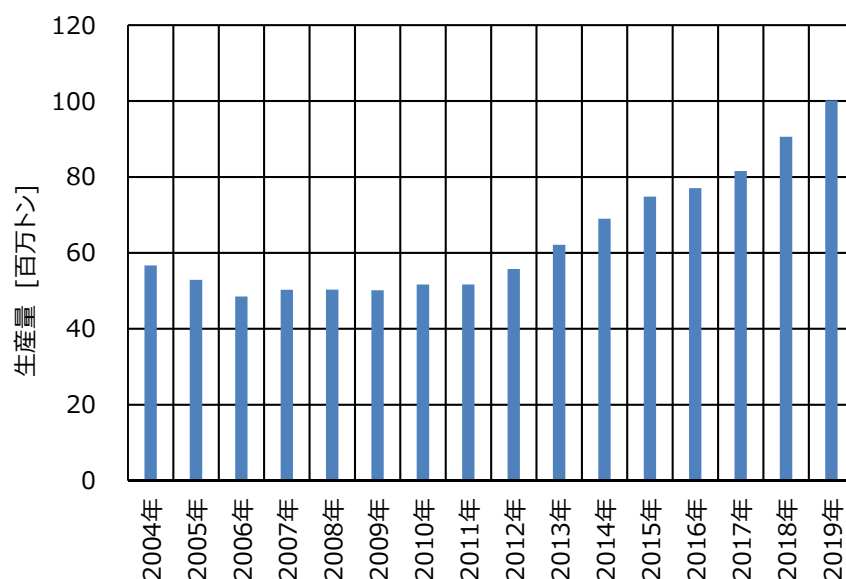


図 2.1-45 北米の LP ガス生産量¹⁸

¹⁸ <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/data/222-1-27.xlsx> [2022.3.8 閲覧]

北米での LP ガス消費量を図 2.1-46 に示す。北米での LP ガス消費量は、2004 年及び 2005 年が 6,000 万トン弱で生産量を上回っているが、2006 年から 2019 年までは 5,000 万トン前後で推移し、生産量を下回っており、輸出できる状態にある。

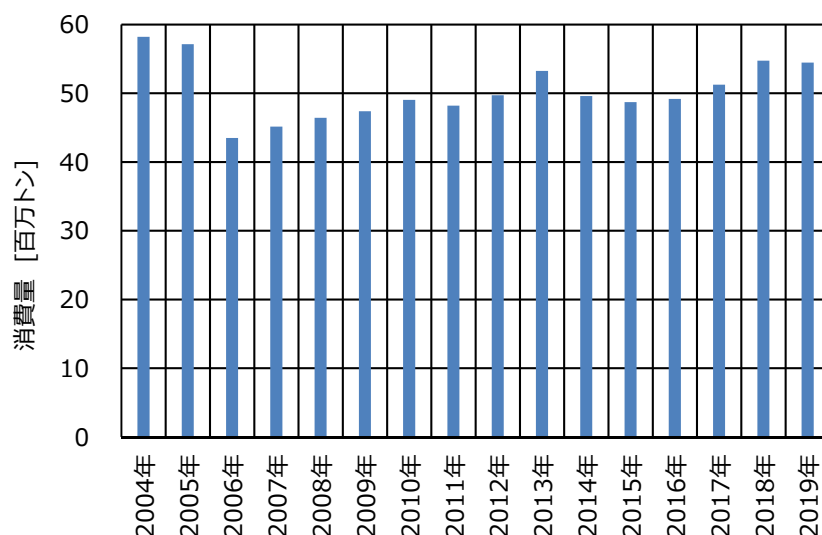


図 2.1-46 北米の LP ガス消費量¹⁹

米国の LP ガス価格（MB 価格²⁰）の推移を図 2.1-47 に示す。

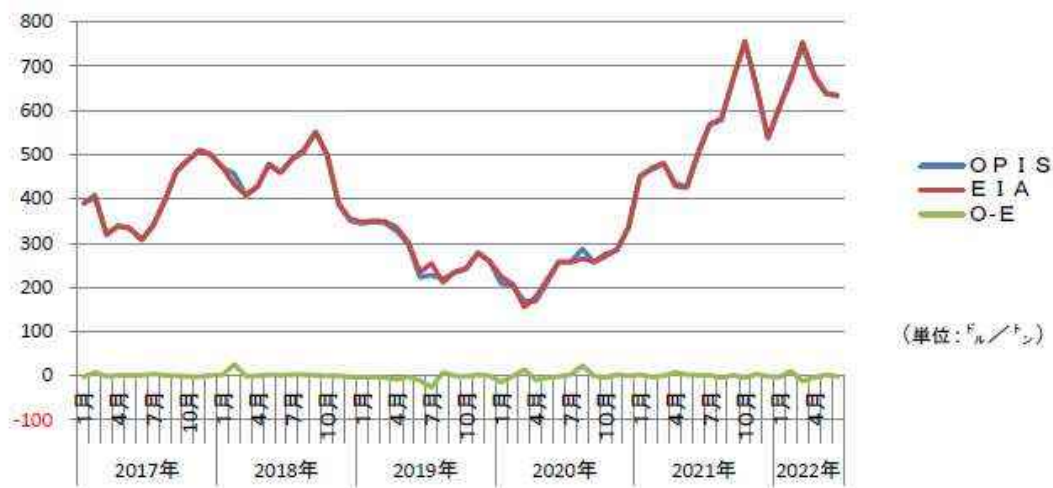


図 2.1-47 米国の LP ガス価格（MB 価格）の推移²¹

¹⁹ <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/data/222-1-28.xlsx> [2022.3.8 閲覧]

²⁰ テキサス州モントベルビュー市の LPG 基地におけるプロパン取引価格。全米で生産されたガスはパイプラインでテキサスに集められ精製されるため、ここでの取引価格がマーケット指標価格となる。

²¹ <http://kyuein.com/swfu/d/mb.pdf>

2.1.4.3 欧州

欧州の LP ガス生産量を図 2.1-48 に示す。2008 年から 2018 年まで 10 年間の欧州の LP ガス生産量は、年ごとに増減はみられるが、2,500 万トン程度で推移している。

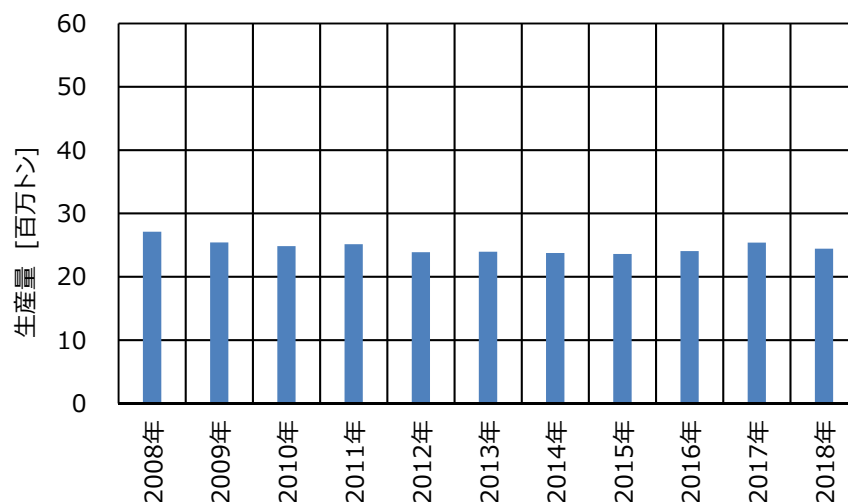


図 2.1-48 欧州の LP ガス生産量¹⁸

2008 年から 2018 年まで 10 年間の欧州の LP ガス消費量の推移を図 2.1-49 に示す。欧州の LP ガス消費量は、2008 年から 2012 年まで 3,000 万トン程度であったものが、2013 年以降増加し、2018 年には 3,500 万トン程度になっている。欧州の LP ガス消費量は、欧州の生産量を上回る状態が続き、輸入が続いている。

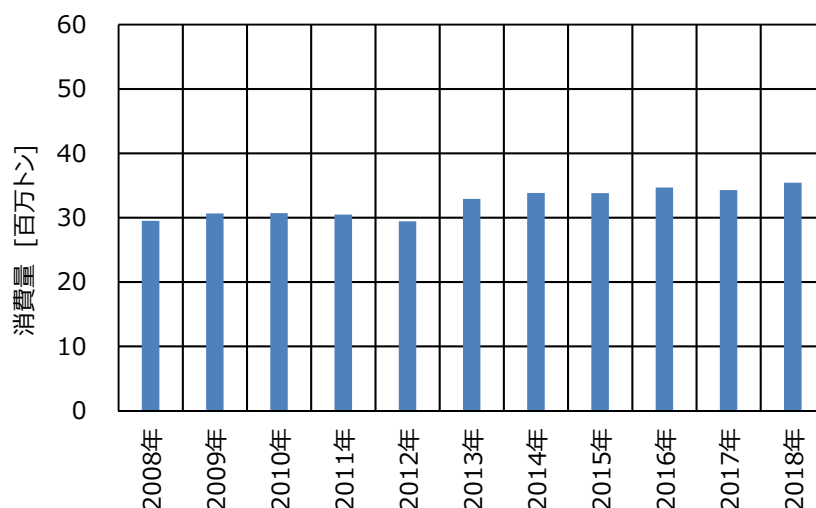
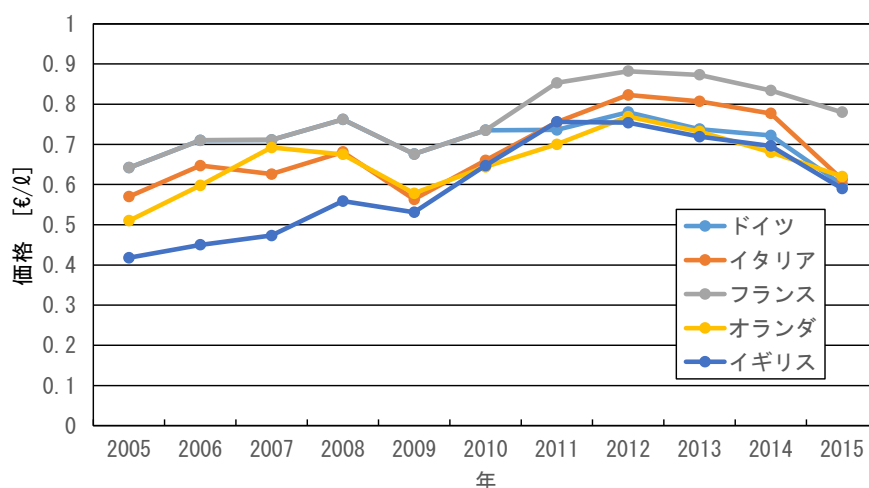


図 2.1-49 欧州の LP ガス消費量¹⁹

欧州主要国の自動車用 LP ガス価格の推移を図 2.1-50 に示す。税率の違いにより各国で価格差が見られる。なお、フランスとドイツの価格は 2010 年まで同一で、2011 年以降フランスの価格が上昇している。



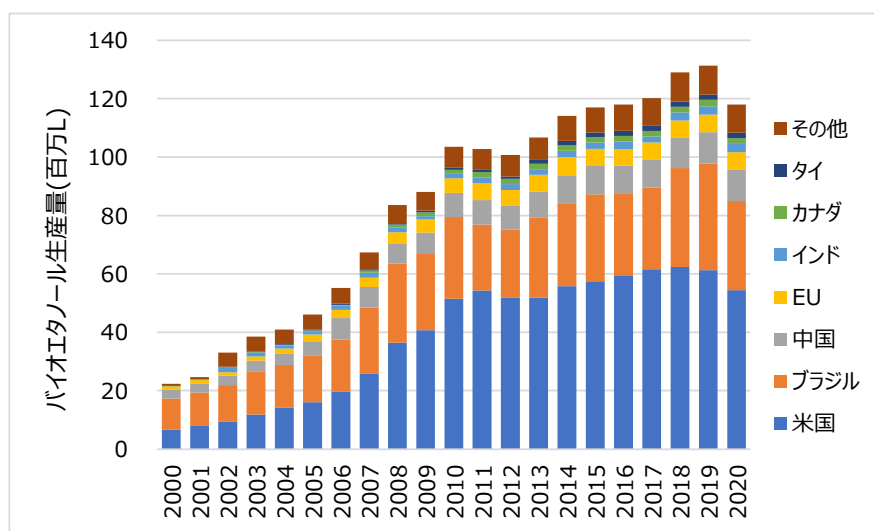
(出所) LP ガス自動車普及促進協議会、「欧州の LP ガス自動車事情と日本の課題」(2017.5) より作成²²

図 2.1-50 欧州主要国の自動車用 LP ガス価格の推移

2.1.5 バイオエタノール

バイオエタノールは、澱粉を分離しグルコースに糖化後、発酵させて製造するエタノールである。現在主流のバイオエタノールは、主に糖質あるいは澱粉質を多く含むトウモロコシやサトウキビ、テンサイなどの農作物を原料としており、アメリカやブラジルですでに産業化されている。このほか、稲わらや廃材など非可食バイオマスを原料としたエタノールの技術開発も進められている。バイオエタノールの国・地域別生産量を図 2.1-51 に示す。本項では、日本、米国、欧州（参考文献が対象とする英国を含めた EU-28）、中国のほか、生産量第 2 位のブラジルとアジアで中国に次いで生産量の多いインドを取り上げた。

²² <http://www.lpgcar.jp/info/dl/20170522.pdf>



(出所) OECD, FAO, "OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030" ²³より作成

図 2.1-51 バイオエタノールの国・地域別生産量推移

2.1.5.1 日本

日本のバイオエタノールの需給動向を図 2.1-52 に示す。バイオエタノールの混合率が 3% までの燃料は通常のカソリンとして使用が可能である（国土交通省の定めた保安基準を満たす車両については混合率 10% が認められている）。バイオエタノールは 2007 年から試験的に輸入され、2011 年からはエネルギー供給構造高度化法²⁴の目標値を達成する量が輸入されてきた。国内生産のバイオエタノールは 2009 年から導入されたが、2012 年のピーク時でも輸入量に対してわずかな量であり、現在では殆ど生産されていない。なお、高度化法の導入目標量は、2017～2022 年度の期間で 50 万 kL/年（原油換算）と設定しており、これは日本の年間のガソリン消費量の 1% 程度に相当する量である。2019 年の燃料用バイオエタノールの輸入量は 79 万 kL（エタノール換算）で、そのうち 92% がバイオ ETBE²⁵の形態である。

日本に輸入される燃料用バイオエタノールの詳細は、財務省の貿易統計より把握することができる。例年その形態の 90% 前後を占めるバイオ ETBE は、品目コード 2909.19.010²⁶で示される。バイオ ETBE の輸入量と単価の推移を図 2.1-53 に示す。単価は輸入金額を

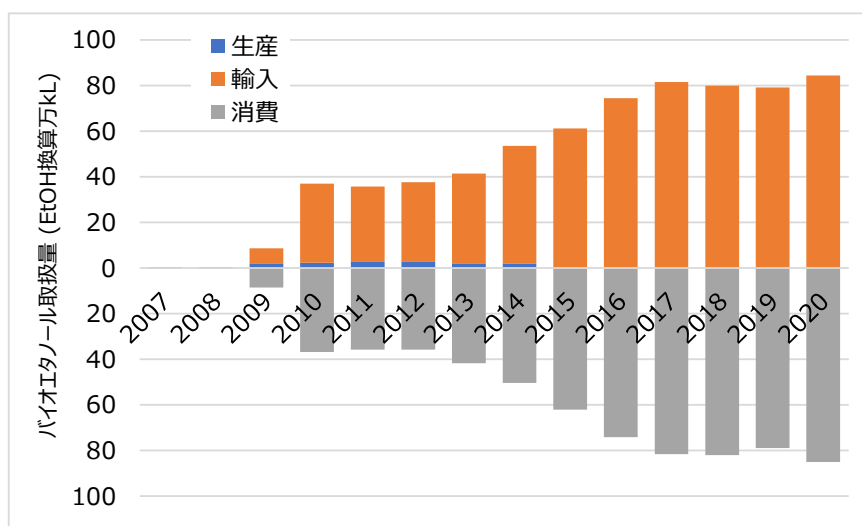
²³ https://stats.oecd.org/viewhtml.aspx?datasetcode=HIGH_AGLINK_2021&lang=en# [2022.3.6 閲覧]

²⁴ 「エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律」（平成 21 年法律第 72 号）。電気やガス、石油事業者といったエネルギー供給事業者に対して、太陽光、風力等の再生可能エネルギー源、原子力等の非化石エネルギー源の利用や化石エネルギー原料の有効な利用を促進するために必要な措置を講じる法律。

²⁵ エチル・ターシャリー・ブチル・エーテルの略称。バイオエタノールと石油系炭化水素であるイソブテンから合成される。

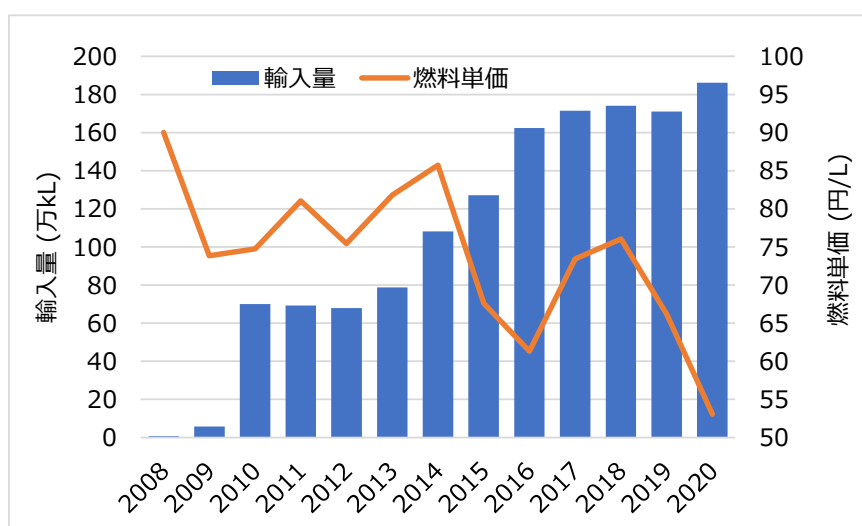
²⁶ ETBE のうちバイオマス（動植物に由来する有機物（原油、石油ガス、可燃性天然ガス及び石炭並びにこれらから製造される製品を除く。）をいう。）から製造したエチルアルコール（エタノール）を原料として製造したものである旨が政令で定めるところにより証明されたもの。

輸入量で除して求めた。輸入元国の内訳について、2009 年にオランダとブラジル、2010 年にブラジルからも試験的にバイオ ETBE を受け入れたが、2011 年以降は全量が米国からの輸入である。



(出所) U.S. Department of Agriculture, "Japan Biofuels Annual"各年版²⁷より作成

図 2.1-52 日本の燃料用バイオエタノールの需給動向



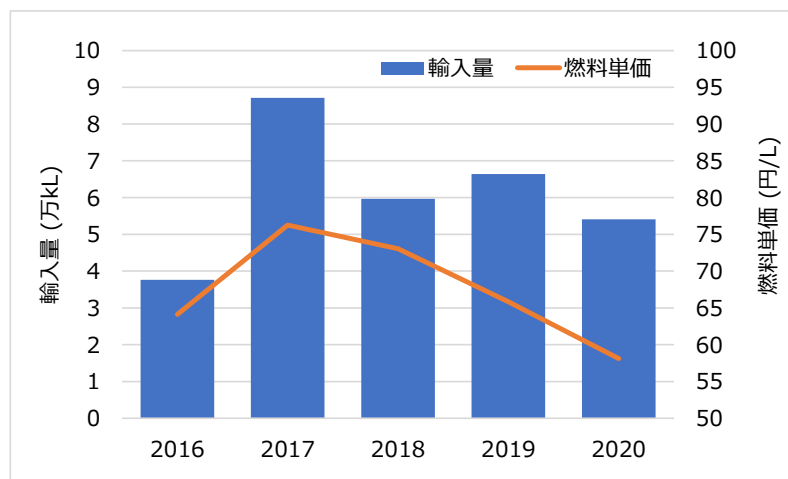
(出所) 財務省、「貿易統計」²⁸より作成

図 2.1-53 バイオ ETBE の輸入量と単価の推移

²⁷ <https://www.fas.usda.gov/data/japan-biofuels-annual-5> [2022.3.6 閲覧]

²⁸ <https://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm?M=01&P=0> [2022.3.6 閲覧]

燃料用バイオエタノールのうち、残りの10%前後がバイオエタノールとして輸入され、日本においてバイオ ETBE へ転換される。バイオ ETBE の製造用のバイオエタノールの輸入については、2016 年から貿易統計の品目コード 2207.10.191²⁹に追加された。バイオエタノールの輸入量と単価の推移を図 2.1-54 に示す。全量がブラジルから輸入される。



(出所) 財務省、「貿易統計」²⁸より作成

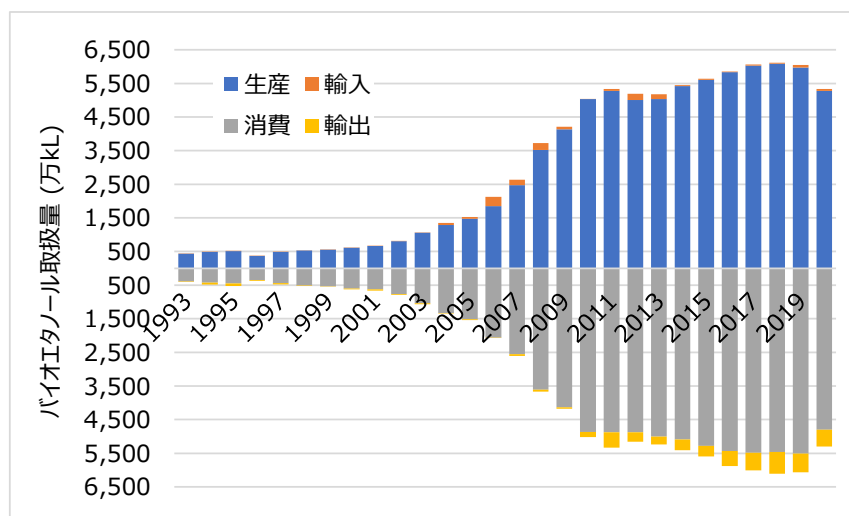
図 2.1-54 ETBE 転換用エタノールの輸入量と単価の推移

2.1.5.2 米国

米国の燃料用バイオエタノールの需給動向を図 2.1-55 に示す。2000 年代後半から急激に生産量が増加しているが、これは 2005 年のエネルギー政策法 (Energy Policy Act) に基づいて定められた再生可能燃料基準 (Renewable Fuels Standard : RFS) によるガソリン流通業者への使用義務の影響が大きい。その後、2007 年に制定された「エネルギー自立・安全保障法 (Energy Independence and Security Act : EISA)」に基づき 2010 年から施行された改訂 RFS (RFS2) では、さらに使用義務量が拡大された。その結果、ブラジルを抜いて世界 1 位の生産国・消費国となった。

2010 年頃からエタノール消費増加がやや減速傾向にあるが、これはいわゆる「ブレンドウォール」によるものである。米国では、バイオエタノール 10% 混合ガソリン (E10) が大勢を占めており、エタノール消費を増加させるにはガソリン消費そのものを増加させる必要がある。ところが、ガソリン消費は 2000 年頃から横ばい傾向にあり、エタノール消費も伸びないという壁 (ブレンドウォール) にぶつかっている。一方、高濃度添加燃料として E85 も販売されているが、提供しているスタンドの数が少なく、販売量自体もわずかである。2019 年の米国におけるバイオエタノールの混合率は 10.1% であった。

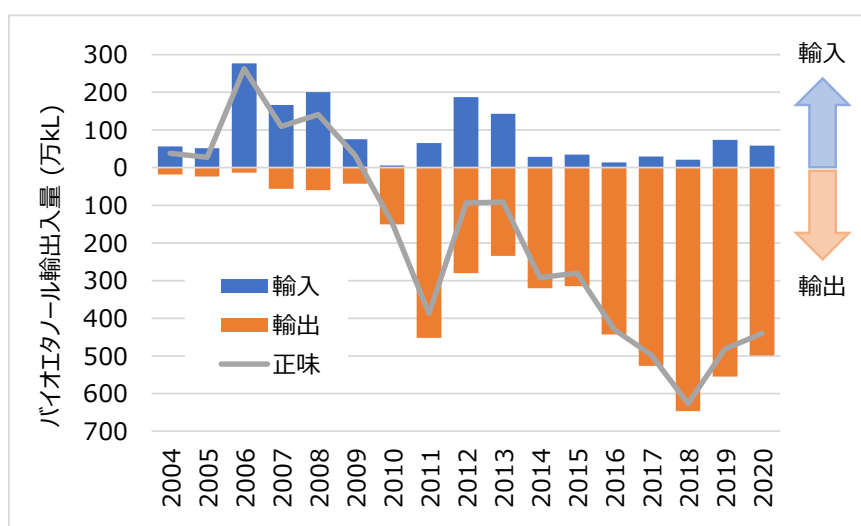
²⁹ バイオマス (動植物に由来する有機物 (原油、石油ガス、可燃性天然ガス及び石炭並びにこれらから製造される製品を除く。) をいう。) から製造したものである旨が政令で定めるところにより証明されたものであり、かつ、エチルターシャリーブチルエーテルの製造の用に供するもの。



(出所) U.S. Department of Agriculture, "U.S. Bioenergy Statistics" ³⁰より作成

図 2.1-55 米国の燃料用バイオエタノールの需給動向

米国の燃料用バイオエタノールの輸出入量推移を図 2.1-56 に示す。2010 年から純輸出国に転じている。輸出先は図 2.1-57 に示すように、カナダ、ブラジル、インド、韓国等である。ブラジルからはバイオエタノールの輸入もわずかに行っており、サンフランシスコとロサンゼルスに陸揚げされ、環境基準が厳しいカリフォルニア州で利用されている。

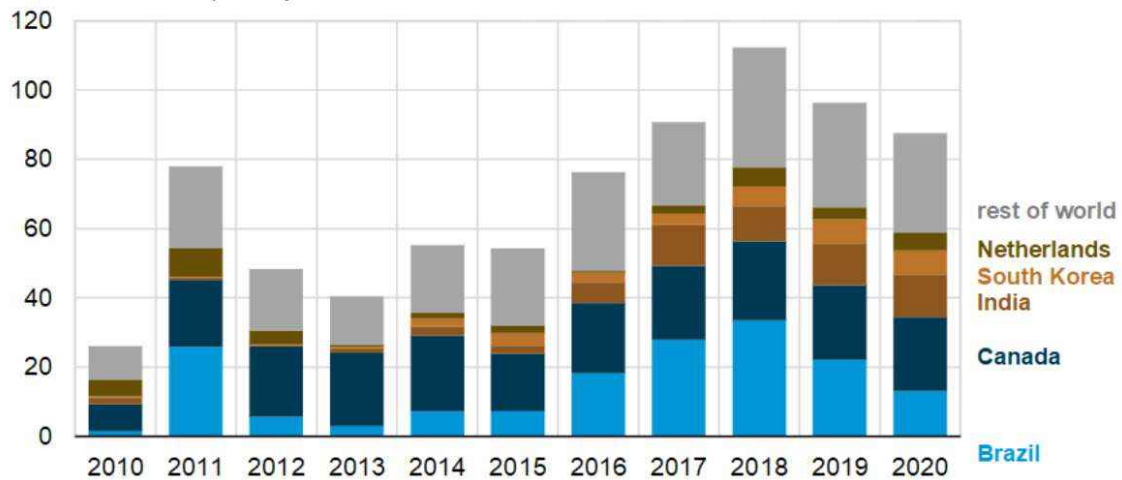


(出所) U.S. Department of Agriculture, "U.S. Bioenergy Statistics" ³⁰より作成

図 2.1-56 米国の燃料用バイオエタノールの輸出入量推移

³⁰ <https://www.ers.usda.gov/data-products/u-s-bioenergy-statistics/> [2022.3.6 閲覧]

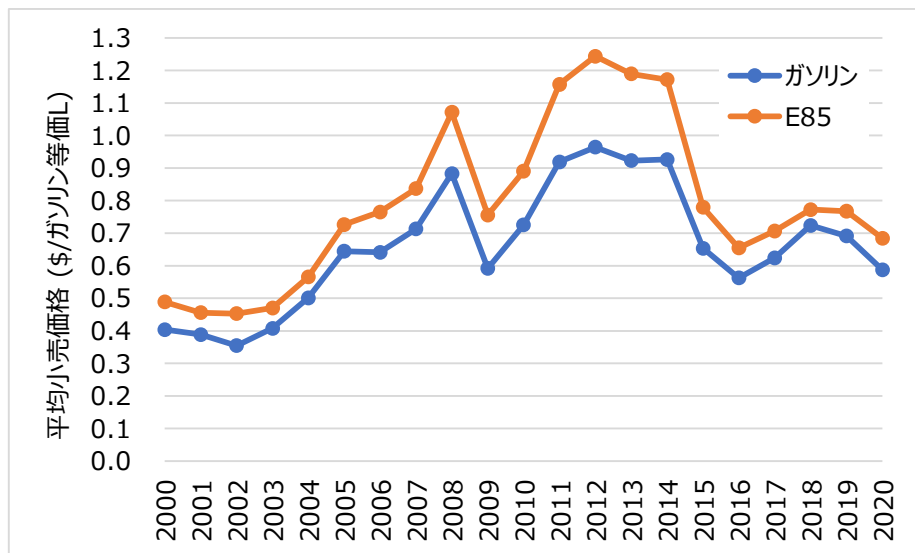
U.S. annual fuel ethanol exports by destination (2010–2020)
thousand barrels per day



(出所) U.S. Energy Information Administration, "In 2020, U.S. exports of fuel ethanol fell for the second consecutive year" (2021.5.14) ³¹

図 2.1-57 米国の燃料用バイオエタノールの国別輸出货量推移

米国のガソリンとバイオエタノール（E85）の価格推移を図 2.1-58 に示す。



(出所) U.S. Department of Energy', "Alternative Fuel Price Report" ³²より作成

図 2.1-58 米国のガソリンとバイオエタノール（E85）の価格推移

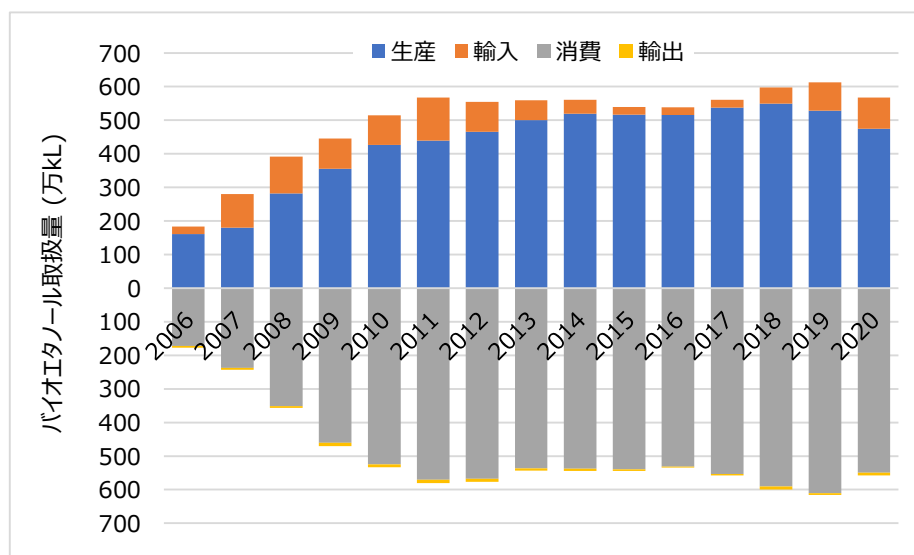
³¹ <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=47956> [2022.3.6 閲覧]

³² <https://afdc.energy.gov/fuels/prices.html> [2022.3.6 閲覧]

2.1.5.3 欧州

EU は、米国、ブラジル、中国に次いで世界 4 位のバイオエタノール生産・消費地域である。再生可能エネルギー指令（Renewable energy Directive : RED I）（2009/28/EC）によって、2020 年までに輸送用燃料の 10% をバイオ燃料などの再生可能エネルギーで供給するよう求めてきた。2018 年 12 月に改正された RED II では、2030 年までに輸送用燃料の 14% を再生可能エネルギーで供給する目標が定められている。

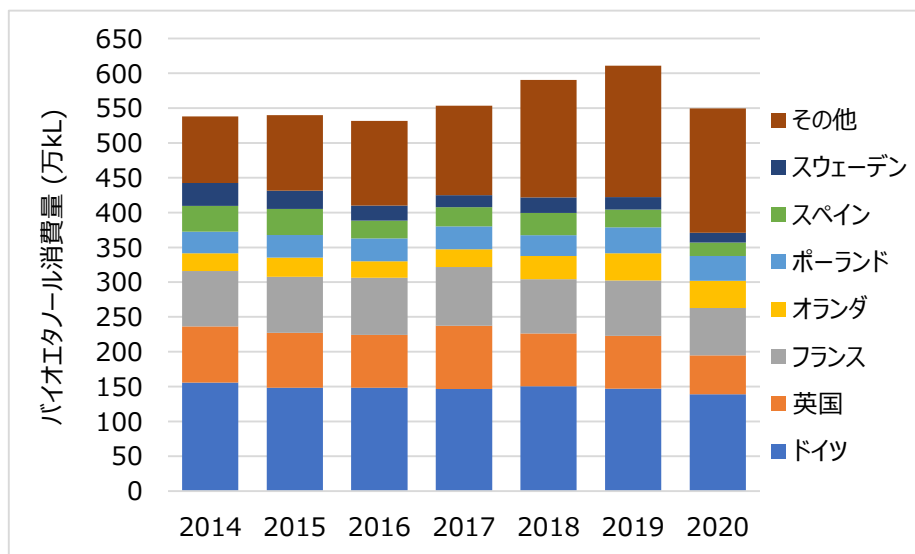
EU（ここでは英国も含めた EU-28）のバイオ燃料の導入はドイツ、フランスが比較的進んでいるが、燃料種別ではバイオエタノールよりもバイオディーゼルの利用が多い。EU-28 の燃料用バイオエタノールの需給動向を図 2.1-59 に、国別の消費量を図 2.1-60 に示す。ドイツの消費量が最も大きい。2020 年の EU-28 におけるバイオエタノールの混合率は 5.5% であった。



（出所） U.S. Department of Agriculture, "EU Biofuels Annual"各年版³³より作成

図 2.1-59 EU-28 の燃料用バイオエタノールの需給動向

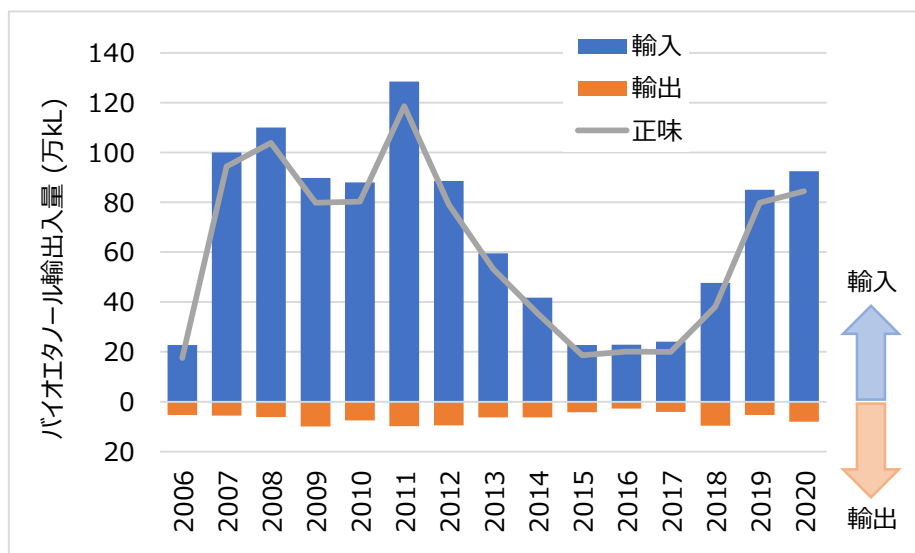
³³ <https://www.fas.usda.gov/data/european-union-biofuels-annual-1> [2022.3.6 閲覧]



(出所) U.S. Department of Agriculture, "EU Biofuels Annual 2021" (2021)³³ より作成

図 2.1-60 EU-28 の燃料用バイオエタノールの国別消費量推移

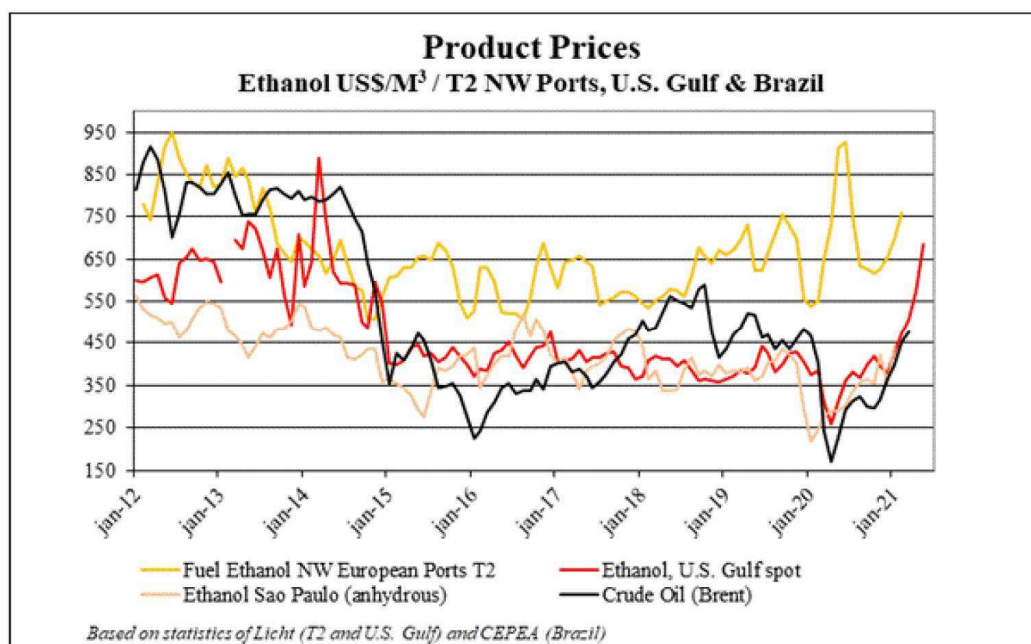
EU-28 の燃料用バイオエタノールの輸出入量推移を図 2.1-61 に示す。2020 年は米国から「non-beverage ethanol」として 45.1 万 kL が輸入された。さらにブラジルからの輸入量が前年の 1.6 万 kL から 24.3 万 kL に急増したほか、他国から無関税枠で 26.8 万 kL が輸入された。また、2.5 万 kL は ETBE として輸入された。



(出所) U.S. Department of Agriculture, "EU Biofuels Annual"各年版³³ より作成

図 2.1-61 EU-28 の燃料用バイオエタノールの輸出入量推移

EU-28 のバイオエタノールの価格を図 2.1-62 に示す。EU の価格 (T2 NW European Ports) のほか、参考として米国とブラジルのエタノール価格及びブレント原油価格も併記されている。2015 年以降、EU-28 の価格は、原油価格や米国とブラジルのエタノール価格と比べ、概して割高な傾向が続いている。



(注) 縦軸の単位：米国ドル/m³

(出所) U.S. Department of Agriculture, "EU Biofuels Annual 2021" (2021)³³

図 2.1-62 EU-28 の燃料用バイオエタノールの価格推移

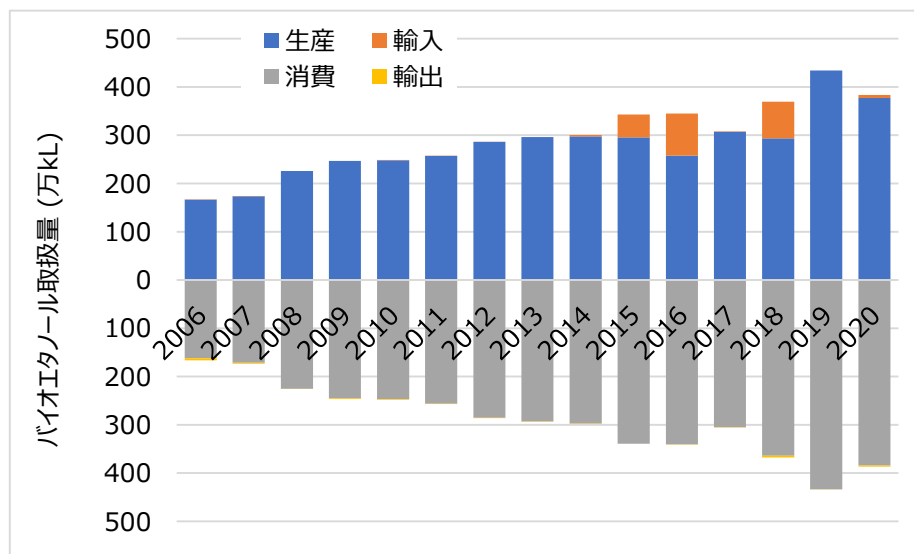
2.1.5.4 中国

中国は、米国、ブラジルに次いで世界 3 位のバイオエタノール生産・消費国である。2017 年 9 月 13 日には、国家发展改革委員会 (NDRC)、国家能源局 (NEA)、財務省 (Ministry of Finance) と 12 の省庁が輸送分野におけるエタノールの生産・販売を拡大する計画を発表した³⁴。これには、2020 年までにガソリン燃料にエタノールを 10% 混合するという全国的な目標などが含まれている。

中国の燃料用バイオエタノールの需給動向を図 2.1-63 に、国別輸入量の推移を図 2.1-64 に示す。消費は概して増加傾向にあるが、2020 年のバイオエタノールの混合率は 2.0% であった。輸出は一貫して殆どない。輸入は 2015 年以降、年により一定量の輸入がある。米国が主な輸入先である。

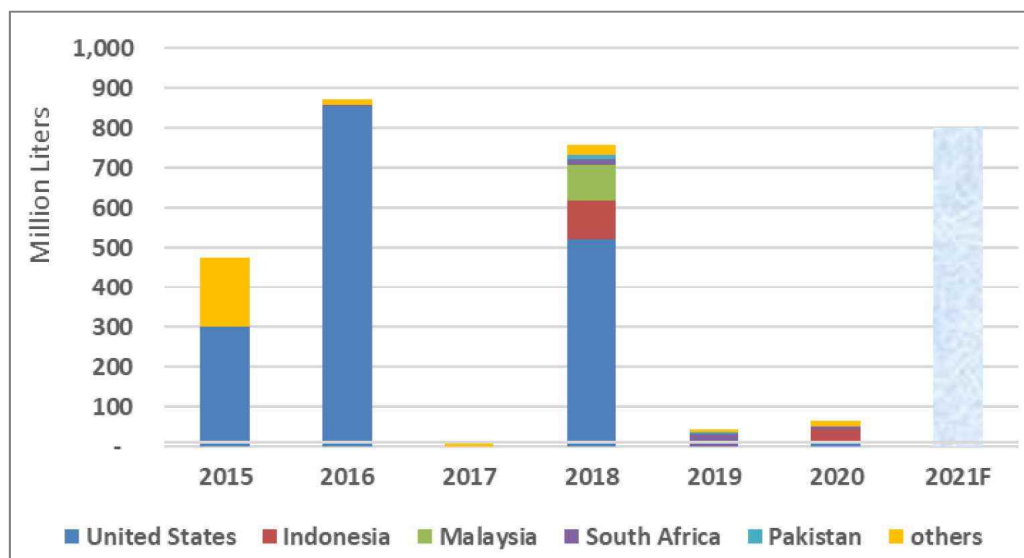
³⁴ Reuters、「独家：中国叫停乙醇汽油推广计划 因玉米储备骤降」（2020.1.9）

<https://www.reuters.com/article/china-ethanol-policy-corn-reserve-0109-idCNKBS1Z803H> [2022.3.6 閲覧]



(出所) U.S. Department of Agriculture, "China Biofuels Annual"各年版³⁵より作成

図 2.1-63 中国の燃料用バイオエタノールの需給動向



(出所) U.S. Department of Agriculture, "China Biofuels Annual 2021" (2021)³⁵

図 2.1-64 中国の燃料用バイオエタノールの国別輸出入量推移

バイオエタノールの価格は、2011年3月1日より施行された国家发展改革委員会の「关于调整变性燃料乙醇结算价格的通知」により、ガソリン価格の0.9111倍と定められている³⁶。

³⁵ <https://www.fas.usda.gov/data/china-biofuels-annual-7> [2022.3.6 閲覧]

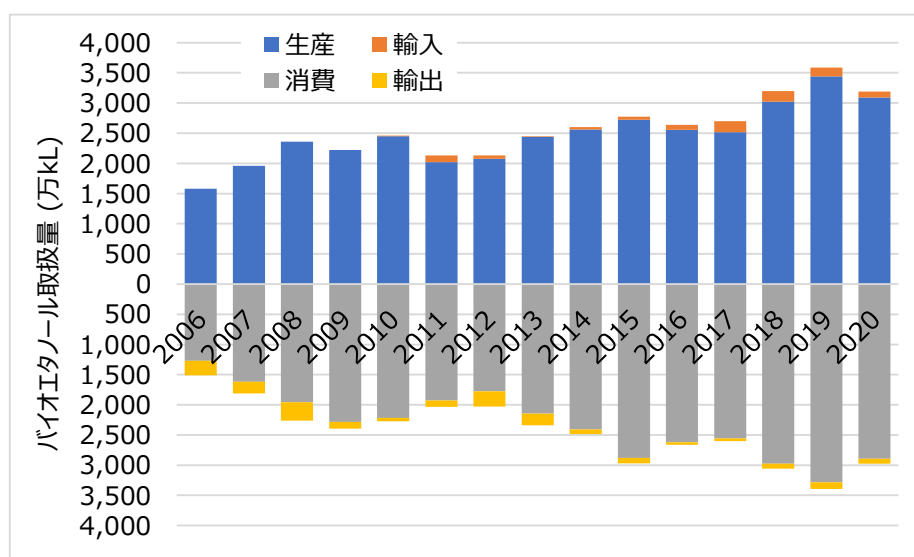
³⁶ 中粮生物化学、「2011年度燃料乙醇补贴标准调整的公告」(2012.2.24)

http://epaper.stcn.com/paper/zqsb/html/2012-02/24/content_343511.htm [2022.3.6 閲覧]

2.1.5.5 ブラジル

ブラジルは米国に次いで、世界 2 位のバイオエタノール生産・消費国である。1993 年の法律第 8723 号「自動車の汚染物質排出量削減に関する法律」において、ガソリンへのバイオエタノールの混合が義務化された³⁷。エタノールの混合率は 18～27.5%の範囲と定められており、関係省庁で組織される CIMA (砂糖アルコール委員会、Interministerial Council for Sugar and Alcohol、Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool)³⁸により、2015 年 3 月 16 日以降現在にかけて 27%に据え置かれている。

ブラジルの燃料用バイオエタノールの需給動向を図 2.1-65 に、種別生産量推移を図 2.1-66 に示す。ブラジルではエタノールでもガソリンでも走れるフレックス車 (Flexible Fuel Vehicle: FFV) が 2003 年から発売され、現在では新車登録台数の殆どを占める。このような自動車の燃料対応に応じて、バイオエタノールの種別 (無水・含水) は変化している。無水エタノールはガソリンに混合され (現在 E27)、含水エタノールは E100 として使用される。フレックス車の普及により、含水エタノールの生産量が増えてきている。



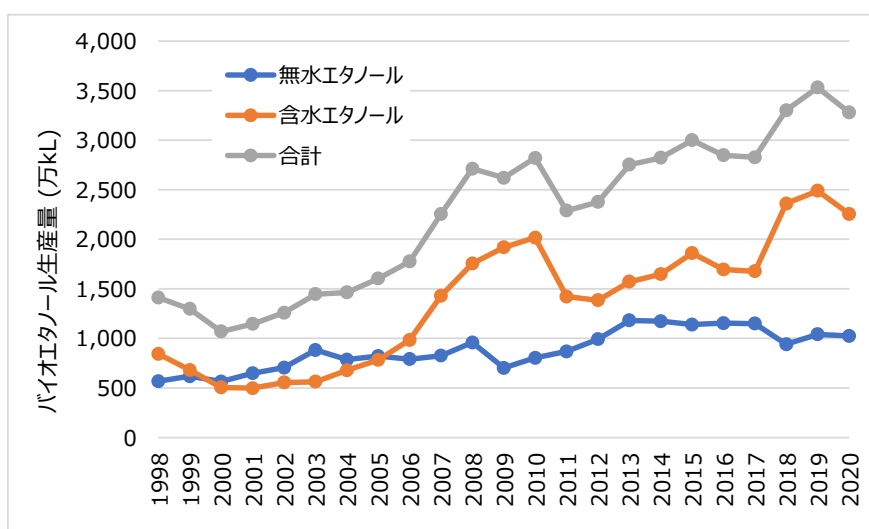
(出所) U.S. Department of Agriculture, "Brazil Biofuels Annual"各年版³⁹より作成

図 2.1-65 ブラジルの燃料用バイオエタノールの需給動向

³⁷ IRENA, "Renewable Energy Policy Brief: Brazil" (2015.6)
<https://rise.esmap.org/data/files/library/brazil/BRAZIL%20Supporting%20Documents/RE/RE%2013.3%20Brazil%20Renewable%20Energy%20Policy%20Brief%202015.pdf> [2022.3.6 閲覧]

³⁸ 1975 年 11 月の国家アルコール計画に基づき設置された。財務省、農務省、鉱山エネルギー省、商工省 (現開発・商工省)、内務省 (現企画・予算・運営省)、企画庁 (同) の各省の代表者で構成される。委員長は商工省次官。

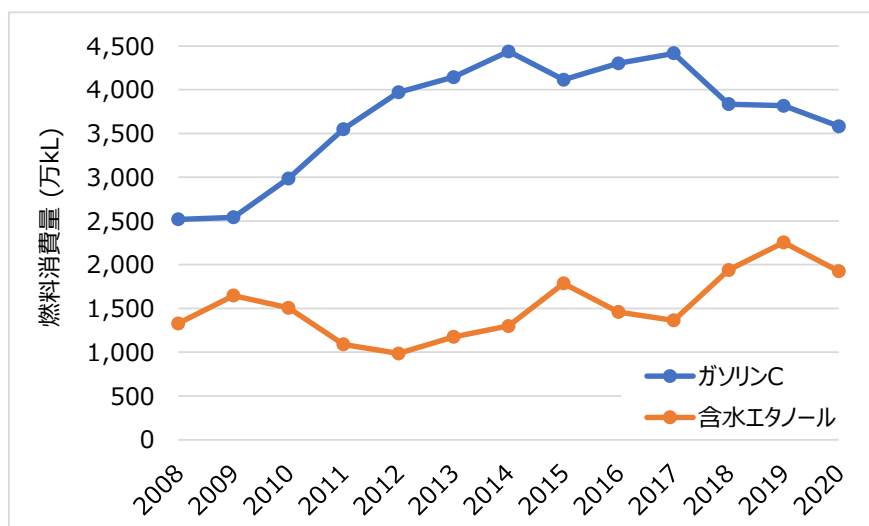
³⁹ <https://www.fas.usda.gov/data/brazil-biofuels-annual-6> [2022.3.6 閲覧]



(出所) ANP (Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis), "Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis"各年版⁴⁰より作成

図 2.1-66 ブラジルの含水エタノール（E100）及び無水エタノール（ガソリン混合用）の生産量推移

自動車用燃料の消費量としては図 2.1-67 のようになり、ガソリン C（エタノール混合ガソリン）の消費量が近年減少傾向であるのに対し、含水エタノールの消費量は増加傾向にある。



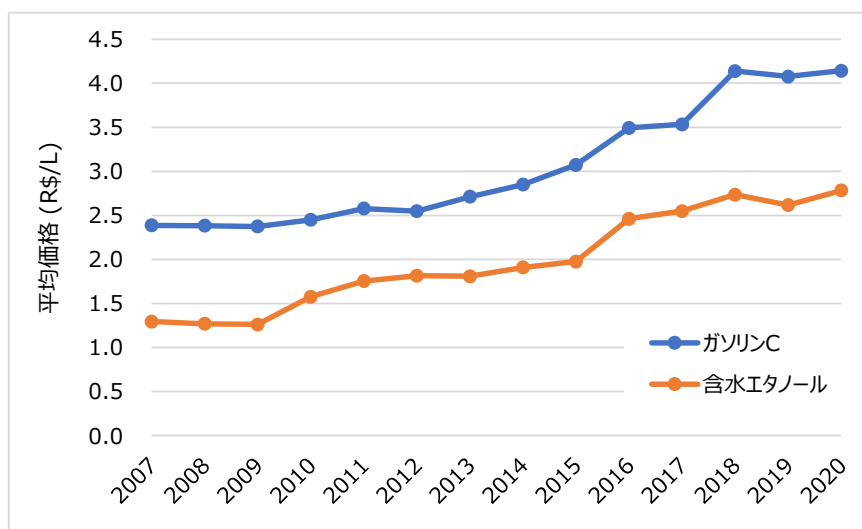
(注) ガソリン C は、18～27.5%の無水エタノールを含む。

(出所) U.S. Department of Agriculture, "Brazil Biofuels Annual"各年版³⁹より作成

図 2.1-67 ブラジルの自動車用燃料消費量の推移

⁴⁰ <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico> [2022.3.6 閲覧]

ブラジル（サンパウロ州⁴¹）の含水エタノールとガソリンの価格を図 2.1-68 に示す。ブラジルでは、生産者から流通業者にバイオエタノールを販売する際の価格を2ヶ月に1回行われるオークションにより決めており、グラフの数値はそれらの年間の平均価格である。2020年8月の時点で含水エタノールの価格 2.564 R\$/L（51.67 円/L）⁴²に対し、E27 ガソリンの価格は1.56 倍の 4.007 R\$/L（80.76 円/L）であった。E27 ガソリンの発熱量は含水エタノールに対して 1.49 倍⁴³であるので、含水エタノールの方が割安である。



（注 1）1 R\$（ブラジルレアル）= 20.154 円（2021 年末時点）

（注 2）ガソリン C は、18～27.5%の無水エタノールを含む。

（出所）U.S. Department of Agriculture, "Brazil Biofuels Annual"各年版³⁹より作成

図 2.1-68 ブラジル（サンパウロ州）の自動車用燃料価格の推移

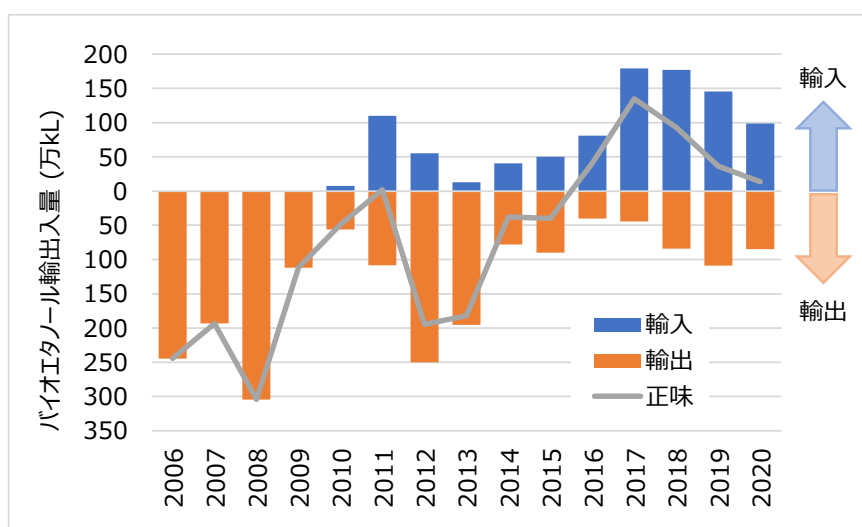
ブラジルの燃料用バイオエタノールの輸出入量を図 2.1-69 に示す。輸出・輸入どちらにおいても、米国が最大の貿易相手国である。

⁴¹ バイオエタノール価格の地域差が大きいため、ここではブラジル最大の経済都市であるサンパウロを有するサンパウロ州の価格データを引用した。

⁴² 1 R\$（ブラジルレアル）= 20.154 円（2021 年末時点）

<https://www.hs-sec.co.jp/bond/foreign/chart/brl.htm> [2022.3.6 閲覧]

⁴³ ANP, "Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2021" (2021)、ガソリン C と含水エタノールの発熱量より

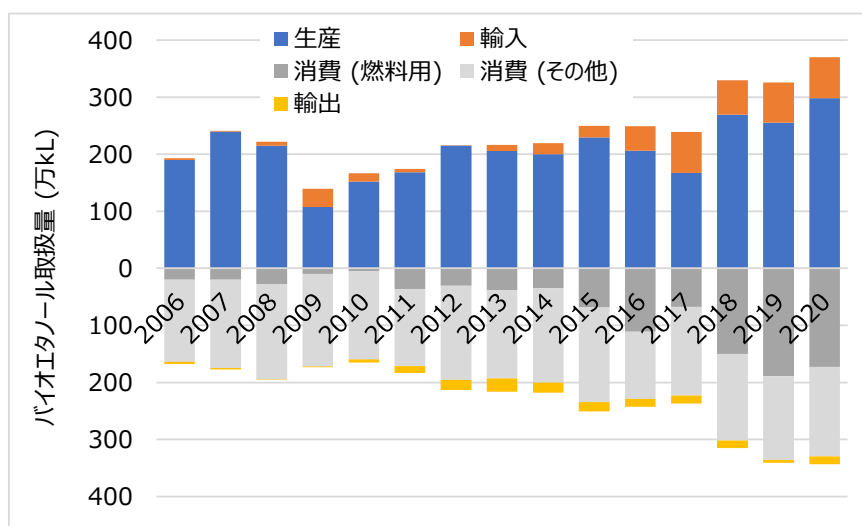


(出所) U.S. Department of Agriculture, "Brazil Biofuels Annual"各年版³⁹より作成

図 2.1-69 ブラジルの燃料用バイオエタノールの輸出入量推移

2.1.5.6 インド

インドは世界4位(EU全体を含めると5位)のバイオエタノール生産・消費国である。インドのバイオエタノールの需給動向を図2.1-70に示す。近年、燃料用バイオエタノールの消費量が増加傾向にある。現在はE10ガソリンの全国導入を目指している段階であり、2021年にインドのガソリンに配合されたエタノールの平均含有率は8.33%である⁴⁴。



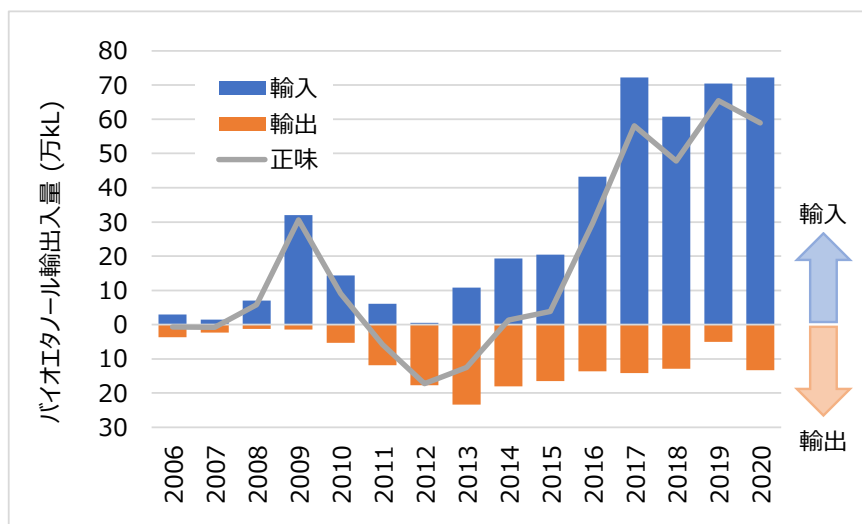
(出所) U.S. Department of Agriculture, "India Biofuels Annual"各年版⁴⁵より作成

図 2.1-70 インドのバイオエタノールの需給動向

⁴⁴ JPEC、「JPEC 世界製油所関連最新情報 2022年1月号」(2022.1.31)
https://www.pecj.or.jp/wp-content/uploads/2022/02/overseas_refinery_202201.pdf [2022.3.6 閲覧]

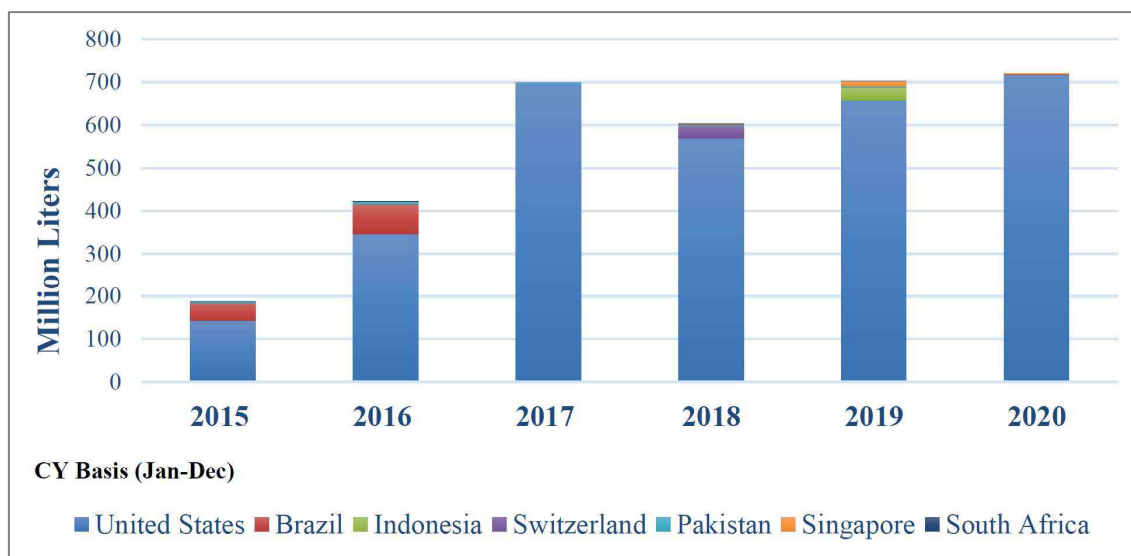
⁴⁵ <https://www.fas.usda.gov/data/india-biofuels-annual-6> [2022.3.6 閲覧]

インドのバイオエタノールの輸出入量、国別輸入量、国別輸出量を、それぞれ図 2.1-71、図 2.1-72、図 2.1-73 に示す。基本的にエタノール輸入国であり、米国からの輸入が中心である。一方、アフリカ諸国に対して、毎年一定程度の輸出も行っている。



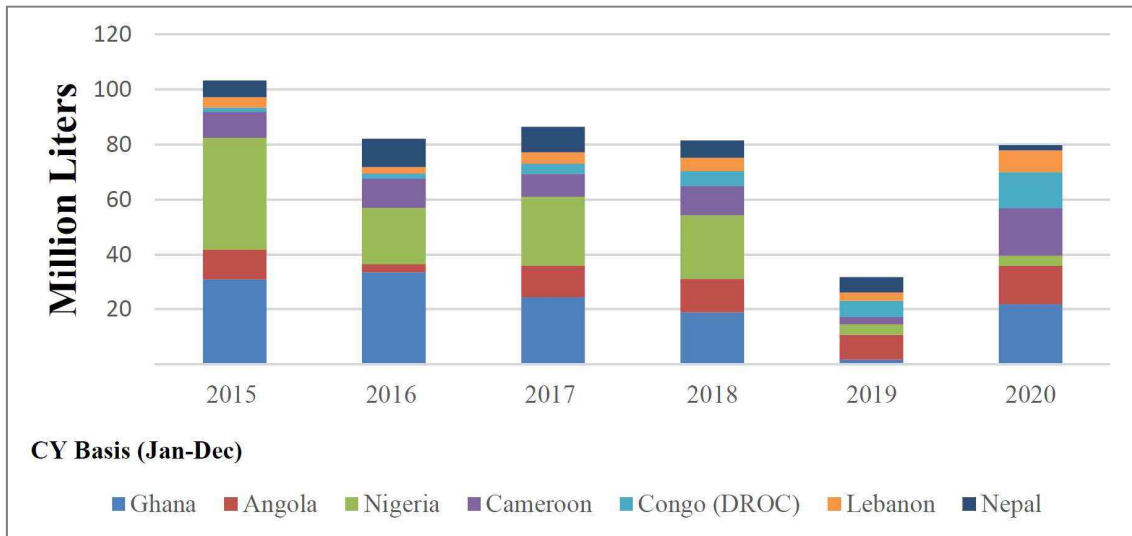
(出所) U.S. Department of Agriculture, "India Biofuels Annual"各年版⁴⁵より作成

図 2.1-71 インドのバイオエタノールの輸出入量推移



(出所) U.S. Department of Agriculture, "India Biofuels Annual 2021" (2021)⁴⁵

図 2.1-72 インドのバイオエタノールの国別輸入量推移



(出所) U.S. Department of Agriculture, "India Biofuels Annual 2021" (2021)⁴⁵

図 2.1-73 インドのバイオエタノールの国別輸出量推移

インドではエタノールの供給を促進するため、政策決定機関である内閣経済対策委員会 (Cabinet Committee on Economic Affairs : CCEA、首相が議長を務める) が、公営石油販売会社 (Oil Marketing Companies : OMCs) による燃料用エタノールの買取価格を毎年度 (12 月から翌 11 月) 設定している。2021 年 12 月から 2022 年 11 月の買取価格は、1 L あたり 45.69 ルピー (70.45 円⁴⁶) から 46.66 ルピー (71.95 円) に見直された⁴⁷。別途、物品サービス税 (Goods and Services Tax : GST) と輸送費も査定される。

2.1.6 バイオディーゼル

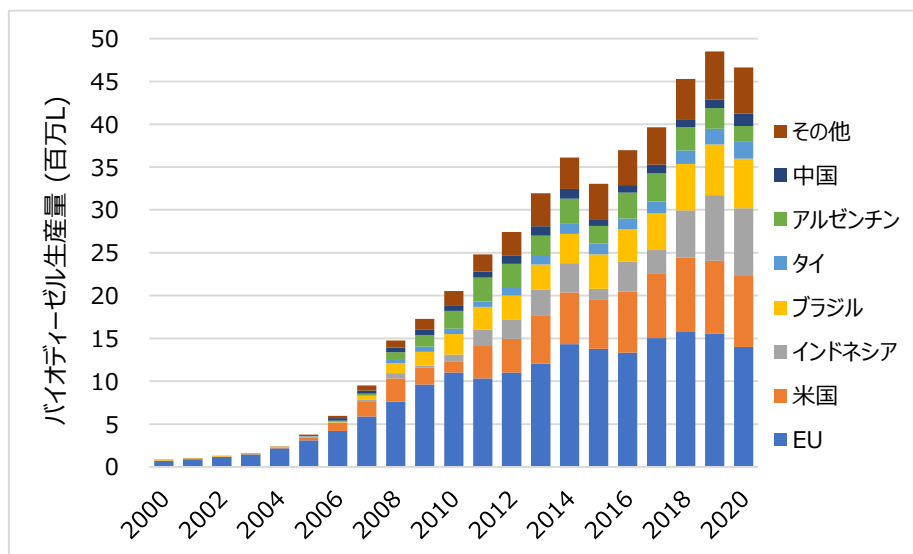
バイオディーゼルは、バイオマスから抽出した油脂あるいは回収した廃食油から生産される。バイオディーゼルの国・地域別生産量推移を図 2.1-74 に示す。本項では、日本、米国、欧州 (参考文献が対象とする英国を含めた EU-28)、中国のほか、生産量の多いインドネシアとブラジルを取り上げた。

⁴⁶ 1 ルピー = 1.542 円 (2021 年末時点)

<https://www.hs-sec.co.jp/bond/foreign/chart/inr.htm> [2022.3.6 閲覧]

⁴⁷ CCEA, "Cabinet approves mechanism for procurement of ethanol by Public Sector Oil Marketing Companies under Ethanol Blended Petrol programme revised - ethanol price for supply to Public Sector OMCs for Ethanol Supply Year 2021-22" (2021.11.10)

<https://pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=1770518> [2022.3.6 閲覧]



(出所) OECD, FAO, "OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030" ⁴⁸より作成

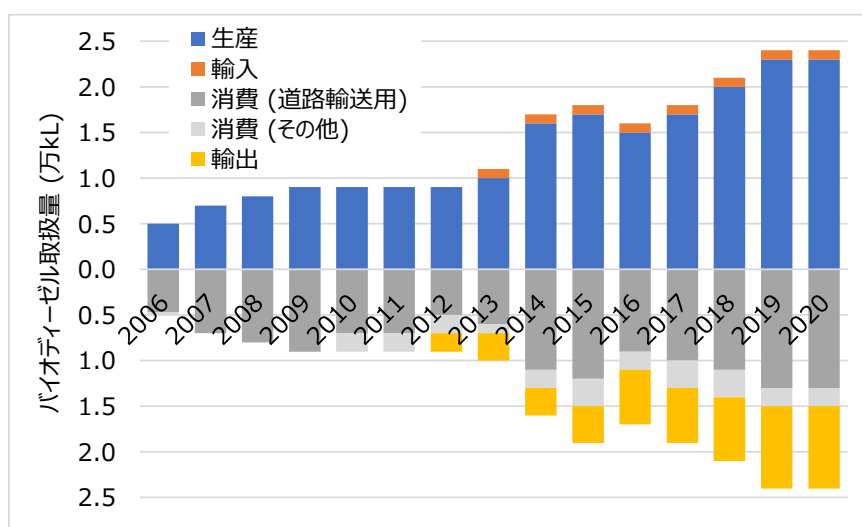
図 2.1-74 バイオディーゼルの国・地域別生産量推移

2.1.6.1 日本

日本のバイオディーゼルの需給動向を図2.1-75に示す。廃食油を利用したバイオディーゼルの生産・利用が、ごみ収集車や市営バス等の公用車を中心に小規模かつ地産地消的に行われている。混合率5%までは通常の自動車燃料の軽油として使用が可能である。国内消費の1.5万kLのうち自動車用は1.2万kLと推計され、これは道路輸送用ディーゼル消費量のわずか0.04%でしかない。

2017年以降の輸出先は殆どスイスであり、2020年は0.9万kL（シェア100%）を輸出した。わずかながら輸入もあり（殆どがマレーシアからのパーム油）、道路輸送以外の用途に使用される。

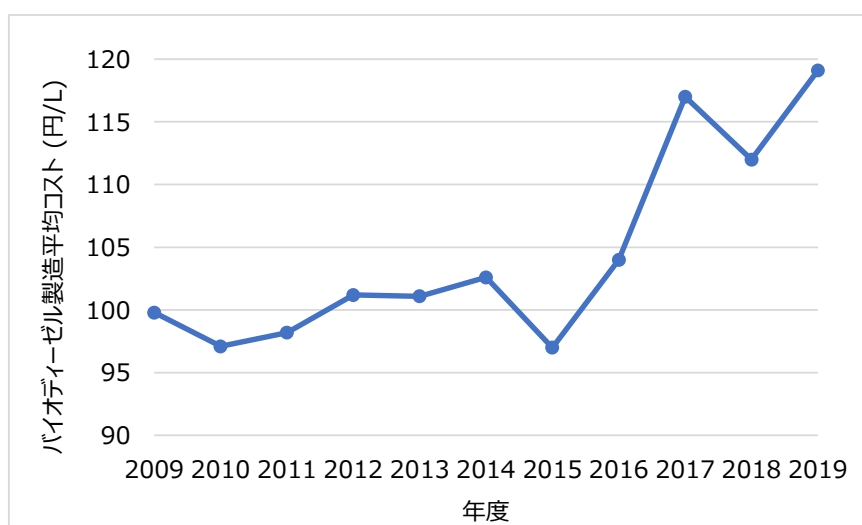
⁴⁸ https://stats.oecd.org/viewhtml.aspx?datasetcode=HIGH_AGLINK_2021&lang=en# [2022.3.6 閲覧]



(出所) U.S. Department of Agriculture, "Japan Biofuels Annual"各年版⁴⁹より作成

図 2.1-75 日本のバイオディーゼルの需給動向

日本のバイオディーゼルの製造コスト推移を図 2.1-76 に示す。



(注) 事業者 (年度により 20 社から 60 社程度) の回答したコストの相加平均 (突出した値は除去)。

(出所) 全国バイオディーゼル燃料利用推進協議会、「BDF 実態調査」各年度版⁵⁰より作成

図 2.1-76 日本のバイオディーゼルの製造コスト推移

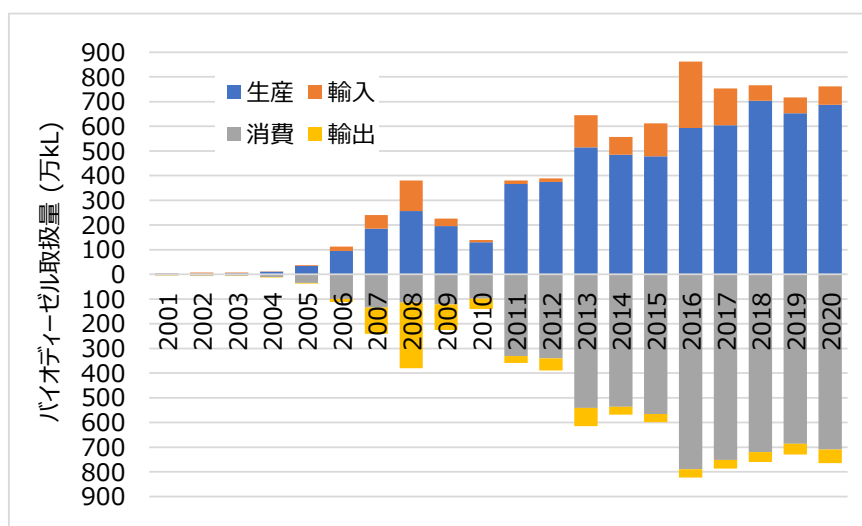
2.1.6.2 米国

米国は EU に次ぐが、国別だと世界 1 位のバイオディーゼル生産・消費国である。米国のバイオディーゼルの需給動向を図 2.1-77 に示す。先に、米国のエタノールの生産量が

⁴⁹ <https://www.fas.usda.gov/data/japan-biofuels-annual-5> [2022.3.6 閲覧]

⁵⁰ <https://www.jora.jp/activity/bdfk/> [2022.3.6 閲覧]

再生可能燃料基準(RFS)により 2000 年代後半から急激に生産量が増加したと述べたが、バイオディーゼルも同様の時期に生産の立ち上がりを示している。バイオディーゼルは自動車用燃料としてはもちろんのこと、船舶用燃料の代替としても従来の軽油や重油に混合している。また SAF (Sustainable Aviation Fuel、持続可能な航空燃料) としての利用も始まっている。



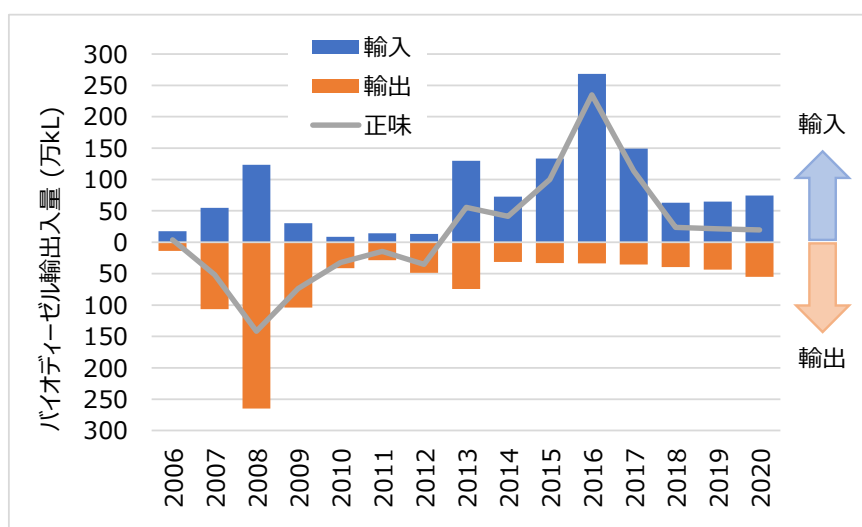
(出所) U.S. Department of Agriculture, "U.S. Bioenergy Statistics" ⁵¹より作成

図 2.1-77 米国のバイオディーゼルの需給動向

米国のバイオディーゼルの輸出入量推移を図 2.1-78 に示す。2013 年頃からアルゼンチンからのバイオディーゼルの輸入が大きく伸びたが、2017 年 12 月 5 日に米国貿易委員会 (USITC) が、「アルゼンチンがバイオディーゼルに輸出補助金を出して輸出を進め、米国内のバイオディーゼル産業へ被害を与えている」と最終認定したことにより、2018 年 1 月から 2022 年 12 月の 5 年間に相殺関税が課されることとなり、アルゼンチンからの輸入はなくなった⁵²。2018 年からは若干輸入量が輸出量を上回る状況が続いている。主要な輸入先はカナダ、ドイツ、韓国であり、輸出先はカナダが殆どのシェアを占める。

⁵¹ <https://www.ers.usda.gov/data-products/u-s-bioenergy-statistics/> [2022.3.6 閲覧]

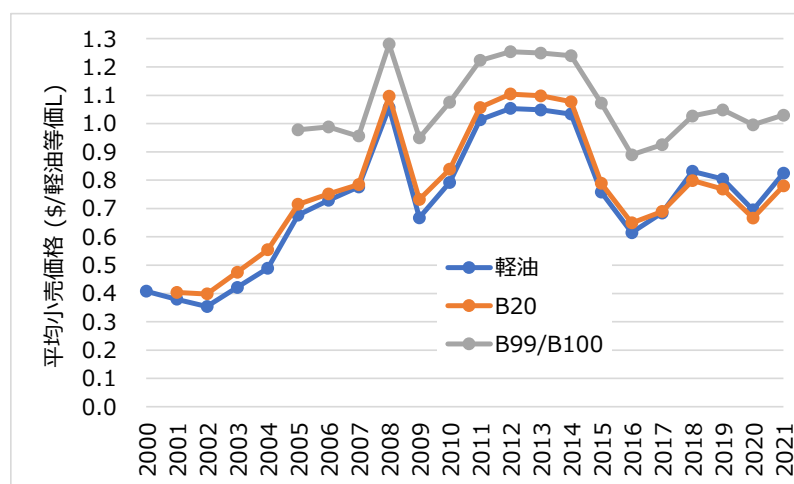
⁵² JETRO、「米国、アルゼンチン産バイオディーゼルに相殺関税適用一税率は約 72%、2018 年 1 月から 5 年間一」(2017.12.25) <https://www.jetro.go.jp/biznews/2017/12/bf6c593c110ba36b.html> [2022.3.6 閲覧]



(出所) U.S. Department of Agriculture, "U.S. Bioenergy Statistics" ⁵¹ より作成

図 2.1-78 米国のバイオディーゼルの輸出入量推移

米国の軽油とバイオディーゼル（B20、B99/B100）の価格推移を図 2.1-79 に示す。



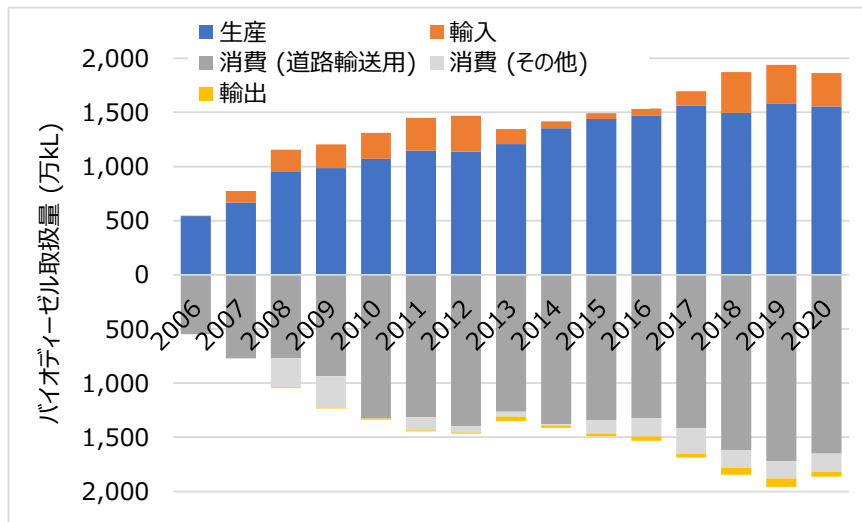
(出所) U.S. Department of Energy, "Alternative Fuel Price Report" ⁵³ より作成

図 2.1-79 軽油とバイオディーゼル（B20、B99/B100）の価格推移

2.1.6.3 欧州

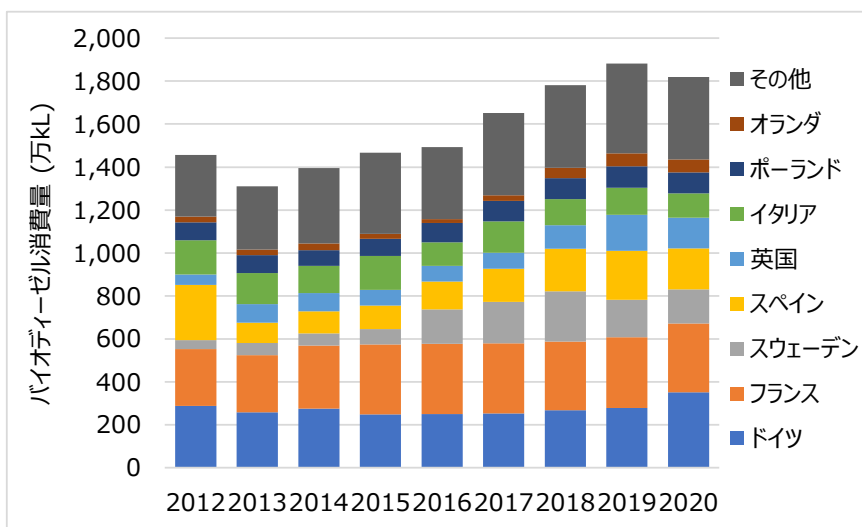
EU は世界最大のバイオディーゼル生産・消費地域である。EU（英国を含む EU-28）のバイオディーゼルの需給動向を図 2.1-80 に、国別消費量の推移を図 2.1-81 に、国別輸入量の推移を図 2.1-82 に示す。2020 年の EU-28 における道路輸送用バイオディーゼルの平均混合率は 7.6%であった。

⁵³ <https://afdc.energy.gov/fuels/prices.html> [2022.3.6 閲覧]



(出所) U.S. Department of Agriculture, "EU Biofuels Annual"各年版⁵⁴より作成

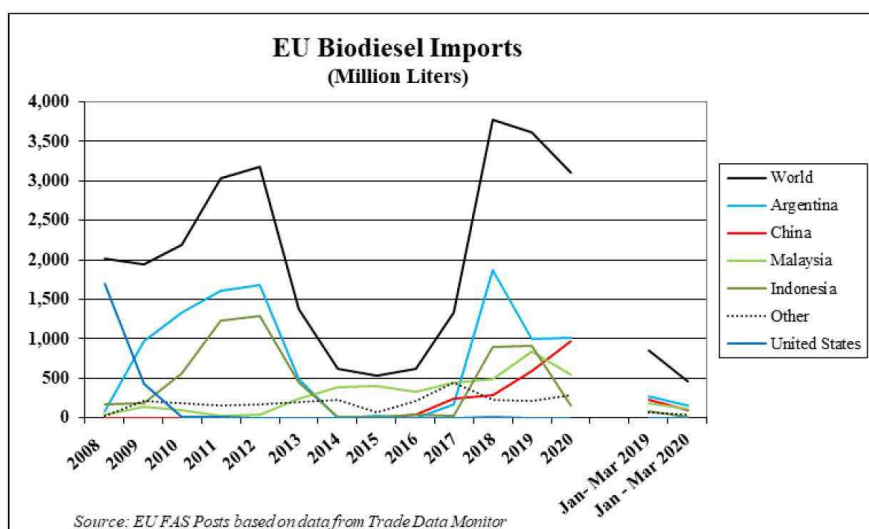
図 2.1-80 EU-28 のバイオディーゼルの需給動向



(出所) U.S. Department of Agriculture, "EU Biofuels Annual 2021" (2021)⁵⁴より作成

図 2.1-81 EU-28 のバイオディーゼルの国別消費量推移

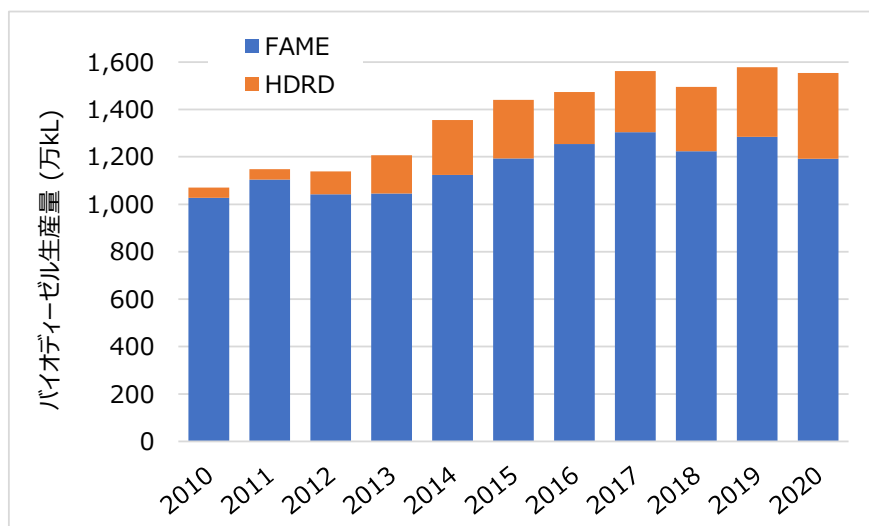
⁵⁴ <https://www.fas.usda.gov/data/european-union-biofuels-annual-1> [2022.3.6 閲覧]



(出所) U.S. Department of Agriculture, "EU Biofuels Annual"各年版⁵⁴より作成

図 2.1-82 EU-28 のバイオディーゼルの国別輸入量推移

EU では、第 1 世代である食用作物から製造されたバイオ燃料の制限⁵⁵があり、第 2 世代バイオ燃料導入促進のために、バイオ由来の脂肪酸トリグリセリドを水素化処理した HVO (HDRD) の生産が進んでおり生産量全体の約 20%を占める (図 2.1-83)。原料の多くが廃食油で、先進バイオ燃料として期待されている。なお、バイオ燃料の種類世代別説明は 2.3 節にて後述する。

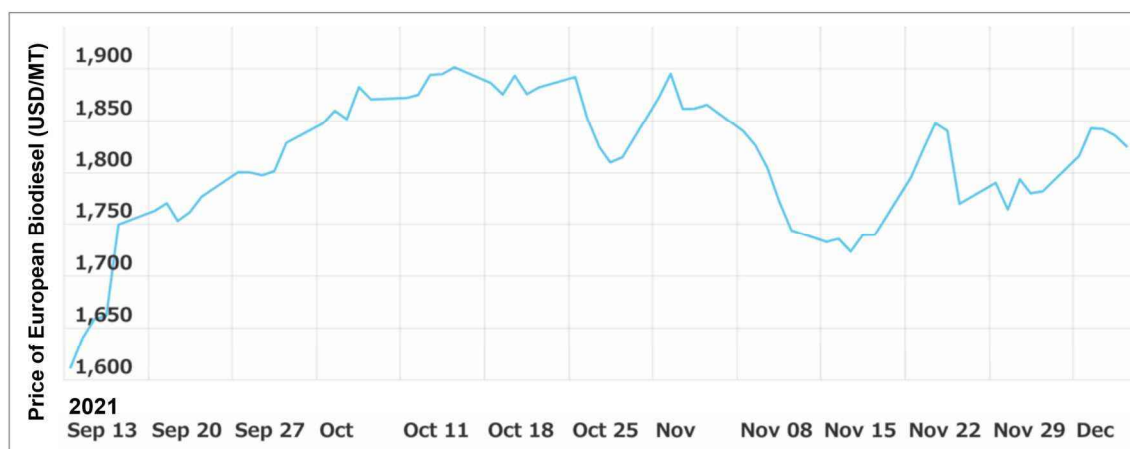


(出所) U.S. Department of Agriculture, "EU Biofuels Annual"各年版⁵⁴より作成

図 2.1-83 EU-28 のバイオディーゼル種類別生産量推移

⁵⁵ 欧州再生可能エネルギー指令 (RED II) では、各加盟国の 7%または 2020 年の混合率+1%のいずれか低い方で食物由来のバイオ燃料導入上限を設定することを、2030 年までの目標としている。

欧州のバイオディーゼルの価格推移を図 2.1-84 に示す。



(注) USD : 米国ドル、MT : metric ton (メートル法でのトン、1,000 kg に等しい)

(出所) S&P Global Platts, "The price of European Biodiesel" ⁵⁶

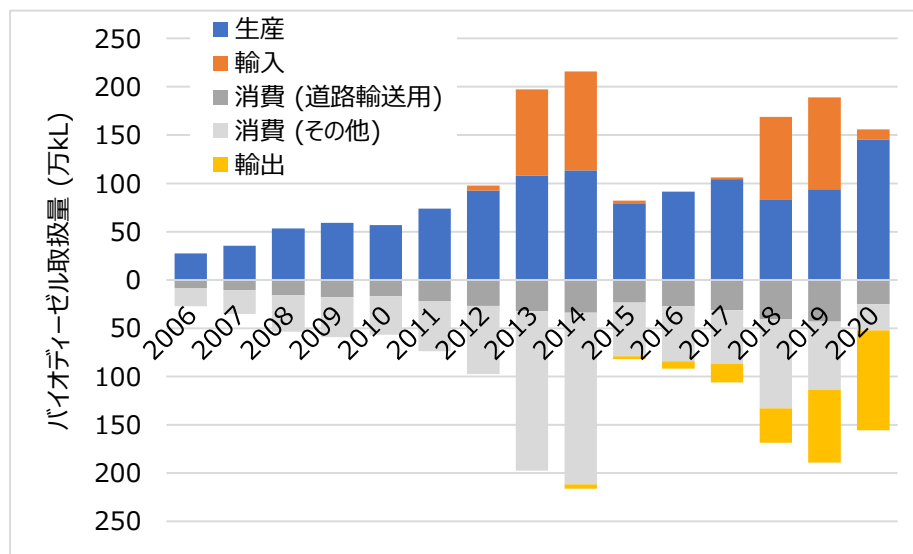
図 2.1-84 欧州のバイオディーゼルの価格推移

2.1.6.4 中国

中国のバイオディーゼルの需給動向を図 2.1-85 に示す。2013 年から 2014 年にかけて、指標原油価格が 100\$/バレルを超えるとバイオディーゼルの需要は拡大したが、2015 年に原油価格が暴落すると需要が激減し、現在も 2014 年のピークレベルを下回ったままである。中国ではバイオディーゼル混合燃料の使用基準や義務化がないため、導入拡大は厳しいものと見込まれている。中国では他国と異なりバイオディーゼルの主な用途は発電、漁船、農機具の燃料であり、道路輸送が需要において占める割合は全体の約 1/3にとどまる。バイオディーゼルプログラムを実施している地方自治体は上海のみであり、通常のディーゼル価格 6.02 元/L より 0.3 元安い 5.72 元/L でバイオディーゼルを販売している⁵⁷。

⁵⁶ <https://www.spglobal.com/platts/en/our-methodology/price-assessments/agriculture/european-biodiesel-price-assessment-explained> [2021.12.31 閲覧]

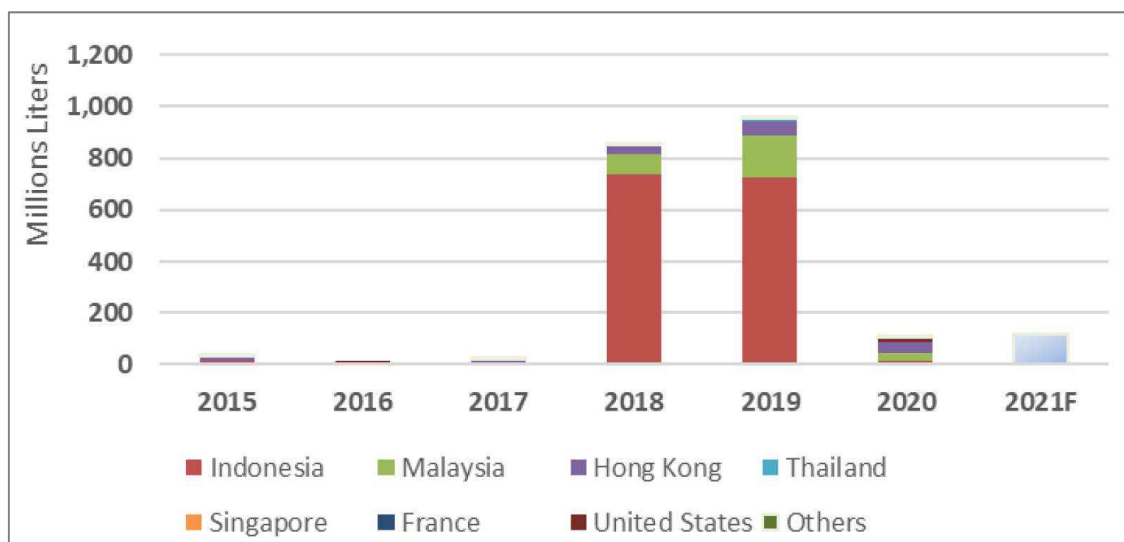
⁵⁷ People's Daily Online, "Shanghai steps up use of biodiesel converted from recycled gutter oil" (2021.3.18) <http://en.people.cn/n3/2021/0318/c90000-9830341.html> [2022.3.6 閲覧]



(出所) U.S. Department of Agriculture, "China Biofuels Annual"各年版⁵⁸より作成

図 2.1-85 中国のバイオディーゼルの需給動向

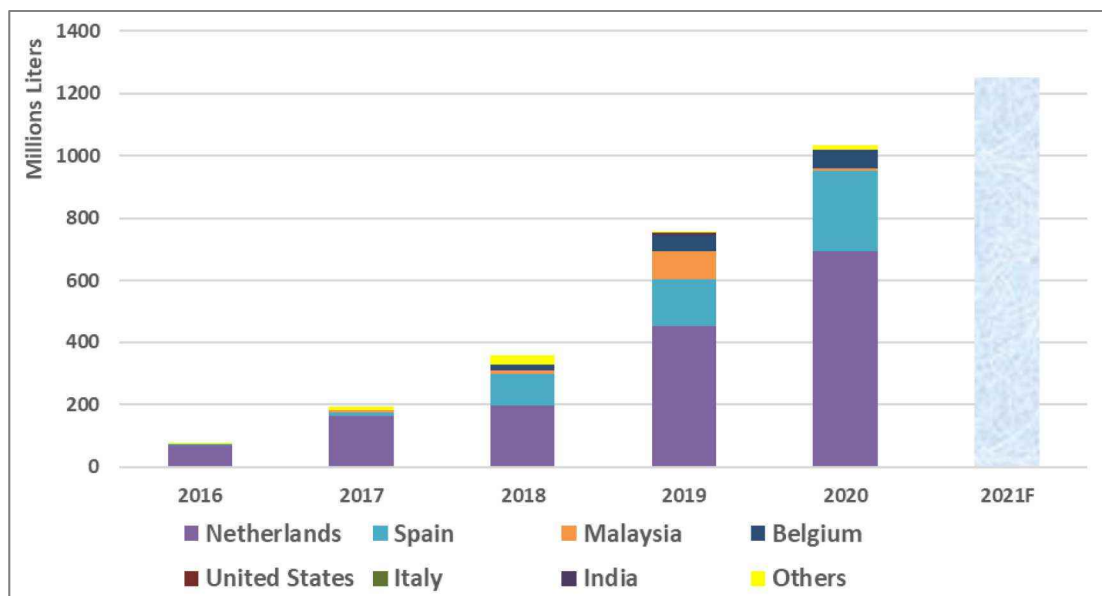
中国のバイオディーゼルの国別輸入量推移を図 2.1-86 に、国別輸出量推移を図 2.1-87 に示す。2018年と2019年に輸入量が突出しており、大部分をインドネシアから輸入した。輸出量は年々増加しており、オランダとスペインへの輸出が主である。



(出所) U.S. Department of Agriculture, "China Biofuels Annual 2021" (2021)⁵⁸

図 2.1-86 中国のバイオディーゼルの国別輸入量推移

⁵⁸ <https://www.fas.usda.gov/data/china-biofuels-annual-7> [2022.3.6 閲覧]



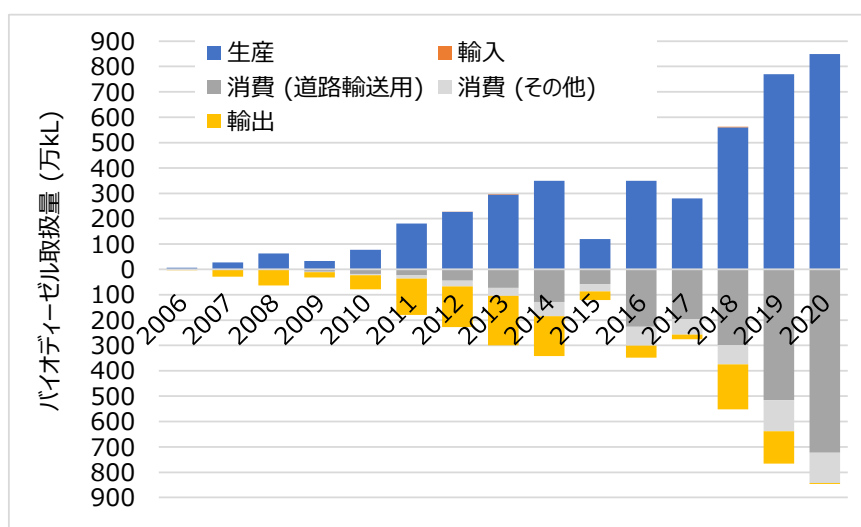
(出所) U.S. Department of Agriculture, "China Biofuels Annual 2021" (2021)⁵⁸

図 2.1-87 中国のバイオディーゼルの国別輸出量推移

2.1.6.5 インドネシア

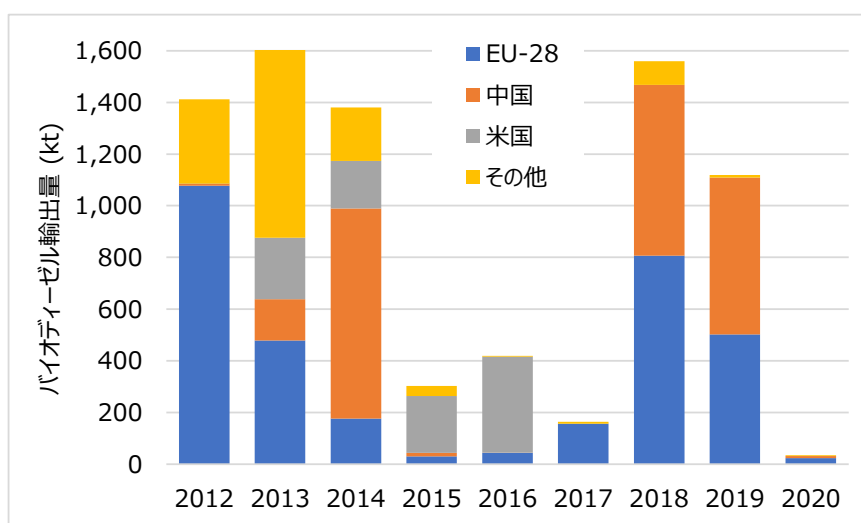
インドネシアは世界第2位のバイオディーゼル生産・消費国である。インドネシアのバイオディーゼルの需給動向を図 2.1-88 に示す。バイオディーゼルの消費は混合義務化プログラムによって推進され、主として道路輸送部門で消費される。2016 年に公共サービス義務 (Public Service Obligation : PSO) 運輸部門で、軽油にバイオディーゼルを 20% 混合した B20 義務化を開始し、2018 年 9 月に非 PSO 輸送への B20 義務を拡大した。2020 年 1 月からは B30 の使用義務化を開始した。

インドネシアのバイオディーゼルの国別輸出量を図 2.1-89 に示す。2018 年と 2019 年は輸出量を EU 各国と中国でほぼ二分したが、2020 年は双方の輸入需要が殆どなくなり、輸出量は大幅に落ち込んだ。



(出所) U.S. Department of Agriculture, "Indonesia Biofuels Annual"各年版⁵⁹より作成

図 2.1-88 インドネシアのバイオディーゼルの需給動向



(出所) International Trade Centre, "Trade Map" ⁶⁰より作成

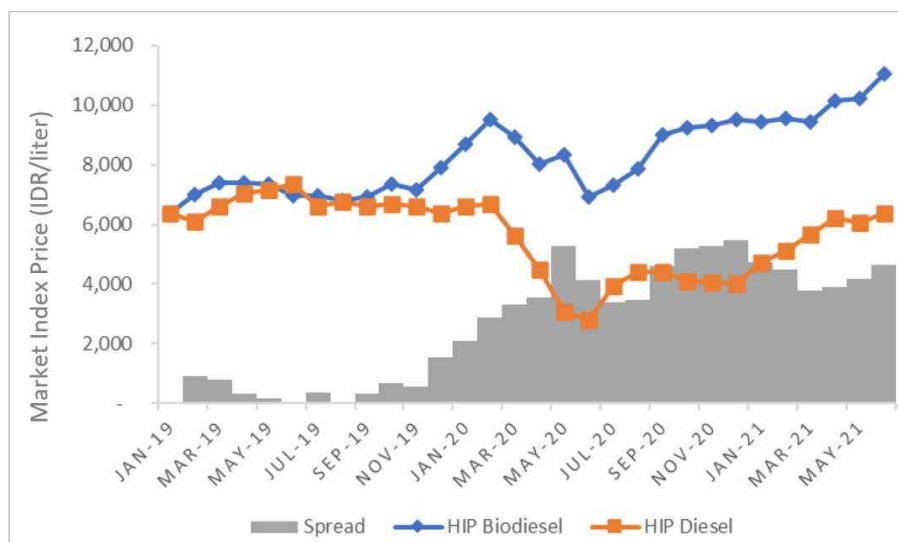
図 2.1-89 インドネシアのバイオディーゼルの国別輸出货量推移

インドネシアのバイオディーゼルと軽油の市場インデックス価格推移を図 2.1-90 に示す。バイオディーゼル混合義務化プログラムは両者の価格差に大きく影響される。インドネシア政府は 2021 年中に B40 の導入を計画していたが、バイオディーゼルの原料であるパーム油（Crude palm oil : CPO）市況の高騰が続いており、B40 の製造コストが当初の見積を大きく上回ったため、事実上、無期延期されたとみられている。バイオディーゼルの

⁵⁹ <https://www.fas.usda.gov/data/indonesia-biofuels-annual-5> [2022.3.6 閲覧]

⁶⁰ <https://www.trademap.org/Index.aspx> [2022.3.6 閲覧]

補助金は、2019 年の 444 ルピア/L（3.58 円/L）⁶¹から 2020 年は 4,052 ルピア/L（32.70 円/L）まで跳ね上がり、2021 年上半期平均も 4,281 ルピア/L（34.55 円/L）と高い水準が続いている。



（注 1）IDR：インドネシアルピア、1 ルピア = 0.00807 円（2021 年末時点）

（注 2）HIP：Harga Indeks Pasar（Market Index Price、市場指数価格）

（出所）U.S. Department of Agriculture, "Indonesia Biofuels Annual 2021" (2021)⁵⁹

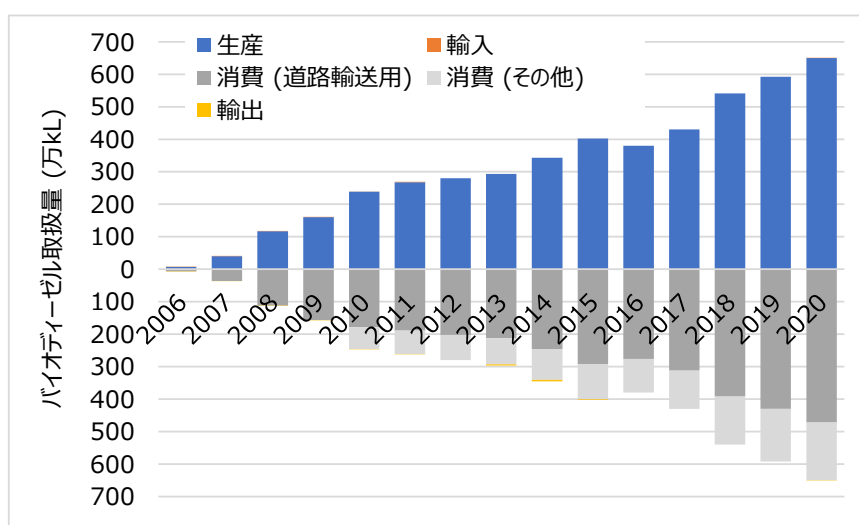
図 2.1-90 インドネシアのバイオディーゼルと軽油の市場インデックス価格推移

2.1.6.6 ブラジル

ブラジルは世界 3 位のバイオディーゼル生産・消費国である。ブラジルのバイオディーゼルの需給動向を図 2.1-91 に示す。2018 年 3 月 1 日以降、消費されるすべての軽油に適用されるバイオディーゼル混合義務は、10%に設定された。毎年 1%ずつ義務混合量を段階的に引き上げ、2023 年 3 月までに B15 とする目標が設定されていたが、COVID-19 による原料不足、ディーゼル燃料の需要拡大、大豆価格の高騰などを理由にして、B10 から B13 の間を行ったり来たりしている。2021 年 3 月に B13 となったが、同 5 月に 10%に引き下げられ、2021 年 9 月以降は B12 である。貿易については、輸出、輸入とも一貫してほぼゼロである。

⁶¹ 1 ルピア = 0.00807 円（2021 年末時点）

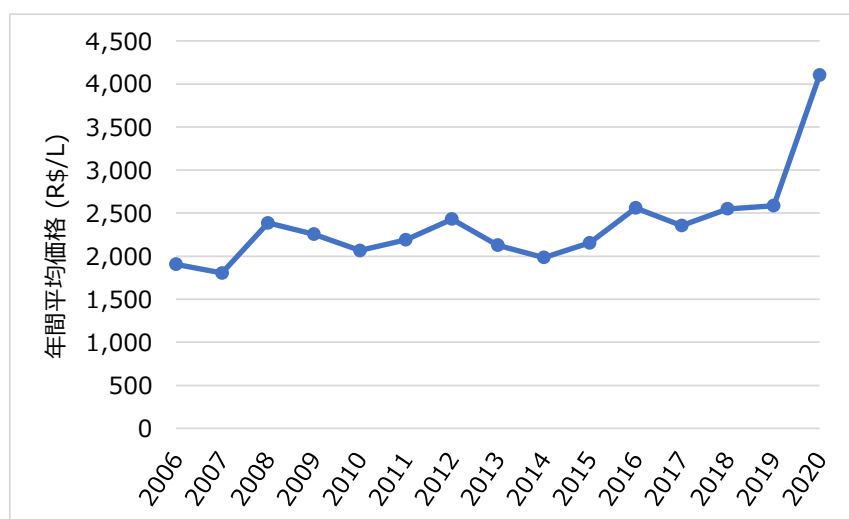
<https://www.hs-sec.co.jp/bond/foreign/chart/idr.htm> [2022.3.6 閲覧]



(出所) U.S. Department of Agriculture, "Brazil Biofuels Annual"各年版⁶²より作成

図 2.1-91 ブラジルのバイオディーゼルの需給動向

ブラジルのバイオディーゼルの平均価格推移を図 2.1-92 に示す。ブラジルでは生産者から流通業者にバイオディーゼルを販売する際の価格を 2 ヶ月に 1 回開催されるオークションにより決めており、グラフの数値はそれらの年間平均である。2020 年 5～6 月期までは横ばい傾向であったが、その後急騰し 2021 年上半期も高い水準を保っている。



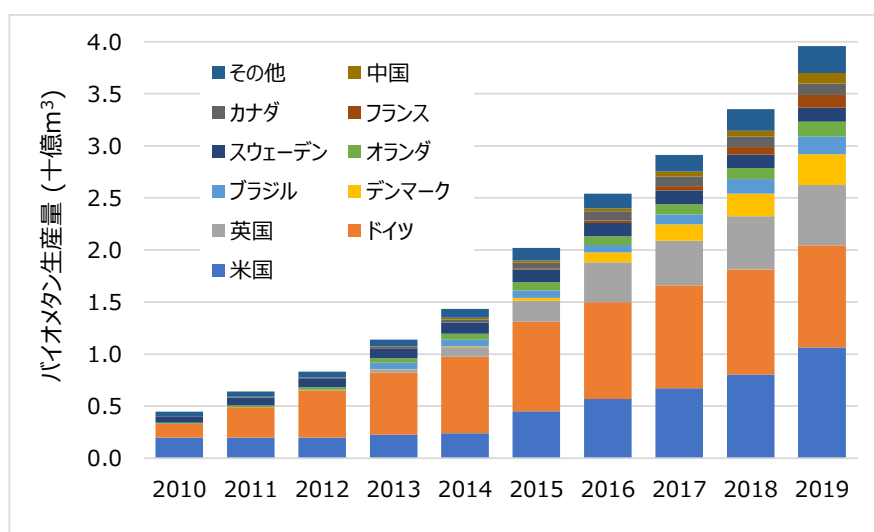
(出所) U.S. Department of Agriculture, "Brazil Biofuels Annual"各年版⁶²より作成

図 2.1-92 ブラジルのバイオディーゼルの平均価格推移

⁶² <https://www.fas.usda.gov/data/brazil-biofuels-annual-8> [2022.3.6 閲覧]

2.1.7 バイオメタン

バイオガスは、家畜糞尿、食品残渣や下水汚泥等の有機性廃棄物を嫌気性発酵させることで生成される。バイオガスは約 60% のメタンと約 40% の CO₂ とごく微量の硫化水素を含有するが、高度精製プロセスによりメタンの体積含有率を約 90% まで高めるとともに不純物を除去することでバイオメタンが製造され、都市ガスや輸送用途に利用される⁶³。バイオメタンの地域別生産量を図 2.1-93 に示す。欧州と北米で世界の殆どのシェアを占める（2019 年はそれぞれ 61.6%、29.6%）。本項では、日本のほか、生産量の多い米国、欧州、中国、ブラジルにおけるバイオメタンの市場動向を概観した。なお、バイオメタンはバイオ液体燃料と比べて情報がかなり少ないため、生産量を中心に述べる。



（出所）CEDIGAZ, "GLOBAL BIOMETHANE MARKET 2021 ASSESSEMENT" (2021.3) ⁶⁴より作成

図 2.1-93 バイオメタンの地域別生産量推移

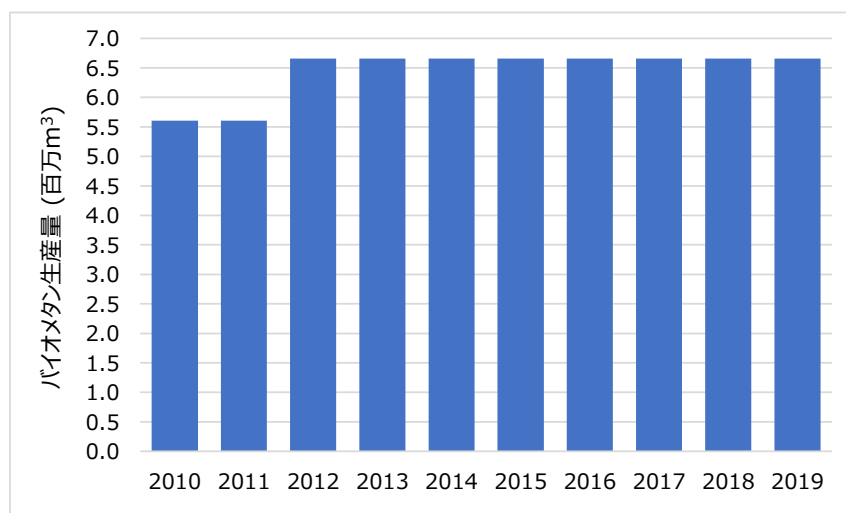
2.1.7.1 日本

湿潤系の有機性廃棄物の処理方法としてメタン発酵は古くから活用されており、日本国内には 600 以上のバイオガスプラントが存在すると言われている⁶⁵。その半数程度が下水処理施設の汚泥を処理するものであり、残りが畜産糞尿や生ごみ等を処理するものである。生産量は 670 万 m³ にしかすぎない（図 2.1-94）。CNG 車や LNG 車が殆ど普及していないため、バイオメタンが文献等で取り上げられる場合は、輸送用としてではなく、専ら固定価格買取制度(FIT)を背景としたバイオガス発電用として言及されることが殆どである。

⁶³ 吉田昌登、「欧州におけるガスの低炭素化・脱炭素化の動き－静かに活況を呈するバイオメタン市場－」（2020.3） <https://eneken.ieej.or.jp/data/8878.pdf> [2022.3.6 閲覧]

⁶⁴ CEDIGAZ, "GLOBAL BIOMETHANE MARKET 2021 ASSESSEMENT" (2021.3) <https://www.cedigaz.org/global-biomethane-market-2021/> [2022.3.6 閲覧]

⁶⁵ 阿久根市、「有機性廃棄物（生ごみ・畜糞）バイオガス導入調査」（2018.3） https://www.city.akune.lg.jp/material/files/group/13/fs_01_3.pdf [2022.3.6 閲覧]

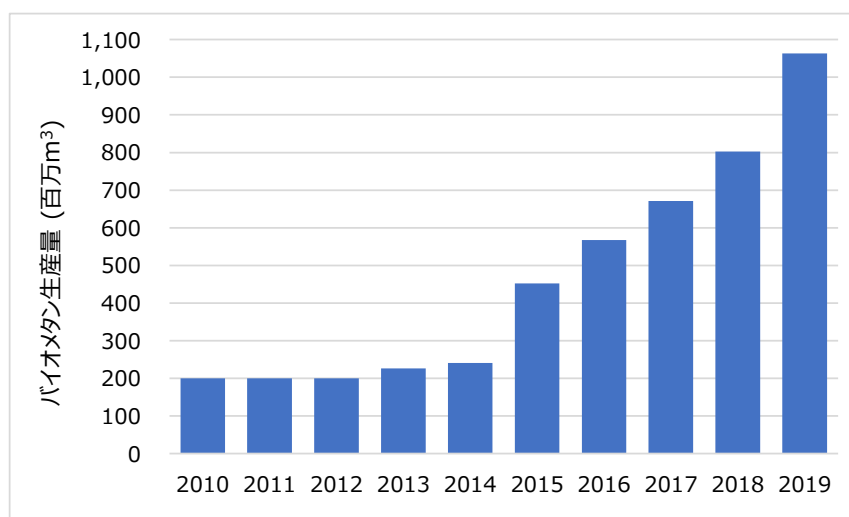


(出所) CEDIGAZ, "GLOBAL BIOMETHANE MARKET 2021 ASSESSEMENT" (2021.3)⁶⁴より作成

図 2.1-94 日本のバイオメタン生産量推移

2.1.7.2 米国

米国は、バイオメタンの生産量が世界第1位（2019年のシェア26.9%）である。年々生産量が増加しており（図2.1-95）、バイオメタンプラントへの投資も進んでいる。特に、バスやトラック用途での需要が拡大している。2019年の天然ガス車のガス需要のうち、バイオメタンが占める割合は37%であった⁶⁴。一方で、バイオメタンは有機廃棄物を原料とするため、燃料需要の多くを代替できるほどの供給量は見込まれておらず、2040年の米国におけるガス需要のうち、バイオメタンの予測シェアは3～5%に過ぎない⁶⁶。



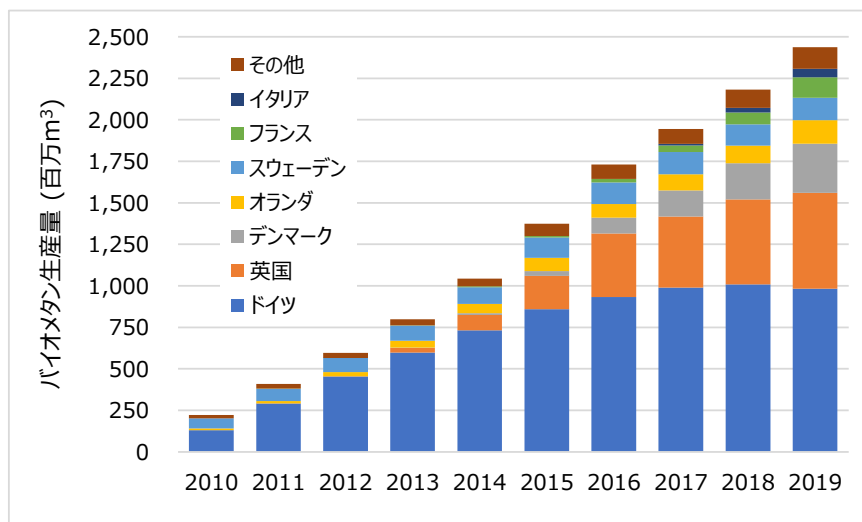
(出所) CEDIGAZ, "GLOBAL BIOMETHANE MARKET 2021 ASSESSEMENT" (2021.3)⁶⁴より作成

図 2.1-95 米国のバイオメタン生産量推移

⁶⁶ 塚原祐介、「米国で注目高まる再生可能な天然ガス（RNG）」、ARC WATCHING（2021.4）
https://arc.asahi-kasei.co.jp/member/watching/pdf/w_318-05.pdf [2022.3.6 閲覧]

2.1.7.3 欧州

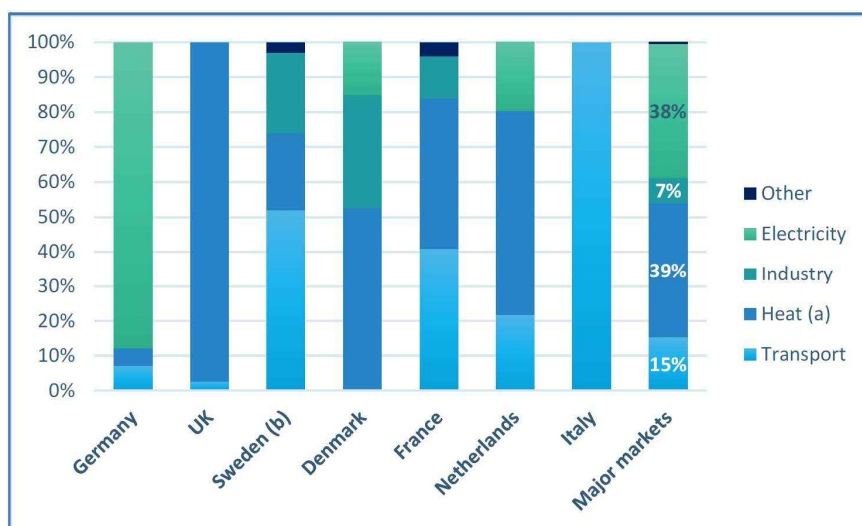
欧州（ここでは EU のほか、アイスランド、ノルウェー、スイス、英国を含む）のバイオメタン国別生産量の推移を図 2.1-96 に示す。ドイツが長年にわたりバイオメタン生産を牽引しており、欧州内での 2019 年のシェアは 24.8% で第 1 位である。それに英国（14.6%）、デンマーク（7.5%）、オランダ（3.6%）が続く。



（出所）CEDIGAZ, "GLOBAL BIOMETHANE MARKET 2021 ASSESSEMENT" (2021.3) ⁶⁴より作成

図 2.1-96 欧州のバイオメタン国別生産量推移

バイオメタンのセクター別消費量シェアを図 2.1-97 に示す。主要市場での自動車用途は約 15% である。



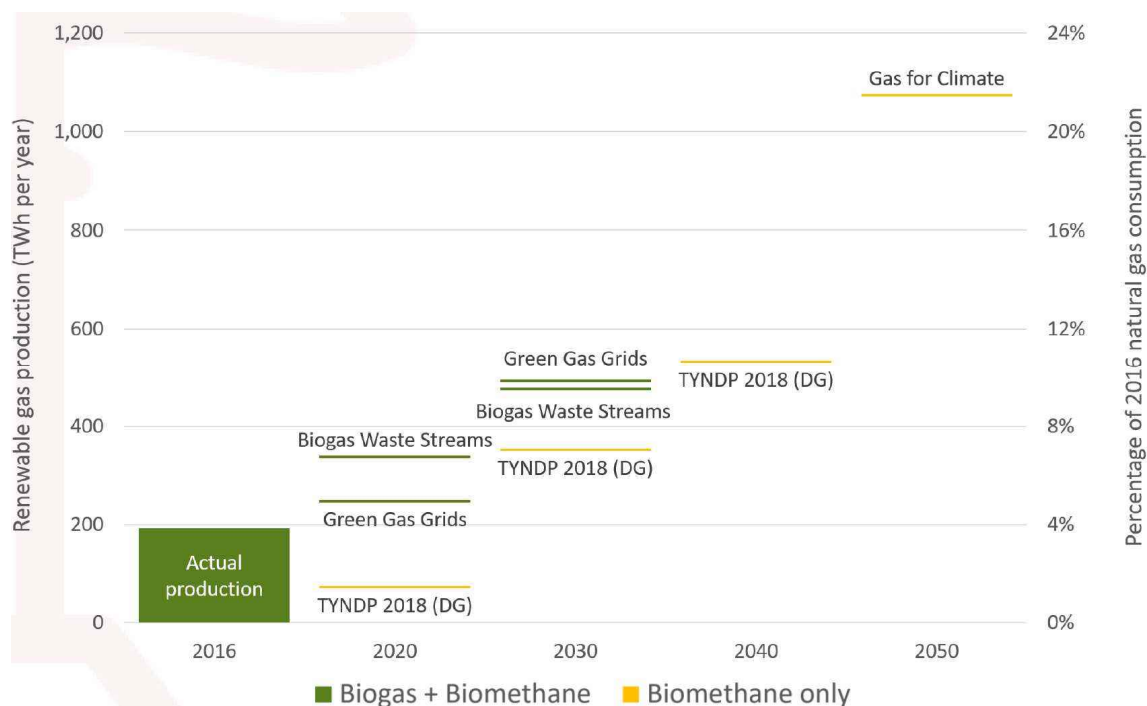
（注 a）ドイツとオランダにおいて、熱セクターでの消費量に産業セクターでの消費量の一部含まれている可能性がある。

（注 b）スウェーデンは 2018 年のデータ。

（出所）CEDIGAZ, "GLOBAL BIOMETHANE MARKET 2021 ASSESSEMENT" (2021.3) ⁶⁴より作成

図 2.1-97 欧州主要市場におけるバイオメタンのセクター別消費量シェア（2019 年）

欧州のバイオメタン生産量の見通しを図 2.1-98 に示す。2017 年までの時点で、バイオガスを全てバイオメタンに精製した場合、EU のガス需要のうち 4%を占める程度に過ぎなかったが、Gas for Climate は、バイオメタン単独で EU のガス需要の 22%を占めると推計している。



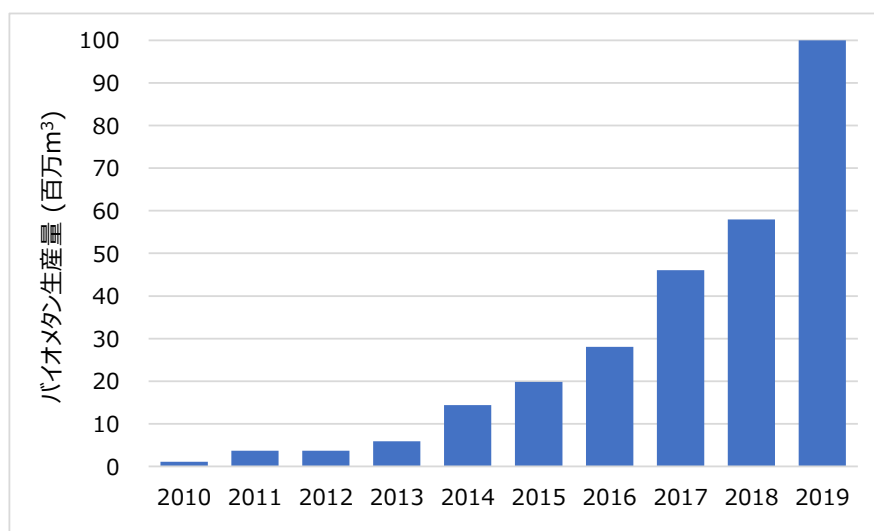
(出所) European Biogas Association, "Biogas Basics" (2019.9.25)

図 2.1-98 欧州におけるバイオメタン生産量の見通し⁶⁷

2.1.7.4 中国

中国のバイオメタン生産量の推移を図 2.1-99 に示す。農村において莫大なバイオマス資源を有するが、近年、バイオメタンの生産量が急増しているといえ、2019 年のシェアは世界第 10 位の 2.5% (アジアでのシェアは 62.5%で第 1 位) と利用開発の途上にある。中国政府が 2019 年に発表した新政策文書では、バイオメタンの大規模工業化を進め、2019 年の 1 億 m³ から、2025 年までに 100 億 m³、2030 年までに 200 億 m³ に生産量を増やす目標を掲げている⁶⁴。

⁶⁷ European Biogas Association, "Biogas Basics" (2019.9.25)
<https://www.europeanbiogas.eu/biogas-basics/> [2022.3.6 閲覧]

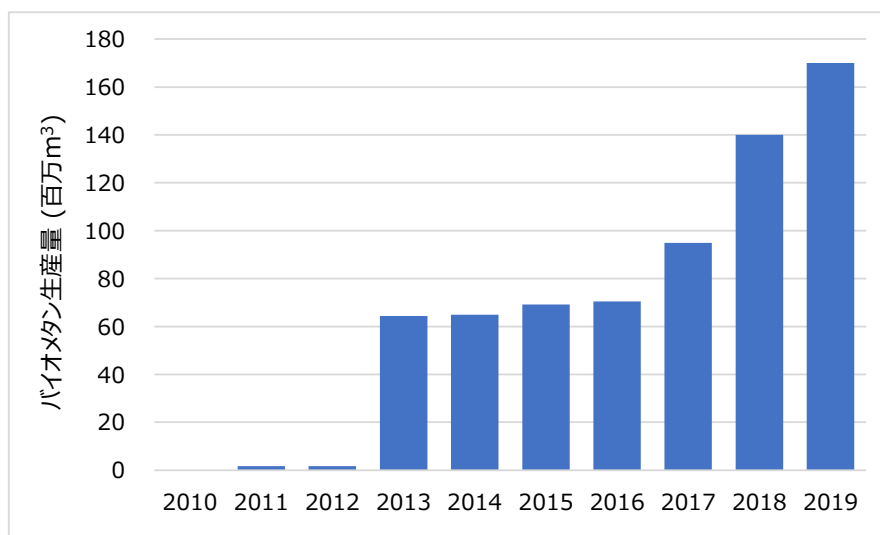


(出所) CEDIGAZ, "GLOBAL BIOMETHANE MARKET 2021 ASSESSEMENT" (2021.3)⁶⁴より作成

図 2.1-99 中国のバイオメタン生産量推移

2.1.7.5 ブラジル

ブラジルのバイオメタン生産量の推移を図 2.1-100 に示す。2019 年のシェアは世界第 5 位の 4.3%である。ブラジルバイオガス協会 (Abiogás) は、特に自動車用の需要ポテンシャルが大きいとして、2019 年の 1.7 億 m³ から 2025 年までに 35 億 m³、10 年以内に 100 億 m³ まで生産が拡大するとの野心的な見通しを示している⁶⁴。



(出所) CEDIGAZ, "GLOBAL BIOMETHANE MARKET 2021 ASSESSEMENT" (2021.3)⁶⁴より作成

図 2.1-100 ブラジルのバイオメタン生産量推移

2.1.8 合成燃料

合成燃料は、CO₂ と水素を合成して製造される燃料である。合成燃料の一般的製法である FT 合成（Fischer-Tropsch 合成）は、1926 年にドイツで開発され、第二次世界大戦前からすでにドイツや日本などで液体燃料が合成されていた⁶⁸。

昨今の脱炭素を巡る対策において、既存石油流通インフラを活用できる合成燃料は再び脚光を集め、例えば日本では「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略⁶⁹」や「カーボンリサイクル技術ロードマップ⁷⁰」などにおいて、脱炭素技術として合成燃料が明記されている。ここでの合成燃料は e-fuel、すなわち再生可能由来の電力で製造した水素及び大気中や燃焼反応から分離・濃縮した CO₂ を原料として生成する合成燃料である。e-fuel は気体燃料の場合もあるが、ここでは本調査の趣旨に鑑み、自動車用液体燃料としてそのまま、もしくは既存のガソリンや軽油に混合するドロップイン燃料として取り上げる。

e-fuel の製造は水素製造、CO₂ 回収、燃料合成の 3 つのプロセスに大きく分かれる。水素製造プロセスにおける水の電気分解技術は基本的に確立しているが、使用する電気が再生エネルギー由来でなければならずその確保が問題となる。炭素源確保のための CO₂ 回収については、工場やガス田などから排出する比較的高濃度な CO₂（数%以上）の回収は実証レベルであり、ましてや大気中から ppm オーダーである CO₂ を直接回収する（DAC：Direct Air Capture）となると、技術的、経済的な課題が多く、まだまだ発展途上の技術である。燃料合成プロセスについては、確立している技術と開発中の技術が混在しており、生成燃料の品質も様々である。

以上より、e-fuel は研究レベルから実証レベルにあり、商業化にはほど遠い。例えば、ポルシェも参画するチリの「Haru Oni」プロジェクト⁷¹では 2026 年までに 55 万 kL の生産目標を掲げており、現在進んでいる実証事業の中では最大級の規模であるが、ガソリン需要が世界で約 15 億 kL、日本で約 5,000 万 kL であることを考えると、その規模はかなり小さい。2030 年代後半の商業化を目指し、まずはレース用燃料として少量生産を行う準備をしているといった現状である。日本では 2021 年 2 月より、JPEC（石油エネルギー技術センター）、石油会社（ENEOS、出光興産）等が連携し、CO₂ からの液体合成燃料一貫製造プロセス技術の研究開発が始まった。これは NEDO の委託により実施され、事業期間は 2020 年度から 2024 年度、全体予算は 45 億円程度を見込む。

e-fuel のコスト試算例を図 2.1-101 に示す。水素調達コストの影響が大きく、現状では 634 円/L と見積もられている。ただし、CO₂ は発電所や工場由来の前提のため、カーボンニュートラルのために大気から回収した CO₂ を原料とする場合はさらにコストが上がる。

⁶⁸ 室井高城、「日本で行われた FT 合成」、触媒懇談会ニュース、No.76（2015.3）
<https://www.shokubai.org/senior/News76.pdf> [2022.3.6 閲覧]

⁶⁹ <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html> [2022.3.6 閲覧]

⁷⁰ <https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.html> [2022.3.6 閲覧]

⁷¹ <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2021/haru-oni.html> [2022.3.6 閲覧]

H ₂	CO ₂	製造コスト	
100円/Nm ³ ×6.34Nm ³ /ℓ	5.91円/kg×5.47kg/ℓ		
= 634円/ℓ	+ 32円/ℓ	+ 33円/ℓ	= 約700円/ℓ
32.9円/Nm ³ + 14.65円/Nm ³ ×6.34Nm ³ /ℓ			
= 301円/ℓ	+ 32円/ℓ	+ 33円/ℓ	= 約350円/ℓ
32.9円/Nm ³ ×6.34Nm ³ /ℓ			
= 209円/ℓ	+ 32円/ℓ	+ 33円/ℓ	= 約300円/ℓ
20円/Nm ³ ×6.34Nm ³ /ℓ			
= 127円/ℓ	+ 32円/ℓ	+ 33円/ℓ	= 約200円/ℓ

(出所) 経済産業省資源エネルギー庁、「合成燃料研究会中間取りまとめ」(2021.4)⁷²

図 2.1-101 各種 e-fuel のコスト

2.1.9 水素

水素は最も軽い元素で、宇宙では最も多く存在する元素であり、地球表面では酸素、ケイ素に次いで3番目に多い元素である。軽い水素分子は地球上では空气中に留まることができず、上昇し続け宇宙空間まで到達するため、水素分子の状態で空気中には存在せず、水や鉱物などの地下資源の中に化合物の状態で存在している。

水素は、沸点が約-253℃、臨界点は約-240℃・約1.3 MPaであり、-240℃以上の温度では圧力を上げてでも液化しない。そのため、水素を高密度貯蔵するためには、液化水素の場合は圧力1.3 MPa以下では-240℃以下の低温、大気圧では-253℃以下の低温を保ち、液化ガスとして貯蔵するか、あるいは圧縮ガスとして貯蔵することになり、水素を効率的に貯めるためには、超低温あるいは圧縮のための専用設備が必要になる。なお、最も軽い元素である水素は、体積エネルギー密度が低く、パイプライン以外の方法での輸送効率が悪いいため、地産地消が水素の使い方としては望ましい。

水素は、エネルギー源として使用(燃焼)する際に炭酸ガスの発生を“0”にすることができるため、水素の利用が世界中で活発化しているが、現在のところエネルギー源としての消費量は、水素の全体の使用量に対して微量である。これまでの水素消費について、その用途別水素需要を図2.1-102に示す。現在の水素の用途は、石油等の精製、肥料の原料になるアンモニア合成など化学薬品生産の用途が大半を占めている。今後のカーボンニュートラル達成に向けて、これまでの用途に加えて、物流用燃料、電力調整用エネルギー源、燃料アンモニア合成、合成燃料製造など、エネルギー源や産業用に用途が広がっていくことになる。

⁷² https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/gosei_nenryo/pdf/20210422_1.pdf [2022.3.6 閲覧]

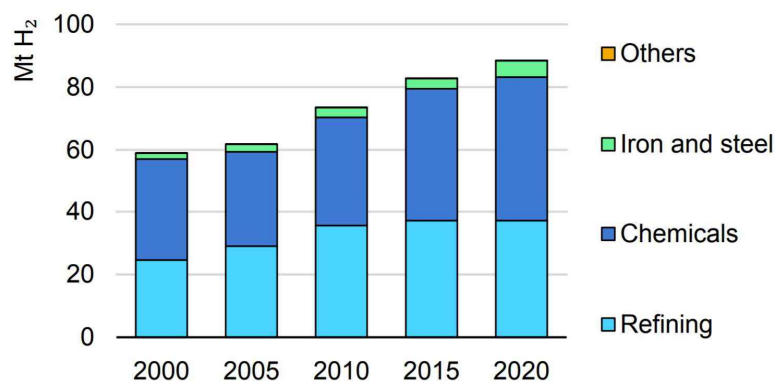


図 2.1-102 世界の用途別水素需要（2000～2020 年）⁷³

将来に向けての国際公約及びカーボンニュートラルでの用途別水素需要（2020～2050）を図 2.1-103 に示す。世界的な水素需要は、これまでの需要に加えてエネルギー源としての利用が増加するため、2050 年に向けて増加傾向が続く見込みになっている。一方、各国政府は、カーボンニュートラルに向けた公約の中で、水素の使用量を増やす提案をしているが、(b) の 2050 年にカーボンニュートラルを達成するために必要なレベルに対して、(a) は大きく乖離する状態にある。

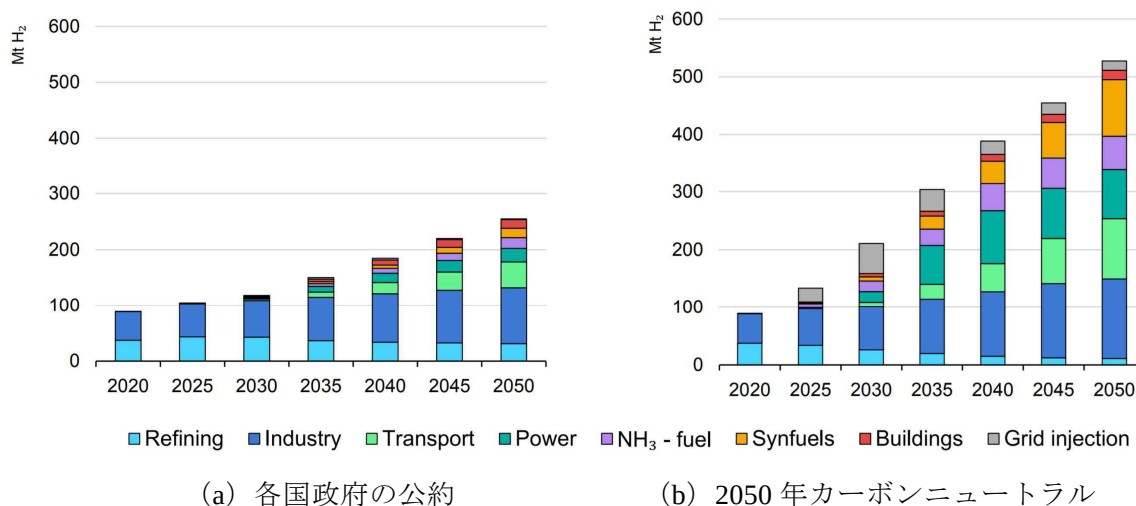


図 2.1-103 国際公約及びカーボンニュートラルでの用途別水素需要（2020～2050）⁷³

本項では、日本、米国、欧州、中国の需給動向について整理した。なお、水素は先に述べたように地産地消向きの燃料であり、現状では貿易動向が確認できなかった。また、価格情報を整理するのが困難（自動車用燃料としての実績に乏しく統計が見つからない、副

⁷³ Global Hydrogen Review 2021, IEA, 2021
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021> [2022.3.8 閲覧]

生水素の場合はコストゼロと考えることもできる) ため、ここでは生産量を中心に述べる。

2.1.9.1 日本

日本の水素生産量を図 2.1-104 に示す。経済産業省生産動態統計によると、2020 年における水素の生産量は約 58,500 万 m³ になっている。これまでの水素の用途は工業用とエネルギー用に大別する中では、肥料等の原料となるアンモニア製造や、石油精製などの工業用が中心になっている。水素を製造しようとする、石油、天然ガス、石炭などの化石燃料から水蒸気改質法により製造することが、これまでは一般的に用いられてきたが、石油製品、製鉄、苛性ソーダなどを製造する過程の副生成物としても大量の水素が製造（副生水素）されている。



図 2.1-104 日本の水素生産量⁷⁴

水素製造拠点とその供給量を図 2.1-105 に示す。最も水素の供給量が多いのは石油製油所で、石油精製などのために使用されている。次に多い製鉄所の水素は、コークス製造時の一酸化炭素などを含むガス中に含まれており、燃料電池発電等で使用できる水素にするためには、水素純度を上げる工程が必要になる。ソーダプラントで苛性ソーダを製造する際、塩の電解工程で高純度な副生水素が製造され、産業用水素ガスとして流通されている。

⁷⁴ 2020 年 経済産業省生産動態統計年報化学工業統計編 経済産業省
<https://mdb-biz.jmar.co.jp/column/c37> [2022.3.8 閲覧]

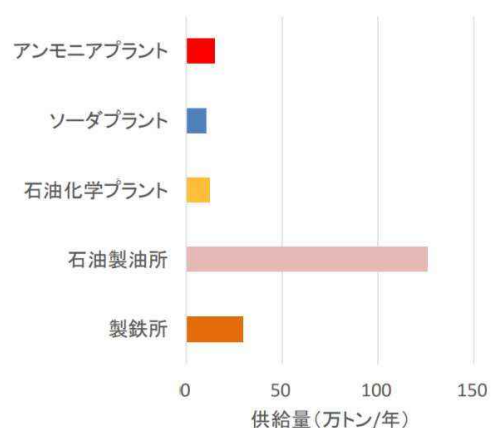


図 2.1-105 水素製造拠点とその供給量⁷⁵

副生水素供給ポテンシャルを表 2.1-1 に示す。副生水素は製鉄、石油化学、苛性ソーダ工場などで発生している。副生水素は、工場内の発電用等にも利用され、残りが外部供給にまわされる。外部供給可能量としては、年間 41 億 Nm³ (約 36.9 万トン) ほどになっている。燃料電池自動車 (FCV) の燃費は、一般的に 100 km/kg-H₂ 程度であり、外部供給可能な水素を全て FCV 用に供給した場合、自動車の年間平均走行距離を 7,000 km 程度とすると、現在でも副生水素だけで FCV 約 527 万台分の水素が賄える計算になる。

将来的に、水素製造はグリーン水素に移行することになるが、その際、副生水素、余剰電力を用いた水電解が一般的な水素製造方法になる。一方、実証段階にある高温ガス炉の排熱を利用した水素製造は、高温ガス炉が実用化された際には、電力供給に影響を及ぼさない水素製造方法になり、注視する必要がある。

表 2.1-1 副生水素供給ポテンシャル⁷⁶

製造源	水素製造	水素発生量 (億Nm ³ /年)	水素製造能力 (億Nm ³ /年)	外部供給 の可能性	外部供給可能量 (億Nm ³ /年)
製鉄	副生	32.8	32.8	△ (将来×)	~13.3
石油精製	目的生産	140.2	170.8	○	~21.4
石油化学	副生	13.7	13.7	×	(0.0)
苛性ソーダ	副生	11.7	11.7	○	~5.5
アンモニア	目的生産	16.7	18.0	△	~0.85
合計		215.1	247.0		~41.0
【外部供給可能量の前提条件】					
製鉄：COGから回収した水素発生量の内部利用のうち、最大40%（発電用途分）					
石油精製・アンモニア：水素製造装置をフル稼働した場合の余剰水素量（回収率70%）					
苛性ソーダ：水素発生量から既存需要の外販分（5.4%）を除いた量のうち、最大50%（燃料用途分）					

⁷⁵ 今後の水素政策の課題と対応の方向性中間整理（案）

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/025_01_00.pdf [2022.3.8 閲覧]

⁷⁶ 副生水素供給ポテンシャルに関する調査、みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社（2019～2020 年度） <https://www.nedo.go.jp/content/100937547.pdf> [2022.3.8 閲覧]

2.1.9.2 米国

米国の水素生産量は、年間約 1,000 万トン。生産量の約 95%が天然ガスの水蒸気改質によるものとされ、水素は、主に石油精製やアンモニア産業向けに生産されている⁷⁷。米国のアンモニア生産に対する水素需要予測を図 2.1-106 に示す。米国では、2017 年から 2019 年までは、生産される水素の 25%程度に相当する約 250 万トンが肥料用等の原料になるアンモニア生産のための使用されている。アンモニア生産のための水素は、2019 年以降増加し、2024 年には 2017 年に対して 25%程度増加すると推定されている。そこにエネルギー源となる水素が追加されることになる。

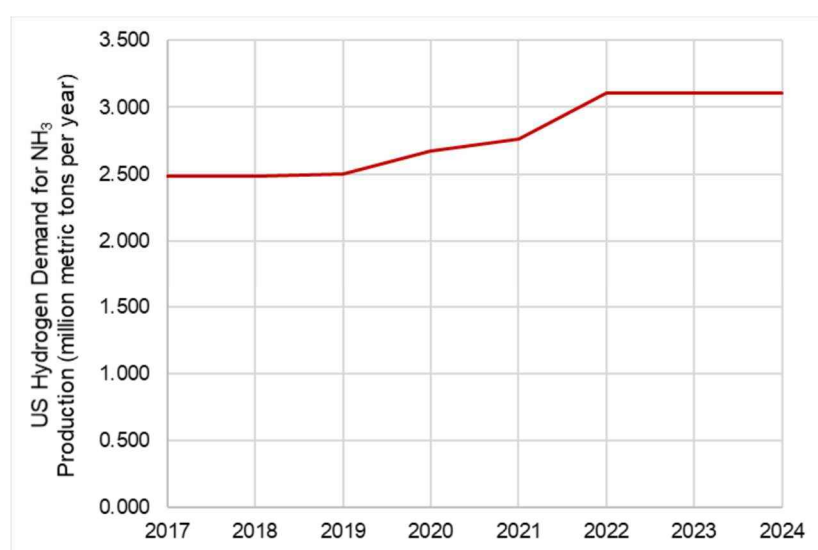


図 2.1-106 米国のアンモニア生産に対する水素需要予測（2017 年～2024 年）⁷⁸

2.1.9.3 欧州

FCH-JU (Fuel Cells and Hydrogen-Joint Undertaking) が 2019 年 2 月に策定した「Hydrogen Roadmap Europe」による、欧州における 2030 年と 2050 年の水素需要予測を図 2.1-107 に示す。図中には現在の水素需要量も示されており、欧州でも日米と同様に、主な用途は石油精製やアンモニア製造などで、2015 年の水素生産量は 325 TWh になっている。将来予想としては、2030 年の最終エネルギー需要のうち、水素は 665 TWh（水素換算 1,700 万トン/年）を占める可能性があると考えられる。そのうちの 238 TWh（水素換算 610 万トン/年）は、発電、運輸、熱利用や産業用原料としての新規需要となっている。

⁷⁷ <https://energy-shift.com/news/ec1e2cdb-2abb-49fc-a9c0-d97b25a1fecb> [2022.3.8 閲覧]

⁷⁸ Assessment of Potential Future Demands for Hydrogen in the United States, Argonne National Lab., 2020.



図 2.1-107 欧州における 2030 年と 2050 年の水素需要予測⁷⁹

2.1.9.4 中国

中国の 2019 年の水素生産状況を図 2.1-108 に示す。中国の 2019 年の水素生産量は、約 3,342 万トンになっている。生産種別については、いわゆる化石燃料由来の水素製造を目的とする水素が 77%以上を占め、副生水素が残りの 21%程度を占めている。水電解により生産される水素は、全体の比率で見ると 1.5%と少ないが、50 万トン程度を生産している。水素生産の地域分布は、主に石炭の産地である西北地域と華北地域、及び石油コンビナートや化学工業が発達している華東地域が多くなっている。

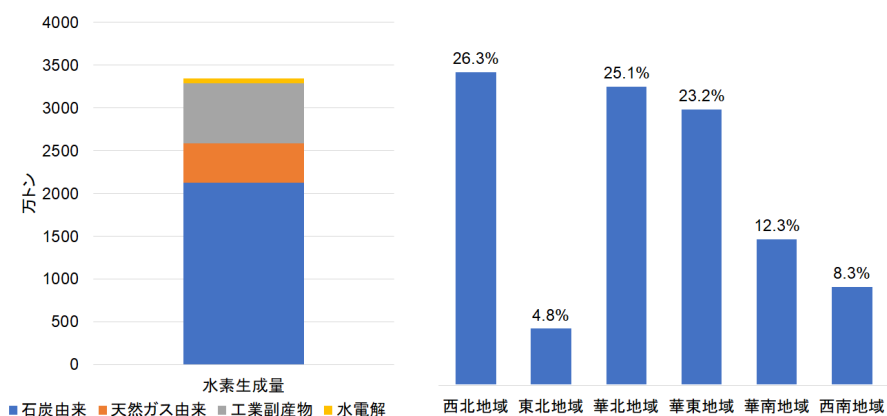


図 2.1-108 中国の水素生産量の構成と地域分布（2019 年）⁸⁰

⁷⁹ FCH-JU https://www.pecj.or.jp/wp-content/uploads/2021/01/JPEC_report_No.210101.pdf [2022.3.8 閲覧]

⁸⁰ https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20210811_1.php [2022.3.8 閲覧]

中国のFCV保有台数を図2.1-109に示す。中国では、2019年の段階で商用車（トラック、バス）を中心に、6,552台のFCVを保有している。また、2020年9月時点で80カ所の水素ステーションを建設し、約80%が稼働している。なお、中国のFCV普及目標としては、2035年に100万台となっている。

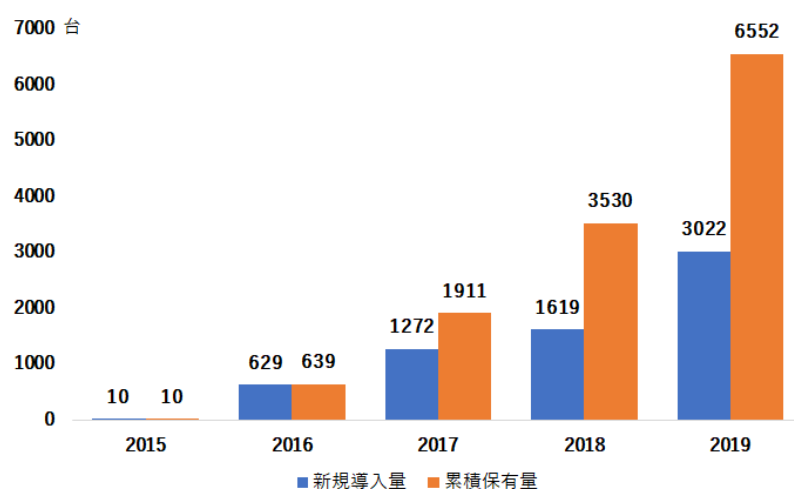


図 2.1-109 中国のFCV保有台数⁸⁰

2.1.10 アンモニア

アンモニアは、水素と窒素を原材料として主にハーバー・ボッシュ法により製造される。水素は化石燃料の水蒸気改質法により製造され、窒素は大気中から採取する方法が、現在の一般的な原材料の入手方法になっている。アンモニアは臨界圧が低く、20℃では0.857 MPa（8.46気圧）で液化するため、将来の水素社会に対して、水素を輸送する方法の1つとしての研究が以前から行われてきた。最近では、アンモニアから水素を取り出す行程等も考慮し、アンモニアを直接燃焼させ熱エネルギーを取り出す方法が検討されるようになってきている。アンモニアを燃焼させることでエネルギーを取り出す場合、アンモニアの構成元素である窒素が窒素酸化物に変化することも考慮する必要がある。現在、アンモニアの自動車での利用については、ディーゼルエンジンのNO_x低減技術の主流となっている尿素SCRシステム内で、尿素水からアンモニアを再合成し、アンモニアを用いたNO_x還元のために使用している。また、アンモニアを燃料とする自動車用エンジンの開発は、2014年度から2018年度にかけて、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）による研究が進められ、窒素酸化物三元触媒による還元の検討も行われ、既に窒素酸化物に関する問題は解決している。⁸¹

アンモニアは、現時点では肥料などの原料としての用途が大半を占めている。世界全体

⁸¹ 小池誠ほか、水素エネルギーキャリアとしてのアンモニアとレシプロエンジン燃焼への適用、日本燃焼学会誌第58巻184号（2016）

のアンモニア生産量を図 2.1-110 に示す。2019 年の世界全体でのアンモニア生産量約 2 億トンのうち、32%を東アジアが占めている。生産量は、上位から中国、ロシア、米国、インドの順で、その 4 カ国で世界の生産量の半分以上を占めている。

なお、生産量の多い国に着目した整理ではなく地域別の整理としたのは、現在のアンモニアの用途が肥料用と少量の工業用（10%程度）で、燃料用としては使われておらず、また、主に消費国内で必要量を生産している状況下で、現在の整理方法を活用したことによるものである。

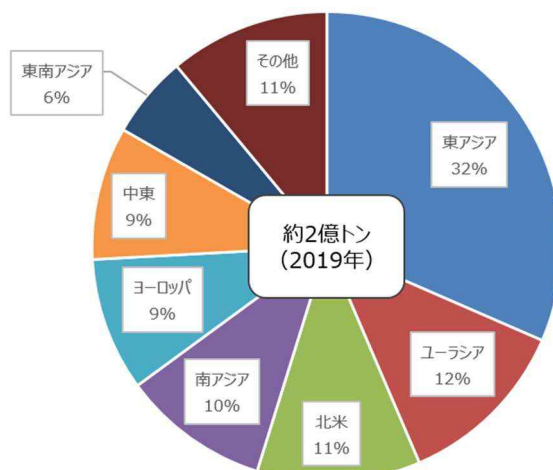


図 2.1-110 世界全体のアンモニア生産状況⁸²

2012 年の世界のアンモニア消費量を図 2.1-111 に示す。現在のアンモニアの用途の約 8 割は肥料用になっており、残りの 2 割は工業用として、メラミン樹脂や合成繊維のナイロン等の原料になっている。

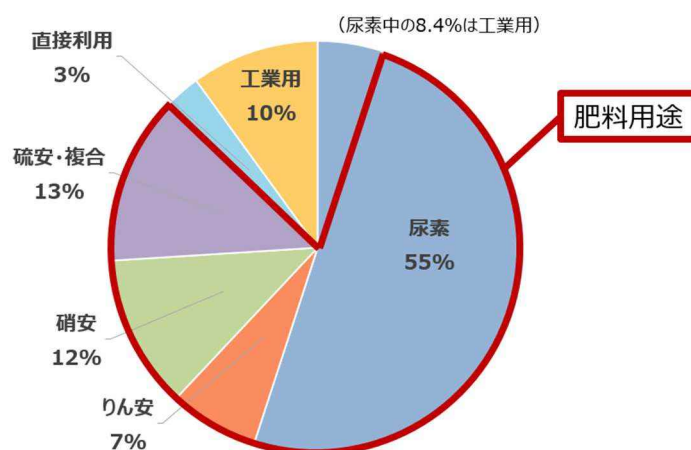


図 2.1-111 世界のアンモニア消費量⁸³

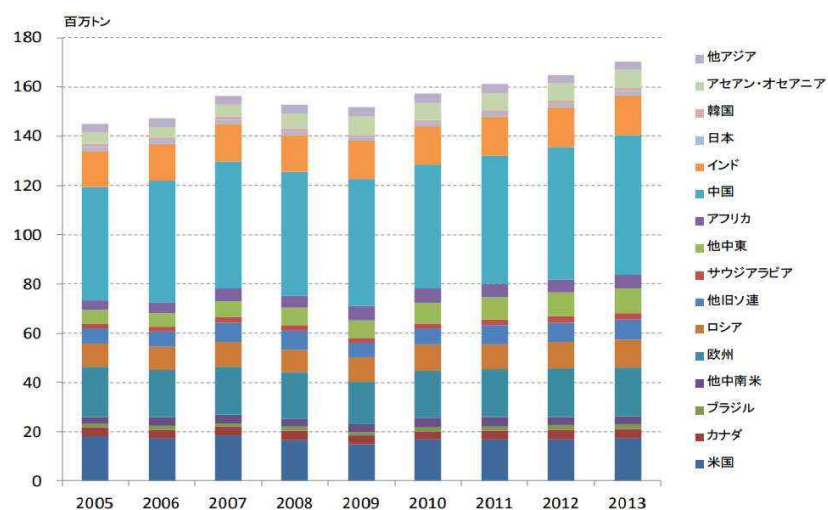
⁸² 基本政策分科会資料（2020.12.21）

https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/035/035_004.pdf [2022.3.8 閲覧]

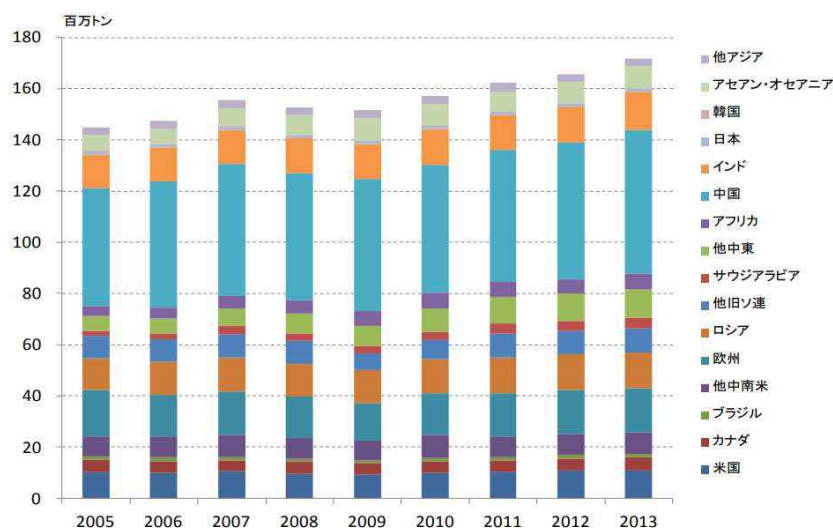
⁸³ 日本エネルギー経済研究所及び NEXANT（2012 年）

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ammonia_01.html [2022.3.8 閲覧]

世界の地域別アンモニア需給バランスの推移（2005 年～2013 年）を図 2.1-112 に示す。
 (a) は地域別アンモニアの需要量の推移、(b) は地域別アンモニアの生産量の推移である。2005 年の世界のアンモニア生産量と需要量は約 14,500 万トンで需給バランスが取れている。2005 年から 2013 年まで、アンモニアの需給バランスはとれており、年々緩やかに増加し続け、2013 年には 17,500 万トンに増加している。2012 年の生産量は中国が最大で、約 5,300 万トンを生産し、欧州は約 1,700 万トン、北米が約 1,600 万トンを生産している。現在の用途では、アンモニアは自国生産し、不足分を輸入することで、需給をバランスさせている。



(a) 地域別アンモニアの需要量の推移



(b) 地域別アンモニアの生産量の推移

図 2.1-112 世界の地域別アンモニア需給バランスの推移（2005 年～2013 年）⁸⁴

⁸⁴ エネルギー経済研究所、「アンモニアの需給及び輸入価格の現状について」（2015.10）
<https://eneken.ieej.or.jp/data/6317.pdf> [2022.3.8 閲覧]

本項では、適切な統計データが見出せない中国を除き、日本、米国、欧州の需給動向について整理した。なお、アンモニアは自動車用燃料としての実績が殆どないため、用途を限定せずアンモニア全体の様子を簡単に述べる。

2.1.10.1 日本

日本のアンモニア消費量を図 2.1-113 に示す。2019 年の日本のアンモニア消費量約 108 万トンのうち、78.3%の 84.6 万トンは国内で生産しており、不足する 21.7%（23.5 万トン）は輸入している。輸入国としては、80.9%にあたる 19 万トンをインドネシアから、残りの 19.1%（4.5 万トン）をマレーシアから輸入している。第 6 次エネルギー基本計画のアンモニアも、東南アジアからのアンモニア輸送船による輸入が想定されている。

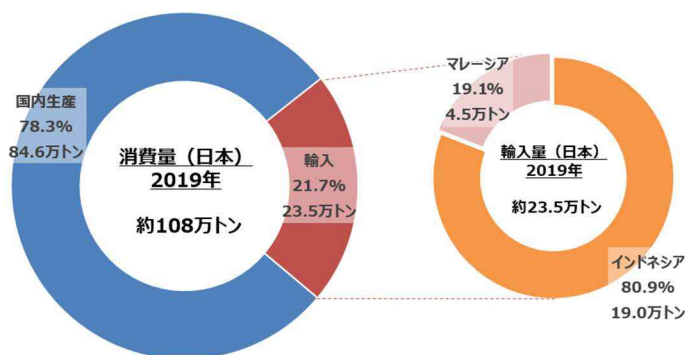


図 2.1-113 日本のアンモニア消費量（2019 年）⁸⁵

2.1.10.2 米国

米国のアンモニア生産量、輸入・輸出品、消費量など推移を表 2.1-2 に示す。米国の 2016 年から 2020 年までのアンモニア生産量は、1,020 万トンから 1,400 万トンまで増加し、5 年間で約 4 割増加している。その間、輸入量は半分程度に減少し、輸出品は 20 万トン程度から 40 万トンまで増加している。その結果として、米国内での消費量は 2016 年の 1,380 万トンから 2020 年の 1,600 万トンまで 16%程度増加している。消費量に占める輸入量の割合は 2016 年の 27%から 2020 年の 10%まで減少し、アンモニアの国内自給率は上昇傾向にある。

⁸⁵ 貿易統計及び経済産業省生産動態統計年報

表 2.1-2 アメリカの、輸入・輸出量、消費量など⁸⁶

項 目	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年 ^{*e}
生産量（万トン）	1,020	1,160	1,310	1,350	1,400
輸入量（万トン）	384	309	253	202	200
輸出量（万トン）	18.3	61.2	22.4	33.8	40.0
消費量（万トン） ^{*2}	1,380	1,410	1,530	1,520	1,600
年末在庫量（万トン）	40	32	49	42	40
平均価格（ドル／トン） ^{*3}	267	247	281	232	220
全産業の雇用数（人）	1,300	1,500	1,600	1,600	1,600
消費量に占める輸入の割合（％） ^{*4}	27	18	14	11	10

2.1.10.3 欧州

欧州のみの適切なデータを扱った資料は確認できなかったが、図 2.1-112 のとおりで、欧州は約 1,700 万トンを生産し、約 300 万トンを入力することで需給バランスがとれている。

⁸⁶ USGS 調査データ

[http://bsikagaku.jp/f-materials/USGS%20Ammonium%20Report%20\(2021\).pdf](http://bsikagaku.jp/f-materials/USGS%20Ammonium%20Report%20(2021).pdf) [2022.3.8 閲覧]

2.2 既存燃料及び次世代燃料の品質確保に係る動向

2.2.1 ガソリン

本項では、各地域のガソリン品質基準、規制を整理した。なお、ここでは最新の情報をベースに整理したが、過去の情報がある地域についてはその情報も併記するものとした。対象地域は消費量が多い日本、米国、欧州、中国に加えて、近年、経済成長に伴う自動車台数の増加により、今後消費量が増加する可能性があるインド、南米、アフリカを対象とするが、南米は消費量が多いブラジルとし、アフリカは国別のデータが今回の調査では入手できなかったため、各国の硫黄分のみを調査した。

2.2.1.1 日本

日本では、大気汚染防止法に基づく「自動車の燃料の性状に関する許容限度及び自動車の燃料に含まれる物質の量の許容限度」に基づき、揮発油等の品質の確保等に関する法律に基づく「揮発油等の品質の確保等に関する法律施行規則」が定められている。ガソリンの強制規格を整理すると表 2.2-1 の通りとなる⁸⁷(後者の方が規制項目は多い)。現状では、この 2 つの燃料性状規則は、整合化されている。日本の燃料規制は、1990 年代後半に順次規制強化が進められてきたところであるが、ここ最近では、硫黄分基準値の強化、エタノール、バイオ燃料の混合上限基準値の追加をメインに改正が進められている。

表 2.2-1 日本の品質確保法によるガソリンの強制規格⁸⁷

項目	満たすべき基準	分類
鉛	検出されない	環境（大気汚染防止）
硫黄分	0.001 質量%以下	環境（大気汚染防止）
MTBE	7 体積%以下	環境（大気汚染防止）
*酸素分	1.3 質量%以下	環境（大気汚染防止）
ベンゼン	1 体積%以下	健康被害防止
灯油	4 体積%以下	エンジントラブル防止
メタノール	検出されない	エンジントラブル防止
*エタノール	3 体積%以下	エンジントラブル防止
実在ガム	5 mg/100 ml 以下	エンジントラブル防止
色	オレンジ色	灯油との誤使用防止

* E10 対応ガソリン車の燃料として用いるガソリンを販売又は消費しようとする場合における規格値は、それぞれ以下のとおりとする。酸素分：3.7 質量%以下、エタノール：10 体積%以下。

⁸⁷ デンソー、「排出ガス規制・燃費関連法規制動向」（2019.11）

2.2.1.2 米国

ガソリンについては、大気汚染の深刻な地域に限定した「改質ガソリン規制」と、米国全地域に適用する「ガソリン硫黄分規制」が従来適用されていた。近年は、自動車燃料総量に対して一定割合の再生可能燃料導入を義務付ける規制や、ガソリン中のエタノール混合率の規制が導入された。

改質ガソリン規制は、自動車からの「有害大気汚染物質」や「オゾン生成揮発性有機化合物（VOC）」の排出量を大幅に削減することにより、大気汚染の改善を図ることを目的としており、大気汚染の深刻な9つの都市部と他のオゾン大気基準の未達成地域に限定して適用された。改質ガソリンは3段階に分けて適用され、強化されている。さらに各規制は、「ガロンベースの基準」（表 2.2-2）と「平均値ベースの基準」（表 2.2-3）が設定されており、石油業者は、どちらかの基準を満たす必要がある。

また、EPA（環境保護庁）は、1990年代後半に実施したTier2規制導入可否を判断するための調査において、燃料中の硫黄分に起因する排出ガス特性の劣化について調査し、自動車排出ガス低減のためには、燃料中の硫黄分の低減が必要と結論づけた。これを受け、EPAは、2000年2月10日に、Tier2自動車排出ガス規制と合わせて、ガソリンの硫黄分規制の導入を決定した⁸⁷（表 2.2-4）。

表 2.2-2 米国のガソリン規制⁸⁷（ガロンベース）

仕様			単位	最大値	最小値
VOC 排出量 削減率	VOC 管理地域 1 のガソリン		%	-	27.5
	VOC 管理地域 2 の ガソリン	エタノール 10～15%含有	%	-	23.9
		上記以外	%	-	25.9
トキシック排出量の削減率			%	-	20
ベンゼン			vol%	1	-
重金属（鉛・マンガン等）			%	0	-

表 2.2-3 米国のガソリン規制⁸⁷（平均値ベース）

仕様			単位	最大値	最小値
VOC 排出量 削減率	VOC 管理地域 1 のガソリン		%	-	29
	VOC 管理地域 2 の ガソリン	エタノール 10～15%含有	-	-	25.4
		上記以外	-	-	37.4
トキシック排出量の削減率			%	-	21.5
ベンゼン			-	-	0.95

表 2.2-4 米国のガソリン硫黄分⁸⁷

	単位	平均値	最大値	適用開始時期
ガソリン硫黄分	ppm	30	80	2006 年 1 月 1 日
	ppm	10	80	2017 年 1 月 1 日

2.2.1.3 欧州

EU の自動車燃料については、軽油以外の他の燃料性状（ガソリンの燃料性状や、軽油の硫黄分以外の性状）については、加盟国毎に規制されてきた。しかし、EU の大気汚染対策を進めていくためには、自動車排出ガス規制と併せ、他の燃料性状についても、EU 全体で適用される規制が必要であるとして、1992 年以降、AUTO-OIL プログラムと呼ばれるプロジェクトが、EU・各国代表・自動車業界・石油業界により進められた。このプロジェクトの結果を受け、1998 年 12 月 28 日に、93/12/EEC の改正指令が、EU EURO 3/EURO 4 排出ガス指令と同時に発布され、2000 年以降のガソリンにエタノール混合上限が定められるなどガソリンについてより広範囲な燃料品質が規定された。その後、2003 年 3 月 22 日、2005 年と 2009 年の 2 段階で硫黄分基準値を強化する改正指令が発布された（表 2.2-5）。そして 2009 年 6 月 5 日には、ガソリンへのエタノール混合上限を 5%から 10%に引き上げる改正規制が発布された⁸⁷。

表 2.2-5 EU のガソリン規制⁸⁷

性状項目		単位	最小値	最大値
リサーチオクタン価		-	95	-
モーターオクタン価		-	85	-
リード蒸気圧		kPa	-	60
蒸留	100℃	%v/v	46	-
	150℃	%v/v	75	-
HC 分析	オレフィン	%v/v	-	18
	芳香族	%v/v	-	35
	ベンゼン	%v/v	-	1
酸素		%m/m	-	3.7
	メタノール	%v/v	-	3
酸素化合物	エタノール	%v/v	-	10
	イソプロピルアルコール	%v/v	-	12
	第 3 ブチルアルコール	%v/v	-	15
	イソブチルアルコール	%v/v	-	15
	エーテル	%v/v	-	22
	その他の酸素化合物	%v/v	-	15
硫黄分		mg/kg	-	10
鉛		g/L	-	0.05

2.2.1.4 中国

中国のガソリン規制の変遷を表 2.2-6 に示す⁸⁸。2013 年 2 月に中国国務院は、全国でガソリンの脱硫を進めることとし、カテゴリ 5 のガソリン (10 ppm) 基準を発表し、同年 12 月に発売を開始した。これらの規格は、中国の燃料を世界トップクラスの品質に向上させるためのロードマップとなった。

品質が改善された燃料は、すべての自動車からの排出ガスを削減すると同時に、自動車側の最新の排出制御技術の導入により、大気汚染物質の排出量を大幅削減に寄与した。

中国におけるガソリン規制を整理した。最新の規制ではカテゴリ 6 となり、この規制は 2020 年と 2023 年の 2 段階で実施する予定であり、この基準は欧州の Euro6 よりもオクタン価などやや厳しいものとなっている。

表 2.2-6 中国のガソリン規制の変遷と主要項目 ⁸⁸

項目	単位	制限	カテゴリ				
			2	3	4	5	6
オクタン価			91-98	91-98	91-98	95-98	98-102
硫黄	ppm	Min	150	30	10	10	10
金属分	mg/kg	-	検出されないこと				
ベンゼン	%v/v	Max	2.5	1	1	1	1
リード蒸気圧	kPa	Min	45	45	45	45	45
		Max	60	60	60	60	60
50%留出温度	℃	Min	77	77	77	77	77
		Max	100	100	100	100	100

2.2.1.5 インド

インドのガソリン規制の変遷を表 2.2-7 に示す⁸⁹。ガソリン規制である Bharat Stage (バーラトステージ: BS) III は 2010 年に施行され、それ以前の水準から顕著に改善された。ベンゼンの規制値は、従来の BSIII ガソリンは指定都市で 3%、その他の地域で 5%であったが、全国で 1%に引き下げられた。BS II では規制されていなかった芳香族は、BS III では 42%、BS IV では 35%に改善された。オレフィンも BS II では規制されていなかったが、BS III と BS IV ではレギュラー無鉛とプレミアム無鉛でそれぞれ 21%と 18%に規制された。2010 年、硫黄含有量は全国で 150 ppm、BSIV の指定都市では 50 ppm に引き下げられた。BS II では、オクタン価がレギュラーで 88、プレミアムで 93 に引き上げられた。さらに、BS III 以降では、レギュラーとプレミアムがそれぞれ 91 と 95 に引き上げら

⁸⁸ World Wide Fuel Charter Sixth edition [2019]
https://www.acea.auto/files/WWFC_19_gasoline_diesel.pdf [2022.3.4 閲覧]

⁸⁹ TransportPolicy.net <https://www.transportpolicy.net/> [2022.3.4 閲覧]

れた。BS VIで義務付けられたガソリン燃料の品質は、燃料の硫黄含有量の低減を除けば、BS IV の燃料と同様である。

ガソリンの硫黄含有量に関して、インドは現在、国際的なトップランナーの品質より遅れている。2013 年の段階では 23 都市ではガソリンの硫黄含有量を 50 ppm 以下にすることが求められたが、それ以外の地域では 150 ppm まで許容された。2016 年には、国のほぼ半分以上が 50 ppm のガソリンを要求した。2024 年からは BS VI の実施を検討しており、この規制は Euro6 に相当するものとされており、導入されればインドは国際的な最新のトップランナー基準を満たすこととなる。

表 2.2-7 インドのガソリン規制の変遷⁸⁹

項目	単位	Bharat Stage			
		II	III	IV	V
実施時期	指定都市	2001	2005	2010	-
	全国	2005	2010	2017	2020
密度 (15℃)	Kg/m ³	710-770	720-775	720-775	720-775
最小 オクタン価	RON	88	91	91	91/95
アンチノック指数/ 最小モーターオクタン価	MON	84	81	81	81/85
最大 硫黄含有量	ppm	500	150	50	10
最大 鉛含有量	g/L	0.013	0.005	0.005	0.005
最大ベンゼン 含有量	vol %	3 (都市) 5 (全国)	1	1	1
最大芳香族 含有量	vol %	-	42	35	35
最大オレフィン 含有量	vol %	-	21/18	21/18	21/18
最大酸素含有量	Mass %	-	2.7	2.7	2.7
最大リード蒸気圧 (37.8℃)	kPa	35-60	60	60	60

2.2.1.6 ブラジル

ブラジルのガソリン品質を表 2.2-8 に示す⁸⁹。ブラジルは 1991 年に有鉛ガソリンの全廃を達成したが、2013 年までは、硫黄分 1,000 ppm までのガソリンが一部地域で販売されていた。2014 年からは、ガソリン小型車の新排出ガス規制 (L-6) に合わせ、S50 (50 ppm) ガソリンを全国で販売を開始し、現在は、ガソリンに 18~27.5%のエタノールを混合する

ことが政府によって義務付けられている。また、高濃度のエタノールが広く使用されており、フレキシブル燃料車の普及率も非常に高い。ブラジルのガソリン性状は細かく区分されており、オクタン価によりレギュラーガソリンとプレミアムガソリンに区分され、さらに Type A はエタノールをブレンドする前のものであり、Type C はブレンド後のガソリンである⁹⁰。

表 2.2-8 ブラジルのガソリン規制⁸⁹

項目	単位	基準値			
		レギュラーガソリン		プレミアムガソリン	
		Type A	Type C	Type A	Type C
無水エタノール含有量	vol %	1	法令値	1	法令値
最大蒸発温度（10%）	℃	65		65	
最大蒸発温度（50%）	℃	120	80	120	80
最大蒸発温度（90%）	℃	190		190	
PEF, max.		215		215	
最大残渣	vol %	2		2	
モーターオクタン価	MON	－	82	－	－
アンチノック指数	－	－	87	－	91
蒸気圧（37.8℃）	kPa	45～62	69	45～62	69
Gum content, max	mg/100 ml	5		5	
誘導時間（100℃）	min	－	480	－	480
最大銅腐食性 （50℃, 3 h）	－	1		1	
最大硫黄含有量	mg / kg	－	50	－	50
最大ベンゼン含有量	vol %	－	1	－	1
最大鉛含有量	g/L	0.005		0.005	
最大リン含有量	mg/L	0.2		0.2	
最大芳香族含有量	vol %	－	35	－	35
最大オレフィン含油量		－	25	－	25

⁹⁰ 森田裕二、「ブラジルの石油事情」（2003） <https://eneken.ieej.or.jp/data/pdf/794.pdf> [2022.2.25 閲覧]

2.2.1.7 アフリカ

アフリカの各国のガソリンの硫黄分規制値を図 2.2-1、図 2.2-2 に示す⁹¹。アフリカではレギュラーガソリンのオクタン価が 80～93 の燃料を用いている。エジプトではガソリンのシェアは RON80 が 52%、RON90 が 40%、RON92 が 8%となっており、これは高オクタン価燃料ではポンプ価格が上昇するためである。UNEP/CEDARE によると、RON90 はその後、市場から段階的に廃止され、現在に至っており。2014 年 2 月、消費者のほとんどが RON92 に移行したため、RON 80 に次ぐ高いシェアとなった。

また、硫黄分を見ると、30 ppm 以上の地域が多くを占めており、特に南アフリカ周辺は 500 ppm 以上と非常に高く、これは他地域と比べると改善の余地があるものと考えられる。

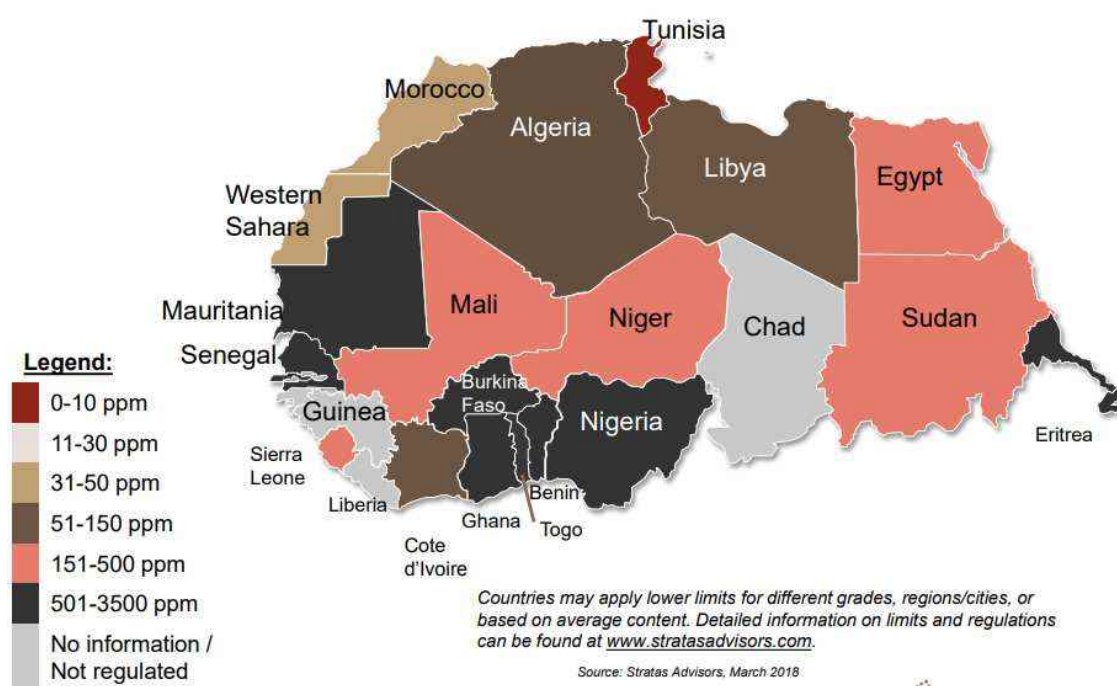


図 2.2-1 西アフリカにおけるガソリンの硫黄分規制値⁹¹

⁹¹ A HART ENERGY COMPANY : Fuel Quality and Emission Standard Developments in Africa[2018]
<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25233/FuelQualityEmissionStandardDevelopments.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [2022.2.24 閲覧]

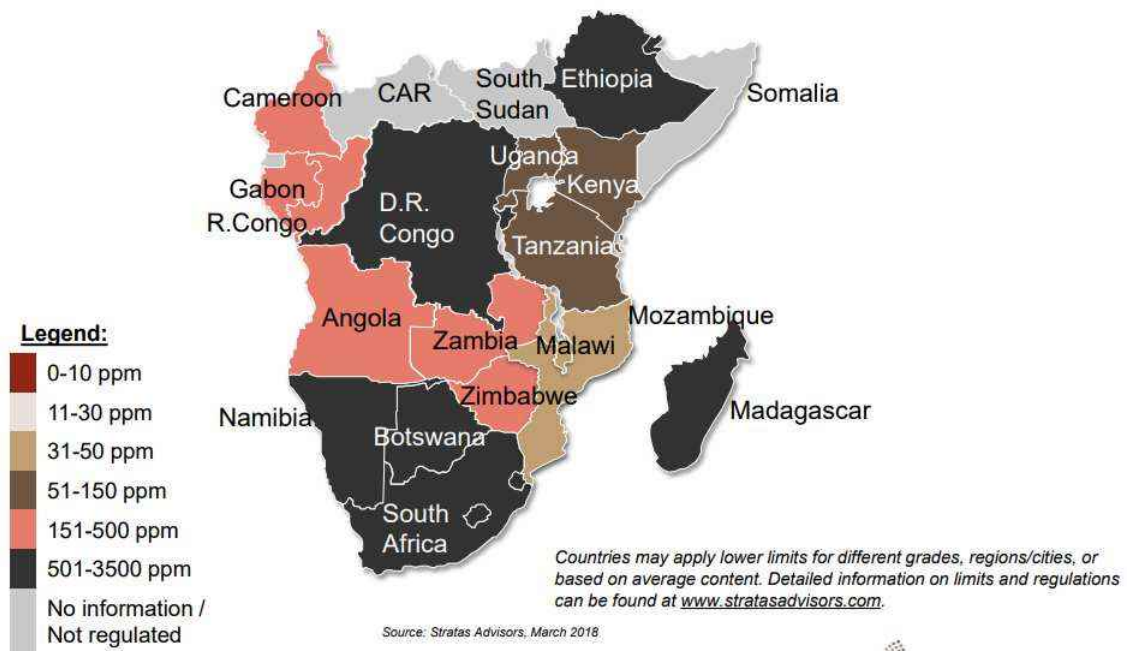


図 2.2-2 南アフリカにおけるガソリンの硫黄分規制値⁹¹

2.2.2 軽油

本項では、各地域の軽油品質基準、規制を整理した。対象地域がガソリンと整合するよう日本、米国、欧州、中国に加えて、近年、経済成長に伴う自動車台数の増加により、今後消費量が増加する可能性があるインド、南米、アフリカを対象とする。ただし、南米は消費量が最も多いブラジルとし、アフリカは国別のデータが今回の調査では入手できなかったため、各国の硫黄分のみを調査した。

2.2.2.1 日本

日本では、軽油もガソリンと同様に、大気汚染防止法に基づく「自動車の燃料の性状に関する許容限度及び自動車の燃料に含まれる物質の量の許容限度」に基づき、揮発油等の品質の確保等に関する法律に基づく「揮発油等の品質の確保等に関する法律施行規則」を定めている。軽油の強制規格を整理すると表 2.2-9 の通りとなる⁸⁷。現状では、この2つの燃料性状規制は、整合化されている（後者の方が規制項目は多い）。日本の燃料規制は、1990 年代後半に順次規制強化が進められてきたところであるが、ここ最近では、硫黄分基準値の強化、バイオ燃料の混合上限の追加をメインに改正が進められている。

表 2.2-9 日本の品質確保法による軽油の強制規格⁸⁷

項目	満たすべき基準	分類
硫黄分	0.001 質量%以下	環境（大気汚染防止）
セタン指数	45 以上	環境（大気汚染防止）
蒸留性状（90%留出温度）	360 度以下	環境（大気汚染防止）
トリグリセリド	0.01 質量%以下	エンジントラブル防止
脂肪酸メチルエステル	0.1 質量%以下	エンジントラブル防止
	5 質量%以下(*)	
*メタノール	0.01 質量%以下	エンジントラブル防止
*酸価	0.13 mg KOH/g 以下	エンジントラブル防止
*ぎ酸、酢酸及びプロピオン酸の合計	0.003 質量%以下	エンジントラブル防止
酸化安定度	65 分以上	エンジントラブル防止

（注）脂肪酸メチルエステルが 0.1 質量%を超え、5 質量%以下の場合、「*」の項目も満たす必要がある。

2.2.2.2 米国

米国は、ディーゼル車からの PM 発生を抑えるため、1994 年のディーゼル重量車の排出ガス規制強化に合わせ、1993 年 10 月から軽油の硫黄分・セタン価・芳香族に対する規制を導入した。しかし、強化が続く排出ガス規制に対応するためには、燃料のさらなる低硫黄化が必須であるとして、EPA は 2001 年 1 月に、軽油の硫黄分基準値を 500ppm から 15.ppm に大幅強化を決定し、2006 年 6 月 1 日から施行することとした。（表 2.2-10）⁸⁷。

表 2.2-10 米国の軽油規制^{※87}

硫黄分	ppm	15 以下
セタン指数		40 以上
芳香族	vol%	35 以下

(注) セタン価基準と芳香族基準はどちらかを満たせば良い

2.2.2.3 欧州

EU は、1993 年に、軽油の硫黄分に関する規制を制定し、本規制は EU 域内で適用された。EU の大気汚染対策を進めていくために 1992 年以降に、AUTO-OIL プログラムと呼ばれるプロジェクトが、EU・各国代表・自動車業界・石油業界により進められこのプロジェクトの結果を受け、1998 年 12 月に、93/12/EEC の改正指令が、EU EURO 3/EURO 4 排出ガス指令と同時に発布され、軽油についても燃料規制が規定された。その後、2003 年 3 月 22 日、2005 年と 2009 年の 2 段階で硫黄分基準値を強化する改正指令が発布された。そして 2009 年 6 月には、軽油へのバイオディーゼル燃料（FAME）混合上限を定める改正指令が発布された（表 2.2-11）⁸⁷。

表 2.2-11 EU の軽油規制値⁸⁷

性状項目	単位	最小値	最大値
セタン価	-	51	-
密度（15℃）	kg/m ³	-	845
95%蒸留点	℃	-	360
多環芳香族 HC	%m/m	-	8
硫黄分	mg/kg	-	10
FAME（脂肪酸メチルエステル）	%v/v	-	7

2.2.2.4 中国

中国の軽油規制を表 2.2-12 に整理する⁹²。主な仕様を示す。

表 2.2-12 中国の軽油規制値の変遷⁹²

カテゴリ	3	4	5	6
燃料基準 (国全体)	GB 19147-2009	GB 19147-2013	GB 19147-2016	
燃料基準 (地域別)	GB 19147-2009	DB11/239-2007 (北京)	DB11/239-2012 (北京)	
		DB31/428-2009 (上海)		
		DB44/695-2009 (広東)		
最大硫黄 mg/kg	350	50	10	10
最小セタン価	50 (GB 17691-2005)	45	47	47
	45 (GB 19147-2009)			
芳香族炭化水素 % (m/m)	11	11	11	7
潤滑性 μm@60℃,HFRR	460	460	460	460
引火点℃	45	45	45	45

⁹² Diesel Net <https://dieselnet.com/standards/cn/fuel.php> [2022.2.28 閲覧]

2.2.2.5 インド

インドでは、歴史的に軽油の補助金があったため、大型車だけでなく小型車も多く走っており、軽油の硫黄分に特に関心が高い。表 2.2-13 は、インドにおける燃料の硫黄含有量削減のスケジュールを示しており、提案されている BS VI 基準による削減の見込みも含まれる⁸⁹。

表 2.2-13 インドのガソリン、軽油規制値の導入時期⁸⁹

実施時期	Diesel	Gasoline
1995	10,000 ppm (nationwide)	–
1996	5,000 ppm (Delhi + selected cities)	–
1998	2,500 ppm (Delhi)	–
1999	500 ppm (BS II, Delhi, limited supply)	–
2000	2,500 ppm (nationwide)	–
2001	500 ppm (BS II, selected cities)	–
2005	500 ppm (BS II, nationwide)	500 ppm (BS II, nationwide)
	350 ppm (BS III, selected cities)	150 ppm (BS III, selected cities)
2010	350 ppm (BS III; nationwide)	150 ppm (BS III, nationwide)
	50 ppm (BS IV; selected cities)	50 ppm (BS IV, selected cities)
2017	50 ppm (BS IV; nationwide)	50 ppm (BS IV; nationwide)
2020	10 ppm (BS VI; nationwide)	10 ppm (BS VI; nationwide)

インドの軽油規制値の変遷を表 2.2-14 に示す。インドの燃料品質及び排出ガス規制は、数年の遅れがあるものの欧州の規制経路を踏襲し、はじめにデリーなどの主要都市で導入され、その後、全国的に実施される。軽油の品質に関する変遷は下表のとおりである。インドでは、1999 年に国土の大部分で 10,000 ppm あった 硫黄含有量を 2012 年には最大 350 ppm まで低減させた。この同時期に、インドは 13 の大都市圏で硫黄含有量を 2,500 ppm から 50 ppm に引き下げた。また、セタン価が 13 年間で全国的に 45 から 51 に上昇したことも、この間に改善された要因の 1 つであった。

BS VI 規制により硫黄含有量が最大 10 ppm まで低減されたことで、BS VI 排出ガス規制を満たすために必要な DPF（ディーゼルパティキュレートフィルター）や SCR（選択触媒還元）システムなどの先進排出ガス規制技術の導入が可能になった。

表 2.2-14 インドの軽油規制値の変遷⁸⁹

項目	単位	Bharat Stage (BS) II	BSIII	BS IV	BSVI
導入年		2001 (指定都市), 2005 (国)	2005 (指定都市), 2010 (国)	2010 (指定都市), 2017 (国)	2020 (国)
最大添加剤	% mass	0.01	0.01	0.01	0.01
カーボン残量	% mass	0.3	0.3	0.3	0.3
最小セタン価	–	48	51	51	51
95%蒸留温度	℃	–	360	360	370
引火点	℃	35	35	35	35
40℃粘性	cst	2.0–5.0	2.0–5.0	2.0–4.5	2–4.5
15℃密度	Kg/m ³	820–860	820–845	820–845	820–860
最大硫黄量	mg/kg	500	350	50	10
最大水含有量	mg/kg	0.05% vol	200	200	200
低温流動温度					
夏季, max	℃	18	18	18	18
冬季, max	℃	6	6	6	6
総コンタミ量	mg/kg	–	24	24	24
酸化安定性	g/mg ³	–	25	25	25
最大芳香族炭化水素	% mass	–	11	11	11
60℃潤滑性	μm	460	460	460	460

2.2.2.6 ブラジル

2001 年以降、軽油の燃料品質は地域によって区別される。2001 年 12 月、ANP Resolution 310/2001 により、首都圏と郊外において 2 種類の軽油の規格が定められた。首都圏は、ブラジルの一部の都市（大気環境の悪い都市、次に人口 20 万人以上の都市）で販売が許可された軽油で、硫黄分は最大で 2,000 mg/kg (2,000 ppm) とした。地方用軽油は、その他の地域向けであり、硫黄含有量は最大で 3,500 mg/kg (3,500 ppm) とした。

2005 年 12 月に ANP 決議 12/2005 により S500 が導入され、硫黄分の規制値は最大で 500 mg/kg (500 ppm) とした。リオデジャネイロ、サンパウロ、カンピーナス、バイシャダ・サンチスタ、サン・ジョゼ・ドス・カンポス、ペロオリゾンテ、ヴァレ・ド・アソの一部の自治体で、都市部の軽油として導入された。

2006 年 7 月に ANP Resolution 15/2006 により、ANP Resolution 310/2001 に代わる新しい軽油の規制が導入された。S500 軽油は廃止されたが、都市部と地方部における軽油の最大硫黄量はそれぞれ 500 と 2,000 mg/kg に引き下げられた。また、2009 年に Euro IV 相当

の排出ガス規制が導入されるのに合わせて、首都圏と沿海地方の軽油の硫黄規制値を 50 mg/kg と 500 mg/kg に下げるとしたが、首都圏の軽油に S50 軽油を導入するという目標は、製油所や自動車側との技術的課題により、2009 年 1 月の予定通りには達成されなかった。

2008 年 11 月に（国家環境会議）は決議 403/2008 を発表し、ANP に対し、2012 年 1 月 1 日までに最大硫黄分 10 mg/kg の軽油（S10）を導入できるよう燃料規格を策定した。

2009 年 12 月に ANP 決議 42/2009 により、ANP 決議 15/2006 で定められた軽油の郊外及び首都圏が、S50（硫黄分 50 mg/kg）、S500（同 500 mg/kg）及び S1800（同 1,800 mg/kg）に変更された。また、パラ州、セアラ州、ペルナンブコ州の多くの都市圏、リオデジャネイロ州、サンパウロ州、クルチバ市のバス車両、リオデジャネイロ州とサンパウロ州の多くの都市のバス車両で、S50 のみを販売することが義務付けられた。その他、ブラジルの多くの都市では、S500 を販売することとした。S1800 は国内の他の地域でも使用可能だが、2014 年 1 月 1 日までに段階的に廃止され、S500 に置き換わる予定であったが、2010 年 9 月、ANP 決議 33/2010 により、一部の自治体での S500 への切り替えが最大 15 ヶ月延期された。

2011 年 10 月、S10 グレードを含む新たな燃料規格を制定するための協議が行われた。この提案では、(1) これまで S50 を要求していた多くの自治体でタイプ B（バイオディーゼル含有）S50 を要求し、(2) 2013 年 1 月 1 日から S50 を S10 に置き換え、(3) 多くの州や自治体に S1800 から S500 への切り替えを要求した。

2013 年 1 月 1 日、大都市圏及び全国の一部のステーションで、P-7トラックの燃料として S50 軽油が S10 軽油に代替した。表 2.2-15 にブラジルの S50、S500、S1800 の燃料基準を示す⁸⁹。

表 2.2-15 ブラジルの軽油の燃料基準⁸⁹

項目	単位	限界値		
		Type A and B		
		S50	S500	S1800
最大硫黄量	mg / kg	50	500	1800
密度（20℃）	kg/m ³	820-850	820-865	820-880
最小引火点	℃	38		
粘度（40℃）	mm ² / s	2.0 to 5.0		
低温流動温度(CFPP)	℃	-10		
セタン価	—	46	42	42
最大添加材含有量	% Mass	0.01		
銅腐食性（3 時間，50℃）		1		
最大水含有量	% Volume	0.05		

2.2.2.7 アフリカ

アフリカの各国の軽油の硫黄分規制値を図 2.2-3、図 2.2-4 に示す⁹¹。モロッコや西サハラでは 15 ppm 以下、ウガンダ、ケニア、タンザニア、モザンビーク、マライなどでは 50 ppm 以下と硫黄分が少ない国があるものの特に西アフリカの国で 2,000 ppm 以上の国が多い。モロッコでは、2023 年までに EURO6 相当まで燃料品質を改善するとしている。

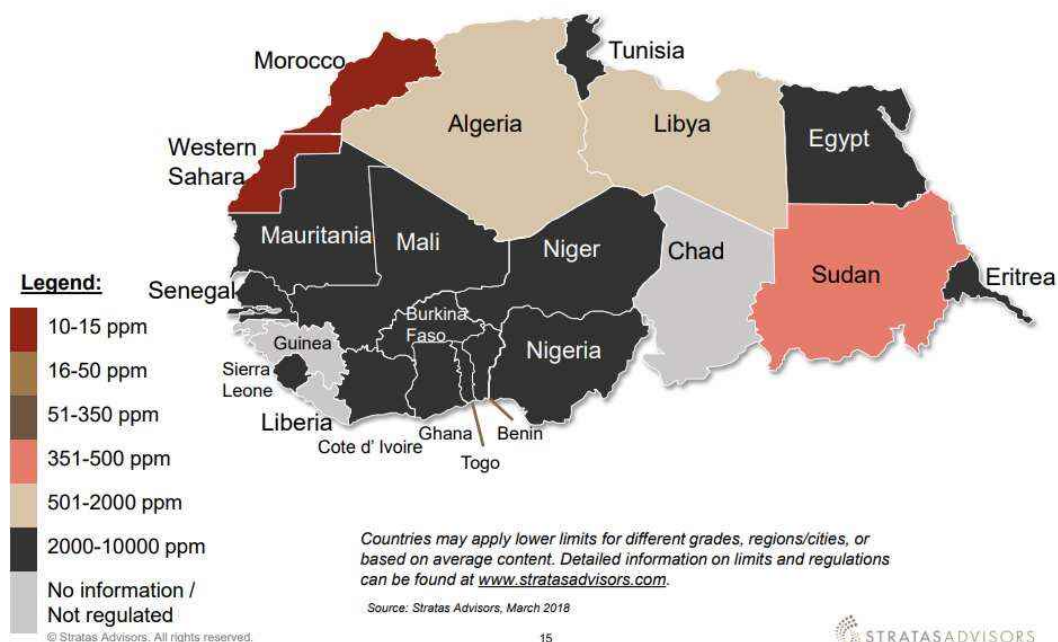


図 2.2-3 西アフリカの軽油の硫黄分規制値⁹¹

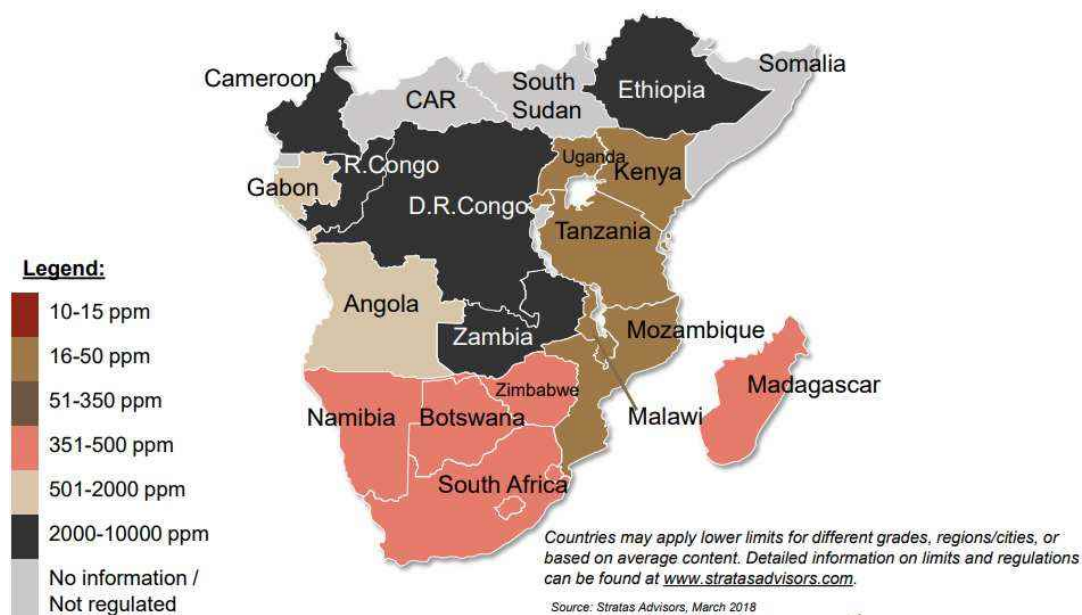


図 2.2-4 南アフリカの軽油の硫黄分規制値⁹¹

2.2.3 CNG

CNG の原料となる天然ガスについては、その品質規格として ISO 13686:2013 - Natural gas - Quality designation がある。本項では、日本、米国、欧州、中国に加えて、産出・輸出・自国内消費が増えているインドネシアについて整理した。

2.2.3.1 日本

日本では CNG 車用の燃料に都市ガスを使用する。都市ガスは、液化天然ガス（LNG）として輸入した天然ガスを、国内で熱量調整、付臭等を行った後に流通する。都市ガスの区分はガス事業法、ガス用品の技術上の基準等に関する省令別表第3（備考）⁹³に整理されている。この区分により、ガスコンロなどの使用機器の熱量や燃焼速度が供給される都市ガスに合わせて適正に設計、製造され、消費者は都市ガスを安全に使用できるようになっている。都市ガスの区分を表 2.2-16 に示す。

表 2.2-16 都市ガスの区分

ガスの区分	ウオッベ指数 (Woobe Index)	燃焼速度 (MCP)
13A	52.7～57.8	35.0～47.0
12A	49.2～53.8	34.0～47.0
6A	24.5～28.2	34.0～45.0
5C	21.4～24.7	42.0～68.0
L1	23.7～28.9	42.5～78.0
L2	19.0～22.6	29.0～54.0
L3	16.2～18.6	35.0～64.0
ウオッベ指数は総発熱量(MJ/Nm ³)をガスの空気に対する比重の平方根で割った値。 燃焼速度（MCP: Maximum Combustion Potential）は燃料ガスの組成により決まり、計算式により得られる値。		

ガスの区分の英字 A、B、C は燃焼速度を示し、A（遅い）、B（中間）、C（速い）と表記される。以前は、石炭の高温乾溜により得られるガスを都市ガスに使っていたこともあるが、ガス中に含まれる一酸化炭素による中毒事故などが発生したため、現在は一酸化炭素を含まない液化天然ガスを原料とする都市ガスが供給されている。

現在の主流となっている都市ガス 13A（45 MJ/m³）の成分組成を表 2.2-17 に示す。主成分のメタンが 89.6% となっており、熱量調整（熱量増加）のためにプロパン、ブタンを合計約 5% 含有している。

⁹³ ガス事業法 ガス用品の技術上の基準等に関する省令

表 2.2-17 都市ガス 13A の成分の一例⁹⁴

メタン	89.60%
エタン	5.62%
プロパン	3.43%
ブタン	1.35%
ペンタン	—
炭酸ガス	—
酸素	—
窒素	—
合計	100%

CNG スタンドでは、原料となる都市ガス 13A を 20 MPa 程度に圧縮して、CNG 車に充填・燃料供給している。

⁹⁴ <https://home.tokyo-gas.co.jp/gas/userguide/shurui.html> [2022.3.8 閲覧]

2.2.3.2 米国

米国内の輸送可能なガスの品質を表 2.2-18 に示す。輸送可能なガスの品質規格では、天然ガス、シェールガス等の産出国であり、そのガスを気体でパイプラインによる陸上輸送が行える米国で、大陸輸送ならびに輸出に向けて、採掘時の産出ガスに含まれる成分等が詳細に規定されている。

表 2.2-18 ANR Pipeline Company が規定する輸送可能なガスの品質（2019 年抜粋）⁹⁵

項目	内容
熱量	● 各受領地点及び受渡地点で配送されるガス1立方フィート当たりの総発熱量で計測する ● 各受領地点のガスは、乾燥基準で決定した場合、1立方フィート当たり1,200 BTU以下または967 BTU以下の熱量を有するものとする
臭気・ごみ他	● 不快な臭い、ほこり、水、及び商品性を妨げたり、機器の適切な動作を傷つけたり、妨げたりする可能性のあるその他の固体または液体が含まれない事
硫化水素	● 東南アジア地域施設及び南西地区施設に16 ppm（ガス1立方フィート当たり1粒）の硫化水素を含有してはならない。 ● メインラインエリアの施設に、4 ppm（100立方フィートのガスあたり4分の1グレイン）を超える硫化水素を含まない ● 「汚染管の長さをを用いた天然ガス中の硫化水素及び二酸化炭素の試験（Test for Hydrogen Sulfide and Carbon Dioxide in Natural Gas Using Length of Stain Tubes）」と題するガス処理協会（Gas Processors Association）規格2377に規定された方法により決定される。
全硫黄分	● ガスの100立方フィート当たり、総硫黄（硫化水素及びメルカプタン中の硫黄を含む）を20グレイン以上含まないこと。
酸素	● いかなる場合でも、酸素含有量が体積比率1%を超えてはならず、その当事者は、ガスが無酸素に保つためにあらゆる妥当な努力をする。
水分 液体炭化水素	● 液体状の水及び炭化水素を含まないものとし、いかなる場合においてもガス100万立方フィート当たり7ポンドを超える水蒸気を含まないものとする。
CO ₂	● 体積比率2%を超える二酸化炭素を含有してはならない。
温度	● 華氏120度を超えない範囲、または華氏40度未満の範囲の温度で配送すること。
窒素	● 窒素を体積比率3%以上含有してはならない。
その他危険物質	● ポリ塩化ビフェニル及び、時々法律、規制、規則または命令に基づいて調査、修復または除去を必要となる物質で、これらに限定されない、有毒で危険な物質または物質、あるいは人または環境に有害となり得る有害物質を含まない。
炭化水素露点	● 華氏 15 度("F") 以下の炭化水素露点

2.2.3.3 欧州

欧州内での天然ガス品質に関する規格として、EASEE gas が推奨する欧州共通ガス品質を表 2.2-19 に示す。欧州も米国と同様に、パイプラインによる天然ガスの陸上輸送が可能なため、産出地で天然ガスに含まれるガス成分について、品質規格が設定されている。ただし、あくまでも品質規格であり、規格外のガス輸送が発生する場合の対応等について

⁹⁵ ANP Pipeline Company, 2010

諸外国における熱量バンド制に関する実態調査、株式会社野村総合研究所（2019）

は不明である。

表 2.2-19 EASEE gas が推奨する欧州共通ガス品質⁹⁶

変数	単位	最小値	最大値	推奨適用日
WI (ウォッベ指数)	kWh/m ³	[13.60]	15.81	1/10/2010
d (比重 : 対空気)	m ³ /m ³	0.555	0.700	1/10/2010
Total S (硫黄分)	mg/m ³	-	30	1/10/2006
H ₂ S + COS (as S)	mg/m ³	-	5	1/10/2006
RSH (as S) (メカパタ)	mg/m ³	-	6	1/10/2006
O ₂	mol %	-	0.001*	1/10/2010
CO ₂	mol%	-	2.5	1/10/2006
H ₂ O DP (露点)	°C at 70 bar (a)	-	-8	See note**
HC DP (炭化水素露点)	°C at 1-70 bar (a)	-	-2	1/10/2006

* <0.001 mol%が日時平均値の限界値である。しかし、CBPのウォッベ指数の範囲に基づいて、酸素や脱硫目的で2006年時点に存在するUGSが適切に運用される結果であれば、クロスボーダーポイントの日時平均レベルが0.01 mol%までは許容される。

** 特定のクロスボーダー地点で、このCBPでは、定義されているより厳しくない値が適用されている。これらのクロスボーダー地点では、これらの値を維持するために、関係する生産やシッパー、輸送者は長期間にCBPの値が適合するように協力して試験を行う必要がある。その他のクロスボーダー地点では、この値は2006年10月1日適用される。

2.2.3.4 中国

中国の自動車用 CNG の品質規格は、国家标准《车用压缩天然气》GB 18047-2017⁹⁷に規定されている。GB は強制標準であり、これに適合しない製品を「生産、販売、輸入」することは、中国標準化法や産品質量法で禁止されている。品質規格を表 2.2-20 に示す。

⁹⁶ European Association for the Stereamlining of Energy Exchange -gas, 2005

諸外国における熱量バンド制に関する実態調査、株式会社野村総合研究所（2019）

⁹⁷ <http://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D81C47D3A7E05397BE0A0AB82A> [2022.3.8 閲覧]

表 2.2-20 GB 18047-2017 の品質規格

項目	要求値
高位発熱量 (MJ/m ³)	≥ 31.4
硫黄分 (mg/m ³)	≤ 100
硫化水素 (mg/m ³)	≤ 15
二酸化炭素 (%)	≤ 3.0
空気 (%)	≤ 0.5
水 (mg/m ³)	車が運転される特定の地域で、圧力25MPa以下、温度-13℃の条件下で、30mg/m ³ を超えないこと
露点(度)	車が運転される特定の地域で、圧力25MPa以下、温度-13℃の条件下で、露点は周囲温度より5℃低くすること
この基準の標準状態は101.325kPa、20℃	

2.2.3.5インドネシア

輸送用 CNG の品質規格は、247.K/10/DJM.T/2011⁹⁸に規定されている。なお、インドネシアの品質規格について、規制の扱い方等は不明である。品質規格を表 2.2-21 に示す。

表 2.2-21 247.K/10/DJM.T/2011 の品質規格

パラメータ	単位	最小	最大	試験方法
1 成分				
C1	%vol	77.0	-	GPA 2261/ISO 6974
C2	%vol	-	8.0	GPA 2261/ISO 6974
C3	%vol	-	4.0	GPA 2261/ISO 6974
C4	%vol	-	1.0	GPA 2261/ISO 6974
C5	%vol	-	1.0	GPA 2261/ISO 6974
C6+	%vol	-	0.5	GPA 2261/ISO 6974
N ₂	%vol	-	3.0	GPA 2261/ISO 6974
H ₂ S	ppm vol	-	10	ASTM 2385/UOP 212
Hg	μg vol	-	100	ISO 6978
O ₂	%vol	-	0.1	GPA 2261/ISO 6974
H ₂ O	lb/mm scf	-	3.0	ASTM D 1142/ISO 10101
CO ₂	%vol	-	5.0	GPA 2261/ISO 6974
2 粒子サイズ>10μm	-	Free		EPA M-05
3 相対密度	-	0.560	0.850	GPA 2261/ISO 6974
4 発熱量	BTU/ft ³	960	1175	GPA 2261/ISO 6974
5 ウォツベ指数	BTU/ft ³	1050	1313	GPA 2261/ISO 6974
6 臭い (付臭剤)	CNGは無臭でなければならず、最低レベルの臭気物質 (付臭剤) は可燃下限の20%の濃度であること。			ISO 13734/ASTM D6228

⁹⁸ Keputusan Dirjen Migas No. 247.K/10/DJM.T/2011 Tentang Spesifikasi Bahan Bakar Gas Jenis CNG Untuk Transportasi Yang Dipasarkan Di Dalam Negeri
<http://203.189.88.27/index.php/web/result/1307/detail> [2022.3.8 閲覧]

2.2.4 LPG

本項では、日本、米国、欧州、中国の燃料品質規格について整理した。

2.2.4.1 日本

日本では、LP ガス（液化石油ガス）の規格として JIS K 2240 : 2013 がある。同規格は、1984 年に第 1 版として発行された ISO 3993、1996 年に第 2 版として発行された ISO 4256、2001 年に第 2 版として発行された ISO 4257、1996 年に第 2 版として発行された ISO 6251、1988 年に第 1 版として発行された ISO 7941、1997 年に第 1 版として発行された ISO 8973 及び 1989 年に第 1 版として発行された ISO 9162 を基として、技術的内容を変更して策定された。LP ガスの規格である JIS K 2240 : 2013 の概要を表 2.2-22 に示す。

表 2.2-22 LPG 規格（JIS K 2240 : 2013）の概要⁹⁹

種類	項目	組成（mol%）				硫黄分 （質量%）	蒸気圧 （40℃） （Mpa）	密度 （15℃） （g/cm3）	銅板腐食 （40℃、1h）	主な用途		
		エタン +エチレン	プロパン +プロピレン	ブタン +ブチレン	ブタジエン							
1 種	1 号	5以下	80以上	20以下	0.5以下	0.0050以下	1.53以下	0.500 ～0.620	1以下	家庭用燃料 業務用燃料		
	2 号		60以上 80未満	40以下								
	3 号		60未満	30以上								
2 種	1 号	-	90以上	10以下	-（注）		1.55以下					工業用燃料 工業用原料 自動車用燃料
	2 号		50以上 90未満	50以下								
	3 号		50未満	50以上 90未満			1.25以下					
	4 号		10以下	90以上			0.52以下					

(注) 自動車用、工業用(燃料及び原料)、その他に使用する場合には、ブタジエン含有量は、使用目的に対し支障を与えるものであってはならない。

2.2.4.2 米国

米国では LPG 業界に適用される法令（連邦法、州法）が数多く存在する。LPG 業界でとりまとめられた作業準則である NFPA 58 Liquefied Petroleum Gas Code が国家規格となっている。LP ガスの燃料成分の規格としては、連邦法にはみつからず、NFPA 58 でも漏洩検知のための付臭剤濃度の規定のみである。州法までは調査できなかった。

⁹⁹ 日本 LP ガス協会 <https://www.j-lpgas.gr.jp/intr/standard.html> [2022.3.8 閲覧]

2.2.4.3 欧州

欧州の自動車用 LPG の品質規格は、EN 589:2018 Automotive fuels - LPG - Requirements and test methods¹⁰⁰が規定されている。品質規格を表 2.2-23 に示す

表 2.2-23 EN 589:2018 品質規格

Property	Unit	Limits		Test method ^a (See Clause 2, Normative references)
		Minimum	Maximum	
Motor octane number, MON		89,0		Annex B
Total dienes content ⁱ	% (m/m)		0,5	EN 27941 DIN 51619
1,3 Butadiene	% (m/m)		0,10	DIN 51619
Propane content ^{g,i} until 2022-04-30 from 2022-05-01	% (m/m)	20 30		EN 27941 DIN 51619
Hydrogen sulphide		negative		EN ISO 8819
Total sulfur content (after odorization) ^j	mg/kg		30	prEN 17178 ASTM D6667
Copper strip corrosion (1 h at 40 °C)	rating	class 1		EN ISO 6251
Evaporation residue ^b	mg/kg		60	EN 15470 EN 15471 EN 16423
Vapour pressure, gauge at 40 °C ^c	kPa		1 550	EN ISO 4256 EN ISO 8973 and Annex C
Vapour pressure, gauge, min 150 kPa at a temperature of: ^{d,e} - for grade A - for grade B - for grade C - for grade D - for grade E	°C		- 10 - 5 0 + 10 + 20	EN ISO 8973 and Annex C
Water content ^f		pass		EN 15469
Odour ^h		unpleasant and distinctive at 20 % LFL		See 6.3 and Annex A

^a See also

6.5.1. ^b See also

6.5.2. ^c See also

6.5.3.

^d For the purpose of this standard EN ISO 8973 together with Annex C shall be applied at the indicated temperatures. For internal routine quality control purposes, the values as given in the informative Annex D may also be used.^e See also 6.1. ^f See also 6.2.

^g A test method on MON and/or on the performance of LPG in the engine is under development. As soon as such a test method is available a revision with the aim of withdrawing the minimum propane content requirement will be initiated.^h

National safety requirements have to be followed in any case and may overwrite this standard.ⁱ See also 6.5.4. ^j See also 6.5.5. ASTM D6667 is intended to be no longer referenced when sufficient data on EN 17178 is available.

¹⁰⁰ EN 589:2018 Automotive fuels - LPG - Requirements and test methods

2.2.4.4 中国

中国の自動車用 LPG の品質規格は、国家标准《车用液化石油气》GB 19159-2012¹⁰¹に規定されている。品質規格を表 2.2-24 に示す。

表 2.2-24 GB 19159-2012 の品質規格

項目	要求値	試験方法
密度 (15℃) (kg/m ³)	記載すること	SH/T 0221
オクタン価 ≥	89.0	附属書A
ジオレフィン (%) ≤	0.5	SH/T 0614
硫化水素	無	SH/T 0125
銅腐食(40℃、1時間) ≤	1	SH/T 0232
硫黄含有量 (付臭剤含む) (mg/kg) ≤	50	ASTM D 6667
蒸発残留物 (kg/kg) ≤	60	EN 15470
C5以上の成分の質量分率(%) ≤	2.0	SH/T 0614
蒸気圧 (kPaG) ≤	1550	附属書B
最小蒸気圧は150kPaG (℃)		
-10番 ≤	-10	ISO 8973 AnnexC
-5番 ≤	-5	
0番 ≤	0	
10番 ≤	10	
20番 ≤	20	
付臭剤	可燃下限濃度の20%volで臭気を感じる	附属書E

2.2.5 バイオエタノール

本項では、日本、米国、欧州、中国のほか、生産量の多いブラジルとインドの燃料品質規格を整理した。

2.2.5.1 日本

ガソリンの品質規格は、大気汚染防止法に基づく「自動車の燃料の性状に関する許容限度及び自動車の燃料に含まれる物質の量の許容限度」¹⁰²に基づき、揮発油等の品質の確保等に関する法律に基づく「揮発油等の品質の確保等に関する法律施行規則」¹⁰³において定められている。バイオエタノールについては、2003年8月21日に、揮発油等の品質の確保等に関する法律施行規則の一部が改正された際、ガソリンに対するエタノール混合上限基準（3%）が規定され、さらに2012年3月30日、エタノール10%混合ガソリン（E10）対応車両専用のE10燃料性状が規定された¹⁰⁴。エタノール混合ガソリンの品質規格を表2.2-25示す。

¹⁰¹ <http://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D7E173D3A7E05397BE0A0AB82A> [2022.3.8 閲覧]

¹⁰² <https://www.env.go.jp/hourei/04/000022.html> [2022.3.6 閲覧]

¹⁰³ https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=352M50000400024_20161001_0000000000000000 [2022.3.6 閲覧]

¹⁰⁴ 国土交通省、「道路運送車両の保安基準の細目を定める告示の一部を改正する告示について」(2012.3.30) https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha10_hh_000072.html [2022.3.6 閲覧]

表 2.2-25 日本のエタノール混合ガソリンの品質規格

項目	単位	最大値	最小値
鉛	—	検出されない	
硫黄	ppm	10	—
ベンゼン	vol %	1	—
MTBE	vol %	7	—
灯油	vol %	4	—
メタノール	—	検出されない	
*エタノール	vol %	3 (10)	—
実在ガム	mg/100mL	5	—
*酸素分	wt %	1.3 (3.7)	—
色	—	オレンジ色	

* E10の場合、括弧内の数値が適用される。

(出所) 資源エネルギー庁、「石油製品の品質確保について」¹⁰⁵

2.2.5.2 米国

米国のガソリン混合用エタノールの燃料性状について、E1 から E15 用のエタノールは ASTM D4806 (Standard Specification for Denatured Fuel Ethanol for Blending with Gasolines for Use as Automotive Spark-Ignition Engine Fuel)¹⁰⁶、エタノール高混合率ガソリン (E51 から E83) は ASTM D5798 (Standard Specification for Ethanol Fuel Blends for Flexible-Fuel Automotive Spark-Ignition Engines)¹⁰⁷に規定される。それぞれ表 2.2-26、表 2.2-27 に示す。

表 2.2-26 米国のガソリン混合用 (E1～E15) エタノールの品質規格

Property	Limits
Ethanol, vol%	92.1, min
Methanol, vol%	0.5, max
Solvent-washed gum content, mg/100 mL	5, max
Water, vol% (mass%)	1.0 (1.26), max
Inorganic Chloride, mg/kg (mg/L)	6.7 (5), max
Copper, mg/kg	0.1, max
Acidity (as acetic acid CH ₃ COOH) mg/kg, (mass%) [mg/L]	70 (0.0070) [56], max
pHe	6.5–9.0
Sulfur, mg/kg	30, max
Existent sulfate, mg/kg	4, max

(出所) ASTM, "Standard Specification for Denatured Fuel Ethanol for Blending with Gasolines for Use as Automotive Spark-Ignition Engine Fuel" (2021)¹⁰⁶

¹⁰⁵ https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/distribution/hinnkakuhou/ [2022.3.6 閲覧]

¹⁰⁶ <https://www.astm.org/d4806-21a.html> [2022.3.6 閲覧]

¹⁰⁷ <https://www.astm.org/d5798-21.html> [2022.3.6 閲覧]

表 2.2-27 米国のエタノール混合ガソリン（E51～E83）の品質規格

Property	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Vapor Pressure, psi	5.5–9.0	7.0–9.5	8.5–12.0	9.5–15.0
Ethanol Content, vol%	51–83			
Methanol, vol%	0.5, max			
Sulfur, mg/kg	80, max			
Acidity, mass%	0.005, max			
Unwashed gum, mg/100mL	20, max			
pHe	6.5–9.0			
Inorganic Chloride, ppmw	1, max			
Water, mass%	1.0, max			

（出所） U.S. DOE, "E85 Flex Fuel Specification"¹⁰⁸

2.2.5.3 欧州

EU では、ガソリンへのエタノールの混合率は、EN 228 において 10%までと規定される¹⁰⁹。ガソリンに混合されるエタノールの燃料性状は EN 15376 に規定される¹¹⁰（表 2.2-28）。

表 2.2-28 EU のガソリン混合用エタノールの品質規格（EN 15376）

Property	Unit	Limits	
		Min	Max
Ethanol + higher saturated alcohols content	% (m/m)	98.7	
Higher saturated (C3-C5) mono-alcohols content	% (m/m)		2.0
Methanol content	% (m/m)		1.0
Water content	% (m/m)		0.300
Total acidity (expressed as acetic acid)	% (m/m)		0.007
Electrical conductivity	μS/cm		2.5
Appearance		clear and colourless	
Inorganic chloride content	mg/kg		1.5
Sulfate content	mg/kg		3.00
Copper content	mg/kg		0.100
Phosphorus content	mg/l		0.15
Involatile material content	mg/100 ml		10
Sulfur content	mg/kg		10.0

（出所） European Standard, "Automotive fuels - Ethanol as a blending component for petrol - Requirements and test methods", UNE EN 15376:2015 (2015)¹¹⁰

¹⁰⁸ https://afdc.energy.gov/fuels/ethanol_e85_specs.html [2022.3.6 閲覧]

¹⁰⁹ European Standard, "Automotive fuels - Unleaded petrol - Requirements and test methods (includes Amendment :2017)", DIN EN 228 (2017)
<https://www.en-standard.eu/din-en-228-automotive-fuels-unleaded-petrol-requirements-and-test-methods-includes-amendment-2017/> [2022.3.6 閲覧]

¹¹⁰ European Standard, "Automotive fuels - Ethanol as a blending component for petrol - Requirements and test methods", UNE EN 15376:2015 (2015)
<https://www.en-standard.eu/une-en-15376-2015-automotive-fuels-ethanol-as-a-blending-component-for-petrol-requirements-and-test-methods/> [2022.3.6 閲覧]

2.2.5.4 中国

中国のエタノール混合ガソリンの燃料性状は、GB 18351-2017（车用乙醇汽油（E10））¹¹¹及び GB35793-2018（车用乙醇汽油 E85）¹¹²に規定される。それぞれ表 2.2-29、表 2.2-30 に示す。

表 2.2-29 中国のエタノール混合ガソリン（E10）の品質規格（国 6）

項目	要求		
	89	92	95
アンチノック性: オクタン価 RON	89 以上	92 以上	95 以上
アンチノック指数 (RON+MON)/2	84 以上	87 以上	90 以上
鉛 g/L	0.005 以下		
蒸留範囲: 10%留出温度 °C	70 以下		
50%留出温度 °C	110 以下		
90%留出温度 °C	190 以下		
終点 °C	205 以下		
残油量 %	2 以下		
リード蒸気圧 kPa: 11月1日～4月30日	45-85		
5月1日～10月31日	40-65		
実在ガム: 未洗 mg/100mL	30 以下		
洗浄 mg/100mL	5 以下		
誘導期間 分	480 以上		
硫黄分 mg/kg	10 以下		
メルカプタン 博士試験	合格		
銅版腐食 (50°C, 3h) 評価	1 以下		
水溶性酸・アルカリ分	なし		
不純物	なし		
水分 wt%	0.20 以下		
エタノール vol%	8.0-12.0		
含酸素率 (エタノール以外) wt%	0.5 以下		
ベンゼン vol %	0.8 以下		
芳香族 vol%	35 以下		
オレフィン vol %	18 以下		
マンガン g/L	0.002 以下		
鉄 g/L	0.010 以下		
密度 (20°C) kg/m ³	720-775		

（出所）国家标准《车用乙醇汽油(E10)》GB 18351-2017¹¹¹より作成

¹¹¹ <http://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D81BB6D3A7E05397BE0A0AB82A> [2022.3.6 閲覧]

¹¹² <http://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D82C5AD3A7E05397BE0A0AB82A> [2022.3.6 閲覧]

表 2.2-30 中国のエタノール混合ガソリン（E85）の品質規格

項目	要求
エタノール vol%	65-85
リード蒸気圧 kPa: 11月1日～4月30日	45-85
5月1日～10月31日	40-65
酸性度 (酢酸として) mg/L	40 以下
硫黄分 mg/kg	10 以下
メタノール vol%	0.5 以下
洗浄実在ガム mg/100mL	5 以下
未洗実在ガム mg/100mL	20 以下
pHe	6.5-9.0
無機塩素 mg/L	1 以下
水分 wt%	1.0 以下
銅 mg/L	0.07 以下
銅版腐食 (50℃, 3h) 評価	1 以下

(出所) 国家标准《车用乙醇汽油 E85》GB 35793-2018¹¹²より作成

2.2.5.5 ブラジル

ブラジルの燃料用エタノールの燃料性状は、ANP（国家石油・天然ガス・バイオ燃料監督庁）の決議第9号/2015 (Resolução ANP N° 19 DE 15/04/2015)¹¹³に規定される(表 2.2-31)。

表 2.2-31 ブラジルの燃料用エタノールの品質規格

項目	単位	無水	含水	プレミアム含水
外観	—	浮遊物質がなくクリア	←	←
色	—	オレンジ (染色)	無色	←
酸性度 (酢酸mg)	mg/L	30 max	←	←
電気伝導率	μS/m	300 max	←	←
密度@20℃	kg/m ³	791.5 max	805.2-811.2	799.7-802.8
アルコール分	% m/m	99.3 min	92.5-94.6	95.5-96.5
pH@20℃	—	—	6.0-8.0	←
エタノール分	% v/v	98.0 min	94.5	96.3
水分	% m/m	0.7 max	7.5	4.5
メタノール分	% v/v	0.5 max	←	←
蒸発残渣	mg/100mL	5 max	←	←
炭化水素分	% v/v	3 max	←	←
塩化物イオン分	mg/kg	1 max	←	←
硫酸塩分	mg/kg	4 max	←	←
鉄分	mg/kg	5 max	←	←
ナトリウム分	mg/kg	2 max	←	←
銅分	mg/kg	0.07 max	←	←

(出所) Resolução ANP N° 19 DE 15/04/2015 より作成

¹¹³ <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=350833> [2022.3.6 閲覧]

2.2.5.6 インド

インドのエタノール混合ガソリン (E10) の燃料性状は、ガソリン (E0) と同じく IS 2796 : 2017 Motor gasoline – Specification (Sixth Revision) に規定される (表 2.2-32) ¹¹⁴。

表 2.2-32 インドのガソリン (E10 を含む) の品質規格

No.	Characteristic	Unit	Limit	Requirement
1	Appearance			Clear & bright, free from undissolved water, foreign matter and other visible impurities.
2	Colour a) MG 91 b) MG 95	—	—	Orange Red
3	Density at 15°	kg/m ³		720–775
4	Distillation:			
	a) percent evaporated at 70°C (E 70°C) 1) Motor gasoline 2) E10	% v/v	—	10–45 10–55 (Summer) 10–58 (Other months)
	b) percent evaporated at 100°C (E 100°C)	% v/v	—	40–70
	c) percent evaporated at 150°C (E 150°C)	% v/v	Min	75
	d) Final boiling point	°C	Max	210
	e) Residue	% v/v	Max	2.0
5	Research octane number (RON) a) MG 91 b) MG 95	—	Min	91 95
6	Motor octane number (MON) a) MG 91 b) MG 95	—	Min	81 85
7	Gum content (Solvent washed)	g/m ³	Max	40
8	Total sulphur	mg/kg	Max	10
9	Lead content (as Pb)	g/L	Max	0.005
10	Reid vapour pressure (RVP) at 38°C: a) MG (without ethanol) b) Ethanol blended MG	kPa	Max	60 67
11	Vapour lock index (VLI): a) MG (without ethanol) b) MG (with 5% v/v ethanol) c) E10	—	Max	Summer / Other months 750 / 950 900 / 1050 1050 / 1100
12	Benzene content	% v/v	Max	1
13	Copper strip corrosion for 3 h at 50°C	—	Max	Not more than No. 1
14	Water tolerance of motor gasoline-alcohol blends, temperature for phase separation a) Winter b) Other months	°C	Max	0 10
15	Engine intake system cleanliness	—	—	Report MFA used
16	Olefin content, percent by volume a) MG 91 b) MG 95	% v/v	Max	21 18
17	Oxidation stability	minutes	Min	360
18	Aromatics content	% v/v	Max	35
19	Oxygen content, percent by mass	% m/m	Max	3.7
20	Ethanol content, percent by volume a) Motor gasoline b) E10	% v/v	Max	5.0 10.0
21	Oxygenates percent by volume a) Ethers containing 5 or more 'C' atoms per molecules such as MTBE, ETBE or TAME b) Any other oxygenates	% v/v	Max	15 Not permitted

(出所) IS 2796 : 2017 Motor gasoline – Specification (Sixth Revision) より作成

¹¹⁴ https://standardsbis.bsbedge.com/BIS_SearchStandard.aspx?Standard_Number=IS%202796&id=9377
[2022.3.6 閲覧]

2.2.6 バイオディーゼル

本項では、日本、米国、欧州、中国のほか、生産量の多いインドネシアとブラジルの燃料品質規格を整理した。

2.2.6.1 日本

軽油の品質規格は、大気汚染防止法に基づく「自動車の燃料の性状に関する許容限度及び自動車の燃料に含まれる物質の量の許容限度」¹¹⁵に基づき、揮発油等の品質の確保等に関する法律に基づく「揮発油等の品質の確保等に関する法律施行規則」¹¹⁶において定められている。バイオディーゼルについて、許容限度告示には記載がない一方、2007年1月15日に、揮発油等の品質の確保等に関する法律施行規則の一部が改正され、軽油に対するバイオディーゼル混合上限基準（5%）が規定された¹¹⁷。バイオディーゼルの品質規格を表 2.2-33 示す。

表 2.2-33 日本のバイオディーゼルの品質規格

項目	単位	最大値	最小値
硫黄	ppm	10	—
セタン指数	—	—	45
蒸留性状 (90%留出温度)	℃	360	—
トリグリセリド	wt %	0.01	—
脂肪酸メチルエステル (FAME)	wt %	0.1 5 (*)	—
*メタノール	wt %	0.01	—
*酸価	mgKOH/g	0.13	—
*脂肪酸、酢酸及びプロピオン酸の合計	wt %	0.003	—
*酸化安定度 (注)	min	—	65

* FAMEが0.1質量%を超え、5質量%以下の場合は、「*」の項目も満たす必要がある。

注) 当分の間、酸価の増加の測定方法において測定した数値が0.12mgKOH/g以下である軽油は、酸化安定度の基準を満たすものとみなす。

(出所) 資源エネルギー庁、「石油製品の品質確保について」¹¹⁸

¹¹⁵ <https://www.env.go.jp/hourei/04/000022.html> [2022.3.6 閲覧]

¹¹⁶ https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=352M50000400024_20161001_0000000000000000 [2022.3.6 閲覧]

¹¹⁷ <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8556468/www.enecho.meti.go.jp/info/event/data/07115a.pdf> [2022.3.6 閲覧]

¹¹⁸ https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/distribution/hinnkakuhou/ [2022.3.6 閲覧]

2.2.6.2 米国

米国のバイオディーゼルの燃料性状は、B6¹¹⁹から B20 については ASTM D7467 (Standard Specification for Diesel Fuel Oil, Biodiesel Blend (B6 to B20))¹²⁰、B100 については ASTM D6751 (Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels)¹²¹に規定される。それぞれ表 2.2-34、表 2.2-35 に示す。

表 2.2-34 米国のバイオディーゼル (B6～B20) の品質規格¹²⁰

Property	Grade B6 to B20 S15	Grade B6 to B20 S500	Grade B6 to B20 S5000
Acid number, mg KOH/g, max	0.3		
Viscosity, mm ² /s at 40°C	1.9–4.1		
Flash point, °C, min	52		
Cloud point, °C, max or Low Temperature Flow Test/Cold Filter Plugging Point, °C, max	(unrealistic to specify)		
Sulfur Content, (µg/g or ppm)	15	—	—
mass %, max	—	0.05	—
mass %, max	—	—	0.5
Distillation temperature, °C, 90% evaporated, max	343		
Ramsbottom carbon residue on 10% bottoms, mass %, max	0.35		
Cetane number, min	40		
One of the following must be met:			
(1) Cetane index, min	40		
(2) Aromaticity, vol %, max	35	35	—
Ash Content, mass %, max	0.01		
Water and Sediment, vol %, max	0.05		
Copper Corrosion, 3 h @ 50°C, max	No. 3		
Biodiesel Content, % (V/V)	6.–20.		
Oxidation Stability, hours, min	6		
Lubricity, HFRR @ 60°C, (micron µm), max	520		
Conductivity (pS/m) or Conductivity Units (C.U.), min	25		

¹¹⁹ 軽油規格 ASTM D975 では、B5 まではバイオ燃料の混合を示すラベルなしに、通常の軽油と表示することが認められている。

¹²⁰ ASTM, "Standard Specification for Diesel Fuel Oil, Biodiesel Blend (B6 to B20)" (2020) <https://www.astm.org/d7467-20a.html> [2022.3.6 閲覧]

¹²¹ ASTM, "Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels" (2020) <https://www.astm.org/d6751-20a.html> [2022.3.6 閲覧]

表 2.2-35 米国のバイオディーゼル（B100）の品質規格¹²¹

Property	Grade No.1-B S15	Grade No.1-B S500	Grade No.2-B S15	Grade No.2-B S500
Sulfur, % mass (ppm), max	0.0015 (15)	0.05 (500)	0.0015 (15)	0.050 (500)
Cold soak filterability, s, max	200	200	360	360
Monoglycerides, % mass, max	0.4	0.4	—	—
Requirements for All Grades				
Calcium and Magnesium, combined, ppm, max	5			
Flash point (closed cup), °C, min	93			
Alcohol Control: One of the following must be met				
(1) Methanol content, mass%, max	0.2			
(2) Flash point, °C, min	130			
Water and sediment, % volume, max	0.05			
Kinematic viscosity, mm ² /s, 40°C	1.9–6.0			
Sulfated ash, % mass, max	0.02			
Copper strip corrosion	No. 3			
Cetane number, min	47			
Cloud point, °C	Report			
Carbon residue, % mass, max	0.05			
Acid number, mg KOH/g, max	0.5			
Free glycerin, % mass, max	0.02			
Total glycerin, % mass, max	0.24			
Phosphorus content, % mass, max	0.001			
Distillation temperature, 90% recovered (T90), °C, max	360			
Sodium and potassium, combined, ppm, max	5			
Oxidation stability, hrs, min	3			

2.2.6.3 欧州

EUにおいて、軽油への脂肪酸メチルエステル（FAME）の混合率は、EN 590において7%までと規定される。バイオディーゼルの燃料性状はEN 14214¹²²に規定される（表 2.2-36）。

表 2.2-36 EU のバイオディーゼル（B100）の品質規格

Property	Limits
Flash point, min	101°C
Water, max	500 mg/kg
Total contamination, max	24 mg/kg
Kinematic viscosity	3.5–5.0 mm ² /s
Density	860–900 kg/m ³
Ester content	96.5% min
Sulfated Ash, max	0.02% mass
Sulfur, max (by mass)	10.0 mg/kg
Copper strip corrosion, max	class 1
Cetane number, min	51
Cloud point	Location & season dependant
CFPP	Location & season dependant
Acid number, max	0.50 mg KOH/g
Oxidation stability	8 hrs min
Iodine value, max	120 g Iod/100g
Linolenic acid methyl ester, max	12.0% wt
Polyunsaturated methyl esters, max	1.00% wt
Alcohol control	0.20% wt methanol max
Monoglycerides, diglycerides & triglycerides, max	MG 0.70% wt DG 0.20% wt TG 0.20% wt
Group I metals (Na + K), max	5.0 mg/kg
Group II metals (Ca + Mg), max	5.0 mg/kg
Free glycerin, max	0.02% wt
Total glycerin, max	0.25% wt
Phosphorous, max	4.0 mg/kg

（出所） Hannu Jääskeläinen, "Biodiesel Standards & Properties" (2015)¹²² より作成

¹²² Hannu Jääskeläinen, "Biodiesel Standards & Properties" (2015)
https://dieselnet.com/tech/fuel_biodiesel_std.php [2022.3.6 閲覧]

2.2.6.4 中国

中国のバイオディーゼル（B5）の燃料性状は、GB 25199-2017（B5 柴油）に規定される¹²³（表 2.2-37）。

表 2.2-37 中国のバイオディーゼル（B5）の品質規格（国 6）

項目	要求		
	5号	0号	-10号
酸化安定性、不溶分 mg/100mL	2.5 以下		
硫黄分 mg/kg	10 以下		
酸度 (KOH) mg/g	0.09 以下		
10%残留炭素 wt%	0.3 以下		
灰分 wt%	0.01 以下		
銅版腐食 (50℃, 3h) 評価	1 以下		
水分 wt%	0.030 以下		
汚染物総含有量 mg/kg	24 以下		
動粘度 (20℃) mm ² /s	2.5-8.0		
引火点 (閉じ口) °C	60 以上		
低温濾過器目詰まり点 (CFPP) °C	8 以下	4 以下	-5以下
凝固点 °C	5 以下	0 以下	-10以下
セタン価	51 以上		
密度 (20℃) kg/m ³	810-845		
蒸留範囲: 50%留出温度 °C	300 以下		
90%留出温度 °C	355 以下		
95%留出温度 °C	365 以下		
潤滑性 摩耗痕直径 (60℃) μm	460 以下		
脂肪酸メチルエステル (FAME) vol%	1.0-5.0		
多環芳香族 wt%	7 以下		

（出所）国家标准《B5 柴油》GB 25199-2017¹²³ より作成

¹²³ <http://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D81D19D3A7E05397BE0A0AB82A> [2022.3.6 閲覧]

2.2.6.5 インドネシア

インドネシアのバイオディーゼル (B20) の燃料性状は、SNI 7182:2015 に規定される¹²⁴ (表 2.2-38)。また、B30 の品質規格が検討されている¹²⁵。

表 2.2-38 インドネシアのバイオディーゼル (B20) の品質規格

Test Parameters	Satuan, min/max	Persyaratan
Density at 40 °C	kg/m ³	850–890
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s (cSt)	2.3–6.0
Satanic number	min	51
Flash point (covered bowl)	°C, min	100
Fog point	°C, max	18
Copper plate corrosion (3 hours at 50 °C)		number 1
Carbon residue - in the original sample; or - in 10% am after distillation	wt%, max	0.05 0.3
Water and sediment	vol%, max	0.05
90% distillation temperature	°C, max	360
Sulfated ash	wt%, max	0.02
Sulfur	mg/kg, max	50
Phosphor	mg/kg, max	4
Acid number	mg-KOH/g, max	0.5
Glycerol free	wt%, max	0.02
Total glycerol	wt%, max	0.24

(出所) Badan Standardisasi Nasional, "Standar Nasional Indonesia (SNI) 7182:2015, Biodiesel" (2015)¹²⁴ より作成

¹²⁴ Badan Standardisasi Nasional, "Standar Nasional Indonesia (SNI) 7182:2015, Biodiesel" (2015) <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DetailSNI/10147> [2022.3.6 閲覧]

¹²⁵ ESDM, "Tim Penyusun Pedoman Penanganan dan Penyimpanan Biodiesel dan Campurannya (B30)" (2020.11) <https://drive.esdm.go.id/wl/?id=OCplAXJSSzx6eFHUEAINI7fUkVjNq3fa&mode=list&download=1> [2022.3.6 閲覧]

2.2.6.6 ブラジル

ブラジルのバイオディーゼル（B100）の燃料性状は ANP 決議「Resolução ANP Nº 45 DE 25/08/2014」に規定される¹²⁶（表 2.2-39）。

表 2.2-39 ブラジルのバイオディーゼル（B100）の品質規格

Property	Units	Limits
Appearance	–	Clear & bright
Density @ 20°C	kg/m ³	850 - 900
Kinematic viscosity @ 40°C	mm ² /s	3.0 - 6.0
Water content, max.	mg/kg	200.02
Total contamination	mg/kg	24
Flash point ³ , min.	°C	100
Ester content	% mass	96.5
Sulfated ash, max.	% mass	0.02
Total sulfur, max	% mass	10
Na + K, max	mg/kg	5
Ca + Mg, max.	mg/kg	5
Phosphorous, max.	mg/kg	10
Copper corrosion, 3h @ 50°C, max.	–	1
Cetane number	–	Report
CFPP, max.	°C	See other table
Acid number, max.	mg KOH/g	0.5
Free glycerin, max.	% mass	0.02
Total glycerin ⁷ , max.	% mass	0.25
Monoglycerides, max.	% mass	0.7
Diglycerides, max.	% mass	0.2
Triglycerides, max.	% mass	0.2
Methanol or ethanol, max.	% mass	0.2
Iodine number	g/100 g	Report
Oxidation stability @ 110°C, min	h	6 - prior to 1.11.2014 8 - 1.11.2014 to 31.8.2019 12 - after 1.9.2019

（出所）ANP, "Resolução ANP Nº 45 DE 25/08/2014" (2014)¹²⁶ より作成

¹²⁶ <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=274064> [2022.3.6 閲覧]

2.2.7 バイオメタン

本項では、日本、米国、欧州、中国のほか、生産量の多いブラジルの燃料品質規格を整理した。

2.2.7.1 日本

バイオメタンの品質規格について、日本では現在のところ、検討状況が確認できない。

2.2.7.2 米国

米国では国家規格がなく、日本と同様に事業者によって品質が異なっている。そのような状況を受け、一部の事業者や業界団体の中で品質の標準化に向けた動きが見られる。¹²⁷。例えば、American Biogas Council は表 2.2-40 に示す推奨規格を公表している。

表 2.2-40 米国のバイオメタンの品質規格（American Biogas Council の例）

Contaminant/ Property	Unit	Recommendations
Heating Value	BTU/ft ³	960-1100
Carbon Dioxide, CO ₂	mol %	2
Oxygen, O ₂	mol %	0.4
Total Inerts	mol %	5
Water, H ₂ O	lbs/mmSft ³	7
Hydrogen, H ₂	% vol	
Hydrogen Sulfide, H ₂ S	gr./100 ft ³	1/4
Total Sulphur, S	gr./100 ft ³	1
Siloxanes, Si	ppm(v)	1
Hydrocarbon Dewpoint	° F	-40
Temperature	° F	50-120
Dust, Particulate		commercially free
Biologicals		commercially free
Heavy Metals		commercially free

（出所）Biogasworld, "Renewable Natural Gas Quality Specifications in North America" (2019.3.21) ¹²⁷

2.2.7.3 欧州

EU のバイオメタンの燃料性状は、EN 16723-2:2018¹²⁸（自動車用、天然ガスも対象）に規定される（表 2.2-41）。

¹²⁷ Biogasworld, "Renewable Natural Gas Quality Specifications in North America" (2019.3.21)
<https://www.biogasworld.com/news/renewable-natural-gas-quality-specifications-in-north-america/> [2022.3.6 閲覧]

¹²⁸ European Standard, "UNE EN 16723-2:2018, Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network - Part 2: Automotive fuels specification" (2018)
<https://www.en-standard.eu/une-en-16723-2-2018-natural-gas-and-biomethane-for-use-in-transport-and-biomethane-for-injection-in-the-natural-gas-network-part-2-automotive-fuels-specification/> [2022.3.6 閲覧]

表 2.2-41 EU の自動車用天然ガス及びバイオメタンの品質規格

Parameter		Unit	Limit values	
			Min	Max
Total volatile silicon (as Si)		mgSi/m ³		0.3
Hydrogen		% (m/m)	–	2
Hydrocarbon dew point temperature (from 0.1 to 7 MPa absolute pressure)		°C	–	-2
Oxygen		% (m/m)	–	1
Hydrogen sulfide + Carbonyl sulfide (as sulfur)		mg/m ³	–	5
S total (including odorization)		mgS/m ³		30
Methane Number		Index	65	
Compressor oil				Free
Dust impurities				Free
Amine		mg/m ³		10
Water dew point	Class A		-10 °C at 20,000 kPa	
	Class B		-20 °C at 20,000 kPa	
	Class C		-30 °C at 20,000 kPa	

(出所) European Standard, "UNE EN 16723-2:2018, Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network - Part 2: Automotive fuels specification" (2018) ¹²⁸

2.2.7.4 中国

中国のバイオメタンの燃料性状は、GB/T 40510-2021¹²⁹（自動車用）に規定される（表 2.2-42）。

表 2.2-42 中国の自動車用バイオメタンの品質規格

項目	要求
メタン mol%	96 以上
高位発熱量 MJ/m ³	34 以上
硫黄分 mg/m ³	50 以下
硫化水素 mg/m ³	15 以下
二酸化炭素 mol%	3.0 以下
酸素 mol%	0.5 以下
水分 mg/m ³	車が運転される特定域内にて、圧力25MPa以上、 周囲温度-13℃以上の条件下で、30mg/m ³ 以下
露点 °C	車が運転される特定域内にて、圧力25MPa以上、 周囲温度-13℃以上の条件下で、 最低周囲温度より5℃低い

* 気体条件：101.325kpa、20℃

(出所) 国家标准《车用生物天然气》GB/T 40510-2021 ¹²⁹

¹²⁹ 国家标准《车用生物天然气》GB/T 40510-2021

<http://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=CA6C0E542C7FC983E05397BE0A0AED11> [2022.3.6 閲覧]

2.2.7.5 ブラジル

ブラジルのバイオメタンの燃料性状は、Resolution ANP 685/2017¹³⁰に規定される（表 2.2-43）。

表 2.2-43 ブラジルのバイオメタンの品質規格

Feature	Unit	Limit		
		North	North East	Midwest, Southeast and South
Higher Calorific Power	kJ/m ³	34,000–38,400	35,000–43,000	
	kWh/m ³	9.47–10.67	9.72–11.94	
Wobbe index	kJ/m ³	40,500–45,000	46,500–53,500	
Methane, min	% mol	90	90	
Oxygen, max	% mol	0.8	0.8	
CO ₂ , max	% mol	3	3	
CO ₂ +O ₂ +N ₂ , max	% mol	10		
Total Sulfur, max	mg/m ³	70		
Hydrogen Sulfide (H ₂ S), max	mg/m ³	10		
Water dew point at 1 atm, max	°C	-39	-39	-45
Hydrocarbon dew point	°C	15	15	0
Siloxane content, max*	mg (Si/m ³)	0.3	0.3	
Chlorinated, max*	mg (Cl/m ³)	5	5	
Fluorinated, max*	mg (F/m ³)	5	5	

* For biomethane from landfills and sewage treatment plants.

（出所）Resolução ANP N° 685 DE 29/06/2017 ¹³⁰

2.2.8 合成燃料

2.1.8 項で述べたように、e-fuel は研究レベルから実証レベルで技術開発が進められており、市場に流通していない。e-fuel はドロップイン燃料として、またはそのまま従来のエンジンに使用することを目的としているため、その品質は従来のガソリンや軽油の品質規格に準拠することになると推察される。現在のところ、各国において e-fuel に特化した品質規格の検討状況は確認できない。

2.2.9 水素

FCV 用水素品質は、日本が 2000 年から研究をスタートし、日本が議長国（ISO TC197（水素技術）の水素品質を決めている WG（WG12 のコンビナ、現在は WG27 の日米共同セクレタリー）となり、国際標準の策定・改定を進めてきた。当初の水素純度は、99.99%

¹³⁰ Resolução ANP N° 685 DE 29/06/2017

<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=345545> [2022.3.6 閲覧]

であり固体高分子形燃料電池に回復不能な影響を及ぼす硫黄分や、一時的な性能低下をもたらす一酸化炭素などの含有を認めなかった。燃料電池に悪影響を及ぼす成分の扱いは現在も変わらないが、水素純度は 99.97%になり、より普及しやすい水素成分への改定が進められると共に、水素製造時の原料由来の成分なども考慮し、より現実的な水素品質となっている。

燃料電池自動車用水素燃料仕様（ISO 14687）を表 2.2-44 に示す。なお、現在発効している燃料仕様は 2019 年版である。

表 2.2-44 燃料電池自動車用水素燃料仕様（ISO 14687）

Characteristics	2019 年版 ¹³¹	2012 年版 ¹³²	主な変更点
Hydrogen fuel index (minimum mole fraction)	99.97%	←	
Total non-hydrogen gases	300 µmol/mol	←	
Maximum concentration of individual contaminants (µmol/mol)			
Water (H ₂ O)	5	←	
Total hydrocarbons except methane (C1 equivalent)	2	←	CH ₄ の許容濃度を 表中に明記 (従来は footnote)
Methane (CH ₄)	100		
Oxygen (O ₂)	5	←	
Helium (He)	300	←	
Nitrogen (N ₂)	300	100	許容濃度の緩和
Argon (Ar)	300	100	許容濃度の緩和
Carbon dioxide (CO ₂)	2	←	
Carbon monoxide (CO)	0.2	←	CO, HCHO, HCOOH の和が 0.2ppm を 超えないこと HCHO の許容濃度を 緩和
Total sulfur compounds (S1 equivalent)	0.004	←	
Formaldehyde (HCHO)	0.2	0.01	
Formic acid (HCOOH)	0.2	←	
Ammonia (NH ₃)	0.1	←	
Halogenated compounds (Halogenate Ion equivalent)	0.05	←	"Total" を削除
Maximum particles concentration	1 mg/kg	←	

¹³¹ ISO 14687: 2019 Hydrogen fuel -- Product specification

¹³² ISO 14687-2: 2012 Hydrogen fuel -- Product specification

以下では、日本、米国、欧州、中国の品質規格について整理した。

2.2.9.1 日本

日本では、国際標準 ISO 14687 燃料電池自動車用水素燃料仕様を国内の水素ステーションで FCV に供給する水素品質規格として採用している。また、水素ステーションで混入する可能性があるゴミやオイル成分などについても調査が進められており、さらに普及に適した燃料仕様改定へのフィードバックも行われている。

2.2.9.2 米国

米国の水素品質規格は、まずはカリフォルニア州法にて、日本と同様に国際標準である ISO 14687 を国内規格として採用していると考えられるが、具体的な国内規格番号等については、確認できなかった。

2.2.9.3 欧州

欧州では、EN17124 で水素品質規格の国際標準である ISO 14687 が水素品質規格として規定されている。なお、Hy4Heat プロジェクト（英国）では、家庭向け燃料電池の水素純度の検討を進めている。水素燃料基準案を表 2.2-45 に示す。水素純度が 98%以上となっており、ISO 14687（燃料電池自動車用水素燃料仕様の水素純度 99.97%）より水素純度が低くなっている。

表 2.2-45 Hy4Heat プロジェクト（英国）の水素燃料基準案¹³³

Content or characteristic	Value	Rationale
Hydrogen fuel index (minimum mole fraction)	98 %	Aim is to have a threshold value that meets user requirement.
Carbon monoxide	20 ppm	A practical engineering limit based on achievable production limits and to meet long term exposure limits HSE EH/40)
Hydrogen sulphide content	≤ 3.5 ppm	These values are taken from GS(M)R:1996 as any detrimental effects would be similar for hydrogen and natural gas.
Total sulphur content (including H ₂ S)	≤ 35 ppm	
Oxygen content	≤ 0.2 % (molar)	
Hydrocarbon dewpoint	-2 °C	Complies with GSMR:1996 and EASEE-gas
Water dewpoint	-10 °C	
Sum of methane, carbon dioxide and total hydrocarbons	≤ 1% (molar)	No combustion impacts and to reduce carbon emissions
Sum of argon, nitrogen and helium	≤ 2% (molar)	To avoid transporting inert gases and to limit the impact on Wobbe Number
Wobbe Number range	42 – 46 MJ m ⁻³	Range and percentage variation based on natural gas range in GS(M);R1996
Other impurities	Shall not contain solid, liquid or gaseous material that might interfere with the integrity or operation of pipes or any gas appliance, within the meaning of regulation 2(1) of the Gas Safety (Installation and Use) Regulations 1998, that a consumer could reasonably be expected to operate	

¹³³ Hy4Heat WP2, “Hydrogen Purity”

水素・燃料電池戦略ロードマップの進捗確認及び国内外における水素・燃料電池利活用状況調査報告書、みずほ情報総研株式会社（2020）

2.2.9.4 中国

自動車用水素燃料の品質規格について、気体水素単独の品質規格は中国の国家標準データベース¹³⁴でも確認できなかったが、自動車用の水素と天然ガスの混合ガスの品質規格（圧力 35 MPa 以下、水素濃度 25vol%以下）は、国家标准《车用压缩氢气天然气混合燃气》GB/T 34537-2017¹³⁵に規定されている（表 2.2-46）。一方、自動車用液化水素の方は、国家标准《氢能汽车用燃料 液氢》GB/T 40045-2021 に規定されている¹³⁶（表 2.2-47）。

表 2.2-46 中国の自動車用混合ガス（水素・天然ガス）の品質規格

项 目	技术指标
氢(H ₂)纯度(体积分数)/%	$2 \leq \varphi(\text{H}_2) \leq 25$
高位发热量/(MJ/m ³)	>26.7
总硫(以硫计)含量/(mg/m ³)	<100
硫化氢(H ₂ S)含量/(mg/m ³)	<15
二氧化碳(CO ₂)含量/%	<3.0
氧气(O ₂)含量/%	<0.5
水分(H ₂ O)含量/(mg/m ³)	在汽车驾驶的特定地理区域内,在最高操作压力和环境温度不低于-13℃的条件下,水分含量应不大于 30 mg/m ³
水露点/℃	在汽车驾驶的特定地理区域内,在最高操作压力和环境温度低于-13℃的条件下,水露点应比最低环境温度低 5℃
注 1: 表中气体体积的标准参比条件是 101.325 kPa、20℃。 注 2: 表中百分比为体积分数。	

（出所）国家标准《车用压缩氢气天然气混合燃气》GB/T 34537-2017

¹³⁴ <http://std.samr.gov.cn/> [2022.3.8 閲覧]

¹³⁵ <http://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D82186D3A7E05397BE0A0AB82A> [2022.3.8 閲覧]

¹³⁶ <http://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=C1A814733AED7A48E05397BE0A0A1C8D> [2022.3.8 閲覧]

表 2.2-47 中国の自動車用液化水素の品質規格

项目名称	指标
氢纯度(摩尔分数)	$\geq 99.97\%$
仲氢含量(体积分数)	$\geq 95\%$
非氢气体总量	$\leq 300 \mu\text{mol/mol}$
水(H_2O)含量	$\leq 5 \mu\text{mol/mol}$
总烃(按 CH_4 计) ^a 含量	$\leq 2 \mu\text{mol/mol}$
氧(O_2)含量	$\leq 5 \mu\text{mol/mol}$
氮(He)含量	$\leq 300 \mu\text{mol/mol}$
总氮(N_2)和氩(Ar)含量	$\leq 100 \mu\text{mol/mol}$
二氧化碳(CO_2)含量	$\leq 2 \mu\text{mol/mol}$
一氧化碳(CO)含量	$\leq 0.2 \mu\text{mol/mol}$
总硫(按 H_2S 计)含量	$\leq 0.004 \mu\text{mol/mol}$
甲醛(HCHO)含量	$\leq 0.01 \mu\text{mol/mol}$
甲酸(HCOOH)含量	$\leq 0.2 \mu\text{mol/mol}$
氨(NH_3)含量	$\leq 0.1 \mu\text{mol/mol}$
总卤化物(按卤离子计)含量	$\leq 0.05 \mu\text{mol/mol}$
颗粒物浓度	$\leq 1 \text{ mg/kg}$
^a 当液氢中含甲烷,且总烃含量大于 $2 \mu\text{mol/mol}$ 时,甲烷、氮气和氩气的总含量不得超过 $100 \mu\text{mol/mol}$ 。	

(出所) 国家标准《氢能汽车用燃料 液氢》GB/T 40045-2021

2.2.10 アンモニア

燃料用アンモニアの品質規格についての情報は乏しく、本項では日本のみ取り上げた。

2.2.10.1 日本

アンモニアについては、JIS K 8085:2021 アンモニア水（試薬）、JIS K 0099：2004 排出ガス中のアンモニア分析方法などの規格があるが、肥料などの原料としてのアンモニアの規格については確認できなかった。燃料アンモニアの国際標準については、現在、日本が中心となって国際標準化のための準備が進められている¹³⁷。具体的には、クリーン燃料アンモニア協会（CFAA）（旧名：グリーンアンモニアコンソーシアム）の内部に標準・基準の専門WGを立ち上げ、基準内容の精査を進める。その上で、国際標準機構（ISO）での国際標準化とその世界での普及を進めていくことになっている。

¹³⁷ 燃料アンモニア導入官民協議会 中間取りまとめ、燃料アンモニア導入官民協議会（2021）

2.3 次世代燃料の研究・技術開発動向

2.3.1 バイオ及び合成燃料

従来の代替燃料対策は、石油資源の枯渇をLPG、天然ガス、石炭、バイオマスで補うことが目的であったが、地球温暖化問題が顕在化するにつれ、代替燃料対策の目的は資源問題から温暖化防止のためのCO₂排出削減対策に移行している。したがって、次世代燃料研究も地球温暖化に寄与しないカーボンニュートラルの燃料を低コストで多量に得る方策の研究に移行している。例えば図2.6-1で示すように、石炭から製造した場合のDME(dimethyl ether)は石油資源の代替にはなるが、CO₂排出削減対策として有効な代替燃料ではないので、次世代自動車用燃料としては重きを置かれていない。また次世代燃料の用途拡大に合わせ、表2.6-8で問題にしているような燃料供給のインフラと備蓄の体制を整えることも、燃料関連の国際安全保障とともに、顕在化していない問題として重要である¹³⁸。

自動車用の炭化水素系次世代燃料は、バイオ燃料と合成燃料に区分することができる。図2.3-1はバイオマス燃料の種類を世代別に分類した結果である。バイオエタノールやバイオディーゼル(バイオエステル)は既存の第1世代の燃料であり、主原料となるバイオマスは食料と競合している。第2世代のバイオ燃料は食料と競合しないセルロースを主原料、第3世代は緑藻類などCO₂の吸収に優れた植物を人工環境下で栽培してバイオマスを得る手法、第4世代は第3世代で得られるバイオ燃料をベースとした合成燃料である。

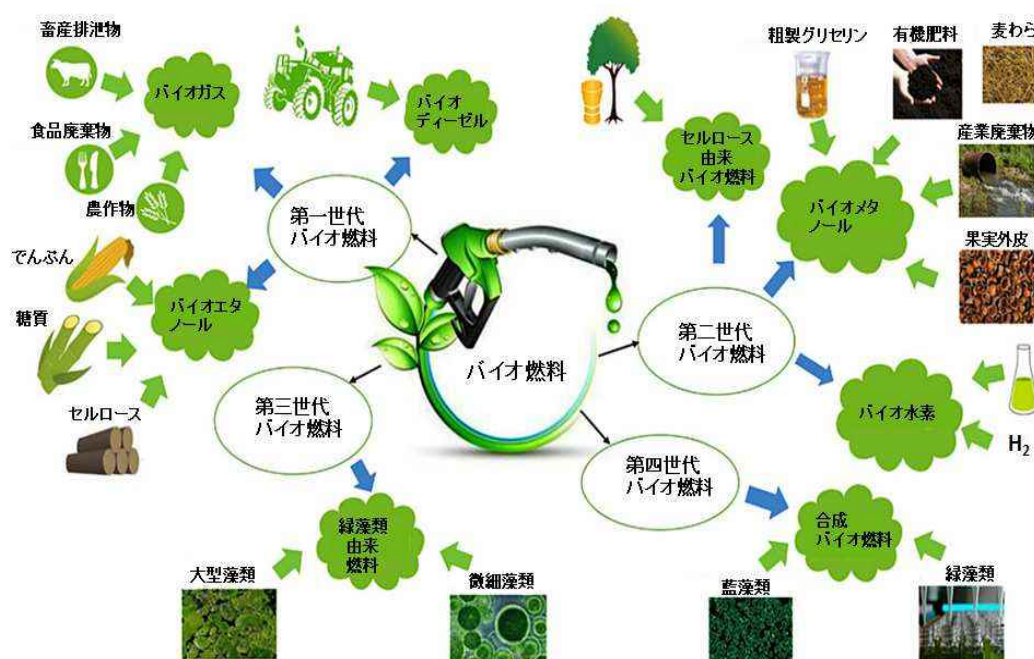


図 2.3-1 バイオマス燃料の種類 (文献¹³⁹より作成)

¹³⁸ J. Philips, M. Finster, J. Pillon, F. Petit, J. Trail (Argonne National Laboratory, USA), State Energy Resilience Framework, ANL/GSS-16-4, 2016.

¹³⁹ M. R. Javed et al. (2019). Microalgae as a Feedstock for Biofuel Production: Current Status and Future

技術的な段階でいえば、第1世代のバイオ燃料の開発は終了し実用化されていて、既存の燃料である。第2世代と第3世代のバイオ燃料の技術開発が行われ、第4世代については研究段階である。また HVO（水素化分解油：hydrotreated vegetable oil）は、バイオ脂肪酸トリグリセリドを水素化かつ分解して得られる直鎖系の炭化水素であり、バイオ資源の世代的にみれば第1世代のバイオエステルと同列であるが、水素化のための水素をバイオ水素から得るとすれば第2世代、バイオマス発電で得られる電力から供給するとすれば第4世代のバイオ燃料とみなすこともできる。

液体合成燃料とその製造プロセスの概要を図 2.3-2 に示す。合成燃料では、最終的な生成物である炭化水素の骨格となる炭素鎖をあらたに合成することが基本になっている。このため、主成分が水素と CO_2 （または水素と CO ）である合成ガス（Syngas）の資源により、化石資源由来の合成液体燃料とバイオ資源由来の合成液体燃料及び両資源に依存しない合成燃料に区分される。合成プロセス自体には本質的な相違はなく、炭化水素系の燃料を合成するフィッシャー・トロプシュ合成（Fischer-Tropsch Synthesis）、メタノール/エタノール合成、DME/OME（dimethyl ether / oxymethylene ethers）合成、アンモニア合成（Haber-Bosch Synthesis）など、生成物の種類に対応した種々のプロセスがある。プロセスを特徴づけるものは、反応の出発点での合成ガスの成分組成、合成反応を行う場合の温度と圧力、選択的に反応を促進させるための触媒などである。

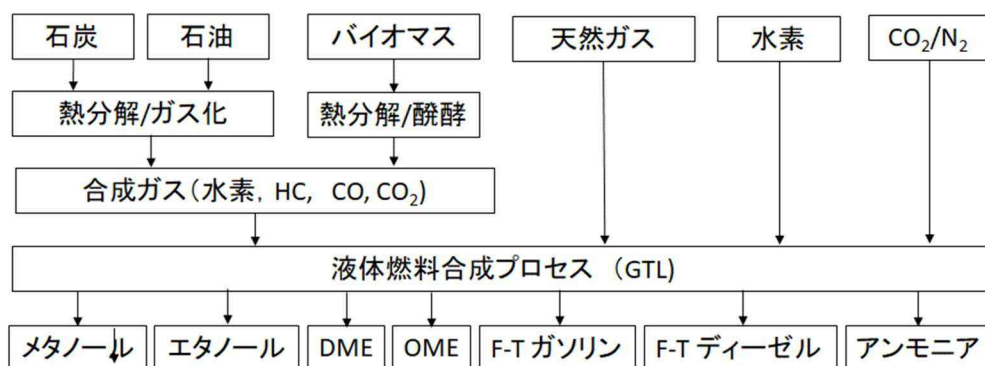


図 2.3-2 合成液体燃料の製造プロセスと種類

図 2.3-3 には、 $\text{CO} + \text{H}_2$ をベースとした合成ガスから触媒反応で作られる様々な生成物を、合成に関与させる触媒と併に示す。ガソリンの代替燃料となるアルコール類はバイオマスの発酵だけでなく、図 2.3-2 に示した様に一度合成ガスに分解した後に合成する方法があり、化学工業で使用されているアルコールは合成アルコールの場合が多い。性状がガソリンやディーゼル軽油に近い液体合成燃料はメタノールから、または F-T 合成により合成ガスから直接製造することが試みられつつある。

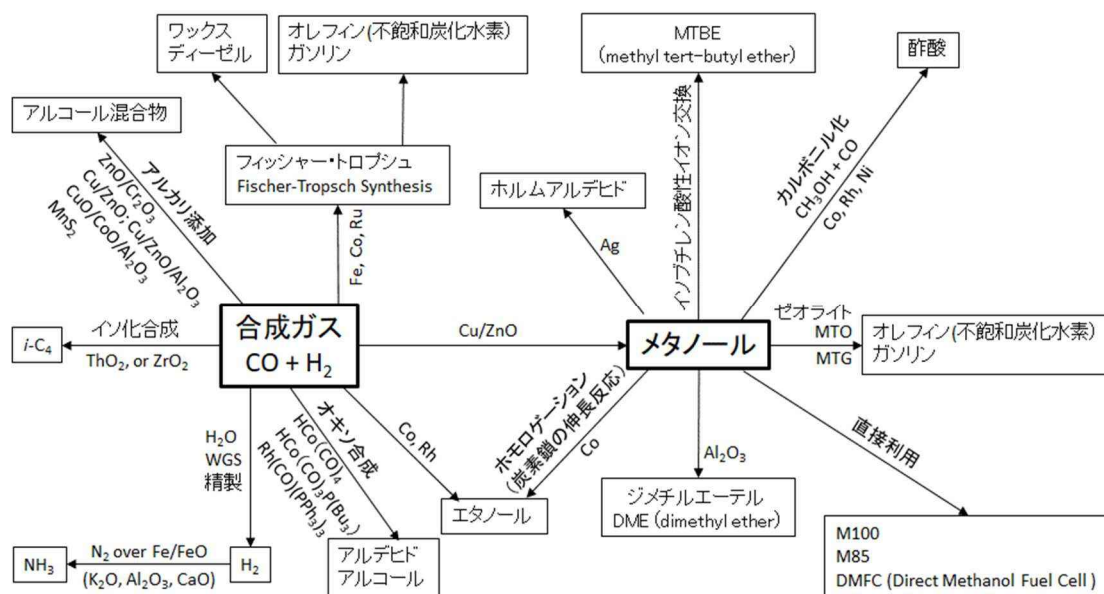


図 2.3-3 合成液体燃料の製造プロセスと触媒（文献¹⁴⁰より作成）

現在の自動車用燃料の主流は原油を精製したガソリンとディーゼル軽油であり、バイオメタノールとバイオエステルをそれに数パーセント混入させている場合がある。またガス燃料として LPG と CNG が使われている。次世代自動車用燃料の主流になるとと思われる燃料として、石油資源の枯渇や CO₂ 排出の低減の立場からすると、水素、水素化バイオ燃料（HVO）、セルロースをガス化した後に合成する合成液体燃料、水素と CO₂/N₂ から合成する液体燃料などが挙げられる。図 2.3-4 はカーボンリサイクルを基礎としてカーボンニュートラルの見地からみた我が国の燃料対策の考え方であり、後述する F-T (Fischer-Tropsch: フィッシャー・トロプシュ) 法による合成燃料（e-fuel 等）が重要な次世代燃料として取り上げられている。また表 2.3-1 は脱炭素燃料に対するニーズであり、すでに開発支援が行われている燃料や今後開発支援が予定されている燃料は部門によって異なる。しかし次世代自動車用燃料としての合成燃料の種類については、社会的なコンセンサスが得られている具体的な燃料はなく、日本国内においては模索中の段階である。また合成燃料のベースとなる資源量にも資源ごとの制約があるため、特定の合成燃料のみを開発目標に選択できない事情もある。一方欧州では e-fuel¹⁴¹、米国ではバイオ燃料¹⁴²が次世代自動車用燃料の主流になるとの予測に伴った検討が行われている。

¹⁴⁰ P. L. Spath and D. C. Dayton, Preliminary Screening - Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-510-34929, 2003.

¹⁴¹ Marta Yugo, A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030–2050) (literature review), Concave Review Volume 28 • Number 1 • October 2019.

¹⁴² Robert Wagner (Oak Ridge National Laboratory), The co-optimization of fuel and engine technologies on a path to decarbonization of the transportation sector, 第 32 回内燃機関シンポジウム, 2021, 12, 7-9.

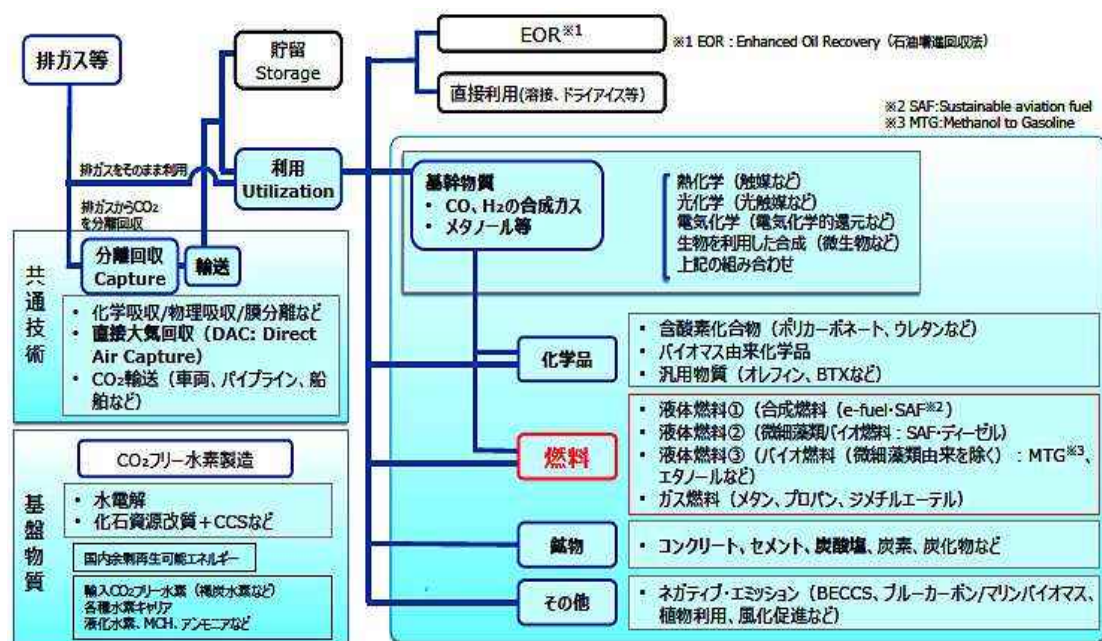


図 2.3-4 カーボンリサイクルと燃料¹⁴³

表 2.3-1 各部門における脱炭素燃料のニーズ¹⁴³

	輸送部門				産業部門	家庭部門
	車	トラック	船	飛行機		
2030年	- ガソリン - LPガス - バイオエタノール※	- 軽油 - バイオディーゼル※	- 重油、軽油 - LNG - LPガス - アンモニア	- ジェット燃料 - 代替航空燃料 (SAF)	- グリーンLPG - 都市ガス - LPガス	- グリーンLPG - 都市ガス - LPガス
2050年	- 合成燃料 - グリーンLPG - バイオエタノール※ - EV - FCV (水素) - ガソリン - LPガス	- 合成燃料 - バイオディーゼル※ - 軽油	- 合成燃料 - 合成メタン - グリーンLPG - アンモニア - LNG - LPガス - 重油、軽油	- SAF - 合成燃料 - 電気 - 水素 - ジェット燃料	- 合成メタン - グリーンLPG - 都市ガス - LPガス	- 合成メタン - グリーンLPG - 都市ガス - LPガス

— : 本プロジェクトで支援する脱炭素燃料 — : 他のプロジェクトで支援する脱炭素燃料
 ※ : 既に製造技術が確立している脱炭素燃料

バイオ及び合成燃料は、一般にその燃料の由来する原材料で分類されているが、燃料により自動車での使用形態が異なっている。各種の次世代自動車用燃料及び次世代自動車に係る代替燃料を、自動車での使用形態で分類すると、互換燃料、混合燃料、非混合燃料に分類することができる。なおこの区分は一般的に定着している区分ではないが、特性の異なる3種類の燃料形態を明確に区別するためにここでは用いることにする。

¹⁴³ CO₂等を用いた燃料製造技術開発プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性(案)、資源エネルギー庁(2021.10)
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/007_02_00.pdf [2021.12.23 閲覧]

(1) 互換燃料 (drop-in fuel、compatible fuel) ¹⁴⁴

既存の燃料供給インフラ及びエンジンを含む車両に使用できる代替燃料 (例 : F-T diesel oil) である。化石燃料由来のガソリンとディーゼル軽油の使用を前提として開発されたエンジンや燃料供給の社会インフラがそのまま使用できるため、好都合の燃料である。しかし、排出ガス問題のように現在の自動車用内燃機関に付随している燃料由来の負の特性もそのまま引き継ぐことになる。したがって、現状のガソリンやディーゼル軽油よりも熱効率が高かつ排出ガス問題が起きにくい互換燃料として、高品質の合成燃料を廉価で大量に製造することが求められている。

(2) 混合燃料 (blend fuel)

既存のガソリンやディーゼル軽油に基材として混合することで使用できる代替燃料 (例 : エタノール) で、互換燃料として使用する場合では混合割合に上限が存在する。第 1 世代のバイオ燃料の多くが、この混合燃料 (混合基材燃料) の区分に該当する。ここで混合後の燃料については、例えばエタノール混合ガソリン (ethanol blended gasoline) の様に称して混合する基材と区別する。この場合、許容できる混合割合の上限を見極めることや許容範囲を拡大することが技術的な大きな課題となっている。

混合の基材となる代替燃料はガソリンやディーゼル軽油と異なる燃焼特性をもち、その特徴を生かした専用の機関 (例 : E85 対応のガソリン機関) の開発も行われている。しかし、この種の燃料の入手が容易な一部の地域を除けば、新たなインフラの整備を行うメリットや内燃機関としての総合性能のメリットはほとんどない。現状で流通している燃料では、エタノール等は混合基材として、ガソリンやディーゼル軽油に部分混合させた状態で使用されている。一方混合する基材燃料がバイオ燃料等のカーボンニュートラルの燃料であれば、混合しただけ CO₂ が減少するので、CO₂ 削減対策とすれば、混合割合に応じた効果がある。

(3) 非混合燃料 (non-blend fuel)

既存のガソリンやディーゼル軽油に混合することのできない燃料である。また既存の燃料供給インフラ及びエンジンを含む車両に変更を加えることを前提とした代替燃料 (例 : LPG、CNG、DME、水素、アンモニア) でもある。CO₂ の本質的な排出をゼロにする内燃機関用の代替燃料として、非混合燃料である水素やアンモニアが現状では理想であるが、備蓄や長距離輸送を含めたインフラの新たな整備と自動車用内燃機関の新規開発が必要である。現状では技術的に不確定な部分が多く、その環境影響のメリットの評価も十分でない。また、燃料として汎用化した場合の資源構成や産業構造の変革に対しての事前評価が難しい。

¹⁴⁴ <https://www.amgc.org.au/project/drop-in-fuel/> [2021.12.24 閲覧]

2.3.1.1 バイオエタノール

バイオエタノールはバイオマス中の澱粉または糖質をエタノール醗酵させて製造する第1世代のバイオ燃料である。エタノールの製造は上記のエタノール醗酵以外に、工業的には石炭や化石燃料油の分解で得られるエチレンを介して作られている。カーボンニュートラルの燃料としては、バイオエタノールが一般的である。図 2.3-5 はバイオエタノールと合成エタノールの製造プロセスである。バイオエタノールの製造は発酵プロセスとその後の蒸留過程に分けられる。またセルロースのようなバイオマスを熱分解して合成ガス($\text{CO}+\text{H}_2$)を生成させた後、図 2.3-3 に示した触媒反応のルートでメタノールやエタノールを合成する場合がある。この場合ではバイオ資源(炭素と水素)に由来したバイオエタノールであるが、発酵というバイオ反応でなく、エタノール合成が人為的な化学反応プロセスとなるため、合成バイオエタノールと称すべきである。合成ガスを製造するガス化技術は、あらゆるバイオマスに対応が可能のため、また燃料として使用した場合に問題となる種々の不純物をガス化以降のプロセスで排除することが可能なため、今後の用途拡大が望まれている。

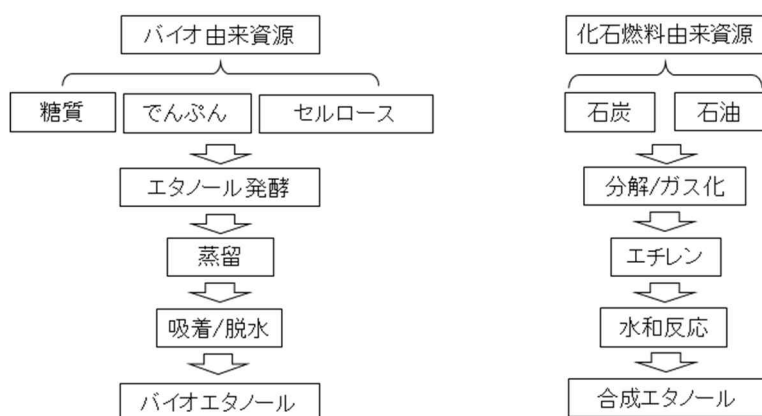


図 2.3-5 バイオエタノールと合成エタノール (文献¹⁴⁵より作成)

バイオマスのアルコール発酵によって作られる液体燃料にはバイオエタノール以外にも、バイオメタノールとバイオブタノールがある。また気体燃料としては、後述するメタン発酵によるバイオメタンとメタン発酵の前段階で生成されるバイオ水素がある。エタノールやエタノールのオクタン価 (RON) は 109 前後¹⁴⁶であり、オクタン価向上の添加剤とすればどちらも優れている。なおメタノールについてはオクタン価が 129 以上でオクタン価向上剤としてエタノールより優れているという報告もある¹⁴⁷。またメタノールはアルコール

¹⁴⁵ <http://scentburst.co.za/blog/ethanol-production-process-in-diagram.html> [2021.12.25 閲覧]

¹⁴⁶ <https://findanyanswer.com/what-octane-is-alcohol-fuel> [2022.01.08 閲覧]

¹⁴⁷ A. Demirbas, M. A. Balubaid, A. M. Basahel, W. Ahmad & M. H. Sheikh, Octane Rating of Gasoline and Octane Booster Additives, *Petroleum Science and Technology*, 33:11, 1190-1197, 2015. DOI: 10.1080/10916466.2015.1050506

ランプの燃料としても手軽に利用できる。しかし、ガソリンに比べて沸点が低くかつ人体に対する毒性が強いため、レーシングカー燃料のように特殊な場合を除きメタノールが自動車用燃料として広く用いられることはない。

2.3.1.2 バイオディーゼル

バイオ由来のディーゼル燃料には、バイオ由来の脂肪酸トリグリセリドをエステル化したバイオエステル FAME (Fatty Acid Methyl Ester) とバイオ由来の脂肪酸トリグリセリドを水素化処理した HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) がある。なお植物油に含まれる脂肪酸には飽和脂肪酸 ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$) 以外に、オレイン酸、リノール酸、 α -リノレン酸などの不飽和の脂肪酸があり、一般的には不飽和の脂肪酸が多い。

バイオ由来のディーゼル燃料の開発初期ではエステル化のみが注目されていたため、バイオディーゼル燃料といえばバイオエステル燃料を意味する場合が多く、水素化処理をしたバイオ由来のディーゼル燃料は HVO と呼称される。前者のバイオディーゼルと区分するために、HVO はリニューアブルディーゼル (Re-Diesel) またはグリーンディーゼル (Green Diesel) と呼ばれる場合もある。一方バイオ由来のディーゼル燃料を全体としてバイオディーゼルと称している場合 (例えば表 2.6-4) もあるので、資料の解釈には注意が必要である。

図 2.3-6 は植物油の主成分である脂肪酸トリグリセリドにメタノールを加え、Na または K を触媒として進行させるエステル化反応の概要である。なお脂肪酸トリグリセリドには不飽和のものも含まれるが、ここでは飽和脂肪酸トリグリセリドで示してある。添加するメタノールにバイオメタノールを使用すれば、バイオマス以外の資源を使用せずに生成することができ、この意味ではカーボンニュートラルな燃料である。

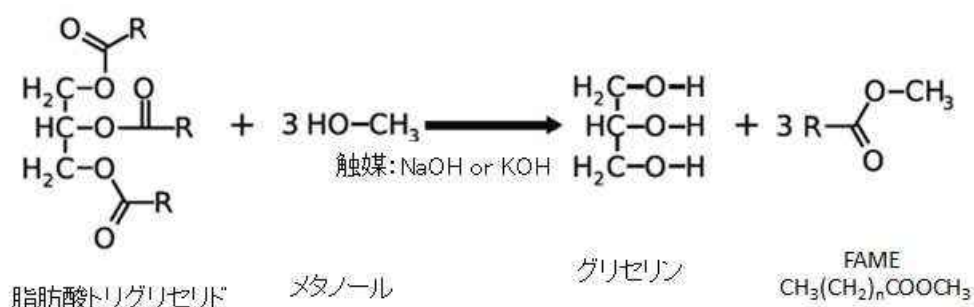


図 2.3-6 バイオエステル (FAME) の生成プロセス (文献¹⁴⁸より作成)

図 2.3-7 は同じ脂肪酸グリセリドを水素化処理して HVO (hydrotreated vegetable oil) を生成する反応プロセスである。この場合には、最終的な水素の添加量や反応の進行度によって、生成される直鎖状炭化水素の炭素鎖の長さをわずかに制御することができる。また水素化のあと、後述する F-T 合成軽油の場合と同様に追加の水素化分解を行うことも

¹⁴⁸ <https://www.etipbioenergy.eu/images/fame-fact-sheet.pdf> [2021.12.25 閲覧]

可能であり、HVO を水素化分解油と称する場合もある。

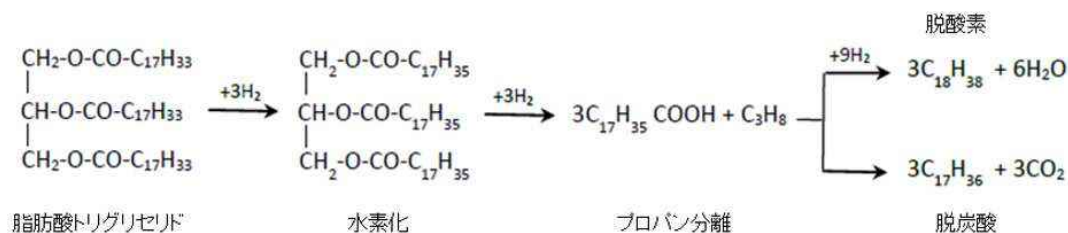


図 2.3-7 HVO (hydrotreated vegetable oil) の生成プロセス (文献¹⁴⁹より作成)

バイオエステル燃料の製造技術開発は 2000 年代に一段落し、現在はディーゼル軽油への混合基材として実用化されている。HVO については 2010 年代より開発が進められているが、水素化のための水素の供給源の問題があり、風力/太陽光発電のような再生可能エネルギーから電気分解で水素を製造することが、HVO の本格的な活用の鍵になっている。

FAME と HVO の燃料としての特徴を組成、メリット、燃料としての制約、技術的な特徴に分けて比較した結果が表 2.3-2 である。バイオメタノールを用いたエステル化反応を前提とすれば、FAME はカーボンニュートラルの燃料であるが、含酸素燃料であり発熱量が低く燃焼特性も既存のディーゼル軽油と異なるため、そのままでは互換燃料として用いることはできず、基材としてディーゼル軽油に混合する混合燃料として用いられている。一方 HVO はディーゼル軽油と同質の直鎖系の炭化水素であり、互換燃料として直接用いることができる。

表 2.3-2 FAME と HVO の比較 (文献¹⁵⁰より作成)

	FAME (Fatty Acid Methyl Ester)	HVO (Hydrotreated Vegetable Oil)
組成	脂肪酸メチルエステル 含酸素燃料	直鎖系の炭化水素
メリット	化石燃料の価格変動の抑制 化石燃料と異なり再生可能な燃料 化石燃料の枯渇対策 カーボンニュートラル燃料	FAMEと同じく化石燃料対策としての燃料 ディーゼル軽油への代替が可能 高発熱燃料 (軽油と同等) GHG低減への貢献
制約	自動車用燃料として軽油への混合が5.0質量%まで認められている エネルギー密度が低い (低発熱量) バイオマスの生産のための耕地面積の確保 耕地の荒廃防止のための収穫制限 (肥沃土壌の保全) 食料農産物との競合	バイオマス資源としての制約はFAMEと同じ
技術	動植物油のエステル化 メタノールの供給 反応後の触媒の分離	水素の供給 高温/高圧の反応場が必要 水素化のための触媒 炭素鎖の短縮化と触媒 反応後の触媒の分離

¹⁴⁹ <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/conversion-technologies/conventional-technologies/hydrotreatment-to-hvo> [2022.01.22 閲覧]

¹⁵⁰ Ashraf Amin (Chemical Engineering & Pilot Plant Department, National Research Centre, El Bohouth St., Dokki, Egypt), Review of diesel production from renewable resources: Catalysis, process kinetics and technologies,

両燃料の一番の違いは、FAME が含酸素の炭化水素燃料であるのに対し、HVO は直鎖系の炭化水素であることであり、この相違が発熱量の相違と内燃機関に使用した場合の Soot の生成の有無に現れる。表 2.3-3 はディーゼル軽油、FAME、HVO の性状比較である。ただし FAME と HVO は原料となるバイオマスや具体的な製造方法によって特性が異なり、ディーゼル軽油のように規格（国によって詳細は異なる）が定められていてその規格内に収まるように性状を調性してあるわけでない。したがってここでの比較は、FAME や HVO の一般的な特性とディーゼル軽油という規格化された燃料の比較と理解すべきである。セタン価や低温流動性の相違は含酸素燃料であるか否かよりも、次に述べる構成成分の沸点の相違に依存している。

表 2.3-3 ディーゼル軽油、FAME、HVO の性状比較（文献¹⁵⁰より作成）

性状	ディーゼル軽油	FAME	HVO
セタン価	40～55	50～65	75-90
エネルギー密度 MJ/kg	43	38	44
エネルギー密度 BTU/gal	129,000	118,000	123,000
密度 g/ml	0.83～0.85	0.88	0.78
曇り点 °C	-5	20	-10
酸化安定性	基準	低安定	高安定
低温流動性	基準	低流動性	高流動性
潤滑性	基準	高潤滑性	基準
イオウ分	< 10 ppm	< 5 ppm	< 10 ppm
NOx エミッション	基準	10% 増	0～10% 減

各種のバイオディーゼル燃料の特性を蒸留曲線上で調べた結果が図 2.3-8 である。ディーゼル軽油（EN590：欧州規格のディーゼル軽油）に比べて、FAME と HVO はともに沸点範囲の狭い燃料であるが、FAME の主成分の蒸留曲線上での範囲は 360～380℃であるのに対し、HVO の主成分は 260～290℃と低い。これは、FAME は主成分が C18 に近い炭素数の飽和及び不飽和の 3 個の脂肪酸がグリセリンと結合した植物油であるバイオ脂肪酸トリグリセリドをエステル化したものであり、もとの脂肪酸の炭素鎖の特性を強く反映しているのに対し、HVO では水素化による不飽和の炭素鎖の飽和化と並行して炭素鎖の分解が起き、炭素鎖の長さが短くなったためである。すなわち脂肪酸トリグリセリドの処理の違いに依存している。図 2.3-9 はガスクロマトグラフにて HVO を分析した一例である。この場合は C14～C17 の飽和炭化水素のピークが顕著であり、また通常のディーゼル軽油には含まれている C20～C24 の高沸点成分が HVO には含まれていない。図 2.3-10 と図 2.3-11 は FAME と HVO のセタン価とセタン指数で、横軸は混合割合である。FAME に比べて HVO のセタン価とセタン指数が共に高くなるが、これも HVO の特異な蒸留性状に

起因している。またセタン指数については蒸留曲線上の T10 や T50、T90 の温度に基づいて計算から求めているので、指数の値の蒸留曲線への依存度が高い。したがってエンジンで実際に計測するセタン価と異なる場合があり、原油由来のディーゼル軽油と構成成分が異なる FAME 等のディーゼル燃焼をセタン指数で評価する場合には注意が必要である。

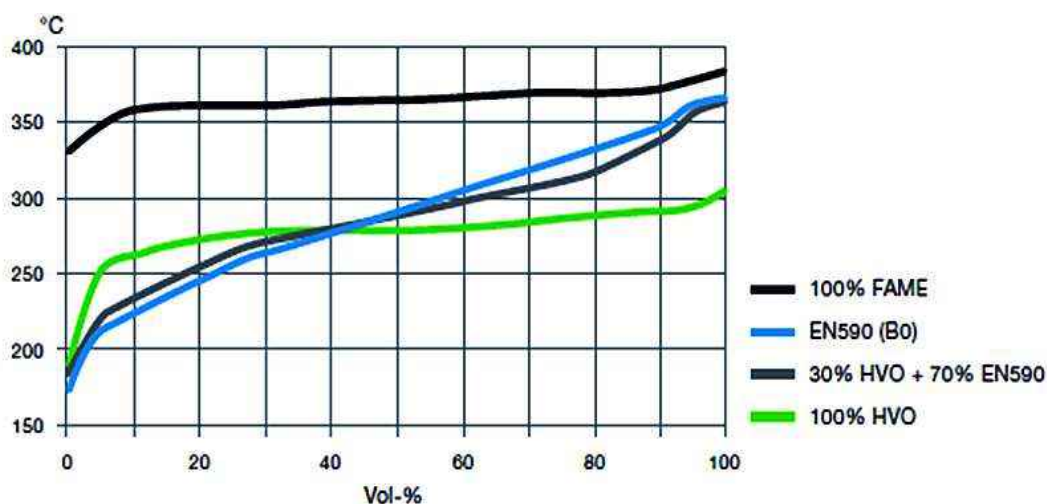


図 2.3-8 ディーゼル軽油、FAME、HVO、HVO 混合軽油の蒸留曲線¹⁵¹

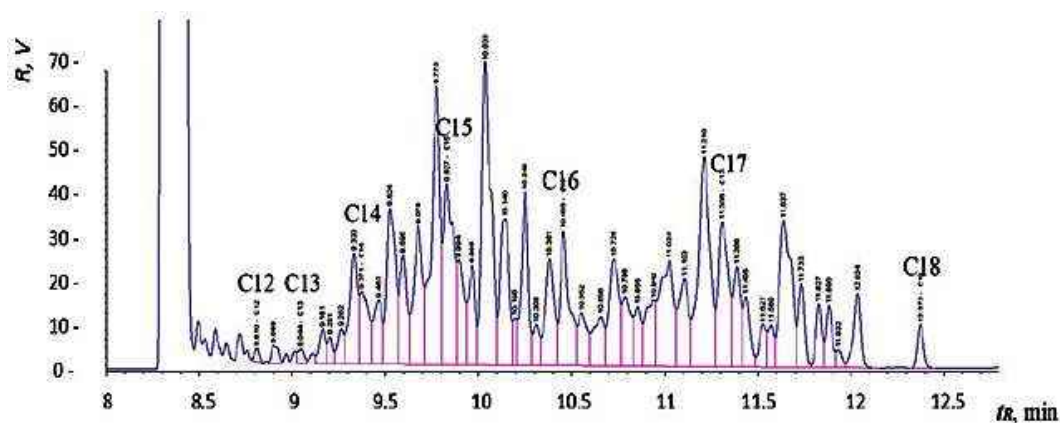


図 2.3-9 HVO の組成（ガスクロマトグラフ）¹⁵²

¹⁵¹ AEA—AMF, Advanced Motor Fuels

https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/paraffins/properties [2021.12.23 閲覧]

¹⁵² Petr Zeman (Czech University Czech Republic), Vladimír Hönl, Martin Kotek, Jan Táborský, Michal Obergruber, Jakub Mařík, Veronika Hartová and Martin Pechout, Hydrotreated Vegetable Oil as a Fuel from Waste Materials, Catalysts 2019, 9, 337; doi:10.3390/catal9040337

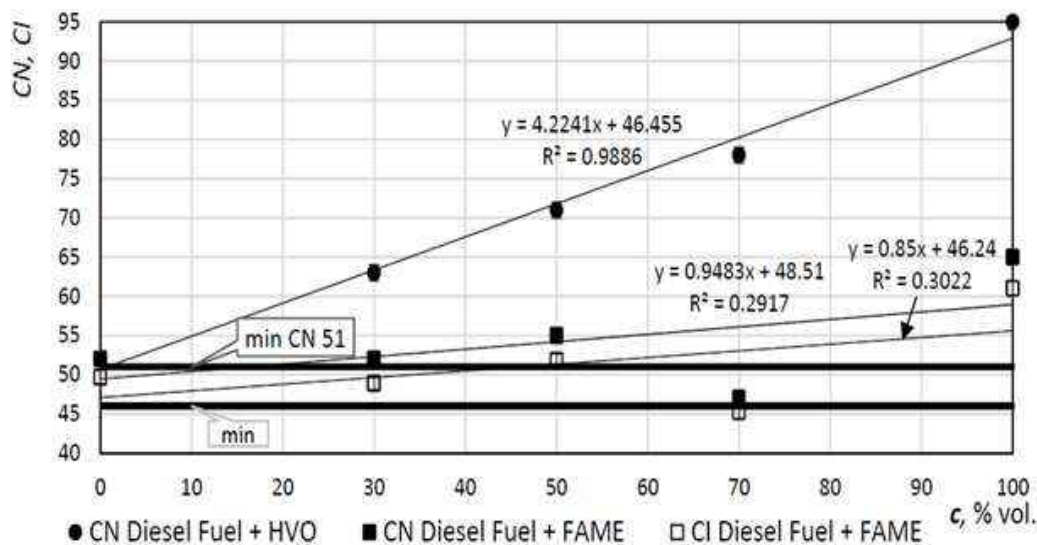


図 2.3-10 HVO または FAME のディーゼル軽油への混合割合とセタン価¹⁵²

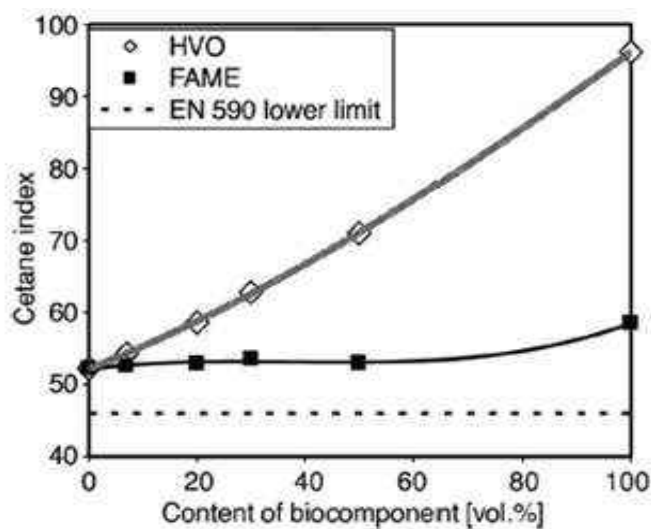


図 2.3-11 HVO または FAME のディーゼル軽油への混合割合とセタン指数¹⁵³

2.3.1.3 バイオメタン

メタン発酵（嫌気性消化酵素）によりバイオ資源からメタンが得られる。メタン発酵（Methane Fermentation）とは、無酸素の嫌気条件下で複数種の嫌気性細菌の代謝作用により廃棄物等に含まれる水分を含む有機物をメタン（CH₄）と炭酸ガス（CO₂）に分解する反応の総称である。メタンは天然ガスの主成分で燃料としての利用が可能であり、有機性廃棄物の処理及び再資源化技術として着目されている。しかし、高濃度のメタンを自動車

¹⁵³ Pavel SIMACEK, Ivan SOUCEK, Milan POSPISIL, Dan VRTISKA and Hugo KITTEL (University of Chemistry and Technology, Prague, Czech Republic), Impact of Hydrotreated Vegetable Oil and Biodiesel on Properties, THERMAL SCIENCE: Year 2019, Vol. 23, Suppl. 5, pp. S1769-S1777

用燃料として取り出すためにはそれなりの回収装置が必要なこと、また大規模な設備としてセルロース系のバイオマス进行处理するメリットが少ないこと、さらに発生したメタンをCNG車で使用するための圧縮や輸送の問題もあり、圧縮天然ガス車（CNG車）の代替燃料としては限定的である。

一方、自然界ではメタン発酵により生成されたメタンがそのまま大気中に放出されている。メタンは地球温暖化物質としてCO₂の28倍¹⁵⁴（100年平均）または84倍¹⁵⁵（20年平均）の寄与率をもっている。したがって、大気中に放出されるメタンを燃焼によりエネルギーを取り出しながらCO₂に変換することはカーボンニュートラルの燃料とは別の意味で温暖化防止に非常に役立つ。しかし、自然界に放置されたバイオマスから発生するバイオメタンを、それが大気中に放出される前に、効率良く回収することが必要になる。

バイオガス、バイオメタン、天然ガスの比較を表2.3-4に示す。バイオガスはメタン発酵で作られるため、発酵時に同時生成されるCO₂を多量に含みかつ硫化水素の濃度が高い場合もある。また発熱量はバイオメタンや天然ガスより低い。バイオメタンと天然ガスは共にメタンの割合が高いが天然ガスにはエタンやプロパンが含まれている。なお採掘した直後の天然ガスには、水分や他の物質も含まれているが、それらは圧縮天然ガスや液化天然ガスの製造時に除去され、この表に記載されているデータは市場に流通する最終形態の天然ガスである。ここでバイオガスがメタン発酵により生成されているため、バイオガス自体をバイオメタンと称する場合もあるので、両者は厳密に分けて議論する必要がある。

表 2.3-4 バイオガス、バイオメタン、天然ガスの比較（文献¹⁵⁶より作成）

ガス組成と発熱量	バイオガス	バイオメタン	天然ガス
メタン CH ₄	50–75 %	94–99.9 %	93–98 %
二酸化炭素 CO ₂	25–45 %	0.1–4 %	1 %
窒素 N ₂	< 2 %	< 3 %	1 %
酸素 O ₂	< 2 %	< 1 %	–
水素 H ₂	< 1 %	Trace	–
硫化水素 H ₂ S	20 – 20,000 ppm	< 10 ppm	–
アンモニア NH ₃	Trace	Trace	–
エタン C ₂ H ₆	–	–	< 3 %
プロパン C ₃ H ₈	–	–	< 2 %
シロキサン（ケイ素・酸素化合物） R ₃ SiO-(R ₂ SiO) _n -SiR ₃	Trace	–	–
水分 H ₂ O	2 – 7 %	–	–
低位発熱量(LHV)	16–28 MJ/m ³	36 MJ/m ³	37–40 MJ/m ³

¹⁵⁴ https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf [2022.02.20 閲覧]

¹⁵⁵ https://ondankataisaku.env.go.jp/communicator/files/WG3_guidebook_151016.pdf [2022.02.22 閲覧]

¹⁵⁶ Biomethane, DEFINITION & PROPERTIES, European Technology and Innovation Platform (ETIP), Bioenergy Fact Sheet, https://www.etipbioenergy.eu/images/ETIP_B_Factsheet_Biomethane.pdf [2021.12.25 閲覧]

2.3.1.4 合成燃料

合成燃料の製造プロセスにおいて水素の供給源は、化石燃料、バイオマス、水の電気分解のいずれかである。このうち、化石燃料発電に依存しない電力を用いた水の電気分解で得られた水素を使用して製造される燃料を **Electro-fuel** または略して **e-fuel** と称している。電力エネルギー (power) の燃料への転換であるため **PtX** と呼ばれることもある。**e-fuel** は互換燃料であり **GHG** (Green House Gas) の排出もないので次世代の自動車用燃料の本命とする考え方もあるが、製造コストが高く、経済的な理由から本命とすることに疑問を示す考え方もある。

水素と関連する **e-fuel** の生成ルートの概要を図 2.3-12 に示す。水素自体も電力を用いて電気分解により製造すれば広義の **e-fuel** に含まれる。なお、日本国内では風力発電や太陽光発電を含む再生可能電力に由来する水素を用いた場合を意味する狭義の **e-fuel** が用いられている。メタノールのような生成物としての燃料の場合でも、最終的に得られる燃料については他の手法で生成した場合と本質的に変わらない。しかし、元になる水素が電力を用いて作られているので、その特徴を受け継いで **e-メタノール** と称して通常のバイオメタノールや化石燃料由来の合成メタノールと区別することもある。一般的に水素と CO_2 から炭化水素を合成するが、 N_2 を用いればアンモニアを製造することができる。また **e-fuel** の合成のための原料として CO_2 も重要である。 CO_2 の確保については CO_2 の回収技術として後述する。

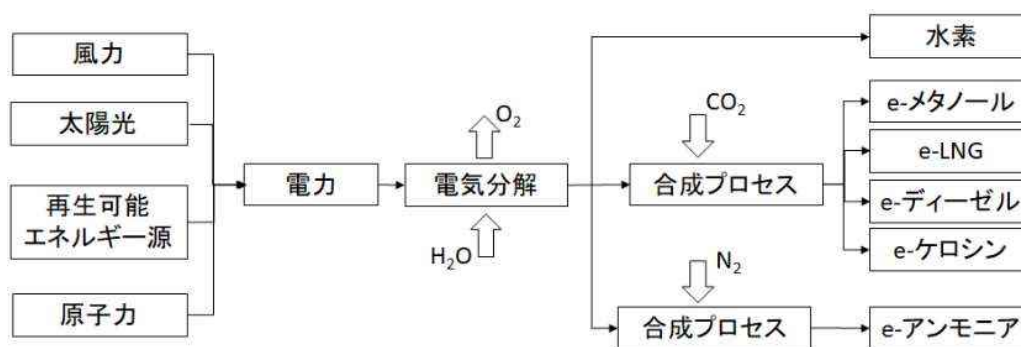


図 2.3-12 水素と関連する **e-fuel** の生成ルート（文献¹⁵⁷より作成）

合成プロセスには図 2.3-13 に示すように、メタン化プロセス、フィッシャー・トロプシュ合成プロセス、メタノール合成プロセス、アンモニア合成プロセスに区分することができる。電力によって得られる水素を用いる合成プロセス自体は、他の合成ガスを使用した場合と大差はない。しかし、他の合成ガスを用いた場合よりも不純物の混入を防ぎやすいため、また水素と CO_2/N_2 の比率も制御しやすいため、目的とする合成燃料が得やすい。

¹⁵⁷ Karin van Kranenburg, Yvonne van Delft, Anastasia Gavrilova, Robert de Kler, Caroline Schipper, Richard Smokers, Maarten Verbeek, Ruud Verbeek, E-FUEL: Towards a more sustainable future for truck transport, shipping and aviation. TNO, 2020.

図 2.3-14 は我が国における e-fuel の定義の一例であり、CO₂ の由来に係わらず、合成燃料の中で再エネ由来の水素を用いて製造した場合の合成燃料を e-fuel としている。

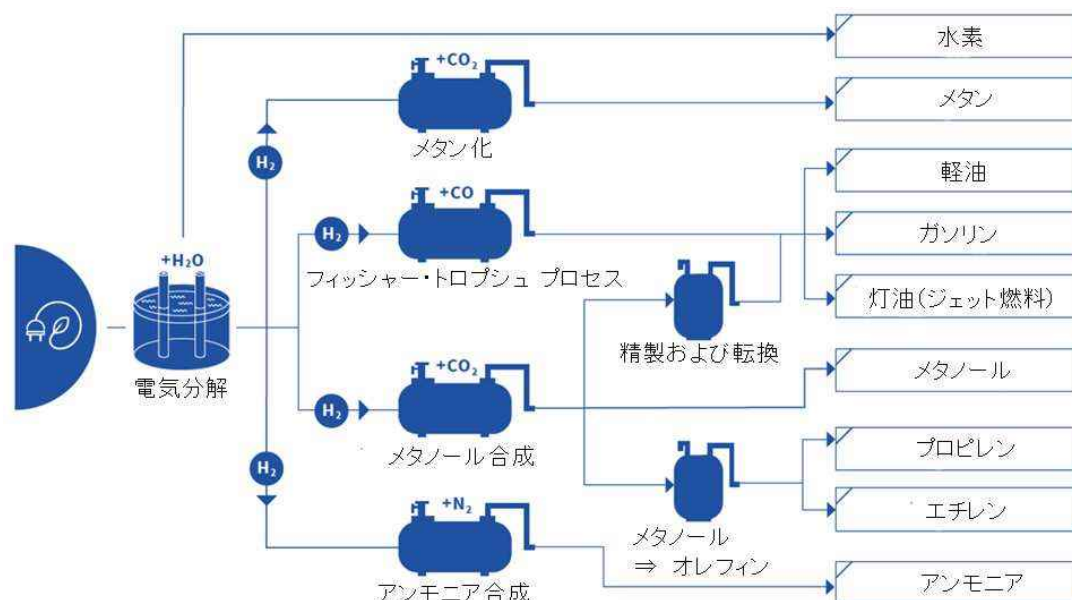


図 2.3-13 PtX と生成物（文献¹⁵⁸より作成）

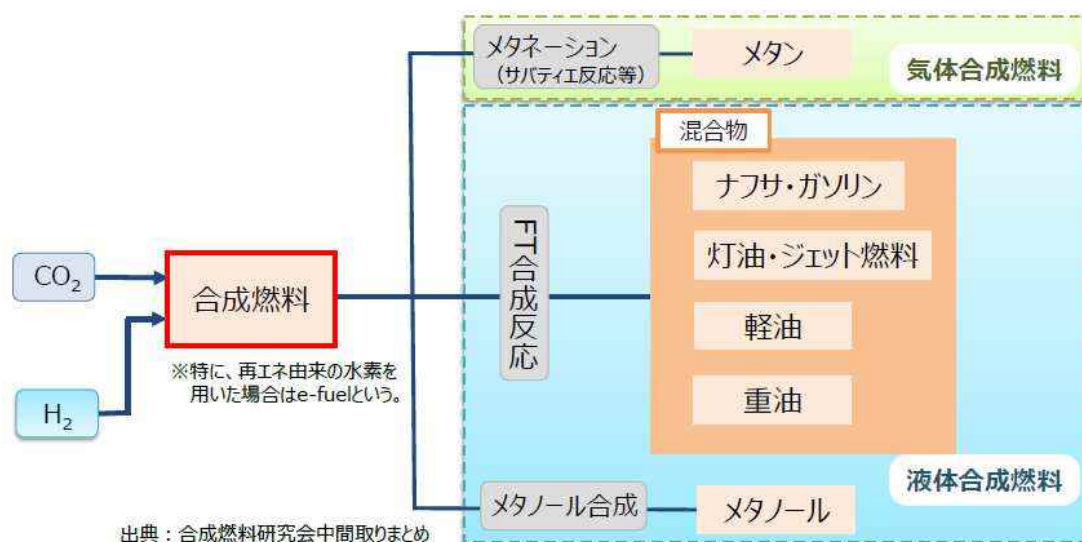


図 2.3-14 我が国における合成燃料と e-fuel の考え方¹⁵⁹

¹⁵⁸ Powerfuels Application Fields: Factsheets about powerfuels technologies and their areas of application, Dena, German energy agency,

https://www.powerfuels.org/fileadmin/gap/Publikationen/Factsheets/Combined_Factsheets.pdf [2021.12.25 閲覧]

¹⁵⁹ CO₂ 等を用いた燃料製造技術開発プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性（案）、資源エネルギー庁、（2021.10）

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/007_02_00.pdf [2021.12.23 閲覧]

前述したように e-fuel は合成に使用する水素の由来を示す区分であり、電力由来の水素をベースとする合成燃料であるが、多くの場合、フィッシャー・トロプシュ合成 (F-T 合成) による炭化水素の合成が主流になっている。いいかえると、e-fuel には F-T 合成とは無関係の合成油も含まれ、F-T 合成油には e-fuel の範疇には入らない合成油もある。F-T 合成に係る反応をまとめた結果が表 2.3-5 である。F-T 反応の基本は触媒の関与したパラフィンの合成(発熱反応)であるが、高温の場合にはオレフィンが生成される場合もある。いずれも高圧 (20~40 気圧) 下の発熱反応であり、Fe や Co 触媒のもとで反応は進行する。水成ガスシフト反応は CO と水から CO₂ と水素を生成する発熱反応である。ここではその逆反応 (吸熱反応) により、F-T プロセスの反応物として必要な CO を CO₂ と H₂ から生成している。なお、逆水成ガスシフト反応を F-T 合成反応に含めて扱っている文献と含めない立場の文献があるので注意が必要である。

表 2.3-5 フィッシャー・トロプシュ合成プロセスの反応 (文献¹⁶⁰より作成)

主反応	
パラフィン	$(2n + 1)H_2 + nCO \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$
オレフィン	$2nH_2 + nCO \rightarrow C_nH_{2n} + nH_2O$
水成ガスシフト反応	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
副反応	
アルコール	$2nH_2 + nCO \rightarrow C_nH_{2n+2}O + (n - 1)H_2O$
Boudourad 反応 (CO の不均化反応)	$2CO \rightarrow C + CO_2$
触媒修飾	
触媒の酸化/還元	$M_xO_y + yCO \leftrightarrow yCO_2 + xM$ $M_xO_y + yH_2 \leftrightarrow yH_2O + xM$
炭化物生成	$yC + xM \leftrightarrow M_xC_y$

F-T 合成プロセスと生成物の関係を図 2.3-15 に示す。ここで示したフローは合成ガスを用いた一般的な F-T 合成プロセスであり、通常 10~30 気圧の高温下で炭化水素を合成する反応である。低温と高温の場合で用いる触媒や生成物が異なるが、コバルト系の触媒を用いて直鎖の炭化水素を合成する反応が低温の場合の主要な反応である。図では合成された直鎖の炭化水素を水素化分解してディーゼル軽油として取り出している。e-fuel の観点からは、電力由来の水素と CCS (CO₂ capture and storage) または DAC (direct air capture) で得られた CO₂ をもとに H₂ と CO の混合ガスをつくり、その後は図 2.3-15 のフローに従って、e-ディーゼルや e-ガソリンを製造する。

電力をエネルギー源とし、電力由来の H₂ と DAC で得られた CO₂ を用いた F-T 合成プロセスで液体燃料を製造する場合のエネルギーとマテリアルフローの一例を図 2.3-16 に示す。ここでは逆水成ガスシフト反応は F-T 合成反応の前段階のプロセスとして分離している。ここで示したフローでは海水と空気中の CO₂ を原料とし、1,000 kWh の電力から 575 kWh のエネルギーを含有する液体燃料が得られると試算している。

¹⁶⁰ Samrand Saeidi, Masoud Talebi Amiri, Nor Aishah Saidina Amin and Mohammad Reza Rahimpour, Progress in Reactors for High-Temperature Fischer-Tropsch Process: Determination Place of Intensifier Reactor Perspective, International Journal of Chemical Reactor Engineering, 12(1), pp.639-664, 2014.

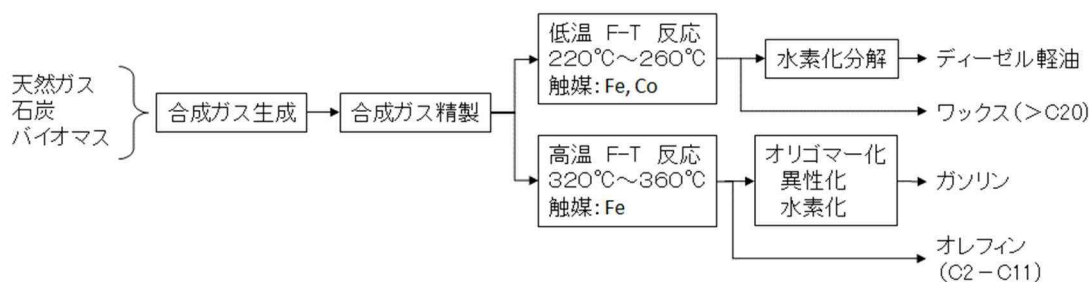


図 2.3-15 フィッシャー・トロプシュ合成プロセスと生成物（文献¹⁶¹より作成）

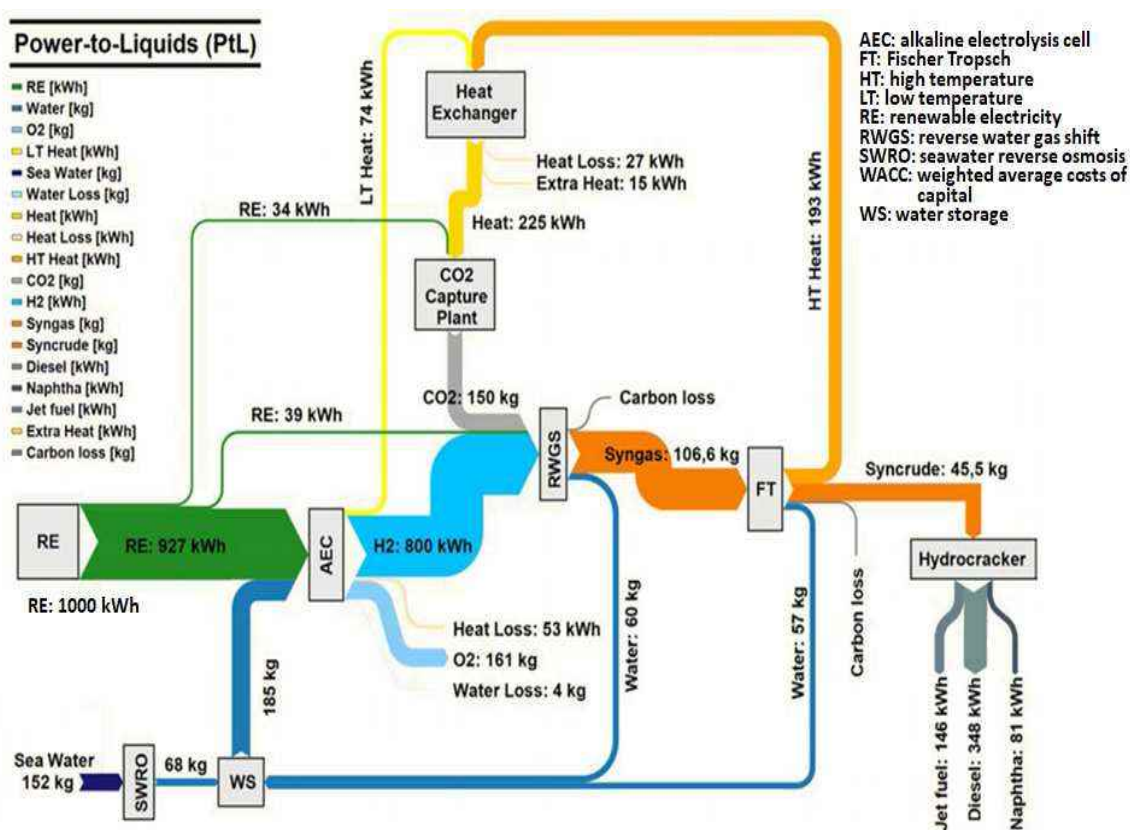


図 2.3-16 F-T 合成を用いた e-fuel 製造プロセスのエネルギーとマテリアルの流れ（文献¹⁶¹より作成）

2020 年以降、欧州を中心に内燃機関の主要燃料を化石由来の燃料から e-fuel に変える方針が顕著になっている。図 2.3-17 はオランダにおける e-fuel の導入スケジュールである。2020 年代前半における欧州の e-fuel 規格の策定、2020 年代におけるパイロットプラント、2030 年代における市場導入が基本的な方針として紹介されている。またこの導入

¹⁶¹ Mahdi Fasihi, Dmitrii Bogdanov, Christian Breyer (Lappeenranta University of Technology, Finland), Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants, 10th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2016, 15-17 March 2016, Düsseldorf, Germany, Energy Procedia 99, pp.243-268, 2016.

スケジュールには乗用車が含まれていないので e-ガソリンは対象外と判断できる。

図 2.3-18 は我が国の e-fuel を含む合成燃料の開発スケジュールである (TRL:technology readiness level、TRL=1～3：概念実証、TRL=4～6：原理実証、TRL=7～9：性能実証)。オランダの場合ではインフラ整備と 2030 年以降の市場への展開がスケジュールに組み込まれている。わが国の場合ではプラントの運転検証を 2030 年以降に予定していることが明らかになっている。

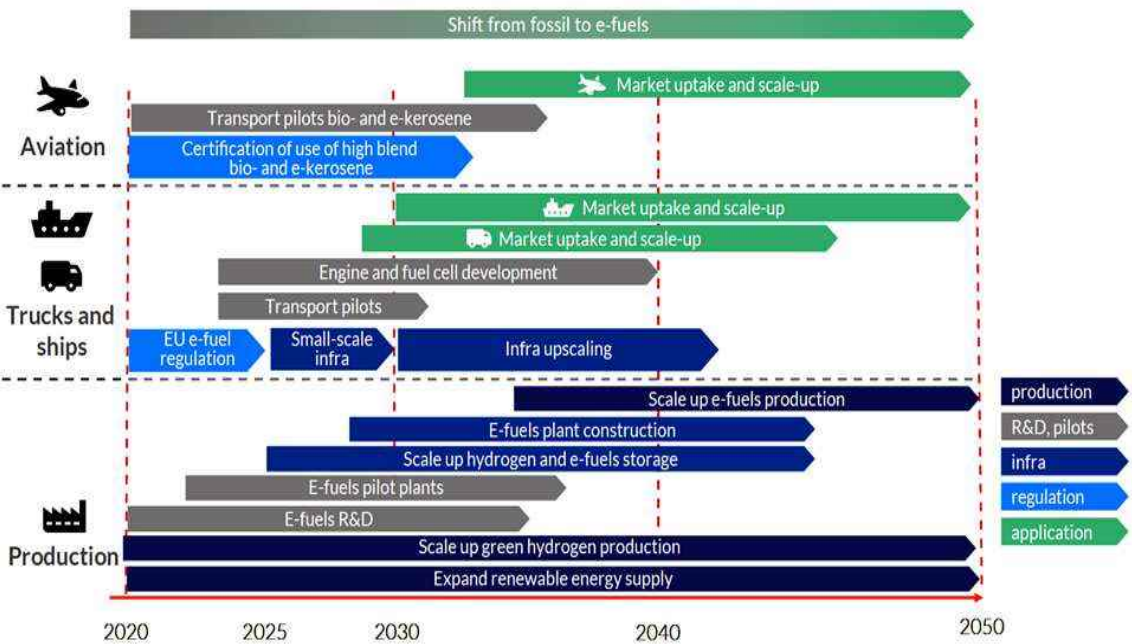


図 2.3-17 オランダにおける e-fuel の導入スケジュール¹⁶²



図 2.3-18 我が国の合成燃料の開発スケジュール（文献¹⁶³より抜粋作成）

¹⁶² Karin van Kranenburg, Yvonne van Delft, Anastasia Gavrilova, Robert de Kler, Caroline Schipper, Richard Smokers, Maarten Verbeek, Ruud Verbeek, E-FUEL: Towards a more sustainable future for truck transport, shipping and aviation. TNO, 2020

¹⁶³ CO₂等を用いた燃料製造技術開発プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性(案)、資源エネルギー

2.3.1.5 水素

水素は、水の電気分解や炭化水素の分解によって作ることができる。水素の種々の生産方法をまとめた結果が図 2.3-19 である。太陽光を水に照射し、光触媒を用いて水素を発生させる方法が水の直接分解である。バイオマスからはメタン発酵に伴う水素発酵により直接水素を得ることもできる。

風力、太陽光、地熱等の再生可能エネルギーで電力を生産し、水の電気分解をこの電力で行った場合に得られる水素は、グリーン水素と呼ばれている。さらに通常の原子力発電だけでなく、放射性廃棄物からの熱放出も利用して電力を生産しこれをもとに水素を生成する方法もある。また放射線を利用して水を直接分解する手法も検討されている。石炭、石油、天然ガスからは、炭化水素の熱分解により、また燃焼熱を利用した水蒸気改質により水素を生産することができる。原油の生成や工業原料となるアンモニアの生成のためには多量の水素が必要になるが、現在、工業的に必要な水素は主に化石燃料から、炭化水素の分解または水蒸気改質によって得られている。

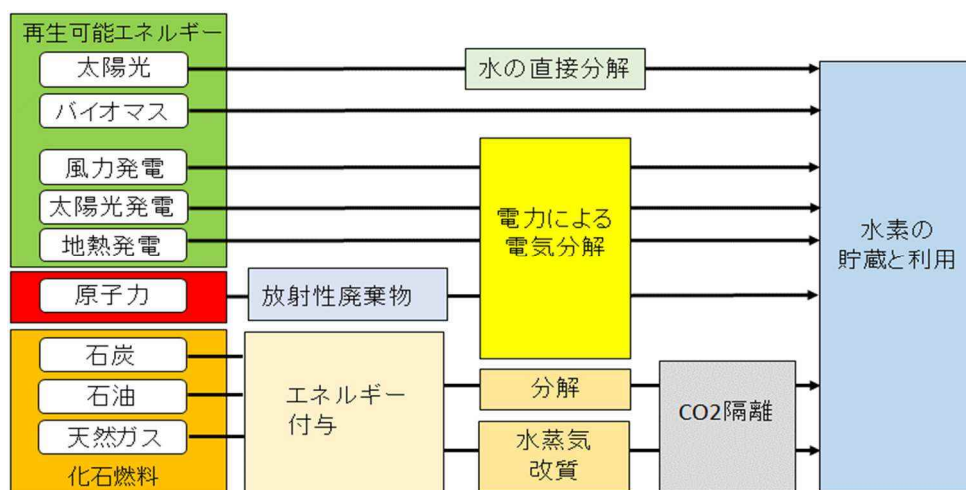


図 2.3-19 水素の生産プロセス（文献¹⁶⁴より作成）

次世代燃料として注目されている水素及び合成燃料のベースとなる水素は、カーボンニュートラルの観点から前述したグリーン水素とする必要がある。水素は石油化学工業の中間材料としての用途が従来の主流であり、中間材料であるがため、過剰な貯蔵は避けられてきた。しかし最近、水素を燃料として評価するようになった結果、水素による電力エ

序、(2021.10)

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/007_02_00.pdf [2021.12.23 閲覧]

¹⁶⁴ <http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/hydrogen/basics/images/HydrogenProductionPaths.gif> [2021.12.25 閲覧]

エネルギー貯蔵が現実的な課題¹⁶⁵となり、水素輸送や貯蔵問題が顕在化¹⁶⁶してきている。

資源別にみた世界の水素製造割合を図 2.3-20 に示す。天然ガスから製造する割合が最も高く、石炭や石油を原材料とする水素がこれに続いている。電気分解によって得られる水素の割合が低い理由は、おもに電力コストが高いことに起因している。図 2.3-21 は世界における水素の用途を示している。石油精製のために必要な水素は、精油所内で石油の分解によって供給しているが、不足分は天然ガスや石炭からつくる水素で補っている。アンモニア合成に 50%以上の水素が使われているが、合成されたアンモニアは化学工業の原料として消費されている。現状では水素の自動車用燃料の利用割合は極わずかであり、区分としてはその他の用途の 10%の中に含まれている。

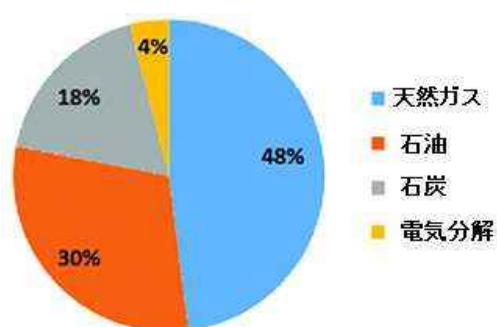


図 2.3-20 資源別の水素の製造割合（文献¹⁶⁷より作成）

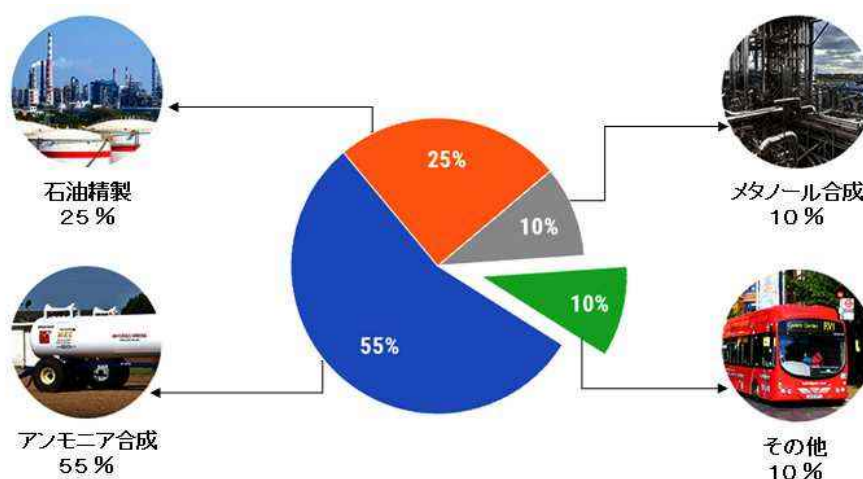


図 2.3-21 水素の用途（文献¹⁶⁸より作成）

¹⁶⁵ Véronique Dias, Maxime Pochet, Francesco Contino and Hervé Jeanmart (Université catholique de Louvain, Belgium), Energy and Economic Costs of Chemical Storage, *Frontiers in Mechanical Engineering*, May 2020 Volume 6 Article 21, 2020. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2020.00021/full> [2021.12.25 閲覧]

¹⁶⁶ What is “SPERA HYDROGEN” system? | CHIYODA CORPORATION
<https://www.chiyodacorp.com/en/service/spera-hydrogen/innovations/> [2021.12.25 閲覧]

¹⁶⁷ https://www.researchgate.net/figure/a-Hydrogen-production-methods-and-various-end-users-18-1b-percentage-of-hydrogen_fig1_322056332 [2021.12.26 閲覧]

¹⁶⁸ <https://wha-international.com/hydrogen-in-industry/> [2021.12.26 閲覧]

IEA による水素の今後の生産量予測を図 2.3-22 に示す。クリーン水素(右縦軸)は CCUS (carbon dioxide capture, utilization and storage) を伴う装置で化石燃料から生成された水素と再生可能エネルギー電力による電気分解で生産された水素の和である。水素の工業的な利用は今後急激に増加することではなく、図に示された水素の飛躍的な増加は、水素のエネルギー源としての用途が、水素社会の構築に伴って増加していくことを示している。

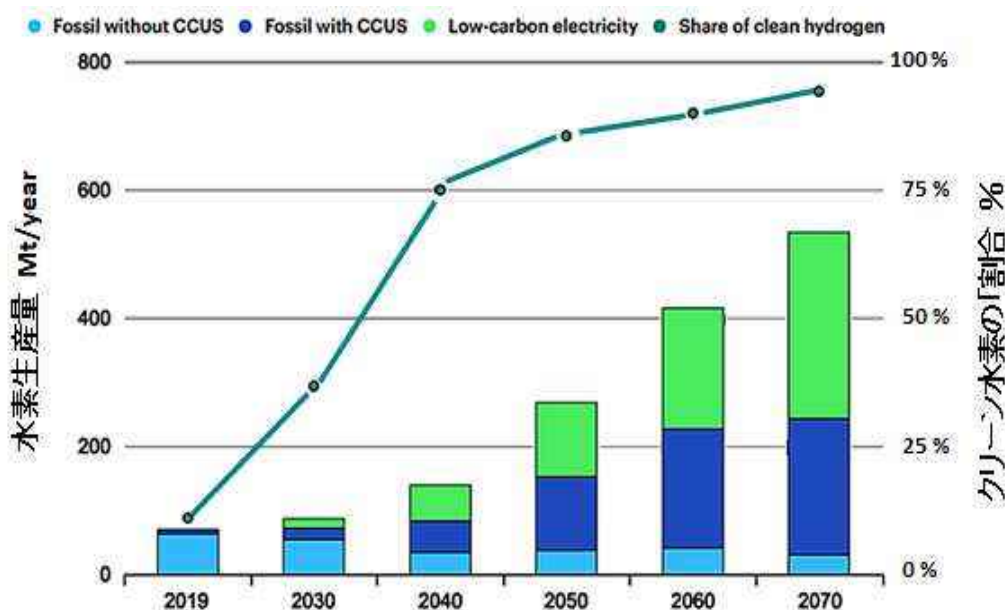


図 2.3-22 世界の水素生産量予測 (文献¹⁶⁹より作成)

2050 年の水素の生産量は 2019 年のおよそ 7 倍になるが、この増加した水素の用途は産業用ではなく、電力の水素やアンモニア貯蔵の為、また水素自動車や水素 FCV のために使われると想定されている。太陽光発電や風力発電は日変動¹⁷⁰や季節変動¹⁷¹が大きいいため、安定した電力を廉価で供給するためには電力を一次的に燃料として貯蔵し、必要ときに火力発電の燃料としてそれを燃焼させて電力に戻すことが検討されている。特に日変動の激しい太陽光発電の場合には、日中の余剰電力を用いて水素を製造し、電力エネルギーを水素として貯蔵することが電力のバッテリー貯蔵とともに必要になってくる。

さらにこの方式を発展させ、e-水素及び e-fuel によるエネルギー貯蔵を国家レベルのエ

¹⁶⁹ <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-production-in-the-sustainable-development-scenario-2019-2070> [2021.12.26 閲覧]

¹⁷⁰ A Policy Brief from the Policy Learning Platform on Low-carbon economy, Source: Improved Self-Consumption of Photovoltaic Electricity in Buildings, Rasmus Luthander, Uppsala University, https://www.researchgate.net/publication/302587113_Improved_Self-Consumption_of_Photovoltaic_Electricity_in_Buildings [2021.12.26 閲覧]

¹⁷¹ Thomas Klaus, Carla Vollmer, Kathrin Werner Harry Lehmann, Klaus Müschen, Energy target 2050: 100% renewable electricity supply, Federal Environment Agency Germany https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050_kurz.pdf [2021.12.26 閲覧]

エネルギー・ネットワークの中核に組み込む図 2.3-23 のようなエネルギー・ネットワーク¹⁷²が現在注目を集めている。このエネルギー・ネットワークではエネルギーの貯蔵の概念は導入されていないが、基本的には図 2.3-19 に示したように水素として貯蔵するネットワークである。

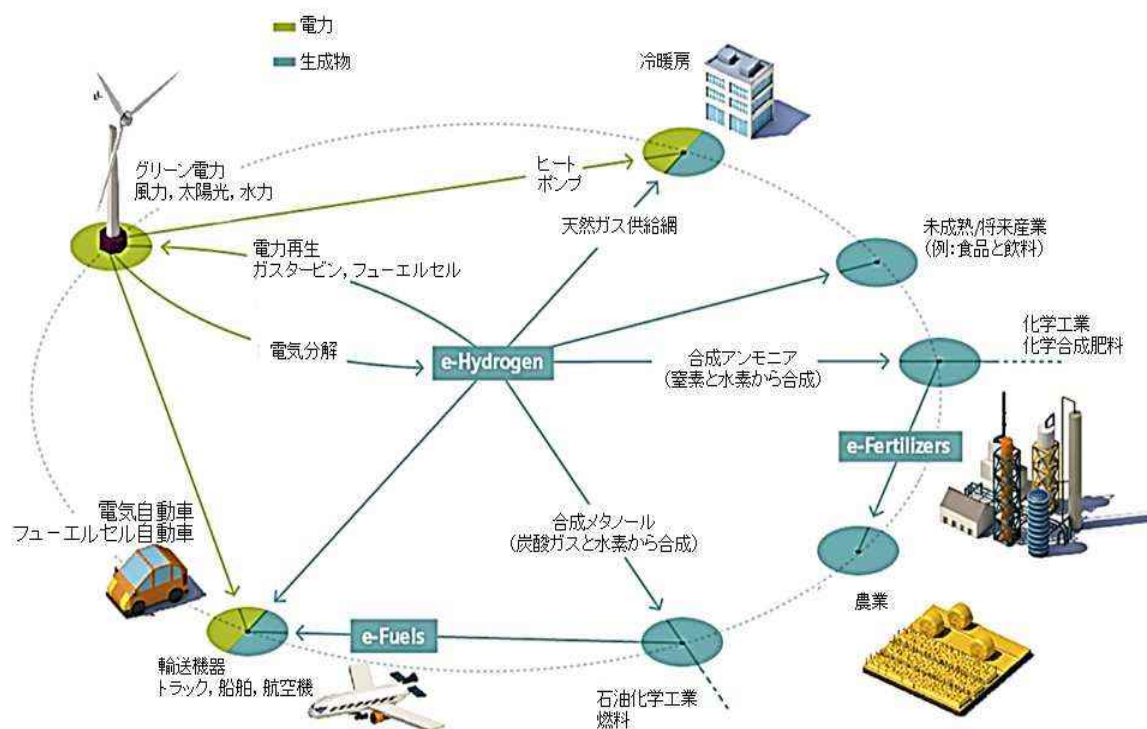


図 2.3-23 e-水素を中核にしたエネルギー・ネットワーク（文献¹⁷³より作成）

2.3.1.6 アンモニア

アンモニアは多くの合成化学製品の原料となるため、アンモニアを水素から合成する技術（Haber-Bosch 法）が 1900 年代初期に開発され、合成化学工業の基礎になっている。アンモニア合成に使われる水素は初期では石炭から製造されていたが、最近では天然ガスから作られている。世界での水素の生産の約半分は図 2.3-21 に示したようにアンモニア合成に使われている。

最近では CO₂ フリーの水素から合成するアンモニアが重要になり、図 2.3-24 に示したように、化石資源から水素を作る場合でも、CO₂ を分離して貯蔵（CCS: CO₂ capture and storage）するか、原油資源の採掘現場に戻して、原油採掘量の増加（EOR: enhanced oil recovery）に寄与させる方法がとられている。一方、再生可能エネルギーから電力をつくり、その電力による水の電気分解で水素を製造する方法、太陽光の熱を利用して高温で水から水素を

¹⁷² https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100422.html [2021.12.26 閲覧]

¹⁷³ White paper | “Power-to-X” Decarbonizing Energy with Green Hydrogen: Technology Available and Proven in Production Today | August 2019

分離 (IS : ion separation) する手法も取られている。アンモニア合成自体は、従前の Haber-Bosch 法であるが、原料である水素製造が CO₂ フリーであるため、合成されたアンモニアも CO₂ フリーのアンモニアである。これをカーボンフリーの燃料として扱い、再生可能エネルギー (電力) の保存とガスタービンやボイラを用いた発電設備による電力への再変換が最近検討されている。図 2.5-12 や表 2.5-8 で後述するようにアンモニアの発熱量は小さくかつ燃焼速度も低いので、単独の燃料として内燃機関で使用することは難しい。そのため、別の燃料と合わせて使用することで、混焼する総燃料中の水素成分の割合を高めて相対的に CO₂ の排出量を低減することが内燃機関では検討されている。

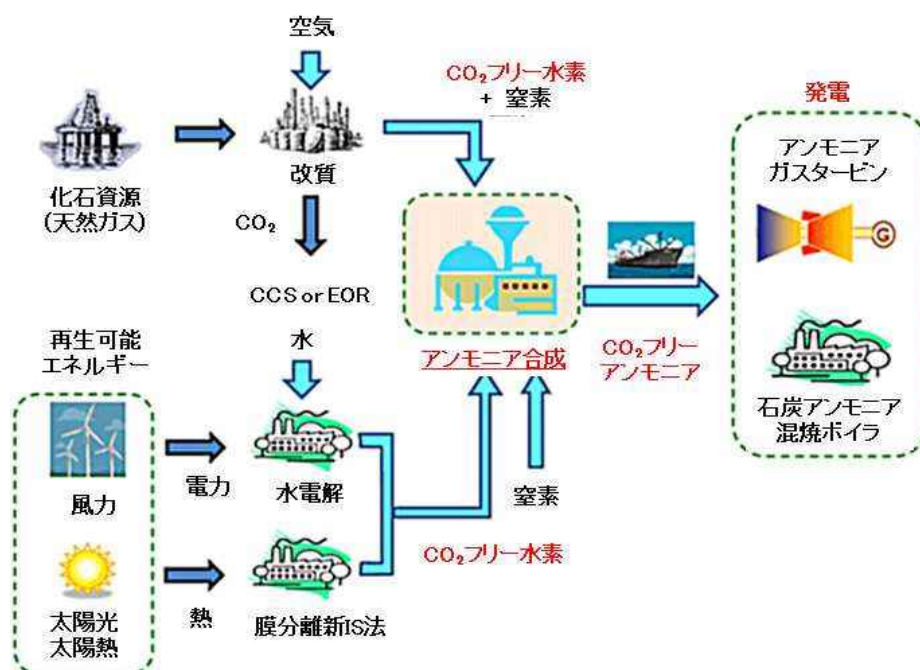


図 2.3-24 CO₂ フリー・アンモニアのサプライチェーン¹⁷⁴

2.3.2 CO₂回収

化石燃料を用いて発電する際に発生する CO₂ を除去することは、CO₂ のネットゼロ排出を達成するために、必要不可欠である。このため、新設の発電所では CCS (CO₂ capture and storage) により CO₂ の除去が行われるようになってきた。一方、CO₂ は炭素資源としても重要であるため、産業目的で CO₂ を化石資源またはその燃料ガスから回収することも行われてきた。表 2.3-6 は CO₂ の回収技術であり、燃焼ガスからの回収では、回収後の CO₂ の使用目的別に必要な純度によりさまざまな手法が用いられている。例えば物理吸着や膜分離によって得られる純度の高い CO₂ は産業用の原料として必要である。しかし、CO₂ の大気への放出量の低減自体を目的とする CO₂ 回収では純度よりも回収量の増加と低コスト化が重要になる。

¹⁷⁴ <https://www.jgc.com/jp/business/tech-innovation/environment/co2-free.html> [2021.12.26 閲覧]

表 2.3-6 CO₂の回収技術（文献¹⁷⁵より作成）

技術名	技術の概要
化学吸収	CO ₂ を選択的に溶解できるアルカリ性溶液との化学反応によって、CO ₂ を分離する。吸収されたCO ₂ を取り出す際には多量の蒸気が必要である。アルカリ性の吸収溶液として、アミンや炭酸カリ水溶液などが使われる。
物理吸収	高压下でCO ₂ を大量に溶解できる液体に接触させ、物理的に吸収させる。そのあと、減圧(加熱)してCO ₂ を回収する。
膜分離	多孔質の気体分離膜にガスを通し、孔径によるふるい効果や拡散速度の違いを利用してCO ₂ を分離する。
物理吸着	ガスを活性炭やゼオライトなどの吸着剤と接触させて、その微細孔にCO ₂ を物理化学的に吸着させ、圧力差や温度差を利用して脱着させる。
深冷分離	ガスを圧縮冷却後、蒸留操作により相分離でCO ₂ を分離する。

産業界における初期のCO₂回収は図2.3-25に示すように、1970年代の天然ガスの処理、肥料製造、化学品の製造の際の副次的な製品としてのCO₂製造である。石炭火力発電におけるCO₂の除去としてのCCSは現在計画中のものが多いが、そこでのCO₂の回収予定量は現状でのCO₂の生産量を上回っている。いいかえると産業用のCO₂の生産に用いられている従来のCO₂プラントとは異なり、CO₂を回収して地中に貯蔵すること自体が新規プラントの主目的であり、その規模は従来の産業用CO₂プラントより大規模になることである。

¹⁷⁵ <https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=27> [2021.12.26 閲覧]

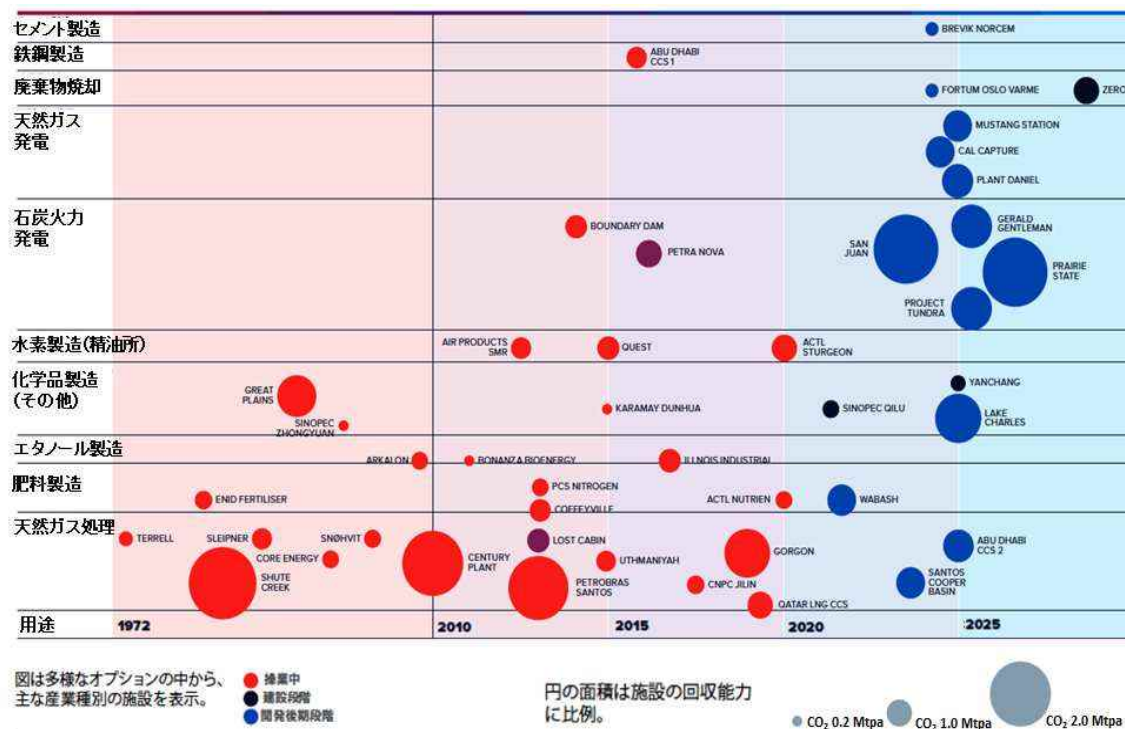


図 2.3-25 操作段階、建設段階、開発後期段階の商用 CCS 施設¹⁷⁶

図 2.3-25 に示された設備の内、2020 年以降の操業予定段階にある設備を表 2.3-7 に示す。ノルウェー、米国、中国、アラブ首長国連邦、オーストラリアが商業ベースのシステムを計画しているとしてリストアップされている。回収した CO₂ は地中に戻して石油増進回収（EOR : enhanced oil recovery）に役立てるほか、地中に永久貯蔵することで CO₂ を除去して得られるクリーンな電力開発を目的とすることも計画されている。計画中で最大のプラントは、Prairie State Generating Station Carbon Capture の燃焼後の CO₂ の地下貯蔵を目的としたプラントで、年間 6.0 Mt の回収能力を持っている。日本においては北海道苫小牧にて 2019 年度に 30 万トン（0.3 Mt）の CO₂ の地下圧入実証実験¹⁷⁷を行なっているが、実用プラントの建設には至っていない。なお 2025 年ごろまでに操業が予定されている設備は e-fuel の合成のような CO₂ を炭素資源として再利用するための設備ではないことも重要である。

176 世界の CCS の動向 2020 年版

<https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCS-Report-2020-Japanese.pdf>

[2021.12.26 閲覧]

177 <https://www.meti.go.jp/press/2019/11/20191125003/20191125003.html> [2021.12.26 閲覧]

表 2.3-7 建設段階、開発後期段階と開発早期段階の CCS 施設¹⁷⁶

施設名	状況	国名	操業日付	産業	回収能力 (Mtpa) (最大)	回収タイプ	貯留 タイプ
Brevik Norcem - Langskip	開発後期段階	ノルウェー	2023 ～2024	セメント製造	0.40	工業分離	純粋地層貯留
Fortum Oslo Varme - Langskip	開発後期段階	ノルウェー	2023 ～2024年	廃棄物発電	0.40	燃焼後回収	純粋地層貯留
The ZEROS Project	建設段階	米国	2020年代 後半	発電(廃棄物エネルギー)	1.50	酸素燃焼 回収	石油増進回収
Mustang Station of Golden Spread Electric Cooperative Carbon Capture	開発後期段階	米国	2020年代 半ば	発電	1.50	燃焼後回収	評価段階
Cal Capture	開発後期段階	米国	2024	発電	1.40	燃焼後回収	石油増進回収
Plant Daniel Carbon Capture	開発後期段階	米国	2020年代 半ば	発電	1.80	燃焼後回収	純粋地層貯留
San Juan Generating Station Carbon Capture	開発後期段階	米国	2023年	発電	6.00	燃焼後回収	石油増進回収
Gerald Gentleman Station Carbon Capture	開発後期段階	米国	2020年代 半ば	発電	3.80	燃焼後回収	評価段階
Project Tundra	開発後期段階	米国	2025-2026	発電	3.60	燃焼後回収	純粋地層貯留
Prairie State Generating Station Carbon Capture	開発後期段階	米国	2020年代 半ば	発電	6.00	燃焼後回収	純粋地層貯留
Yanchang Integrated Carbon Capture and Storage Demonstration	建設段階	中国	2020年代 に延期	化学品製造	0.41	工業分離	石油増進回収
Sinopec Qilu Petrochemical CCS	建設段階	中国	2020 ～2021	化学品製造	0.40	工業分離	石油増進回収
Lake Charles Methanol	開発後期段階	米国	2025	化学品製造	4.00	工業分離	純粋地層貯留
Wabash CO ₂ Sequestration	開発後期段階	アメリカ	2022年	肥料製造	1.75	工業分離	純粋地層貯留
Abu Dhabi CCS Phase 2:Natural gas processing plant	開発後期段階	アラブ首長 国連邦	2025	天然ガス処理	2.30	工業分離	石油増進回収
Santos Cooper Basin CCS Project	開発後期段階	オーストラ リア	2023年	天然ガス処理	1.70	工業分離	純粋地層貯留

CO₂はメタン、アルコール、炭化水素を合成する場合の炭素源として水素とともに重要である。化石燃料及びバイオマスの燃焼では CO₂ が生成されるが、これを大気中に放出することはGHGの放出になるので好ましくない。そのためCCS(CO₂ Capture and Storage) または CCUS (CO₂ Capture, Utilization and Storage) とされる CO₂ の回収が検討され、前述したように一部実用化されている。燃焼ガスからの CCS では CO₂ の濃度が高いため、炭酸カルシウムに直接吸収させる方法、固体に CO₂ を吸着させた後に分離する方法、高圧下での分離膜を利用する方法などがある。今後は合成燃料の原料としての CO₂ の需要が高まるので各種の産業において副生成物として CO₂ を商品化する動きが活発になると思われる。一方、カーボンニュートラルの合成燃料の生成の見地からは、化石燃料やバイオマスの燃焼と無関係の CO₂ の入手が必要である。

化石燃料の燃焼とは無関係な CO₂ を合成燃料の原料として入手するために、大気中の

CO₂ の直接回収 DAC (direct air capture) が提案されている。図 2.3-26 は空気中からの CO₂ 回収プロセスである。空気中の CO₂ 濃度は 410 ppm と低いため、一度水酸化ナトリウム (NaOH) の溶液に吸収させた後、炭酸カルシウムに変換してから分離する。なお CO₂ を吸収する最初のプロセスに水酸化ナトリウムのかわりに水酸化カリウムを使用するシステムもある。

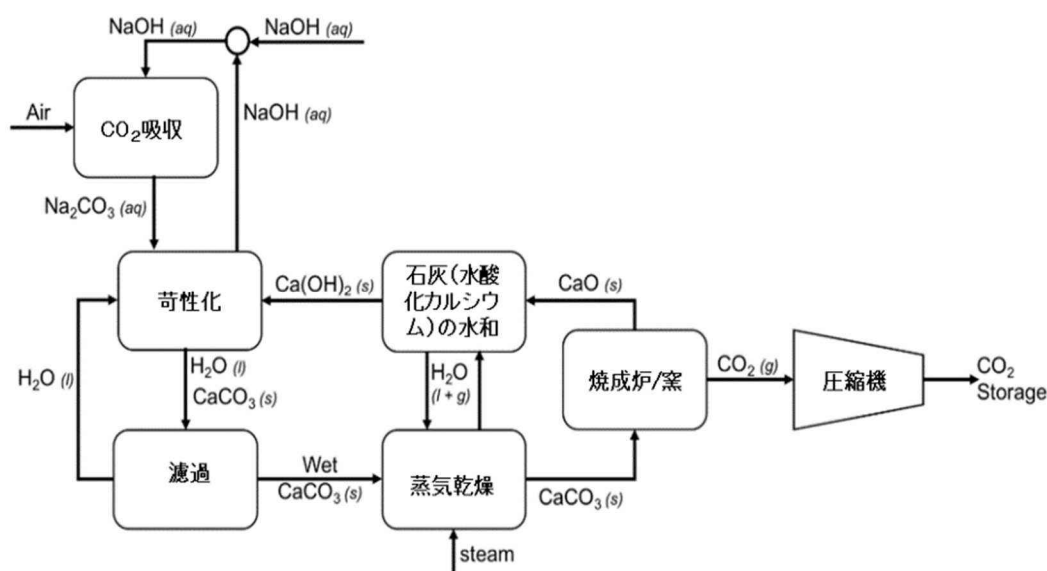


図 2.3-26 空気中からの CO₂ 回収プロセス (文献¹⁷⁸より作成)

現在稼働中及び計画中の DAC プラントを表 2.3-8 に示す。その中で最大のプラントは Carbon Engineering が米国のテキサスにて建設準備中の 1.0 Mt/年のプラント¹⁷⁹である。このプラントの構成は図 2.3-26 とほぼ同じであるが、空気中の二酸化炭素を水酸化カリウム溶液に吸収させて回収する。二酸化炭素を吸収し生成された炭酸カリウム溶液は、ペレット反応炉 (pellet reactor) で水酸化カリウムと炭酸カルシウムペレットとに分けられる。水酸化カリウムはエアーコンタクター (吸収装置) にリサイクルされ、炭酸カルシウムペレットは煅焼炉 (calciner) で加熱されて二酸化炭素が分離される。分離された二酸化炭素は不純物が取り除かれ、貯蔵設備に送られる。この DAC プロセスにより、大気中の二酸化炭素濃度の 4 分の 3 が回収できると想定されている。また同社は同規模のプラントをスコットランドでも計画している。表 2.3-8 のプラントの能力を CO₂ の回収プラントとしてみた場合には前述した表 2.3-7 の CCS プラントの 1/10 以下の規模のプラントが多く、全体的にパイロットプラントの域を脱していない。

苫小牧のプラントで年間 30 万トン (0.3 Mt) の CO₂ 回収の実証試験を行っているが、これを炭素換算すれば 8.2 万トン (30×(12/44)) となり、これはパラフィン系の e-fuel の

¹⁷⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/direct_air_capture [2021.12.26 閲覧]

¹⁷⁹ https://engineer.fabcross.jp/archeive/210810_direct-air-capture.html [2021.12.26 閲覧]

およそ 9.7 万トンに相当する炭素である。したがって苫小牧のプラントは大型タンカー 1 隻に相当する燃料に対応する規模であり、仮に国内の軽油やガソリンを e-fuel で賄うことにすると、苫小牧の百倍以上の規模の CO₂ 回収プラントが必要になる。なお 2020 年の日本の原油の年間輸入量は 14,900 万トンである。

表 2.3-8 DAC プラント (2020) ¹⁸⁰

Company Name	Partners	Plant Type	Status	Plant Location	CO2 Removal Capacity (metric tons/yr)	CO2 Market Application, if Commercial	Date of Operation
Climeworks	Several	14 Pilot and Commercial plants	Operational	Across Europe (ex., Switzerland, Italy, Iceland)	Total of 2,000	CDR services; renewable fuels & materials; food, beverage & agriculture	2015-2020
Climeworks	Carbfix, ON Power	Commercial plant	Under construction	Hellisheidi, Iceland	4,000	CDR services to corporations (e.g., Microsoft, Shopify, Audi) and individuals (permanent storage via mineralization)	Q2 2021
Carbon Engineering	None	Pilot plant	Operational	Squamish, British Columbia	350	Not commercial	2015
Carbon Engineering	None	Innovation Centre	Under construction	Squamish, British Columbia	1,500	Shopify and Virgin will pay CE for CO2 capture and storage	2021
Carbon Engineering	1PointFive, Oxy Low Carbon Ventures	Commercial plant	Pre-construction	Permian Basin, Texas	1,000,000	EOR and geologic storage (planned)	Mid-2020s (goal is 2024)
Global Thermostat	None	Pilot plant (DAC+ Flue)	Not currently operating	Menlo Park, California	10,000	Not commercial	2013
Global Thermostat	None	Pilot plant	Not currently operating	Huntsville, Alabama	4,000	Not commercial	2019
Global Thermostat	Large Corporates	Two commercial plants	Under construction	Sapulpa, Oklahoma	2,000 each	CO2 to fuels; CO2 as industrial gas	Late 2021

Note: The carbon dioxide capture capacity of Global Thermostat's second listed Menlo Park plant (carbon capture capacity of 10,000 metric tons per year) includes both direct air capture and flue gas capture.

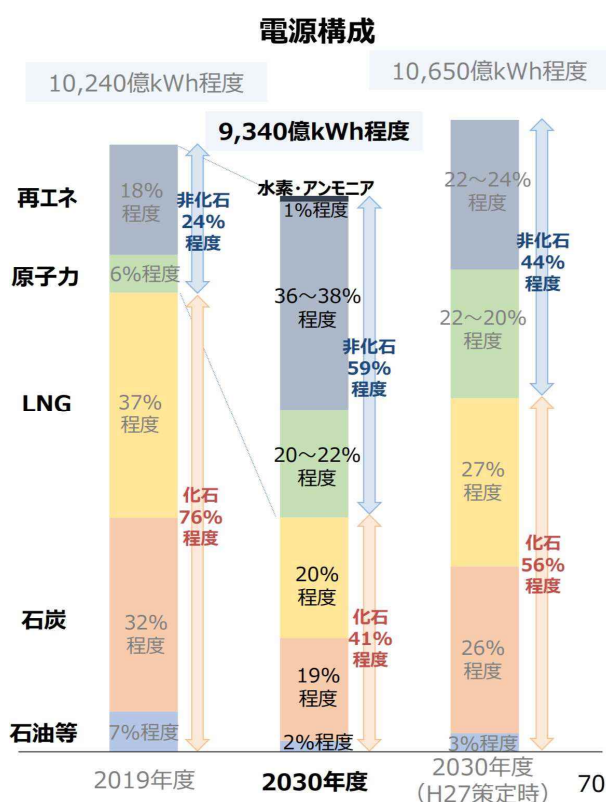
¹⁸⁰ The Commercial Case for Direct Air Capture, A White Paper by the Bipartisan Policy Center's Direct Air Capture Advisory Council, 2021, https://bipartisanpolicy.org/download/?file=/wp-content/uploads/2020/05/BPC_BusinessForDac2021_V7.pdf [2021.12.26 閲覧]

2.4 次世代燃料対応自動車の普及動向

2.4.1 現在及び将来の電源構成

次世代自動車、特に電動車の普及によるカーボンニュートラル化には、電源構成が大きな影響を及ぼす。本項では、日本のほか、電動車の普及が台数・シェアともに世界の中で先行して進んでいる米国、EU、中国について、現在及び将来の電源構成を示す。

日本の 2019 年度と 2030 年度の電源構成を図 2.4-1 に示す。2030 年度の見通しについて、2015 年（H27）時点の策定では非化石燃料由来が約 44%であったが、2021 年の第 6 次エネルギー基本計画で見直された見通しでは、約 59%とさらに低炭素になるとしている。

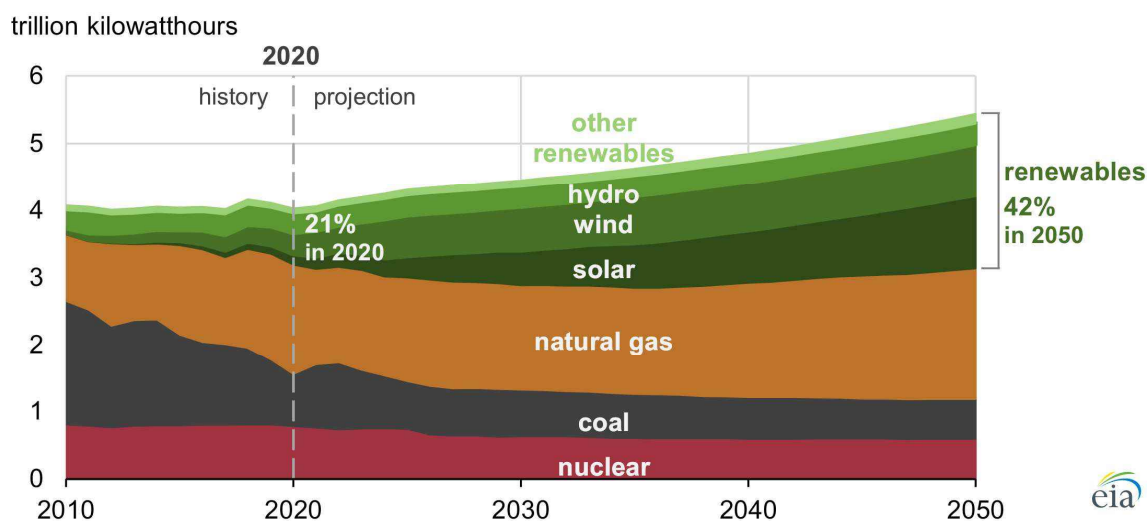


（出所）資源エネルギー庁、「2030 年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料）」（2021.10）¹⁸¹

図 2.4-1 日本の 2019 年度と 2030 年度の電源別発電量

米国の 2050 年までの電源構成の見通しを図 2.4-2 に示す。再生可能エネルギー発電の電力量と電源シェアともに増加する見通しである。

¹⁸¹ <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-3.pdf> [2022.3.6 閲覧]

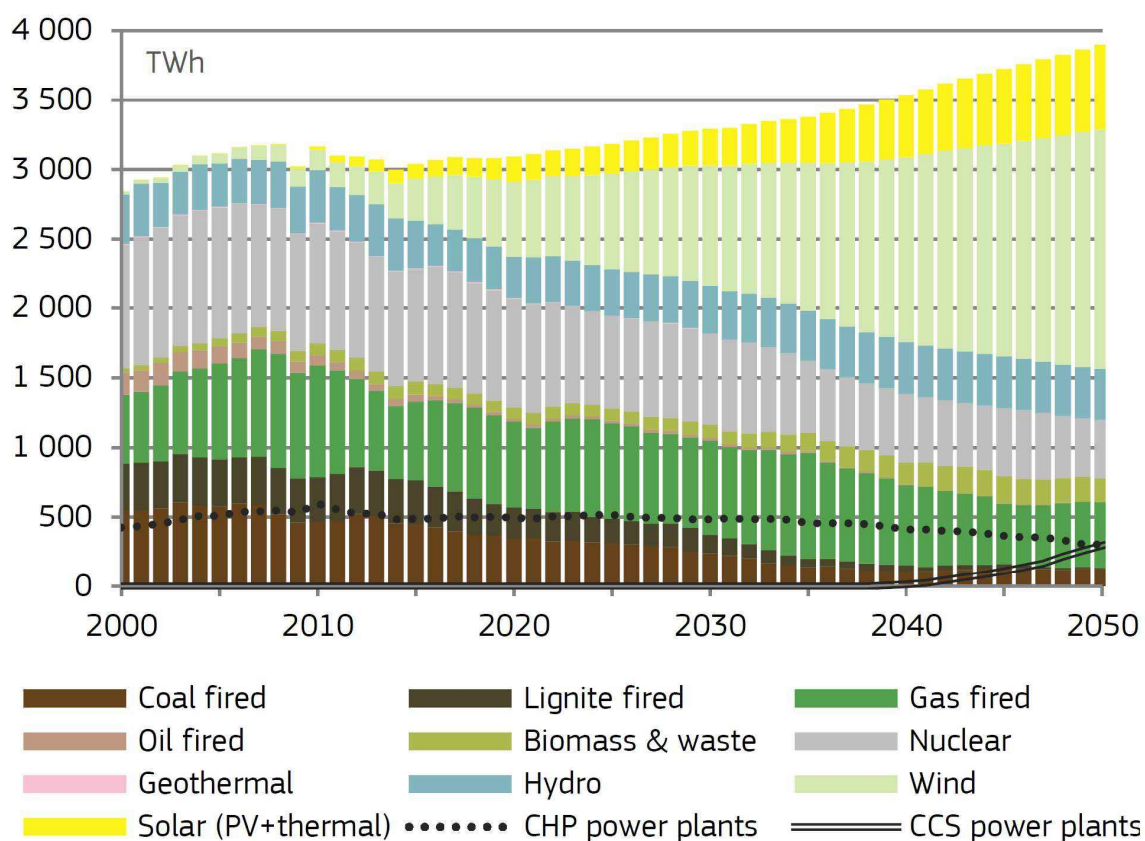


(出所) U.S. Energy Information Administration, "EIA projects renewables share of U.S. electricity generation mix will double by 2050" (2021.2.8) ¹⁸²

図 2.4-2 米国の 2050 年までの電源別発電量推移

EU（英国含む）の 2050 年までの電源構成の見通しを図 2.4-3 に示す。再生可能エネルギー発電の電力量と電源シェアともに増加する見通しである。

¹⁸² <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=46676> [2022.3.6 閲覧]

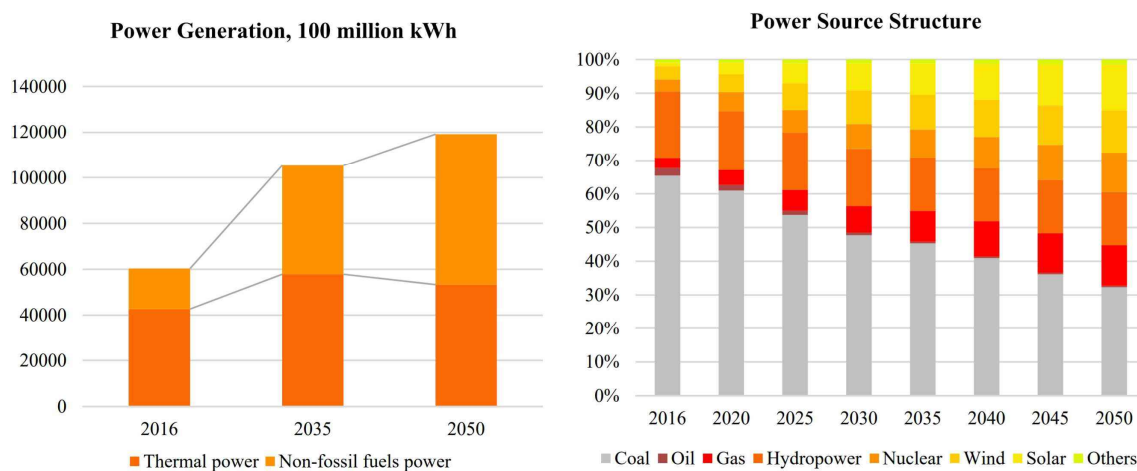


(注) CHP : Combined Heat and Power (熱電併給)、CCS : CO₂ Capture and Storage (CO₂ 回収・貯留)
 (出所) European Commission, Joint Research Centre, Rózsai, M., Wiesenthal, T., Mantzos, L., et al., The POTEnCIA central scenario : an EU energy outlook to 2050, Publications Office (2019) ¹⁸³

図 2.4-3 欧州の 2050 年までの電源別発電量推移

中国の 2050 年までの電源構成の見通しを図 2.4-4 に示す。再生可能エネルギー発電の電力量と電源シェアともに増加する見通しである。

¹⁸³ <https://data.europa.eu/doi/10.2760/78212> [2022.3.6 閲覧]



(出所) CNPC Economics & Technology Research Institute, "China Energy Outlook 2050" (2018.11.13) ¹⁸⁴

図 2.4-4 中国の 2050 年までの発電量と電源構成

2.4.2 次世代燃料対応自動車及び電動車の普及動向

2.4.2.1 次世代自動車の普及動向

IEA（国際エネルギー機関）の統計¹⁸⁵に基づき、日本、米国、欧州（EU のほか英国、ノルウェー、スイス、アイスランドを含む）、中国における電動車の販売動向を示す。ここで電動車とは、電気自動車（BEV）、プラグインハイブリッド車（PHEV）、燃料電池車（FCEV）である。また、車種は、乗用車、バン（車両総重量 3.5 t 以下/未満の小型商用車）、トラック（車両総重量 3.5 t 以上/超の大型商用車）である。

電動乗用車の販売台数推移を表 2.4-1 に、欧州（主要国及び普及が急速に進んでいる国）における推移を表 2.4-2 に示す。世界の電動乗用車の総販売台数は、2020 年は約 300 万台で、そのうち欧州は約 46% であるが、1 か国でみると中国が約 39% で突出している。

電動乗用車の販売台数シェア推移を図 2.4-5 に、欧州における推移を図 2.4-6 に示す。2020 年の世界平均シェアは 4.6% である。欧州と中国でのシェア拡大が大きく寄与している。

¹⁸⁴ <https://eneken.ieej.or.jp/data/8192.pdf> [2022.3.6 閲覧]

¹⁸⁵ IEA, "Global EV Outlook 2021" (2021.4)
<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021> [2022.3.6 閲覧]

表 2.4-1 電動乗用車の販売台数推移

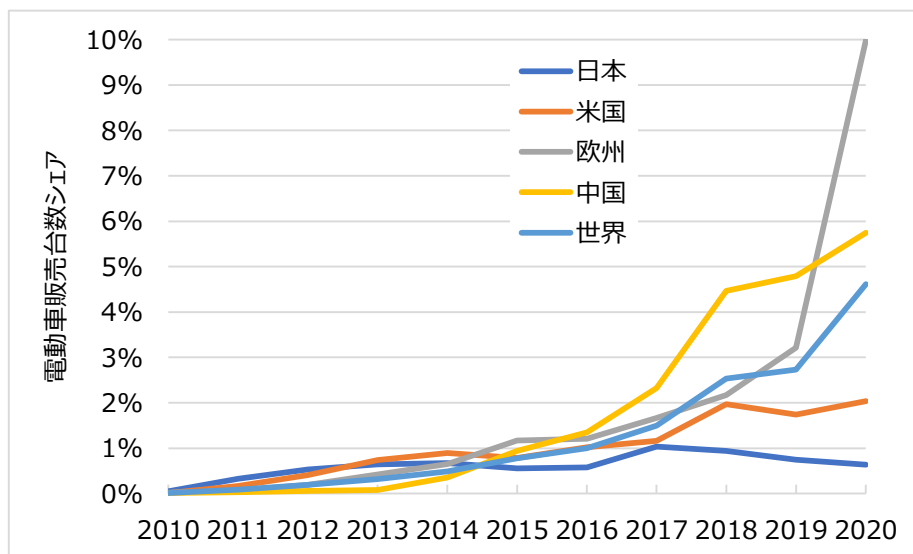
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
日本	BEV	2,442	12,607	13,469	14,756	16,109	10,465	15,300	18,100	26,530	21,300	14,600
	PHEV		15	10,968	14,122	16,178	14,188	9,390	36,000	23,220	17,600	14,700
	FCEV	2		1	4	7	388	1,055	850	610	673	800
	Total	2,444	12,622	24,438	28,882	32,294	25,041	25,745	54,950	50,360	39,573	30,100
米国	BEV	1,191	9,750	14,650	47,690	63,420	71,044	86,731	104,487	238,823	241,912	231,088
	PHEV		7,980	38,590	49,010	55,360	42,825	72,885	93,862	122,492	84,732	64,311
	FCEV					55	104	1,074	2,270	2,689	2,006	938
	Total	1,191	17,730	53,240	96,700	118,835	113,973	160,690	200,619	364,004	328,650	296,337
欧州	BEV	2,632	10,134	18,341	32,521	61,571	87,167	91,964	138,342	201,869	363,404	746,819
	PHEV	44	433	9,187	26,094	34,088	100,643	116,561	155,791	179,337	204,297	625,459
	FCEV	27	38	29	27	31	162	102	170	271	605	879
	Total	2,703	10,605	27,557	58,642	95,690	187,972	208,627	294,303	381,477	568,306	1,373,157
中国	BEV	1,090	4,750	9,640	14,610	48,906	146,719	257,000	468,000	815,870	834,197	931,291
	PHEV	340	320	260	730	24,265	60,663	79,000	111,000	265,219	226,106	228,291
	FCEV									1,527	2,737	1,182
	Total	1,430	5,070	9,900	15,340	73,172	207,382	336,000	579,000	1,082,616	1,063,040	1,160,764
世界	BEV	7,876	39,243	57,804	112,649	195,753	324,907	465,632	758,053	1,370,922	1,542,867	2,008,024
	PHEV	384	9,050	60,508	91,577	133,367	222,567	286,459	416,591	637,557	570,724	969,034
	FCEV	29	38	30	31	93	683	2,289	3,365	6,003	10,281	9,601
	Total	8,289	48,331	118,342	204,257	329,214	548,157	754,380	1,178,009	2,014,482	2,123,872	2,986,659

(出所) IEA, "Global EV Outlook 2021" (2021.4)¹⁸⁵ より作成

表 2.4-2 欧州における電動乗用車の販売台数推移

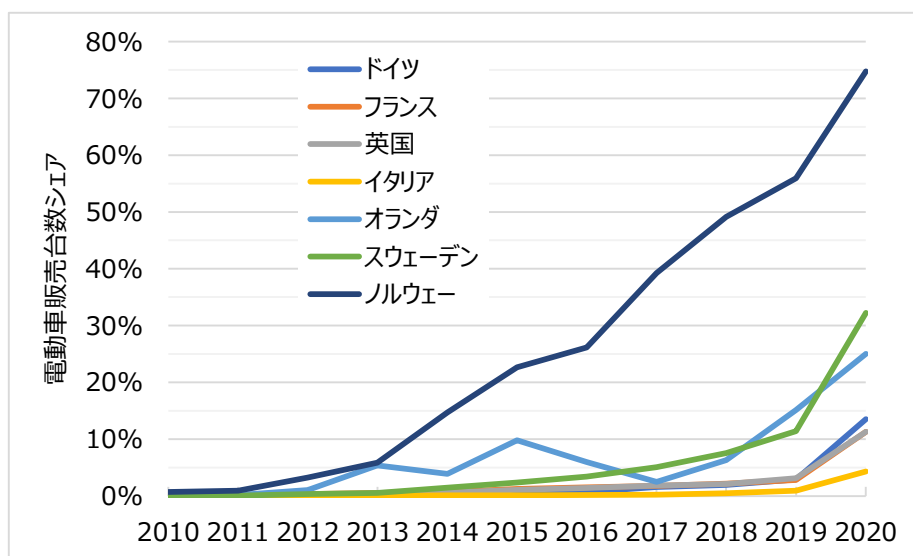
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
ドイツ	BEV	144	1,404	2,214	5,311	8,347	12,081	11,322	25,065	36,062	63,281	194,474
	PHEV		241	1,157	1,620	4,390	11,111	13,290	29,499	31,442	45,348	200,469
	FCEV	16	38	29	23	8	63		11	24	201	308
	Total	160	1,683	3,400	6,954	12,745	23,255	24,612	54,575	67,528	108,830	395,251
フランス	BEV	187	2,630	5,661	8,781	10,567	17,270	21,758	25,983	31,055	42,800	110,000
	PHEV		96	601	834	2,068	5,677	7,749	11,614	15,648	18,553	74,587
	FCEV				1	1	10	4	46	10	60	211
	Total	187	2,726	6,262	9,616	12,636	22,957	29,511	37,643	46,713	61,413	184,798
英国	BEV	255	1,211	1,705	2,679	6,812	10,095	10,509	13,551	15,743	38,357	108,329
	PHEV	21	7	988	1,073	7,931	19,241	27,403	33,701	34,619	36,630	67,717
	FCEV						4	8	35	36	68	89
	Total	276	1,218	2,693	3,752	14,743	29,340	37,920	47,287	50,398	75,055	176,135
イタリア	BEV	40	113	459	794	1,040	1,396	1,382	2,022	4,978	10,663	32,485
	PHEV				182	336	738	1,439	2,864	4,798	6,471	27,407
	FCEV					10	1			1	17	7
	Total	40	113	459	976	1,386	2,135	2,821	4,886	9,777	17,151	59,899
オランダ	BEV	120	858	786	2,251	2,664	2,543	4,054	9,194	24,434	62,004	72,299
	PHEV		17	4,331	20,164	12,425	41,226	18,619	1,130	3,536	5,518	15,960
	FCEV					2	21	7	5	13	156	146
	Total	120	875	5,117	22,415	15,091	43,790	22,680	10,329	27,983	67,678	88,405
スウェーデン	BEV	4	178	266	432	1,239	2,962	2,951	4,359	7,147	15,795	28,097
	PHEV			662	1,115	3,428	5,625	10,464	15,986	21,811	24,907	66,134
	FCEV				3		1	3	14		2	5
	Total	4	178	928	1,550	4,667	8,588	13,418	20,359	28,958	40,704	94,236
ノルウェー	BEV	905	1,229	4,122	7,882	19,771	25,779	24,222	33,080	46,143	60,345	76,804
	PHEV	2	1	333	323	1,677	7,947	20,666	29,232	26,546	19,295	28,905
	FCEV					4	9	20	30	45	29	16
	Total	907	1,230	4,455	8,205	21,452	33,735	44,908	62,342	72,734	79,669	105,725

(出所) IEA, "Global EV Outlook 2021" (2021.4)¹⁸⁵ より作成



(出所) IEA, "Global EV Outlook 2021" (2021.4)¹⁸⁵ より作成

図 2.4-5 電動乗用車の販売台数シェア推移



(出所) IEA, "Global EV Outlook 2021" (2021.4)¹⁸⁵ より作成

図 2.4-6 欧州における電動乗用車の販売台数シェア推移

電動バンの販売台数推移を表 2.4-3 に、欧州における推移を表 2.4-4 に示す。ここでも欧州と中国が市場拡大に寄与している。

表 2.4-3 電動バンの販売台数推移

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
日本	BEV		849	2,487	2,065	1,045	827	322	325	278	521	1,185
	PHEV											
	FCEV											
	Total		849	2,487	2,065	1,045	827	322	325	278	521	1,185
米国	BEV											
	PHEV											
	FCEV											
	Total											
欧州	BEV	1,474	2,489	7,064	7,288	8,602	9,909	12,555	15,984	24,354	26,651	36,101
	PHEV	0	0	3	3	7	205	169	73	33	281	1,129
	FCEV	2	0	0	1	4	55	101	26	110	0	19
	Total	1,476	2,489	7,067	7,292	8,613	10,169	12,825	16,083	24,497	26,932	37,249
中国	BEV	121	333	522	551	718	12,463	38,400	67,217	84,206	42,653	35,247
	PHEV											4,000
	FCEV											
	Total	121	333	522	551	718	12,463	38,400	67,217	84,206	42,653	39,247
世界	BEV	1,605	3,854	10,899	11,018	11,857	24,448	51,413	83,601	108,929	70,110	88,727
	PHEV			3	3	21	782	178	88	42	272	6,562
	FCEV	2			50	85	145	101	26	110		26
	Total	1,607	3,854	10,902	11,071	11,963	25,375	51,692	83,715	109,081	70,382	95,315

(出所) IEA, "Global EV Outlook 2021" (2021.4)¹⁸⁵ より作成

表 2.4-4 欧州における電動バンの販売台数推移

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
ドイツ	BEV	171	282	949	595	716	1,013	2,445	4,471	5,294	5,192	8,955
	PHEV				2		2					180
	FCEV	2										3
	Total	173	282	949	597	716	1,015	2,445	4,471	5,294	5,192	9,138
フランス	BEV	795	1,677	3,645	5,113	4,485	4,916	5,546	6,020	8,103	8,000	8,792
	PHEV						10	9	5		22	
	FCEV				1	4	53	99	25	92		2
	Total	795	1,677	3,645	5,114	4,489	4,979	5,654	6,050	8,195	8,022	8,794
英国	BEV	239	269	439	317	811	939	1,055	1,178	1,294	3,236	5,350
	PHEV					7	99	78	41		205	576
	FCEV											
	Total	239	269	439	317	818	1,038	1,133	1,219	1,294	3,441	5,926
イタリア	BEV	214	84	355	175	272	418	780	520	612	1,018	1,085
	PHEV			3	1				2			53
	FCEV											1
	Total	214	84	358	176	272	418	780	522	612	1,018	1,139
オランダ	BEV	39	72	336	175	589	202	168	507	1,012	1,297	1,640
	PHEV											33
	FCEV								1	2		12
	Total	39	72	336	175	589	202	168	508	1,014	1,297	1,685
スウェーデン	BEV		9	275	213	282	321	45	196	2,465	1,380	1,948
	PHEV						7				9	
	FCEV											
	Total		9	275	213	282	328	45	196	2,465	1,389	1,948
ノルウェー	BEV		1	4		555	712	700	940	1,890	1,908	2,571
	PHEV											30
	FCEV											
	Total		1	4		555	712	700	940	1,890	1,908	2,601

(出所) IEA, "Global EV Outlook 2021" (2021.4)¹⁸⁵ より作成

トラック（車両総重量 3.5 t 以上）については、2020 年の世界全体での BEV の販売台数が 7,409 台、PHEV が 28 台、FCEV が 33 台と、乗用車と比較して桁違いに台数が少なく殆ど普及していない。

2.4.2.2 次世代自動車普及に向けた取り組み

ここでは、次世代燃料対応自動車として FCEV、電動車として BEV 及び PHEV を対象に、それら車両の普及に向けた国や地域の取り組み状況を概観する。

(1) 日本

製造事業者等に対する政策として燃費規制がある¹⁸⁶。1979 年の省エネ法の制定以降、その導入初期から燃費規制は導入されており、数度の改正を経て現在に至る。2013 年の改正では、製造事業者等がそれぞれの技術的な特質に応じた選択と集中を柔軟に行うことで、全体として高い省エネ効果を期待できる企業別平均燃費基準方式（CAFE 方式）を採用することとなった。2020 年の改正では、BEV 及び PHEV も含む形で燃費基準が策定され、次世代自動車の販売拡大がより求められるようになった。

ユーザーに対する主な普及政策として、以下に例を挙げる^{187 188}。

- ・ クリーンエネルギー自動車導入事業費補助金
次世代自動車の購入に対する補助金。車両本体への補助のみならず、災害時の電力供給を可能とする外部給電器や BEV・PHV から施設へ放電（給電）ができる装置である V2H 充放電設備への導入を支援する。
- ・ 電気自動車・プラグインハイブリッド自動車の充電インフラ整備事業費補助金
BEV や PHEV の普及に向けて、充電インフラ整備の補助を行うもの。個人宅への設置は不可で、複数人が使用可能である設備が対象。
- ・ 燃料電池自動車の普及促進に向けた水素ステーション整備事業費補助金
FCEV の普及による早期の自立的な水素市場の確立のため、水素ステーション整備の補助を行うもの。
- ・ 自動車重量税の軽減措置（エコカー減税）
排出ガス性能及び燃費性能に優れた自動車に対して、それらの性能に応じて、自動車重量税を免税・軽減。2009 年度に創設されて以降、対象・要件や特例措置の内容が一定期間ごとに変遷（当初は自動車取得税も対象）。現在の適用期間は 2021 年 5 月 1 日から 2023 年 4 月 30 日。減税対象車について、適用期間中に新

¹⁸⁶ 国土交通省、「自動車燃費目標基準について」

https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000005.html [2022.3.6 閲覧]

¹⁸⁷ 次世代自動車振興センター、「中央省庁等の補助制度・税制上の優遇措置制度」

http://www.cev-pc.or.jp/local_supports/chuo.html [2022.3.6 閲覧]

¹⁸⁸ 国土交通省、「自動車関係税制について（エコカー減税、グリーン化特例等）」

https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr1_000028.html [2022.3.6 閲覧]

車新規登録等を行った場合に限り、特例措置が適用（1回限り）。BEV、PHEV、FCEVは免税。

- ・ 環境性能割での非課税

自動車取得税の代わりに導入された税。BEV、PHEV、FCEVは非課税。

- ・ 自動車税の軽減措置（グリーン化特例）

排出ガス性能及び燃費性能に優れた自動車に対して、それらの性能に応じて、自動車税・軽自動車税を軽減するとともに、新車新規登録等から一定年数を経過した自動車に対して自動車税・軽自動車税を重課。2001年度に創設されて以降、対象・要件や特例措置の内容が一定期間ごとに変遷。軽減に関し、現在の適用期間は2021年4月1日から2023年3月31日。適用期間中に新車新規登録等を行った場合に限り、当該年度の翌年度分について特例措置が適用。BEV、PHEV、FCEVを対象に概ね75%軽減。

(2) 米国

製造事業者等に対する政策として、1975年に企業平均燃費規制（Corporate Average Fuel Economy (CAFE) standards）が導入され、2009年よりGHG排出基準が追加された。運輸省道路交通安全局（NHTSA）及び環境保護庁（EPA）が所管する。なお、カリフォルニア州ではCAFEの適用は除外となっており、独自規制の実施が認められている。また、他州もカリフォルニア州規制を選択可能で、2022年3月時点で16州とワシントンDCが採用している¹⁸⁹。

カリフォルニア州独自の燃費規制である低排出車規則（Low Emission Vehicle Regulation）が導入された際、ZEV（Zero Emission Vehicle）に関する規定も盛り込まれた。ZEVとは、いかなる条件下でも走行時に大気汚染物質やGHG排出のない車両であり、具体的にはBEVとFCEVである。同州内で規定台数以上を販売するメーカーに対して、販売台数の一定比率以上をZEVとすることが義務づけられている¹⁹⁰。GHG排出規制と同様にZEV規制もカリフォルニア州以外で準拠する州があり、2022年3月時点で13州とワシントンDCが採用している¹⁸⁹。

ユーザーに対する連邦政府の主な普及政策として、以下に例を挙げる¹⁹¹。

¹⁸⁹ JETRO、「米環境保護庁、カリフォルニア州独自の自動車環境規制を再認」（2022.3.14）

<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/03/7ee131ccd6543412.html> [2022.3.16 閲覧]

¹⁹⁰ ZEV クレジットを取得できる車両はZEVのほかに、暫定ZEV（Transitional Zero-Emission Vehicles/TZEV）、近隣用電気自動車（Neighborhood Electric Vehicle/NEV）、レンジエクステンダーエンジン付き電気自動車（BEV with range extender/BEVx）である。TZEVは主にPHEVを指し、水素内燃エンジン車（Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle/HICE）も含まれる。BEVxが満たす要件は以下である。①充電による走行距離が75マイル（120.7km）以上。②補助動力装置（発電専用エンジン）を搭載し、これによって発生した電力での走行距離が、充電による走行距離を下回る。③バッテリー残量がSOC（State of Charge＝充電率）設定下限値以下になるまで、補助動力装置は作動してはならない。④カリフォルニア州大気資源局（CARB）による極超低公害車（SULEV）とエバゴ排出ゼロ基準に適合している。

¹⁹¹ Alternative Fuels Data Center, "Federal Laws and Incentives"

https://afdc.energy.gov/laws/fed_summary [2022.3.6 閲覧]

- PEV (BEV・PHEV) への税額控除 (Qualified Plug-In Electric Vehicle (PEV) Tax Credit)
電池（容量が 5 kWh 以上、充電に外部電源を使用）で駆動し、車体重量が最大 14,000 ポンドで、規定の排出基準を満たす自動車の購入に対する税額控除。控除額は最低 2,500 ドルで、電池容量や車体重量により最大で 7,500 ドルとなる。
- 相乗り専用レーンへの走行制限除外 (High Occupancy Vehicle (HOV) Lane Exemption)
一定の条件を満たす代替燃料車 (AFV) と PEV に関して、州内の相乗り専用レーン (HOV) を走行することを認めるもの¹⁹²。PEV は、外部電源からの充電が可能であり、少なくとも 4 kWh の容量がある電池を搭載する自動車と定義される。

なお、代替燃料充填設備（充電設備も含む）設置費用の税額控除（30,000 ドルを上限に 30%）や、FCEV 購入補助金（上限 8,000 ドル）が 2021 年 12 月 31 日までであったが、2022 年 3 月時点で復活は確認できていない。

州レベルでの普及政策として、カリフォルニア州の例をいくつか挙げる¹⁹³。

- PEV 及び ZEV への割り戻し (Plug-In Hybrid and Zero Emission Light-Duty Vehicle Rebates)
名称は、クリーン・ビークル・リベート・プロジェクト (CVRP)。適格車両の購入・リースに対してリベートを提供する。適格車両は、ZEV と、カリフォルニア州大気資源局 (ARB) が認可・認証した PHEV。割り戻し額は、FCEV が最大 4,500 ドル、BEV が最大 2,000 ドル、PHEV が最大 1,000 ドル、無排出の二輪車が最大 750 ドル。リベートは、州内の個人、経営者、政府機関が新車を購入・リースする場合に、先着順で提供。
- 集合住宅向けの EV 供給機器に関する方針 (Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE) Policies for Multi-Unit Dwellings)
共同住宅、コンドミニアム、共同開発などの集合住宅で、住宅所有者が自身の駐車スペースに EVSE や PEV 専用の使用時間 (TOU) メーターを取り付け・使用することを禁止・制限してはならないと規定。
- 代替燃料車駐車インセンティブプログラム (Alternative Fuel Vehicle (AFV) Parking Incentive Programs)
州一般サービス局 (DGS) が運営する駐車スペース 50 以上の公営駐車施設と、州運輸局 (DOT) が所有・運営するパーク＆ライド駐車場について、AFV の駐車を優遇するインセンティブ（優先スペース、料金割引、燃料インフラ等）を開発・実施。

¹⁹² 警官による路上での取締りや設置カメラでの撮影により違反者は摘発される。

¹⁹³ Alternative Fuels Data Center, "California Laws and Incentives"
https://afdc.energy.gov/laws/state_summary?state=ca [2022.3.6 閲覧]

(3) 欧州

欧州委員会は 2021 年 7 月、2030 年の気候目標の達成に向けての気候変動政策パッケージである Fit for 55 の政策提案の一環で、乗用車及びバン（小型商用車）に対する CO₂ 排出量規制の改正案を示した。この中で、2035 年の CO₂ 排出量削減目標を 100%減とすることを提案しており、その通りになれば新車市場の全量が BEV または FCEV になるとしている。

保有については、欧州委員会が 2020 年 12 月に発表した新たなモビリティ戦略 (Sustainable and Smart Mobility Strategy) の中で言及している。2030 年までに ZEV の運用台数を乗用車で少なくとも 3,000 万台、大型トラックで 8 万台とする目標を示した。また、2050 年目標として、ほぼ全ての自動車（乗用車、バン、バス、新型大型トラック）を ZEV とする目標を盛り込んだ。

ユーザーへの普及政策については、各国で車両やインフラへの補助金や優遇税制等を様々に行っている¹⁹⁴。例えば、欧州で突出して PEV の普及率が高いノルウェーでは、自動車購入時に課せられる VAT（付加価値税）25%が ZEV 及び PHEV は免除、CO₂ 排出量と NO_x 排出量に応じて課せられる輸入税が ZEV は免除、自動車保険として徴収される保有税が ZEV は免除などのインセンティブがある。新規ビルの駐車場について、最低 6% は ZEV や PHEV に割り当てる必要がある。

(4) 中国

製造事業者等に対する政策として、従来の企業平均燃費（Corporate Average Fuel Consumption : CAFC）規制に加え、2019 年、乗用車を対象に新エネルギー車（New Energy Vehicle : NEV）規制における NEV クレジット取得義務を開始した。NEV クレジットは BEV、PHEV、FCEV に付与される。NEV クレジット取得義務は毎年 2%ずつ課され 2023 年は 18%である。

ユーザーへの普及政策については、NEV に対する税制優遇や車両購入補助等がある。例えば、2021 年の購入補助金は、販売価格 30 万元（542 万円¹⁹⁵）以下の NEV を対象に付与され、航続距離に応じて補助額上限が異なる。航続距離 300 km～400 km の BEV は 1.3 万元（23.5 万円）（自家用車）と 1.62 万元（29.3 万円）（公共車¹⁹⁶）、400 km 以上の BEV は 1.8 万元（32.5 万円）（自家用車）と 2.25 万元（40.7 万円）（公共車）、EV モードで 50 km 以上走行の PHEV は、0.68 万元（12.3 万円）（自家用車）と 0.9 万元（16.3 万円）（公共車）の補助額上限である。また、大都市を中心に、ナンバープレート規制に関する優遇措置（NEV に対して優先的にナンバープレートを発給するものや、都心部への侵入禁止措置の除外）や、駐車料金の免除などが実施されている。

¹⁹⁴ European Alternative Fuels Observatory, "Incentives and Legislation"
<https://www.eafo.eu/countries/european-union/23640/incentives> [2022.3.6 閲覧]

¹⁹⁵ 1 元 = 18.07 円（2021 年末時点）

¹⁹⁶ 公共バス、タクシー、物流車、環境衛生車、空港・港湾・鉱山などの作業車等。

2.4.2.3 バイオ燃料普及に向けた取り組み

ここでは、2.1 節及び 2.2 節のバイオ燃料の箇所で取り上げた国や地域を対象に、特にバイオ液体燃料の普及に向けた取り組みを概観する。

(1) 日本

2021 年 10 月の第 6 次エネルギー基本計画において、2050 年カーボンニュートラルに向けた燃料分野での対応としてバイオ燃料も取り上げられ、国際的な導入動向等を踏まえ導入の在り方を引き続き検討していくとある。一方で現状は、エネルギー供給構造高度化法でバイオ燃料の導入目標量が定められているものの、ガソリン全消費量の 1%程度にエタノールが混入されているに過ぎず、バイオディーゼルについては、廃食油を利用して地域の地産地消的な取り組みが細々となされている程度である。ユーグレナ社による次世代バイオディーゼルの一般販売など象徴的な動きはあるが、現状のバイオ燃料消費量を増加させる大規模で具体的な取り組みは見られない。国の技術開発プロジェクトも、自動車用から航空機用のバイオジェットを主な対象にシフトしている状況である。

(2) 米国

米国はバイオ燃料大国であり、バイオエタノール生産量は世界 1 位でシェアは約 46%に達し、バイオディーゼルの生産量は EU の約半分にとどまるものの、国別では世界 1 位である。政策面での普及支援では、2005 年のエネルギー政策法 (Energy Policy Act of 2005) の中に、再生可能燃料基準 (Renewable Fuel Standard : RFS) を設け、輸送用燃料 (ガソリン、軽油、ジェット燃料など) に対してバイオ燃料の最低使用量 (化石燃料への混合比率) を石油精製業者に義務付けている。

また、バイオ燃料の技術開発を政策的にも強化している。例えばエネルギー省 (DOE) は、2016 年から「Co-Optima (Co-Optimization of Fuels & Engines)」と名付けたイニシアティブを実施している。バイオ由来新燃料など再生可能燃料の利用の最大化と高効率エンジンの組み合わせによる最適化が狙いである。2021 年 5 月には、9 つの国立研究所、大学、企業など 20 以上の組織が参画する 4 件のバイオ燃料研究に対し、DOE は新たに総額 100 万ドルを助成すると発表した¹⁹⁷。

(3) 欧州

EU では、2009 年より再生可能エネルギー指令 (Renewable energy Directive : RED I) (2009/28/EC) によって、2020 年までに輸送用燃料の 10%をバイオ燃料などの再生可能エネルギーで供給するよう求めてきた。2018 年 12 月に改正された RED II では、2030 年ま

¹⁹⁷ Biomass Magazine, "DOE funds 4 biofuel projects under Co-Optima initiative" (2021.5.10) <http://biomassmagazine.com/articles/17984/doe-funds-4-biofuel-projects-under-co-optima-initiative> [2022.3.6 閲覧]

でに輸送用燃料の 14%を再生可能エネルギーで供給する目標が定められている。また、食料由来のバイオ燃料の上限を 7%とすること、非可食原料由来である先進バイオ燃料を 3.5%とすることが合わせて求められている。

この改正内容の見直しは、欧州委員会が 2021 年 7 月に発表した Fit for 55 で提案された¹⁹⁸。バイオ燃料は、2030 年において高い再エネ比率を達成する上で最大の役割を果たし、運輸分野の最終エネルギーに占める割合は、17%が必要とされた。そのうち、従来型の食用作物由来バイオ燃料（RED II 26 条に規定）と廃棄物由来バイオ燃料（附属書 IX パート B に規定）には、それぞれ算入上限（7%と 1.7%）が設定されているため、最も高いシェアを占めるのは非食用作物由来の先進型バイオ燃料（附属書 IX パート A に規定）であり、その比率は、8～9%となっている。

（4）中国

中国政府はバイオマス原料の莫大なポテンシャルを背景に、バイオ燃料生産の拡大方針を掲げている。2017 年 9 月 13 日に、国家発展改革委員会（NDRC）、国家能源局（NEA）、金融省（Ministry of Finance）と 12 の省庁が輸送分野におけるエタノールの生産・販売を拡大する計画を発表した¹⁹⁹。これには、2020 年までにガソリン燃料にエタノールを 10%混合するという全国的な目標や、2025 年までに商業規模のセルロース系エタノールへの移行を提案するものが含まれている。ただし、商業規模のセルロース系エタノール生産の数値目標は発表されていない。

2018 年 8 月 22 日、李克強首相は国務院幹部会議でバイオエタノール燃料産業の全体的なレイアウトとして、「生産量の上限管理、生産者の限定、公正なアクセス、適度な穀物ベースの燃料エタノール生産を要求すると同時に、キャッサバ燃料エタノールプロジェクトの建設加速、セルロースの茎と鉄鋼産業からの排出ガスを利用した燃料エタノール工業化の実行」を提案した。

税制関連では、2017 年に税務局は、エタノール製品の輸入に適用される付加価値税（VAT）を 13%から 11%に引き下げた。使用済みの動植物油から作られたバイオディーゼルの輸出は 70%の VAT の払い戻しを受ける。適格生産者は、関連する製品の課税所得から 90%の割引を受けることができる。国内でのバイオディーゼルの使用を支援するために、税務当局は廃食用油（UCO）を用いて生産されたバイオディーゼル（B100）に対する消費税を免除する政策を発表した。一方、国産バイオディーゼルの需要を促すべく、2018 年 8 月 23 日、1～30%のバイオディーゼルを含む米国産石油（バイオディーゼル混合率上限 30%

¹⁹⁸ European Commission, "amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652" (2021)

https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/amendment-renewable-energy-directive-2030-climate-target-with-annexes_en.pdf [2022.3.6 閲覧]

¹⁹⁹ U.S. Department of Agriculture, "China Biofuels Annual 2020" (2020.7)
<https://www.fas.usda.gov/data/china-biofuels-annual-6> [2022.3.6 閲覧]

の石油、HS 27102000) に 25%の追加関税を課し、実質的に関税を 6%から 31%に引き上げた。

(5) ブラジル

ブラジルは米国に次ぐバイオ燃料大国であり、バイオエタノールの生産量は世界 2 位、バイオディーゼルの生産量は世界 3 位である。バイオ燃料政策は、GHG 削減のための中心的な役割として位置づけられている。RenovaBio Program が 2017 年 12 月 16 日に「国家バイオ燃料政策 (Política Nacional de Biocombustíveis)」として制定され²⁰⁰、国家石油ガスバイオ燃料公社 ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) にて実施されている。その目標は下記の通りである。

- ・ 国連気候変動枠組条約に基づく COP21 パリ協定におけるブラジル政府の目標達成に貢献すること。
- ・ ライフサイクルアセスメントのメカニズムに加え、バイオ燃料の生産・販売・使用におけるエネルギー効率及び GHG 排出量削減の適格化へ貢献すること。
- ・ 国内におけるバイオ燃料の生産及び利用の適切な拡大を促進し、継続的な燃料供給を強調すること。
- ・ 国内燃料市場において、様々なバイオ燃料の予見性へ貢献すること。

バイオエタノール、バイオディーゼルとも義務混合率が規定されており、現在はそれぞれ 27%、12%である。税制関連では、バイオ燃料及びバイオ燃料対応車 (エタノール車・フレックス車) に対し優遇税制が設けられている。

(6) インド

インドのバイオエタノール生産量は世界 4 位である。インド政府は、貿易赤字の最大の原因となっている石油輸入の削減を目的として、これまでも自動車用燃料でのエタノールの活用を奨励してきた。バイオ燃料に関する国家政策 2018 のなかで、エタノール混合プログラム (Ethanol Blending Program : EBP) により、より多くのエタノールをガソリンに混合するように奨励している。この政策の主な特徴は、バイオ燃料を「基本的なバイオ燃料」(例: 第 1 世代エタノールとバイオディーゼル) と「高度なバイオ燃料」(例: 第 2 世代エタノール、バイオ CNG、ドロップイン燃料) に分類して範囲を拡大することである。エタノール生産の原料には、小麦、破碎米、腐ったジャガイモなどの損傷食用穀物が含まれる。さらに、高度なバイオ燃料の研究開発と原料生産が推進されている。

エタノールについては従来、E20 を 2030 年までにインド全土に普及させる考え方を示していたが、導入時期を 2025 年に 5 年前倒しすることを 2020 年 12 月に決定した。さらに、2021 年 6 月には、インド政府の諮問機関である国家改造評議会 (NITI Aayog) が石油・天然ガス省 (MoPNG) と共同で、バイオ燃料の導入スケジュールに関する 2025 年ま

²⁰⁰ http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13576.htm [2022.3.6 閲覧]

でのロードマップ²⁰¹を発表した。このロードマップでは、2025～26 年度までを対象期間として、主に E20 の普及計画や、それに伴うエタノールの需要・供給見通しなどを示したが、現状は、E10 の全国供給を進めている途上である。

(7) インドネシア

インドネシアのバイオディーゼル生産量は世界 2 位で、1 位の米国に肩を並べる。インドネシアでは、2006 年に大統領令第 5 号として国家エネルギー政策が発表された。化石燃料への依存度を減らし、同国が多く産出するパーム油を原料とするバイオ燃料へと転換することが、バイオ燃料政策を推進する目的の 1 つとして挙げられている。また、国家バイオ燃料委員会が設立され、「バイオ燃料開発のロードマップ」が作成された。その後、エネルギー鉱物資源省令によって、バイオ燃料の導入目標（目標混合率）は部門ごとに設定された。導入目標はこれまでに何度か改訂され、その度に目標が前倒し（より高い目標が設定）されてきた。これらは単に目標ではなく、法的拘束力を持ったものである。直近では 2015 年 3 月にエネルギー鉱物資源省令（2015 年第 12 号）によって改訂され、2020 年 1 月以降は B30 の導入が義務づけられた²⁰²。ここでは、2025 年 1 月以降も B30 となっているが、政府は前倒しで B40 の導入を目指している。しかしながら、原料のパーム油の高騰が続いており、政府は 2021 年内の導入を断念し、事実上、無期延期されたとの見方が広がっている。

²⁰¹ NITI Aayog, Ministry of Petroleum and Natural Gas, "ROADMAP FOR ETHANOL BLENDING IN INDIA 2020-25" (2021.6)

https://www.niti.gov.in/sites/default/files/2021-06/EthanolBlendingInIndia_compressed.pdf [2022.3.6 閲覧]

²⁰² <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/143504/permen-esdm-no-12-tahun-2015> [2022.3.6 閲覧]

2.5 次世代燃料対応自動車の研究・技術開発動向

2.5.1 次世代燃料に対応する自動車技術

現在ガソリン及びディーゼル軽油として市場に流通している燃料は原油を精製したのち、それぞれの機関に適合する蒸留成分に分離し、さらに改質して得られた燃料である。改質の主目的はガソリンについてはオクタン価、軽油についてはセタン価の調整である。図 2.5-1 は自動車の燃料として用いるガソリンやディーゼル軽油に対応する次世代に係わる燃料を分類したものである。またその一部は既存燃料としてすでに実用化されている。ただし水素とアンモニアはガソリンやディーゼル軽油とは異質の次世代燃料であるため、ここでは除外してある。

ガソリンについては、バイオマス中の糖質や澱粉をエタノール発酵させて作るバイオエタノールがガソリンの代替燃料の主流である。しかし、化学反応を利用してメタノールやエタノールを生成することも行われている。合成ガソリンにはバイオ由来や化石燃料由来のエタノール、また化石燃料由来の DME (dimethyl ether) をベースにした合成ガソリンがある。また電力を用いて水素を製造し、これをベースにした e-ガソリンも検討されている。ここでバイオ合成ガソリンと e-ガソリン以外は含酸素の燃料である。

ディーゼル軽油については、バイオマス中の油分である脂肪酸トリグリセリドをエステル化したバイオエステル軽油が一般的であるが、脂肪酸トリグリセリドを水素化（水素化分解）して改質した HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) もある。合成ディーゼル軽油は、バイオマスを CO/CO₂ や H₂ を含む合成ガスに分解して、その後再合成した燃料である。代替軽油は、含酸素燃料であるメタノール/エタノール、エーテル系列の DME/OMEs (dimethyl ether / oxymethylene ethers) と、鎖状飽和炭化水素を主成分とするフィッシャー・トロプシュ合成軽油 (F-T 軽油) に区分される。

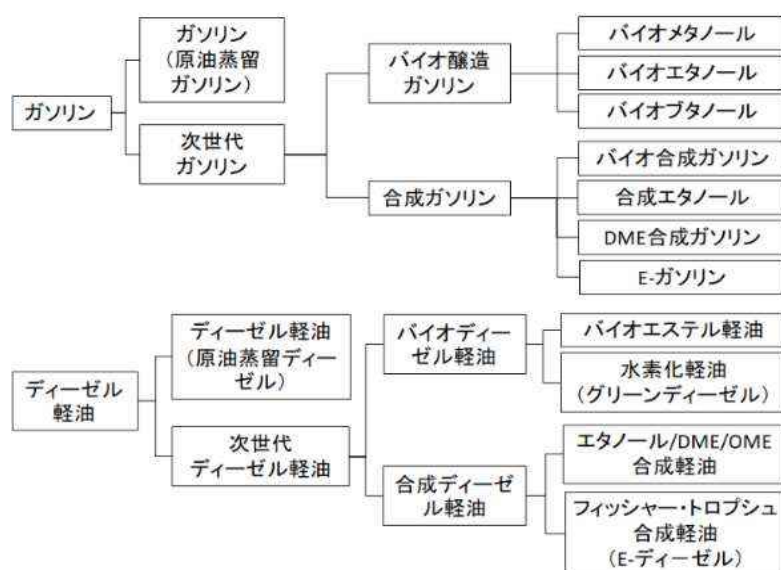


図 2.5-1 次世代燃料の分類

次世代燃料に対応した自動車技術は燃料の特性によって異なる。表 2.5-1 は互換燃料、混合燃料、非混合燃料の燃料区分に伴う自動車側の対応技術をまとめた結果である。互換燃料については、そのままガソリンやディーゼル軽油の代替となることができる燃料であり、互換が可能であることを確認することが自動車側の主たる対応になる。

混合燃料については、ガソリンやディーゼル軽油への混合割合が少ない場合は、混合後の燃料を互換燃料として使用することができるため、互換燃料として使用できる混合割合の拡大が大きな課題となる。この場合、機関の燃料供給系における最小限度の変更や装備の追加、またガソリン機関では点火時期、ディーゼル機関では噴射タイミングの設定などが運転条件の変更として必要になる。混合燃料の混合割合をさらに増加させ、もとの燃料の場合と異なる燃焼を行わせることも行われている。エタノールを 85vol% 程度まで混入させた E85-ガソリンがその具体的例であるが、この場合 FFV (Flex Fuel Vehicle) として独自の燃料供給機構と機関運転条件の設定が必要になる。

水素のように既存のガソリンやディーゼル軽油に混合させずに使用する燃料については、機関をあらたに設計する必要がある。しかし CNG 機関や LPG 機関で見られるように、燃料供給系の変更で済む場合もあり、現在では種々の方式が模索されている。例えば水素やアンモニアなどの非混合燃料を吸気管から吸入させて (図 2.5-4)、筒内噴射される既存のガソリンやディーゼル軽油と混焼させる方式などがある。

表 2.5-1 次世代燃料に対応する自動車の技術課題

		火花点火機関(ガソリン機関)	圧縮着火機関(ディーゼル機関)
互換燃料(drop-in fuel)		機関性能と排ガス特性の確認 燃料性状の変化に伴う未確認排ガス	機関性能と排ガス特性の確認 燃料性状の変化に伴う未確認排ガス 排ガス後処理装置の動作確認
混合燃料 (blend fuel)	互換可能混合	機関性能と排ガス特性の確認 混合割合の限界拡大	機関性能と排ガス特性の確認 混合割合の限界拡大
	互換不可能混合	燃料供給系の改良 点火時期の制御 燃焼室堆積物(CCD)と混合割合	燃料供給系の改良 高圧噴射と噴射タイミングの制御 燃焼室堆積物(CCD)と燃焼室形状 排ガス後処理対策
非混合燃料 (non-blend fuel)	複合燃料機関 (dual fuel engine)	複数燃料の供給方式 空燃比の制御 点火制御の対象混合気 過早着火とノッキングの防止	複数燃料の供給方式 (高圧噴射と吸気管噴射) 空燃比の制御 混合気形成過程の制御 着火制御の対象混合気
	単一燃料機関 (single fuel engine)	燃料供給系を含む機関の新設計	燃料供給系を含む機関の新設計

内燃機関では、機関の熱効率の向上と NO_x や Soot/PM などの有害排出物の低減が課題であり、次世代燃料を使用する自動車においても CO₂ の排出を実質的に抑制する熱効率の向上と排出ガス対策が重要になる。最近では後処理装置の開発が進み、自動車から排出される有害排出物の低減は燃料の種類に係わらず一定の水準以下に抑制することが可能であ

るが、機関の総合性能とすれば後処理装置に依存しない排出ガス削減対策が望まれている。図 2.5-2 は排出ガス対策のために用いられるディーゼル燃焼の当量比-燃焼温度のコンセプト (ϕ -T map) であり、燃焼過程における NO_x と Soot の生成領域と種々の燃焼方式を図示したものである。HCCI (homogeneous charge compression ignition : 均一予混合圧縮着火) 燃焼、PCCI (premixed charge compression ignition : 予混合圧縮着火) 燃焼、RCCI (reactivity controlled compression ignition 反応度制御圧縮着火) 燃焼の領域が、従来型のディーゼル燃焼や火花点火 (SI) 燃焼の領域とともに示してある。図中の破線の枠内が高効率かつ排出ガス低減を可能とする燃焼領域である。このコンセプトより NO_x と Soot の生成領域を避けるためには EGR による低温ディーゼル燃焼が、また最近のガソリン機関のように希薄燃焼を行わせることが燃焼技術として開発されつつある。次世代燃料の場合でも、これらの技術の適用が必要で、適用が可能であるが否か次世代燃料の評価の一つの基準となっている。

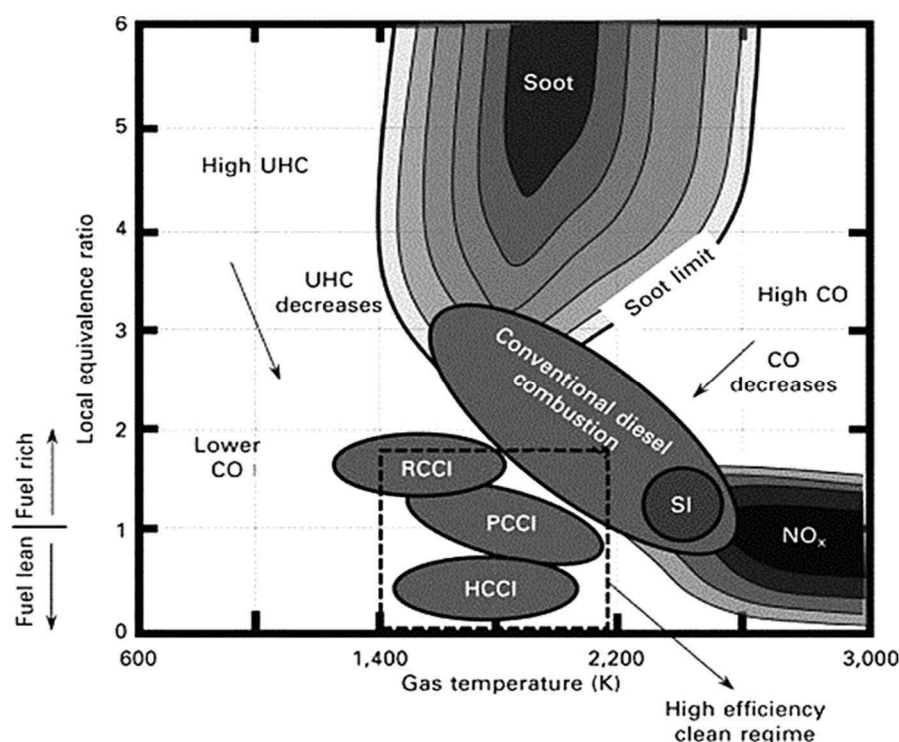


図 2.5-2 燃焼場における局所当量比と燃焼温度の関係(ϕ -T map)²⁰³

RCCI 燃焼は、複数の燃料を用いた場合のコンセプトであり、オクタン価が高く自己着火の起きにくい低反応性燃料とセタン価が高く自己着火の起きやすい高反応性燃料を組み合わせる方式である。この RCCI の着火と燃焼は、燃料の反応性と燃料供給位置や着火の

²⁰³ <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/reactivity-controlled-compression-ignition> [2021.12.28 閲覧]

方式の関係を示した図 2.5-3 において、ガソリン機関とディーゼル機関の間に位置するコンセプトになり両者の特徴を併せ持つ着火と燃焼が行われる。図 2.5-4 は RCCI 燃焼の具体的な方式で、吸気管から水素のように反応性が低く自着火しにくい燃料を供給し、その後ディーゼル軽油のように自着火しやすい燃料を筒内噴射して着火と低 NO_x/低 Soot 燃焼をさせるコンセプトである。次世代燃料の中で非混合燃料である水素やアンモニアを複合燃料機関の燃料として使用する場合では、この RCCI 方式が現実的な燃焼方式の一つとして挙げられる。



図 2.5-3 燃料の反応性をもとにした種々の着火方式のコンセプト（文献²⁰⁴より作成）

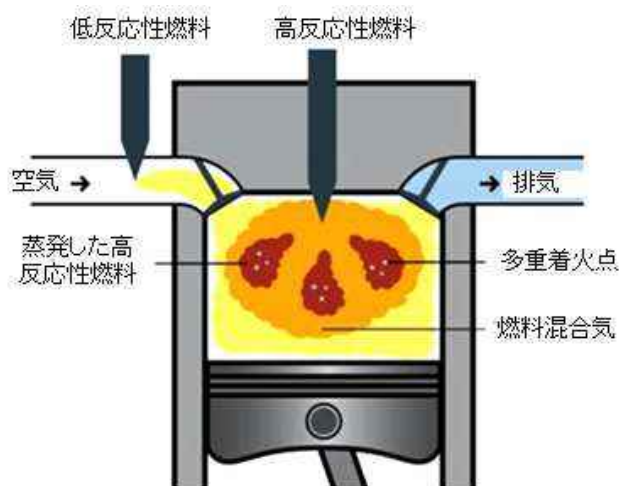


図 2.5-4 RCCI 燃焼のコンセプト（文献²⁰⁴より作成）

2.5.2 バイオエタノール

燃焼に関連するエタノールの特性値を表 2.5-2 に示す。ガソリンは種々の炭化水素の混合物である。一方、エタノールは分子構造が明確な単一化学物質であるため、物性値は確定しているが、それが内燃機関の燃焼の際に有利に作用するとは限らない。オクタン価が高いため、ガソリンのオクタン価向上に役立ち、また含酸素燃料であるため Soot の生成

²⁰⁴ SZAMREJ, G., KARCZEWSKI, M., CHOJNOWSKI, J. A review of technical solutions for RCCI engines. Combustion Engines. 0000, XXX(X), xx-xx. <https://doi.org/10.19206/CE-142551> [2021.12.28 閲覧]

を抑制することにも役立つ。一方エタノールは水溶性の液体であり、またエタノール自体が金属を腐食しゴムを劣化させるので、燃料供給系の部材には劣化防止対策が必要である。理論混合比の値がガソリンと大幅に異なるので、前述した E85 エタノール混合ガソリンの場合では、E85 に対応した混合比の設定が運転条件として必要になる。さらに低位発熱量の値が小さいため、機関出力の低下が問題となる。以上の観点から、日本国内ではエタノールを 3vol% まで混合することが、市場に流通するガソリンの規格として認められている。また、10% 混合ガソリン (E10) 対応車両専用であれば 10vol% までの混合も認められている。言い換えると、E10 対応ではない新規登録車や使用過程車に対して、3vol% 以下の割合でエタノールを混合したガソリンは、エタノールを混合していないガソリンの互換燃料としてすでに流通している。

表 2.5-2 エタノールの特性 (文献²⁰⁵より作成)

	ガソリン	エタノール
Chemical formula 化学式	C_nH_{2n+2} (n=4 ~ 12)	C_2H_5OH
分子量 (g/mol)	100 ~ 105	46.07
オクタン価	88 ~ 100	108
密度 (kg/Litter)	0.69 ~ 0.79	0.79
沸点 (°C)	27 ~ 225	78
凝固点 (°C)	-22.2	-96.1
引火点 (°C)	-43	13
自着火温度 (°C)	275	440
低位発熱量 (MJ/litter)	30 ~ 33	21.3
低位発熱量 (MJ/kg)	~ 43	26.95
蒸発潜熱 (kJ/kg)	289	854
可溶性(水)	非可溶	可溶
粘度 (mm ³ /s)	0.537	1.409
理論混合比 (質量)	1: 14.49	1: 8.87
可燃範囲(ガス容積比) (%)	1.4 ~ 7.6	4.3 ~ 19.0

エタノールの蒸発潜熱はガソリンの約 3 倍である。したがって、キャブレターまたは吸気管噴射方式の機関では、エタノールの混合割合が高いと低温時に吸気管において蒸発不足となるために始動が困難になる場合があり、燃料供給量の増量や加熱等の対策が必要になることもある。例えば E85 エタノール混合ガソリンでは相当問題になる。

ガソリンにエタノールを混合したエタノール混合ガソリンの蒸留特性は、混合割合によって変化する。エタノール混合ガソリンの蒸留曲線の測定例を図 2.5-5 に示す。エタノールの沸点は 78°C で、ガソリンの中間留分とほぼ同じである。混合割合が 6% までは蒸留曲

²⁰⁵ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6233010/> [2021.12.26 閲覧]

線上で目立った変化はないが、混合割合が増加すると中間成分の蒸発が低温で進行するようになる。したがって、吸気管噴射機関ではさほど問題にはならないが、筒内直接噴射機関では可燃混合気の形成過程にガソリンの場合と相違が生じる。これが機関のノッキング限界の拡大を生じさせるメリットはあるがその場合に THC の排出が増加する恐れがある。一般に、混合割合の高いエタノール混合ガソリンを使用する場合には空気過剰率や点火タイミングの変更が必要になる。

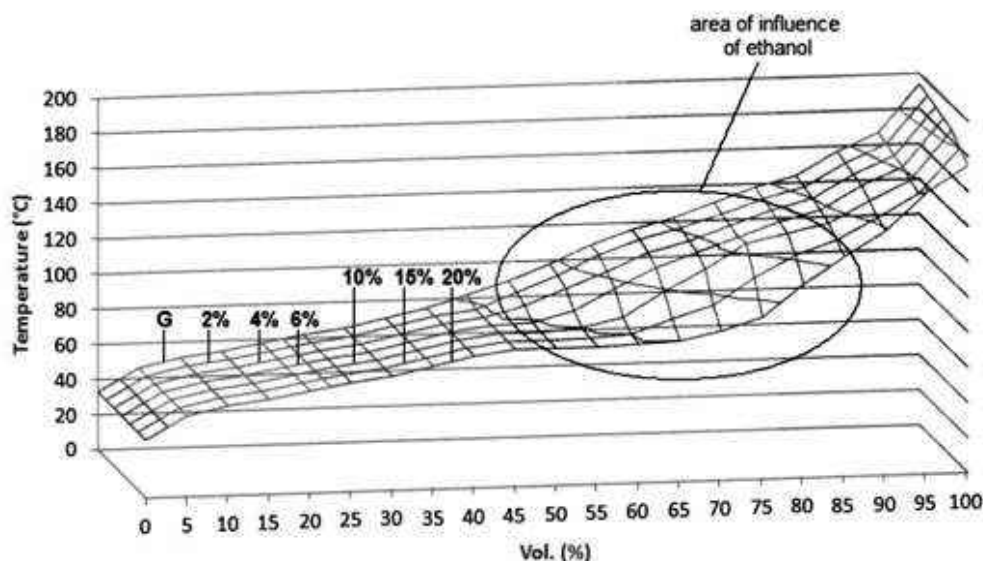
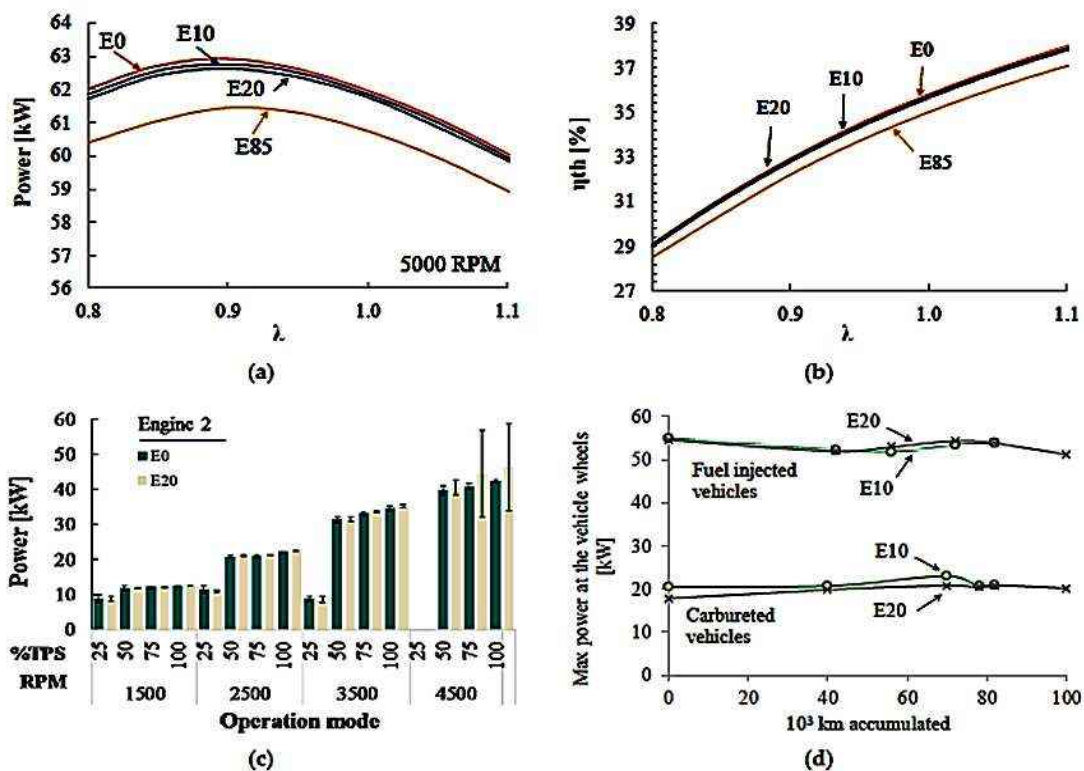


図 2.5-5 ガソリン及びエタノール混合ガソリンの ASTM 蒸留曲線²⁰⁶

エタノール混合ガソリンと機関性能の関係を図 2.5-6 に示す。(a) と (b) より、機関性能は E0 (ガソリン)、と E10/E20 (エタノールの 10/20% 混合) では大きな相違はないが、E20 では若干出力が低下する。また E85 では出力と熱効率の両方が明らかに低下する。また (c) の結果から、部分負荷の運転状態においても E20 の出力低下傾向に変化はない。供試機関は直接噴射式のガソリン機関であり、エタノールの混合に伴う理論混合比の変化に対応した運転制御を行っているが、エタノールの低位発熱量が低いことが影響した結果とみられる。(d) は気化器式の機関との比較であるが、この場合には機関出力は低下するものの、走行距離の影響は直接噴射機関より気化器式機関の方が少ない。今後の自動車用ガソリン機関では、過給と筒内直接噴射が基本なり、またエタノール混合によってオクタン価の向上も多少期待できるため、エタノール混合による機関出力の低下は技術的に解決可能と思われる。

²⁰⁶ V. Hönig1, M. Orsák, M. Pexa and Z. Linhart, The distillation characteristics of automotive gasoline containing biobutanol, bioethanol and the influence of the oxygenates, Agronomy Research 13(2), pp.558–567, 2015.



(注 1) (a) 圧縮比と機関出力 (5,000 rpm)、(b) 圧縮比と熱効率、(c) 負荷 (TPS : Throttle Position Sensor) と出力、(d) キャブレター式機関との比較 (走行キロによる車両出力の変化)
 (注 2) 1.597 L 直接噴射機関、圧縮比 9.4、Chevy GM Z16SE

図 2.5-6 エタノール混合ガソリンと機関性能²⁰⁷

エタノール自体は安定な化学物質であるが、含酸素の燃料であり、保管中に生じる OH 基により、ガソリン中の炭化水素を部分酸化して、高分子の炭素状堆積物を生じる場合がある。またバイオエタノールは醸造で得られる燃料であり、ガソリンのように高温に加熱した後に冷却して得られた燃料ではない。ガソリンは、蒸留塔にてガソリン成分の沸点より高に高温である 400°C 近辺の温度に加熱してすべて蒸発させ、その温度で熱分解する成分をすべて熱分解させた後、冷却して低沸点の炭化水素を抽出した燃料である。その結果、蒸留して得られたガソリンは 400°C 以下では基本的に安定であるが、バイオエタノール中の不純物には 400°C 以下で不安定な物質も含まれている。バイオエタノールを蒸留して精製する場合もあるが (図 2.3-5)、発酵時に含まれている水との分離が主目的であるため、100°C 以下で蒸留する場合が多い。したがってバイオエタノールは高温加熱を経た蒸留油ではないのでミネラル等の含有量もガソリンに比べて多い。その結果バイオエタノール

²⁰⁷ Juan E. Tibaquirá (Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia), José I. Huertas, Sebastián Ospina, Luis F. Quirama and José E. Niño, The Effect of Using Ethanol-Gasoline Blends on the Mechanical, Energy and Environmental Performance of In-Use Vehicles, Energies 2018, 11, 221; doi:10.3390/en1101022

ルの燃焼では、内燃機関の給排気バルブや燃焼室内への堆積物が問題になる場合²⁰⁸がある。また前述した（d）の場合の様に走行距離の増加に伴う出力の低下も問題となるが、堆積物が排出ガスの悪化や出力の低下を引き起こしていると推定されている。そこで多くの国でガソリンに混合して使用できるエタノールについて3%前後の規制を設けている（互換燃料として使用する場合の混合割合の上限）。

表 2.5-3 はエタノール混合ガソリン（E85）に起因するバルブと燃焼室堆積物（100 時間運転）の関係を示した結果であり、吸気バルブや燃焼室壁面の堆積物が相当な量になっていることを示している。堆積物を低減させるための添加剤（DCA : deposit control additive）の開発が現在も行われている。

表 2.5-3 エタノール混合ガソリン（E85）に起因するバルブと燃焼室堆積物（100 時間運転）の低減のための添加剤の開発²⁰⁹

Fuel/Deposit Control Additives	Inlet Valve Deposits [mg/Valve]	Combustion Chamber Deposits [mg]
15% (v/v) Commercial petrol (RON 95) 85% (v/v) Ethanol	59	2163
Base fuel + 85% (v/v) Ethanol	30	426
Base fuel + 85% (v/v) Ethanol + DCA X1	6	2050
Base fuel + 85% (v/v) Ethanol + DCA Y1	20	807

2.5.3 バイオディーゼル

ディーゼル軽油、FAME、HVO、及び GTL 軽油の代表的な燃料特性を表 2.5-4 に示す。いずれの燃料も種々の炭化水素の混合物であり、成分が確定しているわけでないので、特性値は平均的な値を表している。FAME として掲載している菜種油エステル(rapeseed methyl ester) は代表的なバイオエステルであり、セタン価はディーゼル軽油と同等であるが、動粘度が高いこと、低沸点成分を含まないこと、含酸素燃料であり発熱量が低いこと、保管安定性が劣ることに燃料としての問題がある。

²⁰⁸ https://www.acea.be/uploads/publications/WWFC_19_gasoline_diesel.pdf [2021.12.26 閲覧]

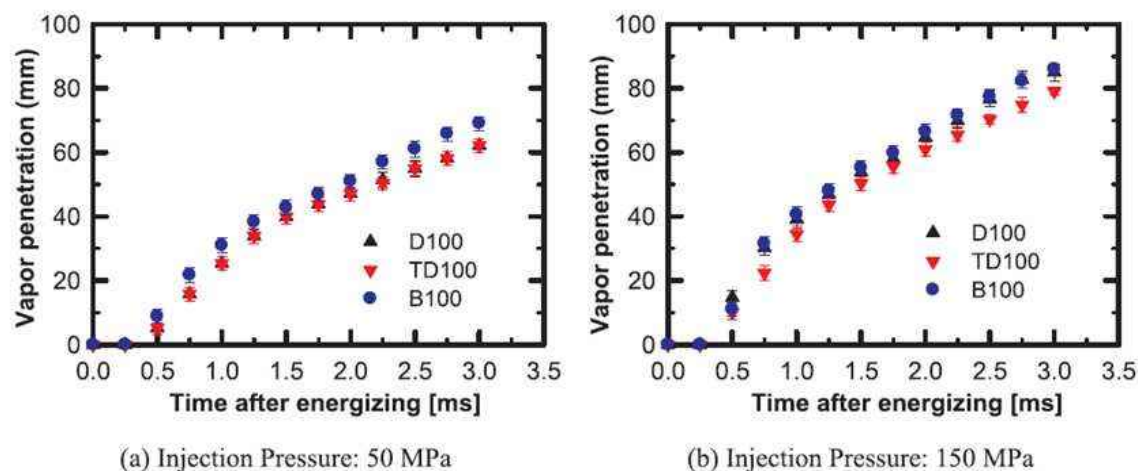
²⁰⁹ Zbigniew Stępień, Grażyna Żak, Jarosław Markowski and Michał Wojtasik, Investigation into the Impact of the Composition of Ethanol Fuel Deposit Control Additives on Their Effectiveness, *Energies* 2021, 14, 604. <https://doi.org/10.3390/en14030604> [2021.12.26 閲覧]

表 2.5-4 ディーゼル軽油、FAME、HVO、GTL の燃料特性（文献²¹⁰より作成）

	EN590(欧州, 夏用 ディーゼル軽油)	FAME (RME) (菜種油エステル)	HVO (水素化バイオ軽油)	GTL (F-Tディーゼル軽油)
密度 kg/m ³ (15°C)	≈ 835	≈ 885	775~785	770~785
動粘度 mm ² /s or cSt (40°C)	≈ 3.5	≈ 4.5	2.9~3.5	3.2~4.5
セタン価	≈ 53	≈ 51	≈ 80~99	≈ 73~81
蒸留範囲(沸点範囲) °C	≈ 180~360	≈ 350~370	≈ 190~320	≈ 190~330
曇点 °C	≈ -5	≈ -5	-25~-5	-25~-0
低位発熱量 MJ/kg	≈ 42.7	≈ 37.5	≈ 44	≈ 43
低位発熱量 MJ/L	≈ 35.7	≈ 33.2	≈ 34.5	≈ 34
総芳香族 wt% (欧州基準)	≈ 30	0	0	0
多環芳香族 wt%	≈ 4	0	0	0
含有酸素 wt%	0	≈ 11	0	0
含有硫黄 wt%	<10	<10	<10	<10
潤滑性(HFRR) μm (60°C)	<460 (with lubricity additive)	<460	<460 (with lubricity additive)	<460 (with lubricity additive)
保管安定性	良好	問題有り	良好	良好

バイオエステル燃料がディーゼル機関で問題となるのは、高粘度燃料であるためディーゼル噴霧として燃焼室内に供給する場合に燃料分散が良好にならないことである。図2.5-7は急速圧縮装置を用いてディーゼル機関を想定した高圧高温（5.065 MPa and 724 K）雰囲気下で燃料蒸気の分散を調べた結果である。バイオエステル（B100）の燃料蒸気の分散が良好でないのは（到達距離が伸びることは混合不良で混合気の分散角が狭いことを意味している）、バイオエステルがエステル化により低粘度にしてもディーゼル軽油に比べて高粘度でかつ沸点が高いためである。また高粘度であるため、燃料噴霧形成時の微粒化特性が悪いことも明らかになっている。このようなバイオエステル燃料の欠点を補う方法として、噴射装置の改良、高噴射圧化、燃焼室壁面との干渉を防ぐための燃焼室形状の変更などが行われ、ディーゼル軽油へのバイオエステルの混合割合が低い場合であれば支障がない状態になることが実験的に明らかになっている。

²¹⁰ Seppo Mikkonen (Neste), Second-generation renewable diesel offers advantages, Hydrocarbon Processing, 87, 2, pp.63-66, 2008.



(注) D100 : ディーゼル軽油 ($C_{15}H_{32}$ 、動粘度 $4.0 \text{ mm}^2/\text{s}$)、
 TD100 : テトラデカン ($C_{14}H_{30}$ 、動粘度 $2.8 \text{ mm}^2/\text{s}$)、
 B100 : オレイン酸メチルエステル (疑似バイオ軽油 $C_{19}H_{36}O_2$ 、動粘度 $5.9 \text{ mm}^2/\text{s}$)

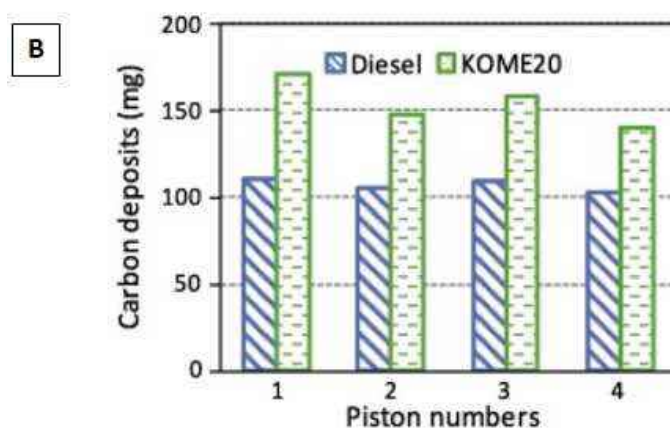
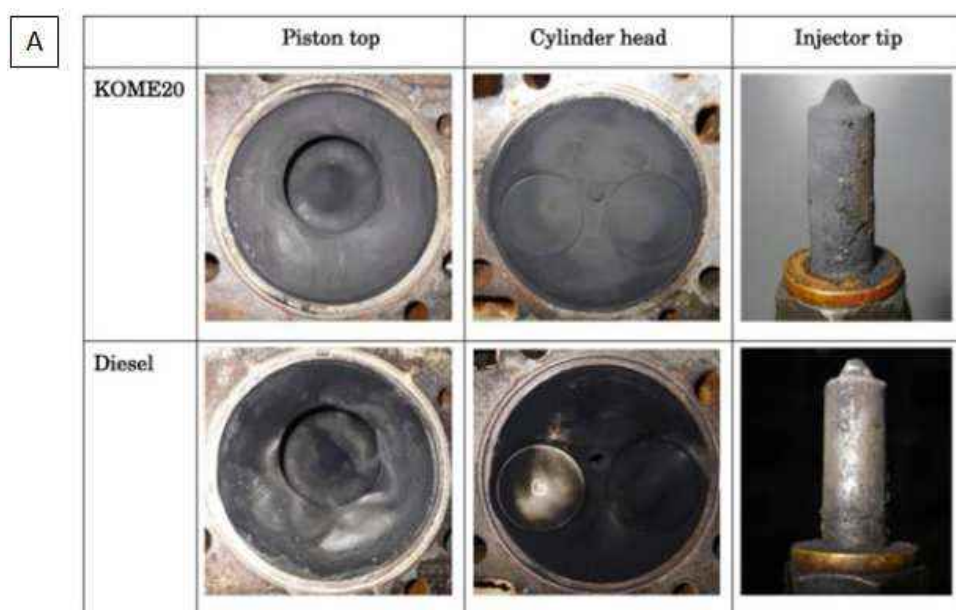
図 2.5-7 急速圧縮装置 (5.065 MPa、724 K) を用いた高圧、高温下におけるディーゼル蒸発噴霧の到達距離の測定²¹¹

バイオエステルについては、炭素状堆積物への対処が機関運用上の対処として問題になる。図 2.5-8 は実際の小型ディーゼル機関で 250 時間運転を行った後のピストン頂部、シリンダーヘッド、インジェクターの堆積物の状況である。燃料にはディーゼル軽油とディーゼル軽油に KOME (karanja oil methyl ester) を 20% 混合した混合燃料を使用している。燃焼室壁面への堆積は HC 排出物の増加を招きやすく、またインジェクター先端への付着は、噴霧特性の悪化を招いて出力低下や PM を含む有害排出物の増加を引き起こすので避けるべきである。この問題に対する本質的な解決策はなく、堆積物の生じにくい燃焼室形状への機関変更と長時間の低負荷高速運転のような堆積物の生じやすい運転条件をできるだけ避けることが推奨されている。

なお、堆積物の増加の恐れがあるため、WWFC (6th Worldwide Fuel Charter)²¹²では今後バイオエステルの混合を認めないことを希望している。WWFC は世界の主要な自動車製造業側からの意見書であり、法的な強制力はないが、今後の燃料性状の動向を左右する考え方として重要である。

²¹¹ Meshack Hawia, Hidenori Kosakab, Susumu Satob, Tsuyoshi Nagasawab, Ahmed Elwardanya,c, Mahmoud Ahmed, Effect of injection pressure and ambient density on spray characteristics of diesel and biodiesel surrogate fuels, Fuel 254 (2019) 115674.

²¹² https://www.acea.be/uploads/publications/WWFC_19_gasoline_diesel.pdf [2021.12.26 閲覧]



(注 1) A : ピストン頂部、シリンダーヘッド、インジェクターへの炭素状堆積物

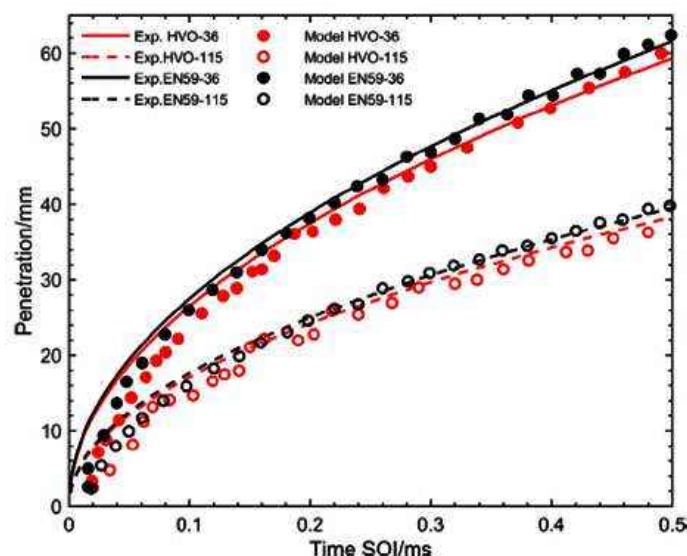
B : インジェクター先端の堆積物

(注 2) KOME20 : Karanja biodiesel 20%、blended with 80% diesel)

図 2.5-8 バイオエステル機関の堆積物 (250 時間運転) ²¹³

ディーゼル軽油と HVO の噴霧の到達距離の比較を図 2.5-9 に示す。結果は、293 K の温度下で霧囲気密度が 36 kg/m³ と 115 kg/m³ の場合の噴霧の到達距離である。HVO は、直鎖系の炭化水素でディーゼル軽油より幾分低い動粘度 (表 2.5-4) になるため、噴霧の特性としてはディーゼル軽油の場合より若干良好になる。ここでディーゼル軽油より噴霧の到達距離が短いことは、その分だけ噴霧角が大きくなり、燃料と空気の混合が促進されていることを示している。またバイオエステルのように含酸素燃料ではなく発熱量もディーゼル軽油に近い場合、ディーゼル機関での燃焼特性にはさほど大きな相違が生じない。

²¹³ J A Hidayat, Bambang Sugiarto, Review on Effect Biodiesel Blend on The Growth of Deposit in Combustion Chamber, AIP Conference Proceedings 2230, 050002 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0006900> Published Online: 04 May 2020 [2021.12.26 閲覧]



(注) ディーゼル軽油 (密度: 779.9 kg/m^3 、動粘度: $3.087 \text{ mm}^2/\text{s}$)
HVO (密度: 843.0 kg/m^3 、動粘度: $3.208 \text{ mm}^2/\text{s}$)

図 2.5-9 ディーゼル軽油と HVO の噴霧の到達距離の実験値と推定値の比較²¹⁴

ただし、HVO のセタン価はディーゼル軽油 (EN590) に比べて一般的に高くなるため、既存機関に代替燃料として HVO をそのまま使用すると、着火遅れ時間は短くなり熱効率は若干低下する傾向を示す。この結果として熱効率や排出ガス特性が表面的には変化する²¹⁵。しかし、パイロット噴射とメイン噴射の噴射時期や噴射圧の設定変更により燃料別の最適運転条件を求めることは可能である。したがって HVO に合わせて機関の ECU プログラムを変更すれば、ディーゼル軽油の互換燃料として十分実用に耐える燃料である。また若干の燃料改質 (水素化分解) を行なえばディーゼル軽油より上質の互換燃料になる可能性がある。

バイオマスをガス化して生成した合成ガスから、図 2.3-15 に示したように F-T 合成により直鎖系の炭化水素を合成することができる。合成ガスから生成した液体燃料であるため、通常 GTL (gas to liquid) と呼ばれている。GTL の中で炭素数が 10~18 の成分を中心に蒸留したものが GTL 軽油であるが、バイオマス由来であるためバイオ GTL 軽油と称することもある。この場合に表 2.5-4 に示したように沸点範囲をディーゼル軽油にできるだけ近くなるようにすれば、動粘度もディーゼル軽油に近づき、不飽和炭化水素が含まれないためセタン価はディーゼル軽油より高くなる。バイオ GTL 軽油は HVO とともにディーゼル軽油の互換燃料である。合成やその後の水素化分解や蒸留プロセスで成分の調整が可

²¹⁴ Qiang Chenga, Hulkkonen Tuomo, Ossi Tapani Kaario, Larimi Martti, Spray dynamics of HVO and EN590 diesel fuels, Fuel 245, pp.198–211, 2019.

²¹⁵ Athanasios Dimitriadis, Tine Seljak, Rok Vihar, Urban Žvar Baškovič, Athanasios Dimaratos, Stella Bezergianni, Zissis Samaras, Tomaž Katrašnik, Improving PM-NOx trade-off with paraffinic fuels: A study towards diesel, Fuel 265 (2020) 116921.

能であるが、一般に、GTL 軽油の構成成分の炭素数や沸点範囲は HVO より若干広くなる。なおバイオ GTL 軽油を自動車用燃料として使用することについては、後述する e-fuel の箇所で説明する。

バイオマスをガス化しメタンを合成すれば、そのメタンをもとに DME (dimethyl ether) や OMEs (oxymethylene ethers : $\text{CH}_3\text{O}(\text{CH}_2\text{O})_n\text{CH}_3$) を合成できる。それらの燃料は、単独またはディーゼル軽油に混合して使用することができるので、含酸素の合成バイオディーゼル燃料に分類することができる。表 2.5-5 に DME と OMEs の燃料性状を示す。

表 2.5-5 DME と OMEs の燃料性状 (文献²¹⁶より作成)

	Diesel	OME ₀ (DME)	OME ₁	OME ₂	OME ₃	OME ₄	OME ₅	OME ₆
化学式	C ₁₀ H ₂₀ to C ₁₅ H ₂₈	C ₂ H ₆ O	C ₃ H ₈ O ₂	C ₄ H ₁₀ O ₃	C ₅ H ₁₂ O ₄	C ₆ H ₁₄ O ₅	C ₇ H ₁₆ O ₆	C ₈ H ₁₈ O ₇
セタン価	50-55	55	28	68	72	84	93	
理論混合比	14.6	8.9	7.2	6.5	5.1	5.8	5.6	5.5
沸点(°C)	180-360	-24	42	105	156	202	242	
密度 @ 20 °C (Kg m ⁻³)	820-845	735 (-25 °C)	859	977	1030	1074	1106	
低位発熱量 (kJ/g)	43.2	28.4	23.3	20.3	19.6	19.0	18.5	
粘度 @ 40 °C (mm ² /s)	2-4.5			0.559	0.866	1.33	1.96	

DME は常温常圧では気体であるが、数気圧の加圧により液化するので、燃料システムに若干の変更を加えれば液体燃料としてディーゼル機関で使用する事ができる。さらに OME₂~OME₅ の混合燃料の物性値はディーゼル軽油に近いので、ディーゼル噴射弁でそのまま機関に噴射することができる。この OME₂~OME₅ の混合燃料は含酸素で発熱量が低い、ディーゼル軽油よりセタン価が高く、Soot の排出の少ない燃料としてのメリットがある。これらの燃料を使用した場合のディーゼル噴霧特性や機関性能については、すでにいくつかの報告^{217 218 219}がなされている。なお OME については、結合している CH₂O の数により性状が異なるので、これを OME と総称した場合には OME₂~OME₅ 等の構成割合によって燃料としての特性が大きく変化することに注意が必要である。

²¹⁶ Shinichi MORITA, Takeshi OKAMOTO, Takeshi SETO, Akira KOMATSU and Naoya ISHIKAWA (Isuzu Advanced Engineering Center, LTD, Japan), Effect of blending OME with diesel fuel on fuel property and engine performance, Transactions of the JSME (in Japanese), DOI:10.1299/transjsme.20-00374, 2021.

²¹⁷ Su Han Park, Chang Sik Lee, Combustion performance and emission reduction characteristics of automotive DME engine system, Progress in Energy and Combustion Science, pp.147-168, 2013.

²¹⁸ Su Han Park, Chang Sik Lee, Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel, Energy Conversion and Management 86, pp. 848-863, 2014.

²¹⁹ Ulrich Arnold, Kathrin Hackbarth, Philipp Haltenort, Jörg Sauer, refuels – Raw Materials, Processes and Applications for Synthetic Fuels, COMSYN European 2nd Generation Biofuels - Opportunities and Applications 1st Workshop of the European Project COMSYN German Aerospace Center (DLR) Stuttgart - INERATEC GmbH and KIT Karlsruhe, April 18-19, 2018.

https://www.comsynproject.eu/app/uploads/2018/06/Arnold_refuels.pdf [2021.12.26 閲覧]

2.5.4 バイオメタン

メタン発酵（嫌気性消化酵素）により有機廃棄物から AD 反応器（嫌気性消化反応器：Anaerobic Digestion Reactor）内で生成されるバイオガスの主成分は、メタンと CO₂ である。また H₂S も不純物として含まれている。自動車用燃料として使用する場合にはこれを精製してメタンの割合を高める必要があり、メタンの割合を高めた後は、既存の CNG 機関でメタンガスとして使用することができる。したがって、バイオメタンの自動車用燃料への適合技術は機関側の技術ではなく、バイオメタンの精製技術であり、図 2.5-10 のような 3 通りの方法がある。(a) はバイオガスからの H₂S のみ分離する方式で、この方式では得られたたバイオガスにはメタン以外に CO₂ が相当量含まれ発熱量も低いので自動車用燃料には適さない。(b) はバイオガスからメタンと CO₂ を分離して (upgrading) 別々の用途に用いる方式である。さらに (c) はバイオメタン収率を向上させる将来技術であり、再生可能電力をもとに作られた H₂ とバイオガス中の CO₂ からメタンを合成することが含まれている。ここで Amine up-grading は非水溶性アミン溶媒による CO₂ の分離であり、バイオメタンの合成後の余剰の CO₂ を off-gas (未利用の廃棄ガス) として除去する。off-gas は H₂S を処理した後、バイオガス中にもともと含まれていた少量の N₂ や O₂ とともに大気中に放出する。

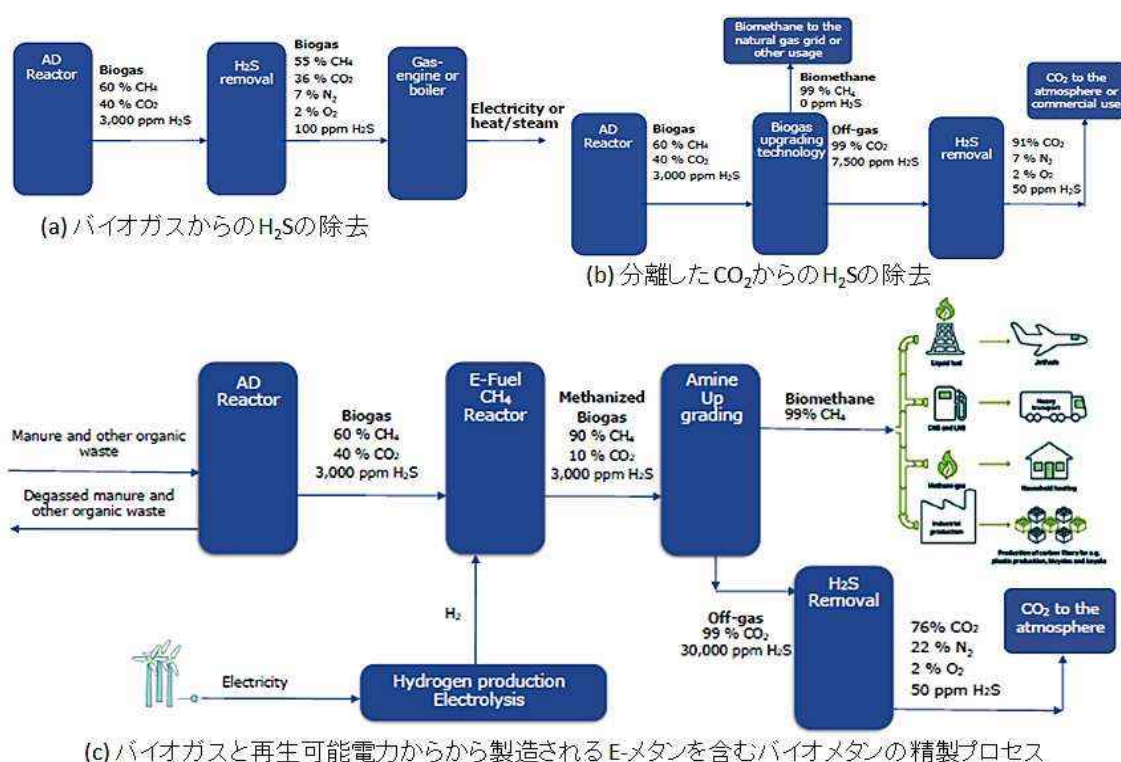


図 2.5-10 自動車用燃料としてのバイオメタンの精製プロセス²²⁰

²²⁰ Biological desulfurization and methanation of biogas, <https://biogasclean.com/wp-content/uploads/2021/03/BG-presentation.-TD.8-21.02.28..pdf> [2021.12.27 閲覧]

なお、AD 反応器で製造したメタンと CO₂ の混合ガスを内燃機関の燃料として直接用いることも、バイオマスのエネルギー利用の一環として、定置型の発電用ガス機関などで行われているが、燃料成分を一定に管理することが難しく、かつ長期間の使用ではエンジン内の堆積物も発生しやすいため、限定的な利用に留まっている。

2.5.5 合成燃料

電力ベースの水素と CO₂ から合成した燃料である e-fuel は、狭義の意味では F-T 合成プロセスで生成される直鎖の飽和炭化水素であり、そのままではワックス成分であるカーボン数が 20 以上の炭化水素も含まれている。通常は F-T プロセスの進行度の制御（反応を 80% 程度で停止させる）とプロセス後の水素による分解（hydrocracking）で、炭素数の少ない直鎖状の炭化水素に変換している。図 2.5-11 は最終的に得られる炭化水素であり、これを蒸留して成分ごとに分け、ガソリン、灯油、ディーゼル軽油を生産する。一般に F-T 合成プロセスでは不飽和の炭化水素はほとんど合成されず、また電気分解で得た水素と空気中から得られた CO₂ をもとにすれば硫黄分も含まれないため、原油精製で得られるガソリンやディーゼル軽油より上質の自動車用燃料が得られる。言い換えると e-fuel は現状の自動車用内燃機関にとって完全に代替可能な互換燃料であり、e-fuel の導入のための既存機関の改善課題は存在していない。

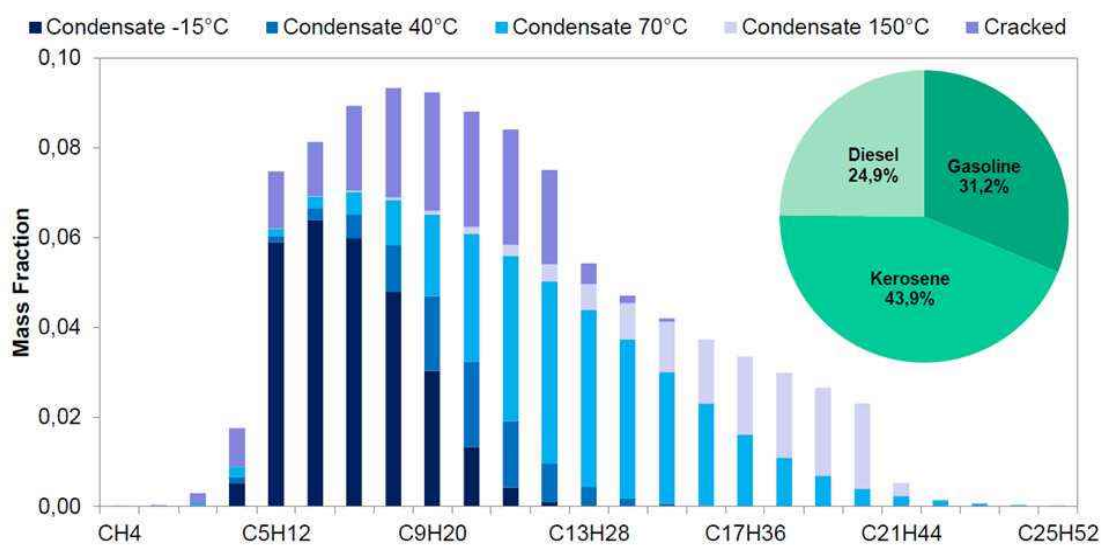


図 2.5-11 F-T プロセスと水素分解で合成された炭化水素²²¹

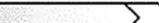
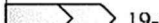
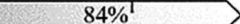
²²¹ Ralph-Uwe Dietrich, D. H. König, A. Wörner, Power-to-Liquids: synthetic fuels from a sustainable pathway, ACHEMA 2015 Frankfurt am Main, June 18, 2015.
https://www.researchgate.net/publication/278686023_Power-to-Liquids_synthetic_fuels_from_a_sustainable_pathway [2021.12.27 閲覧]

一方、合成燃料であるために現状よりオクタン価の高いガソリンやセタン価の高いディーゼル軽油を合成することも技術的には可能である。カーボン数が 10~18 の直鎖の炭化水素を選択的に合成することが、e-fuel の場合では反応の進行度合いの制御²²²とワックスの分解により可能であり、その場合のセタン価は 60 を超える。このような高セタン価の燃料に圧縮比や運転条件を適合させれば、既存のディーゼル機関に対する互換燃料としてのメリットだけでなく、さらに高効率の機関の燃料²²³となる可能性がある。このためには高セタン価に対応した着火遅れの大巾な短縮に対応可能な機関の開発が必要である。

2.5.6 水素

水素は、究極のカーボンフリー燃料である。この水素を自動車用燃料として使用する方式として、水素内燃機関（H₂+ICE）と水素燃料電池（H₂+FC）の 2 つの方法がある。表 2.5-6 はディーゼル機関の大型バスを対象とし、上記 2 つの水素利用の場合のエネルギー効率を比較した結果である。この場合水素は天然ガスから製造するとし、燃料の製造と輸送（WTT：Well to Tank）までと機関と車両（TTW：Tank to Wheel）での効率に分けて表示してある。全体（WTW：Well to Wheel）の効率をみると、水素燃料電池車（H₂+FCEV）の効率が一番高く、水素内燃機関（H₂+ICE）の場合はディーゼル機関よりやや高い効率を示している。

表 2.5-6 水素内燃機関、水素燃料電池、及びディーゼル機関を用いた大型バスのエネルギー効率²²⁴

	η -WTT (Fuel)	$\times$	η -TTW (Vehicle)	$=$	η -WTW (Mobility)
H₂ + ICE	 43-58% ¹ NG based		 40% ²		 17-23%
H₂ + FCEV	 43-58% ¹ NG based		 45-59% ³		 19-34%
Diesel ICE	 84% ¹ Crude oil based		 19-22% ¹		 16-18%

1) European Union (2014), WELL-TO-WHEELS Report version 4.a. <https://dx.doi.org/10.2790/95533>.

2) Koch, D., Ebert, T. and Sousa, A. (2020), "Engine Adaptation from Diesel to H₂ HP-EGR Lean Combustion Concept", MTZ worldwide, Vol. 81 No. 5, pp. 30-37. <https://dx.doi.org/10.1007/s38313-020-0223-9>.

3) Wietschel, M., Gnann, T., Thielmann, A. and Kühn, A. (2016), "Stand der Forschung, Marktpotenziale und Forschungsbedarf für Brennstoffzellen-LKW", MKS-Fachworkshop, Berlin, June 30, 2016, Fraunhofer ISI, Berlin.

²²² Hans Schulz (University of Karlsruhe), Principles of selectivity in Fischer-Tropsch Synthesis, DGMK/SCI-Conference, "Sybthesis Gas Chemistry", October 4-6, Dresden, Germany, 2006.

<https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20840757> [2012.12.28 閲覧]

²²³ FEV Report,

https://www.fev.com/fileadmin/user_upload/Media/TechnicalPublications/Diesel_Systems/ImpactofFuelPropertiesonEmissionsandPerformance.pdf [2021.12.27 閲覧]

²²⁴ Salehi, Vahid Douzloo (Munich University, Germany), APPLICATION OF A HOLISTIC APPROACH OF HYDROGEN INTERNAL COMBUSTION ENGINE (HICE) BUSES, INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, ICED21 16-20 AUGUST 2021, GOTHENBURG, SWEDEN,

<https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/3A72E79725D6E7C9CA1A96257374D42D/S2732527X21000481a.pdf/div-class-title-application-of-a-holistic-approach-of-hydrogen-internal-combustion-engine-hice-buses-div.pdf> [2021.12.27 閲覧]

ここでは、内燃機関の燃料として水素を使用する場合を扱い、水素燃料電池（H₂+FC）では内燃機関の場合と異質なエネルギー変換及び使用環境についての検討が必要になるので、以後は除外して議論を進める。まず水素、無鉛ガソリン、ディーゼル軽油の燃焼特性値の比較を表 2.5-7 に示す。

水素は、最小点火エネルギーが低いが自己着火温度とオクタン価が高いため、火花点火方式の内燃機関には適するが圧縮着火機関には不向きな燃料である。水素自体の燃焼速度は、通常の炭化水素燃料に比べて速くかつ可燃範囲も広いと、ノッキングを回避しての燃焼や低 NO_x のための希薄燃焼にはメリットがある。しかし、燃料供給系や水素噴射装置等を独自に設計制作する必要がある、非混合燃料としての多くの課題を抱えている。

表 2.5-7 水素、無鉛ガソリン、ディーゼル軽油の燃焼特性値の比較（文献²²⁵より作成）

	水素	無鉛ガソリン	ディーゼル軽油
化学式	H ₂ —	C _n H _{1.87n} C ₄ ~C ₁₂	C _n H _{1.8n} C ₈ ~C ₂₀
自着火温度 (K)	858	533~733	530
最小点火エネルギー (mJ)	0.02	0.24	—
可燃範囲 (vol% in air)	4~75	1.4~7.6	0.7~5
理論混合比 (質量比, 空気)	34.3	14.6	14.5
可燃範囲 (当量比)	0.1~7.1	0.7~3.8	—
密度 (kg/m ³) (16°C, 1.01 bar)	0.0838	721~785	833~881
正味発熱量 (MJ/kg)	119.93	43.9	42.5
火炎速度 (cm/s)	265~325	37~43	30
消炎距離 (cm) (NTP air)	0.064	0.2	—
拡散係数 (cm ² /s) (空気)	0.63	0.08	—
オクタン価	130	92~98	—
セタン価	—	13~17	44~55

上記の燃焼問題に加え、単位質量あたりの発熱量は大きいと密度が小さく、自動車用燃料としての車載燃料タンクが大きくなる問題がある。水素自動車では水素を 700 気圧の高圧タンクに貯蔵して、使用することが計画されているが、車載用の高圧タンク、高圧配管、燃料供給系の補器等の体積や質量が車載する水素の質量以上になる。図 2.5-12 は車載燃料として評価した場合の水素のエネルギー密度を他の燃料と比較した結果である。仮に極低温水素（液体状態、hydrogen cryogenic）で車載したとしても、エネルギー密度は小さく、水素自動車の実用化のためには、実質的なエネルギー密度の向上が技術的に重要である。またこれは水素内燃機関の自動車だけでなく、水素燃料電池車にとっても必要な技術である。

²²⁵ N. Saravanan, G. Nagarajan, G. Sanjay, C. Dhanasekaran, K.M Kalaiselvan., Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine, International Journal of Hydrogen Energy Volume 32, pp. 4071-4080, 2007

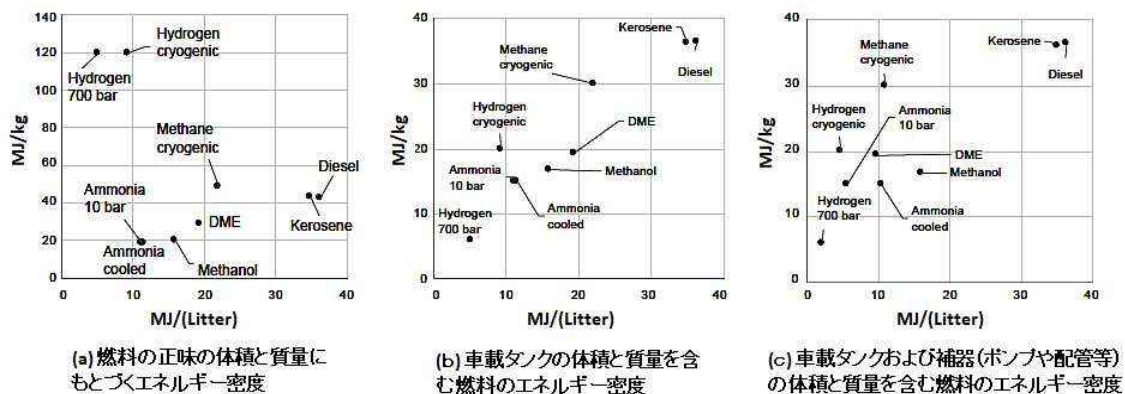


図 2.5-12 車載燃料として評価した場合の水素のエネルギー密度 (文献²²⁶より作成)

水素内燃機関に水素を供給する具体的な方式には図 2.5-13 に示す 3 通りの方式がある。LPG 機関と同様に吸気管の途中のキャブレター部に水素を連続的に供給する (a) の方式は、特別な水素供給装置が不要で簡便であるが、可燃範囲の広い水素ではバックファイヤーの危険がある。この問題を回避するためには、水素専用のガスインジェクターを開発して、機関の吸気タイミングに合わせて水素を噴射する (b) の方式があり、この技術をさらに進めて筒内に水素を直接噴射する (c) の方式もある。しかし筒内直接噴射では、水素インジェクターのように高温に晒される金属部分の水素脆性による劣化の防止が重要であり、また摺動部では水素自体の潤滑性が低いので耐久性の向上が技術課題である。

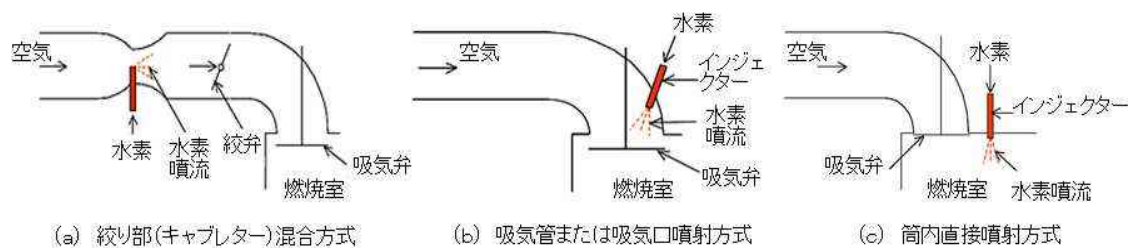


図 2.5-13 内燃機関への水素の供給方式 (文献²²⁷より作成)

気体状態の水素の体積当たりのエネルギー密度が低いため、高出力機関とする場合には機関に供給できる水素の総量が機関の出力性能の上限を支配することになる。水素の機関への供給位置と投入エネルギーの関係を図 2.5-14 に示す。

²²⁶ Karin van Kranenburg, Yvonne van Delft, Anastasia Gavrilova, Robert de Kler, Caroline Schipper, Richard Smokers, Maarten Verbeek, Ruud Verbeek, E-FUEL: Towards a more sustainable future for truck transport, shipping and aviation. TNO, 2020.
https://platformduurzamebiobrandstoffen.nl/wp-content/uploads/2020/09/2020_TNO_Voltachem_E-fuels-towards-a-more-sustainable-future-for-truck-transport-shipping-and-aviation.pdf [2021.12.27 閲覧]

²²⁷ Murat CİNİVİZ, Hüseyin KÖSE, HYDROGEN USE IN INTERNAL COMBUSTION ENGINE: Review, International Journal of Automotive Engineering and Technologies Vol. 1, Issue 1, pp.1-15, 2012.

ガソリンをキャブレターから供給し、ガソリン蒸気として筒内に導入した場合 (a) を基準に、水素機関の場合の投入エネルギーを比較している。気体状態の水素を吸気管にて供給した場合 (b) では、水素の容積が大きく燃焼に必要な空気が制限される状態になり、投入エネルギーは結局のところ低下する。これを避けるためには、(c) のように液体水素の状態で筒内に投入し筒内で気化させるか、(d) のように高压気体として筒内に供給する手法が考えられる。極低温の液体水素をタンクに貯蔵して車載することは、大型車両、鉄道機関車、舶用水素機関以外は現実的でなく、現在は高压気体水素を筒内噴射する方式の技術開発が行われている。

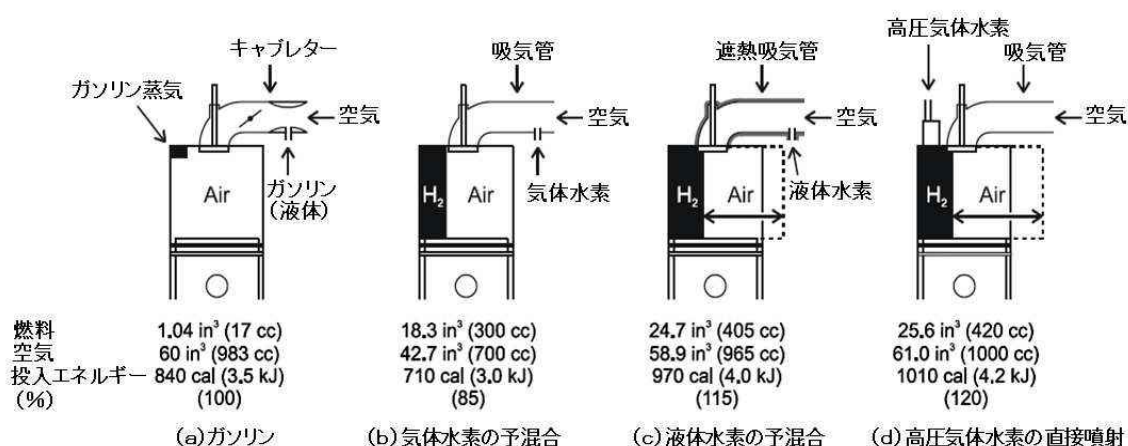


図 2.5-14 水素の投入位置と投入エネルギーの関係 (文献²²⁸より作成)

水素の吸気管噴射方式は、前述した通り機関の出力低下を招くが、ガソリン機関の吸気に水素を予混合することで、デュアルフューエル機関として出力の向上を図る試みがなされている。吸気管噴射方式の水素予混合ガソリン機関の一例を図 2.5-15 に示す。この機関ではポート噴射方式のガソリン機関の吸気に水素を連続的に供給している。図 2.5-16 は機関出力と熱効率の結果である。水素の供給割合の増加につれ、機関出力と熱効率はともに増加する。しかし水素の供給割合が 25% の場合には機関出力と熱効率はともに低下し、この理由として気体水素の予混合供給にともなう空気量の実質的な低下を挙げている。

²²⁸ Hydrogen Use In Internal Combustion Engines, Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies: Rev 0, December 2001.

https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pdf [2021.12.27 閲覧]

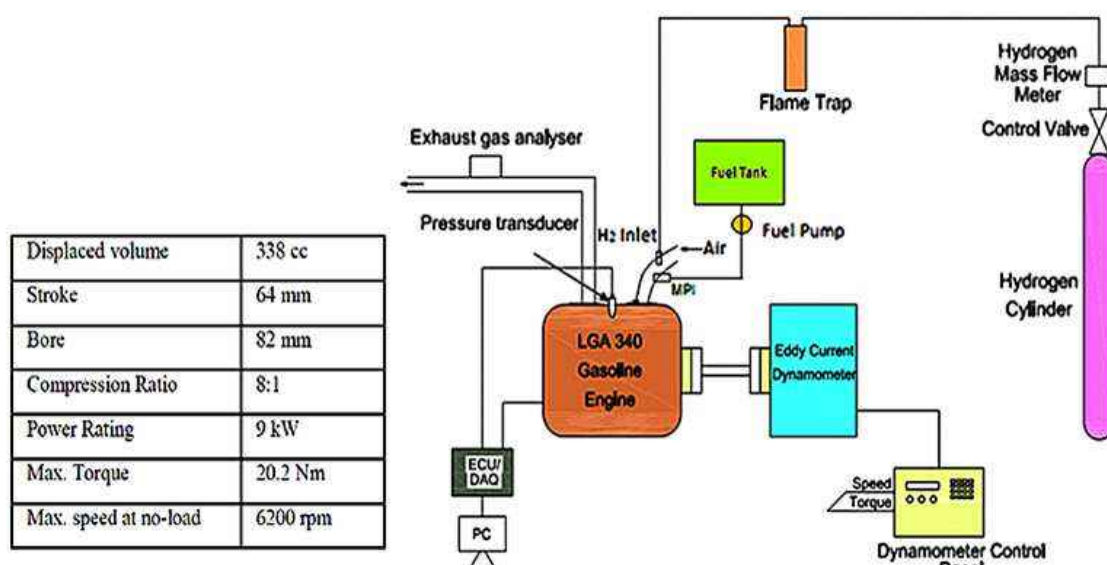


図 2.5-15 吸気管噴射方式の水素予混合ガソリン機関²²⁹

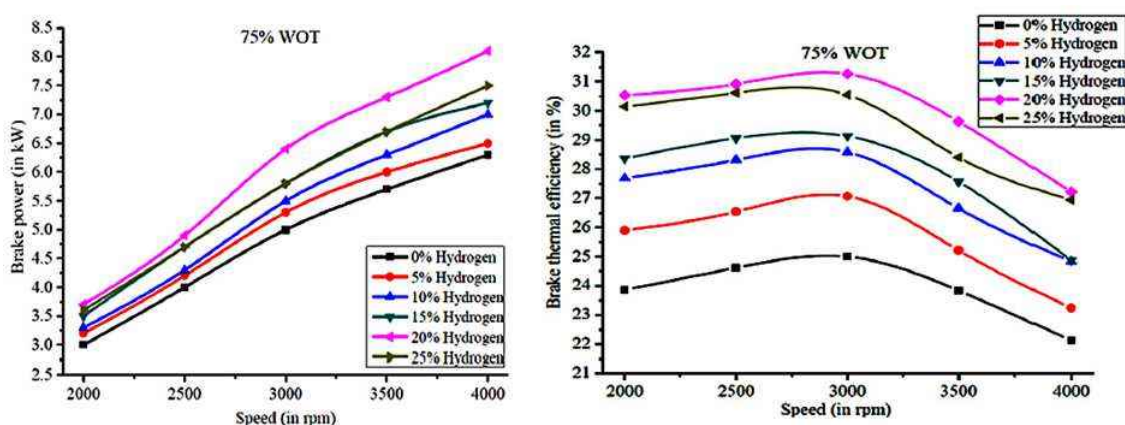


図 2.5-16 吸気管噴射方式の水素予混合ガソリン機関の性能²²⁹

(左：機関軸出力、右：熱効率)

前述した RCCI 燃焼は、ディーゼル機関の吸気管から水素を供給して混焼させる方式から発展したコンセプトである。最近では、水素を含むバイオガスの利用を検討した実験²³⁰や自動車用機関での RCCI 燃焼の数値解析²³¹が行われていて、水素に対応する次世代内燃

²²⁹ K. V. Shivaprasad, P. R. Chitragar, and G. N. Kumar (National Institute of Technology Karnataka, India), Effect of Hydrogen Addition on Combustion and Emission Characteristics of High Speed Spark Ignition Engine- An Experimental Study, SAE paper 2015-01-1684, 2015.

²³⁰ Mojtaba Ebrahimi, Seyed Ali Jazayeri, Effect of hydrogen addition on RCCI combustion of a heavy duty diesel engine fueled with landfill gas and diesel oil, international journal of hydrogen energy 44 (2019) 7607-7015.

²³¹ Alexandru Cernat, Constantin Pana, Niculae Negurescu, Gheorghe Lazaroiu and Cristian Nutu, The Influence of Hydrogen on Vaporization, Mixture Formation and Combustion of Diesel Fuel at an Automotive Diesel Engine, Sustainability 2021, 13, 202. <https://doi.org/10.3390/su13010202>

機関の対応技術例になっている。しかし、水素とディーゼル軽油という 2 種類の燃料を車載しなければならないため、次世代自動車用としての適応範囲は船用や大型トラック用のディーゼル機関に限定される。

2.5.7 アンモニア

アンモニア (NH₃) もカーボンフリーの燃料である。アンモニアを水素と窒素から合成し、水素エネルギーをアンモニアとして貯蔵すること、またその燃焼により電力を取り出すことが計画されている。アンモニアと気体燃料の燃焼特性値を比較した結果が表 2.5-8 である。アンモニアは低位発熱量が少なく、また燃焼速度も低いため、アンモニアを自動車用燃料に混合して利用することは現実的でない。したがってアンモニアの低い燃焼速度を補うため、燃焼速度の速い水素等と混合して燃焼させる方式が解決策の一つとして検討されている。またアンモニアをタンクに充填して車載するには技術的な課題も多い。ただし水素より貯蔵や運搬が容易であるため、船用内燃機関にアンモニアの用途を広げることが計画されている。

表 2.5-8 アンモニアと気体燃料の燃焼特性値（文献²³²より作成）

	NH ₃	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
沸点 (°C, 1atm)	-33.4	-253	-161	-42.1
25°Cにおける飽和蒸気圧 (atm)	9.90	N/A	N/A	9.40
低位発熱量 (MJ/kg)	18.6	120	50.0	46.6
理論混合比 (質量比, 空気)	6.11	34.3	17.3	15.7
可燃限界 (当量比)	0.63~1.40	0.10~7.1	0.50~1.7	0.51~2.5
断熱火炎温度 (°C)	1800	2110	1950	2000
最大層流燃焼速度 (m/s)	0.07	2.91	0.37	0.43
自己着火温度 (°C)	650	520	630	450

アンモニア内燃機関の種々の技術的な障害の実態を明らかにするため、図 2.5-17 に示すような試験機関を使用して、液体アンモニアを吸気管噴射するデュアルフューエルガソリン機関の研究が行われている。この研究では、アンモニア 70%とガソリン 30%を組み合わせた燃料での試験が行われ、通常の排出ガスだけでなく、未燃のアンモニアの排出も調べられている。

またディーゼル機関ではアンモニアと DME を混合した液体燃料を使用する直噴ディーゼル機関の研究が行われ、図 2.5-18 に示すような機関特性が得られている。アンモニア-DME の混合割合を変えた場合の出力が示されているが、出力はディーゼル軽油の場合に比べて半減しかつ高速運転が難しくなっている。さらに図 2.5-19 のような方式で、船用の

²³² Hideaki Kobayashi, Akihiro Hayakawa, K.D. Kunkuma, A. Somarathne, Ekenechukwu, C. Okafor, Science and technology of ammonia combustion, Proceedings of the Combustion Institute 37, pp.109-133, 2019.

ディーゼル機関の吸気にアンモニアを混合させて CO_2 を 20% 低減させることが検討されている。この方式ではアンモニアの混焼による CO_2 の低減だけでなく前述した RCCI コンセプトにもとづいた排出ガスの浄化も期待できる。

なお次世代船用燃料としてアンモニアや水素を使用する場合は、次世代自動車用燃料として使用する場合と異なり、図 2.5-12 の (c) に示したタンクや補器を含めた燃料のエネルギー密度の低いことが実用上大きな問題とならないことも重要である。

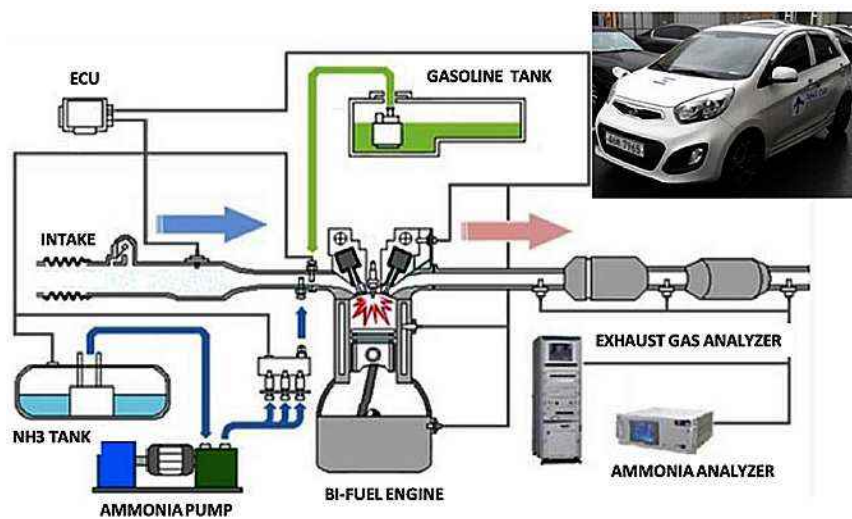


図 2.5-17 アンモニア予混合ガソリン機関²³³

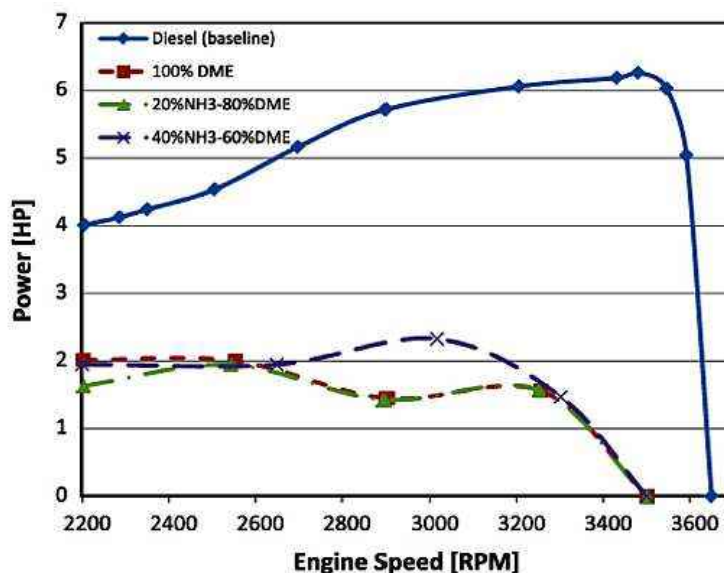


図 2.5-18 アンモニア-DME 直噴ディーゼル機関²³⁴

²³³ A Valera-Medina, H Xiao, M Owen-Jones, W.I.F. David, P. J. Bowen, Ammonia for power, Progress in Energy and Combustion Science 69, pp.63-102, 2018.

²³⁴ C. W. Gross, S. C. Kong, Performance characteristics of a compression ignition engine using direct-injection

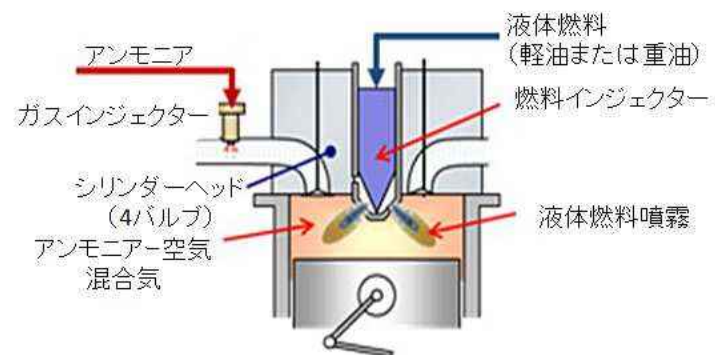


図 2.5-19 船用ディーゼル機関におけるアンモニアの混焼（文献²³⁵より作成）

ammonia-DME mixtures. Fuel 2013; 103, pp.1069-1079, 2013.

²³⁵ アンモニア直接燃焼技術「船用ディーゼルエンジンへの適用」

<https://www.challenge-zero.jp/jp/casestudy/74> [2021.12.28 閲覧]

2.6 次世代燃料が自動車の排出ガスに及ぼす影響とその対策

2.6.1 内燃機関の性能向上対策

内燃機関の熱効率向上、GHG（Green House Gas）低減、排出ガス低減のための主要な対策を表 2.6-1 に示す。次世代燃料は、基本的に地球温暖化防止のための GHG 排出量の低減を目的とする燃料対策であるが、燃料の変更に付随する排出ガスの変化にともない、それなりの排出ガス対策が必要になる。表には主要な排出ガス対策を掲げているが、いずれも従来技術の延長上にあり、水素やアンモニアを除けば次世代自動車用燃料の使用にあたって従来と異なる新技術が開発されている状態ではない。既存燃料の場合も含めた排出ガス規制の観点からみると、HC や CO の排出は酸化触媒、また PM に関しては GPF/DPF による捕集と酸化処理で今後も対処できると思われる。一方、NO_x の還元処理は不十分で、NO_x 規制のレベルは後処理で除去可能な技術的限界に近づきつつある。さらに NO_x の大部分は、内燃機関の高温の燃焼ガス中で生成されるサーマル NO であり、空気を酸化剤として用いる内燃機関では燃料の種類にかかわらず生成され、かつ熱効率向上のために有利な高温燃焼と相反するため、燃焼室内での低減が技術的に難しい課題である。また PCB（Poly Chlorinated Biphenyl）やニトロ化合物等の発がん性物質²³⁶を含む未規制物質については²³⁷、バイオ燃料では今後も問題となる可能性があるが、H₂+CO/CO₂ をベースにした合成燃料の場合ではほとんど問題が起きないと思われる。

²³⁶ Christopher A. Laroo, Charles Schenk, James Sanchez, Joseph McDonald and Peter Smith (US Environmental Protection Agency, Emissions of PCDD/Fs, PCBs, and PAHs from a Modern Diesel Engine Equipped with Selective Catalytic Reduction Filters, SAE paper 2013-01-1778, 2013)

²³⁷ Masataka Arai, Automobile and Air Pollution, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2021, ISBN: 978 620 3 86079-5, Chapter 3.

表 2.6-1 内燃機関の性能向上のための主要な対策

	火花点火機関（ガソリン機関）	圧縮点火機関（ディーゼル機関）	ガス機関
出力向上	過給と高速化	過給と高速化	過給と高速化
熱効率向上	燃料のオクタン価向上 圧縮比の向上 リーンバーン 冷却および機械損失の低減	熱発生率パターンの変更 冷却および機械損失の低減	
GHG排出量低減	熱効率の向上 燃料の変更（水素、CNG、バイオエタノール） 低炭素混合燃料（Blend Fuel or Partial Drop-in Fuel）への転換	熱効率の向上 燃料の変更（バイオディーゼル、HVO、F-Tディーゼル軽油） 低炭素互換燃料（Full Drop-in Fuel）への転換	熱効率の向上 燃料の変更（水素、アンモニア）
NO _x 排出量低減	希薄燃焼 EGRによる低温燃焼 後処理装置（TWC）	EGRによる低温燃焼 後処理装置（Urea-SCR）	希薄燃焼 EGRによる低温燃焼 後処理装置（TWC）
PM排出量低減	非炭化水素系燃料（水素、アンモニア） 含酸素燃料 燃料の沸点範囲の限定 燃料の壁面付着の防止 GPFによる捕集と連続再生	非炭化水素系燃料（水素、アンモニア） 含酸素燃料 燃料中のアロマと高沸点成分の除去 燃料噴射と拡散燃焼の改善 DFF（Cata-DFF）	非炭化水素系燃料（水素、アンモニア） 後処理装置（TWC）
CO排出量低減	非炭化水素系燃料（水素、アンモニア） 希薄燃焼に伴う燃焼効率の低下抑制 後処理装置（TWC）	非炭化水素系燃料（水素、アンモニア） DOCIによる酸化	非炭化水素系燃料（水素、アンモニア） 後処理装置（TWC）
HC排出量低減	非炭化水素系燃料（水素、アンモニア） 燃料の壁面付着の防止 希薄燃焼に伴う燃焼効率の低下抑制 後処理装置（TWC）	非炭化水素系燃料（水素、アンモニア） DOCIによる酸化	非炭化水素系燃料（水素、アンモニア） 後処理装置（TWC）
未規制物質（発がん性物質を含む）の低減	問題物質の特定 燃料中の原因物質の除去 合成燃料への燃料転換 後処理触媒の劣化防止	問題物質の特定 燃料中の原因物質の除去 合成燃料への燃料転換 PM中のSOF分の除去 後処理触媒の劣化防止	問題物質の特定 燃料中の原因物質の除去 後処理触媒の劣化防止
振動/騒音の低減	ハッキングの防止	熱発生率パターンの変更	
機関変更対策	互換燃料：不要 混合燃料：混合率の増加限界拡大と燃焼堆積物の抑制 非混合燃料：燃料供給系の新設計	互換燃料：不要 混合燃料：高圧噴射系の変更と燃焼堆積物の抑制 非混合燃料：燃料供給系の新設計	燃焼堆積物の抑制

次世代燃料の開発と導入の主目的は、温暖化の原因となる CO₂ のような GHG の排出低減にある。100 km 走行に必要な燃料の製造時を含めた総エネルギーと 1 km 走行時の GHG 排出量（CO₂ 換算）の関係を図 2.6-1 に示す。排出される GHG は WTW（Well to Wheel）の値なので、燃料の製造時や燃料の輸送時に排出される GHG も含まれている。それぞれの燃料については、燃料資源や製造方法が多種多様で、さらに機関での燃焼方式も多様であるため大きなバラツキが現れている。

ガソリンやディーゼル軽油は、横軸に示した 100 km 走行に必要な燃料の製造時を含めた総エネルギーが他の燃料に比べて小さい。エネルギー効率の観点からは有効な燃料であるが、GHG の排出量の観点からは、地球温暖化への寄与が高い燃料といえる。セルロースやサトウキビを原料とした EtOH（バイオエタノール）については、製造時に必要とするエネルギーは大きい、原材料がバイオ由来であるため WTW としては GHG の排出量が少なく、温暖化対策として有効な代替燃料である。HVO や合成ディーゼル軽油は燃料資源に依存した特性になるが、HVO では GHG の排出量を大幅に低減できる場合があることを示している。

バイオガス燃料は、自然界で行なわれているメタン発酵によるメタン発生を燃焼によるCO₂の発生に置き換えることになる。メタンは、100年間で比較したときCO₂の28倍、20年間では84倍の高い地球温暖化寄与率を示すガスである。燃焼によりCO₂が排出されたとしても、自然界からメタンとして放出されるGHGの排出量が抑制できているので、CO₂換算のGHGの排出量としてはマイナスになる。DMEは天然ガスや石炭また木材を原料として合成され、石油資源の枯渇対策としては有効であるが、木材等のバイオマスを原料としない限りGHGの排出量が多いので、GHGの低減を主目的とする次世代の代替燃料としての価値は低い。図には示されていないが、再生可能電力から生成される水素やこの水素と空気中のCO₂をもとに作られるe-fuelについては、車両走行時のGHG排出量はゼロとみなせる。

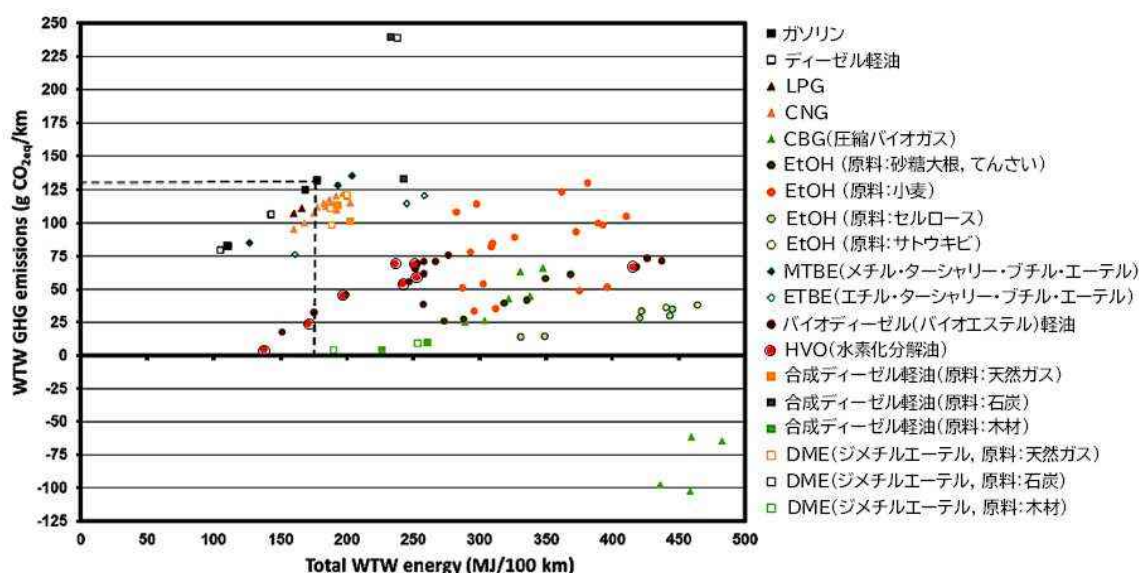


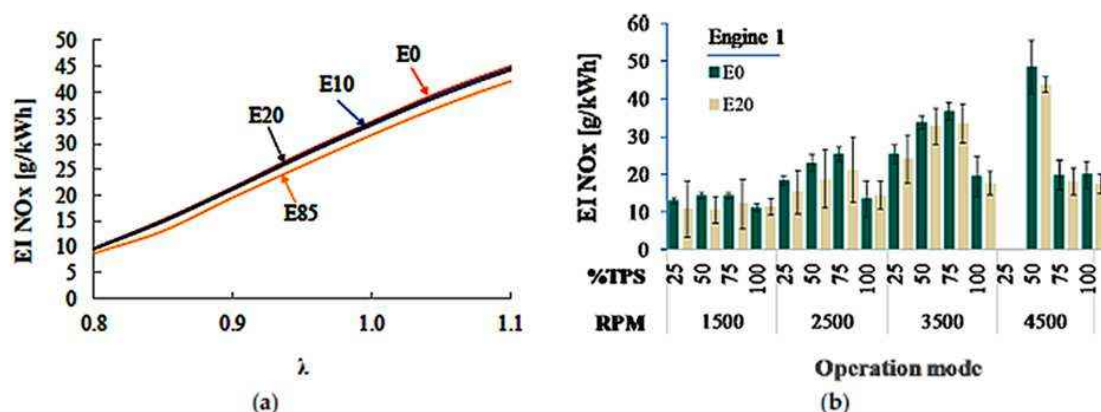
図 2.6-1 乗用車 100 km 走行に必要な燃料の製造時を含めた総エネルギーと 1 km 走行時の総 GHG 排出量の関係（文献²³⁸より作成）

2.6.2 バイオエタノール

エタノールを代替燃料（E100）として自動車で使用することは現実的でないので、ガソリンに混合し、エタノール混合ガソリンとして使用する場合の排出ガス特性が調べられている。バイオエタノールと化石燃料ベースで合成されたエタノールの燃料としての相違は、製造過程で副成されるメタノールやブタノール、またミネラル系の不純物の含有量に存在するが、内燃機関の排気特性としてその影響を系統的に調べた結果は報告されていない。

²³⁸ Well-to-Wheels Analyses, WTW energy expended and GHG emissions for non-hydrogen pathways (2020+ vehicles)©EU, 2016, The European Commission's science and knowledge service, 2020
<https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/activities/wtw> [2021.12.30 閲覧]

エタノール混合ガソリンと NO_x 排出特性の一例を図 2.6-2 に示す。多くの国で現在認められている 10%以下（日本の場合は E10 対応車で 10vol%以下、非対応車で 3vol%以下）のエタノール混合ガソリンについては、ガソリンとほぼ同等の NO_x 排出指数であるが、混合割合を 20%とした場合（E20）では混合により NO_x の排出指数は低下し、E85 の場合はさらに顕著に低下する。これはエタノールの発熱量が小さく、燃焼ガス温度がエタノール混合とともに低下することに起因してサーマル NO の生成が減少したためである。



(注 1) (a) 当量比と NO_x 排出指数、(b) 機関回転数及び負荷と NO_x 排出指数の関係

(注 2) 1.597 L 直接噴射機関、圧縮比 9.4、Chevy GM Z16SE

図 2.6-2 エタノール混合ガソリンと NO_x 排出特性²³⁹

各種のエタノール混合ガソリンの特性を表 2.6-2 に示す。Tier-III と LEV-III は現行のアメリカ及びカリフォルニア州のガソリン、EU-5 と EU-6 は欧州のガソリン、Race fuel はエタノールの高オクタン価（RON：108）の特性を生かした競技用のエタノール混合ガソリンである。また Terminal fuel は配送ターミナル（貯留施設、米国ミシガン州）から採取した燃料である。いずれのエタノール混合ガソリンも約 10%のエタノールを含有しているが、蒸留特性などはエタノールの混合割合だけでなくベースとなるガソリンの性状にも依存している。機関性能としての出力の低下を防止するため、エタノール混合ガソリンとしての低位発熱量とオクタン価（RON：91.9 以上、MON：83.9 以上）がいずれの場合でもほぼ等しくなるように各種のガソリンブレンド基材を混合していることが、市場に出回っている燃料としての特徴である。

図 2.6-3 に上記の混合ガソリンの蒸留特性を示す（通常の蒸留曲線とは縦軸と横軸が入れ替わっている）。競技用のエタノール混合ガソリンは、エタノールの混合割合が 10.86 と高く蒸気圧 (RVP) は低い、沸点範囲は非常に狭くなっている (IBP (Initial Boiling Point) :

²³⁹ Juan E. Tibaquirá (Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia), José I. Huertas, Sebastián Ospina, Luis F. Quirama and José E. Niño, The Effect of Using Ethanol-Gasoline Blends on the Mechanical, Energy and Environmental Performance of In-Use Vehicles, Energies 2018, 11, 221; doi:10.3390/en11010221

43.8℃、EBP（End Boiling Point）:175.4℃）。Tier、LEV、EU 等の規格の燃料では、図 2.5-5 に示したエタノール混合ガソリンの特性が顕著に現れ、Terminal fuel では低沸点から高沸点までの幅広い成分を持つガソリンと混合したエタノール混合ガソリンになっている。

表 2.6-2 各種のエタノール混合ガソリンの特性²⁴⁰

Fuel	IBP [°C]	T10 [°C]	T50 [°C]	T90 [°C]	EBP [°C]	Density (@15C) [kg/m ³]	RVP [psi]	Ethanol [%v]	RON	MON	LHV [MJ/kg]
Tier III Premium	39.1	55.2	93.9	160.6	203.7	749.10	8.90	9.83	99.0	88.1	41.74
Tier III Regular	35.8	53.9	90.6	161.2	197.6	742.50	9.20	9.70	92.3	84.5	41.67
LEV III Regular	41.7	57.8	97.2	156.7	188.9	754.40	7.20	9.60	91.9	84.3	41.55
EU5 cert fuel	38.2	49.7	98.3	157.6	197.9	749.10	8.56	5.30	96.6	86.8	42.25
EU6 cert fuel	38.4	46.0	89.1	159.5	183.1	747.60	8.54	9.10	96.8	86.8	41.36
Race Fuel	43.8	63.8	100.4	106.7	175.4	737.70	6.40	10.86	>101	94.0	41.43
Terminal Fuel#1	28.8	44.1	66.4	162.0	214.4	732.30	12.03	10.75	92.0	84.2	41.77
Terminal Fuel#2	25.6	40.5	66.7	159.2	204.5	729.10	13.40	9.85	92.0	84.4	41.81
Terminal Fuel#3	28.1	44.3	69.3	162.5	210.3	732.70	11.79	9.97	92.2	84.2	41.81
Terminal Fuel#4	25.3	38.4	67.1	158.6	206.3	726.50	14.33	11.64	93.2	84.7	41.63
Terminal Fuel#5	25.9	42.3	68.0	165.9	219.0	735.30	12.69	10.54	91.9	83.9	41.68

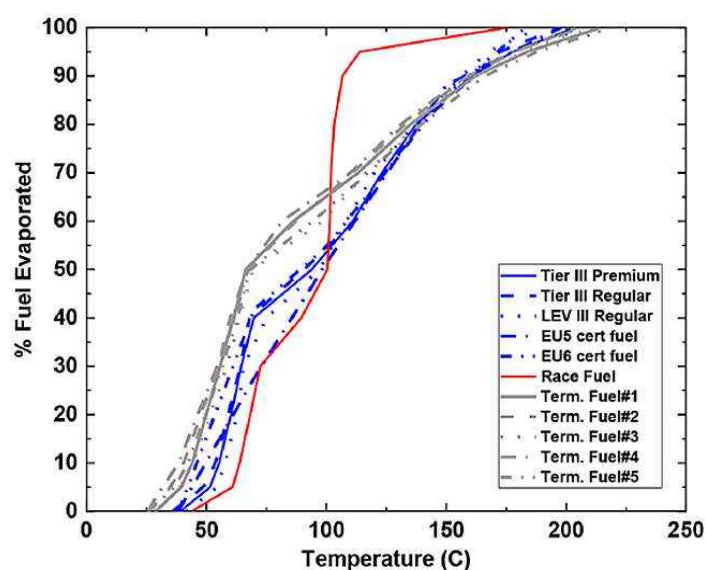
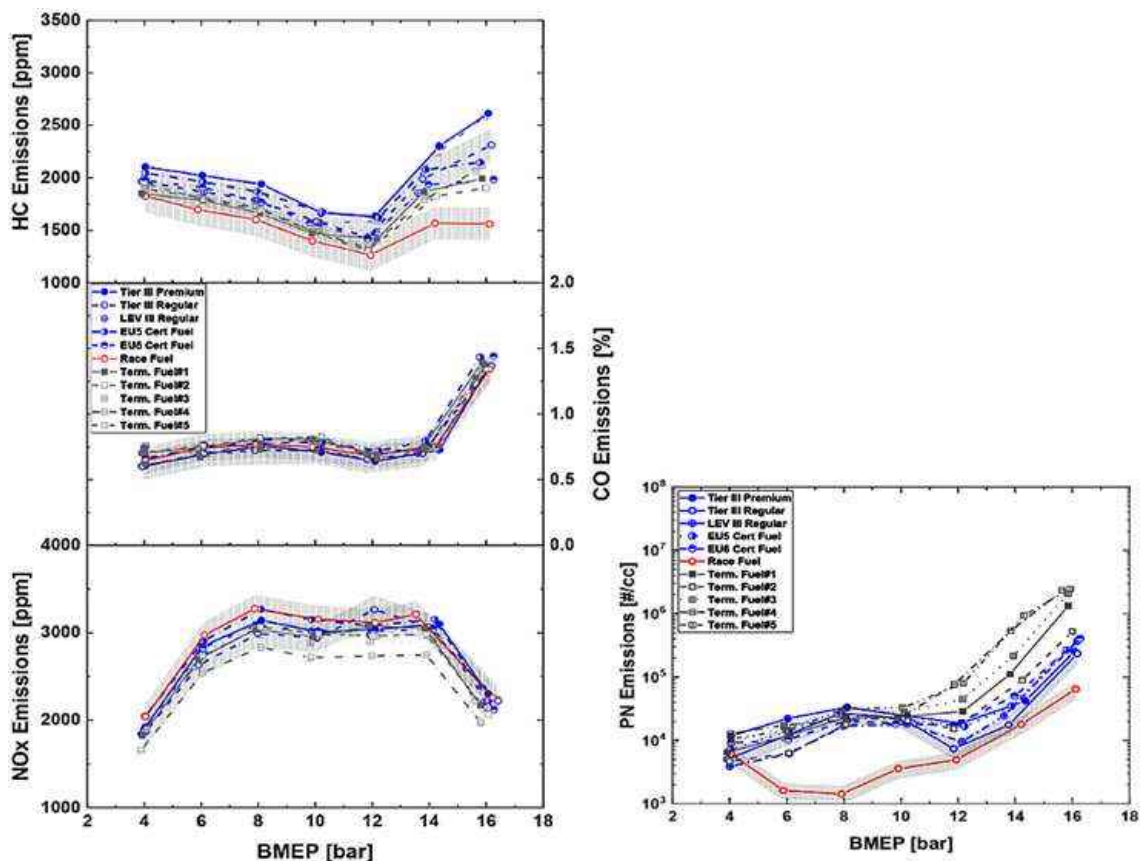


図 2.6-3 各種エタノール混合ガソリンの蒸留特性²⁴⁰

直接噴射式ガソリン機関を用いて上記燃料に対する機関の排出物特性を BMEP（Brake Mean Effective Pressure：正味平均有効圧）を基に調べた結果を図 2.6-4 に示す。これは当量比を 1.0 に固定した試験で排気のサンプリングは機関直後であり後処理装置の影響は受

²⁴⁰ Ripudaman Singh (Robert Bosch LLC), Alexander Voice (Aramco), Mohammad Fatouraie (Robert Bosch LLC), Robert Levy (Aramco), Fuel Effects on Engine-out Emissions Part 1 - Comparing Certification and Market Gasoline Fuels, SAE Technical Paper 2021-01-0541, 2021, doi:10.4271/2021-01-0541.

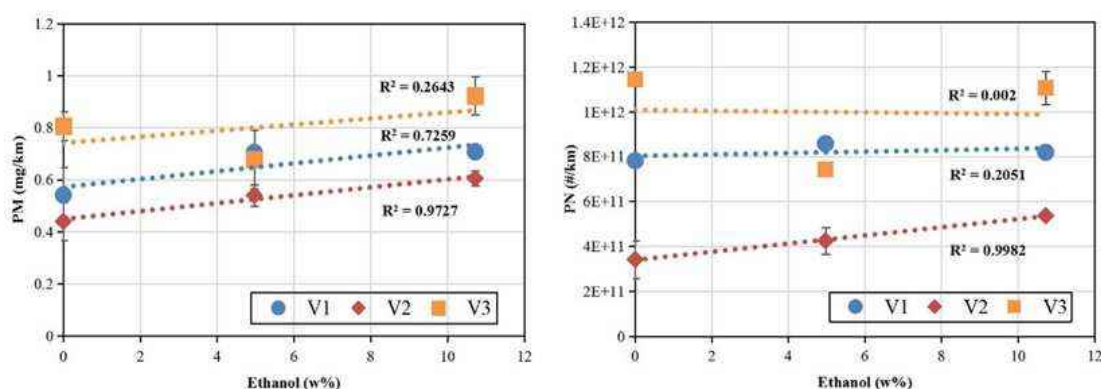
けていない。蒸留範囲の狭い競技用の燃料は、HC の排出が少なく NO_x の排出が多いことが明らかである。また PN (PM の排出個数) を見ると、競技用の燃料の場合に極端に低下し、蒸留範囲が広く高沸点の成分を含む Terminal fuel では、負荷の高い場合に PN の排出量が増加している。この結果はいずれもエタノールを 10% 程度含む結果であるが、エタノールを混合した場合でもベースとなるガソリン中の低沸点と高沸点の成分が排気特性を左右していることを示している。



(注) 4気筒 2.3 L GDI、圧縮比：10、高圧ガソリン噴射：Bosch HDEV6 Injector

図 2.6-4 各種のエタノール混合ガソリンを用いた場合の排出物特性²⁴⁰

3 種類のターボインタークーラ付き機関 (V1:1.0L-GDI [2018]、V2:1.0L-GDI [2017]、V3:1.8L-MPI [2018]) を用い、エンジンアウトでの PM の排出量とエタノール混合割合の関係を調べた結果が図 2.6-5 である。エタノールの混合割合とともに PM の排出量が増加していく場合とそうでない場合があり、混合割合の影響は機関ごとに異なる。



(注) V1 : 1.0 L-GDI [2018]、V2 : 1.0 L-GDI [2017]、V3 : 1.8 L-MPI [2018])

図 2.6-5 3 種類の機関を用いたエタノール混合ガソリンと PM 排出量の関係²⁴¹

一方、4 気筒 2.3 リッターの火花点火機関を 1,500 rpm かつ全負荷で運転した場合の PM の粒径分布として、図 2.6-6 が報告されている。エタノールは含酸素燃料であり、燃焼時の Soot の発生を抑制することは一般に知られているが、ここでの PN (PM の粒子個数) の結果はこの抑制効果を明確に示している。しかし今後の PM 規制として検討されている 23 nm 以下の粒子、とくに 10 nm 以下の粒子をみると、エタノール混合割合とともに増加している。このような微小粒子には固体粒子だけでなく液体粒子も含まれていて、人体の健康に対する悪影響が指摘されている。

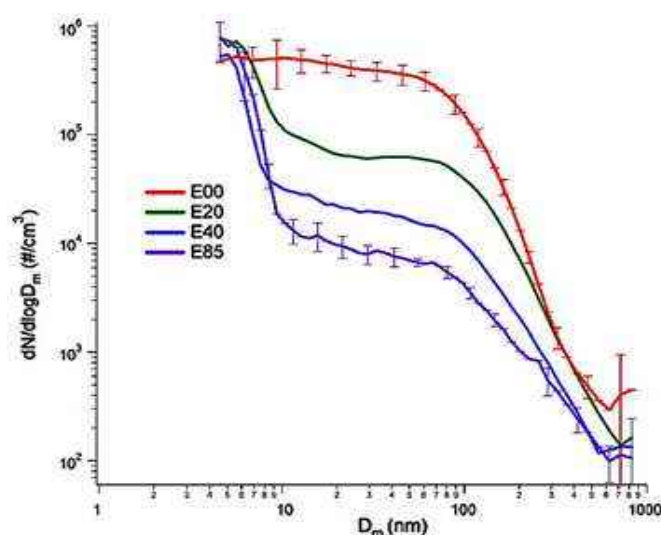


図 2.6-6 PM の粒径分布に与えるエタノール混合ガソリンの影響²⁴²

²⁴¹ Wen Sun (DONGFENG Motor Corporation), Susan Zhang (Pan Asia Technical Automotive Center Co), Haitao Zhou and Xiaoshuang Kong (China FAW Group CO., Ltd), Ni Zhang (DONGFENG Motor Corporation), Influence of Ethanol and MTBE Proportion in China VIB Gasoline on Vehicle Particulate Emissions, SAE Technical Paper 2021-01-0540, 2021, doi:10.4271/2021-01-0540.

²⁴² Dabrina D. Dutcher, Mark R. Stolzenburg, Samantha L. Thompson, Juan M. Medrano, Deborah S. Gross, David B. Kittelson and Peter H. McMurry, Emissions from Ethanol-Gasoline Blends: A Single Particle Perspective, Atmosphere 2011, 2, 182-200; doi:10.3390/atmos2020182

図 2.6-6 の結果は図 2.6-5 の結果と相反している。図 2.6-5 でのエタノールの混合範囲は最大 11%と狭く、エタノール混合ガソリンを互換燃料として使用する際の影響の調査であり、エタノールがオクタン価向上のための添加剤として機能している範囲とみられる。これに対し、図 2.6-6 は混合割合が高い場合で、含酸素燃料としてのエタノール本来の Soot 低減効果が表れている。

ここで紹介したエタノールの排出物に対する影響は、いずれもエンジンアウトの特性であり、通常の自動車用機関では後処理装置により、HC と CO の酸化、NO_x の還元、PM の捕集と酸化が行われている。したがって、自動車からの最終的な排出物特性は後処理装置に依存するが、現状の規制値レベルを十分クリアする後処理装置が開発されているので、現在はそのコストダウンが技術的な課題になっている。将来の問題としては NO_x 規制がさらに厳しくなるため、NO_x のエンジンアウトの値を低下させかつ熱効率向上を意図したリーンバーンエンジンの開発が重要になる。この場合、オクタン価の高いエタノールはガソリンへの混合基材として重要である。一方、PM や HC が増加する場合があります、メタノールやエタノール自体の腐食性など燃料の特性として好ましくない点もあるため、現状ではエタノール混合ガソリンの使用拡大を意図した特別な排出ガス対策は行われていない。

2.6.3 バイオディーゼル

狭義のバイオディーゼル燃料は、植物油にメタノールを加えてエステル化し動粘度を低下させた燃料（FAME であり HVO は含まれていない）であるが、植物油をそのまま燃料として用いた場合のディーゼル機関の排出特性も調べられている。表 2.6-3 はエステル化する前の菜種油（neat/straight rapeseed oil）とディーゼル軽油の比較であり、ディーゼル軽油に比べて、菜種油は極端に動粘度が高く、筒内に噴射した場合に良好な噴霧が得にくい短所を持っている。また発熱量は若干低く含酸素燃料であるため、ディーゼル機関での拡散燃焼中に Soot が発生しにくい特徴がある。しかし高沸点成分（蒸留曲線での T90）の温度が高いため、PM 中の SOF が増加する傾向がある。

表 2.6-3 菜種油（Rapeseed oil）とディーゼル軽油（Gas oil）の燃料性状の比較²⁴³

		Rapeseed oil	Gas oil
Density	kg/m ³ @288 K	911	837
Kinematic viscosity	cSt@303 K	47.8	3.53
Distillation, T90	°C	(> 400)	325
Lower heating value	MJ/kg	38.1	42.7
Oxygen content	wt%	11.1	0

²⁴³ Y. Kidoguchi, Y. Nada, S. Sangawa, M. Kitazaki, D. Matsunaga, Effect of low load combustion and emissions

小形の直接噴射式ディーゼル機関を用いて、菜種油とディーゼル軽油を燃料とした場合の PM の排出傾向を調べた結果が図 2.6-7 である。燃料性状の特徴から推定した通り、菜種油を用いると Soot は減少するが SOF は増加する。この主な原因は、菜種油の動粘度が高いことに起因したディーゼル噴霧特性の悪化にある。

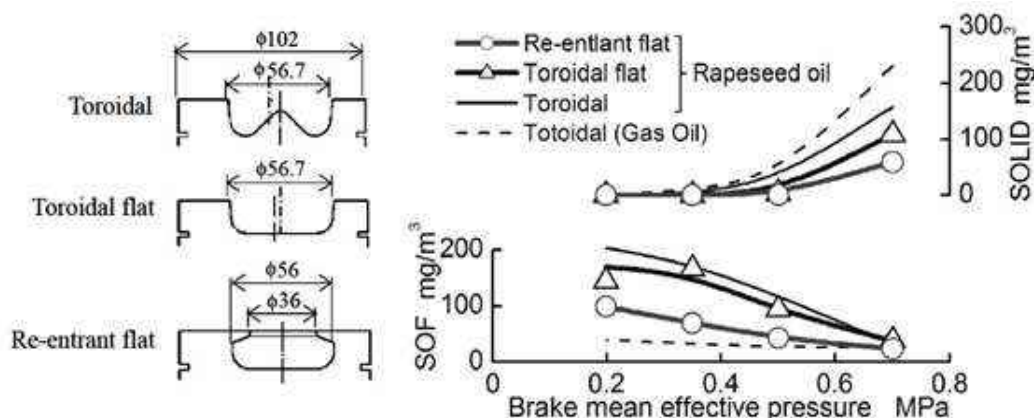


図 2.6-7 菜種油（Rapeseed oil）とディーゼル軽油（Gas oil）を用いたディーゼル機関（機械式燃料噴射）の Soot と SOF の排出傾向²⁴³

SOF の増加を抑える対策としては、高圧噴射を行って噴霧特性を改善する方法と、菜種油の使用により悪化したディーゼル噴霧に合わせて燃料室形状を変更する方法がある。図 2.6-7 に示した結果は、燃焼室形状を変更して混合を促進することで、Soot の更なる改善と SOF の増加を抑制することが可能であることを示している。しかし、燃料室形状の変更でも長期間運転に伴う燃焼室内での堆積物の増加が避けられないため、エステル化を行っていない菜種油をディーゼル機関で使用することには限界がある。

植物油をエステル化したいわゆるバイオディーゼル油を用いたディーゼル機関の排出ガス特性は、多くの論文で報告されている。排出ガスの特性は一般的にエステル化の前の植物油の種類、ディーゼル軽油への混合割合、機関自体の特性等により異なっている。

ディーゼル軽油（D）、ジャトロファエステル油（JB）、パームエステル油（OB）、廃食エステル油（WCO）、藻類エステル油（AB）を混合した軽油の特性を表 2.6-4 に示す。バイオエステルをディーゼル軽油に 10% または 20% 混合した状態では、密度、動粘度、引火点、発熱量、セタン価等がディーゼル軽油に近い状態になるため、混合後の燃料はそのままディーゼル軽油の互換燃料と使用することができる。言い換えれば、1 台の試験機関を用いて同一運転条件で排出ガスの比較を行うことができる。

直接噴射式の小型ディーゼル機関で、上記の燃料を使用した場合の排気特性を図 2.6-8 に示す。基本的に大きな相違は現れないが、バイオエステル混合軽油の場合に NO_x の排

on fuel dilution in lubricating oil and deposit formation on DI diesel engines fueled by straight rapeseed oil, Fuel 221, pp.35-43, 2018.

出量は増加し CO と HC の排出量が減少する傾向にある。さらに混合するバイオエステルの種類によって減少割合は多少異なっている。例えば廃食エステル油を 20%混合した WCOB20 の場合では発熱量とセタン価が高く、CO₂ と NO_x の濃度も他のバイオエステルに比べて高くなる。しかし、表 2.6-4 に示した燃料特性から CO₂ と NO_x の排出濃度が高いことを説明することは難しく、試験機関の特性や燃料の詳細な組成が複雑に関与している。

表 2.6-4 バイオエステル混合軽油の特性²⁴⁴

Biodiesel Blends	Density at 15.56 °C, kg/m ³ ASTM D-4052	Kinematic Viscosity at 40 °C, mm ² /s(cSt) ASTM D-445	Flash Point, °C ASTM D-93	Heating Value, kJ/kg ASTM D-224	Cetane Number ASTM D-13
Diesel oil	829	2.8	75	42,000	45
Jatropha biodiesel (B20)	845	5.2	88	40,000	53
Jatropha biodiesel (B10)	835	3.5	83	41,500	48
Palm biodiesel (B20)	835	2.82	71.5	41,206	60
Palm biodiesel (B10)	833	2.49	69	41,780	51
WCO biodiesel (B20)	855.8	2.98	60	43,953	60.71
WCO biodiesel (B10)	856.4	2.85	69	47,021	59.53
Algae biodiesel (B20)	843.8	4.8	90	37,866	70
Algae biodiesel (B10)	840.5	3.31	83	40,017	56

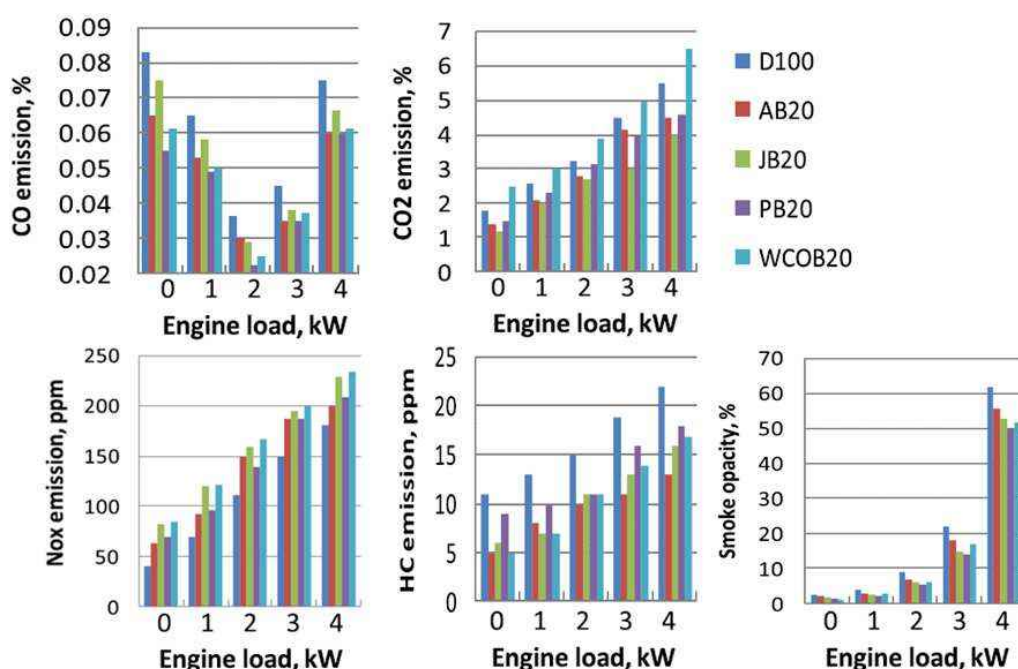


図 2.6-8 バイオエステル混合軽油を用いた場合のディーゼル機関の排出ガス特性²⁴⁴

²⁴⁴ K. A. Abed (National Research Centre, Giza, Egypt), M. S. Gad, A.K. El Morsi, M. M. Sayed, S. Abu Elyazeed, Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions, Egyptian Journal of Petroleum 28 (2019) pp.183–188.

種々の機関、また種々のバイオエステル混合軽油について、混合割合の排出ガスに対する平均的な影響は図 2.6-9 のように EPA にてまとめられている。前述した例も大筋ではこの傾向に一致しているが、機関やバイオエステルの種類により、詳細は異なる。さらに代替燃料として自動車用を使用する場合の排出ガス特性とすれば、機関が具備する後処理装置の性能で自動車からの最終的な排出ガス特性は定まる。言い換えれば、後処理装置で対応可能な範囲での NO_x の増加であれば、バイオエステル混合軽油を互換燃料として使用することに支障がないといえる。ただし長期間運転の場合に燃料室内の堆積物の増加が起き、これが燃焼特性の悪化を招く恐れがあり、現実的には 20% 程度の混合が限界である。

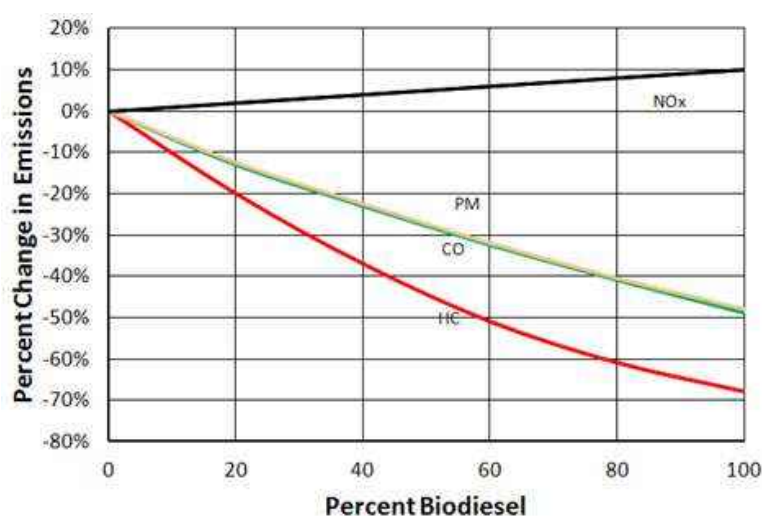


図 2.6-9 バイオエステルの混合割合とディーゼル機関の平均的な排出ガス特性の変化²⁴⁵

バイオ水素化燃料 (HVO) については図 2.3-7 に示した通り水素化の後にさらに水素処理により炭化水素中の炭素鎖の分解を行っているので、HVO の原料である植物油の個々の特性は現れ難く、単に HVO として排出ガス特性が議論されている。100% HVO とディーゼル軽油 (欧州規格 : EN-590) に HVO を 30% 混合した場合の排出ガスと燃費を、ディーゼル軽油 (EN-590) の場合をベースにして相対比較した結果を図 2.6-10 に示す。

HVO はディーゼル軽油に比べて、低沸点及び高沸点成分が少なくディーゼル機関にとって好都合の燃料になっているので、THC、NO_x、CO、FSN (filter smoke number) のすべてにおいてベースとなる EN-590 に比べて改善され、かつ燃費特性も改善されている。燃料体積当たりの燃費が悪化しているのは HVO の密度が EN-590 に比べて低いためである。また EN-590-30 で NO_x が若干悪化しているのは、HVO のセタン価の高い効果のみが 30% 混合では現れたためと思われる。

²⁴⁵ Lilian Lefol Nani Guarieiro and Aline Lefol Nani Guarieiro, Biofuels - Economy, Environment and Sustainability, Chapter 14, Vehicle Emissions: What Will Change with Use of Biofuel?, INTECH, <https://www.intechopen.com/predownload/42164> [2021.12.31 閲覧]

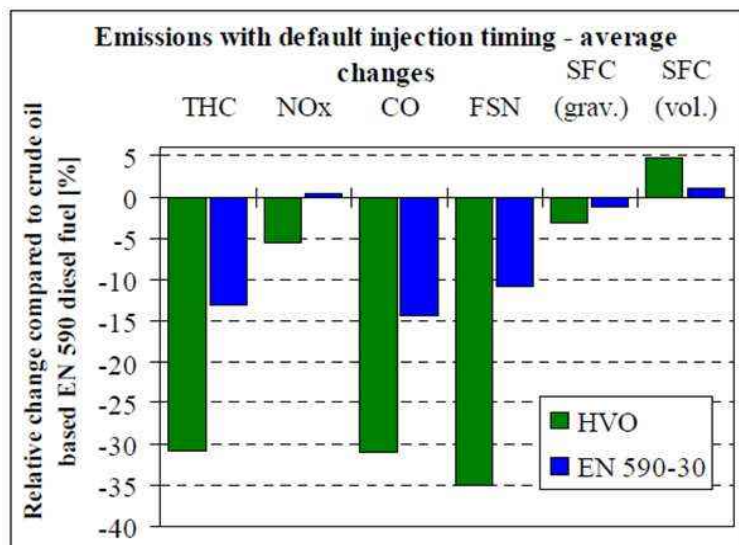


図 2.6-10 100%HVO と 30%HVO 混合ディーゼル軽油の排出ガスと燃費のディーゼル軽油（EN-590）の場合を基準にした低減率²⁴⁶

図 2.6-11 は多数のディーゼル機関を用いて調べた HVO を混合した燃料あるいは 100% HVO の NO_x と PM のディーゼル軽油（EN-590）に対する低減率である。一般的にバイオディーゼル（バイオエステル）は、ディーゼル軽油の互換燃料とする場合に混合割合に制限があるが、HVO には混合割合に制限がなく、HVO 自体が互換燃料（drop-in fuel）である。

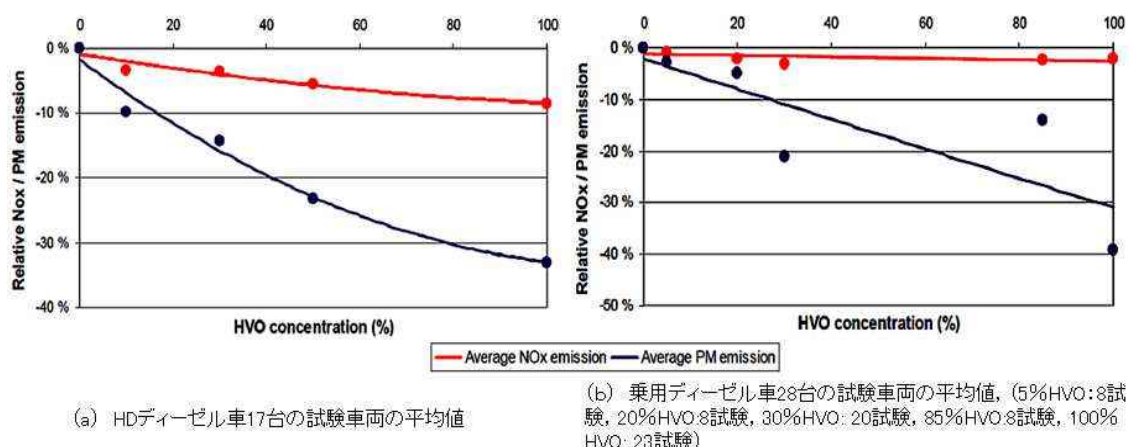


図 2.6-11 HVO の混合割合とディーゼル機関の平均的な NO_x と PM の削減率²⁴⁷

²⁴⁶ Hannu Aatola, Martti Larmi, Teemu Sarjovaara (Helsinki University of Technology), Seppo Mikkonen (Neste Oil), Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NO_x, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine, SAE 2008-01-2500, 2008.

²⁴⁷ Tuukka Hartikka, Markku Kuronen and Ulla Kiiski (Neste Oil Corp.), Technical Performance of HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) in Diesel Engines, SAE paper 2012-01-1585, 2012

最近のディーゼル機関では、過給、EGR (Exhaust Gas Recirculation、排出ガス再循環) 及び多段噴射が高負荷高効率かつ低排出ガスを実現する手法として一般化している。そこで、このような最新のディーゼル機関を用いて、HVO を燃料とした場合の排出ガス特性が調べられている。使用した燃料はディーゼル軽油、HVO、及び 2-エチルヘキサノール ($C_8H_{18}O$) と RME を混合した HVO (EHR7) であり、その燃料性状は表 2.6-5 の通りである。EHR7 は、2-エチルヘキサノールを 37% 及び RME (Rapeseed Methyl Ester) を 7% の割合で HVO に混合した燃料である。2-エチルヘキサノールと RME は、それぞれ含酸素系のアルコールとエステルで HVO とともにバイオ由来の燃料基材である。この 3 基材を混合した EHR7 は含酸素燃料でありながら、セタン価や発熱量はディーゼル軽油に近い値になっている。

表 2.6-5 ディーゼル軽油、HVO、及び 2-エチルヘキサノール ($C_8H_{18}O$) と RME を混合した HVO の燃料性状²⁴⁸

	Unit	Diesel	2-Ethylhexanol	HVO	RME	EH37-H56-R7 (EHR7)
Density	kg/m ³	830	832	779.9	888.3	809.5
Cetane number (CN)	-	52	23.2	75.1	53.4	51.3
Aromatic content	m. %	<8	0	0	0	0
Flash point	°C/K	74/347	75/348	94/367	154/427	NA
Lower heating value (LHV)	MJ/kg	42.9	38.4	44.1	37.3	41.1
Oxygen content (Ox)	%	0	12.3	0	10	5.4
H/C ratio	-	1.83	2.25	2.15	1.81	2.13
O/C ratio	-	-	0.125	-	0.095	0.045
A/F _{stoich}	-	14.4	12.7	14.9	12.6	13.9
Boiling point	°C/K	180-350/ 453-623	184/457	<330/<603	317-346/ 590-619	NA
Kin viscosity. (40°C/ 298 K)	mm ² /s	3.0	5.2	2-4	4.2	NA
Vapor pressure (25°C/ 298 K)	Pa	<120	-26.6	8.7	NA	NA
Latent heat of evaporation	kJ/kg	250	389	NA	NA	NA
Cloud point	°C/K	<0/<273	-20/253	-40/233	-3 - -5/270-268	NA

エンジンアウトの NO_x と Soot に及ぼす燃料と EGR 及び噴射パターンの影響を図 2.6-12 に示す。噴射パターンとしては、メイン噴射のみ、メイン+ポスト噴射、プレ+プレ+メイン噴射、プレ+プレ+メイン+ポスト噴射の 4 パターンを調べている。プレ噴射 (パイロット噴射) は熱効率を高めるための熱発生率制御、またポスト噴射は後処理装置のための噴射であり、エンジンアウトの NO_x や Soot の低減を主目的としたものではない。EGR を行わない条件では、 NO_x は高く Soot の排出が少ない状態であるが、 NO_x を低減するための低酸素低温燃焼を EGR で行うといずれの燃料の場合でも NO_x の値は低下する。Soot については EGR を行わない場合では HVO が一番低い値を示すが、EGR を行うと Soot は増加する。しかし含酸素基材を含む EHR7 では EGR による Soot 増加の影響を小さくすることができている。

²⁴⁸ Josefine Preuss, Karin Munch, and Ingemar Denbratt (Chalmers University of Technology), Effect of Injection Strategy and EGR on Particle Emissions from a CI Engine Fueled with an Oxygenated Fuel Blend and HVO, SAE Technical Paper 2021-01-0560, 2021, doi:10.4271/2021-01-0560.

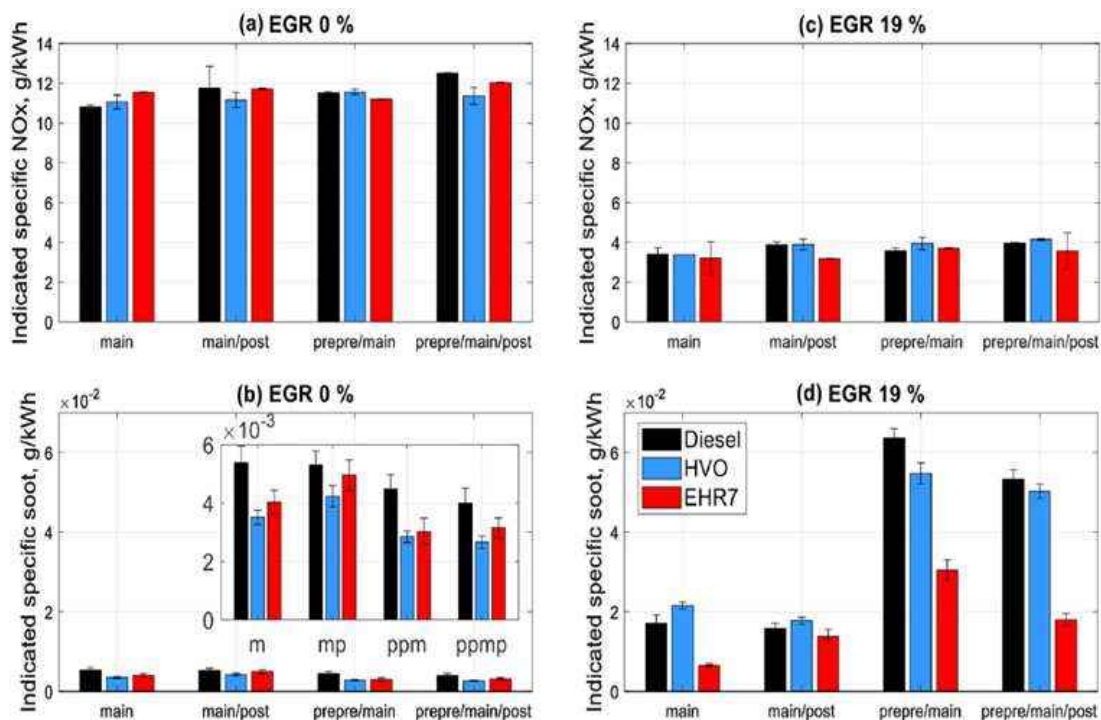


図 2.6-12 NO_x と PM に及ぼす燃料と EGR 及び噴射パターンの影響²⁴⁸

PM の粒径分布に及ぼす燃料と EGR 及び噴射パターンの影響を図 2.6-13 に示す。EGR を行くと、30 nm 以下の核生成モードの粒子が減少し、100 nm 前後にピークを持つ凝集モード粒子が増加する。これは図 2.6-12 に示した Soot の排出濃度の EGR 下での増加に対応しているが、凝集モードの PM は DPF により容易に捕集かつ酸化除去できるので、後処理装置を含めた機関全体としては大きな問題にならない。

一般的にディーゼル軽油と HVO については、Soot の排出量と PM の粒径分布が類似の傾向を示すが、含酸素燃料である EHR7 はそれらと異なる傾向を示しかつ排出ガス低減効果が大きいと見られる。したがって、今後の NO_x と PM の同時低減対策では HVO だけに頼らず、含酸素燃料基材にも注目することが重要である。

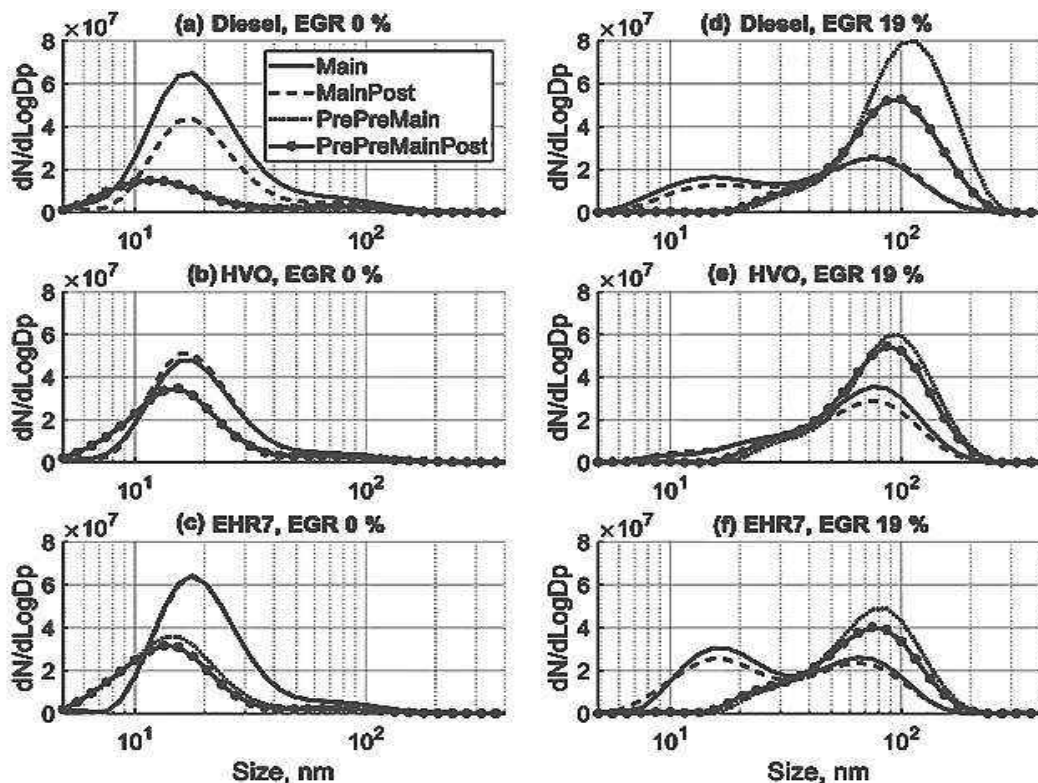


図 2.6-13 PM の粒径分布に及ぼす燃料と EGR 及び噴射パターンの影響²⁴⁸

2.6.4 バイオメタン

次世代自動車用燃料の観点からバイオメタンを検討し、その排出ガ斯特性を本格的に調べた研究は見当たらない。ただし、バイオメタンと天然ガスはともにメタンを主成分とする燃料であるため、CNG 自動車としての排出ガ斯特性の把握と一般的な排出ガス対策は行われている。図 2.6-14 に CNG とガソリンを使用した場合の火花点火機関の排出ガ斯特性の一例を示す。表 2.3-4 に示した通り天然ガスにはエタンやプロパンが含まれていて、CNG にもエタンやプロパンが数パーセント含まれている。一般的に CNG 車はガソリン車より排出ガスレベルが改善されるので、ガソリン車の通常の排出ガス対策と排出ガス後処理対策で十分である。また表 2.3-4 に示してある通り、CO₂ を取り除いてバイオメタンとする以前のバイオガス自体には硫化水素が多量に含まれている場合が多いので、バイオガスをそのまま内燃機関の燃料とする場合には後処理装置の硫黄被毒に注意する必要がある。またバイオガスをガス燃料としてガソリン機関やディーゼル機関で直接使用する場合には、燃料の発熱量の低下に伴う出力不足への対処が問題となる。さらに長時間運転後の燃焼室内にカルシウムやケイ素系の堆積物が生じることもあるので、バイオガス自体の浄化を十分に行う必要がある。

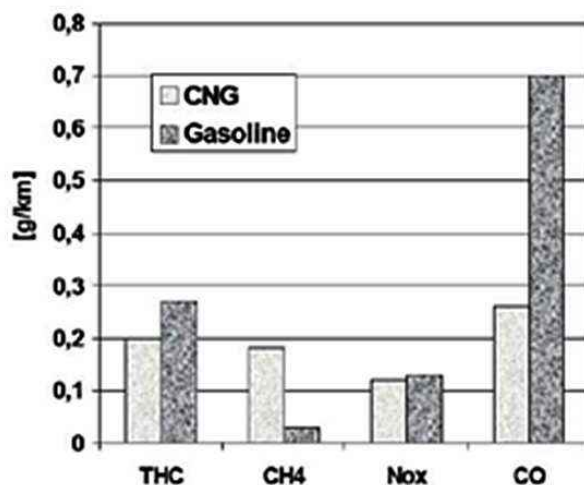


図 2.6-14 火花点火機関で CNG とガソリンを使用した場合の排出ガス特性²⁴⁹

2.6.5 合成燃料

e-fuel は、電力由来の水素をベースとした合成燃料の総称であり、その典型的な燃料には、再生可能な電力で得られた H_2 と、同じく再生可能電力を用いて大気中から回収した CO_2 をもとに F-T 合成した直鎖系の炭化水素がある。また e-fuel の製造プラントでは、プラントの運転エネルギーもすべて再生可能電力でまかなうことが前提になっている。前述した通り F-T 合成した直鎖系の炭化水素は、基本的に完全な Drop-in Fuel である互換燃料であるため、得られた直鎖系の炭化水素を蒸留してガソリン、ジェット燃料、ディーゼル軽油に分ければ、それぞれは特別な排気対策を施さずに現状の機関で利用できる。

GTL (gas to liquid) 燃料は水素と CO_2 から合成する液体燃料の総称であり、通常は F-T 合成で得られる合成軽油を意味し、水素や CO_2 の由来については特別な制約はない。すなわち、e-ディーゼル軽油は GTL の中で、再生可能電力を由来とする水素を用いる F-T 合成軽油であるが、他の手法で得られた水素や CO_2 を用いた場合と燃料としては同じである。そこで、GTL 軽油を用いて e-ディーゼル軽油の特性を説明する。表 2.6-6 は 5% のバイオエステルを含むディーゼル軽油、GTL 軽油、GTL を 20% 含む混合軽油、及び GTL を 50% 含む混合軽油の燃料特性である。GTL 軽油は密度が低くセタン価が高い特徴があり、GTL 混合軽油はディーゼル軽油と GTL の中間の値を示している。

²⁴⁹ Semin, Rosli Abu Bakar (University Malaysia), A Technical Review of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines, American J. of Engineering and Applied Sciences 1 (4), pp.302-311, 2008.

表 2.6-6 GTL 及び GTL 混合軽油の燃料特性²⁵⁰

Properties	Diesel B5	GTL	D80G20	D50G50
Density @ 40°C (gm/cc)	0.8328	0.7619	0.8178	0.7922
Kinematic viscosity @ 40°C (mm ² /sec)	3.4626	2.7417	3.2761	3.1253
Flash Point (°C)	77.5	103.5	83.5	88.5
Calorific Value (MJ/Kg)	44.664	46.805	45.026	45.734
Cetane NO.	55	75	70	65

小形の直噴ディーゼル機関（ボア×ストローク＝92 mm×96 mm）の全負荷での出力と熱効率を図 2.6-15 に示す。GTL は発熱量が高いため全負荷での出力は高くなるが、熱効率でみても GTL は高く、これは発熱量の問題ではなく GTL により燃焼が改善されていることを示している。GTL は、ディーゼル軽油に比べて動粘度が低くかつ Flash Point が高いため、蒸発や燃焼以前の噴霧の状態での燃焼室内への分散が良好なことが、燃焼改善の要因として挙げられる。図 2.6-16 は排出ガスの結果であり、GTL 燃料では CO、HC、NO がすべて改善していることが示されている。

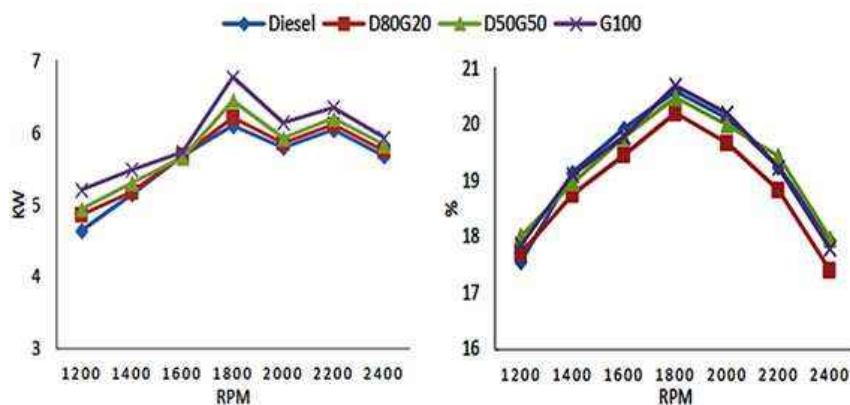


図 2.6-15 GTL 及び GTL 混合軽油とディーゼル機関の出力と熱効率²⁵⁰

²⁵⁰ H. Sajjad, H. H. Masjuki, M. Varman, Mohammad Mahmudur Rahman Khan, M.I. Arbab, S.Imtenan, A. Sanjid, (University of Malaya ,Malaysia), Comparative study of biodiesel, GTL fuel and their blends in context of engine performance and exhaust emission, 10th International Conference on Mechanical Engineering, ICME 2013, Procedia Engineering 90 (2014) 466 - 471.

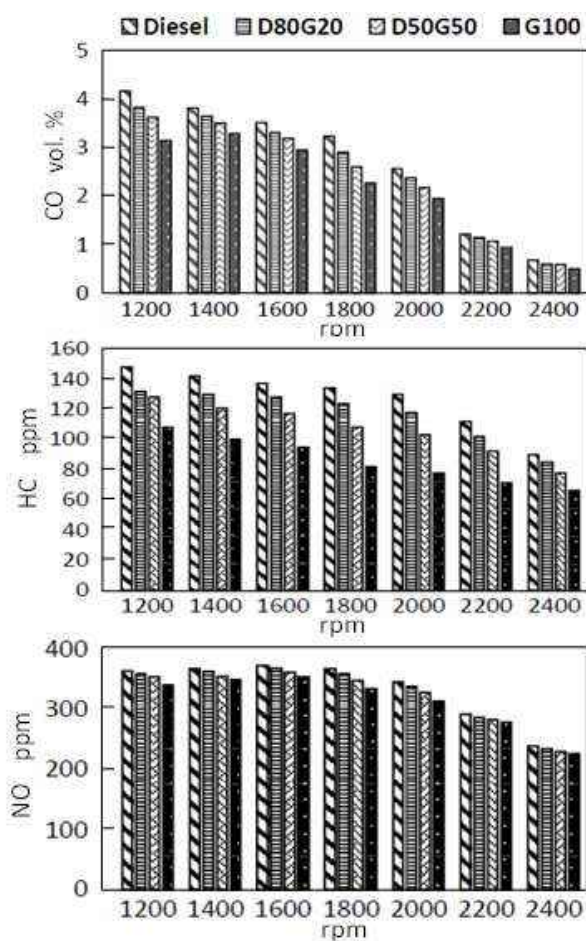


図 2.6-16 GTL 及び GTL 混合軽油とディーゼル機関の排出ガス²⁵⁰

GTL は含酸素燃料ではないため、Soot や PM の排出抑制には大きな改善効果が望めないが、前述した HVO の場合と同じく含酸素燃料の混合により NO_x と Soot の同時低減が可能なことが報告²⁵¹されている。また e-ガソリンを火花点火機関に用いる場合でも、単独で用いる場合と含酸素燃料と組み合わせた場合についての比較が報告²⁵²されている。

広義の e-fuel には、電力ベースの水素をもとにした種々の合成燃料があり、それぞれは混合燃料または非混合燃料として内燃機関で用いられることになるが、いずれも開発段階の燃料である。これらの燃料は、現在の化石燃料系の内燃機関燃料よりも排出ガス対策上有利な基本的な特性をもっていることは明らかであるが、開発途上の合成燃料であるため、

²⁵¹ Felipe Andrade Torres (Federal University of Bahia, Brazil), Omid Doustdar, Jose Martin Herreros, Runzhao Li, Robert Poku, Athanasios Tsolakis, Jorge Martins and Silvio A. B. Vieira de Melo, A Comparative Study of Biofuels and Fischer-Tropsch Diesel Blends on the Engine Combustion Performance for Reducing Exhaust Gaseous and Particulate Emissions, *Energies* 2021, 14, 1538. <https://doi.org/10.3390/en14061538> [2022.01.01 閲覧]

²⁵² Anna KRAJINSKA, Magic green fuels, *Transport & Environment* (2021), https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/11/2021_12_TE_e-fuels_cars_pollution.pdf [2021.12.23 閲覧]

e-fuel という枠組みでの排出ガ斯特性の詳細は現状ではほとんど明らかにされていない。一方 e-fuel は、CO、HC、NO_x、Soot/PM の低減という排出ガスの問題解決以上に、内燃機関自動車からの CO₂ 排出を低減させるための燃料として期待されている。

2030～2050 年での EU における e-fuel の導入予測を表 2.6-7 に示す。ここでは e-fuel として広義の考え方を採用し、水素やアンモニアなども e-fuel に含めている。メタンは運輸部門以外の燃料としての導入が主流、アンモニアは船舶への導入が主流になると予測されている。さらに F-T 合成で作られる狭義の e-fuel は、ディーゼル軽油やジェット燃料に対する代替燃料としての導入が主流になると予測されている。乗用車への e-fuel の導入は欧州ではさほど期待されていないが、これは EV 車が乗用車の主流になるとの予測に基づいているためと思われる。

表 2.6-7 e-fuel の運輸部門での導入予測²⁵³

	E-FUELS	PASSENGER CARS	HEAVY DUTY	MARITIME	AVIATION	OTHER SECTORS (NON TRANSPORT)
Gas	e-methane (CH ₄)	X	XX	XX		XXX
	e-hydrogen (H ₂)	XX	XX	X		X
Liquid	e-ammonia (NH ₃)	X	X	XXX		
	e-methanol (CH ₃ OH)	XX	X	X		
	e-DME/e-OME	X	XX	XX		
	e-gasoline	X				
	e-diesel	X	XXX	XX		
	e-jet				XXX	

(注) XXX (緑色) : 一次利用、XX (青色) : 二次利用、X (黄色) : 部分利用

気体及び液体の e-fuel の発熱量、燃料の貯蔵/備蓄、供給インフラ、及び自動車用動力源としての EU における開発状況を表 2.6-8 に示す。図中の注釈については (a) は e-メタンは天然ガスの燃料供給インフラが使用できるが、液体燃料としての備蓄は難しいこと、(b) は e-水素は燃料電池車として使用可能だが、主流になるか疑わしいこと、(c) は e-ガソリン、e-ディーゼル軽油、e-ジェットは化石燃料由来のそれぞれの燃料と互換可能であるが、市場で現在利用できる状態ではないことを示している。

狭義の e-fuel である e-ガソリン、e-ディーゼル軽油、e-ジェット燃料については、前述した通り互換燃料であるため、燃料の貯蔵/備蓄は容易であり、供給インフラ整備と内燃機関の新規開発が不要なことをこの図では明確に示している。また発熱量については、表 2.5-7 に示したガソリンやディーゼル軽油とほぼ同等であることも互換燃料として重要である。

²⁵³ Marta Yugo, A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030–2050)(literature review), Concawe Review Volume 28 Number 1, October 2019.
https://www.etipbioenergy.eu/images/Concawe_A%20look%20into%20e-fuels%20in%20transport%20system_Oct19.pdf [2022.01.02 閲覧]

表 2.6-8 気体及び液体の e-fuel の発熱量と開発状況²⁵³

	E-FUELS	LOWER HEATING VALUE (LHV), MJ/kg / MJ/litre	STORAGE	ADDITIONAL INFRASTRUCTURE	POWERTRAIN DEVELOPMENT
Gas	e-methane	46.6 / 0.04	Medium ^a	No	No
	e-hydrogen	120 / 0.01	Difficult	Yes	No ^b
Liquid	e-ammonia	18.6 / 14.1	Easy	Yes	Yes
	e-methanol	19.9 / 15.8	Easy	No	Yes
	e-DME	28.4 / 19.0	Easy	Yes	Yes
	e-OME	19.2 / 20.5	Easy	Yes	Yes
	e-gasoline ^c	41.5 / 31.0	Easy	No	No
	e-diesel ^c	44.0 / 34.3	Easy	No	No
	e-jet ^c	44.1 / 33.3	Easy	No	No

(注) 緑色：有利、黄色：不利、橙色：困難

化石燃料、電力、バイオ燃料、e-fuel についての開発状況や GHG 排出に及ぼす総括的な比較を表 2.6-9 に示す。

再生可能電力と e-fuel については GHG 排出低減効果が大きいので、開発のための投資が EU において積極的に行われていることが示されている。なお、米国においては e-fuel よりもバイオエタノールの乗用車での使用増加を中心にバイオ燃料の導入拡大に重きが置かれていると思われる。さらに電力を直接動力源とする BEV においてはバッテリーの製造時の環境汚染や電力製造時の GHG 排出の問題があり、使用時の CO₂ 排出だけで GHG の排出の効果を評価することは BEV の総合評価にならないとする報告もある²⁵⁴。

表 2.6-9 種々の燃料の開発環境と GHG 低減²⁵⁵

	TRANSPORT SECTORS	INFRASTRUCTURE	STORAGE	INVESTMENT	GREENHOUSE GAS REDUCTION
Fossil fuels	All	Existing	Easy	Low	Low
Electricity	LDV/HDV ^a	New	Difficult	High	High
Biofuels	All (limited by availability and cap in demand)	Existing	Easy	Medium	High
E-fuels	All	Existing ^b	Easy	High	High

(注 1) a：自動車の区分、b：狭義の e-fuel についてはインフラが存在しているが、広義の e-fuel に含まれる e-hydrogen、e-ammonia、e-DME/OME については例外でありインフラが存在しない。

(注 2) 緑色：非常に有利、黄色：有利、橙色：不利

上記の予測において、GHG の排出量は e-Fuel の導入に対する主要な判断基準になっているが、排出ガス問題は判断基準に挙げられていない。この理由としては、狭義の e-Fuel

²⁵⁴ Richard K. Lattanzio, Corrie E. Clark, Environmental Effects of Battery Electric and Internal Combustion Engine Vehicles, Congressional Research Service, R46420, 2020.

²⁵⁵ Marta Yugo, A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030–2050)(literature review), Concawe Review Volume 28 Number 1, October 2019.
https://www.etipbioenergy.eu/images/Concawe_A%20look%20into%20e-fuels%20in%20transport%20system_Oct19.pdf [2022.01.02 閲覧]

は完全な互換燃料であり、仮に広義の e-Fuel を含めても、排出ガス以前の問題、また燃料コスト以前の問題として、GHG の低減と既存インフラの活用が e-Fuel の積極的な導入政策の根拠になっていることを示している。

欧州の EU における e-fuel の導入計画としてドイツの例を図 2.6-17 に示す。なおオランダもほぼ同じスケジュールの導入計画（図 2.3-17）を公表しているため、このスケジュールは EU 全体の計画であると思われる。ここで注目すべきは、この計画が 2017 年以前に立案されたスケジュールであり、e-fuel の導入が 2020 年代には開始される計画であることと、オランダの場合と異なり乗用車への導入も含まれていることにある。さらに供給体制が 15 年ほどで確立されたとしても、航空機や船舶では 20～40 年の期間が燃料転換のために必要であること、またトラックの燃料転換は乗用車の場合よりスムーズに行われると予測していることである。

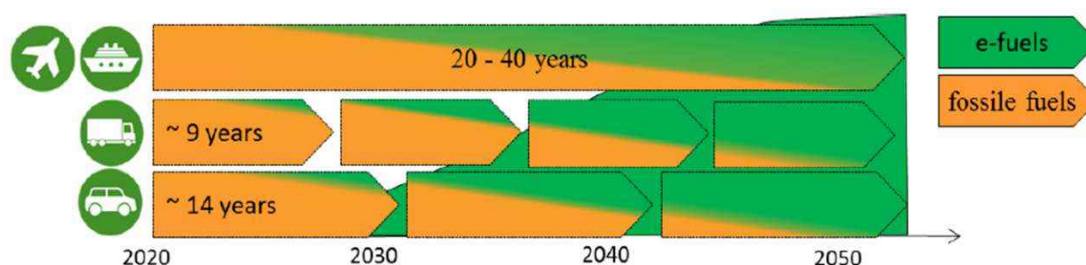


図 2.6-17 ドイツの e-fuel 導入計画²⁵⁶

2.6.6 水素

吸気管から水素とガソリンを供給するタイプの小型の火花点火機関で、水素の混焼割合と CO、HC、NO_x の排出特性の関係を調べた結果を図 2.6-18 に示す。水素の混焼割合を高めていくと CO と HC の排出量は混焼割合に比例して低下していくが、混焼割合が 25% で高速運転の場合に HC の排出量が混焼割合 20% の場合に比べて増加する場合も生じる。これは水素混焼の場合でもガソリンに起因する HC の排出を防ぐことができないことを示している。一方、機関から排出される NO_x は窒素を含む高温燃焼ガス中のサーマル NO に起因しているため、水素混焼による急速燃焼のために燃焼ガスが高温になるに従い増加の傾向にある。したがって水素の混焼は、混焼割合の増加に従い GHG である CO₂ の低減に役立つが NO_x の低減には逆効果になり、NO_x 低減対策として燃焼方式の変更や後処理装置が必要になる。

²⁵⁶ Stefan Siegemund, The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) German Energy Agency, 2017.
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9219_E-FUELS-STUDY_The_potential_of_electricity_based_fuels_for_low_emission_transport_in_the_EU.pdf [2022.1.2 閲覧]

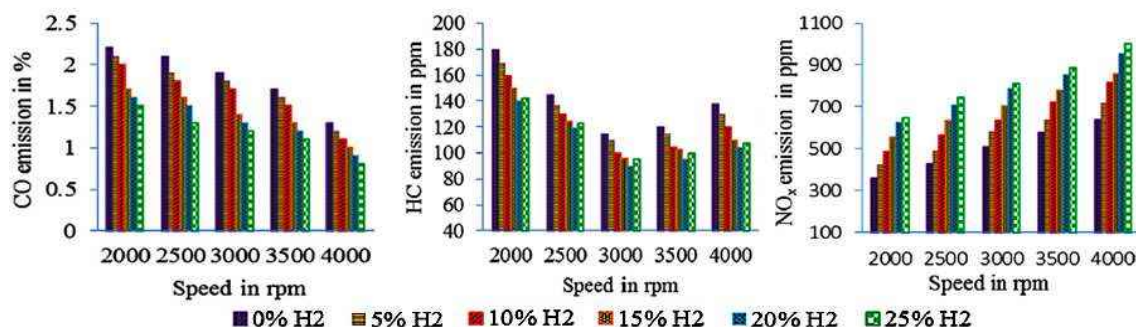


図 2.6-18 水素混焼を行った場合のガソリン機関（75%WOT）の排出ガス特性²⁵⁷

水素のみを筒内に直接噴射する小形の火花点火機関においても NO_x の排出は問題になる。図 2.6-19 は EGR を用いて燃焼時の酸素濃度を下げて NO_x を低減させる対策を示した結果である。EGR を行わない（EGR%=0）場合は、前述した水素混焼の場合より低いものの NO_x はそれなりに排出されていて、その低減には空気過剰率の増加、すなわち希薄燃焼（リーンバーン）が有効であることを示している。空気過剰率の低い場合では EGR の効果が顕著であり、わずか 5% の EGR により NO_x を大幅に低減することができる。EGR の増加は出力の低下を招くが希薄燃焼は燃焼効率の向上に寄与するので、EGR と希薄燃焼の組み合わせが現実的であると思われる。水素の専焼機関では CO と HC の排出は問題にならないが、後処理装置で NO_x をさらに除去する際に CO と HC を NO_x の還元剤として使えないため、燃料の水素や尿素等の還元剤を使用する SCR が後処理装置として必要になる。

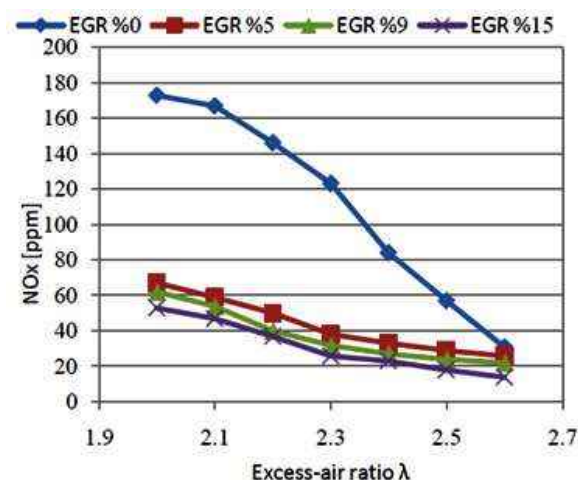


図 2.6-19 火花点火式の水素直噴機関の NO_x 低減対策としての EGR²⁵⁸

²⁵⁷ K. V. Shivaprasad, P. R. Chitragar, and G. N. Kumar (National Institute of Technology Karnataka, India), Effect of Hydrogen Addition on Combustion and Emission Characteristics of High Speed Spark Ignition Engine- An Experimental Study, SAE paper 2015-01-1684, 2015.

²⁵⁸ Zuhdi Salhab, Effect of Exhaust Gas Recirculation on the Emission and Performance of Hydrogen Fueled

水素はセタン価が低いため、ディーゼル機関の主燃料にはならないが、副燃料として吸気管から供給してRCCI燃焼を行わせることが試みられている。複合燃料機関であるRCCI機関ではNOと燃焼室に直接噴射される炭化水素系燃料に起因するSmokeを同時に低減することを目的とした機関変更が前提になっている。結果の一例を図2.6-20と図2.6-21に示す。ここでHVOは $C_{15}H_{32}-C_{18}H_{38}$ の燃料、PRODiesはHVOを15%混合させた軽油($C_{10}H_{22}-C_{18}H_{38}$)、LLは低負荷、MLは中負荷、NLは定格負荷である。図の結果では、水素混焼によるNOの増加を抑制しつつ煙濃度(Smokiness)の低減が達成でき、RCCI機関での水素とHVOまたはディーゼル軽油の組み合わせがNOとSmokeの同時低減に効果があることが明らかにされている。

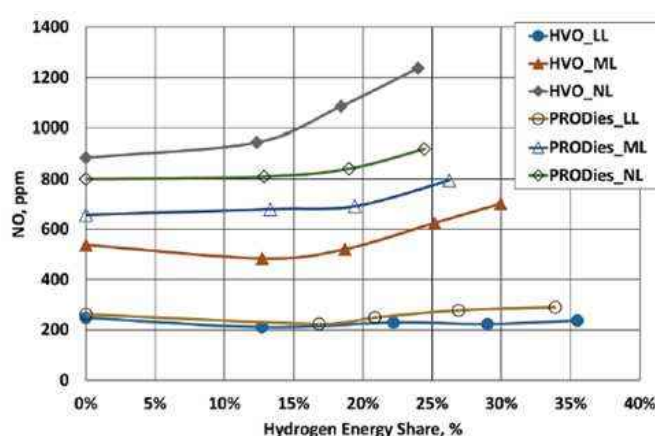


図 2.6-20 水素 RCCI 燃焼の NO 低減に及ぼす水素の効果²⁵⁹

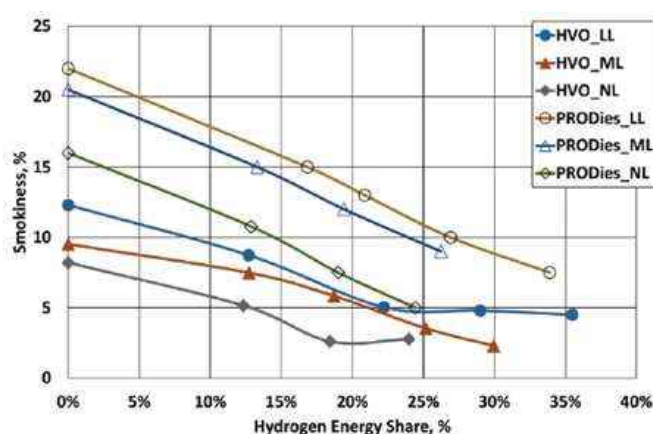


図 2.6-21 水素 RCCI 燃焼の煙濃度 (smokiness) 低減に及ぼす水素の効果²⁵⁹

2.6.7 アンモニア

アンモニア燃焼の内燃機関で問題となるのは、未燃のアンモニアと NO_x の排出である。吸気管からアンモニアを供給する火花点火機関について、未燃のアンモニアと NO_x 排出濃度の関係を調べた結果の一例が図 2.6-22 である。アンモニアの燃焼速度が遅いため、この機関では通常運転（1,000 rpm と 2,000 rpm）条件の場合 H_2 を 5%以上加えないと運転ができない。それぞれの機関回転数の場合 NO_x の最大は当量比 0.9 の希薄側の場合であり、当量比が増加（1.0 と 1.1）すると NO_x は低下する。当然のことながら NO_x の生成メカニズムとしてはサーマル NO 以外にフューエル NO の生成メカニズムも含まれている。当量比が 1.0 のアンモニア-空気混合気中のアンモニア濃度が 21.9%であることを勘案すると 5%前後のアンモニアが未燃のまま放出されていることになるので、排出ガスとしての問題だけでなく、内燃機関の燃焼効率の観点からも未燃のアンモニアの低減が必要である。未燃のアンモニアの排出と NO_x の排出はトレードオフの関係にあり、未燃のアンモニアの排出が少ない燃焼の場合には燃焼ガスが高温になり NO_x の排出量は通常のガソリン機関より高くなる（ガソリン機関の約 3 倍）。したがって、後処理装置によるアンモニアを用いた NO_x の還元除去と余剰の未燃アンモニアの触媒酸化除去が必要になる。

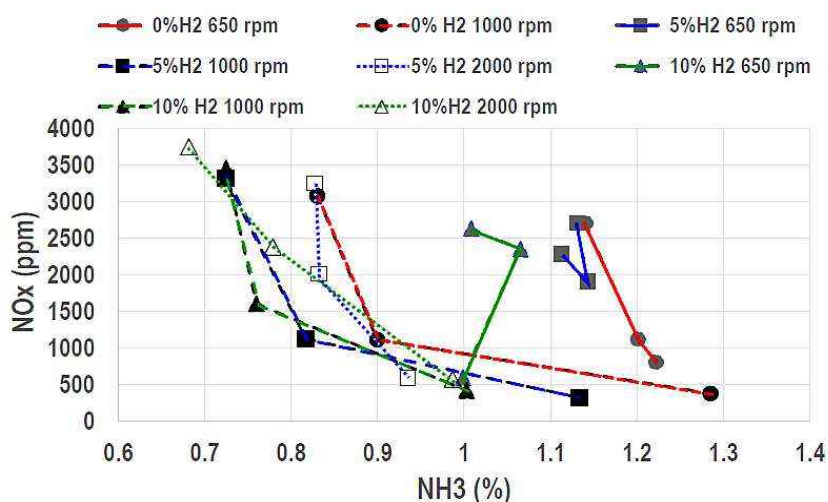


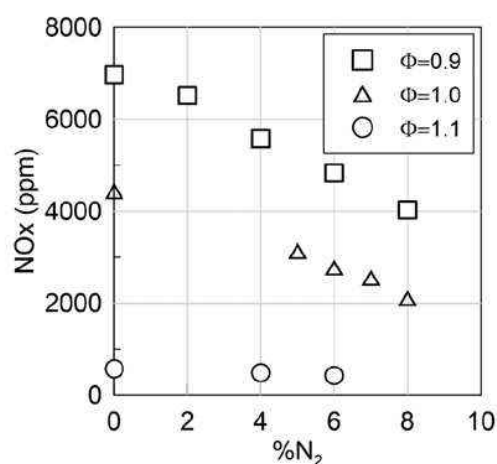
図 2.6-22 アンモニア火花点火における未燃のアンモニアと NO_x 排出濃度の関係
(文献²⁶⁰より作成)

過給を行い 1,500 rpm でアンモニアのみで運転を行った場合の NO_x の排出量を図 2.6-23 に示す。この場合、EGR の代わりにアンモニアを N_2 で直接希釈して NO_x を低減させる方策をとると、当量比が 0.9 と 1.0 の場合に効果的に NO_x を低減することができる。なお

²⁶⁰ Christine Mounaïm-Rousselle (University Orléans, France), Pierre Bréquigny, Clément Dumand and Sébastien Houillé, Operating Limits for Ammonia Fuel Spark-Ignition Engine, Energies 2021, 14, 4141. <https://doi.org/10.3390/en14144141> [2022.01.02 閲覧]

9%の N_2 希釈は11%のEGRに相当する。当量比が1.1の場合は過濃混合気の燃焼であり、燃焼温度が低く NO_x の排出がもともと少ないため、 N_2 希釈の効果は顕著ではない。

アンモニア機関の場合にはCOやHCの排出はないが、今後も排出量の低減が求められている NO_x についてはその低減対策が必要である。エンジンアウトの NO_x を低減するためにはEGR燃焼が、またテールパイプ NO_x を削減するためにはアンモニアを還元剤とする NO_x 還元処理が好都合で重要になるが、いずれの技術も既存の NO_x 対策技術として確立されているので、アンモニア機関への適応は可能と思われる。



(注) $P_{in}=1.3$ bar、1,500 rpm

図 2.6-23 アンモニア火花点火におけるアンモニアの N_2 希釈と NO_x 排出濃度の関係²⁶⁰