

カーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョン 2.0 :
CO₂ 排出削減が困難な産業の循環経済への変革

Carbon Independence Vision 2.0:
Circular Transformation from Hard-to-Abate Industries

化学工学会
地域連携カーボンニュートラル推進委員会
(2025年3月)

Executive Summary

CO₂排出削減が困難な産業のうち、化学産業におけるプラスチック等再資源化、バイオマスからの化学原料合成、CCUについて、具体的なプロセスを想定し、炭素フローとエネルギー収支を算出した

技術レベルが向上したケースについて検討し、技術革新のインパクトを定量化した

炭素自立の具現化に向けて、炭素源の発生場所から使用場所への移送を考慮した炭素自立の姿を示した

炭素自立ビジョン更新の趣旨

2024年9月に発表したカーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョンでは、化石燃料をエネルギーとして利用するだけでなく、素材として利用する鉄鋼、化学、セメント、紙・パルプなど、CO₂排出削減が困難な（Hard to abate, HTA）産業の将来の炭素フローの姿を示した。示した炭素自立ビジョンには、大胆な仮定や近似の精緻化、炭素フローの実現に必要な投入エネルギー、資源の分布と輸送等の地理的な考慮、技術や制度等の社会実装の時間軸など様々な論点が残されていた。本意見書は、炭素自立に向けた具体的なアクションにつなげていくため、残された論点のうち、仮定や近似の精緻化、炭素フローの実現に必要な投入エネルギー、資源の分布と輸送等の地理的な条件を検討し、炭素自立ビジョン第2版として公表するものである。

CO₂排出削減が困難な産業のカーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョン2.0

炭素自立ビジョン第2版では、HTA産業のうち、化学産業におけるプラスチック等再資源化、バイオマスからの化学素材の生産、CO₂の回収・利用（CCU）について、具体的なプロセスを想定し、その収率および副生物を考慮した上で、炭素フローとエネルギー収支を算出した。

それぞれの工程で必要となるエネルギー量の観点から、バイオマスからの化学素材の生産とCCUがトレードオフとなる観点が明確化され、化学素材の生産、CCU、および水素製造に関する技術の成熟度の進展を考慮した社会実装の姿を描くことが重要であることを示した。社会実装に重要となる、再生可能エネルギー資源、バイオマス資源、バイオマスの集積拠点、化学原料生産拠点などの立地と輸送を考慮した炭素のフローと必要なエネルギー量についても具体的にその姿を示した。加えて、技術の進展を想定した炭素自立の姿についても検討し、新技術のインパクトを定量的に示した。

炭素自立の具現化に向けた課題と論点

炭素自立に向けて、バイオリファイナリーやCCU、再生可能エネルギーからの水素製造等、新産業を創出するとともに、既存産業との連携を考慮した生産拠点の立地と移送が重要となる。化学原料を利用する川下産業も含め、規模のメリットを考慮した製造拠点の集約化など、社会全体の経済合理性の観点での最適化も必要である。

炭素自立ビジョンを実現するためには、それぞれの技術をどのような時間軸で社会実装するかシナリオを描く必要がある。今後、各技術や社会の仕組みの成熟度、経済合理性がどのように進展し、既存設備の活用と設備の新規導入をどのように進めるべきか、あるべき道筋を示し、炭素自立に向けた具体的なアクションに結実させることで、他国に先んじてGXを実現し、国際競争力を強化しつつ、2050年のネットゼロに到達することが期待できる。

1. はじめに

現在、2050年の温室効果ガス排出の実質ゼロの実現は、不可逆の長期目標として国際的に認識されている。その実現に向けた様々な分野の取り組みの中でも、ものづくりの分野における取り組みがもっともハードルが高く、各国がその対策に注力している。2024年9月に発表したカーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョンでは、化石燃料をエネルギーとして利用するだけでなく、素材として利用する鉄鋼、化学、セメント、紙・パルプなど、CO₂排出削減が困難な（Hard to abate, HTA）産業の将来の炭素フローの姿を示した。具体的には、プラスチックなど化学品のリサイクル率の向上、国内森林バイオマス資源の最大活用と大気に放散されるCO₂の回収・利用・貯留（CCUS）により炭素資源の循環を実現し、HTA産業が輸入化石資源に依存しない将来像を示した。

炭素自立ビジョンを、具体的なアクションにつなげていくためには、大胆な仮定や近似の精緻化、素材として利用される炭素循環の実現に必要な投入エネルギー、炭素資源の発生や再生可能エネルギーの分布と移送等の地理的な考慮、技術や制度等の社会実装の時間軸など様々な論点が残されている。

本意見書では、炭素自立ビジョン第2版として、HTA産業のうち、化学産業におけるプラスチック等再資源化、バイオマスからの化学素材の生産、CCUについて、具体的なプロセスを想定し、その収率および副生物を考慮した上で、炭素循環とその実現に必要なエネルギー量を算出した。現状の技術レベルが向上した場合のインパクトを評価するとともに、炭素源の発生場所から使用場所への移送を考慮した炭素自立の姿についても検討した。

2. CO₂ 排出削減が困難な産業の炭素自立ビジョン 2.0

第2版では、第1版の国内森林バイオマス資源を化学素材生産で優先的に利用するケース1を対象に、化学産業における素材生産プロセスを具体化し、後述するようにそれぞれの収率を踏まえた炭素循環の姿を詳細化した（図1）。

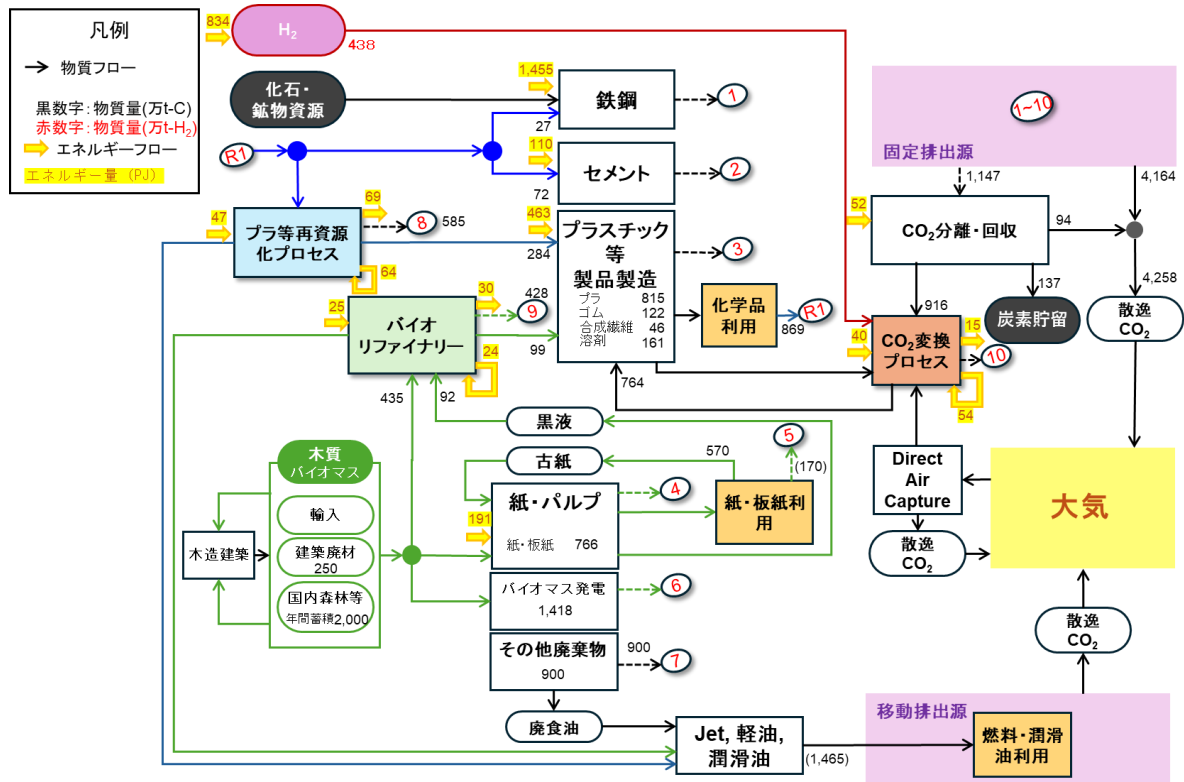


図1 炭素循環の全体図（ケース1a）

プラスチックは、排出されたうちの80%をリサイクルし、残り20%は直接焼却とした。

リサイクル（図 2）の内訳は 10%をマテリアルリサイクル、50%を油化、40%をガス化とした。油化では生成された分解油を水素化処理しナフサクラッカーに投入し、その過程で生成される一部を用いて芳香族を製造する。ガス化プロセスでは、精製合成ガスを用いてメタノールを合成し、メタノールからオレフィンを合成（MTO）する。ここで、マテリアルリサイクルや油化プロセスで生じる残渣は、ガス化プロセスに投入することとした。

ゴムは、タイヤのリトレッドによる寿命の延長・廃棄物の最小化を進めながら、現在、サーマルリサイクルされている部分の 80%を油化やガス化によりリサイクルすることとした。繊維は、80%をリサイクルすることとし、そのうち単一繊維からなる 13%をモノマー化、残りの混紡素材をガス化によりリサイクルすることとした。使用済み有機溶剤は、50%を回収・リサイクルし、残りの 35%は焼却、15%は大気放散されるとした。

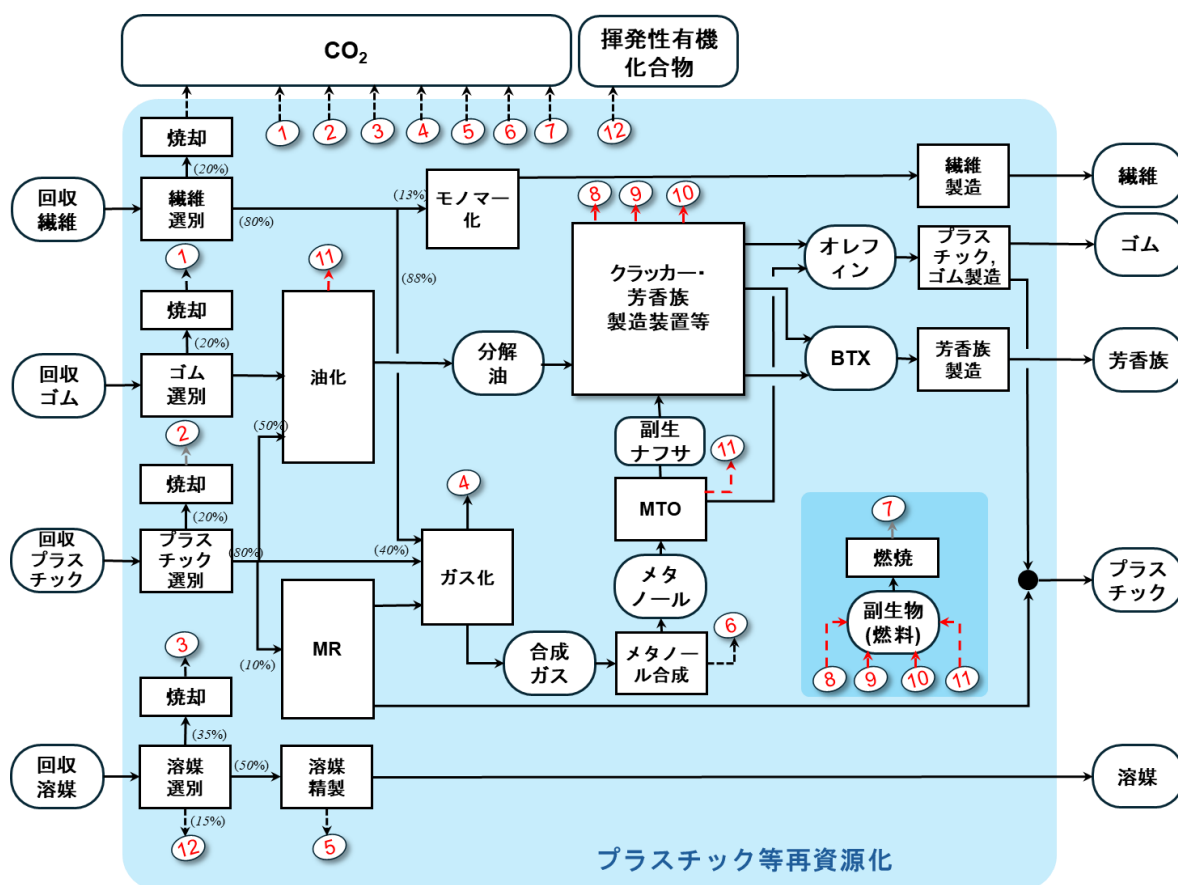


図 2 プラスチック等再資源化の詳細図

バイオリファイナーで化学素材の生産に用いる木質バイオマス（図 3）は糖化発酵とガス化プロセスに 1:1 で投入することとした。糖化発酵により得られたエタノールは、脱水工程を経てエチレンを生産する。ガス化では、合成ガスを精製し、メタノールを経てオレフィンを生産する。紙・パルプ製造で排出される黒液は、現在は製紙工場にて熱回収に用いられているが、将来的にはバイオマス資源として化学品製造に活用することも視野に入れ、本検討の対象として考慮する。

プラスチック等再資源化及びバイオリファイナーでの化学素材生産過程で副生物として生産されるナフサは、軽質ナフサと重質ナフサに分留する（図 4）。軽質ナフサはナフサクラッカーに、重質ナフサは芳香族製造プロセスに投入し、基礎化学品を製造する。また、それぞれのプロセスから排出される CO₂及び副生物・残渣を焼却したこと由来する CO₂に関しては対象を定め回収・利用する。

CCU（図 5）では、メタノール合成を経てオレフィンを生産する。オレフィン生産プロセスから排出されるナフサは、上記同様に活用する。

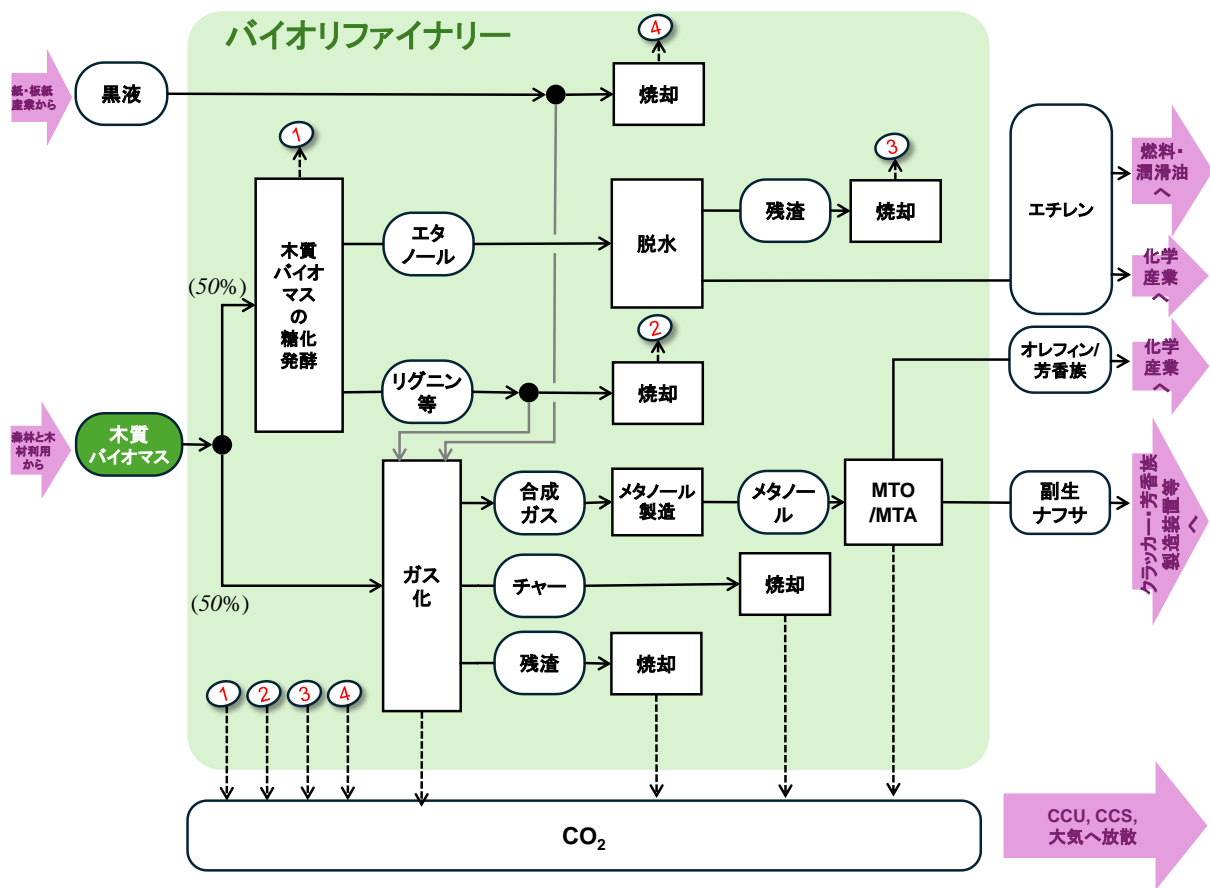


図3 バイオリファインリーの詳細図

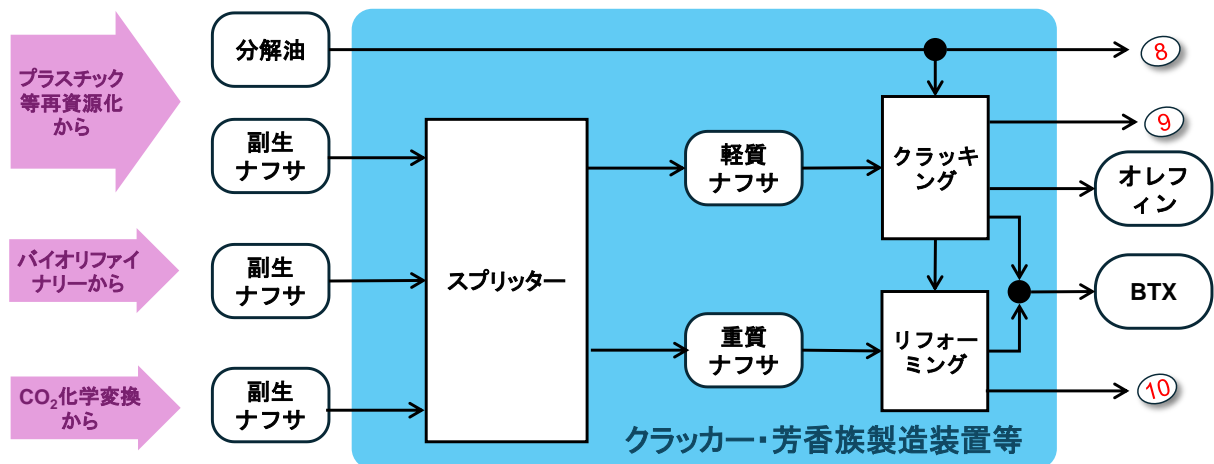


図4 副生ナフサからのオレフィン・芳香族製造プロセスの詳細図

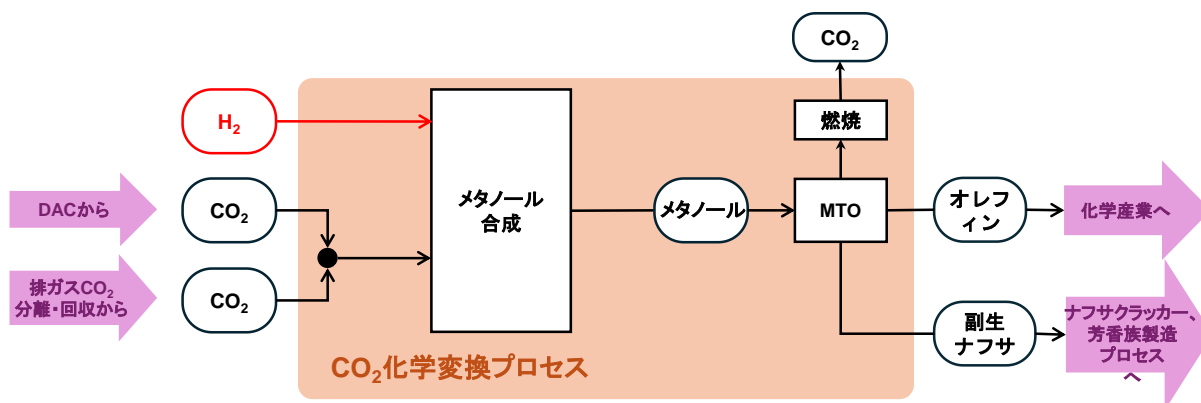


図5 CO₂の回収・利用プロセスの詳細図

3. 主要な前提

化学素材の製造向けの国産木質バイオマスの投入量及び製品原料として必要な水素量は、製造プロセスから排出されるCO₂や副生物・残渣の活用方法によって異なる。そこで、本意見書では、CO₂等の活用について第1版におけるケース1をベースとし、表1に示す3つのケースについて炭素循環の姿を詳細化した。炭素循環においては、第1版同様にネットゼロとなることを前提とし、以下各ケースの条件下において、同前提条件が満たせない場合には、追加的にCO₂の回収・貯留（CCS）を行うこととする。

ケース1aでは、プラスチック等再資源化及びバイオリファイナリーでの化学原料合成の過程で排出されるCO₂及び副生物・残渣のすべてを回収対象とすることを前提とした。副生物・残渣は燃焼し、排ガスに含まれるCO₂を回収する。CCU工程で発生するオフガスの燃焼CO₂は回収、CCSの対象とした。

ケース1bでは、バイオリファイナリーでの化学素材生産過程はケース1aと同様とし、プラスチック等再資源化に関してはガス化-成分調整の工程に由来する高濃度のCO₂のみをCCUすることとした。これはバイオマス由来のCO₂を優先的に利用する環境を想定している。CCU工程で発生するオフガスの燃焼CO₂は、バイオマス由来のCO₂はCCSの対象とした。

ケース1cでは、プラスチック等再資源化及びバイオリファイナリーからの化学原料合成過程ともに、高濃度のCO₂のみをCCUすることを前提とした。該当するプロセスは、ガス化-成分調整の工程とバイオマスの糖化発酵の工程である。回収したCO₂の利用プロセスからは高濃度のCO₂の排出はないため、CCSの対象とはしない。

表1 各ケースにおいてCCUSの対象とするCO₂

(CCUS対象のCO ₂)	ケース1a	ケース1b	ケース1c
プロセス由来の高濃度CO ₂	✓	✓	✓
バイオマスからの化学原料合成過程の燃焼排ガスCO ₂	✓	✓	
リサイクル過程の燃焼排ガスCO ₂	✓		

また、本意見書では、技術開発のインパクトを把握するために、野心的な技術水準を想定したケースについて、それぞれケース1a'、1b'、1c'として検討した。具体的には、プラスチック等再資源化過程では、技術開発によって、マテリアルリサイクル、油化、ガス化、モノマー化は収率が10%向上、有機溶剤は収率が5%向上し、リサイクルされる割合が5%増加するとした。バイオリファイナリーでは、糖化発酵とガス化の収率が10%向上し、糖化発酵で生じるリグニン等は燃焼させる代わりに、ガス化プロセスに投入することとした。

4. 炭素自立ビジョン2.0における物質・エネルギーの検討結果

表2に各ケースにおける原材料の投入・生産量、CO₂の回収・放散量を示す。ケース1aではCCUでの製品製造量が600万t-Cを超え、プロセス由来の高濃度CO₂のみをCCUの対象とする

ケース 1c の約 1.4 倍となり、必要な水素量も 430 万 t-C 超となる。他方、化学素材生産に投入する国産木質バイオマスの投入量は最も少なく、ケース 1c のおよそ 3 分の 1 の 435 万 t-C となる。化学素材生産に用いる国産木質バイオマス量は、バイオマス発電に利用できる国産木質バイオマスの量を規定することになるため、ケース 1c における発電用のバイオマスは 548 万 t-C となり、海外から輸入する必要がある。

CO₂ の大気放散量は、ケース 1a では、化学産業の製造プロセスで 113 万 t-C、セメントや鉄鋼等も合わせた HTA 産業全体で 4,258 万 t-C となり、2050 年に想定する森林等による年間吸収量 5,000 万 t-C を下回るため、ネットゼロと炭素自立の両立が可能となり、ケース 1b でも同様である。プロセス由来の高濃度 CO₂ のみを CCU の対象とするケース 1c では、化学産業の製造プロセスから 1,120 万 t-C、HTA 産業全体では森林吸収量を上回る 5,265 万 t-C が大気放散され、ネットゼロは実現できない。ネットゼロの実現には、超過量相当の CO₂ をどこかの燃焼において分離回収し、CCUS する、すなわちケース 1b に近づける必要がでてくる。例えば、バイオマスからの化学原料生産過程におけるリグニン等の燃焼分の CO₂ (約 404 万 t-C) を回収対象とすることでネットゼロと炭素自立をとともに達成できる。

表 2 各ケースにおける原材料の投入・生産量、CO₂ の回収・放出量

名称	項目	単位	Case					
			1a	1a'	1b	1b'	1c	1c'
プラスチック等再資源化	投入量	万 t-C	869	869	869	869	869	869
	生産物 (オレフィン・芳香族)	万 t-C	284	352	284	352	284	352
	CO ₂ 回収対象 (プロセス由来)	万 t-C	136	105	136	105	136	105
	CO ₂ 回収対象 (燃焼後)	万 t-C	404	376	-	-	-	-
	CO ₂ 大気放散	万 t-C	66	55	429	394	429	394
バイオリファイナリー	投入量	万 t-C	435	355	800	685	1,305	780
	生産物 (オレフィン・芳香族)	万 t-C	99	161	182	288	297	325
	CO ₂ 回収対象 (プロセス由来)	万 t-C	170	205	312	357	509	401
	CO ₂ 回収対象 (燃焼後) ※2	万 t-C	245	62	374	97	(404)**	-
	CO ₂ 大気放散	万 t-C	32	15	50	24	573 (209)**	124
CO ₂ 変換	投入量	万 t-C	877	690	765	530	618	485
	必要水素量	万 t-H ₂	438	345	383	265	309	242
	生産物 (オレフィン・芳香族)	万 t-C	614	518	536	398	432	364
	CO ₂ 回収対象 (燃焼後)	万 t-C	88	69	64	43	-	-
	CO ₂ 大気放散	万 t-C	9	7	19	14	62	48
副生ナフサ	投入量	万 t-C	214	147	203	137	189	134
	生産物 (オレフィン・芳香族)	万 t-C	150	114	142	106	132	104
	CO ₂ 回収対象 (燃焼後)	万 t-C	64	33	45	22	-	-
	CO ₂ 大気放散	万 t-C	6	3	20	11	57	30
CCS	貯留量	万 t-C	137	92	98	59	(364)**	-
大気放散	化学及び CCUS	万 t-C	113	80	519	443	1,120	596
	(HTA 産業全体)	万 t-C	4,258	4,225	4,664	4,588	5,265 (4,902)**	4,742

※ネットゼロの実現に必要な追加的な CCS 対象分を考慮した値

※2 紙・パルプ製造からの黒液分の燃焼分を含む

技術開発が進展し、収率の向上及びリグニン等の化学素材の製造プロセスへの投入が実現すると、プラスチック等再資源化及びバイオリファイナリーから直接得られる化学素材の量が増え、

結果として CCU や副生ナフサの利用プロセスからの生産量が減少する。CCU の減少に伴い、外部からの水素供給は減少し、ケース 1a と比して 1a' では、必要水素量が約 100 万 t 減少する。これは、燃焼させた場合には熱として利用されるリグニン中の水素を化学素材の製造に活用できるためである。また、収率の向上によりバイオマスの投入量を約 80 万 t-C 減らすことができる。

バイオマスの投入量で大きな影響を受けるのはケース 1c であり、技術の進展により 500 万 t-C 以上投入量を減らすことができる。ケース 1c では、燃焼したリグニン等の CO₂ は回収対象とならないが、ケース 1c' ではガス化に投入される CO₂ は回収対象となることが主要因である。そのため、大気放散の量も化学素材の製造プロセスで 600 万 t-C 以下、HTA 産業全体でも 4,742 万 t-C と森林吸収量を下回り、ネットゼロと炭素自立の両立が可能となる。

本意見書では、炭素自立の実現にあたって化学産業の製造プロセスに必要なエネルギー量（電気、熱）について推算した。具体的には、各プロセスで消費するエネルギー量のほか、その消費エネルギー量のうち、プロセス内の副生物（燃料）等を燃焼させ創出して確保が可能となるエネルギー量及びプロセス外部から投入が必要なエネルギー量を推算している。ここで、化学素材等から各種化学製品を製造する際の消費エネルギー量は既存のエネルギー量と同等とし、新規プロセスの技術特性は現時点で想定される水準とした。

表 3 ケース 1a, 1a', 1c, 1c' に必要となるエネルギー (PJ)

名称	項目	ケース			
		1a	1a'	1c	1c'
プラスチック等再資源化対象物質	プロセス消費エネルギー(電力・熱) (うちプロセス内創出分エネルギー ^{※1})	111 (64)	120 (56)	111 (64)	120 (56)
	製品製造消費エネルギー	91	115	91	115
	プロセス外部からの投入必要エネルギー(小計)	138	178	138	178
	副生物・残渣等燃焼の創出エネルギー	69	68	69	68
バイオマス	プロセス消費エネルギー(電力・熱) (うちプロセス内創出分エネルギー ^{※1})	49 (24)	65 (7)	148 (73)	128 (13)
	製品製造消費エネルギー	43	69	128	140
	プロセス外部からの投入必要エネルギー(小計)	67	128	202	256
	副生物・残渣等燃焼の創出エネルギー	30	21	48	44
CO ₂ 変換	プロセス消費エネルギー(電力・熱) (うちプロセス内創出分エネルギー ^{※1})	77 (43)	61 (34)	55 (30)	43 (24)
	水素製造消費エネルギー	834	657	588	461
	製品製造消費エネルギー	265	223	186	157
	プロセス外部からの投入必要エネルギー(小計)	1,133	907	799	637
	副生物・残渣等燃焼の創出エネルギー	-	-	-	-
副生ナフサ	プロセス消費エネルギー(電力・熱) (うちプロセス内創出分エネルギー ^{※1})	17 (11)	11 (8)	15 (10)	10 (7)
	製品製造消費エネルギー	65	49	57	45
	プロセス外部からの投入必要エネルギー(小計)	70	53	62	48
	副生物・残渣等燃焼の創出エネルギー	15	6	13	6
CO ₂ 分離・回収	プロセス消費エネルギー(電力・熱) (うちプロセス内創出分エネルギー ^{※1})	52 (-)	38 (-)	21+(21) ^{※2} (-)	16 (-)
	プロセス外部からの投入必要エネルギー(小計)	52	38	21+(21) ^{※2}	16
貯留	プロセス消費エネルギー(電力・熱) ^{※1} (うちプロセス内創出分エネルギー ^{※2})	0.4 (-)	0.3 (-)	0+(1.2) ^{※2} (-)	0 (-)
	プロセス外部からの投入必要エネルギー(小計)	0.4	0.3	0+(1.2) ^{※2}	0
総括	化学産業の素材製造プロセスでの消費エネルギー (水素製造向けを除いた値)	1,551 (717)	1,370 (715)	1,378+(22) ^{※2} (790)+(22) ^{※2}	1,219 (757)
	CO ₂ 分離・回収	52	38	21+(21) ^{※2}	16
	CO ₂ 貯留	0.4	0.3	0+(1.2) ^{※2}	0
	化学及びCCUSにおけるプロセス外部からの投入必要エネルギー(小計)	1,462	1,304	1,221+(22) ^{※2}	1,135
	副生物・残渣等燃焼の創出エネルギー	113	95	129	117

※1 プロセス消費エネルギーのうち、同プロセス内の副生物(燃料)等を燃焼させ創出して確保するエネルギー量

※2 ネットゼロを実現するために追加的に必要なエネルギー

今回対象とした製品製造プロセスが代替すると想定する有機化学品製造プロセスが消費するエネルギー量は、683 PJと推算されたり。表3に示す、検討したケースの化学産業由来の消費エネルギー量は、現状と同等か最大で約100 PJ増加すると推算された。ただし、CCUに必要な水素を水電解で賄うと仮定すると、水素製造に必要なエネルギー量が化学産業由来の消費エネルギーと同等程度を占めるようになり、現状の化学産業全体のエネルギー消費量を大きく上回る。

上述した水素製造で消費するエネルギーを除けば、副生物やオフガスなどを自己消費することにより、プロセスで消費するエネルギーの一部を賄うことができる。例えば、リサイクル過程では、すべてのケースにおいて、プロセス消費エネルギー量の5割以上を自己消費による創出エネルギーで賄うことができ、バイオリファイナリーでの化学原料合成過程では、現時点の技術水準を想定した場合には、5割程度を賄うことができる。

5. 炭素・エネルギー資源の地理的分布を考慮した分析例

第1版において、3つの炭素フローを実現するためには、炭素源の発生場所と使用場所といった空間的ギャップが課題であることを述べた。第2版では、再エネポテンシャルが高く、炭素源の一つであるバイオマス資源が豊富に存在するが、HTA産業・都市・空港など化学品の製造・需要拠点が点在するため、拠点間の移送が無視できない北海道を対象に、炭素自立の絵姿を検討した。道内を14の振興局単位に分け、苫小牧を化学産業拠点とし、存在する炭素・エネルギー資源及び炭素を含む製品の移送について検討した。炭素源としては、全国を対象とした場合同様に、プラスチック等再資源化対象物、木質バイオマス及び生産プロセス等から排出されるCO₂に加え、農業残渣及び家畜排せつ物を対象とした。

これら炭素源のポテンシャルについては、別紙の表に記載する。

北海道全土の太陽光、風力、中小水力、地熱、太陽熱、地中熱の再生可能エネルギーの導入ポテンシャルは4,180 PJであり²⁾、太陽光が1,576 PJ、風力が2,290 PJと大部を占める。地域別では、道東地域が太陽光と風力と合わせて1,828 PJと最大のポテンシャルを有している。

地理的に分布する炭素資源は、ある地点に集積し、より輸送しやすい形態に転換し、素材への変換を行う大規模集積地に輸送する。それぞれどのような規模と地点で集積するかが社会実装の観点から重要である。本意見書では、一次集積拠点において基礎化学品や燃料の製造に活用可能な液体に変換し、現在製油所が立地する苫小牧まで輸送し、基礎化学品や燃料を製造することとした。ただし、畜産バイオマス及び農業残渣の一部は、オンサイトでメタン発酵によりメタンとCO₂を得ることとし、生成されたメタンは熱利用することとした。

ケース1aの試算結果を図6に示す。一次集積拠点では、メタノールが約160万t-C、エタノールが約32万t-C、合計で約200万t-C製造される。メタンは道内全体で61万t-C生産され、発熱量換算で33 PJとなる。

一次集積拠点における生産に必要なエネルギー量は、合計で約18 PJである。道東地域で見ればメタンを熱利用することで、生産に必要なエネルギー量を賄うことができる規模となる。必要水素量は全道で約70万tとなり、生産には約135 PJ必要になるが、再生可能エネルギーのポテンシャルからは十分に賄うことができる。

輸送方法としては、小樽駅がある後志、函館駅がある渡島、北見駅があるオホーツク、旭川駅がある上川からの生産物は貨物鉄道を想定した。宗谷については、上川まではローリー輸送し、その後、貨物鉄道で輸送することとした。十勝港がある十勝、釧路港のある釧路はフェリー輸送とし、根室については釧路までローリーで輸送し、その後はフェリーで輸送することとした。ここで鉄道は電気、ローリーは水素、フェリーはメタノールで駆動させることとした。鉄道輸送にかかるエネルギーは6.6 TJ、ローリー輸送に必要な水素は458 t、フェリー輸送に必要なエネルギーは0.06 PJでメタノールにすると0.1万t-Cと算出された。

本検討では、炭素・エネルギー資源は北海道では道東地域に偏在しており、検討内容を実現する場合には、人材を含め、同地域での生産能力の向上に向けた施策が必要となる。あくまで1例であるが、今後、炭素・エネルギー資源の分布のみならず、人材の確保の観点も含め、生産及び輸送がより効率的に行われるための施策などを検討していくことが重要である。

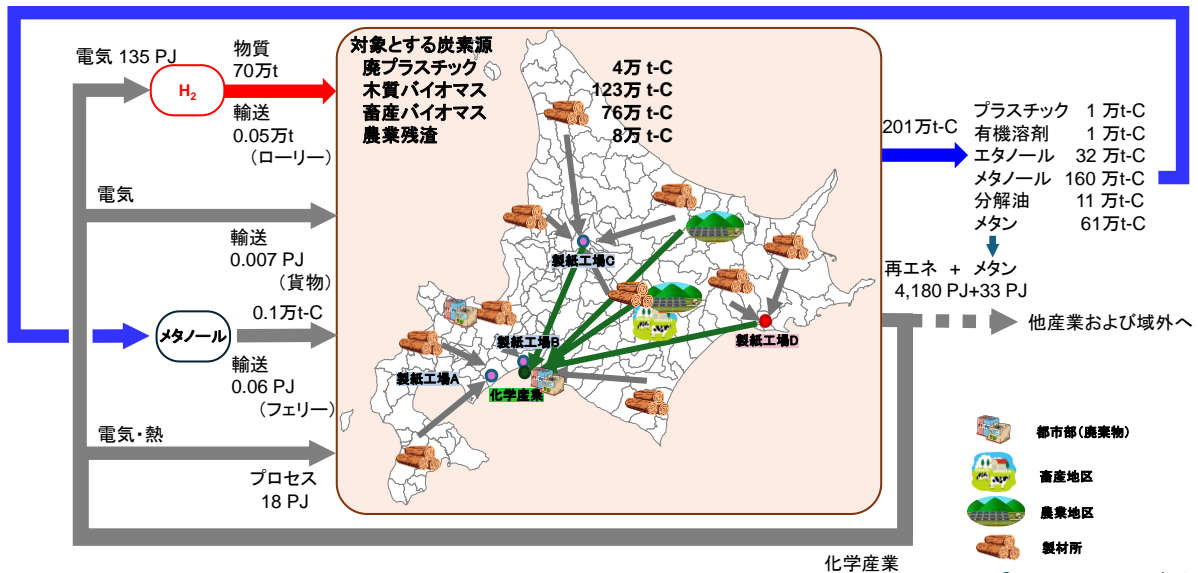


図6 北海道における炭素循環およびエネルギー循環

6. 炭素自立実現に向けた課題と論点

今回、HTA産業のうち、化学産業におけるプラスチック等再資源化、バイオリファイナリー、CCUについて、具体的なプロセスを想定し、その収率および副生物を考慮した上で、炭素フローと必要となるエネルギー量を算出した。

その結果、プラスチック等再資源化過程では、マテリアルリサイクルや油化プロセスで生じる残渣を有効利用しても、製造される化学製品の炭素量は投入量の3~4割にしか至らず、生成される副生物質およびCO₂に起因する炭素量を十分に考慮する必要があることがわかった。リサイクルプロセスで目的生産量の不足分は、バイオリファイナリーあるいはCCUで補填する必要がある。その際、バイオマスからの化学素材生産を増大させるほど、CCUの対象となるCO₂量を減少させることができ、かつ、CO₂の質としても利用しやすいものに絞り込むことが可能となる。結果として、水素製造を除く化学産業に必要なエネルギーは増大するが、CCUに必要な水素量は減少するため、水素製造に必要なエネルギーは減少する。CCUを増大させた場合には逆のことが言え、バイオマスからの化学素材生産技術とCCU技術の成熟度の進展を考慮した社会実装の姿を描くことが重要である。社会実装には、再生可能エネルギー資源、バイオマス資源、バイオマスの集積拠点、化学原料生産拠点などの立地が重要であることは言うまでもなく、本意見書では、北海道を例として立地と輸送を具体的に考慮した炭素のフローと必要となるエネルギー量に関して検討した。森林産業と化学産業は、現在は独立した産業として経済活動を行っているが、炭素自立に向けて、バイオリファイナリーやCCUなど新たな産業を創成するとともに、産業間の連携に最適な立地や輸送法を検討する必要がある。

本意見書では、現在選択し得る技術の範囲で、国内における炭素自立の定量的な絵姿が描けることを確認した。また、どのケースにおいても化学産業に必要なエネルギーは、水素製造を除くと、現行化学産業の消費エネルギーより1割程度の増大であるが、CCUに必要な水素は年間300~500万t程度と算出された。これら水素を水電解装置で供給すると仮定すると、最低でも600PJの電力が必要であり、現状の国内電力消費のおよそ4分の1に相当する。

技術の進展を想定すると、バイオマスの投入量を減らすことができ、CO₂変換技術の対象となるCO₂量も減少する。結果として、化学産業に外部から投入するエネルギーも10%以上減らすことができる。また、CO₂化学変換に必要な水素量も減少し、水素製造に必要なエネルギーも減少する。すなわち、各工程の収率を向上させる技術やバイオマスからの化学原料生産過程で副生さ

れるリグニンの有効活用技術などの新技術のインパクトが大きいことがわかった。

7. まとめと展望

ネットゼロの達成は達成困難であるものの、長期的な視点ではゆるがない目標であると位置付けるべきである。その実現にはエネルギーの脱化石資源化だけではなく、HTA産業における脱化石資源化が必須であり、炭素循環の実現が必須である。一方、短期的には先行きの不透明さが増してきており、必ずしも2050年のネットゼロ実現への着地点は見えない。

本意見書は、化石資源依存から脱却し、国産の炭素資源であるバイオマスの利活用と炭素循環による炭素自立ビジョンを示した2024年9月の公表内容を、第2版として更新したものである。具体的には、HTA産業のうち、化学産業におけるプラスチック等再資源化、バイオリファイナリー、CCUについて、具体的なプロセスを想定し、炭素フローと必要となるエネルギー量を算出した。さらに、現状の技術レベルが向上した場合のインパクトを評価し、炭素源の発生場所から使用場所への移送を考慮した炭素自立の姿を検討した。バイオリファイナリーおよびCCUによる化学素材生産の比率は、それぞれの工程で必要となるエネルギーだけでなく、必要となる水素量にも影響する。社会実装には、再生可能エネルギー資源、バイオマス資源、バイオマスの集積拠点、化学原料生産拠点などの立地が重要であることは言うまでもなく、本意見書では、北海道を例とした検討結果を示した。

本意見書では、CCUでの水素利用のみを考慮し、製造や貯蔵、輸送については検討の対象外である。実際の社会実装に向けては、再生可能エネルギーからの水素製造拠点の立地とCCUによる化学原料生産拠点への移送の考慮は必須である。更には、化学原料を利用する川下産業も含め、規模のメリットを考慮した製造拠点の集約化など、社会全体の経済合理性の観点での最適化も必要である。

炭素自立ビジョンを実現するためには、プラスチック等再資源化、バイオリファイナリー、CCUSをどのような時間軸で社会実装するか、シナリオを描く必要がある。そのためには、今後、各技術や社会の仕組みの成熟度や経済合理性がどのように進展し、既存設備の活用と設備の新規導入をどのように考えるか検討する必要がある。HTA産業の炭素自立に向けた技術的・経済的ハードルは極めて高いが、国や地域によらず普遍的な課題であり、素材産業の維持発展のためにも避けては通れない道である。今後、炭素自立ビジョンの実現に向けたシナリオを描くことで、人材・資本を優先的に投入すべき分野を明確化することができ、他国に先んじてGXを実現できる。結果、国際競争力を強化しつつ、2050年のネットゼロに到達することができると期待できる。

謝辞

地域連携カーボンニュートラル推進委員会は、地域の産業連携によるHTA産業の排出量実質ゼロに向けたビジョンを構築し、実行に移すべく、関連省庁や、産業界、地域など産学官民と議論を重ねてきました。有益な意見や視点を提供いただいたすべての関係者に感謝申し上げます。

別紙 | 参考資料：エネルギー量の算定

収率及びエネルギー量

(プラスチック等再資源化)

- ・ プラスチックリサイクルのマテリアルリサイクルプロセスの収率及び必要エネルギー量等については文献^{3, 4)}などを参照して本委員会にて収集したデータをもとに補正などを加えて設定した。
- ・ プラスチック及びゴム、繊維のケミカルリサイクルの収率及び必要エネルギー等については文献^{5~8)}などを参照して本委員会にて収集したデータをもとに補正などを加えて設定した。

(木質バイオマス)

- ・ 木質バイオマスを糖化発酵した際に得られるエタノール及び脱水プロセスを経て得られるエチレンの収率及び必要エネルギー量は、既存の事例及び文献^{9,12)}などを参照して本委員会にて収集したデータをもとに補正などを加えて設定した。
- ・ 木質バイオマスをガス化-メタノール製造により得られるメタノール及びメタノールからオレフィンを製造する工程の収率及び必要エネルギー量は、既存の事例及び文献¹³⁻¹⁵⁾などを参照して本委員会にて収集したデータをもとに補正などを加えて設定した。
- ・ 木質バイオマスを熱分解した際に得られる分解油の収率及び必要エネルギー量等については既存の事例及び文献^{16,17)}などを参照して本委員会にて収集したデータをもとに補正などを加えて設定した。

(CCU)

- ・ CO₂と水素によるメタノール製造についての収率及び必要エネルギー量は、文献¹⁸⁾などを参照して本委員会にて収集したデータをもとに補正などを加えて設定した。

(CCS)

- ・ CCSに必要なエネルギー量は、文献¹⁹⁻²¹⁾などを参照して本委員会にて収集したデータをもとに補正などを加えて設定した。
- ・ その他、ナフサクラッキング等の既存の石油化学プロセスと同様のプロセスについては、文献²²⁾などを参照して本委員会にて収集したデータをもとに補正などを加えて設定した。

北海道を対象とした分析

表 対象とした炭素源

振興局名	プラスチック等 千 t-C	木質バイオマス 千 t-C	畜産バイオマス 千 t-C	農業残渣 千 t-C
空知		65	5	31
石狩	240	26	20	5
後志		32	6	1
胆振	41	49	38	
日高		51	0	
渡島		61	13	
檜山		34	0	
上川		161	29	27
留萌		24	0	
宗谷		34	6	
オホーツク		281	146	38
十勝		249	332	42
釧路		124	132	
根室		38	166	
対象合計	280	1,231	946	144

- ・ プラスチック等の再資源化対象物について、第1版同様に一般廃棄物と産業廃棄物を対象とし、一般廃棄物は、環境省「廃棄物処理技術情報（令和4年度調査結果）」²³⁾の排出量及び環境省「容器包装廃棄物の飼養・排出実態調査の概要（令和4年度）」²⁴⁾の組成割合から算出。産業廃棄物は、「北海道産業廃棄物処理状況調査の結果について（令和2年度（2020年度））」²⁵⁾を参照した。収率やプロセスに必要なエネルギー量は、日本全国を対象にした際と同じとしている。
- ・ 木質バイオマスのポテンシャルについては、北海道木材需給実績²⁶⁾を参照している。木質バイオマスからアルコール等を生産する場所には、製紙工場を想定している。その理由としては、道内には4つの製紙工場があり、うち3工場でパルプを生産しているが、パルプ需要は2050年向け現状比40%減となる前提であり、稼働が減少するパルプ製造設備を最大限活用し、生産されたパルプのうち紙生産に回らない分を糖化発酵によりエタノールに転換することをしたためである。各プロセスの収率は上述したものと同様に設定して

- いる。
- ・ 畜産バイオマスは、乳用牛、肉用牛、豚、採卵鶏、ブロイラーを対象とした。ポテンシャルの算定は、北海道農政事務所の統計データ²⁷⁾を基に国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「再生可能原料アベイラビリティ調査」²⁸⁾を参考に算出した。
 - ・ 農業残渣については、稲わら（水稻）、もみ殻（水稻）、麦（小麦）、茎莢（大豆）茎葉（甜菜）、馬鈴薯（未出荷）、ビートパルプ（甜菜）、糖蜜（甜菜）、余剰粗糖（甜菜）を対象とし、北海道農政事務所の統計データ²⁹⁾を参照している。稲わら、もみ殻、麦稈、茎秆、甜菜のビートパルプに関してはメタン発酵によりメタンと CO₂を得るプロセスに投入することとした。排出される発酵 CO₂は高濃度であり、回収し、外部から供給される水素と合成してメタノールの製造に活用することとした。他方、糖分が多い馬鈴薯（未出荷）、糖蜜（甜菜）、余剰粗糖（甜菜）は発酵を経てエタノールを製造することとした。発酵時に排出される CO₂は同様にメタノール製造で使用することとしている。
 - ・ 上記ポテンシャルのうち、プラスチック等再資源化対象物は、人口集積地である札幌が立地する石狩に約 24 万 t-C と大半が集積するが、今回は製油所を含め二次産業が集積する苫小牧が存在する胆振の 4 万 t-C を対象とした。木質バイオマスは、道内の伐採ポテンシャルを基に算出した約 123 万 t-C をすべて対象とした。家畜排せつ物に由来する畜産バイオマスは、約 95 万 t-C と、木質バイオマスに次ぐ規模となっており、オホーツク、十勝、釧路、根室がある道東地域の約 76 万 t-C を対象とした。農業残渣は、約 14 万 t-C と算出され、オホーツクと十勝を合わせた約 8 万 t-C を対象とした。
 - ・ 輸送については、船舶輸送については、4 万 m³ のケミカルタンカーを前提とし、メタノール燃料対応エンジンの燃費を参考³⁰⁾に、必要メタノール消費量を算定した。ローリーは 12,000 ガロン/台を前提として、各種公表資料³¹⁾を基に搭載水素 50 kg で航続距離を 600 km として算出した。貨物鉄道は、公表情報³²⁾を基に燃費を算出した。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁 「総合エネルギー統計 2022 年度」
(https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html) (参照日 2025-03-07)
- 2) 再生可能エネルギー情報提供システム【REPOS (リーポス)】 (<http://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/>) (参照日 2025-03-07)
- 3) 海洋プラスチック問題対応協議会(2019)「プラスチック製容器包装再商品化手法およびエネルギーリカバリーの環境負荷評価」 (https://www.nikkakyo.org/system/files/JaIME%20LCA%20report_0.pdf) (参照日 2025-03-07)
- 4) 株式会社産業情報研究センター (2017) 「PET ボトルのリサイクル効果の分析 (平成 28 年度)」
(<https://www.jcpra.or.jp/Portals/0/resource/00oshirase/pdf/pet-lca-all20170131-2-0809.pdf>) (参照日 2025-03-07)
- 5) 榊旭リサーチセンター (2020) 「プラスチックのケミカルリサイクルとその技術開発 (上)」
(https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1046.pdf) (参照日 2025-03-07)
- 6) 榊旭リサーチセンター (2020) 「プラスチックのケミカルリサイクルとその技術開発 (下)」
(https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1047.pdf) (参照日 2025-03-07)
- 7) 榊旭リサーチセンター (2020) 「ケミカルリサイクルの最新動向」(https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1069.pdf) (参照日 2025-03-07)
- 8) 一般財団法人石油エネルギー技術センター石油基盤技術研究所(2023)「ケミカルリサイクル技術の開発動向調査」 (https://www.pecj.or.jp/wp-content/uploads/2023/04/IPECForum_2023_program_033.pdf) (参照日 2025-03-07)
- 9) St1 “St1’s and SOK’s joint venture NEB plans 50-million-litre Cellunolix® bioethanol plant in Pietarsaari” ([St1’s and SOK’s joint venture NEB plans 50-million-litre Cellunolix® bioethanol plant in Pietarsaari](https://www.st1.com/press-releases/st1-sok-joint-venture-neb-plans-50-million-litre-cellunolix-bioethanol-plant-in-pietarsaari)) (参照日 2025-03-07)
- 10) European Technology and Innovation Platform “Production Facilities” (<https://www.etipbioenergy.eu/production-facilities/>) (参照日 2025-03-07)
- 11) Kumar, D., Murthy, G.S. (2011) “Impact of pretreatment and downstream processing technologies on economics and energy in cellulosic ethanol production.” *Biotechnol Biofuels* 4, 27. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-27> (参照日 2025-03-07)
- 12) C, Paulo et al, (2013) “Braskem’s Ethanol to Polyethylene Process Development, Catalytic Process Development for Renewable Materials”, doi: 10.1002/9783527656639.ch6
- 13) Enerkem, (<https://enerkem.com/projects/varenes>) (参照日 2025-03-07)
- 14) Department for Business, Energy and Industrial Strategy (2021) “Advanced Gasification Technologies – Review and Benchmarking” (<https://assets.publishing.service.gov.uk/media/615aaac38fa8f52981d40c99/agt-benchmarking-task-5-report.pdf>) (参照日 2025-03-07)
- 15) Peng Tian, Yingxu Wei, Mao Ye, and Zhongmin Liu, (2015) “Methanol to Olefins (MTO): From Fundamentals to Commercialization”, *ACS Catalysis* 5 (3), 1922-1938
- 16) Shell “Integrated Hydropyrolysis and Hydroconversion”(https://www.shell.com.cn/en_cn/business-customers/catalysts-technologies/licensed-technologies/benefits-of-biofuels/ih2-technology/hydropyrolysis.html#frame=L2h5ZHJvcHlyb2x5c2lzLWZvcml0) (参照日 2025-03-07)
- 17) National Renewable Energy Laboratory, (2010) “Techno-Economic Analysis of Biomass Fast Pyrolysis to Transportation Fuels”, Technical Report NREL/TP-6A20-46586
- 18) Shu Bin et al. (2024) “Cost estimation and prediction of CO₂ and hydrogenated to green methanol, Electric Power Technology and Environmental Protection,” *电力科技与环保*, 2024, 40(2): 191-197. DOI: 10.19944/j.eptep.1674-8069.2024.02.011
- 19) Restrepo-Valencia, S., & Walter, A. (2019). Techno-Economic Assessment of Bio-Energy with Carbon Capture and Storage Systems in a Typical Sugarcane Mill in Brazil. *Energies*, 12(6), 1129. <https://doi.org/10.3390/en12061129> (参照日 2025-03-07)
- 20) 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター (2016) “CCS (二酸化炭素回収貯留) の概要と展望” <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2015-pp-08.pdf> (参照日 2025-03-07)
- 21) Terlouw, T et al (2021) Life Cycle Assessment of Direct Air Carbon Capture and Storage with Low-Carbon Energy Sources, *Environmental Science & Technology*, 55 (16), 11397-11411 DOI: 10.1021/acs.est.1c03263
- 22) Dencan Seddon (2010) “Petrochemical Economics” *Catalytic Science Series — Vol. 8* Imperial College Press
- 23) 環境省「廃棄物処理技術情報 (令和 4 年度調査結果)」
(https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r4/index.html) (参照日 2025-03-07)
- 24) 環境省「容器包装廃棄物の使用・排出実態調査の概要 (令和 4 年度)」
(https://www.env.go.jp/recycle/yoki/c_2_research/research_R04.html) (参照日 2025-03-07)
- 25) 北海道「北海道産業廃棄物処理状況調査の結果について (令和 2 年度 (2020 年度))」
(https://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/jss/sanpai_1/165281.html) (参照日 2025-03-07)
- 26) 北海道「木材需給情報」(https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/rrm/05_rinkin/mokuzaijukyu.html) (参照日 2025-03-07)
- 27) 北海道農政事務所「食と農林水産データライブラリー北海道」
(<https://www.maff.go.jp/hokkaido/toukei/kikaku/database/index.html>) (参照日 2025-03-07)

- 28) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(2023)「再生可能原料アベイラビリティ調査」
(<https://www.nedo.go.jp/content/100961233.pdf>) (参照日 2025-03-07)
- 29) 北海道農政事務所「北海道農林水産統計年報」(<https://www.maff.go.jp/hokkaido/toukei/kikaku/nenpou/r4-r5sougou/r4-r5sougou.html>) (参照日 2025-03-07)
- 30) 三井 E&S 「MARINEPROPULSION SYSTEM Program 2024」 (https://www.mes.co.jp/business/uploads/MITSUI-MAN_BandW.pdf)
- 31) 日野自動車「燃料電池大型トラックの走行実証を 2022 年春頃より開始」
(<https://www.hino.co.jp/corp/news/2020/20201013-002705.html>) (参照日 2025-03-07)
- 32) JR 貨物「JR 貨物グループレポート 2024」(https://www.jrfreight.co.jp/files/ir_sustainability/csr_jr_rep2024_H.pdf)
(参照日 2025-03-07)

執筆メンバー

委員長 辻佳子（東京大学）
幹事 古山通久（信州大学）

今井博文（出光興産）	藤井実（国立環境研究所）
遠藤明（産業技術総合研究所）	古屋武（産業技術総合研究所）
石戸利典（IHI）	松方正彦（早稲田大学）
中垣隆雄（早稲田大学）	水口能宏（日揮ホールディングス）
新美雄太郎（三井住友信託銀行）	山田秀尚（金沢大学）
福島康裕（東北大学）	

掲載内容の無断転用を禁止します。
転用をご希望の場合は、必ず化学工学会地域連携カーボンニュートラル推進委員会事務局
へお問い合わせください。
contact: scej.cn2050@scej.org