

付録2 レポートディング事例集

事例①：共電解によるメタノール製造

事例②：低炭素型コンクリート

事例③：ポリオレフィン系廃プラスチックのケミカルリサイクル

※各事例の LCCO₂ 評価は架空の計算であり、実在の LCCO₂ 評価とは関係ありません。

目次

事例①：共電解によるメタノール製造	1
1 目的	1
1.1 対象とする主生成物と技術	1
1.2 目的	1
1.3 概要説明	1
1.4 意図する伝達先	2
1.5 機能単位	2
2 評価範囲	3
2.1 システム境界	3
3 LCCO ₂ 排出量の計算	3
3.1 フォアグラウンドデータのデータソース	3
3.2 エネルギー源	3
3.3 バックグラウンドデータのデータソース	4
4 評価結果	4
4.1 評価結果	4
4.1.1 現状の電解セル性能	4
4.1.2 CO ₂ 基準のメタノール収率向上ケース	5
4.1.3 電解セルのエネルギー効率向上ケース	6
4.2 主な結論	7
4.2.1 CO ₂ と H ₂ O からの共電解メタノール	7
4.2.2 副生酸素及び水素の利用	7
事例②：低炭素型コンクリート	8
1 目的	8
1.1 対象とする主生成物と技術	8
1.2 目的	8
1.3 概要説明	9
1.4 意図する伝達先	10
1.5 機能単位	10
2 評価範囲	10
2.1 システム境界	10
3 LCCO ₂ の計算	10
3.1 フォアグラウンドデータのデータソース	10
3.2 エネルギー源	12
3.3 バックグラウンドデータのデータソース	12
4 評価結果	13

4.1	評価結果.....	13
4.2	主な結論.....	15
事例③：ポリオレフィン系廃プラスチックのケミカルリサイクル		16
1	目的.....	16
1.1	対象とする主生成物と技術	16
1.2	目的.....	16
1.3	概要説明.....	16
1.4	意図する伝達先.....	16
1.5	機能単位.....	17
2	評価範囲.....	17
2.1	システム境界	17
3	LCCO ₂ 排出量の計算.....	18
3.1	フォアグラウンドデータのデータソース	18
3.1.1	ポリオレフィン系廃プラリサイクルの熱分解による軽質油製造（ベース）	18
3.1.2	ポリオレフィン系廃プラリサイクルの熱分解による軽質油収率向上 ...	19
3.2	エネルギー源	20
3.3	バックグラウンドデータのデータソース	20
3.4	廃プラスチック、生成物を焼却する場合の燃焼熱及び CO ₂ 排出量	22
3.5	熱回収	22
4	評価結果.....	22
4.1	評価結果.....	22
4.1.1	ポリオレフィン系廃プラリサイクルの熱分解による軽質油製造（ベース）	22
4.1.2	ポリオレフィン系廃プラリサイクルの熱分解による軽質油収率向上 ...	23
4.2	主な結論.....	25

事例①：共電解によるメタノール製造

1 目的

1.1 対象とする主生成物と技術

本 LCCO₂ で対象とする主生成物はメタノールである。

CO₂ と H₂O の共電解（電気化学反応）によりメタノールを製造する技術である。

1.2 目的

現在、メタノールは天然ガス等を原料とする合成ガスから触媒を用いる熱化学反応により製造されており、CO₂ を大量に排出することになる。

近年、再生可能エネルギーを用いて CO₂ と H₂O の電気分解で製造される H₂ から触媒を用いる熱化学反応により製造するメタノール製造の研究が多数なされている。この技術は従来の合成ガスから触媒を用いた熱化学反応によるメタノール製造技術の延長線上の技術である。

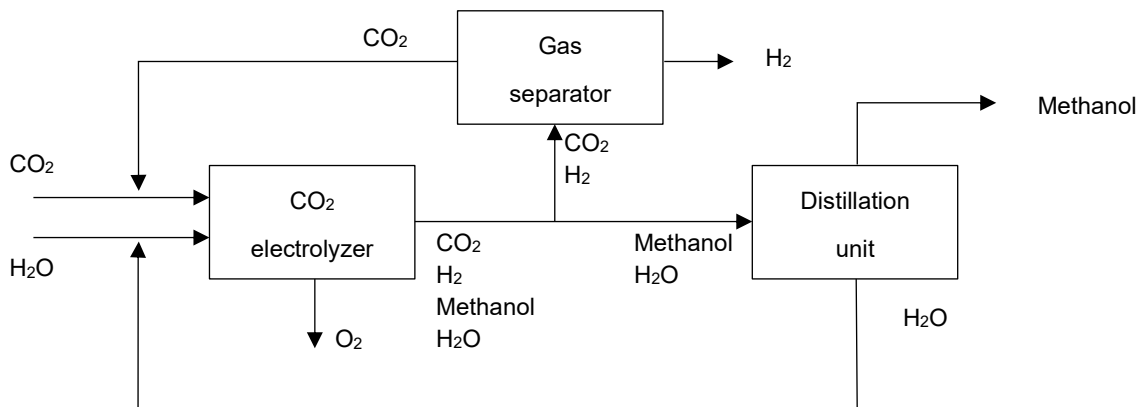
さらに将来技術として注目されているのが CO₂ と H₂O の共電解によりメタノールを直接製造する技術である。

今回はこの CO₂ と H₂O の共電解によりメタノールを直接製造する技術を従来技術と比較することで、共電解によるメタノール製造技術の CO₂ 削減ポテンシャルを明確にすることを目的とする。

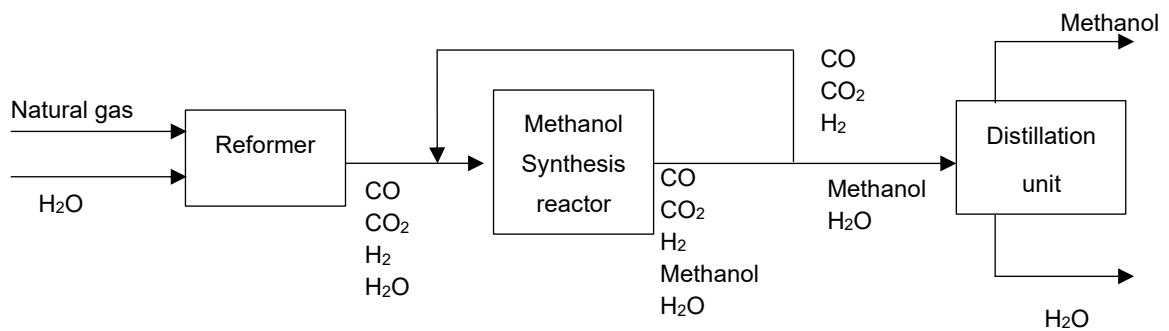
1.3 概要説明

CO₂ と H₂O から共電解によりメタノールを製造する。

CO₂ と H₂O の共電解によるメタノール製造におけるブロックフロー図を図①- 1 に示す。従来技術は図①- 2 に示す天然ガスからのメタノール製造技術である。



図①- 1 共電解によるメタノール製造ブロックフロー図



図①- 2 天然ガスからのメタノール製造ブロックフロー図

1.4 意図する伝達先

社内の事業企画部門

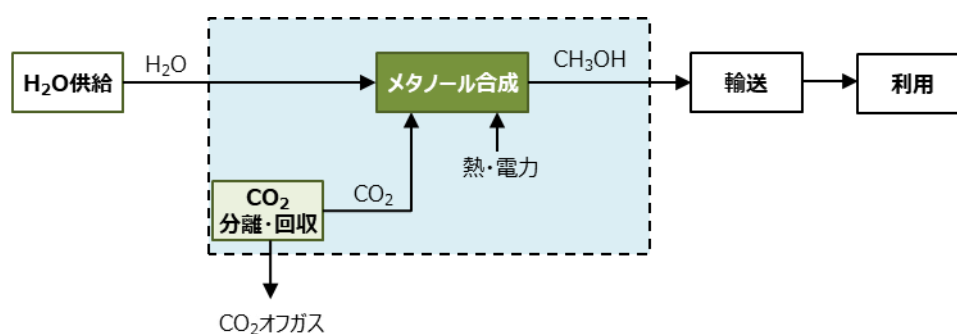
1.5 機能単位

本 LCCO₂ では、メタノール 1 kg の量を機能単位として設定した。

2 評価範囲

2.1 システム境界

本 LCCO₂ におけるシステム境界の考え方を図①- 3 に示す。本 LCCO₂ では、原料からメタノールを合成するまでを評価対象とした。なお、原料として用いた H₂O やメタノール合成工程において使用される触媒、助剤、機器類の製造・組立てはシステム境界外とした。



図①- 3 システム境界

3 LCCO₂ 排出量の計算

3.1 フォアグラウンドデータのデータソース

原料原単位及びエネルギー原単位は、実験により得られた値を用いた。

現状の電解セルの性能によると、CO₂ 基準のメタノール収率は 80% であり、原料 CO₂ の投入量は 1.719 kg/kg-メタノール、電力の投入量は 15.533 kWh/kg-メタノールとなる。(表①- 1 参照)。これをベースケースとした。

表①- 1 CO₂ と H₂O からの共電解メタノール製造フォアグラウンドデータ

I/O	項目	単位	フォアグラウンドデータ		主生成物に利用されるCO ₂ (kg-CO ₂)
			新規技術	化学量論	
投入物	原料CO ₂	kg	1.719		-
	水素	kg			-
	電力	kWh	15.533		-
	熱	MJ	0.000		-
	一酸化炭素 (CCU由来)	kg			-
主生成物	メタノール	kg	1.000	1.000	1.375

3.2 エネルギー源

実験結果を基に算出した投入エネルギー予想値より投入した電力は、15.533 kWh/kg-メ

タノールと設定した。

3.3 バックグラウンドデータのデータソース

バックグラウンドデータはガイドライン規定値（表①- 2 参照）を用いた。

表①- 2 バックグラウンドデータ

項目	単位	CO2排出原単位 (kg-CO2/単用量)			出典
		現状適用	中間	低炭素	
CO2利用分	kg	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	ガイドライン既定値
CO2回収エネルギー	kg	1.48E-01	8.01E-02	7.04E-03	ガイドライン既定値
水素	kg	9.82E+00	7.56E+00	3.18E-01	ガイドライン既定値
電力	kWh	5.06E-01	1.58E-01	6.65E-03	ガイドライン既定値
熱	MJ	5.10E-02	5.10E-02	2.24E-03	ガイドライン既定値
一酸化炭素 (CCU由来)	kg	1.82E+00	1.05E+00	5.14E-02	ガイドライン既定値
従来技術 (メタノール)	kg	8.34E-01	-	-	3EID

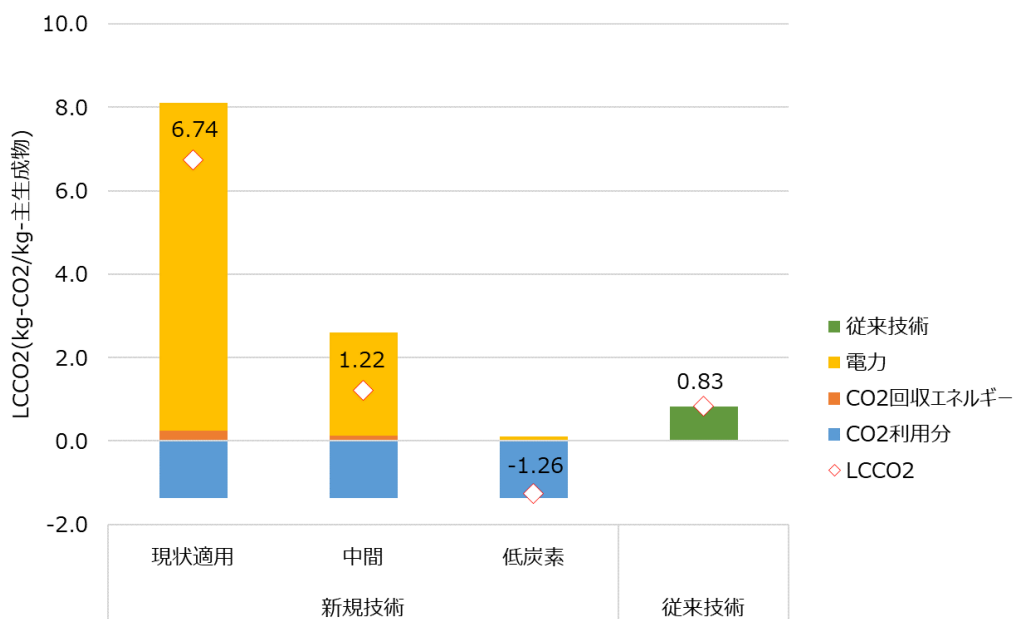
4 評価結果

初めに、現状の電解セル性能における LCCO₂ を試算する。次に、感度分析のため、ケーススタディとして電解セルの改良等により、原料原単位が低下した場合及びエネルギー原単位が低下した場合の LCCO₂ を試算する。

4.1 評価結果

4.1.1 現状の電解セル性能

現状の電解セル性能によるメタノール（共電解メタノール）の LCCO₂ を図①- 4 に示す。現状適用ケースにおける共電解メタノールの LCCO₂ は 6.74 kg-CO₂/kg-メタノールとなり、従来技術（0.83 kg-CO₂/kg-メタノール）に対して、5.91 kg-CO₂/kg-メタノール大きい値となった。その大部分は電力由来の CO₂ である。中間ケースにおける共電解メタノールの LCCO₂ は 1.22 kg-CO₂/kg-メタノールとなり、現状適用ケースより小さくなるが、従来技術に対しては 0.39 kg-CO₂/kg-メタノール大きい値である。低炭素ケースでは、-1.26 kg-CO₂/kg-メタノールとなり、従来技術（0.83 kg-CO₂/kg-メタノール）に対して 2.09 kg-CO₂/kg-メタノール小さくなる。

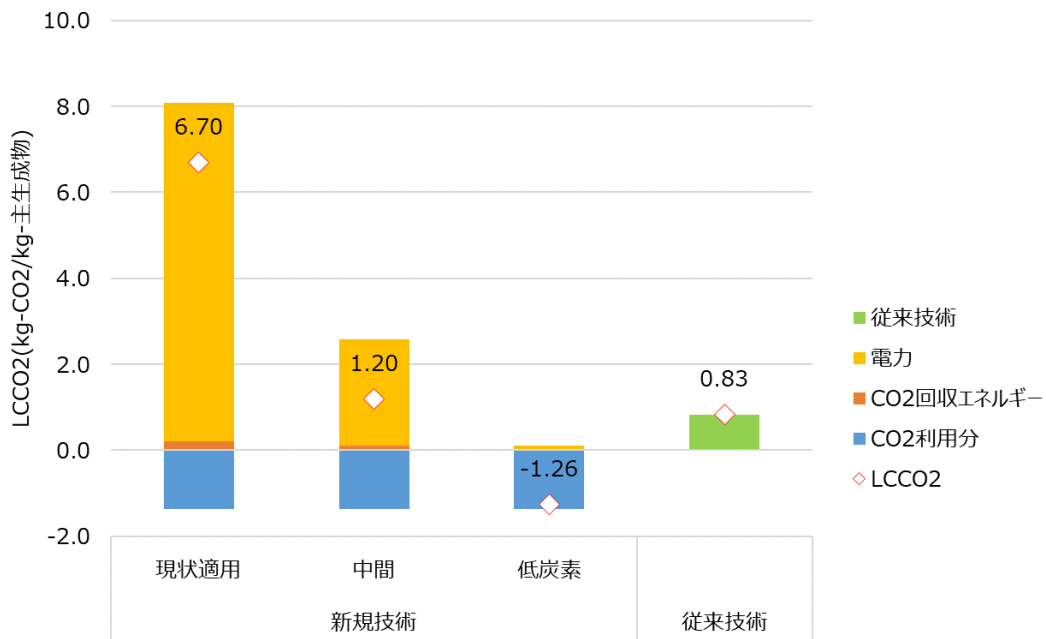


図①- 4 CO₂とH₂Oからの共電解によるメタノール製造のLCCO₂評価結果

4.1.2 CO₂基準のメタノール収率向上ケース

電解セルの性能が上がり、電力投入量は同等のまま、CO₂基準のメタノール収率が95%に向上し、CO₂投入量が1.447 kg/kg-メタノールとなったケースを評価した。結果を図①- 5に示す。

現状適用ケースにおける共電解メタノールのLCCO₂は6.70 kg-CO₂/kg-メタノールとなり、収率向上による削減量は0.04 kg-CO₂/kg-メタノールと非常に小さい。これはCO₂回収エネルギーの削減分である。中間ケースにおける共電解メタノールのLCCO₂は1.20 kg-CO₂/kg-メタノールとなり、収率向上による削減量は0.02 kg-CO₂/kg-メタノールと非常に小さい。低炭素ケースでは、-1.26 kg-CO₂/kg-メタノールであり、収率向上によるLCCO₂削減効果はほぼない。

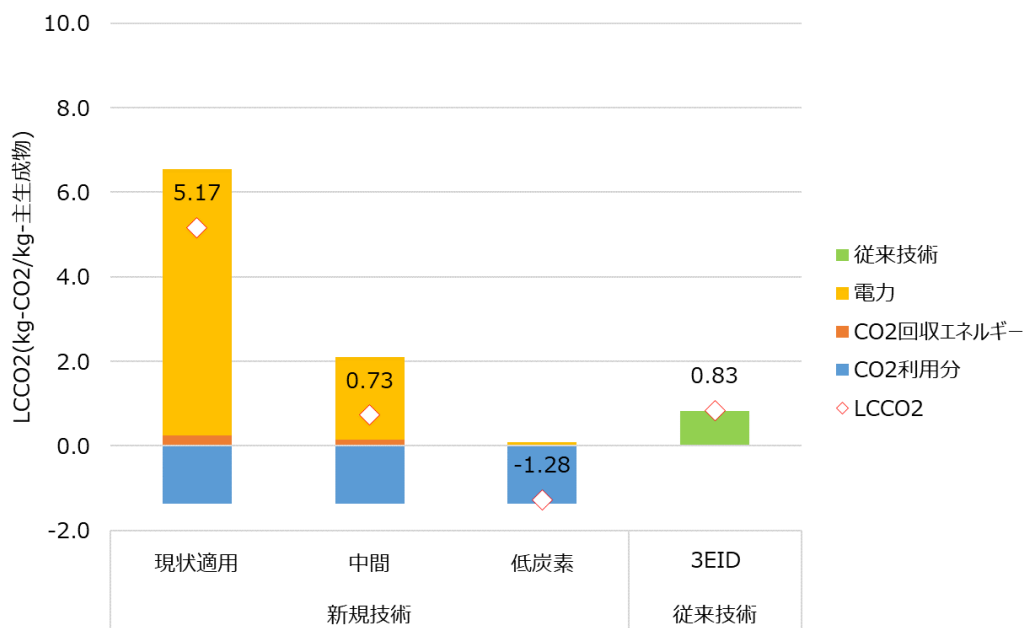


図①- 5 メタノール収率向上ケースの LCCO₂ 評価結果

4.1.3 電解セルのエネルギー効率向上ケース

電解セルの性能が上がり、CO₂投入量はベースケースと同等のまま、電力投入量が20%削減され、12.43 kWh/kg-メタノールとなったケースを評価した。結果を図①- 6 に示す。

現状適用ケースにおけるCO₂とH₂Oからの共電解メタノールのLCCO₂は5.17 kg-CO₂/kg-メタノールとなり、エネルギー効率向上による削減量は1.57 kg-CO₂/kg-メタノールとなる。これは、電力由来のCO₂の削減によるものであり、収率向上よりも効果が大きいことが分かる。中間ケースにおける共電解メタノールのLCCO₂は0.73 kg-CO₂/kg-メタノールとなり、エネルギー効率向上による削減量は0.49 kg-CO₂/kg-メタノールであり、従来技術に対して0.10 kg-CO₂/kg-メタノール小さくなる。低炭素ケースでは、-1.28 kg-CO₂/kg-メタノールとなり、エネルギー効率向上による削減量は0.02 kg-CO₂/kg-メタノールと非常に小さくなる。これは、低炭素ケースでは、電力のCO₂排出原単位が非常に小さいためである。



図①- 6 エネルギー効率向上ケースの LCCO₂ 評価結果

4.2 主な結論

4.2.1 CO₂ と H₂O からの共電解メタノール

CO₂ と H₂O から共電解でメタノールを製造する技術は電気化学反応によりワンステップで製造するシンプルなものであるが、LCCO₂ としては電力に大きく依存する技術である。

現状の未熟な技術では、LCCO₂ は従来技術に対して現状適用ケースでは大幅に大きく、中間ケースにおいても十分でなく、低炭素ケースでようやく優位になる。CO₂ と H₂ からグリーンメタノール製造に対しても低炭素ケースでようやく同等となる。

LCCO₂ の削減に対して共電解メタノール技術は、原料 CO₂ 基準のメタノール収率向上の寄与は小さい。一方で、電解セルのエネルギー効率向上は LCCO₂ の削減に大きく寄与するため、電解セルのエネルギー効率を向上する技術開発が重要である。

2040 年の低炭素ケースの CO₂ 排出原単位のエネルギーを用いることにより、従来技術と比較して 2.11 kg-CO₂/kg-メタノールの CO₂ 削減が期待される。

4.2.2 副生酸素及び水素の利用

共電解によるメタノール製造では酸素と水素が副生するが、今回の評価ではガイドラインに従いシステム境界外としている。これらは CO₂ を排出しない電気（燃料電池の原料）・熱源（水素ボイラーの原料等）の原料として用いることも考えられ、更なる LCCO₂ 削減を目的として利用することも可能と思われる。

事例②：低炭素型コンクリート

1 目的

1.1 対象とする主生成物と技術

LCCO₂評価対象とする主生成物は炭酸化養生によってCO₂を吸収するコンクリートである。ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、 γ -2CaO \cdot SiO₂ (γ -C2S) の混合物から成るセメントペーストに、CO₂を吸収させる¹。

1.2 目的

コンクリートの構成物の一つであるセメントは製造過程でCO₂が大量に発生するためCO₂発生量の削減が望まれている。セメント、コンクリート産業は土木建築に必須であるばかりでなく、現在、代替原料、代替燃料として大量の産業廃棄物を受け入れており、既に循環社会に大きく貢献していることから、産業を維持しつつ、セメント製造過程等のCO₂発生を削減することが重要である。

2050年カーボンニュートラル社会の実現のため、経済産業省は2023年6月にカーボンリサイクルロードマップを制定した。その中の技術ロードマップにおいて、CO₂利用対象技術の短期目標として2030年に道路ブロック等コンクリート製品が、中長期目標として2040年以降には新たに用途開発された製品について、従来製品と同等のコスト目標が定められている²。

コンクリートは、特殊混和材として γ -2CaO \cdot SiO₂ (γ -C2S)を使用することで、その後の炭酸化養生によってCO₂を吸収することが報告されている³。さらに最近では、コンクリートや、解体した廃コンクリート、コンクリートの構成物となる高炉スラグがCO₂を吸収できることが報告されている。

本レポートでは、コンクリートのセメント成分を代替する混和材として、高炉スラグ微粉末、 γ -2CaO \cdot SiO₂ (γ -C2S)を使用したコンクリート前駆体を炭酸化養生したコンクリートのLCCO₂を算出し、CO₂削減効果を比較評価することを目的とする。

¹ 取違ら，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），2021，Vol. 77.

² 「カーボンリサイクルロードマップ」，経済産業省，2023

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_recycle_rm/20230623_report.html；2023/8/4 閲覧).

³ 渡邊ら，コンクリート工学，2007，Vol. 45.

1.3 概要説明

本レポートでは、製造時のCO₂排出の大きいポルトランドセメントを高炉B種セメントに代替することでCO₂排出量を減らし、更に、コンクリートがCO₂を吸収するように、コンクリート成分のポルトランドセメントの一部を混和材である高炉スラグ、 γ -C2Sで代替する。低炭素型コンクリートの配合を表②-1に示す。高炉B種セメントから製造したコンクリートAに対し、 γ -C2Sを添加したコンクリートB、並びに、高炉スラグ割合を増量した開発セメントに γ -C2Sを添加したコンクリートCのCO₂削減効果を検討した。

表②-1 低炭素型コンクリートの配合

(単位：kg/m³-コンクリート)

投入物	A 高炉B種セメント	B 高炉B種セメント + γ -C2S	C 開発セメント + γ -C2S
高炉B種セメント	400	300	
開発セメント			300
γ -C2S		100	100
骨材	1700	1700	1700
水	200	200	200
合計	2300	2300	2300

コンクリート前駆体は、まずポルトランドセメント、混和材である高炉スラグ、 γ -C2S、細骨材、粗骨材を強制二軸ミキサーで練り混ぜ、さらに水とAE減水剤標準形I種(変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体)を1wt%加え、練り混ぜた。混練物の空気量は $4.5 \pm 0.5\%$ となるように調整した。こうして得られた混練物を $\phi 100 \times 200$ mmの円柱型枠に打ち込み、20°Cで1~2日間養生、脱型し、炭酸化養生を行った。炭酸化養生は、炭酸化が進行しやすい条件として50°C、相対湿度40%、CO₂濃度20%、4週間とした⁴。炭酸化養生で使用するCO₂は、発電所等の排ガスを直接利用する(CO₂分離回収装置を使用しない)ことを想定した⁵。

炭酸化養生後のコンクリートの圧縮強度、空隙率を測定し、一般的なコンクリートと同程度であることを確認した⁶。

⁴ レポーティングのポイント) LCCO₂の精度向上のために、炭酸化養生で使用する電力や熱等の投入エネルギーも、試算ツールのフォアグラウンドデータに計上することが望ましい。

⁵ レポーティングのポイント) 炭酸化養生で使用されるCO₂は入手法に従って投入されるエネルギーが異なるため、CO₂入手法を想定することが望ましい。CO₂入手法が排ガス直接利用の場合は投入エネルギーが不要だが、CO₂分離回収の場合はCO₂分離回収に必要なエネルギーに係るCO₂排出も計上する必要がある。

⁶ レポーティングのポイント) コンクリート、セメント製造において、強度や耐久性等も重要な技術評価指標であるため、概要説明等で記載することが好ましい。

1.4 意図する伝達先

低炭素型コンクリートに関するプロジェクトを選定する研究評価機関（NEDO 等）

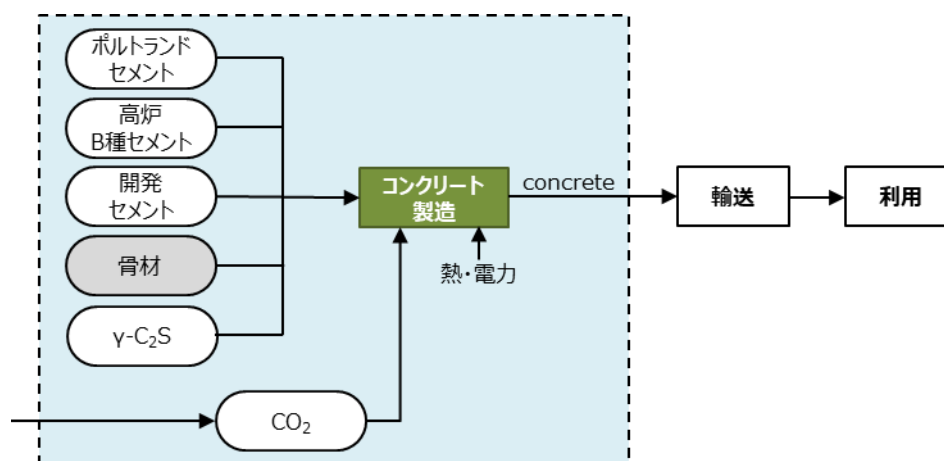
1.5 機能単位

低炭素型コンクリート LCCO₂ 評価の機能単位は、生成物であるコンクリート 1 m³ と設定した。

2 評価範囲

2.1 システム境界

低炭素型コンクリート LCCO₂ のシステム境界を図②- 1 に示す。図において、グレー枠で示した項目は LCCO₂ への影響が非常に小さいため評価対象外とした。



図②- 1 CO₂吸収コンクリート LCCO₂ のシステム境界

3 LCCO₂ の計算

3.1 フォアグラウンドデータのデータソース

投入物の量は表②- 1 に示した実験値を使用した。組成 A~C のフォアグラウンドデータをそれぞれ表②- 2、表②- 3、表②- 4 に示す。

炭酸化養生で使用する CO₂ は、発電所等の排ガスを直接利用する（CO₂ 分離回収装置を使用しない）ことを想定した。この場合、CO₂ 分離回収エネルギーが必要ないため、LCCO₂ に影響しないが、流通した排ガス中の CO₂ 総量として 1,000 kg をプロセスへの投入量とし

た。また、開発セメントの投入量は、「その他のセメントの項目」に入力した。

コンクリートに吸収されたCO₂量は「主生成物に利用されるCO₂」の項目に入力した。吸収されたCO₂量の測定には、無機炭素分析や熱分析などの方法があるが、今回は無機炭素分析法によった。無機炭素分析法では、試料を粗骨材を含めて粉砕し、全炭酸濃度測定装置（日本アンス製、クーロメータ）を使用した⁷。

表②- 2 低炭素型コンクリートLCCO₂のフォアグラウンドデータ（組成：A）

I/O	項目	単位	フォアグラウンドデータ		主生成物に利用されるCO ₂ (kg-CO ₂)
			新規技術	化学量論	
投入物	原料CO ₂ （分離回収あり）	kg			—
	原料CO ₂ （分離回収なし）	kg	1000		—
	電力	kWh	5		—
	熱	MJ	50		—
	ポルトランドセメント	kg			—
	高炉B種セメント	kg	400		—
	フライアッシュB種セメント	kg			—
	その他のセメント	kg			—
	γ-C ₂ S	kg	0		—
	廃セメント微粉末	kg			—
	高品質再生骨材	kg			—
主生成物	コンクリート	m ³	1.000	1.000	0

表②- 3 低炭素型コンクリートLCCO₂のフォアグラウンドデータ（組成：B）

I/O	項目	単位	フォアグラウンドデータ		主生成物に利用されるCO ₂ (kg-CO ₂)
			新規技術	化学量論	
投入物	原料CO ₂ （分離回収あり）	kg			—
	原料CO ₂ （分離回収なし）	kg	1000		—
	電力	kWh	5		—
	熱	MJ	50		—
	ポルトランドセメント	kg			—
	高炉B種セメント	kg	300		—
	フライアッシュB種セメント	kg			—
	その他のセメント	kg			—
	γ-C ₂ S	kg	100		—
	廃セメント微粉末	kg			—
	高品質再生骨材	kg			—
主生成物	コンクリート	m ³	1.000	1.000	110

⁷ レポーティングのポイント) コンクリートのCO₂吸収量の測定にはいくつかの方法があり、その測定方法によって固定量に差が生じる場合があるため、測定方法を明記することが望ましい。

表②- 4 低炭素型コンクリート LCCO₂ のフォアグラウンドデータ (組成 : C)

I/O	項目	単位	フォアグラウンドデータ		主生成物に利用されるCO ₂ (kg-CO ₂)
			新規技術	化学量論	
投入物	原料CO ₂ (分離回収あり)	kg			-
	原料CO ₂ (分離回収なし)	kg	1000		-
	電力	kWh	5		-
	熱	MJ	50		-
	ポルトランドセメント	kg			-
	高炉B種セメント	kg			-
	フライアッシュB種セメント	kg			-
	その他のセメント	kg	300		-
	γ-C2S	kg	100		-
	廃セメント微粉末	kg			-
	高品質再生骨材	kg			-
主生成物	コンクリート	m ³	1.000	1.000	150

3.2 エネルギー源

新規技術に投入されるエネルギーは従来技術と同等と想定して、電力 5 kWh、熱 50 MJ と設定した。

3.3 バックグラウンドデータのデータソース

バックグラウンドデータを表②- 5 に示す。バックグラウンドデータはガイドラインで整備したものをを用いた。開発セメントの CO₂ 排出源単位は、セメントの簡易試算ツールを用いて計算し、0.21 kg-CO₂ kg-セメントと設定し、「その他のセメント」として入力した。また、従来技術に関しては、試算ツールに産業連関表-3EID から算出した値を表示した。

表②- 5 低炭素型コンクリート LCCO₂ のバックグラウンドデータ

■バックグラウンドデータ

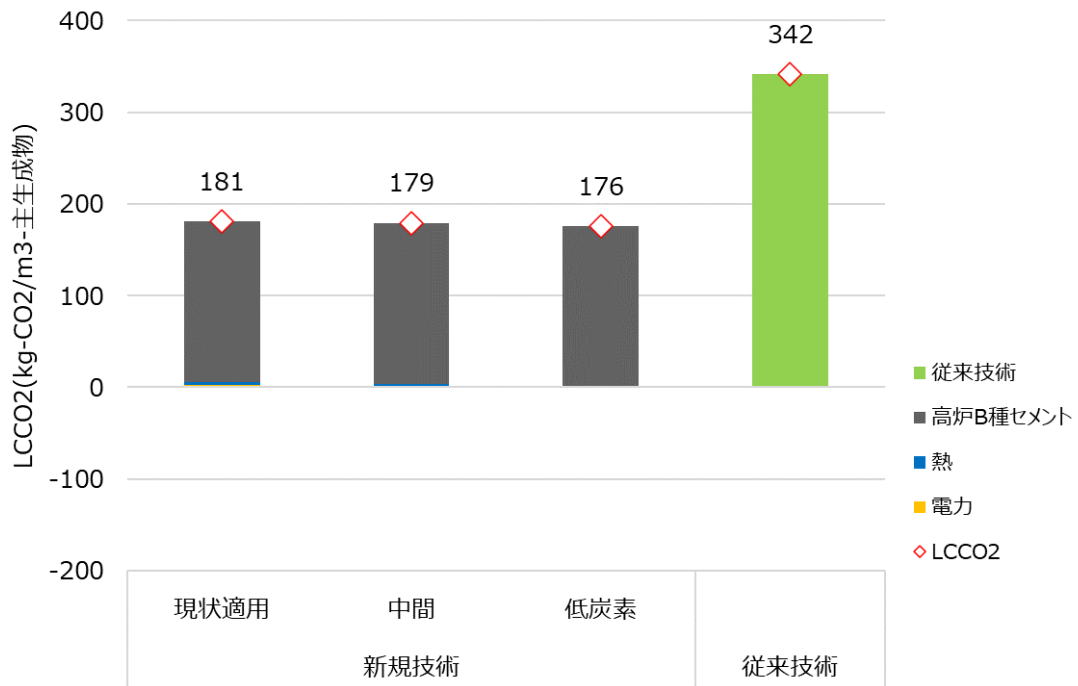
項目	単位	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /単位量)			出典
		現状適用	中間	低炭素	
CO ₂ 利用分	kg	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	ガイドライン既定値
CO ₂ 回収エネルギー (分離回収あり)	kg	1.48E-01	8.01E-02	7.04E-03	ガイドライン既定値
CO ₂ 回収エネルギー (分離回収なし)	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	ガイドライン既定値
電力	kWh	5.06E-01	1.58E-01	6.65E-03	ガイドライン既定値
熱	MJ	5.10E-02	5.10E-02	2.24E-03	ガイドライン既定値
ポルトランドセメント	kg	7.54E-01	7.54E-01	7.54E-01	3EID
高炉B種セメント	kg	4.40E-01	4.40E-01	4.40E-01	ガイドライン既定値
フライアッシュB種セメント	kg	6.26E-01	6.26E-01	6.26E-01	ガイドライン既定値
開発セメント	kg	2.10E-01	2.10E-01	2.10E-01	ユーザー既定値
γ-C2S	kg	6.32E-01	6.32E-01	6.32E-01	ガイドライン既定値
廃セメント微粉末	kg	1.77E-02	1.77E-02	1.77E-02	ガイドライン既定値
高品質再生骨材	kg	1.77E-02	1.77E-02	1.77E-02	ガイドライン既定値
従来技術 (生コンクリート)	m ³	3.42E+02	-	-	3EID

4 評価結果

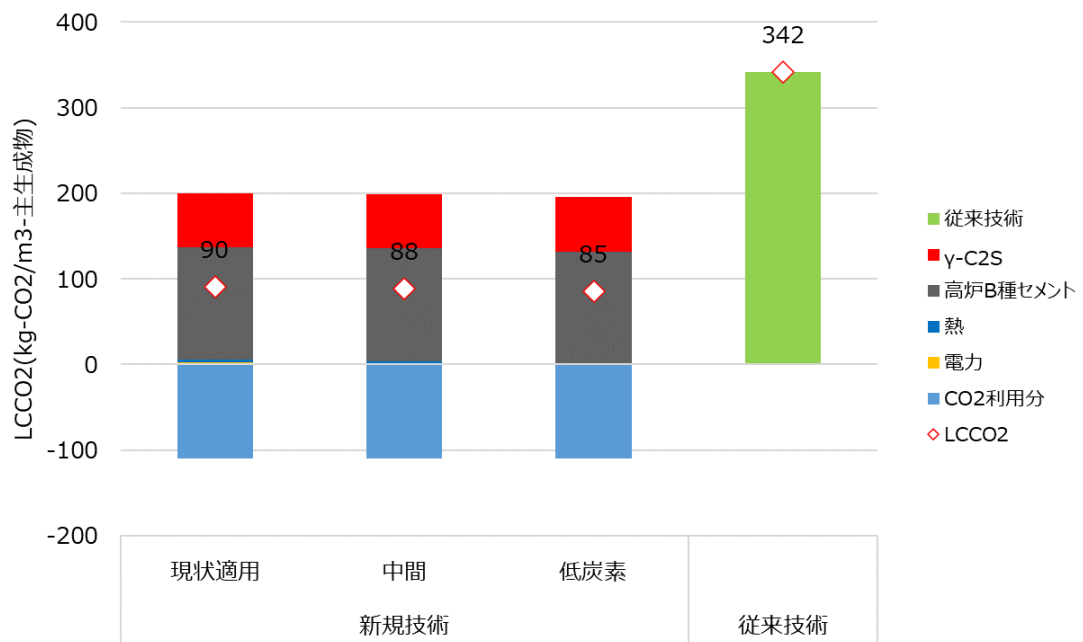
4.1 評価結果

今回検討した低炭素型コンクリートの組成 A～C の $LCCO_2$ をそれぞれ図②- 2～図②- 4 に示す。炭酸化養生は、炭酸化が進行しやすい条件として 50°C、相対湿度 40%、 CO_2 濃度 20%、4 週間行った。

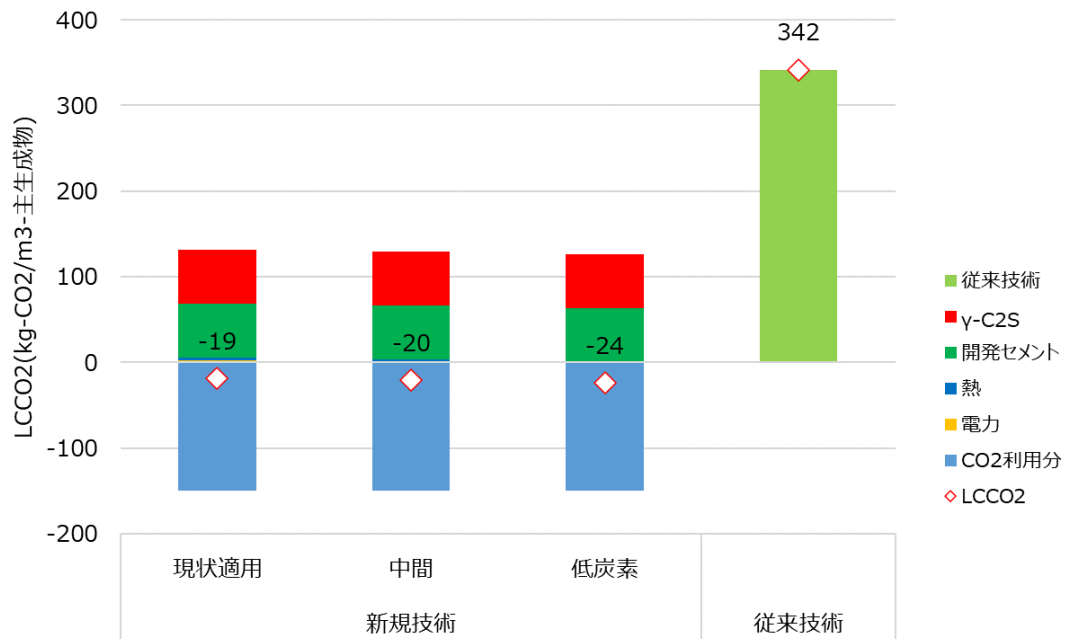
ポルトランドセメントの代わりに高炉 B 種セメントを使用して製造した低炭素型コンクリート A の $LCCO_2$ は現状適用ケースで $181 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ -コンクリートであり、従来技術によって製造されたコンクリート ($342 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ -コンクリート) よりも低い値であった。高炉 B 種セメントに加えて、 γ -C2S を加えたコンクリート B では、110 kg の CO_2 吸収が確認され、 $LCCO_2$ は A よりも低い $90 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ -コンクリートとなった。また、高炉 B 種セメントの代わりに新たに開発したセメントを用いたコンクリート C では、セメントの CO_2 排出原単位が低下したことに加え、 CO_2 吸収量も増加し、 $LCCO_2$ は $-19 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ -コンクリートとなった。



図②- 2 CO₂吸収コンクリート LCCO₂ (組成 : A)



図②- 3 CO₂吸収コンクリート LCCO₂ (組成 : B)



図②- 4 CO₂吸収コンクリート LCCO₂ (組成 : C)

4.2 主な結論

今回検討した低炭素型コンクリートの LCCO₂ は以下の序列であり、コンクリート C が最も低い LCCO₂ であった。

A (高炉 B 種セメント) > B (高炉 B 種セメント+γ-C2S) > C (開発セメント+γ-C2S)

これらの LCCO₂ は、いずれの場合も従来技術よりも低い値であり、現状適用ケースにおける CO₂ 削減効果はそれぞれ 161、252、361 kg-CO₂/m³-コンクリートが見込まれることが明らかになった。

事例③：ポリオレフィン系廃プラスチックのケミカルリサイクル

1 目的

1.1 対象とする主生成物と技術

本 LCCO₂ で対象とする主生成物は廃プラスチックの熱分解油化製品である軽質油製品（ナフサ相当品）である。

ポリオレフィン系（主としてポリエチレン、ポリプロピレン）廃プラスチックの熱分解により油化製品を製造するケミカルリサイクルに関する技術である。

1.2 目的

ポリオレフィン系（主としてポリエチレン、ポリプロピレン）廃プラスチックを熱分解することで油化製品を製造する技術はケミカルリサイクル技術として知られている。特に軽質のナフサ相当の油化製品はそのまま既存のスチームクラッカーで分解することでオレフィン系を主成分とする基幹化学品を製造することができ有用である。

本 LCCO₂ では廃プラスチックの熱分解によるナフサ相当の軽質油を製造する技術開発の収率目標の設定を目的とする。

1.3 概要説明

ポリオレフィン系（主としてポリエチレン、ポリプロピレン）廃プラスチックを熱分解することで油化製品を製造する。

収集された廃プラスチックから熱分解に適さない成分（埋立残渣（金属等））を選別除去し、液化反応工程（熱分解）にて油化する。生成する製品は軽質油（ナフサ相当品）、中質油（A 重油相当品）、重質油（C 重油相当品）、残渣固形物（石炭類似）などである。廃プラスチックに PVC（ポリ塩化ビニル）が含まれる場合には塩酸水溶液が副生するため、PVC はなるべく除去して原料とするのが望ましい。

1.4 意図する伝達先

廃プラスチックリサイクルに関するプロジェクトを選定する研究評価機関（NEDO 等）

1.5 機能単位

本 LCCO₂ では、ポリオレフィン系廃プラリサイクルの熱分解により製造される軽質油（ナフサ相当品）1 kg を機能単位として設定した。

2 評価範囲

2.1 システム境界

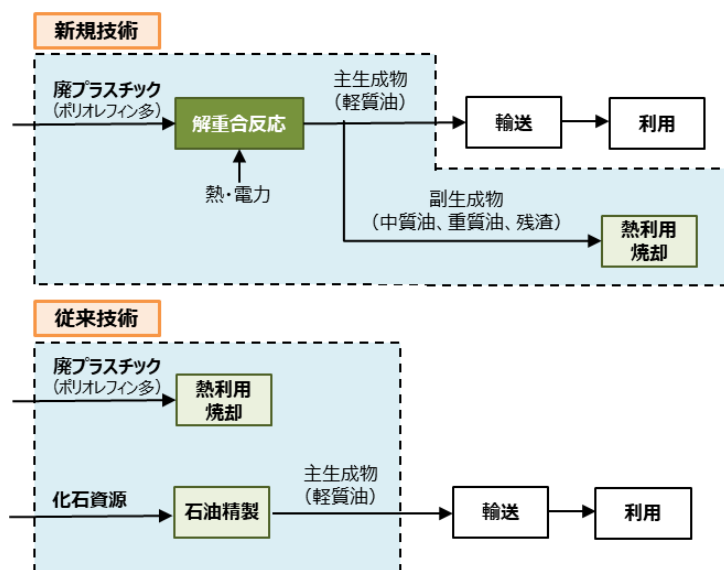
本 LCCO₂ におけるシステム境界の考え方を図③-1 に示す。

廃プラスチックリサイクルの評価はリサイクルの有り・無しで発生する CO₂ 排出量を評価する。

本 LCCO₂ では、ポリオレフィン系廃プラリサイクルの熱分解により製造するプロセスにおいて投入される原料及びエネルギーを評価対象とした。なお、廃プラ収集・運搬・ベール化、副生塩酸水溶液、埋立残渣はシステム境界外とした。

リサイクル有りは主製品を製造する際に投入するエネルギーにより発生する CO₂ と副生製品を焼却する際に発生する CO₂ 及び熱回収により控除される CO₂ を LCCO₂ としてカウントすることとなる。

リサイクル無しは廃プラスチックを単純に燃焼する際に発生する CO₂ 及び熱回収により控除される CO₂ とリサイクル有りと同量の化石原料より製造される主製品の CO₂ 排出量を LCCO₂ としてカウントすることとなる。



図③-1 システム境界

3 LCCO₂排出量の計算

3.1 フォアグラウンドデータのデータソース

3.1.1 ポリオレフィン系廃プラリサイクルの熱分解による軽質油製造（ベース）

原料の廃プラスチックは、日本容器包装リサイクル協会「プラスチック製容器包装に係る実証試験」（平成26年6月）で用いたベール組成を適用し、PE、PP、PS、PET、PVCがそれぞれ25.0、27.8、20.4、14.8、0.9wt%（オレフィン成分63wt%）であり、オレフィン成分の多い組成である⁸。

廃プラスチック1kgを油化したときの投入エネルギー、生成物量を表③-1に示す。

表③-1 廃プラスチック1kg当たりの実験結果

I/O	項目	単位	ベースケース
投入物	熱	MJ	13.47
	廃プラスチック（ポリオレフィン多）	kg	1.000
主生成物	軽質油（ナフサ類似）	kg	0.280
副生成物	中質油（A重油類似）	kg	0.014
副生成物	重質油（C重油類似）	kg	0.305
副生成物	残渣（石炭類似）	kg	0.180

本LCCO₂では軽質油（ナフサ相当品）を主製品とするため、機能単位である軽質油1kgで換算する。その結果を表③-2に示す。これがフォアグラウンドデータとなる。

⁸ 「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（LCA）」、海洋プラスチック問題対応協議会、2019（日本化学工業協会、<https://www.nikkakyo.org/news/page/7599>；2022/9/8閲覧）を基に算出。

表③- 2 ベースケースフォアグラウンドデータ

I/O	項目	単位	フォアグラウンドデータ	
			新規技術	化学量論
投入物	電力	kWh	0.000	
	熱	MJ	48.12	
	廃プラスチック (ポリオレフィン多)	kg	3.571	
主生成物	軽質油 (ナフサ類似)	kg	1.000	
副生成物	芳香族	kg	0.000	
副生成物	中質油 (A重油類似)	kg	0.050	
副生成物	重質油 (C重油類似)	kg	1.089	
副生成物	残渣 (石炭類似)	kg	0.643	
主生成物	計	kg	1.000	1.000
副生成物	計	kg	1.782	0.000
生成物合計		kg	2.782	0.000

3.1.2 ポリオレフィン系廃プラリサイクルの熱分解による軽質油収率向上

前述のとおり、軽質のナフサ相当の油化生成物はそのまま既存のスチームクラッカーで分解することでオレフィンを主成分とする基幹化学品を製造することができ有用である。生成物において軽質油の比率を上げることは廃プラスチックの油化技術開発の大きな目標となると考える。

ここでは生成物のうち、重質油及び残渣の比率を下げ、軽質油の比率を上げた2つのケースについて LCCO₂としてどのように評価されるかを検討する。

表③- 3 に廃プラスチック 1 kg から熱分解油化により製造される軽質油の比率向上の2つのケース（ケース1：生成物に占める軽質油の比率が約15%向上、ケース2：約30%向上）の生成物の組成を示した。機能単位として軽質油 1 kg として換算して、それぞれ表③- 4 及び表③- 5 に示すフォアグラウンドデータとなる。軽質油収率向上により原料原単位及びエネルギー原単位が小さくなる。

表③- 3 軽質製品比率向上のケーススタディ（ケース1及びケース2）

I/O	項目	単位	ベースケース	ケース1	ケース2
投入物	熱	MJ	13.47	13.47	13.47
	廃プラスチック (ポリオレフィン多)	kg	1.000	1.000	1.000
主生成物	軽質油 (ナフサ類似)	kg	0.280	0.399	0.519
副生成物	中質油 (A重油類似)	kg	0.014	0.014	0.014
副生成物	重質油 (C重油類似)	kg	0.305	0.246	0.186
副生成物	残渣 (石炭類似)	kg	0.180	0.120	0.060

表③- 4 ケース 1 のフォアグラウンドデータ

I/O	項目	単位	フォアグラウンドデータ	
			新規技術	化学量論
投入物	電力	kWh	0.000	
	熱	MJ	33.77	
	廃プラスチック (ポリオレフィン多)	kg	2.506	
主生成物	軽質油 (ナフサ類似)	kg	1.000	
副生成物	芳香族	kg	0.000	
副生成物	中質油 (A重油類似)	kg	0.035	
副生成物	重質油 (C重油類似)	kg	0.617	
副生成物	残渣 (石炭類似)	kg	0.301	
主生成物	計	kg	1.000	1.000
副生成物	計	kg	0.952	0.000
	生成物合計	kg	1.952	0.000

表③- 5 ケース 2 のフォアグラウンドデータ

I/O	項目	単位	フォアグラウンドデータ	
			新規技術	化学量論
投入物	電力	kWh	0.000	
	熱	MJ	25.96	
	廃プラスチック (ポリオレフィン多)	kg	1.927	
主生成物	軽質油 (ナフサ類似)	kg	1.000	
副生成物	芳香族	kg	0.000	
副生成物	中質油 (A重油類似)	kg	0.027	
副生成物	重質油 (C重油類似)	kg	0.358	
副生成物	残渣 (石炭類似)	kg	0.116	
主生成物	計	kg	1.000	1.000
副生成物	計	kg	0.501	0.000
	生成物合計	kg	1.501	0.000

3.2 エネルギー源

前述のとおり、いずれのケースにおいても廃プラスチック 1 kg を油化するために投入した熱量は 13.47 MJ であり、各ケースにおいて軽質油 1 kg 生成するために投入する熱量は、ベースケース : 48.12 MJ、ケース 1 : 33.77 MJ、ケース 2 : 25.96 MJ と設定した。

3.3 バックグラウンドデータのデータソース

バックグラウンドデータはガイドライン既定値 (表③- 6 参照) を用いた。

項目	単位	CO2排出原単位 (kg-CO2/単用量)			出典
		現状適用	中間	低炭素	
電力	kWh	5.06E-01	1.58E-01	6.65E-03	ガイドライン既定値
熱	MJ	5.10E-02	5.10E-02	2.24E-03	ガイドライン既定値
廃プラスチック (ポリオレフィン多)	kg	0.00E+00	-	-	ガイドライン既定値
軽質油 (ナフサ類似)	kg	5.34E-01	-	-	3EID
芳香族	kg	7.25E-01	-	-	3EID
中質油 (A重油類似)	kg	5.34E-01	-	-	3EID
重質油 (C重油類似)	kg	5.34E-01	-	-	3EID

表③- 6 バックグラウンドデータ

3.4 廃プラスチック、生成物を焼却する場合の燃焼熱及び CO₂ 排出量

廃プラスチック及び副生成物を焼却した場合の燃焼熱及び CO₂ 排出量を**エラー！参照元が見つかりません**。に示す。

表③- 7 廃プラ・副生成物焼却時の燃焼熱、CO₂ 排出量のバックグラウンドデータ

項目	発熱量 (MJ/kg)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /kg)	出典
廃プラスチック (ポリオレフィン多)	35.6	2.71	「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 (LCA)」、海洋プラスチック問題対応協議会 (JalME)、2019年3月
中質油 (A重油類似)	46.0	2.71	「温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度 算定方法及び排出係数一覧 (参考1)」、環境省 (https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc ; 2023/1/4閲覧)、比重0.85 kg/Lより算出
重質油 (C重油類似)	44.1	3.00	「温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度 算定方法及び排出係数一覧 (参考1)」、環境省 (https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc ; 2023/1/4閲覧)、比重0.95 kg/Lより算出
残渣 (石炭類似)	17.0	2.33	「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 (LCA)」、海洋プラスチック問題対応協議会 (JalME)、2019年3月 「温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度 算定方法及び排出係数一覧 (参考1)」、環境省 (https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc ; 2023/1/4閲覧)

3.5 熱回収

図③-1 に示した熱回収は、熱の CO₂ 排出原単位に基づいて CO₂ 量に換算され、LCCO₂ から控除される。これは、廃プラスチックまたは副産物を燃焼させて発生する熱を熱エネルギーとして回収し利用することで、燃料を使用する分を削減するという考え方に基づいている。

4 評価結果

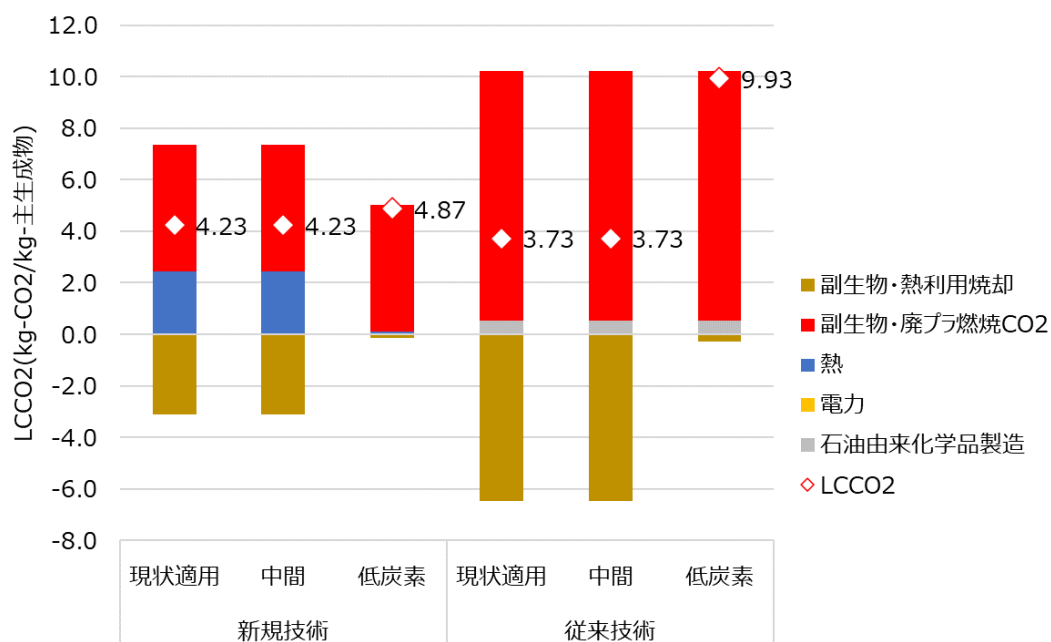
4.1 評価結果

4.1.1 ポリオレフィン系廃プラリサイクルの熱分解による軽質油製造 (ベース)

ベースケースにおける LCCO₂ 評価結果を図③- 2 に示す。現状適用ケース及び中間ケースにおいて、LCCO₂ はいずれも 4.23 kg-CO₂/kg-軽質油となり、リサイクルをしない従来技術 (3.73 kg-CO₂/kg-軽質油) に対して、0.50 kg-CO₂/kg-軽質油ほど大きな値となった。本評価では、従来技術として廃プラスチックの焼却に伴って発生する熱を有効利用することを設定しており、特に現状適用ケース、中間ケースでは、天然ガスの代替としての利用を想定しているため、熱利用による大きなマイナス計上効果が見込まれる。新規技術では、廃プラスチックのリサイクルにより再利用できる熱量が小さくなるため、従来技術に比べて、新規技術の LCCO₂ が高くなった。

低炭素ケースでは、4.87 kg-CO₂/kg-軽質油と現状適用ケース、中間ケースより LCCO₂ 排出量は増加しているが、従来技術 (9.94 kg-CO₂/kg-軽質油) に対して 5.06 kg-CO₂/kg-軽質油ほど小さくなった。低炭素ケースでは、水素の代替として熱利用されることを想定し

ており、熱のCO₂排出原単位が小さいため、熱利用によるマイナス計上の効果が小さくなったことが主な要因である。



図③-2 ベースケースのLCCO₂評価結果

4.1.2 ポリオレフィン系廃プラリサイクルの熱分解による軽質油収率向上

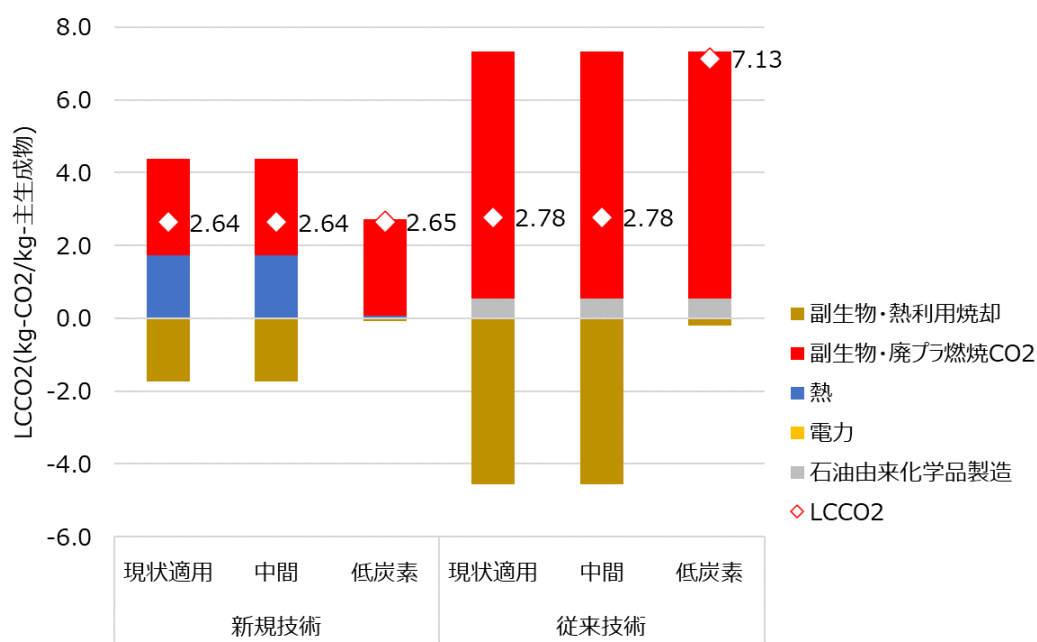
感度分析のため、ケーススタディとしてポリオレフィン系廃プラリサイクルの熱分解において、技術開発により軽質油収率が向上した場合のLCCO₂について試算し評価した。

軽質油収率が15%向上したケース1におけるLCCO₂評価結果を図③-3に示す。現状適用ケース及び中間ケースではLCCO₂が2.64 kg-CO₂/kg-軽質油となり、リサイクルしない従来技術(2.78 kg-CO₂/kg-軽質油)に対して、わずかに小さな値となった。また、低炭素ケースでは、2.65 kg-CO₂/kg-軽質油と従来技術(7.13 kg-CO₂/kg-軽質油)に対して4.48 kg-CO₂/kg-軽質油ほど小さくなった。

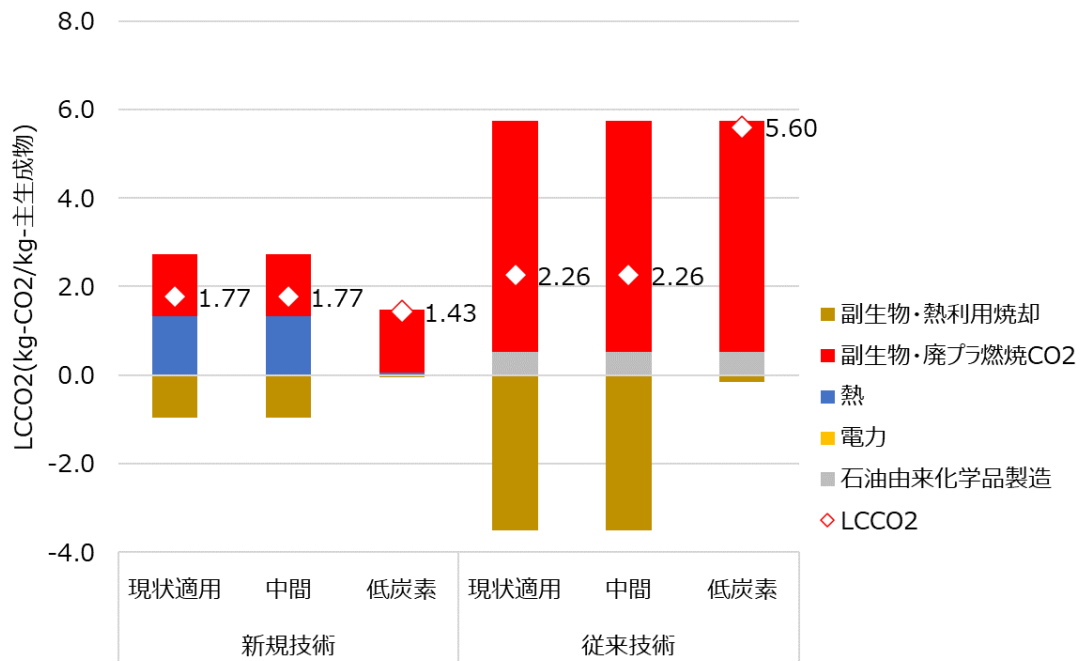
軽質油収率が30%向上したケース2におけるLCCO₂評価結果を図③-4に示す。現状適用ケース及び中間ケースではLCCO₂が1.77 kg-CO₂/kg-軽質油となり、リサイクルしない従来技術(2.26 kg-CO₂/kg-軽質油)に対して、0.49 kg-CO₂/kg-軽質油ほど小さな値となった。また、低炭素ケースでは、1.43 kg-CO₂/kg-軽質油と従来技術(5.60 kg-CO₂/kg-軽質油)に対して4.17 kg-CO₂/kg-軽質油ほど小さくなった。

以上の結果より、現状適用ケース、中間ケースでは、軽質油収率が向上することによって、新規技術のLCCO₂が小さくなり、新規技術と比較した時のCO₂削減効果も大きくなることがわかった。これは、軽質油収率の向上により、軽質油1 kgを製造するために必要な

原料やユーティリティが減少することや重質油等の副生成物の焼却に伴う CO₂ 排出量が減量することに起因する。低炭素ケースにおいても、軽質油収率が向上することによって新規技術の LCCO₂ は小さくなったが、その CO₂ 削減効果は収率の向上に伴って小さくなった。これは現状適用ケース、中間ケースでは焼却熱の再利用に伴う CO₂ 排出量のマイナス計上の効果が大きい、低炭素ケースではマイナス計上の効果が殆ど無くなり、新規技術における副生成物の生成量減少に伴う CO₂ 排出削減量よりも従来技術における廃プラスチックの焼却量減少に伴う CO₂ 排出削減量の方が大きいことの影響が出るためであると考えられる。



図③- 3 ケース 1 の LCCO₂ 評価結果



図③-4 ケース 2 の LCCO₂ 評価結果

4.2 主な結論

廃プラスチックの熱分解によるナフサ相当の軽質油を製造する技術について評価した。

副生する重質油等の副生製品の生成を抑制し軽質油の収率を向上することで原料原単位及びエネルギー原単位が下がり、その結果 LCCO₂ は減少する。現状適用ケース及び中間ケースにおいて、ベースケース（廃プラスチック 1 kg から軽質油 0.280 kg を生成）では、従来技術よりも新規技術の方が LCCO₂ は 0.50 kg-CO₂/kg-軽質油ほど大きいですが、ケース 1（軽質油収率が 15% 向上）では、従来技術と同程度となり、ケース 2（軽質油収率が 30% 向上）では 0.49 kg-CO₂/kg-軽質油ほど小さくなった。

低炭素ケースでは代替する熱の CO₂ 排出原単位が小さく、熱利用によるマイナス計上の効果が非常に小さいため、従来技術と比較して新規技術における廃プラスチックリサイクル効果の影響が大きくなり、LCCO₂ は全てのケースで新規技術の方が小さくなった。

以上の評価結果に基づき、現状技術であるベースケースから製品に占める軽質油の比率を 30% 向上させる収率目標を設定することとした。