

6.1.3 FDCA の品質の確認

【FDCA の PEF 重合試験評価 1 回目】

作成したパルプ糖由来の FDCA を用いて重合試験により PEF を作成し、ポリマー特性を評価した。これまで合成したパルプ糖由来 FDCA を 50 g 準備し、飲料メーカー協力のもと、初回の重合試験を実施した。

〔目標〕 (1) PEF への重合可否の確認

(2) 着色を抑えた PEF を作成できるかの確認

(3) 重合度の確認

〔重合条件〕

FDCA からのエステル化を実施し、5-フランジカルボン酸ジメチル (FDCM) を得た (写真 7)。重合触媒、熱安定剤及び酸化防止剤存在下、FDCM とエチレングリコールを添加してエステル交換反応を実施し、ビス-2-ヒドロキシエチルフラネート (BHEF) を合成した (写真 8)。フラスコ中の BHEF を窒素ガスで十分に置換した後、減圧しながら 200℃以上で加熱し、PEF への縮合重合を行った。得られた PEF は成形および溶液粘度測定を実施し、IV 値と色味を確認した。溶液粘度測定は JIS K 7390 に準拠して実施した。

写真7. FDCA から合成した5-フランジカルボン酸ジメチル (FDCM)

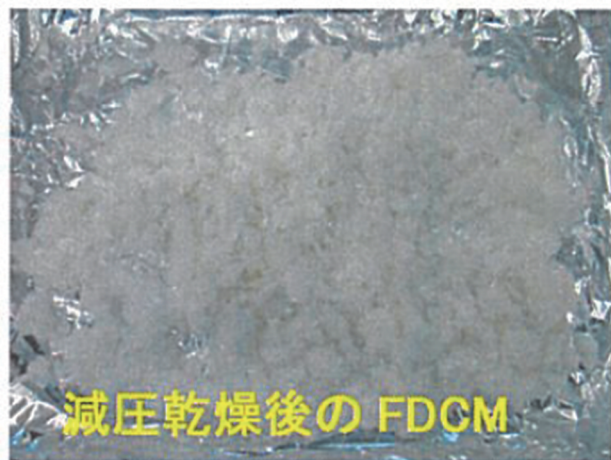
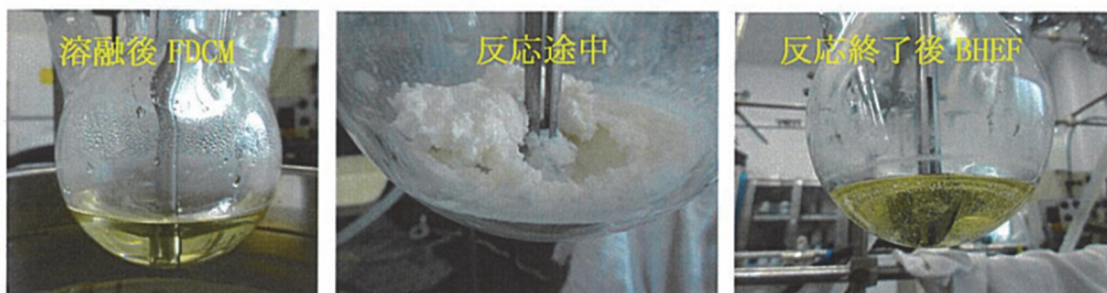


写真8. FDCM から BHEF への合成の様子



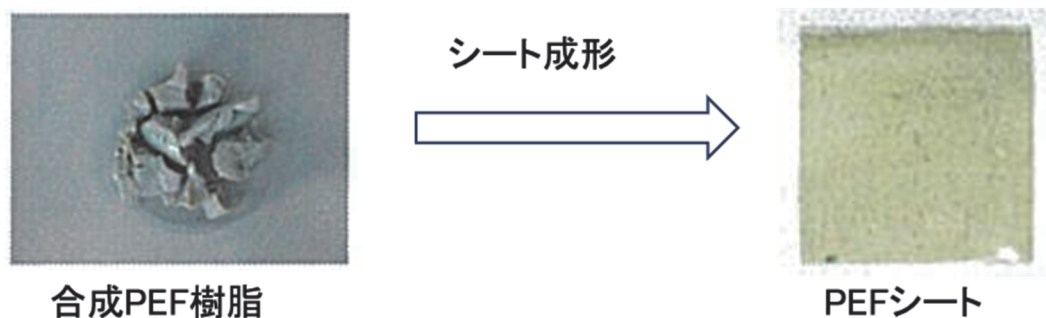
[PEF の評価結果]

(1) FDCA から合成した FDCM を 2.5 g 用いて、PEF 樹脂を 1.72 g 作成することができた。この結果により、パルプ糖由来の FDCA から PEF への重合が可能であることが分かった。

(2) 今回の重合条件により合成した PEF 樹脂を用いて、油圧式圧縮成形機により厚さ 2 mm の PEF シートの成形を行い、色味を確認した。事前に調査した情報から、PEF は褐色に着色しやすいことが懸念されていたが、今回作

成した PEF シートは着色が比較的に抑えられることが分かった（写真 9）。

写真 9．合成した PEF 樹脂から PET シートを成形



（3）重合した PEF の溶液粘度を測定した結果、IV 値が 0.322 であることから、PEF 樹脂の重合度が低いことが分かった。準備した FDCA のサンプル量が少なかったこともあり、重合試験を 1 回しか実施できておらず、重合試験の最適化ができていないと考えている。

●溶液粘度測定結果の詳細

PEF 質量 : 1.999 g

濃度 : 0.3998 g/dL

溶媒流下時間 : 114.8 s

溶液流下時間 : 130.1 s

比粘度 : 0.134

IV 値 : 0.322 dL/g

【FDCA の PEF 重合試験評価 2 回目】

重合試験に用いる FDCA サンプルが少量だと、小スケール評価によるバラツキや乱動要因が多くなることから、重合上の特徴の把握は難しくなる。この課題を抑えるため、飲料メーカーと議論し、PEF と PET の共重合サンプルを作成することにし、重合特性の評価を実施することにした。パルプ糖由来の FDCA を追加で 100 g 準備し、飲料メーカー協力のもと、PEF と PET の共重合試験を実施できる外部機関にて 2 回目の重合試験を実施した。比較対象として、市販品として購入した FDCA（東京化成工業株式会社製）の PEF-PET の共重合試験も同条件で実施した。

〔重合条件〕

重合方式として、溶融重合でプレポリマーを作成し、続く固相重合により PEF-PET の共重合樹脂を作成した。

●溶融重合

仕込み組成は、PET Oligomer /FDCA /EG = 90 / 10 / 30 mol 比（84 / 7.3 / 8.7 wt 比）とした。触媒と添加剤存在下、280℃でエステル化（ES）、280℃で重縮合（PC）を実施した。

●固相重合

回転式加熱装置を用いて、減圧下で 210℃に加熱して重合を行った。

[重合試験結果]

●溶融重合

エステル化時にパルプ糖由来 FDCA では濁りが発生し、最後まで均一相にならなかったため、試薬 FDCA よりもエステル時間（ES 時間）が長くなった（表 5）。一方で、重縮合時間（PC）時間は試薬 FDCA と比較して同等であった。また、試薬 FDCA と比較して、パルプ糖由来 FDCA で FDCA 残存量（共重合量）とエチレングリコールが少なく、COOH 末端基並びに触媒の残存量が少ないことから、パルプ糖由来 FDCA に含まれている不純物が影響している可能性があると考えている。熱特性については、パルプ糖由来 FDCA で T_g が低く、T_m が高い値であることが分かった。色調については、パルプ糖由来 FDCA で L 値が低く、a 値が高くなり、クスマが強いことが分かった。

表 5．溶融重合での、重合時間と得られたプレポリマーの特性値

内容	No.	溶融重合		プレポリマー特性値									
		ES時間	PC時間	IV値	残存FDCA	DEG	COOH末端基	触媒量	DSC 2nd		色調		
		[h:min]	[h:min]	[-]	[mol%]	[mol%]	[eq/t]	[ppm]	Tg [℃]	Tm [℃]	L	a	b
(参考) 試薬FDCA		1:15	2:50	0.60	9.9	6.6	5.0	316	72.9	228.3	53.4	0.7	16.2
バイオ糖由来FDCA	n=1	2:15	2:35	0.61	7.0	2.7	1.3	238	70.4	235.8	28.1	5.3	10.3
	n=2	1:55	2:40	0.61	7.2	2.4	1.2	231	71.1	235.3	29.4	5.8	11.2

●固相重合

固相重合後に、PEF-PET 重合ポリマーを得ることができた。試薬 FDCA に比べて、パルプ糖由来 FDCA は重合時間が長くなったことから、固相重合性が劣る結果であった。また、試薬 FDCA は 7 時間程度で PET 樹脂と同等の IV 値（0.78）に到達する一方で、パルプ糖由来 FDCA は 15 時間以上かかって試薬 FDCA の IV 値に到達することには至らなかった（図 20）。合成した樹脂の色味、試薬 FDCA に比べて暗い色の結果であった（表 6）。原因として、プレポリマーの COOH 末端基量や触媒の残存量が少なかったことから、不純物による反応阻害などが考えられる。ただし、今後まとまった量の FDCA が確保でき、条件検討（FDCA や触媒などの添加量、触媒種類の変更等）を実施すれば改善の余地はあると考えられる。

しかし、1 回目の重合試験結果（IV 値 = 0.3）に比較して、重合条件は異なるものの、本 2 回目の重合試験により、重合度を大幅に改善することが出来ることが分かった。

図 20．固相重合での、重合時間と IV 値の関係

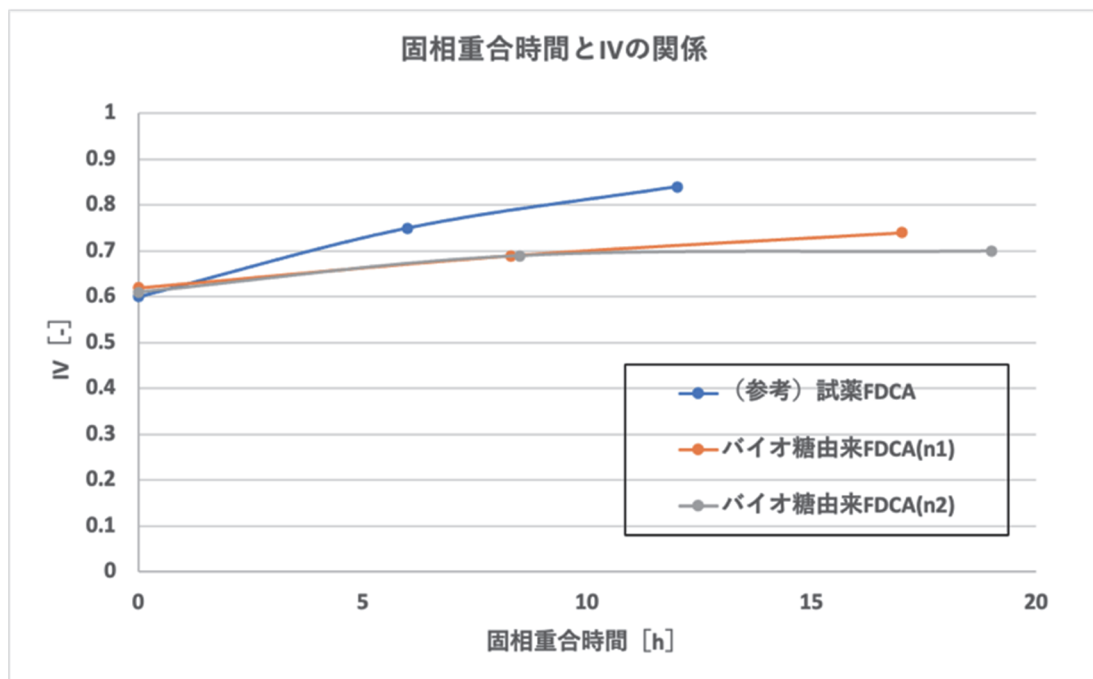


表 6．固相重合後のポリマー特性値

内容	No.	固相重合	ポリマー特性値			
		時間	IV値	色調		
		[h]	[-]	L	a	b
(参考) 試薬FDCA		12	0.84	70.2	-0.2	13.0
バイオ糖由来FDCA	n=1	17	0.74	42.8	3.8	12.7
	n=2	19	0.70	44.9	3.7	13.6

【重合試験のまとめ】

パルプ糖由来 FDCA から PEF 樹脂、及び PEF-PET 共重合樹脂を作成することが出来た。また、パルプ糖に含まれる不純物が、重合に大きな影響を与えることを確認することが出来た。HPLC や $^1\text{H-NMR}$ ・ $^{13}\text{C-NMR}$ から、FDCA

純度は99%程度と高いが、残りの不純物成分1%が悪さをすることは否定できない（図21、22、23）。また、パルプ糖が天然物であること、FDCA合成までの工程でアルカリ金属を用いていることから、パルプ糖由来FDCAからはアルカリ金属成分がppmオーダーで検出されている。今後は、これらの不純物を取り除くことに加え、FDCAサンプル量を十分に確保した上で重合条件を検討し、さらに重合度の高いPEF樹脂を作成することにする。

図21．重合試験に用いたパルプ糖由来FDCAのHPLC分析結果



ピーク	RT	タイプ	幅	面積	高さ	面積%
#	[min]		[min]	[mAU*s]	[mAU]	[%]
1	1.591	BB	0.050	7695.4	2279.9	98.7
2	5.044	BB	0.052	13.0	3.6	0.2
3	5.237	BB	0.051	9.6	2.7	0.1
4	8.492	BB	0.058	46.0	11.3	0.6
5	8.965	BB	0.115	35.3	4.6	0.5

図 2 2. 重合試験に用いたパルプ糖由来 FDCA の ^1H -NMR 測定結果

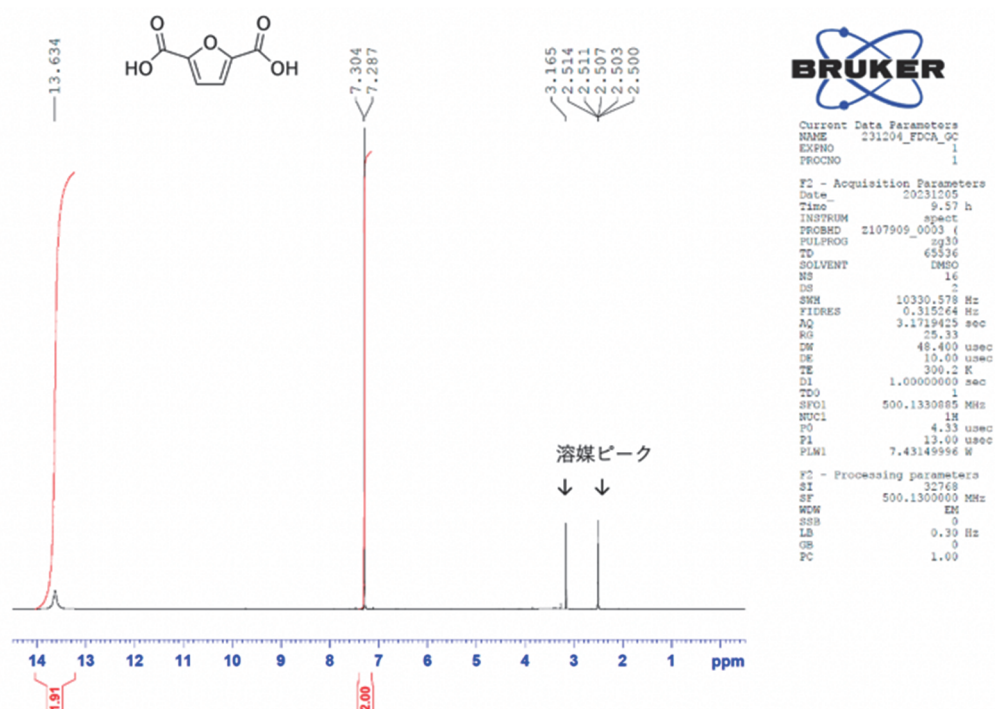
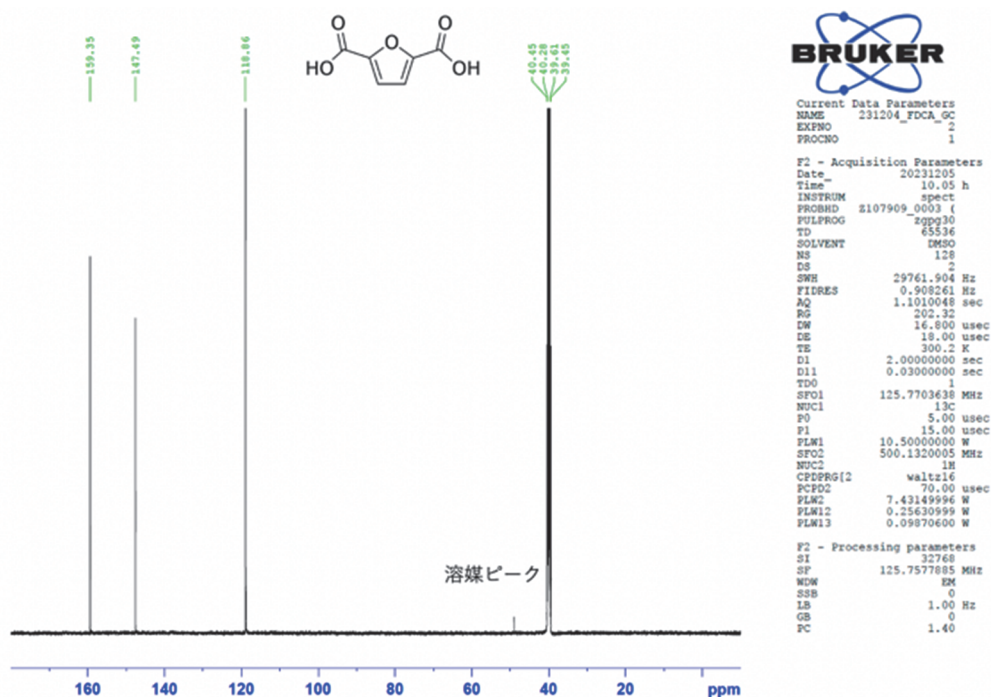


図 2 3. 重合試験に用いたパルプ糖由来 FDCA の ^{13}C -NMR 測定結果



6.2 パルプ糖～FDCA の一貫生産のスケールアップ実証試験

6.2.1 パルプ糖から HMF 生産のスケールアップ実証試験

去年度までの HMF 合成検討結果について、各種ラボデータを日本ゼオン社と共有し、スケールアップの検証を行った。その結果、スケールアップに以下の課題があることが判明した。

①反応工程

A) 流通反応では触媒寿命が数時間しかないために、反応管の切り替えが頻繁に必要となり、実質的に実施が困難である。

B) バッチ反応では酸性溶液の加圧反応となっており、グラスライニング反応釜かつ耐圧の設備が必要。このような設備は少ない。

②後処理工程

A) 反応液と触媒の分離（ろ過）に時間を要するので、実質的に困難である。

B) 反応液から HMF の抽出に使用する有機溶媒量が膨大で、実質的に困難である。

③精製工程

A) シリカゲルカラム精製はトンレベルの製造には使用できない。

以上を踏まえたうえで、スケールアップするための改良手法を開発する必要が生じたので、以下の改善方針を立てて、検討を実施した。

① 反応工程

- A) 流通反応でスケールアップするために必要な触媒寿命の改善は短期で解決することは困難と判断。流通反応の適用は見送る。
- B) - 1 加圧可能な設備を有する委託製造先を調査する。
- B) - 2 常圧バッチ反応の可能性を検討する。

② 後処理工程

- A) 触媒ろ過を実施しないプロセスに変更する。
- B) 抽出の必要性を確認して、可能であれば抽出を実施しないプロセスに変更する。

③ 精製工程

- A) - 1 蒸留精製の可能性を検討する。
- A) - 2 スケールアップのサイズを 100 g スケールにサイズダウンする。

以下に検討内容をまとめる。

①反応工程

B) - 1 加圧可能な設備を有する委託製造先を調査する。

委託製造会社約 15 社にコンタクトして調査を実施したところ、以下が判明。

- 1) 最小で 500L スケールの設備保有会社を見つけた。
- 2) 設備の空きスケジュールが半年以上先までない。

3) この段階でのラボバッチ反応の実績スケールは1リットル程度。

⇒ そのため、500 倍のスケールアップはリスクが高いと判断した。

<結論>

加圧バッチ反応は、期間内に実施できないことが分かり検討中止とした。

B)– 2 常圧バッチ反応の可能性を検討する。

スケールアップ時の原料はグルコース糖水溶液 (パルプ糖) が前提となるので水溶液となり、沸点は 100℃となる。この前提で以下の検討を実施した。

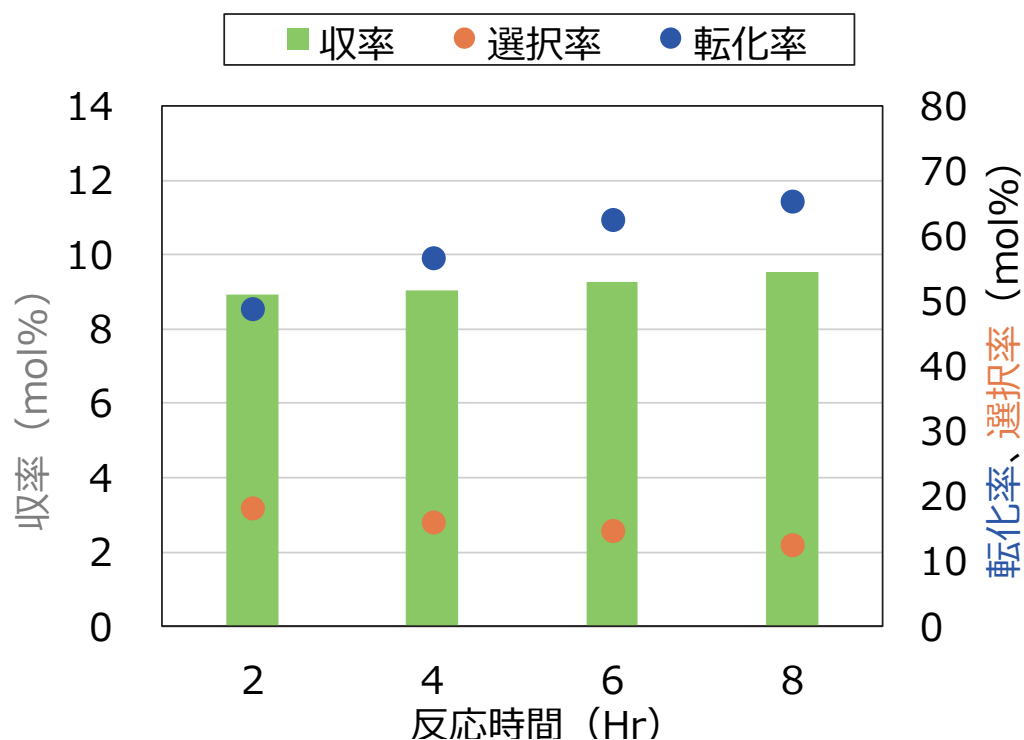
- ① 100℃反応の進行度合い確認
- ② 1-ブタノールを使用する反応
- ③ 反応時間延長の検討
- ④ スケールアップの確認

【結果】

① 100℃反応の進行度合い確認

50ml のナス型フラスコに 30wt%D-グルコース水溶液 20g、触媒 2g を加えた。この溶液を 100℃で加熱した。2 時間ごとにサンプリングを行い、HPLC 分析を行うことで、反応の進行度を確認した (図 2 4)。

図 2 4．小スケールでの HMF 合成反応の追跡結果



【まとめ】

- ① 100℃にしたことで、収率は 9.3%程度に低下した。

(従来は 6 時間反応で収率 12%)

- ② 反応時間の延長で転化率・収率が緩やかに増加していることから、
収率低下分を反応時間の延長で充足できる可能性があることが判明。

② 1-ブタノールを使用する反応

1-ブタノールを用いて、生成する HMF を有機層に抽出しながら反応を実施するコンセプトがグリーンケミカル社にあったので、その技術を適用して 100℃

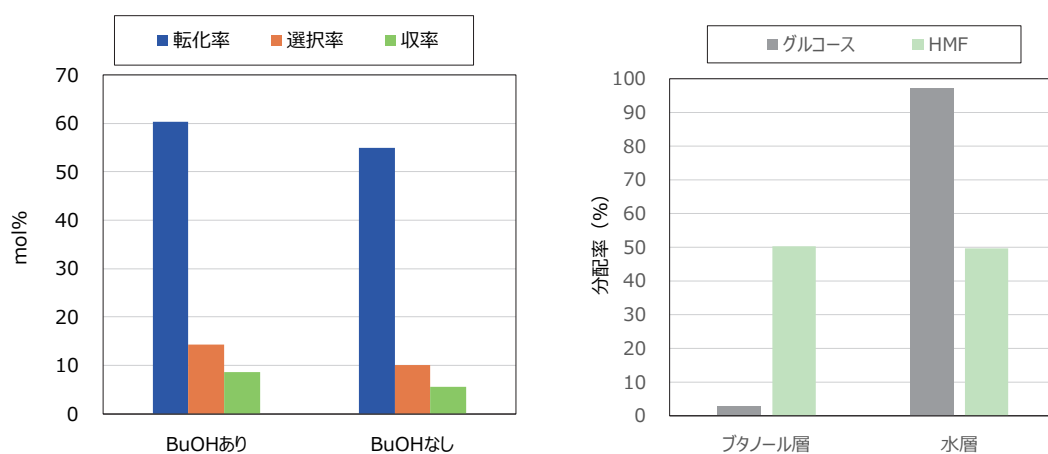
常圧にて反応を実施した。

またこの段階から、試薬の糖ではなく広葉樹酵素分解糖液を使用することにした。具体的な仕込み比率、手順を以下に示す。

30ml のナス型フラスコに、パルプ糖である広葉樹酵素分解糖液（グルコース含量 60wt%）10 g、1-ブタノール 5ml、触媒 1.2g を加えて 100℃にて 6 時間反応を行った。

比較として、30ml のナス型フラスコに、広葉樹酵素分解糖液（グルコース含量 60wt%）20 g、触媒 2g を加えて 100℃にて 6 時間反応を行った。反応後、HPLC にて分析を行い、反応成績及び、水層と 1-ブタノール層の分配率を算出した。結果を以下に示す（図 2 5）。収率は、水層と 1-ブタノール層の合算である。

図 2 5． 1-ブタノールの影響の確認



【まとめ】

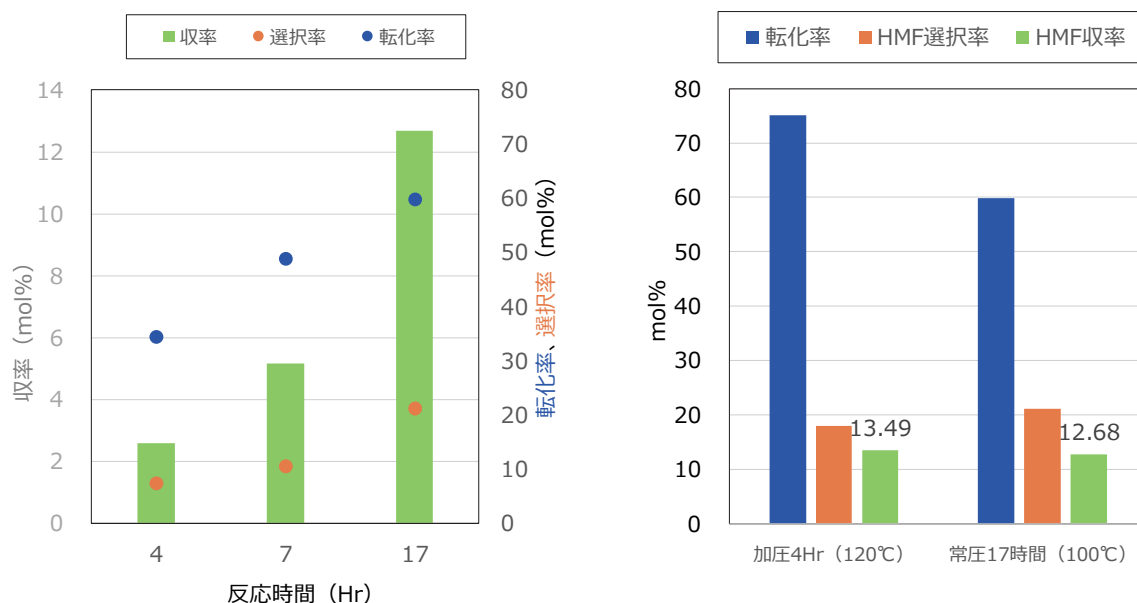
- ① 広葉樹酵素分解糖液では、収率が 5.5%（水系）に低下した。試薬糖：9.3%。
- ② ブタノール含有系では収率が 8.6%であり、改善することが分かった。
- ③ ブタノール含有系における、HMF の分配率は水層／有機層 = 50/50 であることが分かった。
- ④ ブタノール含有系の方がより高収率であることから、この系を使用していくことにした。

③ 反応時間延長の検討

先の検討で、広葉樹酵素分解糖液に変更すると収率が低下することが分かった。そこで、反応時間の延長及び、激しい加熱により収率を元のレベルに戻せるか検討を実施した。具体的な仕込み比率、手順を以下に示す。

30ml のナス型フラスコに、広葉樹酵素分解糖液（グルコース含量 60wt%）10 g、1-ブタノール 5ml、触媒 2g を加えて内温 100℃（オイルバス 120℃）にて反応を行った。適宜、サンプリングを実施して HPLC 分析を行った。結果を以下に示す（図 2 6）。収率は、水層と 1-ブタノール層の合算。

図 2 6．広葉樹酵素分解糖液からの HMF 合成条件検討



【まとめ】

- ① 広葉樹酵素分解糖液でも、反応時間の延長と、強加熱により、加圧条件と概ね同等の反応成績が得られることが分かった。
- ② この反応条件を基本的な方法とする。
- ③ スケールアップに伴い、反応温度が上がりきらない場合は、反応時間の延長で対応する。

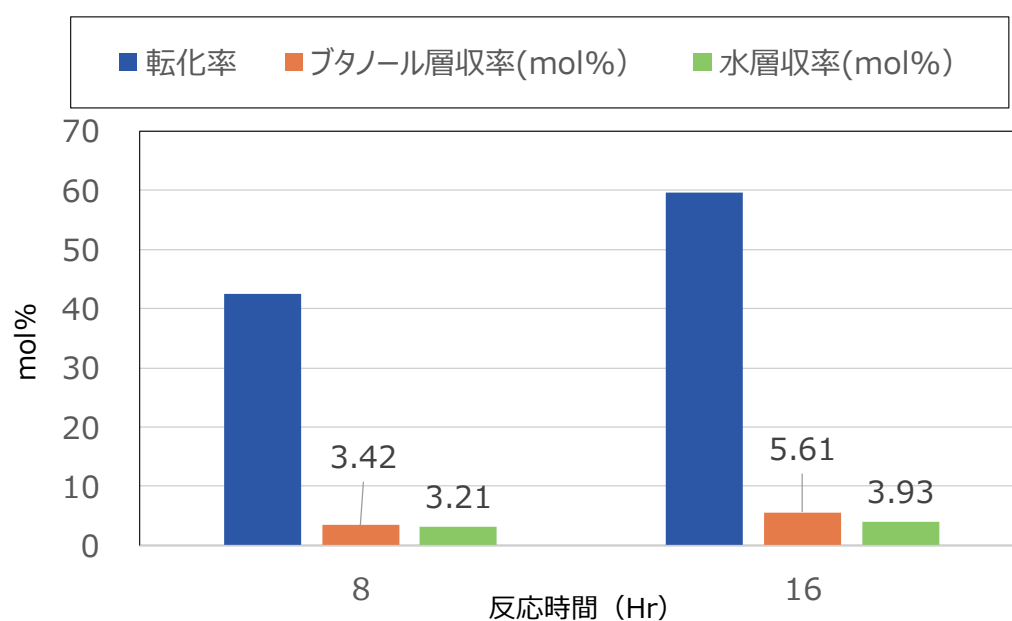
④ スケールアップの確認

1-ブタノールを使用する反応系において、糖液でリットルレベルまでスケールアップ合成をして新たな問題が発生しないかを確認した。具体的な仕込み比

率、手順を以下に示す。

3 リットルの 4 つ口フラスコに広葉樹酵素分解糖液（グルコース含量 44.5wt%）1.5 リットル、1-ブタノール 750ml、触媒 267g（グルコースに対して 0.4 重量等量）を加えて、内温 100℃（オイルバス温度：120℃）にて、16 時間反応を行った。以下に結果を示す（図 2 7）。

図 2 7．HMF 合成のスケールアップ検証



【まとめ】

- ① 広葉樹酵素分解糖液 1.5 リットルスケールでも反応成績の悪化は見られず、実施であることが分かった。
- ② 反応工程に関しては、1-ブタノールを使用して、強熱する常圧反応で進めると決定した。

② 後処理工程

A) 触媒ろ過を実施しないプロセスに変更する。

先の 1.5 リットルスケールでの 1-ブタノールを使用して、強熱する常圧反応において、反応終了後の時点で触媒はすべて水層側に移行することが分かった（写真 10）。上層が 1-ブタノール層で、下層が水層であるが、水層側に触媒がすべて移行していることが分かる。

写真 10．HMF 合成反応後の様子



【まとめ】

① 1-ブタノールを使用して、強熱する常圧反応においては、触媒がすべて下層の水層側に移行することが分かった。

② この状態において、上側から 1-ブタノールを抜き出すと、触媒ろ過を行わずとも、有機層を取り出せることが分かった。

③ 上層を反応器の上側から抜き出す操作は、スケールアップ時に実施可能な方法なので、この方法を採用することで、ろ過を回避することとした。

B) 抽出の必要性を確認して、可能であれば抽出を実施しないプロセスに変更する。

水層から酢酸エチルを用いて HMF を抽出する操作において、どの程度の数量の HMF が抽出回収されているかを調査した。具体的な仕込み比率、手順を以下に示す。

3 リットルの 4 つ口フラスコに広葉樹酵素分解糖液（グルコース含量 54.2wt%）1.0 リットル、1-ブタノール 500ml、触媒 217g（グルコースに対して 0.4 重量等量）を加えて、内温 100℃（オイルバス温度：120℃）にて、16 時間反応を行った。その後、1-ブタノール層を反応器の上から抜き出し、残った水層を 1-ブタノールと同体積の酢酸エチルで抽出して、その状況と、抽出割合

を検証した。結果を以下に示す（写真 1 1、1 2、図 2 8、2 9）。

写真 1 1．抽出の様子（水層側の写真）

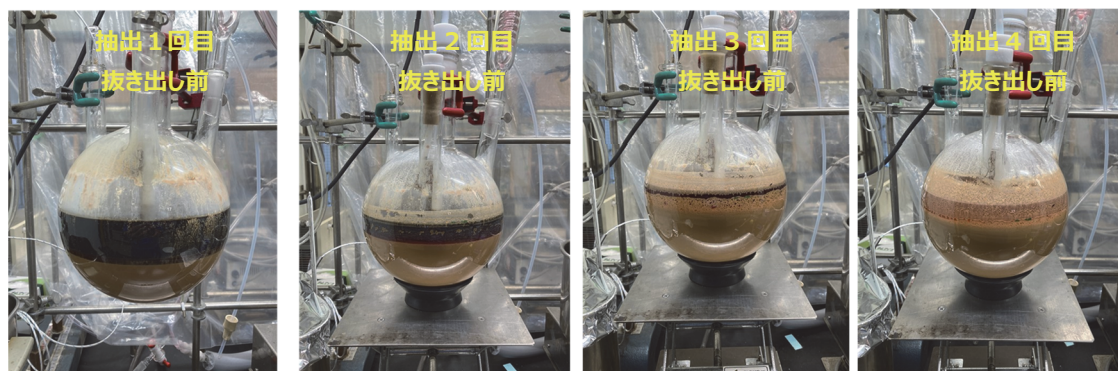


写真 1 2．有機層側（抽出液側）

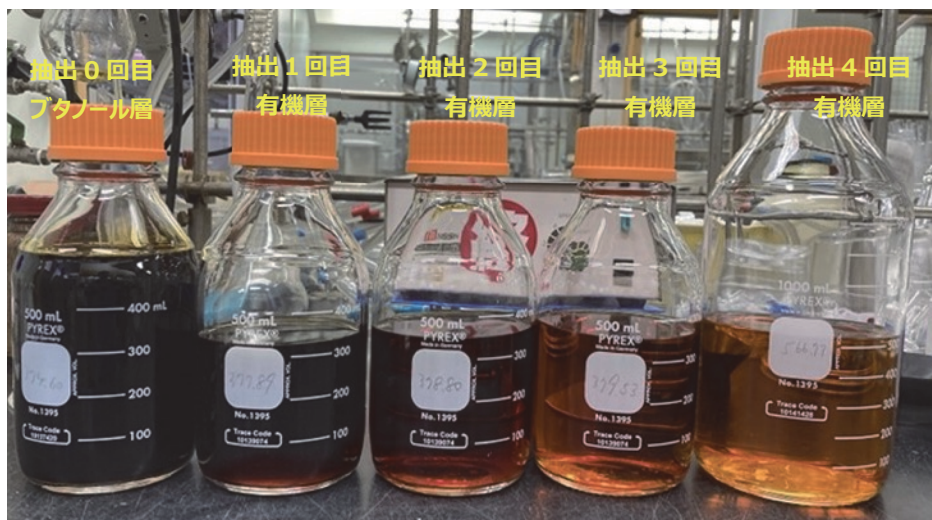


図 2 8．回収される有機層の割合

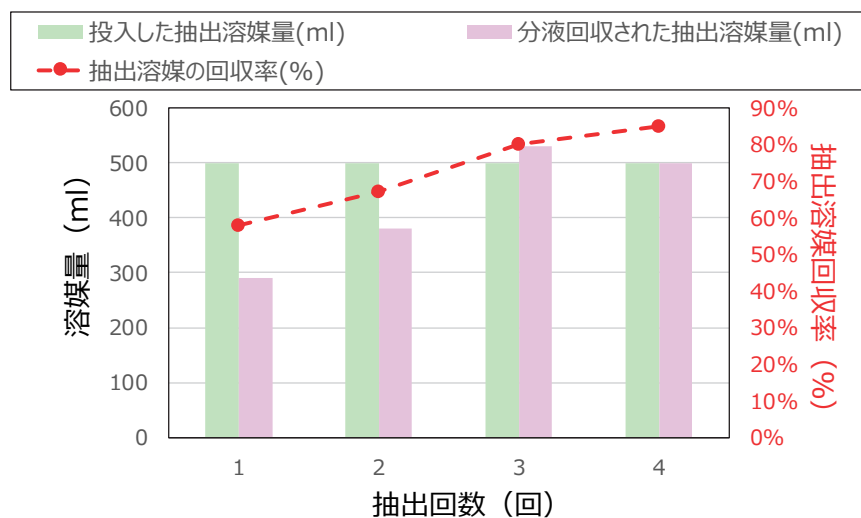


図 2 9．水層から抽出回収される HMF の量

	得られた液量(g)	HMF濃度(wt%)	含有されるHMF量(g)		水層に残する HMF量(g)
ブタノール層	600.4	2.91	17.47		
水層	N.A.	N.A.	19.60		
酢酸エチル①	290	1.63	4.73	8.76	10.84
酢酸エチル②	380	0.86	3.27		
酢酸エチル③	530	0.53	0.48		
酢酸エチル④	500	0.40	0.28		
水層から抽出されたHMFの割合（%）				44.7	

【まとめ】

① 抽出初期において、投入した酢酸エチルが完全に分層、回収できない問題があることが分かった。

- ② 抜き出せる酢酸エチルだけを抜き出しながら抽出を続けると、徐々に分液性は良化の方向に向かうことが分かった。
- ③ 最終的に 4 回抽出操作を行うと、投入した全酢酸エチル量の 85% が回収できることが分かった。
- ④ 水層から回収される HMF の回収率は約 45% 程度であり、作業工数の割には回収率が低いことが分かった。

<結論>

酢酸エチル抽出は実施しない。

③ 精製工程

A) -1 蒸留精製の可能性を検討する。

工業的なスケールでのシリカゲルカラム精製は実質的に実施できない。そこで、代替策として蒸留による精製の可能性を検証した。

<蒸留検討①>

HMF の沸点が高いことが想定されたので、減圧単蒸留で検討を行った（写真 1 3）。試料として、広葉樹酵素分解糖液から合成、シリカゲルカラム精製を実施した HMF 8.0 g を用いた（LC 純度 82.4%）。結果を以下に示す（表 6）。

写真 1 3．減圧単蒸留の装置



表 6．減圧単蒸留の検討結果

時刻	ボトム温度/℃	Top温度/℃	圧力/Torr	備考
8:42	135	38	16.6	
8:50	135	38	18.2	既にボトムは真っ黒な溶液。増粘はしていない様子。
9:00	157	42	19.2	冷却管の入口に水滴が付着。トラップには水がある。
9:10	180	51	20.1	
9:15	190	53	20.1	オイルバスの温度が限界。中止。
結果：全く抜き出てこない。				

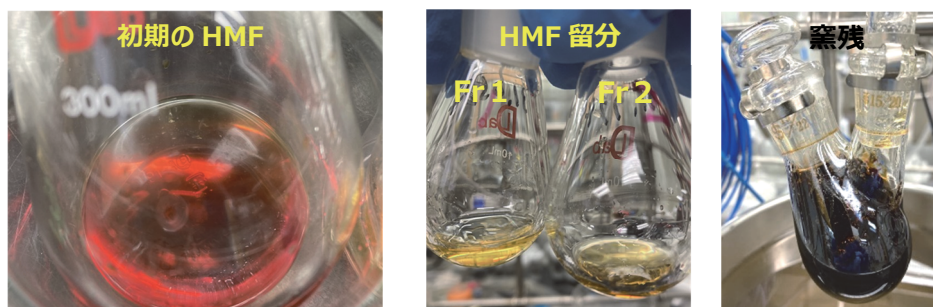
<蒸留検討②>

同様の単蒸留設備を用いて、安定剤（ヒドロサルファイトナトリウム）を 2 重量%添加して蒸留を実施した。結果を以下に示す（表 7、写真 1 4）。

表 7．安定剤を添加した減圧単蒸留の検討結果

時刻	ボトム温度/℃	Top温度/℃	圧力/Torr	取得数量(g)	LC純度 (%)	備考
13:30	70	—	13.9	8.0	82.4	安定剤：0.16g（2重量%）
13:50	112	30	17.5			115℃位から黒く変色が始まる。 確かに、安定剤を入れると変色しにくくなっている。
14:00	155	45	19.6			145℃あたりで、水がわずかに生成している様子で、冷却管入口が曇り始める。
14:05	160	110	19.9	2.34	88.0	Topが急上昇して、留出が始まる。
14:07	165	135	20.1			
14:10	166	137	20.5	1.36	85.5	
14:13	170	132	20.7			
				回収率：46.2%		ボトムはカチカチの樹脂状。量も多い。

写真 1 4．安定剤を添加した減圧単蒸留の様子



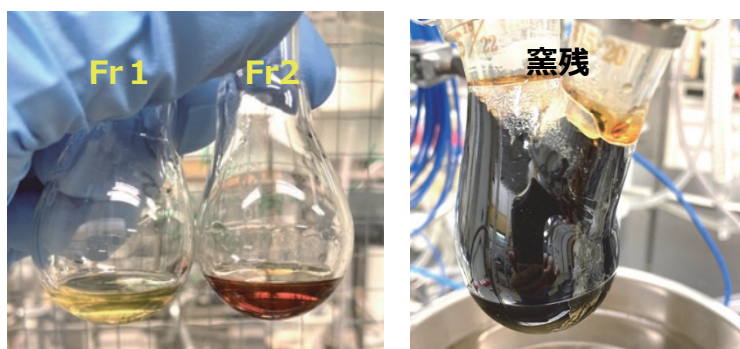
<蒸留検討③>

同様の単蒸留設備を用いて、安定剤（ヒドロサルファイトナトリウム）を 2 重量%から 5 重量%に増量して蒸留を実施した。結果を以下に示す（表 8、写真 1 5）。

表 7. 安定剤を添加した減圧単蒸留の検討結果－ 2

時刻	ボトム温度/℃	Top温度/℃	圧力/Torr	取得数量(g)	LC純度 (%)	備考
9:25	80	—	5.0	8.0	82.4	安定剤 : 0.4g (4重量%)
9:33	115		6.3			115℃位から黒く変色が始まる。 確かに、安定剤を入れると変色しにくくなっている。
9:37	135		6.5			135℃あたりで、下の方で還流が始まっている。 TOP温度が上昇し始める (80℃) 。
9:40	145	126	6.8	1.60	93.4	Topが急上昇して、留出が始まる。
9:43	148	128	6.8			
9:45	150	128	6.8	2.34	95.5	留分の色が変わったので、フラクションを切り替えた。
9:47	156	128	6.8			留分が茶色い溶液
9:50	160	121	6.9			Top温度が下がり始める。流出もゆっくりになる。
9:52	163	115	6.9			留出は止まる。ボトム付近ではまだ少し還流している様子がある。
				回収率 : 49.3%		ボトムはカチカチの樹脂状。量も多い。

写真 1 4. 安定剤を添加した減圧単蒸留の様子－ 2



【まとめ】

- ① 安定剤を添加しない減圧蒸留では HMF が全く流出しなかった。
- ② 安定剤としてヒドロサルファイトナトリウムを添加すると、蒸留で HMF を得ることができるが、回収率は 50%程度にとどまる。
- ③ ヒドロサルファイトの添加量は 2～5 重量%の範囲では、多い方が効果

が得られ、その効果は主に HMF の純度に影響する。

- ④ 回収率が約半分程度であるので、今回のスケールアップでの実施は不可。

<結論>

蒸留は適用せず、従来のシリカゲルカラム法で精製を実施する。

以上の結果から、スケールアップを実施するプロセスは以下とした。

工程	① 反応工程	② 触媒ろ過	③ 分液抽出	④ 濃縮	⑤ カラム精製
手法	常圧バッチ方式	実施なし	1-ブタノール層の 抜き出しのみ	エバポレータで 濃縮	シリカゲルカラム 精製

触媒量：グルコースに対して40wt%
反応温度：100℃（加熱浴：120℃）
反応時間：20時間
反応圧力：大気圧

シリカゲル：Crudeの10wt倍使用
カラム準備：ヘキサン/酢酸エチル=2/1（体積比）
サンプルアプライ：クロロホルムをCrude重量と同じ体積使用
初期展開：ヘキサン/酢酸エチル=2/1（体積比）
1カラムボリューム使用
本展開：ヘキサン/酢酸エチル=2/8（体積比）
分画：1カラムボリュームを5分割

共通事項
エバポレータ濃縮：35℃@ダイヤフラムPU
1-ブタノール濃縮：45℃@油回転PU
バージ前：冷却（氷浴）
バージ時：窒素導入

【外部委託先でのスケールアップ実施】

外部委託先を使用して、上記プロセスによるスケールアップを実施した。

バッチサイズは、20 リットルの反応器を使用した。

広葉樹酵素分解糖液を 7Kg 使用し、1-ブタノールを 7 リットル、触媒を 1.5Kg 使用した。反応時間は、スケールアップに伴い 20 時間に設定した。

委託先でのラボ検討も含めて、結果を以下にまとめた（表9）。

表 9. 外部委託先でのスケールアップ実施結果

		ラボトレース		スケールアップ				
バッチ番号		0-1	0-2	1	2	3	目標値 (ラボ実績から算出)	
作業期間		11/13-17	11/27-12/1	12/5-12/11	12/12-12/18	12/19-12/25		
原料情報	糖液使用量 (Kg)	1.0	1.0	7.0	7.0	7.0		
	原料糖液のグルコース含量 (wt%)	55.14	49.69	51.87	51.87	53.44	60	
反応成績	転化率 (mol%)		67.03	61.26	64.57	63.79	63.01	60以上
	反応収率 (mol%)	合計	12.66	11.71	11.51	10.18	12.05	10以上
		ブタノール層	10.16	9.27	8.94	7.94	9.29	N.A.
		水層	2.50	2.44	2.57	2.24	2.76	N.A.
単離成績	HMF単離数量 (g)		15.9	22.0	121	100	118	150g
	純度 (LC-area%)		57.86	79.5	79.7	82.4	79.4	80以上
	純度換算後のHMF数量 (g)		9.20	17.49	96.44	82.40	93.69	3バッチ合計で100以上
	HMF単離収率 (mol%)		2.4	5.0	3.8	3.2	3.6	2.4以上

【まとめ】

- ① スケールアップの基本的な設計として、1バッチあたり 100 g の HMF 取得を目標とした。
- ② 委託先のラボ検討において、反応 1 バッチ当たりシリカゲルカラム精製を 2 回に分けて実施する必要性が生じたので 2 回に分けて実施した。
- ③ バッチごとの純度換算後の HMF 取得数量は目標値をやや下回ったが、今回の目的である合計で 100g 以上の HMF を得る目標は達成できた。
- ④ 2バッチ目の単離収量が少なくなっているのは、反応収率がやや低下したことと、シリカゲルカラム精製において、分画のタイミングが悪かったことに起因している。

6.2.2 HMF 製造コストの試算・目標値・現状の課題

HMF 製造プラントの投資額、変動費、CO₂ 排出量を以下の前提を置き、試算した。

- ・現状の触媒寿命では流通反応を採用すると短時間で触媒再生が必要となり、実現性が低いと判断した。現状では流通反応は不可だが、触媒寿命を改良することを前提に流通反応を採用した。

- ・ラボではカラムで精製している。カラム精製は処理量が少なく、商業プラントでは採用できない。技術が完成していないが、試算では精製工程としては蒸留を採用した。

- ・各入力値をパラメーターとして変動させ、設備投資額が 100 億円前後になるようにパラメーターを収束させることで、結果や目標値を算出する方法を採用した。

以下に試算する際に使用した詳細条件を示す。

項目	内容
条件	・ 20t/年でプラントコストを算出し、5,000t/年に外挿
	・ 土地費用、およびユーティリティ設備費用含めず
	・ 8,000h/年稼働、3か月ごとに5日ダウンタイム
原料	・ 30wt%グルコース水溶液、触媒
工程	・ 流通反応→抽出溶媒で抽出→バッチ蒸留、排水精製(抽出溶媒除去)、抽出溶媒精製
	注：流通反応及び抽出工程はラボ実績を元にサイズアップ、精製は検討が不十分であるが蒸留工程を採用
反応	・ 流通反応、100mmφ×4m長さ(反応管体積換算でラボ実績の14,000倍)、反応管4本
	・ 触媒量：27.7Kg/1反応管
	・ 反応条件：160℃15min
	・ 流量：80kg/h(反応管4本)
	・ 収率30mol%
	・ 触媒寿命2000h(Qごとに触媒入替)
抽出	・ 処理速度：20kg/h、HMF10%溶液処理想定
精製	・ バッチ減圧蒸留
	・ 還元剤ハイドロサルファイトナトリウム($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)未使用
その他	・ 使用済触媒は廃棄、未反応グルコースは廃棄、抽出溶媒は蒸留精製し再利用

【結果】

①プラント投資額：100 億円程度(HMF5,000t/y)

②変動費：約 200 円/kg(HMF1kg 当たり)

バイオ糖：93 円/kg

触媒：67 円/kg

ユーティリティコスト：30 円/kg

③CO₂ 排出量：約 0.53tCO₂/t(HMF1t 当たり)

原単位：蒸気 2.5t/t、電気 300kW/t、水 5t/t

蒸気： $2.5\text{t/t} \times 0.16\text{tCO}_2/\text{t} = 0.40\text{tCO}_2/\text{t}$

電気： $300\text{kW/t} \times 0.415\text{kCO}_2/\text{kWh} (\div 1000) = 0.125\text{tCO}_2/\text{t}$

④プラント投資額：100 億円程度、変動費：約 200 円/kg(HMF1kg 当たり)

とするためには、下記の目標値を実現する必要有り。()内は現行の実力。

バイオ糖価格：30 円/kg(120 円/kg)

触媒価格：3,000 円/kg(3,000 円/kg)

グルコース濃度：30wt%(30wt%)

触媒寿命：2,000h(2h)

収率：30mol%(6mol%)

① 現状の課題および考察

- ・目標値に対し、触媒寿命および収率が最も乖離大。
- ・ラボー貫プロセスが完成していない状況、更にベンチスケールでのデータがない中で算出した結果のため、試算精度に欠ける。
- ・ベンチ設備を立ち上げ、データ取得が必要。
- ・反応液濃度が薄い。一般論として反応液濃度を上げることができれば、処理量が低減し投資額を削減することが可能。
- ・投資額を下げることに特化したプロセス開発も検討したい。

6.2.3 HMF から FDCA 生産のスケールアップ実証試験

これまではオートクレーブ方式により、 MnO_2 触媒と炭酸水素ナトリウム塩を加え、さらに酸素ガスを 1 MPa の加圧条件で供給して、HMF から FDCA を合成した。オートクレーブはバッチ方式であり、外部機関の適切な設備を使用できれば、設備投資せずとも FDCA の製造が可能になる可能性があるが、反応条件が 1 MPa と高い圧力を必要とすることから、連続生産には向かない手法であると考えられる。実際に、共同実施者である日本ゼオン社とのスケールアップ条件の議論に加え、外部機関で数社調査したが、オートクレーブ方式でスケールアップ試験できる製造委託先は見つからなかった。スケールアップ困難の課題を解決するために、改良手法を新たに検討する必要があると判断した。

改良手法として、[スケールアップ酸素ガスを全く使用しないバッチ反応] と [貴金属を用いたフロー合成反応] を検討した。

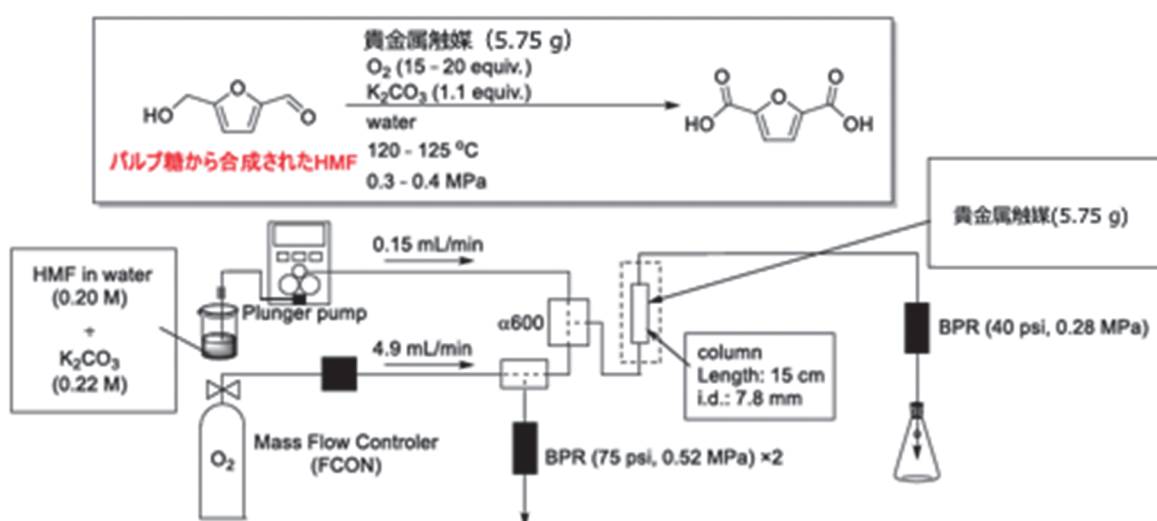
・[スケールアップ酸素ガスを全く使用しないバッチ反応]

酸化反応の酸素源として、酸素ガスではなく、酸化剤に着目して検討を行った。種々検討を行った結果、市販されている有機フリーラジカル試薬を触媒として用い、亜塩素酸ナトリウムを酸化剤として用いることで、HMF から FDCA を 70%以上の単離収率で合成できる手法を見出した。現在は、他企業とこちらの酸化反応のスケールアップ条件の検討を実施しており、合成条件と反応プロセスが決まり次第、スケールアップの実証に取り組んでいく予定である。

・[貴金属を用いたフロー合成反応]

二つ目の改良手法として、FDCA フロー合成検討時でも述べた、貴金属触媒を用いた酸化反応である。この手法は酸素ガスを使用するが、圧力は0.4 MPa 程度であることから、設備制限が緩和される利点が多い。実際に共同研究先との議論から、設備の設計も可能であることが分かった。パルプ糖由来 HMF から FDCA 合成の反応条件の確立も済んでおり、こちらの手法で FDCA 100 g のスケールアップ実証を共同研究先で行った。

《FDCA 合成プロセス条件》



- ・ HMF 溶液はプランジャーポンプで送液し、酸素はボンベから直接送気。
- ・ マイクロミキサーで気液を混合し、形成したスラグを触媒充填カラムに導入。カラムはパイプ型マントルヒーターで加熱。

- ・ カラムを通過してきた反応溶液を回収。

流路の閉塞によって系内圧力がポンベの二次圧(0.85 MPa)を越えた場合に酸素ライン側への逆流を防止するため逆止弁を設置。また、系内圧力が 1 MPa を越えた場合に酸素や反応溶液を系外へ排出するためのリークラインを設置。

《パルプ糖由来 HMF 溶液の調整》

外部委託先でのスケールアップ実施により合成したパルプ糖由来 HMF を水に溶解させると、溶液に濁りが発生したがセライト濾過により透明な水溶液を得た。

《パルプ糖由来 FDCA 合成結果》

共同研究先にて FDCA の連続フロー合成を行った。その結果、約 20 日間の連続生産で、HMF (215 g) から FDCA (123 g) を得ることができた。収率としては 46 %であった。

使用したHMF (g)	合成したFDCA (g)	収率 (%)
215	123	46

得られたパルプ糖由来の FDCA は、試薬 HMF から合成したものに比べて、より茶色に着色していたが、活性炭による脱色操作を行うことで白色の FDCA 粉体

が得られた（写真 1 6）。脱色後の FDCA を ^1H -NMR で測定した結果、高純度の FDCA が得られていることがわかった（図 3 0）。

写真 1 6．合成した FDCA の脱色前後の見た目

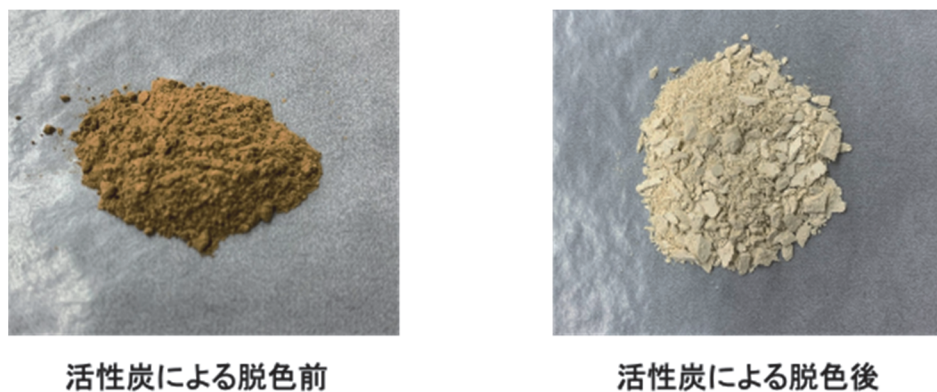
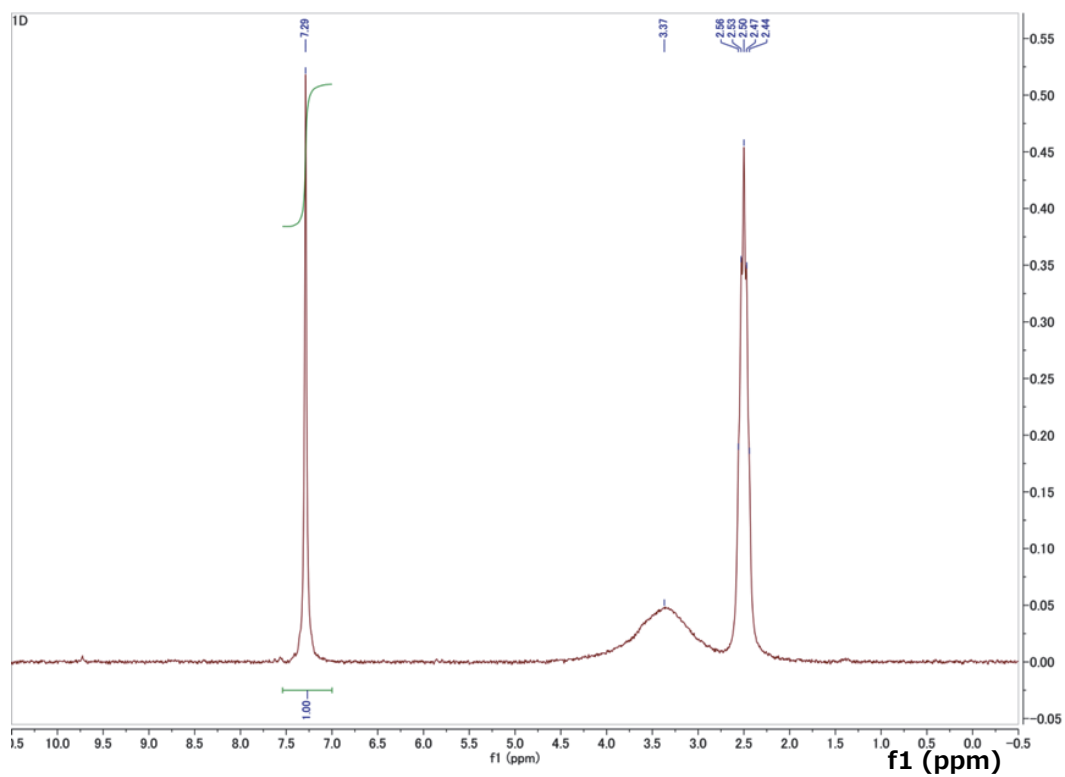


図 3 0．脱色後 FDCA の ^1H -NMR (DMSO- d_6 , 60 MHz)



6.2.3

6.2.4 FDCA 製造コストの試算・目標値・現状の課題

FDCA 製造プラントの投資額、変動費を以下の前提を置き、試算した。

5000ton/年生産設備投資額は共同研究先との議論により 100 億円前後とした。

各入力値をパラメーターとして変動させ、結果や目標値を算出する方法を採用した。

以下に試算する際に使用した詳細条件を示す。

項目	内容
条件	・ 10ton/年でプラントコストを試算、5,000t/年に外挿
	・ 土地費用、及びユーティリティ設備費用含めず
	・ 8,000h/年稼働、3ヶ月ごとに5日ダウンタイム
原料	・ HMF、K ₂ CO ₃ 、触媒
工程	・ HMF原料溶液調整（1.1M）→流通反応→塩析→活性炭脱色
	注：流通反応及び抽出工程はラボ実績を元にサイズアップ
反応	・ 流通反応、25mmφ×1.2m長さ、反応管10本
	・ 触媒量：10Kg/10反応管分
	・ 反応条件：120℃、13min
	・ 流量：10.8L/h（反応管10本分）
	・ 収率90mol%
	・ 触媒寿命8000h(年ごとに触媒入替)
精製	・ 塩析で濾過
	・ 活性炭で脱色
その他	・ 使用済触媒は廃棄

【結果】

①プラント投資額：100 億円程度(FDCA5,000t/y)

②変動費：約 365 円/kg(FDCA1kg 当たり)

HMF：180 円/kg

副原料：145 円/kg

触媒：10 円/kg

ユーティリティコスト：30 円/kg

③プラント投資額：100 億円程度、変動費：約 365 円/kg(FDCA1kg 当たり)

とするためには、下記の目標値を実現する必要有り。()内は現行の実力。

HMF 価格：200 円/kg 程度(1000 円/kg 以上)

触媒価格：10,000 円/kg(100,000 円/kg 以上)

触媒寿命：8,000h(480 時間程度まで確認済)

収率：90mol%(46～67mol%)

② 現状の課題および考察

- ・目標値に対し、触媒寿命の継続評価、および収率向上が必要。
- ・ラボ一貫プロセスが完成していない状況、更にベンチスケールでのデータがない中で算出した結果のため、試算精度に欠ける。
- ・ベンチ設備を立ち上げ、データ取得が必要。
- ・触媒のコストが高いため、より低コストの金属の検討が必要。
- ・投資額を下げることに特化したプロセス開発も検討したい。

6.3 HMF 及び FDCA のサンプル評価

東京工業大学協力のもと、日本ゼオン社に、糖液から HMF を合成する基本的な反応、精製技術、分析手法の技術移転を実施した。

1) バッチ反応

【目的】糖液から HMF を合成する基本的な反応手法を取得する。

【実施内容】東京工業大学において下記を実施することで、基本的な技術取得を実施した。

- ① チタニア担体の合成
- ② チタニアの酸修飾（触媒の合成）
- ③ バッチ反応による HMF の合成
- ④ HMF の単離（シリカゲルカラム精製）

【結果】

① チタニア担体の合成

300ml のナス型フラスコに蒸留水 160ml を加えて 40℃まで昇温した。

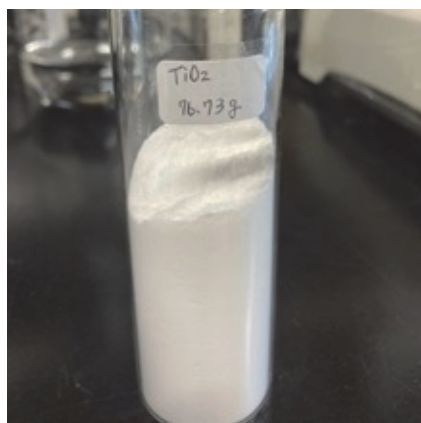
そこに、チタンテトライソプロポキシド 40g を強攪拌下にて 10～15 分かけてゆっくりと滴下した。反応液を 40℃のまま 18 時間攪拌した。反応終了後、吸引ろ過を実施して蒸留水 1 リットルで洗浄した。

得られた固体を 1 リットルのテフロンボトルに入れて、蒸留水 800ml を加えて

100℃にて 6 時間加熱した。放冷した後、吸引濾過をして固体を得た。得られた固体を 90℃にて 1 昼夜常圧乾燥させたのち、グランドして粉碎することでチタニア担体 76.73g を得た（写真 1 7）。

この合成を 6 バッチ実施。表面積は 200m²/g であった。

写真 1 7．得られたチタニア担体



② チタニアの酸修飾（触媒の合成）

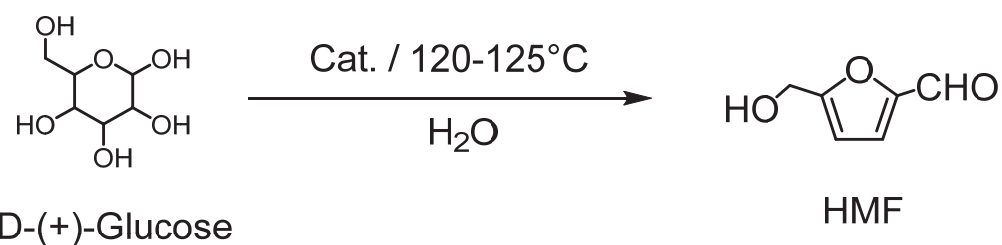
2 リットルのビーカーに 1mol/L のリン酸水溶液 1.8 リットルを測り取る。そこに、攪拌しながら室温下にて、1.38mol/L の硝酸 18ml をゆっくりと加えた。この溶液に室温下にて、先に合成したチタニア 36g をゆっくりと加えた。このスラリー溶液を 30℃にて 23 時間攪拌して反応を実施した。反応後、吸引ろ過を実施して固体を得た。得られた固体を蒸留水 900ml で洗浄した。ろ物をバットにあけて、90℃にて一昼夜常圧乾燥させた。得られた固体

をグラインドして粉碎して、34.9g の触媒を得た（写真 1 8）。この合成を合計 2 バッチ実施した。

写真 1 8．得られたチタニアの酸修飾（触媒）



③ バッチ反応による HMF の合成



200ml の耐圧ボトルに 30wt% の D-グルコース（試薬）水溶液 100ml、先に合成した触媒 10g を加えた。密栓をした後、120℃ のオイルバスにて、攪拌しながら 6 時間反応を実施した。

反応後、室温まで冷却した後、吸引ろ過を実施した。この際の濾過速度はあまり良くないことが分かった。反応液を高速液体クロマトグラフ（HPLC）で定量

を実施。グルコースの転化率は 61.2 モル%、反応収率は 11.9 モル%であった。

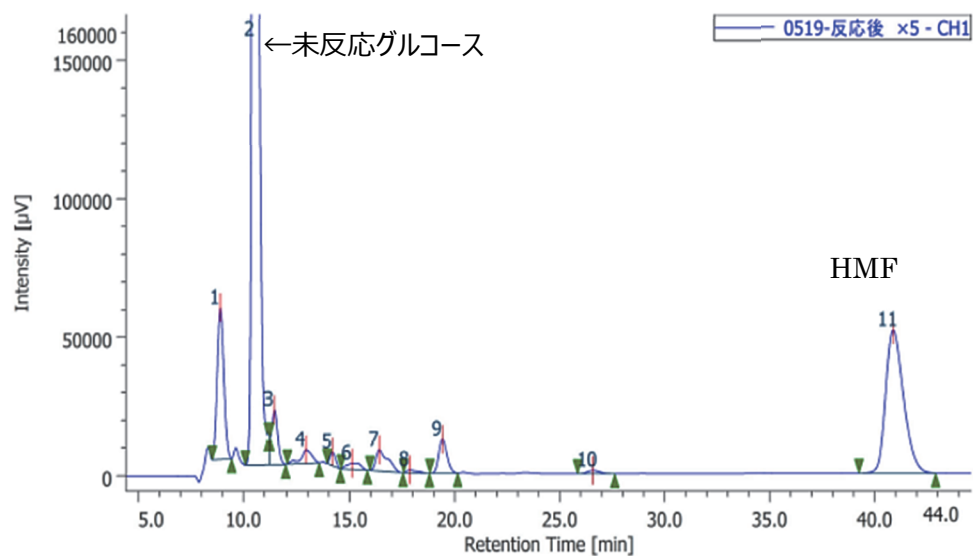
この反応を合計で 4 バッチ実施した。

以下に反応液（写真 1 8）と、反応液の HPLC チャート（図 3 1）を示す。

写真 1 8．反応液の様子



図 3 1．反応液の HPLC チャート

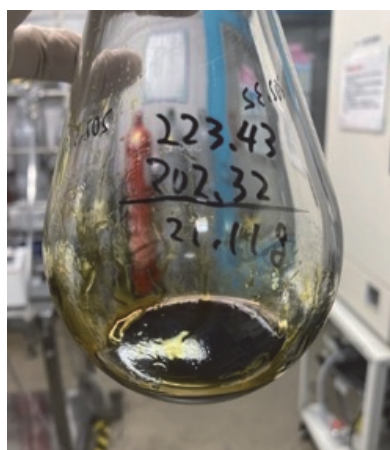


④ HMF の単離（シリカゲルカラム精製）

1 リットルの分液漏斗に、先の反応で得られた反応液 300ml、酢酸エチル 300ml を加えて抽出を実施した。この抽出操作を合計で 4 回実施した。

得られた酢酸エチル層 1.2 リットルに無水硫酸ナトリウムを加えて脱水を行った後、ろ別した。得られた酢酸エチル層をロータリーエバポレータにて減圧濃縮を実施して、21.1 g のクルードを得た（写真 19）。

写真 19．得られた HMF クルード



シリカゲル 300g を充填したガラス製のカラムに、クロロホルムを用いてクルードをアプライして、ヘキサン／酢酸エチル = 1 / 1 にて展開することで、11 分画を得た。TLC にて、それぞれの分画をチェックして HMF が主成分として含まれる 5 フラクションを一つにまとめて、ロータリーエバポレーターにて減

圧濃縮を実施して、5.2g の HMF を得た。収率は 7.4 モル%であった。

【まとめ】

スケールアップに当たっては、以下の課題があることが判明した。

- ① 触媒合成に大きな問題はない。
- ② HMF 合成において、反応温度が 120℃で加圧反応（約 0.2MPa）となる。
- ③ 反応液と触媒を分離するろ過性が悪く、ろ過に時間を要する。
- ④ シリカゲルカラム精製は工業化には不向きである。

2) 流通反応

【目的】糖液から HMF を合成する基本的な反応手法を取得する。

【実施内容】グリーンケミカルにおいて下記を実施することで、基本的な技術取得を実施した。

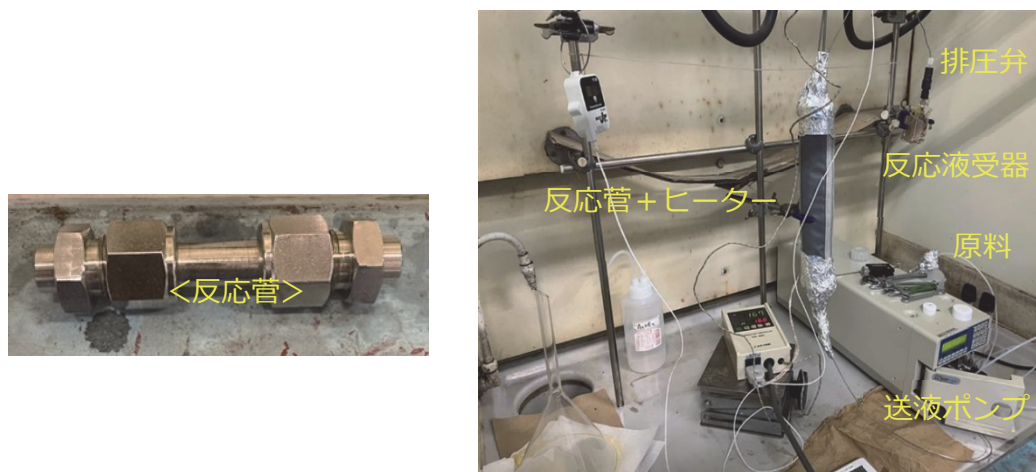
- ① 反応装置のセットアップ
- ② 立ち上げ～反応終了までの操作

【結果】

- ① 反応装置のセットアップ

7.6mmφ×5cm の反応管（触媒 2g 充填）を用いて、写真 20 に示す装置をセットアップした。

写真 2 0 . 装置のイメージ



② 立ち上げ～反応終了までの操作

- 1) 水で満たされている系内を、濃度 30wt%のグルコース溶液に置換する。
- 2) 反応温度：160℃に設定。

反応温度は反応管の外温。内温は測定できていないので不明。

- 3) 置換が終わったら、160℃に昇温する。その間、流量はゼロにする。
- 4) 160℃に達してから 1 時間そのまま流量ゼロでステイ。
- 5) 1 時間経過後、反応液の供給を開始する。

・ 流速：0.15ml/min。

・ ポンプ表示圧力：0.4～0.5MPa

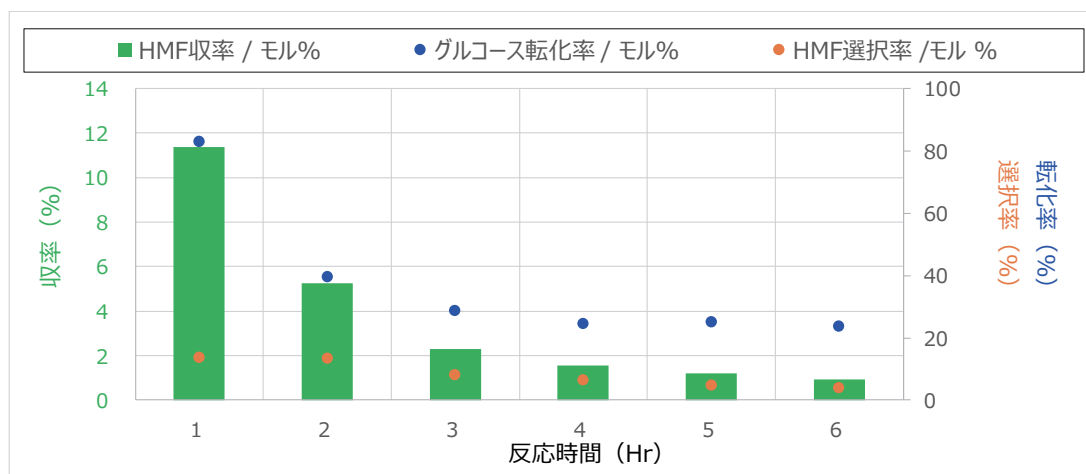
- ・ 排圧弁：7.5 Psi = 0.157 MPa・・・うまく平衡していることを確認。
- ・ 1 時間ごとにサンプリングして HPLC 分析。
- ・ 5 時間半応液を送液して運転を実施。
- ・ 1 時間ためた溶液を HPLC にて、定量分析を実施して反応成績を得る。

6) 停止操作

- ・ 加熱を停止。
- ・ 供給する液を蒸留水に変更。
- ・ 1 時間程度、蒸留水を送液して停止。

反応結果を以下に示した（図 3 2）。

図 3 2. HMF 合成反応の結果



【まとめ】

スケールアップに当たっては、以下の課題があることが判明した。

- ① 触媒寿命が短すぎるため、トンレベルでの製造は不可能。
- ② 1時間目の反応液は「160℃に達してから1時間そのまま流量ゼロでステイ」した反応液がメインとなっている。この操作はバッチ反応に近い。

2. スケールアップに向けた HMF 純度の検討

HMF のスケールアップ実施に向けて、HMF の純度規格を検討した。

反応は 1-ブタノールを使用するスケールアッププロセスを用いて実施した。

反応を複数回実施して、純度の異なるサンプルを複数用意した。

これらのサンプルをグリーンケミカル社で酸化反応を行い、目標純度を決定した。結果を以下に示す（図 3 3）。

図 3 3. HMF の純度検討

サンプル 番号	素性	数量 (g)	LC純度 (area%@254nm)	性状	FDCA化収率(mol%)		判定
					n=1	n=2	
⑤	グリーンケミカル殿よりいただいたCrude品をカラム精製_Pure	10.56	97.01	黄色固体	75.0		○
⑥	グリーンケミカル殿よりいただいたCrude品をカラム精製_Mixture	13.09	81.53	黄色オイル	22.6		○
⑦	100mlスケールで合成したサンプル	1.98	93.28	茶色固体			○
⑧	1Lスケールサンプル-①；やや不純	5.41	88.01	茶色オイル	51.0		○
⑨	1Lスケールサンプル-②；きれい	19.28	89.28	茶色固体	71.0	67.0	○
⑩	1.5Lスケールサンプル-①；やや不純	13.88	76.64	茶色オイル	46.5		○
⑪	1.5Lスケールサンプル-②；きれい	38.34	92.60	茶色固体	53.4	31.4	○
⑫	100mlスケール 原点カットのみ	4.21	51.48	茶色固体	23.0		○

【まとめ】

- ① いずれのサンプルでも酸化反応は可能で、目標とする FDCA を得られることが分かった。
- ② ミニマムで 52%の純度でも合格することができた。
- ③ これまでのシリカゲルカラム精製の実績を踏まえて、スケールアップの際の目標純度は 80%以上に設定することにした。

6.4 LCA の検証・評価

時点で本事業において想定される、HMF および FDCA の製造および PEF 製品に関するライフサイクルアセスメント（LCA）および GHG 排出削減効果の調査を行った。

一般社団法人サステイナブル経営推進機構及び株式会社エティーサ研究所の協力を得て、PET 及び PEF に関するバックグラウンドデータの調査、並びに HMF 及び FDCA 合成の各プロセスにおけるフォアグラウンドデータの確認を行い、条件設定、検討・評価の状況、目標及び今後の実施手順について LCA 評価を実施した。

実施目的

「令和 5 年度脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業（新規触媒プロセスによるバイオ由来樹脂原料効率的な工業生産技術の実証事業）」の HMF 製造および FDCA を原料とした PEF 製品に関して、ライフサイクルアセスメント（以下、LCA）手法に基づきライフサイクルの GHG 排出量およびベースラインに対する GHG 排出削減効果を定量的に評価することを目的とした。

ただし、実証事業であるため LCA を実施するためのプロセスデータ、前提条件、シナリオ設定などは実証結果をもとに推計したものが含まれるため、完全な工

業化を想定したものではなく、仮定が含まれるものもある。

評価対象製品とベースライン

評価対象製品はバイオマス原料由来の HMF と FDCA を経て生産される PEF 樹脂から製造される製品とした。PEF 樹脂は PET 樹脂の代替原料として期待されているため、PEF 樹脂を PET 樹脂の主要な用途であるフィルム、シート、ボトルの3種類を想定した。

ベースラインは化石資源由来の PET 樹脂と位置付けた。この理由は評価対象製品の原料である

表 40 評価対象製品とベースライン

評価対象製品	ベースライン
PEF フィルム	PET フィルム
PEF シート	PET シート
PEF ボトル	PET ボトル

機能単位

本事業の特徴は、化石資源から製造されている PET 樹脂に代わる素材として、

PEF 樹脂を製造するために必須の中間原料となる HMF と FDCA の製造を実証するものである。PEF は FDCA と EG から製造される樹脂であり、本事業はバイオ資源由来の FDCA と EG を用いることを想定している。PET は TPA と EG から製造される樹脂であり、一般的な PET は TPA と EG はいずれも化石資源から製造されている。したがって、PEF は FDCA、PET は TPA を原料とした樹脂であるため FDCA と TPA は LCA 手法を用いて GHG 排出量を比較することは困難である。

また PEF と PET は樹脂としての GHG 排出量の比較においても、既存の PET 製品は多様な商品が存在していることに加え、市場での用途によって廃棄段階における処理ルートが異なるため、製品を特定した上で評価対象製品とベースラインの GHG 排出量を比較しなければならない。

したがって、評価対象製品は HMF と FDCA を経由して製造される PEF 製品の機能単位は、フィルム、シート、ボトル 1kg とした。ベースラインは PET 製品（フィルム、シート、ボトル）1kg とした。

製品の機能においては、評価対象製品の PEF 製品とベースラインの PET 製品は市場において同等の機能を果たすものとした。

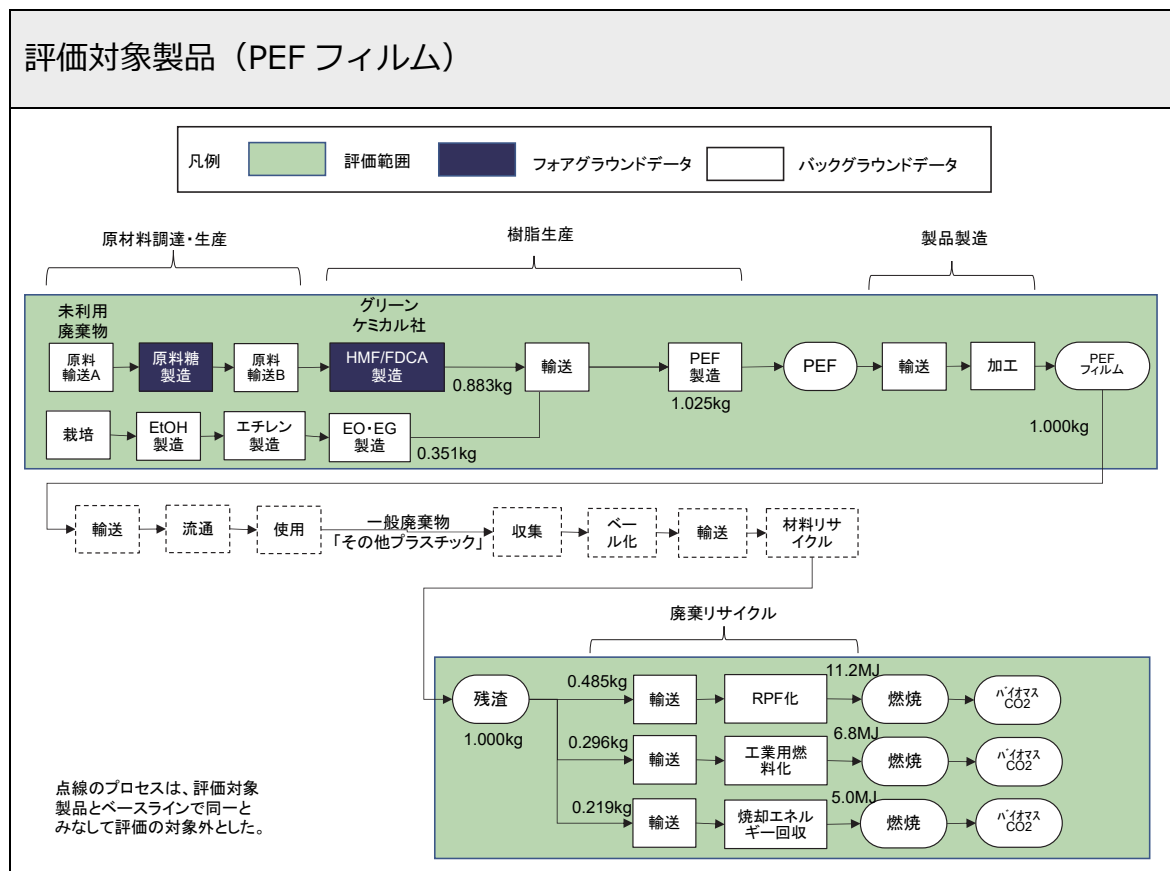
システム境界

評価対象製品のシステム境界は、原料調達から PEF 製品の製造を経て使用済品を廃棄するまでの範囲とした。ベースラインのシステム境界は、原料調達から PET 製品の製造を経て使用済品を廃棄するまでの範囲とした。

PEF フィルム

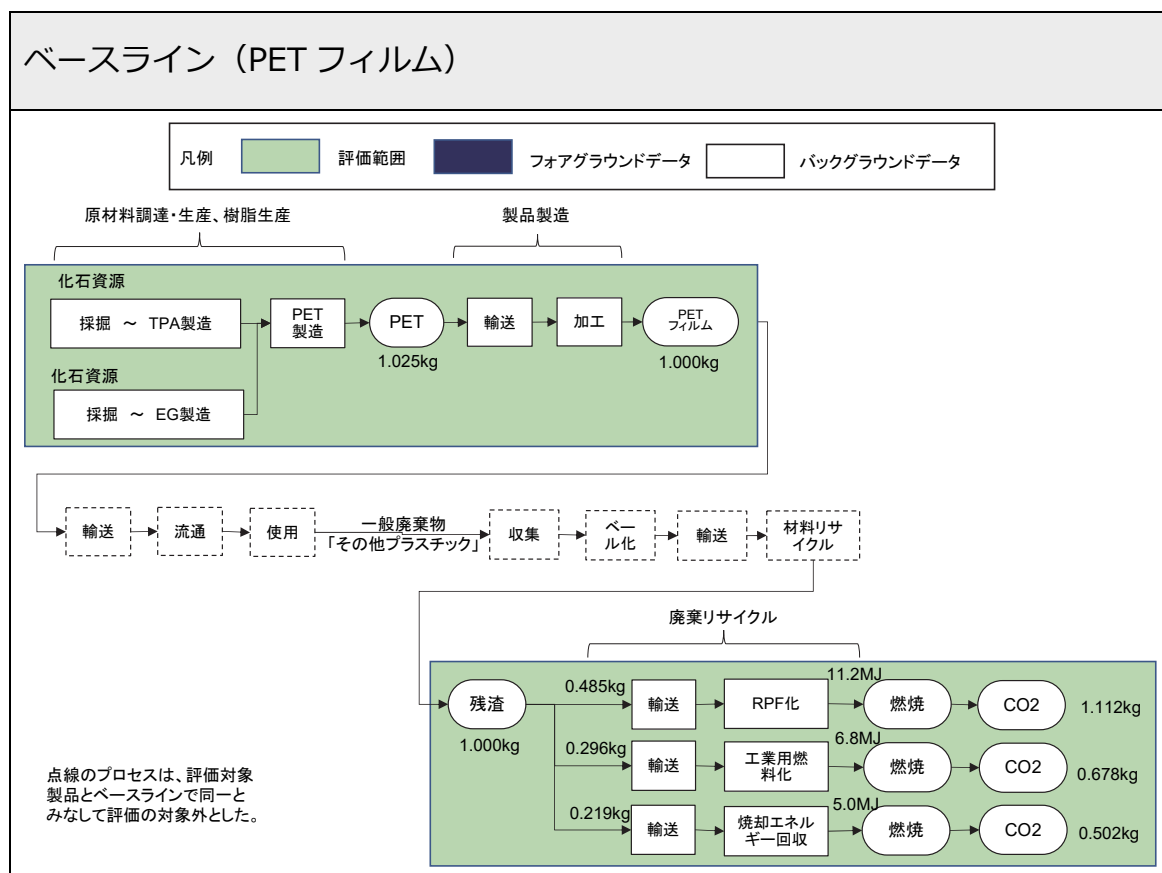
PEF フィルムはバイオマス由来の資源から FDCA の製造、バイオマス資源由来の EG 製造を経て PEF 樹脂を製造し、フィルムを製造するまでを範囲とした。フィルム製造後に市場に供給されて使用後に廃棄物として処理されるまでは、ベースラインの PET フィルムと同じ処理ルートを辿るため、フィルム製造後の輸送から容器包装リサイクルとして材料リサイクルの工程までは GHG 排出量の算定対象には含めずに評価を省略した。材料リサイクルから発生するプラスチック残渣の処理に係る一連のプロセスに関する GHG 排出量は評価範囲に含めた。

図 3 4．評価対象製品（PEF フィルム）のシステム境界



PET フィルムは化石資源由来の TPA および EG 製造を経て PET 樹脂を製造し、フィルムを製造するまでを範囲とした。フィルム製造後に市場に供給されて使用後に廃棄物として処理されるまでは、評価対象製品の PEF フィルムと同じ処理ルートになるものと想定されるため、フィルム製造後の輸送から容器包装リサイクルとして材料リサイクルの工程までは GHG 排出量の算定対象には含めずに評価を省略した。材料リサイクルから発生するプラスチック残渣の処理に係る一連のプロセスに関する GHG 排出量は評価範囲に含めた。

図 3 5．ベースライン（PET フィルム）のシステム境界

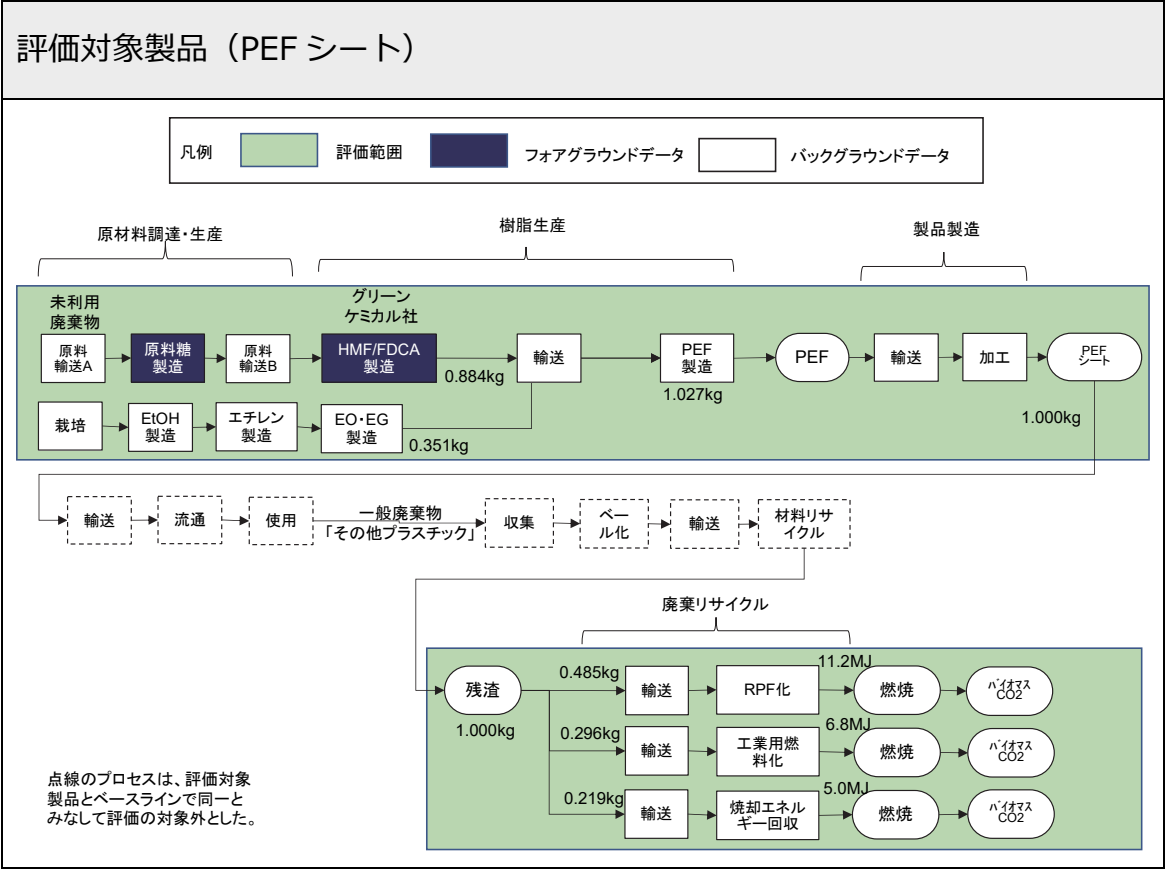


PEF シート

PEF シートはバイオマス由来の資源から FDCA および EG 製造を経て PEF 樹脂を製造し、シートを製造するまでを範囲とした。シートが市場に供給された後、廃棄物として処理されるルートは、現行の処理状況ではベースラインの PET シートと同じ処理ルートなることから、フィルム製造後の輸送から容器包装リサイクルとして材料リサイクルの工程までは GHG 排出量の算定対象には含めずに評価を省略した。プラスチック残渣の処理に係る一連のプロセスに関する

GHG 排出量は評価範囲に含めた。

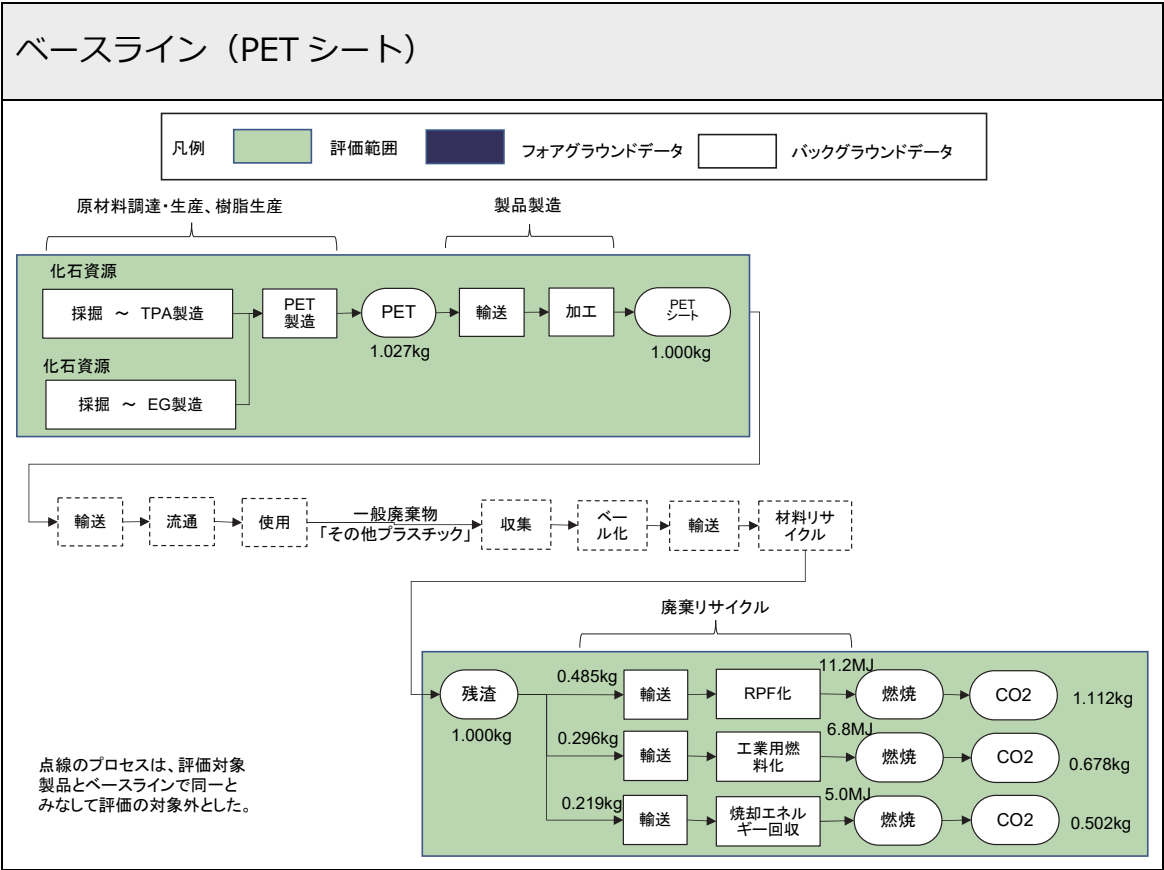
図 3 6．評価対象製品（PEF シート）のシステム境界



PET シートは化石資源由来の TPA および EG 製造を経て PET 樹脂を製造し、シートを製造するまでを範囲とした。シートが市場に供給されて使用後に廃棄物として処理されるまでは、現行の処理体制では容器包装リサイクル法のプラスチック製容器包装として処理されるものとした。したがって、評価対象製品の PEF フィルムと同じ処理ルートを経ると考えることができることから、フィル

製造後の輸送から容器包装リサイクルとして材料リサイクルの工程までは GHG 排出量の算定対象には含めずに評価を省略した。材料リサイクルから発生するプラスチック残渣の処理に係る一連のプロセスに関する GHG 排出量は評価範囲に含めた。

図 37. ベースライン（PET シート）のシステム境界

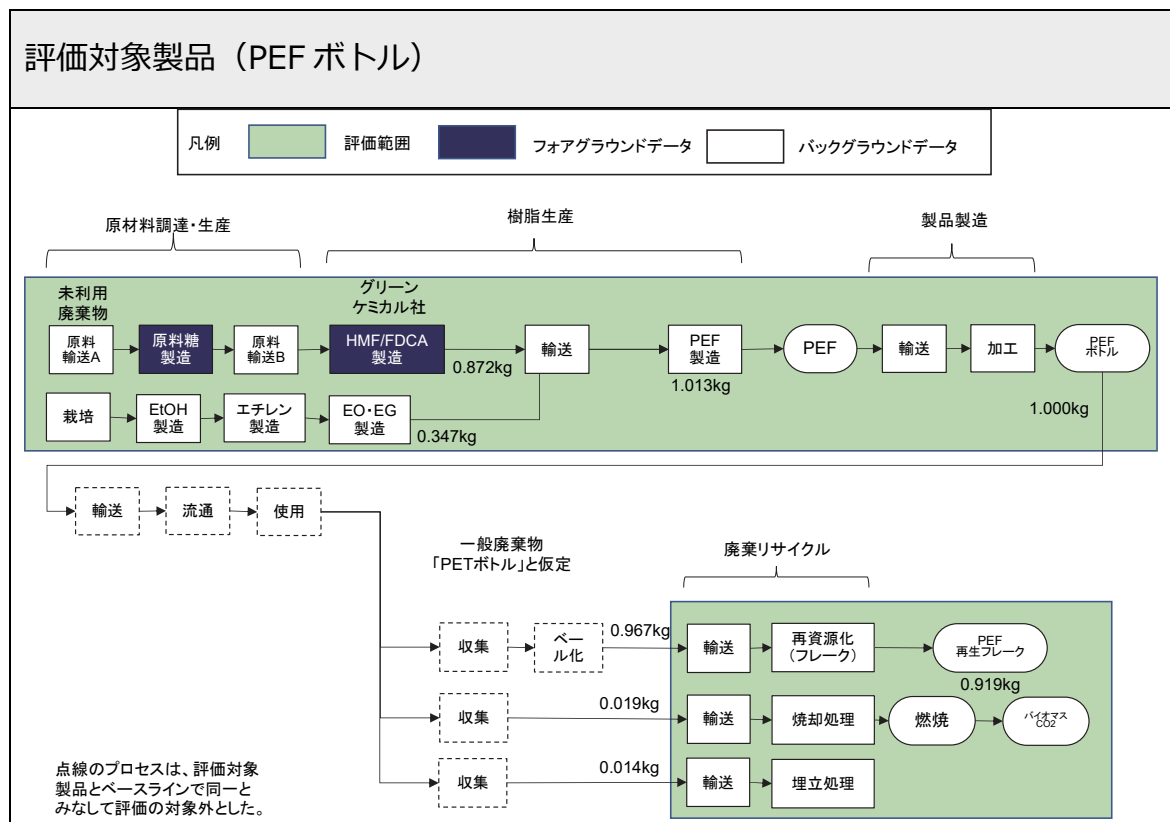


PEF ボトル

PEF ボトルはバイオマス由来の資源から FDCA および EG 製造を経て PEF 樹

脂を製造し、ボトルを製造するまでを範囲とした。PEF ボトルと PET ボトルは同一の樹脂ではないため、使用済み品の廃棄・リサイクルが同じ処理システムで実施することが可能か、それとも PEF と PET を混合せずに単独で廃棄・リサイクルの体制を構築する必要があるかまでは、本分析では言及することはできない。したがって、PEF ボトルはまだ市場に供給されていない製品であるため、PET ボトルの現在の状況と同様に処理されるものと仮定した。ボトル製造後の輸送から使用済み品の収集、リサイクルされる場合はベール化の工程までは GHG 排出量の算定対象には含めずに評価を省略した。使用済み品の処理場までの輸送から下流のプロセスに関する GHG 排出量は評価範囲に含めた。

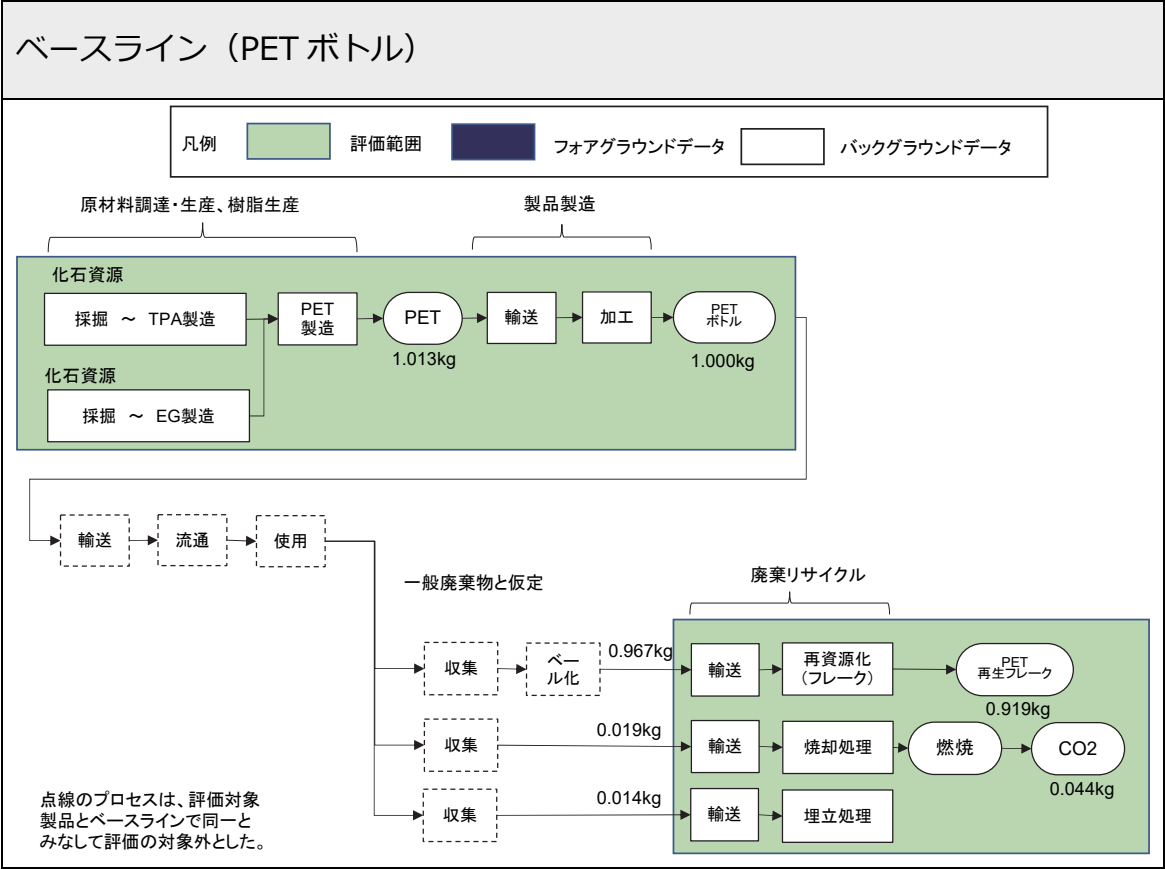
図 3 8．評価対象製品（PEF ボトル）のシステム境界



PET ボトルは化石資源由来の TPA および EG 製造を経て PET 樹脂を製造し、ボトルを製造するまでを範囲とした。日本は使用済み品の PET ボトルの回収率が非常に高いため、96.7%のボトルが回収されてリサイクルされている。回収されない 3.3%の PET ボトルに関しては、日本における焼却処理と埋立処理の比率を参考に廃棄されるものとした。ボトル製造後の輸送から使用済み品の収集、ベール化の工程までは GHG 排出量の算定対象には含めずに評価を省略した。使用済み品の処理場までの輸送から下流のプロセスに関する GHG 排出量は評

価範囲に含めた。

図 3 9．ベースライン（PET ボトル）のシステム境界



地理的条件

評価対象製品とベースラインは日本国内で提供される製品とした。

PEF を製造する際の原料であるエチレングリコール（EG）はブラジルのサトウキビ由来のバイオエタノールを輸入して、国内でエチレンおよびEGの生産を行うものとした。

影響領域

環境負荷の影響領域は地球温暖化とした。温室効果ガス（Greenhouse Gas : GHG）は二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、亜酸化窒素（N₂O）、ハイドロフルオロカーボン類（HFCs）、パーフルオロカーボン類（PFCs）、六フッ化硫黄（SF₆）、三フッ化窒素（NF₃）が対象である。本書において記載する温室効果ガス排出量または削減貢献量に関する単位の表記は、kg-CO₂ または kg-CO₂eq とした。単位に付与されている eq は equivalent の略で、7つの温室効果ガス排出量に地球温暖化係数（Global Warming Potential : GWP）を乗じて合算した数字であることを意味する。基本的に GWP は国連気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC）の第5次評価報告書（2013年）の100年値を用いている。

バックグラウンドデータ

GHG 排出原単位は基本的に IDEAver3.1 を使用した。IDEAver3.1 に収録されていない原料および製品に関する GHG 排出量は文献等から製造プロセスに関するデータを収集したものを利用した。

評価対象製品に関わる算定条件と GHG 排出量

原料輸送 A

バイオマス原料はもみ殻などの未利用バイオマス廃棄物を想定している。FDCA の生産工場に関する立地は、原料の調達を含めて総合的に検討するため、現時点では近隣地域から輸送するものとし、距離は 10km で使用車両は 4 トントラックとした。トラックの積載率は平均のデータを使用した。

原料調達

FDCA の原料となるグルコースは、バイオマス由来の未利用廃棄物を糖化处理して得られるものとした。環境省の報告書 1)では、バイオマス廃棄物や木材パルプを原料としてエタノールを製造する実証事業が行われている。このプロセスでは原料からエタノールを製造する過程でグルコースが生成されており、本事業ではこのような低炭素技術で製造されるグルコースを原料として用いることを検討している。

報告書 1)によると、木質系バイオマスからグルコースを経てエタノールを製造する際に生成するため、グルコースの生成過程に係る GHG 排出量よりも少なくなることが予想される。グルコース生成段階での GHG 排出量は特定できなかったため、本分析ではグルコース 1kg を製造する際の GHG 排出量を過少評価し

ないために保守的な観点からグルコースよりも多いと予想されるエタノール製造時の GHG 排出量を計算に使用した。

エタノール 1 kg を製造する際のバイオマスの投入量は 2.39kg であり、このプロセスにおける GHG 排出量はエタノール 1kg あたり 0.201kg-CO₂eq（エネルギー起源 0.147 kg-CO₂eq、非エネルギー起源 0.054kg-CO₂eq）である。

ただし、このプロセスに使用される電力と蒸気は黒液回収のものが想定されているため、一般の購入電力や化石資源を燃料として製造される蒸気を用いた場合には、エタノールを製造する際の GHG 排出量は多くなる可能性が高い。

原料輸送 B

HMF/FDCA の原料となるグルコースは、原料調達 A と同様に工場立地の検討事項であるため、現時点では近隣地域から輸送するものとし、距離は 10km で使用車両は 4 トントラックとした。トラックの積載率は平均のデータを使用した。

HMF/FDCA 製造

本事業の結果をもとに、工業的な生産を行う場合を想定して、FDCA1kg を製造する際の諸原料の使用量、電力および蒸気の使用量、プロセスで使用される用水量、固形廃棄物の発生量を推計した（表 1 1）。

投入原材料はグルコースが 2.2kg であり、溶剤等の副原料は繰り返し利用が可能なものは循環利用することを想定している。しかしながら、ユーティリティの使用量や原料原単位は、本事業の成果に基づくものであり、プロセス設計が成熟していくにつれて、精度は向上ものと考えられる。

現時点では、一般的な工業プラントと位置付けて GHG 排出量を算定しているため、電気は購入電力（公共電力）として計上している。工場が再生可能エネルギー由来の電力を受け入れやすい立地で、利用することが可能であれば電力に係る GHG 排出量は公共電力を想定した現在の結果よりも少なくなる見込みである。

表 1 1. FDCA 製造プロセスの入出力表

品目		数量	単位
原材料	グルコース	2.20	kg
	溶剤	0.0498	kg
	塩基	1.39	kg
	塩酸(35%)	2.48	kg
	酸素ガス	0.586	kg
	有機溶媒	0.00909	kg
ユーティリティ	電力(購入)	0.401	kWh
	蒸気(自家用)	0.984	MJ
	水	0.0458	m3
製品	FDCA	1.00	kg
廃棄物	固形廃棄物	0.806	kg
	排水	0.0496	m3

表 1 2. FDCA 製造プロセスの GHG 排出量（グルコース由来は含まない）

品目	GHG排出量	単位
原材料	2.29	kg-CO ₂ eq
ユーティリティ	0.302	kg-CO ₂ eq
廃棄物	0.0137	kg-CO ₂ eq
計	2.61	kg-CO ₂ eq

注：表1のグルコースの調達に関わる GHG 排出量は含まない。溶剤から下の各項目の GHG 排出量を計算した結果である。

バイオ EG 製造

PEF を製造する際に必要となる EG については、HMF/FDCA と同様にバイオマス資源由来のものを想定している。ただし、現在の日本においてバイオ EG が一般的に流通している状態ではなく、バイオ EG の調達は容易ではないと考えられる。本分析では、バイオ EG の製造に係る GHG 排出量をブラジル産のバイオエタノールを輸入して国内でバイオエチレンを製造した後、EG の製造プロセスを経るものとして、LCA ソフトウェア等の諸データを用いて推計した。

経済産業省の資料 2)によれば、海上輸送を除くバイオエタノールの 1kg の製造に係る GHG 排出量は最大で 0.417kg-CO₂eq である。ブラジルから日本に輸入する際の海上輸送距離は 21,784km であり、石油タンカーの海上輸送時の GHG 排出原単位を用いて計算した結果、GHG 排出量は 0.212kg-CO₂eq となる。バイオエタノールからバイオエチレンを製造する際のエネルギー消費量はエタノールの比熱 (2.42kJ/kg/°C) を用いて 20°C から 160°C の昇温に必要な熱

量 0.3MJ/L-EtOH を電気で行う場合は 0.0941kWh/L-EtOH となる。エタノール 1kg から生成できるエチレンは 0.609kg であることから、バイオエチレンの製造に必要な電力は 0.155kWh/kg-バイオエチレンとして GHG 排出量を算出した。バイオエチレンから EG を製造する際の GHG 排出量は MiLCAver3.1 のデータから抽出した。

これらの GHG 排出量の計算結果から、バイオ EG1kg の製造に係る GHG 排出量は 1.215kg-CO₂eq と推計した。

PEF 製造

PEF 樹脂を製造する際の原料とエネルギー消費量の詳細データは入手することができなかった。ただし、文献 3)において、PET 樹脂の製造時と大きく変わらないという記述がみられることから、PET 樹脂の重合と同程度であるものと仮定して、MiLCAver3.1 の PET 樹脂製造時の諸原料およびユーティリティ使用量をを用いて GHG 排出量を算出した。主原料の FDCA と EG の所要量に関しては、FDCA と EG の投入モル比を 1:1 として算出した。

フィルム、シート、ボトル製造

PEF フィルム 1kg あたりの樹脂使用量はプラスチック循環利用協会の資料 4)を

参考に PET フィルムと同じ 1.025kg とした。同様に PEF シート 1kg の樹脂量は 1.027kg とした。PEF ボトルの必要樹脂量は環境省の資料 5)を参考に 1.013kg とした。

PEF 樹脂を原料とする製品として PET フィルム、PET シート、PET ボトルの製造に係る GHG 排出量は代用した 4)5)。フィルム、シート、ボトル製造時の GHG 排出量はエネルギー源の 50%を電力、残り 50%を蒸気で賄うものとして GHG 排出量を推計した。

PEF 製品の廃棄処理

PEF 製品はまだほとんど製品として流通しておらず、現時点では使用済みの PEF 製品が PET 製品と同じ施設で扱えるかどうかもわかっていない。しかしながら PET 製品の代替物として流通した場合の程度を知るために、現行の処理体制に即して廃棄・リサイクルを行った場合の GHG 排出量を算出した。

PEF フィルムと PEF シートの廃棄処理

PEF フィルムが市場で利用された場合、使用済の PEF フィルムは一般廃棄物のプラスチック製容器包装（容リプラ）として排出されることになる。容リプラは自治体で分別収集された後に、ベール品（圧縮梱包品）として保管され、材料リ

サイクルやケミカルリサイクルによって再資源化される。

容リプラの処理量の 50%以上を占める材料リサイクルでは、PE と PP、一部の PS が再資源化されて、他の成分はプラスチック残渣となるため、PEF はプラスチック残渣として扱われることになる。公益財団法人容器包装リサイクル協会（以下、容リ協）の資料 6)によると、プラスチック残渣の処理方法の内訳は RPF 化 48.5%、工業用燃料化 29.6%、焼却エネルギー回収 21.9%であることから、使用済の PEF フィルムはこの処理比率で廃棄処理されるものとした。RPF 化、工業用燃料化、焼却エネルギー回収に係る GHG 排出量は容リ協の LCA 報告書 7)のデータを用いて算出した。なお PEF はバイオマス由来であるため、RPF 化、工業用燃料化、焼却エネルギー回収の際に PEF が燃焼して発生する CO₂ はカーボンニュートラルとみなして GHG 排出量はゼロとした。

PEF ボトルの廃棄処理

PEF ボトルが普及した場合、使用済の PEF フィルムは一般廃棄物の PET ボトルとして排出されることが想定される。PET ボトルは自治体やスーパーの店頭等で分別収集され、指定法人ルートや独自処理ルートで再資源化された後に有効利用される。PET ボトルの回収率は PET ボトルリサイクル推進協議会の資料 8)によると 96.7%に達している。PEF ボトルが現状の PET ボトルと同じ水準で再

資源化された場合の GHG 排出量を推計した。回収されない PEF ボトルは焼却 1.9%、埋立 1.4%で処理されるものとした。

なお PEF はバイオマス由来であるため、焼却の際に PEF が燃焼して発生する CO₂ はカーボンニュートラルとみなして GHG 排出量はゼロとした。

再資源化された PEF は破砕品（フレーク）状態とし、新規の PEF 樹脂と同等の品質を有するものと仮定した。PEF フレークは新規の PEF 樹脂を代替することができ、フレークが代替した PEF 樹脂の GHG 排出量に見合った分を差し引くことができるものとした。

評価対象製品の GHG 排出量

PEF フィルムの GHG 排出量

PEF フィルム 1kg のライフサイクルに係る GHG 排出量は 4.283kg-CO₂eq という結果が得られた。この GHG 排出量のうち、エネルギー起源は 4.153kg-CO₂eq、非エネルギー起源は 0.131kg-CO₂eq であり、エネルギー起源の GHG 排出量が大きな割合を占める。エネルギー起源では、HMF/FDCA 製造時の GHG 排出量が最も多く、次いで PEF フィルム製造と EG 製造（EG の原料調達含む）が多い。HMF/FDCA 製造プロセスでは副原料の使用に伴う GHG 排出量が多い

ことから、原料原単位の向上や GHG 排出量の少ない副原料の採用によって、GHG 排出量をさらに削減することが見込める。

表 1 3．PEF フィルムの GHG 排出量

	単位: kg-CO ₂ eq/kg-製品		
	PEFフィルム		
	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
(1)原料輸送A	0.014	0	0.014
(2)原料調達	0.286	0.105	0.390
(3)原料輸送B	0.006	0	0.006
(4)HMF/FDCA製造	2.301	0	2.301
(5)FDCA輸送	0.001	0	0.001
(6)EG製造	0.426	0	0.426
(7)PEF製造	0.238	0.026	0.264
(8)PEF樹脂輸送	0.017	0	0.017
(9)PEFフィルム製造	0.765	0	0.765
(10)廃棄リサイクル	0.099	0	0.099
計	4.153	0.131	4.283

PEF シートの GHG 排出量

PEF シート 1kg のライフサイクルに係る GHG 排出量は 5.539kg-CO₂eq である。エネルギー起源の GHG 排出量は 5.408kg-CO₂eq、非エネルギー起源の GHG 排出量は 0.131kg-CO₂eq であり、エネルギー起源の占める割合が大きい。エネルギー起源の GHG 排出量のうち、HMF/FDCA 製造、PEF シート製造、EG 製造（EG の原料調達含む）の数値が高い。これは PEF フィルムの GHG 排出量と似たデータ構造であり、HMF/FDCA 製造プロセスでは副原料の使用に伴う

GHG 排出量の影響が大きいものと考えられる。

表 1 4．PEF シートの GHG 排出量

	単位: kg-CO ₂ eq/kg-製品		
	PEFシート		
	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
(1)原料輸送A	0.014	0	0.014
(2)原料調達	0.286	0.105	0.391
(3)原料輸送B	0.006	0	0.006
(4)HMF/FDCA製造	2.306	0	2.306
(5)FDCA輸送	0.001	0	0.001
(6)EG製造	0.427	0	0.427
(7)PEF製造	0.238	0.026	0.264
(8)PEF樹脂輸送	0.017	0	0.017
(9)PEFシート製造	2.014	0	2.014
(10)廃棄リサイクル	0.099	0	0.099
計	5.408	0.131	5.539

PEF ボトルの GHG 排出量

PEF ボトル 1kg のライフサイクルに係る GHG 排出量の算定結果は 6,362kg-CO₂eq であった。エネルギー起源の GHG 排出量は 6.233kg-CO₂eq、非エネルギー起源の GHG 排出量は 0.129kg-CO₂eq である。エネルギー起源の GHG 排出量のうち、PEF ボトル製造、HMF/FDCA 製造、EG 製造（EG の原料調達含む）の数値が高い。これは PEF フィルムと PEF シートの GHG 排出量と似た構造である。

表 15. PEF ボトルの GHG 排出量

単位: kg-CO ₂ eq/kg-製品			
	PEFボトル		
	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
(1)原料輸送A	0.014	0	0.014
(2)原料調達	0.282	0.103	0.385
(3)原料輸送B	0.006	0	0.006
(4)HMF/FDCA製造	2.273	0	2.273
(5)FDCA輸送	0.001	0	0.001
(6)EG製造	0.421	0	0.421
(7)PEF製造	0.235	0.026	0.261
(8)PEF樹脂輸送	0.016	0	0.016
(9)PEFボトル製造	2.592	0	2.592
(10)廃棄リサイクル	0.393	0	0.393
計	6.233	0.129	6.362

設定条件の変更に伴う GHG 排出量への影響

PEF フィルム、シート、ボトルの出発原料となるグルコースをバイオマス廃棄物から製造する際の GHG 排出量は、エタノール製造時のデータで代用したものである。グルコースはバイオマス廃棄物からエタノールを製造する際の中間体として得られる物質であるため、エタノール製造までの GHG 排出量をグルコースに適用した場合は過大評価となる可能性がある。グルコースを製造する際のプロセスデータは入手することができないため、現在の GHG 排出量の算定に使用しているグルコース 1kg の GHG 排出量 0.201kg-CO₂eq（エネルギー起源 0.147 kg-CO₂eq、非エネルギー起源 0.054kg-CO₂eq）が変化することによってライフサイクル GHG 排出量への影響を調べた。

PEF フィルムのライフサイクル GHG 排出量は 1kg あたり 4.28kg-CO₂eq であり、このうちグルコース製造は 0.390kg-CO₂eq (9.1%) である。グルコースの GHG 排出原単位を 0.5 倍に設定した場合には 0.180 kg-CO₂eq が全体から減少するので PEF フィルムのライフサイクル GHG 排出量は 4.10kg-CO₂eq になる。グルコースの GHG 排出原単位を 1.5 倍に設定した場合にはグルコースの GHG 排出量が 0.390kg-CO₂eq から 0.570 kg-CO₂eq に増加するので PEF フィルムのライフサイクル GHG 排出量は 4.46kg-CO₂eq となる。したがって、不確実性の高いグルコースの GHG 排出量がライフサイクル全体へ与える影響は限定的である。

ただし、本分析で参照した環境省の報告書 2) はバイオマス廃棄物からエタノールを製造する際の電力と蒸気は黒液回収によるものを想定して GHG 排出量が評価されている。他の技術によって調達されたグルコース、黒液回収による電力と蒸気を適用せずに製造されたグルコースについては、本分析の結果と同じ傾向にはならない恐れがある。

まとめ

PEF フィルム、シート、ボトルの各 1kg のライフサイクルに係る GHG 排出量はエネルギー起源の GHG 排出量が大きな割合を占めている。GHG 排出量の多

いのは、HMF/FDCA 製造、PEF 製品（フィルム、ボトル、シート）製造、EG 製造（EG の原料調達含む）である。PEF 製品（フィルム、ボトル、シート）製造に係る GHG 排出量は引用文献をもとに算定したものであり、本事業としては恣意的に数値を下げるのが困難な箇所である。EG 製造（EG の原料調達含む）は、ブラジル産のサトウキビ由来のエタノールと国内でのエチレン・EG 製造によるものであり、国内では流通していないバイオ EG を想定して GHG 排出量を算出していることから、より精度の高いデータ、もしくは実際のバイオ EG 商品のデータに差し替えることが可能であれば、GHG 排出量の精度が高まる。

HMF/FDCA 製造は本事業の成果に基づくものであり、ライフサイクルの GHG 排出を削減するために当事者が直接的に貢献できるプロセスである。

HMF/FDCA 製造プロセスの精度向上によって、原材料使用量やユーティリティ使用量が軽減できれば、本分析の GHG 排出量の算定結果よりも改善することができる。

ベースラインに関わる算定条件と GHG 排出量

原料調達～PET 樹脂製造

原料調達から PET 樹脂製造までの GHG 排出量は IDEAv3.1 のデータを用いた。

PET 樹脂の輸送

PET 樹脂の輸送は具体的な状況が想定できないため、同一県内からの輸送とみなして、距離は 100km、使用車両は 10 トン車とした。トラックの積載率は平均のデータを使用した。

フィルム、シート、ボトルの製造

PET フィルム 1kg あたりの樹脂使用量は資料 4)を参考に 1.025kg とした。PET シート 1kg の樹脂量は 1.027kg とした。PET ボトルの必要樹脂量は資料 5)を参考に 1.013kg とした。

PET 樹脂を原料とする製品として PET フィルム、PET シート、PET ボトルの製造に係る GHG 排出量は代用した 4)5)。フィルム、シート、ボトル製造時の GHG 排出量はエネルギー源の 50%を電力、残り 50%を蒸気で賄うものとして GHG

排出量を推計した。

PET 製品の廃棄処理

PET フィルムと PET シートの廃棄処理

使用済の PET フィルムは一般廃棄物のプラスチック製容器包装（容リプラ）として排出される。容リプラの処理量の 50%以上を占める材料リサイクルの再商品化物は PE と PP を主体としたものであり、PET はプラスチック残渣となる。資料 6)によると、残渣は RPF 化 48.5%、工業用燃料化 29.6%、焼却エネルギー回収 21.9%として処理されている。RPF 化、工業用燃料化、焼却エネルギー回収に係る GHG 排出量は容リ協 LCA 報告書 7)のデータを用いて算出した。なお PET は化石資源由来であるため、RPF 化、工業用燃料化、焼却エネルギー回収の際に PET が燃焼して発生する CO₂ は 2.29kg-CO₂/kg-PET として算出した。

PET ボトルの廃棄処理

PET ボトルは自治体やスーパーの店頭等で分別収集され、指定法人ルートや独自処理ルートで再資源化される。PET ボトルの回収率は資料 8)から 96.7%であり、ほとんどの PET ボトルは有効利用されている。回収されない PET ボトル

は、国内の一般的なプラスチックの廃棄として焼却 1.9%、埋立 1.4%で処理されるものとした。PET が燃焼して発生する CO₂ は 2.29kg-CO₂/kg-PET で算出した。

ベースラインの GHG 排出量

PET フィルムの GHG 排出量

PET フィルム 1kg のライフサイクルに係る GHG 排出量は 6.504kg-CO₂eq であった。この GHG 排出量のうち、エネルギー起源は 4.159kg-CO₂eq、非エネルギー起源は 2.345kg-CO₂eq である。エネルギー起源では、PET 樹脂製造（原料調達を含む）の GHG 排出量が多い。非エネルギー起源の GHG 排出量は廃棄リサイクルによるものが大きな割合を占める。廃棄リサイクルの GHG 排出量は、材料リサイクルの残渣として RPF 化、工業用燃料化、焼却エネルギー回収として処理される際に PET が燃焼することによって発生した CO₂ である。

表 1 6 . PET フィルムの GHG 排出量

	単位:kg-CO ₂ eq/kg-製品		
	PETフィルム		
	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
(1)採取～PET樹脂製造	3.278	0	3.278
(2)PET樹脂輸送	0.017	0	0.017
(3)PETフィルム製造	0.765	0.053	0.818
(4)廃棄リサイクル	0.099	2.292	2.391
計	4.159	2.345	6.504

PET シートの GHG 排出量

PET シート 1kg のライフサイクルに係る GHG 排出量は 7.768kg-CO₂eq であった。この GHG 排出量のうち、エネルギー起源は 5.414kg-CO₂eq、非エネルギー起源は 2.345kg-CO₂eq である。エネルギー起源の PET 樹脂製造（原料調達を含む）の GHG 排出量が多い点、非エネルギー起源の GHG 排出量は廃棄リサイクルによるものが大きい点は、PET フィルムと同様である。廃棄リサイクルの GHG 排出量は、材料リサイクルの残渣として RPF 化、工業用燃料化、焼却エネルギー回収として処理される際に PET が燃焼することによって発生した CO₂ である。

表 1 7． PET シートの GHG 排出量

	単位:kg-CO2eq/kg-製品		
	PETフィルム		
	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
(1)採取～PET樹脂製造	3.285	0	3.285
(2)PET樹脂輸送	0.017	0	0.017
(3)PETシート製造	2.014	0.062	2.076
(4)廃棄リサイクル	0.099	2.292	2.391
計	5.414	2.354	7.768

PET ボトルの GHG 排出量

PET ボトル 1kg のライフサイクルに係る GHG 排出量は 7.768kg-CO2eq であった。この GHG 排出量のうち、エネルギー起源は 5.414kg-CO2eq、非エネルギー起源は 2.345kg-CO2eq である。エネルギー起源の PET 樹脂製造（原料調達を含む）の GHG 排出量が多い点、非エネルギー起源の GHG 排出量は廃棄リサイクルによるものが大きい点は、PET フィルムと同様である。廃棄リサイクルの GHG 排出量は、材料リサイクルの残渣として RPF 化、工業用燃料化、焼却エネルギー回収として処理される際に PET が燃焼することによって発生した CO2 である。

表 1 8 . PET ボトルの GHG 排出量

	単位: kg-CO ₂ eq/kg-製品		
	PETフィルム		
	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
(1)採取～PET樹脂製造	3.238	0	3.238
(2)PET樹脂輸送	0.016	0	0.016
(3)PETボトル製造	2.592	0.029	2.621
(4)廃棄リサイクル	0.408	0.155	0.563
計	6.255	0.184	6.439

GHG 排出削減効果

GHG 排出削減効果は、評価対象製品のライフサイクル GHG 排出量(1)とベースラインのライフサイクル GHG 排出量(2)の差をとって算出した。

(1)評価対象製品のライフサイクル GHG 排出量

(2)ベースラインのライフサイクル GHG 排出量

(3)上記(1)、(2)の結果から導出される GHG 排出量の削減効果（削減量）

PEF フィルムの GHG 削減効果

PEF フィルム 1kg のライフサイクル GHG 排出量は 4.283kg-CO₂eq、PET フィルムは 6.504 kg-CO₂eq であり、PEF フィルムの GHG 排出量は PET フィルムよりも 2.220kg-CO₂eq 少ない。したがって、PEF フィルムの PET フィルム

に対する GHG 削減効果はフィルム 1kg あたり 2.220kg-CO₂eq である。

表 19. PEF フィルムと PET フィルムの GHG 排出量

	PEFフィルム			PETフィルム		
	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
(1)原料調達	3.272	0.131	3.403	3.278	0	3.278
(2)樹脂輸送	0.017	0	0.017	0.017	0	0.017
(3)フィルム製造	0.765	0	0.765	0.765	0.053	0.818
(4)廃棄リサイクル	0.099	0	0.099	0.099	2.292	2.391
計	4.153	0.131	4.283	4.159	2.345	6.504

単位:kg-CO₂eq/kg-製品

表 20. PEF フィルムの PET フィルムに対する GHG 排出削減効果

	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
GHG削減効果	0.006	2.214	2.220

単位:kg-CO₂eq/kg-製品

PEF シートの GHG 削減効果

PEF シート 1kg のライフサイクル GHG 排出量は 5.539kg-CO₂eq、PET シートは 7.768 kg-CO₂eq であり、PET シートの GHG 排出量に対して PEF シートの GHG 排出量は 2.229kg-CO₂eq 少ない結果となった。したがって、PEF シートの PET シートに対する GHG 削減効果はシート 1kg あたり 2.229kg-CO₂eq である。

表 2 1． PEF シートと PET シートの GHG 排出量

単位: kg-CO ₂ eq/kg-製品						
	PEFシート			PETシート		
	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
(1)原料調達	3.278	0.131	3.409	3.285	0	3.285
(2)樹脂輸送	0.017	0	0.017	0.017	0	0.017
(3)シート製造	2.014	0	2.014	2.014	0.062	2.076
(4)廃棄リサイクル	0.099	0	0.099	0.099	2.292	2.391
計	5.408	0.131	5.539	5.414	2.354	7.768

表 2 2． PEF シートの PET シートに対する GHG 排出削減効果

単位: kg-CO ₂ eq/kg-製品			
	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
GHG削減効果	0.006	2.223	2.229

PEF ボトルの GHG 削減効果

PEF ボトル 1kg のライフサイクル GHG 排出量は 6.362kg-CO₂eq、PET ボトルは 6.439 kg-CO₂eq であり、PEF ボトルの GHG 排出量は PET ボトルよりも 0.077kg-CO₂eq 少ない結果となった。したがって、PEF ボトルの PET ボトルに対する GHG 削減効果はボトル 1kg あたり 0.077kg-CO₂eq である。

表 2 3．PEF ボトルと PET ボトルの GHG 排出量

	PEFボトル			PETボトル		
	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
(1)原料調達	3.232	0.129	3.361	3.238	0	3.238
(2)樹脂輸送	0.016	0	0.016	0.016	0	0.016
(3)ボトル製造	2.592	0	2.592	2.592	0.029	2.621
(4)廃棄リサイクル	0.393	0	0.393	0.408	0.155	0.563
計	6.233	0.129	6.362	6.255	0.184	6.439

単位:kg-CO₂eq/kg-製品

表 2 4．PEF ボトルの PET ボトルに対する GHG 排出削減効果

	エネルギー 起源	非エネルギー 起源	計
GHG削減効果	0.022	0.055	0.077

単位:kg-CO₂eq/kg-製品

PEF と PET の違い

PEF フィルムと PET フィルムの排出構造の違いに着目すると、エネルギー起源の GHG 排出量は PEF フィルムが 4.153kg-CO₂eq、PET フィルムは 4.159 kg-CO₂eq であり、ほとんど違いはないことがわかる。非エネルギー起源の GHG 排出量は PEF フィルムが 0.131kg-CO₂eq とわずかであるのに対して、PET フィルムは 2.345kg-CO₂eq と多い。この違いは廃棄リサイクルの段階における GHG 排出量が原因であることがわかる。評価対象製品とベースラインの双方において、廃棄リサイクル段階の GHG 排出量の算定方法をみると、PEF と PET は容リプラの材料リサイクルから発生するプラスチック残渣として処理される可

能性が高く、残渣の処理方法である RPF 化、工業用燃料化、焼却エネルギー回収において、PEF または PET が燃焼して CO₂ が排出されるという評価を行っている。PEF フィルムはバイオマス資源由来の原料を利用しているため、カーボンニュートラルの考えを適用して燃焼時の CO₂ 排出量は計上されない。PET フィルムは化石資源由来の原料であることから燃焼時の CO₂ 排出量は計上される。

同様に PEF シートと PET シートの GHG 排出量の構造では、エネルギー起源の GHG 排出量には違いはなく、非エネルギー起源の GHG 排出量で PEF シートが 0.131kg-CO₂eq であるのに対して PET フィルムは 2.345kg-CO₂eq と多い構造になっている。

これらのことから、フィルムとシートのような廃棄リサイクルにおいてプラスチックが燃焼してしまう製品では、PET に比べて PEF の GHG 排出量は少ない結果となった。ただし、これはバイオマス由来か化石資源由来かによって生じている差であり、PEF と PET を製造する際の GHG 排出量の影響によって生じているものではない。

図 4 0．PEF フィルムと PET フィルムの GHG 排出量の構造

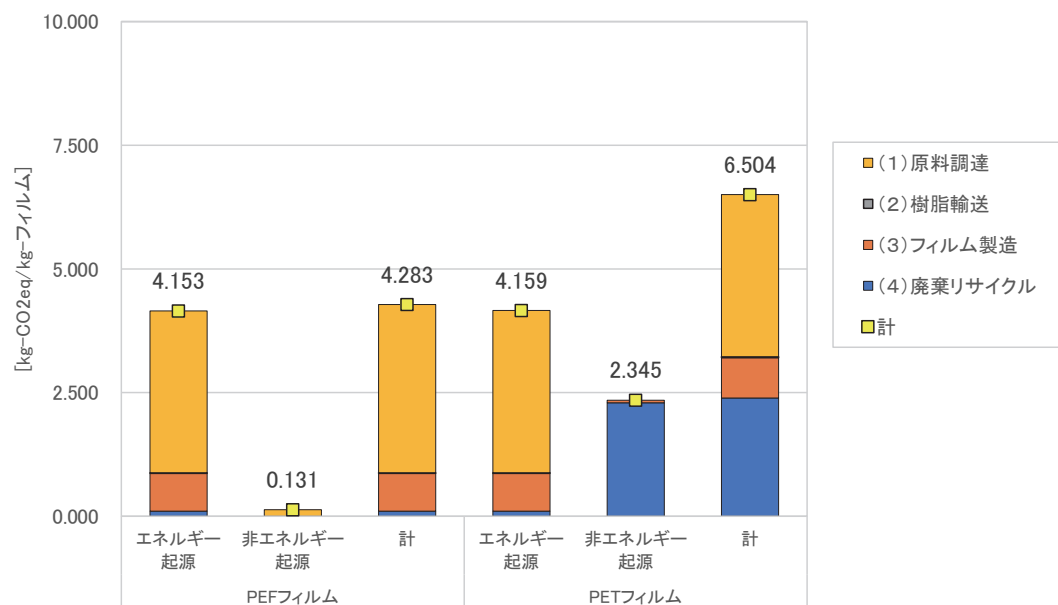
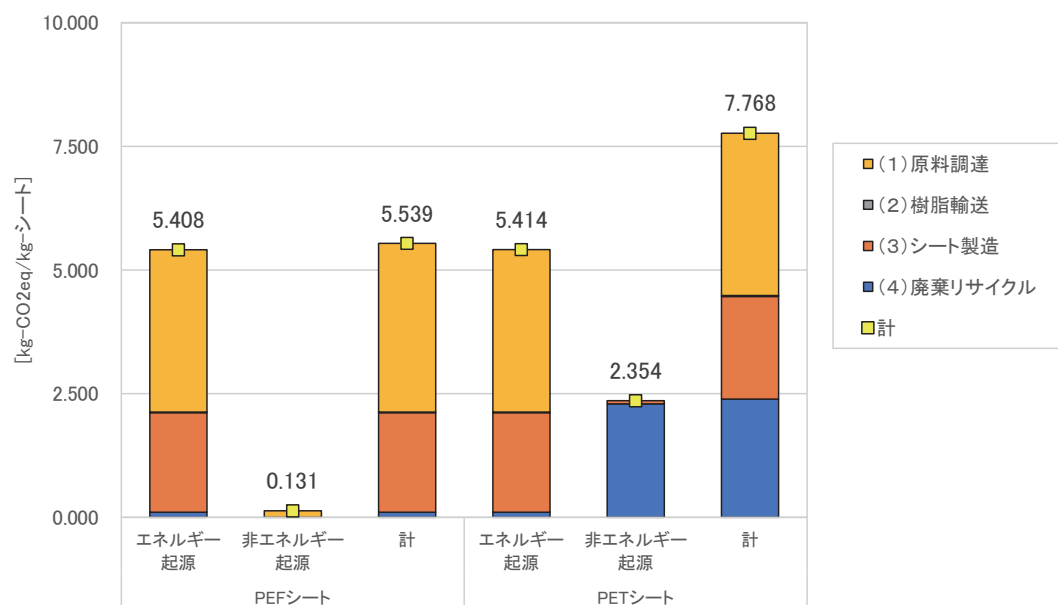
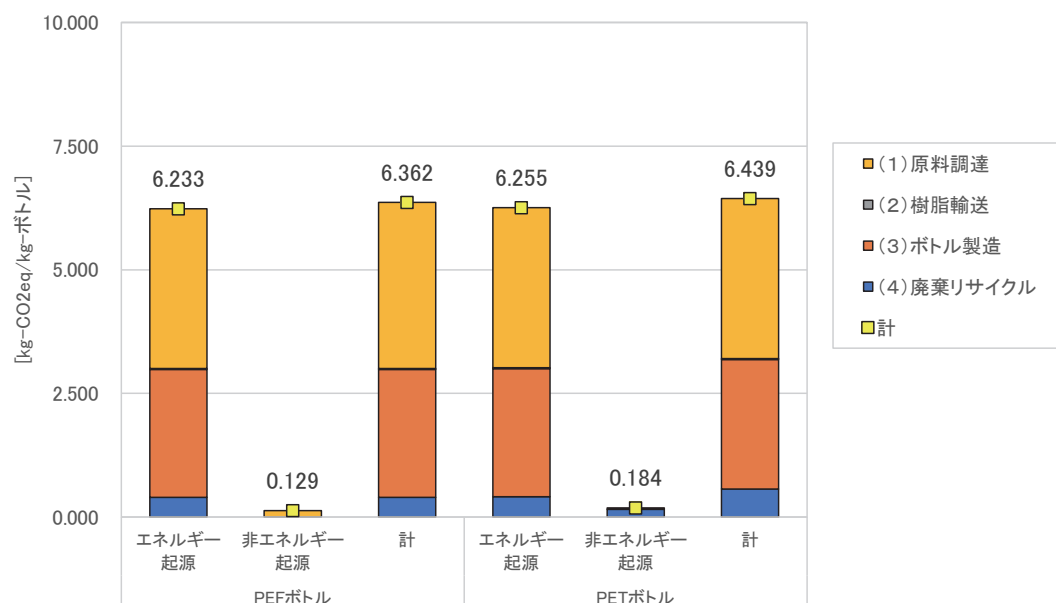


図 4 1．PEF シートと PET シートの GHG 排出量の構造



PEF ボトルと PET ボトルの排出構造の違いに着目すると、エネルギー起源の GHG 排出量は PEF ボトルが 6.233kg-CO₂eq、PET ボトルは 6.255 kg-CO₂eq であり、大きな違いはない。非エネルギー起源の GHG 排出量においても PEF フィルムが 0.129kg-CO₂eq、PET フィルムは 0.184kg-CO₂eq と大差ない。ボトルについてはフィルムとシートとは異なり、国内の PET ボトル回収率が 93.7%と非常に高く、回収されずに焼却されているとみなされているボトルが燃焼することによって発生する CO₂ 排出量が極めて少ない状態である。したがって、PEF ボトルが PET と同じ廃棄リサイクル段階の評価を行った場合には、LCA 手法に基づく GHG 排出量の評価ではカーボンニュートラルが適用されるバイオマス資源由来の PEF の有効性が限定的になり、化石資源由来の GHG 排出量と大きく変わらない評価結果に留まる可能性があることがわかった。

図 4 2 . PEF ボトルと PET ボトルの GHG 排出量の構造



考察と課題

(1) バイオマス資源由来の製品に関する GHG 排出量の評価と削減効果に関する

知見

LCA 手法による GHG 排出量の評価におけるバイオマス由来製品の特徴は、育成段階の CO₂ 吸収相当分を減算する、もしくは対象製品を焼却して排出される CO₂ を非加算（カーボンニュートラル）にすることによって、化石資源由来の同等製品に対して優位性を発揮するものである。しかし、この CO₂ 削減効果は、廃棄段階で製品が燃焼（焼却）することによって生じるものであり、ほとんどが非エネルギー起源の CO₂ である。

(2)エネルギー起源の CO2 排出量の削減量を増加させるためのプロセス設計の検討

本事業は HMF/FDCA 製造プロセスが事業範囲である。自社以外のプロセスに関しては一般的な事例やデータを参考に GHG 排出量の評価を行っているため、原材料や電気・燃料類により少ない製品などの採用に関しては検討が必要である。自社の範囲で可能なことは、エネルギー起源の CO2 排出量を削減するためには、実証プロセスで CO2 排出量の少ない原材料を使用すること、GHG 排出量の少ないエネルギーの導入が重要となる。主原料はバイオマス廃棄物から製造することが可能であり、原料調達時の GHG 排出量は LCA 評価においてそれほど大きな影響は与えない。FDCA を製造するためには副原料が必要であり、それぞれに化学反応上の所要量がある。したがって、原材料に関する事項では

- ・ 原材料の使用率を高めてロスを少なくすること
- ・ 廃棄を前提とした副原料ではなく、循環利用できるものを利用すること
- ・ GHG 排出量の少ない原材料を検討すること

といった点についても視野に含めてプロセス設計をしていく必要がある。

エネルギー使用に伴う GHG 排出量に関しては、本事業では装置・機器類の稼働、原材料等の温度管理などにも電気や蒸気などのエネルギーが必要となるため、

CO2 排出量を減らすために高効率のボイラー導入やグリーン電力の購入といった措置を行うことも重要である。このほかにも立地条件によっては再生可能エネルギー電力の導入（施設内設置）も自社の GHG 排出量を削減するための手段の一つと言える。

(3)PEF の製品が普及することによる処理体制への影響

LCA 視点から言及できるエネルギー起源の CO2 削減策は、PEF フィルムと PEF シートでは、使用済み品を回収すること、材料リサイクルを行って PEF の再資源化物を利用すること、が可能となる技術や社会システムを構築する必要がある。ベースラインの PET フィルムと PET シートは現行の容リ法における材料リサイクルの流れに乗っても残渣物としてエネルギー利用され、PEF も同様の廃棄リサイクルルートで処理される可能性が高い。PEF フィルムと PEF シートによってエネルギー起源 CO2 の削減を行うためには材料リサイクルやケミカルリサイクルといった手法で再資源化して PEF を循環利用することが求められる。

PEF ボトルの事例では、ベースラインの PET ボトルの流通量が多く、かつ高回収率を実現していることから、PEF に切り替えたとしてもエネルギー起源の CO2 を減らすことは極めて困難であることがわかった。PEF ボトルで、PET ボトルと同等の回収率、再資源化率を実施できなければ PEF の優位性は示せない。

また、PEF ボトルが流通することで、PET ボトルと同じ廃棄リサイクルルートが利用可能か、PEF と PET が混合しても PET の再資源化物に影響はないか、PEF ボトル単体での回収システムを構築可能か、といったことについても、今後を見据えながら検討する必要がある。

(4)創出可能な資源/国内調達可能な資源

本事業で製造する HMF・FDCA は PEF の主原料である。HMF・FDCA の原料はグルコースであり、このグルコースは未利用のバイオマス廃棄物であるもみ殻などから製造することが可能である。もみ殻は日本国内で発生する廃棄物由来の資源である。ベースラインとなる PET は原油を中心とする化石資源から製造されており、原油のほとんどが輸入品であり国内では創出できない資源である。LCA 結果では国内資源を利用した場合と資源を輸入した場合とで原料調達に係るエネルギー起源の CO₂ 排出量の違いとして評価結果に反映されているものの、この部分はライフサイクル全体に占める割合が小さいため、LCA においては創出可能な資源/国内調達可能な資源を有効に活用することで、ライフサイクル GHG 排出量において優位性を表現することが難しい。

LCA としての結果の重要性だけでなく、HMF/FDCA は創出可能な資源/国内調達可能な資源を利用できる技術という点についても目を向けてほしい。

参考資料

- 1) 令和 2 年度脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業 非可食バイオマスを活用した国産バイオマスプラスチック製造実証事業 (令和 3 年 3 月)
- 2) 平成 30 年度石油産業体制等調査研究 (バイオ 燃料を中心とした我が国の燃料政策の在り方に 関する調査) 報告書、株式会社 日本総合研究所 2019 年 3 月 29 日 p.68
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H30FY/000306.pdf
- 3) Ex-ante life cycle assessment of polyethylenefuranoate (PEF) from bio-based monomers synthesized via a novel electrochemical process、Author links open overlay panelEmma A.R. Zuiderveen , Davide Ansovini , Gert-Jan M. Gruter , Li Shen
- 4) 「樹脂加工におけるインベントリデータ調査報告書／更新版 第 2 版」(2011 年 12 月)、社団法人プラスチック処理促進協会
- 5) 「平成 16 年度容器包装ライフ・サイクル・アセスメントに係る調査事業 報告書－ 飲料容器を対象とした LCA 調査 －」(平成 17 年 3 月)、財団法人 政策科学研究所
- 6) (公益財団法人) 日本容器包装リサイクル協会、残さ処理方法 プラスチック製容器包装 | 公益財団法人 日本容器包装リサイクル協会 (jcpra.or.jp)
<https://www.jcpra.or.jp/recycle/recycling/tabid/434/index.php>
- 7) 「プラスチック製容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討」(平成 19 年 6 月)、財団法人 日本容器包装リサイクル協会 プラスチック製容器包装再商品化手法に関する環境負荷等検討委員会

6.5 バイオ糖に関する市場調査

当該触媒はグルコースやマンノースなどのアルドヘキソースは全てHMFに変換できるが、天然物由来であるため、産地の偏在や季節変動への対応は必要である。また農業産物以外のバイオ糖をも原料として使用を想定するため、実際の原料所在分布と供給可能量の調査は引き続き必要となる。当事業では、石油由来プラスチック製品の代替として、バイオプラスチック製造を目指すものであり、バイオ糖原料としては十分な量を確保することが重要である。

[パルプ糖に関わる調査]

国産パルプメーカーから、グルコース含有量や他成分含有量が異なるパルプ糖サンプルを数種類入手し、HMF合成試作を行った。グルコース含有量が多いサンプルからはHMFが主生成物として得られ、五炭糖成分含有量が多いサンプルからはフルフラールが主生成物として得られることが分かっている。HMF収量が多く得られるパルプ糖種類も特定しており、実際にスケールアップ実証試験に使用するために、数十kg単位で糖サンプルを入手している（写真21）。

写真 2 1. 数十 k g 単位のパルプ糖からサンプリングした見本サンプル



秘密保持の関係上、具体的内容は明らかに出来ないが、スケールアップ時に
ける供給体制の協議を行った。

供給可能なパルプ糖の量・品質・コストは以下を予定している。

- ・量：数百Kg（現在）～数千 t（近い将来）
- ・品質：精製品～未精製品までいくつかのグレードを展開。HMF製造に適した
グレードは特定している。
- ・コスト：数百円/Kgレベル

非可食バイオ資源として工業的な生産もされているパルプ糖は実用化での重
要な原料ソースと考えているが、現状では供給メーカーが少ない。また、現状で
は原料と確認されていないが潜在的な可能性のある原料糖も探索していきたい。

その場合も非可食・安定供給が基準となる。

[もみ殻糖に関わる調査]

秋田県大潟村には大量のもみ殻が安定的に存在するが、糖の生産についてはまだ現地で計画が描けていない。大潟村では高橋村長以下、非常に協力的に対応して頂いているが、糖化技術を持つ企業との連携促進に助力したい。

今年度は秋田県立大学の協力のもと、少量の「もみ殻糖」サンプルを作成した
だき、HMF合成試作を実施した。HMFは問題なく得られたが、糖原料中のグル
コース含有量が少なく、グルコース以外にも他の五炭糖成分が含まれているこ
とから、継続的に糖化技術の検討が必要になる。

安定供給までには時間がかかると考えられるが、来年度以降も、今後の供給体
制等に関する情報共有を秋田県大潟村と行っていく予定である。

[バガス糖に関わる調査]

商社経由で、バガス糖の供給に関する可能性・体制等についての情報収集を行
った。バガス糖サンプルを入手し、触媒反応を検討したところ、HMFは問題なく
得られたため、HMF製造のバイオ糖原料として活用できることが分かった。糖
原料中にグルコース以外にも他の五炭糖成分が含まれていることから、フルフ
ラールも同時に得られる。バガス糖は国内で生産体制が構築されていないこと

もあり、安定供給までには時間がかかると考えられるが、来年度以降も、今後の供給体制等に関する情報共有を商社と行っていく予定である。

〔副生成糖に関わる調査〕

副生成糖はトレハロース製造時に出てくる副生成物です。昨年度に、原料糖候補として、工業生産における副生成物としてのバイオ糖を得て（写真２２）、HMF合成試作を行ない、HMFを得ることに既に成功している。しかし、大手商社のご協力で、バイオ糖サプライヤー候補企業に関する情報収集を行ったところ、年間で数トン未満の量しか確保が見込めないことが分かったため、当事業としては他バイオ糖原料を優先的に調査することとした。

写真２２．工業生産プロセスからの副生成糖サンプル



6.6 取り組みのスケジュール実績

【バイオ糖～HMF～FDCA 一貫生産における収率・収量の向上のための試験】

①回収率向上の検討 4月～9月

HMF 触媒の再生手法の検討を行った。パルプ糖を原料に用いた際の反応条件の検討を行った。

②収量向上の検討 4月～10月

糖原料のグルコース濃度変化による HMF 合成への影響を検討した。反応カラム管のサイズアップを検討した。FDCA 合成のフロー方式の反応条件と反応プロセスの検討を行った。

③FDCA の品質の確認 4月～12月

パルプ糖から合成した FDCA を 50 g と 100 g で合成し、PEF への重合試験を行った。

【パルプ糖～FDCA の一貫生産のスケールアップ実証試験】 7月～24年2月

HMF と FDCA のスケールアップ課題を抽出し、改良プロセスの検討を行った。改良プロセスで実際に HMF と FDCA をそれぞれ 100 g 以上製造検討した。また、前提条件を置き、HMF と FDCA 製造の設備投資額と変動費の試算を行い、目標値を設定し、課題を抽出した。

【HMF 及び FDCA のサンプル評価】 5月～12月

日本ゼオン社に合成と評価手法の技術移転を行った。HMF の仮純度規格の決定を行った。

【LCA の検証・評価】 10月～1月

ラボスケール装置のフォアグラウンドデータ及びバックグラウンドデータを取得し、LCA 評価の打ち合わせを実施した。

【バイオ糖に関する市場調査】 4月～1月

市場調査により商社経由にてバイオ糖サプライヤー企業の初期情報を入手し、当該候補企業と直接の面談等により、サンプル入手及び今後の供給体制の確認を行った。

6.7 共同実施者との打ち合わせ

開催した主な会議を以下に示す（表 2 5）。

表 2 5．開催した主な会議

日付	会議名	参加者
4 月 3 日	大潟村もみ殻糖の打ち合わせ	グリーンケミカル（以下、GC）、秋田県立大、他
4 月 7 日	日本ゼオンと打ち合わせ	GC、日本ゼオン
4 月 18 日	東工大、日本ゼオンと打ち合わせ	GC、日本ゼオン、東京工業大学（以下、東工大）
4 月 19 日	バガス糖打ち合わせ	GC、糖化メーカー、商社
4 月 20 日	FDCA 打ち合わせ	GC、共同開発先
4 月 21 日	パルプ糖打ち合わせ	GC、パルプ糖会社
4 月 25 日	ゼオンと打ち合わせ	GC、日本ゼオン
5 月 2 日	飲料メーカーと打ち合わせ	GC、東工大、飲料メーカー
5 月 8 日	ゼオンと打ち合わせ	GC、東工大、日本ゼオン
5 月 9 日	大潟村対策打ち合わせ	GC、秋田県立大
5 月 15 日	パルプ会社と打ち合わせ	GC、パルプ会社
5 月 24 日	HMF 打ち合わせ	GC、共同開発先
5 月 25 日	社内打ち合わせ	GC
6 月 30 日	バイオ糖打ち合わせ	GC、バイオ糖メーカー
7 月 5 日	FDCA 重合打ち合わせ	GC、飲料メーカー

7月11日	日本ゼオンと打ち合わせ	GC、日本ゼオン
7月13日	バイオ糖打ち合わせ	GC、商社
7月21日	FDCA 重合打ち合わせ	GC、外注先
7月27日	日本ゼオンと打ち合わせ	GC、日本ゼオン
8月1日	環境省打ち合わせ	GC、環境省担当官等
8月8日	日本ゼオンと打ち合わせ	GC、日本ゼオン
8月25日	FDCA 重合打ち合わせ	GC、外注先
8月30日	日本ゼオンと打ち合わせ	GC、日本ゼオン
9月15日	日本ゼオンと打ち合わせ	GC、日本ゼオン
9月29日	パルプ糖打ち合わせ	GC、サプライヤー
10月13日	環境省打ち合わせ	GC、環境省担当官等
10月17日	日本ゼオンと打ち合わせ	GC、日本ゼオン
10月17日	FDCA 合成打ち合わせ	GC、製造委託先
11月1日	東工大と打ち合わせ	GC、東工大
11月6日	バイオ糖打ち合わせ	GC、商社
11月13日	LCA 打ち合わせ	GC、SuMPO、エディーサ研
11月17日	日本ゼオンと打ち合わせ	GC、日本ゼオン
11月24日	環境省中間期報告会	GC、評価審査委員、環境省担当官等
11月30日	FDCA 合成打ち合わせ	GC、製造委託先
12月4日	環境省現地視察会	GC、評価審査委員、環境省担当官等
12月15日	パルプ糖打ち合わせ	GC、サプライヤー
12月21日	FDCA 合成打ち合わせ	GC、共同開発先

1 月 12 日	FDCA 合成打ち合わせ	GC、共同開発先
1 月 15 日	日本ゼオンと打ち合わせ	GC、日本ゼオン
1 月 29 日	環境省期末審査会	GC、評価審査委員、環境省担当官等

7. 事業実施の成果と課題

7.1 事業の成果と課題（まとめ）

これまで述べてきた令和 5 年度の本事業の成果と課題を以下にまとめる（表 2 6）。

表 2 6．実証内容とその目標、成果、達成度、課題（2024 年 2 月現在）

実証内容	担当	令和 5 年度目標	成果と達成度	今後の課題
回収率向上の検討	グリーンケミカル	パルプ糖～HMF～FDCA の一貫生産の実施	・ HMF 触媒再生手法の確立 ・ パルプ糖から HMF 合成の条件を確立し、FDCA への連続生産を達成	・ 副生成物の抑制による HMF 触媒寿命をさらに延長が必要
収量向上の検討	グリーンケミカル	FDCA1 t /年の生産体制が確立できることを確認	・ 糖濃度を 60wt%まで向上 ・ スケールアップに向けて、フロー合成による FDCA 反応条件最適化（1t/年設備案の議論開始）	・ FDCA1 t /年スケールで試作し、スケールアップのデータ取得
FDCA の品質確認	グリーンケミカル	PEF 樹脂のポリマー特性を調査	・ パルプ糖由来 FDCA の重合試験を実施し、ポリマー	・ FDCA サンプル増量し、重合条件の

	カル	し、PEF ボトルへの実用性を確認	特性を評価。不純物の影響で重合速度が低下する課題を確認	最適化 ・不純物除去検討
パルプ糖～FDCA の一貫生産のスケールアップ実証試験	グリーンケミカル、 日本ゼオン	・日本ゼオンとの連携による事業化を見据えたプロセスで製造コストを概算し、課題の明確化	・HMF と FDCA 合成と評価技術移転 ・改良手法で HMF と FDCA を 100 g 以上合成 ・前提条件を置いて、HMF と FDCA の製造コストを算出。目標値を設定し、スケールアップ課題の抽出	・抽出課題の検討継続 ・ベンチスケールでのデータを収集し、計算精度の向上を目指す。
HMF 及び FDCA のサンプル評価	東工大、 日本ゼオン	・バイオ糖、HMF反応液、FDCA 反応液等の分析及び評価方法の技術移転と手合わせによる品質評価結果の一致 ・ベンチスケール設備の課題改良に向けての提言	・反応と評価方法の技術移転 ・HMF 品質評価の手合わせ実施 ・スケールアップ課題抽出、改良プロセス検討	—
LCA の評価	グリーンケミカル、SuMPO、 エディーサ	・フォアグラウンドデータを得し、PEF 製品における CO2 削減効果の検証	・ラボスケールデータにおいて機能単位で PEF フィルム・シート・ボトルにおいて、PET との比較で CO2 削減効果が見込まれる。	・エネルギー起源の CO2 排出量削減策の検討

バイオ糖に関する市場調査	グリーンケミカル	・パルプ糖の供給体制の確認 ・各バイオ糖の供給体制及び品質の調査により将来の PEF 原料として活用の可能性を確認	・パルプ糖の供給体制情報入手し、本事業の事業化可能性を確認 ・各種バイオ糖の供給体制の情報調査	・もみ殻糖の量産体制を新規構築
--------------	----------	--	--	---

7.2 事業化へ向けての課題と取り組み

事業化に向けて、パートナー企業と共に HMF と FDCA の工程を平準化して、一貫生産でトンスケールへのスケールアップ実証を目指す。

そのために、以下の取り組みに取り組んでいく。

●HMF触媒の寿命延長

触媒再生手法は決まったが、触媒寿命はまだ短い課題が残されている。大学機関等との共同研究を開始し、触媒寿命の延長を検討していく。反応と精製プロセスについても改善検討を継続し、改良手法でスケールアップしてHMFを製造実証する。

●FDCAの生産量向上

1日に生産できる量を向上させるために、反応設備のサイズアップ検証を実施する。新たに開発した改良手法の2つの方法でスケールアップしてFDCAを製造実証する。

●パルプ糖由来FDCAの品質の確定

重合に影響を与える不純物成分を除き、FDCAサンプル増量して重合条件を最適化する。実際にPEFボトル／PETシート／PETフィルムを製造し、製品として

要求される物性の評価を実施する。

●事業化を見据えたHMFとFDCAの製造コストの精査

HMFとFDCAの改良手法をもって、ベンチスケールで実際にHMFとFDCA製造の試作を行い、データを収集し、コストの計算精度の向上を目指す。

●バイオ糖原料の調達シナリオ

それぞれのバイオマス由来糖は生産地の季節変動による品質や量の変動が考えられる。また、天然品ながらもトレーサビリティとサステナビリティの確保は必要となる。

それらを克服した多様で安定した調達のネットワークを構築して行くため、今後は商社や糖サプライヤーメーカーと連携して柔軟な需給体制を検討する。事業化初期は、供給体制が安定しているパルプ糖を活用する。長期的には、秋田県大潟村と、もみ殻の糖化体制の構築を予定している。

●LCAにおいてエネルギー起源のCO₂排出量の削減量を増加させるためのプロセス設計の検討

1) エネルギー起源のCO₂排出量を削減するためには、実証プロセスでCO₂排出量の少ない原材料を使用すること、GHG排出量の少ないエネルギーの導入が重要となる。FDCAを製造するためには副原料が必要であり、それぞれに化学

反応上の所要量がある。

したがって、原材料面において、下記の点についてプロセス設計をしていく予定。

- ・ 原材料の使用率を高めてロスを少なくすること
- ・ 廃棄を前提とした副原料ではなく、循環利用できるものを利用すること
- ・ GHG排出量の少ない原材料を検討すること

2) エネルギー使用に伴うGHG排出量に関しては、本事業では装置・機器類の稼働、原材料等の温度管理などにも電気や蒸気などのエネルギーが必要となるため、CO2排出量を減らすために高効率のボイラー導入やグリーン電力の購入といった措置を行うことも検討する予定。

3) このほかにも立地条件によっては再生可能エネルギー電力の導入（施設内設置）も自社のGHG排出量を削減するための手段も検討していく。

8. 謝辞

本実証事業は、令和3年12月1日からの慌ただししいスタートとなりましたが、地球環境の保全と新たな脱炭素社会の構築という困難だが希望ある目標に向かうものです。

非可食バイオマスを原料にして、国際的に注目されるバイオプラスチックであるPEF樹脂へ至る工業的プロセスを創り出すというテーマに対して、弊社は東京工業大学原亨和教授が開発された触媒プロセスを武器として挑戦いたしました。バイオ糖と総称される天然素材由来糖のグルコース成分を触媒プロセスによりHMFさらにFDCAへと合成し、PEF樹脂を目指しました。

本報告書に記載しました通り、残念ながら、ラボスケールからのスケールアップは量的にはわずかししか達成できませんでしたが、将来への諸課題は明らかにすることができました。ラボのスタートからここまで進めることができたのも、化学メーカーや飲料メーカーや商社から多くのアドバイスを得たお陰です。

HMFという化学品ツリーの出発点物質をユビキタスなバイオ原料から生み出すことは、脱炭素社会構築に直結したプロセスと確信しております。

今後はまだまだ困難を伴いますが、明らかになった諸課題を新たな視点から見直して、効率を向上させ、量産設備建設へと進めたいと思います。

最後になりましたが、この実証事業推進にご協力頂いております東京工業大学原研究室、日本ゼオン株式会社、ご関係者の皆さまと、そしてこの実証事業の場を与えて頂いた環境省環境再生・資源循環局総務課リサイクル推進室に感謝いたします。今後とも引き続きよろしくお願いいたします。

令和6年2月

株式会社グリーンケミカル
代表取締役 岩越 万里

リサイクル適性の表示:印刷用の紙にリサイクルできます。

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料[Aランク]のみを用いて作製しています。

