

日産自動車株式会社
自動車廃プラスチック油化技術の開発
報告書

令和 5 年 3 月 8 日

環境エネルギー株式会社

目次

1. 第1章	検体の組成分析	1
2. 第2章	ラボ油化実験	13
3. 第3章	樹脂以外の影響調査	38
4. 第4章	残渣選別結果	53
5. 第5章	分解油の水素化精製	72
6. 第6章	生成油の品質評価と経済性評価	91
7. 第7章	LCA 評価について	104

第 1 章 検体の組成分析

1. 目的

本委託事業の目的は、自動車から回収する廃プラスチックからケミカルリサイクルにより再生樹脂を開発することの技術的有用性、ビジネス上の可能性を検討することである。自動車シュレッダーダスト ASR (Automobile Shredder Residue) の破碎工程において、各種選別装置、方法により分別された検体の素材の割合を調べ、標本 (サンプリング) による素材の割合の違いを調べた。

2. 検体の選別方法

図 1 に ASR 破碎工程フローを示し、表 1 に当該工程フローにて選別された検体組成、割合一覧を記す。ASR 破碎工程において選別された検体①～⑤は、各検体の素材に応じ、手選別により大別した。図 2 に大別した各検体の外観を示す。図 2 (a)は検体①：PSP 浮沈選別後、浮き、(b)は検体②：PSP 浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③：PSP 浮沈選別後、沈み、(d)は検体④：PPP 選別、ゴム系、(e)は検体⑤：PPP 選別、ウレタンである。

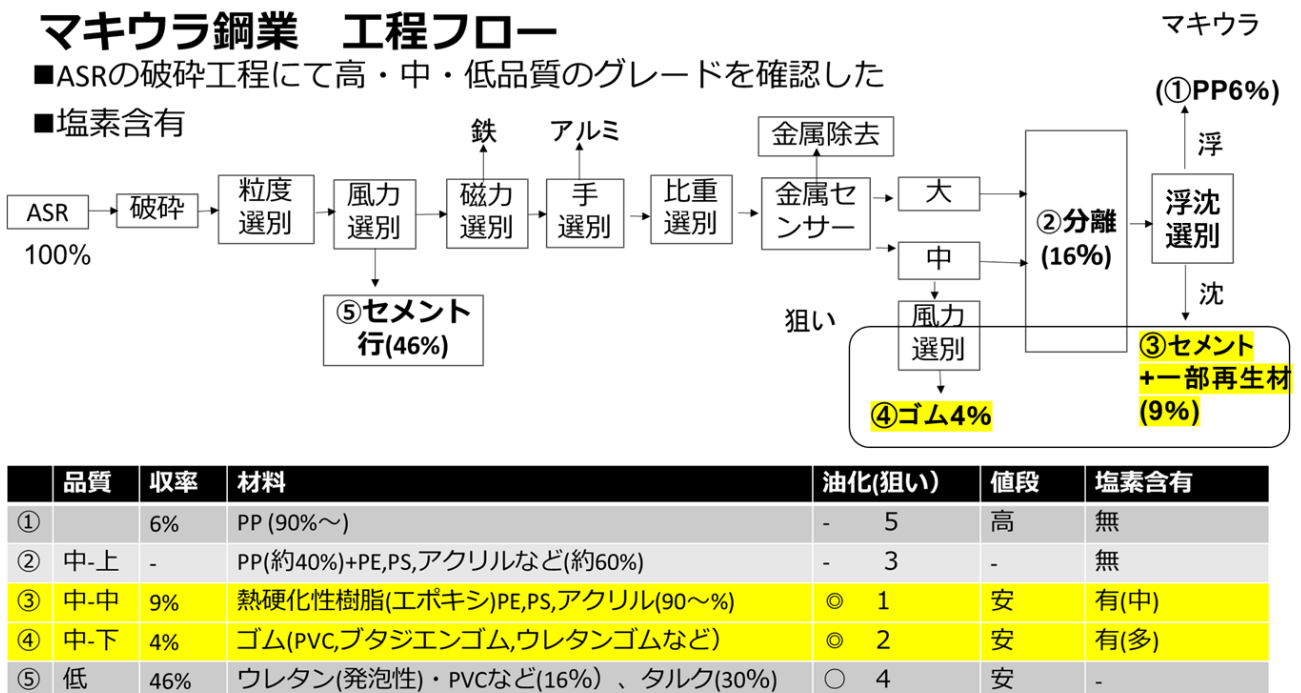


図 1 ASR 破碎工程フロー







表 1 検体組成、割合一覧

検体	用途	組成等	割合 [%]	価値	備考
①	再生PP	PP	≥90	有価	PSP浮沈選別後, 浮き
②	再生PP 選別前原料 (ミックスプラ)	PP	約40	有価	PSP浮沈選別前, 粉碎後
		PE, PS, PMMA等	約60		
③	再生PP 選別残渣 (浮沈選別: 沈降物)	熱硬化性樹脂 (エポキシ), PE, PS, PMMA	≥90	産廃	PSP浮沈選別後, 沈み 配線あり
④	再生PP 選別前原料 (ゴム・ウレタン)	ゴム (PVC, ブタジエンゴム, ウレタンゴム等)	情報 なし	産廃	PPP選別, ゴム系 配線, 金属魂あり
⑤	風力選別 (軽質ダスト)	ウレタン(発泡性)	54	産廃	PPP選別, ウレタン 木片あり
		PVC等	16		
		タルク	30		



(a) 検体①:PSP 浮沈選別後、浮き

図 2 検体の外観

選別前	ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (ゴム系)
		
繊維 (柔らかい)	配線, 金属	その他 (ふるい選別)
		

(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後



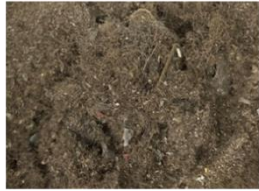
選別前	ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (スポンジ, ゴム系)
		
繊維 (柔らかい)	配線, 金属	その他 (ふるい選別)
		

(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

図 2(続き) 検体の外観

選別前	ミックス (硬質プラ)	ゴム
		
	<p>異素材 (木, ガラス, 繊維)</p>	<p>配線, 金属</p>
		

(d) 検体④: PPP 選別、ゴム系

選別前	ウレタン (スポンジ)	繊維 (柔らかい)	繊維 (布)
			
<p>プラ, ゴム</p>	<p>異素材 (木片, 紙)</p>	<p>配線, 金属</p>	<p>その他 (ふるい選別)</p>
			

(e) 検体⑤: PPP 選別、ウレタン

図 2(続き) 検体の外観

提供されたフレコン袋内から検体を採取する際、各標本の素材の偏りの影響を懸念し、フレコン袋の上層付近、中間層付近、周囲4箇所(約90°間隔)等から採取し、10標本(検体⑤は20標本)を基準;初期標本とした。なお、初期標本のうち、各素材の外れ値がある場合、追加標本を用意し、標本による違いがほとんどない標本を10標本(検体⑤は20標本)準備した。一つの標本の質量は、1000g(検体⑤は、500g)とした。

表2に各素材の割合、標本のばらつき、標本の素材割合のばらつきを調べた結果を記す。表2(a)は検体①:PSP浮沈選別後、浮き、(b)は検体②:PSP浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③:PSP浮沈選別後、沈み、(d)は検体④:PPP選別、ゴム系、(e)は検体⑤:PPP選別、ウレタンである。

ここで、検体③を例にして説明するため、表3に検体③の素材の割合、標本のばらつき、標本の素材割合のばらつきを再掲載し、表4に検体③の標本のばらつきの評価を記す。各素材において、初期標本;10標本のうち、ほぼ同じ質量である初期標本の算術平均(表2、表3中、赤枠)を取り、算術平均値よりもかなり小さな値(表2、表3中、桃色)、かなり大きな値(表2、表3中、橙色)であるものを外れ値とした。各初期標本において、素材割合が多い素材が外れ値である場合、外れ値である素材の数(表2、表3中、桃色と橙色)から判断し、初期標本の外れ値とした(表2、表3中、青枠)。また、初期標本が外れ値の場合、フレコン袋内から再度、検体を採取し、各素材に選別し、同様の評価を行い、各検体において、標本による違いがほとんどない10標本(検体⑤は20標本)を準備した。

表2に記した内容をまとめた結果、各検体、各素材の算術平均値、素材割合を表5に記す。検体①~④は、標本による違いがほとんどない10標本、検体⑤は同20標本を各々油化し、油化時、再実験が必要と判断した場合、さらに標本を準備し、油化を実施した。

表2 各素材の割合、標本のばらつき、標本の素材割合のばらつき

(a) 検体①:PSP浮沈選別後、浮き

検体①(大きく分別)	← 初期標本 →										← 追加標本 →			算術平均 (算術平均)	割合 [%] (算術平均)	算術平均 (外れ値等除外)	割合 [%] (外れ値等除外)	150 [g] 1回分確保
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	①	②	③					
粗粒 (重いプラ)	940.8	929.0	928.7	920.3	909.1	883.4	927.9	886.4	914.9	938.7	914.8	921.4	944.5	920.0	91.9	923.0	92.0	○
重なか質素材 (ゴム系)	24.1	30.9	20.3	25.1	26.3	10.5	19.9	14.9	15.6	11.7	16.3	27.9	22.6	20.5	2.0	21.3	2.1	○
中間 (しっとりプラ)	11.0	18.2	13.2	27.8	11.5	38.7	14.7	44.7	14.2	10.5	20.2	21.5	17.6	20.3	2.0	15.3	1.5	不足 +2
その他 (ふるいで落ちた物)	22.4	22.5	37.4	31.7	56.1	68.2	37.6	54.0	56.9	44.7	47.8	28.6	15.2	40.2	4.0	43.9	4.4	○
合計	998.3	1000.6	999.6	1004.9	1003.0	1000.8	1000.1	1000.0	1001.6	1005.6	999.1	999.4	999.9	1001.0	100.0	1003.4	100.0	

赤枠 : 算術平均値

青枠 : 外れ値
選別割合が多い組成が外れ値である場合、選別した検体が外れ値である数から判断

算術平均(外れ値等除外)と比較して、
黄色: ほとんど同じ
白色: 相応
橙色: 大きい(外れ値)
桃色: 小さい(外れ値)

表 2(続き) 各素材の割合、標本のばらつき、標本の素材割合のばらつき

(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後

← 初期標本 → ← 追加標本 →

標本 ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ① ② ③ ④

評価 △ × △ ○ ○ △ ○ ○ ○ ○ × △ △ ○

標本数 ① × ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑩ ⑪ ⑫

検体②		1/10	2/10	3/10	4/10 保存	5/10	6/10	7/10	8/10	9/10 保存	10/10	追加 1/2	追加 2/2	追加 1/2	追加 2/2	算術平均 (単純平均)	割合 [%] (単純平均)	算術平均 (外れ値等 除外)	割合 [%] (外れ値等 除外)	150 [g] 1回分
mix (固いプラ)		722.8	578.2	630.9	694.8	689.2	655.1	699.3	685.7	697.6	692.7	746.4	743.4	767.1	733.2	695.5	71.4	704.5	72.3	○
柔らかい異素材 (ゴム系)		146.8	216.2	195.3	125.5	145.8	165.2	117.7	125.7	123.0	110.8	95.7	114.0	86.5	108.6	134.1	13.8	124.2	12.7	○
繊維 (フワフワ)		26.6	41.7	36.0	38.0	27.7	33.8	35.4	45.4	43.3	26.9	19.9	33.8	33.1	33.9	34.0	3.5	35.0	3.6	○
錠剤・金属		2.8	8.4	5.3	4.5	3.0	4.3	7.1	5.7	3.8	5.0	4.8	7.1	5.1	5.8	5.2	0.5	5.4	0.6	微砂 約50g +2
その他 (ふるいで落ちた 物)		89.0	126.4	105.8	119.2	117.4	100.1	115.7	111.8	102.6	100.7	118.8	83.6	94.0	95.2	105.7	10.9	105.9	10.9	○
合計		988.0	970.9	973.3	982.0	983.1	958.5	975.2	974.3	970.3	936.1	985.6	981.9	985.8	976.7	974.4	100.0	975.0	100.0	

(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

← 初期標本 → ← 追加標本 →

標本 ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ① ② ③ ④

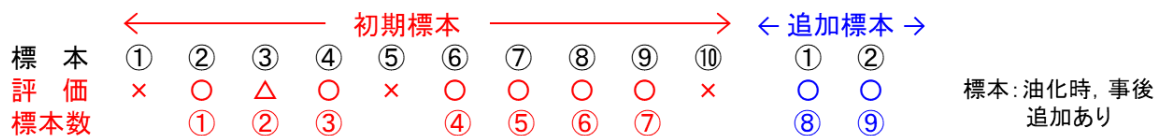
評価 × ○ ○ ○ ○ △ ○ ○ ○ × × × △ △

標本数 ① ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑧ ⑧ × × ⑨ ⑩

検体③		1/10	2/10 (保存)	3/10	4/10 保存	5/10	6/10	7/10	8/10	9/10	10/10	追加 1/2	追加 2/2	追加 1/2	追加 2/2	算術平均 (単純平均)	割合 [%] (単純平均)	算術平均 (外れ値等 除外)	割合 [%] (外れ値等 除外)
mix (固いプラ)		645.2	634.1	671.4	634.2	603.1	613.4	620.0	625.9	670.2	657.1	690.2	714.6	690.8	668.1	652.7	67.6	648.0	66.3
柔らかい異素材 (スポンジ・ゴ ム)		203.6	181.1	147.5	175.3	183.8	163.4	159.3	169.7	138.1	111.4	113.5	119.8	125.8	115.9	150.6	15.6	164.8	16.9
繊維 (フワフワ)		56.1	36.0	39.0	37.5	43.1	62.0	60.7	55.2	37.2	53.3	41.3	44.6	39.8	39.1	46.1	4.8	46.1	4.7
錠剤・金属		9.9	11.1	6.9	9.7	8.0	8.8	10.6	8.5	3.6	6.4	12.1	11.6	14.3	11.6	9.5	1.0	10.0	1.0
その他 (ふるいで落ちた 物)		76.6	103.9	113.0	117.3	107.7	85.2	104.7	103.0	106.7	126.5	124.7	104.9	105.7	116.4	106.9	11.1	108.3	11.1
合計		991.4	966.2	977.8	974.0	945.7	932.8	955.3	962.3	955.8	954.7	981.8	995.5	976.4	951.1	965.8	100.0	977.1	100.0

表 2(続き) 各素材の割合、標本のばらつき、標本の素材割合のばらつき

(d) 検体④:PPP 選別、ゴム系



検体④		1/10	2/10	3/10	4/10	5/10	6/10	7/10 保存	8/10	9/10 保存	10/10	追加 1/2	追加 2/2	算術平均 (単純平均)	割合 [%] (単純平均)	算術平均 (外れ値等 除外)	割合 [%] (外れ値等 除外)	150 [g] 1回分
mix (固いゴミ)		527.6	554.6	586.1	575.5	466.7	574.8	590.6	597.9	586.8	637.7	615.5	602.6	576.4	57.6	587.2	59.1	○
ゴム		422.0	391.8	292.6	380.8	459.0	372.4	372.7	352.7	372.4	331.3	345.7	373.8	372.3	37.2	366.0	36.8	○
異素材 (木・ガラス・繊維)		24.4	34.7	15.8	34.0	54.5	13.6	16.0	28.0	15.2	11.2	10.2	2.1	21.6	2.2	16.8	1.7	○
配線・金属		27.2	19.2	106.4	9.6	18.9	38.8	22.8	21.6	26.0	20.9	28.2	17.4	29.8	3.0	24.1	2.4	○
合計		1001.2	1000.3	1000.9	999.9	999.1	999.6	1002.1	1000.2	1000.4	1001.1	999.6	995.9	1000.0	100.0	994.0	100.0	

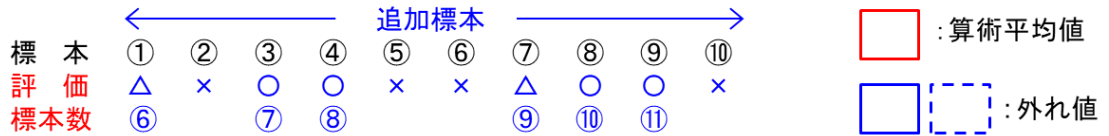
(e) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン



検体⑤		1/10	2/10 保存	3/10	4/10	5/10	6/10	7/10	8/10	9/10	10/10
ウレタン (スポンジ)		97.9	105.5	111.2	114.8	98.4	127.3	81.5	92.4	114.1	128.0
繊維 (フワフワ系)		130	74.5	72.5	51.2	123.4	104.6	114.5	51.4	82.4	52.6
繊維 (布)		48.6	48.7	80.4	66.8	51.9	60.3	70.5	79.8	72.4	77.6
プラ・ゴム		192.8	218.2	181.2	209.6	187.0	177.5	185.0	208.6	186.0	191.7
配線・金属		9.2	15.3	13.7	15.1	10.2	9.6	18.6	27.1	11.5	12.6
異素材 (紙・木くず)		11.5	17.1	22.8	16.3	11.2	9.4	8.8	13.2	6.5	12.4
その他 (ふるいで落ちた物)		9.0	18.1	14.9	21.7	15.1	10.3	19.0	24.9	24.8	22.2
合計		499.0	497.4	496.7	495.5	497.2	499.0	497.9	497.4	497.7	497.1

表 2(続き) 各素材の割合、標本のばらつき、標本の素材割合のばらつき

(e)(続き) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン



検体⑤		追加 1/3	追加 2/3	追加 3/3 保存	追加 1/7 保存	追加 2/7	追加 3/7	追加 4/7	追加 5/7	追加 6/7	追加 7/7	算術平均 (単純平均)	割合 [%] (単純平均)	算術平均 (外れ値等 除外)	割合 [%] (外れ値等 除外)
ウレタン (スポンジ)		102.1	98.2	105.8	105.1	83.5	102.5	107.6	91.1	103.8	102.7	103.7	20.8	103.3	21.4
繊維 (フワフワ系)		122.3	67.3	77.8	85.5	49.7	53.6	56.0	62.2	66.0	53.7	77.6	15.6	73.5	15.3
繊維 (布)		52.7	52.2	52.2	50.9	51.6	49.3	63.0	48.5	47.3	35.5	58.0	11.7	55.4	11.5
ブラ・ゴム		189.3	237.0	217.2	196.5	263.5	230.4	207.8	217.5	197.5	238.5	206.6	41.5	197.7	41.0
配線・金属		13.1	18.3	11.3	17.4	12.8	16.7	17.7	16.9	17.4	17.0	15.1	3.0	15.3	3.2
異素材 (紙・木くず)		10.3	12.2	15.5	28.3	20.8	20.2	27.3	34.7	34.6	26.2	18.0	3.6	16.7	3.5
その他 (ふるいで落ちた 物)		10.6	14.3	18.3	13.7	15.8	24.5	18.2	25.4	29.9	24.4	18.8	3.8	19.7	4.1
合計		500.4	499.5	498.1	497.4	497.7	497.2	497.6	496.3	496.5	498.0	497.7	100.0	481.8	481.8

表 3 検体③の素材の割合、標本のばらつき、標本の素材割合のばらつき(検体③の例示)

検体③		1/10	2/10 (保存)	3/10	4/10 保存	5/10	6/10	7/10	8/10	9/10	10/10	追加 1/2	追加 2/2	追加 1/2	追加 2/2	算術平均 (単純平均)	割合 [%] (単純平均)	算術平均 (外れ値等 除外)	割合 [%] (外れ値等 除外)
mix (固いブラ)		645.2	634.1	671.4	634.2	603.1	613.4	620.0	625.9	670.2	657.1	690.2	714.6	690.8	668.1	652.7	67.6	648.0	66.3
柔らか異素材 (スポンジ・ゴ ム)		203.6	181.1	147.5	175.3	183.8	163.4	159.3	169.7	138.1	111.4	113.5	119.8	125.8	115.9	150.6	15.6	164.8	16.9
繊維 (フワフワ)		56.1	36.0	39.0	37.5	43.1	62.0	60.7	55.2	37.2	53.3	41.3	44.6	39.8	39.1	46.1	4.8	46.1	4.7
配線・金属		9.9	11.1	6.9	9.7	8.0	8.8	10.6	8.5	3.6	6.4	12.1	11.6	14.3	11.6	9.5	1.0	10.0	1.0
その他 (ふるいで落ちた 物)		76.6	103.9	113.0	117.3	107.7	85.2	104.7	103.0	106.7	126.5	124.7	104.9	105.7	116.4	106.9	11.1	108.3	11.1
合計		991.4	966.2	977.8	974.0	945.7	932.8	953.3	962.3	955.8	954.7	981.8	995.5	976.4	951.1	965.8	100.0	977.1	100.0

表 4 検体③の標本のばらつきの評価(検体③の例示)

	初期標本										追加標本			
標本	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	①	②	③	④
評価	×	○	○	○	○	△	○	○	○	×	×	×	△	△
標本数		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧				⑨	⑩

表 5 各検体、各素材の算術平均値、素材割合

(a) 検体①:PSP 浮沈選別後、浮き

素材	外観	標本数	外れ値数	算術平均 [g]	素材割合 [%]
ミックス (硬質プラ)		13 (10 + 3)	4 (3 + 1)	923.0	92.0
軟質異素材 (ゴム系)		13 (10 + 3)	3 (3 + 0)	21.3	2.1
中間 (湿りプラ)		13 (10 + 3)	3 (3 + 0)	15.3	1.5
その他 (ふるい選別)		13 (10 + 3)	4 (3 + 1)	43.9	4.4

【各検体共通事項】

標本数 : 初回10個(検体⑤以外:各1000g, 検体⑤:500g)

初回標本数 + 追加標本数(外れ値がある場合等, 当該数程度)

外れ値数: 初回標本の外れ値数 + 追加標本の外れ値数

算術平均: 外れ値を除いた算術平均

標本数の括弧内左側の数: 初期標本数

標本数の括弧内右側の数: 追加標本数

外れ値数の括弧内左側の数: 初期標本のうち、外れ値数

外れ値数の括弧内右側の数: 追加標本のうち、外れ値数

(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後








素材	外観	標本数	外れ値数	算術平均 [g]	素材割合 [%]
ミックス (硬質プラ)		14 (10 + 4)	1 (1 + 0)	704.5	72.3
軟質異素材 (ゴム系)		14 (10 + 4)	5 (3 + 2)	124.2	12.7
繊維 (柔らかい)		14 (10 + 4)	1 (0 + 1)	35.0	3.6
配線, 金属		14 (10 + 4)	1 (1 + 0)	5.4	0.6
その他 (ふるい選別)		14 (10 + 4)	3 (2 + 1)	105.9	10.9

表 5(続き) 各検体、各素材の算術平均値、素材割合

(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

素材	外観	標本数	外れ値数	算術平均 [g]	素材割合 [%]
ミックス (硬質プラ)		14 (10 + 4)	1 (0 + 1)	648.0	66.3
軟質異素材 (スポンジ, ゴム系)		14 (10 + 4)	6 (2 + 4)	164.8	16.9
繊維 (柔らかい)		14 (10 + 4)	0 (0 + 0)	46.1	4.7
配線, 金属		14 (10 + 4)	1 (1 + 0)	10.0	1.0
その他 (ふるい選別)		14 (10 + 4)	4 (3 + 1)	108.3	11.1

(d) 検体④:PPP 選別、ゴム系

素材	外観	標本数	外れ値数	算術平均 [g]	素材割合 [%]
ミックス (硬質プラ)		12 (10 + 2)	3 (3 + 0)	587.2	59.1
ゴム		12 (10 + 2)	3 (3 + 0)	366.0	36.8
異素材 (木, ガラス, 繊維)		12 (10 + 2)	4 (3 + 1)	16.8	1.7
配線, 金属		12 (10 + 2)	2 (2 + 0)	24.1	2.4

表 5(続き) 各検体、各素材の算術平均値、素材割合

(e) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン

素材	外観	標本数	外れ値数	算術平均 [g]	素材割合 [%]
ウレタン (スポンジ)		20 (10 + 10)	4 (3 + 1)	103.3	21.4
繊維 (柔らかい)		20 (10 + 10)	12 (7 + 5)	73.5	15.3
繊維 (布)		20 (10 + 10)	4 (3 + 1)	55.4	11.5
プラ, ゴム		20 (10 + 10)	4 (0 + 4)	197.7	41.0
異素材 (木片, 紙)		20 (10 + 10)	11 (5 + 6)	16.7	3.5
配線, 金属		20 (10 + 10)	4 (4 + 0)	15.3	3.2
その他 (ふるい選別)		20 (10 + 10)	4 (2 + 2)	19.7	4.1

表 5 より、検体⑤: PPP 選別ウレタン以外、各素材の初期標本 (10 標本) のうち、外れ値は最大 3 標本である。すなわち、提供されたフレコン袋内から検体を採取した際、各標本の素材の偏りは最大 3 標本であったことから、標本によるばらつきは、ほとんど問題ないと言える。一方、検体⑤: PPP 選別ウレタンの各素材の初期標本 (10 標本) のうち、外れ値は、他の検体と同様、3 標本程度であるが、繊維 (柔らかい) 素材と配線、金属素材の外れ値は、5 から 7 標本であり、標本によるばらつきが見られる。このばらつきは、当該素材以外に混入している他の素材が見られること、配線、金属素材が繊維素材に混入しやすく、検体⑤は繊維素材の割合が他の素材に比べて大きいことから、その影響が大きいことが考えられる。

繊維 (柔らかい) 素材と配線、金属素材の外れ値が多いことに対する対処方法は、標本数を増やし、各素材の算術平均値に近い標本数を増やすことであり、油化実験時、生成油収率の低さもあることから、表 5 (e) に記した標本数 (20 標本) 以上の標本を用意して採油を行った。

次に、各標本の素材の割合について述べる。検体①: PSP 浮沈選別後、浮きは、ミックス (硬質プラ) が約 9 割、検体②: PSP 浮沈選別前、粉碎後は、検体①と同様、ミックス (硬質プラ) が多く、約 7 割、軟質異素材 (ゴム系) が約 1 割含まれている。検体③: PSP 浮沈選別後、沈みは、ミックス (硬質プラ) が約 6 割、軟質異素材 (スポンジ、ゴム系) が 2 割弱含まれている。検体④: PPP 選別、ゴム系は、ミックス (硬質プラ) が約 6 割、ゴムが 4 割弱含まれている。検体⑤: PPP 選別、ウレタンは、ウレタンが主素材と思われたが、約 2 割であり、プラ、ゴム素材が多く、約 4 割であり、次いで繊維素材が約 3 割である。

3. まとめ

自動車シュレッダーダスト ASR (Automobile Shredder Residue) の破碎工程において、各種選別装置、方法により分別された検体を標本（サンプリング）する際、標本によるばらつき、標本（サンプリング）による素材のばらつきが懸念され、それらの影響を調べ、検体の素材の割合も調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) 検体⑤：PPP 選別ウレタン以外、各素材の初期標本（10 標本）のうち、外れ値は最大 3 標本であり、標本によるばらつきは、ほとんど問題ないと言える。
- (2) 検体⑤：PPP 選別ウレタンの各素材の初期標本（10 標本）のうち、外れ値は、他の検体と同様、3 標本程度であるが、繊維（柔らかい）素材と配線、金属素材の外れ値は、5 標本から 7 標本であり、標本によるばらつきがあった。

第 2 章 ラボ油化実験

1. 目的

本委託事業の目的は、自動車から回収する廃プラスチックからケミカルリサイクルにより再生樹脂を開発することの技術的有用性、ビジネス上の可能性を検討することである。自動車シュレッダーダスト ASR (Automobile Shredder Residue) の破碎工程において、各種選別装置、方法により選別された検体の油化、破碎工程において選別された検体を油化した時のマテリアルバランス、生成油のガスクロマトグラム分析、留分割合を調べた。

提供されたフレコン袋内から検体を採取する際、素材の偏りが懸念されるため、油化試験前に各素材の割合、標本のばらつき、標本の素材割合のばらつきを調べ、ばらつきが少ない検体を準備している。実際に油化した場合、標本の個体差がマテリアルバランス、生成油のガスクロマトグラム分析、留分割合および生成油に含まれる主要元素の濃度に及ぼす影響を調べた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

図 1 に油化実験装置の外観を示し、図 2 に同概略を示す。油化は、検体を反応器内に規定量入れるバッチ方式を採用した。図 1、図 2 より、触媒、熱媒体、検体を反応器に入れ、マントルヒータで加熱した。反応器の内部温度は、マントルヒータと反応器の間に入れた熱電対温度計により計測する外部温度により、温度制御装置で過昇温しないように制御し、反応器の内部温度が 10 分間に数℃上昇するように緩やかに昇温した。検体が熔融し、攪拌用モータで連続攪拌ができるようになるまで、攪拌翼を手回しにより反応器内の触媒、熱媒体、検体を攪拌させた。連続攪拌時、攪拌翼の回転数は、

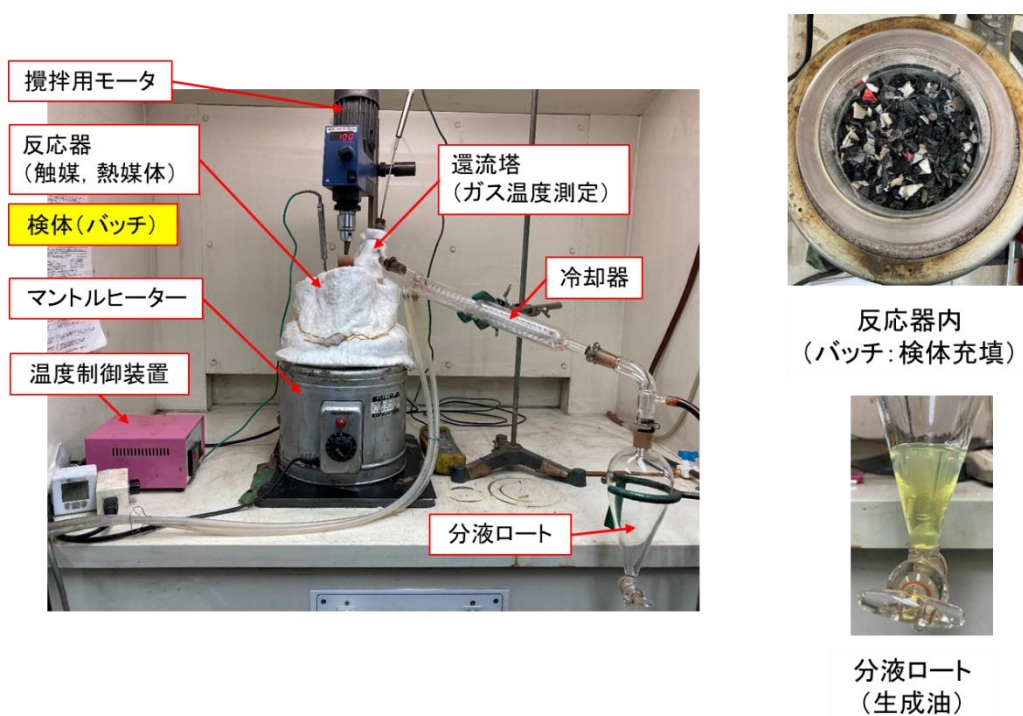


図 1 実験装置外観

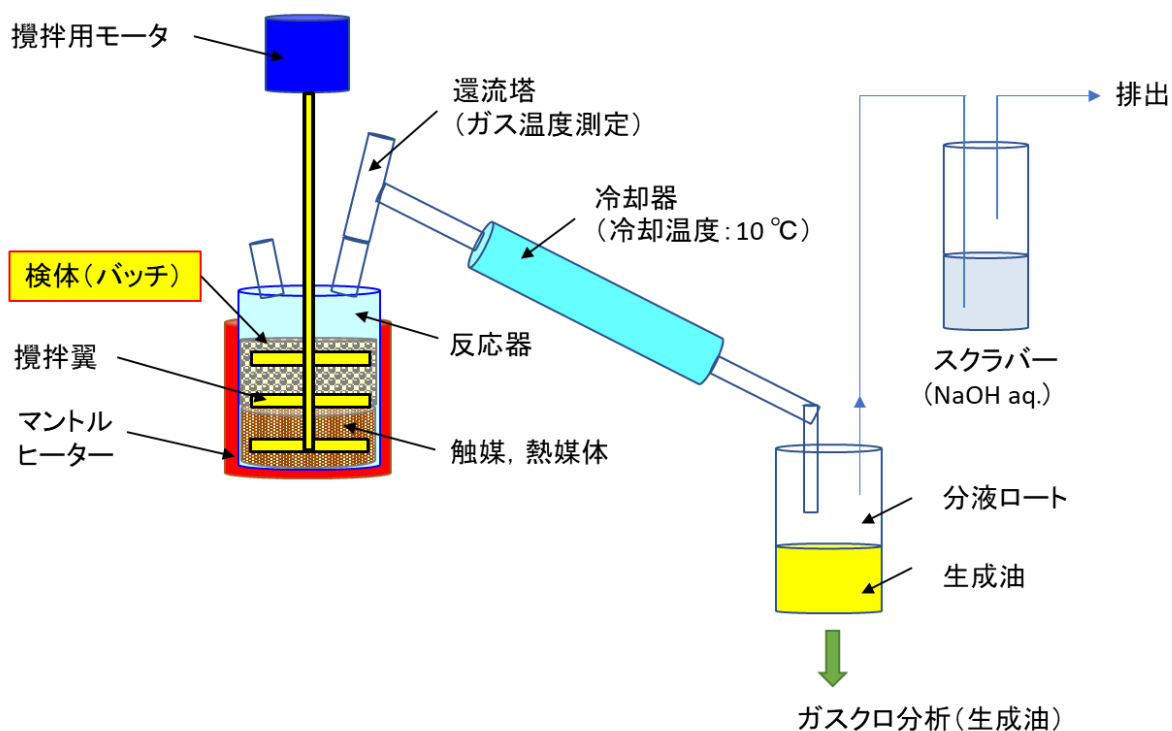


図 2 実験装置概略

約 100 rpm で一定とした。反応器内の検体が熔融し、発生したガスは還流塔部を上昇し、冷却管に流入する。冷却管は、10 °C の冷水を流しており、検体から発生したガスが冷却管で冷却され、凝縮し、油が分液ロートに溜まり、10 分毎に採油した。オフガスは、冷却管と分液ロートの間の分岐管に接続されたビニールホースから検知管を用いて測定した。

2.2 マテリアルバランス;物質収支の定義

検体を油化した際、検体投入量に対する生成油量、油化後の残渣量、排出されるオフガス量の割合を知ることが重要であり、次に記す算出式により算出 (オフガス量率は推計) した。

なお、生成油収率 (液収率) は、後述する生成油の留分; ナフサ、ガソリン (炭素数: C₅~C₁₂)、灯油、軽油 (炭素数: C₁₃~C₂₄)、重油 (炭素数: C₂₅~) のように、液体; 油を全て合わせた油の収率であり、この生成油収率の高さで評価することが重要である。

$$(1) \text{生成油収率} = (\text{生成油量} / \text{検体投入量}) \times 100$$

$$(2) \text{残渣率} = (\text{反応器内残渣量; 触媒等を除く} / \text{検体投入量}) \times 100$$

$$(3) \text{オフガス量率 (推計)} = 100 - (\text{生成油収率} + \text{残渣率})$$

2.3 分析方法

生成油の GC/MS 分析は、自社所有のガスクロマトグラフィー（島津製作所製、GC-2014）を用いて実施し、生成油の元素分析は、外部の分析機関；一般社団法人 日本海事検定協会に依頼した。表 1 に元素分析項目、試験方法一覧を記す。

・水素化用粗油

GC/MS（環境エネルギー株式会社、福山本社にて実施）

元素分析（一般社団法人 日本海事検定協会に依頼）

表 1 元素分析項目、試験方法一覧

分析項目	試験方法
密度(15 °C)	JIS K2249-1
引火点	JIS K2265-1
動粘度(30 °C)	JIS K2283
流動点	JIS K2269
残留炭素濃度	JIS K2270-2
灰分	JIS K2272
有機塩素	微量電量滴定法
無機塩素	水抽出-イオンクロマトグラフィー
全塩素	ASTM D5808
硫黄分	JIS K2541-6
窒素濃度	JIS K2609
塩基性窒素	UOP 269
酸素量	COHコーダ
水分	JIS K2275-3
蒸留点 10 %	JIS K 2254(常圧蒸留)
pH	JIS Z 8802
臭素	燃焼イオンクロマトグラフィー




3. 実験結果および考察

3.1 検体の標本の個体差の影響

提供された各検体のフレコン袋内から採取する際、各標本の素材の割合が異なることが懸念されたため、その影響を調べた結果、検体⑤以外、算術平均値から外れた外れ値が3割あることがわかった。外れ値にならなかった場合においても、標本の個体差が少なからず存在するため、油化した際、標本の個体差の影響の有無を調べた。表2に標本個体差がマテリアルバランス；生成油収率、残渣率、オフガス量率に及ぼす影響を記す。表2(a)は検体①：PSP浮沈選別後、浮き、(b)は検体②：PSP浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③：PSP浮沈選別後、沈み、(d)は検体④：PPP選別、ゴム系、(e)は検体⑤：PPP選別、ウレタンである。

表2 標本個体差がマテリアルバランスに及ぼす影響

(a) 検体①:PSP浮沈選別後、浮き

検体①		標本1	標本2	標本3	平均
生成油外観					—
①生成油収率	[wt %]	82.2	80	80.7	81
②残渣率	[wt %]	7.4	6.9	7.1	7.1
③オフガス量率(推計)	[wt %]	10.4	13.1	12.2	11.9
④比重	[-]	0.735	0.740	0.740	0.738

※各実験結果は、触媒の初期活性時である。

触媒が通常活性時、生成油収率が向上する傾向がある。




以下、同様

(b) 検体②:PSP浮沈選別前、粉碎後




検体②		標本1	標本2	標本3	平均
生成油外観					—
①生成油収率	[wt %]	59.1	66.6	67.7	64.5
②残渣率	[wt %]	27.8	23.3	22.7	24.6
③オフガス量率(推計)	[wt %]	13.1	10.1	9.6	10.9
④比重	[-]	0.780	0.785	0.790	0.785

表 2(続き) 標本個体差がマテリアルバランスに及ぼす影響




(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

検体③		標本1	標本2	標本3	平均
生成油外観					—
①生成油収率	[wt %]	56.2	58.7	57.1	57.3
②残渣率	[wt %]	35.3	34.6	35.9	35.3
③オフガス量率(推計)	[wt %]	8.5	6.7	7.0	7.4
④比重	[-]	0.815	0.830	0.823	0.823

(d) 検体④:PSP 浮沈選別後、浮き

検体④		標本1	標本2	標本3	平均
生成油外観					—
①生成油収率	[wt %]	57.5	56.0	56.8	56.8
②残渣率	[wt %]	33.1	34.8	34.5	34.1
③オフガス量率(推計)	[wt %]	9.4	9.2	8.7	9.1
④比重	[-]	0.803	0.805	0.801	0.803

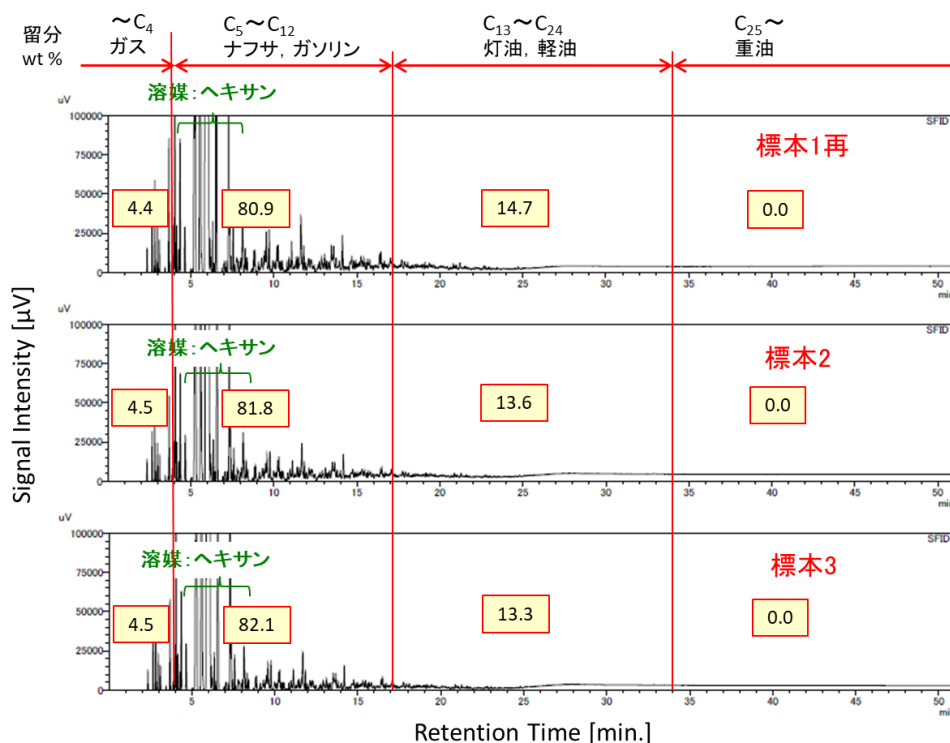
(e) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン

検体⑤		標本1	標本2	標本3	平均
生成油外観					—
①生成油収率	[wt %]	44.2	46.2	49.1	46.5
②残渣率	[wt %]	41.2	39.7	40.7	40.6
③オフガス量率(推計)	[wt %]	14.6	14.1	10.2	13.0
④比重	[-]	0.813	0.822	0.808	0.808

一例として、表 2(c)より、検体③：PSP 浮沈選別後、沈みの場合、3 標本の生成油収率は、56%台から 58%台、残渣率は、34%台から 35%台、推計値であるが、オフガス量率は、6%台から 8%台、比重は、0.82 前後であり、標本による差異はほとんど見られない。表 1 より、各検体とも、標本 1 から標本 3 のマテリアルバランス、比重は、ほぼ同じであり、標本（サンプリング）による個体差はほとんどないことがわかる。

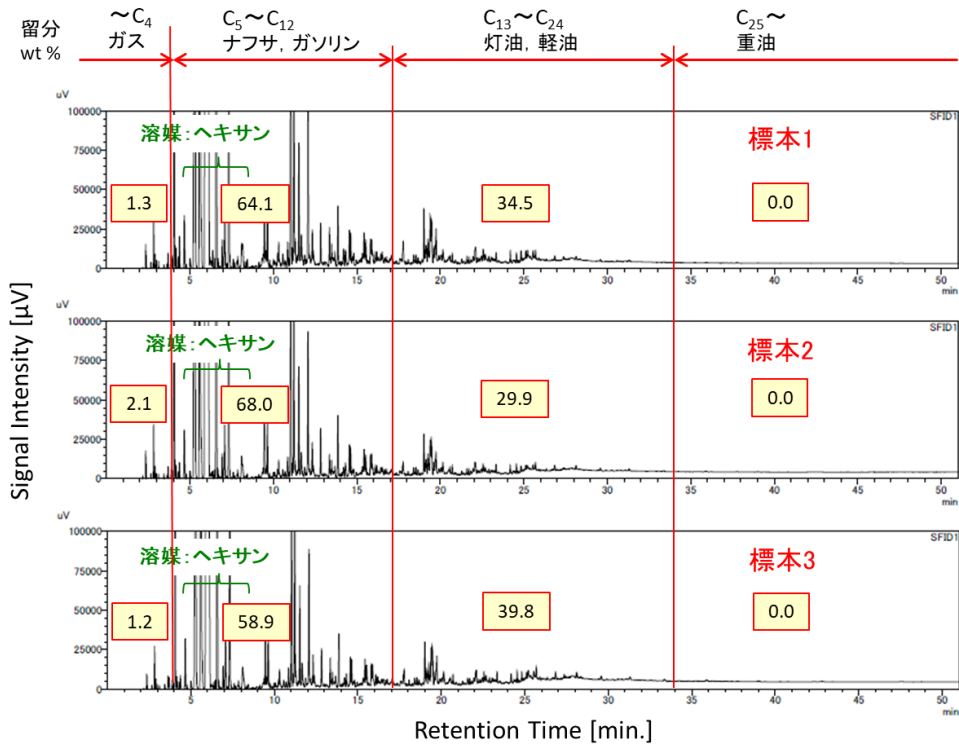
これらの結果から、油化に際し、各検体の標本（サンプリング）による影響は、ほとんどないものと言える。

図 3 に標本 1 から標本 3 の GC-FID クロマトグラムを示す。図 1 (a)は検体①：PSP 浮沈選別後、浮き、(b)は検体②：PSP 浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③：PSP 浮沈選別後、沈み、(d)は検体④：PPP 選別、ゴム系、(e)は検体⑤：PPP 選別、ウレタンである。マテリアルバランスと同様に、一例として、図 3(c)より、検体③：PSP 浮沈選別後、沈みの場合、ピーク高さの違いはあるが、視認できる範囲において標本によらず、ピーク値が現れる保持時間は同じであり、標本による個体差は、ほとんど見られない。図 3 より、各検体とも、標本 1 から標本 3 の GC-FID クロマトグラムは、ほぼ同じであり、標本（サンプリング）による個体差はほとんどないと言える。

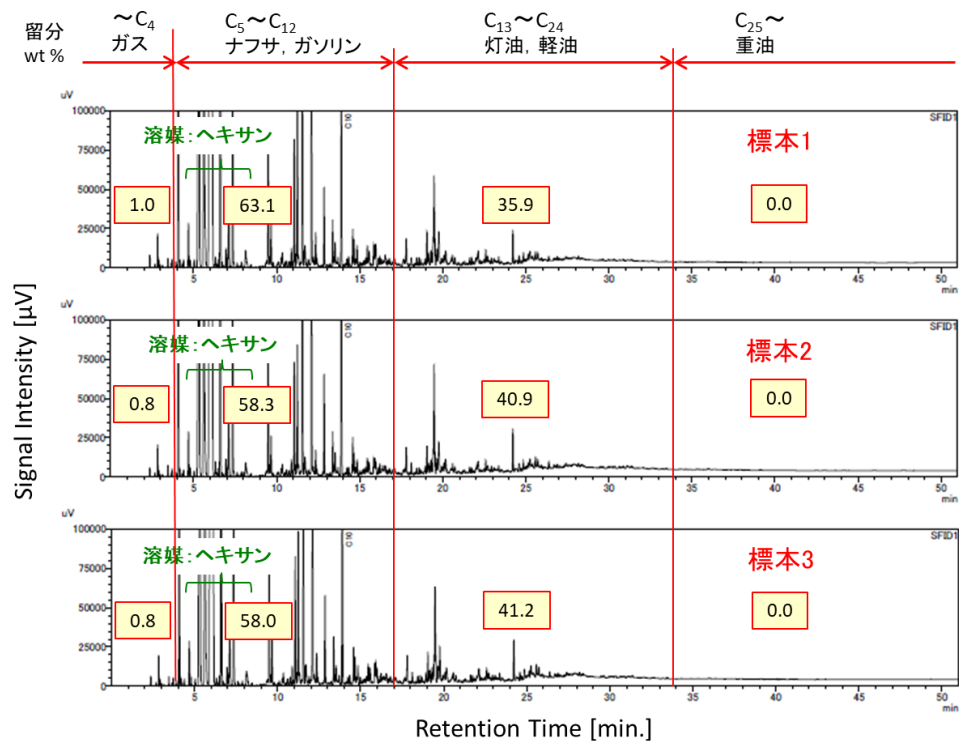


(a) 検体①:PSP 浮沈選別後、浮き

図 3 標本 1 から標本 3 の GC-FID クロマトグラム

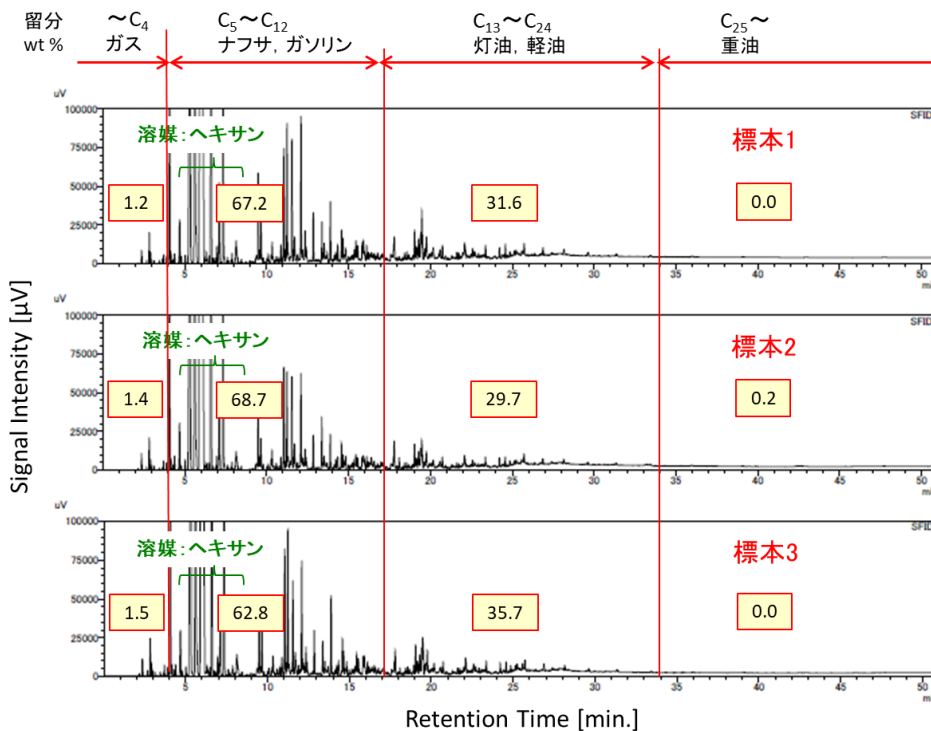


(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後

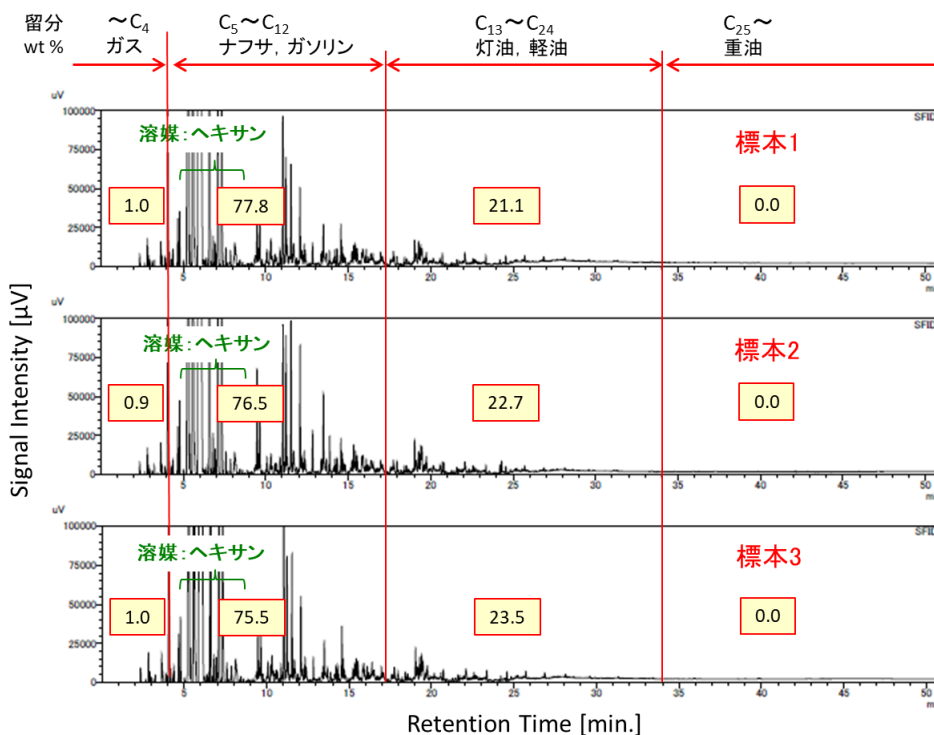


(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

図 3(続き) 標本 1 から標本 3 の GC-FID クロマトグラム



(d) 検体④:PSP 浮沈選別後、浮き



(e) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン

図3(続き) 標本1から標本3のGC-FIDクロマトグラム

表 3 に標本個体差が生成油の留分に及ぼす影響を記す。表 2 (a)は検体①：PSP 浮沈選別後、浮き、(b)は検体②：PSP 浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③：PSP 浮沈選別後、沈み、(d)は検体④：PPP 選別、ゴム系、(e)は検体⑤：PPP 選別、ウレタンである。

表 3 標本個体差が生成油の留分に及ぼす影響

(a) 検体①:PSP 浮沈選別後、浮き

炭素数	留分 [wt %]	標本1	標本2	標本3	平均
~C ₄	ガス	4.4	4.5	4.5	4.5
C ₅ ~C ₁₂	ナフサ, ガソリン	80.9	81.8	82.1	81.6
C ₁₃ ~C ₂₄	灯油, 軽油	14.7	13.6	13.3	13.9
C ₂₅ ~	重油	0.0	0.0	0.0	0.0

※各実験結果は、触媒の初期活性時である。

触媒が通常活性時、低沸点（ナフサ、ガソリン）留分割合が減少する傾向がある。

以下、同様

(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後

炭素数	留分 [wt %]	標本1	標本2	標本3	平均
~C ₄	ガス	1.3	2.1	1.2	1.5
C ₅ ~C ₁₂	ナフサ, ガソリン	64.1	68.0	58.9	63.8
C ₁₃ ~C ₂₄	灯油, 軽油	34.5	29.9	39.8	34.7
C ₂₅ ~	重油	0.0	0.0	0.0	0.0

(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

炭素数	留分 [wt %]	標本1	標本2	標本3	平均
~C ₄	ガス	1.0	0.8	0.8	0.87
C ₅ ~C ₁₂	ナフサ, ガソリン	63.1	58.3	58.0	59.8
C ₁₃ ~C ₂₄	灯油, 軽油	35.9	40.9	41.2	39.3
C ₂₅ ~	重油	0.0	0.0	0.0	0.0

表 3(続き) 標本個体差が生成油の留分に及ぼす影響

(d) 検体④:PSP 浮沈選別後、浮き

炭素数	留分 [wt %]	標本1	標本2	標本3	平均
~C ₄	ガス	1.2	1.4	1.5	1.4
C ₅ ~C ₁₂	ナフサ, ガソリン	67.2	68.7	62.8	66.2
C ₁₃ ~C ₂₄	灯油, 軽油	31.6	29.7	35.7	32.3
C ₂₅ ~	重油	0.0	0.2	0.0	0.1

(e) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン

炭素数	留分 [wt %]	標本1	標本2	標本3	平均
~C ₄	ガス	1.0	0.9	1.0	0.97
C ₅ ~C ₁₂	ナフサ, ガソリン	77.8	76.5	75.5	76.6
C ₁₃ ~C ₂₄	灯油, 軽油	21.1	22.7	23.5	22.4
C ₂₅ ~	重油	0.0	0.0	0.0	0.0

表 3 より、検体②において、低沸点分：ナフサ、ガソリン留分、比較的、高沸点分：灯油、軽油の留分割合に最大約 10 %の標本による留分の個体差が見られるが、それ以外の検体は、標本による各留分の個体差はほとんど見られない。

表 4 に標本 1 から標本 3 の元素分析結果を記す。表 4 (a)は検体①：PSP 浮沈選別後、浮き、(b)は検体②：PSP 浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③：PSP 浮沈選別後、沈み、(d)は検体④：PPP 選別、ゴム系、(e)は検体⑤：PPP 選別、ウレタンである。

表 4 より、生成油中の有害元素として低減が求められている有機塩素濃についてみると、検体①、②の場合、標本によらず、同じ濃度、もしくは 20 %程度の濃度差が見られる程度であるが、検体③~⑤の場合、標本により、2 倍を超える違いがあり、ppm 単位であるものの、標本による違いが見られる。有機塩素濃度は、検体①が最も低く、1 ppm 未満、検体⑤が高く、470 ppm である。無機塩素濃度は、検体によらず、1 ppm 程度、もしくはそれ未満であり、低くなっている。窒素分(濃度)は、検体①が最も低く、その他の検体は、1 %前後と高くなっている。このように、標本による違いが見られるものの、各検体とも、3 標本のうち、2 標本の各元素濃度は、当該検体の各元素濃度として把握できる濃度であり、標本による元素濃度の個体差は問題視するものではないと判断する。

表 4 標本 1 から標本 3 の元素分析結果

(a) 検体①:PSP 浮沈選別後、浮き

元素	単位	標本1再	標本2	標本3
有機塩素	mass ppm	1未満	1未満	1未満
無機塩素	mass ppm	1未満	1未満	1未満
窒素分	mass ppm	39	90	56

(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後

元素	単位	標本1	標本2	標本3
有機塩素	mass ppm	50	44	75
無機塩素	mass ppm	1未満	1未満	1未満
窒素分	mass %	0.55	0.62	0.63

(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

元素	単位	標本1	標本2	標本3
有機塩素	mass ppm	120	320	190
無機塩素	mass ppm	1未満	1未満	1
窒素分	mass %	1.18	1.49	1.35

(d) 検体④:PSP 浮沈選別後、浮き

元素	単位	標本1	標本2	標本3
有機塩素	mass ppm	190	450	220
無機塩素	mass ppm	1未満	1未満	1未満
窒素分	mass %	0.90	0.90	0.93

表 4(続き) 標本 1 から標本 3 の元素分析結果

(e) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン

元素	単位	標本1	標本2	標本3
有機塩素	mass ppm	260	180	470
無機塩素	mass ppm	1未満	1未満	1未満
窒素分	mass %	1.25	1.62	1.19

以上より、各検体の標本（サンプリング）による素材の割合が異なることが懸念され、油化した際、標本の個体差の影響があるものと思ひ、マテリアルバランス、生成油のクロマトグラム、有機塩素濃度、無機塩素濃度、窒素分（濃度）に及ぼす影響を調べた結果、各検体において、マテリアルバランス、生成油のクロマトグラムは、標本による個体差はほとんど見られなかったが、生成油の元素分析結果は、標本による個体差が大きく表れる検体があることがわかった。

なお、標本により大きな個体差が見られる検体があるものの、各検体とも、3 標本のうち、2 標本の各元素濃度は、当該検体の各元素濃度として把握できるため、標本による元素濃度の個体差は問題視するものではないと判断する。

ここで、触媒の使用の有無が生成油中の有機塩素濃度、無機塩素濃度、窒素分（濃度）に及ぼす影響について、検体③を代表として調べた。表 5 に検体③を代表として、触媒の使用の有無の影響を調べた元素分析結果を記す。

表 5 より、有機塩素濃度、無機塩素濃度、窒素分（濃度）ともに、各標本による濃度の違いが見られるものの、単純熱分解（分解触媒未使用）の場合、有機塩素濃度、無機塩素濃度は、触媒分解と比較して桁違いの濃度差があり、かなり高く、窒素分（濃度）も高く、触媒分解の各濃度の方が低くなっている。この結果から、触媒（分解触媒）を使用することにより、特に有機塩素濃度の低減に効果的であることがわかる。

表 5 元素分析結果[触媒(分解触媒)の使用の有無の影響(代表:検体③)]

分析項目	単位	単純熱分解			触媒分解		
		標本1	標本2	標本3	標本1	標本2	標本3
有機塩素	mass ppm	3,340	2,480	3,270	190	450	220
無機塩素	mass ppm	6	4	23	1未満	1未満	1未満
窒素分	mass %	1.40	1.38	1.27	0.90	0.90	0.93
	mass ppm	14,000	13,800	12,700	9,000	9,000	9,300

次に、有機塩素濃度、無機塩素濃度、窒素分（濃度）の他の元素分析用、水素化処理用に必要な油を採油するために、検体①から検体④は 10 標本分、検体⑤は 30 標本分の採油を行った。表 6 に元素分析用、水素化処理用に必要な油を採油するために各検体の標本ごと（検体①から検体④は 10 標本、検体⑤は 30 標本）に採油した油のマテリアルバランス；生成油収率、残渣率、オフガス量率、比重を記す。

表 6 より、検体①から検体⑤の各標本（検体①から検体④は 10 標本、検体⑤は 30 標本）のマテリアルバランス；生成油収率、残渣率、オフガス量率、比重は、外れ値がなく、平均値前後の値になっており、各検体において、各標本の生成油を混合しても問題ないことがわかる。検体⑤の各標本のマテリアルバランスは、外れ値がないものの、検体①から検体④に比べ、標本による違いが見られる標本があり、生成油収率を取り上げると、最小 44.4 %、最大 60.0 %（30 標本の平均値：51.6 %）である。

これは、標本⑤の場合、各素材の割合、標本のばらつき、標本の素材割合のばらつきが他の検体に比べて多いことに起因するものと思われる。

図 4 に元素分析用、水素化処理用に必要な油を採油するために各検体の標本ごと（検体①から検体④は 10 標本、検体⑤は 30 標本）に採油した油の GC-FID クロマトグラムを示す。図 4(a)は検体①：PSP 浮沈選別後、浮き、(b)は検体②：PSP 浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③：PSP 浮沈選別後、沈み、(d)は検体④：PPP 選別、ゴム系、(e)は検体⑤：PPP 選別、ウレタンである。検体①から検体⑤まで、標本による違いはほとんど見られないため、一例として、検体③について説明する。

図 4(C)より、検体③：PSP 浮沈選別後、沈みの場合、ピーク高さの違いはあるが、視認可能なピーク値において、ピーク値が現れる保持時間は同じであり、標本による個体差は、ほとんどないことがわかる。したがって、各標本の生成油を混合して、元素分析用の油、水素化処理用の油として問題ないと判断する。

表 6 各検体の標本ごとのマテリアルバランス、比重

(a) 検体①:PSP 浮沈選別後、浮き

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	平均
①収	86.8	84.1	82.6	81	84.3	83.3	82.8	82.6	83.4	80.6	83.2
②残	5.7	4.2	8.4	6.5	6.5	6.0	8.0	6.9	6.4	7.2	6.6
③ガ	7.5	11.7	9.0	12.5	9.2	10.7	9.2	10.5	10.2	12.2	10.3
④比	0.745	0.745	0.750	0.745	0.750	0.750	0.740	0.740	0.740	0.730	0.744

※各実験結果は、触媒の初期活性時である。

以下、同様

(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	平均
①収	67.5	65.9	68.5	68.0	69	66.5	64.9	67.6	65.4	68.3	67.2
②残	24.3	23.0	22.8	22.6	21.4	24	25.3	21.7	23.1	23.2	23.1
③ガ	8.2	11.1	8.7	9.4	9.6	9.5	9.8	10.7	11.5	8.5	9.7
④比	0.793	0.801	0.795	0.805	0.790	0.795	0.782	0.795	0.795	0.795	0.795

(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	平均
①収	56.1	56.6	56.9	53.9	53.7	56.0	54.0	52.7	55.0	55.1	55.0
②残	36.6	35.7	37.6	38.1	38.6	36.3	37.2	36.7	37.0	36.2	37.0
③ガ	7.3	7.7	5.5	8.0	7.7	7.7	8.8	10.6	8.0	8.7	8.0
④比	0.825	0.823	0.820	0.820	0.815	0.811	0.805	0.816	0.813	0.820	0.816

(d) 検体④:PSP 浮沈選別後、浮き

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	平均
①収	59.0	57.8	54.8	58.9	62.3	55.2	57.0	57.5	58.0	53.2	57.4
②残	33.9	33.5	35.8	33.8	28.5	37.3	34.4	34.3	35.1	38.0	34.5
③ガ	7.1	8.7	9.4	7.3	9.2	7.5	8.6	8.2	6.9	8.8	8.1
④比	0.806	0.794	0.811	0.794	0.800	0.795	0.802	0.805	0.804	0.800	0.801

表 6(続き) 各検体の標本ごとのマテリアルバランス、比重

(e) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	平均
①収	48.1	47.1	56.9	48.5	50.3	47.3	46.2	49.8	49.0	52.1	49.5
②残	38.0	42.7	30.8	40.2	38.0	41.8	39.5	37.0	37.1	37.5	38.3
③ガ	13.9	10.2	12.3	11.3	11.7	10.9	14.3	13.2	13.9	10.4	12.2
④比	0.816	0.807	0.817	0.807	0.810	0.806	0.805	0.795	0.821	0.795	0.808

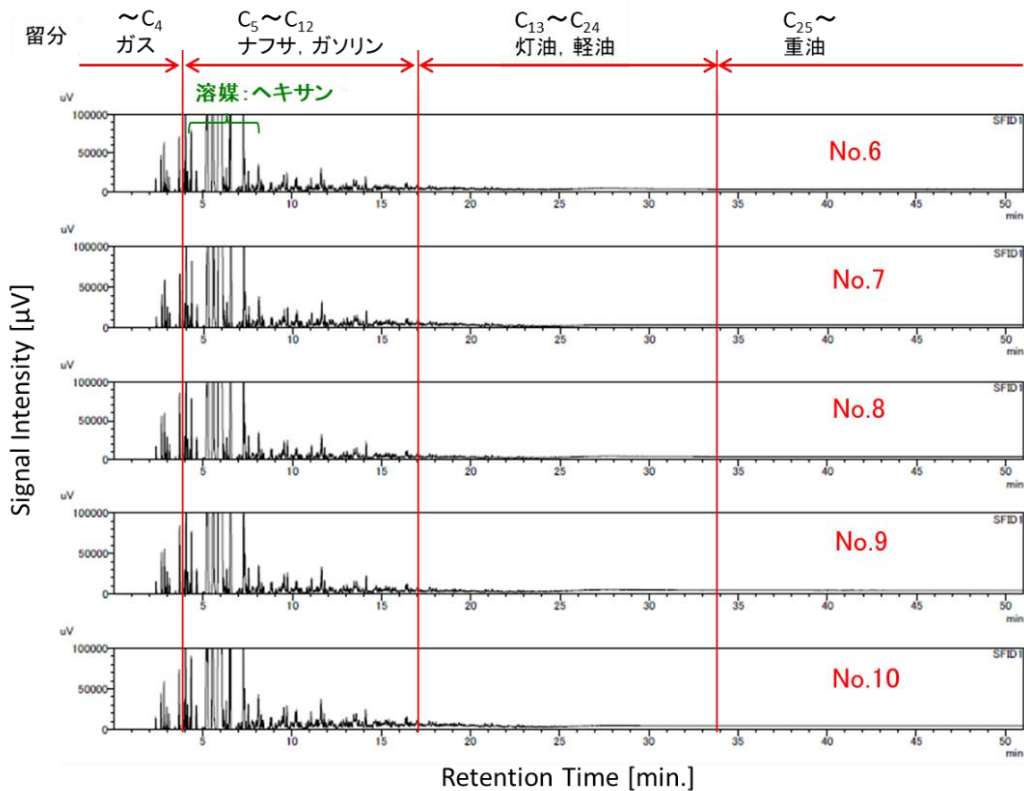
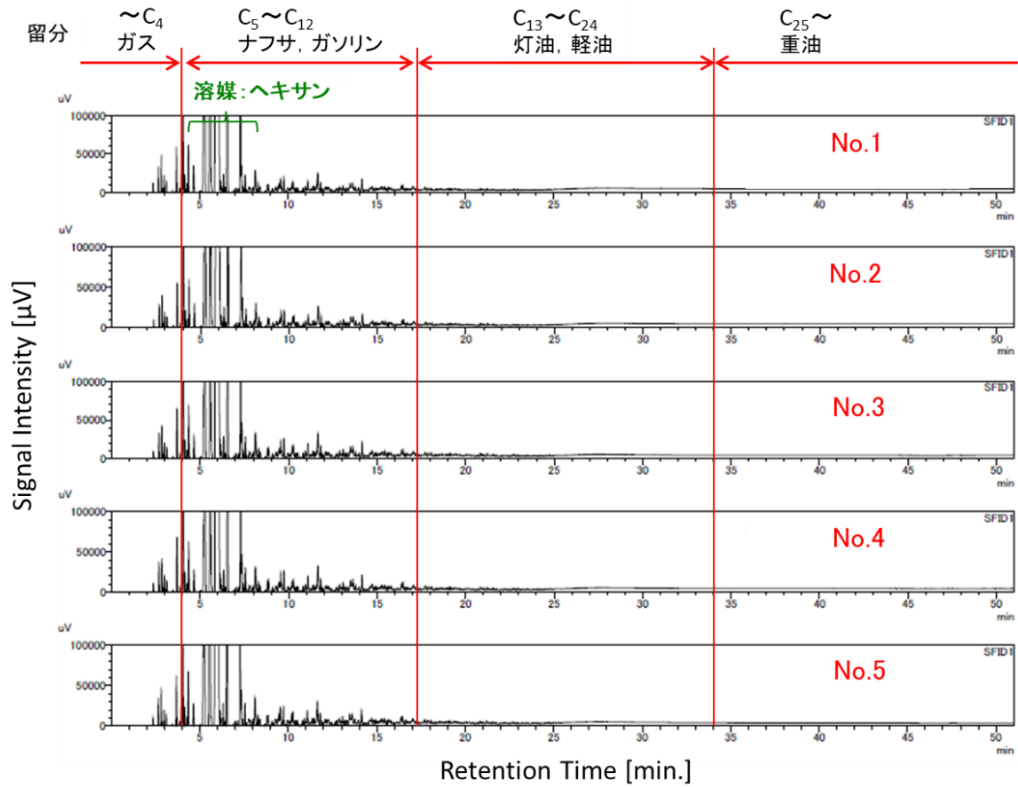
	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	平均
①収	50.2	54.9	60.0	56.6	49.7	49.4	56.0	53.2	44.4	45.2	51.96
②残	35.0	34.0	27.2	32.8	38.0	41.0	31.3	35.3	41.6	44.5	36.1
③ガ	14.8	11.0	12.8	10.6	12.3	9.6	12.7	11.5	14.0	10.3	11.96
④比	0.832	0.790	0.811	0.792	0.812	0.800	0.818	0.795	0.822	0.813	0.809

	No.21	No.22	No.23	No.24	No.25	No.26	No.27	No.28	No.29	No.30	平均
①収	59.9	49.5	59.7	50.0	49.1	51.5	55.3	51.0	54.3	53.3	53.4
②残	27.5	39.2	25.5	38.2	39.0	35.9	31.5	36.6	31.0	33.6	33.8
③ガ	12.6	11.3	14.8	11.8	11.9	12.6	13.2	12.4	14.7	13.1	12.8
④比	0.800	0.805	0.798	0.810	0.816	0.826	0.809	0.805	0.806	0.806	0.808

	平均 No.1~No.10	平均 No.11~No.20	平均 No.21~No.30	総平均 No.1~No.30
①生成油収率 [%]	49.5	51.96	53.4	51.6
②残渣率 [%]	38.3	36.1	33.8	36.1
③オフガス量率 [%]	12.2	11.96	12.8	12.3
④比重 [-]	0.808	0.809	0.808	0.808

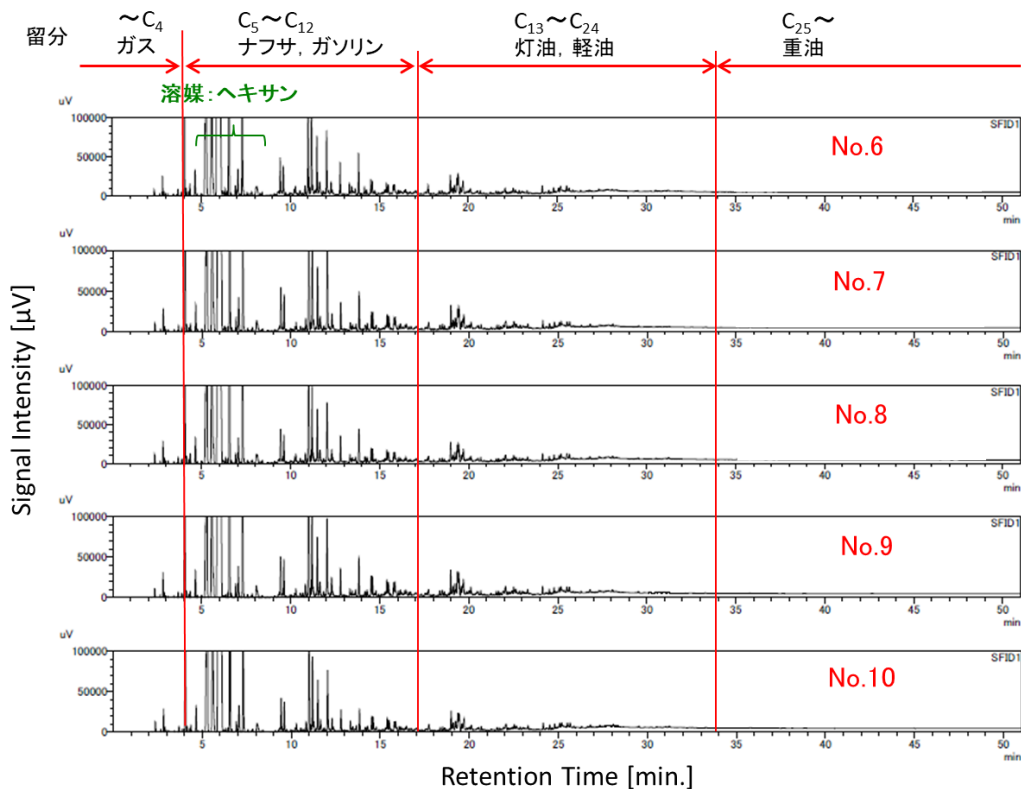
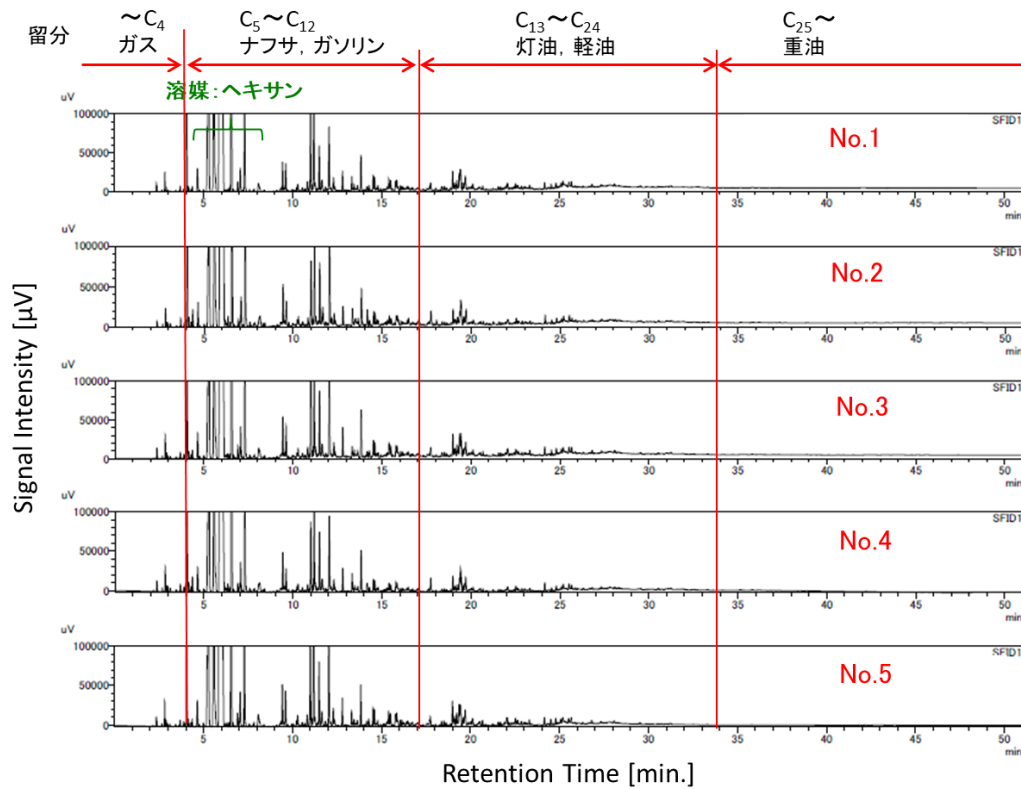
※各実験結果は、触媒の初期活性時である。

触媒が通常活性時、生成油収率が向上する傾向がある。



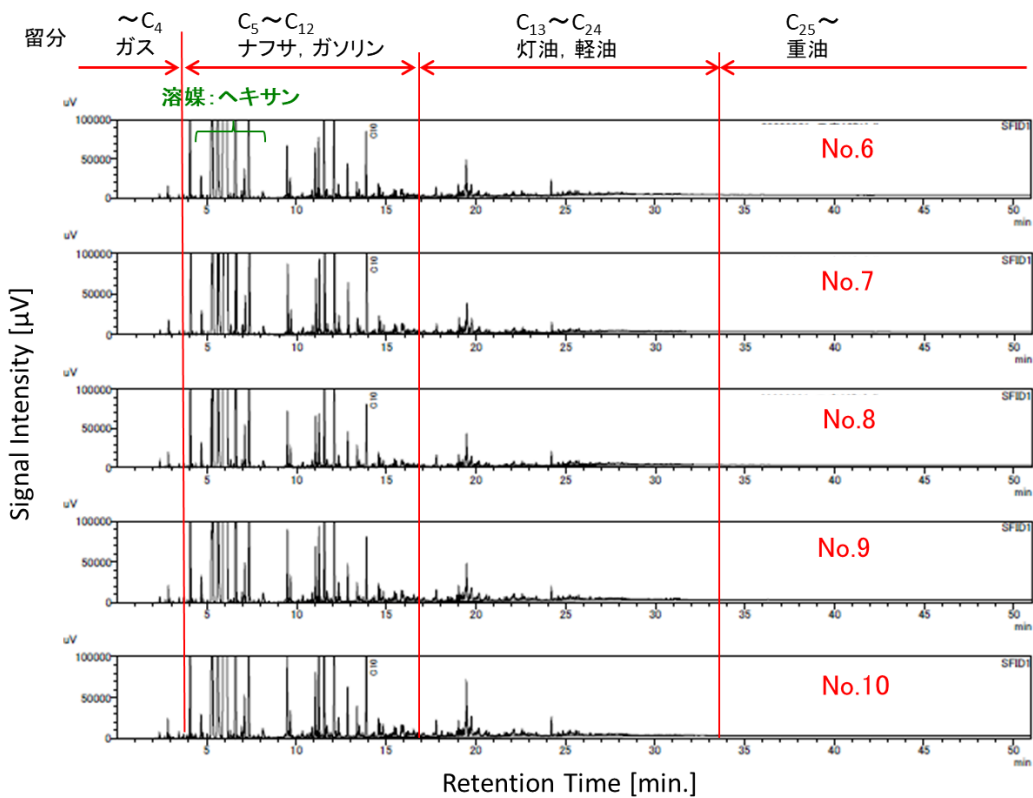
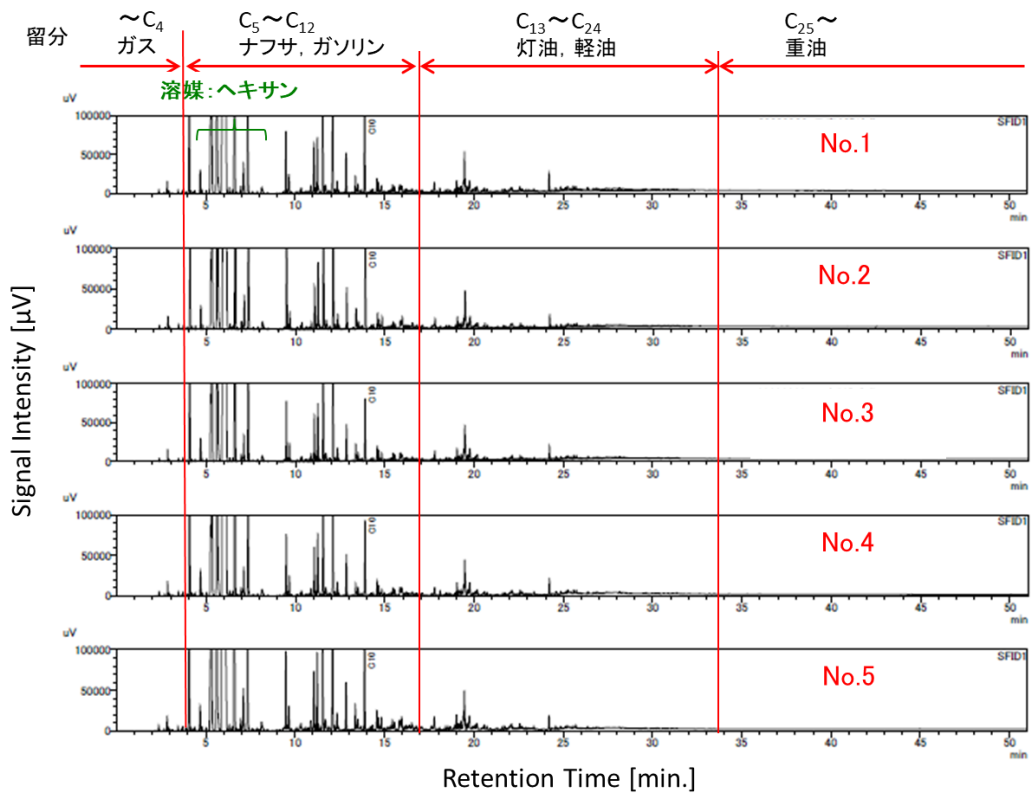
(a) 検体①:PSP 浮沈選別後、浮き

図 4 各検体の標本ごとの GC-FID クロマトグラム



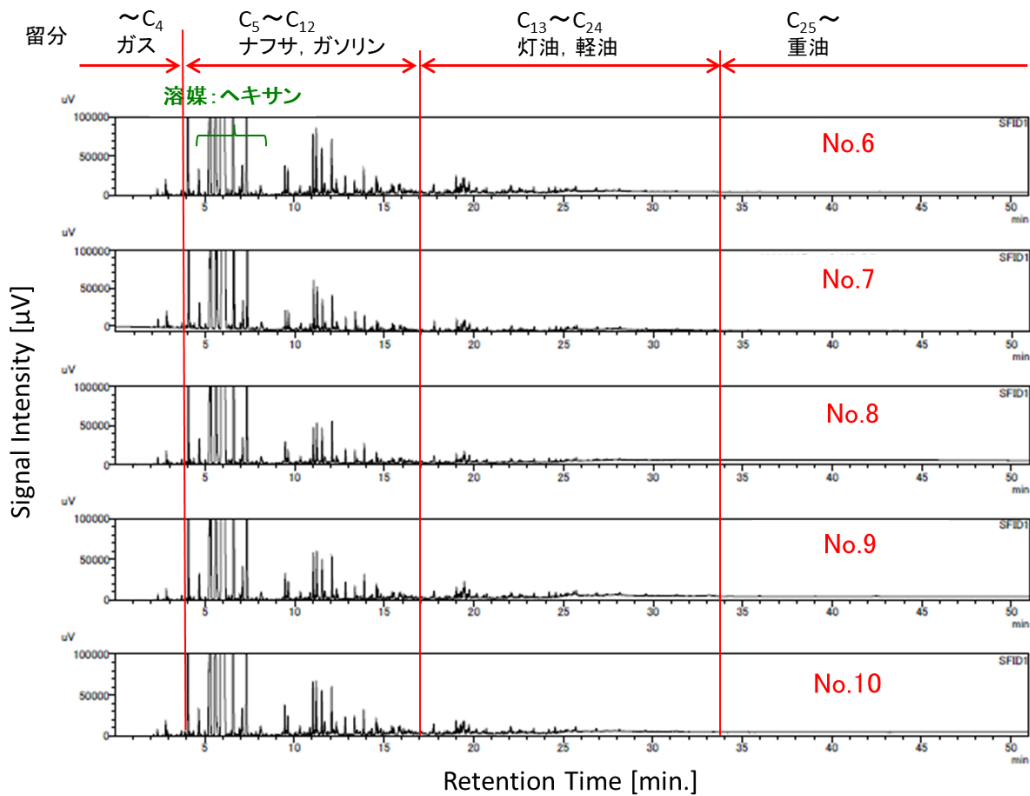
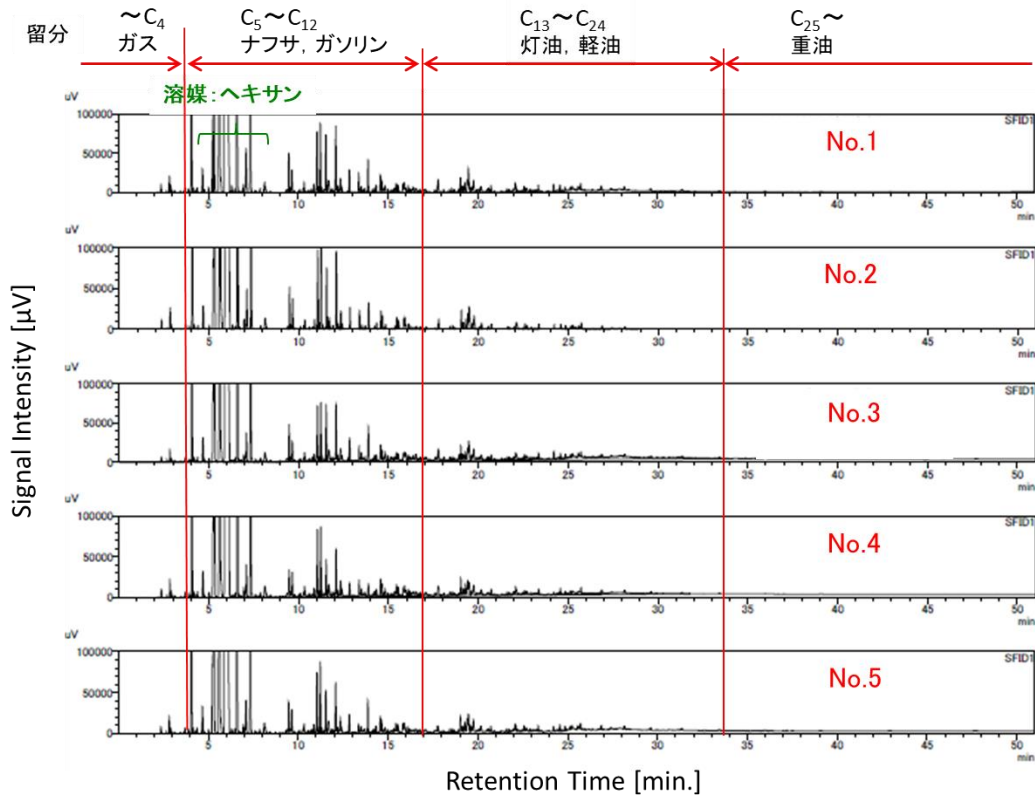
(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後

図 4(続き) 各検体の標本ごとの GC-FID クロマトグラム



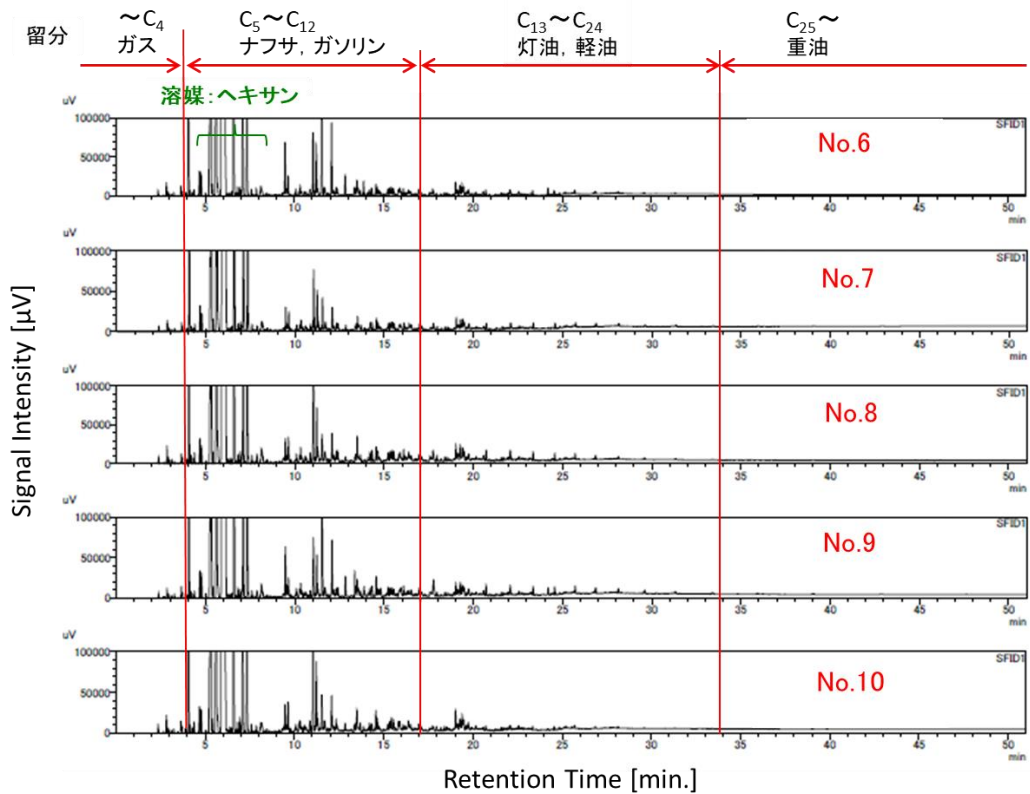
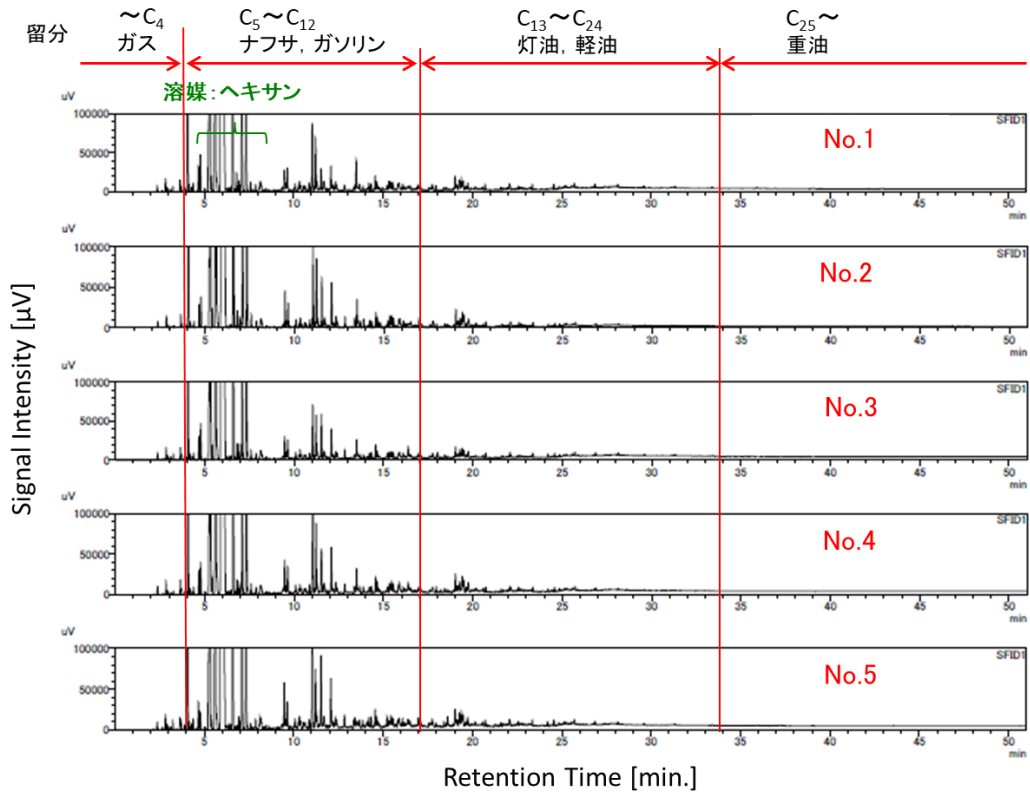
(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

図 4(続き) 各検体の標本ごとの GC-FID クロマトグラム



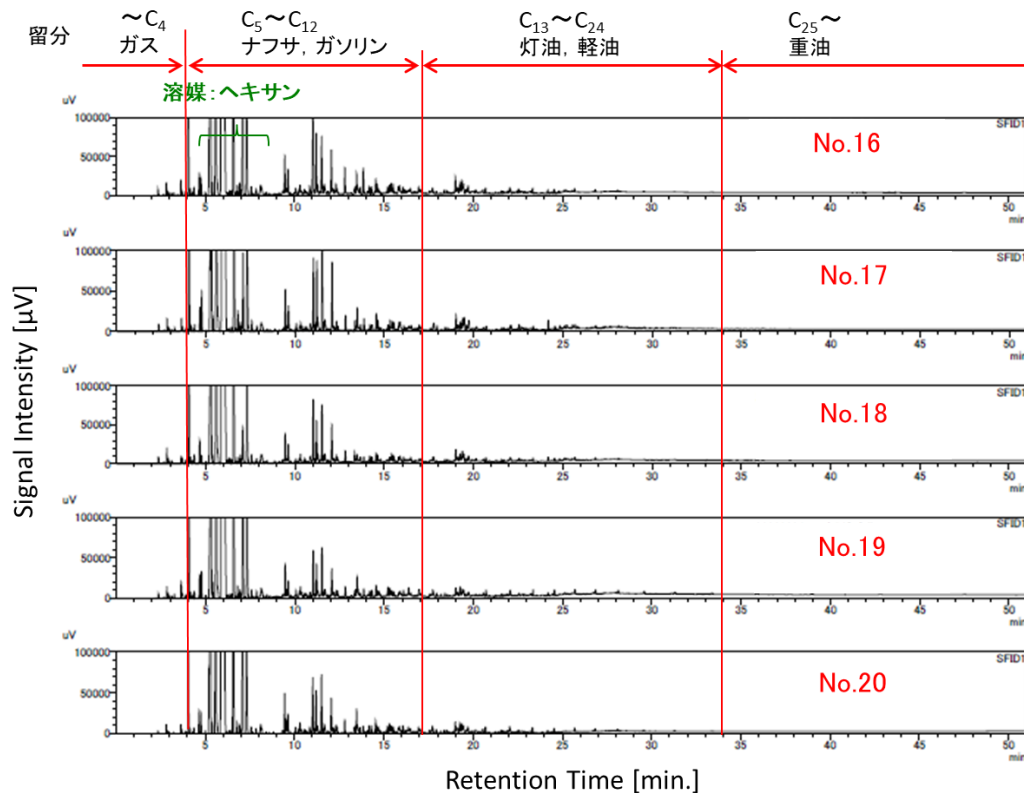
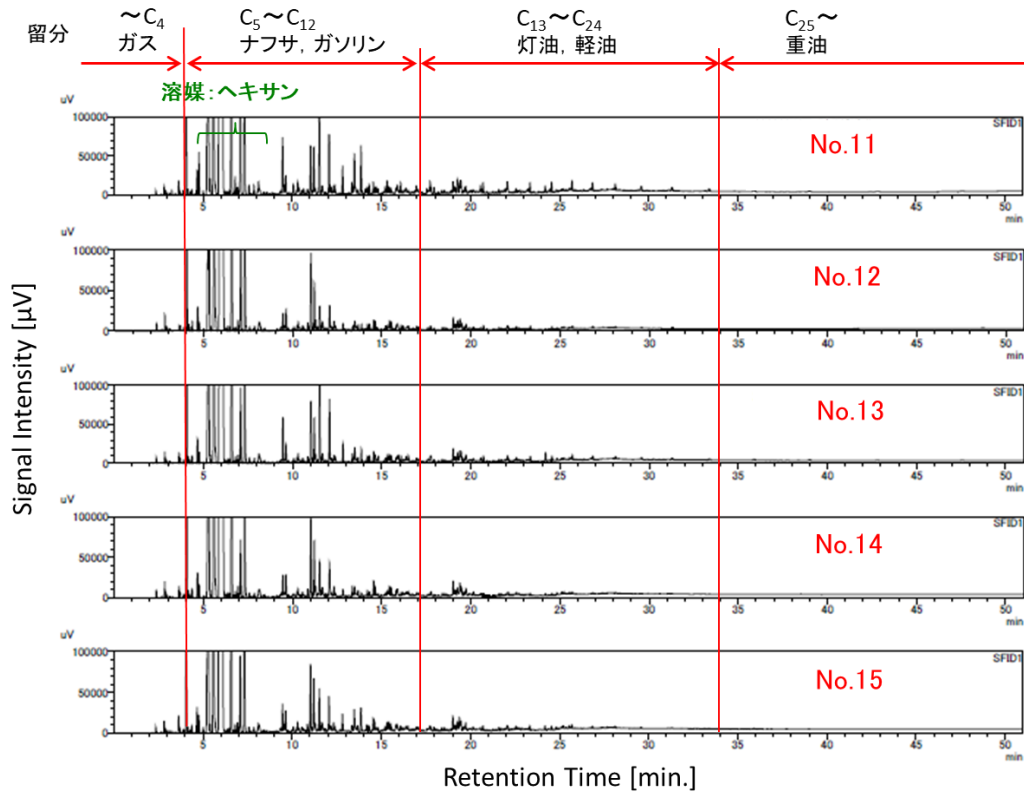
(d) 検体④:PSP 浮沈選別後、浮き

図 4(続き) 各検体の標本ごとの GC-FID クロマトグラム



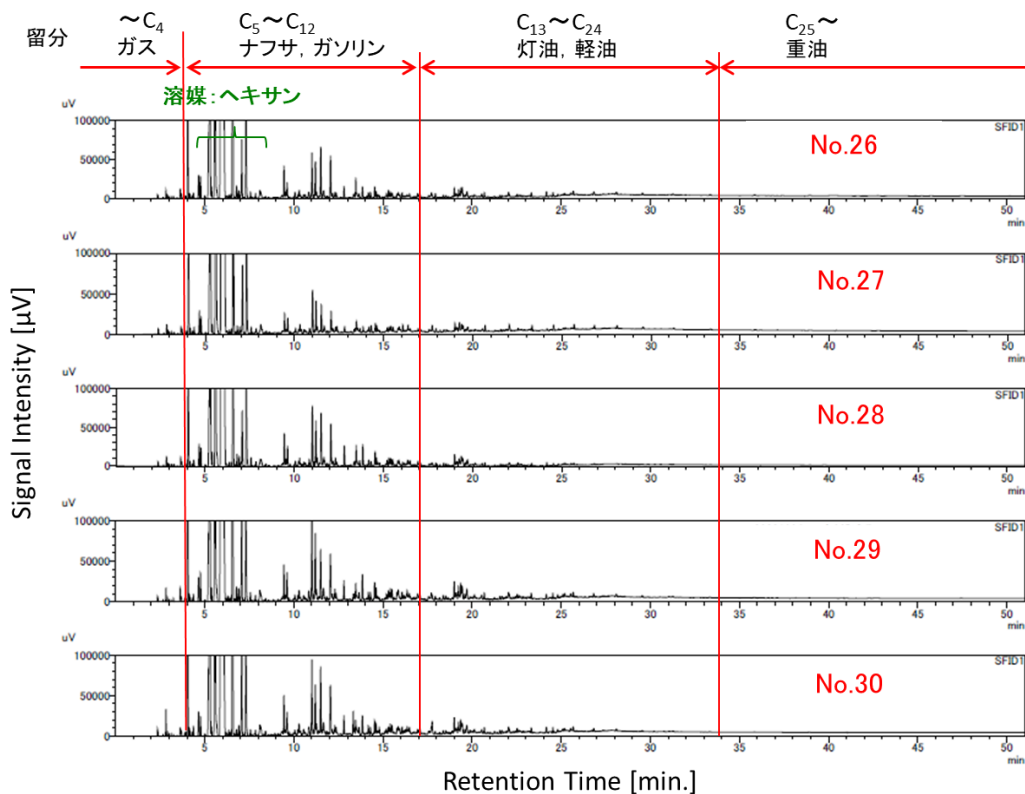
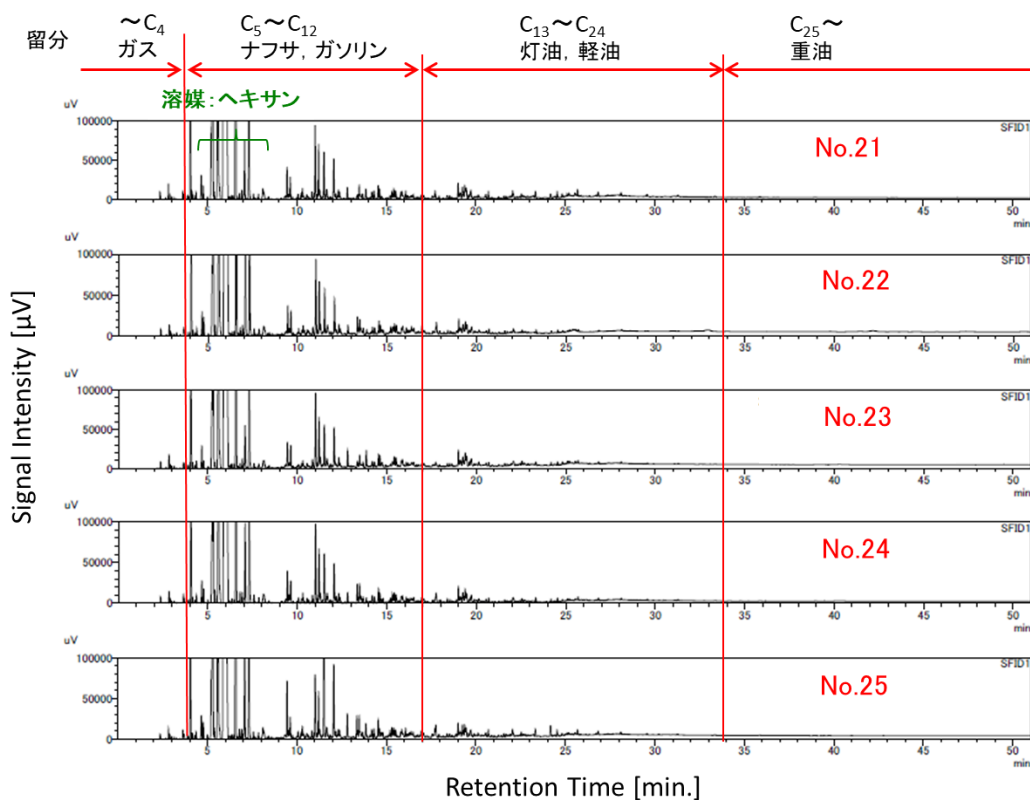
(e) 検体⑤: PPP 選別、ウレタン

図 4(続き) 各検体の標本ごとの GC-FID クロマトグラム



(e)(続き) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン

図 4(続き) 各検体の標本ごとの GC-FID クロマトグラム



(e)(続き) 検体⑤: PPP 選別、ウレタン

図 4(続き) 各検体の標本ごとの GC-FID クロマトグラム

表 7 に元素分析用、水素化処理用に必要な油を採油するために各検体の標本ごと（検体①から検体④は 10 標本、検体⑤は 30 標本）に採油した油の混合油のマテリアルバランス、比重のまとめを記し、表 8 に混合油の留分のまとめを記す。

表 7 各検体の標本ごとに採油した油の混合油のマテリアルバランス、比重のまとめ

	検体①	検体②	検体③	検体④	検体⑤
生成油収率 [%]	83.2	67.2	55.0	57.4	51.6
残渣率 [%]	6.6	23.1	37.0	34.5	36.1
オフガス量率 [%]	10.3	9.7	8.0	8.1	12.3
比重 [-]	0.744	0.795	0.816	0.801	0.808

※各実験結果は、触媒の初期活性時である。

触媒が通常活性時、生成油収率が向上する傾向がある。

表 8 各検体の標本ごとに採油した油の混合油の留分のまとめ

炭素数	留分 [wt %]	検体①	検体②	検体③	検体④	検体⑤
~C ₄	ガス	3.3	0.8	0.7	1.0	0.7
C ₅ ~C ₁₂	ナフサ, ガソリン	82.1	62.1	65.8	60.1	68.1
C ₁₃ ~C ₂₄	灯油, 軽油	14.6	37.1	33.5	38.9	31.2
C ₂₅ ~	重油	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※各実験結果は、触媒の初期活性時である。

触媒が通常活性時、低沸点（ナフサ、ガソリン）留分割合が減少する傾向がある。

表 7、表 8 より、検体①；PSP 浮沈選別後、浮きの組成は PP 主体（組成割合が 90 %以上）であるため、生成油収率は高く、80 %を超えており、残渣率は低く、6 %程度である。また、低沸点留分；ナフサ、ガソリンの割合は 80 %を超えており、油の収量、油の品質ともに優れている。PP の組成割合が低くなり（40 %）、PE、PS、PMMA の組成割合が合わせて 60 %になる検体②；PSP 浮沈選別前、破碎後の生成油収率は、検体①と比較して 20 %程度低くなり、60 %強であり、低沸点留分；ナフサ、ガソリンの割合は約 20 %低くなり、60 %台である。熱硬化性樹脂、PVC が含まれる検体③；PSP 浮沈選別後、沈み、検体④；PPP 選別、ゴム系の生成油収率は 50 %台、残渣率は 30 %台であり、低沸点留分；ナフサ、ガソリンの割合は 60 %台である。検体⑤；PPP 選別、ウレタンは、PVC、タルクの組成割合が合わせて約 50 %であり、生成油収率がかなり低くなり、残渣率がかなり高くなること予想されたが、生成油収率は検体③、検体④並の 50 %台であり、残渣率は 30 %台であり、生成油

収率は、予想よりも高く、残渣率は低くなっている。

これは、検体⑤の組成がウレタン（発泡性）、PVC 等、タルクとなっているが、検体を手選別した際、プラ、ゴムが約 40%含まれていたことから、これらの素材が油化されたことにより、生成油収率が予想よりも高くなったものと思われる。また、残渣率が予想よりも低くなったのは、残渣量が多くなるウレタン、繊維（布）の素材割合が合わせて 40%弱であり、素材に占める割合が比較的低いためと思われる。

さらに、検体②から検体⑤の低沸点留分；ナフサ、ガソリンの割合は、概ね 60%台前半から後半であり、微視的に見ると、これらの検体のうち、検体④の低沸点留分；ナフサ、ガソリンの割合が最も低くなっている（約 60%）。

これは、第 1 章で述べたとおり、検体④の素材にゴムが 40%弱（36.8%）占めており、油化時、他の検体に比べて高沸点留分が多い油になったため、低沸点留分の割合が若干、低くなったものと考えられる。

表 9 に元素分析用、水素化処理用に必要な油を採油するために各検体の標本ごと（検体①から検体④は 10 標本、検体⑤は 30 標本）に採油した油の混合油の元素分析結果の一部を記す。

表 9 より、有機塩素濃度についてみると、検体①は 1 ppm 未満であり、未検出に等しい値である。検体②から検体⑤は、100 ppm 台から 200 ppm 台であり、廃プラ油中に含まれる有機塩素濃度の目標値よりも高く、脱塩処理が必要である。

窒素分（濃度）についてみると、検体①の濃度はその他の検体と比較してかなり低いが、検体②から検体⑤は、検体①よりも桁違いに高く、脱窒処理が必要である。窒素分（濃度）が高くなる組成は、検体②、検体③は不明であるが、検体④中のゴム、検体⑤中のウレタン、ゴムである。

酸素量についてみると、検体①は 0.1%未満（分析装置の感度：日本海事検定協会より）であり、検体②から検体⑤は、1%前後であり、高くなっている。

表 10 各検体の標本ごとに採油した油の混合油の元素分析結果（一部）

元素	単位	検体①	検体②	検体③	検体④	検体⑤
有機塩素	mass ppm	1未満	240	230	250	140
無機塩素	mass ppm	1未満	1未満	1未満	1未満	1未満
窒素分	mass ppm	70 ppm	5,600	13,000	8,700	12,000
酸素量	mass %	0.1未満	0.7	1.3	1.2	2.4
硫黄分	mass ppm	9	250	400	738	241
臭素	mass ppm	10未満	10未満	10未満	10未満	10

硫黄濃度についてみると、検体①は 9 ppm であり、濃度ではなく低いが、検体①の組成において、硫黄分が検出される成分はない。これは、ASR 破碎工程において選別した際、ゴム系の素材がわずかに混入したことが考えられる。検体②から検体⑤は、200 ppm 台から 700 ppm 台であり、高濃度で

ある。硫黄濃度が高くなる組成は、検体③中の熱硬化性樹脂；エポキシ樹脂に含まれる添加剤の可能性、検体④中のゴムである。また、検体⑤の硫黄濃度が 200 ppm 台であり、高くなっている理由は、先述のとおり、手選別した際、プラ、ゴムが約 40 %含まれていたことから、当該素材により、硫黄濃度が高くなったものと思われる。

ハロゲン元素の一つである臭素についてみると、検体⑤は 10 ppm であり、低い濃度である。また、他の検体①から検体④は、10 ppm 未満（分析装置の感度、検出限界）であり、ほとんど検出されない分析結果である。

4. まとめ

提供されたフレコン袋内から採取した検体の素材の偏りの懸念、油化時、標本の個体差がマテリアルバランス、生成油のガスクロマトグラム、留分割合および生成油に含まれる主要元素の濃度に及ぼす影響を調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) 各検体とも、3 標本のマテリアルバランス、比重は、ほぼ同じであり、標本（サンプリング）による個体差はほとんど見られない。
- (2) 検体②において、ナフサ、ガソリン留分、灯油、軽油の留分割合に最大約 10 %の標本による個体差が見られるが、それ以外の検体①、検体③から検体⑤は、標本による各留分の個体差は、ほとんど見られない。
- (3) 生成油の元素分析値は、標本により大きな個体差が見られる検体があるものの、各検体とも、3 標本のうち、2 標本の各元素濃度は、当該検体の各元素濃度として把握できるため、標本による元素濃度の個体差は問題ないと判断する。
- (4) 検体①から検体⑤のマテリアルバランス、比重、GC-FID クロマトグラムについて、標本による個体差の影響を調べた結果、以下のとおりとなった。
 - (a) 検体⑤の各標本（30 標本）のマテリアルバランス、比重は、外れ値がないものの、検体①から検体④に比べ、標本による違いが見られる標本がある。検体①から検体④の各標本のマテリアルバランス、比重は、外れ値はなく、平均値前後の値になっている。
 - (b) 検体①から検体⑤の GC-FID クロマトグラムは、標本による違いは見られない。
 - (c) 総合的に判断し、各検体において各標本の生成油を混合しても問題ない。
- (5) 検体①の生成油収率は高く、80 %を超えており、残渣率は低く、6 %程度であり、低沸点留分；ナフサ、ガソリンの割合は 80 %台であり、油の収量、油の品質ともに優れている。検体②の生成油収率は 60 %強であり、比較的高く、検体③から検体⑤は、50 %台である。検体②から検体⑤の低沸点留分の割合は 60 %台である。
- (6) 主な元素について、検体①の有機塩素濃度は、1 ppm 未満であり、未検出に等しい値であるが、検体②から検体⑥の有機塩素濃度は、100 ppm 台から 200 ppm 台であり、別途、脱塩処理が必要である。検体①の窒素分（濃度）は、問題視される約 300 ppm よりも低くなっているが、その他の検体②から検体⑤は、検体①よりも桁違いに高く、脱窒素処理が必要である。

第3章 樹脂以外の影響調査

1. 目的

自動車シュレッダーダスト ASR (Automobile Shredder Residue) の破碎工程において、各種選別装置、方法により選別された検体を油化した時のマテリアルバランス、生成油のガスクロマトグラム分析、留分割合を調べた。本章は、樹脂と樹脂以外の素材を油化すること、残渣の状態を確認することを目的とし、素材ごとに選別した検体を油化した時のマテリアルバランス、生成油のガスクロマトグラム分析、留分割合を調べた結果について述べる。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

図1に油化実験装置の外観を示し、図2に同概略を示す。実験装置は、前章で述べた油化装置と同様である。油化は、検体を反応器内に規定量入れるバッチ方式を採用した。図1、図2より、触媒、熱媒体、検体を反応器に入れ、マントルヒータで加熱した。反応器の内部温度は、マントルヒータと反応器の間に入れた熱電対温度計により計測する外部温度により、温度制御装置で過昇温しないように制御し、反応器の内部温度が10分間に数℃上昇するように緩やかに昇温した。検体が熔融し、攪拌容量リモータで連続攪拌ができるようになるまで、攪拌翼を手回しにより反応器内の触媒、熱媒体、検体を攪拌させた。連続攪拌時、攪拌翼の回転数は、約100 rpmで一定とした。反応器内の検体が熔融し、発生したガスは還流塔部を上昇し、冷却管に流入する。冷却管は、10℃の冷水を流しており、

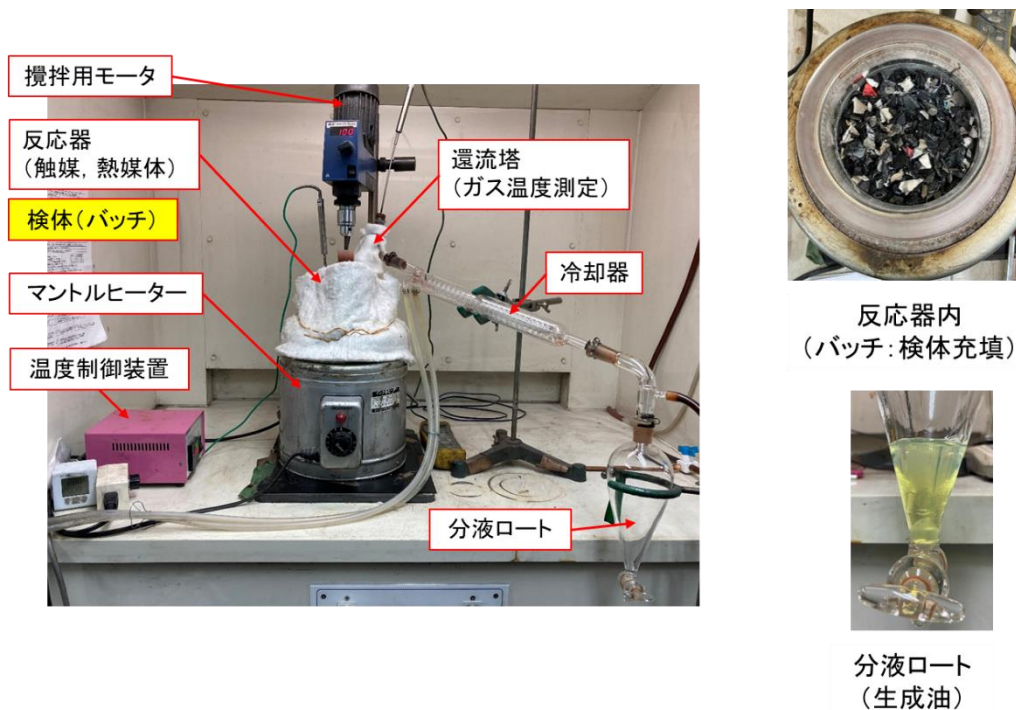


図1 実験装置外観

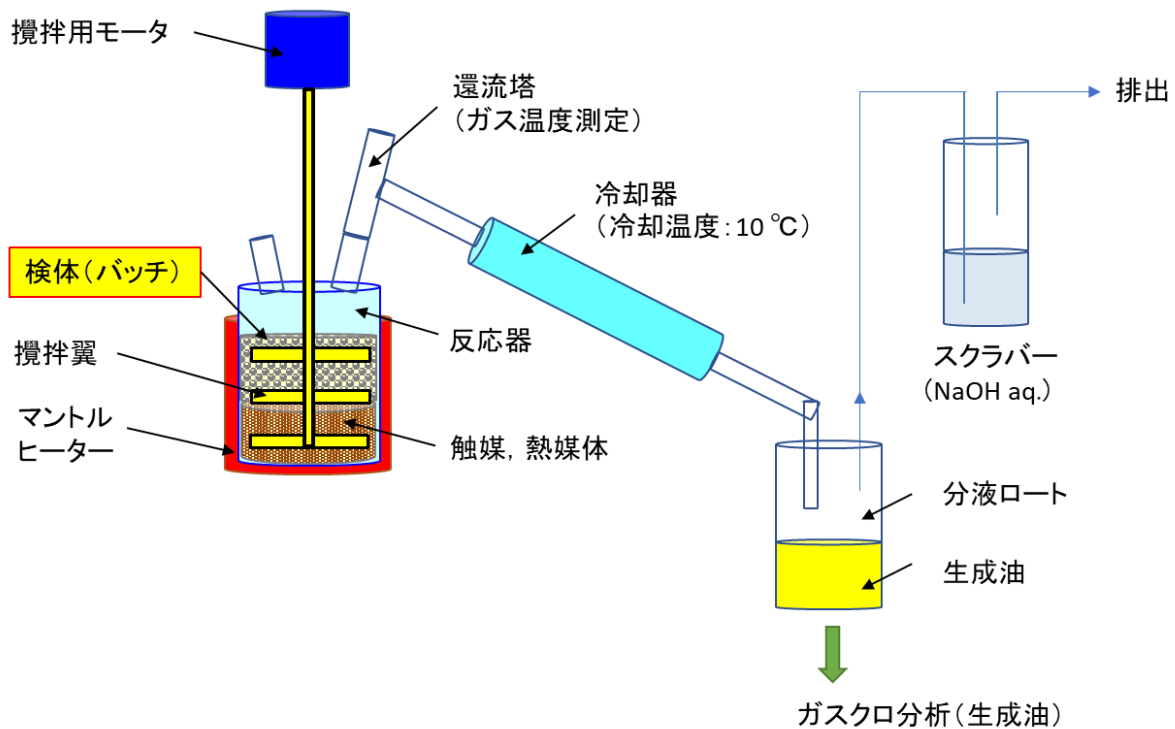


図 2 実験装置概略

検体から発生したガスが冷却管で冷却され、凝縮し、油が分液ロートに溜まり、10分毎に採油した。オフガスは、冷却管と分液ロートの間の分岐管に接続されたビニールホースから検知管を用いて測定した。約 100 rpm で一定とした。反応器内の検体が熔融し、発生したガスは還流塔部を上昇し、冷却管に流入する。冷却管は、10 °C の冷水を流しており、検体から発生したガスが冷却管で冷却され、凝縮し、油が分液ロートに溜まり、10分毎に採油した。オフガスは、冷却管と分液ロートの間の分岐管に接続されたビニールホースから検知管を用いて測定した。

2.2 マテリアルバランス;物質収支の定義

検体を油化した際、検体投入量に対する生成油量、油化後の残渣量、排出されるオフガス量の割合を知ることが重要であり、次に記す算出式により算出（オフガス量率は推計）した。

なお、生成油収率（液収率）は、後述する生成油の留分；ナフサ、ガソリン（炭素数：C₅～C₁₂）、灯油、軽油（炭素数：C₁₃～C₂₄）、重油（炭素数：C₂₅～）のように、液体；油を全て合わせた油の収率であり、この生成油収率の高さで評価することが重要である。

$$(1) \text{生成油収率} = (\text{生成油量} / \text{検体投入量}) \times 100$$

$$(2) \text{残渣率} = (\text{反応器内残渣量} ; \text{触媒等を除く} / \text{検体投入量}) \times 100$$

$$(3) \text{オフガス量率(推計)} = 100 - (\text{生成油収率} + \text{残渣率})$$

2.3 生成油収率割合の定義

本章は、素材ごとに選別した検体の生成油収率、残渣率等を調べるため、2.2で定義した生成油収率、残渣率に追加し、次に記す算出式により、選別後の各組成の生成油収率、同残渣率に素材割合を乗じた生成油収率割合、残渣率割合を算出し、評価した。

$$(1) \text{生成油収率割合} = \text{選別後の各組成の生成油収率} \times \text{素材割合}$$

$$(2) \text{残渣率割合} = \text{選別後の各組成の残渣率} \times \text{素材割合}$$

$$\text{素材割合} = (\text{選別後の各組成の質量} / \text{試料選別前の質量}) \times 100$$

3. 実験結果および考察

3.1 各検体の樹脂、樹脂以外の素材のマテリアルバランス

表1に各検体の樹脂、樹脂以外の素材のマテリアルバランス；生成油収率、残渣率、オフガス量率を記す。表1(a)は検体①：PSP浮沈選別後、浮き、(b)は検体②：PSP浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③：PSP浮沈選別後、沈み、(d)は検体④：PPP選別、ゴム系、(e)は検体⑤：PPP選別、ウレタンである。

表1 各検体の樹脂、樹脂以外の素材のマテリアルバランス

(a) 検体①:PSP浮沈選別後、浮き

検体①		ミックス (硬質プラ)	* 軟質異素材 (ゴム系)	* 中間 (湿りプラ)	その他 (ふるい選別)
生成油外観					
素材割合	[wt %]	92.0	2.1	1.5	4.4
生成油収率割合	79.6 %	73.3, 73.5	1.6	1.2	3.4, 3.4
括弧内: 平均値		(73.4)			(3.4)
残渣率割合	6.1 %	5.2, 5.3	0.3	0.2	0.3, 0.3
括弧内: 平均値		(5.25)			(0.3)
オフガス量率割合	14.3 %	—	—	—	—
①生成油収率	[wt %]	79.7, 79.9	74.5	79.9	77.6, 77.3
②残渣率	[wt %]	5.7, 5.8	13.0	8.1	7.1, 7.0
③オフガス量率 (推計)	[wt %]	14.6, 14.3	12.4	12.0	15.3, 15.7
④比重	[-]	0.740, 0.735	0.790	0.755	0.740, 0.740

* 分別量により、1回分の実験






※各実験結果は、触媒の初期活性時である。

触媒が通常活性時、生成油収率が向上する傾向がある。

以下、同様


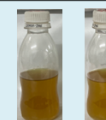



表 1(続き) 各検体の樹脂、樹脂以外の素材のマテリアルバランス

(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後

検体②		ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (ゴム系)	繊維 (柔らかい)	* 配線, 金属 ②, ③共用	その他 (ふるい選別)
生成油外観						
素材割合	[wt %]	72.3	12.7	3.6	1.0	10.9
生成油収率割合 括弧内: 平均値	68.5 %	52.9, 53.1 (53.0)	7.0, 6.7 (6.9)	1.7, 1.8 (1.75)	0.1	6.5, 6.8 (6.7)
残渣率割合 括弧内: 平均値	20.95 %	12.4, 11.4 (11.9)	4.3, 4.6 (4.5)	0.5, 0.4 (0.45)	0.8	3.4, 3.2 (3.3)
オフガス量率割合 10.5 %		—	—	—	—	—
①生成油収率	[wt %]	73.2, 73.5	55.4, 52.4	48.6, 49.2	10.5	59.9, 62.5
②残渣率	[wt %]	17.2, 15.8	33.5, 36.0	37.4, 38.6	80.5	31.0, 29.2
③オフガス量率 (推計)	[wt %]	9.6, 10.7	11.1, 11.6	14.0, 12.2	9.0	9.1, 8.3
④比重	[-]	0.795, 0.795	0.810, 0.795	0.800, 0.810	(0.737)	0.790, 0.795

各検体: 各150 g * 検体②50 g, 検体③100 gを合算





(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

検体③		ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (スポンジ, ゴム系)	繊維 (柔らかい)	* 配線, 金属 ②, ③共用	その他 (ふるい選別)
生成油外観						
素材割合	[wt %]	66.1	16.9	4.7	1.0	11.0
生成油収率割合 括弧内: 平均値	52.0 %	37.2, 37.4 (37.3)	7.0, 7.2 (7.1)	2.1, 2.1 (2.1)	0.11	5.5, 5.3 (5.4)
残渣率割合 括弧内: 平均値	36.6 %	22.6, 21.0 (21.8)	8.1, 8.1 (8.1)	2.2, 2.2 (2.2)	0.08	4.2, 4.6 (4.4)
オフガス量率割合 11.4 %		—	—	—	—	—
①生成油収率	[wt %]	56.3, 56.6	41.5, 42.8	44.3, 44.8	10.5	49.7, 48.6
②残渣率	[wt %]	34.2, 31.8	47.8, 47.9	46.5, 46.3	80.5	37.9, 41.9
③オフガス量率 (推計)	[wt %]	9.5, 11.6	10.7, 9.3	9.2, 8.9	9.0	12.4, 9.5
④比重	[-]	0.815, 0.820	0.815, 0.810	0.810, 0.810	(0.737)	0.815, 0.820

各検体: 各150 g
* 検体②50 g, 検体③100 gを合算








表 1(続き) 各検体の樹脂、樹脂以外の素材のマテリアルバランス

(d) 検体④:PSP 浮沈選別後、浮き

検体④		ミックス (硬質プラ)	ゴム	* 異素材 (木片, ガラス, 繊維)	* 配線, 金属
生成油外観					
素材割合	[wt %]	59.1	36.8	1.7	2.4
生成油収率割合 括弧内: 平均値	52.1 %	35.3, 34.7 (35.0)	15.2, 17.0 (16.1)	0.7	0.3
残渣率割合 括弧内: 平均値	38.1 %	15.3, 18.1 (16.7)	18.8, 18.3 (18.6)	0.9	1.9
オフガス量率割合	9.8 %	—	—	—	—
①生成油収率	[wt %]	59.7, 58.7	41.2, 46.3	39.2	11.5
②残渣率	[wt %]	25.9, 30.7	51.2, 49.6	51.9	78.1
③オフガス量率 (推計)	[wt %]	14.4, 10.6	7.6, 4.1	8.9	10.4
④比重	[-]	0.820, 0.805	0.825, 0.825	0.805	計測機器 入荷後, 測定

* 分別量により, 1回分の実験

(e) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン

検体⑤		ウレタン (スポンジ)	繊維 (柔らかい)	繊維 (布)	プラ, ゴム	* 異素材 (木片, 紙)	** 配線, 金属	その他 (ふるい選別)
生成油外観								
素割	[wt %]	21.4	15.3	11.5	41.0	3.2	3.5	4.1
収割 括弧内平均値	50.6 %	9.1, 8.7 (8.9)	5.8, 5.2 (5.5)	4.2, 4.2 (4.2)	30.7, 29.2 (30)	0.89, 0.9 (0.9)	0.36	0.8, 0.66 (0.73)
残割 括弧内平均値	37.4 %	8.9, 9.8 (9.4)	7.5, 8.3 (7.9)	5.6, 6.5 (6.1)	6.1, 6.6 (6.4)	1.6, 1.7 (1.65)	2.86	3.0, 3.2 (3.1)
ガ割	12.0 %	—	—	—	—	—	—	—
①収	[wt %]	42.3, 40.7	38.1, 34.0	36.4, 36.1	74.9, 71.3	27.9, 28.8	10.4	19.8, 16.2
②残	[wt %]	41.7, 45.6	49.3, 54.3	49.1, 51.0	14.9, 16.0	51.5, 52.5	81.7	73.7, 77.8
③ガ	[wt %]	16.0, 13.7	12.6, 11.7	14.5, 12.9	10.2, 12.7	20.6, 18.7	7.9	6.5, 6.0
④比	[-]	0.910, 0.905	0.87, (0.843)	0.870, 0.835	0.780, 0.775	計測機器 入荷後, 測定	同	同

各検体: 各150 g

表1より、検体①は、ミックス（硬質プラ）が大半を占めており、素材割合が約90%である。ミックスプラ（硬質プラ）の素材割合を考慮した生成油収率割合は70%台であり高く、残渣率割合は5%程度であり、低くなっている。検体①の素材全体の生成油収率割合は約80%であり高く、同残渣率割合は6%程度でありかなり低くなっている。

検体②は、検体①と同様、ミックス（硬質プラ）が占める割合が最も高く、素材割合が約70%台である。ミックス（硬質プラ）の生成油収率割合は50%台であり、残渣率割合は10%程度である。その他の素材の生成油収率割合は低く、数%程度であり、残渣率割合も低く、数%である。検体②の素材全体の生成油収率割合は70%弱であり高く、同残渣率割合は20%台であり、検体①よりも高くなっている。

検体③は、検体①、検体②と同様、ミックス（硬質プラ）が占める割合が最も高く、素材割合が70%弱である。ミックス（硬質プラ）の生成油収率割合は30%強であり、検体②と比較して、ミックス（硬質プラ）が占める割合は、検体②の約70%台と大きな違いはないが、生成油収率割合は検体③の方が検体②よりも低くなっている。

ミックス（硬質プラ）の残渣率割合は20%台であり、検体①、検体②よりも高くなっている。検体③の素材全体の生成油収率割合は50%台であり、同残渣率割合は30%強であり、検体②よりも高くなっている。

検体④は、検体①から検体③と同様、ミックス（硬質プラ）が占める割合が最も高く、素材割合が約60%であり、ゴムの素材割合も高く、30%強である。生成油収率割合は、ミックス（硬質プラ）が30%台、ゴムが10%強、これら以外の素材；異素材、配線、金属が1%未満である。検体④の素材全体の生成油収率割合は約50%であり、検体③とほぼ同じである。

残渣率割合は、ミックス（硬質プラ）、ゴム共に10%強であり、これら以外の素材；異素材、配線、金属が1%前後であり、ミックス（硬質プラ）の残渣率割合は、検体③（20%台）よりも若干、低くなっている。

検体⑤は、入手した検体の組成割合より、ウレタン（発泡性）の組成割合が54%、タルクが30%、PVC等が16%となっていたが、各検体を素材ごとに手選別した結果、スポンジ状の外観を呈し、明確にウレタンと判断できる素材の割合が約20%であり、入手した組成割合になかったプラ、ゴムの素材の割合が約40%もあった。

検体⑤を手選別した素材割合が最も多かった素材；プラ、ゴムの生成油収率割合は約30%であり、次いで素材割合が多かった素材；ウレタン（スポンジ）が10%弱であり、これら以外の素材；繊維（柔らかい素材、布素材）、異素材（木片、紙）、配線、金属、その他（ふるい選別残部）が、各々、数%である。検体⑤の素材全体の生成油収率割合は約50%であり、検体③、検体④とほぼ同じである。

残渣率割合は、ウレタン（スポンジ）、繊維（柔らかい素材）が各々10%弱、これら以外の素材が各々数%程度であり、検体⑤の素材全体の残渣率割合は30%強である。

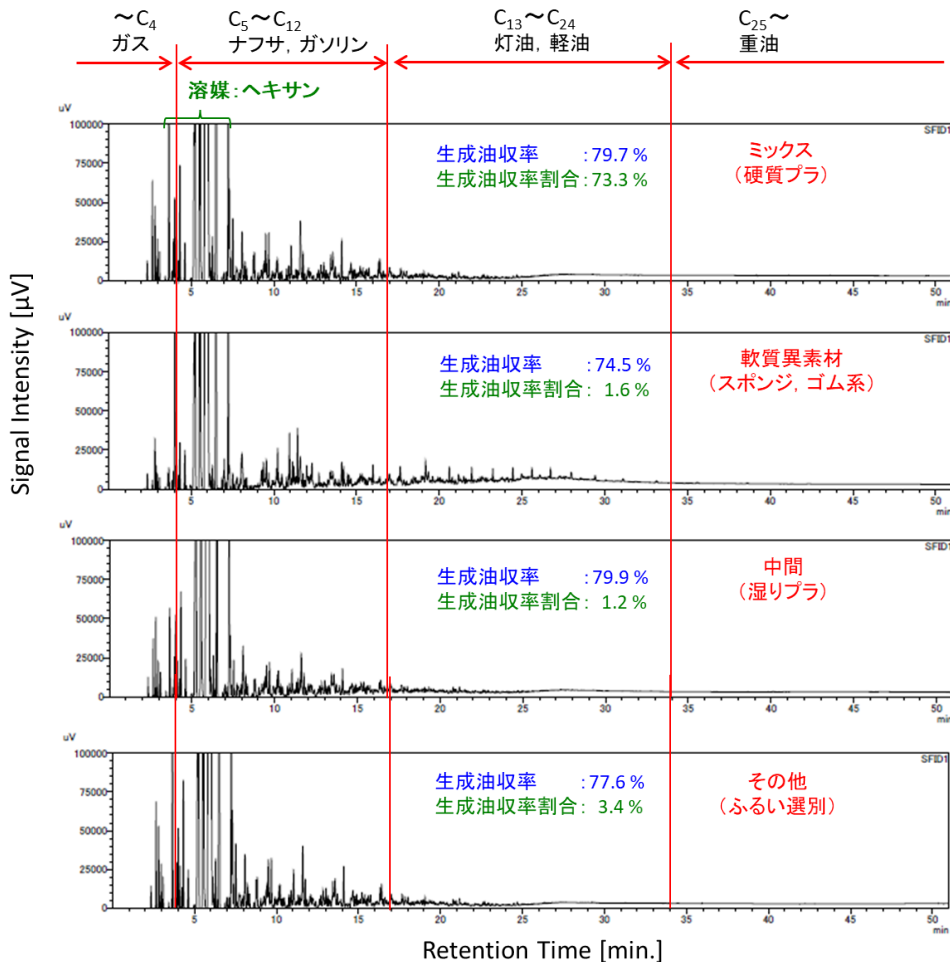
これらの結果より、検体⑤以外、各検体に共通する素材であるミックス（硬質プラ）の素材割合は、検体①が最も高く、90%台であり、浮沈選別、浮き材、沈み材により、検体②の70%台、検体③の70%弱、検体④の約60%のように、ミックス（硬質プラ）の素材割合は低くなっている。検体①のミックス（硬質プラ）の生成油収率割合は70%台であり高く、検体②は50%台、検体③は30%強、検体④は30%台のように、ミックス（硬質プラ）の生成油収率割合は低くなっていく。

また、残渣率割合は、検体①が最も低く、6%程度であり、検体②の10%程度、検体③の20%台、

検体④の 10 %強であり、浮沈選別、浮き材、沈み材により、残渣率割合は若干、高くなる程度である。
 素材全体の生成油収率割合は、検体①の約 80 %が最も高く、検体②の 70 %弱、検体③の 50 %台、
 検体④の約 50 %、検体⑤の約 50 %のように、いずれの検体においても、素材全体の生成油収率割合
 は、50 %を超える結果になっている。

図 3 に各検体の樹脂、樹脂以外の素材の GC-FID クロマトグラムを示す。図 3 (a)は検体① : PSP
 浮沈選別後、浮き、(b)は検体② : PSP 浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③ : PSP 浮沈選別後、沈み、
 (d)は検体④ : PPP 選別、ゴム系、(e)は検体⑤ : PPP 選別、ウレタンである。なお、各検体において、
 素材；その他（ふるい選別）は、当該素材以外を手選別した際、選別できなかった素材が混合してい
 るため、評価対象にしないこととする。

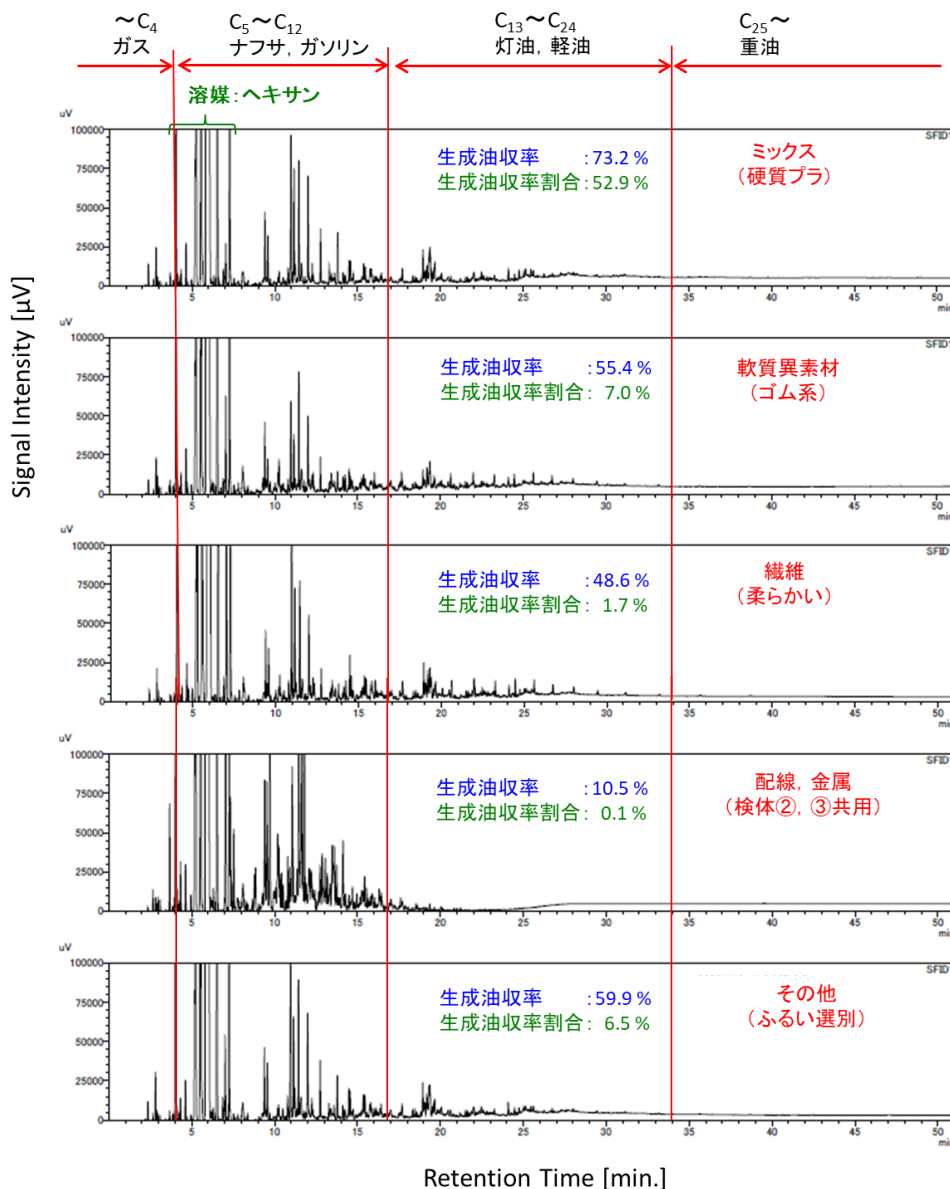
図 3 (a)より検体① : PSP 浮沈選別後、浮きの場合、ミックス（硬質プラ）と中間（湿りプラ）のピーク
 値が現れる保持時間はほとんど同じである。GC-FID クロマトグラムより、比較的、高沸点留分
 である灯油、軽油留分のピーク高さに着目すると、ミックス（硬質プラ）と中間（湿りプラ）のピーク
 高さは小さいが、軟質異素材（スポンジ、ゴム系）のピーク高さはやや高くなっている。



(a) 検体①:PSP 浮沈選別後、浮き

図 3 樹脂、樹脂以外の素材の GC-FID クロマトグラム

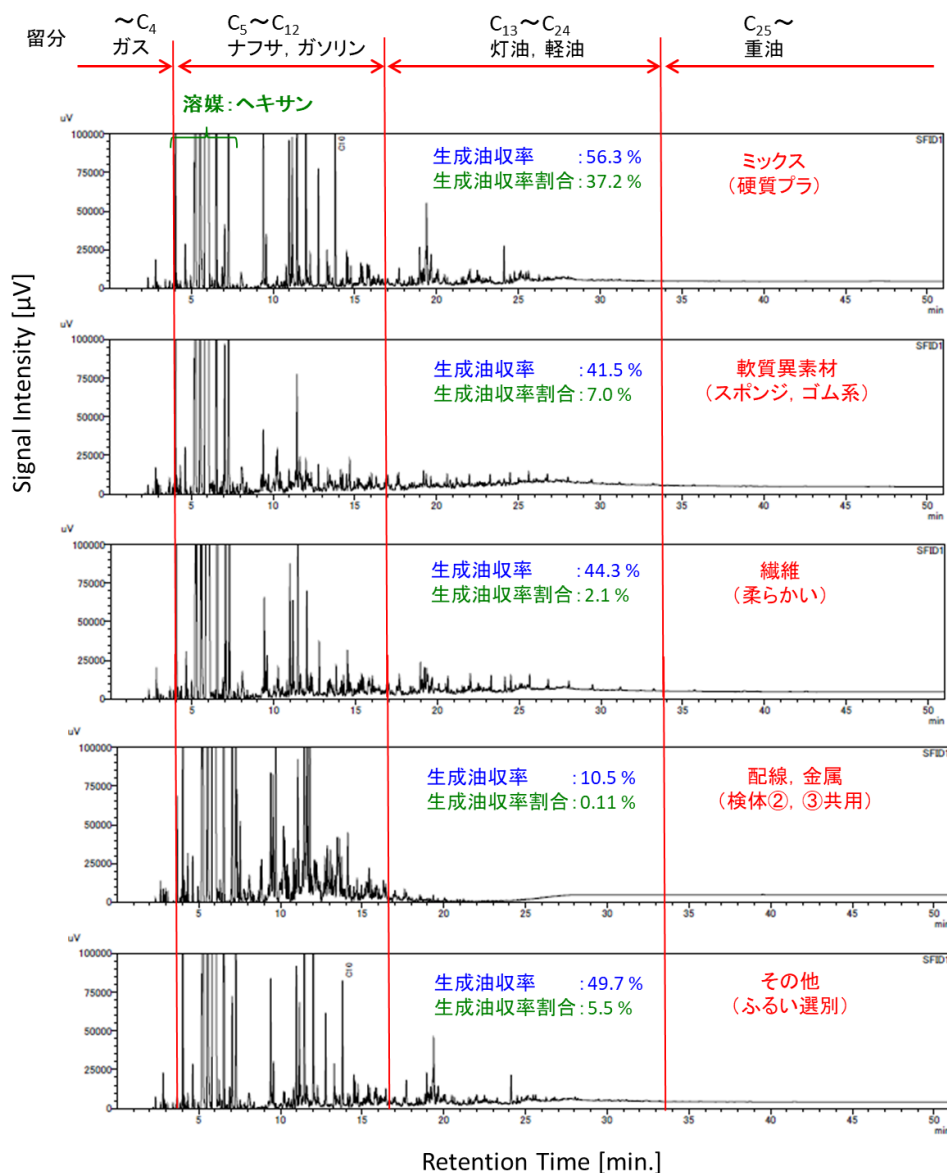
図 3 (b)より検体②：PSP 浮沈選別前、粉碎後の場合、ピーク高さの違いはあるが、配線、金属以外、ピーク値が現れる保持時間は素材によらず、ほとんど同じである。ここで、先述した検体①の場合、比較的、重質油である灯油、軽油留分のピーク高さは、ミックス（硬質プラ）と軟質異素材（スポンジ、ゴム系）において異なっていたが、検体②の場合、当該検体のピーク高さはほぼ同じになっている。検体①と検体②において、同一素材でありながら、灯油、軽油留分のピーク高さの傾向が異なる理由は、物理的にも不明である。配線、金属の場合、灯油、軽油留分のピーク値は、これ以外の素材と比較してほとんど現れておらず、低沸点留分であるナフサ、ガソリン留分のピーク高さが高くなっている。しかし、生成油収率割合が極めて低く、0.1%であり、配線、金属の素材から油がほとんど採れないことから、検体残渣である金属類の有効活用が望まれる。



(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後

図 3(続き) 樹脂、樹脂以外の素材の GC-FID クロマトグラム

図 3(c)より検体③ : PSP 浮沈選別後、沈みの場合、検体②の各素材のクロマトグラムと同様、配線、金属以外、ピーク高さの違いはあるが、ピーク値が現れる保持時間は素材によらず、ほとんど同じである。また、検体②と同一素材のクロマトグラムにおいて、ピーク値が現れる保持時間、各留分で現れるピーク高さの傾向は類似している。

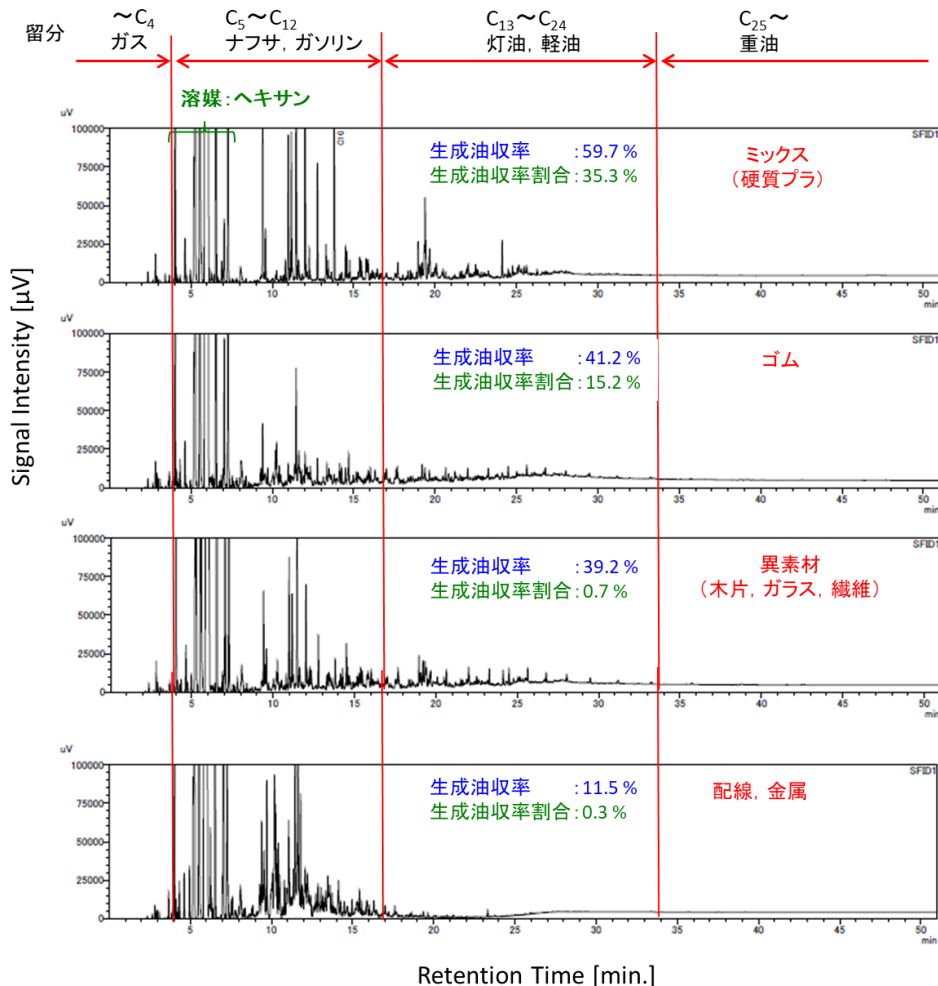


(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

図 3(続き) 樹脂、樹脂以外の素材の GC-FID クロマトグラム

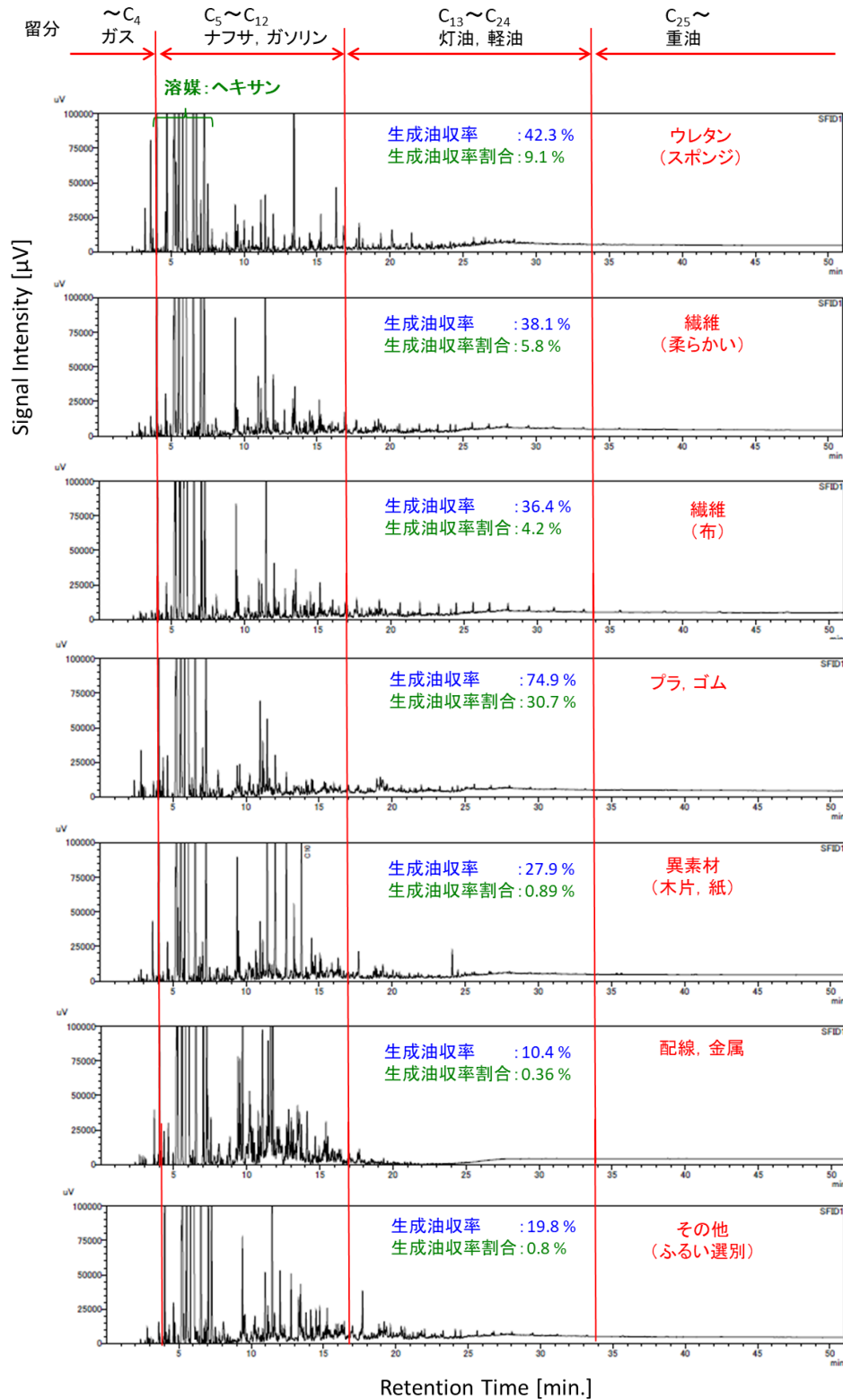
図 3(d)より検体④：PPP 選別、ゴム系の場合、検体②、検体③と同一素材；ミックス（硬質プラ）、軟質異素材（スポンジ、ゴム系、ゴム）、配線、金属のクロマトグラムにおいて、ピーク値が現れる保持時間、各留分で現れるピーク高さの傾向は類似している。

図 3(e)より検体⑤：PPP 選別、ウレタンの場合、他の検体と同一素材；繊維（柔らかい）、プラ、ゴム系、配線、金属のクロマトグラムにおいて、ピーク値が現れる保持時間、各留分で現れるピーク高さの傾向は類似している。検体⑤の素材の中で生成油収率割合が高いウレタン（スポンジ）、プラ、ゴムは、低沸点留分であるナフサ、ガソリン留分にピーク値が多くあるが、比較的、高沸点分である灯油、軽油、軽油留分にもピーク値が多く現れている。後述する生成油の留分割合、別章で述べる残渣率を踏まえ、検体⑤の結果を検討する。



(d) 検体④:PSP 浮沈選別後、浮き

図 3(続き) 樹脂, 樹脂以外の素材の GC-FID クロマトグラム



(e) 検体⑤: PPP 選別、ウレタン

図 3(続き) 樹脂, 樹脂以外の素材の GC-FID クロマトグラム

表 2 に樹脂、樹脂以外の素材が生成油の留分に及ぼす影響を記す。表 2 (a)は検体①：PSP 浮沈選別後、浮き、(b)は検体②：PSP 浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③：PSP 浮沈選別後、沈み、(d)は検体④：PPP 選別、ゴム系、(e)は検体⑤：PPP 選別、ウレタンである。なお、各検体において、素材；その他（ふるい選別）は、当該素材以外を手選別した際、選別できなかった素材が混合しているため、評価対象にしないこととする。

表 2 (a)より、検体①において、ミックス（硬質プラ）、中間（湿りプラ）の低沸点分：ナフサ、ガソリン留分の割合は、80 %前後であり、かなり高くなっている。表 1 に記したミックス（硬質プラ）の生成油収率割合は、70 %程度であり、比較的高いが、中間（湿りプラ）の生成油収率割合は、1 %程度である。中間（湿りプラ）は、低沸点分：ナフサ、ガソリン留分の割合が高いが、生成油収率割合も踏まえ、油としての用途は検討する必要がある。

また、軟質異素材（ゴム系）について、低沸点分の割合が他の素材と比較して低く、高沸点分：灯油、軽油の割合が高くなっているが、生成油収率割合は、1 %台であり、残渣率割合は、1 %未満であり、かなり低く、検体①の生成油の質、残渣にほとんど影響しないと言える。

表 2 樹脂、樹脂以外の素材が生成油の留分に及ぼす影響

(a) 検体①:PSP 浮沈選別後、浮き

炭素数	留分 [wt %]	ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (ゴム系)	中間 (湿りプラ)	その他 (ふるい選別)
~C ₄	ガス	4.5, 4.5	1.5	3.8	4.5, 4.8
C ₅ ~C ₁₂	ナフサ, ガソリン	82, 82.4	57.2	79.5	82, 80.5
C ₁₃ ~C ₂₄	灯油, 軽油	13.5, 13.1	41.3	16.7	13.5, 14.7
C ₂₅ ~	重油	0.0, 0.0	0.0	0.0	0.0, 0.0

(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後

炭素数	留分 [wt %]	ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (ゴム系)	繊維 (柔らかい)	* 配線, 金属 ②, ③共用	その他 (ふるい選別)
~C ₄	ガス	1.7, 1.2	1.3, 0.99	1.1, 1.0	0.4	1.6, 1.9
C ₅ ~C ₁₂	ナフサ, ガソリン	57.5, 58.2	60.2, 56.2	68.0, 66.6	81.6	61.9, 65.7
C ₁₃ ~C ₂₄	灯油, 軽油	40.8, 40.6	38.5, 42.8	30.9, 31.9	16 (15.98)	36.5, 32.4
C ₂₅ ~	重油	0.0, 0.0	0.0, 0.0	0.0, 0.5	2 (1.96)	0.0, 0.0

表 2 標本個体差が生成油の留分に及ぼす影響

(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

炭素数	留分 [wt %]	ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (スポンジ, ゴム系)	繊維 (柔らかい)	* 配線, 金属 ②, ③共用	その他 (ふるい選別)
~C ₄	ガス	0.9, 0.7	0.8, 0.7	0.8, 0.7	0.4	1.1, 1.2
C ₅ ~C ₁₂	ナフサ, ガソリン	66.9, 66	53.7, 58.6	65.2, 72.3	81.6	67.7, 67.5
C ₁₃ ~C ₂₄	灯油, 軽油	32.2, 33.3	45.5, 40.7	34, 27.0	16 (15.98)	31.2, 31.3
C ₂₅ ~	重油	0.0, 0.0	0.0, 0.0	0.0, 0.0	2 (1.96)	0.0, 0.0

(d) 検体④:PSP 浮沈選別後、浮き

炭素数	留分 [wt %]	ミックス (硬質プラ)	ゴム	* 異素材 (木片, ガラス, 繊維)	* 配線, 金属
~C ₄	ガス	1.2, 1.1	0.7, 0.7	2.0	0.3
C ₅ ~C ₁₂	ナフサ, ガソリン	66, 70.7	67.4, 70.2	70.5	95.3
C ₁₃ ~C ₂₄	灯油, 軽油	32.7, 28.2	31.9, 29.1	27.5	4.4
C ₂₅ ~	重油	0.1, 0.0	0.0, 0.0	0.0	0.0

(e) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン

炭素数	ウレタン (スポンジ)	繊維 (柔らかい)	繊維 (布)	プラ, ゴム	* 異素材 (木片, 紙)	** 配線, 金属	その他 (ふるい選別)
~C ₄	1.4, 1.6	0.4, 0.6	0.3, 0.4	2.1, 1.6	0.4, 0.4	0.3	0.5, 0.2
C ₅ ~C ₁₂	61.8, 61.8	79.1, 85.7	74.5, 80.8	68, 69.2	80.6, 83.1	87.7	76.8, 82.7
C ₁₃ ~C ₂₄	36.8, 36.6	20.5, 13.7	24.8, 18.8	29.9, 29.4	19, 16.5	12.1	22.7, 17.1
C ₂₅ ~	0.0, 0.0	0.0, 0.0	0.4, 0.0	0.0, 0.0	0.0, 0.0	0.0, 0.0	0.0, 0.0

表 2 (b)より、検体②において、表 1 に記した生成油収率割合が最も高いミックス（硬質プラ）の低沸点分：ナフサ、ガソリン留分の割合が 60 %弱である。配線、金属の低沸点留分の割合が最も高く、80 %台であるが、生成油収率割合は、0.1 %であり、ほとんど油が採れていないため、生成油の質については、生成油収率割合が最も高いミックス（硬質プラ）の低沸点留分にて検討することが望ましい。

表 2 (c)より、同様の見方をすると、検体③において、表 1 に記した生成油収率割合が最も高いミックス（硬質プラ）は、検体①、検体②に比べて低いが、30 %強であり、低沸点分：ナフサ、ガソリン留分の割合が 60 %強である。熱硬化性樹脂であるものの、生成油の収率と質の両面から用途があると言える。

表 2 (d)より、検体④において、表 1 に記した生成油収率割合が最も高いミックス（硬質プラ）は、検体①、検体②に比べて低いが、検体③とほぼ同じく 30 %台であり、次いで生成油収率割合が高い組成のゴムは、10 %強である。これらの素材の低沸点分：ナフサ、ガソリン留分の割合は、共に 60 %強であり、生成油収率を踏まえ、用途があると言える。

表 2 (e)より、検体⑤において、表 1 に記した生成油収率割合が最も高いプラ、ゴムの生成油収率割合は約 30 %である。他の素材の生成油収率割合は 10 %未満であるため、プラ、ゴムの低沸点分：ナフサ、ガソリン留分の割合を見ると、70 %弱であり、検体④と同様、生成油の収率を踏まえ、用途があると言える。

以上の結果より、検体⑤以外、共通して含まれるミックス（硬質プラ）の素材割合は、検体①：浮沈選別後浮き、検体②：浮沈選別前、検体③：浮沈選別後沈み、検体④：PPP 選別になるにつれて低くなり、生成油収率割合は単調に低くなり、残渣率割合は高くなる傾向がある。また、全検体において共通して含まれるゴム系の素材割合は、検体①、検体②、検体③、検体④、検体⑤になるにつれて高くなり、生成油収率割合は高くなる傾向がある。

検体③、検体④に着目すると、素材割合が多いミックス（硬質プラ）、ゴムを合わせた残渣率割合は高いが 30 %台であり、生成油収率割合は約 50 %であり、比較的高くなっている。また、ミックス（硬質プラ）、ゴムの低沸点分：ナフサ、ガソリン留分の割合は、60 %弱から 70 %であり、比較的高く、生成油の収率、品質とも、触媒分解油として高いものと言える。

検体⑤に着目すると、素材がウレタン主体であると思われたが、プラ、ゴムの素材割合がウレタンの約 2 倍；40 %程度を占めている。ウレタンとプラ、ゴムの生成油収率割合を合わせて約 40 %であり、プラ、ゴムの低沸点分：ナフサ、ガソリン留分の割合が 70 %弱であることから、セメント行きとされていた検体であるが、その他の用途があると考えられる。

4. まとめ

樹脂と樹脂以外の素材ごとに選別した検体を油化した時のマテリアルバランス、生成油のガスクロマトグラム分析、留分割合を調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) 検体⑤以外、共通して含まれるミックス（硬質プラ）の素材割合は、検体①：浮沈選別後浮き、検体②：浮沈選別前、検体③：浮沈選別後沈み、検体④：PPP 選別になるにつれて低くなり、生成油収率割合は低くなり、残渣率割合は高くなる。
- (2) 全検体において共通して含まれるゴム系の素材割合は、検体①、検体②、検体③、検体④、検体⑤になるにつれて高くなり、生成油収率割合は高くなる。
- (3) 本事業の狙いであった検体③、検体④の場合、素材割合が多いミックス（硬質プラ）、ゴムを合わせた残渣率割合は高く 30%台であるが、生成油収率割合は約 50%であり、比較的高くなっている。また、ミックス（硬質プラ）、ゴムの低沸点分：ナフサ、ガソリン留分の割合は、60%弱から 70%であり、比較的高く、生成油の収率、品質とも、触媒分解油として高いと言える。
- (4) 検体⑤の場合、ウレタン主体であると思われたが、プラ、ゴムの素材割合がウレタンの約 2 倍；40%程度を占めていた。ウレタンとプラ、ゴムの生成油収率割合は約 40%、プラ、ゴムの低沸点留分の割合が 70%弱であり、セメント行きの検体であったが、その他の有益な用途があると考えられる。

第4章 残渣選別結果

1. 目的

自動車シュレッダーダスト ASR (Automobile Shredder Residue) の破碎工程において、各種選別装置、方法により選別された検体①から検体⑤を油化した際、各素材の残渣；検体残渣（残渣をふるいにかけて後、主に触媒残渣以外の残渣）、炭化率を把握することを目的とし、次の調査を行った。

検体残渣の選別は、2通りの方法にて実施した。1通り目は、破碎工程において、各種選別装置、方法により選別された検体①から検体⑤をそのまま油化した時の検体残渣を選別し、各組成割合を求めた。2通り目は、破碎工程において選別された検体①から検体⑤をそのまま油化せず、素材ごとに選別した後、各々の素材を油化した時の各素材の検体残渣を把握し、残渣率を求めた。また、各検体の各素材の残渣中に含まれる炭化物の量を把握するため、炭化率も求めた。

2. 残渣の選別、炭化率の測定

2.1 破碎工程において選別された検体をそのまま油化した時の検体残渣

図1に破碎工程において選別された検体をそのまま油化した時の検体残渣の選別、調査方法を示す。破碎工程において選別された検体①から検体⑤をそのまま油化し、主に触媒残渣、検体残渣を選別す

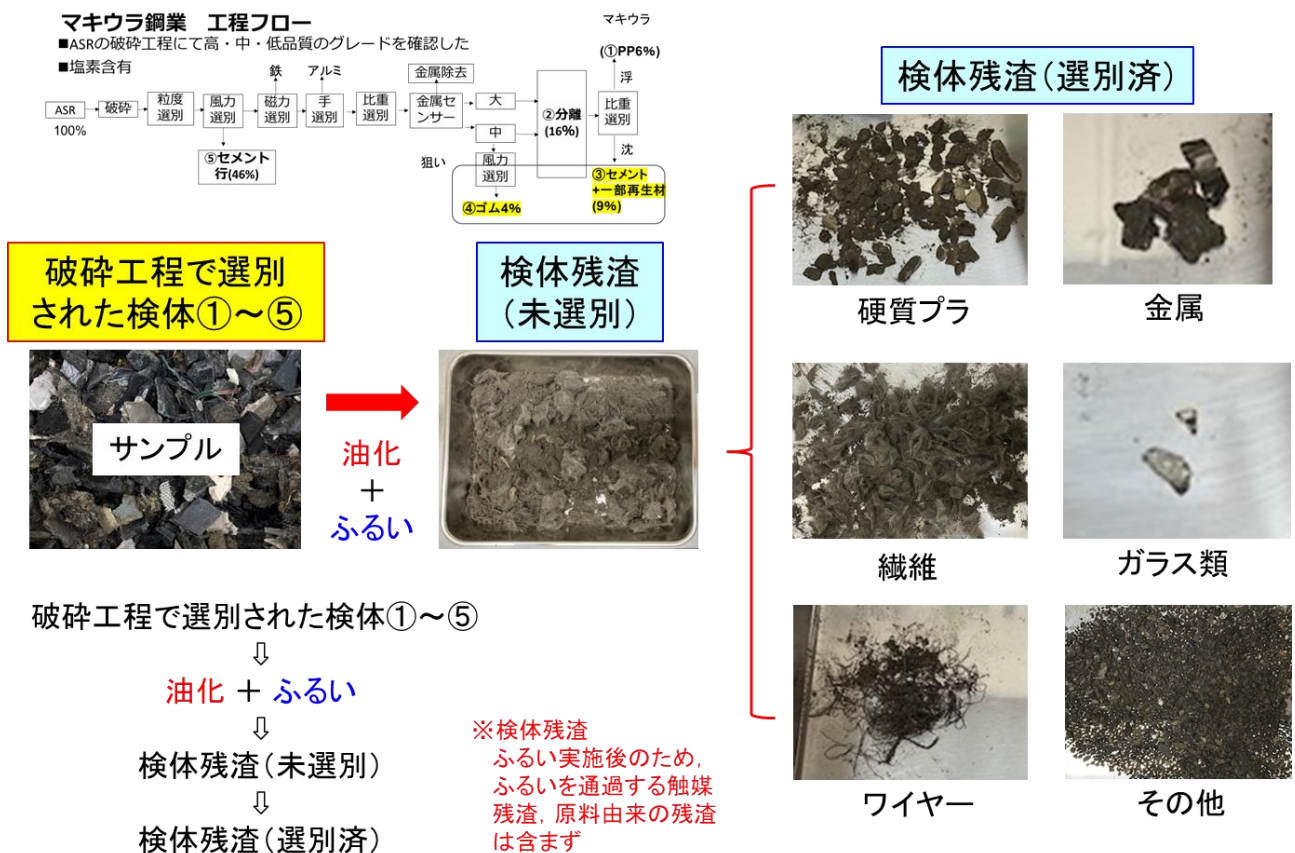


図1 検体残渣の選別、調査方法(破碎工程で選別された検体の油化時)

るため、ふるいにかけて、各素材の残渣が混在しているふるい後の検体残渣（ふるいを通らなかった検体残渣）を手選別により選別し、各組成割合を求めた。

2.2 素材ごとに選別した検体を油化した時の各素材の検体残渣

図2に破碎工程において選別された検体をそのまま油化せず、素材ごとに選別後、油化した時の検体残渣の調査方法を示す。破碎工程において選別された検体①から検体⑤をそのまま油化せず、素材ごとに選別した後、各々の素材を油化し、油化後の残渣（触媒残渣、検体残渣）をふるいにかけて、ふるいを通らなかった主に検体残渣の組成割合を求めた。

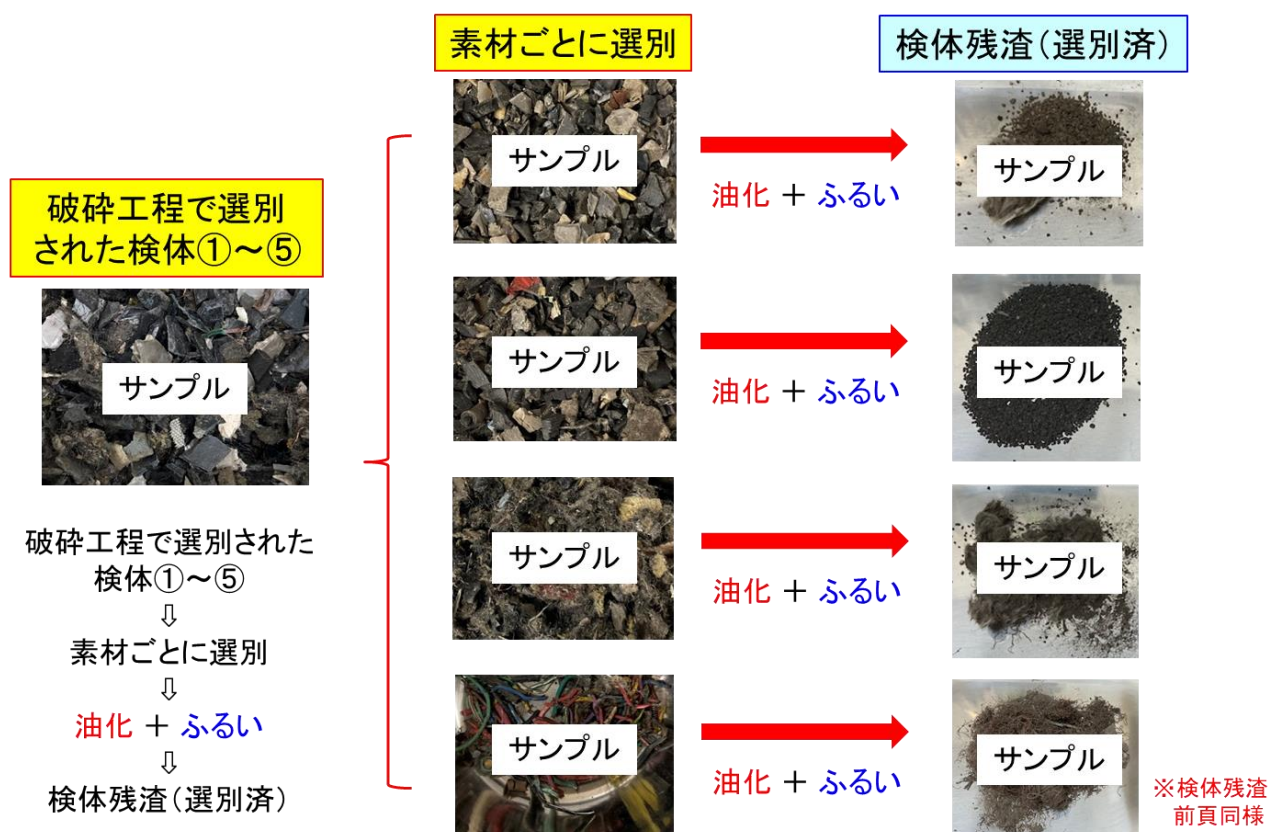


図2 検体残渣の選別、調査方法(素材ごとに選別した検体の油化時)


2.3 素材ごとに選別した検体を油化した時の炭化率の算出

図3に素材ごとに選別した検体を油化した時の炭化率の算出手順を示す。残渣は、触媒残渣と検体残渣が含まれている。素材ごとに選別した検体を油化後、残渣をバットに入れ、ほぼ均一な厚さになるようにならし、残渣の質量を測定した後、マッフル炉で焼成した。焼成条件は、焼成温度が600℃、焼成時間が3時間を基本とし、後述する焼成後の残渣の色の濃淡を判断し、追加焼成（焼成温度：600℃、焼成時間：1時間）を行った。焼成後、残渣の質量を測定し、焼成前後の残渣質量減少量を算出した。炭化率は、次式に示すとおり、焼成前の残渣質量に対する焼成前後の残渣質量減少量の比として算出した。一例として、図3中に検体③のミックス（硬質プラ）素材の炭化率の算出結果を示す。なお、残渣の焼成状態を確認するため、焼成後の残渣をかき混ぜて、色の濃淡の有無により、均

質焼成の確認を行った。


$$\text{炭化率} = (\text{焼成による残渣質量減少量} / \text{焼成前残渣質量}) \times 100$$

焼成前




残渣

焼成



マッフル炉

焼成後




焼成後、静置状態

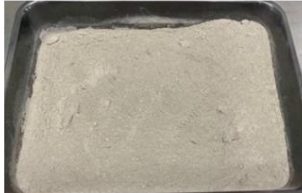
→ 焼成

炭化率算出(例: 検体③)

焼成前残渣質量 [g]	341.9
焼成後残渣質量 [g]	329.8
残渣質量減少量 [g]	12.1
炭化率 [%]	3.5



焼成温度: 600 °C
焼成時間: 3 h



均質焼成の確認
(焼成後、かき混ぜて確認)

$$\text{炭化率} = (\text{焼成による残渣質量減少量} / \text{焼成前残渣質量}) \times 100$$

図 3 素材ごとに選別した検体を油化した時の炭化率算出手順

3. 実験結果および考察

3.1 破碎工程において選別された検体をそのまま油化した時の検体残渣

図4に破碎工程において、各種選別装置、方法により選別された検体①から検体⑤をそのまま油化した時の検体残渣の選別結果を示し、表1に検体残渣選別時の各組成割合を記す。なお、元素分析用、水素化処理用に必要な油を採油するために各検体の標本ごと（検体①から検体④は10標本、検体⑤は30標本）に採油した油の残渣率を表1に併記する。図4(a)は検体①：PSP浮沈選別後、浮き、(b)は検体②：PSP浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③：PSP浮沈選別後、沈み、(d)は検体④：PPP選別、ゴム系、(e)は検体⑤：PPP選別、ウレタンである。

図4(a)、表1より、検体①の検体残渣は、硬質プラ、その他（選別できず、各種混在物）の2種類であり、検体残渣の組成割合が各々、丁度50%である。また、検体①の残渣率は低く、数%であり、第2章の結果において示したとおり、ほぼ油になっていること（生成油収率：80%台、オフガス量率：10%台）から、検体残渣は、ほとんどなく、残渣の用途等の検討は不要である。

図4(b)、表1より、検体②の検体残渣は、その他（各種混合）の占める割合が高く、50%近くあり、それ以外、繊維、ワイヤーの検体残渣の組成割合が各々、20%弱であり、次いで硬質プラ、ワイヤー以外の金属が10%弱であり、ガラス類が低く、1%程度である。また、検体残渣の各組成に占める有機物、無機物の割合は、その他（各種混合）を除くと、ほぼ同じであり、有機物の残渣組成割合の中で高く占める、その他（各種混合）の用途の検討が必要である。

外観	硬質プラ	繊維	ワイヤー
 破碎工程で選別 ↓ 油化 + ふるい  検体残渣(未選別)		該当物なし	該当物なし
	金属 (ワイヤー以外)	ガラス類	その他 (各種混合)
	該当物なし	該当物なし	

(a) 検体①:PSP浮沈選別後、浮き

図4 破碎工程において選別された検体①から検体⑤をそのまま油化した時の検体残渣の選別結果

外観	硬質プラ	繊維	ワイヤー
 破碎工程で選別 ↓ 油化 + ふるい 検体残渣(未選別)			
	金属 (ワイヤー以外)	ガラス類	その他 (各種混合)

(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後

外観	硬質プラ	繊維	ワイヤー
 破碎工程で選別 ↓ 油化 + ふるい 検体残渣(未選別)			
	金属 (ワイヤー以外)	ガラス類	その他 (各種混合)

(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

図 4(続き) 破碎工程において選別された検体①から検体⑤をそのまま油化した時の検体残渣の選別結果

外観	硬質プラ	繊維	ワイヤー
 破碎工程で選別			
 油化 + ふるい	金属 (ワイヤー以外)	ガラス類	その他 (各種混合)
 検体残渣(未選別)			

(d) 検体④:PSP 浮沈選別後、浮き

外観	硬質プラ	繊維	ワイヤー
 破碎工程で選別	該当物なし		
 油化 + ふるい	金属 (ワイヤー以外)	ガラス類	その他 (各種混合)
 検体残渣(未選別)			

(e) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン

図 4(続き) 破碎工程において選別された検体①から検体⑤をそのまま油化した時の検体残渣の選別結果

表 1 検体残渣選別時の各組成割合

残渣 検体 番号	残渣率 [wt %]	ふるい後，検体残渣選別時，各組成割合 [wt %]						
		硬質プラ (熱硬化 性樹脂)	繊維	その他 (各種 混合)	ワイ ヤー	金属 (ワイヤー 以外)	ガラス 類	合計
①	6.6	50.0	0.0	50.0	0.0	0.0	0.0	100.0
②	23.1	8.5	17.8	48.3	15.7	8.4	1.3	100.0
③	37.0	14.2	33.2	46.5	4.0	1.9	0.2	100.0
④	34.5	31.5	2.7	60.0	2.8	1.2	1.8	100.0
⑤	36.1	0.0	31.9	27.3	28.4	11.9	0.5	100.0

- ①PSP浮沈選別後，浮き
②PSP浮沈選別前，粉碎後
③PSP浮沈選別後，沈み

- ④PPP選別，ゴム系
⑤PPP選別，ウレタン

背景赤：有機物
背景青：無機物

図 4 (c)、表 1 より、検体③の検体残渣は、検体②と同様、その他（各種混合）の占める割合が高く、40%強であり、繊維が30%台、硬質プラが10%台である。これら以外の組成は、無機物であるワイヤー、ワイヤー以外の金属、ガラス類であり、数%程度である。

図 4 (d)、表 1 より、検体④の検体残渣は、検体②、検体③と同様、その他（各種混合）の占める割合が高く、60%であり、次いで硬質プラが30%台と高くなっている。これら以外の組成は、繊維、無機物であるワイヤー、ワイヤー以外の金属、ガラス類であり、数%程度となっている。

図 4 (e)、表 1 より、検体⑤の検体残渣は、繊維が最も高く、30%台であり、ワイヤー、その他（各種混合）が20%強であり、ワイヤー以外の金属が10%程度である。検体⑤は、繊維の残渣割合が高くなることが予想されたが、ワイヤーの割合が比較的高くなっている。これは、各種選別装置、方法により選別する際、ウレタンにワイヤーが絡みつくと等により、混在していたものと思われる。


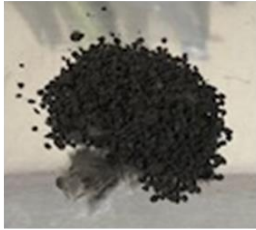



3.2 破碎工程において選別された検体を素材ごとに選別後、油化した時の各素材の検体残渣

図 5 に破碎工程において選別された検体をそのまま油化せず、素材ごとに選別後、油化した時の検体残渣を示す。図 5 (a)は検体①：PSP 浮沈選別後、浮き、(b)は検体②：PSP 浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③：PSP 浮沈選別後、沈み、(d)は検体④：PPP 選別、ゴム系、(e)は検体⑤：PPP 選別、ウレタンである。

なお、図 5 に示した各検体の各素材は、図 4 に示した各検体の各素材と異なる。これは、破碎工程において選別された検体①から検体⑤をそのまま油化した時の検体残渣の選別限度、油化前に素材ごとに選別する時の選別限度による違いであるが、各検体の主な素材の残渣は両者に含まれていることを付記する。

ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (ゴム系)
ふるい後, 残部なし	
中間 (湿りプラ)	その他 (ふるい選別)
	

(a) 検体①:PSP 浮沈選別後、浮き

ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (ゴム系)	繊維 (柔らかい)
		
配線, 金属 (②, ③共用)	その他 (ふるい選別)	
		※ 触媒等の残渣の一部, 混在していた他素材の 残渣が含まれる。 以降, 他の検体も同様

(b) 検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後

図 5 破碎工程において選別された検体を素材ごとに選別後、油化した時の検体残渣




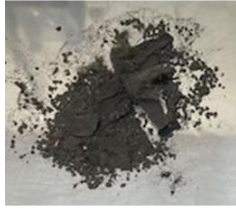


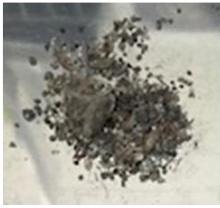
ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (スポンジ, ゴム系)	繊維 (柔らかい)
配線, 金属 (②, ③共用)	その他 (ふるい選別)	

(c) 検体③:PSP 浮沈選別後、沈み

ミックス (硬質プラ)	ゴム
異素材 (木片, ガラス, 繊維)	配線, 金属

(d) 検体④:PSP 浮沈選別後、浮き

図 5(続き) 破碎工程において選別された検体を素材ごとに選別後、油化した時の
検体残渣

ウレタン (スポンジ)	繊維 (柔らかい)	繊維 (布)	プラ, ゴム
			
異素材 (木片, 紙)	配線, 金属	その他 (ふるい選別)	
			

(e) 検体⑤:PPP 選別、ウレタン

図 5(続き) 破碎工程において選別された検体を素材ごとに選別後、油化した時の検体残渣

検体①から検体⑤について、各素材を油化後の検体残渣の画像からわかることを述べる。図 5 (a)より、検体①の場合、ミックス(硬質プラ)の検体残渣はなく、軟質異素材(ゴム系)、中間(湿りプラ)、その他(ふるい選別)の検体残渣もほとんどなく、各素材とも、ほぼ油になっていることから、検体残渣の用途等の検討は不要である。

図 5 (b)より、検体②の場合、各素材とも、検体残渣が比較的多くあり、配線、金属の素材以外、ふるいを通過しなかった原料由来の残渣；原料由来の炭化物と思われる粉体の小さな塊が多く見受けられる。また、各素材の検体残渣の中に他の素材の検体残渣はほとんど見られず、油化前に素材ごとに選別した場合、各素材の検体残渣の利用が容易であることがわかる。

図 5 (c)より、検体③の場合、検体②と同様、各素材とも、検体残渣が比較的多くあり、配線、金属以外、ふるいを通過しなかった原料由来の残渣と思われるものが見受けられる。また、ミックス(硬質プラ)の検体残渣の中に他の素材；繊維(柔らかい)と思われる検体残渣が混在している。これは、検体③を手選別時、当該素材に付着していた他の素材がまとまって残部として残ったものと思われる。当該素材以外、各素材の検体残渣の中に他の素材の検体残渣はほとんど見られないことから、油化前に素材ごとに選別した場合、各素材の検体残渣の利用が可能であることがわかる。

図 5 (d)より、検体④の場合、ミックス(硬質プラ)の検体残渣は、検体②、検体③の同一素材と比較して少なくなっている。これは、当該素材の検体に占める割合が低くなっているため、検体残渣も少なくなっているものと判断する。また、他の検体と同様、各素材以外、検体残渣の中に他の素材の検体残渣はほとんど見られないことから、油化前に素材ごとに選別した場合、各素材の残部の利用が

可能であることがわかる。

図 5 (e)より、検体⑤の場合、各素材とも、ふるいを通過しなかった原料由来の残渣と思われるものが見受けられるが、当該素材の検体残渣以外、ほとんど見られない。検体⑤は、ウレタンが主の素材であるが、配線、金属がウレタン素材に入り込み、選別、仕分けが困難であったものと思われ、ウレタンの検体残渣の用途を考えた際、選別の方法を一考する必要がある。

表 2 に各素材の残渣率を記す。表 2 に記す残渣は、破碎工程において選別された検体をそのまま油化せず、素材ごとに選別後、油化した時の触媒残渣と検体残渣を示しており、残渣率は、各素材の検体量に対する各素材の残渣量（触媒残渣量と検体残渣量）の比を割合として表している。ここで、その他（ふるい選別）は、残渣率として比較的高いが、各検体の各素材に選別できなかった素材であるため、ここでは言及しないこととする。

表 2 より、検体①の各素材の残渣率は、軟質異素材（ゴム系）が最も高いが 10 % 台であり、それ以外の素材；ミックス（硬質プラ）、中間（湿りプラ）の残渣率は、共に 10 % 未満であり低く、検体①の各素材の残渣率は低くなっている。

検体②の各素材の残渣率は、ミックス（硬質プラ）が低く、10 % 台であり、それ以外の素材；軟質異素材（ゴム系）、繊維（柔らかい）が共に 30 % 台であり、高くなっている。配線、金属の残渣率は、最も高く、約 80 % となっている。

検体③の各素材の残渣率は、ミックス（硬質プラ）、軟質異素材（ゴム系）、繊維（柔らかい）が 30 % 台から 40 % 台であり、高くなっている。また、先述した検体①、検体②と共通の素材であるミックス（硬質プラ）、軟質異素材（ゴム系）について、検体①よりも検体②、検体②よりも検体③の残渣率が

表 2 各素材の残渣率

検体	残渣率 [%]									
	A ミ硬プ	B 軟ゴ	C 中プ	D プ,ゴ	E 織,柔	F 織,布	G 他	H ウ,ス	I 異素	J 配,金
①	5.8	13.0	8.1	—	—	—	15.5	—	—	—
②	16.5	34.8	—	—	38.0	—	30.1	—	—	* 80.5
③	33.0	47.9	—	—	46.5	—	39.9	—	—	* 80.5
④	28.3	—	—	50.4	—	—	—	—	51.9	78.1
⑤	—	—	—	15.5	51.8	50.1	75.8	43.7	52.0	81.7

* ②, ③共用

検体

- ①PSP浮沈選別後, 浮き
- ②PSP浮沈選別前, 粉碎後
- ③PSP浮沈選別後, 沈み
- ④PPP選別, ゴム系
- ⑤PPP選別, ウレタン

検体素材

- A: ミックス(硬質プラ)
- B: 軟質異素材(ゴム系)
- C: 中間(湿りプラ)
- D: プラ, ゴム
- E: 繊維(柔らかい)
- F: 繊維(布)
- G: その他(ふるい選別)
- H: ウレタン, スポンジ
- I: 異素材(木片, ガラス, 繊維)
- J: 配線, 金属

※残渣率
残渣: 触媒残渣, 検体残渣

増加している。これは、一例として、ミックス（硬質プラ）に着目すると、第1章で述べた素材割合について、検体①よりも検体②、検体②よりも検体③が低くなっているが（検体①：91.6%、検体②：72.3%、検体③：66.1%）、浮上選別前後、同浮き、同沈みによる検体素材の組成の違いにより、油になりにくい組成の割合が増えることにより、残渣率が増加したものと考えられる。




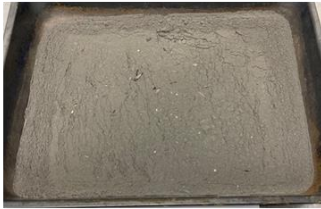
検体④の各素材の残渣率は、ミックス（硬質プラ）が検体③とほぼ同じく、30%弱であり、プラ、ゴムが約50%であり、一般的なゴム系の残渣率に匹敵する高さである。また、異素材（木片、ガラス、繊維）の残渣率が約50%であり、異素材の各素材から判断すると、残渣率はかなり高くなるものと思われるが、繊維に混在した他のプラスチック系素材の油化により、残渣率が当該素材として50%程度に抑えられたものと思われる。配線、金属の残渣率は、他の検体と同様に最も高く、80%近くになっている。

検体⑤の各素材の残渣率は、繊維（柔らかい）、繊維（布）、ウレタン、スポンジ、異素材（木片、ガラス、繊維）が50%前後であり、高くなっている。また、第1章で述べたとおり、検体⑤は、ウレタン主体の検体であるが、プラ、ゴムの素材割合が約40%であり、高く、当該素材の残渣率は15%程度になっている。さらに、配線、金属の残渣率は、他の検体と同様に最も高く、80%を超えている。その他（ふるい選別）の残渣率は、言及しないこととしていたが、検体⑤の当該素材類の残渣率が高くなっており、選別時、当該素材が混入しないような方策が必要である。





3.3 破碎工程において選別された検体を素材ごとに選別後、油化した時の各素材の炭化率

図6に破碎工程において選別された検体をそのまま油化せず、素材ごとに選別後、油化した時の各素材の焼成前後の残渣を示し（残渣の画像の提示のみ）、表3に炭化率を記す。図6(a)は検体①：PSP浮沈選別後、浮き、(b)は検体②：PSP浮沈選別前、粉碎後、(c)は検体③：PSP浮沈選別後、沈み、(d)は検体④：PPP選別、ゴム系、(e)は検体⑤：PPP選別、ウレタンである。なお、その他（ふるい選別）の炭化率は、比較的高い検体があるが（5%台）、各検体の各素材に選別できなかった素材であるため、ここでは言及しないこととする。

表3より、検体①の各素材の炭化率は、1%前後であり、残渣中の炭化物はほとんどないことがわかる。検体②、検体③の場合、検体①と同一素材の炭化率は、若干、高くなっているが、数%程度であり、それ以外の素材の炭化率も低くなっている。検体④のプラ、ゴムの炭化率は、10%弱であり、比較的高くなっており、当該素材において、油にならず、炭化物として存在していたものが、他の検体の各素材よりも多いことがわかる。検体⑤の場合、繊維（布）、異素材（木片、ガラス、繊維）の炭化率が10%弱であり、比較的高くなっている。これは、布、木片が素材に占めているため、炭化率が高くなっているものである。次いで、繊維（柔らかい）の炭化率が6%弱であり、プラ、ゴム、ウレタン、スポンジの各素材の炭化率が2%程度である。

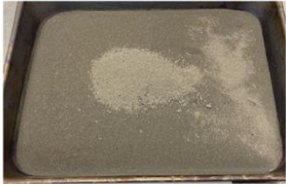




ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (ゴム系)
	
中間 (湿リプラ)	その他 (ふるい選別)
	

(a) 焼成前(検体①:PSP 浮沈選別後、浮き)


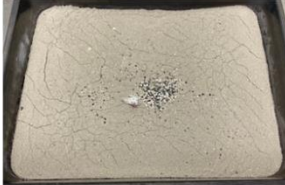



ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (ゴム系)
	
中間 (湿リプラ)	その他 (ふるい選別)
	

(a) (続き)焼成後(検体①:PSP 浮沈選別後、浮き)

図 6 破碎工程において選別された検体を素材ごとに選別後、油化した時の検体残渣焼成

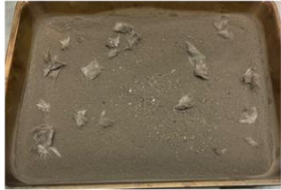
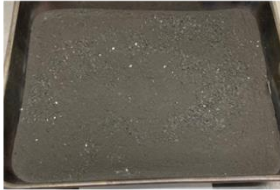
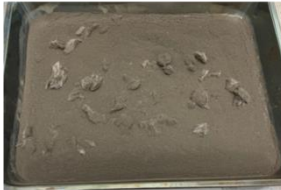


ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (ゴム系)	繊維 (柔らかい)
		
配線, 金属 (②, ③共用)	その他 (ふるい選別)	
		

(b) 焼成前(検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後)






ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (ゴム系)	繊維 (柔らかい)
		
配線, 金属 (②, ③共用)	その他 (ふるい選別)	
		

(b) (続き) 焼成後(検体②:PSP 浮沈選別前、粉碎後)

図 6 (続き) 破碎工程において選別された検体を素材ごとに選別後、油化した時の検体残渣焼成

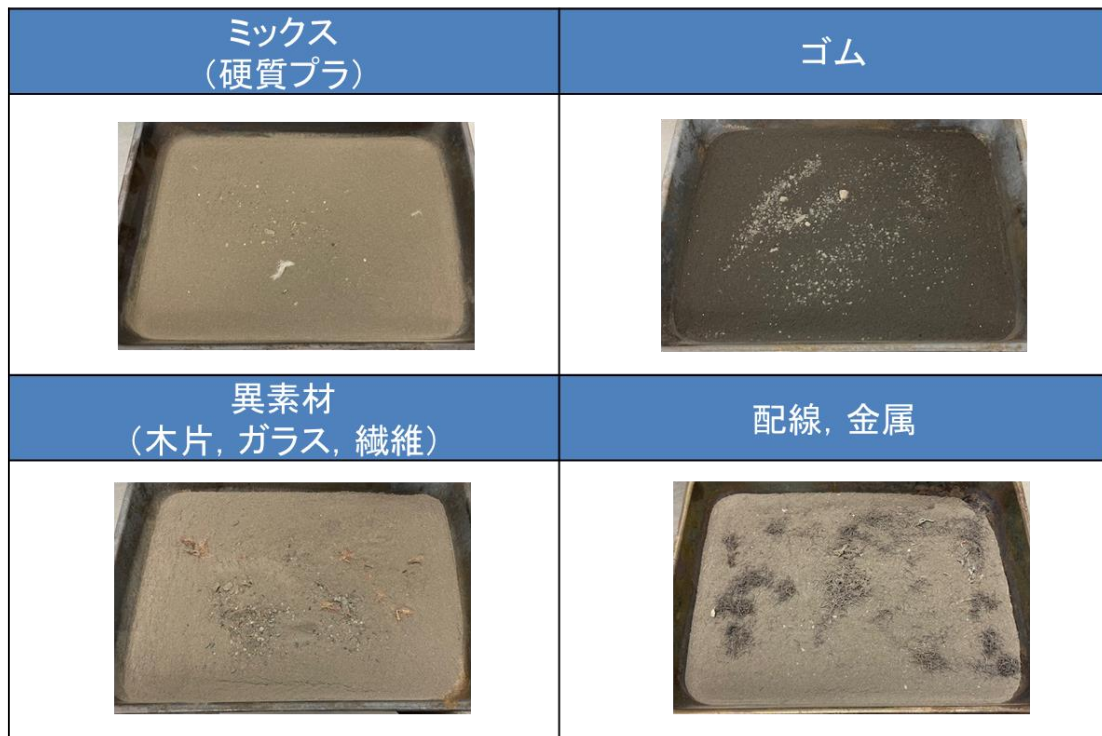
ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (スポンジ, ゴム系)	繊維 (柔らかい)
		
配線, 金属 (②, ③共用)	その他 (ふるい選別)	
		

(c) 焼成前(検体③:PSP 浮沈選別後、沈み)

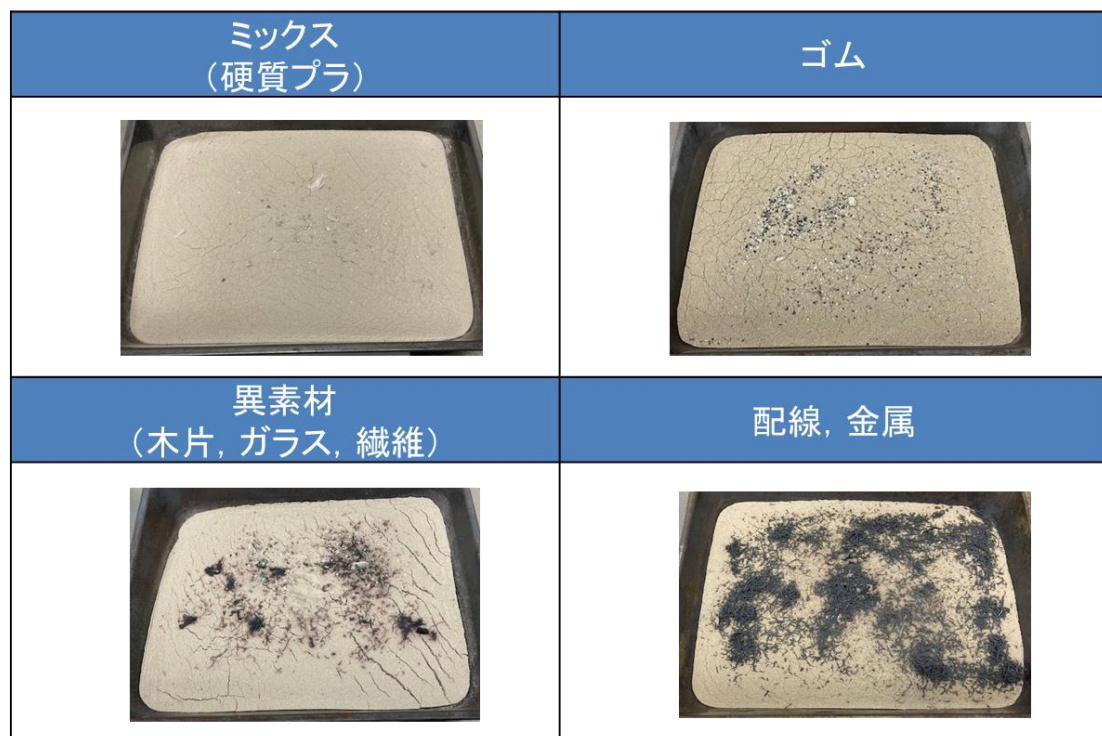
ミックス (硬質プラ)	軟質異素材 (スポンジ, ゴム系)	繊維 (柔らかい)
		
配線, 金属 (②, ③共用)	その他 (ふるい選別)	
		

(c) 焼成後(続き)(検体③:PSP 浮沈選別後、沈み)

図 6 (続き) 破碎工程において選別された検体を素材ごとに選別後、油化した時の検体残渣焼成



(d) 焼成前(検体④):PSP 浮沈選別後、浮き



(d)(続き)焼成後(検体④):PSP 浮沈選別後、浮き

図 6 (続き) 破碎工程において選別された検体を素材ごとに選別後、油化した時の検体残渣焼成

ウレタン (スポンジ)	繊維 (柔らかい)	繊維 (布)	プラ, ゴム
異素材 (木片, 紙)	配線, 金属	その他 (ふるい選別)	

(e) 焼成前(検体⑤):PPP 選別、ウレタン)

ウレタン (スポンジ)	繊維 (柔らかい)	繊維 (布)	プラ, ゴム
異素材 (木片, 紙)	配線, 金属	その他 (ふるい選別)	

(e) (続き)焼成後(検体⑤):PPP 選別、ウレタン)

図 6 (続き)破碎工程において選別された検体を素材ごとに選別後、油化した時の
検体残渣焼成

表 3 素材ごとに選別後、油化した時の各素材の炭化率

検体	炭化率 [%]									
	A ミ硬プ	B 軟ゴ	C 中プ	D プ,ゴ	E 織;柔	F 織;布	G 他	H ウ,ス	I 異素	J 配,金
①	0.5	0.4	1.5	—	—	—	2.5	—	—	—
②	1.1	3.8	—	—	2.8	—	5.0	—	—	* 6.4
③	3.5	6.7	—	—	4.2	—	5.7	—	—	* 6.4
④	2.2	—	—	9.5	—	—	—	—	0.8	1.6
⑤	—	—	—	2.7	5.9	8.2	0.5	2.2	9.9	1.3

* ②, ③共用

検体

- ①PSP浮沈選別後, 浮き
- ②PSP浮沈選別前, 粉碎後
- ③PSP浮沈選別後, 沈み
- ④PPP選別, ゴム系
- ⑤PPP選別, ウレタン

検体素材

- A: ミックス(硬質プラ)
- B: 軟質異素材(ゴム系)
- C: 中間(湿りプラ)
- D: プラ, ゴム
- E: 繊維(柔らかい)
- F: 繊維(布)
- G: その他(ふるい選別)
- H: ウレタン, スポンジ
- I: 異素材(木片, ガラス, 繊維)
- J: 配線, 金属

4. まとめ

破碎工程において、各種選別装置、方法により選別された各検体をそのまま油化した時の検体残渣を選別し、各組成割合を求めた。また、破碎工程において選別された各検体をそのまま油化せず、素材ごとに選別した後、各々の素材を油化した時、各素材の検体残渣を把握し、残渣率を求め、炭化率を算出した結果、以下のことがわかった。

- (1) 破碎工程において選別された検体をそのまま油化した時の検体残渣の選別結果、各組成割合
 - (a) 検体①の検体残渣は、ほとんどなく、残渣の用途等の検討は不要である。
 - (b) 検体②の検体残渣は、繊維、ワイヤーが各々、20%弱であり、次いで硬質プラ、ワイヤー以外の金属が10%弱である。また、検体残渣の各組成に占める有機物、無機物の割合は、ほぼ同じであり、有機物の残渣組成割合の中で高く占める、その他(各種混合)の用途の検討が必要である。
 - (c) 検体③の検体残渣は、繊維が30%台、硬質プラが10%台である。これら以外の組成は、無機物であるワイヤー、ワイヤー以外の金属、ガラス類であり、数%程度である。
 - (d) 検体④の検体残渣は、硬質プラが30%台と高くなっており、これら以外の組成は、検体③と同じである。
 - (e) 検体⑤の検体残渣は、繊維が最も高く、30%台であり、ワイヤー、その他(各種混合)が20%強であり、ワイヤー以外の金属が10%程度である。

- (2) 破碎工程において選別された検体をそのまま油化せず、素材ごとに選別後、油化した時の検体残渣
- (a) 検体①の場合、ミックス（硬質プラ）の検体残渣はなく、軟質異素材（ゴム系）、中間（湿りプラ）、その他（ふるい選別）の検体残渣もほとんどなく、検体残渣の用途等の検討は不要である。
 - (b) 検体①以外、各素材とも、配線、金属の素材以外、ふるいを通過しなかった原料由来の残渣；原料由来の炭化物と思われる粉体塊が多く見られた。
 - (c) 各素材の検体残渣の中に他の素材の検体残渣はほとんど見られず、油化前に素材ごとに選別した場合、各素材の検体残渣の利用が容易である。
- (3) 破碎工程において選別された検体をそのまま油化せず、素材ごとに選別後、油化した時の炭化率
- (a) 検体①の各素材の炭化率は、その他（ふるい選別）以外、1%前後であり、残渣中の炭化物はほとんどない。
 - (b) 検体②、検体③の場合、検体①と同一素材の炭化率は、若干、高くなっているが、数%程度であり、それ以外の素材の炭化率も低い。
 - (c) 検体④のプラ、ゴムの炭化率は、10%弱であり、比較的高くなっている。
 - (d) 検体⑤の場合、繊維（布）、異素材（木片、ガラス、繊維）の炭化率が10%弱であり、比較的高くなっている。

第5章 分解油の水素化精製

1. 実験方法

本検討で対象となる5検体の組成、分解油性状を基に、初めに実際に分解油に含まれると考えられるモデル化合物を用いた予備水素化実験を行い、その後に実検体分解油の水素化精製実験を行った。

1.1 使用した検体

1.1.1 ASR 分解油を用いた水素化精製

本検討で用いた5検体の原料組成、及び同5検体分解油の含有成分(性状)を下の表1、及び表2にそれぞれ示す。

表1 5検体の組成と割合

検体	用途	組成等	割合 [%]	価値	備考
①	再生PP	PP	≥90	有価	PSP浮沈選別後、浮き
②	再生PP選別前原料(ミックスブラ)	PP	約40	有価	PSP浮沈選別前、粉碎後
		PE, PS, PMMA等	約60		
③	再生PP選別残渣(浮沈選別:沈降物)	熱硬化性樹脂(エポキシ), PE, PS, PMMA	≥90	産廃	PSP浮沈選別後、沈み配線あり
④	再生PP選別前原料(ゴム・ウレタン)	ゴム(PVC, ブタジエンゴム, ウレタンゴム等)	情報なし	産廃	PPP選別, ゴム系配線, 金属魂あり
⑤	風力選別(軽質ダスト)	ウレタン(発泡性)	54	産廃	PPP選別, ウレタン木片あり
		PVC等	16		
		タルク	30		

表2 5検体分解油の性状

成分	分解油性状				
	検体①	検体②	検体③	検体④	検体⑤
有機塩素 (mass ppm)	1未満	240	230	250	140
無機塩素 (mass ppm)	1未満	1未満	1未満	1未満	1未満
硫黄分 (mass ppm)	9	250	400	738	241
窒素濃度 (mass ppm)	70	5,600	13,000	8,700	12,000
塩基性窒素 (mass ppm)	40	2,200	4,300	5,500	7,600
酸素量 (mass %)	0.1未満	0.7	1.3	1.2	2.4

1.1.2 モデル化合物を用いた水素化精製

ASR 分解油の水素化精製に先立ち、塩素原子、窒素原子、及び酸素原子を各々含有するモデル化合物を選定し、それらについて水素化精製実験を行った。選定したモデル化合物を下表 3 に示す。選定の背景として、表 1 に示した各検体組成の情報を基に、検体を構成するポリマーを割り出した。次に、各ポリマーについて、過去に報告されている熱分解に関する論文より、ポリマー熱分解によって生成する化合物を想定し、それらをモデル化合物とした。

表 3 検体構成ポリマーとモデル化合物

ポリマー	モデル化合物
PMMA	メタクリル酸
	メタクリル酸メチル
熱硬化性樹脂 (エポキシ樹脂と仮定)	フェノール
	ビスフェノールA
ウレタン	1,8-オクタンジオール
	ヘキサメチレンジイソシアネート(HDI)
PVC	1-クロロデカン
	塩化ベンジル

1.2 実験方法

1.2.1 モデル化合物を用いた水素化精製

原料油として、各モデル化合物を市販の灯油に添加し、濃度 3,000ppm に調製したものを用いた(ビスフェノール A については、試薬量の都合により 1,000ppm)。ここで、モデル原料の濃度は、各化合物の構造式に含まれる酸素成分(原子)、窒素成分(原子)、及び塩素成分(原子)を基準とし、それらの灯油中の濃度とした。なお、HDI については、酸素成分と窒素成分が両方含まれる為、窒素成分を基準とした。

水素化精製実験の概要として、原料油は送液ポンプにより定量的に送り出され、ポンベから供給される水素ガスと混合された後に固定床反応器に供給される。反応器には水素化触媒が充填されており、実験条件下で原料油と水素ガスの混合物が触媒を通過する際に水素化反応が起こる。触媒層を通過した生成物は冷却された後、受器より水素化油として採取され、軽質のガス及び未反応の水素は、背圧弁で減圧された後にスクラバーにて酸性及び塩基性成分を吸収させ、最終的に積算流量計を経て排気される。

本検討で行った実験装置のフロー図、外観図をそれぞれ図 1、図 2 に示す。反応のマテリアルバランスは、出発物である原料油が、生成物である水素化油、軽質ガス、及び触媒に付着する残渣に分かれるという概念に基づいている。また、表 3 に掲載のモデル化合物を用いた各水素化精製実験は、触媒交換を行わずに同じ固定床で実施された。

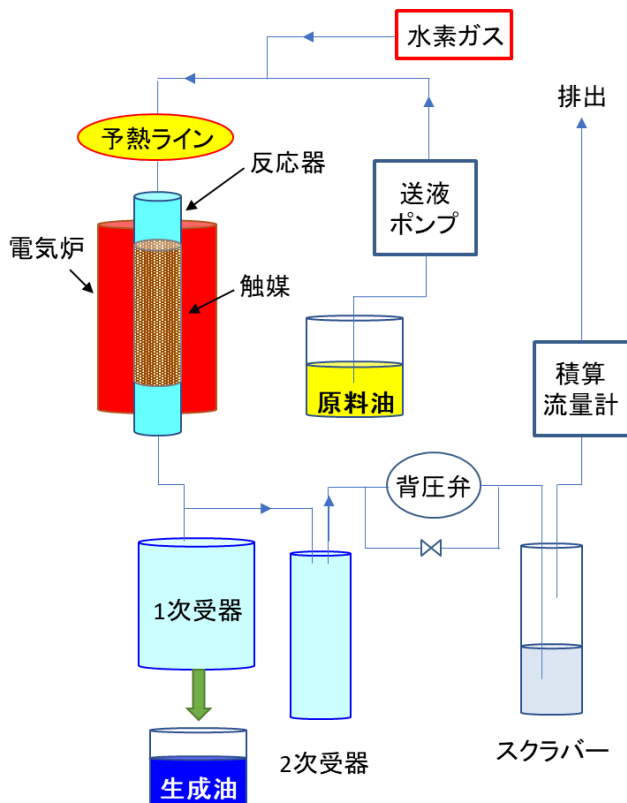


図1 水素化精製装置のフロー図

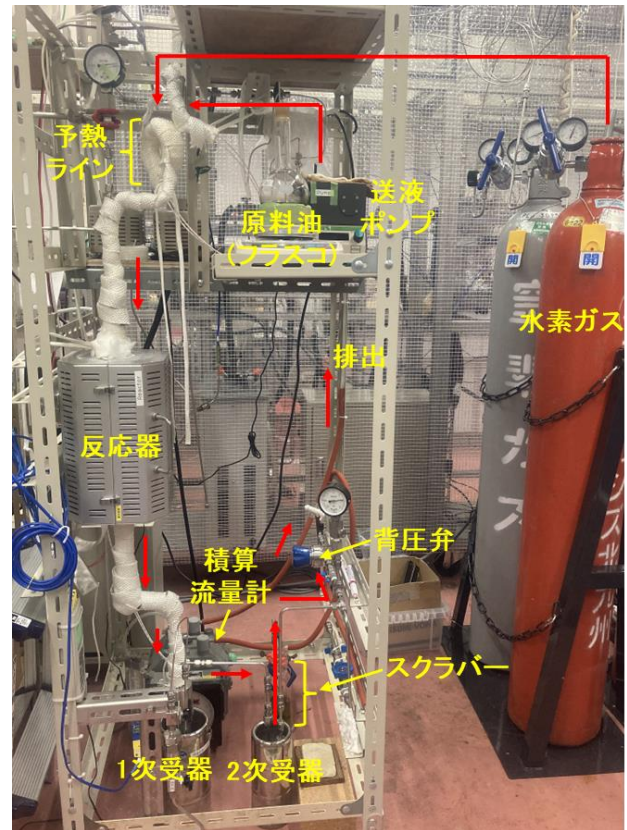


図2 水素化精製装置の外観

1.2.2 ASR 分解油を用いた水素化精製

原料油として、5 検体を各々油化することによって得られた分解油を用いた。

水素化精製の概要としては、前の 1.2.1 項に記載した、モデル化合物を用いた水素化精製の場合と同様である。

水素化触媒については、モデル化合物の水素化精製検討と同じ触媒を使用し、実験条件も同じとした。また、本検討で使用した水素化精製装置についても、モデル化合物の検討で用いたものと同じであり、図1のフロー図、及び図2の外観のものを用いた。

1.3 分析方法

今回の水素化精製検討の評価に用いた分析方法について記す。

- モデル化合物を用いた水素化精製

GC/MS による定性分析(環境エネルギー(株)北九州研究所で実施)

- ASR 分解油を用いた水素化精製

GC/MS による定性分析(環境エネルギー(株)北九州研究所で実施)

各種性状分析(一般社団法人日本海事検定協会に依頼) (表6に記載)

GC/MS 分析については、原料油中に含まれるモデル化合物あるいは塩素、窒素、硫黄、及び酸素を有する化合物が、水素化精製によりどの程度減少するかの変化を定性的に把握する目的で実施した(今回の評価では、水素化油(水素化精製後)に含まれる化合物は考慮の対象外とした)。

また、ASR 分解油の水素化精製における各種性状分析については、水素化前後の各元素濃度の変化を外部機関による分析で定量的に把握すると共に、各定量値と社内の GC/MS による定性分析結果を相対的に比較することを目的として実施した。なお、日本海事検定協会に依頼した分析項目は下の表 4 に示す通りである。

表 4 日本海事検定協会に依頼の分析項目

分析項目	試験方法	一般用途
有機塩素	微量電量滴定法	対象物中の微量成分試験
無機塩素	水抽出-イオンクロマトグラフィー	対象物中の水溶性イオン成分試験
硫黄分	JIS K2541-6	原油、石油製品の硫黄成分試験
窒素濃度	JIS K2609	原油、石油製品の窒素成分試験
塩基性窒素	UOP 269	原油、石油製品の塩基性窒素成分試験
酸素量	COHコーダ	有機物の燃焼分解による元素分析
炭素	COHコーダ	有機物の燃焼分解による元素分析
水素	COHコーダ	有機物の燃焼分解による元素分析

2. モデル化合物を用いた水素化精製

2.1 マテリアルバランス

一連のモデル化合物水素化精製のマテリアルバランスを表 5-1 に示す。

表 5-1 モデル化合物水素化精製のマテリアルバランス

水素化油収率 [wt%]	96.8
ガス収率 [wt%]	1.8(推計)
残渣収率 [wt%]	1.4

水素化油収率は 96.8%であったが、この数値は各モデル水素化実験で得られた水素化油重量の合計を、反応に要した原料油の重量で除したものである。各モデル実験の水素化油収率を表 5-2 に示す。

表 5-2 各モデル実験の水素化油収率

	PVCモデル化合物		ウレタンモデル化合物	
	1-クロロデカン	塩化ベンジル	1,8-オクタンジオール	HDI
原料投入量 (g)	55.6	55.2	46.7	55.4
水素化油収率 (wt%)	97.6	97.5	93.8	96.0

	PMMAモデル化合物		熱硬化性樹脂モデル化合物	
	メタクリル酸	メタクリル酸メチル	フェノール	ビスフェノールA
原料投入量 (g)	54.9	59.4	55.4	41.8
水素化油収率 (wt%)	97.9	96.3	98.1	94.6

何れのモデル化合物の水素化精製も、水素化油が高収率で得られる結果となった。水素化の起こる主対象である塩素、窒素、硫黄あるいは酸素成分が、ほぼ数千 ppm のモデル化合物のみであることから、ガス収率が低く、水素化油が高収率で得られたものと考えられる。

以下の項で、各元素系に分けた、モデル化合物水素化精製の結果を記載する。

2.2 PVC 由来化合物(含塩素系)

含塩素系モデル化合物である、1-クロロデカン及び塩化ベンジルにおける水素化前後の GC/MS クロマトグラム比較を図 3、図 4 に各々示す。

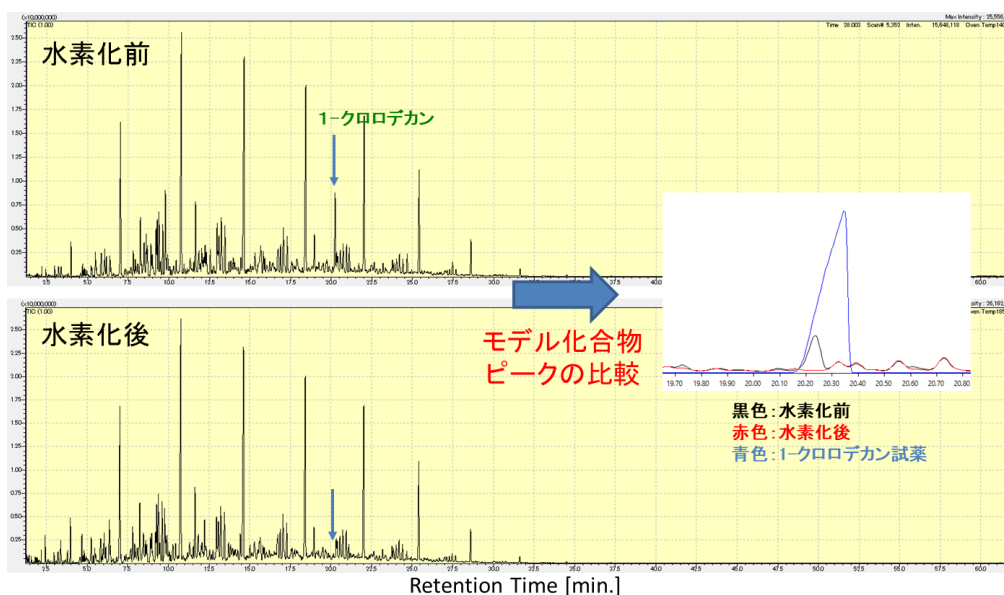


図 3 1-クロロデカン水素化の GC/MS クロマトグラム比較

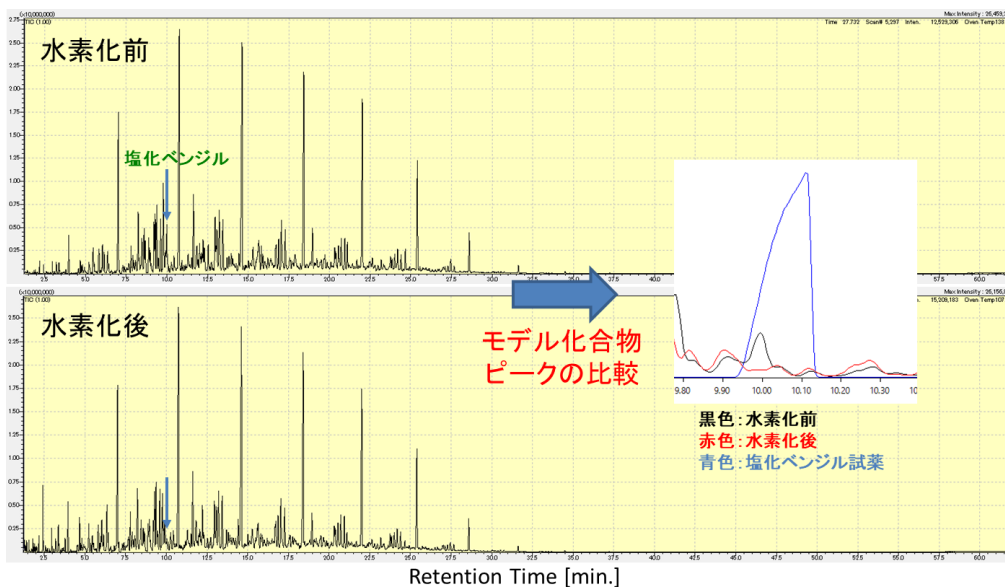


図4 塩化ベンジル水素化の GC/MS クロマトグラム比較

含塩素系のモデル化合物両者のピークについて、水素化精製後にピーク消失が確認されたことから、これらの化合物は水素化されたものと判断した。

2.3 ウレタン由来化合物(含窒素、含酸素系)

ウレタン由来のモデル化合物である、1,8-オクタンジオール及びヘキサメチレンジイソシネート(HDI)における水素化前後の GC/MS クロマトグラム比較を図5、図6に各々示す。

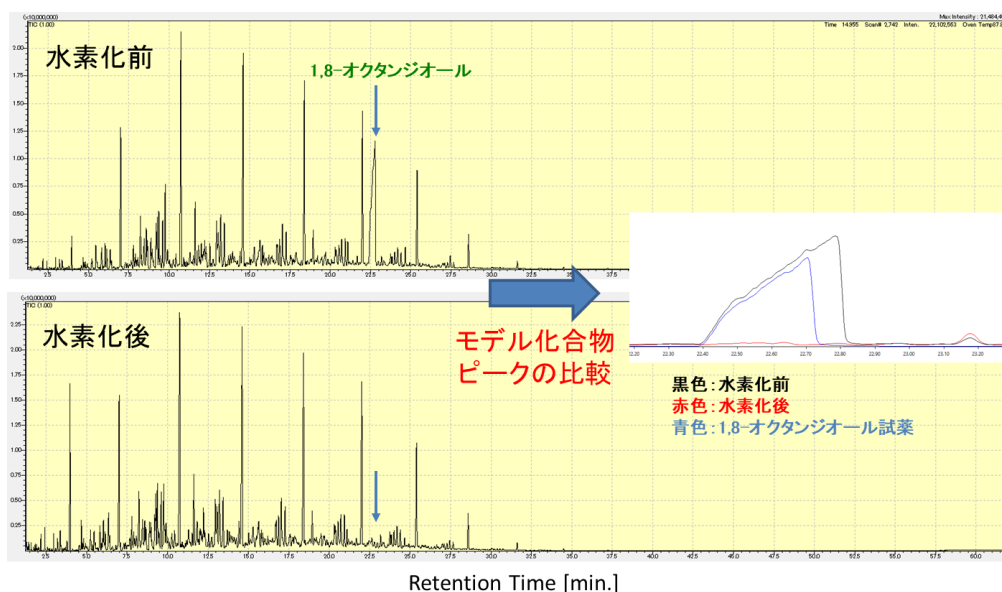


図5 1,8-オクタンジオール水素化の GC/MS クロマトグラム比較

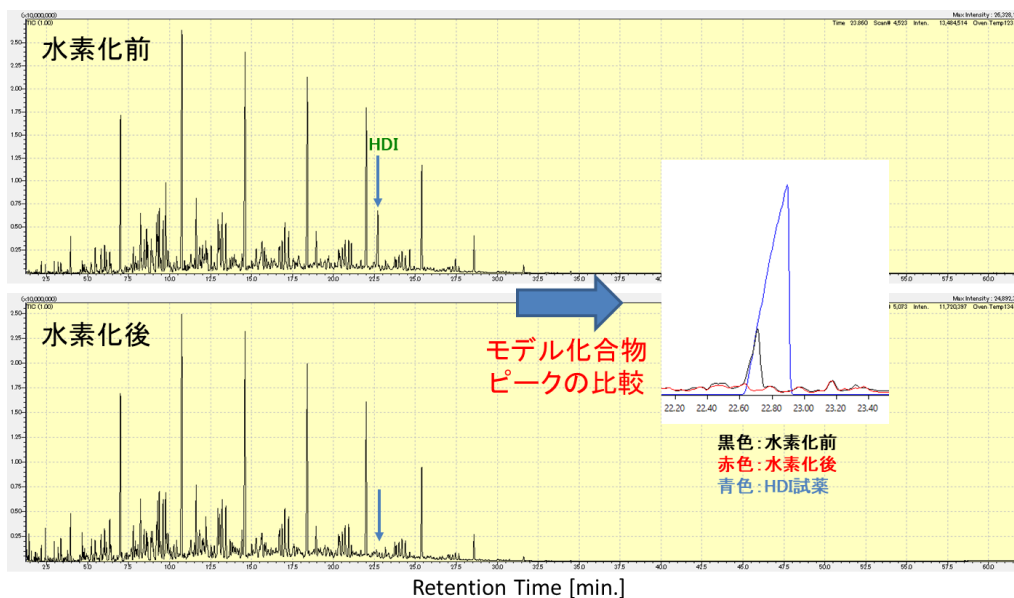


図 6 HDI 水素化の GC/MS クロマトグラム比較

1,8-オクタジオール及び HDI の両者ピークについて、水素化精製後にピーク消失が確認されたことから、これらの化合物は水素化されたものと判断した。

2.4 PMMA 由来化合物(含酸素系)

PMMA 由来の含酸素系モデル化合物である、メタクリル酸及びメタクリル酸メチルにおける水素化前後の GC/MS クロマトグラム比較を図 7、図 8 に各々示す。

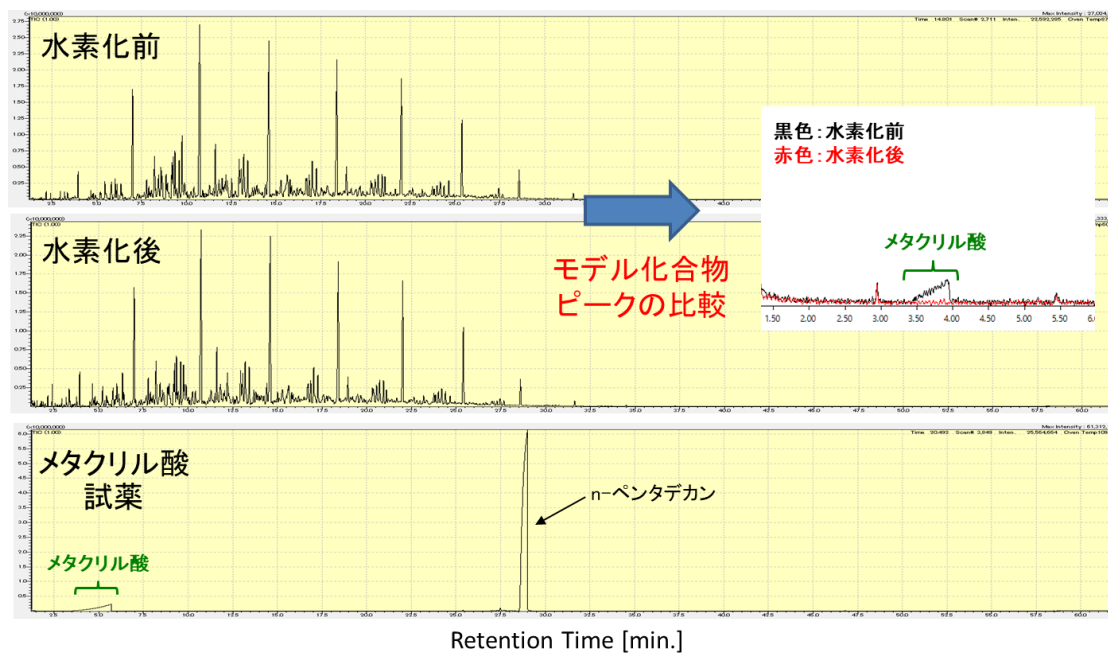


図 7 メタクリル酸水素化の GC/MS クロマトグラム比較

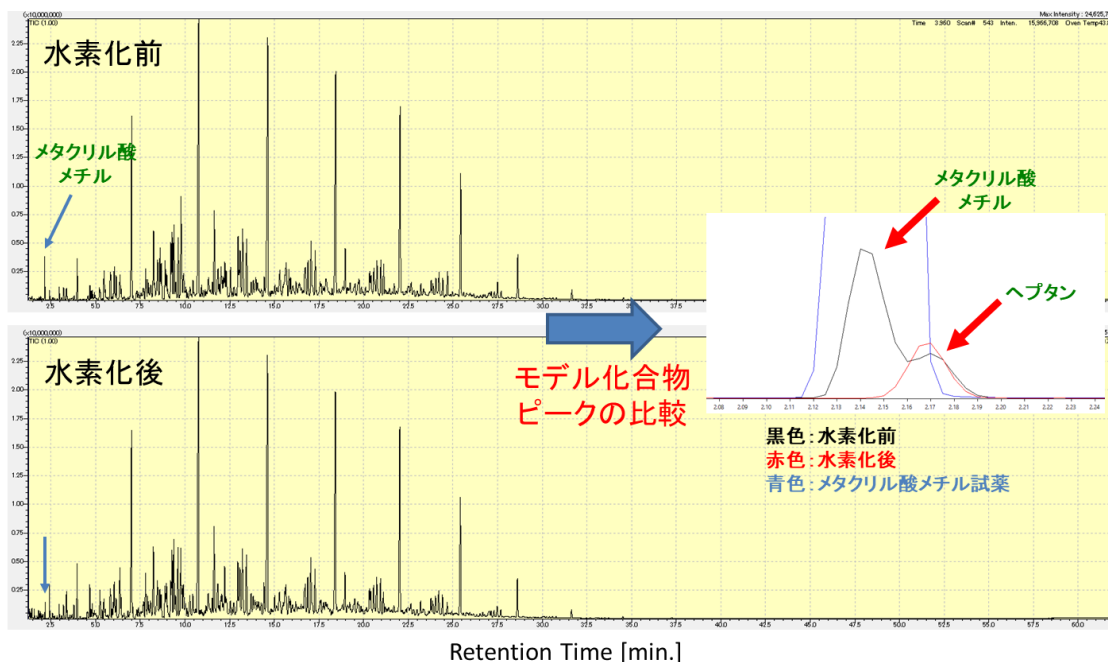


図 8 メタクリル酸メチル水素化の GC/MS クロマトグラム比較

メタクリル酸及びメタクリル酸メチルの両者ピークについて、水素化精製後にピーク消失が確認されたことから、これらの化合物は水素化されたものと判断した。

2.5 熱硬化性樹脂由来化合物(含酸素系)

熱硬化性樹脂由来の含酸素系モデル化合物である、フェノール及びビスフェノール A における水素化前後の GC/MS クロマトグラム比較を図 9、図 10 に各々示す。

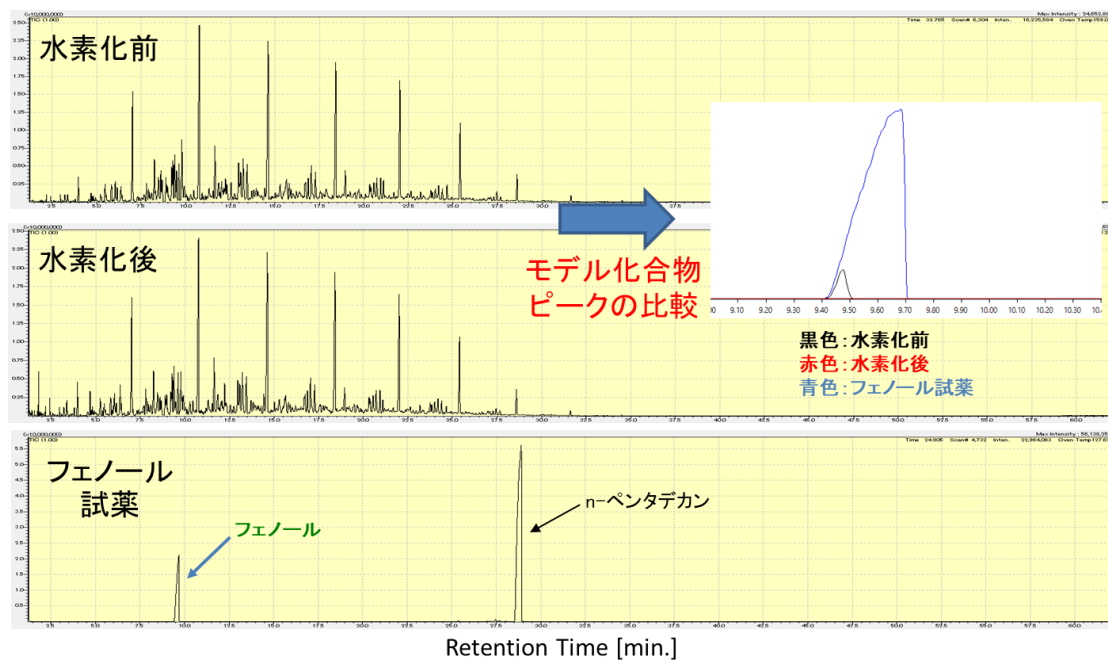


図 9 フェノール水素化の GC/MS クロマトグラム比較

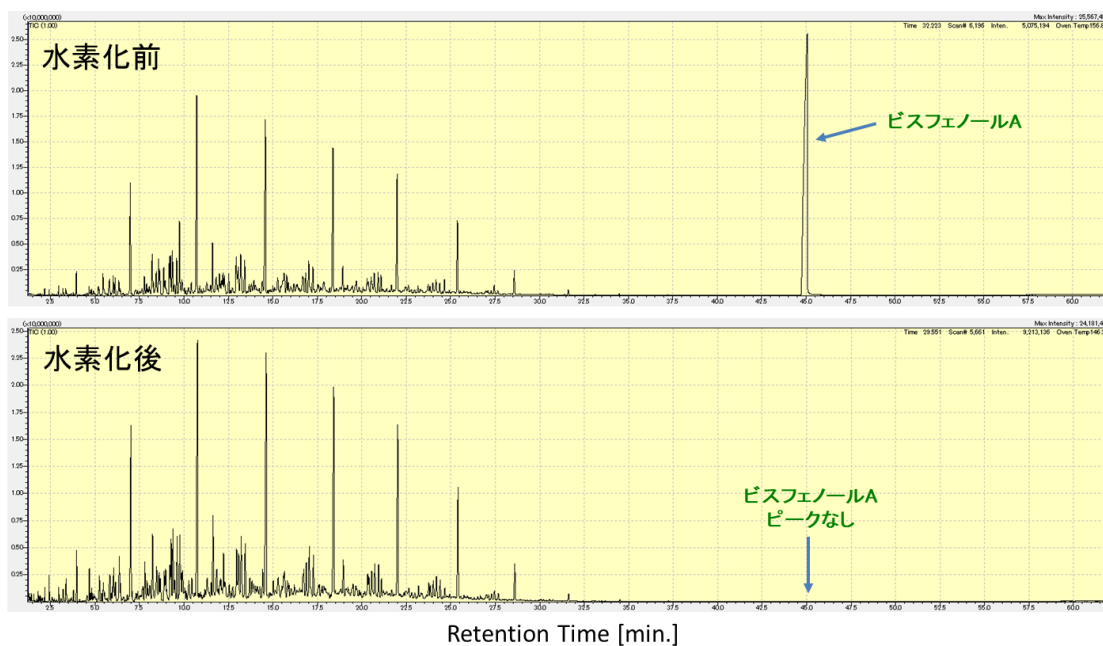


図 10 ビスフェノール A 水素化の GC/MS クロマトグラム比較

フェノール及びビスフェノール A の両者ピークについて、水素化精製後にピーク消失が確認されたことから、これらの化合物は水素化されたものと判断した。

以上のように、今回選定したモデル化合物は、何れも全て水素化されることを確認した。これらの結果より、ASR の実検体分解油についても、当該モデル化合物と同一あるいは類似構造の化合物が含まれていれば、それらの水素化が進行するものと考えた。

3. ASR 分解油を用いた水素化精製

3.1 5 検体の水素化精製まとめ

初めに、5 検体分解油の水素化精製検討を総括したマテリアルバランス(表 6)、水素化前後の油写真(表 7)、及び日本海事検定協会にて実施した元素分析の結果(表 8)を示す。

表 6 各検体分解油の水素化精製マテリアルバランス

	検体①	検体②	検体③	検体④	検体⑤
水素化油収率 [wt%]	92.5	92.1	91.4	89.9	88.0
ガス収率 [wt%](推計)	6.9	7.9	6.3	9.9	11.8
残渣収率 [wt%]	0.58	0.03	2.30	0.20	0.16

表 7 水素化精製前後の油写真

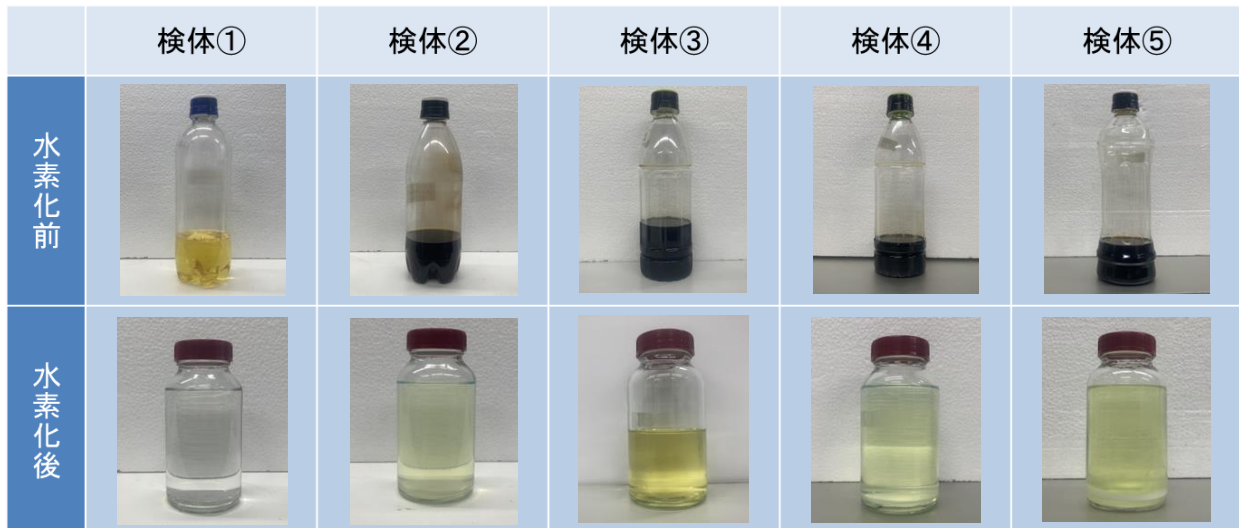


表 8 水素化精製前後の元素分析比較

分析項目	水素化前					水素化後				
	検体①	検体②	検体③	検体④	検体⑤	検体①	検体②	検体③	検体④	検体⑤
有機塩素 (mass ppm)	1 未満	240	230	250	140	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満
無機塩素 (mass ppm)	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満
硫黄分 (mass ppm)	9	250	400	738	241	1 未満	1	29	6	1
窒素濃度 (mass ppm)	70	5,600	13,000	8,700	12,000	1	4	2,700	87	590
塩基性窒素 (mass ppm)	40	2,200	4,300	5,500	7,600	10 未満	10 未満	2,200	52	437
酸素量 (mass %)	0.1 未満	0.7	1.3	1.2	2.4	0.1 未満	0.1 未満	0.3	0.1 未満	0.1 未満

全 5 検体における分解油の水素化精製のマテリアルバランスについて、水素化で得られた水素化油の収率は概ね約 90%、ガス収率(集計)は 6~10%となった。残渣収率については、検体③を除くと概ね 0.2~0.5%であるが、検体③のみは約 2%と、他と比較して高い結果となった。しかし、全検体を通して、マテリアルバランスは大きなバラツキの無い結果であった。

得られた各水素化油の外観は、室温で無色透明あるいは黄色を有する液体であった。また、検体②、③、④及び⑤の水素化精製については、何れもアンモニア臭のある水素化油が得られた。これは、水素化精製前の分解油において、水素化の対象となる塩素、硫黄、及び窒素成分のうち窒素成分の濃度が一番高い為であると考えられる(表 2)。即ち、これらの窒素成分が水素化されて発生するアンモニア量が、他の 2 成分の水素化によって発生する塩化水素、及び硫化水素量よりも圧倒的に多い為であると考えられる。

表 8 より、全検体について、塩素、硫黄、窒素、及び酸素成分の何れの濃度も、水素化精製によって低減していることを確認できた。但し、後段工程を見据えた石油精製設備への投入に向けた品質を考慮すると、水素化後の残留成分の更なる濃度低減検討も必要であると考えられる(検体③、④、⑤)。表 8 における各検体の水素化後の残留成分濃度について、その高低は水素化前の分解油に含まれる各該当成分の濃度に依存すると考えられるが、GC/MS による定性分析結果より、それらの化学構造にも依存する傾向があることが示唆された。また、該当元素を含まない炭化水素化合物についても、オレフィンや芳香環などのように不飽和部を有するものは水素化の対象となる為、これらの不飽和炭化水素化合物の含有量も水素化油の品質に影響を及ぼすものと考えられる。よって、該当元素を含む成分の化学構造、及び油の組成全体の観点からも、水素化油の品質に及ぼす影響について考察する必要があると考える。

3.2 検体①の水素化精製

検体①の水素化精製におけるマテリアルバランス(表 9)、水素化前後の油写真(図 11)、及び元素分析の結果(表 10)を示す。

表 9 検体①分解油の水素化精製マテリアルバランス

原料投入量 [g]	209.5
水素化油収率 [wt%]	92.5
ガス収率 [wt%]	6.9 (推計)
残渣収率 [wt%]	0.58



水素化前



水素化後

図 11 検体①分解油の水素化精製前後の油写真

表 10 検体①分解油の水素化精製前後の元素分析比較

分析項目	試験方法	単位	分析結果	
			水素化前	水素化後
有機塩素	微量電量滴定法	mass ppm	1未満	1未満
無機塩素	水抽出-イオンクロマトグラフィー	mass ppm	1未満	1未満
硫黄分	JIS K2541-6	mass ppm	9	1未満
窒素濃度	JIS K2609	mass ppm	70	1
塩基性窒素	UOP 269	mass ppm	40	10未満
酸素量	COHコーダ	mass %	0.1未満	0.1未満
炭素	COHコーダ	mass %	-	84.9
水素	COHコーダ	mass %	-	15.1

得られた水素化油は、全 5 検体中で一番透明度が高い結果となった(図 11: 水素化後の写真)。また、他の 4 検体の水素化油とは異なり、アンモニア臭の無い水素化油であった。表 10 から読み取れるように、水素化前の分解油の窒素濃度が 70ppm と、他検体のそれらよりも低い為、水素化によるアンモニア生成が少なかったものと考えられる。元素分析については、窒素成分、硫黄成分共に水素化によって濃度が 1ppm 以下に低減しており、塩素成分及び酸素成分は、水素化前後で各々分析下限値未満であった。このように、原料分解油に含まれる該当成分がそれぞれ水素化されたと考えられる結果となった。

3.3 検体②の水素化精製

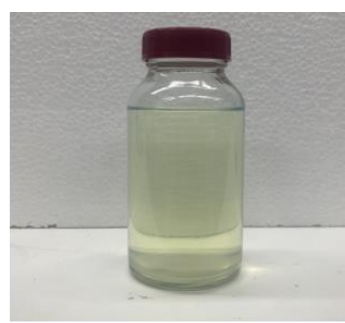
検体②の水素化精製におけるマテリアルバランス(表 11)、水素化前後の油写真(図 12)、及び元素分析の結果(表 12)を示す。

表 11 検体②分解油の水素化精製マテリアルバランス

原料投入量 [g]	217.4
水素化油収率 [wt%]	92.1
ガス収率 [wt%]	7.9 (推計)
残渣収率 [wt%]	0.03



水素化前



水素化後

図 12 検体②分解油の水素化精製前後の油写真

表 12 検体②分解油の水素化精製前後の元素分析比較

分析項目	試験方法	単位	分析結果	
			水素化前	水素化後
有機塩素	微量電量滴定法	mass ppm	240	1未満
無機塩素	水抽出-イオンクロマトグラフィー	mass ppm	1未満	1未満
硫黄分	JIS K2541-6	mass ppm	250	1
窒素濃度	JIS K2609	mass ppm	5,600	4
塩基性窒素	UOP 269	mass ppm	2,200	10未満
酸素量	COHコーダ	mass %	0.7	0.1未満
炭素	COHコーダ	mass %	-	86.0
水素	COHコーダ	mass %	-	14.0

検体②の水素化精製からは、アンモニア臭を有する淡い黄色の水素化油が得られた。アンモニア臭については、表 15 から見られるように、水素化前の分解油中に含まれる窒素成分の水素化によって生成したアンモニアに由来するものと考えられる。検体①の場合と同様、窒素成分をはじめ他の塩素、硫黄成分についても水素化後の各々の濃度が 10ppm 未満まで低減していることを確認した。

3.4 検体③の水素化精製

検体③の水素化精製におけるマテリアルバランス(表 13)、水素化前後の油写真(図 13)、及び元素分析の結果(表 14)を示す。

表 13 検体③分解油の水素化精製マテリアルバランス

原料投入量 [g]	222.2
水素化油収率 [wt%]	91.4
ガス収率 [wt%]	6.3 (推計)
残渣収率 [wt%]	2.3

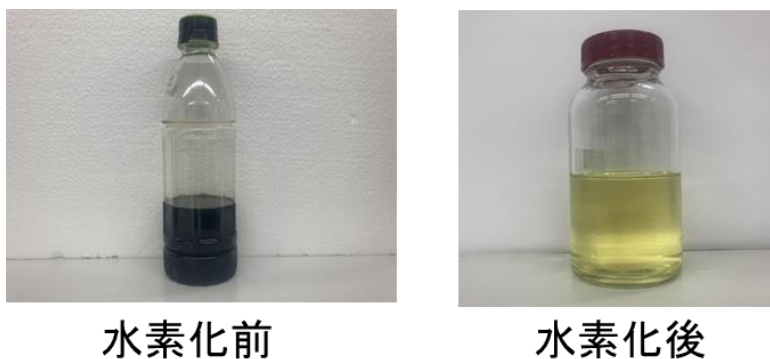


図 13 検体③分解油の水素化精製前後の油写真

表 14 検体③分解油の水素化精製前後の元素分析比較

分析項目	試験方法	単位	分析結果	
			水素化前	水素化後
有機塩素	微量電量滴定法	mass ppm	230	1未満
無機塩素	水抽出-イオンクロマトグラフィー	mass ppm	1未満	1未満
硫黄分	JIS K2541-6	mass ppm	400	29
窒素濃度	JIS K2609	mass ppm	13,000	2,700
塩基性窒素	UOP 269	mass ppm	4,300	2,200
酸素量	COHコーダ	mass %	1.3	0.3
炭素	COHコーダ	mass %	-	86.1
水素	COHコーダ	mass %	-	13.0

得られた水素化油は、図 13 に見られるように黄色であるが、その色付きの度合いは 5 検体の中で一番強い印象であった。また、水素化油はアンモニア臭を有したことから、原料である分解油に含まれる窒素成分の水素化によって生成したアンモニアに由来するものと考えられる。

残渣収率について、検体③の水素化精製では 2.3wt%と、他検体の残渣収率と比較して高くなった。触媒残渣に褐色の薄い皮のような物質が散見されたが、この現象の残渣収率への影響も一要因として考えられる。本検体における水素化精製の再現性を見る他、触媒残渣の分析等も今後必要に応じて実施する検討事項になると考える。

元素分析については、表 14 に見られるように、何れの元素濃度も水素化精製によって低減したが、それらの残留濃度は全検体の中で一番高かった。なお、水素化前後の GC/MS クロマトグラム比較において、熱硬化性樹脂由来と思われるフェノール系含酸素化合物の残留が目立った。また、窒素成分においては、GC/MS での水素化後の残留成分に着目すると、アニリン系などが見られた。これらの化合物は酸素原子あるいは窒素原子の他に芳香環を含み、一分子中に水素化の対象となる部位が複数存在する。よって、化学構造上の特徴が、水素化で残留しやすい傾向と何らかの関係があるのではないかと考える。

3.5 検体④の水素化精製

検体④の水素化精製におけるマテリアルバランス(表 15)、水素化前後の油写真(図 14)、及び元素分析の結果(表 16)を示す。

表 15 検体④分解油の水素化精製マテリアルバランス

原料投入量 [g]	225.0
水素化油収率 [wt%]	89.9
ガス収率 [wt%]	9.9 (推計)
残渣収率 [wt%]	0.20



水素化前



水素化後

図 14 検体④分解油の水素化精製前後の油写真

表 16 検体④分解油の水素化精製前後の元素分析比較

分析項目	試験方法	単位	分析結果	
			水素化前	水素化後
有機塩素	微量電量滴定法	mass ppm	250	1未満
無機塩素	水抽出-イオンクロマトグラフィー	mass ppm	1未満	1未満
硫黄分	JIS K2541-6	mass ppm	738	6
窒素濃度	JIS K2609	mass ppm	8,700	87
塩基性窒素	UOP 269	mass ppm	5,500	52
酸素量	COHコーダ	mass %	1.2	0.1
炭素	COHコーダ	mass %	-	86.0
水素	COHコーダ	mass %	-	13.8

得られた水素化油は、淡い黄色であり、やはり水素化前の分解油に含まれる窒素成分の水素化に由来するものと思われるアンモニア臭を有した。

水素化前後の元素濃度比較について(表 16)、窒素成分は水素化後の残留が見られるものの、100ppm 未満と、検体③、及び⑤の残留窒素成分と比較して低濃度となった。また、塩素成分については水素化によって 1ppm 未満に低減し、ゴムに由来するものと思われる硫黄成分については、水素化によって 10ppm 未満まで各々濃度が低減した。その他、酸素成分は 0.1%未満まで低減する結果となった。

3.6 検体⑤の水素化精製

検体⑤の水素化精製におけるマテリアルバランス(表 17)、水素化前後の油写真(図 15)、及び元素分析の結果(表 18)を示す。

表 17 検体⑤分解油の水素化精製マテリアルバランス

原料投入量 [g]	219.7
水素化油収率 [wt%]	88.0
ガス収率 [wt%]	11.8 (推計)
残渣収率 [wt%]	0.16



水素化前



水素化後

図 15 検体⑤分解油の水素化精製前後の油写真

表 18 検体⑤分解油の水素化精製前後の元素分析比較

分析項目	試験方法	単位	分析結果	
			水素化前	水素化後
有機塩素	微量電量滴定法	mass ppm	140	1未満
無機塩素	水抽出-イオンクロマトグラフィー	mass ppm	1未満	1未満
硫黄分	JIS K2541-6	mass ppm	241	1
窒素濃度	JIS K2609	mass ppm	12,000	590
塩基性窒素	UOP 269	mass ppm	7,600	437
酸素量	COHコーダ	mass %	2.4	0.1未満
炭素	COHコーダ	mass %	-	85.9
水素	COHコーダ	mass %	-	13.7

検体⑤の水素化精製からは、薄黄色のアンモニア臭を有する水素化油が得られた。アンモニア発生は、他検体と同様に、水素化前の分解油に含まれる窒素成分の水素化に因るものと考えられる。

表 18 の水素化前後における元素分析比較より、塩素、硫黄成分については水素化によって 1ppm 以下まで濃度が低減した。窒素成分も、水素化後に濃度が低減したが、約 600ppm 残留という結果になった。GC/MS において水素化後に残留した窒素化合物としては、窒素原子の他に水素化の対象となる構造を有するインドール系などが確認された。酸素成分については、水素化前の分解油中の濃度が 2.4%と全検体の中で一番高いが、水素化後の濃度は 0.1%未満となった。水素化前の高濃度の酸素成分は、検体⑤のタルク成分に由来している可能性がある。タルクは、珪酸マグネシウム水和物 ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) を主成分とする。水素化油の容器下部内壁に白色成分の付着が見られたが(図 15)、この白色成分がタルクに由来するものと考えられる。つまり、この白色成分が水素化油に溶解せずに除去されたことが、酸素成分濃度が 0.1%未満まで低減した一つの要因であると推察した。また、ウレタン由来の酸素成分としては、GC/MS で脂肪族のケトン類が多かったが、本元素分析結果より、これらの含酸素化合物が水素化されやすい傾向にあることも示唆された。

4. まとめ

・実験結果

5 検体分解油の水素化精製を行い、総じて大きなバラツキのないマテリアルバランスにて各々の水素化油を得ることができた。水素化の評価の目安となる塩素、硫黄、窒素、及び酸素成分の濃度については、全検体において、水素化精製後に何れの成分濃度も低減していることが判り、水素化の進行を確認できた。

・知見、考察

検体 1 を除く 4 検体について、得られた水素化油はアンモニア臭を有した。これらの 4 検体は原料分解油中の窒素成分の濃度が他の塩素、硫黄成分よりも高い傾向があった。これらの窒素成分が水素化されて発生するアンモニアによる影響が、水素化油に現れていると考えている。即ち、この現象は窒素成分の水素化が進行している裏付けでもあると考えている。

その他、検体③のフェノール系含酸素化合物で見られたように、水素化の対象となる元素や構造を多く有する化合物は、水素化後に残留しやすい傾向があることも示唆された。

・課題

今回の検討により、5 検体全ての分解油において水素化の進行を確認できた。ただ、窒素成分や酸素成分などについて、水素化精製後にある程度の残留が確認される検体もあった。よって、これらの残留成分を、後段の石油精製設備で受入れ可能な品質まで低減することが必要であると考えられる。

・今後の取り組み

上記課題の達成へ向けて、水素化反応条件の最適化検討を行う(温度、圧力、 H_2 /oil 比)。また、異なる複数のモデル化合物を混合したモデル原料を用いて水素化実験を行い、元素や化学構造が水素化の起こり易さに及ぼす影響の検証も実施していきたいと考える。その他、禁止物質の水素化反応による無害化検討も、必要に応じてモデル実験において実施する計画である。

第6章 生成油の品質評価と経済性評価

1. 目的

本委託事業の最終的な目的は、ASRの油化によるケミカルリサイクル事業の実現であり、その事業化によって低環境負荷性が担保されたASR由来のプラスチック製品（マスバランス方式を適用した形でのCO₂オフセット商品など）を上市することであると考え。そのために本章では、まず生成した油がケミカルリサイクル原料として使用できるのかという品質評価を石油精製会社に協力を仰ぎ、実施してもらった。特に今回は油化プロセスの次に水素化プロセスとプロセスを二段階にしているため、検体の違いに加え、プロセスの違いによっても同社でケミカルリサイクル原料として使用可能であるかという視点から評価してもらった。

また事業化という最終目標に向け、生成油の品質評価の次に重要となるのが経済性評価となる。品質評価と同様に、油化プロセスと水素化プロセスという二つの両プロセスにかかるコストを検討し、経済的に事業として成立できるかの経済性評価を年間2万tのASRを処理する工場を前提として評価し、必要となる処理費の概算を算出した。

2. 生成油の品質評価

2.1 検体の確認

生成油の品質評価の前に各工程から出た検体①～⑤を確認する。それぞれ組成等は検体ごとにある程度決まっており、下記のような一覧表となる。検体①と②は選別されマテリアルリサイクル原料として有価物でリサイクル原料となっていることもあり、実際の事業としては、検体③～⑤がケミカルリサイクル原料のターゲットとなる。

表1 検体組成、割合一覧

検体	用途	組成等	割合 [%]	価値	備考
①	再生PP	PP	≥90	有価	PSP浮沈選別後、浮き
②	再生PP 選別前原料 (ミックスプラ)	PP	約40	有価	PSP浮沈選別前、粉碎後
		PE, PS, PMMA等	約60		
③	再生PP 選別残渣 (浮沈選別：沈降物)	熱硬化性樹脂 (エポキシ), PE, PS, PMMA	≥90	産廃	PSP浮沈選別後、沈み 配線あり
④	再生PP 選別前原料 (ゴム・ウレタン)	ゴム (PVC, ブタジエンゴム, ウレタンゴム等)	情報 なし	産廃	PPP選別、ゴム系 配線、金属魂あり
⑤	風力選別 (軽質ダスト)	ウレタン(発泡性)	54	産廃	PPP選別、ウレタン 木片あり
		PVC等	16		
		タルク	30		

2.2 生成油の品質評価(油化プロセス)

まず油化プロセスのみで生成した油の品質について、各工程から出た検体①～⑤を評価した。第2章のラボ油化実験での結果をまとめた表10をベースに、ケミカルリサイクル原料としての有効性を判断する指標として、石油精製会社の評価を加えた。

表2 油化プロセスでの生成油の品質評価一覧

元素	単位	検体①	検体②	検体③	検体④	検体⑤
有機塩素	mass ppm	1未満	240	230	250	140
無機塩素	mass ppm	1未満	1未満	1未満	1未満	1未満
窒素分	mass ppm	70 ppm	5,600	13,000	8,700	12,000
酸素量	mass %	0.1未満	0.7	1.3	1.2	2.4
硫黄分	mass ppm	9	250	400	738	241
臭素	mass ppm	10未満	10未満	10未満	10未満	10
生成油の評価		○※	×	×	×	×

※ ○：簡易的な評価ではケミカルリサイクル原料として使用できる可能性は高いが、より詳細な分析が必要

×：簡易的な評価でもケミカルリサイクル原料としての使用は難しい油

表2の通り、選別工程で浮いたPPをメインとした検体①であれば、石油精製装置等に最も悪影響のある有機塩素濃度は低く、油化プロセスのみでもケミカルリサイクル原料として活用できる可能性が高い油となった。一方、検体②～⑤の生成油は有機塩素濃度が高く、加えて窒素分や臭素分も高いため、簡易的な評価でもこのままではケミカルリサイクル原料としての使用は難しい油となった。

これは検体②～⑤には、表2にある通り、浮上選別で沈むPVCやABSが混入していることが主な原因であり、油化装置への投入前に全てを完全に除去することが難しい検体であるため、油の組成の中にある塩素や窒素、臭素を別途除去する水素化プロセスが必要となる。

2.3 生成油の品質評価(水素化プロセス)

油化プロセスに加え、更なるその油の性状をよくするための水素化プロセスを行った油の品質について、検体①～⑤の品質を評価した。

その結果が表3となる。このように油化プロセスで×と評価された検体②～⑤の全ての油であっても、水素化プロセス後では油の中の有機塩素濃度を低減でき、ケミカルリサイクル原料として活用できる可能性が高い油となった。つまり、いかなる工程から排出されるASRであっても、油化プロセスと水素化プロセスによってケミカルリサイクル原料となる可能性が示唆された。(検体③も、問題になるのが窒素濃度のため、希釈すれば可能性がある範囲となる)

表 3 水素化プロセスでの生成油の品質評価一覧

元素	単位	検体①		検体②		検体③		検体④		検体⑤	
		水素化前	水素化後	水素化前	水素化後	水素化前	水素化後	水素化前	水素化後	水素化前	水素化後
有機塩素	mass ppm	1 未満	1 未満	240	1 未満	230	1 未満	250	1 未満	140	1 未満
無機塩素	mass ppm	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満
窒素分	mass ppm	70 ppm	1	5,600	4	13,000	2,700	8,700	87	12,000	590
酸素量	mass %	0.1 未満	0.1 未満	0.7	0.1 未満	1.3	0.3	1.2	0.1 未満	2.4	0.1 未満
硫黄分	mass ppm	9	1	250	1	400	29	738	6	241	1
臭素	mass ppm	10 未満		10 未満		10 未満		10 未満		10	
生成油の評価		○	○	×	○	×	△	×	○	×	○

○：簡易的な評価ではケミカルリサイクル原料として使用できる可能性は高いが、より詳細な分析が必要

△：簡易的な評価でもケミカルリサイクル原料としての使用はやや難しい油

×：簡易的な評価でもケミカルリサイクル原料としての使用は難しい油

2.4 評価者のコメント

最終的にケミカルリサイクル原料として生成油を使用する立場であり、生成油の評価者である石油精製会社より下記のようなコメントをもらった。

水素化処理前の分解油については、検体①を除き有機塩素分および窒素分の値が高く、原油由来の原料に薄めて精製設備に投入する場合も処理は厳しいと考えられる。一方、水素化処理した検体は有機塩素分がいずれも低く、窒素分も大幅な低下がみられる。検体③の窒素分は高い値であるが、原油由来の原料に薄めて処理できる可能性がある。硫黄分は精製設備では問題になる数値レベルではなく、水素化処理後の検体については、製油所での原料として活用できる可能性があると考えられる。但し、精製設備の原料とするには、水素化処理後の検体における残存する金属分等の影響を検証する必要がある。

3. 経済性評価

3.1 廃プラの発生量と動向

日本全体で発生する廃プラの量は 2022 年で 822 万 t であり、を図 1 のように日本で発生する廃プラの量は年々減少傾向にある。これは様々な要因が考えられるが、過剰包装の低減やプラスチックの

使用量の削減に加え、各メーカーが自社の製品に使用するプラスチックの量を技術的な改良によって減らしている点や、デフレ下や高齢化での国内消費の低迷などが様々な原因が複合的に重なった結果と考えられる。

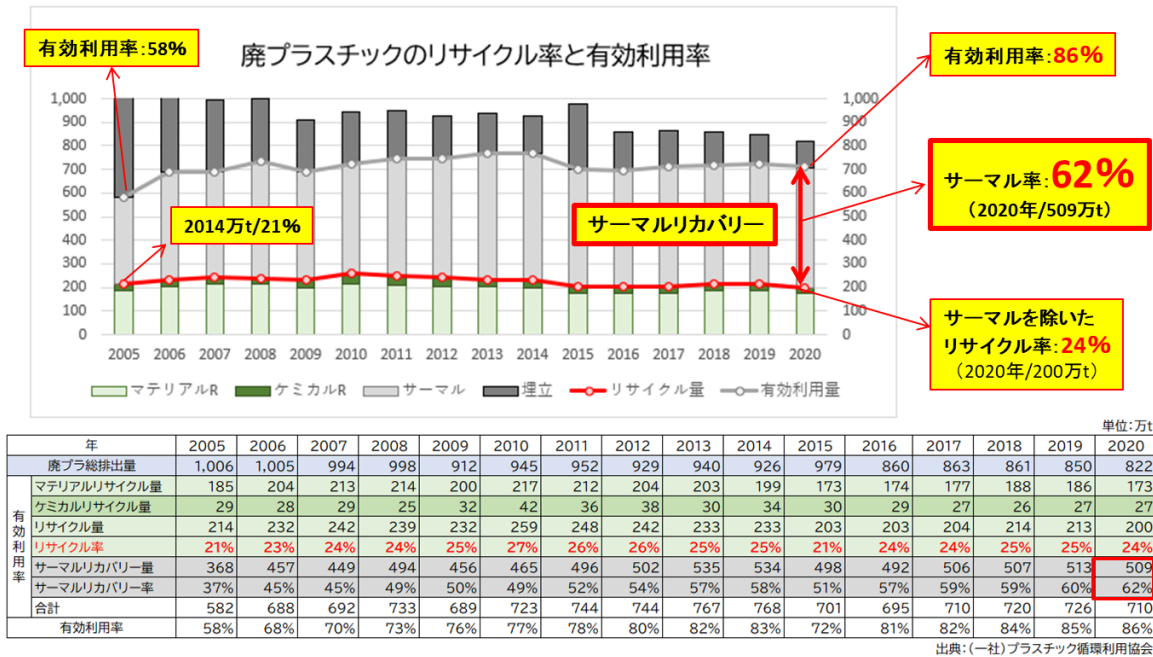


図1 廃プラスチックの発生量と有効利用率

また廃プラ全体での処理方法の推移をみると、図2のように 2005年と2020年を比較してみると、なんとリサイクル量は214万tから200万tと減少しており、ケミカルリサイクルの量も29万tから27万tと減少しており、リサイクルが促進していない実態が明らかとなった。

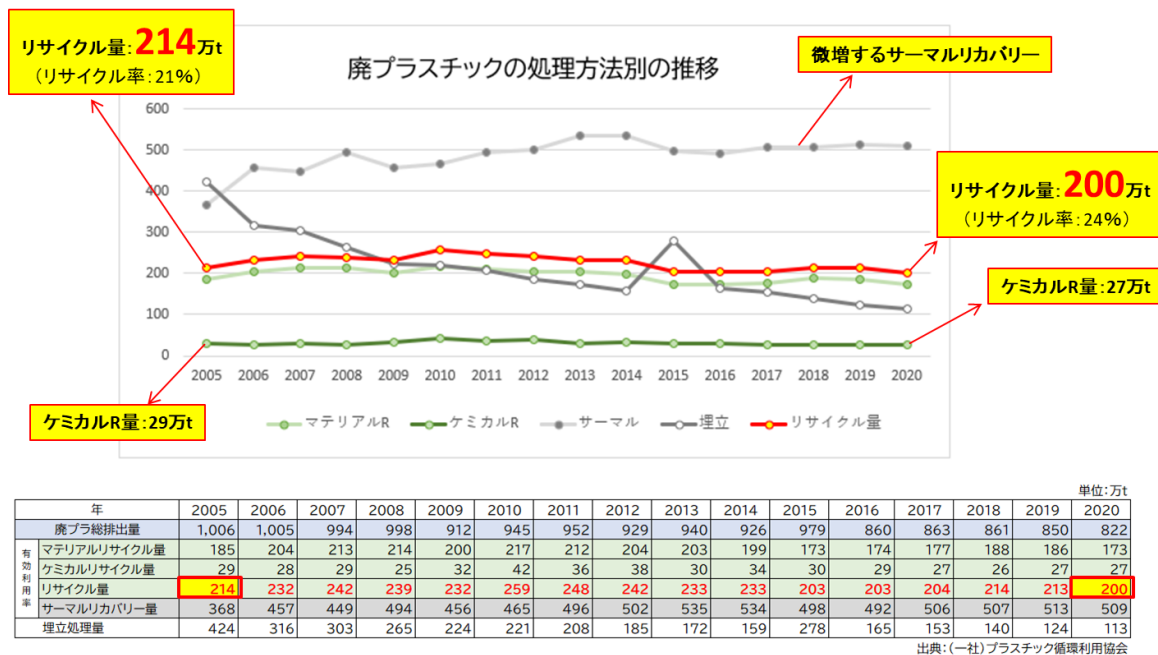
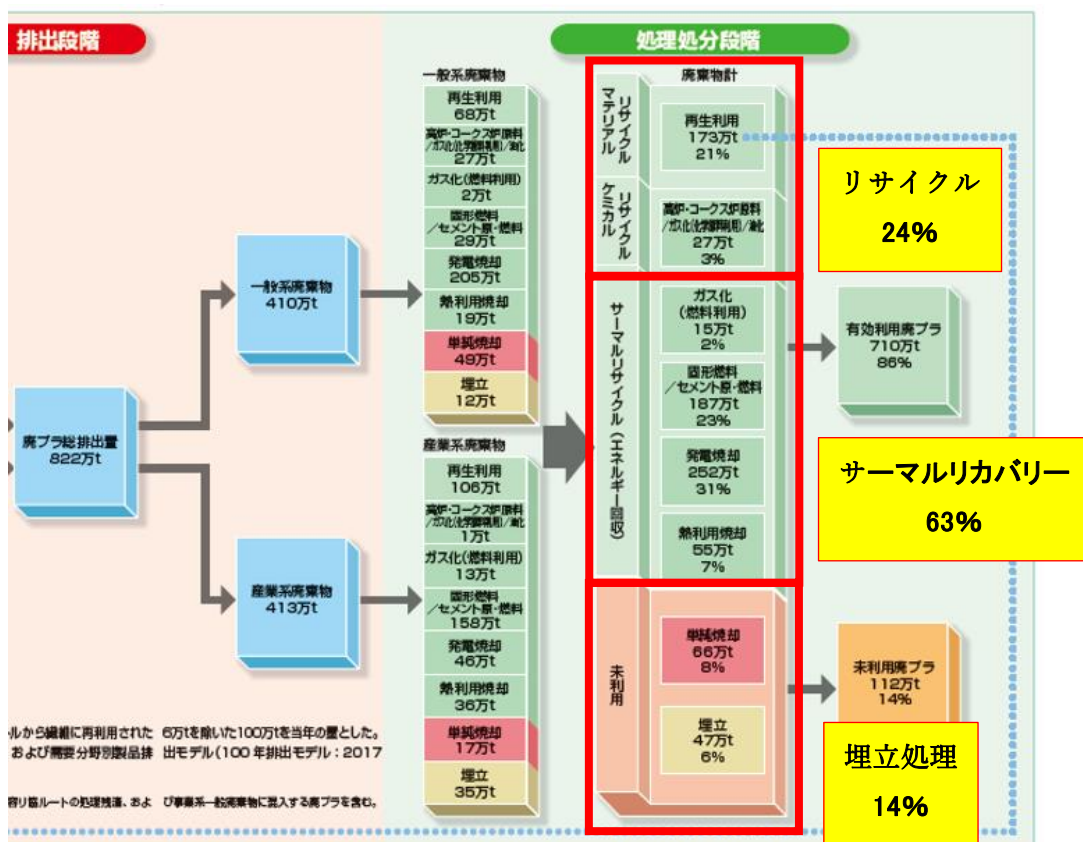


図2 廃プラスチックの処理方法別の推移

つまり、総排出量が減ったこともあり、リサイクル量も微減している中、今まで埋立処理されていたものがサーマルリカバリー原料として活用されており、サーマルリカバリーを含めた廃プラの有効利用率という名目では数値は上昇しているものの、本当のリサイクルという意味においては、マテリアルリサイクルの限界を現実的に示していると考えられる。

真のリサイクルが進まない理由は、現在のケミカルリサイクルでは、コークス炉原料化がメインであり、コークス炉自体が増えないとリサイクル量を拡大することはできないことに加え、マテリアルリサイクルもダウンサイクルであるため、パレットやハンガーなど使用できる用途には限りがあるためリサイクル可能量には限界があるからである。しかし油化によるケミカルリサイクルでは、異物も多く、ABS やウレタン、ゴムなどが混合しているため、サーマルリカバリーしかできなかった検体③、④、⑤などであっても、リサイクルできる可能性が高い。しかもバージン材と同等品質となるアップサイクルであるため、日本全体においても廃プラのリサイクル量を拡大させることが可能となるリサイクル手法として大きな期待をされている。

- マテリアルリサイクル ⇒ ダウンサイクル ⇒ バージンとして活用できない
- 現在のケミカルリサイクル ⇒ コークス炉原料 ⇒ コークス炉がないと拡大できない
- 油化によるケミカルリサイクル
 - ⇒ アップサイクル ⇒ バージンとして活用できる
 - ⇒ サーマルリカバリーしかできなかった混合プラでもリサイクルが可能

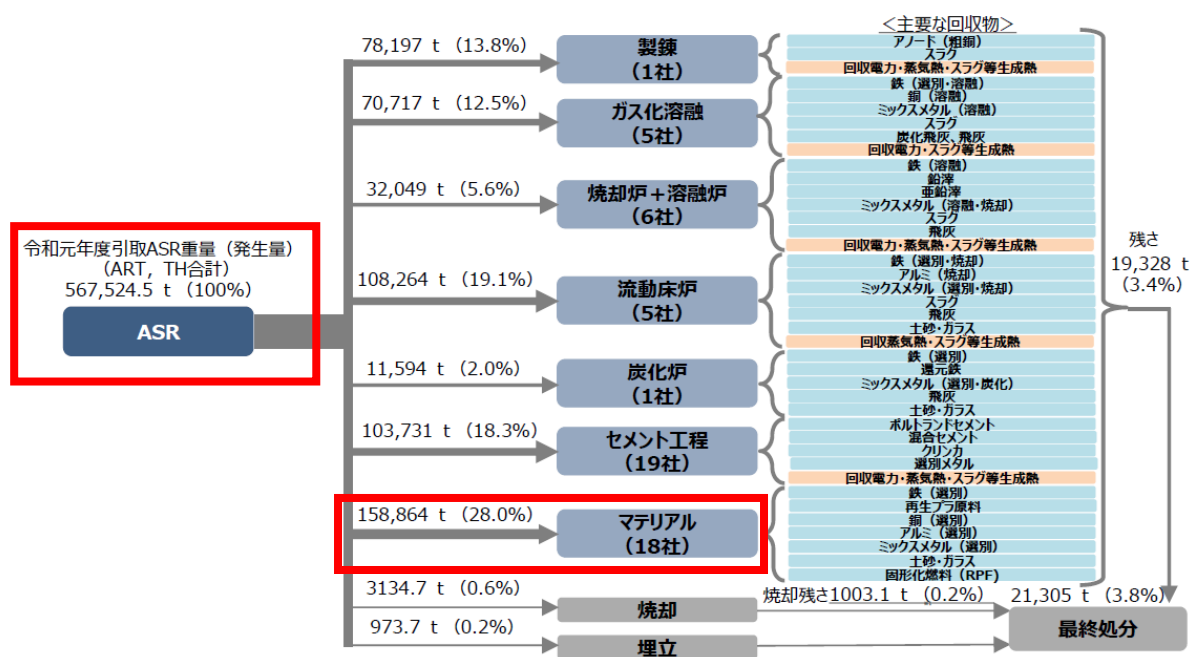


出典：一般社団法人プラスチック循環利用協会

図3 廃プラスチックの利用方法

また一般社団法人プラスチック循環利用協会のデータを参照すると、直近の 2022 年の廃プラの処理方法の詳細をみると図 3 のようになる。一般廃棄物系（一廃系）の廃プラは自治体を通して回収され、産業廃棄物系（産廃系）の廃プラは別のルートで回収され、自動車、家電、建築などそれぞれの業界で排出されるが、図 1、図 2 と同様な傾向の数値であり、2022 年においてもリサイクル（24%）、サーマルリカバリー（63%）、埋立処理（14%）となっている。油化によるケミカルリサイクルが普及することによって、単純埋立処理とサーマルリカバリーを減少させ、24%というリサイクル量を増やすことが可能となる。

全国の廃プラ全体で考えると図 3 のような数字だが、ASR に限定してすると 2020 年の経済産業省、環境省のデータでは、ASR の発生量は、図 4 のように全国で 56.7 万 t であり、マテリアルリサイクルが 28.0%と全国的なリサイクル率の 24%より高い。今後 ASR のリサイクル率と量を向上させるためには、マテリアルリサイクルも増やしていく必要があるが、既にかかなりの割合でマテリアルリサイクルしていることを考えると、油化によるケミカルリサイクルを導入する必要性が不可避であると考えられる。

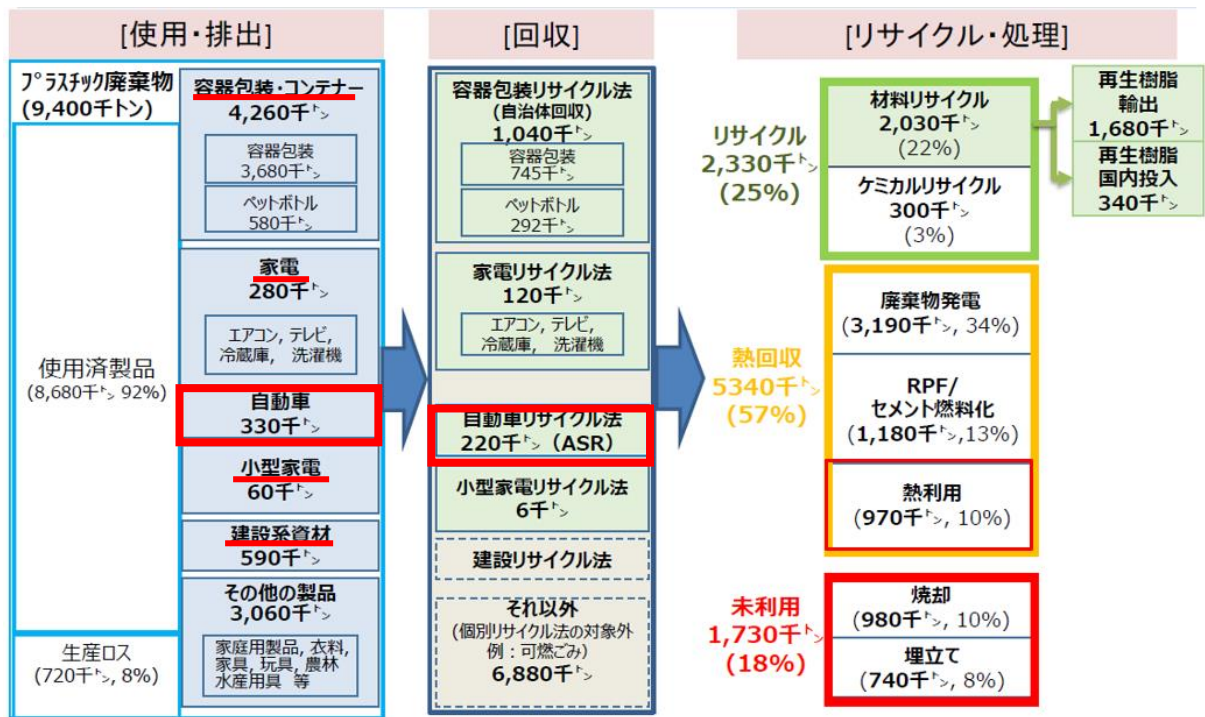


出典：自動車リサイクルの現状（経済産業省、環境省）

図 4 ASR のマテリアルリサイクル率

3.2 各業界における廃プラの発生量と組成

少し古いが 2016 年環境省が発表したデータによると、排出される廃プラを各業界で分けると 2016 年当時の廃プラの排出量は 940 万 t であり、容器包装、コンテナが 45.3%、家電が 3.0%、小型家電が 0.6%、建築系が 6.3%、自動車が年間 33 万 t の 3.5%と図 5 のようになっている。



出典：「マテリアルリサイクルによる天然資源消費量と環境負荷の削減に向けて」（環境省）

図 5 各業界の発生量

またそれぞれの業界で発生する廃プラの組成とケミカルリサイクル難易度（CR 難易度）をまとめると表 4 のようになる。基本的にマテリアルリサイクルは、リサイクルするために少なくとも PP か PE のポリオレフィン系に分別する必要がある、ケミカルリサイクルにおいても安価に油化プロセスのみでサイクルするためには同様のことがいえる。しかし複合素材が多い廃プラや、PP、PE、PS 以外の樹脂の混入が多く分別が難しいため今までサーマルリカバリーしかできないような廃プラに関しては、油化+水素化プロセスにてリサイクルすることが可能となる。

表 4 各業界の発生量と CR 難易度 (2016 年データ)

種類	年間発生量	年間回収量	組成	CR 難易度
ASR	33万t	22万t	PP、ABS、ウレタン、熱硬化性	高
容器包装廃プラ(一廃系)	368万t	75万t	PP、PE、PS、ナイロン、PET	低
容器包装廃プラ(産廃系)	—	80万t	PP、PE、PS、ナイロン、PET	低
PETボトル系	58万t	29万t	PET	中
産廃系廃プラ	306万t	10万t	PP、PE、PS、ABS	高
家電系廃プラ	28万t	12万t	PP、PS、ABS	高
小型家電系廃プラ	60万t	6万t	PP、PS、ABS	高
建築系廃プラ	59万t	—	PP、PE、PVC、ウレタン	高
合計	940万t	826万t		

表 4 では油化プロセスだけではなく、水素化プロセスも必要となる混合廃プラに関しては、CR 難易度を『高』、油化プロセスのみでケミカルリサイクルできるものを『低』と分類した。尚、ASR やその他の業界の廃プラの発生量と回収量も図 5 の数値を引用し、表 4 を作成した。

続いて表 4 のデータを基に各業界の廃プラの発生量と CR の難易度、賦存量を可視化すると図 6 のようになる。様々な業界の廃プラの中でも ASR は樹脂以外の異物も多く、PP、PE、PS 以外の樹脂の混入も割合も高く、それらを油化した場合、油中に塩素、窒素、臭素、酸素などの不純物が混入してしまうため、油化+水素化プロセスの必要があり、処理費が高い廃プラとなる。

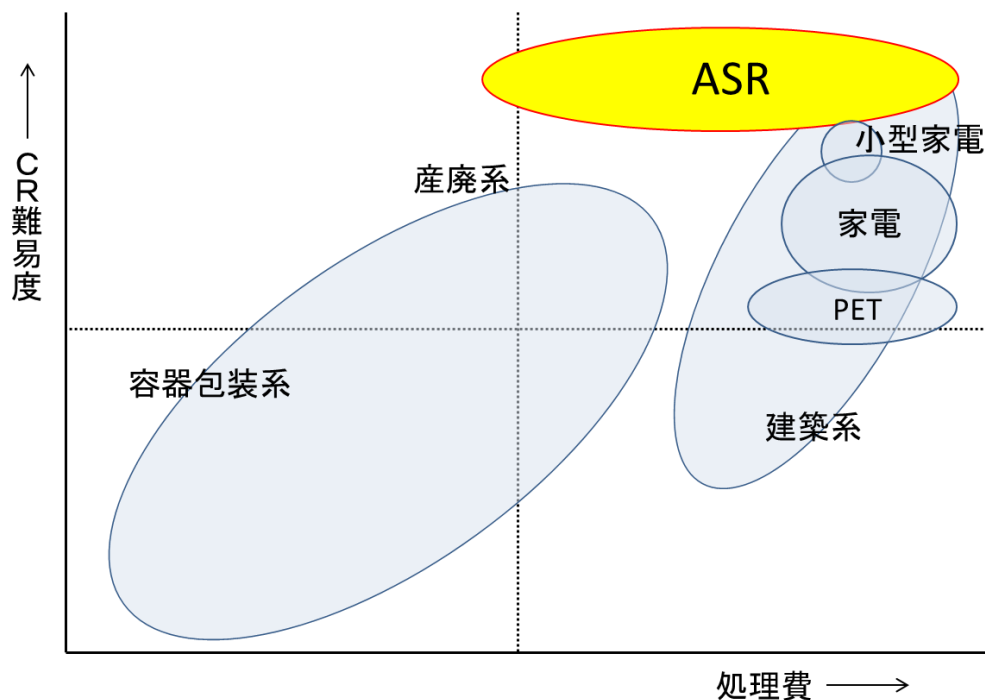


図 5 各業界の廃プラ回収量と処理費

3.3 ASR の経済性評価

検体①～⑤の具体的な処理費を計算するために、第 1 章の処理フローからの発生量、第 2 章の表 7 の油化収率、表 10 の詳細分析結果を基に水素化プロセスの必要性を追記し、第 5 章の水素化精製の結果から各収率を記載し、表 5 のようにまとめた。

ASR を破碎、選別後に浮沈選別を行い、浮き物としてマテリアルリサイクル原料となる検体①は不純物の混入が非常に少ないため水素化プロセスの必要性はないが、その他の検体は水素化プロセスが必要となる。更に検体③、④、⑤は樹脂以外の金属や炭酸カルシウムやフィラー分、ゴム中のカーボンブラックなどもあり、収率も 50%前後と少ないため、総合的な経済性も影響が出る。

表 5 各検体の収率と品質

	単位	検体①	検体②	検体③	検体④	検体⑤
油化収率	wt%	83.2	67.2	55.0	57.4	51.6
水素化収率	wt%	92.5	92.1	91.4	89.9	88.0
最終収率	wt%	77.0	61.9	50.3	51.2	45.4
発生量※	wt%	6	16	9	4	46
有機塩素	mass ppm	1未満	240	230	250	140
無機塩素	mass ppm	1未満	1未満	1未満	1未満	1未満
窒素分	mass ppm	70 ppm	5,600	13,000	8,700	12,000
酸素量	mass %	0.1未満	0.7	1.3	1.2	2.4
硫黄分	mass ppm	9	250	400	738	241
臭素	mass ppm	10未満	10未満	10未満	10未満	10
水素化の必要性		無	有	有	有	有

※：マキウラ鋼業株式会社の ASR の処理フローの発生量となる

それらを考慮し、各検体の処理費を表すと図 6 のようになる。尚、第 3 章での樹脂以外の影響調査、第 4 章でそれぞれの残渣を分析した結果、樹脂以外や残渣が処理費に大きな影響を与えることはないことが明確になったため、処理費を左右する大きなポイントは収率と水素化プロセスの有無となる。

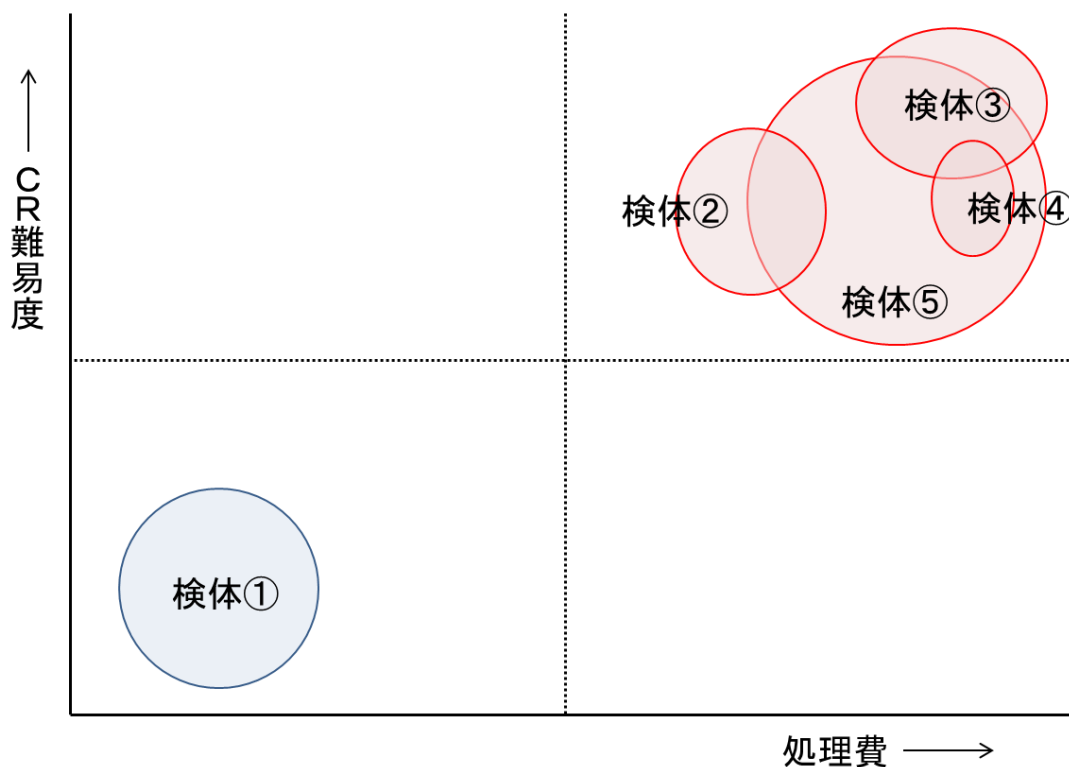


図 6 各検体の処理費と発生量

また年間 2 万 t の ASR の油化工場を想定し、下記の表 6 のような事業計画を作成した。検体①はマテリアルリサイクル原料となるため、ターゲットとなる原料は検体③～⑤とした。検体②は検体①の選別前であるため、メイン対象から外し、下記のような条件にて表 6 を作成した。

- ・年間 2 万 t (検体③～⑤) の油化工場
- ・生成油の収率は平均 50 wt%、比重 0.8、40 円/L にて試算
- ・年間稼働時間：7,500 h にて試算
- ・ASR1 kgに必要な電力量を 2 kwh として試算
- ・水素化に必要な水素量：280 L/生成油 L
- ・水素コスト：1 Nm³=100 円として試算

上記の条件により試算すると、表 6 の通り、**必要な ASR の処理費は 60 円/kg**となった。

表 6 事業計画(年間 2 万 t 処理)

種類	年間量	単価	金額(円)
売上			
ASR処理費	2万t	60円/kg	1,200,000,000
生成油販売益	1.25万kl	40円/L	500,000,000
費用			
人件費		45名	270,000,000
光熱費	2Mwh	18円/kwh	270,000,000
水素コスト		100円/Nm3	350,000,000
触媒コスト			50,000,000
保守メンテナンス費			50,000,000
廃棄物処理費			100,000,000
諸経費			100,000,000
設備償却費(装置)			400,000,000
設備償却費(建屋)			60,000,000
売上合計			1,700,000,000
費用合計			1,650,000,000
営業利益			50,000,000

また概算ではあるが、油化プロセスのみの検体①と油化+水素化プロセスが必要となる検体②～⑤の処理費の概算を示したのが図 7 となる。生成油の売上もあり、全てを処理費換算するのは難しいが、概算で油化プロセスのみであれば 25 円/kg程度、水素コストプロセスも必要であれば、60 円/kg程度であると考えられる。

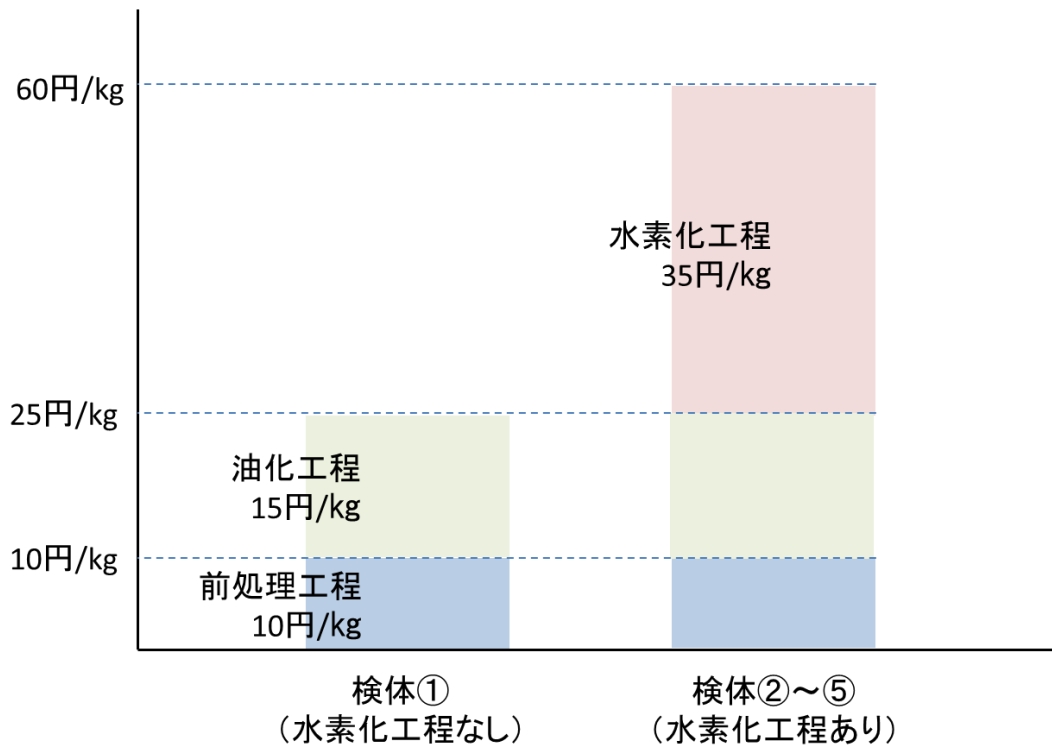


図7 各検体の処理費イメージ

ただし、表6の事業計画も含め、より数字の精度を上げるためには、今後、水素化プロセスのロングランやプロセスの最適化が不可欠であり、それに伴った設備の見積も再度精査する必要があり、あくまでも現時点での概算の目安となる。

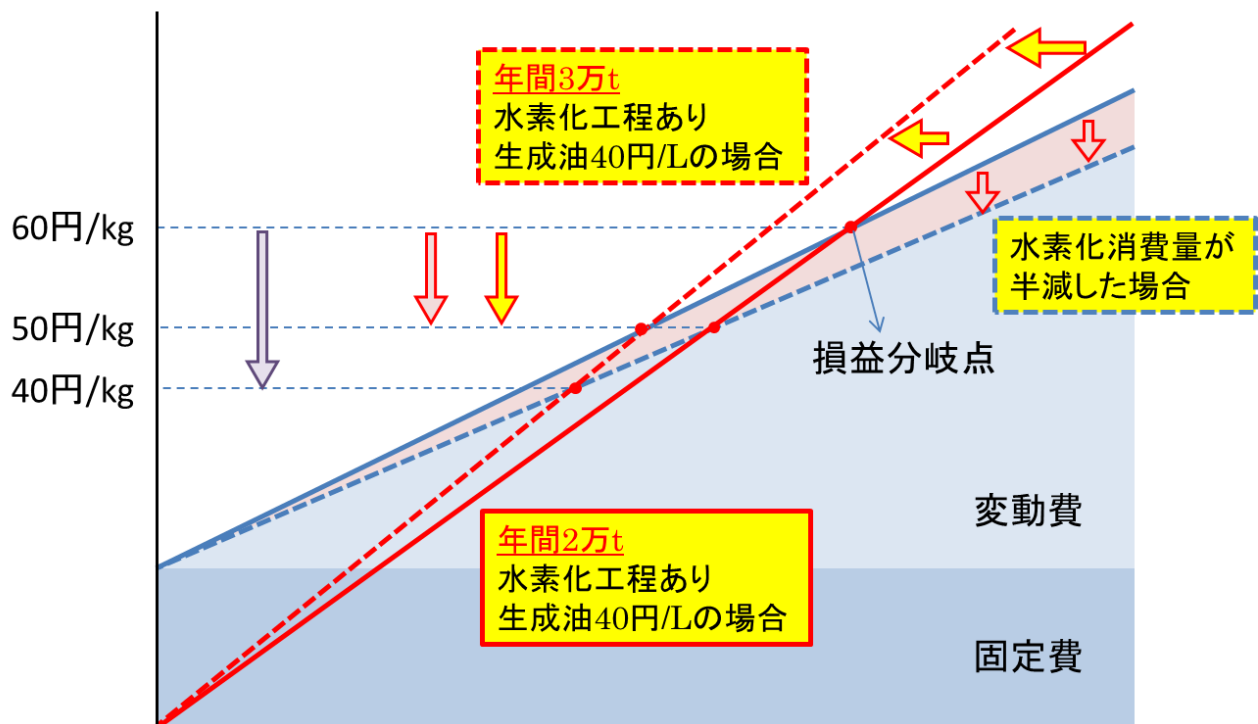


図8 ASR 油化事業損益分岐点

現時点で経済性評価した ASR のケミカルリサイクル事業の損益分岐を図 8 に示した。現時点の想定では ASR の必要処理費は 60 円/kg となるが、固定費が変わらないという前提で処理量を年間 2 万 t から 3 万 t に増産できると必要処理費は 50 円/kg となり、水素消費量が半減、もしくは水素コストが半減すれば同様に必要処理費は 50 円/kg となる。当然、処理量を年間 3 万 t にし、更に水素コストの半減が実現できれば必要処理費は 40 円/kg となる。

また今回、水素使用量の算定に関しては検体③の生成油を GC/MS 分析し、表 7 のように水素化した際に必要となる水素量を表 8 のように計算した。表 8 はオレフィン、シクロオレフィン、芳香族、含酸素化合物、含窒素化合物を特定し、組成割合を計算した一覧となる。今後、プロセス開発、触媒開発を行うことで必要となる水素消費量の低減も事業化に対して重要な課題となる。

表 7 検体③の分解油の 1 L 当たりの必要水素量

		H2消費量[mol]	H2消費量 [L]
炭化水素	パラフィン	0	0
	オレフィン	1.45	32.4
	シクロオレフィン	0.06	1.3
	芳香族	7.46	167.2
含酸素	フェノール	1.34	30.1
	アルコール	0.28	6.3
	ケトン	0.12	2.7
	シクロケトン	0.06	1.4
	エーテル	0.08	1.8
	アルデヒド	0.09	2.1
	カルボン酸	0.04	1.0
	エステル	0.01	0.3
含窒素		1.27	28.4
含硫黄		N.D	0.0
含塩素		N.D	0.0
含窒素-硫黄		0.21	4.7
Total		12.5	279.6

表 8 検体③の分解油の GC/MS 分析による組成一覧

RT [min]	Area [μg]	Area [%]	Best Target	MW	揮発性	沸点	分子式	MW	炭素数	POH	不飽和度		
12	1.715	1.696	1.730	640	86,24,353	1.236	Aro Benzene	78	6	Aro	7	A	3
12	4.980	2.93	3.010	744	117,50,1368	2.533	Aro Toluene	92	6	Aro	8	A	3
63	4.310	5.125	5.315	842	326,324,106	4.661	Aro Ethylbenzene	106	6	Aro	9	A	3
65	5.405	5.425	5.560	850	25,292,860	0.361	Aro p-Xylene	126	6	Aro	9	A	3
71	6.020	5.94	6.070	868	324,433,795	4.627	Aro Styrene	104	6	Aro	9	A	4
73	6.150	6.13	6.260	873	13,942,824	0.199	Aro o-Xylene	126	6	Aro	9	A	3
82	7.260	7.195	7.345	908	148,844,39	2.123	Aro Benzene, 1-methylethyl-	120	6	Aro	10	A	3
88	7.930	7.81	8.000	926	8,120,127	0.116	Aro Benzene, 2-propenyl- + Octene, 3,5-dimethyl-	118	6	Aro	10	A	4
90	8.290	8.245	8.340	936	23,989,013	0.342	Aro Benzene, propyl-	120	6	Aro	10	A	3
93	8.875	8.795	8.920	951	12,537,095	0.179	Aro Benzene, 1,3,5-trimethyl-	120	6	Aro	10	A	3
96	9.255	9.155	9.320	962	295,260,453	4.211	Aro m Methylstyrene	118	6	Aro	10	A	4
99	9.600	9.555	9.650	971	4,548,264	0.065	Aro Benzene, 2-propenyl-	118	6	Aro	10	A	4
100	9.755	9.71	9.845	975	13,013,312	0.186	Aro Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	120	6	Aro	10	A	3
110	10.855	10.825	10.935	1,004	12,709,825	0.181	Aro Benzene, 1-propenyl-	118	6	Aro	11	A	4
111	10.980	10.94	11.020	1,008	6,823,023	0.097	Aro Benzene, 1-methyl-3-(1-methylethyl)-	134	6	Aro	11	A	3
115	11.560	11.53	11.585	1,023	1,268,422	0.017	Aro Benzene, 3-butenyl-	132	6	Aro	11	A	4
120	12.160	12.145	12.210	1,038	10,463,974	0.149	Aro Benzene, butyl-	134	6	Aro	11	A	3
121	12.280	12.235	12.355	1,041	4,007,038	0.057	Aro Benzene, 1-ethyl-3,5-dimethyl-	134	6	Aro	11	A	3
131	14.325	14.21	14.385	1,094	7,771,594	0.111	Aro 10 Benzene, 4-ethenyl-1,2-dimethyl-	132	6	Aro	11	A	3
138	14.425	14.39	14.470	1,097	2,773,467	0.040	Aro Benzene, 1-ethyl-2,3-dimethyl-	134	6	Aro	11	A	3
149	15.785	15.74	15.805	1,133	1,132,663	0.016	Aro Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-	132	6	Aro	12	A	3
151	16.035	15.98	16.125	1,139	3,879,351	0.053	Aro Benzene, pentyl-	148	6	Aro	12	A	3
154	16.43	16.36	16.525	1,149	18,866,22	0.269	Aro Naphthalene	128	6	Aro	12	A	5
159	17.015	16.99	17.070	1,165	8,839,275	0.126	Aro ?	128	6	Aro	12	A	3
160	17.10	17.07	17.205	1,169	2,963,661	0.042	Aro 2-Ethyl-2,3-dihydro-1H-indene	146	6	Aro	12	A	3
162	17.33	17.29	17.370	1,173	2,370,667	0.034	Aro 1H-Indene, 2,3-dihydro-1,6-dimethyl-	146	6	Aro	12	A	3
164	17.595	17.56	17.650	1,180	3,434,188	0.049	Aro ?	6	Aro	12	A	3	
170	18.24	18.175	18.3	1,197	4,855,949	0.069	Aro Benzene, cyclopentyl-	6	Aro	12	A	3	
171	18.965	18.92	19.0	1,217	7,540,433	0.108	Aro 1H-Indene, 2,3-dihydro-1,1,5-trimethyl-	6	Aro	13	A	3	
178	19.05	19.02	19.1	1,220	1,599,910	0.023	Aro ?	6	Aro	13	A	3	
180	19.255	19.22	19.3	1,225	2,752,054	0.039	Aro Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-1-methyl-	6	Aro	13	A	3	
182	19.475	19.435	19.5	1,231	1,813,984	0.025	Aro Naphthalene, 1,2-dihydro-4-methyl-	6	Aro	13	A	4	
181	20.135	20.10	20.2	1,251	2,558,760	0.036	Aro 1H-Indene, 1,1,2-trimethyl-	6	Aro	13	A	4	
190	20.575	20.48	20.6	1,290	9,294,230	0.133	Aro Naphthalene, 1-methyl-	6	Aro	13	A	5	
192	20.83	20.76	20.9	1,299	5,338,786	0.079	Aro Benzene, 1-cyclopentyl-1-yl-	6	Aro	13	A	4	
194	21.04	21	21.1	1,275	17,986,584	0.257	Aro Naphthalene, 2-methyl-	142	6	Aro	13	A	5
209	22.98	22.9	23.0	1,330	5,433,757	0.077	Aro ?	6	Aro	14	A	3	
213	23.43	23.38	23.5	1,343	11,370,148	0.248	Aro Biphenyl	6	Aro	14	A	6	
216	24.025	23.915	24.1	1,361	14,872,660	0.212	Aro Naphthalene, 2-ethyl-	156	6	Aro	14	A	5
222	24.81	24.72	24.9	1,384	15,276,011	0.218	Aro Naphthalene, 1,3-dimethyl-	6	Aro	14	A	5	
223	24.915	24.885	24.9	1,387	1,205,497	0.017	Aro Naphthalene, 1,6-dimethyl-	6	Aro	14	A	5	
225	25.15	25.095	25.2	1,394	8,577,339	0.122	Aro Diphenylmethane	6	Aro	14	A	6	
230	25.855	25.8	25.9	1,415	892,284	0.012	Aro Naphthalene, 1,4-dimethyl-	6	Aro	15	A	5	
232	26.1	26.025	26.2	1,423	2,425,030	0.035	Aro Naphthalene, 2-(1-methylethyl)- + i.P. ?	6	Aro	15	A	5	
238	26.36	26.39	27.0	1,449	22,745,328	0.324	Aro 1,1'-Biphenyl, 3-methyl-	6	Aro	15	A	6	
240	27.1	27.06	27.2	1,454	2,428,439	0.035	Aro 1,1'-Biphenyl, 2,3'-dimethyl-	6	Aro	15	A	6	
245	27.645	27.595	27.7	1,470	5,713,923	0.081	Aro Naphthalene, 1,4,5-trimethyl-	6	Aro	15	A	5	
247	27.92	27.88	28.0	1,479	2,294,664	0.033	Aro Naphthalene, 2-(1-methylethyl)-	6	Aro	15	A	5	
248	27.985	27.955	28.0	1,481	2,550,033	0.036	Aro Biphenyl	182	6	Aro	15	A	6
260	29.8	29.745	29.8	1,539	11,063,891	0.158	Aro 2,2'-Dimethylbiphenyl	6	Aro	16	A	6	
277	31.735	31.7	31.8	1,603	3,778,505	0.054	Aro 4-Ethylbiphenyl	6	Aro	17	A	6	
278	31.82	31.795	31.9	1,606	1,538,960	0.021	Aro Anthracene, 1-methyl-, (E)-	6	Aro	17	A	7	
280	32.03	31.945	32.1	1,613	106,376,004	1.526	Aro Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis	6	Aro	17	A	3	
282	32.46	32.395	32.5	1,627	1,532,943	0.022	Aro ?	6	Aro	17	A	3	
283	32.515	32.485	32.6	1,629	1,719,465	0.025	Aro Benzene, 1,1'-propylidenebis-	6	Aro	17	A	6	
284	32.67	32.575	32.7	1,634	6,646,995	0.095	Aro 1,1'-Biphenyl, 4-(1-methylethyl)-	6	Aro	17	A	6	
285	32.825	32.78	32.9	1,639	1,431,608	0.020	Aro ?	6	Aro	17	A	3	
286	32.94	32.87	33.0	1,643	17,940,570	0.256	Aro Benzene, 1,1'-(1-methyl-1,3-propanediyl)bis-	6	Aro	17	A	6	
288	33.15	33.11	33.2	1,650	4,834,369	0.069	Aro 9H-Fluorene, 1-methyl-	6	Aro	17	A	6	
289	33.215	33.26	33.4	1,656	5,749,065	0.082	Aro 9H-Fluorene, 4-methyl-	6	Aro	17	A	6	
290	33.48	33.435	33.6	1,661	3,433,672	0.049	Aro Anthracene, 9,10-dihydro-	6	Aro	17	A	6	
290	33.94	33.895	34.1	1,676	11,774,153	0.168	Aro Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-2-phenyl-	6	Aro	17	A	6	
297	34.70	34.675	35.0	1,710	13,311,824	0.190	Aro Benzene, 1,1'-(1,4-butanediyl)bis-	6	Aro	18	A	6	
299	35.145	35.09	35.2	1,718	7,642,405	0.109	Aro Phenanthrene	6	Aro	18	A	7	
300	35.44	35.395	35.5	1,729	2,696,928	0.038	Aro 9H-Fluorene, 9-methylene-	6	Aro	18	A	7	
304	35.65	35.595	35.7	1,736	28,545,489	0.407	Aro ?	6	Aro	18	A	3	
308	36.13	36.085	36.2	1,754	16,880,584	0.241	Aro Benzene, 1,1'-(3-methyl-1-propene-1,3-diy)bis-	6	Aro	18	A	7	
318	37.36	37.31	37.4	1,799	19,051,064	0.272	Aro 1H-Indene, 1-(phenylmethylene)- + ?	6	Aro	19	A	4	
322	37.87	37.825	38.0	1,819	9,055,857	0.129	Aro Benzene, 1,1'-(1-ethyl-1,3-propanediyl)bis-	6	Aro	19	A	8	
325	38.29	38.235	38.3	1,837	948,220	0.014	Aro Anthracene, 1-methyl-	6	Aro	19	A	7	
333	38.395	38.33	38.5	1,841	7,835,463	0.112	Aro Anthracene, 2-methyl-	6	Aro	19	A	7	
333	38.59	38.54	38.7	1,849	6,878,934	0.098	Aro Benzene, 1,1'-(1,4-dimethyl-1,4-butanediyl)bis-	6	Aro	19	A	6	
331	38.975	38.955	39.1	1,865	5,379,885	0.077	Aro Phenanthrene, 3-methyl-	6	Aro	19	A	7	
333	39.235	39.175	39.3	1,876	1,740,066	0.025	Aro ?	6	Aro	19	A	3	
334	39.305	39.275	39.3	1,878	422,493	0.005	Aro 1-Pentene, 1,5-diphenyl-	6	Aro	19	A	7	
340	40.175	40.12	40.3	1,914	16,324,760	0.233	Aro Naphthalene, 2-phenyl-	6	Aro	20	A	7	
342	40.39	40.335	40.4	1,923	8,164,879	0.116	Aro ?	6	Aro	20	A	3	
362	43.35	43.29	43.4	2,045	6,623,928	0.094	Aro 4H-Benz[de]anthracene, 5,6-dihydro-	6	Aro	21	A	7	
366	43.83	43.805	43.9	2,065	5,752,697	0.082	Aro ?	6	Aro	21	A	3	
367	44.04	43.97	44.1	2,074	3,991,879	0.057	Aro Benzene, tetradecyl-	6	Aro	21	A	3	
370	44.885	44.86	44.9	2,083	14,010,928	0.200	Aro m-Terphenyl	6	Aro	21	A	9	
380	46.04	45.96	46.1	2,166	9,584,074	0.137	Aro 2-Isopropyl-10-methylphenanthrene	6	Aro	22	A	7	
385	46.94	46.845	46.6	2,192	4,633,930	0.066	Aro 1,1'-(4,1'-Terphenyl-, 3'-methyl-	6	Aro	22	A	12	
391	46.915	46.86	46.9	2,208	981,662	0.014	Aro Benzene, 1,4-bis(phenylmethyl)-	6	Aro	23	A	9	
397	48.37	48.33	48.4	2,283	1,176,840	0.017	Aro Benzene, hexadecyl-	6	Aro	23	A	3	
398	48.52	48.48	48.6	2,291	822,786	0.012	Aro 1,9-Diphenyl-1,3,5,7-nonatetraene	6	Aro	23	A	10	
428	52.075	52.025	52.1	2,492	1,078,526	0.015	Aro Benzene, octadecyl-	6	Aro	25	A	3	
448	57.815	57.77	57.9	2,868	1,363,510	0.019	Aro 1,1,3,1'-Terphenyl, 9'-phenyl-	6	Aro	29	A	12	

4. まとめ

本事業において、どのような工程で排出される ASR であっても水素化処理を行えば、石油精製会社のケミカルリサイクル原料として使用できる可能性があることが示唆された。

経済性評価としてもある程度の指標を作成できたが、現時点ではあくまで概算での計算であり、今後コストの重要な部分を占める水素化コストを正確に検証するためには、水素化装置の長期連続運転による触媒の寿命を検証することや油化工場のロケーション、ASR の搬送ルート、処理量の最適化などの検討も必要であり、それらを含めた低環境負荷性の可視化、精緻な LCA 分析なども必要となる。

加えて最終的にケミカルリサイクル原料とするためには石油精製会社による詳細分析試験が必要であり、更に環境規制に抵触する忌避物質が油化、水素化により分解しているかを検証する必要もある。

第7章 LCA 評価について

1. 目的

本委託事業の最終的な目的は事業化であるが、そのためには昨今の環境負荷低減性を可視化する LCA 評価は不可欠となる。特に今回は難処理廃プラスチックの一つである ASR がターゲットであり、それらをリサイクルする上では様々なプロセスが必要であり、相応のエネルギーが必要となる。本章では投入エネルギーを把握し、その上でどの程度の低環境負荷性があるのか LCA 評価を行った。今後、欧州を含めて益々厳しくなる自動車に対する環境規制をどのように達成していくかの鍵を握っているのが LCA であるが、従来の LCA 手法では低環境負荷性を正確に示すことが難しいため、今後は LCA をベースとしながら、本章で記載するような整合性と客観性と利便性を併せ持つ分析手法が必要となる。

2. LCA 評価

2.1 既存の LCA 評価

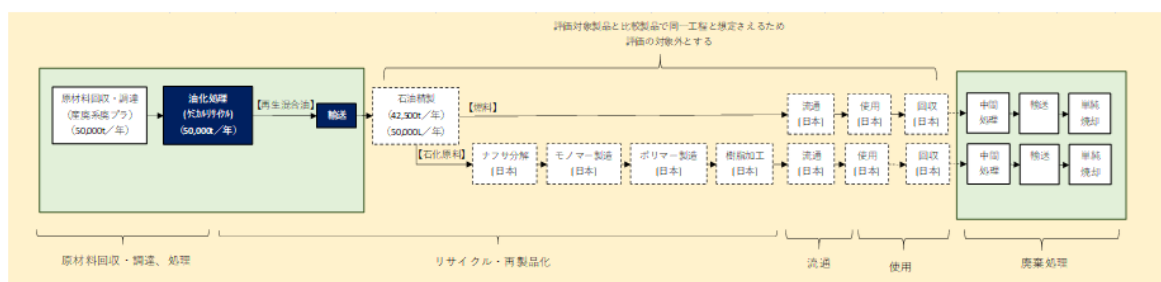
2020 年の環境省の『脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業』の報告書を参考に、既存の LCA 評価を行った。この中の『廃プラスチックの油化プロセスに関する LCA 分析』では下記の図 1、図 2 ように廃プラ 1 kg のケミカルリサイクルで 2.752 kg-CO₂/kg の削減効果となる。

<ライフサイクルでの CO₂削減効果>

条件設定

<機能単位> 廃プラスチック1kgの処理

<評価対象製品> HiCOP方式油化処理技術による再生混合油>



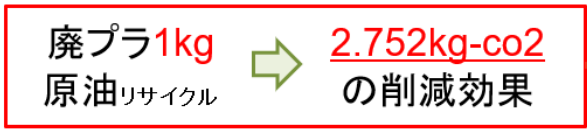
<ベースライン: 焼却処理と原油の採掘・海上輸送>



図 1 既存の LCA による廃プラ油化の評価

<ライフサイクルでのCO2削減効果>

検討・評価の状況、結果



【再生混合油の生成までを評価】

未利用の廃プラスチックを油化することを想定していることからベースラインは単純焼却とした。

原単位 (単位)	①評価対象製品						②ベースライン						③削減量(②-①)						
	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	
エネルギー起源	0.950	2.641				3.591	0.779	2.887				2.677	6.343	-0.171	0.246	0	0	2.677	2.752
非エネルギー起源																			
合計	0.950	2.641	0	0	0	3.591	0.779	2.887	0	0	2.677	6.343	-0.171	0.246	0	0	2.677	2.752	

廃プラスチック処理量 50,000 トン/年		①評価対象製品						②ベースライン						③削減量(②-①)					
原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計	原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計		
エネルギー起源	47,808	132,046			179,554	38,954	144,355			133,838	317,148	-8,554	12,309	0	0	133,838	137,594		
非エネルギー起源																			
合計	47,808	132,046	0	0	179,554	38,954	144,355	0	0	133,838	317,148	-8,554	12,309	0	0	133,838	137,594		

図 2 既存の LCA による廃プラ油化の CO2 削減効果

ケミカルリサイクルの中でも原油としてリサイクルするのか、ナフサ、灯油、軽油としてリサイクルするのかの 2 種類に加え、マテリアルリサイクルするのか、サーマルリカバリーするのかという手法によつての違いを LCA 評価すると図 3 となる。

サーマルリカバリーということは、あくまでも熱回収という一度きりのリカバリーであり、代替燃料となるため CO₂ の削減効果は大きいですが、リサイクルではないので、比較の対象とならないと考えられる。

この図 3 は、容器包装プラ 1kg を基にしているため、今回のような ASR1kg とは組成が全く違うため単純な比較は難しく、また同じ ASR だとしても検体①と③では組成も大きくことなることから選別工程によつた違いを考慮すると、そもそも定義のない廃プラ 1 kg という基準で CO₂ 排出削減効果を評価すること自体に無理があり、正確な低環境負荷性を表現できない。

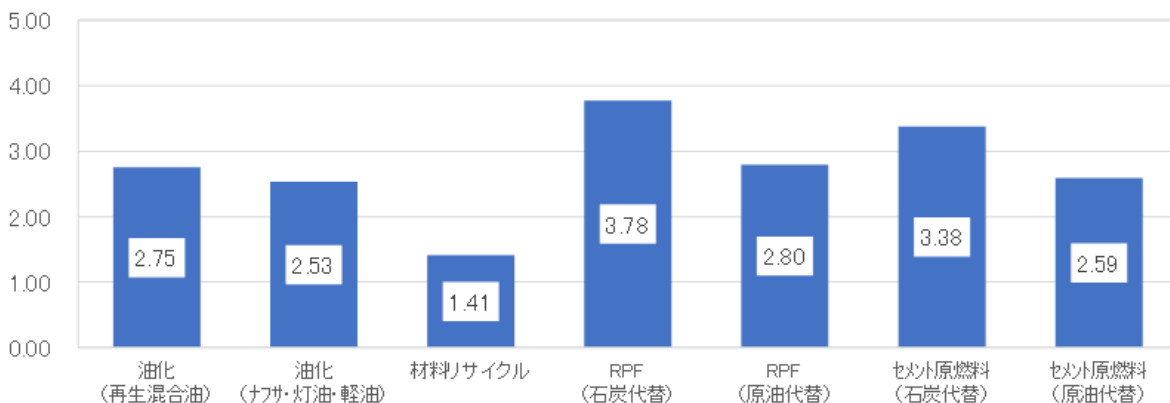


図 3 既存の LCA による廃プラ油化の他のリサイクル手法との比較

このように LCA は個別の廃プラに限定した形では評価はできるが、プロセスの違いや他のリサイクル手法との比較は困難であり、整合性、客観性、利便性の観点から考える通常 LCA が用いる『廃プラ 1 kg』を起点とした評価方法には限界がある。

2.2 既存の LCA の問題点

2.1 で記載した通り、既存の LCA の問題点は、何と云っても、『廃プラ』という定義がないまま、『廃プラ 1 kg』を起点としている点である。廃プラには当然様々な混合物があり、同じ ASR だとしてもどの選別プロセスから発生したものかによって、樹脂の割合、樹脂の組成は変化するため、図 4 のように再生プラと廃プラを比較するのは現実的ではない。

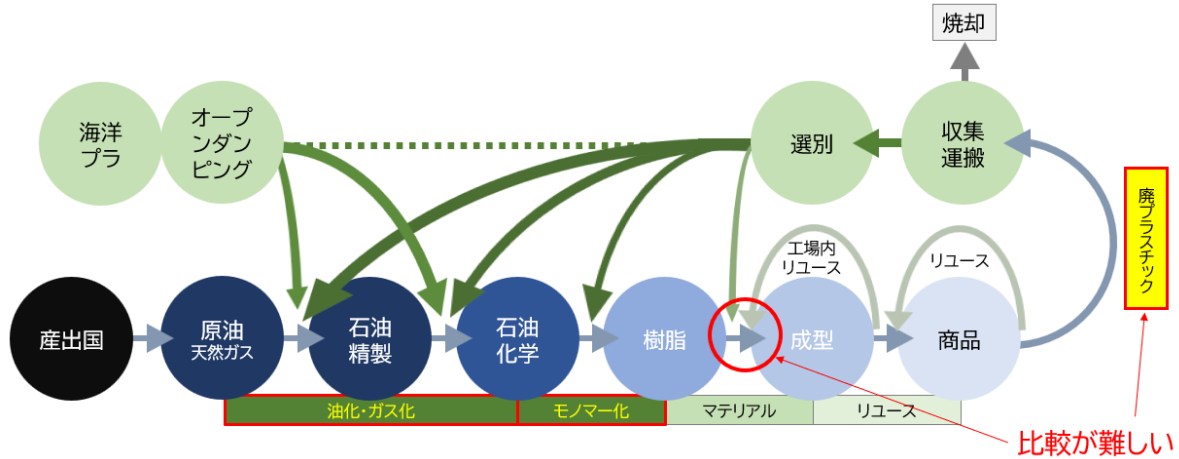


図 4 既存の LCA の問題点

そこで今後は『廃プラ 1 kg』を起点とするのではなく、図 5 のように廃プラを原料として製造されたケミカルリサイクル原料と、既存の化石燃料とを比較して評価した方がより現実的だと考える。具体的には再生原油と原油、再生ナフサとナフサ、再生炭化水素ガスと炭化水素ガス、再生モノマーとモノマーといった比較であり、これであれば比較対象を容易となり、それぞれのエネルギー起源での CO2 が削減量となる。もちろんそこからその再生原料を製造するために使用した投入エネルギーやケミカルリサイクル原料として投入できる場所までの輸送エネルギーを控除し、低環境負荷性を評価することとなる。

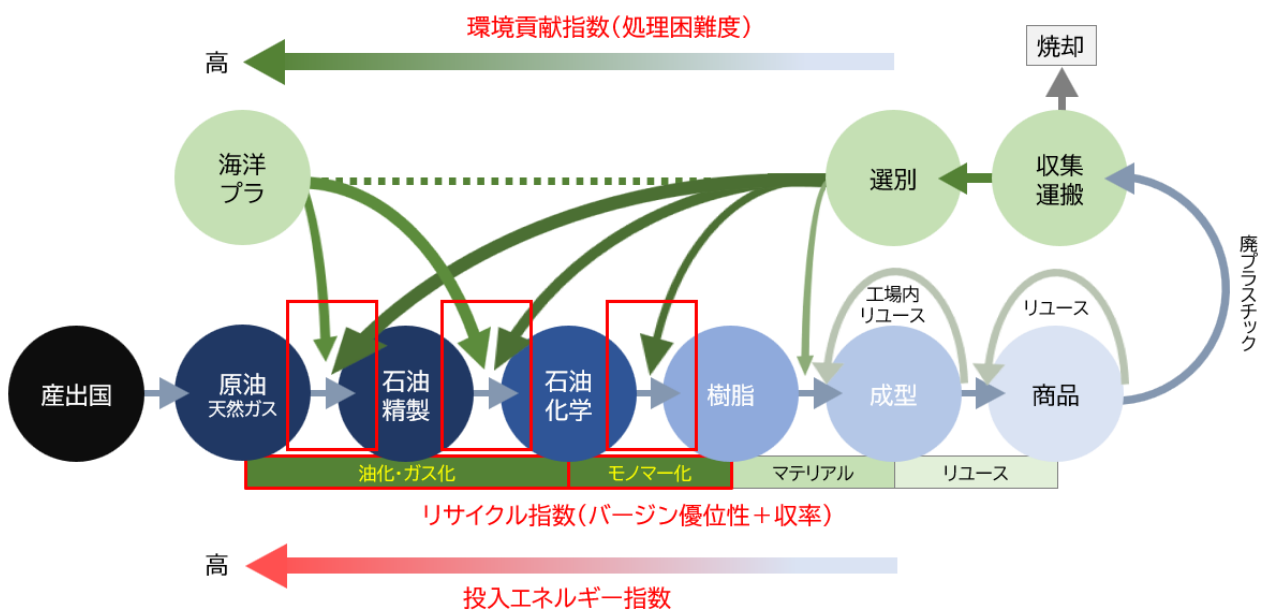


図 5 今後求められる LCA を基とした低環境負荷性の考え方

2.3 世界基準を考えた LCA 的制度設計

LCA は学術的な要素も強く詳細論になりがちであるが、社会実装するための仕組みを目的とするのであれば、ある程度の寛容度を持った利便性が必要となる。それを考えると下記の前提条件として LCA 評価することが望ましく、図 5 のようになる。

- ・比較対象は単純焼却
- ・廃プラの定義は困難であることから、ケミカルリサイクル製品と既存の化石燃料製品との比較
- ・ケミカルリサイクル製品を製造するための投入エネルギーと輸送エネルギーを控除
- ・廃プラの搬入となる油化工場までの輸送エネルギーは、単純焼却場と同等として相殺

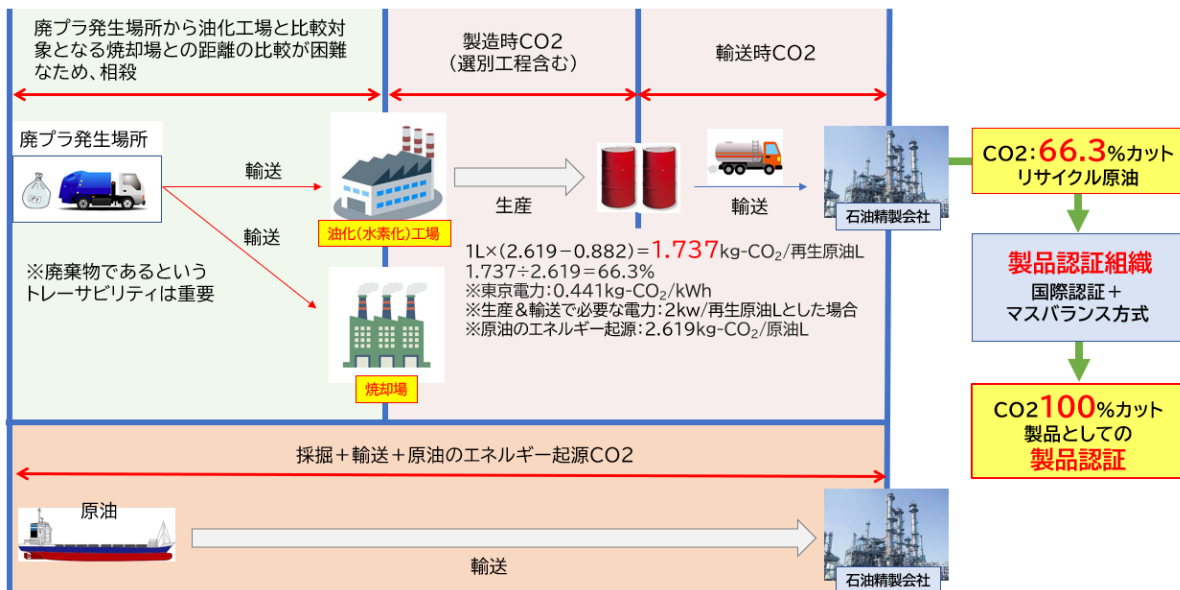


図 5 今後求められる LCA を基とした低環境負荷性の試算イメージ

これらの背景には太陽光でのソーラー発電によるグリーン電力の考え方がある。全国どの場所においても実際の太陽光の敷設場所からの距離に応じて低環境負荷性が変動するものではなく、グリーン電力は全国どこにおいても同一の考え方でシンプルに試算されている。本来であれば、太陽光パネルの製造場所、設置に関わる建築時の CO₂ 排出、発電所までの距離や出力の違いによる送電ロス、バックアップとして待機している火力発電所などを考慮する必要があるが、制度的にはシンプルな計算方法となっている。つまり本来であれば、極めて煩雑な計算方法が必要となるが、整合性、客観性、利便性の観点で考え、一般消費者に訴求しやすく、分かりやすいモデルとなっている。

廃プラ油化によるケミカルリサイクルの低環境負荷性もグリーン電力と同様にシンプルな制度設計が必要である。

3. まとめ

今後、世界では様々な環境規制が強化されていき、更には『 Car to Car 』が求められていくと考えられる。環境は個社だけではなく、地球全体で考える必要があり、本当の意味で永続的な社会を築くためには、広がり続ける貧富の格差を埋めるような制度も環境負荷低減と共に必要になっていく時

代となる。

今回の実証事業を通じ、環境負荷低減の指標や考え方の枠組みを世界的にも発信するとともに、その先を見据えた公益的な活動を通じた環境貢献に関しての先鞭的な活動も将来的な大きな成果につながっていくものと考えられる。