環境調和技術プラスチック —廃 FRP 再資源化の現状と課題

Harmonizing technologies with environment in plastics
—Present statuses and challenges for re-using wasted FRPs as resources

邊 吾一*・東海林 芳郎**

Goichi BEN* and Yosirou SHOUJI**

1. はじめに

2000 年に循環型社会の構築に向けての関連 6 法が一挙に制定・改正され、これまでの大量生産・大量消費・大量廃棄型社会を転換し、環境に調和した循環型社会の形成には、使用材料を問わず、リサイクル技術の確立が必要不可欠な情勢となっている。

本文では、繊維強化プラスチック材 (FRP) も含め、プラスチック全般の環境調和技術、特にリサイクルについて述べるが、最近、プラスチックのリサイクルに関する総括的な文献¹⁾が出版されていることと紙面の制限もあり、プラスチックだけの場合については簡単に触れる。一方、熱硬化性プラスチック樹脂を母材とする FRP のリサイクルについてはあまり紹介されていないことと軽量構造の応用面で FRP は軽金属としばしば競合することもあるので、FRP のリサイクルについての現状と課題について主に述べる。

2. プラスチックのリサイクル

1975 年～1999 年の間の日本におけるプラスチックの生産量と排出量を表 1²⁾に示す。プラスチックの生産量が増加するに従って、廃棄プラスチックの排出量も増加しており、1999 年には 976 万トンで、ほぼ 1,000 万トンに近づいている。総排出量の内訳は、最近数年間、一般廃棄物と産業廃棄物がほぼ同量となっている。

プラスチックは、他の工業材料に比べて素材として比較的新しく流通し、戦後の大量生産・大量消費型の経済成長の中で発展してきており、原料から比較的に容易にかつ安く製造できるため、金属などの工業材料に比べてリサイクル率が低いといわれている。また、プラスチックの種類も多く、使用範囲や使用形態の多様さに起因してリサイクル技術が複雑化し、このこともリサイクル率向上の大きな障害となっているのが現状である。しかしながら、世の中の動きに合せて、廃プラスチックの再資源化が促進されている。

一方で、循環型社会形成の理念に基づいて、再資源化を進めるに当たって考慮すべきは、資源に対してまずリデュース

(Reduce : 減少)、次にリユース (Reuse : 再利用)、そしてリサイクル (Recycle : 再生利用) の順で行われるべきである。さらに、2001 年 4 月 1 日現在の最終処分場 (埋立) の残余年数の推計では全国で 3.9 年、首都圏では 1.2 年と厳しい状況にある。こうした背景から、廃棄物の低減とともに、上述の 3R に配慮した製品設計が一層求められる。

廃プラスチックのリサイクルは、その手法によりマテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクルに大きく分けられるが、リサイクルの選択順位としては、マテリアル→ケミカル→サーマルとなり、それも困難な場合は廃棄物として処理するのが適切である。

マテリアルリサイクルは、物理的 (機械的) 手段により、廃プラスチックを再生し、原料または製品とする方法であり、メカニカルリサイクルまたはフィジカルリサイクルと呼ぶこともある。なお、元の製品より品質レベルの低い製品に再生する場合はカスケードリサイクルと呼ぶ。

ケミカルリサイクルは、化学的手法により再資源化する方法で、化学原料に戻すフィードストックリサイクルのほかに、燃料に利用される油化やガス化も含まれる。

サーマルリサイクルは、廃プラスチックを焼却し、燃焼エネルギーを回収する方法で、ケミカルリサイクルによる燃料油の回収もサーマルリサイクルと呼ぶこともある。

1999 年の廃プラスチックの再資源化状況を前年 ([] 内に示す) と比較して、表 2³⁾に示す。全体として再資源化は上昇しており、1999 年は前年に比べて 2% 増加している。1999 年の総排出量の 46% に当たる 452 万トンがリサイクルされており、その内訳は、マテリアルリサイクルが 134 万トン (14%)、サーマルリサイクルは (2) の固形燃料、(4) の発電付焼却と (5) の熱利用焼却の総和として 314 万トン (32%) を占めている。また、再生利用、発電付焼却、固形燃料化が前年度に比べてそれぞれで増加している。

表 2 の再資源化状況は、容器包装リサイクル法の完全施行前の結果であり、2000 年 4 月の完全施行に伴う PET ボトル以外の容器包装プラスチックへの再商品化義務の適用とこれに対応したケミカルリサイクル技術の進展により、今後その影響が徐々に現れると考えられる。

* 日本大学生産工学部機械工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)。Nihon University (1-2-1, Izumicho, Narashino-shi, Chiba 275-8575). E-mail: ben@cit.nihon-u.ac.jp

** 社団法人強化プラスチック協会 FRP 再資源化実証センター長 (東京都)。The Japan Reinforced Plastics Society (Chuo-ku, Tokyo)。

受理日: 平成 15 年 4 月 16 日

表1 プラスチックの生産量と排出量

年	樹脂 生産量	樹脂製品 国内消費量	廃プラスチック 総排出量	一般廃棄物		産業廃棄物	
	万 t / 年	万 t / 年	万 t / 年	万 t / 年	%	万 t / 年	%
1975	517	315	261	147	56	114	44
1980	752	552	325	178	55	147	45
1985	923	699	419	232	55	187	45
1986	937	730	453	250	55	203	45
1987	1,003	792	465	260	56	205	44
1988	1,102	861	488	276	57	212	43
1989	1,191	957	506	291	58	215	42
1990	1,263	999	557	313	56	244	44
1991	1,280	1,007	622	345	55	277	45
1992	1,258	928	692	391	56	301	44
1993	1,225	902	756	419	55	337	45
1994	1,304	966	846	423	50	*423	50
1995	1,403	979	884	443	50	441	50
1996	1,466	1,081	909	455	50	454	50
1997	1,521	1,136	949	478	50	471	50
1998	1,391	1,020	984	499	51	485	49
1999	1,457	1,081	976	486	50	490	50

* 1994 年から推算方法を変更し、産業廃棄物に未使用の生産ロス量、加工ロス量を新たに計上し加算した。

表2 廃プラスチックの再資源化の現状 (1999 年)

(単位: 万 t)

処理・再資源化方法	一般廃棄物	産業廃棄物	利用度
(1) 再生利用 (マテリアルリサイクル)	10 [6]	124 [116]	有効利用計 452 (46%) [435 (44%)]
(2) 固形燃料 (サーマルリサイクル)	3 [3]	6 [4]	
(3) 油化／高炉原料 (ケミカルリサイクル)	— [—]	4 [4]	
(4) 発電付焼却 (サーマルリサイクル)	161 [158]	8 [6]	
(5) 熱利用焼却 (サーマルリサイクル)	39 [40]	97 [98]	
(6) 単純焼却	168 [183]	38 [38]	未利用計 524 (54%) [549 (56%)]
(7) 埋立	105 [109]	213 [219]	
合 計	486 (50%) [499 (51%)]	490 (50%) [485 (49%)]	976 (100%) [984 (100%)]

註: 下段 [] 内数字は 1998 年のデータを示す

7

3. FRP のリサイクル

3.1 FRP の排出量

FRP は、熱硬化性樹脂である不飽和ポリエステル樹脂と強化材のガラス繊維、さらに炭酸カルシウムや水酸化アルミニウムといった充填材で構成されている複合材料である。軽量性と強度を合せ持ち、複雑な形状でも加工しやすいといった優れた特性により、世界中で幅広く使用されている。

日本では 1996 年におおよそ 48 万トンが生産され、内訳は住宅機器の浴槽、バスユニットが多く 48%、タンクや容器類は 12.5%、また船舶、漁船やプレジャーボートは 5% 等である。この FRP の廃棄物については、各製品の推定取替年数を基に、(株)強化プラスチック協会が試算した数字で見ると、表 3 に示すように、2005 年には、約 45 万トンの廃 FRP の発生量が見込まれている。図 1 に FRP の主な成形法を示すが、

浴槽やバスユニットは Sheet Molding Compound (SMC) 成形、船舶やプレジャーボートはハンドレイアップ法に限られている。SMC 成形の場合は充填材、ハンドレイアップ法は樹脂が主体であり、同じ FRP でも成形法や構成機材によってリサイクル法は異なる。表 4 に、一例として FRP の原料配合比率とリサイクル階梯選定率の関係を示すが、この選定の仕方も状況に応じて変わると考えられる。

海外での FRP のリサイクルは、FRP 先進国の米国や欧州でも埋立や焼却によるダイオキシンが問題となり、リサイクルへの取組みが活発に行われている。

3.2 FRP 廃棄物のリサイクル技術⁴⁾

FRP は熱硬化性であるため、ポリエチレンやポリプロピレンといった熱可塑性樹脂廃棄物のように、再度、加熱熔融成形してリサイクル成形品を得る方法は現在開発されていない。このため、破碎してセメント原燃料にするサーマルリサイク

表 3 廃 FRP 製品発生量の予測

(単位：万 t)

用 途	取替年数	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年
・住機・建設 (住宅機材) (タンク・容器) (建設資材)	(12 年)	15.1	21.7	29.2	26.2
	(15 年)	9.6	15.5	20.4	17.7
	(15 年)	3.0	3.5	4.9	4.3
・輸送機器 (舟艇船舶) (自動車車両)	(20 年)	4.3	6.7	5.6	6.5
	(7 年)	2.6	4.4	3.3	3.9
		1.7	2.3	2.3	2.6
・工業・他 (工業機材) (雑貨) (その他)	(10 年)	6.5	10.9	10.8	9.9
	(10 年)	3.6	5.4	5.7	5.0
	(15 年)	1.9	4.0	3.9	3.7
	(15 年)	1.0	1.5	1.2	1.2
合 計		25.9	39.3	45.6	42.6

	ハンドレイアップ法	スプレーアップ法	マッチドダイ法	SMC 法	FW 法
使 用 型	FRP が一般的 金属、木、 石こう	左に同じ	金属が一般的 (鋳鋼、ミナナイド アルミ 鋳物、鋼板)	鋼材 (S55C, SK-3)	金属が一般的 ワックス、木、 石こう
成 形 圧 力	0	0	1~3MPa	3~20 MPa	張力による
成 形 温 度	常温~50°C	常温~50°C	80~140°C	120~150°C	常温~140°C
成 形 サイクル	30 分~1 日	30 分~1 日	1~10 分	4~3 分	98~9800 N/h
成 形 技 術	樹脂 ガラス 繊維 型	樹脂 ガラス ロービング 型	上型 樹脂 下型 プリフォーム (マット)	上型 SMC 下型	ガラス ロービング 樹脂槽 マンドル

図 1 FRP の主な成形法

表 4 FRP 原材料配合比率とリサイクルの階梯選定例

原材料配合比率* ¹ (重量部)	リサイクルの階梯選定例
④充填材 (約 50)/ガラス繊維 (約 25)/ 樹脂など (約 25) (例: SMC* ² 成形の自動車部品)	粉碎した粉体を SMC に充填材として再利用 —マテリアルリサイクル 原燃料としてセメント (キルン投入) 処理
⑤充填材など (約 70)/樹脂など (約 30) (例: コンパウンド成形のボタン)	ボタンを打抜いた残りの廃棄材料をグリコールと反応させ, 樹脂分を 回収・調製し, 他用途に再利用—ケミカルリサイクル
⑥樹脂 (約 65)/ガラス繊維 (約 35) (例: FRP 漁船)	破碎した廃 FRP 材料を分解炉で熱分解し, ガスと廃油を得る —パイロリシスリサイクル
⑦充填材など (約 80)/樹脂 (約 20) (例: BMC* ² 成形の電気部品)	破碎して他の可燃物とともに燃焼し, 燃焼熱を ・温水として利用—サマルリサイクル ・発電利用—エネルギーリサイクル

*¹ 表中の樹脂とは, 不飽和ポリエステル樹脂, ビニルエステル樹脂のことを意味する

*² SMC は Sheet Molding Compound の略, BMC は Bulk Molding Compound の略

表 5 リサイクルした FRP の物性

項 目		単 位	SMC No.		
			No. 1	No. 2	No.3
組 成	樹 脂	pbw	100	100	100
	CaCO ₃	pbw	125	78	36
	微 粉 砕 品	pbw	0	32	60
	ガ ラ ス 繊 維	%, lin	30	30	30
成 形 品 諸 特 性	収 縮 率	%	0.06	0.07	0.08
	比 重		1.73	1.64	1.59
	引 張 強 さ	MPa	76.49	75.51	77.47
	引 張 弾 性 率	GPa	11.53	11.31	10.93
	曲 げ 強 さ	MPa	196	208.9	182.4
	曲 げ 弾 性 率	GPa	12.09	11.57	11.13
	曲 げ た わ み 率	%	2.6	2.9	2.7
	アイゾッド衝撃強さ	kJ/m ²	80.36	85.65	84.28

ルや, 粉碎してコンクリート系製品, FRP 製品やアスファルトに混入するマテリアルリサイクル, 耐圧容器中で超臨界水を吹込んで加水分割するケミカルリサイクル方法が現在考えられている。

破碎する場合, プラスチックに比べて FRP は硬いため, 粉碎機の刃物寿命を短くし, 騒音や粉塵が発生しやすいので, 経済性や環境負荷を低減する技術が必要である。現在行われている FRP のリサイクル技術の代表例を次に紹介する。

3.2.1 マテリアルリサイクル

廃 FRP の粉体を再び FRP の充填材として利用する方法で, この充填材を用いて成形した FRP は自動車内装部品に採用されている。自動車の FRP 製のリアスポイラを粒径 45 μm 程度に粉碎し, この微粉碎品を充填材として自動車部品用 SMC に配合・成形して, その特性を調べた結果を表 5 に示す。No. 1 が標準品 (微粉碎品を使用していない), No. 2 と No. 3 は微粉碎品を使用しており, No. 2 の微粉碎品は全体の 10% (リサイクル率 10%) に相当する。No. 2 は No. 1 の標準

品に比較して比重が軽くなるが, 機械的強度には大きな変化は見られない。リアスポイラ以外の自動車部品としてはインナーフランクやディーゼルエンジン用のシリンダヘッドカバーの高強度耐熱性軽量 SMC にもこの微粉碎品が利用されており, マテリアルリサイクリングは自動車部品の分野で, 確実に進展している。

3.2.2 ケミカルリサイクル

超臨界水を使用して FRP などの複合材料部材を分解処理するシステムで, 繊維強化材と樹脂だけからなる複合材 (充填材を含まない) を耐圧容器中で超臨界水を吹込んで加水分割する。耐圧容器が大きければ, 複合材料を切断せずに, そのままその容器に入れて処理できる。一方で, ゴミや汚いプラスチックを焼却して火力発電をし, その超臨界水を使用して FRP 等を分解処理するシステム (図 2) の提案がなされている。近い将来, コンピュータの配線板の処理等で有効になると予想されるが, 問題は経済性とリサイクリングした樹脂の処理である。

7

図2 火力発電と超臨界水分解方式

図3 破碎プラントの製造フローチャート

3.2.3 サーマルリサイクル

高炉に廃プラスチックを粉碎・造粒して吹込む方法が始まっているが、このラインに廃FRPを導入する案が検討されているが、実際に実施した場合に廃FRPの集荷量が充分かどうか、あるいはガラス繊維が硬いため粉碎機の刃物の摩耗が激しいのではないか等の問題が考えられる。FRP中のガラス繊維や充填材はスラグとなり、それはまたセメント材料と利用できる。したがって、廃FRPは還元剤とスラグセメントの原料として再利用の可能性がある。(社)強化プラスチック協会は、平成12年より廃FRPの再資源化(セメント原燃化)に取組み、実証研究を経て事業化を実現した。以下にその概要について紹介する。

4. FRP再資源化実証研究

4.1 実証研究の目的

FRPの構成成分である樹脂はセメント焼成時の燃料として、ガラス繊維と無機充填材はセメント原料として、それぞれ利用することが可能である。

しかし、FRPの燃焼熱量は2000~4000 kcal/kg程度と低いため、セメント焼成時の燃料として使用するためにはオレフィン系プラスチック等の高熱量材料を混合して適切な熱量に調整する必要がある。本実証研究では、セメント原燃料として利用できる廃FRPと熱量調整用の廃オレフィン系プラスチックを同一系列で効率的に破碎する実規模のプラントを試作し、破碎技術、騒音・粉塵対策等の研究を行う。さらに、

燃焼熱量調整技術の研究と得られたセメント原燃料を用いてセメントプラントにおける実証評価を行い、廃FRPをセメント原燃料として再資源化するシステムの実用化を目的とした。

4.2 研究開発の内容

(1) 投入原料の研究

廃FRPと廃オレフィンにそれぞれ付着する金属等の異物を取り除き、一次破碎機に投入可能な寸法にするための前選別、前処理を行う。

(2) 破碎プラントの試作

一次破碎、金属選別、熱量調整、二次破碎および騒音・粉塵対策設備で構成されるプラント(処理能力20t/日以上)を設計・建設し、連続運転実証研究を行う。なお二次破碎機では約2cmの大きさに破碎する。

(3) 熱量調整技術の研究

2種類の一次破碎物について、異なる性状の破碎物であっても二次破碎機に精度よく定量で供給可能な計量システムにより、燃焼熱量5000 kcal/kg以上とするための最適な運転条件・方法を確立する。

(4) 騒音・粉塵対策の研究

敷地境界での騒音基準値のクリアおよび粉碎時の発塵防止のための対策を立案する。

(5) セメントプラントにおける実証評価

製造したセメント原燃料をセメントプラントで使用し、ハンドリング性やセメントキルンへの影響の検証を行うとともに、得られたセメント品質の確認を行う。

廃プラスチック製品——（熱量調整用）農ポリ・SMC フィルム・架橋 PE パイプ・折りたたみコンテナ

図4 実証研究用に収集した廃 FRP と廃プラスチック

本破碎プラントの製造フローを図3に示す。

4.3 研究の成果

(1) 投入原料の研究

廃 FRP 製品として使用済み FRP 製品 50t, FRP 工程廃材 150t の計 200t を、熱量調整用廃オレフィン系製品として、農業用ポリエステルフィルム（以下、農ポリと略記）を中心に計 200t を収集し、合せて 400t を投入原料として確保した。使用済み FRP 製品については浴槽、給水タンクのほか、パイプ、ヘルメットなど多方面（図4）から収集した。前処理として、使用済み FRP 製品に付着している金物や断熱材等は人手により除去した結果、破碎刃の損傷はなく、磁選機や金属検出機からの排出は少なかった。

(2) 破碎プラントの試作

廃 FRP と廃オレフィン系プラスチックを同一系列の設備で混合破碎し、処理能力が 20t/日（2.5t/時間）以上を目標とした実証プラントを設置した。処理能力面では最高 24t/日を達成した。大型の FRP 製品は投入前に原形のままでなく重機で減容化処理をした方が、一次破碎機の処理能力が大幅に向上することが確認された。また破碎刃材質の検討では、工具鋼刃と超硬刃を比較した結果、超硬刃の方が明らかに寿命の点で優れていることが明らかとなった。図5にプラントの全景を示す。

(3) 燃焼熱量調整技術の研究

二次破碎機への定量供給精度は、FRP とオレフィンの一次破碎物の性状が、大きく影響を及ぼすことが明らかになった。特に農ポリ等フィルム状のものはかさが高く、時間的な供給量のばらつきが見られた。これに対して、中間ホッパー切出し開口部の改造を行うとともに、供給量が不安定な原料については切出し量の安定な原料と組合せて破碎する等の対策を実施した。その結果、切出し量の安定化が達成され、かつ、得られたセメント原燃料の熱量は各ロットとも目標である 5000 kcal/kg 以上を満たした。

(4) 騒音・粉塵対策の研究

破碎時の騒音対策として、一次、二次破碎機を共に防音室に収納することにより、敷地境界での騒音を 65 dB 未満に抑えられることが確認された。

粉塵面では、破碎機やコンベヤに付設したカバーと、発生個所での集塵が粉塵発生防止に有効に働いていることも確認された。

(5) セメントプラントにおける実証評価

実証研究により得られたセメント原燃料をセメントキルンに投入し、そのときのハンドリング性、キルン操業やセメン

プラント投入側

プラント製品出荷側

図5 プラント全景

ト品質への影響について調査した。その結果、セメント原燃料代替として使用可能であることが確認された。

4.4 実用化への課題

廃 FRP 製品を収集し、必要に応じて前処理・前選別を行い、破碎処理するシステムの実証研究は終了したが、今後市場に受け入れられる処理コストをいかに実現していくか、その経済性の研究が次の課題である。廃 FRP の収集については、FRP 廃棄物の発生場所から効率よく収集・運搬する体制の確立が必要である。また技術的課題としては、①処理能力の向上、②前選別の効率化、③破碎刃の最適化、④セメント原燃料としての投入割合向上等が重要である。

4.5 事業化の現状

研究終了後、本システムの実用化を進めた結果、本システムは民間企業に引継がれ、2002 年 4 月より栃木県真岡市で事

7 |||

業をスタートした。実証研究で得られた多くのノウハウを活かして安定操業に取組み、月平均で廃 FRP と廃オレフィンを含せて 500t/月以上処理し、1 年間で計約 6000t のセメント原燃料をセメント工場に納入した。この間、セメント製造への影響はなく、安定した操業が継続されていることから、更なる処理量の増加が期待されている。

5. おわりに

本報告では、プラスチック系材料の環境調和技術として、これら材料のリサイクル技術、特に FRP のリサイクル技術の現状と FRP 再資源化の実証技術について紹介し、これにより FRP のリサイクル技術が確立されたことを示した。

今後、省庁、自治体やユーザ業界に FRP 製品が積極的に採用されるためにも「FRP はリサイクルできる」ことを強くアピールしていく必要がある。また、国土交通省が進めてい

る FRP 廃船高度リサイクルなど関連プロジェクトとも連携を図ることにより、FRP リサイクルの基盤を強化することが可能であると考ええる。

末筆ながら、本文の執筆に当たり、有益な資料を提供していただいた樹脂ライニング工業会会長 野間口兼政氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 榊東レリサーチセンター、「プラスチックリサイクルの最前線」,(2002. 1).
- 2) ㈱プラスチック処理促進協会資料, <http://www.pwmi.or.jp/>
- 3) ㈱プラスチック処理促進協会資料,「プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況」,(1999).
- 4) 野間口兼政:「複合材料のリサイクルの最近の動向」,プラスチックリサイクル学会, 1998 年秋季研究会.