

「燃料電池自動車に用いられる
炭素繊維複合材料のリサイクル手法等調査」
報告書

平成27年2月

一般社団法人 次世代自動車振興センター
株式会社 矢野経済研究所

目 次

1. 次世代自動車への CFRP 採用	
1-1. 次世代自動車の CFRP 採用状況	1
1-2. 使用済 FCV の発生	3
2. FCV のリサイクル対応	
2-1. 高圧水素タンク処理	4
2-2. FCV のリサイクル対応	6
2-3. CFRP 処理における問題点	10
3. CFRP 材料の燃焼特性の確認	
3-1. 熱重量・示差熱測定 (TG-DTA) データ	14
3-2. 管状炉による焼却温度/時間/重量減曲線の確認	
3-2-1. 試験の目的	15
3-2-2. 試験内容	15
3-2-3. 試験結果	17
3-3. 高温雰囲気炉による燃焼状態の観察	
3-3-1. 試験の目的	26
3-3-2. 試験内容	26
3-3-3. 試験結果	28
3-4. CFRP 燃焼時の CF 燃焼、反応過程の確認実験	
3-4-1. 試験の目的	42
3-4-2. 試験内容	42
3-4-3. 試験結果	44
3-5. CF および CFRP の反応性テスト	
3-5-1. 試験の目的	55
3-5-2. 試験内容	57
3-5-3. 試験結果	61
3-6. CFRP を含む ASR の RDF 加工特性確認	
3-6-1. 試験の目的	68
3-6-2. 試験内容	68
3-6-3. 試験結果	72
4. CFRP 処理に関するリサイクル施設調査	77
5. 処理コスト低減に係る調査	90

(参考資料)

- CFRP 燃焼時の CF 燃焼、反応過程の確認実験結果……………93
- CFRP 処理に関するリサイクル施設調査票…………… 106

1. 次世代自動車への CFRP 採用

1-1. 次世代自動車の CFRP 採用状況

自動車の燃費向上や CO₂ 排出量削減等を目的に、自動車材料の代替が図られており、鉄よりも軽量かつ強度がある炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP¹）が高張力鋼板やアルミ合金等の代替材料の新たな選択肢として注目を集めている。特に軽量化へのニーズが高い次世代自動車については、CFRP を適用することで、効率的にその要求に応えることができ、既に車体に CFRP を採用した電気自動車（BMW i3）が 2014 年 3 月に発売されており、今後も採用拡大が見込まれている。

また次世代自動車に位置づけられる燃料電池自動車（以下、FCV）には、航続距離伸ばさせるべく 70Mpa 充填仕様の高圧水素タンクが必要であり、強度を確保するために CFRP が素材として活用されている。FCV についてはトヨタ自動車が 2014 年 12 月に「MIRAI」発売を開始しており、本田技研工業や日産自動車も早期の発売を表明している。

その FCV を初めとした次世代自動車の普及に向け経済産業省では自動車関連産業および社会全体の短期および中長期的な戦略をとりまとめた「次世代自動車戦略 2010」を発表している。それによれば自動車メーカーが燃費改善、次世代自動車開発等に最大限の努力を行った場合（民間努力ケース）、燃料電池自動車の新車販売台数に占める割合は 2020 年で「僅か」、2030 年で「1%」と予測している。

一方で、政府は「低炭素社会づくり行動計画」において、「（次世代自動車について）2020 年までに新車販売のうち 2 台に 1 台の割合で導入するという野心的な目標の実現を目指す」と掲げている。それを受け、政府が目指すべき FCV 普及目標（政府目標）は 2020 年で「～1%」、2030 年で「～3%」としており、民間努力ケースにおける普及見通しを上回る数値を設定している。

また国内外の主要な自動車メーカーと国内エネルギー企業等で構成される燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）では、2015 年を FCV の一般ユーザー普及開始時期と位置付け、国が掲げる 2050 年における運輸部門の温室効果ガス排出量 80%削減の目標達成のためには、2025 年で FCV が 200 万台、水素ステーション 1,000 箇所の普及を目指すことが必要とのシナリオを公表している。

¹ CFRP は炭素繊維を強化材、樹脂を母材（マトリックス）とする複合材料で、強化材である炭素繊維の比重は鉄の約 1/4、比強度は鉄の約 10 倍、比弾性率は鉄の約 7 倍の性質をもつ。

2020～2030年の乗用車車種別普及見通し(民間努力ケース)

	2020年	2030年
従来車	80%以上	60～70%
次世代自動車	20%未満	30～40%
ハイブリッド自動車	10～15%	20～30%
電気自動車		
プラグイン・ハイブリッド自動車	5～10%	10～20%
燃料電池自動車	僅か	1%
クリーンディーゼル自動車	僅か	～5%

2020～2030年の乗用車車種別普及目標(政府目標)

	2020年	2030年
従来車	50～80%	30～50%
次世代自動車	20～50%	50～70%
ハイブリッド自動車	20～30%	30～40%
電気自動車		
プラグイン・ハイブリッド自動車	15～20%	20～30%
燃料電池自動車	～1%	～3%
クリーンディーゼル自動車	～5%	5～10%

出所:経済産業省

1-2. 使用済 FCV の発生

FCV 市場はまだ立ち上がったばかりであり、既存車の引取車台の平均使用年数を参照すると、FCV が使用済自動車として発生するのは十数年後ということになる。

その中、日本自動車工業会では前述した普及見通しのうち、政府目標普及率の最大値を適用し、販売経過年毎の廃車発生率を用いて、使用済 FCV の発生台数予想を行っている。それによれば使用済 FCV は 2017 年で約 50 台、2020 年で 300 台強、また年間 2 万台以上発生するのは 2030 年以降と予想しており、当面は極少発生期としている。

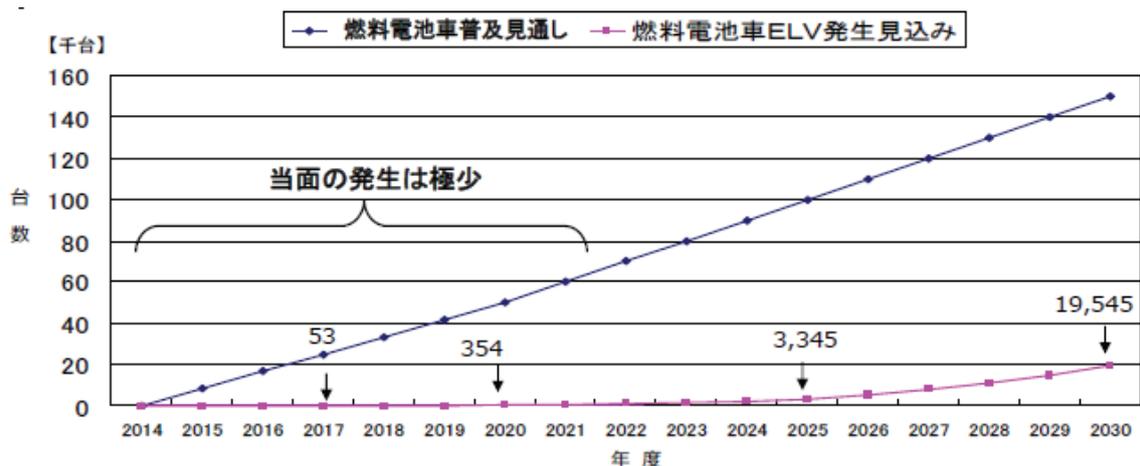
引取車台の平均使用年数

単位：年

	09 年度	10 年度	11 年度	12 年度	13 年度
平均使用年数	13.5	13.4	13.7	14.1	14.3

出所：自動車リサイクル促進センター

FCV 普及見通し・ELV 発生台数予測



- (1) 普及見通しは、「次世代自動車 2010」の「乗用車車種別普及目標」の政府目標普及率の最大値を適用、年間販売台数は、500 万台とした。また ELV 発生予測台数は、販売経過年毎の廃車発生率から算出
- (2) 普及台数は 2014 年実績値を起点として、2020 年、2030 年の計算値との間を直線で結んだ

出所：日本自動車工業会

2. FCV のリサイクル対応

2-1. 高圧水素タンク処理

FCVに搭載されているCFRP製の高圧水素タンクは高圧ガス保安法の容器保安規則「容器保安規則に基づき表示等の細目、容器再検査の方法等を定める告知」の適用を受ける（第二十二条）。

その告知では、容器再検査における容器、附属品の規格を定めており、充てん可能期限を経過した容器の再検査が禁止されている。また容器の交換を行う際は、「容器は、当該容器に貼付されている容器証票に記載された車台番号と異なる車台番号の自動車に装置されたことがないものであること」、「自動車に装置されていない容器にあつては、自動車に装置されたことがないものであること」としており、他の車両へ搭載されたことのあるタンクの再検査を禁止している。

容器保安規則に基づき表示等の細目、容器再検査の方法等を定める告知

	概要
第二十二条 (容器再検査における 容器の規格)	一の二 圧縮水素自動車燃料装置用容器および圧縮水素運送自動車用容器にあつては刻印等において示された容器検査年月日若しくは製造年月日から十五年又は十五年を超えない範囲内において容器製造業者が定めた日を経過していないこと。 二 自動車に装置されている容器にあつては、次に掲げるものとする。 イ 容器に貼付されている容器証票に記載された車台番号は、当該容器が現に装置されている車台番号と同一であること。 ロ 容器は、当該容器に貼付されている容器証票に記載された車台番号と異なる車台番号の自動車に装置されたことがないものであること。 三 自動車に装置されていない容器にあつては、自動車に装置されたことがないものであること。

これにより、高圧水素タンクは中古利用が認められず、他の車両への搭載もできないことになっている。故に FCV が廃棄される際には、高圧水素タンクおよび付属品も廃棄しなければならない。なお廃棄については、同じく高圧ガス保安法の第二十五条「高圧ガスの廃棄」および第五十六条「高圧ガス容器の処分」に則り、適正に処理することが義務づけ

られている。

高圧ガス保安法

	概要
第二十五条 (高圧ガスの廃棄)	高圧ガスの廃棄は、経済産業省令で定める技術上の基準に従う。(例：高圧ガスの廃棄は容器とともに行わない、可燃性のガスを大気中に放出して廃棄するときは、通風の良い場所で少量ずつすること等)
第五十六条 (高圧ガス容器の処分)	容器再検査に合格しなかった容器はくず化し、その他容器として使用することができないように処分しなければならない。(例：容器を二つに切断する等、その後加工しても一度くず化された容器であることが容易に確認できるような処置を施すこと。)

2-2. FCV のリサイクル対応

使用済 FCV が発生した際は、その処理を担う解体業者では高圧ガス保安法に則り、車台から高圧水素タンクを取り外す等により自らくず化するか、くず化処理対応事業者へ処理を委託することが必要となる。ただくず化処理対応事業者は多くなく、高圧ガス容器の受け渡しの条件や処理委託費用も発生することになる。

現在、高圧ガス容器を搭載した車両は天然ガス自動車（以下、CNG 自動車）が中心となるが、普及台数は 4 万台程度と僅かであり、そこから使用済みとして発生している台数は年間 2,000 台程度と少ない²。そのため使用済 CNG 自動車の処理については、台数も多くないことと、特定の解体業者³に引渡されている状況が多いため、くず化処理等について全般的な問題とはなっていない。

一方で FCV については、将来的な市場が拡大する見込みから、より広範にかつ多くの使用済の FCV が発生することが予測される。CNG 自動車同様に高圧ガスの廃棄、高圧ガス容器の処分の必要が発生することになるが、解体業者において適正処理対応の必要性が増すことが予想される。

付録 2 容器の残ガス処理及びくず化処理対応事業者の例

No.	事業者名称	住所				連絡先 TEL/FAX	CNG 容器の 受け取り条件 ^{※1)}	対象地区 (左記条件②～⑥)
		〒	都道府県	区・市・郡	町名・丁目・番地・号			
1	日北酸素(株)発寒工場容器検査所	063-0836	北海道	札幌市 西区	発寒 16 条 13-7-1	011-661-3238 011-661-8035	①	—
2	栃木県登録高圧容器検査所 (株)宇都宮プロパン容器検査工場	321-0933	栃木県	宇都宮市	築瀬町 1540	028-634-5705 028-634-5729	①	—
3	(株)ingヨーケン	350-0126	埼玉県	比企郡 川島町	山ヶ谷戸 270-1	049-297-0815 049-297-8281	①	—
4	(株)カネダ工作所	260-0805	千葉県	千葉市	中央区宮崎町 585	043-261-2421 043-265-5499	①	—
5	香取産業(株)	289-0303	千葉県	香取郡 小見川町	富田 1154	0478-83-2217 0479-83-2909	①	—
6	東京ガスケミカル販売(株)	105-0011	東京都	港区	芝公園 2-4-1-B 館 6F	03-6402-1035 03-6402-1038	②	東京, 神奈川, 千葉, 埼玉, 群馬
7	(有)東京ロケット商会	140-0011	東京都	品川区	東大井 2-19-10	03-5471-1766 03-5471-1790	④又は⑥	東京, 神奈川, 千葉, 埼玉, 群馬
8	長岡工業(株)	939-2706	富山県	婦負郡 婦中町	速星 451	0764-65-2328 0764-66-3528	①	—
9	三保産業(株)・福井営業所	910-1126	福井県	吉田郡 松岡町	小畑 40 蛇谷 6-4	0776-61-6070 0776-61-6073	①②	福井県
10	(株)山梨高圧容器検査所	400-0202	山梨県	南アルプス市	下高砂 224	055-285-0448 055-285-4438	①②	山梨県, 長野県
11	不二高圧(株)	421-0218	静岡県	志太郡	大井川町下江留 437-16	054-622-1120 054-622-3487	①	中部地区
12	日東高圧(株)	474-0001	愛知県	大府市	北崎町清水ヶ根 120-1	0562-44-5771 0562-44-5773	①③⑤	中部地区
13	三保産業(株)・滋賀営業所	520-3046	滋賀県	栗東市	大橋 7-2-61	077-552-2413 077-553-6141	①②	滋賀県
14	三保産業(株)・京都営業所	610-0111	京都府	城陽市	富野長谷山 2-1	0774-52-0870 0774-55-2905	①②	京都府
15	三保産業(株)・綾部営業所	623-0116	京都府	綾部市	下八田町下沢 22-3	0773-42-8421 0773-42-6376	①②	京都府

² 環境省「平成 25 年度次世代自動車に係る処理実態調査業務」より

³ CNG 自動車の中心はトラックであるため、トラック処理に特化した解体業者へ引渡されているケースが多い

No.	事業者名称	住所				連絡先 TEL/FAX	CNG容器の 受け取り条件 ^{※1)}	対象地区 (左記条件②～⑥)
		〒	都道府県	区・市・郡	町名・丁目・番地・号			
16	大阪ガスオートサービス(株) サービス部オートサービスセンター	554-0051	大阪府	大阪市 此花区	西島 5-11-151	06-6461-7022 06-6461-6465	①④⑤	近畿2府4県
17	(株)ガスネット	541-0048	大阪府	大阪市	中央区瓦町 4-5-9	06-6204-5055 06-6204-5056	①②	近畿2府4県
18	三保産業(株)・大阪営業所	592-8331	大阪府	堺市	築港新町 3-52	072-245-2448 072-247-0545	①②	大阪府
19	三保産業(株)・奈良営業所	630-8452	奈良県	奈良市	北之庄西町 1-8-13	0742-64-0810 0742-64-0886	①②	奈良県
20	三保産業(株)・大和営業所	639-0274	奈良県	北葛城郡 当麻町	今在家玄場 67-1	0745-48-2648 0745-48-2407	①②	奈良県
21	三保産業(株)・和歌山営業所	649-6565	和歌山県	那賀郡 粉河町	杉原下嶋 306-52	0736-73-7510 0736-73-7231	①②	和歌山県
22	三保産業(株)・兵庫営業所	671-2515	兵庫県	宍粟郡 山崎町	五十波小瀬 1064-7	0790-63-0695 0790-64-3785	①②	兵庫県
23	島根県エルピーガス事業協同組合 容器検査所	699-1115	島根県	大原郡 加茂町	大字岩倉 48-3	0854-49-6323 0854-49-6376	①	—
24	ヤマコー(株)	736-0084	広島県	広島市 安芸区	矢野新町 1-1-3	082-884-2111 082-885-2222	④又は⑥	広島、山口
25	(株)サイブモータース	811-2304	福岡県	糟屋郡	粕屋町大字仲原 489-25	092-938-5437 092-938-5268	①	—

※1) CNG容器の受け取り条件

【廃棄処理希望者が、容器を車両から取り外すケース】

- ① CNG容器の廃棄処理希望者が、CNG容器を車両から取り外し、残ガス容器単体で処理業者に持ち込む。
- ② 処理事業者が、CNG容器の廃棄処理希望者が車両から取り外したCNG残ガス容器を回収に出向く。

【処理事業者が、容器を車両から取り外すケース】

- ③ 処理事業者が出向き、車両からCNG残ガス容器を取り外して回収する。
- ④ CNG容器の廃棄処理希望者が、車両ごとCNG残ガス容器を持ち込む。(車両の解体処理含む)
- ⑤ CNG容器の廃棄処理希望者が、車両ごとCNG残ガス容器を持ち込む。車両は、廃棄処理希望者が持ち帰る。
- ⑥ 処理事業者がCNG容器の廃棄処理希望者の所へ出向き、車両ごとCNG残ガス容器を回収する。

出所：日本ガス協会

このことから解体業者に対して安全確実、工数負担の少ない手順を策定することが重要となっており、そのためにまずは既存の使用済自動車と同様の処理工程およびインフラの活用が可能かどうかの検証が行われている。

日本自動車工業会では使用済FCV処理における課題となるくず化および再資源化についての試験を行っており、ニブラによる高圧水素タンクのくず化と、高圧水素タンクを電炉に投入することでの適正処理が可能であることの実証を行っている。

FCV 廃車処理の課題

	課題点	対応
解体段階	<ul style="list-style-type: none"> ・水素ガス抜き ・水素タンクの取外し作業 	<ul style="list-style-type: none"> ・CNG車の対応（ガス抜き、クズ化）を参考に、適切な水素ガス抜き、タンクのクズ化方法の周知徹底（例：各社解体マニュアルの作成、ELVに関する講習会での説明） ・ELV発生初期段階については、メーカーとして、水素ガス抜き等技術サポートを実施
水素タンクの廃棄段階	<ul style="list-style-type: none"> ・くず化処理方法 ・適正廃棄処理方法 	<ul style="list-style-type: none"> ・電炉等を活用した適正処理、再資源化のインフラの展開の方法を明確化

出所：日本自動車工業会

水素タンクのニブラによるくず化



水素タンクの電炉による適正処理試験



出所：日本自動車工業会

水素ガス抜き・くず化ステップ例

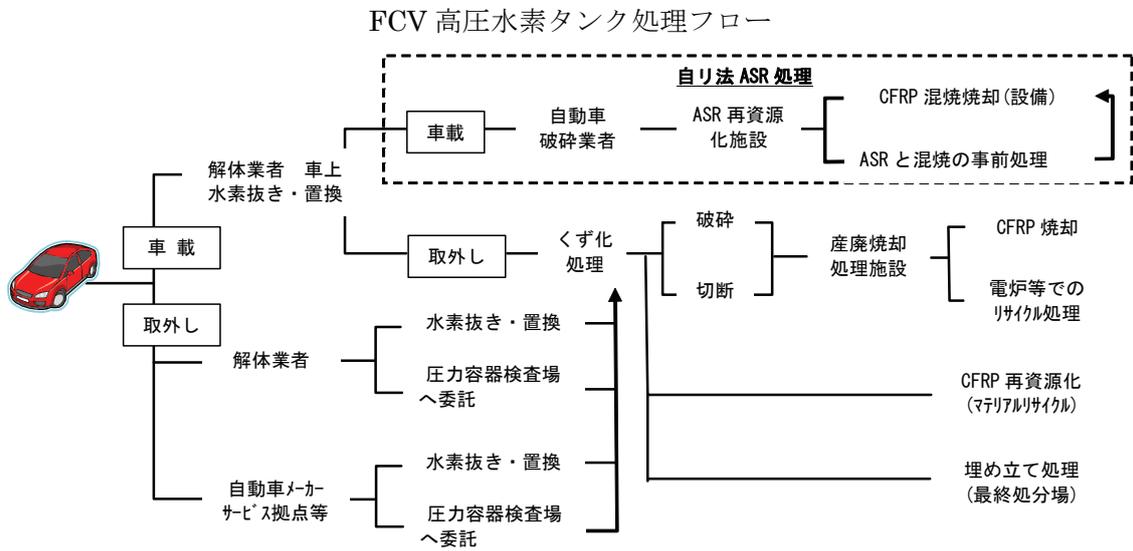
	①水素ガス抜き	②タンク取り外し	③タンク くず化	④タンクの再資源化
工程				
作業内容	<ul style="list-style-type: none"> ・電装設備の負荷などでガスを消費する。 ・ガス抜きポートから水素ガスを放出する。 ・運転席の燃料メーターで燃料切れを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業手順に則りタンクを取り外す。 	<ul style="list-style-type: none"> ・タンクが再利用できないように切断や穴あけなどの処理を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・樹脂で被覆されたタンクを電炉などの再資源化施設で処理する。

出所：日本自動車工業会

ただ廃車段階においては、高圧水素タンクをはじめとした CFRP 採用部位の取り外し回収ができないことも想定されるため、より安全かつ、工数負担を減らすべく、自動車リサイクル法に則った再資源化への対応も検討されている。

具体的には車台から高圧水素タンクを取外さず、破碎業者へ引渡されることで車載のまま、プレスおよびシュレディングされることでくず化処置が施され、かつ破碎後の残渣

である ASR (Automobile Shredder Residues) として処理することができれば、使用済み FCV の大量発生時期を見越した上で、解体業者への負担を軽減することができると考えられている。



出所：日本自動車工業会

2-3. CFRP 処理における問題点

炭素繊維（以下、CF）の安全な取扱いについて炭素繊維協会では、以下のような注意が示されている。先に示した自動車リサイクル法の ASR 再資源化の中で高圧水素タンクを処理した場合、ASR に含有した CF が浮遊し、ASR 再資源化業者の施設運営に重大な支障を引き起こす可能性があることになる。

性状および取扱い時の注意（一部抜粋）

性状	<ul style="list-style-type: none"> 炭素繊維は導電性を有するのでフライや糸くずが電気系統の短絡の原因になることがある。
電気設備の障害・感電	<ul style="list-style-type: none"> 浮遊しているフライが開閉器や制御機器の中に入り込むと短絡による事故を起こすことがある。機器内には清浄空気を吹き込み（パージング）、結線部分には絶縁措置（塗料、テープによる保護）をする。 粉塵やフライが浮遊している作業場に電子機器、パソコンを持ち込むときは、プラスチックのケースに収納し、清浄空気内部で与圧する。 糸くずやプラグに付着していると、コンセントに差し込んだとき感電したり、短絡により怪我をすることがある。保護手袋を着用しプラグを確認する。特に 220V の場合は注意が大切である。電気絶縁部材を製造するガラス繊維製品取扱い作業場では炭素繊維は使用しないよう推奨。
廃棄上の注意	<ul style="list-style-type: none"> 炭素繊維の廃棄物および塵芥は必ず一般ごみと区分し、産業廃棄物として取り扱う。廃棄物分類は「廃プラスチック」に分類される。 焼却処理はしない。炭素繊維は一般ごみの焼却炉では完全には燃えない。電気集塵機用設置炉では燃え残りの短い繊維（フライ）により電気短絡事故の原因となる。

出所：炭素繊維協会

ASR は「使用済自動車の再資源化等に関する法律（以下、自動車リサイクル法）」にて、自動車メーカー等が引取り、再資源化することが義務付けられている品目の一つである。自動車メーカー等では ASR の引取り、再資源化を効率よく行うために、各地域のリサイクル施設⁴と契約しているが、規模の利益によるコスト削減、破砕業者の業務円滑化を目的に、2 チーム（TH チーム、ART チーム）においてリサイクルを実施している。

両チームの ASR リサイクル率は 96～97%（2013 年度）と、自動車リサイクル法施行時に設定された基準（50%）を大きく上回っており、埋立てられ最終処分される ASR は僅かで、ほとんどがリサイクルされている。

⁴ リサイクル施設（指定引取場所）はリサイクル施設、焼却施設、埋立処分場の 3 種類がある

ASR リサイクル率

基準	70% (平成 27 年度～) 50% (平成 22 年度～) 30% (平成 17 年度～)
12 年度実績	93%～96.8%
13 年度実績	96%～97.7%

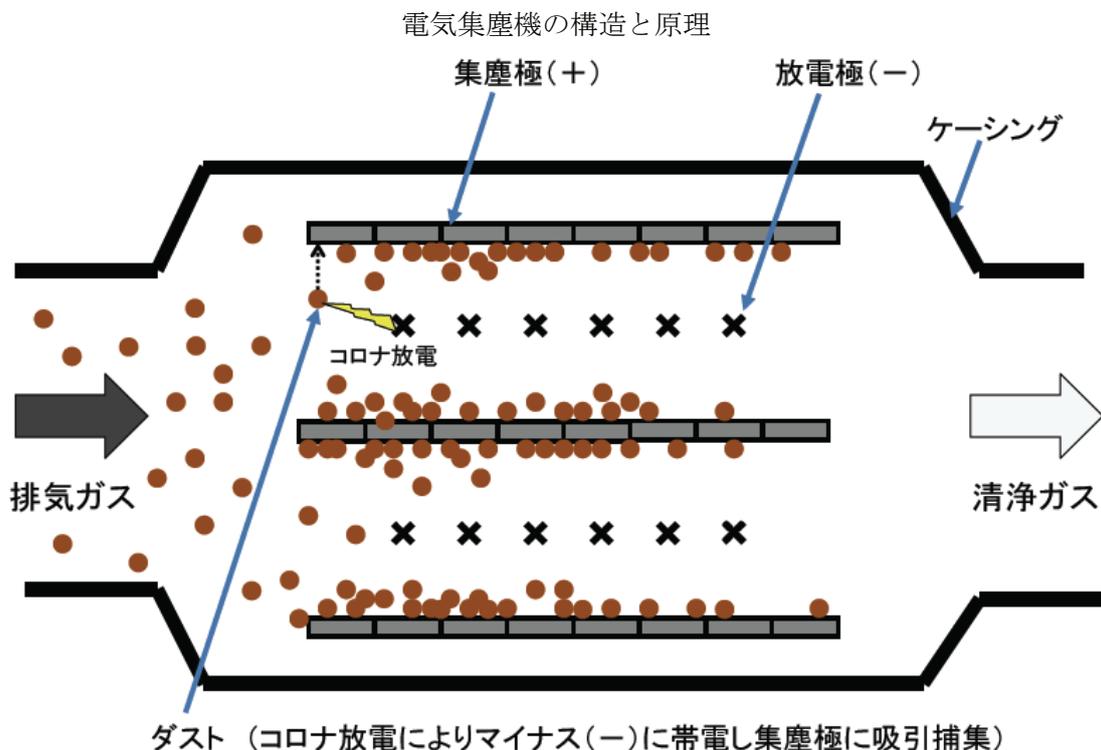
出所：経済産業省

リサイクル施設の種類

1. 燃料代替 + 原料化
2. 焼却処理 + 熱回収 + 原料化
3. 乾留ガス化 + ガス利用 + 原料化
4. 乾留ガス化 + 熱回収 + 原料化
5. 素材選別 + 燃料代替

先に示した FCV の高圧水素タンクが ASR 再資源化ルートに沿って処理された場合、破碎された高圧水素タンクのうち CFRP は残渣として ASR となり再資源化処理が行なわれる。

しかし廃棄上の注意にあったように、燃焼条件によっては CF が完全に燃焼せず、残った短繊維（フライ）が浮遊し、リサイクル施設の排ガス処理工程で飛灰となった CF が電気集塵機⁵の電極を短絡させてしまう可能性がある。再資源化業者では排ガス処理能力の低下により、装置を停止させてしまうという恐れから、CFRP が混入した ASR の受け入れが出来ないとする場合も想定される。



出所：太平洋セメント

⁵ 静電気を応用した集塵方式であり、放電線と集塵板から構成される。放電線に高電圧を加えガスを流すと、ガス中に含まれるダストはイオンで帯電する。帯電したダストはクーロン力で集塵板に捕集され、ガスは清浄となり、外部排出される。集塵板に捕集したダストは集塵板を叩いて払い落とし、ホッパから装置外に排出される（セメント工場の場合、原料代替として使用）。

結果的に CFRP が混入した ASR は焼却できないとなった場合、埋め立て処理で対応せざるを得ないことになる。しかし ASR の最終処分場となる管理型処分場⁶には限りがあることから、埋立処理費用が高騰する可能性がある。それを受けて自動車リサイクル料金も上昇した場合、CFRP を使用した次世代自動車の普及を阻害する要因ともなりかねない。

本調査では上記観点を踏まえて、CFRP を採用した自動車を安全、適正かつ低コストで再資源化等処理が可能となる技術、手法等を明らかにすべく CF の燃焼に関する基本特性を測定する各種試験を実施し、次項以降で検証を行った。

⁶ コンクリート製の仕切りで公共の水域および地下水と完全に遮断される構造で、有害物質が基準を超えて含まれる産業廃棄物が対象となる最終処分場。埋め立て地から生じる浸出液による地下水などの汚染を防止するため、遮水対策（底にシートを張る等）を行い、浸出水を集める集水設備および浸出液の処理施設が必要。

3. CFRP 材料の燃焼特性の確認

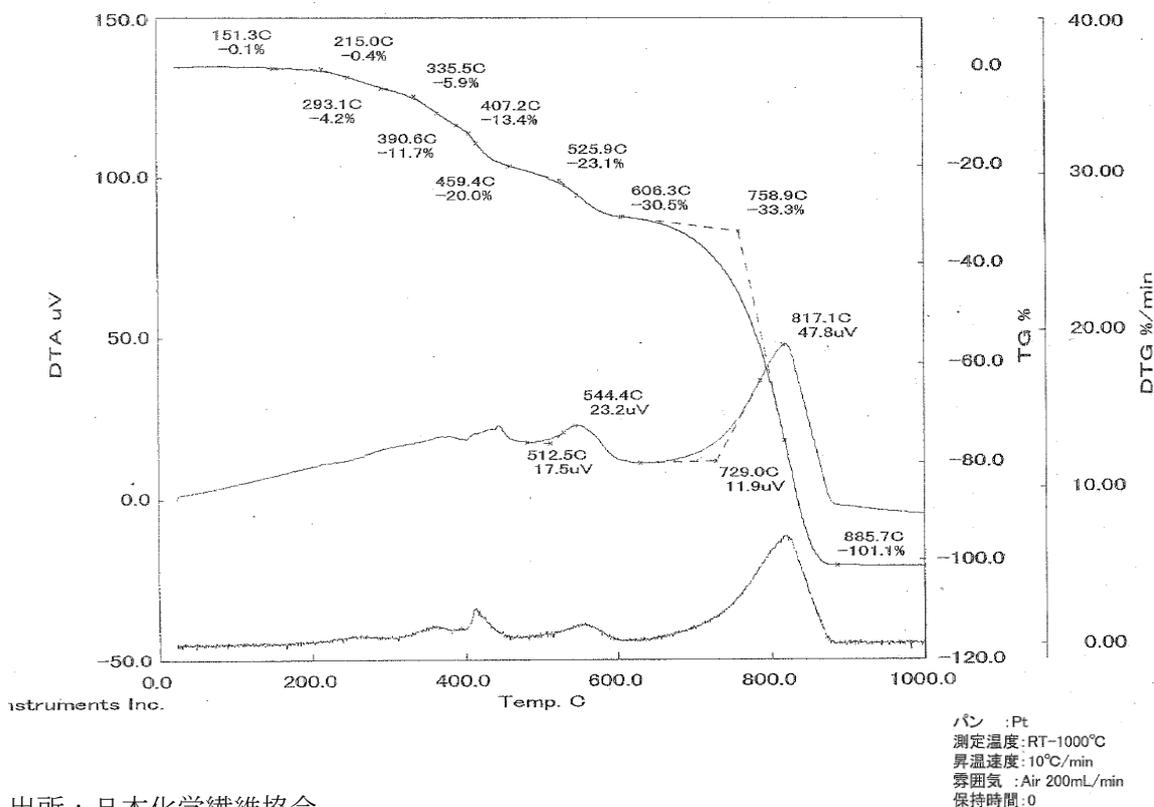
前項に示した様に、CF は軽く、燃え難くまた電気導電性を有するという特性から焼却に適さないと考えられているが、その燃焼に関する基礎特性の調査例は見当たらなかった。よって焼却施設でのトラブル事例が、どのような原因で発生しているか十分な解析が行われてきていない。

本調査は、CFRP および CF の燃焼特性を明らかにすることで、焼却施設におけるトラブル原因の解析に役立ち、焼却プロセスや設備の改良、開発に方向性を与えることを目的としている。

3-1. 熱重量・示差熱測定 (TG-DTA) データ

CF の燃焼に関する基本特性として、日本化学繊維協会 炭素繊維協会委員会の協力により、CFRP の TG-DTA データを入手した。TG (熱重量分析)⁷では、606.3°Cから 885.7°C で急激な重量減が観察され、DTA (示差熱分析)⁸では、約 400°C でマトリックス樹脂、また約 600°C から 900°C で CF による発熱が観察された。よって、燃焼に関する基本特性の検討には 800°C を中心とした温度域での試験を実施することとした。

図 1-1



⁷ TG (Thermogravimetric Analysis) 熱重量分析

温度を変化させながら、あるいは一定の温度に保って試料の重量変化を測定する分析方法。

⁸ DTA(Differential Thermal Analysis) 示差熱分析

試料及び基準物質の温度を一定のプログラムによって変化させながら、その試料と基準物質との温度差を温度の関数として測定する分析方法。

試料の反応や転移などの反応が吸熱、発熱現象として情報が得られる。

3-2. 管状炉による焼却温度／時間／重量減曲線の確認

3-2-1. 試験の目的

TG - DTA では、微量の資料を長い昇温時間を用いて測定することで、CFRP を構成するマトリックス樹脂および CF と酸素の反応温度について情報を得ることが出来たが、実際の燃焼では燃焼速度（時間）も重要であることから、ブロック形状の CFRP 試料を用い、管状炉内で所定の温度まで急速加熱して時間に対する重量減を測定する。また、炉内の酸素濃度を複数設定し、炉内雰囲気による燃焼速度（時間）と重量減の影響についても確認する。

3-2-2. 試験内容

試験試料は写真 2-1 に示す 25mm 角、約 24g／個の試材（CFRP 材）を用い、所定温度に昇温した炉内に CFRP 材の平滑面が上になるよう投入し、燃焼に伴う重量減少曲線を取得するとともに試験後の燃焼残渣有無の確認を行った。

試験は炭素繊維協会から取得した TG-DTA データを参考に、CF が完全燃焼する 800℃をベースに温度および酸素濃度を変え、表 2-1 に示す 6 条件を設定した。なお写真 2-2 に示す管状炉による大型熱天秤装置により試験を実施した。

実証実験概要

実施日時	2014 年 10 月～11 月
委託先	JFE テクノリサーチ株式会社 ソリューション本部（神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1）
実施場所	JFE テクノリサーチ株式会社 ソリューション本部
燃焼 CFRP 試料	大きさ（mm）：25×25×25 積層構成：[(0/90)ns] 炭素繊維：普通弾性糸炭素繊維（弾性率：230GPa、強度：4900MPa） 強化樹脂：エポキシ樹脂（130 度硬化タイプ） 繊維含有率（Vf）：67%

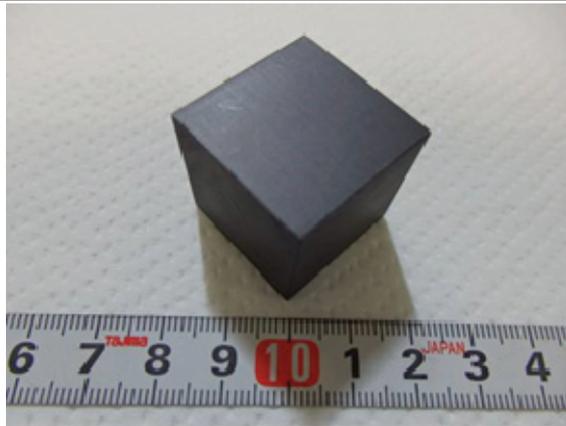


写真 2-1 CFRP 試料

燃焼方法
(設備)

- ・管状電気炉による焼却
- ・大型熱天秤装置にて焼却温度、焼却時間、重量減曲線を取得



写真 2-2(1)管状電気炉



写真 2-2(2)天秤

・ 燃焼温度、酸素濃度を変えて下記の 6 条件で実施

表 2-1 試験条件

	温度 (°C)	雰囲気	雰囲気流量 (L/min)	CFRP 材個数 ※3
試験 1	800	空気	15.0	3
試験 2	1000	空気	5.0	1
試験 3	1200	空気	5.0	1
試験 4	600	空気	5.0	1
試験 5	800	酸素 12% 調整雰囲気※1	5.0	1
試験 6	800	酸素 40% 調整雰囲気※2	5.0	1

※1：酸素ガスと窒素ガスにより調整

※2：CFRP 材投入後 3 分間は空気雰囲気とし、それ以降は酸素ガスと窒素ガスにより酸素 40%調整雰囲気とした

※3：試験 1 を 3 個の CFRP 材で実施後、試験 3 も 3 個で実施した際、排気ガスの燃焼（火炎）が確認されたため、試験 1 以外の CFRP 材は 1 個とした

3-2-3. 試験結果

表 3-1 に試験前後における試料重量等の試験結果一覧を示し、図 3-1 に時間・重量減曲線を示す。何れの条件においても CFRP 材は燃焼により 99.9%以上減量することが確認されるとともに、燃焼残渣も確認された。

試料の燃焼が終了するまでに要した時間は、空気雰囲気では異なる温度条件（600°C、800°C、1000°C、1200°C）において明確な違いは観察されず、どの条件も約 2.5 時間であった。

（図 3-2）

この結果から、空気雰囲気では、CF が燃焼により消費する酸素の量に対して CF 表面付近の酸素の供給が追いつかず燃焼の律速要因となっていることがわかった。

マトリックス樹脂の分解・燃焼温度は、約 400°C であることから、酸素濃度が十分ではない炉の場合、炉温の高い設備でも CF だけが燃え残り電気集塵機等の設備トラブルの要因になりうると考えられる。

また同じ温度（800°C）で異なる酸素濃度条件（12%、空気 20%、40%）において燃焼が終了するまでに要した時間は、それぞれ 1.5 時間、3.0 時間、4.5 時間であった。

（図 3-3）

この結果から、CF 表面付近において酸素の拡散による供給には余裕があり、酸素濃度を上昇させることで CF を適切に燃焼できる可能性が確認された。

各条件における重量減曲線は図 3-4～9 に、試験後の燃焼残渣写真は写真 3-1～6 に示す。

表 3-1 試験結果一覧

項目	試験 1	試験 2	試験 3	試験 4	試験 5	試験 6
温度 (°C)	800	1000	1200	600	800	800
雰囲気	空気	空気	空気	空気	酸素 12% 調整雰囲気	酸素 40% 調整雰囲気
雰囲気流量 (L/min)	15.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
CFRP 材 個数	3	1	1	1	1	1
CFRP 材単位 重量あたりの 酸素供給量 (mol/min・g)	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0011	0.0037
試験前重量(g)	72.97	24.27	24.24	24.29	24.30	24.12
試験後重量(g)	0.0456	0.0170	0.0117	0.0196	0.0166	0.0155
減量 (%) ※	99.94	99.93	99.95	99.92	99.93	99.94

※試験前後の重量（秤量値）より算出。

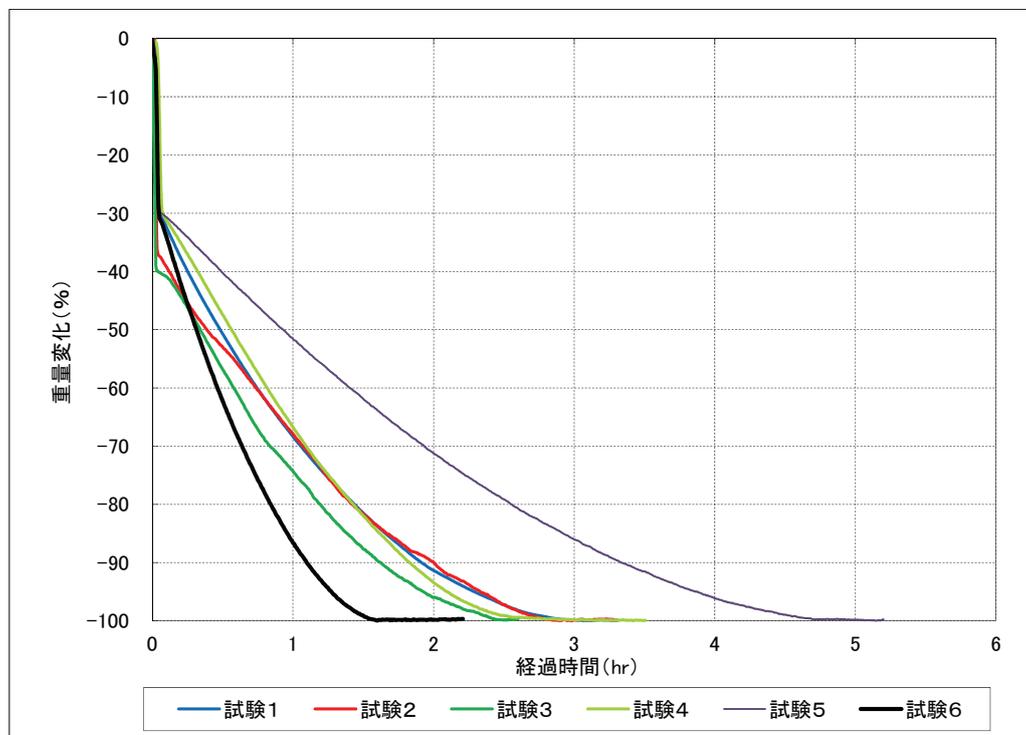


図 3-1 時間-重量減曲線

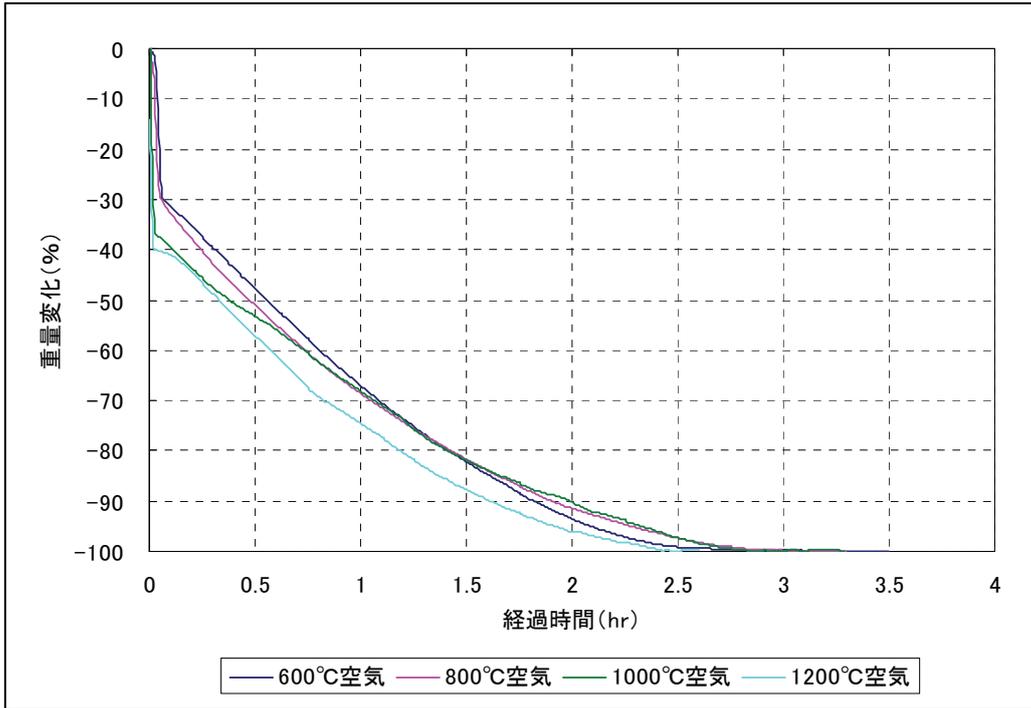


圖 3-2 酸素濃度一定

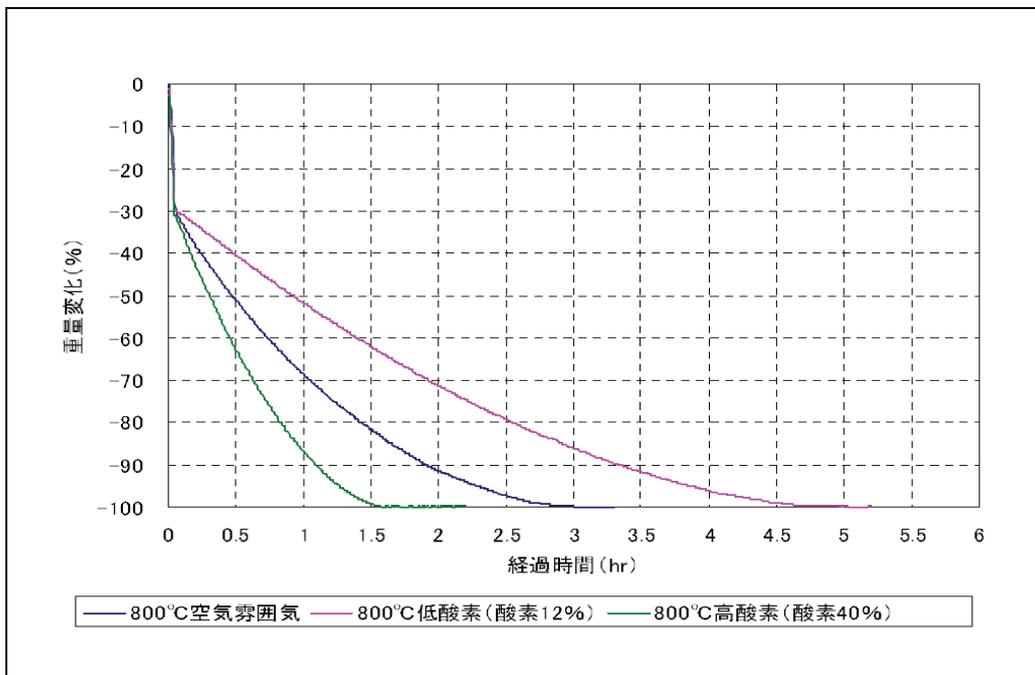


圖 3-3 溫度一定

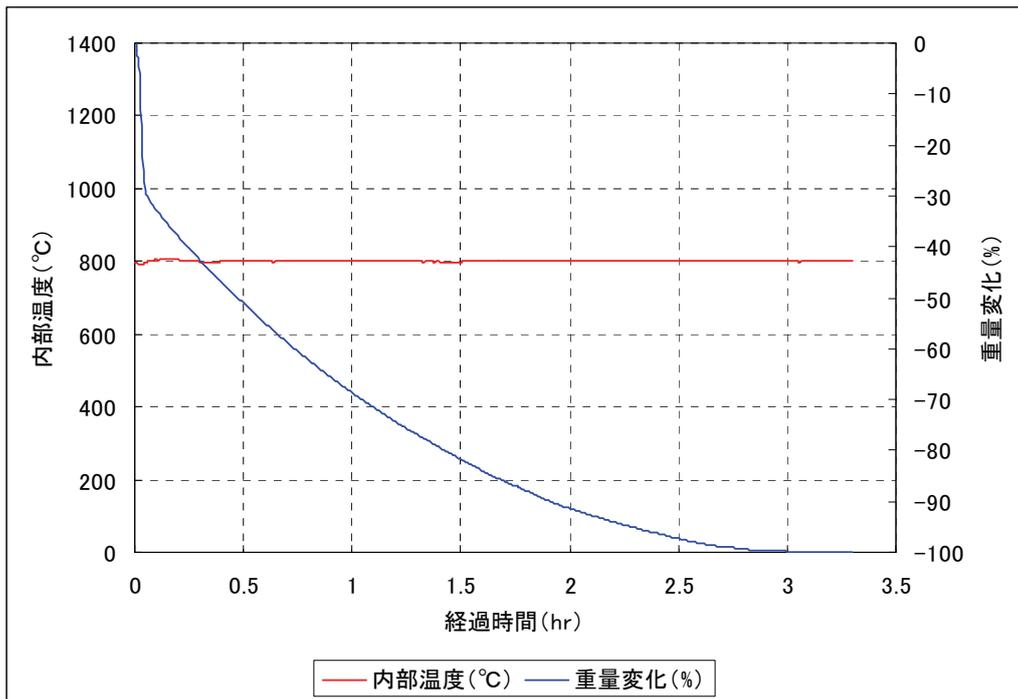


図 3-4 温度/時間/重量減曲線 (試験 1)

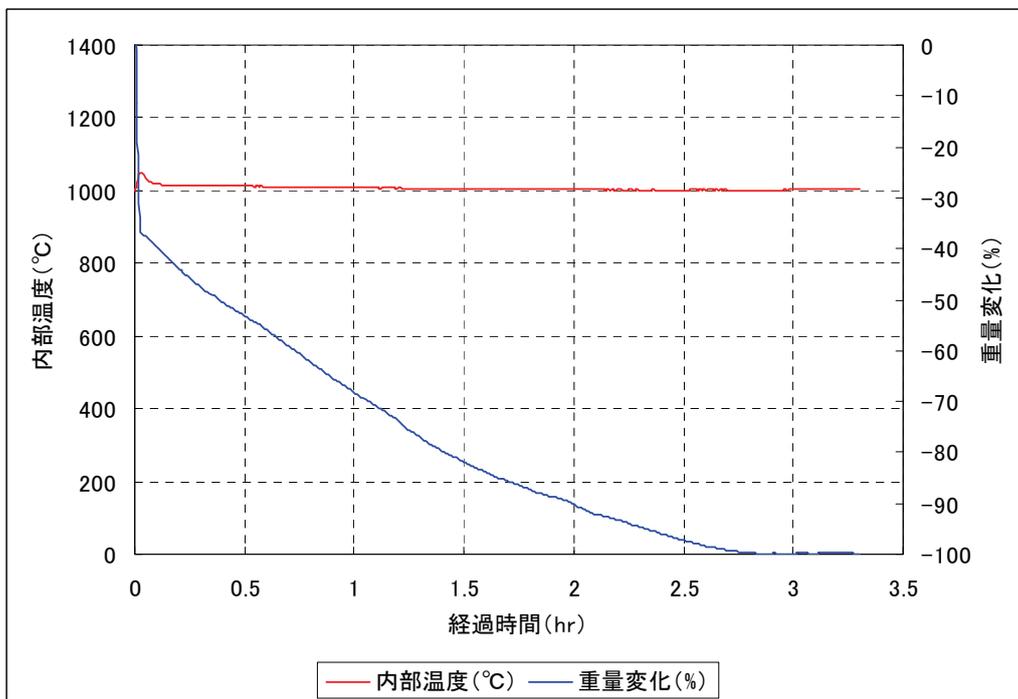


図 3-5 温度/時間/重量減曲線 (試験 2)

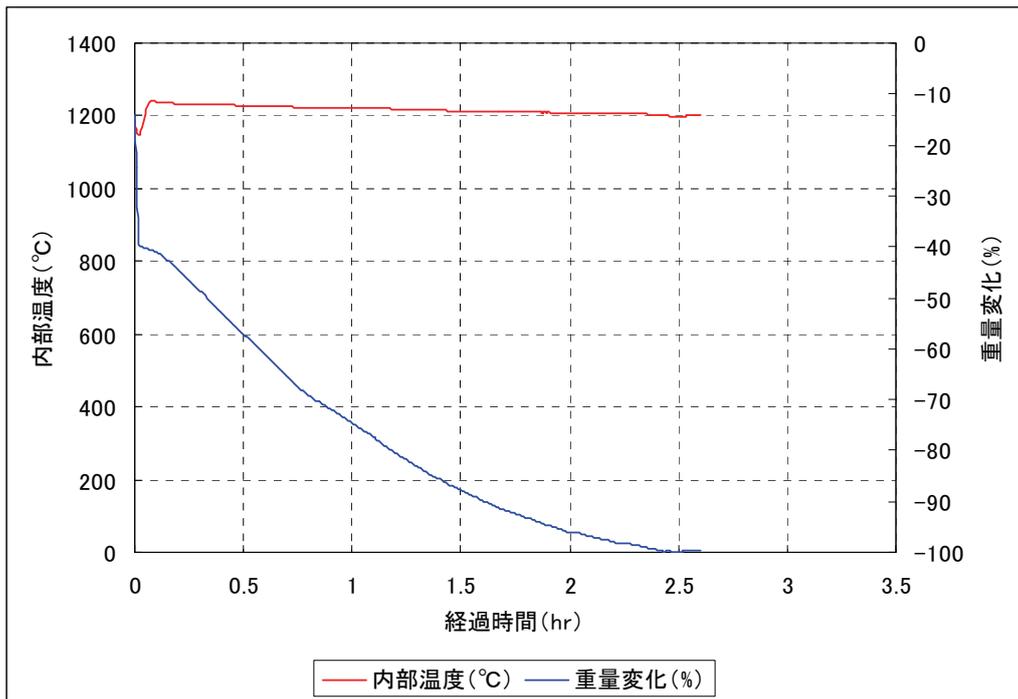


図 3-6 温度/時間/重量減曲線 (試験 3)

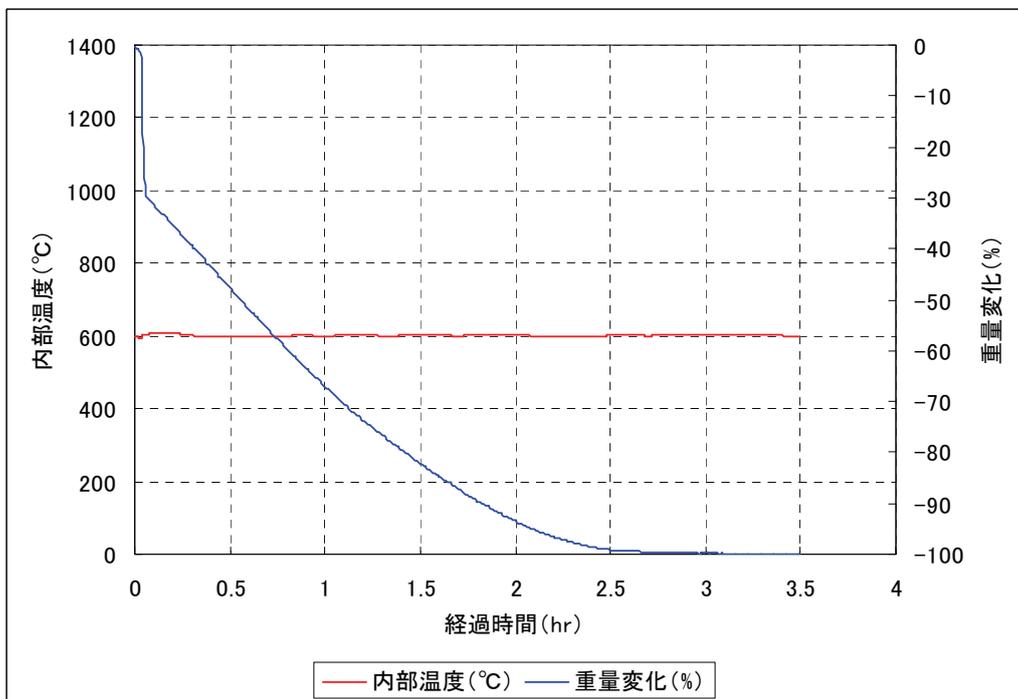


図 3-7 温度/時間/重量減曲線 (試験 4)

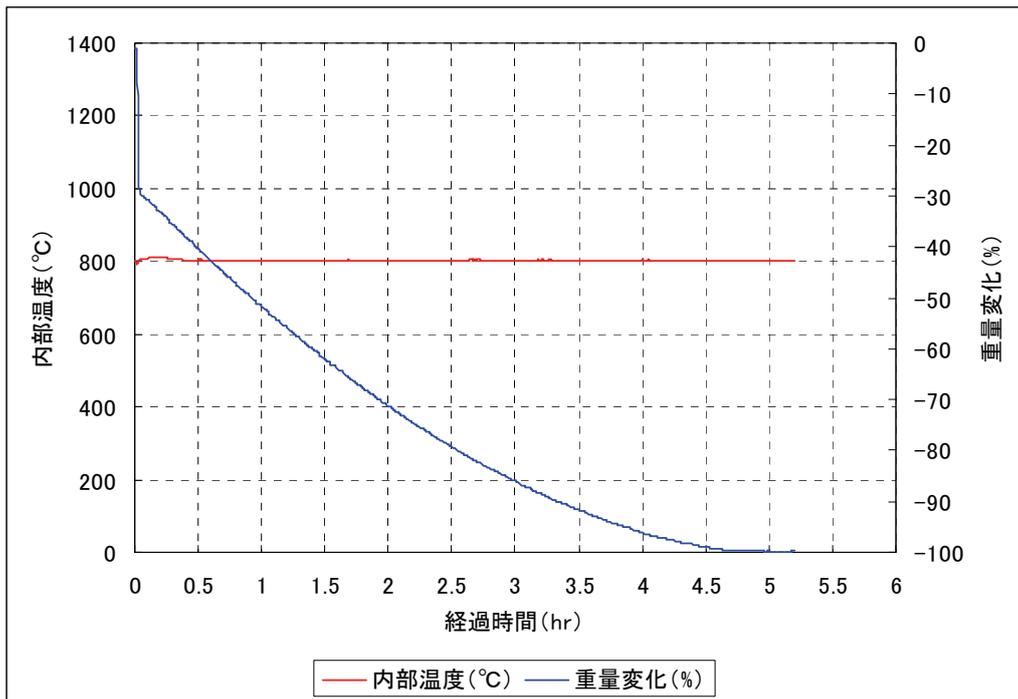


図 3-8 温度/時間/重量減曲線 (試験 5)

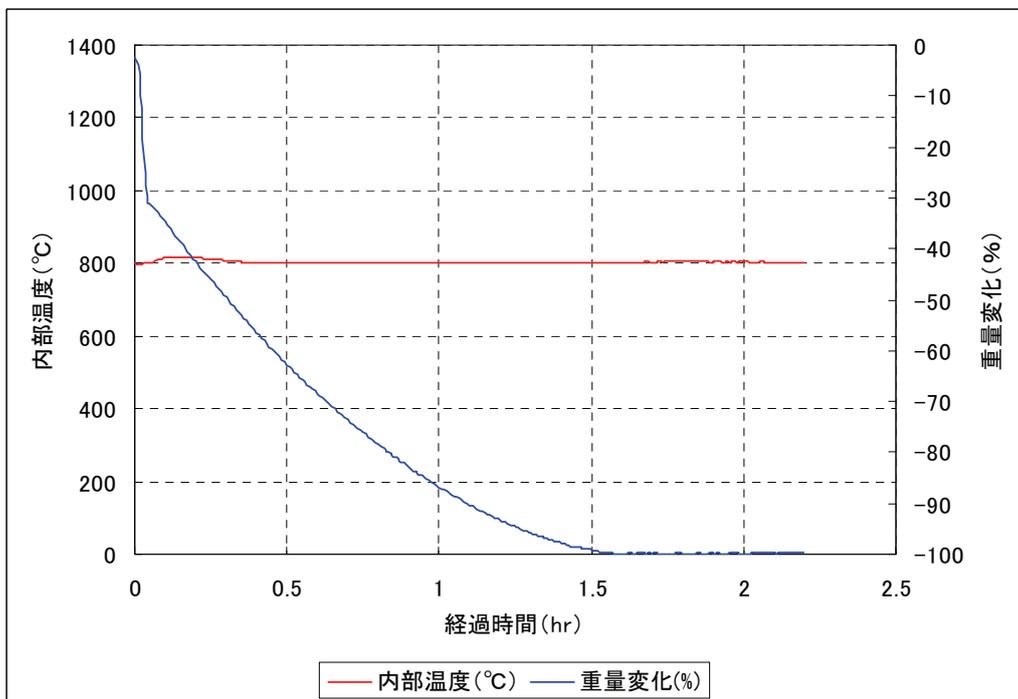


図 3-9 温度/時間/重量減曲線 (試験 6)

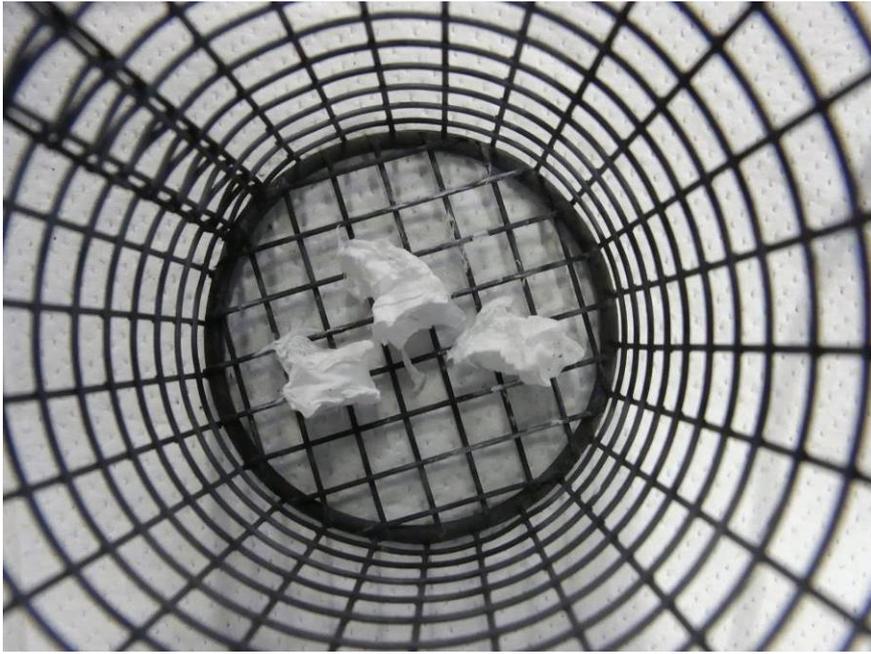


写真 3-1 燃烧残渣 (試験 1)

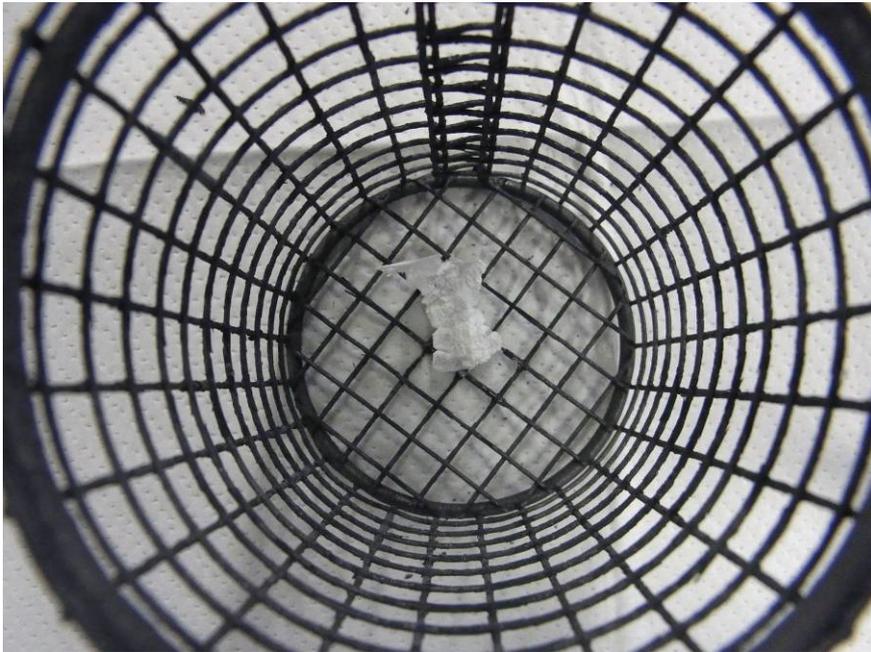


写真 3-2 燃烧残渣 (試験 2)

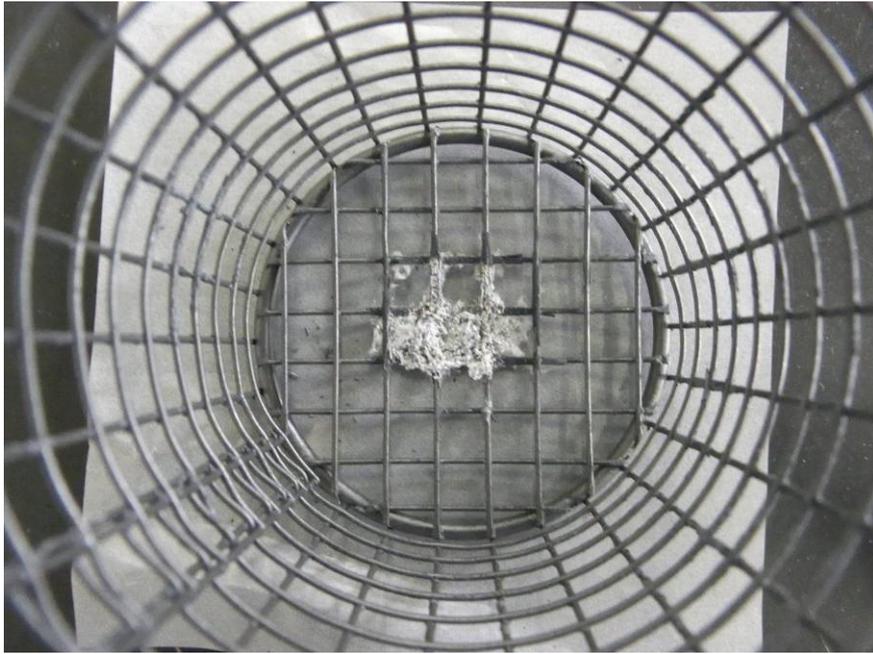


写真 3-3 燃燒残渣 (試験 3)



写真 3-4 燃燒残渣 (試験 4)



写真 3-5 燃烧残渣 (試験 5)

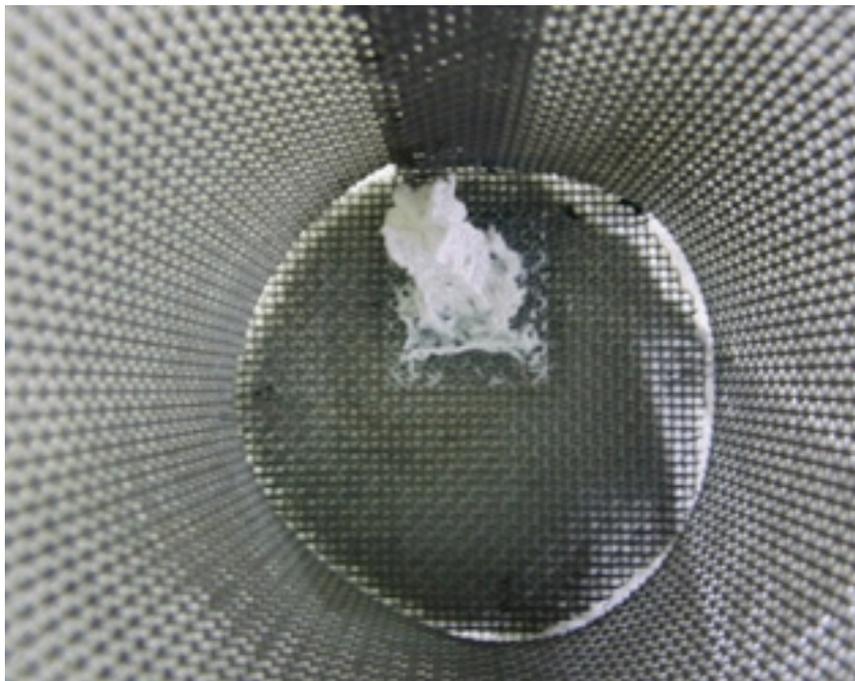


写真 3-6 燃烧残渣 (試験 6)

3-3. 高温雰囲気炉による燃焼状態の観察

3-3-1. 試験の目的

管状炉試験では燃焼の状況を目視で確認することができなかつたため、まずは気流などの外的要因の少ない高温雰囲気炉にて静的状態での炉内温度、酸素濃度の違いによる燃焼状況を目視で確認する。これにより CFRP からマトリックス樹脂が分解・燃焼し、残った CF が燃焼終了に至る過程において、燃焼による形態の変化が、焼却設備中でどのような影響を与える可能性があるか知見を得る。

3-3-2. 試験内容

試験試料は管状炉試験と同様、25mm 角、約 24g/個の試材（写真 3-1 に再掲）を用い、所定温度に昇温した炉内に CFRP 材の平滑面が上になるよう投入し、供試材の燃焼状況をビデオカメラで撮影するとともに、試料近傍の温度および酸素濃度の測定を行った。

試験は表 3-1 に示す空気雰囲気と低酸素状態の 2 条件を設定し、写真 3-2 に示す雰囲気調整加熱炉により試験を実施した。

実証実験概要

実施日時	2014 年 10 月
委託先	JFE テクノリサーチ株式会社 ソリューション本部（神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1）
実施場所	JFE テクノリサーチ株式会社 ソリューション本部
燃焼 CFRP 試料	大きさ（mm）：25×25×25 積層構成：[(0/90)ns] 炭素繊維：普通弾性糸炭素繊維（弾性率：230GPa、強度：4900MPa） 強化樹脂：エポキシ樹脂（130 度硬化タイプ） 繊維含有率（Vf）：67%

写真 3-1 CFRP 試料（再掲）

燃焼方法
(設備)

- ・ 雰囲気調整加熱炉による焼却
- ・ ビデオカメラで撮影するとともに、試料近傍の温度および酸素濃度を測定



写真 3-2(1)雰囲気調整加熱炉



写真 3-2(2) 上部排気口、酸素濃度測定用ノズル

- ・ 酸素濃度を変えて下記の 2 条件で実施

項目	試験 1	試験 2
温度 (°C)	800	800
雰囲気	空気	低酸素※1
CFRP 材個数	1	1

※1：目標酸素濃度は 12% であり、アルゴンガスにより調整するが、炉体上部を排気口等の目的で開放しているため、炉内酸素濃度の調整は成り行きとなる。酸素ガスと窒素ガスにより調整。

3-3-3. 試験結果

燃焼状態の観察結果（静止画像）を写真 3-3～4 に、試験時の温度および酸素濃度測定結果を図 3-1～2 に、試験後の燃焼残渣写真を写真 3-5～6 に示す。いずれの条件でも CFRP 材投入後 15 秒程度で着火し、樹脂部の炎を伴う燃焼後、気流等の少ない静的条件では短繊維（フライ）の飛散や浮遊も発生せず、CF が徐々に燃焼していく状況が観察された。試験 2 における酸素濃度調整は、樹脂部の燃焼終了を確認後、炉内にアルゴンガスを導入し、最終的にアルゴンガス流量を 20L/min とした結果、炉内酸素濃度は 17%程度で安定した。

急速加熱においても樹脂の熱分解によるガスの噴出で一気に CF が飛散等が起きる状況は観察されず、CF は形状を保ったまま燃焼が進行した。このことから、他の焼却物や原材料等に混ぜ込むなどによって電気集塵機等への CF 移行によるトラブルを防ぎつつ処理を行うプロセスや設備開発可能性が考えられる。



写真 3-3(1) CFRP 材投入【試験 1】



写真 3-3 (2) 投入後 15 秒 (着火) 【試験 1】



写真 3-3 (3) 投入後 83 秒 (炎を伴い燃焼中) 【試験 1】



写真 3-3 (4) 投入後 30 分【試験 1】



写真 3-3 (5) 投入後 60 分【試験 1】



写真 3-3 (6) 投入後 90 分【試験 1】



写真 3-3 (7) 投入後 120 分【試験 1】



写真 3-3 (8) 投入後 150 分 【試験 1】



写真 3-3 (9) 投入後 180 分 【試験 1】



写真 3-3 (10) 投入後 210 分【試験 1】



写真 3-3 (11) 投入後 240 分【試験 1】

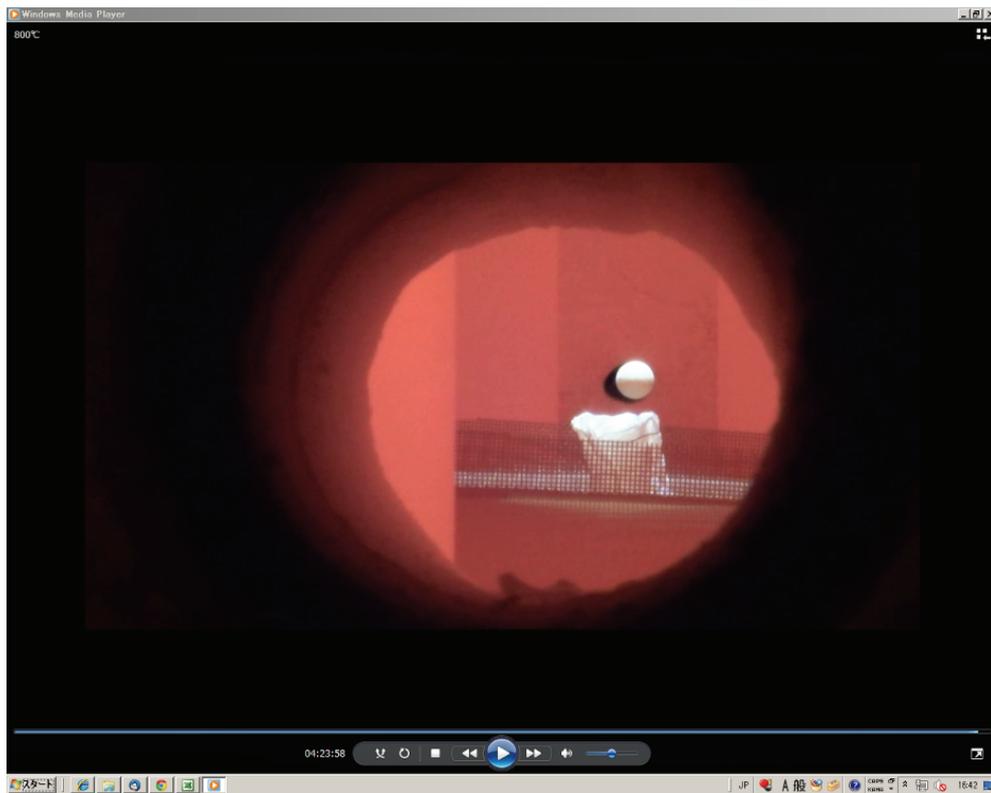


写真 3-3 (12) 投入後 260 分【試験 1】

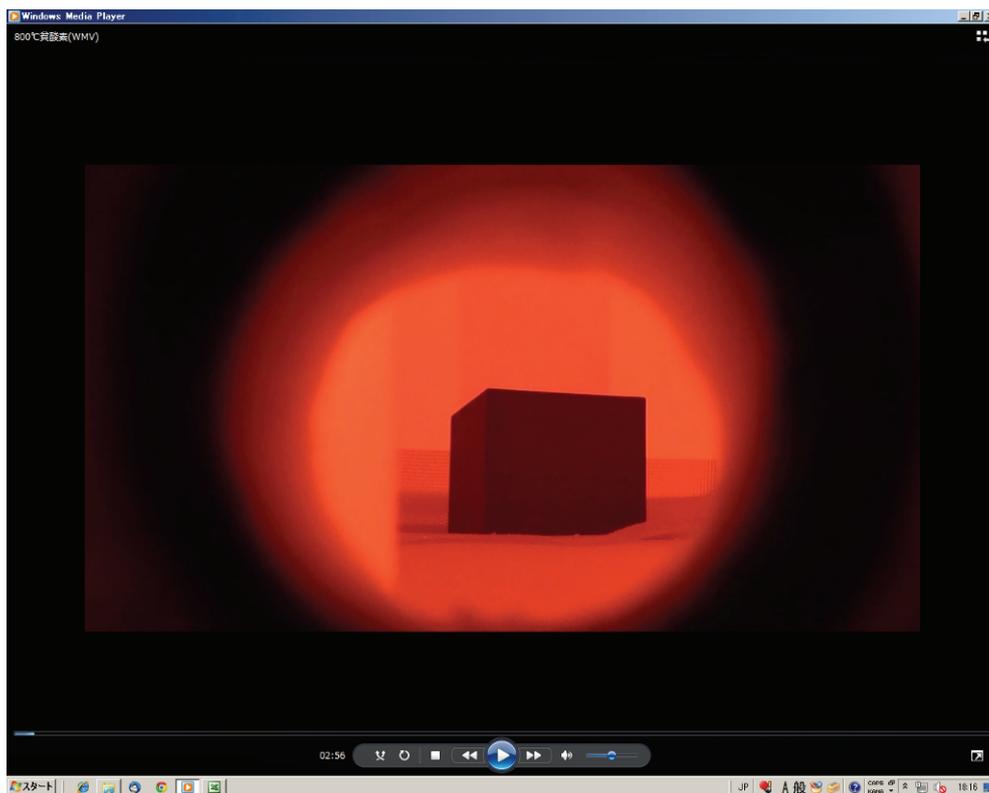


写真 3-4(1) CFRP 材投入【試験 2】

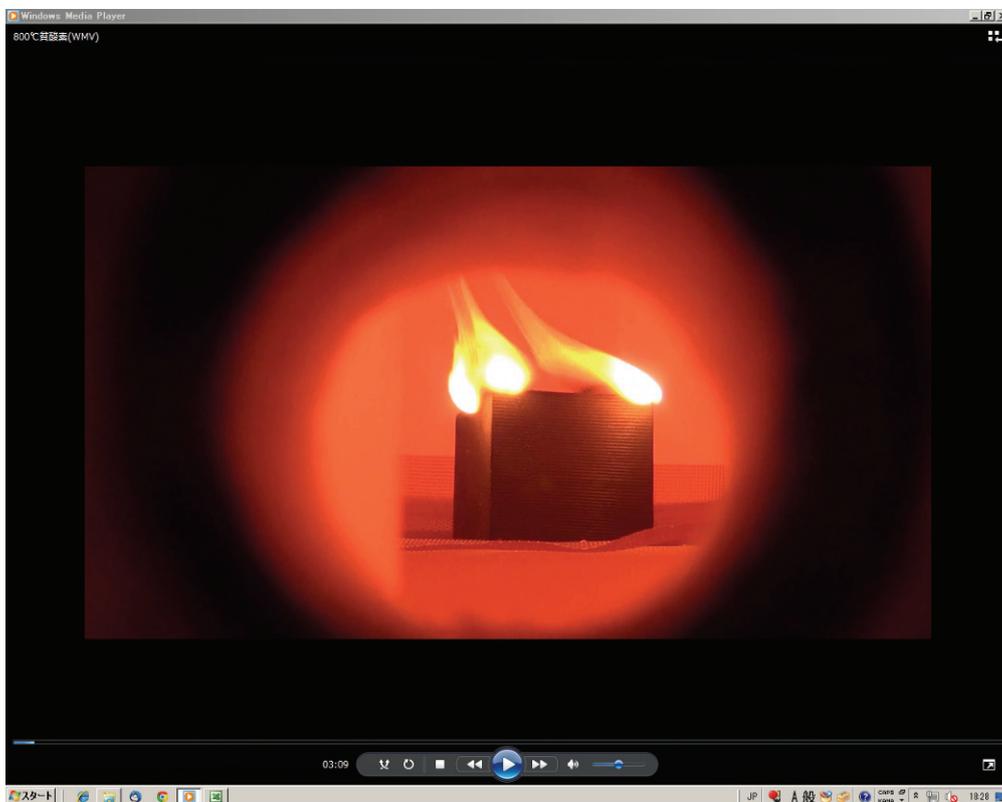


写真 3-4(2) 投入後 13 秒 (着火)【試験 2】



写真 3-4 (3) 投入後 60 秒 (炎を伴い燃焼中) 【試験 2】



写真 3-4 (4) 投入後 5 分 (アルゴンガス導入開始) 【試験 2】



写真 3-4 (5) 投入後 60 分【試験 2】



写真 3-4 (6) 投入後 120 分【試験 2】



写真 3-4 (7) 投入後 180 分【試験 2】



写真 3-4 (8) 投入後 240 分【試験 2】



写真 3-4 (9) 投入後 300 分【試験 2】



写真 3-4 (10) 投入後 360 分【試験 2】

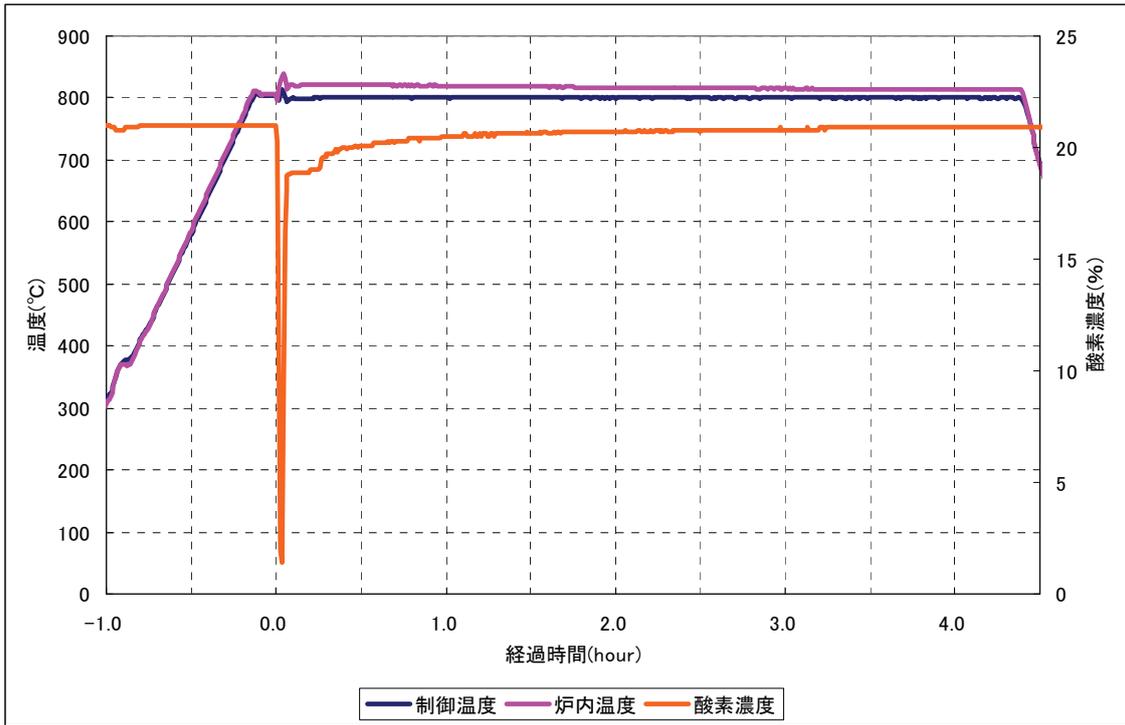


図 3-1 温度および酸素濃度測定結果 (試験 1)

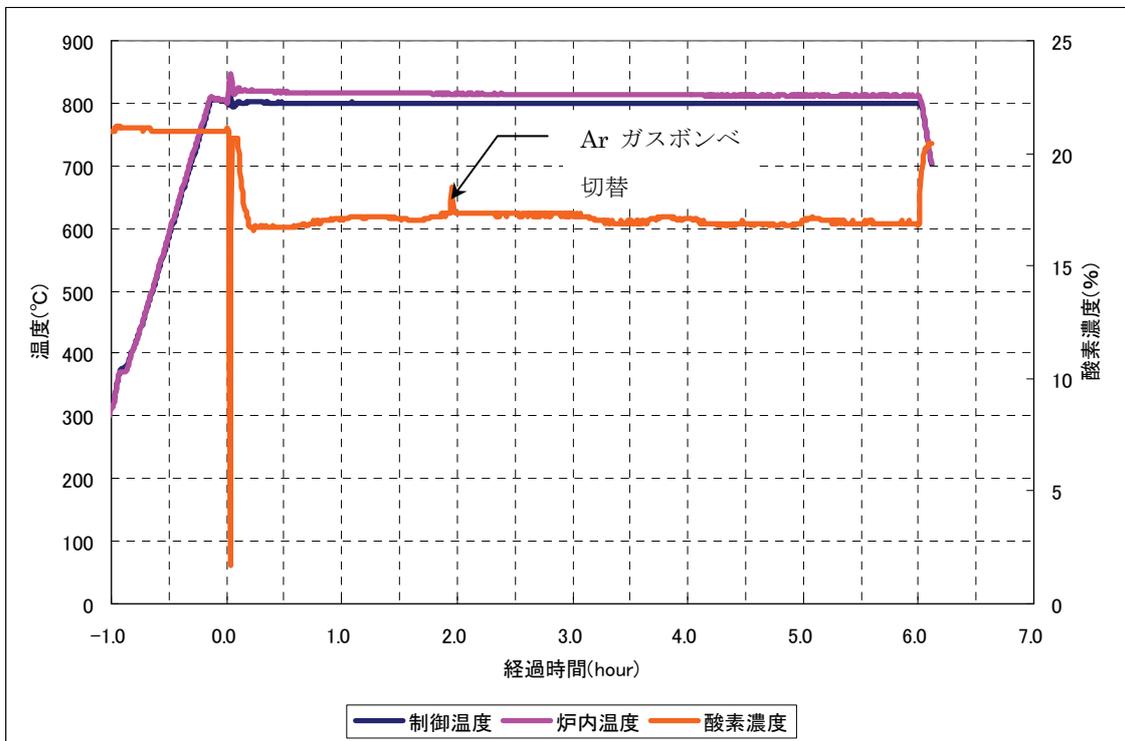


図 3-2 温度および酸素濃度測定結果 (試験 2)

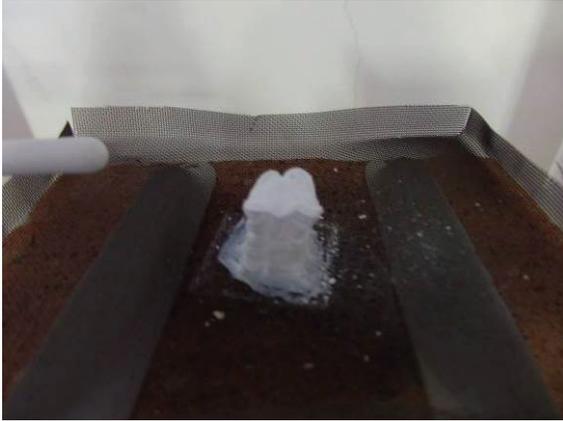


写真 3-5 試験後の燃焼残渣 (試験 1)

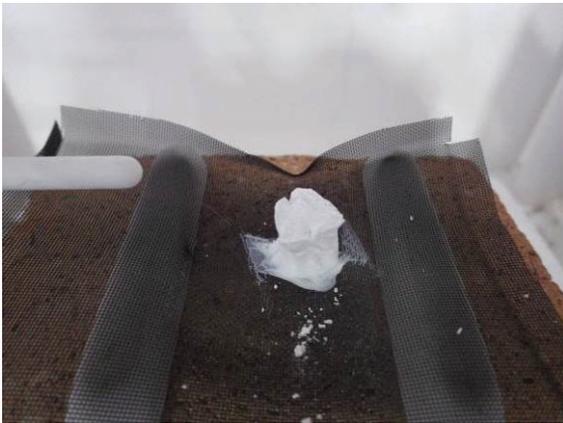


写真 3-6 試験後の燃焼残渣 (試験 2)

3-4. CFRP 燃焼時の CF 燃焼、反応過程の確認実験

3-4-1. 試験の目的

前項で示したように、静的な条件下においては CFRP を燃焼させても短繊維（フライ）の飛散は発生しなかったことが確認できた。ただ実際に ASR を処理するリサイクル施設においては燃焼する条件等も異なっている。

そこで、上記から気流等の影響がある火炎を用いて CFRP を燃焼した際の CF の燃焼形態を確認すべく ASR のリサイクル施設である共英製鋼株式会社へ委託し、以下の条件等により実証実験を行った。

3-4-2. 試験内容

CFRP 燃焼時の CF 燃焼、反応過程の確認実験

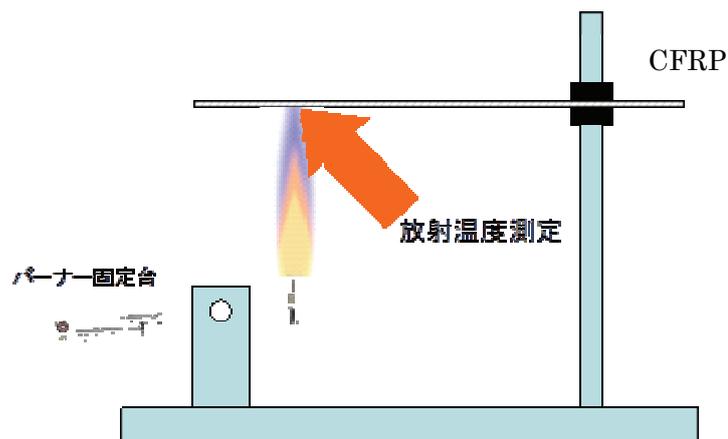
実施日時	2014 年 12 月 16 日
委託先	共英製鋼株式会社 山口事業所（山口県山陽小野田市小野田 6289 番 18） 
実施場所	共英製鋼株式会社 メスキュード事業部
燃焼 CFRP 板	CFRP 板材：t=4mm（12K 綾織 [TRK510 853DMV] 6ply） 炭素繊維 三菱レイヨン TRK510 Vf（繊維体積含有率）=56% 縦 10（本/インチ） 横 10（本/インチ）
燃焼方法（設備）	・ 拡散炎による直接加熱 （焼却炉を想定した燃焼の場合、燃焼ガス噴きつけによる CF 飛散が考えられるため、直接火炎による燃焼テストを実施）

- ・火炎条件は酸素供給量を変え 2 水準設定
- ・バーナー火口と CFRP 板の間隔を変えて、燃焼条件を観察
(CFRP 材料の熱反応挙動試験にて条件設定した 800°C、1000°C、1200°C を基本にしてその周辺温度条件で燃焼状況を確認)
- ・燃焼ガスはプロパンと酸素を使用
- ・バーナーで加熱した CFRP 板面を放射温度計で側温し、ビデオ撮影により炎への暴露時間を計測

酸素供給少



酸素供給大



- ・放射温度計は NEC/Avio 製 (サーモギア) を使用



3-4-3. 試験結果

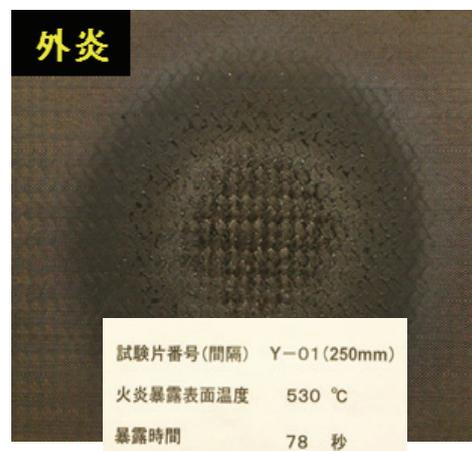
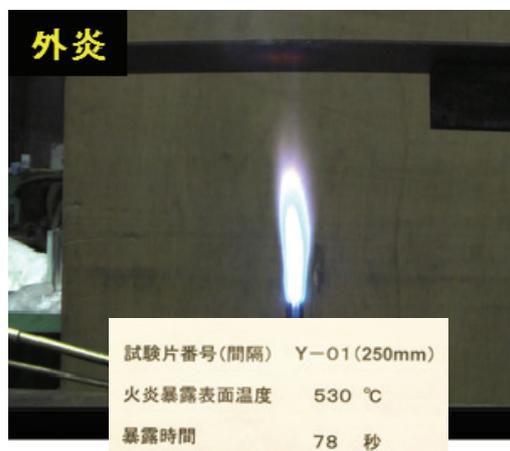
<CFRP 板燃焼結果（酸素供給少）>

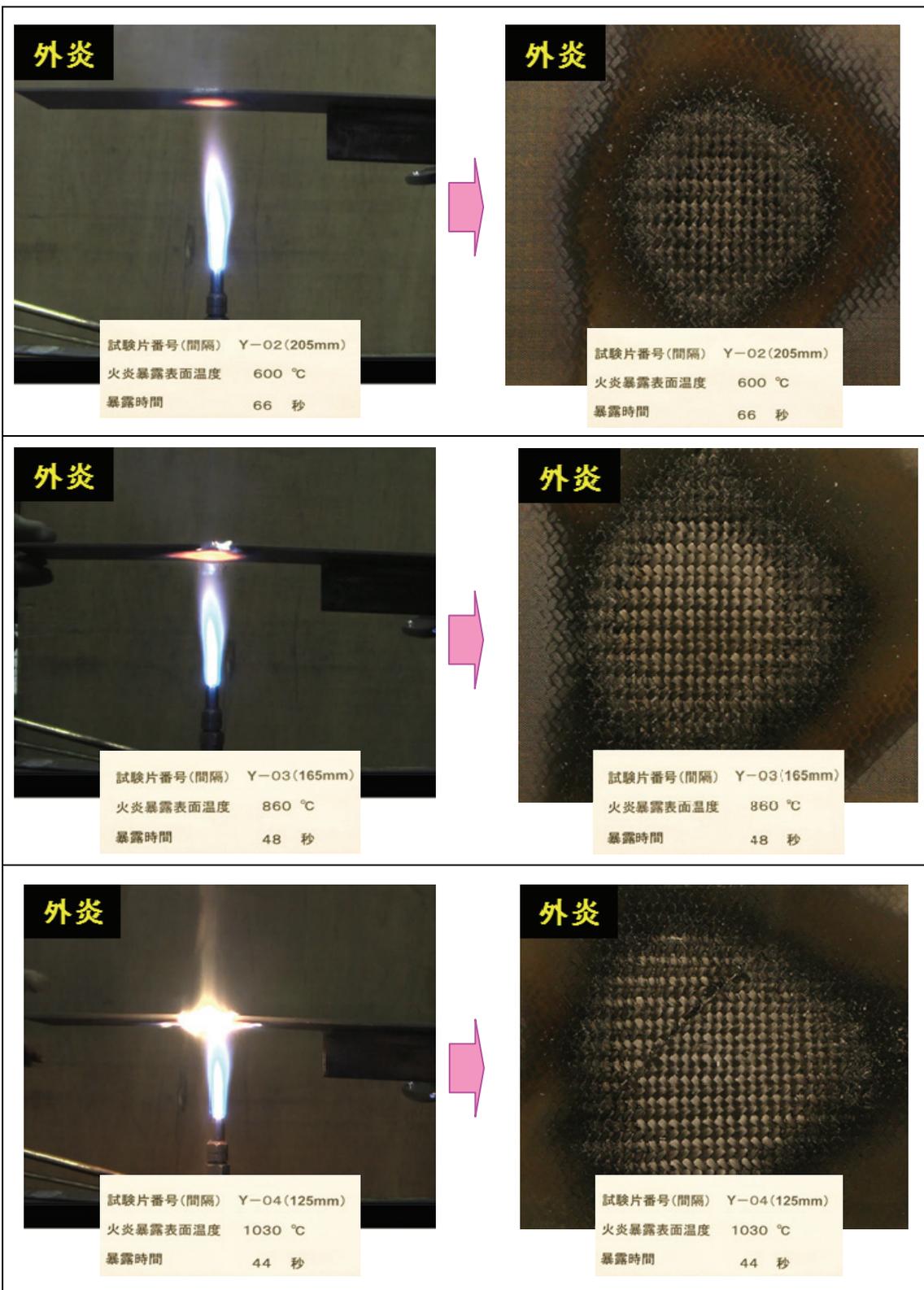
- ・外炎上端から内炎に向かって CFRP 加熱温度が上昇し、TG-DTA で観察された炭素繊維の燃焼温度（800℃）を超えても外炎/内炎境界に達するまで、炭素繊維の損傷は観察されなかった。
- ・内炎中で、間隔を狭めても表面温度の上昇は観測されなかったが、酸素濃度の高くなるバーナー火口に近づくほど炭素繊維の損傷が見られた。
- ・外炎による加熱では、マトリクス樹脂が分解・燃焼され、赤熱されても CF が損傷されることはないため繊維長を保ったフライの発生が考えられる。酸素の吹き込みにより酸素濃度の高い内炎においては、CF が急激に損傷することから、短い繊維長のフライの発生が考えられる。焼却炉に酸素を吹き込んで燃焼を促進する検討にあたっては、酸素濃度の影響によるフライの発生について考慮することが必要と思われる。

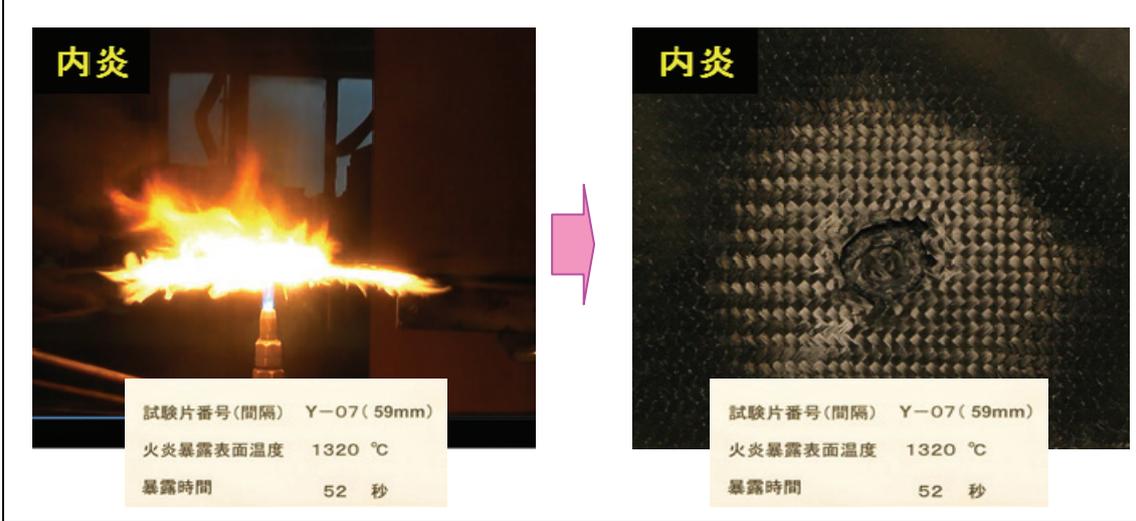
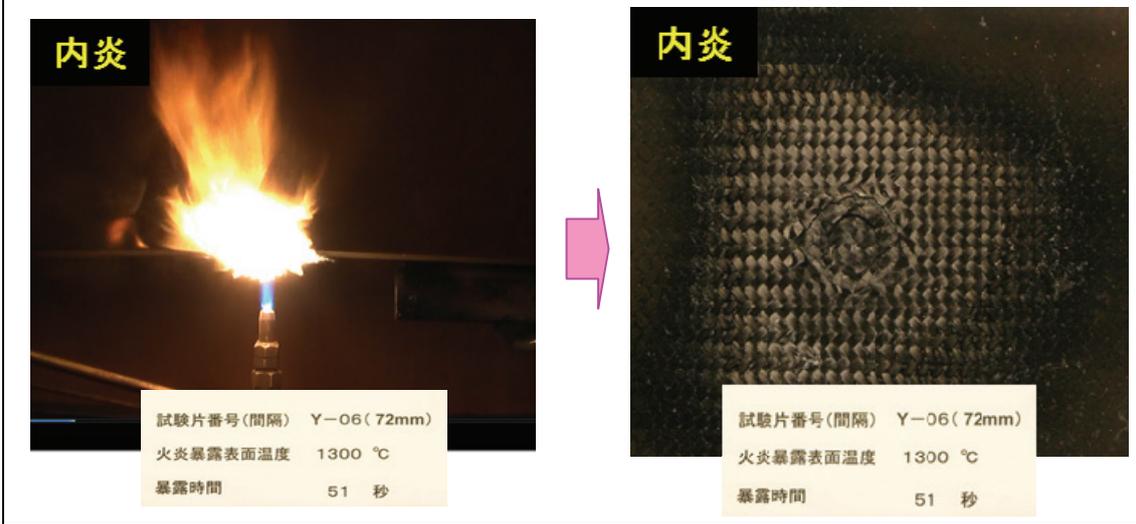
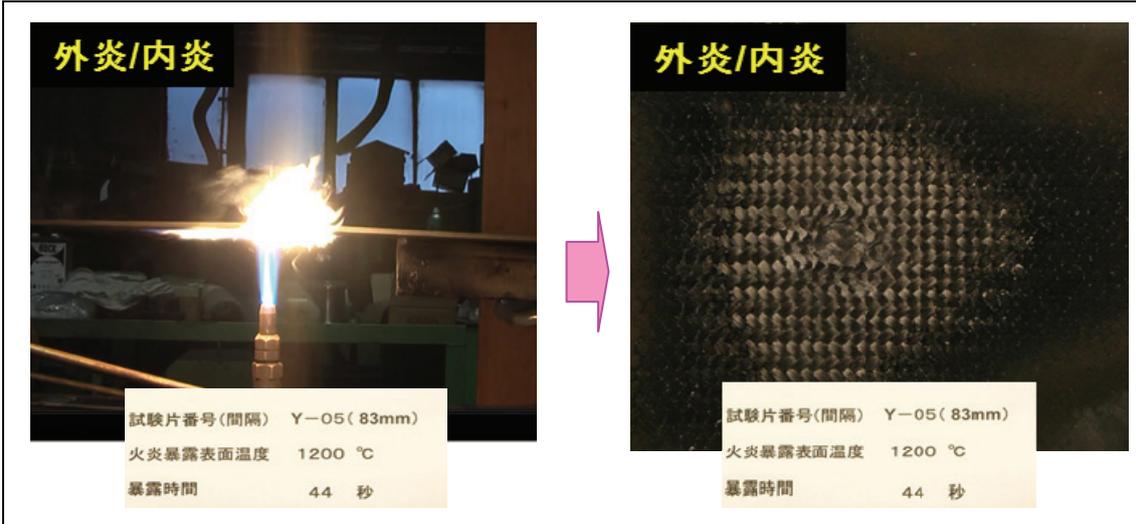
試験実施状況

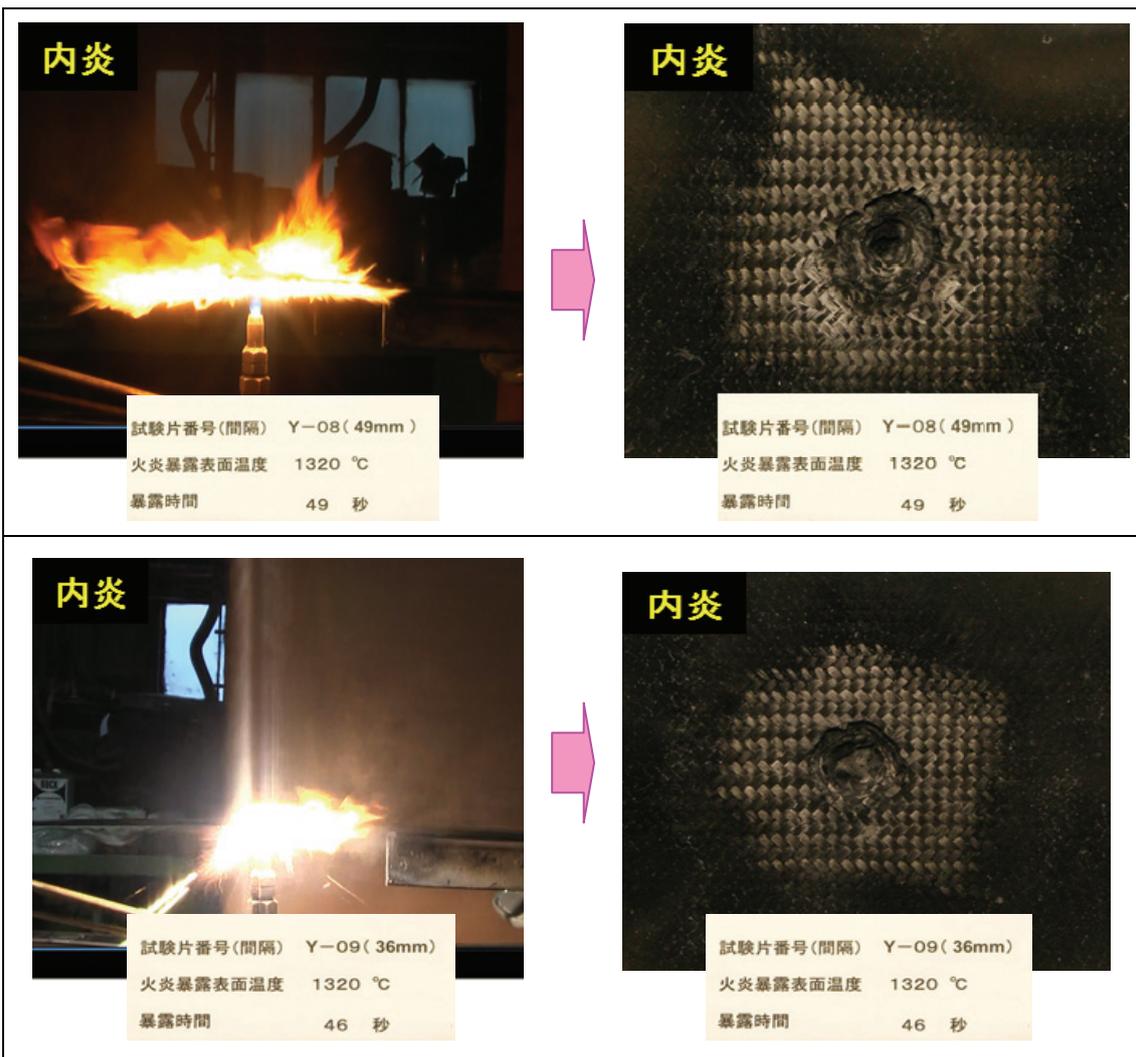


燃焼と焼損状況





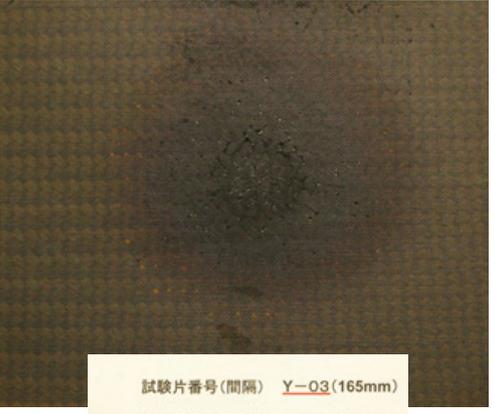
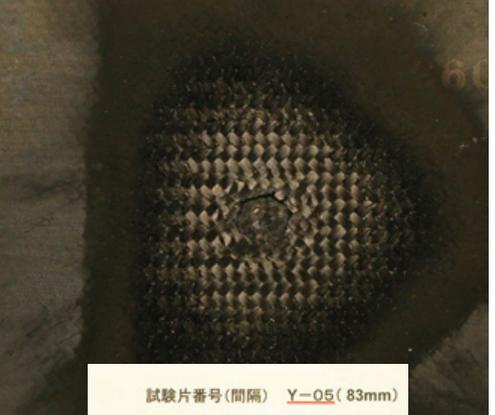


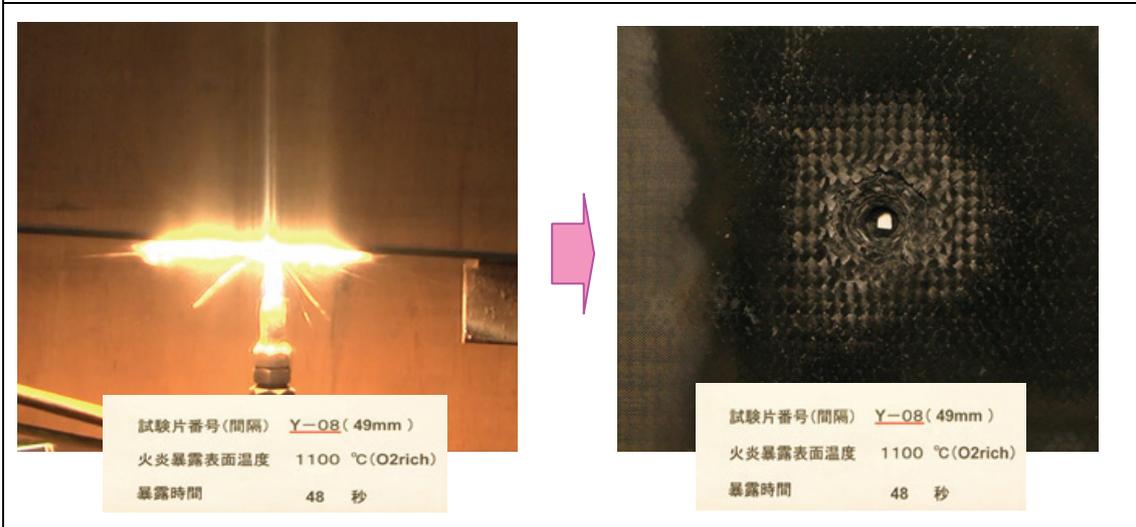
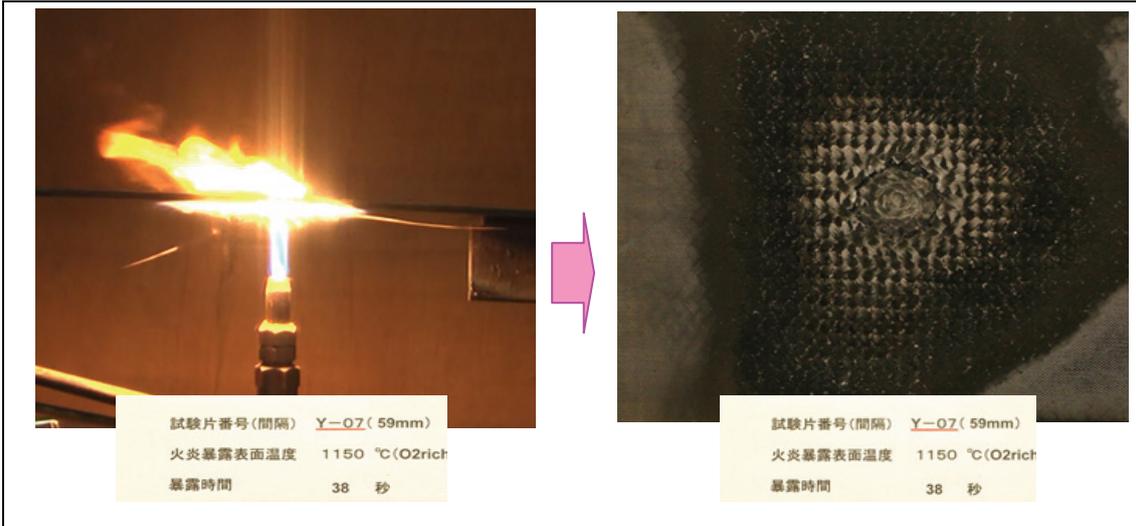


<CFRP 板燃焼結果（酸素供給大）－酸素を多く供給し、CFRP 板を加熱>

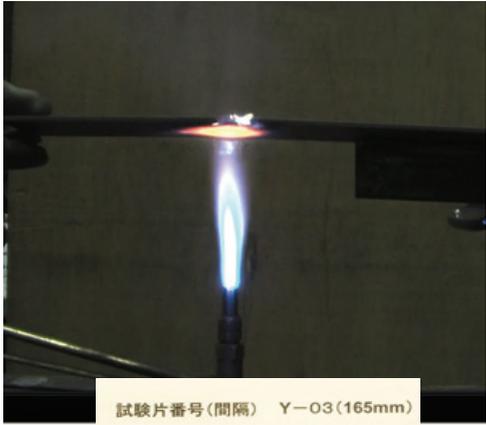
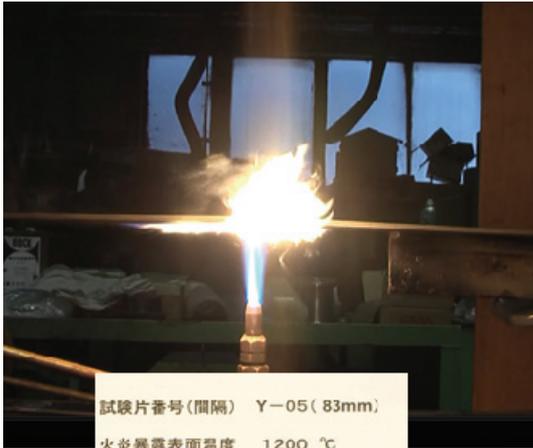
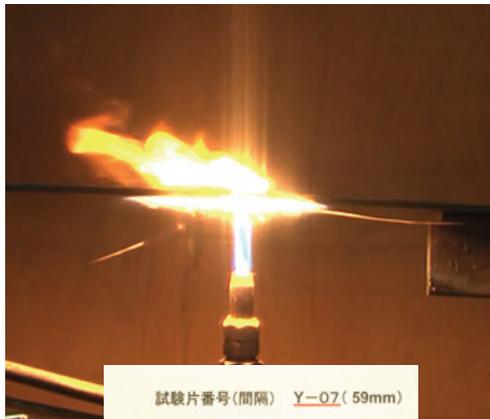
- ・バーナーへの酸素吹き込み量を多くすると、炎が CFRP 板に達した状態で加熱した場合、表面温度が低くても、酸素量の多い方が、焼損が大きいことが確認された。
- ・高濃度の酸素を吹き込みにより、CFRP のサイズの大きな破砕品や大量の処理への可能性が考えられる。

燃焼と焼損状況

 <p>試験片番号(間隔) <u>Y-03</u>(165mm) 火炎暴露表面温度 320 °C(O2ric) 暴露時間 49 秒</p>		 <p>試験片番号(間隔) <u>Y-03</u>(165mm) 火炎暴露表面温度 320 °C(O2ric) 暴露時間 49 秒</p>
 <p>試験片番号(間隔) <u>Y-05</u>(83mm) 火炎暴露表面温度 920 °C(O2ric) 暴露時間 45 秒</p>		 <p>試験片番号(間隔) <u>Y-05</u>(83mm) 火炎暴露表面温度 920 °C(O2ric) 暴露時間 45 秒</p>



燃焼状況比較 (左) 酸素供給量少 (右) 酸素供給量大

<p>• バーナー火口/CFRP 板間隔 165mm</p>  <table border="1" data-bbox="347 712 671 835"> <tr> <td>試験片番号(間隔)</td> <td>Y-03(165mm)</td> </tr> <tr> <td>火炎暴露表面温度</td> <td>860 °C</td> </tr> <tr> <td>暴露時間</td> <td>48 秒</td> </tr> </table>	試験片番号(間隔)	Y-03(165mm)	火炎暴露表面温度	860 °C	暴露時間	48 秒	<p>• 暴露時間 (左) 48 秒 (右) 49 秒</p>  <table border="1" data-bbox="914 712 1238 835"> <tr> <td>試験片番号(間隔)</td> <td>Y-03(165mm)</td> </tr> <tr> <td>火炎暴露表面温度</td> <td>320 °C(O2rich)</td> </tr> <tr> <td>暴露時間</td> <td>49 秒</td> </tr> </table>	試験片番号(間隔)	Y-03(165mm)	火炎暴露表面温度	320 °C(O2rich)	暴露時間	49 秒
試験片番号(間隔)	Y-03(165mm)												
火炎暴露表面温度	860 °C												
暴露時間	48 秒												
試験片番号(間隔)	Y-03(165mm)												
火炎暴露表面温度	320 °C(O2rich)												
暴露時間	49 秒												
<p>• バーナー火口/CFRP 板間隔 83mm</p>  <table border="1" data-bbox="331 1283 646 1406"> <tr> <td>試験片番号(間隔)</td> <td>Y-05(83mm)</td> </tr> <tr> <td>火炎暴露表面温度</td> <td>1200 °C</td> </tr> <tr> <td>暴露時間</td> <td>44 秒</td> </tr> </table>	試験片番号(間隔)	Y-05(83mm)	火炎暴露表面温度	1200 °C	暴露時間	44 秒	<p>• 暴露時間 (左) 44 秒 (右) 45 秒</p>  <table border="1" data-bbox="927 1283 1251 1406"> <tr> <td>試験片番号(間隔)</td> <td>Y-05(83mm)</td> </tr> <tr> <td>火炎暴露表面温度</td> <td>920 °C(O2rich)</td> </tr> <tr> <td>暴露時間</td> <td>45 秒</td> </tr> </table>	試験片番号(間隔)	Y-05(83mm)	火炎暴露表面温度	920 °C(O2rich)	暴露時間	45 秒
試験片番号(間隔)	Y-05(83mm)												
火炎暴露表面温度	1200 °C												
暴露時間	44 秒												
試験片番号(間隔)	Y-05(83mm)												
火炎暴露表面温度	920 °C(O2rich)												
暴露時間	45 秒												
<p>• バーナー火口/CFRP 板間隔 59mm</p>  <table border="1" data-bbox="347 1861 671 1984"> <tr> <td>試験片番号(間隔)</td> <td>Y-07(59mm)</td> </tr> <tr> <td>火炎暴露表面温度</td> <td>1320 °C</td> </tr> <tr> <td>暴露時間</td> <td>52 秒</td> </tr> </table>	試験片番号(間隔)	Y-07(59mm)	火炎暴露表面温度	1320 °C	暴露時間	52 秒	<p>• 暴露時間 (左) 52 秒 (右) 38 秒</p>  <table border="1" data-bbox="938 1861 1262 1984"> <tr> <td>試験片番号(間隔)</td> <td>Y-07(59mm)</td> </tr> <tr> <td>火炎暴露表面温度</td> <td>1150 °C(O2rich)</td> </tr> <tr> <td>暴露時間</td> <td>38 秒</td> </tr> </table>	試験片番号(間隔)	Y-07(59mm)	火炎暴露表面温度	1150 °C(O2rich)	暴露時間	38 秒
試験片番号(間隔)	Y-07(59mm)												
火炎暴露表面温度	1320 °C												
暴露時間	52 秒												
試験片番号(間隔)	Y-07(59mm)												
火炎暴露表面温度	1150 °C(O2rich)												
暴露時間	38 秒												

・バーナー火口/CFRP 板間隔 49mm

・暴露時間 (左) 49 秒 (右) 48 秒



試験片番号(間隔) Y-08(49mm)
火炎暴露表面温度 1320 °C
暴露時間 49 秒



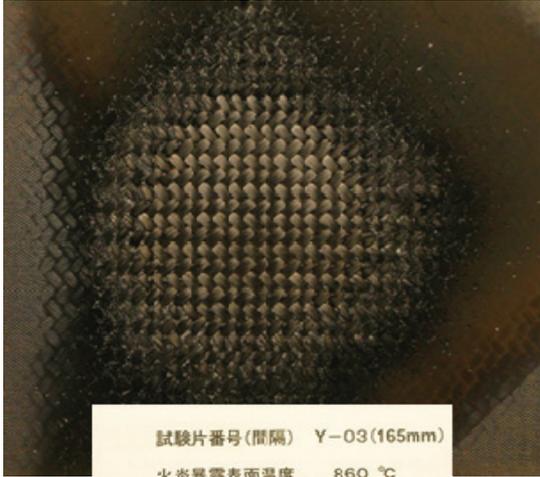
試験片番号(間隔) Y-08(49mm)
火炎暴露表面温度 1100 °C(O2rich)
暴露時間 48 秒

CFRP 板/バーナー火口 同間隔での焼損レベル比較

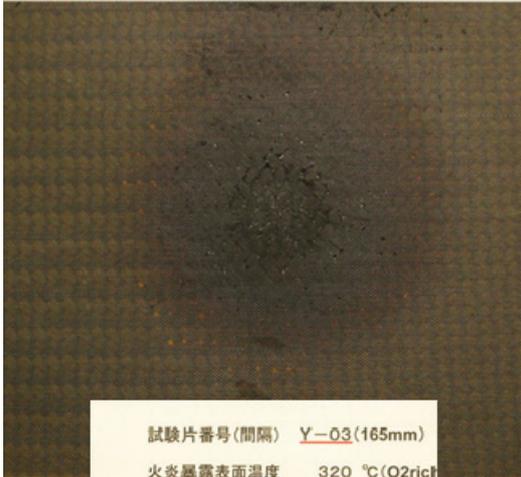
(左) 酸素供給量少 (右) 酸素供給量大

• バーナー火口/CFRP 板間隔 165mm

判定対象外



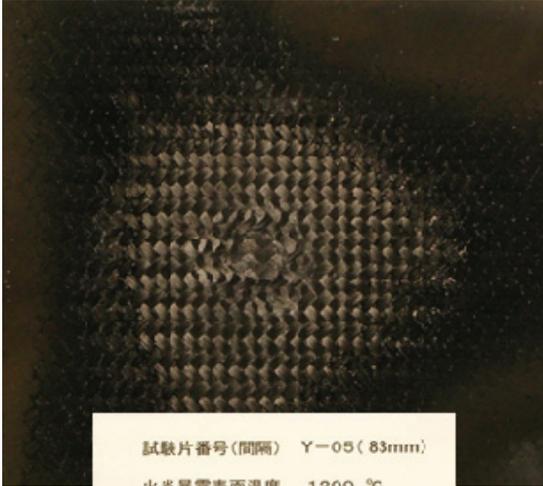
試験片番号(間隔)	Y-03(165mm)
火炎暴露表面温度	860 °C
暴露時間	48 秒



試験片番号(間隔)	Y-03(165mm)
火炎暴露表面温度	320 °C(O2rich)
暴露時間	49 秒

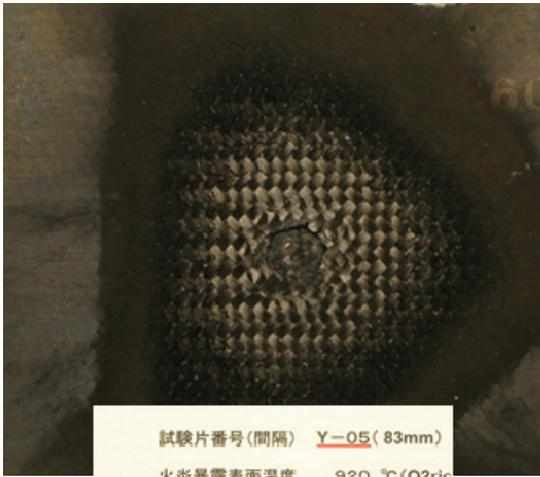
• バーナー火口/CFRP 板間隔 83mm

(左) 焼損 少



試験片番号(間隔)	Y-05(83mm)
火炎暴露表面温度	1200 °C
暴露時間	44 秒

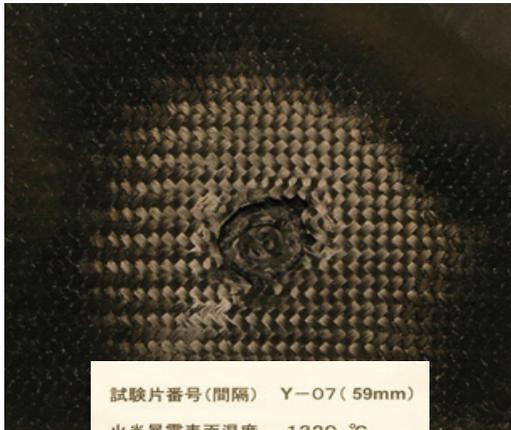
(右) 焼損 大



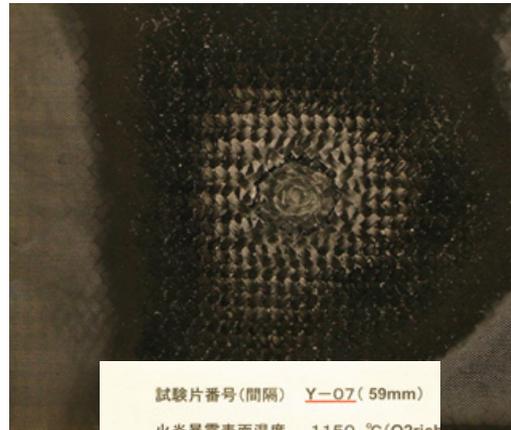
試験片番号(間隔)	Y-05(83mm)
火炎暴露表面温度	920 °C(O2rich)
暴露時間	45 秒

・バーナー火口/CFRP 板間隔 59mm

判定対象外



試験片番号(間隔) Y-07(59mm)
 火炎暴露表面温度 1320 °C
 暴露時間 52 秒

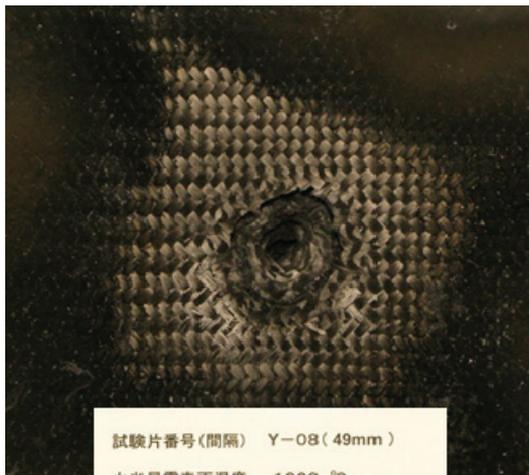


試験片番号(間隔) Y-07(59mm)
 火炎暴露表面温度 1150 °C(O2rich)
 暴露時間 38 秒

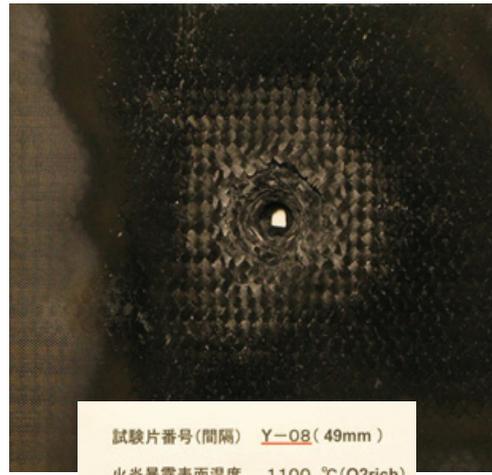
・バーナー火口と CFRP 板の間隔 49mm

(左) 焼損 少

(右) 焼損 大



試験片番号(間隔) Y-08(49mm)
 火炎暴露表面温度 1320 °C
 暴露時間 49 秒



試験片番号(間隔) Y-08(49mm)
 火炎暴露表面温度 1100 °C(O2rich)
 暴露時間 48 秒

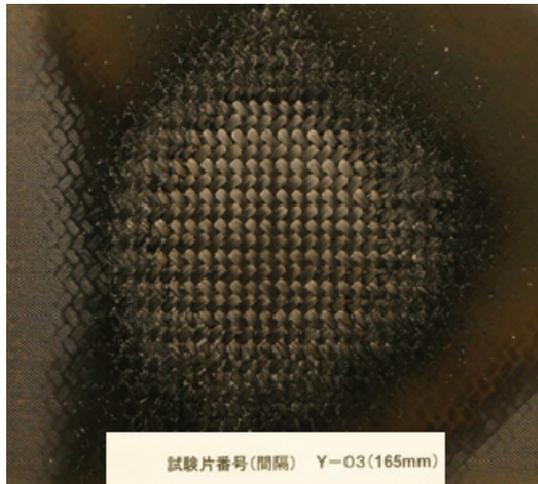
近温度での損傷レベル比較

(左) 酸素供給量少 (右) 酸素供給量大

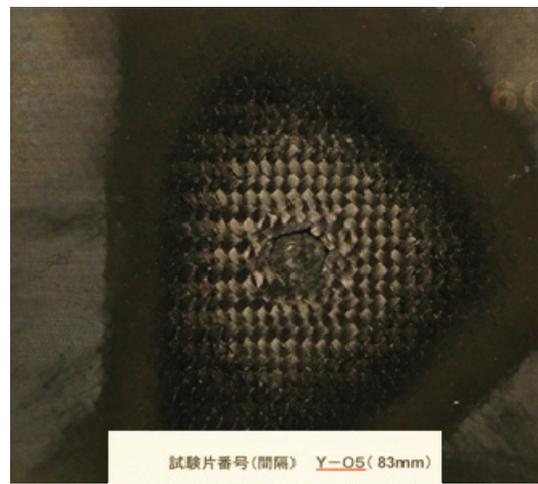
・ 火炎暴露表面温度 (左) 860℃ (右) 920℃

(左) 焼損 少

(右) 焼損 大



試験片番号(間隔) Y-03(165mm)
火炎暴露表面温度 860 °C
暴露時間 48 秒

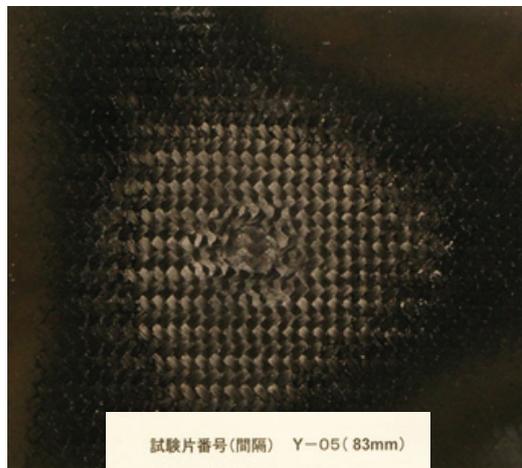


試験片番号(間隔) Y-05(83mm)
火炎暴露表面温度 920 °C(O2ric)
暴露時間 45 秒

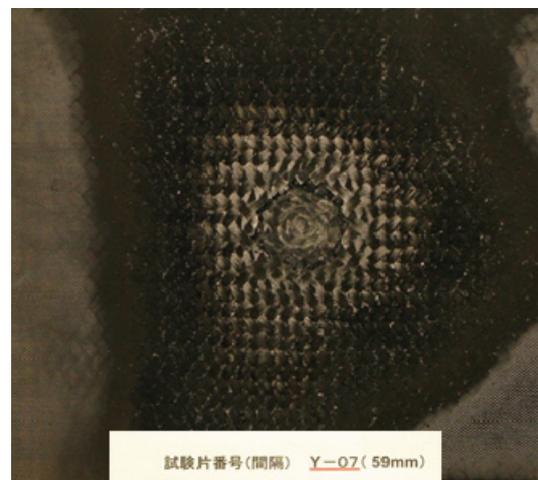
・ 火炎暴露表面温度 (左) 1200℃ (右) 1150℃

(左) 焼損 少

(右) 焼損 大



試験片番号(間隔) Y-05(83mm)
火炎暴露表面温度 1200 °C
暴露時間 44 秒



試験片番号(間隔) Y-07(59mm)
火炎暴露表面温度 1150 °C(O2rich)
暴露時間 38 秒

3-5. CF および CFRP の反応性テスト

3-5-1. 試験の目的

これまでの試験の結果から、CFRP の燃焼には十分な酸素が必要であることがわかったが、効率良くリサイクル施設の炉内で CFRP を完全燃焼させるために、さらに燃焼速度を速める方法を検証した。

東レ社特許【特開平 6-117614】によれば、「炭素繊維強化樹脂混合物を焼却処理するに際し、アルカリ金属、アルカリ土類金属、遷移金属よりなる群から選ばれた 1 種以上の金属を含む化合物を、炭素繊維に対し金属元素に換算して 100ppm 以上添加することにより短時間で炭素繊維または炭素繊維強化樹脂混合体の焼却処理が可能となる」と示されていることから、CFRP 製造時ではなく、焼却時においても同様の効果があるか、金属添加条件での CF の反応特性を確認することとした。

合わせて、前述したように CFRP 焼却におけるセメントキルンの集塵機において電気短絡の懸念があることを鑑み、セメントキルン内での焼成に合わせた条件を設定して燃焼状況を確認するとともに、CFRP の形状による燃焼特性、さらには酸素富化条件での燃焼特性を検証することとした。

東レ社特許（一部抜粋）

発明の名称	炭素繊維の焼却方法および炭素繊維強化樹脂混合物の焼却方法
公開番号	特開平 6-117614
出願人	東レ株式会社
出願日	平成 4 年（1992）10 月 1 日
公開日	平成 6 年（1994）4 月 28 日
課題・構成	<p>【発明の詳細な説明】</p> <p>【0004】炭素繊維は、その構造が基本的には黒鉛構造の炭素からなっており、酸化可能な物質ではあるが、製造工程で高温での延伸処理を受けているため、一般的には熱安定性が高く、焼却には比較的長時間を要するため、処理の経済性に難点があった。</p> <p>【0005】このため、例えば、炭素繊維の耐酸化性を低下させる目的で、炭素繊維またはマトリックス樹脂中に予めアルカリ金属などを含有させておくことにより、焼却による廃棄処理を容易にするという提案がみられる（特開昭 57-117535 号公報）。これは、燃焼性が高く、燃焼後の炭素繊維の電気抵抗を高くすることができるため、万一、炭素繊維が浮遊しても電気障害などが生じにくい炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）を提供できるというものである。これによれば、CFRP の熱安定性は確かに低下し処理が容易になるが、通常の使用時において製品としての熱安定性も低下することを免れ得ず、また、金属がコンポジット全体に分布しているため、加える金属の量に対して熱安定性の低下効果が小さいという問題点があった。</p>

【0007】

【発明が解決しようとする課題】一般的に、炭素繊維は90%以上が炭素元素からなり、その燃焼熱は石炭などと殆ど同程度の値を示すにもかかわらず、非常に熱安定性が高いため、燃焼に多大の時間を要するため、廃棄物処理の観点からは、不燃物として位置づけられてきた。したがって、本発明の課題は、このような炭素繊維、炭素繊維とマトリックス樹脂との混合体およびその硬化物などを効率よく経済的に焼却処理する技術を提供することにある。

【0008】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するため本発明の炭素繊維の焼却方法は、次の構成を有する。すなわち、炭素繊維を焼却処理するに際し、アルカリ金属、アルカリ土類金属、遷移金属よりなる群から選ばれた1種以上の金属を含む化合物を、炭素繊維に対し金属元素に換算して100ppm以上添加することを特徴とする炭素繊維の焼却方法である。

【0009】また、本発明の炭素繊維強化樹脂混合物の焼却方法は、次の構成を有する。すなわち、炭素繊維強化樹脂混合物を焼却処理するに際し、**アルカリ金属、アルカリ土類金属、遷移金属**よりなる群から選ばれた1種以上の金属を含む化合物を、炭素繊維に対し金属元素に換算して100ppm以上添加することを特徴とする炭素繊維強化樹脂混合物の焼却方法である。

【0011】以下、本発明について詳細に説明する。本発明は、従来方法では焼却困難であるとされてきた炭素繊維、樹脂混合物またはその硬化物を、用済み後、金属化合物を別途添加し、金属元素の触媒効果によって効率よく焼却するものである。金属元素による促進機構については、詳細は不明であるが、本発明に用いる金属または金属化合物の金属元素として効果が認められるものは、Na、K、Liなどのアルカリ金属、Mg、Caなどのアルカリ土類金属、Fe、Co、Ni、Al、Zn、V、Zr、Mn、Cr、Cuなどの遷移金属よりなる群から選ばれた1種以上の金属である。これら金属またはその金属化合物を焼却すべき対象物に付与するには、一般的には、金属の水酸基との化合物や酢酸塩など各種の金属塩化合物を、水溶液または水分散液の状態です噴霧付与するのが好ましい。

【0012】これらのうち、焼却の促進効果を高いものとし、焼却炉に対する損傷を極小化するなどの観点から、比較的アルカリ性の弱い金属化合物を用いるのが好ましく、具体的には、水酸化鉄、塩化鉄、硫酸鉄、酢酸鉄、硫酸カルシウム、酢酸マグネシウム、酢酸銅が特に好ましい。

【0013】加える金属または金属化合物の量としては、金属元素換算で焼却対象物に対し100ppm以上、好ましくは500ppm以上とするものである。100ppm未満では燃焼促進効果に乏しい。一方、燃焼促進効果は金属量の増加にともなって飽和するし、あまり大量に加えてもかえってその後処理が問題になることもあり、また、経済的観点からも、その上限は10000ppm以下とすることが好ましい。

	【発明の効果】本発明の方法によれば、短時間で炭素繊維または炭素繊維強化樹脂混合体を経済的に効率良く焼却処理することが可能となる。
--	--

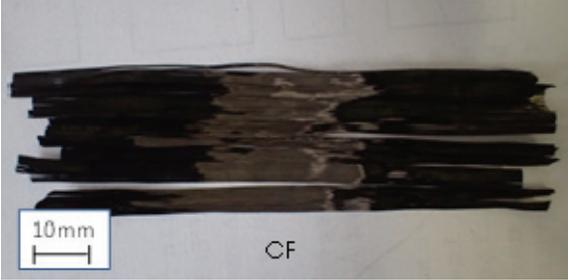
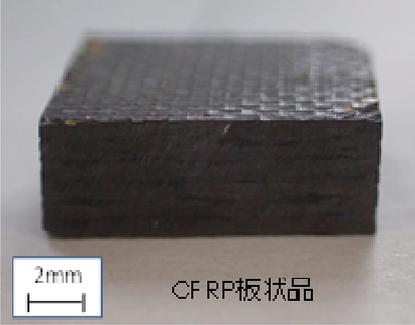
これらの反応過程で考えられる炭化物の生成、CFのグラファイト層間化合物の形成、遷移金属の触媒効果による燃焼性の促進について、焼却時における各種元素を添加した場合の影響を確認した。

添加元素は、セメント原料として用いられるものから選択し、アルカリ金属としては速硬セメントに用いられるリチウムを、またアルカリ土類および遷移金属としてはカルシウムおよび鉄を用いた。

上記を踏まえてCFRPおよびCFについて、以下の項目について検証する。

- (1) 金属添加条件による燃焼特性への影響
 - ① CFと金属添加剤の反応性
 - ② 金属添加剤による触媒効果
- (2) セメントキルン焼成条件およびCFRP形状による燃焼特性への影響
- (3) 酸素富化条件による燃焼特性への影響

3-5-2. 試験内容

実施日時	2014年12月～2015年1月
委託先	太平洋セメント株式会社 中央研究所
実施場所	太平洋コンサルタント株式会社 西日本事業所
燃焼CF CFRP	  

	<p>表 1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="395 275 507 371">種類</th> <th data-bbox="507 275 647 371">製造元</th> <th data-bbox="647 275 746 371">型番</th> <th data-bbox="746 275 916 371">大きさ 形状</th> <th data-bbox="916 275 1337 371">備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="395 371 507 448">CF</td> <td data-bbox="507 371 647 448">東レ</td> <td data-bbox="647 371 746 448">T700</td> <td data-bbox="746 371 916 448">繊維単体 L=100mm</td> <td data-bbox="916 371 1337 448">・長手方向が 100mm になるように切断</td> </tr> <tr> <td data-bbox="395 448 507 757">CFRP 板状品</td> <td data-bbox="507 448 647 757">三菱 レイヨン</td> <td data-bbox="647 448 746 757">TRK 510</td> <td data-bbox="746 448 916 757">11mm× 8mm× 4mm</td> <td data-bbox="916 448 1337 757"> <ul style="list-style-type: none"> ・ 12K 綾織、6ply ・ 縦 10 (本/inch)、横 10 (本/inch) 幅 120mm ・ Vf (繊維体積含有率)=56% ・ 厚さ 4mm ・ ダイヤモンドカッターで 0.5000g 前後になるように切断したものを板状とした試験で使用 </td> </tr> <tr> <td data-bbox="395 757 507 999">CFRP 破砕品</td> <td data-bbox="507 757 647 999">三菱 レイヨン</td> <td data-bbox="647 757 746 999">TRK 510</td> <td data-bbox="746 757 916 999">1~3mm</td> <td data-bbox="916 757 1337 999"> <ul style="list-style-type: none"> ・ 上記 CFRP をカッティングミルで破砕したのち、3mm 篩いを通し、かつ 1mm 篩い上に残存したもの。 ・ 繊維が長尺状であるため、長手方向が 3mm 以上のものもある。 </td> </tr> </tbody> </table>	種類	製造元	型番	大きさ 形状	備考	CF	東レ	T700	繊維単体 L=100mm	・長手方向が 100mm になるように切断	CFRP 板状品	三菱 レイヨン	TRK 510	11mm× 8mm× 4mm	<ul style="list-style-type: none"> ・ 12K 綾織、6ply ・ 縦 10 (本/inch)、横 10 (本/inch) 幅 120mm ・ Vf (繊維体積含有率)=56% ・ 厚さ 4mm ・ ダイヤモンドカッターで 0.5000g 前後になるように切断したものを板状とした試験で使用 	CFRP 破砕品	三菱 レイヨン	TRK 510	1~3mm	<ul style="list-style-type: none"> ・ 上記 CFRP をカッティングミルで破砕したのち、3mm 篩いを通し、かつ 1mm 篩い上に残存したもの。 ・ 繊維が長尺状であるため、長手方向が 3mm 以上のものもある。
種類	製造元	型番	大きさ 形状	備考																	
CF	東レ	T700	繊維単体 L=100mm	・長手方向が 100mm になるように切断																	
CFRP 板状品	三菱 レイヨン	TRK 510	11mm× 8mm× 4mm	<ul style="list-style-type: none"> ・ 12K 綾織、6ply ・ 縦 10 (本/inch)、横 10 (本/inch) 幅 120mm ・ Vf (繊維体積含有率)=56% ・ 厚さ 4mm ・ ダイヤモンドカッターで 0.5000g 前後になるように切断したものを板状とした試験で使用 																	
CFRP 破砕品	三菱 レイヨン	TRK 510	1~3mm	<ul style="list-style-type: none"> ・ 上記 CFRP をカッティングミルで破砕したのち、3mm 篩いを通し、かつ 1mm 篩い上に残存したもの。 ・ 繊維が長尺状であるため、長手方向が 3mm 以上のものもある。 																	
<p>燃焼方法 (設備)</p>	<p>燃焼試験には太平洋コンサルタント社西日本事業所が保有している管状電気炉を用いた。管状電気炉の外観を図 1 に、模式図を図 2 に、仕様を表 2 に示す。</p> <p>本試験では雰囲気調整用のガスとして、N₂、O₂、Ar、CO₂ の 4 種のガスを使用しており (いずれも純度 99.9%以上)、ガス導入前にガス混合用流量計で各種ガス流量を調整することで、任意のガス雰囲気に調整した。また、大気雰囲気下で試験を行う場合は、単一ガス用の流量計をシリコンゴム栓に接続して、ガスを導入した。</p> <div data-bbox="614 1442 1134 1899" data-label="Image"> </div> <p>図 1 管状電気炉の外観</p>																				

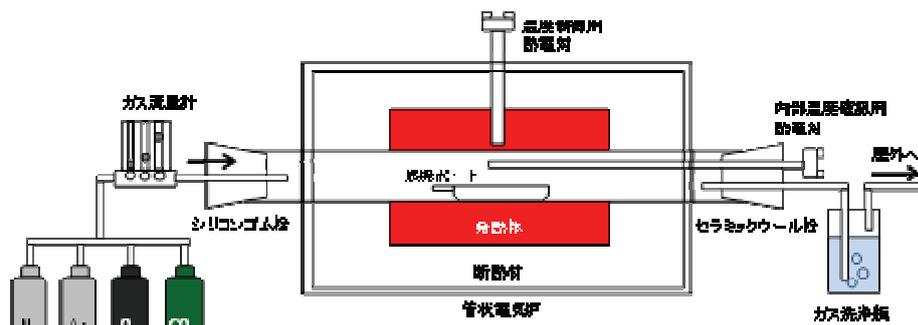


図 2 管状電気炉の模式図

表 2 管状電気炉の仕様

項目	仕様
最高温度	1,500℃
ガス雰囲気	任意に調整可能
炉心管	<ul style="list-style-type: none"> 材質：ムライト管 内径 35mm、外径 42mm 長さ 1000mm
燃焼ポート	20mm×12mm×140mm

金属
添加材

- ・ CaO、Li₂CO₃、鉄化合物 (Fe₃O₄、Fe₂O₃、FeSO₄)：市販の試薬を使用
- ・ セメント原料：太平洋セメント社セメント工場品。アルカリ金属、アルカリ土類金属、遷移金属の合計は約 44%

表 3 セメント原料のアルカリ金属、アルカリ土類金属、遷移金属

	Fe	Ca	Mg	Na	K	Ti
化学成分(%)	0.9	41.0	0.7	0.1	0.9	0.2

※成分値は波長分散型蛍光 X 線分析装置を用いたファンダメンタルパラメーター法による半定量分析値

分析項目
および
分析手法

本試験では、重量変化、構成化合物の分析に際して、表 4 記載の分析方法を用いた。

表 4 性状評価方法

分析項目	分析手法
重量変化	電子天秤による重量測定 (秤量精度 0.0001g)
構成化合物	粉末 X 線回折装置 (XRD)

試験水準	<p>試験水準は、表 5 の通りとした。</p> <p>CF および CFRP の分解程度の評価には、①式の通り、処理前後の重量、処理前の試料の強熱減量（JIS R 5202:2010 セメントの化学分析方法に準拠）から算出した「分解率」を用いた。</p> <p>CFRP 板状品と破砕品は同じ CFRP から採取したが、CFRP 板状品と破砕品の強熱減量が若干異なっており（破砕品の粒度調整のため、1～3mm の破砕品のみを意図的に採取した影響と推測）、真の分解率での評価を実施するため、強熱減量を分解率の分母に用いた。</p> $\text{分解率}(\%) = \frac{(\text{処理後の重量} - \text{処理前の重量}) / (\text{処理前の重量})(\%)}{\text{強熱減量}(\%)} \times 100 \quad \dots \textcircled{1}$ <p style="text-align: center;">表 5 試料の強熱減量</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>試料</th> <th>強熱減量 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CF</td> <td>99.8</td> </tr> <tr> <td>CFRP 板状品</td> <td>98.1</td> </tr> <tr> <td>CFRP 破砕品</td> <td>98.6</td> </tr> </tbody> </table>	試料	強熱減量 (%)	CF	99.8	CFRP 板状品	98.1	CFRP 破砕品	98.6
試料	強熱減量 (%)								
CF	99.8								
CFRP 板状品	98.1								
CFRP 破砕品	98.6								

評価項目	表 6 試験水準および評価項目						
	目的	試験条件				処理温度 (°C)	評価項目
		ガス雰囲気 ¹⁾	試料 ²⁾	金属添加剤			
	種類			添加量 (ppm)			
	CF と金属添加剤の反応性	Ar 100%	CF	CaO	1000 ⁴⁾	1450	<ul style="list-style-type: none"> ・金属添加剤による分解への影響 ・処理後の構成化合物
金属添加剤による触媒効果	Ar 80% O ₂ 20%		鉄化合物 ³⁾				
セメントキルン焼成条件	N ₂ 77% CO ₂ 20% O ₂ 3%	CFRP 板状品および	—	—	1000	<ul style="list-style-type: none"> ・完全燃焼に要する時間 ・金属添加剤に 	

および CFRP 形状 による 燃焼特性 への影響	模擬条件： キルン入口	CFRP 破砕品	セメ ント 原料	1000 ⁴⁾	1450	よる燃焼促 進効果
	大気： N ₂ 78% O ₂ 21% その他 1%	CFRP 板状品 および 破砕品	—	—		
	模擬条件： キルン 焼成帯	CFRP 破砕品	セメ ント 原料	1000 ⁴⁾		
酸素富化 条件による 燃焼特性へ の影響	N ₂ 60% O ₂ 40%	CFRP 破砕品	—	—	1450	・完全燃焼に要 する時間 ・酸素富化によ る燃焼促進 効果
酸素富化条 件による 燃焼特性へ の影響	N ₂ 60% O ₂ 40%	CFRP 破砕品	—	—	1450	・完全燃焼に 要する時間 ・酸素富化によ る燃焼促進 効果

1) ガス流量はいずれも 1L/min とした。
2) 試料量は 0.5000±0.05g とした。
3) 鉄化合物は Fe₃O₄、Fe₂O₃、FeSO₄ とした。
4) 金属添加剤の添加量は、対象試料の重量に対する金属添加剤中のアルカリ金属、アルカリ土類金属、遷移金属の合計量（元素換算）の割合とした。

3-5-3. 試験結果

(1) 金属添加条件による燃焼特性への影響

① CF と金属添加剤の反応性

i. 添加量 1000ppm

- ・表 6 の処理条件（CaO および Li₂CO₃ の添加量 1000ppm）で 60 分間処理を行った結果、分解率は表 7 の通りとなった。

- ・ CaO、Li₂CO₃ を添加した水準の分解率は、CF 単独の水準とほぼ同等であり、CaO、Li₂CO₃ による分解率への影響は確認できなかった。

表 7 CF の分解率 (CaO、Li₂CO₃ 添加)

試料	金属添加剤	分解率(%)
CF	—	16
	CaO	14
	Li ₂ CO ₃	17

ii. 添加量増加

- ・ 添加量 1000ppm で行った試験の結果を受け、過剰な量の金属添加剤を添加した場合、どのような反応が起きるか評価した。
- ・ 金属添加剤を図 4 に示すように、CF を完全に覆うまで添加した結果、CaO の添加量は 86%、Li₂CO₃ の添加量は 580% となった。
- ・ 処理の結果 (処理温度、処理時間などの条件は①と同一)、金属添加剤の融点を超える温度で処理したため、図 5 に示すように燃焼ボート内でアルカリ金属が溶融して一部は CF に融着してしまった。



図 4 金属添加剤を過剰に添加した場合の燃焼ボート外観 (処理前)

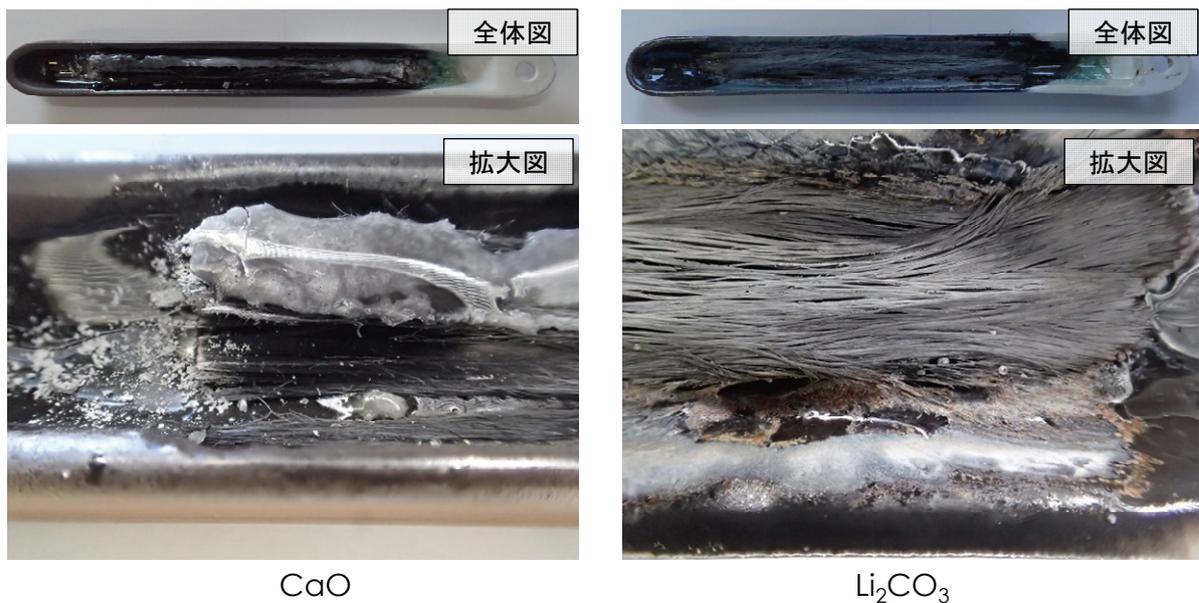


図 5 金属添加剤を過剰に添加した場合の燃焼ボート外観 (処理前)

- ・次に、CFに融着した金属添加剤の塊などを除去した後、微粉碎してXRDで構成化合物を評価した結果が図6となる。比較対象として処理前のCF、単独で処理したCFも図6に示した。
- ・CF+CaOのメインピークは、処理前のCFのメインピーク位置から僅かながらピークシフトしているように捉えることができ、CF+Li₂CO₃については、高角側へ0.6 degree ずれた位置に別のピークが確認された。

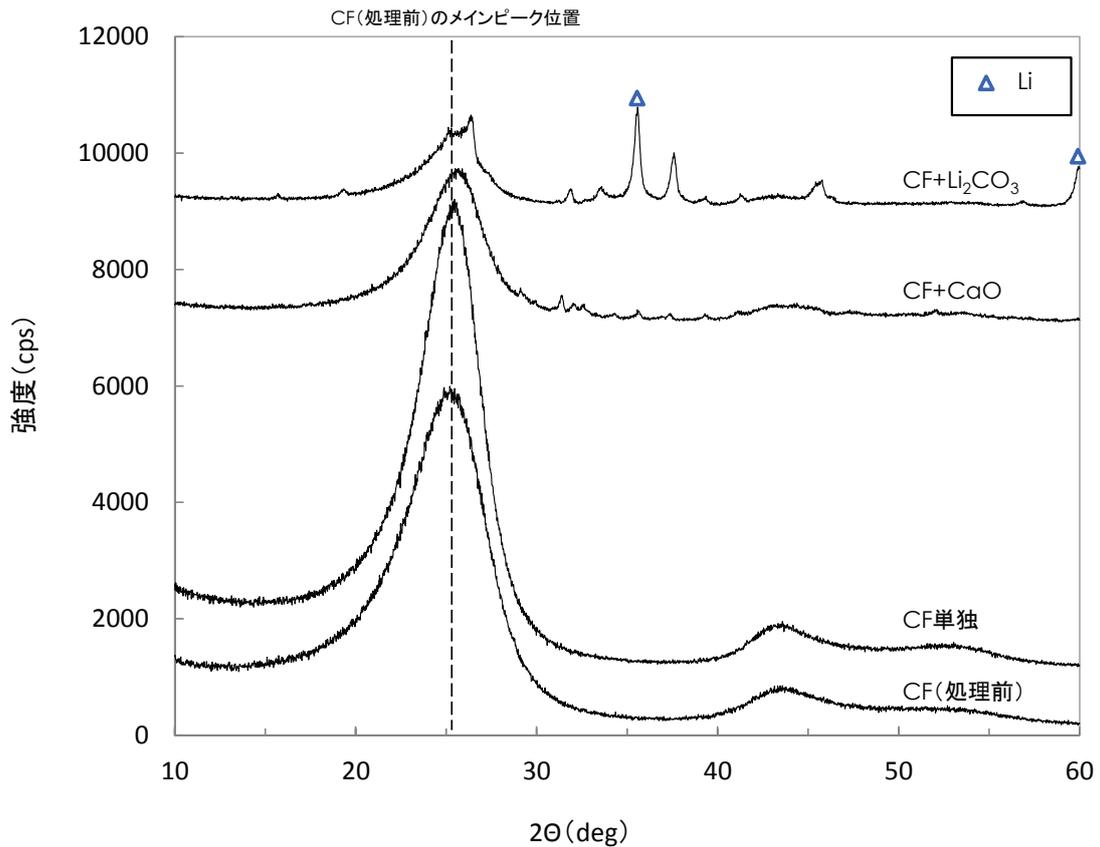


図6 金属添加剤を過剰に添加した水準の粉末 X 線回折パターン

② 金属添加剤による触媒効果

- ・ 表6の鉄化合物（Fe₃O₄、Fe₂O₃、FeSO₄、添加量1000ppm）を添加した処理条件について2分間で試験を実施した結果、分解率は表8の通りとなった。
- ・ 本試験において金属添加剤による効果を確認するには、CF単独で処理した場合に完全燃焼（分解率100%）に達しない処理時間である必要がある。そこで予備試験の結果、CF単独の分解率が40%弱である処理時間2分で試験を実施した。
- ・ Fe₃O₄またはFe₂O₃、FeSO₄を添加した水準の分解率は、CF単独の水準とほぼ同等

であり、鉄化合物による分解率への影響は確認されなかった。

表 8 CF の分解率（鉄化合物添加）

試料	金属添加剤	分解率 (%)
CF	—	36
	Fe ₃ O ₄	35
	Fe ₂ O ₃	37
	FeSO ₄	37

(2) セメントキルン焼成条件および CFRP 形状による燃焼特性への影響

i. キルン焼成帯模擬

- キルン焼成帯を模擬した水準について試験を実施した結果、分解率は図 7、図 8 の通りとなった。
- 処理時間 8 分では、板状品の分解率は 69%だったが、破砕品の分解率は 100%に達するなど、板状品に対して、破砕品は同一処理時間における分解率が向上していた（図 7）。
- 以上の結果から、小径化に伴い CFRP の燃焼性が向上したと考えられた。
- 処理時間 4 分では、セメント原料を添加した場合、破砕品単独とほぼ同等の結果だった（図 8）。

以上の結果から、キルン焼成帯におけるセメント原料添加による燃焼性向上効果はないと判断される。

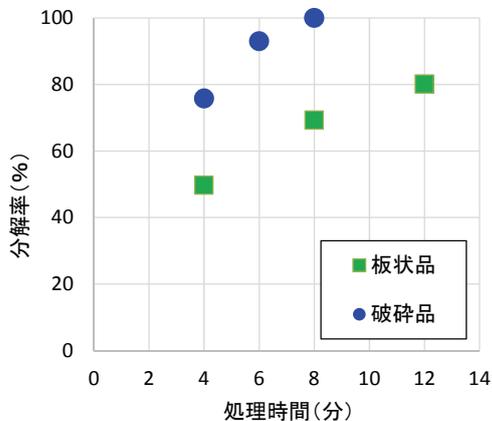


図 7 CFRP の分解率

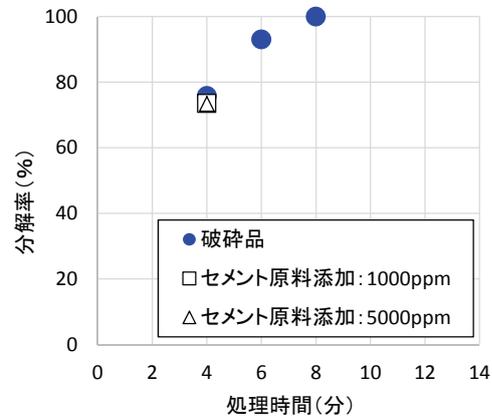


図 8 CFRP+セメント原料の分解率

ii. キルン入口模擬

- ・キルン入口を模擬した水準について試験を実施した結果、分解率は図 9 の通りとなった。なお、前述のキルン焼成帯模擬の結果を受け、本水準では、セメント原料を添加する水準を省略した。
- ・処理時間 60 分では、板状品の分解率は 56%だったが、破砕品の分解率は 96%に達しており、キルン焼成帯模擬の結果と同様に、小径化に伴う CFRP の燃焼性向上が確認された。
- ・また、破砕品の完全燃焼に要する時間は、処理温度および酸素濃度が低い本水準では、①の水準に比べて 50 分以上長くなった（本水準のみでは処理温度、酸素濃度のどちらの影響が大きいかわかりにくい）。

以上の結果から、CFRP の燃焼には、粒径、処理温度、酸素濃度が重要であると判断される。

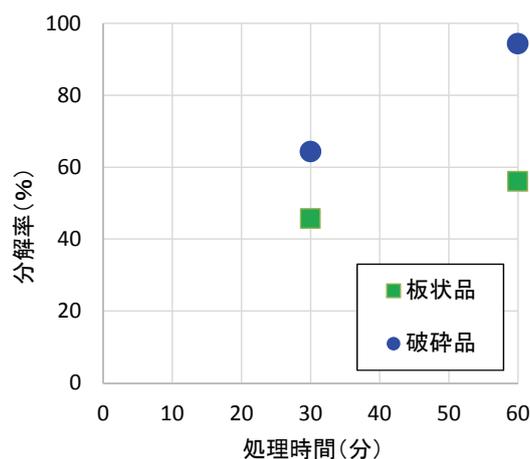


図 9 CFRP の分解率

(3) 酸素富化条件による燃焼特性への影響

酸素 40%に酸素富化させた水準について試験を実施した結果、分解率は図 10、図 11 の通りとなった。なお、比較対象として、図 7 で示した板状品および破砕品の酸素 20%の結果を併記した。

- ・板状品、破砕品いずれについても、酸素富化によって、完全燃焼に要する時間が短縮された。

以上の結果から、3-4-3 で得られた結果と同様に、CFRP の燃焼には、酸素濃度が重要

であり、酸素富化燃焼によって CFRP の燃焼速度を向上できる可能性が確認された。

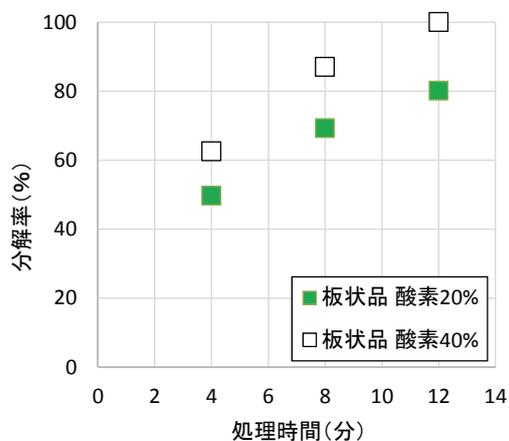


図 10 CFRP 板状品 (酸素富化条件)

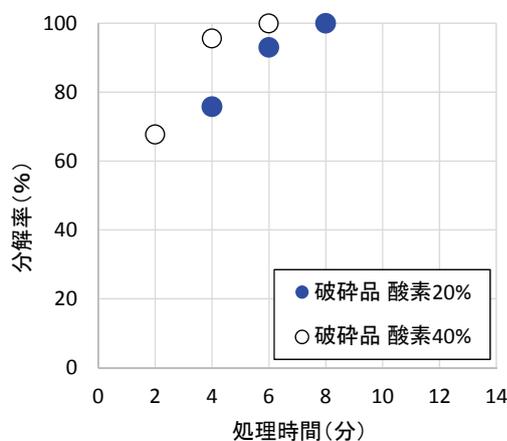


図 11 CFRP 破砕品 (酸素富化条件)

<結論>

本試験では、金属添加、セメントキルン利用、酸素富化による CFRP 燃焼処理技術を確認するため、CFRP 燃焼試験を行った結果、以下の知見が得られた。

(1) 金属添加条件による燃焼特性への影響

- ・ CaO、Li₂CO₃、鉄化合物 (Fe₃O₄、Fe₂O₃、FeSO₄) を CF に 1000ppm 添加した場合、CF 単独の水準とほぼ同等の分解率であり、CaO、Li₂CO₃ による分解率への影響は確認されなかった。
- ・ 各添加剤の後添加による CF 焼却特性の改善は確認にできなかったが、X 線回折パターンにおいてメインピークのシフトが観察され、本手法の可能性を否定するものではないことが確認された。

(2) セメントキルン焼成条件および CFRP 形状による燃焼特性への影響

- ・ セメント原料を添加した場合、CFRP 単独とほぼ同等の分解率であったことから、セメント原料添加による燃焼性向上効果はないと判断された。
- ・ キルン焼成帯模擬条件下および入口模擬条件下いずれにおいても、同一処理時間における分解率は、板状品に比べて、破砕品の方が高く、小径化による CFRP の燃焼速度向上が確認された。
- ・ 1-3mm の破砕品の場合、完全燃焼に必要な時間は、セメントキルン焼成帯模擬条件下では 8 分、キルン入口模擬条件下では 60 分であり、いずれも燃焼に時間を要すること、CFRP の燃焼には処理条件 (温度、酸素濃度) が重要であることが確認された。

(3) 酸素富化条件による燃焼特性への影響

- ・板状品、破砕品いずれについても、酸素富化によって、完全燃焼に要する時間が短縮されたことから、燃焼には、酸素濃度が重要であり、さらに酸素富化燃焼によって、粒径に関わらず、CFRPの燃焼速度を向上できる可能性が確認された。

表 図表の詳細データ

目的	試料		金属添加剤		処理条件			分解率 (%)
	種類	強熱減量 (%)	種類	添加量 (ppm)	温度 (°C)	雰囲気ガス	処理時間 (min)	
CF反応性調査	CF	99.8	—	—	1450	Ar100%	60	16
			CaO	1000			60	14
			Li2CO3	1000			60	17
			—	—		Ar 80% O2 20%	2	36
			Fe3O4	1000			2	35
			Fe2O3	1000			2	37
			FeSO4	1000			2	37
キルン焼成帯模擬	CFRP板状	98.1	—	—	1450	N2 80% O2 20%	4	50
			—	—			8	69
			—	—			12	80
	CFRP破砕品	98.6	—	—			4	76
			—	—			6	93
			—	—			8	100
	CFRP破砕品	98.6	セメント原料	1000			4	73
				5000			4	73
	キルン入口模擬	CFRP板状	98.1	—			—	1000
—				—	60	56		
CFRP破砕品		98.6	—	—	30	64		
			—	—	60	94		
酸素富化燃焼	CFRP板状	98.1	—	—	1450	N2 60% O2 40%	4	62
			—	—			8	87
			—	—			12	100
	CFRP破砕品	98.6	—	—			2	68
			—	—			4	96
			—	—			6	100

3-6. CFRP を含む ASR の RDF 加工特性確認

3-6-1. 試験の目的

CFRP の燃焼において CF の飛散の抑制手法として、ASR を RDF 加工し CFRP の焼却条件を制御（廃棄物や原材料に機械的に混ぜ込み飛散を防ぐなど）することが考えられる。

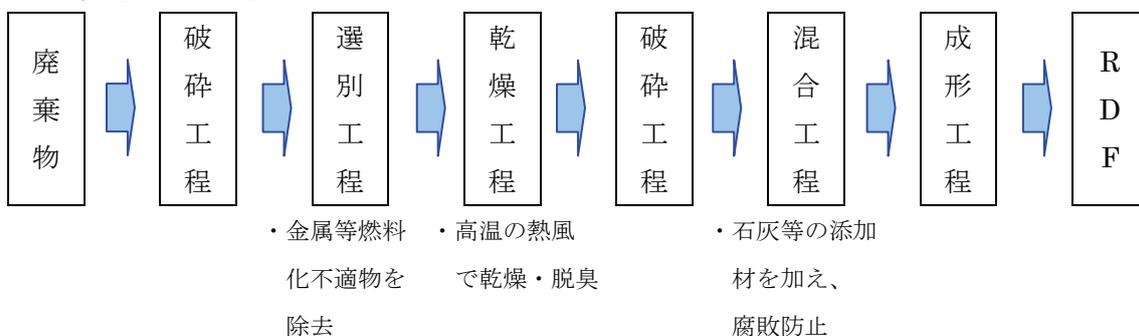
CFRP は剛性が高いこともあり、RDF に練り込むことができるかを検証し、またその特性を把握する。

3-6-2. 試験内容

破砕業者では ASR の減量・減容へ取り組みの一環で RDF⁹の製造が一部行われており、廃棄物処理とともに製造された RDF は燃料代替として活用されている。ASR に混入した CFRP がその RDF によって固められ、短繊維（フライ）の発生を防止できるのではないかと期待できる。

そこで CFRP 含有した ASR が通常の ASR と同様な RDF 製造工程で作成できるのか、またその成分の状況を確認すべく、CFRP を混入させた ASR を作成し、RDF 化を試みるとともに、その成分分析を実施した。

RDF 製造プロセス例

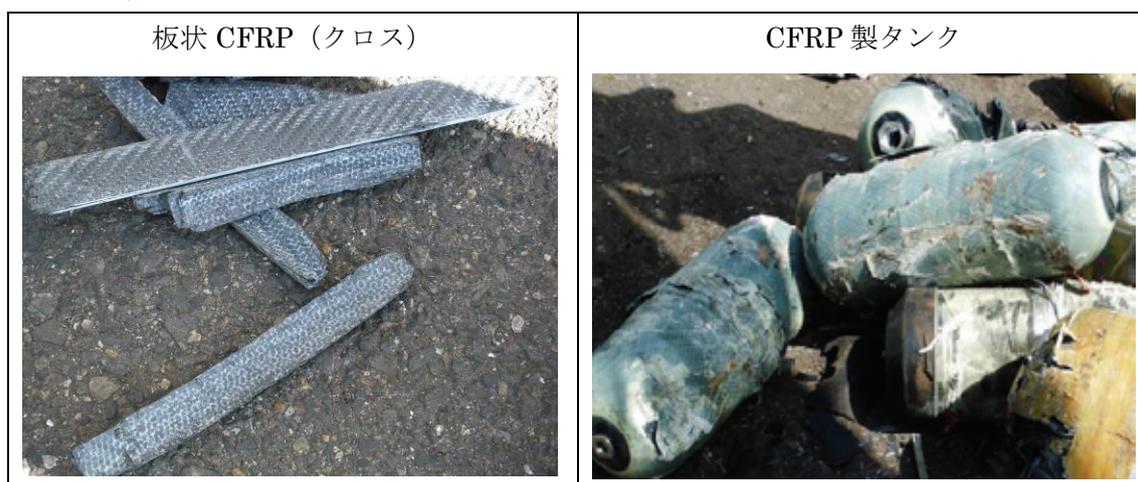


⁹ RDF (Refuse Derived Fuel) : 廃棄物を主な原料とし、破砕や成形などを経て製造された固形燃料

実証実験概要

実施日時	2014年11月3日
委託先	豊田メタル株式会社 愛知県半田市日東町1番地6
実施場所	豊田メタル株式会社 ASR リサイクル部
RDF化対象 CFRP	・CFRP製タンク 12本 (250kg) ・板状CFRP (クロス) 416kg
CFRP混入 ASR作成	・FVCにおける高圧水素タンク等に使用されているCFRP量からCFRP含有割合を算出 ・CFRPが上記割合となるようにASRと混合 *CFRP製タンク由来のASRと板状CFRP (クロス) 由来のASRを区別して作成

CFRP 試料



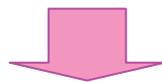
CFRP 破砕



CFRP を破砕機へ投入



CFRP を破砕機へ投入



破砕後 CFRP

破砕後 CFRP



破砕後 CFRP

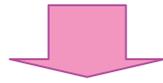


破砕後 CFRP



破砕後 CFRP



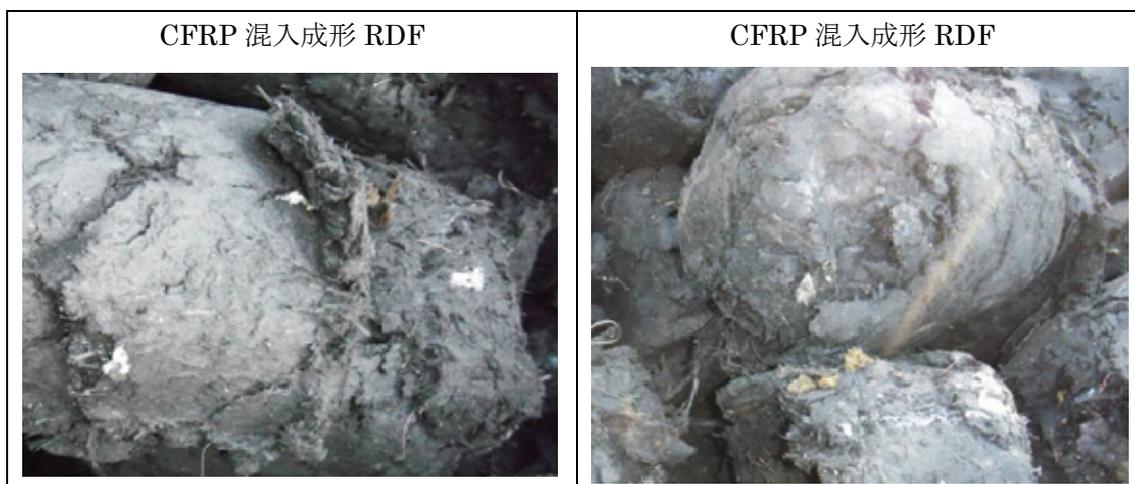


RDF 製作

<p>ASR</p> 	<p>ASR (左)・破碎後 CFRP</p> 
<p>RDF 加工機</p> 	<p>RDF 混合工程</p> 
<p>RDF 加工工程</p> 	<p>RDF 加工工程</p> 



成形 RDF



3-6-3. 試験結果

CFRP が混入した RDF については、上記に示したように製造できることが確認された。
なお、製造された RDF の成分分析結果は以下の通り。

成分分析の実施

実施日時	2014 年 12 月 16 日～2 月 5 日
委託先	株式会社 環境管理センター 東京都八王子市散田町 3-7-23
実施場所	株式会社 環境管理センター 分析センター 東京都八王子市恩方町 323-1
分析試料	・測定試料については、板状クロス CFRP 由来品および CFRP タンク由来品それぞれの試料の表面部分から一部を採取し、試料に含まれている焼却不適物（金属等）を除去した後、乾燥させ、粗粉碎（<8mm）および微粉碎（<1.5mm）を行い、測定試料とした。

○板状 CFRP (クロス) 由来品



供試材



分析試料 (金属等除外物を除く)



金属等除外物



剥離後の残り



粗粉碎後 (<math>< 8\text{mm}</math>)



微粉碎後 (<math>< 1.5\text{mm}</math>)

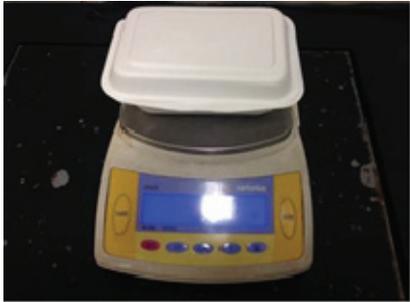
○タンク (ボンベ) 由来品



供試材

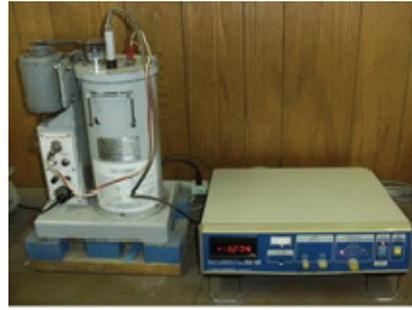


分析試料

	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>剥離後の残り</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>粗粉碎後 (<8mm)</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  <p>微粉碎後 (<1.5mm)</p> </div>																					
<p>試験項目 および 試験方法</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #cccccc;"> <th style="text-align: center;">分析項目</th> <th style="text-align: center;">分析方法</th> <th style="text-align: center;">定量下限値及び単位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>灰分</td> <td>JIS Z 7302-4 815°C強熱 重量法</td> <td style="text-align: center;">0.1 wt%</td> </tr> <tr> <td>水分</td> <td>JIS Z 7302-3 107°C加熱 重量法</td> <td style="text-align: center;">0.1 wt%</td> </tr> <tr> <td>可燃分</td> <td>計算法 (100-水分-灰分で可燃分を算出)</td> <td style="text-align: center;">0.1 wt%</td> </tr> <tr> <td>全塩素分</td> <td>JIS Z 7302-6 燃焼 - 休クマトグラフ法 (Cl 換算)</td> <td style="text-align: center;">0.01 wt%</td> </tr> <tr> <td>低位発熱量</td> <td>JIS Z 7302-2 総発熱量、水分および水素分からの計算法</td> <td style="text-align: center;">50 KJ/kg</td> </tr> <tr> <td>かさ比重</td> <td>JIS Z 8807 8 重量法に準拠</td> <td style="text-align: center;">0.001 —</td> </tr> </tbody> </table>	分析項目	分析方法	定量下限値及び単位	灰分	JIS Z 7302-4 815°C強熱 重量法	0.1 wt%	水分	JIS Z 7302-3 107°C加熱 重量法	0.1 wt%	可燃分	計算法 (100-水分-灰分で可燃分を算出)	0.1 wt%	全塩素分	JIS Z 7302-6 燃焼 - 休クマトグラフ法 (Cl 換算)	0.01 wt%	低位発熱量	JIS Z 7302-2 総発熱量、水分および水素分からの計算法	50 KJ/kg	かさ比重	JIS Z 8807 8 重量法に準拠	0.001 —
分析項目	分析方法	定量下限値及び単位																				
灰分	JIS Z 7302-4 815°C強熱 重量法	0.1 wt%																				
水分	JIS Z 7302-3 107°C加熱 重量法	0.1 wt%																				
可燃分	計算法 (100-水分-灰分で可燃分を算出)	0.1 wt%																				
全塩素分	JIS Z 7302-6 燃焼 - 休クマトグラフ法 (Cl 換算)	0.01 wt%																				
低位発熱量	JIS Z 7302-2 総発熱量、水分および水素分からの計算法	50 KJ/kg																				
かさ比重	JIS Z 8807 8 重量法に準拠	0.001 —																				
<p>測定機器</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>灰分</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>水分</p> </div> </div>																					



塩素



発熱量



発熱量



発熱量



かさ密度



CHN レコーダー



CHN コーダー

<測定結果>

それぞれの測定結果を表 2-1 および表 2-2 に示す。

三成分（灰分・水分・可燃分）および低位発熱量については、乾燥可燃物中の測定結果から水分および焼却不適物の重量比等を割り戻して、有姿状態による測定結果を算出した。

かさ比重については、焼却不適物を含めた測定値を、塩素については、乾燥可燃物中の測定値をそれぞれ結果とした。

但し、焼却不適物については、板状 CFRP 由来品のみで、CFRP タンク由来品からは確認されなかった。

表 2-1 RDF 成分測定結果

検体名称		板状クロスCFRP由来品	CFRPタンク由来品
資料搬入日		2014年12月16日	2014年12月16日
三成分	水分(wt%)	1.4	5.5
	灰分(wt%)	46.0	28.0
	可燃分(wt%)	52.6	66.5
低位発熱量(KJ/Kg)		18200	22600
かさ比重		0.594	0.444

※測定結果は、有姿状態における測定値

表 2-2 RDF 塩素分測定結果

検体名称		板状クロスCFRP由来品	CFRPタンク由来品
資料搬入日		2014年12月16日	2014年12月16日
全塩素(wt%)		0.93	1.03

※測定結果は、有姿状態における測定値

4. CFRP 処理に関するリサイクル施設調査

本調査では CFRP の燃焼性確認を通じて、適切に燃焼処理する方法の検討を行っているわけであるが、今後、CFRP が ASR に混入した際に、自動車リサイクル法における ASR リサイクル施設が上記検討方法に対応可能かどうかの確認をすべくアンケート調査を実施した。

<アンケート結果まとめ>

- ・一般的に言われている集塵機トラブルなどへの懸念が広く認識されており、受け入れに積極的でない施設が多い。それゆえ、処理経験も少なく不安が先行している状況も見受けられる。
- ・設備に関しては、今回の試験結果による知見として酸素濃度が CF の燃焼に重要であることが分かったが、現時点で高酸素濃度での処理が期待できる施設は少ない。
- ・よって、焼却施設に求められる取り組みとして以下の方向性が考えられる
 - 1) 高い酸素濃度による燃焼を可能とする（酸素吹き込みシャフト炉など）
 - 2) 酸素濃度を高めなくても燃焼できるように微細化する（セメントなど）
 - 3) CF の飛散自体を抑え込む（RDF など）
- ・処理コストについては、CFRP 廃棄物を受け入れている少数の事業所から回答があったが、その処理費の幅は広く、今後 CFRP の処理される量が増大した場合についてはわからない。しかし、処理困難物という認識のため、ASR に混入した場合、処理コストが増加する可能性が予想されている。

アンケート実施概要

アンケート対象	: 自動車リサイクル法 第 28 条 特定再資源化物品（ASR）の再資源化認定業者
アンケート実施期間	: 2015 年 1 月 26 日～2015 年 2 月 13 日
アンケート発送数	: 62 事業所
アンケート回収数	: 50 事業所（回収率 80.6%）
アンケート内容	: CFRP 廃棄物受入状況、CFRP 廃棄物処理形式、残渣回収形態 処理施設温度・酸素濃度、RDF 加工可否、CFRP 廃棄物受入価格 CFRP 廃棄物処理に対する意見 等

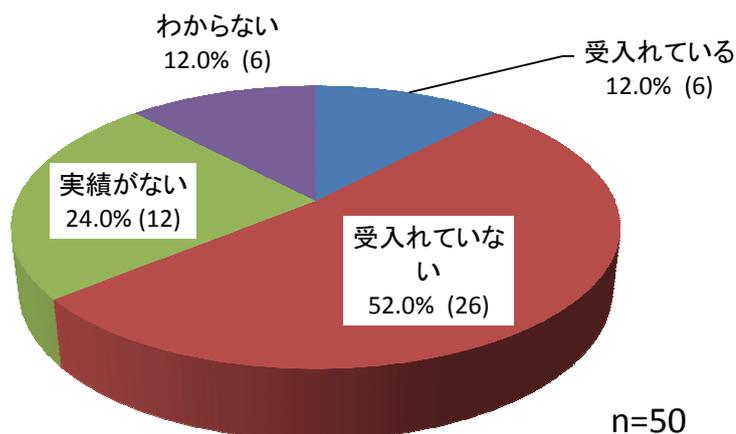
*一部、アンケート結果について電話にて確認調査

*アンケート票は P106 に記載

4-1. CFRP 廃棄物処理受入れ

<CFRP 廃棄物受入れ状況>

本調査では 50 の事業所から回答が得られ、うち 6 事業所で現在、CFRP 廃棄物の受入れを行っており (12.0%)、残り 44 事業所は「受入れていない」もしくは「実績がない」「わからない」との回答となった (アンケート設問 Q1)。



* () 内数字は回答事業所数

CFRP 廃棄物受入状況

n = 6

	年間 CFRP 受入れ頻度 (件)	年間 CFRP 廃棄物受入れ量 (t)
1	100 件	480 トン
2	48 件	300 トン
3	9 件	43 トン
4	1 件	20 トン
5	未回答	微量
6	未回答	未回答

*アンケート設問 Q1-1

CFRP 廃棄物由来 (複数回答)

n = 6

・航空宇宙用途 (1)	・スポーツ・レジャー用途 (2)
・不明 (1)	・その他 (2)

*アンケート設問 Q1-1-1

<受入れていない理由/受入れ予定・計画>

CFRP 廃棄物を受入れていないと回答した 44 事業所のうち、26 事業所が受入れていな

い理由の回答があった（複数回答）。その理由としては集塵機トラブルの防止を理由とする回答が最も多く 19 件となり、現状の保有設備では困難との回答が 15 件でそれに続いた。

また今後、CFRP 廃棄物の受入れを行う予定・計画があるかとの質問に対しては、全ての事業所が「なし」もしくは「未定」との回答であった（アンケート設問 Q1-2）。

n = 26

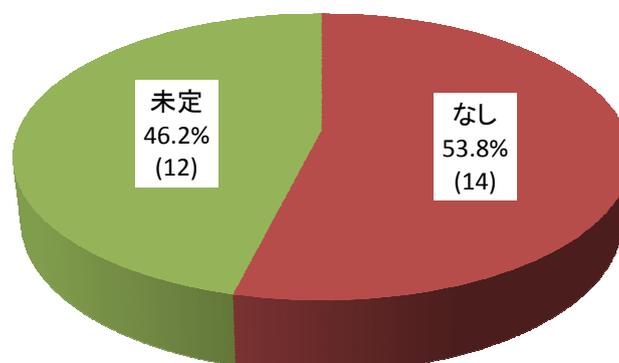
受入れない理由上位	回答 事業所数	構成比
燃え残った短い繊維（フライ）が集塵機トラブルの原因となる	19	73.1%
現状の保有設備では、完全に焼成・焼却する事が困難	15	57.7%
熱エネルギーにならない	1	3.8%
処理依頼がない／他の処理物をメインとしている	2	7.7%
破碎後のダスト受入れ先／リサイクルフローが確立されていない	2	7.7%
処理前の選別が困難	1	3.8%
その他	1	3.8%

受入れ予定「なし」「未定」の理由

なし	・ 現在受け入れている ASR に CFRP 廃棄物が混入する可能性がある場合は混入比率や形状など打合せあるいはテストが必要
未定	・ 集塵装置に影響の出ない廃棄物投入口からであれば処理可能だが、CFRP 含有の有無が識別できない為現状は受入不可（受入に向け対策中で結論が出ていない状況）

* 受入れ予定「あり」理由回答事業所なし

CFRP 廃棄物受入れ予定・計画

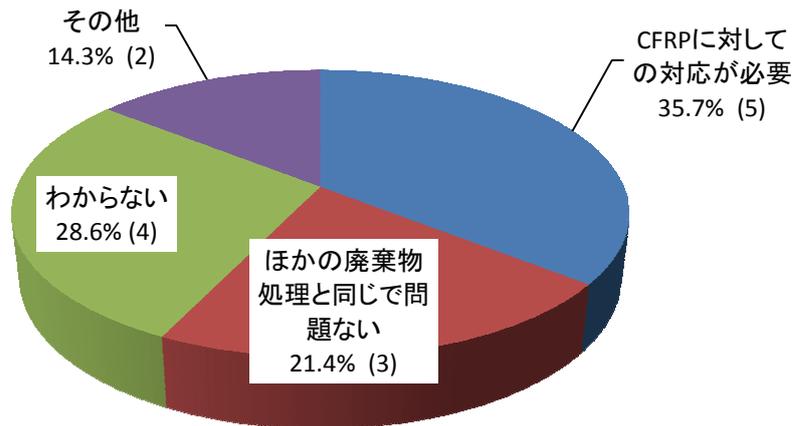


n=26

* () 内数字は回答事業所数

<CFRP 廃棄物処理方法の認識>

CFRP 廃棄物の受入れの「実績がない」もしくは「わからない」と回答があった 18 事業所において、現状の CFRP 廃棄物の処理方法の考えについて見ると（未回答 4 事業所）、「CFRP に対する対応が必要」と回答した事業所が 5 事業、対応が「わからない」と回答した事業所が 4 事業所となり、「他の廃棄物処理と同じで問題ない」と回答した事業所が 3 事業所となった（アンケート設問 Q1-3）。



n=14

* () 内数字は回答事業所数

その他回答 (2)

・分析・テストが必要 (2)

* () 内数字は回答事業所数

4-2. CFRP 廃棄物処理形式

<CFRP 廃棄物処理形式>

CFRP 廃棄物の処理形式について確認したところ 45 事業所にて回答があった（アンケート設問 Q2）。うち 6 事業所が現在 CFRP 廃棄物を受入れているが、その他の事業所については、今後、処理を行なうとした場合の処理形式についての回答（以下同じ）。

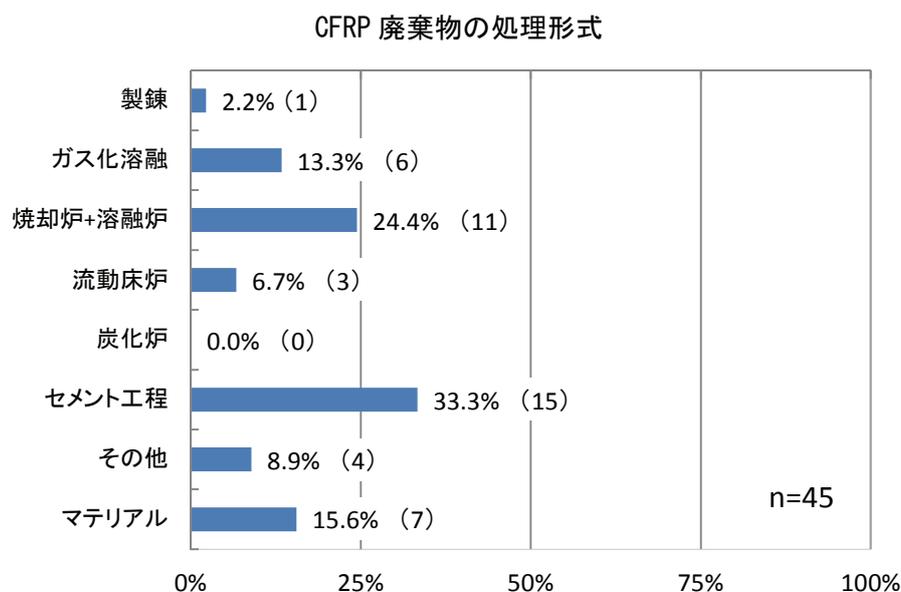
その CFRP 廃棄物処理形式は（複数回答）、焼却キルン（セメント）、マテリアル、キルンストーカが上位となり、この 3 つの処理形式で 7 割以上を占めることとなった。

一方、現在 CFRP 廃棄物を受入れている 6 事業所の処理形式は（複数回答）、セメント工程（焼成キルン）（1）、ガス化溶融（サーモセレクト炉）（1）、焼却炉+溶融炉（キルン+ストーカ+溶融炉）（1）、焼却炉+溶融炉（キルン式溶融炉）（1）、焼却炉+溶融炉（キルンストーカ）（1）、電気炉（1）、マテリアル（2）という状況であった。

なお本調査から CFRP 廃棄物を処理している事業所があることを確認できたが、それぞれの処理実態についてまでは確認できていない。処理実施事業所と同様の設備を保有している事業所において、設備と受入れていない理由との結びつけまで情報を得ることはできなかったが、受入れの可能性があることになる。

今後 CFRP 廃棄物を受入れている事業者と受入れていない事業者との差異を明確にすることで受入れに関わる懸念事項が実際に発生するか、また装置や操作方法の改良等で受入れが行われるようになるか詳細調査を行うことが必要と考えられる。

特に電気集塵機を有する処理施設においては、バグフィルターへの変更必要性や CFRP の前処理、燃焼方法等の改良による受入れの可能性の検証を行う必要がある。



* () 内数字は回答事業所数

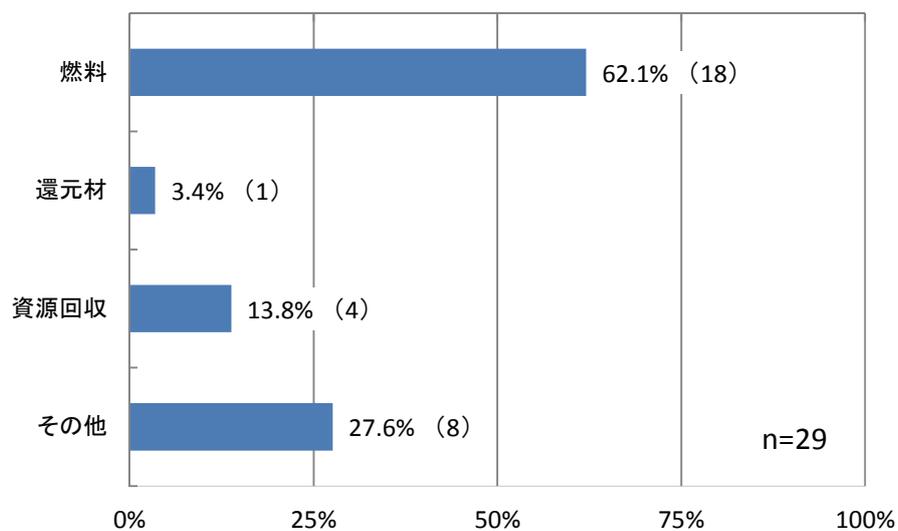
n = 45

処理形式		回答事業所数	構成比
製錬	銅製錬炉	1	2.2%
	亜鉛製錬炉	0	—
ガス化溶融	サーモセレクト炉	4	8.9%
	シャフト炉	2	4.4%
焼却炉＋溶融炉	キルン＋ストーカ＋溶融炉	1	2.2%
	キルン式溶融炉	3	6.7%
	キルンストーカ	6	13.3%
	ストーカ＋溶融炉	1	2.2%
流動床炉	流動床式ガス化炉＋溶融炉	1	2.2%
	流動床式焼却炉	2	4.4%
	キルン＋流動床炉	0	—
炭化炉	炭化炉	0	—
	還元炉	0	—
セメント工程	焼却キルン（セメント）	15	33.3%
マテリアル	マテリアル	7	15.6%
その他（電気炉等）		4	8.9%

*現在、CFRP 廃棄物を処理していない事業所（39）含む

<CFRP 廃棄物処理目的>

CFRP 廃棄物を上記処理形式で処理する際の処理目的については（複数回答）、燃料としての利用が全体の 62.1%を占め、次いで資源回収（13.8%）となった（アンケート設問 Q2-1）。



*（ ）内数字は回答事業所数

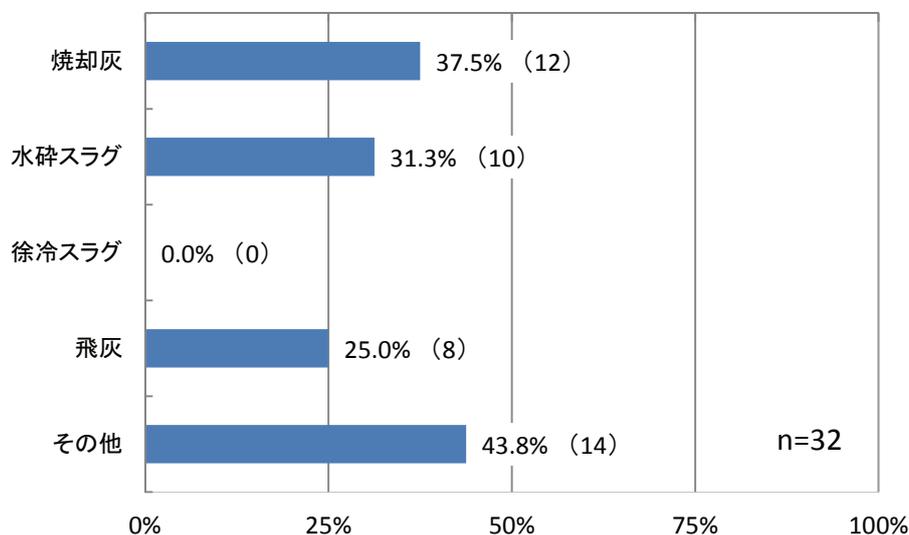
その他回答

・廃棄 (5)	・焙焼土木資材として処分 (1)
・破碎選別品と共にセメント工場等のリサイクル先へ (2)	

* () 内数字は回答事業所数

< 残渣回収形態 >

CFRP 廃棄物を上記処理形式で処理した際の残渣の回収形態について確認したところ(複数回答)、焼却灰としての回収が 37.5%と最も多く、以下、水砕スラグ、飛灰と続き、一方で徐冷スラグとしての回収との回答はなかった(アンケート設問 Q2-2)。



* () 内数字は回答事業所数

その他回答

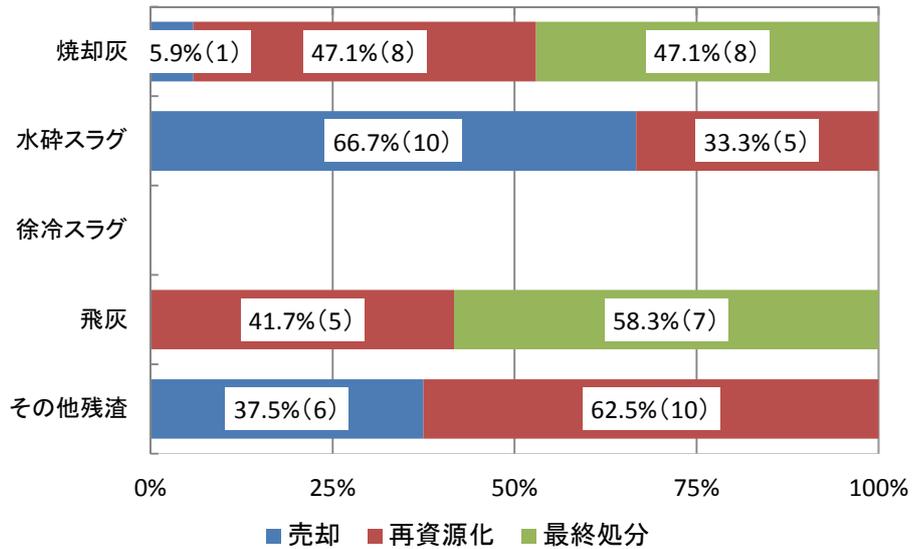
・セメント (9)	・炉底排出物 (1)	・重金属含有スラジ (1)
・金属類 (1)	・RFP (1)	・その他 (1)

* () 内数字は回答事業所数

< 残渣利用形態 >

CFRP 廃棄物を上記処理形式で処理した際に回収した残渣ごとの利用形態については(複数回答)、焼却灰については再資源化・最終処分、水砕スラグは売却、飛灰については最終処分が最も多くなり、それぞれで利用形態が異なる結果となった(アンケート設問 Q2-2-1)。

残渣利用形態



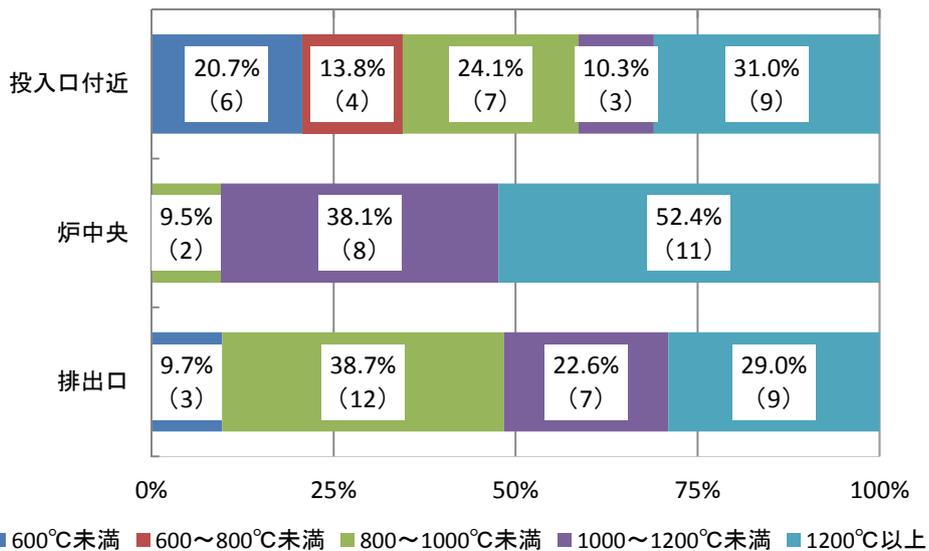
* () 内数字は回答事業所数

n = 32

回答事業所数	焼却灰	水砕スラグ	徐冷スラグ	飛灰	その他残渣
売却	1 (5.9%)	10 (66.7%)	0 (—)	0 (—)	6 (37.5%)
再資源化	8 (47.1%)	5 (33.3%)	0 (—)	5 (41.7%)	10 (62.5%)
最終処分	8 (47.1%)	0 (—)	0 (—)	7 (58.3%)	0 (—)

* () 内数字は残渣利用形態ごとの構成比

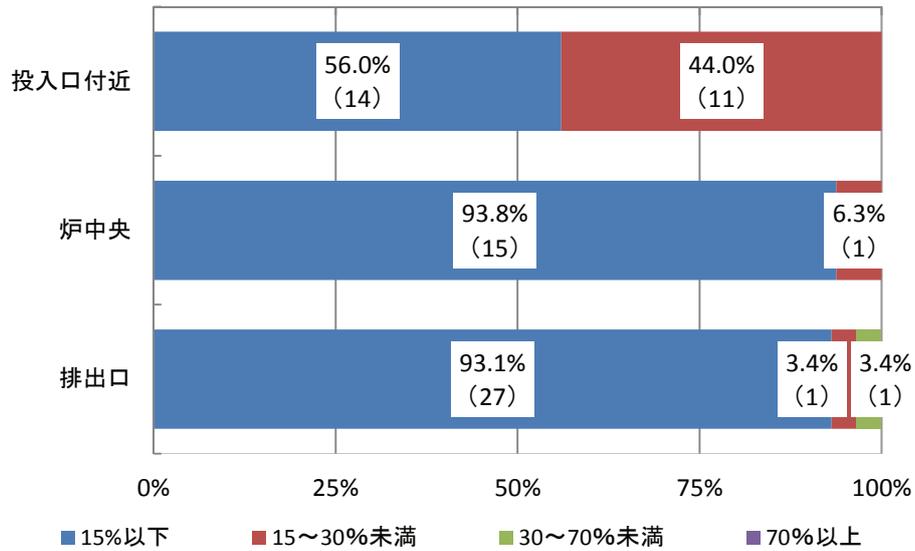
<CFRP 廃棄物処理 炉内温度> * 上記 CFRP 廃棄物処理形式における炉内温度



* () 内数字は回答事業所数

* アンケート設問 Q2-3

<CFRP 廃棄物処理 酸素濃度> *上記 CFRP 廃棄物処理形式における酸素濃度



* () 内数字は回答事業所数

*アンケート設問 Q2-3

<CFRP 廃棄物処理 炉内滞留時間> *上記 CFRP 廃棄物処理形式における炉内滞留時間

	30 分以下	30~60 分以下	60~120 分以下	120 分以上
回答事業所数	2 (9.1%)	9 (40.9%)	5 (22.7%)	6 (27.3%)

*「燃焼ガスは約 3 秒」と 10 事業所が併記

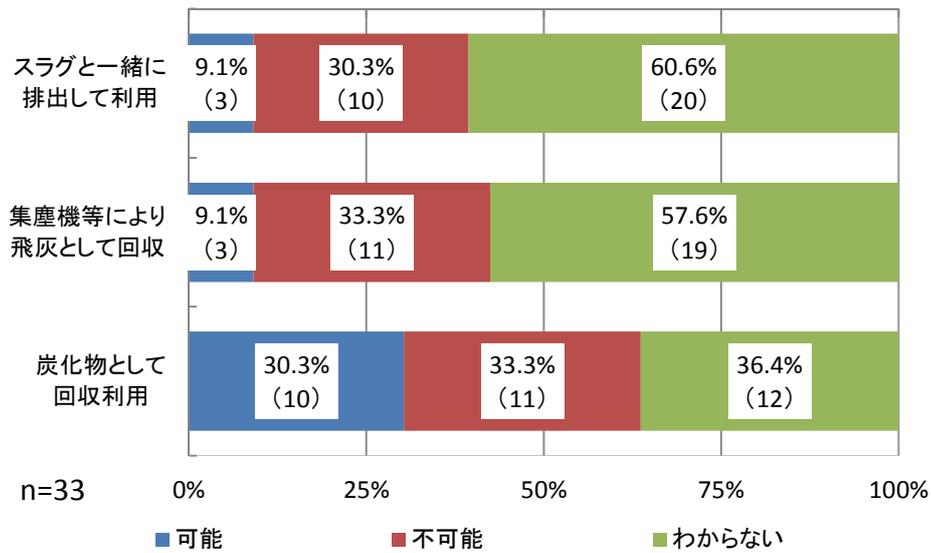
* () 内数字は構成比

*アンケート設問 Q2-4

<炭素繊維対応>

CFRP 廃棄物を上記処理形式で処理した際に、CFRP 廃棄物の樹脂成分が熱分解し、CF が残った場合の利用・回収の可能性については 33 事業所から回答があり、炭化物として回収利用する方法が可能とする事業所が 10 事業所存在した。またスラグと一緒に排出して利用、集塵機等により飛灰として回収することが可能と回答した事業所数はともに 3 事業所となった (アンケート設問 Q2-5)。

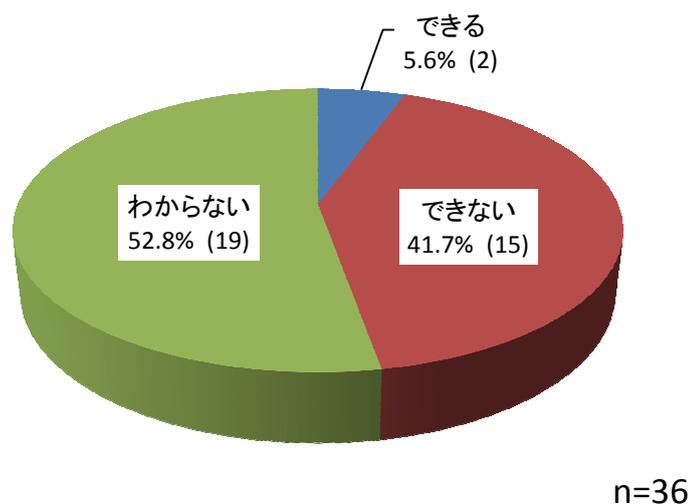
炭素繊維対応



* () 内数字は回答事業所数

<CFRP 廃棄物の RDF 加工可否>

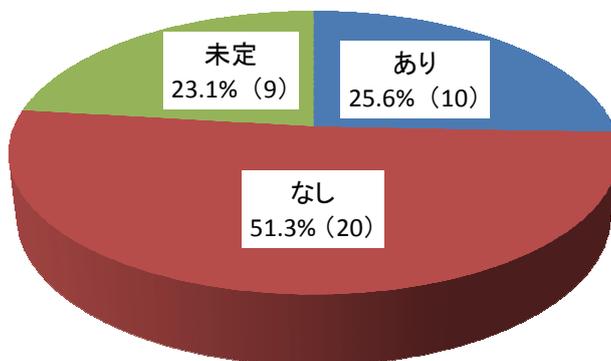
CFRP を焼却した際、短繊維（フライ）が発生する可能性があり、電気設備の障害等を引き起こすことが CFRP 廃棄物処理の課題となっている。本調査では、短繊維（フライ）の発生を抑えるべく CFRP が混入した ASR の RDF 化の加工特性を確認しているが、ASR 再資源化認定業者において RDF 加工が可能かどうかについて確認したところ（36 事業所より回答）、2 事業所で可能という結果となった（アンケート設問 Q2-6）。



* () 内数字は回答事業所数

<CFRP 廃棄物処理設備計画>

今後、CFRP 廃棄物処理に対して、設備等の対応計画があるかについて、39 事業所より回答があり、計画があると回答した事業所は 10 事業所となった（アンケート設問 Q2-7）。



n=39

* () 内数字は回答事業所数

計画内容

あり	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高性能集塵装置への変更（バグフィルター等） ・ 燃料化技術の導入 ・ 破碎処理設備の導入
未定	<ul style="list-style-type: none"> ・ ASR 処理を含めて評価をしてもらえるのであれば開発から考える

4-3. CFRP 廃棄物受入れ価格

<現在の受入れ価格>

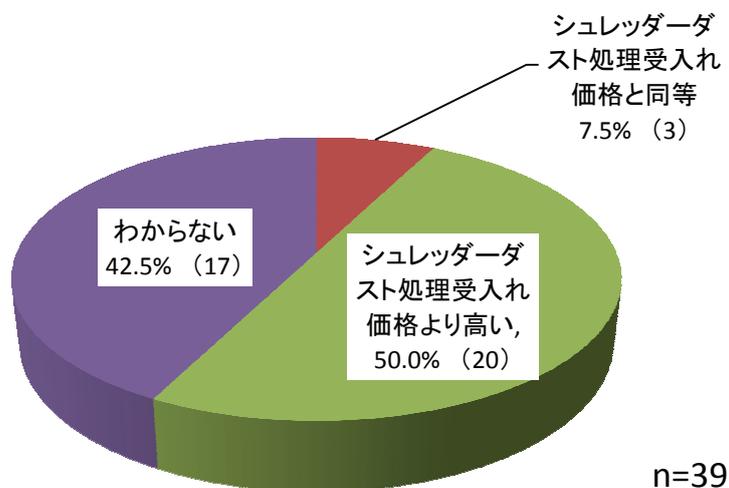
現在、CFRP 廃棄物を受入れている事業所に対して、その受入れ価格について聞いたところ（3 事業所より回答）、倍近い開きが生じることとなった。なお受入れの際の形状（破碎済み等）によっても価格が変動するとの意見があった（アンケート設問 Q3）。

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| ・ 38,000～45,000 円/ t (1) | ・ 30,000～50,000 円/ t (1) |
| ・ 50,000～60,000 円/ t (1) | |

* () 内数字は回答事業所数

<ASR 再資源化費用との価格比較>

今後、CFRP が ASR に混入した場合にその ASR の処理を受入れる価格について、現状の ASR 受入価格との対比で聞いたところ（39 事業所より回答）、「現状 ASR 処理受入価格より高い」とした事業者が 20 事業者（50.0%）と最も高く、次いで「わからない」とした事業者が 17 事業者（42.5%）という結果となった（アンケート設問 Q3-1）。



* () 内数字は回答事業所数

4-4. CFRP 廃棄物処理に対する考え（複数回答）

- ・燃料電池車の水素タンクに限らず、CFRP の採用状況について可能な限り情報を提供して欲しい（12）
- ・CFRP の処理技術が確立されるまでは、ASR に CFRP が混入しないような部位に使用を限定して欲しい（8）
- ・CFRP 廃棄物のセメントリサイクルに利用できるような処理スキームやガイドライン等の整備を行って欲しい（5）
- ・CFRP 廃棄物処理の可否を処理結果をみながら検討したい（5）
- ・燃え残りの CFRP 繊維による電気集塵機短絡トラブルの発生事例がある（4）
- ・現状問題なく処理できている（3）
- ・現在は受入れを断っている（3）
- ・設備投資を含めメリットがあるかどうか検討が必要（2）
- ・前処理技術の向上が必要（2）
- ・設計段階から廃棄の事も考慮して自動車を生産して欲しい（1）
- ・電気集塵機で集塵しているため大量に処理すると集塵効率の低下が懸念される（1）
- ・CFRP の含有量が増えた場合、中間処理物を業者に引き渡すことが難しくなる（1）
- ・ASR への混入可能性と混入割合を教えて欲しい（1）
- ・CFRP の成分や形状について情報開示して欲しい（1）
- ・CFRP が混入している ASR は事前に区別して欲しい（1）

*（ ）内数字は回答事業所数

*アンケート設問 Q4

5. 処理コスト低減に係る調査

今後、FCVを中心にCFRPを採用した自動車が市場投入されていく見込みであるが、前述しているように廃棄段階において、CFRPを採用した部位が取り外し回収されていない、もしくはできないことも想定される。

その場合、CFRP採用部位は解体済自動車と共に破碎工程を経て、有価金属等は選別工程で回収されるが、CFRPはASRに混入することになる。今回の調査では上記を含めてASRへの混入を想定し、CFRPが燃焼処理した際の挙動、反応過程などを把握し、サーマルリサイクル手法について検討を行っている。

ただASRはサーマルリサイクルされずに埋立て処分されるものもあるので、結果的にCFRPも埋め立て処分されるケースも想定される。

またFCVの高圧水素タンクについては、事前に回収することも可能であり、取り外した高圧水素タンクについては、電炉に投入しても、スラグ中に残渣は見られず、鉄鋼製品品質への影響もないと結論づけられている。加えて加炭剤としての効果、および還元剤としての効果も確認できており¹⁰、前項「CFRP処理に関するリサイクル施設調査」においても現在、CFRP廃棄物を電炉にて処理している事業所が存在している。

上記から、使用済自動車の既存の再資源化ルートにおいてCFRP採用部位の処理方法としては大きく3つの方法が考えられる。

1. 車台から回収せず、破碎後のCFRP混入ASRとして再資源化
2. 車台から回収せず、破碎後のCFRP混入ASRを管理型処分場で埋め立て
3. 車台から回収し、CFRP採用部位を電炉等により再資源化

自動車リサイクル法にてASR処理に要する費用は、リサイクル料金として自動車の最終所有者の負担となる。その中、ASRが埋め立てとなった場合、その処分先となる管理型処分場には限りがあるため、今後、FCVが普及し、CFRPが混入したASRが大量に発生した場合、最終処分費用が高騰する可能性がある。一方で自動車リサイクル法では段階的なASRのリサイクル率の向上が求められており、埋立処分量を減らすことが示されている。

このリサイクル料金の負担増がFCV普及を阻害させる一因となつてはならないため、自動車リサイクル法に基づいて適正にサーマルリサイクルされることが必要である。また、技術的には処理が可能であっても経済性が合わなければ、自律的な仕組みとして成立しづらいため、低コストで処理し、ユーザー負担を最小限にとどめることが重要となる。

¹⁰ 環境省請負業務「平成25年度次世代自動車に係る処理実態調査業務報告書」

同じく「CFRP 処理に関するリサイクル施設調査」において、CFRP 廃棄物を受入れている事業所における焼却処理価格について確認した。現状 CFRP の用途が航空宇宙やスポーツ・レジャー用途などが中心で廃棄物そのものの発生量が多くない、炭素繊維協会「炭素繊維の安全な取り扱い」における廃棄上の注意で「焼却処理はしない」と示されている等から、焼却施設での受け入れは僅かという結果となった。CFRP 廃棄物の処理委託がまだ一般的ではないために限られた回答しかなく、処理受入れ費用を見るとトンあたり 30,000～60,000 円となっている。

一方、既存車における ASR のトンあたりの再資源化費用を各自動車メーカーが自動車リサイクル法に基づいて公表している ASR 引取重量と ASR 再資源化等に要した費用から算出すると、トンあたりおよそ 33,000 円（2013 年度）となっている。

現時点、CFRP の処理実施例が少ないため ASR に混入した場合の試算は難しいが、CFRP の処理事例と同様のコストであった場合、トンあたり現行 33,000 円よりもコストアップの可能性が考えられるので、サーマルリサイクルによる処理費用低減への取組みが重要となる。

上記のように CFRP が ASR に混入した場合のサーマルリサイクルによる再資源化処理は実施されていなく、現状の CFRP 廃棄物の処理業者や処理方法も限定される。その中、今回の調査において、過去に報告されたトラブルがそもそも必要な酸素が十分でないために CFRP が完全に燃焼せず、障害を引き起こしていた場合もあったのではないかと示唆も得られている。

また CFRP を破砕するなどの前処理を通じて、燃焼しやすい状態となることも確認されている。今後さらに条件等を把握していくことが必要となるが、CF 燃焼に関する基本特性をもって、処理方法を確立することで、より広範に処理が可能となり、より処理費用の低減ができると考えられる。結果的に既存車の ASR 処理費用との差が縮まることが期待でき、CFRP が FCV 普及の阻害要因とはならないものと見込まれる。

CFRP 再資源化推計コスト比較

	処理方法	処理費用	再資源化にあたっての課題等
サーマルリサイクルによる処理方法	CFRP を車台から回収せず、ASR として再資源化	現状の ASR 再資源化費用（33,000 円/トン）よりも上昇が見込まれている	<ul style="list-style-type: none"> ・既存使用済自動車の処理ルートにて再資源化が可能。 ・燃焼時に酸素供給等を行うことで、完全燃焼が可能。 ・CF 燃焼に関する基本特性をもって、処理方法を確立することで、処理費用の低減ができると考えられる。 ・解体段階で回収する必要がないため、解体業者の負担が少ない。
サーマルリサイクルしない（できない）場合の処理方法	CFRP を車台から回収せず、ASR を管理型処分場で埋め立て	現状の ASR 埋立処分費用は 20,000 円/トン程度	<ul style="list-style-type: none"> ・既存使用済自動車の処理ルートにて処理が可能 ・管理型処分場の逼迫により、処理費用が高騰する恐れあり。 ・CFRP が混入する可能性のある ASR を管理（区別）する必要あり。 ・自動車リサイクル法にて、埋立処分量を段階的に減らすことが求められている。
	CFRP 部位を車台から回収し、電炉等により再資源化	対象物の重量によって再資源化費用は異なる（タンク処理については kg あたり 100 円程度）	<ul style="list-style-type: none"> ・電炉等にて処理が可能で、加炭剤としての効果、および還元剤としての効果も確認できている ・高圧水素タンクについては、取外し回収できるが、パネル類等採用の CFRP については、外見から区別できず、回収できないことも想定される。

－ 参考資料 －

CFRP 燃焼時の CF 燃焼、反応過程の確認実験結果

< CFRP 板燃焼実証実験 酸素供給少 >



試験片番号 (間隔) Y-01 (250mm)

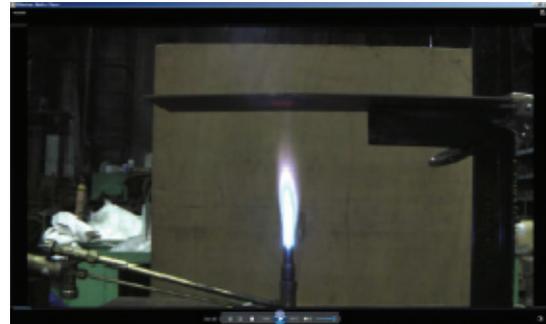
火炎暴露表面温度 530°C

暴露時間

78 秒

START 0:03

STOP 1:21 (TIME 1:18)



試験片番号 (間隔) Y-02 (205mm)

火炎暴露表面温度 600°C

暴露時間

66 秒

START 3:37

STOP 4:43 (TIME 1:06)



試験片番号 (間隔) Y-03 (165mm)

火炎暴露表面温度 860°C

暴露時間 48 秒

START 6:03

STOP 6:51 (TIME 0:48)



試験片番号 (間隔) Y-04 (125mm)

火炎暴露表面温度 1030°C

暴露時間 44 秒

START 8:25

STOP 9:09 (TIME 0:44)



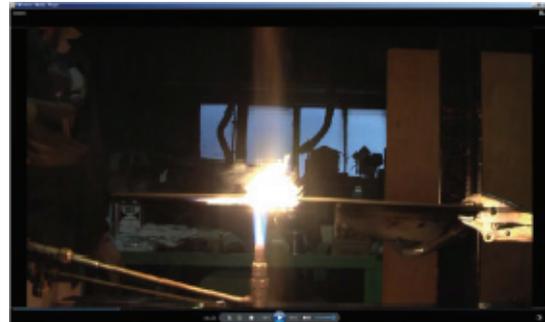
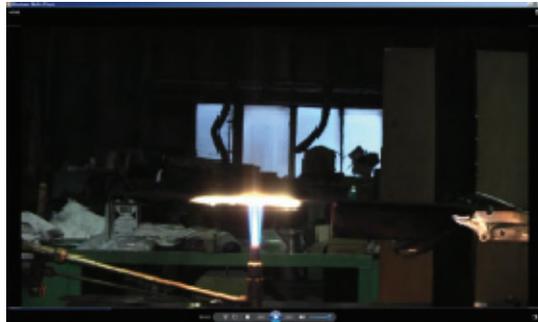
試験片番号 (間隔) Y-05 (83mm)

火炎暴露表面温度 1200°C

暴露時間 44 秒

START 10:38

STOP 11:22 (TIME 0:44)



試験片番号 (間隔) Y-06 (72mm)

火炎暴露表面温度 1300°C

暴露時間 51 秒

START 13:29

STOP 14:20 (TIME 0:51)



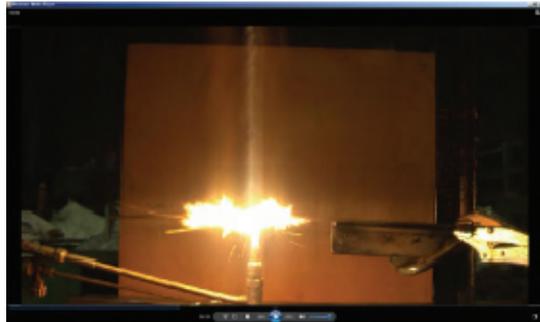
試験片番号 (間隔) Y-07 (59mm)

火炎暴露表面温度 1320°C

暴露時間 52 秒

START 18:04

STOP 18:56 (TIME 0:52)



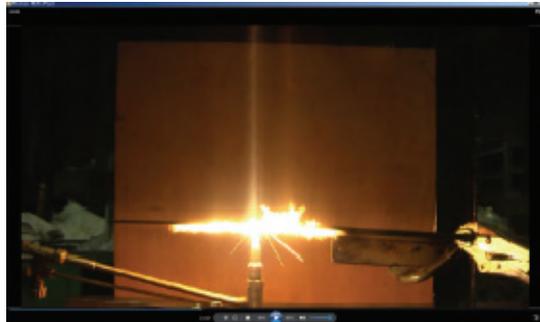
試験片番号 (間隔) Y-08 (49mm)

火炎暴露表面温度 1320°C

暴露時間 49 秒

START 20:39

STOP 21:38 (TIME 0:49)



試験片番号 (間隔) : Y-09 (36mm)

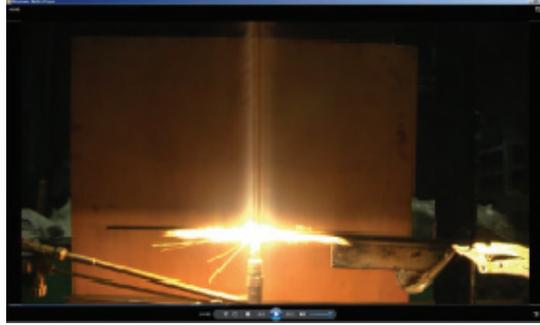
火炎暴露表面温度 1320°C

暴露時間

46 秒

START 23:47

STOP 24:33 (TIME 0:46)



< CFRP 板燃烧実証実験 酸素供給大 >

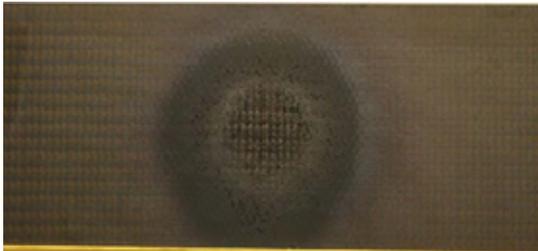
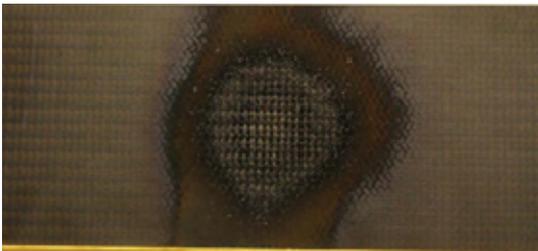


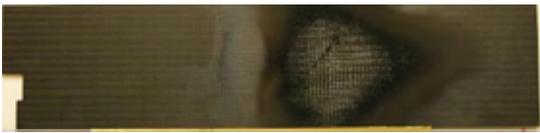
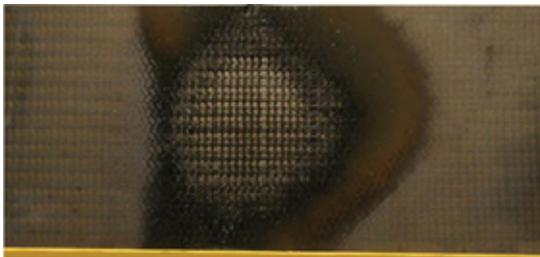
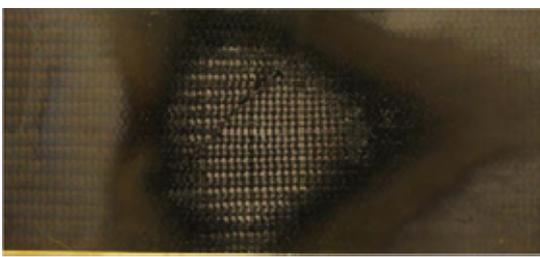
試験片番号 (間隔) Y-03 (165mm) 火炎暴露表面温度 320°C 暴露時間 49 秒	試験片番号 (間隔) Y-05 (83mm) 火炎暴露表面温度 920°C 暴露時間 45 秒
START 37:11 STOP 38:00 (TIME 0:49)	START 39:12 STOP 39:57 (TIME 0:45)
	

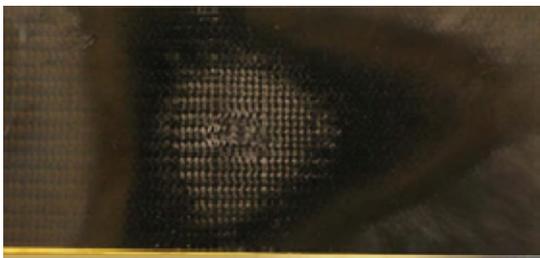
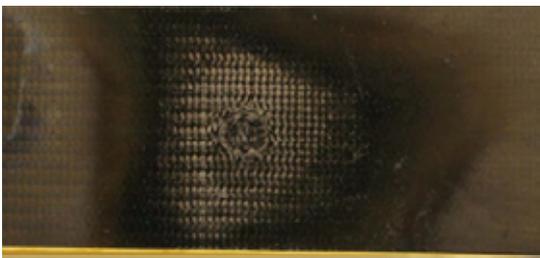
試験片番号 (間隔) Y-07 (59mm) 火炎暴露表面温度 1150°C 暴露時間 38 秒	試験片番号 (間隔) Y-08 (49mm) 火炎暴露表面温度 1100°C 暴露時間 48 秒
START 41:19 STOP 41:57 (TIME 0:38)	START 43:06 STOP 43:54 (TIME 0:48)
	

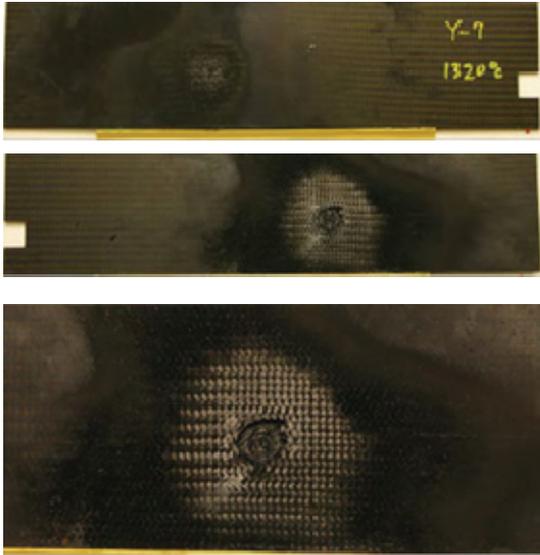
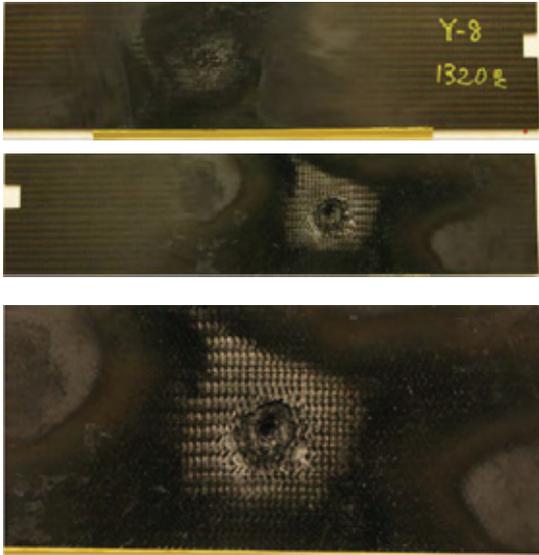
< CFRP 板燃烧実証実験 酸素供給少 >

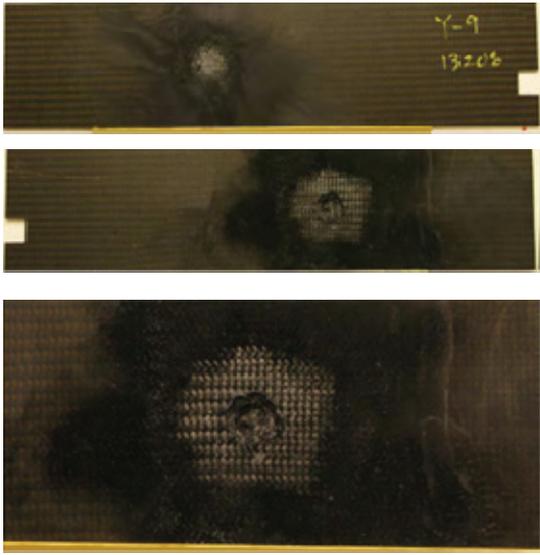


試験片番号 (間隔) Y-01 (250mm)	試験片番号 (間隔) Y-02 (205mm)
火炎暴露表面温度 530°C	火炎暴露表面温度 600°C
暴露時間 78 秒	暴露時間 66 秒
START 0:03 STOP 1:21 (TIME 1:18)	START 3:37 STOP 4:43 (TIME 1:06)
	
	
	

試験片番号 (間隔) Y-03 (165mm) 火炎暴露表面温度 860°C 暴露時間 48 秒	試験片番号 (間隔) Y-04 (125mm) 火炎暴露表面温度 1030°C 暴露時間 44 秒
START 6:03 STOP 6:51 (TIME 0:48)	START 8:25 STOP 9:09 (TIME 0:44)
	
	
	

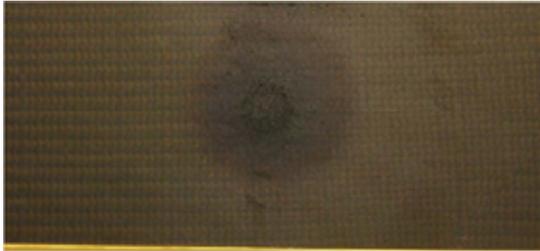
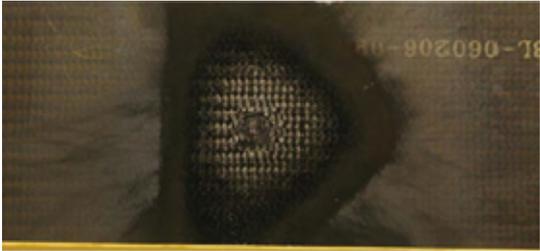
試験片番号 (間隔) Y-05 (83mm) 火炎暴露表面温度 1200°C 暴露時間 44 秒	試験片番号 (間隔) Y-06 (72mm) 火炎暴露表面温度 1300°C 暴露時間 51 秒
START 10:38 STOP 11:22 (TIME 0:44)	START 13:29 STOP 14:20 (TIME 0:51)
	
	
	

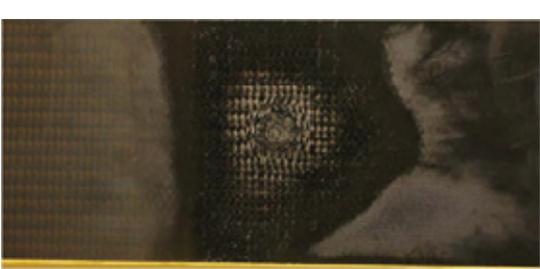
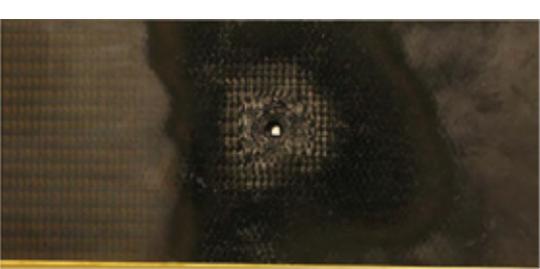
試験片番号 (間隔) Y-07 (59mm) 火炎暴露表面温度 1320°C 暴露時間 52 秒	試験片番号 (間隔) Y-08 (49mm) 火炎暴露表面温度 1320°C 暴露時間 49 秒
START 18:04 STOP 18:56 (TIME 0:52)	START 20:39 STOP 21:38 (TIME 0:49)
	

試験片番号 (間隔) Y-09 (36mm) 火炎暴露表面温度 1320°C 暴露時間 46 秒
START 23:47 STOP 24:33 (TIME 0:46)


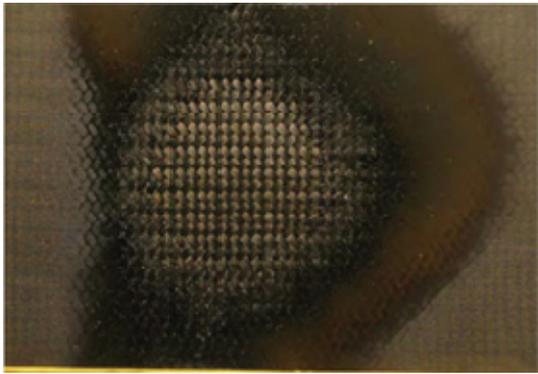
< CFRP 板燃烧実証実験 酸素供給大 >



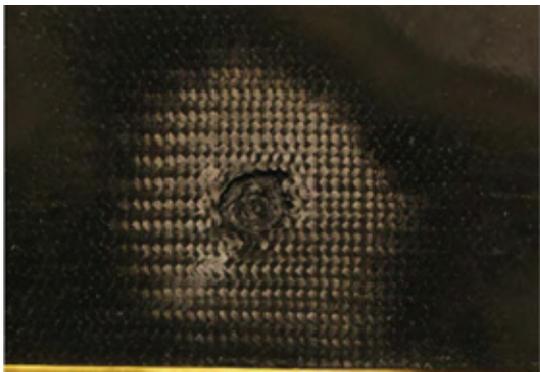
試験片番号 (間隔) Y-03 (165mm)	試験片番号 (間隔) Y-05 (83mm)
火炎暴露表面温度 320℃	火炎暴露表面温度 920℃
暴露時間 49 秒	暴露時間 45 秒
START 37:11 STOP 38:00 (TIME 0:49)	START 39:12 STOP 39:57 (TIME 0:45)
	
	
	

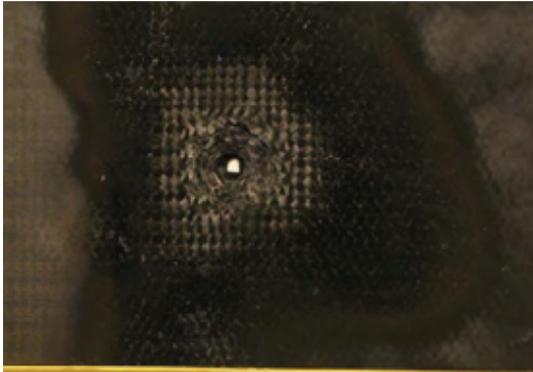
試験片番号 (間隔) Y-07 (59mm) 火炎暴露表面温度 1150℃ 暴露時間 38 秒	試験片番号 (間隔) Y-08 (49mm) 火炎暴露表面温度 1100℃ 暴露時間 48 秒
START 41:19 STOP 41:57 (TIME 0:38)	START 43:06 STOP 43:54 (TIME 0:48)
	
	
	

<CFRP 板/バーナー火口 同間隔比較>

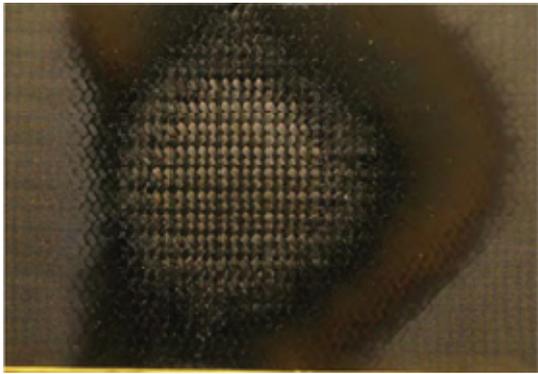
試験片番号 (間隔) Y-03 (165mm)	試験片番号 (間隔) Y-03 (165mm)
火炎暴露表面温度 860°C	火炎暴露表面温度 320°C (O ₂ rich)
暴露時間 48 秒	暴露時間 49 秒
	
比較できず	

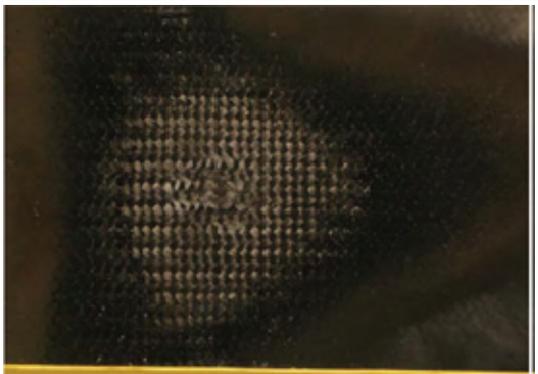
試験片番号 (間隔) Y-05 (83mm)	試験片番号 (間隔) Y-05 (83mm)
火炎暴露表面温度 1200°C	火炎暴露表面温度 920°C (O ₂ rich)
暴露時間 44 秒	暴露時間 45 秒
	
燃焼少	燃焼大

試験片番号 (間隔) Y-07 (59mm)	試験片番号 (間隔) Y-07 (59mm)
火炎暴露表面温度 1320℃	火炎暴露表面温度 1150℃ (O ₂ rich)
暴露時間 52 秒	暴露時間 38 秒
	
比較できず	

試験片番号 (間隔) Y-08 (49mm)	試験片番号 (間隔) Y-08 (49mm)
火炎暴露表面温度 1320℃	火炎暴露表面温度 1100℃ (O ₂ rich)
暴露時間 49 秒	暴露時間 48 秒
	
燃焼少	燃焼大

<近温度比較>

試験片番号 (間隔) Y-03 (165mm)	試験片番号 (間隔) Y-05 (83mm)
火炎暴露表面温度 860℃	火炎暴露表面温度 920℃ (O ₂ rich)
暴露時間 48 秒	暴露時間 45 秒
	
燃烧少	燃烧大

試験片番号 (間隔) Y-05 (83mm)	試験片番号 (間隔) Y-07 (59mm)
火炎暴露表面温度 1200℃	火炎暴露表面温度 1150℃ (O ₂ rich)
暴露時間 44 秒	暴露時間 38 秒
	
燃烧少	燃烧大

<アンケート票>

CFRP 廃棄物引取り・再資源化処理に関するアンケート調査

Q1. 貴社では現在、炭素繊維複合材（以下、CFRP）廃棄物の処理受入れを行っていますか。
下記の回答で当てはまる回答に○をつけて、指定の質問にご回答ください。

- | | |
|-------------------|--------------------|
| ① 受入れている → Q1-1 へ | ② 受入れていない → Q1-2 へ |
| ③ 実績がない → Q1-3 へ | ④ わからない → Q1-3 へ |

Q1-1. 「Q1」で「① 受入れている」と回答された方にお伺いします。CFRP 廃棄物の受入れ頻度および量について、おおよそで構いませんのでご回答ください。

受入れ頻度	受入れ量
年間合計 件	年間合計 トン

Q1-1-1. 上記処理を受入れている CFRP 廃棄物は何に使用されていたものかについてご回答ください（当てはまる回答全てに○を付けてください）。

- | | | |
|--------------------|------------------|---------------|
| ① 航空宇宙用途 | ② 輸送機器（航空宇宙用途除く） | ③ スポーツ・レジャー用途 |
| ④ 建築・橋梁用途 | ⑤ 工業製品 | ⑥ 不明 |
| ⑦ その他（具体的に： _____） | | |

Q1-2. 「Q1」で「② 受入れていない」と回答された方にお伺いします。どのような理由で受入れていないのでしょうか。また今後、CFRP 廃棄物の処理受入れを行う予定、計画はありますか（当てはまる回答に○を付けてください）。その理由についてもご回答ください。

受入れていない理由	
受入れ予定・計画 およびその理由	① あり ② なし ③ 未定

Q1-3. 「Q1」で「③ 実績がない」「④ わからない」と回答された方にお伺いします。CFRP 廃棄物の処理方法について現状のお考えについてご回答ください(当てはまる回答に○を付けてください)。

① CFRP に対する対応が必要	② 他の廃棄物処理と同じで問題ない	③ わからない
④ その他 (具体的に: _____)		

Q2. 貴社で CFRP 廃棄物を処理する際の処理形式についてご回答ください (当てはまる処理形式に○を記入してください)。現在、処理していない場合は、今後処理を行なうとしたらとの仮定でご回答ください (以下の設問も処理を仮定してご回答ください)。

処理形式		○を記入
製錬	銅製錬炉	
	亜鉛製錬炉	
ガス化溶融	サーモセレクト炉	
	シャフト炉	
焼却炉 + 溶融炉	キルン + ストーカ + 溶融炉	
	キルン式溶融炉	
	キルンストーカ	
	ストーカ + 溶融炉	
流動床炉	流動床式ガス化炉 + 溶融炉	
	流動床式焼却炉	
	キルン + 流動床炉	
炭化炉	炭化炉	
	還元炉	
セメント工程	焼却キルン (セメント)	
その他 (具体的な処理形式: _____)		
マテリアル	マテリアル	

Q2-1 へ

→ Q2-6 へ

Q2-1. 上記処理形式において CFRP 廃棄物はどのように処理されていますか (当てはまる回答全てに○を付けてください)。

① 燃料	② 還元材	③ 資源回収
④ その他 (具体的に: _____)		

Q2-2. 上記処理形式における残渣の回収形態についてご回答ください（当てはまる回答全てに○を付けてください）。

① 焼却灰	② 水砕スラグ	③ 徐冷スラグ	④ 飛灰	⑤ その他（具体的に： _____）
-------	---------	---------	------	--------------------

Q2-2-1. 「2-2」で回収した残渣の利用形態について、当てはまる回答全てに○を付けてください。

	回答例	焼却灰	水砕スラグ	徐冷スラグ	飛灰	その他残渣
売却	○					
再資源化						
最終処分	○					

Q2-3. 上記処理形式における炉内温度、酸素濃度はそれぞれどのくらいかご回答ください。

投入口付近		炉中央		排出口	
炉内温度	酸素濃度	炉内温度	酸素濃度	炉内温度	酸素濃度
℃	%	℃	%	℃	%

Q2-4. 上記処理形式における炉内の滞留部時間についてご回答ください。

滞留部時間
時間

Q2-5. CFRP 廃棄物の樹脂成分が熱分解し、炭素繊維が残った場合の対応についてご回答ください（当てはまる回答に○を付けてください）。

	対応可否
スラグと一緒に排出して利用することは可能ですか	① 可能 ② 不可能 ③ わからない
集塵機等により飛灰として回収は可能ですか	① 可能 ② 不可能 ③ わからない
炭化物として回収利用することは可能ですか	① 可能 ② 不可能 ③ わからない

Q2-6. CFRP を含有した廃棄物を RDF 加工することが可能かどうかについてご回答ください
 (当てはまる回答に○を付けてください)。

① できる ② できない ③ わからない

Q2-7. CFRP 廃棄物の処理に対して、設備等の対応計画がありますか (当てはまる回答に○を付けてください)。ある場合、その計画内容についてご回答ください。

計画	計画内容
① あり	
② なし	
③ 未定	

Q3. 「Q1」で「① 受入れている」と回答された方にお伺いします。CFRP 廃棄物の受入れ価格についておおよそで構いませんのでご回答ください (「Q1」で「② 受入っていない」「③ 実績がない」「④ わからない」と回答された方は「Q3-1 へ」)。

受入れ価格
円/トン

Q3-1. CFRP がシュレッダーダスト処理に混入した場合、現状のシュレッダーダスト受入価格との価格差へのお考えについてご回答ください (当てはまる回答に○を付けてください)。

① 現状シュレッダーダスト処理受入価格より安い
② 現状シュレッダーダスト処理受入価格と同等
③ 現状シュレッダーダスト処理受入価格より高い ④ わからない

Q4. CFRP 廃棄物の処理に関して、どんなことでも構いませんのでご意見をお願いします。

--

以上、お忙しい中アンケートにご協力いただきましてありがとうございました。

この調査は、経済産業省の「H26 年度クリーンエネルギー自動車等導入促進対策費補助金」により実施したものである。

平成 27 年 2 月 第1刷発行

発行所 一般社団法人 次世代自動車振興センター

〒105-0001

港区虎ノ門一丁目 6 番 12 号 大手町建物虎ノ門ビル

許可なく転載を禁じます。