

令和3年度産業標準化推進事業委託費

(戦略的国際標準化加速事業 ルール形成戦略に係る調査研究)

リサイクル炭素繊維の評価手法や採用状況に
関する国際動向調査

令和4年3月25日

株式会社矢野経済研究所

目次

用語集	5
本事業の概要	6
1 章. 調査の目的と背景	7
委員会について	10
2 章. 調査報告	12
2-1. 国内における性能評価試験方法の確認調査	12
2-1-1. 評価試験法比較	12
(1) 力学特性試験	12
(2) 不純物元素分析試験	32
2-2. 欧米諸国等における研究機関調査	39
2-2-1. 評価試験法比較	39
2-2-2. 評価試験結果の比較検証	39
2-2-3. rCF 評価手法の国際標準化に向けて対応すべき課題の検討	39
2-2-4. 欧米研究機関の試験法評価	40
2-3. CF 及び CFRP 関連の標準化に関する国内外の動向調査	41
2-3-1. 調査方法	41
2-3-2. 炭素繊維の標準化規格動向	43
2-4. rCF の評価手法に関する国際標準化に関する調査	44
2-4-1. 国内外（日、欧（英、独、仏、伊）、米）の研究機関などにおける評価手法の 開発状況に関する動向調査	44
(1) 調査概要	44
(2) 調査結果	44
2-4-2. rCF 評価手法の国際標準化において関係する国内外（日、欧（英、独、仏、伊）、 米）の標準化の動向	45
(1) 調査概要	45
(2) 調査結果	45
2-4-3. rCF 評価手法の標準化の動向及びルール形成によって創造・拡大できる rCF の国際市場規模	47
(1) rCF 原料（廃 CF）の発生源	47
(2) CF 発生量	49
(3) CFRP 発生量	50
(4) CFRP 製品の工程内端材	51
(5) 使用済 CFRP 製品由来の廃材処分量	52
(6) 廃 CFRP 処分量	53
(7) 廃 CF 処分量	53

(8) ルール形成がもたらす rCF 市場の成長予測（数量）	54
(9) ルール形成がもたらす rCF 市場の成長予測（金額）	55
2-4-4. rCF 評価手法に関し、国内外（日、欧）における規制上の制約の有無の調査	57
2-5. ルール案の検討及びルール形成戦略の策定	58
2-5-1. 他素材で実施されている規制及び認証制度	58
(1) 他素材で実施されている認証制度の概要	58
(2) 開発した基準の各国の規制への引用	68
(3) 開発した基準の各国政府や主要企業の調達基準への引用	69
(4) 開発した基準を用いた認証制度の構築	71
2-5-2. ルールを普及するための具体的な戦略策定の提案	76
(1) リサイクル品の定義	76
(2) 材料品の品質規定	78
(3) 通商ルール（廃棄物扱い品）	79
(4) 今後のラベリングに関する他業界の取り組み（Green Aluminium）	83
2-5-3. rCF におけるルールを普及するための課題と解決方法	84
(1) 他素材と比較した時の rCF の位置づけ	84
(2) rCF における課題抽出	84
(3) 今後 rCF の基準構築、普及に必要となる取り組み	84
3 章. まとめ	85
3-1. rCF 評価手法の国際標準規格を策定に向けた課題と解決方法	85
3-2. 評価試験法のラウンドロビンに向けたロードマップ作成	85

用語集

用語	注釈
CF	炭素繊維 (Carbon Fiber)
rCF	rCF (recycled Carbon Fiber)
vCF	バージン炭素繊維 (vergin Carbon Fiber)
CFRP	炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics)
Vf	繊維体積含有率 (Fiber volume content)

本事業の概要

CFRP の生産量増加に伴い CFRP 廃棄量（工程内端材+使用済 CFRP）の増加が見込まれる。しかし CFRP はその特性から既存プロセスでの処理が困難であるため、CFRP の循環利用に向けたリサイクルシステム等の確立が求められている。

本事業では、**rCF** の評価手法となるフラグメンテーション試験と不純物元素分析試験のラウンドロビンテストを実施し、国際標準規格策定に向けた課題の抽出と解決方法を検討した。また、国際論文調査や標準化に関する調査を行い、**rCF** の各国規格がないこと、**rCF** の評価手法は産業技術総合研究所の評価試験方法程度しかないことを確認した。これらの評価手法の標準化等によるルール形成によって見込まれる **rCF** の国際市場の規模について算出した。

1章. 調査の目的と背景

CO₂ 排出削減が世界的な課題となる中、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は軽量かつ高強度という特性から、航空機や自動車等への普及が進んでおり、我が国はバージン炭素繊維（CF）の生産量が世界一となっている。他方、その工程端材や廃材の大部分は埋立処理されており、ライフサイクル全体の環境負荷を低減するため、CFRP の循環利用に向けたリサイクルシステム等の確立が求められている。

係る状況のもと、我が国と比較した廃 CFRP の排出量について、欧州では約 4 倍、北米では約 5 倍といった報告もあり、エアバス社やボーイング社等を中心に CFRP をリサイクルするための技術及びサプライチェーンの構築に欧米諸国等が動き出している。しかしながら、現状、様々な用途で使用されたリサイクル炭素繊維（rCF）を統一的に評価する手法が存在しておらず、効率的な循環利用システムの確立には至っていない。

欧米諸国の対応が先行する中、バージン CF の生産量が世界一である日本が rCF 評価手法の国際標準化に向けて、CFRP リサイクル分野での日本企業の競争力を強化することは極めて重要である。また、先行している欧米各国試験機関等ともラウンドロビンテスト等により協力することで、効率的な CFRP 循環利用システムを構築することも可能となる。

本事業ではこのような背景事情を踏まえ、rCF 評価手法の国際標準化に向けた内外の状況を調査しつつ、我が国が rCF の評価体制構築の議論をリードしていくため、欧米諸国等と協力しながら、日本が主導する rCF 評価手法の国際標準規格策定に向けた取組みの検討を行う。また、我が国が優位となるような rCF 評価手法の規格化や同評価手法の普及戦略等により、rCF 市場において当該評価手法が適用されるのみならず、我が国のリサイクル技術が世界において優位となるような仕組みやルール形成によって創造・拡大できる CFRP の国際市場の規模等についての検討を行う。

本調査では以下の（1）～（5）の項目に関して実施した。また、調査方針や調査方法については、有識者によって構成された CFRP リサイクル検討委員会における議論を踏まえて決定した。

（1）国内における性能評価試験方法の確認調査

力学特性試験、材料分析試験を行い評価手法の優位性について国内の研究機関で実証し、その内容を整理した。

①評価試験方法比較

- ・力学特性試験（フラグメンテーション試験）
- ・材料分析試験（不純物元素分析試験）

②評価試験法比較結果の検証

- ・各研究機関で実施した力学特性試験、材料分析試験結果の突き合わせ

(2) 欧米諸国等における研究機関調査

欧米諸国等の研究機関などに性能評価試験を委託・実証し、日本が開発している評価試験方法の妥当性に関するヒアリング調査を行った。

- ①力学特性試験（フラグメンテーション試験）
- ②評価試験結果の比較検証
 - ・国内における力学特性試験結果との突き合わせ
 - ・試験結果に関するヒアリング調査を実施
- ③rCF 評価手法の国際標準化に向けて対応すべき課題の検討
- ④欧米研究機関の試験法評価

(3) CF 及び CFRP 関連の標準化に関する国内外の動向調査

rCF 評価手法の国際標準化に向け、CF 及び CFRP の関連する各規格の国内外の開発状況等を文献又は Web サイト等から得られる範囲で調査し、将来的に我が国の方向性に沿った標準化テーマの提案に資するための情報を収集、整理した。

- ①日欧米の標準化規格動向
 - ・ISO（国際）
 - ・JIS（日）
 - ・EN（欧）
 - ・BSI（英）
 - ・DIN（独）
 - ・ASTM¹（米）
- ②新興国の標準化規格動向
 - ・中国国家標準である GB
 - ・中国業界標準
 - ・中国地方標準

(4) rCF の評価手法に関する国際標準化に関する調査

rCF 評価手法の国際標準化に向け、国内外における rCF の研究・開発状況を文献、Web 又はヒアリングから得られる範囲で調査した。また rCF 評価手法の標準化の動向や rCF 評価手法に関する国内外における規制上の制約の有無を調査し、ルール形成によって創造・拡大できる rCF の国際市場規模を推計した。

①国内外（日、欧（英、独、仏、伊）、米）の研究機関などにおける評価手法の開発状況に関する動向調査

¹ ANSI（米）自体は規格をほとんど制定せず専門機関や関連団体が制定した規格を承認して ANSI 規格としている。ANSI 単独の規格は約 20 件程度で、加えて CF、複合材に関する規格が存在していないことが確認できたため調査対象外とした。

- ②rCF 評価手法の国際標準化において関係する国内外（日、欧（英、独、仏、伊）、米）の標準化の動向
- ③rCF 評価手法の標準化の動向及びルール形成によって創造・拡大できる rCF の国際市場規模（2020～2030 年予測（重量ベース））
- ④rCF 評価手法に関し、国内外（日、欧）における規制上の制約の有無の調査

（5）ルール案の検討及びルール形成戦略の策定

（1）国内における性能評価試験方法の確認調査、（2）欧米諸国等における研究機関調査、の調査内容を踏まえ、日本企業が開発すべきルールの素案とルールを普及するための具体的な戦略を策定した。

- ①他素材で実施されている規制及び認証制度
 - ・ 開発した基準の各国の規制への引用
 - ・ 開発した基準の各国政府や主要企業の調達基準への引用
 - ・ 開発した基準を用いた認証制度の構築
- ②ルールを普及するための具体的な戦略策定の提案
 - ・ リサイクル品の定義
 - ・ 材料の品質規定
 - ・ 通商ルール

委員会について

大学、研究機関、CF 製造企業等の有識者からなる CFRP リサイクル検討委員会を設置した。本検討委員会は 4 回開催され、調査・検討内容に関する審議・決定や調査結果のとりまとめの方向性について議論した。委員名簿は以下の通り。

<委員>

京都大学大学院工学研究科 機械理工学専攻機械材料力学講座適応材料力学分野 教授	北條 正樹 (委員長)
国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院工学研究科 助教官ショナルコンポジットセンター 学術連携研究員 兼務	入澤 寿平
金沢工業大学 (ICC) 大学院工学研究科 高信頼ものづくり専攻教授 博士 (工学)	鵜澤 潔
福井県工業技術センター 新産業創出研究部 部長	川邊 和正
産業技術総合研究所 マルチマテリアル研究部門 ポリマー複合材料グループ グループ長	今井 祐介
産業技術総合研究所 マルチマテリアル研究部門 ポリマー複合材料グループ 研究員	杉本 慶喜
産業技術総合研究所 環境創生研究部門 環境計測技術研究グループ グループ長	中里 哲也
産業技術総合研究所 環境創生研究部門 環境計測技術研究グループ 研究員	槇納 好岐
早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構 ナノプロセス研究所	加茂 徹
日本プラスチック工業連盟 規格部 規格部長	栢 英則
日本プラスチック工業連盟 規格部	斉藤 良
一般社団法人日本自動車工業会 環境技術・政策委員会 リサイクル・廃棄物部会副部会長 (本田技研工業株式会社)	堂坂 健児
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会 委員長 (東レ株式会社)	山口 晃司
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会 委員 (帝人株式会社)	恒川 浩
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会委員 (株式会社クレハ)	清水 和彦
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会委員 (大阪ガスケミカル株式会社)	奥田 健二
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会委員 (日本グラフィートファイバー株式会社)	岸本 宏一
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 ELC 委員会委員 (三菱ケミカル株式会社)	田口 真仁

日本化学繊維協会 炭素繊維協会 標準化分科会 (東レ株式会社)	山本 泰正
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 標準化分科会 (帝人株式会社)	五島 隆
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 標準化分科会 (三菱ケミカル株式会社) ※2022 年 2 月 28 日まで	三輪 陽平
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 標準化分科会 (三菱ケミカル株式会社) ※2022 年 3 月 1 日より	福島 明彦

<オブザーバー>

日本化学繊維協会 炭素繊維協会 業務調査グループ 主幹	戸円 真弓
日本化学繊維協会 炭素繊維協会 業務調査グループ 主任	新井 智子
経済産業省 産業技術環境局 資源循環経済課 課長補佐 (国際担当)	山下 章仁
経済産業省 産業技術環境局 資源循環経済課 係長	利野 勇樹
経済産業省 基準認証政策課 調査員 (弁理士)	藤田 和子
中部経済産業局 資源エネルギー環境部 環境・リサイクル課 課長補佐	佐藤 陽子
中部経済産業局 資源エネルギー環境部 環境・リサイクル課 総括係長	名畑 拓真
中部経済産業局 資源エネルギー環境部 環境・リサイクル課	伊藤 沙恵

<事務局>

株式会社矢野経済研究所 インダストリアルテクノロジーユニット ユニ ット長	相原 光一
株式会社矢野経済研究所 インダストリアルテクノロジーユニット 素材 産業グループ 上級研究員	船木 知子
株式会社矢野経済研究所 インダストリアルテクノロジーユニット 素材 産業グループ 研究員	青木 万葉
株式会社矢野経済研究所 インダストリアルテクノロジーユニット 素材 産業グループ 研究員	向 順規

2章. 調査報告

2-1. 国内における性能評価試験方法の確認調査

2-1-1. 評価試験法比較

(1) 力学特性試験

①産業技術総合研究所

i. 改良フラグメンテーション試験について

フラグメンテーション試験は繊維強化樹脂複合材料の繊維/樹脂界面せん断強度を評価する方法として知られている。樹脂中に一本の繊維を直線的に埋め込んだ単繊維包埋フィルムを作製し、その単繊維複合材料の繊維方向に引張変形を与える。繊維/樹脂界面を介して荷重が繊維に伝達されることで逐次繊維の破断が繰り返され、最終的に繊維破断点数が飽和する。破断点数が飽和した段階における繊維破断片の長さから繊維破断が生じる最低繊維長(臨界繊維長)を求め、さらに別に測定した繊維引張強度と繊維直径を用いることで、繊維/樹脂界面せん断強度を求めることができる。

rCF に本試験を適用する場合、リサイクル過程での繊維の損傷等により、強度低下が起こっている可能性があるため、rCF そのものの強度を測定する必要がある。しかしながら、繊維長が数 mm 程度にまで短くなっている場合には、単繊維の引張試験等通常の手法で強度評価を行うことが困難である。この課題に対し、産業技術総合研究所の杉本らは、フラグメンテーション試験において、加えるひずみが小さい試験初期の繊維破断点数の増加挙動から、包埋された繊維の強度分布を求める手法を提案している²。

繊維の引張強度がワイブル分布に従うとき、初期の破断点の増加挙動は次の式で表される。

$$\ln(\lambda) = m \ln(\varepsilon - \varepsilon_0) + \ln\left(\frac{E}{\sigma_0}\right)^m$$

ここで λ は破断点密度、 ε は試験片に与えたひずみ、 ε_0 はフィルムの収縮ひずみ、 E は繊維弾性率、 m および σ_0 は繊維強度分布を表すワイブルのシェイプパラメータとスケールパラメータである。したがって、ひずみと破断点密度の両対数プロットを作成すると、試験初期では破断点の増加が直線となり、その傾きと切片からワイブルパラメータを得ることができる。そして、十分に大きなひずみを加えて破断点密度が飽和した状態から、同じ試験内で得られた繊維強度を用いて、繊維/樹脂界面せん断強度を評価できる。すなわち、本試験法によれば、フラグメンテーション試験のみで繊維強度分布と繊維/樹脂界面せん断強度を

² 参考文献 Y. Sugimoto, D. Shimamoto, Y. Imai and Y. Hotta, Carbon 161 (2020) 83–88.

同時に評価できる。また、本試験法では、複数の試験片のデータを重ね合わせることで、十分に長い繊維の評価を行ったことになるため、短く破断された状態の rCF であっても、繊維が直線的に包埋された試験片を作製することで、rCF の力学特性を包括的に評価することができる。

しかし、この手法の実施例は限られており、標準的な試験手法としての課題は必ずしも明確になっていない。本調査ではこの手法の課題を明らかにするため複数機関における試験を実施した。

ii. フラグメンテーション試験片

樹脂としてポリアミド 12、炭素繊維として新品の PAN 系炭素繊維を用いた。まず、ポリアミド 12 のフィルムを 2 枚用意して、その間に繊維を挟み込むことによって繊維包埋フィルムを作製した。そのフィルムから繊維が中央に来るように 5mm×100mm のフィルムを切り出してフラグメンテーション試験片とした。

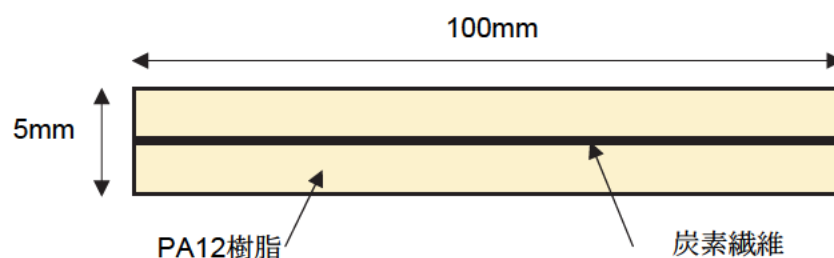


図 2-1. 配布したフラグメンテーション試験片の模式図
出所:産業技術総合研究所

iii. 各機関でのフラグメンテーション試験の条件

作製した試験片の改良フラグメンテーション試験を、産業技術総合研究所、福井県工業技術センター、金沢工業大学、名古屋大学にて実施した。各機関で所有する顕微鏡や試験機が異なるため、同条件の試験を実施することが難しかった。そのため本調査では各機関で条件検討を依頼し、試験を実施した。各機関の主な試験条件を表 2-1 にまとめた。

表 2-1. 各試験機関の試験条件

項目	産業技術総合 研究所	福井県工業技術 センター	金沢工業大学	名古屋大学
試験機	引張試験機	手動延伸機	手動延伸機	手動延伸機
つかみ具間距離	20mm	25mm	20mm	35mm
引張ひずみ	0.25%(50 μ m)	0.25%(62.5 μ m)	0.25%(150 μ m)	0.35%(125 μ m)
ひずみ計算	つかみ具間	測定間距離	測定間距離	つかみ具間
測定範囲	20mm	10mm	10mm	35mm
測定雰囲気	窒素中	空气中 (温度・湿度記録)	空气中 (温度・湿度記録)	空气中 (温度・湿度記録)
その他	n=6	n=5	n=5	n=9

出所:産業技術総合研究所

iv. 各機関でのフラグメンテーション試験の結果

今回の評価で得られる最終的なパラメータは引張強度に関するワイブルスケールパラメータとシェイプパラメータ、界面せん断強度、臨界繊維長である。各機関で得られたその結果を表 2-2 に示す。ワイブルシェイプパラメータ、ワイブルスケールパラメータは 2.8～7.3、0.8～3.9 GPa、界面せん断強度に関しては 28.8～50.6 MPa とばらつきの大きい結果となった。

表 2-2.各研究機関の試験結果一覧

研究機関	ワイブルパラメータ		界面せん断強度 τ / MPa	臨界繊維長 lc / μm
	シェイプ パラメータ m	スケール パラメータ σ_0 /GPa		
産業技術総合研究所	7.3 ± 0.8	3.9 ± 2.2	50.6	686
名古屋大学	6.8 ± 0.9	2.9 ± 2.2	28.8	931
福井県工業技術センター	2.8 ± 0.4	0.8 ± 0.7	35.0	856
金沢工業大学	3.3 ± 0.3	1.0 ± 0.6	34.5	817

※名古屋大学と福井県工業技術センターについては 1 回目の結果

出所:各機関の試験結果を基に産業技術総合研究所作成。

今回のラウンドロビンテストでは、産業技術総合研究所が作製した試験片を各試験機関に配布した。しかし、試験条件については、各試験機関で所有する試験システムが異なるため産業技術総合研究所での実施内容を参考に試験条件の決定を依頼した。そのため結果が異なった原因として考えられるのは、試験者による差異に加えて、試験機・試験条件による差異がある。具体的には、①試験者に依存するセッティング時のフィルムへの予備張力、②試験機に依存する試験片の把持状態、③試験条件に依存する試験片の乾燥状態が差異の原因として挙げられる。

セッティング時の予備張力は繊維に付与される初期ひずみに影響を与える。繊維に付与される初期ひずみが大きいとわずかなひずみで繊維破断が起きることになるので繊維の平均強度が見かけ上低下する。繊維の平均強度は 2 つのワイブルパラメータによって決定されるが、スケールパラメータの影響を強く受ける傾向がある。そのため、スケールパラメータの大きさを比較することでセッティング時の予備張力の影響を推定することができる。スケールパラメータに注目すると産業技術総合研究所と名古屋大学が大きく、福井県工業技術センターと金沢工業大学の結果が小さい傾向があった。そのため試験者によって予備張力が異なっていたことが予想される。ひずみから強度を推定する本手法は、わずかなセッティングの差が結果に大きな影響を及ぼしうるため、試験片セッティング時の予備張力の設定が重要であることがこの結果から確認できた。

繊維にひずみを与えるためには試験片の把持状態は重要である。具体的には試験中にし

っかり把持できていない場合は試験片が滑り、繊維にひずみを与えられないケースがある。その場合は見かけ上ひずみを与えても、繊維が切断しないため繊維の強度分布が見かけ上広くなると考えられる。また、強く把持しすぎると把持部からネッキング等の変形が起きてしまい均一にひずみを与えることができない。繊維の強度分布は 2 つのワイブルパラメータによって決定されるが、主にシェイプパラメータの影響を強く受ける。今回シェイプパラメータの違いに注目すると産業技術総合研究所と名古屋大学が大きく、福井県工業技術センターと金沢工業大学の結果が小さい傾向があった。繊維の把持状態が異なっていることが推察される。初期検討段階で福井県工業技術センターからは試験片滑りが、金沢工業大学からは延伸機の把持部分の改良の報告があった。これらの報告からも明らかなように、フィルムに試験片把持の方法についても適切な把持力の設定が重要であることが確認できた。

一般にポリアミド系の樹脂は吸湿すると弾性率や降伏応力等が低下することが知られている。試験片が吸湿すると界面せん断強度が低下するので臨界繊維長が長くなる。今回、ポリアミド系の樹脂の中でも比較的吸湿性が低い樹脂としてポリアミド 12 を選定して、輸送時にも吸湿しないように注意した。しかし、臨界繊維長は産業技術総合研究所が最も短いという結果になっており、産業技術総合研究所以外では乾燥条件で試験実施が難しくその影響が反映されていると考えられる。マトリックス樹脂が吸水性の場合の乾燥状態については重要な因子であることを確認できた。

今回得られた結果から、試験開始時のセッティングや試験雰囲気の設定が重要であり、これらに関して規定が必要であることが分かった。その一方で従来からフラグメンテーション試験を実施している経験がある機関では問題なく本試験手順を実施できることが分かった。課題を解決していくことで標準的な試験法としてより適切なものに改良を行えると考えられる。得られるパラメータの信頼性等については様々な条件の違いから本ラウンドロビンテストからは明確にできなかった。実験的・理論的な観点からさらなる検討が必要である。

②名古屋大学

i. 試験結果

フラグメンテーション試験（(a) 手回し延伸機および (b) 自動延伸機）の試験結果を表 2-3、図 2-2 に示す。

得られた $\ln(\lambda)$ vs. $\ln(\varepsilon - \varepsilon_0)$ カーブは産業技術総合研究所と類似したカーブを得ることができた一方で、そこから得られる各パラメータ数値に産業技術総合研究所との差異が認められた。特に手回し延伸機での実施した試験の場合は、歪み量の刻み幅が大きくなったことによって初期歪み時での細断化の様子を捉えきれなかったため、それが産業技術総合研究所との結果との差異の原因である可能性がある。

自動延伸機（ $50\mu\text{m}$ 刻みで延伸）を行った場合、低 $\ln(\lambda)$ の領域のプロット数が増える結果となった。引張刻み幅を細かくすることによって、初期段階での細断化が捉えやすくなったと考えられる。

一方で、産業技術総合研究所とほぼ同一装置、条件での測定を行ったが、結果に差異が認められた。これらの要因として、炭素繊維の直径、弾性率、強度のばらつきのほか、サンプルの厚みなど様々な要因が考えられる。ISO 化に向けては、上記要因として想定される点を詳細に調べる必要があると考えられる。

表 2-3. フラグメンテーション試験結果 (名古屋大学)

(a)			(b)		
ワイブルパラメータ			ワイブルパラメータ		
シェイプパラメーター	m	6.80	シェイプパラメーター	m	7.72
	Δm	0.89		Δm	1.22
スケールパラメーター	σ_0 (GPa)	2.94	スケールパラメーター	σ_0 (GPa)	4.38
	$\Delta\sigma_0$ (GPa)	2.17		$\Delta\sigma_0$ (GPa)	3.55
平均繊維強度			平均繊維強度		
25mm相当	σ_{25mm} (GPa)	4.72	25mm相当	σ_{25mm} (GPa)	6.64
	$\Delta\sigma_{25mm}$ (GPa)	0.81		$\Delta\sigma_{25mm}$ (GPa)	1.02
臨界繊維長相当	σ_{lc} (GPa)	7.65	臨界繊維長相当	σ_{lc} (GPa)	10.23
	$\Delta\sigma_{lc}$ (GPa)	0.41		$\Delta\sigma_{lc}$ (GPa)	1.01
界面せん断強度			界面せん断強度		
臨界繊維長	l_c (μm)	931.3	臨界繊維長	l_c (μm)	888.9
界面せん断強度	τ (MPa)	28.8	界面せん断強度	τ (MPa)	40.3
	$\Delta\tau$ (MPa)	2.1		$\Delta\tau$ (MPa)	5.1

図 2-2. 破断点数とフィルムひずみの両対数プロット (名古屋大学)
出所: 名古屋大学

③福井県工業技術センター

i. はじめに

福井県工業技術センターでは、小型引張試験治具を透過型光学顕微鏡にセットし、試験片に少しずつ歪みを与えながら、その歪みでの炭素繊維の破断を測定する方法にて、フラグメンテーション試験を実施した。

ii. 使用装置

本試験に実施した透過型光学顕微鏡及び小型引張試験治具は以下のとおりである。

- ・透過型光学顕微鏡（画像連結＋深度合成機能あり）
（株）キーエンス VHX-5000（図 2-3）
- ・小型引張試験治具
（株）井本製作所 手動一軸延伸機 1A12

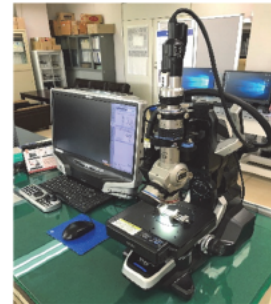


図 2-3. 顕微鏡全体写真
出所:福井県工業技術センター

iii. 試験

iii-i. 試験片のセット方法

産業技術総合研究所様より送付された試験片を以下の手順に従い、小型引張試験治具（延伸機）にセットした。

- (1) 試験片にボールペンで基準線を 2 本、一定の間隔を設けて引く。試験片の間隔は 5mm または 10mm を設定し、今回の試験では約 10mm の間隔を設けた。
- (2) 延伸機 1A12 および紙やすりペーパー 600 番を用意する。紙やすりの大きさはチャックにセットできる大きさとし、上下で挟むため、計 4 枚を用意した（図 2-4 参照）。
- (3) チャック部分に紙やすりをセットし、その上に試験片をセットする。チャック間距離は約 25mm とした（図 2-5 (1) 参照）。試験片は延伸治具の中央より上部（または下部）にセットする。この位置にセットすると顕微鏡観察の際に透過法を採用できる。試験片のセット位置は中央部にセットするとネジ部分が邪魔をして観察ができないため上記手法を採用した。
- (4) 試験片の上に紙やすりをかぶせ、チャックをセットし締め込む。締め込みは強くおこなった。（図 2-5 (2)、(3) 参照）

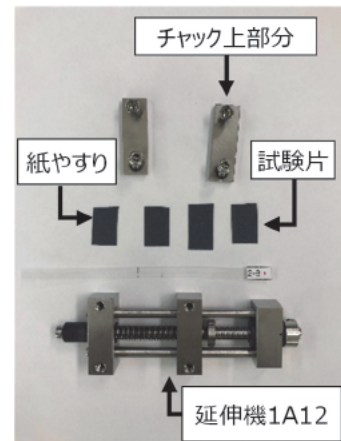


図 2-4. 試験片及び延伸機
出所:福井県工業技術センター

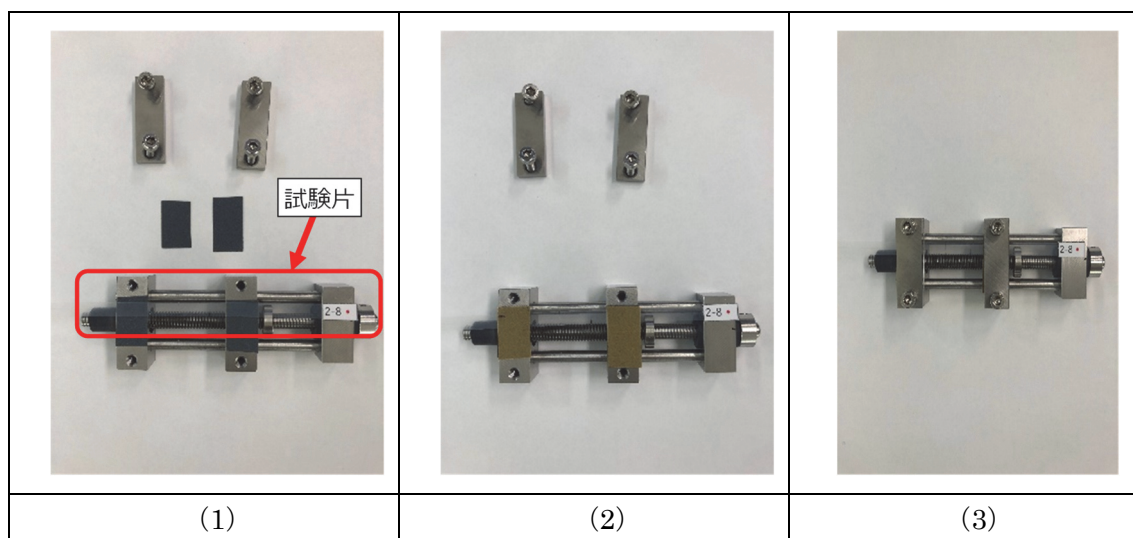


図 2-5. 試験治具への試験片セットの様子
出所:福井県工業技術センター

iii-ii. 試験手順

実際に試験を行った手順などについて、以下に示す。

- (1) 試験片をセットした延伸機を顕微鏡にセットした。当該試験では反射法より透過法を用いて撮影する方が CF の破断個所をよりはっきりと認識し易かったため、透過法を採用した。
- (2) 試験片の炭素繊維に焦点と倍率を合わせ、ボールペンの間隔を「2 点間距離測定」機能を使用して測定した。なお顕微鏡倍率は 20 倍とした。ボールペンで基準線を引くと二重線が描かれるため (図 2-6 参照)、その内側線を基準に測定を実施した。

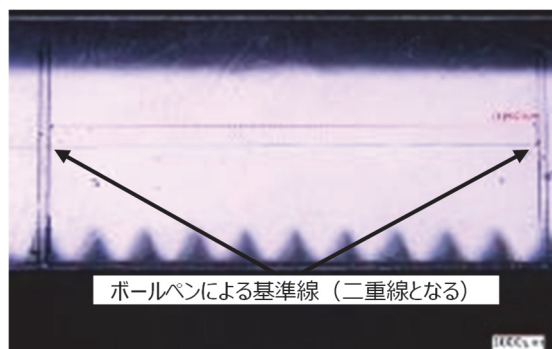


図 2-6. 初期状態における観察の様子
出所:福井県工業技術センター

- (3) チェック間距離が約 25mm のため約 2～2.5%分、長さにして約 0.5～0.63mm の伸びを試験片に与えるよう引っ張った。これは延伸機をつまみを約 1/2 周回転させている。(延伸機 1A12 はネジピッチ 1mm のため、1/2 周すると 0.5mm 伸びたことになる。)
- (4) この状態にして基準線の間隔を顕微鏡の「2 点間距離測定」機能を使用して測定し、炭素繊維の伸びを測定し歪みを求めた。
- (5) この初期状態での CF の破断数を測定した。破断測定時には倍率をあげることで測定がし易くなるため 500 倍で観察した。なおモニター画面を使用した撮影では 10mm 間隔を一度に投影できないため、端部から順に CF が破断していないかを観察した。観察の結果、初期状態では破断個所が測定されなかった。

- (6) 以後は、延伸機のネジつまみを約 1/16 周（ネジピッチで $62.5\ \mu\text{m}$ ）ずつ回した。基準線間隔（初期状態で約 10mm の間隔）を測定すると、約 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ （平均 $25\ \mu\text{m}$ ）ずつ伸びていた。CF は約 0.25% ずつ伸びていた。チャックすべりもなく安定して延伸できていると考えられた。
- (7) 約 1/16 周回すごとに、CF の破断数を測定した。
- (8) 破断数の観察後、基準線の 2 点間距離を計測で求めた値（伸長後値）および CF 破断数を記録した。
- (9) 破断数が飽和するまで計測を実施した。
今回は約 $600\sim 800\ \mu\text{m}$ ほど伸ばした（約 6~8% ほど伸ばしている）。

iii-iii. 解析方法

iii-ii の「試験手順」に従い、求めた伸長後値と CF 破断数を「フラグメンテーション試験計算シート」に基づき解析を実施した。その手順を以下に示す。

- (1) 「フラグメンテーション試験計算シート(20210930)」に新たなシートとして、「ひずみ計算用」シートを追加した。
- (2) 「ひずみ計算用」シートは、測定したサンプル毎に、最初の長さ、伸びを与えた後の試料長さ（伸長後値）、その時の破断数を入力し、サンプル毎に歪みと破断数を示す表を作成した。
- (3) 「ひずみ計算用」シートで各サンプルの歪みと破断数をそれぞれ一つのセルにまとめ、順番を昇降順にすることで歪みと破断数の一覧表を作成した。
- (4) 歪みと破断数の一覧表を、「①測定データ入力」シートに入力し「①測定データ入力」シート内に表を作成した。
- (5) 「①測定データ入力」シートに作成されたデータを「②解析」シート内の表に入力しグラフを作成した。
- (6) 作成したグラフを観察し②解析シートの「 $\ln(\lambda)$ のフィッティング範囲」に数値を入力した。当該試験では開始 4.5、終了 6.5 とした。
- (7) 「フラグメンテーション試験計算シート」内に出力される「③結果」を確認した。

iv. 試験結果

10mm 間隔で測定を行い、試験は 5 回実施した。各サンプルの初期状態（伸びを与える前の状態）観察結果を示す。試験は繊維の真直な部分を選んで実施した。

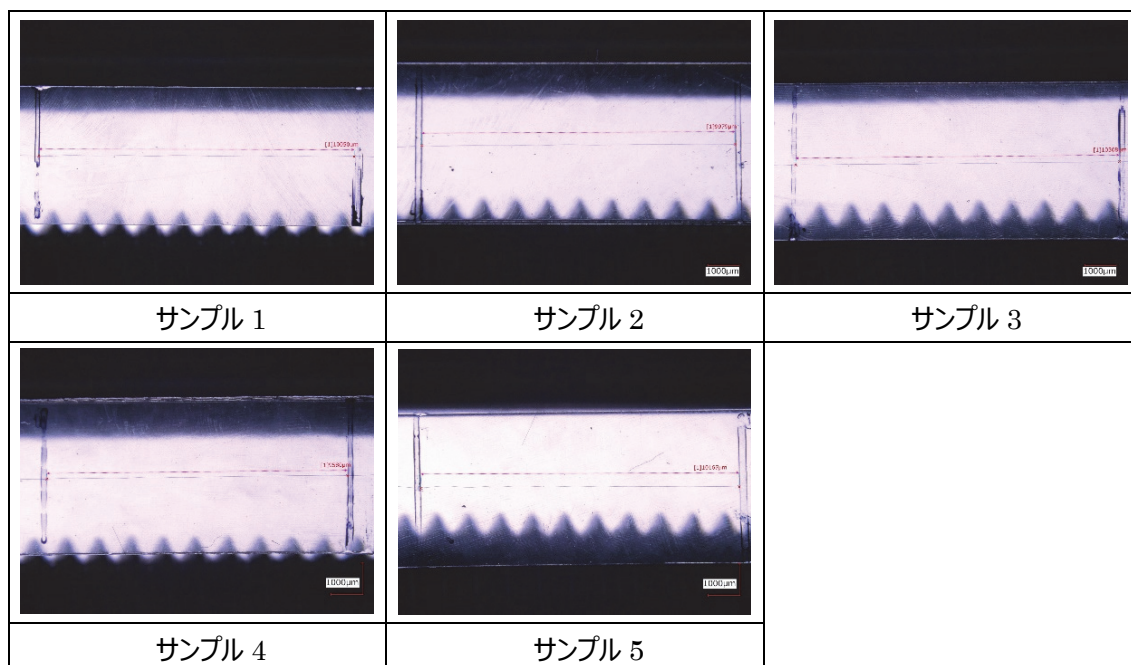


図 2-7.フラグメンテーション試験における初期状態
出所:福井県工業技術センター

試験結果を表 2-4、図 2-8 に示す。

表 2-4.フラグメンテーション試験結果（福井県工業技術センター）

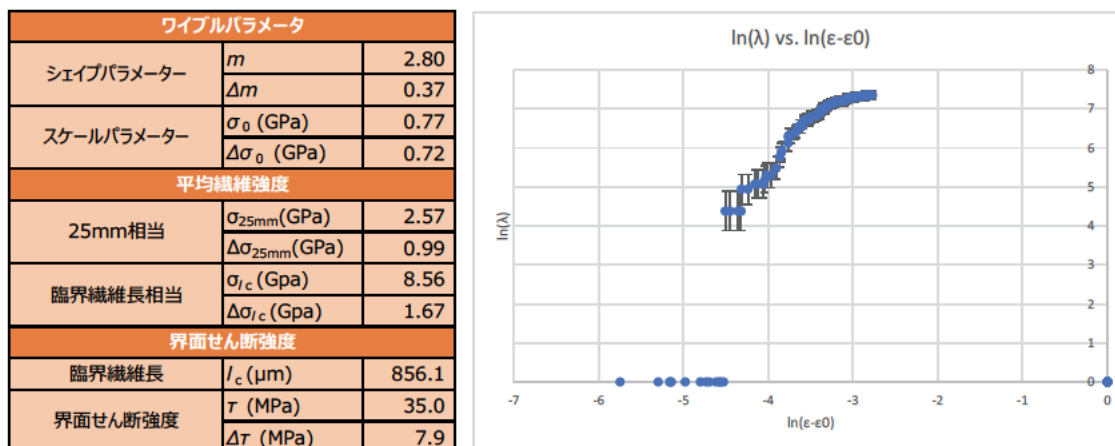


図 2-8.破断点数とフィルムひずみの両対数プロット（福井県工業技術センター）
出所:福井県工業技術センター

図 2-8 を見ると初期歪みでの形が他機関の結果に比べると不一致となる結果となった。初期状態においてグラフが横にねたような状態であり、直線状になっていないことが分かる。表 2-4 で示した試験結果を他機関の試験結果と比較すると違和感がある。

v. フラグメンテーション試験方法の再検討

先の試験において、試験結果が他機関と不一致する原因について検討した結果、透過型光学顕微鏡による標線間距離の測定において誤差が生じたのではないかと考えられた。

具体的には、先の試験では、透過型光学顕微鏡の倍率を 20 倍にして、標線間距離 10mm の伸び量を 2 点間距離測定という機能を用いて計測した。2 点間距離測定機能は、測定したい位置にカーソルを合わせて測定する方法であるが、カーソルの位置が少しでもズレると、伸び量が変化してしまい、この変化量が大きかったことから、正確な歪が計算できなかったのではないかと考え再試験を実施した。

v-i. 再試験方法

図 2-9 に示すように、標線間距離を 10mm にした試験片 A と、標線間距離を 5mm にして連続させた試験片 B を用意した。各試験片の標線間をモニターに映し出すためには、試験片 A では透過型光学顕微鏡の倍率を 20 倍に、試験片 B では倍率を 50 倍に設定する。この倍率の差による測定への影響について確認した。

まず、倍率による測定の誤差について、試験片 B を用いて、倍率 20 倍および 50 倍で標線間距離測定を同一個所にて 2 回測定し、実際に得られた値からその測定誤差を確認した。

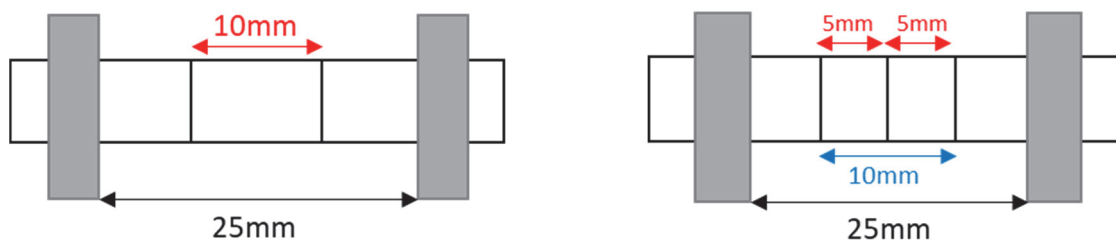


図 2-9.試験片 A (左図) と試験片 B (右図) について
出所:福井県工業技術センター

次に、試験片 A および試験片 B でフラグメンテーション試験を行い、その結果を比較した。試験片 A では、標線間距離 10mm で 2 点間距離測定を行い（倍率 20 倍）、その後破断点数を測定する方法にて試験を実施し、試験片 B では、標線間距離 5mm で 2 点間距離測定を行い（倍率 50 倍）、その後破断点数を測定した。そして、2 カ所の結果を合わせて標線間距離 10mm の結果とみなすという方法にて試験を行った。

v-ii. 再試験結果

測定誤差について

試験片 A および試験片 B、それぞれをモニターに映し出した状況を図 2-10 に示す。

この写真から分かるように、試験片 A では線が細く、かつ狭い範囲に標線間が示される。2 点間距離測定を行うためカーソルを標線上にポイントするが、微妙にずれる状況は生じ易い。実際に 2 点間距離測定を 2 回実施したところ、1 回目は $511\mu\text{m}$ 、2 回目は $5078\mu\text{m}$ であり、その差は $33\mu\text{m}$ であった。 $5000\mu\text{m}$ に対し $33\mu\text{m}$ の差は歪にして 0.66% に相当し、0.25% ずつ伸ばす実験では非常に大きな誤差になると考えられる。

試験片 B では、標線間がモニター全体に映し出され、標線もはっきりと分かる。カーソルをポイントする際も行い易い。2 点間距離測定を行ったところ、1 回目は $5106\mu\text{m}$ 、2 回目は $5102\mu\text{m}$ で、その差は $4\mu\text{m}$ であった。 $5000\mu\text{m}$ に対し $4\mu\text{m}$ の差は歪にして 0.08% と試験片 A の場合に比べ約 8 分の 1 の誤差と小さくなった。ただし、0.25% ずつ伸ばす実験において、0.08% の測定誤差は大きいと考えられるが、しかし、当センターが現状保有する装置を用いた本方法における測定の限界でもある。

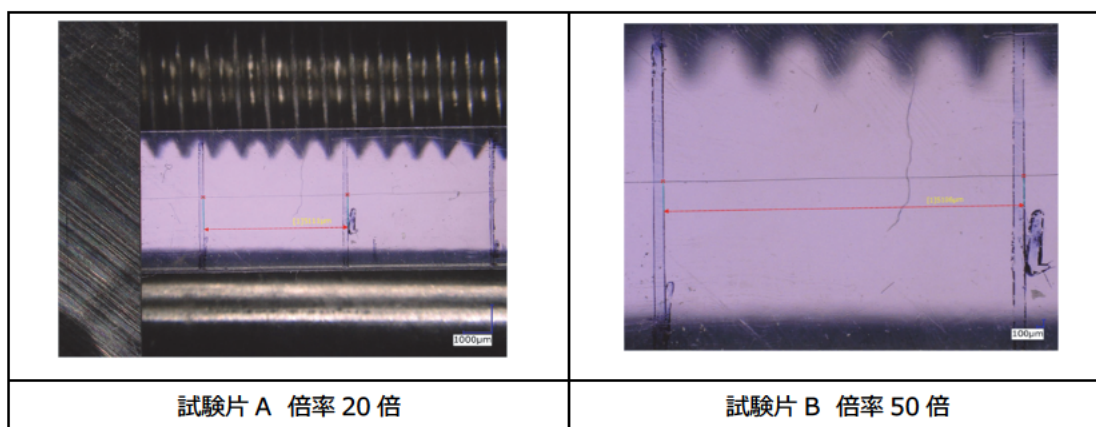


図 2-10.試験片 A (左図) と試験片 B (右図) のモニター写真
出所:福井県工業技術センター

v-iii. 試験結果のまとめ

試験片 A の試験結果を表 2-5、図 2-11 に、試験片 B の試験結果を表 2-6 図 2-12.破断点数とフィルムひずみの両対数プロット (試験片 B) に示す。

試験片 A は標線間距離を 10mm にして倍率 20 倍で測定した結果である。試験片 B では、標線間距離 10mm を 5mm に 2 分割し、標線間距離 5mm を倍率 50 倍でそれぞれ測定して合わせることで標線間 10mm の結果である。なお試験には 5 サンプルを使用した。

表 2-5.第 2 回フラグメンテーション試験結果 (試験片 A) (福井県工業技術センター)

ワイブルパラメータ		
シェイプパラメーター	m	3.38
	Δm	0.43
スケールパラメーター	σ_0 (GPa)	0.74
	$\Delta\sigma_0$ (GPa)	0.69
平均繊維強度		
25mm相当	σ_{25mm} (GPa)	1.96
	$\Delta\sigma_{25mm}$ (GPa)	0.64
臨界繊維長相当	σ_{lc} (Gpa)	5.91
	$\Delta\sigma_{lc}$ (Gpa)	0.86
界面せん断強度		
臨界繊維長	l_c (μm)	601.5
界面せん断強度	τ (MPa)	34.4
	$\Delta\tau$ (MPa)	6.0

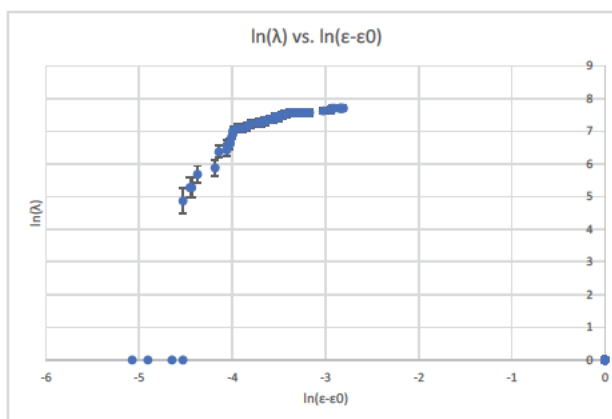


図 2-11.破断点数とフィルムひずみの両対数プロット (試験片 A) (福井県工業技術センター)
出所:福井県工業技術センター

表 2-6.第2回フラグメンテーション試験結果（試験片 B）（福井県工業技術センター）

ワイブルパラメータ		
シェイプパラメーター	m	7.82
	Δm	0.83
スケールパラメーター	σ_0 (GPa)	3.28
	$\Delta\sigma_0$ (GPa)	2.04
平均繊維強度		
25mm相当	σ_{25mm} (GPa)	4.94
	$\Delta\sigma_{25mm}$ (GPa)	0.75
臨界繊維長相当	σ_{lc} (Gpa)	7.81
	$\Delta\sigma_{lc}$ (Gpa)	0.80
界面せん断強度		
臨界繊維長	l_c (μm)	699.6
界面せん断強度	τ (MPa)	39.1
	$\Delta\tau$ (MPa)	5.4

※フィッティング範囲：3-6.5

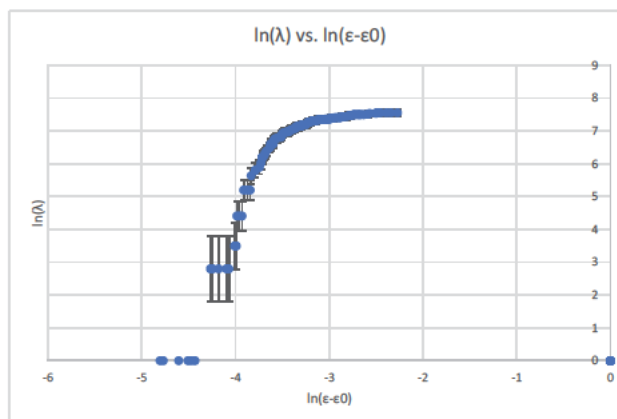


図 2-12.破断点数とフィルムひずみの両対数プロット（試験片 B）（福井県工業技術センター）
出所:福井県工業技術センター

試験の結果、試験片 B の結果が他機関とよく似た傾向となった。この結果から、標線間の 2 点間距離測定を正確に行うことが重要であり、誤差を生じる原因となるモニターでの低倍率測定は極力避けることが必要と分かった。

vi. まとめ

今回の試験実施において、手動一軸延伸機 1A12 を使用したフラグメンテーション試験の実施方法をまとめることができた。また、試験片に対する歪みもすべりなく与えることができていたことを確認した。

試験方法において、2 点間距離測定については、誤差を生じ難くするため、標線間距離を短くして高倍率で測定することが重要と分かった。

④金沢工業大学

i. 使用装置

手動本試験に実施した透過型光学顕微鏡及び小型引張試験治具は以下のとおりである。

- ・デジタルマイクロスコープ VHX-8000
(株)キーエンス (図 2-13)
- ・引張試験機
(株)井本製作所 手動一軸延伸機 1A12

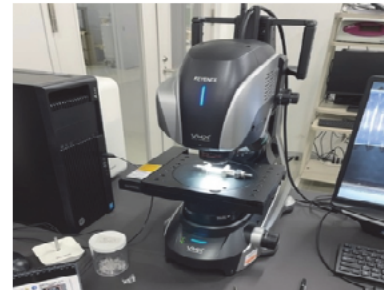


図 2-13.デジタルマイクロスコープ

出所:金沢工業大学

手動一軸延伸機 (図 2-14) を基に、チャック部を改善した。供試体(フィルム)を把持するチャック部の固定ジグを厚さ 10mm に変更し、リーマー穴と締め付けボルトにより固定ジグが平行に移動することでフィルムを片締めりなく均等に締め付けられるように初期位置固定治具を作製した。また、初期の供試体のチャック間距離が一定となるように初期位置固定治具を作製した (図 2-15 参照)。



図 2-14. 手動一軸延伸機

出所:金沢工業大学

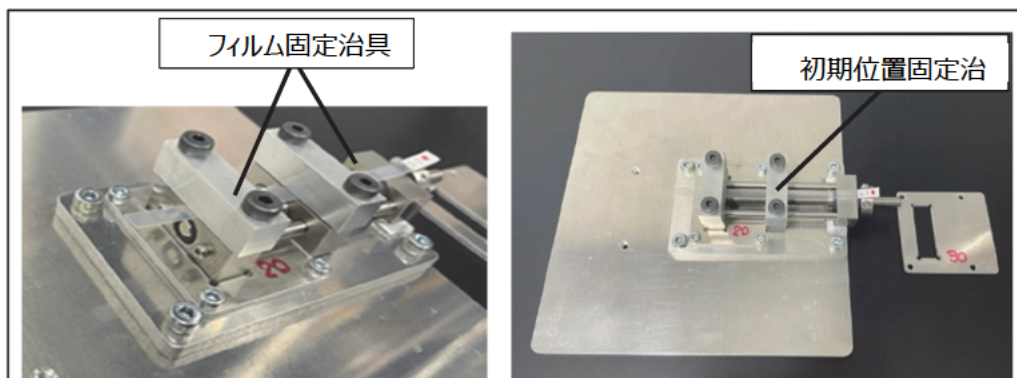


図 2-15. 改良型手動一軸延伸機

出所:金沢工業大学

ii. 試験

以下に計測の工程を説明する。

ii-i. 測定準備

- (1) 試験片に細径油性ペンで標線を 2 本引く。標線間距離は 10 mm とした。
- (2) 手動一軸延伸機の中央（中央ネジ部に重なるように）にフィルムを固定する。初期位置固定治具を用いてチャック間距離を 20 mm になる様に固定治具をセットし、標線の中心部分がチャック間の中央付近になるようにフィルムを固定する。チャックにフィルムを固定する際はチャック上部が傾かないように水平に固定する。

ii-ii. 測定

- (1) 試験片をセットした延伸機をマイクロスコープのステージにセットし、測定室の温度・湿度を記録する。
- (2) マイクロスコープの倍率を 300 倍に合わせ、標線間の炭素繊維（CF）を「画像連結（深度合成あり）」を用いて撮影し、標線間距離を測定する。
- (3) つまみを 16 等分し、最初は 10/16 回転させる。（1 周で約 1 mm 移動、1/16 回転で 0.0625 mm 移動する。）
- (4) フィルムを延伸させた後に、線間の CF の破断点を観察し、画像連結機能で標線間の様子を撮影し、標線間距離および破断点を測定する。
- (5) 以後は、1/16 回転ずつつまみを回してひずみを与え、(4)と同様の手順で破断点観察、画像撮影、標線間距離および破断点の計測を行う。
- (6) 破断点数が飽和するまで計測を行う。

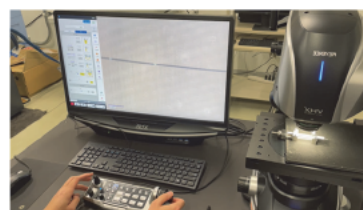


図 2-16. マイクロスコープによる測定の様子

出所:金沢工業大学

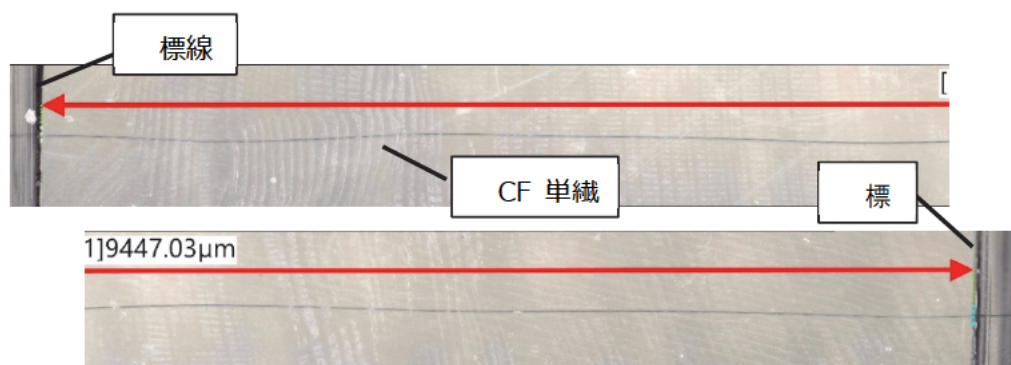


図 2-17. マイクロスコープ観察画像(標線間距離測定)

出所:金沢工業大学

iii. 試験結果

計測された破断点数と破断点密度を表 2-7 に示す。

表 2-7. フラグメンテーション試験結果 1-1 (金沢工業大学)

合計繊維長	4-6	2-1	4-1	5-2	10-1
L	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
0.04903995	9.6706	9.447	10.004	9.8009	10.118

フィルムひずみ	破断点数	破断点数	破断点数	破断点数	破断点数	フィルムひずみ	破断点密度	合計
ϵ	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	ϵ	$\lambda \text{ (m}^{-1}\text{)}$	N
0.025024041	0	0	0	0	0	0.025	0	0
0.025492343	0	0	0	0	0	0.0255	0	0
0.026103858	0	0	0	0	0	0.0261	0	0
0.026490865	0	0	0	0	0	0.0265	0	0
0.027069815	0	0	0	0	0	0.0271	0	0
0.027335214	0	0	0	0	0	0.0273	0	0
0.028497896	0	0	0	0	0	0.0285	0	0
0.029027074	0	0	0	0	0	0.029	0	0
0.02912979	0	0	0	0	0	0.0291	0	0
0.029520555	0	0	0	0	0	0.0295	0	0
0.030421109	0	0	2	0	0	0.0304	40.78308	2
0.03147278	0	0	2	3	0	0.0315	101.9577	5
0.031501472	0	0	2	3	1	0.0315	122.3492	6
0.031568652	0	0	2	3	1	0.0316	122.3492	6
0.032875231	0	0	3	3	1	0.0329	142.7408	7
0.03288541	1	0	3	3	1	0.0329	163.1323	8
0.033629375	1	0	3	3	1	0.0336	163.1323	8
0.034015417	1	0	3	3	1	0.034	163.1323	8
0.034538897	1	0	3	3	1	0.0345	163.1323	8
0.035814923	3	0	3	3	1	0.0358	203.9154	10
0.035960126	3	0	6	3	1	0.036	265.09	13
0.036612196	3	0	6	3	3	0.0366	305.8731	15
0.037400838	3	0	6	6	3	0.0374	367.0477	18
0.037752606	3	1	6	6	3	0.0378	387.4392	19
0.038559337	4	1	6	6	3	0.0386	407.8308	20
0.038610178	4	1	9	6	3	0.0386	469.0054	23
0.039723501	4	1	9	6	5	0.0397	509.7884	25
0.039828178	4	1	9	7	5	0.0398	530.18	26
0.041329391	4	3	9	7	5	0.0413	570.9631	28
0.041562269	10	3	9	7	5	0.0416	693.3123	34
0.041580114	10	3	9	7	5	0.0416	693.3123	34
0.042160756	10	3	9	7	9	0.0422	774.8784	38
0.042722825	10	3	9	8	9	0.0427	795.27	39
0.044019241	10	3	11	8	9	0.044	836.0531	41
0.044091106	10	4	11	8	9	0.0441	856.4446	42

0.077397178	17	12	19	16	14	0.0774	1590.54	78
0.07756164	17	12	19	16	14	0.0776	1590.54	78
0.079081335	17	12	19	16	14	0.0791	1590.54	78
0.07946955	17	12	19	16	14	0.0795	1590.54	78
0.080013507	17	12	19	16	14	0.08	1590.54	78
0.080017276	17	12	19	16	15	0.08	1610.931	79
0.08026535	17	12	19	16	15	0.0803	1610.931	79
0.080894004	17	12	19	17	15	0.0809	1631.323	80
0.081910676	17	12	19	17	15	0.0819	1631.323	80
0.08314585	17	12	19	17	15	0.0831	1631.323	80
0.085248578	17	12	19	17	15	0.0852	1631.323	80
0.085342598	17	12	19	17	15	0.0853	1631.323	80
0.087812792	17	12	19	17	15	0.0878	1631.323	80

出所: 金沢工業大学

iii-i. 解析結果

表 2-7 で示した試験結果を基に解析した結果を表 2-8、図 2-18 に示す。

表 2-8. フラグメンテーション試験結果 1-2 (金沢工業大学)



以上から、極端な計測上のエラーは発生していなかったと考えている。しかし、金工大の結果は、表 2-2 のように、産業技術総合研究所の結果に比べて界面せん断強度は低く、臨界繊維長は大きい結果となった。この要因は本章の冒頭で考察されているが、名古屋大学と福井県工業技術センターも同様であったことから、手動延伸機の使用による何らかの影響(例えば、ひずみ印加時のひずみ速度のバラつき等)が有ったとも考えられる。

今後、広く一般に利用される試験法として確立すべく、種々の検討を継続したいと考えている。

(2) 不純物元素分析試験

①産業技術総合研究所

i. はじめに

rCF には、複合材料由来の残留元素や廃棄回収時に混入する金属粉、ガラス繊維、ほこりなどに由来する不純物元素が含まれていると考えられる。この rCF の利活用のためには、環境規制対応および素材評価の面で不純物元素の管理が必要となる。環境規制の面では、例えば鉛やカドミウムといった有害元素の管理が必要であり、また、素材評価の面ではアルカリ金属や鉄など微量元素の管理が必要となると考えられる。産業技術総合研究所は新構造材料技術研究組合 (ISMA) において、これらの不純物元素の管理に資する rCF 中の不純物元素分析法を 2022 年度末までに確立するため研究開発を進めており、また、確立後に汎用的分析法として標準化を進めていきたいと考えている。今回、この開発中の分析法の標準化に向けて再現性を確認するために、分析法の後段部分である rCF 試料を分解処理後の分解液中の不純物元素の定量分析について、ラウンドロビンテストを行い、分析法の評価と課題抽出を行った。

ii. ラウンドロビンテストの概要

今回のラウンドロビンテストは、ISMA プロジェクトで開発中の分析前処理法により分解した rCF 試料の分解溶液中の不純物元素を参加の試験機関が誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) により定量分析を行い、試験機関間で比較検証した。ICP-MS の概略図を図 2-19 に示す。

本テストで用いた rCF の分解溶液は 2 種類の rCF 試料 (rCF-A, rCF-B) を各々分解し溶液化した。また、不純物元素を高濃度含有する rCF を想定し、rCF-B 分解溶液に分析対象の元素を添加した溶液 (rCF-B-spiked) も調製した。また、分析操作の汚染および定量下限値を評価するため空試験試料として純水試料を用いた。

これら 3 種類の試料分解処理溶液 (rCF-A, rCF-B, rCF-B-spiked) と空試験試料の計 4 種類の試料は産業技術総合研究所が調製し、3 試験機関 (受託環境分析会社、ICP-MS 機器製造会社、公的研究機関) に提供した。

各参加機関は ICP-MS により 10 種類の元素 (Na, Mg, Al, K, Ca, Cr, Fe, Ni, Cd, Pb) の定量分析を実施した。分析回数は試料毎に 3 回繰り返して行い、1 元素当たりの測定質量数は可能な限り 2 種類以上の測定を行った。なお、ICP-MS の測定条件は各機関の ICP-MS 装置等の条件が異なるため、各機関の判断で対象元素を定量できる条件を選択した。

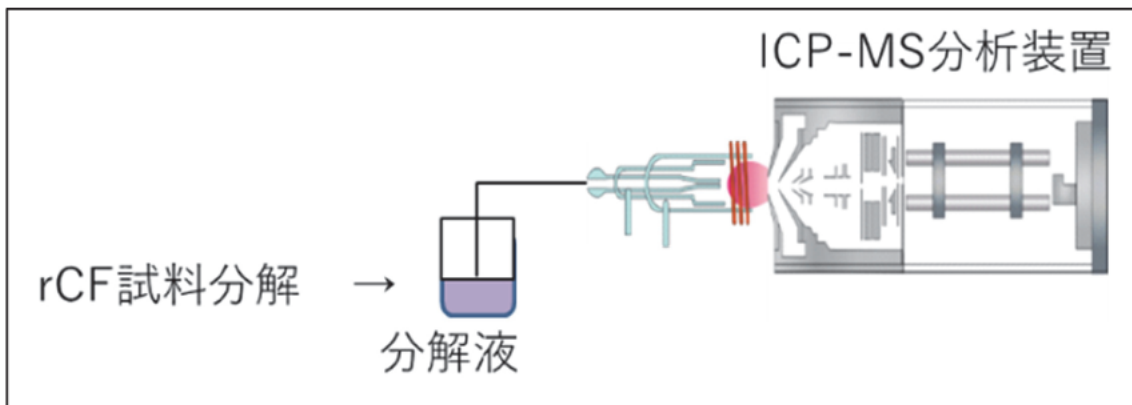


図 2-19. rCF の不純物元素分析法 (rCF 分解液の ICP-MS 分析の概略図)
出所:産業技術総合研究所

iii. ラウンドロビンテストの結果概要

iii-i. rCF 分解処理液中の不純物元素の定量分析

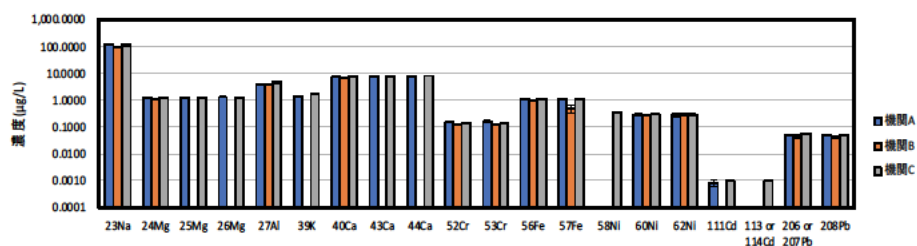
2 種類の rCF 試料 (rCF-A, rCF-B) の分解処理液および rCF-B 分解溶液に分析対象の元素を添加した溶液 (rCF-B-spiked) の各機関の定量分析結果を図 2-20、表 2-9 示す。なお、参加した 3 試験機関は匿名化している。3 機関の分解処理溶液 (rCF-A, rCF-B, rCF-B-spiked) の分析値はほぼ一致した。試験機関間のばらつきの評価の一つである室間精度は、元素濃度が定量下限値近傍で定量困難な元素または元素同位体(例: rCF-A 試料の ^{39}K , ^{57}Fe など)以外は、概ね相対標準偏差 (RSD) 10%以内と良好な結果が得られた。また、各試験機関内の分析誤差の評価となる繰り返し分析(分析回数 3 回)における室内精度の結果を図 2-21 に示す。全ての元素が $1\text{ }\mu\text{g/L}$ 以上の濃度となるように元素が添加された rCF-B-spiked 試料の精度は、各機関は 10%未満と良好な分析精度が得られた。一方、rCF-A および rCF-B に関しては、重金属の一部で $0.05\text{ }\mu\text{g/L}$ 以下の低濃度の元素(Cd, Pb)または低濃度で同位体比が低い元素同位体(例: ^{62}Ni)の室間精度は 10%を超えたものもあった。これは定量下限値近傍での低精度の定量となったためと考えられる。また、6 元素(Mg, Ca, Fe, Ni, Cd, Pb)については複数の同位体を測定した。結果、定量可能範囲であれば分析値は同位体間でおおむね一致し、対象元素の同定および定量分析に有効であることが示唆された。

次に、これらの不純物元素の定量における各機関の ICP-MS 測定条件の影響を評価した。各機関による測定条件は以下の通り異なっていたが、定量分析結果はおおむね一致した。具体的には、ICP-MS 測定時の分解処理液の希釈率については、各機関は最大 200 倍まで適宜希釈されていたが、分析結果の希釈率の明確な依存性は見られなかった。また、定量法は全機関で内標準法が用いられた。内標準元素は各機関で異なったが(試験機関 A: ^{115}In 、試験機関 B: ^{45}Sc 、 ^{89}Y 、 ^{103}Rh 、 ^{115}In 、 ^{185}Re 、試験機関 C: ^{45}Sc 、 ^{89}Y)、分析結果はおおむね一致した。また、ICP-MS における測定干渉(例: ^{52}Cr 測定時に ICP のアルゴン由来で生成する同質量数の $^{40}\text{Ar}^{12}\text{C}$ 分子イオンによる妨害)を抑制するために、全機関はガスを用いたコリジョン/リアクションセル法を利用した。このガス種は試験機関 A ではヘリウム、水素及び

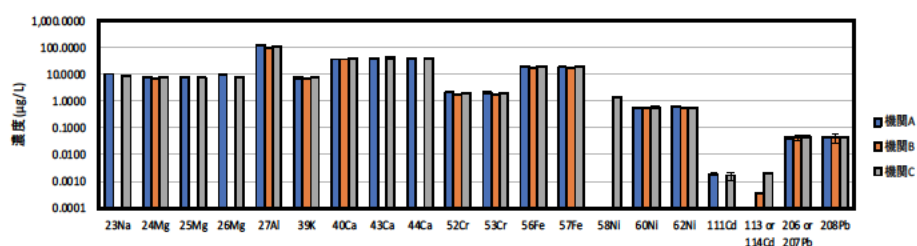
酸素、試験機関 B では水素及びヘリウム、試験機関 C では水素が用いられたが、定量結果はガス種間でおおむね一致した。

以上、ICP-MS 測定条件はある程度の範囲で許容されるため、本研究で開発している ICP-MS 測定も含む rCF の不純物元素分析法の標準規格化を想定した場合、ICP-MS 装置を有する多くのラボが利用できる可能性があると考えられる。

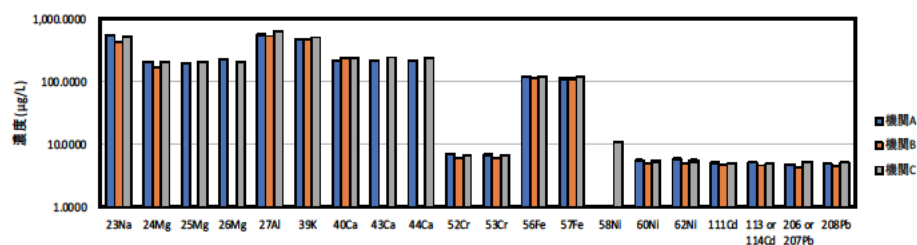
(a) rCF-A



(b) rCF-B



(c) rCF-B-spiked



(d) 空試験試料

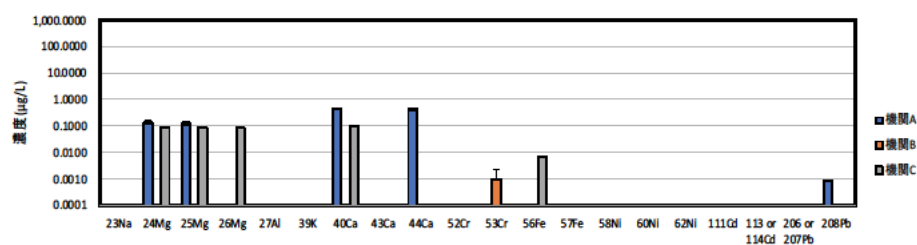


図 2-20. 3 試験機関における試験試料の定量分析結果
(エラーバーは測定 3 回の標準偏差 1σ で表記)
出所: 産業技術総合研究所

表 2-9. 3 試験機関における試験試料の定量分析結果のまとめ

(a)rCF-A

元素	同位体	測定値の平均 (μg/L)	標準偏差 (1σ)	%RSD
Na	23Na	112	10.468	9%
	24Mg	1.17	0.077	7%
Mg	25Mg	-	-	-
	26Mg	-	-	-
Al	27Al	4.25	0.322	8%
K	39K	1.53	0.232	15%
Ca	40Ca	7.45	0.577	8%
	43Ca	-	-	-
	44Ca	-	-	-
Cr	52Cr	0.14	0.012	8%
	53Cr	0.15	0.020	14%
Fe	56Fe	1.10	0.078	7%
	57Fe	0.90	0.373	42%
Ni	58Ni	-	-	-
	60Ni	0.29	0.016	6%
	62Ni	0.30	0.010	3%
Cd	111Cd	0.00091	0.000	15%
	113 or 114Cd	-	-	-
Pb	206 or 207Pb	0.05	0.006	12%
	208Pb	0.05	0.006	12%

(b)rCF-B

元素	同位体	測定値の平均 (μg/L)	標準偏差 (1σ)	%RSD
Na	23Na	9.78	0.809	8%
	24Mg	7.35	0.587	8%
Mg	25Mg	-	-	-
	26Mg	-	-	-
Al	27Al	106.70	11.411	11%
K	39K	7.20	0.156	2%
Ca	40Ca	37.43	1.414	4%
	43Ca	-	-	-
	44Ca	-	-	-
Cr	52Cr	1.93	0.146	8%
	53Cr	1.91	0.142	7%
Fe	56Fe	18.46	1.159	6%
	57Fe	17.94	1.190	7%
Ni	58Ni	-	-	-
	60Ni	0.55	0.034	6%
	62Ni	0.56	0.026	5%
Cd	111Cd	0.0018	0.000	9%
	113 or 114Cd	-	-	-
Pb	206 or 207Pb	0.04	0.003	7%
	208Pb	0.04	0.002	4%

(c)rCF-B-spiked

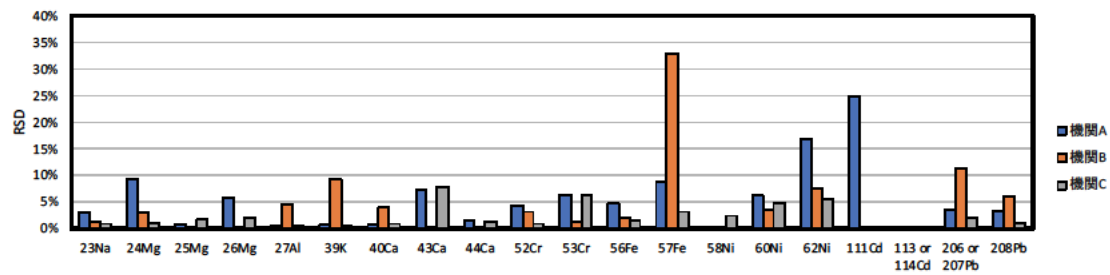
元素	同位体	測定値の平均 (μg/L)	標準偏差 (1σ)	%RSD
Na	23Na	508.62	64.772	13%
	24Mg	199.23	22.210	11%
Mg	25Mg	-	-	-
	26Mg	-	-	-
Al	27Al	587.96	47.986	8%
K	39K	493.49	22.456	5%
Ca	40Ca	235.22	17.995	8%
	43Ca	-	-	-
	44Ca	-	-	-
Cr	52Cr	6.62	0.475	7%
	53Cr	6.57	0.492	7%
Fe	56Fe	120.24	6.316	5%
	57Fe	116.72	6.153	5%
Ni	58Ni	-	-	-
	60Ni	5.34	0.314	6%
	62Ni	5.51	0.403	7%
Cd	111Cd	4.96	0.240	5%
	113 or 114Cd	4.94	0.268	5%
Pb	206 or 207Pb	4.81	0.481	10%
	208Pb	4.84	0.332	7%

(d)空試験試料

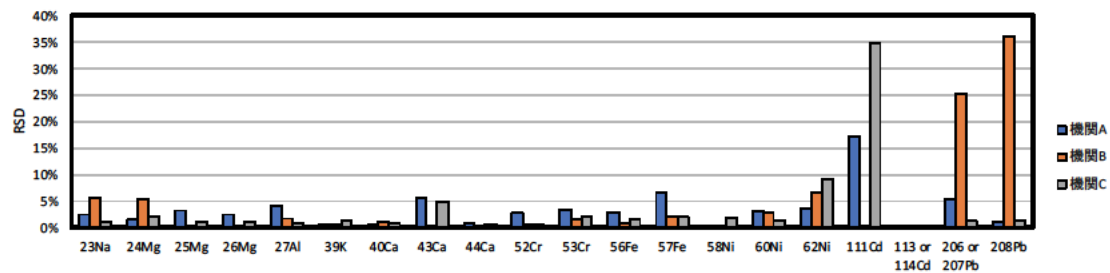
元素	同位体	測定値の平均 (μg/L)	標準偏差 (1σ)	%RSD
Na	23Na	-	-	-
	24Mg	0.12	0.036	32%
Mg	25Mg	-	-	-
	26Mg	-	-	-
Al	27Al	-	-	-
K	39K	-	-	-
Ca	40Ca	-	-	-
	43Ca	-	-	-
	44Ca	-	-	-
Cr	52Cr	-	-	-
	53Cr	0.00	-	-
Fe	56Fe	-	-	-
	57Fe	-	-	-
Ni	58Ni	-	-	-
	60Ni	-	-	-
	62Ni	-	-	-
Cd	111Cd	-	-	-
	113 or 114Cd	-	-	-
Pb	206 or 207Pb	-	-	-
	208Pb	0.00088	-	-

出所:産業技術総合研究所

(a) rCF-A



(b) rCF-B



(c) rCF-B-spiked

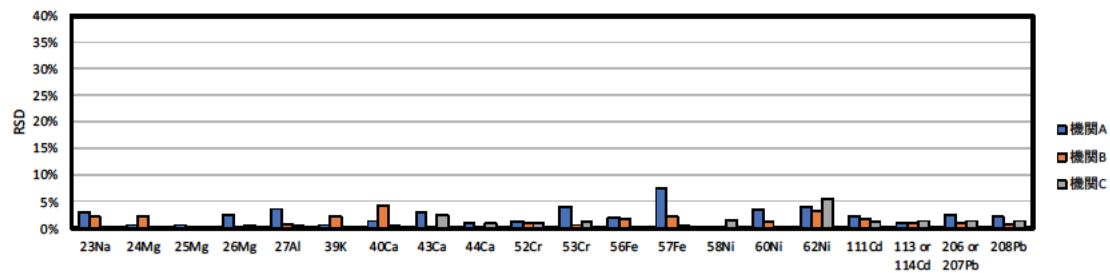


図 2-21. 3 試験機関における試験試料分析の室内精度、測定 3 回の相対標準偏差 RSD (1 σ) で表記
出所:産業技術総合研究所

iii-ii. rCF 分解処理液の容器由来の汚染の影響

分解処理液中の元素は微量であるため、分析用器具からの汚染は分析結果に影響を与える可能性がある。そこで今回、分解処理液の容器由来の元素汚染による定量分析への影響の評価のために、rCF 分解液ではなく純水を入れた空試験試料も分析した。結果を図 2-20(d) に示す。空試験試料が入った容器を試験機関に輸送して分析に供しているため、容器からの元素の経時的な溶出の可能性が考えられたが、ほとんどの元素は各試験機関の ICP-MS 測定法の定量下限値未満の極低濃度であった。例えば、容器由来の元素汚染が観察しやすい定量下限値が低い試験機関 A および B においては、空試験試料の元素濃度値が得られたのは 10 元素中 4 元素のみで、Mg, Ca は約 $0.1 \mu\text{g/L}$ レベル、Fe および Pb が $0.001 \mu\text{g/L}$ レベルで、rCF 分解処理液の元素濃度の 1/10 以下で定量への影響はほとんどなかった。以上のことから、今回の rCF 試料の分解処理液条件および各試験機関の ICP-MS 測定条件では、容器由来の汚染の影響はほとんどないと考えられた。

iii-iii. rCF の不純物元素の定量下限値の調査

rCF の不純物元素分析法の標準規格化を想定した場合、本分析法の適用範囲を規定する必要がある。今回、各試験機関によって行われた ICP-MS による不純物元素の分析結果を基に本分析法の定量下限値を調査した。今回の試験では rCF 分解後の分解処理液を試験試料に供していることから、この rCF 分解処理液に準じた水溶液条件における定量下限値を調査した。結果を図 2-22 に示す。各元素の定量下限値は各試験機関によって異なっており、例えば、Na は機関 B が 36 $\mu\text{g/L}$ であったのに対し、機関 A 及び C はそれぞれ 1.5 $\mu\text{g/L}$ 、0.68 $\mu\text{g/L}$ とより良好な定量下限値が得られた。これは使用した ICP-MS 装置自身の性能の差に加えて、測定条件の違いによる感度差、装置や器具の汚染に起因するバックグラウンドレベルの差などが反映されたと考えられる。また、rCF 固体試料条件での低濃度の元素分析を評価するため、3 機関の水溶液条件の定量下限値の平均値を用いて、分解前の rCF 固体試料条件に換算した定量下限値を推定した。

(a) 溶液試料条件の定量下限値

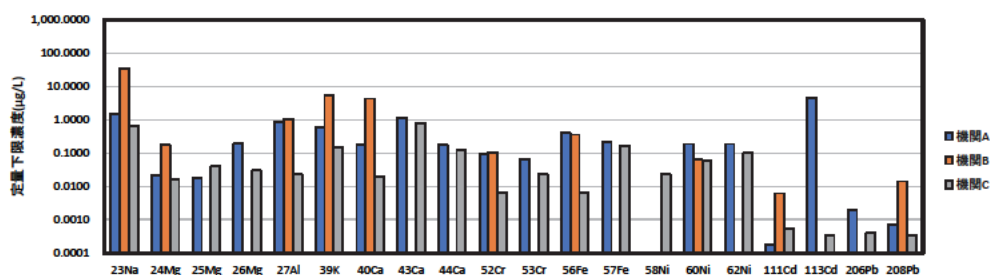


図 2-22.試験機関における不純物元素の定量下限濃度
出所:産業技術総合研究所

iii-iv. 不純物元素の高濃度条件での定量分析の評価

前項では rCF の不純物元素分析法の標準規格化を想定し、元素の低濃度側の適用範囲の評価を行った。本項では高濃度側の適用性を評価するため、高濃度不純物元素が含有する rCF 分解処理液試料を模擬した rCF-B-spiked 試料の定量分析試験を行った。rCF-B-spiked 試料は、不純物元素の含有濃度が高い炭素繊維リサイクル材 rCF-B の分解処理液に 10 倍量程度の既知量の元素を添加することで、高濃度不純物元素を含有する rCF 分解処理液試料を模擬した。各試験機関の分析結果から、添加した元素量の回収率により評価した。結果を図 2-23 に示す。各試験機関の回収率は 80%以上であり、顕著な回収率の低下は見られなかった。このことは添加後に各元素が高濃度条件となり、今回対象とした元素の総濃度は約固体試料換算で 800ppm まで上昇しているが、rCF 分解液試料の容器内で沈澱や容器壁面への吸着等が生じず、添加した元素は安定に溶解し、かつ定量分析が成功したと考えられる。標準規格化を検討する場合は、この高濃度条件での分析の条件も参考にして検討していくべきと考える。

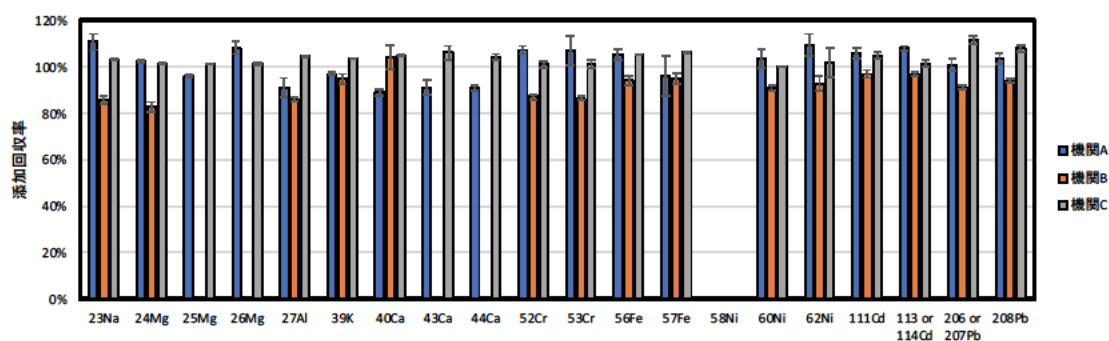


図 2-23. 3 試験機関における試験試料測定の内精度、測定 3 回の相対標準偏差 RSD (1 σ)で表記
出所:産業技術総合研究所

iv. まとめ

本ラウンドロビンテストでは、3 種類の rCF 試料分解処理溶液 (rCF-A, rCF-B, rCF-B-spiked) と空試験試料の計 4 種類の試料を、3 試験機関 (受託環境分析会社、ICP-MS 機器製造会社、公的研究機関) にて、10 種類の元素 (Na, Mg, Al, K, Ca, Cr, Fe, Ni, Cd, Pb) の分析比較試験を行った。各試験機関は異なる ICP-MS 装置や測定条件が異なっていたが、試験機関間のばらつきである室内精度は、各試験機関の定量下限値より高い濃度領域 (1 μ g/L 以上) では 10%未満と良好な精度を得られた。各元素の定量下限値は機関毎で異なるが、rCF 固体換算で概ね 10 ppm(mg/kg)未満と低く、rCF 分解処理時に汚染影響が無ければ rCF 試料に含まれる低濃度の不純物元素分析が可能であることが示唆された。他方、元素が高濃度含有する分解処理液条件でも元素は溶解状態を保持し、定量分析が可能であることが示唆された。今後、開発中の rCF 分解処理法と本分析法と組み合わせて、標準規格化に向けた rCF 試料中の不純物分析法を確立していきたい。

2-2. 欧米諸国等における研究機関調査

2-2-1. 評価試験法比較

rCF の評価手法を標準化するには、国内だけでなく海外でも評価試験を実施し、その試験方法に汎用性があるかを確認する必要がある。当初、不純物元素分析試験についても欧米での性能評価試験をする予定であったが、試験に使用する試料が毒物及び劇物取扱法上の劇物に当たるものとなり輸出ができないため、本事業で実施したフラグメンテーション試験に関して欧州での評価試験を呼びかけた。今回は欧州の 1 大学による協力が得られたものの、新型コロナウイルス感染拡大の影響により試験環境が整わない側面もあったため、同大学での試験結果を得るまでには至らなかった。

また、本評価試験で行った rCF の試料の長さは、通常のフラグメンテーション試験で実施する試料よりも短いため、同研究機関での評価においてジグ等の調整が必要になること、画像撮影時の光の当て方など、rCF 試料の評価に最適化した事前準備に時間をかけておくことが重要であることが分かった。

2-2-2. 評価試験結果の比較検証

本調査では欧米での rCF の評価試験結果を得るまでには至らなかったが、国内でのラウンドロビンテストと同様に、得られたデータの突き合わせから課題の抽出と解決方法について双方で協議する必要がある。

2-2-3. rCF 評価手法の国際標準化に向けて対応すべき課題の検討

本評価試験方法に関して、欧州研究機関と産業技術総合研究所が協議した。欧州研究機関からは本評価試験について、繊維強度分布の測定に有用な方法であるという意見があった。通常の引張試験では繊維強度分布や強度の低下度合いの測定等が難しいが、本評価試験であれば比較的簡単な方法で実施できるうえ、多くの rCF での試験を重ねることで統計的な情報を得ることができるという期待の声もあった。

また、同機関からは rCF に関する評価試験の標準化により、rCF の長さの基準化につながることに評価もあった。現状、欧州では rCF に関して 3mm、6mm、12mm の長さが求められることが多い。今後はこうした rCF の長さの基準化に加え、その長さに適した用途先としてどういうものがあるのか、rCF の出口の明確化も重要となってくる。同機関では、rCF の長さそれに適した用途が明確になれば、rCF ユーザーもそれぞれの用途に応じた使い分けができるという見方をしている。

3-1. で述べる評価試験法での課題と解決方法に加え、海外での評価試験の実施の際は「rCF」よりも「フラグメンテーション試験」に着目して協力してくれる研究機関を探索する必要がある。rCF の評価を実施している海外の研究機関はそもそも少ないが、そうした研究機関がフラグメンテーション試験に関する知見を有しているとは限らない。一方で、フラグメンテーション試験を実施している研究機関は少なくない。今回協議した欧州研究機

関からは、フラグメンテーション試験に知見のある研究機関であれば rCF のフラグメンテーション試験に関する協力の申し出に対し、「非常に前向き」な姿勢を示すだろうという見方もあった。フラグメンテーション試験を実施している研究機関への rCF 評価試験の実績を積み上げながら、本評価試験方法の標準化につなげていくことが有用であると考えられる。

2-2-4. 欧米研究機関の試験法評価

本調査では欧米で rCF の評価試験を実施している研究機関を把握できなかったため(P44で述べるように、rCF の評価試験を発表している研究機関は産業技術総合研究所以外に存在しないと見られる)、欧米研究機関での試験法を国内の研究機関で実施するまでには至らなかった。

2-3. CF 及び CFRP 関連の標準化に関する国内外の動向調査

rCF 評価手法の国際標準化に向け、CF 及び CFRP の関連する各規格の国内外の開発状況等を文献又は Web サイト等から得られる範囲で調査し、将来的に我が国の方向性に沿った標準化テーマの提案に資するための情報を収集、整理した。

2-3-1. 調査方法

下表に示す各国・地域の主要標準化機関のウェブサイトから炭素繊維及び CFRP に関する規格を検索し、データを収集した。

表 2-10. 各国・地域における主要標準化機関のウェブサイト

対象国・地域		対象規格	管理組織ウェブサイト（検索サイト）
国際		IS	国際標準化機構（：ISO）
日本		JIS	日本産業標準調査会（：JISC）
			日本規格協会（：JSA）
欧州		EN	欧州標準化委員会
英国		BS	英国規格協会
ドイツ		DIN	ドイツ規格協会
米国		ASTM	米国試験材料協会
中国	国家標準	GB	国家標準化管理委員会（：SAC）
	業界標準	業界ごと	
	地方標準	地方ごと	

出所: 日本化学繊維協会 炭素繊維協作成

使用した検索キーワードは以下の通り。ただし「Carbon Fiber（米語）」「Carbon Fibre（英語）」の違いでヒットしないことがあるため、ICS 分類コードなどを併用する。しかし検索サイトによっては ICS 検索ができないものもあるため、キーワード検索を優先させ、検索結果を ISC コードで絞り込みを実施した。

表 2-11.図表 検索サイト別検索キーワード

国・地域	検索サイト	検索キーワード			
日本	JISC	炭素繊維	強化プラスチック	繊維強化	補強用糸強化繊維
	JSA				
欧州	CEN	carbon fibre	reinforced polymer 及び reinforced plastics	fibre reinforced	fibre reinforcement
	BSI				
	DIN				
米国	ASTM				
中国	SAC	碳纤维	增强塑料	纤维增强	加强线

表 2-12.国際規格分類（ICS コード）（抜粋）

コード	分類
59	繊維・皮革技術
59.1	複合強化材料
59.100.20	炭素繊維
59.6	紡織繊維
59.60.20	人造繊維
49	航空宇宙工学
49.25	航空宇宙機製造材料
49.25.60	繊維

出所:日本化学繊維協会 炭素繊維協会作成

各検索サイトから収集した規格は、炭素繊維との関連性によって3つに分類（大分類）した。このうち炭素繊維との関連が高い規格について「試験規格」と「製品規格」の2つに分類し（中分類）、製品規格については、さらに「炭素繊維」「中間基材」「コンポジット」の3つに分類した（小分類）。

表 2-13.炭素繊維との関連性

関連性	判断基準
高	炭素繊維・複合材料関連規格であることが明確な場合
中	複合材の規格であるが、素材の詳細は判断できない場合
低	ガラス繊維の規格等、他の複合材料であることが明確な場合

出所:日本化学繊維協会 炭素繊維協会作成

2-3-2. 炭素繊維の標準化規格動向

各検索サイトを使用して行った調査結果を以下に示す。

炭素繊維との関連性が高い規格はその多くが試験法に関するものであり、製品規格は極めて少ない。しかし中国では国家規格（GB）に加え、業界規格や地方規格においても製品規格の制定に積極的な動きがみられる。

全体を通じて rCF に関する規格は確認できなかった。

表 2-14.炭素繊維の標準化規格一覧

規格		炭素繊維				素材不明	炭素繊維 以外	合計
		試験法	製品					
			炭素繊維	中間基材	コンポジット			
国際	ISO	57	0	1	2	16	202	278
日本	JIS	35	0	0	1	28	210	274
EU	EN	28	0	0	0	75	91	194
英国	BS	29	0	0	1	70	240	340
ドイツ	DIN	18	2	5	1	50	251	327
米国	ASTM	4	0	0	1	21	57	83
中国（国）	GB	24	1	3	1	74	114	217
中国（業界）	FZほか	14	1	1	2	15	83	116
中国（地方）	DBほか	3	0	1	4	3	6	17
合計		212	4	11	13	351	1,254	1,846

出所:日本化学繊維協会 炭素繊維協作成

炭素繊維に関する規格の多くは 2000 年以前に制定され、その後改定や確認を経て現在も使用されている。しかし 2017 年に ISO TC61（プラスチック）SC13（複合材及び強化用繊維）に WG7（金属と複合材との接合体）が日本提案で新設されたこともあり、近年は新たに規格制定の動きが活発化している。

2-4. rCF の評価手法に関する国際標準化に関する調査

2-4-1. 国内外（日、欧（英、独、仏、伊）、米）の研究機関などにおける評価手法の開発状況に関する動向調査

(1) 調査概要

名古屋大学において、Web of Science（論文検索ツール）を使用して国内外の研究機関等における rCF の評価手法（力学物性を中心に）の開発状況に関する動向調査を実施した。

新品の CF に関する評価は単繊維引張試験（ISO 11566）、樹脂含浸ヤーン（ストランド）引張試験（ISO 10618）が国際的にも規格化されている。また、国内では産業技術総合研究所のグループからフラグメンテーション試験法を利用した CF の強度を推定する方法が提案されている（Y. Sugimoto et al., Carbon, 161, 83-88 (2020)）。従って、「carbon fiber, recycle, tensile」、「carbon fiber, recycle, single fiber」、「carbon fiber, recycle, tensile」および「carbon fiber, recycle, fragmentation」でそれぞれ検索をし、検索で挙げた論文を全て確認した。

(2) 調査結果

国内外の研究機関等における rCF の評価手法の開発状況に関する動向調査を行った結果、rCF の新評価手法として新たに提案されているものは前述の産業技術総合研究所のグループからの論文しか現状では見つからない。

2-4-2. rCF 評価手法の国際標準化において関係する国内外（日、欧（英、独、仏、伊）、米）の標準化の動向

(1) 調査概要

国際標準化の流れが論文検索から見えなかったため、2-4-1 に続いて、名古屋大学で Web of Science を使用し 国内外の研究機関等における rCF の論文報告動向について調査を実施した。

(2) 調査結果

各キーワード検索における 2010 年以降のヒット件数を示すと「carbon fiber, recycle」1518 件、「carbon fiber, recycle, tensile」302 件、「carbon fiber, recycle, single fiber」93 件、「carbon fiber, recycle, tensile」および「carbon fiber, recycle, fragmentation」4 件が確認できた。キーワード「carbon fiber, recycle」と「carbon fiber, recycle, tensile」の検索結果を図 2-24、図 2-25 に示す。

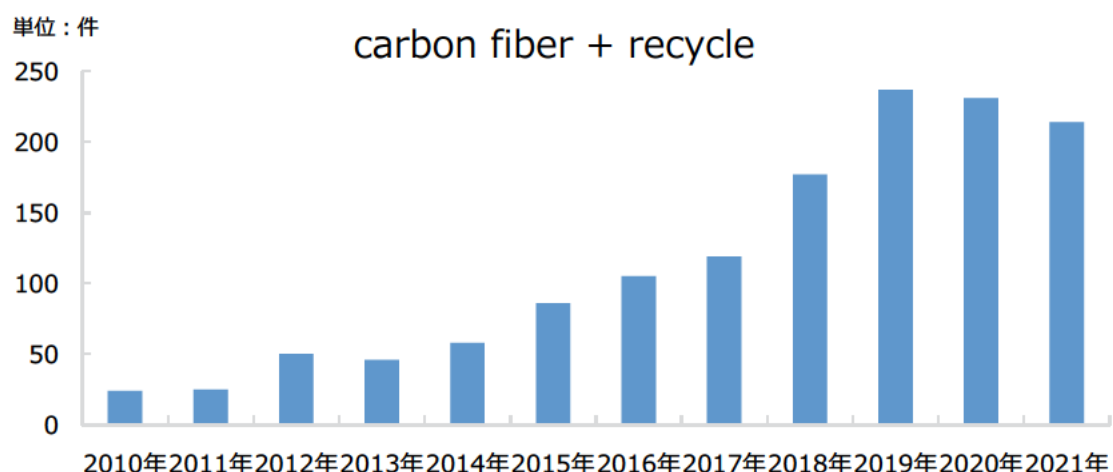


図 2-24. キーワード検索結果（Web of Science）
出所:名古屋大学作成

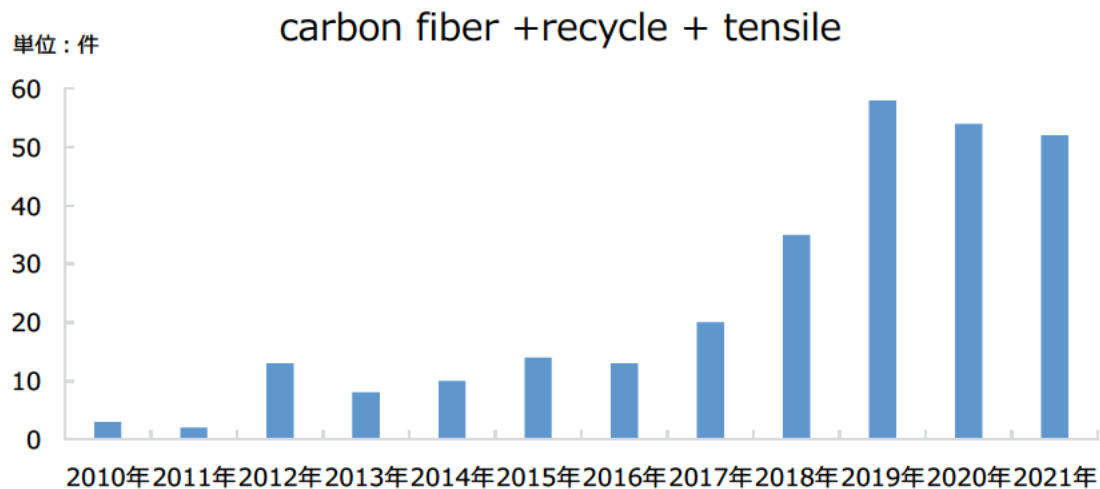


図 2-25. キーワード検索結果 (Web of Science)
出所:名古屋大学

この5年間で論文数が飛躍的に増えている様子が分かる。

国別で見ると、中国が全論文数の約30%、米国7%、韓国が5%と続くが、日本はrCFへの関心が高いと思われている一方で3%未満の発表占有率であった。また欧州においても注視するほどの発表件数を抱えている国は無いのが現状である。

さらに2020-2021年の「carbon fiber, recycle, tensile」でヒットした113件の論文から、国別割合が高かった中国および香港と米国の研究機関（大学等）から報告された39件について、筆者及び筆者の所属報告を分析した。その結果、米国の研究機関からの報告は、他国の研究機関と共著の論文は一報も無かった。一方で、中国からの報告（The University of Nottingham Ningbo China から）のうち、シンガポール所属（James Cook University）の研究者（筆頭著者）との共著論文が2報あり、連携している様子が窺える。また、オーストリアやオーストラリア、イギリスの研究者との共著論文が見受けられたが、それぞれ別の連絡著者となっており、国同士で連携している様子ではない。

最後に、この2年間で3報以上報告している機関を抽出したところ、中国と香港の Beijing University of Chemical Technology、Nanjing Institute of Technology、Harbin Institute of Technology、Shandong University、City University of Hong Kong の4機関であった。

2-4-3. rCF 評価手法の標準化の動向及びルール形成によって創造・拡大できる rCF の国際市場規模

(1) rCF 原料（廃 CF）の発生源

rCF はさまざまなプレコンシューマーやポストコンシューマーから得られるが、それぞれの工程で得られる CF の素性は異なる。図 2-26 と図 2-27 に得られる CF を示す。vCF 製造時や織物製造時に発生するのは CF のみとなるが、プリプレグ（PP）製造時や CFRP 部品製造時、さらに使用済 CFRP 製品からは CF と樹脂が得られる。

CF として回収される廃 CF のうち、vCF 製造時の端材はボビンに残ったヤーンの形で排出されるため長い繊維として回収されており、すでに「くず糸」として再生業者が引き取り CF としてリユースされるケースが多い。そのため本事業で定義するリサイクルされる炭素繊維としての rCF とは異なる原料のため、rCF の原料からは除外するものとして定義した。

織物由来の CF は長い糸に戻すことができないため 30～50mm 程度に裁断され、ミルドやチョップド糸、不織布等の製品としてリサイクルが可能である。

PP 製造時や CFRP 部品製造時で排出された工程内端材の処理方法としては、現状では電炉等によるサーマルリカバリーや埋め立て処理が中心である。マテリアルリサイクルについては欧州や米国で一部製品化されたものがあるが、大部分は少量生産にとどまっている段階である。マテリアルリサイクルの際、rCF を回収するには熱分解等の処理により CF のみを取り出す必要がある。マテリアルリサイクルでは、ミルドやチョップド糸、不織布等への再利用が検討されているが、研究機関やリサイクラーの中には水素タンクから数 m 程度の長さで rCF を取り出す技術開発を進めているところもある。

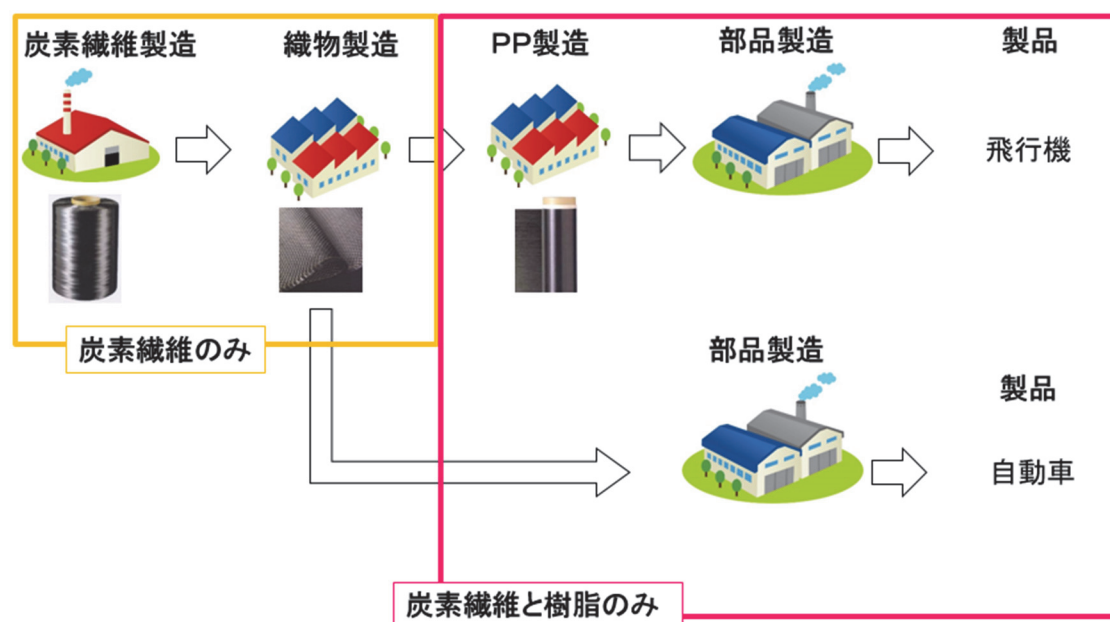


図 2-26. CFRP のサプライチェーンと廃棄物
出所: 東レ

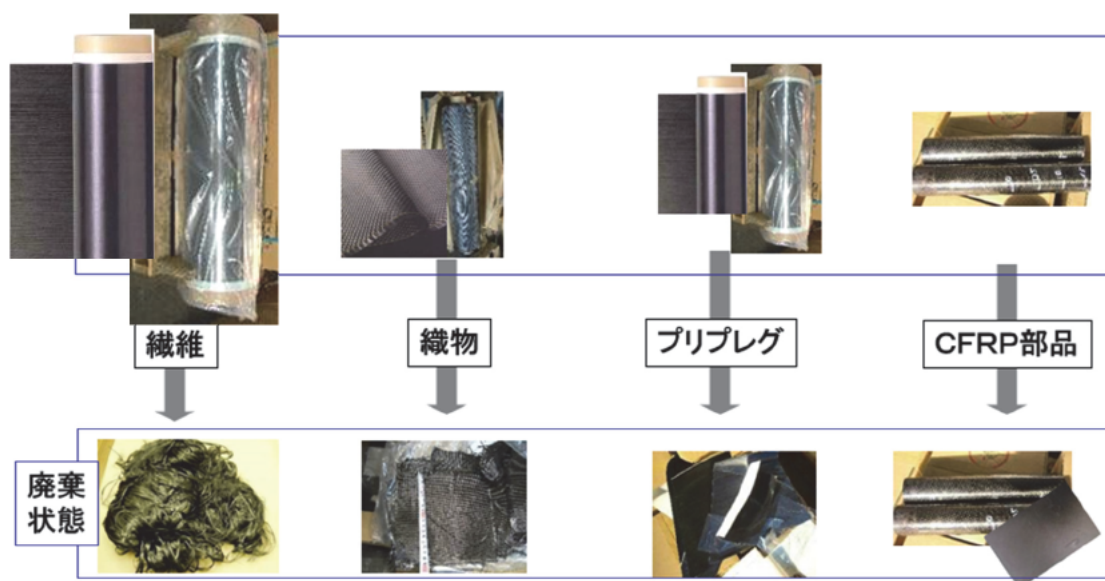


図 2-27.CFRP 製品と廃棄物
出所:東レ

自動車や航空機など最終製品の部材として搭載された CFRP は、耐用年数が過ぎれば全て廃棄物（所謂退役製品）となる。米国モハベ空港で解体を待つ使用済航空機のように野ざらしで保管されるケースもあるが、現時点ではほとんどの製品が耐用年数に達していないものが多い。また、テニスラケットやゴルフクラブのような一般消費財に関しては、消費者が家庭ごみとして排出し地方自治体によって処理されているとみられる。

rCF 市場規模算出のために廃 CFRP 発生量（CFRP 製品の工程内端材量、使用済 CFRP 量）を算出し、廃 CF 発生量を推計した。推計方法を表 2-15 に示す。

表 2-15.廃 CF 発生量推計方法

項目	推計方法
廃CFRP量処分量	CFRP製品の工程内端材発生量 + 使用済CFRP発生量
CFRP製品の工程内端材発生量 (硬化前+硬化後) ※くず糸 (2%) は除く	①CF生産量を推計 ②CF生産量÷Vf55% ③CF生産量×用途別端材発生率
使用済CFRP発生量	【航空機】 ①航空機生産台数から1機種あたりのCFRP使用量を推計 ②耐用年数30年として推計 【一般産業】 ①耐用年数10年として、該当年の廃CFRP発生量算出
廃CF処分量	廃CFRP処分量×Vf55%

出所:矢野経済研究所

(2) CF 発生量

廃 CFRP 発生量を算出するために各種資料³から CF 生産量を推計した。CF 世界市場規模を表 2-16、図 2-28 に示す。

2020 年 CF 生産量は 82,270t に対して 2030 年は 189,270t まで増加すると推計される。CF 市場は新型コロナウイルス感染拡大により航空機用途をはじめとして影響を受けたが 2022 年から徐々に回復しているほか、カーボンニュートラル社会の実現に向けて風力発電用途が急速に増加しているため、今後は風力用途の CF 使用量が大幅に増加すると推定される。

表 2-16.CF 世界市場規模

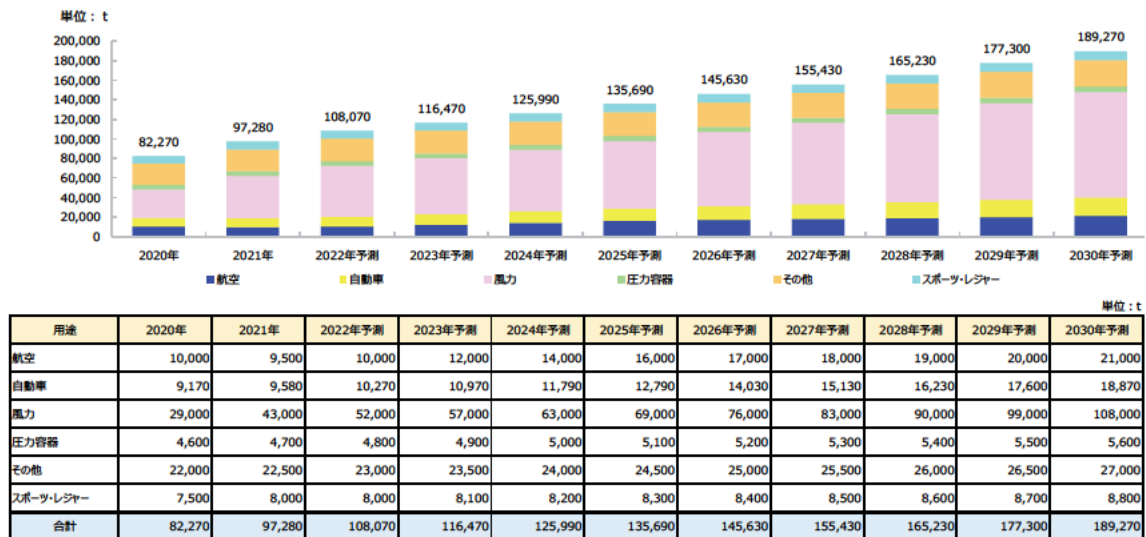


図 2-28.CF 世界市場規模
出所:各種資料から矢野経済研究所作成

³ (株)矢野経済研究所「2011 年版機能性炭素繊維市場の現状と将来展望」、「2021 車載用 CFRP の世界需要予測」、東レ(株)「中期経営課題 “AP-G 2022” 事業説明会 炭素繊維複合材料事業」、(株)三菱ケミカルホールディングス「2020 年複合材料セミナー資料」、(株)帝人「経営概況説明会」等を参考に推計

(3) CFRP 発生量

推定した CF 世界市場規模に対して、CFRP の Vf を 55%として CFRP 世界市場を推計した。推計した CFRP 世界市場規模を表 2-17、図 2-29 に示す。

表 2-17.CFRP 世界市場規模

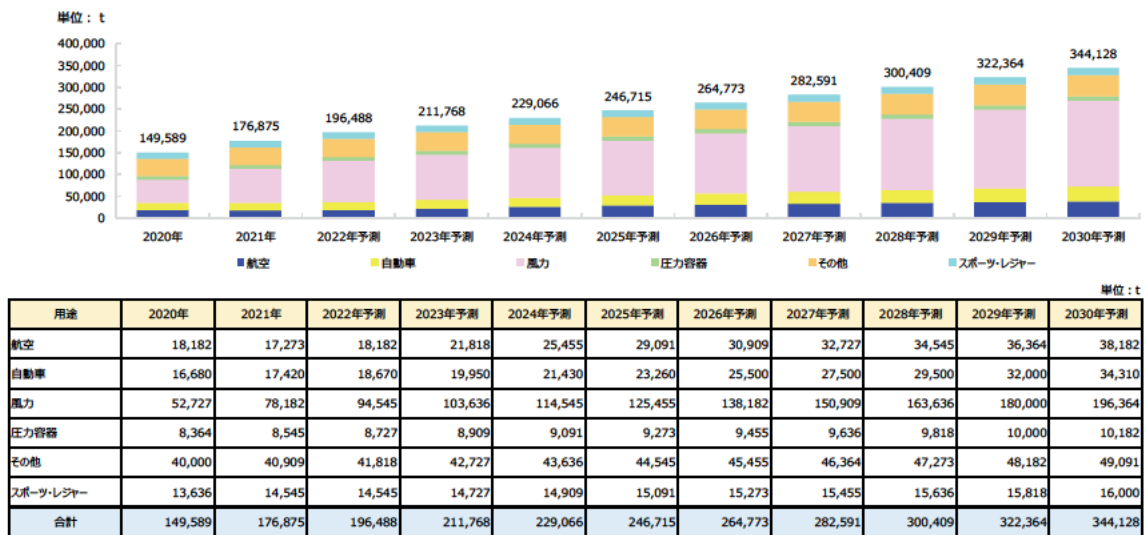


図 2-29.CFRP 世界市場規模
出所:各種資料から矢野経済研究所作成

(4) CFRP 製品の工程内端材

「令和 2 年度地球温暖化・資源循環対策等に資する調査委託費（リサイクル炭素繊維の利用・評価手法等に関する国際動向調査）」で実施した rCF メーカーへのヒアリング結果をもとに CFRP 製品の工程内端材の発生量を推計した。なお、先述の通りすでにリユースされているくず糸分は除外して算出している。CFRP 製品の工程内端材の発生量を表 2-18、図 2-30 に示す。2020 年の工程内端材発生量は 10,476t と推計した。2030 年の工程内端材発生量では 2020 年の 2 倍以上の発生量を見込む。

表 2-18.CFRP 製品の工程内端材発生量

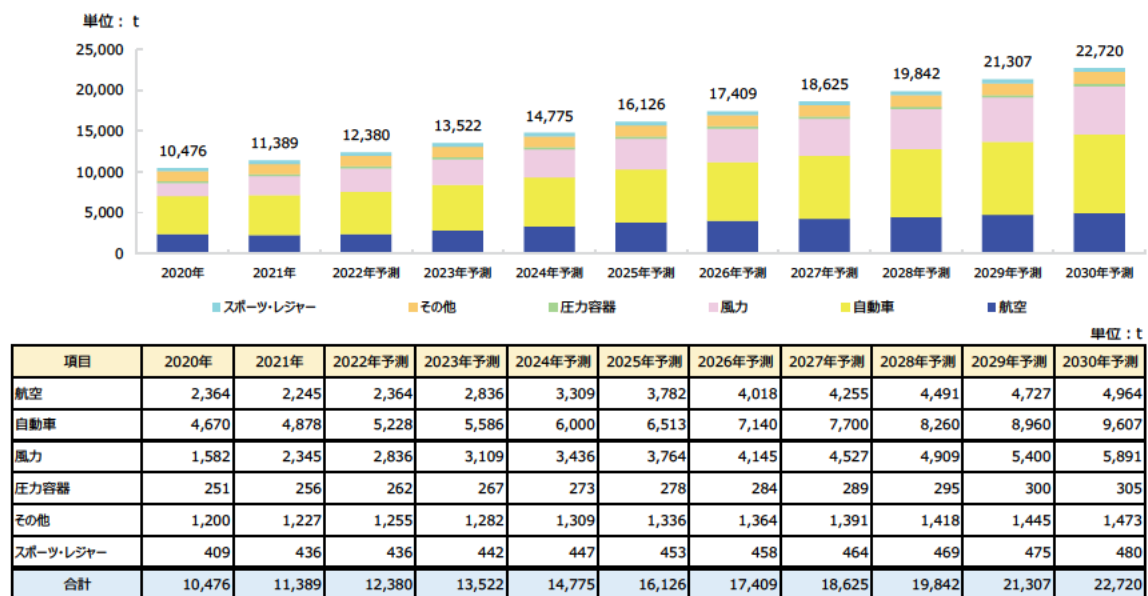


図 2-30.CFRP 製品の工程内端材発生量
出所:各種資料から矢野経済作成

(5) 使用済 CFRP 製品由来の廃材処分量

使用済 CFRP 製品由来の廃材とは、航空機やスポーツ・レジャー用品、自動車等、CFRP を使用した製品が市場として市場に出た製品が耐用年数を終え、使用済製品として廃棄されたものを指す。端材発生量と同様に市場規模に関する統計資料が無いため、製品ごとの CFRP 使用量、用途別 CF 需要量の推計値と、各製品の耐用年数を元に推計した。

耐用年数は、航空機を 30 年、その他（スポーツ・レジャー用品、風力、圧力容器、自動車等）を 10 年とした。

航空機については、一般財団法人 日本航空機開発協会のデータ⁴を元にした 1989 年時点の機種別の受注台数に加え、ヒアリング結果等から該当年の一機種当たりの CFRP 使用データを基に推計した。使用済 CFRP の市場規模を表 2-19、図 2-31 に示す。その結果、2020 年の使用済 CFRP の発生量は 46,481t と推計した。2030 年は CF 需要の増加に伴い、使用済 CFRP の発生量は約 3 倍の 133,947t に達するものと推計した。

表 2-19.使用済 CFRP 製品由来の廃材発生量

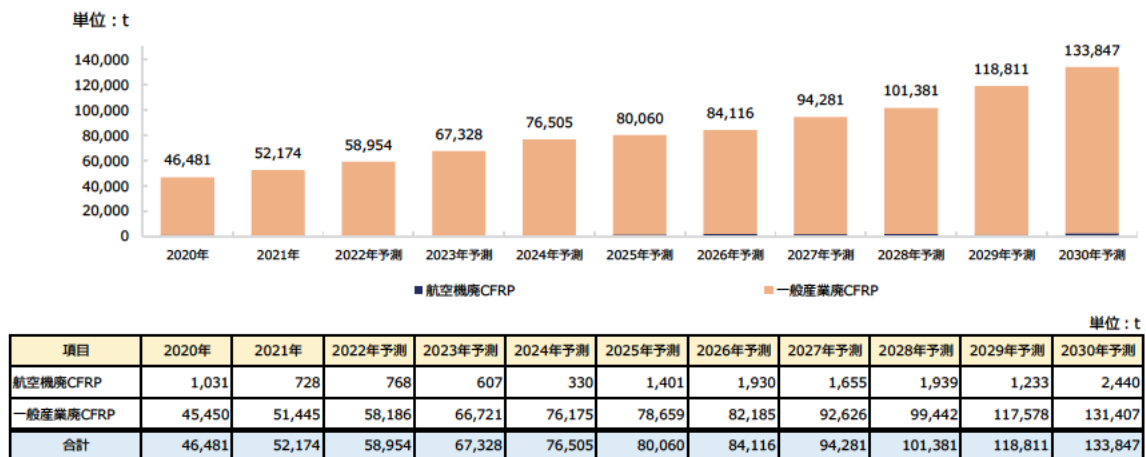


図 2-31.使用済 CFRP 製品由来の廃材発生量
出所:各種資料から矢野経済作成

⁴ 一般財団法人日本航空機開発協会「令和元年度 民間航空機関連データ集」

(6) 廃 CFRP 処分量

推計した CFRP 製品の工程内端材発生量と使用済 CFRP 発生量から廃 CFRP 処分量を推計した。廃 CFRP 処分量を表 2-20、図 2-32 に示す。

表 2-20. 廃 CFRP 処分量

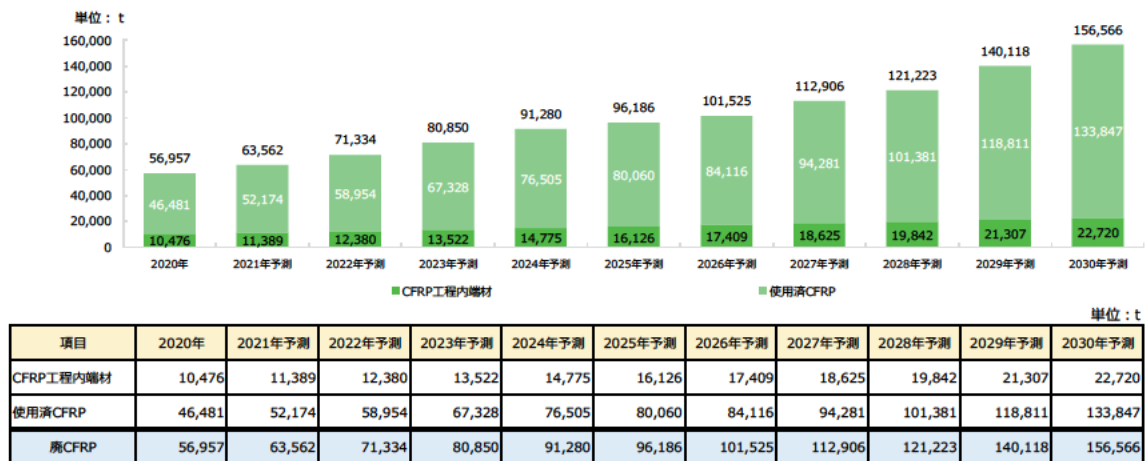


図 2-32. 廃 CFRP 処分量
出所: 矢野経済研究所

(7) 廃 CF 処分量

推計した廃 CFRP 処分量から rCF の原料となる廃 CF 処分量を推計した。廃 CF 処分量を表 2-21、図 2-33 に示す。

2020 年の廃 CF 処分量は 31,326t と推計した。2030 年の廃 CF 処分量は 86,111t を見込む。推計した 2030 年の CF 処分量は 2020 年よりも 2.7 倍増加する可能性がある。

表 2-21. 廃 CF 処分量

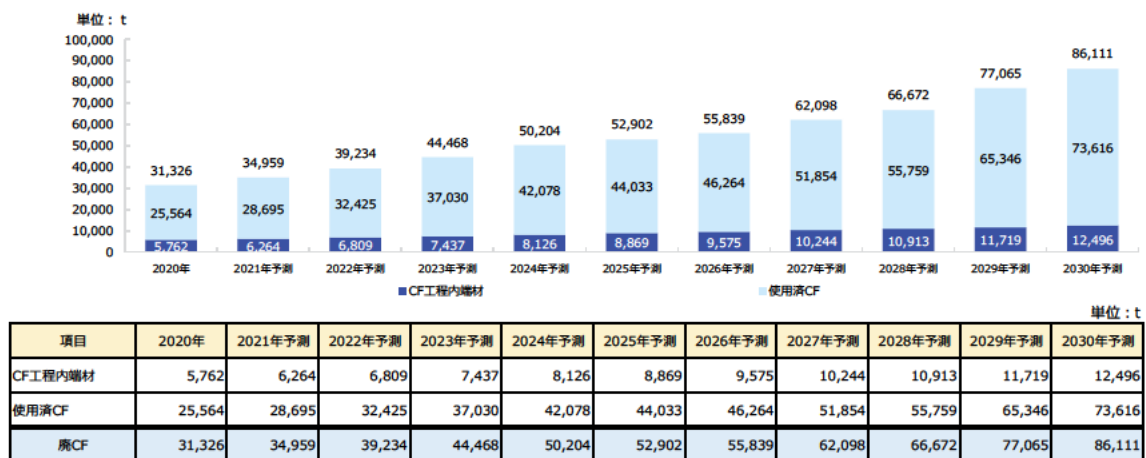


図 2-33. 廃 CF 処分量
出所: 矢野経済研究所

(8) ルール形成がもたらす rCF 市場の成長予測（数量）

推計した廃 CF 処分量について、本事業で検討するルール形成が 2025 年から運用される前提で rCF として廃 CF をリサイクルする使用量を推計した。推計結果を表 2-22、図 2-34 に示す。なお、リサイクル比率は 2025 年までは工程内端材の内 5%を想定し、2025 年以降は 2030 年時点に工程内端材の 30%、使用済品の 10%をリサイクルするシミュレーション①、2030 年時点に工程内端材の 50%、使用済品の 30%をリサイクルするシミュレーション②を想定した。

シミュレーション①の場合、2030 年時点で 1.1 万 t、同②の場合は 2.8 万 t の廃 CFRP がリサイクルされる予測となる。このルール形成によってまず工程内端材のリサイクル率が向上し、ここで培ったノウハウを活かし使用済 CFRP のリサイクルが進むことを想定している。

表 2-22. ルール形成がもたらす rCF 市場の成長イメージ

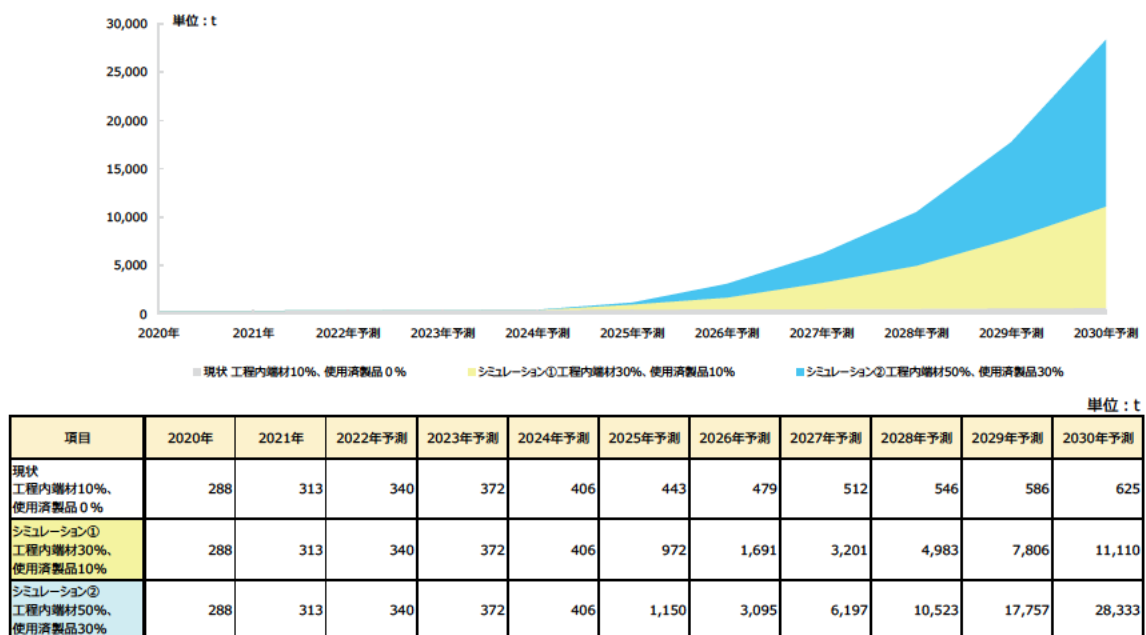


図 2-34.ルール形成がもたらす rCF 市場の成長イメージ
出所:矢野経済研究所

(9) ルール形成がもたらす rCF 市場の成長予測（金額）

rCF 市場の金額ベースの成長予測について、rCF の単価¥2,000/kg と ¥500/kg の 2 パターンを想定したシミュレーション結果を表 2-23 図 2-35、表 2-24 図 2-36 に示す。廃 CF は排出元によってグレードが大きく異なるため、それぞれに合わせた出口戦略が重要であり、各用途に合わせたブランディングや価格戦略などのさらなる検討が必要である。

表 2-23.ルール形成がもたらす rCF 市場の成長イメージ（rCF 単価=¥2,000/kg）

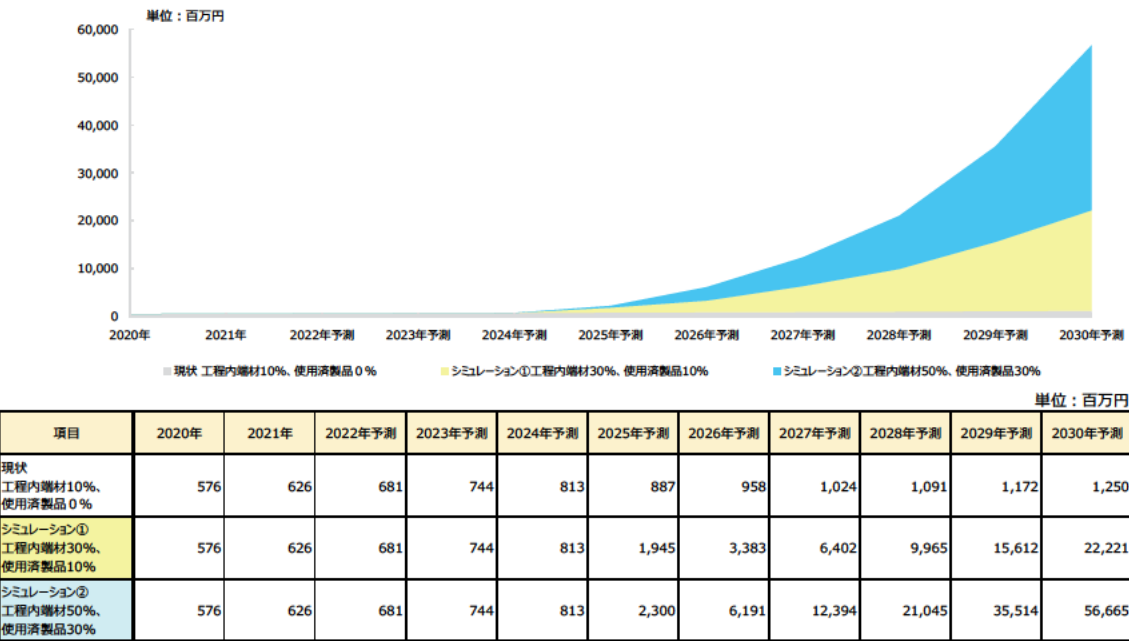


図 2-35.ルール形成がもたらす rCF 市場の成長イメージ（rCF 単価=¥2,000/kg）

出所:矢野経済研究所

表 2-24.ルール形成がもたらす rCF 市場の成長イメージ (rCF 単価=¥500/kg)

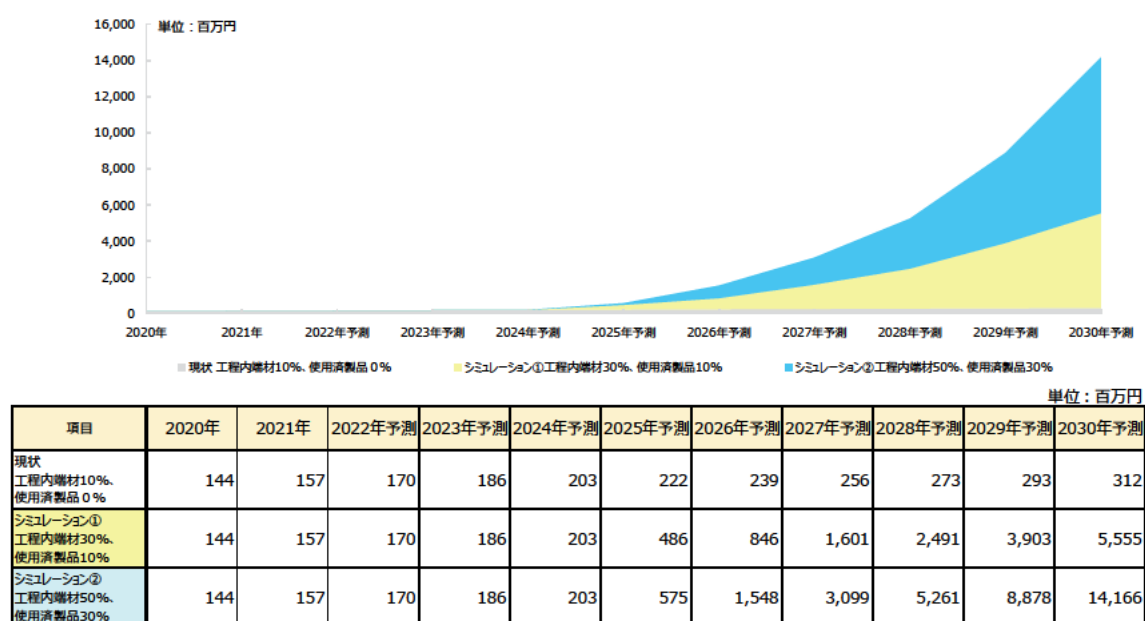


図 2-36.ルール形成がもたらす rCF 市場の成長イメージ (rCF 単価=¥500/kg)

出所:矢野経済研究所

2-4-4. rCF 評価手法に関し、国内外（日、欧）における規制上の制約の有無の調査

国内 CF メーカーや研究機関のほか、欧州自動車メーカー1 社に rCFRP に関するヒアリングを実施した。ヒアリングから、rCF 評価手法に関し、国内外における規制上の制約の有無に関しては特にないという結果であったが、欧州自動車メーカーへのヒアリングでは主に rCFRP の使用に関する検討状況や、rCFRP に対する見解についても確認した。

同社では vCFRP を一部車両のルーフ、ボンネット等に使用している。rCFRP は採用段階には至っていないが、vCF や rCF のコンパウンドの採用を検討している。rCF に関する検討は、コストダウンや製造時の CO2 排出量削減を目的としており、rCF のメカニカルパフォーマンスとのバランスが確保できるか検討を進めている段階である。

rCF を使用するメリットは CO2 削減や省資源化を消費者に提示できることのほか、コストダウンによる収益性の向上が挙げられる。一方、デメリットとしては rCF の繊維長が短く、織物や繊維の作成が困難であることや機械的な性能面が低下すること、さらに安定した資材調達が難しいことにある。他業界も含め、rCF が安定供給できないために採用に繋がっていない可能性が高いという見方をしている。

同社では rCF の採用に必要なポイントについて要件に適応した性能を持ち、vCF より安価であることを重視している。これは資源循環型社会の実現に rCF を使用する意義は高いが、それ以上に性能面で vCF と同等以上のうえでコストメリットを創出できることに採用の意義を見出している。

また、欧州では「CF＝ハイテク、高性能」の代名詞となっている風潮があるため、消費者にとって自動車に使用されている CF はステータスを意味する材料になっており、こうした消費者への訴求のため CFRP を活用する可能性もあるとしている。

また、カーボンニュートラルについて 2040 年に欧州、全世界で 2050 年に達成することを目指して取り組む中で、同社ではリサイクル素材の使用量の増加を進めている。そのため rCF の物性や価格が自動車メーカーの要件に合致し、かつサプライヤーが確立されれば自動車メーカーにおける rCF の採用が進む可能性があると考えている。

2-5. ルール案の検討及びルール形成戦略の策定

2-5-1. 他素材で実施されている規制及び認証制度

(1) 他素材で実施されている認証制度の概要

①調査概要

rCF の標準化とともに、他素材における規制や認証制度の活用例を参考にしながらルール形成を検討する必要がある。すでに認証制度が存在しているアルミニウム、紙、およびバイオプラスチックの認証制度の基準を整理することにより、標準化への策案、ルール素案の検討、今後の rCF に関わる産業発展に繋がる提案に資する情報を整理する。

表 2-25.アルミニウム、紙、バイオプラスチックにおける認証制度一覧

	アルミニウム	紙	バイオプラスチック・バイオマス
主要協会	International Aluminium Institute (IAI)	International Council of Forest and Paper Association	European Bioplastics (EUBP) ※国際レベルでは存在せず、欧州を主体と予測
認証機関	Aluminium Stewardship Initiative	Forest Stewardship Council	—
認証制度	ASI Certification : Performance Standard Certification	FSC Certification : Forest Management Certification, Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC)	・バイオ材料含有率の認証などはないが、EU規格CEN/TS 16137:2011に準拠した製品が取得できる認証はある： OK biobased TUV Austria, DIN Certco ・その他、各国におけるコンポスト可認証（日本も有する）のほか、Seedlingラベルもある（DIN Certo, TUV Austria が承認） ・バイオマス関連認証制度：REDCert, Sustainable Biomass Program (SBP)、Roundtable for Sustainable Biomass (RSB)、Green Gold Labelなど
ロゴ（認証ラベルなど）	   	  	   

出所:各種資料より矢野経済研究所作成

②アルミニウム

アルミニウムにおける国際レベルでの産業機関としては International Aluminium Institute (IAI) がある。1973 年に設立され、アルミニウムの製造における世界のボーキサイトメーカー、アルミナメーカー、アルミニウムメーカーが加盟している。さらには日本を含む各国のアルミニウム協会も加盟メンバーとなっている。近年、当機関ではサステナブルなアルミニウムのバリューチェーンの構築に焦点を当てており、各製造工程でいかに環境に良く、CO₂ の排出を抑制するとともに品質の良いアルミニウムを製造できるかを重要視している。

Aluminium Stewardship Initiative (ASI) は、グローバルな非営利の標準化および認証を実施する団体である。ASI はアルミニウムのバリューチェーンにおける製造者、ユーザーおよびステークホルダーを一つにとりまとめ、持続可能な社会へのアルミニウムの貢献を最大化するために活動を行う。また、ASI は関係者と協力し合い、アルミニウムの責任ある製造、調達および管理について発展していくことを目的としている。同団体が実施するプログラムでは、「ASI Performance Standard」(ASI パフォーマンススタンダード) および「ASI Chain of Custody Standard」(ASI Chain of Custody 認証) という 2 つの自主基準に対す

る保証を提供する認証を取り扱っている。

ASI Performance Standard 認証（PS 認証）は、アルミニウムのバリューチェーンにおける持続可能性の問題に対処することを目的として、環境、社会、ガバナンスの原則と基準を定義したものである。ASI の会員メンバーは「生産と加工」および「産業用ユーザー」のいずれかに遅い方の期間内に、少なくとも 1 つの施設・プラントが ASI PS 認証を取得していることが要求される。

i. ASI Performance Standard 認証概要

ASI PS 認証は、次のような方法で責任あるサプライチェーンの支援をすることを目的としている。

- 環境、社会、ガバナンスのパフォーマンスについて、アルミニウムのバリューチェーンに共通の基準を提供する。
- ASI 認証を付与するための客観的な証拠となる、独立した監査が可能な要件を確立する。
- アルミニウムに対する消費者及びステークホルダーの信頼を強化し、促進する。
- 金属サプライチェーンにおける責任ある生産、調達、マテリアルスチュワードシップのイニシアチブを確立し、改善するための広範な参考資料としての役割を担う。

さらに、ASI PS 認証は、アルミニウムのバリューチェーンに携わる事業体や施設に対して、環境、社会、ガバナンスの持続可能性に取り組むための要件を以下の通り定義・基準付けしている。

表 2-26. ASI PS 認証における要件

ガバナンス	ビジネスインテグリティ、方針とマネジメント、透明性、マテリアルスチュワードシップ
環境	GHG排出量、排出物・廃液・廃棄物、ウォータースチュワードシップ、生物多様性
社会	陣形、労働者の権利、労働安全衛生

出所: ASI PS 認証を参考に矢野経済作成

この規格の発行までの開発経緯としては、PS 認証第 1 バージョン（Version 1）は、IUCN（International Union for Conservation of Nature:国際自然保護連合）調整の下、ASI の基準設定グループ（SSG）によって開発され、2014 年に 2 度のパブリックコメント期間を受け付けた後、同年 12 月に発行された。PS 認証の第 2 バージョン（Version 2）、ASI 標準委員会の下で、1 度のパブリックコメント期間とパイロットプログラムの実施後、改訂版として開発され 2017 年に改訂版として発行されている。改訂版の主な目的は、2015 年から 2017 年にかけて開発された、より広範な ASI プログラムに PS 認証を統合し、ガイダンスの開発と試験運用の間に提起された明確な問題に対処することにあった。主な変更点を下

記に示す。

- ASI スタイルガイドに合わせたレイアウト
- イントロダクションの更新
- 用語集の拡充と定義された用語の一貫した使用の促進
- 監査性向上のため、一部の基準をサブセクションに再構成
- 一部の基準における言語と意図の明確化
- 本基準のガイダンスを含め、2014 年末に第 1 版が発行されて以降に作成された補助文書やプロセスへの言及

ii. 認証制度の取得

ASI の PS 認証は、ASI 認定審査員が認証を付与するために事業者の適合性を検証する。事業者の「認証の範囲」はその事業者により定義され、認証手順を下記に示す。

1. 事業体（企業）は、ASI 認定審査員に認証審査の準備と依頼をする。
2. 審査員は、事業者がパフォーマンススタンダードを遵守するシステムを有していることを確認する。不適合である場合、事業者はそれらに対処するよう指示される。
3. 審査報告書（結果）に基づき、ASI は最大 3 年間の認証を発行できる。また、必要な場合には、認証発行の前に審査員にフォローアップを実施する。
4. 12～18 ヶ月以内に、審査員は認証を取得した事業者の「サーベイランス審査」（定期的検定）を実施し、システムが認証取得当初から継続的にしっかりと機能していることを検証する。不適合性が発見された際にはサーベイランス審査前に対処することが要求される。
5. 認証の有効期間は 3 年とされ、3 年経過後は、認証更新のために再度審査が必要となる。その後また 12～18 ヶ月以内にサーベイランス審査が実施される。

iii. 認証制度の見直し、改訂について

ASI は、規格概要の初版発行（2017 年）から 5 年後の 2022 年までに、または必要に応じてそれ以前に規格を正式に見直すことが要求される。改訂や規格の明確化に関する提案は随時可能で、ASI はそれらを文書化し、次のレビュープロセスで検討することとなる。さらに、ASI は本規格が「適切かつ達成可能」であることを保証できなければならない。

③紙

紙における主体となる認証制度は Forest Stewardship Council (FSC) および Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC) 認証などがある。

i. FSC 認証概要

The Forest Stewardship Council (FSC:森林管理協議会) は、ドイツを拠点とする非営利 (マルチステークホルダー) 組織である。1992 年の国連環境開発会議 (リオデジャネイロにて開催された地球サミット) のフォローアップとして世界の森林を「環境的に適切で、社会的に有益で、経済的に実現可能な方法で管理」することを目的に 1993 年に設立された。

FSC は自主的な認定と独立した第三者認証のシステムを提供する。認証保有者は、「環境的に適切で社会的に有益かつ経済的に実行可能な森林管理」に基づいているものとされ、自社の製品やサービスの提供が許可される。さらに、FSC Principles and Criteria (原則と基準) に基づく FSC Stewardship 基準の策定と承認のための基準も定めているほか、基準に準拠していることを証明する適合性評価機関 (認証機関ともいう) の認定に関する基準も定める。

最初のオリジナル版は 1994 年 11 月に作成され、1996 年、1999 年、2001 年に改訂されている。2009 年 1 月からは「Version 5-0」として基準の抜本的な見直しを行い 2012 年 2 月に改訂が完了した。

Version 5-0 は FSC-PRO-01-001 に従い改訂されており以下に準拠して作成されている:

- ISEAL Code of Good Practice for Setting Social and Environmental Standards (P005 Public Version 4, 2006 年 1 月) 及び ISEAL Code of good Practice for Setting Social and Environmental Standards (P005, Version 5.01, 2010 年 6 月)
- ISO/IEC Guide 59 Code of Good Practice for Standardization (1994 年 2 月)
- WTO Agreement on Technical Barrier to Trade (TBT) , Annex 3: Code of Good Practice for the Preparation, Adoption and Application of Standards (1995 年 1 月)

さらに、セビリア (スペイン) で開催された第 7 回総会において、FSC 会員は、要求事項の明確性と一貫性を高めるために Principles (基準) 6.5, 6.9, 9.1, 10.6 の変更を求める法定動議第 7 番を承認した。これらの変更の結果、FSC Principles and Criteria (原則と基準) の Version 5-1 が作成され、現在の Version 5-2 は、誤字修正後 2015 年 7 月に発行された。

FSC 原則は、「環境的に適切で、社会的に有益かつ経済的に存続可能な森林管理」に不可欠な規則または要素であり、Criteria (基準) は原則が満たされているかどうかを判断するための手段を提供するものとされている。原則は FSC 認証制度の基礎であり、前文および用語集とともに包括的な規格の中核を構成している。

ii. FSC 認証における Principles and Criteria (原則と基準)

FSC 原則と基準では、「Management Unit (管理ユニット)」、「地理的空間」、「植生」、「製品とサービス」、「法律」について表 2-27 に示す。

表 2-27. FSC 認証における原則と基準

管理ユニット	内部または外注かを問わず、管理ユニットに関連する組織のすべての管理活動を対象としている。
地理的空間	(再) 認証のために提出される管理ユニットの境界内の全地理的空間に適用される。しかし、一部の原則と基準は、管理ユニットの境界を越えて適用。これには、FSC の原則と基準で定義された管理ユニットの一部であるインフラ施設も含まれる。
植生	自然林※1、植林地、その他の (すなわち非森林) 植生を含む、あらゆる種類と規模の森林に世界的に適用される。「その他の植生」の概念は、樹木の生育を伴う土地利用に限定されるべきであるが、FSC の使命に貢献するものであれば、原則として「非森林」の土地利用も含まれる。
製品とサービス	木材と非木材林産物の生産、保全※2、保護※2、生態系サービス、その他の利用を対象としている。(生態系サービスには、気候変動の緩和に貢献する炭素の隔離と貯留が含まれる)
法律	世界における責任ある森林管理を支援する他のイニシアチブに取って代わるのではなく、それを補完することを意図する。したがって、FSC 原則と基準は国際的、国内的、地域的な法律や規制と合わせて使用されるものであるが、これらの法律や規制よりも厳しい、あるいは要求の高い規定が含まれている場合がある。

※1 複雑さ、構造、土壌の特性や動植物など、在来生態系の主要な特徴や重要な要素の多くを持ち、全てまたはほとんどすべての木が在来種である森林地域で、植林地として分類されないもの。

※2 特定された環境的または文化的価値を長期的に存在させるために行われる管理活動を指すときに、互換的に使用される。管理活動は、ゼロまたは最小限の介入から、特定された価値を維持する、または維持と両立するよう設計された適切な介入と活動の特定範囲に及ぶことがある (出所: FSC2011)。

出所: FSC 認証を参考に矢野経済研究所作成

文化的、生態的、経済的、社会的環境における予期せぬ変化が、時としてパフォーマンスに悪影響を与える時があるため、FSC は、FSC 原則と基準のすべてに準拠することを求めている。原則と基準はパフォーマンスベースの基準の主要な構成要素であるため、認証の決定は管理活動が各 FSC 基準をどの程度満たしているかどうか、各 FSC 基準を満たさない場合の重要性及び／又は結果により導かれている。

認証機関が評価で検出したパフォーマンスの不適合性は、その不適合要素の重大性に応じて、軽微な是正処置要求 (CAR: Corrective Action Requests) または重大な是正処置要求に分類され、対象事業者は即時に対応する必要がある。 FSC 認証制度ガイドラインにおけ

る原則と基準を表 2-28 に示す。

表 2-28. FSC 認証制度ガイドラインにおける原則と基準

1	法規制の遵守
2	労働者の権利と雇用条件
3	先住民の権利
4	地域社会との係わり
5	森林からの恩恵
6	環境価値と環境影響
7	経営計画
8	モニタリング評価
9	高い保護価値
10	管理活動の実施

出所:FSC 認証を参考に矢野経済研究所作成

iii. 認証取得者による FSC ラベルの使用要件 (FSC-STD-50-001 V2-1)

FSC 認証の認定機関について FSC が認定する認証機関に対する要求事項(FSC-STD-20-001 V4-0) について、Forest Management 認証の審査を行う認定機関は「General Requirements for CBs」(FSC-STD-20-001) のほか、「Stakeholder consultation for forest evaluations」(FSCSTD-20-006)、「FM Evaluations」(FSC-STD-20-007) 及び「Evaluation of FSC CW」(FSC-STD-20-012) に基づいて審査することを要求される。認定機関に求められる条件を表 2-29 に示す。

表 2-29.認定機関に求められる条件

1	認定スコープ
2	法的・契約事項
3	FSCラベルおよび訴求活動
4	認証の付与、維持、延長、削減、一時停止、取り消しおよび復活
5	公平性
6	負債と資金調達
7	無差別的な条件
8	守秘義務
9	苦情・不服申し立て
10	情報の公開

出所:FSC 認証を参考に矢野経済研究所作成

iv. 日本における FSC の創設および FSC 認証制度

「FSC 認証における Principles and Criteria (原則と基準)」の記述のように、「法律」に関しては「国際的、国内的、地域的な法律や規制と合わせて使用されるものであるが、これ

らの法律や規制よりも厳しい、あるいは要求の高い規定が含まれている場合がある」とされている。これを踏まえ、日本の FSC 認証の「法律」においては、「The FSC National Forest Stewardship Standard of Japan」に基づいている。

v. The FSC National Forest Stewardship Standard of Japan (FSC-STD-JPN-01.1-2020 Japan Natural Forests and Plantations EN)

FSC が日本に導入されたのは 1999 年で、速水林業 (SCM-FM/COC-00155P) が自社の森林を認証申請したのが始まりとされる。2000 年に認証が授与され、以来、日本における FSC (Forest Management) 認証保有者数は 2017 年末には 35 社となった。

特定非営利活動法人フォレスト・スチュワードシップ・アライアンス (Specified Nonprofit Corporation Forest Stewardship Alliance) が、2006 年 8 月 23 日に東京で設立され、2007 年 9 月 17 日に FSC 日本ワーキンググループ (現 FSC ナショナルオフィス) として正式に認定された。2017 年末時点で FSC 日本は、19 の組織会員、24 の個人国内会員、および 5 つの賛助会員を擁している。さらに、日本における FSC の普及を目的として、様々なプロモーション活動やイベントの開催、FSC 規範文書の作成・改訂を行い、日本国内の認証書保有者や認証機関を支援している。

vi. 日本における National Forest Stewardship Standard (NFSS) 確立までの背景

National Forest Stewardship Standard 策定の提案は 2015 年 4 月 27 日に発表。その後、SDG 会員が集まり、同年 8 月に規格策定における会議を実施。その後も継続的に会議を繰り返した結果、2018 年 5 月 21 日に The FSC National Forest Stewardship Standard of Japan version 1-0 (FSC-STD-JPN-01-2018 V 1-0) が承認され、同年 11 月 15 日に正式文書が発行、2019 年 2 月 15 日より有効となった⁵。

日本の FSC にて定められている「原則」(Principles) は基本オリジナルの FSC に基づいている一方で、「基準」(Criteria) が日本の森林の状況および特徴に合わせものとなる。また、準拠、対象としている日本の法規制に関しても FSC に記載されている。FSC に含まれる日本の法令を表 2-30 に示す。

⁵ 日本の林業は、諸外国と比較すると特異と思われる点が多々あるとされており、日本版の規格の策定にあたっては、そのような固有の事情を考慮する必要があった。

表 2-30.FSC に含まれる日本の法令

1	収穫に関する法的権利
2	税金と手数料
3	木材伐採活動
4	第三者の権利
5	貿易・輸送
6	デューデイルジェンス／デューケア
7	エコシステムサービス

出所:FSC 認証を参考に矢野経済研究所作成

vii. Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC)

森林（紙製品）の認証制度としては Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC) もあり、日本でも FSC と並行し取得されている認証制度となっている。PEFC は 1999 年に発足し、欧州地域の「汎欧州森林認証制度」(Pan European Forest Certification Schemes) として始まった。その後、2003 年には北米や豪州などが加わり国際化が進んだため、「PEFC 森林認証制度相互承認プログラム」(Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes) に改称され、世界各国の認証制度との相互承認を行う国際認証組織として舵を切った。その後、アジア地域や南米の国々との相互承認も加わり、近年ではアフリカ地域においても積極的な活動を行っている。2019 年 6 月時点で、加盟メンバー国が 51 カ国となっている。FSC と異なる点として PEFC の特徴を下記に記載する。

1. ISO の原則を採用する。
2. 各国の森林認証制度間の相互承認をする。

PEFC の主要目的は、各国の信頼ある認証制度の独立性と自主性を尊重し、それらの認証制度間の一貫性と適合性を実現し、持続可能な森林管理のための統一かつ高レベルの森林認証制度を世界レベルで確立・実施することにある。この相互認証制度を通じて PEFC は同承認を受けた森林認証制度を有するすべての国において実行される認証制度が同一且つ高い水準で維持・運営されていることを検証している。

3. ISO 方式採用の利点:認定の役割。

PEFC が採用する ISO 方式において、公平性を確保するための重要な役割を果たすのが国際認定フォーラムに加盟する原則各国に唯一の認定機関。認定機関は認証機関や審査員などの資源、能力、資質、独立性などに関する厳格な認定審査に基づいて認定することとしている。このような認定を受けた認証機関は、森林管理者、木材・木製品、紙の加工・メーカーなどが森林認証規格が求める要求事項を厳守しているかどうかについて厳格な審査により検証の上、認証している。

4. 森林認証の基準は公的な「政府間プロセス基準」が原則。

PEFC は、世界の 149 カ国の政府が支持する持続可能な森林管理のための国際基準とさ

れる「政府間基準」の採用を基本とし、各国においてはこれらの政府間のプロセスのうち当該自国の政府が参加する基準を自国の森林認証制度が使用する森林規格のベースとすることを原則としている（政府間プロセス基準は、世界の森林環境に応じて異なる）。

1992年の地球サミットの森林保全片の動きを受けて、各国間で持続可能な森林経営のための基準、指標策定のための検討が実施され、政府間のプロセス基準がまとめられた。

表 2-31.PEFC における政府間のプロセス基準

1	ヘルシンキ・プロセス（欧州）
2	モントリオールプロセス（環太平洋）
3	アフリカ木材機関（ATO：Africa）
4	国際熱帯木材機関（ITTO：東南アジア）
5	アジア乾燥森林の地域イニシアチブ
6	乾燥アフリカ地帯における持続可能な管理のための基準および指標
7	タラポト提案：Amazon河流域の森林の持続可能な管理のための基準および指標
8	中近東プロセス
9	レパデリックプロセス

出所：PEFC 認証を参考に矢野経済研究所作成

なお、PEFC 認証の取得にあたり、森林が満たさなければならない「パフォーマンス評価（基準）」は「PEFC International Standard Requirements for Certification Schemes」（PEFC ST 1002:2018）の文書に記載されている要求事項となり、（認証機関による）審査は FSC と類似している。

④バイオプラスチック

バイオプラスチックにおいて国際レベルでの認証機関は存在しないが、欧州の **European Bioplastics (EUBP)** が一番大きなバイオプラスチック協会となっている。同協会は 1993 年にドイツの生分解性ポリマーの協会として設立され、その後バイオベースと生分解性プラスチックの両方を代表する欧州の協会へと発展してきた。**EUBP** は現在、再生可能原料の生産者、加工事業者からユーザー（ブランド）、研究機関、廃棄物管理団体まで、バイオプラスチックにおけるバリューチェーンの全体を通じて約 70 の会員を擁している。

バイオプラスチックの認証制度は現在まだ存在しない。また、バイオプラスチックにおけるバイオ材料含有率に関する認証もないが、EU 規格 **CEN/TS 16137:2011** に準拠した、バイオプラスチック製品（企業）が取得できる認証は存在する：**OK biobased TUV Austria** 及び **DIN Certo**（独）。さらには、バイオプラスチック（特に生分解性バイオプラ）の大きな特徴となる「土に戻る」ということを保証する「コンポスト可」の認証がある（日本も有する）。

そのほか、バイオプラスチックの原料となるバイオマスに関する認証制度は、**REDcert**、**Sustainable Biomass Program (SBP)**、**Roundtable for Sustainable Biomass (RSB)**、**Green Gold Label** などがある。

(2) 開発した基準の各国の規制への引用

①アルミニウム

アルミニウムの場合、アルミニウムという素材を各国の法律の下で管理しているわけではないため、各国への規制への引用はない。PS 認証は Aluminium Stewardship Initiative に加盟している企業が自社のアルミニウム（およびアルミニウムに伴う製造プラント）が認証制度の要求事項に準拠したうえで製造されていることを訴求する制度となる。

②紙

紙の場合は、Forest Stewardship Council 等の主目的として、国が管理している森林から木を伐採し紙の製造を行っていることを保証するため、各国の規制が引用されている。Forest Stewardship Council はドイツを本拠地としているが、日本を含め、各地域にも拠点を持つ。

なお、各国の規制（法令）を引用する際、National Standard と称して FSC のホームページに各国の引用法令が記載されている（伐採権、税金および手数料、木材伐採活動、第三者の権利、貿易・輸送、エコシステムサービスなどに係ってくる法令等）。

さらに、PEFC も FSC 同様、森林の管理に関する認証制度であることから、各国への規制が引用されている。

③バイオプラスチック

バイオプラスチックは現時点では認証制度が確立されていないほか、バイオプラスチックの原料となるバイオマスに関する認証制度についても各国への規制の引用はない。

(3) 開発した基準の各国政府や主要企業の調達基準への引用

①アルミニウム

アルミニウムの場合、Aluminium Stewardship Initiative の認証制度が 2014 年に発行されている。各国政府までの状況は読み取れないが、まだ比較的新しく、同認証制度の以前は認証制度がなかったため主要ユーザー企業にとって重要な調達基準になっていると思われる。また、アルミニウムメーカー側も、自社のホームページ、IR レポート、環境レポートなどで ASI 認証を取得していることを謳っているケースが多いことからユーザー側からも大事な調達基準になることが伺える。さらには、近年、中国企業（アルミニウム産業・市場が大きい）が相次いで取得していることが産業ニュースなどでは報道されている。このような状況を踏まえ、ASI 認証がアルミニウム産業で重要視されていることがうかがえる。

②紙

日本国外において、調達基準という観点からは Forest Stewardship Council 認証がどの程度まで国や企業の「調達判断基準」という位置づけになっているかは明確にはできないが、FSC 認証ラベルが紙製品等に貼付されていることによりしっかりと管理された森林、規制に準拠した方法で作られていることが明確化されるため、「判断基準の一つ」になっていることが推測される。

一方で、アルミニウムの ASI 認証と少し異なり FSC 認証の場合は、認証の取得がユーザーおよび調達先への訴求になると同時に、FSC 認証を取得する企業が自社製品・木材がしっかりと（国の法律により）管理された森林から伐採されている、違法に森林を活用していない、という点も訴求している。

※このようなことから、FSC（国の管理下）の森林を使用した製紙・木材がどこまでユーザー側にとって「認証の有無による判断基準」になるかは判断しきれない。

i. 日本のグリーン購入法による紙製品の調達推進

平成 12 年 5 月に循環型社会形成推進基本法の個別法の一つとして「国などによる環境物品などの調達の推進等に関する法律（グリーン購入法）」が制定されている。同法は、国などの公的機関が率先して環境物品など（環境負荷低減に資する製品・サービス）の調達を推進するとともに、環境物品等に関する適切な情報提供を促進することにより、需要の転換を図り、持続的発展が可能な社会の構築を推進することを目指している。さらに、国などの各機関の取り組みに関するもののほか、地方公共団体、事業者及び国民の責務等についても定めている。

表 2-32. グリーン購入法の対象分野

①紙類	②文具類	③オフィス家具等	④画像機器等	⑤電子計算機等	⑥オフィス機器等	⑦携帯電話等
⑧家電製品	⑨エアコンディショナー等	⑩温水器等	⑪照明	⑫自動車等	⑬消火器	⑭制服・作業服等
⑮インテリア・寝袋寝具	⑯作業手袋	⑰その他繊維製品	⑱設備	⑲災害備蓄用品	⑳公共工事	㉑役務
㉒ごみ袋等						

出所:環境省「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律」を参考に矢野経済研究所作成

③バイオプラスチック

「グリーン購入法」は令和元年（2019 年）に見直しが行われ、特定調達品目に係る判断の基準等が変更された。結果、1 品目が特定品目に追加され、2 品目が削除された。さらには 37 品目の判断の基準なども見直されることとなった。

見直しの背景には、プラスチック資源循環戦略への対応、特定の化学物質に係る JIS 規格への対応、JIS 規格の名称変更への対応などといった「分野横断的な対応」が挙げられる。特に 2019 年 5 月 31 日に政府が策定した「プラスチック資源循環戦略」への対応としては、同戦略の重点戦略の一つとしてプラスチック資源循環において「再生材・バイオプラスチックの利用促進」が含まれているほかマイルストーンとして 2030 年までにバイオマスプラスチックを約 200 万トン導入すること、その施策の一つとして「可燃ごみ用指定収集袋などの燃やさざるを得ないプラスチックにおけるバイオマスプラスチックの使用」と具体的に明記されているため、グリーン購入法は国・地方公共団体による環境用品等の率先的な公共調達を推進する立場から、再生材・バイオプラスチックの需要の拡大や、リデュース等を通じた海洋プラスチック対策などへの貢献を期待されている。その結果、バイオマスプラ（ごみ袋）が追加され、バイオプラスチックもグリーン購入法の対象となった。

(4) 開発した基準を用いた認証制度の構築

①アルミニウム

前項でも記述したように、ASI の PS 認証では、認証を取得する際に満たす必要のある要件が大きくガバナンス、環境、社会性に分けられている。また、各分野で事業管理、廃棄物管理、スクラップ管理、従業員の管理などが求められており、アルミニウム関連事業であるボーキサイト、アルミナ、アルミニウムメーカーが準拠することが求められる（自己評価の後に監査審査を申請する）。

なかでもマテリアルスチュワードシップ（Material Stewardship）⁶は rCF の認証制度の構築において将来的に参考となる事項であると思われる。具体的要件は以下の通りとなる。

i. （ガバナンス）マテリアルスチュワードシップ

マテリアルスチュワードシップの要件では、企業（事業体）は、「ライフサイクルの視点に立ち、事業内およびバリューチェーン内でアルミニウムの資源効率、回収、リサイクルを促進することを約束する」と記されている。さらに、具体項目としては「環境面での LCA」（Environmental Life Cycle Assessment）、「製品設計」（Product Design）、「アルミニウムの工程内スクラップ」（Aluminium Process Scrap）および「使用済み製品の回収・再資源化」（Collection and Recycling of Products at End-of-Life）が挙げられている。

「環境面での LCA」（Environmental Life Cycle Assessment）

1. アルミニウムが使用されている主要な製品ラインのライフサイクルの影響を評価する。
2. 顧客の要求に応じて、事業者はアルミニウム（を含む）製品に関する適切な「Cradle-to-Gate」間での LCA 情報を提供しなければならない。
3. Cradle-to-Gate:原料調達、製造、使用、廃棄までの全プロセス
4. LCA に関する「公的な」コミュニケーションは、LCA 情報、システムの境界を含むその基礎となる仮定への一般公開を含むことを要求する。

「製品設計」（Product Design）

1. 半製品、材料変換、またはアルミニウムを含む消費者／商業製品の製造または販売に従事する事業者は、製品または部品の設計・開発工程において、最終製品の環境ライフサイクル影響を含む持続可能性を高めるための明確な目標を統合するものとする。

「アルミニウムの工程内スクラップ」（Aluminium Process Scrap）

1. 自社の事業活動におけるアルミニウムの工程内スクラップの発生を最小限にし、発生した場合は、100%回収、リサイクル、再利用を目標とすること。

⁶ マテリアルスチュワードシップ:価値の最大化のための体系的取り組み
https://mric.jogmec.go.jp/public/current/11_20.html

2. 事業者は、アルミニウム合金及びグレードを分別し、リサイクルするよう努めることを要求する。

ii. 「使用済み製品の回収・再資源化」(Collection and Recycling of Products at End-of-Life)

1. 具体的なスケジュール、活動、目標を含むリサイクル戦略を実施すること。
2. 地元、地域、国の回収・リサイクルシステムと連携し、それぞれの市場におけるアルミニウム含有量の把握とリサイクル率向上のための努力を支援すること。

※上記は LCA の比較により、マテリアルリサイクルが環境にとって最良の選択肢でないことが実証されているアルミニウムを含む製品を除外している。

なお、マテリアルスチュワードシップのほかに、rCF との直接比較にあたって、環境面での要件（情報開示）も重要視する必要がある。ASI の PS 認証では、環境に関して以下の様な要件が要求されている。

iii. (環境) GHG 排出

国連気候変動枠組条約で定められた目標を考慮し、事業者は地球気候への影響を軽減にあたり、GHG 排出量の削減に取り組むことが要求されている。

iv. GHG 排出量およびエネルギー使用量の開示

1. 重要な GHG 排出量とエネルギー使用量を排出源別に毎年計上し公表することが要求される。

v. GHG 排出量の削減

1. 期限付き（一定の時期を目標とした）GHG 排出量削減目標を公表し、達成するための計画を実施することが要求される。目標は、直接（スコープ 1）及び間接的（スコープ 2）な GHG 排出の重要な排出源をカバーすることを要求されている。

vi. アルミニウム製錬に従事する事業者への要求事項

1. 直接的な GHG 排出の抑制にあたり必要な管理システム、評価手順、業務管理を導入していることを証明することを要求されている。
2. 2020 年までに設置されたアルミニウム製錬所については、アルミニウムの生産に伴うスコープ 1 及びスコープ 2 の GHG 排出量が、2030 年までにアルミニウム 1 トン当たり 8 トン CO₂-eq 未満であることを証明することを要求されている。
3. 2020 年以降に生産を開始するアルミニウム製錬所については、アルミニウムの生産に起因するスコープ 1 及びスコープ 2 の GHG 排出量が、アルミニウム 1 トンあたり 8 トン CO₂-eq 以下のレベルであることを証明することを要求されている。

vii. (環境) 排出物・廃液・廃棄物

事業者は、人の健康や安全、環境に悪影響を及ぼす可能性のある排出物や排水を最小限に抑え、廃棄物削減の階層にしたがって廃棄物を管理することを要求される。

viii. 大気への排出

1. 人・環境に悪影響を及ぼす大気への排出を定量化し、報告し、これらの悪影響を最小化する計画を実施することを要求されている。

ix. 水域への排出

1. 人間または環境に悪影響を及ぼす水域への排出を定量化し報告し、これらの悪影響を最小化する計画の実施を求められる。

x. 流出・漏出の評価および管理

1. 流出・漏出が大気、水、土壌を汚染する可能性のある、操業の主要リスク領域の評価を実施することを要求されている。
2. 評価完了後、事業者は、漏れたりしたものを防止・検出するための管理・外部コミュニケーション計画、遵守管理、モニタリングプログラムを実施することを要求されている。

xi. 流出の報告

1. 流出などの後、直ちにその量、種類、潜在的な影響を、影響を受ける当事者に開示するものとする。また、流出の影響評価及び実施された是正措置を公表し、毎年公表すること。

xii. 廃棄物管理および報告

1. 廃棄物軽減ヒエラルキー (Waste Mitigation Hierarchy) に従って設計された廃棄物管理戦略を実施することを要求されている。
2. 事業体から発生する有害・非有害廃棄物の量、および関連する廃棄物処理方法を、年単位で公表することを要求されている。

上記要件のほか、ASIP S 認証ではさらに人権、労働権利、従業員における健康・安全面、水のスチュワードシップ、政策・管理なども認証取得に必要な評価基準として挙げられている。

②紙

FSC 認証制度における原則と基準を表 2-33 に示す。FSC 原則と基準では、先述の表 2-27 に示す通り定められている。

表 2-33. FSC 認証における原則と基準

管理ユニット	内部または外注かを問わず、管理ユニットに関連する組織のすべての管理活動を対象としている。
地理的空間	(再) 認証のために提出される管理ユニットの境界内の全地理的空間に適用される。しかし、一部の原則と基準は、管理ユニットの境界を越えて適用。これには、FSC の原則と基準で定義された管理ユニットの一部であるインフラ施設も含まれる。
植生	自然林※1、植林地、その他の（すなわち非森林）植生を含む、あらゆる種類と規模の森林に世界的に適用される。「その他の植生」の概念は、樹木の生育を伴う土地利用に限定されるべきであるが、FSCの使命に貢献するものであれば、原則として「非森林」の土地利用も含まれる。
製品とサービス	木材と非木材林産物の生産、保全※2、保護※2、生態系サービス、その他の利用を対象としている。（生態系サービスには、気候変動の緩和に貢献する炭素の隔離と貯留が含まれる）
法律	世界における責任ある森林管理を支援する他のイニシアチブに取って代わるのではなく、それを補完することを意図する。したがって、FSC原則と基準は国際的、国内的、地域的な法律や規制と合わせて使用されるものであるが、これらの法律や規制よりも厳しい、あるいは要求の高い規定が含まれている場合がある。

※1自然林：複雑さ、構造、土壌の特性や動植物など、在来生態系の主要な特徴や重要な要素の多くを持ち、すべてまたはほとんどすべての木が在来種である森林地域で、植林地として分類されないもの。

※2保全／保護：特定された環境的または文化的価値を長期的に存在させるために行われる管理活動を指すときに、互換的に使用される。管理活動は、ゼロまたは最小限の介入から、特定された価値を維持する、または維持と両立するよう設計された適切な介入と活動の特定範囲に及ぶことがある（出所：FSC2011）。

出所:FSC 認証を参考に矢野経済研究所作成

文化的、生態的、経済的、社会的環境における予期せぬ変化が、時としてパフォーマンスに悪影響を与える時があるため、FSC は、FSC 原則と基準のすべてに準拠することを求めている。原則と基準はパフォーマンスベースの基準の主要な構成要素であるため、認証の決定は管理活動が各 FSC 基準をどの程度満たしているかどうか、各 FSC 基準を満たさない場合の重要性及び／又は結果により導かれている。

認証機関が評価で検出したパフォーマンスの不適合性は、その不適合要素の重大性に応じて、軽微な是正処置要求（CAR:Corrective Action Requests）または重大な是正処置要求に分類され、対象事業者は即時に対応する必要がある。

FSC 認証制度ガイドラインにおける原則と基準を表 2-34 に示す。

表 2-34. FSC 認証制度ガイドラインにおける原則と基準

1	法規制の遵守
2	労働者の権利と雇用条件
3	先住民の権利
4	地域社会との係わり
5	森林からの恩恵
6	環境価値と環境影響
7	経営計画
8	モニタリング評価
9	高い保護価値
10	管理活動の実施

出所:FSC 認証を参考に矢野経済研究所作成

③バイオプラスチック

バイオプラスチックは現時点では認証制度は存在しない。

2-5-2. ルールを普及するための具体的な戦略策定の提案

(1) リサイクル品の定義

①アルミニウム

アルミニウムのリサイクル品としての「定義」はないが、アルミニウム業界全体で共通の定義でリサイクル品の位置づけを設けている（各社が「自主申告」している状況にある）。また、アルミニウムのリサイクル品に関して「自主申告」する環境主張の要求事項を規定した ISO 14021 に従った定義もアルミニウム産業では適用している。同規格では、「環境」に対する主張・アピールで使用される用語の定義に加え規格の準拠により使用する権利を与えている。アルミニウム産業で共通して使用されるリサイクル品としての定義を表 2-35 に、ISO14021 におけるプレコンシューマーおよびポストコンシューマースクラップの定義を表 2-36 に示す。

表 2-35. アルミニウム産業で共通して使用されるリサイクル品としての定義

リサイクル内容	製品に含まれるプレおよびポストコンシューマースクラップの両方を対象としている。
プレコンシューマースクラップ	アルミおよびその合金の製造、半成型品および最終製品の製造から発生するスクラップ。（製造工程で発生するスクラップ）
ポストコンシューマースクラップ	使用済み製品を廃棄する際に発生するアルミスクラップ。リサイクル工場で再熔解される前に回収・選別される必要がある。

※プレコンシューマースクラップは、再熔解のためにリサイクル工場に直接戻される。

出所: Norsk Hydro ASA 資料を参考に矢野経済研究所

表 2-36. ISO14021 におけるプレコンシューマーおよびポストコンシューマースクラップの定義

プレコンシューマースクラップ	製造工程で発生した廃棄物からの材料・工程内で発生した再加工品、再粉碎品、スクラップなど、発生した工程内で再生利用が可能な材料は除外される。
ポストコンシューマースクラップ	家庭や商業・工業・施設において使用済み材料を指す。流通過程からの返品も含まれる。

出所: Norsk Hydro ASA 資料を参考に矢野経済研究所

②紙

古紙の定義を下記に記載する。

古紙とは、製紙原料として回収されたものを指し、法令上は「資源の有効な利用の促進に関する法律」の通達（3 生局第 343 号平成 3 年 12 月 24 日）「紙製造業に属する事業を行う者の古紙の利用に関する判断基準となるべき事項を定める省令等の運用について」では、次のよう定義している。

紙、紙製品、書籍等その全部又は一部が紙である物品であって、一度使用され、又は使用されずに収集されたもの、又は廃棄されたもののうち、有用なものであって、紙の原料として利用することができるもの（収集された後に輸入されたものも含む。）又はその可能性があるもの。ただし、紙製造事業者の工場又は事業場（以下「工場等」という。）における製紙工程で生じるもの及び紙製造事業者の工場等において加工等を行う場合（当該紙製造事業者が、製品を出荷する前に委託により、他の事業者加工を行わせる場合を含む）に生じるものであって、商品として出荷されずに当該紙製造事業者により紙の原材料として利用されているものは除く。

③バイオプラスチック

バイオプラスチック自体が黎明期にあるためリサイクル品としての定義はない。一方で、バイオプラスチック樹脂、バイオプラスチック製品に対してのバイオベース原料の含有率に関しては、アルミニウムのリサイクル品同様、自主申告制であり、バイオプラスチックメーカーは自社のバイオプラ樹脂のバイオマス含有率を公表しているケースが多数ある。

(2) 材料品の品質規定

①アルミニウム

アルミニウムにおける品質規定を表 2-37 に示す。

表 2-37.アルミニウムの品質規定

2000系アルミニウム合金	Al-Cu-Mg系合金
3000系アルミニウム合金	Al-Mn系合金
4000系アルミニウム合金	Al-Si合金
5000系アルミニウム合金	Al-Mg合金
6000系アルミニウム合金	Al-Mg-Si系合金
7000系アルミニウム合金	Al-Zn-Mg系合金

出所: 日本アルミニウム協会資料を参考に矢野経済研究所

②紙

古紙のグレードは R70、R80、R90、R100 の 4 種類であった。

③バイオプラスチック

バイオプラスチックに関しては、アルミニウムや紙のような「グレード」の品質規定はないものの、海洋プラスチック問題、マイクロプラスチック問題等の環境問題を重要視したうえで、生分解性度やバイオベース度の評価方法として ISO 国際規格にて専門委員会 TC61（プラスチック）、分科委員会 SC14（環境側面）で審議、発行している⁷。

良好な海洋生分解性をもち、バイオマスから生産される新しい（良い）機能を持つプラスチックは、ISO 規格の要求事項による認証システムで認証され、市場導入の促進を要求される。

⁷ 海洋生分解度の評価法も ISO として定義される。

(3) 通商ルール（廃棄物扱い品）

①バーゼル条約

廃棄物の通商ルールに関しては、バーゼル条約および OECD 議会決定による加盟国・非加盟国間の規定が挙げられる。バーゼル条約に関しては廃プラスチックの越境移動の管理を強化するにあたり、条約が見直され、新しい改訂版が 2021 年 1 月より有効になっている（以下参照）。これを踏まえ、通商ルールではバーゼル条約および OECD における廃プラスチックをはじめとする廃棄物を対象とし輸出入の状況を整理する。

2017 年に中国がプラスチックの廃棄物（以下、「廃プラスチック」という。）の輸入規制を実施した。その後、中国に代わり東南アジア諸国への廃プラスチックの輸出が増加したが、これらの廃プラスチックが、輸入国におけるリサイクルの過程で不適切に処理され、環境汚染を引き起こしていると指摘され、その結果、東南アジア諸国において輸入規制が実施されている状況にある。この問題を解決するため、「バーゼル条約第 14 回締約国会議（COP-14、2019 年 4 月 29 日～5 月 10 日）は、プラスチック廃棄物の越境移動の管理を強化し、当該廃棄物に適用される条約の範囲を明確にする目的で、条約附属書 II、VIII、IX の改正を採択した。」（バーゼル条約ホームページ抜粋）

改正版は、2021 年 1 月より有効となり、批准国による廃プラスチックの輸出にさらなる制限が設けられた。

※以降、バーゼル条約の規制対象となる廃プラスチックを輸出する際、相手国（輸入側）の同意が必要となった。

新条項では、ほとんどの廃プラスチックを、「自由に取引できる材料」として確保されたカテゴリーから、バーゼル条約の要件に従う以下の 2 つのカテゴリー、およびバーゼル条約の要件に基づかないカテゴリーに分類されている。

1. ほとんどの非有害物（Non-hazardous）プラスチックおよび廃棄物を対象とし、汚染されたもの、他のスクラップ・廃棄物と混合したもの、ほとんどの混合廃プラが対象となる（Annex VIII の A3210 対象）
2. バーゼル条約で有害廃棄物に分類される廃プラスチックを対象。該当する廃プラを輸出する批准国は、輸入国側からその輸出物を受け入れるという書面による合意が必要とされる（Annex IX の B3011）
3. 事前通知・同意の対象ではなく、事前に選別され、正常且つ汚染されておらず、「環境にやさしい方法」でリサイクルされる廃プラスチック（Annex II の Y48）

表 2-38. 改訂版バーゼル条約 Annex IX (B3011)、Annex VIII (A3210)、Annex II (Y48)

バーゼル条約 Annex IX B3011	
B3011	廃プラ（附属書Ⅱの関連項目Y48及びリストA A3210に注意）： ・ただし、汚染や他の種類の廃棄物がほとんどなく、環境に配慮した方法でリサイクルすることを目的とするものに限る。 ※「汚染や他の種類の廃棄物がほとんどない」ことに関連して、国際規格や国内規格を参考とできる。 ⇒ほとんど1種類の非ハロゲンポリマーからなる廃プラであり、以下のポリマーを含むがこれに限定されない。 ポリエチレン（PE） ポリプロピレン（PP） ポリスチレン（PS） アクリロニトリルブタジエンスチレン（ABS） ポリエチレンテレフタレート（PET） ポリカーボネート（PC） ポリエーテル ⇒廃プラ1種類の樹脂の硬化物または縮合物からなるほぼ唯一のもので、以下の樹脂を含むがこれらに限定されない： 尿素ホルムアルデヒド樹脂 フェノールホルムアルデヒド樹脂 メラミンホルムアルデヒド樹脂 エポキシ樹脂 アルキド樹脂 ⇒廃プラのほとんど以下のフッ素系ポリマーのいずれかからなるもの パーフルオロエチレン／プロピレン（FEP） パーフルオロアルコキシアルカン： テトラフルオロエチレン／パーフルオロアルキルビニルエーテル（PFA） テトラフルオロエチレン／パーフルオロメチルビニルエーテル（MFA） ポリフッ化ビニル（PVF） ポリフッ化ビニリデン（PVDF） ・PE、PP、PETからなる廃プラの混合物。ただし、各材料を別々にリサイクルするために、環境に配慮した方法で、汚染や他の種類の廃棄物がほとんどない場合に限る。
バーゼル条約 Annex II Y48	
Y48	以下を除く混合物を含む廃プラ： ・第18条第1項(a)の規定により有害廃棄物とされる廃プラ ・環境に配慮した方法で再利用されることを目的とし、汚染や他の種類の廃棄物がほとんどないものに限る、以下リストの廃プラ ⇒以下のポリマーを含むが、同リストに限定されない、1 種類の非ハロゲン化ポリマーからほぼ構成されるプラスチック廃棄物 ※締約国は、この項目に関して、より厳しい要件を課せる。 ポリエチレン（PE） ポリプロピレン（PP） ポリスチレン（PS） アクリロニトリルブタジエンスチレン（ABS） ポリエチレンテレフタレート（PET） ポリカーボネート（PC） ポリエーテル ⇒廃プラ1種類の樹脂の硬化物または縮合物からなるほぼ唯一のもので、以下の樹脂を含むがこれらに限定されない 尿素ホルムアルデヒド樹脂 フェノールホルムアルデヒド樹脂 メラミンホルムアルデヒド樹脂 エポキシ樹脂 アルキド樹脂 ⇒廃プラのほとんど以下のフッ素系ポリマーのいずれかからなるもの パーフルオロエチレン／プロピレン（FEP） パーフルオロアルコキシアルカン： テトラフルオロエチレン／パーフルオロアルキルビニルエーテル（PFA） テトラフルオロエチレン／パーフルオロメチルビニルエーテル（MFA） ポリフッ化ビニル（PVF） ポリフッ化ビニリデン（PVDF） ・PE、PP、PETからなる廃プラの混合物。ただし、各材料を別々にリサイクルするために、環境に配慮した方法で、汚染や他の種類の廃棄物がほとんどない場合に限る。
バーゼル条約 Annex VIII A3210	
A3210	A3 主に有機成分を含むが、金属や無機物を含む可能性のある廃棄物。 廃プラ（その混合物を含む）で、Annex IIIの特性を示す程度にAnnex Iの構成要素を含む、または汚染されたもの（Annex IIのY48およびリストB B3011の関連項目に留意すること）。

出所:改訂版バーゼル条約附属書Ⅱ、Ⅷ、Ⅸを参考に矢野経済研究所作成

CFRP 部品の廃棄物としての取り扱いに際しては、Annex VIII の A3210 が対象になると思われるが、さらなる確認が必要となる。

②OECD 理事会にて決定した規定

バーゼル条約に加盟している国は 2022 年 2 月時点で 189 カ国あるものの、米国を含めバーゼル条約に批准していない国もある。このようなケースを踏まえ、OECD 加盟国間・非加盟国間でもバーゼル条約に基づいた規制が設けられている。

2021 年 1 月 1 日より、Decision of the Council on the Control of Transboundary Movements of Wastes Destined for Recovery Operations（回収作業のために廃棄される廃棄物の越境移動の規制に関する理事会決定（OECD/LEGAL.0266））は、各 OECD 加盟国が国内法および国際法に準拠して非有害廃プラスチック（バーゼル条約 Y48/B3011 対象プラ）を規制する権利を保持すること等を規定している。加盟国は、非有害廃プラスチックに適用されている管理について、また今後のそのような管理規制が変更された場合、適時に OECD 事務局に報告することに合意している。

OECD では、廃棄物を非有害～有害に分類するにあたり、「グリーンリスト対象物」、「アンバーリスト対象物」、「レッドリスト対象物」に分類。レッドリスト対象物に入るものは非 OECD 国への輸出が禁止であるため本報告書では対象外とする。

通常、OECD 理事会決定に基づくグリーンリスト対象物に関しては、理事会において物の性状や回収技術等の管理方法・側面などを踏まえたうえで環境汚染などへの危険性を評価し、有害性基準が低いと位置づけられる。対象外となる廃棄物はグリーンリスト対象物で、再生利用される廃棄物の輸出のみとされる（OECD 加盟国間のみ）。非 OECD 諸国間、又は非 OECD/OECD 間の廃棄物（処分・再生利用）はすべて規制対象となる。

（例：非 OECD 諸国から OECD 加盟国へ輸入される「グリーンリスト対象物」の再生利用廃棄物は規制対象と位置付けられる）

表 2-39. OECD における規制対象

項目		輸入		輸出	
		グリーン物	アンバー物	グリーン物	アンバー物
OECD	再生利用	×	○	×	○
	処分	○	○	○	○
非OECD	再生利用	○	○	○	○
	処分	○	○	○	○

※○＝対象、×対象外

出所：経産省・環境省「特定有害廃棄物等の範囲の見直しについて」を参考に矢野経済作成

一方で、日本は先進的な環境技術を有しているとされており、OECD 非加盟国からの輸入について規制対象外とされていたとしても、国内で当該廃棄物受け入れによる環境汚染の発生の恐れが小さいと判断された場合は受け入れることを許可している。したがって、OECD 議会による上図のようなフレームワークの下、各国での独自の判断、規制・法律によって「対象」、「対象外」という判断基準は異なることを意味する。

表 2-40.日本における規制対象

項目		輸入		輸出	
		グリーン物	アンバー物	グリーン物	アンバー物
OECD	再生利用	×	○	×	○
	処分	○	○	○	○
非OECD	再生利用	×	○	○	○
	処分	○	○	○	○

※○＝対象、×対象外

出所:経産省・環境省「特定有害廃棄物等の範囲の見直しについて」を参考に矢野経済研究所作成

OECD 理事会決定にて規定されたグリーンリスト対象物とアンバーリスト対象物を表 2-41 に示す。

表 2-41.OECD 理事会決定で規定されたグリーンリスト対象物とアンバーリスト対象物

グリーンリスト 対象物	OECD理事会が定めた、比較的有害性が低いとされる廃棄物。グリーンリスト対象物に含まれる廃棄物同士の混合物はグリーンリスト廃棄物として扱われ、「事前の通知および同意の手続き」が不要とされている。基本、バーゼル条約Annex IXのB3011に含まれているものはグリーンリスト対象物となる。
アンバーリスト 対象物	OECD理事会が定めた、比較的有害性はグリーンリスト対象物のものより高いとされる廃棄物。基本、バーゼル条約Annex IIのY48に含まれているものはアンバーリスト対象物となる。

出所:矢野経済研究所

(4) 今後のラベリングに関する他業界の取り組み（Green Aluminium）

rCF が今後標準化され市場が拡大した際、次の「さらなる成長への取り組み」は rCF の製品としての特長を前面に持ち出した rCF および rCF 製品の訴求となる。アルミニウム産業は、現在その段階に直面しており、「Green Aluminium」の普及を推進している。現時点では Green Aluminium における規定、定義などは定められておらず、低炭素・脱炭素といった低カーボンフットプリントである環境で製造されているアルミニウム製品として各社が謳っている状況にある。アルミニウム産業全体にわたって Green Aluminium のフレームワークは構築できておりこのようなアルミニウムの製造に取り組む企業が増えている。また、Aluminium Stewardship Initiative でも Green Aluminium におけるディスカッションの実施、当該ホームページでも同用語を使用していることから、今後 Green Aluminium として持続可能なアルミニウム製品の普及は進んでいくと見込まれるほか、今後は定義に加え、基準なども設けられる可能性もみられる。

事例として数社、低カーボンフットプリントであるアルミニウム製品を製造している企業動向を表 2-42 に示す。

表 2-42. グリーンアルミニウムにおける企業動向

企業名	国・地域	Low Carbon 製品	カーボンフットプリント (kg CO ₂ /kg)	備考
Companhia Brasileira de Aluminio	ブラジル	P1020A	4.0以下	・ほぼ100%水力発電。
Hydro	ノルウェー	CIRCAL 75R	2.3	・75%以上のポストコンシューマースクラップ使用率。
Hydro	ノルウェー	REDUXA	4.0	・再生可能エネルギー（水力、風力、太陽光）を使用し、カーボンフットプリント（Scope 1, 2, 3）を4.0kg CO ₂ /kgに削減したアルミ製品（押出用インゴット、 casting alloy、シート用インゴット等に対応）。ノルウェーKarmoy工場にて製造。
Centruy Aluminium	米国	Natur-Al	4.0	・2020年2月にローンチした、ASI認定のNorðurál Grundartangi工場（アイスランド）で製造された、100%再生可能エネルギー使用の一次地金。 ・2021年2月、オーストリアHammerer Aluminium Industries（HAI）との間で締結した5年間・15万トンの販売契約を終了。HAIはNatur-Alを用いた合金（6000系）をSustain-Alとして展開。
Rusal	ロシア	ALLOW	4.0以下	・同社が水力発電による電力を用い製造する、カーボンフットプリント4.0以下（Scope 1, 2）のアルミ製品。
Rio Tinto	豪州	RenewAl	4.0以下	・2016年、りおていんごは世界初の認証付低炭素排出アルミニウムのブランドである「RenewAl」（リニューアル）をローンチ。 ・2021年2月には、製品に関するサステナビリティ情報（製造過程で排出された炭素量、水の使用量、リサイクル比率、エネルギー源等）を表示するラベルサービス「START」を開始。
Rio Tinto	カナダ	Elysis	0.0	・Alcoa独自のカーボンフリー製錬技術（不活性アノード技術を採用したElysisプロセス）の実用化をAlcoaと共同で推進中。 ・2021年4月にはAlma製錬所（ケベック州）にフルスケール・プロトタイプ炉（450kA）を導入することを発表。同年7月より建設を開始しており、2024年には本格実用化する計画。
Alcoa	カナダ	EcoLum	2.5	・AlcoaはSustanaシリーズとしてEcoSource（アルミナ）、EcoLum（一次地金）、EcoDura（リサイクル原料50%以上使用のアルミ製品）を展開。EcoLumはボーキサイト／アルミナ／製錬／圧延を通じカーボンフットプリント4.0以下（Scope 1, 2）を保証。このうち、EcoLumキャスト製品は水力発電100%の製錬所で製造することで、カーボンフットプリント2.5未満を保証しており、スウェーデンの熱交換機メーカーGranges等への供給も開始。

出所: 矢野経済研究所作成

2-5-3. rCF におけるルールを普及するための課題と解決方法

(1) 他素材と比較した時の rCF の位置づけ

通常、リサイクル品はプレコンシューマー（工程内端材）、ポストコンシューマー（使用済製品）に区分されるが、CF には CFRP になる前のくず糸もあるため、もう一段別の切り口を導入する必要がある。CFRP のリサイクルでは、vCF 製造時に発生するくず糸、織物、プレコンシューマー（工程内端材）、ポストコンシューマー（使用済製品）に区分することが求められる。このうち、プレコンシューマーではプリプレグ硬化前と硬化後の状態で処理方法が異なることに留意する必要がある。

(2) rCF における課題抽出

ユーザーが rCF をより使用しやすくするために、まずは技術的にどのように加工すれば良いのか、それに適した用途はどういうものがあるかについて考える必要がある。技術的な難度の順でいえば、ポストコンシューマー、プレコンシューマー（硬化後）、プレコンシューマー（硬化前）、織物、くず糸となる。くず糸はすでにマーケットが確立されており、IC チップトレイ等の射出成形部品、断熱材向けのマット等で使用されている。ポストコンシューマー由来、プレコンシューマー由来それぞれで得られる rCF の素性は異なってくるため、それらに適した用途を見据えておく必要がある。

(3) 今後 rCF の基準構築、普及に必要となる取り組み

まずは rCF としての定義付けが必要となる。現状のくず糸は vCF 製造時の端材であるが、一般的には「リサイクル炭素繊維」として捉えられる傾向にある。くず糸はユーザーが使用しやすい長さにカットされるが、リサイクルのために行っている加工は裁断程度で、くず糸も rCF として定義すべきか議論が必要である。また、プレコンシューマーでも、樹脂硬化の有無などによって得られる rCF の素性が異なる。この点も含めて rCF としての定義付けに関して、ISO で基準化すべきである。

定義付け後、その定義に則った材料であるか認証を与える機関も必要であるほか、この認証制度がユーザー、サプライヤーにとって活用しやすくするためのシステムの構築も必要となる。認証取得後も規則に反することなく使用しているか、定期的な監査の実施も求められる。

ユーザーが rCF を安心して使用できる環境作りのため、バラツキが生じやすいリサイクル品に関して世界で統一された評価手法を確立させることが必要となる。いまだ世界で確立されていない rCF の評価手法に関して、産業技術総合研究所をはじめとする日本の研究機関と rCF に携わる日本の企業各社が協力し、世界に受け入れられる評価手法を提案していくことが求められる。

3章. まとめ

3-1. rCF 評価手法の国際標準規格を策定に向けた課題と解決方法

本事業においては、力学特性試験としてフラグメンテーション試験、材料分析試験として不純物元素分析試験という産業技術総合研究所の研究内容をベースに実施した。

すでに記述しているように、フラグメンテーション試験の課題として、試験実施時の事前調整（試験開始時のセッティングや試験雰囲気の設定）、得られるパラメータの精度向上が挙げられる。この解決案として、試験実施前の事前調整に関しては、①試験者に依存するセッティング時のフィルムへの予備張力、②試験機に依存する試験片の把持状態、③試験条件に依存する試験片の乾燥状態に対する調整が必要となる。パラメータの精度向上に関しては実験的・理論的な観点からさらなる検討が求められる。

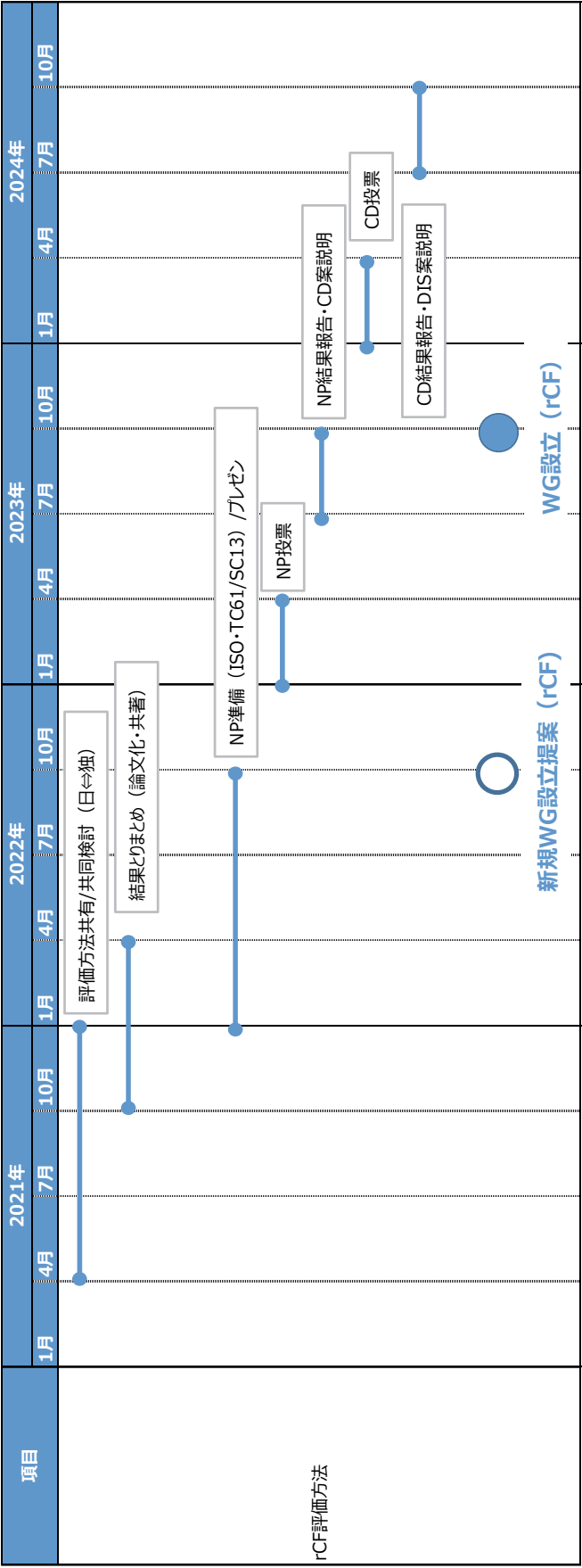
不純物元素試験に関しては、rCF の分解後に元素濃度の定量分析ができることを確認できているため、今後は適切に汚染なく分解できるかがポイントとなる。引き続き分析法の確立に向けて検討を重ねていく必要がある。また、今回の試験試料は産業技術総合研究所にて分解溶液を事前に準備して実施したため、今後は不純物元素分析法の前半部分である rCF 分解法が ISMA プロジェクトにて確立された後に、分解溶液の作製方法を含めた本評価手法全体の汎用性を確認することが求められる。そのためには、他の研究機関とのラウンドロビンテストの実施に取り組むことが必要となる。

3-2. 評価試験法のラウンドロビンに向けたロードマップ作成

最終ユーザーが rCF を活用しやすくするためには、あるグレードについては世界中で同じ品質、同じレベルのものを調達できるように、評価試験方法の ISO 規格化を実現することが求められる。そのためには、まずは産業技術総合研究所で開発中の評価試験方法について欧州の研究機関においてラウンドロビンテストを実施し、その結果を取りまとめることも必要となる。

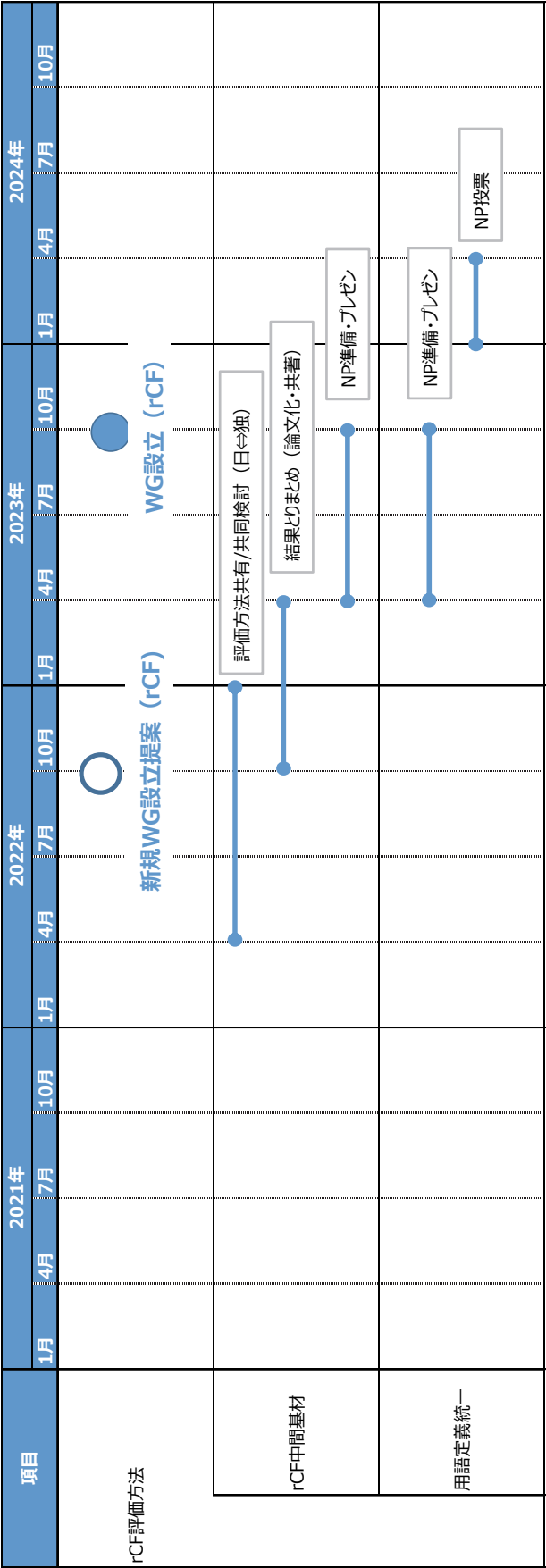
ISO・TC61/SC13 では、繊維強化材料及び強化用繊維（GF、CF 等）に関する規格の制定・改正等を行っている。まずは年 1 回開催される国際会議において NP（New work item proposal）を申請し、ワーキンググループ（WG）内での検討を経て、rCF 評価方法開発を通じて、rCF に関する新規 WG 設立を目指すことが求められる。

なお、CFRP リサイクル検討委員会での協議のなかで、rCF 中間基材や rCF 用語定義統一等に関する取り組みも必要となるという指摘もあったため、「図 3-2.rCF 評価試験法のラウンドロビンに向けたロードマップ」として別途記載する。



※NP = New work item proposal (新業務項目提案)
 CD = Committee Draft (委員会原案)
 DIS = Draft international standard (国際規格案)
 WG = Working Group (作業グループ)

図 3-1. rCF 評価試験法のラウンドロビンに向けたロードマップ
 出典: 矢野経済研究所作成



※NP = New work item proposal (新業務項目提案)

図 3-2.rCF 評価試験法のラウンドロビンに向けたロードマップ
出典:矢野経済研究所作成

二次利用未承諾リスト

報告書の題名 リサイクル炭素繊維の
評価手法や採用状況に関する国際動向
調査

委託事業名 令和3年度産業標準化推進事業委託費
(戦略的国際標準化加速事業 ルール形成戦略に係る調査研究)
リサイクル炭素繊維の評価手法や採用状況に関する国際動向調査

受注事業者名 株式会社矢野経済研究所

[illegible]