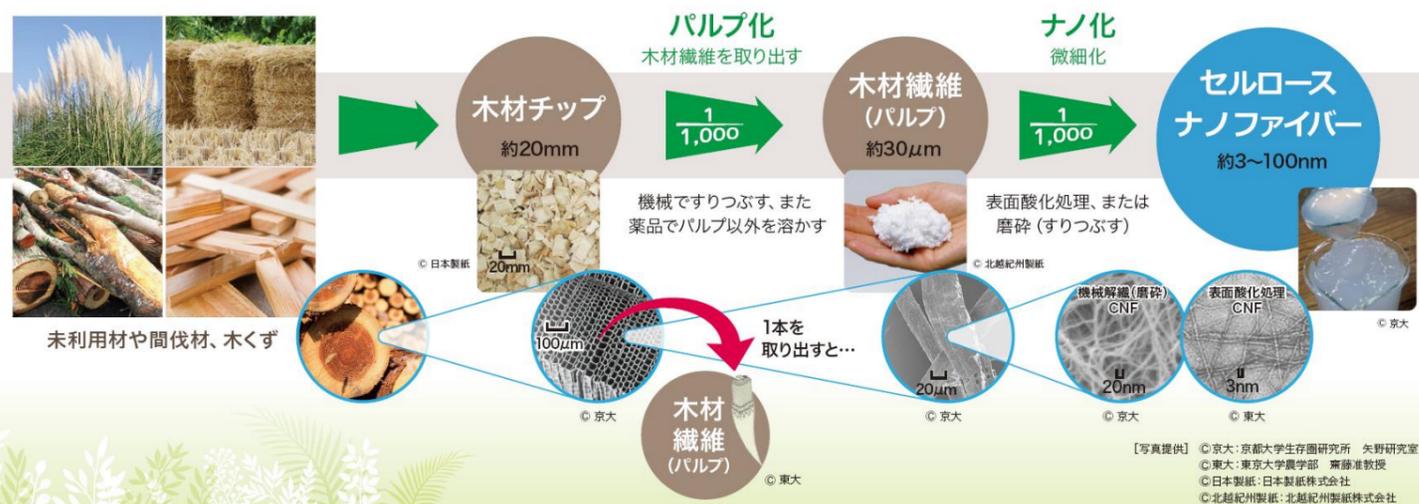


脱炭素・循環経済の実現に向けた セルロースナノファイバー利活用ガイドライン

要約版

Ver.1.0 (令和3年3月)

植物由来の次世代素材 セルロースナノファイバー (CNF)



環境省では、脱炭素や資源循環の実現に向けて多大なる貢献が期待できる次世代素材「セルロースナノファイバー (CNF)」について、2015年度から社会実装に向けた様々なチャレンジを、大学やメーカー、自治体等と連携し実施してきました。これらの成果を踏まえ、用途に応じたCNFの選択をユーザーが適切に行い、効率的にCNF活用製品の開発・製造が行えるよう包括的かつ実践的な情報をガイドラインとしてまとめました。



5. ガイドライン策定にご協力頂いたメンバー紹介

ガイドライン策定にあたり、策定委員会を設置し1年をかけて議論を進めてきました。取りまとめにご協力頂きました委員会メンバーをご紹介します。



■策定委員会 座長
西野 孝(神戸大学大学院 工学研究科 応用化学専攻 教授)

工学部で化学の立場からセルロースを研究しています。木綿/麻、木材、紙として、人類は天然高分子のセルロースをふんだんに使ってきました。これをほぐすと直径がナノレベルになり、エコ&ナノ繊維として注目を集めています。やんちゃな奴ですが、ぴったりの役割を割り当てれば、すごい性能を発揮します。皆様と相談して利活用のためのガイドラインをまとめました。セルロースナノファイバー (CNF) をぜひ使ってみてください。

■委員会メンバー

区分	氏名 (所属・役職)	自己紹介
学識者	磯貝 明 (東京大学 特別教授)	再生産が可能な植物セルロース繊維から製造されるCNFは、化石資源に一部代替可能な新規バイオ系ナノ素材です。CNFの優位性や機能を様々な汎用および先端材料に活用することにより、持続可能な社会基盤の創成や地球温暖化防止につながる事が期待されます。
	遠藤 貴士 (国立研究開発法人産業技術総合研究所中国センター 機能化学研究部門 セルロース材料グループ 研究グループ長)	現在、各種原料からのCNF製造技術、特性評価技術、樹脂・ゴム複合化技術、機能化・食品応用技術などをテーマに研究開発を進めています。CNFならではの特性を発揮させた材料開発では、様々な側面からのブラッシュアップが必要です。是非、皆様もCNFに触って新しいアイデアを出して下さい。
	服部 順昭 (東京農工大学 名誉教授)	専門は木材の機械加工です。レーザの木材加工への応用やインサイジング、木工機械の低騒音化等を研究してきました。最近の研究は木材だけで構成の耐火集成材の開発と木製品の環境負荷評価(LCA)です。ガイドラインにはLCA視点で協力しており、真に環境に優しいCNF製品の普及を期待しています。
	能木 雅也 (大阪大学 産業科学研究 自然材料機能化研究分野 教授)	一昔前は「低」炭素社会が目標となっていました。現在は「脱」炭素社会の実現が喫緊の課題となりつつあります。このような重要かつ困難な課題実現に向けて、本ガイドラインが貴重な情報源となり、CNFの利活用と「脱」炭素社会が一刻も早く実現することを期待しております。
	矢野 浩之 (京都大学 生存圏研究所 生物機能材料分野 教授)	カーボンニュートラルな高性能ナノファイバー：CNFは多くの可能性を秘めた植物からの贈り物です。この地球上における何億年も植物の歴史を生かして、温室効果ガスゼロエミッションに向けたCNF材料の社会実装をオープンイノベーションのスタイルで皆さんと一緒に進めて行きたいと思っております。
企業担当者	瀧上 康太郎 (帝人株式会社 マテリアル技術本部 マテリアル技術企画部 担当部長)	CNFは、様々な材料と適切に複合化されることでサステナブル社会に貢献できる高機能複合材料・商品に変貌することが期待されています。このガイドラインを活用し、更なる多用途での早期社会実装を進め、世界に先駆けた環境対応型社会の実現を目指して頑張っていきたいと思っております。
	内貴 昌弘 (宇部興産株式会社 ナイロン開発部 部長)	宇部興産ではナイロンとCNFを用いた新しい複合材料の開発を進めています。天然由来のCNFの活用を通して循環型社会に貢献するだけでなく、新たなビジネスチャンスととらえて、CNFを用いた樹脂分野のデファクトスタンダードを目指します。
	山岡 宗康 (三井化学株式会社 経営企画部 主席部員)	CNFを各種樹脂等への添加材として使用することで得られる機能が、お客様へのソリューション提供と同時にサステナブルな社会の実現に繋がることに期待します。当ガイドラインがCNFへの皆様の関心を高め、利活用に一步踏み出すための一助になれば幸いです。

区分ごとに氏名の五十音順に掲載、所属・役職は2021年3月時点

6. ガイドライン (本編) の入手先について

「セルロースナノファイバー利活用ガイドライン(本編)」Ver.1.0の詳細については、以下のWEBサイトをご覧ください。

<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cnf.html>



セルロースナノファイバー利活用ガイドライン(要約版)(令和3年3月発行)

■発行 環境省 地球環境局地球温暖化対策課 地球温暖化対策事業室 〒100-8975 東京都千代田区霞が関1-2-2 TEL: 0570-028-341 <https://www.env.go.jp/>

■制作 株式会社エックス都市研究所 サステナビリティ・デザイン事業本部 TEL: 03-5956-7504 デロイト・トーマツコンサルティング合同会社 パブリックセクター TEL: 03-6867-8916 一般社団法人サステナブル経営推進機構 LCA事業部 TEL: 03-5209-7708



1. セルロースナノファイバー (CNF) の概要

■CNFの特徴

☞「序章1 CNFの特徴」参照

セルロースナノファイバー(以下、CNF)は、**植物由来の次世代素材**です。

木材などから化学的・機械的処理により取り出されたナノサイズの繊維状物質で、高い比表面積を有しており、軽量でありながら高い強度や弾性率を持つという特徴があります。それらの特徴を踏まえCNFを使った商品化やその商品の使用により、環境面でさまざまな効果を期待することができます。



【CNFの特徴】

- 軽くて強い
- 植物由来
- 高リサイクル性
- 国内森林資源から調達
- 新素材

- 【環境側面等で期待される効果】
- ：構造材用途への利用によるエネルギー消費・CO₂の削減
 - ：従来素材（プラスチック等）の代替によるCO₂削減
 - ：リサイクル性の向上による循環経済の実現への貢献
 - ：国内の森林保全・CO₂吸収源対策へ貢献
 - ：設備、人材、技術等を活用した地域産業の創出が可能

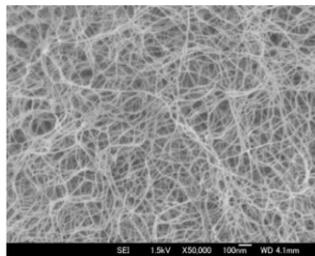
■CNFの種類

☞「序章4 適用範囲」
「第1章 1.1CNFとは」参照

CNFはナノセルロースの一種です。ナノセルロースは、幅や長さ、由来原料によって種類(セルロースナノファイバー、セルロースナノクリスタル、バクテリアナノファイバーなど)が分かれています。また、CNFは統一した呼び方が決まっていないため、マイクロフィブリル化セルロース、セルロースナノフィブリルなどと呼ばれることもあります。本ガイドラインでは、幅3-100nm、長さ5μm以上、高アスペクト比を有し、機械解繊等で製造されているものをCNFとして扱っています。

【ナノセルロースの分類】

種類	ナノセルロース		
	セルロースナノファイバー (CNF)	セルロースナノクリスタル (CNC)	バクテリアナノセルロース
幅	3-100nm	10-50nm	20-100nm
長さ	100μm未満	100-500nm	1.5-5.0μm
非結晶	あり	なし	あり



【木材細胞壁中のCNF】
(出典) 京大大学生存研究所

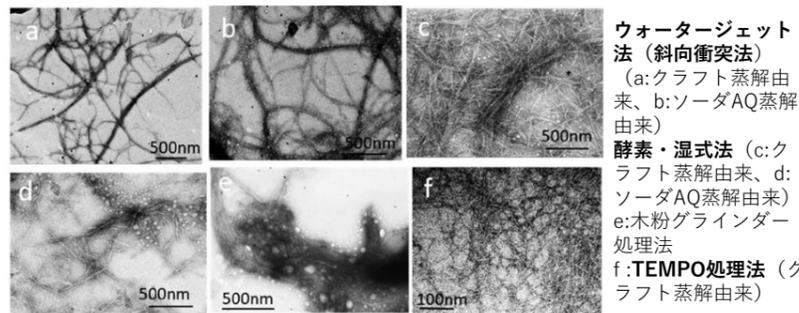
(出典) 公益財団法人 ちゅうごく産業創造センター「中国地域におけるセルロースナノファイバー関連産業創出可能性調査報告書」(2016年3月)をもとに、一部追記

■CNFの製造方法と特性

☞「第1章 1.1CNFとは」参照

CNFの製造は、**精製処理**とその後に**機械装置等**を用いた**解繊処理**を行う必要があります。

CNFの特性は様々ありますが、**原料とパルプ化及びCNF化の処理方法で出現する特性に違い**があります。そのため、CNFを扱う際には、何を原料にしているか、どんな処理方法で製造されたものかを知ること、機能と用途との関連づけが非常に重要となってきます。



【製造方法別のCNF透過電子顕微鏡写真】

(出典) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構「セルロースナノファイバー利用促進のための原料評価書(概要版)」(2020年3月)

2. 国内のCNFに関する技術開発及び製造、製品化の動向

■CNFの普及状況

☞「第1章 1.3CNFの用途」
「第2章 2.1CNFの普及状況と今後の市場見込み」参照

2020年時点において、水系用途(親水性)CNFの用途では、複数の用途が製品・実用化されています。一方で、プラスチックへの添加などCO₂削減効果の高いと考えられる複合材料用途(自動車、家電、住宅建材、等)においては、実用化に向けて実証等が進められている段階のものが多くなっています。

【現在実用化・研究開発されている商品の一例】



■CNF原材料の生産状況

☞「第2章 2.3CNF原材料の生産状況・生産体制」参照

2020年度4月時点で25か所のCNF製造プラントが稼働しており、2021年には新たに1か所のプラントが稼働予定です。製造方法別に見ると、機械処理法が多くを占めています。その他にTEMPO酸化法と変性パルプ直接混練法(通称「京都プロセス」)によるプラントが、それぞれ3か所ずつ稼働しています。詳細は本編を参照ください。

※ 地図上の番号に対応するプラント情報(工場名、生産能力、製造方法)は、本編p.51に掲載されています。



【CNF製造プラントが立地する大王製紙株式会社の三島工場全景(右図⑨)】
(出典) 大王製紙株式会社提供資料



【CNF製造プラント一覧(2020年4月現在)】

(出典) 近畿経済産業局・(地独)京都市産業技術研究所「セルロースナノファイバー関連サンプル提供企業一覧(第9版)」(2020/2/27)、各種公開情報より作成

■今後のCNFの市場見込み

☞「第2章 2.1CNFの普及状況と今後の市場見込み」参照

繊維強化複合材料の世界市場は、2016年度で8.6兆円と見積られています。用途としては、輸送(自動車)、建設、電気・電子、パイプ・タンク、消費財などを想定しており、これらの市場の何割かにCNF複合樹脂が導入されると推定すると、**CNF複合樹脂で数兆円規模の市場**が見込まれています。



【CNF材料の実用化時期と市場規模】

(出典) 京都大学矢野教授提供資料

3. 環境省によるCNF社会実装の取組内容

■CNFに関する関係省庁との主な役割分担

「第3章 3.1環境省によるCNF社会実装に向けた取組の全体像」参照

国内では、各省庁が分担してCNFの利活用に取り組んでいます。環境省では、中長期的なエネルギー起源CO₂排出削減に資するCNF等の次世代素材のCO₂削減効果の評価・実証、リサイクル時の課題・解決策に向けた対策技術の評価・実証を2015年から2020年まで行ってきました。

	関係省庁	主な役割分担
上流 ↑ ↓ 下流	農林水産省	農林業や食品産業からの国産セルロース原料の供給
	文部科学省	CNFに関する基礎研究
	経済産業省	CNFの製造（技術の研究開発等）
	環境省	地球温暖化対策に資する分野への具体的な展開

【CNFに関する主な環境省事業の紹介】

CNF製品製造工程の低炭素化対策の立案事業 (2015～2017年度)

最終製品サイドからバックキャスティングで様々な評価や検証等を行い、製品製造時や社会実装時における課題を抽出・対策し、あらかじめ課題解決を図ることで、CNFの早期社会実装を実現することを目的に実施。

セルロースナノファイバー性能評価モデル事業 (2015～2019年度)

国内の市場規模が大きく、CO₂削減ポテンシャルの大きい自動車分野及び家電、住宅・建材等の分野において、材料メーカーおよび製品メーカーのそれぞれと連携し、CNF軽量材料の用途開発と性能評価等を実施。

リサイクル時の課題・解決策検討の実証事業 (2017～2019年度)

CNF樹脂複合材（材料）を製造する段階での易リサイクル性、リサイクル材料の性能評価等を行い、解決策について実証。

2016年、環境省の委託事業として「NCV（Nano Cellulose Vehicle）プロジェクト」を開始しました。京都大学が代表事業者となり、計22の大学・研究機関・企業等で構成するコンソーシアムを構築しています。プロジェクトの成果として、CNF複合材で作製されたコンセプトカーを2019年の東京モーターショーで初披露しました。

「第3章 3.1環境省によるCNF社会実装に向けた取組の全体像」コラム(p.58～)参照



【2019年に初披露されたNCV】

【NCV（ガソリン車）の2020年技術ポテンシャル】

車両軽量化率(二次的軽量化含む)	16%
燃費改善効果(エンジンのダウンサイジング含む)	11%
ライフサイクルCO ₂ 排出量削減効果(CNF効率的量産シナリオ)	2t-CO ₂ e/台

NCV Nano Cellulose Vehicle プロジェクト

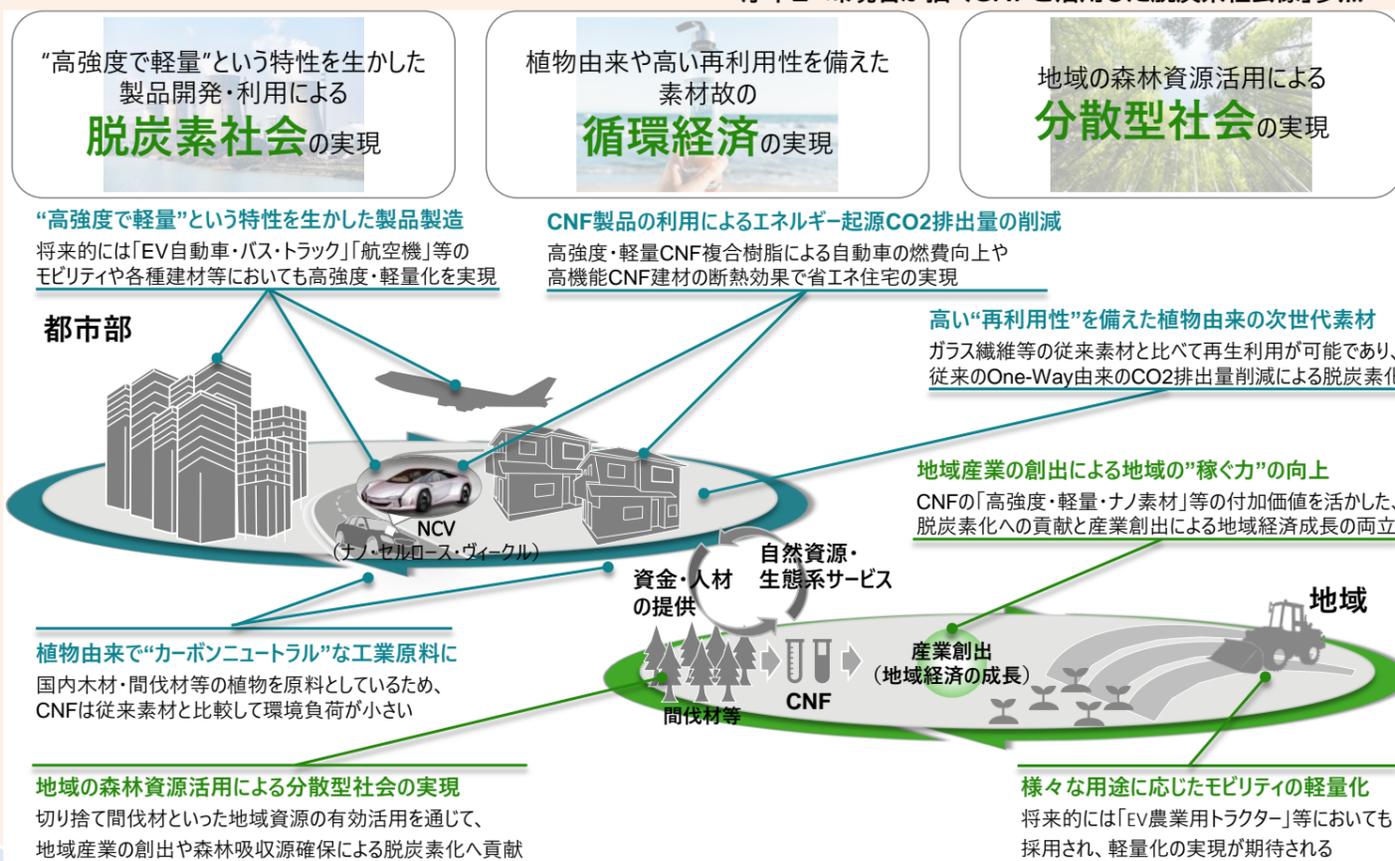
■CNFの現状供給価格

「第3章 3.2CNF関連事業の概要」参照

環境省「セルロースナノファイバー性能評価モデル事業」の委託事業者の情報等を基に、製法別のCNF現状供給価格を整理したところ、現時点では機械処理法によるものが最も安価(500円～数万円/kg)であることが分かりました。他方、化学処理法であるTEMPO酸化や変性パルプ直接混練法では、3,000円～数万円/kg(10～30%CNF相当)となっていて、このような価格差はCNFの解繊度や製造時の処理工程の数によるものと推測されます。

環境省が目指す CNFを活用した”脱炭素社会・循環経済・分散型社会”の将来像

「序章2 環境省が描くCNFを活用した脱炭素社会像」参照



環境省ではCNFを活用した”脱炭素社会・循環経済・分散型社会”の将来像を明確に掲げ、実現に向けた施策等の方向性を示すことで、CNFに関する取組や投資拡大の基盤となることを期待します。

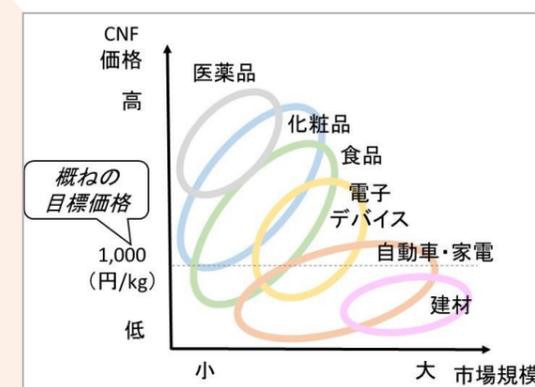
富士市が立ち上げた「富士市CNFプラットフォーム」では、CNFの取組ステージやニーズに応じた様々な活動を行政が支援することで、会員企業による食品（菓子）や化粧水などのCNF製品の商用化を実現しています。

「第3章 3.3CNFによる地域産業の創出」参照

【プラットフォーム会員企業により実用化された商品例】



CNFの市場価格は、用途とそれに応じた製品の品質によって決定されます。高付加価値分野(医薬品等)では高い供給価格でも取引が成立しますが、構造用途(自動車・家電・建材等)では、市場規模は大きいもののそれほどの高い市場価格が期待できないため、利用拡大していくためには、現状より供給価格を下げていく必要があります。



【CNFの用途別の市場規模と価格の概念図】

地域単位での取組事例

■静岡県富士市

森林が多く、古くから製紙産業が興り、地域の主要産業の一つとなっている静岡県や富士市では、行政主導の下、地域コンソーシアムを立ち上げて情報提供や企業間の連携を支援し、CNFによる新しい産業の創出に取り組んでいます。

富士市が立ち上げた「富士市CNFプラットフォーム」では、CNFの取組ステージやニーズに応じた様々な活動を行政が支援することで、会員企業による食品（菓子）や化粧水などのCNF製品の商用化を実現しています。

「第3章 3.3CNFによる地域産業の創出」参照



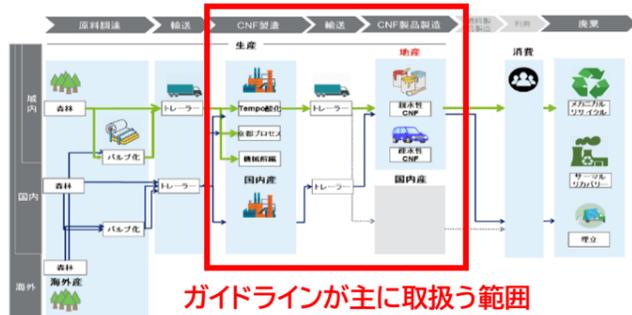
4. CNF利活用ガイドラインに関するQ&A

質問1: このガイドラインは誰を対象にしていますか？また、ガイドラインに記載されている内容の範囲はどのように設定されていますか？

本ガイドラインは、CNFの製造、製品の研究開発・利活用に携わる全ての関係者を読者層と想定しています。
また、取扱う範囲はCNFサプライチェーン全体としていますが、特にCNF製造から輸送、CNF製造製品の部分を中心に取まとめています。

⇒本編「序章3対象とする読者層」及び「序章4適用範囲」を参照ください。

【CNFのサプライチェーンの全体像】



質問2: 環境省で実施された事業について、その後各事業者でどのような取り組みに発展していますか？

引き続き自社で技術開発を行っている事業者や、既に製品化している企業や別の大学・研究機関との共同研究に発展した企業もあります。
また、一部の事業者では、環境省事業での成果や知見を活かし、CNF製品の商品化を行っているところもあります。

⇒本編「第3章環境省によるCNF社会実装の取組内容」、「別冊1環境省事業の成果まとめ」を参照ください。



←大王製紙(株)
トイレトクリーナー

パナソニック(株)→
コードレス掃除機

質問3: CNFによる地域産業の創出は、地域にとってどのようなメリットがありますか？また、創出にあたって地域の主体にどんな役割が期待されていますか？

地域のGDP上昇、失業率の低減、平均時給の上昇などの効果が期待できます。

環境省が試算した結果（CNFが10%含まれるマスターバッチを年間4.3万t生産するケース）は以下の通りです。
 > 地域の需要創出額 約1,270億円
 > 就業誘発者数 約3,200名

これらの効果を得るためには通常のサプライチェーン構築に加え、「**地域内で製品製造を担う企業の確保**」がポイントになります。
加えて、CNFの出口創出や需要拡大に向けて、地域内外の企業・有識者との連携が必要です。

連携を主導する役割を期待されているのが**地方自治体**であり、周辺自治体、都道府県とともに地域産業の創出に取り組むことで地域全体の活性化に繋がります。

⇒本編「第3章3.3CNFによる地域産業の創出」を参照ください。
複数パターンでケーススタディを実施し、経済効果や雇用創出効果の具体的な数値等を掲載しています。

【地域コンソーシアムに求められる機能】

必要な人材	役割の概要	要件
取組主体 (地域行政等)	地域の特性や課題等をもとに、構想を練り、計画を策定するために必要な多くの関係者(ステークホルダー)の連携や積極的な参画を、中心となって主導する。	特になし (行政、事業者、NPO等が想定される。地域内の循環最適化の観点では、行政が望ましい)
コーディネータ	取組全体を縦横から客観的に冷静に見極めつつ、柔軟な発想で参加者の意見を聞き出し、取りまとめたりして、合意形成まで事業を的確に運んでいく。	土地勘や影響力を持つ、協議会等の中心になる存在。または、その役割を専門に担う外部人材、企業出身者など、CNFの知見と産業界へのネットワークを有する人材が期待される。
キーパーソン (有識者等)	関係者間の各種調整や、取組に関連する分野の専門家として、取組推進に向けた的確な助言を行う。また、協議会の委員長として、参加メンバーの意見を聞き出し、集約したり、会議の取りまとめ役を担うことも期待される。	その地域で影響力を持つ関係者(首長等)や、その取組分野に関する有識者(学識経験者等)
実施主体	事業者	特になし (地域産業創出の観点では、県内事業者が望ましい)
	森林組合等	特になし (地域産業創出の観点では、県内組織が望ましい)
行政(国)	事業実施の際に課題となる規制等に関する情報や、国として支援可能な施策等の情報を提供する。循環資源が循環する地域が都道府県をまたぐ場合などには、協議会等の設置運営に中心的な役割を果たす。	(国を想定した役割)

質問4: CNFの特徴の1つに「リサイクル性」とありますが、他の素材と比べてCNF複合材のリサイクルにはどのような優位性がありますか？

CNF複合材と同様に高い機械物性を持つGFRP(ガラス繊維強化プラスチック)やCFRP(炭素繊維強化プラスチック)と比較すると、CNF複合材はマテリアルリサイクル時の繊維破断が少なく、繰り返しのリサイクルによる物性低下が少ないこと、原料が植物由来のため燃焼性があり、紙やプラスチックと同じようにサーマルリカバリーが可能である特徴があります。

⇒本編「第4章CNFのリサイクル」を参照ください。

【材質ごとのリサイクルに関わる特性の比較】

	マテリアルリサイクル	サーマルリカバリー
CNF複合材	リサイクル時の繊維破断が少なく、物性の低下が少ないため可能性は高い。	原料が木材等であり、燃焼する材料であるため、サーマルリカバリーが可能である。
GFRP (ガラス繊維強化プラスチック)	高い耐熱性により処理が難しく、リサイクルを行うと繊維長が短くなり利用価値が低下するため、可能性が低い。	不燃性・難燃性・耐熱性という性質から、処理効率等の課題があり、可能性は低い。
CFRP (炭素繊維強化プラスチック)		

質問5: CNFを利用することでどのくらいCO₂を削減することができますか？また、算定は、どのように計算することができますか？

CNFはその特性を活かし、企業ビジネスを通じてサステナビリティに関する様々な社会情勢に対応することが期待できます。

そのため、企業等が社会情勢に対応した製品を上市するにあたり、CNF活用のメリットを定量的に考察し、これに基づきステークホルダーとコミュニケーションすることが有効です。

こうした観点でLCA特に使用時に加えて、原料調達から廃棄段階までを含めた一連のライフサイクルCO₂(LCCO₂)を把握し、その情報を効果的に活用する重要性が高まっています。

CO₂削減量は、右図のフローに従って算定することができます。CNF素材を使ったガソリン車では、従来品と比較して1台当たり2トンのCO₂削減効果量があることが試算されました。本編にはその他製品のCO₂削減効果の試算結果も掲載しています。

⇒本編「第5章CNFのCO₂削減効果の算定」及び「別冊3CNFに関する温室効果ガス削減効果算出ガイドライン」を参照ください。

質問6: 今後CNFの利活用を想定する新たな分野にどのようなものがありますか？また、現時点で想定される課題にはどのようなものがありますか？

環境省では、地球温暖化対策などの環境負荷低減の観点から、今後もモビリティ、住宅建材、家電の3つの分野に特にフォーカスを当て実用化を推進していきます。

特に開発が有望視されるのが「**小型・電動モビリティ**」及び「**蓄電池・コンデンサ**」です。現時点で想定される主な課題は以下の通りです。

- ✓ 性能の向上・品質の担保
- ✓ 製造及び輸送コストの低減
- ✓ リサイクル手法等の確立

環境省ではこのガイドラインが脱炭素社会や循環経済社会の実現に向けたCNFの利活用のきっかけになることを期待致します。

⇒本編「第6章今後のCNFの利活用に向けて」を参照ください。

