

平成25年度
環境研究総合推進費補助金 次世代事業
総合技術開発報告書

未利用バイオマス由来ナノファイバーと FRP 廃材を
利用した複合材及びスモールバッチ生産システムの
開発に関する実証試験

3J113007

平成26年3月

トクラス株式会社 牧瀬 理恵

補助事業名 環境研究総合推進費補助金次世代事業（平成23年度～平成25年度）

所管 環境省

総事業費 110,000,000円（平成23年度～平成25年度の総計）

国庫補助金 52,294,000円（平成23年度～平成25年度の総計）

研究課題名 未利用バイオマス由来ナノファイバーと **FRP** 廃材を利用した複合材
及びスモールバッチ生産システムの開発に関する実証試験（3J113007）

研究事業期間 平成23年6月1日～平成26年3月31日

研究代表者名 牧瀬 理恵（トクラス株式会社）

研究分担者氏名 伊藤 弘和（トクラス株式会社）

目 次

総合技術開発報告書概要	1
本文	
1. 事業の目的	7
1.1 本事業に至った背景	7
1.2 事業成果の目標	9
1.3 本事業開発のポイント	10
2. 開発した技術の詳細	12
2.1 未利用バイオマス等廃棄物系バイオマスからの CNF 合成	12
2.2 廃 FRP とセルロースナノファイバー(CNF)のアロイによる機能化	17
2.3 機能化セルロースナノファイバー(CNF)高充填複合化技術	23
2.4 スモールバッチシステムの構築	27
3. 実証施設の設置場所等	34
4. 開発した技術がもたらす効果	35
5. まとめ	36
6. 事業概要図	37
7. 英文概要	38

環境研究総合推進費補助金 次世代事業 総合技術開発報告書概要

研究課題名：未利用バイオマス由来ナノファイバーと FRP 廃材を利用した複合材
及びスモールバッチ生産システムの開発に関する実証試験

研究番号：3J113007

総事業費：110,000,000 円（平成23年度～平成25年度の総計）

国庫補助金：52,294,000 円（平成23年度～平成25年度の総計）

研究期間：平成23年6月1日～平成26年3月31日

研究代表者名：牧瀬理恵（トクラス株式会社）

研究分担者：伊藤弘和（トクラス株式会社）

事業の目的

本事業開発においては、「密度＝1.5 g/cm³以下（金属やセラミックより軽量）、熱膨張係数＝ $2.5 \times 10^{-5}/K$ 以下（金属同レベル）、24 時間吸水率＝2%以下（木材より高耐久）」を実現する性能目標と「市場競争力のある複合材（350 円/kg以下）を 50t/月レベルで事業収益性（粗利 15%以上確保）を確保し、原料（未利用バイオマス（主として木質系バイオマス）^{※1}＋廃 FRP）から複合材まで一貫した生産システムで実証」する事業目標の 2 点となる。本事業開発成果は、コストメリットだけではなく、従来製品（素材）の機能向上（耐久面、軽量面、耐久面）の視点、さらには容易に加工ができる（成形加工、切削加工）という視点から、サッシやエクステリアなど住宅系の部材（木材、アルミ）、自動車の金属部品（鋼板加工品）、家電、機械部品（金属、セラミック）などに代わる部材として広く利用されることにあり、その市場は 100 万 t/年（3000 億円/年）を大きく超える。一方、少量でも事業性のあるスモールバッチシステム提案であることから、原料となる未利用バイオマス発生個所あるいは廃 FRP の集積場等で新たな環境ビジネスとして導入できる。市場規模から類推して、最終的な処理量は未利用バイオマスで 60 万 t/年、廃 FRP とて 20 万 t/年が見込まれる。

※1 本事業で対象としている「未利用バイオマス、未利用バイオマス等廃棄物系バイオマス」とは、主として、廃紙や廃木材、間伐材も含む林地残材、剪定枝など木質（セルロース）バイオマス系廃棄物である。

開発した技術の詳細

◆未利用バイオマス等廃棄物系バイオマスからの(CNF)合成

性状の異なる種々の廃棄物系バイオマスから高いアスペクト比^{※2} 効果を有する CNF を合成するために、高いせん断を与え粉碎する装置を導入し、廃棄物系バイオマスから CNF が合成できることを検討した。また、同装置と同じ機能を有する大型設備を利用し、目標とする生産能力を実現した。この成果により、目標性能を確保することにつながり、さらに、事業目標におけるコスト目標を達成することに貢献した。

<ラボスケールによる CNF の合成>

セルロース繊維同士が水素結合で結合している点^{※3} に注目し、高含水状態（水素結合を膨潤させてほぐし易くする）での遊星ボール粉碎を検討した。遊星ボールミルにおいては、回転数が高いほど早く微粉化され、同様に粉碎時間が長いほど微粉化された。しかしながら、回転数が増加する程、平均粒径（頻度）のピークは変わらないが、微粒分も確認された。これは、高含水状態での粉碎でも、高いせん断を与えすぎるとセルロース繊維が断裂することを意味している。一方、アスペクト比においては、250rpm の CNF は、細くて短いセルロースが多く認められる（細かくて短い CNF の凝集体）。また、150rpm においては、細くて長い CNF が多く存在していることが確認された（図 A）。CNF 形成しているかどうかの評価として、電子顕微鏡観察（SEM 法）以外に沈降速度法^{※4} とチキソトロピーインデックス法^{※5} を実施した結果、SEM 法と合致した。ここで、本事業においても一つ重要な成果として、沈降法とチキソトロピーインデックスにおいてアスペクト比が評価できたという点である。SEM 法による評価は、設備が高額である点に加え、評価に手間がかかるため、品質管理作業の員数負荷も高くなり、結果、経済性においてはマイナスとなる。ここで実施した沈降速度法及びチキソトロピーインデックス法に利用する装置は、総額でも 100 万円以上は必要とせず、加えて、品質管理に要する作業員数の負荷も少ない。これらの効果等は、「スモールバッチシステムの構築」のところで具体的に示すが、ここでの研究成果は、性能目標達成だけではなく、事業目標達成にも大きく貢献できるテーマであった点を特記する。

※2 アスペクト比は、形状物の長辺と短辺の比率を表す場合に用いられ、長辺：短辺の比で表される。本報告では、CNF の径と繊維長の比率を指す。したがって、アスペクト比が高いほど、細くて長い繊維形状となり、繊維補強効果が高くなると推察した。

※3 磯貝明、「セルロースの科学」、朝倉書店、p41

※4 CNF を 1% に希釈し、沈降管にて十分に攪拌後、静置、上澄み液に 660nm の可視光を照射し、光の透過度を経時測定する手法（ex. 粒子が大きいと早く沈降し、経時の透過度が高くなる）。

※5 回転粘度計にて、異なる回転数の粘度を測定、その粘度変化の比を測定する手法（ex. 粒子のアスペクト比が高くなると、高速回転時に粒子配向し、粘度が低くなる）。

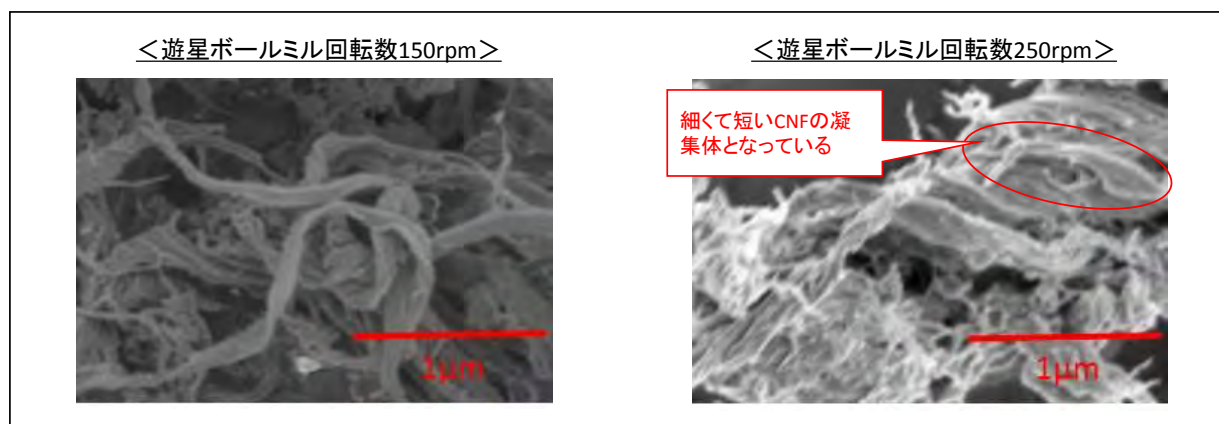


図 A 各回転数における CNF の SEM 画像

<量産ベースでの実証>

ラボの粉碎（せん断）条件の結果をもとに、量産設備での評価を実施した。量産での CNF 化はディスク型のミル（増幸産業社製；マスコロイダー）を用いた。ディスク型ミルもボールミル同様、せん断が高いと（回転数が高くなる）、微粉分の増加がみられ、アスペクト比の低下が生じた。ここで得られた結果をもとに、種々の廃棄物系バイオマスで CNF 化を実施し、全てにおいて CNF 化と目標とする生産性を確保した（図 B）。

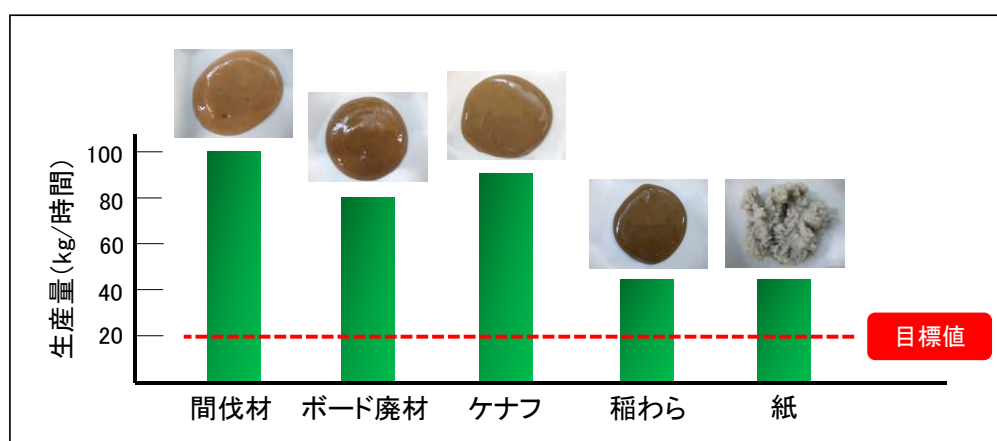


図 B ディスク型ミルで合成した各種廃棄物系バイオマス CNF の生産性

◆廃 FRP と CNF のアロイによる高機能化

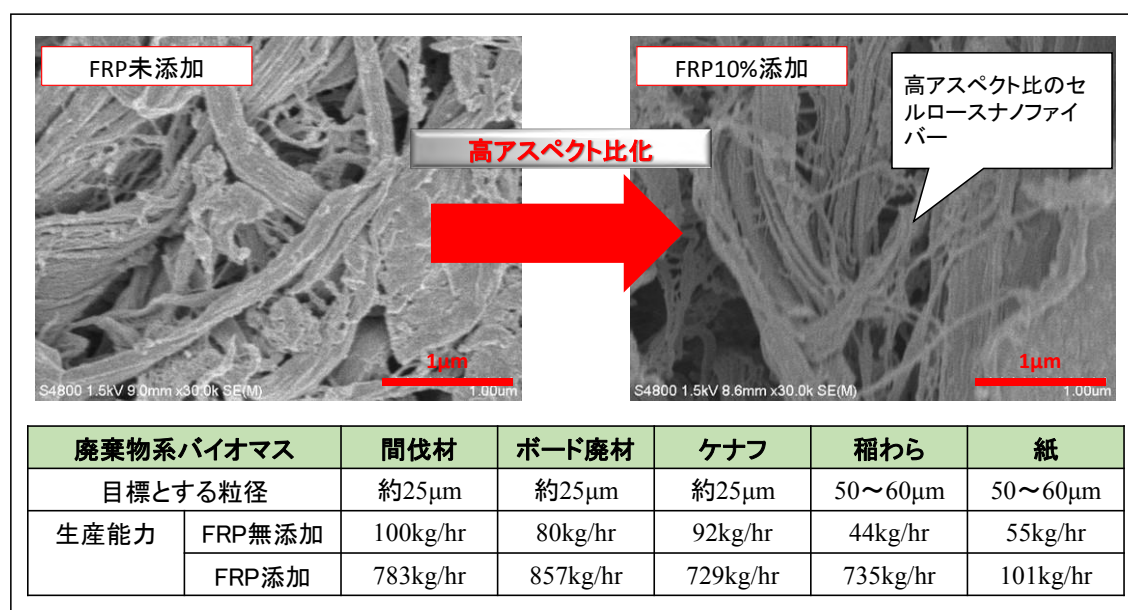
本技術課題は、CNF 表面に廃 FRP 粉末をアロイ※6する表面処理技術を構築することである。ここでのポイントは、親水性 CNF を疎水性のプラスチックと相容させるため、CNF 表面を親水性の低いケイ酸カルシウムで表面被覆する技術であり、ケイ酸カルシウムは、廃 FRP 粉末中のガラス繊維成分（ケイ

※6 化学的あるいは物理的に異種の素材を融合させる技術。本事業では、粉碎エネルギーを利用し、CNF 表面に物理的に融合（CNF 表面に廃 FRP 粉末を埋め込む）させる処理を実施した（メカニカルアロイと表記）。

酸成分)を利用し、CNF表面をケイ酸カルシウムで表面被覆されやすいように、予めCNF表面に廃FRP粉末を固着させることである。廃棄物系バイオマスを高せん断で粉碎する際、廃FRP粉末を同時添加することで（ここでは、この処理のことをメカニカルアロイと言う）、粉碎エネルギーにより、CNF表面に多くの廃FRP粉末が固着した。この廃FRP粉末が固着したCNFを水熱合成することで、CNF表面にケイ酸カルシウムが形成され、プラスチックと相容性のあるCNFが合成された。同時に、硬度のある廃FRP粉末が添加されることで、アスペクト比の高いCNFが合成できる点も確認された。この表面処理効果により、複合化するプラスチックへの相容性が改善され、目標性能が達成された。さらに、メカニカルアロイ効果により表面処理時間が短縮された点、従来乾燥性に課題のあったCNFが容易に乾燥できた点等新たな成果を見出し、事業目標におけるコスト目標達成にも大きく貢献した。

＜廃FRP粉末アロイ技術の構築＞

廃FRP粉末と廃棄物系バイオマスを同時に添加しCNF化するとCNF表面に廃FRP粉末が多くアロイされることが確認された（メカニカルアロイ効果）。CNF粉碎時に廃FRP粉末を同時に添加することで、高アスペクト比化と粉碎性の向上の向上が認められた（図C）。特に粉碎性に関しては、多くの廃棄物系バイオマスにおいて、大幅に向上した。



図C 廃FRP粉末添加による粉碎性の改善

＜水熱処理による廃FRP粉末アロイCNFの合成＞

この廃FRP粉末がアロイされたCNFを水熱処理することで、CNF表面にケイ酸カルシウムが被覆するように形成される（以下、ケイ酸カルシウム処理CNFと称す）ことが確認された（図D）。また、メカニカルアロイ無しに比べ、メカニカルアロイ処理をすることで、ケイ酸カルシウムの結晶性が促進される効果も認められた。これらのメカニカルアロイ及び水熱条件をもとに、各種廃棄物系バイオマスにて量産ベースでも対応できることを確認した。さらに、ケイ酸カルシウムでCNF表面を被覆することで、処理をすることで、従来通常乾燥ができなかったCNFが容易に通常乾燥できることが確認され、この成果は、次項のコンパウンド量産化においてもメリットが見出された。

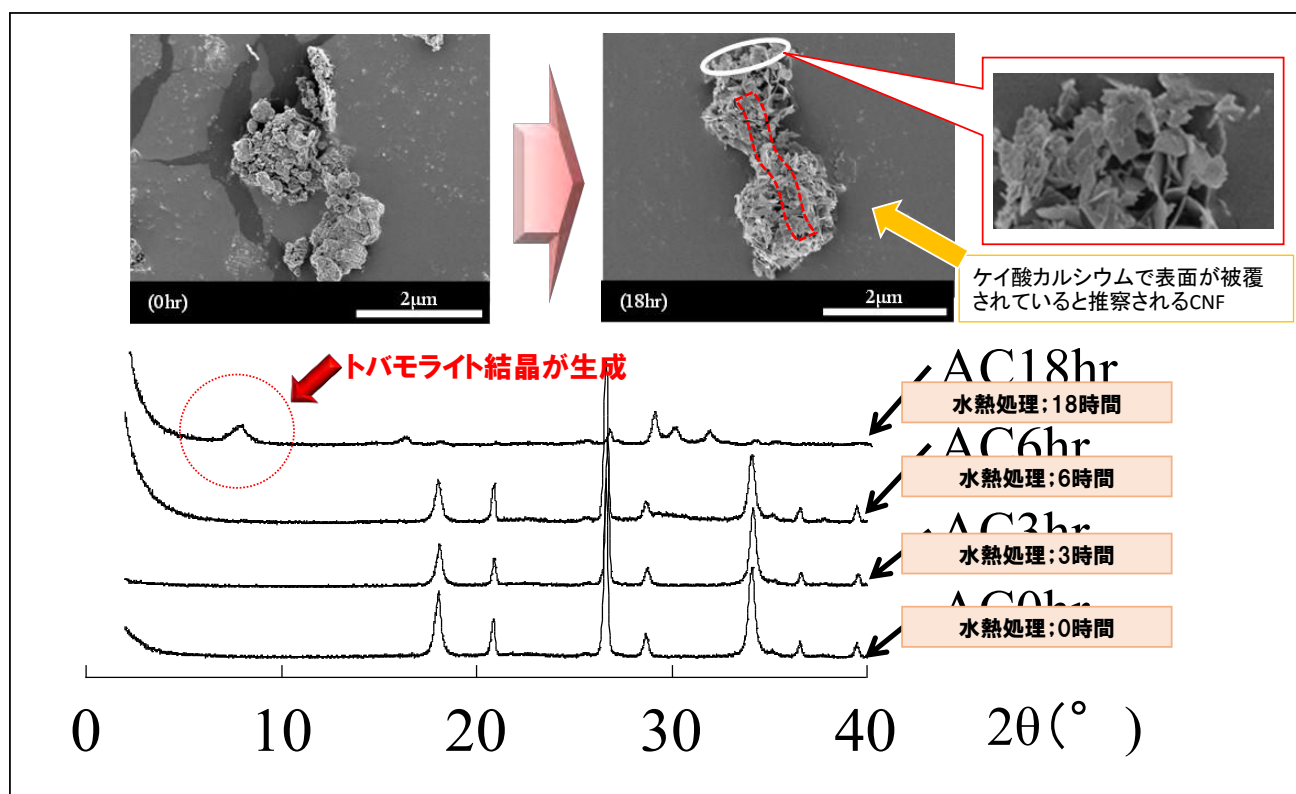


図 D 水熱合成により合成されるケイ酸カルシウム処理 CNF

◆機能化 CNF 高充填複合化技術開発

上記のように確立されたケイ酸カルシウム表面処理 CNF を様々な製品に展開すべく、プラスチックとの複合化評価において、高速回転でプラスチックと混練する（以下、高せん断と略称する）ミキサを用いたコンパウンド方法を見出し、含水状態の CNF を乾燥なしに直接プラスチックと均一分散する複合化する技術を見出した。均一分散が実現したことにより、各種複合材の目標性能を達成した。加えて、この乾燥レスのコンパウンド化手法を汎用の設備を利用して量産化できたことにより、事業目標の達成にも貢献した。

<高充填コンパウンド技術の検討>

高いせん断を与えケイ酸カルシウム処理 CNF とプラスチックを溶融混合（コンパウンド）することで、凝集の無い高分散のコンパウンド化とケイ酸カルシウム処理 CNF の高充填化が実現した（図 E）。一方、メカニカルアロイによる効果は、相容性にも発現し、さらに高機能化に貢献している。

<高充填コンパウンドの成形体性能評価>

前述したコンパウンドにて各種性能評価を実施し、機械的特性において、ケイ酸カルシウム処理の効果と CNF 上に形成したケイ酸カルシウムの高結晶化による機能化が確認された。また、目標性能に関しては、機械的特性同様、ケイ酸カルシウム表面処理効果により、すべて達成している（図 F には、密度と熱膨張を示すが、吸水性はほぼ 0%に近いので図中への表記は省略する）。

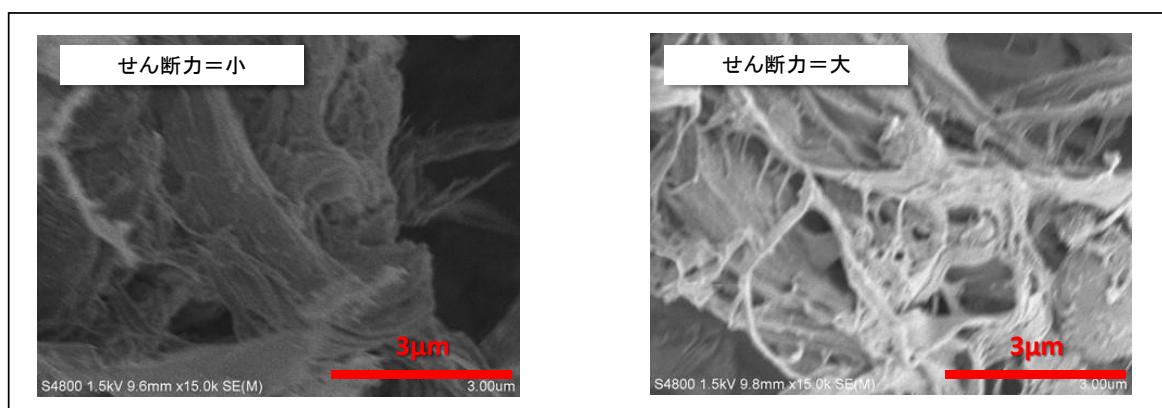


図 E せん断力の違いによる分散性の比較

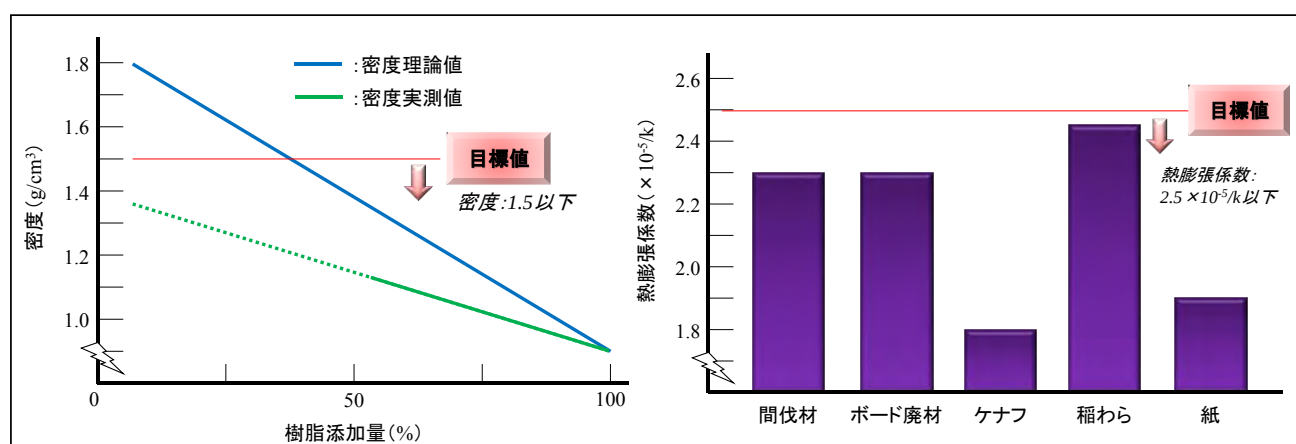


図 F ケイ酸カルシウム表面処理 CNF による効果（密度、熱膨張）

◆スモールバッチシステムの構築

廃 FRP 粉末添加による粉砕効率の改善、ケイ酸カルシウム処理 CNF の乾燥性改善と言う素材系の成果とこの機能化処理を汎用の設備で実証した生産系の成果により、事業目標における原価目標を達成した。また、CNF の品質確認等において、簡易な測定手法を確立し、さらに高充填のマスターバッチ化実現による在庫リスクの削減等により、事業損益改善となり、事業粗利目標を達成した。さらに、ユーザーワーク、事業初期の外注生産等の検証を行い、事業終了後、迅速に市場導入できる体制を構築した。

<目標原価を達成する生産システムの構築>

汎用の設備にて廃棄物系バイオマス、廃 FRP より高機能複合材（マスターバッチ）を生産する工程を確立した。表 A に汎用設備を用いたマスターバッチの原価計算表を示す。同設備による生産性及び設備投資の生産能力、生産人員、設備仕様等を検証し、原価目標より、100 円/kg 以上安価な生産システムが構築された（表 A）。

<事業性の検討>

品質管理から営業及び開発経費までの事業経費を算出し（表 B）、事業評価を実施した。マスターバッチ化による営業リスクの回避、簡易評価手法確立による品質管理費用の削減等の成果により、事業粗利目標を超える成果を得た。

表 A 原価計算表

内容			単価	備考
変動費	原材料	未利用バイオマス(間伐材)	14 円/kg	70円/kg × 20%
		FRP廃材	20 円/kg	100円/kg × 20%
		マスターバッチ樹脂	120 円/kg	200円/kg × 60%
	電力費		15 円/kg	当社コンパウンド事業実績より
	副資材等		3 円/kg	当社コンパウンド事業実績より
	計		172 円/kg	
固定費	設備償却費		40 円/kg	投資総額115百万円、投資回収係数0.21
	人件費		33 円/kg	4名、5,000千円/人
	計		73 円/kg	
原価合計			245 円/kg	

表 B 事業計算表

内容		単価	備考
製品原価		245 円/kg	
管理費	品質評価設備償却	4 円/kg	11,200千円、投資回収係数0.21
	一般管理費	12 円/kg	製品原価 × 5%
営業費用	人件費	8 円/kg	1名、5,000千円/人
	営業経費	2 円/kg	製造原価 × 1%
開発費用	開発費	12 円/kg	製品原価 × 5%
	人件費	8 円/kg	1名、5,000千円/人
事業原価		291 円/kg	
売価		350 円/kg	
粗利		59 円/kg	
粗利率		17%	

開発した技術がもたらす効果

小規模でも事業性あるモデルのため、1号機は600t/年のプラントがスタートであるが、アウトプットの市場性があり、1号機で量産品質性検証ができれば随時拡大し100万t/年の事業（5年程度；プラントは実用機が地域分散）に拡大する見込みである。成果物における競合の多くは輸入品であるため、新たな国内産業として3000億円以上（@300円/kg × 100万t）の経済効果が見込め、5000名以上50t/月 × 12か＝600t/年、100万t/年 ÷ 600t/年＝約1700プラント、3名/プラント × 1700プラン＝5100名）の雇用効果もある。展開先により若干のブレはあるが、概ね未利用バイオマス60万t/年、廃FRP20万t/年の削減効果が見込まれる。成果物の展開に関しては、代替市場であるため、既存のプラスチック製品ルートが利用でき、このルートは木質系バイオマスをプラスチックフィラーとして実用化しているウッドプラスチックでも実証しているためほぼ確立していると言える。市場参入に当たり機能面では、軽量化や低価格化等のメリット、政策面でもグリーン購入、国産バイオマス素材の利用等の追い風があることは大きい。集積地による品質格差、新規素材であるが故の長期実績等使い手側から見ると不安な面もある。

り、官学が中心となった基礎分野のサポートが不可欠となる。一方、成果物は世界的共通ニーズであり、我が国の新たな環境輸出製品あるいは環境援助技術として国際貢献ができる。

環境政策への貢献

◆「素材技術」について

＜各未利用バイオマス CNF 特有の効果＞

本技術開発成果物の用途は、金属、セラミック、木材、プラスチックの様々な分野へ展開することを想定している。これらの最終用途は、建築材料、自動車、家電、機械等多岐にわたっており、基本的な要求性能は本目標値であるが、実用に対しては、さらに細かい性能要求が追加される。

一方、今回 CNF を同一条件で製造した場合、各種未利用バイオマス特有の性能を見出すことができた（例えば、紙由来の CNF は機械部品用途、稲わら由来の CNF は家電用途等々）。具体的な用途とのマッチングは、25 年度ユーザーヒヤリング等を実施して検討を進める。

このような背景の中、未利用バイオマス発生地域にそれに該当する用途の産業（企業）があれば、地産地消の構図が提案できる事例も期待できる。

＜廃 FRP の新規用途＞

CNF は近年プラスチックフィラー等様々な分野で世界的に注目を集めている。この用途で最大の課題がコストで、このコスト問題の要因は、乾燥が容易でない点である。本技術開発成果により、廃 FRP をアロイすることで、簡易に乾燥が実現できている点は、この課題改善になっている。

現在、この効果が、FRP 中のガラス繊維（シリカ成分）に由来するものなのか、FRP に存在する樹脂成分が相乗効果を発現しているかは、さらに詳細な解析が必要であるが、FRP ゆえにこの効果が発現されれば、廃 FRP は CNF 技術にとって必要な添加剤となり、付加価値型の素材製品として提案できる。

現時点では、ほぼ 100 μ m の廃 FRP 粉末が、ディスクミルで細くなっており、これは、汎用のシリカでは固すぎて、困難なため、生産性面でのアドバンテージは持っていることは、本成果から実証している。

◆「事業開発」について

＜少量の廃棄物で事業が実現＞

第一次でのフィージビリティスタディでは、50t/月生産で、粗利 15%以上の確保が見込めている。このモデルで使用する未利用バイオマス量は、10t/月程度であるため、未利用バイオマスの大規模収集は不要である。したがって、自治体や工場レベルでの事業化が可能となり、25 年度検討するアウトプットの波及性次第（適合する用途があれば）では、実用化移行が速い。また、使い手側も高機能素材であり、秘密保持の観点から、小規模生産事業であれば、完全なタイアップ（1 つのユーザーだけの商品を作ること）も可能である。

＜新規事業として着手しやすい事業＞

本事業成果により汎用設備で設備種類も少ないので、生産での管理が容易となっている（汎用の設備のため、設備メーカーにとっても実用事例が多くケアしやすい）。さらに、敷地の問題はありますが、小型設備を大量に使用する手法で事業採算が確保できていることから、立ち上げ時の投資リスクも少ない（事業初期は少量の設備でスタートし、売上拡大とともに段階的に設備増強できる）。生産管理、設備管理及

び初期の事業投資負荷の軽減は、新規事業立ち上げにとって大きな課題となっており、本事業成果はこの課題をクリアしている。

開発した技術の事業化の可能性

本事業成果のポイントは、小規模生産でも採算性が確保できる「スモールバッチシステム」を確立した点である。そこで、この効果を最大限に活かした事業展開を検討している。本事業で開発した「ケイ酸カルシウム処理 CNF」は、市場では新規素材であり、評価から導入にはタイムラグがある。そこで、まずユーザーにおける評価段階でのサンプルワークに関しては、研究者らの機関で有している設備を利用して生産する。即ち、事業初期の投資等のリスクはない。次に第一段階においては、生産数量 10t/月までは、関連設備を有している外注で生産し対応する。外注生産においては、利益率は下がるものの、事業性効果により赤字供給の可能性はない。この第一段階でのユーザー供給が安定したら、廃棄物発生個所（第一工場は、研究者らが管理しやすい静岡周辺での生産を予定している）において、25t/月レベルの設備投資（約 6 百万円）で事業開始する。ここで段階投資が可能である効果も、本事業開発で得られた成果によるものである。ここで、市場拡大に併せ、第一工場を随時拡大し、50t/月（あるいは供給できる最大量）まで最大の規模での供給体制を構築する。続いてさらに市場が拡大したら、第一工場のモデルに併せ、拠点拡大を図る。

一方、ターゲットとするユーザーであるが、フロントユーザーが樹脂加工メーカーである点を鑑み、初期はプラスチック代替用途で展開する。実際には、自動車や家電等のユーザーニーズと本事業成果物の性能が合致するプラスチック部材代替が初期ターゲットとなる。プラスチック部材代替で導入し、市場側がこのような素材に慣れてくれば、随時セラミックや金属等プラスチック部材以外の分野へ進出する。時期的には、事業終了後、5 年程度までは、プラスチック用途中心で、5 年目以降徐々にプラスチック以外の部品にも展開を見込んでいる。この時間差は、ユーザーでの評価期間の違いと考えても良い。

以上まとめると、本事業終了後、1 年間は、サンプルワークも含め外注生産体制でプラスチック市場に対し供給する。2 年目より、廃棄物発生個所に第一工場設立し、3 年目に第一工場本格生産、4 年目より、新規拠点追加を行う。自動車や家電等へビーユーザーが立ち上げれば、拡大は加速度的になることが見込まれ、遅くとも 5～7 年目においては、100 万 t/年事業となる見込みである。

1. 事業の目的

1.1 本事業に至った背景

1.1.1 廃棄物の観点から

ガラス繊維等繊維系素材とプラスチックの複合材料である繊維強化プラスチック FRP は、機械的特性や耐久性等高い機能を有しており、自動車等の輸送機器、家電部品等の機械部品、バスタブ等の建築材料等々、様々な分野に活用されている。これらの FRP 素材のほとんどは、プラスチックに熱硬化性樹脂を利用しており、ポリエチレンやポリプロピレンに代表される熱可塑性樹脂のように直接元の原料に還元するマテリアルリサイクルは困難な材料である。しかしながら、FRP からガラス成分を取り出す技術、熱硬化性樹脂を炭化水素素材に分解回収する技術あるいは、樹脂成分と無機成分を双方活用するセメントへの原燃利用等様々な取り組みが進められている。ところが、これら有効利用用途の実現には、大量に収集できることが必要とされており、浄化槽や舟艇のような大型の廃棄物や自動車、家電等一部回収システムが確立している分野に限定される。一方、1980 年代より、バスタブを中心に住宅設備にも FRP が広く利用されており、近年の住宅リフォーム需要を背景に、住宅に利用されていた FRP が廃材として大量に発生し始めている。着工時期とリフォーム時期は住宅により異なるので、廃棄量の統計値はないが、現在リフォームターゲットとなっている築 15 年以上の住宅から類推すると、潜在的に 200 万 t 以上の住宅系廃 FRP が存在する。しかしながら、住宅系の廃 FRP は、地域に分散して賦存しており、大量収集が困難であることから、前述した既存の FRP 有効利用技術が活用できず、かつ無機素材を大量に含んでいるため、汎用プラスチックのようなサーマル利用にも課題が多い（灰分の問題）。

未利用バイオマス等廃棄物系バイオマス（本事業で対象としている未利用バイオマス等廃棄物系バイオマスとは、主として、廃紙や廃木材、間伐材も含む林地残材、剪定枝など木質（セルロース）バイオマス系廃棄物である；以降、廃棄物系バイオマスと称す）は、主成分がセルロースであり、紙産業をはじめ様々な産業分野から排出される。また素材のほとんどが有機物でありことから近年は燃料としても注目されている。しかしながら、大量に収集できる廃棄物系バイオマスは、製紙業界やエネルギー業界等で利用できるが、少量の場合、収集費用等の観点から、付加価値型の利用が必要となる。したがって、剪定枝、刈草、木材加工端材、古新聞等、稲わら等の農業系廃棄物等地域に分散賦存している廃棄物系バイオマスも多く、大量収集型の有効利用法は活用できない。さらに廃棄物系バイオマスの中には水分を多く含んでいるものもあり、サーマルリサイクルが困難である。

これら、廃 FRP 及び廃棄物系バイオマスの一部では、「地域に賦存している」、「含有成分の影響によりサーマルリサイクルができない」の共通した課題を持っており、少量利用でかつ付加価値の高い有効利用法が求められている。

1.1.2 素材産業の観点から

国民生活が豊かになり、自動車をはじめ家電、住宅設備等において、より高機能が求められる時代になった。機能や性能の向上には製品だけではなく、素材側へも様々な要求が求められている。このようなニーズは、分別の簡易化等の観点からの素材の同一化、省エネルギーや使い勝手の観点からの軽量化、形状や色柄等のデザイン性の向上、資源保護の観点からの素材の非石油化、素材の低コスト化等に見られるように今までの素材では対応できなくなっている。素材産業においても植物系プラスチックやナノテクノロジーの導入等、新しい材料や技術分野において様々な取り組みがなされているが、これら新たなニーズに対応できる素材技術はない。このような中、木質系素材を新たにプラスチックフィラーとし

て利用する技術が注目されてきた^{※1}。このような素材は、軽量化が可能であり、木質系素材であることから石油系資源削減にも貢献できる。しかしながら、ガラス繊維やタルク（粉末滑石）、炭酸カルシウム等異種の素材を添加するフィラー充填プラスチックの分野においては、素材の統一が実現できるものの金属、セラミックや木材等のプラスチック製品以外の素材への置き換えは課題がある。この課題を解決する素材として CNF が注目されているが、素材のコストやプラスチックに添加するための処理（乾燥や表面処理等）に課題^{※2}があり、実用化には至っていない。すなわち、CNF 製造コストとプラスチック添加へ適した処理が確立すれば、廃棄物系バイオマスの有効利用は促進できる。

1.1.3 事業目的

私たちは環境研究総合推進事業等を利用した研究^{※3} をとおして、廃棄物系バイオマスから素材産業を革新する CNF の合成技術及び廃 FRP を利用し、CNF を様々な製品に利用できる変換技術を開発した。しかしながら、本技術を実用化するためには、原材料である廃 FRP や廃棄物系バイオマスが安定的に調達でき、かつコストや品質が市場に適合できる仕組みづくりが必要となってくる。

そこで、本事業では、新たな市場ニーズに適合する CNF を廃棄物系バイオマスから合成し、廃 FRP を用いプラスチック等複合材へ容易に変換できる新規素材の技術を開発することを目的とした。また、この新規素材製造事業が、小規模（対象廃棄物が発生する小さな地域）生産でも採算性が確保できるビジネスモデルの構築することを目的とした。

1.2 事業目標の設定

本事業の実現のためには、新規素材として提案できる性能目標と、この新規素材を市場に導入できるモデルを構築する事業目標がある。

1.2.1 性能目標の設定とその狙い

事業では新規素材をプラスチック代替用途だけでなく、金属、セラミックスあるいは木材等代替用途への展開を目指している。したがって、これら素材用途にも適合できる性能目標を設定した。

◆密度=1.5 g/cm³ 以下、熱膨張係数=2.5×10⁻⁵/K 以下、24 時間吸水率=2%以下

- ・金属やセラミック素材より軽量で、金属と同レベルの熱膨張安定性
- ・吸水性のあるバイオマス素材が原料のため、耐水性の確保（ナイロン樹脂と同等の吸水率）

本事業がターゲットとしているセラミックや金属は、切削等の後加工や複雑な形状への加工は困難である（手間をかければできるが）。本事業成果が目標とする用途は、自動車等輸送車両に利用されているプラスチック製品や複合金属部品の代替、家電や事務機器の歯車等可動部分に利用されているセラミックや金属部品の代替及び住宅資材であるアルミサッシや木製サッシの代替等である。新規素材の導入は、機能性や利便性の向上だけではなく、軽量化による省エネルギー性、省資源性等の環境負荷軽減にも寄与する。

※1 伊藤弘和、「ウッドプラスチック」、成形加工学会誌。24(12)、p686(2012)

※2 伊藤弘和、樋口逸郎、牧瀬理恵、岡本真樹、「ナノセルロースがウッドプラスチックを革新するためには」、Cellulose Communication、21(2)、p52(2014)

※3 平成 22 年度次世代循環型社会形成推進技術基盤整備事業、「木質ボード廃材及び容器リサイクル樹脂を用いた機能化コンパウンドの FRP 廃材を利用した改質」

1.2.2 事業目標の設定とその狙い

本事業では、前述した新規素材を使い勝手の良い複合材（コンパウンド）化までを行う事業モデルにおいて、廃棄物が発生する地域で、小規模でも市場価格に対応できる採算性と経済性を確保できる仕組みづくりを構築することが目標となる。即ち、

- ◆市場競争力のある複合材（350 円/kg以下）を 50t/月の事業規模で事業収益性（粗利 15%以上確保）を確保し、原料（未利用バイオマス+廃 FRP）から複合材まで一貫した生産システムを実証
 - ・ガラス繊維強化プラスチックレベルの原価設定
 - ・地域規模で発生する廃棄物量を想定した事業規模の設定

複合材の製造コスト（350 円/kg以下）は、ガラス繊維強化プラスチックを意識している。但し、単純に同一部材と同じものを作った場合のコスト競争ではなく、製品の大型化や従来素材では対応できなかった複雑形状の実現等の効果も期待できる。さらに、本事業のフロントユーザー（最初に取扱産業）は、プラスチック成形メーカーであり、汎用のガラス繊維強化プラスチックと同じ価格に設定することで、想定している用途以外にも拡大（例えば、ガラス繊維では、ガラス繊維より製品サイズの小さい微小部品は強度補強できない場合があり、ガラス繊維により流動性が低下するため、強度補強が必要でも製品サイズが大きい場合、成形できない等、単に代替以外の効果も見込める）も期待している。一方、事業規模については、廃棄物の発生量から設定されているだけではなく、事業リスクへの対応も含んでいる。即ち、市場規模としては、大きなマーケットを想定しているが、新規素材であり、ユーザーによる製品評価期間が必要なため、事業立ち上がりには時間を要する。大規模事業では、少量生産時の事業初期赤字が大きくなる。したがって、市場拡大に合わせ小規模事業を随時拡大することで、事業初期のリスクを軽減できるメリットもある。

1.2.3 廃 FRP 及び廃棄物系バイオマス利用の効果の必然性

本事業においては、原材料として廃 FRP や廃棄物系バイオマスを設定した理由は、コストや環境貢献もあるが、以下に示すように、両廃棄物の組成や性状から本事業課題解決の一助にもなる。

廃 FRP は、不飽和ポリエステル等の樹脂成分とガラス繊維等のシリカ成分の双方が含有された素材である。シリカ成分は硬度が高いため、廃棄物系バイオマスから CNF を合成する際の粉砕促進剂的役割を担っている効果もあるが、シリカとセルロースの相容性がある^{※4}ため、CNF 表面に容易に廃 FRP がアロイされる効果もある。さらに、ガラス繊維は非晶質のシリカのため、廃 FRP アロイ CNF 表面に形成させるケイ酸カルシウム水和物の反応性が高いこと^{※5}も挙げられる。さらに、樹脂成分も共存しているので、プラスチックと複合化した際、この樹脂成分から推測すると、プラスチックとの相容性を強化させる働きも期待できる^{※3}。このような特性を持つ素材を新たに合成するには費用がかかり、現実的な機能化手法ではない。

※4 L. Y. Mwaikambo, M. P. Ansell, 「Effect of chemical treatment on the properties of hemp sisal, jute and kapok composite reinforcement, *Angewandte Makromolekulare Chemie*, 59(9), p1303(1999)

※5 松下文明、青野義道、柴田純夫、濱幸雄、「水蒸気吸着等温線による珪酸カルシウム水和物の細孔構造解析、*コンクリート工学年次論文集*, 28(1), p599(2006)

一方、バイオマス素材を CNF 化する場合、高含水状態で長時間粉碎しなければならない。これは、含水しなければ、セルロース繊維が解繊されないためと、強固なセルロース繊維同士の結合を破壊しなければならないためである。剪定枝、草本系廃棄物、間伐材等の廃棄物系バイオマスは、水分を持っており、CNF 化における湿潤粉碎の時間を短縮できる。逆に、木質ボードや紙などの乾燥している廃棄物系バイオマスでは、製造工程において、粉碎や解繊等セルロース繊維自体ダメージを受けており、粉碎しやすくなっている場合もある。

以上のように、親和性の非常に強い廃 FRP・CNF アロイ形成に互いにプラスの効果を持つ循環資材である。

尚、本事業で対象としている「未利用バイオマス等廃棄物系バイオマス、廃棄物系バイオマス」とは、主として、廃紙や廃木材、間伐材も含む林地残材、剪定枝など木質（セルロース）バイオマス系廃棄物である。

1.3 本事業開発のポイント

本事業のポイントは、廃 FRP と廃棄物系バイオマスから高機能 CNF 複合材を製造する技術の開発と、新規素材を廃棄物が発生する小規模地域で生産するビジネスモデルを、少量でも採算性が見込める手法で確立する事業開発である。以下にその概略を図 1.1、1.2 に示す。

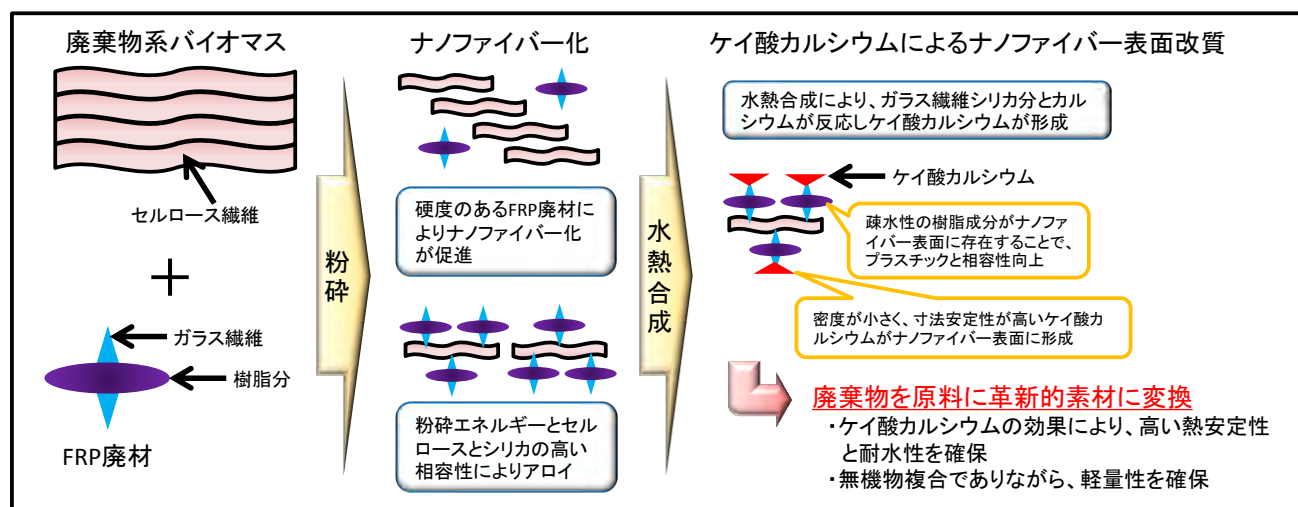


図 1.1 廃 FRP と廃棄物系バイオマスから高機能 CNF 複合材を製造するプロセスフロー

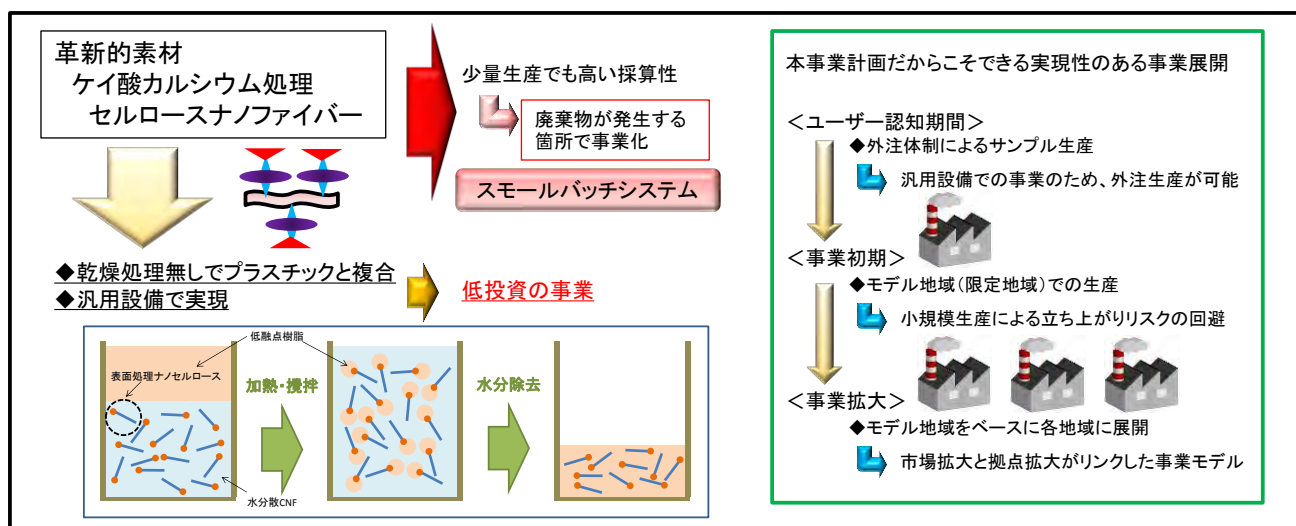


図 1.2 廃棄物発生地域における段階的生産ビジネスモデル（少量でも採算性が見込める手法）の確立

2. 開発した技術の詳細

2.1 未利用バイオマス等廃棄物系バイオマスからのセルロースナノファイバー（CNF）合成

2.1.1 概要

各種性状の異なる廃棄物系バイオマスから高いアスペクト比効果を有するセルロースナノファイバー（以下、CNF と略記する）を合成するために、各種粉碎せん断条件を検証するとともに、この CNF を量産できる手法を見出した。この成果により、目標性能を確保につながり、さらに、事業目標におけるコスト目標達成に貢献した。

尚、図 2-1 には、木繊維から CNF 最小単位までの模式図を示すが、本報告書では、CNF を「繊維径 100nm 前後、繊維長サブ μm ～数 μm 程度のもの」と定義した。

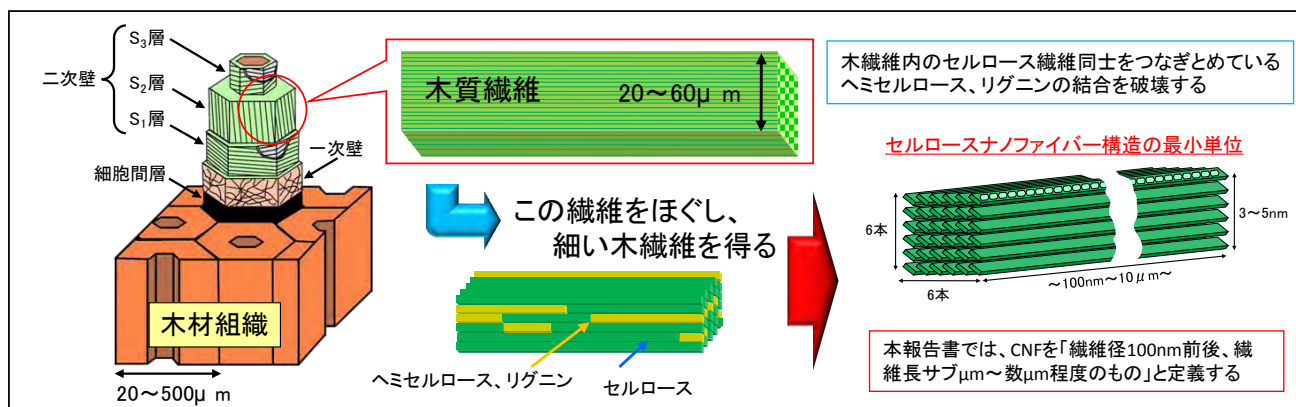


図 2-1 木繊維から CNF 最小単位までの模式図

2.1.2 ラボスケールにおける粉碎条件の検討

ここでは、廃棄物系バイオマスの中で、CNF 化が最も困難な木材由来のバイオマスにてラボスケールで条件検討した。木材由来のバイオマスは、セルロース繊維が集中する細胞 2 次壁から、効率的にアス

ペクト比効果のある CNF を抽出する（図-2.1）粉碎条件の確立がポイントとなる。

セルロース繊維（木質繊維）を効率的に解す（解繊）ためには、高いせん断力を与えなければならない。しかしながら、高いせん断を与えた場合、セルロース繊維も解れるが、繊維自体も断裂し、アスペクト比の高い（細くて長い）CNF を得ることは困難となる。そこで、セルロース繊維同士が水素結合で結合している点に注目し、高含水状態（水素結合を膨潤させてほぐし易くする）での粉碎により高いアスペクト比の CNF が得られるかどうかを検討した。さらに、結果は示さなかったが、高含水状態であるとセルロース自体の強度も増加し、繊維が断裂しにくくなるという利点も見出された。ここで、膨潤を促進させるために、水酸化ナトリウム添加での粉碎も検証したが、量産化時でのアルカリの中和による作業工程の増加、作業環境（設備の耐薬品性処理等での設備費アップ）の改善等によりコスト高になるので、最終的にこの手法は採用しなかった。繊維が断裂し難い高含水粉碎を見出したことで、粉碎時には高いせん断エネルギーを与えることが可能となった。そこで、高いせん断エネルギーを与えることが可能な粉碎装置の検討を行った。ハンマーミル、ボールミル、遊星ボールミルにて、回転数（せん断強度レベルの評価）、時間等の条件評価を行った結果、遊星型のボールミル（図 2-2）が最も適していることが確認された。遊星ボールミルは、回転数と時間でせん断力をコントロールできる。

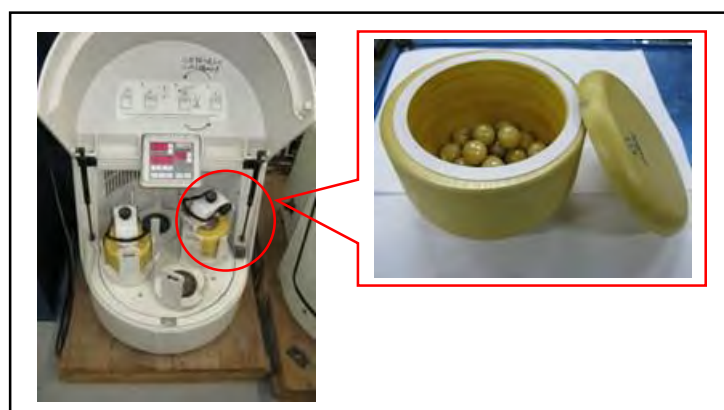


図 2-2 遊星ボールミル

2.1.3 CNF 粒子サイズの測定法とその評価

図 2-3 には遊星ボールミルの回転数と粉碎時間におけるメジアン径を示す。本メジアン径を測定した粒度分布計は、堀場製作所社製 LA950 である。この粒度分布計は、水分散した粒子を循環させ、レーザー照射によりその粒子の面積を測定し、この面積を円形に換算する装置である。CNF を評価するにあたり、粒度分布は重要な評価項目ではあるが、細くて長い繊維状の素材も面積計算されるため、CNF のようなアスペクト比の高い素材では、同一の繊維径でも長くなるほど、面積が大きくなる（粒度分布が大きくなる）欠点もある。しかしながら、CNF サイズで正しくアスペクト比を評価できる装置はなく、ここでは、結果を示さなかったが、電子顕微鏡写真での画像との比較から、メジアン径が $50\mu\text{m}$ 以下であれば、本事業で定義としている CNF となることが確認されている。遊星ボールミルの回転数が高いほど早く微粉化され、同様に遊星ボールミルの粉碎時間が長いほど微粉化されており、遊星ボールミルが廃棄物系バイオマスに与える粉碎エネルギーに依存している。

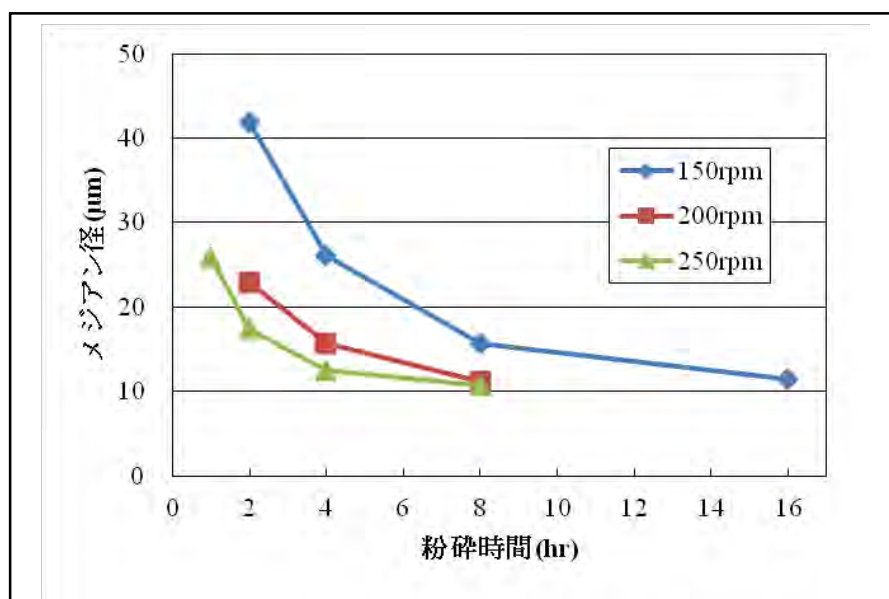


図 2-3 回転数／粉砕時間とメジアン径の関係

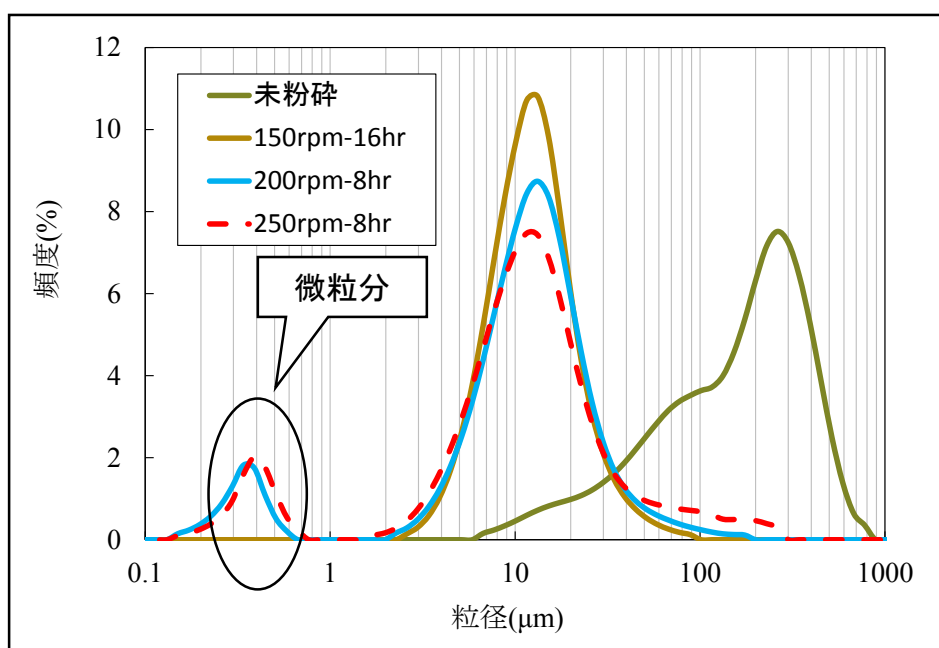


図 2-4 回転数／粉砕時間と粒度分布

一方、図 2-4 に異なった回転数で粉砕処理したもので同程度のメジアン径を持つ CNF の粒度分布を示す。回転数が高い 250rpm 及び 200rpm においては、平均粒径（頻度）のピークは、 $15\mu\text{m}$ であるが、同時に $1\mu\text{m}$ 以下の微粒分にもピークが認められる。これは、湿潤状態での粉砕でも、高いせん断を与えすぎるとセルロース繊維が断裂することを意味している。

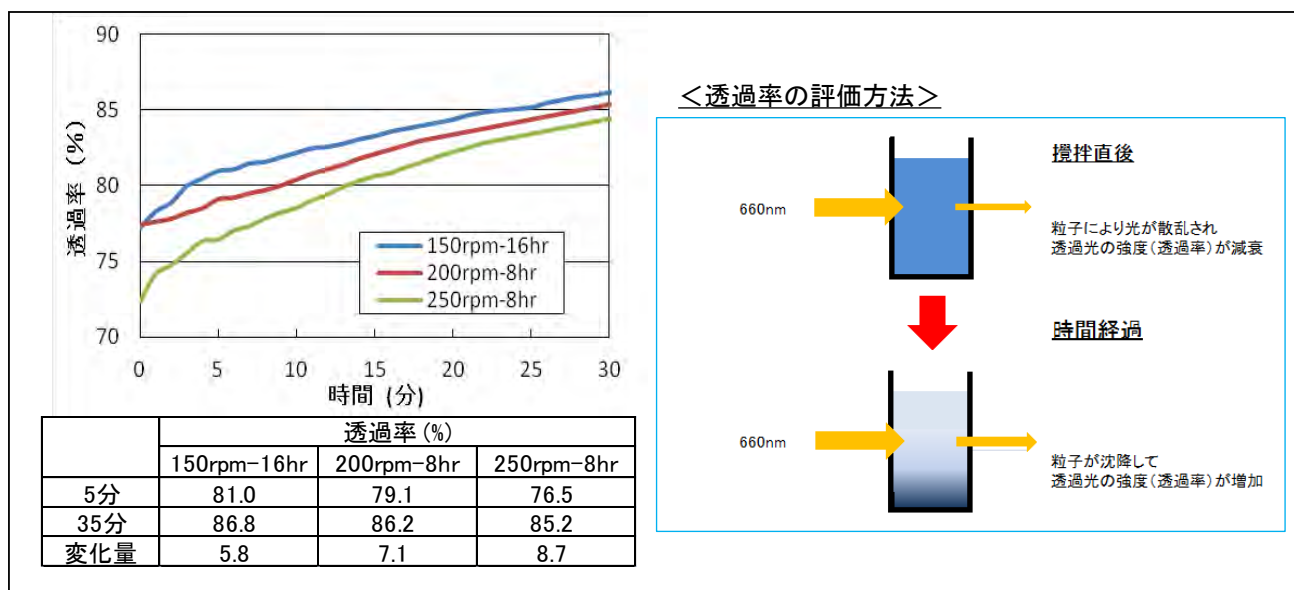


図 2-5 回転数／粉砕時間と透過率変化

次にアスペクト比に関して評価をした。目標性能を確保するためには、ナノ化されているだけではなく、繊維補強効果（高いアスペクト比）を有していなければならない。図 2-5 に異なった回転数で処理した同じメジアン径の CNF の透過率の変化量を示す。これは CNF 濃度約 1%の水溶液を、十分に攪拌後、静置した際の上澄み液の透過性を評価したものである。本来、同一素材で粒子の大きさ、形状が同じであれば、ストークスの式に従ってこの粒子が沈降する速度も同じであり、上澄み液の透過性も同じとなる。しかしながら、この沈降法による透過率ではメジアン径は同じであるものの CNF 形状（アスペクト比や CNF 表面形状）が違っている場合、沈降する挙動が異なってくることが考えられることから、静置 5 分後と 35 分後の透過率の変化率で評価した。即ち、同じ CNF メジアン径でも、繊維状、表面の毛羽立ち等 CNF の沈降に抵抗する因子があれば、変化率は小さくなる。透過率の変化率から、遊星ボールミルの回転速度が小さくなるほど、変化率は小さくなっている（沈降しにくくなっている）。

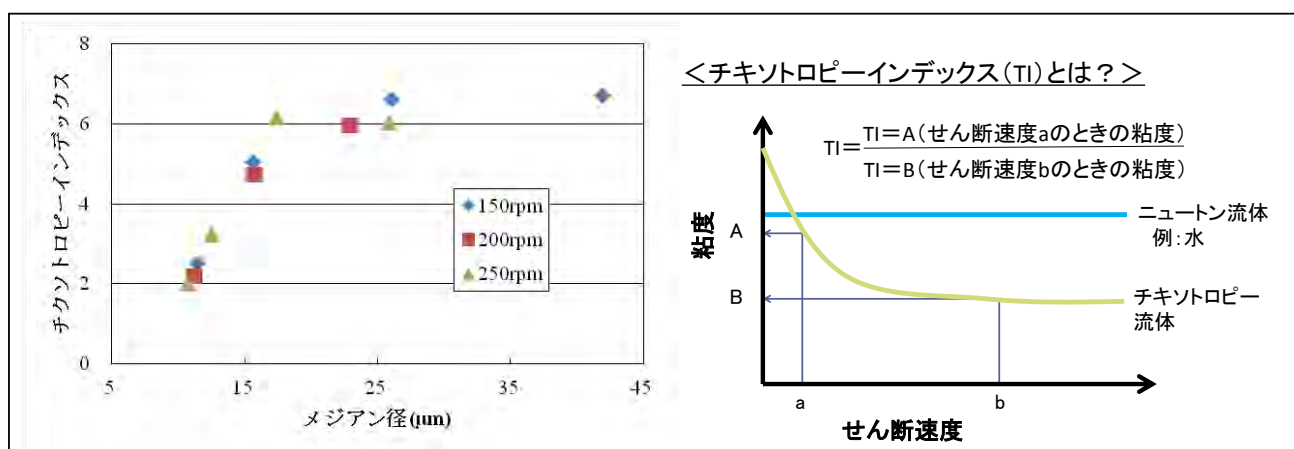


図 2-6 回転数／粉砕時間とチキソトロピーインデックス

したがって、異なる回転速度で粉碎処理された CNF は、メジアン径は同じでも形状に変化があることが示唆される。その理由として 2 つの事項が挙げられる。1 つは、回転数が低いほど、CNF のアスペクト比が高くなり（繊維状となり）、全体のかさが高くなったことで、CNF が沈降しにくくなったことである。もう 1 つは、CNF 表面に増加した微細な毛羽立ちにより抵抗が増え、CNF の沈降が遅くなったことである。以上の考察を検証するために、回転粘度計を用いたせん断応力の違いによって求められる粘度の差から、チキソトロピー性（チキソトロピーインデックス）を評価した（図 2-6）。

チキソトロピーインデックスは、アスペクト比が高くなるほど高せん断時の粘度が繊維の配向により大きくなるという傾向が評価できる指標である。本実験で求めた全てのメジアン径において、遊星ボールミルの回転数が低くなるほど、チキソトロピーインデックスは高くなっている。即ち、回転数が小さいほど、アスペクト比の高い CNF が生成されることを明らかにした。

図 2-7 には、メジアン径が $15\mu\text{m}$ における遊星ボールミル回転数 150rpm と 250rpm の CNF 電子顕微鏡（SEM）画像を示す。250rpm の CNF は、細くて短い CNF が多く認められる（細かい CNF の凝集体）。これは、図 2-4 の粒度分布結果で確認した微粉碎物が存在することを裏付けている。一方、150rpm においては、細くて長い CNF が多く存在していることが確認された。したがって、前述した沈降速度（透過率変化率）及びチキソトロピーインデックスの結果と合致している。ここで、本事業において重要な成果として、従来 SEM 等の特殊設備でしか評価できなかった CNF のアスペクト比を、簡易な設備で測定できる沈降法とチキソトロピーインデックスにおいて測定できた点である。SEM は、高額な装置である点に加え、測定者にある程度のスキルが必要となり、本事業のように、小規模生産の現場への導入は、投資による設備償却への負荷、人員増等、事業の採算性に悪影響を及ぼす。一方、沈降法及びチキソトロピーインデックス評価用の装置は、総額でも 100 万円以上は必要とせず、加えて品質管理に要する作業員数が少ない。これらの効果等は、「スモールバッチシステムの構築」の章で具体的に示すが、ここでの研究成果は、性能目標の達成だけではなく、事業目標達成にも大きく貢献できるものであった。

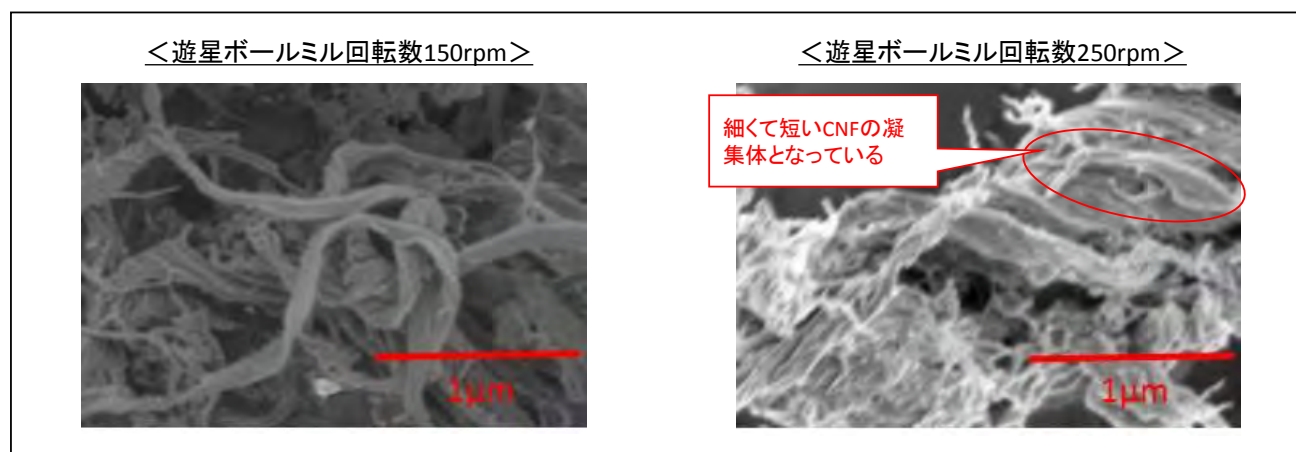


図 2-7 各回転数における CNF の SEM 画像

表 2-1 評価した廃棄物系バイオマス

廃棄物系バイオマス	仕様
間伐材	スギ間伐材(いび森林資源活用センター提供)
木質廃材	パーティクルボード廃材(当社キッチン生産における加工廃材)
草本系廃材	ケナフ繊維残渣(丸文製作所提供)
農業系廃材	稲わら(浜松市米農家提供)
紙廃材	シュレッダーダスト(当社コピー用紙廃材)

2.1.4 量産ベースでの実証

ラボベースにおいて、最も CNF 化し難い木質廃棄物系バイオマスにて処理条件を確立した。そこでここでは、この確立した条件をもとに量産用設備及びその他の廃棄物系バイオマスについて CNF 化条件を検討した。表 2-1 に今回使用した廃棄物系バイオマスを示す。量産用設備については、遊星ボールミルと同じ効果のある粉砕装置としてディスク型のミルを調査した。湿潤状態で利用する汎用のディスク型ミルは、パルプの解繊に用いるリファイナーが一般的である。しかしながら、パルプ用のリファイナーは大型設備しかなく、本事業のスモールバッチシステムには合致しない。また、CNF を量産する装置として、高圧ホモジナイザーが広く知られているが、現時点で汎用装置ではなく、設備投資負担が高くなるため活用できない。そこで、類似の能力を有する装置として、食品の微粉化に使われている石臼型のディスクミル（増幸産業、マスコロイダー）を選定した（図 2-8）。これは豆腐用の大豆粉砕やコーンスープ用のコーンの粉砕装置であり、湿潤状態で使用できるだけでなく、少量生産にも対応でき、さらには食品分野では汎用の設備として利用されている設備のため設備投資負担も少ない。

遊星型ボールミルと同様、同装置もせん断力を変えることができる（ディスクミルの場合は、ディスクの回転数でせん断力をコントロール）。図 2-9 に前節と同様最も解繊が困難と想定される間伐材で行った粉砕実験におけるディスクの回転数と粒度分布を示す。粒度分布の結果からは、CNF 化における粒度分布状態の大きな違いは認められなかった。また、図 2-10 に異なるディスク回転数粉砕された CNF 溶液の透過率を示す。回転数が大きいほど、透過率が高いことが分かるが、その傾き（透過率の変化率）に大きな差はなく、回転数が高いほどアスペクト比が低くなっているものと考えられる。



図 2-8 評価に用いたディスク型ミル

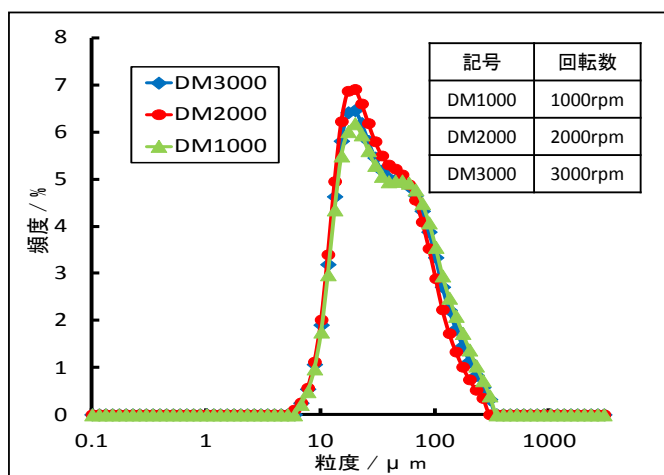


図 2-9 ディスク回転数と粒度分布

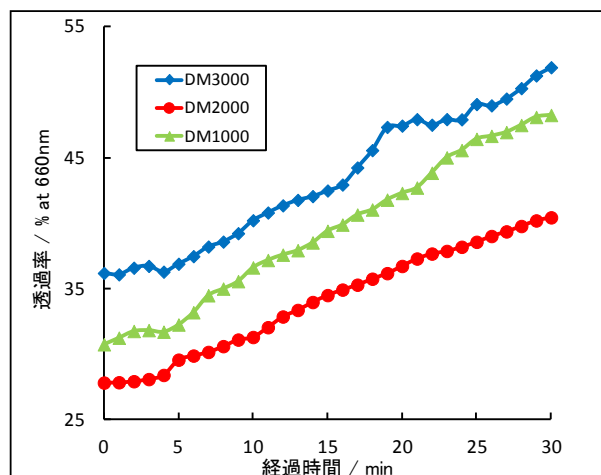


図 2-10 ディスク回転数と沈降速度

粒度分布状態が同じであるにもかかわらず、透過率が異なっている点を推察するために、ディスクミル各ディスク回転数における粉碎初期の木粉表面を SEM にて観察した (図 2-11)。ディスク回転数 1000rpm においては、木粉自体が大きく割れていることが分かる。よって、木粉自体が大きく割れていき、徐々に CNF 化されると考えられる。この場合、大きく割れた木粉は、ディスク内に滞留し (ディスククリアランスより大きいとディスクより排出されないため)、木粉に過剰なせん断が加わることで、木繊維 (セルロース繊維) 方向だけでなく、繊維に対し垂直な方向にも粉碎され、アスペクト比の小さな CNF になると予想される。ディスク回転数 2000rpm では、木粉表面に細長い繊維が多く目立つ。このことから、木粉表面から順次 CNF が剥離するような形で合成されていると考えられる。この剥離した形で合成された CNF は、SEM 画像からも明らかのように、アスペクト比の高い CNF となっていると推察される。ディスク回転数 3000rpm も同様に木粉表面から剥離しているように見られるが、その長さはディスク回転数 2000rpm に比べ短い。これら推察から、ディスク回転数 2000rpm が、高いアスペクト比の CNF が得られたため、沈降法による透過率に差が生じたと考えられる。以上の結果から、ディスク回転数は、CNF のアスペクト比を制御する重要な因子であることが確認された。

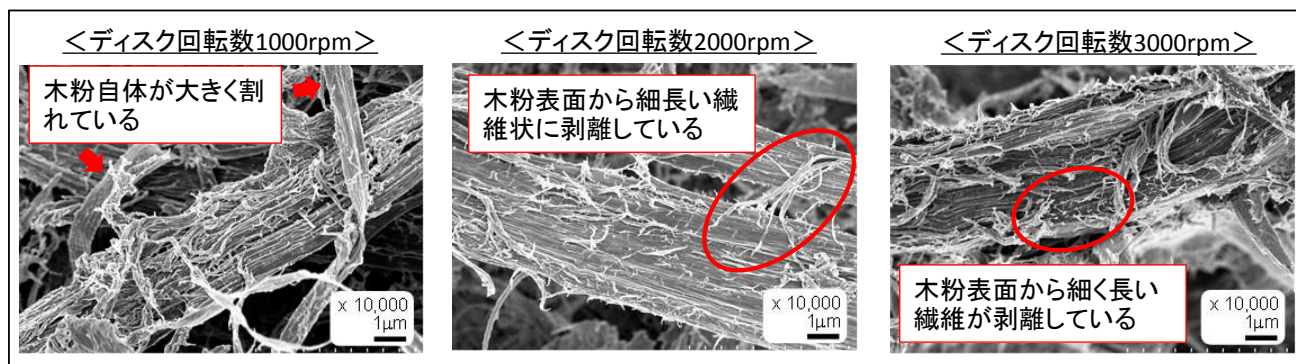


図 2-11 各ディスク回転数における粉碎初期木粉表面の SEM 画像

間伐材での粉碎条件をベースに、各種廃棄物系バイオマスの CNF 化のための粉碎処理を実施した。ここで、ケナフは、廃棄物系バイオマスではないが、本事業の評価において草本系廃棄物が安定的に調達できないため、その代替として用いた。さらに、ケナフの利用は、今後拡大する可能性もあり、利用が促進すれば、再利用の手法も課題となることから、中長期的な視野も入れ、評価に用いた。また、近年稲わらの利用は増えてきてはいるが、本事業のように付加価値が高い手法を提案することを目的としている。加えて、草本系廃棄物の中には、シリカ分を含んでいるものも多く、稲わらはシリカ成分が多く含有されていることから、この影響因子を確認することも意図されている。図 2-12 には、各種廃棄物系バイオマスから得られた CNF の写真とディスクミル処理におけるメジアン径を示す。稲わら及び紙では粒径が大きくなってはいるが、全ての廃棄物系バイオマスで CNF 化できている。稲わら、紙においても粉碎時間を延長すれば他の廃棄物系バイオマス同様のサイズまでは微粉化可能である。しかしながら、本事業の目的は細かい CNF を作るのではなく、目標とするコストにおいて、目標とする性能を確保することである。そこで、本事業では、生産性を考慮した条件で進めていく。

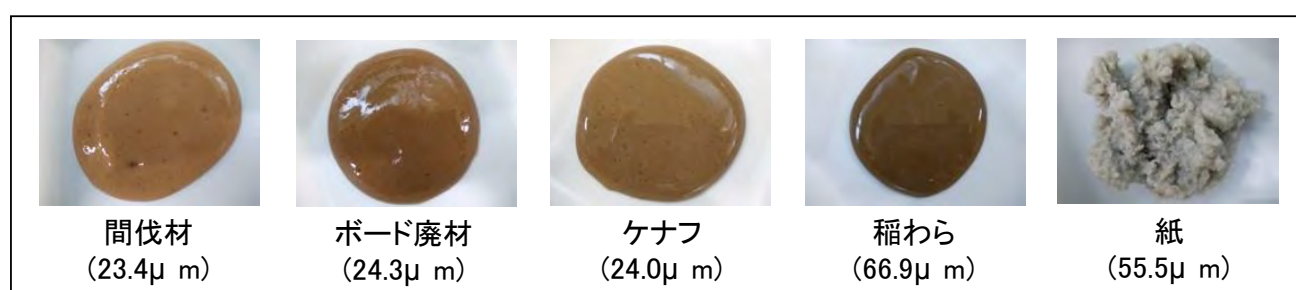


図 2-12 各種廃棄物系バイオマスから得られた CNF

図 2-13 には、各種廃棄物系バイオマスにおける生産性を示す。目標とする製造原価を達成するためには、20kg/hr 以上が必要であり（50t/月×CNF 添加量 20%÷稼働日 20 日÷稼働時間 24 時間＝CNF 時間当たりの生産量 20kg/hr）、全ての廃棄物系バイオマスにて目標値を達成している。したがって、本量産設備は、本事業における CNF 量産設備として適していると判断した。

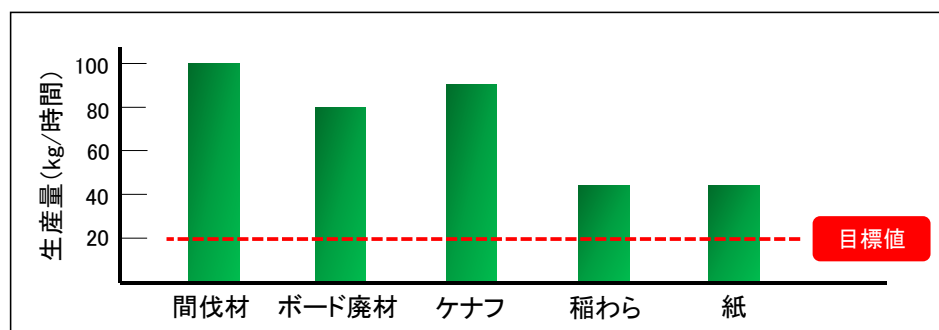


図 2-13 各種廃棄物系バイオマスの生産性評価

2.2 廃 FRP とセルロースナノファイバー(CNF)のアロイによる高機能化

2.2.1 概要

本技術課題は、CNF 表面に廃 FRP をアロイする表面処理手法を検討することである。ここでのポイントは、親水性 CNF を疎水性のプラスチックと相容させるため、CNF 表面を親水性の低いケイ酸カルシウムで表面被覆する技術であり、ケイ酸カルシウムは、廃 FRP 粉末中のガラス繊維成分(ケイ酸成分)を利用し、CNF 表面をケイ酸カルシウムで表面被覆されやすいように、予め CNF 表面に廃 FRP 粉末を固着させることである。廃棄物系バイオマスを高せん断で粉砕する際、廃 FRP 粉末を同時添加することで(ここでは、この処理のことをメカニカルアロイと言う)、粉砕エネルギーにより、CNF 表面に多くの廃 FRP 粉末が固着した。この廃 FRP 粉末が固着した CNF を水熱合成することで、CNF 表面にケイ酸カルシウムが形成され、プラスチックと相容性のある CNF が合成された。同時に、硬い廃 FRP が添加されることで、アスペクト比の高い CNF が合成できる点も確認された。この表面処理効果により、複合化するプラスチックへの相容性が改善され、目標性能が達成された。さらに、メカニカルアロイ効果による表面処理時間の短縮及び従来課題のあった CNF の乾燥性の改善という新たな効果を見出し、事業目標におけるコスト目標達成にも大きく貢献した。

2.2.2 廃 FRP 粉末アロイ技術の構築

廃 FRP 粉末は、不飽和ポリエステル系 SMC (ユニットバス防水パン) 端材をハンマーミル(増幸産業; マスコロイダー/ハンマーユニット)にて粉砕、#100 メッシュふるい(約 $100\mu\text{m}$)を通過したものをを用いた。図 2-14 に間伐材を CNF 化する際に、廃 FRP 粉末を同時に添加した場合の SEM 画像を示す。廃 FRP を添加し粉砕した方が、細くて長い(高アスペクト比) CNF が得られたことが分かる。SEM 画像からは確認できないが、これは、硬度のある廃 FRP 粉末が CNF 粉砕時の助剤として働いていることが考えられる。廃 FRP 中のシリカ成分(ガラス繊維)はセルロースと相容が高く、解砕された繊維間に順次廃 FRP が入り込むこともこの効果発現の要因であると予想される。

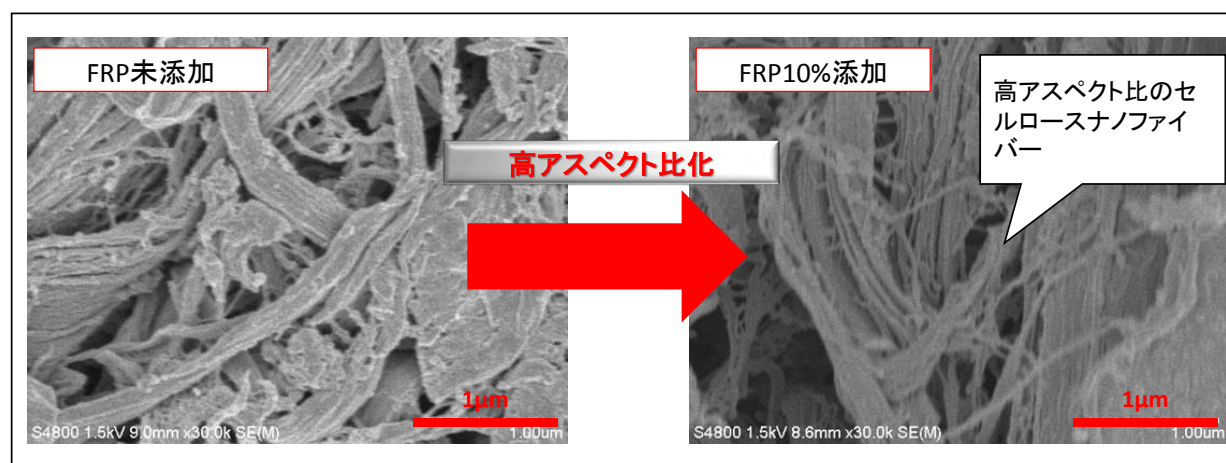


図 2-14 廃棄物系バイオマス、廃 FRP 粉末同時粉砕の効果

そこで各種の廃棄物系バイオマスに廃 FRP を添加し、実機(ディスクミル)にて同時粉砕を行った。廃 FRP 添加の有無により、見かけ上 CNF の状態に大きな差は認められない(図 2-15)。また、表 2-2

に前項ディスクミルにおける CNF 化の量産で設定した条件で得られた粒径を設計条件とした場合の生産能力を示す。

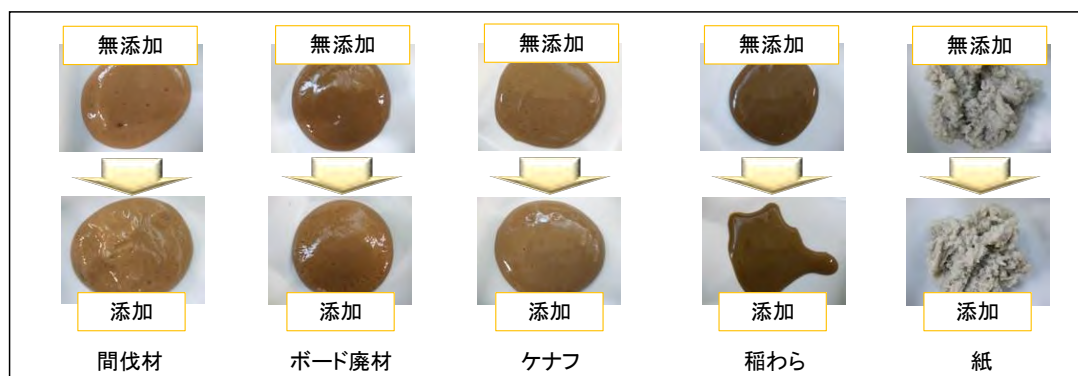


図 2-15 廃 FRP 粉末添加／無添加によって生成される各種廃棄物系バイオマスの CNF 写真

表 2-2 廃 FRP 粉末添加／無添加による CNF の生産性比較

廃棄物系バイオマス		間伐材	ボード廃材	ケナフ	稲わら	紙
目標とする粒径		約25 μ m	約25 μ m	約25 μ m	50～60 μ m	50～60 μ m
生産能力	FRP無添加	100kg/hr	80kg/hr	92kg/hr	44kg/hr	55kg/hr
	FRP添加	783kg/hr	857kg/hr	729kg/hr	735kg/hr	101kg/hr

廃 FRP 粉末無添加での生産量は、過去の CNF 製造実験から得られたデータをもとに小型設備での数値から換算しているため、多少の差異はあるが、大きく異なっていることはないと判断する。表から廃 FRP を添加することで、高い粉碎性が確認された。本設備の生産量の目標（目標原価を達成するための生産量）は 20 kg/hr 以上であり、今回評価に用いた廃棄物系バイオマス全てにおいて、目標値を大きく上回った。紙も目標値は大きく上回っているが、他の廃棄物系バイオマスより生産性が低かった事由は、同一濃度では、CNF の粘度が高く、ディスクへの食い込みが低くなったことが考えられる。紙においては、濃度等の調整により改善できると考えられる。

図 2-16 に量産機で得られた各種廃棄物系バイオマス由来の CNF のメジアン径を示す。同じ材料に対しては同一目標粒径を CNF 化しているの、廃 FRP 粉末添加、無添加にかかわらずほぼ同じ平均粒径になっている。ここで、特筆すべき点は、廃 FRP も微粉化されている点である。アロイ化に使用した廃 FRP 粉末（平均粒径 100 μ m）は処理後には図 2-14 でも確認できないほどに微細化されていた（但し、この考察を裏付けるため、溶かして確認する等の評価は行っていない）。

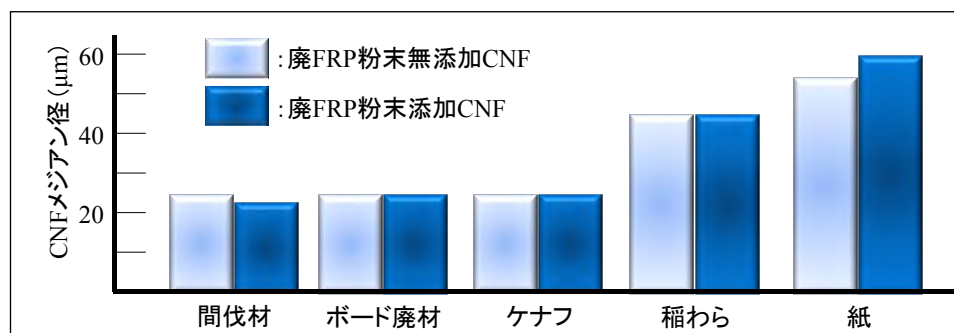


図 2-16 廃 FRP 粉末添加／無添加による CNF メジアン径

2.2.3 水熱処理による廃 FRP 粉末アロイ CNF の合成

廃 FRP 粉末と廃棄物系バイオマスを同時粉砕することで、CNF 表面に廃 FRP 粉末が何らかの物理及び／或いは化学的結合によりアロイされていることは、予備試験で実証されている※¹。廃 FRP 粉末と廃棄物系バイオマスを同時粉砕して合成したメカニカルアロイ状態の CNF のさらなる高機能化を実現するための技術を検討した。ここで注目したのは、廃 FRP 中のガラス繊維成分であるシリカである。シリカはアルカリ性条件で僅かに水に溶解する。溶解速度は、シリカ素材の結晶状態により異なるが、非晶質のシリカのほうが溶解速度は速い※²。廃 FRP に含まれるガラス繊維は、非晶質であるため、溶解速度が速くなると考えられる。このシリカの溶解速度を促進させる手法として、高温高压の熱水条件が挙げられる。いわゆる水熱合成である※³。一方、セルロース繊維は、パルプ製造からも明らかなように水熱合成が起こる条件下では、比較的分解しにくい特性を有している。そこで、廃 FRP 粉末をメカニカルアロイした CNF に対してこの効果を上手く応用した改質技術を検討した。

廃 FRP 粉末中のシリカを水熱反応させる手法は様々あるが、セメントに代表されるケイ酸カルシウム水和物の合成反応※⁴が最も迅速に進行する。またケイ酸カルシウム水和物は、断熱材にも用いられているように耐熱性も高く、安価な原材料（セメント、消石灰、珪石）が多い。更にセルロース繊維は酸には弱いがアルカリには強く、ケイ酸カルシウム水和物の合成に適している。

※¹ 平成 22 年度次世代循環型社会形成推進技術基盤整備事業、「木質ボード廃材及び容器リサイクル樹脂を用いた機能化コンパウンドの FRP 廃材を利用した改質」

※² 田中美穂、「シリカゲルの溶解に対するアルカリ、アルカリ土類及び亜鉛イオンの効果」、分析化学、45(7)、p683(1996)

※³ 宗宮重行、堂山昌男、長谷川正木、縣義孝、「新素材」、日本 MRS

※⁴ 「電力中央研究所報告；フライアッシュを使用したトバモライト高含有型コンクリート製造技術の開発」、電力中央研究所、N04034、p1(2005)

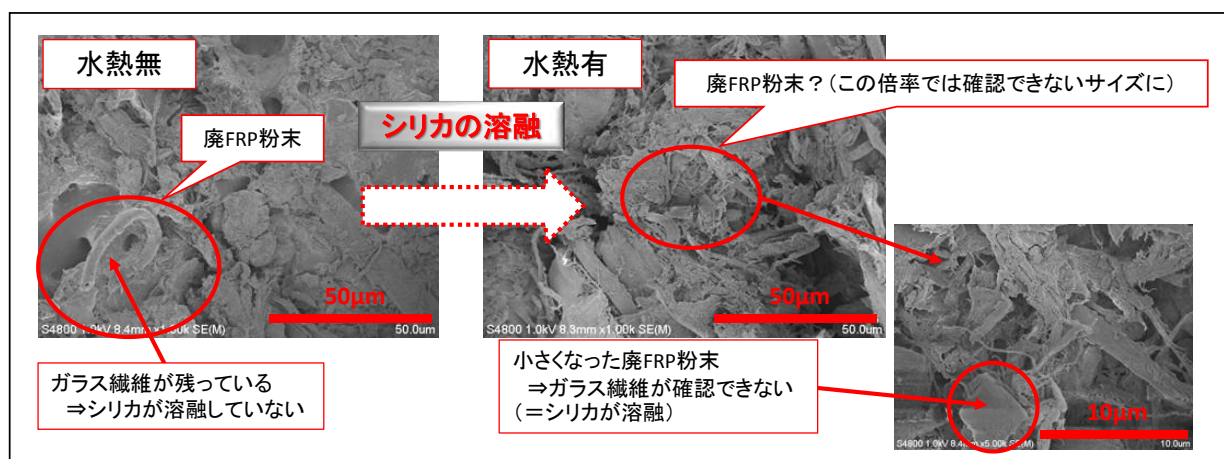


図 2-17 水熱合成有無による廃 FRP 粉末アロイ CNF

図 2-17 に廃 FRP 粉末をメカニカルアロイした CNF の水熱処理 (175℃) 後の SEM 画像を示す。メカニカルアロイ中に存在していた廃 FRP 粒子 (樹脂) は水熱反応により分解していると思われる。ここで注目したいのは、水熱反応によってミクロンサイズにまで微粒子化した廃 FRP 粉末が CNF 表面に結合している点である。これは、シリカが溶解し、シリカ中のシラノール基とセルロース中の水酸基の脱水反応によるイオンの結合によって結合していると思われる。この結合仮説を Si-NMR により検証しようと試みたが、セルロース、シリカとも水酸基が多く、顕著な事実は確認できなかった。

そこで溶解したシリカとカルシウムの水熱反応によりケイ酸カルシウム水和物を CNF 表面上に結晶化させる表面処理を検討した。

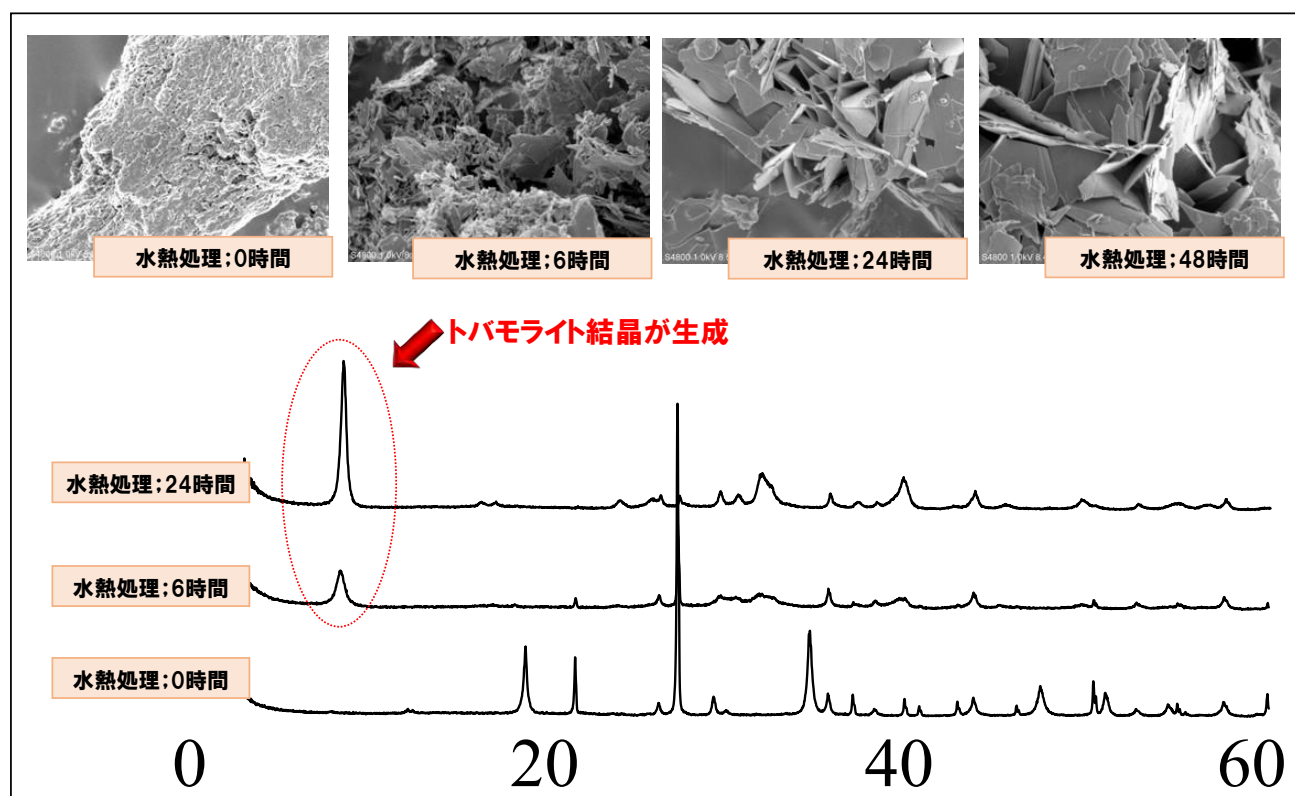


図 2-18 廃 FRP 表面上でのシリカ成分とカルシウム成分の水熱合成

図 2-18 にスラリー状の廃 FRP (CNF を除いたもの) の水熱処理物の X 線回折と SEM 画像を示す。SEM 画像より水熱処理時間が増加するほど、繊維状の結晶から板状の結晶に変化していることが分かる。この変化は、X 線回折からケイ酸カルシウム水和物の 1 種であるトバモライト結晶が形成したものであると思われる。トバモライト結晶は、ケイ酸カルシウム板に利用されている結晶で、軽量でかつ耐熱性が高い建築材料である。

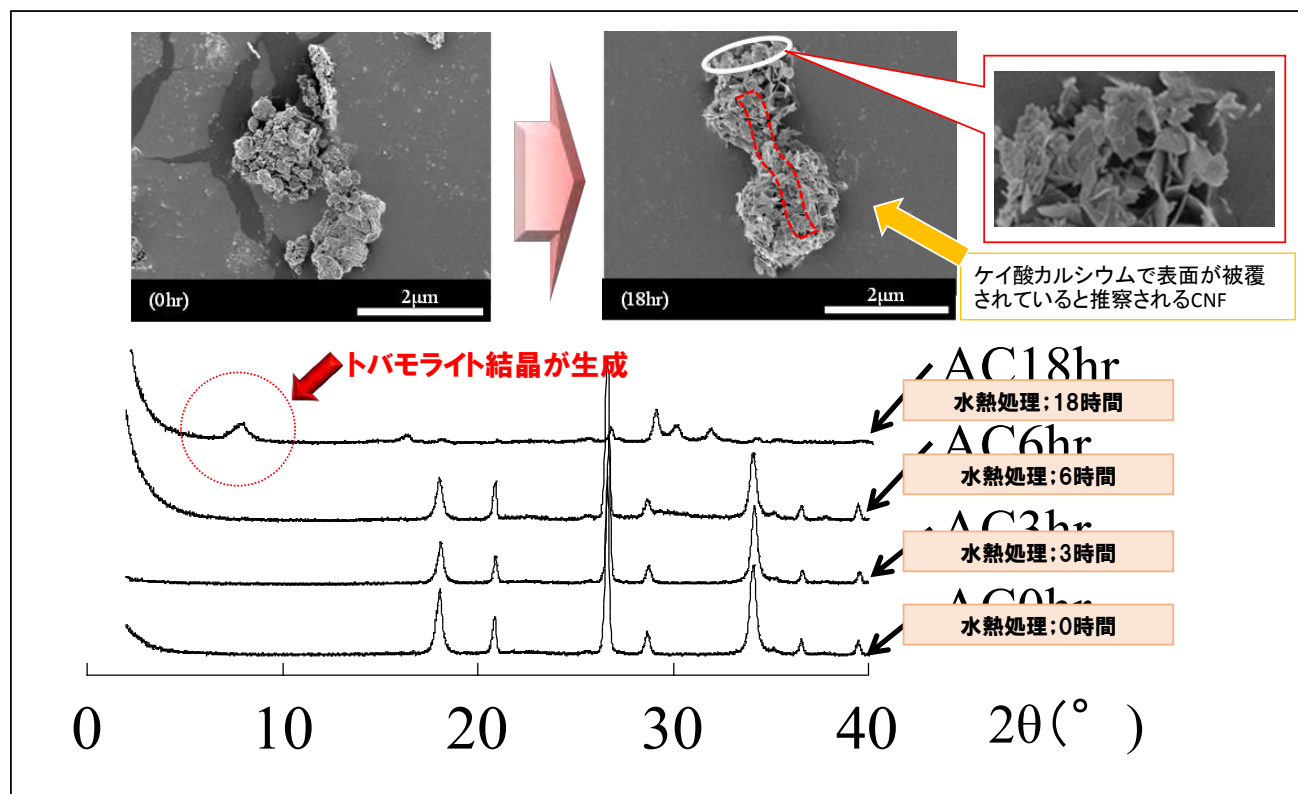


図 2-19 水熱合成によりケイ酸カルシウムで表面処理された CNF (アロイ有)

図 2-19 にシリカ成分を添加して作成したメカニカルアロイ CNF の水熱処理物の X 線回折と SEM 画像を示す。SEM 画像より水熱処理 18 時間において、CNF 表面に板状の結晶が形成している。SEM 画像では、被覆されている CNF が確認できないが、ステージ上に CNF が存在していない点、水熱処理後の色に変色していない点 (CNF は水熱処理の経時により変色することは、確認されており、ケイ酸カルシウムで被覆されていなければ、変色しているとの推察) から考察した。これは、CNF 表面にアロイされたシリカ成分を起点にケイ酸カルシウムが形成されていると考えられる。X 線回折からは、このケイ酸カルシウムはトバモライト結晶であることが確認された。セルロースの添加がない系 (図 2-18) では、水熱合成 6 時間からトバモライト結晶が確認されていたが、メカニカルアロイ CNF においては結晶形成が遅くなっている。これは、水熱反応により生じたヘミセルロースの分解成分 (低分子糖) がシリカ表面にコロイドを形成し、結晶形成を阻害したためと考えられる。

図 2-20 にメカニカルアロイをしていない CNF とシリカ成分を混合し、同様に水熱処理した試料の SEM 画像と X 線回折を示す。SEM 画像からメカニカルアロイと同様に CNF の表面に針状のケイ酸カルシウムが形成されていることが認められる。アロイしていないにもかかわらず CNF 表面にケイ酸カル

シウム水和物が形成された理由としては、図 2-17 にも示したように水熱合成により溶解したシリカ成分が、CNF 表面に着床し、そこを起点にケイ酸カルシウム水和物が形成されたものと思われる。しかしながら、形成されたケイ酸カルシウム水和物の形状が異なっている。これは、X 線回折から結晶性の低いケイ酸カルシウム水和物であると考えられる。メカニカルアロイ処理を行った試料のトバモライト結晶もまた、この結晶性の低いケイ酸カルシウム水和物が出発物であると思われる。メカニカルアロイ未処理の場合、結晶形成が遅くなっていると予想される。この要因としては、前述のメカニカルアロイの節で考察したとおり、ヘミセルロース由来の分解物の低分子糖の影響と考えられる。メカニカルアロイ処理した場合、CNF 表面には既にシリカ成分が着床していることから水熱処理により合成反応が加速され、ケイ酸カルシウム水和物が CNF 表面を素早く覆う。このため、CNF に含まれるヘミセルロースの分解が抑制されていると考えられる。一方、メカニカルアロイ未処理の場合、シリカ成分が CNF 表面に着床するまでにタイムラグが起こるのでヘミセルロースの分解が多くなるものと思われる。即ち、メカニカルアロイによる効果は、表面処理にも効果があることが明らかにされた。

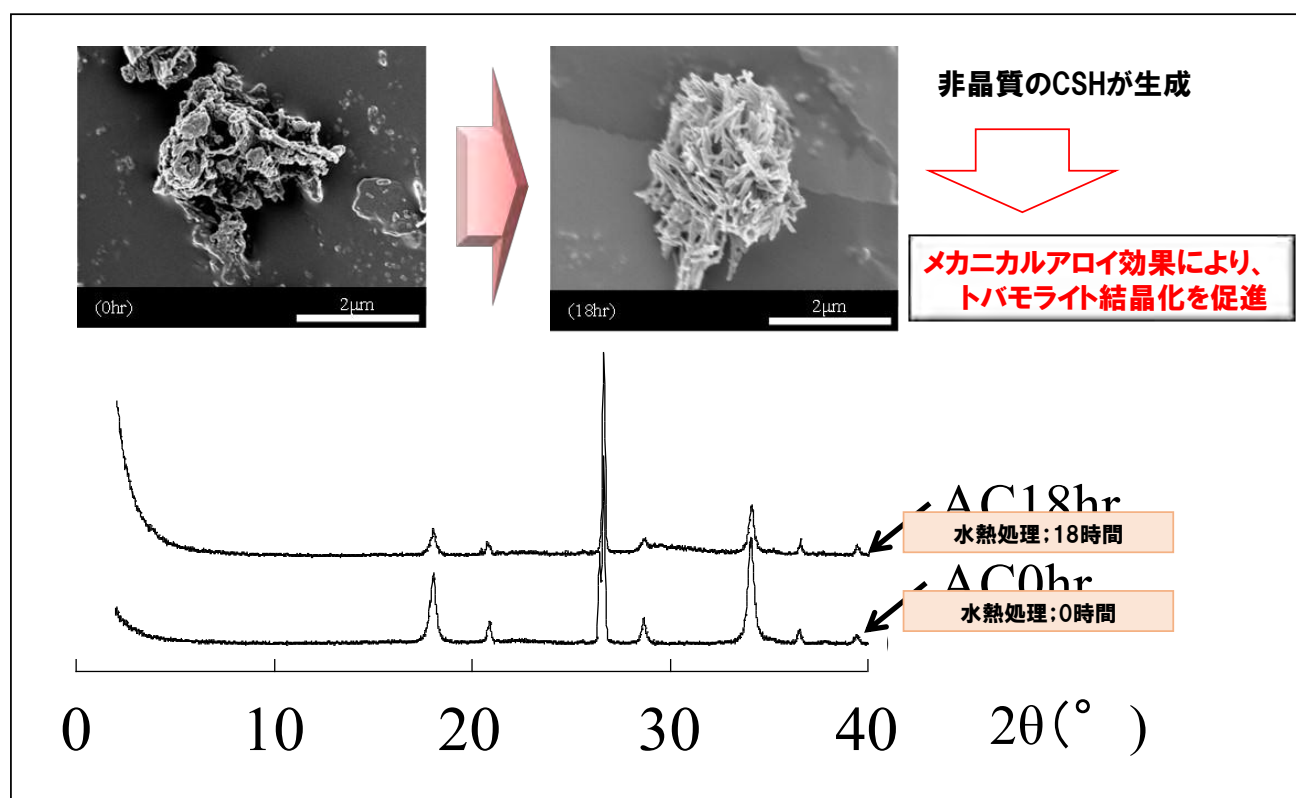


図 2-20 水熱合成によりケイ酸カルシウムで表面処理された CNF (アロイ無)

ヘミセルロースの含有量は、バイオマスの種類によって異なる。廃 FRP をアロイした各種廃棄物系バイオマス由来の CNF を量産対応設備にて水熱合成（表面処理）した CNF の写真を図 2-21 に示す。ヘミセルロースが分解すると褐色が濃くなる。写真から全ての廃棄物系バイオマスにおいて、著しい変色は認められなかった。即ち、廃 FRP をメカニカルアロイすることは、ヘミセルロースが多い草本系のバイオマスにおいても有効な手段となる。低分子糖による阻害の程度は糖の定量等で評価は可能であるが、ガスクロマトグラフィー等特殊な分析機器を要する。色差で評価すれば、安価な評価方法としても提案

でき、事業目標達成にも効果がある。



図 2-21 ケイ酸カルシウム表面処理した各種廃棄物系バイオマス由来 CNF

以上から、「CNF 上にアロイされた廃 FRP 微小粒子中に含まれるシリカ成分を起点に水熱合成反応が起こり、ケイ酸カルシウム水和物が形成され、CNF 表面を被覆した」ことが確認され、水熱合成による表面処理技術を構築することができた。

2.3 高機能化 CNF 高充填複合化技術の開発

2.3.1 概要

前節で構築したケイ酸カルシウム水和物によって表面処理された CNF を様々な製品に展開すべく、プラスチックとの混練・複合化を行い、高いせん断を加えたコンパウンド製造技術を構築し、湿潤状態の CNF を乾燥なしに直接プラスチックと均一分散する複合化技術を見出した。均一分散が実現したことにより、各種複合材の目標性能を達成した。更にはこの乾燥レスのコンパウンド製造技術を汎用の設備を利用して量産化できたことにより、事業目標も達成した。

2.3.2 高充填コンパウンド製造技術の開発

前節で述べたケイ酸カルシウム水和物による表面処理において、表面処理の付加的効果として表 3 に示すように乾燥性の改善が確認された。

セルロースは、表面に水酸基を多く有する素材であり、細くなるほど水酸基同士の凝集が顕著になる。その結果、CNF は一般に乾燥し難くなる（表 2-3 から同様な結果が得られている）。即ち、ケイ酸カルシウム水和物がセルロース表面の水酸基をブロックすること及び CNF スラリー中の水が結晶水として取り込まれることによって凝集が阻害されたものと思われる。後述する高せん断下でのコンパウンド製造技術は、凝集しやすい CNF のチキソ性を利用して凝集を防止するコンパウンド製造技術である。安全を考慮すると、最初から凝集し難い CNF を利用の方が好ましい。したがって、ケイ酸カルシウム水和物による表面処理の効果は、生産品質管理面においても大きい。

表 2-3 水熱処理による廃 FRP・CNF アロイの乾燥性改善

	水熱処理時間 (hr)	平均粒径 (μm)		
		スラリー	凍結乾燥	60°C乾燥
ケイ酸カルシウム 表面未処理CNF	0	15.3	17.4	凝集
	6	14.7	16.5	凝集
	18	12.1	21.5	凝集
	24	-	14.0	凝集
ケイ酸カルシウム 表面処理CNF	0	12.0	13.1	凝集
	6	12.9	19.0	12.4
	18	20.2	12.0	12.3
	24	-	12.6	12.7

ケイ酸カルシウムの結晶性に関係なく、結晶がCNF上に形成することで乾燥性は改善された
⇒これにより、コンパウンドの分散性向上にも大きく貢献できる成果である

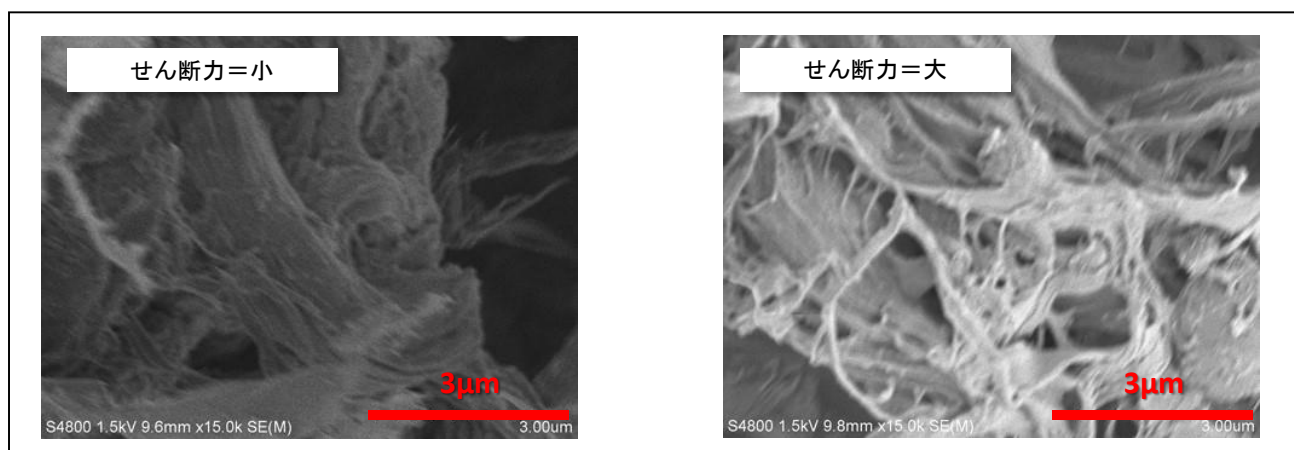


図 2-22 せん断力の違いによる分散性の比較

今回開発したコンパウンド製造装置に高せん断力仕様の混練装置を導入することの合理性を確認するために、せん断力が可変できる混練装置にて分散性の程度を調べた。図 2-22 にせん断の大小による分散性の違いを SEM 画像で示す。高いせん断を与えることで、分散性が良好になることを確認した。これは、高いせん断により、CNF が配向し、CNF 同士が接触しない状態で、乾燥されるため、凝集が防止できたと思われる。以上より、この技術は本事業に適合していると結論づけ、以降この技術を用い混練・副業化評価を行った。

複合化においては分散性と同様、重要な因子に相容性がある。図 2-23 にアロイの有無による相容性を動的粘弾性 (TA インストロメツツ ; ARES-G2) の貯蔵弾性率で比較したグラフを示す。相容化には汎用性の高い酸変性樹脂を用いた。酸変性樹脂は、水酸基をエステル化し、親水性から疎水性に改質する性質を持つ素材である。貯蔵弾性率が向上する傾向が認められ、メカニカルアロイによる相容性向上の

可能性が示唆された。この粘弾性評価では、プラスチックが溶融する温度で評価しているので、CNF とプラスチックの界面の相互作用が発現していると考えられる。これは、前項で考察したとおり、廃 FRP 粉末のアロイレベルが影響しており、メカニカルアロイをすることで、多くの CNF 上の水酸基をブロックした結果であると考えられる。

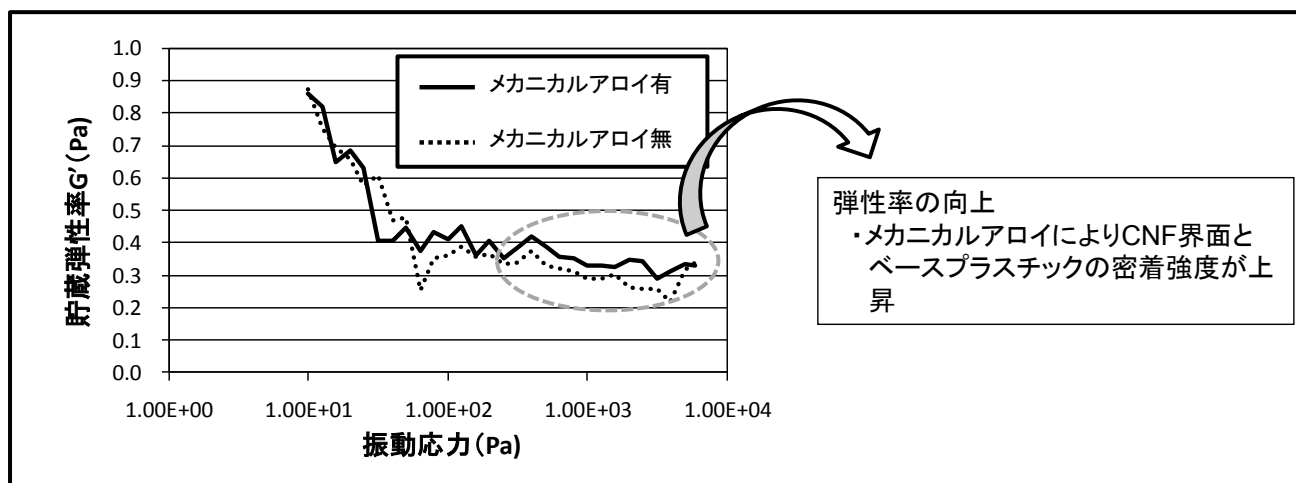


図 2-23 相容性におけるメカニカルアロイ効果

また、メカニカルアロイの有無により、複合化するプラスチックへの影響を評価するために、FT-IR（日本分光社製；FT/IR4000）と DSC（DSC；パーキンエルマー社製；DSC4000）評価を行った。結論としては、メカニカルアロイによるプラスチック成分への影響はないと考えられる。

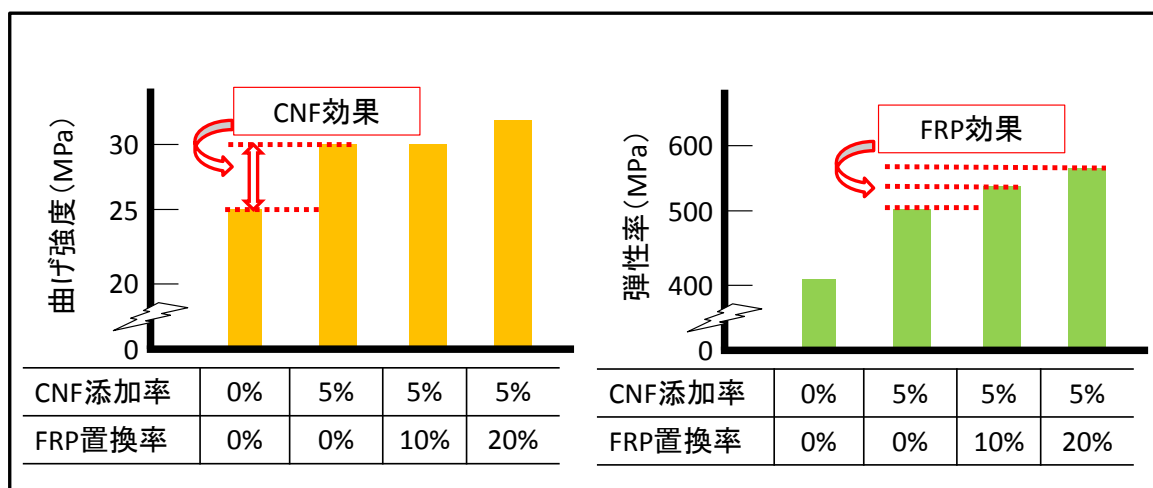


図 2-24 ケイ酸カルシウム表面処理 CNF 複合材の機械的特性

2.3.3 高充填コンパウンドの成形体性能評価

今回の複合材（射出成型した成形体にて評価）の性能目標は、密度、熱膨張及び吸水である。FRP メカニカルアロイの効果、ケイ酸カルシウムの効果等を評価するために、機械的特性を調べた。図 2-24 に水熱処理を行った廃 FRP 粉末アロイ CNF を用い混練・複合化（射出成型）した成形体の機械的特性を示す。曲げ特性においては、CNF の繊維補強効果が発現し、弾性率においては、廃 FRP 粉末添加の効果が発現している。したがって、コンパウンドとしては、相容性、分散性ともに良好であることが確認された。

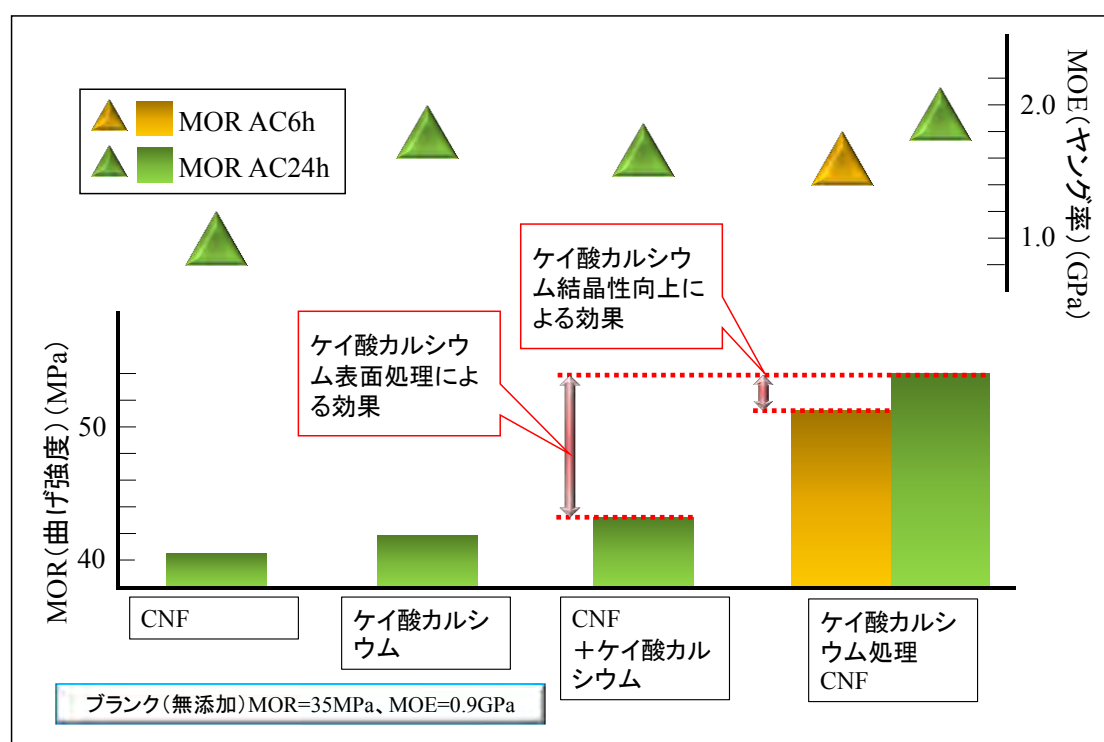


図 2-25 ケイ酸カルシウム表面処理レベルと機械的特性の関係

また図 2-25 に示すように、メカニカルアロイによる効果及びケイ酸カルシウムの結晶性による効果を機械的特性で評価した。CNF 単体、ケイ酸カルシウム単体、CNF 単体とケイ酸カルシウム単体の混合及びケイ酸カルシウム処理 CNF で比較した。また、全てのフィラー量が同じになるように調整した。なお、ケイ酸カルシウム処理 CNF は、水熱時間を変えて結晶性の違いも比較した。無添加に比べ、CNF 単体及びケイ酸カルシウム単体は機械的特性が向上している。単体で混合したものは、各単体に比べ若干向上している。これは、粒径差の相乗効果によるものと考えられる。これらに比べ、ケイ酸カルシウム処理した CNF は大きく向上している。これは、CNF 表面にケイ酸カルシウム水和物の結晶が形成（被覆）されることで、繊維の剛性の向上並びにプラスチックとの相容性が向上したためと予想される。さらに、結晶性の向上によっても機械的特性は増加した。これは、板状のトバモライト結晶が形成されたことで比表面積が大きくなり、密着性が向上したためと推察される。即ち、本技術は、曲げ強度やヤング率のような機械的特性値に対しても効果が示された。

次に機械的特性に関する効果を確認したケイ酸カルシウム処理 CNF を添加資材として、高充填コンパウンド（CNF 量 50%）を製造し、各種性能評価を実施した。なお、ケイ酸カルシウム処理 CNF は、密度が低い「密度が低い」と修正いたしました。ことから生産性から鑑みた充填率の上限が存在する。

図 2-26 にケイ酸カルシウム処理 CNF 添加量と複合体密度の関係を示す。ケイ酸カルシウム処理 CNF は、複合化するプラスチックより密度が高いため添加量が増えるほど、密度は増加する。しかしながら、材料の密度から計算した理論密度に比べ実測密度は低い結果となっている。これは、成形体に空隙が存在しているためである。成形体に空隙が存在すれば、機械的特性や吸水性能においてはマイナスになる。しかしながら、機械的特性、吸水性能とも空隙の影響は受けていない。即ち、機械的特性に影響を受けない微細な独立した空隙が存在しているものと思われる。図 2-19 の SEM 画像から推察すると、この空隙は板状のケイ酸カルシウム結晶間の隙間と考えられる。したがって、ケイ酸カルシウム表面処理により機械的特性や耐久特性に影響しない空隙が生じ、これが軽量化につながっているものと推察した。以上の結果から表面処理技術は、軽量化にも効果を発揮した。

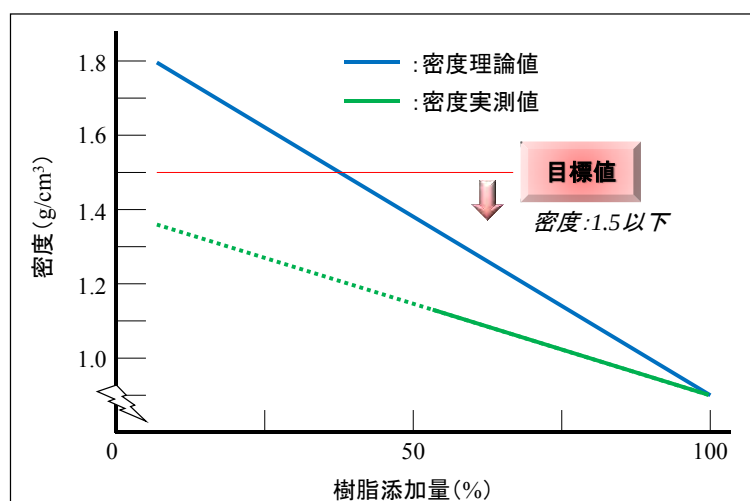


図 2-26 ケイ酸カルシウム表面処理 CNF 添加量と密度の関係

図 2-27 に廃 FRP 粉末添加によってケイ酸カルシウム処理した各種廃棄物系バイオマス CNF 添加の複合材（射出成形体）の熱膨張係数を示す。全てのケイ酸 CNF を添加した複合体の熱膨張係数は目標をクリアした。廃木材（間伐材、ボード廃材）はほぼ同じ熱膨張係数であった。これは同じ構造のバイオマスであるため、アスペクト比、表面形状等に差がないためであると考えられる。一方、ケナフが大きな熱膨張係数を示したのは、細胞壁がシングルセルでフィブリル化しにくいことから、短繊維構造で異方性が高いことが挙げられる。紙に関しては、他の CNF に比べ粒径メジアン径が大きく、アスペクト比がより大きくなったため小さな値になったと推察される。一方、稲わらが大きかったのは、少ないセルロース成分やアスペクト比の低い CNF の混在などが考えられる。以上より、原料となるバイオマスの種類により熱膨張係数は若干の違いはあるものの全て目標値をクリアしており、熱膨張の視点からは金属を代替する素材であることが示された。

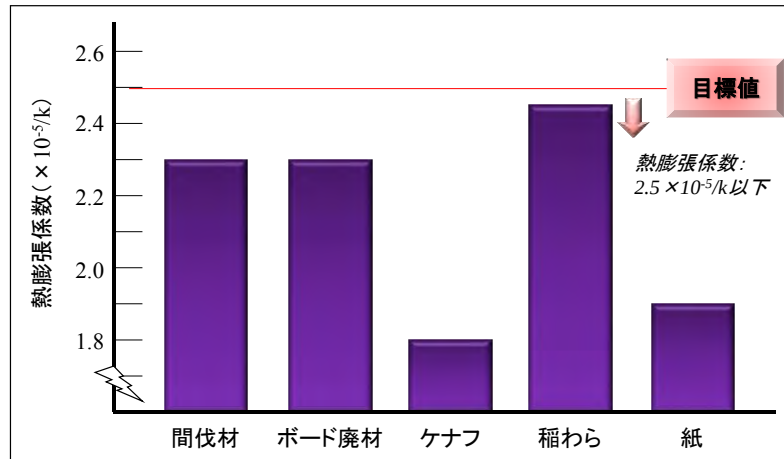


図 2-27 複合体の熱膨張係数

一方、吸水率目標であるが、全てで 24 時間吸水 1% 以下であり、目標値をクリアした。ケイ酸カルシウム処理 CNF は密度のところでも考察したとおり、空隙は存在するが、微細で独立空隙であることから吸水等に影響を与えなかったものと思われる。

目標性能には設定していないが、本事業において新たに得た機能に耐熱性の向上がある。図 2-28 にケイ酸カルシウム表面処理 CNF の熱分解を示す。ケイ酸カルシウムで表面処理されることで熱分解温度が高くなっている。これは、耐火物であるケイ酸カルシウムが CNF 表面を被覆しており、これがセルロースの分解を抑えたためであると推察する。

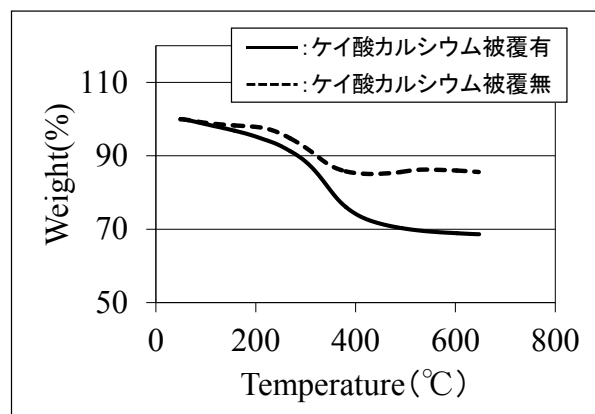


図 2-28 CNF 複合材の熱重量 (TG) 変化

2.4 スモールバッチシステムの構築

2.4.1 概要

廃 FRP 粉末添加による粉砕効率の改善、ケイ酸カルシウム処理 CNF の乾燥性改善という素材系の成果と高機能化処理を汎用の設備で実証した生産系の成果により、事業目標である原価目標を達成した。また CNF の品質確認等において、簡易な測定手法を確立した。さらに高充填のマスターバッチ化の成功による在庫リスクの削減等が事業損益改善に繋がり、事業粗利目標を達成した。またユーザーワーク、事業初期の外注生産等の検討を行い、事業終了後、迅速に市場導入できる体制を構築した。

2.4.2 目標原価を達成する生産システムの構築

材料開発の結果より汎用設備を用い、廃棄物系バイオマス、廃 FRP 粉末より高機能複合材（マスターバッチ）を生産する工程を確立した（図 2-29）。CNF 化及び廃 FRP 粉末アロイに用いるディスクミルは、先に検証した石臼型のディスクミル（増幸産業製；マスコロイダー）、水熱合成はオートクレーブ（日本耐圧硝子、型式）、コンパウンドはヘンシェル型ミキサ（カワタ、スーパーミキサ）を用いた工程を提案している。この生産工程の特徴は汎用性であり、投資金額が低いことに加えて様々な規模のラインナップがあり、廃棄物発生個所の規模や市場の規模に合わせてチョイスできることが大きな利点である。さらに、水熱合成設備は、特殊な耐圧装置ではなく、飽和水蒸気圧 10hPa、温度 180℃以下の条件で実現できた。これらの成果により、事業目標達成に大きく貢献した。

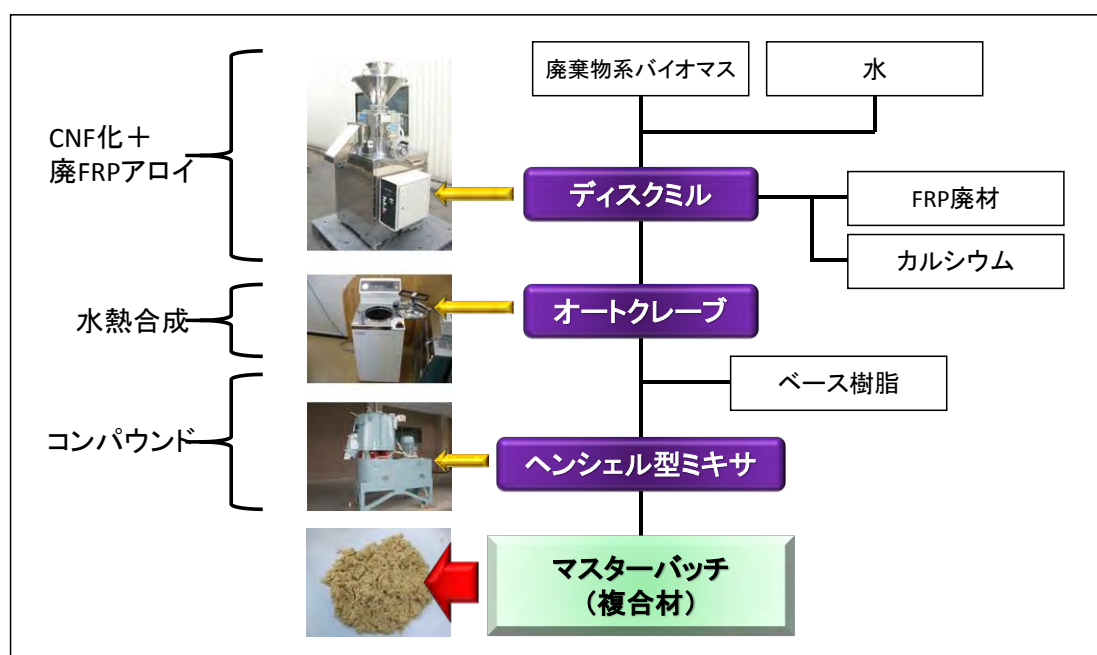


図 2-29 ケイ酸カルシウム表面処理 CNF マスターバッチの工程図

次にこれら設備をベースに 50t/月生産における設備投資を検討した（表 2-4）。事業開始から 50t/月に対応できる大型設備を導入する手法もあるが、本事業で製造されるマスターバッチ（複合材）の用途は多岐であり、同じものを大量に製造するプラントではない。したがって、中規模なプラントをいくつか準備し、様々な市場ニーズに対応できる設計をしており、現実的な投資計画といえることができる。さらにこのような小型設備での計画は、市場規模に合わせて段階的投資が可能であり、投資リスクを最小限にできる投資計画である点も特記しておく。また、設備能力を換算するにあたり、最終製品のマスターバッチ（複合体）におけるケイ酸カルシウム表面処理 CNF の添加量設定が必要となる。前項での評価は、添加量 50%で実験したが、ここでは、生産の簡易性から、添加量 20%で設定している。

表 2-4 事業設備、能力及び投資金額一覧

工程	CNF化＋廃FRPアロイ	水熱合成	コンパウンド
設備	ディスクミル	オートクレーブ	ヘンシェル型ミキサ
仕様	マスコロイダー (MKZA10-15J)	高圧蒸気滅菌器 (MCS-3032S)	スーパーミキサ (SMV-20)
能力	10kg/hr※ ¹ ＝300kg/月※ ²	15kg/hr ＝450kg/月※ ²	18kg/hr ＝10,800kg/月
設備費	2,500千円/台	700千円/台	3,000千円/台
必要量	10t/月※ ³	10t/月※ ³	50t/月
設備数	34台	22台	5台
投資額	85百万円	15百万円	15百万円

※1 時間当たりの生産能力はCNFスラリー換算している
 ※2 月あたりの生産能力はCNF固形分換算としている
 ※3 CNF添加量20%で産出

以上より、減価償却を計算すると、

$$\text{◆} 115 \text{ 百万円} \times 0.21 \text{ (資本回収係数；定額)} \div 50 \text{ 万 t/年} = 40.25 \text{ 円/kg}$$

となる。表 2-5 は表 2-4 の投資金額から原価計算した原価計算表である。ここで、原材料である廃 FRP 粉末及び廃棄物系バイオマスは、有価としている。これは、地域ごとに発生状態も異なり、前処理等も必要であることを想定しているが、実際にバージン素材と同じ価格設定をしている（廃 FRP 粉末は、ガラス繊維同等）。さらに原材料費をバージン材で計算した根拠は、市場供給量により原材料の過負荷が発生した際、バージン材を調達する必要も想定している。人員は、3 直／1 人で管理者 1 名で設定をしている。また、電力、副資材費用関連は、課題代表者の所属法人での実績をベースとした。

表 2-5 原価計算表

内 容			単 価	備 考
変動費	原材料	未利用バイオマス(間伐材)	14 円/kg	70円/kg × 20%
		FRP廃材	20 円/kg	100円/kg × 20%
		マスターバッチ樹脂	120 円/kg	200円/kg × 60%
	電力費		15 円/kg	当社コンパウンド事業実績より
	副資材等		3 円/kg	当社コンパウンド事業実績より
	計		172 円/kg	
固定費	設備償却費		40 円/kg	投資総額115百万円、投資回収係数0.21
	人件費		33 円/kg	4名、5,000千円/人
	計		73 円/kg	
原価合計			245 円/kg	

以上より、製造原価 245 円/kg は、事業目標 350 円/kg以下を大きく超える（安価）結果となった。これは、前項の成果である生産性の改善によるもの大きい。

2.3.3 事業性の検討

事業性の検討をするにあたり、前述した製造原価に加え、品質等事業を管理する管理費用、営業関連に必要とする営業費用及びユーザーニーズからくる改良研究及び次世代技術開発等の開発費用等の事業経費が計上される。事業経費の中で、投資を伴う費用は品質管理用（品質試験、出荷検査）の検査設備である。表 2-6 には、本事業推進に必要な検査設備とその取得金額を示す。

表 2-6 品質評価設備及び取得金額

品質評価項目	測定手法	評価設備	取得金額
粒子サイズ	沈降試験による透過試験	分光光度計	700千円
	粘度測定によるチキソ性評価	回転粘度計	1,000千円
アロイレベル	ケイ酸カルシウム結晶評価	X線回折	7,000千円
流動性	溶融粘度による管理	メルトインデクサー	2,000千円
含水率・吸水率	残留水分の検査	水分計	500千円
計			11,200千円

管理設備の減価償却額は、総生産量から 4 円/kgと大きくはないが、投資金額は小規模生産の事業所としては決して少なくはない。しかしながら、これらの設備は、地域の工業センターや大学が所有している汎用の測定装置であり、事業初期にはこれらを有効に活用できる。本事業ではこれらの評価手法を外部機関にて代用できることが大きなメリットとなった。

複合材を市場展開するにあたり、これを販売する営業部門が必要となる。本事業の成果は原材料に近い素材を再利用することであり、複合材を利用するユーザーは全国各地に存在する。このため、全国展開は必須となるが、事業規模が小さいため全国規模の営業組織を設けることは得策ではない。したがって、多くのベンチャー等が利用している商社販売が最も有効な営業手法であり、営業人員は、デリバリ＋商品説明の担当者として 1 名充てるのみでよい。また、営業経費に関しては、在庫リスク等の経費を鑑み、材料メーカー等のヒヤリングから製造原価の 1%とした。本事業計算では考慮していないが、このような取り組みをする小規模事業者が市場拡大に併せ連合することが可能であれば、経費はもっと削減できる。工業製品であるため、代表的な商品は、ある程度の規格化が不可欠で、この点からも事業連合はメリットがある。

なお、付加価値利用であるため、利用者側も様々な要求をしていくことが予想される。この観点から、必ず開発人員は必要となる。同様に開発に伴う開発費用も計上しなければならない。この開発経費に関しては、市場要求によって異なるが、1 製品 5%程度と仮定して計上した。逆に市場展開する際、開発負荷の大きな製品に関してはこの開発経費も原価換算する必要がある。ここでは、本事業成果であるスタンダードな製品において想定しているので、大きな開発経費は計上していない。一方、環境事業とはいえ、工業製品であるため、市場競争は必ず存在する。そこで、競争に勝ち抜くためには、開発研究も不可欠で、開発経費を省略する訳にはいかない。

表 7 には、以上の経費も踏まえた事業計算表を示す。売価設定は、市場に汎用で広く流通しているガラス繊維強化プラスチック単価を想定しており、相当競争力がある（本提案用途だけではなく単純にプラスチック製品代替でも展開できる）。したがって、ユーザーワークを行っても、的を外れた設定でない

ことは明白である。設定売価から製造原価及び各事業経費の合計を差し引いた金額が粗利となり、事業粗利 17%となった。これは、目標粗利 15%よりも高い結果となっている。50t/月生産で年間粗利額は 35 百万円となり、3 年強で投資も回収できるので、事業性としては高い結果である。

表 2-7 事業計算表

内容		単価	備考
製品原価		245 円/kg	
管理費	品質評価設備償却	4 円/kg	11,200千円、投資回収係数0.21
	一般管理費	12 円/kg	製品原価×5%
営業費用	人件費	8 円/kg	1名、5,000千円/人
	営業経費	2 円/kg	製造原価×1%
開発費用	開発費	12 円/kg	製品原価×5%
	人件費	8 円/kg	1名、5,000千円/人
事業原価		291 円/kg	
売価		350 円/kg	
粗利		59 円/kg	
粗利率		17%	

2.3.4 事業成果の市場ヒヤリング

図 2-30 には、この事業の商流を示す。この商流からも明らかなように、最終製品は、プラスチック用途だけでなく金属、セラミックあるいは木材等様々な業界の製品に展開されるが、フロントユーザーは樹脂加工メーカー、即ちプラスチック業界である。したがって、ユーザーワークはプラスチック業界中心に実施し、まずはこの業界が抱える事業、技術双方の課題改善に本技術が展開可能なことが市場導入の第一歩となる。

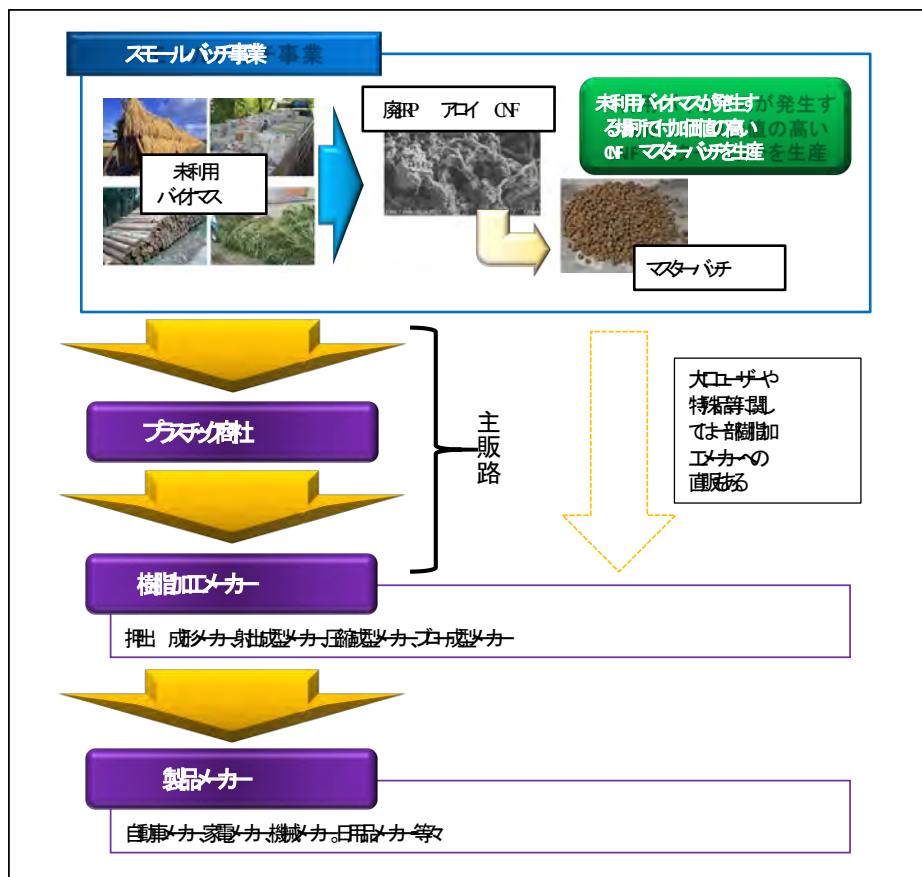


表 2-8 にプラスチックメーカー中心に行った本事業成果に関するヒヤリング結果を示す。コストに関しては、一般的に安価であればほど喜ばれるが、基本的には代替商品と同等レベルのコストであることを前提に市場ニーズを調査した。プラスチック業界であるため、プラスチック製品が中心となるニーズとなっているが、多くのニーズで本事業成果が活用できることが確認された。特に自動車関連においては、本事業成果も含む CNF 利用に関しては、積極的であると言える。

	用途展開	成形方法	市場ニーズ
A社	電気部品	射出成形	非石油系素材、難燃化
B社	日用品	射出成形	薄肉、高強度化
C社	音響製品	真空成型	深絞り可能な高靱性かつ高弾性
D社	自動車部材	射出成形	大型成形化、耐衝撃強化
E社	自動車部材	ブロー成形	薄肉化
F社	日用品	射出成形	質感
G社	文具関連	射出成形	複雑成形への対応

当社ブーツのメイン展示は、開発した製品であったが、本事業技術も展示し、プラスチックユーザー以外からのヒヤリング情報も得られた。これらに対しては引き続きサポートしているが、当初ターゲットとしていなかった繊維業界やフィルム業界からの引き合いがあり、事業の波及性は想定以上であると考えられた。廃材利用の目的ではなくなるが、セルロース学会での学会発表及び企業展示、プラスチック成型加工学会での企業展示も実施し、パルプ業界、プラスチック業界からも本開発技術の説明を求められた。ケイ酸カルシウムで表面処理を行うという革新的な技術の波及効果も高いことが分かった。



図 2-31 展示会における本事業成果の啓発（ヒヤリング）

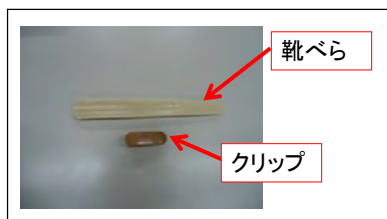


図 2-32 ユーザーによる用途評価

最後に本事業成果物であるマスターバッチ（複合体）が、ユーザーの実ラインにて利用できるかどうかを検証した。成形した製品の用途は、木製品代替として靴べら、金属製品代替としてのクリップである（図 2-32）。クリップの場合は複雑成形でありが、流動性の高い本事業成果物は、複雑成形に十分対応した。一方、靴べらの場合は木材同様しなり（靱性）が必要となる。実際に成形体でこのしなりを調べ、実際に使用して問題の無いレベルに達していることを確認した。また、両製品とも通常のプラスチック製品同様に成形ができていることも確認された。

なお以上の用途検証に関しては、本事業の目的ではないが、本事業終了後、迅速に市場導入すべく、引き続きユーザーワークを継続している。

3. 事業施設の設置場所

本事業は対象とする廃棄物が発生している地域で実施するモデルであるが、現時点では、当社の事業所に設置している（図 3-1）。廃棄物発生地域にて本事業を実施する際も、事業初期は立上リスクも踏まえ、廃棄物発生地域にて本事業を実施するにあたり、立上リスクを考慮すると、事業初期は、外注体制からスタートすることが望ましい。さらに、廃棄物系バイオマスの種類、廃 FRP 粉末の性状等は異なっているため、予備評価等は必要となる。そこで、当社事業所内のプラントをマザー工場として利用できる。また、現時点で、オートクレーブは、設置場所の都合及び電力の関係上、真庭市にある当社のラボに設置しているが、事業が稼働すれば当該事業所への移転が可能である。

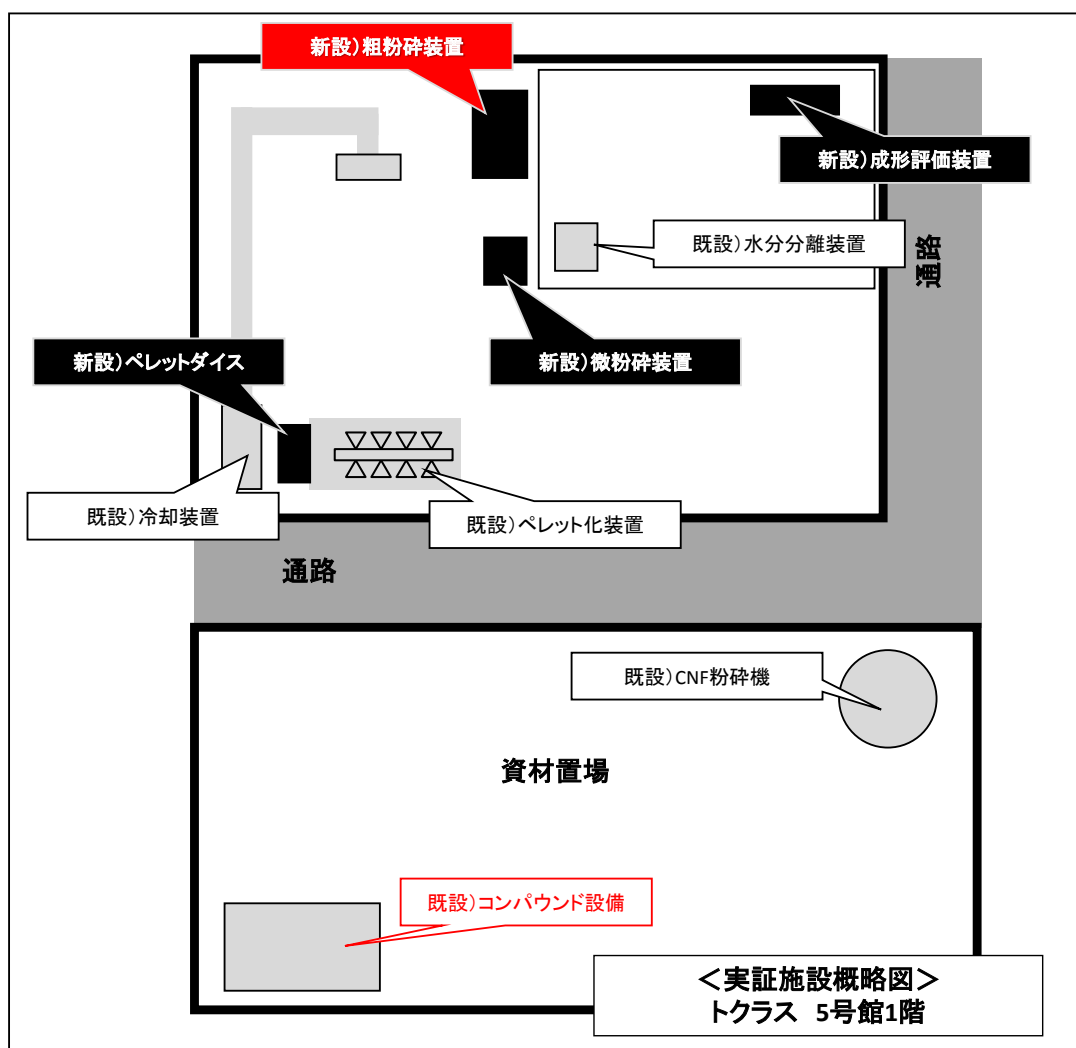


図 3-1 本事業設備の設置場所

4. 開発した技術がもたらす効果

小規模でも事業性あるモデルのため、1号機は600t/年規模のプラントでのスタートである。アウトプットの市場性があり、1号機で量産品質性検証ができれば随時拡大し100万t/年の事業（5年程度；プラントは実用機が地域分散）に拡大する見込みである。成果物における競合の多くは輸入品であるため、新たな国内産業として3000億円以上の経済効果が見込め、5000名以上の雇用効果もある。展開先により若干のブレはあるが、概ね未利用バイオマス60万t/年、廃FRP20万t/年の削減効果が見込まれる。成果物の展開に関しては、代替市場であるため既存のプラスチック製品ルートが利用できる。このルートは類似素材である混練型WPC（ウッドプラスチックコンポジット）でも実証しているためほぼ確立していると言える。市場参入に当たり機能面では、軽量化や低価格化等のメリット、政策面でもグリーン購入、国産バイオマス素材の利用等の追い風があることは大きい。集積地による品質格差、新規素材であるが故の長期実績等ユーザー側から見ると不安な面もあり、官学が中心となった基礎分野のサポートが不可欠である。一方、成果物は世界的共通ニーズであり、我が国の新たな環境輸出製品あるいは環境援助技術として国際貢献ができる可能性が高い。

5. まとめ

本事業では、廃 FRP 粉末及び未利用バイオマス等廃棄物系バイオマスから、高機能なセルロースナノファイバー（以下、CNF と略記する）を合成し、これをプラスチックだけではなく、金属、セラミックや木材等様々な用途へ展開できる複合体（複合体＝マスターバッチ）を製造する技術開発を目的とする。また、本技術開発の成果を廃棄物が発生する地域で事業化するため、少量生産でも採算性が高いスモールバッチ生産システムを構築することを目的とする。これを実現するために、以下に示す性能目標と事業目標を設定し、それらの目標を全て達成した。

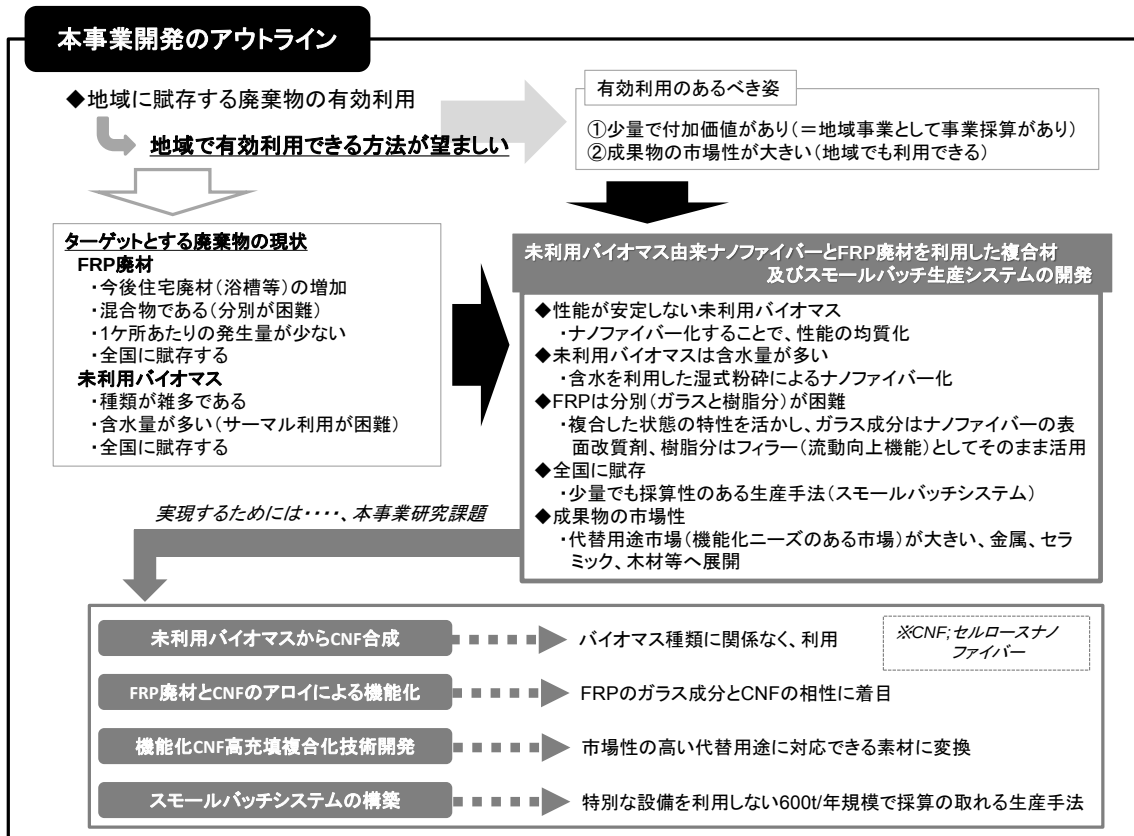
①性能目標

- ◆「密度＝1.5 g/cm³ 以下（金属やセラミックより軽量）、熱膨張係数＝ $2.5 \times 10^{-5}/\text{k}$ 以下（金属同レベル）、24 時間吸水率＝2%以下（木材より高耐久）」
- ・各種廃棄物系バイオマスを原料に、ディスク型のミルを用いることで、補強効果等機能性の高い CNF の合成を実現した。
- ・CNF 合成時に廃 FRP 粉末を添加し、この廃 FRP 粉末の硬度効果により粉碎性の促進が見出された。また、粉碎によるエネルギー効果と廃 FRP 粉末に含まれるガラス繊維成分とセルロースの相容性効果で、CNF 上に廃 FRP 粉末を着床させるメカニカルアロイ技術を確立した。
- ・廃 FRP 粉末をメカニカルアロイした CNF を水熱処理することで、目標性能に到達できる表面処理手法（ケイ酸カルシウム処理 CNF）を確立した。
- ・CNF が有する流動特性を活用し、プラスチック中にケイ酸カルシウム処理 CNF が高充填、高分散するコンパウンド技術を確立するとともに、各種用途に展開するための複合化技術（マスターバッチ化）を確立した。

②事業目標

- ◆「市場競争力のある複合材（350 円/kg以下）を 50t/月レベルで事業収益性（粗利 15%以上確保）を確保し、原料（廃棄物系バイオマス＋廃 FRP 粉末）から複合材まで一貫した生産システムで実証」
- ・CNF 合成から、廃 FRP 粉末のメカニカルアロイ、CNF 表面のケイ酸カルシウム処理及びケイ酸カルシウム処理 CNF のマスターバッチ化まで生産性を確保し、かつ設備投資負荷の少ない汎用設備で生産する仕組みを確立した。
- ・事業負荷に関わる品質管理、営業、開発経費を算出するとともに、これら事業経費の合理化を確立し、目標粗利が確保できる事業モデルを構築した。

6. 事業概要図



7. 英文概要

研究課題名 : The development of small butch production system – composites made from nano fiber origin from unutilized biomass with FRP-wastes.

研究代表者名及び所属 : Rie Makise, TOCLAS Corporation, Busines Development Division

研究分担者名及び所属 : Hirokazu Ito, TOCLAS Corporation, Business Development Division

要旨 :

In this project, the purpose are the following two points.

- 1) Development of composites alternative to plastics, ceramics, metals and woods as raw materials from wasted fiber reinforce plastic and unutilized biomass.
- 2) Development of “Small Butch System” that has the high profitability in low-volume production.

In order to achieve those objects, it was established, synthesis of cellulose-nanofiber treated calcium-silicate from wasted fiber reinforce plastic and unutilized biomass, and product system of used general-purpose machinery and of high productivity.

In results, it was achieved the following targets;

- Density $\geq 1.5 \text{ g/cm}^3$, Thermal expansion $\geq 2.5 \times 10^{-5}/\text{k}$, Water absorption $\geq 5\%$
- Cost $\geq \text{¥}350/\text{kg}$, Gross profit $\leq 15\%$

キーワード : utilized biomass, FRP-wastes , cellulose, calcium-silicate, small butch production system