

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 別冊3-1

セルロースナノファイバーに関する
温室効果ガス排出量削減効果
算定ガイドライン（本編）

令和3年3月

環 境 省

目次

1. はじめに	- 1 -
2. CNF-LCA ガイドライン策定の目的	- 2 -
3. CNF-LCA ガイドラインの位置づけ	- 2 -
4. 温室効果ガス排出量の算定	- 4 -
4.1 算定方法について.....	- 4 -
4.2 算定条件宣言シートについて	- 5 -
4.3 算定結果のレビューについて	- 5 -
5. 評価対象製品等の算定	- 6 -
5.1 目的の設定	- 6 -
5.2 評価対象製品等の設定	- 6 -
5.3 削減効果を発揮する最終製品等の機能単位の設定.....	- 6 -
5.4 評価範囲の設定（システム境界）	- 6 -
5.5 温室効果ガス排出量の算定	- 7 -
5.5.1. 活動量の収集について	- 7 -
5.5.2. データ品質について	- 7 -

5.5.3. 排出原単位設定の優先順位.....	- 8 -
5.5.4. CNF 製造段階の CO2 排出原単位の推定	- 8 -
5.6 カットオフ基準	- 16 -
6. 比較対象製品等の算定	- 18 -
6.1 比較対象製品等のシナリオ設定	- 18 -
6.2 削減効果を発揮するベースラインの機能単位の設定.....	- 18 -
6.3 ベースラインの算定.....	- 18 -
7. 削減効果量の算定方法	- 19 -
8. 削減効果ポテンシャル量の算定方法	- 19 -
8.1 削減効果ポテンシャル量について.....	- 19 -
8.2 普及量の設定	- 20 -
8.3 前提条件・シナリオ設定における注意事項	- 20 -
9. 簡易算定の方法.....	- 21 -
10. CNF のサプライチェーンを通じたライフサイクル設計支援.....	- 22 -
11. 参考文献	- 30 -
12. 用語の解説	- 32 -

1. はじめに

セルロースナノファイバーに関する温室効果ガス排出量削減効果算定ガイドライン（以下、「CNF-LCA ガイドライン」という。）は脱炭素・資源循環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（環境省）の別冊として、平成 30 年に発行された「セルロースナノファイバーに関する温室効果ガス排出量削減効果算定ガイドライン（環境省）」を改訂する形で策定された。

「SDGs : Sustainable Development Goals（持続可能な開発目標）」が国連で定められ、国連加盟国 193 カ国が 2030 年までに達する目標（17 の目標と 169 のターゲット）に向けて努力することとなった。その目標に向けて産官学が一体となり共通目標として進めていくことが重要である。これを受けて、産業界では多くの企業が SDGs の目標に取り組んでおり、企業活動を通して目標へのアプローチ等についてコミュニケーションされつつある。国連が発行している「SDG Compass」においては、その定量的な評価で企業のバリューチェーンを通じた影響を測るための 1 つのツールとして「LCA : Life Cycle Assessment（ライフサイクルアセスメント）¹」が有用であるとされており、そのコミュニケーションを行う上での定量的指標として LCA の重要性が高まっている。またパリ協定以降、地球温暖化対策において世界合意がなされた。その合意に基づき各国で地球温暖化対策に関する定量的目標が定められ、その目標に向けて各国環境政策や企業活動が活発になっている。特に、日本全体でエネルギーシステムの改革が行われたとき、セルロースナノファイバー（CNF）はフィードストックの炭素が再生可能資源由来のものであるため化石資源由来の材料に比べて大きく脱炭素化に貢献するが、LCA はその貢献量を検討する際に有用である。

そこで CNF-LCA ガイドラインではそのような企業活動等を支援すべく、国際規格である ISO14040 及び ISO14044 に基づく LCA における算定について、目的、対象、手順などの考え方を定める文書とした。算定のみならず、サプライチェーン間、ESG 投資等のサステナブルファイナンス関係者及び、消費者との情報開示・コミュニケーションを支援することも目的として、情報開示事例や算定事例を充実させた。さらには、サプライチェーンを通じたライフサイクル設計を支援するため、CNF 製造方法を体系的に整理し、品質機能展開（QFD）を応用して最終製品の要求品質と CNF 特性の関連付けの枠組みを提供した。

CNF-LCA ガイドラインの作成においては、既存の LCA ガイドライン等を整理し、まずは地球温暖化に特化し、温室効果ガス排出量²算定及び温室効果ガス排出削減効果のポテンシャルを評価する手法における共通課題を整理した上で、製品・サービス等の LCA を実施するための算定ガイドラインを作成したものである。

2. CNF-LCA ガイドライン策定の目的

CNF-LCA ガイドラインは、事業者が製品・サービスのライフサイクル全体にわたる環境側面³を見える化し、サプライチェーン間等の情報開示・コミュニケーション・ライフサイクル設計を支援する目的のために定めるものである。ただし、CNF-LCA ガイドラインに算定された結果については、対象製品の温室効果ガス排出量の算定（ステップ 1）及び温室効果ガス排出削減効果のポテンシャルを評価する（ステップ 1～ステップ 3）ものであり、環境優位性判定を示すものではない。

3. CNF-LCA ガイドラインの位置づけ

事業者が、自らが製造又は供給する製品・サービス等の温室効果ガス排出量の算定及び削減効果ポテンシャル量⁴を定量化し、対外的にコミュニケーションする際には、CNF-LCA ガイドラインを参照することが推奨される。また、事業者が提供する製品・サービス等の温室効果ガス排出量の算定及び削減効果ポテンシャル量を集計することで、組織単位で削減効果ポテンシャル量を定量化する際にも同様とする。

なお、CNF-LCA ガイドラインで扱う削減効果ポテンシャル量は、政府機関などによる削減効果ポテンシャル量の認証は想定していない。

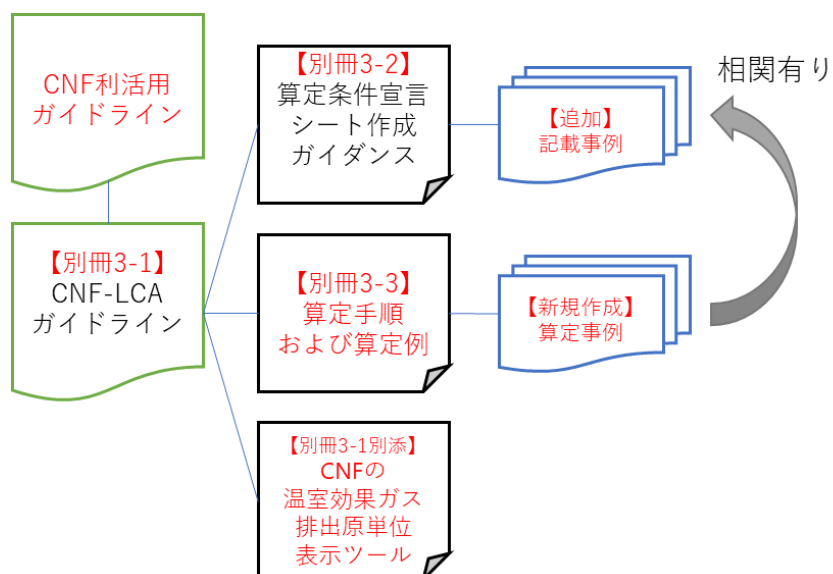
CNF-LCA ガイドラインの構成は表 1 および図 1 の通りとなっている。CNF-LCA ガイドライン（別冊 3-1）において、製品における LCA を用いた温室効果ガス排出量の算定及び削減効果ポテンシャル量の評価を行う事業者は、以下に定める要求事項に従い、自社の製品の算定を行う。別冊 3-2「CNF-LCA ガイドライン 算定条件宣言シート作成ガイダンス」にて算定時に設定した条件・シナリオを明確にしなければならない。別冊 3-3「CNF-LCA ガイドライン 算定手順および算定例」では標準的な簡易算定の手順と、自動車部品、建材、蒸気配管用断熱材への適用の算定例が示されており、自社製品の算定の際に参照することが出来る。別冊 3 別添「CNF-LCA ガイドライン CNF の温室効果ガス排出原単位表示ツール（Microsoft Excel 形式）」では、代表的な CNF として、変性パルプ直接混練法（京都プロセス）CNF、TEMPO 酸化 CNF、湿式微粒化法 CNF について、その製造時まで（変性パルプ直接混練法については CNF 強化複合樹脂の製造まで）の累積での温室効果ガス排出原単位を自社製品の算定の際に参照することが出来る。

また、CNF を使用する目的は一般に複数あると考えられるが、その中に温室効果ガス排出量削減が含まれない場合（例えば、医療用目的として用いられる場合）は CNF-LCA ガイドラインの対象外である。

CNF-LCA ガイドラインにおける用語の定義・解説は「12 項 用語の解説」に、参考文献は「11 項 参考文献」にそれぞれ記載している。

**表 1 脱炭素・資源循環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 別冊3
セルロースナノファイバーに関する温室効果ガス排出量削減効果算定ガイドラインの構成**

資料名	内容
別冊 3-1 セルロースナノファイバーに関する温室効果ガス排出量削減効果算定ガイドライン(CNF-LCA ガイドライン) (本編)	温室効果ガス排出量の算定及び削減効果ポテンシャル量の評価を行う際の要求事項を定める。
別冊 3-2 CNF-LCA ガイドライン 算定条件宣言シート作成ガイダンス	明確に設定すべき算定条件・シナリオを示す。
別冊 3-3 CNF-LCA ガイドライン 算定手順および算定例	標準的な簡易算定の手順と、自動車部品、建材、蒸気配管用断熱材への CNF 材料適用時の算定例を示す。
別冊 3 別添エクセルファイル CNF-LCAガイドライン CNFの温室効果ガス排出原単位表示ツール	変性パルプ直接混練法(京都プロセス) CNF、TEMPO 酸化 CNF および湿式微粒化法 CNF について、その製造時まで(変性パルプ直接混練法については CNF 強化複合樹脂の製造まで)の累積での温室効果ガス排出原単位を表示する。



**図 1 脱炭素・資源循環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 別冊3
セルロースナノファイバーに関する温室効果ガス排出量削減効果算定ガイドラインの構成**

4. 温室効果ガス排出量の算定

CNF-LCA ガイドラインを基に実施する温室効果ガス排出量の算定および削減効果ポテンシャル量の評価の方法と、結果に対するレビューについて以下に記載する。

4.1 算定方法について

CNF-LCAガイドラインで扱う削減効果ポテンシャル量を算定するための基本的なステップを図 2 に示す。

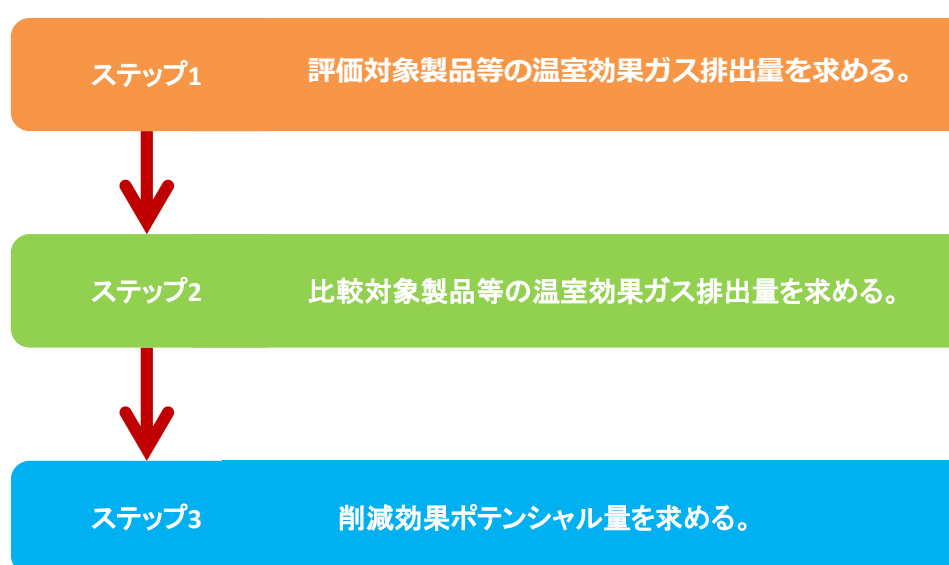


図 2 基本的なステップ

ステップ 1 は「5 項 評価対象製品等の設定」、ステップ 2 は「6 項 比較対象製品等の設定」にそれぞれ詳細を記載している。ステップ 3 は、「ステップ 2 の算定結果」－「ステップ 1 の算定結果」を計算することで算出される単位量当たりの削減効果を算出し、その結果に普及量を乗じて削減効果ポテンシャル量を算出する。

ただし、事業者の算定目的に応じてステップを省略してもよい。事業者の目的が評価対象製品・サービス等の温室効果ガス排出量の算定までの場合、ステップ 1 までで完了となる。

尚、評価対象と比較対象⁵で同じプロセスが存在する場合、異なるプロセスについてのみデータ収集を行い、削減効果ポテンシャル量を算出する方法がある。詳細は 9.簡易算定の方法に記載している。

4.2 算定条件宣言シートについて

CNF-LCA ガイドラインに沿って温室効果ガス排出量の算定および削減効果ポテンシャル量の評価を行う上で最低限設定すべき条件を、別冊 3-2「CNF-LCA ガイドライン 算定条件宣言シート作成ガイドランス」で定めている。

設定すべき条件項目としては以下の①～⑫の通り示す。

- ①目的
- ②評価対象製品等
- ③最終製品等
- ④機能
- ⑤機能単位
- ⑥評価範囲
- ⑦カットオフ基準
- ⑧比較対象製品等
- ⑨ベースライン（比較対象製品等の最終製品等）
- ⑩普及量（販売量）
- ⑪データ品質
- ⑫出典

各条件項目についての説明および記載例は別冊 3-2「CNF-LCA ガイドライン 算定条件宣言シート作成ガイドランス」に記載している。

どのような条件で得られた数値であるかを明確にするため、別冊 3-2「CNF-LCA ガイドライン 算定条件宣言シート作成ガイドランス」は算定結果とセットで扱うこと。

4.3 算定結果のレビューについて

算定された結果および報告書の内容については、自らの所属団体での内部レビュー、もしくは外部レビューを実施すること。レビュー実施者は、算定結果の適切性、妥当性等を評価する。

5. 評価対象製品等の算定

評価対象とする製品・サービス等の評価を実施する。

5.1 目的の設定

定量化を実施する際には、目的を明確にしなければならない。また、その目的に沿って、報告相手、報告手段を明確にすることが望ましい。

5.2 評価対象製品等の設定

CNF-LCA ガイドラインでは、温室効果ガス排出量の算定及び削減効果ポテンシャル量を評価する対象となる製品・サービス等を「評価対象製品等」と定義する。評価対象製品等は、削減効果を発揮する最終製品である場合や最終製品の一部の機能を担う部品・素材等の中間財である場合がある。いずれの場合においても評価対象製品等の機能又は内容等を明確にしなければならない。

なお削減効果ポテンシャル量は、評価対象製品等のライフサイクル全体で効果が測られるものであることから、評価対象製品等が部品・素材等の中間財である場合は、それらが組み込まれる最終製品等を特定することが重要である。

5.3 削減効果を発揮する最終製品等の機能単位⁶の設定

計量可能な機能単位を設定するとともに、必要に応じて評価範囲に応じた機能単位を設定すること。機能単位とは最終製品等の機能を特定し、その機能のある単位で定量化したものである。機能単位には、最終製品等の使用期間ならびに使用する地域も特定しておくが良い。使用期間の設定に当たっては、削減効果を発揮する最終製品等の法定耐用年数、物理的耐用年数、買い替えまでの期間等を参考にすることが望ましい。

5.4 評価範囲の設定（システム境界）

評価範囲を明確にしなければならず、算定製品毎に評価範囲ライフサイクルフロー図を記述することが望ましい。

5.5 温室効果ガス排出量の算定

温室効果ガス排出量は、以下の(1)式により算定することができる。

$$\text{温室効果ガス排出量} = \Sigma (\text{活動量}^{\ast 1} \times \text{温室効果ガス排出原単位}^{\ast 2}) \cdots (1)$$

- ※1 活動量とは、原材料の投入量など、各プロセスにおけるインプット情報とアウトプット情報を指す。「5.5.1 項 活動量の収集について」に詳細を記載している。
- ※2 温室効果ガス排出原単位とは、単位当たりの温室効果ガス排出量を指す。原単位には地球温暖化係数（GWP）⁷を考慮した数値を用いることが望ましい。「排出原単位設定の優先順位」に詳細を記載している。

5.5.1. 活動量の収集について

一次データの使用を基本とする。ライフサイクル全体に対する寄与度が低いプロセスや、LCA 実施者が一次データを入手することが困難な場合については、二次データの利用も認める。

二次データは、①公共機関データ、②業界データ、③文献データ、④産業連関表ベースデータから選択する。

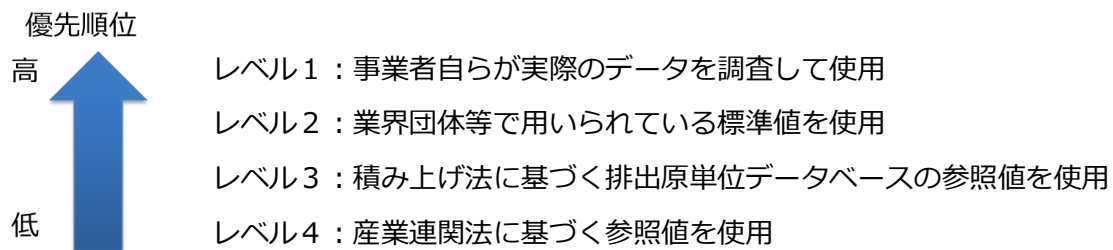
5.5.2. データ品質について

削減効果ポテンシャル量の算定にあたっては、各種データの収集や前提条件を置いたシナリオの作成が必要となるが、データの透明性を重視するとともに、データやシナリオの品質に留意することが望ましい。

基本的に、評価対象製品等と比較対象製品等は、可能な限り前提条件などをそろえ、同程度の信頼性を有するデータを採用することが望ましい。

5.5.3. 排出原単位設定の優先順位

投入物の排出原単位に関して、どのデータベースを使用するかによって LCA の結果が変わるため、排出原単位設定の優先順位を規定する。投入物の排出原単位に関するデータベース利用の優先順位は以下の通りとする。原則として優先順位はこの通りとするが、レベル 4 産業連関法およびレベル 3 積み上げ法についてはいずれもメリット・デメリットが存在するため、それぞれの特性をよく理解した上で、目的に応じて使い分けあるいは併用することが望ましい。



なお、参考として主要な種類の CNF については次節に挙げる関数式あるいは別冊 3 別添「CNF-LCA ガイドライン CNF の温室効果ガス排出原単位表示ツール」の値をレベル 2 に相当するものとして使用することができる。ただし、CNF の生産条件や外部要因によって排出原単位は大きく変化しうるため、事業者自らがサプライヤー等から実際のデータを調査し次節に挙げる関数式に当てはめて利用することを優先し、それが不可能である場合には別冊 3 別添の排出原単位の値を使用する。なお、ここで挙げた主要な CNF についてはそれぞれ「機能が異なる」「提供される形態が異なる」「用途が異なる」ため、排出原単位のみを単純に比較することは出来ない。

5.5.4. CNF 製造段階の CO₂ 排出原単位の推定

CNF 素材および CNF を使用した製品は市場に増えつつあるものの、本格的な量産体制が構築されていないわけではない。そのため、将来的に製造プロセスの改善やスケールアップによって原料やエネルギーの利用効率が向上する可能性がある。また、特に機械解繊プロセスにおいてはその消費エネルギーの多くは電力であるが、再生可能エネルギーの活用などによる電力の脱炭素化が今後も進展する可能性が高い。公共電力を利用する場合でもその CO₂ 排出原単位は低減しうるし、CNF 製造者や CNF 活用製品メーカーが独自に低炭素電力を調達することでも CO₂ 排出原単位は低減できる。これらの効果を考慮した CNF 製品の製造時 CO₂ 排出原単位を推定することを目的に、機器の消費電力や電力の CO₂ 排出原単位をパラメータとした関数からその算出ができるよう、推算方法の検討を行った。

対象としては、国内での検討が比較的進んでいる以下複数の製法と製品をピックアップした。

- 1) 変性パルプ直接混練法（京都プロセス）による CNF 強化樹脂
- 2) 湿式解繊法による CNF 分散液
- 3) TEMPO 酸化法による CNF 分散液

以下、それぞれの内容について概説する。なお、パラメータにはいくつかのサンプル値を掲載しているが、使用する機器や温度条件などによって変化しうる。可能な限り実際の製造条件を想定した実測値を用いることを推奨する。

1) 変性パルプ直接混練法（京都プロセス）による CNF 強化樹脂の製造時温室効果ガス排出原単位推算

変性パルプ直接混練法は、原料パルプを解繊しナノファイバーにしてから樹脂と混ぜるのではなく、セルロース繊維の集合体であるパルプを樹脂と直接混練して、パルプのナノ解繊とナノファイバーの樹脂中への均一分散を同時に行うプロセスである[2]。混練プロセスそのものは従来の強化樹脂製造でも用いられている。混練の前にパルプを化学変性（ここではアセチル化）することで解繊性の向上と、強度等の機能の向上を同時に達成することを狙っている。京都大学と京都市産業技術研究所が中心となって開発がすすめられたことから通称「京都プロセス」と呼ばれている。下図に変性パルプ直接混練法のプロセスフローを示す。

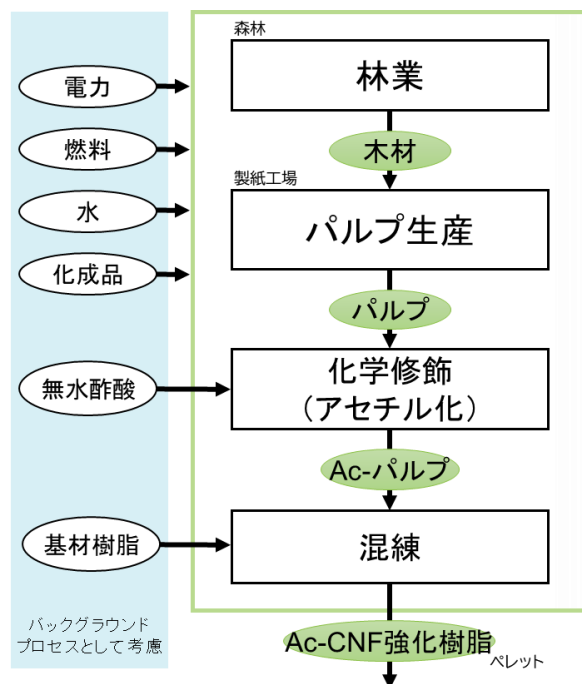


図3 変性パルプ直接混練法のプロセスフロー

以下に温室効果ガス排出量の推算式を示し、その概要を述べる。

■アセチル化パルプ製造

- $GHG_{Acパルプ}$ (kg-CO₂eq/kg-Acパルプ) { 実験室製法: 91 ~ 94
工業的製法: 8 ~ 17

■アセチル化CNF強化樹脂製造

- $GHG_{強化樹脂}$ (kg-CO₂eq/kg-強化樹脂)

$$= GHG_{Acパルプ} \times r + GHG_{基材樹脂} \times (1-r) + P_{混練} \times GHG_{電力}$$

r ← CNF混練率
 $P_{混練}$ ← 混練機の電力消費量 (kWh/kg-樹脂)

$GHG_{xxx} = XXX$ の製造時GHG排出量 (kg-CO₂eq/単位量)

{ 実験規模: 7
工業規模: 0.8
(サンプル値)

アセチル化パルプ (Acパルプ) はパルプを無水酢酸と反応させることで得られる。実験室的製法では反応時の溶媒として NMP(n-メチルピロリドン)が用いられているが、量産プロセスでは削減または回避したい物質であるため、反応物である無水酢酸を量論比よりも大幅に多く投入することで溶媒としても機能させることが検討されている [3]。この方法を採用した場合、アセチル化反応に寄与しなかった未反応無水酢酸やパルプ中の水分との副反応で生じた酢酸を分離回収することが考えられるが、蒸留塔などが必要となるため実験室では実現不可能と考えられる。NMP は量産時には使用されないという前提に立ち、上記の $GHG_{Acパルプ}$ (アセチル化パルプの製造時温室効果ガス排出量) の「実験室製法」は NMP の代わりに無水酢酸を溶媒としても利用するが、副生酢酸と未反応無水酢酸の分離回収を行わなかった場合の推算値を指し、「工業的製法」は分離回収を工業的に実施した場合の推算値を指す (詳細については既報 [3] を参照)。この分離回収条件によって CO₂ 排出原単位には幅が生じ、さらに原料パルプは製紙パルプを想定しているため、製紙条件によっても製造時 CO₂ 排出原単位が異なる。上記の条件による低位・高位の温室効果ガス排出量を示している。

下表にアセチル化パルプ生産における低位・高位温室効果ガス排出量の前提条件を整理する。

表 2 アセチル化パルプ生産における低位・高位温室効果ガス排出量の前提条件

構成要素	低位	高位
パルプ生産プロセス	既存の製紙工場モデル[4]を用いて計算された排出原単位の最小値。 条件の詳細は既報[5]に記載の通り。	既存の製紙工場モデル[4]を用いて計算された排出原単位の最大値。 条件の詳細は既報[5]に記載の通り。

アセチル化プロセス	未反応無水酢酸および副生酢酸を分離する蒸留塔の還流比を高めに設定し、アセチル化反応器の後段および脱気装置の後段で分離を実施。	未反応無水酢酸および副生酢酸を分離する蒸留塔の還流比を標準値に設定し、アセチル化反応器の後段のみで分離を実施。
-----------	--	---

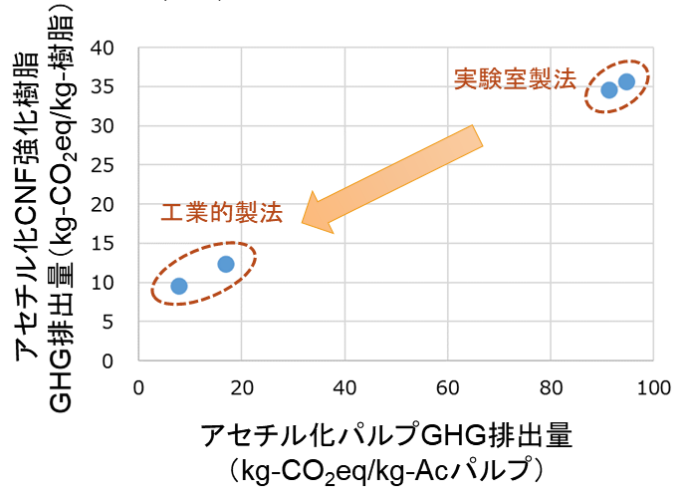
アセチル化 CNF 強化樹脂製造の温室効果ガス排出量は、上記の $GHG_{Ac \text{ パルプ}}$ を用い、CNF 混練率 (r)、基材樹脂の温室効果ガス排出原単位 ($GHG_{\text{基材樹脂}}$)、混練機の消費電力 ($P_{\text{混練}}$)、使用電力の GHG 排出原単位 ($GHG_{\text{電力}}$) を用いて、上記のような式で示すことができる。 $P_{\text{混練}}$ にはサンプル値を記載しているが、使用する機器や温度条件などによって変化しうる。可能な限り実際の製造条件を想定した実測値を用いることを推奨する。

なお、アセチル化パルプ生産や基材樹脂生産にも電力は使用されており、厳密にはこれらの温室効果ガス排出原単位も電力をパラメータとした関数で表現が可能であるが、検討した範囲では電力の影響は無視できる程度に小さかったため、わかりやすさを重視してここでは定数値とした。例えば、電力を多く使用する製造方法で生産される基材樹脂を用いる場合には、適宜その影響も考慮すべきである。

変性パルプ直接混練法 CNF の温室効果ガス排出原単位計算式を利用して、スケールアップやプロセス改善、電力の低炭素化がアセチル化 CNF 強化樹脂の温室効果ガス排出量に及ぼす影響を検討した(下図)。下図は横軸にアセチル化パルプ(Ac パルプ)温室効果ガス排出量を取り、それが変化した場合のアセチル化 CNF 強化樹脂の温室効果ガス排出量を縦軸にプロットしたものである。グラフ右上の 2 点が実験室製法(高位と低位)であるが、工業的製法としてプロセス改善とスケールアップを実現した場合、Ac パルプの温室効果ガス排出原単位は 8 割~9 割程度低減できる可能性がある(グラフ左下)。CNF 混練率 30% で PA6(ポリアミド 6)樹脂との混練を行った場合、工業的製法にすることで実験室製法に比べて、強化樹脂全体では 6 割~7 割程度の温室効果ガス削減が可能であると考えられることを示している。なお、工業的製法においても無水酢酸の分離回収方法の選択肢によって温室効果ガス排出量が変わりうるため、その高位・低位両方の排出量を示している。(詳細については既報 [3] を参照)

スケールアップとプロセス改善の効果

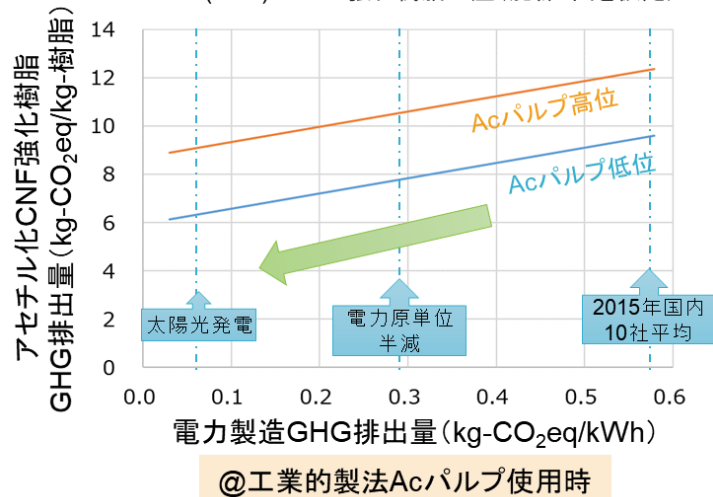
CNF(30%) PA6の強化樹脂生産(混練1回を仮定)



また、電力の低炭素化の効果について、工業的製法のAcパルプを用いた場合に対して、低炭素電力の使用によってどの程度温室効果ガス削減されるかを検討したものが下図のグラフである。例として電力の温室効果ガス排出原単位が50%低減した場合と、太陽光発電による電力を用いた場合（原単位は電力中央研究所報告書 [6] より抽出）をグラフ上に示している。

電力の低炭素化の効果

CNF(30%) PA6の強化樹脂生産(混練1回を仮定)



2) 湿式解繊法による CNF 分散液の製造時温室効果ガス排出原単位推算

湿式解繊法は、パルプを水に分散させたパルプ分散液を、高圧ホモジナイザー、グラインダー、超音波処理機、などで機械的に処理することでパルプを解繊し、CNF 分散液を得る方法である。実際には呼称の統一はされていないが、本書では上記を「湿式解繊法」と称することとする。湿式解繊法 CNF 製造の

プロセスフローを下図に示す。分散液をそのまま使用する場合もあるが、乾燥する場合にもその方法が多様に存在するため、本書ではCNF分散液の温室効果ガス排出量の算出までを対象としている。

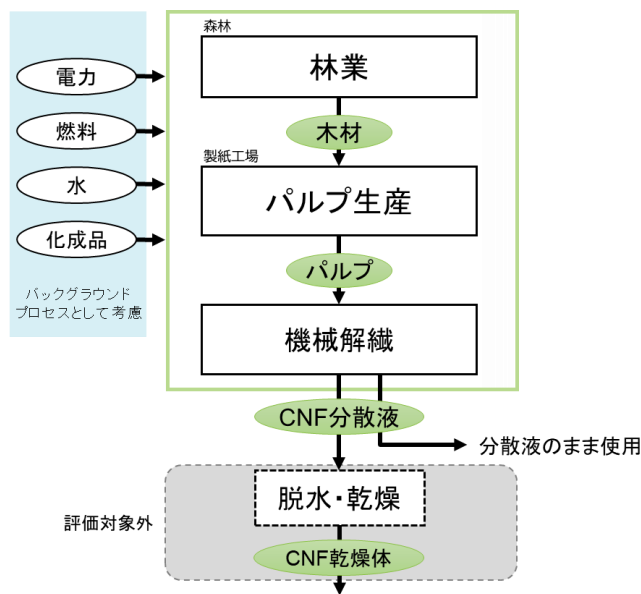


図3 湿式解繊法 CNF 製造のプロセスフロー

以下に、湿式解繊法による CNF 分散液の製造時の温室効果ガス排出原単位推算式の概要を示す。最初に、解繊装置に供給される原料パルプ分散液の温室効果ガス排出原単位について、パルプには一般に 10～20%程度の水分が含まれるので、セルロース基準の濃度で表現されたパルプ分散液への換算において、原料パルプの含水率に応じて算出が可能なように、含水率を変数とした関数で記述した。なお、GHG_{パルプ}の値は既報[4][5]を参考とし、製紙条件などによって変動しうる幅のある値としている。

パルプ濃度 x wt% (セルロース量基準) のパルプ分散液を用いて
 同じ濃度の CNF 分散液を得る場合

原料パルプが含水率 m % であったと仮定※すると
 分散液 1kg の調製に用いられた原料パルプは

$$\frac{x}{100} \times \frac{100}{100 - m} = \frac{x}{100 - m} \quad (\text{kg})$$

※パルプ原単位として用いたデータの
 のパルプ含水率が不明であったため、
 含水率を仮定値とした。

■ パルプ分散液 (解繊装置への供給前の状態)

$$GHG_{\text{パルプ分散液}} = GHG_{\text{水}} \times \left(1 - \frac{x}{100 - m}\right) + GHG_{\text{パルプ}} \times \frac{x}{100 - m}$$

$GHG_{\text{パルプ}} = 1.2 \sim 3.9$
 (生産条件によって変動)

次にこのパルプ分散液を原料として機械解繊によって製造された CNF 分散液の温室効果ガス排出原単位は、上記の $GHG_{\text{パルプ分散液}}$ と、機械解繊時の収率 (y)、機械解繊の所要回数 (n)、機械解繊装置の消費電力 ($P_{\text{機械解繊}}$) を用いて以下のように表現できる。一般に機械解繊は複数回行われ、適用先の最終製

品の要求機能に合わせて解繊の程度を解繊回数によって調整する。処理された分散液を再度装置に供給して解繊を行うため、このような数式表現となる。

■ CNF分散液

$$GHG_{CNF分散液} = GHG_{パルプ分散液} \times \frac{1}{y^n} + \left(P_{機械解繊} \times \frac{1}{y} \times GHG_{電力} \right) \times n$$

y: 機械解繊時の収率(ロスが無い場合1)
 n: 機械解繊の所要回数
 $P_{機械解繊}$: 機械解繊の消費電力(kWh/kg-原料懸濁液)

なお、この数式で得られる $GHG_{CNF分散液}$ の値は、CNF 質量基準ではなく、分散液 1kg あたりの値であることに十分注意する必要がある。例えば、乾燥パウダー等に加工して使用する場合には、水分除去に起因する温室効果ガス排出の加算に加え、CNF 量基準への重量換算も必要となる。前述の通り、分散液をそのまま使用する場合や、乾燥する場合はその方法が多様に存在するため、本書では CNF 分散液の温室効果ガス排出量の算出までを対象としている。

下表にここで用いた低位・高位温室効果ガス排出量の前提条件を示す。

表 3 湿式解繊法 CNF 製造における低位・高位温室効果ガス排出量の前提条件

構成要素	低位	高位
パルプ生産プロセス	既存の製紙工場モデル[4]を用いて計算された排出原単位の最小値。 条件の詳細は既報[5]に記載の通り。	既存の製紙工場モデル[4]を用いて計算された排出原単位の最大値。 条件の詳細は既報[5]に記載の通り。
機械解繊回数	ヒアリングに基づく	ヒアリングに基づく
機械解繊装置消費電力	装置カタログに記載のモーター消費電力(kW)および処理可能量(kg/hr)からの推算値。大型機で最大処理量での条件を想定。	装置カタログに記載のモーター消費電力(kW)および処理可能量(kg/hr)からの推算値。小型機で低処理量での条件を想定。

3) TEMPO 酸化法による CNF 分散液の製造時温室効果ガス排出原単位推算

TEMPO 酸化法は機械解繊の前に、TEMPO (2,2,6,6-tetramethyl-1-piperidinyloxy radical) を触媒とした酸化反応を行うことで、セルロース繊維中の水酸基をカルボキシル基に置換した、TEMPO 酸化パルプ (TO-pulp) を得る。酸化処理によって繊維間に静電的斥力が働くようになり、より少ない機械解繊の回数でナノ分散を可能とする。下図に TEMPO 酸化法による CNF 製造のプロセスフローを示す。機械解繊法 CNF と同様に、分散液をそのまま使用する場合もあるが、乾燥する場合にもその方法が多様に存

在するため、本書では CNF 分散液の温室効果ガス排出量の算出までを対象としている。

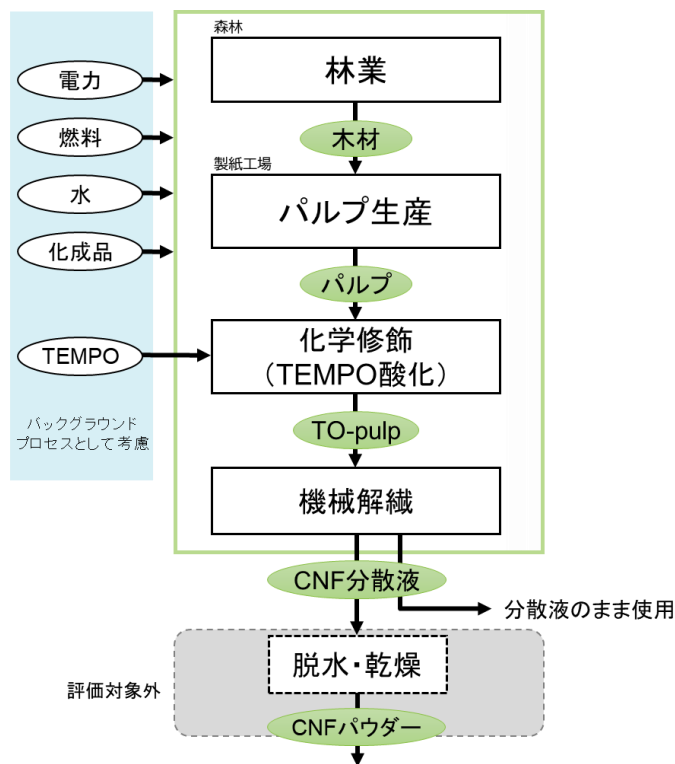


図4 TEMPO 酸化法による CNF 製造のプロセスフロー

この製法における温室効果ガス排出原単位推算式の概要を以下に記す。

■ TEMPO酸化パルプ分散液 (x wt%) のLC-GHG

TEMPO酸化パルプが含水率m%で得られていると仮定

$$GHG_{TO-pulp分散液} = GHG_{水} \times \left(1 - \frac{x}{100-m}\right) + GHG_{TO-pulp} \times \frac{x}{100-m}$$

■ CNF分散液のLC-GHG (前項と同じ)

$$GHG_{CNF分散液} = GHG_{TO-pulp分散液} \times \frac{1}{y^n} + \left(P_{機械解繊} \times \frac{1}{y} \times GHG_{電力}\right) \times n$$

y: 機械解繊1回あたりのセルロース収率 (ロスが無い場合1)

n: 機械解繊の所要回数

P_{機械解繊}: 機械解繊の消費電力(kWh/kg-原料懸濁液)

前述の湿式解繊法による CNF 分散液の製造時の温室効果ガス排出原単位推算式におけるパルプ分散液の排出原単位を TEMPO 酸化パルプの排出原単位に置き換えることで計算可能であり、同様の関数で表現される。前述の通り、機械解繊のみで処理するタイプの湿式解繊法に比べて、TEMPO 酸化によって解繊回数(n)を減らすことが可能である。TEMPO 酸化パルプの温室効果ガス排出量 (GHG_{TO-pulp 分散液}) は既報 [7] にて検討、算出されている。

湿式解繊の推算式同様に、この数式で得られる GHG_{CNF} 分散液 の値は、CNF 質量基準ではなく、分散液 1kg あたりの値であることに十分注意する必要がある。例えば、乾燥パウダー等に加工して用いる場合には、水分除去に起因する温室効果ガス排出の加算に加え、CNF 量基準への重量換算も必要となる。分散液をそのまま使用する場合もあり、乾燥する場合にもその方法が多様に存在するため、CNF 分散液の温室効果ガス排出量の算出までを対象とした。下表にここで用いた低位・高位温室効果ガス排出量の前提条件を示す。

表 4 湿式解繊法 CNF 製造における低位・高位温室効果ガス排出量の前提条件

構成要素	低位	高位
パルプ生産プロセス	既存の製紙工場モデル[4]を用いて計算された排出原単位の最小値。 条件の詳細は既報[5]に記載の通り。	既存の製紙工場モデル[4]を用いて計算された排出原単位の最大値。 条件の詳細は既報[5]に記載の通り。
TEMPO 酸化プロセス	TEMPO 製造の温室効果ガス排出量は製造時に用いる化成品の製造原単位を積み上げ。溶媒等の再利用を想定。また、TEMPO 酸化プロセスにおける TEMPO の再利用を想定。	TEMPO 製造の温室効果ガス排出量は製造時に用いる化成品の製造原単位を積み上げ。溶媒等の再利用は行わない。また、TEMPO 酸化プロセスにおける TEMPO の再利用も行わない。
機械解繊回数	ヒアリングに基づく	ヒアリングに基づく
機械解繊装置消費電力	装置カタログに記載のモーター消費電力(kW)および処理可能量(kg/hr)からの推算値。大型機で最大処理量での条件を想定。	装置カタログに記載のモーター消費電力(kW)および処理可能量(kg/hr)からの推算値。小型機で低処理量での条件を想定。

また、カルボキシメチル化、リン酸エステル化など、化学処理によって解繊性を向上させて機械解繊を行う製法では、同様の計算式が適用できる。ただし、各種の化学修飾パルプの製造時温室効果ガス排出量は別途検討が必要であり、本書では対応できていない。

5.6 カットオフ基準⁸

製品システム⁹を網羅的に調査することは事業者には過大な作業負担を及ぼす場合がある。したがって、算定においては、当該製品のライフサイクルにおいて一般的に重要でないライフサイクル段階、プロセスあるいはフローで、一定の基準を満たすものは、製品システムからカットオフ（算定の対象外とすること）してもよい。カットオフ項目は以下のカットオフ基準毎に設定することができる。

該当する算定ルールに記載されたカットオフ項目についてカットオフすることができる。加えて、以下に定めるカットオフ基準に従い、算定時に算定製品毎にカットオフ項目を追加してもよい。

- ① 投入される部品、素材、容器包装、副資材については、基準フローの質量比で累計 5%までとする。ただし、質量が少ないものでも、影響評価結果が大きいと想定されるものは製品システムに含まなければならない（例：電子機器におけるプリント基板）。
- ② 排出される物質、廃棄物等については、基準フローの質量比で累計 5%までとする。ただし、質量が少ないものでも、影響評価結果が大きいと想定されるものは製品システムに含まなければならない。特に大気・水圏等への直接排出や管理対象の有害物質については注意が必要である（例：エアコンの冷媒漏洩や窒素肥料起因の亜酸化窒素の放出）。
- ③ 質量で把握できないフローおよびプロセスについては、試算結果に対して、影響領域指標比で累計 5%までとする（例：サイト内輸送プロセス）。
- ④ 信頼性に足る十分な情報が得られず妥当なシナリオのモデル化が困難な領域とする（例：生産工場の建設や資本財、間接部門）。

6. 比較対象製品等の算定

比較対象とする製品・サービス等の評価を実施する。

6.1 比較対象製品等のシナリオ設定

CNF-LCA ガイドラインでは、評価対象製品等が存在しなかった時に代替となる対象製品・サービス等を「比較対象製品等」と定義する。比較対象製品等のシナリオは、そのシナリオを採用したことの根拠となる考え方を説明しなければならない。

比較対象製品等のシナリオは、例えば、以下のものを使って示すことができる。

- 市場に存在する他の製品・サービス等
- 法規制等で規定された基準値（例：トップランナー基準）
- 製品・サービス等の業界平均値

尚、比較対象製品等についても評価対象製品等と同様に、削減効果を発揮する最終製品である場合や最終製品の一部の機能を担う部品・素材等の中間財である場合がある。「5.2 項評価対象製品等の設定」の記載と同様に明確にする必要がある。

CNF-LCA ガイドラインでは、比較対象製品等の最終製品等を「ベースライン」と定義する。

6.2 削減効果を発揮するベースラインの機能単位の設定

ベースラインは、評価対象製品等の最終製品等と同一の機能単位でなければならない。

6.3 ベースラインの算定

設定したシナリオに沿って、ベースラインの算定を実施する。算定の実施において、「5.5 項～5.6 項」と同様に評価対象製品等の最終製品等の機能単位を前提とする。

7. 削減効果量の算定方法

5項で求めた評価対象製品等の最終製品等の算定結果より、6項で求めたベースラインの算定結果を減算し、その差分を削減効果量とする。計算式は(2)式に記載する。

$$\begin{aligned} \text{削減効果量 [kg-CO}_2\text{e]} &= (\text{比較対象製品等の最終製品等の算定結果 [kg-CO}_2\text{e]}) \\ &\quad - (\text{ベースラインの算定結果 [kg-CO}_2\text{e]}) \cdots (2) \end{aligned}$$

8. 削減効果ポテンシャル量の算定方法

(2)式で求めた削減効果量に普及量を乗じたものを削減効果ポテンシャル量とする。

計算式は(3)式に記載する。

$$\text{削減効果ポテンシャル量 [kg-CO}_2\text{e]} = \text{削減効果量 [kg-CO}_2\text{e]} \times \text{普及量} \cdots (3)$$

8.1 削減効果ポテンシャル量について

評価期間における削減効果ポテンシャル量の算定方法においては、フローベースやストックベースなど、いくつか考え方ががあるが、ここでは販売期間、使用期間をそろえたフローベースの考え方を記載する。

◆ フローベース

組織単位で削減効果ポテンシャル量を定量化する場合には、「8項 削減効果ポテンシャル量の算定方法」に記載している(3)式に則り算定する。これにより事業者が評価期間における評価対象製品等の削減効果ポテンシャル量を示すことができる。

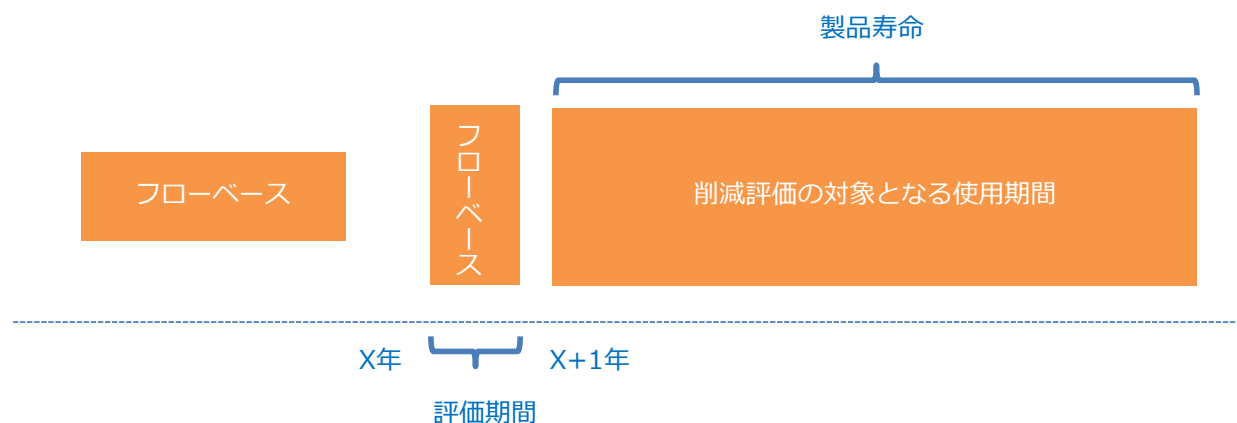


図 5 フローベースの考え方

なお、上記は削減効果ポテンシャル量の算定方法の代表例として記載しているが、必ずしも上記の算定方法による必要はない。

8.2 普及量の設定

温室効果ガス排出削減は、実際に評価対象製品等が使用され、普及して初めて効果を発揮すると考える。そのため、定量化の目的に応じた期間における評価対象製品等の普及量を把握することが望ましい。

なお、普及量のデータ入手が難しい場合は、生産量もしくは出荷量を用いるなど、他のデータから推計する方法も考えられる。

8.3 前提条件・シナリオ設定における注意事項

削減効果ポテンシャル量の定量化にあたっては、各種データの収集や前提条件を置いたシナリオの作成が必要となるが、データの透明性を重視するとともに、データやシナリオの品質に留意することが望ましい。

基本的に、評価対象製品等とベースラインシナリオは、可能な限り前提条件などをそろえ、同程度の信頼性を有するデータを採用することが望ましい。

CNF 複合製品製造にかかる環境負荷の多くは電力に起因しているため、長期的に電力の脱炭素化が進み、電力消費量あたりの温室効果ガス排出量が変わった場合には再計算が必要となる。

【海外での削減効果ポテンシャル量を定量化する場合】

海外では国毎に機器の効率等の基準が異なり、データ収集にかかる負荷も大きいことから、評価対象製品等の特性を踏まえ、前提条件の設定やデータの収集の方法を柔軟に検討することが必要である。

9. 簡易算定の方法

削減効果を発揮する最終製品等及びベースラインが、同一もしくは同等の段階やプロセスを有しているなど、温室効果ガス排出量に差がないと認められる場合には、それらの算定を省略してもよいと考える算定方法論である。簡易算定のイメージを図 6 に示す。

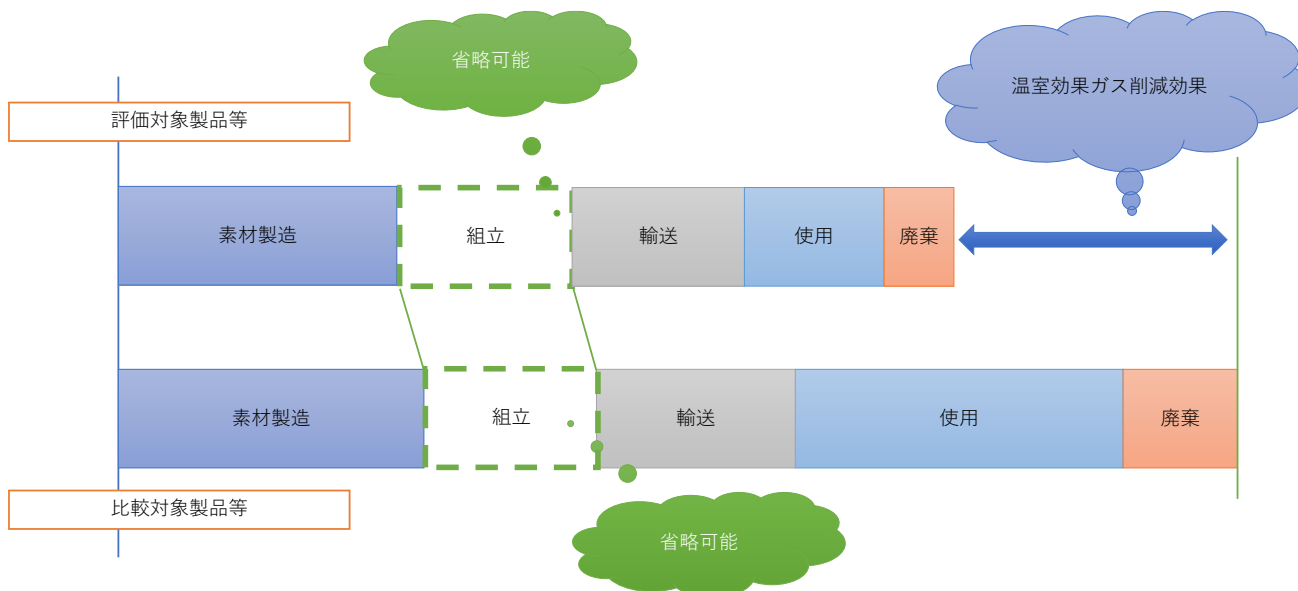


図 6 簡易算定のイメージ

10. CNF のサプライチェーンを通じたライフサイクル設計支援

CNF と呼称されるものには多様な種類と製法が存在する。CNF 製造方法には多種の要素技術が存在しそれらの組合せは多様かつ増加している。国内ではパルプ直接混練法（京都プロセス）によるアセチル化 CNF 強化樹脂への適用や TEMPO 酸化法による CNF 等が著名である。CNF は製造方法によって発現される特性が異なる。これまで化学処理や機械解繊などの要素技術に関する個別の整理はなされてきたがライフサイクルを俯瞰した整理は不足していた。そこで、文献等から単位プロセスの組合せによる CNF 製造方法の要素技術別の類型を体系的に整理した（表 5-表 7）。これらの類型毎に CNF 特性や CNF を使用した二次材料（CNF 複合樹脂）の特性が整理されることが期待される。また、LCA に必要な情報を単位プロセスごとに整理することで、LCA 実施の支援につながる。

表 5 CNF 製造方法の類型の体系的整理（資料 [1] に基づき作成）

	製紙パルプ以外を原料とする	製紙パルプを原料とする
化学処理なし	<p>植物原料 → 機械解繊 → CNF</p> <p>植物原料 → 機械解繊 → 機械解繊 → CNF</p>	<p>製紙パルプ → 機械解繊 → CNF</p> <p>製紙パルプ → 機械解繊 → 機械解繊 → CNF</p>
化学処理あり	<p>植物原料 → 化学処理 → 機械解繊 → CNF</p> <p>植物原料 → 化学処理 → 機械解繊 → 機械解繊 → CNF</p> <p>植物原料 → 化学処理 → 化学処理 → 機械解繊 → CNF</p>	<p>製紙パルプ → 化学処理 → 機械解繊 → CNF</p> <p>製紙パルプ → 機械解繊 → 化学処理 → CNF</p> <p>製紙パルプ → 化学処理 → 機械解繊 → 機械解繊 → CNF</p> <p>製紙パルプ → 機械解繊 → 化学処理 → 機械解繊 → CNF</p>

菊池康紀、兼松祐一郎、下野僚子、ライフサイクル思考に基づくナノセルロースの技術評価、ナノセルロース塾第3期 講演資料、2021 に基づき作成

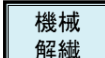
 : 主たる解繊プロセス

表 6 CNF 製造方法の種類の体系的整理と実例：製紙パルプ以外からの製造方法
(資料 [1] に基づき作成)

類型	原料	化学処理	機械解繊
植物原料 → 機械解繊 → CNF	ペーパースラッジ		ウォータージェット グラインディング
植物原料 → 機械解繊 → 機械解繊 → CNF	木粉		粉碎 機械的疎水化
植物原料 → 化学処理 → 機械解繊 → CNF	ポテトパルプ	漂白	ホモジナイゼーション
	綿	漂白	グラインディング
	稲わら	漂白	高速攪拌
植物原料 → 化学処理 → 機械解繊 → 機械解繊 → CNF	ビートパルプ	蒸解漂白	凍結破碎 ホモジナイゼーション
	大豆殻	漂白	リファインング ホモジナイゼーション
植物原料 → 化学処理 → 化学処理 → 機械解繊 → CNF	稲わら	漂白 TEMPO酸化	超音波処理
		漂白 TEMPO酸化	リファインング

菊池康紀、兼松祐一郎、下野僚子、ライフサイクル思考に基づくナノセルロースの技術評価、ナノセルロース塾第3期 講演資料、2021 に基づき作成

機械解繊 : 主たる解繊プロセス

表 7 CNF 製造方法の種類の体系的整理と実例：製紙パルプからの製造 (資料 [1] に基づき作成)

類型	化学処理	機械解繊
製紙パルプ → 機械解繊 → CNF		ウォータージェット グラインディング リファインング
製紙パルプ → 機械解繊 → 機械解繊 → CNF		リファインング ホモジナイゼーション ニーディング 超音波処理 リファインング ボールミル
製紙パルプ → 化学処理 → 機械解繊 → CNF	TEMPO酸化	ホモジナイゼーション
	カルボキシメチル化	ホモジナイゼーション
	TEMPO酸化	ボールミル
製紙パルプ → 機械解繊 → 化学処理 → CNF	アセチル化	グラインディング
製紙パルプ → 化学処理 → 機械解繊 → 機械解繊 → CNF	酵素処理	超音波処理 ボールミル
	TEMPO酸化	リファインング 超音波処理
	TEMPO酸化	グラインディング 超音波処理
製紙パルプ → 機械解繊 → 化学処理 → 機械解繊 → CNF	アセチル化	リファインング 混練

菊池康紀、兼松祐一郎、下野僚子、ライフサイクル思考に基づくナノセルロースの技術評価、ナノセルロース塾第3期 講演資料、2021 に基づき作成

機械解繊 : 主たる解繊プロセス

前述の CNF 製造方法の類型では、製品・サービスを提供する事業者にとって関心のある最終製品の要求品質との関連付けが出来ていない。そこで、製品・サービスの企画等で用いられる品質機能展開（QFD）の手法を応用して、最終製品の要求品質と、CNF 材料特性、CNF 製法の連関を特定し、CNF のライフサイクル設計・評価における留意点を整理するための枠組みを提供することとした。QFD では、要求品質、CNF 材料特性、CNF 製法の項目を論理的に階層化（展開）しながら挙げることによって、各項目をもれなくかぶりなく、抽象度をそろえた形で導出できることで、CNF 研究者・専門家が暗黙的に把握している品質・機能・特性の連関を明示的に整理することが期待できる。また、項目間の関係を示す二元表により、要求品質と CNF 材料特性、CNF 材料特性と CNF 製法といった関係を俯瞰できることで複層的な情報を整理し、関係者間のコミュニケーションを円滑にすることが期待できる。これらは、CNF を活用した素材と、最終製品を構成する部品・部材を、製造技術に関連する要素にブレークダウンして体系的に紐づける考え方である（イメージを図 7 に示す）。

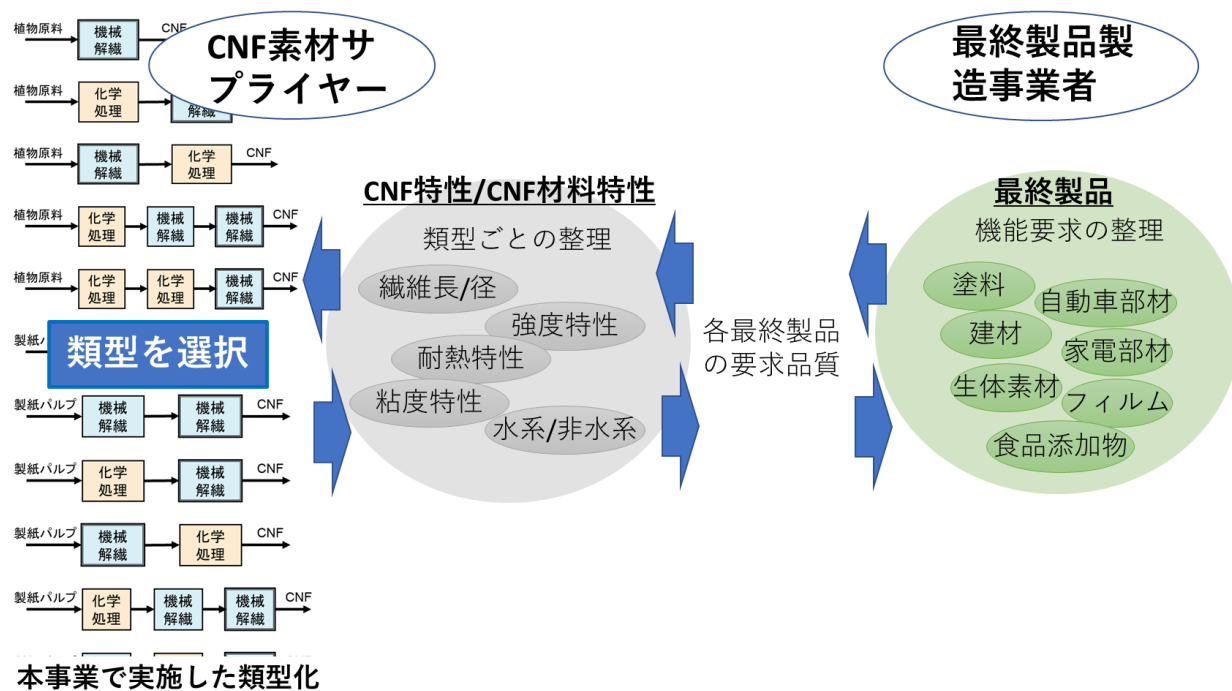


図 7 CNF を活用した素材と最終製品を構成する部品・部材の紐づけ（イメージ）

図 8 に CNF の製造方法に着目した QFD の構成要素を示す。図 の各象限（①～④）について逐次検討することにより、CNF サプライヤーおよび CNF ユーザー間での効率的かつ効果的なコミュニケーションが期待される。

		材料特性														ライフサイクル設計における留意点														
		樹脂・分散液特性							素材特性																					
		力学特性			熱特性	化学特性		他		物理特性		化学特性		他																
		弾性率	曲げ強度	比重	耐衝撃性	寸法安定性(CTE・線膨脹係数)	荷重たわみ・温度(HDT)	成形性(MFR)	耐水性	難燃性	リサイクル耐性	発泡性	透明度	チキン性	繊維サイズ (nm)	比表面積	粘度	疎水性/親水性	耐熱性	液体への分散性	樹脂への分散性	透明度	バイオ由来炭素	エネルギー起源炭素	機能単位の精査	スケール効果	化学プロセスの工業化	電力原単位の影響	プロセス廃棄物の処理	リサイクル性
要求品質 (最終製品)	共通																					✓	✓	✓						
	自動車 インテークマニホールド																													
	運転時に変形しない	○	○				○	○																						
	高温でも変形しない	○	○				○	○																						
	軽量化できる			◎																										
	要求形状に成形できる						◎	○																						
	衝撃に耐えることができる				○																									
リサイクルできる									◎																				✓	
CNF製法	要素技術																													
	蒸解																													
	バルブ化																													
	叩解																													
	リファイナー																													
	機械解繊																													
多軸混練機	◎	◎																												
アセチル化 ²	◎	◎		◎	◎	◎	◎	◎																						
化学処理																														
ASA変性 ³																														

菊池康紀、兼松祐一郎、下野僚子、ライフサイクル思考に基づくナノセルロースの技術評価、
ナノセルロース塾第3期 講演資料、2021 に基づき作成

図 8 CNF の製造方法に着目した品質機能展開の構成要素

行方向(縦)には「要求品質 (最終製品)」、「CNF 製法」の情報を並べ、列方向(横)には「材料特性」、「ライフサイクル設計における留意点」の情報を並べている。詳細は後述するが、これら要素間の連関を見ていくことで、その材料が最終製品に必要な要求を満たしているか、その機能はどのような製造プロセスによって発現するものか、LCA やサプライチェーン設計を行う上ではどのような点に留意すべきか、といったことが整理できる。基本的な考え方として、この QFD に完成形は存在せず、常にアップデートされていくことを想定しており、サプライヤーやユーザー等の間での意見交換を通して表を作成・更新する過程においてこそ、もっとも効果を発揮すると言える。

「要求品質 (最終製品)」の部分には、市場の要求を把握し、最終製品に求められる要求項目に変換したものを列挙する。ここでは CNF 素材を使用して製造される製品または部品などが最終製品の対象となる。

「CNF 製法」の部分には、前述の CNF 製法の類型化において整理した化学処理や機械解繊といったプロセス技術の単位で、適用される技術を列挙する。これらプロセス技術によってセルロースの変性や解繊が行われることによって CNF の特性が発現する。

「材料特性」については最終製品の製造に直接用いられる「樹脂・分散液」の特性と、CNFのナノ繊維そのものとしての「素材」の特性に分けて整理することとした。これは、CNFは素材単独で用いられることは少なく、CNF強化樹脂やCNF分散液といった材料の添加物として活用されることが多く、材料の状態における特性が最終製品の要求に影響を与えるためである。この点からは「樹脂・分散液特性」のみを把握すれば良いとも考えられるが、樹脂・分散液特性はCNF素材の特性によってもたらされるものであり、その特性はCNF製法によって発現するものであるため、相互の関係性を整理しておくことも有用と考えられるので、このような方針とした。

「ライフサイクル設計における留意点」には主にLCAを実施する際に、目的と評価範囲の設定、インベントリ分析、インパクト評価、解釈などの過程で考慮すべきポイントを列挙する。これによりLCA実施において一定の品質を担保するとともに、LCA結果を活用したサプライチェーン設計や製品ライフサイクル設計にも役立つと考えられる。

次に、項目間の連関の表現や解釈について述べる。行方向の項目と列方向の項目の交点に◎、○、※、×などの記号によってその特性を示す。ここでは、「◎：比較対象よりも向上する」、「○：要求を満たすことができる」、「※：条件により性能が異なる」、「×：比較対象よりも劣る」、と設定したが、分析対象に応じて設定を変更しても良い。以下、各象限についての概要を述べる。

「①製品要求を満たす材料特性」のパートに記載される記号は、ある製品要求を満たすために材料に求められる特性を示す。逆に、ある材料特性によって満たすべき製品要求または影響を与える製品要求を整理することもできる。

「②プロセス技術によって発現する材料特性」は、CNFおよびCNF添加材料を製造するために必要な各種の単位プロセスが、それぞれどの材料特性の発現に寄与しているかを示す。この整理により、製品化にあたって課題となっている特性がある場合の課題解決や、強みとなる特性がある場合のさらなる改善などのために、重要な単位プロセスを明示的に表現することができる。

「③製造プロセスの評価における留意点」および「④最終製品の評価における留意点」は、製造プロセスおよび最終製品のLCAやライフサイクル設計において留意すべき事項との連関を示す。留意すべき事項としては、バイオマス由来製品の特性としてバイオマス由来炭素とエネルギー起源炭素をそれぞれ考慮することや、新規な機能（例：樹脂の軽量化と強化）が付加されることによる機能単位設定の工夫、技術開発自体が途上であることから考慮すべき技術発展やスケールアップによる変化、将来的に期待される電力原単位の低減や再生可能エネルギーの積極的利用、などが挙げられる。各項目を考慮する際にどの要求品質や製法と関連が深いのかを一覧することができる。

この枠組を、京都プロセス（変性パルプ直接混練法）によるCNF強化樹脂の自動車構造材への適用したケーススタディを表に示す。この表は一例であり、評価したい最終製品の要求品質や、評価したいCNF素材/CNF複合材の種類に応じて項目を変更可能である。

表 8 を例として表の読み方、使い方を述べる。まず、表の欄外上部に記述のとおり、CNF 材料としては変性パルプ直接混練法によって製造されるアセチル化 CNF 強化ナイロン 6（以下、「新規材料」）を対象とした。この新規材料はインテークマニホールドやエンジンカバーなどの自動車部品への適用が検討されており、これを最終製品と設定し、従来使用されているガラス繊維強化ナイロン 6（以下、「従来材料」）を比較対象に設定した。表中の「◎」および「×」は、新規材料を適用した各自動車部品が従来材料に比べて最終製品としての機能や特性が向上する／劣ることを示す。「○」は最終製品として必要とされる機能水準を、新規材料を用いた場合に満たすことができることを示す。CNF 材料は開発途上にあるため、化学変性や機械解繊における製造条件について探索中である場合も多く、その条件によって機能や物性値も変わりうる。そこで、条件が定まっていない場合や、様々な条件設定がありうる場合、その条件によって優劣も逆転しうる要求特性には「※」を記すこととした。

インテークマニホールドに関して、要求品質のひとつである「高温でも変形しない」については、材料特性として樹脂・分散液特性の「弾性率」、「曲げ強度」、「寸法安定性」、「荷重たわみ温度」と関連があり、すべての項目が要求品質を満たしており、特に「荷重たわみ温度」については比較対象（従来品）よりも向上が見込まれること（◎）が示されている。また、要求品質「軽量化できる」については比重に関して◎がついているが、このとき LCA を行う場合には新規品を用いることで同じパーツの機能を満たすために必要となる樹脂の質量が小さくなるため、機能単位を設定する際には重量あたりの評価よりもパーツあたりの評価のほうが適切である。また、使用段階（自動車の走行）も含めた評価をする場合には、車体軽量化による燃費改善の効果が見込まれるのであれば、同じく評価において考慮することが望ましい。以上のことから、ライフサイクル設計における留意点として「機能単位の精査」にチェックマーク（✓）が示されている。

「CNF 製法」のパートでは、例えば化学処理の「アセチル化」の行を見ると、多くの材料特性と関連があり、その効果と影響が大きいことがわかる。ライフサイクル設計における留意点としては、「アセチル化」の行で 4 項目に✓が示されている。「スケール効果」や「化学プロセスの工業化」はアセチル化プロセスを工業的にスケールアップすることで消費エネルギーや入出力物質が変化することに留意する必要がある、同時にそれは「電力原単位の影響」（将来的に電力の温室効果ガス排出原単位が低減されている可能性）と「プロセス廃棄物の処理」も考慮すべきであることを示している。これらの議論は「環境省、平成 30 年度セルロースナノファイバー利活用による CO2 排出削減効果等評価・検証事業委託業務」および「環境省、社会実装に向けた CNF 材料の導入実証・評価・検証～自動車分野～（NCV プロジェクト）」等の事業報告書により詳細に議論されているので参考にされたい。

表 8 CNF の製造方法に着目した品質機能展開の実施例（京都プロセス（変性パルプ直接混練法）によるアセチル化 CNF 強化ナイロン 6 の自動車構造型材への適用）（作成協力：東京大学）

CNF材料	アセチル化CNF強化ナイロン6
製法	変性パルプ直接混練法
適用先	自動車用 インテークマニホールド、エンジンカバー
比較対象	ガラス繊維強化ナイロン6

◎：比較対象よりも向上する
○：要求を満たすことができる
※：条件により性能が異なる
×：比較対象よりも劣る

		材料特性																	ライフサイクル設計における留意点										
		樹脂・分散液特性									素材特性																		
		力学特性			熱特性		化学特性		他		物理特性		化学特性		他														
弾性率	曲げ強度	比重	耐衝撃性	寸法安定性 (CTE-線膨張率)	荷重たわみ温度 (HDT)	成形性 (MFR)	耐水性	難燃性	リサイクル耐性	発泡性	透明度	チキソ性	繊維サイズ (nm)	比表面積	粘度	疎水性/親水性	耐熱性	液体への分散性	樹脂への分散性	透明度	バイオ由来炭素	エネルギー起源炭素	機能単位の精査	スケール効果	化学プロセスの工業化	電力原単位の影響	プロセス廃棄物の処理	リサイクル性	
要求品質 (最終製品)	共通																					△	△	△					
	自動車 インテークマニホールド																												
	運転時に変形しない	○	○			○	○																						
	高温でも変形しない	○	○			○	◎																						
	軽量化できる			◎																				✓					
	要求形状に成形できる					◎		○ ¹					○ ¹																
	衝撃に耐えることができる				○																								
	リサイクルできる										◎																		✓
	自動車 エンジンカバー																												
	運転時に変形しない	○	○			○	○																						
	高温でも変形しない	○	○			○	◎																						
	軽量化できる			◎							◎																		
	微細発砲できる										◎																		
	要求形状に成形できる					◎		○ ¹					○ ¹																
	衝撃に耐えることができる				○																								
	リサイクルできる										◎																		
CNF製法	要素技術																												
	パルプ化																												
	蒸解																												
	叩解																												
	繊維分離																												
	リファイナー																											✓	
多軸混練機	◎	◎											10-500nm										✓		✓	✓			
化学処理																疎水	◎		◎					✓	✓	✓	✓		
アセチル化 ²	◎	◎		◎	◎	◎	◎	○	◎	◎				◎															
ASA変性 ³																													

1. MFRの数値としては成形性が低下する方向になるが、チキソ性が付与されるため、混練においては問題ない。
 2. 未変性パルプとの比較によるスコア付けをしている。
 3. ASA変性はナイロン6との混練では一般的に使用しないためここでは除外。

ここまでに挙げた QFD の例では、単一材料（CNF 強化樹脂）を対象とした整理をしているが、次のように整理をすることで、複数の他材料を比較対象とした検討も可能である。ここで一般的な事例を用いてその方法を紹介する。QFD では、挙げられた要求品質について、自社が注力すべきポイントを明らかにするため、市場からの要求としての重要度を明らかにしたうえで自社と他社の達成度を明らかにする。これにより、重要な要求品質に対して自社がより優れている要求品質をセールスポイントとして明らかにできる。この枠組は異なる CNF 間やガラス繊維等の他素材との比較にも援用することができる。図 9 の例示のように、要求品質の各項目について、各技術による達成程度を比較し、当該材料(CNF)のセールスポイントを明確化することに使用できる。

要求品質一覧表		品質特性										比較					重要要求		
		フレームの剛性	振動吸収性	グリップ素材	グリップ形状	空気抵抗	フレーム長さ	フレーム材質	フレーム形状	フレーム重量	バランス	メンテナンス性	デザイン性	重要度	自社レベル	他社 A		他社 B	他社 C
要求品質	長い間使用しても手が疲れない	○	◎	○		○		○		◎	○		5	4	2	5	2	5	◎
	ボールの反発力がよい	◎				◎		◎	○				5	3	4	4	4	4	
	ひじへの負担が少ない		◎	○	○			○	○	◎	○		1	4	3	4	3	4	
	グリップの握り心地がよい			◎	◎						○		3	3	3	3	3	3	
	ラケットの振りぬぎがよい					◎	○	◎	○	◎			5	3	2	5	3	5	◎
	スイート・スポットが大きい	○						◎					4	5	5	5	5	5	
	流行の色使いである											◎	4	2	4	1	2	3	
品質特性重要度		33	18	25	15	40	10	37	53	28	27	14	27						
設計品質		フレックス 6.5	● システム採用	略				グラファイト、ケブラー	ストリング 16×19	31.5±5g	31.5±7mm	略							

要求品質の各項目について、CNF(自社)とその競合材料(他社)は、どの程度実現できているかを可視化
 →重要度と比較結果を考慮して重要要求(セールスポイント)を明確化

テニスラケットを例とした品質展開（永井一志，品質機能展開の基礎と応用，日本規格協会，2017）
 本例に用いている品質特性の名称や対応関係は実例ではない、あくまでもイメージを理解するために作成したものである。

図 9 CNF の製造方法に着目した品質機能展開の他材料との比較方法の例

11. 参考文献

- [1] 菊池康紀、兼松祐一郎、下野僚子、ライフサイクル思考に基づくナノセルロースの技術評価、ナノセルロース塾第3期 講演資料 (2021)
- [2] 令和元年度環境省委託事業「脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業 (京都プロセスで製造したアセチル化セルロースナノファイバー強化バイオ PE の社会実装評価)」成果報告書 (http://www.env.go.jp/recycle/R01_012_KyotoU.pdf)
- [3] 平成30年度環境省委託業務「セルロースナノファイバー活用製品の性能評価事業委託業務 (社会実装に向けた CNF 材料の導入実証・評価・検証～自動車分野～)」 (http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cnf/mat49_kyoto-univH30.pdf)
- [4] Naofumi Miyata, Yasunori Kikuchi, Masahiko Hirao, Scenario Analysis on Pulp and Paper Flow for the Design of Paper Recycling System, Proceedings on the 9th International Conference on EcoBalance (2010)
- [5] 平成29年度環境省委託業務「セルロースナノファイバー活用製品の性能評価事業委託業務 (社会実装に向けた CNF 材料の導入実証・評価・検証～自動車分野～)」成果報告書 (http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cnf/mat40_kyoto-univH29.pdf)
- [6] 「日本における発電技術のライフサイクル CO2 排出量総合評価」電力中央研究所 (2016)
- [7] 平成30年度環境省委託業務「セルロースナノファイバー利活用による CO2 排出削減効果等評価・検証事業委託業務」成果報告書 (https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cnf/mat55_jemaiH30CNF-LCA_R1.pdf)
- [8] 一般社団法人日本化学工業協会. 温室効果ガス削減に向けた新たな視点－国内および世界における化学製品のライフサイクル評価 第3版サマリー編. 2014年3月 発行.
- [9] 川崎市. 域外貢献量算定ガイドライン. 2018年3月 発行.
- [10] 日本 LCA 学会. 温室効果ガス排出削減貢献量算定ガイドライン 第1版. 2015年2月24日 発行.
- [11] 環境省. 再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン 第I部 基本編. 平成25年3月 発行.
- [12] 環境省. 水素サプライチェーンにおける温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン Ver.1.0. 平成29年5月 発行.
- [13] 環境省. セルロースナノファイバーを用いた家電部材及び住宅建材に関する LCA ガイドライン (案). 平成28年3月 発行.

[14] 一般社団法人産業環境管理協会. JEMAI 環境ラベルプログラム算定・宣言規程(総則、要求事項)文書管理番号 JR-07-01. 平成 29 年 11 月 1 日 発行.

以上

12.用語の解説

¹ LCA (Life Cycle Assessment) 、ライフサイクルアセスメント

製品システムのライフサイクルの全体を通じたインプット、アウトプットおよび潜在的な環境影響のまとめ、並びに評価。(ISO 14040:2006/JIS Q 14040:2010 引用)

²温室効果ガス排出量、GHG (Green House Gas) 排出量。

特定の期間(例:1年間)に大気中に排出される温室効果ガスの全重量をCO₂の重量に換算したもの。温室効果ガスには、二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、ハイドロフルオロカーボン(HFCs)、パーフルオロカーボン(PFCs)及び六ふっ化硫黄(SF₆)が含まれる。この7種類の温室効果ガスの重量に各ガスの地球温暖化係数(GWP:Global-Warming Potential)を乗じてCO₂の排出量に換算したものを合算することにより求められる。

³ 環境側面

環境側面は環境影響をもたらす可能性がある。著しい環境側面とは、一つ又は複数の著しい環境影響を与える又は与える可能性がある。組織は、一つ又は複数の基準を適用して著しい環境側面を決定する。

なお、本ガイドラインでは、データ収集が困難な状況も想定されるため温室効果ガス排出以外の環境側面については評価の対象外としている。しかしながら、対象外とした環境側面についても、事業者が自主的に情報開示することによって投資家やCNF製品ユーザーをはじめとするステークホルダーからの高い評価を得るポテンシャルを有する。具体的には、セルロースナノファイバーと同様に天然資源由来であるバイオマス由来プラスチックについて水資源消費や土地利用変化といった環境影響評価もユーザーから求められつつあり、セルロースナノファイバーでも同様の検討が重要である。

⁴削減効果ポテンシャル量

温室効果ガス削減に資する環境性能の優れた製品・サービス等が提供されることにより、それに代わる製品・サービス等が提供される場合(比較対象のシナリオ)と比べた温室効果ガス排出削減・抑制への貢献分をライフサイクルでの比較により定量化したもの。

⁵ 比較対象

評価対象製品・サービス等が普及しなかった場合に、最も起こりうる仮想的なシナリオ。

⁶ 機能単位

製品システムの性能を表す定量化された参照単位。

⁷ 地球温暖化係数（GWP : Global-Warming Potential）

二酸化炭素を基準とし、他の温室効果ガスがどれだけ温暖化する能力があるかを表した数値。IPCC 第5次報告書に記載された100年係数を使用し、算定対象とする温室効果ガスを7種類のガス（二酸化炭素 [CO₂]、メタン [CH₄]、一酸化二窒素 [N₂O]、ハイドロフルオロカーボン [HFC]類、パーフルオロカーボン [PFC]類、六フッ化硫黄 [SF₆]、三フッ化窒素[NF₃]）とする。IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）とは国連気候変動に関する政府間パネル。人為起源による気候変化、影響、適応及び緩和方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的な見地から包括的な評価を行うことを目的として、1988年に国連環境計画（UNEP）と世界気象機関（WMO）により設立された組織。

⁸ カットオフ基準

調査から除外されている、物質若しくはエネルギーのフローの量又は単位プロセス若しくは製品システムにかかわる環境面での重要度の仕様。

⁹ 製品システム

基本フロー及び製品のフローを伴い、一つ以上の定義された機能を果たし、かつ、製品のライフサイクルをモデル化した単位プロセスの集合体。