

令和 6 年度環境省委託業務

令和 6 年度脱炭素型循環経済システム構築促進事業
(うち、プラスチック等資源循環システム構築実証事業)
再生プラスチックの機能を回復させる手法の研究開発とその循環モデルの検証
委託業務

成果報告書
(公開版)

令和 7 年 3 月

株式会社 G S I クレオス

事業の要旨

1. 本事業の背景

社会の基礎インフラである電力、通信、鉄道、ガスなどは、我が国国内に広く送電網が築かれており、ライフラインとしての重要性は論を俟たない。これら送電網に用いられる電気設備資材（以降、電材）は、長期間にわたる高い力学的性能と共に、難燃性、絶縁性、耐電圧性などの機能性においても極めて要求性能水準の高い製品である。

一方、その要求性能の高さゆえに、これまで再生品の使用は制限されてきた。特に難燃剤を添加した難燃樹脂は、回収後の再生品における力学的性能と機能性の低下が著しく、再生品使用を妨げる主要因である。

難燃性再生樹脂の力学的、機能性の回復は、予てユーザー側より強く求められているところである。

2. 本事業の目的

本事業では、要求性能の高い「難燃性樹脂製電材」の物性の回復と再生品の使用拡大を目的として、バージン樹脂製電材から再生樹脂製電材への水平リサイクルのための各種開発事業を実施する。

電材は社会インフラを担う電力、通信、鉄道、ガス企業が使用する主要部材の一つであり、力学的にも機能的にも高い水準が要求される部材であるが、屋外での長期ばく露による樹脂の劣化が顕著で、再生品の使用拡大には幾つかの課題がある。

本事業では、各種課題のうち、力学的物性及び機能性の回復、使用済み樹脂再生回数の増加、再生樹脂製造コスト低減の課題解決を目的とする。

本事業の概念を以下に示す。



事業概念図

3. 本年度の成果

下記表に本年度の成果を示す。

表 令和6年度成果のまとめ

実証内容	令和6年度目標	成果
①物性回復に関する 技術開発	以下の検討を実施し最適な配合を検討 ①材料加工条件 ②材料配合条件 ③評価方法の簡素化 物性としての目標は以下 通期目標 ①力学的特性：難燃 LDPE バージン品比 80%の回復 ②機能性 ・垂直燃焼試験：V-0 ・絶縁性：$10^{11}\Omega\text{cm}$ 以上 2. 難燃性再生 LDPE の物性回復 再生品の諸物性はバージン比、50%以下に低下していることが先行研究により予想されており、これをバージン比 50～60%への回復を目指す。	1. 条件検討 ①材料処理条件の検討 試験片作製における処理時間、処理温度、処理回転数等の条件を確立 ②材料配合条件の検討 樹脂 4 種、CNT4 種、CNT 濃度（6 水準）等で配合検討を実施 各材料の特性を確認、コストを考慮した配合検討を実施 ③評価方法の簡素化 小型ダンベル試験片を用いて、力学的特性、機能性の評価ができるよう検討実施 2. 難燃性再生 LDPE の物性回復 難燃再生 LDPE を用いた樹脂配合を行い、物性の回復、およびコスト削減の検討を実施 【物性】 ①力学的特性：配合比によって、バージン品比 80%程度の回復が可能 ②機能性 ・垂直燃焼試験：評価系を組み、試験方法の条件検討を実施 ・絶縁性：体積抵抗値 $10^7\Omega\text{cm}$ 以上を達成

実証内容	令和6年度目標	成果
②再生回数の増加	製品形状で下記目標値達成 ①力学的特性 難燃 LDPE バージン品比 80%の回復（通期目標） ②機能性 ・垂直燃焼試験：V-0 ・絶縁・耐電圧：15,000V 交流電圧耐性	1. 難燃バージン LDPE、難燃再生 LDPE の電材製品形状に対する SWOM2000h 実施 2. SWOM 処理品の再生 3. 二軸押出機を使用した CNT 含有 LDPE の製造 4. SWOM4000h 品の劣化状態の確認と定義の検証 【物性】 ①力学的特性：SWOM 品を用いた CNT 含有品でバージン品比 80% 達成 ②機能性 ・垂直難燃試験：SWOM 品を用いた CNT 含有品で、V-0 を達成 ・絶縁・耐電圧：SWOM 品を用いた CNT 含有品で、15,000V に対する耐電圧性を達成
③コスト削減の検討	再生品コストを 20～35%低減	バージン、再生、難燃、非難燃樹脂の最適配合の検証を実施し、配合比によって再生品コスト 20～35%低減を達成可能
④LCA の検証と評価	材料配合を決め、それに伴う CO2 排出量、及び削減量の検証と評価を実施	①CNT1～2%の場合で試算 ②加工拠点のコンパクト化のため、CNT 配合拠点を近江物産に移した場合の LCA 試算

令和6年度に取り組んだ諸検討により、力学的特性の向上、コスト低減については、目標達成できる見通しである。

令和7年度は、力学的特性、コストとともに、難燃性等の機能性を向上すべく、研究開発を実施する。また、社会実装を見据えて、目標設定のための調査・擦り合わせを連携機関と共に行い、本事業で開発した技術の実装準備を行っていく。

Summary

1. Background of this project

Electric power, telecommunications, railroads, gas, and other basic social infrastructures, such as power grids, are widely used in Japan, and their importance as lifelines is undisputed. Electrical equipment materials (hereinafter referred to as “electric materials”, “Denzai” in Japanese) used in these power grids are products with extremely high-performance requirements in terms of long-term high mechanical performance as well as functionality such as flame resistance, insulation, and voltage resistance.

On the other hand, the use of recycled products has been restricted due to their high-performance requirements. In particular, flame-retardant resins to which flame retardants have been added show a significant decline in mechanical performance and functionality in the recycled product after recovery, which is a major factor preventing the use of recycled products.

The restoration of mechanical performance and functionality of flame-retardant recycled resins has been strongly demanded by users in the past.

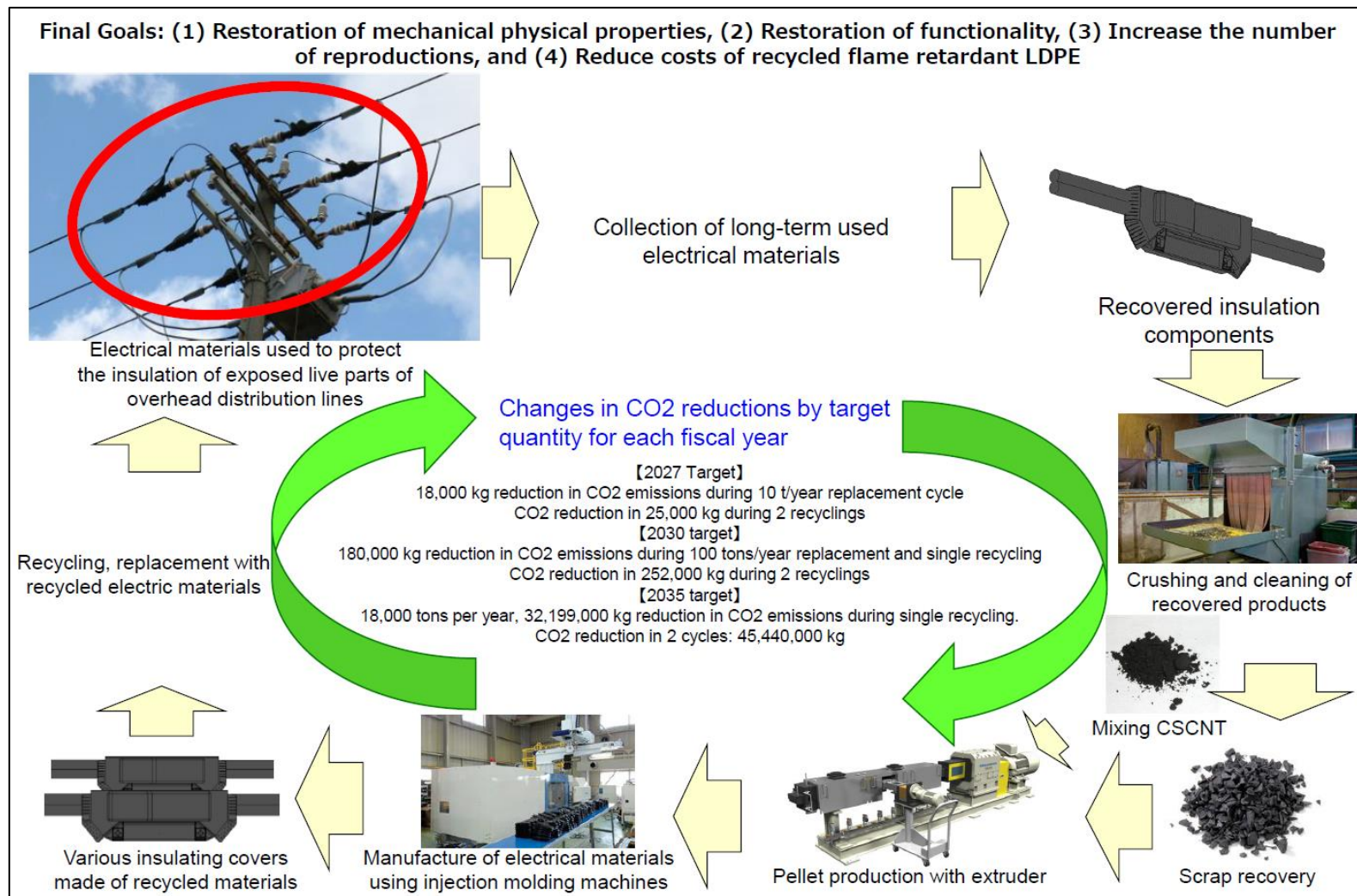
2. Objectives of this project

In this project, various development projects for “horizontal recycling” from virgin resin electrical materials to recycled resin electrical materials will be carried out with the aim of restoring the properties of “flame-retardant resin electrical materials” with high performance requirements and expanding the use of recycled products.

Electric materials are one of the main components used by electric power, telecommunications, railroad, and gas companies that play a key role in social infrastructure and are required to have a high level of mechanical and functional properties.

This project aims to solve the issues of restoring mechanical properties and functionality, increasing the number of times used resin is recycled, and reducing the cost of manufacturing recycled resin.

The concept of this project is as follows.



Project Conceptual Diagram

3. Results of this fiscal year

Table: Summary of this fiscal year results

Content	This year's objective	Achievement
① Restoration of physical properties Technology	Conduct the studies described below to consider the optimal formulation. ①Material processing conditions ②Material mating conditions ③Simplified evaluation methods The goals of physical properties are as follows. (Full-year target) ①Mechanical properties: Flame retardant LDPE virgin recovery of 80% ②Functionality • Vertical combustion test: V-0 • Resistance: $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ or more	1. Examination of conditions ① Examination of material processing conditions Establish conditions such as processing time, processing temperature, and processing speed for specimen. ② Examination of material blending conditions Formulation studies were conducted for 4 types of resins, 4 types of CNTs, and CNT concentrations (6 levels). Confirm the characteristics of each material and consider the composition of the material in consideration of cost. ③ Simplification of evaluation methods Using small dumbbell specimens, we examined the evaluation of mechanical properties and functionality. 2. Restoration of physical properties of flame retardant regenerated LDPE Resin blending using flame-retardant recycled LDPE to restore physical properties and reduce costs.

Content	This year's objective	Achievement
		[Physical properties] ① Mechanical characteristics: Depending on the blending ratio, it is possible to recover 80% compared to virgin products. ② Functionality • Vertical combustion test: Evaluate the conditions of the test method by assembling an evaluation system. • Resistance: Volume resistance is $10^7 \Omega\text{cm}$ or more.
② Increase in the number of views	Achieved the following target values in product shape ① Mechanical properties Recovery to 80% of flame-retardant LDPE virgin products (full-year target) ② Functionality • Vertical combustion test: V-0 • Voltage resistance: 15,000V AC pressure resistance	1. SWOM tests were conducted on flame retardant virgin LDPE and flame retardant recycled LDPE electrical materials. 2. Recycling of SWOM test products 3. Production of CNT-containing LDPE using twin-screw extruder 4. Confirmation of the deterioration status of SWOM4000h products and verification of definitions [Physical properties] (1) Mechanical characteristics: 80% of virgin products are achieved for products containing CNTs using SWOM products.

Content	This year's objective	Achievement
		(2) Functionality • Vertical flame retardant test: V-0 achieved with CNT-containing products using SWOM products. • Insulation and withstand voltage: CNT-containing products using SWOM products achieve withstand voltage to 15,000 V
③ Study cost savings	20~35% reduction in refurbished product costs	Verification of the optimal blend of virgin, recycled, flame retardant, and flame retardant resins was conducted. It was found that it was possible to achieve a 20~35% reduction in the cost of recycled products by blending ratio.
④ LCA Validation and Evaluation	Determine the composition of verify and evaluate the associated CO2 emissions and reductions.	① Studied in the case of CNT 1~2% ② Studied LCA when the CNT blending base is moved to Omi Bussan in order to reduce the size of the processing base

As a result of the various studies undertaken in 2024, the goal of improving mechanical characteristics and reducing costs was achieved. In 2025, we will conduct research and development to achieve both mechanical characteristics, cost and functionality. In addition, in anticipation of social implementation, we will conduct surveys and rubbing together with each partner to set goals. In addition to research and development, we will prepare for the implementation of the technology developed in this project.

目次

事業の要旨	1
Summary	6
1. 件名	13
2. 業務の目的	15
3. 業務の内容	15
(1) 物性回復に関する技術開発	15
(2) 再生回数の増加	16
(3) コスト削減の検討	16
(4) LCA の検証・評価	17
(5) 「再生プラスチックの機能を回復させる手法の研究開発とその循環モデルの 検証」の現地視察会及び検討会の開催	18
(6) 評価審査委員会の出席	18
(7) 報告書の作成	18
(8) 実証事業の目標設定	18
(9) 関係者間の連携	18
4. 成果報告	23
(1) 物性回復に関する技術開発	23
(2) 再生回数の増加	63
(3) コスト削減の検討	75
(4) LCA の検証・評価	82
(5) 「再生プラスチックの機能を回復させる手法の研究開発とその循環モデルの 検証」の現地視察会及び検討会の開催	87
(6) 評価審査委員会の出席	88
(7) 報告書の作成	93
(8) 実証事業の目標設定	93
(9) 関係者間の連携	96
5. 申請者の要素技術	100
(1) CSCNT の概要	100

(2) 樹脂複合材での CSCNT の挙動	104
(3) 高分子架橋技術	105
(4) CSCNT の線長測定方法	105
6. 事業化までの計画	108
(1) 最終目標	108
(2) リサイクルするプラスチック	108
(3) リサイクル対象物とリサイクルされた後の素材の用途	108
(4) リサイクル対象物の流通量	108
(5) リサイクル目標量	108
(6) スケジュール	109
(7) 実証事業後の出口戦略と波及効果	110
(8) エネルギー起源 CO ₂ 排出削減量等環境負荷の低減	112
(9) その他の環境影響の低減・循環型社会への貢献の見込み	124
(10) 環境影響の低減に資する要望とその必要性	125
7. 総括	126

1. 件名

(1) 事業名

令和6年度脱炭素型循環経済システム構築促進事業

(うち、プラスチック等資源循環システム構築実証事業)

(再生プラスチックの機能を回復させる手法の研究開発とその循環モデルの
検証) 委託業務

(2) 事業の期間

令和5年度～令和7年度の3か年度事業

(3) 本事業に至った背景

社会の基礎インフラである電力、通信、鉄道、ガスなどは、我が国国内に広く送電網が築かれており、ライフラインとしての重要性は論を俟たない。これら送電網に用いられる電気設備資材(以降、電材)は、長期間にわたる高い力学的性能と共に、難燃性、絶縁性、耐電圧性などの機能性においても極めて要求性能水準の高い製品である。一方、その要求性能の高さゆえに、これまで再生品の使用は制限されてきた。

特に難燃剤を添加した難燃樹脂は、回収後の再生品における力学的性能と機能性の低下が著しく、再生品使用を妨げる主要因である。難燃性再生樹脂の力学的、機能性の回復は、予てユーザー側より強く求められているところである。

事業概要

令和5年度脱炭素型循環経済システム構築促進事業
プラスチックなどのリサイクルプロセス構築及び省CO2化実証事業

申請事業名：再生プラスチックの機能を回復させる手法の研究開発とその循環モデルの検証

1. 事業費：3年総額 175,666,946円 1年目:23,892,009円 2年目:82,704,435円 3年目:69,070,502円

2. 申請法人名：株式会社G S I クレオス、連携法人名：大東電材株式会社、株式会社近江物産

3. 事業の背景

- (1)重要な社会インフラである電力、通信、鉄道などの電材に用いられる難燃性LDPEは、使用済品の諸物性低下が大きい。
- (2)再生品使用および使用拡大のためには、力学的物性だけでなく、機能性の回復も必要である。
- (3)従来、難燃性樹脂の再生目的ではバージン品を大量充填しており、再生品の使用拡大には制限がある。

4. 解決すべき課題

- (1)樹脂の劣化：酸素環境における解重合の主たる要因であるラジカル連鎖の制御
- (2)力学的物性低下：樹脂劣化に加え、難燃剤と助剤が40%以上充填されているため、引張強さなどの力学的物性が低下
- (3)機能性の低下：樹脂劣化に伴う溶融張力低下により難燃性など機能性も低下

5. 事業の内容

- (1)申請者GSIクレオスは、独自構造のCSCNTを微量充填し、樹脂の力学的性能を上げる要素技術を有する。
- (2)本技術、およびCNTが有する酸化抑制効果、難燃性付与効果により、従来再生困難な使用済難燃性LDPEの再生を目標とする
- (3)具体的には以下4点の達成を目的とする。

①難燃性再生LDPEの力学的物性回復 ②難燃性再生LDPEの機能性回復 ③複数回再生品の物性回復 ④コスト低減

6. 検討項目

【1】力学的物性の回復

CSCNT:長さ、充填量、高分子架橋などの表面改質をパラメータとした力学的物性回復

【2】機能性の回復

前項同様パラメータによる、機能性、特に難燃性の回復

【3】複数再生品の物性回復

SWOMにより試料への屋外暴露10年相当の加速疲労試験を実施、洗浄粉砕乾燥後、CSCNT充填して成形、このサイクルを繰り返した複数再生品の物性回復を検証する

【4】コスト低減

再生品100%使用、難燃化を試みた非難燃LDPEを再生品とハイブリッド化するなど、物性を維持した再生品の総コスト削減を検証する

7. 事業全体像



図1 事業概要

2. 業務の目的

本事業では、要求性能の高い「難燃性樹脂製電材」の物性の回復と再生品の使用拡大を目的として、バージン樹脂製電材から再生樹脂製電材への水平リサイクルのための各種開発事業を実施する。

電材は社会インフラを担う電力、通信、鉄道、ガス企業が使用する主要部材の一つであり、力学的にも機能的にも高い水準が要求される部材であるが、屋外での長期ばく露による樹脂の劣化が顕著で、再生品の使用拡大には幾つかの課題がある。

本事業では、各種課題のうち、力学的物性及び機能性の回復、使用済み樹脂再生回数の増加、再生樹脂製造コスト低減の課題解決を目的とする。

3. 業務の内容

(1) 物性回復に関する技術開発

①力学的物性の回復

〔内容〕

難燃性バージン低密度ポリエチレン (Low Density Polyethylene, 以降 LDPE) および難燃性再生 LDPE の各力学的物性を測定し、これをリファレンスとした上で、カップ積層型カーボンナノチューブ (Cup-Stacked Carbon Nanotubes、以降 CSCNT) 充填再生 LDPE 試験片を作製し、CSCNT 種および配合率の最適化検討を行う。

〔方法〕

以下の各条件をパラメータとして各種力学的試験を実施し、取得結果の検討を行い、劣化樹脂の物性回復をもたらす最適条件を探索する。

- (i) CSCNT 長さ：標準材、ほぐし品（やや短い）、短化品
- (ii) CSCNT 充填率：0.1%、0.5%、1%、3%など
- (iii) CSCNT 表面改質：高分子架橋、酸素含官能基付加

②機能性の回復

〔内容〕

難燃性バージン LDPE、難燃性再生 LDPE それぞれの難燃性、絶縁性などの機能性を測定し、リファレンスとした上で、CSCNT 充填再生 LDPE 試験片を作製し、CSCNT 種および配合率の最適化検討を行う。

〔方法〕

前項の力学的性質回復を達成した試料を優先的に抽出し、機能性回復のための最適化条件を探索する。

（２）再生回数の増加

〔内容〕

LDPE 試験片に対し、サンシャインウエザーオメーター（**Sunshine Weather-O-Meter**、以降 **SWOM**）を屋外暴露 10 年に相当する 2,000 時間照射し、劣化させた試験片を粉砕・洗浄・乾燥した粉砕品に前項記載の最適条件探査で得られた **CSCNT** 種、配合により機能回復を試みる。

更にそのプロセスを 2 回、3 回繰り返し、再生、再再生、再々再生品の評価を行い、機能回復を試みる。

〔方法〕

以下 2 系統（ア）（イ）で **SWOM** による加速試験を実施した各再生回数の試験片に対し、前項で検討する **CSCNT** 最適条件により物性回復を試みる。

（ア）素性の明らかな難燃性バージン LDPE ペレットからスタート

難燃バージン LDPE→**SWOM**2,000h→粉砕・洗浄・乾燥→**CSCNT** 充填
→再生 1 試験片

各種評価後、再生 1→**SWOM**2,000h→粉砕・洗浄・乾燥→**CSCNT** 充填
→再生 2 試験片

各種評価後、再生 2→**SWOM**2,000h→粉砕・洗浄・乾燥→**CSCNT** 充填
→再生 3 試験片

（イ）素性の分からない再生難燃 LDPE ペレットからスタート

再生難燃 LDPE「再生 1」各種評価後→**SWOM**2000h→粉砕・洗浄・乾燥
→再生 2 試験片

各種評価後、再生 2→**SWOM**2000h→粉砕・洗浄・乾燥→**CSCNT** 充填
→再生 3 試験片

各種評価後、再生 3→**SWOM**2000h→粉砕・洗浄・乾燥→**CSCNT** 充填
→再生 4 試験片

（３）コスト削減の検討

〔内容〕

従来、物性低下により使用できなかった難燃性再生 LDPE100%品の物性を **CSCNT** 充填により回復させる、もしくはバージン品の充填量を最小限にすることで総コスト低減を目指す。

更に安価な非難燃性 LDPE に CSCNT を充填し力学的、機能性を付与した上で、難燃性再生 LDPE との複合体を作製し、総コストの低減を図る。

〔方法〕

（４）項にて最適化検討した条件で CSCNT を充填した難燃性 LDPE の物性回復度合いにより、バージン品充填などによりコスト低減を試みる。

非難燃性 LDPE の力学的物性、機能性を CSCNT 充填により従来材の非難燃性 LDPE と同程度に引き上げることで、大幅なコスト低減を試みる。

（４）LCA の検証・評価

今回の循環スキームにおける LCA のインベントリ分析を行う。

申請書作成段階で、申請者（G S I クレオス）と連携機関（大東電材、近江物産）との間で、各工程で使用する装置、機器の消費電力、水、ガスから計算される CO2 排出量を試算した。

本事業開始後に、各社各工程に要する時間も考慮して消費電力を算出し、実際の CO2 排出量として検証する。

検証にあたっては、申請者 G S I クレオスが大東電材（滋賀県彦根市）および近江物産（滋賀県栗東市）への現地ヒアリング・実地検証（年 1～2 回程度）を行う。

各工程と実施機関は以下の通り。

（i）原材料生産

（ア）LDPE 製造＝LDPE 製造会社

（イ）CSCNT 合成＝G S I クレオス

（ii）コンパウンド製作

CSCNT と LDPE 樹脂（ペレット、粉碎品）の混錬品試作（小型 2 軸押出機、中型 2 軸押出機）＝G S I クレオス

（iii）電材製品成形

コンパウンドから射出成型機による製品成形＝大東電材

（iv）樹脂再生

LDPE 製品の粉碎、洗浄、乾燥＝近江物産

（v）上記各工程間で必要とされる材料の運送に関わるエネルギー試算
→改良トンキロ法をベースとして計算

（５）「再生プラスチックの機能を回復させる手法の研究開発とその循環モデルの検証」の現地視察会及び検討会の開催

業務の円滑な実施のため、業務実施期間内において、評価審査委員 1 名程度、環境省担当官 1 名程度、「令和 5 年度地球温暖化対策に係る技術実証事業管理・検討等事業委託業務」の受託者（以下「事務局という。」）2 名程度による現地視察会を 1 回程度開催する。尚、現地視察会の日程については、事務局と調整を行うこと。また、現地視察会に併せて検討会を設置し、本業務の進捗報告を行うこと。事務局の決定により現地視察会及び検討会はオンラインで行う場合もある。

評価審査委員、事務局の旅費等については、事務局で支払いを行うため、事業者で支払う必要はない。

（６）評価審査委員会の出席

業務実施期間内において開催する評価審査委員会（都内、2 回程度）に出席し、業務の進捗状況についてプレゼン形式で報告を行う。プレゼン資料のデータについては、事務局の指示に従って事前に送付する。

（７）報告書の作成

業務の内容についての最終的な取りまとめを行い、業務報告書を作成し、提出する。

（８）実証事業の目標設定

本実証事業の目標は、別表のとおりとし、別添の工程表に従って業務を実施する。

（９）関係者間の連携

本業務の遂行にあたっては、別途業務委託している事務局が実施する以下の事項について、協力・連携する。

- ・現状把握
- ・実施計画等に関する達成状況の調査
- ・LCA 評価（CO2 削減効果の検証・評価等）
- ・共通的な事業課題の抽出・整理
- ・広報資料の作成

- ・展示会への出展 ※東京都区内 1 イベント程度
- ・そのほか、環境省担当官が協力・連携を要請する業務

別表 本技術開発[実証研究]の目標

	項 目	採択時の技術の状況	本年度の目標	最終目標
0	全体目標	1. 市場の現状 ①難燃性再生LDPEは物性劣化が激しく、再生品100%の製品使用実績は無い。 ②再生品の効果的な物性回復方法は無い。バージン品を充填することで物性を回復させる試みがある。 ③難燃性LDPEは再生品も高コストであり、使用動機の妨げとなっている。 2. 当社状況 ①PCR（市場使用済）PP（ポリプロピレン）にCSCNTを微量充填し、バージン以上の物性回復を確認済み。 ②難燃性LDPEに対する事前評価（FS）実績は無い。	1. リファレンスの設定 難燃性バージンLDPEおよび難燃性再生LDPEの各力学的物性、機能性を評価し、再生品の物性状態を明らかにすること。 それを指標として、最終目標到達への道程、パラメータを検討すること。 2. 難燃性再生LDPEの物性回復 再生品の諸物性はバージン比、50%以下に低下していることが先行研究により予想されており、これをバージン比50～60%への回復を目指す。	1.難燃性再生LDPEの諸物性（力学的、機能性）の回復を達成すること。 全体としてバージン樹脂比80%回復を目標とする。 力学的目標 （ア）引張強度8MPa以上、伸び280%以上 （イ）90℃×96時間加熱後、それぞれ6MPa以上、160%以上 2. 同再生樹脂の再生回数を増大させること。 目標：複数回再生後に上記（ア）（イ）を達成すること。 3. 同再生樹脂コストを削減すること 現行品（再生品50%バージン50%）を¥600/kgとした時、¥500/kg、¥400/kgへの大幅なコスト削減を目標とする。

	項 目	採択時の技術の状況	本年度の目標	最終目標
1	物性回復に関する技術開発 ①力学的特性の回復 ②機能性の回復	同上	下記（i）（ii）（iii）をパラメータとして左記①②の物性回復を試みる。 （i）CSCNT長さ：標準材、ほぐし品（やや短い）、短化品 （ii）CSCNT充填率：0.1%、0.5%、1%、3%など （iii）CSCNT表面改質：高分子架橋、酸素含官能基付加 これらのパラメトリック検討により物性回復の状況を評価する。	同上
2	再生回数の増加	同上	上記で実施する物性回復の状況により、再生回数増大の可能性を検討する。	上記で実施する物性回復の状況により、再生回数増大の可能性を検討する。

	項 目	採択時の技術の状況	本年度の目標	最終目標
3	コスト削減の検討	同上	上記で実施する物性回復の状況により、物性回復を達成する配合、製作にかかるコスト試算を実施する。	上記で実施する物性回復の状況により、物性回復を達成する配合、製作にかかるコスト試算を実施する。
4	LCAの検証・評価	CO2 削減効果について、机上の計算で構わないので、1年目の時点でリサイクルした場合の物性劣化度等を踏まえて、1～2回リサイクルした場合の削減効果を精査すること。	上記で実施する物性回復の状況により、物性回復を達成する配合、製作にかかるCO2削減効果を精査する。	上記で実施する物性回復の状況により、物性回復を達成する配合、製作にかかるCO2削減効果を精査する。 第2項記載の再生回数増大によるCO2削減量の拡大を目標とする。

4. 成果報告

(1) 物性回復に関する技術開発

①力学的物性の回復

①－1 使用材料

①－1－1 樹脂材料

以下の4種類の樹脂材料を用いて、処理条件および配合の検討を行った。

(ア) 難燃バージン LDPE (図 2)

(イ) 難燃再生 LDPE (図 3)

(ウ) 非難燃バージン LDPE (図 4)

(エ) 非難燃再生 LDPE (図 5)



図 2 難燃バージン LDPE ペレット



図 3 難燃再生 LDPE ペレット



図 4 非難燃バージン LDPE ペレット



図 5 非難燃再生 LDPE ペレット

①－１－２ CSCNT

CSCNT は、線長、表面状態、分散性、結晶度等の調整が可能であり、用途や目的に応じて使い分けが可能である。

本事業では、樹脂材料の機械的特性のみならず、機能性向上を目的とするため、数種の CSCNT を用いて検討を実施した。

(ア) 長尺 CSCNT (24PS : 標準グレード)

(イ) 長尺ほぐし CSCNT (24YD)

(ウ) 短尺 CSCNT (TJ20A)

(エ) 長尺結晶度調整 CSCNT (24LHT)

(ア) 長尺 CSCNT (24PS : 標準グレード)

申請者 CSCNT の元材料であり、以下 (イ) ～ (エ) は 24PS を追加加工したものである。線長は平均 $5\mu\text{m}$ 程度。長尺 CSCNT が絡まり、凝集塊が多く存在している (図 6)。

量産性は高く、それに伴い比較的低コストとなっている。

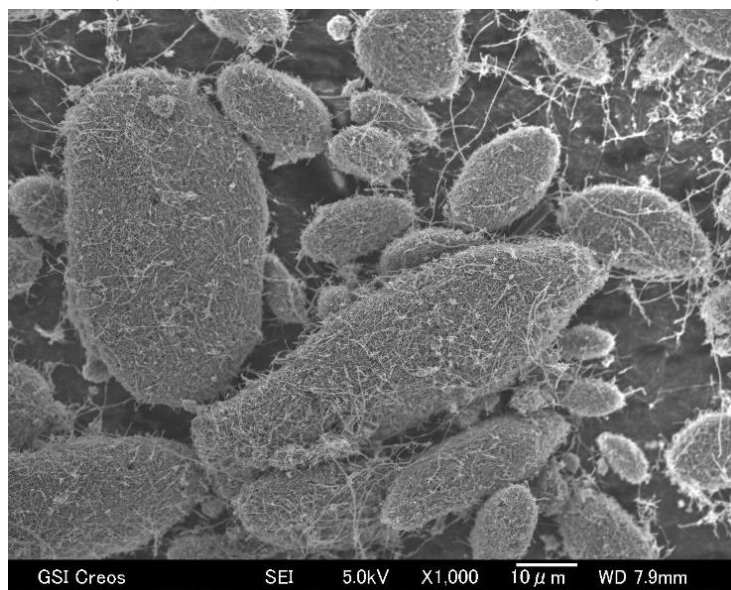


図 6 長尺 CSCNT (24PS : 標準グレード) の 1000 倍写真

(イ) 長尺ほぐし CSCNT (24YD)

上記標準グレード 24PS に存在する CSCNT の凝集塊をほぐしたグレードである (図 7)。

ほぐし前のものと比較して母材への分散性が良好であり、母材中での単離分散によって、機械的特性向上の傾向がみられる。

標準グレードからほぐし処理工程が増えるため、標準グレードである 24PS と比較するとコスト増となる。

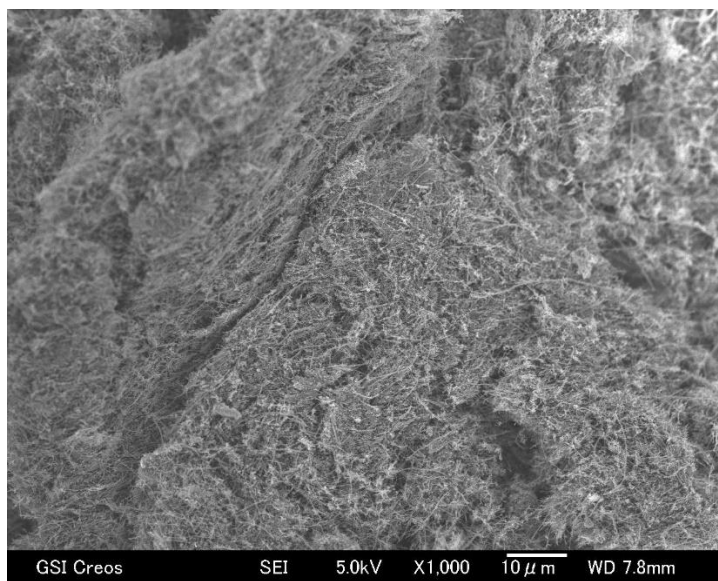
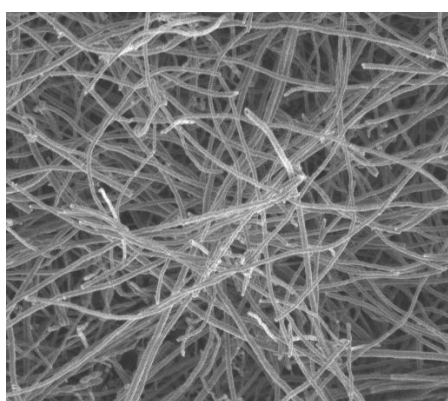


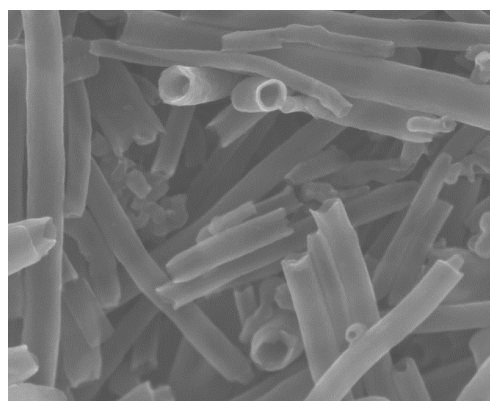
図 7 長尺ほぐし CSCNT (24YD) の 1000 倍写真

(ウ) 短尺 CSCNT (TJ20A)

標準グレード 24PS の積層する炭素カップを外す形で短尺化处理した CSCNT である (図 8)。特長は高い分散性であり、標準グレードの 24PS と比較して高濃度化、粘度低減の傾向がみられる。



長尺 CSCNT (24PS)



短尺 CSCNT (TJ20A)

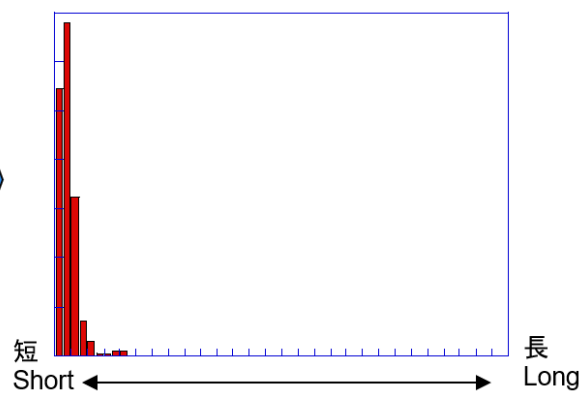
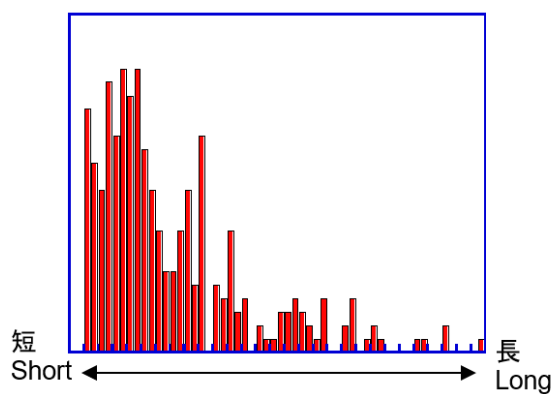


図 8 CSCNT 長さ調整前後の SEM 写真と線長ヒストグラム

(エ) 結晶度調整 CSCNT (24LHT)

高温処理により結晶化度を高めた CSCNT である。

処理温度の調整により、CSCNT の持つ柔軟性を損なうことなく、高結晶化度による高い剛性を併せ持つ。

線長と凝集状態は、標準グレード 24PS と同等である。

上記の数種類の CSCNT を用いて、試作および評価を行った。

①ー2 配合検討の試作・評価フロー

本事業では、多数のパラメータを振った試作検討が必須であり、以下図9の評価フローで多くの条件検討及び評価を実施した。

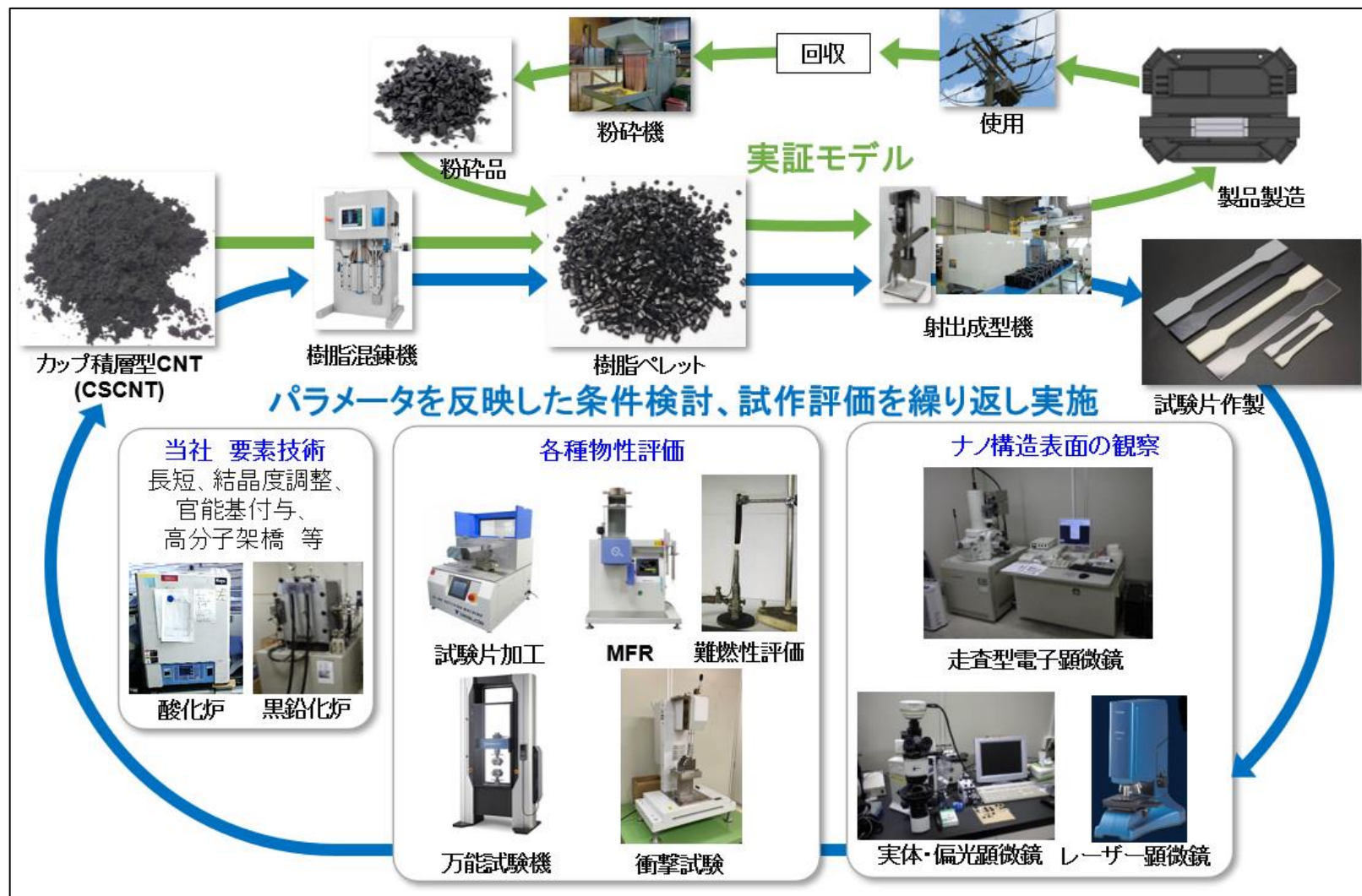


図9 試作検討評価のフロー

①－3 最適な処理条件の検討

本検討は、卓上混錬機、及び成型機（図 10）を使用して、各種材料の混錬からダンベル試験片の作製を行った。その試験片（図 11）を用いて評価を実施した。

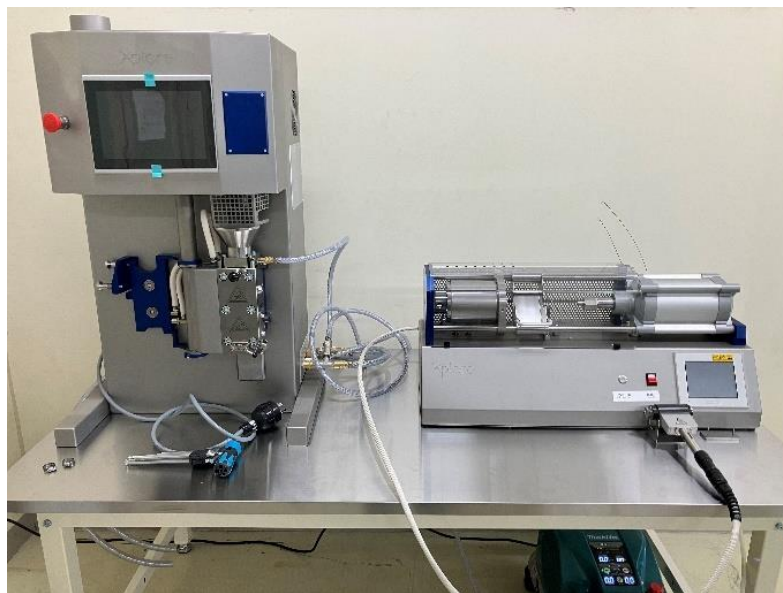


図 10 卓上混錬機、及び卓上成型機



図 11 小型ダンベル試験片（ISO527-2 1BA）

初期評価として、CNT 未添加の難燃バージン LDPE と、非難燃バージン LDPE を用いて、試作検討時における最適条件の検討を行った。

評価は、以下の万能試験機（図 12（a））、メルトインデクサー（図 12（b））を用いて行った。

(a)



(b)



図 12 (a) 万能試験機、(b) メルトインデクサー

①－３－１ 処理温度の最適化

樹脂材料の推奨処理温度の中央値 200℃から、プラスマイナス 20℃の 180℃、200℃、220℃の処理温度条件で試作評価を実施した。

(ア) 非難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 1）

非難燃バージン LDPE では、処理温度 200℃での処理が最も高い伸びが得られた。MFR は、220℃で顕著な低下傾向が確認された。

表 1 非難燃バージン LDPE の処理温度の最適化検討結果

処理温度	引張試験 (n=5) 平均値		MFR (g/10s、n=3)
	最大点応力	破断点ひずみ	
	MPa	伸び (%)	
180℃	12.9108	425.624	7.656
200℃	13.0874	452.601	7.708
220℃	13.8003	353.977	3.192

(イ) 難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 2）

難燃バージン LDPE も、上記（ア）同様に 200℃での処理が最適とされる結果となった。

表 2 難燃バージン LDPE の処理温度の最適化検討結果

処理温度	引張試験 (n=5) 平均値		MFR (g/10s、n=3)
	最大点応力	破断点ひずみ	
	MPa	伸び (%)	
180℃	14.5495	388.267	7.876
200℃	14.4880	408.766	8.194
220℃	14.4307	404.654	8.136

①－３－２ 処理時間の最適化

前記①－３－１で最適化した処理温度 200℃で、処理時間を条件として処理を行い、物性を評価した。

(ア) 非難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 3）

非難燃バージン LDPE は、処理時間を長くすることで、顕著な伸び率の低下が確認され、また、MFR も低下傾向となった。

表 3 非難燃バージン LDPE の処理時間の最適化検討結果

処理時間	引張試験（n=5）平均値		MFR (g/10s、n=3)
	最大点応力	破断点ひずみ	
	MPa	伸び（%）	
5 分	13.0874	452.601	7.708
15 分	13.2571	432.836	4.404
30 分	12.1969	241.155	2.328

(イ) 難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 4）

非難燃バージン LDPE のような顕著な物性低下傾向は確認されなかった。

表 4 難燃バージン LDPE の処理時間の最適化検討結果

処理時間	引張試験（n=5）平均値		MFR (g/10s、n=3)
	最大点応力	破断点ひずみ	
	MPa	伸び（%）	
5 分	14.4880	408.766	8.194
15 分	14.5184	394.199	8.024
30 分	14.9300	400.989	8.008

①－３－３ 処理回転数の最適化

前記の①－３－１、および①－３－２で最適化した処理温度：200℃、処理時間：5分として、処理回転数を条件として試作検討を実施した。

（ア）非難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 5）

処理回転数を増加することで、顕著な伸びの低下及び、MFR 値も大幅に低下し、流動性が低下したことが確認された。

表 5 非難燃バージン LDPE の処理回転数の最適化検討結果

処理回転数	引張試験（n=5）平均値		MFR (g/10s、n=3)
	最大点応力	破断点ひずみ	
	MPa	伸び (%)	
100rpm	13.0874	452.601	7.708
300rpm	13.2128	312.369	1.612

（イ）難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 6）

非難燃バージン LDPE で確認されたような顕著な物性低下は確認されなかったが、処理回転数増加に伴って、伸びおよび MFR では若干の低下傾向が確認された。

表 6 難燃バージン LDPE の処理回転数の最適化検討結果

処理回転数	引張試験（n=5）平均値		MFR (g/10s、n=3)
	最大点応力	破断点ひずみ	
	MPa	伸び (%)	
100rpm	14.4880	408.766	8.194
300rpm	14.7661	387.353	7.654

①－３－４ 処理条件検討のまとめ

上記検討結果から、最適処理条件を以下と設定し、事項の配合検討を実施した。

- ・ 処理温度：200℃
- ・ 処理時間：5 分
- ・ 処理回転数：100rpm

①－４ 最適な配合条件の検討

前記の処理条件を用いて、各種樹脂、及び CSCNT 種の配合検討を実施した。

①－４－１ リファレンスの評価結果

試作検討に使用する樹脂 4 種を用いて、CSCNT を添加せずにリファレンスデータの測定を行った（表 7）。

一度市場に出て回収した各再生品は、各バージン品と比較して物性は低下傾向であった。特に非難燃再生 LDPE では、表 7、および図 13（b）、図 14（b）に示す通り、物性低下が顕著であった。

表 7 樹脂 4 種によるリファレンスデータの測定結果

樹脂種	最大点応力 (MPa)	破断点ひずみ (%)	MFR g/10min
非難燃バージン LDPE	13.087	452.60	7.708
非難燃再生 LDPE	10.608	127.41	4.256
難燃バージン LDPE	14.488	408.77	8.194
難燃再生 LDPE	11.021	380.73	8.416

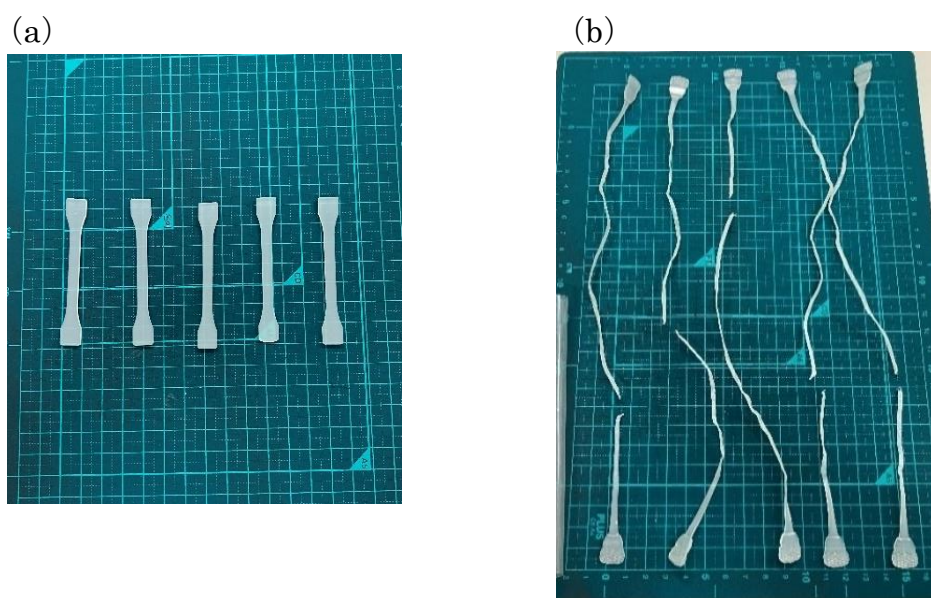


図 13（a）非難燃バージン LDPE の引張試験前、（b）引張試験後



図 14 (a) 非難燃再生 LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

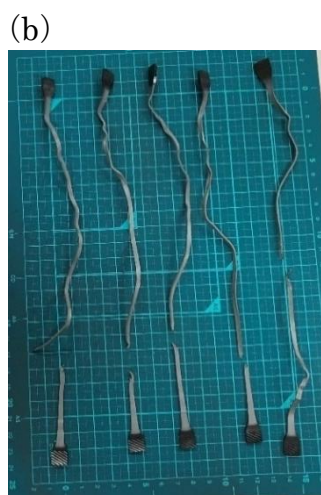


図 15 (a) 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

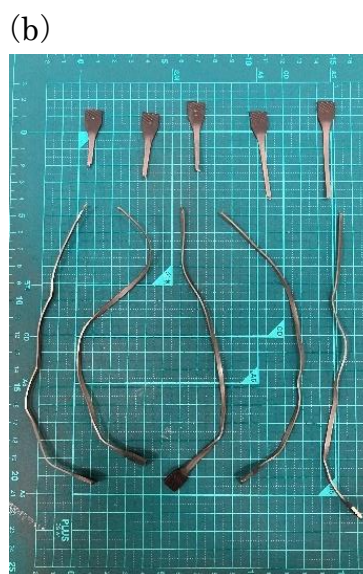


図 16 (a) 難燃再生 LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

①－４－２ 配合検討

①－４－２－１ パラメータ

樹脂材料は、難燃バージン LDPE、非難燃バージン LDPE を用いた。

CSCNT は、①－１－２に記載の 4 種を用いた。配合比率として、CSCNT 濃度、0.1%、0.5%、1%、3%、5%の 5 水準で検討を行った。

①－４－２－２ 評価結果

最大点応力は、CSCNT 添加量で大きな変化はなかった（図 17）。破断点ひずみは、CSCNT の添加量増加に伴い低下傾向となった（図 18）。

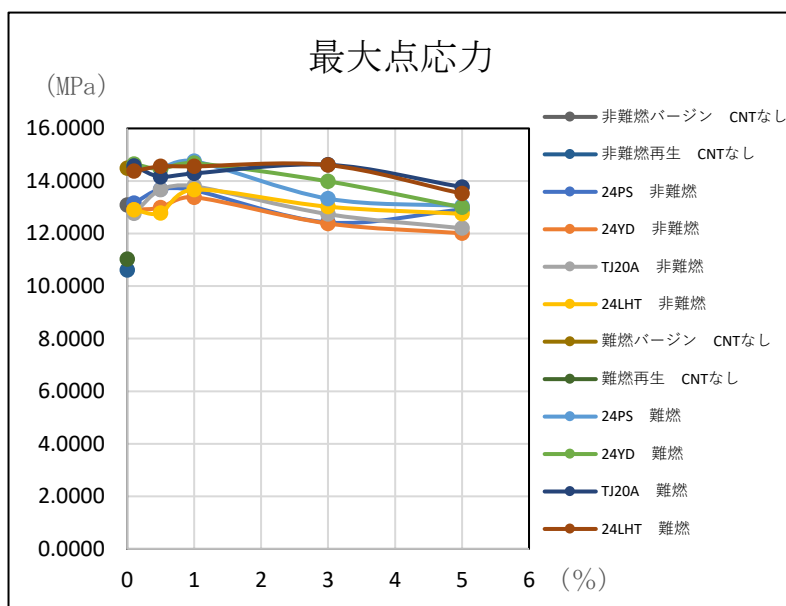


図 17 最大点応力の比較

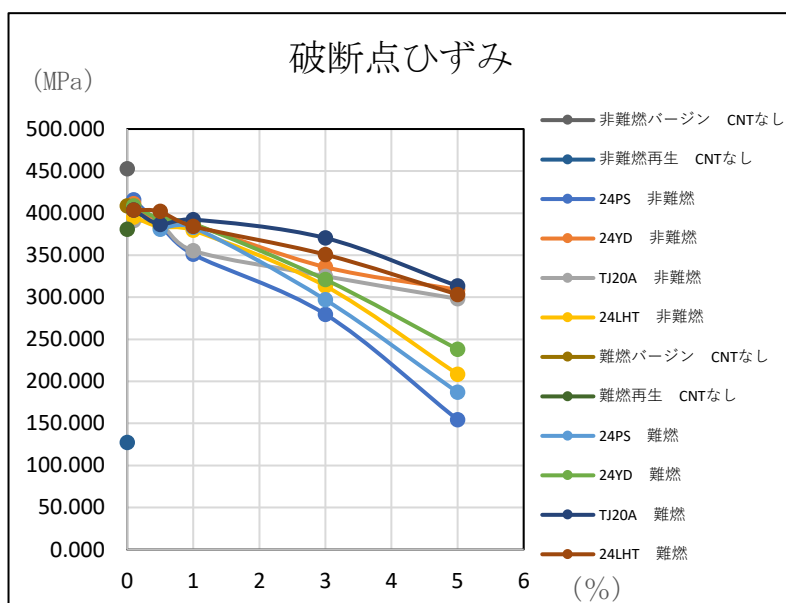


図 18 破断点ひずみ（伸び）の比較

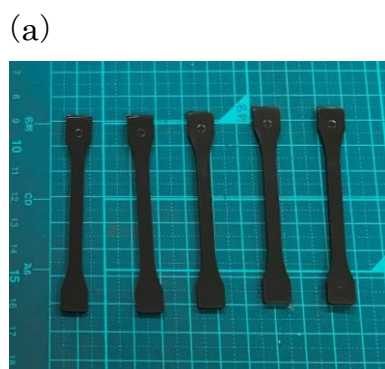


図 19 (a) 0.1% 24PS 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

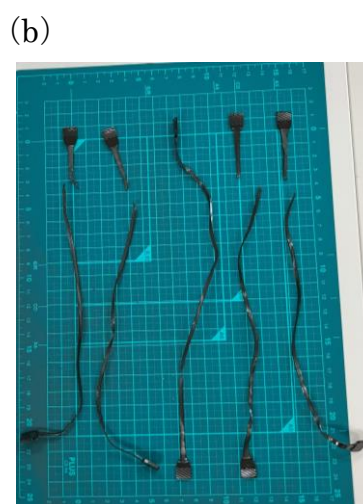
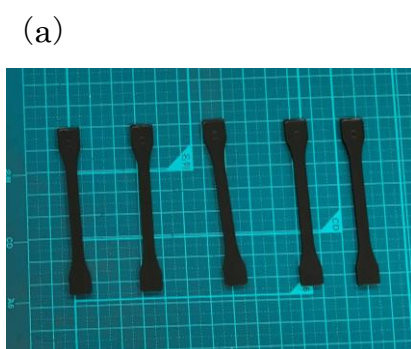


図 20 (a) 0.5% 24PS 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

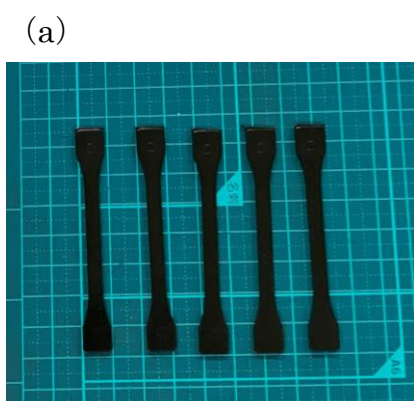


図 21 (a) 1% 24PS 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

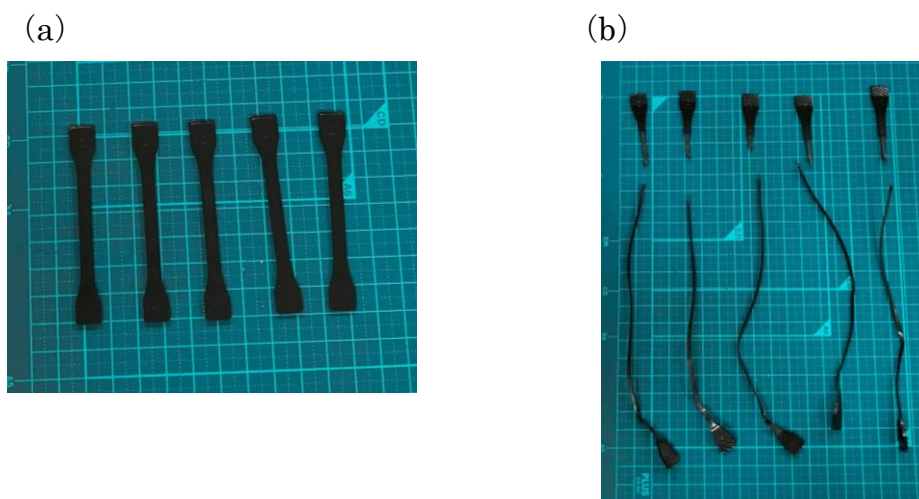


図 22 (a) 3% 24PS 非難燃バージン LDPE の引張試験前、 (b) 引張試験後

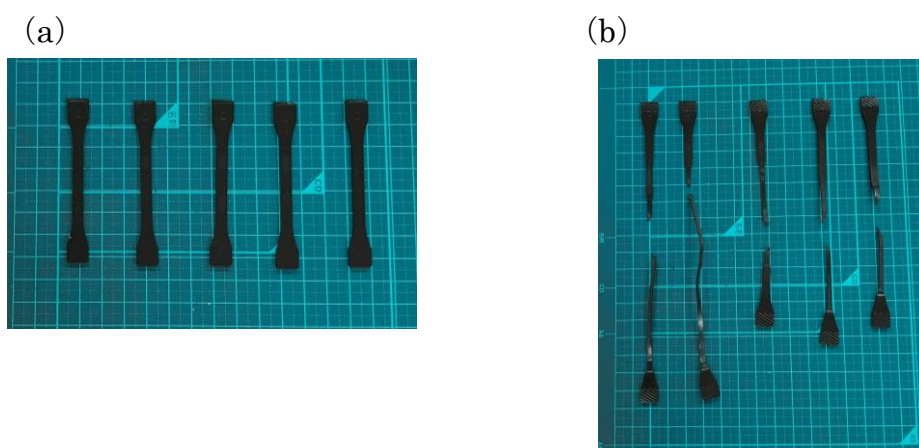


図 23 (a) 5% 24PS 非難燃バージン LDPE の引張試験前、 (b) 引張試験後

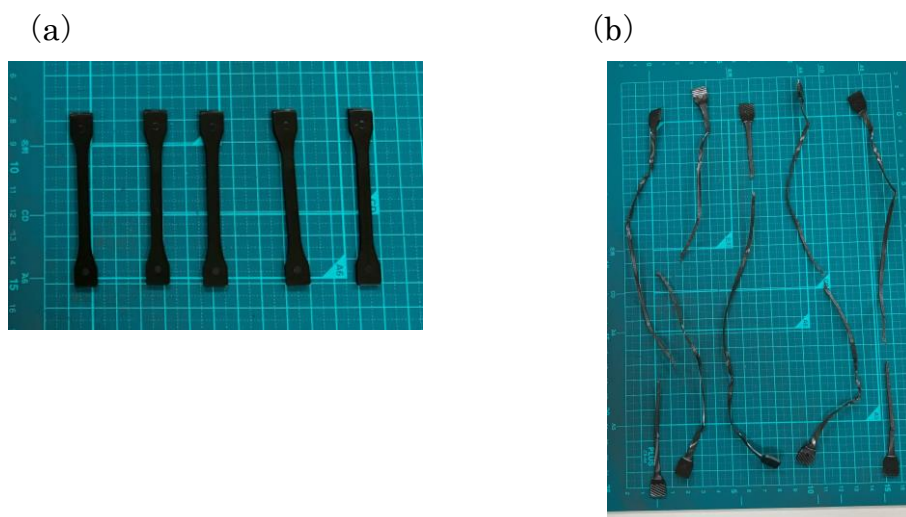


図 24 (a) 0.1% 24YD 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

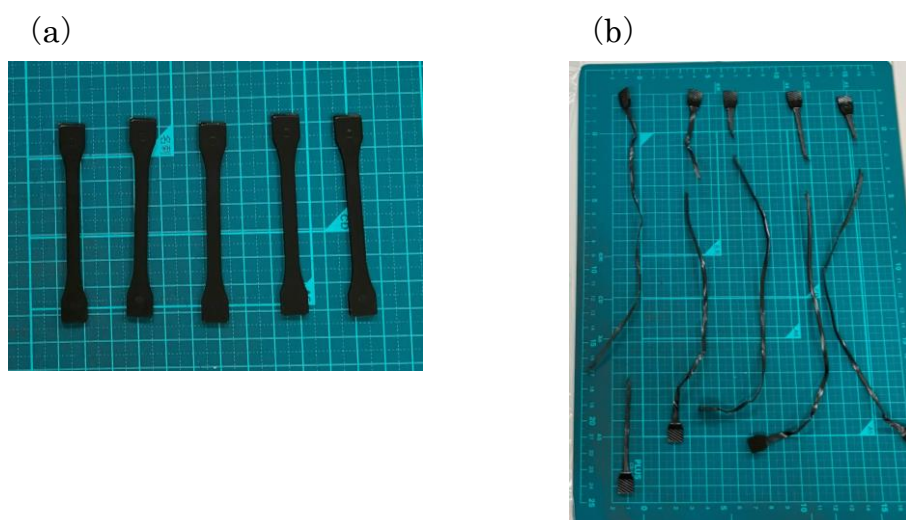


図 25 (a) 0.5% 24YD 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

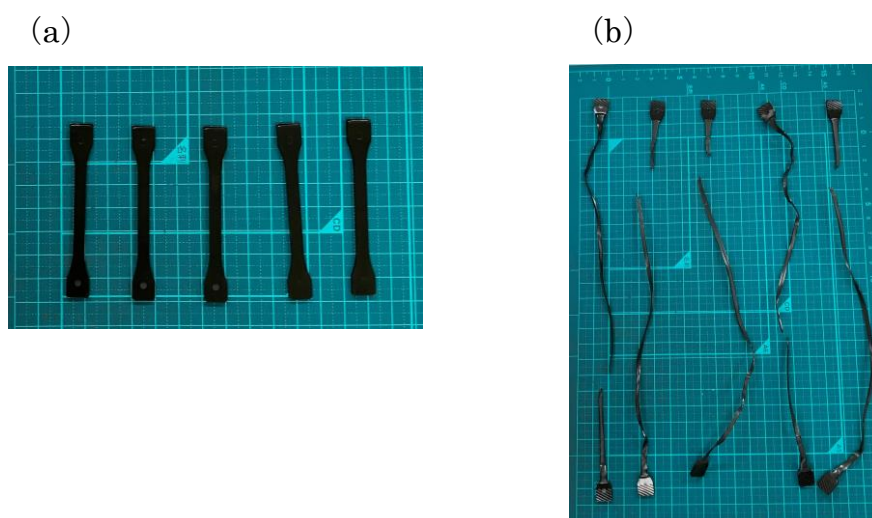


図 26 (a) 1% 24YD 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

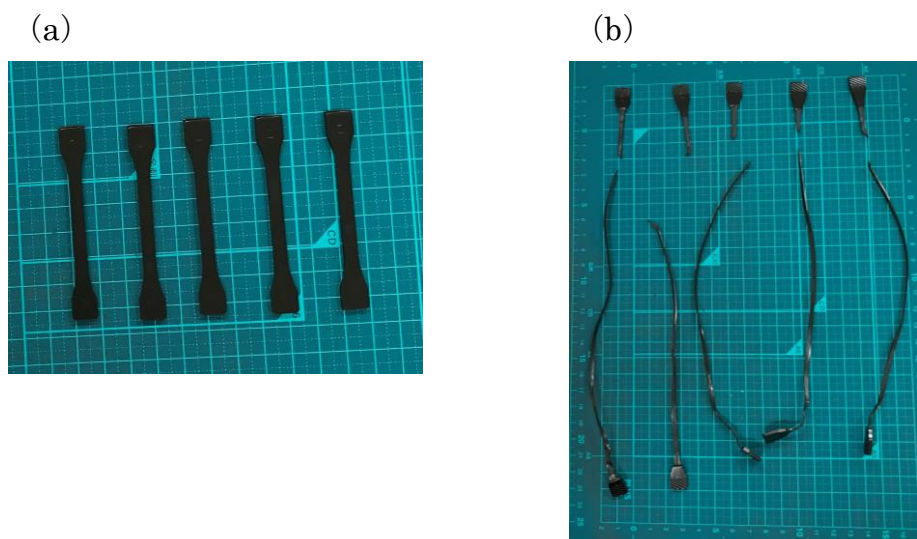


図 27 (a) 3% 24YD 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

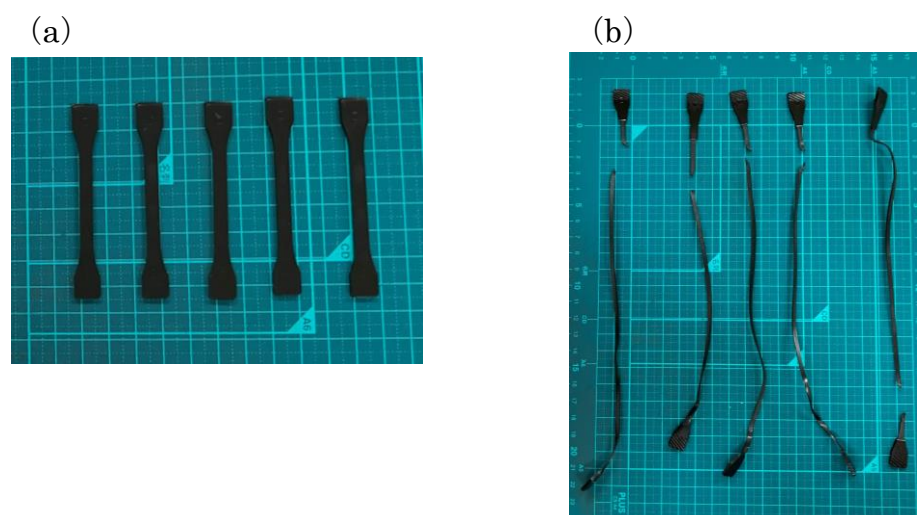


図 28 (a) 5% 24YD 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

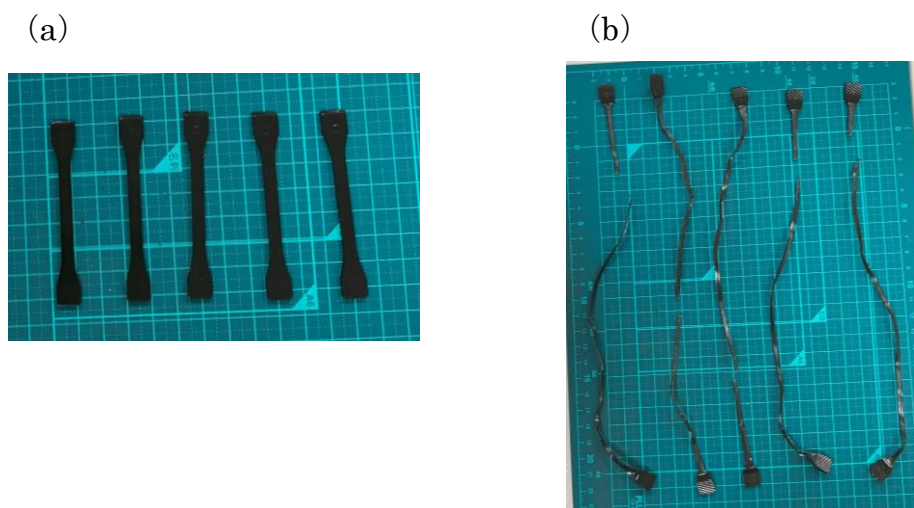


図 29 (a) 0.1% TJ20A 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

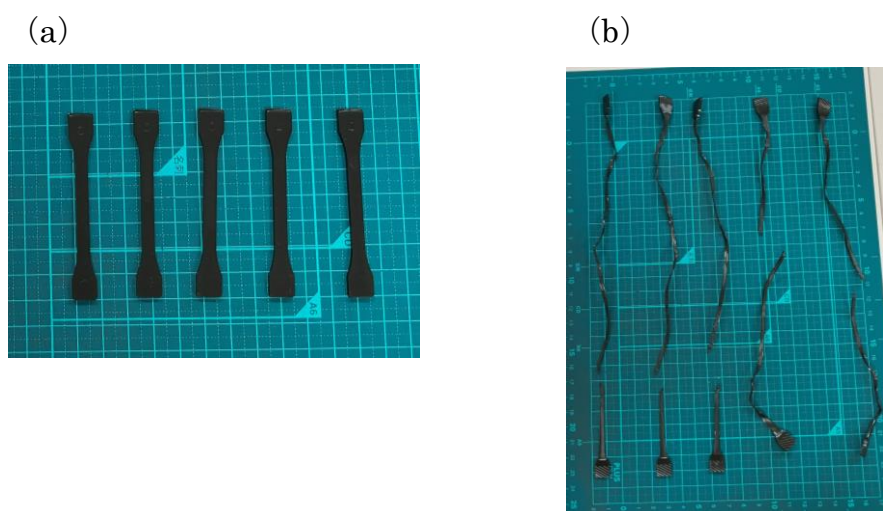


図 30 (a) 0.5% TJ20A 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

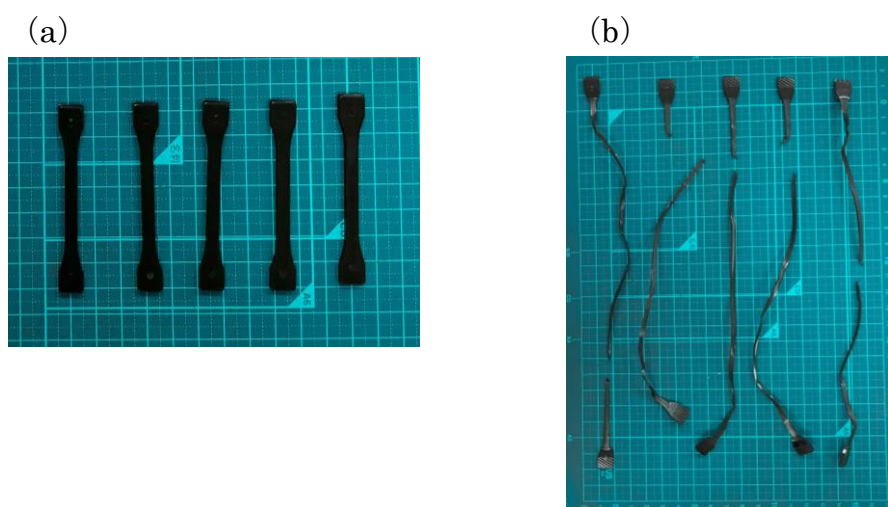


図 31 (a) 1% TJ20A 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

(a)



(b)



図 32 (a) 3% TJ20A 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

(a)



(b)



図 33 (a) 5% TJ20A 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

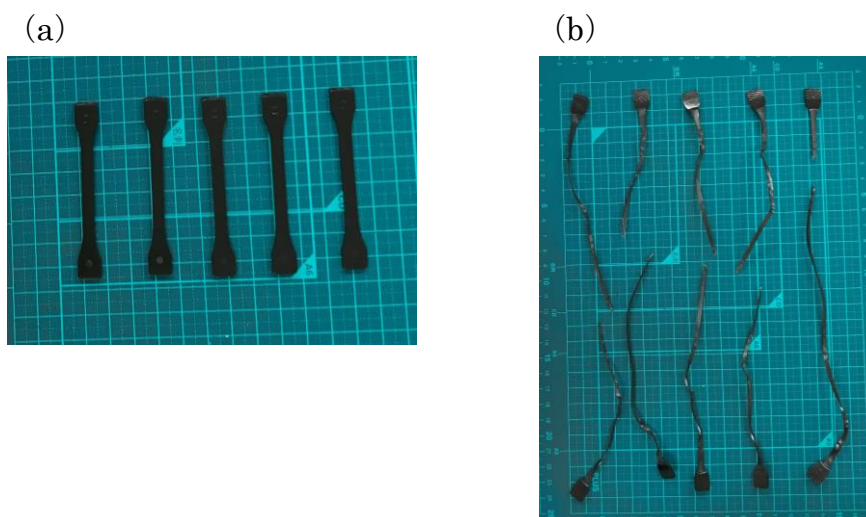


図 34 (a) 0.1% 24LHT 非難燃バージン LDPE の引張試験前、 (b) 引張試験後

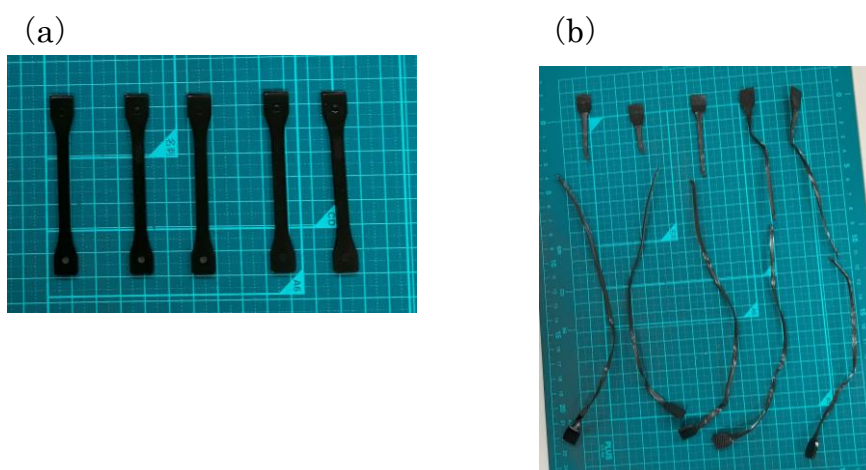


図 35 (a) 0.5% 24LHT 非難燃バージン LDPE の引張試験前、 (b) 引張試験後

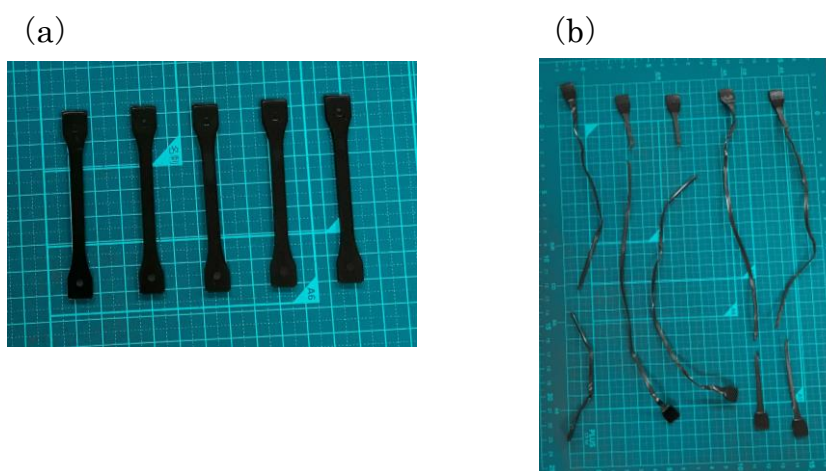


図 36 (a) 1% 24LHT 非難燃バージン LDPE の引張試験前、 (b) 引張試験後

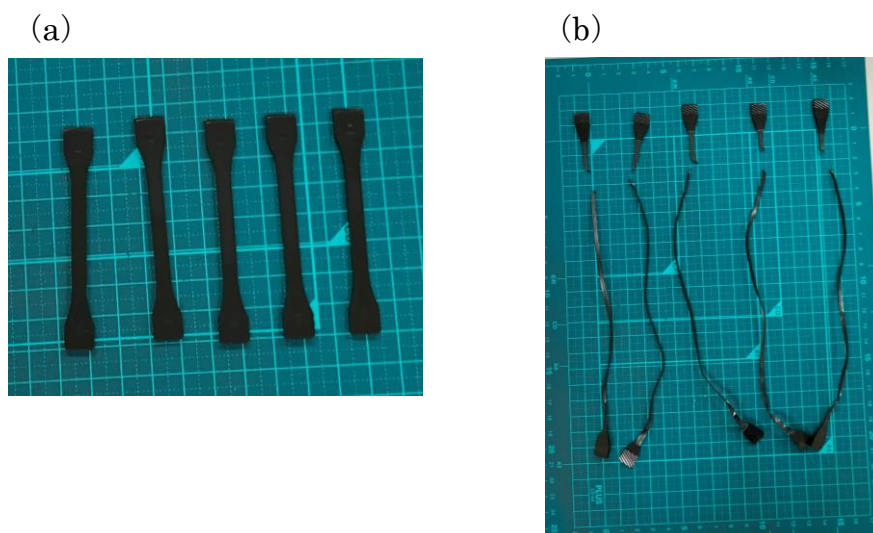


図 37 (a) 3% 24LHT 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

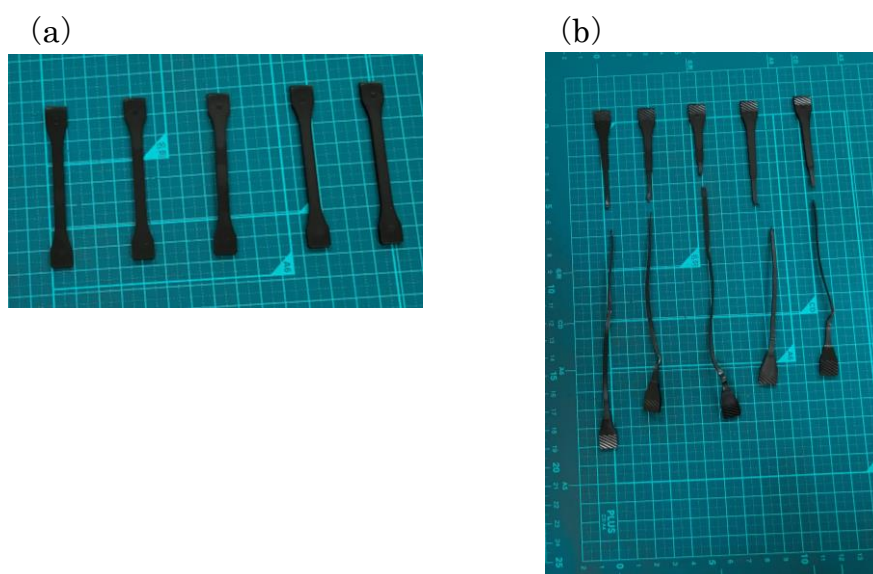


図 38 (a) 5% 24LHT 非難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

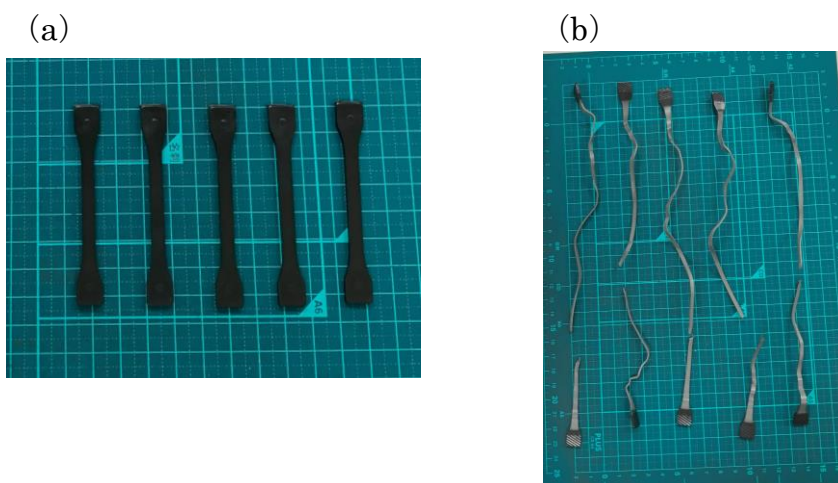


図 39 (a) 0.1% 24PS 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

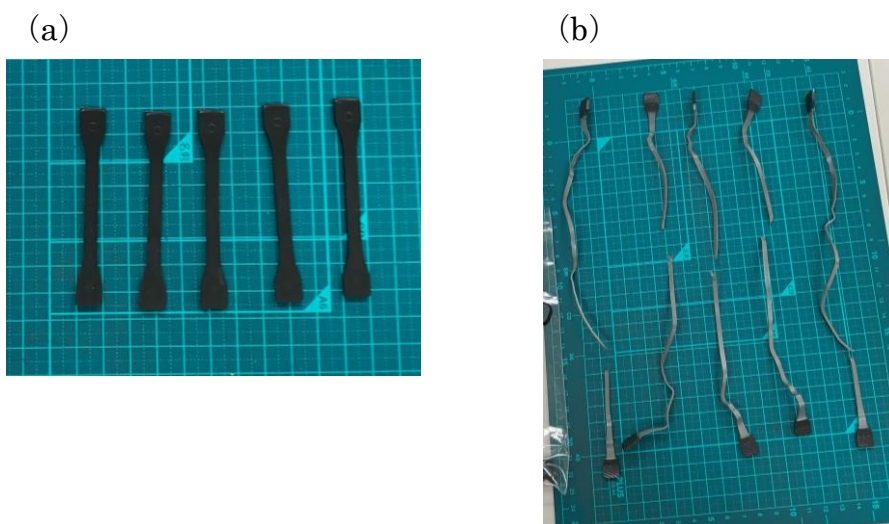


図 40 (a) 0.5% 24PS 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

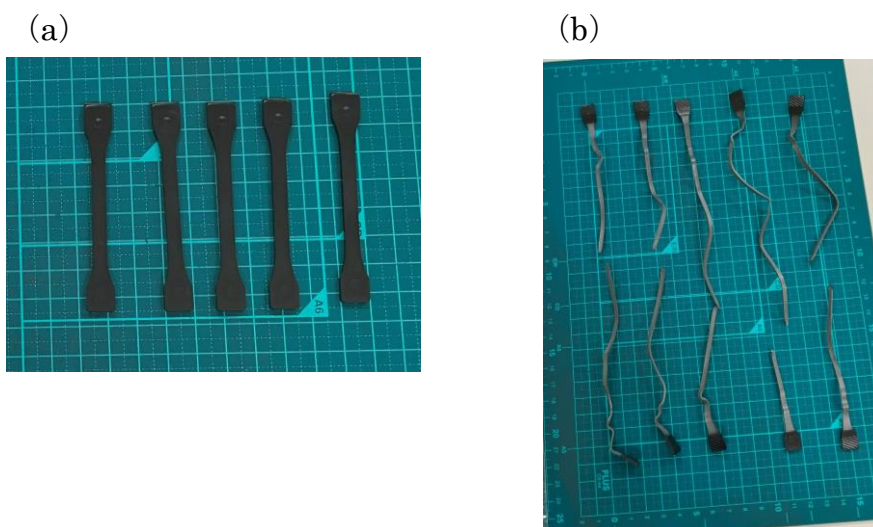


図 41 (a) 1% 24PS 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

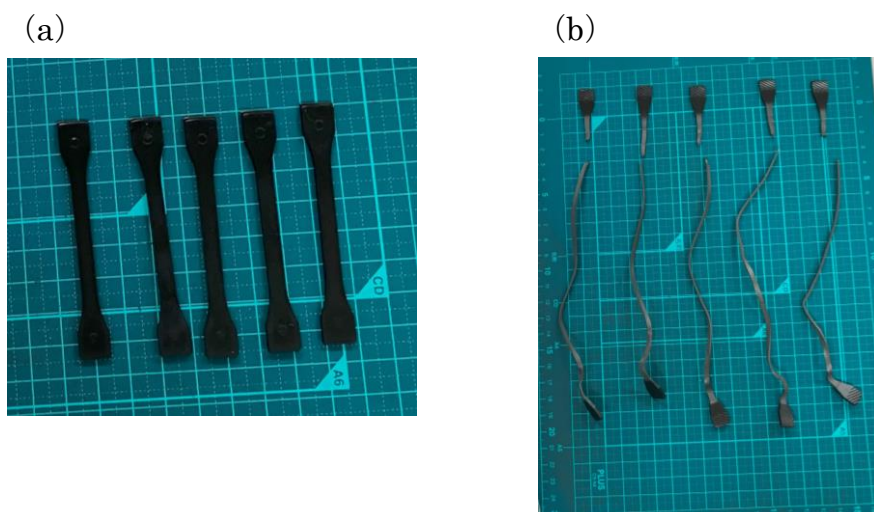


図 42 (a) 3% 24PS 難燃バージン LDPE の引張試験前、 (b) 引張試験後

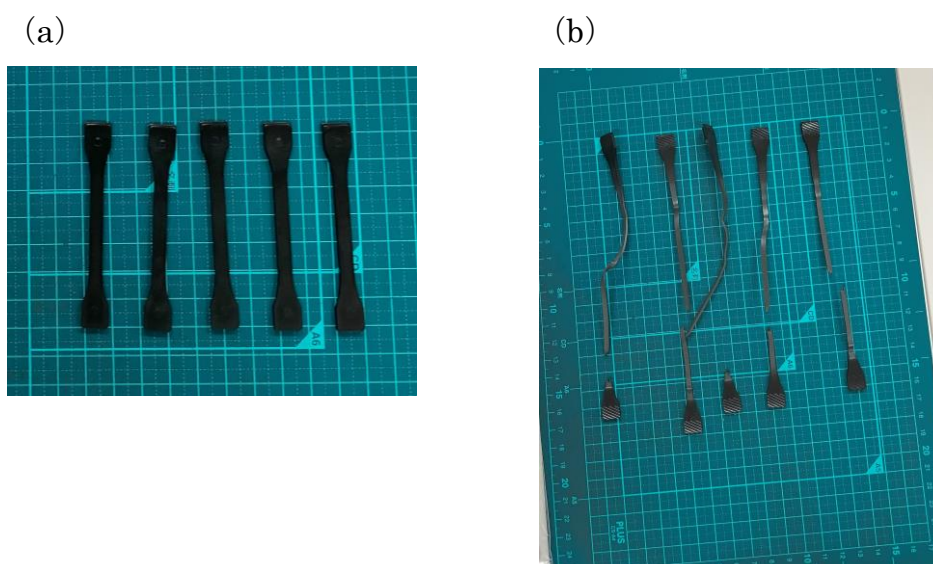


図 43 (a) 5% 24PS 難燃バージン LDPE の引張試験前、 (b) 引張試験後

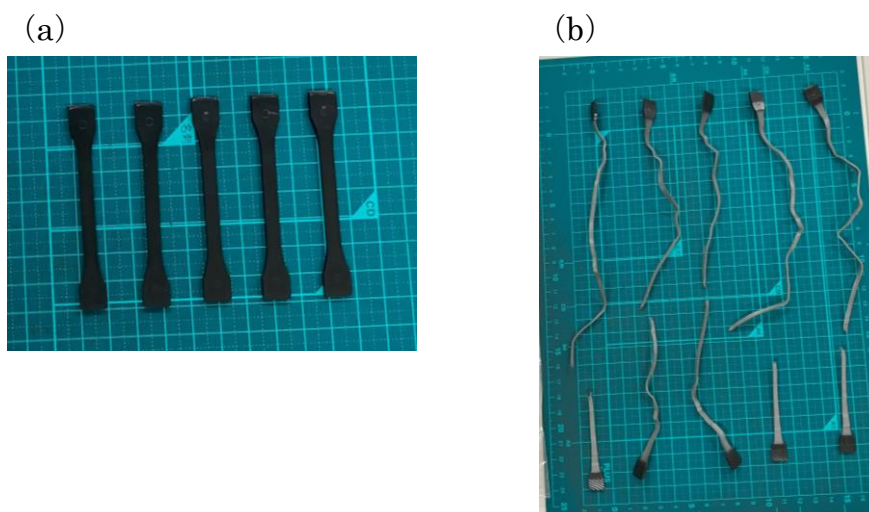


図 44 (a) 0.1% 24YD 難燃バージン LDPE の引張試験前、 (b) 引張試験後

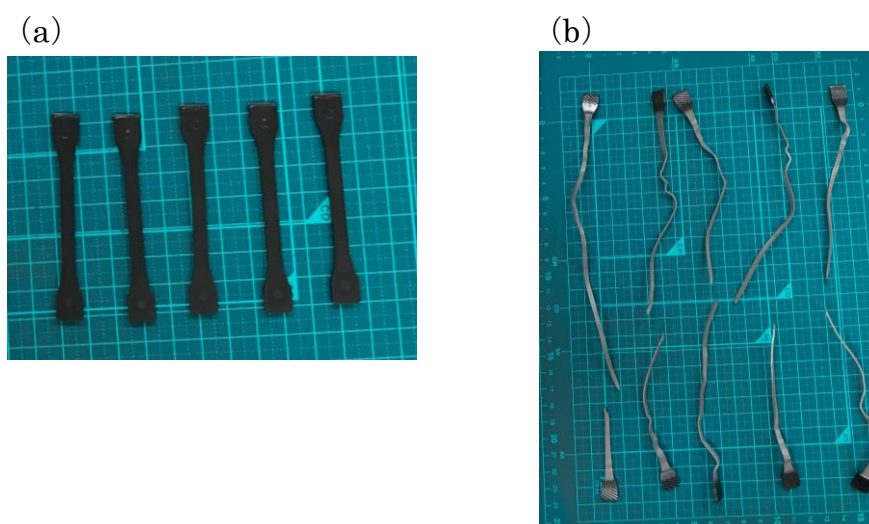


図 45 (a) 0.5% 24YD 難燃バージン LDPE の引張試験前、 (b) 引張試験後

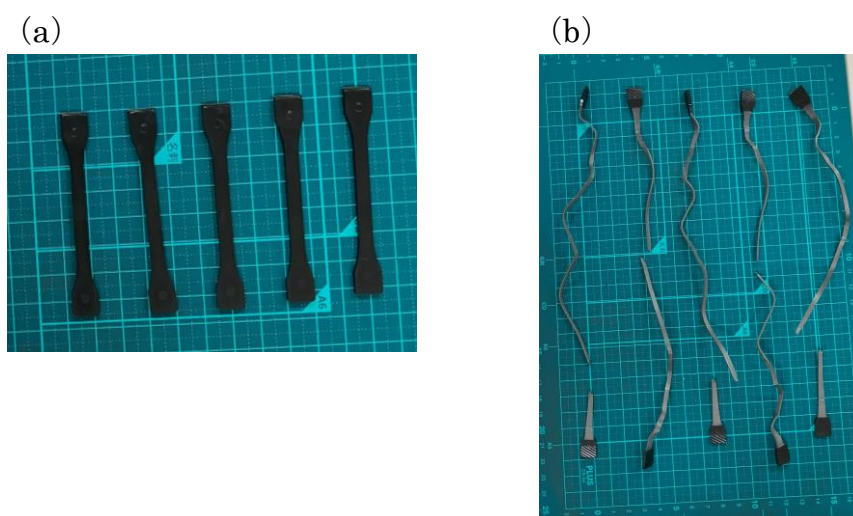


図 46 (a) 1% 24YD 難燃バージン LDPE の引張試験前、 (b) 引張試験後

(a)



(b)

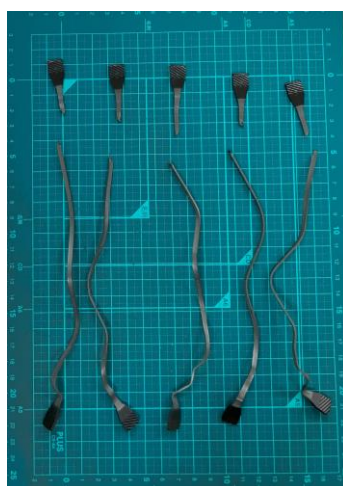


図 47 (a) 3% 24YD 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

(a)



(b)



図 48 (a) 5% 24YD 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

(a)



(b)



図 49 (a) 0.1% TJ20A 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

(a)



(b)



図 50 (a) 0.5% TJ20A 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

(a)



(b)



図 51 (a) 1% TJ20A 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

(a)



(b)



図 52 (a) 3% TJ20A 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

(a)



(b)



図 53 (a) 5% TJ20A 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

(a)



(b)

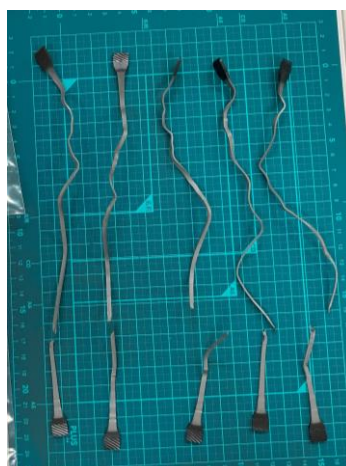


図 54 (a) 0.1% 24LHT 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

(a)



(b)

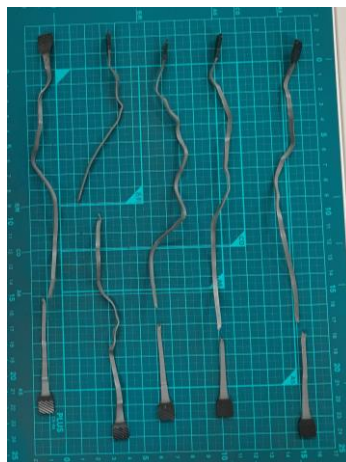


図 55 (a) 0.5% 24LHT 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

(a)



(b)

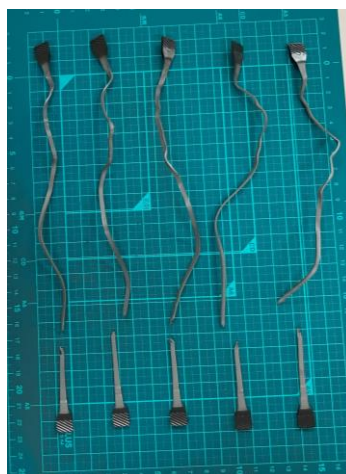


図 56 (a) 1% 24LHT 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

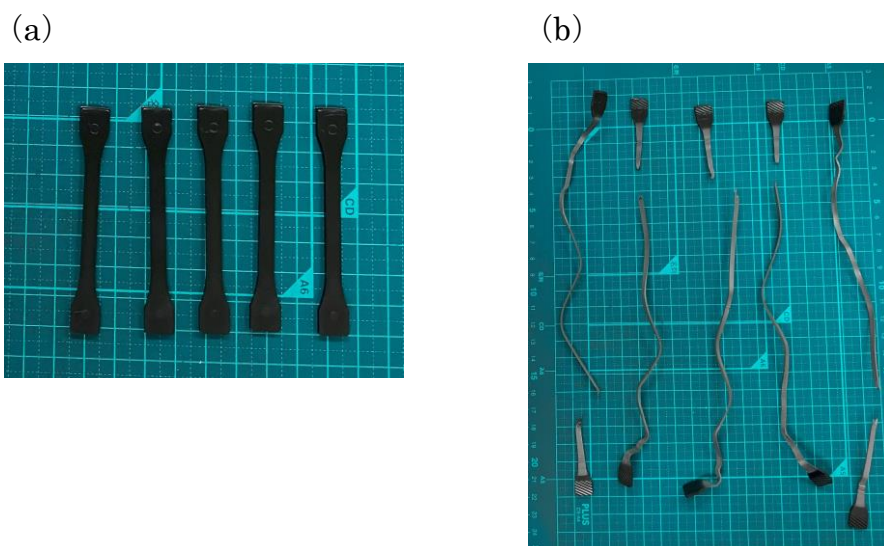


図 57 (a) 3% 24LHT 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

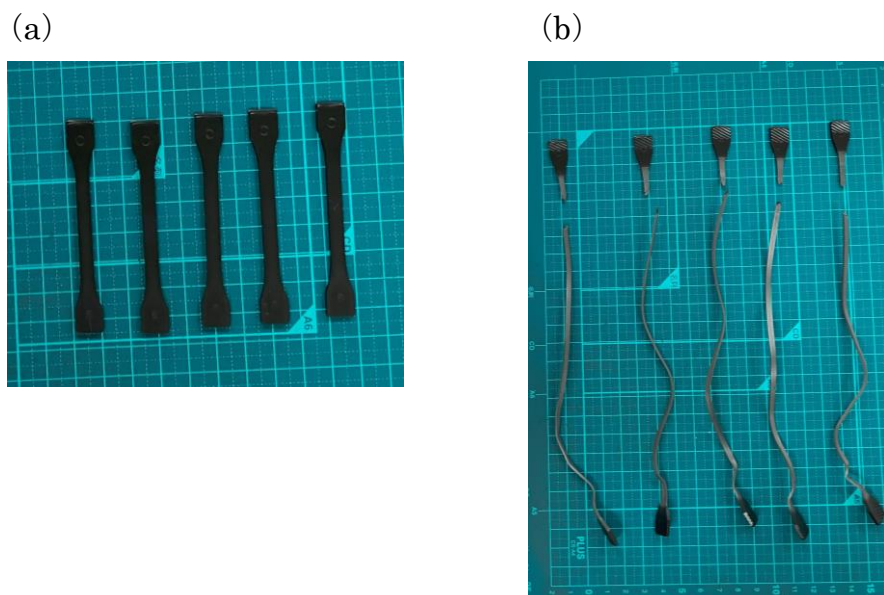


図 58 (a) 5% 24LHT 難燃バージン LDPE の引張試験前、(b) 引張試験後

①－４－２－３ 考察

CSCNT の高濃度化により、ひずみ率の低下が確認された。現状では 1～2% の CSCNT 添加により、目標物性を達成可能と考えられる。

CSCNT 種の違いによる物性の差異は見られず、CSCNT 種によらず同様の傾向が確認された。

処理条件が最適でない場合、CSCNT の凝集物が残存する可能性があるため、事項の通り樹脂中での CSCNT の分散状態を観察した。

①－５　CSCNT 分散状態の観察結果

①－５－１　観察方法

以下の観察設備を用いて、試作した CSCNT 含有サンプルの観察を行なった。

本観察法は申請者考案の観察法であり、凝集の有無を簡易的に確認することが可能である。

①－５－１－１　観察機器

(ア) レーザー顕微鏡（図 59）

装置仕様を以下に示す。

- ・ レーザースポット径：0.5 μ m
- ・ Ra,Rz,Wa の計測線長：140 μ m
- ・ Sa の計測範囲：73 $\times$ 73 μ m
- ・ 観察可能倍率：360～18,000 倍



図 59　レーザー顕微鏡

(イ) 透過型光学顕微鏡（図 60）

装置仕様を以下に示す。

- ・ BX51（OLYMPUS 製）
- ・ 観察可能範囲（透過観察）：100 $\times$ 100 mm
- ・ レンズ倍率：接眼レンズ 10 倍
対物レンズ：10 倍、20 倍、50 倍、100 倍



図 60 光学顕微鏡

①－５－１－２ 観察試料作製方法

観察試料は、以下の方法で作製した（図 61）。

CSCNT 濃度は、0.1%と 5%で観察を行った。

（ア）スライドガラスに試料を置き、その上にもう一枚ライドガラスを置く。

（イ）ホットプレートで融点まで加温し、試料を溶融させ、薄く広げる。

（ウ）顕微鏡で観察

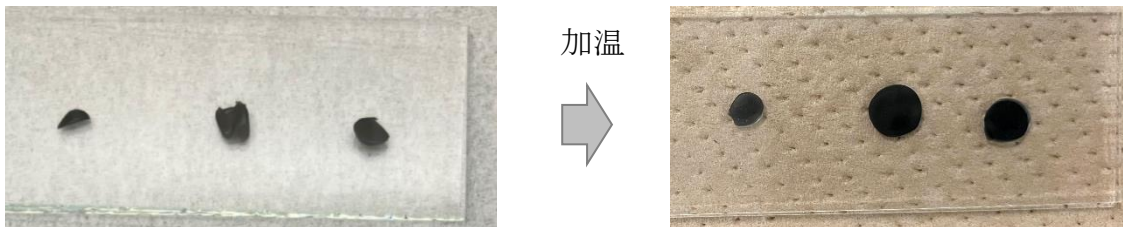


図 61 観察試料の溶融前後

①－５－２ 顕微鏡観察結果

CSCNT 標準グレード 24PS 含有非難燃バージン LDPE サンプルを用いて観察試料を作製し、保有する観察機器にて観察を行った。

①－５－２－１ レーザー顕微鏡観察結果

これまでの経験から、レーザー顕微鏡の場合、CSCNT の充填量が少ない試料ではレーザー光の透過度が高いため、試料表面から深いところまでの観察が可能である。

それに対し CSCNT の充填量の多い試料では透過度が低いため、試料表面から深さ数 μm までを観察可能である。

今回の試料では、CSCNT 充填量 0.1%品は深さ約 $20\mu\text{m}$ まで、CSCNT 充填量 5%品は深さ約 $2\mu\text{m}$ までを観察している。

添加量によって、画像中の CSCNT の密度に違いは見られるが、CSCNT の長さや凝集物の有無に違いは見られなかった（図 62）。

CSCNT は分散を目的とした混錬によって CSCNT が切断・破砕され、繊維形状を失う現象がしばしば確認されるが、前項の試験条件での処理では、CSCNT の線長を維持したまま高分散が観察された。ただし、実際の CSCNT 線長の調査は今後行うこととする。

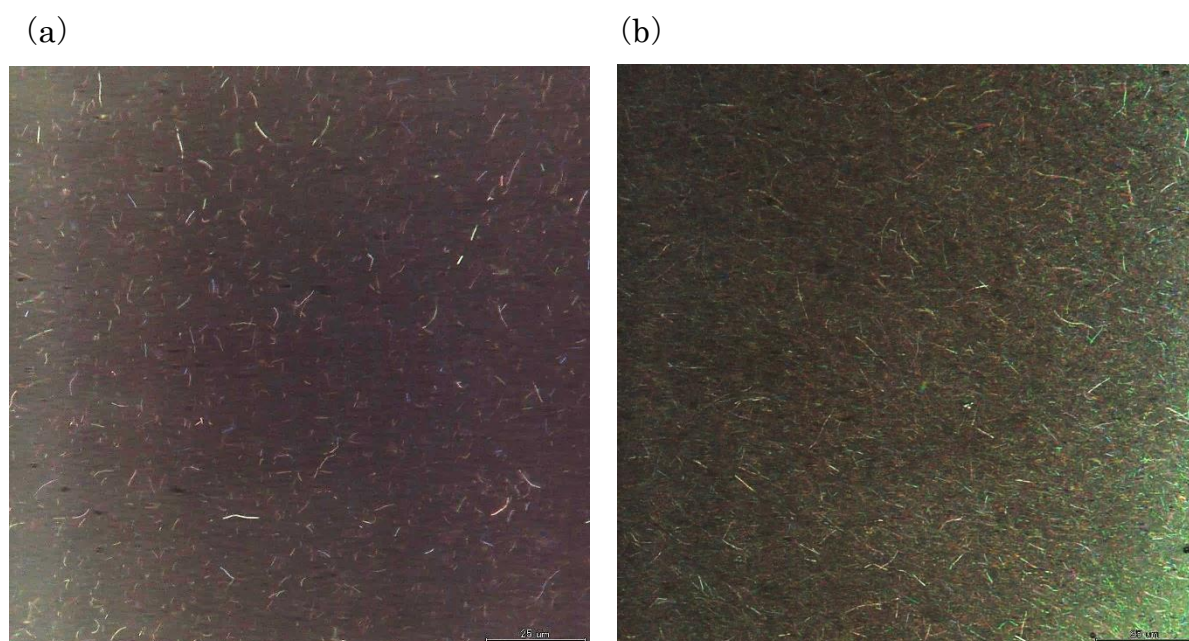


図 62 (a) 0.1%24PS 含有非難燃バージン LDPE
(b) 5%24PS 含有非難燃バージン LDPE

①－5－2－2 透過型光学顕微鏡観察結果

CSCNT 種によらず CSCNT の分散状態は良好であり、処理条件は最適と判定した(図 63)。

CSCNT 添加量は全て 0.1%の試料を観察した。

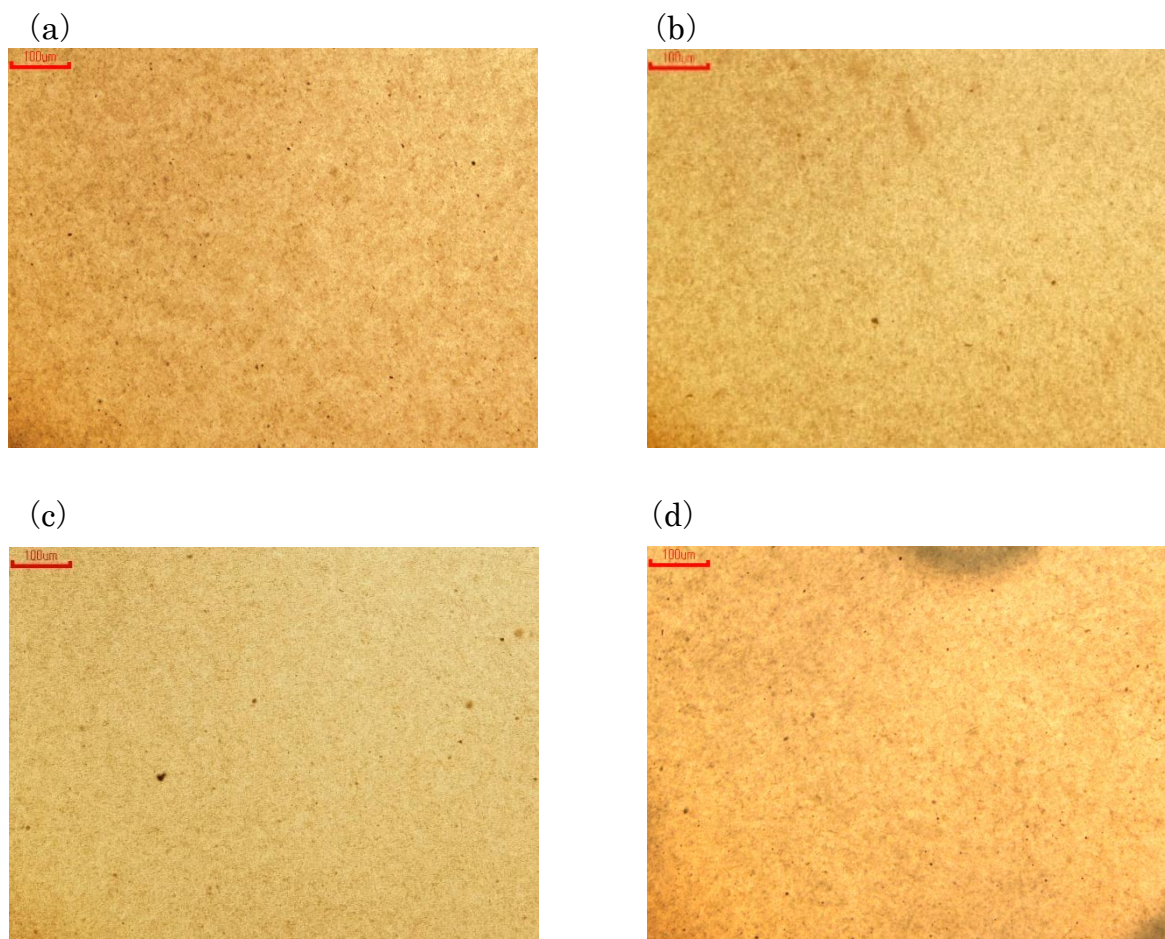


図 63 (a) 24PS 含有非難燃バージン LDPE の観察結果
(b) 24YD 含有非難燃バージン LDPE の観察結果
(c) TJ20A 含有非難燃バージン LDPE の観察結果
(d) 24LHT 含有非難燃バージン LDPE の観察結果

比較対象として、CSCNT の標準グレードである 24PS の凝集物を図 64 に示す。

図 6 に記載の通り、長尺 CSCNT が絡まり、数 10～数百 μm の CSCNT の凝集物が存在する。



図 64 CSCNT 凝集物（24PS） 参考写真

①－5－3 まとめ

試作した CSCNT 含有樹脂試料のレーザー顕微鏡観察では、CSCNT 凝集塊は確認されず、長尺の CSCNT が均一分散している様子が確認された。

CSCNT が良好に分散することにより、申請書記載の通り、（ア）機械的特性の向上、（イ）劣化（速度・度合）の低減、（ウ）難燃性の発現が期待される。

②機能性の評価法の検討

②－１ 難燃性試験

難燃性試験は、今後様々な条件、かつ自社で実施するため、評価設備・方法について自社内で実証実験を実施した。本試験は火炎を使用するため慎重な実験系が必要である。

②－１－１ 測定方法の規格

試験規格：JIS K 6911 の 5.24 B 法にて評価を実施した。

【JIS K 6911 記載内容】

【JIS K 6911 5.24B 法 垂直燃焼試験】

(1) 装置は、次の通りとする。

(1. 1) 空気の流れのないチェンバー、エンクロージャー、実験用フード

(1. 2) ブンゼンバーナー（管の長さ 101.6mm、内径 9.5mm）

(1. 3) クランプ付きリングスタンド

(1. 4) 工業用メタンガス又は 37MJ/m³ {約 9 000kcal/m³} の天然ガスのボンベ
（流量計、レギュレータ付き）

(1. 5) 乾いた外科用綿

(1. 6) ストップウォッチ又はタイマー

(1. 7) デシケーター（乾燥塩化カルシウム又はシリカゲル入りのもの）

(1. 8) 70±1℃に保持できる完全通風循環式恒温器

(2) 試験片

成形材料の場合は、長さ 127mm、幅 12.7mm、厚さ 0.8mm 以上に成形したものを
用いる。積層板の場合は試料から原厚のまま、長さ 127mm、幅 12.7mm の大きさに滑
らかに切り取ったものを用いる。いずれの場合も試験片の R の半径は 1.27mm を超
えないこと。

(3) 前処理

試験片の前処理は、次の 2 種類について行う。

(3. 1) 受理状態とする。

(3. 2) 温度 70±1℃で 168 時間加熱した後デシケーター中に 4 時間以上放置する。

(4) 試験片の個数

上記 (3) に示す各前処理条件ごとに 5 個とする。

(5) 方法

バーナーの炎を高さ 19mm の青色炎に調節し、クランプで長さ方向を鉛直に保持し
た試験片の下端中央部に 10 秒間接炎する。接炎後、バーナーを試験片から 152mm 以
上離してフレーミング時間を測定する。フレーミングが止まったら直ちにバーナーの
炎を再度、試験片の同じ箇所に 10 秒間当てた後、152mm 以上離し、フレーミング時
間とグローイング時間を測定する。なお、結果には試験片の厚さを付記する。

(6) 試験結果に対する要求事項(3. 1)及び(3. 2)の両条件で、次に示す要求事項に適合するものをそれぞれ V-0 級又は V-1 級とする。

試験条件	耐燃性	
	V-0 級	V-1 級
(1) 炎を取り去った後のフレーミング時間。	10 秒以内	30 秒以内
(2) 5 個 1 組の試験片に計 10 回接炎した後のフレーミング時間の合計。	50 秒以内	250 秒以内
(3) 第 2 回目の炎を取り去った後のグローイング時間。	30 秒以内	60 秒以内
(4) 試験片から 305mm 下の外科用綿を発火させるような滴下物の有無。	あってはならない。	あってはならない。
(5) クランプまで達するフレーミング又はグローイングの有無。	あってはならない。	あってはならない。
(6) 5 個 1 組の中 1 個が不適合の場合、又は 1 組 5 個のフレーミング時間の合計が右記の場合は他の 5 個 1 組を用いて再試験し、上記(1)、(2)、(3)の要求値にすべて適合しなければならない。	51～55 秒	251～255 秒

②－1－2 測定方法の簡素化検討

【評価方法】

JIS K 6911 記載の耐燃性評価 A 法垂直燃焼試験を参考として評価を実施した。

標準規格としては短冊状の試験片を用いて評価を実施するが、試作検討評価加速のための評価の簡素化を目標として、引張試験で使用するダンベル試験片を用いて難燃性評価を実施するべく検討を行った。

②－１－３ 検討結果

難燃性評価方法はいくつかの評価項目がある。

以下に示す通り、小型ダンベル試験片を用いた評価では、傾向を得るには十分であることが確認できた。

(ア) 難燃バージン LDPE での難燃性試験結果の概況 (図 65)

- ・ フレーミング、グローイングなし。
- ・ 滴下物あるが、外科用綿を発火させるような滴下物なし。

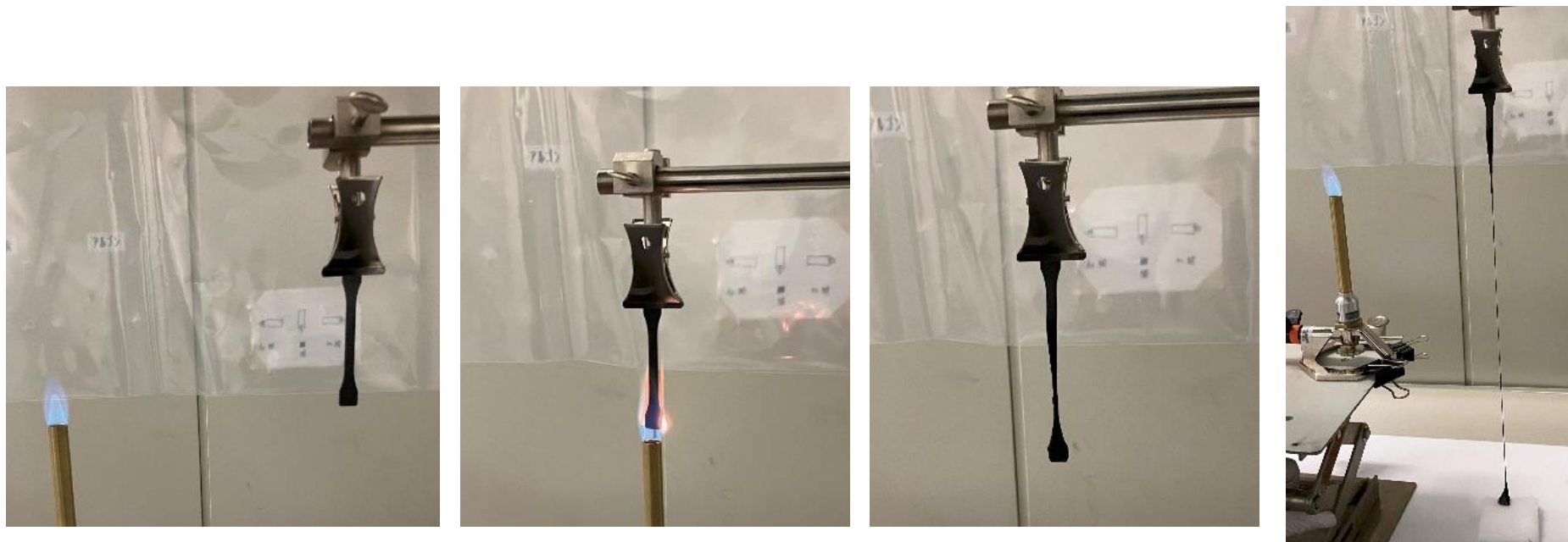


図 65 難燃バージン LDPE での難燃性試験の状況

(イ) 非難燃バージン LDPE での難燃性試験結果の概況 (図 66)

- ・フレーミングあり。
- ・外科用綿を発火させるような滴下物あり。

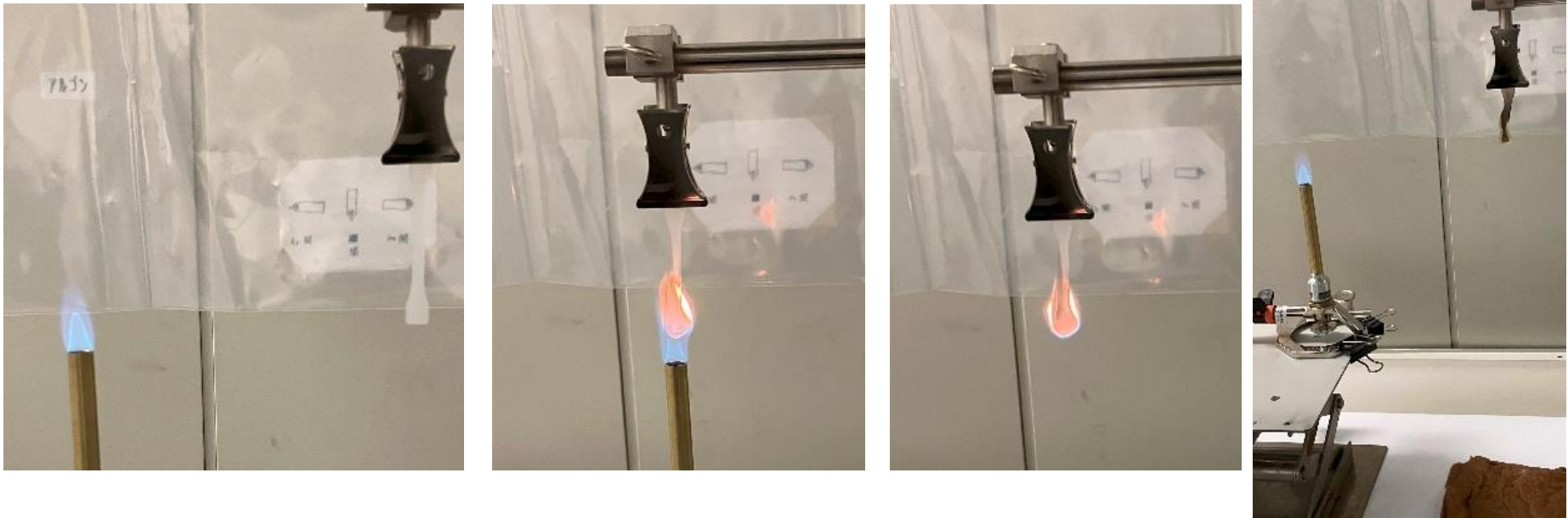


図 66 非難燃バージン LDPE での難燃性試験の状況

②－２ 配合検討時の耐電圧試験検討

②－２－１ 測定方法

電気抵抗測定装置ロレスターGP（三菱化学製）（図 67）を用いて、試作品の体積抵抗値を測定した。

ロレスターGP は四探針方式の測定装置であり、試料を試料台に乗る寸法に調整（図 68）し、4 つの探針に圧着させて、抵抗値を測定する。

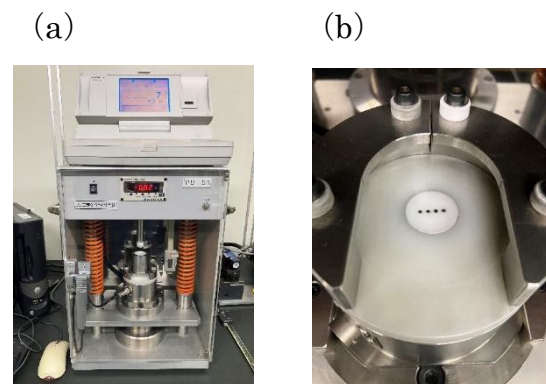


図 67 (a) 粉体抵抗測定装置、(b) 試料台



図 68 ダンベル試験片から切り取った測定試料

②－２－１ 測定結果

4 種の CSCNT 種で充填量が最も多い 5% 添加のダンベル試験片から切り取ったサンプルを用いて評価を行った。
測定結果を表 8 に示す。

表 8 体積抵抗値測定結果

	①5%24PS 含有 難燃バージン LDPE	②5%24YD 含有 難燃バージン LDPE	③5%TJ20A 含有 難燃バージン LDPE	④5%24LHT 含有 難燃バージン LDPE
体積抵抗値 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	10^7 以上	10^7 以上	10^7 以上	10^7 以上

(2) 再生回数の増加

①成形体での再生試験

①ー1 再生スケジュールの全体像 (図 69)

以下スケジュールの通り評価を行った。

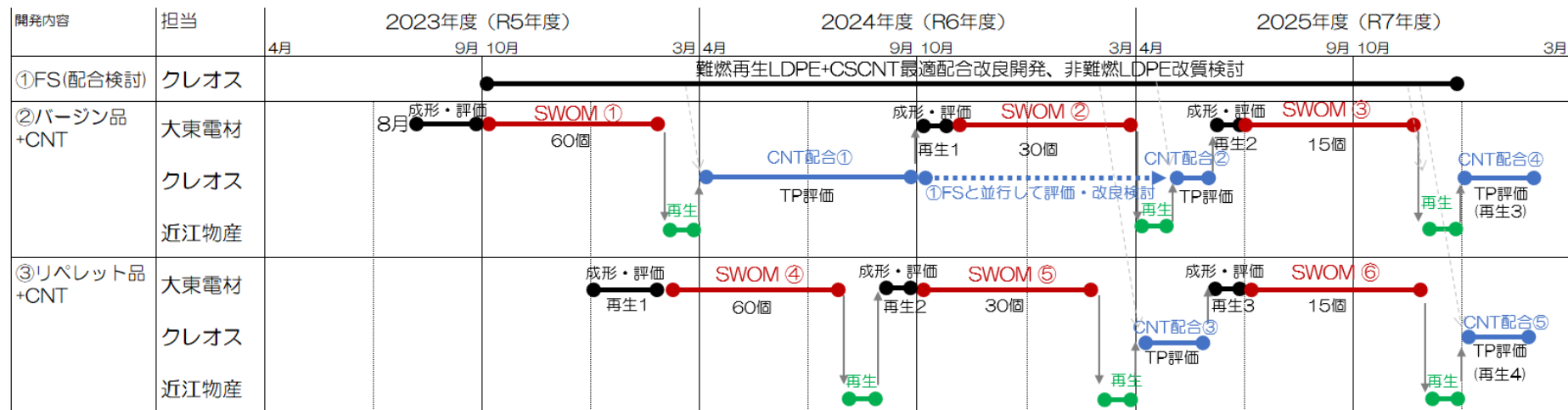


図 69 本事業の実施内容スケジュール

①－２ 各材料の状態

①－２－１ 難燃バージン LDPE 成形体（図 70）

難燃バージン LDPE について、加速劣化試験（SWOM）を行った。SWOM 試験前後の外観について差異は見られなかった。

また SWOM 後品の粉碎チップ（図 71）を用いて、2%の配合比で CSCNT の混練を行い、コンパウンドペレット（図 72）を試作した。

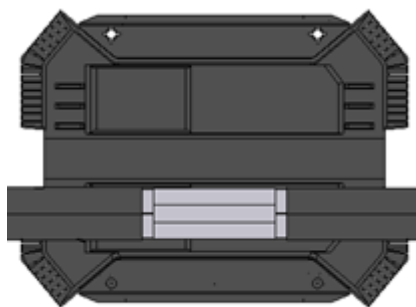


図 70 電材成形品イメージ



図 71 難燃性バージン LDPE の SWOM 後の粉碎品



図 72 難燃性バージン LDPE の SWOM 後の粉碎品に 24PS を 2%添加したペレット

①－２－２ 難燃再生 LDPE 成形体

難燃再生 LDPE について、SWOM 試験を実施した。難燃バージン LDPE 同様、SWOM 試験前後の外観に差異は見られなかった。

また、SWOM 後の粉砕チップ品は、再度リペレットして、成形体の材料とした（図 73）。

その成形体について、SWOM 試験を実施し、再度粉砕チップ品とした（図 74）。



図 73 難燃再生 LDPE の SWOM 後の粉砕品およびペレット品



図 74 SWOM2 サイクル目の難燃再生 LDPE の粉砕品

②耐久性試験

②－1 SWOM 試験

②－1－1 SWOM 試験の概要

【SWOM 試験について】

SWOM を用いて、電材製品形状表面に 2000 時間のサンシャインカーボンアーク光を照射する。SWOM2000 時間の照射で 10 年相当の野外暴露と同等の劣化状態とされる。

SWOM は樹脂など有機物劣化に強い影響を与える UV-A 波長 315～400nm を太陽光の数倍の放射照度で照射することで加速的劣化をもたらす（図 75 青丸囲み部）。

評価は、JIS A 1415 の規格に則り実施した。

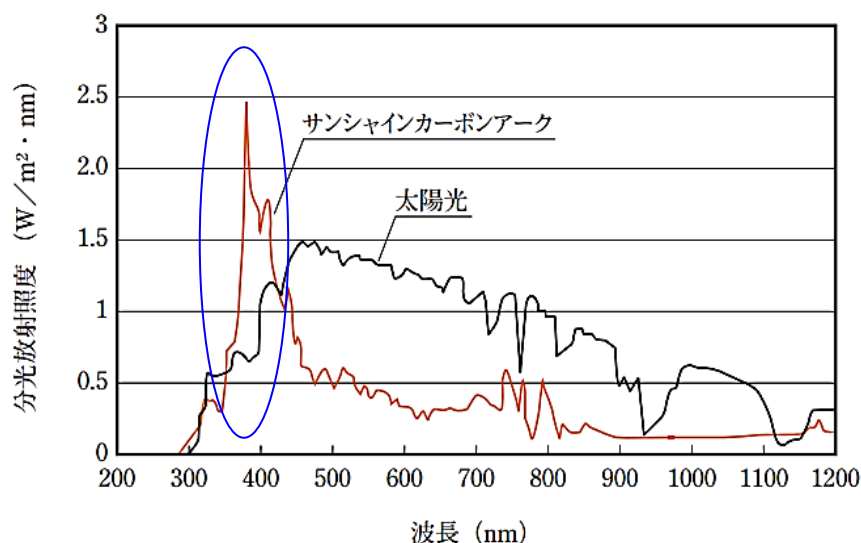


図 75 SWOM 分光分布

②－2 SWOM 試験前後の表面観察

②－2－1 観察方法

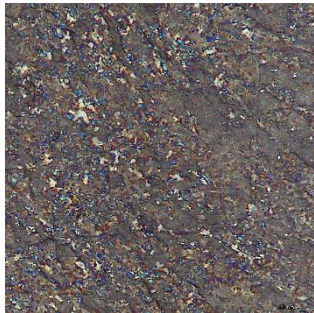
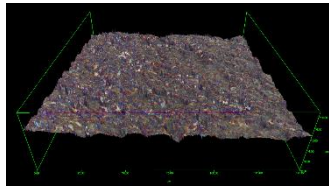
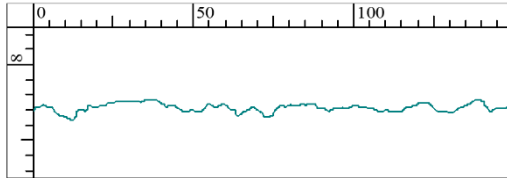
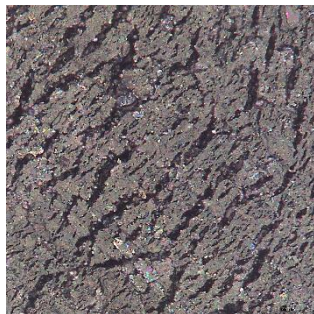
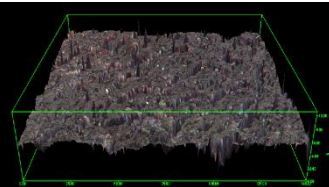
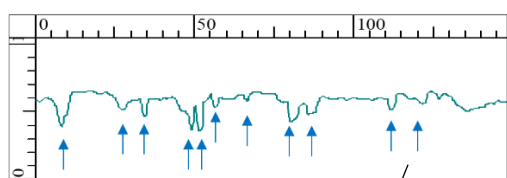
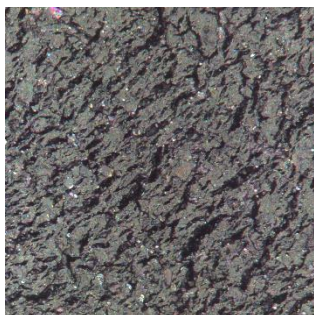
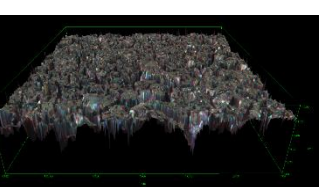
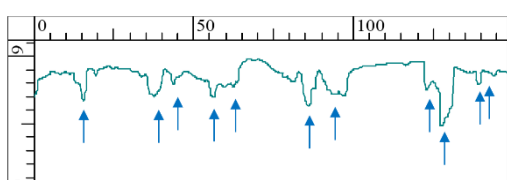
SWOM 前後のサンプルの一部を切り出し、当室既存のレーザー顕微鏡を用いて、表面観察を実施した。

②－2－2 観察結果

レーザー顕微鏡を用いて、低倍率（360 倍）と、高倍率（1800 倍）で観察を行った。その観察写真を基に劣化箇所の各種解析を実施した（表 9）。

SWOM 試験前後でクラックが発生し、SWOM の処理時間を長くする事でさらに劣化が進展している事が確認された。

表 9 SWOM 試験前後の成型品表面状態の変化

	1800 倍観察	3D	クラック深さ	粗さ測定結果 (n=3)										
SWOM 前			 深さ : 1 μ m/目盛 幅 : 5 μ m/目盛	<table><tr><th>項目</th><th>数値</th></tr><tr><td>Ra</td><td>0.154μm</td></tr><tr><td>Rz</td><td>0.952μm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>0.387μm</td></tr><tr><td>Rv</td><td>0.614μm</td></tr></table>	項目	数値	Ra	0.154 μ m	Rz	0.952 μ m	Sa	0.387 μ m	Rv	0.614 μ m
項目	数値													
Ra	0.154 μ m													
Rz	0.952 μ m													
Sa	0.387 μ m													
Rv	0.614 μ m													
SWOM 2000h			 深さ : 1 μ m/目盛 幅 : 5 μ m/目盛 クラック箇所	<table><tr><th>項目</th><th>数値</th></tr><tr><td>Ra</td><td>0.323μm</td></tr><tr><td>Rz</td><td>2.440μm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>0.396μm</td></tr><tr><td>Rv</td><td>2.020μm</td></tr></table>	項目	数値	Ra	0.323 μ m	Rz	2.440 μ m	Sa	0.396 μ m	Rv	2.020 μ m
項目	数値													
Ra	0.323 μ m													
Rz	2.440 μ m													
Sa	0.396 μ m													
Rv	2.020 μ m													
SWOM 4000h			 深さ : 1 μ m/目盛 幅 : 5 μ m/目盛 クラック箇所	<table><tr><th>項目</th><th>数値</th></tr><tr><td>Ra</td><td>0.437μm</td></tr><tr><td>Rz</td><td>3.257μm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>0.450μm</td></tr><tr><td>Rv</td><td>2.413μm</td></tr></table>	項目	数値	Ra	0.437 μ m	Rz	3.257 μ m	Sa	0.450 μ m	Rv	2.413 μ m
項目	数値													
Ra	0.437 μ m													
Rz	3.257 μ m													
Sa	0.450 μ m													
Rv	2.413 μ m													

②－3 SWOM 試験による劣化機構の定義の検証

従来知られている高分子材料の劣化機構を図 76 に示す。

SWOM 試験は、屋外の環境条件を模倣し、製品や材料の耐候性を評価する試験方法である。強力な紫外線（UV）を放射するサンシャインカーボンアーク灯は高い劣化促進性を示すことが知られており、対象樹脂の種類により劣化の進展度合いに差が生じることがあるが、今日に至るまで使用されている信頼に足る評価方法である。

一方、樹脂の劣化機構は様々な考察があるが、屋外暴露の場合、太陽光に含まれる UV 照射による樹脂内のラジカル発生から高分子の解重合、マイクロクラックの発生、クラックの進展機構と考えられる。

従い今回 SWOM 試験後の試験体表面に顕著に観察されたクラックは、SWOM 試験により内部に発生したラジカル起源と考察した。

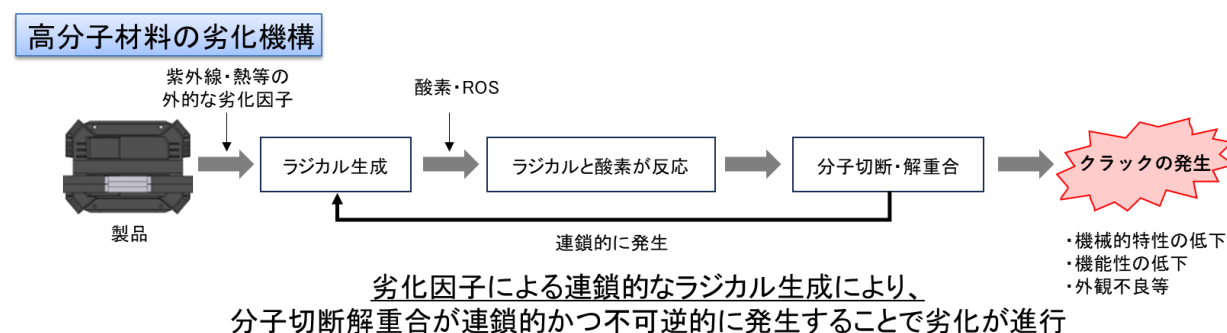


図 76 高分子の劣化機構

SWOM試験での劣化機構

SWOM試験による劣化は、従来2000時間が屋外暴露10年相当として、定性的に示されている。

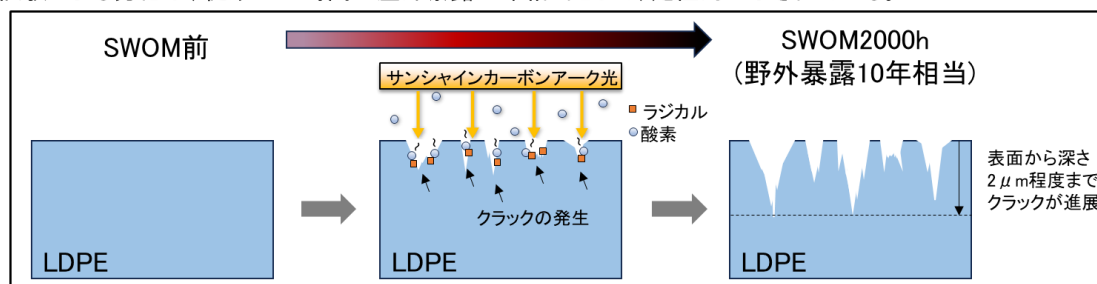


図. SWOM試験での劣化機構

今回の評価により、SWOM試験後の表面の劣化状態を、初めて定量的に示すことができた。これによりSWOM2000時間品を10年屋外暴露品の評価対象として使用する正当性が示された。従い、SWOM評価品を長期野外暴露劣化品として評価を進める。

図 77 SWOM 試験での劣化機構

③耐電圧試験

③－１ 評価方法

耐電圧試験の評価は、電技、及び配電規程でも規定されている規格の通り実施した。

高電圧防護具の完成品試験として、下記絶縁耐電圧試験を実施しこれに耐える性能を有することを条件づけられている。

(ア) 乾燥状態で 15kV の交流電圧を 1 分間

(イ) JIS C 0920 の規定による散水試験後、10kV の交流電圧を 1 分間

散水試験規格：散水方法の規格である JIS C 0920 に沿って散水を実施した。

③－２ 評価状況

③－２－１ 乾燥状態での 15kV の交流電圧を 1 分間通電時の評価状況

電線の接続箇所を模擬したものを覆うように電材サンプルをセットする。その後、電材の表面に導電性のあるアルミシートを巻き付け、耐電圧試験設備にセットする。



図 78 耐電圧試験設備にセット時の写真

③－２－２ 散水後 10kV の交流電圧を 1 分間通電時の評価状況

散水方法は、JIS C 0920 の規格の通り実施した。

(ア) 両側に 60 度までの角度で噴霧した水を電材に 5 分間散水する。

(イ) 散水部は振り子のように稼働しながら散水する。

散水後、電材内部には水が入り込んでいる。電材の構造状、水は抜けるので、水がたまらず通電は発生しない。

③－３ 耐電圧試験の評価結果

SWOM 前品と SWOM 後品へ CSCNT 充填したものでの評価結果を表 10 に示す。

表 10 耐電圧試験の評価結果

試験項目		規格	SWOM 試験前	SWOM 試験後 24PS 充填品
耐電圧	乾燥	15000V・1min で 異常ないこと	異常なし	異常なし
	散水	15000V・1min で 異常ないこと	異常なし	異常なし

④引張試験

④－１ 評価方法

上記成形品と同グレードの材料を用いて、下記のダンベル試験片を作成後、引張試験を実施した。

ダンベル試験片形状や評価方法は、日本電気技術規格委員会の配電規程（JEAC7001）の215-6『工作物と接近箇所使用する防護具』の記載の通りとした。

【配電規程】

1) 材料について（ポリエチレンの場合）

（ア）室温において引張強さ及び伸びの試験を行ったとき、引張強さが、9.8N/mm²以上、伸びが350%以上であること。

（イ）90℃±2℃に96時間加熱した後96時間以内において、室温に4時間以上放置した後に（ア）の試験を行ったとき、引張強さが、（ア）の試験の際に得た値の80%以上、伸びが（ア）の試験の際に得た値の65%以上であること。

2) 試験片形状について

試験片形状はJIS K 6251のダンベル状3号形とすること。

ダンベル試験片は、二本ロール混練機を用いて元材料の混練後、2mm厚のシート状にプレス加工を行う。その後、打ち抜きで試験片を作製した。

試験規格は、JIS K 7161-1：2014（ISO527-1：2012）の通り評価を実施した。



図 79 作成したダンベル試験片

④－２ 評価状況

試験片を万能試験機にセットし、下記の条件で評価を実施した。

評価時の条件は以下の通りとした。

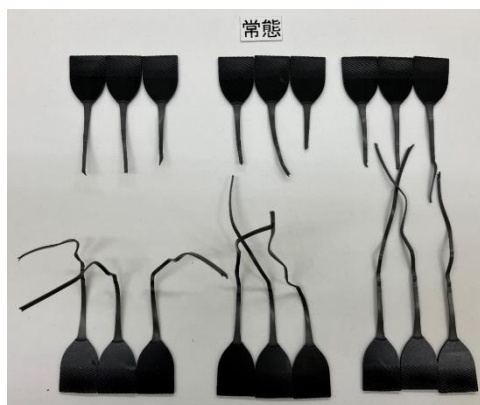
- ・ 引張速度：200mm/分
- ・ 標線間距離：20mm



図 80 引張試験時の写真

引張試験後のサンプルを以下に示す。

(a)



(b)



図 81 (a) 引張試験後サンプル (加熱なし)

(b) 引張試験後サンプル (加熱後)

④－３ 引張試験の評価結果

SWOM 前品と SWOM 後品へ CSCNT 充填したもののでの評価結果を表 11 に示す。

表 11 引張試験の評価結果

試験項目		規格	SWOM 試験前	SWOM 試験後 24PS 充填品
常態	引張強さ (MPa)	9.8MPa 以上	16.0	15.2
	伸び (%)	350%以上	702	658
加熱 老化後	引張強さ残率 (%)	常態に対して引張 強さ残率 80%以上	96.5	87.3
	伸び残率 (%)	常態に対して伸び 残率 65%以上	94.7	98.2

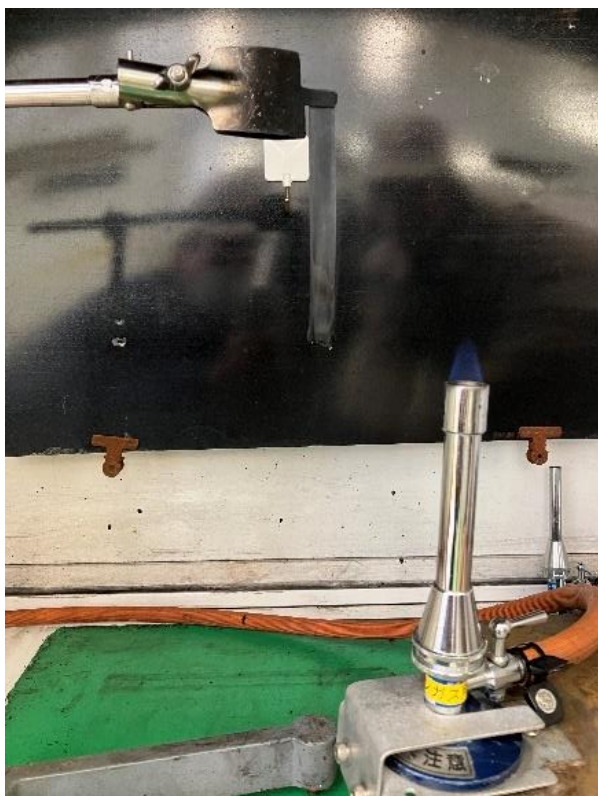
⑤難燃性試験

⑤－1 評価方法

②－1－1 項に記載の規格『JIS K 6911』記載内容の通り試験を行った。

⑤－2 評価状況

(a)



(b)



図 82 (a) 難燃性試験 接炎前、(b) 難燃性試験 接炎時

⑤－3 難燃性試験の評価結果

SWOM 前品と SWOM 後品へ CSCNT 充填したもののでの評価結果を表 12 に示す。

表 12 難燃性試験の評価結果

試験項目		規格	SWOM 試験前	SWOM 試験後 24PS 充填品
難燃性	JIS K 6911 B 法	V-0 級であること	V-0	V-0

(3) コスト削減の検討

(3) - 1 各種材料の概算価格

表 13 に示す材料コストを基に、コスト削減を目的として配合比率の検討、試作検討、物性評価、コスト試算を行った。

表 13 各材料の価格表 (2023 年時点)

各材料の価格	円/kg
難燃性バージンLDPE	800
難燃性再生LDPE	400
非難燃性バージンLDPE	200
非難燃性再生LDPE	100
CSCNT	10,000

以降、バージン品を **V**、再生品を **R** と省略して記載する。

(3) - 2 当初のコスト試算

本事業申請時のコスト試算と目標のコストを表 14 に示す。

表 14 当初のコスト試算

比較対象素材		リサイクル素材		
名称	価格 (円/kg)	名称	現状の価格 (円/kg)	価格低減目標 (円/kg)
難燃 V、 難燃 R 混合	約 600 円/kg	難燃 R-LDPE (99%) CSCNT (1%)	物性劣化のため 現状、再生品 100%は 存在しない	約 496 円/kg
難燃 V、 難燃 R 混合	約 600 円/kg	難燃 R-LDPE (50%) 非難燃 V-LDPE (49%) CSCNT (1%)	現状、非難燃 LDPE は 本用途に使用されない	約 398 円/kg

(3) - 2 - 1 当初配合案での評価結果

表 14 の配合での力学的特性の評価結果を表 15 に示す。

表 15 コスト試算及び引張試験の評価結果（当初案の配合）

	比較対象素材 難燃 V : 難燃 R =1 : 1	①難燃 R (99%) CSCNT (1%)	②難燃 R (50%) + 非難燃 V (49%) CSCNT (1%)
コスト	600 円/kg	498 円/kg	396 円/kg
最大点応力	12.6374MPa	10.6471MPa	11.7138MPa
ひずみ率	403.049%	329.999%	357.640%

(3) - 2 - 2 当初配合案での評価結果の考察

難燃 R を配合することでコスト削減が可能であるが、力学的特性の低下が確認された。

以下 (3) - 3 以降で、コスト削減および力学的特性の維持・向上の両立を目的とした配合検討を実施した。

(3) - 3 コスト削減、および力学的特性向上を目的とした配合検討

各種材料の配合比率をパラメータとして、力学的特性および、コストの面で配合検討および評価を行った。

(3) - 3 - 1 難燃 V、難燃 R を複合した配合検討内容

(3) - 3 - 1 - 1 目的

難燃 R のみでは、力学的特性の低下が確認されたため、難燃 V との複合を検討した。

(3) - 3 - 1 - 2 配合比

以下の配合で試作検討を行った (図 83)。

(ア) 難燃 V : 難燃 R = 1 : 1

(イ) 難燃 V : 難燃 R = 1 : 2 (1% CNT 含有)

(ウ) 難燃 V : 難燃 R = 1 : 3 (1% CNT 含有)

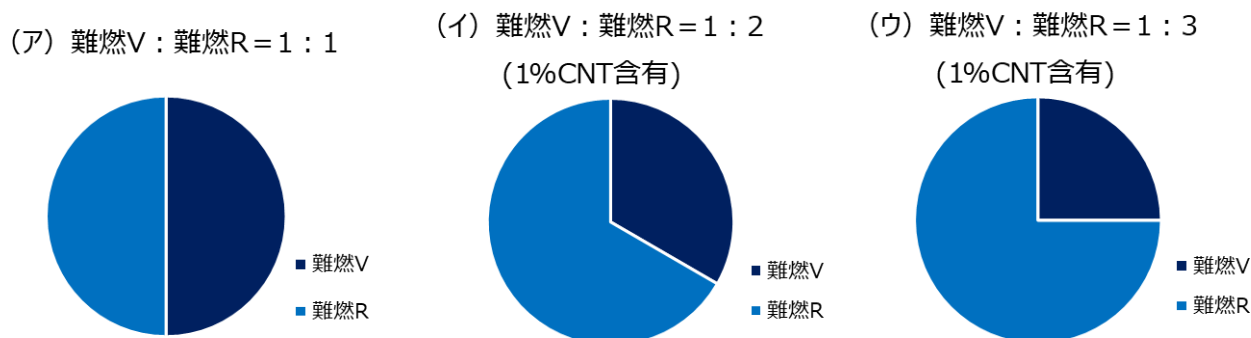


図 83 各配合比率の円グラフ (難燃 V、難燃 R 配合品)

(3) - 3 - 1 - 3 コスト試算及び引張試験の評価結果 (難燃 V、難燃 R 配合品)

評価結果を表 16 に示す。

難燃再生品の使用量増加により、力学的物性の低下が確認された。

表 16 コスト試算及び引張試験の評価結果 (難燃 V、難燃 R 配合品)

	(ア) 難燃 V : 難燃 R = 1 : 1	(イ) 難燃 V : 難燃 R = 1 : 2 (1% CNT 含有)	(ウ) 難燃 V : 難燃 R = 1 : 3 (1% CNT 含有)
コスト	600 円/kg	628 円/kg	600 円/kg
最大点応力	12.6374MPa	10.829MPa	10.4344MPa
ひずみ率	403.049%	345.991%	340.750%

(3) - 3 - 2 難燃 V、難燃 R、非難燃 V を複合した配合検討内容

(3) - 3 - 2 - 1 目的

(3) - 3 - 1 の検討結果から、難燃 V を添加する事によるコストの増加が確認された。コスト低減のため低コストである非難燃 V を添加し検討を行った。

(3) - 3 - 2 - 2 配合比

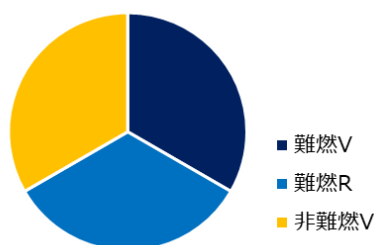
以下の配合で試作検討を行った (図 84)。

(ア) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 1 : 1

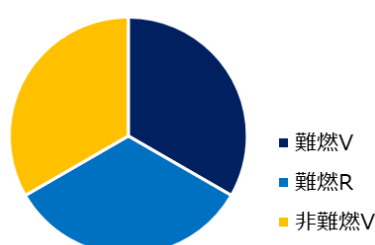
(イ) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 1 : 1 (1% CNT 含有)

(ウ) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 2 : 2 (1% CNT 含有)

(ア) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V
= 1 : 1 : 1



(イ) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V
= 1 : 1 : 1 (1% CNT 含有)



(ウ) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V
= 1 : 2 : 2 (1% CNT 含有)

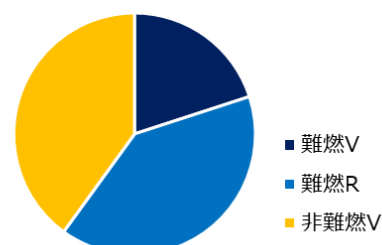


図 84 各配合比率の円グラフ (難燃 V、難燃 R、非難燃 V 配合品)

(3) - 3 - 2 - 3 コスト試算及び引張試験の評価結果 (難燃 V、難燃 R、非難燃 V 配合品)

評価結果を表 17 に示す。

非難燃バージン品の配合比率増加により、コスト低減が可能と考えられる結果が示された。

力学的特性は、非難燃バージン品の添加により、複合品のひずみ率は回復傾向だった。

表 17 コスト試算及び引張試験の評価結果 (難燃 V、難燃 R、非難燃 V 配合品)

	(ア) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 1 : 1	(イ) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 1 : 1 (1% CNT 含有)	(ウ) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 2 : 2 (1% CNT 含有)
コスト	462 円/kg	562 円/kg	500 円/kg
最大点応力	12.4707MPa	11.8393MPa	11.6407MPa
ひずみ率	404.066%	366.088%	354.045%

(3) - 3 - 3 難燃 V、難燃 R、非難燃 V、非難燃 R を複合した配合検討内容

(3) - 3 - 3 - 1 目的

(3) - 3 - 2 の検討結果から、更なるコスト低減を目的として、非難燃 R の添加検討を行った。

(3) - 3 - 3 - 2 配合比

以下の配合で試作検討を行った (図 85)。

(ア) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V : 非難燃 R = 1 : 1 : 1 : 1 (1% CNT 含有)

(イ) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V : 非難燃 R = 3 : 3 : 3 : 1 (1% CNT 含有)

(ア) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V : 非難燃 R
= 1 : 1 : 1 : 1 (1% CNT 含有)

(イ) 難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V : 非難燃 R
= 3 : 3 : 3 : 1 (1% CNT 含有)

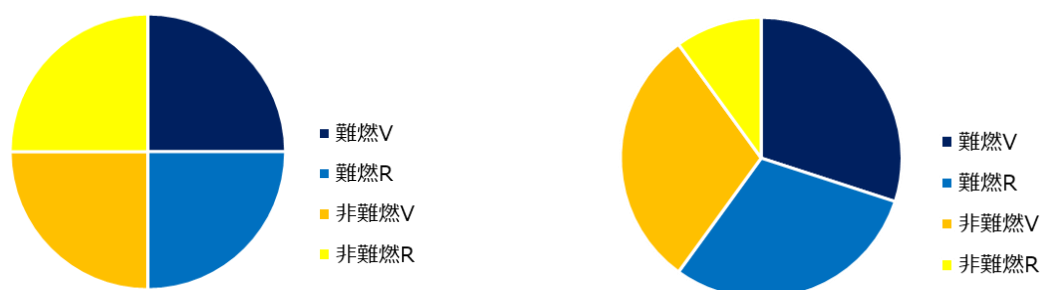


図 85 各配合比率の円グラフ (難燃 V、難燃 R、非難燃 V、非難燃 R 配合品)

(3) - 3 - 3 - 3 コスト試算及び引張試験の評価結果 (難燃 V、難燃 R、非難燃 V、非難燃 R 配合品)

評価結果を表 18 に示す。

非難燃再生品の添加により、ひずみ率の顕著な低下が確認された。非難燃再生品の添加割合を減らすことで、ひずみ率低下を低減可能と示唆される結果となった。

表 18 コスト試算及び引張試験の評価結果
(難燃 V、難燃 R、非難燃 V、非難燃 R 配合品)

	⑦難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V : 非難燃 R = 1 : 1 : 1 : 1 (1% CNT 含有)	⑧難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V : 非難燃 R = 3 : 3 : 3 : 1 (1% CNT 含有)
コスト	475 円/kg	530 円/kg
最大点応力	12.2536MPa	11.9156MPa
ひずみ率	327.693%	338.913%

(3) - 3 - 4 難燃 R、非難燃 V を複合した配合検討内容

(3) - 3 - 4 - 1 目的

難燃 R で低下する伸び率を回復、およびコスト低減を目的として、難燃 R、非難燃 V の配合検討を行った。

(3) - 3 - 4 - 2 配合比

以下の配合で試作検討を行った (図 86)。

(ア) 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 1 (1% CNT 含有)

(イ) 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 2 (1% CNT 含有)

(ウ) 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 2 (1% CNT 含有)

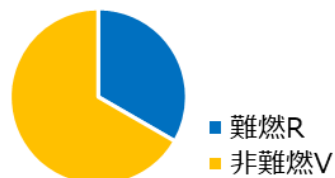
(エ) 難燃 R : 非難燃 V = 2 : 1 (1% CNT 含有)

(オ) 難燃 R : 非難燃 V = 2 : 1 (1% CNT 含有)

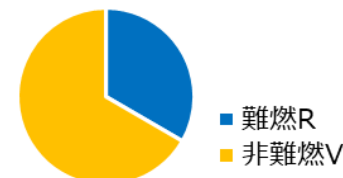
(ア) 難燃 R : 非難燃 V
= 1 : 1 (1% CNT 含有)



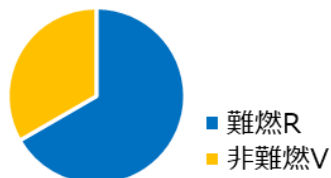
(イ) 難燃 R : 非難燃 V
= 1 : 2 (1% CNT 含有)



(ウ) 難燃 R : 非難燃 V
= 1 : 2 (1% CNT 含有)



(エ) 難燃 R : 非難燃 V
= 2 : 1 (1% CNT 含有)



(オ) 難燃 R : 非難燃 V
= 2 : 1 (1% CNT 含有)



図 86 各配合の円グラフ (難燃 R、非難燃 V 配合品)

(3) - 3 - 4 - 3 コスト試算及び引張試験の評価結果（難燃 R、非難燃 V 配合品）

評価結果を表 19 に示す。

非難燃バージン品を複合する事で、コスト低減することが可能であり、また力学的物性も規格値以上の数値の達成が可能と分かった。非難燃バージン品を複合することで難燃性の低下が懸念されるため、今後評価を実施する。

表 19 コスト試算及び引張試験の評価結果（難燃 R、非難燃 V 配合品）

	(ア) 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 1 (1%CNT 含有)	(イ) 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 2 (1%CNT 含有)	(ウ) 難燃 R : 非難燃 V = 1 : 2 (2%CNT 含有)	(エ) 難燃 R : 非難燃 V = 2 : 1 (1%CNT 含有)	(オ) 難燃 R : 非難燃 V = 2 : 1 (2%CNT 含有)
コスト	396 円/kg	364 円/kg	464 円/kg	430 円/kg	530 円/kg
最大点応力	11.7138MPa	11.396MPa	11.1089MPa	11.5245MPa	10.6738MPa
ひずみ率	357.640%	363.421%	349.917%	380.899%	341.514%

(4) LCA の検証・評価

(4)－1 本年度の試算内容

当初の LCA 試算と比較するために、以下の 2 つの条件で試算を行った。

(4)－1－1 CSCNT 濃度増加の場合

CSCNT の配合検討から、CSCNT 濃度は 1～2% で最適点があると推測される。

申請時の試算では、CSCNT 濃度 1% としていたため、2% 添加時の CO₂ 削減量を試算した。

(4)－1－2 サイクルのコンパクト化した場合

申請時の試算では、流通・輸送を再生業者（滋賀県）→G S I クレオス（神奈川県）→成型業者（滋賀県）としていた。

クレオスでの加工を再生業者（滋賀県）で実施することで、サイクルのコンパクト化により、CO₂ 削減量の向上を狙う。

(4) - 2 試算結果の比較

(4) - 2 - 1 樹脂 6t を用いて製品生産後、2 回再利用し処分までを行う場合の CO2 排出量の計算 (CNT 濃度 1%)

No	担当企業	工程	エネルギー内容	フォアグラウンドデータ			バックグラウンドデータ			CO2排出量	単位
				量	単位		原単位	単位			
1	樹脂メーカー	LDPE使用	LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120	kg-CO2
2		運搬	走行距離	170	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	137	kg-CO2
3	大東電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
4		運搬	水	0.12	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	0	kg-CO2
5		取付	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
6	ユーザー	回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
7		運搬	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
8		運搬	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
9	近江物産	粉砕・洗浄	電力	313.45	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	136	kg-CO2
10		運搬	水	15	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	4	kg-CO2
11		運搬	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
12	クレオス	CNT混練・ペレット作製	電力	2779.59	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	1,209	kg-CO2
13		CNT合成	水	25	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	6	kg-CO2
14	クレオス	CNT合成		60	kg		10.449	kg-CO2/kg	=	627	kg-CO2
15		運搬	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
16	大東電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
17		運搬	水	0.12	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	0	kg-CO2
18		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
19	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
20		回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
21		運搬	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
22	近江物産	粉砕・洗浄	電力	313.45	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	136	kg-CO2
23		運搬	水	15	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	4	kg-CO2
24		運搬	走行距離	50	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	40	kg-CO2
25	大東電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
26		運搬	水	0.12	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	0	kg-CO2
27		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
28	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
29		回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
30		運搬	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
31	処分業者	処分	焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2
合計										55,293	kg-CO2

上記集計			LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120	kg-CO2
			CNT合成	60	kg		10.449	kg-CO2/kg	=	627	kg-CO2
			電力	63406.49	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	27,582	kg-CO2
			水	55	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	13	kg-CO2
			運搬	3,300	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	2,651	kg-CO2
			焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2
合計										55,293	kg-CO2

図 87 樹脂 6t を用いて製品生産後、2 回再利用し処分までを行う場合の CO2 排出量 (CNT1%) 当初試算

(4) - 2 - 2 樹脂 6t を用いて製品生産後、2 回再利用し処分までを行う場合の CO2 排出量の計算 (CNT 濃度 2%)

No	担当企業	工程	エネルギー内容	フォアグラウンドデータ			バックグラウンドデータ			CO2排出量	単位
				量	単位		原単位	単位			
1	樹脂メーカー	LDPE使用	LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120	kg-CO2
2		運搬	走行距離	170	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	137	kg-CO2
3	大車電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
			水	0.12	m3	×	0.235	kg-CO2/m3	=	0	kg-CO2
4		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
5	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
6		回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
7		運搬	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
8	近江物産	粉碎・洗浄	電力	313.45	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	136	kg-CO2
			水	15	m3	×	0.235	kg-CO2/m3	=	4	kg-CO2
9		運搬	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
10	クレオス	CNT混練・ペレット作製	電力	2779.59	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	1,209	kg-CO2
			水	25	m3	×	0.235	kg-CO2/m3	=	6	kg-CO2
11	クレオス	CNT合成		120	kg		10.449	kg-CO2/kg		1,254	kg-CO2
12		運搬	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
13	大車電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
			水	0.12	m3	×	0.235	kg-CO2/m3	=	0	kg-CO2
14		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
15	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
16		回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
17		運搬	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
18	近江物産	粉碎・洗浄	電力	313.45	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	136	kg-CO2
			水	15	m3	×	0.235	kg-CO2/m3	=	4	kg-CO2
19		運搬	走行距離	50	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	40	kg-CO2
20	大車電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
			水	0.12	m3	×	0.235	kg-CO2/m3	=	0	kg-CO2
21		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
22	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
23		回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
24		運搬	-	算出不可	-	×	2.320	kg-CO2/L	=		kg-CO2
25	処分業者	処分	焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2
										合計	55,920 kg-CO2
上記集計			LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120	kg-CO2
			CNT合成	120	kg		10.449	kg-CO2/kg		1,254	kg-CO2
			電力	63406.49	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	27,582	kg-CO2
			水	55	m3	×	0.235	kg-CO2/m3	=	13	kg-CO2
			運搬	3,300	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	2,651	kg-CO2
			焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2
										合計	55,920 kg-CO2

図 88 樹脂 6t を用いて製品生産後、2 回再利用し処分までを行う場合の CO2 排出量 (CNT2%)

(4) - 2 - 3 樹脂 6t を用いて製品生産後、2 回再利用し処分までを行う場合の CO2 排出量の計算
(CNT 濃度 1%、サイクルコンパクト化の場合)

No	担当企業	工程	エネルギー内容	フォアグラウンドデータ			バックグラウンドデータ			CO2排出量	単位
				量	単位		原単位	単位			
1	樹脂メーカー	LDPE使用	LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120	kg-CO2
2		運搬	走行距離	170	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	137	kg-CO2
3	大東電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
4		運搬	水	0.12	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	0	kg-CO2
5		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
6	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×	-	-	=	-	kg-CO2
7		回収	-	算出不可	-	×	-	-	=	-	kg-CO2
8		運搬	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
9	近江物産	粉碎・洗浄	電力	313.45	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	136	kg-CO2
10		運搬	水	15	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	4	kg-CO2
11		運搬	走行距離	0	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	0	kg-CO2
12	近江物産	CNT浸漬・ペレット作製	電力	2779.59	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	1,209	kg-CO2
13		運搬	水	25	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	6	kg-CO2
14	クレオス	CNT合成		60	kg	×	10.449	kg-CO2/kg	=	627	kg-CO2
15		運搬	走行距離	50	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	40	kg-CO2
16	大東電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
17		運搬	水	0.12	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	0	kg-CO2
18		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
19	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×	-	-	=	-	kg-CO2
20		回収	-	算出不可	-	×	-	-	=	-	kg-CO2
21		運搬	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
22	近江物産	粉碎・洗浄	電力	313.45	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	136	kg-CO2
23		運搬	水	15	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	4	kg-CO2
24		運搬	走行距離	50	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	40	kg-CO2
25	大東電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
26		運搬	水	0.12	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	0	kg-CO2
27		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
28	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×	-	-	=	-	kg-CO2
29		回収	-	算出不可	-	×	-	-	=	-	kg-CO2
30		運搬	-	算出不可	-	×	2,320	kg-CO2/L	=	-	kg-CO2
31	処分業者	処分	焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2
										合計	54,626 kg-CO2
上記集計				LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120 kg-CO2
				CNT 合成	60	kg	×	10.449	kg-CO2/kg	=	627 kg-CO2
				電力	63406.49	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	27,582 kg-CO2
				水	55	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	13 kg-CO2
				運搬	2,470	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	1,984 kg-CO2
				焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300 kg-CO2
										合計	54,626 kg-CO2

図 89 樹脂 6t を用いて製品生産後、2 回再利用し処分までを行う場合の CO2 排出量 (CNT1%、サイクルコンパクト化の場合)

(4)－3 試算結果のまとめ

CSCNT 添加量、サイクルのコンパクト化による CO2 削減量は、当初試算した CO2 削減量と同等となった（表 20）。

今後、以下の検討を実施する。

- ・樹脂配合の最適化による CO2 削減量の向上
- ・加工拠点移動の実現可能性を調査・検討

表 20 令和 6 年度 LCA の追加計算結果

試算内容	①対象製品の CO2 排出量	②ベースライン	③削減量 (② - ①)
18t・1%CNT 含 難燃 LDPE (当初試算)	55,293	100,734	45,441
18t・2%CNT 含 難燃 LDPE	55,920	100,734	44,814 (約 1.5%減)
18t・1%CNT 含 難燃 LDPE (拠点：再生業者)	54,626	100,734	46,107 (約 1.5%増)

（５）「再生プラスチックの機能を回復させる手法の研究開発とその循環モデルの検証」の現地視察会及び検討会の開催

（５）－１ 令和６年９月６日：令和６年度現地視察会及び検討会

本事業の全体概要の説明、これまでの取り組み状況、成果報告、開発現場の見学、本事業後の構想等を説明し、討論を行った。

（５）－２ 当日の質問とその場での申請者回答

Q1 CNTの分散が良好と記載あったが、何か技術的なノウハウがあるか。

【申請者回答】

添加剤等のケミカルは入れていない。当社でCNTの凝集を緩めて分散する手法を開発した。

樹脂中へのCNTの分散は母材樹脂の粘度が効いてくる。母材樹脂の粘度が高い場合は、CNTの分散は可能。

Q2 プラスチック成型品の表面にCNTを入れるか。それとも全体にCNTを入れるのか。

【申請者回答】

全体に３次元で入れる。

Q3 10年劣化加速試験（SWOM）に関して、10年とSWOM4000時間の関係は何か。

【申請者回答】

SWOM2,000時間が10年相当、4,000時間は20年相当。

現評価では、SWOM4,000時間はないが、更に劣化が進展することを評価するため、SWOM4,000時間を実施した。大東電材は標準の評価スペックをSWOM2000時間としている。

Q4 加速試験の際に、クラックの発生のみを確認するか。

【申請者回答】

クラックの発生状況、機械的物性を確認する。

Q5 10年の加速試験を実施したものにCNTを添加して再生し、バージンと比べてどの程度の物性となるかを確認するということか。

【申請者回答】

樹脂の劣化は分子切断により進行する。それにより物性が低下する。

Q6 リファレンスとなる再生LDPEは、SWOM試験を実施したものか、それとも市場から回収したものか。

【申請者回答】

市場から回収したもの。

Q7 実際に市場で使用される期間は何年か。

【申請者回答】

通常は10年。劣化有無に限らず、10年で取り替える。

Q8 本技術は自動車のバンパーの再生に使用できないか。

【申請者回答】

CNT を 0°方向に配向すれば、異素材間のひずみや熱による収縮率の違いを低減する事ができる可能性はある。これは異素材間での破断低減につながる。

バンパーはすでにリサイクルのサイクルが出来上がっているため、CNT 添加で物性向上させたとしても、参入する価値がないと考えている。

Q9 再来年度はどう考えているか。

【申請者回答】

本研究内容を量産にスケールアップする事を考えている。その際は設備導入等が必要になる。補助事業等について、具体的に環境省殿に相談する予定。

Q10 顕微鏡によるナノ構造の観察では、写真の撮り方は決まっているか。

【申請者回答】

左隅・右隅・上下・中央などをランダムで観察し、総合的な結果を報告する。

(6) 評価審査委員会の出席

令和 6 年度、以下の評価審査委員会にて成果の報告、及び本事業の遂行に向けた審査委員から意見をいただいた。

(6) - 1 令和 6 年 10 月 7 日：中間報告会

(6) - 1 - 1 当日の質問とその場での申請者回答

Q1 次のステージの実証（実装？）はどう考えているか。

【申請者回答】

9 大電力会社への提案を考えている。電力会社は使用する電材の形状がそれぞれ異なっており、実計上での評価を実施する必要がある。

電力会社と一緒に実証試験を進めるにあたり、2025 年前半に環境省殿へ 2026 年度以降の次のフェーズの進め方を相談させていただく事を考えている。

Q2 劣化はどれくらい進展しているのか。また回復のため CNT をどれくらい添加するのか。難燃性の再現性の担保はどうしているのか。

【申請者回答】

予備試験のダンベルで CNT 量や長さを決める。今まで得られた結果から、CSCNT 添加量 1%以下で期待物性を達成でき得ると考えている。製品形状によって CSCNT の長さや方向、混練状態等で物性は変わるため、最適点を検討する。

Q3 すでにデータは出てるのか？

【申請者回答】

ゲート位置やゲートの本数等で CNT の配向が変わることは経験的に分かっているので、実形状での物性は実形状次第である。金型でのゲート位置を変更するなど、微調整が必要かもしれない。その検討は大東電材と一緒に進めることが可能。

Q4 難燃性の再現性は？

【申請者回答】

CNT 自体燃えにくい材料である。また、バルク体では樹脂の燃焼時に発生する可燃性ガスが内部にフィードバックすることで燃焼が促進されるが、CNT が障害となり、可燃性ガスの進行距離を稼ぎ、可燃進行を遅らせる効果は先行研究で確認されている。CNT 添加量 1%でも分散さえよければ難燃性の発現が期待できる。またその際、CNT の分散状態は重要だが、特に CNT を長いまま高分散させることで、より良い効果が期待できる。

Q5 コストについて、実証はいつを予定しているか？価格目標は？

【申請者回答】

LDPE はそれほど高価な樹脂ではない。しかし難燃剤を添加した難燃グレードがとても高い、ということは、難燃剤および難燃剤+ α を配合するコンパウンダーのコスト、値付け高く、言いづらいが高利益を上げていると理解している。

従ってコスト低減の実現は、使用する難燃剤をどれだけ減らせるか次第である。

Q6 2回再生とあるが、2回目以降の CNT 添加量はどう考えているのか？

【申請者回答】

今はまだ2回再生を行ってないので、正直なところわからない。

劣化の状態は、分子量、分子鎖の長さによる。樹脂の劣化は活性酸素によって分子が分解されることで進行する。

分解により短くなった分子鎖を支えるため、一定量の CNT 添加、初回より多くの量が必要となる可能性はある。

Q7 電力会社によって電材に使用する材料が違うのか？形状が違うのか？

【申請者回答】

材料配合は同じで基本的な物性が得られる筈だが、最終形状が異なることによって、発現物性が変わってくると予想している。大東電材の情報では、9大電力ごとに電材の形状が異なるので、形状ごとに最適配合、ゲート位置の変更などが必要になってくるかもしれない。

(6) - 1 - 2 後日頂戴した委員コメントに対する申請者対応方針

委員コメント	対応方針
CNT（カーボンナノチューブ）の形状、サイズの幅を広げた分散性テストの方法について検討すること。	CSCNT の外径は一定であり、線長の調整、凝集物のほぐし、結晶化度の調整が可能である。 それぞれの CSCNT 材料で、樹脂中に混練した際の分散状態を確認する。
CNT を入れることで特定の製品（形状）にだけ対応できる技術なのか、他製品まで展開可能かを明確にすること。	本研究により物性向上が確認できれば、適切な用途での展開を検討する。
電力会社が導入しやすいポイントや他製品への優位性を整理すること。	申請時点から本件は電力会社からの要望を受けて発案した。 本事業 2 年目までのデータを整理して電力会社に現状報告し、先方の意向を再確認する。
CNT の分散による課題を製品形状からバックキャストできないか検討すること。	CNT の分散の課題はすでに達成している。 ゲートの位置で配向を活用可能である。 CNT の長さによって、形状の末端にまで CNT を分散させることが可能。

(6)－2 令和6年2月7日：期末審査委員会

(6)－2－1 当日の質問とその場での申請者回答

Q1 将来的な量産時、CNTの分散について問題ないか。

【申請者回答】

量産時に使用する二軸押出機で処理したサンプルのCNT分散状態は、今後確認する予定。

仰る通り、現状の当社評価ではラボスケールの分散状態の観察であり、ベンチスケール、量産時と段階毎に分散状態を確認する必要がある。

Q2 ユーザーである電力会社と早く面談した方がよい。評価方法や必要な条件について擦り合わせする必要あり。

【申請者回答】

来期の上旬～中旬には、各種評価結果が揃っている予定であり、そのデータをFSとして、電力会社に説明、興味を確認する。

Q3 その際、難燃評価について、簡易版の評価方法で良いのか。

【申請者回答】

簡易版評価は、試作条件検討の段階で、配合比の最適点をある程度決めるための評価として考えている。

簡易評価で、ある程度の配合比が決まった段階で、大東電材等で規格に則った評価を実施する予定。

Q4 非難燃再生品は物性が低い、一方でコストは安い。この材料を添加する事で、物性低下となり、コストも物性も達成できない、いわゆる共倒れとなる可能性もある。その見極めをしっかりとやる必要があるが、どのように考えているか？

【申請者回答】

仰る通り、どこかで判断する必要がある。

物性低下が顕著な再生品にCNTを添加する事で、物性向上となるため、コストと性能を見極める。

Q5 最適配合が複雑となる場合、次の再生・リサイクルの時に障壁となるだろう。そこを考えて第3物質等を添加した方がよい。

【申請者回答】

その通り。承知した。

難燃性品には難燃剤となにかしらのひずみが良くなる添加剤が履いている可能性あり。

我々の技術でそれがなくてもひずみが改善できると期待

Q6 1回再生、2回再生と徐々に配合比を変えていくのか？将来的に再生回数が増えた先の事を考えた方がよい。

【申請者回答】

現状は水平サイクルを想定しているので、配合比は決めて行うと考えている。

しかし 15 年以上使用や他の添加剤等が介入してしまうと、試作検討からしなくてはと想定している。

Q7 コストはこれでいいのか。（コストインパクトはあるのか）

【申請者回答】

ある。大東電材からそのように確信持っている。

（６）－２－２ 後日頂戴した委員コメントに対する申請者対応方針

委員コメント	対応方針
品質基準が電力会社間で統一されていないことから、電力会社へ必要な仕様や試験方法のヒアリングを早急に実施し、社会実装の確度を高めること	次年度に掛けて、電材メーカーである連携機関である大東電材株式会社と共に電力会社の情報をヒアリングする。
再生可能なものと再生が困難なものを線引きしたうえで実証を進めること	今後検討を進め、大幅な物性低下がみられるものについては、検討の継続を断念し、可能性のより高い配合に集中して検討を行う。
開発品が電材メーカーに選択されないとい一切使用先がない、といったことがないよう用途開発を引き続き検討すること	申請時点から本件は電力会社からの要望を受けて発案した。 本事業 2 年目までのデータを整理して電力会社に現状報告し、先方の意向を再確認する。 また、本技術は、他の用途、また他の樹脂での展開も可能と考えられるため、電材以外での実証・実装を見据えた情報収集及び、検討を実施する事とする。

(7) 報告書の作成

契約日 4 月 1 日より、下記の報告書の作成、及び提出を実施した。

(ア) 4 月、5 月、6 月、7 月、8 月、9 月、10 月、11 月、12 月、1 月、2 月、
3 月 合計 12 回の月次報告

(イ) 9 月：現地視察会用の報告資料

(ウ) 10 月：中間報告会用の報告資料

(エ) 1 月：期末審査委員会用の報告資料

(オ) 3 月：成果報告書

(8) 実証事業の目標設定

本実証業の目標は、以下の通りであり、変更はない。

但し、令和 7 年度については、より実装を見据えた検討を行うこととする。

本実証事業の目標

	項 目	採択時の技術の状況	本年度の目標	最終目標
0	全体目標	1. 市場の現状 ①難燃性再生LDPEは物性劣化が激しく、再生品100%の製品使用実績は無い。 ②再生品の効果的な物性回復方法は無い。バージン品を充填することで物性を回復させる試みがある。 ③難燃性LDPEは再生品も高コストであり使用動機の妨げとなっている。 2. 当社状況 ①PCR（市場使用済）PP（ポリプロピレン）にCSCNTを微量充填し、バージン以上の物性回復を確認済み。 ②難燃性LDPEに対する事前評価（FS）実績は無い。	1. リファレンスの設定 難燃性バージンLDPEおよび難燃性再生LDPEの各力学的物性、機能性を評価し、再生品の物性状態を明らかにすること。 それを指標として、最終目標到達への道程、パラメータを検討すること。 2. 難燃性再生LDPEの物性回復 再生品の諸物性はバージン比、50%以下に低下していることが先行研究により予想されており、これをバージン比50～60%への回復を目指す。	1. 難燃性再生LDPEの諸物性（力学的、機能性）の回復を達成すること。 全体としてバージン樹脂比80%回復を目標とする。 力学的目標 （ア）引張強度8MPa以上、伸び280%以上 （イ）90℃×96時間加熱後、それぞれ6MPa以上、160%以上 2. 同再生樹脂の再生回数を増大させること。 目標：複数回再生後に上記（ア）（イ）を達成すること。 3. 同再生樹脂コストを削減すること 現行品（再生品50%バージン50%）を¥600/kgとした時、¥500/kg、¥400/kgへの大幅なコスト削減を目標とする。

1	物性回復に関する技術開発 ①力学的特性の回復 ②機能性の回復	同上	下記（i）、（ii）、（iii）をパラメータとして左記①②の物性回復を試みる。 （i）CSCNT長さ：標準材、ほぐし品（やや短い）、短化品 （ii）CSCNT充填率：0.1%、0.5%、1%、3%など （iii）CSCNT表面改質：高分子架橋、酸素含官能基付加 これらのパラメトリック検討により物性回復の状況を評価する。	同上
2	再生回数の増加	同上	上記で実施する物性回復の状況により、再生回数増大の可能性を検討する。	上記で実施する物性回復の状況により、再生回数増大の可能性を検討する。
3	コスト削減の検討	同上	上記で実施する物性回復の状況により、物性回復を達成する配合、製作にかかるコスト試算を実施する。	上記で実施する物性回復の状況により、物性回復を達成する配合、製作にかかるコスト試算を実施する。
4	LCAの検証・評価	CO ₂ 削減効果について、机上の計算で構わないので、1年目の時点でリサイクルした場合の物性劣化度等を踏まえ、1～2回リサイクルした場合の削減効果を精査すること。	上記で実施する物性回復の状況により、物性回復を達成する配合、製作にかかるCO ₂ 削減効果を精査する。	上記で実施する物性回復の状況により、物性回復を達成する配合、製作にかかるCO ₂ 削減効果を精査する。 第2項記載の再生回数増大によるCO ₂ 削減量の拡大を目標とする。

（９）関係者間の連携

本業務の関係者間で下記の協力・連携を実施した。

①現状把握

各社にて実施の以下作業について、連絡を密にとり状況を定期的に確認した。

- ・大東電材：製品形状サンプルの成形、SWOM 試験、成形品での評価状況
- ・近江物産：再生処理

②実施計画等に関する達成状況の調査

上記（１）同様

③LCA 評価（CO2 削減効果の検証・評価等）

大東電材、近江物産から情報開示

④共通的な事業課題の抽出・整理

１度の対面面談実施し、課題の抽出・整理を実施した。

⑤広報資料の作成・展示会への出展

（ア）環境省 紹介資料での掲載（図 90、91）



図 90 環境省 紹介資料表紙



再生プラスチックの機能を回復させる手法の研究開発とその循環モデルの検証

期間：令和5～7年度

本事業は電材用機能性LDPEの再生品の使用比率の増大、再生回数の増大、コスト削減を実現 することで資源循環社会に貢献します。

代表 株式会社GSIクレオス

事業概要

背景・目的

社会の基礎インフラである電力・通信・鉄道・ガスなどは、国内に広く送電網が築かれていますが、これら送電網に用いられる電気設備資材(以降、電材)は、長期間にわたる高い力学的性能と共に、難燃性・絶縁性・耐電圧性などの機能性においても極めて要求性能水準の高い製品です。一方、その要求性能の高さゆえに、これまで再生品の使用は制限されてきました。特に電材用に各種機能を高めた樹脂は、回収後の再生品における力学的性能と機能性の低下が著しく、再生品使用を妨げる主要因となっており、本再生樹脂の力学的・機能性の回復は、予てユーザー側より強く求められているところです。そこで本事業では、社会重要インフラ向け電材に最も使用される特殊低密度ポリエチレン(以降LDPE)の再生品の使用比率の増大、再生回数の増大、コスト削減を目標とします。

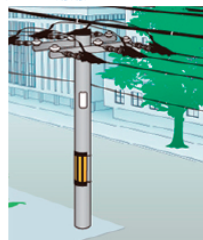
実施概要

- 1.再生LDPEの力学的物性の回復
カップ積層型カーボンナノチューブ(以降CSCNT)添加により力学的物性を回復させます
- 2.再生LDPEの機能性の回復
難燃性、絶縁性、耐UV特性、高電圧性など機能性を、CSCNTを添加して回復させます
- 3.再生回数の増加
CSCNT充填により再生回数によらず力学的物性、機能性を所定水準まで回復させます
- 4.コスト削減
①再生LDPE使用100%を達成し再生品のコストを約20%低下させます
②安価な汎用LDPEにCSCNTを微量添加し力学的物性、機能性を高めた上で、高価な再生特殊LDPEに充填することで再生LDPEの総コストを約35%低下させます

リサイクルされるプラスチック

低密度ポリエチレン(難燃性、非難燃性を含む)

導入製品の利用用途



絶縁防護電材

リサイクル対象物:LDPE製「電気設備資材」(電材)

本対象物は、重要社会インフラである電線の絶縁力パーなどに用いられる部材で、特に難燃性など各種機能を高めた機能性樹脂材料として極めて広範囲に使用されています。

リサイクル後の素材用途:電材用途

本用途は、再生品にも各種樹脂添加剤が高濃度で含まれる高価な素材であり、同じ特殊電材向けに「水平リサイクル」します。

実証フロー



4つの目標

実証計画

- ①配合検討・経路の改良開発を実施
- ②バージン機能性LDPEから製品形状成形、加速疲労試験実施
- ③再生機能性LDPEから製品形状成形、加速疲労試験実施

本事業終了後、2026-28年度に連携する電材製造社の顧客である電力、通信、鉄道などユーザーと共同で国内での実証試験実施を計画します。実証試験後、2029年を目標に当該品の社会実装開始を計画します。

期待される事業の成果

普及目標

	国内	海外
リサイクル対象物の流通量	電材用機能性LDPE製造量 約18,000トン 《算出根拠》国内の電材向けLDPE 製品年間製造量および当該市場シェ アから試算	電材用LDPE製造量 約710,000トン(推定) 《算出根拠》世界LDPE製造量 52,966千トンに国内LDPE比率 1.34%をかけて試算

波及効果

本事業は、当初から出口戦略を明確にして構想しています。すなわち社会インフラに用いられるが故に要求性能の高い、機能性樹脂製電材の再生を試みると共に、同じ電材用途での再生品使用とその使用拡大を目標としており、出口と循環領域を明確にした事業計画となっています。機能性樹脂の再生は、力学的特性の回復だけでなく、様々な機能性の回復が必要であり、極めて難度の高い技術開発が必要とされています。再生LDPEの物性回復に成功すれば、電材製造社、電材のユーザーである電力、通信、鉄道、ガスなど日本を代表するインフラ企業で大規模な実証実験を行う計画です。当社提携先の電材製造社ではこれら国内の主要インフラ企業ほぼすべてを顧客として電材製品を納入しており、実証実験の際には既存の広範囲な取引関係を活用することが可能です。最終的に2030年代前半には電材向けLDPE製品18,000トン全量について、再生100%への置き換えを目標としています。

CO₂削減効果

廃プラスチックを再生せずに焼却した場合(現行)をベースラインとして、本開発品を2度利用した場合のCO₂削減量は下記の通りです。

・1kg-LDPE:2.52kg-CO₂

図 91 環境省紹介資料内容

- ⑥展示会への出展 ※東京都区内
 会期：2025年1月29日～1月31日
 会場：東京ビッグサイト 東棟
 展示会名：nanotech2025
 展示内容：パネル展示、資料配布（図92）

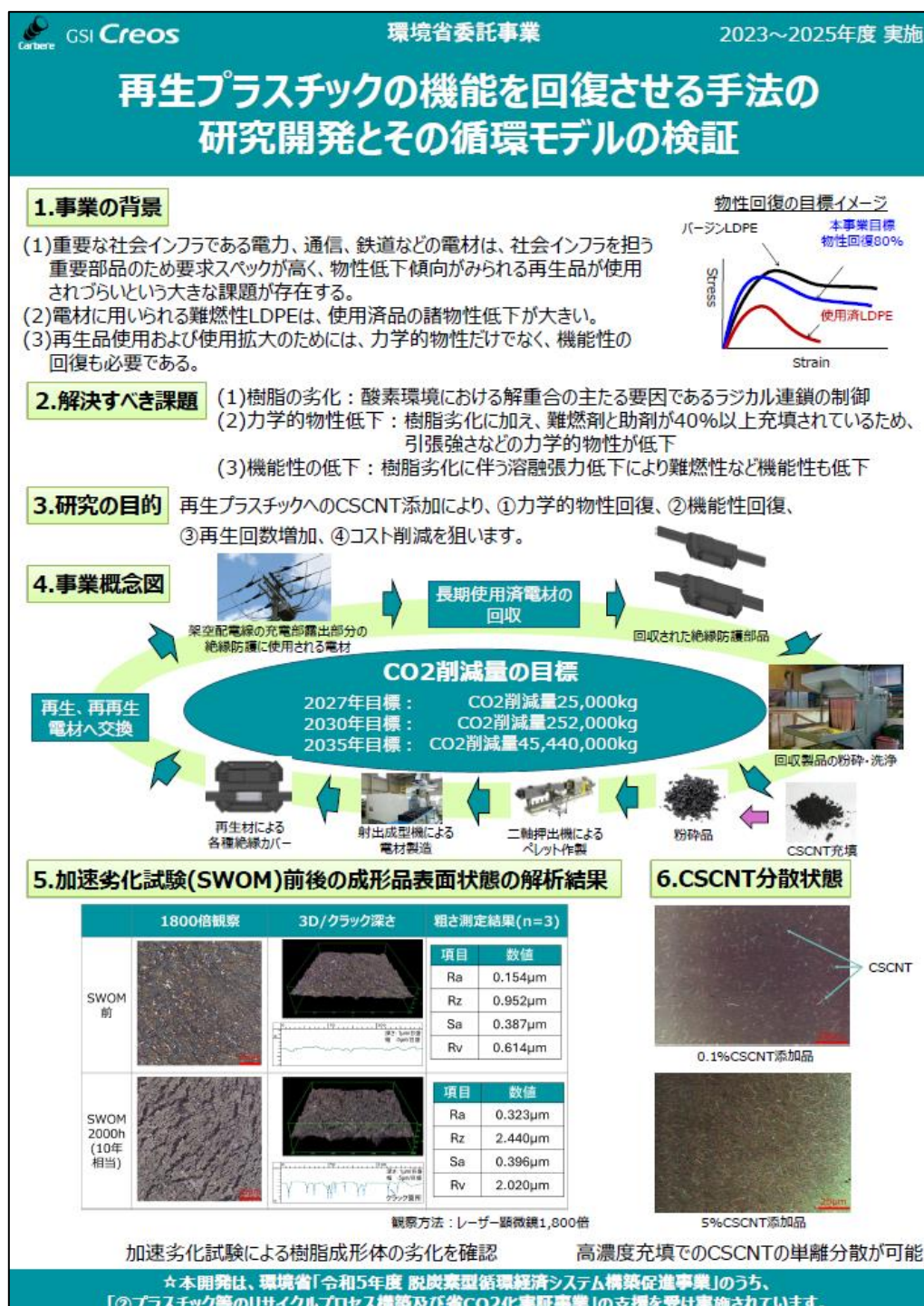


図92 展示会パネル、及び配布資料



図 93 展示会出展風景 1



図 94 展示会出展風景 2

⑦そのほか、環境省担当官が協力・連携を要請する業務なし。

5. 申請者の要素技術

(1) CSCNT の概要

CNTは当社製造のカップ積層型カーボンナノチューブ（Cup Stacked Carbon Nanotubes、以降CSCNT）のデータを下記に示す。

(i) 組成、成分

- 成分及び含有量：Carbon98%以上

(ii) 寸法

- 外径：中央値≒約80nm、分布範囲40～120nm
- 内径：中央値≒約50nm、分布範囲30～70nm
- 長さ：中央値≒約5μm、分布範囲1～数十μm

(iii) 構造と特徴

ナノ炭素の代表的な材料であるカーボンナノチューブ（CNT）の中で一般的に知られている通常の多層カーボンナノチューブ（MWCNT）の形状は、炭素網が同心円状に積層した円筒構造をしている（図95）。

これは炭素結晶が多層に丸められた円筒構造で、黒鉛結晶と同様に、炭素網面内の炭素原子の結合は非常に強固である。そのため、繊維自体の弾性率が極めて高く、容易に破断しない。

また繊維表面は基底面で、他のマトリックス材料との親和性が低いため、溶媒内に容易に分散しない。

外部応力が付加された時には、炭素網は破断しないが、炭素層間はファンデルワールス力（VWF）の結合であるため、炭素網円筒が引き抜ける「テレスコープ現象」が観察されている。

本研究者であるG S Iクレオスは、信州大学遠藤守信教授（現、特別荣誉教授）との共同研究により、気相成長法で合成されたCNTがカップ積層型、すなわち炭素網（グラフェン）層が底の抜けたカップ形状をなし、その炭素網カップが積層した繊維構造、という特異な形状である事を世界で初めて突き止めた（図96、97、98）。

図97 透過電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope：以降TEM）、図98 模式図に示す通り、炭素網層間は黒鉛結晶と同様にVWFで結合し、全体として繊維状を形成している（図96）。

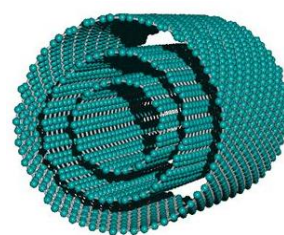


図 95. MWCNT 模式図

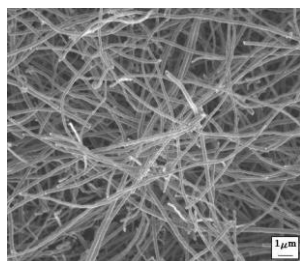


図 96 CSCNT 外観



図 97 CSCNT
HR-TEM 像

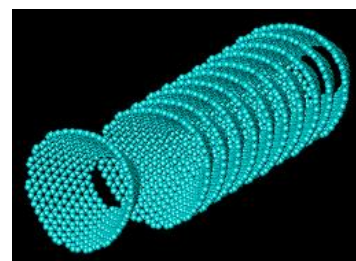


図 98 CSCNT 模式図

この構造では、繊維内外表面に炭素網端が露出する為、繊維表面のエネルギー準位が高く、他のマトリックス材料との親和性が良好であり、樹脂、液体を問わず、分散性に極めて優れていることも見出している。

この新奇炭素結晶構造の CSCNT は、外部応力に対し特徴的な挙動を示す。

その挙動の TEM 観察像とその動きに対応するシミュレーションを図 99 (a) (b) (c) (d) に示す。

通常の MWCNT では、このような圧縮応力に対し座屈を起こし破壊されるが、CSCNT の場合はカップ状炭素網がベローズ（蛇腹）状に積層しており、外部からの圧縮応力に対し変形しながらエネルギーを吸収している様子が観察されている。

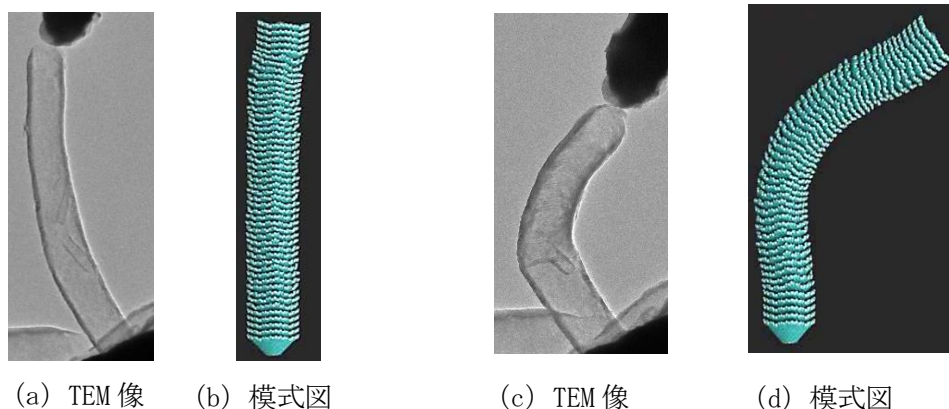


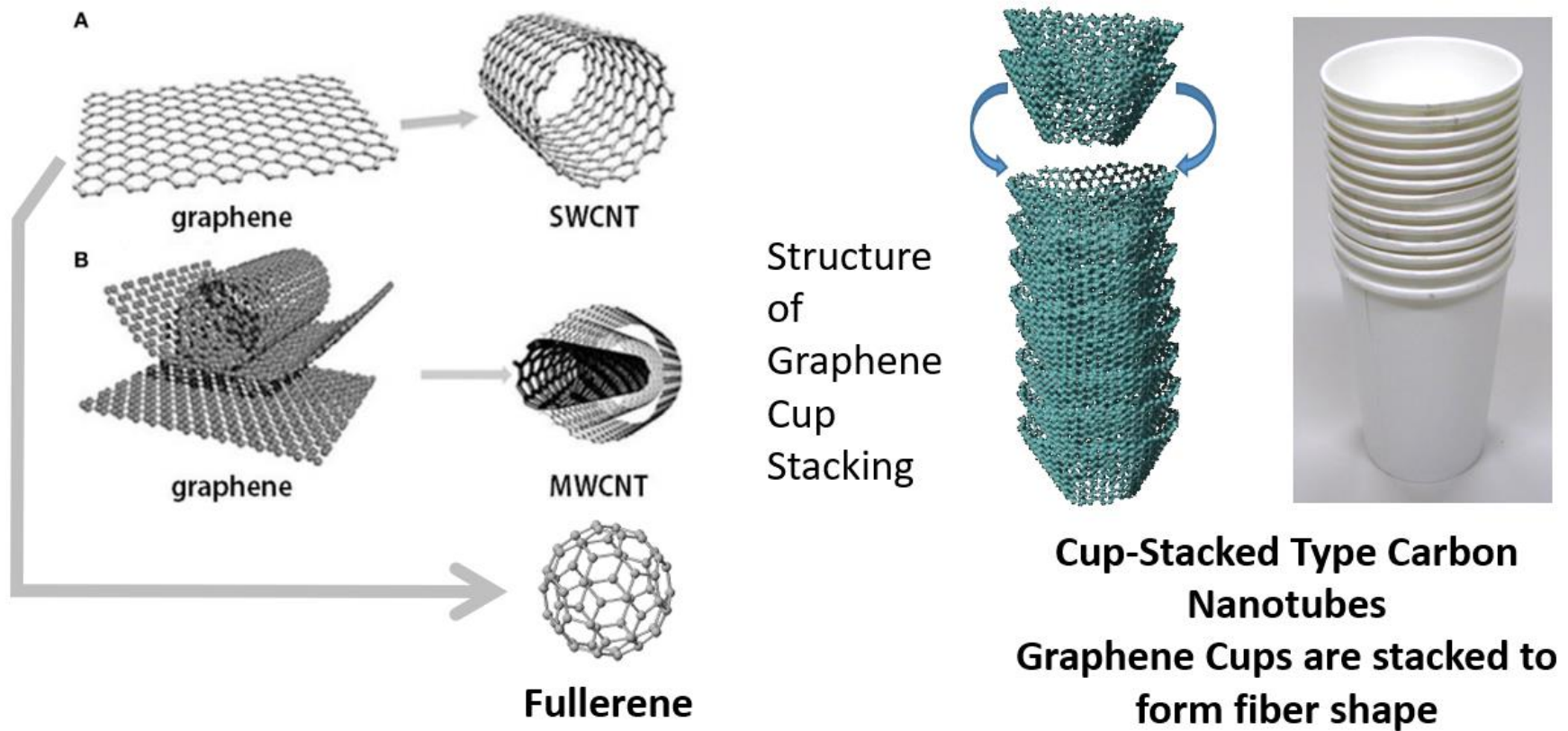
図 99 (a) (b) CSCNT に力が掛かる前
 (c) (d) 曲げに対してバネ様変形を示す

外部エネルギーに対するこうした挙動は、他の炭素結晶や MWCNT では見られない極めて特異的な現象である。

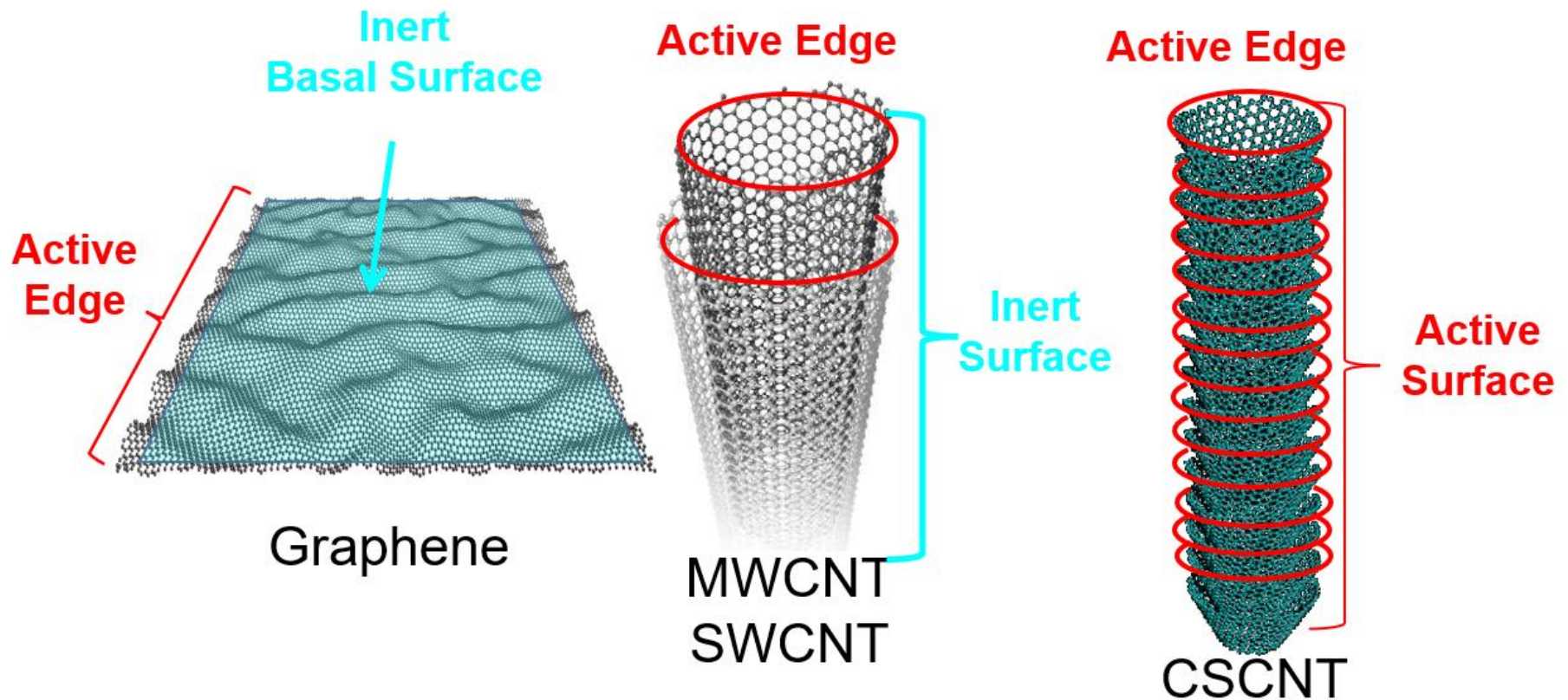
研究実施者は、この CSCNT を用いて数多くの製品化、社会実装に成功しているが、例えばスピーカー振動板では、CNT 充填により複合体としての弾性率を向上させることで音速を上げながら、同時に高い減衰を示し、スピーカーとして理想的な物性値を得ている。

この現象は、CSCNT の結晶構造が関係しているものと推測されている。

1. Carbon Diversity CNT(CSCNT, SWCNT, MWCNT), Graphene, Fullerene



2. Difference of Surface Activity



Only active area is interactive with matrix material such as polymers, while inert area is low reactive with matrix materials.

(2) 樹脂複合材での CSCNT の挙動

市場から強く要求される複合材料の高性能化機能の中に「より高い靱性」がある。複合材料工学では、この高靱性化を実現するために必要なメカニズムの一つに「クラックディフレクション」を挙げている。

ここでは、強化相（フィラー）が CNT のように十分な強度を有し、母材との界面が形成されている場合、寸法とは無関係に、フィラー形状、体積含有率に依存すること、またアスペクト比 (L/D =長さ/直径) が大きい CNT のような繊維状物質ほど、高靱性化効果が大きい事が示されている。

図 100 は、CSCNT を分散した複合体（黒枠）の模式図である。

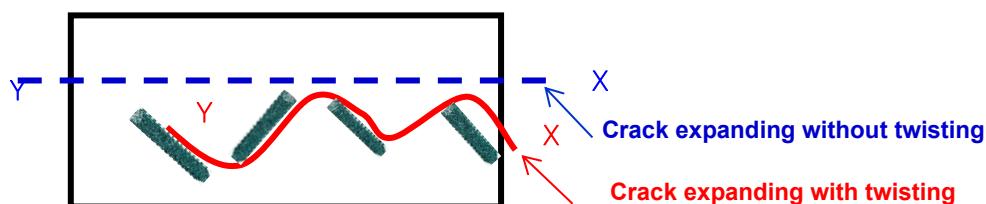


図 100 クラックディフレクション模式図

右側の X 点から Y 点に向かって力が与えられた時、CSCNT が存在しない場合を青点線、存在した場合を赤線で示す。青点線と赤線は同じ長さ、すなわち同じ「力」を示す。

青点線では、CSCNT が存在しないために、X 点から Y 点に向かって直線状にエネルギーが伝わり、複合体内部から外部にかけてエネルギー解放される。複合体に生じるクラックや破断は、このエネルギー解放が発現した状態である。

一方、CSCNT が存在する場合は、X' 点に与えられた同じ量のエネルギーは、複合体内部に存在する CSCNT が障害となり、CSCNT に沿ってエネルギーは伝播していく。この伝播については、フィラーに沿って蛇行することから **Twisting** と呼ばれ、複合体の外側で解放される Y 点に達する前の Y' 点でエネルギーは解消される。

一般的には、このエネルギーは低品位の熱に転化し系内で解消されていると理解されている。

また複合材では、フィラーによるブリッジング効果も知られている。図 101 はブリッジングの模式図である。

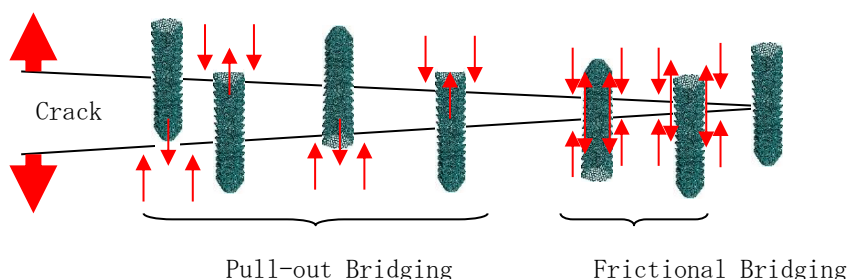


図 101 ブリッジング模式図

左側にあるクラックをもたらし上方向、下方向へのエネルギーに対し、複合体内部に存在するフィラーがブリッジとなり、引張 (pull-out) に対する抗力となる pull-out bridging と、CSCNT と母材の界面の抵抗による frictional bridging が知られて

いる。

ここに述べたクラックディフレクションとブリッジング現象は、フィラーと母材樹脂の界面が一定以上の力で形成され、相互作用が起こることにより得られることが知られている。

(3) 高分子架橋技術

申請者は独自の結晶構造CSCNTを充填した複合体の力学的物性、機能性を向上させることで様々な製品化に成功してきた（別添資料参照）。最近、反応性高分子をCSCNT表面に工業的手法で架橋させる方法を開発した（図102）。

この高分子架橋CSCNTを樹脂に充填し、母材樹脂と良好に結合させることで、力学的機能が向上することを見出した。

申請者はこの先端技術を再生樹脂の機能回復に適用できると考え、申請を決断した。

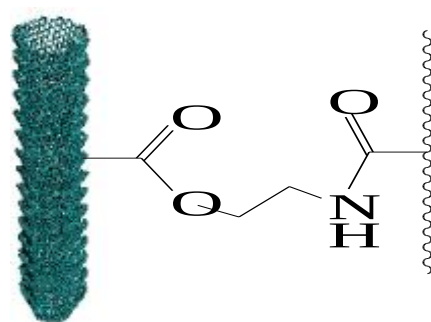


図 102 CSCNT 及び高分子架橋 CSCNT

(4) CSCNT の線長測定方法

以下フロー図の通り CSCNT の線長測定を実施する。

(ア)当社が大学と共同で開発した測定方法のフロー図を下①～⑥に記す。



図 103 線長測定方法のフロー図

CSCNT(カップ積層型カーボンナノチューブ) ご説明資料

概要 Great Features

GSIクレオスのCSCNTは切頭円錐形炭素網積層構造のカーボンナノチューブです。(図1)
炭素網カップを引き抜く事で線長調整、表面処理等を行なう事が容易で優れた分散性を示します。

特長 Advantages

- 優れた分散性 >>> 図2
- 線長調整機能 >>> 図3(a)線長調整前、(b)調整後
- 母材との良好な密着性 >>> 図5
- 表面活性調整機能(黒鉛化、酸素含官能基付与)
- ナノ粒子担持体機能 >>> 図4

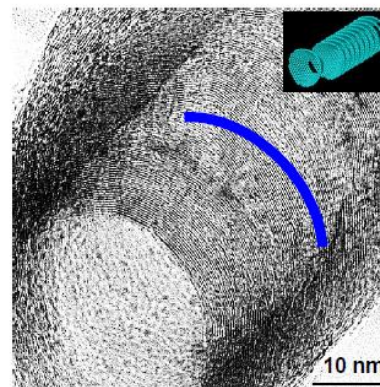


図1. HR-TEMによる観察



図2. 水中攪拌30秒後分散状態
左:CSCNT 右:一般のCNT

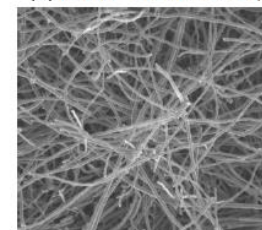
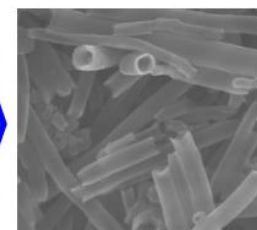


図3(a)元のCSCNT



(b)長さ調整後

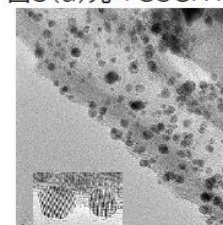


図4. CSCNT上の
ナノサイズ白金粒

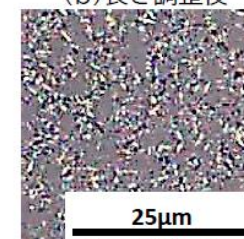


図5. エポキシ樹脂内
CSCNTの高分散

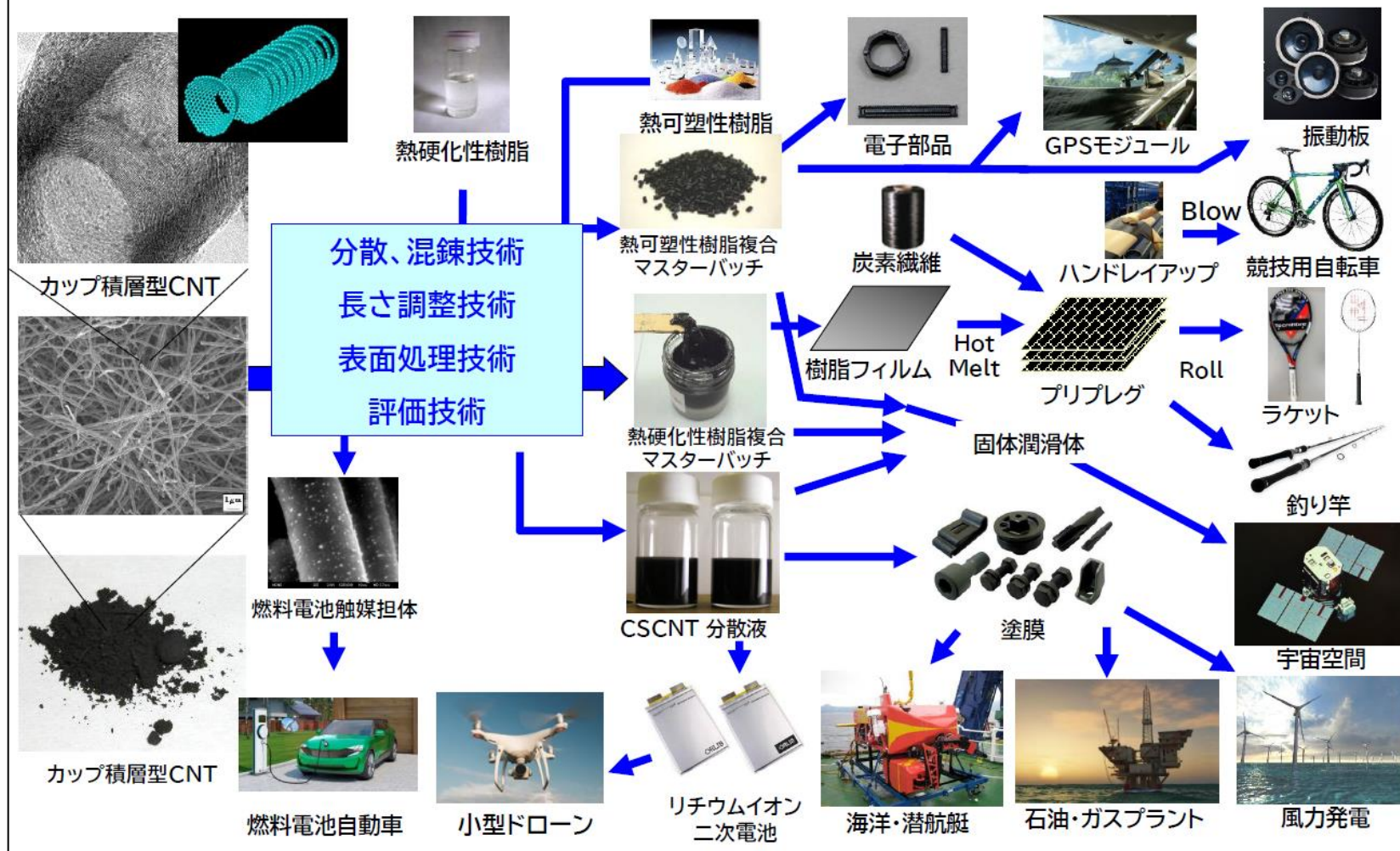
株式会社GSIクレオス

ナノテクノロジー開発室

〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町1-12 C棟2階

TEL:044-322-5595 FAX:044-322-5596 MAIL: nano@gsi.co.jp

GSIクレオスの強みとする要素技術と商品化実績



6. 事業化までの計画

(1) 最終目標

社会重要インフラ向け電材に最も使用される難燃性低密度ポリエチレン（以降LDPE）の再生品の使用比率の増大、再生回数の増大、コスト削減を本事業の目標とする。

申請者の調査によれば、日本の電材市場における難燃性LDPE使用量は年間約18,000トンであり、本事業が対象とする数量である。

本事業による開発に成功すれば、電材向けLDPEはもとより他セクターに用いられる様々な難燃性樹脂の再生品の利用拡大へ大きな動機付けとなり、その使用量は大きく拡大する。

(2) リサイクルするプラスチック

低密度ポリエチレン（以降LDPE）、難燃性、非難燃性を含む

(3) リサイクル対象物とリサイクルされた後の素材の用途

①リサイクル対象物：難燃性LDPE製「電気設備資材」（電材）

本対象物は、重要社会インフラである電線の絶縁カバーなどに用いられる部材で、特に難燃性を高めた樹脂材料として極めて広範囲に使用されている。

②リサイクル後の素材用途：電材用途

本用途は再生品にも難燃剤が高濃度で含まれる高価な素材であり、難燃性が必要な同じ電材向けに『水平リサイクル』する。

(4) リサイクル対象物の流通量

①国内

電材用難燃性LDPE製造量：約18,000トン

《算出根拠》本事業の連携社、大東電材（株）の難燃性LDPE製品年間製造量及び当該市場シェアから試算した。

参考：国内LDPE製造量は1,336千トン（石油化学工業協会資料2022年）なので、当該対象物は全LDPEの約1.34%を占める。

②国外

電材用難燃性LDPE製造量約710,000トン（推定）

《算出根拠》上記の通り、国内LDPE製造量に対する当該対象物の割合は約1.34%である。世界LDPE製造量は52,966千トン（経済産業施用製造産業局素材産業課資料）であり、当該対象物の国内での割合を基に試算した。

計算式： $52,966 \times 1.34\% \approx 710,000$ トン

(5) リサイクル目標量

①国内

18,000トン→電材向け難燃性LDPEを再生品に置き換える

②国外

710,000トン

(6) スケジュール

令和5年度	①配合検討：3年間を通し継続的改良開発を実施する。(G S I クレオス) ②難燃性バージンLDPEから製品形状成形、加速疲労試験実施 8月-9月：難燃性バージンLDPEの製品形状へ成形、物性評価(大東電材(株)) 10月-2月：SWOM2000時間(屋外暴露10年相当の加速試験、大東電材(株)) 3月-4月：SWOM後製品粉碎・洗浄・乾燥((株)近江物産) ③難燃性バージン再生LDPEから製品形状成形、加速疲労試験実施 1月-2月：難燃性再生LDPEの製品形状物性評価(大東電材(株)) 3月-7月：SWOM2000時間(大東電材(株))
令和6年度	①配合検討：難燃、非難燃性再生LDPE+CSCNT最適配合改良開発(G S I クレオス) ②難燃性バージンLDPEから製品形状成形、加速疲労試験実施 4月-6月：CSCNT配合コンパウンド作製(G S I クレオス) 7月：製品形状成形(大東電材(株)) 8月-12月：SWOM2000時間(大東電材(株)) 1月：SWOM後製品粉碎・洗浄・乾燥((株)近江物産) 2月-4月：CSCNT配合コンパウンド作製((株)G S I クレオス) ③難燃性バージン再生LDPEから製品形状成形、加速疲労試験実施 6月-7月：SWOM2000時間実施後製品粉碎・洗浄・乾燥((株)近江物産) 8月-9月：製品形状成形(大東電材(株)) 10月-2月：SWOM2000時間(大東電材(株)) 3月：SWOM後製品粉碎・洗浄・乾燥((株)近江物産)
令和7年度	①配合検討：難燃性再生LDPE+CSCNT最適配合改良開発、非難燃性LDPE改質検討。(G S I クレオス) ②難燃性バージンLDPEから製品形状成形、加速疲労試験実施 4月：製品形状成形(大東電材(株)) 5月-9月：SWOM2000時間(大東電材(株)) 10月：SWOM後製品粉碎・洗浄・乾燥((株)近江物産) 11月-1月：CSCNT配合コンパウンド作製、試験片性能評価(G S I クレオス) ③難燃性バージン再生LDPEから製品形状成形、加速疲労試験実施 4月-5月：CSCNT配合コンパウンド作製(G S I クレオス) 6月：製品形状成形(大東電材(株)) 7月-11月：SWOM2000時間(大東電材(株)) 12月：SWOM後製品粉碎・洗浄・乾燥((株)近江物産) 1月-2月：CSCNT配合コンパウンド作製、試験片性能評価(G S I クレオス)
実証事業終了後社会実装まで	本事業終了後、2026-28に連携する(大東電材(株))の顧客である電力、通信、鉄道などユーザーと共同で国内での実証試験実施を計画する。 実証試験後、2029年を目標に当該品の社会実装開始を計画する。

(7) 実証事業後の出口戦略と波及効果

本事業は、当初から出口戦略を明確にして構想した。すなわち社会インフラに用いられるが故に要求性能の高い、難燃性樹脂製電材の再生を試みると共に、同じ電材用途での再生品使用とその使用拡大を目標としており、出口と循環領域を明確にした事業計画である。

既に述べてきた通り、難燃性樹脂の再生は、力学的特性の回復だけでなく、難燃性など機能性の回復が必要であり、極めて難度の高い技術開発が必要とされている。難燃性再生LDPEの物性回復に成功すれば、連携先の電材製造、大東電材（株）、その顧客である電力、通信、鉄道、ガスなど日本を代表するユーザー企業で大規模な実証実験を行う計画である。大東電材（株）はこれら国内の主要インフラ企業ほぼすべてを顧客として自社電材製品を納入しており、実証実験ではその良好な取引関係を活用することが可能である。

試みに大東電材（株）からユーザー企業に対し、将来の難燃性再生電材製品のフィールド実証試験の可否を打診したところ、高い興味を示されており、本事業への期待の高さを実感しているところである。

本事業提案では、従来実現困難な難燃性再生LDPEの諸物性の回復を試みる研究開発と並行して、バージン材から再生、再再生に至るまで再生回数毎に性能評価を実施し、性能と循環の有効性を検証することにも特長がある。

この循環検証は、既存の製品フロー、商流に従っており、本事業目標達成後の実証試験時、更にその後の難燃性再生LDPEの事業化時に、既存の製品フロー、商流を活用して実施できる点で大きなアドバンテージを有している。

ユーザー企業が本再生樹脂の物性やコストの有用性を認識することは、回収スキーム構築へのモチベーションともなる。本事業における電材製品群は、家庭から排出される樹脂などと異なり、設置と回収を同時に行うことができ、また異なる電材メーカー製品でも、使用される樹脂種はおおよそ同じであることから、回収スキームが確立されれば、回収量が増え、製造時にコストメリットが出る数量領域につなげることが可能である。

本事業は2023年（令和5年）度から2025年（令和7年）度まで実施、その後、2026年（令和8年）度から2028年（令和10年）度にかけて、全国のユーザー企業において様々な条件で大規模実証事業を計画する。

この時点で難燃性再生LDPEを年間1～10トン程度使用する見込みなので、申請者はこの供給量確保のために設備投資を実施、マスターバッチ製造施設を整える計画である。

その後、大東電材（株）の製造する難燃性LDPE製電材1,400トンについて、2029年度（令和11年）から再生100%品に置き換えることを目標とする。特にCO2削減に有効な再生回数を増やし、その複数再生品の使用量100トン以上を目指す。

その後、難燃性電材全般に対象を広げ、最終的に2030年代前半には電材向け難燃性LDPE製品18,000トン全量について、再生100%への置き換えを目標とする。

なお本事業でのLDPE再生化研究開発は、他のオレフィン系樹脂PPにも適用可能である。

事前検討により、申請者はCSCNT充填再生PPでの物性向上を確認済みである。

本項（10）に、本研究の波及効果となる潜在顧客の改良要望概要を記載する。

別表 事業終了時及び終了後に想定されるリサイクル数量

① 想定されるリサイクルされた後の素材の用途、製品、販売先

用途・製品	販売先（想定）
電材全般 例えば配電線の露出部分の絶縁防護製品など	主に電材製造社 再生品の使用業界は、電力、通信、鉄道、ガスなど社会インフラ業界

② 製品の市場規模とリサイクル素材の調達可能量、調達ルート

	実証終了時	2030年	2035年
製品の市場規模(t/年) と その根拠 (供給・販売先)	電材用難燃性LDPE市場規模 18,000トン 電材メーカー製造量と市場シェアから試算	電材用難燃性LDPE市場規模 18,000トン 経済情勢などにより規模増大可能性	電材用難燃性LDPE市場規模 18,000トン 経済情勢などにより規模増大可能性
本事業における リサイクル素材調達 可能量(t/年)	本事業は、再生品の性能回復を実証する目的なので、事業終了時の素材調達は次の実証事業期間時となる。	2026年度以降、実証事業：年間10トン程度 2030年以降：年間100トン以上 実証事業期間に回収スキームを確立し回収量増大を図る	回収スキームの確立により 年間18,000トン規模の回収を目論む
リサイクル素材 調達ルート	電材メーカーが回収した使用済電材をリサイクル業者で再生(粉碎・洗浄・乾燥品) これをリサイクル素材として調達	同業電材メーカーとコンソーシアム組織化、全国の使用済電材の回収スキームを確立する 各地の再生業者と連携し、使用済電材の粉碎・洗浄・乾燥品を調達する	同左

(8) エネルギー起源 CO2 排出削減量等環境負荷の低減

(8) - 1 概念 (ライフサイクルフロー)

(8) - 1 - 1 廃プラスチックを再生せずに焼却処分した場合 (現行)

図 104 フロー : ①→②→③→④→焼却

(8) - 1 - 2 本開発技術により廃プラスチックを 2 度再生利用した場合 (例)

図 104 フロー :

①→②→③→④→⑤→⑥→②→③→④→⑤→⑥→②→③→④→焼却

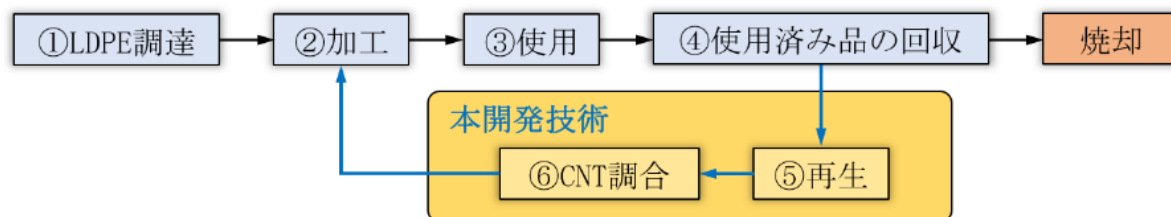


図 104 ライフサイクルフロー

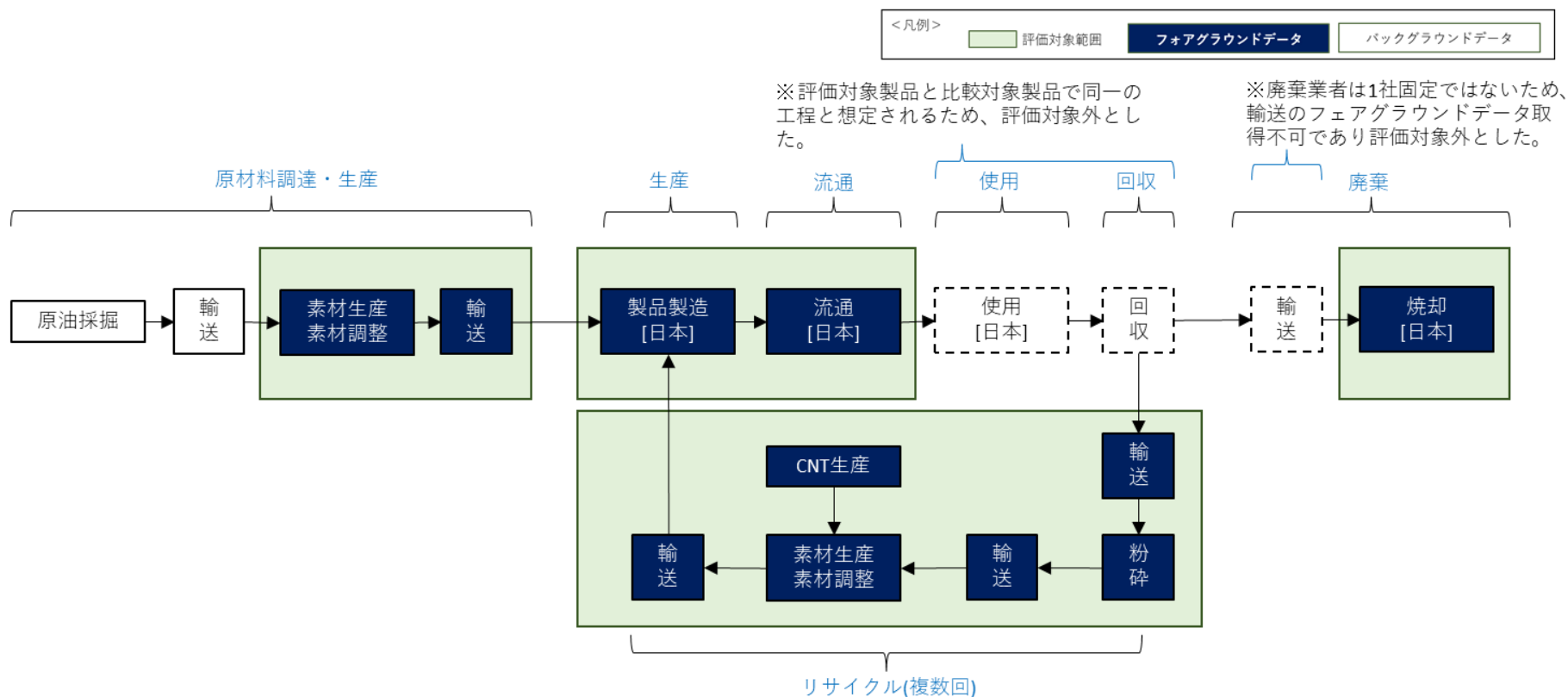


図 105 評価対象製品：電材製品（CNT 含有難燃性 LDPE）のスキーム

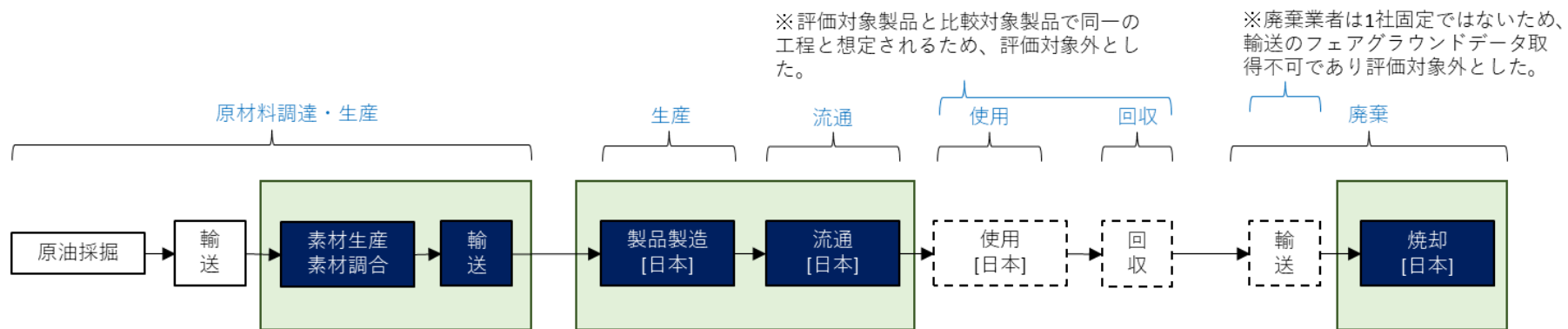


図 106 ベースライン：電材製品（難燃性 LDPE）のスキーム

(8) - 2 ライフサイクルインベントリ分析による CO2 排出量

(8) - 2 - 1 インベントリ分析のバックグラウンドデータ

表 21 の通りデータを取得し、下記の CO2 排出量を試算した。

表 21 バックグラウンドデータ取得の使用データ

no.	段階	プロセス	使用データ源
1	原材料調達・生産	素材生産、素材調整	石油化学製品のLCIデータ調査報告書
2	原材料調達・生産	輸送	経済産業省・国土交通省 物流分野のCO2排出量に関する算定方法ガイドライン『改良トンキロ法』
3	生産	製品製造	・電力：環境省・経済産業省『電気事業者別排出係数』P17 一般送配電事業者を参考 ・水：東京都水道局 CO2排出量計算ツールを参考
4	流通	流通	経済産業省・国土交通省 物流分野のCO2排出量に関する算定方法ガイドライン『改良トンキロ法』
5	リサイクル	輸送	経済産業省・国土交通省 物流分野のCO2排出量に関する算定方法ガイドライン『改良トンキロ法』
6	リサイクル	粉砕	・電力：環境省・経済産業省『電気事業者別排出係数』P17 一般送配電事業者を参考 ・水：東京都水道局 CO2排出量計算ツールを参考
7	リサイクル	輸送	経済産業省・国土交通省 物流分野のCO2排出量に関する算定方法ガイドライン『改良トンキロ法』
8	リサイクル	素材生産、素材調整	・電力：環境省・経済産業省『電気事業者別排出係数』P17 一般送配電事業者を参考 ・水：東京都水道局 CO2排出量計算ツールを参考
9	リサイクル	CNT生産	・電力：環境省・経済産業省『電気事業者別排出係数』P17 一般送配電事業者を参考 ・水：東京都水道局 CO2排出量計算ツールを参考 ・天然ガス：環境省『算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧』P7 参考 ・鉄：東京製鉄HP
10	リサイクル	輸送	経済産業省・国土交通省 物流分野のCO2排出量に関する算定方法ガイドライン『改良トンキロ法』
11	廃棄	焼却	環境省『算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧』P8 別表4参考

(8) - 2 - 2 CO2 排出量の計算

(8) - 2 - 2 - 1 再生なしの場合の CO2 排出量計算

①集計データ

No	担当企業	工程	エネルギー内容	フォアグラウンドデータ			バックグラウンドデータ(係数)			CO2排出量	単位
				量	単位		原単位	単位			
1	樹脂メーカー	LDPE使用	LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120	kg-CO2
2	運送業者	運搬	走行距離	170	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	137	kg-CO2
3	大東電材	成形	電力	20,000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
			水	0.12	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	0	kg-CO2
4	運送業者	運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
5		取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
6		回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
7		運搬	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
8	処分業者	処分	焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2
										合計	33,578 kg-CO2
										× 2回の場合	67,155 kg-CO2
										× 3回の場合	100,733 kg-CO2

上記集計			LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120	kg-CO2
			電力	20,000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
			水	0.12	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	0	kg-CO2
			走行距離	570	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	458	kg-CO2
			焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2
										合計	33,578 kg-CO2

図 107 再生なしの場合の CO2 排出量

②輸送時の CO2 排出量

改良トンキロ法
(精度:中)

CO₂排出量の算出結果と削減効果の把握

下表参照
(10tトラック軽油60%(6t))

ガソリン : 34.6
軽油 : 37.7
ほか、下表参照

ガソリン : 0.0183
軽油 : 0.0187
ほか、下表参照

単位換算

	輸送の種類	発地	着地	主な輸送方法	a	平均的な積載率 (%)	年間運行回数	b	c	d	e	f	CO ₂ 排出量
					距離 (km)			輸送量 (年間・t)	燃料使用 原単位 (年間 L/t・km)	単位 発熱量 (GJ/kl)	排出係数 (tC/GJ)	44/12 (炭素量⇒ 二酸化炭素量)	$a*b*c*d*e*f/1,000$
現行	1 樹脂材料の輸送	樹脂メーカー	大東電材	10tトラック	170	60	1	6	0.0518	37.7	0.0187	3.666667	0.14 t
	2 成型品の輸送	大東電材	ユーザー	10tトラック	400	60	1	6	0.0518	37.7	0.0187	3.666667	0.32 t
合計					570								0.458 t

⇒ $a*b*c*d*e*f/1,000$

図 108 再生なしの場合の輸送における CO2 排出量

(8) - 2 - 2 - 2 樹脂 6t を用いて製品生産後、1 回再利用し処分までを行う場合の CO2 排出量の計算

①集計データ

No	担当企業	工程	エネルギー内容	フォアグラウンドデータ			バックグラウンドデータ			CO2排出量	単位
				量	単位		原単位	単位			
1	樹脂メーカー	LDPE使用	LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120	kg-CO2
2		運搬	走行距離	170	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	137	kg-CO2
3	大東電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
			水	0.12	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	0	kg-CO2
4		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
5	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
6		回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
7		運搬	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
8	近江物産	粉碎・洗浄	電力	313.45	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	136	kg-CO2
			水	15	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	4	kg-CO2
9		運搬	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
10	クレオス	CNT混練・ペレット作製	電力	2779.59	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	1,209	kg-CO2
			水	25	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	6	kg-CO2
11	クレオス	CNT合成		60	kg		10.449	kg-CO2/kg		627	kg-CO2
12		運搬	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
13	大東電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
			水	0.12	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	0	kg-CO2
14		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
15	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
16		回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
17		運搬	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
18	処分業者	処分	焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2
合計										45,690	kg-CO2

上記集計			LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120	kg-CO2
			CNT合成	60	kg		10.449	kg-CO2/kg		627	kg-CO2
			電力	43093.04	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	18,745	kg-CO2
			水	40	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	9	kg-CO2
			運搬	2350	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	1,888	kg-CO2
			焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2
合計										45,690	kg-CO2

図 109 樹脂 6t を用いて製品生産後、1 回再利用し処分までを行う場合の CO2 排出量

②輸送時の CO2 排出量

改良トンキロ法
(精度: 中)

CO₂排出量の算出結果と削減効果の把握

ガソリン: 34.6
軽油: 37.7
ほか、下表参照

ガソリン: 0.0183
軽油: 0.0187
ほか、下表参照

単位換算

図 110 樹脂 6t を用いて製品生産後、1 回再利用し処分までを行う場合の輸送における CO2 排出量

(8) - 2 - 2 - 3 樹脂 6t を用いて製品生産後、2 回再利用し処分までを行う場合の CO2 排出量の計算

①集計データ

No	担当企業	工程	エネルギー内容	フォアグラウンドデータ			バックグラウンドデータ			CO2排出量	単位
				量	単位		原単位	単位			
1	樹脂メーカー	LDPE使用	LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120	kg-CO2
2		運搬	走行距離	170	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	137	kg-CO2
3	大東電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
			水	0.12	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	0	kg-CO2
4		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
5	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
6		回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
7		運搬	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
8	近江物産	粉碎・洗浄	電力	313.45	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	136	kg-CO2
			水	15	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	4	kg-CO2
9		運搬	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
10	クレオス	CNT混練・ペレット作製	電力	2779.59	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	1,209	kg-CO2
			水	25	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	6	kg-CO2
11	クレオス	CNT合成		60	kg		10.449	kg-CO2/kg		627	kg-CO2
12		運搬	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
13	大東電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
			水	0.12	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	0	kg-CO2
14		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
15	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
16		回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
17		運搬	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
18	近江物産	粉碎・洗浄	電力	313.45	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	136	kg-CO2
			水	15	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	4	kg-CO2
19		運搬	走行距離	50	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	40	kg-CO2
20	大東電材	成形	電力	20000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2
			水	0.12	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	0	kg-CO2
21		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	321	kg-CO2
22	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
23		回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
24		運搬	-	算出不可	-	×	2.320	kg-CO2/L	=		kg-CO2
25	処分業者	処分	焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2
合計										55,293	kg-CO2

上記集計			LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120	kg-CO2
			CNT合成	60	kg		10.449	kg-CO2/kg		627	kg-CO2
			電力	63406.49	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	27,582	kg-CO2
			水	55	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	13	kg-CO2
			運搬	3,300	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	2,651	kg-CO2
			焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2
合計										55,293	kg-CO2

図 111 樹脂 6t を用いて製品生産後、2 回再利用し処分までを行う場合の CO2 排出量

②輸送時の CO2 排出量

CO ₂ 排出量の算出結果と削減効果の把握													
改良トンキロ法 (精度:中)													
現行	輸送の種類	発地	着地	主な輸送方法	距離 (km)	平均的な積載率 (%)	年間運行回数	輸送量 (年間・t)	燃料使用 原単位 (年間・l/t-kl)	単位 発熱量 (GJ/kl)	排出係数 (tC/GJ)	44/12 (炭素量⇔ 二酸化炭素量)	CO ₂ 排出量 a*b*c*d*e*f/1,000
	1 樹脂材料の輸送	樹脂メーカー	大東電材	10tトラック	170	60	1	6	0.0518	37.7	0.0187	3.666667	0.137 t
	2 成型品の輸送	大東電材	ユーザー	10tトラック	400	60	1	6	0.0518	37.7	0.0187	3.666667	0.321 t
	3 回収品の輸送	ユーザー	近江物産	10tトラック	500	60	1	6	0.0518	37.7	0.0187	3.666667	0.402 t
	4 再生品の輸送	近江物産	クレオス	10tトラック	440	60	1	6	0.0518	37.7	0.0187	3.666667	0.353 t
	5 CNT含再生品の輸送	クレオス	大東電材	10tトラック	440	60	1	6	0.0518	37.7	0.0187	3.666667	0.353 t
	6 成型品の輸送	大東電材	ユーザー	10tトラック	400	60	1	6	0.0518	37.7	0.0187	3.666667	0.321 t
	7 回収品の輸送	ユーザー	近江物産	10tトラック	500	60	1	6	0.0518	37.7	0.0187	3.666667	0.402 t
	8 再生品の輸送	近江物産	大東電材	10tトラック	50	60	1	6	0.0518	37.7	0.0187	3.666667	0.040 t
	9 成型品の輸送	大東電材	ユーザー	10tトラック	400	60	1	6	0.0518	37.7	0.0187	3.666667	0.321 t
合計					3,300								2.651 t

図 112 樹脂 6t を用いて製品生産後、2 回再利用し処分までを行う場合の輸送における CO2 排出量

③CNT 合成時の CO2 排出量

担当企業	工程	エネルギー内容	フォアグラウンドデータ			バックグラウンドデータ			CO2排出量	
			量	単位		原単位	単位		単位	
クレオス	CNT合成	電力(22.78kWh/1kg)	22.78	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	9.91	kg-CO2
		天然ガス使用(400L/kg)	400	L	×	0.001	kg-CO2/L	=	0.49	kg-CO2
		触媒(鉄) 0.02kg/kg	0.02	kg	×	2.3	kg-CO2/kg	=	0.05	kg-CO2
		水	0	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	0	kg-CO2
合計								合計	10.449	kg-CO2

図 113 CNT1kg の合成における CO2 排出量

(8) - 2 - 3 CO₂ 排出量の集計比較

本試験の対象物は、大東電材㈱の1製品の数量 6t-LDPE から試算した数字である。

(8) - 2 - 3 - 1 廃プラスチックを再生せずに焼却処分した場合

フォアグラウンドデータ					バックグラウンドデータ				CO ₂ 排出量	
入出力項目			量	単位	原単位		単位			単位
エネルギー起 源CO ₂	入力	原料	LDPE	6,000 kg	×	1.52	kg-CO ₂ /kg	=	9,120	kg-CO ₂
		エネルギー	電力	20,000 kWh	×	0.435	kg-CO ₂ /kWh	=	8,700	kg-CO ₂
			水	0.12 m ³	×	0.235	kg-CO ₂ /m ³	=	0	kg-CO ₂
			輸送(国内)	570 km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	=	458	kg-CO ₂
	出力	処分	市場回収品	6,000 kg	×	2.55	kg-CO ₂ /kg	=	15,300	kg-CO ₂
再生なし1回 合計									33,578	kg-CO ₂
再生なし2回 合計									67,155	kg-CO ₂
再生なし3回 合計									100,733	kg-CO ₂

	CO ₂ 排出量	単位
エネ起	54,833	kg-CO ₂
非エネ起	45,900	kg-CO ₂

図 114 廃プラスチックを再生せずに焼却処分した場合

(8) - 2 - 3 - 2 廃プラスチックを再生利用した場合

エネルギー起源CO2

フォアグラウンドデータ					バックグラウンドデータ					
入出力項目			量	単位	原単位	単位	CO ₂ 排出量	単位		
入力	原料	LDPE	6,000	kg	×	1.52	kg-CO ₂ /kg	=	9,120	kg-CO ₂
		CNT	60	kg	×	10.449	kg-CO ₂ /kg	=	627	kg-CO ₂
	エネルギー	電力	63,406	kWh	×	0.435	kg-CO ₂ /kWh	=	27,582	kg-CO ₂
		水	55	m ³	×	0.235	kg-CO ₂ /m ³	=	13	kg-CO ₂
		輸送(国内)	3,300	km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	=	2,651	kg-CO ₂
出力	処分	市場回収品	6,000	kg	×	2.55	kg-CO ₂ /kg	=	15,300	kg-CO ₂
					再生なし品1回使用後再生2度 合計			55,293	kg-CO ₂	}
					再生なし品1回使用後再生1度 合計			45,690	kg-CO ₂	

	CO ₂ 排出量	単位
エネ起	39,993	kg-CO ₂
非エネ起	15,300	kg-CO ₂

図 115 廃プラスチックを再生利用した場合

(8) - 2 - 4 結論 本技術による CO₂ 削減量 (単位 : kg-CO₂)

①再生あり			②再生なし			③再生によるCO ₂ 削減量(②-①)			
使用回数	CO ₂ 排出量	1kg-LDPE当りのCO ₂ 排出量	CO ₂ 排出量	1kg-LDPE当りのCO ₂ 排出量	使用回数	1kg-LDPE当りのCO ₂ 削減量	10t/年置換え時のCO ₂ 削減量	100t/年置換え時のCO ₂ 削減量	18,000t/年置換え時のCO ₂ 削減量
1回(再生0)	-	-	33,578	5.60	1回(再生0)	0	0	0	0
2回(再生1度)	45,690	3.81	67,155	5.60	2回(再生0)	1.79	17,888	178,882	32,198,696
3回(再生2度)	55,293	3.07	100,733	5.60	3回(再生0)	2.52	25,245	252,447	45,440,465

図 116 本技術による CO₂ 削減量のまとめ

（９）その他の環境影響の低減・循環型社会への貢献の見込み

申請者の CSCNT に関する研究開発や製品化の事実は、国内外で認知されており、現行顧客や潜在顧客から様々な提案を受けている。

表 22 に記載する具体的な要望内容が示す通り、いずれも地球環境負荷軽減を志向している。

申請者が本事業で実施する研究開発が、様々な分野での環境負荷低減への有用な方策になるものと確信している。

(10) 環境影響の低減に資する要望とその必要性

表 22 申請者顧客からの要望とその必要性

	樹脂	状態	用途	背景・ニーズ
熱可塑性樹脂	オレフィン系樹脂	バージンPP	石油輸送パイプ	中東諸国では石油輸送目的で鉄鋼製パイプが使用される。しかし膨大な防錆費用、金属パイプ継目からの石油リーク、鉄製パイプの重量による輸送・維持コストが長年の大課題であり、自国製PP適用を狙う壮大な研究が開始されている。申請者の研究開発実績を知った国立研究所から、CSCNT充填により過酷環境に耐えうる諸物性（耐UV性、強度、靱性など）を維持、向上させた油送パイプを開発し環境負荷低減を図りたい、との打診を受けている。
		再生PP 再生PE	暗渠用パイプ	北米では、従来カーボンブラック（CB）充填により再生樹脂を暗渠用樹脂パイプに活用している事例があるが、十分な靱性が得られず、また膨大な量のCBを充填するため保管コスト、周辺への環境負荷が大きな課題となっている。極少量のCSCNT充填で再生樹脂の靱性改善、回復の可能性を打診されている。
		再生PP	自動車部品	大手自動車会社から、再生PPの破壊靱性を回復したい、熱膨張係数（CTE）を制御したい、との要望を受けている。 破壊靱性の低下は再生品の弱点として既に認識されている。 一方、CTE制御要望は、PPの高いCTEのためにPP製部品同士の間には大きな隙間を空けねばならないため、外観が悪く再生品の使用ができないためである。 CSCNTの適切な配向制御によりCTE制御ができれば、再生PPの使用量が増え、CO2削減に資する、との要望である。
熱硬化性樹脂	エポキシ（溶剤系）	バージン	航空宇宙、ドローン構造物、部品	あらゆる高速移動体の構成部材を軽量高強度のCFRP（炭素繊維強化樹脂）製にすることで環境負荷への大幅な低減が期待されている。しかしCFRPには耐衝撃性、層間剥離、衝撃後圧縮強度（CAI, Compression After Impact）など、依然として解決すべき様々な課題が山積している。特に航空業界を中心に、CFRP内の樹脂部分をCSCNTで強化することでこれら諸課題の解決を求められている。航空宇宙、鉄道などの高速移動体セクターでは、更なる軽量化による地球環境負荷軽減を求める強いニーズが存在している。

7. 総括

2025 年度は計画通り業務を遂行した。

本事業は、将来的な事業化を見据えたものであり、最終目標の達成、及び事業終了後の市場化を構想している。

2025 年度までの結果から、再生品を活用できる可能性を見出すことができた。

2026 年度は、2025 年度までの開発成果を FS として、電力会社へヒアリングを行い、現状把握と社会実装に向けた要望等を確認し、本事業を進めることとする。

リサイクル適性の表示：印刷用の紙にリサイクルできます

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料〔Aランク〕のみを用いて作製しています。