

令和 7 年度環境省委託業務

令和 7 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 8 年 2 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材（電気設備資材）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。

本事業の概念を図1に示す。



図1 事業概念図

3. 本年度の成果

下記表に本事業の成果を示す。

表 1 令和 7 年度成果のまとめ

実証内容	令和 7 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 物性目標は以下の通り	① 材料加工条件 初年度に確立済 ② 材料配合条件 戦略的にパラメータを絞りこみ実施した。 物性、作業性、コスト等の観点から CSCNT（カップ積層型カーボンナノチューブ）は長尺グレードとした。 ③ 評価方法の簡素化 難燃性評価方法について、簡易に作成可能な試験片を用いて評価を実施し、その優位性を確認した。
	① 力学的特性 難燃 LDPE（Low-Density Polyethylene、低密度ポリエチレン）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： $10^{11}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上	① 力学的特性 配合調整により難燃 LDPE バージン品比 80%以上の物性回復実現 ② 機能性 ・ 垂直燃焼試験：CSCNT 微量添加により難燃性向上(垂れ難さ)傾向を確認 ・ 絶縁性：高絶縁領域の $10^{11}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上の達成

実証内容	令和 7 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 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 力学的特性 以下の通り、(1) バージン品、(2) 再生品ともに規格内の物性値が得られた。 (1) 難燃バージン LDPE を用いたサイクル 2 回再生後、バージン品比 80%以上の各物性値を達成した。 (2) 難燃再生 LDPE を用いたサイクル 2 回再生後、各物性値は 80%以下となったが、規格内の物性値を達成した。 ② 機能性 ・ 垂直燃焼試験：難燃バージン LDPE・難燃再生 LDPE とともに、再生による機能性の変化は見られなかった。 ・ 機能性(絶縁・耐電圧)：難燃バージン LDPE・難燃再生 LDPE とともに、再生による機能性の変化は見られなかった。
③コスト削減の検討	再生品コストを 20～35%低減	0.5～1%CSCNT 含有難燃バージン LDPE、及び難燃再生 LDPE の配合で、コスト 13.5～27.3%低減
④LCA (Life Cycle Assessment) の検証と評価	材料配合を決め、それに伴う CO ₂ 排出量、及び削減量の検証と評価を実施	CSCNT 添加量 0.5～1%、樹脂を難燃バージン品と再生品のハイブリッド、調達ルートに関東圏として LCA 試算実施した。 ・ 0.5～1%CSCNT+バージン品・再生品ハイブリッド (1 : 1) 29,971～30,441kg の CO₂ 排出量削減 ・ 0.5～1%CSCNT+バージン品・再生品ハイブリッド (1 : 2) 43,031～43,345kg の CO₂ 排出量削減

本事業は、社会インフラ用の難燃性樹脂製電気設備資材における再生樹脂の物性低下を解決するため、CSCNT を用いて物性回復技術と水平リサイクルモデルを開発した。期間は令和 5～7 年度の 3 年間で、材料配合の最適化、複数回再生時の性能維持、コスト低減、環境負荷評価である LCA を実施した。

本事業の具体的な成果として、CSCNT を 0.5～1% 添加することで、難燃再生 LDPE の力学的特性と難燃性をバージン品の 80% 以上に回復し、垂直燃焼試験で V-0 等級を達成した。また、加速劣化試験により 10 年相当の屋外暴露を模擬し、複数回再生後も規格内性能を維持可能であることを確認した。他方、コスト面では非難燃バージン LDPE との最適な配合、複合化により最大 27% の低減を実現し、LCA では最大約 45,000kg の CO₂ 削減効果を見込む。

今後は実使用環境での実証試験に向けて回収体制と品質管理の強化、耐摩耗性や耐衝撃性などの材料改良を進める。成果は国内外の樹脂リサイクル拡大、CO₂ 削減に寄与する。

本開発品はユーザー企業より高い評価を得ている一方で、共同でより実地に即した確認が必要となることから、令和 8 年度以降は社会実装を前提とし、開発品の導入検討を進める。

Summary

1. Background of this project

In Japan, basic social infrastructures such as electric power, telecommunications, railroads, gas, and power grids are widely used, and their importance as lifelines is undisputed. Electrical materials (referred to as “Denai” in Japanese) used in these infrastructures require extremely high performance, including long-term mechanical durability as well as functionalities such as flame resistance, insulation, and voltage resistance.

However, the use of recycled products in such applications has been restricted because they often fail to meet these high-performance requirements. Recycled flame-retardant resins tend to show a significant decline in mechanical performance and functionality after recovery, which is a major factor limiting their reuse. There has been strong demand from users for the restoration of mechanical performance and functionality in recycled flame-retardant resins.

2. Objectives of this project

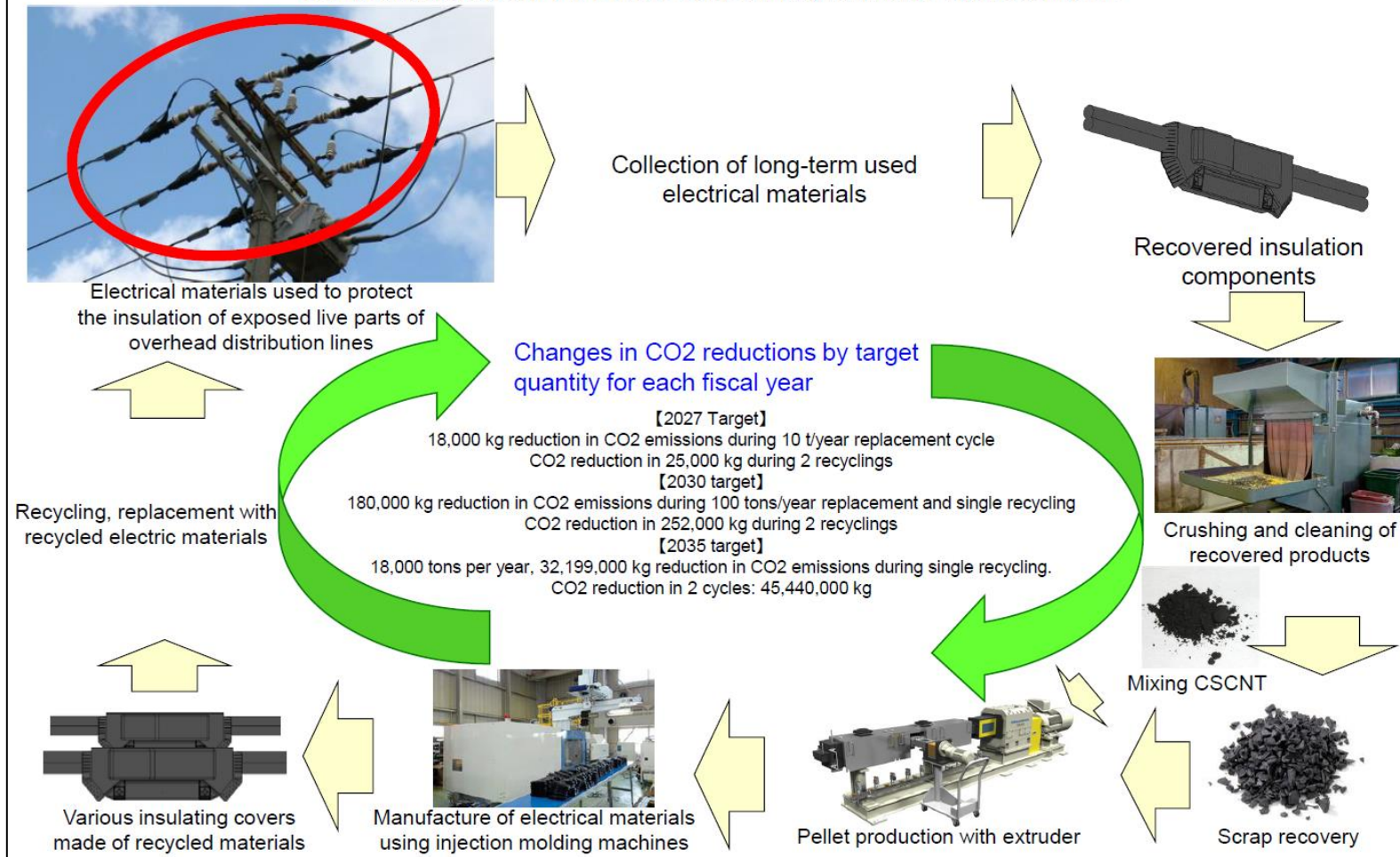
This project will undertake various developments aimed at achieving “horizontal recycling” recycling virgin resin electrical materials into recycled resin electrical materials — with the goal of restoring the properties of high-performance flame-retardant resin electrical materials and expanding the use of recycled products.

Electrical materials are key components used by electric power, telecommunications, railroad, and gas companies, which play a crucial role in social infrastructure, and are required to have high mechanical and functional properties.

This project aims to address challenges such as restoring mechanical properties and functionality, increasing the number of recycling cycles for used resin, and reducing the manufacturing costs of recycled resin.

The concept of this project is as follows.

Final Goals: (1) Restoration of mechanical physical properties, (2) Restoration of functionality, (3) Increase the number of reproductions, and (4) Reduce costs of recycled flame retardant LDPE



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. (1) Material processing conditions (2) Material mating conditions (3) Simplified evaluation methods The goals of physical properties are as follows. (Full-year target)	(1) Material processing conditions: Established in the first year (2) Material mixing conditions: Strategically narrow down the parameters. From the perspective of physical properties, workability, cost, CSCNT was made a long grade. (3) Simplification of evaluation methods Flame retardant evaluation method is evaluated using a specimen that can be easily prepared and confirmed its superiority.
	(1) Mechanical properties: Flame retardant LDPE virgin recovery of 80% (2) Functionality • Vertical combustion test: V-0 • Resistance: $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ or more	(1) Mechanical properties: Physical properties are restored to more than 80% of flame-retardant LDPE virgin products by adjusting the formula. (2) Functionality • Vertical combustion test: Confirmation of flame retardant improvement (sagging resistance) trend by adding CSCNTs in small amounts - Insulation: Achieves $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ or more in the high isolation area

Content	This year's objective	Achievement
(2) Increase in the number of views	Achieve 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) [Regeneration cycle using flame retardant virgin LDPE] At the time of the second playback, it achieved more than 80% physical properties. [Regeneration cycle using flame retardant recycled LDPE] At the time of the second playback, the physical properties were less than 80%. Both virgin and refurbished products were obtained within the standard. (2) Functionality • Vertical combustion test There was no change in functionality due to regeneration for both flame-retardant virgin LDPE and flame-retardant recycled LDPE. • Insulation and withstand voltage There was no change in functionality due to regeneration for both flame-retardant virgin LDPE and flame-retardant recycled LDPE.
(3) Study cost savings	20~35% reduction in refurbished product costs	Flame-retardant virgin LDPE with 0.5- 1% CSCNT and flame-retardant recycled LDPE reduce costs by 13.5 to 27.3%.

Content	This year's objective	Achievement
(4) LCA Validation and Evaluation	Determine the composition of verify and evaluate the associated CO ₂ emissions and reductions.	A preliminary LCA calculation was performed assuming a 0.5–1% CSCNT additive, using a hybrid of flame-retardant virgin and recycled resins, with the procurement route set in the Kanto region. •0.5–1% CSCNT + virgin and recycled hybrid (1:1): CO₂ emissions reduced by 29,971–30,441 kg •0.5–1% CSCNT + virgin and recycled hybrid (1:2): CO₂ emissions reduced by 43,031–43,345 kg

In this project, we have developed a physical recovery technology and a horizontal recycling model using cup-laminated carbon nanotubes (CSCNTs) to solve the physical property degradation of recycled resin in flame-retardant resin electrical equipment materials for social infrastructure.

Over the three years of Reiwa 5 to 7, we optimized material formulations, maintained performance during multiple regenerations, reduced costs, and conducted environmental impact assessments (LCA).

By adding 0.5-1% CSCNT, the mechanical properties and flame-retardant properties of flame-retardant recycled LDPE are restored to more than 80% of virgin products, and the V-0 grade has been achieved in the vertical combustion test.

Accelerated deterioration tests simulated outdoor exposure equivalent to 10 years and confirmed that performance within the standard can be maintained even after multiple reproductions.

In terms of cost, the combination with non-flame-retardant virgin LDPE can achieve a reduction of up to 27%, and the LCA is expected to reduce CO₂ emissions by up to approximately 45,000 kg.

In the future, the company will strengthen the collection system and quality control and improve materials such as wear resistance and impact resistance for demonstration tests in actual use environments. The results will contribute to the expansion of resin recycling in Japan and overseas, and from Reiwa FY8 onwards, large-scale demonstrations in collaboration with user companies are planned.

目次

事業の要旨	1
Summary	6
1. 本事業の概要	14
(1) 事業名	14
(2) 事業の実施期間	14
(3) 本事業に至った背景	14
(4) 本事業の目的	16
(5) 実施体制	16
(6) GSI クレオスの要素技術	17
① CSCNT の概要	17
② 電材用途で有効とされる CSCNT の挙動	20
③ 高分子架橋技術	21
2. 事業内容	24
(1) 物性回復に関する技術開発	24
① 力学的物性の回復	24
② 機能性の回復	24
(2) 再生回数の増加	24
(3) コスト削減の検討	25
(4) LCA の検証・評価	25
3. 成果報告	28
(1) 物性回復に関する技術開発	28
① 力学的物性の回復に向けた検討	28
② 機能性の回復	44
③ 最適配合の検討	55
④ 考察	62
(2) 再生回数の増加	64

① 試験の全体像	64
② 引張試験	70
③ 機能性	72
④ 評価結果まとめ	74
⑤ 考察	75
(3) コスト削減の検討	76
① 各種材料の概算価格	76
② 当初のコスト試算	76
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	77
④ 考察	81
(4) LCA の検証・評価	82
(5) 展示会への出展	102
(6) 関係者間の連携	107
4. 事業化までの計画	108
(1) 最終目標	108
(2) 最終目標に向けた対応が求められる項目	108
(3) リサイクルするプラスチック及び用途	109
(4) リサイクル対象物の流通量	109
(5) リサイクル目標量	109
(6) 実証事業後の出口戦略と波及効果	109
(7) その他の環境影響の低減・循環型社会への貢献の見込み	110
(8) 環境影響の低減に資する要望とその必要性	111
5. 総括	113
(1) 物性回復技術の確立	113
(2) 再生回数の増加と耐久性評価	113
(3) コスト削減の検討	113
(4) 環境負荷低減の検証 (LCA)	113
(5) 今後の課題と展望	113

1. 本事業の概要

(1) 事業名

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) 事業の実施期間

令和7年4月～令和8年2月

(本事業は令和5年度、令和6年度、令和7年度に実施した)

(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、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材(電気設備資材)は、アルミニウム線や銅線をPE(ポリエチレン)や塩化ビニルの樹脂で被覆して製造されており、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、電材を構成する材料のリサイクルを進める上で大きな課題であり、予てユーザー側より強く改善を求められているところである。

【電材(電気設備資材)】

電材とは、電気設備工事において配線の保護・固定・接続・絶縁・分岐・収容等を行うために使用される各種部材の総称である。配線ダクト、モール、電線カバー、ジョイントボックス、ケーブル固定具など、多岐にわたる資材が含まれ、これらは工事の品質確保、安全性向上、保守性および意匠性の確保において欠かせない役割を果たす。電材の一種である電線カバーは、電線の露出を防ぐことで、誤接触や感電リスクの低減、異物混入やほこり堆積の防止等を実現する。また、着脱可能な構造を有するため、メンテナンス時の開放や配線変更が容易で、設備の維持管理性向上に寄与する重要部品である。

事業概要

脱炭素型循環経済システム構築促進事業 プラスチック等資源循環システム構築実証事業

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. 研究代表法人：株式会社GSI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

2. 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。

3. 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

4. 本事業の内容

- (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(下図) 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

5. 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、洗浄粉碎乾燥後、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



図2 事業概要スライド

（４）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」の水平リサイクルを目指し、使用済み電材樹脂を再び電材材料に水平リサイクルするための物性の回復と再生品の使用拡大等の実証検証を実施する。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材料特性や使用性などの課題がある。

この課題を解決するべく、(株) GSI クレオスの独自結晶構造である CSCNT（カップ積層型カーボンナチューブ）を樹脂材料に添加することで機能向上を図る。CSCNT は（６）で後述する通り、その特異的な構造由来で母材の力学的特性を向上させることが可能な材料であり、電材で多く使用される LDPE（Low-Density Polyethylene、低密度ポリエチレン）の再生化において各種物性を上げる効果が期待される。

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 LDPE 樹脂再生回数の増加、再生樹脂製造コスト低減を対象として課題解決を目指す。具体的には、CSCNT を再生樹脂母材中に均一分散して電材を再生し、電材に必要な各種特性の維持、向上を狙う。また、物性の低下が顕著である複数回再生品の機能維持・復元の効果も同時に評価する。

令和 5 年度及び 6 年度では、力学的物性の回復、また複数回数再生品の物性維持は達成した。

令和 7 年度では、難燃性や絶縁性等の機能性を含めた観点での最適配合の検討及び、コスト、LCA 等の調査を目的として検証を実施した。

（５）実施体制

本プロジェクトは、(株) GSI クレオスを研究代表機関とし、全体をとりまとめ、複数の連携機関が役割分担のもとで連携して実施した。(株) GSI クレオス、及び連携機関の役割を以下図 3 に示す。

(株) GSI クレオスは、主に研究開発の中核として、材料の基礎研究および試作開発を担当した。具体的には、CSCNT を用いた各種条件検討および評価と、材料の調整や実験を実施した。

連携機関の大東電材(株)は、製品形状での評価および性能試験を担当した。具体的には、再生低密度ポリエチレン (LDPE) 製品の成型、各種評価試験を実施し、SWOM（サンシャインウェザーメーター）による加速環境試験（耐候 10 年相当）を行い、製品の耐久性および実用性を検証した。

連携機関の(株) 近江物産は、プラスチック製品の再生加工の専門企業である。具体的には、大東電材(株)で加速環境試験を実施した成形品の粉砕、洗浄、乾燥処理等を担当した。

また、これらの機関は相互に連携し、材料の開発から製品評価まで一貫した体制で本プロジェクトを推進した。

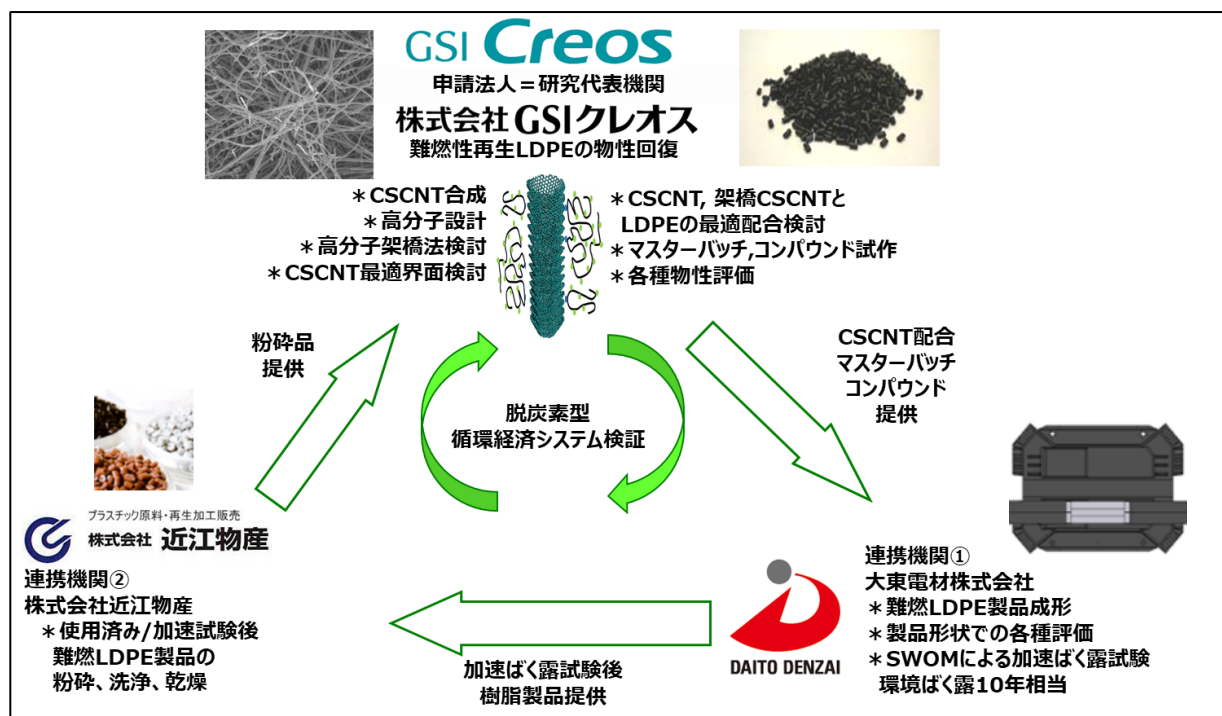


図3 実施体制及び各機関の役割

(6) GSI クレオスの要素技術

電材用再生樹脂に求められる物性は、力学的特性、および【何の？】機能性である。この機能を再生樹脂に付与するために、母材との良好な分散性や、高い力学的特性を持つ添加材料としてカーボンナノチューブを使用する。

(株) GSI クレオス独自の CSCNT について以降説明する。

① CSCNT の概要

当社製造のCSCNT（カップ積層型カーボンナノチューブ、Cup Stacked Carbon Nanotubes）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CNT（カーボンナノチューブ）の中で一般的に知られている通常のMWCNT（多層カーボンナノチューブ）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4）。

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、

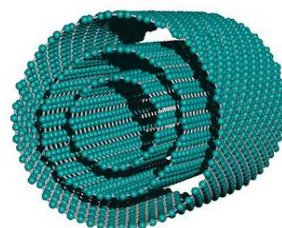


図4 MWCNT 模式図

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VWF（ファンデルワールス力）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。

（株）GSI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5、6、7）。¹

図6 HR-TEM画像（High-Resolution Transmission Electron Microscope、高解像度透過型電子顕微鏡）、図7 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5）。

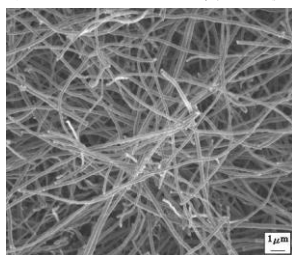


図5 CSCNT 外観

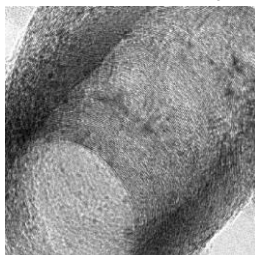


図6 CSCNT
HR-TEM 像

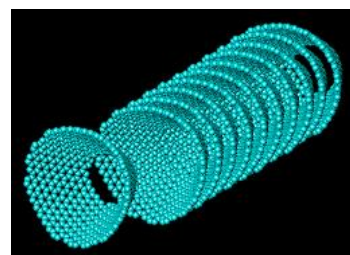
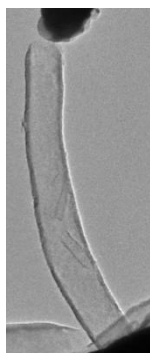


図7 CSCNT 模式図

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、高表面活性である。それにより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。

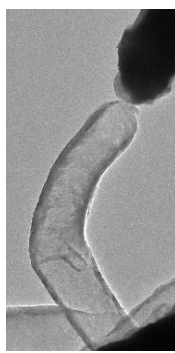
その挙動のTEM観察像とその動きに対応するシミュレーションを図8(a)(b)(c)(d)に示す。通常のMWCNTでは、このような圧縮応力に対し座屈を起こし破壊されるが、CSCNTの場合はカップ状炭素網がベローズ（蛇腹）状に積層しており、外部からの圧縮応力に対し変形しながらエネルギーを吸収している様子が観察されている。



(a)



(b) 模



(c)



(d) 模

図8 (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

¹ 参考文献：Endo, M., Yanagisawa, T., Dresselhaus, M. S., et al. *Cup-Stacked Carbon Nanofibers with an Entirely Hollow Core*, Appl. Phys. Lett., 80, 1267–1269 (2002).

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。(株) GSI クレオスは、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、CSCNT 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している。

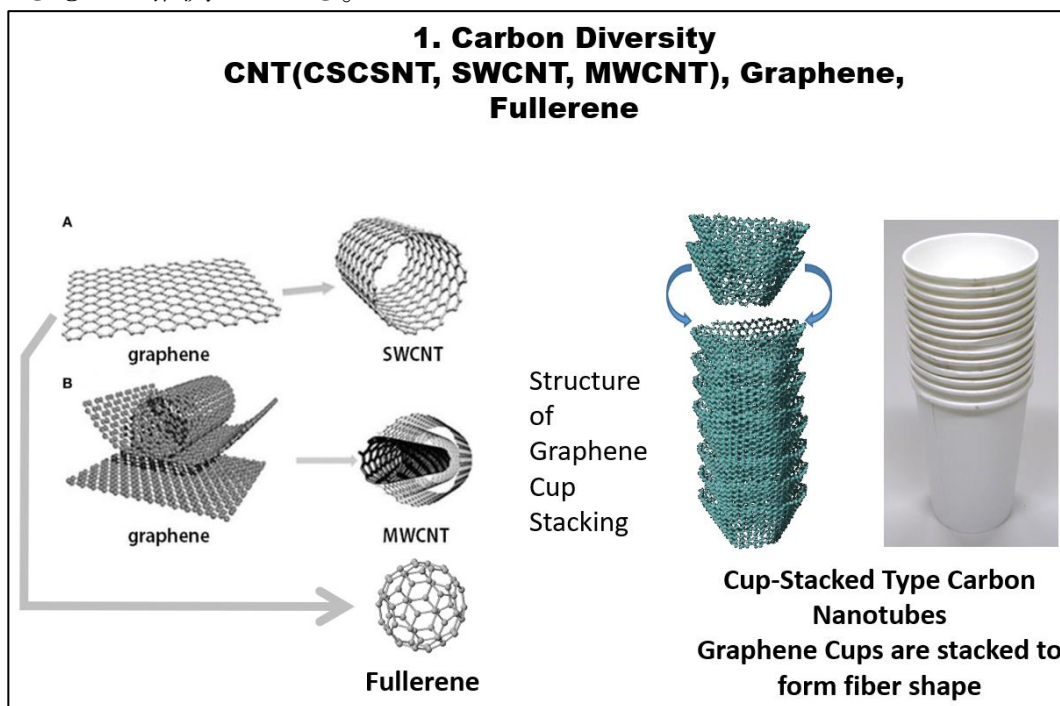


図 9 CSCNT を含むカーボン材料の構造

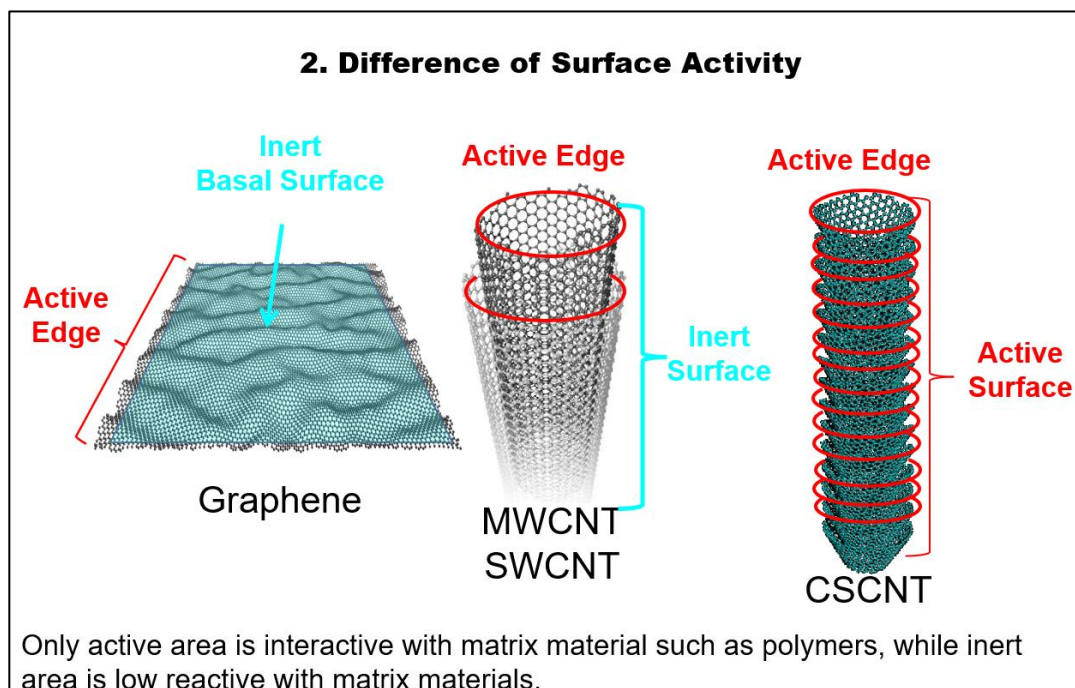


図 10 CSCNT の表面活性

② 電材用途で有効とされる CSCNT の挙動

市場から強く要求される電材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 11 は、CSCNT を分散した複合体（黒枠）の模式図である。

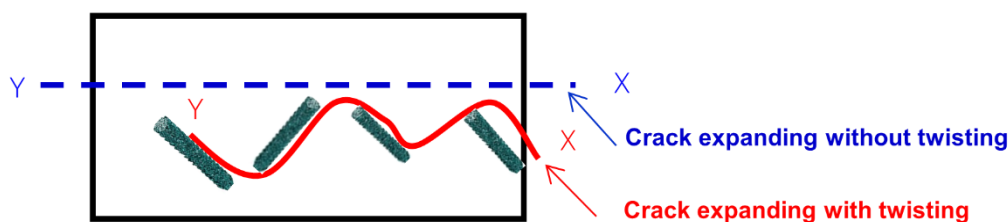


図 11 クラックディフレクション模式図

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。また複合則では、フィラーによるブリッジング効果も知られている。図 12 はブリッジングの模式図である。

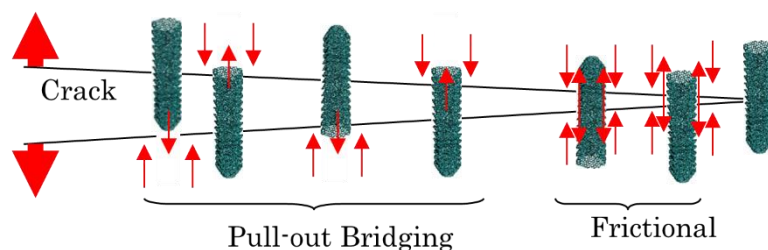


図 12 ブリッジング模式図

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。

本実証項目（１）物性回復に関する技術開発にて、この高靱性化効果について検証した。

③ 高分子架橋技術

（株）GSIクレオスは独自の結晶構造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（図15参照）。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13）。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。

本実証項目（１）物性回復に関する技術開発にて、力学的特性向上を検討した。

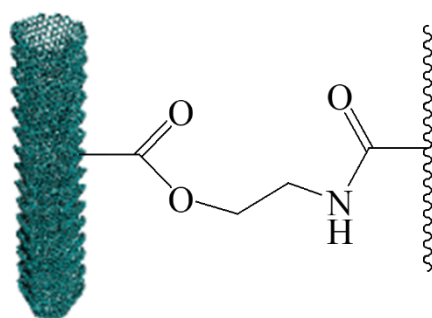


図 13 高分子架橋 CSCNT

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

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

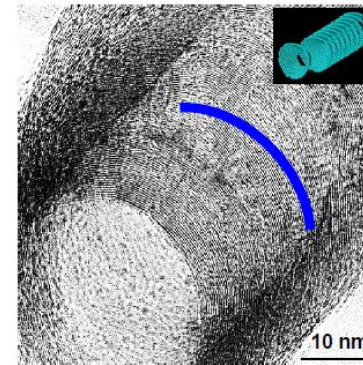


図1. HR-TEMによる観察



図2.水中攪拌30秒後分散状態
左:CSCNT 右:一般のCNT

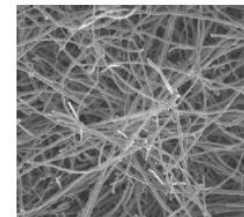
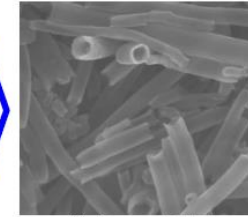


図3(a)元のCSCNT



(b)長さ調整後

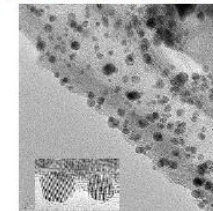


図4. CSCNT上の
ナノサイズ白金粒

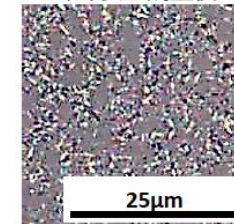


図5.エポキシ樹脂内
CSCNTの高分散

図 14 CSCNT の特徴説明

GSIクレオスの強みとする要素技術と商品化実績

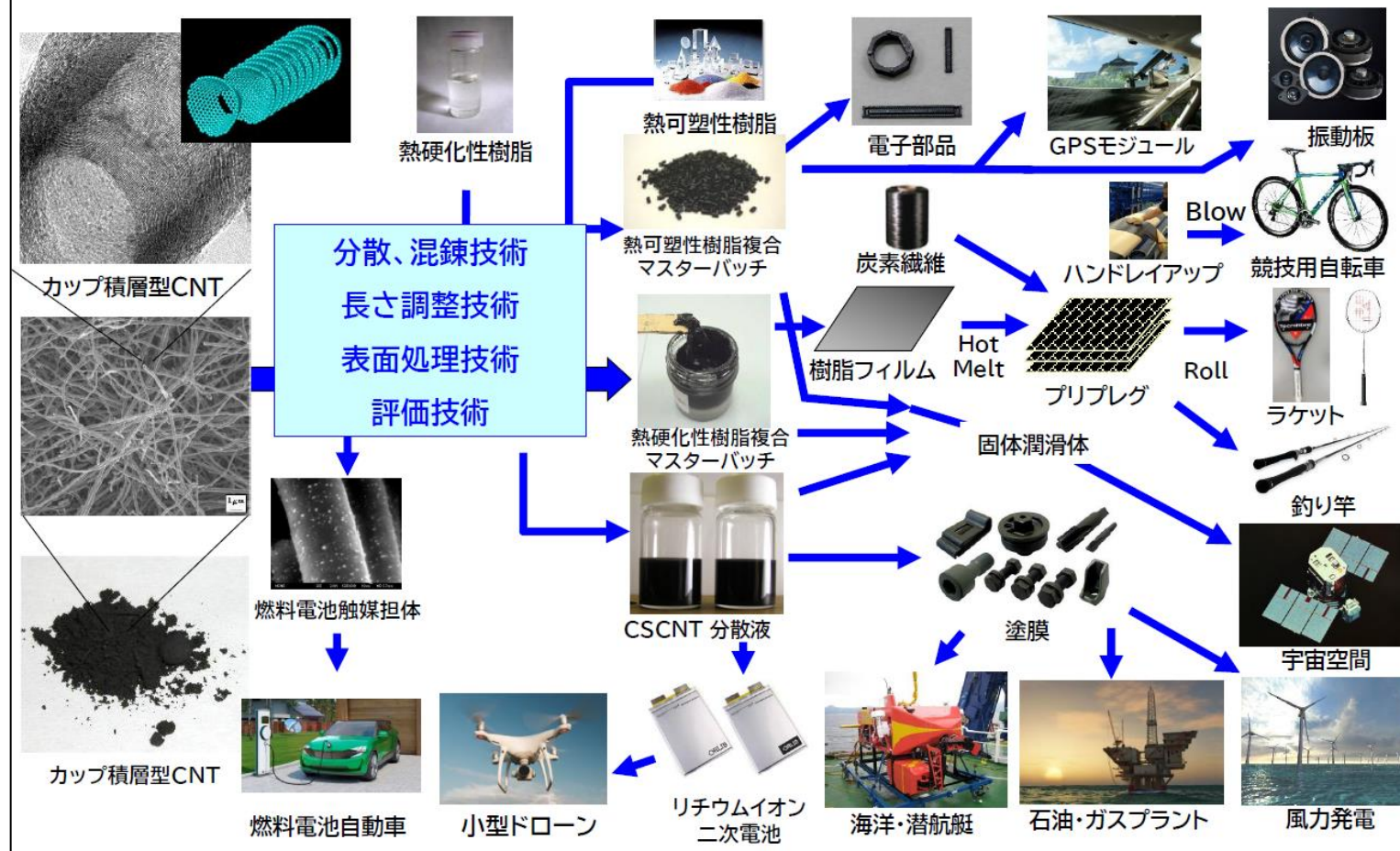


図 15 CSCNT 製品化のフローチャート

2. 事業内容

(1) 物性回復に関する技術開発

① 力学的物性の回復

本開発の対象は、電材製品に実際に使用される難燃性を付与した電材であるため、難燃バージン LDPE 及び難燃再生 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、CSCNT を充填した再生 LDPE 試験片を作製し、CSCNT 種及び配合率の最適化検討を行った。次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した。

なお、各パラメータに設定した項目は、(株) GSI クレオスのこれまでの先行研究、用途開拓の知見から、電材製品に求められる力学的特性、および機能性を付与する観点から、設定したものである。

- (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%等
- (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

①で前述した通り、電材製品に求められる機能性には難燃性と絶縁性があり、電気設備の技術基準の解釈に記載されている。電気設備の技術基準の解釈とは、電気設備の安全性や信頼性を確保するために定められた法令や規格の内容を具体的に理解し、適用するための指針である。

難燃バージン LDPE、難燃再生 LDPE それぞれの難燃性、絶縁性等の機能性を測定し、リファレンスとした上で、CSCNT 充填した再生 LDPE 試験片を作製し、難燃性と絶縁性を満たす CSCNT 種及び配合率の最適化検討を行う。前項(1)①において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した。

具体的には、開発品を用いた試験体に対する SWOM 試験による環境ばく露加速試験、一部物性試験、粉碎・洗浄・乾燥等を実施した。

(2) 再生回数の増加

LDPE 試験片に対し、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碎・洗浄・乾燥した粉碎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、機能回復を試みた。

次の 2 系統 (ア) (イ) で SWOM による加速劣化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た。

なお、この 2 系統に設定した観点は、由来が異なる材料に対する機能回復の効果を比較評価することにある。これにより、原料の違いが再生プロセスおよび CSCNT 添加による性能回復に及ぼす影響を定量化し、最適な再生条件の確立を目指す。

(ア) 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→SWOM2,000h→粉碎・洗浄・乾燥→CSCNT 充填→再生

- 1 回目試験片
- ・ 各種評価後、再生 1→SWOM2,000h→粉砕・洗浄・乾燥→CSCNT 充填→再生 2 回目試験片
- ・ 各種評価後、再生 2→SWOM2,000h→粉砕・洗浄・乾燥→CSCNT 充填→再生 3 回目試験片
- (イ) 市場から回収された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→SWOM2000h→粉砕・洗浄・乾燥→再生 2 回目試験片
- ・ 各種評価後、再生 2→SWOM2000h→粉砕・洗浄・乾燥→CSCNT 充填→再生 3 回目試験片
- ・ 各種評価後、再生 3→SWOM2000h→粉砕・洗浄・乾燥→CSCNT 充填→再生 4 回目試験片

(3) コスト削減の検討

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、若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。

(1) 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、バージン品充填等によりコスト低減を試みた。

他方、コスト低減策として、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、総コストを検証した。

(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った。本業務の準備段階で、(株) GSI クレオスと大東電材(株)、(株) 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 CO₂排出量を試算しており、本業務開始後に、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排出量として検証した。

各工程と実施機関は以下の通り。

(i) 原材料生産

原材料精算では LDPE 製造、CSCNT 合成を各製造企業で実施した。

(ii) コンパウンド製作

CSCNT と LDPE 樹脂(ペレット、粉砕品)の混練品試作(小型 2 軸押出機、中型 2 軸押出機)は(株) GSI クレオスにて担当した。

(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は大東電材(株)にて担当した。

(iv) 樹脂再生

LDPE 製品の粉砕、洗浄、乾燥は(株) 近江物産が実施した。

(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(株) GSI クレオスにて実施した。

なお、本事業における有識者コメントである、「令和 5 年度及び令和 6 年度の実証検

証したりサイクル材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。」に対応すべく、物性劣化した対象材に対する実際の物性回復条件でのエネルギーを計算し、それを 1～2 回リサイクルした場合の CO₂ 削減効果を検証、精査した。

表 2 本技術開発[実証研究]の目標

	項 目	採択時の技術の状況	本年度目標
0	全体目標	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。 ① 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回復させる試みがある。 ② 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。 【当社状況】 ① 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 難燃性再生 LDPE の力学的特性、機能性の回復を達成する。 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。 複数回再生後に上記 (ア) (イ) を達成する。 ③ 同再生樹脂コストを削減する。 現行品 (再生品 50%バージン 50%) を 600 円/kgとした時、500 円/kg、400 円/kgへの大幅なコスト削減
1	物性回復に関する技術開発 ・力学的特性の回復 ・機能性の回復	同上	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し、方策を提示する。
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し、削減の方策を提示する。
4	LCA の検証・評価	本業務の準備段階で連携法人との間で、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 CO ₂ 排出量を試算済み。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 CO ₂ 排出量として検証する。	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。

3. 成果報告

(1) 物性回復に関する技術開発

① 力学的物性の回復に向けた検討

①－1 目的

電材用途では、LDPE が使用されており、各使用材料の物性をリファレンスとして、CSCNT 添加による物性の変化を確認し、配合比の最適化を図る。

なお、本事業の対象の電材製品は難燃性樹脂であるが、樹脂の物性回復、コスト低減の目的から、本実証では非難燃性も検討サンプルとした。(コスト削減効果の検証については、3.(3)で検証する)。

①－2 検討に用いる材料

①－2－1 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 16)

(イ) 難燃再生 LDPE (図 17)

(ウ) 非難燃バージン LDPE (図 18)

(エ) 非難燃再生 LDPE (図 19)



図 16 (ア) 難燃バージン LDPE ペレット



図 17 (イ) 難燃再生 LDPE ペレット



図 18 (ウ) 非難燃バージン LDPE ペレット



図 19 (エ) 非難燃再生 LDPE ペレット

①－２－２　CSCNT

CSCNT は、線長、表面状態、分散性、結晶度など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、樹脂材料の力学的特性に加え、機能性（難燃性、絶縁性）の向上を目的として、４種類の CSCNT を用いて検討を実施した。これらのサンプルは CSCNT の凝集状態や表面活性、長さ等の構造や分散性が異なり、当社先行研究から、力学的特性および機能性に有意な効果が予測されるため選択した。

サンプルの略称は商品コードである。

サンプル①：24PS：長尺 CSCNT（標準グレード）

サンプル②：24YD：長尺ほぐし CSCNT

サンプル③：TJ20A：短尺 CSCNT

サンプル④：24LHT：長尺結晶度調整 CSCNT

(ア) 長尺 CSCNT (24PS : 標準グレード)

CSCNT の元材料であり、(イ) ~ (エ) は 24PS を追加加工したものである。線長は平均約 $5\mu\text{m}$ であり、長尺 CSCNT が絡まり合い、凝集塊が多く存在する (図 20)。量産性が高く、それに伴い比較的低コストである。本グレードは、今回選定した 4 種の CSCNT の内、最も長く、樹脂混練時に線長を保って高分散することで、特に力学的特性の向上が期待できる材料である。

前述 (1 項 (6) GSI クレオスの要素技術②) 記載のクラックディフラクションや Twisting 機構からも、長い CNT は短い CNT よりも力学的特性に与える影響が大きいことが知られている。

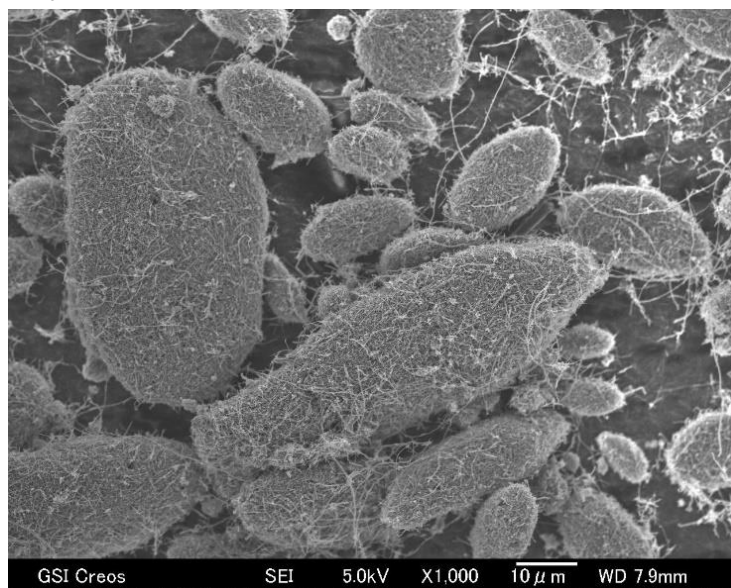


図 20 (ア) 長尺 CSCNT (24PS : 標準グレード) の 1000 倍写真

(イ) 長尺ほぐし CSCNT (24YD)

標準グレードの 24PS に存在する CSCNT の凝集塊をほぐしたグレードである (図 21)。ほぐし処理により母材への分散性が向上し、母材中での単離分散が促進されるため、力学的特性の向上が見られる。ただし、標準グレードの 24PS に比べてほぐし処理工程が追加されるため、コストは増加する。

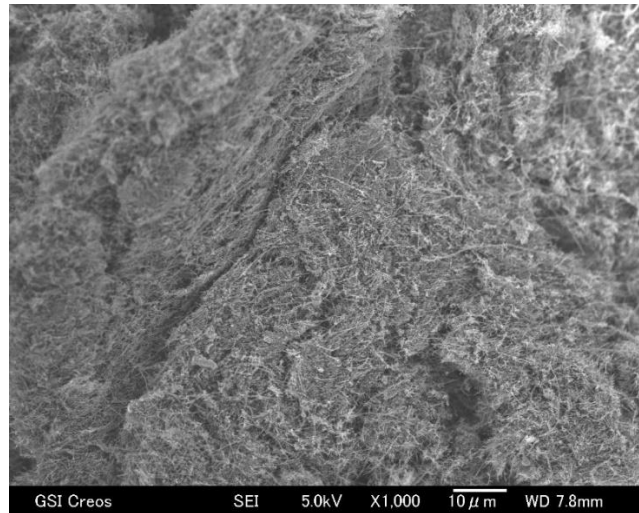
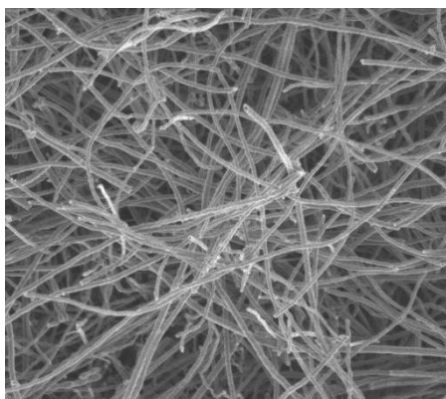
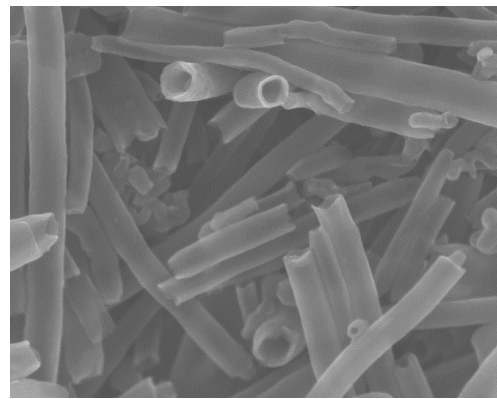


図 21 (イ) 長尺ほぐし CSCNT (24YD) の 1,000 倍写真
(ウ) 短尺 CSCNT (TJ20A)

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処理した CSCNT である (図 22)。特徴として高い分散性を有しており、標準グレードの 24PS と比較して高濃度化および粘度低減の傾向が確認されている。そのため、母材中の均一分散により力学的特性、機能性の向上や物性のバラつき低減に効果があると予測されるため選択した。



長尺 CSCNT (24PS)



短尺 CSCNT (TJ20A)

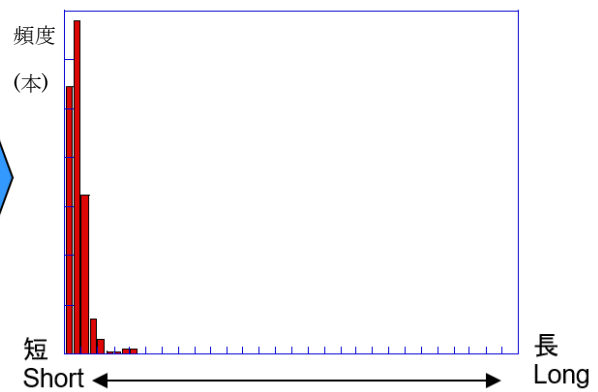
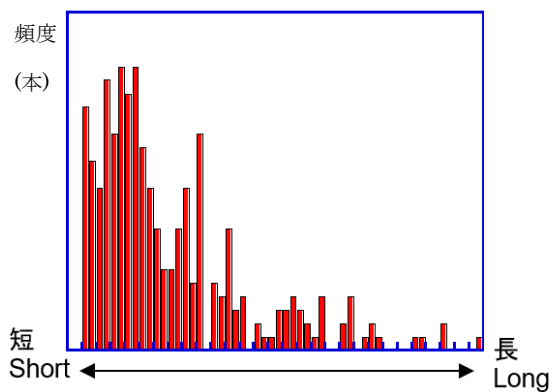


図 22 CSCNT 長さ調整前後の SEM 写真と線長ヒストグラム

(エ) 結晶度調整 CSCNT (24LHT)

高温処理により結晶度を高めたものである。処理温度の調整により、CSCNT の柔軟性を損なうことなく、高結晶化度に伴う高い剛性を併せ持つ。線長および凝集状態は標準グレードの 24PS と同等である。

以上の複数種類の CSCNT を用いて、試作および評価を実施した。

①－3 各種母材樹脂を用いた処理条件の最適化

①－3－1 試作評価に用いた設備

本検討は、卓上混錬機、及び成型機（図 23）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 24）を用いて評価を実施した。

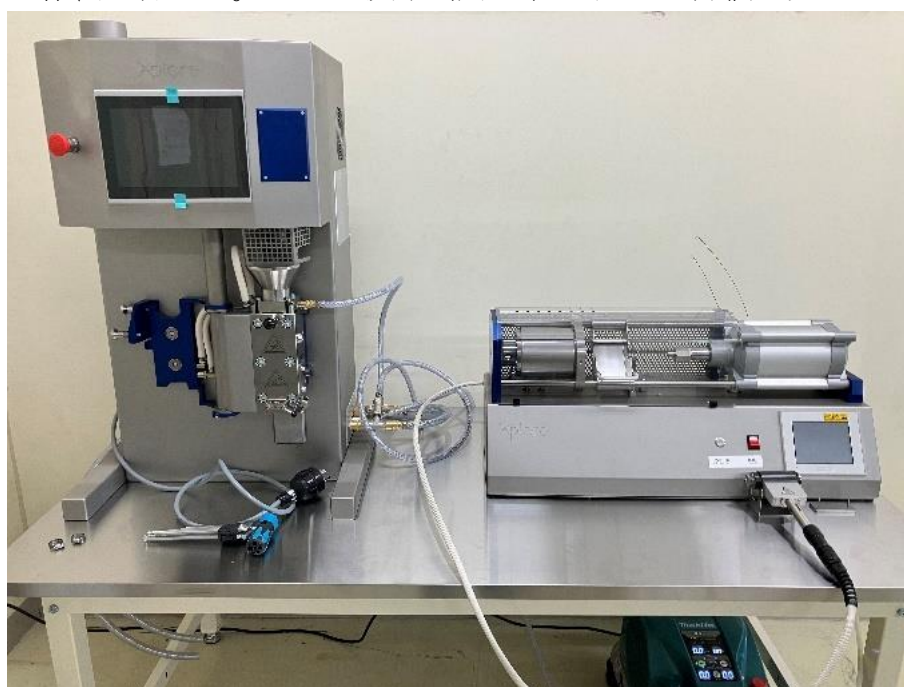


図 23 卓上混錬機、及び卓上成型機



図 24 小型ダンベル試験片 (ISO527-2 1BA)

初期評価として、CSCNT 未添加の難燃バージン LDPE (①－2－1 (ア)) と、非難燃バージン LDPE (①－2－1 (ウ)) 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 25 (a))、メルトインデクサー (図 25 (b)) を用いて行った。

(a)



(b)



図 25 (a) 万能試験機、(b) メルトインデクサー

①－３－２ 処理温度の最適化

樹脂材料の推奨処理温度範囲は 170℃～230℃であり、中央値 200℃から±20℃の 180℃、200℃、220℃の処理温度条件で試作評価を実施した。

難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 3）

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

表 3 （ア）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	伸び	
	MPa	(%)	
180℃	14.55	388.3	7.876
200℃	14.49	408.8	8.194
220℃	14.43	404.7	8.136

非難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 4）

（ウ）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。

表 4 （ウ）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	伸び	
	MPa	(%)	
180℃	12.91	425.6	7.656
200℃	13.9	452.6	7.708
220℃	13.80	354.0	3.192

樹脂の溶融流動性を評価する指標である MFR（Melt Flow Rate）は 220℃で顕著な低下傾向が確認された。

①－３－３ 処理時間の最適化

前述①－３－２で最適化した処理温度 200℃で、処理時間を条件として評価した。

難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 5）

（ア）難燃バージン LDPE で、処理時間による大きな物性の変化は確認されなかった。

表 5 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	伸び	
	MPa	(%)	
5 分	14.49	408.8	8.194
15 分	14.52	394.2	8.024
30 分	14.93	401.0	8.008

非難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 6）

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

表 6 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	伸び	
	MPa	(%)	
5 分	13.09	452.6	7.708
15 分	13.26	432.8	4.404
30 分	12.20	241.2	2.328

①－３－４ 処理回転数の最適化

前述の①－３－２、および①－３－３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。

難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 7）

（ア）難燃バージン LDPE は、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 7 （ア）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	伸び	
	MPa	(%)	
100rpm	14.49	408.8	8.194
300rpm	14.77	387.4	7.654

非難燃バージン LDPE での最適化検討結果（表 8）

（ウ）非難燃バージン LDPE は、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、流動性の低下が確認された。

表 8 （ウ）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	伸び	
	MPa	(%)	
100rpm	13.09	452.6	7.708
300rpm	13.21	312.4	1.612

①－3－5 処理条件検討のまとめ

上記検討結果から、難燃バージン LDPE、および非難燃バージン LDPE とともに、伸び、MFR 値から樹脂への負荷が最も小さい条件である以下を最適処理条件と設定し、以降から CSCNT 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 リファレンスデータの測定結果

試作検討に用いる樹脂 4 種類について、①－3 で得られた処理条件において CSCNT を添加せずにリファレンスデータの測定を実施した（表 9）。一度市場に出て回収された各再生品は、各バージン品と比較して物性が低下する傾向が認められた。特に（エ）非難燃再生 LDPE では、表 9 に示す通り、すべての物性の低下が顕著であった。

表 9 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)	伸び (%)	MFR g/10min
（ア）難燃バージン LDPE	14.49	408.8	8.194
（イ）難燃再生 LDPE	11.02	380.7	8.416
（ウ）非難燃バージン LDPE	13.09	452.6	7.708
（エ）非難燃再生 LDPE	10.61	127.4	4.256

※処理条件：温度：200℃、時間：5 分、回転数：100rpm（①－3 検討結果適用）

①－５　CSCNT 種、及び添加量の最適化検討

①－５－１　検討条件

本検討では、前節で示した 4 種類の LDPE 樹脂の内、難燃バージン LDPE、および非難燃バージン LDPE を対象とし、CSCNT の添加量を 0.1%、0.5%、1%、3%、5% の 5 段階に設定し、初期評価を実施した。

初期評価の力学的特性評価結果、および難燃性評価結果、コスト試算結果を基に、更に添加量の最適化を図るべく、以下③最適配合の検討を行った。

①－５－２　評価結果

最大点応力については、CSCNT の添加量の増減による顕著な変化は認められなかった（図 26）。一方、伸びは添加量の増加に伴い低下傾向を示し、材料の伸び性能に影響を与えることが示唆された（図 27）。

これらの結果から、CSCNT の添加量は、伸びの低下が少ない低濃度領域である 0.5% 近辺が最適と判断された。

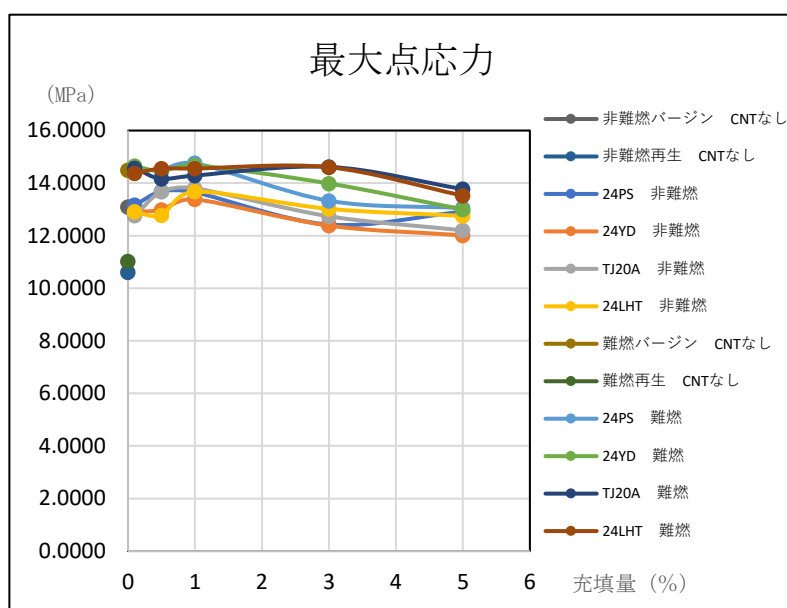


図 26 最大点応力の比較

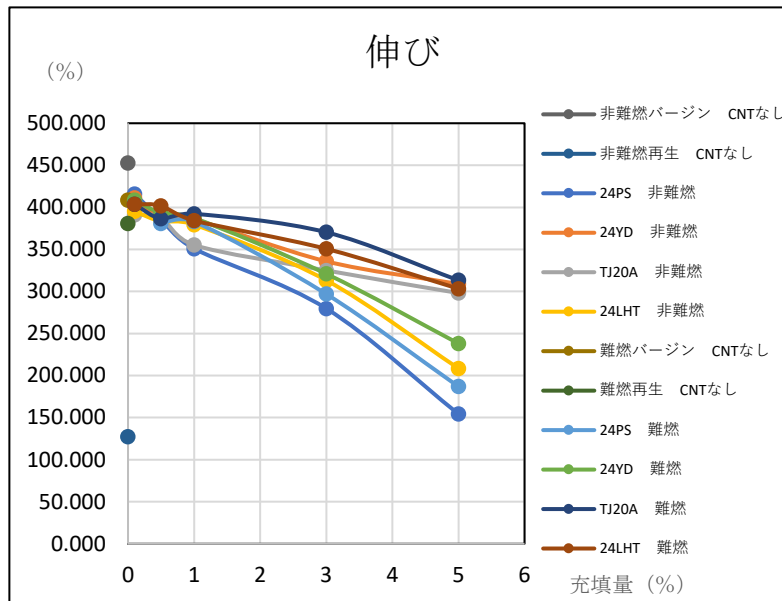


図 27 伸びの比較

①－5－3 考察

本検討において、CSCNT の高濃度添加に伴い伸びの低下が確認された。現時点では、CSCNT 添加量をより低濃度である 2%以下に抑えることで、目標とする物性である最大点応力 9.8MPa 以上、伸び 350%以上を十分に達成可能であると考えられる。また、CSCNT の種類による物性差異は認められず、いずれの CSCNT 種においても類似した傾向が確認された。一方で、処理条件が最適でない場合には、CSCNT の凝集物が樹脂中に残存する可能性があるため、事項に示す通り、樹脂中における CSCNT の分散状態について詳細に観察を行った。

①－6　CSCNT 分散状態の観察

①－6－1　観察方法

本事業では、以下の観察機器を用いて、①－5で試作した4種のCSCNT含有サンプルの観察を実施した。本観察法は(株)GSIクレオスが考案したものであり、CSCNTの凝集の有無を簡便に確認できる特徴を有している。

①－6－2　観察機器

(ア) レーザー顕微鏡 (図 28)

装置仕様を以下に示す。

- ・ レーザースポット径：0.5 μ m
- ・ 表面粗さ (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 28　レーザー顕微鏡

(イ) 透過型光学顕微鏡 (図 29)

装置仕様を以下に示す。

- ・ BX51 (OLYMPUS 製)
- ・ 観察可能範囲 (透過観察) : 100×100 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 29 光学顕微鏡

①－6－3 観察試料作製方法

観察試料は、以下の方法で作製した (図 30)。

CSCNT 濃度は、0.1%および 5%の 2 系統で観察を実施した。

- (ア) スライドガラスに試料を置き、その上にもう一枚のスライドガラスを重ねる。
- (イ) ホットプレートにて試料を融点まで加温し、溶融させながら薄く広げる。
- (ウ) 顕微鏡を用いて観察を行う。

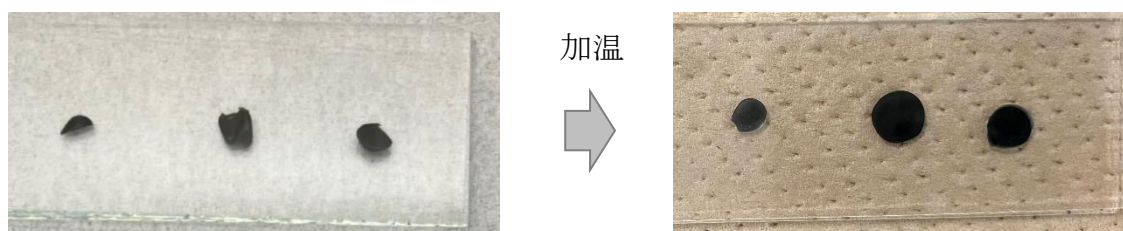


図 30 観察試料の熔融前後

①－6－4 顕微鏡観察結果

①－6－4－1 レーザー顕微鏡観察結果

これまでの経験から、レーザー顕微鏡では CSCNT の充填量が少ない試料においてレーザー光の透過度が高く、試料表面から深部までの観察が可能である。一方、充填量が多い試料では透過度が低下し、試料表面から数 μm 程度の深さまでの観察となる。本試料においては、(a)CSCNT 充填量 0.1%の試料、(b)5%の試料の 2 系統において観察を行った。添加量の違いにより画像中の CSCNT 密度には差異が認められたが、CSCNT の線長や凝集物の有無に関しては差異が見られなかった（図 31）。

CSCNT は分散を目的とした混錬処理により切断・破碎され、繊維状形態を失う場合があるが、本検討で用いた条件下では CSCNT の線長を維持したまま高分散状態が確認された。ただし、実際の CSCNT 線長の調査は今後行うこととする。

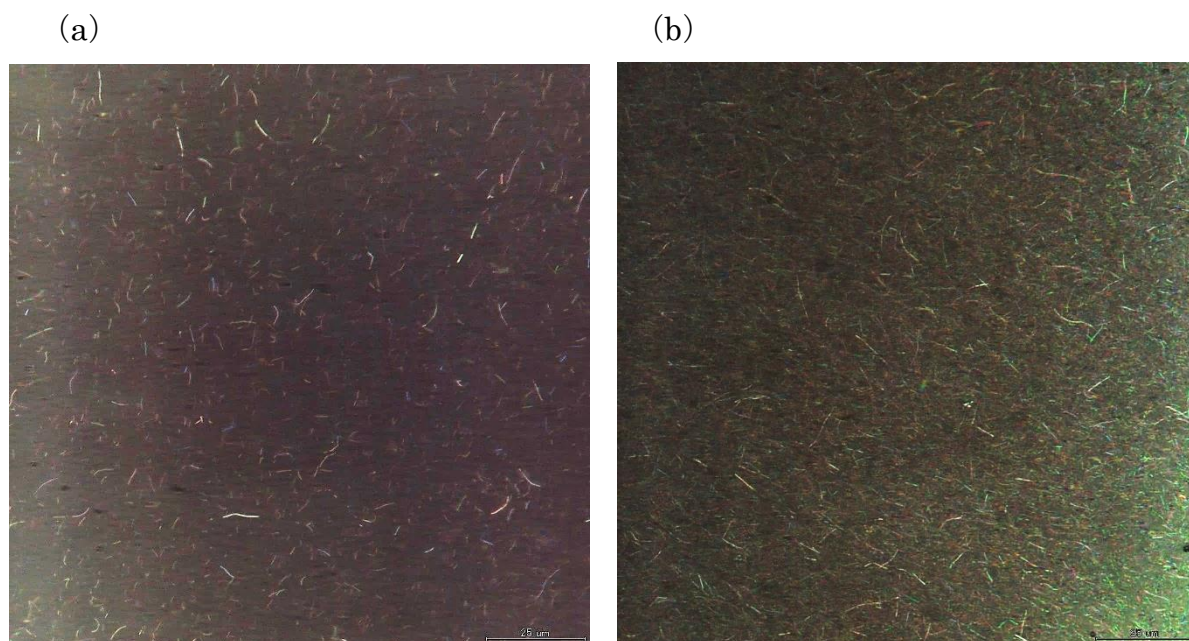


図 31 左： (a) 0.1%CSCNT (24PS：3 項①－2－2 (ア) 参照) 含有
非難燃バージン LDPE

右： (b) 5%CSCNT (24PS) 含有非難燃バージン LDPE

①－6－4－2 透過型光学顕微鏡観察結果

各種 CSCNT の分散状態観察結果を以下図 32 に示す。

CSCNT の種類にかかわらず、いずれの試料においても CSCNT の分散状態は良好であり、処理条件は最適であると判断した。

本評価法は、光を透過させて凝集状態を観察するため、母材は光を透過する樹脂である必要がある。難燃 LDPE は、難燃剤等の添加剤含有のため、黒色であり光透過性がないため、本観察は、非難燃バージン LDPE にて評価を行った。

本観察は、すべて CSCNT 添加量 0.1% の試料を対象に実施した。

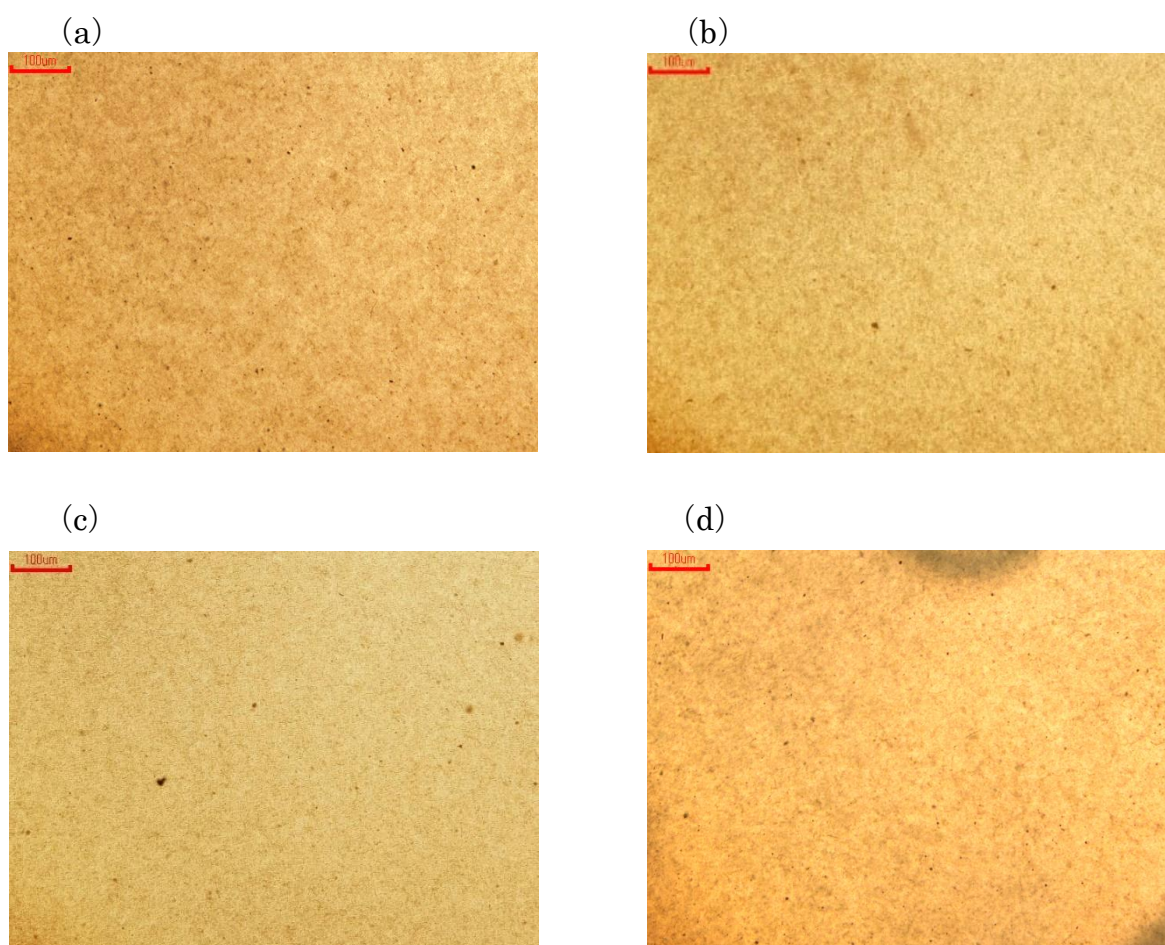


図 32 (a) 24PS 含有非難燃バージン LDPE の観察結果
(b) 24YD 含有非難燃バージン LDPE の観察結果
(c) TJ20A 含有非難燃バージン LDPE の観察結果
(d) 24LHT 含有非難燃バージン LDPE の観察結果

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 33 に示す。図 20 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 33 CSCNT 凝集物 (24PS) 参考写真

①－6－5 考察

試作した CSCNT 含有樹脂試料のレーザー顕微鏡観察では、CSCNT の種類に関係なく、CSCNT 凝集塊は確認されず、長尺の CSCNT が樹脂マトリックス内に均一分散している状態が確認された。この良好な分散状態により、以下の効果が期待できる。

- (ア) 力学的特性の向上については、均一に分散した CSCNT が応力分散や強化に寄与し、引張強度や耐衝撃性の改善が見込まれる。
- (イ) 劣化の速度や度合いの低減については、CSCNT が微細亀裂の進展を抑制し、環境ストレスによる劣化を遅らせる効果がある。
- (ウ) 難燃性の発現では、CSCNT が熱伝導性の向上や炭素基盤の保護層形成に関わり、燃焼時の熱分解抑制や燃え広がりの抑制に寄与し、材料の安全性を高める。

② 機能性の回復

②－1 難燃性の測定

②－1－1 難燃性測定方法の規格

JIS K 6911 の 5.24 B 法(垂直燃焼試験)を参考とした。

本評価方法は、プラスチック材料の燃焼特性を評価する代表的な試験方法であり、燃焼後の自己消火性や燃焼滴下物の有無などを基準とされる。材料表面の燃焼挙動を垂直方向から観察し、燃焼時間および燃焼の広がりを定量的に評価することを目的としている。これにより、難燃性の有無やその程度を客観的に判断できるため、製品の安全性評価に有効である。

【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 $37\text{MJ}/\text{m}^3$ {約 $9\,000\text{kcal}/\text{m}^3$ } 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) $70\pm 1^\circ\text{C}$ 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 $70\pm 1^\circ\text{C}$ 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

難燃性評価における V-0 等級について

「V-0」等級は、最も優れた難燃性能を示す評価基準の一つである。

この評価を満たす材料は、火災時の延焼リスクを低減できるため、安全性が非常に高いと判断される。

②－1－2 測定方法の簡素化検討

JIS K 6911 に記載されている耐燃性評価 B 法（垂直燃焼試験）を参考に評価を実施した。標準規格では短冊状の試験片を用いて評価を行うが、試作検討の評価を迅速化するため、評価手順の簡素化を目指した。具体的には、引張試験で使用するダンベル形状の試験片を活用し、難燃性評価実施の可能性について検討を行った。

②－1－3 リファレンス材料の測定

①－1 で示した、(ア) 難燃バージン LDPE、(イ) 難燃再生 LDPE、(ウ) 非難燃バージン LDPE、(エ) 非難燃再生 LDPE の各試料について測定を実施した。

②－1－3－1 測定結果

リファレンスの評価状況は以下の通りである。

(ア) 難燃バージン LDPE

難燃バージン LDPE については、垂直燃焼試験においてフレーミング（炎が継続的

に燃え続ける状態)、およびグローイング(炎が消えた後も赤熱している状態)は一切認められなかった。滴下物の発生は確認されたものの、その滴下物が外科用綿(脱脂綿)を発火させるようなものではないことから、安全性の観点から問題ないレベルであると評価した。

(イ) 難燃再生 LDPE

難燃再生 LDPE においても、上記(ア)同様にフレーミングおよびグローイングは認められなかった。さらに、滴下物の発生自体も確認されず、燃焼に伴う滴下のリスクは低いことが示された。これらの結果から、難燃性能においてバージン材料と遜色ない性能を有していることが確認された。

(ウ) 非難燃バージン LDPE

非難燃バージン LDPE では、試験中に明確なフレーミング現象が発生した。また、燃焼により滴下した物質が脱脂綿に引火することが確認され、燃焼の拡大および二次火災のリスクが高いことが示された。これにより非難燃バージン材料の安全性には課題があることが明らかとなった。

(エ) 非難燃再生 LDPE

非難燃再生 LDPE においても、上記(ウ)同様にフレーミング現象が発生した。さらに滴下物による脱脂綿の引火も確認され、上記(ウ)同様に安全性の課題があることが明らかになった。

②－１－３－２ 考察

以上の評価結果から、難燃 LDPE 材料はバージン品および再生品ともに燃焼挙動において安全性が高く、特に再生材料において、燃焼時の滴下を抑制効果が確認された。非難燃 LDPE は、バージン品、および再生品ともに燃焼が確認され、配合には課題がある事が確認された。

本評価方法は、ダンベル形状の試験片を用いた加速試験であり、本来は滴下が起こりやすい特徴を持つ。しかし、滴下抑制現象の確認により、従来の評価である JIS K 6911 では判定が難しい材料特性を評価可能であることが確認された。

②－１－４　CSCNT 配合品の測定

前項、リファレンス材料の測定結果から、①難燃再生 LDPE、②ハイブリッド品（難燃性再生 LDPE 及び難燃性バージン LDPE 各 50%配合）、③難燃バージン LDPE、に対して、24PS（標準グレード、前述①－２－２（ア））を添加して評価を実施した。配合比は、前項物性回復に関する技術開発結果、及び、コストの観点から 0.1、0.5、1% とした。

②－１－４－１　測定結果

難燃性試験結果を以下表 10 に示す。

表 10　難燃性試験結果まとめ

No.	サンプル内容 (使用 LDPE は全て難燃性)	フレーミング有無 (難燃性簡易評価)	難燃試験時の 滴下物有無
1	①再生 LDPE	なし	なし
2	①+0.1%CSCNT	なし	なし
3	①+0.5%CSCNT	なし	なし
4	①+1%CSCNT	なし	なし
5	②再生 LDPE +バージン LDPE (配合比 1:1)	なし	3 本中 1 本滴下
6	②+0.1%CSCNT	なし	3 本中 1 本滴下
7	②+0.5%CSCNT	なし	なし
8	②+1%CSCNT	なし	なし
9	③バージン LDPE	なし	滴下
10	③+0.1%CSCNT	なし	滴下
11	③+0.5%CSCNT	なし	滴下

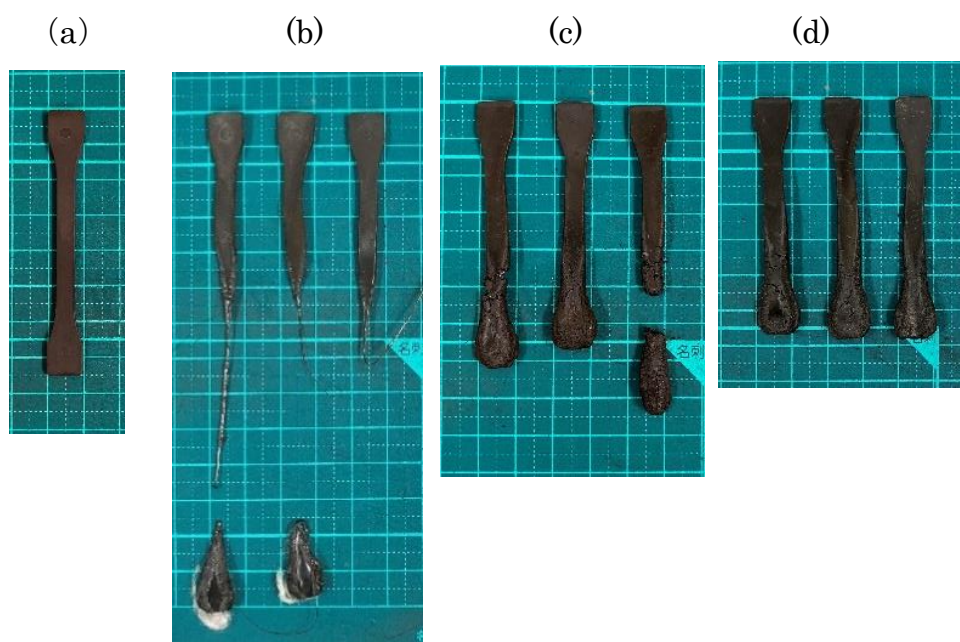


図 34 (a) 難燃試験前サンプル
 (b) 難燃試験後サンプル 100%難燃バージン LDPE 表中 No.9)
 (c) 難燃試験後サンプル 50%難燃バージン LDPE -50%難燃再生 LDPE
 (表中 No.5)
 (d) 燃試験後サンプル 0.5%CSCNT 含 50%難燃バージン LDPE -50%難燃再生
 LDPE (表中 No.7)

燃焼試験の結果は次の通りである。

- ・ 難燃バージン LDPE、難燃再生 LDPE とともに、フレーミングの発生は確認されなかった。
- ・ 難燃バージン品 LDPE は難燃試験時の材料の滴下を確認したが、CSCNT を微量添加した難燃再生 LDPE の滴下物はなかった。
- ・ 難燃バージン+難燃再生品の配合系では、CSCNT 添加により、滴下物の抑制効果を確認した。

②－１－４－２ 考察

難燃バージン LDPE 及び難燃再生 LDPE では、CSCNT 添加の有無にかかわらずフレーミングは発生しなかった。

一方、難燃バージン品と難燃再生品のハイブリッド品では CSCNT 無添加品で滴下物が確認されたが、CSCNT を 0.5%配合することで滴下物の発生が抑制された。

CSCNT を添加した配合では、燃焼時の滴下抑制効果が確認され、難燃性に加えて滴下による二次被害等のトラブル低減も期待できる材料であることが示された。

以上より、CSCNT は難燃性能の維持および滴下物抑制に効果的であると評価した。

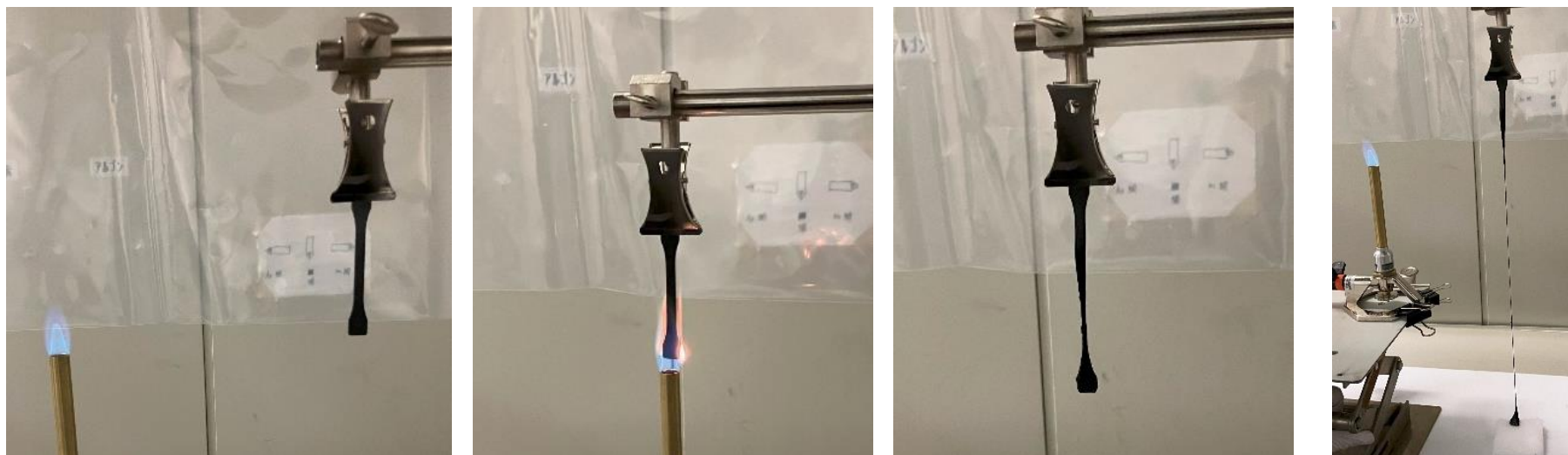


図 35 参考 難燃試験時の状況＝滴下あり、燃焼なしの場合＝（難燃バージン LDPE（表 10 No.9 試料））

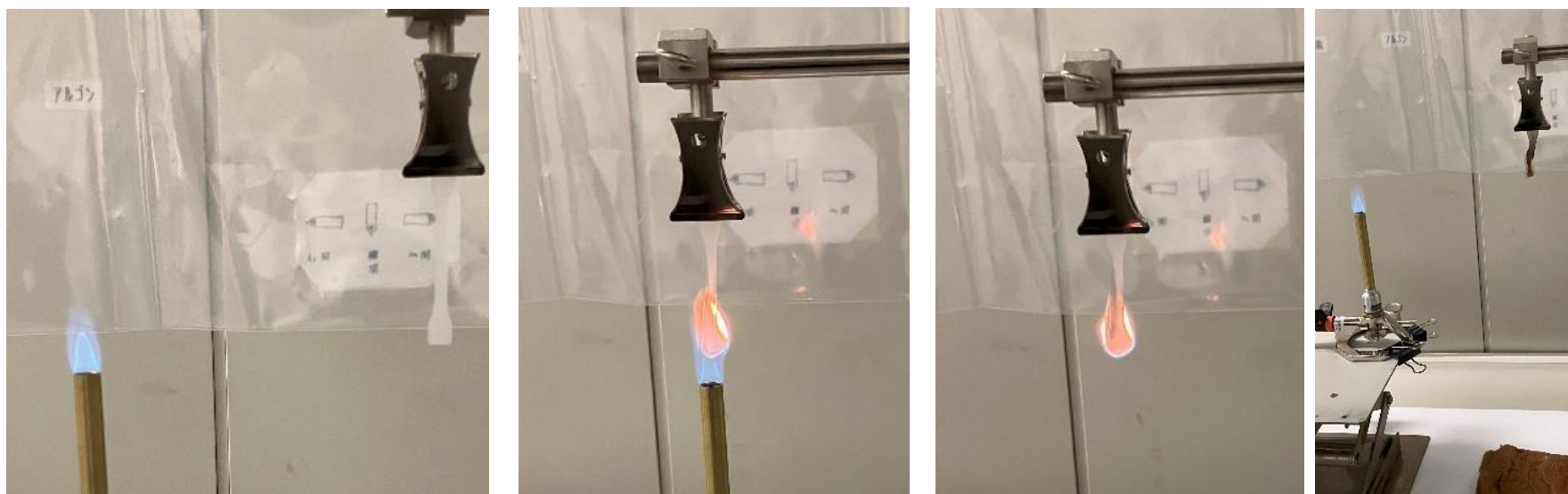


図 36 参考 難燃試験時の状況＝滴下あり、燃焼ありの場合＝（非難燃バージン LDPE）

②－２ 絶縁性(電気抵抗値)の測定

②－２－１ 絶縁性評価方法

本開発材料の絶縁性の目標値は、体積抵抗値 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上である。

一般的に CSCNT を含む炭素材料は導電材料であり、単体では $10-2 \Omega \cdot \text{cm}$ 程度の体積抵抗値であるが、樹脂への複合方法や状態により絶縁材料とすることが可能である。

表 1 に示す本検討の目的である $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の評価に先立ち、(株) GSI クレオス保有の設備にて高抵抗領域のふるい分けを目的として実施した。具体的には、評価対象試料の抵抗値が (株) GSI クレオス保有設備の測定可能範囲 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上にあるかを事前に確認し、詳細な評価に向けた効率的な選別を実施した。

本測定では、開発の効率化を目的として、初期評価は体積抵抗値 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上である事を (株) GSI クレオス保有設備で確認・スクリーニングした上で、外部評価機関にて $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の評価を実施した。

②－２－１－１ 評価方法

1) 保有設備でのスクリーニング評価方法

本試験では、(株) GSI クレオス保有の電気抵抗測定装置「ロレスターGP」(三菱化学製、図 37) を用いて、試作品の体積抵抗値を測定した。

ロレスターGP は四探針方式を採用した精密測定装置であり、試料の表面に 4 本の探針を均等に接触させることで、正確な抵抗値の取得を可能としている。測定にあたっては、試料を試料台に適切な寸法に調整し (図 38)、安定した圧着状態を確保した上で測定を実施した。

この方法により、試料の体積抵抗値を高い再現性と精度での評価が可能である。

本設備における体積抵抗値の測定限界は $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上である。

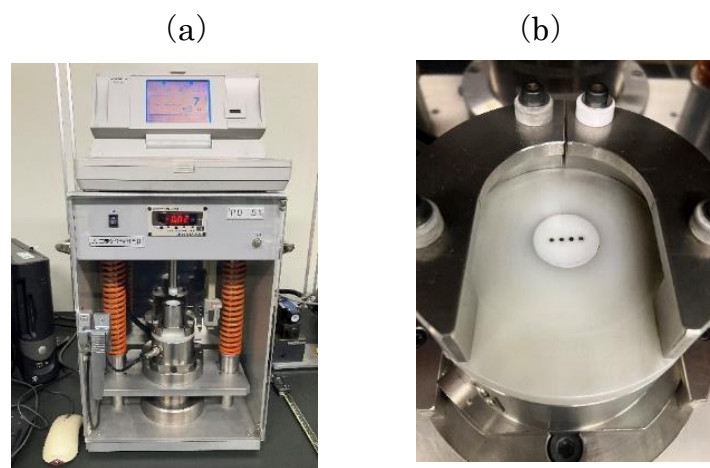


図 37 (a) 粉体抵抗測定装置、(b) 試料台



図 38 ダンベル試験片から切り取った測定試料

2) 外部評価機関での評価方法

JIS C 2139-3-1 の規格に準拠し評価を実施した。

JIS C 2139-3-1 に規定される高抵抗測定方法は、体積抵抗値が $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の絶縁材料を対象としているため、外部機関に分析を委託した。測定は高精度の絶縁抵抗計を用い、試料に一定の直流電圧を印加し、電流の微小な漏れを測定することで抵抗値を算出する。

試料は規格に定められた寸法および形状に調整され、測定環境は温度や湿度を一定に保つことで、測定結果の再現性と信頼性を確保している。

これにより、極めて高い抵抗値を持つ材料の絶縁特性を適正に評価することが可能となる。

【試験条件】

- ・ 印加電圧 ; DC100V×60s
- ・ 測定温度 : 23℃
- ・ 測定数 : n=3
- ・ 測定装置 : ハイレジスタンスメータ 4339B

②－2－1－2 測定試料

1) 保有設備での $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ までの評価

- ・ 5%24PS 含有難燃バージン LDPE
- ・ 5%24YD 含有難燃バージン LDPE
- ・ 5%TJ20A 含有難燃バージン LDPE
- ・ 5%24LHT 含有難燃バージン LDPE

(株) GSI クレオス保有装置にて測定可能な抵抗値範囲が $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上であるため、この範囲内での電気抵抗特性を把握することを目的に各種 CSCNT (24PS、24YD、TJ20A、24LHT) を含有する難燃バージン LDPE で評価を実施した。

CSCNT の濃度は、試作したサンプルで最も高濃度である 5%添加品で評価を実施した。これにより、CSCNT の種類による電気抵抗値への影響を比較・分析し、材料特性の理解を深めることが可能となる。

2) 外部評価機関による $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の評価

- ・ 難燃バージン LDPE
- ・ 難燃再生 LDPE
- ・ 1%24PS 含有難燃バージン LDPE
- ・ 1%24PS 含有難燃再生 LDPE
- ・ 1%24PS 含有の難燃バージン LDPE と難燃再生 LDPE のハイブリッド品

社会実装を念頭に、これまでの実験結果から最適と想定される配合比での絶縁性評価を実施した。対象試料としては、(ア) 難燃バージン LDPE および (イ) 難燃再生 LDPE の基本材料に加え、これらのハイブリッド品 (ア+イ) に対して評価を実施した。

CSCNT は標準グレードである 24PS を用いた。CSCNT 添加量は、これまでの力学的特性、機能性（難燃性）、コスト試算の検討結果から、0.5～1%が最適配合であるため、その中でより高濃度である 1%品での評価を実施した。

②－２－１－３ 測定結果

１）保有設備での評価結果

測定結果を表 11 に示す。

表 11 体積抵抗値測定結果

	5%24PS 含有 難燃バージン LDPE	5%24YD 含有 難燃バージン LDPE	5%TJ20A 含有 難燃バージン LDPE	5%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

各種 5% CSCNT (24PS、24YD、TJ20A、24LHT) を含有する難燃バージン LDPE の体積抵抗値は、いずれも $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上であることが確認された。この数値は、保有設備の測定限界値であり、いずれの CSCNT においても材料は低抵抗領域には該当せず、高い絶縁特性を有していることが評価できる。

これらの結果は、CSCNT の種類にかかわらず、難燃バージン LDPE の電気的特性が一定の水準を保っていることを示唆している。

２）外部の高抵抗測定装置での評価結果

測定結果を表 12 に示す。

表 12 体積抵抗値測定結果（高抵抗領域）

	難燃 バージン LDPE	難燃 再生 LDPE	1%24PS 含有 難燃バージン LDPE	1%24PS 含有 難燃再生 LDPE	1%24PS 含有 難燃バージン LDPE/ 難燃再生 LDPE ハイブリッド品
体積抵抗値 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	6.3×10^{14}	1.3×10^{13}	5.0×10^{14}	2.5×10^{13}	1.1×10^{14}

より製品化に近い配合での評価結果では、全ての配合において、高抵抗領域である 10^{11} 以上の結果が得られた。

②－２－１－４ 考察

保有設備および外部評価機関による測定において、対象試料はいずれも高い体積抵抗値を示し、優れた電気絶縁特性を有していることが確認された。特に、外部評価機関による高抵抗領域（ $10^{11}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上）での評価では、CSCNT を添加した 3 種の配合条件下で全試料が絶縁領域の抵抗値を維持しており、製品化に向けた材料選定において十分な特性を有していることが示された。

これらの結果から、異なる測定環境および評価範囲においても一貫して高い電気絶縁特性が確認できたことは、試料の品質安定性および信頼性の高さを示している。

前項①、②の結果を踏まえて、更なる配合比の最適化検討を実施した。

③ 最適配合の検討

③－１ 目的

前項①、②の結果から、CSCNT の種類を変えても、物性はほとんど違いが得られず、電材の規格に準拠した値となる事、また難燃 LDPE の物性の高さが示された。

7 つの評価項目（弾性率、引張強さ、伸び、難燃性、摺動性、耐摩耗性、耐衝撃性）の観点から、難燃 LDPE における再生品の利用や CSCNT 添加量の低減を行い、最適化を図った。

③－２ 配合内容

③－２－１ CSCNT 種

CSCNT 種の違いは、物性に大きく影響するものではないため、コスト及び LCA の観点から、標準グレードである 24PS を用いて配合検討を実施した。

③－２－２ 樹脂種

（ア）難燃バージン LDPE、（イ）難燃再生 LDPE、またバージン品と再生品のハイブリッド（ア＋イ）とした。

③－２－３ 配合比率

前項の評価結果から、CSCNT 添加量は比較的低濃度で有用性が確認されたため、低濃度領域で更に濃度条件を振って試作検討を実施した。

③－２－４ 評価内容

比較的試作から評価まですぐにできる引張試験、及び難燃性試験にて、スクリーニングを実施した。

③－３ 評価結果

(1) 弾性率

試料の名称を以下の通り省略した。

- (ア) 難燃バージン LDPE→FRV (Flame Retardant Virgin)
- (イ) 難燃再生 LDPE→FRR (Flame Retardant Recycled)
- (ウ) 非難燃バージン LDPE→NFRV (Non-Flame Retardant Virgin)
- (エ) 非難燃再生 LDPE→NFRR (Non-Flame Retardant Recycled)

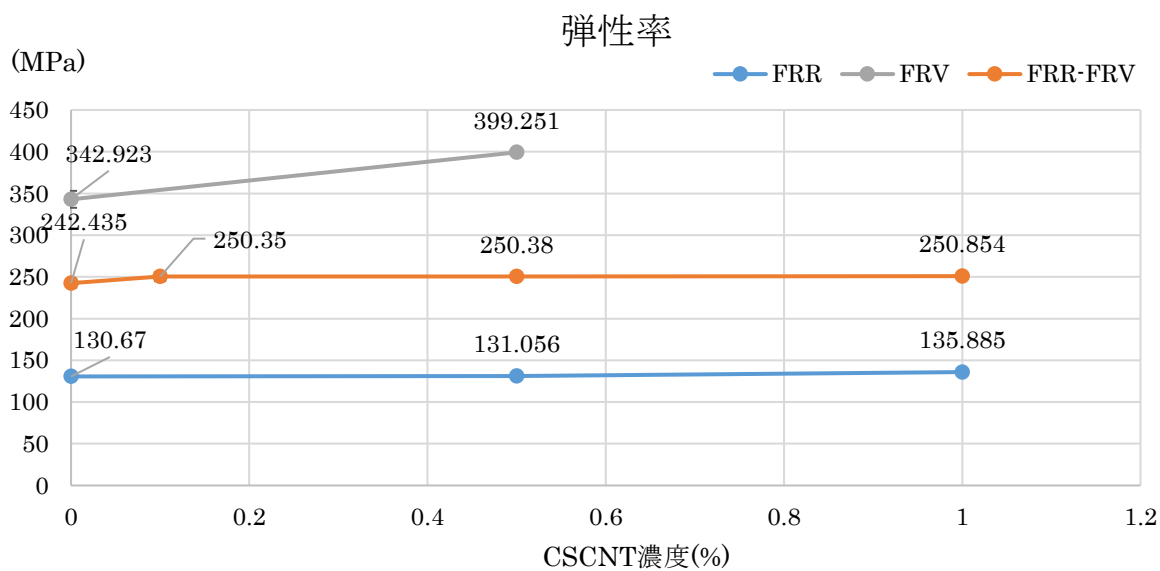


図 39 弾性率の比較表 (n=1～3)

弾性率の結果から FRV、FRV-FRR 複合、FRR については次の通りである。

- ・ FRV : CSCNT 添加量 0.5%において、約 16.4%の性能向上を達成した。
- ・ FRV-FRR 複合 : CSCNT 添加量 0.1%で、約 3.2%の性能向上が確認された。
- ・ FRR : CSCNT 添加量 1%で、約 4.0%の性能向上が確認された。

(2) 引張強さ

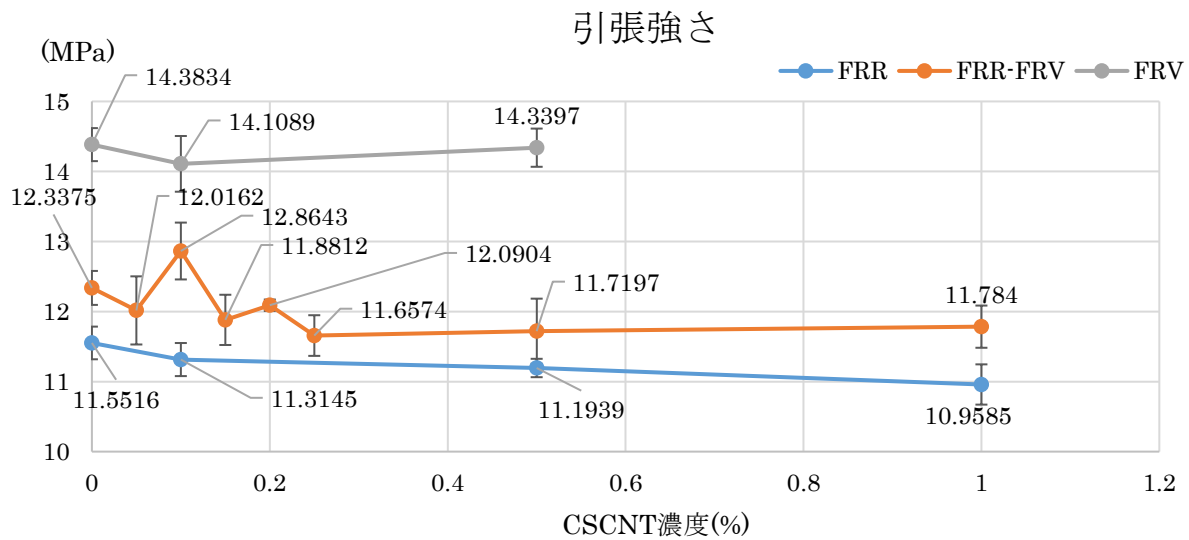


図 40 引張強さの比較表 (n=5)

引張強さの結果から **FRV**、**FRV-FRR** 複合、**FRR** については次の通りである。

- ・ **FRV** : CSCNT 添加による性能の差異は認められなかった。
- ・ **FRV-FRR** 複合 : CSCNT0.1%添加で約 4.2%の性能向上が見られた。
- ・ **FRR** : CSCNT 添加量の増加に伴い性能が低下する傾向が確認された。

(3) 伸び

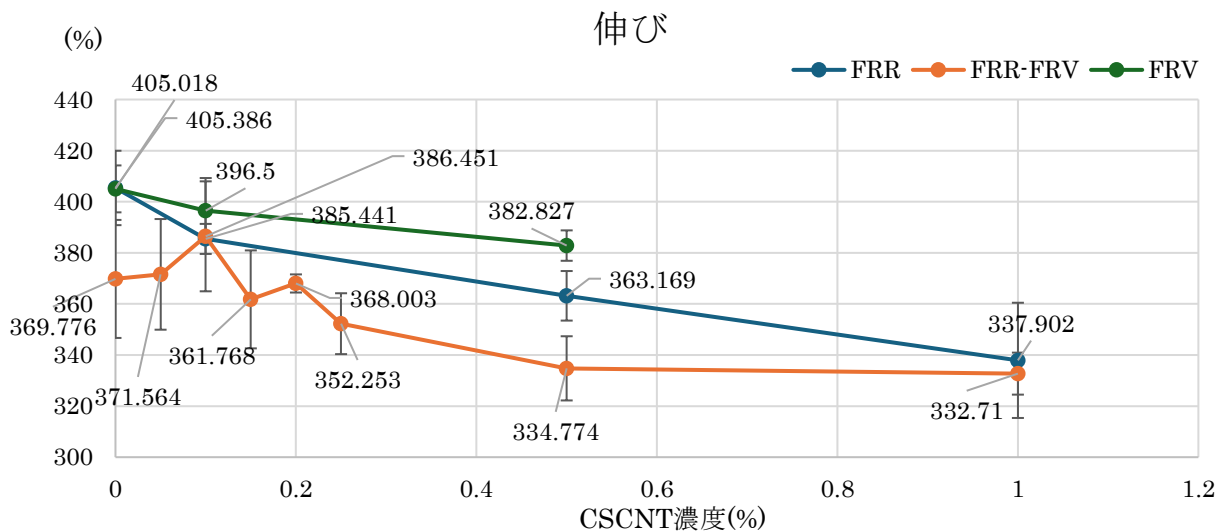


図 41 伸びの比較表(n=5)

伸びの結果から **FRV**、**FRV-FRR** 複合、**FRR** については次の通りである。

- ・ **FRV** : CSCNT0.5%添加により伸びが約 5.4%低下した。
- ・ **FRV-FRR** 複合 : CSCNT0.1%添加で伸びが約 4.5%向上した。
- ・ **FRR** : CSCNT1%添加において伸びが約 16.6%低下する結果となった。

(4) 難燃性

前述②－4－1の結果の通り。

(5) 摺動性

本試験は、対象材料の摺動性を評価することで電材用途において想定される樹木等とのこすれ時の摩擦負荷を簡易的に試験する目的として実施した。評価指標として、摺動試験中の動摩擦係数 (μ_k) の推移を比較し、材料配合による摩擦挙動の差異を整理する。

・試験条件

荷重：500 g

往復回数：500 回

移動速度：3 m/min

圧子材質：炭素鋼



図 42 摩擦摩耗試験装置（トライボギア）

・試験結果

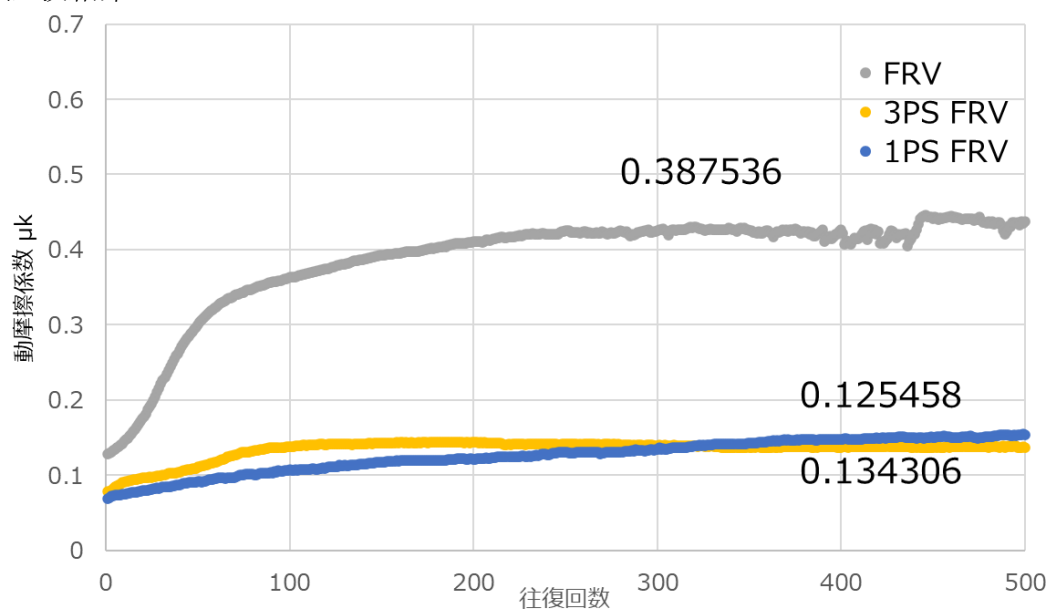


図 43 動摩擦係数の比較グラフ

摺動性試験の結果は次の通りである。

- ・ FRV、1%CSCNT (24PS) 含有 FRV、3%CSCNT (24PS) 含有 FRV の摩擦係数の推移を比較したところ、FRV は動摩擦係が数約 0.39 に達し、最も摩擦が大きいことが確認された。
- ・ 1%CSCNT (24PS) 含有 FRV、および 3%CSCNT (24PS) 含有 FRV はともに動摩擦係数が 0.12～0.13 程度で推移し、低摩擦であることが示された。

FRV では試験初期から摩擦係数が高く、摺動の進行に伴って摩擦抵抗が増大する傾向が見られた。これは、摺動中に材料表面の微細な表面損傷が進行し、接触状態が不安定になることに起因すると考えられる。一方、CSCNT を添加した試料では、試験初期から低い摩擦係数を示し、その後も安定した値で推移した。

このことから、CSCNT を高分散させることで摺動中の応力集中が緩和し、表面損傷の進行を抑制していると考えられる。このような摺動挙動の安定化は、後述する耐摩耗性の向上とも密接に関連している。

(6) 耐摩耗性

上記 (5) 摺動性の評価後試験片表面（難燃バージン LDPE、1%CSCNT 含有難燃バージン LDPE、3%CSCNT 含有難燃バージン LDPE）をレーザー顕微鏡で観察、分析し、摩耗深さから材料の耐摩耗性を評価した。

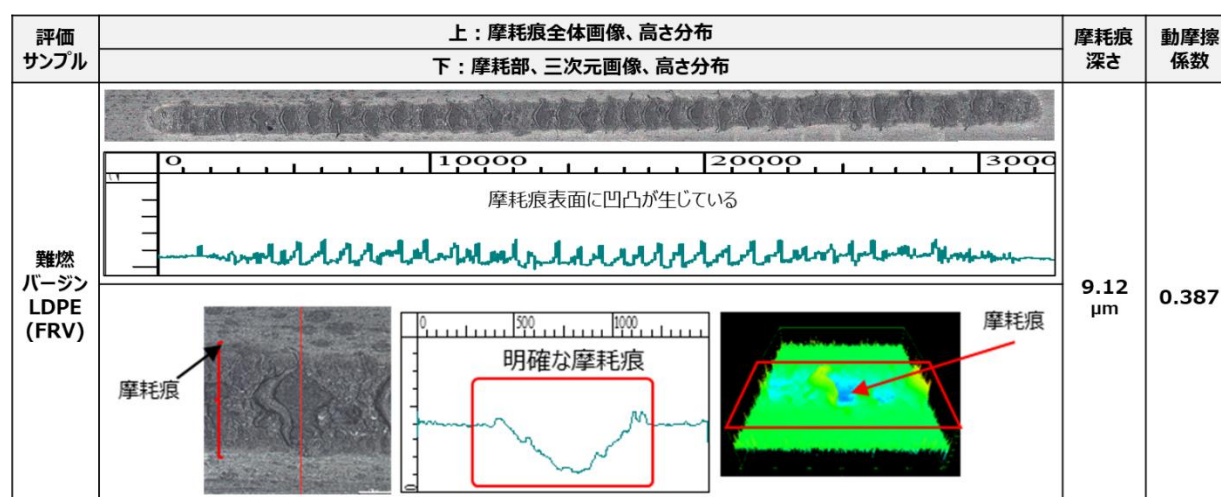


図 44 難燃バージン LDPE 摩擦摩耗試験後サンプルの観察結果

- ・ 現行の難燃バージン LDPE では、試験後の表面に顕著な凹凸や明確な摩耗痕が確認され、摩耗深さは約 9.12μm に達していた。

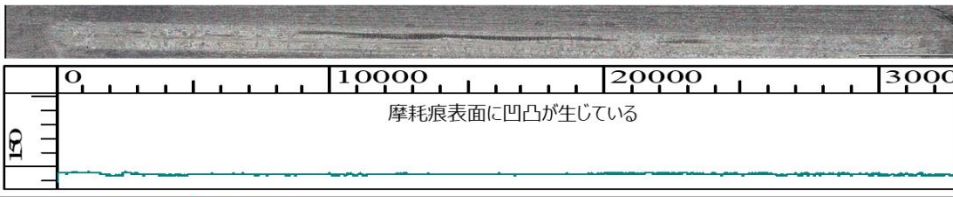
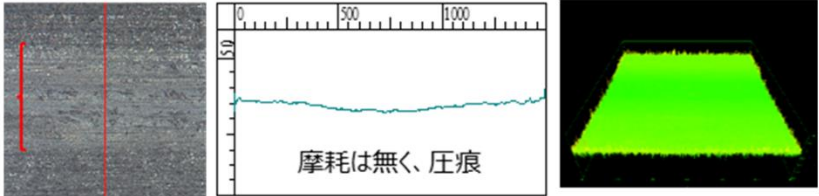
評価 サンプル	上：摩耗痕全体画像、高さ分布	摩耗痕 深さ	動摩擦 係数
	下：摩耗部、三次元画像、高さ分布		
1% CNT/ 難燃 バージン LDPE (1PS FRV)		0.504 μm	0.125
			

図 45 1%CSCNT/難燃バージン LDPE 摩擦摩耗試験後サンプルの観察結果

・1%CSCNT を添加した難燃バージン LDPE では摩耗痕はなく、圧痕のみが確認され、摩耗深さは約 0.504μm まで低減した。

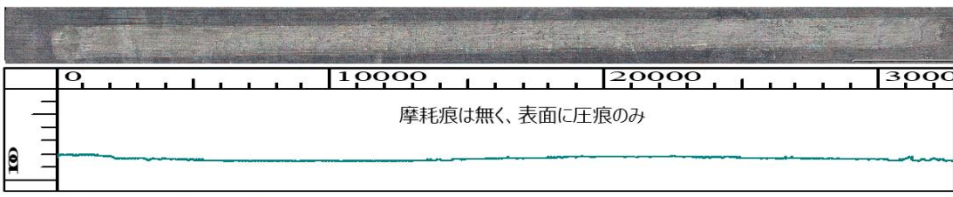
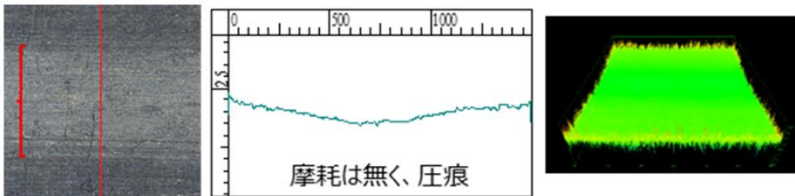
評価 サンプル	上：摩耗痕全体画像、高さ分布	摩耗痕 深さ	動摩擦 係数
	下：摩耗部、三次元画像、高さ分布		
3% CNT/ 難燃 バージン LDPE (3PS FRV)		0.458 μm	0.134
			

図 46 3%CSCNT/難燃バージン LDPE 摩擦摩耗試験後サンプルの観察結果

・3%CSCNT を添加した難燃バージン LDPE でも、1%CNT 添加時と同じく摩耗痕は観察されず、摩耗深さは約 0.458μm と、より低い値を示した。

摺動性、耐摩耗性試験の結果は次の通りである。

- ・難燃バージン LDPE (CSCNT 無添加) では、摺動後の表面に顕著な摩耗痕および凹凸が観察され、摩耗深さは約 9 μm に達した。
- ・一方、1% CSCNT 添加品では、表面に明確な摩耗痕はほとんど確認されず、摩耗深さは約 0.5 μm まで大幅に低減した。
- ・さらに 3% CSCNT 添加品では、摩耗深さは 0.5 μm 以下に抑制された。
- ・これらの結果から、CSCNT 添加により難燃 LDPE の耐摩耗性が飛躍的に向上することが明らかとなった。
- ・摺動性に関する CSCNT の最適添加量は、次フェーズでのラボ及び実証試験での評価を基に、検討する計画とする。

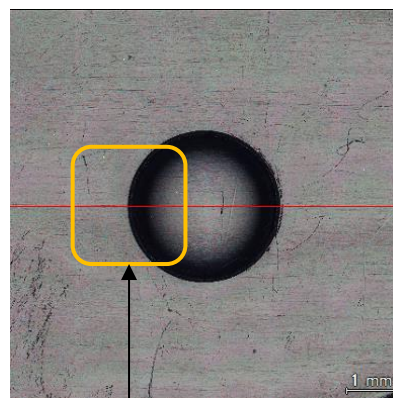
(7) 耐衝撃性

本試験では、非難燃バージン LDPE と CSCNT を添加した非難燃バージン LDPE の評価サンプルについて、圧痕部のクラック発生状況および圧痕深さの測定を行った。

なお、非難燃バージン LDPE を用いた理由は、CSCNT の添加効果を明確にするためである。非難燃バージン LDPE を用いることで難燃剤等の添加剤の影響を排した CSCNT の効果を明確に評価できる。

耐衝撃性の評価は、デュポン試験機を用いて実施した。試験条件は以下の通りである。

落下重り：500 g
落下高さ：100 mm
撃芯（先端半径）：1.59 mm



観察点

図 47 試験後の圧痕と観察点

なお、本評価方法は本来塗膜の評価に用いられるものであるが、衝撃耐性を迅速にかつ簡便に評価できる点を考慮し実施した。

評価サンプル	非難燃バージンLDPE	0.5%CNT/ 非難燃バージンLDPE	5%CNT/ 非難燃バージンLDPE
圧痕端部 レーザー顕微鏡観察 写真			
写真赤線部の深さ分布			
三次元画像			
圧痕の深さ	226μm	220μm	210μm

図 48 観察・解析結果まとめ(圧痕端部クラックおよび圧痕深さの抑制を確認)

衝撃体制試験の結果は次の通りである。

【非難燃バージン LDPE】

- ・ 圧痕部に大規模なクラックが観察された。
- ・ 写真赤線部の深さ分布においてもクラックの存在が明確であった。

【0.5%CSCNT 含有非難燃バージン LDPE】

- ・ 圧痕部にマイクロクラックのような軽微な痕が確認されたが、いわゆるクラック状の亀裂は確認されない。
- ・ 深さ分布も、非添加品に比べて大きく軽減された。

【5%CSCNT 含有非難燃バージン LDPE】

- ・ 圧痕部にクラックは見られなかった。
- ・ 画像、深さ分布を精査した結果、クラックの発生が抑制されていることが確認された。

④ 考察

本検討では、難燃性再生 LDPE の物性回復を目的に、CSCNT の添加量および配合比率の最適化を行った。特に 0.5%および 1%の CSCNT 添加が、力学的特性や難燃性、コストのバランスにおいて最適と判断された。レーザー顕微鏡および透過型光学顕微鏡による観察では、CSCNT は樹脂中で良好に分散し、凝集物は認められなかった。これにより、引張強度、伸び、弾性率などの力学的物性がバージン品比で 80%以上回復し、垂直燃焼試験では最高等級 V-0 を達成した。摺動性評価では CSCNT 添加により摩擦係数の大幅な低減と耐摩耗性の著しい向上が確認された。摩耗深さは従来品の約 9 μ m から 0.5 μ m 以下に低減し、材料の耐摩耗性向上に寄与することが明らかとなった。耐衝撃性評価においても、CSCNT 添加により圧痕部のクラック発生が顕著に抑制された。

これらの結果は、CSCNT 添加による力学的特性、および機能性の回復だけでなく、耐摩耗性・耐衝撃性などを必要とする電材用途に求められる耐摩耗、耐久性の強化・向上に寄与することが可能であることが明らかとなった。

なお、耐摩耗性については、日本電気技術規格委員会規格「耐摩耗性能を有する「ケーブル用防護具」の構造及び試験方法」J E S C E 2 0 2 0 (2 0 1 6) に以下内容があり、耐摩耗性が規定されている。

【日本電気技術規格委員会規格「耐摩耗性能を有する「ケーブル用防護具」の構造及び試験方法」J E S C E 2 0 2 0 (2 0 1 6) 記載内容】

完成品は、摩耗検知層が露出した状態で、日本産業規格 JIS C 3005 (2014)「ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法」の「4.29 摩耗」の規定により、おもりの重さを 24.5N、回転数を 500 回転として摩耗試験を行ったとき、防護具に穴が開かないこと。

【JIS C 3005 (2014)「ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法」の「4.29 摩耗」記載内容】

以下図 49 に示す。

4.29 摩耗

摩耗は、完成品から適切な試料を採取し、その一端を、図22に示す摩耗試験装置の摩耗円板の中心から上方約300 mmに位置する支持具に固定し、反対側の端に個別規格に規定する質量のおもりをつるす。試料の表面は、この円板の円周に接触させ、おもりの重力と同じ方向に毎分約60回の速度で回転させ、個別規格に規定する回転数に達したとき、その被覆物が摩耗して内部の絶縁体が現れるかどうかを調べる。

摩耗試験装置の摩耗円板の材質は、JIS R 6001に規定する粒度F36の炭化けい素の粒を主成分とする。

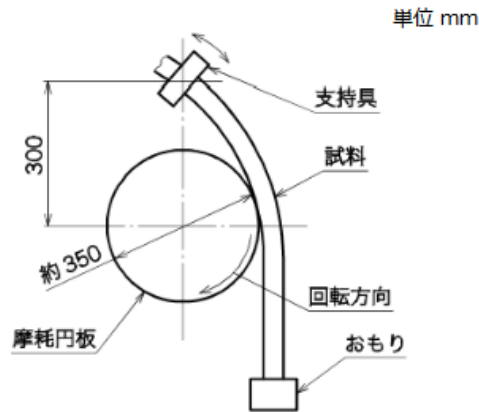


図22-摩耗試験装置

図 49 JIS C 3005 (2014)「ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法」の「4.29 摩耗」記載内容

(株) GSI クレオスの評価方法は、上記規格と評価方法が異なるため、上記規格に準拠する評価は、今後実施する計画である。

耐衝撃性については、規格では規定されていなく、ユーザーとの現場ベースでの面談からニーズを確認した。本情報は、大東電材、および電力会社との面談から得られた情報に基づくものである。

(2) 再生回数の増加

① 試験の全体像

難燃バージン LDPE、および市場から回収された難燃再生 LDPE の 2 系統で、加速劣化試験、引張試験、機能性試験、何回再生が可能であるか推算する。

①-1 試験片の加速劣化試験 (SWOM 試験)

①-1-1 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紫外線 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 50 青丸囲み部)。評価は、JIS A 1415 の規格に則り実施した。

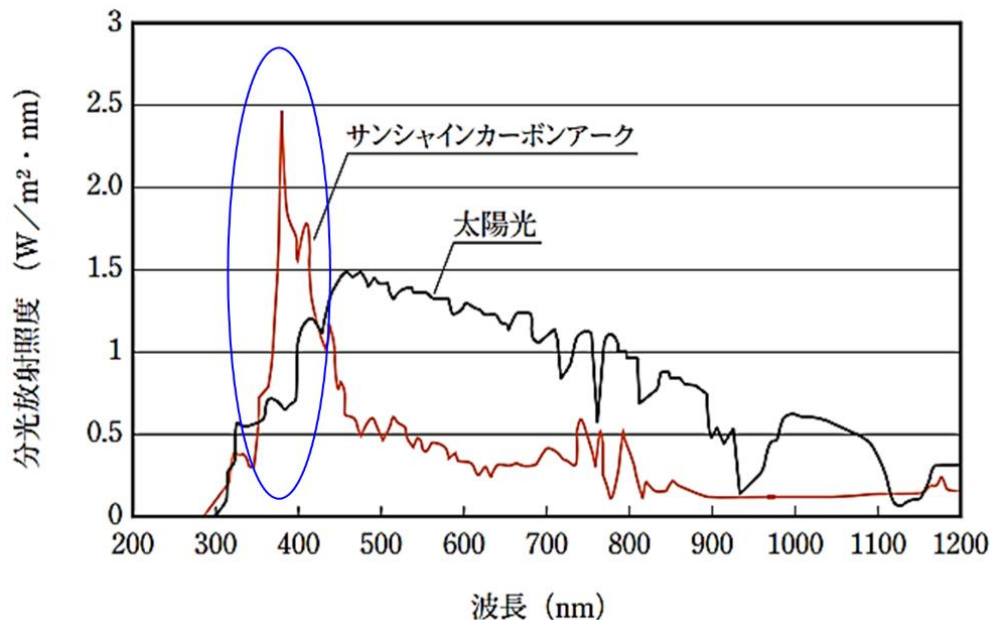


図 50 SWOM 分光分布



図 51 SWOM 試験機

①－１－２ SWOM 試験前後の表面状態比較

①－１－２－１ 評価方法

(ア) 顕微鏡観察

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。

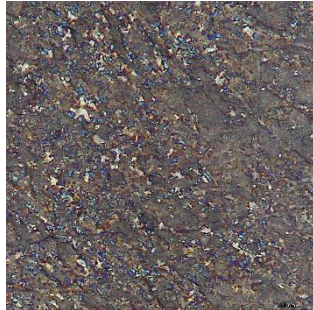
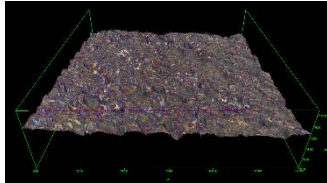
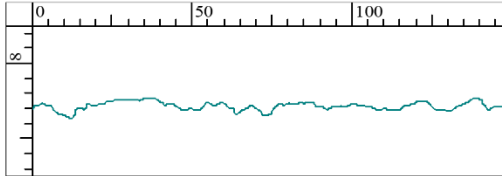
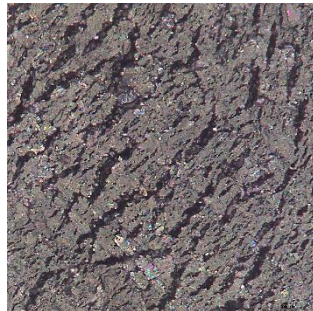
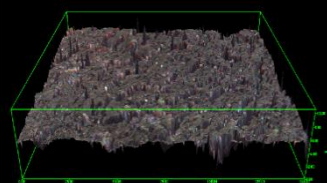
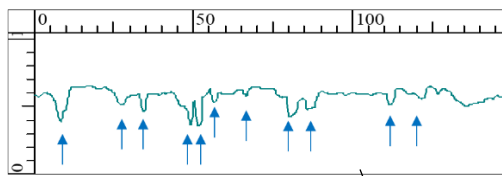
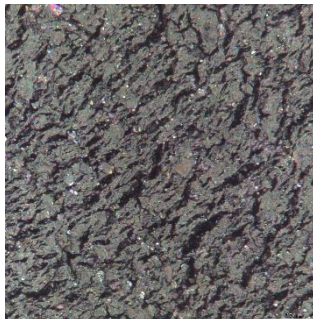
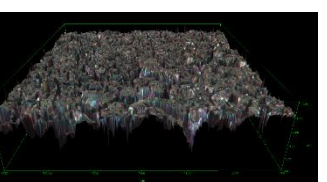
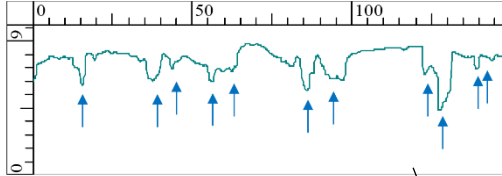
(イ) 表面状態解析

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。

①－１－２－２ 評価結果

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 13 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 μm/目盛 幅 : 5 μm/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 μm	Rz	0.952 μm	Sa	0.387 μm	Rv	0.614 μm
項目	数値													
Ra	0.154 μm													
Rz	0.952 μm													
Sa	0.387 μm													
Rv	0.614 μm													
SWOM 2000h			 深さ : 1 μm/目盛 幅 : 5 μm/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 μm	Rz	2.440 μm	Sa	0.396 μm	Rv	2.020 μm
項目	数値													
Ra	0.323 μm													
Rz	2.440 μm													
Sa	0.396 μm													
Rv	2.020 μm													
SWOM 4000h			 深さ : 1 μm/目盛 幅 : 5 μm/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 μm	Rz	3.257 μm	Sa	0.450 μm	Rv	2.413 μm
項目	数値													
Ra	0.437 μm													
Rz	3.257 μm													
Sa	0.450 μm													
Rv	2.413 μm													

①－１－２－３ 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 52 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、太陽光に含まれる紫外線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。

高分子材料の劣化機構

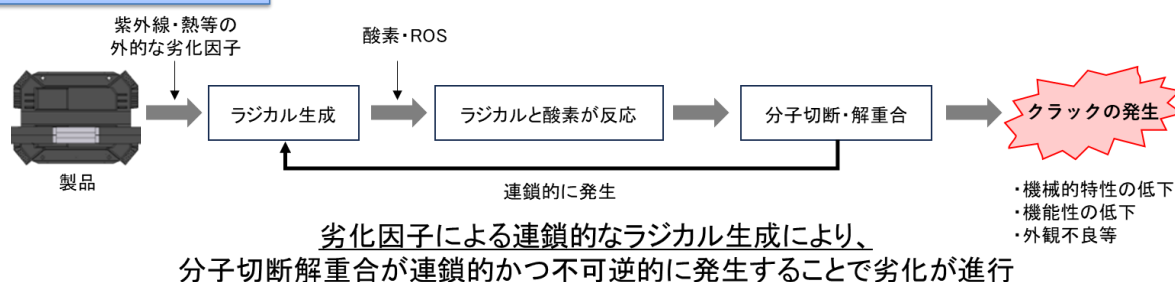


図 52 高分子の劣化機構

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。

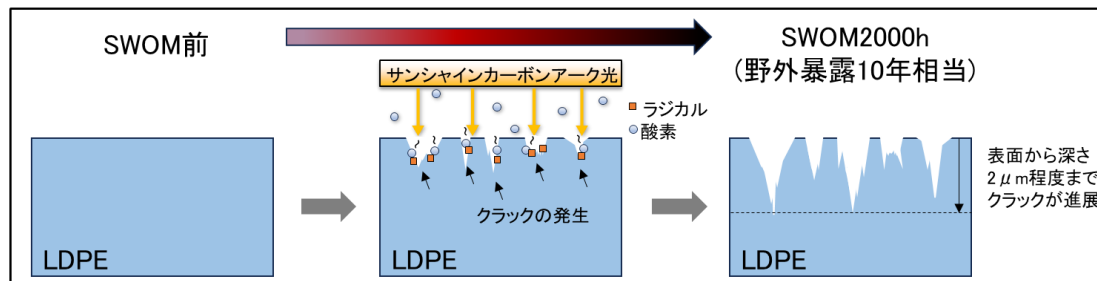


図. SWOM試験での劣化機構

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 53 SWOM 試験での劣化機構

①ー2 再生スケジュール

再生スケジュールの全体像を図 54 に示す。

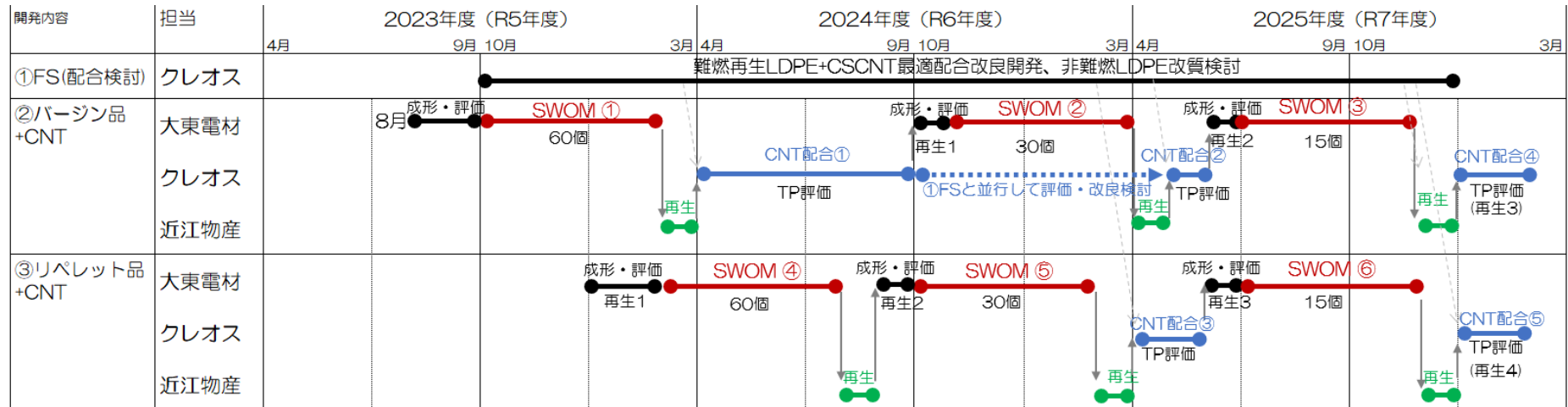


図 54 本事業の実施内容スケジュール

①－3 各材料の状態

①－3－1 難燃バージン LDPE を用いたサイクル

難燃バージン LDPE について、SWOM 試験を行った。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 56）を用いて、2%の配合比で CSCNT の混錬を行い、コンパウンドペレット（図 57）を試作した。

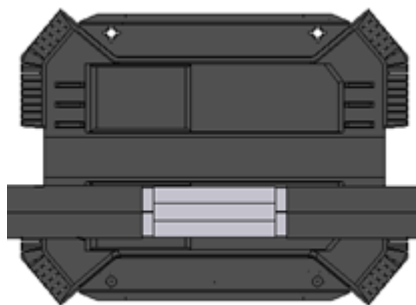


図 55 電材成形品イメージ



図 56 難燃性バージン LDPE の SWOM 後の粉碎品



図 57 難燃性バージン LDPE の SWOM 後粉碎品に 24PS 2%添加したペレット

①－３－２ 難燃再生 LDPE 成形体を用いたサイクル

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 後の粉碎チップ品（図 58）は、再度リペレットして、成形体の材料とした（図 59）。



図 58 難燃再生 LDPE の SWOM 後の粉碎品



図 59 難燃再生 LDPE の SWOM 後のペレット品

② 引張試験

②－１ 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『工作物と接近箇所に使用する防護具』の記載の通りとした。

【配電規程（JEAC7001）】

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/mm^2 以上、伸びが 350%以上であること。

（イ） $90^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ 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、二本ロール混錬機を用いて元材料の混錬後、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 60 作成したダンベル試験片

②－2 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

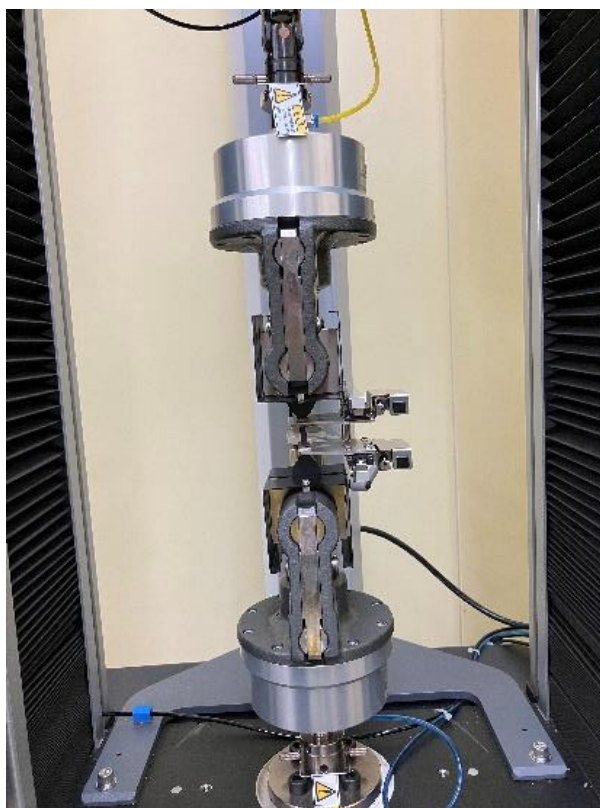


図 61 引張試験時の写真

引張試験後のサンプルを以下に示す。



図 62 (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)

③ 機能性

③－1 耐電圧試験

③－1－1 評価方法

耐電圧試験の評価は、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。

(i) 乾燥状態で 15kV の交流電圧を 1 分間

(ii) 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。

③－1－2 評価状況

③－1－2－1 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 63 耐電圧試験設備にセット時の写真

③－１－２－２ 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。

(i) 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。

(ii) 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。

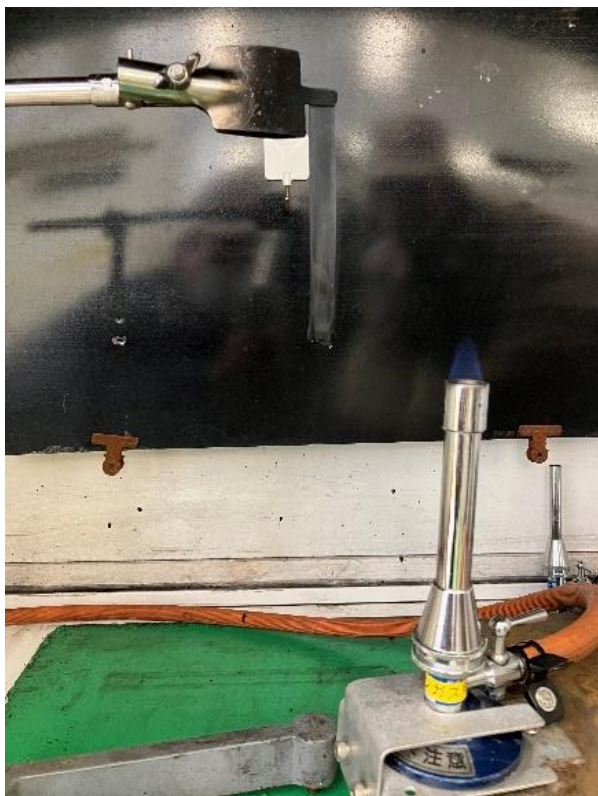
③－２ 難燃性試験

③－２－１ 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。

③－２－２ 評価状況

(a)



(b)



図 64 (a) 難燃性試験 接炎前、(b) 難燃性試験 接炎時

④ 評価結果まとめ

④－１ 難燃バージン LDPE を用いたサイクルの評価結果

表 14 難燃バージン LDPE を用いたサイクルの評価結果

試験項目	SWOM 前	1 回目 SWOM 後 (CSCNT2%)	2 回目 SWOM 後	3 回目 SWOM 後 (TP 評価)
引張強さ	16.0MPa	15.2MPa	14.3MPa	14.38MPa
伸び	702%	658%	618%	395%
難燃性	V-0	V-0	V-0	-
耐電圧	異常なし	異常なし	異常なし	-

注：3 回目は、SWOM 前 1，2 回目と同形状での試験ではないため、そのため、引張強さ、及び伸びについては参考値である。

④－２ 難燃再生 LDPE を用いたサイクルの評価結果

表 15 難燃再生 LDPE を用いたサイクルの評価結果

試験項目	SWOM 前	1 回目 SWOM 後	2 回目 SWOM 後 (CSCNT2%)	3 回目 SWOM 後 (TP 評価)
引張強さ	13.3MPa	13.6MPa	10.5MPa	11.6MPa
伸び	694%	687%	504%	317%
難燃性	V-0	V-0	V-0	-
耐電圧	異常なし	異常なし	異常なし	-

注：3 回目は、SWOM 前 1，2 回目と同形状での試験ではないため、そのため、引張強さ、及び伸びについては参考値である。

⑤ 考察

本評価では、難燃バージン LDPE および難燃再生 LDPE を用いて、それぞれ 3 回の SWOM 試験サイクル後の物性変化を比較した。

【難燃バージン LDPE を用いたサイクル】

難燃バージン LDPE では、引張強さが SWOM 前で 16.0MPa から、3 回目再生時の評価結果では 14.38MPa となり、再生による低下傾向が確認された。難燃性および耐電圧特性は、再生による機能低下は確認されなかった。

これらの結果から、難燃バージン LDPE はサイクルを繰り返しても物性の劣化は限定的であることが確認された。

【難燃再生 LDPE を用いたサイクル】

難燃再生 LDPE では、初期の引張強さは 13.3MPa と難燃バージン LDPE に比べやや低く、1 回目のサイクル後は数値を維持、2 回目および 3 回目のサイクル後には 10.5MPa、11.6MPa への低下を観察した。難燃性および耐電圧特性は、機能低下は確認されなかった。

これらの結果から、難燃再生 LDPE では、力学的特性の低下が確認された。

以上より、バージン品は同様の条件下でも性能の安定性が高く、耐久性に優れると考えられる。再生品は使用サイクルの増加に伴い引張強さ、および伸びが低下する傾向が確認され、複数回再生時の物性維持には課題があることが改めて示された。再生 LDPE を用いた複数回の再生実用化に向けては、難燃バージン LDPE と難燃再生 LDPE との複合化、配合最適化により、低下した物性を補強することで水平リサイクルが可能と考えられる。

(3) コスト削減の検討

① 各種材料の概算価格

表 16 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 16 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。

② 当初のコスト試算

②-1 試算内容

本事業申請時のコスト試算と目標のコストを表 17 に示す。

表 17 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	名称	現状の価格	目標価格
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

②-2 当初配合案での評価結果

表 17 の配合での力学的特性の評価結果を表 18 に示す。

表 18 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	12.64MPa	10.65MPa	11.71MPa
伸び	403.1%	330.0%	357.6%

②－３ 比較結果

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 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。

③－１ 難燃 V、難燃 R を複合した配合検討内容

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。

③－１－２ 配合比

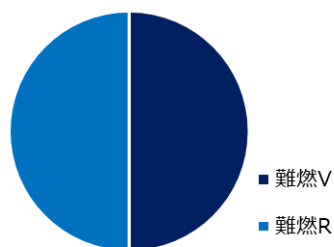
以下の配合で試作検討を行った（図 65）。

（ア） 難燃 V：難燃 R＝１：１

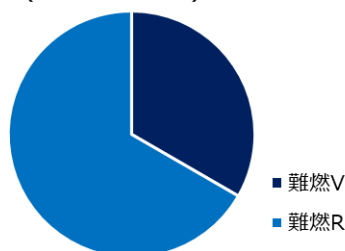
（イ） 難燃 V：難燃 R＝１：２（１％CSCNT 含有）

（ウ） 難燃 V：難燃 R＝１：３（１％CSCNT 含有）

（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）

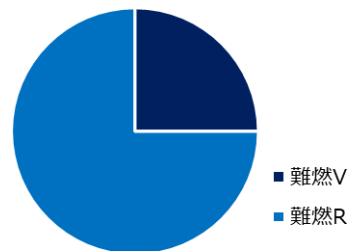


図 65 各配合比率の円グラフ（難燃 V、難燃 R 配合品）

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 19 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 19 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％CSCNT 含有）	（ウ） 難燃 V：難燃 R＝１：３ （１％CSCNT 含有）
コスト	600 円/kg	628 円/kg	600 円/kg
最大点応力	12.64MPa	10.83MPa	10.43MPa
伸び	403.1%	346.0%	340.8%

③－２ 難燃 V、難燃 R、非難燃 V を複合した配合検討内容

③－２－１ 目的

上記表 19 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。

③－２－２ 配合比

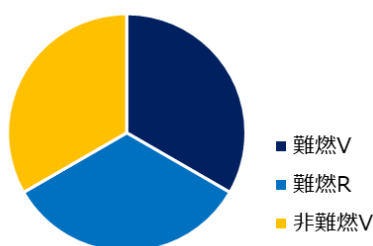
以下の配合で試作検討を行った（図 66）。

（ア） 難燃 V：難燃 R：非難燃 V＝1：1：1

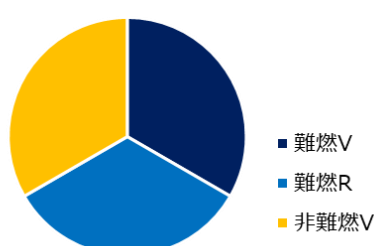
（イ） 難燃 V：難燃 R：非難燃 V＝1：1：1（1% CSCNT 含有）

（ウ） 難燃 V：難燃 R：非難燃 V＝1：2：2（1% CSCNT 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）

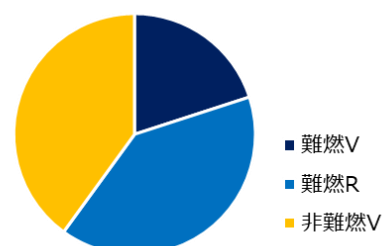


図 66 各配合比率の円グラフ（難燃 V、難燃 R、非難燃 V 配合品）

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 20 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、複合品の伸びは回復傾向だった。

表 20 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% CSCNT 含有）	（ウ） 難燃 V：難燃 R：非難燃 V＝1：2：2 （1% CSCNT 含有）
コスト	462 円/kg	562 円/kg	500 円/kg
最大点応力	12.47MPa	11.84MPa	11.64MPa
伸び	404.1%	366.1%	354.1%

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

③－３－１ 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。

③－３－２ 配合比

以下の配合で試作検討を行った (図 67)。

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

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

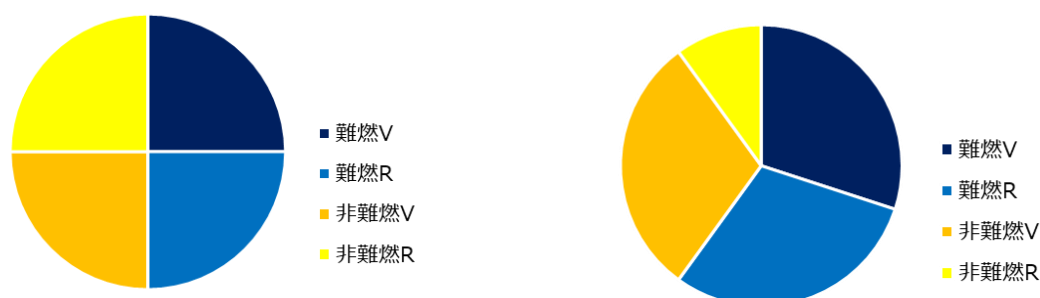


図 67 各配合比率の円グラフ (難燃 V、難燃 R、非難燃 V、非難燃 R 配合品)

③－３－３ 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 21 に示す。非難燃再生品の添加により、伸び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、伸び低下を低減可能と示唆される結果となった。

表 21 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)

	難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V : 非難燃 R = 1 : 1 : 1 : 1 (1% CSCNT 含有)	難燃 V : 難燃 R : 非難燃 V : 非難燃 R = 3 : 3 : 3 : 1 (1% CSCNT 含有)
コスト	475 円/kg	530 円/kg
最大点応力	12.25MPa	11.92MPa
伸び	327.7%	338.9%

③－４ 難燃 R、非難燃 V を複合した配合検討内容

③－４－１ 目的

難燃 R で低下する伸びを回復、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。

③－４－２ 配合比

以下の配合で試作検討を行った（図 68）。

（ア） 難燃 R：非難燃 V＝1：1（1%CSCNT 含有）

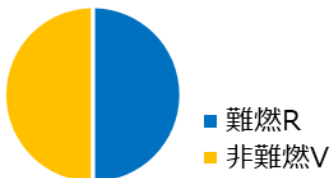
（イ） 難燃 R：非難燃 V＝1：2（1%CSCNT 含有）

（ウ） 難燃 R：非難燃 V＝1：2（1%CSCNT 含有）

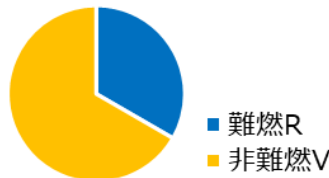
（エ） 難燃 R：非難燃 V＝2：1（1%CSCNT 含有）

（オ） 難燃 R：非難燃 V＝2：1（1%CSCNT 含有）

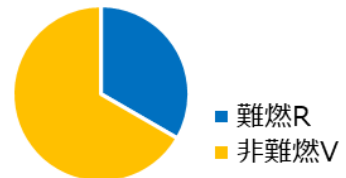
（ア） 難燃R：非難燃V
＝ 1：1（1%CNT含有）



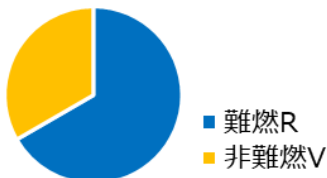
（イ） 難燃R：非難燃V
＝ 1：2（1%CNT含有）



（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）

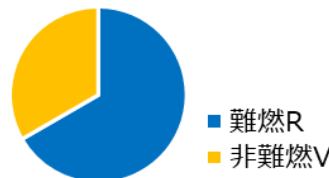


図 68 各配合の円グラフ（難燃 R、非難燃 V 配合品）

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 22 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。

表 22 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%CSCNT 含)	(イ) 難燃 R：非難燃 V =1：2 (1%CSCNT 含)	(ウ) 難燃 R：非難燃 V =1：2 (2%CSCNT 含)	(エ) 難燃 R：非難燃 V =2：1 (1%CSCNT 含)	(オ) 難燃 R：非難燃 V =2：1 (2%CSCNT 含)
コ ス ト	396 円/kg	364 円/kg	464 円/kg	430 円/kg	530 円/kg
最 大 点 応 力	11.71MPa	11.40MPa	11.11MPa	11.52MPa	10.67MPa
伸 び	357.6%	363.4%	349.9%	380.9%	341.5%

④ 考察

本検討では、難燃再生 LDPE の配合によりコスト削減が可能であるが、力学的特性の低下が課題であった。難燃バージン LDPE との複合で物性は改善されたが、コストは上昇傾向にある。非難燃バージン LDPE を添加することでコスト低減と伸びの回復を両立した。

難燃・非難燃ハイブリッド品については、現在計画する次フェーズでのラボ及び実証試験での評価を基に、更なる高次の多機能性向上を試みる。

(4) LCA の検証・評価

(4) - 1 概念 (ライフサイクルフロー)

(4) - 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 69 フロー : ①→②→③→④→焼却

(4) - 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 69 フロー :

①→②→③→④→⑤→⑥→②→③→④→⑤→⑥→②→③→④→焼却

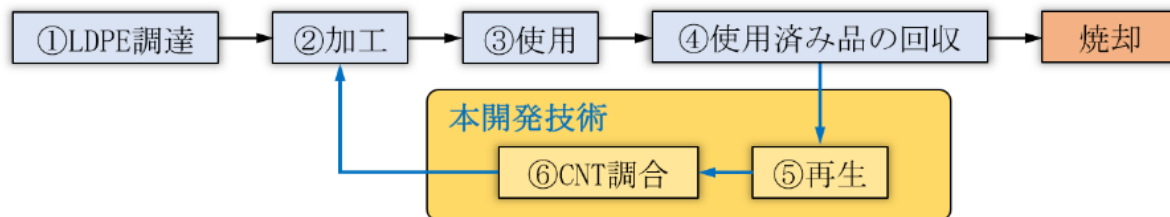


図 69 ライフサイクルフロー

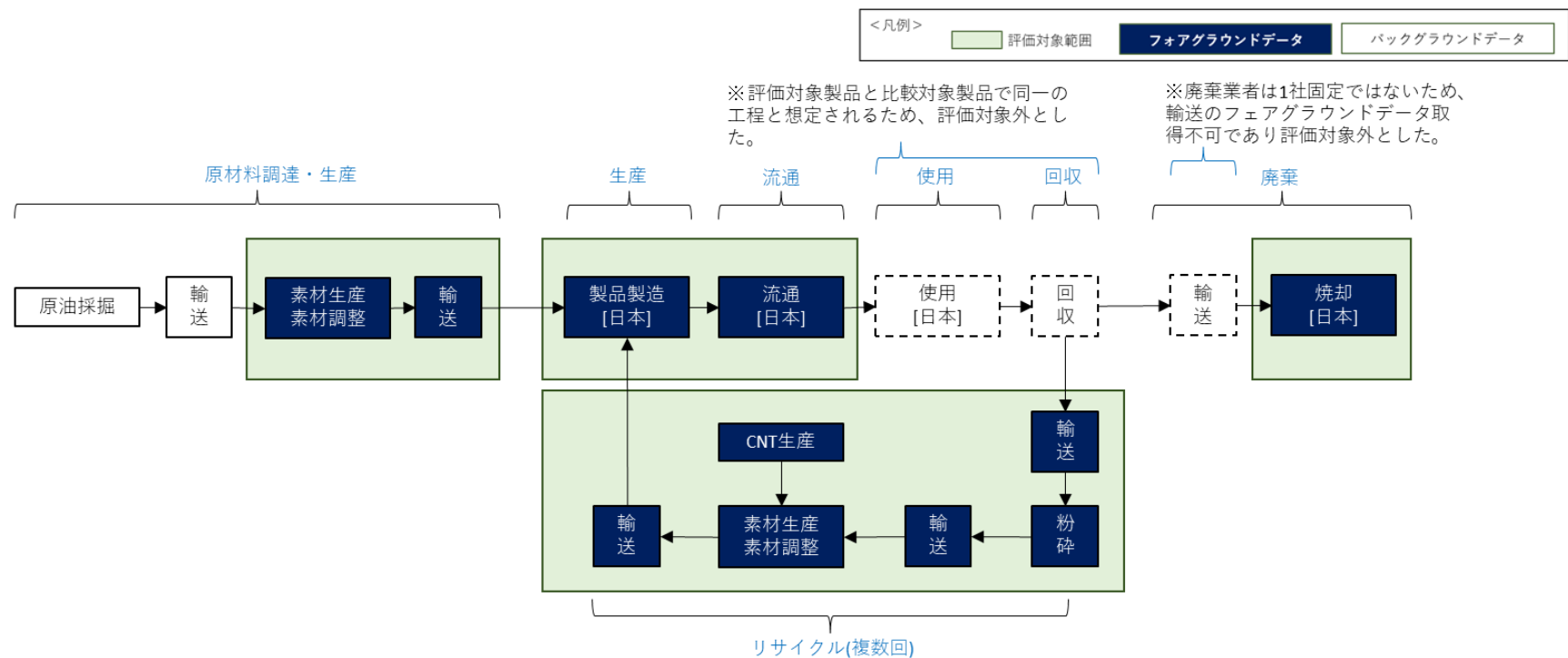


図 70 評価対象製品：電材製品（CSCNT 含有難燃 LDPE）のスキーム

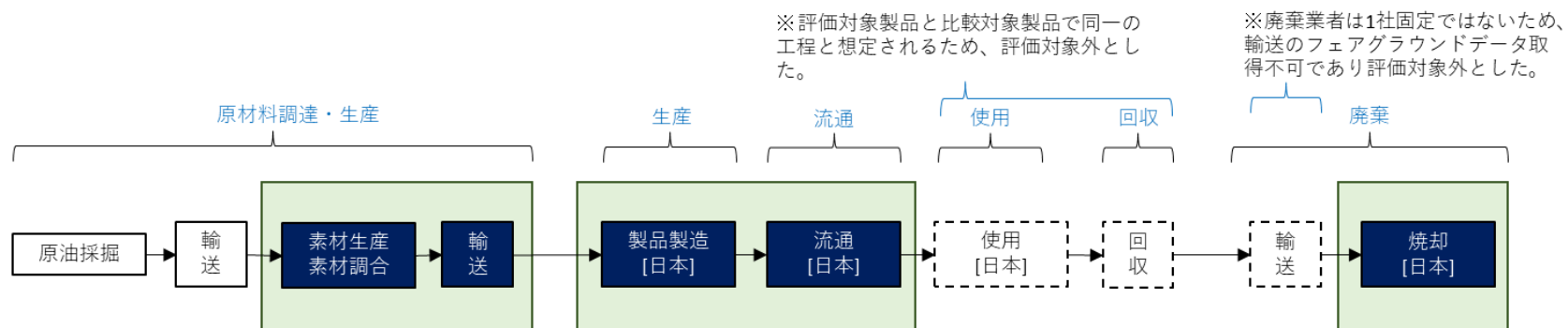


図 71 ベースライン：電材製品（難燃性 LDPE）のスキーム

(4) - 2 ライフサイクルインベントリ分析による CO₂ 排出量

(4) - 2 - 1 インベントリ分析のバックグラウンドデータ

表 23 の通りデータを取得し、下記の CO₂ 排出量を試算した。

表 23 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	使用データ類
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 002 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 002 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 002 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 002 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 002 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 002 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 002 排出量計算ツールを参考
9	リサイクル	CSCNT 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 002 排出量計算ツールを参考 ・光励励法、燃料法「製造・輸送・公表製剤における算定方法・排出係数一覧」P7 参考
10	リサイクル	輸送	経済産業省・国土交通省 物流分野の 002 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「廃棄・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

(4) - 2 - 2 CO₂ 排出量の計算

(4) - 2 - 2 - 1 再生なしの場合の CO₂ 排出量計算

(ア) 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 72 再生なしの場合の CO₂ 排出量

(イ) 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

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・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)	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	0.14 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

図 73 再生なしの場合の輸送における CO₂ 排出量

(7) - 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

(ア) 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・ベレット作製	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 74 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

(イ) 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

下表参照

現行	a		b		c	d	e	f	CO ₂ 排出量 g(tC)*25696/1,000					
	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)	
	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
	合計					2,350							1.888 t	

⇒a*b*c*d*e*f/1,000

図 75 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

(4) - 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

(ア) 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 76 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

(イ) 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

					a		b	c	d	e	f		
	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
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	0.137 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

⇒a*b*c*d*e*f/1,000

図 77 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

(ウ) CSCNT 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		CO2排出量	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	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	0	kg-CO2
								合計	10.449	kg-CO2

図 78 CSCNT1kg の合成における CO₂ 排出量

(4) - 2 - 3 CO₂排出量の集計比較

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

(4) - 2 - 3 - 1 廃プラスチックを再生せずに焼却処分した場合

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
	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 79 廃プラスチックを再生せずに焼却処分した場合

(4) - 2 - 3 - 2 廃プラスチックを再生利用した場合

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			CO ₂ 排出量	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
			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 80 廃プラスチックを再生利用した場合

(4) - 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 81 本技術による CO₂削減量のまとめ

(4)－3 追加試算

当初の LCA 試算と比較するために、以下の条件で試算を行った。

(4)－3－1 追加試算内容

【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）→（株）GSI クレオス（神奈川県）→成型業者（滋賀県）としていた。（株）GSI 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。

【難燃バージン品、再生品ハイブリッドの場合】

CSCNT の配合検討から、CSCNT 濃度は 0.5～1% 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、0.5% 添加時の CO₂ 削減量を試算した。

- ・ 0.5%CSCNT バージン：再生品＝1:1 ハイブリッドの場合
- ・ 1.0%CSCNT バージン：再生品＝1:1 ハイブリッドの場合
- ・ 0.5%CSCNT バージン：再生品＝1:2 ハイブリッドの場合
- ・ 1.0%CSCNT バージン：再生品＝1:2 ハイブリッドの場合

(4) - 3 - 2 試算結果

①【当初試算】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 (CSCNT 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
			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 82 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 (CSCNT1%) 当初試算

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（CSCNT 濃度 0.5%）

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			CO ₂ 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-CO ₂ /kg	-	9,120	kg-CO ₂
2		運搬	走行距離	170	km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	-	137	kg-CO ₂
3	大東電材	成形	電力	20000	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
4		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	-	321	kg-CO ₂
5	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			-		kg-CO ₂
6		回収	-	算出不可	-	×			-		kg-CO ₂
7		運搬	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	-	402	kg-CO ₂
8	近江物産	粉碎・洗浄	電力	313.45	kWh	×	0.435	kg-CO ₂ /kWh	-	136	kg-CO ₂
			水	15	m ³	×	0.235	kg-CO ₂ /m ³	-	4	kg-CO ₂
9		運搬	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	-	353	kg-CO ₂
10	クレオス	CNT混練・ペレット作製	電力	2779.59	kWh	×	0.435	kg-CO ₂ /kWh	-	1,209	kg-CO ₂
			水	25	m ³	×	0.235	kg-CO ₂ /m ³	-	6	kg-CO ₂
11	クレオス	CNT合成		30	kg		10.449	kg-CO ₂ /kg		313	kg-CO ₂
12		運搬	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	-	353	kg-CO ₂
13	大東電材	成形	電力	20000	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
14		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	-	321	kg-CO ₂
15	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			-		kg-CO ₂
16		回収	-	算出不可	-	×			-		kg-CO ₂
17		運搬	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	-	402	kg-CO ₂
18	近江物産	粉碎・洗浄	電力	313.45	kWh	×	0.435	kg-CO ₂ /kWh	-	136	kg-CO ₂
			水	15	m ³	×	0.235	kg-CO ₂ /m ³	-	4	kg-CO ₂
19		運搬	走行距離	50	km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	-	40	kg-CO ₂
20	大東電材	成形	電力	20000	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
21		運搬	走行距離	400	km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	-	321	kg-CO ₂
22	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			-		kg-CO ₂
23		回収	-	算出不可	-	×			-		kg-CO ₂
24		運搬	-	算出不可	-	×	2.320	kg-CO ₂ /L	-		kg-CO ₂
25	処分業者	処分	焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO ₂ /kg	-	15,300	kg-CO ₂
										合計	54,979 kg-CO ₂
上記集計			LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO ₂ /kg	-	9,120	kg-CO ₂
			CNT合成	30	kg		10.449	kg-CO ₂ /kg		313	kg-CO ₂
			電力	63406.49	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
			運搬	3,300	km	×	0.803	kg-CO ₂ /km	-	2,651	kg-CO ₂
			焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO ₂ /kg	-	15,300	kg-CO ₂
										合計	54,979 kg-CO ₂

図 83 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（CSCNT0.5%）

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
(CSCNT 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
			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	0	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	0	kg-CO2
10	近江物産	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	50	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	40	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	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	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	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 84 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
(CSCNT1%、サイクルコンパクト化の場合)

④ 0.5%CSCNT バージン：再生品=1:1 ハイブリッドの場合

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(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	3,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	4,560	kg-CO2
2		運搬(樹脂メーカー大東)	走行距離	170	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	137	kg-CO2
3		運搬(大東→クレオス)	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
4	クレオス	CNT混練・ペレット作製	電力	1389.795	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	605	kg-CO2
			水	12.5	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	3	kg-CO2
5	クレオス	CNT合成(0.5%分)		15	kg		10.449	kg-CO2/kg		157	kg-CO2
6		運搬(クレオス→大東)	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
7	ユーザー	回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
8		運搬(東京→近江物産)	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
9	近江物産	粉碎・洗浄・リペレット	電力	156.725	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	68	kg-CO2
			水	7.5	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	2	kg-CO2
10		運搬(近江物産→大東)	走行距離	50	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	40	kg-CO2
11	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
12		運搬(大東→東京)	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
13	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
14	処分業者	処分	焼却	3,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	7,650	kg-CO2
										合計(1回再生)	23,431 kg-CO2
										2回再生	46,862 kg-CO2
										3回再生	70,293 kg-CO2
上記集計											
LDPE使用				9,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	13,680	kg-CO2
CNT合成				45	kg		10.449	kg-CO2/kg		470	kg-CO2
電力				64,640	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	28,118	kg-CO2
水				60	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	14	kg-CO2
運搬				6,300	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	5,061	kg-CO2
焼却				9,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	22,950	kg-CO2
										合計	70,294 kg-CO2

図 85 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
(0.5%CSCNT バージン：再生品=1:1 ハイブリッドの場合)

⑤ 1.0%CSCNT バージン：再生品＝1:1 ハイブリッドの場合

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(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	3,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	4,560	kg-CO2
2		運搬(樹脂メーカー→大東)	走行距離	170	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	137	kg-CO2
3		運搬(大東→クレオス)	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
4	クレオス	CNT混練・ペレット作製	電力	1389.795	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	605	kg-CO2
			水	12.5	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	3	kg-CO2
5	クレオス	CNT合成(1%分)		30	kg		10.449	kg-CO2/kg		313	kg-CO2
6		運搬(クレオス→大東)	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
7	ユーザー	回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
8		運搬(東京→近江物産)	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
9	近江物産	粉碎・洗浄・リペレット	電力	156.725	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	68	kg-CO2
			水	7.5	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	2	kg-CO2
10		運搬(近江物産→大東)	走行距離	50	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	40	kg-CO2
11	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
12		運搬(大東→東京)	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
13	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
14	処分業者	処分	焼却	3,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	7,650	kg-CO2
										合計(1回再生)	23,588 kg-CO2
										2回再生	47,175 kg-CO2
										3回再生	70,763 kg-CO2
上記集計			LDPE使用	9,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	13,680	kg-CO2
			CNT合成	90	kg		10.449	kg-CO2/kg		940	kg-CO2
			電力	64,640	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	28,118	kg-CO2
			水	60	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	14	kg-CO2
			運搬	6,300	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	5,061	kg-CO2
			焼却	9,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	22,950	kg-CO2
										合計	70,764 kg-CO2

図 86 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
(1%CSCNT バージン：再生品＝1:1 ハイブリッドの場合)

⑥ 0.5%CSCNT バージン：再生品=1:2 ハイブリッドの場合

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(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	2,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	3,040	kg-CO2
2		運搬(樹脂メーカー→大東)	走行距離	170	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	137	kg-CO2
3		運搬(大東→クレオス)	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
4	クレオス	CNT混練・ペレット作製	電力	926.53	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	403	kg-CO2
			水	8.333333333	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	2	kg-CO2
5	クレオス	CNT合成(0.5%分)		10	kg		10.449	kg-CO2/kg		104	kg-CO2
6		運搬(クレオス→大東)	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2
7	ユーザー	回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
8		運搬(東京→近江物産)	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
9	近江物産	粉碎・洗浄・リペレット 4t分	電力	208.9666667	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	91	kg-CO2
			水	10	m ³	×	0.235	kg-CO2/m ³	=	2	kg-CO2
10		運搬(近江物産→大東)	走行距離	50	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	40	kg-CO2
11	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
12		運搬(大東→東京)	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2
13	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2
14	処分業者	処分	焼却	2,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	5,100	kg-CO2
										合計(1回再生)	19,129 kg-CO2
										2回再生	38,259 kg-CO2
										3回再生	57,388 kg-CO2
上記集計				LDPE使用	6,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	9,120 kg-CO2
				CNT合成	30	kg		10.449	kg-CO2/kg		313 kg-CO2
				電力	63,406	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	6,300	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	5,061 kg-CO2
				焼却	6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300 kg-CO2
										合計	57,389 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
(0.5%CSCNT バージン：再生品=1:2 ハイブリッドの場合)

⑦ 1.0%CSCNT バージン：再生品＝1:2 ハイブリッドの場合

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(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	2,000	kg	×	1.52	kg-CO2/kg	=	3,040	kg-CO2	
2		運搬(樹脂メーカー→大東)	走行距離	170	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	137	kg-CO2	
3		運搬(大東→クレオス)	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2	
4	クレオス	CNT混練・ペレット作製	電力	926.53	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	403	kg-CO2	
			水	8.333333333	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	2	kg-CO2	
5	クレオス	CNT合成(1%分)		20	kg		10.449	kg-CO2/kg		209	kg-CO2	
6		運搬(クレオス→大東)	走行距離	440	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	353	kg-CO2	
7	ユーザー	回収	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2	
8		運搬(東京→近江物産)	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2	
9	近江物産	粉碎・洗浄・リペレット 4t分	電力	208.9666667	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	91	kg-CO2	
			水	10	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	2	kg-CO2	
10		運搬(近江物産→大東)	走行距離	50	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	40	kg-CO2	
11	大東電材	成形	電力	20,000	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	8,700	kg-CO2	
			水	0.12	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	0	kg-CO2	
12		運搬(大東→東京)	走行距離	500	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	402	kg-CO2	
13	ユーザー	取付	-	算出不可	-	×			=		kg-CO2	
14	処分業者	処分	焼却	2,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	5,100	kg-CO2	
										合計(1回再生)	19,234	kg-CO2
										2回再生	38,468	kg-CO2
										3回再生	57,702	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		63,406	kWh	×	0.435	kg-CO2/kWh	=	27,582	kg-CO2	
		水		55	m³	×	0.235	kg-CO2/m³	=	13	kg-CO2	
		運搬		6,300	km	×	0.803	kg-CO2/km	=	5,061	kg-CO2	
		焼却		6,000	kg	×	2.55	kg-CO2/kg	=	15,300	kg-CO2	
										合計	57,703	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
(1%CSCNT バージン：再生品＝1:2 ハイブリッドの場合)

(4) - 3 - 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 24)。

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 24 令和 7 年度 LCA の追加計算結果

試算内容	①対象製品の CO ₂ 排出量	②ベースライン	③削減量 (② - ①)
【当初試算】 18t-1%CSCNT 含 難燃再生 LDPE	55,293	100,734	45,441
18t-0.5%CSCNT 含 難燃再生 LDPE	54,979	100,734	45,755
18t-1%CSCNT 含 難燃再生 LDPE (拠点：再生業者)	54,626	100,734	46,107
18t-0.5%CSCNT 含 難燃バージン LDPE : 難燃再生 LDPE = 1:1	70,293	100,734	30,441
18t-1%CSCNT 含 難燃バージン LDPE : 難燃再生 LDPE = 1:1	70,763	100,734	29,971
18t-0.5%CSCNT 含 難燃バージン LDPE : 難燃再生 LDPE = 1:2	57,388	100,734	43,345
18t-1%CSCNT 含 難燃バージン LDPE : 難燃再生 LDPE = 1:2	57,702	100,734	43,031

(5) 展示会への出展

展示会への出展を実施し、開発品の成果及び新たな取引を目指した。(R5 年度から 7 年度)

(ア) 環境省 紹介資料での掲載 (図 89、90、91)



図 89 令和 6 年度 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。

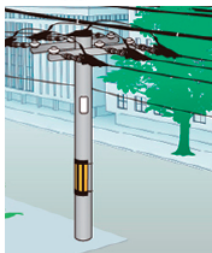
実施概要

- 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.再生回数の増大
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.コスト低減
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・選定の改良開発を実施
- 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
電材用機能性LDPE製造量	約18,000トン	電材用LDPE製造量 約710,000トン(推定)
リサイクル対象物の流通量	《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	《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



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

代表

株式会社GSIクレオス

事業概要

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るが、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ともに、難燃性・絶縁性・耐電圧性などの機能性においても極めて高い要求性能を有する製品である。一方、その要求性能の高さゆえに、従来再生品の使用は一部に限られてきた。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及び機能性の低下が著しく、再生品使用を妨げる要因となっており、本再生樹脂の力学的・機能性の回復は、かねてよりユーザー側から強く求められているところである。

本事業では、社会インフラ向け電材に多く使用されている機能性低密度ポリエチレン（以降、LDPE）の再生品について、機能性回復、使用比率・再生回数の増大、コスト削減を目標に4つの項目で実証を行う。①再生LDPEの力学的物性の回復を狙い、カップ積層型カーボンナノチューブ（以降、CSCNT）を添加することにより、力学的物性を回復させる。②再生LDPEの機能性の回復を狙い、難燃性、絶縁性、耐UV特性、高電圧性などの機能性を、CSCNT添加により維持する。③再生回数の増加を目指し、CSCNT添加により、再生回数によらず力学的物性及び機能性を所定水準まで回復させる。④再生LDPEを用いた最適配合で、力学的物性及び機能性を向上させた上で、使用材料の総コストを低減させる。以上の4項目を達成することで機能及びコストの観点から従来品と同等以上の製品を達成し、再生品由来電材の社会実装を目指す。

実証フロー

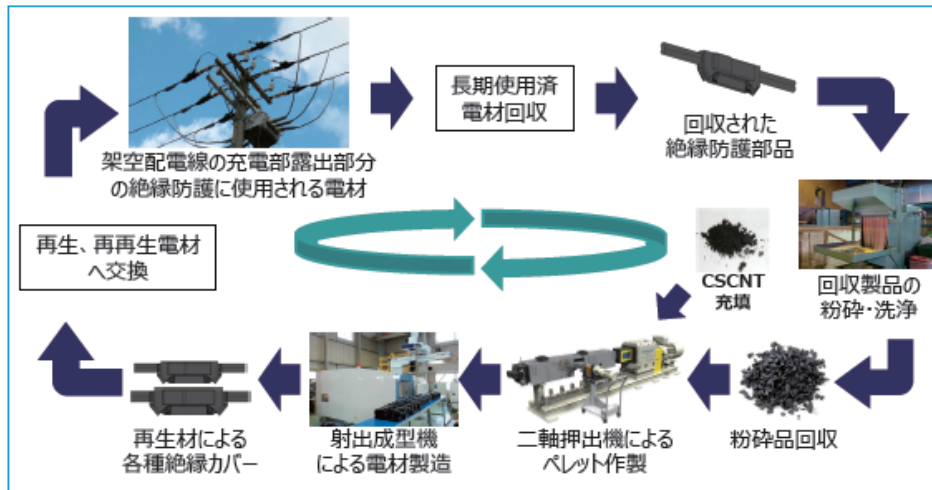


図 91 令和 7 年度 環境省紹介資料内容

(イ) (株) GSI クレオスによる展示会出展

● nanotech2025

会期：2025年1月29日～1月31日

会場：東京ビッグサイト

展示内容：資料配布（図92）

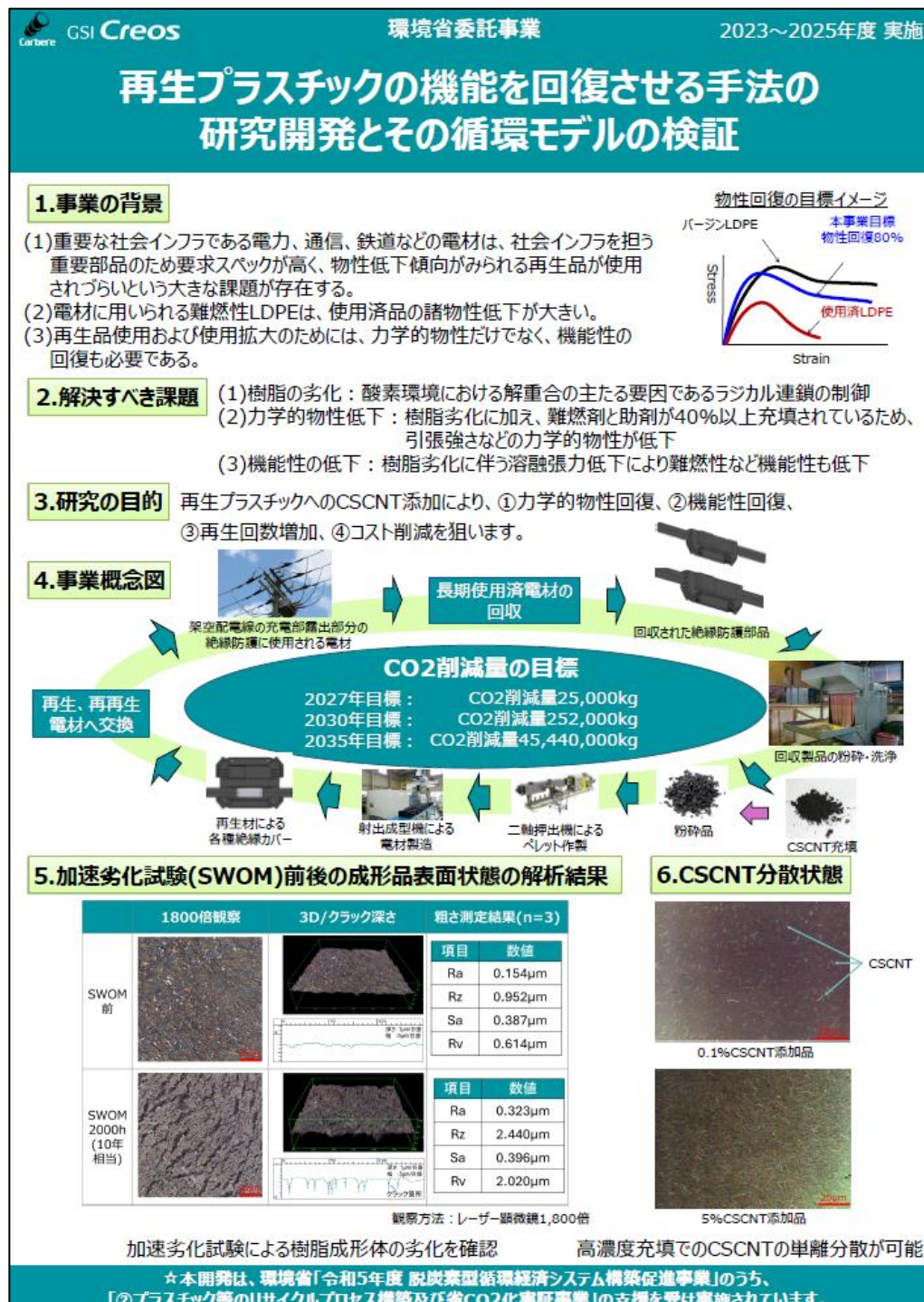


図92 展示会パネル、及び配布資料



図 93 nanotech2025 出展風景

● オープンイノベーション world 2025

会期：2025 年 11 月 12 日～11 月 14 日

会場：幕張メッセ

展示内容：資料配布（図 92）



図 94 オープンイノベーション world 2025 出展風景

● nanotech 2026

会期：2026 年 1 月 28 日～1 月 30 日

会場：東京ビッグサイト

展示内容：パネル展示・資料配布（図 92）



図 95 nanotech2026 出展風景

（６）関係者間の連携

本業務の関係者間での協力・連携のため、以下面談を実施した。

- ① 2025 年 4 月 21 日：大東電材（株）・（株）GSI クレオス間の面談
面談目的：電力会社との面談に先立つ事前打合せ、および今後の進め方を協議
- ② 2025 年 5 月 19 日：大東電材（株）・（株）近江物産・（株）GSI クレオス間の面談
面談目的：環境省からのコメントの共有、および研究開発ロードマップ全体像、令和 7 年度の実施スケジュールの再共有
- ③ 2025 年 5 月 19 日：大東電材（株）・（株）GSI クレオス間の面談
面談目的：電材市場の状況共有、および電力会社への紹介方法協議
- ④ 2025 年 8 月 20 日：大東電材（株）・（株）GSI クレオス間の面談
面談目的：電力会社との面談内容の擦り合わせ
- ⑤ 2025 年 10 月 23 日：大東電材（株）・（株）GSI クレオス間の面談
面談目的：本事業の開発品について、電力会社への説明資料の表現や内容の最適化
- ⑥ 2025 年 12 月 17 日：電力会社・大東電材（株）・（株）GSI クレオス間の面談
面談目的：本事業で開発品を最終ユーザーである電力会社へ提案、および今後の取り組みについて協議
- ⑦ 2025 年 12 月 17 日：大東電材（株）・（株）GSI クレオス間の面談
面談目的：電力会社との面談結果を踏まえ、今後の進め方を協議
- ⑧ 2026 年 2 月 2 日：大東電材（株）・（株）GSI クレオス間の面談
面談目的：状況確認、今後の進め方を協議

4. 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。

(株) GSIクレオスの調査によれば、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) 最終目標に向けた対応が求められる項目

電力会社等の電材ユーザーへのヒアリングから、以下を確認した。

- ・ 樹木成長速度の加速が社会インフラに与える負の影響
- ・ 中国の輸出規制対象物質であるアンチモンの価格高騰

上記樹木成長速度に伴う電線への激しい擦れや摩耗、衝撃の対策として電材の力学的特性の強化による対策、また難燃剤として使用されるアンチモンへの価格高騰への対策としてアンチモンの再利用の対策を図る。

上記のテーマに対応する具体的な今後の実証試験時の検討項目は以下である。

(ア) 耐摩耗性・摺動性の強化

具体的には、既存の評価規格をクリアすることを最低限の目標としつつ、ユーザーからはさらに高性能化の要望がある。樹木の成長に伴う激しい擦れや摩耗に対し、耐摩耗性を含む高度な耐久性を一層向上させることが求められている。

(イ) 耐衝撃性の向上

現状、具体的な評価規格は設けられていないが、樹木との衝突による衝撃への耐久性、すなわち耐衝撃性を向上させることができれば、ユーザーの満足度が高まる。これにより、実使用環境での安全性を飛躍的に高めることを目指す。

(ウ) 寸法安定性の改善

ある電力会社で採用されている現行材料では、設置場所の温度変化による電材の膨張・収縮率が約 1%である。例えば 20m の電線では約 20cm という大きな変動が観察されている。この膨張・収縮により、プロテクターの突っ張りや脱落、電線の暴露、露出による断線・ショート事故のリスクが顕在化している。

これらの課題解決に向け、CSCNT 添加や成形方法等の手法を検討し、材料の熱変形を抑制する。

本情報は、大東電材（株）、および電力会社から得られた情報に基づくものである。

(エ) ねじれ耐性

一部の電材では、架空電線への設置の際にねじれが発生し、カバーが外れるリスクがある。その用途では、ねじれ耐性の評価が必要である。

本事業での開発品は、弾性率の向上が確認されており、耐ねじれ性についても向上することが予測される。

（オ）材料回収と品質管理

本事業で開発した再生品の事業開始時、使用済み製品の回収品は、使用期間や品質、配合等にばらつきがあるため、回収体制の整備、回収した製品の品質評価および管理のシステム化構築が必要である。

（３）リサイクルするプラスチック及び用途

LDPE、難燃、非難燃をリサイクル対象とし、本実証事業の結果を踏まえて想定される用途は次の２製品を対象とする。

【リサイクル対象物：難燃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。本事業の成果として、CSCNT添加により、難燃性の向上、力学的特性（摺動性、耐摩耗性、耐衝撃性等）の向上が確認されており本用途のリサイクルは可能である。

【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』することで、CO₂の排出量削減に限らず、材料コストの低減が見込まれる。

（４）リサイクル対象物の流通量

【国内：電材用難燃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LDPE製品年間製造量及び当該市場シェアから試算した。²

計算式：18,000トン/1,336,000トン $\div$ 1.35%

【国外：電材用難燃LDPE製造量約710,000トン（推定）】

《算出根拠》国内LDPE製造量に対する当該対象物の割合および世界LDPE製造量より試算した。

計算式：52,966 $\times$ 1.34% $\div$ 710,000 トン³

（５）リサイクル目標量

【国内：18,000トン】

電材向け難燃LDPEを再生品に置き換える。

【国外：710,000トン】

（６）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。難燃再生LDPEの物性回復に成功すれば、電材製造メーカーである大東電材（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

² 国内LDPE製造量は1,336千トン（石油化学工業協会資料2022年）

³ 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）

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。この時点で難燃再生LDPEを年間1～10トン程度使用する見込みなので、（株）GSIクレオス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（ポリプロピレン）にも適用可能である。また、事前検討により、（株）GSIクレオスはCSCNT充填再生PPでの物性向上を確認済みである。

本項（8）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。

（7）その他の環境影響の低減・循環型社会への貢献の見込み

（株）GSIクレオスの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25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。

（株）GSIクレオス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。

(8) 環境影響の低減に資する要望とその必要性

表 25 (株) GSI クレオス顧客からの要望とその必要性

種別	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が、膨大な防錆費、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課題となっている。これを受け、自国製 PP 適用を狙う大規模な研究が開始されている。中東諸国の国立研究所では、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。本内容は、中東諸国の石油パイプメーカーとの面談により得た情報に基づくものである。
		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する事例があるが、十分な靱性が得られないこと、また大量の CB を充填するため、材料の保管コスト、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 充填により再生樹脂の靱性を改善、回復できる可能性が示唆されており、関連企業からその適用性について打診を受けている。本内容は、北米の大手暗渠用樹脂パイプメーカーとの面談により得た情報に基づくものである。
		再生 PP	自動車部品	大手自動車会社からは、再生 PP の破壊靱性を回復したい、CTE（熱膨張係数）を制御したいとの要望が寄せられている。破壊靱性の低下は再生材料の既知の課題であり、また PP の高い CTE のために部品間に大きな隙間を設けざるを得ず、外観上の問題が生じるため、CTE 制御による再生 PP の適用拡大が期待されている。CSCNT の適切な配向制御により CTE を制御できれば、再生 PP の使用拡大を通じた CO ₂ 排出量の削減に繋がるとニーズがある。本内容は、大手自動車会社との面談等により得た情報に基づくものである。

種別	樹脂	状態	用途	背景・ニーズ
熱硬化性樹脂	エポキシ (溶剤系)	バージン	航空宇宙、ドローン構造材、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課題を抱えている。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、これら課題解決を図りたいとの要望があり、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。本内容は、航空宇宙関連の研究機関との面談により得た情報に基づくものである。

5. 総括

本事業は、社会インフラを支える難燃性樹脂製電気設備資材における再生樹脂の物性低下という課題に対し、CSCNT を活用した物性回復技術の開発と、水平リサイクルモデルの確立を目的として実施した。

令和 5 年度から令和 7 年度までの 3 年間にわたり、材料の最適配合検討、再生回数増加試験、コスト削減検討、LCA による環境負荷評価を行い、以下の成果を得た。

(1) 物性回復技術の確立

難燃性 LDPE 再生品に対し、CSCNT の最適添加量 (0.5~1%) を設定し、力学的特性 (引張強度、伸び、弾性率) および機能性 (難燃性、絶縁性) の回復に成功した。

特に難燃再生 LDPE ではバージン比 80%以上の物性回復を示し、垂直燃焼試験で V-0 等級を達成した。

絶縁抵抗値も高水準を維持しており、CSCNT 添加により難燃性試験時の滴下物抑制効果が確認され、安全性の向上にも寄与することを確認した。

(2) 再生回数の増加と耐久性評価

SWOM 加速劣化試験により、10 年相当の屋外暴露環境を模擬した条件下で複数回の再生プロセスを検証した。難燃バージン LDPE・難燃再生 LDPE とともに再生後も規格内の力学的特性と機能性の維持が確認された。

難燃再生 LDPE では複数回再生で物性低下を確認、バージン材料との最適な複合化による補強で対応可能、との結論を得た。

(3) コスト削減の検討

CSCNT 添加によるコスト増加を抑制し、難燃再生 LDPE の配合工夫で現行再生品価格 (約 600 円/kg) から 13.5~27.3%のコスト低減を達成した。

(4) 環境負荷低減の検証 (LCA)

本技術導入で再生プラスチック製電材の CO₂ 排出量が大幅に削減可能、とライフサイクルインベントリ分析で確認した。再生回数の増加により最大約 45,000kg の CO₂ 削減が見込まれ、樹脂再利用と CSCNT 添加最適化でさらなる削減効果が期待できることが分かった。

(5) 今後の課題と展望

次期開発では、実使用環境での実証試験に向けて、電材回収スキーム構築やユーザー企業との連携を強化する。

特に本研究成果を報告した実ユーザーの電力会社から、特定の用途での適用希望を受けた。その用途では耐摩耗性・耐衝撃性・温度変化による寸法安定性・ねじれ耐性など、特有の性能要求を満たすための材料改良・評価が必要とされることも明らかとなった。将来の実装時には回収される再生樹脂の品質バラつきへの対応、安定供給体制の整備、長期耐用性検証などが、事業化に際しての重要な課題となる。

本事業の成果は、難燃性 LDPE 製電材の再生利用拡大と水平リサイクルモデル確立により、循環型社会構築と環境負荷低減に寄与すると同時に、国内外の他の用途、例えば自動車分野などへの樹脂リサイクルへの適用、波及の効果が大きいと期待できる。

令和 8 年度以降は社会実装を前提に、ユーザー企業である電力会社との協業により、温度変化に対する寸法の安定性を達成するための研究開発、また共同での性能評価、更には実証試験を計画している。

以上の通り、本事業は難燃性再生樹脂の物性回復技術と環境負荷低減の両面で大きな成果を挙げ、持続可能な循環経済システム構築に向けた重要な基盤を築いたと自負している。今後もユーザー企業と連携し、技術の高次・高度化と共に、実装を実現すべく、最大限の研究開発を進めていく計画である。

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。