

革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）

終了時評価報告書（平成30年度）

「プログラム名

超薄膜化・強靱化「しなやかなタフポリマー」の実現」

平成30年12月26日

P M 名：伊藤 耕三

P M補佐名：加藤 尚樹

：石原 正司

：松井 正宏

：小林 裕紀

研究開発プログラムの全体計画

(1) 研究開発プログラムの構想

① 解決すべき社会的課題

ポリマーのタフネス化は、燃料電池やLi電池のセパレータの超薄膜化を通じて飛躍的な高性能化・軽量化・小型化などに寄与するだけでなく、車体構造やタイヤなどでの強靱化を通じて自動車を始めとする輸送機器の軽量化・信頼性・安全性を飛躍的に向上させる重要な研究開発課題である。また、高分子材料が利用されている様々な産業分野で、省資源、省スペース、省エネルギー、高耐久性、高安全性、メンテナンスフリーなどに広範な影響を及ぼす。タフポリマーが実現すれば、世界トップレベルにある我が国の高分子部材分野の産業競争力の維持・強化に貢献するとともに、従来の常識を超えたタフな高分子部材を用いた革新的製品による新規産業の創出などが予想される。

② 上記の社会的課題を解決し、産業や社会のあり方に大きな変革をもたらすPMの構想

本プログラムでは、「薄くても破れない」、「硬くてももろくない」、タフでしなやかなポリマーを実現しようとしている。従来の限界を超える薄膜化と強靱化を備えた「しなやかなタフポリマー」を実現することで、究極の安全性・省エネ自動車の実現など、材料から世の中を変革する。ポリマーのタフネス化は、燃料電池やLi電池、車体構造、タイヤなどの飛躍的な高性能化に寄与するため、自動車を始めとする輸送機器の軽量化・信頼性・安全性を飛躍的に向上させることに繋がる。本研究成果は自動車産業のみならず、種々の輸送機器、電子デバイス、医療機器などの最先端で用いられる広範なポリマーへの応用展開および波及効果を通じて、LCAの観点から炭酸ガス排出量の大幅な削減や、高分子材料に対する長期信頼性に基づいた安心・安全と低環境負荷社会の実現への貢献が期待できる。

③ 出口目標及び出口に至る将来的なシナリオ

本プログラムでは、燃料電池電解質膜・Li電池用セパレータの超薄膜化、車体構造用樹脂・透明樹脂の強靱化及びタイヤの薄ゲージ化を実現する（材料の具体的な数値目標については後述）。電池や車体構造のプロトタイプを作製し、自動車会社における実証実験で産業適用性を検証する。また、破壊の分子的機構解明とタフポリマーを実現するための分子設計・材料設計の指針を確立する。さらに簡便かつ迅速な強度評価標準試験法と様々な環境下での破壊予知・疲労寿命予測法を開発し、高分子部材の長期信頼性を確立する。各プロジェクトで掲げた数値は、いずれも既存技術の延長線上では到底達成不可能な定量的目標となっており、自動車メーカー

とのすり合わせを経て決定した。もし達成できれば非連続イノベーションの実現につながる、実用化可能な非常に高い目標値が設定されている。さらに本プログラムでは、開発されたタフポリマーの社会実装の場としてコンセプトカーというクルマのプロトタイプ製作を行なう。これに加え、新規テーマ・参画機関を追加して研究開発分野を拡張し、「タフポリマー実現のための分子設計・材料設計指針」の汎用性を検証することで、本研究成果の産業全体への波及を加速する。さらに、高分子破壊標準データベースのプロトタイプも構築する。以上により、本プログラムで得られた非連続イノベーションを具現化するとともに、モノづくりにおける課題を顕在化させ、解決に向け産学の知恵を結集し、実用化への道筋を明らかにする。

④ 解決のための発想・アイデア及びブレークスルーのポイント

用途に応じた機能を発現しつつ壊れない「タフポリマー」を実現しようとした場合、現状の試行錯誤的アプローチでは時間がかかり過ぎてトレードオフに陥るリスクがある。またタフネスをもたらすミクロの分子設計とマクロの破壊力学を結びつける破壊の分子理論はまだ未完成であり、タフネスとその他すべての要求条件を満たす高分子材料の創製は一般に極めて困難となっている。これを解決するために、トップレベルの実験・理論の英知を集結し、SPring-8を用いた破壊の時空間階層的なその場観察による現象解明、スーパーコンピュータ「京」を用いたシミュレーションなどを用いてマクロの破壊挙動理論と分子論的機構解明とをつなぎ、タフネスの本質に迫る。これを世界トップレベルの優れた独自技術と高い技術的受容性を有する我が国の企業へ実行可能な知見として引き渡すことで、タフポリマーを実現するための分子設計・材料設計の指針を確立する。この指針を新規な分子結合と高次構造設計に結びつけることにより、戦略的かつ効率的に革新的概念のタフポリマーを実現するとともに、開発されたタフポリマーの産業適用性を自動車メーカーの観点も入れながら検証する。以上により、従来の試行錯誤から脱却して飛躍的な開発速度で理想の材料を追求することが可能となり、他国では簡単に真似のできない斬新な材料開発手法が確立できる。

(2) 研究開発プログラムの達成目標

本プログラムの目標を達成するために、本プログラムは8件の研究開発プロジェクトから構成されている。プロジェクトA～Eは材料開発プロジェクトであり、ポリマーのタフネス化を通じて燃料電池や車体構造用樹脂などの飛躍的な性能向上を目指す。それぞれの材料開発プロジェクトの数値目標は下記の通りである。

プロジェクトA：燃料電池電解質膜薄膜化プロジェクト

乾湿サイクル2万回以上のタフネスと薄膜化（5～10 μ m）の両立

プロジェクトB：Li電池セパレータ薄膜化プロジェクト

膜厚5 μ mで突刺強度500gf以上

プロジェクトC：車体構造用樹脂強靱化プロジェクト

引張弾性率 2GPa 以上かつ破断伸度 80%以上

プロジェクトD：タイヤ薄ゲージ化プロジェクト

適用ゴム重量の 40%を減量

プロジェクトE：透明樹脂強靱化プロジェクト

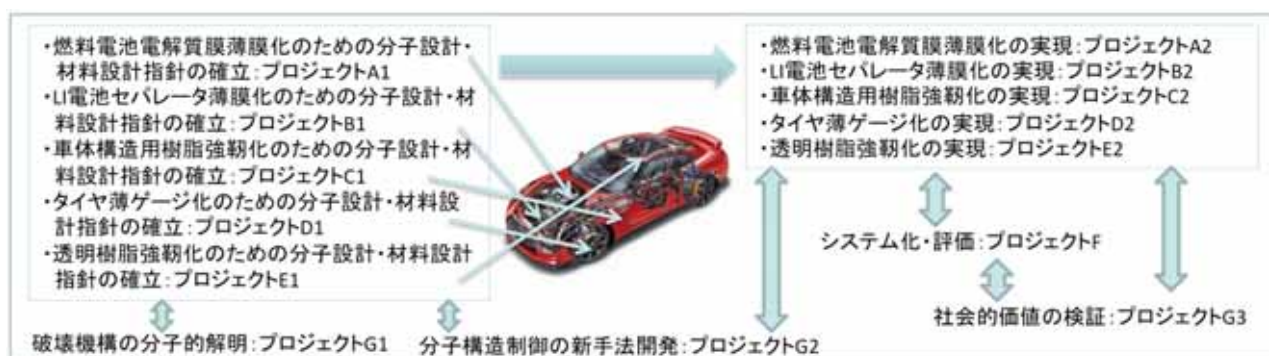
耐衝撃強度 60 J/m と曲げ弾性率 8Gpa (2mm 厚) の両立

プロジェクトFは開発された材料を自動車メーカーの観点から検討し、実際に実用化が可能か、その産業適用性をユーザーの立場から評価する。プロジェクトGは「分子構造制御の新技术開発」などプロジェクト横断的な共通課題を解決し、タフポリマーの材料開発を加速させる。

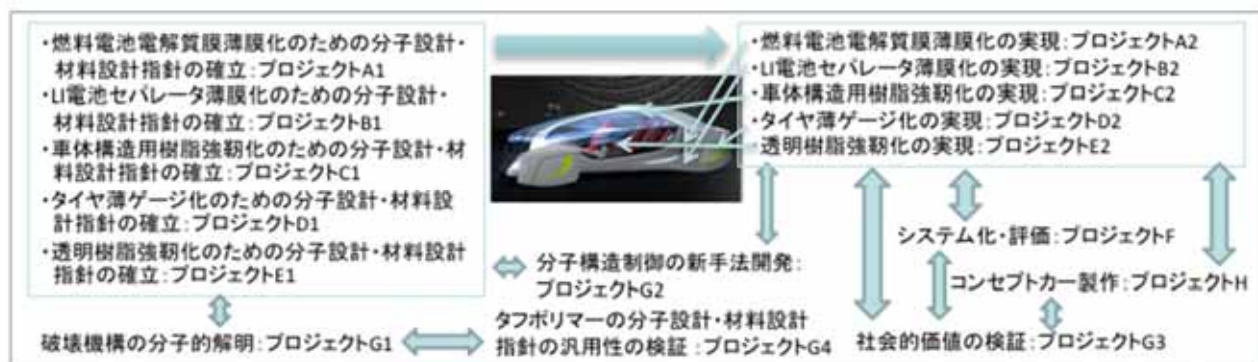
本プログラムでは以上の当初目標に加えて、コンセプトカーの製作プロジェクトHを追加した。プロジェクトHは、開発された材料を現実の車体構造や部品として搭載したコンセプトカーの製作を通して、タフポリマーの材料開発を加速させるとともに、開発成果のアウトリーチに資することを目的としている。鉄系材料に較べて約 10 倍高価なポリマー系材料が普及した大きな理由は賦形性が良く工程プロセスが簡潔な点にある。新規のポリマー材料を実用化するには、その賦形プロセス(成型工程)の開発を同時に進める必要があり、コンセプトカーの製作は材料開発の実用化の加速に資するところが大きい。

(3) 研究開発プログラムの全体構成図

平成 27 年 11 月 24 日時点での全体構成図



現時点での全体構成図



(4) 具体的な取組

① プロジェクトA: 燃料電池電解質膜薄膜化プロジェクト A1+A2

1. 研究開発の概要

燃料電池（PEFC）の発電性能は、電解質膜を薄膜化しプロトンや水の移動度を高めることで飛躍的に向上することが期待できる。電解質膜の薄膜化では機械的耐久性（特に乾湿サイクル耐久性）を確保するためポリマーのタフ化が必須であり、電解質膜の破壊過程の分子的機構を解明することで薄膜化に必要な分子設計・材料設計の指針を確立し、新規構造を有するフッ素系高分子電解質の開発を行なう。また、電解質膜を薄膜化すると燃料水素ガスのリーク量が増え燃費性能が低下するため、水素透過抑制技術を開発し、電解質薄膜に適用する。

2. 成果目標

次世代燃料電池に求められる、高温作動（～120℃）、低・無加湿運転を可能にする高プロトン伝導性薄膜電解質膜（5-10 μ m）を開発する。破壊機構の解析とその分子論的解明から機械的タフ化の指標を確立し、超薄膜でありながら実使用に耐える機械的耐久性を付与するとともに、水素透過性を従来無補強膜（25 μ m）と同レベルに抑制する。電解質膜の基本性能の向上に加え、燃料電池としての発電性能、耐久性、水素透過性を中心にシステム化評価を行ない、自動車用途への適用性を検証する。

② Li 電池セパレータ薄膜化プロジェクト B1+B2

1. 研究開発の概要

本研究開発プロジェクトの目標であるLi 電池セパレータの薄膜化を実現するために、Li 電池セパレータの新規成形加工プロセスを開発する。まず放射光X線散乱法を用いて、ポリプロピレン（PP）薄膜の伸長下での構造因子を系統的かつ網羅的に測定・解析し、PP結晶の破壊と空孔構造形成の相関を明らかにする。また、Li 電池セパレータの破壊過程の観察・分析と破壊エネルギー

の計測データを破壊のシミュレーション結果と比較することにより、Li 電池セパレータの破壊機構を分子的に解明する。これにより、リチウムイオン透過性を担保しながら高強度化（タフ化）を実現する空孔構造の分子設計・設計指針を明らかにし、その設計指針に基づき Li 電池セパレータの薄膜化・強靱化を乾式法で具現化する。

2. 成果目標

電気自動車の航続距離を延ばすためには Li 電池容量を上げなければならない、そのためにはセパレータをこれまで以上に薄くする必要がある。本プロジェクトでは、従来技術では到底達成不可能なセパレータフィルムの薄膜化を達成し、電池として実用的なレベルでのデンドライト発生に耐えることを目指した。そのため具体的には、当社従来品の突刺強度を 2 倍以上に高めて必要な強度を維持しながら、一般的な車載用セパレータの厚みである $20\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$ に対して $5\mu\text{m}$ まで薄くすることを数値目標とする。開発されたセパレータについて、Li イオン電池としての初期電池特性、充放電耐久性、安全性への跳ね返り特性などのシステム化評価を行い、自動車用途への適用性を検証する。

③ 車体構造用樹脂強靱化プロジェクト C1+C2

1. 研究開発の概要

自動車用構造材料の軽量化・強靱化・衝撃吸収エネルギーの向上は、輸送機器の軽量化・信頼性・安全性を飛躍的に向上させる重要な研究開発課題である。本プロジェクトでは、車体構造用材料として、環境問題、安全対策に対する新たなニーズ（タフネス化）を先取りし、革新的概念（環動ポリマーとナノアロイ化技術の融合）による理想材料を創出し、新たな市場創出を図る。

2. 成果目標

- ・ EV 車軽量化による航続距離 300km（スチール車体比 2 倍）の実現

本目標達成のためには、熱可塑 CFRP（曲げ弾性率 $>50\text{GPa}$ 、吸水率 $<2\%$ ）や現場重合 CFRP（大型一体成形）等による車体の軽量化（スチール車体比 1/2）が必要であり、まずは車体構造材のベースポリマーとして適した環動ポリマー分子の設計（高耐熱主鎖骨格、官能基制御）とプロセス中でのアロイ化技術を融合し、環動ポリマー構造の微分散化（ $<100\text{nm}$ 以下）を実現する。これら強靱化させたベースポリマーを用い、CFRP 等の繊維強化系へ展開し、車体構造材に適した処方設計の確立を目標とする。

- ・ 衝突エネルギー吸収量 150J/kg （スチール比 5 倍）、非フラグメント化の実現

このためには、破壊過程のその場観察、局所的破壊エネルギー計測技術の確立、実測破壊データを用いた計算機シミュレーション技術の構築（MD～FEM）、並びに分子的機構解明による材料設計指針を確立する必要がある。その材料設計指針

のもと、車体構造材に適した環動ポリマーの分子設計、プロセス中でのナノスケールでのアロイ化技術を融合した破壊モード制御技術の確立を目標とする。

また、本プロジェクトは進捗が著しいことから、自動車以外の応用展開、たとえばスポーツ用具などについてのプロトタイプを製作し評価することで、車の部品を製作する上での課題を抽出し、プロジェクトの実用化を加速する。

④ タイヤ薄ゲージ化プロジェクト D1+D2

1. 研究開発の概要

タイヤを構成する各種部材を強靱化し薄くすることで、タイヤの省資源化および軽量化を実現する。このためには、既存技術の枠を超えた画期的な高強度材料の導入による、より高い安全性の確保が必須となる。したがって本プロジェクトでは、既存技術の問題点の詳細解析を通じた評価・予測技術の開発と、新材料システムの開発による高強度化技術開発を同時並行で進めていく。

2. 成果目標

タイヤに使用する原材料を 20～40%削減することを最終目標とする。第一段階では、実験室レベルでの高強度化の実現を目指す。ここには、シミュレーション等による予測技術開発、実験室での信頼性の高い評価技術開発も含まれる。第二段階では、第一段階で改良が認められたケース（強度指標としているき裂進展転移エネルギーを基準ゴムに対して 350%以上向上）に対して、実際の製品（タイヤ）での実証検討を行なうことを目標とする。本プロジェクトでは、タイヤ以外の応用展開、たとえばゴムクローラやコンベアベルトなどについても実用化を目指した研究開発を推進する。

⑤ 透明樹脂強靱化プロジェクト E1+E2

1. 研究開発の概要

透明樹脂の高剛性/高タフネス(=衝撃性)の両立を実現する。透明樹脂/無機材料のナノコンポジットは、透明性を維持したまま剛性を向上できる技術であるが、無機材料の添加量と衝撃性の維持はトレードオフの関係にあり、実用化には衝撃性の向上が必要である。本プロジェクトでは、環動部位の導入などによる衝撃性の向上を検討する。最適な環動部位の設計/導入を実施することで、従来の手法では到達できなかった透明樹脂の高剛性/高タフネスを実現し、透明樹脂ガラス、表示デバイス前面板、高靱性フィルム分野などへの応用を実現する。

2. 成果目標

環動部位の導入などの手法を用い、高剛性/高タフネスを両立した透明樹脂材料の実現を目標とする。剛性（弾性率/表面硬度等）及び衝撃性（シャルピー衝撃等）に関連する指標を用いて設計された透明樹脂材料を作製・評価す

る。さらに、破壊シミュレーション、破壊挙動の観察・分析などにより、剛性・衝撃性と構造との相関を把握する。得られた知見を活かしながら、従来の特性範囲をはるかに越える透明樹脂材料（弾性率 8GPa（2mm 厚）以上かつノッチ有シャルピー衝撃 60J/m 以上）の実現を目指す。

⑥ システム化・評価プロジェクト F

1. 研究開発の概要

プロジェクト①～⑤で開発されたタフポリマーを実際に自動車で使用することを想定した環境下で評価を行なうことで、各種タフポリマーの産業適用性を自動車メーカーの観点から検討する。評価に当たっては、ポリマーの供与を受けて車載用システムとして組み上げるところまで含めて実施する。

2. 成果目標

プロジェクト①～⑤で開発されたタフポリマーの供与を受け、車載用システムを模擬した簡易システムとして組み上げ、特徴的な試験を行い、実力評価・耐久試験・課題抽出などを行なう。具体的には ①燃料電池電解質膜については、5 μ m 程度の薄膜化におけるプロトン伝導性、耐久性、水素リーク抑制の同時成立の確認 ②LiB セパレータにおいては、5 μ m 程度への薄膜化（エネルギー密度 20%向上）における初期電池特性、充放電耐久性、安全性への跳ね返りの確認 ③車体構造上樹脂においては、連続繊維熱可塑 CFRP における現場重合プロセスによる大物一体成型の実現、および開発材による部品試作・評価による軽量化効果の実証確認 ④透明樹脂ガラスにおいては、その特性に合った適用部品の選定と、選定部品に特有な要求特性に対する特性確認 を行なう。以上を通じて車両適用の可能性について総合的に判断を行なう。

⑦ 横断的共通課題プロジェクト G1+G2+G3+G4

1. 研究開発の概要

「破壊機構の分子的解明」、「分子構造制御の新手法開発」、「社会的価値の検証」、「タフポリマーの分子設計・材料設計指針の汎用性の検証」などプロジェクト横断的な共通課題について研究開発を行なう。

2. 成果目標

破壊機構の分子的解明、ポリマーをタフにする分子設計・材料設計指針と破壊予知・疲労寿命予測法の確立、簡便かつ迅速な強度評価標準試験法の開発などを目標とする。

⑧ コンセプトカー製作プロジェクト H

1. 研究開発の概要

本プログラムで開発されたしなやかタフポリマーを母材とする炭素繊維強化複合材料等を車体の主構造に用い、透明なタフポリマーを窓の一部へ適用する。このように、本プログラムで開発した材料を活用するクルマの設計と製作を通じて、新しい材料に適した使い方や賦形に関わる技術知見を蓄積するとともに、材料開発へフィードバックすることで成果の最大化を図る。また、開発材料で作られた部品等をコンセプトカーとして提示することで、関連分野の研究者・技術者へ成果を強くアピールする。また、展示会やイベントなどでコンセプトカーを展示あるいは試走させることで、広く国民へプログラム成果をわかりやすく紹介する。

2. 成果目標

平成 30 年 10 月をめどに、金属系材料の使用を最小限にとどめ、本プログラムで開発した材料の特徴を活かしつつ、タフ化による大幅な軽量化・省エネルギー化の可能性を示すために、樹脂の軽量性と高い形状の自由度を表現したデザインの EV コンセプトカーを製作する。

(5) 研究開発プログラムの全体ロードマップ



(6) 研究開発プログラムのマイルストーン

平成 29 年 3 月をめどに、プロジェクト G で破壊の分子的機構が解明され、ポリマーをタフにする分子設計・材料設計の指針が得られ、さらにこれを用いてプロジェクト A～E の各材料開発プロジェクトでタフポリマー開発のそれぞれの数値目標達成のめどが付いたことをもって本研究開発プログラムのマイルストーンとする。この段階で目標達成のめどが検証できなかった材料開発プロジェクトについては、打ち切りも含めた大幅な見直しを行なうこととした。平成 28 年 10 月にアドバイザー

会議を開催し、進捗状況についての各プロジェクトからの報告とアドバイザーによる質疑応答を含めた中間評価を実施した。その際のアドバイザーによる評価も参考にした上で、PMとして各プロジェクトとも目標の達成のめどがついたと判断し、各プロジェクトを最終年度まで継続することとした。

(7) 研究開発プログラム実施期間

平成 26 年 10 月 2 日から平成 31 年 3 月 31 日まで（4.5 年間）

2. 研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果

(1) 燃料電池電解質膜薄膜化プロジェクト

① プロジェクトの計画

まず、標準膜（従来ポリマー）薄膜の評価をベースに、アカデミアと協働し実験系・測定系を構築するとともに、薄膜化の発電性能への影響を把握する。タフポリマー開発に向けては、電解質膜の破壊過程の基礎的検討から劣化メカニズム解析と劣化を支配するマクロな膜物性を抽出評価し、電解質ポリマーのタフ化指標を導出する。一方、特性の異なる各種試作電解質ポリマーについて、大型放射光設備を活用したミクロ構造解析及び分子動力学シミュレーションによる構造モデル化と合わせ、マクロ物性の発現機構を分子論的に理解しタフポリマーのコンセプトを確立する。コンセプトに基づき新規電解質ポリマーを合成、膜特性評価からポリマー最適化を行ない、日産自動車でのシステム評価に移行する。並行して水素透過抑制技術の開発を進め、新規開発電解質膜に適用、日産自動車でのシステム評価において実用膜としての検証を行う。

プロジェクトの全体計画図

研究開発課題	平成 26年度 (5ヶ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヶ月)
1. アカデミアと連携した実験・測定系構築					
・実験測定系の整備、解析方針決定	←→				
・薄膜化による発電性能への影響把握	←→				

2. タフポリマー開発					
・タフ化指標導出とポリマー設計のコンセプト確立	←		→		
・新規電解質ポリマーの合成、組成最適化			←		→
・大型放射光設備活用によるマイクロ構造解析	←				→
・MDシミュレーションによる構造のモデル化	←				→
3. 水素透過抑制技術の開発					
・無機層状化合物との複合化		←			→
・導電性補償に向けた無機層状化合物の改質		←			→
4. 日産社でのシステム評価					
・現行膜及び開発試作膜のシステム評価				←	→

② プロジェクトの体制

具体的には各研究開発課題に対し、参加研究機関のアカデミアと連携し解決に取り組み、新規ポリマーの創出を目指す。分析・解析は、九大高原研、山形大伊藤研、理研播磨（SPring-8）と、また、相分離構造や機械特性シミュレーションについては、名大岡崎研、理研播磨と連携を取りながら開発を行う。新コンポジット膜開発では、弘前大沢田研、理研相田研と連携して取り進める。

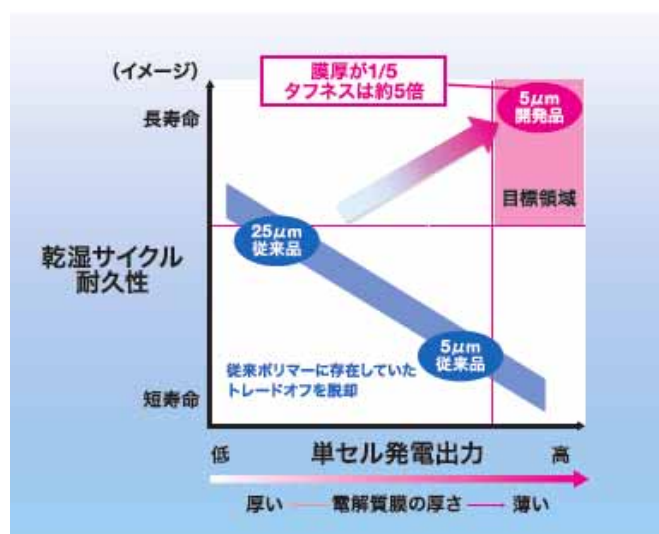
研究開発課題	内容、研究開発プロジェクトにおける役割等	研究開発機関
電解質ポリマーのタフ化指標導出	電解質膜の破壊過程の基礎的検討 劣化メカニズム解析と劣化を支配するマクロな膜物性の抽出評価	AGC株式会社
タフポリマーのコンセプト確立	大型放射光設備を活用したマイクロ構造の解析 電解質膜破壊の観察と解析	AGC、九州大学、理化学研究所、山形大学
	MDシミュレーションによる構造モデル化、機械特性シミュレーション	AGC、名古屋大学、理化学研究所
水素透過抑制技術の開発	無機層状化合物との複合化検討 水素リーク量低減化の基本技術確立	AGC、理化学研究所、弘前大学
日産社でのシステム評価	現行膜及び開発試作膜のシステム評価	AGC、日産自動車

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

全体計画に沿って研究開発を進め、平成 27 年度に薄膜電解質膜評価に必要な実験系を構築、平成 28 年度には乾湿サイクル耐久性に影響するタフ化指標を見出し、ポリマーのコンセプトを確立、タフな電解質薄膜を実現した。電解質はポリマー主鎖の柔軟化という新しいコンセプトでポリマー設計されており、SPring-8 等で検証しながら、安定なマイクロ相分離構造を有する燃料電池用の

新規フッ素系電解質薄膜を開発した。開発膜は、薄膜化すると乾湿サイクル耐久性が低下するという、従来の無補強電解質膜が有していたトレードオフの関係からの脱却を実現でき、膜厚を従来の5分の1に相当する $5\mu\text{m}$ にしても、無補強の従来品に対し5倍以上の乾湿サイクル耐久性を達成することに成功した。引き続きSPring-8等やシミュレーションでの解析を深化することで、電解質膜にタフネスを付与するためのポリマー構造についての分子論的理解が進んだ。

一方、水素透過抑制については、平成29年より無機層状化合物とのコンポジット膜化に重点的に取り組んできた。一般にコンポジット化はプロトン伝導性も低下させてしまうため、新たなコンセプト導入によるトレードオフからの脱却が大きな課題であった。表面修飾を施した分散性の良好な特定のフィラーを用いることで、水素透過性とプロトン伝導性のトレードオフの関係から脱却し、プロトン伝導性に優れたコンポジット膜を実現した。目標レベルに近い水素透過性とプロトン伝導率を有するコンポジット膜が得られるようになり、日産自動車と連携して検証した。



<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
1	6

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

車載用の固体高分子形燃料電池の膜材料において、競合となるのは補強型フッ素系電解質膜であり、また炭化水素系電解質膜も候補として考えられる。前者は、延伸PTFE多孔体からなる補強布を使用するものが主流であるが、極薄の

PTFE 補強布の製造およびフッ素系電解質を含浸する工程が必要になるために高コストとなり、膜の導電性の面でも不利である。後者の炭化水素系電解質膜は、セル内で発生する過酸化水素やそれに由来するラジカルに対する化学的な耐久性が低いために、自動車への展開は困難である。

ZEV（ゼロエミッションビークル）としては、電気自動車（EV）が燃料電池自動車（FCV）の競合となるが、EVは航続距離に課題があり、航続距離の長いFCVとは棲み分けることになると予想されている。

<獲得成果の革新性>

無補強の5 μ m薄膜の実用化に目途が得られ、従来の延伸PTFE多孔体からなる補強布を使用した膜に比べて、低コストの薄膜を得る方法を切り拓いた。プロトン伝導性の面でも上述の補強膜に比べて有利である。コンポジット化による水素透過抑制技術は、従来技術の課題であるプロトン伝導性低下とのトレードオフ関係を打破し、優れたプロトン伝導性の保持を可能とした。ちなみに、本開発の電解質薄膜は、膜内の異物となる水素透過抑制フィラーを添加しても十分な乾湿サイクル耐久性を有している。

<獲得成果の独創性>

乾湿サイクル耐久性と相関のあるタフ化指標を見出した。その指標にしたがって、主鎖に柔軟な構造を導入する分子設計により、ミクロ相分離構造（クラスター構造）の構造安定性が飛躍的に高まり、乾湿サイクル耐性が大幅に向上した無補強5 μ m薄膜電解質膜を創出することができた。水素遮蔽用フィラーを添加した膜において、フィラー表面を特定の方法で化学修飾することで、プロトン伝導性と水素透過性のトレードオフの関係の打破に成功し、水素透過性が低くプロトン伝導性の優れた薄膜を実現した。

（２）Li 電池セパレータ薄膜化プロジェクト

① プロジェクトの計画

本研究開発プロジェクトの目標を達成するために、三菱ケミカル株式会社がリーダーシップを取りながら、Li 電池セパレータの新規成形加工プロセスを開発し、Li 電池セパレータ薄膜化を実現する。また、アカデミアの協力を仰ぎながらLi 電池セパレータの破壊過程の観察・分析と破壊エネルギーの計測データを破壊のシミュレーション結果と比較することにより、Li 電池セパレータの破壊機構を分子的に解明し、Li 電池セパレータの薄膜化に必要な分子設計・材料設計の指針を確立する。さらに、新規概念の高分子構造を導入することにより、Li 電池セパレータの薄膜化を効率よく実現する。

② プロジェクトの体制

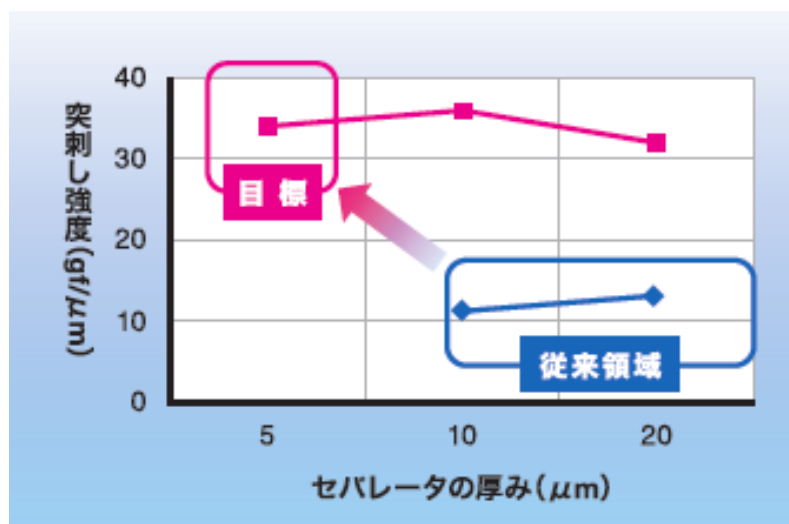
研究開発課題	内容、研究開発プロジェクトにおける役割等	研究開発機関
Li電池薄膜セパレータの開発	Li電池のセパレータの薄膜化の実現	三菱ケミカル株式会社
分析・解析	Li電池セパレータの破壊過程の観察・分析と破壊エネルギーの計測	三菱ケミカル、九州大学、理化学研究所、山形大学、群馬大学、MCHC/RDSC
理論・シミュレーション	Li電池セパレータの破壊機構の分子的解明および破壊のシミュレーション	三菱ケミカル、名古屋大学、お茶の水女子大学
合成・プロセス	Li電池セパレータの新規成形加工プロセスの開発	三菱ケミカル、山形大学

研究開発課題	平成 26年度 (5ヶ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヶ月)
1. Li電池薄膜セパレータの開発 ・ Li電池セパレータの薄膜化検討 ・ 薄膜化の実現とLi電池としての特性評価		←	←	←	←
2. 分析・解析 ・ 測定システムの整備 ・ Li電池セパレータの破壊過程の観察・解析 ・ 破壊エネルギーの計測	←	←	←	←	←
理論・シミュレーション ・ Li電池セパレータの破壊機構の解明 ・ Li電池セパレータの破壊シミュレーション	←	←	←	←	←
4. 合成・プロセス ・ Li電池セパレータの新規成形加工プロセスの開発	←	←	←	←	←

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

本プロジェクトでは、電気自動車の航続距離アップに繋がるLiイオン二次電池高容量化のために多孔質セパレータの薄膜化に取り組んでおり、従来20～30μm厚のセパレータを5μm厚まで薄膜化し、充放電500サイクル試験において、デンドライト発生に耐えうる、実用的な多孔膜の薄膜化・タフ化技術を

確立することを目標としている。そのために放射光X線散乱法を用いて、ポリプロピレン（PP）薄膜の伸長下での構造因子を系統的かつ網羅的に測定・解析し、PP結晶の破壊と空孔構造形成の相関を明らかにした。また、多孔膜の破壊過程の観察・分析と、破壊エネルギーの計測データを破壊のシミュレーション結果と比較することにより、多孔膜の破壊機構を分子的に解明した。その結果、多孔膜のタフ化を実現する空孔構造の分子設計・材料設計指針が確立し、それに従って延伸前の原シートの最適な構造と多孔膜の強度アップをもたらす革新製法を構築することで、ラボスケールで5 μ m厚までの薄膜化、突き刺し強度で従来品に比べて3倍程度の強靱化に成功した。また、セパレータ製法のスケールアップを実施し、ラボ機で達成した性能を量産機においても再現できた。日産自動車における小型セルでの試験で電池としての初期性能や耐久性の面で、実用化されているセパレータと遜色のないことも確認した。



<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
1	6

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

多孔膜製造の競合技術である湿式法では、延伸、溶剤抽出、乾燥といった多岐に渡る工程を必要とするが、三菱ケミカルの乾式法は延伸工程のみで空孔を形成することができ、製造コスト的に優位である。また溶剤を使用する必要もないため、環境への負荷が小さいというメリットもある。

<獲得成果の革新性>

コストや環境不可という点で有利な乾式法を用いて、多孔構造（サイズ、分布、配向など）を自在に制御できる技術が確立できた。これを用いることで、従来品

に比べて突き刺し強度が約3倍、膜厚 5 μ m のセパレータを量産機で製作することに成功した。多孔膜はLi 電池のセパレータだけでなく、断熱材など様々な分野での応用が期待されていることから、得られた成果の産業的・社会的価値はきわめて大きい。

<獲得成果の独創性>

乾式法は湿式法に比べてコストや環境不可という点で有利ではあるが、一般的に空孔制御が困難であり、空孔構造は勘と経験に頼って制御されてきた。本プロジェクトでは、アカデミアとの強力な連携により、空孔構造の形成過程や構造の観察技術、空孔構造の設計指針が確立し、しかも実際に量産レベルで多孔膜の薄膜化と強靱化に成功した。同様の例は国内外で他に皆無であり、本成果はきわめて独創的と言える。

(3) 車体構造用樹脂強靱化プロジェクト

① プロジェクトの計画

本研究開発プロジェクトの目標を達成するために、東レ株式会社がリーダーシップを取りながら、車体構造用樹脂の新規成形加工プロセスを開発し、車体構造用樹脂の強靱化を実現する。また、アカデミアの協力を仰ぎながら車体構造用樹脂の破壊過程の観察・分析と破壊エネルギーの計測データを破壊のシミュレーション結果と比較することにより、車体構造用樹脂の破壊機構を分子的に解明し、車体構造用樹脂の強靱化に必要な分子設計・材料設計の指針を確立する。さらに、新規概念の高分子構造を導入することにより、車体構造用樹脂の強靱化を効率よく実現する。本プロジェクトは進捗が著しいことから、自動車以外の応用にも展開することで、車の部品を製作する上での課題を抽出し、プロジェクトの実用化を加速する。

② プロジェクトの体制

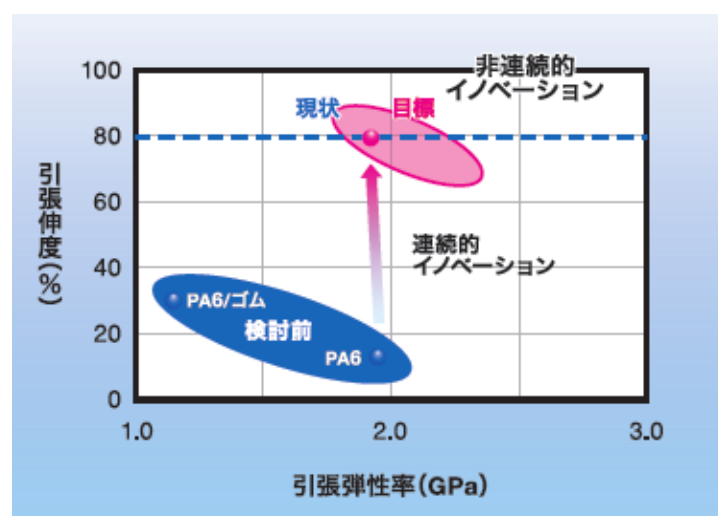
研究開発課題	内容、研究開発プロジェクトにおける役割等	研究開発機関
車体構造用高靱性樹脂の開発	車体構造用樹脂の高靱性化による大幅な軽量化および安全性の向上	東レ株式会社
分析・解析	車体構造用樹脂の破壊過程の観察・分析と破壊エネルギーの計測	東レ、理化学研究所、山形大学、東京工業大学、東北大学、金沢工業大学、神戸大学

理論・シミュレーション	車体構造用樹脂の破壊機構の分子的解明および破壊のシミュレーション	東レ、名古屋大学、東京大学
合成・プロセス	新規ポリロタキサンの合成と量産化検討、および車体構造用樹脂の新規成形加工プロセスの開発	東レ、東京大学、大阪大学、山形大学、アドバンスト・ソフトマテリアルズ

研究開発課題	平成 26年度 (5ヶ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヶ月)
1. 車体構造用高靱性樹脂の開発 ・ 車体構造用樹脂の強靱化検討 ・ 強靱化の実現と車体構造用樹脂としての特性評価	←→	←→	←→		←→
2. 分析・解析 ・ 測定システムの整備 ・ 車体構造用樹脂の破壊過程の観察・解析 ・ 破壊エネルギーの計測 ・ 車体構造用樹脂の観察・解析	←→	←→	←→		←→
3. 理論・シミュレーション ・ 車体構造用樹脂の破壊機構の解明 ・ 車体構造用樹脂の破壊シミュレーション	←→	←→	←→		←→
4. 合成・プロセス ・ 新規ポリロタキサンの合成と量産化検討 ・ 車体構造用樹脂の新規成形加工プロセスの開発 ・ シクロデキストリン“ナノアロイ”特性発現機構解明	←→	←→	←→	←→	←→
5. 車用途以外への横展開 ・ マトリックス樹脂作製 ・ プリプレグ作製 ・ オートクレーブ成形			←→	←→	←→
6. ポリアミド以外の結晶性樹脂への展開 ・ PBTエラストマーへの導入／ポテンシャル把握				←→	←→

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

- (1) ベースポリマーとしてポリアミド／ポリロタキサンナノアロイ[®]の構造微細化（＜100nm 以下）を達成し、剛性（引張弾性率 2GPa 以上）を維持しつつ伸度を 80% 以上にまで向上させることに成功した。
- (2) CFRP 展開に際し、指導原理を得る目的で GF 短繊維強化系に適用した結果、繊維界面制御により、GF 強化系で剛性を維持しつつ高伸度化する現象を見出した。
- (3) 車体構造としての評価に先行し、衝撃吸収部材を模したクラッシュボックス（製品重量 100g）で衝突エネルギー吸収量を評価した結果、ポリアミド／ポリロタキサンナノアロイ[®]ベースポリマーで 600J 以上、GF 短繊維強化系で 2400J 以上の衝撃吸収エネルギーを有し、かつ非フラグメント化することを確認した。
- (4) GF 短繊維強化系で得られた知見を活かし、熱可塑 CFRP（CF 連続繊維、ポリアミド）系へ展開し評価を行った結果、ポリロタキサンナノアロイ[®]はブランクと比較して強度 1.5 倍、吸収エネルギーは 2 倍となることを確認した。
- (5) 自動車以外への応用展開として、新たにスポーツ用義足をターゲットアイテムに選定し、エポキシ／ポリロタキサンナノアロイ[®]をマトリクス樹脂とした CFRP の評価を実施し、良好な破壊形態となることを確認、さらに曲げ疲労がブランク比 3 倍に向上することを確認した。



<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
1	6

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

本検討の中で得られた優れた衝突エネルギー吸収性は、さらなる“安全・安心・軽量化”が求められる次世代自動車に対して有望な技術であり、今後、衝突試験の厳

格化に伴い、時速 32km の中速域から、時速 64km、90km の高速域への対応が求められつつある。従来樹脂材料では、衝突時にエネルギー吸収する前に破壊が生じるため、自動車メーカーでは衝突吸収部材として金属部材を使用（車体重量増加、設計自由度低下）している。剛性を維持しつつ伸度の大幅な向上を可能とする本樹脂材料を用いたクラッシュボックス評価で時速 32km の中速域に対応可能であることを実証済みであり、さらに繊維強化系に展開することにより、時速 64km の高速域へ適用可能であることも実証した。同様の特性を示す樹脂材料は他に例がない。

<獲得成果の革新性>

環動ポリマーとナノアロイ技術を融合させることにより剛性とエネルギー吸収性といったトレードオフに関係にある特性のブレークスルーに成功、剛性とエネルギー吸収性を両立するタフポリマーを創出した。本タフポリマーは、従来樹脂ではエネルギー吸収前に破壊するため適用困難（金属部材を使用）であった中速・高速域の衝撃吸収部材への適用が可能であり、これからの自動車に求められる“衝突安全性と軽量化”の両立を実現する革新材料である。

<獲得成果の独創性>

東レ株式会社保有のナノアロイ技術を駆使、さらに環動ポリマーの構造適正化を行うことにより、環動ポリマーをポリアミド中にナノオーダーで分散させることに成功し強靱化を達成した。また特性発現機構の理解を進め、繊維強化系、熱硬化系樹脂への展開も可能とした。同様の報告例は他にないことから、本技術の独創性はきわめて高い。

（４）タイヤ薄ゲージ化プロジェクト

① プロジェクトの計画

本研究開発プロジェクトを達成するために、株式会社ブリヂストンがリーダーシップを取りながら、タイヤの薄ゲージ化を実現する。また、アカデミアの協力を仰ぎながらタイヤの各構成部材の破壊過程の観察・分析と破壊エネルギーの計測データを破壊のシミュレーション結果と比較することにより、ゴム系高分子複合材料の破壊機構を分子的に解明し、タイヤの薄ゲージ化に必要な分子設計・配合設計の指針を確立する。さらに、新規概念の高分子構造を導入することにより、タイヤの薄ゲージ化を効率よく実現する。また、タイヤ以外のゴム製品に応用展開し、プロジェクトの実用化を加速する。

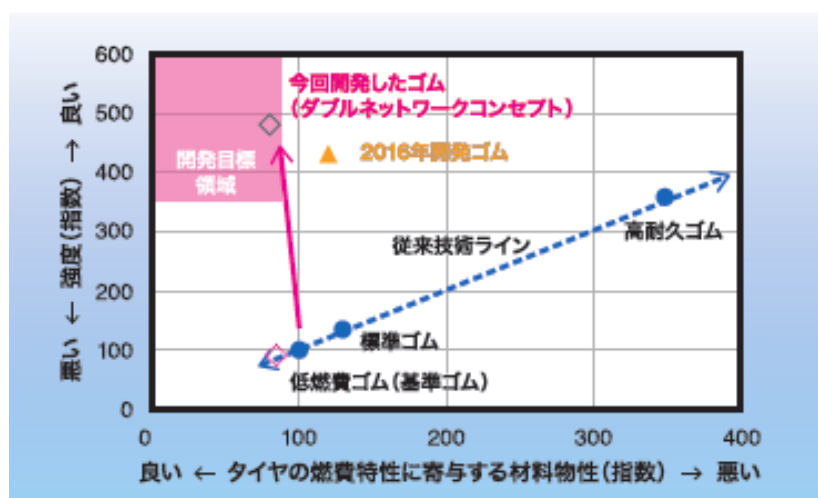
② プロジェクトの体制

研究開発課題	内容、研究開発プロジェクトにおける役割等	研究開発機関
薄ゲージ化タイヤの開発	タイヤの各構成部材の薄ゲージ化による軽量化・省資源化の実現	株式会社ブリヂストン
分析・解析	タイヤの各構成部材の破壊過程の観察・分析と破壊エネルギーの計測	ブリヂストン、九州大学、理化学研究所、山形大学、京都工芸繊維大学、東京大学
理論・シミュレーション	タイヤの各構成部材の破壊機構の分子的解明および破壊のシミュレーション	ブリヂストン、名古屋大学、お茶の水女子大学、東京大学
合成・プロセス	新規ポリロタキサンなど新規ポリマーの合成と量産化検討	ブリヂストン、東京大学、大阪大学

研究開発課題	平成 26年度 (5ヶ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヶ月)
1. 薄ゲージ化タイヤの開発 ・タイヤの各構成部材の薄ゲージ化検討 ・薄ゲージ化の実現とタイヤとしての特性評価 ・タイヤ以外への応用展開	←→		←→	←→	←→
2. 分析・解析 ・測定システムの整備 ・タイヤの各構成部材の破壊過程の観察・解析 ・破壊エネルギーの計測	←→	←→			←→
3. 理論・シミュレーション ・タイヤの各構成部材の破壊機構の解明 ・タイヤの各構成部材の破壊シミュレーション	←→				←→
4. 合成・プロセス ・新規ポリロタキサンの合成と量産化検討	←→				←→

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

ブリヂストンでは、ゴム複合材のタフ化の視点として、ゴム複合材が亀裂進展で特異に発現する亀裂進展速度の転移挙動に着目し、大規模放射光等を用いた実験的亀裂先端の解析、理論物理/計算機シミュレーション、ダブルネットワークゲル等の新概念材料の破壊機構解析を同時並行で推進し、転移挙動の本質理解を通して、転移エネルギーを高エネルギー化する要件を見出すとともに、その具現化に取り組んだ。本研究では、基準配合対比で、燃費指数 90%以下かつ転移エネルギー350%以上を開発目標とした。分析/解析を通して、高強度化と低燃費特性という従来のトレードオフを両立するための統合的な材料設計指針を導出することに成功した。この設計指針の具現化に対して、ダブルネットワークコンセプトをゴム複合体で実現することを着想し、技術の粋を集めたネットワーク成分の分子設計、及びプロセス制御により、世界で初めてダブルネットワーク構造をゴムで具現化することに成功した。これにより、基準ゴム材料対比で燃費特性を 15%改良するとともに、転移エネルギーを 4.8 倍向上させるという、従来のトレードオフを大きく打破する材料を開発した。この材料の耐久性能をタイヤで評価したところ、期待とする耐久性能を確認し、接地面ゴムや側面ゴムの 40%ゲージダウンに目途を付けた。併せて、ゴムクローラやコンベアベルトといったタイヤ以外のゴム製品でもその有用性を確認した。



<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
2	8

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

我々が注目する亀裂進展の転移挙動は、ゴム複合材に限らず樹脂やゲルでも観察される普遍的な現象であるが、世の中に広く知られておらず、その本質についても長年に

わたり未解明であった。この現象は、通常の評価である変形（亀裂進展速度）を与えてエネルギーを測定する方法では観察されず、エネルギーを与え、亀裂を自走させることで初めて観察されるからである。従って、世界的に見ても転移エネルギーを制御する技術はブリヂストンが世界 No1 の技術水準にある。これまでのブリヂストンの配合設計技術では、転移エネルギーの高エネルギー化は、タイヤに重要な要求特性である燃費特性の悪化を引き起こしていた。本研究開発を通して、ダブルネットワークコンセプトの具現化により、基準対比で燃費特性を 15%改良するとともに、転移エネルギーを 4.8 倍向上させるという、従来のトレードオフを大きく打破する材料の開発に成功した。今後の課題としては、ダブルネットワークを安定的に形成するネットワーク成分の分子構造の最適設計の推進、及び量産化技術開発の確立が望まれる。

<獲得成果の革新性>

従来技術では、亀裂進展転移エネルギーの増大と燃費特性はトレードオフの関係であった。本研究では、転移エネルギーを大きく上昇するとともに燃費特性を改善するというゴム複合材料を世界で初めて実現した。本成果は、タイヤだけでなくゴム材料全般に適用できる普遍的技術であることから、その産業的・社会的価値はきわめて大きい。

<獲得成果の独創性>

ダブルネットワークコンセプトをゴム複合体で実現することを着想し、技術の粋を集めたネットワーク成分の分子設計、及び熱力学理論に基づいたプロセス制御により、世界で初めて実現することに成功した。同様の例は国内外で他にない。

（５）透明樹脂強靱化プロジェクト

① プロジェクトの計画

本研究開発プロジェクトの目標を達成するために、最適な環動部位の設計/導入を検討するとともに、高透明樹脂の新規成形加工プロセスを開発し、透明樹脂の強靱化を実現する。また、アカデミアの協力を仰ぎながら高透明樹脂の破壊過程の観察・分析と破壊エネルギーの計測データを破壊のシミュレーション結果と比較することにより、高透明樹脂の破壊機構を分子的に解明し、透明樹脂の強靱化に必要な分子設計・材料設計の指針を確立する。さらに、新規概念の高分子構造を導入することにより、透明樹脂の強靱化を効率よく実現する。

② プロジェクトの体制

研究開発課題	内容、研究開発プロジェクトにおける役割等	研究開発機関
高靱性透明樹脂の開発	高靱性・高透明樹脂材料開発	住友化学株式会社
分析・解析	高透明樹脂の破壊過程の観察・分析と破壊エネルギーの計測	住友化学、九州大学、理化学研究所、山形大学、北海道大学
理論・シミュレーション	高透明樹脂の破壊機構の分子的解明および破壊のシミュレーション	住友化学、名古屋大学
合成・プロセス	新規ポリロタキサンの合成と量産化検討、および高透明樹脂の新規成形加工プロセスの開発	住友化学、東京大学、大阪大学、山形大学、アドバンス・ソフトマテリアルズ

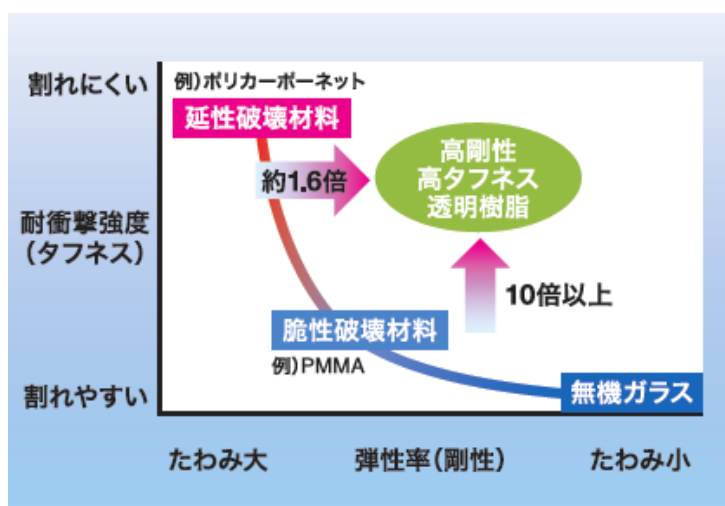
研究開発課題	平成 26年度 (5ヶ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヶ月)
1. 高靱性透明樹脂の開発 ・ 高透明樹脂の強靱化検討 ・ 高靱性透明樹脂の実現と特性評価	←→	←→	←→	←→	←→
2. 分析・解析 ・ 測定システムの整備 ・ 高透明樹脂の破壊過程の観察・解析 ・ 破壊エネルギーの計測	←→	←→	←→	←→	←→
3. 理論・シミュレーション ・ 高透明樹脂の破壊機構の解明 ・ 高透明樹脂の破壊シミュレーション	←→	←→	←→	←→	←→
4. 合成・プロセス ・ 新規ポリロタキサンの合成と量産化検討 ・ 高透明樹脂の新規成形加工プロセスの開発	←→	←→	←→	←→	←→

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

自動車の透明部材（ルーフ、リアハッチ、フロント）への適用を目指して、アクリル樹脂の技術をベースに材料開発を進めた。従来のアクリル樹脂をこれらの部材に適用するためには、耐衝撃強度と曲げ弾性率のトレードオフの関係から脱却することが必要であった。これを可能とする技術として、環動架橋構造の導入などによる分子構造制御、ポリマーと無機フィラーのナノコンポジット、加工によるポリマーの分子レベ

ルでの高次構造制御などによる体系的な検討を進めた。その結果、上記のトレードオフの関係から脱却する技術を見出すことに成功した（弾性率：3.8GPa、ノッチなしシャルピー衝撃：破壊せず）。

日産自動車と協議し、本PJの成果を適用した透明樹脂の適用候補として透明ルーフを選定した。弾性率について当初設定した目標値8GPaには未達であるが、ルーフのたわみにくさを製品厚みで補うことで大幅な軽量化を見込むことができた。透明ルーフに適用するには、衝撃強度と曲げ弾性率、透明性の他に、①曲げ強度、②低温面衝撃強度、③低線膨張性、④熱負荷（高温）での物性変化の抑制、⑤耐摩耗性が求められる。これらの要件のうち、①曲げ強度、②低温面衝撃強度については本PJの成果を適用した透明樹脂は要件を満たしていることを確認した。③低線膨張係数と④熱負荷（高温）での物性変化抑制については、分子構造と加工による高次構造制御の工夫により改善の目途を得た。⑤耐摩耗性について、本PJ内での検討は進められなかったが、通常のハードコート技術を適用することで要件を満たす可能性があると考えている。



<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
1	5

⑤ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

透明部材で競合する材料はガラスである。ガラスはその高い曲げ弾性から、大判窓材としての活用が可能であり、これまでの技術改良の歴史を経て今も広く利用されている。しかしながら、今後自動車には、高い視認性、デザイン性のさらなる自由化・高度化、そして軽量化が望まれている。視野をさらに拡大するピラーレスやフロントからルーフにつながるようなデザインを可能とする大判サイズの窓材を考えた場合、ガラス材では

鋼板に対して重量増となってしまう。ルーフへの透明材適用を考えた試算では、鋼板に対して強化ガラスでは2割、合わせガラスでは7割超の重量増となる。一方、本PJの成果を適用した透明樹脂は大幅な部材の軽量化が可能となった。この透明樹脂を使用した場合、剛性の向上による薄肉化も可能となったことから、その軽量化効果は合わせガラスに対して6割超、鋼板に対して約4割の重量減を実現しうる可能性がある。また、この透明樹脂の自動車フロント窓への適用可能性も評価した。その結果、自動車安全ガラス試験（JIS R3212）の自動車フロント窓に対する低温落球試験（マイナス30℃）の合格基準をクリアできた。

<獲得成果の革新性>

本技術の結果、従来の透明樹脂における、弾性率と耐衝撃強度のトレードオフから脱却した。これにより、従来の透明部材（ガラス）に対して、大幅な軽量化が可能となった。また、透明樹脂において線膨張係数を大幅に低減することに成功し、大判製品への適用の可能性を上げた。以上の成果は自動車だけでなく他の透明材料への展開が可能であることから、その産業的・社会的価値は、きわめて大きい。

<獲得成果の独創性>

透明樹脂の破壊機構に立ち戻り、独自の新規成形加工プロセスによる分子レベルでの高次構造制御を適用した結果、透明材料で剛性と耐衝撃性のトレードオフからの脱却に成功した。同様の報告は、国内外で他に例がない。

（6）システム化・評価プロジェクト

① プロジェクトの計画

本研究開発プログラムの実行に向け

1. 材料開発プロジェクトへの開発目標値の提示、合意
2. 開発材料を用いた部品化、システム化試作
3. 試作した部品、もしくはシステムにおける機能、性能評価、解析
4. 以上の評価結果に基づいた車両への適用性の判断を実施する。

② プロジェクトの体制

研究開発課題	内容、研究開発プロジェクトにおける役割等	想定する研究開発機関
1. FC電解質膜	・ 材料開発 PJ への目標値の提示、合意 ・ サブスケールでの各種特性、耐久性確認 ・ 耐久性向上に向けた触媒層設計指針創出	日産自動車株式会社、AGC

2. Li電池セパレータ	・材料開発PJへの目標値の提示、合意 ・電池容量の向上確認 ・セル特性、耐久性への影響確認 ・安全性への影響確認 ・パイロットプラント試作でのばらつき有無確認	日産自動車、三菱ケミカル
3. 車体構造用樹脂	・材料開発PJへの目標値の提示、合意 ・開発短繊維材における部品試作、評価 ・開発連続繊維材における部品試作、評価 ・軽量化効果確認（部品試作、CAEでの確認）	日産自動車、東レ、金沢工大
4. 透明樹脂ガラス	・材料開発PJへの目標値の提示、合意 ・適用先候補の選定、合意 ・最終的な適用先の決定とその可能性判断 ・用途拡大に向けた課題の明確化	日産自動車、住友化学

研究開発課題	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヶ月)
1. FC電解質膜	←目標合意→	←サブスケール MEA 試作、評価→ ←触媒層設計指針創出→		
2. Li電池セパレータ	←目標合意→	←小型セル試作、特性・耐久性評価→ ←安全性評価→		
3. 車体構造用樹脂	←目標合意→	←短繊維材における部品試作、特性評価→ ←連続繊維材における部品試作、特性評価→ ←軽量化効果見積もり→		
4. 透明樹脂ガラス	←目標合意→	←適用先候補選定→		←適用可能判断→

研究開発課題	平成 26年度 (5ヶ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヶ月)
--------	---------------------	------------	------------	------------	---------------------

1. システム化・評価 ・自動車メーカーとしてのシステム化および 特性評価		←			→
2. 分析・解析 ・成形・破壊過程の観察・解析		←			→
3. 理論・シミュレーション ・破壊シミュレーション		←			→

② プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

日産自動車のタスクである

1. 材料開発プロジェクトへの開発目標値の提示、合意
2. 開発材料を用いた部品化、システム化試作
3. 試作した部品、もしくはシステムにおける機能、性能評価、解析
4. 以上の評価結果に基づいた車両への適用性の判断

に関して、日産自動車が担当しているすべての開発材料について計画通り完了した。それぞれの詳細を以下に示す。

FC 電解質膜

開発を進めるに当たり AGC とは評価項目を、プロトン伝導性、耐久性(乾湿サイクル)、水素リーク、化学耐性の4つとすること、および開発計画における節目、分担についても合意、実行に移した。具体的には AGC にて様々な材質、作製プロセスで試作を行い、その中から選抜頂いた電解質膜について日産自動車にてサブスケールの燃料電池セルを試作、電気特性、耐久試験(乾湿サイクル)、試験後の劣化解析を行い、目標への到達度、耐久試験における様々な特性変化、応力解析、推定劣化メカニズムなどを AGC へフィードバックするサイクルを通じ、プロジェクト目標達成を目指した。

その結果として、プロトン伝導性、耐久性(乾湿サイクル)、化学耐性については目標をクリアした。一方、水素リーク抑制については、AGC での様々な取り組みで水素リーク vs 膜厚のトレードオフを大きく打破することはできたが(Fig.1 参照)、開発膜 5 μ m 厚にて基準膜 25 μ m 厚レベルの水素リーク量という目標については達成することができず、現時点(平成 30 年末)で 10 μ m レベルにとどまっている(目標 20 μ m 削減に対し 15 μ m 減)。総合的には耐久性をはじめとした他の特性をクリアできていることから、FC スタックの小型化、低コスト化に寄与できると判断しているが、研究室レベルの技術実証を完了したと判断するには 5 μ m という目標をクリアすることが必要と考えている。一方で、今回は研究室レベルの技術実証であり、実証・デモンストレーションへ向けては更なるロバスト性検証、サイズアップなどの課題をクリアする必要がある。

また、触媒層の微細構造をモデル化し応力解析した結果、アイオノマーまたはカー

ボンの凝集体間に応力集中が発生することを明らかにした。触媒層のアイオノマー/カーボン比の最適化により、電解質膜の応力が抑制され、耐久性に優れた MEA が作成できるという設計指針を提示した。

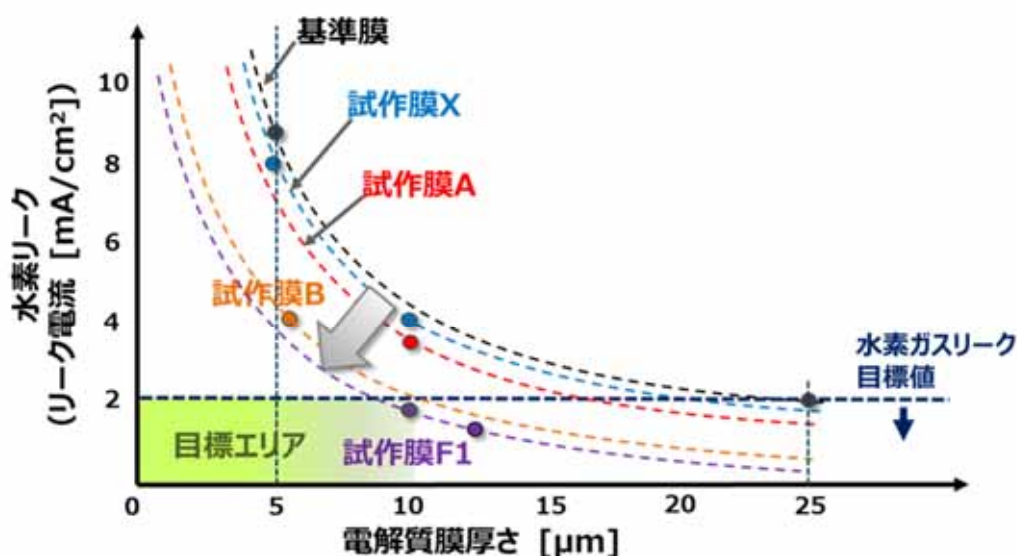


Fig.1 電解質膜厚さと水素リークのトレードオフ

Li 電池セパレータ

開発を進めるに当たり、三菱ケミカルとは方向性として、薄膜化と他の主要特性（耐久、安全性など）との両立を目指すこと、セパレータ物性と主要特性の関係を明らかにすることを提案、合意し、開発計画における節目、分担についても合意、実行に移した。具体的には三菱ケミカルにて様々な材質、作製プロセスで試作を行い、その中から選抜頂いたセパレータについて日産自動車にて小型セルを試作し、電気特性、耐久評価（サイクル試験等）、試験後の劣化解析を行った。目標への到達度、三菱ケミカルにて取得したセパレータ物性と特性の関係、劣化解析結果を三菱ケミカルへフィードバックするサイクルを通じ、プロジェクト目標達成を目指した。加えて開発膜の安全性に関する基礎評価、および将来の量産化に向け、パイロットプラント試作品におけるバラツキ評価も実施した。

まずは三菱ケミカルで試作した様々なセパレータについて、小型セルを試作、様々な特性評価を実施し、セパレータ物性（透気度、空孔率、平均細孔径、電気抵抗など）と初期特性、充放電サイクル試験での耐久性との関連を解析し、平均細孔径がキーパラメータであることを見出した（Fig.2 参照）。この結果をもとに、三菱ケミカルにて平均細孔径を様々なコントロールしたセパレータ試作を行い、薄膜（6 μm）であっても標準品（20 μm）に比較して、初期特性、耐久性が維持されていることを検証できた（Fig.3 参照）。また、この指針に沿って試作したセパレータについて安全性基礎評価を実施し、熱暴走に関する致命的な問題が無い事を検証。加えてラボスケールではなく、量産を見すえたパイロットプラントの設備により試作したセパレータについても

同様の特性評価を行い、大きなばらつきが無いことを確認した。以上から技術コンセプトの実験的な検証はできており、車載用バッテリー適用の可能性は十分あると考えられる。一方で、現状は小型単セルでの基本性能の評価結果であり、また項目も限られているので、車載を判断するにあたっては、サイズアップ、複数層積層のセルでの様々な条件下での試験を実施する必要がある。

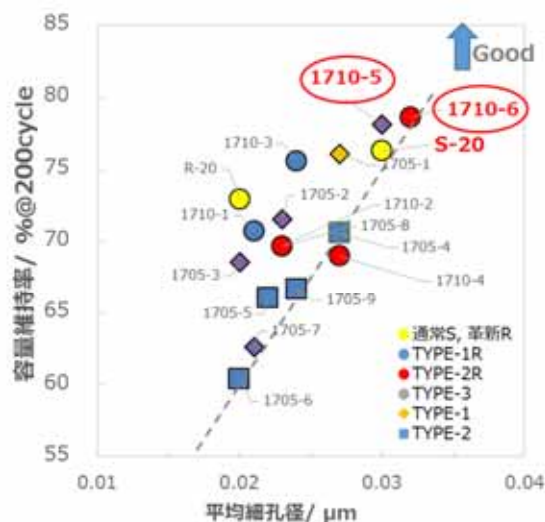


Fig.2 平均細孔径と充放電サイクル耐久の関係

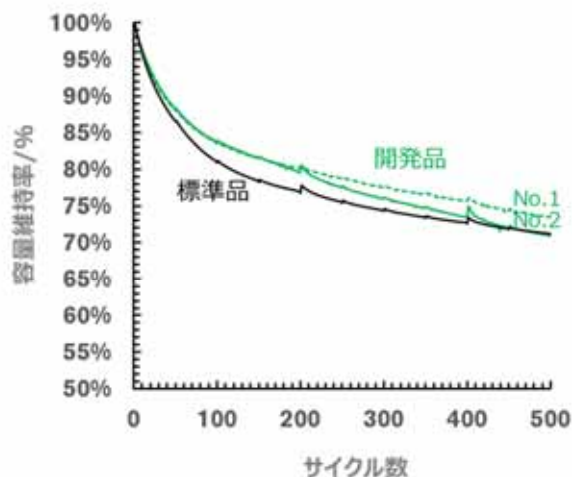


Fig.3 標準品と開発品の充放電
サイクル耐久比較

車体構造用樹脂

開発を進めるに当たり目標として ①短繊維材(溶融混練工法):アルミを超える比剛性が必要 ②連続繊維材(RTM 工法):現行 CFRP に対する剛性や破断伸び向上の効果が必要 の2点を提案、合意した。ちなみに衝撃吸収材については、自動車全体に使用される量が軽微であることから、今回の評価対象からは除外している。これに合わせて、開発計画における節目、部品レベル実証に向けた部品試作タイミングについても合意、実行に移した。ただし、連続繊維材については、開発期間途中で東レ側にて短繊維材開発を先行する判断を受け、部品試作、評価による軽量化などの効果判断を見送り、テストピースによる物性評価と CAE による軽量化効果見積りにとどめる計画修正を行った。

① 短繊維材 (溶融混練工法)

本材料についてはハット形状の部品設計、型設計から東レ開発の様々な材料について試作、さらには物性評価を行い、車両適用の可能性について検討を行った。部品試作評価の結果、ナノアロイや添加するポリロタキサンの改良により剛性、破壊強度などの向上は確認できた (Fig. 4 参照) が、比剛性としてはアルミを超えるという目標に届かず、車体構造用としては適用が難しいと判断した。

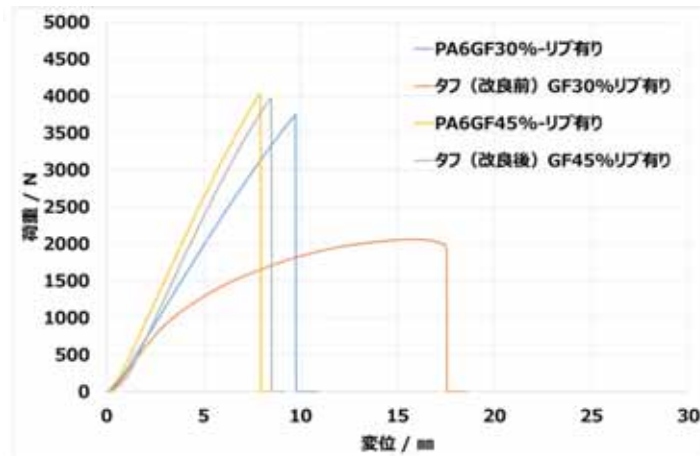


Fig.4 ハット部品における変位-荷重評価結果（短繊維材）

② 連続繊維材 (RTM 工法)

本材料については先に述べた通り、東レにて短繊維を優先するとしたことから部品での実証は行わず、東レでテストピースの物性を評価し、日産自動車では、その物性値を用いて CAE により部品適用時の軽量化効果を明らかにすることとした。東レでは、カーボン繊維を 90° でクロスに積層したタフポリマー入りのテストピースを作製、従来の CFRP との比較評価を行った。この評価結果では、A. 繊維に対し 0° 方向での剛性の向上、B. 繊維に対し 45° 方向での剛性の向上、の二つのタフ化による特性向上が認められた (Fig. 5 参照)。この結果をもとに CFRP の物性異方性まで加味したモデルを構築、計算を行った結果、タフ化により構造体の機械的性質が向上し、タフポリマーを用いることで最大 25%の軽量化効果があることが明らかになった。

以上から、開発材料については大きな軽量化の可能性が期待される。一方で、まだサイズが数cm程度のテストピース評価結果であり、また連続繊維材としてのタフ化メカニズムも未解明であることから、大きなポテンシャルは認めるものの現状では車体構造への適用を判断することは難しい。

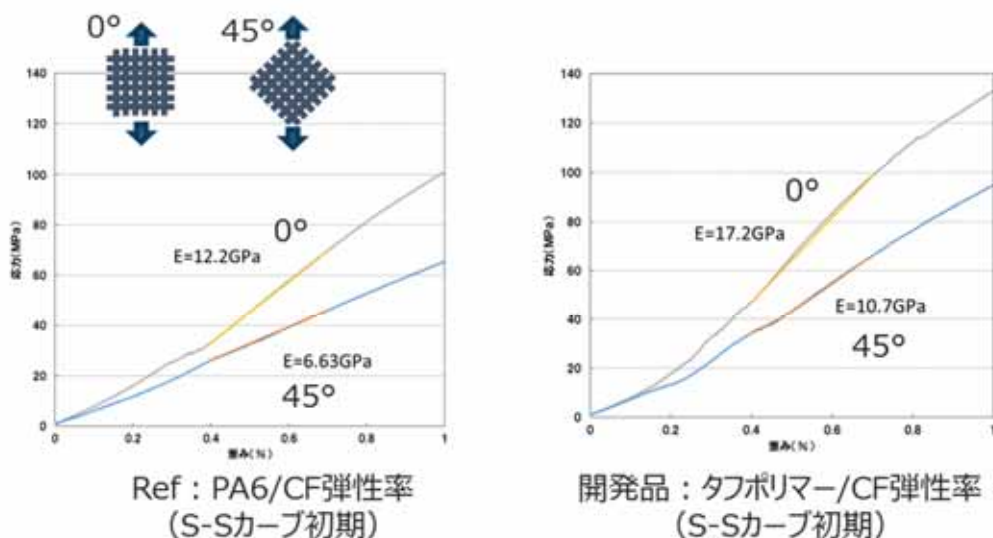


Fig.5 テストピースにおける弾性率比較

透明樹脂ガラス

開発を進めるに当たり、適用候補および適用先別の要求特性を提示、その要求特性をもとに、まず優先的にクリアする項目などについての開発方針、開発計画における節目、部品レベル実証に向けた部品試作タイミングについても合意、実行に移した。具体的には候補として、①透明ルーフ、②大型リアハッチ、③ラップアラウンドフロントガラスを提案、まずは全てに共通な特性の改善を優先し、次いで候補ごとに特有の課題に取り組むこととした。また最終的には部品試作による実証を行うこととした。

この結果、トレードオフとなる曲げ弾性率、耐衝撃の両立を達成するとともに、他の共通した特性の向上についても見通しが立ち、透明ルーフへ適用した場合、合わせガラス比 6 割程度の軽量化を達成できる可能性が示された (Fig. 6 参照)。更には透明ルーフ特有の要求特性についても材料改良を進めており、一部残課題はあるが、いずれも技術的に対応可能と推定、セダン、SUV レベルのサイズであれば車両適用可能なポテンシャルのある材料と判断した (Fig. 7 参照)。また、技術的には線膨張係数の更なる改善や、他の適用先についての課題解消が進めば、さらなる用途拡大のポテンシャルもあると判断している。

以上から車両適用の可能性は十分あると考えられるが、そのためには現状見えている課題の対策の実証と、更なる大型試作プロセスの検討が必要である。

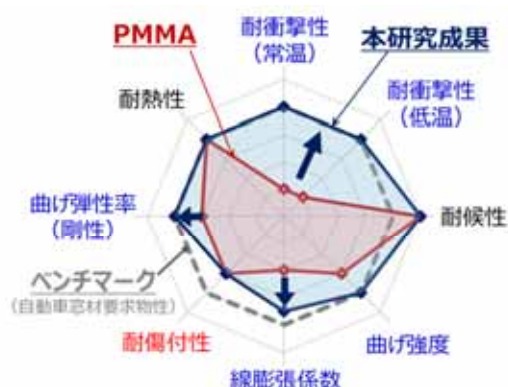


Fig.6 各材料の特性比較

Fig.7 透明ルーフ適用向け試験項目とその達成度

試験項目	達成度	備考
曲げ弾性率	○	
落球衝撃	○	
曲げ強度	○	
線膨張係数	△	更に20%程度低減望ましい
Haze	○	
耐摩耗	No Data	ハードコートで対策可能
耐熱、熱サイクル	△	材料組成で対応の可能性あり
大型サイズ加工	○	
光学特性	△	加工プロセスで対応の可能性あり

* 本プロジェクトはTRL評価に該当しない

③ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

本プロジェクトの評価対象は、各社それぞれのコンセプト、保有する強みの材料技術をベースとしており、今回開発している素材のシステムへの特性向上への寄与を一概に言うのは難しいが、他と比べて似て非なる独創的なシステムを構築できていることは確かである。また、今回のプログラムではタフポリマーという素材の開発に主眼を置いていることから、システムレベルまでのベンチマークは本プロジェクトのスコープからされることもあり、このプロジェクトの中で取り扱うので適当ではないと考えられる。

(7) 横断的共通課題プロジェクト

① プロジェクトの計画

「破壊機構の分子的解明」、「分子構造制御の新手法開発」、「社会的価値の検証」、「タフポリマーの分子設計・材料設計指針の汎用性の検証」などプロジェクト横断的な共通課題について研究開発を行なう。

② プロジェクトの体制

研究開発課題	内容、研究開発プロジェクトにおける役割等	研究開発機関
破壊機構の分子的解明	高分子破壊機構の分子的解明に関するプロジェクト横断的共通課題を解決するとともに、材料設計指針の確立、破壊予知・疲労寿命予測法の開発、簡便強度評価標準試験法の開発などを行なう。	九州大学、理化学研究所、北海道大学、名古屋大学、お茶の水女子大学、東京工業大学、京都工芸繊維大学、東京大学、東北大学、MSCH/RDSC
分子構造制御の新手法開発	分子構造制御の新手法開発に関するプロジェクト横断的共通課題を解決するとともに、分子合成の新手法開発、タフポリマーの創製と物性評価、分子設計指針の確立などを行なう。	大阪大学、理化学研究所、東京工業大学、山形大学、東京大学、名古屋大学
社会的価値の検証	各プロジェクトで得られた成果の社会的価値を検証する。	東京大学
タフポリマーの分子設計・材料設計指針の汎用性の検証	タフポリマー実現のための分子設計・材料設計の指針の有効性を、様々な高分子材料について検証するとともに、高分子破壊標準データベースを構築する。	名古屋大学、山形大学、東京大学、三菱ケミカル株式会社、東レ株式会社、住友化学株式会社、旭化成株式会社、宇部興産株式会社

研究開発課題	平成 26年度 (5ヶ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヶ月)
1. 破壊機構の分子的解明					
・ 共通測定システムの整備	←		→		
・ モデル樹脂を用いた破壊機構の解明	←				→
・ 亀裂進展機構の解明	←				→
・ フィラーとポリマー界面での破壊機構			←		→

・破壊予知・疲労寿命予測法の開発 ・簡便強度評価標準試験法の開発				←→	←→
2. 分子構造制御の新手法開発 ・自己修復分子結合系の合成 ・疲労、破壊、応力の可視化		←→		←→	←→
3. 社会的価値の検証				←→	←→
4. タフポリマーの分子設計・材料設計指針 の汎用性の検証				←→	←→

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

共通測定システムの整備については、本プログラムでは共通設備を理研播磨 (SPring-8)、九州大学、山形大学の3ヶ所に集中し、共通利用機器として活用することになっている。実際にSPring-8には、2016年10月より「しなやかタフポリマー専用実験ステーション」が立ち上がり、割り当てられたビームタイム（総計283日）を参画機関の企業とアカデミアで利用して研究開発を推進した。また、九州大学と山形大学に設置したバルジ試験機や高速引張試験機なども順調に整備が進み、参画機関の企業とアカデミアで利用が進んで成果につながった。

モデル樹脂（非晶性高分子）を用いた破壊機構の解明やエラストマーの亀裂進展機構の解明で特に大きな進捗が見られた。その結果、目標となっていたタフポリマー実現のための分子設計の指針や材料設計の指針が確立し、企業プロジェクトの成果に繋がった。また、引裂き強度が金属並みのコンポジットDNゲルや、新規自己修復性材料、動的共有結合を利用して応力が可視化できる材料など、様々な新規材料が開発された。亀裂進展機構の解明は、簡便強度評価標準試験法の開発に展開しており、ブリヂストンを中心とした標準化への取り組みも始まっている。

さらに、社会的価値の検証としてLCAを用いてコンセプトカーItoPのCO₂排出量の計算を行った結果、ItoPを従来素材で製作した場合に比べ、走行時でCO₂排出量30～40%減、コンセプトカーの製作も含めると10万kmの走行段階で11%減という結果が得られた。また開発テーマを増やしてタフポリマーの分子設計・材料設計指針の汎用性を検証するとともに、高分子破壊標準データベースのプロトタイプを構築した。

今後の課題としては、「破壊予知・疲労寿命予測法の開発」が挙げられる。SPring-8「しなやかタフポリマー専用実験ステーション」に高分子疲労試験の専用装置を設置し、散乱スペクトルの経時変化を現在も長期間追跡している。今後、AIなどを利用してこれらの膨大なデータを解析し、解明された破壊の分子的機構を適用すれば、破壊予知・疲労寿命予測法が確立できると予想している。

＜研究開発の進展状況＞

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
1	3～4

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

高分子の破壊については、我が国だけでなく米国やドイツなどでも以前から継続して研究が行われてきたが、ここ30年ほど、それほど大きな進展は見られていない。本プログラムでは、SPring-8などの最新の構造解析手法やスーパーコンピュータ「京」を用いた全原子シミュレーションなど、最先端の大型設備を駆使しながらアカデミアの力を結集したことで、高分子の破壊の分子的機構や亀裂進展機構を明らかにすることに成功した。同様のアプローチは世界的に見てもほとんど例がない。また、従来よりも硬い自己修復材料や、水中でも修復可能な材料など、新しい自己修復性材料の開発についても大きな進展があった。

＜獲得成果の革新性＞

破壊の分子的機構の解明や亀裂進展機構の解明などの成果によりタフポリマーの分子設計指針・材料設計指針を確立できたことは、様々な高分子材料の共通の課題である剛性と靱性とトレードオフの打破や劣化の予測、信頼性の確立につながることから、得られた成果の革新性はきわめて高い。実際に、それらの指針は各企業のプロジェクトで応用され革新的なタフポリマーの創成に貢献した。さらに、指針の汎用性の検証という課題を掲げ、対象とする高分子材料の種類を増加して研究開発を行った結果、適用範囲の広い普遍的な指針であることも明らかになった。

＜獲得成果の独創性＞

SPring-8などの最新の構造解析手法やスーパーコンピュータ「京」を高分子の破壊に特化した研究開発は海外では例が無く、これらを用いて得られた成果の独創性はきわめて高い。しかも、その基礎的な成果がプロジェクト内で企業に利用され新規タフポリマーの開発に貢献したことで、産業適用性についての検証が進んでいる点も、共通課題の成果の産業的・社会的価値を高めている。高分子の破壊に関する大規模な産学連携プロジェクトは世界的にもユニークであり、独創的な成果が多数得られている。

(8) コンセプトカー製作プロジェクト

① プロジェクトの計画

本プロジェクトの目標である新しい材料を活かしたポリマーのクルマを具現化するために、ポリマーによる軽量化を最大化しつつ、タフポリマーの特徴を活かした車両のデザイン・設計を見出し、工法の開発を行いつつ、新しい材料による部品を試作・製作し、これを車両に組み上げる。駆動はモータによる電気自動車とする。また、クルマ以外の応用分野にタフポリマーを展開することで、材料メーカーの研究開発が加速し、コンセプトカー製作に向けた実証確認の精度が向上するとともに、タフポリマーの性能・実用性を早期からアピールできる。

研究開発課題	平成 26年度 (5ヶ月)	平成 27年度	平成 28年度	平成 29年度	平成 30年度 (9ヶ月)
1. コンセプトカーの設計および製作 ・ 基本設計仕様の策定 ・ 詳細設計 ・ コンセプトカーの組み立て・製作			←→	←→	←→
2. 部品の作製			←→	←→	←→
3. 車以外の応用分野への展開			←→	←→	←→

② プロジェクトの体制

研究開発課題	内容、研究開発プロジェクトにおける役割等	想定する研究開発機関
コンセプトカーの設計および製作	ポリマーによる軽量化を最大化しつつ、新しい材料の特徴をかした、車両のデザイン・設計と製作全般を統括する。	東レ・カーボンマジック株式会社
部品の作製	クルマの基本設計に基づいて、新しい材料による部品の詳細設計を行い、工法開発を行いつつ、部品を試作および作製する。	東レ、住友化学、ブリヂストン、三菱ケミカル、AGC
車以外の応用分野への展開	クルマ以外の応用分野に各社のタフポリマーを展開することで、コンセプトカー製作に向けた実証確認の精度を向上するとともに、タフポリマーの性能・実用性をアピールする。	東レ・カーボンマジック、東レ、住友化学、ブリヂストン、三菱ケミカル、AGC

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

従来の概念に捉われない設計および工法の創出が重要課題と認識し、新材料が自動車部品において、その特長を最大限発揮する適用部位を選定し、軽量化に留まらずタフポリマーならではの機能革新を追求した。

平成 28 年度中にコンセプトカーに適用、搭載するデザイン、技術要素などを決定、タフポリマーの特性を生かした高強度高剛性超軽量化ボディ、衝撃吸収部材、サスペンション、樹脂ホイール、EV 駆動システム採用に伴い搭載するリチウムイオンバッテリー、インホイールモーター等を搭載したテストベッド及びインテリアモックアップを平成 29 年度中に設計・製作した。テストベッドについては実際にテスト走行を行って様々な特性を計測、これら検証結果をコンセプトカーの詳細設計に反映した。平成 30 年度以降、材料開発プロジェクトと密に連携しながら、可能な限り開発品を搭載したコンセプトカー「ItoP（アイトップ）」を製作、何回かの走行テストを経て完成させた。全国各地で展示会、試乗会等を行い、アウトリーチ活動に供した。JARI での 60km/h 定速走行データから電力消費率：12.9 (km/kWh) を記録した。最新の日産リーフのカタログ値である JC08 モード：10 (km/kWh)、実走行データ：約 8.0 (km/kWh) と比較しても 1.3 ～1.6 倍の高い効率を達成した。

また、その他用途開発において競技用義足ブレード、ホッケースティック等を試作、実証試験を進めた。

<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時の TRL	プロジェクト終了時の TRL
3 ～ 4	6

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

新規に開発されたタフポリマー部材・部品の特徴を生かしたコンセプトカーの製作は、他に例を見ないアプローチであり、獲得した成果に革新性、独創性がある。

コンセプトカー「ItoP」の製作により、「しなやかなタフポリマー」の持つ特質が、自動車を始めとした輸送機器の性能・機能向上に大きく貢献する可能性を見出すことができた。同様の課題や背景を有する一般産業用途・スポーツ器具などにおいても適用の効果が見込まれる。

<獲得成果の革新性>

・樹脂製の大きなサイドウインドや透明ルーフとフロントウインドの一体化など、これまでにないフォルムと空力を両立させつつ、革新的な一体成形モノコック構造ボディ・フレーム（一般的な金属製モノコック約半分の重量）により、強度・剛性にも優れた衝突安全構造を実現した。

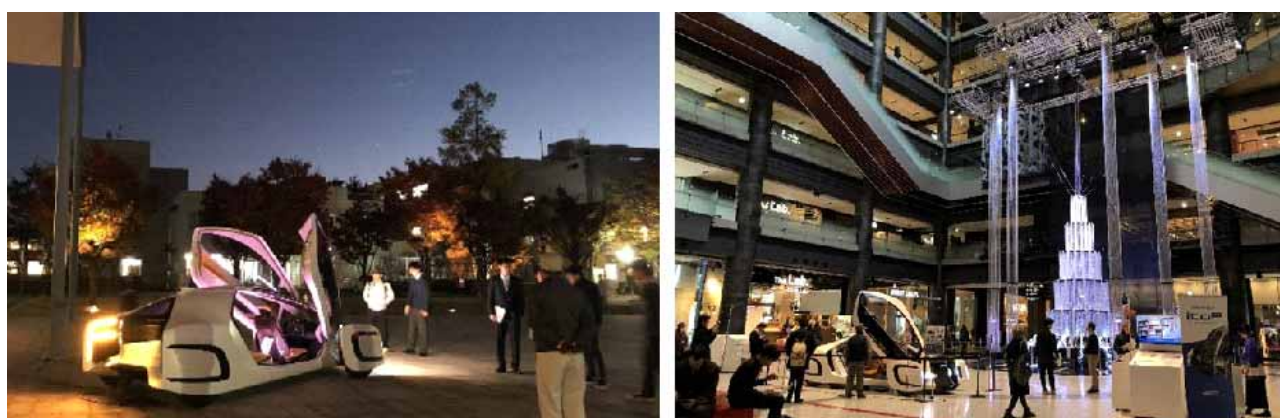
・サスペンション・スプリング・ホイールなどの足回り部品にもタフポリマーを利用した炭素繊維強化プラスチックを適用したことで、大幅な軽量化（軽量化率約 40%）を達成することができた。

<獲得成果の独創性>

タフ化が期待されるエポキシ樹脂と炭素繊維による複合材で車体を製作するために、材料試験による基礎データを取得。特に疲労特性の観点から、これまでは実用化が難しかったサスペンションのバネやホイール等への適用を推進した。複合材料の自動車への適用は国内外で盛んに検討されているが、サスペンションのバネやホイール等への適用は、機械強度が十分でないことからこれまでほとんど報告例がない。



【コンセプトカーItoP】



【山形大学、及びグランフロント大阪での展示風景】

3. 研究開発プログラムの全体成果

(1) 目標達成の状況（目標達成できた場合の要因分析、目標達成が困難となった場合の原因分析も記載）

本プログラムは、5つの材料開発プロジェクトとシステム化・評価、横断的共通課題プロジェクトから構成され、各材料開発プロジェクトの目標達成の見通しは、2. に記載している。中間評価の段階では、若干遅れていたプロジェクトも見受けられたが、各プロジェクトに対して臨機応変なアカデミアとの連携並びにプロジェクト体制の強化を促した結果、各プロジェクトで顕著な進捗が見られ、いずれも最終目標をほぼ達成した。さらに、コンセプトカー製作プロジェクトやLCAを用いた社会的価値の検証、本プログラムで得られた材料設計指針の汎用性の検証、高分子破壊標準データベースのプロトタイプの構築などのプロジェクトについても、概ね目標を達成している。

(2) 参考指標

① 民間企業等とのマッチング及び橋渡しの状況

本プログラムでは、下図のように企業とアカデミアのマトリックス運営体制を採用しており、参画企業はアカデミアとの連携により、競争領域として個別材料のクローズな研究開発を行なった。一方、基盤的共通課題プロジェクトでは、協調領域についてアカデミアを中心に共通的な課題検討を行ない、プログラム内での情報共有は可能であるが、材料個別の情報は共有しないなどの情報管理を行なった。各材料プロジェクトの研究開発成果についてはタイヤを除き、日産自動車が開発材料の自動車としての産業適用性を評価している。

一方、共通課題の検討で得られた成果、特にタフ化のための分子設計・材料設計の指針は、他の高分子材料テーマに展開できるため、平成29年度より参画企業が3テーマを追加するとともに、新規企業が2社参画した。この結果、計5テーマが新たに追加された。

以上のように本プログラムでは、民間企業とアカデミアのマッチングはプログラム内で緊密に進んでおり、プログラム終了後は得られた成果の実用化に向けた橋渡しが速やかに進むと予想している。



	既存テーマ	新規テーマ タフポリマー化の汎用性検証
旭硝子	フッ素樹脂/電解質膜	
三菱ケミカル	ポリプロ/多孔膜	バイオエンブラ
東レ	ナイロン/車体構造用樹脂	他の結晶性樹脂(PBT等)
ブリヂストン	ゴムエラストマー/タイヤ	
住友化学	アクリル樹脂/透明樹脂	ポリオレフィン(PP→PE)
横断的共通課題	宇部興産	ポリウレタン、pRXコストダウン
	旭化成	ポリスチレン

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
企業の研究者数	設定なし	53	69	92	172	205
協力企業数 ※	設定なし	0	3	4	6	5

※ 研究開発に参画する企業だけでなく、研究成果の展開に意欲を示し、ImPACT で得た機密情報を開示する秘密保持契約等を具体的に結んだ企業の数

② 論文

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全体数	設定なし	7	48	78	67	49(+5)
うち IP ファクター 10 以上	設定なし	1	5	10	8	9(+1)

注：() は見込み数、() 前の数字は平成 30 年 12 月末時点の数字

③ 学会発表

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全 体 数	設定なし	43	194	287	322	233(+7)
学会賞等の受賞数		8	31	51	47	29(0)

注：() は見込み数、() 前の数字は平成 30 年 12 月末時点の数字

④ 国際学会における招待講演

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全 体 数	設定なし	13	103	90	100	99(+3)

注：() は見込み数、() 前の数字は平成 30 年 12 月末時点の数字

⑤ 特許出願件数

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
国内	設定なし	0	13	20	18	17(+4)
海外	設定なし	0	1	3	8	1(+2)
合 計	設定なし	0	14	23	26	18(+6)

注：() は見込み数、() 前の数字は平成 30 年 12 月末時点の数字

⑥ 知財・標準化等の取組状況

知財については、上表にあるように数多くの特許が出願されており、海外出願も順調に進捗している。プログラム終了後の実用化に向けた知財戦略については参画した各企業で検討が進んでいる。また、横断的共通課題プロジェクトで解明された破壊機構や亀裂進展機構の成果に基づき、亀裂進展試験法の標準化について ISO:TC45-SC2-WG6 への上程を準備中である。

⑦ アウトリーチ等の状況

広報、アウトリーチ活動については、企画も含めて広報担当補佐と研究開発担当補佐が中心となって対応した。主体的に学術成果を発表する場として、シンポジウムについては高分子学会の協力をいただきながら年 1 回程度開催し（主催と共催を含む）、研究者、技術者や各企業に研究成果を紹介するとともにアクティビティの高さをアピールしてきた。また国際シンポジウムについては主催と共催を合わせて 5 回開催し、海外への情報発信に務めた。外部発表の場を活用し、学会などのセッションや招待講演を通じた学術関係者への広報、招待講演などを通じた非参画企業の技術者・研究者への紹介する機会も多く得た。本研究成果に関心を寄せてコンタクトのあった企業との相談にも積極的に応じてきた。

また、JST フェアなどの一般の方が参加するイベントにも毎年積極的に参加し、本プログラムの成果を分かりやすく伝える小冊子（漫画）を日本語・英語・中国

語で作成してイベントで配布、NHKの科学番組「サイエンスゼロ」にPM自ら出演し成果を説明するなど、（国内外の）小中高生や一般向けのアウトリーチ活動にも積極的に取り組んできた。デジタルメディアを活用したアウトリーチ活動として、ImPACT 共通ホームページ：<https://www.jst.go.jp/impact/program/01.html> において本プログラムの構想概要を紹介する一方で、PMごとに運用する個別公式ホームページ：<http://www.jst.go.jp/impact/shinayaka/index.html> では、成果を動画や画像などを積極的に利用してアピールした。

さらに、本研究の成果を紹介するビデオを作成しユーチューブにアップした（総計で閲覧数 30 万回以上）。特に本プロジェクトの研究開発課題は、他の大型予算では実施が困難なハイリスク・ハイインパクトな内容であることから、アウトリーチを通じた国民との対話は重要であると考えている。

製作したコンセプトカーは、お台場でお披露目を行った後、名古屋大学、山形大学、北海道大学、大阪大学、九州大学、ブリヂストン、AGC、東京大学などの主要参画機関を巡回し、地方企業や地元の皆様に技術成果を紹介するとともに、試乗体験などを行った。また、グランフロント大阪や福岡国際会議場、成田空港などでも展示を行った。

以上のようなアウトリーチ活動は、テレビや新聞にも数多く取り上げられ、上述の通り NHK のサイエンス ZERO では特集が組まれた。コンセプトカーはInstagramやフェイスブックなどの SNS などでも大きな話題となっている。

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
アウトリーチ回数	15	1	13	20	17	23(+4)
新聞、TV等の報道数		3	9	32	23	37(0)

注：（ ）は見込み数、（ ）前の数字は12月末時点の数字

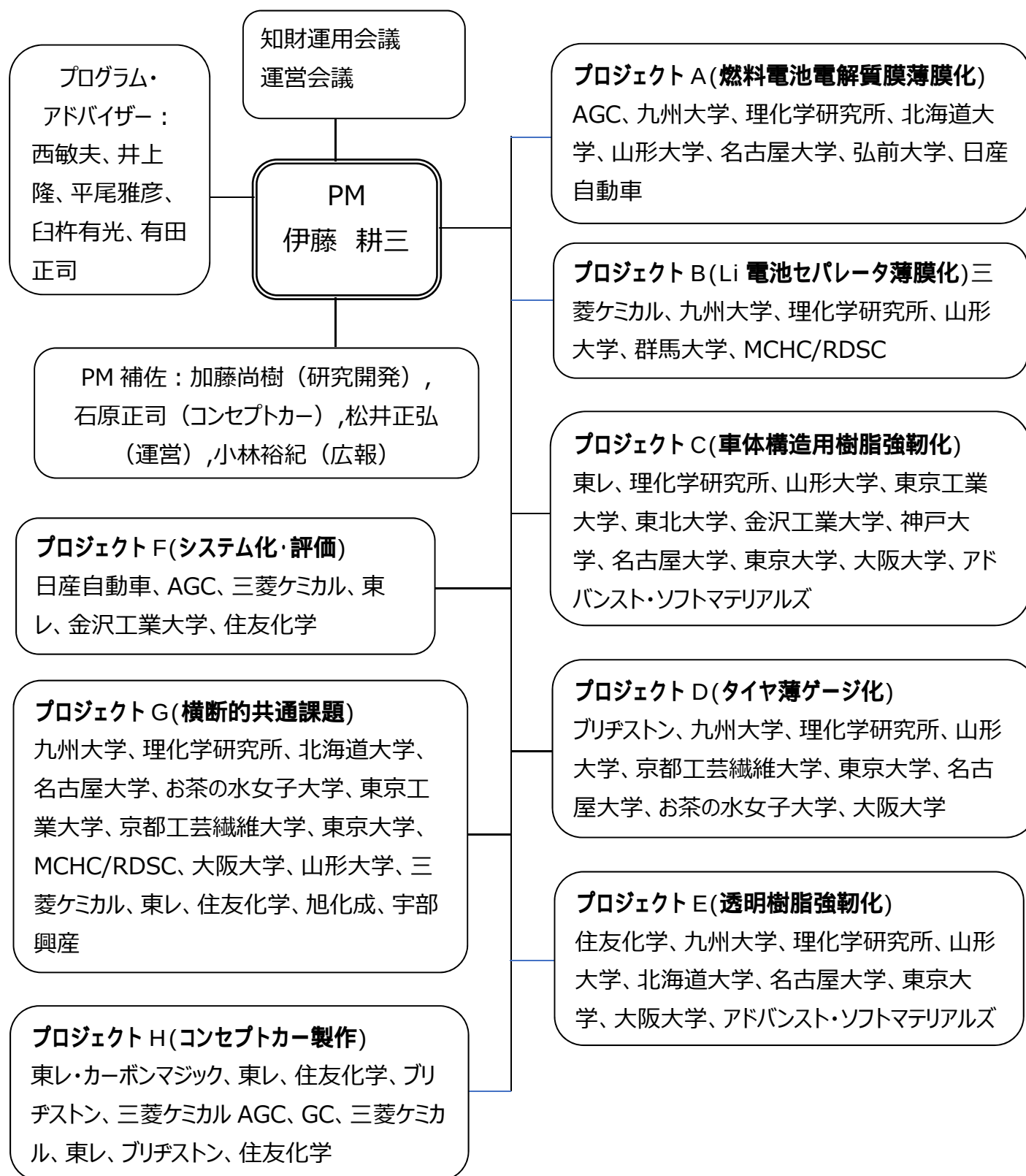
⑧ その他特筆すべき取り組み

2015年9月には、ImPACTとして初めて、総合科学技術・イノベーション会議において、安倍首相と主要閣僚および総合科学技術会議の有識者議員の前で、研究成果のプレゼンを行なった。安部首相にも実験に参加していただきタフポリマーの素晴らしさを体験いただいた。首相秘書官や科学技術担当大臣から非常に高い評価をいただき、その後、科学技術担当大臣、G7の科学技術担当相会議、衆議院議員のサイトビジット、愛知県自民党県議会議員訪問団などで同様のプレゼンを行う機会を頂戴した。

4. 研究開発プログラム予算の推移

	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	合計
A: 燃料電池電解質膜薄膜化	27.000	82.800	43.740	50.500	40.200	244.240
AGC(旧旭硝子)	27.000	72.800	30.700	42.500	35.000	208.000
弘前大・澤田英夫		10.000	13.040	8.000	5.200	36.240
B: Li電池セパレータ薄膜化	20.000	71.300	70.128	75.703	41.672	278.803
三菱ケミカル(旧三菱樹脂)	20.000	43.000	43.000	44.103	23.000	173.103
三菱ケミカル(旧MCHC/RDSC)		20.000	22.128	25.100	13.672	80.900
群馬大・河井貴彦		8.300	5.000	6.500	5.000	24.800
C: 車体構造用樹脂強靱化	6.600	124.778	79.177	123.975	88.670	423.200
東レ	6.600	104.280	21.975	70.975	48.170	252.000
東工大・中嶋健		7.198	10.802	9.000	9.000	36.000
東大・梅野宜崇		10.000	10.000	11.000	11.000	42.000
金沢工大・山部昌		3.300	15.400	13.200	11.000	42.900
アドバンス・ソフマテリアルズ			21.000	19.800	9.500	50.300
D: タイヤ薄ゲージ化	27.000	90.400	68.600	34.800	34.300	255.100
ブリヂストン	27.000	61.000	44.000	15.000	20.000	167.000
九大・田中敬二		9.900	15.100	9.900	4.400	39.300
京都工繊大・浦山健治		19.500	9.500	9.900	9.900	48.800
E: 透明樹脂強靱化	13.200	43.000	43.000	46.000	34.500	179.700
住友化学	13.200	43.000	43.000	46.000	34.500	179.700
F: システム化・評価		20.000	59.033	97.832	70.427	247.292
日産自動車		20.000	59.033	97.832	70.427	247.292
G1: 破壊機構の分子的理解	159.990	539.388	223.682	237.760	182.110	1,342.930
九大・高原淳	60.000	100.000	48.000	48.000	34.700	290.700
理研・高田昌樹	59.990	299.900	29.940	30.000	30.000	449.830
北大・龔剣萍	20.000	40.000	40.000	40.000	30.000	170.000
名大・岡崎進	10.000	54.528	46.682	49.170	35.000	195.380
お茶の水女子大・奥村剛	10.000	30.000	34.100	26.000	22.500	122.600
東北大・高田昌樹(豊田光紀)			10.000	16.500	6.500	33.000
東北大・陣内浩司				13.090	8.910	22.000
理研・侯召民		14.960	14.960	15.000	14.500	59.420
G2: 分子結合制御の手法開発	70.580	374.320	232.690	229.340	190.210	1,097.140
阪大・原田明	20.000	50.000	50.000	48.000	36.000	204.000
理研・相田卓三	19.910	59.840	59.840	59.840	39.710	239.140
山形大・伊藤浩志	10.670	144.980	34.350	50.000	47.000	287.000
東大・伊藤耕三	20.000	80.000	55.000	45.000	40.000	240.000
名大・竹岡敬和		13.000	13.000	10.000	11.000	47.000
東工大・大塚英幸		16.500	10.500	16.500	16.500	60.000
理研・瀧宮和男		10.000	10.000			20.000
G3: 社会的価値の検証				9.000	7.000	16.000
東大・平尾雅彦				9.000	7.000	16.000
G4: タフポリマーの分子設計・材料設計指針の汎用性検証				30.400	19.600	50.000
宇部興産				20.400	9.600	30.000
旭化成				10.000	10.000	20.000
H: コンセプトカー製作			154.284	276.186	280.564	711.034
東レ・カーボンマジック			154.284	276.186	280.564	711.034
研究費合計	324.370	1,345.986	974.334	1,211.496	989.253	4,845.439

5. 研究開発プログラムの推進体制



6. 研究開発プログラムの実施管理状況

(1) 研究開発プログラムのガバナンス

① 進捗状況の把握及び指導・管理状況

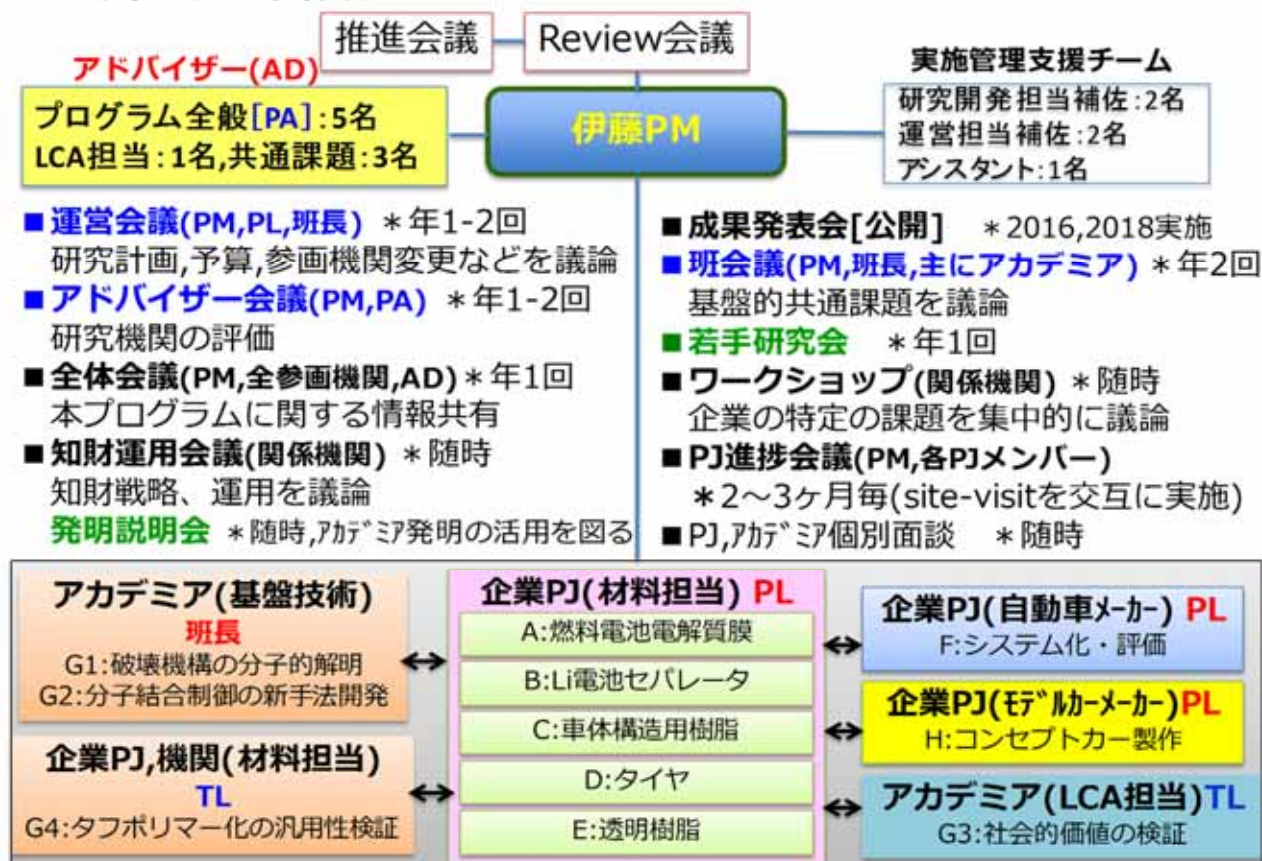
実施管理支援チーム（PM 補佐 4 名、事務担当補助員）を設置し、アドバイザー（AD）会議については年 1 ～ 2 回ほど開催してきた。

重要事項の連絡・調整・審議については、プロジェクトリーダー（PL）と班長からなる運営会議を設置して対応した。横断的共通課題プロジェクト以外の 7 プロジェクトについては、企業が PL を務めた。一方、横断的共通課題プロジェクトについては、研究課題 G1「破壊機構の分子的解明」および G2「分子構造制御の新技术開発」のそれぞれに班長を置き、アカデミアが担当した（G1: 高原淳（九大）、G2: 原田明（阪大））。運営会議は年 2 回程度開催し、研究計画や予算、研究機関の変更など重要事項について検討した。

研究開発機関における研究の進捗状況の把握のために、PM は PL と 2 月に 1 回程度サイトビジットも含めたミーティングを行い、研究目標を達成する上での課題について検討した。PL は毎月（それ以外の PI は 3 ヶ月ごと）、月報を PM に送ることによって進捗状況を報告した。PM はそれらを取りまとめて全 PI に対して毎月メールにて月報を送り、情報の共有を図ってきた。また、横断的共通課題に対応するために、班長が主催する班会議を PM や AD 同席のもとで年に 2 回程度開催し、「破壊機構の分子的解明」や「タフポリマーを実現するための分子設計・材料設計の指針の確立」を図ってきた。さらに、横断的に共通な個別課題に関する検討会を年に数回開催し、アカデミアが中心となって互いに協力しながら課題の解決に取り組んできた。これにより、各企業プロジェクトで遂行されている各種タフポリマーの実現を強力にサポートした。さらに、企業の特定の課題について複数のアカデミアが集まって集中的に討議するワークショップも PL 主導で適宜開催しており、特定の課題についての迅速な解決を図っている。

PM、PL、JST、有識者から構成される知財運用会議を設け、本プログラムで出願された知財や商標の取り扱い、内外の関連する知財への対応、知財ポリシーや知財戦略を検討するための会議を不定期に開催してきた。アカデミアで出願した特許については、その活用を加速するために、参画企業を対象とした発明説明会を計 4 回（特許件数：計 13 件）開催した。

◆マネジメント体制



	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
運営会議等の開催数	10	40	45	82	43
研究開発機関等の訪問回数	11	29	27	21	5

② 新たな発想・アイデアの採用（若手・女性人材の育成を含む。）に関する取り組み
各材料開発プロジェクトの取り組みにおいて、アカデミア視点の新規な発想やアイデアの反映、また複数のアカデミアを組合せた対応は極めて重要である。

本プログラムでは、横断的共通課題のアカデミアの取り組み状況を参画企業が共有できる機会を多く設定した。年2回、1泊2日の班会議（参加者平均90名、内女性4～13名）では、企業も含めた全機関、アドバイザーが参加し、アカデミアの成果を共有、ポスター発表や情報交換会での議論を通じて、迅速な展開を図ってきた。また、個別の共通課題に限った検討会も適宜実施し、企業プロジェクトでのクローズな環境下で個別の課題についてさらに突っ込んだ議論の機会も設定した。

◆班会議/開催実績

		第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回
開催日		2015 7/24-25	2016 1/6-7	2016 7/25-26	2017 1/6-7	2017 7/21-22	2017 12/25-26	2018 7/20-21
担当 大学		九大	阪大	北大 @小樽	名大	山形大 @天童	九大 @小倉	JST @逗子
発表	口頭 +特別 講演	12+1 件	10+2	12+2	15+2	15+2	15+2	13 4(SP8)
	ポス ター	30件	32	41	33	31	38	41
参加人数 (うち女性)		71名 (4)	99 (8)	82 (4)	86 (4)	88 (10)	99 (13)	103 (8)

また若手研究者の交流、育成の観点で、年1回、1泊2日の若手研究会（参加者平均60名、内女性2～11名）を企業とアカデミアが一緒になって行なってきた。実際に亀裂進展機構の解明は、若手研究会での企業も含めた若手研究者の自由な議論によって培われたものである。

◆若手研究会/開催実績

		第1回	第2回	第3回	第4回
開催日		2015/9/24-25	2016/11/21-22	2017/10/3-4	2018/10/1-2
開催場所		湘南国際村 (逗子)	IPC生産性国際 交流センター (逗子)	湘南国際村 (逗子)	アリソンホテル神戸 (神戸PI)
発表	口頭	14件	4: フォーミュラ形式	6: フォーミュラ形式	4: フォーミュラ形式 4: 学生発表
	ポス ター	19件	31 +7[企業紹介]	30	29
久間議員 ご講演		ImPACTへの思いと 若手研究者への期待	我が国の科学技術 イノベーション戦略 - Society 5.0 実現に向けて -		
その他			企業紹介: 7社 JAMSTEC見学	企業紹介: 9社	企業紹介: 9社 EVS31見学・試乗
参加人数 (うち女性)		56名 (2)	57 (8)	62 (7)	62 (11)

★若手研究者名簿/若手ネットワークの基盤: 75名登録(2017/10)

一方、各材料開発プロジェクトの個別課題については、随時ワークショップの機会を設けて、プロジェクトと複数アカデミアで集中的に議論してきた。さらに、上記のような取り組みでも埋もれる可能性のあるアカデミア単独の成果については、特許化を促すとともに、公開前の時点で、企業へ開示を行う発明説明会を上述のように開催し、新たな発想・アイデアの積極的な活用を迅速に図ってきた。

③ 研究開発機関等の評価及び追加変更の状況

本プログラムでは、研究開発機関の評価を以下のような方法で行ってきた。まず、プロジェクトの評価については、年に1回アドバイザー会議を開催し、各 PL が進捗を報告し、アドバイザーが評価する。それを参考に PM が各プロジェクトの評価を行ない、翌年度の予算に評価結果が反映するようにした。

各アカデミアの参画機関（PI）の評価については、それぞれの PL が各プロジェクトの進捗に対するアカデミア参画機関の貢献度を評価する。企業 PL はそれぞれの数値目標の達成や実用化という観点からの評価が中心となるのに対して、基盤的共通課題の PL（PM が兼務）は、ハイリスク・ハイインパクトな課題への挑戦と基盤的共通課題への貢献度という観点で評価を行なった。以上の評価を総合的に判断して、PM が各 PI の評価を行い、翌年度の予算に評価結果が反映するようにしてきた。

参画機関は当初、企業とアカデミアを指名してスタートした。スタート後、企業からのヒアリングを通じて、特殊な技術を有するアカデミアの参画を必要と感じたため、企業 PJ より要望があった技術について公募を実施して参画機関を追加した。また、企業の研究開発の進捗に応じて必要な技術が増えた時点、さらに社会的価値の検証、タフポリマーの分子設計・材料設計指針の汎用性の検証、コンセプトカーの製作など新しい研究テーマの追加に応じて参画機関を随時補強した。

	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
参画研究機関数	14	25	30	33	32
参画研究者数	161	246	300	410	442
うち中止（解任）		0	0	1	1
追加（新任）		11	5	4	0

④ 「選択と集中」に向けた取り組み

研究開発プロジェクトおよび研究開発機関の選択と集中のために、平成28年10月にアドバイザー会議を開催し、各材料開発プロジェクトの厳密な中間評価を実施した。進捗状況についての各プロジェクトからの報告とアドバイザーによる質疑応答を行い、その際のアドバイザーによる評価も参考にした上で、PM として各プロジェクトとも目標の達成のめどがついたと判断し、各プロジェクトを最終年度まで継続することとした。ただし、一部の参画機関については中止あるいは減額とした。

(2) 研究成果の展開に向けた取り組み

① これまでの取り組み

H28 年度計画より、プログラムの最終目標を、自動車の部品のプロトタイプ of 作製・評価から、本プログラムで新規に開発されたタフポリマーを用いたコンセプトカーを製作することで、開発材料の実用化を加速することへ拡張した。本コンセプトカーは、実用性と安全性を兼ね備えた未来型クルマのプロトタイプである。軽量性、安全性、省エネ、高強度、強靱性、自己修復性などの機能も備わっている。またタフポリマーを用いて、実用性と安全性を両立した未来型のクルマを実際に製作することで、材料の産業適用性について実車レベルでのより正確な判断が可能になった。特に、企業はコンセプトカーの製作のために、実用レベルの大きなサイズの部材を実際に作成することが課題として新たに加わった。たとえば、ブリヂストンは、開発材料でトレッド部分の膜厚が約半分のタイヤを実際に作成したが、その際にタイヤの設計や製作など事業に近い部署を研究開発に巻き込むことになったことから、社内での認知度が向上するなど、各社で研究成果の実用展開の加速が見られている。

② 今後の方針と具体的な取り組み計画

各材料研究開発プロジェクトで獲得した成果についての事業化戦略およびグローバル展開戦略等については、各プロジェクトの PL が中心になって各企業で積極的に進めることになっている。特に本プログラムの後半では、自動車への利用を踏まえた産業適用性の評価を日産自動車が行なったので、自動車会社のお墨付きが得られた材料については、短期間での事業化が実現できると予想している。

本研究成果は自動車への応用を想定しているが、高分子のタフネス化は自動車だけでなくあらゆる高分子材料にとって共通の課題であることから、電気・電子産業、建築産業、医療産業、環境産業などの最先端で用いられる広範なポリマーへの応用展開および波及効果が期待される。その結果、炭酸ガス排出量の大幅な削減や高分子材料に対する長期信頼性の向上など、安心・安全と低環境負荷社会の実現に貢献できる。

本プログラムのタフポリマーの分子設計や材料設計の指針などの成果は、今回のプロジェクトに参加した企業だけでなく、それ以外の企業にも積極的に展開したいと考えている。そのために、研究成果報告会、国際的な高分子関連雑誌での特集号、国内の技術雑誌、国際会議、講演会などを通じて今後も広く成果を紹介していく。

そのような指針を応用して開発された製品については、高信頼性が学術的に裏付けられた新規応用製品として対外的に高い競争力を保持することから「しなやかポリマー」というマスターブランドを付与する。これにより、本プログラムの研究成果が社会や産業に寄与していることを内外にアピールできるだけでなく、諸外国が簡単に真似できない高分子部材であることが強調され、社会や産業の変革だけでな

く、現在の我が国の高分子部材における高い世界シェアを将来にわたって維持・増強することに貢献できる。

7. PMの自己評価

(1) PMが実施管理を行った研究開発プログラム（研究成果）に関する評価

- ① 産業や社会のあり方の変革（漸進的でなく、非連続的なイノベーション）をもたらす見通しは得られたか。以下の視点を踏まえて記載すること。

・将来の産業や社会のあり方の変革をもたらすような革新性を有する研究成果が獲得されたか。

気候変動が危ぶまれ低炭素社会実現が社会課題となって久しい。

近年、低炭素社会実現に向けた電気自動車の普及が始まっているが、巡航距離を初めとした問題があり普及は低調である。巡航距離向上の手段は、自動車の軽量化や電池の大容量化（小型化）であり、構造体のポリマー化やポリマー部材の薄膜化が有効であるが、ポリマーには硬くすると脆くなるというトレードオフがあった。また、他の様々な分野においてもポリマーによる軽量化は有効であるが、強度と靱性の両立が大きな課題となっている。そこで、このトレードオフを脱却し、従来の限界を超える薄膜化と強靱化を備えた「しなやかなタフポリマー」を実現するとともに、高分子材料のタフ化の原理を明らかにすることで、非連続イノベーションを引き起こす。出口戦略として、自動車を始めとする輸送機器の軽量化・信頼性・安全性を飛躍的に向上させるとともに、ロボット、電子デバイス、医療機器、農業など広範なポリマーへの応用展開および波及効果を通じて、産業や社会のあり方に革新をもたらす。炭酸ガス排出量の削減や安心・安全社会の実現に向け、材料から世の中を変革する。

・産業や社会のあり方変革に向けた戦略が具体的かつ明確となったか。

本プログラムの成果は、いずれも企業単独では解決が到底不可能な高分子材料の本質的なトレードオフにブレークスルーをもたらしただけでなく、従来の材料の物性値を1桁近く高めたという達成値が数多く含まれている。高分子は軽いという点に利点があるが、金属などに比べると脆く信頼性に乏しいことから、自動車の構造体部分への採用には、現時点で各社ともそれほど積極的ではない。本プログラムの成果により、高分子材料に対する認識が変化し、構造部分にまで高分子が採用されるようになれば、コンセプトカーで示したように車重が約半分とな

り、走行時の炭酸ガス排出量が約半分と大幅に減少する。また空飛ぶ車などへの採用も予想される。さらにタイヤの薄ゲージ化も、軽量化や省資源という観点から炭酸ガス排出量削減への寄与は非常に大きい。一方、セパレータの薄膜化は、燃料電池とLi電池の小型化や容量の向上を通じて航続距離の増加をもたらす。その結果、本プログラムの成果は、モビリティの軽量化、電動化という戦略を通じて持続可能性社会の実現を促し、将来の産業や社会のあり方に変革をもたらす。

・戦略の実現に向けた課題が整理・明確化されたか。

ポリマーの強靱性をもたらすミクロの分子設計とマクロの破壊力学を結びつける破壊の分子理論はまだ未完成であり、出口戦略の実現に向けた根本的な技術的課題である。これを解決するために、我が国最高のアカデミアが強力に連携しながら、大型放射光施設 SPring-8 とスーパーコンピュータ「京」を駆使し、強靱性発現の分子的機構の解明を通じて、「しなやかなタフポリマー」の分子設計と材料設計の指針を確立した。得られた指針を、自動車の各部材を開発している企業が、それぞれのプロジェクト（PJ）で新規な分子結合や高次構造設計に結びつけることで、戦略的かつ効率的に革新的概念のタフポリマーが実現した。実現されたタフポリマーが、実際に自動車の車体や電池として利用可能か、産業適用性という観点から自動車メーカーが検証するとともに、コンセプトカーの製作を通じて社会実装の有効性を示した。

・技術的課題を克服するためのアイデア・着眼点の斬新さ、技術的なサプライズは存在したか。

技術的課題を克服するためのアイデア・着眼点の斬新さ、技術的なサプライズをいくつか紹介する。ブリヂストンPJでは、ゴムのタフ化の材料設計指針を確立するために、ゴムの破壊の現象解明として亀裂先端の形状という新しい着眼点で取り組み、ゴム処方と亀裂先端の形状の相関解明からゴムのタフ化を目指し、転移エネルギーを従来の4倍に向上することに成功した。また東レPJでは、環動ポリマーといったアカデミアから生まれた分子構造を企業の独自技術（ナノアロイ）と結びつけた結果、強度と破断伸びの相反関係を打破した。さらにAGCでは、アカデミアの協力による新しい取り組みのもと、新たなアイデアとして燃料電池の電解質膜のタフ化に影響する因子を絞り込み、電解質膜におけるタフ化指標発見した結果、膜厚を1/5にして耐久性を5倍にすることに成功した。

・戦略の実現に向けた道行き（ロードマップ）が適切に描けたか。

例えばブリヂストンPJでは、平成28年度までにゴムの破壊現象の解析結果とゴム処方の相関関係を纏め、新規タイヤのコンセプト、設計指針を確立した。現状のタイヤに比べて磨耗速度60%減を達成し、平成29年度より事業部を巻き込ん

で製品化検討に移行した。今後、タイヤゴム重量の40%減を目指す。他のPJでも同様にロードマップが適正で実現可能なものとなっている。PJごとに隔月に開催された進捗会議においては、「達成目標に対する進捗度（ロードマップ）」を都度更新し、状況の見える化と共有化を常に図りながら、遅れが見えた場合には迅速な対応を行ってきた。

・戦略の実現に向けた産業界との連携・橋渡し等が行われたか。

世界に前例のない強力な産学連携研究開発体制を構築し、出口戦略の実現に向けた産業界とアカデミアの連携・橋渡しを行ってきた。企業の開発課題は大学からは見え難く、大学の持つ基礎的な要素技術は企業が活用し難い。そこで、技術的課題を克服するため、本プログラムでは「マトリクス運営」という研究開発体制を採用し、各企業が個別の課題について、それぞれ異なる技術を有する複数のアカデミアと同時に共同研究開発を行うことで、集中的かつ効率的な課題解決を実現してきた。

タフ化のための材料設計の指針は、他の高分子材料、テーマにも展開可能である。そのため、平成29年度より参画企業が3テーマを追加するとともに、新規企業が2社参画した。この結果、計5テーマが新たに追加され、産業界との連携はさらに強化された。以上のように、企業との橋渡しは順調に行われている。

また、本プログラムでは、各機関で得られた高分子の破壊に関する実験結果を集約することで、高分子破壊標準データベースのプロトタイプの構築についても取り組んでいる。我が国最高のアカデミアが最先端の実験装置を用いて得た非常に質の高い高分子の破壊に関するデータベースは、国内外に例がなく、実際に集めたデータを、SIP岸プロジェクトとの連携のもと、最新のMIやAIあるいはデータ科学などを駆使して解析することで、タフ化の新しい材料設計指針の発見を試みようとしている。

・知財・標準化戦略は明確かつ適正か。

マトリクス運営においては、企業PJがクローズに行う研究開発の競争領域とアカデミアが横断的共通課題としてオープンに取り組む協調領域を存在させ、新規なオープンイノベーションを実践している。参画機関は、このオープン・クローズの領域を常に意識しながら研究開発を行った。

競争領域の知財戦略は、企業独自で担当しており、アカデミアが見出した新規技術については、積極的にその特許化と企業活用の促進、機会設定を行ってきた。具体的には横断的共通課題の取組み成果として、ゴム亀裂モード転移のシミュレーション方法等が権利化されている他、20件弱のアカデミア出願があり、発明説明会で企業活用の積極的促進を図ってきた。また、必要に応じ、PM、PL、JST、有識者から構成される知財運用会議を開催し、本プログラムで出願された知

財や商標の取り扱い、内外の関連する知財への対応、知財ポリシーや知財戦略を検討してきた。

標準化戦略についても、本プログラムで得られた亀裂進展の評価方法や、理論的解釈、シミュレーションによる成果などをベースにして、JIS や ISO の取得に向けた検討を開始している。

- ② 上記①以外の派生的な効果（派生的に生み出された成果、新たな学術的知見の創出、失敗から得られた知見等）として、どのようなものが得られたか。

本プログラムでは、基盤的研究課題の中で数多くの学術的知見が得られた。自己修復材料だけでも、相田グループが報告したガラスレベルのヤング率を示す自己修復性材料やナノシートを利用した複合材料、原田グループの強靱な自己修復材料、侯グループの水中でも修復可能な材料、グングループのイオン性自己修復材料、大塚グループの産業適用性の高い自己修復材料など枚挙にいとまがない。また高分子の破壊機構という点に関しても、奥村グループによる亀裂進展の転移現象のモデル化と厳密解の発見、高分子破壊の全原子シミュレーションなどは、新たな学術的知見の創出につながる画期的な成果である。これ以外にも企業との接触に触発され、企業の実用に近い課題の中から基礎研究として重要な発見が数多く生まれている。

（２）PM自身の活動（プログラム・マネージメント）に関する評価

- ① <目標設定>産業や社会のあり方変革を目指した研究開発プログラムとして、目標設定の水準は妥当であったか。

本プログラムの中核である材料開発プロジェクトの目標設定に当たっては、材料のユーザーである日産自動車とも協議し、現状の技術の延長線上では達成不可能で、今回の ImPACT でなければ挑戦できないようなハイリスク・ハイインパクトな数値目標を設定した。その中には、企業単独では到底設定できない大きなトレードオフや、1桁程度の物性値向上などの数値目標がある。最終年度に目標を達成した参画企業からも、ImPACT でなければ達成がきわめて困難であったとの評価をいただいている。また、コンセプトカーの製作など、より難易度の高い魅力的な目標を設定することで、参加機関のハイリスク・ハイインパクトな研究開発に挑戦するモチベーションの向上も図った。

- ② <作り込み> トップ研究者の採用や異分野研究者との融合、外部専門家からの助言聴取など、国内外から斬新なアイデアや最先端の知見等を結集して研究開発を推進できたか。また、研究開発の実施体制は適切であったか。

本プログラムでは、作り込み期間に、高分子化学、高分子物理、高分子化工、ソフトウェア理論、全原子シミュレーションなどにおける我が国のトップ研究者の所属機関を参画機関として採択し、産学連携マトリックス方式を用いて研究開発を推進してきた。また、外部専門家の助言を聴取するために、自動車企業または自動車関連企業出身のプログラム・アドバイザー2名（臼杵有光、有田正司）、アカデミア出身のプログラム・アドバイザー3名（西敏夫、井上隆、平尾雅彦）から構成されるアドバイザー会議を設けた。各企業のプロジェクトリーダーには、目標達成のために、自社技術だけでなく、アカデミアの斬新なアイデアや最先端の知見などの新規技術を必ず取り入れて研究開発を進めるように指導した。そのために、企業とアカデミア、PMの3者面談を、特に研究開発の初期段階には頻繁に開催し、企業とアカデミアのマッチングを図り、アカデミアの企業プロジェクトへの貢献を強く促した。また毎年、開催しているアドバイザー会議では、企業の研究開発プロジェクトの進捗以外に、企業についてはアカデミアとの連携度を、アカデミアについては企業プロジェクトへの貢献度をアドバイザーに評価していただき、それぞれの評価結果を参考に翌年度の各参画機関の予算を査定した。

- ③ <進捗管理> 研究開発の進捗状況や国内外における研究開発動向（ベンチマーク）等に応じ、各プロジェクトの加速、減速、中止、方向転換等を果敢に行うことができたか。

プロジェクトの進捗状況をサイトビジットなども通じて常に把握することに務め、進捗の遅れているプロジェクトについては体制の強化を要求するとともに、体制の見直しや方針の変更を適度に促した。企業の研究開発が進んでくると、必要なアカデミアの技術が変化していく。そこで、企業の研究開発の進捗状況に応じて、迅速にアカデミアの必要な技術が提供できるようマトリックスの見直しを臨機応変に行ない、企業とのアカデミアの連携を年度の途中なども含めて適切なタイミングで調整した。また、企業プロジェクトと共通課題の双方に貢献度が低い参画機関については、研究開発の中止または方向転換などを行った。

- ④ <関係者の巻き込み> 研究開発に関連する産業界を巻き込み、それら関係者の自発的な研究開発投資を誘導することはできたか。

本プログラム開始当初は、あまりにも高い目標に及び腰であった企業もあったが、いくつかの企業で目覚ましい成果が報告されるなどマトリックス運営の有効性が明らかになり、PMの指導で体制を強化してからは、企業自身の負担で社内の優

秀な人材を数多く投入するなど、すべての企業でマッチングによる自発的な研究開発投資が誘導された。特に、目標設定をコンセプトカーの製作に難度化したことで、研究開発部門だけでなく、プロセス開発部や事業部など、より実用化に近い社内部署が本プログラムに企業の自己負担で参加することになり、企業のマッチングの負担割合がさらに増加した。これにより、ImPACT 終了後の実用化が加速するという影響が各企業で見られている。

- ⑤ <成果の展開>得られた研究成果の産業界への橋渡しや将来的な実用化・事業化に向けた戦略（知財及び標準化を含む。）及び体制が構築できたか。

マトリックス運営という強力な産学連携研究開発体制を構築し、出口戦略の実現に向けた産業界とアカデミアの連携・橋渡しを行ってきた。各企業が個別の課題について、それぞれ異なる技術を有する複数のアカデミアと同時に共同研究開発を行うことで、集中的かつ効率的な課題解決を実現した。これにより、産業界との連携が強化された結果、ImPACT 期間中だけでなく終了後にも本体制を基本とした連携の一部は継続し、産業界への橋渡しは順調に継続すると予想される。特に、コンセプトカーの製作を契機として事業部や経営戦略・企画部門の参画が各企業で始まっていることから、実用化・事業化に向けた動きも急速に進んでいる。

競争領域の知財戦略は、実用化・事業化に向けて企業独自で進めている。ImPACT 終了後も、知財戦略の結果として、企業から関連特許が出願されると予想している。また出願アカデミアが見出した新規技術についても、企業での活用検討が今後も継続する。標準化戦略については、本プログラムで得られた亀裂進展の評価方法や、理論的解釈、シミュレーションによる成果などをベースにして、JIS や ISO の取得に向けた検討が始まっている。

- ⑥ <PM 支援機能の活用>PM 補佐や JST、外部支援の活用など PM 支援機能を有効に活用できたか。

実施管理支援チーム（PM 補佐 4 名、事務担当補助員）を設置し、PM 補佐は、担当が研究開発（加藤）、コンセプトカー製作（石原）、運営（松井）、広報（小林）などに分かれ、それぞれの役割に応じて機能的に業務を処理することで PM 活動を強力に支援した。隔日程度に全員が集まる連絡会を開催し、方向性の確認、情報の共有、仕事の分担、個別課題への対応などを検討した。JST については、参画機関との契約や会計処理、各種のイベントの支援など、PM 活動のロジスティックについて多大の支援を有効に活用させていただいた。外部支援としては、5 名のプログラム・アドバイザーからの助言がきわめて有効であった。産業界特に自動車産業から 2 名、アカデミアから 3 名の有識者にアドバイザーを委嘱した結果、特に各参画

機関の研究開発内容についての有効なアドバイスと、予算に直結する毎年の機関評価について多大の貢献があった。アドバイザーは、年1～2回ほど開催した機関評価のためのアドバイザー会議だけでなく、全参画機関が集まる全体会議や班会議にも、ほとんど毎回全員が参加し、各機関の進捗状況を正確に把握していたため、アドバイスや評価が妥当であったことから、PM はアドバイザーの評価結果をきわめて有効に活用することができた。

- ⑦ <アウトリーチ>アウトリーチ活動等が積極的に行われ、研究開発の意義・重要性等に関し、関連する産業界や一般の理解が深まったか。

本プログラムでは、国内外の研究者や技術者に研究成果を分かりやすく説明するだけでなく、大学生や中高生、小学生などの学生、高分子や材料に精通していない一般の国民に易しく研究成果を伝えることに数多くの工夫を行ってきた。たとえば、漫画を使ったプログラム紹介冊子（日本語版、英語版、中国語版2種類）が例として挙げられる。本冊子は非常に好評で、日本語版は5,800部、英語版は900部、中国語版は220部がこれまでに配布された。日本語版と英語版については、特に高分子学会の全面的な協力のおかげで学会や国際会議で配布していただき好評を博した。また、本研究成果を一般向けに分かりやすく説明するビデオも製作し、YouTubeにアップした（総計で閲覧数30万回以上）。

製作したコンセプトカーは、お台場でお披露目を行った後、名古屋大学、山形大学、北海道大学、大阪大学、九州大学などの主要参画機関を巡回し、地方企業や地元の皆様に技術成果を紹介するとともに、試乗体験などを行った。また、グランフロント大阪や福岡国際会議場、成田空港などでも展示を行った。

以上のようなアウトリーチ活動は、テレビや新聞にも数多く取り上げられ、NHKのサイエンスZEROでは特集が組まれた。コンセプトカーはInstagramやフェイスブックなどのSNSなどでも大きな話題となっている。

- ⑧ <人材育成>若手や女性を含め研究人材の育成にどの程度貢献できたか。また、基礎研究からイノベーションを生み出す取り組みに関する参画研究者の意識改革がどのように進んだか。

我が国は高分子の科学技術の分野で、アカデミアと企業がともに世界一のレベルに位置している。一方、企業の開発課題は大学からは見え難く、大学の持つ基礎的な要素技術は企業が活用しづらい。そのためこれまで、両者の間の協力関係はやや限定的なきらいがあり、企業はアカデミアの基礎研究の成果が実用化に結びつくことに懐疑的で導入することにためらいが見られ、逆にトップレベルのアカデミアは企業の泥臭い課題に関わることで基礎研究が妨げられることを心配していた。しかし今回、両者が強力に連携した結果、アカデミアの基礎研究の成果

を導入した企業がブレークスルーに成功し、逆にアカデミアは企業の実用に近い課題の中から基礎研究として画期的な発見を果たすことができた。これにより、両者の意識が大きく変革したことも、本プログラムの大きな成果と言える。

ImPACT 終了後も、双方にとって産学連携の重要性は共通認識として定着すると予想している。

また本プログラムでは、若手研究者の交流、育成の観点で、年1回、1泊2日の若手研究会を企業とアカデミアが一緒になって行ってきた（参加者平均60名、内女性2～11名）。実際に亀裂進展機構の解明は、若手研究会での企業も含めた若手研究者の自由な議論によって培われたものである。特に、若手研究者の企業とアカデミアが一緒に夜を徹して議論するという機会は、通常はそれほど多くな
く、これらをきっかけにアカデミアと企業の交流が飛躍的に進んだ。このような産学連携の有効性を、将来の我が国の高分子分野を担う若手研究者が実感できた点は、基礎研究からイノベーションを生み出す継続的な仕組みとしてきわめて重要と考えられる。

⑨ <全体>更なる研究開発の発展や、我が国の産業競争力の強化、困難な社会課題の解決に向け、どれほどの貢献ができたか。

金属やセラミックと並ぶ3大材料と言われるポリマーは、軽い、薄い、柔軟という点に特徴があり、特に軽いという点は、モビリティに活用する場合に非常に大きな利点となっている。しかし通常の自動車ではポリマーの採用割合は、重量で10%程度に留まっている。その最大の理由は、ポリマーが金属やセラミックに比べて力学特性が劣り、信頼性に乏しいことが挙げられる。したがってポリマーのタフネス化は、モビリティの軽量化・信頼性・安全性を飛躍的に向上させる重要な研究開発課題である。

本プログラムでは、自動車の電池や車体構造分野で利用可能な新規なタフポリマーが実現できただけでなく、タフ化のための分子設計や材料設計指針が得られ、その産業適用性が検証できたという点が、ポリマー分野の更なる研究開発の発展や、自動車産業を含む我が国の産業競争力の強化、低環境負荷社会の実現という困難な社会課題の解決に貢献する重要な成果である。たとえば最近、海洋プラスチック問題の解決にバイオプラスチックが期待されているが、バイオプラスチックの弱点の1つとして、通常のオイルベースのプラスチックに比べて靱性が劣ることが指摘されている。そのような問題の解決に当たっても、本プログラムで得られたタフ化のための指針が有効に活用できると考えている。

- ⑩ <全体>目標通りの成果が得られなかった事例等の原因分析や解析が適切に行われ、そこから得られた知見や教訓を次の挑戦に活かすことができるか。失敗を通して次の挑戦につながる道筋は描けたか。

目標通りの成果が十分に得られなかった目標としては、「破壊予知・疲労寿命予測法の開発」が挙げられる。現在であれば本目標の実現には AI や MI の活用が有効と考えられるが、ImPACT 開始時点では MI は未だ注目されていなかった。本プログラムでは、プログラムの途中から破壊予知・疲労寿命の予測に MI を積極的に取り入れようと試みたが、そもそも MI で必要とされる破壊のデータベース自身が存在しないことが明らかになった。そこで本プログラムの期間内では、将来 MI を活用した「破壊予知・疲労寿命予測法の開発」を実現するための道筋として、高分子破壊標準データベースの構築に集中的に取り組むこととした。平成 30 年末の時点で、6 千件あまりのデータを蓄積している。本データベースに対して MI を適用すれば、本プログラムでは未達であった「破壊予知・疲労寿命予測法の開発」が実現できると考えられる。

(3) その他、ImPACT プログラム全体に対する所感・提言

通常の国のプロジェクトでは、申請時にメンバーがほとんど決まっているため、採択された場合にはメンバーの貢献を無視することが出来ない。そのために、プロジェクトの遂行中にメンバーを入れ替えることは通常の場合には難しく、プロジェクトリーダーの人事権は制限されている。これに対して ImPACT の場合には、採択されたのは PM のみで、構成メンバーは計画の作り込みとともに採択後に決めることになっている。これは、従来のプロジェクトにはなかった画期的な方法と高く評価している。この結果、過去のしがらみに左右されずに、プロジェクトの内容について頭を冷やして考えながら理想的な研究体制が構築できた。また各研究機関の予算についても、採択後に決めることができたことも予算を無駄なく有効に使う上で非常にやりやすかった。

ハイリスク・ハイインパクトな研究開発を進めると予想外の成果などが出てくるともあり、その結果として目標設定をよりインパクトの高いものに柔軟に変更した場合があった。ImPACT は基金であったため、予算の弾力的な運用が可能であり、このような場合に柔軟に対応できた点は高く評価できる。基金化は、ハイリスク・ハイインパクトな研究開発を進める上で、きわめて重要であると考えられる。

我が国トップレベルのアカデミアの協力を得るためには、PM に研究開発の実績がまったく無いと実際には難しい。マネジメント経験だけではアカデミアの貢献を十分に引き出すことは困難であり、PM がテーマ分野の専門性を有することは必須と

考えられる。一方、PMだけでなくPM補佐の選定も重要である。アカデミア出身のPMの場合には企業、企業出身の場合にはアカデミアなど、相補的な体制を組むことが産学連携を進める場合には望ましい。

研究機関・研究者のキャスティングについてのPM権限の適切な行使により、新しい産学連携の形態が生まれ、結果として予想以上の成果に繋がった。1対1の産学連携は、始めると止められないなど、成果が限定的となる面があるが、PM権限で研究開発ステージに合わせて、新規な連携のスタート、また改廃を行うことで、無駄なく、かつ挑戦的な取組みが可能となった。特にマトリックス運営による1対複数アカデミアの連携は、多角的なアプローチが可能となり、大きな成果に繋がることが判った。また、これまで連携の無かったアカデミア同士の学学連携も生まれるなど、総じてアカデミアの活性化にも繋がった。

企業プロジェクトの研究開発が進んでいくと、必要とされる技術の内容もそれに応じて変わってくる。本プログラムでは、必要に応じてアカデミアの研究機関の追加、変更などを行えた結果、臨機応変に適切なタイミングで必要な技術を提供することができた。これが技術上のブレークスルーに繋がったことから、企業からの評価もきわめて高い。

研究開発の進行管理は、小まめな進捗状況の把握が問題点を早期に発見する上できわめて重要である。特に頻繁なサイトビジットで現場の若い研究者から実際の研究内容を直にヒアリングしたことは、双方にとって大いに有効であった。

本プログラムでは、社会実装に向けた取り組みとしてコンセプトカーの製作や自動車以外の応用分野のプロトタイプの試作を行った。数値目標の達成だけでは、国民目線でインパクトの高い成果とは中々理解していただけないと考えた。実際にコンセプトカーを製作することで、プロセスの問題を解決する必要性が生じることから、実用化の加速にもつながった。このように社会実装を進める上で、成果のプロトタイプを作製して見せることは有効であった。これにより、ハイインパクトな成果を多くの一般国民が実感することができたと考えている。

アウトリーチ活動を積極的に行うために、メディアやHPなどを積極的に使うことが重要である。

大臣が出席される推進会議、CSTI本会議のプレゼン機会は、プログラム参画機関のモチベーション向上に繋がり、きわめて有意義であった。