

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）

「超高機能構造タンパク質による素材産業革命」

平成31年4月5日

P M 名：鈴木 隆領

P M補佐名：村田 真也

：後 圭介

1. 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

- ・原料を枯渇資源に頼った産業構造からの脱却

現在、汎用的に使用されている素材の多くは石油や鉱物等の枯渇資源に依存している。本プログラムで実用化を目指す「クモの糸」に代表される構造タンパク質素材は微生物を用いた発酵培養により生産が可能であるため、枯渇資源に頼らないものづくりが可能となる。

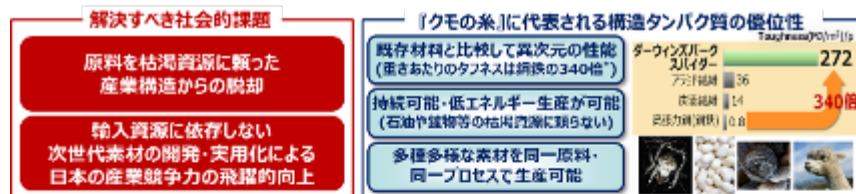
- ・次世代素材の実用化による日本の産業競争力の飛躍的向上

構造タンパク質の実用化は世界中の企業及び大学・研究機関が取り組んでいるが、実用化を達成した組織は未だ存在しない。本プログラムを通じて構造タンパク質素材に関する研究開発を加速させ、資源制約が大きい日本こそが世界に先駆けて実用化を達成することによって、日本の産業競争力を飛躍的に向上させる。

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

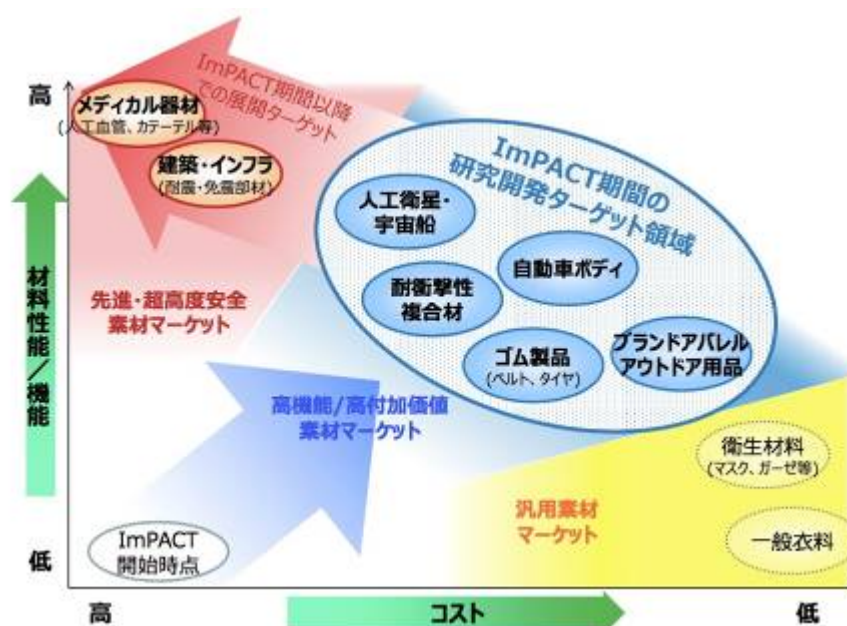
重さあたりのタフネスが鋼鉄の約 340 倍を誇る「クモの糸」に代表される構造タンパク質は、既存材料と比較して圧倒的な性能を持ち、原料を石油等の枯渇資源に頼らず生産が可能であり、次世代の基幹素材となり得る巨大なポテンシャルを秘めるが、実用化の技術的障壁が高く、産業的に未開拓分野である。

本プログラムでは、世界的にも未開拓分野となっている人工構造タンパク質素材の設計・製造技術、及び構造タンパク質素材を工業用材料として使いこなすための加工技術を確立することにより、環境対応と高機能を両立するサステイナブルな新世紀型ものづくりを実現し、構造タンパク質素材による新産業の創出を図る。



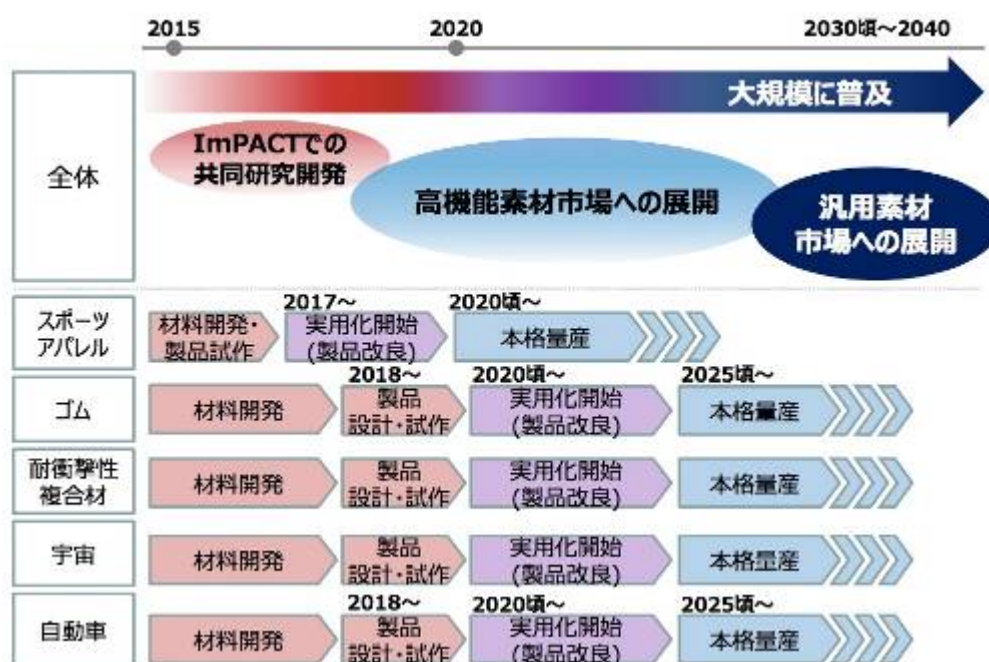
③ 出口目標及び出口に至る将来的なシナリオ

本プログラムでは、ImPACT 終了までに天然クモ糸の最高物性を上回る人工構造タンパク質素材の設計・製造の実現を目指し、それと同時進行で開発した人工構造タンパク質素材を工業用材料として適用するための加工技術開発及び製品化試作を進める。材料開発の用途ターゲットとして、まずは高機能・高付加価値な次世代素材としてのニーズが見込まれる①アウトドアアパレル、②ゴム製品、③耐衝撃性材料、④人工衛星、⑤自動車ボディの5領域にフォーカスした開発を進め、基盤技術の構築及び知財の創出・蓄積を推進する。



ImPACT 終了以降も ImPACT で達成する研究開発成果を元に人工構造タンパク質素材の生産スケールアップと新素材を用いた実用化・製品改良を進化・深化させ、①アウトドアアパレル領域においては 2021 年頃からの本格量産開始、その他領域は 2025 年頃からの本格量産開始を目指す。また、5 領域以外の産業分野へも順次研究開発を展開させていく想定である。

プログラム開始当初はアパレル領域においては 2017 年度より実用化・製品試作を開始する予定であったが、構造タンパク質素材の水への感受性（耐水性）への対応等に時間を要したため、2018 年度から取り組むこととなった。その他の産業領域において変更は無い。



プログラム開始当初のロードマップ



変更後のロードマップ

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



課題①：アミノ酸配列の組み合わせが無量大である

タンパク質は20種類のアミノ酸配列が連結することで機能を発現するため、20の n 乗の組み合わせが考えられる。これらの膨大な組み合わせの中から個別のトライアンドエラーにより有用なアミノ酸配列を同定することは容易では無い。

成功の鍵：世界初の天然構造タンパク質データベースの構築・活用

天然に存在する構造タンパク質の中から高機能・高物性を発現するものを収集し、遺伝子配列解析及び構造解析の結果を統合化・集積することにより、構造タンパク質の高機能発現メカニズムの分析に活用する。これまでに収集したタンパク質素材の解析結果から様々な知見が得られており、特に耐水性においては解析結果を分子設計にフィードバックすることによって、水接触時の収縮を大幅に低減（約90%低減）する等、素材の性能を向上させることができた。今後もデータを拡充していくことで様々な物性発現メカニズムに関する更なる知見を得ながらアミノ酸配列の設計に活かしていくことが可能であると考えている。

課題②：工業用材料として構造タンパク質素材を適用する事例・知見が乏しい

現在使用されているウールやシルク等の天然の構造タンパク質素材は、天然素材であるがゆえに均質性の担保が難しく、また化学繊維等と比較して耐熱性等の基本性能が不十分であるなどの課題があり、これまで衣料用以外での工業用材料化するための技術開発が進んでこなかった。

成功の鍵：分野横断的なフィードバック体制による素材性能の作りこみ

天然の構造タンパク質素材の解析から得られた知見に基づき、人工的な構造タンパク質素材の設計・生産からその素材を工業用材料として使いこなすための評価・加工技術開発までを同時進めかつ分野横断で課題抽出～問題解決のフィードバックを迅速に繰り返すことにより、天然の構造タンパク質素材を上回る性能を持ち且つ工業用材料利用に適合する人工構造タンパク質素材をいち早く創出することを目指す。

(2) 研究開発プログラムの達成目標

本プログラムの PJ1 及び PJ2 で設定している達成目標を以下に記載する。

【PJ1：大規模ゲノム情報を活用した超高機能タンパク質の設計・製造】

- Ø 引張り強度：800MPa（変更前 1.6GPa）、タフネス：100 MJ/ m³（変更前 354MJ/ m³）、耐熱性：150℃以上、耐候性：10 年保持、繊維径の均一化

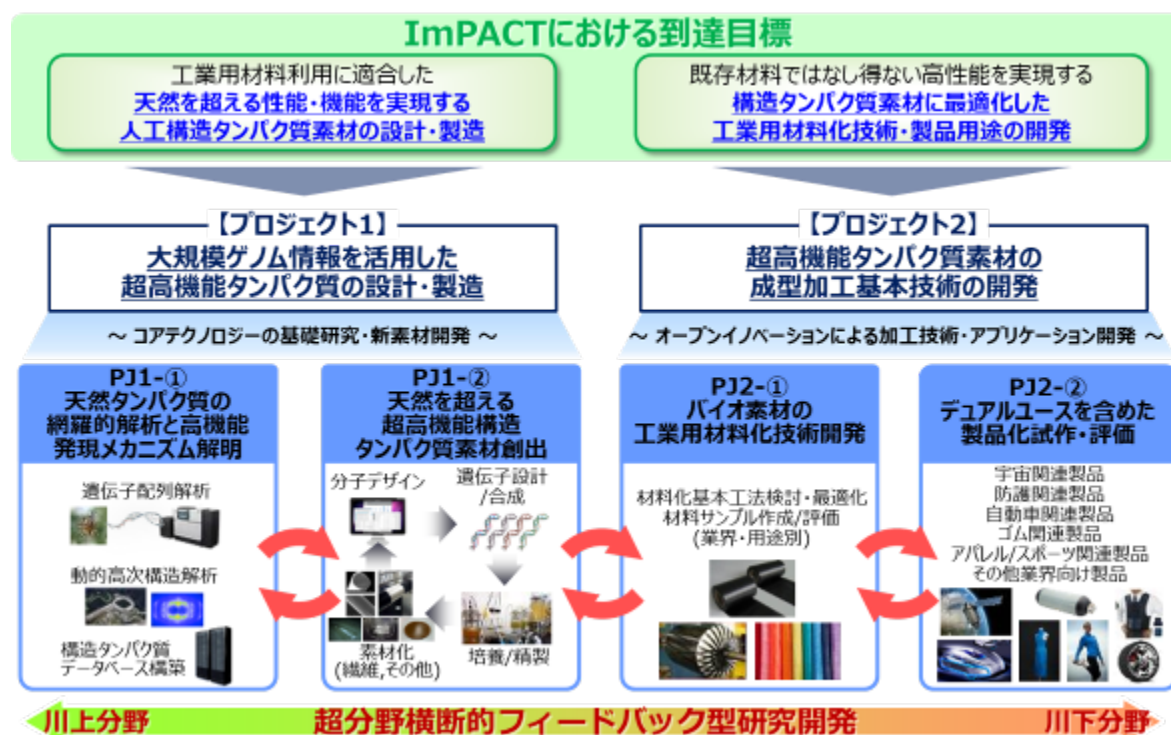
※ 当初は天然クモ糸の最高物性を目標としていたが、各産業領域における研究開発を通じて、800MPa・100MJ/ m³でも素材としての競争力を十分に担保できることが分かったため、目標を変更した。

【PJ2：超高機能タンパク質素材の成型加工基本技術の開発】

- Ø アウトドアアパレル：製品実用化(保温性能 PET 比 400%向上、天然繊維より細い繊維径(15μm 以下))
- Ø 自動車ボディ：次世代自動車ドアパネル原理試作品作製（軽量化 70%）
- Ø ゴム製品：産業用ベルト原理試作品作製（ベルト伝動効率 10%向上）
- Ø 耐衝撃性材料：防護用ヘルメットの原理試作品作製（軽量化 20%）
- Ø 人工衛星：人工衛星向け電池・アンテナ筐体試作（軽量化 30%）

※ () 内の性能値等は既存製品と比較した値

(3) 研究開発プログラムの全体構成図

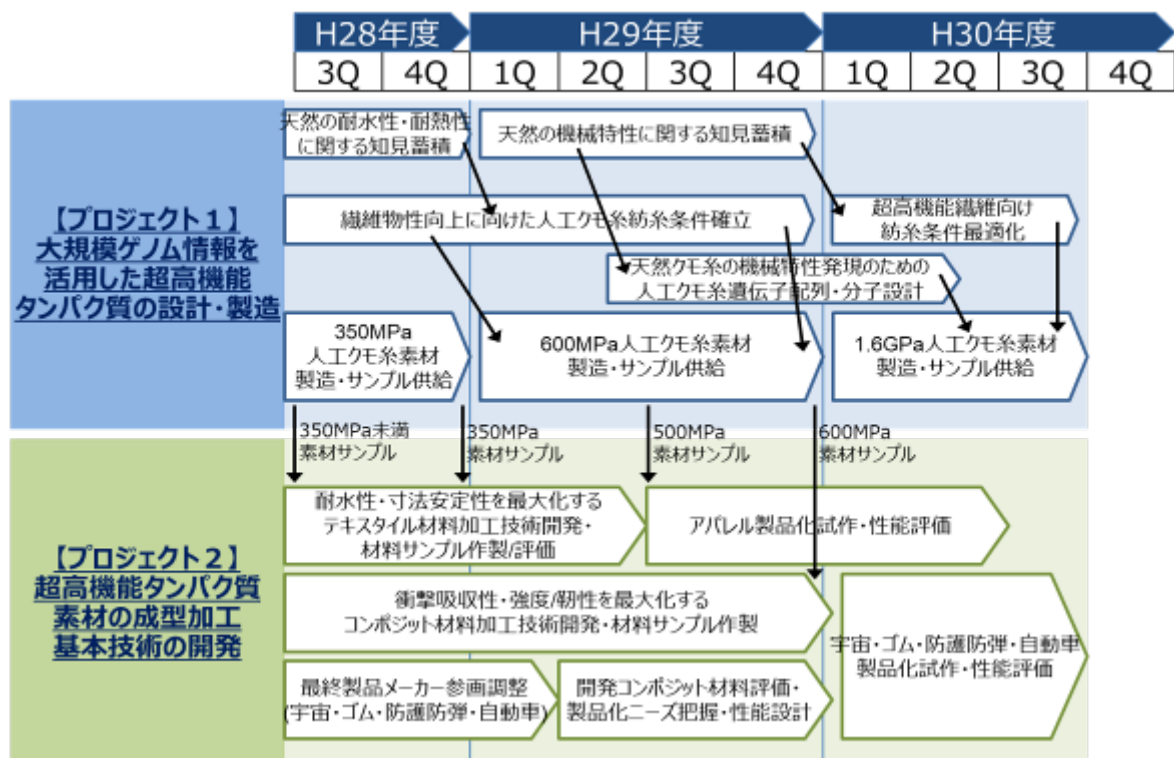


(4) 具体的な取組

プロジェクト1 名称	大規模ゲノム情報を活用した超高機能タンパク質の設計及び製造
研究開発の概要	高機能構造タンパク質素材を産生する生物から、当該素材及びその遺伝子を網羅的に取得し、基本的な成分分析や構造解析を行いデータベース(DB)化、さらに高機能を発現する分子メカニズムを解明し、それらの知見・データを活用して天然を超える「超高機能タンパク質素材」の創出を試みる
研究開発の目標	①天然高機能タンパク質素材の網羅的解析と高機能発現メカニズムの解明 Ⅰ 天然高機能構造タンパク質素材の取得： - è 国内及び海外よりシルク関連を中心に1,000種類以上取得/解析/DB化 - è 遺伝子、アミノ酸配列、基本的な成分分析結果、二次構造解析、結晶化度、配向度等 Ⅱ 高機能発現メカニズムの解明： - è 構造・機能解析技術の確立、それによる解析200サンプル ②天然を超える超高機能構造タンパク質素材の創出 Ⅰ 将来を見据えた高効率生産プロセスのサーベイと実現可能性の理論的実証 Ⅱ 引張り強度：800MPa (2018年10月に変更する前 1.6GPa)、タフネス：100 MJ/m³ (2018年10月に変更する前 354 MJ/m³)、耐熱性：150℃以上、耐候性：10年保持、繊維径の均一化

プロジェクト2 名称	超高機能タンパク質素材の成型加工基本技術の開発
研究開発の概要	構造タンパク質を産業的に利用する上で不可欠な要素技術の開発及び既存材料ではなし得ない圧倒的性能を実現する複合材料の試作、及び実現可能性検討を行なう
研究開発の目標	①バイオ素材の工業用材料化技術開発 Ⅰ 長繊維を利用した複合化 (オートクレーブ、プリプレグ、フィラメントワインディング、テキスタイル、不織布等)： è 特定の性能で既存材料を上回るサンプル作成 Ⅰ 短繊維を利用した複合化（射出成型、圧縮成型等）： è 特定の性能で既存材料を上回るサンプル作成 ②デュアルユースを含めた製品化試作・評価 Ⅰ アウトドアアパレル： アウトドアアパレル製品の実用化 è 保温性能 PET比400%向上、天然繊維より細い繊維径(15μm以下) Ⅰ 自動車ボディ： 次世代自動車ドアパネル原理試作品作製 è 軽量化 70%、室内空間容積20%向上、衝撃吸収値50%向上 Ⅰ 人工衛星： 人工衛星向け電池・アンテナ筐体試作 è 軽量化 30% Ⅰ ゴム製品： 産業用ベルト原理試作品作製 è ベルト伝動効率 10%向上、高タフネス化によりベルト幅半減 Ⅰ 耐衝撃性材料： 防護用ヘルメットの原理試作品作製 è 軽量化 20%

(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

領域	達成目標	平成 26年度 (7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)
PJ1-①	天然構造タンパク質素材 の取得件数 (※各年の件数は累計)	50	250	500	1,000	
	構造タンパク質の構造・ 機能解析サンプル件数 (※各年の件数は累計)	10	50	100	200	
PJ1-②	人工合成タンパク質素 材 の目的物性と次工程 供給量の達成		- 強度:350MPa - バネ率:10%以下 - 繊維径: 20μm以下 - 生産量: 数kg/Lot	- 耐熱性:150℃ - 生産量: 数十kg/Lot		- 強度:800MPa - タネ:100MJ - 繊維径: 15μm以下 - 生産量: 数百kg/Lot
PJ2-①	バイオ素材の工業用材 料化技術の開発		テキスタイル 不織布	オートクレーブ プロパレグ フィラメントワイピング SMC/BMC 圧縮成型		
PJ2-②	製品化試作・評価					製品試作として 目標性能達成

(7) 研究開発プログラム実施期間

平成26年10月1日から平成31年3月31日まで(4.5年間)

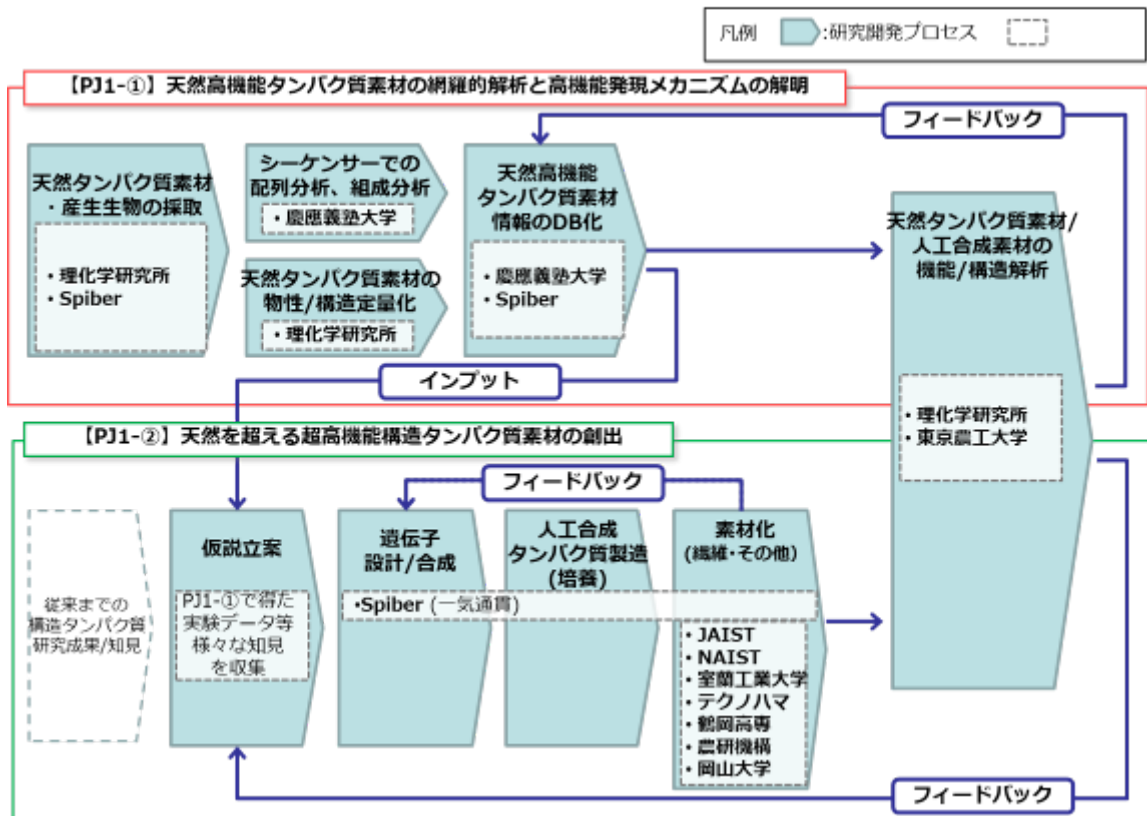
2. 研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果

(1) PJ1: 大規模ゲノム情報を活用した超高機能タンパク質の設計及び製造

① プロジェクトの計画

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
① 天然高機能タンパク質素材の網羅的解析と高機能発現メカニズムの解明	○ クモ類、昆虫類のシルクを中心に、天然に存在する高機能構造タンパク質を実際に収集し、基本的な組成分析や構造解析、物性測定を行なうとともに、対象生物より遺伝子情報を取得し、タンパク質の配列を決定し、データベース化を進める。 ○ さらに、高機能発現のメカニズムを解明するためのin-situの分析技術を確認して解析をすすめ、高機能発現のメカニズムを解明する。それらの詳細解析のデータも含めて構造タンパク質の統合データベースを構築し、新素材開発に活用する。
② 天然を超える超高機能構造タンパク質素材の創出	○ ①で蓄積された知見及び構築されたデータベースの情報を活用し、天然を上回る性能を発揮することが可能な超高機能構造タンパク質を創出する。 ○ ①で蓄積された多角的な分析手法のノウハウを駆使し、当該高次構造を実現可能な紡糸加工技術を開発するとともに、生産性と高性能を両立する人工遺伝子を設計、合成、分析、評価を繰り返すフィードバックシステムの両輪で開発を進めることで、天然を上回る性能と高い生産性を両立する実現する次世代超高機能素材を開発する。

② プロジェクトの体制



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

・PJ1-①

天然の構造タンパク質素材からの遺伝子配列データ及び構造解析データの収集は計画通り進んでおり、当初の目標としていたサンプル数を予定通り達成できる見込みである。また、世界初の構造タンパク質データベースの構築も予定通り完了した。データベースから得られた知見の活用も進んでおり、既に耐水性についてはPJ1-②へのフィードバックが完了し、新たな分子設計・合成に繋がっている。

・PJ1-②

人工構造タンパク質素材の生産量については計画通り順調に拡大を進めながらPJ2側への素材サンプルも順次供給を進められている。また、PJ1-①側での天然構造タンパク質素材の組成分析や構造解析から得られた知見やPJ1-②側で得た構造タンパク質の劣化メカニズムに関する研究成果に基づき、耐水性が大幅に向上した新規分子の設計・合成を達成する等、着実に成果を上げている。

現状、課題となっているのは構造タンパク質繊維の機械的特性（強度及びタフネス）の向上である。本プログラムでは汎用素材として実用化を達成することを目的としているため、コスト（生産性）と性能のバランスを取る必要があるが、機械的特性を向上させるための分子設計（例えば結晶領域の増加など）を行なった場合、タンパク質の生産性が低下することが分かった。この課題を解決するためには、分子設計と生産性及び機械的特性の関係を明らかにする必要がある。また、構造タンパク質繊維の機械的特性には、繊維中の結晶化度や結晶配向度等のパラメータが関わっているが、これらのパラメータは繊維の紡糸条件によって変動する。そのため、分子設計と並行して、設計した分子に最適な紡糸条件の検討に取り組む必要がある。

<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
4（研究室レベルでの技術実証）	6（実証・デモンストレーション） 以下に参考となる数値を記載する。 （いずれも開始時との相対値） ・構造タンパク質原料生産効率：14 倍 ・構造タンパク質原料費：95%減 ・構造タンパク質繊維生産量：60 倍 ・繊維強度：5 倍（ラボスケール）

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

<獲得成果の革新性>

発酵培養によるタンパク質の生産性について、一般的な生産効率の10倍以上の効率で生産することが可能となった。また、培養条件及び精製条件の検討の結果、構造タンパク質生産に関わる原料費の大幅な削減（95%減）を実現した。繊維の強度については目標値が未達の状態ではあるが、生産スケールや耐熱性等については製品試作が可能な水準を達成した。

<獲得成果の独創性>

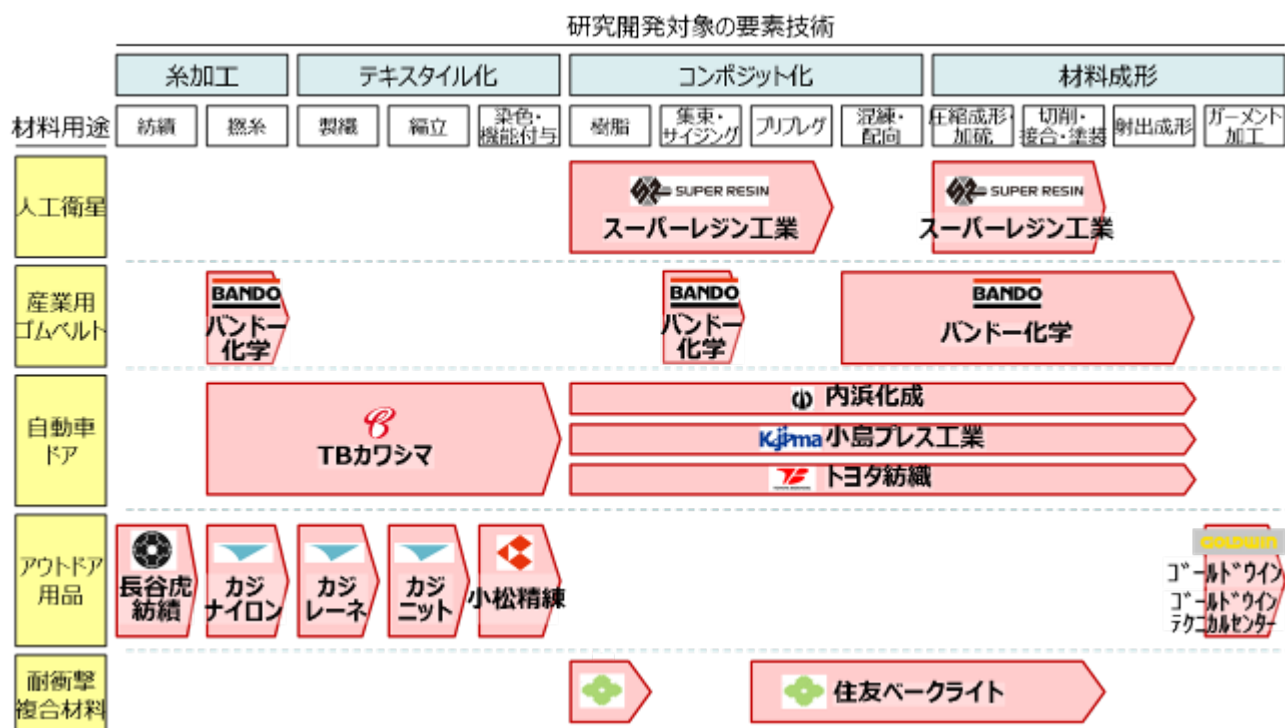
本プログラムで生産しているタンパク質は高分子量のものがほとんどであるが、そのような高分子量のタンパク質を上述のような高効率で生産した事例は無い。また、構造タンパク質繊維の生産においても、コスト及び生産性において、他の企業・アカデミアでは実現していないレベルに到達していると考えている。

（２） PJ2 超高機能タンパク質素材の成型加工基本技術の展開

① プロジェクトの計画

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
① バイオ素材の加工技術及び複合化技術の開発	- Ø 他材料との複合化検討など、タンパク質を産業的に利用するための基礎となる要素技術の開発を行なう。 - Ø プロジェクト前半では超高機能タンパク質素材が開発途上であるため、絹糸等類似している既存のタンパク質素材などを用いて先行的に技術開発を進める。
② デュアルユースを含めた製品化試作・評価	- Ø ①②で開発された基盤技術を活用し、既存材料ではなし得ない圧倒的性能を実現する複合材料の試作、及び実現可能性検討を行なう。 - Ø 全産業に用途開発の公募をかけ、選定されたチームが本PJ中核事業体と共同開発契約を結び、構造タンパク質材料の供給を受け、用途別に開発を行う。

② プロジェクトの体制



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

・PJ2-①

加工技術開発の取り組みとして、構造タンパク質繊維を用いた紡績糸の開発及び編み・織りによるテキスタイル開発に取り組み、紡績糸や生地についてPJ2-②製品化試作を通じた性能評価を実施した。具体的には撚りの保持性、引っ張り強度、摩擦耐性、発色性、耐候性等の評価を行い、製品のスペックに反映すると共に、PJ1側にフィードバックした。

複合化技術開発においては、各種樹脂に対して構造タンパク質繊維を添加することによって、強度、弾性率、伸度を同時に向上させることに成功した。具体的には既存の複合材(CFRP)と比較して、構造タンパク質繊維+CFRPからなる新規複合材は強度が32%、弾性率が21%、伸度が45%向上した。また、SMCやプリプレグ等、最終製品に応じた様々な複合化手法の開発に取り組み、技術的な優位性が確認された工法については特許出願を行なった。

・PJ2-②

PJ2-①で開発した加工技術及び複合化技術を活用し、製品化試作に取り組んだ。特にアパレル領域においては、最終製品を想定した試作品の作成が完了しており、上市に向けた評価を進めている。複合材においてはテストピース(試験片)を用いた評価試験が完了し、製品試作に向けた設計に取り組んでいる。

＜研究開発の進展状況＞

プロジェクト開始時のT R L	プロジェクト終了時のT R L
1（基本原理・現象の発見） 以下に研究開発の進展について追記する。 1. 紡績糸の製造は不可能であった。 2. テキスタイルの製造は可能であったものの、耐水性及び発色性に課題があった。 3. 複合材の作成は不可能であった。	5（想定使用環境下での技術実証） 1. 紡績糸の生産体制を確立した。 2. 耐水性を 90%低減すると共に、製品試作が可能な発色性を実現する染色方法を見出した。 3. 世界初の構造タンパク質複合材の作製を実現し、既存の複合材よりも優れた機械的特性を有することを確認した。

④競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

＜獲得成果の革新性＞

紡績糸及びテキスタイル開発においては、以前より絹糸を用いた加工及び製品販売が行われていることから、ある程度確立された技術が存在するものの、人工的に設計・生産した構造タンパク質繊維の加工は前例が無いため、加工技術の最適化を行なった。

複合材開発については、過去に例がない取り組みであるため、構造タンパク質繊維の性状や処理条件、複合化時の加工条件について詳細な検討を行った結果、構造タンパク質複合材を作製することに成功した。

＜獲得成果の独創性＞

人工構造タンパク質素材の加工技術及び複合化技術の開発に関しては、その多くが全く新しい取り組みであるため、20 件を超える特許の出願に繋がっている。特に複合材開発においては、他繊維とは性質が大きくことになっており、添加する繊維の性状によって複合材の性能が大きく変わることを見出す等、過去の知見に囚われない研究開発に取り組めたと考えている。

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）

・PJ1

① 構造タンパク質データベースの構築

構造タンパク質素材の物性発現メカニズムの解明を目的として、天然構造タンパク質素材（天然クモ糸）の網羅的な収集を行い、遺伝子配列解析及び構造解析を実施した。最終的には1,533個体を採取し、ユニークな種数として1,000サンプル（雌雄別885サンプル）を超える遺伝子配列を取得すると同時に、200サンプルを超える構造解析データを取得し、データベースの構築を行なった。本データベースを活用することで、クモの紡糸機構の解明や、耐熱性・耐水性と遺伝子配列（アミノ酸配列）に相関解明等、様々な知見を得ることができた。

② 構造タンパク質繊維の量産化・物性向上

構造タンパク質素材を産業用材料として使用するためには、量産化と物性向上が必須であると考えており、これらの研究開発に取り組んできた。その結果、ImPACT開始当初と比較して、生産スケールが拡大し、原料となるタンパク質の生産効率で14倍、繊維生産量で60倍を達成した。また、更なる大規模化に向けた技術・知見も蓄積しているため、引き続き研究開発に取り組み、将来的な製品開発に向けた材料供給体制を構築する想定である。一方、物性向上については、ImPACT開始当初と比較すると強度は5倍となったが、当初の目標は未達となっている。その原因となっているのが、「構造タンパク質の生産性と物性のトレードオフ」である。構造タンパク質繊維の物性（特に高強度化）においては、結晶領域の設計が重要になるが、結晶化が進みやすい設計にした場合、微生物による生産性が大きく低下してしまうことが分かった。そのため、このトレードオフを解消するための研究開発に取り組んでいるが、研究開発期間内での目標達成は難しいと考えている。

③ 構造タンパク質樹脂・フィルムの開発

本プログラムでは構造タンパク質素材の形態として繊維を主軸に置いた研究開発を進めてきたが、様々な用途に対応することを目的として樹脂やフィルムの作成についても取り組みを行なった。その結果、TPI（熱可塑性ポリイミド）に匹敵する曲げ強度を有する樹脂の開発や、連続的にフィルムを生産する技術の開発を行なった。

・PJ2

① 構造タンパク質の複合化技術開発

出口戦略の一つとして自動車ドアパネルや人工衛星用部材等を想定し、構造タンパク質繊維と樹脂との複合材の開発に取り組んだ。当初は「構造タンパク質繊維＋樹脂」という構成で研究開発に取り組んでいたが、既に市場で採用されている FRP（繊維強化樹脂）の一つである CFRP（炭素繊維強化樹脂）に関する調査の結果から、脆性等の CFRP が抱える課題が明らかになったため、「構造タンパク質繊維＋炭素繊維＋樹脂」という構成の新規複合材の研究開発もターゲットに加えることとした。その結果、既存の CFRP の機械的特性（強度、弾性率、伸度）を向上させる新規複合材の開発に成功した。新規複合材の内部破壊挙動の観察結果からも、内部破壊の低減が確認されており、複合材としての信頼性が上がっていることが分かった。また、自動車ドアパネルについては製品化試作も実施しており、実製品を想定した加工・評価等に取り組んでいる。

② 構造タンパク質テキスタイルの加工技術開発

構造タンパク質繊維を用いたアウターウェア及びインナーウェアの開発に向けて、これらの製品で用いられる紡績糸やフィラメント糸、テキスタイルの加工技術開発を行なった。具体的には撚糸条件・紡績条件・布帛化条件・精錬条件・染色条件・後処理条件（耐水性・耐光性向上）について検討を行い、アウターウェア、インナーウェアの試作を行なった。既存の繊維とは特性が異なるため、前述のいずれの工程においても知財やノウハウが蓄積しており、戦略的に特許出願を行なっている。試作品のフィールドテストや各種品質検証なども踏まえ、早期の製品上市に向けた準備を進めている。

（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

	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	(531)	10	112	127	141	(141)
協力企業数 ※	21	1	16	16	19	(19)

注：（ ）は見込み数

※ 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	約 70 報	0	19	23	27	(20)
うち IP ファクター 10 以上	0	0	0	0	0	(0)

注：（ ）は見込み数

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	200	0	55	82	84	(50)
学会賞等の受賞数		0	8	4	0	(0)

注：（ ）は見込み数

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	20	0	9	8	15	(5)

注：（ ）は見込み数

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	100	0	13	28	53	(25)
海外	10	0	0	3	3	(4)
合 計	110	0	13	31	56	(28)

注：（ ）は見込み数

⑥ 知財・標準化等の取組状況

本プログラムをオールジャパン体制で推進していく上で、ImPACT 期間中及び終了後も含め企業・研究機関で知財面でのコンフリクトが起きない共同研究開発体制作り、さらに技術標準化の推進・技術戦略の一元管理を目指した知財管理の枠組みの構築を進める。具体的には、コンソーシアムを構築し、ImPACT で創出した技術及び知財を集約することで、新素材の普及・産業展開を促進する。

また、上述のコンソーシアムに参画している企業・アカデミアが主体となり、人工構造タンパク質素材に関する標準化・規格化についても取り組みを進めている。

⑦ アウトリーチ等の状況

	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	3	3	3	1	(3)
新聞、TV等の報道数		0	88	50	61	(50)

注：（ ）は計画数

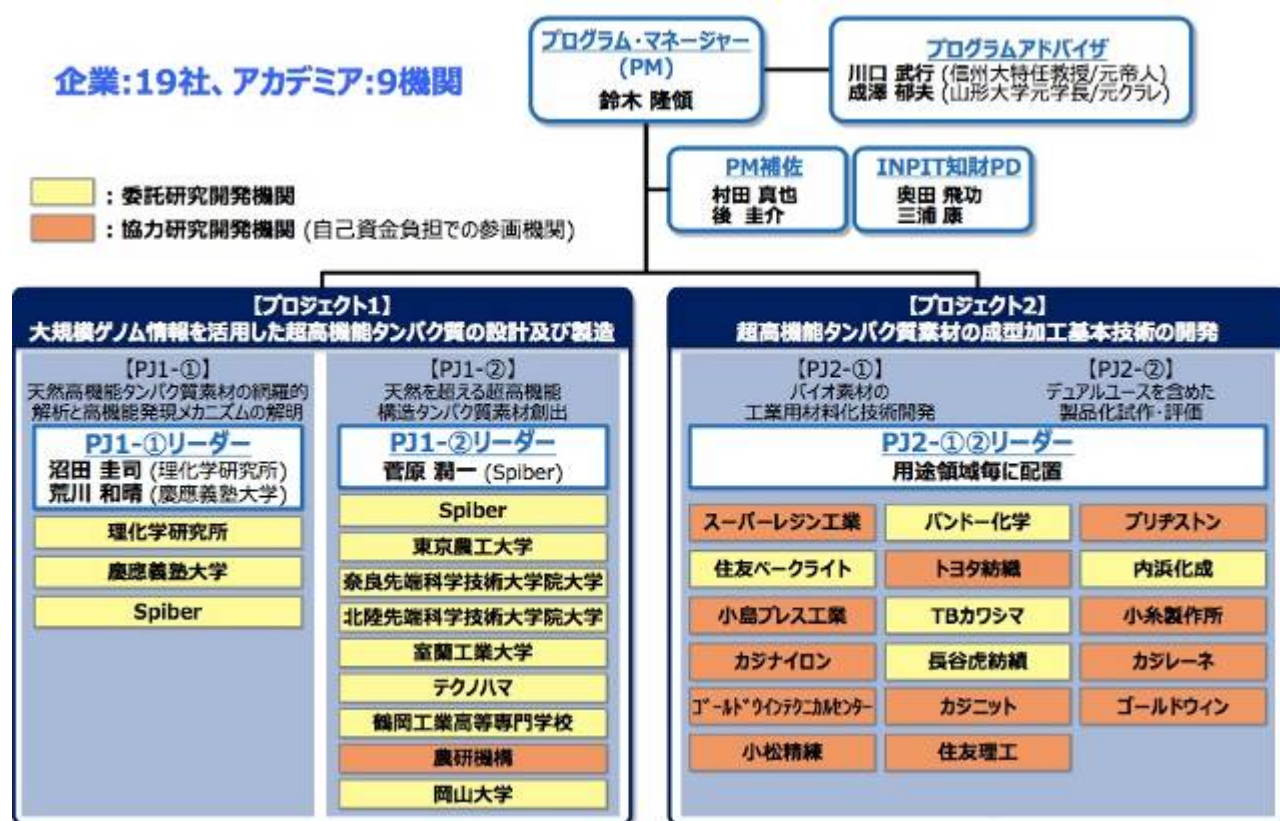
⑧ その他特筆すべき取り組み

該当なし

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
プロジェクト 1	331,012	715,868	531,856	462,904	187,204
PJ1-① 天然高機能タンパク質素材の網羅的解析と高機能発現メカニズムの解明	274,000	231,000	201,000	202,510	0
PJ1-② 天然を超える超高機能構造タンパク質素材の創出	57,012	484,868	330,856	260,394	187,204
プロジェクト 2	0	206,863	414,012	150,281	0
PJ2-① バイオ素材の工業用材料化技術開発	0	206,863	414,012	150,281	0
PJ2-② デュアルユースを含めた製品化試作・評価(※)	0	0	0	0	0
研究開発費合計	331,012	922,731	945,868	613,185	187,204

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

	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
運営会議等の開催数	1	2	2	1	2
研究開発機関等の訪問回数	15	50	80	100	90

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

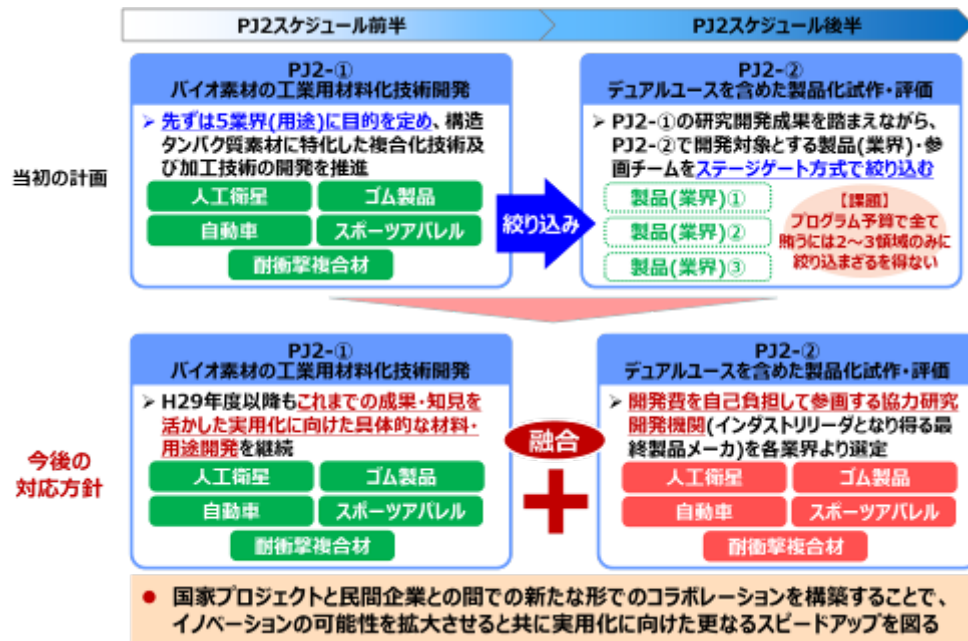
本プログラムの最終目標である構造タンパク質素材・材料の実用化を達成する上では、製品化に向けたニーズや性能要件・評価方法等に精通している各業界の最終製品メーカーとのコラボレーション・連携が必要不可欠である。そこで、構造タンパク質素材・材料の実用化に向け積極的に取り組む意欲を持つ企業・メーカーの参画を促進することを目的として、従来の枠組みである委託研究開発機関としての参画方法に加えて、より柔軟に本プログラムでの研究開発に参画・貢献できる方法として協力研究開発機関という枠組みを新たに設定した。協力研究開発機関は研究開発費を自己負担して本プログラムへ参画し、委託研究開発機関と連携することによって、構造タンパク質素材の実用化を加速させることを目指す。

③ 研究開発機関等の評価及び追加変更の状況

	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
参画研究機関数	3	24	25	28	28
参画研究者数	9	174	200	214	214
うち中止（解任）	0	0	6	14	5
追加（新任）	0	165	32	28	5

④ 「選択と集中」に向けた取り組み

本プログラムの当初の計画では、まずは5つの業界・用途領域において材料化技術開発を進め、その進捗状況に応じてそのうち3つ程度の領域に絞り込んで製品化検討を進めることを想定していたが、これまでのPJ2-①各領域での進捗状況も鑑みた上、構造タンパク質素材・材料の適用可能性を拡大することを目的として、5領域全てにおいて製品化検討まで引き続き進める方針に見直しした。また、それに伴い前述の協力研究開発機関という枠組みを新たに設定し、参画企業が研究開発費を自己負担することで、5領域全てについて研究開発を継続するための予算を維持できるよう調整した。



(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

本プログラムを通じて得られた成果及び取得した特許群は、今後継続的に人工構造タンパク質素材の普及・用途拡大を実現していく上で適切に管理される必要がある。そのため、ImPACT終了以降も本プログラムで創出された関連知財群の継続的な管理・活用を目的とした管理運営団体を新たに設立し、構造タンパク質素材による新産業の持続的な発展に向けてライセンス管理等を一元的に行う枠組みの構築を目指す。

② 今後の方針と具体的な取り組み計画

実用化を進める上で適切なタイミングを検討し、適宜アウトリーチ活動を実施する。2019年2月に開催する最終成果報告会では、実製品を想定した試作品を作成し、ユーザとなる一般消費者が実用化した際のイメージを分かりやすく伝える。

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。

- ・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。
- ・戦略の実現に向けた課題が整理・明確化されたか。
- ・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は存在したか。
- ・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。
- ・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。
- ・知財・標準化戦略は明確かつ適正か。

新規素材である構造タンパク質素材の実用化に関する取り組みは、社会に変革をもたらす挑戦であると考えているが、ImPACTの研究開発を通じて、構造タンパク質素材の設計や解析、生産から実用化を想定した加工技術開発・製品化試作に取り組み、多くの研究成果が得られたと考えている。H29年度からは参画企業の一部が資金を自己負担で研究開発を継続する等、産業化に向けて前向きに取り組んでもらうことができた。

研究開発機関間での情報共有も活発に行われており、特に耐水性等の技術的な課題については、プロジェクトを跨いで会議を開催し、対応を検討した。その結果、構造タンパク質データベースから得られた知見を活用し、構造タンパク質繊維の生産～最終製品の設計・試作まで一気通貫で進めることができた。

ImPACTの研究開発を通じて、100件を超える特許出願が行われたが、ImPACT終了後もこれらの特許の管理・活用を行うことを目的として、知財管理団体を設立した。今後は当該団体を軸に知財管理や標準化に向けた活動を進める想定である。

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。

派生的な効果の例として、構造タンパク質繊維とCFRPとの複合化に関する成果があげられる。計画立案時においては、既存の樹脂に構造タンパク質繊維のみを添加することを想定していたが、先行研究を調査する中で既存のCFRPに関する課題が明確になったことから、CFRPに構造タンパク質素材を添加し、「樹脂＋炭素繊維＋構造タンパク質繊維」という構成に取り組むようマネジメントを行い、大きく舵を切った。その結果、既存のCFRPの物性を大幅に向上させることに成功し、現在は自動車の最終製品メーカーの設計チームと連携し、具体的な車型を想定した製品開発を進めている。

（２）PM自身の活動（プログラム・マネジメント）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。

PJ1 及び PJ2 の目標設定について、妥当であったと考えている。いずれのプロジェクトにおいても、当初想定していた目標を達成することができ、産業化に繋がる成果が得られた。PJ1 の構造タンパク質素材の物性目標（強度、タフネス）については、プロジェクト開始当初から、難易度の高い目標であることは認識しており、結果的には達成困難な状況ではあるものの、目標達成に向けた研究開発を通じて多くの知見を得ることができたため、前向きに捉えている。

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。

研究開発を通じて技術的な課題が生じた場合は、プロジェクトの垣根を超えて打ち合わせに参加してもらい、様々な観点から課題解決に向けた提案をしてもらう等、分野横断的なコミュニケーションが取れる体制を構築した。その結果として、複数の特許について異業種間による共同出願が行われた。

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。

構造タンパク質素材の実用化に関する研究開発は世界各国で行われているため、定期的に特許調査を実施する等、競合他社の研究開発動向について調査してきた。調査の結果を踏まえ、海外の競合他社では解決されていない構造タンパク質素材の水への応答性（水接触時の収縮）について集中的に研究開発に取り組み、収縮率を大幅に低減（研究開発当初と比べて 90%減）させることに成功した。また、競合他社が取り組んでいないゴム分野においては、当初、タイヤ向けのゴム複合材開発を想定していたが、安全性等の観点から長期間に渡る研究開発が必要と判断し、より短期間で製品化に繋がる可能性の高い自動車シート用ウレタンパッドの研究開発にも取り組んだ結果、商品化の目処付けができるまでに至った。本プログラムにおいては適宜、研究開発の方向性について検討・方向転換を行うことで、社会実装への道筋をつけられたと考えている。

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。

本プログラムにおいては、研究開発の初期段階から各産業の最終メーカーを参画させ、素材に求められる性能や加工技術に関する情報を入手し、構造タンパク質の遺伝子設計・合成にフィードバックしている。その結果として、産業界が求める材料性能（耐水性・耐熱性・密着性）が達成されたことから、ほぼ全ての企業が早い段階から自己負担で ImPACT に参画する等、積極的に研究開発に取り組んでもらえたと考えている。

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。

ImPACTの研究開発を通じて得られた知財をImPACT終了後も分散させることなく一元管理し、活用しやすくするための「知財コンソーシアム」を立ち上げ、継続的なオープンイノベーションが促進され、産業展開されることを目指すべく、パテントポートフォリオの構築・管理を進める体制を構築した。ImPACT終了後もImPACTの成果である知財群を有効活用していくことで、ImPACT参画機関だけでなくその他の産業界・アカデミアも巻き込んだ継続的な研究開発を後押しし、さらにそこで創出された新たな知財群までを管理する枠組みを整備したことにより、今後の社会実装が円滑に進められるようになることを見込む。また同時に当該枠組みを通じて、新素材である人工構造タンパク質素材の標準化推進にも取り組み、新素材の社会的信頼の獲得に向けた活動を進める予定であり、そのための体制作りにも着手した。

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。

JSTによる支援機能に加え、担当領域を分けた2名のPM補佐を選定できたことによりバイオ分野や海外の研究者へのマネジメント、法務対応等を円滑に進められた。また、工業所有権情報・研修館（INPIT）から知財プロデューサーを派遣して頂き、知財発掘や活用において大きく貢献して頂くことができた。

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。

JSTフェアや各種シンポジウム等、研究成果を発表できる機会を積極的に利用し、アウトリーチ活動に努めてきた。また、各参画各機関においてもImPACTプログラムに参画していることを紹介してもらう等、研究開発の重要性を伝えている。アウトリーチ活動の一例として、2018年10月に開催した記者懇談会では、記者から「こういうテーマこそImPACTに相応しい。こういうテーマを積極的に進めるべきだ。」と本プロジェクトの重要性についてコメントを頂くことができた。また知財コンソーシアム等新聞で紹介されたことにより、ImPACT終了後のスキームへの参画に多数問い合わせを受けている。

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。

本プログラムで取り組んでいる研究テーマは、NASAや大手化学メーカーが過去に取り組んだものの頓挫したテーマであるため、プログラムの初期段階から、既成概念に囚われない30代の実力のある若手研究者の採用に積極的に取り組んできた。同時にそれら若手研究者にアドバイスできる、その分野の重鎮をプログラムアドバイザーに迎えて研究開発を推進

してきた。結果として未開拓の研究対象である構造タンパク質素材の実用化が見えてきたと考えている。

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。

本プログラムで取り組んでいる構造タンパク質の実用化を達成した企業は存在しておらず、構造タンパク質素材の開発及びその加工技術開発についても未開拓な状況である。その中で、本プログラムでは100件を超える特許出願を行うと同時に、製品化試作にも取り組んでおり、他国及び競合企業に先駆けて、枯渇資源に頼らない素材産業革命のスタートが切れたと判断している。また、構造タンパク質素材によって、従来素材では解決できなかった「(相反する特性である)剛性と衝撃吸収性を両立させた自動車ボディ部品」や「強度と応力緩和を両立させたコンパクトシート」等、画期的な製品試作ができたことで、環境問題への対応だけでなく、全く新しい製品の提案が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。

本プログラムでは、アミノ酸配列と物性の紐づけを行ったデータベースを活用し、物性発現メカニズムの解明を行い、そこから得られた知見を材料設計にフィードバックすることで、耐水性や耐熱性等、従来成しえなかった特性を持つ構造タンパク質素材を創出・提供に取り組んできたが、その一方で、分子設計だけでは達成が難しい特性があることも明らかになってきた。例えば、構造タンパク質の特徴である生分解性は、工業材料の観点からは材料劣化に該当するため、従来からある添加剤技術を構造タンパク質に応用し、劣化制御を行うことで問題解決を図った。強度の向上についても、分子設計だけでは達成が難しい状況であるが、クモの紡糸機構に関する知見や、工業化・量産化に向けた混合溶媒の選定等、本プログラムを通じて蓄積したデータを解析することによって、近いうちに解決できるものと考えている。

(3) その他、ImPACT プログラム全体に対する所感・提言（自由記載）

ImPACT は過去の研究開発プログラムと比較して PM の裁量が大きく、チャレンジングな研究開発に取り組むことが可能であったため、このような成果に繋がったと考えている。また、書類作成等の業務も簡素化されていることや、PM 補佐等の PM 支援機能が充実していたことから、研究開発に注力することができた。このような枠組みが継続されることを期待する。