

ほらいずん

バイオマテリアル関連科学技術の将来展望

— 第 11 回科学技術予測調査より —

科学技術予測センター 特別研究員 蒲生 秀典

【概要】

人工材料を生体へ適用するバイオマテリアルは、医療分野の診断や治療を大きく変えながら発展してきた。近年では、診断、治療、計測のための人工デバイス、人工臓器、薬物送達システム、イメージング、再生医療において実用化が進められている。科学技術・学術政策研究所では、2050年までの実現が期待される科学技術として、バイオマテリアルに関連する21の科学技術トピックを設定し、科学技術予測調査を実施した。その結果、バイオマテリアル関連科学技術は全般的に重要度が高く、国際競争力も高いと評価された。体内情報をモニタリングするウェアラブルデバイス、埋め込み型健康管理デバイス、生体組織や移植臓器の長期保存を実現する技術の重要度が高く、生体適合材料や生体外で使うマテリアルは国際競争力が高いと評価された。政策手段では、研究開発費の拡充、研究環境基盤の整備だけでなく、法整備や倫理的・法的・社会的課題（ELSI）への対応が重要と認識されている。技術的優位性が確立されれば、社会、産業ともに発展が見えているテーマであるが、法整備や ELSI に対する対応の遅れが、研究開発自体、ひいては、研究者の人材育成の遅れにも影響しない対策が求められる。

キーワード：バイオマテリアル, 生体適合材料, ドラッグデリバリーシステム (DDS), バイオ関連デバイス, バイオフィアブリケーション

1. はじめに

人工材料を生体へ適用するバイオマテリアルは、医療分野の診断や治療を大きく変えながら発展してきた。近年では、診断、治療、計測のための人工デバイス、人工臓器、薬物送達システム (DDS)、イメージング、再生医療において実用化が進められるとともに、ナノレベルで構造制御された人工材料と、分子レベル、細胞レベル、組織・臓器レベルでの反応を捉える研究へと進展している¹⁾。将来に向けバイオマテリアルに関連する科学技術は、医療の最先端だけではなく、より人間を中心とした社会の実現のために、健康、農業、食料、環境などの人間の生活の維持向上、あるいは新しい価値や産業の創造を担う、基盤技術として注目されている。

我が国では、統合イノベーション戦略 2019 (令和元年 6 月 21 日閣議決定)²⁾ において、特に取組を強

化すべき主要分野として AI (人工知能)、量子技術と並んで「バイオテクノロジー」を、全ての科学技術イノベーションに影響する最先端の基盤的技術分野と位置づけている。またこれに先駆け「バイオ戦略 2019～国内外から共感されるバイオコミュニティの形成に向けて～」(令和元年 6 月 11 日統合イノベーション戦略推進会議決定)³⁾ を策定している。戦略では「バイオとデジタルの融合」を基盤として掲げるとともに、社会課題の克服に必要なキーワードとして持続可能性、循環型社会、健康 (ウェルネス) を挙げ、実現したい 4 つの社会像を示している。

一方、科学技術・学術政策研究所 (NISTEP) では、第 11 回科学技術予測調査^{4,5)} の一環として 2018～2019 年にデルファイ調査^{注 1)} を実施した。この調査では科学技術 7 分野を設定し、2050 年までの実現が期待される科学技術として 702 トピックを選定した。7 分野の中でマテリアル・デバイス・プロセス分

野⁶⁾では、今回細目として「応用デバイス・システム（ライフ・バイオ分野）」を新設し、バイオマテリアルに関連する15の科学技術トピックを設定した。産学官の専門家に対するWebアンケートによって、それぞれのトピックについて重要度、国際競争力、技術的実現時期、社会的実現時期、政策手段などについての回答を得ている。

本稿では、バイオマテリアル関連科学技術の概要を示すとともに、NISTEPの科学技術予測調査で得られた産学官の専門家による科学技術トピックの評価と将来展望について記す。

2. バイオマテリアル関連科学技術の概要

バイオマテリアルとは、人体やその構成要素と直接あるいは間接に接触させて、損傷あるいは喪失した組織や器官の機能診断や治療を行い、さらに、ある場合には損傷部を補ったり置き換えたりするための根源的な役割や機能を決定する材料と定義される⁷⁾。バイオマテリアル関連科学技術は、材料、生体との反応、分離・吸着などの基礎的な材料科学と、人工臓器・医療デバイス、DDS、再生医療などの応用・デバイスに大別できる¹⁾。

材料には高分子、セラミックス、金属あるいは複合材など様々な材料が適用可能で、これまで注射器、輸液システム、カテーテルなど医療機器のディスプレイ化、軽量化、低コスト化を実現してきた。また、眼内レンズ、インプラント、心臓弁、ステント、人工血管、人工関節、人工の腎臓、心臓、肺などの人工臓器・医療デバイスを様々な材料からなるバイオマテ

リアルによって実現されている。DDSは体内での薬物分布を制御することで、薬物の効果を最大限に高め、副作用を最小限に抑えることを目的とした技術であり、近年ではナノレベルの大きさで作られた輸送用の分子に薬剤を内包し、その動きを外部から制御することで目的の場所まで輸送するための研究や、特定の遺伝子をナノレベルの分子を用いて輸送することで、特定の部位での遺伝子発現を制御するなどの研究が進められている¹⁾。再生医療では、近年iPS（人工多能性幹）細胞の発見もあり大きな期待が寄せられているが、細胞培養のための足場（スキャホールド）や細胞のマイクロカプセル化、細胞シートなどでバイオマテリアルの応用研究が進められている。また最近では、バイオプリンティング、バイオファブリケーションによる3次元組織や臓器の構築に関する研究開発が活発化している⁸⁾。

2018年6月に中国成都でConference of Definitions on Biomaterials 2018が開催された。ここでは、1986年に定義されたバイオマテリアルに関する用語の見直しが32年ぶりに議論された。その結果、図表1に示すように、バイオマテリアルは7つに分類され、用語の定義の草案が示された⁹⁾。

一般的には医療応用に関しバイオマテリアルと呼ぶことが多いが、本稿では、2018年の国際会議で提示された図表1に示される、バイオメテックス（生物模倣）、バイオインスパイアードマテリアル、バイオデグラダブル（生分解性）マテリアルなども含む、広義のバイオマテリアルを関連科学技術として扱うこととする。

図表1 バイオマテリアルの分類

生体材料タイプ	生体適合性と生体材料に対する免疫反応	生分解現象	再生医療	生体材料ベースのデバイス	生体材料ベースのデリバリーシステム	生体材料ベースのバイオテクノロジー
<ul style="list-style-type: none"> ・バイオセラミックス ・バイオポリマー ・ハイドロゲル ・バイオハイブリッド材料 ・レスポンスバイオマテリアル ・組織誘導バイオマテリアル ・<u>バイオインスパイアードマテリアル</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>生体適合性</u> ・炎症 ・適応後天性免疫システム ・過敏症 ・筋線維芽細胞 ・機械伝達 ・血液適合性 ・血栓形成性 ・補体活性化 ・マクロファージ表現型 	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>生分解</u> ・<u>生分解性ポリマー</u> ・<u>生分解性金属</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ・再生 ・再生医療 ・<u>組織工学</u> ・再生工学 ・脱細胞化 ・再細胞化 ・<u>全器官工学</u> ・足場 ・テンプレート ・免疫隔離 	<ul style="list-style-type: none"> ・インプラント ・経皮及び経皮 ・プロテアーゼ ・バイオプロテアーゼ ・<u>狭小</u> ・ステント ・インプラント ・<u>ソフトロボティクス</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>薬物送達</u> ・制御放出 ・拍動性送達 ・ゼロ次放出 ・細胞内送達 ・治療薬 ・プログラム可能な送達 ・持続送達 ・即時送達 	<ul style="list-style-type: none"> ・バイオチップ ・生体機能チップ ・<u>生体模倣システム</u> ・オルガノイド ・バイオマテリアルゲノム ・バイオクリック反応 ・バイオインク ・<u>バイオファブリケーション</u> ・<u>バイオプリンティング</u>

* 赤字下線は今回のデルファイ調査（次節参照）で取り上げられた科学技術トピックに含まれるキーワードを示す。参考文献9）を基に科学技術予測センターにて作成

注1 多数の人に同一内容の質問を複数回繰り返し、回答者の意見を収れんさせるアンケート手法。

3. 第 11 回科学技術予測調査デルファイ調査の概要

NISTEP では、科学技術全般にわたる中長期的な発展の方向性について専門家の知見を得ることを目的として、約 5 年ごとに大規模な科学技術予測調査を実施している。第 11 回に当たる今回の調査では、2040 年をターゲットイヤーとし、2050 年までの 30 年間を展望した。デルファイ調査では科学技術 7 分野を設定し、分野ごとに設置した産学官の専門家（各分野 10 名程度、計 74 名）からなる分科会での検討を経て、2050 年までを見据えた研究開発課題として計 702 の科学技術トピックを選定した^{4,5)}。7 分野は、①健康・医療・生命科学、②農林水産・食品・バイオテクノロジー、③環境・資源・エネルギー、④ ICT・アナリティクス・サービス、⑤マテリアル・デバイス・プロセス、⑥都市・建築・土木・交通、⑦宇宙・海洋・地球・科学基盤である。また、各分野にはそれぞれの 8～10 程度の細目が設けられ、計 59 細目を設定した。アンケートは、2019 年 2 月～5 月にかけて 2 回同じ質問をするデルファイ法で実施、科学技術トピックごとに図表 2 に示す質問をした。全分野でのべ 5352 名の産学官の専門家から回答を得ている。

バイオマテリアルに関連する科学技術として、7 分野のうちの 1 分野である⑤マテリアル・デバイス・プロセス分野⁶⁾の中で、今回の調査で新設した細目「応用デバイス・システム（ライフ・バイオ分野）」において、15 の科学技術トピック（食品関係 2 トピッ

クを含む）を設定している。さらに、①健康・医療・生命科学分野では DDS 関連を含む 6 トピックが設定され、合計 21 の科学技術トピックが関連トピックとして挙げられる。これら、21 トピックには、前節の図表 1 で示したバイオマテリアルの分類の各カテゴリーから、それぞれ赤字下線のキーワードを含む科学技術トピックを含んでいる。

4. デルファイ調査に見るバイオマテリアル関連科学技術の評価と将来展望

バイオマテリアルに関連する科学技術として、デルファイ調査 7 分野のうち、マテリアル・デバイス・プロセス分野及び健康・医療・生命科学分野から、分野横断的に計 21 の科学技術トピックを取り上げた。調査結果を基に社会的実現時期の順に示した年表を、重要度と国際競争力のデータと併せて図表 3 に示す。

バイオマテリアル関連の科学技術トピックは、バイオマテリアル（●）が 7 トピック、デバイス（▲）、プロセス（▼）、計測・モニタリング（△）、食品関連（○）がそれぞれ 2 トピック、及び健康・医療・生命科学分野（■）が 6 トピックである。社会的実現時期（アンケート回答の中央値）^{注 2}の結果から、トピックにより 2029 年から 2037 年までの間に社会的に実現（社会実装・普及）する。これは本調査で設定した全 702 トピックの平均が 2032 年であることから、バイオマテリアル関連科学技術は全般的に比較的遅い時期に実現するという予測結果となっている。

図表 2 デルファイ調査の質問項目

項目	内容	選択肢
重要度 (単数選択)	30年後の望ましい社会を実現する上で、日本にとっての現在の重要度	非常に高い、高い、どちらでもない、低い、非常に低い、わからない
国際競争力 (単数選択)	現在の日本が置かれた国際競争力の状況	非常に高い、高い、どちらでもない、低い、非常に低い、わからない
技術的実現見通し (単数選択)	日本を含む世界のどこかで技術的に実現する時期	実現済み、2025年以前、2026～2030年、2031～2035年、2036～2040年、2041～2045年、2046～2050年、2051年以降、実現しない、わからない
技術的実現に向けた政策手段 (複数選択可)	技術的な実現に向け、求められる政策手段	人材の育成・確保、研究開発費の拡充、研究基盤整備、国内連携・協力、国際連携・標準化、法規制の整備、倫理的課題への対応、その他
社会的実現見通し (単数選択)	日本を含む世界のどこかで技術的な実現に続き、日本で社会的に実現する時期	実現済み、2025年以前、2026～2030年、2031～2035年、2036～2040年、2041～2045年、2046～2050年、2051年以降、実現しない、わからない
社会的実現に向けた政策手段 (複数選択可)	日本での社会的な実現に向け、求められる政策手段	人材の育成・確保、事業補助、事業環境整備、国内連携・協力、国際連携・標準化、法規制の整備、倫理的・法的・社会的課題への対応、その他

・技術的実現とは、所期の性能を得るなど技術的な環境が整う、例えば、研究室段階で技術開発の見通しがつくこと。または、原理・現象が科学的に明らかにされること。
 ・社会的実現とは、実現された技術が製品やサービス等として利用可能な状況となること、あるいは普及すること。

注 2 ここで示す実現時期は中央値(1/2 値)であり、アンケートの回答にはトピックごとに概ね前後 4～6 年、計 8～12 年程度の幅(1/4-3/4 値の幅)がある。例えば、科学技術トピック「生体外で生体組織を培養するシステム及びバイオマテリアル」の実現時期では、中央値は 2033 年であるが、2028～2039 年の幅がある。

図表 3 バイオマテリアル関連科学技術トピックの社会的実現時期、重要度、国際競争力

社会的 実現時期	分類*	科学技術トピック	重要度**	国際** 競争力
2029	○	食品の安全をその場で確認できる超小型化学分析システム	0.98	0.71
2030	■	目的とする組織・器官への送達と細胞内ドラッグデリバリーシステム(DDS)技術を実現させる核酸医薬品	0.95	0.32
	■	患者への負担や医療費を軽減できる簡便なウェアラブル透析装置	1.07	0.27
	○	人工肉など人工食材をベースに、食品をオーダーメイドで製造(造形)する3Dフードプリンティング技術	0.12	0.17
	●	人と同じソフトな動きと感触を可能にするためのロボット向けの機能をもつソフトマテリアル	0.95	0.75
2031	▲	体内情報(薬物動態、癌マーカー、感染、その他血液成分)をモニタリングするウェアラブルデバイス	1.32	0.58
	●	バイオミメティクスに基づく表面や構造を有し、耐久性、安全性が飛躍的に向上する生体適合材料	1.07	0.80
	▼	タンパク質の一次配列構造から三次元立体構造を予測する技術	0.75	0.42
2032	■	ナノテクノロジーによる生体人工物界面制御の精密化に基づく、高機能インプラント機器やドラッグデリバリーシステム(DDS)技術を実現する高度な生体適合性材料	0.83	0.53
	●	全てバイオデグラダブル(生分解性)マテリアルで構成されたデバイスや日用品の実用化技術(例えば、環境中、生体中に放置できるもの)	1.16	0.61
2033	■	眼、脳等(到達困難な組織)への薬剤輸送を可能とする技術	0.91	0.17
	●	生体外で生体組織を培養するシステムおよびバイオマテリアル	1.26	0.82
	■	(核酸以外の)薬や遺伝子を標的細胞内部の特定部位に運ぶナノキャリアシステム	0.88	0.36
	△	細胞や細胞内のタンパク質、アミノ酸、イオン等の動態を、マイクロ秒以下の時間分解能で追尾可能なモニタリング技術	0.75	0.38
2034	●	移植用臓器を長期間保存できるバイオマテリアルおよびプロセス技術	1.21	0.54
	■	がん細胞を包み込んだり、がん細胞特異的に吸収したりする材料(ポリマーなど)により、がん細胞を物理的に孤立させて死滅させる治療法	0.70	0.29
	▼	3Dプリンティング技術を用いた再生組織・臓器の製造(バイオファブリケーション)	1.06	0.47
	●	CO2固定化や廃棄物の再資源化プロセスを実現する、生分解性材料あるいは生化学的機能を有する材料	1.06	0.50
2036	●	人の感覚について、喪失した場合には補い、さらには超人的レベルを達成するよう補強するバイオミメティクス材料	0.97	0.42
	△	量子もつれ光による超高精度測定を利用した新規な生命現象、生化学現象の解明	0.48	0.33
2037	▲	生体エネルギーで半永久的に動き続ける体内埋め込み健康管理(検査・診断・治療)デバイス	1.11	0.38

*分類: ●バイオマテリアル、▲デバイス、▼プロセス、△計測・モニタリング、○食品関連、■健康・医療・生命科学分野

**重要度・国際競争力:非常に高い(+2)、高い(+1)、どちらでもない(0)、低い(-1)、非常に低い(-2)としてスコアを算出

バイオマテリアルなどの材料関係では、ロボット向けのソフトマテリアルやバイオミメティクスに基づく構造を有する、あるいは、インプラント機器やDDS用の生体適合材料、全て生分解性材料で構成された実用品が、2032年までの比較的早い時期に実現する。一方、生体外で生体組織を培養できる、あるいは、移植用臓器を長期間保存できるバイオマテリアルやプロセス技術・システムが、2033~34年に実現する。また、人の感覚を補いさらには超人的レベルを達成するバイオミメティクス材料は、比較的遅い2036年に実現する。また、健康・医療・生命科学分野で複数設定されたDDS関係では、核酸医薬品が比較的早い2030年に、目や脳などへの薬剤輸送や核酸医薬以外が2033年に実現する。バイオ関連デバイスでは、ウェアラブル透析装置が2030年、体内情報をモニタリングするウェアラブルデバイスが2031年と比較的早期に、一方体内埋め込み型健康管理デバイスは2037年と遅い時期に実現する結果となった。

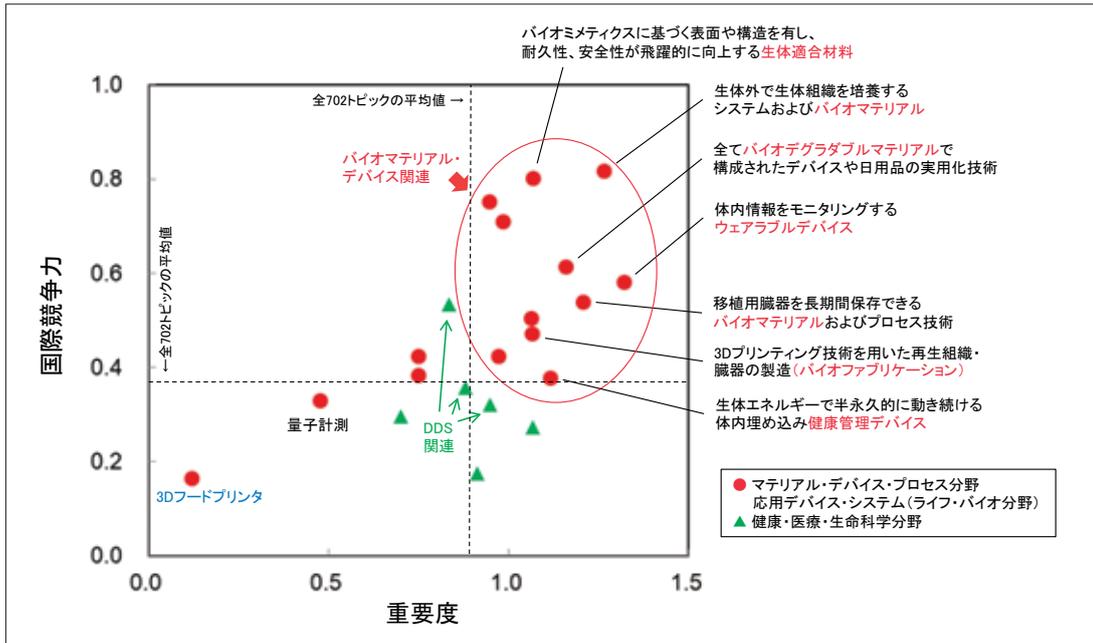
また近年、幅広い分野で開発が進んでいる、デジタルファブリケーション(3Dプリンティング)に関連する技術として、人工食材をベースとした3Dフードプリンティングが比較的早い2030年に、再生組織・臓器の製造(バイオファブリケーション)は比較的遅い2034年に実現する。また、最近の量子コンピュータの急速な発展によって注目されている量子技術を用いた量子計測の生命科学応用に関するトピックは

比較的遅い2036年に実現する結果となった。

図表3に示したバイオマテリアル関連の21科学技術トピックの重要度と国際競争力の関係を図表4に示す。

マテリアル・デバイス・プロセス分野で今回新設した細目「応用デバイス・システム(ライフ・バイオ応用)」の多くのトピック(●)は、全分野計702トピックの平均(重要度:0.85、国際競争力:0.38)と比較すると、重要度は高く、国際競争力も高いと評価されている。特に「生体外で生体組織を培養するシステムおよびバイオマテリアル」は双方の評価が高い。また、「体内情報をモニタリングするウェアラブルデバイス」の重要度が最も高かった。ほかに「移植用臓器を長時間保存できるバイオマテリアルおよびプロセス技術」、「全てバイオデグラダブル(生分解性)マテリアルで構成されたデバイスや日用品の実用化技術」、「バイオミメティクスに基づく表面や構造を有し、耐久性、安全性が飛躍的に向上する生体適合材料」のトピック群は、重要度・国際競争力ともに比較的高い評価となった。生体適合材料、生分解性材料を含むバイオマテリアル関連とウェアラブルデバイスは重要度・国際競争力が高い。生体組織や臓器の製造を目指すバイオファブリケーションも重要度は高い。一方、健康・医療・生命科学分野に挙げられたDDS関連トピックは、重要度は比較的高いながら国際競争力は比較的低い評価となっている。また、

図表 4 バイオマテリアル関連科学技術トピックの重要度と国際競争力の関係



生体量子計測、3D フードプリンティングは重要度、国際競争力とも低い結果となった。

複数回答で聞いた必要な政策について、図表 5 に人材育成の選択割合が特に高い科学技術トピック（上位 3 トピック）を示す。技術的実現、社会的実現ともに全て DDS 関連の同じ科学技術トピックで占められる結果となった。図表 6 に技術的実現における研究開発費の拡充及び研究基盤整備の選択割合の特に高いトピックを示す。ウェアラブルデバイス、バイオミメティクスに基づく生体適合材料、目、脳等への薬剤輸送などのトピックが上位となった。研究開発費の拡充と併せて、研究基盤整備が必要あるとの結果が得られている。

政策手段として社会実現のための法規制の整備及び倫理的・法的・社会的課題 (ELSI) への対応では、本科学技術全般で高いと評価されている。図表 7 に示すように、いずれも同じ科学技術トピックが選択割合の上位を占めている。バイオファブリケーション、ウェアラブルデバイス、埋め込み型健康管理デバイスなど、人体の組織・臓器に直接関わる技術や情報を取り出すデバイスの選択割合が特に高いことが分かる。

5. まとめ

産学官専門家へのアンケートの結果、バイオマテリアル関連科学技術は全般的に重要度が高く、国際競争力も高いと評価された。体内情報をモニタリングするウェアラブルデバイス、埋め込み型健康管理デバイス、生体組織や移植臓器の長期保存を実現する技術について重要度が高い。さらに、生体適合材料や生体外

で使うマテリアルについては国際競争力が高いと評価されている。2020 年代末から 2030 年代初期に技術的実現に達するという予測になっているが、人を含めた生体そのものを扱うテーマについて国際競争力が低いという結果である。研究開発費の拡充、研究環境基盤の整備だけでなく、法整備や ELSI への対応が重要と認識されていることが本科学技術の特徴といえる。技術的優位性が確立されれば、社会、産業ともに発展が見えているテーマであるが、法整備や ELSI に対する対応の遅れが、研究開発自体、ひいては、研究者の人材育成の遅れにも影響しない対策が求められる。また、近年の海洋プラスチックや国際的なゴミの廃棄に関わる問題の顕在化もあり、バイオデグラダブル (生分解性) マテリアルによるデバイスや日用品の実用化技術に対する重要度も高いと見られた。

バイオ戦略 2019³⁾ では「バイオとデジタルの融合」を基本方針として示している。一方、内閣府では戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」¹⁰⁾ において、データ科学を材料開発に適用するマテリアル・インテグレーション (MI) を推進している。しかしながら、バイオ戦略では生物や生化学を主に対象とし、SIP マテリアル革命では人工材料を主に対象としており、双方の融合領域を扱うバイオマテリアルは対象として明示的には示されていない。バイオマテリアル関連科学技術においても、多様な素材の最適化、そして異種材料間の反応や相互作用の制御など、あるいはプロセス並びに経時変化などのパラメータも含め、データ科学と AI との融合、そしてその先のマテリアルキュレーションを目指し、材料開発を加速すること

図表 5 技術的実現、社会的実現に必要な政策手段：人材育成（選択割合上位 3 トピック）

技術的 実現	社会的 実現	科学技術トピック
66%	66%	(核酸以外の)薬や遺伝子を標的細胞内部の特定部位に運ぶナノキャリアシステム
60%	60%	目的とする組織・器官への送達と細胞内ドラッグデリバリーシステム(DDS)技術を実現させる核酸医薬品
59%	59%	眼、脳等(到達困難な組織)への薬剤輸送を可能とする技術

図表 6 技術的実現に必要な政策手段：研究開発費の拡充及び研究基盤整備（選択割合上位 3 トピック）

研究開発 費の拡充	研究基盤 整備	科学技術トピック
78%	71%	体内情報(薬物動態、癌マーカー、感染、その他血液成分)をモニタリングするウェアラブルデバイス
75%	65%	バイオメテックスに基づく表面や構造を有し、耐久性、安全性が飛躍的に向上する生体適合材料
74%	68%	眼、脳等(到達困難な組織)への薬剤輸送を可能とする技術

図表 7 社会的実現に必要な政策手段：法規制の整備及び ELSI への対応（選択割合上位 3 トピック）

法規制 の整備	ELSI へ の対応	科学技術トピック
62%	57%	3D プリンティング技術を用いた再生組織・臓器の製造(バイオファブリケーション)
61%	48%	体内情報(薬物動態、癌マーカー、感染、その他血液成分)をモニタリングするウェアラブルデバイス
60%	56%	生体エネルギーで半永久的に動き続ける体内埋め込み健康管理(検査・診断・治療)デバイス

が期待できる。医療、環境、産業などの社会課題解決にとどまらず、今後の人間中心社会、人間拡張社会に向け、人と物をつなげる要素技術としてバイオマテリアル科学技術の発展が期待される。

謝辞

本稿作成に当たり、東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻 高井まどか教授、日本電信電話株式会社先端集積デバイス研究所 瀬山倫子主幹研究員には貴重な御意見を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献・資料

- 岡野光夫監修、田端靖彦・埴隆夫編著、「バイオマテリアル その基礎と先端研究への展開」、東京化学同人(2016)
- 内閣府総合科学技術・イノベーション会議、「統合イノベーション戦略 2019」(令和元年 6 月 21 日閣議決定)：
https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019_honbun.pdf
- 首相官邸、「バイオ戦略 2019 ～国内外から共感されるバイオコミュニティの形成に向けて～」(令和元年 6 月 11 日統合イノベーション戦略推進会議決定)：
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/biosenryaku2019.pdf>
- 横尾淑子、赤池伸一、「ST Foresight 2019 (速報版) の概要－人間性の再興・再考による柔軟な社会を目指して－」；文部科学省 科学技術・学術政策研究所 STI Horizon 2019. Vol.5 No.3：
<http://doi.org/10.15108/stih.00184>
- 科学技術・学術政策研究所プレスリリース、第 11 回科学技術予測調査 S&T Foresight 2019 総合報告書 [NISTEP REPORT No.183] の公表について (2019 年 11 月)：
<https://www.nistep.go.jp/archives/42863>
- 科学技術・学術政策研究所、第 11 回科学技術予測調査デルファイ調査結果速報<マテリアル・デバイス・プロセス分野>：
https://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/5_Delphi_material.pdf
- 日本学会会議 材料工学委員会バイオマテリアル分科会、「医療を支えるバイオマテリアル研究に関する提言」(平成 29 年 9 月 29 日)：
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t251-3.pdf>
- 蒲生秀典、「デジタルファブリケーション・医療応用の Horizon ～ 3D デジタルデータの活用とバイオファブリケーションの進展～」；文部科学省 科学技術・学術政策研究所 STI Horizon 2016. Vol.2 No.1：
<http://dx.doi.org/10.15108/stih.00016>
- X. Zhang and D. Williams、「Definitions of Biomaterials for the Twenty-First Century」、materials today, ELSEVIER (2019)
- 内閣府；戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」：
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/5_material.pdf