(11) 材料工学分野

① 材料工学分野のビジョン

材料の進化は、人類史の中で、新しい科学、新しい技術や新しい産業の発展の基盤となり、常に人類の繁栄と社会進歩に貢献してきた。また、社会は進歩する度に、材料のさらなる進化を求め続けてきた。このように、時代時代で主題は変わっても、綿々と続く材料と社会の相補的かつ相乗的関係が今日の文明社会を築き上げてきており、この関係は未来においても不変である。

20 世紀までは自然環境、身近な資源や歴史発展等の地域的な制約を主に受けてきたが、21 世紀に入って主要な制約は環境制約を含めて地球規模のものとなった。同時に、材料に対する要求も世界規模で多様化するようになった。また、要求内容もより高い水準に、さらにより多くの機能の同時実現へと先鋭化している。さらに、グローバルな入手容易性、安定供給性、経済性等、一層多様でかつ高度な視点からの最適化が求められている。

材料工学は、歴史的には錬金術を起源とし、20 世紀以降、金属工学、無機材料工学、高分子材料工学等それぞれの材料分野で発展を遂げ、個別に体系化してきた。21 世紀に入る辺りから上で述べたような社会要請の変化に応じて、すべての材料を横断する融合展開が図られてきている学術分野である。すなわち、材料工学は、各種材料を融合展開する工学であり、端的には「材料の創製と高機能化を極める工学」と定義される。

材料工学における「材料」は、様々な物質からなる素材から、ある使用目的を有した構造体の多様な構成要素まで、それらの中間段階のものも含む総称である。ここに、様々な物質を構造体の構成要素までに止揚させる一連の所作がある。この一連の所作の方向性を材料化と呼び、一連の所作を材料プロセスという。材料プロセスは一元的ではなく多元的な視点から最適化される。

材料の創製は、現状では存在しない、或いはより優位に使用目的に適合する材料を工夫して造り出すことをいう。一方、材料の高機能化は、材料の多様な機能を社会価値尺度での向上を含めて高度化する、或いは材料に新たな機能を付加することをいう。

材料機能とは、材料の働きをすべて指す。複数の原子並びに分子さらにそれらの組み合わせが有機的に関係し合い、集合体として材料機能を発現する。材料機能を発現するこの集合体の様態を材料システムと呼ぶ。求められる材料機能を発現する最も有効な材料システムを設計する。

材料の創製は、物質等を原料にして、最も有効な材料システムを最適な材料プロセスで、材料化すると表現することもできる。材料の創製と高機能化は、互いに連関して達成される場合も、それぞれ独立して達成される場合もある。また、材料の創製と高機能化は、未来事象のみではなく、過去から現在までのすべての歴史的事象も含んでいる。

材料化は目的行為であり、材料工学に固有のものである。物質を対象とする他の諸科学では、既知物質の存在様態や機能を与件に、全く新たな機能を有する新物質探索

に資する学術が中心となり、むしろ一切の制約条件を超える挑戦が鍵になる。それに対して材料工学では、新物質探索のベクトルを内包しながらも、一般に材料化を無条件では考えない。すなわち、材料化に際しての種々の制約条件を正しく認識した上で、与えられた条件のもとで最適な材料プロセスを展開し、使用環境、使用条件における最も有効な材料システムを実現する。

材料工学は、物質、材料、構造体とそれらの機能が持つ多様性に対して、以下に示す多様なアプローチで対応する。多様さを担保することにより、単一のアプローチだけでは陥りがちな部分性や偏りを補正し、補完する。

第１は、理論的・規範的アプローチである。材料化においてまず洞察すべきは、多様な物質機能のそれぞれの原理及び材料が実現すべき新たな価値の規定である。そして、両者を論理的に関連付ける。その際、基礎諸科学の学術的知見を基本とした理論的かつ規範的考察がその中心となる。

第２は、帰納的・実証的アプローチである。錬金術は、洗練された技を知的考察の対象とした。近代材料工学は、より優れた材料を意図的、設計的に作り出そうとするアプローチから生まれた。材料工学が成立し対象物質が大幅に拡大した現代においても、実用的関心を常に鋭く持ち続けている。

第３は、演繹的・実践的アプローチである。物質、材料、或いは構造体について、理論や計算によって、客観的かつ実証的に記述や説明を試み、より確実な知識の基盤の上に材料化を展開する。

材料工学に課された使命は、求められる材料性能が規定されれば、それを実現する最も効果的な材料システムを最適な材料プロセスを実現することである。したがって、材料工学が扱う範囲は、材料機能と材料システムの関係の解明、様々な材料システムの実現のための高効率な材料プロセスの追求、構造体等の最適加工技術を含めた構造体設計、材料による製品の社会価値尺度の評価等、基礎科学から応用工学までを包含している。さらに、材料工学は極めて広範な時空間を扱う工学でもある。したがって、材料工学の社会的役割は、上述した材料機能はもちろんのこと、材料機能の保証や信頼性、寿命や価値の最適化設計等に関する説明責任性や、材料のライフサイクル解析や持続可能社会の設計までも及ぶ。

しかしながら、材料性能が実現すべき価値は、材料工学において自動的に導かれるものではない。社会の価値観、必要性、使命等と関連しており、工学としての材料工学は、土木学、建築学、機械工学、電気・電子工学等の工学分野全体の基盤を横断するものであり、それらの学術領域との連携は不可欠である。さらに経済的、社会的視点を繰り入れるためには、医学、法学等あらゆる学術領域との連携を可能とする柔軟性が求められる。

一方、人類の科学的英知の結集に基づくためには、主に物理学、化学、さらには生物学をも含む基礎科学を統合した材料に関する独自の学術分野を更新、再構築し続けることが求められる。

すなわち、材料工学の基礎は、以下の３つの柱で主に構成されている。

(A) 材料リテラシー学は、高校並びに大学学部前期における物理学、化学、生物学等を素養にして、材料と材料工学の基本的役割について、理解、記述、説明するための学術体系である。

(B) 材料システム工学は、材料機能を発現する仕組みである材料システムに関する学術体系である。

(C) 材料プロセス工学は、目的の材料及び材料システムを創製、製造するための、物理的及び化学的な方法に関する学術体系である。材料化における学術的基本構造は、材料リテラシー学の知識を土台に、材料システム工学の知識に裏付けられた目標材料システムを、材料プロセス工学の知識を駆使して作り込む方法論を理解することにある。

さらに、対象応用工学分野ごとに、以下のような応用材料学を学術領域として展開する。

(D) 社会インフラ材料学は、土木建築、機械、電気等の応用工学が対象とする製品に期待される材料の機能とその利用技術に関する学術体系である。

(E) グリーン・エネルギー材料学は、環境負荷最小限化、再生可能エネルギーと資源の高効率有効利用のための製品に期待される材料の機能とその利用技術に関する学術体系である。

(F) 医療・バイオ材料学は、医療のための、さらには生体機能を利用した製品に期待される材料の機能とその利用技術に関する学術体系である。

(G) デバイス材料学は、電子・光・磁気機能を利用した製品に期待される材料の機能とその利用技術に関する学術体系である。

材料工学は、求められる材料性能が規定されれば、それを実現する最も効果的な材料システムを最適な材料プロセスを、科学的原理に基づきかつ最も高い社会的価値尺度で実現する。そのためには、以下の材料工学のツールである以下の学術領域が不可欠となる。

(H) 材料解析・診断学は、材料システム及び材料プロセスを時間的空間的に解析する物理的、化学的な方法の学術体系である。

(I) 理論・計算材料学は、材料機能の発現機構解明と設計のための、理論と理論計算の方法とその利用技術に関する学術体系である。

(J) 材料ゲノム工学は、これまで蓄積されてきた膨大なデータを、理論やモデリング、或いはデータ解析手法を駆使することで、効率的かつ迅速に、合目的な材料設計や材料機能創製を果たすための方法とその利用技術に関する学術体系である。

「材料工学分野のビジョン」（概要図）は、現代社会が求める課題解決型の材料工学を確立のために、他学術分野と連携しつつ、あらゆる材料知を統合して、新しい知識体系を構築することにある。そのために考慮すべきキーワードを、材料工学の基礎、ツール、応用材料の３段階構造の周りに示している。これらの専門領域をあまねく発展させてこそ、この概要図の中心に書かれている段階（後述）を経て、到達目標に至る。

②　材料工学分野の夢ロードマップの考え方

材料工学では、様々な要求に応えるために様々なベクトルを向いて多様化せざるを得ない局面がある。これは材料工学の真髄の１つであるが、反面、焦点が十分絞られていない、複雑でわかりにくい等の印象を一般社会に与えてしまう場合がある。したがって、材料工学の専門家には一般社会から正当な理解と支援を得るための不断の努力が求められる。

また、貴重な知見が広範囲にかつ歴史的にも多く蓄積されてきたことが強みの源泉でもあるが、反面、次代の育成の場では、学ぶべきことが膨大過ぎる等の印象を与え、一定の障害となる場合もある。したがって、学ぶべき基礎素養をよく整理し、簡潔に体系化して、材料工学の魅力を次世代に伝える不断の努力も求められる。

また、社会の共通基盤的である材料工学は、常に従来の枠内に安住せずに、あらゆる学術分野と連携し、自らの発展のために必要なものを取り込んでいかざるを得ない宿命にある。

したがって、専門知識を体系的に旺盛に蓄積する一方で、蓄積された知識を合目的に、また合理的に活用する新しい総合的解法手法の開発が課題打開の鍵となる。すべての専門領域で、ナノテクノロジー及び計算・データ処理技術の長足の進歩を大胆に組み入れて、相互利用のネットワーク化を構築すれば、その実現性が一層確実となる。すなわち、向こう 30 年以内に世界に先駆けて新しい総合的解法手法を開発することを材料工学分野のロードマップの大目標に設定する。

そのための進歩のステップは３つに分かれる

(A) 材料創製と高機能化の実現のための共通課題に関する現象の解明
(B) 材料創製と高機能化の総合的解法の確立
(C) 総合的解法の普及による最適材料機能の提供

(A) の段階では、共通基礎課題を解決する全国ネットワーク共同利用形式による最先端解析ツール群について、それぞれコストパフォーマンスを最大限化する視点を持って、総合的かつ体系的に整備する。同時に各専門領域では、既存の知見を含めてインフォマティクス手法による知見の体系化を進める。また、実験と計算シミュレーションを相互交流によって推進し、共に発展する研究スタイルを常態化する。新しい技術を担う人材、次代を担う人材の育成事業をこれらの事業と関連付ける。

(B) の段階では、創製と高性能化の関係を合理的に説明できるモデル・理論を確立する。実証においては、実験室規模での検証はもちろん、企業が保有する実生産設備での検証も不可欠となる。そのために、産業と学術の相互信頼感を持った密接な連携を促進する。(A) での知見の体系化はこの時期に国際規格、標準等としてその一部が結実される。また、(A)で育成された人材が第一線で活躍し始める。

(C) の段階では、我が国の材料工学のあり様が一変している。社会、産業が抱える重要課題が、学術界に真剣に持ち込まれ、お互いの高い信頼関係に裏付けられた協同が進む。産業においては、国内での事業展開とグローバルな事業展開の望ましいバランスが追及される際に、求められる性能を実現する総合解法がその有力な武器となる。さらに材料と生物科学の関係が新たに体系化され、材料リテラシー学が一段と高い地平で統合化される。

ア　材料リテラシー学の夢ロードマップ

材料に関する基礎科学は、従来の知的ストックに加えて、ナノテクノロジーの進歩等に伴い長足の進歩を遂げている。長足の進歩の一方で、高校までの物理学・化学等の履修状況とのギャップが広がりつつある。

そこで、社会受容性を前提に、先端的学術成果を社会に還元するためにも、知的到達点を良く整理することによって、一般市民を含めた初心者が、限られた時間内でその根幹を理解できるように継続的に再構築していく。また、材料の概念の広がりに応じて、特に材料生物学を新たな基礎としてしっかりと取り込んでいく。さらに、ジェンダーの克服に向けた取り組みを強化する。

イ　材料システム工学の夢ロードマップ

材料の機能を化学組成から解釈する捉え方に加えて、原子・分子等の配列の多次元多階層なシステム（マルチースケールシステム）と密接な関係になることが、特にナノテクノロジーの進歩に伴って理解が深まった。同時に、大きさ、形状も材料機能と密接に結び付いていることが強く認識されるようになった。

まずは、材料機能とマルチスケールシステムの対応関係を統一的に明らかにする。また、材料システムの時間変化と機能の時間変化の関係についても明確にする。それらを通じて、全く新しい材料システムが多様に追究される状況を速やかに実現する。

ウ　材料プロセス工学の夢ロードマップ

多様な材料を対象に、多様な加工法が開発されている。さらに、資源・エネルギーの最大限活用、環境負荷最小限化の視点から材料プロセスを再構築する取り組みも定着してきている。

引き続き多様なアプローチで、有効性の高い加工法を追究することを基盤とする。その上で、目的の製品を得る最適なプロセスを逆算によって絞り込む、もしくは新

しく追究できる手法を開発する。社会貢献・インパクトを強く認識するために、経済性指標等も取り込んでいく。

エ　社会インフラ材料学の夢ロードマップ

安全・安心、長寿命、低環境負荷な製品性能を実現する世界最高水準の材料機能とその利用技術を提供している。

引き続き、環境負荷を抜本的に低減する、より高機能な材料の創製に取り組む。さらに、使用中材料を延命するための補修・メンテナンス技術を速やかに革新する。

オ　グリーン・エネルギー材料学の夢ロードマップ

多くの応用工学分野で世界最高水準の材料機能とその利用技術を提供している。

引き続き、より抜本的に高機能な材料の創製に取り組む。さらに、その高度利用技術の新規展開を速やかに進める。

カ　医療・バイオ材料学の夢ロードマップ

医療診断技術等世界最高水準の材料機能とその利用技術を提供している。生体機能代替のための材料の創製においても革新的な成果を生み出している。

引き続き、高齢化社会における QOL を抜本的に改善する、より高機能な材料の創製に取り組む。さらに、その高度利用技術の新規展開を速やかに進める。

キ　デバイス材料学の夢ロードマップ

世界最高水準の材料機能とその利用技術を提供している。

引き続き、製造コスト面での国際競争力と市場シェアの確保に寄与する、抜本的に高機能な材料の創製に取り組む。さらに、その高度利用技術の新規展開を速やかに進める。

ク　材料解析・診断学の夢ロードマップ

ナノテクノロジーの進歩の直接的な成果が集中して現れている。特に、微小なスケールでの解析・診断に長足な進歩が加えられている。

今後は、空間的マルチスケールをすべて埋め尽くすと同時に時間的なマルチスケールを強力に埋めていく。特に、ハイスループットで広範な研究者が利用できるように整備し、空間的、時間的にマクロな現象を、よりミクロな観点で解析・診断する手法を速やかに開発する。

ケ　理論・計算材料学の夢ロードマップ

空間スケールの個々の階層における信頼性の高い計算ツールが揃いつつある。

今後は、空間マルチスケールを速やかに連結・統合し、効率的に成果を得る抜本的な手法を開発する。さらに時間スケールに対応する計算ツールを強力に開発する。

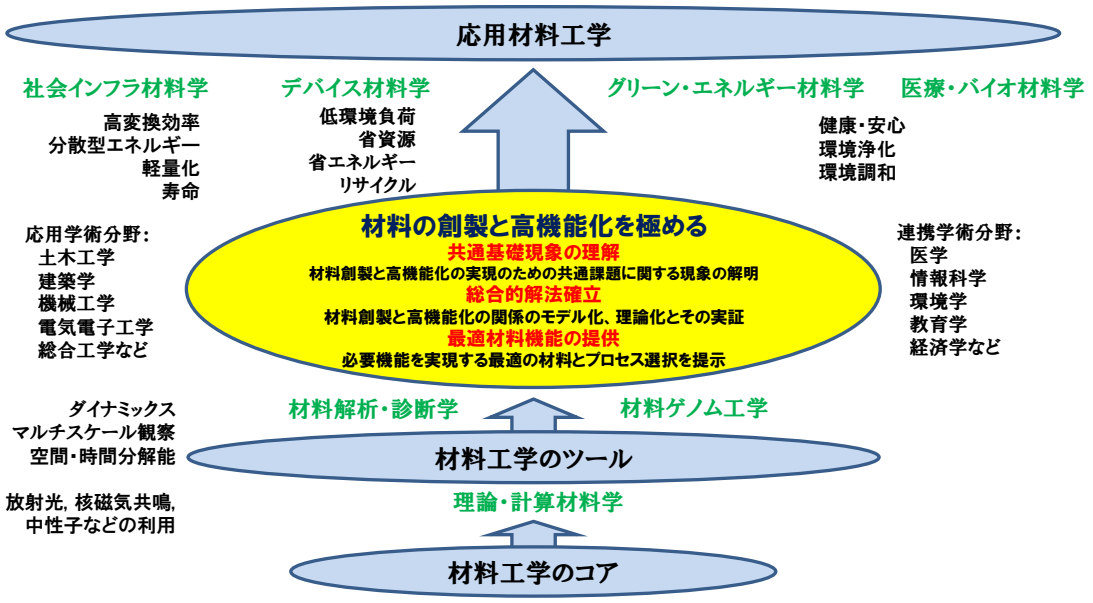
コ　材料ゲノム工学の夢ロードマップ

端緒的、部分的に系統性のある取り組みが生まれ始めている。

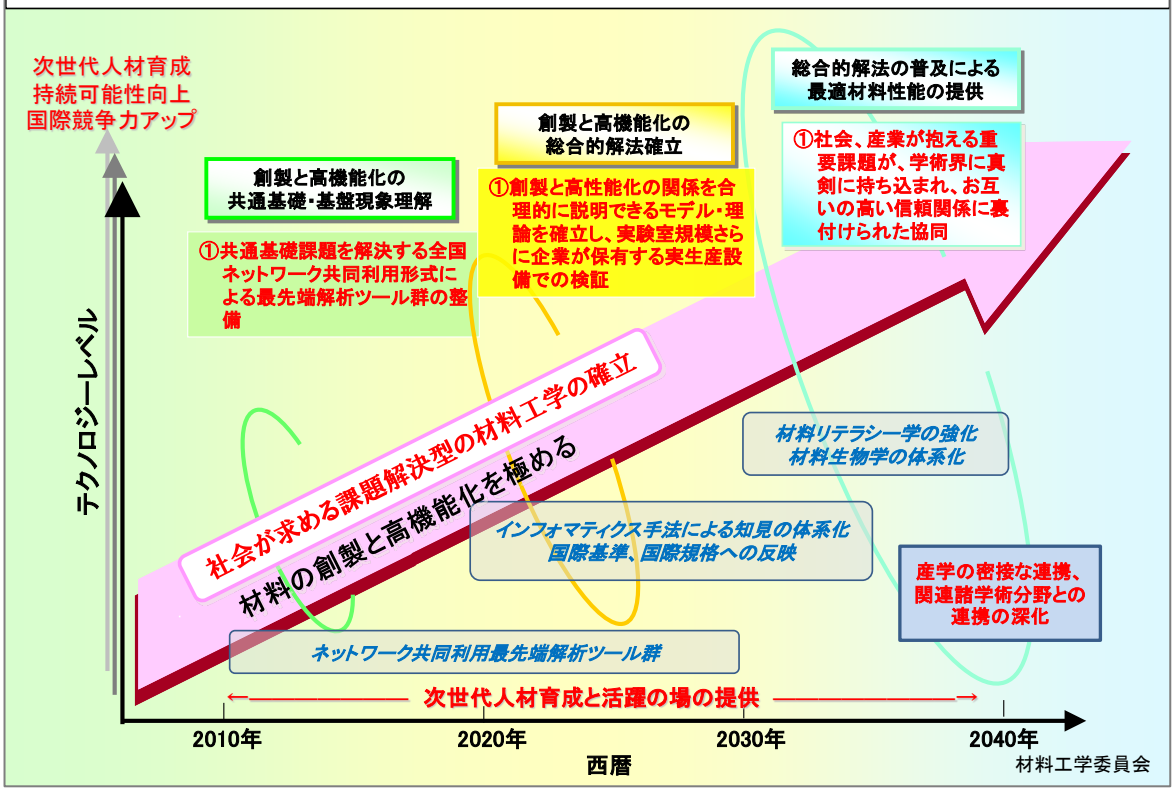
今後は、国際競争力の増進に寄与する、全国規模での協同作業手法を速やかに開発し、社会実装する。

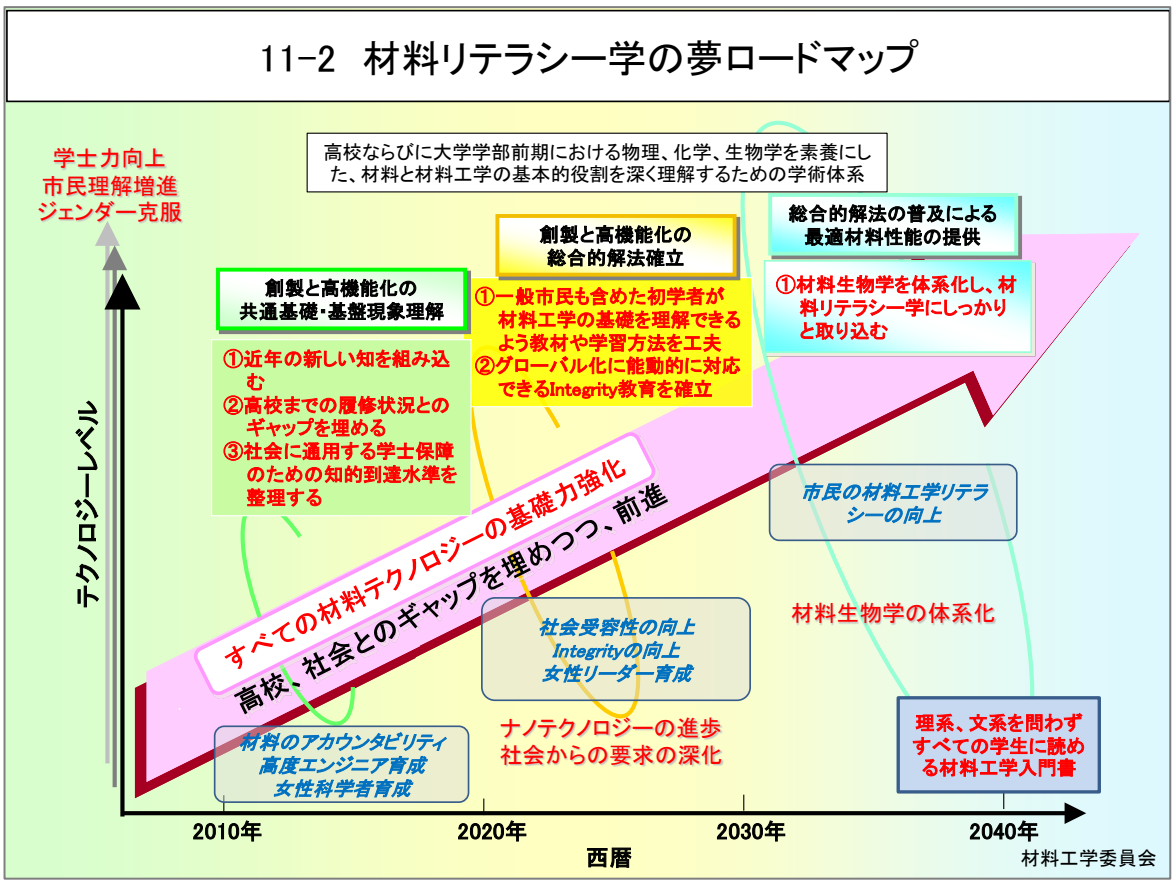
11　材料工学分野のビジョン

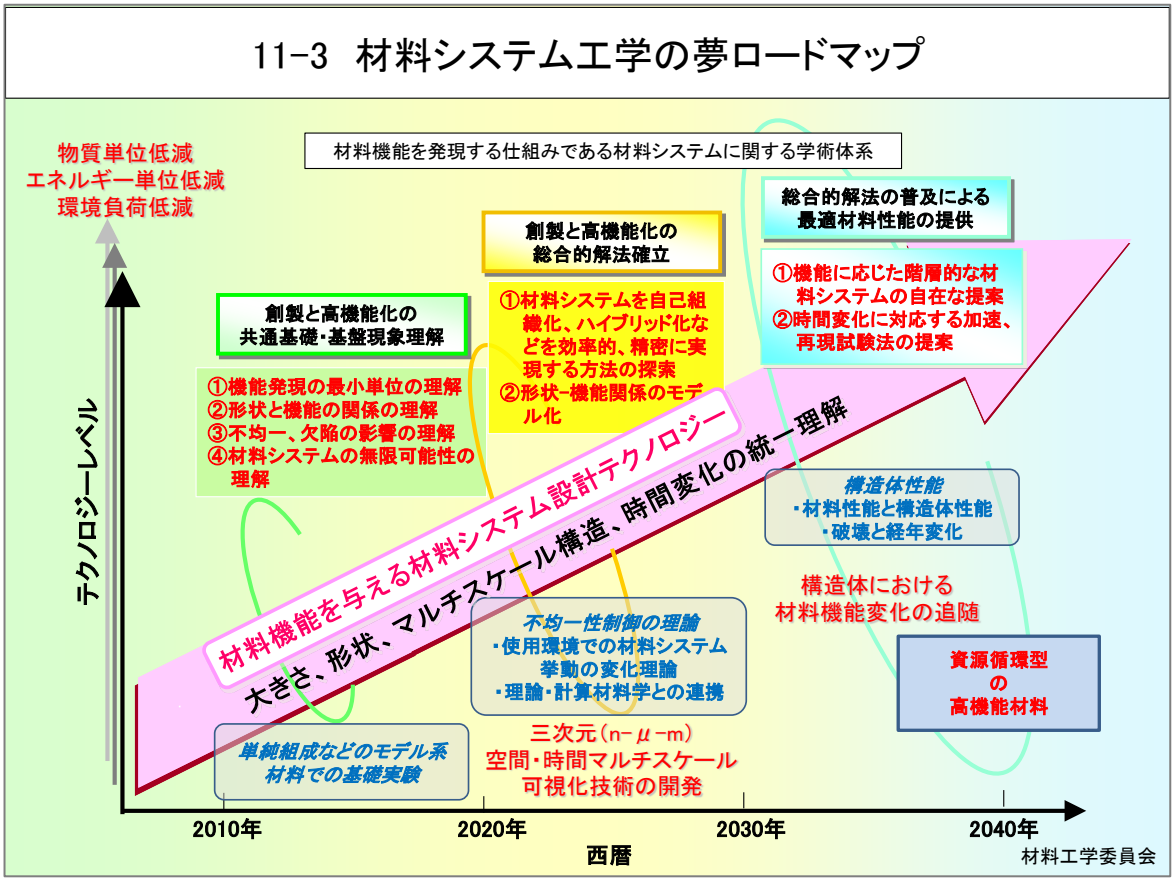
社会が求める課題解決のために、他学術分野と連携しつつ、多様性のあるアプローチを駆使し、あらゆる材料知（シーズ創出、セレンディピティなども含む）を統合して、新しい知識体系を構築する



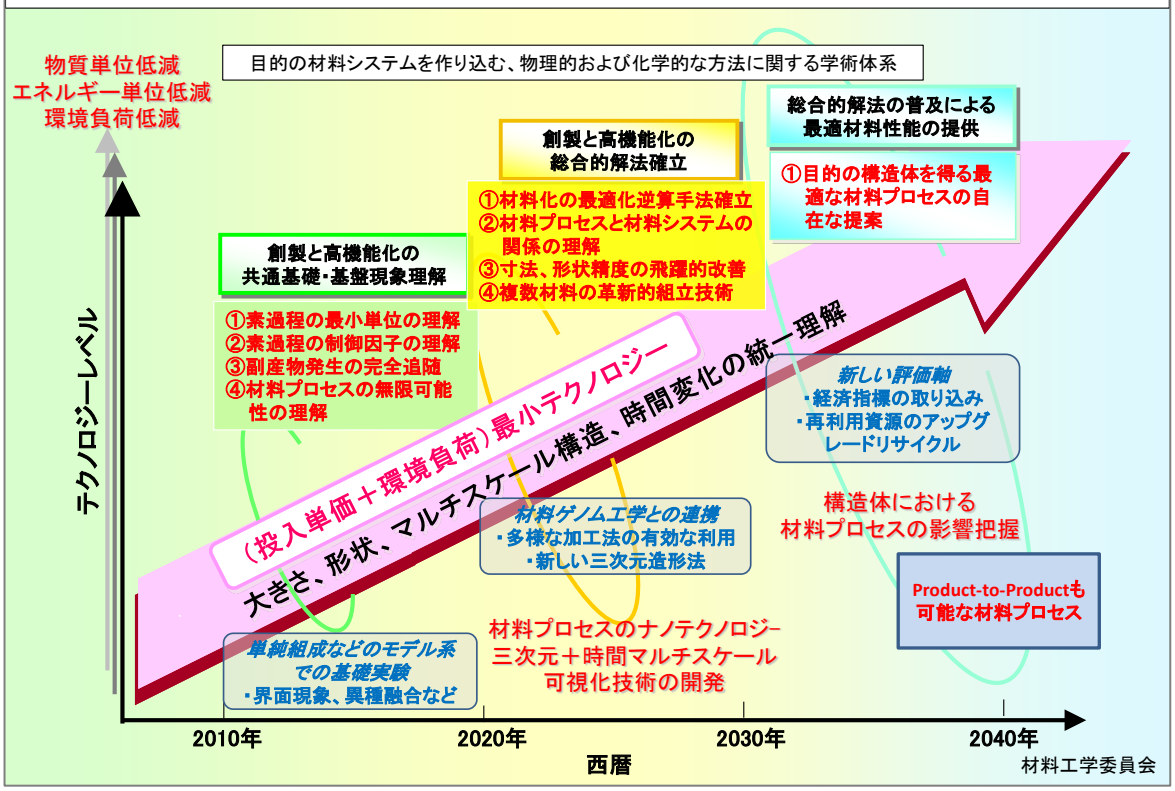
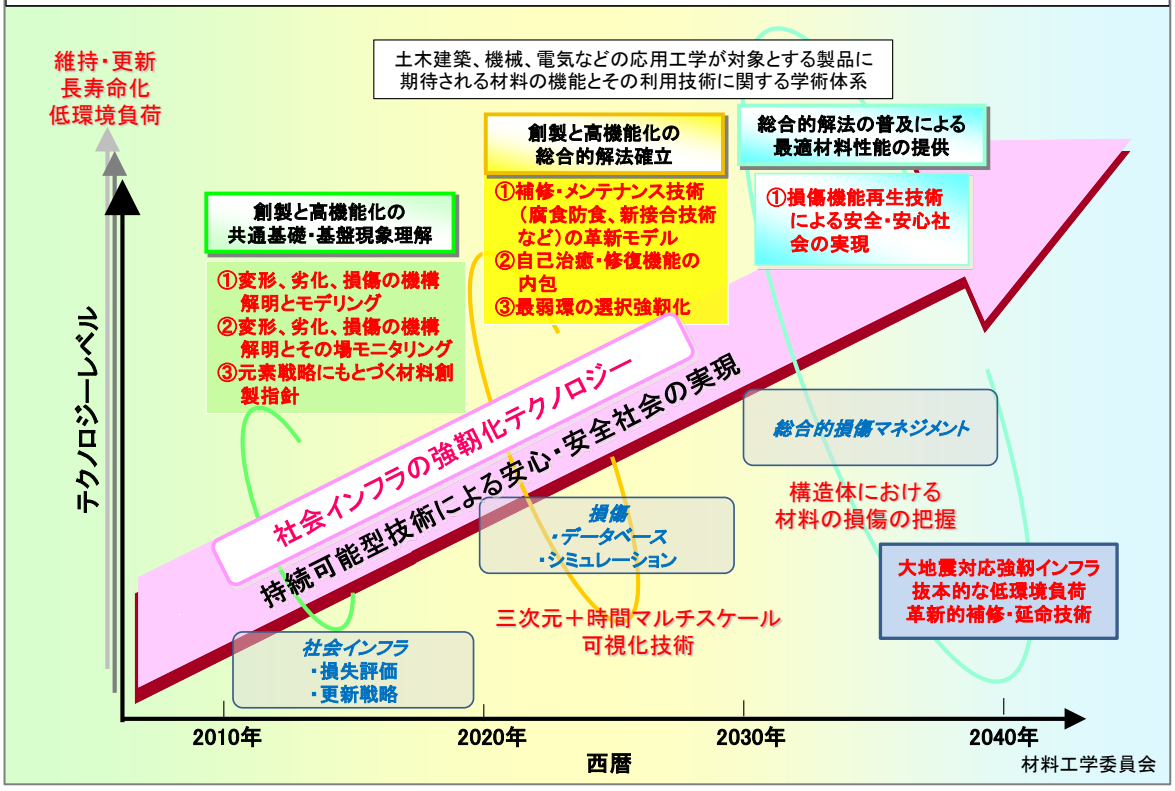
11-1　材料工学の夢ロードマップ




11-2 材料リテラシー学の夢ロードマップ
学士力向上
市民理解増進
ジェンダー克服
高校ならびに大学学部前期における物理、化学、生物学を素養にした、材料と材料工学の基本的役割を深く理解するための学術体系
創製と高機能化の共通基礎・基盤現象理解
①近年の新しい知を組み込む
②高校までの履修状況とのギャップを埋める
③社会に通用する学士保障のための知的到達水準を整理する
創製と高機能化の総合的解法確立
①一般市民も含めた初学者が材料工学の基礎を理解できるよう教材や学習方法を工夫
②グローバル化に能動的に対応できるIntegrity教育を確立
総合的解法の普及による最適材料性能の提供
①材料生物学を体系化し、材料リテラシー学にしっかりと取り込む
テクノロジーレベル
すべての材料テクノロジーの基礎力強化
高校、社会とのギャップを埋めつつ、前進
市民の材料工学リテラシーの向上
材料生物学の体系化
社会受容性の向上
Integrityの向上
女性リーダー育成
ナノテクノロジーの進歩
社会からの要求の深化
材料のアカウンタビリティ
高度エンジニア育成
女性科学者育成
理系、文系を問わずすべての学生に読める材料工学入門書
2010年
2020年
2030年
2040年
西暦
材料工学委員会


11-3 材料システム工学の夢ロードマップ
物質単位低減
エネルギー単位低減
環境負荷低減
材料機能を発現する仕組みである材料システムに関する学術体系
創製と高機能化の共通基礎・基盤現象理解
①機能発現の最小単位の理解
②形状と機能の関係の理解
③不均一、欠陥の影響の理解
④材料システムの無限可能性の理解
創製と高機能化の総合的解法確立
①材料システムを自己組織化、ハイブリッド化などを効率的、精密に実現する方法の探索
②形状-機能関係のモデル化
総合的解法の普及による最適材料性能の提供
①機能に応じた階層的な材料システムの自在な提案
②時間変化に対応する加速、再現試験法の提案
テクノロジーレベル
材料機能を与える材料システム設計テクノロジー
大きさ、形状、マルチスケール構造、時間変化の統一理解
構造体性能
・材料性能と構造体性能
・破壊と経年変化
構造体における
材料機能変化の追随
不均一性制御の理論
・使用環境での材料システム挙動の変化理論
・理論・計算材料学との連携
資源循環型の高機能材料
三次元（n-μ-m）
空間・時間マルチスケール
可視化技術の開発
単純組成などのモデル系材料での基礎実験
2010年
2020年
2030年
2040年
西暦
材料工学委員会

11-4 材料プロセス工学の夢ロードマップ



11-5 社会インフラ材料学の夢ロードマップ