

記録

文書番号	SCJ第22期-260729-2269000-034
委員会等名	材料工学委員会 材料工学将来展開分科会
標題	「材料工学分野の科学・夢ロードマップ2014」 の取りまとめに関する分科会記録
作成日	平成26年（2014年）7月29日

※本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

この記録は、日本学術会議 材料工学委員会材料工学将来展開分科会の審議経過を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議材料工学委員会
材料工学将来展開分科会
科学・夢ロードマップWG

委員長 吉田 豊信（第三部会員）物質・材料研究機構フェロー・東京大学名誉教授

副委員長 長井 寿（連携会員）物質・材料研究機構ナノ材料科学環境拠点マネージャー

幹事 小関 敏彦（連携会員）東京大学大学院工学系研究科教授

幹事 山口 周（連携会員）東京大学大学院工学系研究科教授

森田 一樹（連携会員）東京大学大学院工学系研究科教授

目次

I. 第三部からの作成依頼を受けた改訂方針検討と協力態勢構築（2013年4月2日から2013年7月19日まで）	3
I-1 材料工学将来展開分科会による改訂方針の検討	3
(1) 荒川第三部副部長の作成方針	3
(2) 更新の基本方針	3
(3) 連携する学協会等	7
(参考) 2013年4月2日：理学・工学分野における科学・夢ロードマップ2014の作成方針	7
(参考) 2013年5月17日：ロードマップ改訂計画（担当：分野別委員会）について	7
I-2 改訂協力体制の構築	17
II. ドラフト案の第三部提出まで（2013年7月19日から2013年12月27日まで）	18
II-1 学協会によるロードマップ個別シートの作成	18
II-2 学協会等との協力による最終版のとりまとめと提出	29
II-3 「材料工学分野の科学・夢ロードマップ2014」案（2013. 12. 27版）	34
III 参考情報	45
III-1 材料ゲノム工学に関する予備検討	45
III-2 材料システム工学に関する仮想QAC	47
III-3 10領域の分類と定義（2013. 12. 27版）	49
III-4 高校生のみなさんへ 材料工学の大事さ、深さ、面白さについて	49

I. 第三部からの作成依頼を受けた改訂方針検討と協力態勢構築（2013年4月2日から2013年7月19日まで）

I-1 材料工学将来展開分科会による改訂方針の検討

材料工学委員会（以下、委員会）は、2013年4月2日付および2013年5月17日付の作成依頼（後述、参考文書）を受けて、材料工学将来展開分科会（以下、分科会）に改訂版の作成を指示した。分科会は、まず幹事を中心に対応する科学・夢ロードマップWG（以下、WG）を組織した。WGは断続的に開催し、改訂基本方針などを検討した。まず、以下に示す作成方針案をまとめ、2013年7月3日開催の第22期：第9回分科会に諮った。第9回分科会は、協力学協会を原案団体以外にもできる限り広げることを申し合わせ、作成方針案を了承した。分科会委員による協力依頼に応じて、バイオマテリアル学会、軽金属学会、日本MRS、粉体粉末冶金協会、材料戦略委員会が新たに協力団体に加わった。

定められた改訂の基本方針等は以下のとおりである。

（1）荒川第三部部長の作成方針

- ・2013年7月 ロードマップ改訂方針の決定（協力学協会リストの作成と目次案作成）
- ・2013年12月 ロードマップ改訂版の提出
- ・2014年4月 報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ2014」の完成（担当：第三部拡大役員会）
- ・2014年8月頃 幹事会の承認後、報告を公表

（2）更新の基本方針

想定される読み手は、材料工学分野の関係者というよりは、むしろ他分野の関係者ひいては次世代を含む一般市民などの社会全般であり、そのために材料工学という専門分野の社会における存在意義を、学術の言葉で語り切ることが問われているということを基本認識とした。

したがって、文章は、「材料工学分野の展望（2010.4.5）」、「材料工学の定義（既定：後述）」、「材料工学における学術研究10領域（既定：後述）」、「第22期学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープラン（審議中）」、「学士課程教育における材料工学分野の参照基準（審議中）」などの関連文書と平仄を合わせ、それらと整合性を採って、「科学・夢ロードマップ 11. 材料工学分野（2011.8.24）」を見直すこととした。

なお、今回の第三部からの改訂指示は、「技術ロードマップ」ではなく、その背景にある「学術ロードマップ」を、関連学協会協力の下、材料工学委員会のクレジットでまとめ上げることと理解した。

そのために、

- 1) まずは関連学協会に今回の改定の趣旨と基本方針をできる限り丁寧に説明すること
- 2) 既に学術的な位置づけから定められている、材料工学分野の展望、材料工学の定義、材料工学における学術研究領域を見直すのではなく、それらを前提にし、整合性のある改訂を行うことが肝要であると判断した。

そのために、関連学協会等には、作成方針案を提示するだけでなく、その他必要事項について、簡明な説明もしくは具体性のあるたたき台を提示すべきと考えた。そこで、以下に示す、「材料工学の定義」、「材料工学における学術研究領域」の説明文章は勿論、それらと「『材料工学分野の展望』の整合性」などをまとめた。さらに、第三部からの作業指示に含まれる「三つのステップ」、「領域のビジョン」については、原案をたたき台としてまとめた。これらをまとめて、作成方針案と同時に関連学協会等に提示した。

※材料工学の定義

材料工学の定義	材料の創製と高機能化を極める工学
---------	------------------

※材料工学における学術研究10領域（Ⅲ－3参照）

学術研究領域		
No.	領域名	説明
1	材料システム工学	個々に固有の機能を有する材料が原子レベルからマクロスケールでインテグレートされることにより複雑な機能を新たに発現するためのマテリアルインターフェースの方法とそのシステム化利用技術
2	材料プロセス工学	材料の機能を発現させるための物理的・化学的な方法（プロセスング）を体系化した材料技術分野、リサイクルプロセスの技術
3	材料解析・診断学	材料の組織と構造の解析，材料が使用される環境や状態における材料の機能とその機能発現の阻害要因、問題の解析・診断とその処方から成る材料技術の領域
4	社会インフラ材料学	大型構造物を実現する構造材料の科学とその利用技術：鉄鋼，非鉄金属材料プラスチック，セメント，無機材料を含む
5	グリーン・エネルギー材料学	再生利用エネルギーのためのデバイス材料、およびリサイクル・資源の有効利用のための材料学
6	医療・バイオ材料学	医療に用いられる材料、並びに生体機能デバイス用材料の科学と応用技術
7	デバイス材料学	電子・光・磁気機能を利用するデバイスで用いられる材料の科学とその応用技術
8	材料ゲノム工学	高い水準で原子レベルからマクロスケールにわたる材料の機能設計を行うための方法とその利用技術
9	理論・計算材料工学	材料の機能発現機構の解明と解析を実現する新しい理論と理論計算の方法とその利用技術
10	材料の物理と化学 (材料リテラシー学)	材料の機能と特性を適切に理解・解釈し、分析し、また記述・表現する能力を与える材料学の基礎

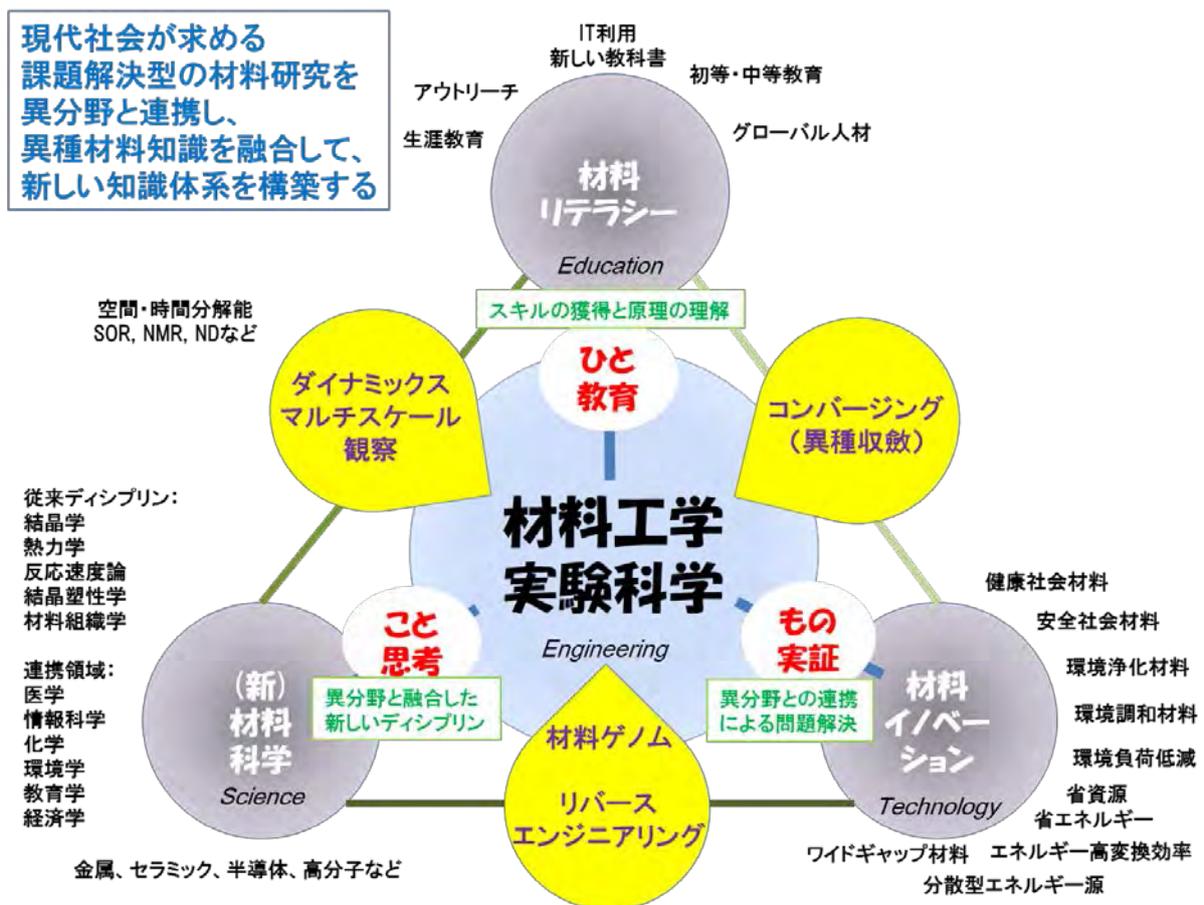
※「材料工学分野の展望（2010.4.5）」と「材料工学における学術研究10領域」の対応関係

学術研究領域		「材料工学の展望」におけるキーワード	
		個別	全体共通
1	材料システム工学		<ul style="list-style-type: none"> ・豊かな社会実現、 貧困問題解決 ・地球環境保全、循環社会実現 ・世界的視野に立って材料工学研究を推進できる人材の育成
2	材料プロセス工学	<ul style="list-style-type: none"> ・環境劣化に対する対応技術指導、リサイクルを前提とした材料・プロセス開発を広める ・自然を克服して世界中で同じ生活スタイルを確立するのではなく、自然条件に適合することで環境負荷の低減 	
3	材料解析・診断学		
4	社会インフラ材料学	・材料構造化コンバージング・テクノロジーの導入	
5	グリーン・エネルギー材料学	・分散型エネルギー源開発	
6	医療・バイオ材料学	・健康社会（難病克服）実現	
7	デバイス材料学		
8	材料ゲノム工学		
9	理論・計算材料工学	・基礎物理、基礎化学、生命科学や計算科学の進歩を理解し、応用領域としての環境科学、極限材料等にも精通	
10	材料の物理と化学 （材料リテラシー学）	<ul style="list-style-type: none"> ・見通しの良い新たな学問として若者にとって魅力ある分野へと整備する必要がある。そのため、 ・伝統的な知識体系に加え、現代基礎科学といった新しい知識体系の導入、 ・医学等の異分野との連携を図り再整備しなければならない。 	

※材料工学の進歩の三つのステップ（向う 30 年）案

短期 ～2020 年まで	資源、エネルギー、HQL 問題において材料工学が関与しうる側面からの問題解決に向けた糸口探索。	物理、化学、生命科学や計算科学の発展過程を理解し、異分野を積極的に導入し、問題解決に求められる材料工学の基礎・基盤を強化するために有効なツールを揃え、新しい知見を得る。
中期 ～2030 年まで	地球環境保全や循環型社会の実現、健康増進や高齢化対策における材料工学的シナリオ提示。	新しい材料工学のツール開拓を一層強化するとともにその有効活用展開を強化し、グローバル・ローカル問題に適用する。
長期 ～2040 年まで	世界的視野で地球環境保全や循環社会を実現し、健康増進や高齢化対策を通じた貧困問題解決への実践的寄与。	材料工学の国際性、歴史性を顕在化させ、グローバル・ローカルの均整の取れた社会発展に寄与する材料工学を構築する。

※材料工学の構成イメージ



(3) 連携する学協会等

日本金属学会、日本鉄鋼協会、日本材料学会、資源・素材学会、溶接学会、日本鋳造工学会、日本塑性加工学会、高分子学会、セラミック協会、その他

※参考「科学・夢ロードマップ 11. 材料工学分野 (2011. 8. 24)」の構成

1 1	材料工学分野の科学・夢ロードマップ	5 頁
1 1 a	材料技術	7 頁
1 1 b	金属技術	1 4 頁
1 1 c	溶接・接合技術	3 頁
1 1 d	塑性加工技術	4 頁

(参考) 2013年4月2日：理学・工学分野における科学・夢ロードマップ2014の作成方針

担当 荒川 泰彦 (第三部副部長)

1. 分野別委員会と関係学協会は、当該分野における理学・工学分野における科学・夢ロードマップの改訂作業を連携して行い、改訂版を第三部拡大役員会に提出する。
2. 第三部拡大役員会は、諸調整・審議を行った後、理学・工学分野における科学・夢ロードマップの改訂版を報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ2014」として公表する。
3. スケジュール
(ア)2013年7月 ロードマップ改訂方針の決定 (担当：分野別委員会)
(イ)2013年12月 ロードマップ改訂版の提出 (担当：分野別委員会)
(ウ)2014年4月 報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ2014」の完成 (担当：第三部拡大役員会)
(エ)2014年8月頃 幹事会の承認後、報告を公表

(参考) 2013年5月17日：ロードマップ改訂計画 (担当：分野別委員会) について

担当 荒川 泰彦 (第三部部长)
渡辺美代子 (第三部会員)

分野別委員会は、下記について 7月19日 までに事務局宛く kiyomi.okiyama@cao.go.jp >ご回答いただきたい。

『23期で作成する夢ロードマップ名と協働作業を行う学会のリスト』

(様式)

分野別委員会名 _____

	夢ロードマップ名	協働作業を行う学会名
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

取り纏めのイメージ

1. ○○分野

(1) ○○分野のビジョン

(A)

(a)

(b)

(B)

(C)

分野別委員会名

小項目は

(1) (2)・・・/(A) (B)・・・/(a) (b)・・・とする

(2) ○○分野のロードマップ

2. △△の夢ロードマップ

分野として、2. 以下のまとめ

3. □□の夢ロードマップ

学術研究領域名
あるいは学術研究小領域名

(1) 地球惑星科学分野のビジョン

地球惑星科学は太陽系全般における固体、流体、気体、プラズマ、さらには其処に芽生える生命の多様な形態を研究の対象とする幅広い学問分野である。特に地球という惑星は我々にとって身近な存在であり、この惑星の研究を通して太陽系の他の惑星、さらには系外の惑星系までを理解しようとする、野心的な学問分野でもある。

現在の地球は固体層、流体層、気体層、プラズマ層の4つが互いに影響し合いながら存在している。その形態の上に人類が発生し、特異な人間圏を形成している。人類の存在は地球環境へも影響を及ぼしている。この現在の地球の姿は、永久の昔からこうであったのではない。地球には起源があり、今とは異なる姿をとりつつ現在に至ったのである。この地球の歴史を調べ、さらには地球の未来の姿にも迫るために地球史という学問分野が存在している。この互いに関連する学問のキーワードが概要の中心サークルを取り巻く5つのサークルに示されている。いわく

- ・ 惑星「地球」
- ・ 地球史
- ・ 地球内部構造・変動機構
- ・ 人間圏
- ・ 地球環境

である。これらの分野をあまねく理解してこそ、この概要の中心に書かれている

- ・ 地球システム全容の理解と予測
- ・ 宇宙に開いた地球像の創出
- ・ 生命を育む地球惑星環境の理解

に至るのである。

—
—
—

(2) 地球惑星科学分野のロードマップ

宇宙惑星科学は他の学問分野と同様に、あるいはそれ以上に探査技術、観測技術、分析技術の進歩と歩調を合わせ進んでいく。特に日本における惑星探査はごく少数の成功（始源天体イトカワからの試料回収）を例外として、いまだ達成されて居らず、これが行われると新しいものにアプローチ出来るという点で飛躍的な進歩を遂げる

進歩のステップは3つに別れる

- (A) 宇宙における惑星系形成の仕組みを明らかにする
- (B) 第二の地球・生命居住可能惑星を宇宙に見いだす
- (C) 生命を育む様々な惑星環境を理解する

(A)を達成するためにはまず太陽系の様々な惑星を訪ね、その環境を理解しそれぞれを比較する(その中には、各惑星と太陽との相互作用の様々なあり方も含まれる)必要がある。惑星の探査は技術的理由から、地球に近い(太陽に近い)惑星から始まり、次第に太陽から離れた惑星に展開していく。これはより始源的な環境を調べるという方向性とも一致する。また系外惑星の観測を開始し、これを計算機によるシミュレーションと比較していく必要がある。

(B)を達成するためには太陽と惑星の相互作用をより深く理解すると共に、太陽そのものをさらによく知らなければならない。そして、目を外に向ければ第二の地球と呼ばれるものが発見されていくだろう。天文観測と太陽系探査の融合がなされるステップである。また宇宙からやってくる物質を分析する方法が確立される時期でもある。

1-3 材料工学将来展開分科会「材料工学委員会「科学・夢ロードマップ」改定とその作業スケジュール案」

- 1) 1st (7月、8月) 作業体制の構築とドラフトの作成
- 2) 2nd (9月、10月) ドラフト案のブラッシュアップ
- 3) 3rd (11月、12月) 意見を集約し、最終案を第三部に提出。

◆『23期で作成する夢ロードマップ名と協働作業を行う学会のリスト』

分野別委員会名 材料工学委員会

	夢ロードマップ名	協働作業を行う学会名
1	材料工学分野の科学・夢ロードマップ	日本金属学会
2		日本鉄鋼協会
3		日本材料学会
4		資源・素材学会
5		溶接学会
6		日本鑄造工学会
7		日本塑性加工学会
8		高分子学会
9		日本セラミックス協会
10		バイオマテリアル学会
11		軽金属学会
12		日本 MRS
13		粉体粉末冶金協会
14		材料戦略委員会 (関連学協会等の連絡組織)

(1) 材料工学分野のビジョン

材料工学は、「材料の創製と高機能化を極める工学」と定義される。

材料の進化は、人間の歴史の中で常に新しい科学・技術や新しい産業の発展の基盤となって、人類の繁栄と社会進歩に貢献してきた。ところが、社会の進歩につれて、新しい需要が生まれ、既存技術の弱点の克服への期待も高まり、さらなる材料の進化が求められるようになる。このように、材料と社会は、長い歴史の中で常に相補的・相乗的な関係を持ちながら、問題解決を通じ、共に進化し今日に至っている。

材料の生産や利用は、それぞれの地域の自然環境や歴史発展の制約を受けざるをえないが、今や素材・エネルギー資源の調達、製品製作とそれらのリサイクルなどの流通は地球規模で展開されている。また、製品等の需要者もグローバル化し、必然的に需要者からの要求は多様化している。かつてなかったこれらの状況変化に的確に対応できるかどうかかが国際競争力の決め手となっている。

さらに、材料に関する新しい知見も西欧、日本の先進国の枠から外れて、一層グローバルな環境での熾烈な競争が高まっている。このような中で、我が国の材料工学は国益を守りつつ、グローバル規準に積極的に立脚して、世界をリードすることが期待されている。

材料の開発・設計においては、時代の進化と共に、複数の特性・性能の両立やバランスある発展への期待がより先鋭化している。同時に入手容易性、安定供給性、経済性、さらには環境性能など、極めて多様な経済的、社会的視点からも最適化することが期待されている。

材料工学は、したがって、主に物理、化学、さらには生物科学も含む基礎科学を融合した材料独自の専門分野を持ちながら、様々な工学分野を横断する基盤となる学術分野である。さらに経済的、社会的視点を入れ込むためには、あらゆる学術領域との連携を柔軟に強めて行かざるを得ない。すなわち、材料工学が扱う範囲は、物質の構造と機能・特性の関わりを基礎とし、材料化のための様々な要求性能の実現と高効率な製造プロセスの追求、さらに材料による構造物やデバイス（ここでは

部材と呼ぶ) の設計、部材の加工技術と製造プロセス、材料による製品の社会価値尺度の評価などまで、基礎科学から応用学のきわめて多岐にわたっている。

材料工学の対象を時空間からみれば、時間的にはピコ・ナノ秒レベルでの現象や挙動の解明から年単位のオーダーでの特性変化や信頼性評価まで、空間的には原子スケールやナノレベルの物質の設計・制御からキロメートルオーダーの構造体までと、時間、空間ともに極めて広く、マルチスケールなことを特徴とする工学である。

材料工学による社会価値尺度は、上記で述べた材料の機能・特性は勿論のこと、材料・部材の性能保証や信頼性、寿命や価値の最適化設計などに関する説明責任や、資源からリサイクル・再生までの材料のライフサイクルの解析や持続可能社会の設計などに関する持続可能性などに展開している。

このように、材料工学は材料の創製と高機能化を追求し極めようとする工学である。ここで「創製」とは材料の設計・創出、ならびに材料の製造・生産を意味し、「高機能化」とは材料・部材の諸機能の発現と向上に加え、上記の様々な社会価値尺度の向上を意味する。

材料工学の基礎 は、既に体系化が進んでいる材料物理と材料化学、今後急速な体系化が求められる材料生物科学の基礎科学と、金属、セラミックス、ソフトマテリアルなどの材料各論からなる。これらの知見を材料工学者は基礎として勿論自家薬籠中とすべきだが、ひろく市民にその理解を広げるべきであり、その観点から**材料リテラシー学 (材料の物理と化学)** と呼ぶ。

材料の創製 は、材料リテラシー学を基礎とし、個々に固有の機能を有する材料が原子レベルからマクロスケールでインテグレートされることにより複雑な機能を新たに発現するためのマテリアルインターフェースの方法とそのシステム化利用技術を扱う**材料システム工学**、材料の機能を発現させるための物理的・化学的方法 (プロセッシング) を体系化し、リサイクルプロセスも扱う**材料プロセス工学**、材料の組織と構造の解析、材料が使用される環境や状態における材料の機能とその機能発現の阻害要因、問題の解析・診断とその処方を行う**材料解析・診断学**を駆使して追究される。

材料の高機能化 は、材料リテラシー学を基礎とし、部材の安全性や寿命、持続可能性、環境性能の向上を扱う**社会インフラ材料学**、再生可能エネルギーの利用、リサイクル・資源の有効利用のための**グリーン・エネルギー材料学**、さらに生体や医療へ適用される材料の高機能化を追求する**医療・バイオ材料学**、電気・磁気・光をはじめ様々な機能性の追求とデバイスへの展開に向けた**デバイス材料学**を駆使して追及される。

材料工学の将来ビジョン は、必要とされる材料・部材の性能が提示されれば、それを実現するための物質、材料の組み合わせの選択、並び方の設計、それらの製造プロセスが、最も高い社会的価値尺度で決定できるようにすることである。そのためには、材料の機能発現機構の解明と解析を実現する新しい理論と理論計算の方法とその利用技術を扱う**理論・計算材料工学**、高い水準で原子レベルからマクロスケールにわたる材料の機能設計を行うための方法とその利用技術を扱う**材料ゲノム工学**などを駆使して達成されるものである。

これらの互いに関連する学問のキーワードが概要の中心サークルを取り巻く4つのサークルに示されている。いわく

材料工学の基礎

- ・材料リテラシー学 (材料の物理と化学)

材料の創製

- ・材料システム工学
- ・材料プロセス工学
- ・材料解析・診断学

材料の高機能化

- ・社会インフラ材料学
- ・グリーン・エネルギー材料学
- ・医療・バイオ材料学
- ・デバイス材料学

材料の創製と高機能化の統合化

- ・理論・計算材料工学

・材料ゲノム工学

である。これらの分野をあまねく理解してこそ、この概要の中心に書かれている

- ・ 創製と高機能化の共通基礎現象調査
- ・ 創製と高機能化の関係のモデル化、理論化
- ・ 必要性能を実現する総合解法の実現

に至るのである。

(2) 材料工学分野のロードマップ

材料工学分野の特有の性格として、社会基盤を責任持って担うために様々なベクトルにおいて多様化せざるを得ない。しかし、そのために一般社会がその存在意義を正しく認識する際の障害ともなっている。材料工学に関わる専門家には、その障害を自ら乗り越え、正当な理解と支援を一般社会から得るための一段の努力が求められる。

また、貴重な知見が、広範囲でかつ歴史的に高く蓄積されてきたことが、強みの源泉であるが、それが次代を担う専門家の育成の一定の障害ともなっている。材料工学は今後とも従来の枠内に留まらずあらゆる学術分野と連携し、必要なものを取り込んでいかななくてはならない。

したがって、専門知識を今後とも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、合理的に活用する新しい総合的解法手法を開発することが大課題の打開の鍵となる可能性が高い。計算・データ処理技術の長足の進歩をさらに促進し、材料工学分野における研究開発活動の相互利用のためのネットワーク化を図れば、その実現性が一層高くなる。向こう30年以内に、国際交流を進めつつ、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つに別れる

- (A) 材料の創製と高機能化における共通基礎課題を抽出し、調査する
- (B) 材料の創製と高性能化の関係をモデル化、理論化し、実証する
- (C) 社会が求める必要性能を実現する総合解法を理論的に提示する

(A) を達成するためには、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化する視点を持って、総合的かつ体系的に整備することが求められる。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) を達成するために、創製と高性能化の関係を合理的に説明できるモデル・理論を確立し始める。実証においては、実験室規模での検証は勿論、企業が保有する実生産設備での検証も不可欠となる。そのためには、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必要がある。(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することが期待される。また、(A) で育成された人材が第一線で活躍し始める段階となっていなくてはならない。

(C) は、我が国の材料工学の在り様を一変させる。社会、産業が抱える重要課題が、学术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が、必要性能を実現する総合解法がその際の実用的な武器となる。材料生物科学が体系化され、材料リテラシー学が一段と高い地平で統合化されることとなる。

1. 材料リテラシー学（材料の物理と化学）領域の科学・夢ロードマップ

材料の機能と特性を適切に理解・解釈し、分析し、また記述・表現する能力を与える材料学の基礎

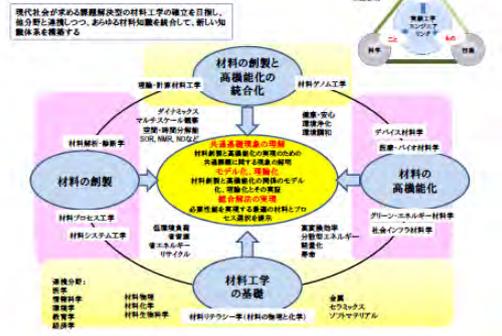
2. 材料システム工学領域の科学・夢ロードマップ

個々に固有の機能を有する材料が原子レベルからマクロスケールでインテグレートされること

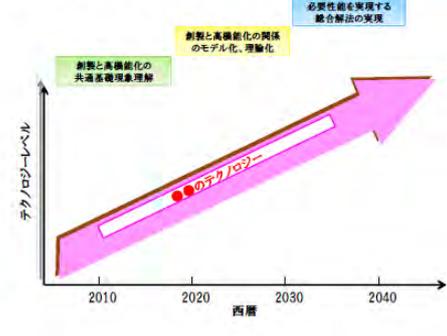
により複雑な機能を新たに発現するためのマテリアルインターフェースの方法とそのシステム化利用技術

3. 材料プロセス工学領域の科学・夢ロードマップ
材料の機能を発現させるための物理的・化学的な方法（プロセッシング）を体系化した材料技術分野、リサイクルプロセスの技術
4. 材料解析・診断学領域の科学・夢ロードマップ
材料の組織と構造の解析，材料が使用される環境や状態における材料の機能とその機能発現の阻害要因、問題の解析・診断とその処方から成る材料技術の領域
5. 社会インフラ材料学領域の科学・夢ロードマップ
大型構造物を実現する構造材料の科学とその利用技術：鉄鋼，非鉄金属材料，プラスチック，セメント，無機材料を含む
6. グリーン・エネルギー材料学領域の科学・夢ロードマップ
再生可能エネルギーの利用、およびリサイクル・資源の有効利用のための材料学
7. 医療・バイオ材料学領域の科学・夢ロードマップ
医療に用いられる材料、並びに生体機能デバイス用材料の科学と応用技術
8. デバイス材料学領域の科学・夢ロードマップ
電子・光・磁気機能を利用するデバイスで用いられる材料の科学とその応用技術
9. 理論・計算材料工学領域の科学・夢ロードマップ
材料の機能発現機構の解明と解析を実現する新しい理論と理論計算の方法とその利用技術
10. 材料ゲノム工学領域の科学・夢ロードマップ
高い水準で原子レベルからマクロスケールにわたる材料の機能設計を行うための方法とその利用技術

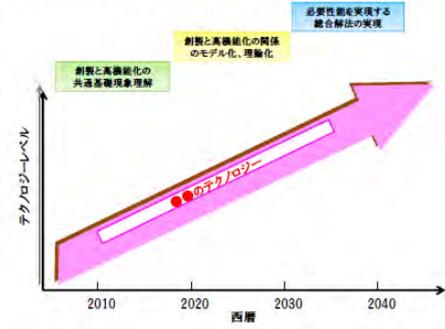
材料工学分野のビジョン



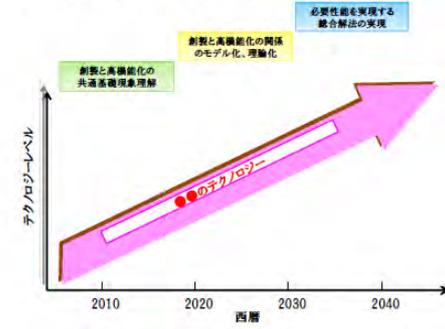
1. 材料工学分野の科学・夢ロードマップ



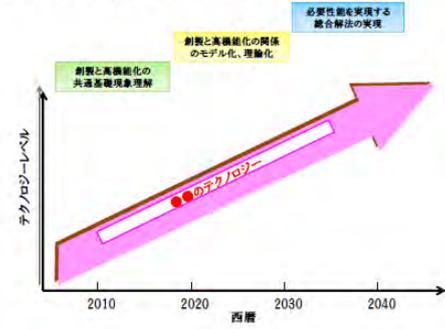
2. 材料リテラシー学(材料の物理と化学)領域の科学・夢ロードマップ



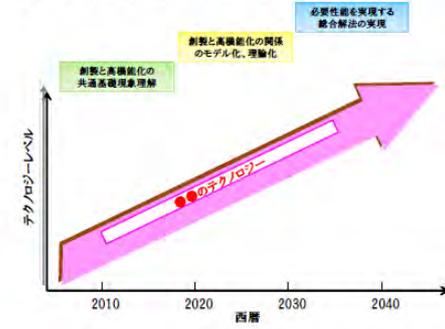
3. 材料システム工学領域の科学・夢ロードマップ



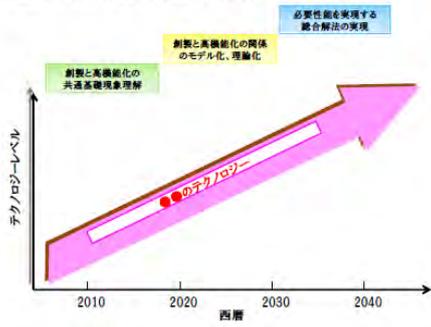
4. 材料プロセス工学領域の科学・夢ロードマップ



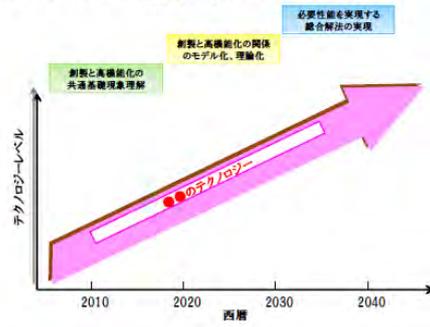
5. 材料解析・診断学領域の科学・夢ロードマップ



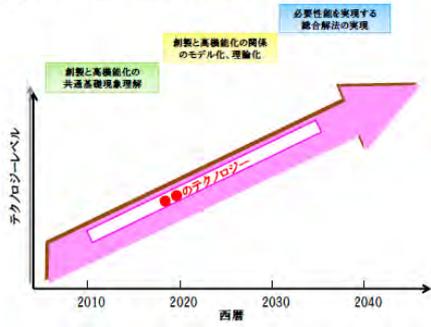
6. 社会インフラ材料科学領域の科学・夢ロードマップ



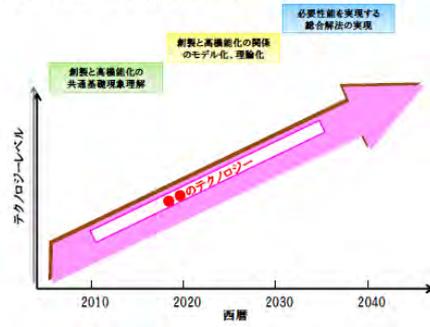
7. グリーン・エネルギー材料科学領域の科学・夢ロードマップ



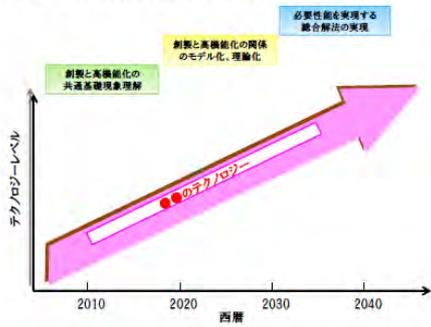
8. 医療・バイオ材料科学領域の科学・夢ロードマップ



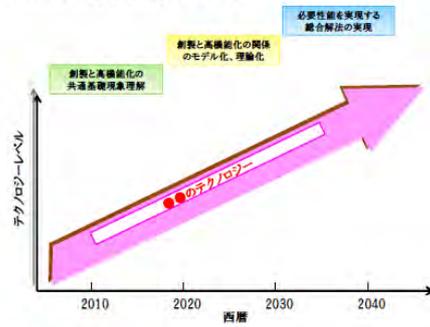
9. デバイス材料科学領域の科学・夢ロードマップ



10. 理論・計算材料工学領域の科学・夢ロードマップ



11. 材料ゲノム工学領域の科学・夢ロードマップ



I-2 改訂協力体制の構築

以上の準備を整え、作成方針案について、2013年7月3日に関係学協会代表への協力依頼と意見交換、2013年7月12日に材料戦略委員会企画委員会への協力依頼と意見交換などにより、関連団体の賛同を確認し、2013年7月19日にロードマップ改訂計画を指定書式に則って第三部宛て提出した。

その後、作成方針に基づき、以下のより具体的なお願いとスケジュールを関連学協会に提示し、改訂作業を進めた。

(お願い)

(1) 「材料工学分野のビジョン」(1枚)は、WGで原案を作成し、回覧しますので、ご忌憚のないご意見をお寄せください。

(2) 「学術研究領域毎のロードマップ」は各領域に1枚、計10枚を最終的にはWGでまとめますが、まず協力学協会に原案作成をお願いします。各領域に何枚でもご提案いただいても結構です。ご提案のものを参考に、WGでまとめたものを回覧しますので、それに対して後日ご忌憚のないご意見をお寄せください。

(3) 本文については、今回提示のものを原案として、ご忌憚のないご意見をお寄せください。

(大まかなスケジュール)

(1) 1st (7月、8月) 作業体制の構築とドラフトの作成

・8月末までに、協力学協会および材料工学委員会メンバーにドラフトを配布

※ドラフトの作成に当たっては、2011版にご協力いただいた材料戦略委員会に今回も多大なご協力をお願いする。

(2) 2nd (9月、10月) ドラフト案のブラッシュアップ

・9月末までに、コメントを集約する

・10月末までに、WGがドラフト案をブラッシュアップして、最終案をまとめる

(3) 3rd (11月、12月)

・11月1日に関連学協会代表に集まっておいただき、最終案を提示し、意見交換の場を設ける。材料工学委員会も同日同趣旨で開催。

・11月末までに意見を集約し、最終案を手直しし、材料工学委員会でオーソライズして、12月中旬に第三部に提出。

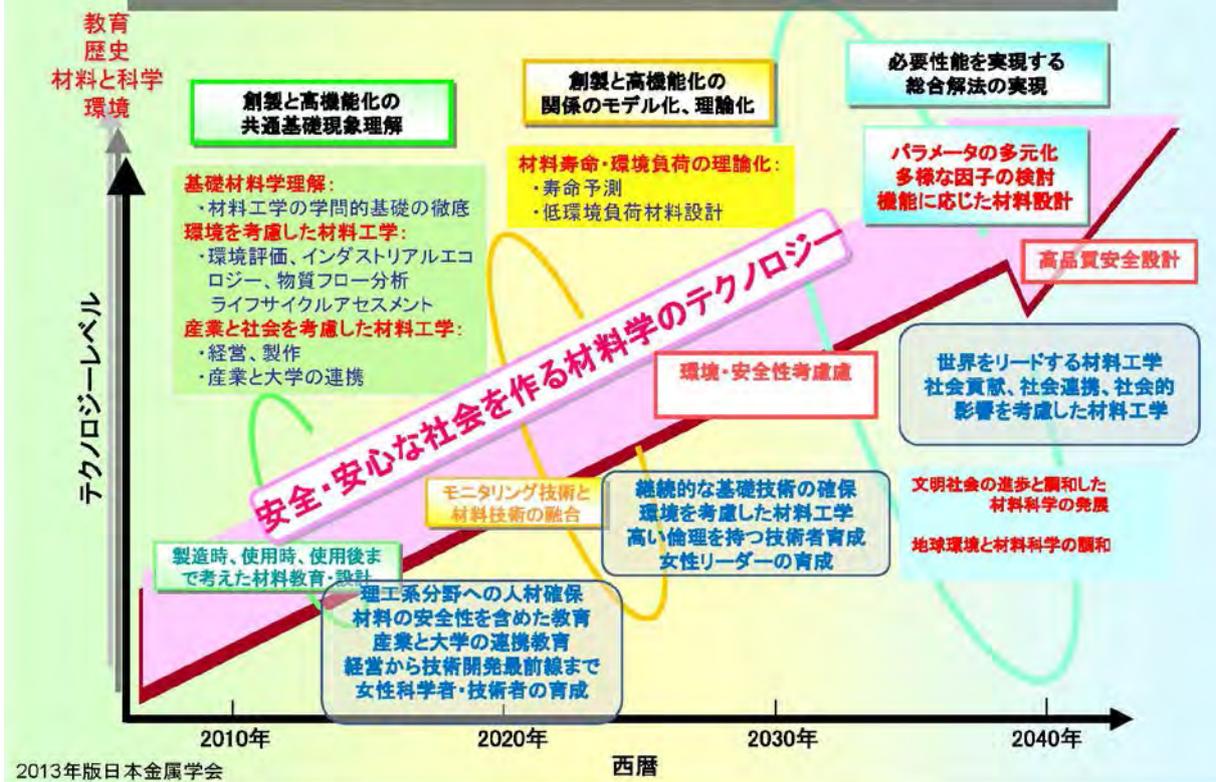
II. ドラフト案の第三部提出まで（2013年7月19日から2013年12月27日まで）

II-1 学協会によるロードマップ個別シートの作成

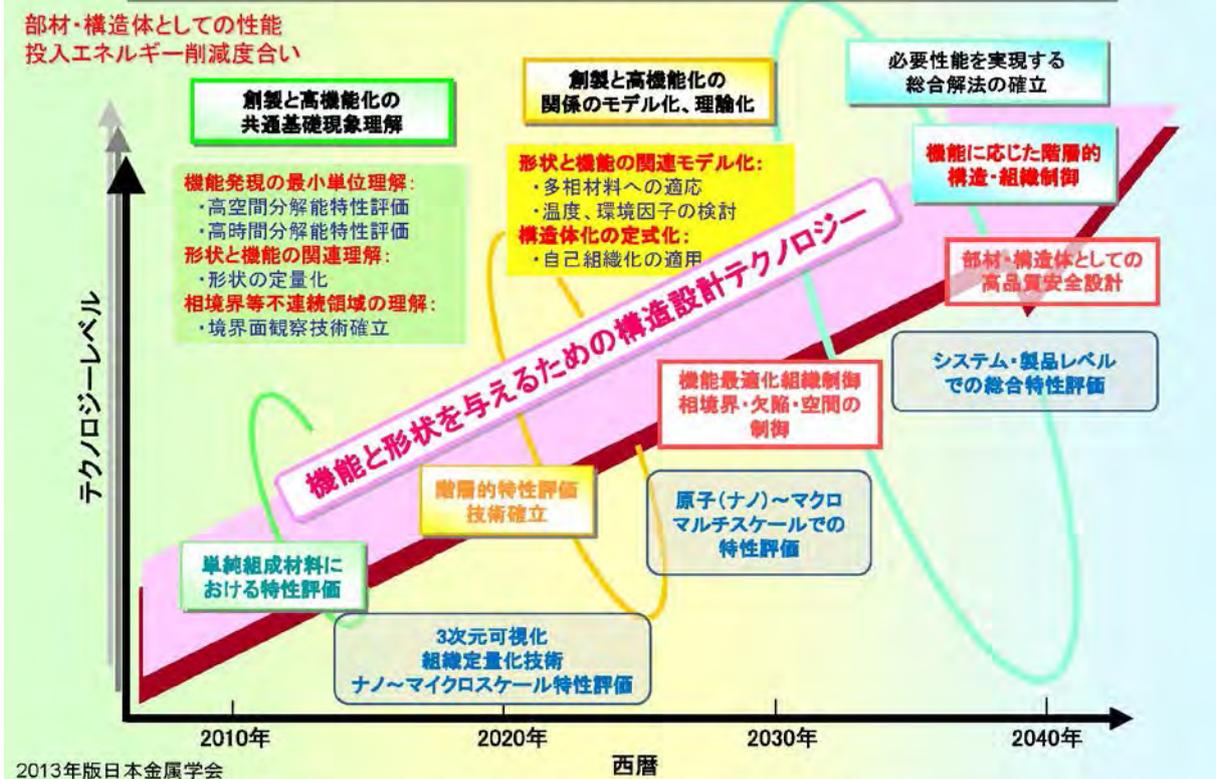
下表に示すように、多くの協力学協会は、材料戦略委員会に参加していることもあり、材料戦略委員会幹事会の調整の下で、個別シートを作成し、期限までに提出された。また、独自に個別シートを提出された学協会もあった。提出された個別シートは、後掲の20枚に及んだ。これらを参考に、WGがロードマップ改訂版を作成することになるが、この記録では、各学協会のオリジナリティを尊重し、その資料的価値を認める立場から、下表に黒丸印で示した個別シートをこの記録に掲載する。後掲の各個別シートの左下に作成学協会名が明記してある。

材料工学の領域	個別学協会	材料戦略委員会（◎主担当学協会）	
	分担学協会（○、●は個別シート作成） ●の個別シートを記録する		まとめ
材料リテラシー学		◎日本金属学会（○）	●
		日本鉄鋼協会	
材料システム工学		◎日本金属学会（●）	
		日本材料学会（●）	
材料プロセス工学		◎日本鉄鋼協会（○）	●
		資源・素材学会	
材料解析・診断学		◎日本材料学会（●）	○
		軽金属学会（●）	
社会インフラ材料学		◎日本鉄鋼協会（●）	
		日本金属学会（●）	
		腐食防食学会（●）	
		日本材料学会（●）	
		日本鋳造工学会（●）	
グリーンエネルギー材料学		◎日本金属学会（●）	
		軽金属学会（●）	
医療・バイオ材料学	バイオマテリアル学会（●）	◎日本金属学会（●）	
デバイス材料学	MRS-J（●）	◎日本金属学会（●）	
材料ゲノム工学		◎日本金属学会（○）	●
		日本鉄鋼協会	
理論・計算材料工学		◎日本金属学会（○）	●
		日本鉄鋼協会	

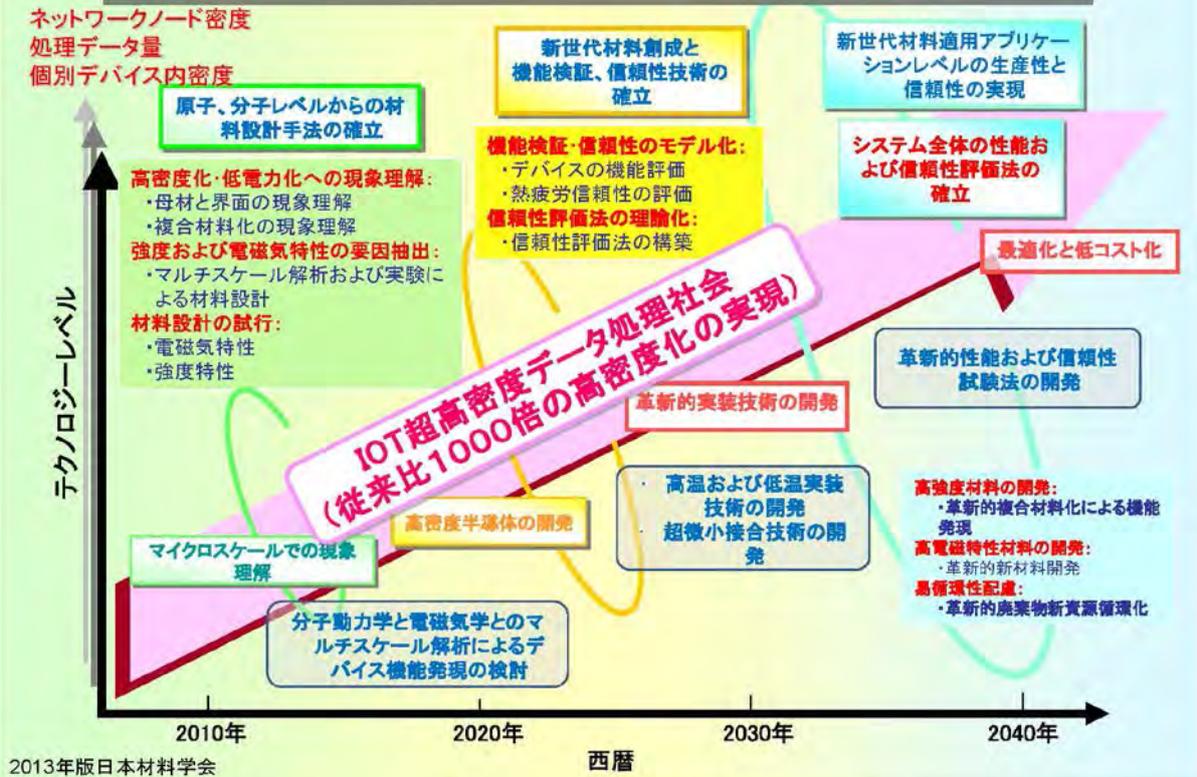
材料リテラシー工学領域の夢ロードマップ



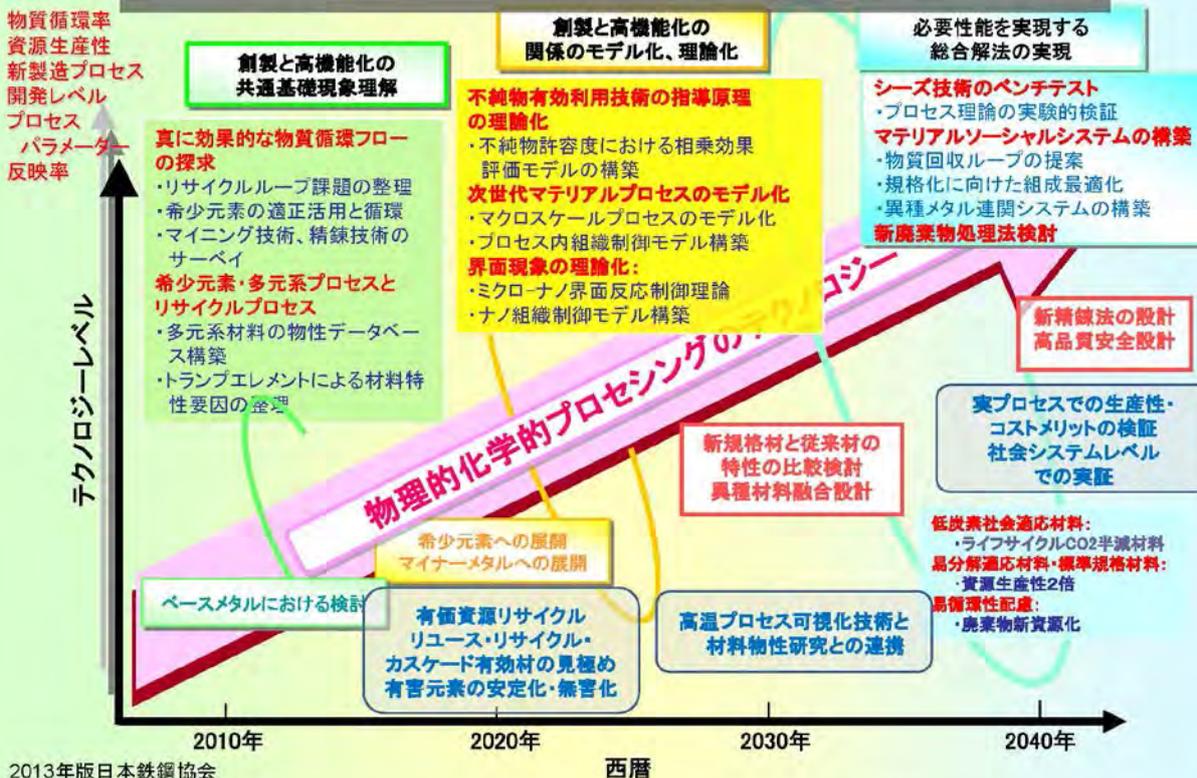
材料システム工学領域の夢ロードマップ



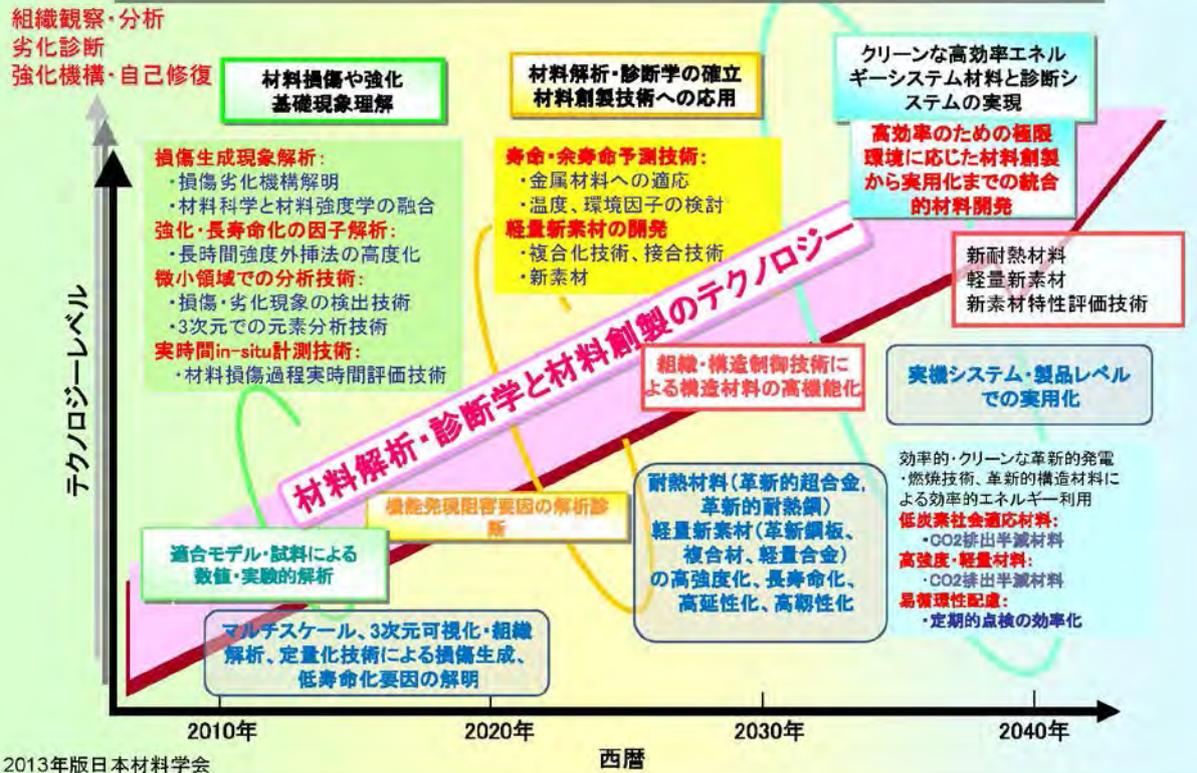
材料システム工学領域の夢ロードマップ



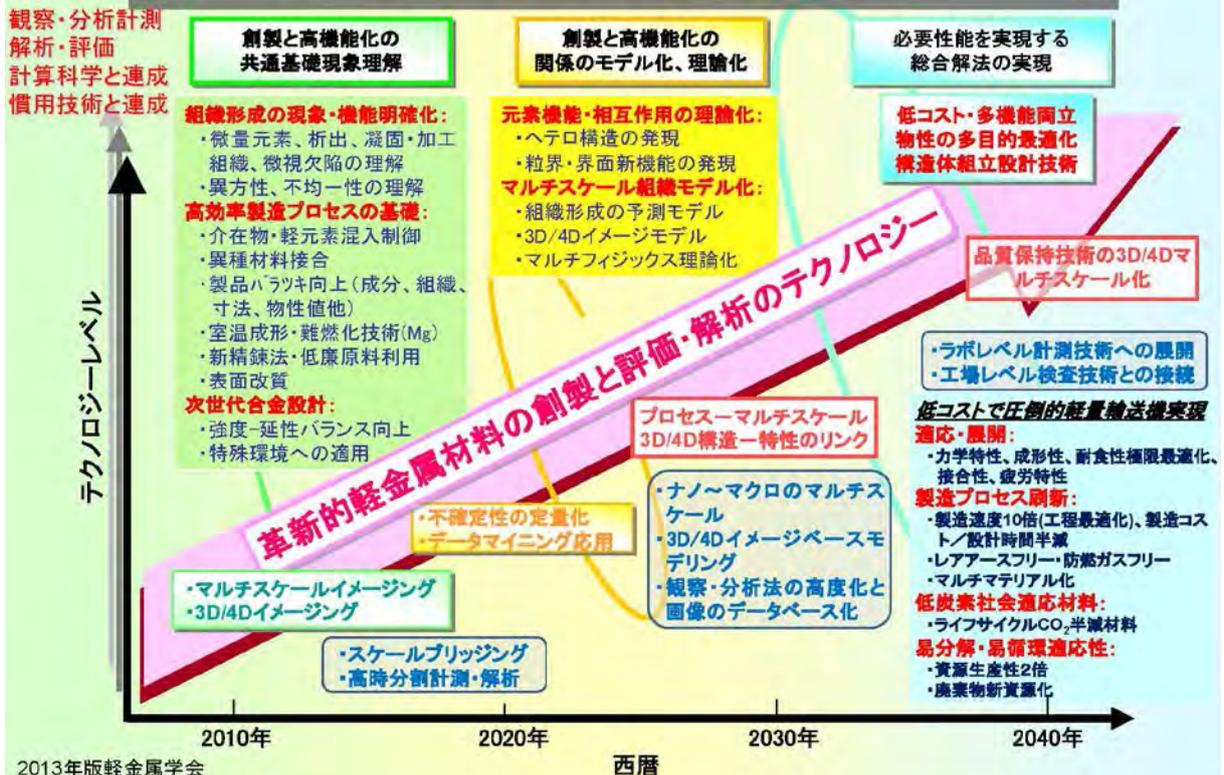
材料プロセス工学領域の夢ロードマップ



材料解析・診断学の夢ロードマップ

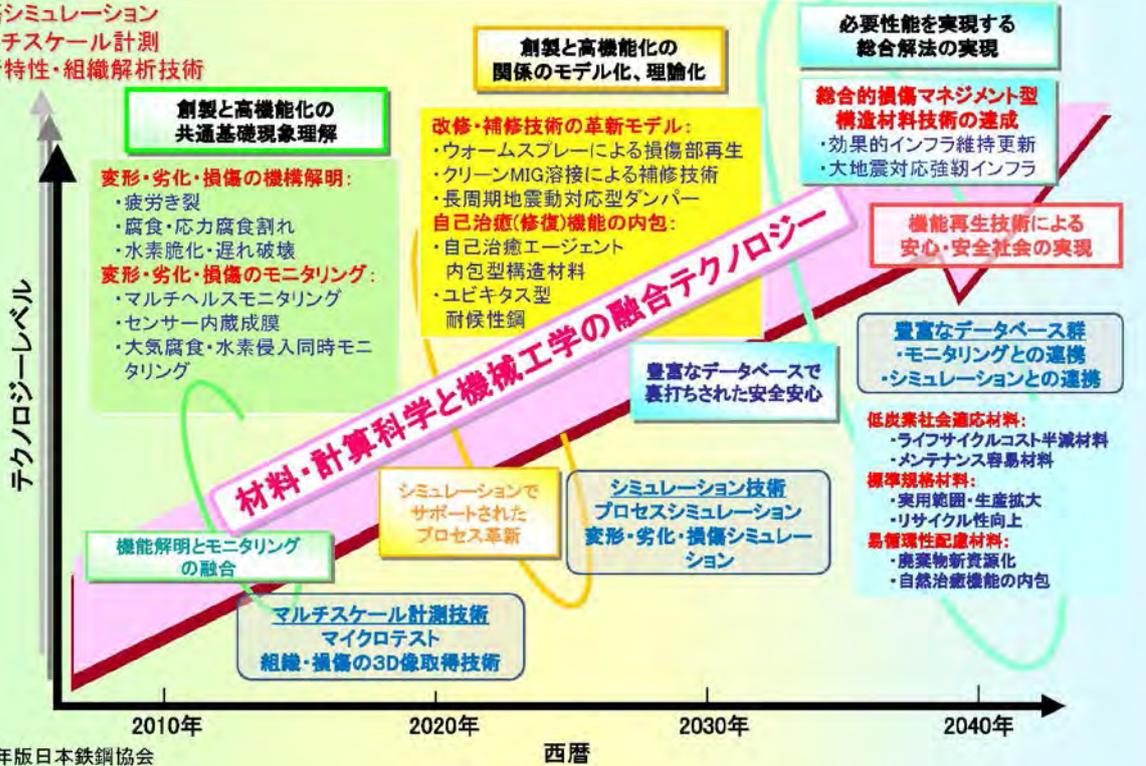


材料解析・診断学領域の夢ロードマップ



社会インフラ材料学領域の夢ロードマップ

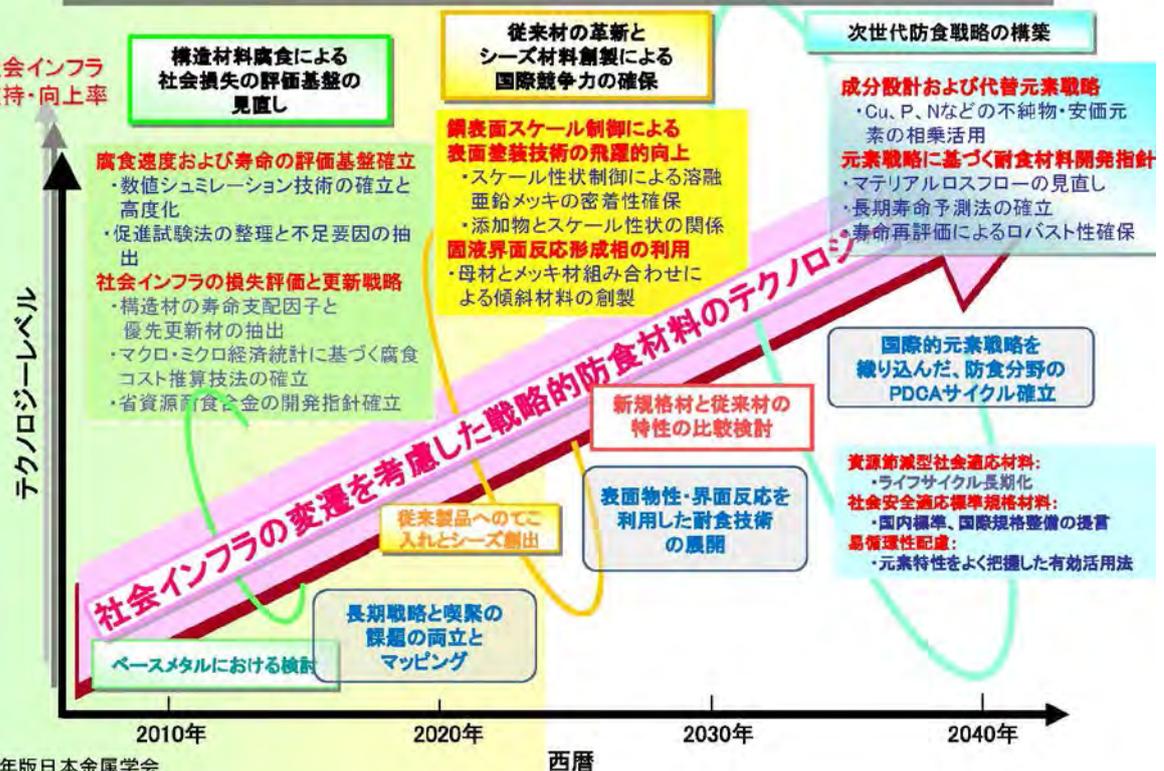
損傷シミュレーション
マルチスケール計測
局所特性・組織解析技術



2013年版日本鉄鋼協会

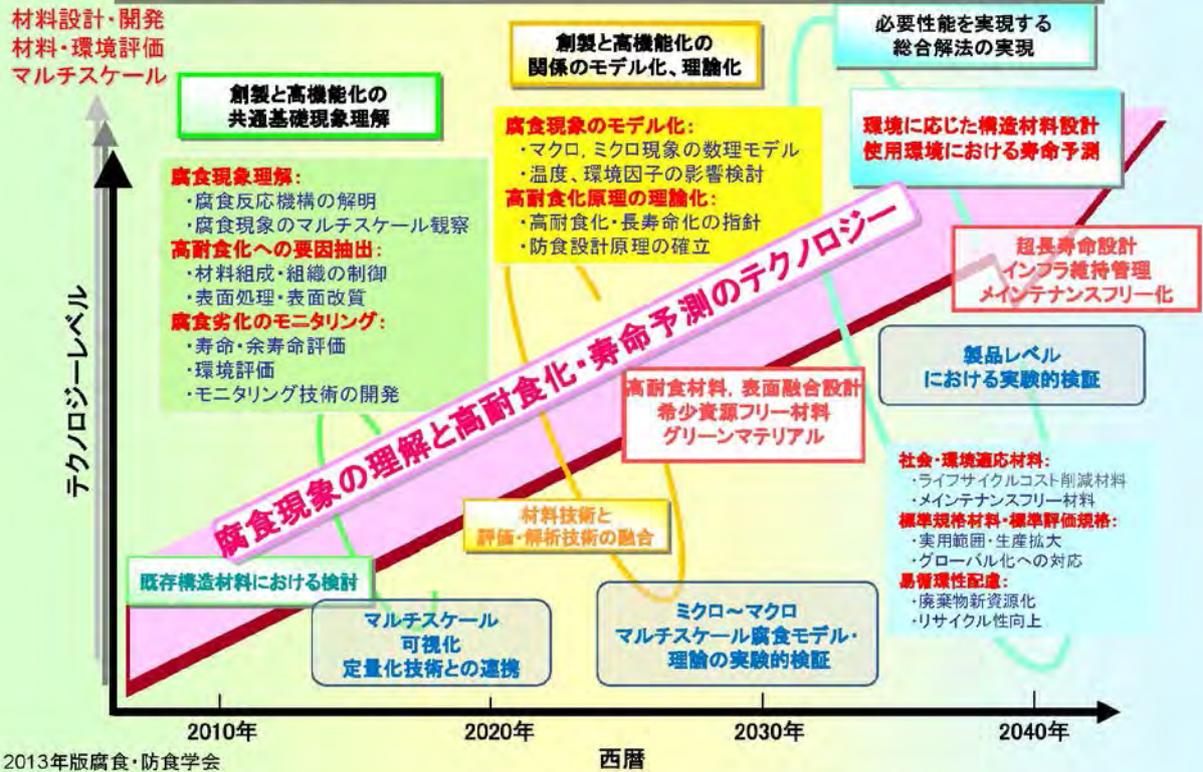
社会インフラ材料学領域の夢ロードマップ

社会インフラ
維持・向上率

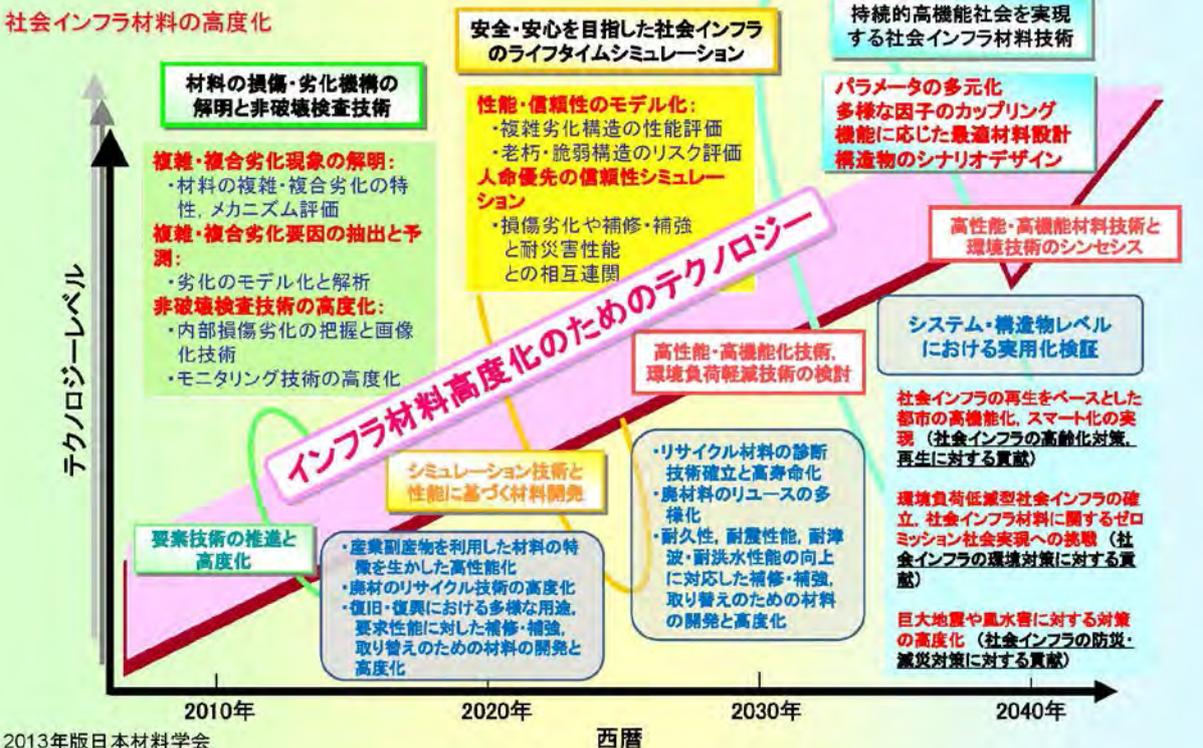


2013年版日本金属学会

社会インフラ材料学領域(腐食防食)の夢ロードマップ

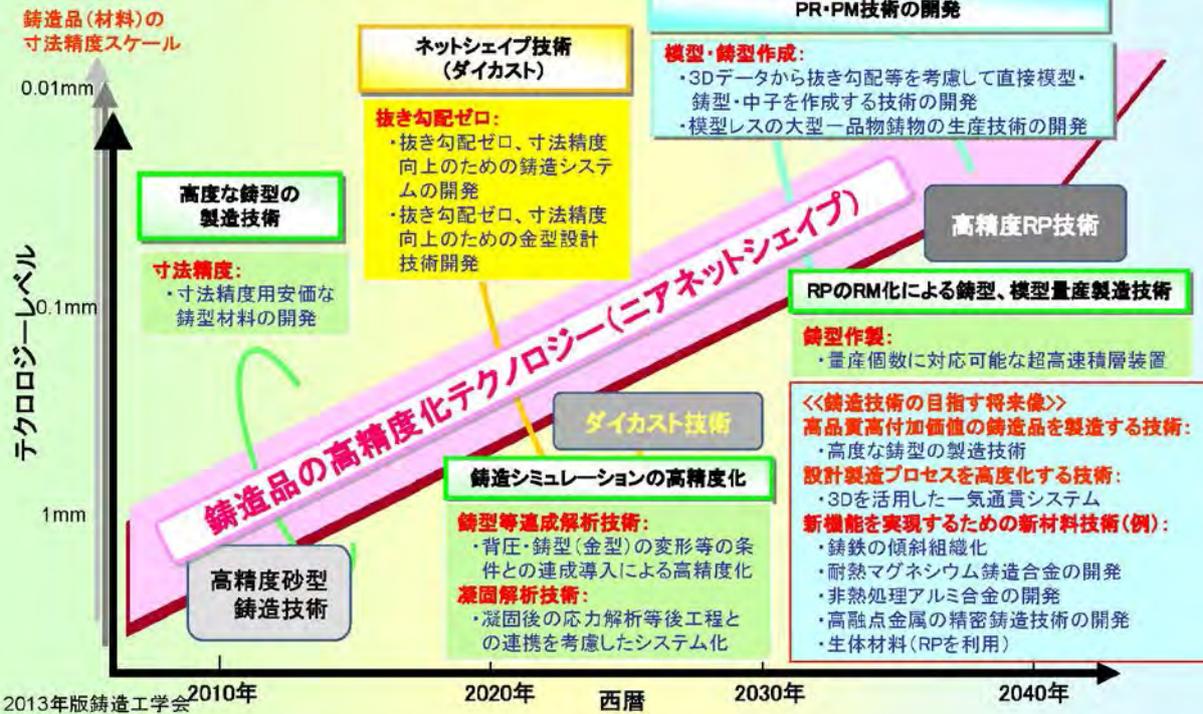


社会インフラ材料学領域の夢ロードマップ



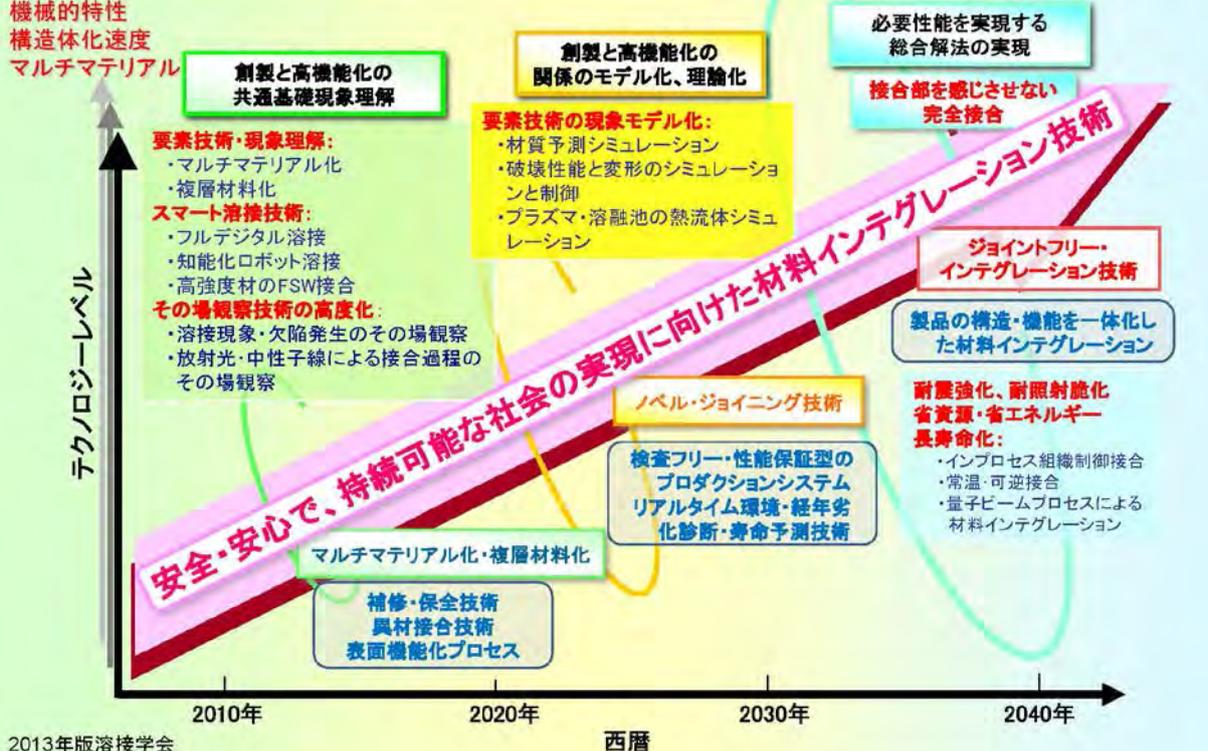
鑄造工学領域の夢ロードマップ

鑄型製作へのRP技術の導入、設計・鑄造方でシミュレーション技術を組み合わせ、鑄造品の複雑形状・薄肉化・信頼性の更なる向上



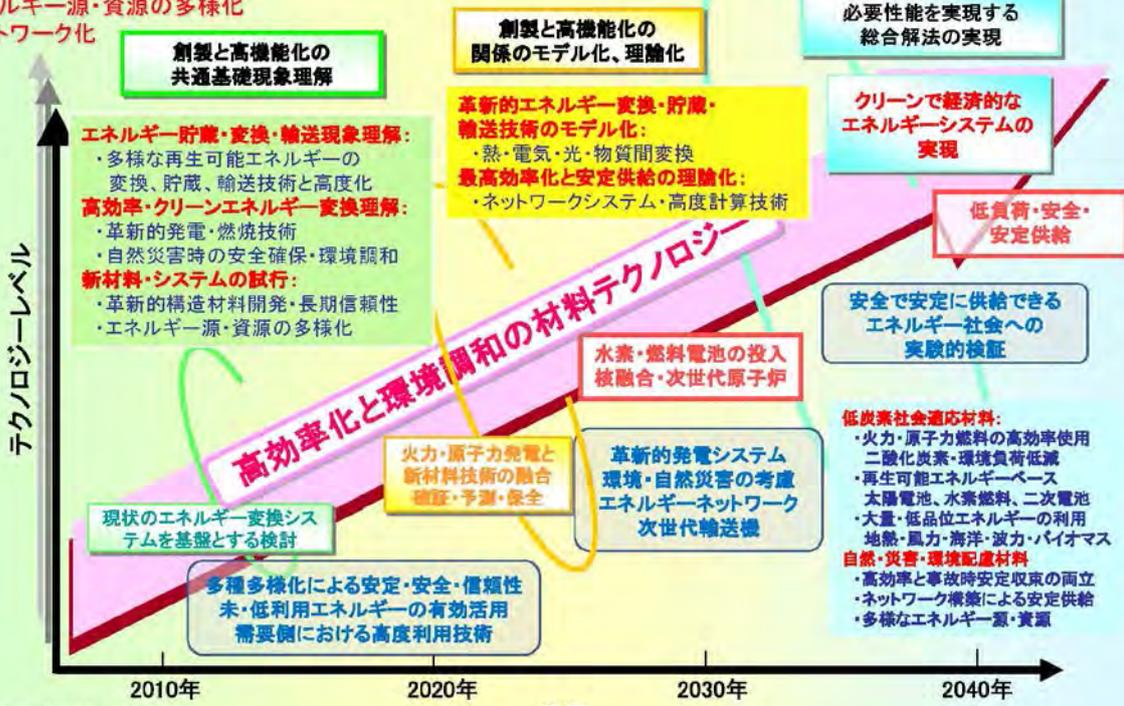
社会インフラ材料学領域の夢ロードマップ

機械的特性
構造化速度
マルチマテリアル



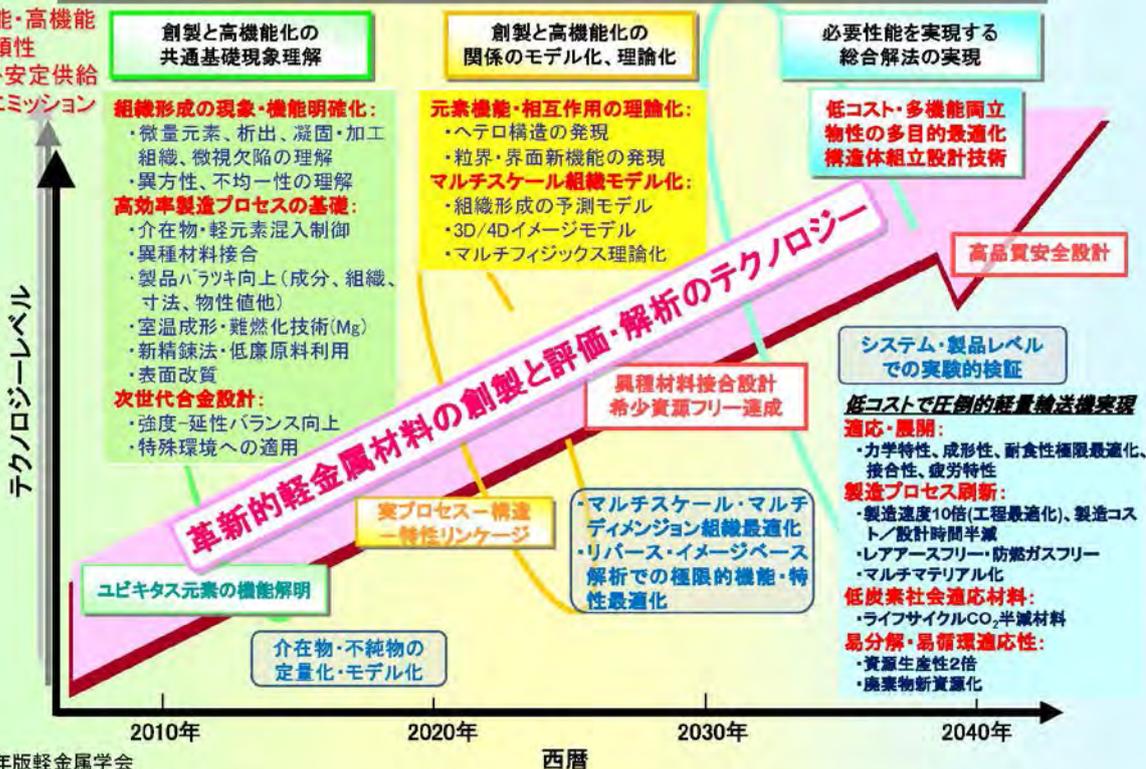
グリーンエネルギー材料学領域の夢ロードマップ

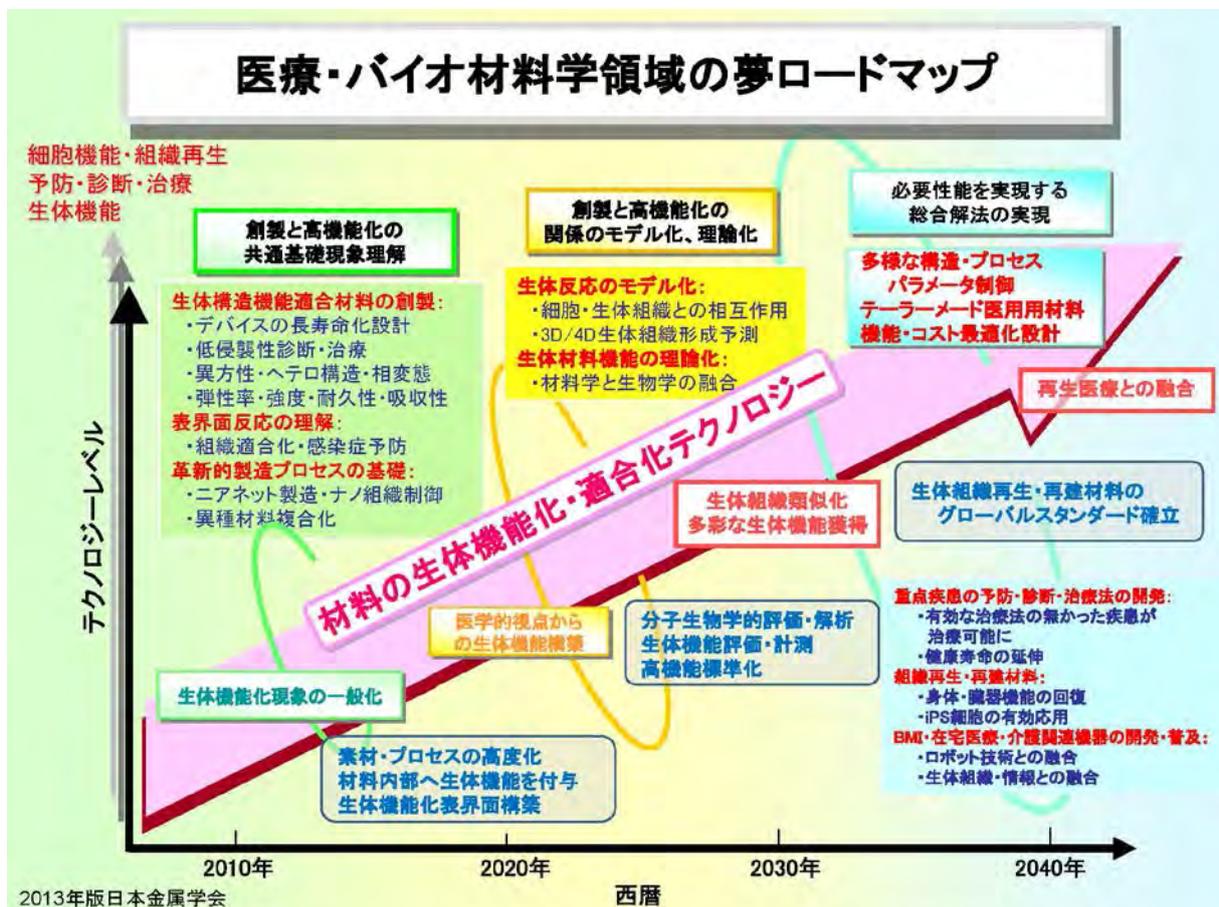
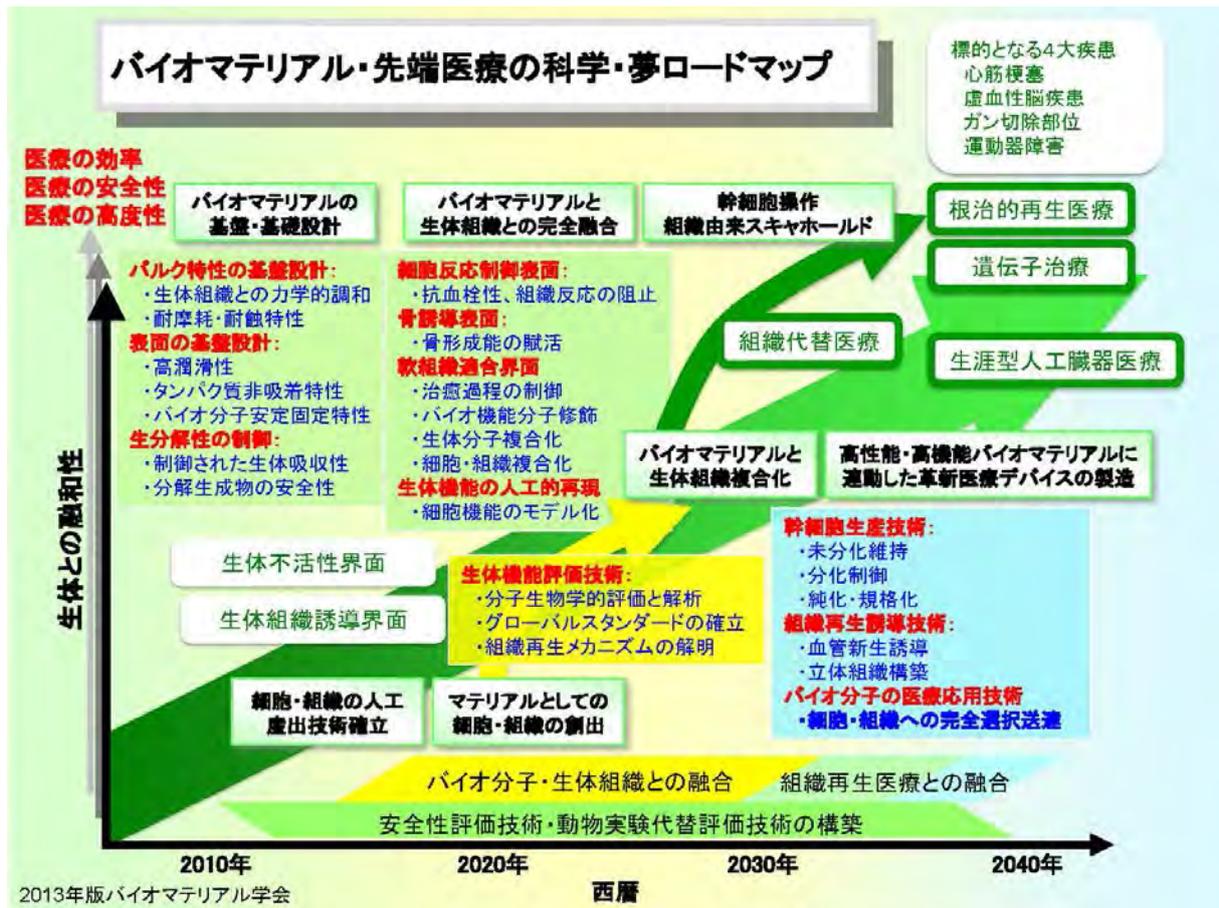
革新的新材料
エネルギー源・資源の多様化
ネットワーク化



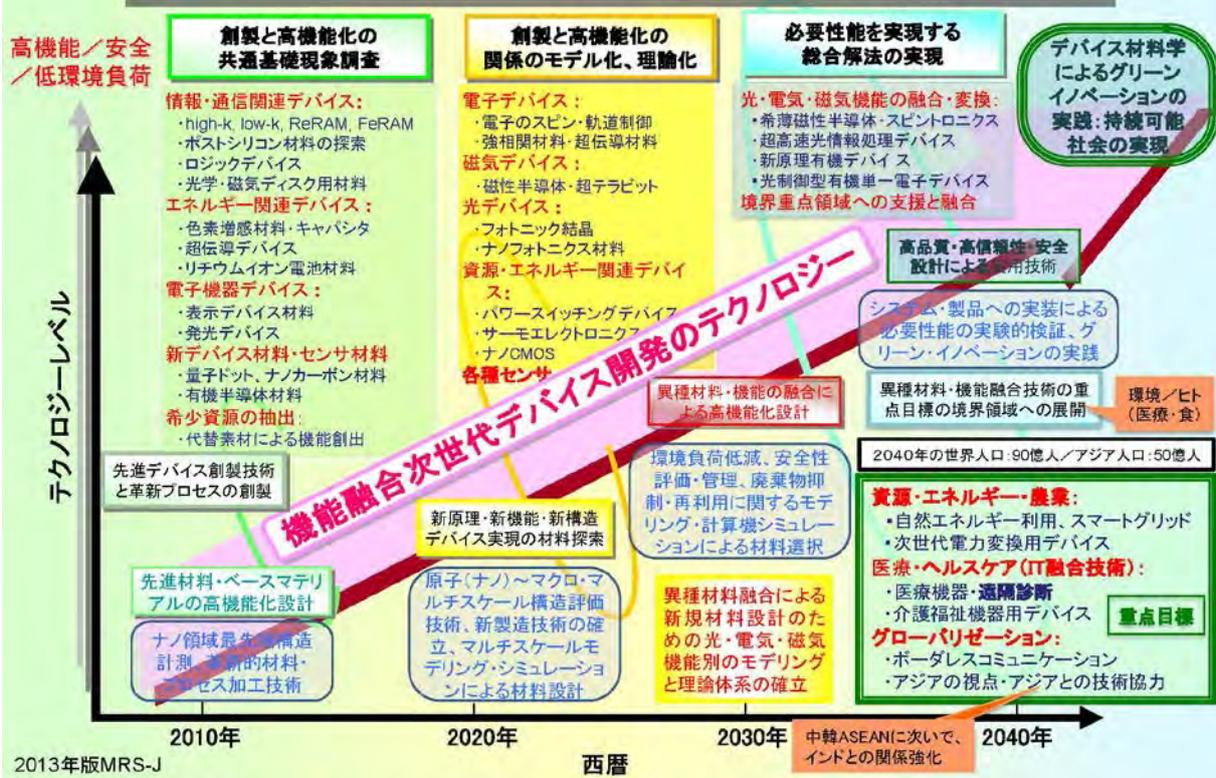
グリーンエネルギー材料学領域の夢ロードマップ

高性能・高機能
高信頼性
低コスト安定供給
ゼロエミッション

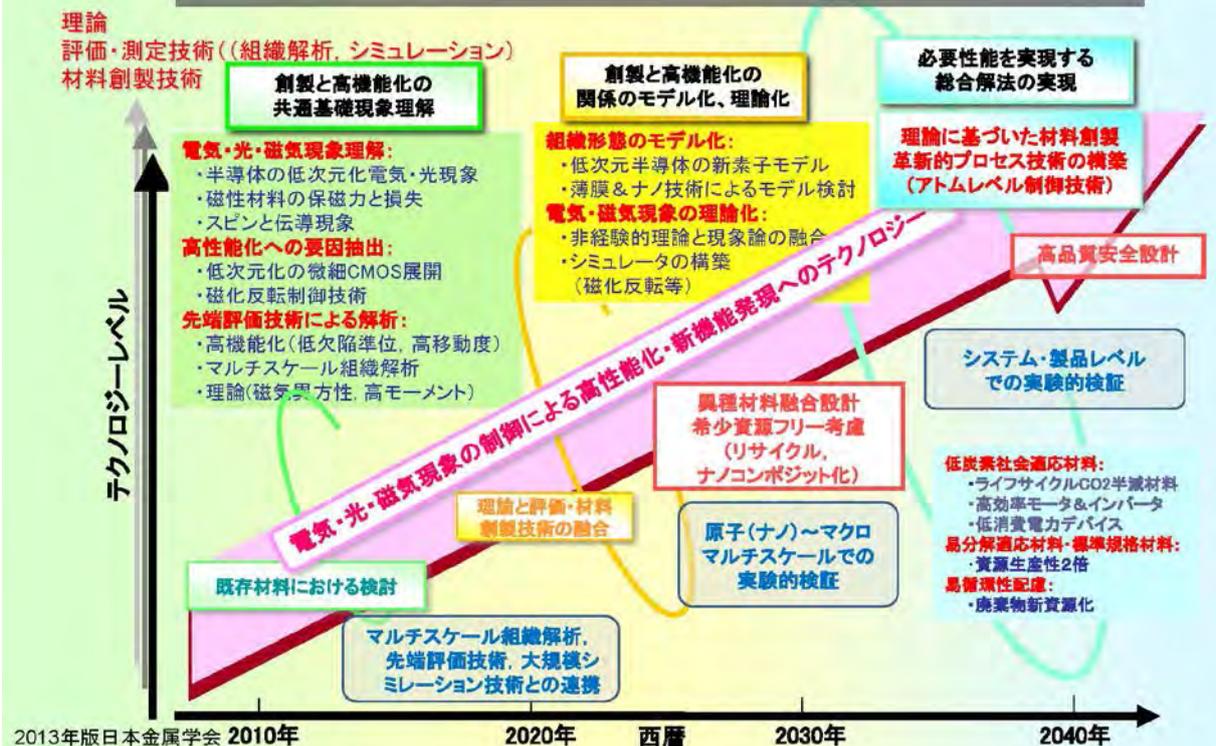




デバイス材料学領域の科学・夢ロードマップ

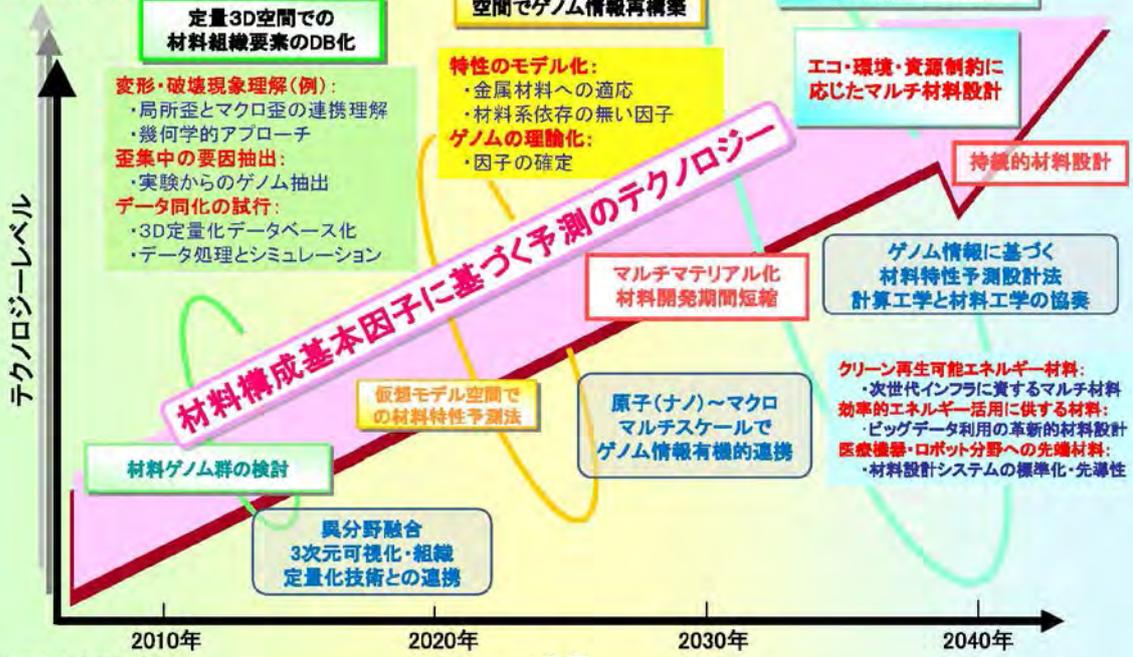


デバイス材料学領域の夢ロードマップ



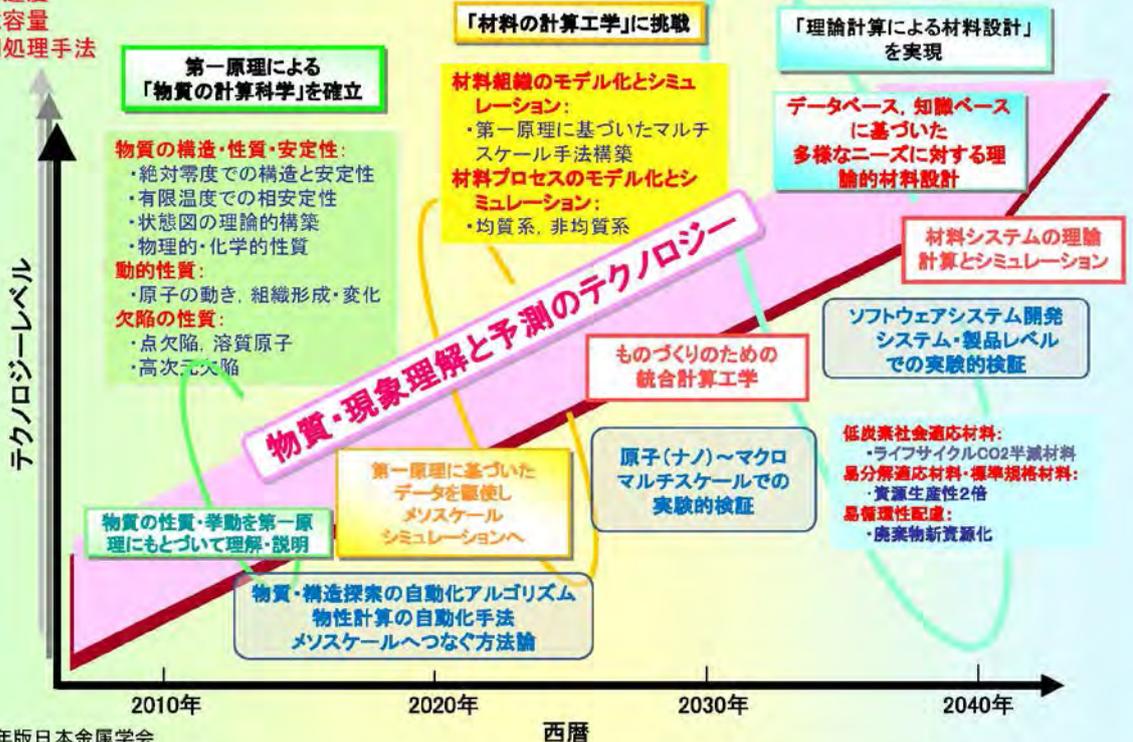
材料ゲノム工学領域の夢ロードマップ

マルチマテリアル
3D/4D可視化
材料ゲノムの抽出



理論・計算材料工学領域の夢ロードマップ

演算速度
記憶容量
並列処理手法



II-2 学協会等との協力による最終版のとりまとめと提出

学協会等からの個別シートの上記の提案を受け、それらを参考に、WGは全体ドラフト案（本文＋パワーポイント）をとりまとめた。ドラフト案を材料工学委員会メンバーと関連学協会に回覧し、修正意見等を求めた。具体的には以下のような日程で、とりまとめ作業を進め、最終的には分科会幹事会、WGが調整し、材料工学委員長のチェックを得て、第三部に提出した。

10月 9日 第一次案の提示（10月21日 意見集約締切）

11月 1日 材料工学委員会・材料工学将来展開分科会合同会議で、意見取りまとめと対応方針を審議

12月10日 第二次案の提示（追加意見を募集）

12月27日 WGで最終調整を行い、材料工学委員長を通じて、最終案を第三部に提出。

材料工学委員会メンバーおよび学協会からは以下に示すような意見が寄せられた。特に、材料戦略委員会には細部のチェック意見を含めて、全面的にまとめていただいた。いただいたコメント、修正意見は基本的にはほぼ修整のために取り入れられた。

この「記録」では、12月27日提出版のみを示す。途中のドラフト案を示すよりも、寄せられたさまざまな意見を「記録」に留め、今後のさらなる前進の参考としていただきたい。

調整、検討の結果、当初案について特に以下のポイントで修整が加えられたが、同時にさらに将来検討すべき問題も残った。

- ・材料工学分野のビジョンの記述：10領域を階層的に分類し、高校までの基礎からの発展、他分野と連携した社会貢献への展開などを容易に読み取れるようにすること、同時に材料工学分野の特徴を理解しやすくすることを考慮して、当初の惑星サークル版ではなく、階層構造版に改めた。

- ・10領域の名称、定義、並び順の再検討：ほぼ同上の理由で、10領域をそれぞれに個々に見直しつつ、統一的全体感が生まれるように工夫した。また、説明文が長くなったり、徒に難解となったりしないように留意した。これは次の世代、他分野、一般市民などに材料工学に関する理解増進を図る見地からの判断である。

- ・三ステップの設定：ここが最も難しい課題であったし、自らも未だ十分納得しきれない側面が強いが、それでも10年ステップでの展開を考えた。当然、リニアモデルを前提にしたものではなく、フィードバックを掛けること、様々な紆余曲折があることを前提としている。また、年次展開は良しとしても、年次展開と共に発展すべき要素、例えば、研究対象スケールが、10年毎に一桁ずつ増加していく、と言った目標設定などもあり得るだろう。この点は今後の大変重要な検討課題として残された。

- ・個別ロードマップのできる限りの統一的で簡略な表現：前述を同じ観点で、簡易だからこそアピール力があるということを中心に心掛けた。他で検討されている「技術ロードマップ」、学会等が作成する「学会ロードマップ」などと一緒に活用できることが望ましいと考えた。特に、一般市民などの注目を引くように、ビジュアルな体裁を得たいと考えたが、財政的な問題がネックとなっている。

以下に、寄せられたコメント、修正意見等を記録する。その後に、12月27日第三部提出版を示す。

[全般的な記述について]

1) 計算材料工学など学術用語として使われていないものが見られます。「材料工学」という言葉ではなく、「材料学」で統一したほうが 他分野の人に受け入れられやすい。

2) 各領域の記述を少し修正してみました。参考まで

⑨理論・計算材料工学は、材料機能の発現機能の解明と設計を計算と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。

⑩材料ゲノム工学は、これまで膨大な蓄積されてきたデータを理論やモデリング、ある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。

3) 立派な科学・夢ロードマップが出来上がり関係者の皆様に敬意を表します。敢えて言わせていただければ、(1) 材料工学分野のビジョン のところの文章が、以下の部分と比較して、硬いかな、と感じました。大きな問題ではありませんので、無視されても結構です。

4) 1 ページ目の左下 SOR, NMR, ND などは、素人にも理解できるように日本語のほうがよいと思います。

5) 横軸が年代となっており、ロードマップでは 2010~2040 年のスケールですが、記述している内容と達成年がかみ合わないと思うところもあります。例えば、8. デバイス材料学・・・のページでは、今から 25 年後に「理系、文系を問わずすべての学生に読める材料応用入門書」を作ることになる、というところがありますが、本当に 2040 年実現を目指すのか、もっと短期間でできることではないか、と思えるところがいろいろと見受けられます。年代と記述内容の整合性をご検討いただけたらと思います。

[材料工学分野のビジョンについて]

1) 説明文で、まず「材料工学は、材料の創製と高機能化を極める工学である。」と定義しており、その中核になる学術を①材料リテラシー学、②材料システム工学、③材料プロセス工学としており、それぞれの定義、学術的な役割が記述されています。材料システムについては機能を発現する仕組みを対象とし、材料プロセスについては目的の材料システムを作りこむ方法を対象としているという記述になっており、材料工学の普遍的な役割、あるべき姿が述べられており、広く一般に受け入れられる記述内容になっていると考えます。

“材料応用工学”として、④社会インフラ材料学、⑤グリーン・エネルギー材料学、⑥医療・バイオ材料学、⑦デバイス材料学を位置づけ、“材料工学ツール”として⑧材料解析・診断学、⑨理論・計算材料工学、⑩材料ゲノム工学をピックアップされており、必要不可欠な学術領域と考えます。

ただ、ここでは、①から⑩までの学術領域を同列にとらえられている印象があり、添付図でも中心部に材料工学の定義があり、その周りに並べられています。説明文を読みますと、明らかに階層があり、①から③までがコアになっていて、学術体系的にはより普遍化された上流に位置するように受け取ることができます。考え方として、④から⑦は①~③の外側にあり、工学であるので、社会的役割として産業の国際競争力、低コストで高機能・高性能な材料・製品を供給する能力、経済発展、モノづくり産業・素材産業の科学技術的サポート、雇用創出、グローバルなビジネスへの対応など、これからの日本社会が求めているニーズに対応できるものであるべきと考えます。一方、⑧~⑩はもとより、②③を発展させるためには、大変重要なものではありますが、あくまで材料工学のツールであり、①~⑦とはやや色合いが異なるものと考えます。

つきましては、材料工学のさらなる発展に向けて、材料とは何か、材料工学とは何かを深く考えられており、敬意を表する次第ですが、材料工学分野のビジョンを図示した添付図 1 枚目を再考する余地があるように考えます。なお、①~⑩それぞれに対応するロードマップは必要と考えます。

2) 説明文ページ 2/6 において、「・・・それを実現するための 物質や材料 の組み合わせを選択し設計する・・・」というところで、物質という言葉がでてきておりますが、どこかで、物質と材料の違いを明確にしておく必要があるかと思えます。

3) 『「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。』は、まさに、学際領域をカバーする当学会の理念と合致し大変すばらしいと思います。ただし、今回の一次案は、全体的に表現内容がやや抽象的で、パターン化しているのが気になるという意見が多く寄せられました。特に、多用されている「材料化」の意味が理解できない、あるいは「材料創製」との相違が明確ではない、との意見がございました。さらに、「材料システム」は、複合材料や機械そのものを含んだ記述になっており定義が曖昧である、との指摘もございました。また、生命・化学分野で、「ゲノム工学・ゲノム技術」という言葉が広まりつつありますが、「材料ゲノム工学」というキーワードの定義が理解できない、その内容についての記述は、かなり分かり難い表現で、内容説明(3/6 頁)を加筆していただいた方が良いのではないかと、との意見が寄せられました。また、細かな点として、「5/6 頁: ナノテクノロジーのシンポ → ナノテクノロジーの進歩(カタカナにする意味?)」の指摘もありました。本質的な内容ではございませんが追記いたします。

4) 私ども日本 MRS は、IUMRS (International Union of Materials Research Societies) の創設メンバーとして IUMRS の傘下でも活動しております。IUMRS は 2005 年より、The International Council for Science (ICSU, 国際的な科学者の非政府組織) のメンバーとして、最近の IUMRS の国際会議の成果を ICSU の場でも反映させる方向で活動領域を広げております。ICSU の対象分野は非常に広範囲ですが、その最も重要な課題が「グローバルな持続可能性についての科学的な基礎を強化するために、自然科学・社会科学の関連諸分野を統合し、ひとつの地球環境科学を構築する」という問題です。その観点から、次のような文章(記述)がどこかに盛り込まれると良いと考えております。

「最終氷期が終わった後 1 万年の比較的気候が安定していた時期(完新世(Holocene))に人類は文明を発展させ、その原動力となったのが材料である。これは青銅器時代や鉄器時代などの名称があることから明らかである。人間活動は科学革命、産業革命を経て、1800 年頃を境に大発展を遂げ、特に 20 世紀後半に資源エネルギーの大量使用による経済成長の大加速の時代に突入した。その結果人間活動による様々なグローバルな環境変化が引き起こされ、地質年代名を完新世

(Holocene) より人間世 (Anthropocene) に変更すべきであるという提案がなされるに至った。人間世においては、人類は地球生命圏の保全、すなわち惑星管理 (Planetary Stewardship) に特別な責任を負わなければならない。人類文明による環境負荷を地球的境界条件 (Planetary Boundaries) の枠内に収めなければならない。文明発展の原動力であり基盤である材料工学は人間世において惑星管理の使命が課せられている。少なくとも 10 万年は持続可能な発展を構想する時、材料工学は地球システム科学等を統合し、より高度の人類文明の基盤となることを目指さなければならない。」

5) 日本学術会議材料工学委員会の科学・夢ロードマップ第一次案の内容は良くできていると思います。10 月 8 日にお送り頂いたロードマップ一次案および説明文を材料戦略委員会メンバーの学協会に転送して意見を求めたところ、「医療・バイオ材料学領域」のロードマップに関して、語句・表現についての意見が届きました。他は「了解しました」「とてもよく出来ていると思います」以外には特に意見はありませんでした。

材料戦略委員会の幹事メンバーで検討した際のコメントを以下にまとめます。委員会としての決定事項ではなく、細かなコメントも多いですがブラッシュアップのためにご検討いただければ幸いです。

全体として、説明文とロードマップのスライドとの整合性が不十分なところがあるので、その点を留意していただきたい。また、同一学問領域内および各学問領域毎で用語が統一されていないケースが(例:材料生物科学と材料生物学)見受けられますので、そこを統一すべきと考えます。

スライド毎の細部のコメントは以下に個別に記載します。

1- (1) 材料工学分野のビジョン	<p>説明文</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料工学では「課題解決型」が強調されるのは当然かと思いますが、シーズ創出・セレンディピティなどの記載があってもいいと感じます。
1- (2) 材料工学分野の科学・夢ロードマップ	<p>説明文</p> <ul style="list-style-type: none"> ・4頁上から11行目 「別れる」→「分かれる」 ・「材料生物科学」と「材料生物学」をどちらかに統一。スライドとの整合性を取る。
	<p>スライド</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「次世代人材育成・・・」の用語は極力左に寄せる。 ・「ネットワーク・・・」の用語は極力左に寄せる。
2. 材料リテラシー学領域の科学・夢ロードマップ	<p>説明文</p> <ul style="list-style-type: none"> ・学術領域の定義 「大学教養」→「大学学部前期」？ ・スライドに記載されているキーワードに沿った記載に修正する。学生以外に「市民」を含めた初心者の啓発活動を追記する。女性に関する記載を追記する。 ・「生物材料」→「生物材料学」スライドの用語と合わせる。
	<p>スライド</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「大学教養」→「大学学部前期」？ ・Integrityは英語のままが良いか？（日本語訳は難しいですが） ・「教育」の用語は「倫理教育」のみですが良いですか？ ・「環境」に関する用語の追加が欲しい。
3. 材料システム工学領域の科学・夢ロードマップ	<p>スライド</p> <ul style="list-style-type: none"> ・縦軸：材料プロセス工学と同様に、「環境負荷低減」を追加する。資源循環型の高機能材料との関連も明確になる。 ・ななめ覧の記載 ・「理論。計算材料工学との連携」→「理論・計算材料工学との連携」 ・「ナノ、マイクロ、マクロ」の階層に関する記載を盛り込めないか？ 註：スライドには「マイクロ」と「構造体」の記載がありますが、記載場所が離れています。
4. 材料プロセス工学領域の科学・夢ロードマップ	<p>スライド</p> <ul style="list-style-type: none"> ・説明文に記載されている「加工」の用語を取り込む。 ・「界面現象」、「異種材料融合設計」、「 casting」の用語を入れたい。
5. 社会インフラ材料学領域の科学・夢ロードマップ	<p>スライド</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「安心・安全社会」→「安全・安心社会」 説明文にあわせる。2か所。 ・「改修、補修技術」→「補修・メンテナンス技術」 説明文にあわせる。 ・「三次元+時間マルチスケール」→「ル」が隠れています。 ・「腐食防食」、「ノベルジョイニング」の用語を入れたい。
6. グリーン・エネルギー材料学領域の科学・夢ロードマップ	<p>説明文</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スライドの概要を追記する。 ・低炭素社会に関する記載が必要ではないか。
	<p>スライド</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「リジェリエントなシステム」 →「・・・なシステム」または「柔軟なシステム」か「柔軟で強いシステム」
7. 医療・バイオ材料学領域の科学	<p>説明文</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「利用技高機術」→「利用技術」

学・夢ロードマップ	<p>スライド→別添の図を参照（念のため下記に記載します）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「バイオマテリアル」と「バイオ材料」の用語の統一 ・斜めの矢印の2行目 「・・複合化」→「・・融合」 ・右の方 「バイオマテリアル活用医療デバイスの開発」→「高機能バイオ材料活用医療デバイスの開発」 ・左の方 バイオマテリアルの基盤。基礎設計→「バイオ材料の基礎・基盤設計」 ・真ん中 「生体機能の人工的再現」→「生体機能の人工的再現・再生医療」
8. デバイス材料学領域の科学・夢ロードマップ	<p>説明文</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スライドの概要を追記する。
	<p>スライド</p> <ul style="list-style-type: none"> ・縦軸 処理量と処理速度をひとつにして「国際競争力強化」を追加する。 ・右下 「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」は材料リテラシー学領域に記載されているので削除し、他を記載する。 ・用語 電子・光・磁気機能は、電気・光・磁気機能？
9. 材料解析・診断学領域の科学・夢ロードマップ	<p>説明文</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スライドとの整合性のため、材料の高機能化、実用化への貢献についても記載する。
	<p>スライド</p> <ul style="list-style-type: none"> ・他のスライドに比較して、記載方針および記載の絞込みが未完です。ご検討願います。 ・ななめ覧：他の学術領域と同様に2行目を追記する。 例えばナノテクノロジー、マルチスケール、ハイスループットによる技術革新 ・個別記載：絞り込み方法としてゴシック体のキーワードのみにするなど。 ・右側真ん中：枠ずれ箇所あり。
10. 理論・計算材料工学領域の科学・夢ロードマップ	<p>説明文</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最近の進展（「電子論」からのアプローチ等）についてもっと言及する。
	<p>スライド</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「第一原理計算」の用語を入れてはいかがでしょうか？
11. 材料ゲノム領域の科学・夢ロードマップ	<p>説明文</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「ゲノム」の定義をできるだけ明確に記載する。 ・米国の研究開発状況について追記する。
	<p>スライド</p> <ul style="list-style-type: none"> ・手法の記載が大半なので、内容の記載を補充する。
<p>その他、体裁に関して全体を通して</p> <ul style="list-style-type: none"> ・枠内の用語が、センタリングと左詰めで混在しているので統一する。 ・複数行の行頭位置の統一 ・縦軸の矢が3本なので、項目を全て3個に統一してはどうか 	

II-3 「材料工学分野の科学・夢ロードマップ2014」案（2013. 12. 27版）

注：本版が最終確定版ではない。第三部提出後、第三部における検討、審議を経て、「理学・工学における科学・夢ロードマップ2014」として最終的にまとめられることを付記しておく。

1. 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關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など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、経済性など、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、歴史的には冶金術を起源とし、20世紀以降、金属工学、無機材料工学、高分子材料工学など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、ある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、ある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、材料のはたらきをすべて指す。複数の原子ならびに分子さらにそれらの組合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、物質などを原料にして、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。

第一は、理論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およ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。

第二は、実証的で演繹的アプローチである。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。

第三は、実用的で帰納的アプローチである。冶金術は、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。

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など、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勿論のこと、材料機能の保証や信頼性、寿命や価値の最適化設計などに関する説明責任や、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、使命などに関連しており、工学としての材料工学は、土木学、建築学、機械工学、電気・電子工学など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、法学など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、人類の科学的叡智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、以下の三つの柱で主に構成されている。

①材料リテラシー学は、高校ならびに大学学部前期における物理学、化学、生物学などを素養にして、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。

②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。

③材料プロセス工学は、目的の材料および材料システムを創製、製造するための、物理的およ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、対象応用工学分野毎に、以下のような応用材料学を学術領域として展開する。

④社会インフラ材料学は、土木建築、機械、電気など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。

⑤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。

⑥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。

⑦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。

⑧材料解析・診断学は、材料システムおよ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。

⑨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。

⑩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、あつ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、応用材料の三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) 材料工学分野のロードマップ

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一つであるが、反面、焦点が十分絞られていない、複雑で分かりにくいなど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などの印象を与え、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、常に従来の中核に安住せずに、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、ナノテクノロジーおよび計算・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勿論、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在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。

2. 材料リテラシー学領域の科学・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など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・化学など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、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。

3. 材料システム工学領域の科学・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シンポ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つ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。

4. 材料プロセス工学領域の科学・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、経済性指標なども取り込んでいく。

5. 社会インフラ材料学領域の科学・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。

6. グリーン・エネルギー材料学領域の科学・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。

7. 医療・バイオ材料学領域の科学・夢ロードマップ

医療診断技術など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。

8. デバイス材料学領域の科学・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。

9. 材料解析・診断学領域の科学・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。

10. 理論・計算材料学領域の科学・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。

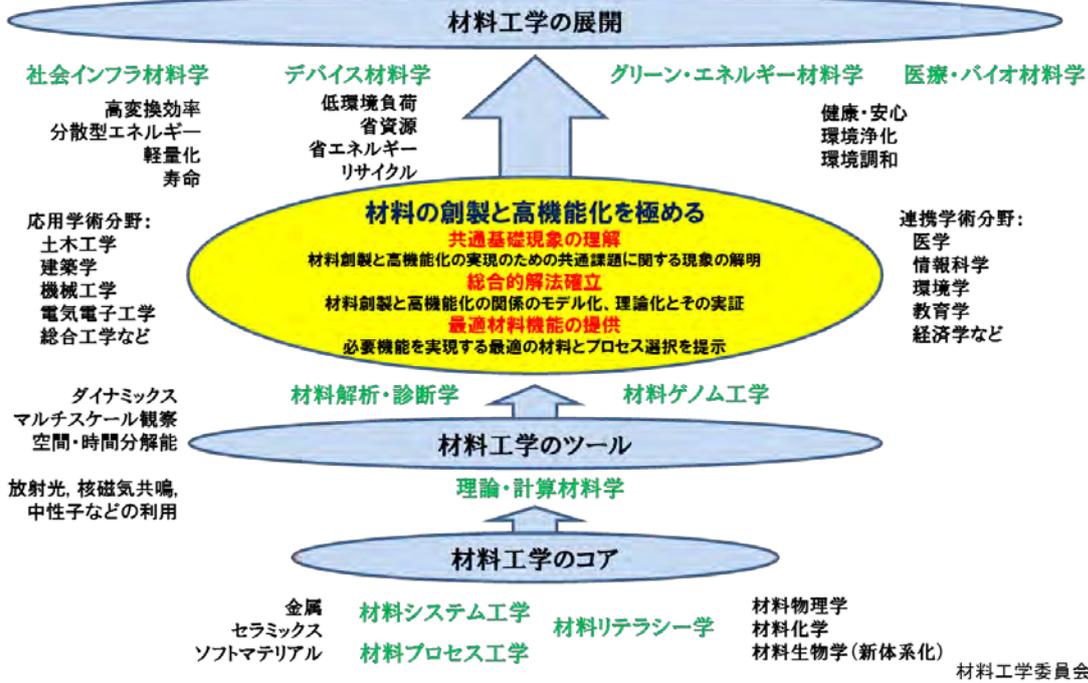
11. 材料ゲノム工学領域の科学・夢ロードマップ

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。

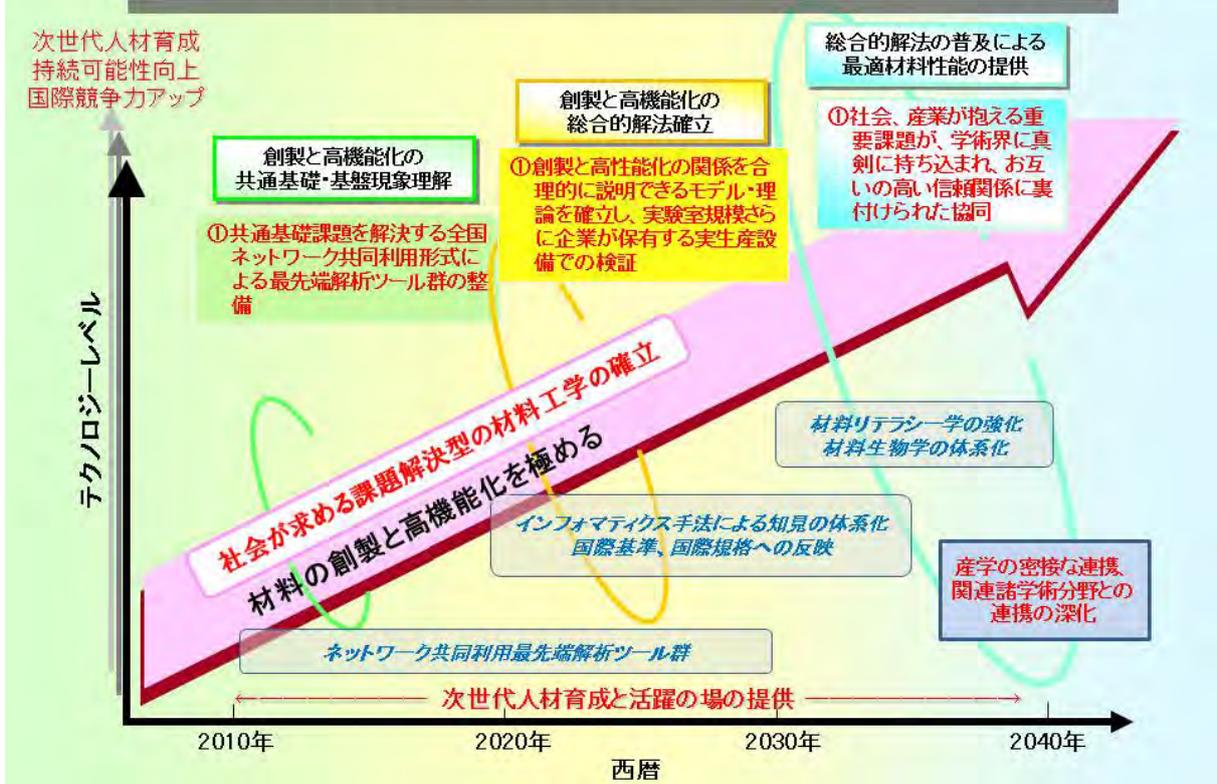
今後は、国際競争力の増進に寄与する、全国規模での協同作業手法を速やかに開発し、社会実装する。

1-(1) 材料工学分野のビジョン

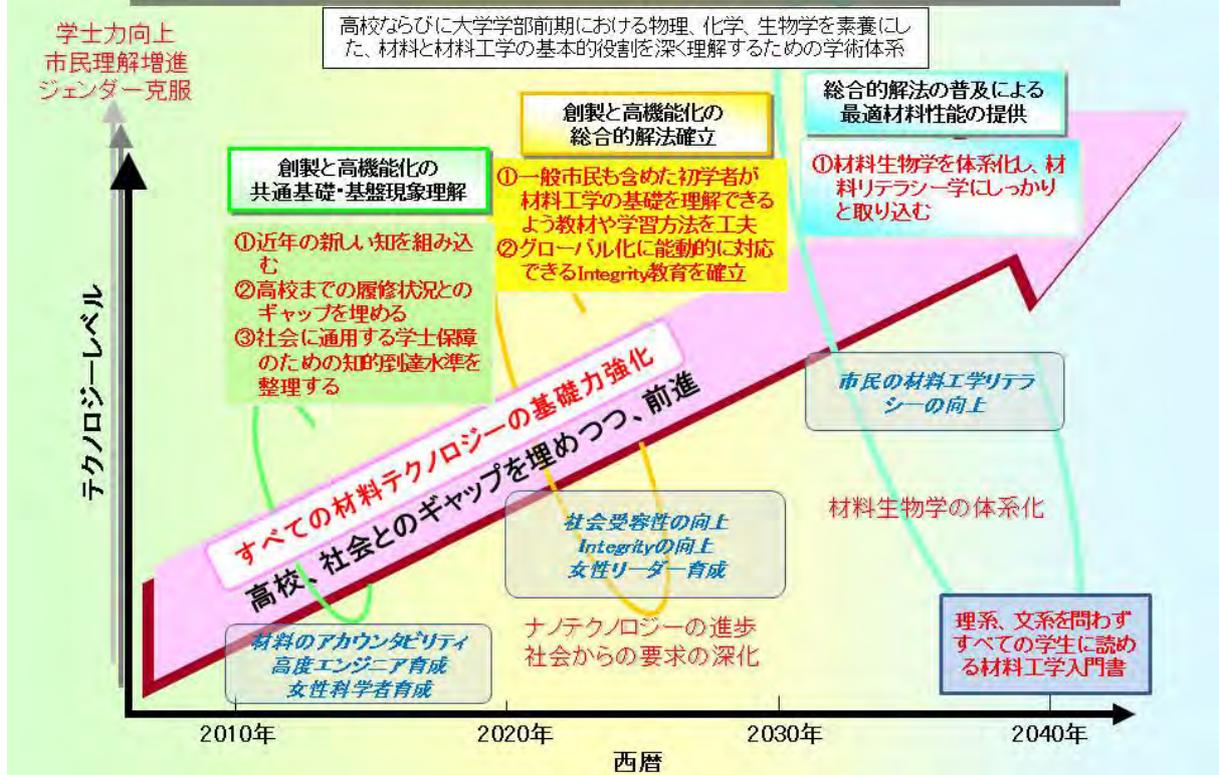
社会が求める課題解決のために、他学術分野と連携しつつ、多様性のあるアプローチを駆使し、あらゆる材料知(シーズ創出、セレンディピティなども含む)を統合して、新しい知識体系を構築する



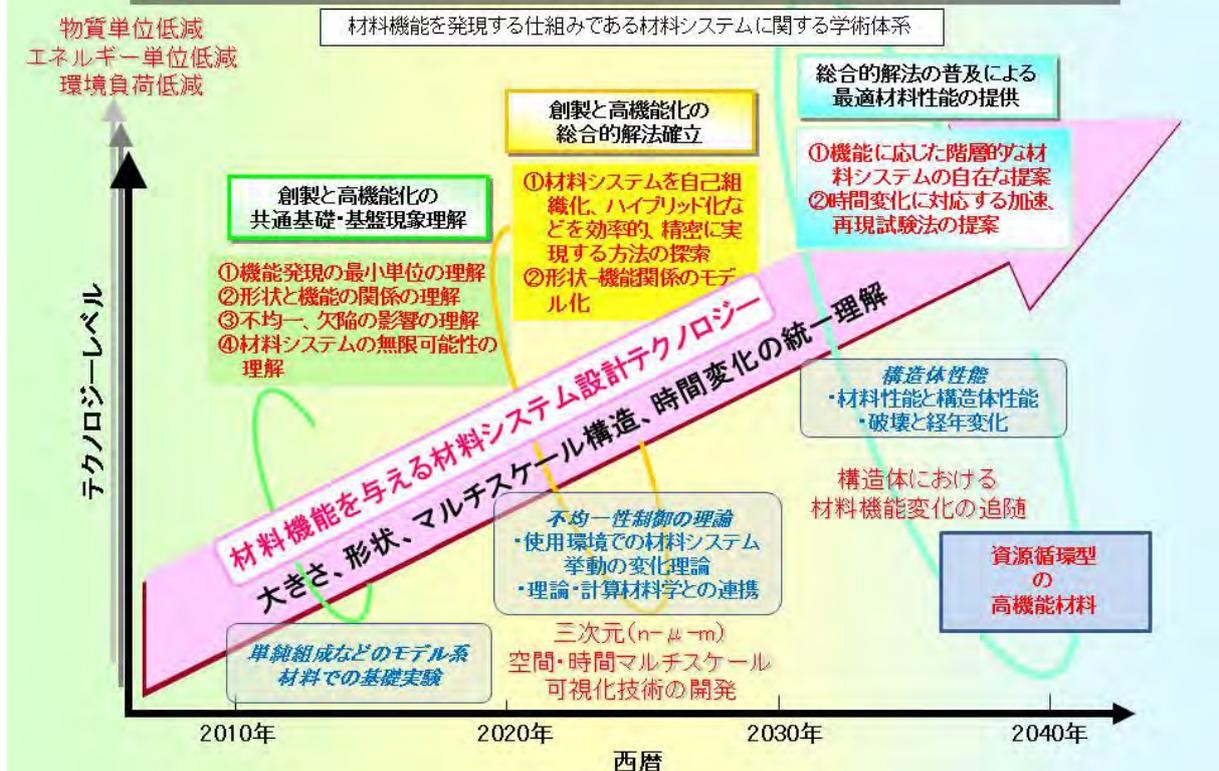
1-(2) 材料工学分野の科学・夢ロードマップ



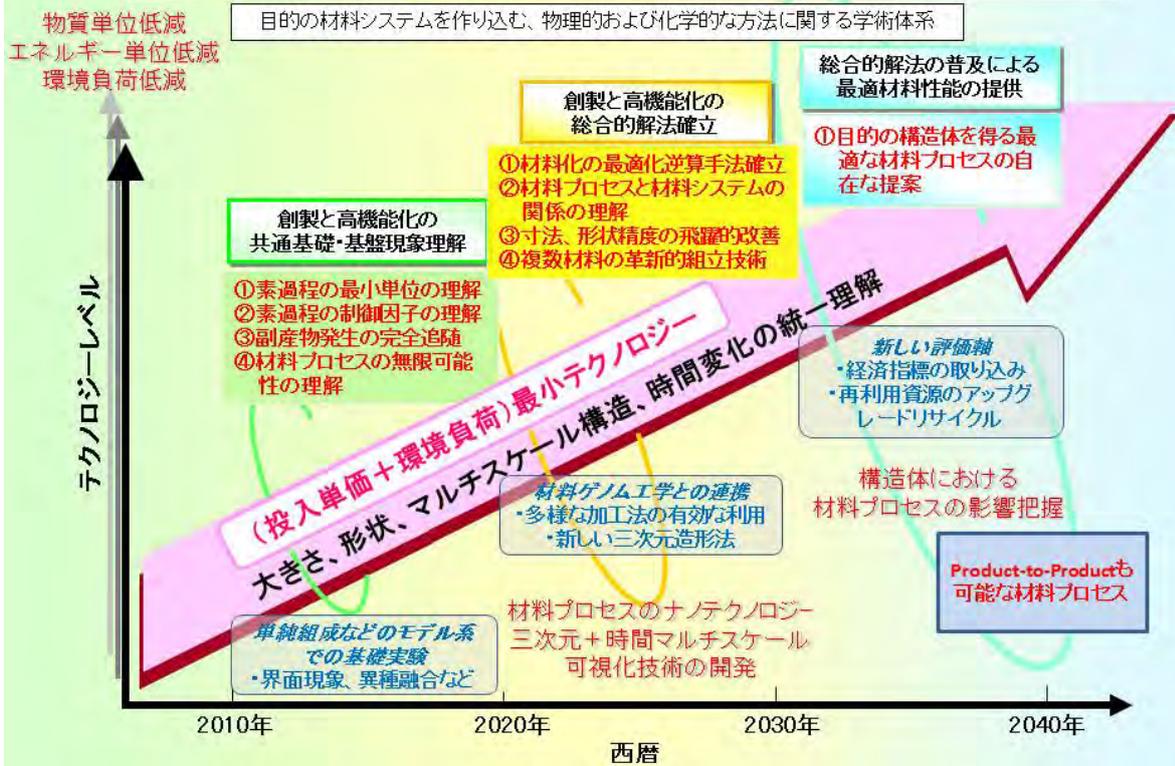
2.材料リテラシー学領域の科学・夢ロードマップ



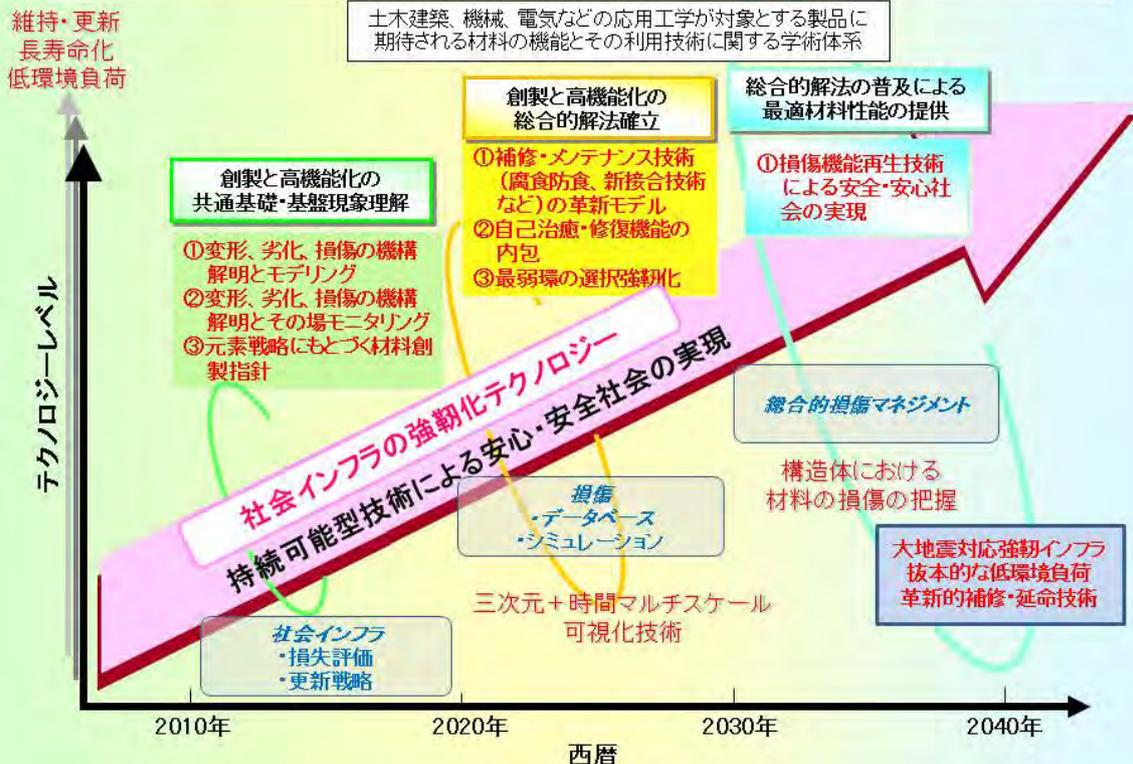
3.材料システム工学領域の科学・夢ロードマップ



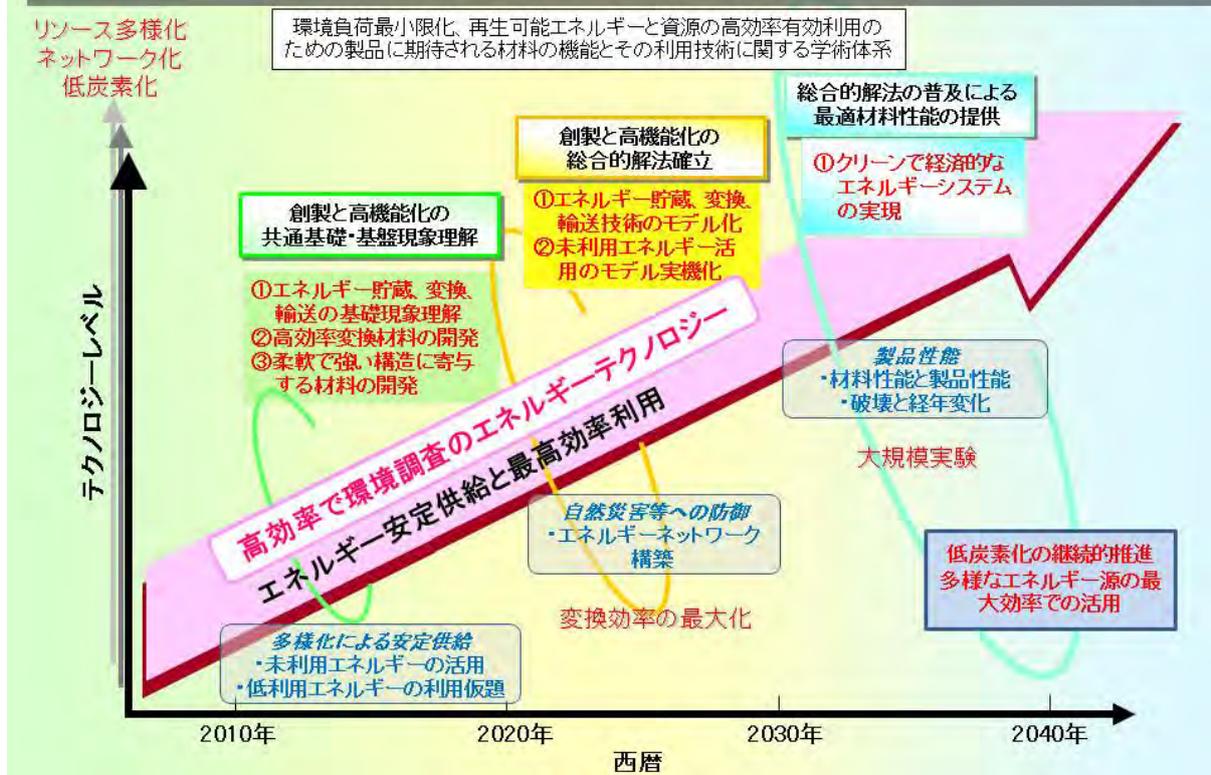
4.材料プロセス工学領域の科学・夢ロードマップ



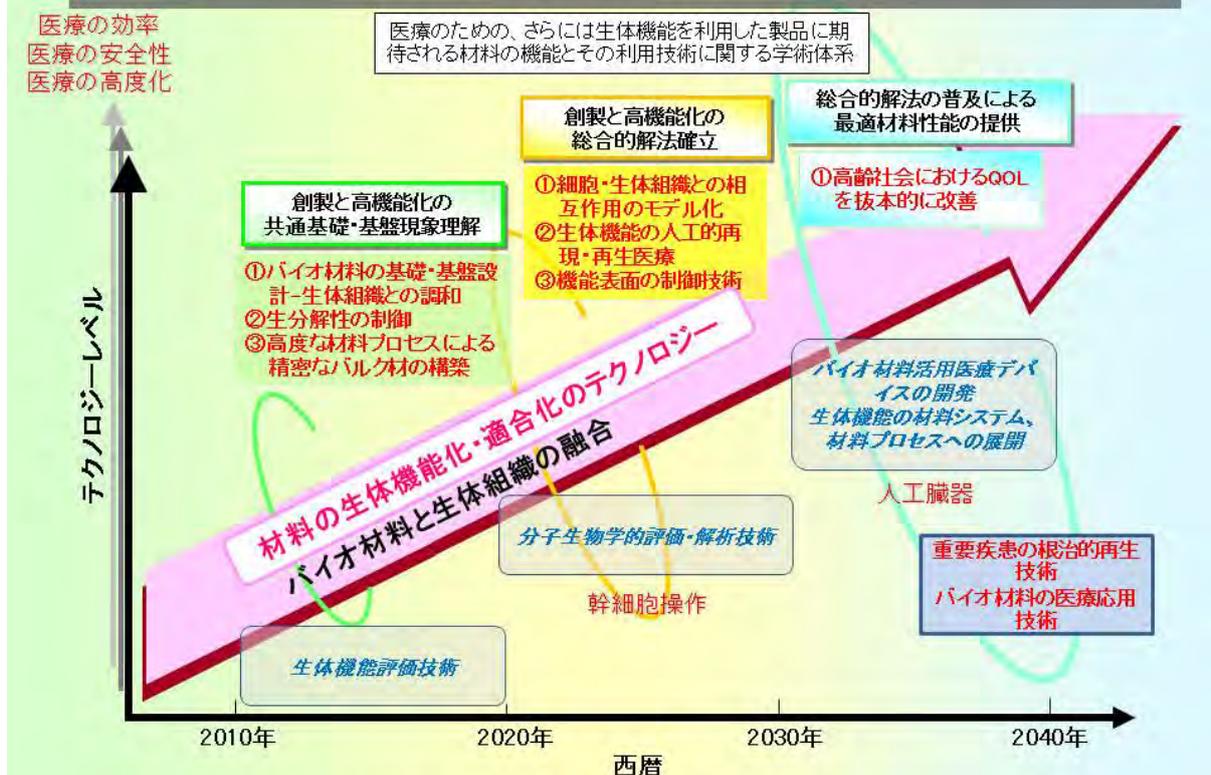
5.社会インフラ材料学領域の科学・夢ロードマップ



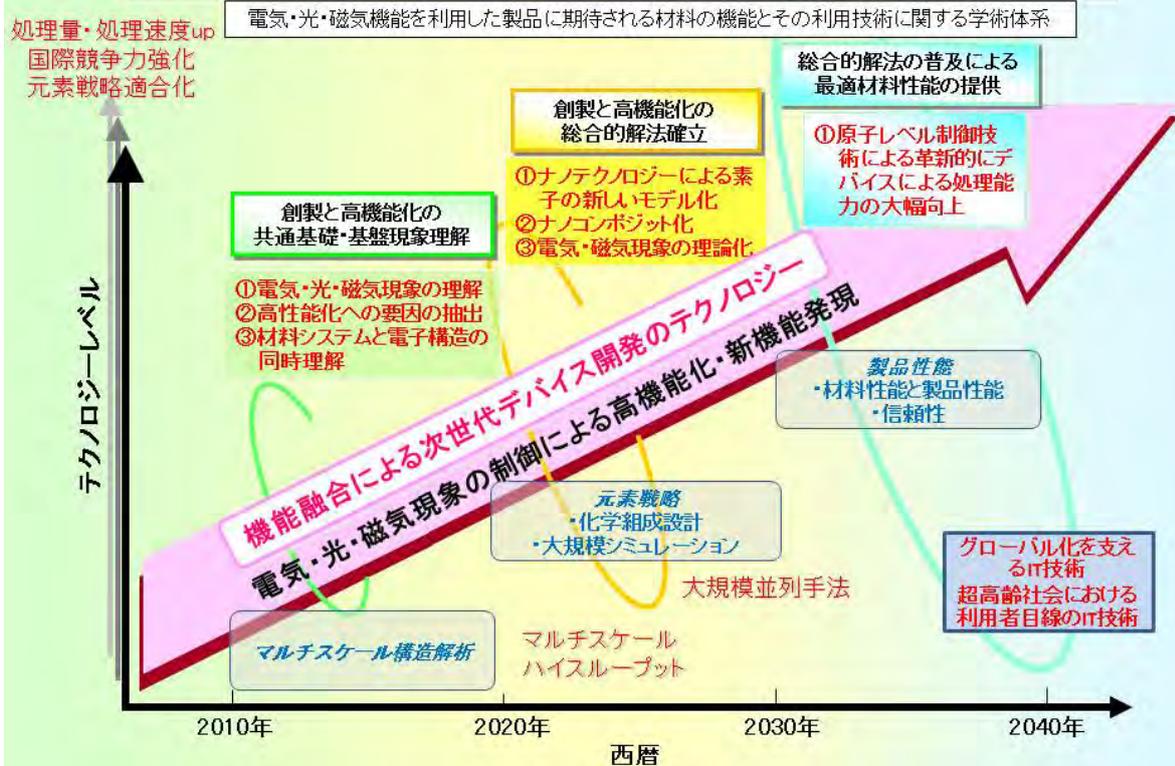
6. グリーン・エネルギー材料学領域の科学・夢ロードマップ



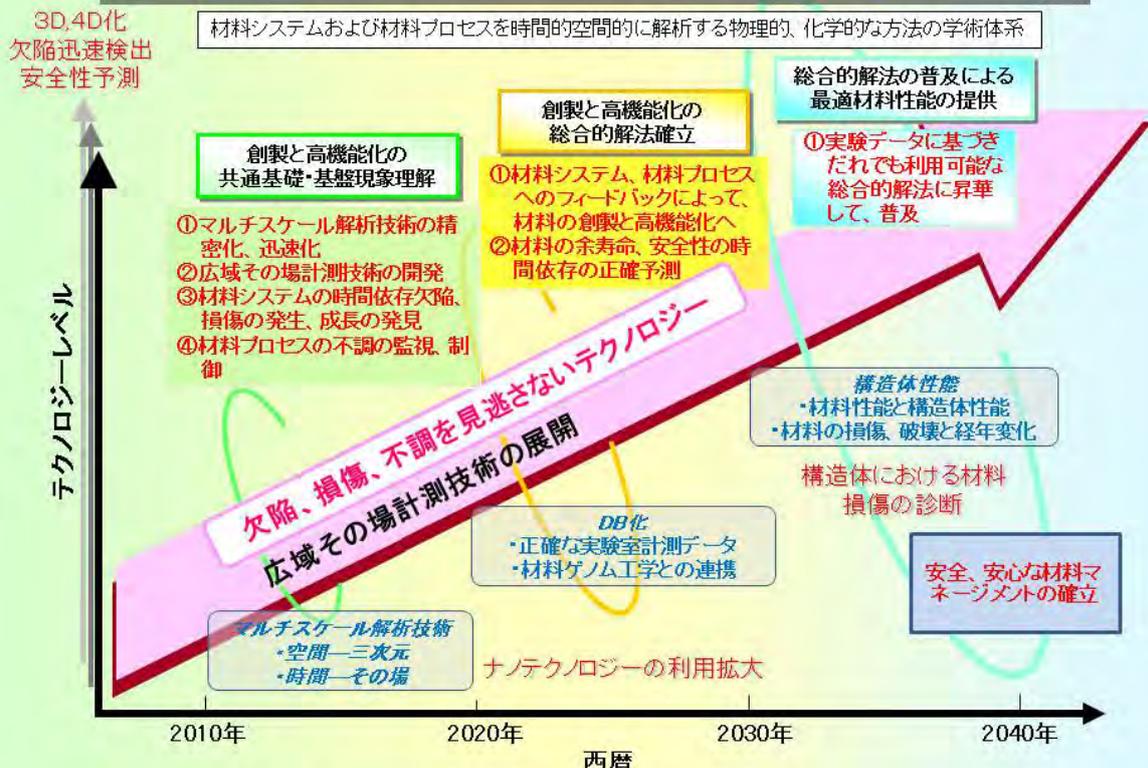
7. 医療・バイオ材料学領域の科学・夢ロードマップ



8. デバイス材料学領域の科学・夢ロードマップ



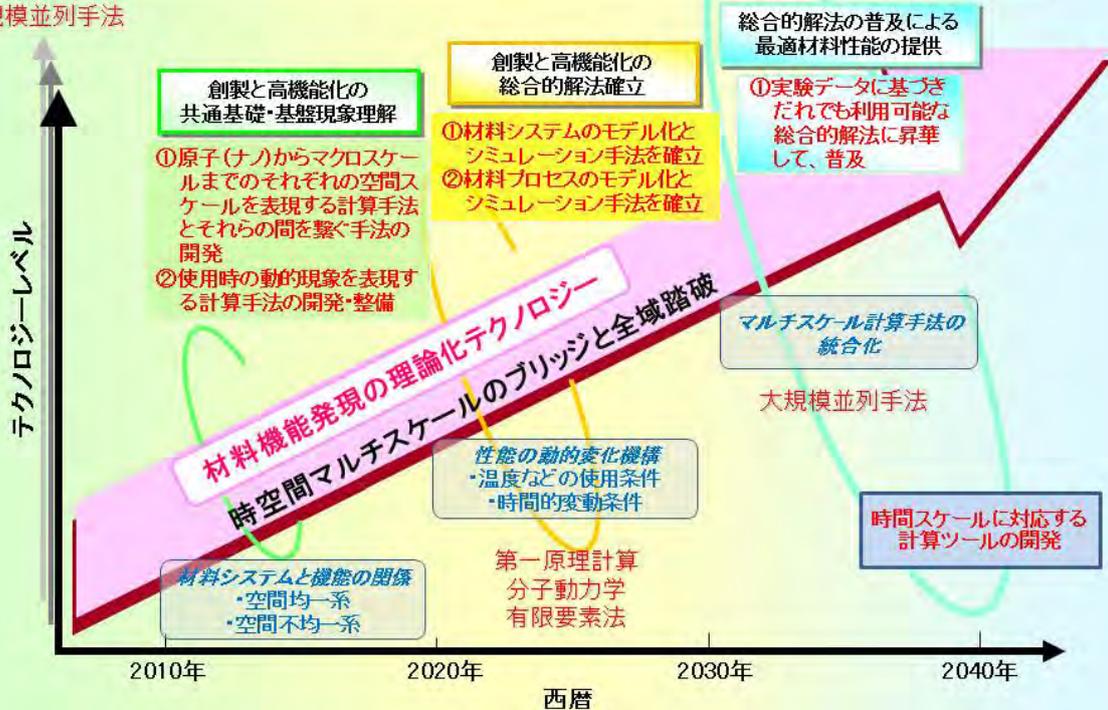
9. 材料解析・診断学領域の科学・夢ロードマップ



10.理論・計算材料学領域の科学・夢ロードマップ

マルチスケール
ハイスループット
大規模並列手法

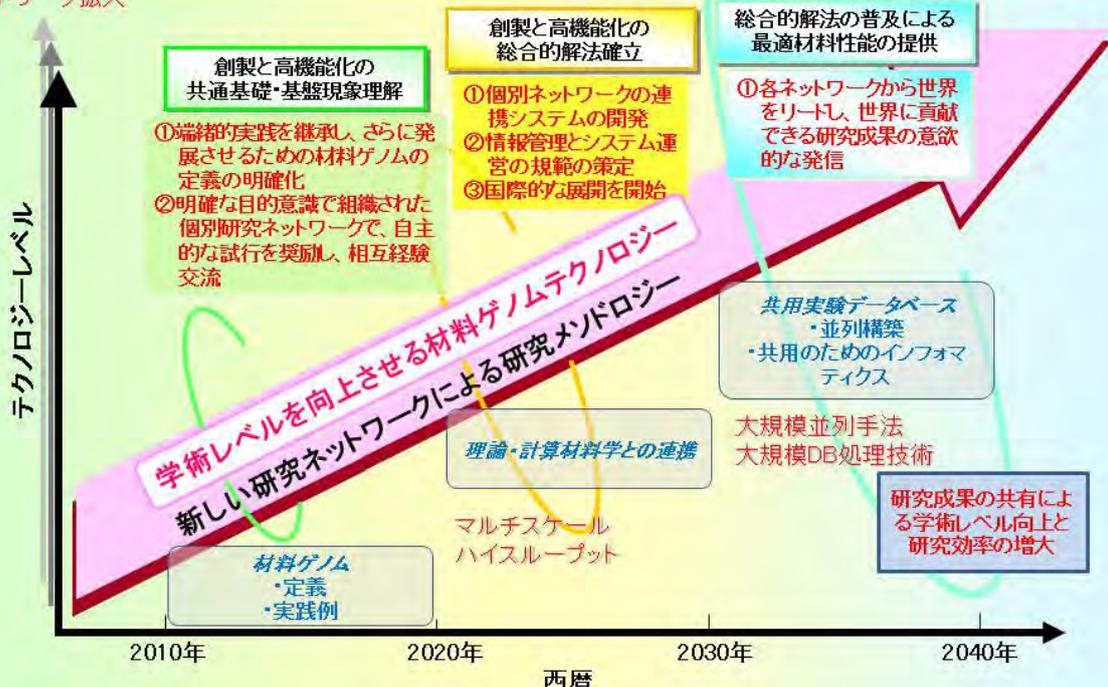
材料機能の発現機構解明と設計のための、理論と理論計算の方法とその利用技術に関する学術体系



11.材料ゲノム工学領域の科学・夢ロードマップ

効率性向上
可能性高次化
ネットワーク拡大

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、ある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



III 参考情報

以下に、参考となるであろう作業ペーパーを記録する。作業ペーパーとは、WGで議論をまとめるために作成したもので、オーソライズはされていない。以下に記録する以外にも作成したものがある。

III-1 材料ゲノム工学に関する予備検討

○材料ゲノム工学によって

- ・ 学術段階を質量ともに一段階上昇させる
- ・ 既知の領域のエッセンスを統合化することにより、より高次の可能性を掌中にする
- ・ 新しい研究ネットワーク運営論の構築によって、より効率的に学術成果を生み出す

遺伝子工学は、人間の遺伝子情報の全容を解明し、その情報を共有することにより、より高度な展開可能性と、より節度ある使用遵守規律を求めるようになった。このような前進の一步は、材料工学でも起こりえる。なぜなら、材料のシステムである、複数の原子・分子さらにそれらの組合せが有機的に関係し合い、集合体としてまとまって、材料の機能を発揮するからである。原子・分子の配列の組合せは無限であるが、そのごく一部しか人類は未だ体験していない。

周辺技術の進歩も甚だしい。例えば、計測技術の内、X線回折を例にとれば、従前はその基本原理を理解しない限り測定データの意味ある理解はできなかった。近年、測定データの精度が計測技術そのものの進歩を土台にして、さらに計算技術の進歩の裏付けがあつて、従来不可欠とされた基本原理の理解がたとえ不十分であっても、従来よりも正確な測定データを得ることができる。背景となる基礎理論の正しい理解が求められるが、同時に新しい技術によって生まれた余裕をさらに新しい高度な課題への挑戦に振り向けることができるようになった。そのためには、従来理論の正しくしかもより高度に昇華された、単純明快な姿で次世代に伝えるのは先達の歴史的役割かもしれない。

いずれにせよ、最先端データが次々と生産される状況にあつて、得られるデータとそれから抽出される新知見を得る研究者間の個人的競争を最重視するか、(国内に限って共有することを前提に)最近データを研究者間で共有し、その信頼性を高めつつ、未検討な領域についてお互いに協力してしらみつぶしにしていき、得られる総合的なデータを元に、新しい原理、新しい可能性を見つけ出していき、国際競争力を最重視するかを国民的に選択する時機が到来しているのではないだろうか？

後者の道を選択すれば、我が国の材料工学は現在よりも一段と高い地平にいち早く立つことになる。前者の道に固執すれば、グローバルな競争の中に埋没する可能性が高い。個人的先着の名誉を得ることはできても、それが我が国の利に繋がることなく、他の国の後塵を拝することになりかねない。

米国 Materials Genome Initiative (MGI) では、Materials Genome を a fundamental block for a large purpose と定義づけている。この定義では、for a larger purpose と目的を示すことで、従来の physical definition とは一線を画している。材料は何らかの価値を具現化するという自発的な目的を持つべきものであるので、この定義は当然とも言える。

材料の機能は何によって決まるのか？は、本源的であり、究極的な材料工学の目的かもしれないが、現在では次のように捉えられている。すなわち、バルク材料をどんどん大きさの細かいサンプルにして行って、どこかの寸法までバルクの性能が再現されるのかという自問に対しては、どこかに限界があるに違いないと思われている。また、視点を変えて言えば、バルクの性能を決める内部構造の最大単位があるはずという理解もある。

一方、原子・分子を積み上げたモデルでシミュレーションすればどこかのスケールで、バルクの性能を再現できるはずと信じられている。しかし、単結晶であっても格子欠陥があり、単結晶でなければ粒界などが無視できなくなるなど、どのスケールで観察しても均一となることはなく、むしろ

ろスケールによって不均一な姿が多重に繰り返される。

このように、材料はまずは空間的にも多階層な構造という意味でマルチスケールであり、その性能の発現メカニズムの根本原理および使用条件の変化、変動に、動的要素が不可避免に加わり、時間的にもマルチスケールな現れ方を示すものである。

米国 MGI の定義はその側面を反映しているものである。すなわち、多階層構造における高次構造を決める対応する低次構造の基本単位を求めようとしている。

ヒトゲノム計画では各国が分担しあい取得データを共有することで共通データベースを完成させ、遺伝子工学の本格的発展の礎を築いたと言えよう。

来るべき日本版 MGI では、それぞれの分野の国内研究者が共通テーマで一斉に「絨毯爆撃」を行い、戦略的共通データベースを構築し、さらにそれを元に自己発展できるメカニズムを発明、導入することが求められる。

個々の研究者や研究グループの貢献度を業績評価の指標として明示することも大事になるだろう。

また、特に共同利用設備の使用当たっては、それまで蓄積された共通データベースを参照し、重複が無用なサンプリングをできるだけ避けることのできるような状況が現実化することが望ましい。

以上の考察のために、この分野でご活躍の以下の方々の情報提供を受けた。この分野の、特に鉄鋼分野での日本の経験、実績、データ蓄積は国際的にみて極めて高い水準にあることは自他ともに認めるところである。

◆柳本潤 東京大学 「内部組織制御変形加工のための材料ゲノム取得法」

材料ゲノムとは一種の材料データベースのようなもので、正確な材料ゲノムを得ることができれば、マルチスケールモデリングを利用して短時間の数値計算で塑性変形加工に誘起される内部組織変化の解析が可能となる。

・塑性加工学会誌（塑性と加工）、41 巻第 484 号（2001 年 5 月）464 ページ 「材料ゲノム」の初出文献か？

・ふえらむ、9 巻（2004）No.12、882 ページ

◆足立吉隆 鹿児島大学 「構造材料ゲノムの解明-全自動シリアルセクションング 3D 顕微鏡の開発と位相・微分幾何学に基づいた 3D 像の定量評価-」

材料組織（形態、結晶学的特徴、組成、局所硬度など：総称して鉄鋼ゲノム）をすべてデジタルアーカイブ化し、モデリングと組み合わせて組織・特性の予測をしたい。

・2013.2.11 JST「課題解決型の新物質・材料研究」ワークショップ報告

【データを活用した機能に基づく新物質・材料の設計（マテリアルインフォマティクス）】分科会

III-2 材料システム工学に関する仮想 QAC

【Q】例の学術会議材料工学委員会の10領域のうち、「材料システム工学」の定義をもう一度、分かりやすく教えてください。

材料工学委員会の資料から関連箇所を抜粋しますと以下になっております。

材料の創製は、材料リテラシー学を基礎とし、個々に固有の機能を有する材料が原子レベルからマクロスケールでインテグレートされることにより複雑な機能を新たに発現するためのマテリアルインターフェースの方法とそのシステム化利用技術を扱う材料システム工学、

3. 材料システム工学領域の科学・夢ロードマップ

個々に固有の機能を有する材料が原子レベルからマクロスケールでインテグレートされることにより複雑な機能を新たに発現するためのマテリアルインターフェースの方法とそのシステム化利用技術

この記述から金属学会は、「MEMS、マイクロ接合、デバイス化全般、インターコネクション、実装、自己組織化」などと理解して、作業担当は第2分科としました。先日のお話では、ここでいうシステムは「デバイス・システム」とは違い組織学に近いものということでしたが、ロードマップ作成作業に当たって、明確にイメージできません。「粒界」「金属組織」なのかな、とも思っています。「接合」はプロセスなのかシステムなのか？宜しく願いいたします。

【C】分類の仕方を新しくしますと、仮に組みかえるだけでも整合性が本当に取れているか、抜け落ちはないか？などを確認、保証することは大変なことですね。ましてや、新しい定義を考えようとすると、相当慎重に議論する必要があります。

【A】個人的な理解は、「材料自体をシステムと定義する新しい学」と捉えております。

【C】これはシステムの定義を、より上流の材料にまで広げるとのことと理解できますし、逆に材料をより下流にまで広げるとのこと、どちらかというとも後者でしょうね。

【A】「出口」はすべて「材料学」で統一しておりますので、「材料システム工学」はまずは出口イメージには馴染まないでしょう。

【C】これは納得できます。

【A】また、「材料プロセス工学」が別途設定されているので、プロセスそのものを扱うのも混乱すると思います。しかし、プロセスの定義が未確定です。

それでは「材料」の定義は何か？というのがもっと本質的な疑問となるはずですが、WGメンバーは、「材料とは、最終製品を構成する要素であって、物質を単独もしくは各種組み合わせで、所定の機能、形状等を与えたもの」というような定義を想定していると思います。すなわち、従来の言葉で言えば、素材、素形材、部材、さらにデバイスなどはすべて材料で統一することになっていくこととなります。

このような定義を前提に考えますと、「材料はシステムである」と言い換えることも可能になります。さらに別の表現で、材料に機能と形状を与えるために、原子・分子を空間構造で組み上げたシステムを設計する工学というのが、より理解しやすいのではないかと思います。最終的に、材料ゲノム工学を想定する場合にはこのような定義でないと結びつきにくいと思います。

【C】「材料に機能と形状を与えるために、原子・分子を空間構造で組み上げたシステムを設計する工学」

「設計する」と言っても、デザインして描くだけではしょうがないでしょうから機能と形状を与える方法論、原子分子で空間構造を組み上げる方法論が必要になります。となると、下のパラグラフに出てくるように、接合・塑性加工などもここに入るべきでしょうね。

逆にいうと、それらを取り入れないで、なおかつ「設計する」その中身があるかないか。あるのであれば、プロセス抜きの「材料システム工学」が定義できるかもしれません。

接合・塑性加工などが「材料システム工学」に入ってしまうと、今度はやはり「材料プロセス工

学」の定義が難しくなりますね。

【A】原子（電子も）から材料・システム（現在の定義、デバイスなども）まで滞りなく流れる、進展できるようにするための工学であり、「材料ゲノム工学」は、材料における元素機能の根源を明らかにすることで、「材料システム工学」に指針を与えるべきものである。などと両者の関係は理解できそうです。

ただ、ここで、システム設計のアウトプットを機能に限るか、形状も同時にするかというのが議論の岐路になるでしょう。私は、同時に設計の方がよいという考えの持ち主ですが、既述のものは、機能を前面に出していると思います。

ところで、機能というのは、力学的性質もすべて含んだもので、構造材料、機能材料という区別は廃止するつもりです。すべての材料は、構造材料であり、機能材料でもあるというのが材料工学委員会のコンセンサスに近いと思います。

【C】今の定義の構造材料は、力学特性をメインな機能として必要とされ、使われている材料であり、機能材料は、それ以外の諸特性で勝負している材料ですね。

但し、表現としては「構造材料」は便利であり、広く定着してしまっているのは事実ですね。英語で考えると分かりやすいですが、表現としては「構造材料」がおかしいのではなく、「機能材料」がおかしいですね。

「電子材料」「磁性材料」などと同列に「構造材料」があるものと思います。

【A】接合、塑性加工なども材料システム工学に分類した方が整理し易いというのが個人的意見ですが、これはまだ十分議論されていない点ですし、結果プロセス工学に分類するのが良いということもあり得ると思っています。

第2分科会でご検討いただいていること自体は大変有意義で外れていないと思いますが、そこだけで閉じるというものではないと思います。その点は、今後のブラッシュアップの中で全体の整合性を議論しながら適切な修正を加えていくことでより一層素晴らしいものに仕上がっていくと期待しております。

【C】作業に入る前に、もう少し議論を重ねてイメージをはっきりさせようと思います。

今のところは、「原子・電子から出発して機能発現の単位であるところの材料（今の定義よりは広く、デバイス・システムも含まれる）を無駄なく形作るための方法論を扱う学問」くらいに理解しておきます。

とすると、異分野融合が大事になるといいますか、学協会の連携というより再編が必須になってくるのでしょうか。

【A】融合と言っても大事なものは、お互いのディシプリンを堅持しつつ、異分野同士で連携することだと思います。

Ⅲ-3 10領域の分類と定義（2013. 12. 27版）

材料工学 の中核的基礎	材料リテラシー学	高校ならびに大学学部前期における物理学、化学、生物学などを素養にして、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
	材料システム工学	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
	材料プロセス工学	目的の材料システムを作り込む、物理的および化学的な方法に関する学術体系
材料工学 のツール	材料解析・診断学	材料システムおよ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
	理論・計算材料学	材料機能の発現機構の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
	材料ゲノム工学	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、ある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
材料工学の 展開	社会インフラ材料学	土木建築、機械、電気など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
	グリーン・エネルギー材料学	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
	医療・バイオ材料学	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
	デバイス材料学	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。

Ⅲ-4 高校生のみなさんへ 材料工学の大事さ、深さ、面白さについて

【注】以下の文章は、高校生を対象に、今回の作業を説明するとどうなるかを仮想的に書いてみたものです。

私たちは、材料工学という学術分野で活動している学者の集まりです。どこで働いているかというと、工学ですので、大学では主に工学部で、企業では主に製造業で働いています。「主に」でして、相当いろんな分野で働いているのが本当の姿です。私たちが研究・教育・生産などで扱う材料は金属、セラミック、プラスチックなど多種多様で、それらをさらに細かく分類すると材料のリストは膨大になります。身の回りの物がいろんな材料で作られており、材料なしには現代文明自体が成り立たないということは改めて説明する必要もないでしょう。一方、あまりにもありふれているので詰まらないと思われ、製品での縁の下の力持ちなので、目につきにくく、アピール力が弱く、分かりにくいというイメージもあるように思われます。そこで、今日は、材料に興味を持てるかどうかは問わず、材料工学の深さを聴いて考えていただき、その面白さ、大事さに思いを寄せていただ

れば良いと思いこの話を準備しました。

まずは材料の定義です。高校生の皆さんに限らず、「材料ってなんだと思いますか」と聞くと相当多くの皆さんは料理のことを思い浮かべるようです。

確かに、広辞苑という辞書を引くと、「材料：加工して製品にする、もとの物。原料。」とありますので、「料理の素材が材料」という答えは間違っていない。ということで、料理の話題から始めましょう。実は材料工学の学者さんには、「材料と料理を一緒にするな」と気分を害する人も少なからずいますので、こんな話をすると身内の人たちから袋叩きにあうかもしれません。

うどんのものは小麦ですが、小麦から直ぐにうどんを調理できません。小麦（植物）の栽培、小麦の粒（穀類）の収穫・乾燥、粒を粉々にした小麦粉、小麦粉に水、つなぎなどを混ぜて、こねて延ばして、裁断してうどん麺にし、それをうどんに調理します。家庭では、うどん麺を乾燥させたものを買って調理するのが普通ですね。流れを全部書きだすと、小麦（植物）→小麦（穀類）→小麦粉→うどん麺→うどん、となります。聡明な皆さんは、この途中途中でいろんな副産物があったり、ほかの原料を使ったりすることを省いて話していることに気づかれていると思います。それら全部を書き出すと壮大なパノラマになりますので、挑戦してみるのも面白いと思います。

さて、辞書にあった「加工」とはなんでしょう。これも分かっているようで説明しにくい言葉だと思いませんか？

広辞苑に頼りましょう。「加工：原材料に手を加えること」とあります。これだけではむしろ雲に包まれそうになりますので、「材料」の説明と繋げてみましょう。そうすると、「材料を原料に、手を加えて（加工）、製品にする」ということになります。この関係は、材料→加工→製品と表現できます。「→」の印は変化する方向を示します。出発点の小麦→最終点のうどんでは、この手順が繰り返されていることになります。すなわち、材料1→加工1→製品1＝材料2→加工2→製品2＝材料3・・・材料n→加工n→製品n＝最終製品という式が書けることになります。なんと、これが材料工学の真髄のひとつです。この連続式を「材料のプロセス」と言います。辞書では「プロセス：手順、方法」とありますので、正に辞書のとおりだにご理解いただけたと思います。

でも人為的な手を加えると言っても、もう少しその意味するところを整理しておかなくてはなりません。小麦（植物）も元は小麦の種が出発点ですので、小麦の種→栽培（加工）→小麦（植物）を先頭に足してもよいではないかという素朴な疑問がでます。野原に自然に生えていたものを収穫したのではなく、ひとが畑も作り、品種改良もし、肥料も改善を加え・・・さまざまな人為の結果として、種から成熟した小麦を作るのだ、ということになれば、種が最初の材料で栽培は加工という見方もあながち変ではありません。

金属の始まりも自然金や隕鉄など自然界で入手（採集）できるものでした。それを材料にして加工によって、装飾品、道具、武器等のいろんな製品を作ってきたわけです。自然界での入手が困難になり、長い歴史の中で、鉱石から金属元素を取り出す方法を見つけて、現代文明の花が開いています。

深く理由を問われると回答に窮するのですが、今までは、生物の「栽培」やいろんなものの「収穫」は、それが人為であっても、「加工」とは言わないできました。農業と工業の区別がくっきりとしていた時代は、この区別は暗黙的に「自明」だったようですが、「工場栽培」などが現実的になってくると、暗黙の自明さの持つ曖昧さが表面化してきます。きっと、これからの社会の進化に伴ってこの曖昧さがだんだんと克服されていくでしょうが、まだその段階には至っていないようです。

ということで、私たちは、小麦粉生産が工業化している場合は、小麦粉の原料である小麦（穀物）も材料として考えます。すなわち、「製品が工業的加工品と判定される場合には、その原料は材料とする」という判定基準を当面は採用することにします。

これが「材料」の当面の定義にもなる訳です。材料が、加工、製品と一緒にしか定義されないというのは、実は深い意味があります。その深い意義はだんだんにご理解いただけるようになるでしょう。

材料→加工→製品の連続式における材料の入口側の話をしましたが、実は同じような問題が、製品への材料の出口側にもあります。今度は自動車を思い浮かべて下さい。自動車は正に最終製品の代表格です。ご存じのように自動車は多くのパーツ（部品）を組み合わせたものです。そのパーツも分解してみると、より小さなパーツ（部品）を組み立てたものが多いですね。部品→組立（加工）→製品という式が書けるとすると、部品も材料かという素朴な疑問がここでもでてきます。

学問だから森羅万象を対象にしてよいのではないかと思われるでしょう。そのとおりです。森羅万象に関心をもつべきという面と、そうは言っても専門分野を持つべきという面があります。材料工学もそのような専門分野のひとつです。そうすると対象範囲をそれなりに定めるということが不可欠になります。数学の問題でも、境界条件が明確でないと答えが得られない、境界条件が明解でも複数の答えが正答という場合があります。対象範囲は、この境界条件と似たものです。ただし国境のようにお互いに侵略してはいけないという線引きではありません。他の専門分野と重複する対象領域を持つことはむしろ自然です。お互いに自己論理性のある境界条件を定めたら重複領域ができた、というのが良いのではないのでしょうか。

パーツと材料をどこで線引きするかという問題に戻ります。材料→加工→パーツ(製品)という材料の終点になる判定基準は何でしょうか？

組立は材料の加工に加ええないという考え方もあるかもしれませんが、後でその話に戻ることとして、ここでは、「機能」という言葉の意味を考えてみます。辞書では「機能：物のはたらき」とあります。製品も材料も物ですので、「製品の機能」、「材料の機能」ということを考えることができます。役に立つ機能があるからこそ製品となり、ひとが購入し、使用するわけですので、実は役立つ機能ということがまず大事です。

こう話した時に、「機能はどうやって生まれるのか？」という疑問を持っていただけましたか？自発的にこの疑問を持たれた方は、論理的に物事を考える、という素質を既に持っておられる方ですね。

「材料の機能はどうやって生まれるのか？」というのが、材料工学の最も重要な課題だと思います。

さて、皆さん、何気なく「システム」という言葉を普段使っておられませんか？コンピュータ製品が普及し、この携帯のシステムは・・・などと皆さんも馴染みが深い言葉になっていると思います。辞書にはなんて書いてあるのでしょうか。

「システム：複数の要素が有機的に関係し合い、全体としてまとまった機能を発揮している要素の集合体。組織。系統。」とあります。

要素をパーツで置き換えると自動車の機能もシステムによるものだということを教えてください。自動車だけでなく、船も、ビルディングも、橋も、携帯電話も、テレビもシステムが機能を出しているという理解で間違いありません。

システムですので、その要素に不具合が出ると全体としてのまとまった機能にも不具合がでるのは致し方ありません。故障だけでなく、寿命も、要素そのものに不具合があるのか、要素同士の関係に不調なのかと考えて、問題の在り処を見つけていくことになります。

このように、「製品はシステムです」という話は、皆さんも納得できるでしょうが、実は「材料もシステムです」というと初耳でしょうし、ちょっと驚かれるのではないかと思います。

この言葉を聞いて、材料の内部に部品があるのか？という素朴な疑問を持った皆さんは、鋭い思考力の持ち主ですね。

物理や化学で、目に見えるすべての物質は、原子、分子で構成されている、と習うはずですが。材料のシステムを考える時に、原子、分子が部品の役割を果たすと理解していただいてもよいでしょう。先ほどの辞書の説明で、要素を原子・分子に置き換えていただければ、「材料のシステム」を正しく説明しています。私は、材料のシステムの方が、製品のシステムより多分複雑なものだと考えています。

さて、部品は目で見えますが、原子・分子は肉眼では見えません。製品のシステム要素をより細かい単位に分解していったときに、製品のシステム要素と判定できないものに遡ることが必ずできます。それが出口端の材料です。建築で言えば、鋼製の梁は製品のシステム要素ですが、その梁の原料となった例えばH型鋼の棒は材料となります。梁も形鋼も物質的には全く同じですが、材料とするかどうかという判定は、「材料→加工→製品」の「材料のプロセス」の手順の中で行います。

さて、これで材料の入口と出口の判定が皆さんにもできるようになったと思います。それでは、材料工学の対象範囲では上述の鋼製の梁は除くのかと思われるかもしれませんが、そうはなりません。材料のプロセスの入口と出口の両端の材料の、原料、加工、製品についても原則的には対象に含みます。そうすることによって、重複領域を持つ、関連する学問領域との円滑な協同が可能になります。

皆さん、これで材料工学が扱う材料の範囲と材料工学の対象範囲を説明したことになります。それと同時に、材料工学の真髄として、「材料のプロセス」と「材料のシステム」があることにも触れました。そして、工学である以上は、「機能」が大事ということも言いました。

私たちは、材料工学を「材料の創製と高機能化を極める工学」と定義しています。創製とは「はじめてつくりだすこと」(辞書)です。今までになかった材料を始めてつくることとその機能発揮を、与えられた条件のもとで最適化・最大化するのが材料工学の役割になります。

短距離走のランナーのことを思い浮かべましょう。体重と記録とは一般に比例しないと思います。ですが、必要な筋肉を増やしたり、より強くしたり、むしろ体重を増やして、記録を更新してきました。材料の高機能化は同じような開発の歴史になります。常識＝「体重と記録は反比例する」を破る時に、高機能化が極められます。すなわち、筋肉を含む体質の改善、材料で言葉を換えて言えば「材料のシステム」の改革から常識がブレクスルーされます。

内部のシステム構造だけでなく、大きさや形も機能と密接な関係を持ちます。これを材料工学では、形質制御ということがあります。形質制御は「加工」もしくは「材料のプロセス」で行われます。

元素の種類が200以上あることは高校で教わります。そうするとその組み合わせ、配合率まで含めると可能性は無限にあります。1モルはアボガドロ数の原子・分子のことだということも高校で知ります。固体の1モルがどの程度の体積かは計算できると思います。せいぜいサイコロの大きさです。その中に含まれている複数の元素・化合物種類の原子・分子の並び方(順列組合せ)を計算してみてください。高校の数学では計算不能な大きな数字になるはずですが、一秒間にその一つの例を試すことができるとしましょう。宇宙の年齢を140億歳として、それを秒に直すことは簡単です。せいぜい10の18乗程度のはずです。アボガドロ数にも及びません。可能性は文字通り無限になります。

これが、「材料の創製と高機能化」が単なるスローガンではないことの最も簡単な証拠です。では、膨大な可能性があれば簡単に問題が解けるような気がします、そうは問屋が卸しません。何気ない1回の実験で答えが見つかる確率も確かにゼロではありません。ですが、しっかりとした成果は数えきれない試行錯誤の山の頂点にこそ生まれると思います。宇宙は無限で可能性に満ちています。でも隣の惑星に行くことすら容易ではありません。存在が確定した隣の惑星に行こうとするにも、宇宙で迷子になるようでは元の木阿弥です。しっかりとした羅針盤と確かな道具立てを持ち、ひとりひとりの限界を超える必要があるでしょう。そのために、多くのひとと共通土台を共有し、努力を競い合うという戦略が求められています。

とかく偉大な先達たちは既存の分野は熟した、残された課題は少ない、という遺言を残しがちです。それは、その偉大な先輩が掘った範囲の穴の中の話であって、傾聴すべき貴重な意見を含みますが、信じる必要はありません。もし課題が尽きたら、もう誰も研究する必要はありません。研究する必要がないとしたら、人類はその分野でこれ以上大きくは進歩できません。

現状では、まだアボガドロ数相当量の知識も尽くしていないと考えるべきです。どんな分野でも進歩のマージンがどれほど残されているのかを心配するのは時間の無駄です。勇躍してご自分の関心のある学問に挑戦されることを勧めます。

ご自身が材料工学に携われることがなくても、今回お話した材料工学の専門家がいつも身近に活動しているということをつつまでも忘れないようにしてください。

よし材料工学も面白そうだと関心が少しでも生まれた方がおられましたら、仲間に加わっていただけのことを心から歓迎いたします。近いうちに一緒に活動できることを心待ちにしています。

今日は、ありがとうございました。