

報告

材料工学ロードマップのローリング
社会インフラ、グリーン・エネルギー分野



平成29年（2017年）8月30日

日本学術会議

材料工学委員会

材料工学ロードマップのローリング分科会

この報告は、日本学術会議材料工学委員会材料工学ロードマップのローリング分科会の審議結果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ロードマップのローリング分科会

委員長	松宮 徹	(第三部会員)	金沢大学大学院自然科学研究科客員教授
副委員長	長井 寿	(連携会員)	物質・材料研究機構構造材料研究拠点特命研究員
幹事	潮田 浩作	(連携会員)	新日鐵住金株式会社顧問
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
	乾 晴行	(連携会員)	京都大学大学院工学研究科教授
	尾崎由紀子	(連携会員)	九州大学大学院工学研究院教授
	河村 能人	(連携会員)	熊本大学先進マグネシウム国際研究センター長
	岸田 晶夫	(連携会員)	東京医科歯科大学学生体材料工学研究所教授
	須山 章子	(連携会員)	株式会社東芝電力エネルギーシステムソリューション社電力・社会システム技術開発センター主査
	陶山 容子	(連携会員)	無機材料総合研究所代表・日本セラミックス協会フェロー
	田中 敏宏	(連携会員)	大阪大学大学院工学研究科教授
	筑本 知子	(連携会員)	中部大学超伝導・持続可能エネルギー研究センター教授
	津崎 兼彰	(連携会員)	九州大学大学院工学研究院教授
	新家 光雄	(連携会員)	東北大学名誉教授、東北大学金属材料研究所客員教授、大阪大学大学院工学研究科特任教授、名城大学大学院理工学研究科特任教授、名古屋大学未来材料システム研究所客員教授
	東 健司	(連携会員)	大阪府立大学副学長・工学研究科教授
	御手洗容子	(連携会員)	物質・材料研究機構構造材料研究拠点副拠点長
	山本 雅彦	(連携会員)	大阪大学名誉教授
	依田 照彦	(連携会員)	早稲田大学名誉教授

本提言の作成にあたり、以下の方々に御協力いただいた。

田村 和夫	(連携会員)	千葉工業大学工学部教授
橘川 武郎	(連携会員)	東京大学名誉教授、一橋大学名誉教授、東京理科大学大学院イノベーション研究科教授
鈴木 俊一		東京大学大学院工学研究科特任教授
森口 祐一	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授

本提言の作成にあたり、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務	石井 康彦	参事官（審議第二担当）（平成 29 年 7 月まで）
	糸川 泰一	参事官（審議第二担当）（平成 29 年 7 月から）
	松宮 志麻	参事官（審議第二担当）付補佐（平成 29 年 7 月まで）
	高橋 和也	参事官（審議第二担当）付補佐（平成 29 年 7 月から）
	西川 美雪	参事官（審議第二担当）付審議専門職付（平成 29 年 3 月まで）
	宮本 直子	参事官（審議第二担当）付審議専門職（平成 29 年 4 月から）

要 旨

1 作成の背景

この報告は、日本学術会議第三部が 2011 年 8 月に報告した「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」、および、2014 年 9 月に報告した「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ 2014」（以下、「夢ロードマップ 2014」）を継承し、社会状況の変化に機敏に対応して見直し（ローリングと呼ぶ）を行った結果をまとめたものである。

2 現状および問題点

「夢ロードマップ 2014」では、材料工学の全研究領域を総論的に示したが、個別領域における具体的な諸課題と対応策の分析が不十分で、ロードマップが適用されにくい弱点があった。

社会インフラ材料学に関しては、老朽化が進む社会インフラ（インフラストラクチャーの略、以下同じ）のメンテナンス・更新のために革新的材料での最良の対応が求められている。地震・津波、火山噴火、風水害等に対する防災、減災技術を深化させるために安全・安心な住宅・社会基盤を構築する必要がある。一方、水素社会の到来に対応する新規インフラの整備も期待されている。

また、グリーン・エネルギー材料学に関しては、地球温暖化抑制のために、再生可能エネルギーの普及拡大、火力発電、送電の高効率化、輸送交通機関（自動車、船舶、航空機、鉄道車両等）の軽量化による燃費の向上、省資源・省エネルギー化の推進等が期待されている。一方、原子力発電のグリーン化（廃炉・燃料処理技術の確立）も焦眉の急である。

「持続可能な開発目標（SDGs）」等の国際的活動への貢献も視座に置き、個別領域におけるこれらの諸課題を詳しく分析し、課題解決のために材料工学がなすべき点をより具体的に示すことが求められている。

3 報告の内容

(1) 社会インフラ材料学のロードマップ

メンテナンス技術については、構造体損傷の「未病療法」（発症前の治癒）を完成すべく、損傷の自己点検材料、損傷の自己補修材料を提供し、その高性能化と安定供給を実現する。防災・減災技術については、災害強靱性の実用的な向上策を提示すべく、軽微損傷を自己治癒できる超長寿命材料であり、かつ、災害時には強靱性が発揮できる多機能型高性能材料の安定供給を実現する。高齢化に対応し、軽量化を実現する材料複合化やバリアフリー構造、電動移動体、看護ロボット、高齢者用ベッド等、在宅看護を支える材料性能を提供し、他分野と協働して都市型ユートピア社会とその持続的発展を達成する。水素社会到来に対応して、安全・堅牢な水素社会インフラ技術を構築すべく、高強度・高延性の両立、水素脆化抑制のための材料システムの革新的設計方法を確立し、最適材料性能の提供を実現する。また、低温利用インフラについては、低温利用新構造体用材料の諸特性のデータベース化等に基づき、低損失・高密度長距離送電網、エネル

ギー貯蔵整備による再生可能エネルギー平準化、さらには省エネルギー移動を実現する先進交通・輸送体系の確立、拡大に寄与する。

(2) グリーン・エネルギー材料学のロードマップ

燃費向上のために、輸送交通機関向け材料（超高強度・高剛性材料、超耐熱材料、高機能モータ用材料、電池材料等）の最適材料・部品の設計方法と創製法を確立する。火力発電の高効率化のために材料の超高温高強度化・超耐酸化を、送電効率改善のために電力変換素子、送電ケーブル等の超低損失化を進め、さらに、発電体系のマルチマテリアル化を推進し、高効率電力供給体系を実現する。また、再生可能エネルギーの普及拡大のために、発電高効率化に資する風力発電モータ用磁性材料、太陽光発電用材料、風力・太陽光発電機架台用高耐久性高強度材料、地熱発電用高耐久性材料、人工光合成材料、熱核融合炉用材料等の高性能化と安定供給を実現する。一方、二酸化炭素排出量を最小化した革新的材料プロセスの確立を目指すとともに、二酸化炭素の分離回収・輸送・貯蓄の革新的手法に資する材料を提供する。さらに、多様な材料を最適配置・統合化し、エネルギー製造から輸送、備蓄、利用、再利用までの全体を総合的に管理する高効率スマート社会の実現に、新資源利用、資源循環率向上の革新的手法を開発し、資源循環型の社会・経済体系の構築に、また、長期に及ぶ原子力発電所の廃炉、燃料処理を支える材料技術を確立し、安心して生活できる社会の構築に寄与する。

(3) 材料工学共通領域

材料システムについては、劣化の自己点検、自己修復機能の付与、マルチマテリアル化、ライフサイクルカーボンマイナス（LCCM）を進展させる必要があり、材料プロセスについては、高能率補修方法、材料複合化の接合・製造プロセス、三次元プリント技術の発展が望まれる。また、材料循環のための革新的分離方法、二酸化炭素排出量を最小化した生産技術の開発が期待される。材料リテラシー学については、学際的研究、超学際的な協働の実現のための教育、LCCM 設計に関する教育の強化が望まれる。材料解析・診断学については、遠隔非破壊検査法、組織制御・特性制御のための新物理解析法、元素機能解明のための先端解析法の開発が望まれる。理論・計算材料科学については、ナノ・マイクロ統合劣化挙動シミュレーション、高温強度・耐酸化性、腐食、金属組織制御・特性制御、元素機能解明に関する計算材料科学の展開が望まれる。材料ゲノム工学については、各種データベースの継続的蓄積、ビッグデータ活用による寿命予測、マテリアルズインフォマティクス／インテグレーション等、IoT やビッグデータ等との関連を考慮した新たな材料学の創成・構築が望まれる。

なお、革新的材料の設計、および、材料の適用による社会的課題の解決に当たっては、多くの局面で、材料工学と物理・化学・情報科学・計算科学・機械工学・エネルギー工学・都市工学等の諸科学・工学、のみならず、医学・看護学・社会福祉学、経済学、政治学等との連携、融合が重要である。

目 次

1	はじめに	1
2	社会インフラ材料学	3
(1)	既存構造体	3
①	メンテナンス技術	3
②	防災・減災技術	3
(2)	高齢化社会対応	4
①	高齢者が暮らしやすい都市インフラ	4
②	高齢者に適したモビリティ	4
(3)	新構造体	5
①	水素社会対応	5
②	低温利用	5
3	グリーン・エネルギー材料学	7
(1)	低炭素社会	7
①	輸送交通機関	7
②	高効率火力発電・送電	7
③	再生可能エネルギー	8
④	二酸化炭素分離・回収・輸送・貯蔵	8
(2)	省エネルギー	9
(3)	省資源・循環・回収	10
(4)	原子力発電（廃炉処理・燃料処理）	10
4	材料工学共通領域	11
	<参考文献>	20
	<参考資料1> 審議経過	22
	<参考資料2> シンポジウム開催	23

1 はじめに

第 21 期日本学術会議第三部は学協会との連携を進めた結果として、理学・工学系学協会連絡協議会の協力のもと 2011 年 8 月に「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」（以下、「夢ロードマップ 2011」）[1]を報告として発表した。しかし、そのロードマップには公表の直前（5ヶ月前）に起きた東日本大震災を踏まえた抜本の見直しができなかった等の状況があったため、第 22 期日本学術会議第三部においてはこの点を含めて内容の精査を行い、2014 年 9 月に「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ 2014」（以下、「夢ロードマップ 2014」）[2]を報告として発表した。

第23期においては第三部全体としてのロードマップを見直す計画にはなかったが、材料工学の10の研究領域について社会状況の変化に機敏に対応して不断に見直す（ローリングと呼ぶ）ことは重要であると考え、ローリングを開始した。今期は4つの応用領域のうち、構造材料が中心となる社会インフラ材料学、およびグリーン・エネルギー材料学のロードマップのローリングを実施するとともに、それを通じて、共通基礎・基盤領域である材料システム工学（材料工学委員会定義：「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、材料リテラシー学、および共通ツール領域である材料解析・診断学、理論・計算材料学、材料ゲノム工学について関連事項を整理することとした。

1960、70年代に多くが建設され老朽化が進む我が国の社会インフラの更新に当たっては、より優れた材料および材料技術によって、より良い対応を実現し、地震・津波、火山噴火、地球温暖化に伴って激化する風水害等に対する防災、減災技術を強化して、安全・安心な住宅・社会基盤を構築する必要がある。

また、水素社会到来に対応する新しいインフラの構築も求められる。二酸化炭素排出量を最小化し地球温暖化を抑制するためには、再生可能エネルギー・発電の普及拡大、火力発電、送電等の高効率化、自動車、航空機、船舶、鉄道車両等の輸送交通機関の軽量化による燃費性能の向上、省資源・省エネルギー化の推進等も求められる。一方、これまでベースロード電源¹を担ってきた原子力発電のグリーン化のためには、長期を要する廃炉（特に事故後の原発の廃炉）および使用済み燃料処理に必要な技術の早期確立が求められる。

なお、社会インフラ材料学、および、グリーン・エネルギー材料学が解決を目指す課題は、グローバルには 2015 年の「持続可能な開発サミット」で国連加盟国が採択した「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」に含まれる「持続可能な開発目標（SDGs）」[3]の目標 3、7、9、11、12、および、13 等と重なるところがあり、また、これと密接な関係にある Future Earth プロジェクトの動向も併せて注視して、これらの動きに貢献していくこともロードマップの視座に置くべきである。

「夢ロードマップ 2014」では材料工学の研究領域すべてを報告したため、社会インフラ材料学、グリーン・エネルギー材料学の領域における上記の課題とその対応策の詳述に及

¹ 季節、天候、昼夜を問わず、一定量の電力を安定的に低コストで供給できる電源

ばず、ロードマップが活用されにくい弱点があった。そこで、今期では対象とする社会的諸課題を再検討し、課題を解決する上で材料学が展開すべきことをより具体的に示すこととした。

分科会はまず課題分析を行い、重要な社会的課題を整理した。それに基づき、社会インフラ材料学においては、既存構造体を対象とした①メンテナンス技術、②防災・減災技術、また、高齢化社会対応を対象とした③高齢者が暮らしやすい都市インフラ、④高齢者に適したモビリティ、さらに新構造体を対象とした⑤水素社会対応、⑥低温利用の計6項目に絞り込んで取り上げた。グリーン・エネルギー材料学においては、低炭素社会を対象として、①輸送交通機関、②高効率火力発電・送電、③再生可能エネルギー、④二酸化炭素分離・回収・輸送・貯蔵、さらに、⑤省エネルギー、⑥省資源・循環・回収、および、⑦原子力発電（廃炉・燃料処理）の7項目を取り上げた。

これら各項目について、社会的課題の解決における最終目標とそれを達成する10年ごとの技術的進展を示し、その進展を支えるために必要な材料学、材料技術の10年ごとのロードマップを作成した。

なお、材料工学の10の研究領域全てを見直し、ローリングを一回り完了する時期は2020年になる。2020年は「夢のロードマップ2014」の10年区切りの最初の10年の区切り年である。この不具合を解消するためにローリングするロードマップは、もう10年更新した30年先、すなわち最終目標時期を2050年に定め直した。以下に、その結果について報告する。

2 社会インフラ材料学

(1) 既存構造体

① メンテナンス技術

高度成長期（1960年代～）、圧倒的に不足していた社会インフラを急速に整備したが、現在、それらは老朽化の一途を辿っている。それにつれて更新・メンテナンス必要経費が嵩み、2050年には公共投資可能額（10兆円想定）を上回ってしまう試算がなされている。そこで、2050年までに安全・安心な持続可能社会の維持のために、特に遅れている構造体の効率的なメンテナンス技術の確立を達成目標とする。これを可能ならしめるには、2030年までに、変形・破壊様式と計測データの相関解析法、現場施工性の統一判定基準を確立し、2040年までには、種々の環境下での低コスト・軽量・遠隔検査法を社会実装すると同時に遠隔集中管理のためのモニタリング情報通信技術を確立し、2050年には構造体損傷を常時把握し、損傷の未病療法を完成していなければならない。そのためには、センサ、ロボット、情報通信の活用が不可欠である。

以上の実現のために、材料学は、2030年までに、損傷のその場非接触モニタリング、変形、劣化、損傷の機構の解明とモデリング、優れた溶接性／接着性の新シーズ発掘などの基盤研究を通じて、材料創製と高機能化に共通する基礎現象の理解を深化させる。そして2040年までには、損傷部位と損傷度の迅速、高精度、遠隔判定法、劣化部位のみの簡便交換工法現場施工性に優れ、かつ低コストの補強・補修のための材料工法のシーズ開発などを通じて、材料創製と高効率化を合わせて検討できる統合的解法の確立を目指す。その結果、2050年には、低環境負荷であり、損傷を自己点検できる材料、損傷を自己補修できる材料を提供できる域に到達し、これら材料の更なる高性能化と安定供給を実現する。（末尾のロードマップ図を参照。以下の項についても同様。）

② 防災・減災技術

2005年から2014年の10年間で、自然災害と人為的災害が全世界で合わせて6000件以上発生しており、80万人を超える人命が失われたといわれている[4]。災害による損失は先進国と発展途上国ともに増大している。災害そのものは発展途上国のみならず先進国においても持続可能な発展を阻害させる要因である。したがって、2030年までには、災害リスクを正しく理解して、災害リスクの大幅な軽減を目指すために、既存構造体の損傷モニタリング技術を深化させる。さらに、2040年までには、災害リスク管理のための災害リスクの統治能力強化を目標に、災害外力に対する材料の脆弱性と強靱性を評価するための測定方法と指標を確立する。そして、災害に対する強靱性の向上には多くの関係者が関与することに配慮して、2050年までには自然科学、工学、医学、社会科学・人文科学などにまたがる学際的研究や科学者・専門家・政策立案者の間での超学際的な協働などにより、材料工学分野から災害強靱性の実用的な向上策を提示する[4]。

材料学的な面から、災害に対する強靱性の構築と持続可能な発展を実現するために

は、2030年までに災害時の材料の損傷機構の解明と損傷のモニタリングをより精緻にする必要がある。2040年までには災害リスクを評価する指標を明確にし、構造性能を向上させる高機能材料の開発を目指す。防災・減災分野での高機能材料の一例として、センサ機能を持つ高性能材料の開発が挙げられる。結果として、2050年までには災害時ではない平常時には軽微な損傷を自己治癒できる超長寿命な材料であり、かつ、災害時には強靱性が発揮できる多機能型高性能材料の安定供給を実現する。

(2) 高齢化社会対応

① 高齢者が暮らしやすい都市インフラ

我が国は他国に類を見ない速さで少子高齢化が進行して、2025年にはいわゆる「団塊の世代」がすべて75歳以上となり、高齢化率が増加する。他方、生産年齢人口は減少するので、総人口は減少するものの65歳以上が人口に占める割合である高齢化率は益々上昇し、2060年には2.5人に1人が65歳以上、4人に1人が75歳以上になると推計されている[5]。特に、三大都市(東京都、愛知県、大阪府)の高齢者の割合は2015年で2割を既に越えており、2025年では三大都市で3割近い高齢化率になると予測されている[5]。このように都市では既に人口減少・超高齢社会へ突入しており、高齢者が暮らしやすい都市インフラ社会の構築に向けた取り組みが必要となっている。

高齢者が暮らしやすい都市インフラ社会の実現を目指して、材料工学においては、2030年までに、工学、都市工学、医学、看護学、社会福祉学、政治学との協働による都市インフラにおける高齢者向け課題の抽出と解決法の検討、都市型社会インフラと社会体系の融合と整合性の調整、高齢化社会における高齢者の位置づけの合意形成などの基盤研究を通じて、インフラ材料創製と高機能化に共通する基礎現象の理解を深化させる。2040年までには、更なる軽量化を実現可能な材料複合化やバリアフリー構造、電動移動体、看護ロボット、高齢者用ベッドなどの在宅看護への移行に対応した都市型高齢化社会の課題を解決する材料提案技術の基盤構築を目指す。2050年には、この総合的解決法の社会実装・普及による最適材料性能を安定して提供できる域に到達し、他分野との協働による実現化戦略の策定とさらに研究開発成果を、高齢者を含めた対応可能な年齢層へ展開させることで、都市型ユートピア社会の実現とその持続可能な発展を達成する。

② 高齢者に適したモビリティ

前項で述べたように、我国は高齢化率が増加する一方で、公共交通機関の弱体化や都市の郊外化・低密度化が進み、高齢者の移動が困難になる事態が深刻化している[6]。高齢者がより豊かな生活、社会参画、文化的活動できる社会を実現するためには、高齢者が利用しやすいモビリティ社会の構築に向けた取り組みが必要となっている。

高齢者に適したモビリティの実現のため、材料工学においては、2030年までに、機械工学、エネルギー工学、情報工学、都市工学、医学、看護学、社会福祉学、経済学、政治学とのコミュニティを形成し、高齢化社会におけるモビリティの課題抽出と解決

法検討、交通体系と都市型社会インフラ（まちづくり）と社会体系の融合・整合・調整などを通じて、高齢化対応モビリティ社会を基本設計するとともに実現化戦略を策定し、それを実現するために必要な構造材料、モータ材料、蓄電池材料、充電器材料、各種センサ材料、情報通信機器材料、データ処理機器材料、制御機器材料などの材料創製と高機能化に共通する基礎現象の理解を深化させる。2040年までには、高齢化対応モビリティ社会実現のための交通体系、社会インフラならびにモビリティの提案により、高齢化対応モビリティ社会構築の設計方法・設計指標を開発し、高齢化対応交通体系・社会インフラの構築、ならびに高齢化対応のモビリティを実現する最適材料提案技術の基盤を構築する。2050年には、他分野との協働による実現化戦略を完成させるとともに、最適材料の提供によって高齢化対応モビリティの実現を図る。さらに、最適材料提案技術を全年齢層に対応したモビリティ社会へ展開させることで、都市型ユートピア社会の実現とその持続可能な発展を達成する。

(3) 新構造体

① 水素社会対応

水素社会対応に向けて、2030年まで水素インフラの整備が計画されているが、2030年に家庭用燃料電池530万台（全世帯の約1割）が普及されても家庭部門におけるエネルギー消費量の4%削減にとどまると見込まれている[7]。そこで、「水素」が主要なエネルギー源となるためには、再生可能エネルギーで製造される「グリーン水素」を市場に普及する必要があると見込まれており、2030年代以降の展開が期待されている。そして、水素が主要なエネルギー源となるためには水素発電の普及が必要不可欠であり、「産業用燃料電池設備」、「水素ガスタービン設備」、「トリプルコンバインドサイクル設備²」などの発電設備体系の構築が期待される。さらに大規模発電だけでなく分散電源も進むことから、グリーン水素でスマートグリッドのようなエネルギー利用網を構築するために、「水素電力貯蔵設備」へと展開されていくことが予想される。

したがって、このような水素供給基地と水素電力貯蔵設備の構築を目指して、高圧水素下などの水素侵入環境でも脆化を起こさず安全に使える金属構造材料のロードマップを示す。すなわち「安全・堅牢な水素社会インフラ技術の構築」が対象である。ここでは「高強度・高延性の両立」や「水素脆化機構の解明」などの基盤現象理解から「材料データベースと損傷メカニズムに基づく材料システムの革新的設計方法」による最適材料性能の提供を示している。この実現には物理・化学・機械工学と材料工学の連携が必要である。また、実現される基盤技術は将来のエネルギー安全保障の観点から、外交交渉での優位点となることが期待される。

② 低温利用

化石燃料の枯渇化、二酸化炭素の多量排出による環境負荷の増加が世界の共通課題

² 燃料電池、ガスタービンおよび蒸気タービンの3段階の発電設備

となっている。そこで、再生可能エネルギーへの転換が各地で進められているが、発送電に関しては昼夜や気候変動の影響を受け発電量が不安定なこと、発電適地と需要地が離れていることなどから輸送ロスが大きい。これらの課題解決のためには、低損失な送配電網および電力エネルギー貯蔵設備の整備が必要であり、それに関わるエネルギー変換・高密度化などが不可欠である。

一方、グローバル化が進み、人や物資の移動が世界規模になっており、航空機・船舶・鉄道をはじめとした化石燃料に依存した交通についても、エネルギー利用の高効率化が求められている。この課題解決に近年、水素利用や高温超電導応用に関する研究開発が進められているが、それらを支える材料技術である低温構造材料についてはあまり検討されていない。低温冷却技術も必要だが、液体水素や液化天然ガス（LNG）などの冷熱を利用することにより超電導冷却が効率化する期待がある。これらをふまえ、ここでは低温利用の新構造体および冷熱利用に焦点を絞る。

具体的には 2030 年までに、低温利用新構造体に関する各種材料の諸特性のデータベース化を行うとともに、構造体の構築に必要な例えば接着剤等の周辺施工技術の基礎開発、また冷熱の効率利用の検討を行う。2040 年までには、これら基礎的知見や技術開発を用いた低温利用新構造体の開発や製造技術低コスト化・供給体制整備、また冷熱利用の実証試験等を行う。2050 年を目処に、低損失・高密度長距離送電網、エネルギー貯蔵技術整備による再生可能エネルギー平準化、さらには省エネルギー移動を実現する先進交通・輸送技術の確立、拡大を目指す。

3 グリーン・エネルギー材料学

(1) 低炭素社会

① 輸送交通機関

自動車、鉄道、船舶や航空機などの輸送交通機関に対する社会からの要請は、地球環境保全と安心・安全との高度な両立である。現状では輸送交通機関からの排出ガスによる温暖化や環境汚染が地球規模で進行している。また、輸送交通機関の安全も十分とは言えず、事故の発生やそれに伴う死亡、障害などは人間への不安のもととなっている。したがって、輸送交通機関に対する将来目標としては、地球環境保全と安全の両立への飽くなき挑戦を通して、人間と共生する輸送交通機関を作ることである。これらの課題を解決するには、広い分野の科学技術を総合的に活用することが必要となるが、材料工学の貢献も大きい。2030年までに、異分野の科学・工学を融合させた材料設計・機能設計のための新たな要素技術を構築する。2040年までには個々の要素技術の融合を図り全体を最適化する設計方法やモノ造りの革新に資する技術を確立する。2050年にはこれらの技術を総合的に活用・融合させ、人間と共生する輸送交通機関の提供に展開する。

上記の実現のために材料学においては、2030年までに地球にやさしく安心・安全な輸送交通機関に貢献する材料（超高強度・高剛性材料、超耐熱材料、高機能モータ用材料、電池材料等）およびこれらの高機能化の実現に関係する共通基礎の理解と深化を先端解析・計算材料科学、表面・界面材料科学などを駆使して図る。2040年までにはこれら材料の創製法と利用技術の確立を通じて、高機能化のための統合的解法（マルチスケール解析、最適化・逆問題解析、ライフサイクルアセスメントなど）の確立を目指す。2050年にはこの統合的解法の普及により、必要性能を有する最適材料・部品を設計し、かつ創製できるようにする。その実現のためには、材料工学と機械工学や情報科学との融合が鍵となる。また、基盤研究を重視した我が国ならではの新学問体系（マテリアルズインテグレーション³やマテリアルズインフォマティクス⁴）の構築と人材育成が重要である。

② 高効率火力発電・送電

東日本大震災以降、原発依存度低減を目指した電力政策が検討されている。再生可能エネルギー発電は電力の需要変動に弱いため、電力の安定供給源として火力発電の依存度が増大した。このため、発電・送電効率の飛躍的向上による環境負荷低減が、火力発電における喫緊の課題であり、経済産業省ではパリ協定の採択等、国内外のエネルギー、地球温暖化対策を巡る議論の進展を踏まえ、平成28年6月に「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」を策定した。これによれば、環境負荷低減に向け、2030年までに、超高温燃焼およびタービンの複合化（第2次世代火力発電）、および次世代

³ 材料科学、計算科学、データ科学を融合し、計算機上で材料のプロセス、組織、特性、性能の連関を予測し材料開発を加速する統合型材料工学

⁴ 計算機の巨大情報処理能力を材料研究に応用する学術領域

低損失送配電網の構築に向けた材料要素技術を確立し、それ以降は第2次世代火力発電と燃料電池の複合化（第3次世代火力発電）、あるいは水素発電の実用化による発電効率改善によって化石燃料依存度を低減する[8]。エネルギーミックスの観点から、2050年には、相互連携された発電・送電・消費サイクルの中に次世代火力発電技術が取り込まれ、消費環境に応じて過不足ない発電・送電が行われ、温室効果ガス排出量の大幅削減[9]が実現可能となる。

これらの技術発展を実現するため、材料工学においてはまず、2030年までに超高温燃焼環境において超高温高強度かつ超耐酸化性を両立し、加えて耐水素脆性を実現する材料の新指導原理提案を行う。同時に、送電効率改善のため、電力変換素子、送電ケーブル等の超低損失化の原理提案も行って行く。これらの研究過程においては、計算科学と実験の融合、あるいは総合材料データベースの継続的蓄積および共有を深化させる。次に、2040年までに、超高温高強度材の成形、切削加工技術、あるいは異種材料間の接合技術を確立させ、火力発電設備のマルチマテリアル化を推進する。さらに、2050年までにはマテリアルズインテグレーション³を基盤とした革新的材料設計方法を構築し、材料設計自由度を高めることによって、消費環境に自在に適合する最適な発電・送電設備体系の実現に寄与して行く。

③ 再生可能エネルギー

火力発電依存に伴う二酸化炭素の排出量増加は、地球温暖化抑制の観点から回避しなければならないが、この回避を原子力発電のみによって達することは安全性、燃料処理に懸念が残る。そこで、将来目標としては再生可能エネルギーによる持続性社会発展を目指すべきである。これを可能ならしめるには、2030年までに、再生可能エネルギーの開拓、変換効率の最大化、送電・エネルギー輸送の高効率化技術開発を進め、2040年までには多様な再生可能エネルギーが、貯蔵、輸送・送電技術の発展を基に安定供給され、活用が拡大して行き、2050年には社会発展を可能にできる十分な再生可能エネルギーが当たり前に使われる技術が完成しなければならない。

その実現のために材料工学においては、2030年までに、高効率発電実現のための材料（風力発電モータ用磁性材料、太陽光発電用材料等）、および風力・太陽光発電機架台用高耐久性高強度材料、地熱発電用高耐久性材料、人工光合成材料、熱核融合炉用材料等のための基盤研究を通じて、材料創製と高機能化に共通する基礎現象の理解を深化する。2040年までには、これら材料の製造原理の確立を通じて、材料創製と高効率化の統合的解法確立を目指す。2050年にはこの統合的解法の普及による最適材料性能を提供できる域に到達し、これら材料の更なる高性能化と安定供給を実現する。産学の密接な連携、関連諸学術分野との連携の深化が重要である。

④ 二酸化炭素分離・回収・輸送・貯蔵

輸送交通機関、家庭、業務設備、発電所、生産設備などから排出される二酸化炭素による地球温暖化の抑制に取り組んでいるが、ここでは、材料の生産プロセスからの

二酸化炭素排出量の最小化技術の実現、および、二酸化炭素の分離回収方法の開発を目標とした取り組みを検討する。2030年までは、生産設備からの二酸化炭素排出量の可能限りの削減が鋭意進められ、その結果に基づき2040年までには二酸化炭素排出量最小の観点から製造方法および製品の選択がされて行く。そして、2050年には製造設備からの二酸化炭素排出量が最小化された上で、発生する二酸化炭素を分離回収・貯留する技術体系が完成する[10]。

その実現のために材料工学においては、2030年までに、製造に伴う二酸化炭素排出フットプリント⁵の確立と製品ごとの二酸化炭素排出量を表示するエコラベルの適用を進め、二酸化炭素の排出量の低い生産方法、二酸化炭素分離回収のための二酸化炭素高効率吸収/再生の材料技術、二酸化炭素輸送基盤技術、および、EOR⁶等二酸化炭素貯留基盤技術を開発する。2040年までには二酸化炭素フットプリントの最小化に資する材料プロセス、二酸化炭素の分離回収・輸送・貯留コストミニマム化に資する材料を開発するとともに、二酸化炭素貯留に関する社会的合意を得、そうして、2050年までに、二酸化炭素排出量が最小の革新的材料プロセス、および、二酸化炭素分離回収・輸送・貯蓄の革新的手法に資する材料を提供する。

(2) 省エネルギー

低環境負荷社会を省エネルギーの観点から実現するために、省エネルギーを個々の住宅単位から都市単位、さらに社会全体に順次、拡大する。省エネルギー実現の核となるのはエネルギー利用の高効率化と熱の利用・回収方法の高度化である。住宅単位では、高効率機器の導入、壁などの断熱化、すでに一部の住宅で実装開始されている ICT (Information and Communication Technology) を活用した住宅内のエネルギーマネジメント、太陽光などの再生エネルギーの活用など、全ての住宅への普及を2020~2030年までに図る。並行して、都市単位では、様々な都市機能やインフラに必要なエネルギーの ICT/IOT をフル活用した高効率化、都市単位の高効率発電やスマートグリッドによる効率的な送配電、さらに太陽光や風力などの再生エネルギーや水素利用を、地域経済との連携を図りながら2030~2040年までに社会実装する。2040年代にはそれらを日本全体でつなぎ、フルに ICT を活用したエネルギーマネジメントや余剰エネルギーの蓄電、超伝導や水素の利用、廃熱の回収や利用・循環、などを通して低環境負荷、低炭素の持続可能社会を実現する。これらの一部はすでにスタートしており、ICT, IOT の技術開発・インフラ整備の加速、エネルギーグリッドの全国大の接続などの進捗によって、実現が早まる可能性は大きい。

この実現のため、材料工学では、2030年までに、更に高性能な蓄電池用材料や熱電変換材料、光電変換材料、超伝導材料など、省エネルギーに資する材料の開発と材料の

⁵ 足跡 (あしあと) に例えて、二酸化炭素がどこでどれだけ排出しているかを示すもの

⁶ Enhanced Oil Recovery、石油増進回収。油層に存在しない流体 (化学溶剤や二酸化炭素等) を圧入することにより、油層が本来持っていない排油機構を利用した石油回収

熱／エネルギー性能の高効率化を、それを支える基盤現象の解明とともに進める。2040年までに、それらの材料を核とした材料の総合的利用、インフラへの実装を進める。更に2050年までには、多様な材料を総合的に最適配置する。全ての期間を通し、ICTと連動するセンサ材料などの開発・実装を進め、エネルギーの製造から輸送、備蓄、利用、再利用までの全体を効率的に管理する高効率スマート社会の実現を、材料工学として支える。

(3) 省資源・循環・回収

現在の資源・エネルギー大量消費社会は、将来的に資源の枯渇や深刻な地球温暖化を招くと危惧されている。資源の枯渇に対する懸念は経済活動をも制約する。資源問題の解決が社会の持続的な発展に不可欠である。また、地球温暖化抑止のために採択された「パリ協定」(2015年)に関連し、我が国は二酸化炭素などの温暖化ガスの排出量を2050年には2013年比で80%削減という高い目標を掲げており、二酸化炭素排出量の最小化のために、省資源・循環・回収に関する革新的な方法を開発しなければならない。

資源は材料製造の根源であり、材料の創製と高機能化の基盤となる原理・現象の学術を探求し、材料データベースの充実・活用や人工知能を活用した効率的な解析と材料設計によって材料の創製と高機能化の統合的解法を確立し、その手法の広い適用によってライフサイクルアセスメントを考慮した材料設計による低環境負荷材料の創製を目指す。

材料の創製において取り組むべき課題として、省資源の一層の発展、海底および月などの地球外も含む場所での新資源・代替資源探索、資源循環の開発促進が挙げられる。そして、新資源利用や回収・再資源化を実現し、石油資源からの脱却を図る。このような省資源・再資源化・再使用によって資源の循環率を限りなく上げる革新的な技術開発を行うとともに、資源循環の社会・経済の仕組みが国や社会で構築されることによって、低環境負荷社会・持続可能な社会を実現する。

(4) 原子力発電（廃炉処理・燃料処理）

2011年の東日本大震災による福島原発事故は、原子力発電の持つ問題を浮き彫りにした。5年経った現在、メルトダウンした燃料を取り出す方法や、解体時に発生する原子炉建屋の廃棄物の処分方法などを検討しながら、慎重に廃炉作業を進めている。一方、福島原発事故後、54基あった原子力発電所は、49基(4基の福島原発を含む)が停止中であり、その半数が建設から30年以上経過している[11]。老朽化した発電所の安全性に関する問題も浮上しているが、原子力発電は発電時に二酸化炭素を発生しないエネルギー源として期待され、廃炉を決定したものは少ない。現状でも、廃止が決まり解体中の原子炉も解体終了まで30年近くかかっており、今後、廃炉の決まる原子炉の増加を見込むと、安全に解体するための廃炉・燃料処理手段を確立する必要がある[11]。

その実現のために、2030年までに、福島原発については、汚染水処理や溶融燃料回収・保管・管理、既設炉については、寿命延長・廃炉判定や廃棄物処分、さらに管理・環境

モニタリング等の手段を開発する[11]。材料工学としては、放射線、中性子による照射損傷機構を解明する。2040年までには、廃棄物・汚染物質減容を実現するとともに、長寿命・高耐食性・高耐放射線材料を開発する。これまでも、放射線曝露しても適度の物理特性を維持できる有機材料の開発が行われてきたが、高い放射線曝露による放射線劣化を長期間止める材料は開発されていない。例えば、放射線物質に汚染された物質を数十年にわたり保管可能な材料を開発することにより、廃炉により生じる廃棄物を安全に保管することが可能となる[12]。高耐放射線材料は、廃炉だけでなく、核融合炉や放射線を扱う医療機器などにも適用が可能であり、これらの研究開発の積み重ねにより、2050年には、安全なエネルギー供給を支える材料技術を確立し、安心して生活できる社会を構築する。

4 材料工学共通領域

材料システム工学については、メンテナンス、防災・減災の進展には、材料の長寿命化、フェールセーフ化に加えて、劣化の自己点検、自己修復機能が求められる。その基礎・基盤手法として、組織形成・経時変化予測（劣化予測）、マルチスケール組織解析等に基づく材料組織の制御・予測法、ならびに、強化機構、特性経時変化予測（劣化予測）等の材料強度の制御・予測法の整備が必要であり、IoT⁷やビッグデータなどを活用した新たな材料学の創成が期待される。高齢化対応社会インフラ、輸送交通機関の軽量化には、複合化、ハイブリッド化、マルチマテリアル化が鍵となる。そのための基礎・基盤手法として、界面科学の深化、他分野との融合（有機／高分子化学、生体材料化学、生物学、土壌学等）が必須である。水素社会対応インフラの整備、再生可能エネルギーの活用拡大、火力発電の高効率化、廃熱回収・活用には、新規材料の創成、材料機能の飛躍向上が期待される。その基礎・基盤手法として、耐水素脆化に資する材料指針や、極低温物性、また一方では、超高温物性等の機能・物性制御法の整備が重要である。また、材料のLCCM⁸化を進展させる必要がある。

材料プロセス工学については、上述の材料システムを実現させるためのオンサイトでの高能率補修、材料複合化のための接合・製造プロセス、複雑構造体製造、高反応性材料成形のための3Dプリンター⁹の発展が望まれる。その基礎・基盤手法として、加工（塑性／切削）、粉末冶金、接合、レーザー・プラズマ適用等におけるプロセス物理学を整備させるべきである。また、循環リサイクルのための革新的分離法、二酸化炭素排出量を最小化した生産技術の開発が期待される。

材料リテラシー学については、材料工学は物理・化学・機械工学はもちろん、情報工学、さらには、医学、社会科学・人文科学などにまたがる学際的研究、協働および協力と、科学者、専門家、政策立案者の間での超学際的な協働により一層の進展が期待される。したがって、その実現のための教育、すなわち、異分野融合による人材育成体制の構築、境界

⁷ Internet of Things、物がインターネットに接続され、情報交換することにより相互に制御する仕組み

⁸ Life Cycle Carbon Minus、生涯を積算して二酸化炭素排出量をマイナスにすること

⁹ 3次元 CAD や CG を元に立体を造形する機器

を超えた材料リテラシー学の整備が重要である。ならびに、LCCM 設計に関する教育の強化が望まれる。

材料解析・診断学については、劣化診断検知、遠隔非破壊検査、組織制御・特性制御のための新物理解析法、元素機能解明のための先端解析法の開発が求められる。その基礎・基盤手法として、ナノ解析、動的解析、高速度観察、長時間観察、環境モニタリング、非破壊計測等が必要である。

理論・計算材料科学については、劣化挙動のナノ〜マイクロ統合マルチスケールシミュレーション、高温強度・耐酸化性と組織に関する数理科学モデル、腐食、金属組織制御・特性制御、元素機能解明に関する計算材料科学の展開が望まれる。その基礎・基盤手法として、第一原理計算、データベース化等の理論計算の整備が必要である。

材料ゲノム工学については、ビッグデータ活用による寿命予測、腐食、高温強度、耐酸化性のデータベースの継続的蓄積、高信頼性 LCA 構築のためのデータベース、金属組織と特性を連結するマテリアルインフォマティクス/マテリアルズインテグレーション（統合型材料開発システム） [13] など、IoT やビッグデータなどとの関連を考慮した新たな材料学の創成・構築が望まれる。

図1 社会インフラ材料学の夢ロードマップ【既存構造体（メンテナンス技術）】

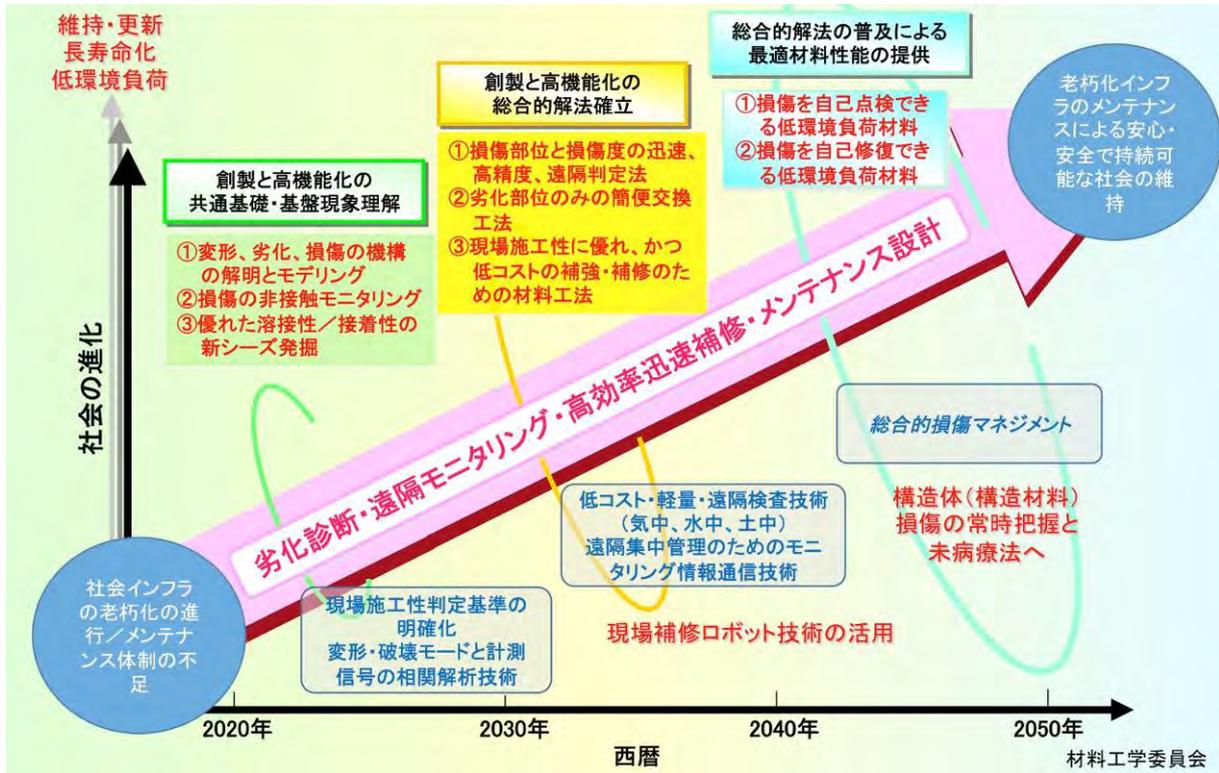


図2 社会インフラ材料学の夢ロードマップ【既存構造体（防災・減災技術）】

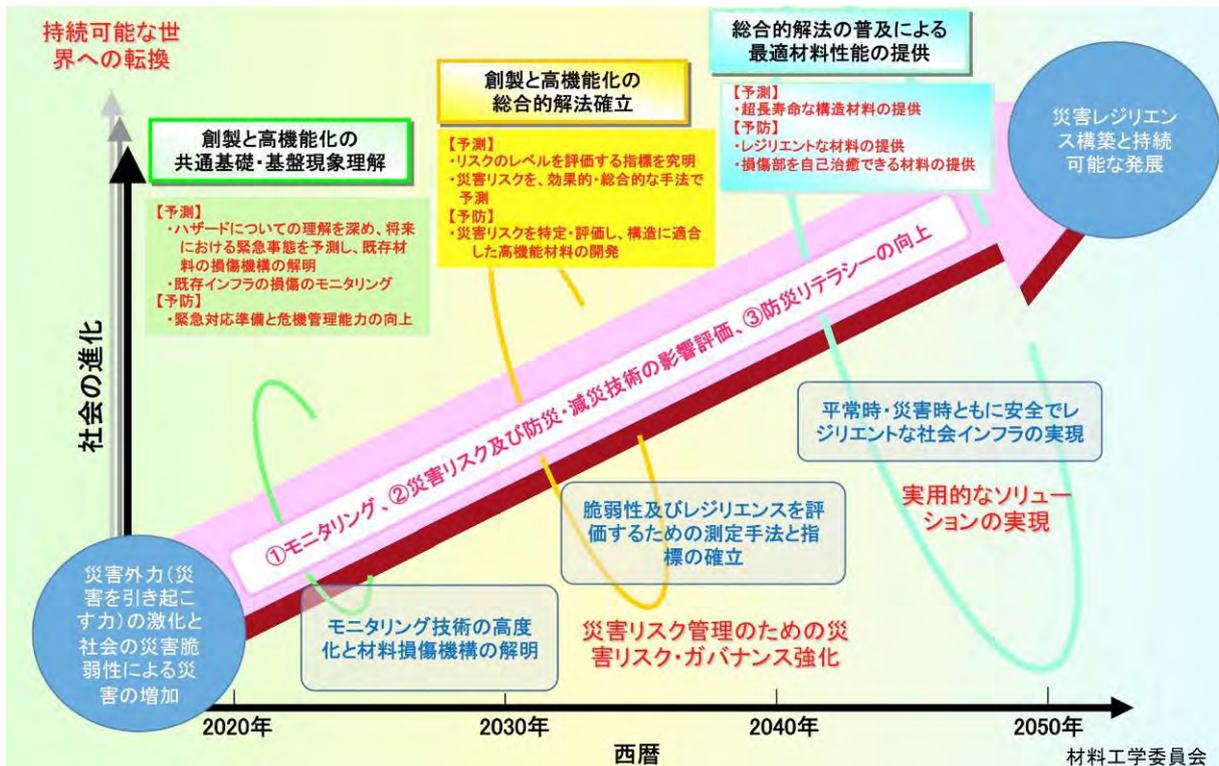


図3 社会インフラ材料学の夢ロードマップ【高齢化社会対応（高齢者が暮らし易い都市インフラ）】

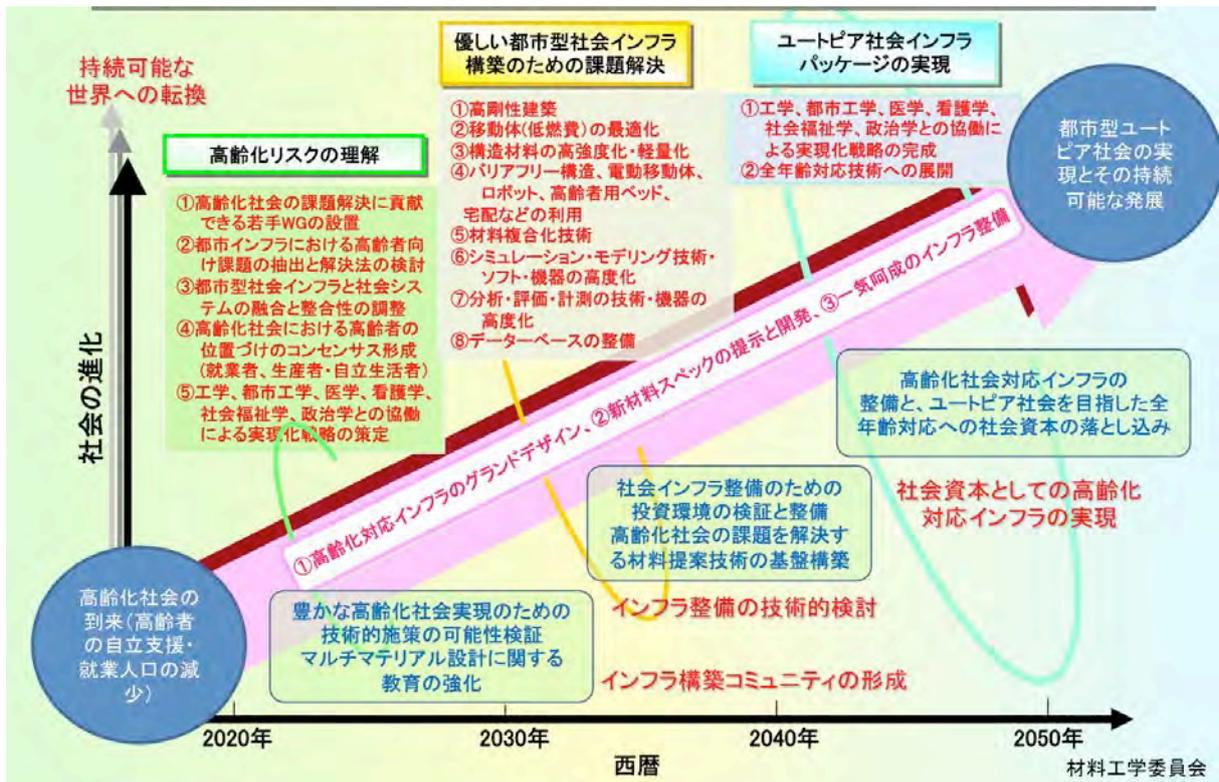


図4 社会インフラ材料学の夢ロードマップ【高齢者社会対応（高齢者に適したモビリティ）】

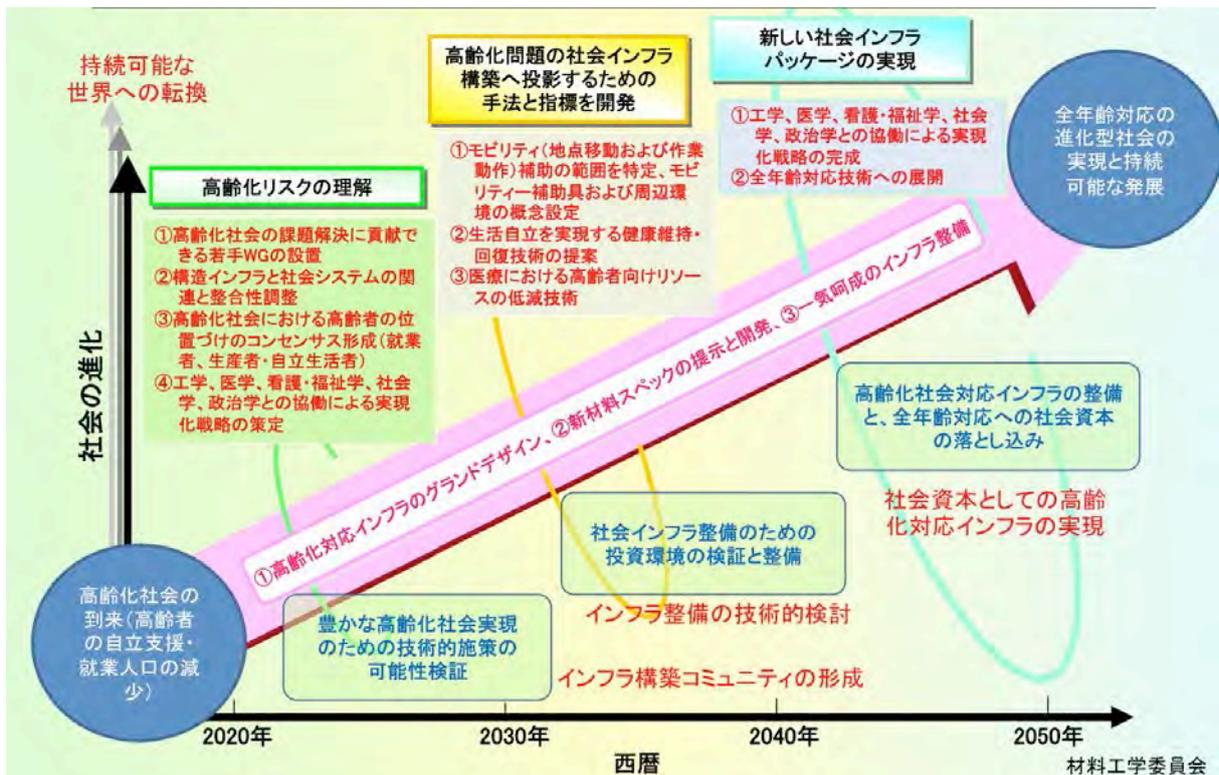


図5 社会インフラ材料学の夢ロードマップ【新構造体（水素社会対応）】

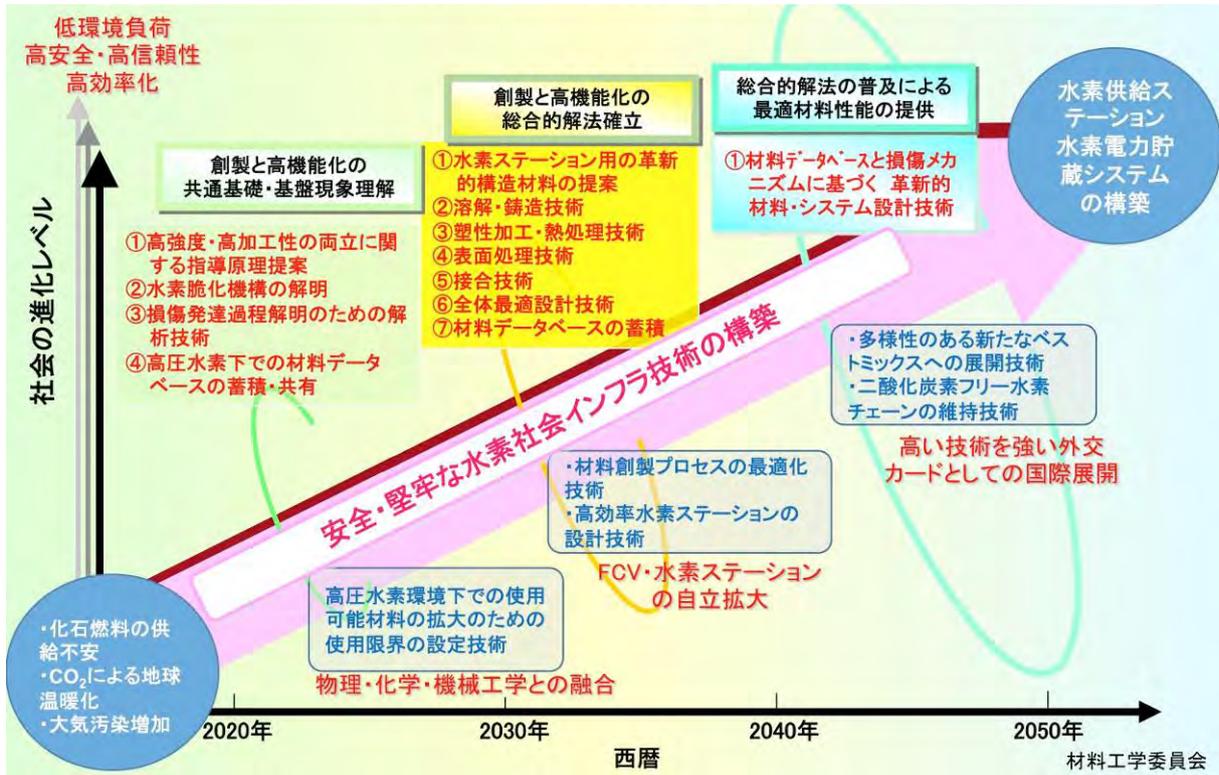


図6 社会インフラ材料学の夢ロードマップ【新構造体（低温利用）】

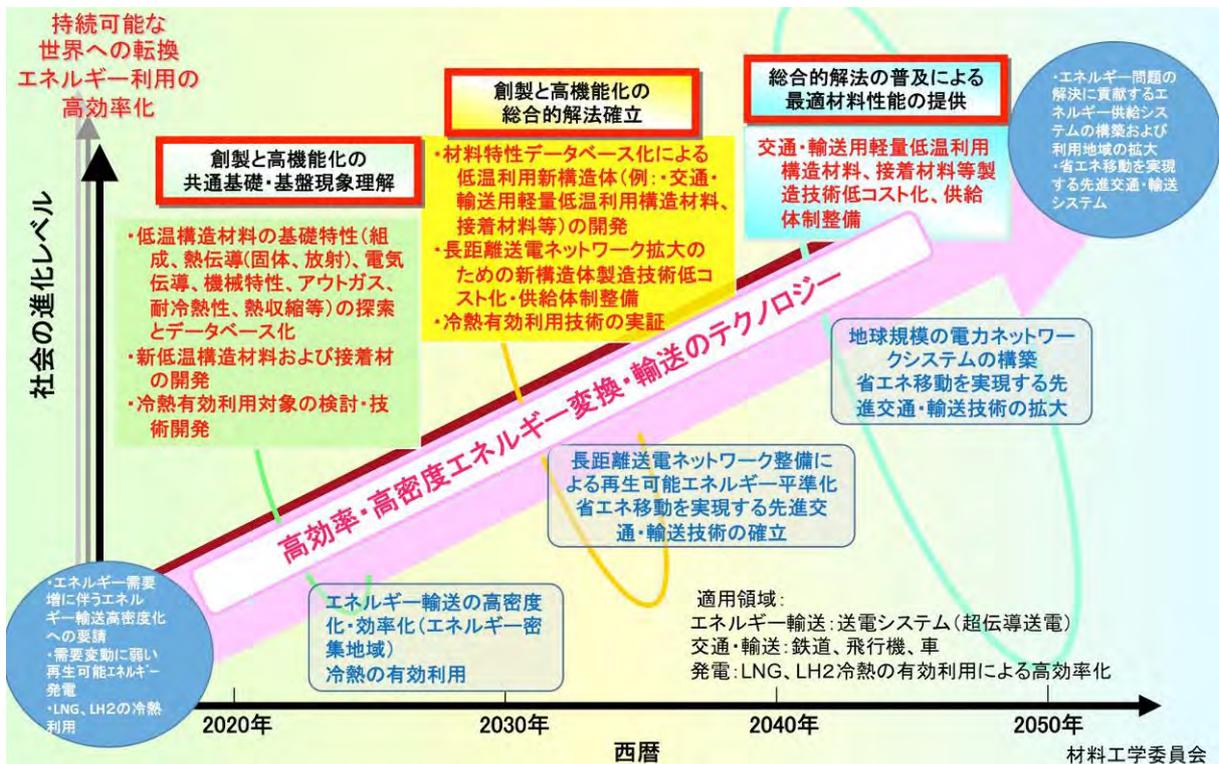


図7 グリーン・エネルギー材料学の夢ロードマップ【低炭素社会（輸送交通機関）】

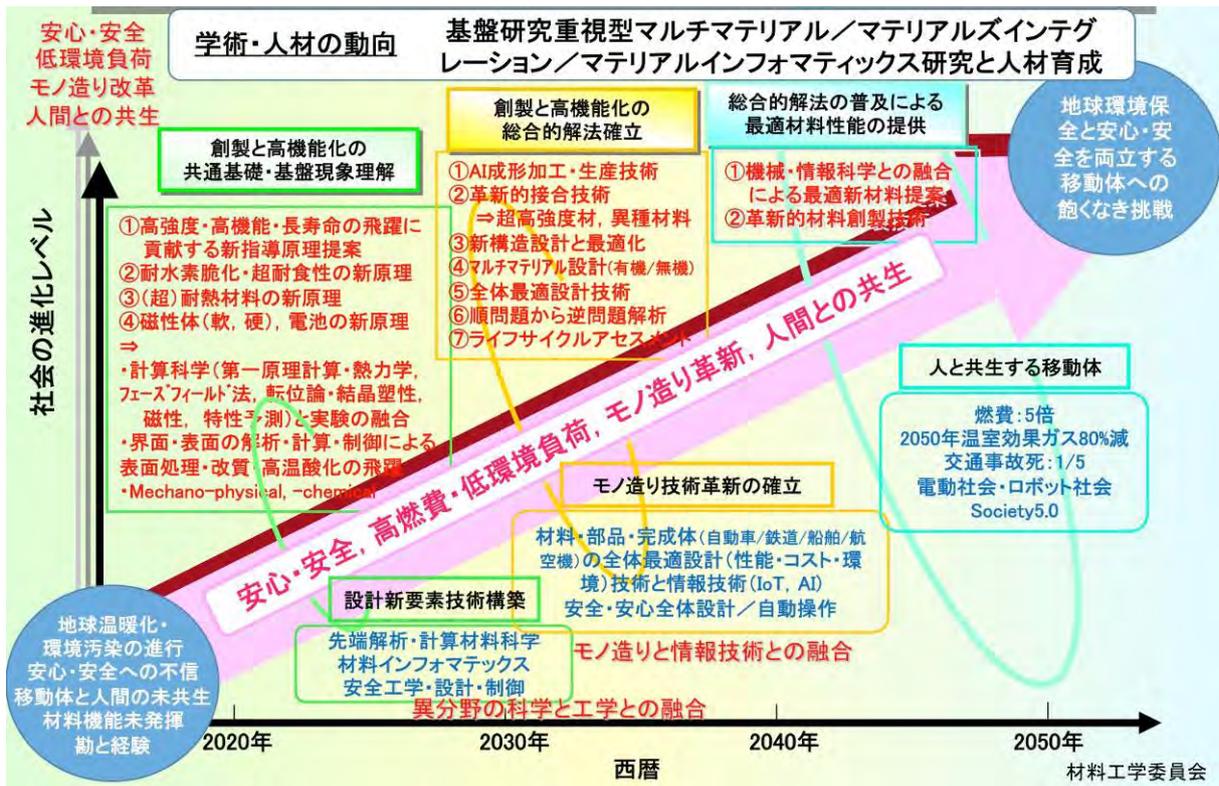


図8 グリーン・エネルギー材料学の夢ロードマップ【低炭素社会（高効率火力発電・送電）】

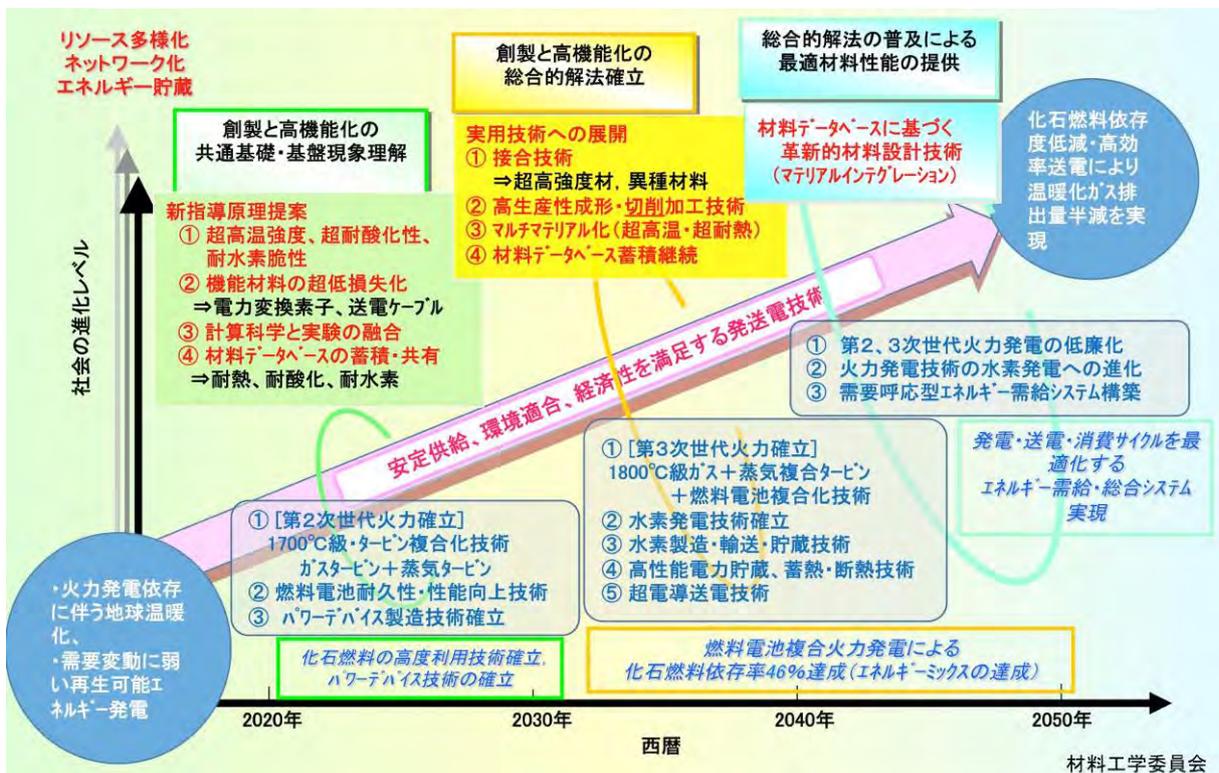


図9 グリーン・エネルギー材料学の夢ロードマップ【低炭素社会（再生可能エネルギー）】

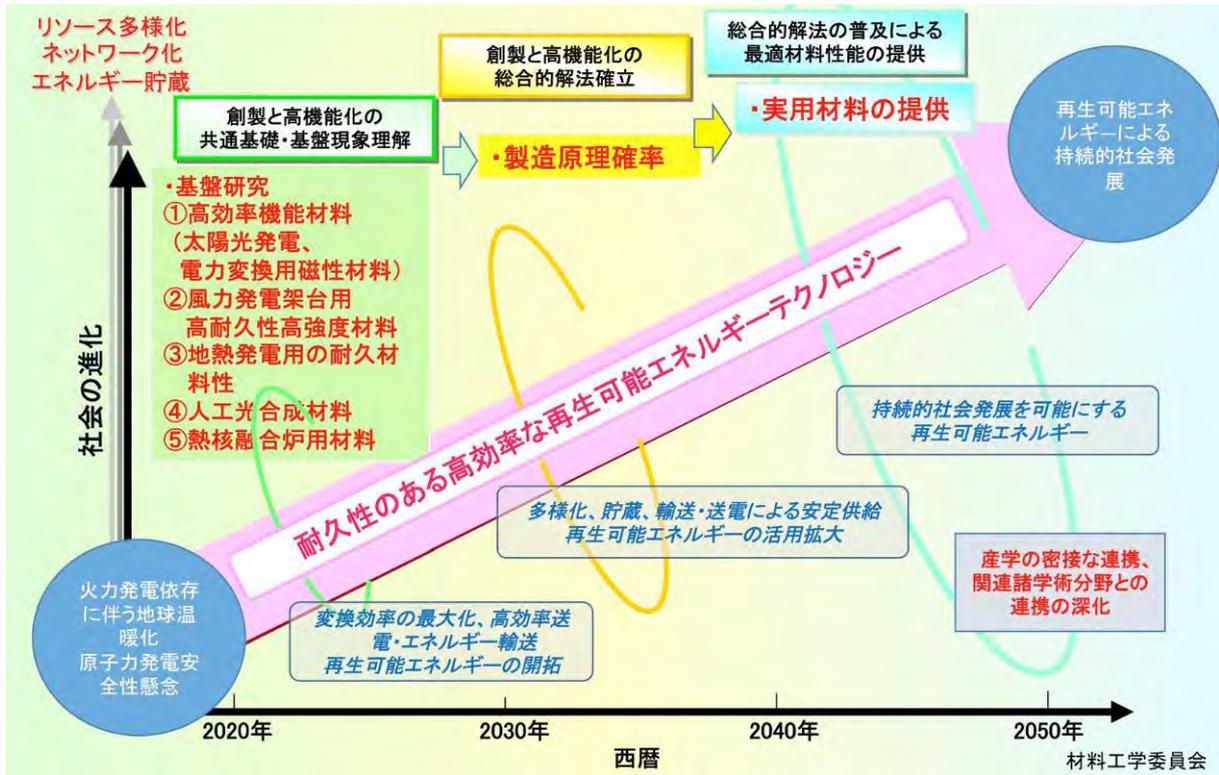


図10 グリーン・エネルギー材料学の夢ロードマップ【低炭素社会（二酸化炭素分離・回収・輸送・貯蔵）】

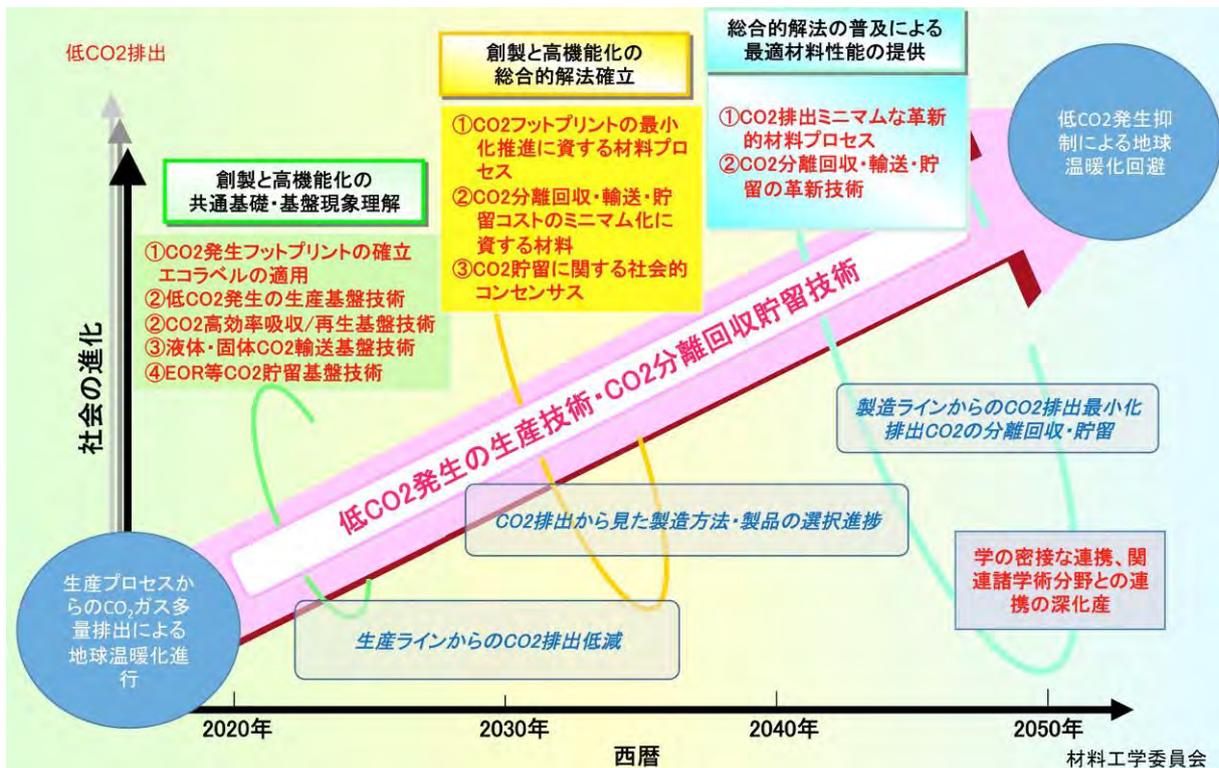


図 11 グリーン・エネルギー材料学の夢ロードマップ【省エネルギー】

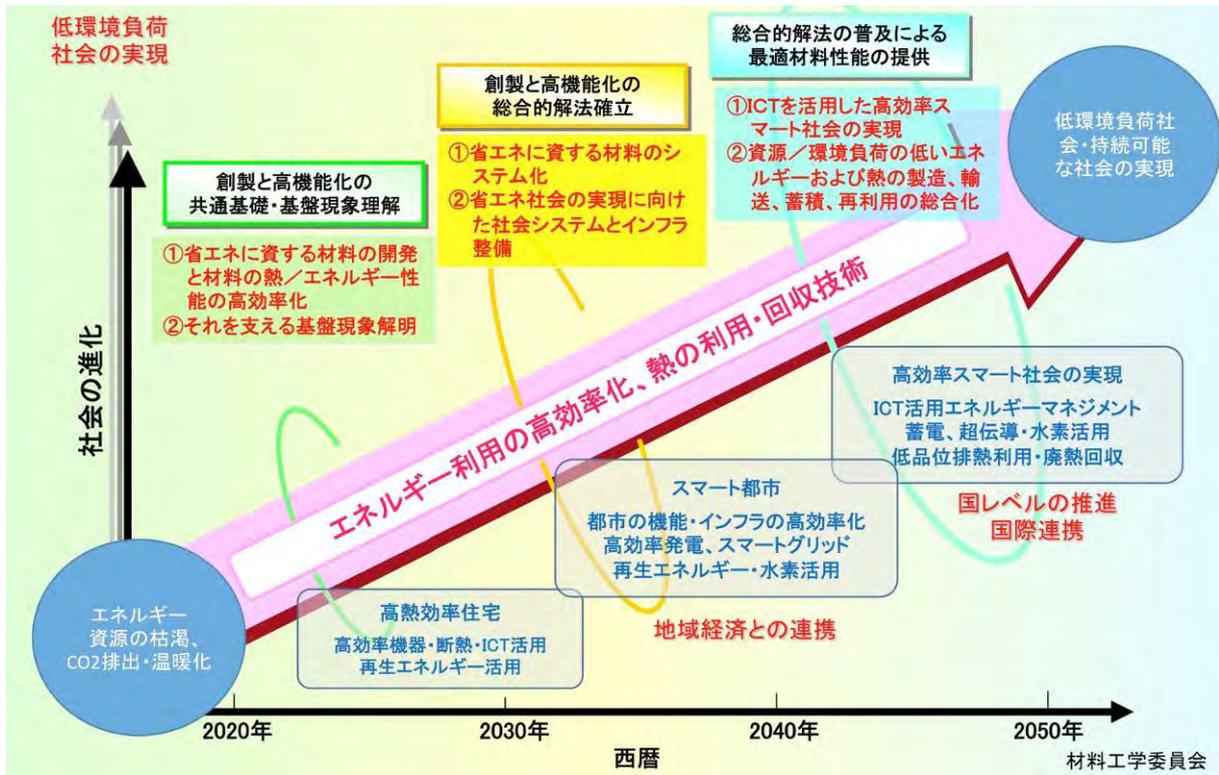


図 12 グリーン・エネルギー材料学の夢ロードマップ【省資源・循環・回収】

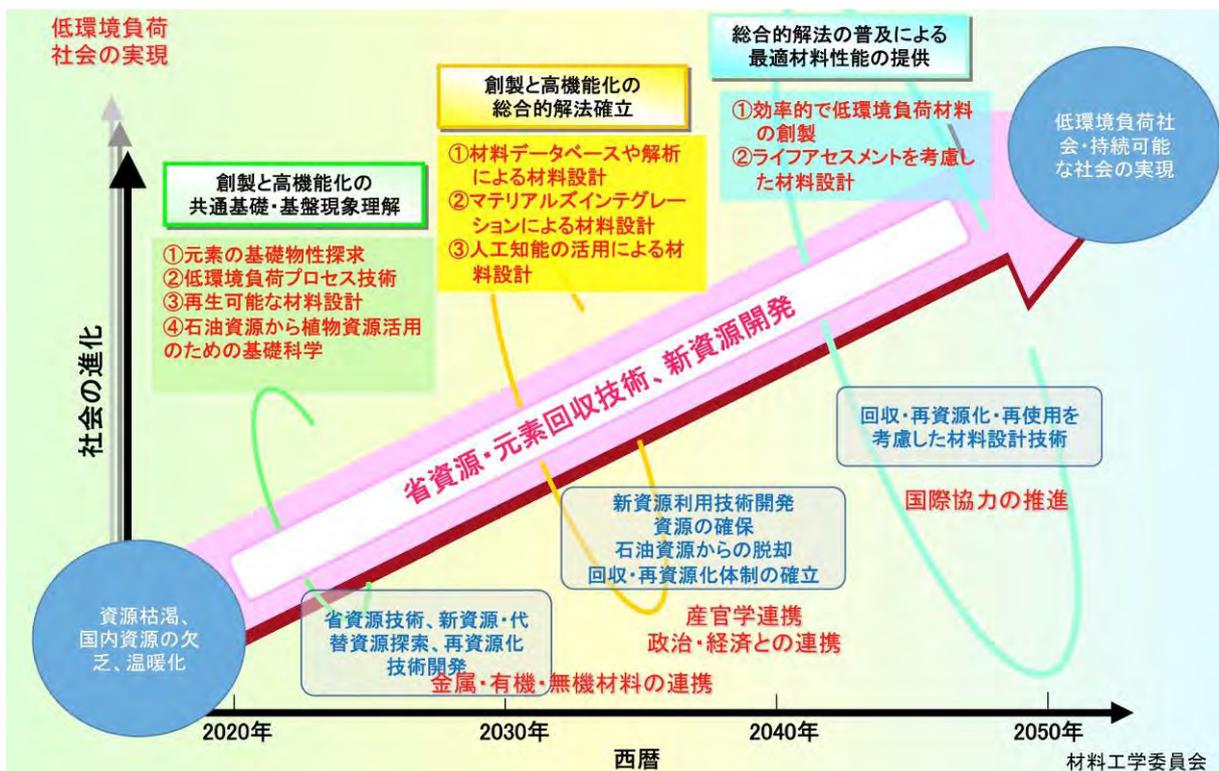
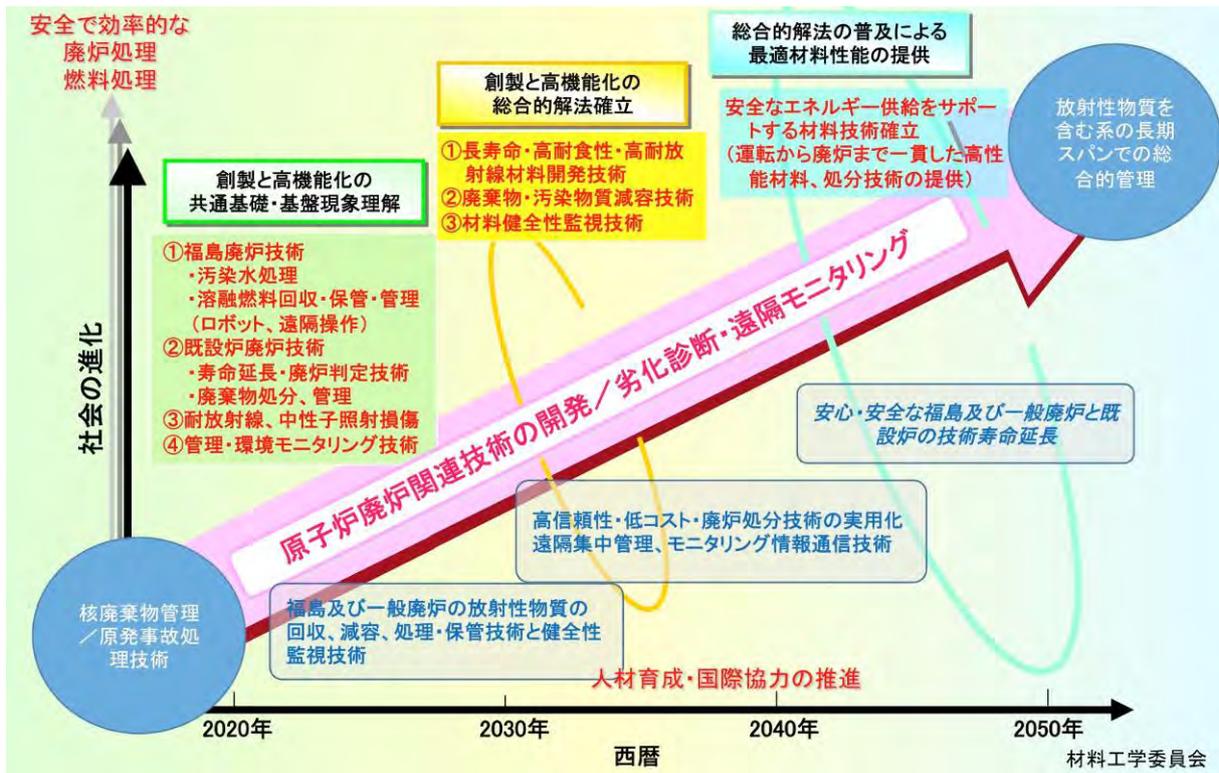


図 13 グリーン・エネルギー材料学の夢ロードマップ【原子力発電（廃炉・燃料処理技術）】



<参考文献>

- [1] 日本学術会議第三部、報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」、2011年8月24日。
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-21-h132.html>
- [2] 日本学術会議第三部、報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ2014」、2014年9月19日。
材料工学分野 Part1
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-h201-3-11-1.pdf>
材料工学分野 Part2
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-h201-3-11-2.pdf>
- 日本学術会議第三部、材料工学委員会材料工学将来展開分科会、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、2014年7月29日。
<http://www.scj.go.jp/ja/member/inkai/kiroku/3-140729.pdf>
- [3] 国際連合広報センターHP、「持続可能な開発 2030 アジェンダ」
http://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/
- [4] 日本学術会議、Gサイエンス学術会議共同声明『Strengthening Disaster Resilience is Essential to Sustainable Development』、2016年4月19日。
- [5] '大阪府市医療戦略会議提言'、2015年1月。
<http://www.pref.osaka.lg.jp/attach/19411/00000000/teigen.pdf#search=>
- [6] まちづくりと交通プランニング研究会編著、「高齢社会と都市のモビリティ」、学芸出版社、2004年。
- [7] 水素・燃料電池戦略協議会、「水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会の実現に向けた取り組みの加速～」、2016年3月22日改定。
<http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009-c.pdf>
- [8] 経産省、次世代火力発電の早期実現に向けた協議会、「次世代火力発電に係る技術ロードマップ（中間とりまとめ）」、p.13、2016。
- [9] 環境省、「環境基本計画」、閣議決定別冊本文、pp.5-6、2012。
- [10] 経産省、「Cool Earthーエネルギー革新技术計画」、2008年3月。
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/for_energy_technology/pdf/cool_earth-hontai.pdf
- [11] 鈴木俊一、日本学術会議主催シンポジウム「社会インフラ、グリーン・エネルギー分野における材料工学の展望」「福島第一原子力発電所の廃炉技術の現状と課題」、2016年10月13日、pp.43-95。
- [12] 文科省「核融合科学技術委員会 原型炉開発総合戦略タスクフォース」「原型炉開発に向けたアクションプラン」、2016年。
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/shiryo/_icsFiles/

afielddfile/2016/04/05/1368567_1_1.pdf

[13] 内閣府、「科学技術イノベーション総合戦略 2016」、2016 年 5 月 24 日.

<http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2016.html>

＜参考資料 1＞審議経過

平成 27 年

- 4 月 2 日 材料工学ロードマップのローリング分科会（第 1 回）
役員の選出、今後の進め方について
- 7 月 31 日 材料工学ロードマップのローリング分科会（第 2 回）
社会インフラ材料、グリーン・エネルギー材料領域のロードマップの検討について
- 12 月 11 日 材料工学ロードマップのローリング分科会（第 3 回）
社会インフラ材料、グリーン・エネルギー材料領域の課題分析票の追加・補強、および、重要項目の選定について

平成 28 年

- 3 月 1 日 材料工学ロードマップのローリング分科会（第 4 回）
ロードマップの纏め方について
- 6 月 2 日 材料工学ロードマップのローリング分科会（第 5 回）
社会インフラ材料学 6 項目とグリーン・エネルギー材料学 8 項目のロードマップの検討、および、シンポジウム開催について
- 10 月 13 日 材料工学ロードマップのローリング分科会（第 6 回）
シンポジウム開催、および、「報告」原稿作成、発出について
- 12 月 16 日 材料工学ロードマップのローリング分科会（第 7 回）
報告「材料工学ロードマップのローリング 社会インフラ、グリーン・エネルギー分野」について承認

平成 29 年

- 7 月 28 日 日本学術会議幹事会（第 249 回）
報告「材料工学ロードマップのローリング 社会インフラ、グリーン・エネルギー分野」について承認

＜参考資料 2＞ シンポジウム開催

平成 28 年

10 月 13 日 「社会インフラ、グリーン・エネルギー分野における材料工学の展望」