

(6) 化学分野

① 化学分野のビジョン

現代の科学に課せられた使命は、「持続する発展」を地球規模で実現するための方策を見出すことである。現代社会が抱えている、例えば「地球温暖化」「エネルギー危機」「食糧問題」「レアアース禁輸」「オゾン層破壊」等の諸問題は、本質的に化学の問題に帰着するといえる。「化学の問題には化学で答える」ことこそが、私たちに課せられた責務であり、社会的情勢の変化に応じた素早い対応が必要であると考えなければならない。

本夢ロードマップの化学分野では「長期持続可能な地球環境の創成」「持続的・安定的エネルギー供給」「豊かな社会を支える新材料」「安全安心・健康長寿の実現」「知的好奇心に支えられた新分野開拓」へのゴールに向かう課題をまとめた。

現在の代表的課題を見ると、(1) 資源・環境分野の究極の夢は、地球環境の維持・発展に資する材料技術の発明とその実用化である。地球環境の保全には環境浄化、省エネルギー、省資源を一体的に実現する必要がある。また(2) 元素戦略では、特にレアアースの資源確保が大きな課題として浮上している。脱稀少元素材料、脱稀少元素触媒、海外や都市鉱山からの有用元素回収等の課題がある。(3) エネルギー関連技術の開発目標は、蓄電、発電、省エネルギーに分けられる。また、(4) 生命現象に関連する材料の高機能化は、ライフイノベーションに直結する基盤技術である。

この推進のために、私たちは企業や地域の要請による「課題解決型の研究(社会的要請)」や大学における知的活動に主導された「基礎/基盤研究(知的好奇心)」等の研究機構の整備を進めることが求められる。さらに強いリーダーシップを発揮したナショナルプロジェクトという研究プラットフォームを編成して、知を結集して社会が直面する諸問題を解決していく決意をしなければならない。

その一方で、私たちは明るい未来を夢見る「努力」も続けていかなければならない。

科学は自然から学び、時にそれを模倣し時にそれを凌駕する努力を続けてきた。そうした知恵と工夫こそが科学技術立国である我が国の屋台骨である。私たちにそうした夢を見る自由や、解決する過程を反芻することはできるだろうか。そうした土壌を形成し、人材を育てることもまた、学協会に社会から託された義務であると感じる。

② 化学分野の夢ロードマップの考え方

以下では、化学分野を構成する有機化学分野、無機化学分野、生物化学分野、物理化学分野、ナノテク化学分野、電気化学分野、高分子化学分野、セラミックス化学分野についてそれぞれのロードマップとその考え方を記す。

ア 有機化学分野の夢ロードマップ

(ア) 有機化学分野の「化学の夢」

化学は実用的な面から我々の日常生活を支える基盤技術であると共に、物質の関わる様々な事象を原子レベルで解明する基礎科学としても果たす役割は大きい。

本項では特に基礎科学としての視点から有機化学の30年後の姿を展望する。

(イ) 有用物質生産のための新合成手法

有機化合物が、我々の生活の基盤を支える基本的な化合物群であり続けることは、30年後も間違いない。この有用な化合物群をいかにして合成するか、すなわち物質生産の方法論の開発研究は、社会的な要請に対応して発展してきている。30年後の物質生産法として確実に要求されることは、貴重な有機資源を無駄なく効率よく利用する合成法の確立、反応の超効率化による廃棄物及びエネルギーミニマムな合成法の確立、ユビキタス金属や非金属触媒を用いる合成法の確立、また化石資源以外の有機資源の活用等、現代の我々が課されている制約に対応しうる、新たな独創的な物質合成の方法論の開発である。このような観点から、炭化水素類を出発物質として用いる物質生産法の確立は至上命題であり、例えば炭素-水素結合や炭素-炭素結合等の不活性結合の革新的な自在変換法の実現が望まれる。また例えば加水分解反応等基本的な反応を最小限の廃棄物及びエネルギーで推進することのできる超効率的・汎用的な触媒反応の実現も重要な課題である。いずれにおいても鍵を握るのは、高度な分子設計に基づいた高機能触媒の開発である。

また、貴金属類は多くの反応の鍵を握る遷移金属触媒の中心元素であるが、近年これらレアメタルは供給構造の脆弱さが大きな問題となっている。これらを安価で入手容易な金属（ユビキタス金属）触媒に代替すること、さらには金属を用いずに生体分子を凌駕する高い特異性、選択性を持つ触媒系を構築することも、これからのものづくりの基盤を支え続けるためには緊急の課題である。ここでは有用物質生産に結び付くことが期待されるいくつかの合成手法の夢を示した。

(ウ) 物質合成の合成戦略

物質合成の方法論の展開と共に、実際に有用化合物を合成するための合成戦略も物質生産の観点からさらに進化し続けるであろう。天然有機化合物や構造的に興味深い化合物、人知を尽くして設計した機能性物質等、標的化合物の高度化、複雑化はさらに進むと考えられる。また後述するように天然有機化合物の探索等からも思いもよらない新たな標的が登場し研究者の好奇心を刺激し続けるであろう。このような化合物群を生物が創るよりも効率よく、自由自在に合成することのできる合成戦略の実現により、新しい生物活性を持つ多くの分子の創出が可能となる。これにより天然物を超える活性を持つ人工分子、生命の理解と制御に貢献する新しい試薬や、臨床的に価値ある医薬の提供が期待される。

(エ) ボトムアップ集積化による電子材料合成

有機化合物の多様性を科学・技術に活用する重要なアプローチとしてナノスケールの分子デバイスの開発を目指した研究が今後重要性を大きく増していくもの

と考えられる。現時点では機能性分子素子をナノサイズの空間に効率よく接続する技術はなく、これが分子エレクトロニクスを実現する際の最大のボトルネックとなっている。今後物質合成の究極的な姿として、例えばナノメートルスケールの電子回路をオングストロームスケールの有機分子からボトムアップ的に作製する手法を実現することで、従来の高エネルギーを消費する微細加工装置や高価なレアメタルに代わり安価な反応装置（ビーカーやフラスコ）と有機分子による集積化が可能となり、製造コスト・エネルギーを大幅に削減できると共に、環境にも優しい革新的技術となると期待できる。

(オ) ゲノム情報に基づく天然物の探索と生産

新たな医薬品のリード化合物としての天然有機化合物の役割は今後も重要な位置を占めるものと考えられる。近年、遺伝子情報から天然物（低分子化合物）情報を見出すことが可能になりつつあるが、そのためには生合成機構の解明が必須であり、遺伝子情報と生合成酵素そして最終代謝産物の構造情報との相関付けが必要となる。今後この技術が確立されれば、これまでの探索で見出されてこなかった単離困難な天然物の存在も予測できる。また、天然物の意義、なぜ、どのように生き物が作り出して来たのか、といったことも遺伝子配列に基づいた進化論的な解析から明らかになる。これらは有用な物質を天然から見出す全く新しい手法であり、さらに異種発現系を自在に操ったタンパク質発現系を確立することにより、遺伝子情報に基づく有用物質生産も可能になる。

(カ) 生命の起源

基礎科学的な有機化学の立場からのアプローチが必要な課題として、有機化合物の「不斉の起源」の問題がある。生命の誕生の鍵を握る現象であり、有機化学に限らず広範囲にわたる諸説が存在するが、1つの強力な仮説として円偏光や水晶、隕石に含まれるアミノ酸が不斉の起源として働いた可能性がある。前生物的な環境下で生成する生体関連分子の不斉自己触媒反応の開拓により、原始の地球上で起こった不斉分子の化学進化をフラスコ内で再現することが実現可能となり、生命の起源の解明に繋がることが期待される。

(キ) まとめ

有機化学の関わる科学・技術は多岐にわたり、ここではそのごく一部を取り上げた。多様な応用科学の基盤を支える有機化学は基礎科学の観点からその重要性が極めて高い。本質を深く掘り下げる学術研究が、結果としてその応用面での飛躍的な発展を支える基盤になるものと確信する。

イ 無機化学分野の夢ロードマップ

(ア) 無機化学分野の「化学の夢」

無機化学分野では、バイオミネラリゼーションからヒントを得て意のままに物質・形態合成を行う技術、反応触媒や高機能材料を自在に設計・合成・大量生産する技術、あらゆる分子の立体構造を決定できる解析法の創成、バイオの力を用いて元素回収・環境浄化を行うこと等が、是非とも実現したい化学の「夢」として挙げられている。いずれも、20世紀型エネルギー・資源大量消費社会から持続可能な太陽利用・低炭素社会への革新的転換に貢献したいと願う化学者の「夢」である。

(イ) 生物無機化学

生命が数十億年をかけて育んできた能力や仕組みに、人類が学ぶところは極めて大きい。例えば生物は各種の無機元素を取り込み、骨や歯はもちろんのこと、貝殻や真珠、珊瑚、棘皮動物（うに、ヒトデ等）の硬い体、走磁性細菌が持っている磁石、カヤの葉の鋭利なシリカ等無機材料を巧みに作って利用している。このプロセスをバイオミネラリゼーション（生体鉱物化）といい、省資源、省エネルギー型の環境に優しい化学プロセスであるため、これを見習って人工材料のサステナブル合成法の創製に役立てたいという「夢」がある。

バイオミネラリゼーションの分子レベルの本質は未だ不明な点も多く、今後解明の努力が必要である。新しい材料合成技術を開発して、分子バイオンクスを応用した形態合成・集積・複合階層構造構築技術を確立していくことにより、ゆくゆくは生物を超える機能を発現できる電子・光学デバイスやマイクロマシン等が様々な応用分野で実現していくであろう。

アパタイトに代表される無機生体材料も、高齢化社会の中でますます重要性が増してくる。ナノオーダーで複雑な形態を持つ材料と生体との界面制御を行って、材料から生体内へシグナル伝達することが可能になれば、外部から挙動がコントロールできる人工臓器の開発に繋がる可能性がある。

また生物の持つ元素取り込み能力を活用し、汚染環境中や廃水中の重金属イオンや有害無機イオンを機能性無機微粒子に変えて利用し、元素資源の確保や環境浄化を目指していくことも重要な「夢」である。これを実現するには、鉱物化機能を有する微生物の探索、生体関連分子の探索、金属イオン輸送・酸化還元に関与する生体分子種の同定と反応系の解明、合成微粒子の機能性評価と解析等、研究すべきことは山積している。しかし、これは化学者の大きな使命の1つでもあり、取り組み甲斐のあるテーマといえよう。

(ウ) 配位高分子

金属イオンと有機配位子との自己組織化で組み上がる配位高分子（金属有機構造体）の化学は近年発展が目覚ましく、様々な応用が考えられている。気体の貯

蔵・分離等は既にかなり研究が進められているが、ここでは触媒設計及びレアメタル回収に応用する「夢」が提案された。

様々な反応触媒を自在に設計・合成・大量生産する技術は、化学者の1つの「夢」である。未来のエネルギー・環境・医療分野への幅広い応用が期待できる触媒は、触媒サイトの精密な時空間制御と共にイオン、分子等を自己組織的に集積化したものになるであろう。格子状ナノ空間材料の内部に、金属触媒サイトを数や位置を規制して導入することが自在にできるようになると、触媒反応効率が既存の触媒に比べて100倍以上に達する新しい触媒ができる可能性がある。

また、配位高分子の高い貯蔵能力と、柔軟に構造設計が可能である点を活かせば、選択的な元素の吸着・回収が可能となるだろう。特に現在枯渇が懸念される各種レアメタルを、廃液や海水から抽出できるようになれば、これらが重要な資源となり、安定的に市場に供給・リサイクルできるシステムの構築が可能となる。元素選択性の高い配位高分子の設計、耐久性の向上、レアメタルの回収法等課題は多いが、豊富な都市鉱山と海水に恵まれた我が国にとっては、実現が大いに待たれる課題といえる。

(エ) 自己組織化を利用する構造解析

有機小分子から核酸・タンパク質に至るまで、あらゆる分子の精密な構造の決定は化学者の「夢」の1つである。これを実現する新しいNMR立体構造解析法の開発のために、磁場配向性分子と解析分子を結合した分子に変換して磁場配向誘起を可能にする技術の開発が不可欠である。有機小分子から生体高分子に至るあらゆる分子をテーラーメイドに認識する自己組織化分子を意のままに作る方法論の開発が進めば、夢の実現はそう遠くはないかもしれない。

(オ) 無機材料設計・合成

大きな可能性を秘めた各種の無機材料を、意のままに設計・合成することは、科学者にとって極めて大きな「夢」である。望みの反応を実現する触媒の設計には、金属酵素をモデルとし、その活性中心を抜き出して人工の物質として再現するアプローチが提案された。例えば安定なポリオキソメタレート等に酵素の活性中心を埋め込み、安定な無機化合物をベースにその機能を自在に引き出すことができれば、触媒の設計という重要な分野は新たなステージを迎えることとなるだろう。

高度情報化社会の進展に伴い、高密度情報記録媒体のニーズは増す一方である。最近、量子磁石の可逆的スイッチングが成功しており、これを情報記録に応用できれば、1分子を1ビットとする媒体が実現することとなる。高いブロッキング温度を持つ量子磁石の開発、情報の読み取り技術等が必要となるが、未来のデバイスとして大いに夢が持てる。

金属酸化物は高温超伝導、光触媒、超巨大磁気抵抗効果等の類い希な機能を示す素晴らしい材料であるが、未だ機能の設計・構造の制御が難しい領域でもある。

シンクロトロン光を用いた解析手法と、酸化物分子線エピタキシーによる合成手法を一体化し、今までにない物質設計を可能とする手法が提案されている。この手法が進めば、新しい物質を生み出すための力強いエンジンとなろう。

(カ) まとめ

無機化学分野は、材料科学・超分子化学・生化学等実生活に大きな影響を与える分野に対し、重要な基盤を提供する。鍵を握るのは、高度な制御のもとに原子や小分子を積み上げ、自在に意図した機能性材料を構築する技術であろう。既に多くの分野でこうした高度制御技術の萌芽が見られており、今後ますますの進展が期待される。

ウ 生物化学分野の夢ロードマップ

(ア) 生化学分野の「化学の夢」

近年の生化学分野は、従来の古典的な生化学の枠を超え、化学と分子生物学・細胞生物学との融合へと歩み出した。これは、「化学」という人工的で自由度の高いツールが、これまでの既存の生物学の枠内ではわかり得なかった生命活動の詳細を解明するのに非常に役立つことに多くの科学者が気づき、それらを融合することに努力を続けてきたからに他ならない。このような時代の流れに伴い、これまで「バイオケミストリー」と呼ばれていた研究の多くは、「ケミカルバイオロジー」と名を変えて呼ばれるようになった。また、この10年で「ケミカルバイオロジー」或いは「化学と生物学の接点」を前面に押し出した関連研究誌も数多く発刊された。この研究の潮流は、生物学の先、すなわち医学との融合に進展していくものを考えられ、従来の古典的な薬学を超える概念を持った「ケミカルメディシン」へと進化を遂げることが予想される。化学をツールとしたケミカルバイオロジー研究により、多くの生命活動の詳細が分子レベルで理解され、さらには薬剤開発や再生医療等に寄与できるケミカルメディシンへと繋がることで、人類の生活と健康に大きく貢献できることが本分野の「夢」といえる。

(イ) タンパク質化学

タンパク質化学は、バイオテクノロジーの発展や薬剤開発に多大な寄与をしてきた研究領域である。近年は、ケミカルバイオロジー研究の進展と共に、蛍光プローブや生体環境下でのタンパク質ラベル化技術の開発が進み、細胞内外の様々なタンパク質の局在化やフォールディング、複合体形成の挙動を分子レベルで、さらにはリアルタイムで解明しようという試みが盛んに行われている。とはいえ、これまで開発された技術は万能ではなく、細胞内の極微濃度のタンパク質でも感度よく検出可能な技術の開発や信頼度の高いハイスループットスクリーニング技術開発の継続は不可欠である。また、抗体医薬に代表されるタンパク質製剤の開発やそれに代わる新規バイオ医薬品も、今後の新規医薬品開発には必要不可欠で

ある。そのためにはタンパク質の構造と機能の相関をより高次元で理解し、高精度かつ高速度で構造や機能・作用機序を予測する方法論の確立も夢である。

また超好熱菌や高度好塩菌のような極限環境微生物は、これまで知られていないような耐久性を持つため多方面への応用が期待される。またその環境耐性のメカニズム解明は、新たな機能性タンパク質創造のアシストに繋がると期待される。

(ウ) 細胞

細胞内での生命活動は、突き詰めれば、生体分子の化学的な反応と相互作用で説明できるはずである。しかし、様々な生体分子の化学反応と相互作用が、同時にかつ複雑に進行しているため、各反応や相互作用の一義的な理解では説明することが難しい。また、細胞は常に細胞膜に囲まれ、その細胞膜にも様々なタンパク質や低分子化合物が存在し、さらに膜タンパク質の多くは糖鎖修飾を受けている。ウイルスのように、その細胞上に存在する糖タンパク質を認識して侵入してくる病原体も多いが、そのダイナミックな変化を理解するには、細胞膜と糖鎖、さらにはタンパク質のそのものの構造変化まで理解をしなければならない。したがって、細胞膜1つにとってもその理解を深めるには、各論ではない総合的な理解が必要となる。さらに、匂いや感覚といった生命活動もまた膜上に存在する受容体を介して起き、この受容体も糖タンパク質であることが多い。細胞という複雑なシステムを化学的視点から解剖し理解をしたと思っただけでは不完全で、その理解を検証するために機能をシンプルファイした人工細胞の創製も必要となる。最終的には、その検証から、「生命起源の謎」に迫ることもできるかもしれない。

(エ) 糖鎖

核酸、タンパク質に続く第3のバイオポリマーと呼ばれる糖鎖は、細胞間のコミュニケーションに重要な役割を果たし、ガンや感染症の発病にも深く関与している。しかしその合成法は十分に確立しておらず、このためその生体内での役割も未解明の部分が多い。自由にオーダーメイドできる糖鎖合成法の確立、それを用いた機能解析や疾患治療への応用は重要な「夢」である。

(オ) 創薬化学

最も直接的に社会に貢献する生化学の応用として、医薬品創出がある。ターゲットタンパク質の構造から、自在に医薬をデザインする方法論は永年研究されているが、未だ理想には程遠く、その創出が待たれている。特にタンパク質間の相互作用を対象とする医薬品は大きな可能性を秘めているが、低分子でこれを効率よく制御する方法は未だ見出されていない。その確立は社会に極めて大きなインパクトを与える。

(カ) 核酸化学

分子生物学や細胞生物学の発展は、核酸化学とタンパク質化学の進歩なしではあり得なかった。望みの配列を持つ DNA や RNA を手に入れるのも、核酸の化学合成技術がなければ実現しない。さらには、この数年でゲノムの配列の解読技術が大幅に進歩し、次世代シーケンサーのような化学を含めた幅広い分野の技術を集約することで実現された機器も登場した。一方で、核酸を単なる遺伝情報物質としてみるのではなく、機能を持った生体分子として捉えた研究も進められてきた。例えば、天然の核酸を修飾した分子や人工的な塩基を持つ核酸分子、さらにはペプチド核酸のように骨格そのものも核酸と異なる化学構造を持ちながら核酸のように機能する分子が開発された。また、siRNA や microRNA のように、従来の RNA 機能の常識を覆すような発見もなされ、核酸化学の重要性はさらに増した。核酸分子は、高いデザイン性が最大の武器である。したがって、今後研究者自らが核酸の構造をデザインし、目的の機能を発現できる技術、また生体内デリバリー等の関連技術の開発が、将来の核酸化学の夢となる。

(キ) ケミカルバイオロジー

ケミカルバイオロジー研究には、大きく分けて2つの潮流がある。1つは、生命活動を制御する化学物質を探索する研究である。そのような化学物質を人工物に求めるか、天然物に求めるか、その違いによりアプローチは異なるが、いずれも従来から行われていた方法論でもある。しかし、後者については近年天然物の合成機構が急速に解明され、合成系の人工的な改変から天然物を超えた擬天然物合成へと、研究がシフトしてきている。一方で、現在の技術では擬天然物の de novo 生合成を達成することはできず、この夢の実現には大きな技術的・知識的な壁を乗り越える必要がある。

もう1つの潮流は、細胞の生命活動を分子レベルで解明できる感度の高い新規プローブの開発、さらにその究極的な応用として、医療現場で簡便に使いかつ信頼度の高い診断薬の開発である。今後、医療はパーソナルメディスン(個別医療)へと進む。その際に必要不可欠なのが、高感度と簡便性を併せ持つ化合物プローブである。また、それに合わせた安価な機器開発も普及には不可欠であろう。

さらに、ケミカルバイオロジーが担う最も大きな出口が薬剤開発である。核酸化学、タンパク質化学、天然物化学から合成化学に至るまで、すべての知識と技術を統合して、人類の生活と健康に寄与できる薬剤の開発を、安価にかつ迅速に進めることができるようになるのがケミカルバイオロジー研究の夢である。

(ク) バイオイメーjing

GFP が 2008 年ノーベル化学賞の対象となったことでもわかる通り、生命活動を直接観察できるバイオイメーjing技術は現代生物学において重要な地位を占める。現在のところ対象となるのは限られた生体分子のみであり、普遍的なプロー

ブは存在していない。プローブとなりうる分子の普遍的な設計指針、それを感知できる超解像度蛍光顕微鏡が完成すれば、シグナル伝達の過程や細胞深部の構造体可視化が可能となる。生物学に革命的な進展をもたらす「夢」であり、その期待は非常に大きい。

(ケ) まとめ

化学と生物学、そして医学との新しい接点が「生命体」としての細胞の理解につ繋がり、「ケミカルバイオロジー」から「ケミカルメディシン」へと研究が広がることで、人類の生活と健康に最大限に貢献できる研究へと進化する、それがこの分野の「夢」であろう。

エ 物理化学分野の夢ロードマップ

(ア) 物理化学分野の「化学の夢」

分子や結晶を構成する1つ1つの原子の動きを追跡できる原子スケールの空間分解能と、電子や原子核の運動を捉えることが可能なアト秒 (10^{-18} 秒) レベルの時間分解を同時に手に入れることができれば、化学者は反応過程をまるで映画館で映画を見るように観測することが可能になる。レーザー技術の著しい発展とナノテクノロジーの深化によってそのような観測が将来可能になることも夢ではなくなりつつある。本項目ではこのような「物理化学の夢」である、個々の分子同士が衝突し、新たな分子を生成するときを生ずる電子波動関数の変化や、原子核の動きを精密に観測するための様々な「夢の計測法・操作法」が紹介されている。これらは、機能を極限まで高めた材料や、高効率・高選択性を有する化学反応場等の設計指針を得るための究極の計測法となるであろう。

(イ) 光源技術

物理化学のみならず、化学の発展にX線、紫外線、可視光線、赤外線等の「光」が果たしてきた役割は極めて大きい。1つのフェムト秒 (10^{-15} 秒) レーザー光源から出た光を液滴、半導体、金属、等様々な物質と相互作用させることによって、X線からテラヘルツ領域の様々な波長の光を生み出すことが可能となりつつある。このような光波長変換のメカニズムの詳細が解明され、制御技術が開発されれば、テーブルトップやパームトップサイズのパームトップサイズのフェムト秒レーザーからでも高強度な様々な波長の光を発生させることが可能となり、X線による原子の動きから、テラヘルツ分光による水素結合の様式まで、様々な計測が実験室レベルで可能となるであろう。

(ウ) 電子波動関数や原子の動きを可視化する測定法

これまで多くの化学者は、フラスコの中で起きている統計的な結果を反応結果として観測し、反応設計にフィードバックしてきた。しかし、1つ1つの分子の

化学反応や構造変化に伴う電子波動関数の変化、及び原子の動きを動画撮影するように測定する方法論を開発することができれば、高効率で高選択的な反応を駆動する新しい反応場の設計に大きく貢献することになるであろう。このような電子波動関数や、原子の動きを可視化するために様々なアプローチがなされている。アト/フェムト秒パルスレーザーを励起光源とし、サブナノメートルの空間分解能を有する光電子顕微鏡、高い時間・空間分解能を有する近接場顕微鏡、X線自由電子レーザーをプローブ光源、フェムト秒レーザーをポンプ光とするポンプ・プローブ法等があるが、いずれの場合も、用いる光源の性能を究極に高めることが求められており、多くのブレークスルーを伴うそれら光源開発や光波制御技術の開発が必要とされる。

(エ) 生体内における生体分子の可視化技術

細胞、組織、個体等生体の様々な階層において、タンパク質の分子間相互作用や酵素活性等、様々な生体分子の機能やシグナル伝達過程をリアルタイムでイメージングする方法論の開発は、生命の仕組みの解明のみならず、疾病の検査等の医療技術としても極めて有用であり、発展が強く望まれている計測法の1つである。この夢を実現するためには、これらの生体分子を高感度に検出・可視化するためのプローブ開発原理の確立と、生体深部を高い時間・空間分解能で観察することのできる超解像蛍光顕微鏡と超高感度光検出器とからなるイメージングシステムの開発が必要となる。これらの技術が開発されれば、将来、X線による被爆を受けずに体の内部を可視化して検査することも可能となるであろう。

(オ) 金属ナノ構造により光を局在化させる技術

一般的な分子が有する吸収断面積の値から明らかなように、光と分子の相互作用は大きくない。そのため、分子を確実に励起し、計測するには光源として光強度の高いレーザーが必要となる。しかし、最近、金属ナノ構造が示す局在プラズモンと呼ばれる現象を利用すると、金属ナノ構造に入射した光が局在し、増強されることが明らかにされている。このようなナノ空間に分子を配置すれば、光と強く結合でき、微弱光を用いても高感度な蛍光計測が可能となることも明らかにされているが、光エネルギーを有効利用するためには、今後より大きな光増強場の実現が必要とされている。これら局在プラズモンを示す金属ナノ構造は、入射光を増強できる光アンテナとなることを示しており、入射した光エネルギーを余すところなく電気エネルギーに変換できる太陽電池や、高密度光記録等、究極の光デバイスへの発展が期待されている。

(カ) 原子・分子の操作技術

光が物質と相互作用したときに発生する光圧等を利用して分子を整然と並べて結晶化する技術が開発されている。これまで結晶化が困難とされてきた様々なタ

ンパク質分子に関しても本手法によって結晶化できることが明らかにされつつあり、その構造解析が進められている。光による分子の結晶化のメカニズムが解明され、普遍的な方法論として利用することが可能になれば、種々のタンパク質の構造解析が進み、タンパク質と反応する物質が予測できる等、新薬の開発に貢献できると期待されている。一方、近年の走査型プローブ顕微鏡の発展によって原子を1つ1つ操作したり、電子顕微鏡の高性能化に伴って有機分子を単分子で観測することが可能になってきた。これらの方法論を融合することによって、分子模型を組み立てるように、原子や分子を自在に操作して新しい有用な分子を合成できる夢の合成法が確立できると期待されている。

オ ナノテク化学分野の夢ロードマップ

(ア) ナノテクノロジー分野の「化学の夢」

原子を1つずつ自在に並べて物質を作り上げる、これは化学者に共通する夢といえる。ナノテクノロジー分野においては、生体材料や電子デバイス等の機能性マテリアル等様々な視点に立った夢が描かれているが、夢の実現のため、ナノメートルよりも1桁小さい原子レベルで構造を制御することの重要性が強く意識されている。また、そこには既存の有機化学、無機化学という垣根は存在せず、あらゆる元素を利用しようとする柔軟な発想が見て取れる。

(イ) クラスタとナノ粒子

コロイド粒子に代表されるナノ粒子の化学は、特にこの四半世紀に目覚ましい発展を遂げた。無機物質でありながら、有機化合物のように1原子レベルで構造が制御されたナノクラスタの合成法も確立されつつある。

特にQドットに代表されるナノ粒子は、量子サイズ効果によりバルクの物質とは異なる特徴的な物性を示す。高機能というだけでなく、高い安定性を有することから実用性の点からもその重要性は高まっており、実際に様々な物質が開拓されてきた。しかしながら、現状では、すべての無機物についてこのようなナノクラスタ合成が可能なのではなく、様々な大きさのクラスタを自由自在に合成できる普遍的な手法の確立が待たれている。

また、球や楕円体のような単純な構造を有するクラスタだけでなく、ドーナツ状或いは中空のような空孔を有するクラスタ等、様々なトポロジーを有するクラスタは合成手法及び物性面の両面から挑戦的な課題であり、興味を持たれる。

一方、無機クラスタと有機化合物の複合化は、単独の物質では実現できない新機能を発現させるために欠かせない方向性である。これまで、ナノクラスタと有機分子の複合化を行う場合、主として有機分子によるナノクラスタの表面修飾が行われてきた。しかしながら、ここで描かれている例のように、自己組織化或いは自己集合化を利用することにより、有機分子とナノクラスタが高度に

組織化された新しい概念の無機有機ハイブリッドナノ材料が得られるものと期待される。クラスター化学には未だ多種多様な可能性が秘められている。

(ウ) 炭素系ナノ材料

フラーレン、カーボンナノチューブ等の炭素系のナノ構造体は、容易に入手可能なナノサイズの「分子」として注目を集めてきた。3次元的に広がる π 共役系、中空構造、化学修飾の容易さ、等の特徴的な性質から、カーボンクラスターは電子材料、構造材料、医療分子デバイス等多様な応用可能性が考えられてきた。この分野は特に理論的研究が先行しており、炭素原子の並び方、或いは欠陥の導入等、カーボンクラスターの構造と物性の相関について様々な予測がなされてきた。その中で、炭素を他の元素に置換する化学的ドーピングは最も挑戦的であり、かつ誰もが実現可能性を感じながら実現できていない「夢」ということができる。また、無機のクラスターの場合と同様、ドーナツ状構造等、様々なトポロジイック特徴を有するカーボンクラスターの合成手法を確立することができれば、大変興味深い。

(エ) 生体機能材料とナノテクノロジー

生体分子のサイズはナノメートルオーダーであり、これらの分子が単独或いは集合化することで様々な機能を実現している。生体分子の機能を制御或いは利用したり、またこれらを模倣、補完するような材料を開発したりする上で、生体分子と同様のサイズの物質を扱うナノテクノロジーの役割は極めて大きい。すなわち、生体分子の大きさと形にフィットするナノ構造体の形成手法の確立、或いはそれを利用した生体分子の機能制御は、医薬品、再生医療等様々な観点から重要性の極めて高い課題である。

また、分子を秩序的に配列し、さらに、その結果形成される分子集合体をまた並べる、という生体の構造に見られる階層構造を実現することは、物質の構造の精密に制御するという観点からナノテクノロジーの大きな目標の1つといえる。

また、生体機能の大きな特徴として、化学現象の時空間制御が行われていることが挙げられている。これまで開発されてきた機能性分子の多くでは、分子の立体構造の変化は考慮されてこなかった。しかしながら、生体分子においては、立体構造がその機能発現に密接に関わっている。分子の立体構造の制御に向けた研究は未だ緒についたばかりであり、これを実現することにより生体の持つダイナミズムを人工的に再現する道が開けるものと期待される。

(オ) 分子機械

ナノテクノロジーの概念を最初に提唱したのはRichard Feynmanといわれているが、その当時の講演で1つの可能性として触れられて以来、分子機械の開発はナノテクノロジーにおける重要な目標とされてきた。それから半世紀ほど経って

いるが、機械的動きを起こす合成分子は着実に発展を遂げてきた。現状では、未だ1分子レベルでの動きを制御することにとどまっているが、分子機械は電気エネルギーを使わずに機械的な動きを起こすことができるため、これを利用した新しい概念の機能性物質開発へと繋がることが期待されている。一方、これと並行して、分子生物学の立場から生体分子機械のメカニズムが明らかになりつつあり、その洗練された分子の動きは、我々に有機分子の持つ可能性の高さをはっきりと実証してきた。現在、自然が生み出した生体分子機械に匹敵する精密な動きを実現する合成分子を作り出すことが1つの目標になっているが、今回示されているような人工分子機械と生体分子機械を組み合わせたハイブリッド分子機械は、さらに高度な機能を追求する「分子サイボーグ」の創製に繋がるものと期待される。

(カ) まとめ

生体分子、合成分子を問わず、機能性分子の多くはナノメートルサイズであり、ナノテクノロジーに対する化学的なアプローチは、このような巨大分子の合成手法と物性の開拓を両輪で進めながら進展していくものと予想される。分子のサイズが大きくなるにつれ、その構造の多様性は飛躍的に増していく。こんな分子を作れたら面白い、という「夢」はこれからもどんどん生まれてくると思われるが、それを実現するためには、まずは地道な合成反応の開拓を丹念に進めていくことが必要であり、その先には未だ無限の可能性が広がっていることは間違いない。

カ 電気化学分野の夢ロードマップ

(ア) 電気化学分野の「化学の夢」

ボルタやファラデーによって電気と化学の関連性が発見されて以来、電気と化学の境界領域を究める電気化学は新たな産業を生み出し、社会の進歩を先導してきた。21世紀に入ると、エネルギー神話の崩壊、資源の枯渇、環境対策等、人類がこれまでに経験したことのない課題に直面し、前世紀までのパラダイムに根本的な見直しが迫られている。電池、センサ、イオン液体等の領域で新しい技術が創出され、これらがパラダイムの変化をもたらし、持続的発展社会形成の一翼を担い続けることが電気化学分野の「夢」である。

(イ) 電池・燃料電池

電池は今や、産業、日常生活等人類の活動に欠くことのできない存在に育っている。その重要性は今後も変わらないが、太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーの大量導入が本格化すると、大電力の貯蔵や電力系統の需給バランスの安定化に対する要求がますます高まり、高容量、高出力の蓄電池が不可欠となる。また、スマートグリッドの普及により、分散型電源としての蓄電池の役割も大きくなってくる。正極に空気中の酸素を用い、負極に金属を用いる金属空気2次電池のような新しい発想による電池がこれらの期待に応えてくれるだろう。既存技

術ではあるが、NaS 電池はその安全性や性能が向上し、再生可能エネルギー用の蓄電池として再び注目され広く普及するものと思われる。

自動車における電池の進展も見逃せない。コストやインフラ整備の点で2次電池に後れを取った感のある燃料電池であるが、2次電池が出力密度とエネルギー密度の両立に苦戦し続けると、燃料電池が巻き返してくる。酵素を電極触媒に利用して糖やアルコールから電気を得る酵素バイオ電池も燃料電池の一種であり、期待が持てる。

(ウ) 化学センサ

ガスセンサ、バイオセンサに代表される化学センサは、感度、応答性、選択性の極限を追求した研究開発が継続されるであろう。これらの研究開発においては、ナノ粒子、薄膜、微生物といった超微細化技術が実現の鍵をにぎるものと思われる。この技術は電子移動の本質を明らかにし、これを制御することを可能にする。この段階になると、モニターや警報といった役割からコントロールの役割が期待されるようになる。環境及び生体の分野では、共にセーフティネットワークをどのような形でいかにして構築するかがこれからの課題となる。進化した化学センサは、詳細な情報を迅速に検知、比較することによってネットワークをコントロールするという主要な役割を果たしてくれるはずである。

(エ) イオン液体

イオン液体は従来の電解質溶液に代わるイオン導電体として期待されており、今後は液体だけでなく、イオンゲルのような固体化技術も進展するであろう。固体化が容易になると、その利用範囲は拡大する。上述の電池、センサはもちろんのこと、太陽電池、キャパシター、アクチュエーター等も考えられる。環境・エネルギー分野を支える重要な素材に育つと予想される。

(オ) 有機電解合成

有機電解合成は廃棄物の極めて少ない合成法であり、今後はグリーンケミストリーの先導役として、さらに安全な、反応率の高い合成法の確立が求められるであろう。そのために、揮発性・可燃性の有機溶媒に代えて上述のイオン液体を用いる、電極への物質移動を容易にするために光や超音波を照射する等、他の分野の技術との融合が促進されるものと思われる。環境調和型の化学合成法として、新規産業創出の基盤技術にもなるだろう。

(カ) まとめ

電気化学は時代と共に新たな産業を生み出し、その進歩を先導してパラダイムを形成してきた。これからは、特に環境・エネルギーの分野でパラダイム・シフトが不可欠であり、ここでも電気化学の果たす役割は大きい。電子導電体とイオ

ン導電体の界面や電子移動の本質を見極めながら新たな技術を創出し、化学の「夢」を実現していきたい。

キ 高分子化学分野の夢ロードマップ

(ア) 高分子化学分野の「化学の夢」

高分子は私たちの生活基盤を支える材料の1つであり、より快適で安心・安全な社会のために新しい高分子材料の開発が常に求められている。科学・技術の発展に伴い、精密に構造制御された高分子の合成法や、高分子を精密に構造・物性解析する方法が次々と開発されており、高分子化学分野は大きく発展を続けている。再生可能な資源から低環境負荷で合成される高分子、生体の機能を代替するような機能性高分子、金属を代替し軽量・高強度で環境に優しい高分子材料、電気消費量の少ないフレキシブルな電子情報デバイスのための高分子材料、生体のように自己修復する高分子材料等、様々な夢のあるターゲットの実現が目前に迫っている。高分子化学分野においては、無機系とのハイブリッド化、物理化学的な先端分析手法の導入等、他の分野との融合や連携も今後の夢の実現には必要不可欠である。

(イ) 精密重合系の開拓

有用な高分子をいかにして合成するかは重要な課題である。立体規則性、分子量・分子量分布、共重合組成・共重合連鎖分布等、高分子に特徴的な多種多様な因子を制御できる精密重合系の開拓が必要とされている。また、ポリオレフィンの機能性向上を指向した非極性・極性オレフィン共重合のための革新的な触媒の開発、分子デバイスとしての展開が可能な共役系高分子の精密合成技術の向上、光学材料等への高機能化に展開可能なヘテロ元素含有高分子の合成等が求められている。さらに、高度に立体制御が可能な超高選択的重合触媒の開発、完全立体特異性重合の実現等、高分子鎖一本の精密構造制御は、高分子に特徴的な階層構造や極限性能発現と関連して重要である。また複数の外部刺激に対して独立して応答する多重刺激応答性ポリマーの開発は、医用材料、分離材料、情報材料等の様々な分野で開発が望まれている。これまでの機能性高分子を凌駕する物性を示す超高性能高分子材料、様々な機能ユニットのシーケンスを精密に配置した定序配列高分子合成は、合成高分子が生体高分子を越える夢を実現するためには重要な合成分野である。

さらに、これからのブレークスルーとなる新材料の創製に向けて、新しい合成概念の創出も夢のある課題である。無機成分と有機成分をナノレベルで組み合わせる従来の有機無機ハイブリッド化技術に、無機元素と有機元素とを元素レベルで複合化させた無機高分子合成技術を融合させた元素ハイブリッド高分子の合成法の開発が期待されている。

(ウ) 高分子ナノ複合材料の開発

複数の高分子或いは高分子と異種材料をナノスケールで複合化すると単一の高分子では実現できないような物性を示す高分子ナノ複合材料が実現できる。高分子ナノハイブリッド材料の高機能化や実用化のためには、高分子の階層構造制御、異種材料の分散技術、高分子の物理化学的な特性の制御、成形加工技術を駆使した材料開発が必要不可欠であるが、未だ発展途上の段階である。ナノ複合化された材料を評価するための実空間観察、逆空間観察技術の開発等の先端解析技術の開発も必要不可欠な技術となる。さらに分子レベルで複合化した分子複合材料、機能のトレードオフをナノレベルの構造制御で解消する超ハイブリッド型高分子ナノ材料の開発により、複合材料を構成するそれぞれの成分の物性や機能性を大きく凌駕する夢の高分子材料の実現が期待できる。

(エ) 高分子高度構造材料

高分子を自動車、飛行機、建築物等の構造材料に応用し、安心・安全を確保するためには、強度のみならず耐久性も必要不可欠である。要素となる高分子の分子設計、階層構造自在制御、ブレンド等の複合化、界面接着強化等による高強度・強靱化、高度構造材料と実用化されるための高耐久化等は基礎研究をベースにした研究が必要不可欠であるが、系統的な基礎研究が行われているとはいえない。より効率的な材料開発には分子レベルからマクロな構造体に至る材料設計・強度設計の階層的シミュレーションに基づく材料設計を行い、それに基づき合成・成形加工を行うのが有効である。そのため高分子の個性を反映した高度なシミュレーション手法の開発が切望されている。さらに疲労・環境安定性等の耐久性の加速試験法を確立することにより軽量高強度かつ信頼性のある安心・安全な高分子高度構造材料が実用化され、現在使われている金属系材料を置き換えることができれば、軽量化によってエネルギー消費や二酸化炭素排出量の削減が実現できる。

(オ) 環境調和型高分子材料の開発

持続可能な社会の実現にはリサイクルと再生可能な資源からの高分子合成が必要である。これまでのリサイクルはエネルギーバランスの点で問題があり、植物由来高分子は製造コストと物性の観点から新規概念の合成手法が必要である。

非可食植物由来モノマーや二酸化炭素を用いて、環境低負荷の合成プロセスにより、物性・加工性のバランスの取れた高分子を合成し高機能化することは、再生可能な資源の有効活用という視点から、今後一層の研究が必要不可欠である。

一方、汎用高分子材料リサイクルシステムの効率化は喫緊の課題であり、未来に向けて継続的に取り組むべき課題である。現状ではリサイクルによる物性低下、リサイクルコスト等の問題点が解決できていない。リサイクルによって物性が低下しない完全リサイクル型高分子の開発、汎用プラスチックや複合材料に匹敵した物性を示し、環境に低負荷の合成プロセスで調製できる自己修復性高分子材料の開発は究極の環境調和型高分子材料となる。

(カ) 生体を模倣した高分子材料

生体を模倣した高分子材料として、生体系に類似した高分子材料合成法或いは生体高分子のように複雑な情報を担持した高分子の開発が挙げられるが、未だに実現されていない。これらは精密高分子合成の開発とも密接に関連しており、高効率の鋳型重合による高分子合成とその高精度化、モノマーやセグメントに情報を担持した配列制御された情報担持型高分子の精密合成、さらに1次構造から高次構造までの階層構造を意識した生体模倣機能性高分子合成システムの開発等、生体を凌駕する高分子材料の実現は高分子化学の夢の1つである。

ク セラミックス化学分野の夢ロードマップ

セラミックスは無機固体材料の総称であり、古くから陶磁器として人間の生活に密着してきた材料である。技術の進展に伴いセラミックスの応用分野は広範囲に拡大し、それを支える科学・技術も化学分野だけでなく物理、生命科学、ナノテクノロジー、計算科学等極めて多くの分野にわたっている。時代の変遷によりセラミックスの使われ方は変化しても、セラミックスに関わる研究・開発は一貫して「材料技術で人の生活に貢献する」ことを目標としている。しかしながら、近年、生活への貢献の内容は大きく変化しつつあることも事実である。かつては経済成長に伴う便利さや物質的な豊かさの追求が研究・開発の目標とされてきたが、地球温暖化、人口爆発、資源・エネルギー枯渇等多くの地球規模での問題が顕在化するにつれ、持続性のある社会の実現を人々は望むようになり、それに伴い研究・開発の目標も「物質的な豊かさ」から「心の豊かさ」へのシフトしている。このような中でセラミックス化学分野の目標は、「人々の心豊かで幸せな生活をセラミックスの科学・技術で実現する」ことであり、この目標を達成するための具体的な「夢」を以下のように設定した。

(ア) 安心・安全のための材料

人の居住空間、輸送機関、公共施設、さらには食品、薬品の安全性の確保には、センシング技術が重要な役割を果たす。焦電素子による赤外線センサーはそのまま人侵入者センサーへの応用が可能であり、その他にも麻薬、爆発物、有毒ガス、毒物・劇物、細菌・ウイルス等のセンサーの多くにはセラミックス材料が使われる。これらはセキュリティセンサーと呼ばれるものである。センサーはもともと人間の五感を代替するものであり、それらの発展も人間の生活を豊かさに貢献する。感性センサーと呼ばれるこれらのセンサーには、目や耳の不自由な人を助ける視覚・聴覚センサー、食品の品質を向上するための味覚センサー、高性能ロボットが持つ触覚センサー、さらには、快適な空間を実現するための匂いセンサー等がある。一方、放射性廃棄物の処理技術は、人々の安心・安全を実現する上で必須である。セメントやガラスによる放射性廃棄物の固化・貯蔵技術の開

発は、セラミックスの夢として実現しなければならない。さらに、公共施設での安全・安心の空間は、閉ざされた密室ではなく、プライバシーを保った上で制御された公開性を必要とする。特殊なガラスによるシースルーセラミックスはこのような空間を実現ための材料である。

(イ) 高度センシング・信号変換材料

人の生活に貢献するエレクトロニクス製品は、何らかの信号を受信し、それを変換して出力している。受信の部分を担うのが高度センシング技術で多くのセラミックスが使われる。例えば、温度、圧力、湿度、ガス濃度、液体・気体流量、微粒子濃度、アルコール濃度等で、これらの性能向上を図ることはエレクトロニクス製品の機能向上のため必要である。特に高温で使用できる圧電センサー（圧力センサー）は、内燃機関のシリンダー内爆発圧力や火力発電所の排気ガス圧力のセンサーとして期待されている。電気回路における受動部品には抵抗(R)、キャパシター(C)、インダクター(L)があり、信号（波形・位相）換素子として利用されている。これらの素子の多くはセラミックスでできており、既に産業として成立し、我が国も最も強い産業分野の1つとなっている。これらの産業の競争力をさらに高め、画期的な新材料や新技術を作ることが本分野の夢であり、そのための科学・技術の進展を図る。広義の信号処理は、電気・磁気・機械的な信号の相互変換を意味する。例えば、圧電素子は電気―機械信号の相互変換素子として多くの分野で使われている。電気（誘電）―磁気の変換はマルチフェロイック材料として基礎研究が盛んな分野である。新規な信号変換材料は、そのまま新規デバイスの実現に結び付くため産業界からの期待も高い。時間はかかっても基礎研究から体系的な取り組み、最終的には全く新しいデバイスの実現という夢を実現したい。

(ウ) 美感性材料

ディスプレイ用ガラスは、現在のセラミックス産業の中で大きな市場を有する分野の1つであるが、さらなる薄型・軽量化が強く求められている。ガラスのみならずセラミックスに共通する本質的な弱点である脆性克服のために、まずは次世代精密加工や次世代表面修飾プロセスが研究対象となる。さらに、革新的な超薄・軽量型のタッチパネルや光子操作等高度な情報処理機能を有する新型ディスプレイが未来に向けた開発目標となり、その先には人間の感性に整合するあらゆる形態や機能化が可能な美感性材料へと昇華していく。

(エ) 蓄光・蓄熱用材料

次世代の発光や発電材料の開発が盛んであるが、同時に、種々のエネルギー形態の中で利用されずに捨てられる割合の高い光熱エネルギーに着目する。これらは、これまではあまり顧みられなかった分野であり、太陽光の未使用成分の蓄光

(タイムシフターによる夜間発電等) や膨大に散逸している熱エネルギーの集散・回収に役立つ熱集積回路等を、形態制御や微細・大型化が容易でかつナノ結晶化等により機能複合化が自在となってきたガラスを母体として開発する。実際には、既存の太陽光発電や熱電素子等の機能を損ねることなく、シースルーカバーのような形状により、発電エネルギー機能と蓄エネルギー効果を集積化する。

(オ) 高性能蓄電システム

エネルギーの形態として最も優れているのが電気であることは誰もが認めることである。しかし、エネルギー源としての電気には「貯める方法が限られる」という決定的な欠点が存在する。この意味で高性能蓄電システムの研究・開発は、現在、人類が取り組むべき最重要の課題であるといっても過言ではない。重量あたりのエネルギー貯蔵量が最も高い素子がリチウム電池であるが、これ以上の向上には抜本的な技術革新が必要となっている。リチウム固体電解質の利用、リチウム-空気電池の実現はまさに夢であり、そのためにセラミックス技術も中核的な役割を果たす。一方、積層セラミックスキャパシターは、放出するパワーの密度では非常に優れているものの、重量あたりのエネルギー貯蔵量は非常に小さい。蓄電システムとして積層セラミックスキャパシターを使うには、パワー密度を決める周波数特性は犠牲にしてもエネルギー貯蔵量を増やす材料・素子構造を作る必要がある。現在の高度セラミックス製造技術を用いれば決して不可能ではなく、目指すべき夢として挙げておく。

(カ) 環境浄化材料

現在、PM2.5 や環境ホルモン等、または放射性同位体等の汚染が非常に問題となっている。これらの問題について、まずはセラミックス多孔体を用いて、有害物質の吸着除去について検討する。セラミックスは耐熱性や物理的耐久性に優れており、これは多孔体を高温で使用したり、また再利用するのに非常に役立つ。次の段階としては、光触媒による分解除去である。吸着した有害物質を、特に可視光型光触媒によって分解したり変質させることができれば、新たなエネルギーの投入なしに環境浄化が可能となる。さらに燃焼により発生し、現在問題となっているPM2.5の回収除去等、有害物質から有害微粒子へとそのターゲットを広げていき、最終的には統合的な有害物質や微粒子の除去技術を確立する。

(キ) 特定元素の回収・除去システム

戦略物質である希土類元素、白金族、リチウム、コバルトやヘリウム等、比較的貴重な元素の使用量を少なくする技術は非常に重要であると同時に、使用済み部品から、これらを回収する技術も非常に大切である。特定元素の回収・除去については、まずはセラミックス多孔体や層状化合物への吸着を検討する。元素サイズや分子形状によっては、セラミックス多孔体で吸着可能な場合もあるし、イ

オンであれば層状化合物へのイオン交換による回収が現実的である。またセラミックス表面と回収元素との相互作用が重要なキーポイントとなることから、表面を改質しつつ、疎水性相互作用、双極子相互作用等の種々の相互作用を駆使して、特定元素が回収可能な材料の創製を目指す。最終的には、それらの材料を組み合わせた特定元素回収システムの構築を目標とする。

(ク) ナノ粒子の科学・応用技術の確立

新しいナノ粒子構造指針を開発する。例えば、人間の感性に訴える光学機能性といった新しい特性を持つナノ粒子を得るため、感性工学との融合によりナノ粒子構造を設計する。

粒子生成反応が進行する化学反応場を高度制御する「ケミカルデザイン」により、ナノ構造制御したナノ粒子を合成する。ナノ粒子の重要な応用分野である環境浄化（光触媒等）、エネルギー有効利用（燃料電池、先端電子デバイス等）、さらに、医療診断デバイス（医療機器、ヘルスケア）への応用を実現する。

(ケ) 脆性克服のための材料科学

破壊靱性パラメーターを再検討して、ナノ構造に対応する破壊靱性理論を再構築し、ナノ構造制御材料による破壊靱性の向上を目指す。共有結合或いはイオン性結合と共に金属結合性領域を持つ、言い換えると異種結合性領域を内在する超配向バルク体の作製を目指す。この新しい材料設計を実現するため、新規な前駆体となる特異構造粉末を用いてバルク体作製を実現する。前駆体の結晶構造を利用した超配向技術を開発し、均質な超複合化焼結体を作製する。強度・靱性の高度化により、高度非脆性材料を開発する。

(コ) 高効率航空機用エンジン部材

燃料費削減及び環境負荷低減の観点から、航空機の燃費向上が強く求められており、その実現にはジェットエンジンの重量減と熱効率の向上が鍵となる。熱効率の向上には、タービン入口温度を高めることが効果的であり、例えば、従来材であるニッケル基超合金の場合には、タービン入口温度を高めるために、空気冷却に加えて、遮熱コーティングの適用が検討されている。また、セラミックス基複合材料は、ニッケル基超合金と比べて比重が 1/4 と軽量であり、1300 度以上の高温でも使用できる耐熱性から、次世代タービン部材材料として注目されている。候補材の 1 つである SiC 等の Si 系セラミックスは、水蒸気雰囲気中では、減肉するためにジェットエンジン部材に用いる際には耐環境コーティングが必要になる。そのため、高効率航空機用エンジンセラミック部材及び遮熱・耐環境性コーティングの開発を目標とする。

(サ) 大型部材製造プロセスの確立

軽量で、剛性が大きく、耐熱性・耐食性に優れたセラミックスを製造装置やシステムに組み込むことで、製造効率の向上が期待される。例えば、液晶・半導体製造ラインでは、セラミックスを大型の精密生産用部材として活用することで、製品の処理能力の向上や微細加工化が可能となる。これらの要求に応じていくには形状付与の自由度を高める必要があるが、従来の一体型のセラミックス成形技術では対応が困難である。軽量・高剛性・高精度セラミック部材を実現するために、例えば、高機能化された小さな精密ブロックを作製し、立体的に組み上げ、高効率で接合・一体化して所望とする大型（巨大）化・複雑化・精密性すべてを満たした部材を得ることのできる革新的なプロセス技術の確立を目標とする。

（シ） おいしい水を作る材料

水は、人類を始めとする生物の根源の1つであり、人類はこれまで安全な水を得ることに邁進してきた。我が国では既に水は安全・安心なものとして水道より供給されるが、世界的には未だ水道水を安心して利用できない国も多い。また一方で、我が国においても、自然災害時等に安全なおいしい水を手に入れるのは困難な場合もある。さらに、一部では水に対して偏った信仰も存在し、非常に高価に販売されている例もある。そのため、安全・安心な水を作る材料開発は、人類を豊かにする技術として非常に重要である。まず初期段階としては、有害物質の除去や殺菌等の水質調整を簡易に行える技術を開発する。続いて、触媒やセラミックセンサー等による安全性確保技術を検討し、最終的には、水質改善システムを構築する。

（ス） 生体環境に調和する材料

セラミックスは医療分野において、歯や骨に代表される硬組織の代替材料として用いられてきた。例えば、骨の代替材料には、様々なセラミックスが用いられているが、自家骨をしのぐには至っていない。生体骨は、応力に応じてリモデリングを生じ、骨梁を改善することにより安定した構造を有し、また、微小骨折が生じた場合、骨組織のリモデリングにより骨折部位を修復し、生体機能を回復する。このように生体内において、骨は吸収と再生を繰り返しており、埋入された骨補填材も同様に吸収され、自家骨に置き換わることが望ましいとされている。現在、骨補填材として幅広く利用されているハイドロキシアパタイトは、生体内において難溶性で自家骨に置き換わることが困難とされている。そこで、生体骨の組成や構造に類似したセラミックスや複合材料を開発することによって、生体組織と同様な機能を持つセラミックスの臨床応用が可能となる。

（セ） 細胞に機能する材料

セラミックスは生体内に埋入されると、無機イオンやタンパク質の吸着が始まり、細胞接着、機能発現を経て、損傷部位の治癒が開始される。セラミックスの組

成や表面性状を制御することにより、細胞機能をマニピュレートすることが可能であり、硬組織や軟組織等適応部位の細胞種に適したセラミックスの創製や表面改質法の開発が期待される。しかしながら、セラミックスが細胞機能をマニピュレートするメカニズムは未解明のままであり、それらを解明し、細胞の機能発現に基づいたセラミックスの設計・創製が急務である。

再生医療の発展と協調して、10年後には iPS 細胞/ES 細胞や間葉系幹細胞等の幹細胞を含む細胞の増殖・分化を制御するセラミックスを創製し、20～30 年後には細胞の高次機能発現を制御、再生医療に資するセラミックスの実現が期待される。

また、セラミックスは、薬物送達システム (DDS) の担体として開発が進んでいる。ナノサイズのセラミックスは、生体内において吸収可能であり、遺伝子や薬物の複合体を効率よく細胞に導入し、細胞の機能を調節しながら、タンパク質産生や遺伝子ワクチンを作製することが可能であることから、効率的な遺伝子治療を実現する DDS の担体として期待される。

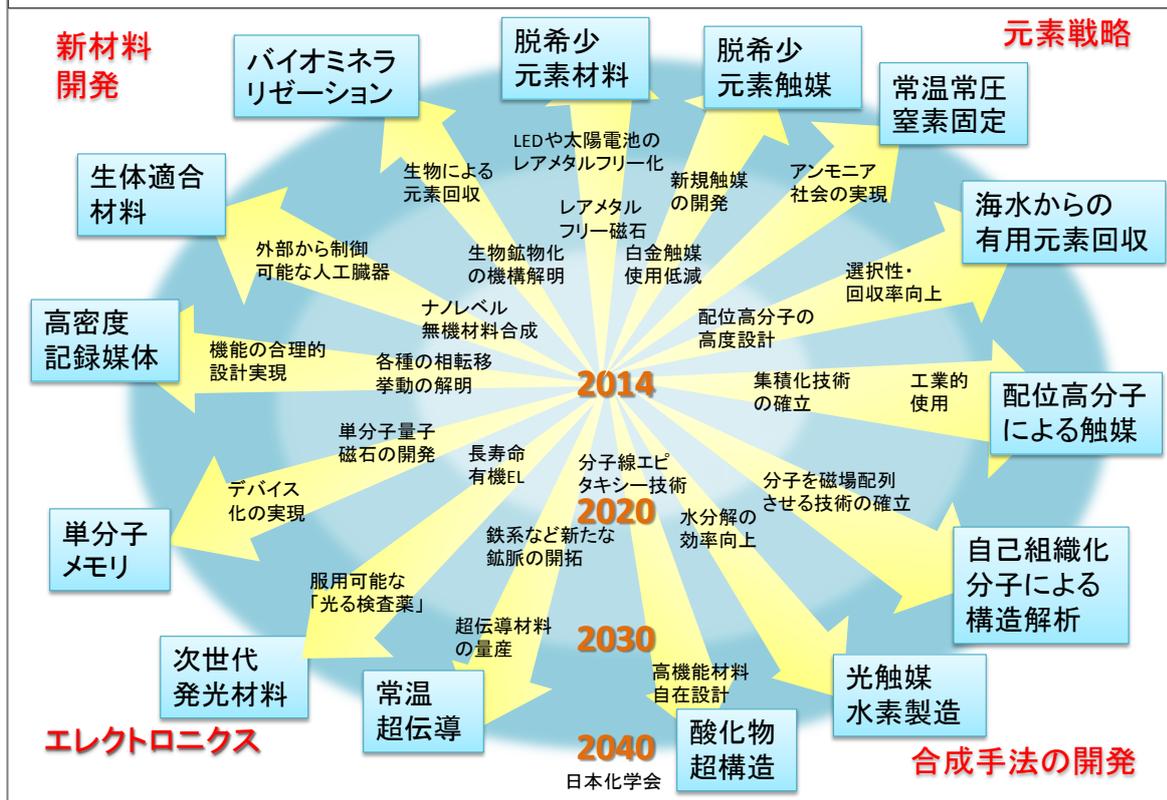
(ソ) 高齢者の高度医療のための材料

日本国内では、4人に1人が65歳以上になる超高齢社会を迎えて、基礎疾患を有する患者や高齢者が増加し、その治療方法や治療用人工材料の高度化が求められている。骨量及び骨質の減少を伴う骨粗鬆症は、主に閉経後の女性や糖尿病患者等で発症し、骨形成の減弱と骨吸収の増加が認められる。このような低下した生体反応に対してセラミックスの臨床応用を行い、セラミックスの適応範囲が拡大すること、そしてそれにより人々のQOLが向上することが期待される。

また、セラミックスを生体内に埋入した場合、感染による抜去、再治療の必要性が生じる場合がある。生体機能が低下した場合、通常では予知し得ない感染が生じるが、抗菌活性を有したセラミックスの創製により、抵抗力の低下した高齢者や有病者においても、安心・安全な治療を行うことができる。

また、中心静脈栄養等カテーテルを長期留置する場合等に抵抗力の弱い高齢者でも重篤な感染を防止するようなデバイスの創製が期待される。

6-2 無機化学分野の夢ロードマップ



6-3 生物化学分野の夢ロードマップ

