

「サステイナブル資源・物質戦略」

ナノテクノロジーと化学についての検討会 提案

---Sustainable Technology (ST)を保証するイノベティブ“ナノ化学空間”---

日本化学連合はこれからの時代変化に対応するために、化学と化学技術者を擁する学協会が連携協力して共通の場をつくることを目的に平成 19 年 6 月に設立された。「社会のための化学」を旗印に、化学の価値を内外に示す活動を推進している。

化学はナノテクノロジーの発展に大きく貢献してきた。また政策課題である環境問題などにおいてもナノテクノロジーがキー技術として期待されており、化学的方法論の役割は非常に大きく、ナノテクノロジーにおける化学の重要性は今後も変わらない。しかし、ナノテクノロジーと化学を真正面から結び付けて両者の関係を検討した例はあまりない。

そこで、日本化学連合では「ナノテクノロジーと化学についての検討会」を発足させた。第 1 回の検討会においては、主に化学分野として取り組む内容について議論を行った。さらに、文部科学省（と JST）の支援を得て、第 2 回の検討会を開催した。ここでは各委員から、各委員の研究範囲を含んでより上位の視点から俯瞰的に描いた状況、その中から期待されること、それを越えなければならないハードルなどについて、プレゼンテーションと議論を行い、新しいコンセプトを作り上げた。さらに、委員間でのメール審議を経て、提案書の形にまとめた。

本提案は、「ナノテクノロジーと化学についての検討会」が、下記検討会における討議を経て、我が国のナノテクノロジーに関する施策に資するため、特に、化学研究に特有な性格をふまえた研究振興を念頭におき、今後の環境・エネルギー・資源問題への対応も含め、化学の原理に基づいて、従来の研究の延長線上でない革新的・挑戦的課題に、ナノテクノロジーとサイエンスから大胆に挑戦していく提案として取りまとめたものである。提案書と参考資料からなる。

第 1 回 検討会 （1）平成 20 年 3 月 8 日（土）12：30～15：00
（2）平成 20 年 3 月 12 日（水）17：00～19：00
（場所： 化学会館）

第 2 回 検討会 平成 20 年 4 月 30 日（水）13 時－平成 20 年 5 月 1 日（木）14 時
（場所： アルカディア市ヶ谷（私学会館））

主査	岩澤 康裕	東京大学大学院理学系研究科 教授
委員	岩村 秀	日本大学大学院総合科学研究科 教授
	大久保 達也	東京大学 大学院工学系研究科 教授
	金村 聖志	首都大学東京大学院都市環境科学研究科 教授
	川崎 雅司	東北大学金属材料研究所 教授
	北川 進	京都大学大学院工学研究科 教授
	北川 宏	九州大学大学院理学研究院 教授
	黒田 一幸	早稲田大学先進理工学部 教授
	下村 政嗣	東北大学原子分子材料科学高等研究機構 教授
	田中 一義	京都大学大学院工学研究科 教授
	寺前 紀夫	東北大学大学院理学研究科 教授
	西 信之	自然科学研究機構 分子科学研究所 教授
	西原 寛	東京大学大学院理学系研究科 教授
	馬場 嘉信	名古屋大学大学院工学研究科 教授
	板東 義雄	(独)物質・材料研究機構 若手国際拠点 センター長
	藤田 誠	東京大学大学院工学系研究科 教授
	真嶋 哲朗	大阪大学産業科学研究所 教授
	山下 正廣	東北大学大学院理学研究科 教授

サステイナブル資源・物質戦略

「Sustainable Technology (ST)を保証するイノベティブ“ナノ化学空間”」

1. 提案の背景、趣旨

現在日本の分子ナノテク、空間材料合成、時空間解析の底力は世界的に高い水準までできている。これを振興させて、真に革新的な学術興隆・産業萌芽の基盤と研究環境をつくる必要がある。そのために、「Sustainable Technology (ST)を保証するイノベティブ” ナノ化学空間”」プロジェクトを提案する。

Sustainable Technology (ST：持続可能な社会を構築するための革新的科学技術)はNT戦略、IT戦略、BT戦略と相乗的かつ相補的な関係にあり、資源やエネルギー消費の最小化、再生可能資源や再生可能エネルギーの活用拡大、人と環境の健康・安全・安心を支える科学技術の開発と推進などの基盤的戦略である。ST戦略は、地球温暖化問題など地球環境負荷の軽減に貢献、環境保全から代替技術へと環境に対する社会改革をもたらす、文化的人材育成に貢献、健康・安全・安心の課題解決につながる、日本が主導権を持てる国際貢献であるなど、多くの利点と波及効果がある。

物質に求められるのはその種類ではなく、優れた物性・機能である。また物性・機能は、一義的には構成元素で決まるが、様々な結合を介したそれらの構造・空間配列で決まることが多い。特に、ナノ化学空間が持つ特有の性質は今後の学術、技術を牽引するSTの中核をなすと予想される。元素戦略とは「物質・材料を構成し、その機能・特性を決定する元素の役割・性格を研究し、物質・材料の機能・特性の発現機構を明らかにすることで、希少元素や有害元素を使うことなく、高い機能をもった物質・材料を開発することを目的」としたものである。これを強力に推進し、環境、エネルギー・資源分野でのブレークスルーを見据え、従来にない革新的な物性・機能の創出を目指し、STを牽引する「イノベティブ” ナノ化学空間”」プロジェクトを提案する。

半導体分野では、ナノ構造中における特異な量子現象の発見と体系化・理論化が進み、現状の半導体の性能を大幅に超える新たなデバイス研究が進んでいる。しかし、ナノケミストリーの分野では、ナノ化学空間特有の分子現象が見つかりつつあるが、その体系化と理論化がほとんど進んでおらず、化学空間の特性を生かした新たなナノ材料・ナノデバイスの開発スピードが加速されていない。これは、化学空間を構築する材料が半導体のシリコン基板に比べて有機・無機・高分子などバラエティーに富んでいること、化学空間で扱

う化合物・生体高分子・細胞などが半導体で扱う量子に比べて理論的取り扱いが困難であること、ナノ化学空間での計測技術が不足していることなどによる。

ナノサイエンスが対象とするサイズ(1 nm-100 nm)は原子・分子のサイズとバルク材料のサイズの間位置し、その特異なサイズ故に原子・分子やバルクの世界では見られないような興味深い新奇「非線形性」や「量子効果」が観測される。無機・有機ハイブリッド物質は、これまであまりナノサイエンスの研究対象とはなっていなかったが、電子状態のみならず、構造や機能性も自由に制御できることから、ナノサイエンスにとって非常に将来性が期待されると同時に殆ど未知のターゲットである。これらハイブリッド物質は、磁性、伝導性、光物性、誘電性などの機能が複数絡み合った次世代型高次機能を創出できると期待される。21世紀のナノテクノロジー・ナノサイエンスを世界でリードし、STを保証するためには全く新しい物質系の枠組みが必要である。

工業技術によるモノ作りはその多くを「エネルギー」に依存しているのに対し、生物は「情報」や「空間」、「構造」を有効に利用し生命体システムを構築しており、「情報」の多くは「分子」(DNAやタンパク、糖、脂質などの生体分子)にプログラムされており、それらが「ナノ構造」と「ナノ空間」を作り出す。今、バイオミメティクス(生物模倣)に注目することが、エネルギーの観点からも、また資源の観点からも、モノ作りの根幹の学問である「化学」がサステナブル社会の実現に大きく貢献できるチャンスになる。現在、バイオミメティクス実現の方法としては、トップダウンが主流でありボトムアップの研究は立ち遅れている。

ボトムアップ構築の有力手法の一つである自己組織化によって作り出すことのできる最も有用な機能性物質群のひとつとして、有限および無限構造をもった空間材料が挙げられる。特に、有機と無機の構成成分を組み合わせた自己組織化空間材料は、その高い設計性、合成の簡便性、空間が有する潜在的高機能性を持っている。金属と有機化合物とから構築されるMOF(metal-organic framework)ナノ空間はプロトン伝導、電子伝導、触媒機能など新たな化学の反応空間となり得る。空間を穴(孔)という観点で見ると、10 - 100 nmの空間はメゾ孔と呼ばれる。ここでは分子、超分子とその複合体が織りなす機能が整然と効率よく進行する。多くの調節性のある細胞機能は、個々の分子の単なる衝突によって果たされるのではなく、例えば遺伝子の転写(DNAを鋳型としたmRNAの合成)やシグナル伝達のように、10 - 100 nmというサイズの大きな分子複合体が担っていることが多い。ナノ化学空間・メゾ孔は化学、物理、生物の十字路である。

近年のゲノムプロジェクトにおける高速 DNA シーケンサーの活躍に示されるとおり、科学技術の大きな転換点は物質の分離と分析技術の飛躍的な発展に支えられている。20 世紀最大の発明である液体クロマトグラフィー (LC) やキャピラリー電気泳動 (CZE) などの分離手法の本質は界面で発現する化学過程の制御にある。従って、分離能の飛躍的な改善において、カラム充填剤やキャピラリーなど分離分析媒体の微細化による界面現象の効率的利用が必須であり、究極の分離カラムとして界面の近接したナノカラムの利用が強く期待されている。ナノチャンネルが従来のキャピラリーと著しく異なる点は、分子サイズレベルのナノ空間を対象とすることによる分離操作の戦略的設計を可能とする点にある。化学プロセスのエネルギー消費の大きな部分を占める分離精製過程に対して、ナノ化学空間は省エネルギーの切札として ST を支える基盤となると期待される。

大切な石油をガソリンとして消費し、しかも温室ガスCO₂を排出し続けているガソリン自動車に電気自動車、そして燃料電池自動車に転換することが持続社会には必須と考えるべきである。この意味で、化学の研究者がこの問題で果たすべき役割は、動力として実用可能な大出力電池 (2 次電池、燃料電池、スーパーキャパシタ等) の開発である。電極材料、電極ナノ触媒などの開発の加速が求められる。また、空気抵抗や摩擦などによって失われている自動車のエネルギーを回収しその場で使用することができる三次元全固体型の電池も三次元ナノ空間で実現され得る。

電極などの界面ポテンシャル場に化学種を固定して、電子移動と化学現象の融合した「化学修飾電極」の研究が米国を中心に 1970 年代に始まって、約 30 年が経過した。この間、自己集合単分子膜 (SAM) は精密配列が簡便にできる手法として現在様々な科学技術分野で活用されている。この方法を発展させ、界面に存在するポテンシャル場を、分子配列や、表面形状のナノサイズ制御によって自在に作り出すことができれば、或いはまた、ナノ表面にモレキュラーインプリンティングした分子認識ナノ化学空間を構築することにより、電子移動、化学変換、物性変換などを随意に行うことができ、分子素子、完全触媒など ST 社会の基盤を提供できる。

ナノテクノロジーの研究開発が進展している今日、ナノからミクロンの微小空間での温度計測が求められている。既存の液体温度計は測定できる温度の空間領域範囲がミリメートル以上と広く、ミクロンからナノと言った微少な空間での温度計測には利用できない。とりわけ、表面や界面等の局所場で起こる様々な化学反応の正確な反応温度を直接に計測できうる新しい微小温度計の開発が不可欠である。

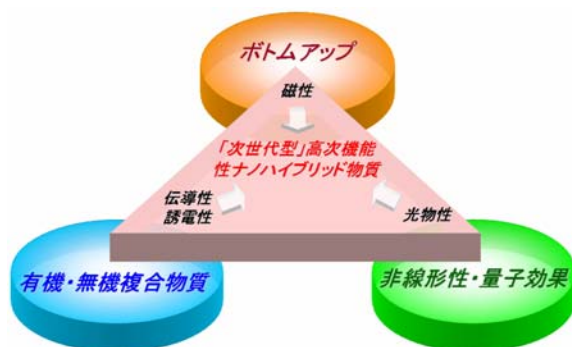
ナノ材料開発の基盤となるのは、ナノ物質特有の性質、機能の解明と制御であるが、例えば不均一系触媒では分子吸着及び反応活性点の不均一性が大きく、ナノスケールでの反応制御が未だに困難であるため、その応用には多くの課題が残されている。ナノ表面・界面における分子及び反応活性種の変化や移動過程は従来のマクロなレベルでの時間分解測定では観測が困難で、空間分解測定が時間分解測定と同様に重要であり、単一分子レベルでの測定が不可欠である。この単一分子化学は、従来の多数の分子を対象とした化学では判別できない事実までも明らかにできる。また、触媒反応を実現している個々の触媒ナノ粒子もそれぞれ性質が異なり不均一性が大きく、環境・エネルギー・資源的に究極の完全制御した触媒（100%収率）開発のブレークスルーには、ナノ粒子一粒毎の物性・機能の解明が必要であり、そのための時間空間分解解析法の開発と確立が求められる。

ナノ化学空間は物質・材料の表面・界面の問題でもあり、化学－物理－生物－医学の学問分野に広がっている。各々の学問分野の界面に、真の創造的な新科学技術の芽があることが多く、異分野連携が望まれる。それをつなぐのはセントラルサイエンスとしての化学の役割である。

2. 具体的提案

(1) ハイブリッドナノ化学

ハイブリッドナノ化学から発現が期待される「新奇非線形性や量子効果」に基づき、近未来に実現が期待される「量子コンピューター」、「光コンピューター」、「大容量高速光通信」、「高密度磁気メモリー」、「単分子メモリー」などの基礎となる「次世代型」高次機能性ナノハイブリッド物質を創出する。本研究で対象とする無機・有機ナノハイブリッド物質はこれまで殆どナノサイエンス・ナノテクノロジーの研究対象とはなっていない。しかしながら、電子状態の多様な無機と構造の多様な有機の特徴を意のままに組み合わせることにより、従来の化合物にはみられない構造、サイズ、電子状態、機能性を創造することが出来る。その例証として、最近、ナノサイズ特有の「非線形性」と「量子効果」に基づく興味ある機能性を示す例が山下（東北大院理）によってナノハイブリッド物質において見いだされている。対象とするナノハイブリッド化合物は大きくわけて、強相関電子系ナノワイヤー金属錯体と分子性量子磁石の2種類である。強相関電子系化合物は電子相関に基づくスピン・電荷・格子のカップリングによる様々な物性や機能性を発現する。



また、分子性磁性体の高機能化のためのナノ化学の推進も考えれる。フリーラジカルの 2p 電子でも交換相互作用をきちんと設計すれば、ポリラジカルを使って磁石ができるという発想は 1960 年代わが国で提唱され、1980 年代に超高スピン分子の実現で立証された。さらにフェロ磁性体とするには、マグネタイトの単磁区構造が 80 nm ほどであるから、これをシミュレートしなければならない。磁性金属イオンとフリーラジカルの超分子化学的手法が優れており、転移温度が窒素の沸点に近い磁石が 1990 年代に入って実現した。まだ実用に供される磁性体はできていない。分子性磁性体は、その設計性や光透過性・応答性ゆえに、磁性以外の物性と組み合わせて様々な素子となることが期待されている

(2) バイオミメティック化学空間

サステナブル・マテリアル・デザインのための自己組織化的階層構造化技術を確立する。エネルギーの観点から、自らが有する「情報」によってナノスケールで「自己集合」した分子集団を非平衡現象による構造形成を利用してマクロなスケールまで「階層的」に組織化する「自己組織化」技術が求められる。現在、ナノテクノロジーの主流は、ボトムアップとトップダウンの融合であるが、真にエネルギーの大幅な削減を実現化するためには、「自己集合と散逸構造を組み合わせた自己組織化」による制御性の高い革新的生産技術としての「バイオミメティック・エンジニアリング」を世界に先駆けて我が国が確立せねばならない。



(3) 自己組織化化学空間

有機と無機の構成成分を組み合わせた自己組織化空間材料は、その高い設計性、合成の簡便性、空間が有する潜在的な高機能性のため、大きな注目があつまり、近年、加速度的に研究が広がっている（図 1）。この研究領域からは、すでに触媒や気体貯蔵材料など、さ

さまざまな機能性空間材料が創出されており、環境・エネルギー問題の解決にも資する大きな波及効果が期待されている。

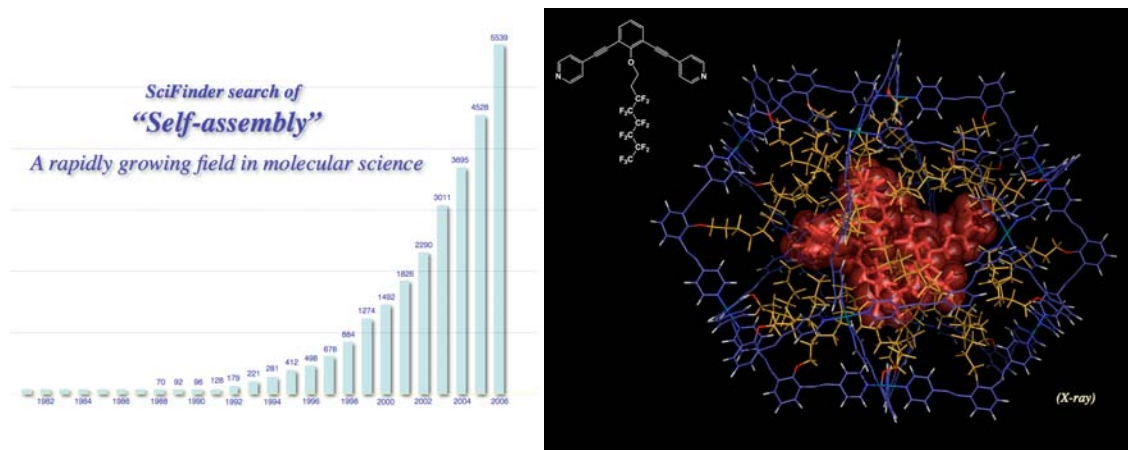


図1 (上図左) SciFinder 検索による Self-Assembly (=自己集合：自己組織化と同義語) の使用頻度。

図2 (上図右) 自己組織化空間材料の例：自己組織化空間内に形成されたフルオラス相（フッ素性小分子が溶解している）。フッ素鎖を持つ配位子（図左上）とPd²⁺イオンから自発的に生成する。ナノメートルスケールの微小空間に設計した”相”をつくり出すことができる。(M. Fujita et al., Science, **2006**, 313, 1273)

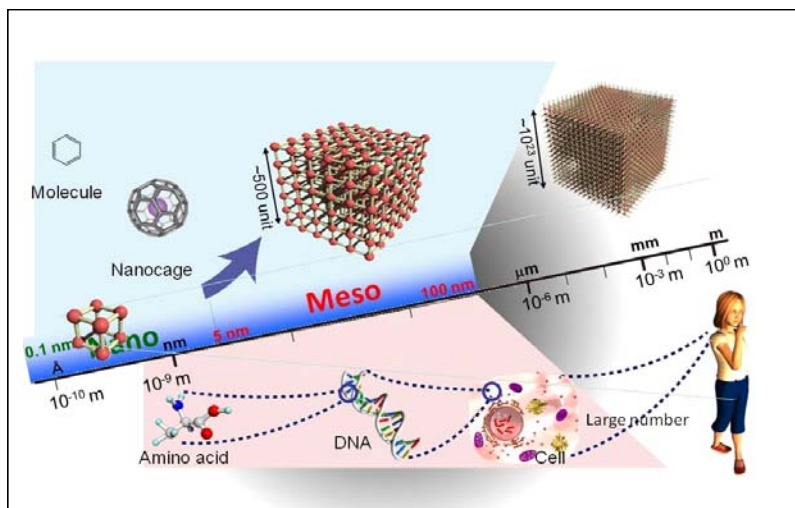
(3) メゾ空間化学

細胞における自律的化学システムにみられるような、分子、イオンの時空間制御にもとづく反応系およびそれより導かれる階層的システムの新機能を探索する化学を発展させる。すなわちメゾ空間における物質系の普遍的原理の理解を化学を主力として学際的協力によってすすめ、さらにメゾ空間レベルで物質機能を制御するための全く新しい技術を確立する。

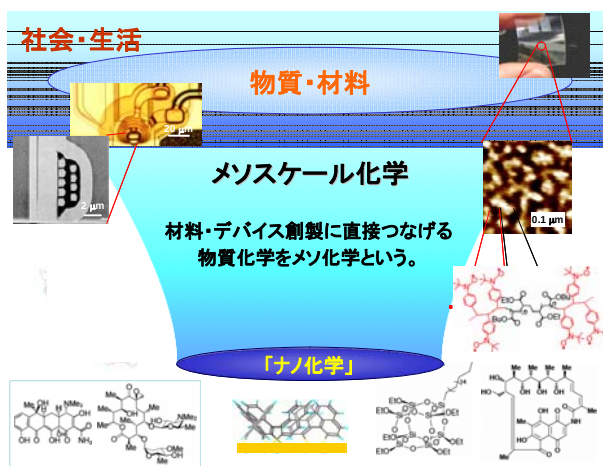
(a) 「自律的に駆動されるメゾ化学反応システムの構築」

細胞や細胞内小器官の自律的な化学反応システムに範をとったメゾ空間反応システムの構築をめざす。この研究を推進することで、環境・生命にやさしい水溶液環境下での合目的化学反応の実現や、非平衡・微小外場摂動下で駆動される低負荷・ゼロエミッションの化学が創成される。

(b)特に、このメゾ領域でつくられる分子システムを用いて、大気中存在する気体（酸素、窒素、二酸化炭素、希ガス等）を選択的捕捉、分離を行う。この操作は、古代より人類が工夫をし、技術を改良してきたが、大量のエネルギーを用いなければならない。いかに低エネルギーで実現するかが鍵である。このためには従来の静的な構造にもとづく化学ではなく、揺らぎも加わるダイナミックな構造を扱う化学が不可欠である。



メソスケール化学は材料とナノを繋ぐキーワードである。Meso とは In-between を意味し、ミクロとマクロの中間領域を意味する。メソスケール化学の学術創成とは、既存の分野ではカバーしない領域を、化学の言葉・方法論でアプローチし、「～の谷」と呼ばれる領域をもカバーし、将来の学術創造・産業創造に繋がる魅力ある未踏の学問領域である。波及効果は幅広く、メソスケール空間に限っても、化学分野は勿論のこと、配列空間における特異物性（超伝導、磁性）の発現に始まる物性物理・理論物理への刺激、ドラッグデリバリー、生体分子の高速分離やなどバイオメディカル分野への貢献、低屈折率材料などの光学・電子デバイス関連など広範な分野への波及が見込まれる。



また、ナノ化学空間の制御により革新的触媒及び分離技術の革新が期待される。環境、エネルギー分野でのブレークスルーのためには、化学反応を自在に制御し、これに伴い有効にエネルギー変換を実現する化学空間の創出が不可欠である。触媒は化学反応を制御する機能材料であるが、精密な化学空間の制御により、その飛躍的な機能の向上が期待される。同時にこれらの検討は吸着や膜分離といった相転移を伴わない分離技術への展開も期待される。今日の燃料や化成品製造においては、分離プロセスにおけるエネルギーロスが大きく、化学空間制御のアプローチは大きなブレークスルーに展開する可能性を秘めている。下図は触媒及び分離を実現するナノ化学空間のイメージ（例）である。

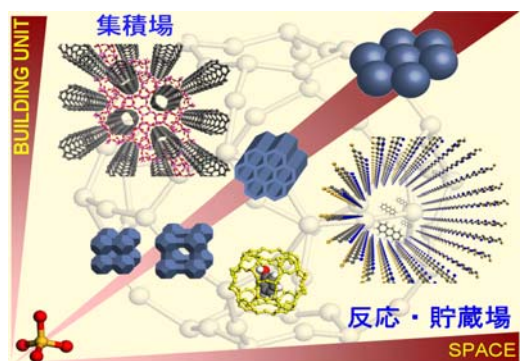
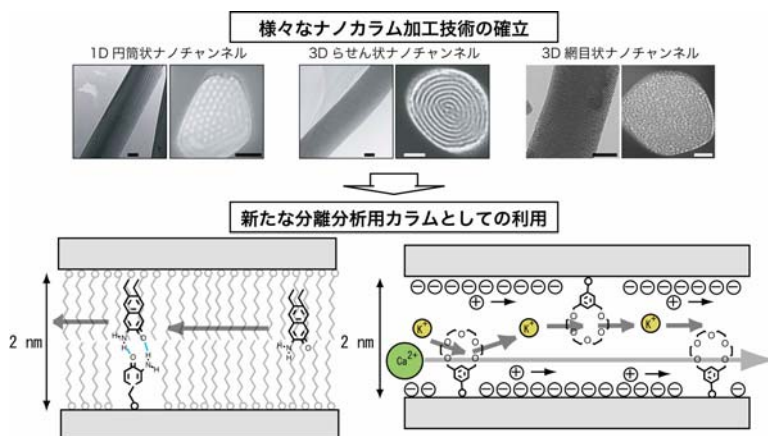


図 1 ナノ化学空間のイメージ（例）

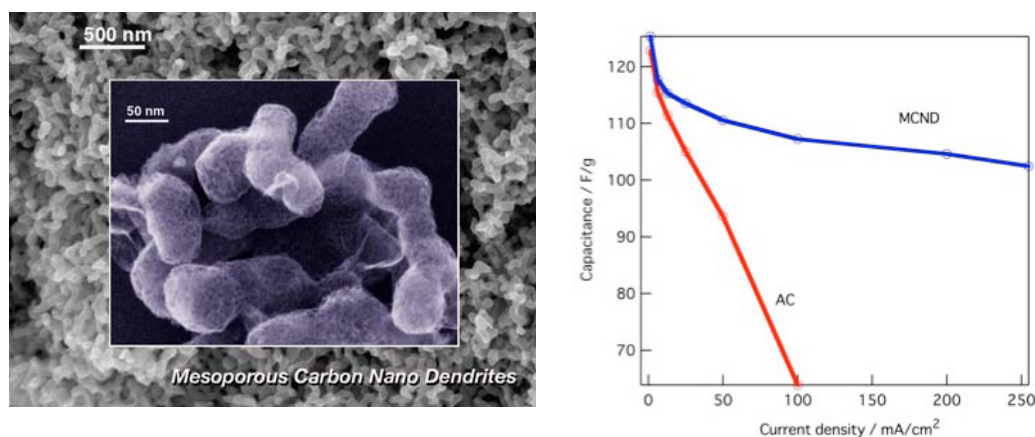
(5) ナノカラム化学空間

現在、マイクロチャンネルチップを用いた Total Analytical System (TAS) が、分析操作の省エネルギー化（グリーンケミストリー）やテーラーメイド医療の実現のために開発が進んでいる。しかし、真に分離能の飛躍的な改善が期待できるナノカラム創製のためには、現在のマイクロチャンネル作成技術の加工精度を 2 桁改善した流路の加工技術が要求される。分子の自己組織化を利用したボトムアップ的なナノカラム作成技術は、加工精度の改善に最適な手法であり、世界に先駆けて我が国が確立せねばならない。分子の自己組織化を利用して形成するナノチャンネル創製の例、とナノチャンネル内部での分離スキームを下図に示す。ナノチャンネル内部では、分子レベルでの分離スキームをコンピューターケミストリーにより戦略的に設計可能である。



(6) 高機能ナノセル型化学空間

メソ多孔性炭素ナノ樹状体のグラフェン壁で囲まれたセル空間に金属層を担持したリチウムイオン電池電極、電気伝導性とイオン流動性に優れたこのナノ樹状体を用いた大電力用スーパーキャパシタ、金属／炭素接合によって生じる電位勾配による分極吸着を可能にする水素吸蔵ナノセル集合体、セル内包に担持されたクラスター触媒列、10nm 毎交互に配列されたドナー／アクセプターカラムのスタッキング構造を持つ有機太陽電池などが考えられる。既にナノインプリンティング法で作成した太陽電池で変換効率が 5.3% を達成しているが、スケールを 1/10 にする事で効率を 20% 超とすることが目標である。下図（左）は、ナノセル空間を持つメソ多孔性炭素ナノ樹状体 (MCND) の SEM 写真である。下図（右）は、MCND キャパシタの電気容量が電流密度の上昇に対しても大きくは変化しないのに対して、従来の活性炭 (AC) は 50mA/cm² 以上では使えない事を示す。



(7) 三次元空間を利用した全固体型リチウム電池創成

未来の環境・エネルギー社会を構築するには空気抵抗や摩擦などによって失われているエネルギーを回収し、その場で使用することが可能な究極の電池として、三次元固体型リチウム電池を創成する（下図）。マイクロメーターの大きさの電極と電解質が三次元空間内で規則的に配列した構造を有している。また、この電池の中では固体電解質と固体活物質が接触し、電気化学的な反応界面を形成している。このような電池の作製には、材料化学、応用物理、界面分析、半導体プロセス技術、ナノインプリント技術、セラミックス化学、精密機械などの分野からの知識が必要となる。基本材料から製品までのすべて段階に

サイエンスとテクノロジーが必要となる。本提案では電池が唯一の出口なのであるが、その電池の応用先は、医療、環境、エネルギー、運輸、家庭電化製品と幅広い。

Three Dimensional Battery (TDB)

- 正極と負極をマイクロメートルサイズで作製し、これらを三次元空間内で規則的に配置した電池構造
- 正極と負極の距離を数マイクロメートルに

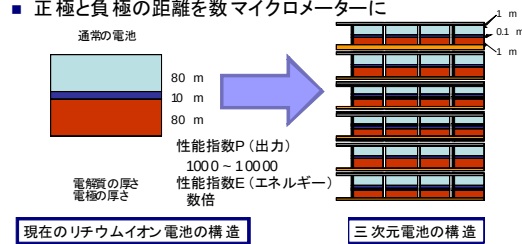
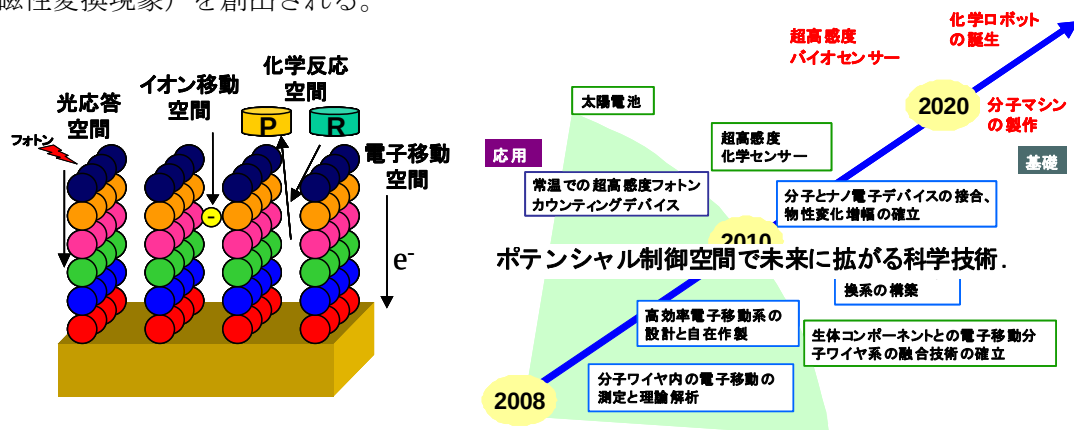


図2 三次元空間を利用した全固体型リチウムイオン電池の構造概念

(8) ポテンシャル制御空間（三次元分子ネットワーク界面）

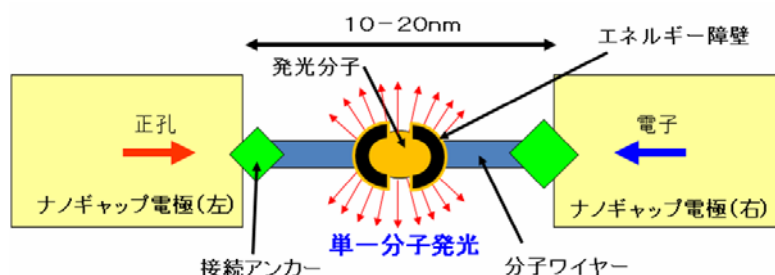
電子移動、化学変換、物性変換などを随意に行うことができる最適なポテンシャル場をもつ開放表面上の空間（ここでは「ポテンシャル制御空間」と定義する）を構築する。この研究は、世界に先駆けて日本でスタートしたものである。界面の三次元ポテンシャル場を原子、分子レベルで自在に制御できるようになると、次の事項により、大きな波及効果が生まれる。(1) 光・電子機能分子の合理的界面配列による電子移動制御空間の構築と理論解析により、ベクトル選択性を持つ高効率光電子移動系、プロトン共役電子移動系、高速変換の分子メモリ系など、分子素子の創製へつながる。(2) 精密に最適化された原子配置をもつ金属ナノ微粒子表面の球面上空間では、バルク金属表面では起こり得ない触媒反応が進行する場合があります、またナノ空間への電場、磁場、光子場の効果により、そこに内包された原子・分子の新しい電子状態、物性が出現する場合があります。そのようなナノ空間のポテンシャル場の制御によって新しく特異な化学現象（特に触媒反応）、物理現象（特に磁性変換現象）を創出される。



界面ポテンシャル分布の自在制御による新しい電子移動反応場の構築.

(9) 単一分子デバイス

分子ナノ工学において外部とのインターフェースとなるナノギャップ電極との「接続」はデバイスとしての成否を分ける生命線である。また、円滑なデバイス動作を保証するには、その化学空間の集積体システム化を果たす必要がある。エレクトロニクス、スピントロニクス、オプティクスなどに使うことができる有機ナノデバイスのコア部分となる単一有機超分子あるいは有機金属錯体を含む単一超分子のアセンブルによるデバイス実装、さらにこれに続くデバイス基本単位の集積体システム化の推進が必須である。



分子ナノオプティクスのための単一分子発光デバイスの概念例

(10) ナノ化学空間・機能相関と化学空間シミュレーター

本提案においては、化学空間を構築するための新規分子・材料を開発するとともに、これらの分子・材料において、化学空間で起こる分子の現象のうち特にバルクでの現象と異なり、ナノ化学空間特有の機能を発揮するものについて、図1に示すナノピラー構造のように、共通構造でありながら、太陽電池、フォトニック結晶、有害物質・微生物分離と異なる機能を発揮できるような化学空間の創製と、特定機能を発する条件（分子・材料、空間サイズ等）を明らかにし、化学空間シミュレーターを構築する。また、化学空間・機能相関を進めるためのナノ化学空間計測技術を開発する。本研究が進展すれば、様々な応用展開を目指して新規機能性ナノ材料開発を著しく加速することができる(図2)。

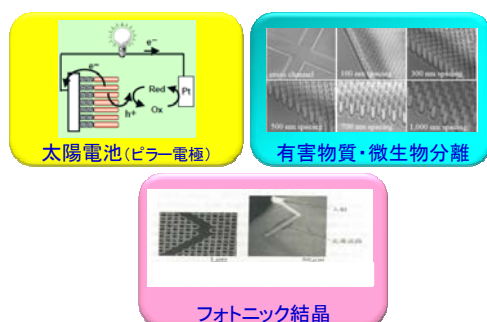


図1 異なる機能を有する共通ナノ構造の例

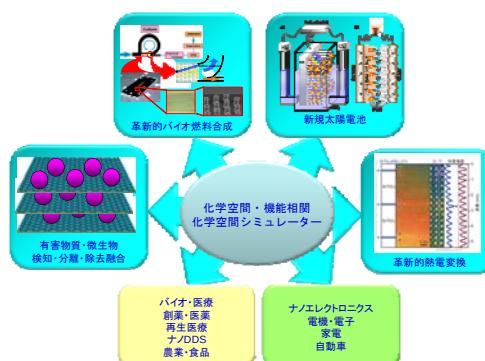
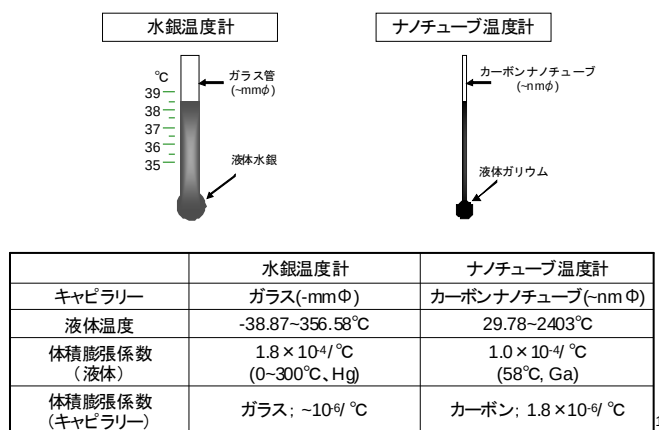


図2 環境・エネルギー分野等への波及効果

(11) ナノ化学空間での温度計測法の開発：液体金属を包含したナノチューブの利用技術

板東ら(物材機構)は液体金属を含んだカーボンナノチューブが「ナノ温度計」として利用でき、しかもミクロン以下の微小な空間での高温での温度計測に利用できることを世界で初めて実証した(Nature, 2002)。「世界で最小の温度計(smallest thermometer)」としてギネスレコードにも認定されている。しかし、ナノ温度計はいまだ実用化に至っていない。本研究は世界に先駆けてナノ温度計を開発し、その実用化を狙うものである。本研究で取り上げる「カーボンナノ温度計」はカーボンナノチューブの新しい応用分野を切り開くものとしてもまた重要である。ナノ温度計はナノ空間といった微小空間での温度測定を可能にすることから、化学反応の局所場の温度、微細な電子回路の故障に伴う温度異常の検出、病気による毛細血管内での温度異常の測定など、化学、エレクトロニクスやバイオなど、とりわけ、環境やエネルギー分野での新規なナノ温度計測法としての利用が高く、その学術的・産業応用的な波及効果は極めて大きい。



ナノチューブ温度計（ナノ温度計）と水温温度計の比較

(12) ナノ界面の単一分子化学

ナノ粒子、ナノロッド、ナノチューブ、ナノシートなど一次元又は二次元空間を有する機、有機、及びバイオナノ材料と異種材料との間で形成されるナノ界面における物質輸送、構造変化、及び化学反応プロセスを、世界最高水準の時間・空間分解能を有するマルチタスク単一分子顕微分光システムを用い、単一分子（粒子）レベルで明らかにするとともに、ナノ界面を活用した機能性ナノ複合材料を創出する。特に、不均一界面における分子の拡散、層間移動、自己組織化プロセス、化学反応ダイナミクスを時間・空間分解単一分子分光法を用いて直接観測することにより、不均一界面反応の学術的基盤を構築するとともに、次元制御ナノ空間を活用した物質変換プロセスの実現を目指す。さらに、ナノスケールで構造制御された無機、有機、及びバイオナノ複合材料を用いた高次集積化技術を確認し、光触媒などの環境浄化材料、光電変換デバイス、ナノ医療などナノバイオテクノロジーの分野への応用展開を試みる。単一分子蛍光分光法を用いた不均一ナノ界面の研究は、科学分野の最先端トピックスであり、バイオ分野での世界における日本の単一分子計測技術の

水準は非常に高く、これまで多くの成果が得られているが、分子論的な単一分子化学に関しては欧米の研究グループに大きく遅れを取っているのが現状である。

波及効果の例

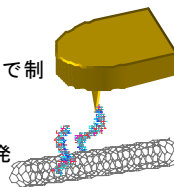
(1) 単一分子反応解析に基づく**ナノ化学反応チャネル**の開発



(化学プロセス・医療)

(2) 単一分子レベルで制御された**革新的ナノバイオ材料**の開発

(ナノテク・医療)



(3) 単一粒子レベルで制御された**ナノ環境機能触媒**の開発

(環境・ナノテク)



環境汚染物質

(13) ナノ化学空間戦略の基盤となる時空間分解解析法の開発と単一ナノ粒子触媒の創出
環境・エネルギー問題を解決するための放射光を用いた時空間分解 XAFS 解析法の開発を柱とするナノ化学空間の基盤的解析法の確立を行う。それにより、多くの研究者が多彩なナノ空間材料を時間軸と空間軸で解析することが可能になる。すなわち、Spring8 にナノ化学空間専用のビームラインを建設し、ナノ化学空間プロジェクトへの参画者、応募採択者が優先的に柔軟に使えるように環境整備を行う。

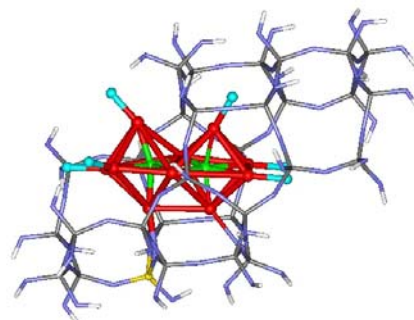
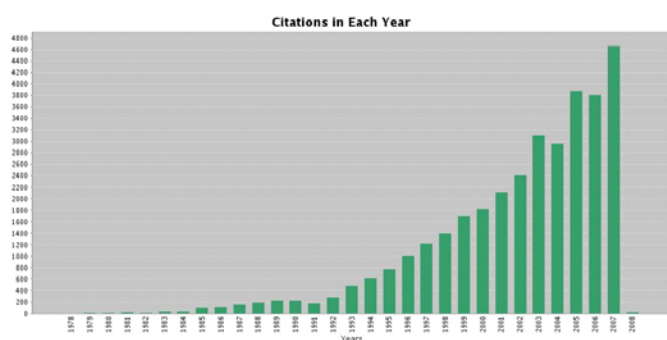
日本発の時空間分解XAFS法

時間分解: マイクロ秒ーピコ秒(単発触媒反応:世界最速)

空間分解: 2ナノメートル(世界最高)

深さ方向分解: サブナノメートル(世界初)

XAFSによる触媒研究の論文の引用数の経年変化



これにより、これまで重要ではあるが成果の出ていない究極のナノ触媒(100%収率、副生成物0%)や燃料電池触媒の開発のブレークスルーを得ることが可能である。最近の触媒の XAFS 研究論文の被引用数は上図(左)に示すように急激に増大している。XAFS からの構造情報が触媒研究に重要な位置を占めるようになってきていることを示す。しかし、我が国には戦略的な専用ビームラインは存在しない。今後の戦略的プロジェクトには大型の解析装置(放射光ビームライン)を建設し、化学、物理、生物など多くの分野の研究課題に資する環境整備をすることも必要である。

また、例えば濃硫酸等を用いて多段階で行うフェノール製造を1段階で直接合成するプロセスを実現する新型触媒（上図右）の開発は環境・エネルギー対策から極めて重要である。或いはPt代替の燃料電池触媒の開発は急務な社会的要請である。そのような夢の触媒には、時間軸と空間軸で触媒作用の機構を理解した触媒開発が必要であり、元素戦略に加え、表面設計、表面解析、分光計測などを通して新触媒・新反応が実現すると期待される。

3. 他分野との連携の具体

持続可能な社会を構築するための革新的科学技術であるST戦略はNT戦略、IT戦略、BT戦略と相乗的かつ相補的な関係にあり、特に、環境・エネルギー・資源の国家的課題の解決を保障する中核的科学と技術を提供する。STを牽引する「イノベティブ” ナノ化学空間”」プロジェクトの推進のために、化学、物理、生物、医学などの異分野間の境界融合領域に革新的ナノ空間材料の創出が期待される。具体的には次の連携策が有効である。

- (1) イノベティブナノ化学空間プロジェクトで採択された課題を物質、生命、環境をキーワードに分類し、文科省或いはJSTに置かれるコーディネーターが様々な研究フェーズにおいて採択課題どうしの連携・コラボ推進を図る。
- (2) イノベティブナノ化学空間プロジェクト推進に基盤的解析拠点（例えばSpring8に放射光時間空間分解ビームライン建設）、装置類を配置し、優先的に柔軟にそれらを使用する連携共同研究の仕組みを作る。
- (3) 従来にない革新的な物性・機能の創出を目指し、2段階フェーズでは、第1段階フェーズの成果・問題を受けて、連携・コラボを推進する課題を募集する。

4. 文科省、JSTがやるべき必要性

イノベティブナノ化学空間プロジェクトは、環境、エネルギー・資源分野でのブレークスルーを見据え、従来にない革新的な物性・機能の創出を目指し、かつ、新しい研究分野を創生すると同時に、急務であるST戦略を担う人材を育成する。ここでは化学、物理、生物学、工学など過去のテリトリーにこだわらず、それらの科学技術が基礎科学を中核に応用科学まで分野横断的に融合する必要がある。これまでの枠組みを超えた新たな知識や技術、新材料を産み出すことにより、日本が世界をリードする研究分野に発展するものと確信する。また、出口イメージを強く求める短期的な施策ではなく、長期的展望を踏まえた基礎研究の育成を使命とする政策として文科省、JSTの主導が不可欠である。トップダウン物質作製とボトムアップ物質作製の融合は、ある意味で目先の解決策である。真に革新的な物性・機能の創出は、市場原理や出口イメージのもとでは達成不可能であり、そのリード・しかけこそ国がやるべき課題である。本戦略は比較的若い研究領域を含み、従って、この領域は今後10年ぐらいの間に、基礎研究からイノベーションに繋がり、革新的空間材料創成と物性・機能の創出を迎えると予想される。文科省やJSTが重点的に支援すべき課題であり、またその時期である。