



精密サブナノ粒子の創製に関する研究

Studies on Precision Creation of Subnano-particles

数原子からおよそ数十原子が集積した1 nm前後のサブナノサイズ
の物質群は、118種類存在する元素と原子数の組み合わせが無制限であるため、多彩な機能をもつ未知の物質が存在するとして、ポストナノ材料として注目をされている。山元公寿氏はこの未踏のナノサイエンスに挑戦し、原子精度で原子を扱う科学技術を開拓、超原子や多元素合金サブナノ粒子と呼ばれる数多く新物質群を創製し、次世代材料に向けた新しい物質化学を拓いている。その原動力となっているアトムハイブリッドは同氏が独自に開発した「デンドリマー」という新しいタイプの高分子を鋳型として、原子数と元素組成を精密に制御してサブナノ粒子を創製する独自のサイエンスである。以下に同氏の業績を紹介する。

1. 精密金属集積法の確立

同氏は剛直で樹状の高分子(フェニルアゾメチンデンドリマー)を世界に先駆け30種類以上も独自に開発している。この高分子に配位サイトの塩基性勾配に従い放射状にしかも段階的に金属イオンが規則正しく集積される現象(多段階放射状錯形成)を世界で初めて発見した。元素周期表の118元素から放射性元素、猛毒元素、希ガス元素を除く、実用70元素のうちほぼすべての67元素の原子精度での集積を可能としている。さらにデンドリマー内部に250パターンを超える異種元素集積を達成しており、最大10元素の精密集積にも成功している。独自のデンドリマーによって、これまで困難とされた原子数と原子配合比の制御を可能として、種々の原子の精密な集積技術を実現している。

2. アトムハイブリッドによるサブナノ粒子の創製

デンドリマーのナノ空間を鋳型として利用する多元素自在集積により、原子組成を制御したサブナノサイズの多元素合金粒子をつくりだす手法(アトムハイブリッド法)を開発した。これまでに230種を超えるサブナノ粒子のライブラリー化を達成している。超原子や6元素を含むサブナノ多元素合金粒子、ポロフェン原子シートなどの数多くの新物質群を誕生させている。さらに、1つの合金サブナノ粒子内の金属配合比を自在に制御し、特定の原子配合比のみ、特殊な吸収と発光特性が発現することも見いだしている。アトムハイブリッド法が新たなサブナノ量子機能を構築する優れた手法であることを実証している。

3. サブナノ粒子の触媒への展開

原子精度のサブナノ粒子を触媒へ展開、1原子組成ごとの活性を明らかにして、バルク金属やナノ触媒の活性を遥かに凌駕するサブナノ

触媒を数多く発見している。例えば、酸素4電子還元の前Pt₁₉、アルカンの水素化の前Pt₁₀、インダンの空気酸化の前Pt₁₆Cu₃₂Au₁₂、水素酸化の前Pt₂₇Pd₂、ニトロ還元の前Rh₃₂Fe₂₈などの特異的な高い触媒活性を突き止め、高効率の物質変換を数多く達成している。1原子精度のサブナノ粒子を材料として扱うことができるようになったことは、学術的にも工業的にも大きな意義がある。

4. サブナノ粒子の理論展開

合成した数多くのサブナノ粒子のマテリアルライブラリーから、サブナノ粒子に周期律があることを発見した。これを新たなサブナノ物質の周期表として提案しており、物質科学界から注目をされている。この周期表の最も重要なことは、メンデレーエフの周期表と同じく未発見のサブナノ粒子や超原子を予測できることにあり、機能物質の設計指針を手にしたことにより学術的意義も極めて大きい。これを契機に、球対称の原子よりも高い対称性をもつ超縮退サブナノ粒子(Zn₂₀, Mg₂₀, Cd₂₀)が存在するという従来の常識を覆す理論的発見にも至っている。

5. 原子ダイナミクスの観測

同氏は低加速電圧6次球面収差補正STEMを用いてサブナノ粒子の金属原子の動き(原子ダイナミクス)を可視化する技術を開発している。サブナノ粒子が時々刻々と構造を変化させていくという、ナノやバルク固体にはない物質の状態(第4の状態)を目で見ることに成功している。さらに、AI(MTANN)と画像追尾解析を組み込んだ新たな観測法の開発により、1原子ごとの元素識別にも成功している。これにより、バルクでは通常相分離して均一な合金をつくらない金、銀、銅が、サブナノ領域ではAuAgCu三原子分子として存在することを世界で初めて明らかにした。さらにグラフェン上で数多くの異種原子の結合形成と開裂のダイナミクスの可視化も達成している。化学の根幹を成す結合の動的観測を可能としたことは、物質の本質に迫る新学理を拓く端緒を得たもので、学術的意義は極めて大きい。

以上のように、数多くのサブナノサイズの新物質群を誕生させて観測した山元氏の研究は、新しい材料化学のフロンティアを切り拓いたものである。アトムハイブリッドの概念、サブナノ粒子の周期表の提案、原子ダイナミクスの観測などの同氏の業績は極めて独創的で、物質の本質に迫る物質科学として、化学分野への貢献は極めて顕著である。よって同氏の業績は日本化学会賞に値するものと認められた。