

ナノチューブ状物質プロジェクト 事後評価報告書

<評価委員>

阿知波 洋次 委員長（東京都立大学 大学院理学研究科 教授）
篠原 久典 委員（名古屋大学 大学院理学研究科 教授）
斎藤 晋 委員（東京工業大学 大学院理工学研究科 教授）

平成 15 年 3 月 7 日、課題事後評価のための会合を科学技術振興事業団において開催。飯島澄男代表研究者が評価委員に対して、プロジェクトの最終事後報告を行った。

飯島代表研究者からの報告内容、当日配布された研究最終報告書をもとに、各評価委員が評価内容をまとめた。最後に評価委員間の調整を経て、本事後評価報告書は作成された。

1. はじめに

21 世紀の科学・技術の基盤をなす最重要研究分野として、ナノサイエンス／ナノテクノロジーは、先進各国で集中的な研究投資が行なわれている。そして、その研究対象の中心に、本プロジェクトの対象であるナノチューブ状物質がある。資源小国である我が国において、このナノチューブ状物質研究の重要性は、他の先進各国に比較して、さらに一段と大きなものがある。即ち、シリコンテクノロジーの終着点が現実のものとして見えてきた現在、カーボンナノチューブをはじめとするナノサイズ物質の量子効果を利用したナノエレクトロニクスが、今世紀の新テクノロジーの鍵となると考えられるからである。ナノエレクトロニクスと、それを支える基盤であるナノサイエンスは、我が国が先進国としてあり続けられるか否かの帰趨をも左右する研究領域とあって過言ではない。

一方、ナノチューブ状物質の中心をになうカーボンナノチューブの構成原子である炭素は、地球上に存在する元素のうち、もっとも豊富にある元素であり、同時にその原子間結合エネルギーはきわめて大きいことが知られている。したがって、炭素元素利用のナノ材料物質は、利用する化学元素の側面から見ても、21 世紀の戦略物質としてその将来性はきわめて重要なものに位置づけられる。炭素原子だけでできたチューブ状物質、カーボンナノチューブは当プロジェクトリーダーである飯島澄男氏によって発見され、同時に未来材料としての特質をすべて持ち備えている可能性が強く示唆されている新物質である。したがって、当プロジェクトの開始は正にこれ以上無い時節を得たものであったし、また、最終段階で報告された内容も研究成果自体はもちろんのこと、特許申請などの社会貢献においても大変に活発におこなわれ、全体として、きわめて成功したプロジェクト研究であると結論できる。具体的評価については以下のとおりである。

2. 研究の内容と評価

本プロジェクトの研究成果でまず評価すべきは、カーボンナノチューブ（CNT）の生成機構に関する研究であろう。CNTの研究は生成法の開発や応用の研究は大変に盛んであるが、最も重要なCNTの生成機構の研究は少ない。これは、CNTの生成機構の解明は困難であり、それよりもコストパフォーマンスの良い生成法や応用研究に研究者が向かうのが大きな原因と考えられる。本研究グループは、レーザー蒸発法を用いたCNT生成を種々のパラメーターを変化させることを試み、このテーマに正面から取り組み、生成機構に関する重要な知見を得た。これらは生成条件の検討と生成物の構造解析を丹念に行い、生成時の様子をナノ秒から数秒にわたって追跡することによって行われた。特に、重要な知見はレーザーが照射された後、1秒以内でCNTが生成することである。また、CNTの生成には金属触媒サイトの依存性が見られることも、今後のCNT生成にとって重要な指針となるであろう。

また、本プロジェクトで得られた最も大きな成果は、ハイブリッドカーボンナノチューブ（各種フラーレンを内包したカーボンナノチューブ、通称、ピーポット）の創製とその高分解能電子顕微鏡（HRTEM）観察と電子損失分光（EELS）による原子レベルでの観察と評価であろう。ピーポットは比較的簡単な方法（この方法は、名城大と都立大の研究グループによって見出された）によって合成されるが、その観察に大きな威力を示すのがHRTEMとその場観察EELSである。HRTEMは日本の飯島グループが、その場観察EELSはフランス側のColliexグループが得意とする観察手段であり、その共同研究が大変にうまく行われた。本プロジェクトは国際共同研究プロジェクトであるので、この点は極めて重要である。

ピーポットをHRTEMとEELSで観察すると、内包されているフラーレンや、あるいは金属内包フラーレンの場合は、内包された1個1個の金属原子を（室温でも）観察することが、本プロジェクトにより可能となった。これは、分子や原子の構造解析や元素の同定を究極のレベルまで行った初めての例と思われる。CNTプロジェクトを通じて、常にHRTEMやその場EELS装置の改良・開発を行う研究スタイルは、ナノテクノロジーの基礎研究としても重要であり、高く評価される。

ピーポットに関しては、ピーポットの熱処理からの2層CNTの創製も興味深い。2層CNTは気相化学蒸着（CVD）法で純度の高いものが最近合成されているが、ピーポットからの創製もナノチューブ内での特異な反応という観点から重要である。これら2層CNTの電子線回折とラマン分光の実験から、2層CNTは外側のチューブの電子状態が化学的・物理的な要因で変調されても、内側のチューブは影響を受けないことにより、2層はお互いに電子物性的に独立していることが明らかにされた。このような2層CNTを用いた応用開発研究が今後発展するであろう。

本プロジェクトでは、また、「カーボンナノホーン（CNH）」という新しいタイプのナノカーボンの発見も行われた。これは、強力な炭酸ガスレーザーを黒鉛に集光して、黒鉛を昇華する時に生成される。1枚のグラファイトシートからなるチューブが基本構成単位で、そ

れがほぼ放射状に集まり、中心で結合している。CNH は CNT と比較して、その構造は複雑で単一の構造を有しないため、詳細な構造研究は困難であるが、純度が高いことと金属触媒が不要なことなど CNT と比較して利点も多い。本研究グループは、これらの CNH の優位性を活かして、ガス吸着に注目し興味深い成果を得ている。CNH にあける穴のサイズを制御して、吸着するガス分子を分子サイズによって CNH 内部での吸着をふるいにかけることに成功している。特に、燃料電池の燃料としても使えるメタンを多量に吸着することから、今後の CNH の燃料電池等の応用・実用化が望まれる。

3. 研究成果の科学技術への貢献

既に述べたピーポット、ナノホーンなどは新しい材料物質として、また、電子材料、複合材料、燃料電池など実用応用展開の可能性を大きく開いた成果であり、科学技術における本研究プロジェクトの重要性は非常に大きなものがある。具体的社会貢献としての特許件数は、最終報告書に記されているように、30 件にもおよび、本プロジェクトとして十分その成果を示している。

4. 相手機関との共同研究実施状況

CNRS の Colliex 教授のグループとの共同研究の規模は大きくないが、実質的な実りある共同研究が実施された。この理由は、HRTEM が得意な日本側とその場観察 EELS が得意なフランス側の興味が、CNT やピーポットなどの極めてチャレンジングなナノカーボン物質の評価を通して、一致したことに尽きると思われる。その結果、Science 誌等に代表される最高級の論文が出版された。応用・実用化研究がマスコミで好んで取り上げられる CNT 研究の中で、基礎研究に基づいた本国際共同研究プロジェクトの占める役割とその研究成果は高く評価されるべきである。

本プロジェクトでは、CNT の生成の基礎科学から次世代産業応用までの広範囲に渡った研究が集中的に行われた。人的、予算的に恵まれたとは言え、今後のナノカーボン研究と開発に関する国際共同研究の一つのあり方を示していると思われる。

本研究プロジェクトは世界の CNT 研究をリードするものであり、この研究成果がもとになって CNT という他に類例をみないユニークなナノ物質が、今後のナノサイエンスとナノテクノロジー研究に大きな役割を果たすことを期待したい。