

平成23年度実施方針

電子・材料・ナノテクノロジー部

1. 件名：プログラム名：ナノテク・部材イノベーションプログラム
(大項目) 低炭素社会を実現する革新的カーボンナノチューブ複合材料開発プロジェクト

2. 根拠法

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第2号及び第3号

3. 背景及び目的・目標

日本で発見されたカーボンナノチューブ（以下、「CNT」という。）は、ナノメートルレベルの直径をもつ筒状の炭素からなる新規ナノ材料である。そのユニークな構造と物性から、発見以来種々の興味深い機能が見いだされ、ナノテクノロジーの中心的な存在となっている。

CNTはその構造から、多層CNT、単層CNTに大別される。多層CNTは、比較的生産が容易であることから、国内外において年数百トンレベルで生産され、電池、キャパシタ部材などで実用化への応用開発が推進されている。

一方、単層CNTは、多層CNTに比べ、軽量、高強度で高い柔軟性を持つ、電気や熱の伝導性が極めて高い、半導体となる等、多くの優れた特性を持つ。この単層CNTは、様々な分野の既存の素材と複合させることにより、従来にない機能や特徴を持つ新機能材料となることが期待できる。例えば軽量で放熱性の極めて高い材料、軽量・高強度構造材料、低消費電力の電子回路用材料などへの応用が想定される。しかしながら、このような複合材料の開発に必要な単層CNTの形状、物性の制御技術、分離精製技術等が確立しておらず、実用化を促進する上での隘路となっている。

本プロジェクトでは、国内技術が海外と比べて優位性をもっていながら、実用化に至っていない単層CNTに的を絞り、複合材料の開発に必要な形状、物性の制御、分離精製技術などの基盤技術の開発を行う。また、単層CNTの普及の上で必要な、CNT等のナノ材料の簡易自主安全管理等に関する技術の開発を併せて行う。これらの基盤技術の成果と、研究開発動向等を踏まえて、単層CNT複合材料の実用化に向けた開発を行う。

本プロジェクトは「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の一環として、単層CNT複合材料の開発を通じて、新たな成長産業の創出による経済成長及び低炭素社会実現への貢献を目指し、我が国産業の国際競争力の維持・強化に資することを目的として、本プロジェクトにおいては、以下の研究開発を実施する。

[委託事業] 基盤研究開発

研究開発項目① 「単層CNTの形状、物性等の制御・分離・評価技術の開発

中間目標（平成24年度）

単層CNT合成の単層CNT形状制御に関する各研究要素に対して、下記の目標を達成する。

1) 単層CNTの形状制御技術

単層CNT合成の単層CNT形状制御に関する各研究要素に対して、平成24年度までの達成を目指す具体的な目標は下記の通りである。

- ・直径：複合材料における導電性や力学特性等を制御するため、制御可能範囲1.0—3.0nm であつ制御分解能が0.2nm の直径制御性を達成する。ただし、半導体用途に用いることに適している直径範囲1.0—2.0nm に関しては、バンドギャップ等電気特性の均一性が重要となるため、ガウス分布を仮定した直径分布標準偏差（ σ ）を0.3nm 以内にする技術に関しても開発する。
- ・長さ：1 μ m 以下（信頼度80%）、1—10 μ m（信頼度70%）、100 μ m 以上1mm 以下（信頼度70%）の長さ制御を達成する。
- ・表面積：比表面積1000m²/g。
- ・結晶性：単層CNTのラマンスペクトルのG-band とD-band の強度比G/D が150 以上。
- ・純度：金属触媒含有率500ppm 以下。
- ・配向性：配向係数（無配向0、完全配向1）を、0.2 から0.8（分解能0.2）で制御する技術を開発する。
- ・集積状態：分散性が良好な単層CNTのために、合成後の制御密度範囲が0.02g/cm³ から0.06g/cm³ で精度が0.01g/cm³ の単層CNT集積状態を持つ試料の作製。

2) 単層CNT集合体の成形加工・配列化技術

a. 板状化技術の開発

平成24年度までに、サイズが40mm×40mm 以上の板状単層CNTを開発する。板状単層CNTは、長さ1mm 以上の単層CNTより構成され、純度99%以上、比表面積1000m²/g 以上、密度0.5g/cm³以上、配向度0.7 以上のいずれかの特性を有するものとする。

b. 配列化技術

平成24年度までに、下記の材料、技術を開発する。

- ・成形加工された板状単層CNTにおいて、位置精度5 μ m 以下、厚み精度200nm 以下の配列化技術を確立する。
- ・既存材料板状単層CNT複合材料において、位置精度5 μ m 以下、厚み精度200nm 以下の配列化技術を確立する。

3) 金属型及び半導体型の単層CNTを効率的に分離する技術

平成24年度までに、金属型及び半導体型の単層CNTを、純度95%以上、収

率 80%以上で、1g/日以上以上の処理能力で分離できる技術を確立する。また、得られた分離単層CNTの電気伝導性等に影響を与えることの少ない分離技術を確立する。

4) 単層CNTの精密計測評価技術

平成24年度までに、半導体及び金属単層CNTの直径及びカイラル指数を広範囲（直径0.7–1.6nm）にわたって、迅速に定量評価する手法及び測定システムを開発する。

また、単層CNTの金属・半導体特性を効率的に計測できる手法を開発する。

さらに、単層CNT集合体の機能と単層CNTの形状との関係を解明するために、単層CNT集合体の熱・電気・機械的特性・分散性と単層CNT集合体を構成する単層CNTの形状（直径・長さ・表面積・結晶性・純度・配向性・集積状態）の関連を評価する手法を確立する。

最終目標（平成26年度）

単層CNT合成の単層CNT形状制御に関する各研究要素に対して、下記の目標を達成する。

1) 単層CNTの形状制御技術

- ・直径：複合材料における導電性や力学特性等を制御するため、単層CNTにおいて制御可能範囲0.8–3.0nmでかつ制御分解能が0.1nmの直径制御性を達成する。ただし、半導体用途に用いることに適している直径範囲0.8–2.5nmに関しては、バンドギャップ等電気特性の均一性が重要となるため、ガウス分布を仮定した直径分布標準偏差(σ)を0.2nm以内にする技術に関しても開発する。
- ・長さ：各種用途に対応するために1 μ m以下（信頼度90%）、1–10 μ m（信頼度80%）、及び10 μ m以上5mm以下（信頼度80%）の長さ制御を達成する。ここでいう信頼度とは、各長さ範囲に入っている単層CNTの本数の全体に対する割合のことである。
- ・表面積：2000m²/g以上の比表面積を達成する。
- ・結晶性：単層CNTのラマンスペクトルのG-bandとD-bandの強度比G/D（グラファイト性の物質の結晶性を示す指標）が300以上を達成する。
- ・純度：金属触媒含有率200ppm以下を達成する。
- ・配向性：配向係数（無配向で0、完全配向で1）を、0から0.8（分解能0.1）で制御する技術を開発する。
- ・集積状態：成形加工性が良好な単層CNTのために、合成後の制御密度範囲が0.05g/cm³から0.1g/cm³で精度が0.01g/cm³の単層CNT集積状態を作成する。

また上記の合成制御技術を用途に応じて複数組み合わせ、形状と機能の関係に関する知見を活用し、高強度軽量複合材料、高導電でフレキシブル軽量の複合材

料、高熱伝導な複合材料等に最適な単層CNTを開発し、その連続合成の基盤技術を確立する。

2) 単層CNT集合体の成形加工・配列化技術

a. 板状化技術の開発

平成26年度までに、電子デバイス等を開発するのに十分な、サイズが200mm×200mm以上（または8インチウェハー相当）の板状単層CNTを開発する。板状単層CNTは、長さ1mm以上の単層CNTより構成され、純度99%以上、比表面積1000m²/g以上、密度0.5g/cm³以上、配向度0.7以上などの所望の用途に必要な特性を複数最適化されたものとする。

b. 配列化技術

平成26年度までに、下記の技術要素を開発する。

- ・成形加工された板状単層CNTにおいて、位置精度1μm以下、厚み精度50nm以下の配列化技術を確立する。
- ・単層CNTデバイス等の量産技術を開発するのに十分な、成形加工された複合化板状単層CNTにおいて、位置精度1μm以下、厚み精度100nm以下の配列化技術を確立する。

3) 金属型及び半導体型の単層CNTを効率的に分離する技術

平成26年度までに、金属型及び半導体型の単層CNTを、それぞれ分離純度95%以上、収率80%以上で、10g/日以上処理能力で分離できる技術を確立する。また単層CNTの金属及び半導体分離工程において、両者の濃度をオンラインでモニターする手法、及び生成物の純度を正確に評価する手法、分離されたそれぞれの単層CNTの実際の電気伝導性等を実証レベルで評価する技術を確立する。

4) 単層CNTの精密計測評価技術

平成26年度までに、単層CNTの構造評価技術として、直径及びカイラル指数評価技術に加え、長さ分布を広範囲（100nm－10μm）にわたって、迅速に評価する手法、更には、単層CNT中に含まれる吸着分子、原子空孔、転位及び不純物を検出する技術を開発する。

また、単層CNT集合体の機能と単層CNTの形状との関係、すなわち単層CNT集合体の熱・電気・機械的特性・分散性と単層CNT集合体を構成する単層CNTの形状（直径・長さ・比表面積・結晶性（構造欠陥量）・純度・配向性・集積状態）との関係を解明する。

研究開発項目② 「単層CNTを既存材料中に均一に分散する技術の開発」

中間目標（平成24年度）

1) 溶媒中に分散する技術の開発

平成24年度までに、単層CNTのラマン分光法で評価した単層CNTの結晶

性 (G-band と D-band の強度比 G/D) が分散前の状態よりも 10%以上劣化しない条件で、水や有機溶媒中に単層CNTを単分散させる技術を開発する。特に金属型・半導体型分離技術に適応するための分散液として一本一本孤立した状態で、収率 5%以上で分散する技術も確立する。

2) 単層CNT「網目」構造制御技術の開発

平成24年度までに、収率 50%以上で、1%から 15%の単層CNT重量充てん率を持ち、網目状かつ均一な単層CNTの分散複合材料を製造する技術を開発する。

3) 板状単層CNT複合材料の開発

平成24年度までに、板状単層CNTを既存材料と複合化する技術を開発し、特に、以下の特性を達成する。

- ・ 30 vol%以上、50 vol%以下の金属を含有する板状単層CNT・金属複合材料を開発する。
- ・ 微粒子が担持された板状単層CNT・微粒子複合材料を開発する。
- ・ 樹脂の3倍の力学強度を有する板状単層CNT・樹脂複合材料を開発する。

4) 樹脂・ゴムに分散する技術の開発

モデル物質となる樹脂・ゴム等に、熱伝導性、導電性等の物性が変化するのに十分な量の単層CNTを均一に分散する技術を開発する。特に導電性ゴムにおいて 80 S/cm を達成する。

5) 金属中に分散する技術の開発

熱伝導率 900W / mK 以上を得られるのに十分な量の単層CNTを金属中に均一に分散し、配向する技術を開発する。

6) 高分子系材料に分散する技術の開発

補強効果を発揮するのに必要な量として少なくとも高分子経済量に対して濃度 0.5%程度で単層CNTを紡糸に適する高分子系材料の溶液中に分散する技術を開発する。

最終目標 (平成26年度)

1) 溶媒中に分散する技術の開発

平成26年度までに、単層CNTのラマン分光法で評価した単層CNTの結晶性 (G-band と D-band の強度比 G/D) が分散前の状態よりも劣化しない条件で、水や有機溶媒中に単層CNTを単分散させる技術を開発する。特に金属型・半導体型分離技術に適応するための分散液として一本一本孤立した状態で、収率 50%以上で分散する技術も確立する。

2) 単層CNT「網目」構造制御技術の開発

平成26年度までに、収率90%以上で、20%の単層CNT重量充てん率を持ち、網目状かつ均一な単層CNTの分散複合材料を製造する技術を開発する。

3) 板状単層CNT複合材料の開発

平成26年度までに、板状単層CNTを既存材料と複合化する技術を開発し、特に、以下の特性を達成する。

- ・配線等に用いるのに十分な、板状単層CNTで10—5Ωcm台の体積(電気)抵抗率を有する、板状単層CNT・金属複合材料を開発する。
- ・直径0.02μm以下の微粒子が担持された板状単層CNT・微粒子複合材料を開発する。
- ・樹脂の5倍の力学強度を有する板状単層CNT・樹脂複合材料を開発する。

4) 樹脂・ゴムに分散する技術の開発

平成26年度までに、実際の用途展開を想定した樹脂・ゴム等に、熱伝導率を10倍以上、電気伝導率を10¹⁰(100億)倍以上改善するのに十分な量の単層CNTを樹脂・ゴム中に均一に分散する技術を確立する。特に導電性ゴムにおいて100S/cmを達成する。

5) 金属中に分散する技術の開発

平成26年度までに、熱伝導率1000W/mK以上(アルミニウムの約5倍、銅の約3倍となる)を得られるのに十分な量の単層CNTを金属中に均一に分散し、配向する技術を確立する。

6) 高分子系材料に分散する技術の開発

補強効果を発揮するのに十分な量として少なくとも高分子系材料に対して濃度1~5%程度で単層CNTを紡糸に適する高分子系材料溶液中に分散する技術を開発する。

研究開発項目③ 「ナノ材料簡易自主安全管理技術の確立」

中間目標(平成24年度)

1) 自主安全管理のためのCNT等ナノ材料の安価かつ簡便な評価手法の確立

- a. 動物実験に依存しないCNT等ナノ材料の有害性評価手法(簡易手法)を開発した上で、安価かつ簡便な自主安全性評価のために最低限必要な試験項目や試験系を設定し、評価手法を確立する。
- b. CNT等ナノ材料の実環境(製造から廃棄まで)におけるばく露を迅速かつ簡便に評価するための手法を確立する。

最終目標(平成26年度)

1) 自主安全管理のためのCNT等ナノ材料の安価かつ簡便な評価手法の確立

- a. 動物実験に依存しないCNT等ナノ材料の有害性評価手法（簡易手法）を開発した上で、安価かつ簡便な自主安全性評価のために最低限必要な試験項目や試験系を設定し、評価手法を確立する。
- b. CNT等ナノ材料の実環境（製造から廃棄まで）におけるばく露を迅速かつ簡便に評価するための手法を確立する。
- c. a. 及びb. を確立した上で、CNT等ナノ材料の安価かつ簡便な自主安全性評価手法を確立する。

2) CNT等ナノ材料の安価かつ簡便な自主安全管理手法の確立とケーススタディの実施

- d. c. の自主安全性評価手法に基づき、CNT等ナノ材料生産事業者の自主安全管理手法（一般手法）を確立する。
- e. 具体的なナノ材料に適用した安全性管理に関する事例（ケーススタディ）報告書を作成する。

3) 開発成果の活用

国際的な機関（OECD、ISO 等）の動向を的確に把握し、国際標準化に向けた取組みを行う。

[助成事業（助成率：1／2以内）]

研究開発項目④ 「高熱伝導率単層CNT複合金属材料の開発」

中間目標（平成24年度）

応用研究開発は、基盤研究開発の進捗、成果を踏まえ、平成23年度以降の適切な時期に開始する。中間目標は、開始時期にあらためて設定する。

最終目標（平成26年度）

高熱伝導率単層CNT金属複合材料を用いて、以下の性能を満たす放熱板を試作すること。

- ・大きさ：300mm×200mm 以上
- ・機械強度：単層CNTを含まないアルミニウム合金マトリックスの引張強度以上

研究開発項目⑤ 「導電性樹脂複合材料の開発」

中間目標（平成24年度）

応用研究開発は、基盤研究開発の進捗、成果を踏まえ、平成23年度以降の適切な時期に開始する。中間目標は、開始時期にあらためて設定する。

最終目標（平成26年度）

以下の性能を有する導電性樹脂複合材料を開発し、LIB集電体の材料として試料提

供を行う。

- ・比重 1.5（銅の約 1/6）以下
- ・導電率 10 S/cm 以上。
- ・フィルムに加工した場合は、100 μm 以下の厚さでの自己支持性を有する。

研究開発項目⑥ 「単層CNT透明導電膜の開発」

中間目標（平成24年度）

応用研究開発は、基盤研究開発の進捗、成果を踏まえ、平成23年度以降の適切な時期に開始する。中間目標は、開始時期にあらためて設定する。

最終目標（平成26年度）

表面抵抗、全光線透過率、機械的耐久性に関してITOと同程度以上となる性能を満たす透明導電膜を開発する。

（参考）現行ITOの標準的仕様

<タッチパネル用>

- ・表面抵抗 : 300-500 Ω / □
- ・全光線透過率 : 90%以上

<LCD用>

- ・表面抵抗 : 10 Ω / □
- ・全光線透過率 : 80%以上

4. 事業内容及び進捗（達成）状況

4. 1 平成22年度（委託）事業内容

本プロジェクトは、経済産業省が、企業、大学等の研究機関（委託先から再委託された研究開発実施者を含む）から公募によって研究開発実施者を選定し、共同研究契約等を締結する研究体を構築して、開始したものである。独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という。）は、平成23年1月に運営・管理を承継した。

4. 2 実績推移

	22年度
一般勘定（百万円）	0（NEDO） 1500（経済産業省）
特許出願件数（件）	1
論文発表数（報）	1
フォーラム等（件）	1

5. 事業内容

プロジェクトリーダーを設置し、以下の研究開発を実施する。実施体制については、別紙を参照のこと。

5. 1 平成23年度（委託）事業内容

（1）基盤研究開発〔委託事業〕

①単層CNTの形状、物性等の制御・分離・評価技術の開発

- ・単層CNTの大量供給開始を受けて、単層CNT形状制御、分離技術の開発を本格化する。
- ・並行して、中間目標を見据えた一定の品質の単層CNTを、企業、大学等の外部機関に対して試料提供を開始するための準備に着手する。
- ・形状や物性の制御された単層CNTについて実用化を検討するために必要な基礎特性（ポテンシャル）を評価し、結果に基づいて合成や分離の更なる向上にむけて技術開発へフィードバックする。
- ・さらに高度な単層CNT形状制御合成技術（炭酸ガスレーザー蒸発法）に関して量産技術構築に着手する。

②単層CNTを既存材料中に均一に分散する技術の開発

- ・水や有機溶媒、樹脂・ゴム、金属及び高分子系材料に単層CNTを均一に分散する技術の開発を本格化する。
- ・単層CNT表面と親和性の高い官能基を探索し、得られた知見を基礎としてモデル材料への単層CNT複合化に関する分散基盤構築、並びに工業生産を見据えたプロセス開発に着手する。

③ナノ材料簡易自主安全管理技術の確立

- ・自主安全管理のためのCNT等ナノ材料の安価かつ簡便な評価手法の確立に向けて、細胞（*in vitro*）試験のためのナノ材料の分散調製・測定技術の開発、簡便な作業環境濃度計測手法の開発に着手する。また、最低限必要な試験項目等の選定を開始する。
- ・細胞（*in vitro*）試験を実施し、得られた結果と生体内（*in vivo*）試験の妥当性評価（validation）手法の検証を行う。
- ・CNT等ナノ材料のライフサイクルに渡る安全性を確保するために、測定データを収集するとともに、暴露評価の手順を提案に着手する。

5. 2 平成23年度事業規模

一般勘定

576百万円（新規）

一般勘定（平成22年度補正予算額）

1,840百万円（継続・繰越）

事業規模については、変動があり得る。

6. その他重要事項

(1) 運営・管理

外部有識者を含む技術委員会を設置し、本プロジェクトの成果物の評価や、事業進捗の確認をする。また、応用研究開発の開始時期についても事業進捗を踏まえて検討する。

(2) 複数年度契約の実施

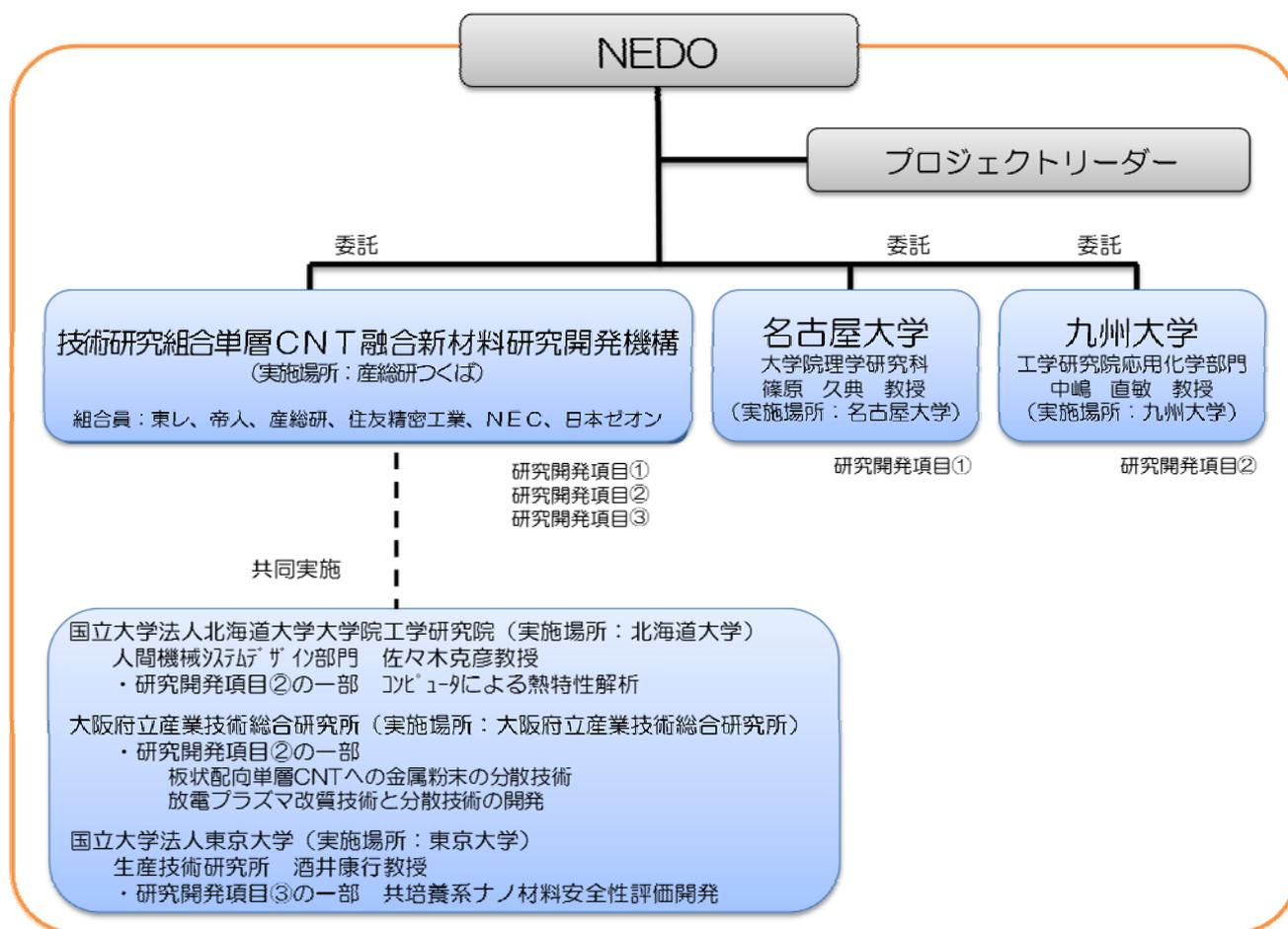
平成 22 年度～24 年度の複数年度契約を行う。

(3) その他

本研究によって得られたあらゆる知的財産、また本研究の過程又は成果に基づき開発したプログラム、サンプル若しくは装置などの成果物について、本プロジェクト外（国内外）への供試・開示については、事前に研究開発責任者と NEDO に連絡する。その際に、NEDO が申請書の提出を求めた場合は、これに応じ速やかに提出する。

7. 実施方針の改定履歴

(1) 平成 23 年 3 月、制定



- 研究開発項目① : 単層CNTの形状、物性等の制御・分離・評価技術の開発
- 研究開発項目② : 単層CNTを既存材料中に均一に分散する技術の開発
- 研究開発項目③ : ナノ材料簡易自主安全管理技術の確立