


エネルギー科学展開に向けた量子熱光物性の基盤構築

	研究代表者	京都大学・エネルギー理工学研究所・教授 宮内 雄平（みやうち ゆうへい）	研究者番号：10451791
	研究課題情報	課題番号：24H00044 キーワード：ナノ物質、カーボンナノチューブ、励起子、熱放射、エネルギー変換	研究期間：2024年度～2028年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

カーボンナノチューブは、髪の毛の10万分の1程度の直径を持つ炭素でできた円筒状のナノ物質である。円筒の直径や炭素原子の並び方向が異なると全く異なる性質を示す。私たちはこれまでに、半導体の性質を持つカーボンナノチューブが、高温の熱エネルギーを近赤外光に変換する特異な量子物性を持つことを報告し、それを太陽光や高温の熱から高効率に電気を作る熱光発電技術に応用できると考え、材料物性と光学特性に関する基礎研究を進めてきた。この物質では、その極端な細さのため、物質が光や熱のエネルギーを吸収した際に生成される負電荷（電子）と正電荷（正孔）の間に働く電気的な力が非常に強く、1000 K以上の高温でも、電子と正孔が互いに引き付けあって結びついた「励起子」と呼ばれる中性の量子状態が安定に形成され、熱を波長（エネルギー）のよく定まった近赤外光に変換する媒体となる。この量子物性を高温で熱を光に変換する技術へと応用できると、熱光発電技術の高効率化に大きく寄与すると期待される。そこで本研究では、カーボンナノチューブ、および類縁ナノ物質系を対象として、これらのナノ物質の集積材料の耐熱性をこれまでの限界を超えて大きく向上させるとともに、これまで未開拓の高温および光照射下（非平衡状態）の量子熱光物性を取り扱う基礎学術基盤を整備し、高温エネルギー科学展開への扉を開く。

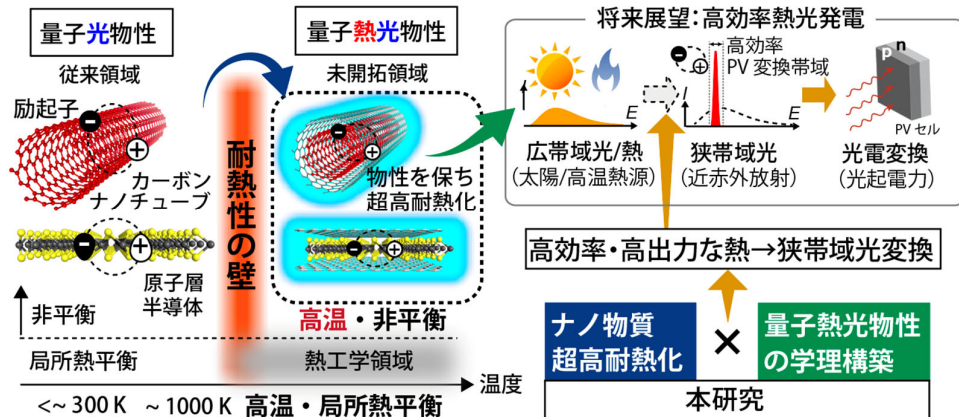


図1 本研究の概要

●研究の背景と目的

励起子は、固体中に励起された電子と正孔がクーロン力により相互に束縛しあうことで形成される、水素原子に似た構造を持つ複合準粒子である。私たちはこれまで、カーボンナノチューブをはじめとするナノ物質の励起子物性に関して、特にその熱的側面に着目して研究を進めてきた。その中で、1000 K以上の超高温域で見られる特徴的な熱光物性として、真空中で高温に加熱された単一のカーボンナノチューブにおいて、熱から励起子が生成し、「原子的な」励起子エネルギーの離散性を反映した「輝線的な」狭帯域（エネルギーのよく定まった）熱放射（図2）が生じることを見出している。このような「熱をエネルギーの決まった光に変える量子物性」は、将来の高効率固体熱発電技術として期待される熱光起電力発電を、従来の限界を超えて高効率化していくために必要な「光子エネルギー選択放射素子」への応用に有望と考えられる。

私たちは近年、カーボンナノチューブを、光子エネルギー選択放射素子材料として応用するための基礎研究を推進してきた。その中で最近、マクロスケールの素子として応用するためにナノチューブを集積して束とすると、一本だけの場合と比べて、材料自体と励起子の両方の熱安定性が低下してしまうことがわかってきた。一方、理論的には、このような「耐熱性の壁」を超えた、1000 K以上の高温の光照射下では、従来の限界を超える高効率な熱光エネルギー変換ができる可能性が示されている。

そこで本研究では、カーボンナノチューブや、高温で安定な励起子物性を持つ類縁ナノ物質系に焦点をあて、従来の耐熱性の壁を克服し、これまで未開拓であった高温領域の熱光物性を理解して活用するための学術基盤を材料と物性の両面から整備する。これにより、ナノ物質の量子物性科学の成果を活用できる温度領域の限界を、従来よりもはるかに高温へと拡張し、過酷な高温環境での動作を必要とする熱と光のエネルギー科学技術における、ナノ物質の量子物性利活用への扉を開くことを目指す。

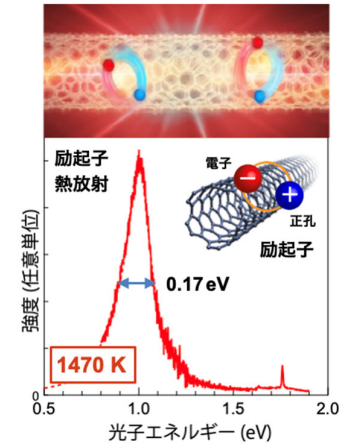


図2 熱励起子のイメージ図と狭帯域励起子熱放射スペクトル

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

量子熱光物性の学術基盤を築くため、主として以下の3項目の研究を行う。これらの研究により、従来の高温エネルギー科学の学術的・技術的枠組みの外から、将来のエネルギー変換技術のイノベーションにつながる新原理と新材料を創出することを目指す。

●ナノ物質の超高耐熱化技術の開発

集積状態でも個々のカーボンナノチューブ同士の相互作用を孤立に近い状態に保ち、励起子と物質自体の高温安定性を担保する優れた表面バリア層形成技術を確立し、高温で顕著な量子物性を利用可能な超高耐熱集積ナノ材料を実現する（図3）。

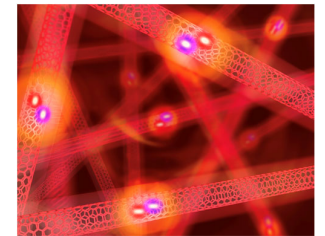


図3 超高耐熱集積ナノ材料のイメージ

●励起子熱光変換特性を支配する物理の解明

超高温までの熱光物性測定を通じて、高温および光照射下の励起子熱光変換特性を支配する物理を明らかにする。そのための新たな実験と解析の手法も確立する。

●類縁ナノ物質系の新しい励起子熱光物性の探究

カーボンナノチューブ類縁物質系（原子層半導体など）における励起子熱光物性を明らかにし、物質の相違がもたらす熱光物性の違いを体系的に明らかにすることで、学理を深化するとともに、さらなる応用上の可能性を探索する。

本研究の推進により、基礎科学の発展に加え、将来の社会を支える様々なエネルギー科学技術への波及効果も期待される（図4）。



図4 本研究の範囲とその後の展開

