

## 2. ナノテクノロジー・材料分野

### 2. 1 ナノテクノロジー・材料分野の概要

ナノテクノロジー・材料分野は物理学、化学、生物学を横断し、原子分子レベルでの観測や構造形成・機能発現などを通して、物質科学や材料技術、デバイス技術などを進展させ、さらには異分野の融合を促進しつつ進化する技術分野である。このため、新しい科学技術や新たな産業の創出のみならず、グローバルな課題の解決あるいは社会的期待に迅速に応える課題解決型研究を支える科学技術基盤の一つとして位置づけられる。CRDS では、ナノテクノロジー・材料分野における世界各国の国家計画、投資戦略、研究ポテンシャル、技術進化、企業化動向、重要な研究開発領域を含む当該分野全体の俯瞰の結果を記載した「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2015年）」（以下では、俯瞰報告書 2015 とする）を 2015 年 4 月に発行した<sup>1)</sup>。

現在、CRDS ナノテクノロジー・材料ユニットは、2016 年度末に発行予定の俯瞰報告書 2017 作成に当たり、俯瞰報告書 2015 発行以降の国内外の研究動向・政策動向の進捗や状況を踏まえた当該分野の俯瞰を充実させているところである。特に、AI 技術に代表される ICT 分野の進展は著しく、多くの産業的な応用への期待が高まっている。これをハードウェアとして支えているナノテクノロジー・材料がどのような可能性を提示できるのかは注目に値する。また、新たな科学技術や産業を創出するナノテクノロジー・材料の科学技術基盤の強化、ナノテクノロジー・材料分野が産み出す社会・経済的価値の顕在化といった視点でも、当該分野の俯瞰を強化している。

本報告書では、俯瞰報告書 2015 では詳述していないものの、最近 1~2 年間での国内外の研究開発上の大きな進展や変化、または政策上の動向として CRDS が注目した下記 4 テーマについて記載したものである。

- ① 超高压下における硫化水素の超伝導状態（転移温度 203K）の発現
- ② ナノバイオ・ナノメディシン領域におけるナノワイヤ応用研究
- ③ 量子コンピュータで大幅に演算を高速化できることを実証
- ④ 米国家ナノテクノロジー・イニシアティブの動向

①~③は、俯瞰報告書 2015 における俯瞰区分「社会インフラ」「健康・医療」「情報通信・エレクトロニクス」に関連するテーマであり、欧米を中心に近年急速に研究開発競争が激化している領域である。また④に関しては、これまでナノテクノロジーを牽引してきた米国における政策上の重要な動きである。

以下、本報告書において取り上げた 4 つのテーマの概略を示す。

- ① 超高压下における硫化水素の超伝導状態（転移温度 203K）の発現

ドイツのマックスプランク化学研究所のグループにより、硫化水素が 150GPa という超高压下で転移温度 203K の超伝導状態を発現することが報告された（2015 年）。このことは、極限条件下とはいえ、量子効果の制御による、室温超伝導の実現可能性を示唆する報告であ

る。銅酸化物超伝導、鉄系超伝導に続く第3の超伝導ブームに通じる可能性があり、ナノテクノロジー・材料分野における重大な発見であることから、本報告書に記載する研究開発上のトピックスとして取り上げた。

#### ② ナノバイオ・ナノメディシン領域におけるナノワイヤ応用研究

2000年以降、化合物半導体ナノワイヤを用いたバイオセンシングに関する研究開発が進展したが、最近、細胞や生体分子と適合性の高い酸化物ナノワイヤや、kinked ナノワイヤと呼ばれる枝分かれした3次元ナノワイヤなどの新しいナノワイヤ構造が開発されている。特に、がん細胞の分離、DNA、RNA、タンパク質の高速解析、細胞内イメージングなどへの応用研究が進展している。ナノテクノロジーとライフサイエンスを繋ぐナノバイオ分野における研究開発上の重要な動向であるため、研究開発上のトピックスとして取り上げた。

#### ③ 量子コンピュータで大幅に演算を高速化できることを実証

カナダ D-wave 社が世界初の市販量子コンピュータを開発して以降、欧米を中心に量子コンピュータの研究開発競争が激化している。量子コンピュータは、従来のコンピュータでは有意の時間に解けない組合せ最適化問題などを瞬時に計算でき、機械学習やディープラーニングの超高速化、新薬・新物質開発、ロボティクスなどへの応用が期待されている。本分野の動向は、安全保障の観点でも世界的に注目される重要事項でもあるため、研究開発上のトピックスとして取り上げた。

#### ④ 米国家ナノテクノロジー・イニシアティブの動向

クリントン政権下の2001年から15年間にわたり実行されてきた国家ナノテクノロジー・イニシアティブ（National Nanotechnology Initiative: NNI）に関し、PCAST（大統領科学技術諮問会議）において総括報告がおこなわれた（2015年）。NNIのもと実施された研究開発成果を商業化していくために、NNIを取り巻く環境を再び活気あるものにすることが課題であるとしている。また、NNIにおける主要プログラムの一つ、ナノテクノロジー研究インフラ共用ネットワーク（NNIN）が終了し、後継プロジェクトとして National Nanotechnology Coordinated Infrastructure（NNCI）が開始された（2015年）。世界におけるナノテクノロジー政策の重要な動向の一つとして取り上げた。

#### 参考資料

- 1) 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）、「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2015年）」（CRDS-FY2015-FR-05）、2015年4月、<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FR/CRDS-FY2015-FR-05.pdf>

## 2. 2 超高压下における硫化水素の超伝導状態（転移温度 203K）の発現

### (1) テーマ名

超高压下における硫化水素の超伝導状態（転移温度 203K）の発現

### (2) 概要

ドイツのマックスプランク化学研究所の A. P. Drozdov, M. I. Erements らは、約 150GPa（約 150 万気圧）の超高压下で硫化水素が転移温度 203K（ $-70^{\circ}\text{C}$ ）の超伝導状態になることを発見し、Nature 誌 2015 年 9 月 3 日号で報告した<sup>1)</sup>。これは過去最高の超伝導転移温度であり、超伝導発現機構が BCS 理論で解釈可能なことから、クーパー対の更なる理解や室温超伝導体を含む新しい高温超伝導体の発見につながる可能性を持つ、画期的な発見である。

### (3) 国内外における研究開発の動向

[背景とこれまでの取組]

1911年に H. K. Onnes が水銀 (Hg) における超伝導状態を発見<sup>2)</sup>して以降、この100年の間に次々と超伝導物質が見つかり、その転移温度も上昇している。1957年の J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer による BCS 理論<sup>3)</sup>は、2つの伝導電子が電子格子相互作用によってペア（クーパーペア）を形成し秩序化するというモデルで超伝導の本質を見事に説明することに成功した。しかし、BCS 理論の枠組みでは転移温度は 40K（ $-233^{\circ}\text{C}$ ）を超えないという予測（BCS の壁）もなされた。そのような中、1986年の J. G. Bednorz, K. A. Müller によって発見された銅酸化物高温超伝導体は当時のどの超伝導体よりも高い転移温度（30K）を示した<sup>4)</sup>。数ヵ月後には同じ銅酸化物である  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  で BCS の壁を越える転移温度 90K が観測され、世界中で銅酸化物高温超伝導フィーバーが巻き起こった。現在の銅酸化物高温超伝導体でもっとも高い転移温度を示すものは、産業技術総合研究所の竹下らによって観測された  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  の 153K とされている<sup>5)</sup>。

一般に超伝導状態は強い磁場によって壊されるため、鉄やニッケルなどの磁性を持った元素を含む化合物では超伝導は示さないことが常識となっていた。ところが、2008年に東京工業大学の神原、細野らが発見した転移温度 26K の鉄系超伝導体 ( $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ) によってその常識は覆された<sup>6)</sup>。その3ヵ月後には銅酸化物以外で初めて転移温度が 50K を越える鉄系超伝導体が発見されるなど、2度目の超伝導フィーバーが巻き起こり、鉄系で現在もっとも高い転移温度は C. Wang らにより発見された  $\text{Gd}_{1-x}\text{Th}_x\text{FeAsO}$  が示す 56K とされている<sup>7)</sup>。

銅酸化物高温超伝導、鉄系超伝導ともその超伝導発現機構は BCS 理論で説明することができない非従来型の超伝導体であり、室温超伝導体の実現を期待するものであったが、現時点では転移温度は室温（300K）にはほど遠い状況である。

より高い転移温度を持つ高温超伝導の実現に向けては、永らく金属水素がその有力候補であることが N. W. Ashcroft によって理論予測されていたが<sup>8)</sup>、それには 400GPa の超高压力が必要であったため実現は不可能であると考えられていた。その後、より低い圧力で水素を多く含む水素化合物が超伝導を示すことも理論予測された<sup>9)</sup>。理論計算においては 200K を超える転移温度を持つ水素化合物の超伝導体の提案がなされたものの<sup>10)</sup>、実験においては圧力下の  $\text{SiH}_4$  が示す

17Kに留まっていた<sup>11)</sup>。また、極限環境という観点では、ロシア科学アカデミーのE. A. Ekimov, V. A. Sidorovらが2004年に高压高温下（約10万気圧、2500～2800K）で超伝導ダイヤモンドの合成に成功しているが、転移温度は4Kであった<sup>12)</sup>。

このような背景の中、ドイツのマックスプランク化学研究所のM. I. Eremetsらは160GPaの圧力下で転移温度80Kの超伝導状態を示すと理論予測されていた硫化水素に注目し実験を行ったところ、150GPaの高压下において転移温度203Kの超伝導状態が発現することを発見し、Nature誌に報告した<sup>1)</sup>。報告後、この超伝導体の構造探索に関する理論的研究が行われ、硫化水素が圧力印加によって $3\text{H}_2\text{S} \rightarrow 2\text{H}_3\text{S} + \text{S}$ の分子解離を起こし、硫黄原子がbcc構造を形成することで200K程度の超伝導転移温度を持つことがわかった<sup>13),14),15)</sup>。また、大阪大学の榮永、清水らによって、硫化水素( $\text{H}_2\text{S}$ )が高压下においてはbcc構造の $\text{H}_3\text{S}$ と $\beta\text{-Po}$ 構造の単体硫黄との混合物であることが実験的にも確認されている<sup>16)</sup>。

#### [意義]

N. W. Ashcroftによって理論予測された金属水素または水素化物の超伝導状態を実現するためには、水素の1s軌道電子が伝導を担うことが重要である。しかし、通常、水素は他の原子と結びつくときには電子を失ってプロトン( $\text{H}^+$ )になるか、電子を供与されてヒドリド( $\text{H}^-$ )になるかのいずれかであり、水素の1s軌道電子が伝導を担うことはそう簡単なことではない。今回の硫化水素においては、水素の1s軌道とエネルギー的に近い硫黄の3d軌道が超高压技術によって共有結合を形成したことで、水素の1s軌道電子が伝導を担い、超伝導が発現したのではないかと考えられている<sup>17)</sup>。さらに興味深い点として、超高压下の硫化水素の状態密度を見てみると、フェルミ準位に水素の1s軌道電子だけではなく、硫黄の3d軌道電子の寄与があり<sup>18)</sup>、水素の1s軌道電子に加えて、硫黄の3d軌道電子が活性化されたことが高い転移温度で超伝導を発現したことに関係しているのではないかと考えられている。

#### [今後必要となる取組み]

硫化水素における超伝導発現は、他の水素化合物においても圧力下で高い転移温度を持つ超伝導体が存在する可能性を示唆している。実際に、ごく最近M. I. Eremetsらのグループでは、リン化水素( $\text{PH}_3$ )が約200GPaで100K級の超伝導状態を示すことが発見されている<sup>19)</sup>。今後は硫化水素以外の水素リッチな化合物における超伝導探索を活発化させ、高压下で硫化水素を超える転移温度を持つ超伝導体の発見や、そのメカニズムの解明によって、常圧下における室温超伝導体の設計指針の構築を進めていくことが期待される。

### (4) 科学技術的・政策的課題

硫化水素の超伝導発現は、極限条件下とはいえ、量子効果をうまく制御すれば室温超伝導の実現が夢ではなくなっていることを予見するものである。この超伝導の発現機構は今後更に解明されていくと考えられるが、上述のように、従来は伝導に寄与していなかった水素1s軌道電子および硫黄3d軌道電子が伝導を担っている点の特徴である。つまり、他の物質においてもこれまで伝導に寄与していないと考えられてきた電子や軌道を活性化させることができれば室温超伝導の可能性がより高まると考えられる。そのためには、超高压科学だけで

なく、計測技術や第一原理計算などの理論計算・シミュレーション技術の更なる進化が必要である。

本分野における日本の強みの一つは、100GPa を超える超高压下でも結晶構造解析が可能な大型放射光設備 Spring-8 が存在する点である。また、大阪大学では温度・圧力・磁場を制御した複合極限条件を生み出すための装置を所有し、それらを複数組み合わせることによって複合的な極限条件下における物性測定が可能である点も強みである。一方、100GPa 級の超高压を扱える物理の研究者層が薄い点は弱みである。超高压科学は、既に地球科学分野でかなり発達してきたが、その中に物性物理や合成化学の研究者が積極的に参入し、高压科学に関する新しい研究領域を生み出すことや、その知見をもとに、常圧で実現する新物質の設計へとつなげることが重要である。

#### (5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

JSPS 科学研究費助成事業 (特別推進研究)「超高压力下の新物質科学：メガバールケミストリーの開拓」(研究代表者：清水克哉、H26～H30) では、超高压科学における究極の目標である固体金属水素と超伝導状態の実現を目指している。硫化水素の超伝導発見以降、新たに硫化水素を出発物質とした水素化合物の超伝導探索が研究項目として追加されている。

#### (6) キーワード

硫化水素、超伝導、BCS 理論、超高压科学、第一原理計算

#### (7) 参考資料

- 1) A. P. Drozdov, et al., “Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system”, *Nature* 525, (2015): 73.
- 2) H. K. Onnes, “Experiments on the possible influence of contact with an ordinary conductor upon the superconductivity of mercury”, *Akad. Van Wetenschappen (Amsterdam)* 14, (1911): 113.
- 3) J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, “Theory of superconductivity”, *Phys. Rev.* 108, (1957): 1175.
- 4) J. G. Bednortz and K. A. Müller, “Possible high  $T_c$  superconductivity in the Ba-La-Cu-O system”, *Z. Physik B* 64, (1986): 189.
- 5) N. Takeshita, et al., “Zero Resistivity above 150K in  $\text{HBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  at High Pressure”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, (2013): 023711.
- 6) Y. Kamihara, et al., “Iron-Based Layered Superconductor  $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$  ( $x=0.05-0.12$ ) with  $T_c=26\text{K}$ ”, *J. Am. Chem. Soc.* 130, (2008): 3296.
- 7) C. Wang, et al., “Thorium-doping-induced superconductivity up to 56K in  $\text{Gd}_{1-x}\text{Th}_x\text{FeAsO}$ ”, *Europhys. Lett.* 83, (2008): 67006.
- 8) N. W. Ashcroft, “Metallic Hydrogen: A High-Temperature Superconductor?”, *Phys. Rev. Lett.* 21, (1968): 1748.
- 9) Y. Wang and Y. Ma, “Perspective: Crystal structure prediction at high pressure”, *J.*

- Chem. Phys.* 140, (2014): 040901.
- 10) M. I. Erements, et al., “Superconductivity in Hydrogen Dominant Materials: Silane”, *Science* 319, (2008): 1506.
  - 11) N. W. Ashcroft, “Hydrogen Dominant Metallic Alloys: High-Temperature Superconductors?”, *Phys. Rev. Lett.* 92, (2014): 187002.
  - 12) E. A. Ekimov, et al., “Superconductivity in diamond”, *Nature* 428, (2004): 542.
  - 13) D. Duan, et al., “Pressure-induced decomposition of solid hydrogen sulfide”, *Phys. Rev. B* 91, (2015): 180502.
  - 14) I. Errea, et al., “High-Pressure Hydrogen Sulfide from First Principles: A Strongly-Anharmonic Phonon-Mediated Superconductor”, *Phys. Rev. Lett.* 114, (2015): 157004.
  - 15) R. Akashi, M. Kawamura and S. Tsuneyuki, “First-principles study of the pressure and crystal-structure dependences of the superconducting transition temperature in compressed sulfur hydrides”, *Phys. Rev. B* 91, (2015): 224513.
  - 16) M. Einaga, et al., “Crystal Structure of 200 K-Superconducting Phase of Sulfur Hydride System”, Preprint: <http://arxiv.org/abs/1509.03156> (2016年3月16日アクセス)
  - 17) 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター,  
“俯瞰ワークショップ報告書「ナノテクノロジー・材料分野 領域別分科会「材料設計・制御 ～物質科学の未来戦略（物性物理の観点から）～」”,  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/WR/CRDS-FY2015-WR-11.pdf> (2016年3月31日アクセス)
  - 18) D. A. Papaconstantopoulos, et al., “Cubic around 200 GPa: An atomic hydrogen superconductor stabilized by sulfur”, *Phys. Rev. B* 91, (2015): 184511.
  - 19) P. A. Drozdov, M. I. Erements and I. A. Troyan, “Superconductivity above 100K in PH<sub>3</sub> at high pressures”, Preprint: <http://arxiv.org/abs/1508.06224> (2016年3月16日アクセス)

## 2. 3 ナノバイオ・ナノメディシン領域におけるナノワイヤ応用研究

### (1) テーマ名

ナノバイオ・ナノメディシン領域におけるナノワイヤ応用研究

### (2) 概要

ナノワイヤをバイオセンシングに応用する研究は、2000年以降、主として化合物半導体ナノワイヤを用いて進められてきた。最近、細胞や生体分子と適合性の高い酸化物ナノワイヤが開発されたこと、また、kinked ナノワイヤと呼ばれる折れ曲がったナノワイヤや、枝分かれ構造を有する3次元ナノワイヤなど新たな構造をもつナノワイヤの作成が可能になったことにより、バイオや医療領域への応用研究が進展している。特に、従来のバイオセンシングのみならず、がん細胞の分離や、DNA、RNA、タンパク質の高速解析、細胞内のイメージング等の分野への応用研究が活発化している。

### (3) 国内外における研究開発の動向

[背景と意義]

低次元ナノ構造のうち、ナノ粒子や量子ドットなどの0次元ナノ構造やグラフェンなどの2次元ナノ構造については、構造に起因する量子効果などを利用した特異的機能を有する新規ナノ材料が開発されている。量子ドットによるがん組織や幹細胞のイメージングをはじめとして、低次元ナノ構造のバイオ・医療分野への応用が進んでいる。コーネル大学のWiesnerらはMemorial Sloan Kettering Cancer Centerと共同で、シリカナノ粒子による皮膚がんのイメージングについて、米国FDAのInvestigational New Drug (IND: 新薬臨床試験開始届) 承認に基づいて、臨床研究 (first-in-human) を進めている<sup>1),2),3)</sup>。また、名古屋大学の馬場らは、カドミウムフリーの低毒性量子ドットを開発し、京都大学iPS細胞研究所・再生医科学研究所等と共同で、低毒性量子ドットによるiPS細胞等の幹細胞およびiPS細胞から分化した治療用の細胞の生体内イメージングについて、AMED再生医療実現拠点ネットワークプログラムで研究開発を進めており、前臨床研究段階に入っている<sup>4),5)</sup>。

これに対して、1次元ナノ構造であるナノワイヤは、0次元・2次元ナノ構造に比べて構造制御の自由度が低いことから、バイオ応用はこれまで生体分子のセンシング領域に限られていた。また、ナノワイヤの材料としてよく使われているIII-V族の化合物半導体ナノワイヤは、表面酸化物の制御が困難であり、水溶液中での取り扱いが必須なバイオ・医療領域における応用が困難であった。また、化合物半導体ナノワイヤの材料の一部は、細胞毒性等があるために、バイオ・医療領域への応用を妨げていた。しかし最近、生体適合性が高く、水溶液中においても安定な酸化物ナノワイヤが開発されたことや、複雑な構造のナノワイヤの作成が可能になったことにより、バイオ・医療領域において、より広い分野への応用展開が進展している。今後、さらに、新たな1次元ナノ構造の開発により、バイオ・医療分野における応用範囲の拡大と実用化を目指した研究開発が進展するものと期待される。

[これまでの取り組み]

従来、ナノワイヤの研究において主流であった化合物半導体ナノワイヤは生体適合性が高くないため、バイオ・医療領域における応用には限界があった。しかし最近、生体適合性の飛躍的に高い酸化物ナノワイヤが開発されたことによって、ナノワイヤのバイオ・医療応用研究が進んでいる<sup>6)</sup>。さらに、直線状のナノワイヤのみならず、複雑な構造をもつナノワイヤの作成が可能になったことで、応用展開の幅が広がりつつある。たとえばハーバード大学の C. M. Lieber らは、kinked ナノワイヤと呼ばれる折れ曲がったナノワイヤを開発し、これに FET(Field effect transistor)を埋め込んだプローブによって、細胞内外の電位計測が可能であることを示した。最近では、このナノワイヤプローブを組み込んだフレキシブルデバイスをラットの脳内に埋め込んで、シグナル検出を行っている。また、名古屋大学の馬場らはナノワイヤに枝分かれ構造を導入した 3 次元ナノワイヤを開発し、3 次元ナノワイヤのネットワーク内に存在する数 nm 程度の空間・空隙を精密制御して、これを組み込んだマイクロ流路による電気泳動法により、DNA の高速分離に基づく DNA のサイズ解析を実現した。本研究においては、生体適合性の高い酸化物ナノワイヤ(ZnO, SnO<sub>2</sub> など)により 3 次元ナノワイヤを形成したこと、および、溶液の pH のコントロールによりナノワイヤ表面を負に帯電させることにより、負電荷を有する DNA 等の生体分子の吸着等を防ぐことが可能になり、DNA の高速分離・サイズ解析を実現している。さらに、従来のナノ構造では、解析困難であった RNA やタンパク質などの分子の高速分離に基づくサイズ解析も達成している。3 次元ナノワイヤ構造を有するマイクロ流路と 1 分子 DNA シークエンサとして研究が進んでいるナノポア技術<sup>7)</sup>を融合することにより、生体分子の分離解析と配列解析を一体化したデバイスの開発が可能になり、多数種の DNA の分離と配列解析を高性能化することでヒト・ゲノム解析の超高速化が達成されるものと期待される。

米国におけるナノワイヤ研究はバイオセンシング応用が中心であるが、最近はさらに、がん細胞の検出、細胞内イメージングなどの新たな応用展開が進められている。がん細胞検出においては、ナノワイヤにがん細胞を認識する抗体を結合した温度応答性高分子を修飾することで、血液中を循環しているがん細胞を効率的に捕捉・検出する技術が開発されている。本技術において、37°Cでは温度応答性高分子が伸展し、がん細胞を認識する抗体と血液中のがん細胞との接触面積が広がり、がん細胞を捕捉することができる。さらに、温度を 4°Cに下げることにより、温度応答性高分子が縮むことにより、捕捉されていたがん細胞と抗体との相互作用が弱まることで、がん細胞のみを取り出し検出することができる。ナノワイヤの非常に大きな比表面積のために、捕捉効率が、ナノワイヤを用いない場合の 50%程度に対して 90%と向上した。また、細胞内イメージングにおいては、生体適合性の高い酸化物ナノワイヤ(SnO<sub>2</sub>)を光ファイバーの先端に結合させることにより、ナノワイヤを細胞内に挿入し、細胞内の限られた領域をイメージングできるナノワイヤ単一細胞内視鏡イメージング技術が開発されている。このナノワイヤは、極めて細く高アスペクト比であるために、細胞に挿入した場合のダメージが最小限にとどまるとともに、ピコリットルスケールの部分しか光励起しないために、光による細胞へのダメージも極めて低いという特徴を有する。さらに、ナノワイヤの先端に光解離性分子を有する量子ドットを結合させることにより、細胞内に挿入したナノワイヤの先から、量子ドットを細胞内の特定の部位に短時間で移動させることにより、より空間分解能の高い細胞イメージングを実現している。



ヨーロッパでは依然として、ナノワイヤの研究はバイオセンシングが主として行われている。中国・韓国においては、グラフェンを用いたバイオセンシングの研究が進められているが、ナノワイヤのバイオ・医療応用は、これからである。日本では、ナノワイヤのバイオ・医療応用の研究例は限られているものの、3次元ナノワイヤの開発により、DNA、RNA、タンパク質の解析への応用展開が始まっている。

#### [今後必要となる取り組み]

ナノワイヤの高機能化とバイオ・医療分野への応用がさらに発展するためには、下記の取り組みが必要と考えられる。

- 1) ナノワイヤの生体適合性をさらに高めるとともに、超低毒性のナノワイヤの開発
- 2) ナノワイヤ表面の電荷・材料等の精密制御とナノワイヤ表面への抗体等の固定化によるナノワイヤの高機能化
- 3) 新規ナノワイヤ構造の開発と、ナノワイヤと他の材料（量子ドット等）のハイブリッド技術開発
- 4) ナノワイヤへの超低電圧印加によるナノワイヤ温度制御と、細胞、生体分子の捕捉・分離
- 5) ナノワイヤの量子効果を活用した新規バイオ・医療応用分野の開拓
- 6) 細胞や生体分子のみならず細胞外小胞、細菌、ウイルス、バイオエアロゾル等へのナノワイヤの応用

#### (4) 科学技術的・政策的課題

日本のナノワイヤ研究は、エレクトロニクス・ナノ材料分野の研究者を中心に太陽電池、オプトエレクトロニクス素子、光デバイス、メモリー等への応用研究が展開されている。しかし、バイオ・医療応用については、研究者はまだごく限られている。米国は、ナノワイヤのバイオ・医療応用で先行しているが、バイオセンシング以外の研究は、まだ端緒についたばかりである。また、ヨーロッパ、中国、韓国の研究もバイオセンシングに限られている。

今後、日本において、異分野融合の研究開発を進め、他国で実現されていない新規ナノワイヤ材料の開発を行うことができれば、細胞・生体分子等の解析・イメージング・センシングの応用にとどまらず、細胞外小胞、細菌、ウイルス、バイオエアロゾル等のセンシング等に応用範囲を拡大させることが可能になり、バイオ・医療応用のみならず、環境分野、食品、農業等への大きな応用展開が進展するものと期待される。

#### (5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

ナノワイヤのバイオ・医療応用における最近のトピックスとして、ナノワイヤ nanoelectronic scaffold (nanoES)による神経細胞の人工組織構築と神経細胞間反応のセンシング<sup>8)</sup>、細胞内のナノワイヤ内視鏡イメージング<sup>9)</sup>、ナノワイヤと温度応答性高分子による血中循環がん細胞の捕捉・検出と遺伝子解析によるがん転移診断<sup>10)</sup>と臨床研究、新規ナノワイヤ FETによる細胞内外のシグナルの同時計測<sup>11)</sup>、3次元ナノワイヤによるナノ構造精密制御に基づく DNA, RNA, タンパク質の高速解析<sup>12),13)</sup>、ナノワイヤによるバクテリア配列<sup>14)</sup>、ナノワイヤ・バイオ分子のハイブリッド光電変換デバイス<sup>15)</sup>、ナノワイヤデバイスによる脳内シグナル検出<sup>16)</sup>、生体中にイ

ンジェクダブルなナノワイヤ素子<sup>17)</sup> (C&EN が 2015 年の most-innovative 研究に選出) などが挙げられる。

## (6) キーワード

ナノワイヤ、細胞、DNA、タンパク質、がん診断、イメージング、センシング

## (7) 参考資料

- 1) A. Burns, et al., "Fluorescent Silica Nanoparticles with Efficient Urinary Excretion for Nanomedicine", *Nano Lett.* 9, (2009): 442.
- 2) M. Benezra, et al., "Multimodal silica nanoparticles are effective cancer-targeted probes in a model of human melanoma", *The Journal of Clinical Investigation* 121, (2011): 2768.
- 3) Wiesner Group, [http://wiesner.mse.cornell.edu/res\\_bioimaging.htm](http://wiesner.mse.cornell.edu/res_bioimaging.htm) (2016年3月18日アクセス)
- 4) H. Yukawa, et al, "Fluorescence imaging using quantum dots reveals increased accumulation of transplanted adipose tissue-derived stem cells in the liver when combined with heparin", *Biomaterials* 33, (2012): 2177-2186.
- 5) T. Kameyama, et al, "Crystal Phase-Controlled Synthesis of Rod-Shaped AgInTe<sub>2</sub> Nanocrystals for in vivo Imaging in the Near-Infrared Wavelength Region", *Nanoscale* 8, (2016): 5435.
- 6) S. Rahong, et al, "Recent developments in nanowires for bio-applications from molecular to cellular levels", *Lab on a Chip* 16, (2016), in press., DOI: 10.1039/c5lc01306b.
- 7) M. Di Ventra, and M. Taniguchi, "Decoding DNA, RNA and peptides with quantum tunneling", *Nature Nanotechnology* 11, (2016): 117.
- 8) B. Z. Tian, et al., "Macroporous nanowire nanoelectronic scaffolds for synthetic tissues", *Nat. Mater.* 11, (2012): 986.
- 9) R. X. Yan, et al., "Nanowire-based single-cell endoscopy", *Nat. Nanotech.* 7, (2012): 191.
- 10) Z. F. Ke, et al., "Programming Thermoresponsiveness of NanoVelcro Substrates Enables Effective Purification of Circulating Tumor Cells in Lung Cancer Patients", *ACS Nano*, 9, (2015): 62.
- 11) Q. Qing, et al., "Free-standing kinked nanowire transistor probes for targeted intracellular recording in three dimensions", *Nat. Nanotech.* 9, (2014): 142.
- 12) S. Rahong, et al., "Ultrafast and Wide Range Analysis of DNA Molecules Using Rigid Network Structure of Solid Nanowires", *Sci. Rep.* 4, (2014): 5252.
- 13) S. Rahong, et al., "Three-dimensional Nanowire Structures for Ultra-Fast Separation of DNA, Protein and RNA Molecules", *Sci. Rep.* 5, (2015): 10584
- 14) K. K. Sakimoto, C. Liu, J. Lim and P. Yang, "Salt-Induced Self-Assembly of Bacteria on Nanowire Arrays", *Nano. Lett.* 14, (2014): 5471
- 15) K. K. Sakimoto, A. B. Wong and P. Yang, "Self-photosensitization of nonphotosynthetic

- bacteria for solar-to-chemical production”, *Science* 351, (2016): 74
- 16) C. Xie, et al., “Three-dimensional macroporous nanoelectronic networks as minimally invasive brain probes”, *Nat. Mater.* 14 (2015), 1286.
- 17) J. Liu, et al., “Syringe-injectable electronics”, *Nat. Nanotechnol.* 10, (2015): 629.

## 2. 4 量子コンピュータで大幅に演算を高速化できることを実証

### (1) テーマ名

量子コンピュータで大幅に演算を高速化できることを実証

### (2) 概要

カナダ D-Wave Systems 社による世界初の市販量子コンピュータの開発をきっかけに、世界中で量子コンピュータに関連する研究開発競争が激化している。そのような中、2015年12月、米国 NASA、Google 社、USRA (Universities Space Research Association) が記者会見を開き、D-Wave Systems 社の量子コンピュータ「D-Wave 2X」によって、特定の組合せ最適化問題を既存のコンピュータと比べて1億倍高速に解いたことを発表した<sup>1), 2)</sup>。

### (3) 国内外における研究開発の動向

[背景とこれまでの取組み]

量子コンピュータに関する研究開発の経緯を示す。

1980~1990年

米欧で量子コンピュータの概念提唱

P. Benioff (CNRS), R. P. Feynman (CALTECH), David Deutsch (Oxford University) 他

1994年

P. W. Shor (MIT) により素因数分解を超高速で行うアルゴリズム開発<sup>3), 4)</sup>

このアルゴリズムを用いた量子コンピュータが実現されると、現在の RSA 暗号が一瞬にして解読される可能性があり、学会、産業界からの量子コンピュータへの注目が一気に高まる。

1998年

西森秀稔教授と門脇正史氏（東工大）が量子アニーリング理論を提唱<sup>5)</sup>

1999年

中村泰信、蔡兆申、Y. Pashkin (NEC) が超伝導回路で量子ゲート (1qbit) を実現<sup>6)</sup>

固体素子で量子ゲートが実現できることを実証、集積化の可能性を提示する。

2000年以降

量子コンピュータの基礎研究が継続（量子コヒーレンス時間が劇的に増大）

2011年

D-Wave Systems 社（カナダ）が量子アニーリングに基づく量子コンピュータを開発

2013年

D-Wave Systems社が2号機をGoogle+NASA (Quantum AI Lab.)、ロッキードマーチンに納入、ロスアラモス国立研究所には2016年に納入予定とされる。

Google、NASA、USRAはNASAのAmes Research Center内に量子人工知能研究所 (Quantum Artificial Intelligence Laboratory) を2013年に設立、人工知能に必要な機械学習

の飛躍的な演算速度向上を目指して量子コンピュータの可能性を追求してきた。2015年9月には超伝導回路で実現される量子ビットを1000個程度搭載した「D-Wave 2X」マシンを導入し、その性能テストを行った。シリコン基板上に1000個程度集積化された超伝導回路は、希釈冷凍機内に挿入され、絶対零度近くに冷却された環境下で動作する。東京工業大学の西森秀稔教授と門脇正史氏（現筑波大学教授）の考案した量子アニーリング理論<sup>6)</sup>に基づき、組合せ最適化問題が解かれる。この理論は組合せ最適化問題を、組合せの数だけ量子スピンを用意し、その量子スピン系全体のエネルギーの最小状態を見つける問題に置き換えることで解を求める。個々のスピンは量子ビットに対応し、超伝導回路で具現化されている。スピン間の相互作用は超伝導回路から成るプログラマブル磁気メモリで構成され、組合せ最適化問題に応じて相互作用の大きさを設定し、問題を解いていく。Google社のDirector of Engineeringを務めるHartmut Neven氏によると、945個の2値変数から成る組合せ最適化問題をD-Wave 2Xマシンで解いたところ、プロセッサコア1個の通常のコンピュータで同じ問題を解く場合に比べ、最大1億倍高速であることを実証することに成功したとしている<sup>7)</sup>。通常のコンピュータではSimulatedアニーリングや量子モンテカルロ法を用いて組合せ問題を解いている。

#### [意義]

量子コンピュータとは、量子力学的な状態の重ね合わせを用いて並列性を実現し、演算を実行するコンピュータである。従来のコンピュータの論理ゲートに代えて、量子ゲートを用いて量子コンピューティングを行う量子ゲート・タイプと、量子状態間に起きるトンネル現象を積極的に利用して組合せ最適化問題を高速に解く量子アニーリング・タイプの2種類に大別される。いずれも現在のスーパーコンピュータでは有意な時間では解く事が困難な問題を、瞬時に計算でき、超スマート社会を牽引する人工知能の開発に欠かせない機械学習やディープラーニングを超高速化するとともに、他分野でも新薬や新物質の開発、複雑な組合せ問題の最適化、ロボティクスなどへの応用が期待されている。量子ゲート・タイプは様々な計算に対応可能な万能型とされるが、実現にはまだ技術的なハードルが高く距離がある。これに対し量子アニーリング・タイプは、特定の組合せ最適化問題に限られるが、すでに上述のD-Wave 2Xマシンのように市販機が登場している。しかし、量子アニーリング・タイプであっても、計算の安定性の問題などまだ多数の乗り越えなければならない課題があるとされる。

#### [今後必要となる取組み]

D-Wave 2Xマシンが上記のような高速性を示すのは限られた問題に対してのみであり、常に通常のコンピュータの能力を超えるというわけではない。多数の量子スピンからなる系全体のエネルギーは、個々の量子スピンの状態の組合せに対して複雑に変化するが、エネルギー最小値に達する前に、行く手をポテンシャル障壁によって妨げられ、局所的なエネルギー最小状態（系全体の最低エネルギー状態ではない状態）に落ち込むという懸念がある。量子アニーリング理論では、そのポテンシャル障壁をトンネル効果によって乗り越えるが、このポテンシャル障壁が特に狭く、値が高い時に、量子コンピュータは通常のコンピュータに対し優位性を発揮できる。Google Research Blog<sup>7)</sup>によると、現状は量子ビットを構成する超伝導回路同士の相互接続の密度が粗く、どのような最適化問題に対しても量子コンピュータが持つ高速性が発

揮できる状況ではないとしている。D-Wave社の次世代機で量子ビット間の接続問題を解決し、より複雑な問題にも対応可能になる事が期待されている。

#### (4) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[日本]

内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) において「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の構築」(山本喜久PM、H26-30) が推進されている。脳における情報処理を司る巨大な神経ネットワークを、系全体に広がった量子的波動関数で構成し、現代コンピュータでは処理できない大規模な組合せ最適化問題を高速で解くことを目標としている。

[米国]

Office of the Director of National Intelligence の下で活動する IARPA (The Intelligence Advanced Research Projects Activity) で下記 2 つのプロジェクトが進行中である。

・ QEO (Quantum Enhanced Optimization)

2015 年開始の 5 年間のプロジェクトであり、従来型のコンピュータでは実質的に計算困難な組合せ最適化問題を、量子アニーリング法で解くことを目標とする。3 次元的に接続された 100 個の超伝導量子ビット、アーキテクチャ、演算操作で構成されるテストベッドの開発により、従来コンピュータに対して 10000 倍の高速演算優位性の実証を目指している。

・ LogiQ (Logic Qubits)

量子ゲート回路方式による量子コンピュータの実現を目指している。

[英国]

2014 年 12 月より EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) が National Quantum Technologies Programme を開始した。4 つの拠点(バーミンガム大学、グラスゴー大学、オックスフォード大学、ヨーク大学) からなり、バーミンガム大学では量子計測標準技術、グラスゴー大学では量子センシング・イメージング技術、オックスフォード大学では量子コンピュータとシミュレーション技術、ヨーク大学では量子通信技術の研究開発を推進している。ハブ整備のために、総額 270M ポンドの中から 5 年間で 120M ポンドの資金を投入する。この投資によって英国は量子技術分野で主導的地位を確実にし、通信、医療、安全保障など数兆円規模の世界市場の形成に向けた取組みを先導することを目指している。

[オランダ]

2015 年 1 月、オランダ量子技術研究機関 QuTech を National Icon に指定した。QuTech は 2013 年にオランダ科学研究機構 (NWO)、オランダ物質基礎研究所 (FOM)、オランダ技術財団 (STW) の支援を得て、デルフト工科大とオランダ応用科学研究機構 (TNO) の共同機関としてスタートした。この投資により、QuTech の先導的立場を強化し、オランダの企業や研究者が量子技術の利益をより早い段階で享受することを目指している。

以上のように、カナダの D-Wave Systems 社による量子コンピュータの商用化に刺激を受け、近年、欧米を中心に量子コンピュータ研究の国家プロジェクトが次々と立ち始めている。これらの研究開発においては、日本で最初に動作実証がなされた超伝導量子ビット技術、また同じく日本で提唱された量子アニーリング理論が中心となっている。特に米国では Google、マイクロソフト、IBM、ロッキードマーチンなどのグローバル企業が研究開発を進めており、また MIT、UCSB（カリフォルニア大学サンタバーバラ校）、USC（南カリフォルニア大学）などを中心に基礎的な研究がなされ、特に MIT ではデバイス試作の高度化が着々となされている。日本では上記のパイオニア的な仕事の後、それをフォローする研究体制が十分ではない。日本としての国際的な観点に立った研究開発の戦略構築が急務であろう。

#### (5) キーワード

量子コンピュータ、量子アニーリング、量子ビット、量子ゲート、量子スピン系、組合せ最適化問題

#### (6) 参考資料

- 1) V. S. Denchev, S. Boixo, S. V. Isakov, N. Ding, R. Babbush, V. Smelyanskiy, J. Martinis and H. Neven, “What is the Computational Value of Finite Range Tunneling?”, Preprint: <http://arxiv.org/abs/1512.02206v4> (2016年3月16日アクセス)
- 2) ITpro by日経コンピュータ “D-Waveの量子コンピュータは「1億倍高速」、NASAやGoogleが会見”、<http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/news/15/120904017/?ST=system> (2016年3月16日アクセス)
- 3) P.W.Shor, “Algorithms for quantum computation: Discrete log and factoring”, Proceedings of the 35th Annual IEEE Symp on Foundations of Computer Science, (1994): 124.
- 4) P.W.Shor, “Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer”, *SIAM Journal on Computing* 26, (1997): 1484.
- 5) T. Kadowaki and H. Nishimori, “Quantum annealing in the transverse Ising model”, *Phys. Rev. E* 58, (1998): 5355.
- 6) Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, J. S. Tsai, “Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box”, *Nature* 398, (1999): 786.
- 7) Google Research Blog “When can Quantum Annealing win?”, <http://googleresearch.blogspot.jp/2015/12/when-can-quantum-annealing-win.html> (2016年3月16日アクセス)

## 2. 5 米国家ナノテクノロジー・イニシアティブの動向

### (1) テーマ名

米国家ナノテクノロジー・イニシアティブの動向

### (2) 概要

米クリントン政権下の2001年に始まって以来、15年間にわたり実行されてきた国家ナノテクノロジー・イニシアティブ（National Nanotechnology Initiative :NNI）について、OSTP（大統領府科学技術政策局）のLloyd Whitman博士がPCAST（大統領科学技術諮問会議）において総括報告を行った（2015年11月）。そこでは、研究開発によって生み出した知見や技術を商業化していくために、NNIを取り巻く環境を再び活気あるものにするのが課題であるとした。そのためにあらゆる分野の団結が必要であり、米国民への周知と参画、教育、研究開発、環境問題、ナノ関連物質が使用された商品の健康や安全に対するリスク、倫理的、法的、社会的課題を広く知らせ、商業化を促進し、それにより米国民が経済的な恩恵を得ることができるとした。

また、2015年前半には、NNIにおける主要プログラムの一つであるNSFのナノテクノロジー研究インフラ共用ネットワーク（NNIN）が終了し、後継プログラムとして、National Nanotechnology Coordinated Infrastructure（NNCI）が開始された。以下ではこれらの諸動向について概説する。

### (3) 国内外における研究開発の動向

[NNIで投じられた予算]

NNIには連邦政府の20省庁と関連機関が参画している。2015年度予算は約\$1.5Bであり、2001年以来の総額は\$22Bに上る。過去4年間は概ね安定して毎年\$1.5Bの規模で推移している。NNI予算の省庁別内訳は、保健福祉省（HHS、大部分がNIH）が31%で最大で、次に全米科学財団（NSF）とエネルギー省（DOE）が続く。この3機関で全体の80%を占めている。残りが国防総省（DOD）、米国標準技術研究所（NIST）と続き、これら5つの省庁・機関で全体の96%を占めている。予算配分は、2015年以降は5つのプログラム・コンポーネント・エリア（PCA）毎にマネジメントされるようになり（2014年以前のPCAは8領域であった）、2016年のPCA別の予算配分は以下のように計画されている。

- Foundational Research (34%)
- Applications, Devices, and Systems (26%)
- Signature Initiatives (17%)
- Infrastructure & Instrument (16%)
- EHS: Environment, Health and Safety (7%)

2011年から開始した省庁横断的に取り組む重点化領域“Signature Initiatives”の5領域（以下）、

- Nanotechnology for Solar Energy Collection and Conversion



- ・ Nanoelectronics for 2020 and Beyond
- ・ Sustainable Nanomanufacturing
- ・ Nanotechnology Knowledge Infrastructure
- ・ Nanotechnology for Sensors and Sensors for Nanotechnology

に関して、1つ目の太陽エネルギーについては目標を達成したものとみなしており、これに替わる新しい分野として“Water Sustainability Through Nanotechnology”が掲げられた（2016年）。

#### [経済効果]

Lux Research社の調査によると、ナノテクノロジーに関する商業分野での世界的収益は2010年の \$339B から2012年は \$731B まで成長し、2018年までには \$4.4T に達すると予測されている。これまでの商品化成功例としてナノ粒子添加剤コーティングなどが挙げられ、NNIの研究から商品化に成功している企業例としては、NanoMeck社、QDVision社、Titan Spine社などがあるとしている。Whitman博士は、ナノテクノロジーが広範な分野で様々なかたちで使用されており、政策立案者はナノテクノロジーの多様性を十分に考慮する必要があると言及した。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

NNIに基づく研究開発によって生み出された知識・技術を商業化していくために、NNIを取り巻く環境を再び活気あるものにしていくことが課題であると指摘している。特に、米国民への周知と参画、教育、研究開発、環境問題、ナノ関連物質が使用された商品の健康や安全に対するリスク、倫理的、法的、社会的課題を広く知らせることが重視されている。米国はこれまでもNNIのもとで教育やアウトリーチに積極的な施策展開を図ってきており、これをさらに重視するよう指摘している。省庁を横断するNNI政策全体を取りまとめる組織として、大統領府にNational Nanotechnology Coordinating Office (NNCO)があるが、NNCOにおける以下の活動について、PCASTの総括報告では言及されている。

- ・ 各種テーマに関するワークショップ開催や報告書の発行：Carbon Nanotubes, Sensors, Exposure science, US-EU Coordination
- ・ インターネットセミナーの開催：例； NNCO's Public Webinars
- ・ アウトリーチ活動：Contests and Challenges, NSF nanotech videos, NSF Generation Nano, Small Science, Superheroes Contest
- ・ 経済協力開発機構（OECD）、米国特許商標局（USPTO）と共にNNIの影響評価の基準を作成中。
- ・ Industry Roundtable の開催（2015年）。
- ・ 実用化・商品開発が遅れていることに関する現状や、ナノ素材使用商品の製造を阻害している要因を特定し、どのようなプログラムによってそれらを乗り越えられるのかについての議論。
- ・ ホワイト・ハウス・フォーラムの開催（2015年）。
- ・ 中小企業のナノテクノロジー商業化促進に関するフォーラムを国家経済会議（NEC）と

共催。

- ・商業化を加速させるための可能性を調査し、I-Corps, Venture for America といった民間部門との協力の有効性を強調。

また、"Nanotechnology-Inspired Grand Challenge for Next Decade"のドラフトを作成し、各国の専門家から意見を公募した。Grand Challenge として掲げられている例として、以下がある。

- ・最も治療が困難なガン患者の5年生存率を50%向上させる。
- ・米粒よりも小さなコンピュータデバイスを、配線・メンテナンス無しで10年稼働できるようにし、IoTに革命を与える。
- ・低消費電力で100倍高速のコンピュータを実現する。
- ・原子レベルの精度で材料を製造し、アルミニウムの50倍の強度と、半分の軽量化を、従来と同じコストで実現する。
- ・海水淡水化のコストを4分の1にする。
- ・ナノ物質の環境影響、健康影響、安全性評価を判定可能にする。

コンピュータに関しては、National Strategic Computing Initiative (NSCI) やBRAIN Initiativeとも連携し、データから学習し、学習によって不慣れな問題も解き、人間の脳と同等のエネルギー効率で作動する新しいタイプのコンピュータを創造するために、ナノスケールのシステム・コンピュータ構造の飛躍的な進歩が必要であるとしている。

## (5) 注目動向

NSFのナノテクノロジー研究インフラ共用ネットワークプログラム (NNIN) が2015年に終了し、後継プログラムとしてNational Nanotechnology Coordinated Infrastructure (NNCI) が開始された。今後5年間で81Mドル以上の予算が計画されている（年間約16Mドル）。15州にまたがる27機関から成る16拠点（内、9拠点にはパートナーとして1つ以上の地方大学が参画する形態）で構成される。日本の文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業（H24-33）に相当するプログラムであり、規模的にも概ね同程度と考えられる。欧米並ともに、このようなナノテクノロジーに関する先端研究共用インフラの整備・発展は、研究開発成果の創出に際し、投資効率を最大化させるものとして共通認識となっているが、なかでも歴史的にみて米国の研究開発エコシステムが一步リードしていると考えられる。NNCIに採択された拠点は、産官学の研究者に対し微細加工や解析・計測装置などのナノテク最先端研究設備をオープンな共用施設として提供する。また、専門技術スタッフにより装置利用や技術習得、専門知見の面でのサービスを充実させる。前進のNNINで培ったフレームワークを活かして、科学技術上の新発見やイノベーション創出、教育、商業化・社会的利益に貢献するものである。NSFではこれまでおよそ40年間の長期にわたりナノテク研究インフラ・サービスの充実に投資を続けてきたが、次世代へ向けてNNCIではこれをさらに拡張・促進させるとしている。これらの特徴は、日本のナノテクノロジープラットフォームにおいても、同等かそれ以上の強力な仕組みとして発展しつつあることは見逃せないポイントである。

NNCIの各拠点は、エレクトロニクス、フォトニクス、マイクロ機械、マイクロ流体、など、それぞれに特徴・専門性を有する。なかには地球科学やライフサイエンスに専門性を有する拠点も含まれており、新分野を促進させることも重視している。NNCIの設備群は、学生・専門家を問わずアクセスが可能であり、国内だけでなく世界中にオープンであるとしている。NNCIの各拠点名と参画機関、PI は下表のとおりである。

表1 NNCIの各拠点名と参画機関、PI

Site	University and Partner	PI
Mid-Atlantic Nanotechnology Hub for Research, Education and Innovation	University of Pennsylvania with partner Community College of Philadelphia	Mark Allen
Texas Nanofabrication Facility	University of Texas at Austin	Sanjay Banerjee
Northwest Nanotechnology Infrastructure	University of Washington with partner Oregon State University	Karl Bohringer
Southeastern Nanotechnology Infrastructure Corridor	Georgia Institute of Technology with partners North Carolina A&T State University and University of North Carolina-Greensboro	Oliver Brand
Midwest Nano Infrastructure Corridor	University of Minnesota Twin Cities with partner North Dakota State University	Stephen Campbell
Montana Nanotechnology Facility	Montana State University with partner Carlton College	David Dickensheets
Soft and Hybrid Nanotechnology Experimental Resource	Northwestern University with partner University of Chicago	Vinayak Dravid
The Virginia Tech National Center for Earth and Environmental Nanotechnology Infrastructure	Virginia Polytechnic Institute and State University	Michael Hochella
North Carolina Research Triangle Nanotechnology Network	North Carolina State University with partners Duke University and University of North Carolina-Chapel Hill	Jacob Jones
San Diego Nanotechnology Infrastructure	University of California, San Diego	Yu-Hwa Lo
Stanford Site	Stanford University	Kathryn Moler
Cornell Nanoscale Science and Technology Facility	Cornell University	Daniel Ralph
Nebraska Nanoscale Facility	University of Nebraska-Lincoln	David Sellmyer
Nanotechnology Collaborative Infrastructure Southwest	Arizona State University with partners Maricopa County Community College District and Science Foundation Arizona	Trevor Thornton
The Kentucky Multi-scale Manufacturing and Nano Integration Node	University of Louisville with partner University of Kentucky	Kevin Walsh
The Center for Nanoscale Systems at Harvard University	Harvard University	Robert Westervelt

## (6) 参考資料

- 1) PCAST Past Meetings,  
<https://www.whitehouse.gov/administration/eop/ostp/pcast/meetings/past> (2016年3月16日アクセス)
- 2) Nanotechnology: Anniversary of PCAST Report, and A Grand Challenge is Born  
[https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/Whitman\\_PCAST\\_NI\\_151120.pdf](https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/Whitman_PCAST_NI_151120.pdf) (2016年3月16日アクセス)
- 3) NNI News Releases, <http://www.nano.gov/node/1502> (2016年3月16日アクセス)
- 4) Water Sustainability Through Nanotechnology , <http://www.nano.gov/node/1577> (2016年3月16日アクセス)
- 5) National Nanotechnology Coordinated Infrastructure, <http://www.nnci.net/> (2016年3月16日アクセス)