

# 量子生命科学領域の研究開発について

量子でヒトを理解する、しあわせにする。～生命科学を場とした第二次量子革命～

## R&D in Institute for Quantum Life Science (iQLS)

国立研究開発法人

量子科学技術研究開発機構 量子生命科学領域

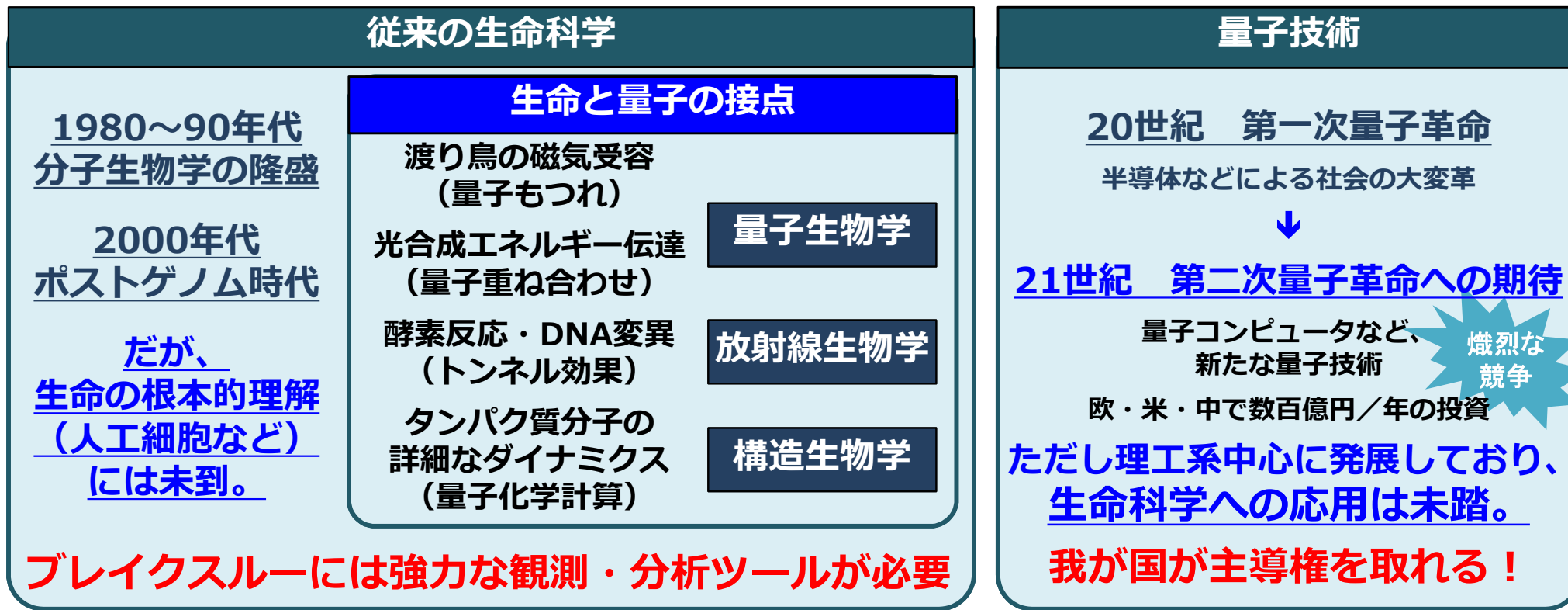
領域長 馬場嘉信



国立研究開発法人審議会 量子科学技術研究開発機構部会（第16回）

2020年1月22日

# 量子生命科学 誕生の背景



## 生命と量子の接点

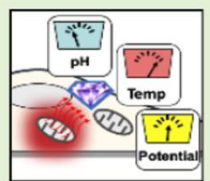
- 渡り鳥の磁気受容 (量子もつれ) **量子生物学**
- 光合成エネルギー伝達 (量子重ね合わせ) **放射線生物学**
- 酵素反応・DNA変異 (トンネル効果) **構造生物学**
- タンパク質分子の詳細なダイナミクス (量子化学計算)

### 量子融合イノベーション領域② 量子生命技術のイメージ

- 近年の量子技術の発展に伴い、量子技術を生命科学に応用するとともに、量子論により生命現象を解明し、得られた知見を医療技術や環境技術の革新につなげることを目指した研究が開始されつつある。
- 超早期診断・治療や抗老化など健康・長寿社会の実現、生物の持つ「量子もつれ」や「重ね合わせ」等の量子効果を模倣した高機能材料の創出など、重要な革新がもたらされる可能性があり、世界に先駆けて取り組む必要がある。

#### 生体ナノ量子センサ

- ✓ ナノ量子センサを生体細胞に適用
- ✓ 核やミトコンドリアなど局所のpH、温度、電流等、これまで計測できなかった細胞内部および細胞組織のパラメータが取得可能に

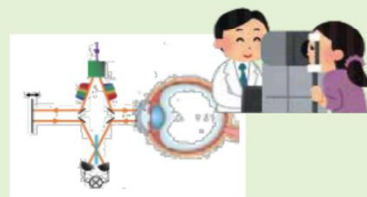


1細胞精度の診断 (イメージ)

老化状況や、がんの発症前予測など新たな診断が実現

#### 量子もつれ光イメージング

- ✓ 量子もつれ光をイメージングに活用
- ✓ 従来光のS/N比を超える高感度・高精細な計測により毛細血管等の細部観察が可能に

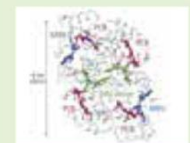


眼底検査 (イメージ)

眼科疾患や動脈硬化の超早期診断が実現

#### 量子バイオミメティクス

- ✓ 生物の高い嗅覚や高効率の光合成・呼吸を実現する「量子効果」の仕組みを解明
- ✓ 麻薬探知犬を超える嗅覚センサや、人工光合成の開発の手掛かりに



「重ね合わせ効果」により100%のエネルギー伝達を実現する光捕集タンパク質

麻薬・爆発物の高感度検知や人工光合成の実現

### 量子技術

量子もつれ、重ね合わせ、トンネル効果 etc...

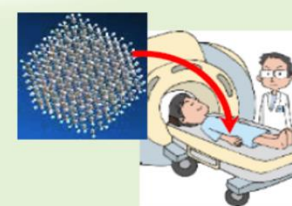
×

### 生命科学

構造生物学、細胞生物学、発生生物学 etc...

#### 超偏極核磁気共鳴技術

- ✓ 核スピンの方向をそろえたスピン偏極化合物をMRI検査に活用
- ✓ 感度が従来法の千倍以上に向上。MRI検査時間の短縮やリアルタイム代謝イメージングが可能に



革新的MRI診断技術

MRI検査の健診への導入や、がん治療の効果判定が実現

量子生命技術により、健康長寿社会の実現や環境技術の革新に貢献！

## ■ 量子生命科学の長期的目標・展望

### (1) 「量子でヒトを理解する」 ～基礎科学～

量子から分子・細胞・個体の階層にまたがる生命理解に量子技術の応用で迫る

### (2) 「量子でヒトをしあわせにする」 ～イノベーション～

生命研究向け量子技術や量子生命科学の知見を応用し高インパクトの技術を創出

## ■ 重点的に推進すべき研究開発テーマ

### (1) 量子論的観点の生命研究

- 量子を知る 生命における量子効果の役割
- 量子になぞらえる 量子論的な数学モデル

### (2) 最新量子技術の応用による生命研究

- 量子で測る 量子センシング、量子イメージング応用
- 量子でひもとく 分子構造解析
- 量子で変える 細胞への介入

### (3) イノベーションを目指した研究開発

- 量子で治す 医療応用（検査・治療・再生医療・がん・免疫・加齢・脳・創薬）
- 量子で考える 情報技術
- 量子で産み出す 工業・エネルギー
- 量子で育てる 農産業・環境
- 量子をやさしく 生命倫理・安全

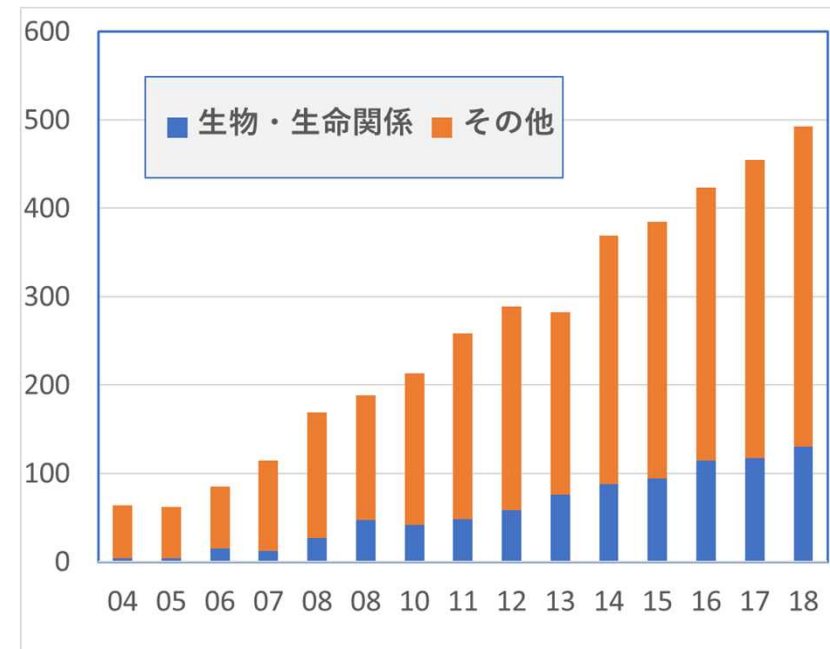
量子生命科学会 「量子生命科学の推進に関する提言」  
全文は量研ホームページからダウンロードできます。

- サリー大学（イギリス）では、Leverhulme Quantum Biology Doctoral Training Centreを設立し、量子生物学分野の学際的研究者の教育と研究を推進。
- Ulm大学（ドイツ）では、Centre for Quantum and Biosciencesを開設。
- アメリカ国立衛生研究所（NIH）やアメリカ国防高等研究計画局（DARPA）でも、生体イメージングや量子生物学の研究を推進。
- また、オーストラリア・RMIT大学及びメルボルン大学では固体量子バイオセンサに関する研究を推進。



Ulm大学（ドイツ）のCentre for Quantum and Biosciences

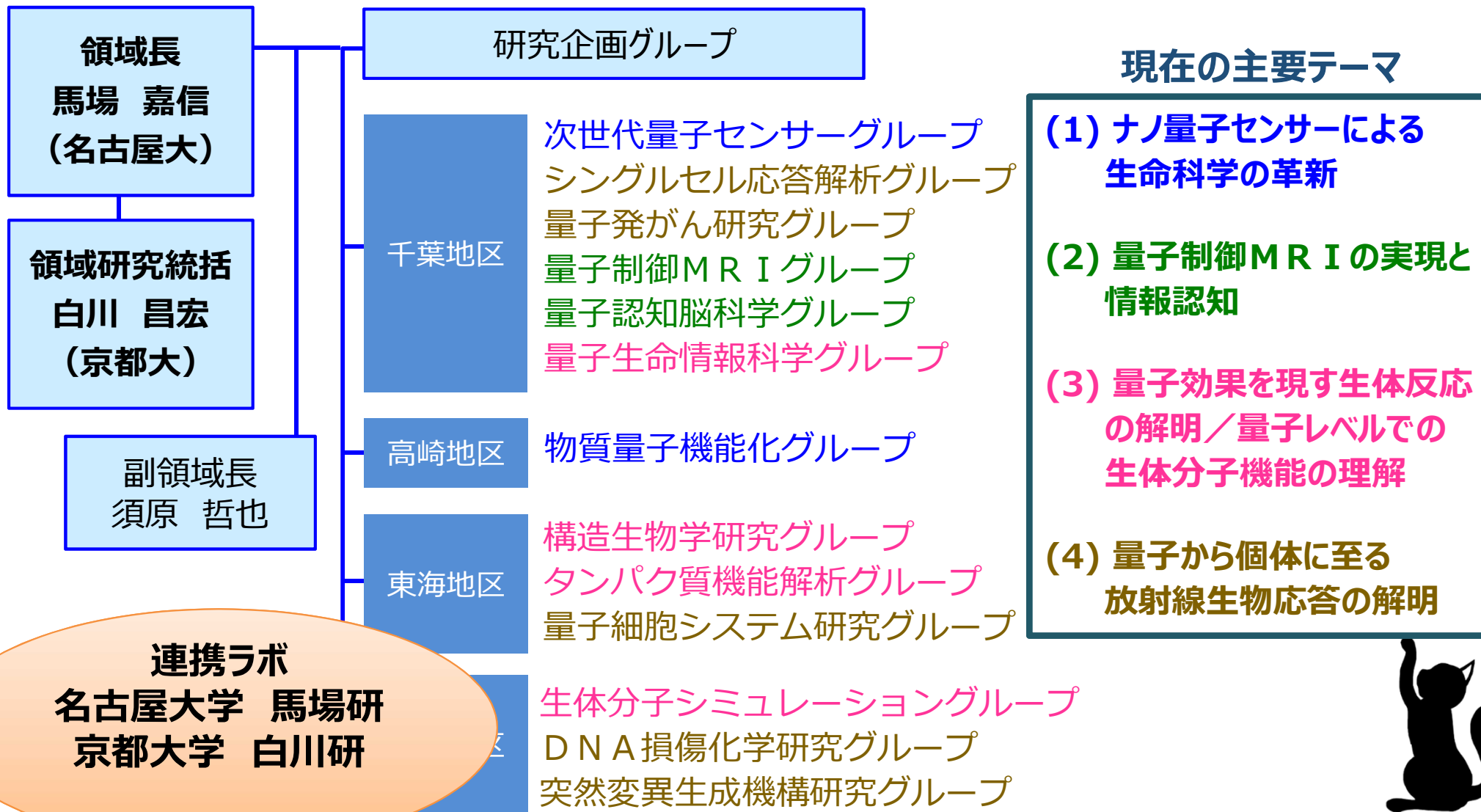
<https://www.uni-ulm.de/en/nawi/center-of-quantum-bioscience/>



毎年のダイヤモンドNVセンター関連論文数

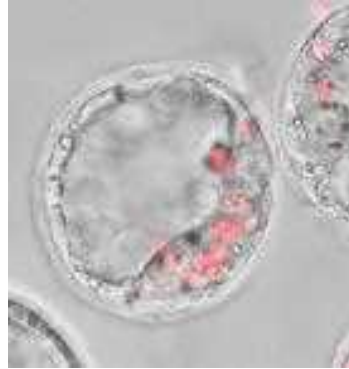
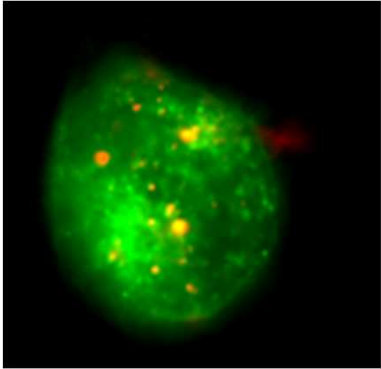
## 研究目標

量子論や量子技術に基づく生命現象の解明と医学への展開



今後さらに、外部研究者の積極的受入(連携ラボの設置)によりテーマを拡大・先鋭化させる

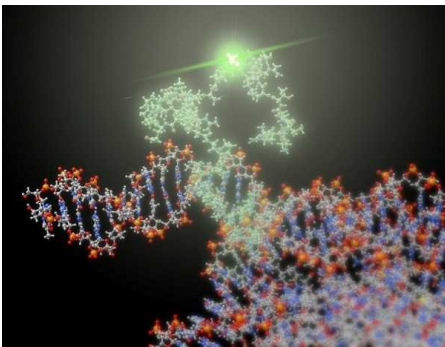
## ○ナノ量子センサによる生命科学の革新



- **ダイヤモンドNVセンター**により、**生きた細胞内部の局所の温度、電場、pHなどの多様なパラメータを高感度・リアルタイムで計測**
- **老化、がん、脳と神経などの複雑な生命現象を解明**

赤い点：細胞内に導入したナノ量子センサ

## ○量子効果を現す生体反応の解明／量子レベルでの生体分子機能の理解



- 磁気コンパスや光合成など、**生体分子における量子効果**が重要な鍵を握ると考えられている生命現象の解明
- **生体分子の構造**を、量子レベルから高精度に理解し、シミュレーションによってその働きを解明

## ○量子制御MRIの実現と情報認知

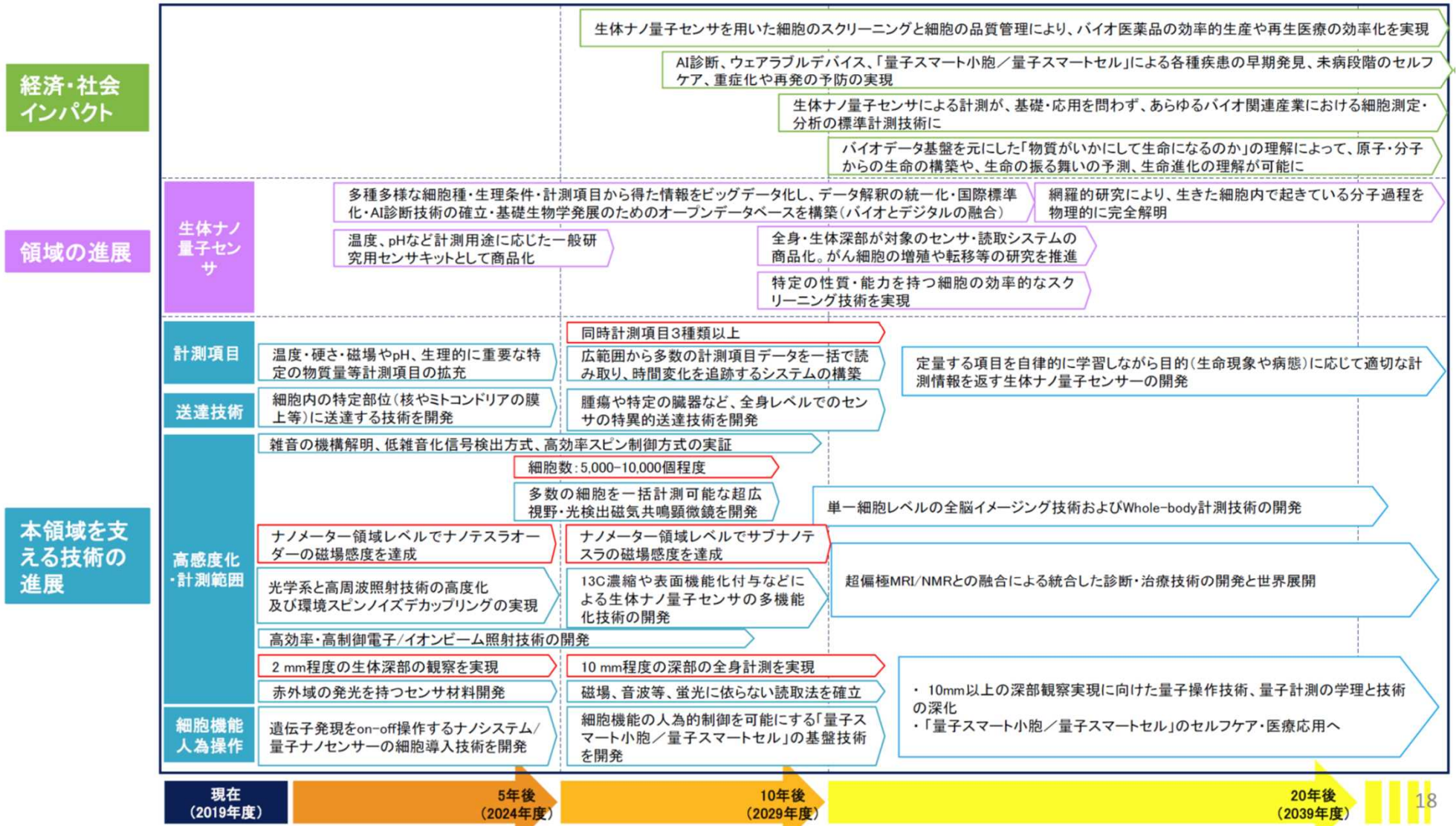
- 量子技術で**MRIの信号を飛躍的に大きくし**、生物・医学に革新
- 量子確率論の数理モデルを用いて、**こころが脳から生じる仕組みを解明**

## ○量子から個体に至る生物応答の解明

- 放射線エネルギーによる**DNAの損傷、突然変異、がんの発生**という、量子レベルから個体レベルまでの一連の現象を解明

### ②量子生命科学 (生体ナノ量子センサ)

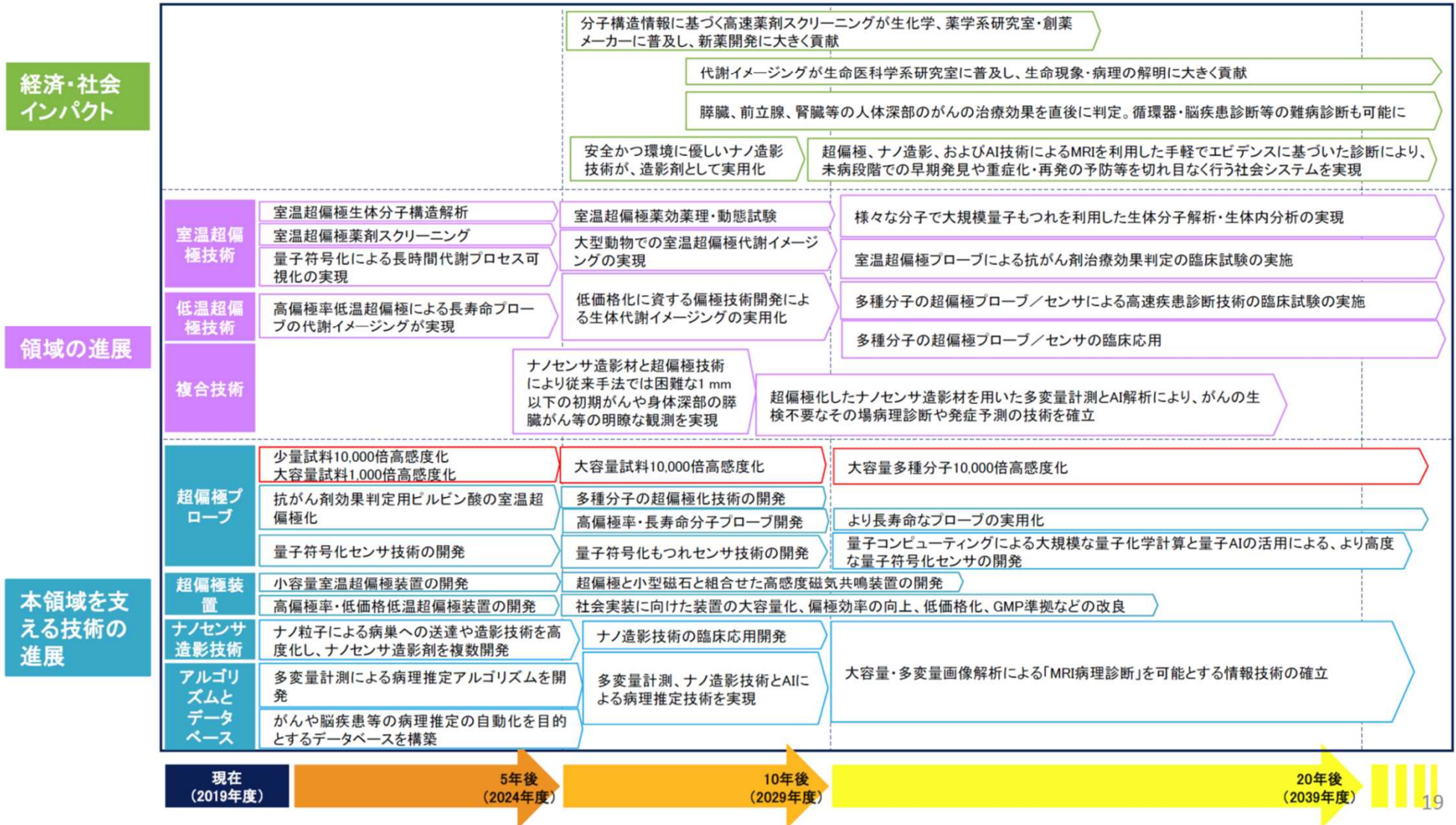
- 特定の性質・能力を持つ細胞のスクリーニングが可能となり、バイオ医薬品の効率的生産や再生医療の効率化等が期待
- 5年後は個々の細胞レベル、10年後は生物個体レベルの計測範囲を実現し、生命現象の予測・再構築のメソッドを構築する
- 計測可能項目の拡充や細胞内の特定部位への送達技術、広範囲観察、生体深部観察技術の開発を進める





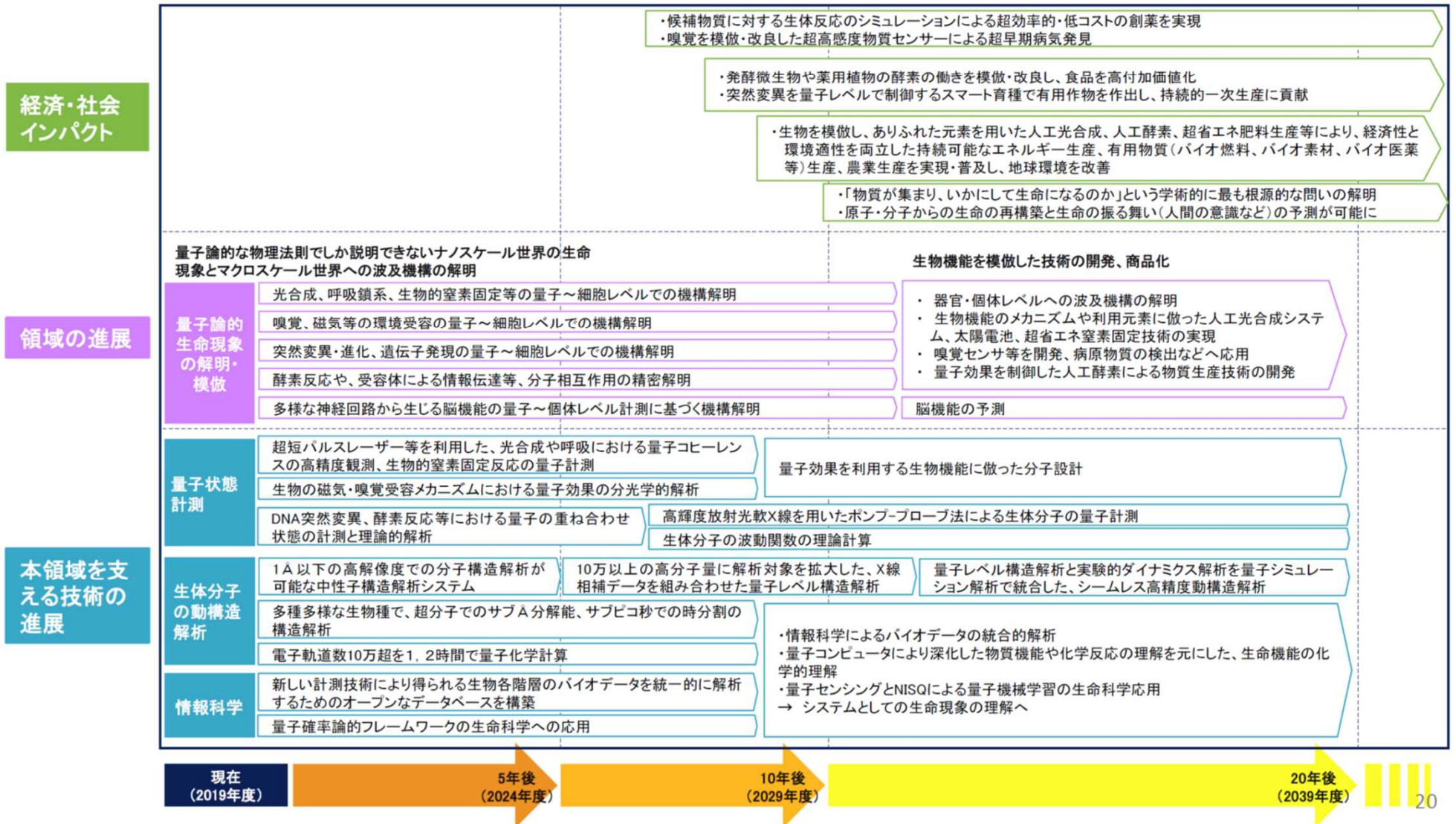
### ③量子生命科学（量子技術を用いた超高感度MRI/NMR）

- 薬剤スクリーニングによる新薬開発への貢献、代謝イメージングによる深部がん治療効果判定や難病診断、早期発見等が期待
- 5年後、室温超偏極による薬剤スクリーニングや長時間代謝過程可視化が実現。10年後、医療診断が実現、臨床治験が開始
- 超偏極化、量子符号化、ナノセンサ造影技術等の開発により、超高感度化を進める。また、多種分子の超偏極化技術も開発



### ④量子生命科学 (量子論的生命現象の解明・模倣)

- 光合成等生物機能を模倣した技術の実現により、省エネ、有用物質生産、持続的・一次生産、地球環境改善等への貢献が期待
- 5年後は分子レベルで量子効果の機能性を解明、10年後は細胞レベルに展開
- 光合成における量子コヒーレンス等、生物内の量子状態計測や生体分子の動構造解析、情報科学による統合的解析を進める



## 生体ナノ量子センサ

- AI診断、ウェアラブルデバイス、「量子スマート小胞／量子スマートセル」を組み合わせた**各種疾患の早期発見、未病段階のセルフケア、重症化や再発の予防**
- バイオデータ基盤を元にした「物質がいかにして生命になるのか」の理解によって、原子・分子からの生命の構築や、生命の振る舞いの予測、生命進化の理解が可能に

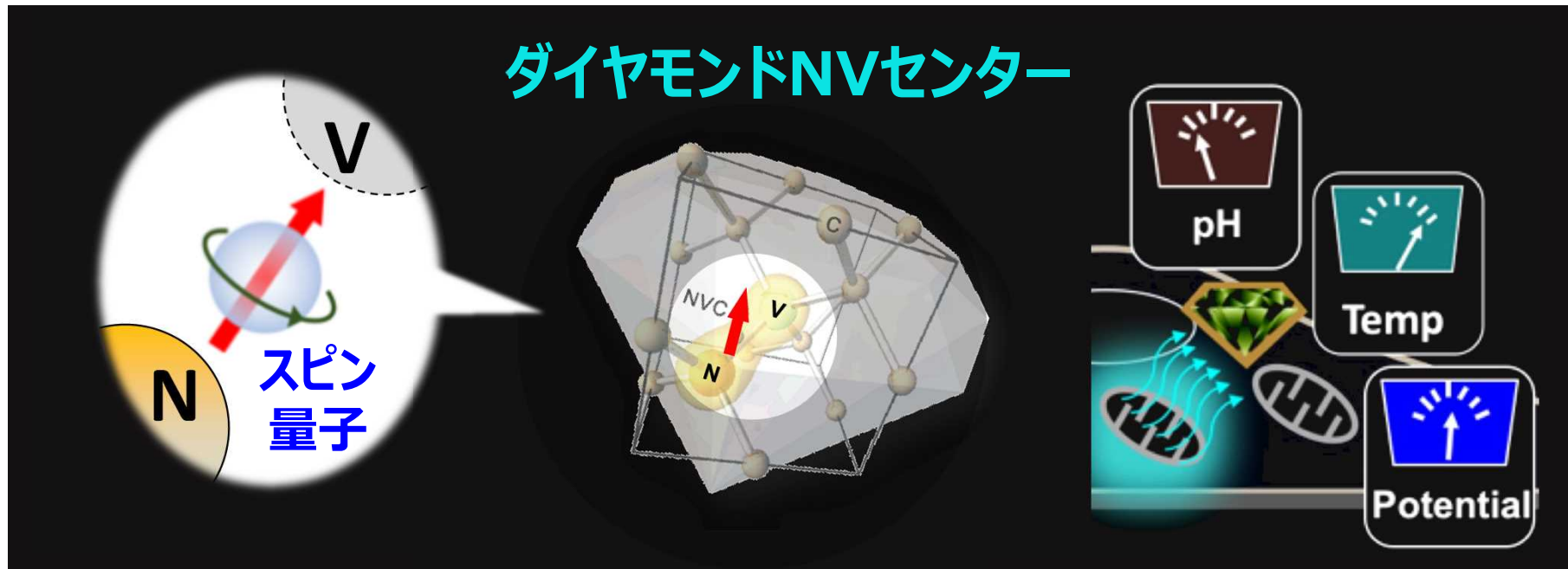
## 量子技術を用いた超高感度MRI／NMR

- **膵臓、前立腺、腎臓等の人体深部のがんの治療効果を直後に判定。循環器・脳疾患診断等の難病診断も可能に**
- 超偏極、ナノ造影、およびAI技術によるMRIを利用した手軽でエビデンスに基づいた診断により、未病段階での早期発見や重症化・再発の予防等を切れ目なく行う社会システム

## 量子論的生命現象の解明・模倣、量子から個体に至る放射線生物応答の解明

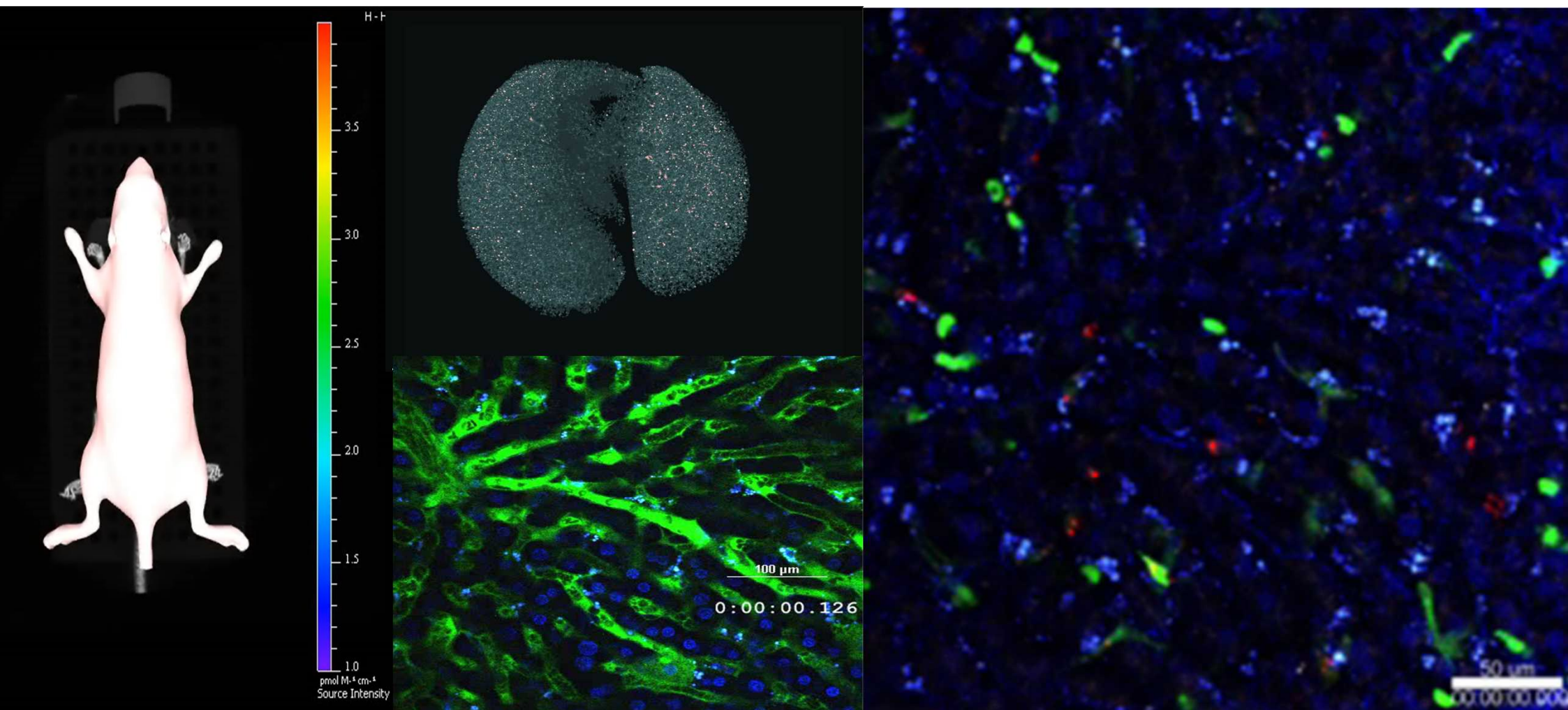
- 「物質が集まり、いかにして生命になるのか」という学術的に根源的な問いの解明
- 嗅覚を模倣・改良した超高感度物質センサーによる超早期病気発見
- 生物を模倣し、ありふれた元素を用いた人工光合成、人工酵素、超省エネ肥料生産等により、経済性と環境適性を両立した持続可能なエネルギー生産、バイオ燃料、バイオ素材、バイオ医薬等生産、農業生産を実現・普及し、地球環境を改善

## (1) ナノ量子センサーによる生命科学の革新



ダイヤモンド結晶等に閉じ込められた、外部を鋭敏に感じ取る「量子」(NVセンター)を使って、細胞内の温度、電場、酸性度などを極限精度で計測し、老化、がん、神経などの複雑な生命現象を解明していく。

## iPS細胞による再生医療、がん研究、抗がん剤研究の課題



*Sci. Rep.*, 2018; *Sci. Rep.*, 2017;  
*Sci. Rep.*, 2015; *Nature Biotech.*, 2004;  
*Nano Lett.*, 2012; *ACS Nano*, 2010; 2011

**AMEDプレスリリース**  
 日本経済新聞、日経産業新聞、日経ハイテク、  
 日刊工業新聞、中日新聞、科学新聞

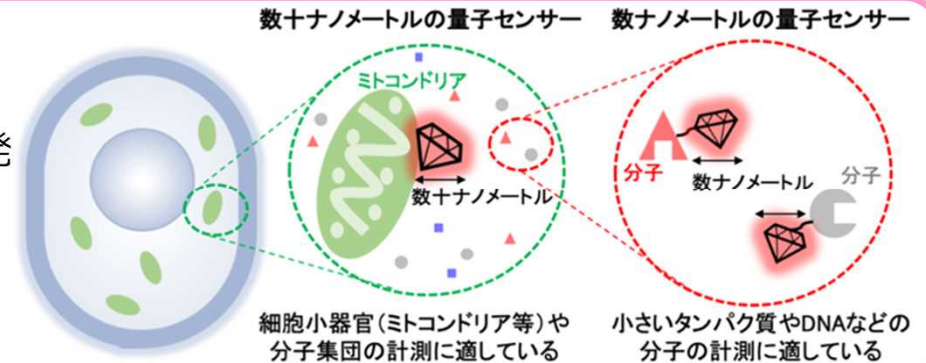
9/1 日経新聞・サイエンス面 特集記事掲載 「量子生命科学で新たな地平をひらく」

1/12 読売新聞・くらしサイエンス面 サイエンスReport 「量子技術で「測る」が変わる」

## 世界最小のダイヤモンドで量子センサーを開発： 5/28リリース

- 世界最小5ナノメートルの「超高感度ナノ量子センサー」を開発
- タンパク質など分子変化の計測が可能に

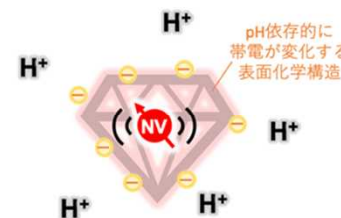
新聞掲載：3件（日経新聞、科学新聞、ぐんま経済新聞）  
web掲載：3件（科学新聞、日経新聞、オプトロニクス）



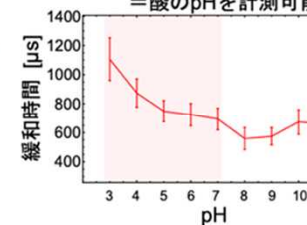
## 世界初・ナノサイズのpHセンサーを実現： 9/20リリース

- 生きた細胞内部局所のpHの「その場計測」が可能ナノ量子センサーを世界で初めて実現
- 細胞の恒常性維持の仕組み解明等、あらゆる細胞研究の基本ツールに

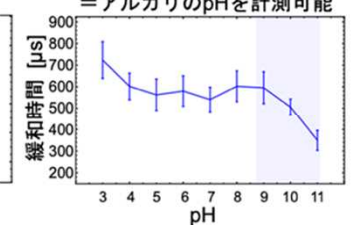
pH計測可能な  
ナノダイヤモンド量子センサー



カルボキシ化処理後  
酸性で変化  
=酸のpHを計測可能



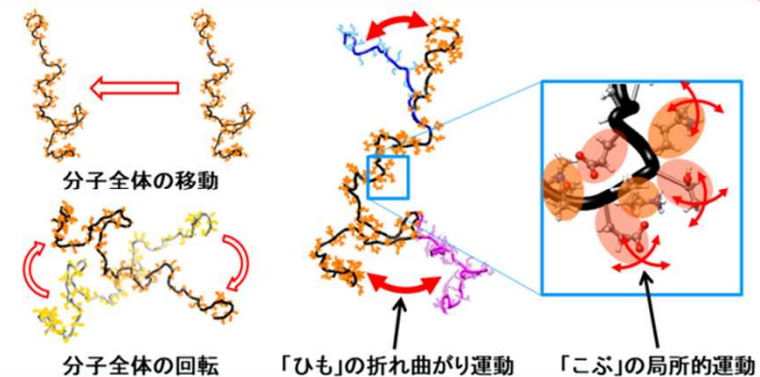
ポリシステイン化処理後  
アルカリ性で変化  
=アルカリのpHを計測可能



新聞掲載：2件（日刊工業新聞、日経新聞、財形新聞） web掲載：2件（オプトロニクス、MONOist）

## タンパク質の動きが病気を引き起こす：8/26リリース

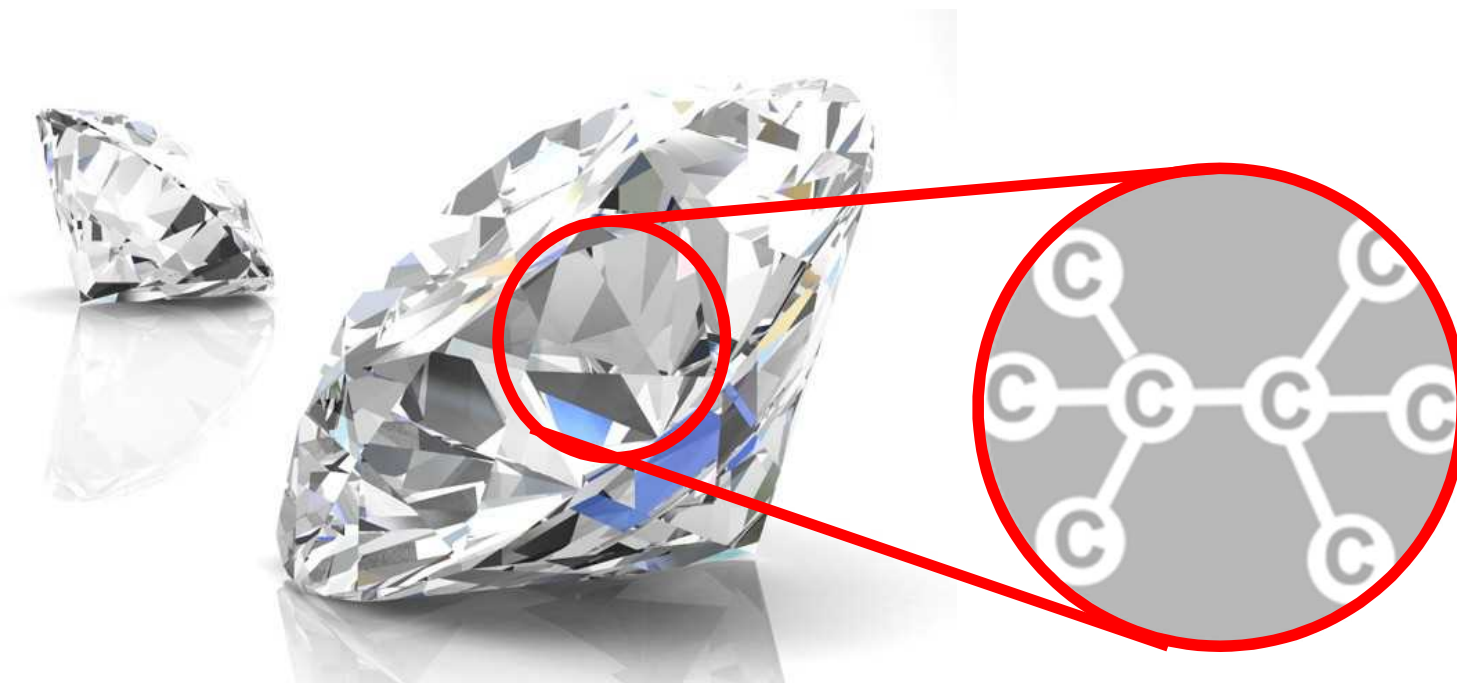
- タンパク質分子の動きを測定する中性子を用いた新たな解析技術を開発
- α-シヌクレインの分子内部の特定の運動が複数・同時に起こることが、パーキンソン病発症の鍵となるアミロイド線維の形成に必須であることを世界で初めて証明



新聞掲載：2件（日経産業新聞、科学新聞）

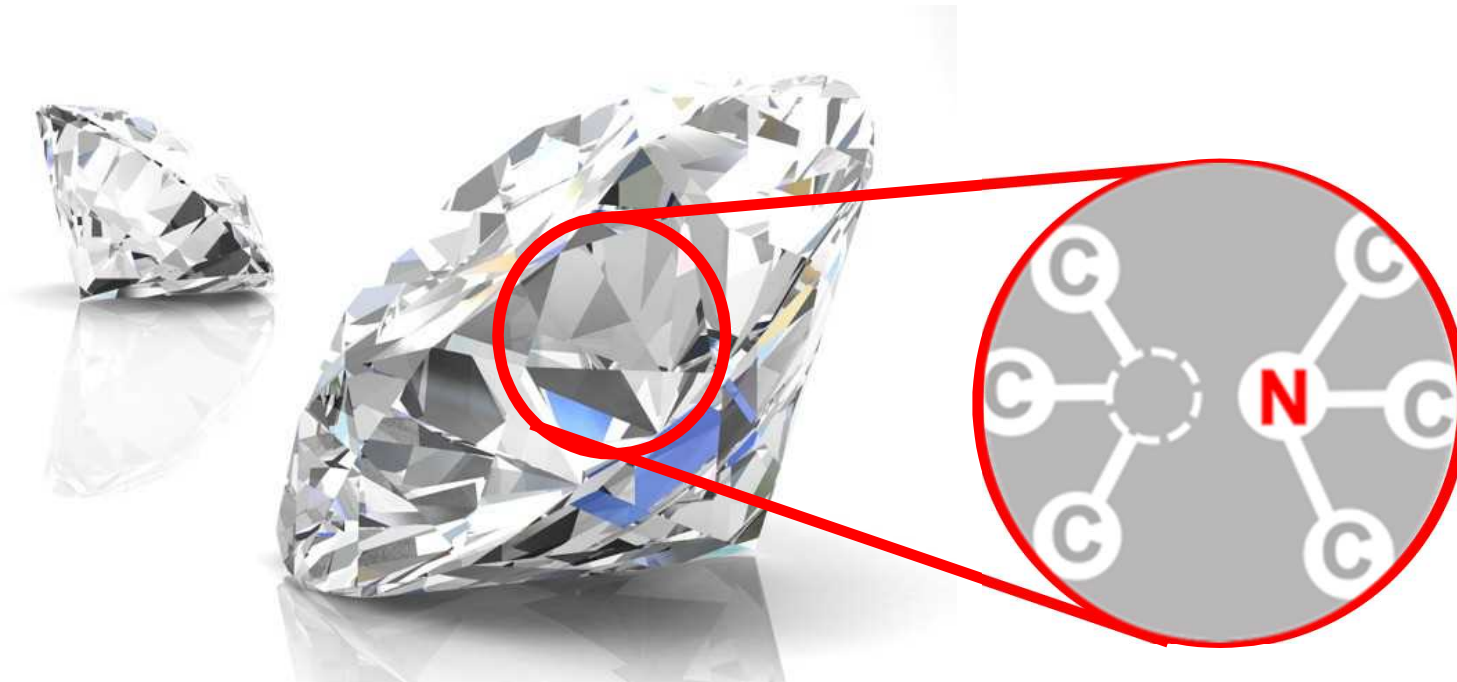
- 1.長時間に渡って機能する
- 2.リアルタイム計測可能な
- 3.超マイクロサイズのpHセンサー  
(ナノサイズ)

**蛍光pH指示薬では実現不可能**



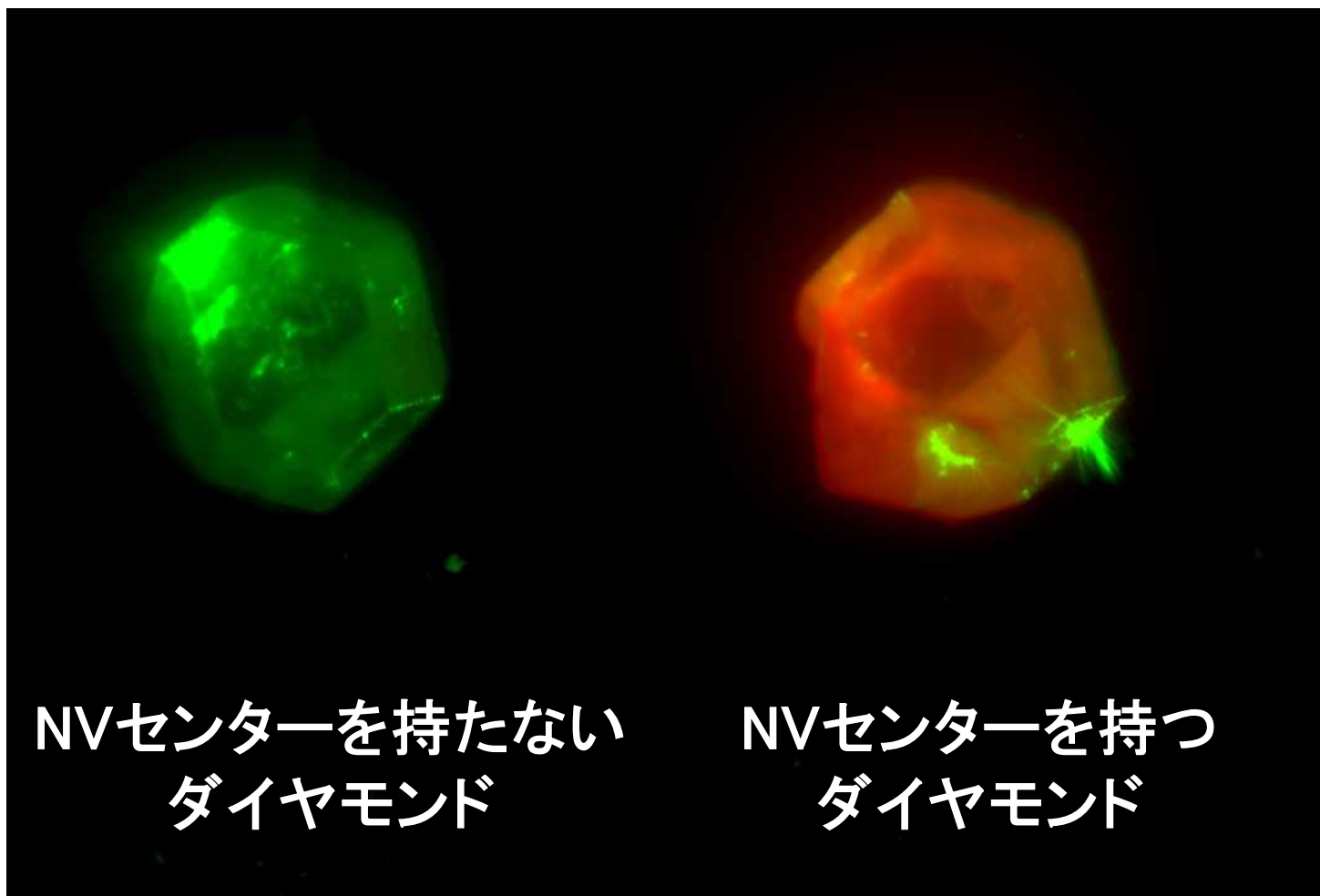
ダイヤモンドはご存知の通り  
純粋な炭素の結晶ですが





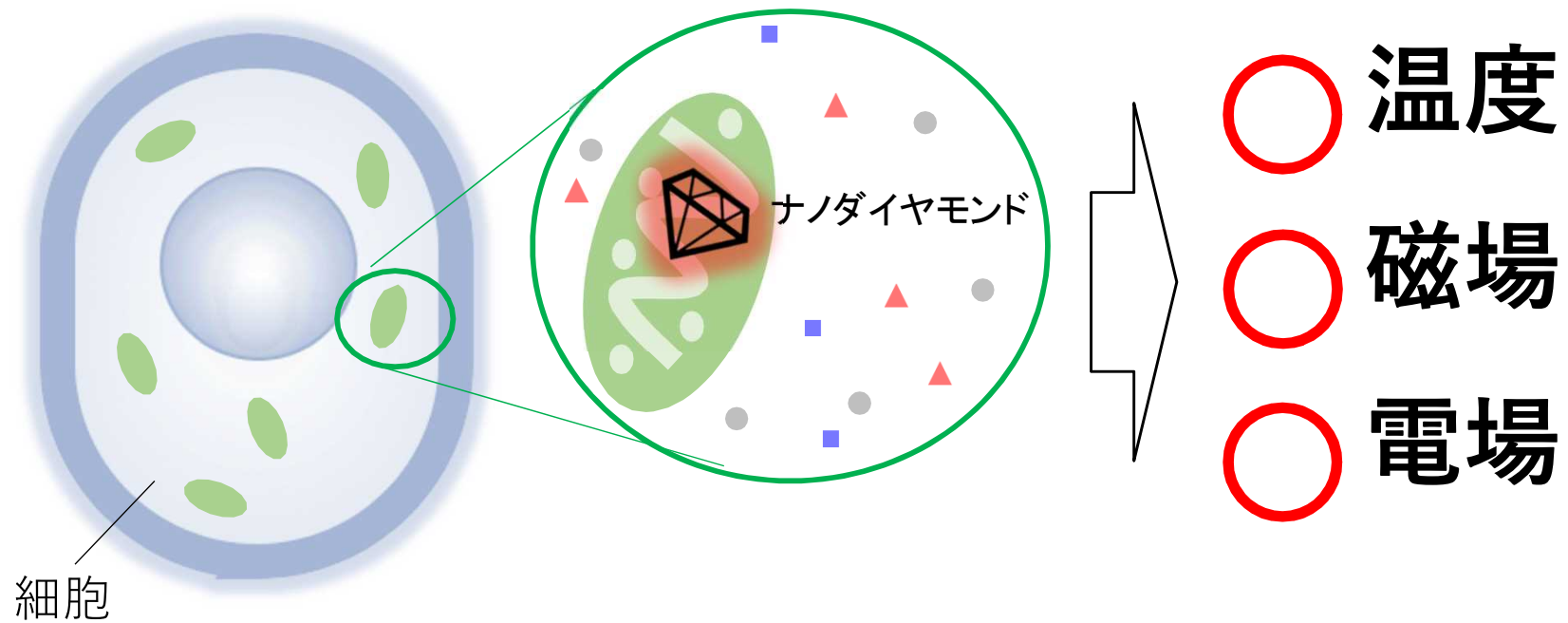
NVセンター

窒素不純物が作る結晶の欠陥（=傷）  
「NVセンター」が超高感度のセンサーになる  
“量子センサー”



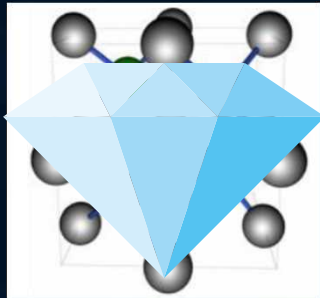
**NVセンターを持つダイヤモンドは赤く光る**

その微粒子は「超マイクロサイズのセンサー」に



ナノダイヤモンド1個で様々な情報を取得できる

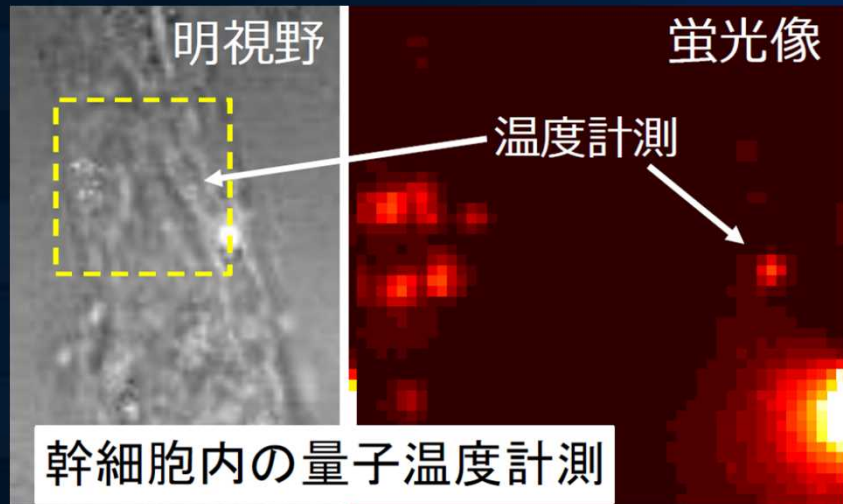
# 光検出電子スピン共鳴による幹細胞温度測定



ナノダイヤモンド  
窒素欠陥(NV)中心

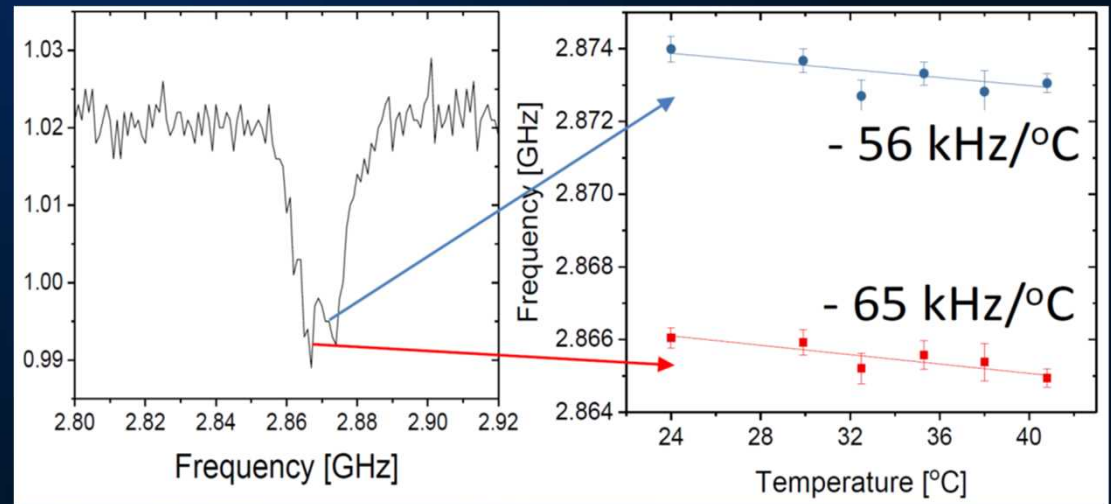
- ① NV中心が電子スピン共鳴時に蛍光量が変化 (ODMR活性)
- ② ナノスケール、超高感度センシング (温度、磁気、電気)
- ③ 常温・常圧・生体無毒性のため生体計測応用が期待

ナノダイヤモンド標識幹細胞画像



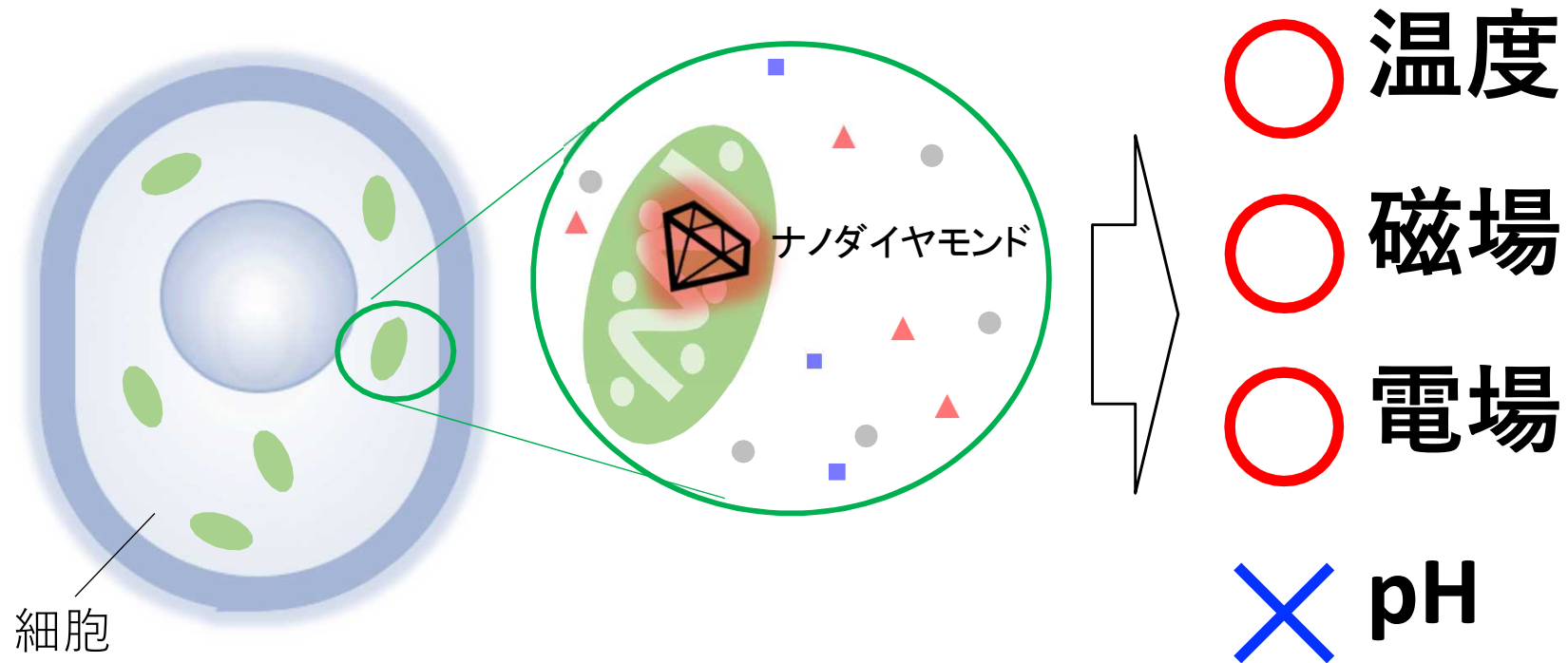
ODMR活性スペクトル

ピーク位置の温度依存性



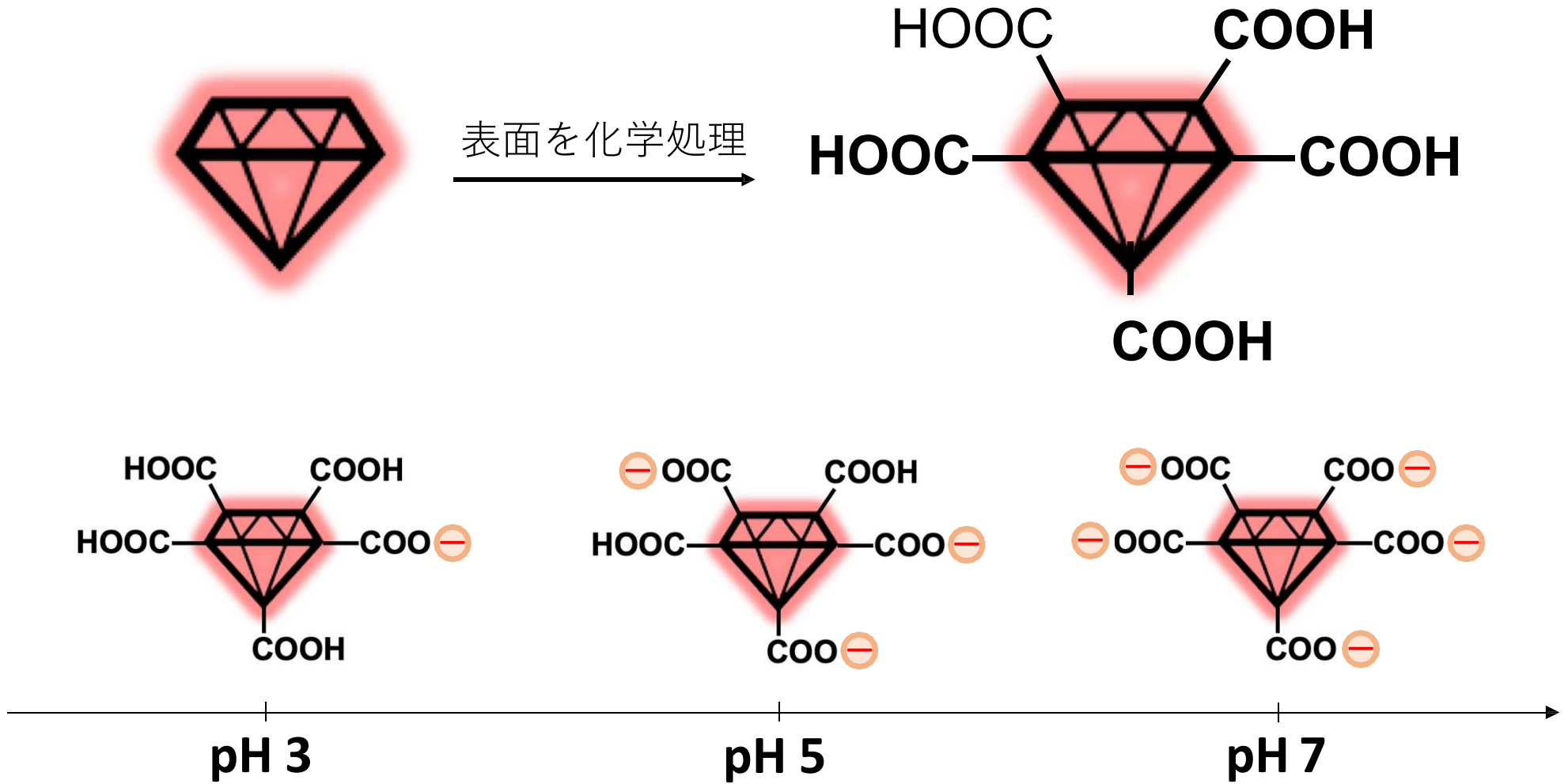
世界初の幹細胞内温度測定を実現

## ナノダイヤモンド量子センサーで超ミクロ計測



生命科学において特に重要な「pH」が計測できない

→量子センサーによるpH計測法が世界中で模索

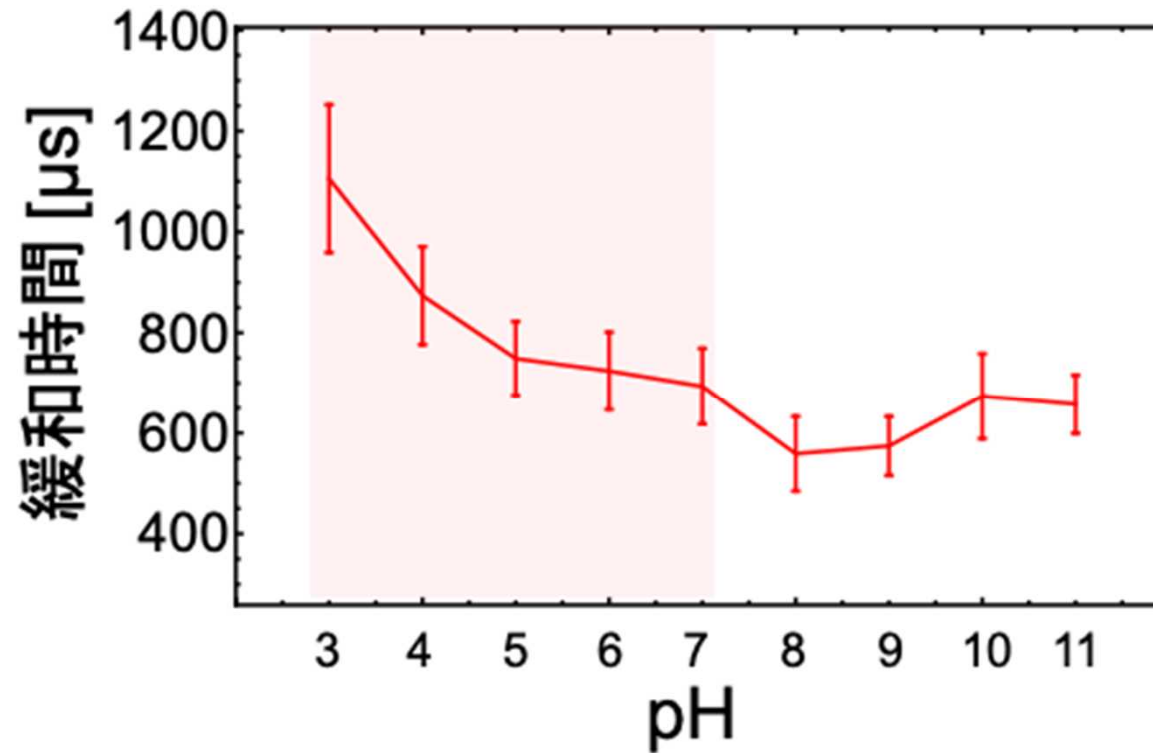


予想：pH 5の周辺でpHを検出できるはず

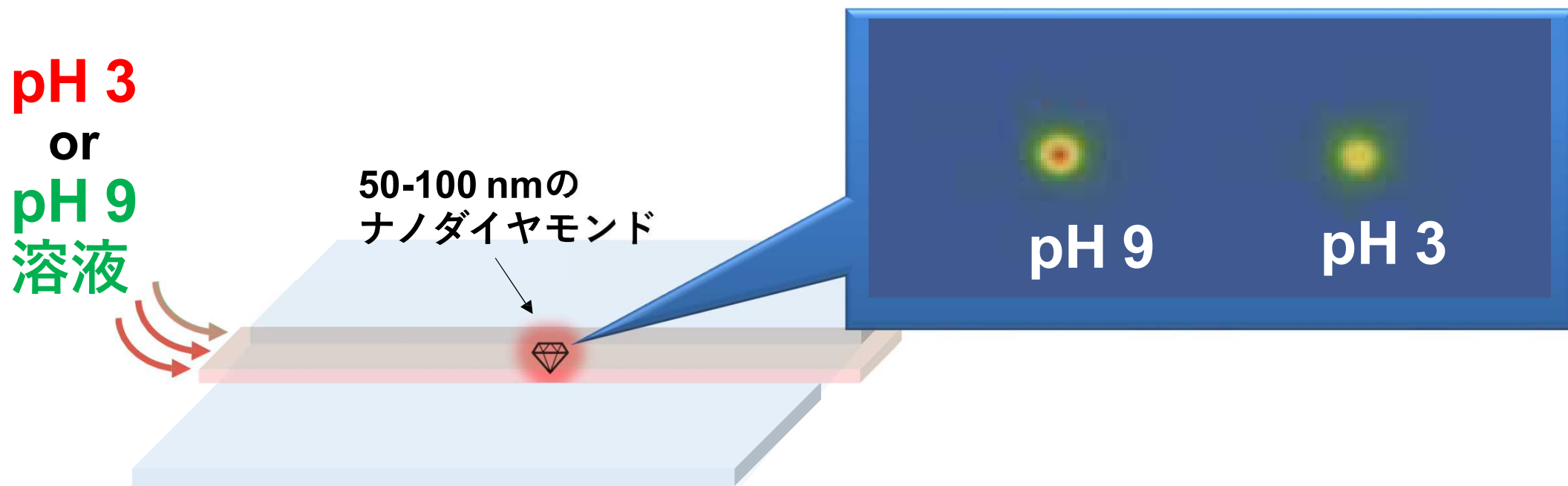
電荷 小



電荷 大

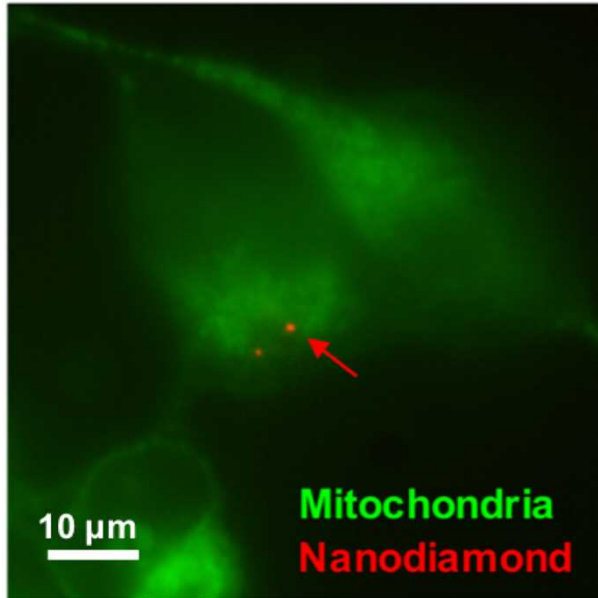


ナノダイヤモンドがpHを検出



世界で初めてリアルタイム超ミクロpH計測を実現





もうすぐ、細胞内で  
超マイクロpH計測が可能になる

- パーキンソン病など神経変性疾患のメカニズム解明
- 発がんメカニズム解明や発がんリスクの評価
- iPS細胞など幹細胞の分化能評価

などへの応用が期待できる



MRI造影剤「リゾビスト」は  
1ミリグラムで数百円

ダイヤモンドパウダー



Economy

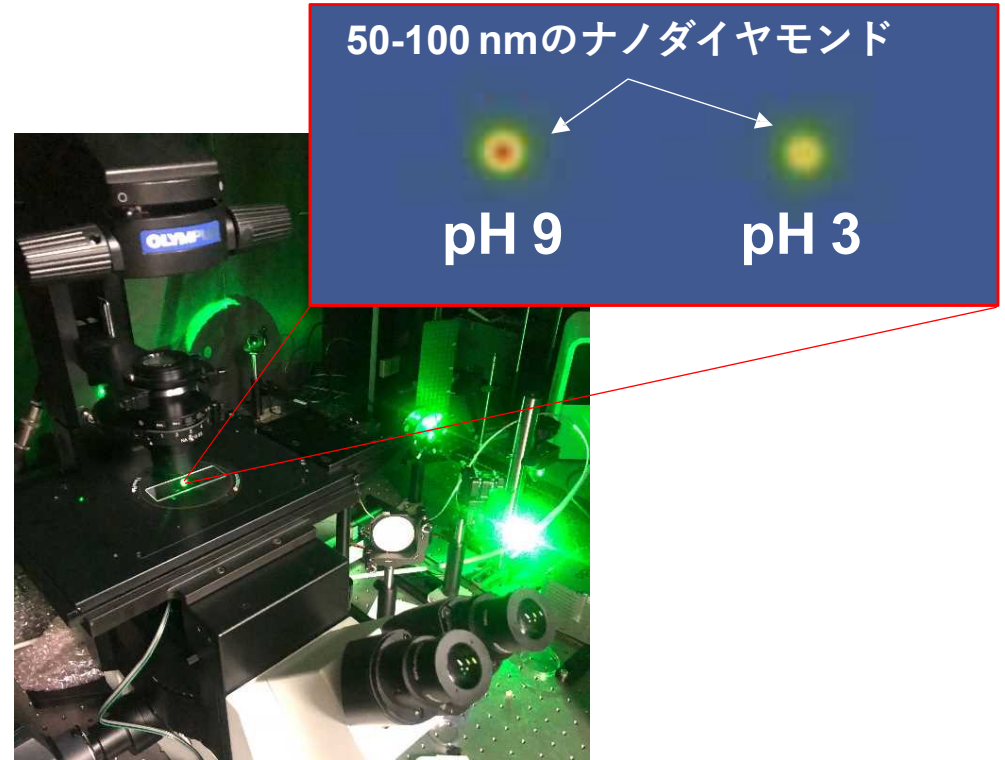
★★★★☆ 平均満足度 4.6 [この商品のレビューをみる\( 3件\)](#)

ミスミ [C-VALUE](#)

通常単価: 1,950円~ 通常出荷日: 在庫品1日目 当日出荷可能 18:00まで受付

ダイヤモンドペーストの研磨力を上げたいときにペーストに混ぜてお使いください。【C-Value】

ナノダイヤモンドは  
1ミリグラムでわずか1円



50-100 nmのナノダイヤモンド

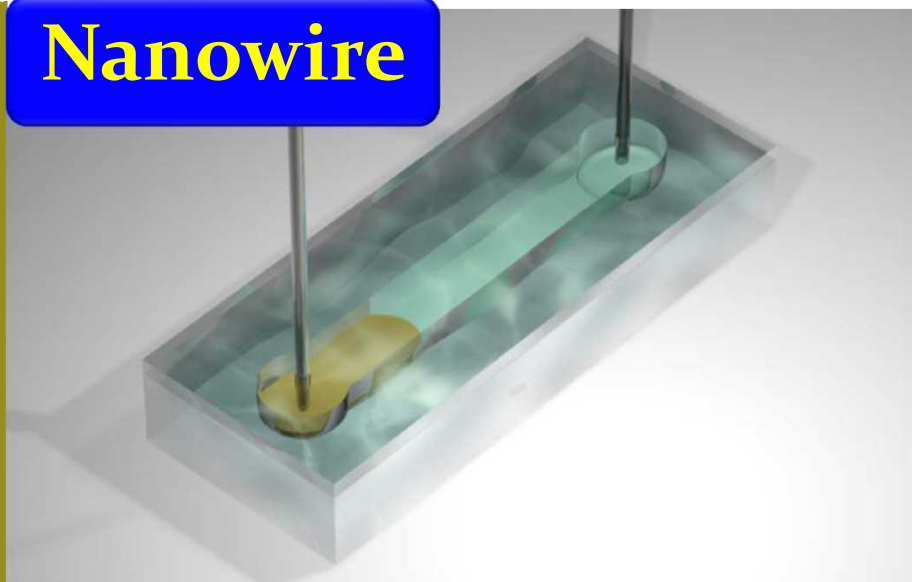
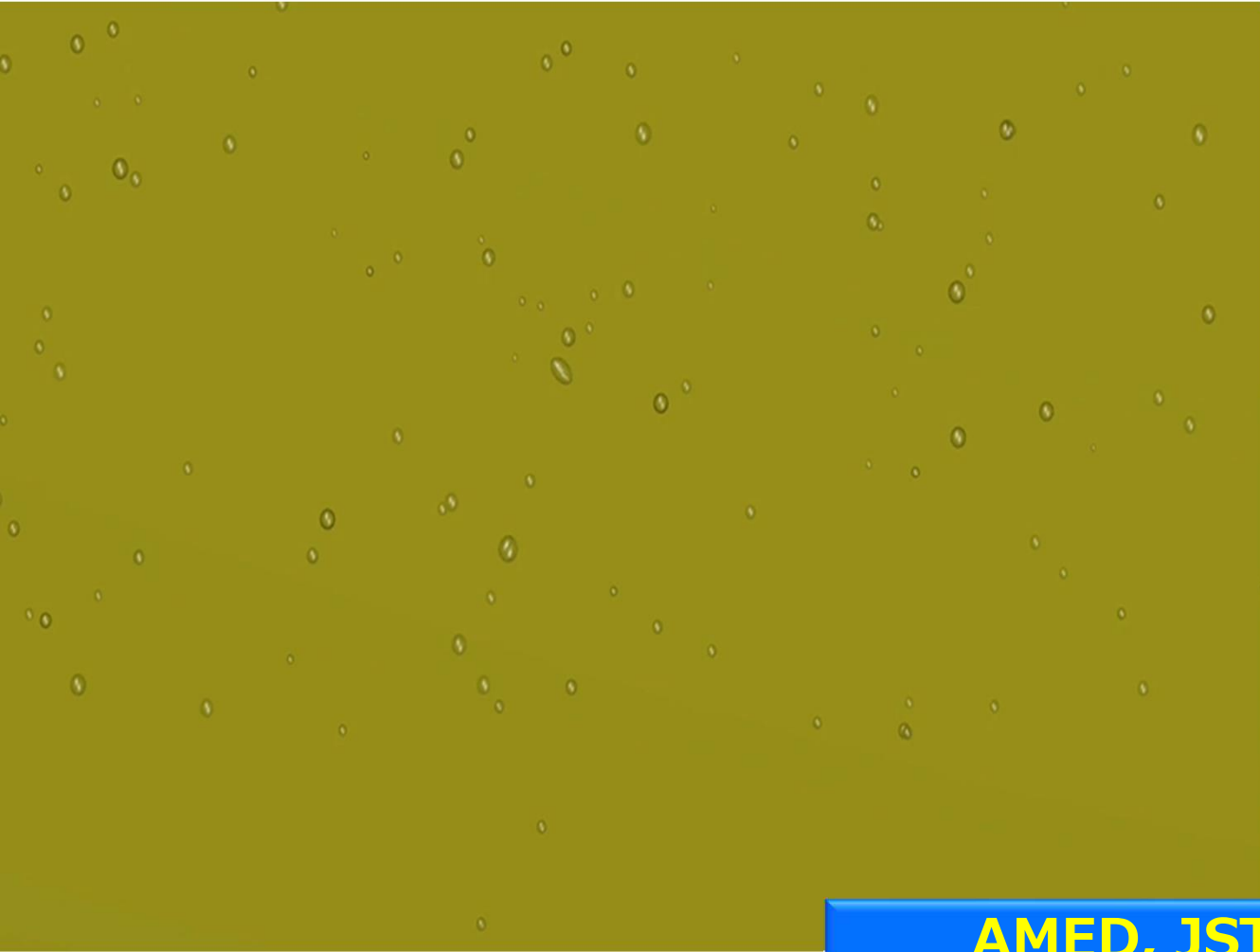
pH 9

pH 3

市販の蛍光顕微鏡で  
pH計測が可能

あらゆる細胞研究の基礎ツールとして普及していくと考えられる

ナノ量子センサとAI診断、ウェアラブルデバイスを組み合わせた  
各種疾患の早期発見、未病段階のセルフケア、重症化や再発の予防



AMED, JST、国立がん研、名大プレスリリース  
朝日新聞、読売新聞、毎日新聞、日本経済新聞、日  
経ハイテク等、計40紙、40海外Web Media

*Science Adv.*, 2017; *ACS Nano*, 2019  
*Nano Lett.*, 2019

# 幅広い研究者コミュニティの形成

- 2017年 4月 量子生命科学研究会 設立（2017年と2018年に研究会を開催）
- 2019年 3月 研究会 有識者会議による「量子生命科学の推進に関する提言」公開
- 4月 一般社団法人 量子生命科学会 設立（会長：平野俊夫）
- 4月 QSTに理事長直轄組織として量子生命科学領域を創設

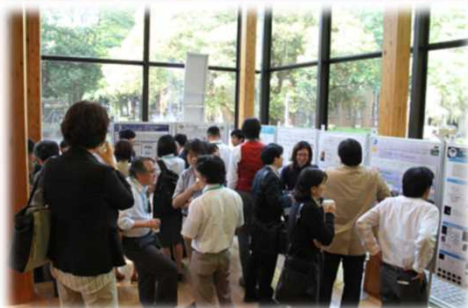
領域長 馬場 嘉信（名古屋大）  
 領域研究統括 白川 昌宏（京都大）  
 副領域長 須原 哲也（QST）

13研究グループ、約100名の研究者



5月 量子生命科学会 第1回大会（参加者273名）

12月 QST国際シンポジウム「量子生命科学」（参加者208名）



- QSTが有する研究開発基盤を強化し、量子生命科学に関するオープンプラットフォーム型の量子技術イノベーション拠点を形成。
- 国内外の大学・研究機関・企業等と連携して、基礎研究から技術実証、オープンイノベーション、知財管理、人材育成等を一体的に実施。
- 最先端の量子技術の開発と社会実装を加速するとともに、国際感覚豊かな若手リーダーを育成。



## 健康長寿社会の実現

- どこでも短時間で各種疾患を早期発見
  - 生体ナノ量子センサを用いたウェアラブルデバイスによる常時体内診断
  - 超高感度MRIとAI技術の融合診断によるがん細胞の診断、循環器・脳疾患診断
- 未病段階のヘルスケア、重症化・再発の予防
  - 生体ナノ量子センサとその信号に反応する治療法を内包した「量子スマートセル」による体内診療
  - 生体ナノ量子センサにより品質管理された細胞による再生医療

## 安全安心社会の実現

- ごく微量な危険物の探知
  - 磁気コンパスや嗅覚等を模倣・改良した超高感度物質センサ

## 生産性革命の実現

- 省エネ・地球環境改善
  - 生物を模倣した人工光合成等による効率的な有用物質の生産

- 統合イノベーション戦略2019 (6/21閣議決定)**  
 量子技術を「特に取り組みを強化すべき主要分野」に位置づけ
- 量子技術イノベーション戦略 (2019末までに策定) の中間報告 (7月発表)**  
 量子生命を「量子融合イノベーション領域(案)」に位置づけ

