

室温で使える 次世代超高感度センサを ダイヤモンドで創る

量子科学技術研究開発機構

量子ビーム科学部門

高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部

主幹研究員 小野田忍

2019年5月30日

発表の概要

私たちは**イオン注入技術**を利用して、**ダイヤモンド**中の点欠陥を形成する技術を開発してきました。点欠陥は、電子スピンという量子性を持っています。電子スピンの量子性を上手く利用することにより、**室温で動作可能**な

- ・ 量子効果を利用した超高感度な磁気センサ
- ・ 量子中継器などの量子情報機器

等が開発できます。さらに、

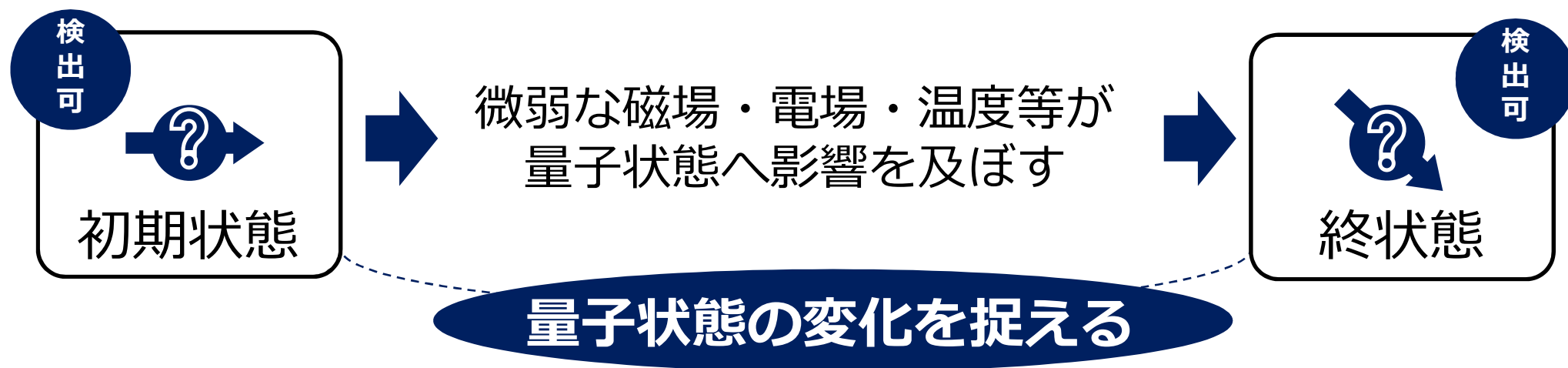
- ・ 量子ビット・量子センサ向けのイオン注入装置の開発

に興味のある企業様と共同開発できることを希望しています。

1-1.次世代超高感度センサ＝量子センサ

古典的計測では不可能なほど微小な物理量を
量子力学の法則を利用して計測するセンサ

例：超電導量子干渉素子（SQUID）



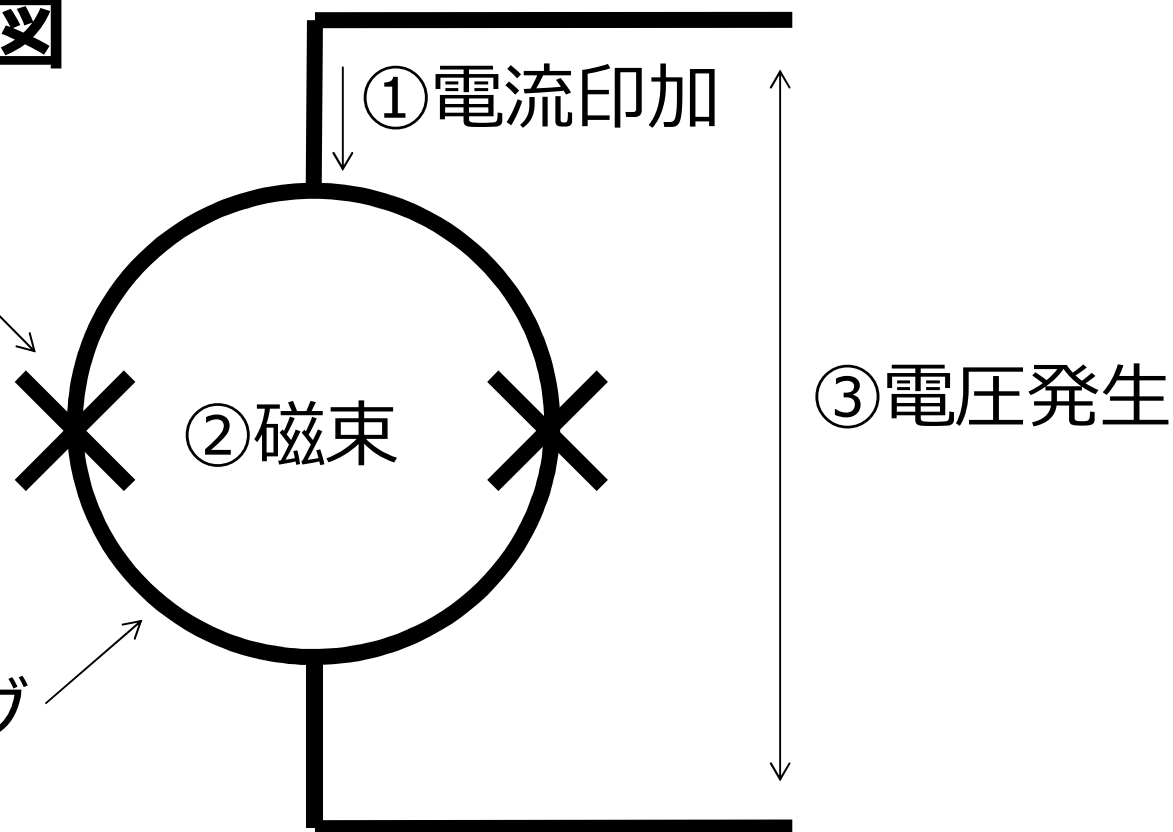
初期状態と終状態を検出できれば量子センサが実現できる

1-1.次世代超高感度センサ：SQUID

SQUIDの構成図

ジョセフソン接合

超伝導リング
(極低温)

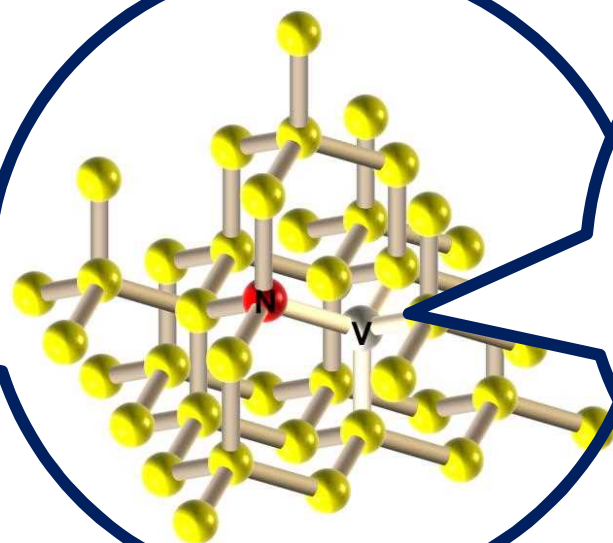
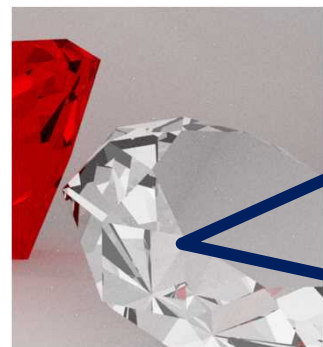


地磁気の1億～10億分の1程度の極めて小さな磁束密度を計測できる。
医療応用、地球物理応用、材料評価応用等広い分野での応用が期待。

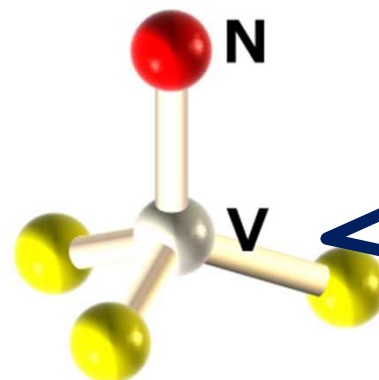
難点：極低温・大型の装置

1-1.次世代超高感度センサ：NVセンター

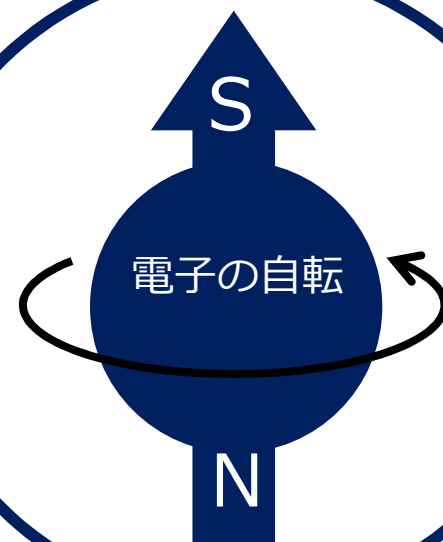
炭素を置換した窒素(Nitrogen)と隣の空孔(Vacancy)



ダイヤモンド
の結晶構造



NVセンター
の構造



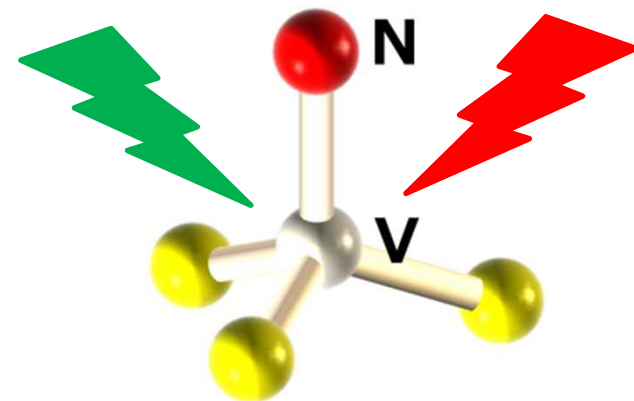
電子が自転している
= スピン(小さな磁石)

特徴

- 室温で利用できる→**革新的**
- ナノからミリメートルまで様々→**マルチスケール**
- SQUIDに匹敵する磁気感度

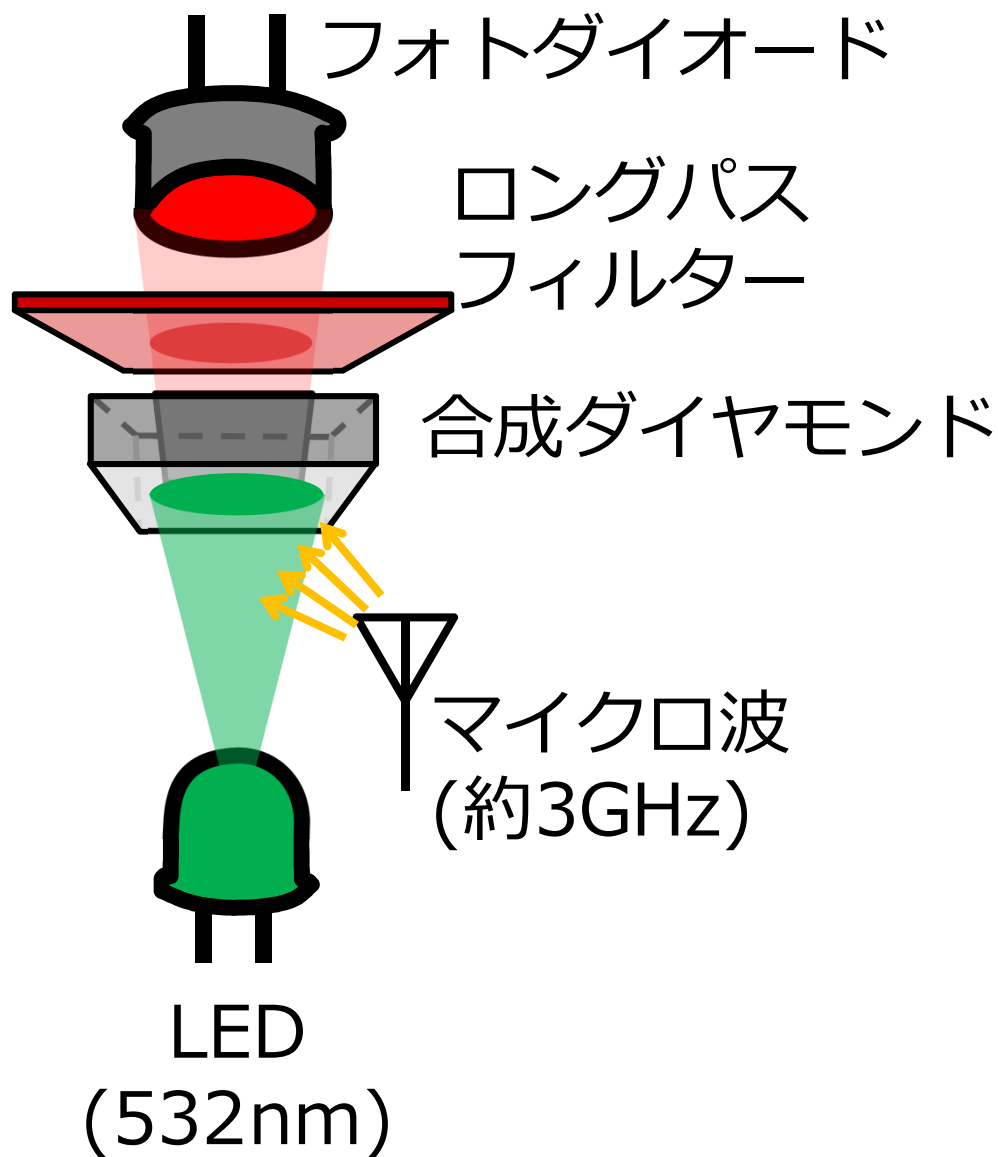
1-2. 高濃度NVセンター：蛍光特性

高濃度NVセンター



緑(532nm)のレーザーにより赤(600-800nm)の蛍光

1-2. 高濃度NVセンター：磁気センサの例



mm程度の合成ダイヤモンド
(高濃度NVセンターを含む)

フォトダイオードの出力
で量子状態を検出できる

3cm³以下の大きさで実現さ
れていて、デモ機の開発が進ん
でいる

1-2. 本節のまとめ

開発が進行中のNVセンターによる磁気センサは、
電子スピンの量子状態の変化を検出している。

“量子”を意識することなく実装できる状況にある
“ミリ”メートル程度の大きさの高濃度NVセンターを利用
5～10年で実用化まで進行中

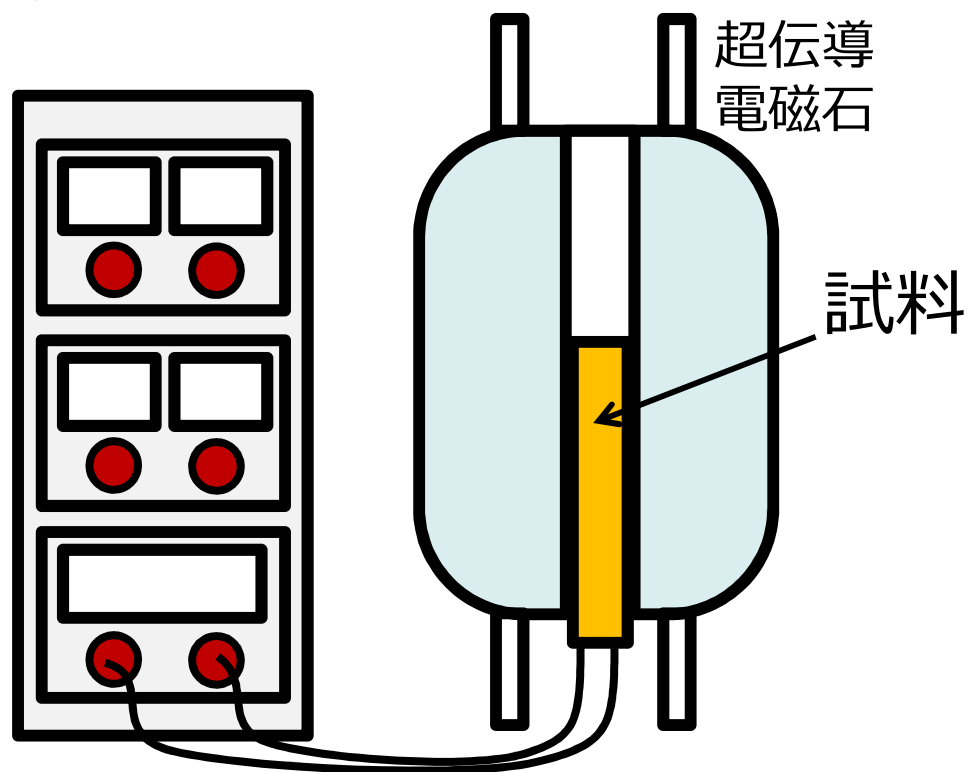
先行メーカー有り

脳磁計測、等

mmスケール

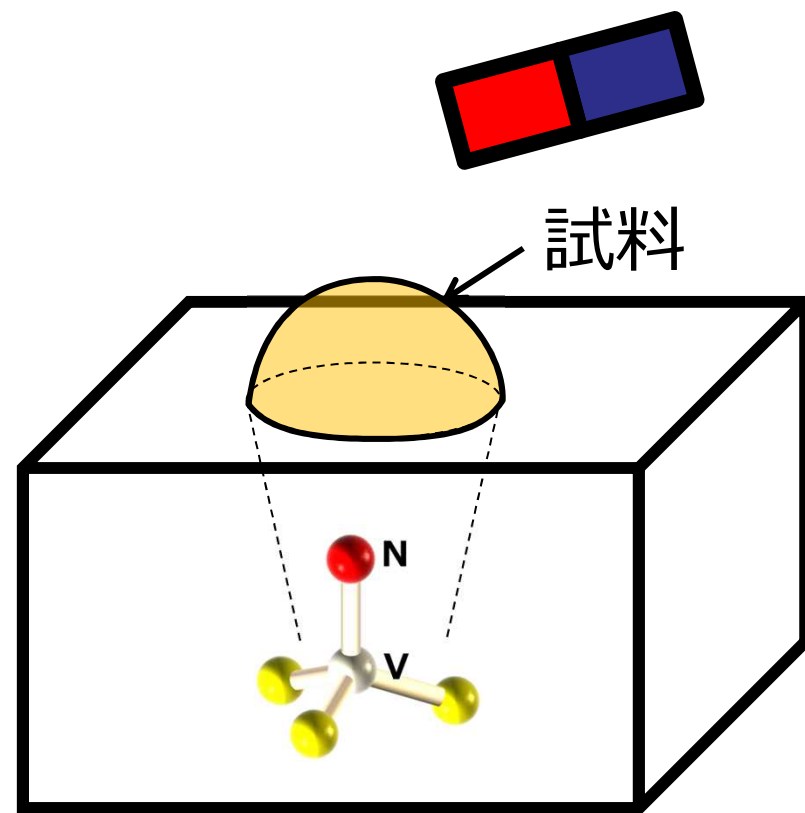
1-3. 核磁気共鳴 (NMR)

市販のNMR



有機化合物、高分子材料、生体物質の分析。平面構造や立体的構造まで分かる。生命科学の発展に欠かせないツール。

ナノNMR

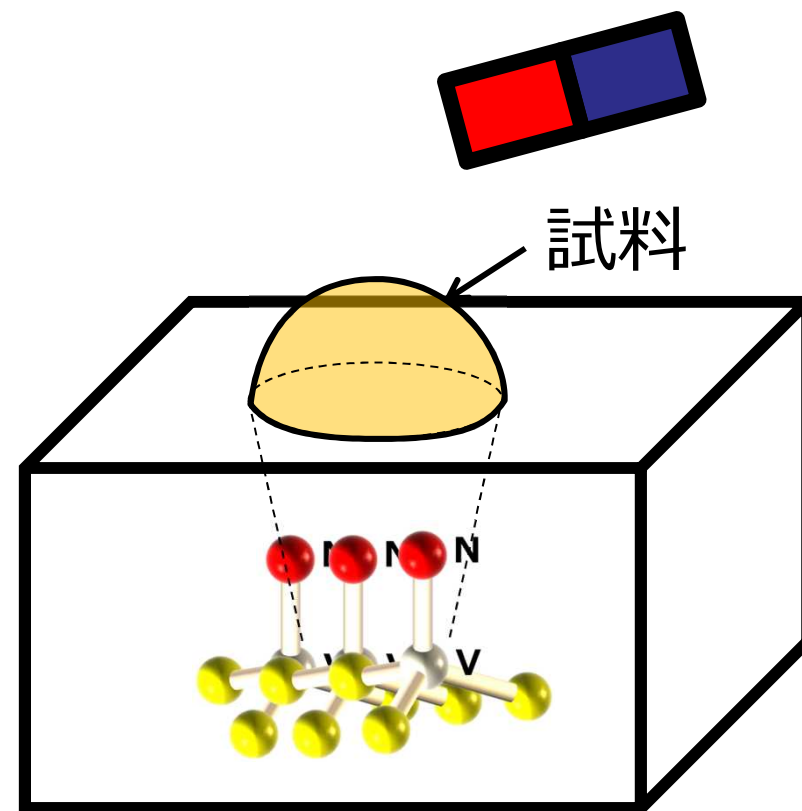
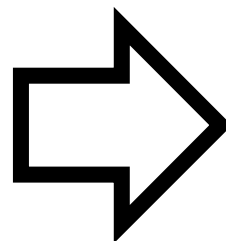
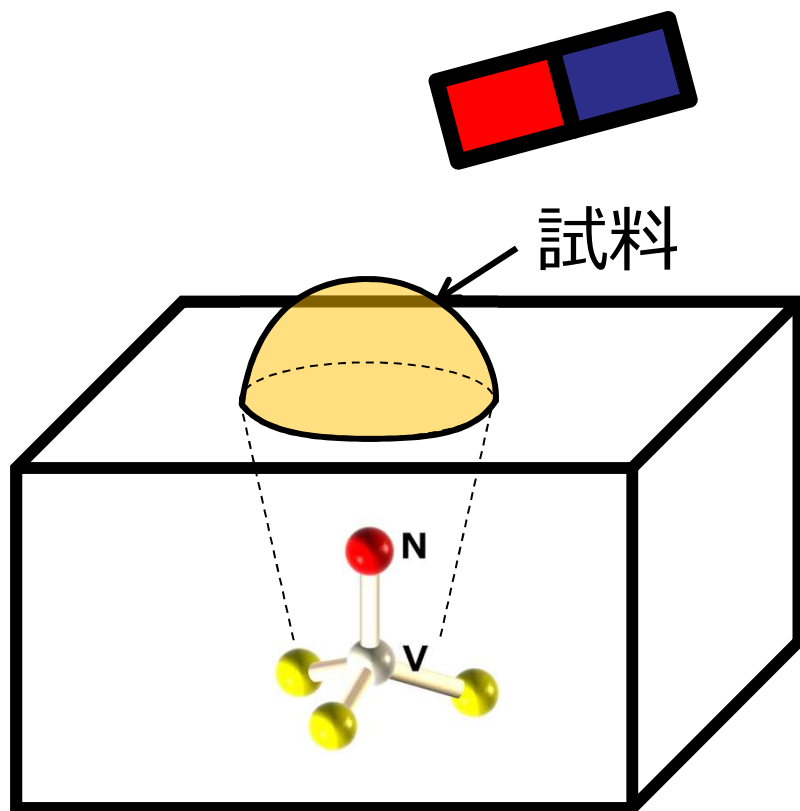


ナノメートルスケールの極微量試料の構造解析。次世代の超高感度NMRとして期待。

1-3.核磁気共鳴 (NMR)

ナノNMR

ナノNMR



NVセンター同士の量子もつれ状態
(十数nm間隔) を利用すればさら
に高感度化が期待される。

1-3.本節のまとめ

- 次世代の超高感度磁気センサによるナノNMR装置の開発は発展途上

→研究開発からご興味ある企業様との共同研究希望

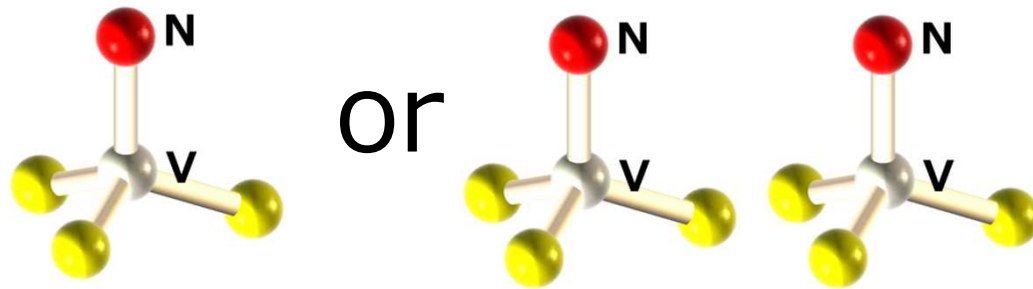
先行メーカー無し

ナノ核磁気共鳴 (NMR)

nmスケール

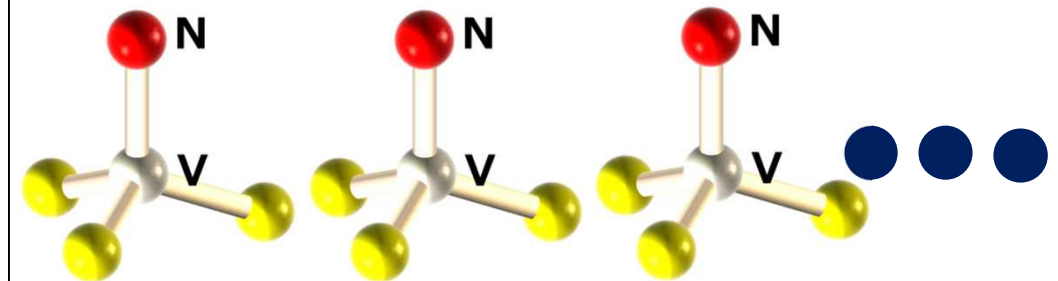
2-1.新技術の特徴・従来技術との比較

従来のイオン注入でできること



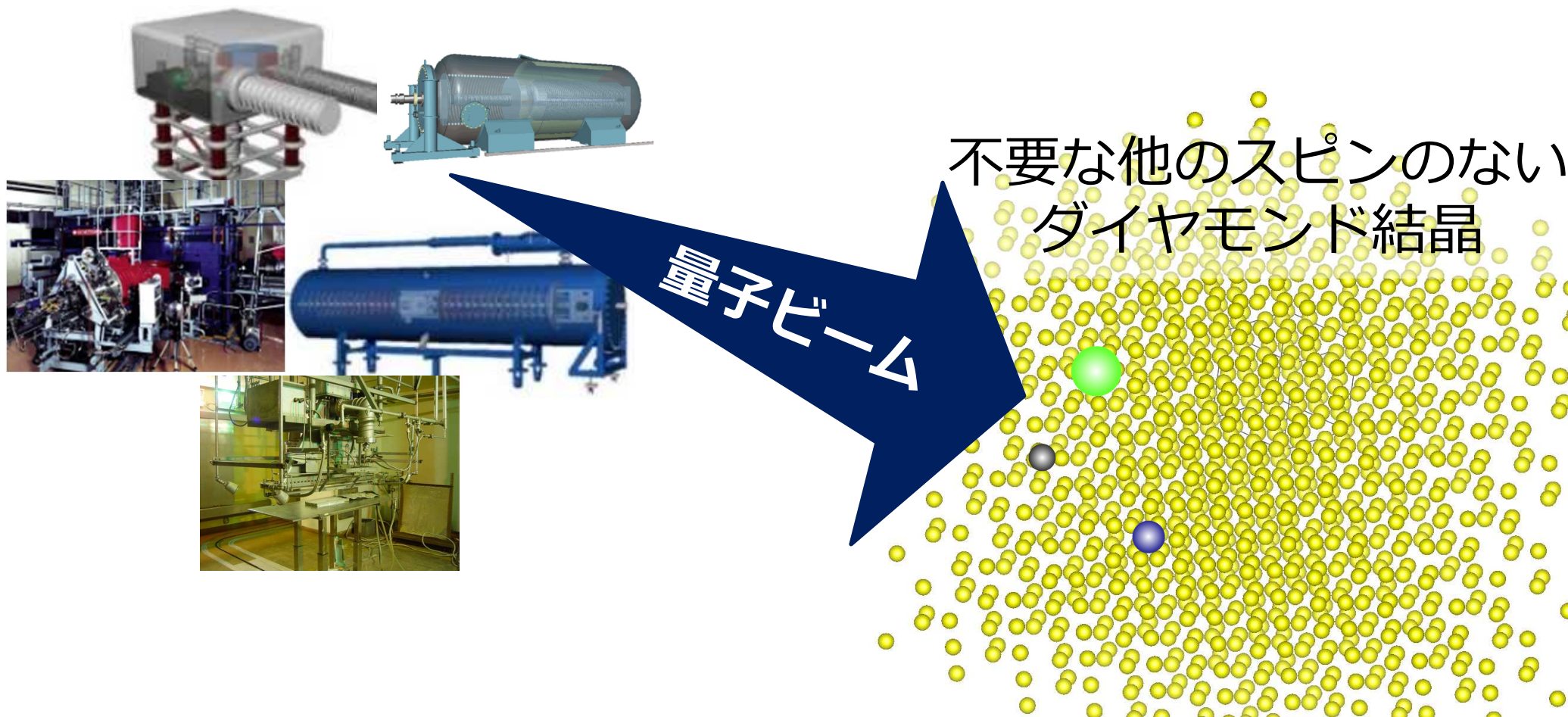
1つは容易に形成可能
2つを形成する成功率が低い
1つの量子状態では感度に限界
(但し、通常のセンサの感度よりも高感度)

新しいイオン注入でできること



3個以上が形成可能
形成する成功率が高い
量子もつれ状態により感度向上

2-2.イオン注入法：概要



2-2.イオン注入法：新技術

NVセンターを作るためのイオン源

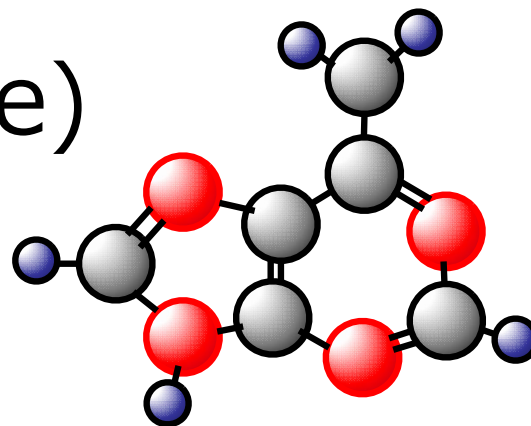
1つ・・・N注入（2005年～）

2つ・・・N₂注入（2006年～）

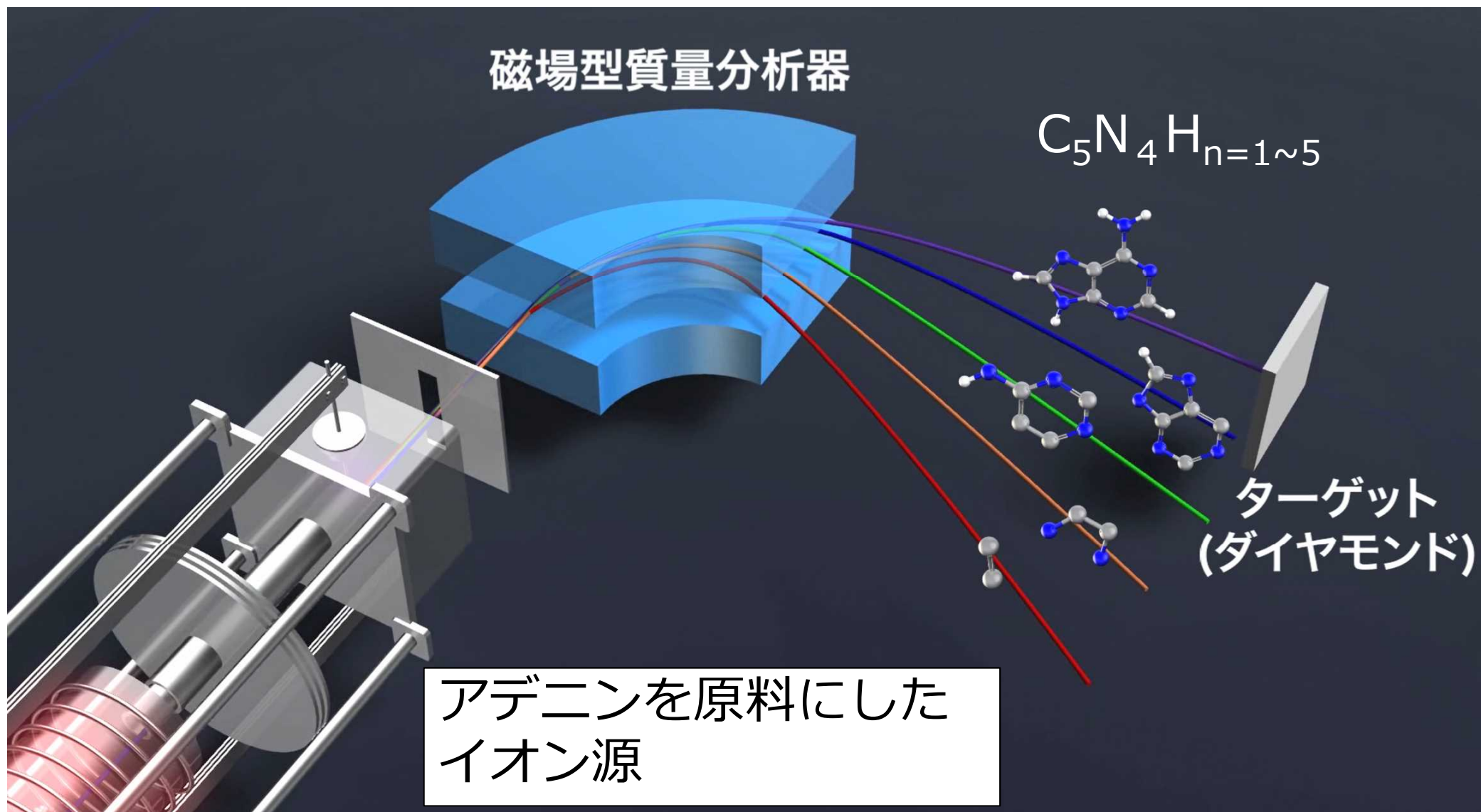
3つ・・・Nクラスター注入（実現されていなかった）

純粋な窒素クラスターは難しいので、新たに以下のイオン源を開発

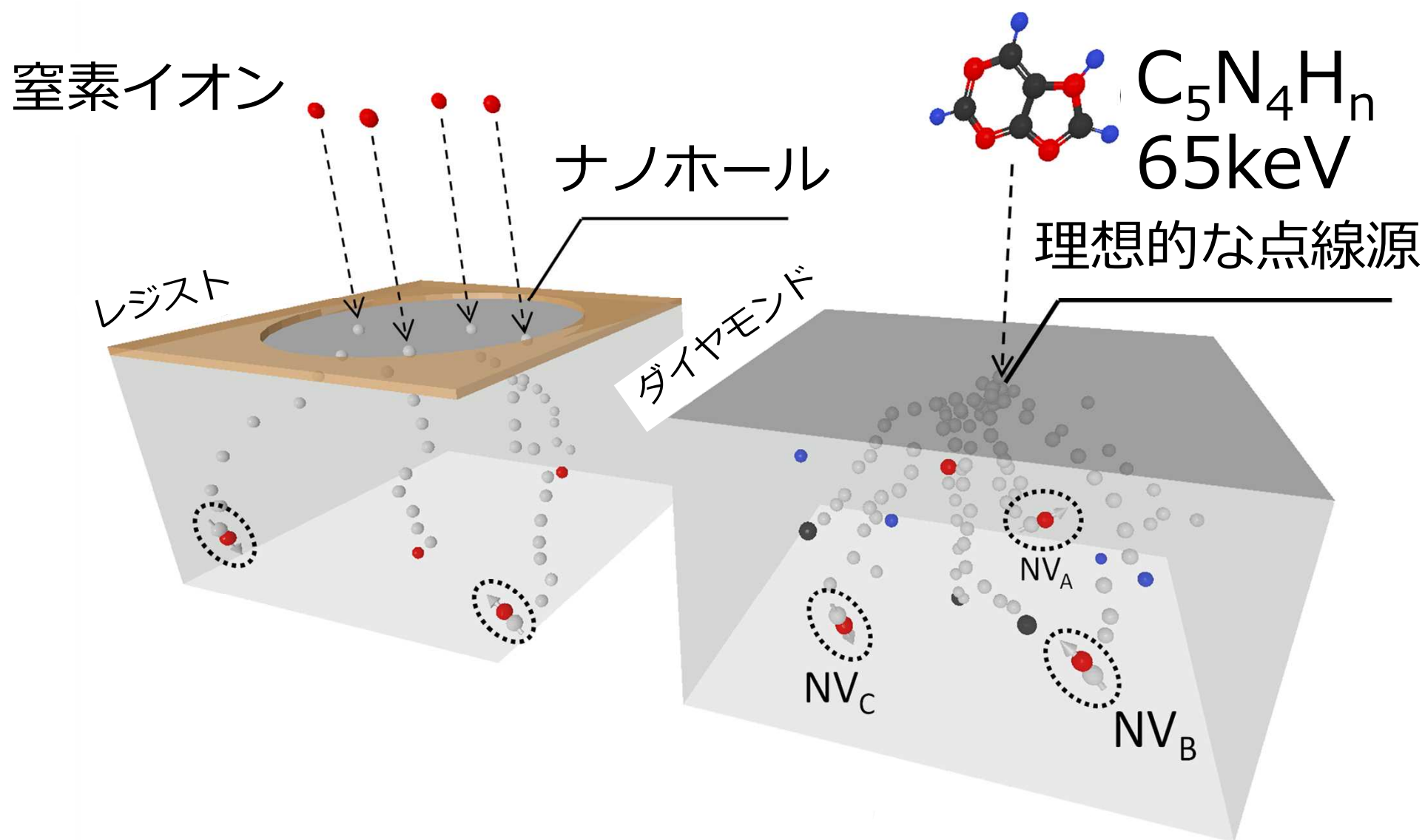
アデニン (adenine)



2-2.イオン注入法：新技術実証実験

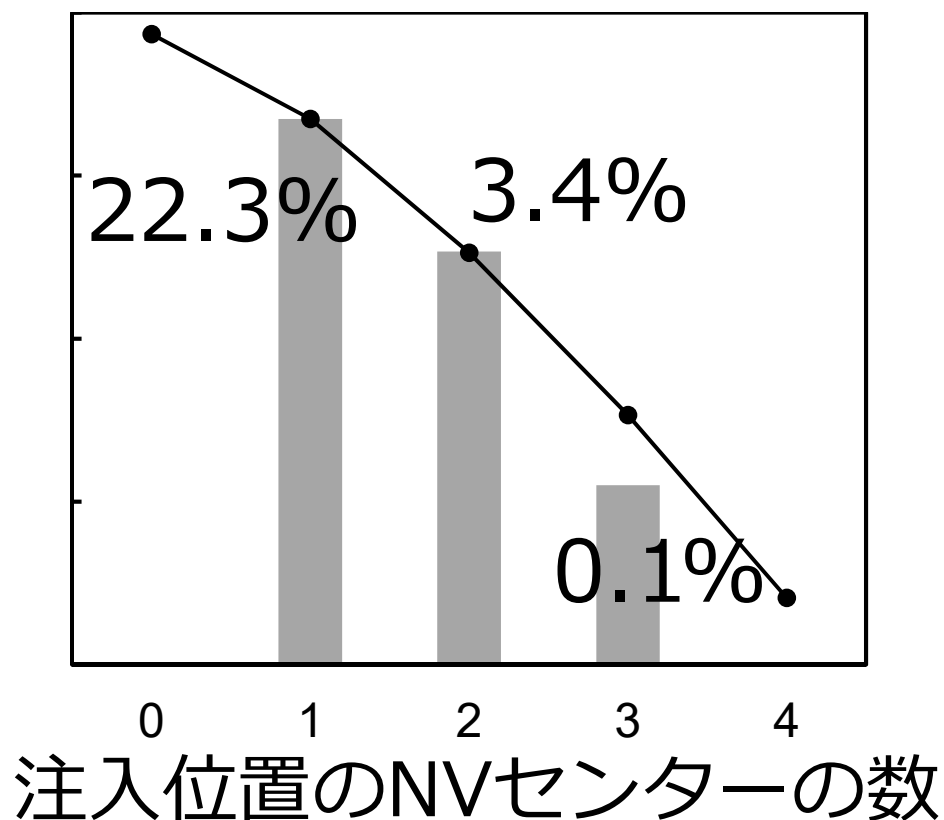


2-2.イオン注入法：新旧技術比較

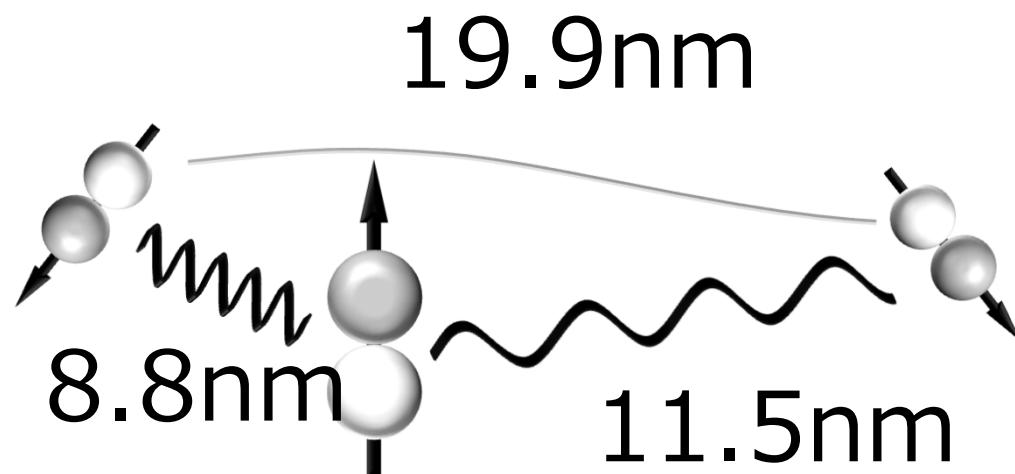


2-3.新技術実証実験結果

形成したNVの割合 (%)



形成できた3つのNVセンターの例



高い成功率で1つ、2つ、3つのNVセンターが形成でき、そのうちの1つは20nmの範囲に量子もつれ状態を発生できる距離にNVセンターが配置

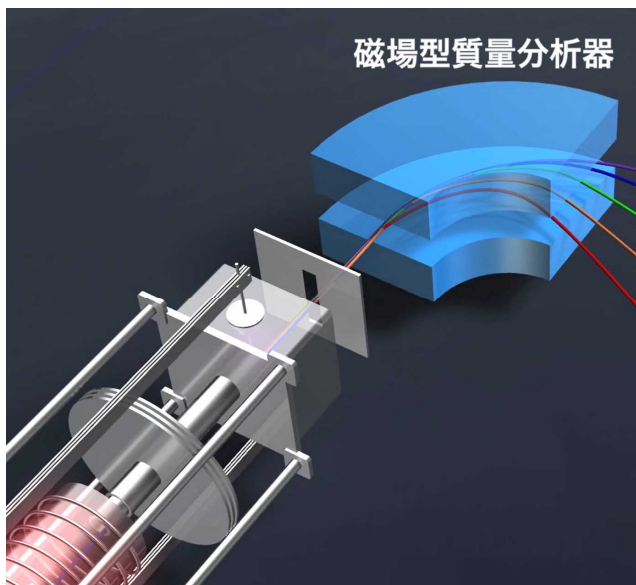
3-1.想定される用途

- 本技術の特徴は、室温で量子もつれ状態を発生させ得るNVセンターを作る技術。
- この特徴を生して、超高感度磁気センサ、ナノNMR等の開発が期待できる。
- 上記以外に、量子もつれ状態を利用した量子情報機器の開発も期待される。
- また、達成された新ビーム技術に着目すると、発展著しいNVセンター形成装置の開発に利用することもできる。

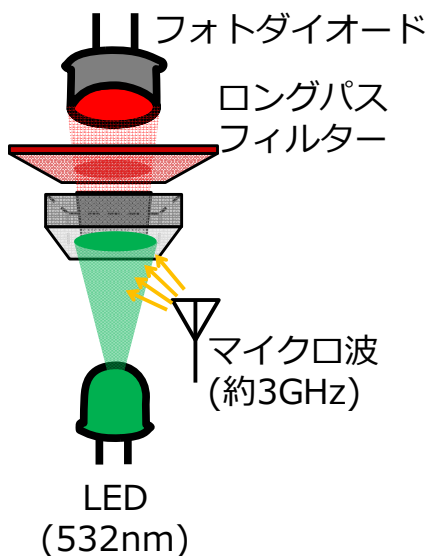
3-2. 企業への期待と課題

- 超高感度磁気センサ・ナノNMRや室温動作する量子情報機器の開発に興味のある企業との共同研究を希望。
 - －さらなる基礎研究が必要
- 爆発的に研究が進み実用化が見えてきたNVセンターではあるが、汎用の製造装置は存在しない。装置開発に関心がある企業との共同開発を希望。
 - －量子ビーム（イオン源）の実績・データは豊富
 - －低価格化が課題

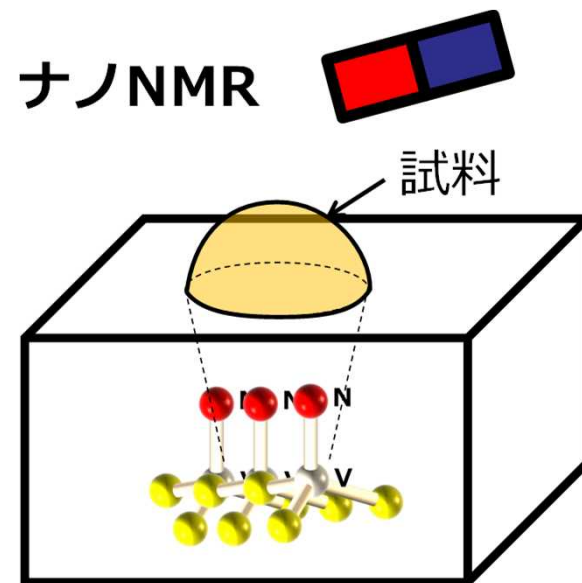
3-2. 企業への期待と課題



【NV作製装置】
共同開発を希望



【磁気センサ】
共同開発を希望



【ナノNMR】
共同研究を希望

【量子情報機器】
共同研究を希望

3-3. 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : ダイヤモンド単結晶およびその製造方法
- 出願番号 : 特願2018-155987
- 出願人 : 量子科学技術研究開発機構
- 発明者 : 小野田忍、春山盛善、大島武、
千葉敦也、平野貴美、五十嵐龍治

お問い合わせは、

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

イノベーションセンター 研究推進課

までお願いいたします。

TEL 043-206-3146(共同研究)
3027(ライセンス)

FAX 043-206-4061

e-mail innov-prom1@qst.go.jp(共同研究)
innov-ip@qst.go.jp(ライセンス)²²