

Q-LEAPにおける量子センサ社会実装に向けた取り組み

酒井 忠司

東京科学大学・Q-LEAP HQ 特任教授



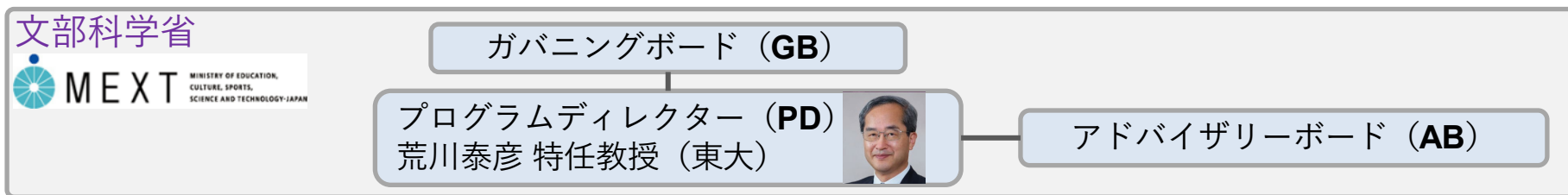
本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118067395の助成を受けたものです。

2026年8月6日 量子科学技術委員会 (第37回)

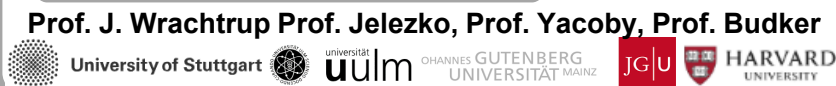
- Q-LEAP 量子計測・センシング Flagshipプロジェクト概要
- エネルギーエレクトロニクス応用
- 生体計測応用
- 基盤技術
- サマリー

Q-LEAP 量子計測・センシング Flagshipプロジェクト

- 研究期間: 2018年度 – 2027年度, 参加研究者: >100名。
- 11機関 (5大学、2国研、4企業) が連携し、基盤技術からセンサシステム、プロト応用までを一気通貫に研究開発。



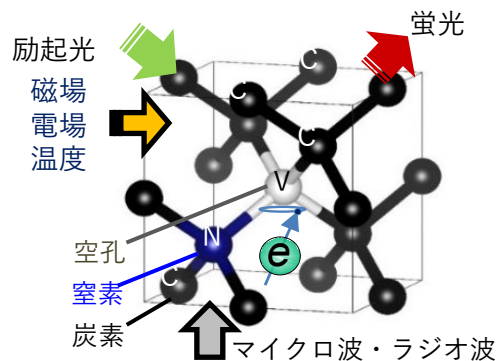
海外業務協力者



産業界業務協力者

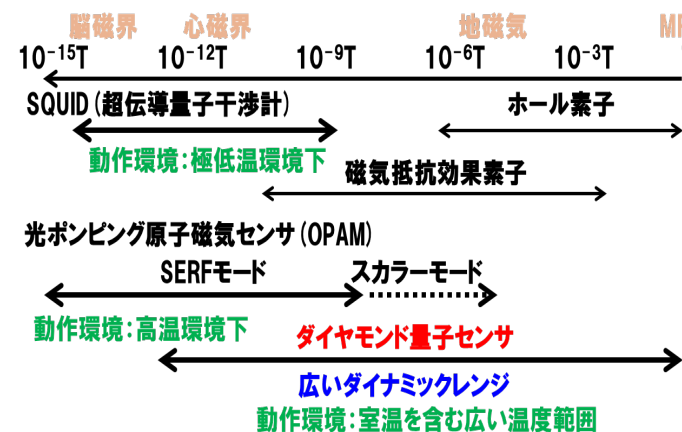
固体量子センサの特徴とQ-LEAPにおける応用ターゲット/成果概要

NVセンタの構造・センシング原理



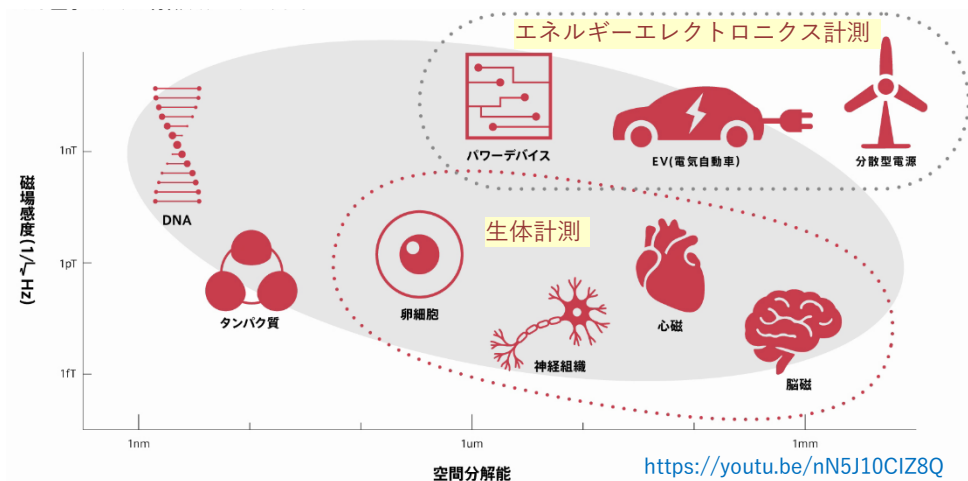
ダイヤモンド内の窒素(N)・空孔(V)の対(NVセンタ)は緑色励起光の照射により赤色蛍光を発し、その強度が磁場、電場、温度、圧力により変化する。

磁気センサの感度とダイナミックレンジ



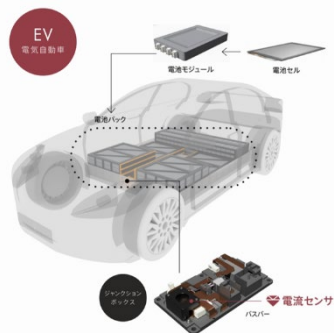
※SQUID、ホール素子、磁気抵抗効果素子の出典:磁気便覧 丸善出版 日本磁気学会 (2016)

スケーラビリティと応用ターゲット



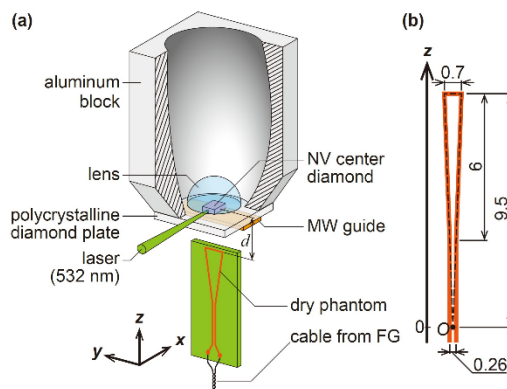
<https://youtu.be/nN5J10CIZ8Q>

広帯域・高精度EV電流計測の実車検証



電流計測レンジ $\pm 1000\text{A}$ 、精度 10mA 、温度範囲 $-40\sim 85^\circ\text{C}$ の広帯域高精度動作を実現。実車搭載動作やWLTCモードでの電流計測性能を検証。

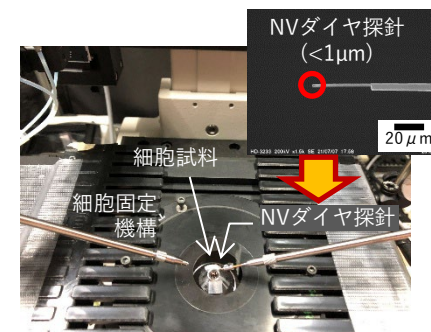
脳磁計測に向けた近接型センサの高感度化



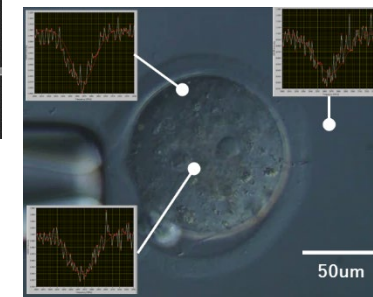
N. Sekiguchi et al, Appl. Phys. Lett. 126, 194001 (2025)

脳磁測定に適した対象に接近可能で小型のNVダイヤモンド量子センサを材料・ノイズ低減等で更に高感度化。低周波磁場の最高感度を $6\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ に更新。

探針型センサ開発と生体計測への適用



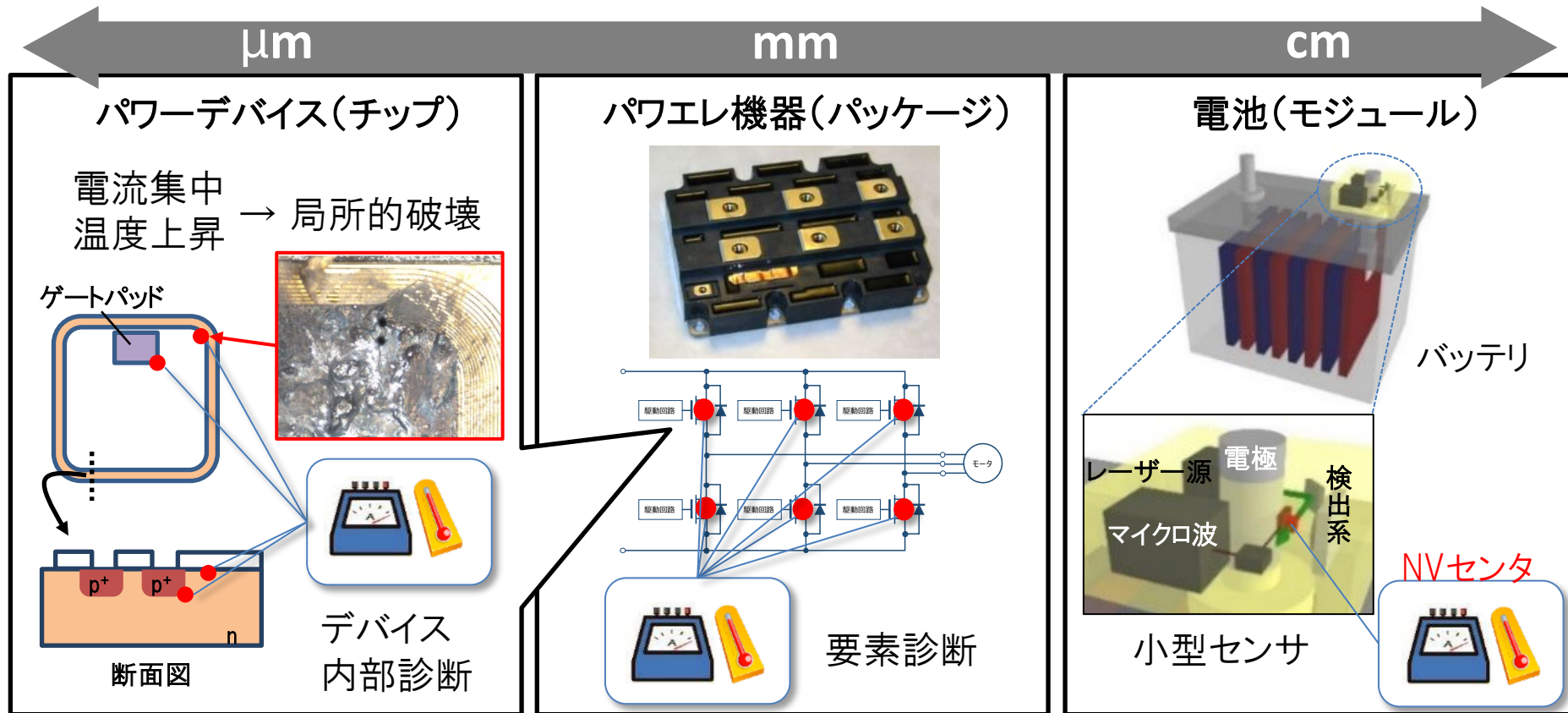
NVダイヤモンド探針センサを用いた細胞用計測システム



卵子、褐色細胞等、幅広い生体組織の低侵襲な計測に適したNVダイヤモンド探針型センサと細胞用計測システムを開発。卵子内温度計測 ($\pm 0.2^\circ\text{C}$) に適用。

エネルギーエレクトロニクス計測の目標

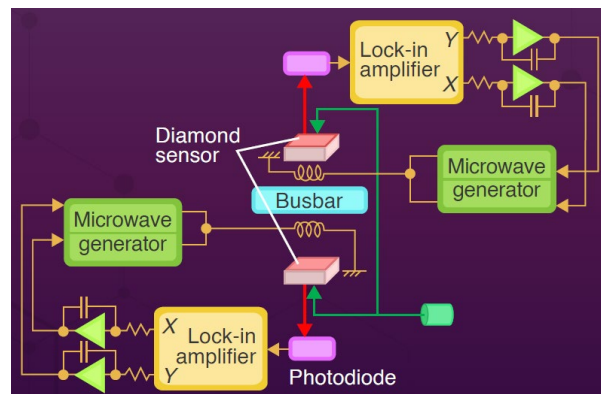
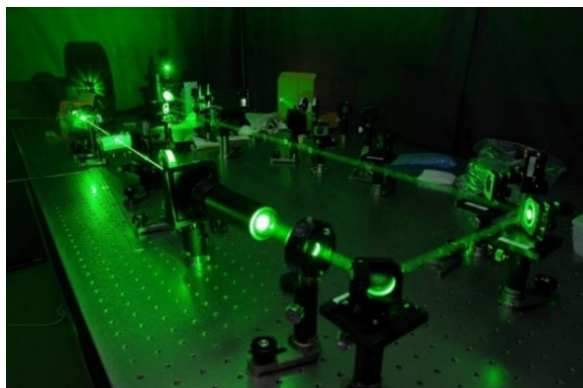
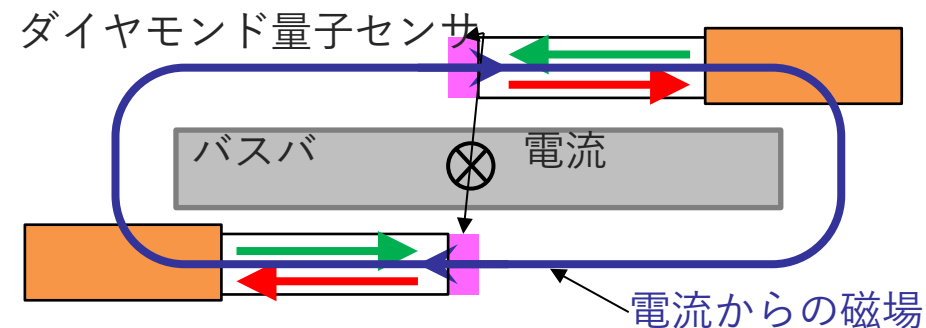
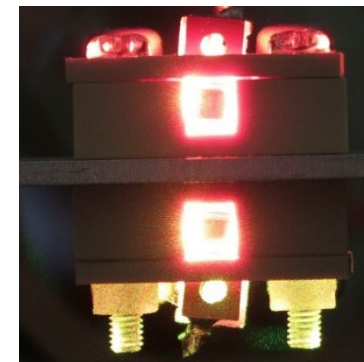
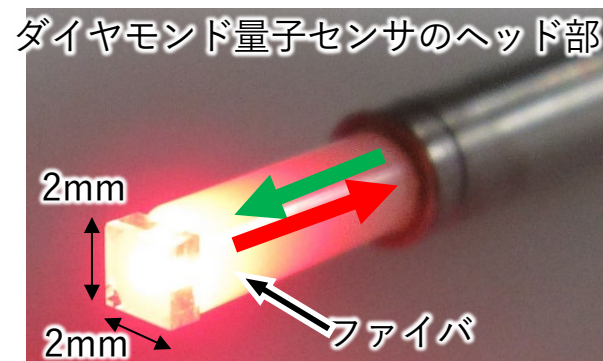
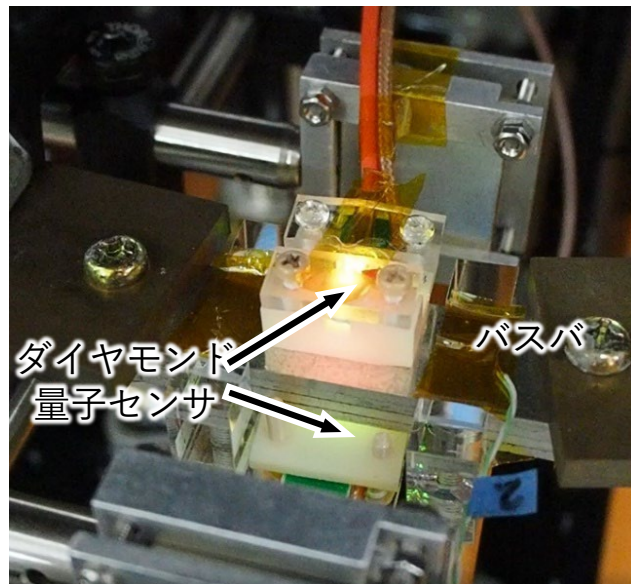
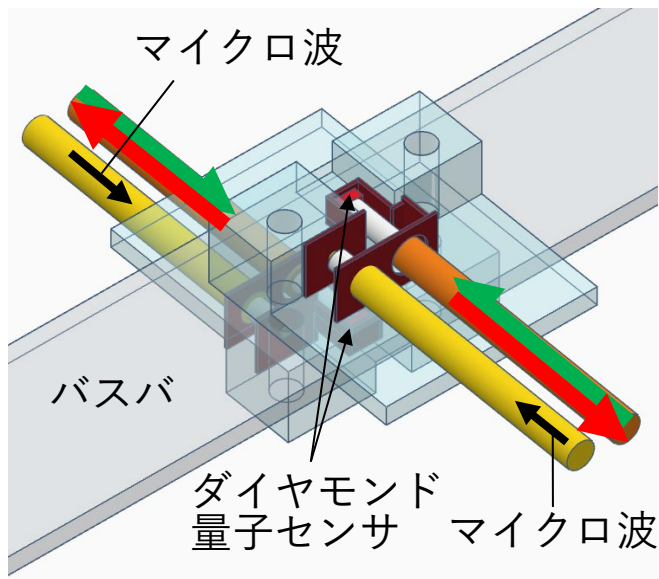
- 2021年に電池やパワーデバイス内部への量子センサ実装、22年に電池やパワーデバイス内部の電流・温度を同時計測。
- 2025年に出力信号重畳された電流・温度を識別、27年に電池やパワーデバイス内部の電流・温度をダイナミカルに計測する小型プロトタイプを実現。



高感度化に加え、スケールに応じた量子センサ実装が課題。

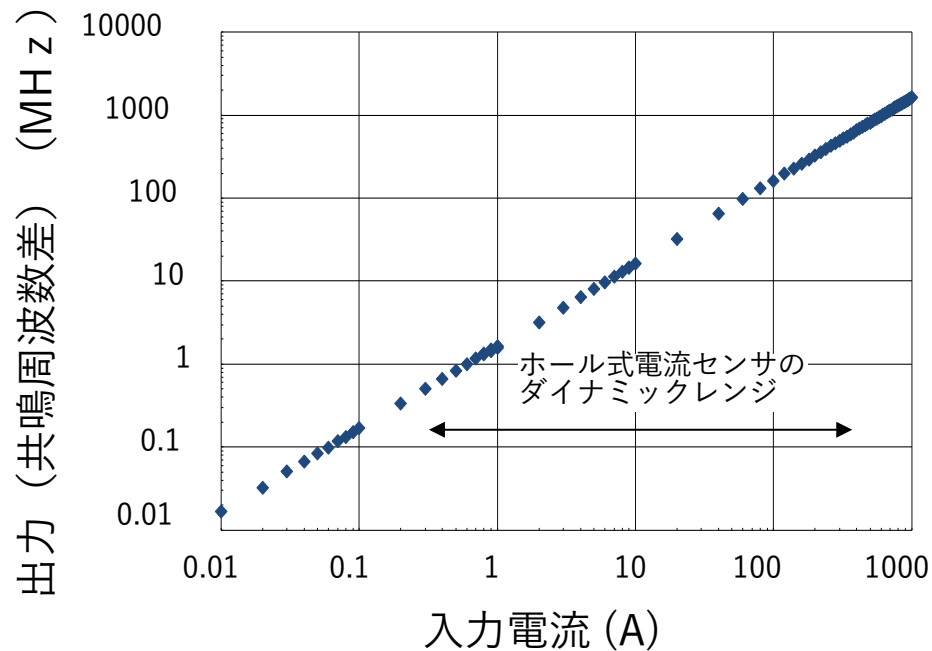
エネエレ計測：EVバッテリー充放電電流の高精度モニタ

- 光学定盤上の光学系をファイバー端のセンサとして小型化実装。
- バッテリ電流が流れるバスバ上下にダイヤモンド量子センサを配置し、共鳴周波数を追従。
- 環境雑音磁場及び光源の変動を同相ノイズとして除去。



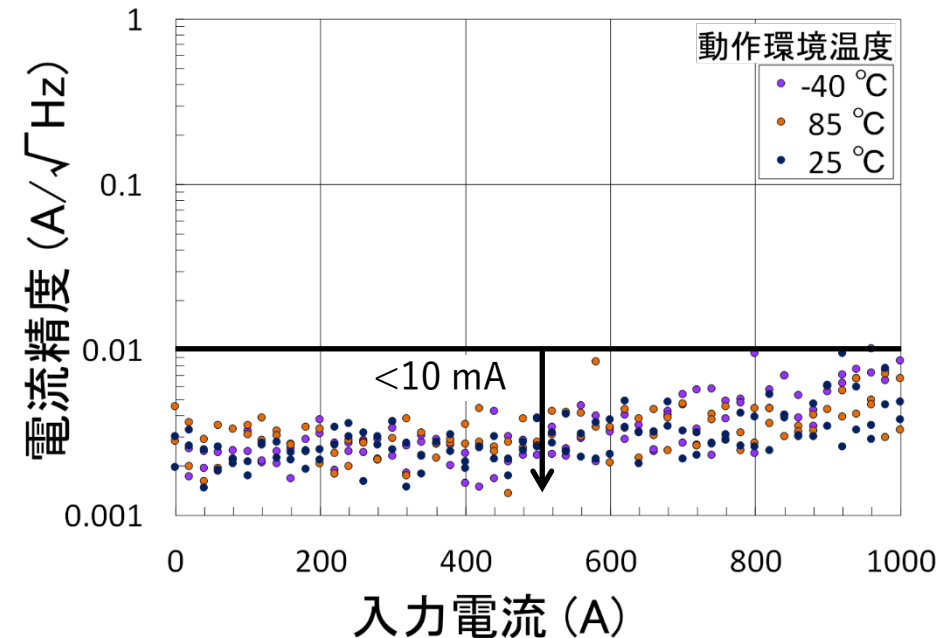
Y. Hatano et al., APL (2021)
Y. Hatano et al., Sci. Rep. (2022)
Y. Hatano et al., Phil. Trans. Royal. Soc. A. (2023)

- これからのEV電池充放電に求められる広い電流帯域 ($\pm 1,000$ A) で高精度 (10 mA：従来比2桁以上) を実現。
- 広い温度での動作を確認 ($-40\sim 85^{\circ}\text{C}$)。



- 広いレンジでのリニアリティを検証

Y. Hatano et al., *Sci. Rep.* 12, 13991 (2022)

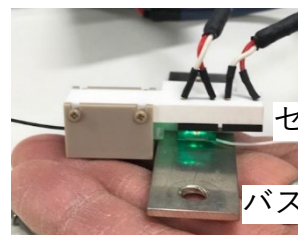
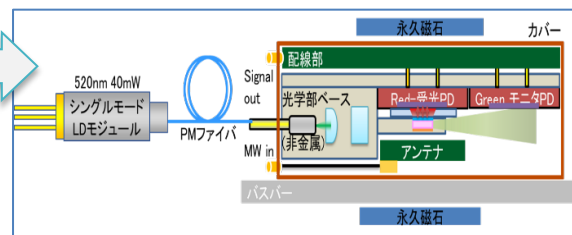
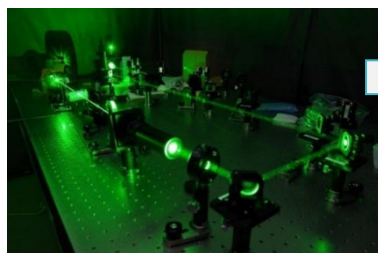


- 広いレンジで高精度 (<10 mA)計測
- 広い温度での動作を確認

- センサヘッド：光学定盤上の光学系を光ファイバー端への実装等により25mm角まで小型化。
- 制御系：マイクロ波用SGの小型化、タイミング信号発生系等の集約により、10cm角以下を目標に。

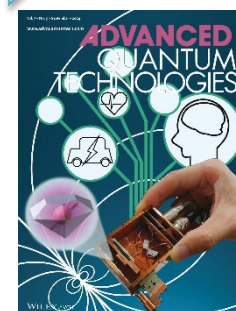
センサヘッドの小型化

電池モニタ向け小型センサヘッド

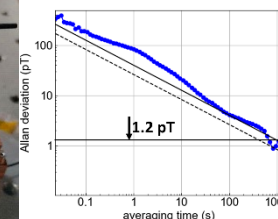
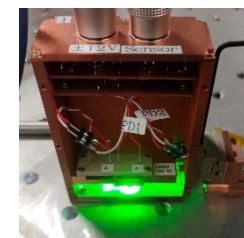


センサヘッド

バスバー

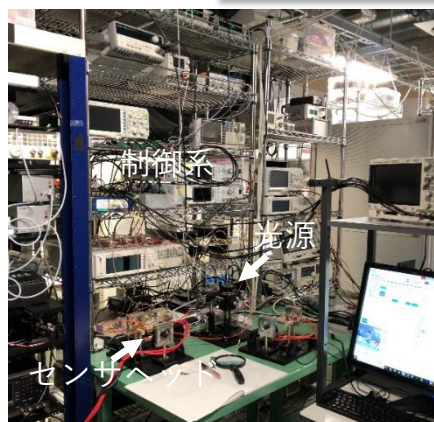


高感度向け小型センサヘッド

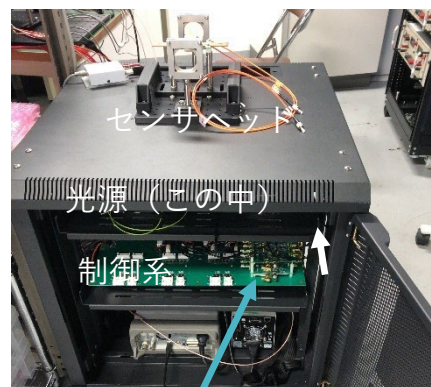


Adv. Quantum Technol. '24/6

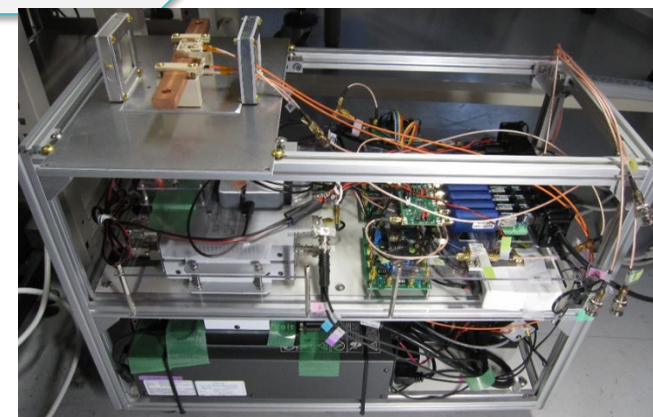
制御系の小型化



80x60x120 cm³



60x60x60 cm³



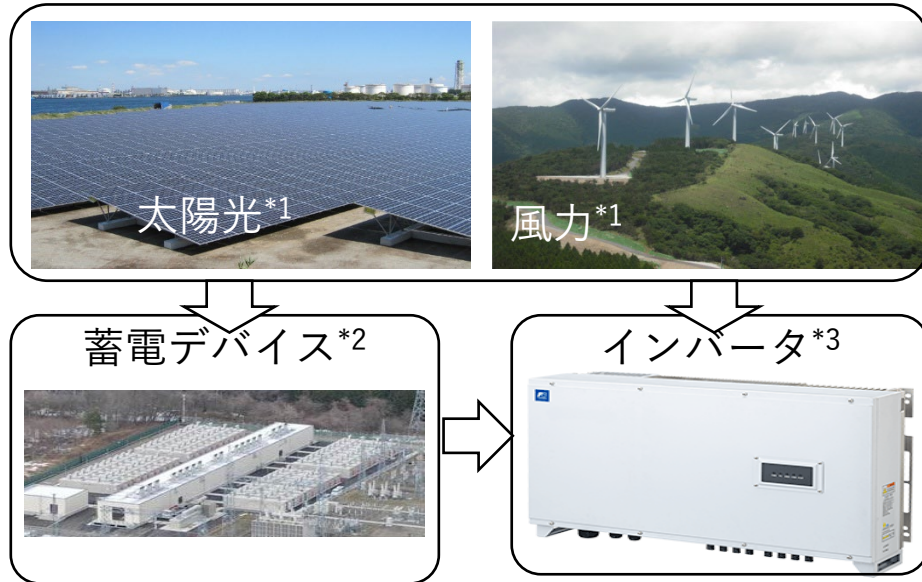
< 60 × 26 × 45 cm³

Diam. Relat. Mater. '23/5
Philos. Trans. Royal Soc. '23/12
応物講演会 '26/3

計測標準に向けた展開：分散型電源対応電流比較器

- 分散型電源の進展に伴い、従来の電流比較器では対応困難な様々な電流測定ニーズが顕在化。
- AISTの計測標準技術とNV量子技術を融合し、**DC・AC電流両用**の広帯域電流比較器のFSを2023年度より開始。多重の検出巻き線なしで、国家標準器として必要な磁場感度をNV量子磁気センサが有することを確認済。
- 電流測定の高精度な実証実験およびNV量子計測に関する**国際標準化活動**を進めていく（SIP/BRIDGE連携）。

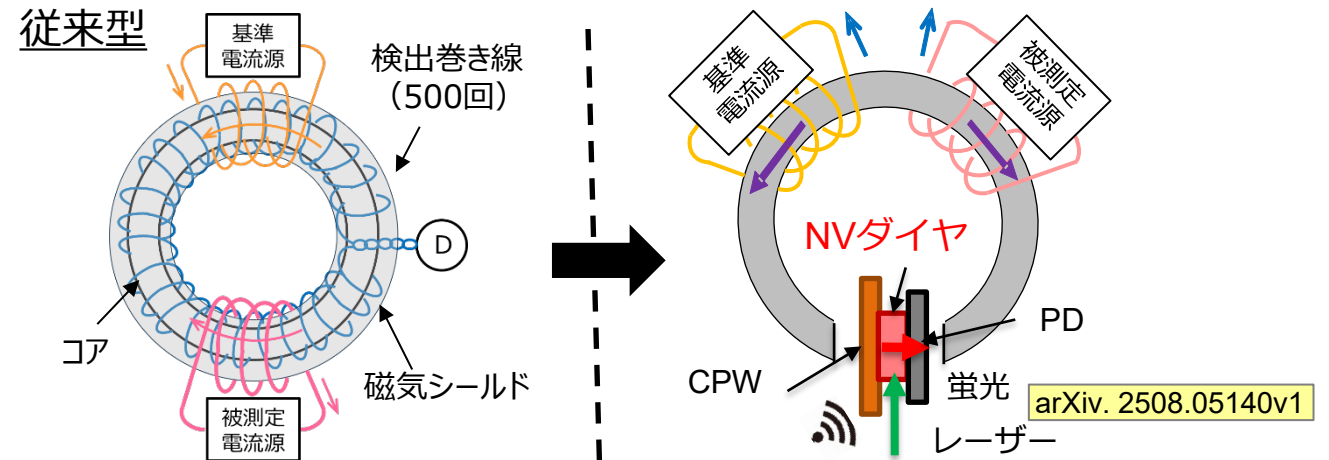
分散型電源



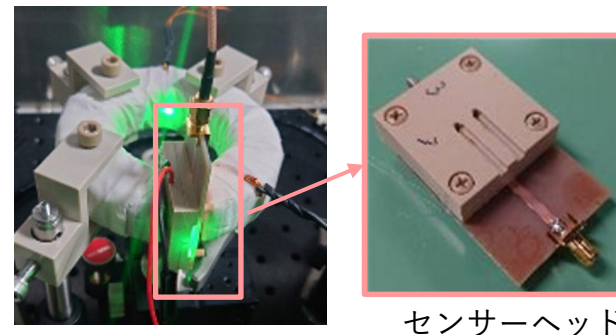
NVによる電流計測の利点

- 高精度化：10倍（必要感度～20pT）
- コアの小型化：1/5（国家標準は30 cm）
- DC・AC電流の両方が可能、広帯域

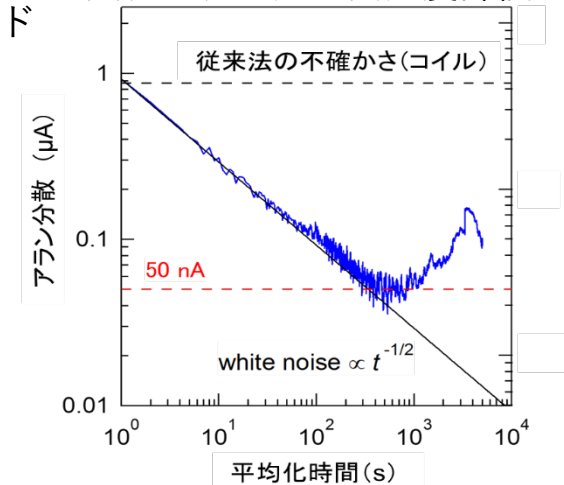
従来型



コアのギャップに挿入できるセンサーヘッド

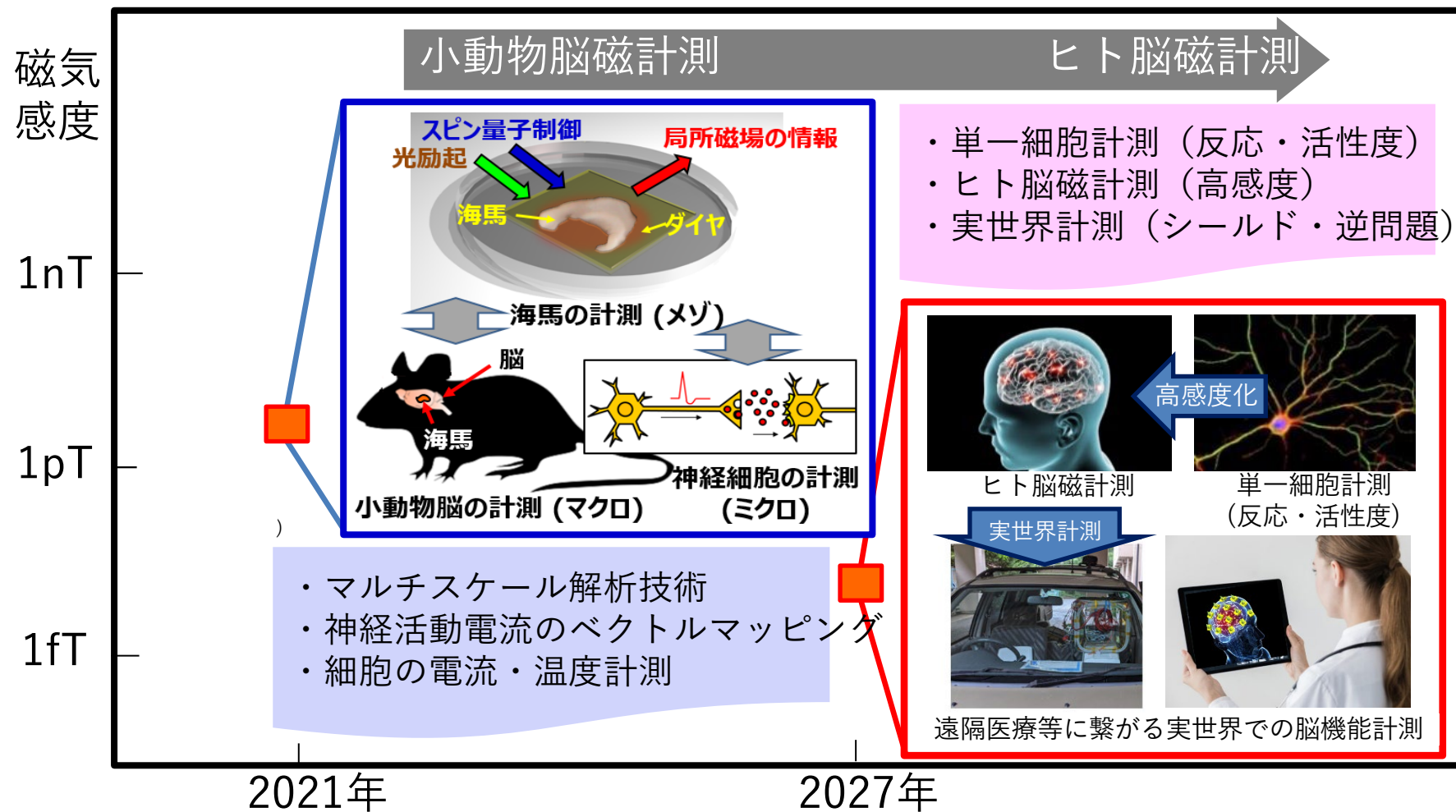


交流電流測定の安定度評価



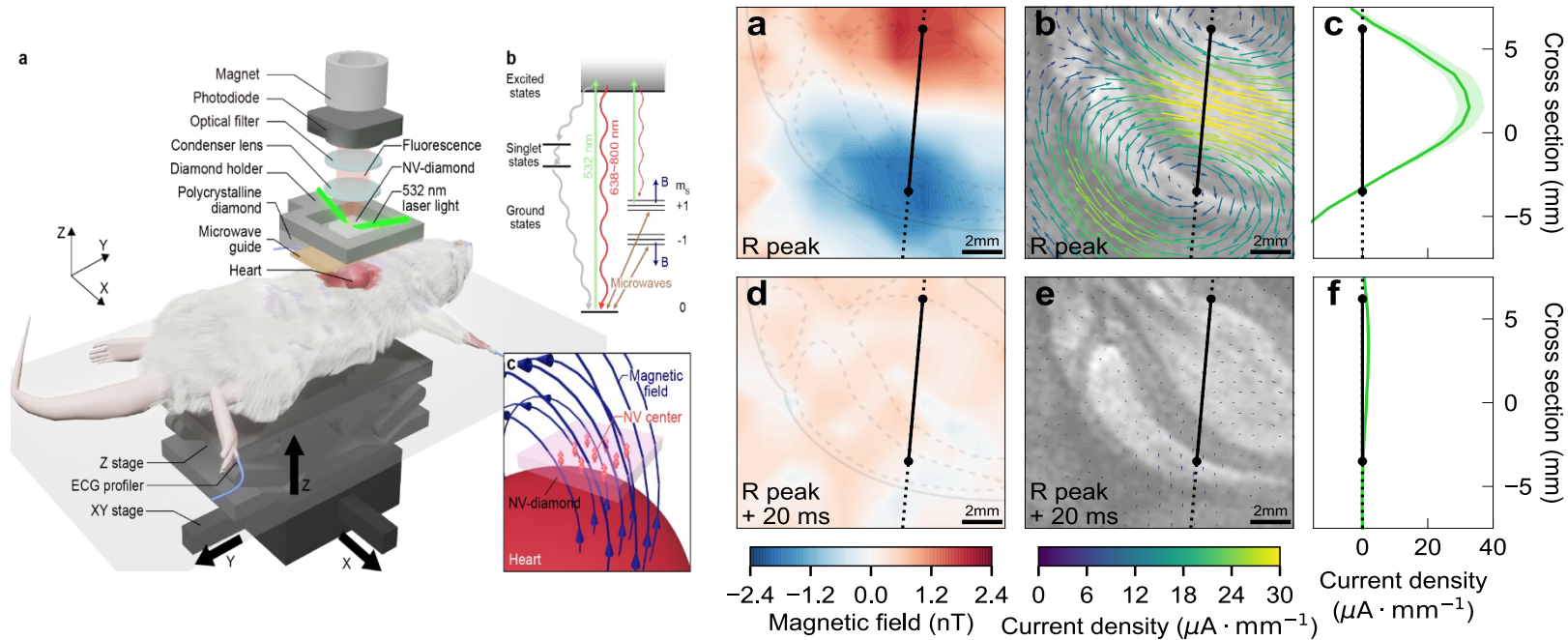
生体計測の目標

- 2021年に感度 5 pTのセンサ実現、22年に神経組織と小動物の脳磁を計測。
- 2025年に感度100 fT、27年に感度10 fTのセンサを実現、ヒト脳磁を計測。



高感度化が最重要の課題。応用に応じた空間分解能も必要。

- ダイヤセンサでの哺乳類の計測は世界初。
- 心臓電流の時空間ダイナミクスの推定。



K. Arai, A. Kuwahata, D. Nishitani, MH et al., Communications Physics(2022)

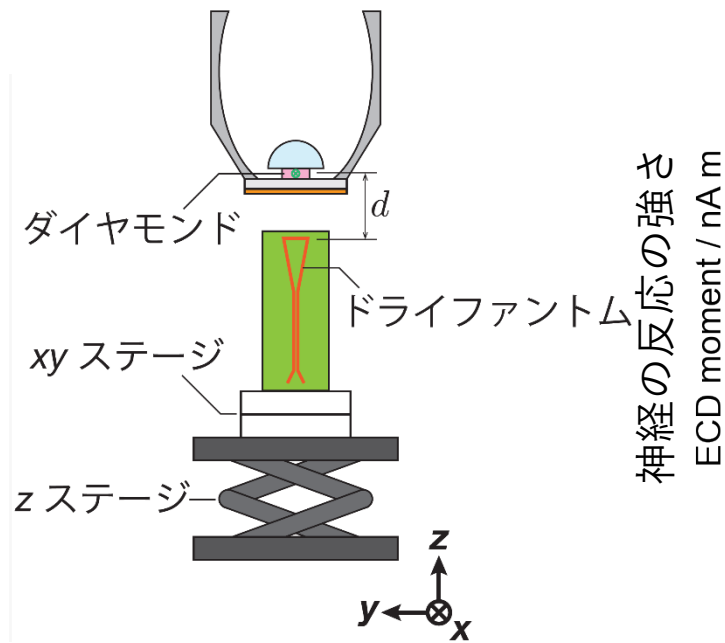
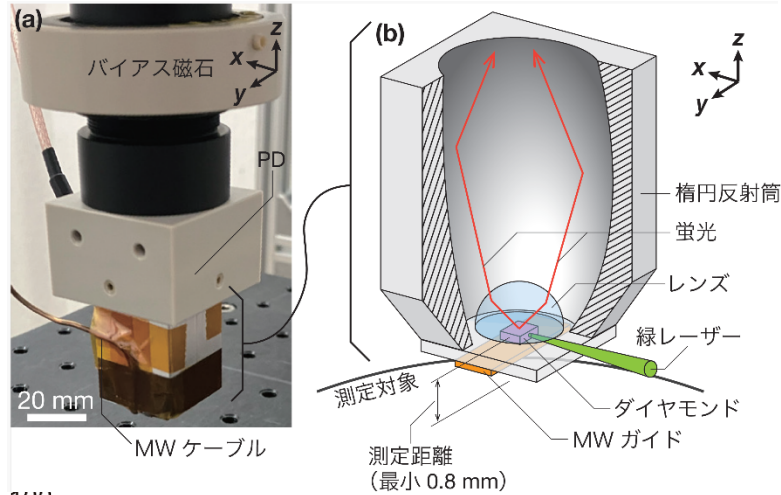
不整脈の原因の詳細な特定など診断技術への活用に期待



高感度化を進め、脳磁計測へ展開。

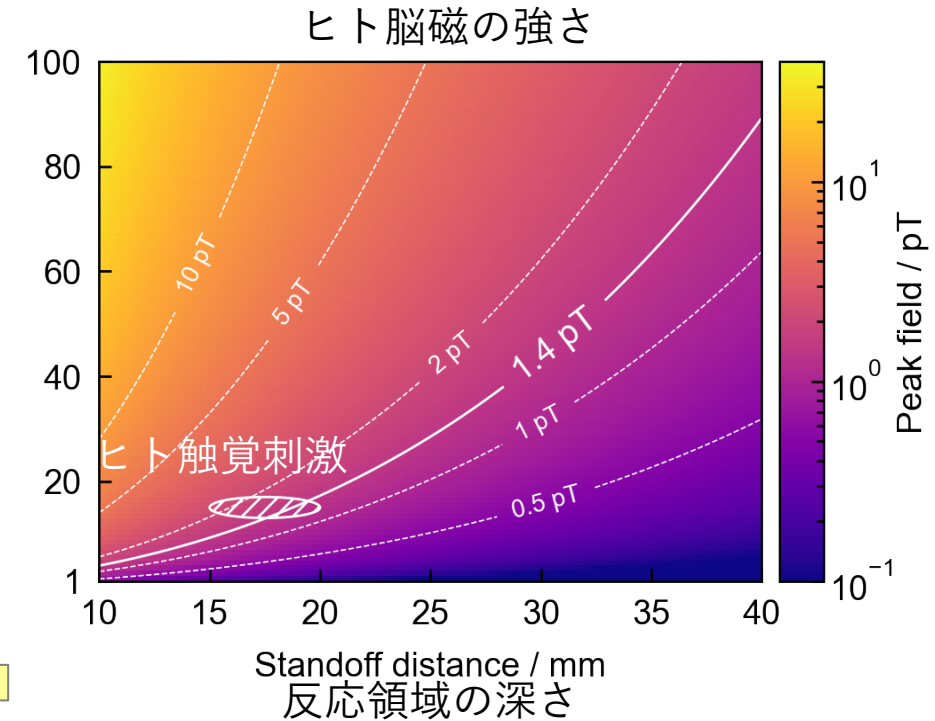


- 脳磁計測に適した対象と近接配置可能なセンサヘッド構造で集光効率向上、光源雑音低減。
- ダイヤモンド特性向上(NIMS, QST)等により、連続波励起では世界最高感度($5.1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @5-100Hz)を実現。最小磁場雑音 $\sim 100 \text{ fT}$ の長時間安定性を確認。
- 擬似脳磁を生じるドライファントムでヒト脳磁の検出可能性を検証。



Phys. Rev. Appl. (2024)

Appl. Phys. Lett. (2025)



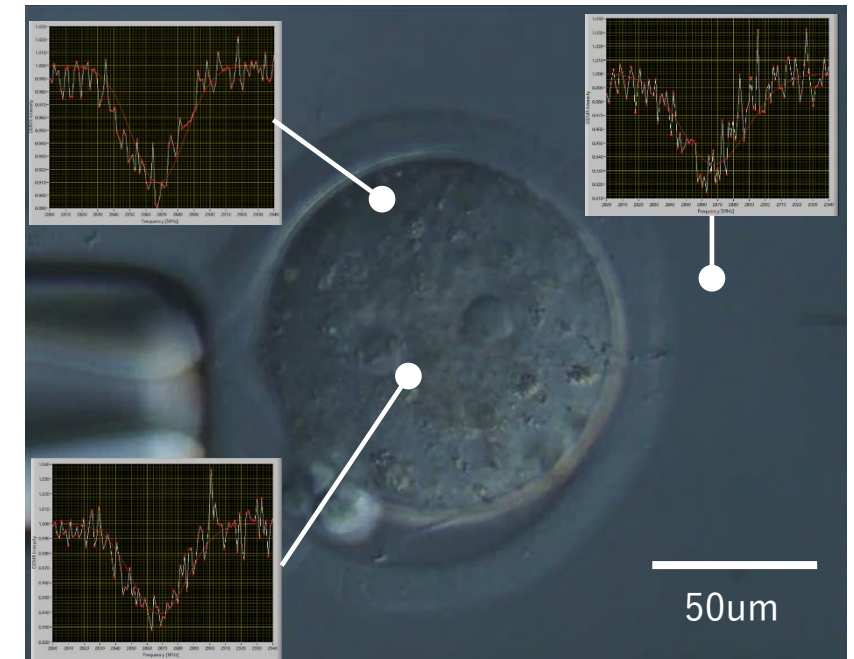
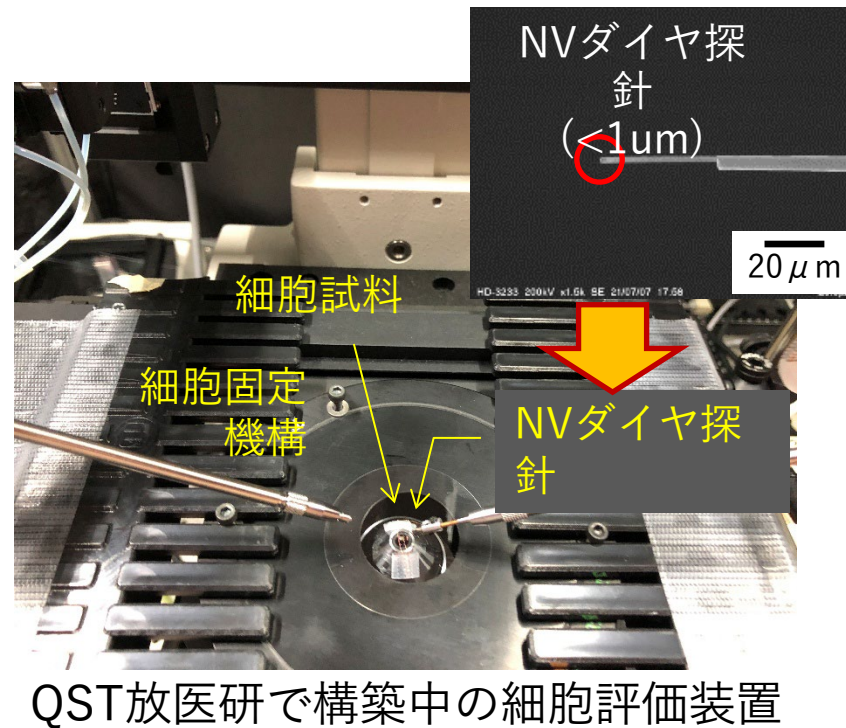
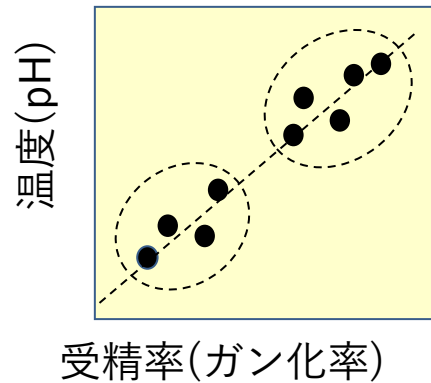
ヒト脳内ECD*からの磁場測定の可能性を検証

*ECD: Equivalent Current Dipole (等価電流双極子)

生体計測：探針型NVセンサによる単一細胞内温度計測

- プローブを細胞からダメージ・残留物なく脱着可能であり、細胞スクリーニングへの応用に可能性
- 細胞内外の任意箇所ODMR測定可能 (空間分解能 $<1\mu\text{m}$)

探針型NVセンサによる卵細胞内温度評価実験



マウス未受精卵内外の任意箇所ODMR測定

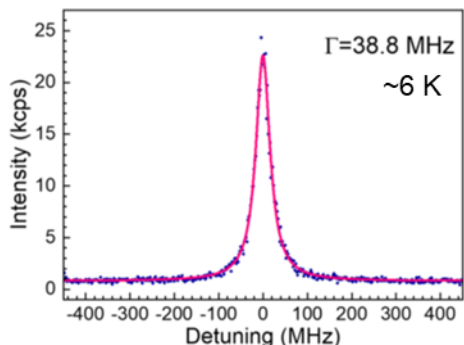
基盤技術：Q-LEAPから生まれた先端研究

ダイヤモンド量子光源：PbVセンタ

フォノンの影響を抑制でき、より高温で物理限界線幅および長い T_2 が期待

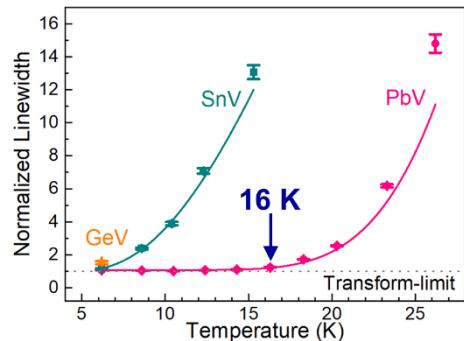


自然幅 (36.2 MHz) に近い発光

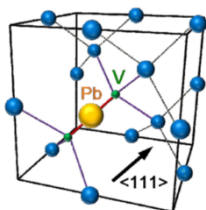


ACS Photonics (2021)

10 K以上での自然幅に近い発光



Phys. Rev. Lett. (2024)



ヘテロエピタキシャルCVDダイヤモンドセンサ

Shin-Etsu

1. 初期基板(111)
φ11.3mm, 1mm厚
研究効率化対応サイズ

2. 中間層
ヘテロエピ成長

3. ヘテロダイヤ
の核形成

4. 極薄連続
膜の形成

5. PECVD
による厚膜化

6. ヘテロ基板
の自立化

7. NVダイヤ
の追加成長

異種基板

異種基板

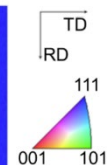
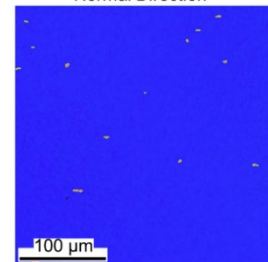
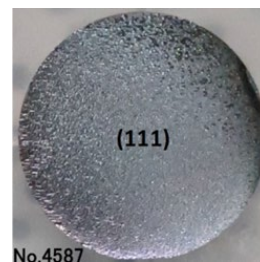
異種基板

異種基板

異種基板

ヘテロ基板

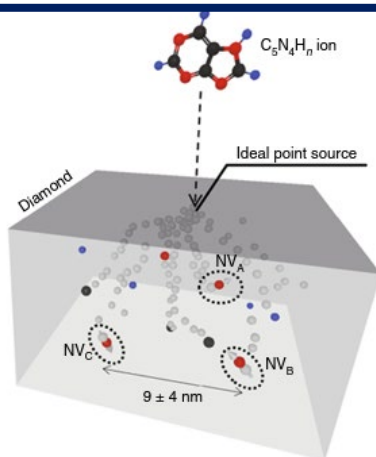
NVダイヤ
ヘテロ基板



電子後方散乱回折法 (EBSD) によるヘテロ基板の結晶面方位の分布マッピング像

Adv. Quantum Technol. (2025)

もつれが期待される近接NVセンタ形成



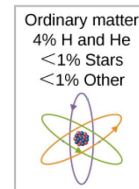
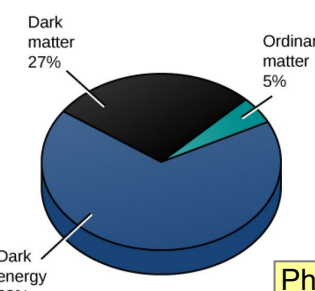
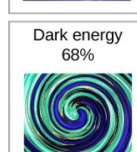
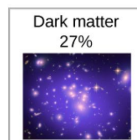
標準量子限界を超える可能性を有する量子プロトコル開拓

複数のN原子を含むアデニン分子線照射により、複数の近接したNVセンタを形成。

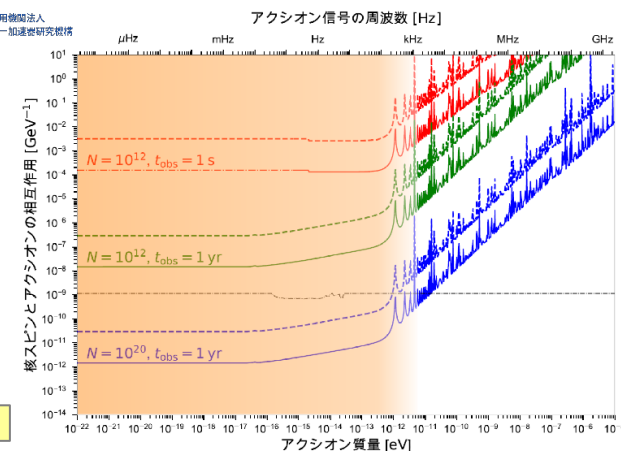
Nat. Commun. (2019)



暗黒物質探査



Phys. Rev. D (2025)



WPI 量子場計測システム国際拠点 (KEK) グループとの共同研究。
ダイヤモンドセンサを用いて新粒子探索を行える可能性を示した。

- Q-LEAP 量子計測・センシング Flagshipプロジェクト概要
 - 主な目標と成果：目標は達成までもう一歩。
- エネルギーエレクトロニクス応用：
 - EV電流計測への適用：広帯域（5桁）に加えロバスト性（劣化考慮不要）は他にない。小型化は進みつつあるがこれから。企業等による進展に期待。
 - 計測標準への展開：AC/DC対応 & 小型高精度化は画期的。量子分野の標準化の取組みとしても重要。日本がリードをとれる可能性。
- 生体計測応用：
 - 心磁・脳磁計測への取組：さらなる高感度化（難しいが本質的）とともに生体適用I/F（昇温抑制、安全確保・・・）が重要な仕事。
 - 医学応用への展開：医学部連携によりニーズが顕在化、今後の発展が期待される。Hands on（近くで使ってもらう）等、医学部アーリーアダプタをさらに巻き込む仕掛けが求められる。
- 基盤技術：
 - 時間かかるが差異化の鍵。大学・国研・企業の長期連携が重要。
 - 光源、新量子ビット、もつれ等：応用と課題を共有し、革新的な進化を支えることに期待。
- 次のステップの方向：
 - 量子センサの産業化を、新たなパートナーと量子基盤研究で次のステージへ。

ありがとうございました。

本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム
(Q-LEAP)JPMXS0118067395の助成を受けたものです。