

固体量子センサの研究開発の現状と今後の課題

量子センサ拠点

- Q-LEAP量子計測・センシング技術領域 量子固体Flagship -

東京工業大学工学院電気電子系 教授
(QST)量子ビーム科学部門研究統括

波多野 睦子

Executive Summary

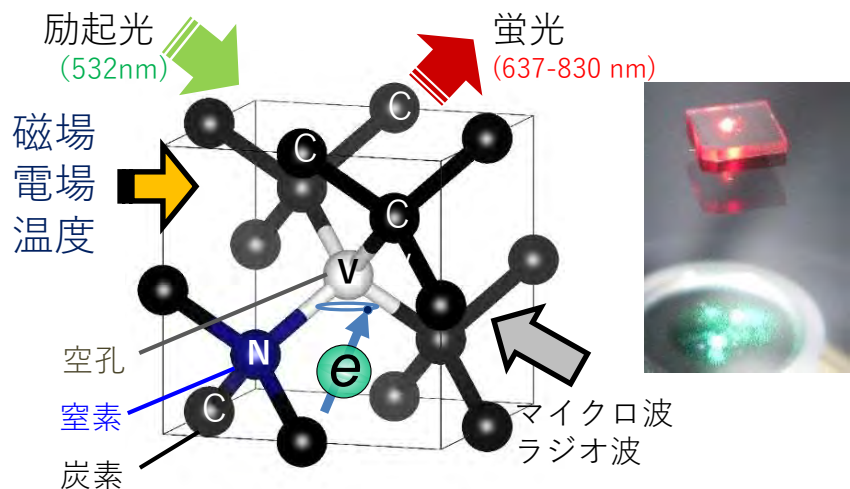
1. Q-LEAP FS 固体量子センサは、超スマート社会を足掛かりに未来社会の主角を狙う
 - ・融合領域の量子を社会実装するためには、分野やレイヤーを横断し、産官学連携、プロトタイピング(TRL6)により、まずはポテンシャルと課題を検証。Testbed構築、センサモジュールにより裾野拡大。
 - ・量子計測の高度化、材料などの基礎基盤、周辺技術の構築を上記と並行して加速。
2. 量子ネイティブ人材の育成
 - ・シニア(特に高度アナログ技術)も含めたダイバーシティが重要。
 - ・応用と基盤技術をつなぐセンサシステムレイヤは最重要であるにもかかわらず、論文投稿が困難でアカデミアの人事評価とのミスマッチが課題。
3. 量子科学技術に投資されている海外との国際連携
 - ・グローバルな共通プラットフォーム構築、最先端設備の相補活用。懸案は先方と連携している企業への対応、知財などのルール。
 - ・多様でダイナミックな教育プログラムの共有化(DDも含む)。
4. 今後は新規参入の企業やアカデミアに対して柔軟に機能する研究エコシステムが必要
 - ・知財プラットフォーム、Testbed構築、標準化推進等により、参加企業とともに国際競争力を強化。
 - ・室温での量子操作の特徴を活かし、量子の導入・教育システムとしての展開。
 - ・若手・学生などからアイデアを発掘し、スタートアップを起業する機会が必要。
 - ・エコシステムでは多様な人材の流動性を重視し、キャリアアップを促進。

1

Q-LEAP 固体量子センサFSの背景

NVセンタは高い操作性と長いコヒーレンスを誇る ダイヤモンド中のスピン量子ビットの特徴

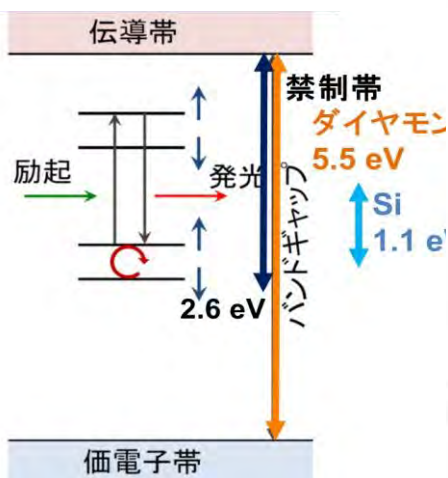
NVセンタ構造



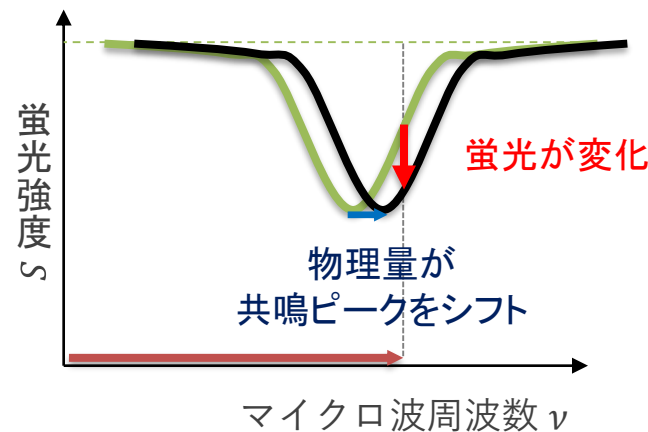
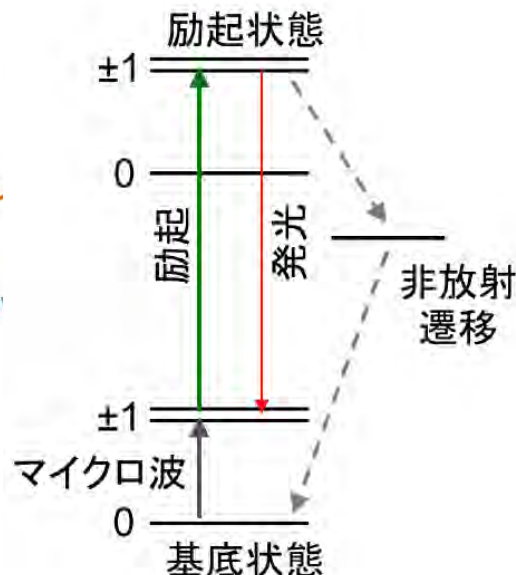
NVセンタの強み

- 室温・大気圧下で動作: 固体中電子スピン系で最長、ミリ秒のスピンコヒーレンス
- スピン状態の初期化、操作、検出により磁場/電場ベクトル、温度、圧力の高感度センサ
- 光検出磁気共鳴(ODMR)によるイメージング
- ナノスケール計測
- アンサンブルによる高感度化

エネルギー準位



光検出磁気共鳴 (ODMR)



1 感度・空間分解能向上により応用が拓ける 固体量子センサの性能とターゲット（例）

磁気感度
[(Hz)^{-1/2}]

創薬、免疫検査、再生医療

非侵襲計測、検査

1 μ T

ナノスケール

1nT

1pT

1fT

1nm

10nm

100nm

1 μ m

10 μ m

100 μ m

空間分解能



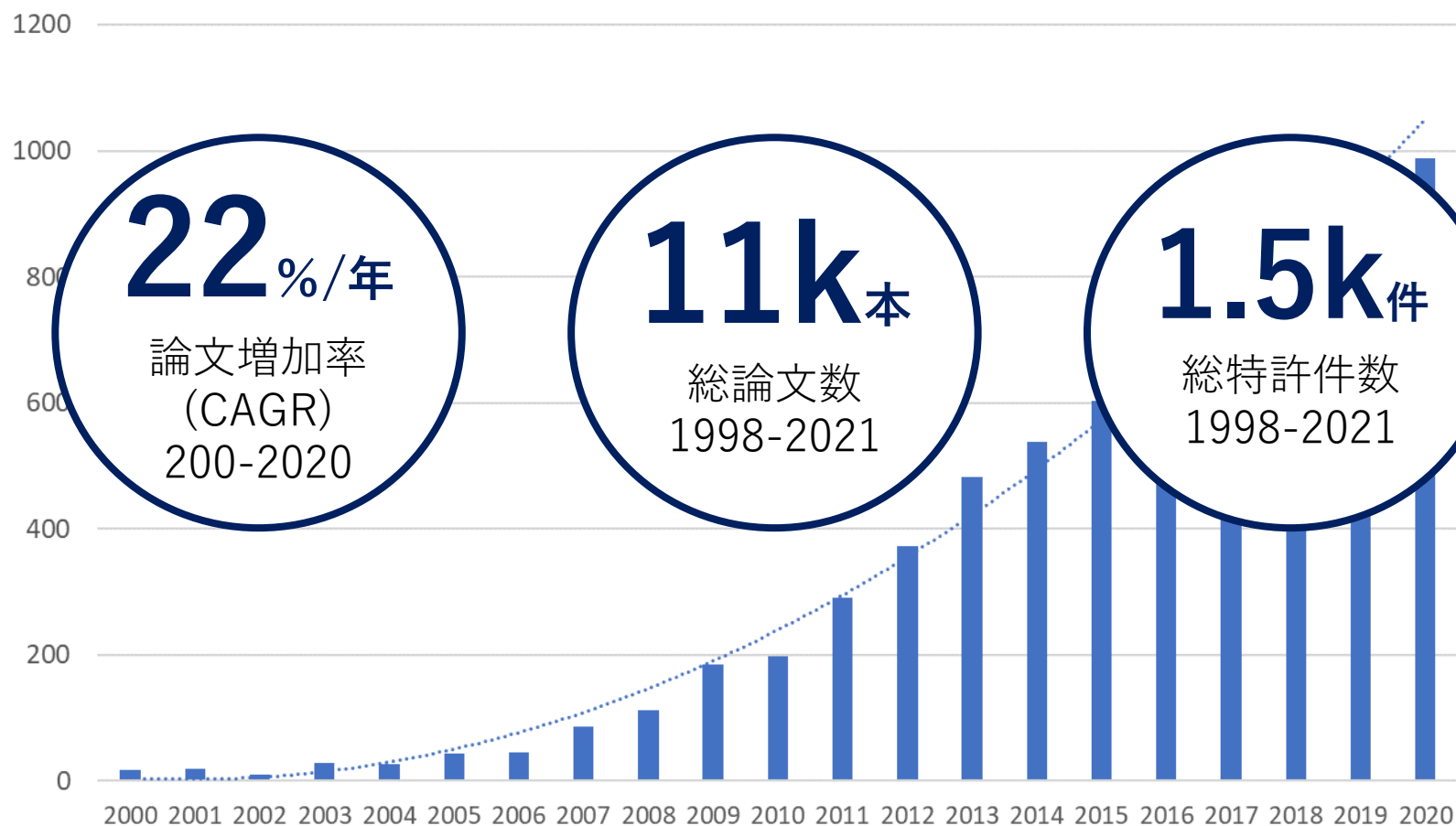
生命・物性・材料計測

マクロスケール

固体量子センサの成長株

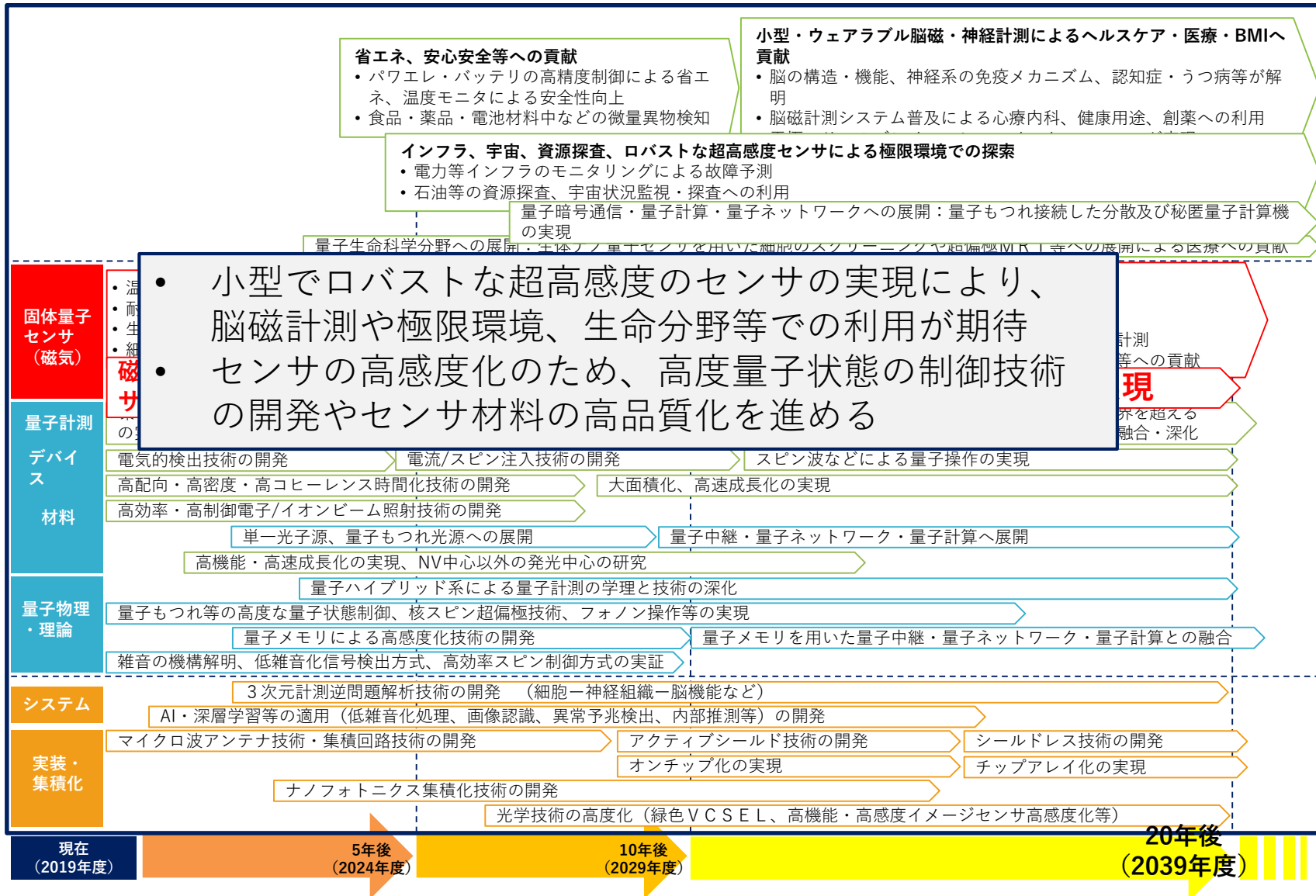
研究の盛り上がりの根拠

NV Center論文数



官学連携してロードマップを策定→ 企業が参画し、リアルタイムでの改訂が必要

参)2020年統合イノベーション戦略推進会議「量子技術イノベーション戦略」



2

Q-LEAP 固体量子センサFSの現状と今後の課題

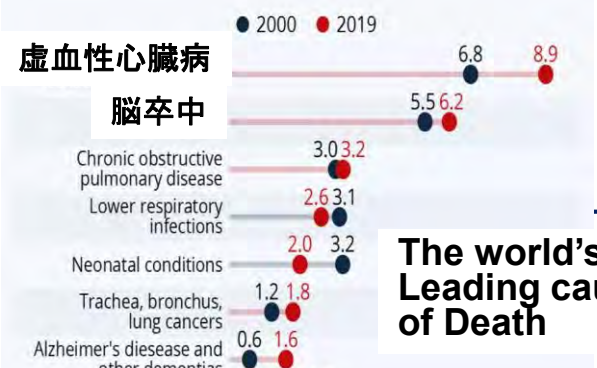
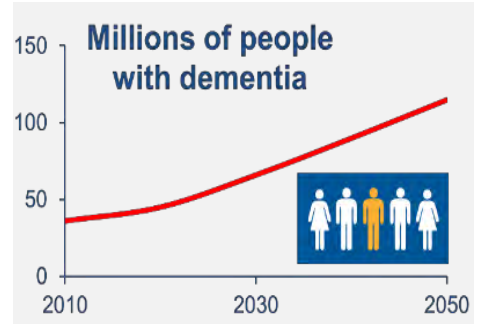
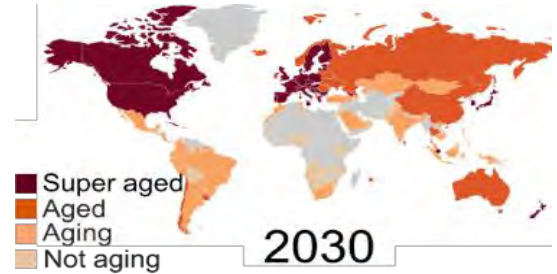
量子センサの活躍が求められる社会が目前に迫る

固体量子センサで解決を狙う社会課題



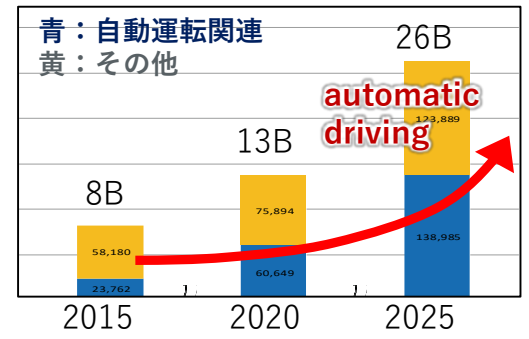
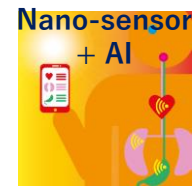
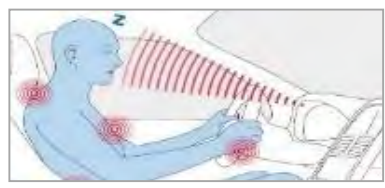
超高齢化社会

認知症・心疾患増加
ヘルスケア・早期診断の需要増加



安心・安全社会

高度IoT+AIによる
新たな付加価値創出の需要増加

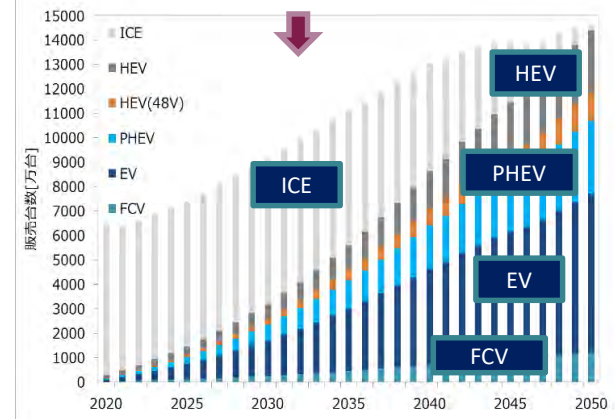


低炭素社会

エネルギー（バッテリー, パワエレ等）
Green transformationの需要増加



2030年のEV販売台数は約2千万台
全固体化、急速充電が加速。



MEXT Q-LEAP 固体量子センサ Flagshipプロジェクト 基礎物理・物性・材料デバイス・システム・応用の連携研究



2 産官学連携実験環境の構築(東工大@大岡山)

- ・企業・国研の若手を中心に集結し、連携活動→企業サイトでプロトタイプの実験開始
- ・共通集積化技術によるエコシステム構築
- ・他の応用展開も検討、量子センサのポテンシャルユーザの開拓
- ・応用とつなぐ、また基礎基盤の要素技術とつなぐ役割

日立【プロト応用】

- ・神経細胞組織計測開発
- ・走査プローブ型顕微鏡

東工大【センサシステム】

- ・高感度・低ノイズ計測技術開発
- ・新規量子計測技術の開発
- ・小型・集積化



量研【プロト応用】【基盤技術】

- ・SiCパワーデバイス計測開発
- ・共焦点顕微鏡

矢崎・デンソー【プロト応用】

- ・電池・運転者モニタプロトモジュール開発
- ・磁場・温度制御評価系

企業のサイトで試験開始

応用展開の検討
量子センサのポテンシャルユーザ

共通集積化
エコシステム

生体計測 (FS-A) の目標

高感度化が最重要の課題。応用応じた空間分解能も必要。

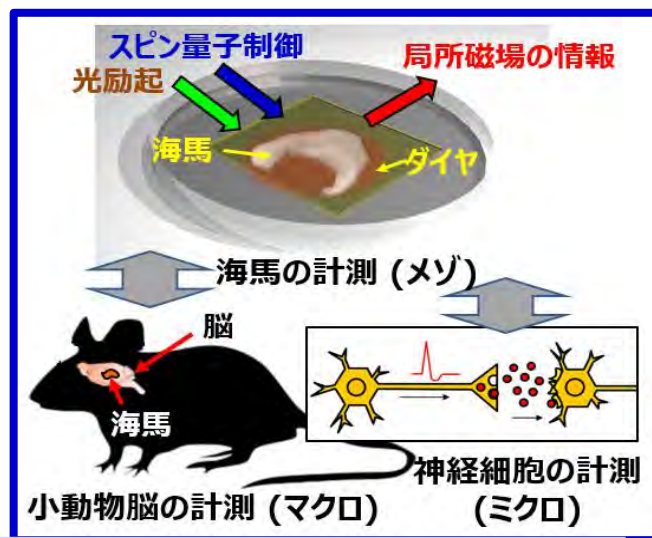
磁気
感度

1nT

1pT

1fT

細胞・神経、小動物脳



- ・マルチスケール解析技術
- ・神経活動電流のベクトルマッピング
- ・細胞の電流・温度計測

ヒト脳磁計測

- ・車載ノイズキャンセル技術
- ・ドライビングシミュレータ融合
- ・深さ情報抽出・逆問題解析法

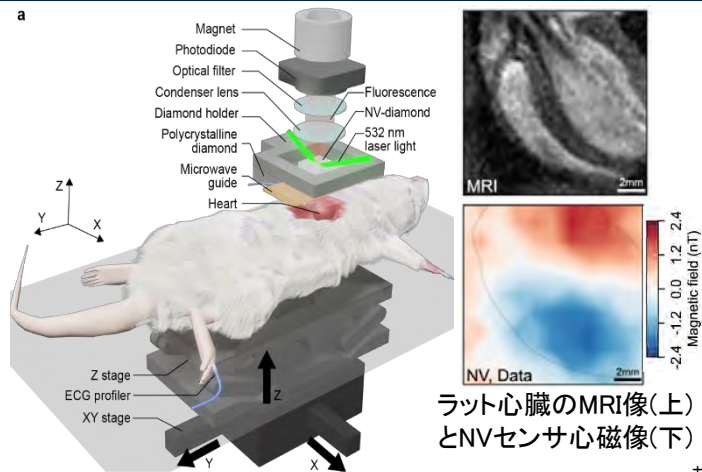


脳機能モニタによる安全安心社会の実現

東大・東工大

ラット生体計測

- ◆ 高感度センサシステム
- ◆ 磁場イメージングを実施し、心筋電流の再構成
- 脳計測へ展開。
- ・心臓専門医(東大)と疾患モデル動物を対象とした研究に発展に期待。

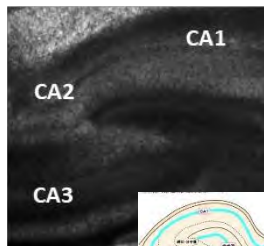


ラット心臓のMRI像(上)とNVセンサ心磁像(下)

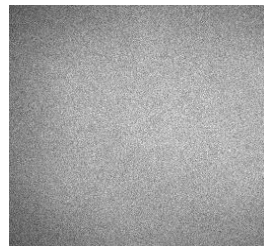
QST

海馬スライスのイメージング

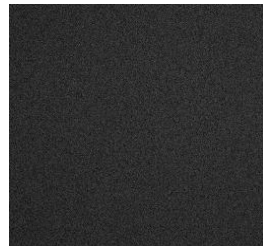
- ◆ ワイドフィールドODMR計測装置の高感度化



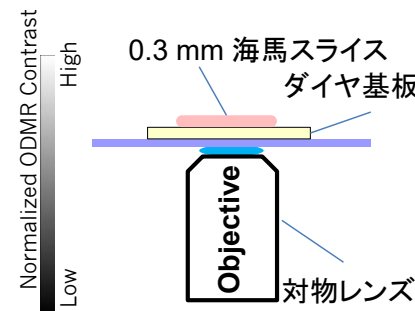
海馬下端面の明視野イメージ



海馬下端面のODMRコントラスト

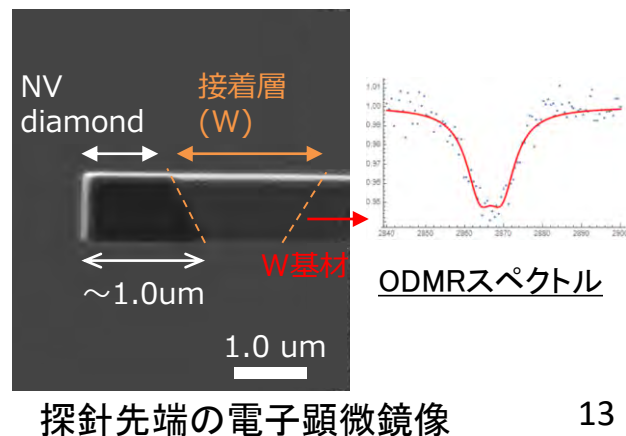
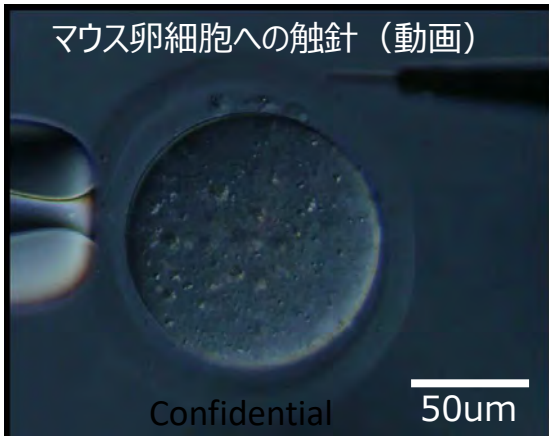


海馬上端面のODMRコントラスト



日立

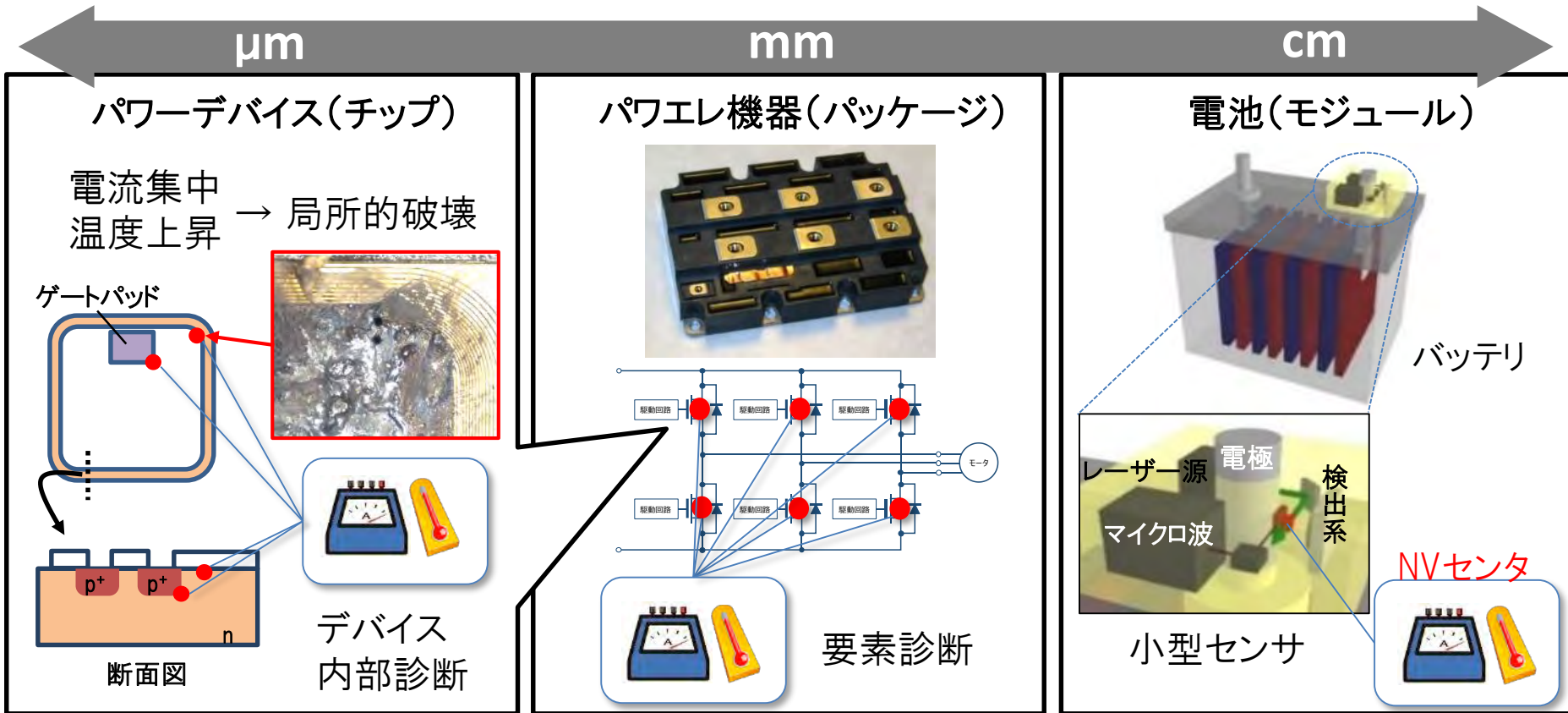
- ◆ SPM用位置制御NV探針の作製と高品位化
- ◆ マウス卵細胞への繰り返し非破壊触針 (量子生命FS連携)
- 細胞スクリーニングへの応用の可能性



探針先端の電子顕微鏡像

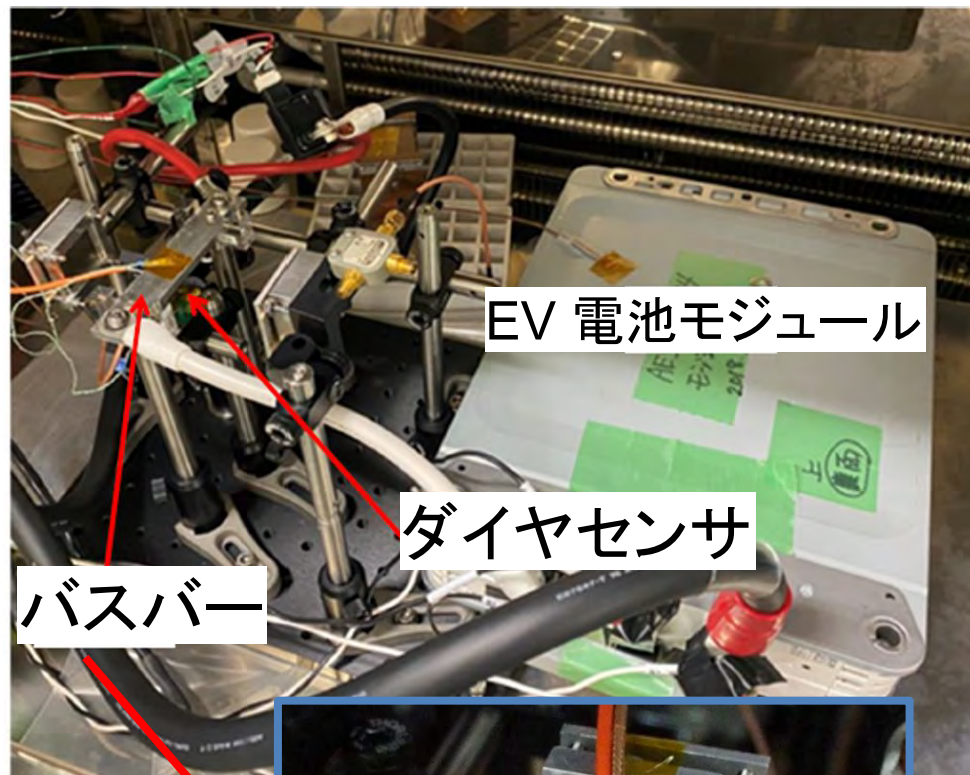
2 電池・パワーデバイス計測 (FS-B) の目標

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

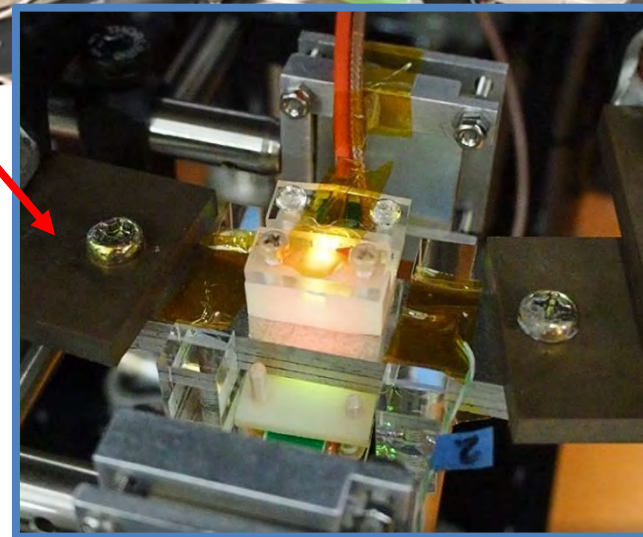


Testbed: EVバッテリーモジュールからの電流と温度計測 東工大・矢崎総業裾野サイト

EV用電池 充放電試験機



電流の計測 広ダイナミックレンジ
(10mAから1kA)の高精度
追従計測の検証
温度のレンジ $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$



社会実装に向けたPJ研究・知財の普及

- 研究会・国際会議等により、PJ研究成果の社会普及を推進中。
- 知財合意書により、PJ知財の集約・利用について合意を形成済。
- PJ外を含めた知財共創・利活用を推進する仕組みが求められる。

応用物理学会 固体量子センサ研究会

- ・'20/4設立。会長:水落教授
- ・**会員165名(内企業45名30社)**
- ・シンポ・研究会・チュートリアル等企画開催

2022年 第69回応用物理学会春季学術講演会 分科企画シンポジウム

ダイヤモンド NV センタを用いた固体量子センサの最新研究動向
Latest Research Trends on Solid-State Quantum Sensors using Diamond NV Centers

固体量子センサは、量子科学技術の中でも比較的早期に社会実装が期待できる技術として、世界各国の大学、国研、及び民間企業で研究開発が進められています。我が国においても、国プロ(文科省 0-LEAP 2018~)や研究会(応用物理学会 固体量子センサ研究会 2020~)の発足もあり、研究が活発化しています。本シンポジウムでは、同日午前開催のチュートリアルと連携し、ダイヤモンド NV センタを用いた固体量子センサの最近の研究の進展を、共通基盤となる材料側からと、センサ応用側から探ります。特に、最近活発化してきた企業の取り組みを取り上げ、その研究背景などを含めて発表・議論いただきます。

日時: 2022年3月23日(水) 13:30~17:30 [予定]
会場: ハイブリッド開催(青山学院大学 相模原キャンパス&オンライン)

招待講演(敬称略、仮題)

水落 恵和(京都大学) -
ダイヤモンド NV 量子センサ研究の進展

寺地 徳之(NIMS) -
量子磁気センサのためのダイヤモンド結晶

左 亦康(住友電工) -
NV センサ用ダイヤモンド材料の合成とそのセンサ応用可能性

五十嵐 龍治(QST) -
蛍光ナノダイヤモンド量子センサを用いたバイオセンシング技術

関野 正樹(東大) -
ダイヤモンド NV 量子センサのバイオ・医療応用へ向けて

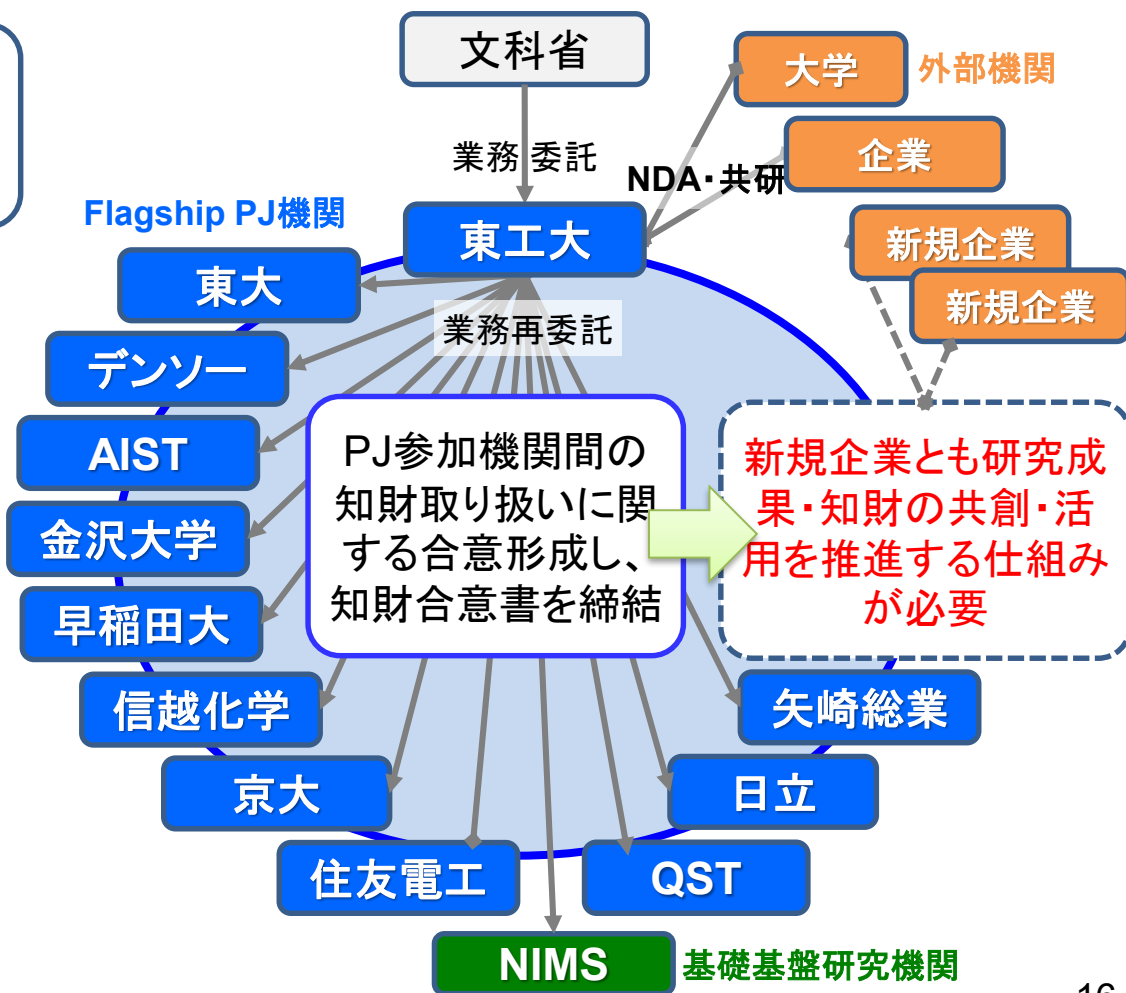
西谷 大祐(デンソー/東工大) -
ダイヤモンド NV センタを用いた量子磁気センサの高感度化への取り組み

申 在原(矢崎総業) -
ダイヤモンド NV 量子センサを用いた車載用広ダイナミックレンジの電流センサの開発

世話人
酒井 忠司(東京工業大学)
林 司(日新電機)

企画
薄護・表面物理分科会
固体量子センサ研究会

12/15 版



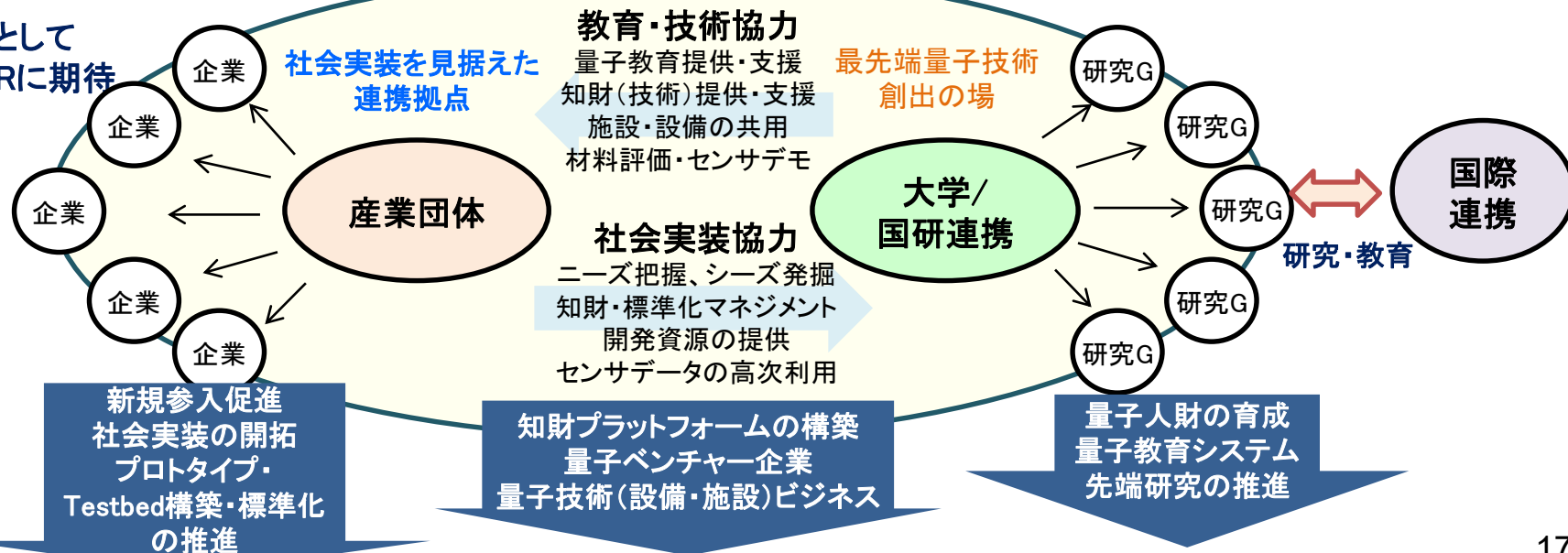
背景・課題

- 産業界の量子センサへのニーズが存在するが、量子技術への参入バリアが高い。
- 大学・国研にも量子人材が不足。
- 協調領域として、コンソーシアム的な、ミスマッチを解消する取り組みが望まれる。

提案内容

- 総力戦をもって全国津々浦々、国際的にも柔軟に機能する研究エコシステムを構築。
- 日本に強みのある量子材料を核にセンサモジュール等のTestbed構築、標準化推進等により、企業参加とともに国際競争力を強化。
- 企業の新規参入に求められる関連技術知財の管理・提供を視野にプラットフォーム構築を推進。
- 室温で量子操作が可能な特徴を活かし、量子技術の導入・教育システムとしての展開も推進。
- 若手・学生からアイデアを発掘、スタートアップ起業の機会を作る。量子人材の拡充にもつなげる。





推進役として
Q-STARに期待



装置・コア技術のオープン利用を促進（東工大の例）

学生や若手、企業の参入障壁を下げ、エコシステムを構築。
 課題：・運用は教員と学生が担っており、継続性が担保されていない。
 ・メンテナンス・修理費の確保。
 ・量子操作やプログラミングを理解する高度技術職員が必要。
 ・海外との相互共有も検討すべき。オープン・クローズド戦略は慎重に要検討。

文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム」事業 「微細加工プラットフォームコンソーシアム」での固体量子センサのオープン利用の促進

機器画像	設備名称	仕様	ナノプラットフォーム支援事業での 利用料金	自主事業での 利用料金
	共焦点ラマン顕微鏡	WiTec alpha300R、532 nm レーザー、グレーティング 600 g/mmおよび1800 g/mm（ブレース波長 500 nm）、空間分解能 350 nm（XY方向）および900 nm（Z方向）、対物レンズ 10倍・20倍・50倍・100倍、XYZ自動ステージによるラインスキャン・2次元マッピング・3次元マッピング	1,100円/1時間	29,000円/1時間
	マイクロ波プラズマCVD装置	最大6 kWのマイクロ波パワーでダイヤモンド薄膜を合成できます。50 mmφのサンプルホルダーを有しています。窒素を添加することで、現在注目されている量子センサである窒素-空孔（NV）センタを作ること可能です。	2,900円/回	38,000円/回
	クライオ共焦点顕微鏡	温度 3.4~350 K（試料温度は3.4 Kよりも上昇）のクライオスタットを備えています。アバランシェフォトダイオードと高感度分光器による微弱な光の検出が可能です。単一光子放出を確認するHanbury-Brown Twiss干渉計測も実施できます。	1,000円/1時間	48,400円/1時間
	ICP-RIE	ダイヤモンドやシリコン、SiO2などを高密度プラズマでエッチングする装置です。また、屈折率差がある材料であれば、終点検出も可能です。最大4インチ、2インチ以下なら不定形基板の取り扱いができます。ガス種：CHF3, O2, CF4	¥7,300/1エッチング	¥51,100/1エッチング

ダイバーシティ・インクルージョン促進

分野や組織を横断した人材の流動性→人とアイデアを囲い込まない

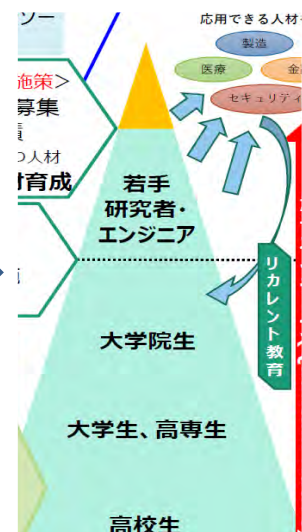
施策例

- ・参画企業へのキャリアパス
- ・参画企業から社会人博士、派遣研究員
- ・クロスアポイントメントの促進
- ・海外先端大学からの移籍(MIT/ハーバード)
- ・量子プロジェクト関連、周辺の人材流動
- ・学協会を通じた人材リソースの共有化
- ・シニア人材の活躍

経験知が重要な高度アナログ技術 →裾野拡大のターゲットの一つ

- ・高専出身者の活躍（研究室の3割）
- ・卒業生との共同研究

シニアの活用



課題

量子人材育成は時間が掛かり、博士進学が必須。

「科学技術イノベーション創出に向けた大学フェロシップ創設事業」スタート
課題はキャリアパス、インセンティブ、就活方法と時期。

国際的なエコシステム

- ・学生、若手研究者の長期滞在も含む相互交流（コロナ禍のため延期）
→キャリアパス発展に期待、特任教授としても雇用
 - ・多様でダイナミックな教育プログラムの協働（DDも含む）
 - ・先方の最先端設備の活用、世界の共通プラットフォーム構築を模索
- 課題： Q-LEAPテーマの扱い、先方と連携している企業への対応
海外はベンチャー企業が急増。日本はこれから。

(例)ドイツとの連携

JSPS 二国間交流 - ドイツ学術交流(DAAD) 相互事業実施中

今年度よりスタートしたドイツのNV関連の産学連携PJの例



RaQuEI

プロジェクト期間 2021年6月1日 - 05/31/2024

電気自動車用の室温量子センサー

量子センサー、計測学、イメージングにおけるアプリケーション関連の研究

OCQNV

プロジェクト期間 2021年9月1日 - 2023年8月31日

NVセンターを備えた量子センサー用の光導波路とCMOSインターフェース

QUANTUMTECHNOLOGIES-大学や研究機関での研究活動の促進

DiaQuantFab

プロジェクト期間 2019年5月15日 - 2022年5月14日

量子効果に基づく高精度電流計の実現のためのダイヤモンドのNVカラーセンターの例を使用した量子材料の製造と処理の標準化

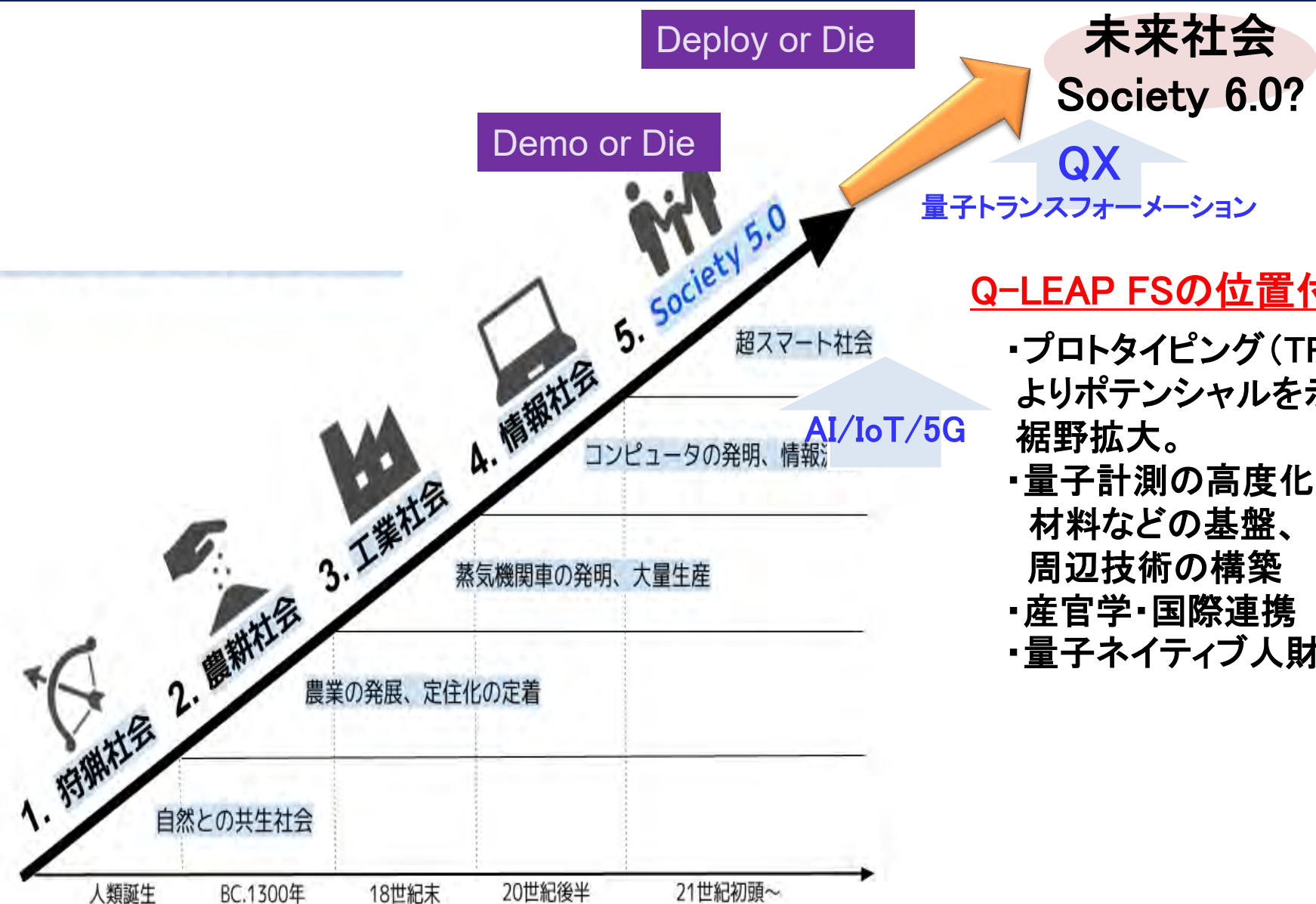
量子技術の主要コンポーネント

Stuttgart大学 Center for Applied Quantum Technology 今年10月スタート

物理とエンジニアの協働、特に量子センサ向けの応用量子技術を開発。磁場、振動、電磁放射などによる環境の影響を排除。鉄筋の代替にガラス繊維を使う徹底ぶり。

まとめ 超スマート社会を足掛かりに量子が未来社会の主角を狙う

人類社会発展の軌跡と量子の今後



Q-LEAP FSの位置付け

- ・プロトタイピング(TRL6)によりポテンシャルを示す。裾野拡大。
- ・量子計測の高度化、材料などの基盤、周辺技術の構築
- ・産官学・国際連携
- ・量子ネイティブ人財育成

ご清聴ありがとうございました

