



# 1. 社会実装に向けた施策・取組等の全体俯瞰

## ① 全体概要

### <①解決すべき社会課題>

- 医薬品候補化合物やバイオモダリティの多様化により、分子量が大きく、構造複雑性の高い有機化合物の研究が進んでいる。これに伴い、主要な分析手法である**NMRについては、高感度化による分析スループットの向上**が求められており、既に冷却プローブや動的核偏極技術といった技術が実用化されている。しかし、**従来技術は専用設備の導入や寒剤管理に伴うコストの増加が大きく、汎用的に使うことは困難であり、エレクトロニクスの限界を超える微小信号計測技術の開発が課題**となっている。
- JST A-STEP 本格型 (以下A-STEP)では、**ダイヤモンド量子磁気センシング技術**を用いて、非冷却条件で冷却プローブ相当の高感度(室温比較 約10倍)を実現した高感度NMRシステムを開発しており、水素核NMRでの性能優位性の検証を行っている。一方、**本技術を社会実装するためには、NMRの分析対象となる様々な核種について、高感度センシングを実現**する必要がある。
- 多様な核種に応じたNMR信号を検出するためには、**広帯域な量子計測、すなわち高速なサンプリングに対応した高感度センシングシステムの開発、およびそれに適応したダイヤモンドの開発**が課題となる。また、本システムの社会実装に向けては**商用レベルの量子磁気センシングシステムの開発、および中核部品となるダイヤモンド供給体制を確立**することが課題である。

### <② 提案施策>

- 量子磁気センシングシステムにおける測定帯域を広帯域化するために **位相蓄積と光による位相情報の読出し&初期化、これら2つの計測プロセスについて、現状のシステムから光エネルギーと集光効率を改良し、量子計測時間短縮を行った広帯域センシングシステムを開発**する。また、位相蓄積時間短縮による感度低下リスク対策として、電子線照射等によるダイヤモンド物性の最適化検討を行う。センシングシステムとダイヤモンドの開発を一気通貫で実施し、量産プロセスへ落とし込み、量産体制の確立を加速する。
- **A-STEP成果となるNMR向けの高感度量子磁気センシングシステムを競争力の高い製品として仕上げ、量産体制を整備することで、商用化に向けた課題を解決し、社会実装を加速する**。事業終了後は、本施策の成果として試作したプロトタイプシステムを用いて、NMRベンダーと共に事業化に向けた評価を行う。

### <③ 成果の社会実装>

- BRIDGEにて**広帯域・高感度ダイヤモンド量子磁気センシングシステム**を開発し、**高感度<sup>13</sup>C NMR測定 (従来システム比 感度10倍、帯域10倍)**を実現することで、分析スループット向上効果を実証する。事業終了後はNMRメーカーとの共同開発にてセンシングシステムの商用化を推進し、冷却を必要としない高感度NMRの社会実装に向けた製品化を行う。これにより**医薬品、食品、農業等のNMRを活用する企業、研究者におけるNMR測定に要する時間を約1/100に短縮し、開発効率の飛躍的向上に寄与する**。
- ダイヤモンド生産・供給の事業体制を整え、本施策参画企業と連携してセンシングシステム全体のサプライチェーンの整備、マネジメントを行う。**ダイヤモンド物性の精密制御技術は磁気センシングの測定可能周波数帯域、すなわち適用できるアプリケーションと密接に関係しており、NMRだけでなくMRIなどのユースケース拡大を図る上で不可欠**である。本事業で得た知見を元に、事業終了後は**新たなユースケース創出と社会実装への加速に貢献**する。

# 1. 社会実装に向けた施策・取組等の全体俯瞰

## ② 全体俯瞰図

### A-STEP「冷却を必要とせずにNMRの高感度化を可能にする超高感度磁気センシングシステム」の社会実装を加速

#### A-STEP (本格型) 開発内容 (2023-2026)

- A-STEP (本格型)にて**微弱なNMR信号を量子磁気センシングを利用して検出する超高感度センシングシステムを開発**。室温下で従来手法と比較して、10倍以上の高感度化、測定時間1/100の実現を目指す。
- **感度1pT/√Hz相当の超高感度磁気センシングシステム構築済**、プロトンを対象に高感度NMRシステムを構築し、性能実証中。
- 信号を電氣的に増幅することなく、磁気信号に変換した上で量子情報として検出する手法は、量子センサの超高感度特性を活かした新たな検出手法である。**本方式を利用したNMRは量子磁気センシングの最も有望なアプリケーション**であり、早期の社会実装が期待される。

#### 社会実装に向けた課題

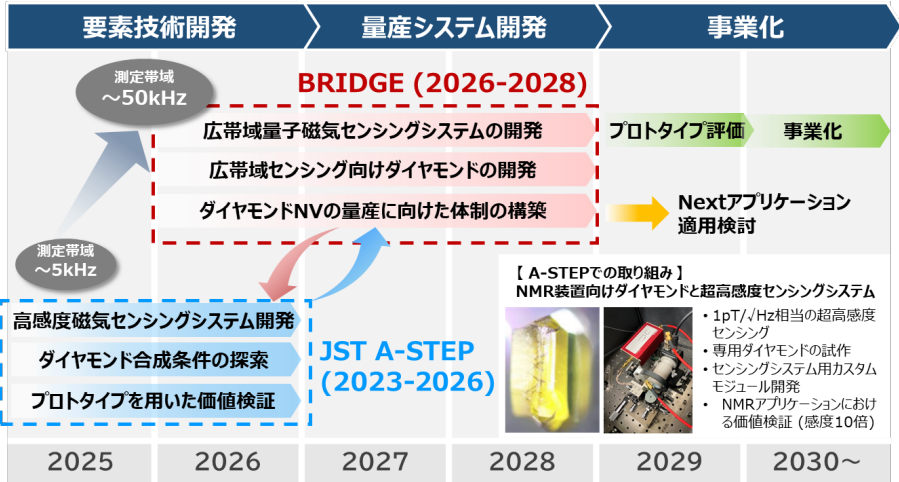
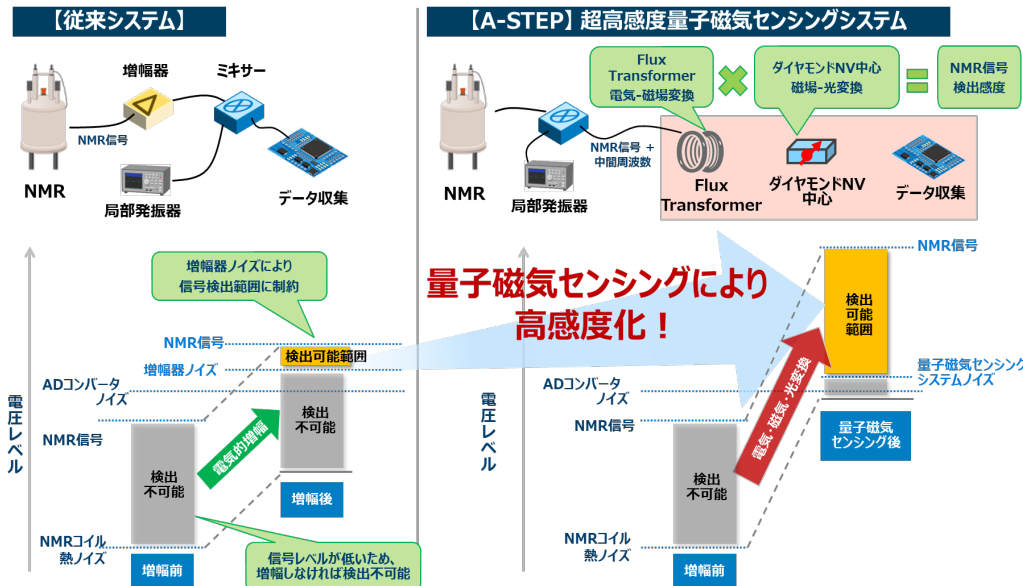
- 開発中システムの測定帯域は約5kHz。**ユースケースを拡大し、競争力のある製品にするために、10倍の広帯域化を目指す。**
- ダイヤモンド量子磁気センシングを製品化するためのサプライチェーンを構築。特に、**ダイヤモンド量産技術の確立と供給体制の整備は必須。**

#### BRIDGEにて実施 (2026 - 2028)

- ① 量子計測シーケンス短縮とダイヤモンド物性の最適化
- ② ダイヤモンド供給体制の確立

#### 【 BRIDGE 終了時点の目標 】

#### NMR向け量子磁気センシングシステムの試作機開発完了



## 2. 研究開発等の具体的な内容・社会実装の目標

### ① 研究開発・社会実装の目標

高感度量子磁気センシングシステムを活用したNMRシステムの社会実装を目指す。本技術によりローエンドの卓上NMRでも、ハイエンドの冷却方式にならぶ高感度が得られ、医薬品・食品・農業・合成生物学等の分野で高まる分析スループットの向上に対するニーズに応える。また、量子磁気センシングシステムのサプライチェーンを構築し、コアデバイスとなるダイヤモンドNVの供給体制を確立する。事業終了時点ではNMR向け量子磁気センシングシステムの試作機開発を完了し、NMR関連企業と連携して早期の製品組み込み、社会実装を目指す。

### ② 研究開発等の具体的な内容

#### (1) 測定帯域の広帯域化 (帯域 現状5kHz → 目標50kHz)

##### 1. 量子計測シーケンス(位相の蓄積・読出・初期化) 時間の短縮

- 励起光エネルギーの増強と蛍光集光効率の向上を行い、量子情報の読出し、及び量子状態の初期化時間の短縮化を検討。
- 位相蓄積時間の短縮化を検討。原理的に信号強度は低下し、感度は低下。

##### 2. ダイヤモンド物性の最適化

- 感度低下対策として、センシングに用いるNV数を増加 (濃度、厚み)し、位相蓄積量低下をキャンセルする条件を探索する。

#### (2) ダイヤモンドNVの製造プロセスフローの確立

##### 1. CVD法によるダイヤモンドNVの量産に向けた体制の構築

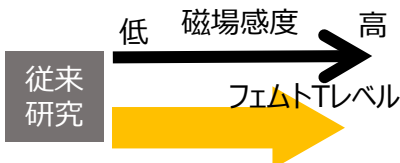
- ダイヤモンドNVの物性について精密制御を可能とする製造技術を開発し、性能とコストを両立した生産・加工条件を確立する。

##### 2. ダイヤモンドNVのスペック妥当性確認

- 試作したダイヤモンドNVのセンシングシステムへの組み込み検証を実施し、ダイヤモンドNVに要求される特性の妥当性検証を行う。市場調査や社会実装に向けたビジネスモデルの検討を実施する。

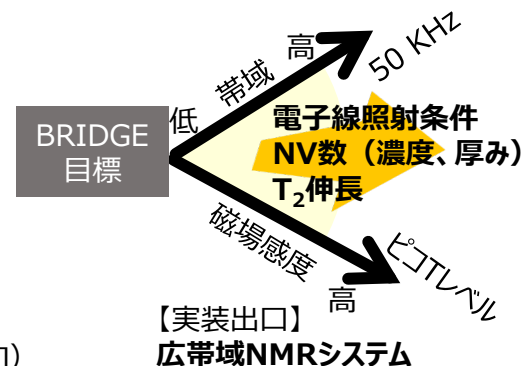
#### ダイヤモンドNV開発の方向性

磁場感度の向上

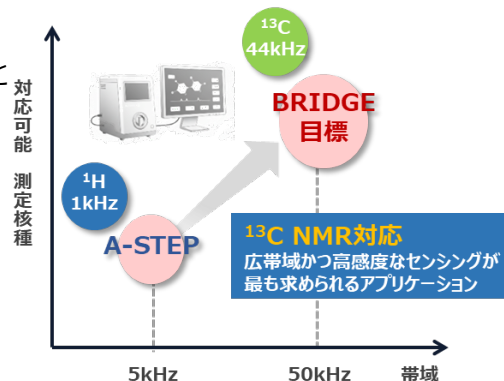


【実装出口】  
脳磁計測 (Q-LEAP)  
パワー半導体 (SIP)  
海中磁場センシング (Kプロ)

磁場感度と共に帯域性能の向上



#### 広帯域センシング技術の開発



- $^{13}\text{C}$  NMRは分子構造を決定するために不可欠な測定。一方、天然存在比が低く、長時間(数時間～数十時間)の測定積算が必要。
- $^{13}\text{C}$  NMRは、 $^1\text{H}$  NMRと比較して広帯域、かつ高感度なNMR測定システムの構築が求められる。

### 3. 年度別の実施内容・到達目標 (KPI)

テーマ名	実施内容の概要 到達目標 (KPI)	R8年度実施内容 到達目標 (KPI)	R9年度実施内容 到達目標 (KPI)	R10年度実施内容 到達目標 (KPI)
① 測定帯域の広帯域化	量子磁気センシングシステムの広帯域サンプリング手法を確立し、NMRにおけるユースケースを拡大する。測定帯域50kHzに対応し、 <sup>13</sup> C NMRにおける性能優位性を検証し、評価機を納入。事業化を行う。	量子計測シーケンス(位相の蓄積・読出・初期化)時間を短縮するための光学条件の調査・最適化を行い、測定帯域10kHzを実現する。NVダイヤモンドに求められる要求特性を絞り込み、最適製造パラメータの策定を行う。(TRL5, BRL4)	広帯域センシング用に特性を最適化したダイヤモンドNVを作製し、開発した小型磁気センシングヘッドに組み込む。測定帯域25kHzを実現し、ユースケースに対して要求性能を満たすことを確認する。(TRL6, BRL5)	小型磁気センシングヘッドをマルチチャンネル化したセンシングシステムを開発し、50kHzを越える広帯域サンプリング手法を実現する。ターゲットとなるNMRメーカーと試作機を用いた評価を行い、既存システムと比較して性能優位性を検証し、量産機の開発をスタートする。(TRL7, BRL6)
② ダイヤモンドNVの製造プロセスフローの確立	広帯域磁気センシングに必要なダイヤモンド物性に対する要求仕様を調査・検証し、製品化KPIを設定する。ダイヤモンドNVの物性について精密制御を可能とする製造技術を開発し、性能とコストを両立した生産・加工条件を確立、製品化KPIを達成し、量産体制を構築する	広帯域センシングを実現するダイヤモンド特性について要求仕様を検討し、これらの物性を精密制御するためのダイヤモンド製造条件の策定、製造技術の開発、ダイヤモンドの試作を行う。製品化KPI(歩留、ロット間ばらつき、検査校正方法、原価目標)を設定する。(TRL5, BRL4)	試作ダイヤモンドのセンシングシステムへの組込評価を行い、単体スペックの検証を実施する。試作結果を元に性能とコストを見積もり、製品化KPIを満足するための生産・加工条件の改良を行う。(TRL6, BRL5)	量子磁気センシングシステムの事業化を踏まえて、ダイヤモンドNV供給体制を構築する。量産に向けた体制の構築と技術移管を行い、量産時のダイヤモンドNVの性能・コスト仕様について評価・製品化KPIの達成に向けた検証を行う。(TRL7, BRL6)

# 4. 工程表

テーマ名	R8年度	R9年度	R10年度
<p>① 測定帯域の広帯域化</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>量子計測シーケンス(位相の蓄積・読出・初期化)時間の短縮(スミダ電機)</li> <li>CVD法によるダイヤモンド合成におけるNV濃度、膜厚の精密制御によるNV数の最適化(京都大学)</li> <li>電子線照射によるダイヤモンド特性の最適化(QST)</li> <li>ベンチトップNMRの市場調査・分析(スミダ電機)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子計測シーケンス時間を短縮するための光学システム開発・最適化</li> <li>広帯域センシングを可能とするダイヤモンド特性の設計・試作</li> <li>電子線照射によるダイヤモンド物性の広帯域化調整手法確立</li> <li>卓上NMR市場のサプライチェーン構築に向けた調査</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試作ダイヤモンドのサイズ最適化、センシングヘッドへの組込・性能出し</li> <li>広帯域センシング用ダイヤモンドの試作開発、単体評価による性能検証</li> <li>電子線照射による広帯域センシング用ダイヤモンドの試作、単体検証</li> <li>研究開発成果の市場価値分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>マルチチャンネル化センシングシステムによる広帯域測定手法確立</li> <li>CVD法によるダイヤモンド合成プロセスの精密制御と条件最適化</li> <li>NV濃度の最適化と電子線照射によるダイヤモンド特性の最適化</li> <li>研究開発成果の社会実装に向けたビジネスモデルの検討</li> </ul>
<p>② ダイヤモンドNVの製造プロセスフローの確立</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CVD法によるダイヤモンドNVの量産に向けた体制の構築(京都大学)</li> <li>ダイヤモンドNVのスペック妥当性確認(スミダ電機)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ダイヤモンドNV物性の精密制御を可能とする製造技術の開発</li> <li>広帯域センシングを実現するダイヤモンド特性について製品化KPIの策定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>性能とコストを両立したダイヤモンドの生産・加工条件の確立</li> <li>試作ダイヤモンドのセンシングシステム組込評価による単体スペック検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ダイヤモンドNVの量産に向けた体制の構築と技術移管</li> <li>量産時のダイヤモンドNVの性能・コスト仕様について評価・製品化KPIの検証</li> </ul>

# 4. 工程表 (令和8年度の詳細)

内容	令和8年度											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
<p>① 測定帯域の広帯域化</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>量子計測シーケンス(位相の蓄積・読出・初期化)時間の短縮 (スミダ電機)</li> <li>CVD法によるダイヤモンド合成におけるNV濃度、膜厚の精密制御によるNV数の最適化 (京都大学)</li> <li>電子線照射によるダイヤモンド特性の最適化(QST)</li> <li>ベンチトップNMRの市場調査・分析 (スミダ電機)</li> </ul>	位相情報の読出・初期化時間を短縮するための光学システム設計					光学系変更によるセンシングシステム広帯域化						
	位相蓄積時間の短時間化手法の探索					位相蓄積量の低下抑制手法の開発						
	電子線照射によるダイヤモンド最適化条件の探索					電子線照射により最適化されたダイヤモンドの開発						
	卓上NMRにおける技術動向等の調査・ユースケース・潜在顧客分析											
<p>② ダイヤモンドNVの製造プロセスフローの確立</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CVD法によるダイヤモンドNVの量産に向けた体制の構築 (京都大学)</li> <li>ダイヤモンドNVのスペック妥当性確認 (スミダ電機)</li> </ul>	ダイヤモンドNV濃度を最適化するための製造設備設計改良					ダイヤモンドNV濃度を精密制御するためのプロセスパラメータ導出						
	高感度を維持しつつ、量子計測シーケンス高速化するために必要となるダイヤモンド特性の抽出					広帯域センシングを実現するダイヤモンド特性について製品化KPIを策定						

# 5. 実施体制及び実施者の役割分担

各省PD  
寒川哲臣  
SIP 3 量子PD



国立研究開発法人  
量子科学技術研究  
開発機構 (QST)



ダイヤモンド量子磁気センシング  
による高感度NMRシステムの開発  
量子科学技術研究開発機構  
大島 武  
研究開発責任者

SIP第3期「先進的量子技術基盤の社会課題への応用促進」と連携する。SIP型のマネジメント体制とし、研究推進法人であるQSTが施策の円滑な推進や進捗管理を担当し、各省PDによるマネジメントが適切に行われるように整備する。SIP推進のために、得られた知見・成果の円滑な展開を行う。

体制について：公募を実施しない理由

本施策の量子磁気センシングシステムの技術開発において、京都大学は高感度磁気センシング手法やダイヤモンド合成に関して、高い技術を有する。スミダ電機株式会社は、ピコテスラレベルの感度を示す量子磁気センシングシステムを既に開発しており、電子部品業界での製品実績を数多く保有する。量子科学技術研究開発機構はダイヤモンドへの電子線照射を行うことができる設備を唯一保有している。以上より、右記体制での実施が必須であり公募は実施しない。

## ① 測定帯域の広帯域化

スミダ電機株式会社  

- 量子計測シーケンス(位相の蓄積・読出・初期化)時間の短縮
- ベンチトップNMRの市場調査

京都大学  

- CVD法によるダイヤモンド合成におけるNV濃度、膜厚の精密制御によるNV数の最適化

量子科学技術研究開発機構  

- 電子線照射によるダイヤモンド特性の最適化

## ② ダイヤモンドNVの製造プロセスフローの確立

京都大学  

- CVD法によるダイヤモンドNVの量産に向けた体制の構築

スミダ電機株式会社  

- ダイヤモンドNVのスペック妥当性確認

# 6. BRIDGE終了後の出口戦略

## 【BRIDGE終了時の成果 (2028年まで)】

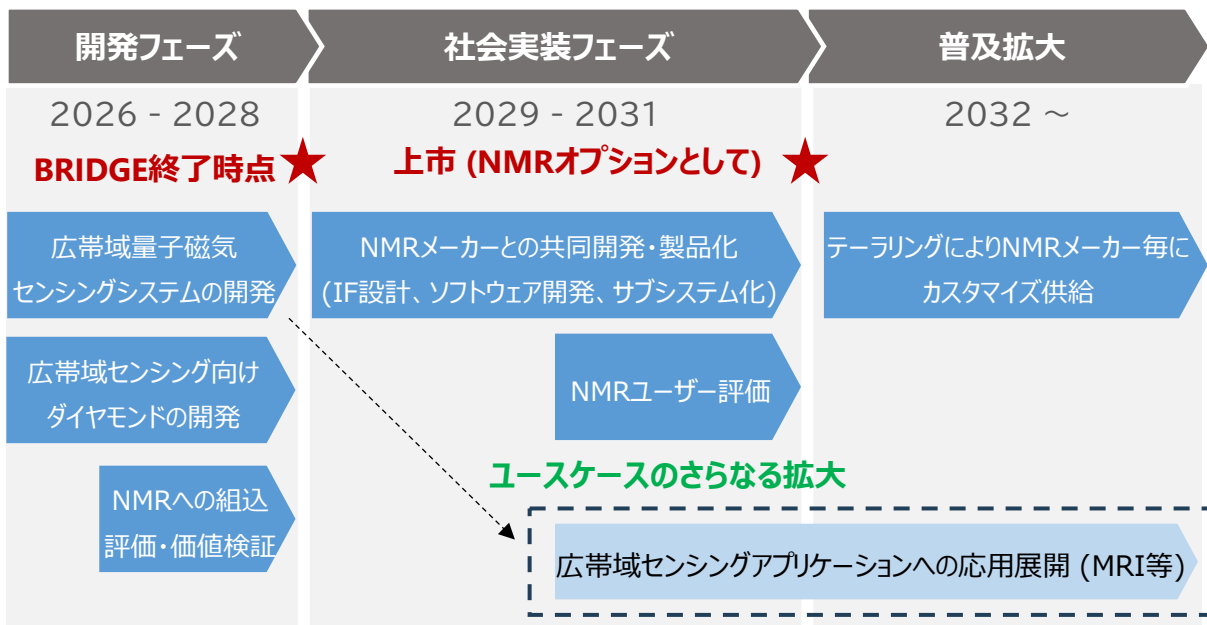
- BRIDGEにおいて広帯域・高感度ダイヤモンド量子磁気センシングシステムのプロトタイプ機を開発。
- NMRメーカーによる評価を通じて、本方式の有用性を実証。
- ダイヤモンド製造プロセスフローを確立し、製品システムへの提供体制準備を行う。

## 【BRIDGE終了後】

- 2031年までにNMRメーカーとの共同開発体制を構築。専用インターフェースの設計、及びソフトウェア(制御API等)を開発し、量子磁気センシングシステムをオプションユニット化。NMRユーザーによる評価を実施したのちに、ベンチトップNMRのオプションとして一般商用化を目指す。
- 冷却を必要としない高感度ユニットとして、本システムをいち早く社会実装することにより、医薬品、食品、農業等のNMRを活用する企業、研究者の開発効率の飛躍的向上、市場拡大に寄与する。
- 開発した広帯域センシング技術をベースに、MRI等への応用展開等、新たなユースケース創出と市場開拓に貢献する。

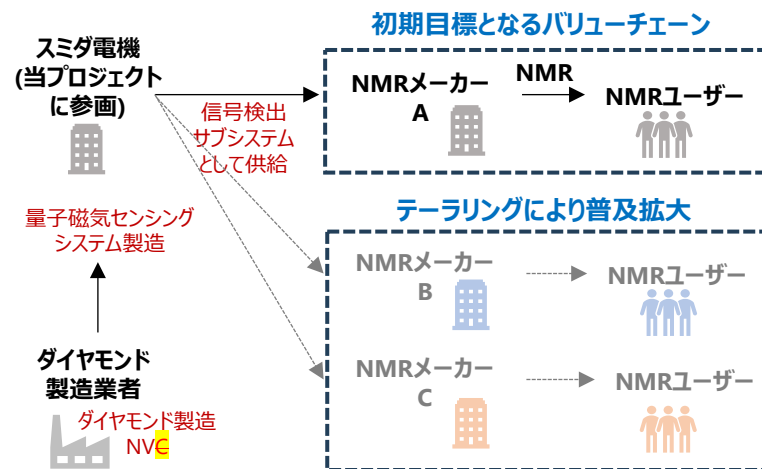
## 【残る課題と対応策】

- 広帯域量子磁気センシングシステムを普及拡大し、さらなる社会実装を推進するためには、複数のNMRメーカーへ本システムを導入する必要がある。BRIDGE終了後、開発したシステムをNMR事業者毎にテラリングを行い、NMRユーザーへのベネフィットを最大化する。
- 超電導NMRへ展開するために、本開発スコープ以上の広帯域化が必要となる。BRIDGE終了後もセンシング帯域の広帯域化技術の開発を継続する。



## 【ビジネスモデル】

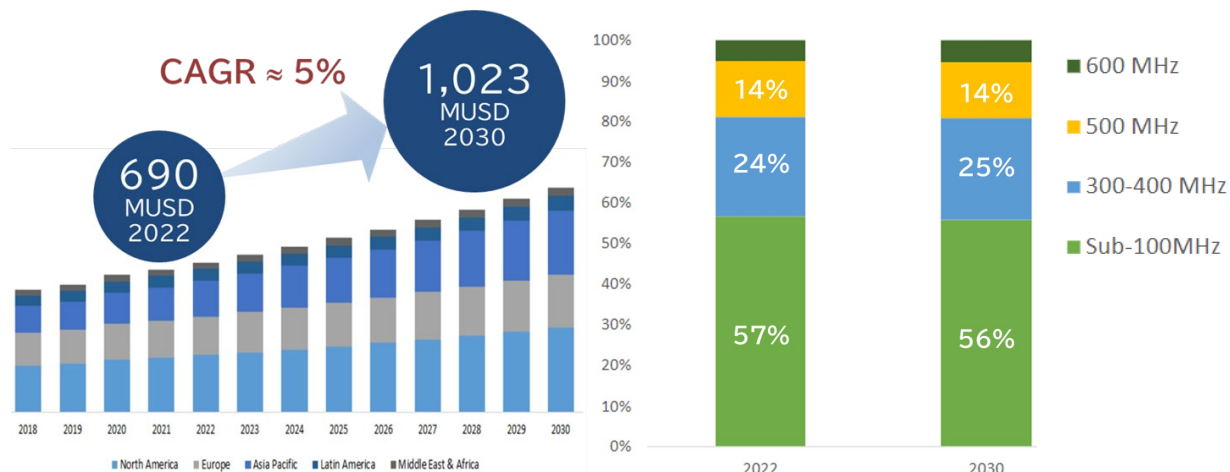
- 量子磁気センシングシステムはNMR全体システムの中で、信号検出サブシステムとして位置づけ
- NMRメーカー毎にカスタムしたサブシステムとして供給



# 7. 民間研究開発投資誘発効果及びマッチングファンドの見込み

## ① 民間研究開発投資誘発効果（財政支出の効率化）の見込み

• NMR市場は主に生化学分野の研究開発の発展に牽引され、**グローバルのNMR市場規模は約7000億円、2030年に向けてCAGR約5%の市場成長**が見込まれている。その内訳は新興国を中心に**2T以下の低価格普及機クラスが市場の約6割を占めるボリュームゾーン**となっている。高感度であるもののコスト等の制約が大きい超電導NMRではなく、静磁石を用いたベンチトップ型NMRが産業界を中心に用いられている状況である。ベンチトップ型NMRの主な用途としては化学材料分析や医薬品・中間体の品質管理、溶液成分プロファイリング、食品成分評価等があり、製造工場内にインラインで設置されるなど、比較的簡易なシステムとして企業等で汎用的に用いられている。



• **量子磁気センシングシステムのメインとなるビジネスターゲットはこれら普及機クラスを対象**としており、本セグメントに対してこれまでなかった高付加価値化技術を提供することで**500億円以上の新規NMR市場を創出**する。これは、一部の**高磁場NMRの代替**、および**地理的に未開拓の市場拡大**により、**卓上NMRが新たな分析プラットフォームとして活用できることを想定**している。特に、**医薬品製造における医薬品原料や中間体の品質管理における卓上NMRの利用拡大**が想定される。

## ② 民間からの貢献度（マッチングファンド）の見込み

• スミダ電機株式会社より**研究員2名以上の参画を予定**しており、**研究費・保有品利用料を含めて各年度期間で19,800千円（3年度間：59,400千円）の貢献を予定**する。マッチングファンド比率については、**次年度以降も各年度期間の要求額に対して25%以上の比率を確保**できる見通しであり、**目標以上の民間貢献度が期待**される。