

オンチップ量子センサの 量産化に資するガスセル製造技術

京都大学大学院 工学研究科機械理工学専攻
講師 平井 義和

2025年11月20日

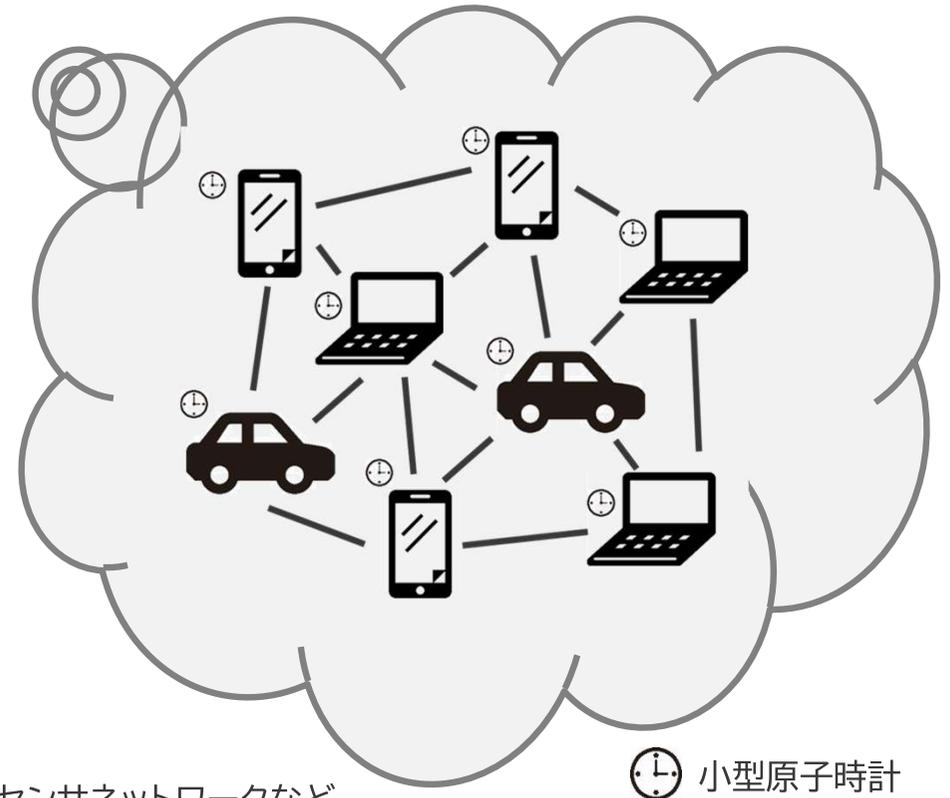
アジェンダ

1. 背景と動向(ガスセル型小型原子時計)
2. 従来のガスセル製造技術とその課題
3. 新技術の特徴・比較
4. 想定されるガスセルの用途
5. 実用化に向けた課題
6. 社会実装へのロードマップ
7. 企業への期待／貢献



背景

- Beyond 5Gでは、自動運転・IoT・遠隔システムなどで**高精度な時刻標準／時空間同期**が必須
- その中核となるのが**小型原子時計**であり、精度・安定性で水晶振動子などを凌駕
- 従来の小型原子時計は高価で量産性にも乏しいため、**民生用途への普及には限界** 例)インフラモニタリング、センサネットワークなど

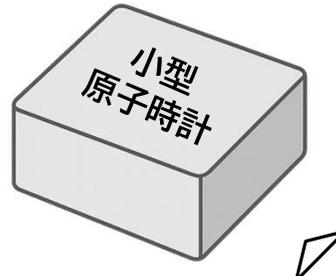


小型原子時計(ガスセル型)

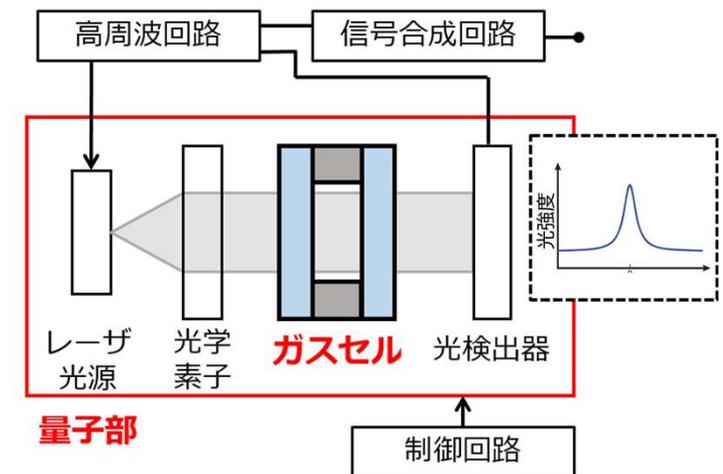
- 原子時計とは: アルカリ金属(Cs、Rb)の遷移周波数を基準にした**高精度な周波数基準器**(\approx 正確な1秒を定義する「時間のものさし」)
- 特長: **小型・低消費電力・高安定性** ※3000年で1秒の誤差

主要スペック例(小型原子時計)

- サイズ : 20 cc
- 消費電力 : 150 mW
- 価格 : \$2000



商用化 : 各国から販売(航空宇宙・海底探査など)
研究開発 : 様々なタイプの実証デバイスが登場



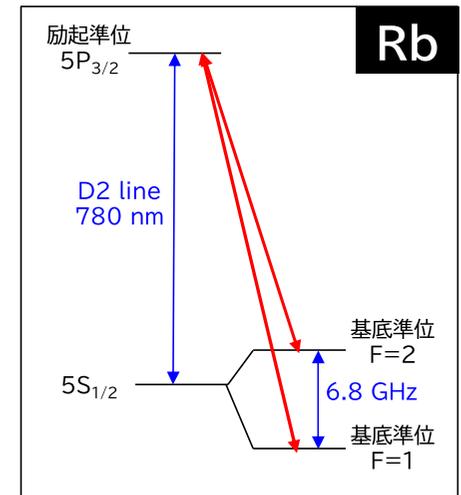
アルカリ金属原子とCPT共鳴

- 小型原子時計では、**原子と光の相互作用による量子干渉現象**である**CPT***共鳴を利用する

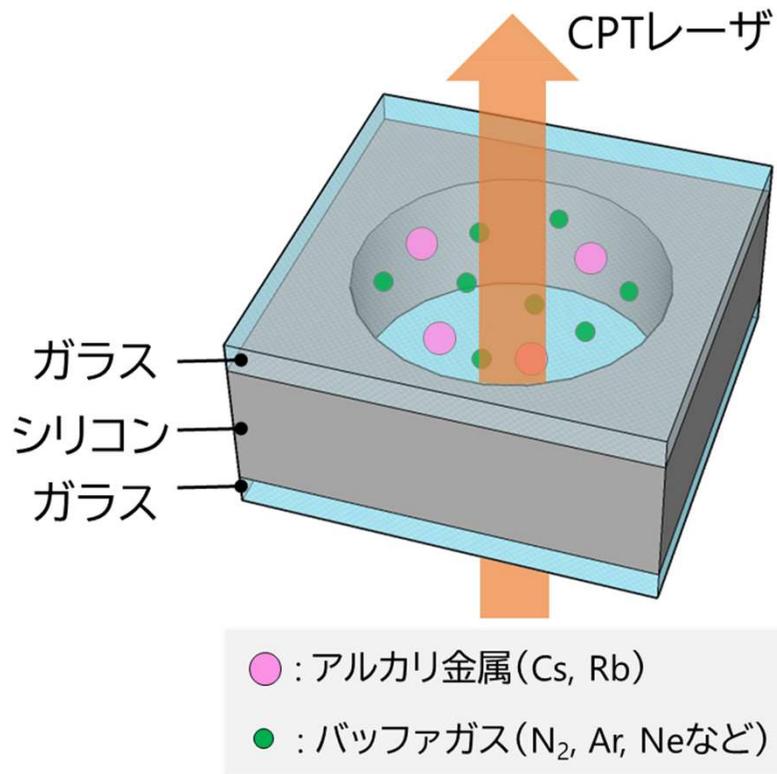
*Coherent Population Trapping

1	1 H	
2	3 Li	4 Be
3	11 Na	12 Mg
4	19 K	20 Ca
5	37 Rb	38 Sr
6	55 Cs	56 Ba
7	87 Fr	88 Ra

原子	原子量	D1線 [nm]	D2線 [nm]	共鳴周波数 [GHz]
Rb	85	795.0	780.2	3.035 732 440
	87			6.834 682 612
Cs	133	894.6	852.3	9.192 631 770



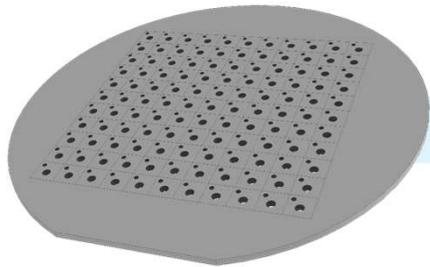
中核部品：アルカリ金属封入ガスセル



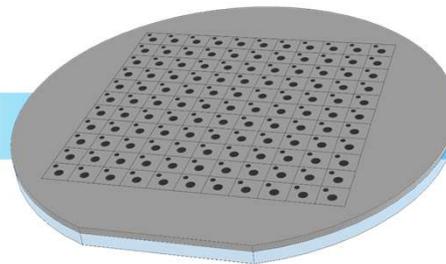
- シリコンとガラスで作製した数mm角の容器に、**アルカリ金属**と**バッファガス**を封入・封止
- 小型原子時計の**心臓部**として、周波数**安定性**と**寿命**の**品質**を左右
- 小型端末の搭載に向けては、**低コスト／簡便に量産可能なガスセル製造技術**が供給のボトルネック

小型ガスセルの製造方法(工程フロー)

1. シリコンに貫通穴を作製



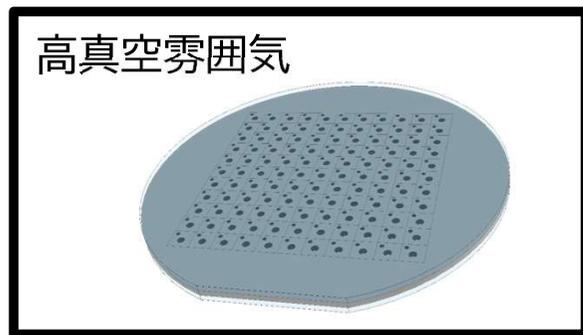
2. ガラス基板を接合



3. アルカリ金属生成物を容器内に投入



4. ガラス基板を接合して封止



5. アルカリ金属生成 (加熱/レーザ/光照射)



6. 個々のガスセルに切り離し(ダイシング)



アルカリ金属生成の代表例

$2\text{CsN}_3 \rightarrow 2\text{Cs} + 3\text{N}_2$
※反応後の残存物なし

生成用材料	固体生成源		アルカリ金属アジ化物					
生成方式	レーザー照射		ガラス基板を加熱	UV照射				
研究グループ	FEMTO-ST(仏)	NIST(米)	CSEM(スイス)	CSEM(スイス)				
ガスセルサイズ	6 mm×4 mm	3.7 mm×3.7 mm	4 mm×4 mm	4 mm×4 mm				
特徴	簡便なプロセス セルを個々に照射	セルサイズの小型化 基板の6割以上をロス	シンプルなセル構造 650℃の加熱が必要	シンプルなセル構造 半日以上のUV照射				
生成の歩留まり	75%	30%	0%	40%				
性能(周波数安定度)	10^{-10} レベル	10^{-10} レベル	—	10^{-11} レベル				
	<p>●:アルカリ金属 ●:不活性ガス</p>							

従来技術とその問題点

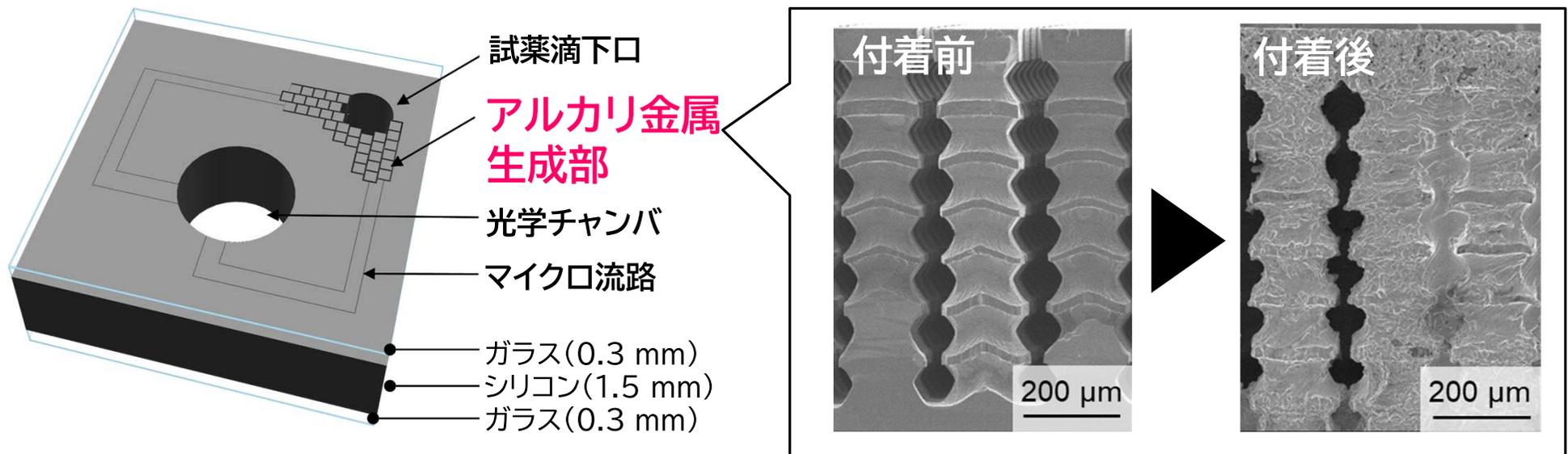
- 固体生成源を用いる方法では、ガスセル使用中に**残存した生成源が緩衝ガスを吸脱着するため**、性能が安定化しない
- アルカリ金属アジ化物を光分解する方法では、**半日以上**のUV照射が必要となるため、**製造スループットが低下**
- アルカリ金属生成プロセスの**高温加熱に起因する残留ガス放出**により、ガスセルおよび原子時計の性能が劣化する

**ガスセル製造技術として未成熟で、
小型原子時計の民生応用へのボトルネックとなっている**

本技術のコンセプト

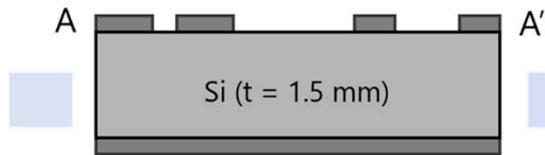
国際出願PCT/JP2021/039690

- 独自のシリコン3次元凹凸構造に付着させたアルカリ金属アジ化物を効率的に加熱分解し、アルカリ金属を生成・封入

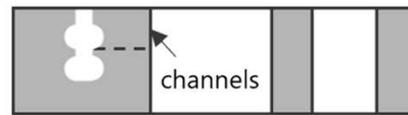


作製プロセス

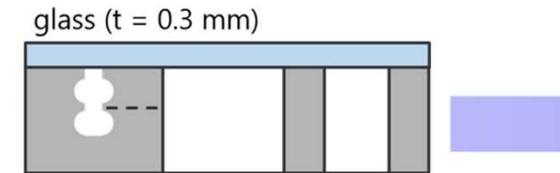
(1) エッチング用マスクの形成



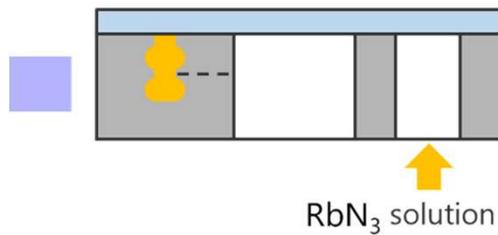
(2) シリコンのエッチング



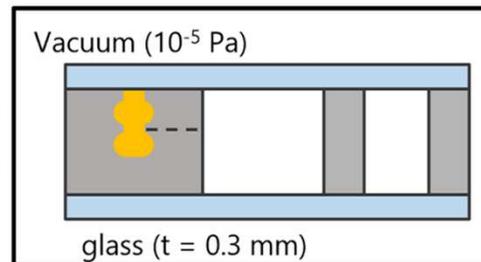
(3) ガラスウェハの接合



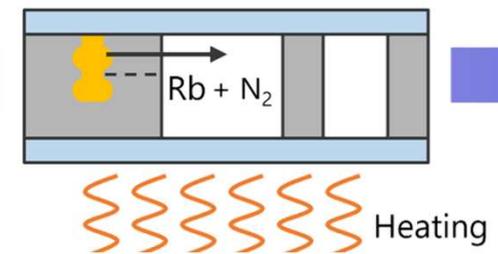
(4) アルカリ金属アジ化物(RbN_3)
水溶液の滴下・乾燥



(5) 真空雰囲気でのガラスウェハの接合
(ガスセル封止)



(6) ホットプレートでガスセルを約350°Cに加熱して
アルカリ金属を生成

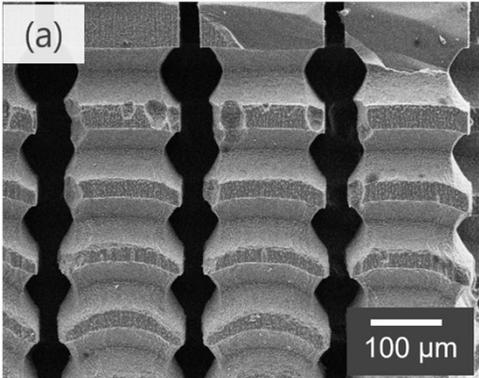
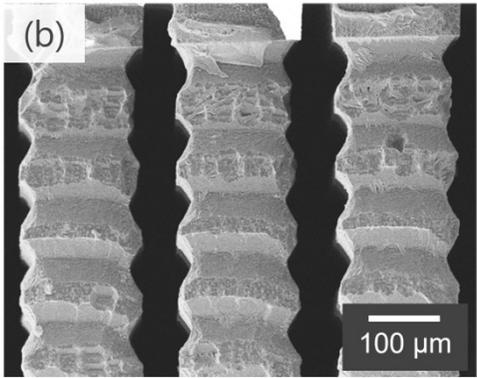
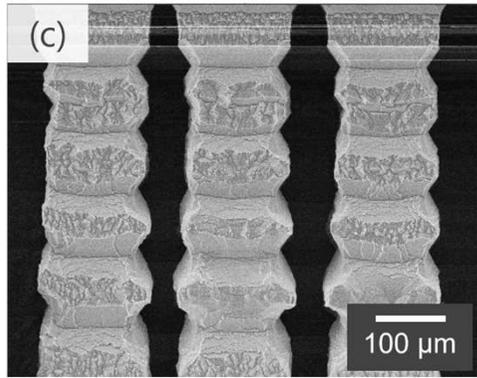


①光学チャンバと生成部を同時形成、②ウェハを一括加熱

新規性・優位性のまとめ

- シリコン3次元構造を用いた低温・短時間プロセス
約350°C・10分でガスセルを作製、従来から約300°Cも低いアルカリ金属生成・封入温度、かつ1/50以下の時間
- 高歩留まり・量産性
アルカリ金属生成の高い歩留まり、短時間プロセスによる量産性
- 汎用性
RbだけでなくCsやKセルにも適用可能、量子センサ用途に幅広く展開できる → ガスセル供給プレーヤー不足を解決

実証データ：優位性

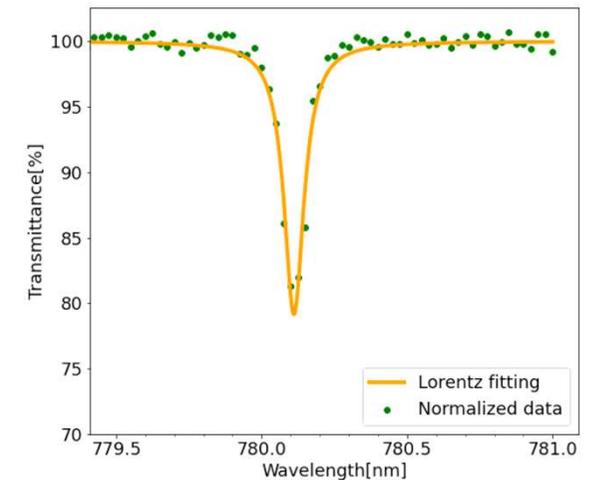
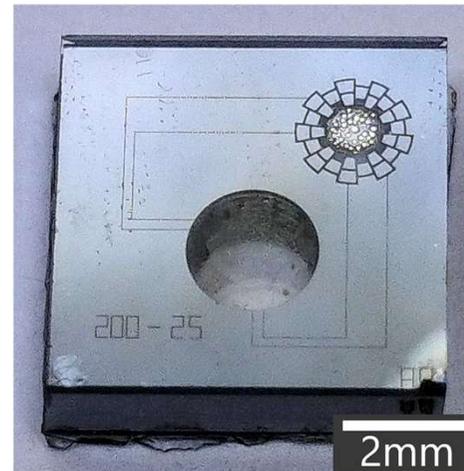
凹凸形状	大きい	中間	小さい
SEM写真	(a) 	(b) 	(c) 
作製セル数	15	16	20
Rb生成個数	10	5	0
歩留り [%]	67	32	0

実証データ：作製結果

作製結果(4インチウェハ)



Rb生成結果／吸光度計測



約350°C、10分間、ホットプレートによる加熱で、セル内にRbの生成を確認。

想定される用途(量子センシング)

- **原子時計: Rb, Cs**

分散コンピューティング、時空間同期システム、Alt-PNT(GPSに代わる位置・通信・タイミング)

- **原子ジャイロセンサ: Rb**

モビリティの慣性航法システム(自動運転・ドローン)

- **原子磁気センサ: Rb, Cs, K**

生体計測(脳磁・心磁計測)、地質調査、非破壊検査

- **Rydberg原子に基づく量子RFセンサ: Rb, Cs**

実用化に向けた課題

- Rb、Csセルの作製が可能であることを実証済み。しかし、アルカリ金属**生成量の精密な制御**が未解決である。
- アルカリ金属生成に関するパラメータ(RbN₃投入量、最適な3次元シリコン構造の寸法など)について詳細な実験データを蓄積し、**デバイス搭載に向けた条件設定**を行う。
- ガスセルのエージング(寿命)や温度サイクル試験など**長期信頼性**に関わる評価データを蓄積し、**耐久性を実用化レベル**まで高める必要がある。

企業への期待

- ガスセル方式の**量子センサ**、レーザ・パッケージ技術などの**構成部品の研究開発／高密度実装**を進めている(検討している)企業との共同研究。
- 実証**実験・評価への参加**により、それぞれの強みを生かした協働。**各社の要素技術と組み合わせる**ことで、ガスセルおよび量子センサの社会実装を加速できる。

将来的に、小型原子時計や高精度タイミングデバイスを搭載した**アプリケーション開発を検討中の企業**にとって、本技術の導入は市場開拓に向けて有効と考えられる。

企業への貢献、PRポイント

- **ガスセルの設計・試作・評価を一貫支援**
プロセスや観察・性能評価に関する**インフラ環境の提供と技術指導**
- **ガスセル応用デバイスの開発を推進**
量子センサの**研究開発に導入**することで、これまで供給プレイヤー不足でターゲットとならなかつた**プロジェクト／製品開発に着手**できることから、新規事業化を後押し

企業内での安定量産や新規応用展開について、**国内外の研究者ネットワーク**や**企業コンソーシアム**(2011年～)とも密に連携しながら支援

産学連携の経歴(ガスセル開発)

磁気

- 2007年～2013年 **キャノン**と共同研究(※京都大学ーキャノン協働PJ)

- 2015年～2017年 **電子部品メーカーA**と共同研究

- 2022年～2023年 **NEDO・官民による若手研究者発掘支援事業(若サポ)・第4期**
マッチングサポートフェーズに採択

→**電子部品メーカーB、自動車部品メーカー**との共同研究

- 2023年～現在 **総務省・電波資源拡大のための研究開発**
周波数資源の有効活用に向けた高精度時刻同期基盤の研究開発
→**材料メーカー、装置メーカー**などとの共同研究

- 2023年～現在 **JST・大学発新産業創出基金事業(起業実証支援)**に採択

- 2024年～現在 **NEDO・官民による若手研究者発掘支援事業(若サポ)・第4期**
共同研究フェーズ(ステージゲート審査)に採択

小型原子時計

本技術に関する知的財産権

- 中核特許
- ・ 発明の名称 : 金属ガス封入セル及びその製造方法
 - ・ 出願番号 : 特願2020-185571、国際出願PCT/JP2021/039690
 - ・ 出願人 : 京都大学
 - ・ 発明者 : 平井義和、清瀬俊

- 防御特許
- ・ 発明の名称 : 金属ガス封入セル
 - ・ 出願番号 : 特願2022-143731、国際出願PCT/JP2023/031643
 - ・ 出願人 : 京都大学
 - ・ 発明者 : 平井義和、清瀬俊

- 防御特許
- ・ 発明の名称 : 金属ガスセル及びその製造方法
 - ・ 出願番号 : 特願2025-166140
 - ・ 出願人 : 京都大学
 - ・ 発明者 : 平井義和、清瀬俊

本技術のまとめ

- 提案技術 : 小型アルカリ金属ガス封入セルのウェハレベル製造技術
- 技術のポイント
 -  低温・短時間 : 約350℃・約10分でアルカリ金属を生成(従来:650℃・数時間～半日)
 -  高歩留まり・量産性 : ウェハ上で数百セルを一括製造
 -  汎用性 : 小型原子時計、原子磁気センサ、量子RF/ジャイロなどの中核部品
- 高温・長時間・低歩留まりの課題を、ウェハ一括・低温短時間プロセスで解決**
- 主な想定用途
 - 小型原子時計 : Beyond 5G/6Gタイミングデバイス
 - 量子ジャイロ : 自動運転・ドローン航法
 - 原子磁気センサ : 心磁/脳磁、生体センシング
- 企業導入メリット : コスト削減、性能向上(安定性・寿命など)、新市場開拓
- 共同研究の分野 : レーザ光源/パッケージ/半導体・センサ製造ラインなど

お問い合わせ先

京都大学 成長戦略本部
統括事業部イノベーション領域

e-mail : ip-eng@saci.kyoto-u.ac.jp