



NEDOインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト
①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

NEDOインフラモニタリング技術シンポジウム

(道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発)

『センサ端末同期用原子時計の研究開発』

平成31年2月1日(金)@機械振興会館B2ホール

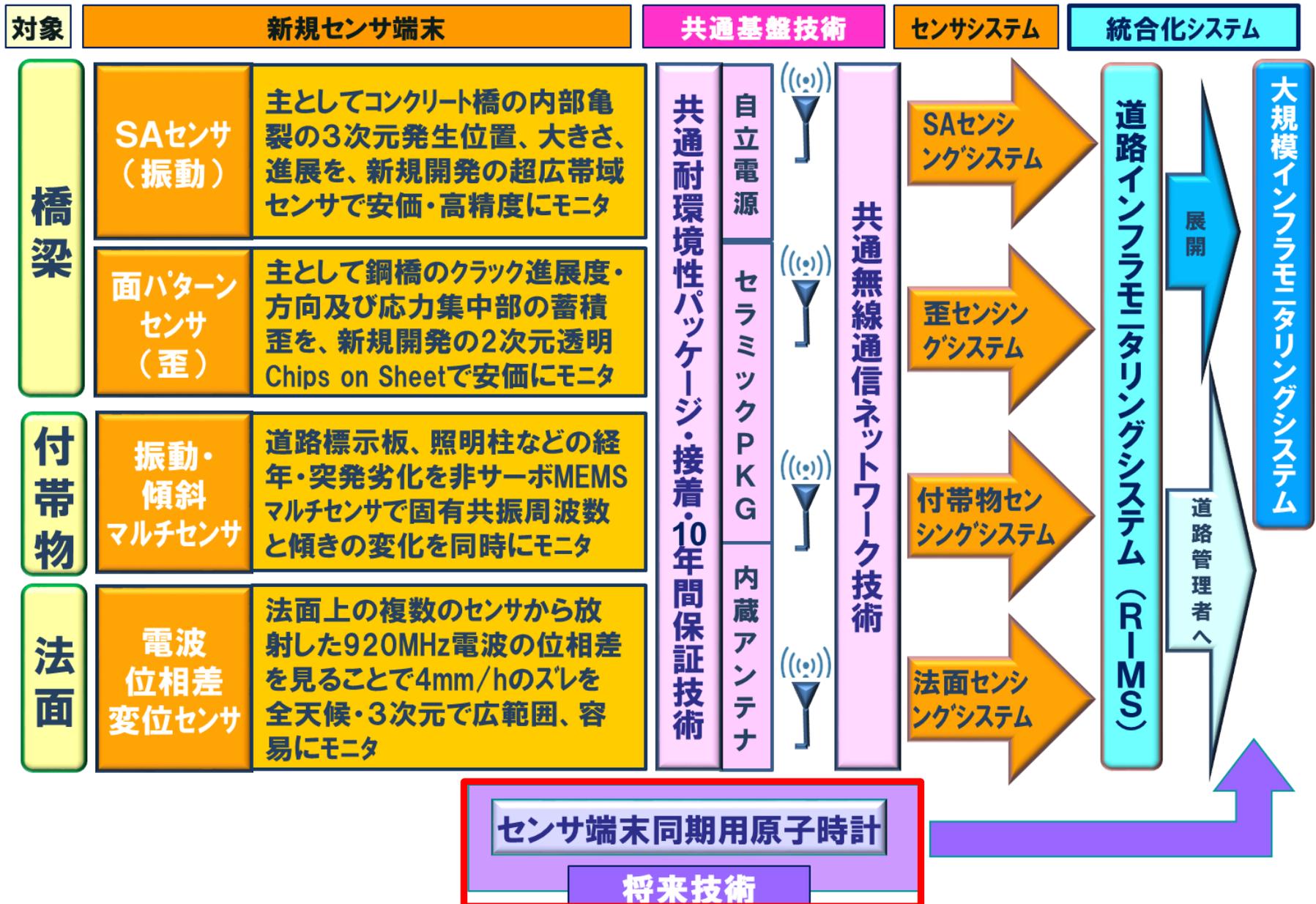
(委託先:技術研究組合 NMEMS技術研究機構)

(実施者:産総研、リコー、MMC、再委託先:京大、東工大、首都大)

**発表者:産総研 計量標準総合センター
主任研究員 柳町真也**



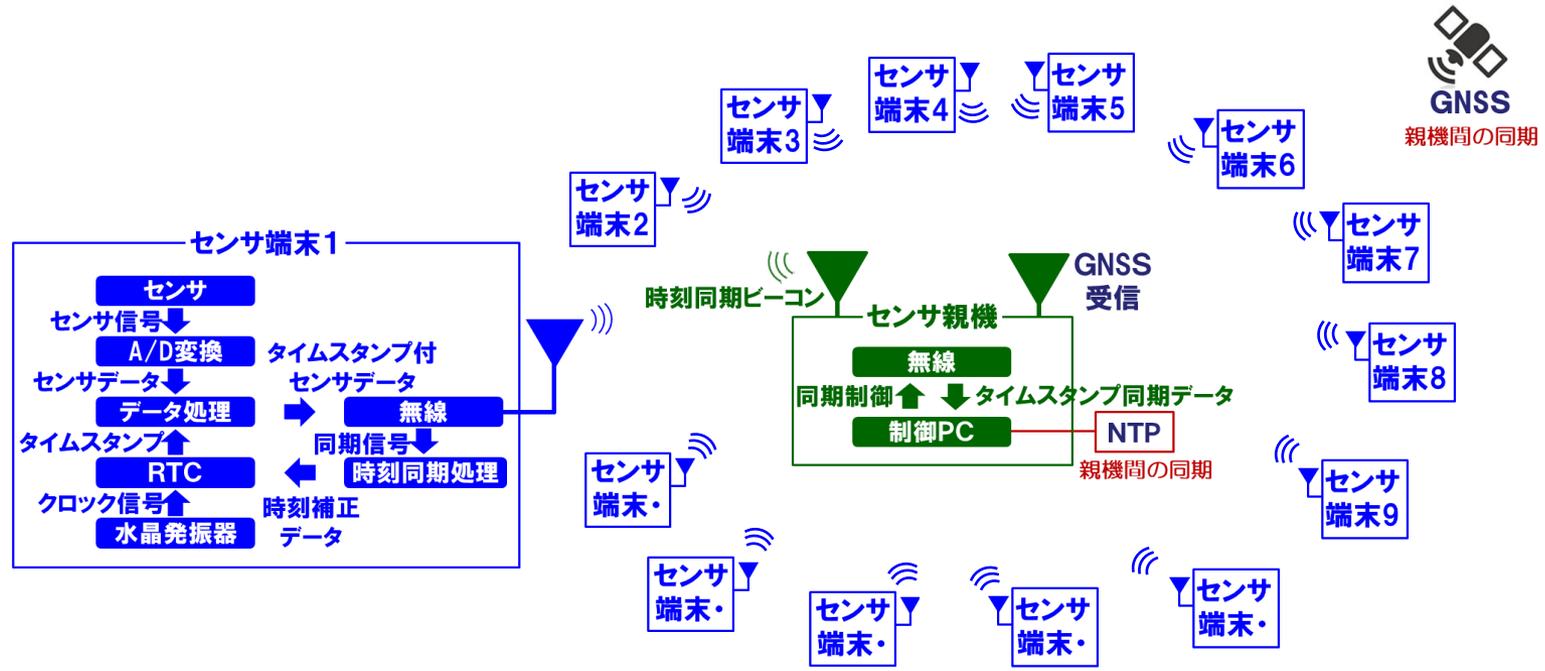
開発内容



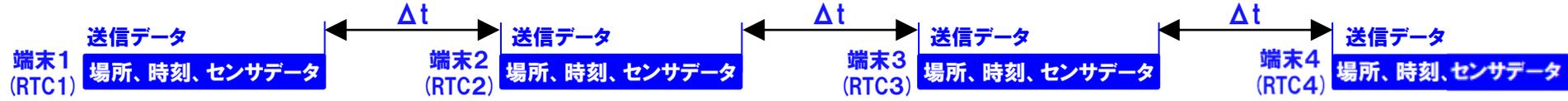
対象とする社会課題における現状

《データ送受信での時刻同期の必要性》

RIMSを始めとする無線センサネットワークの特長の一つとして、親機が多数のセンサ端末(子機)から情報を収集する多接続通信があり、①「端末データ間の衝突回避」、②「データ間の時刻の整合性」、を保証するために、各端末のRTC (Real Time Clock) を時刻同期させている。



親機での各端末からのデータ衝突を回避するため、各端末のRTCを基に、異なる時刻にデータを送信



対象とする社会課題における現状

《データ送受信での時刻同期の必要性》

RIMSを始めとする無線センサネットワークの特長の一つとして、親機が多数のセンサ端末(子機)から情報を収集する多接続通信があり、①「端末データ間の衝突回避」、②「データ間の時刻の整合性」、を保証するために、各端末のRTC (Real Time Clock) を時刻同期させている。



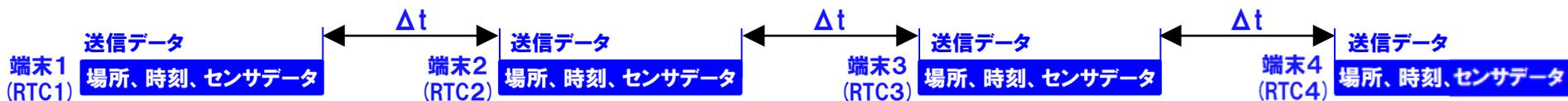
センサ ▼ ▼ センサ

5G通信やビッグデータなどにより実現する高度情報化社会において、GNSSを核とした時刻同期網の脆弱性が懸念されており、**障害発生時の時刻維持機能の強化が課題**となっている。



小型・低消費電力な原子時計により高精度な時刻維持機能を付与することで、時刻同期頻度を大幅に削減もしくは不要とし、安全・安心な高度情報化社会を担保する。

親機での各端末からのデータ衝突を回避するため、各端末のRTCを基に、異なる時刻にデータを送信



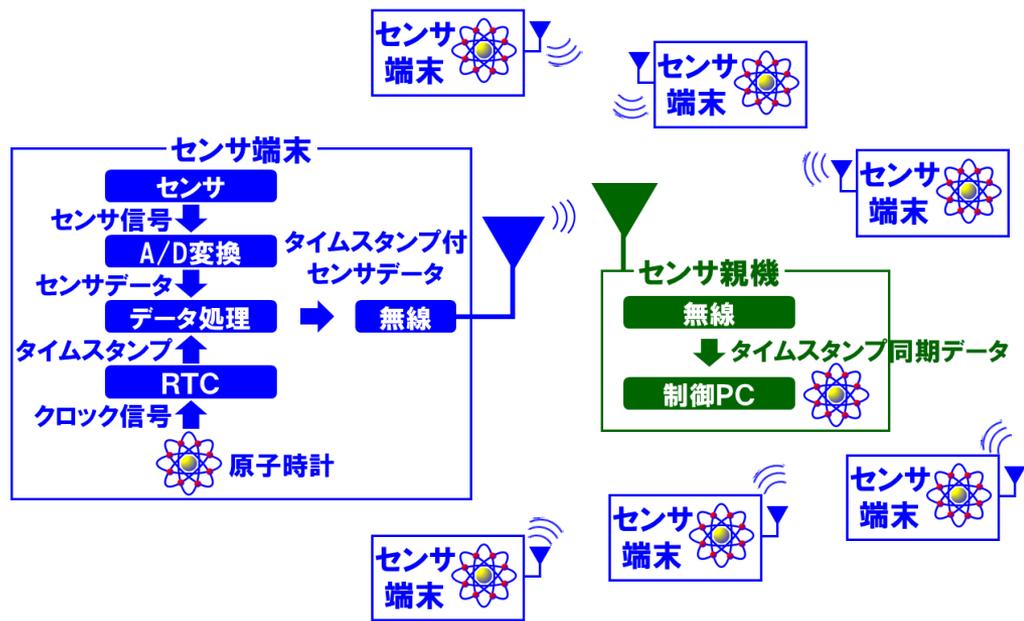
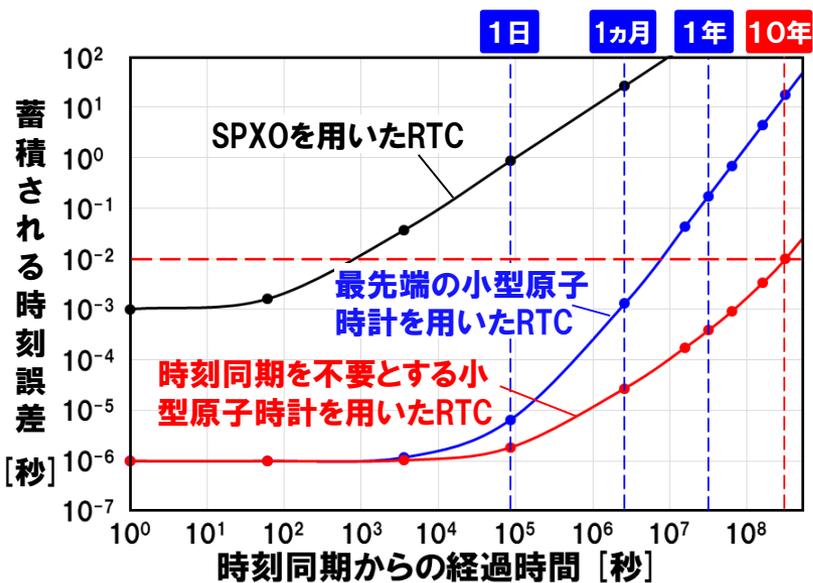
対象とする社会課題における解決策

《本開発テーマの目的》

RIMSなど無線センサネットワークにおける時刻同期を不要とするには、センサ端末に搭載可能なサイズや消費電力の高精度RTC (Real Time Clock) の実現が必要

➡ **高精度RTCの基準発振器と成り得る原子時計の実現可能性を追求**

《時刻同期を不要とするには》

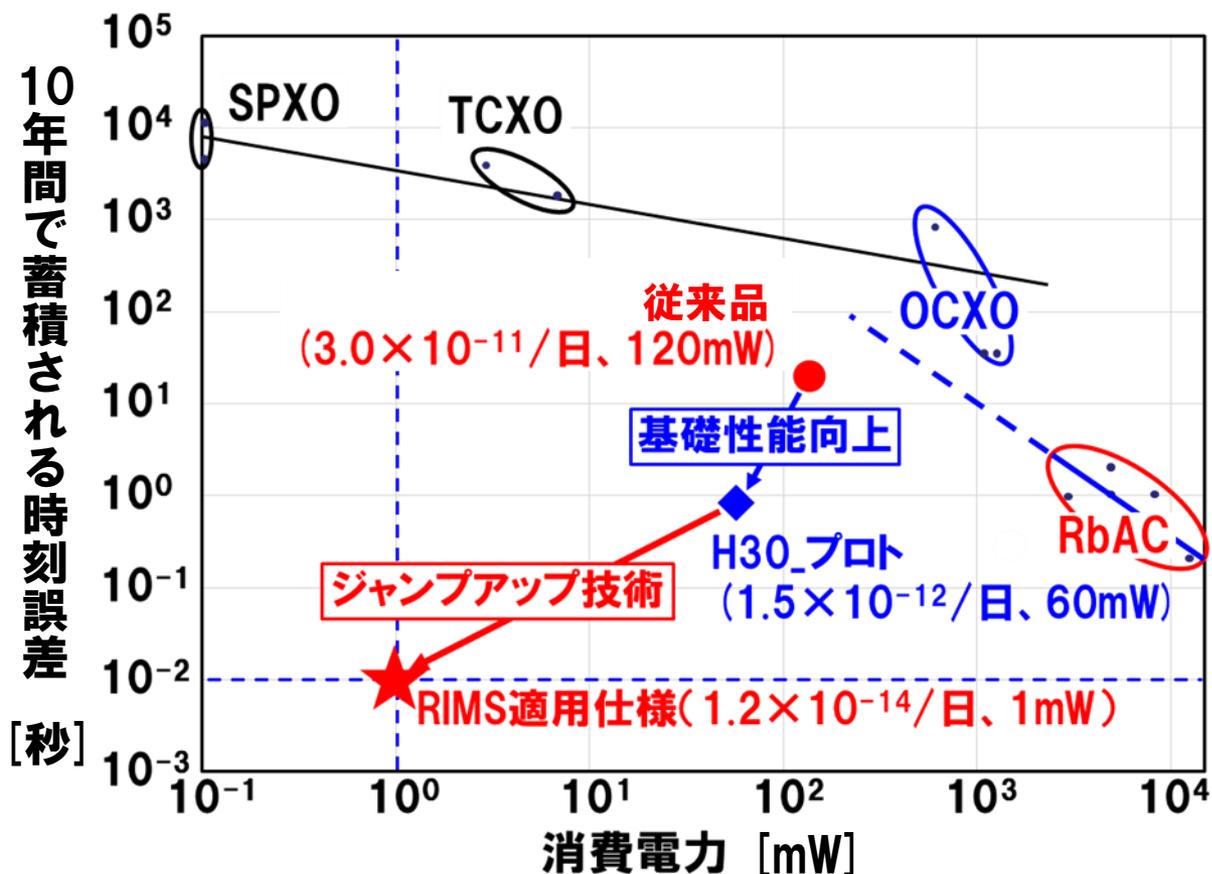


時刻同期を不要とする原子時計の仕様

超小型低消費電力原子時計で実現される世界

センサ端末同期用原子時計の仕様

- ① 基盤技術による限界性能の追求 → 原子時計プロトタイプによる検証
 ◆: 普及しているRb原子時計(基地局など)と同等の時刻精度と二桁小さな消費電力
- ② ジャンプアップ技術による未知領域の実現 → 要素試作による実現能性の検証
 ★: センサ端末への搭載が可能な仕様を実現するための基盤技術



時刻精度向上①: 衝突シフト変動の低減

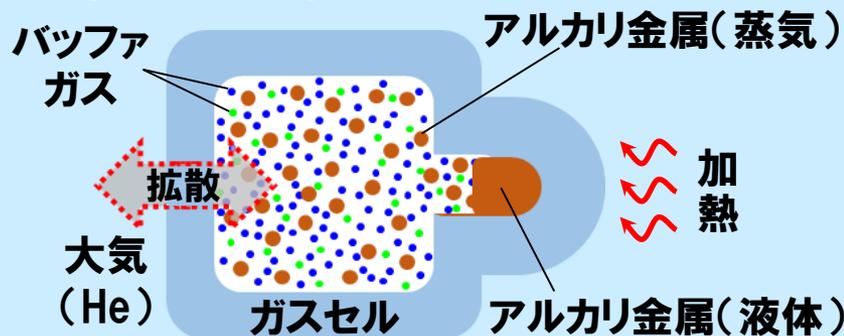
《時刻精度劣化要因①: 衝突シフト変動》

【原因】ガスセル内 **ガス分圧・温度** の変動

$$\text{衝突シフト } \Delta \nu = P_0 [\beta + \delta(T-T_0) + \gamma(T-T_0)^2]$$

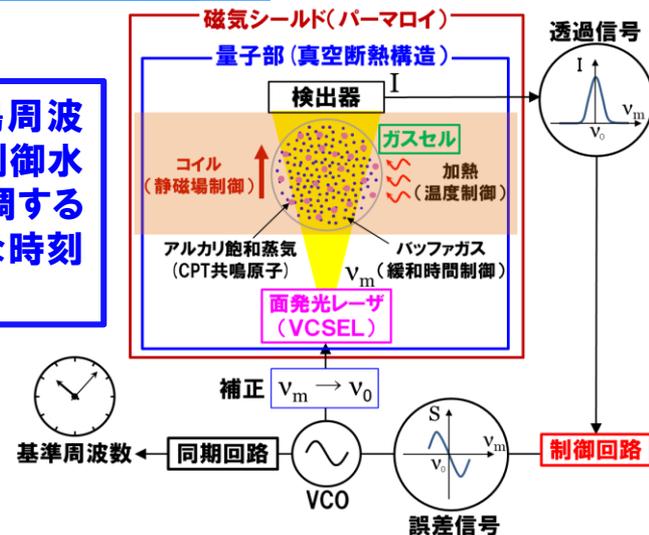
β : 圧力係数 δ : 1次温度係数 γ : 2次温度係数

P_0 : 初期分圧 T_0 : 初期温度 T : 温度



《超小型原子時計の原理》

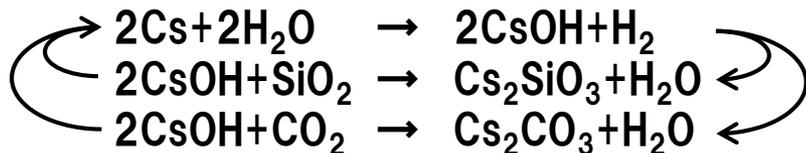
原子固有の共鳴周波数にVCO(電圧制御水晶発振器)を同調することで、高精度な時刻を得る



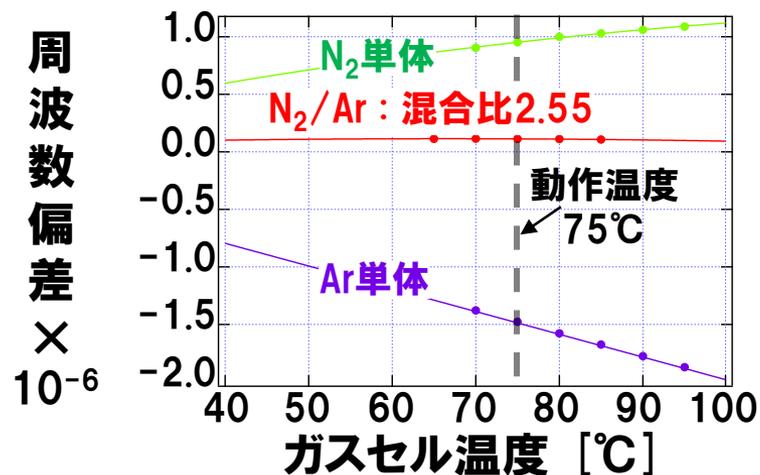
《ガス分圧: ガスセルの高純度化》

ガス分圧変動要因

1. 拡散によるガスセルへのガスの流入出
→ 拡散係数の小さなガスセル材料及びガス
2. ガスセル内壁からのアウトガス
→ 分析セル用脱ガス処理(800°C、 10^{-5} Pa)
3. Csと不純ガスの化学反応
→ 高純度ガスの導入



《温度: 混合バッファガス》

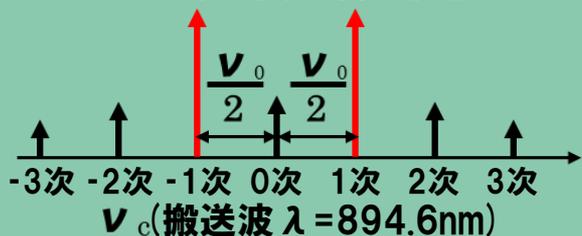


時刻精度向上②: ライトシフト変動の低減

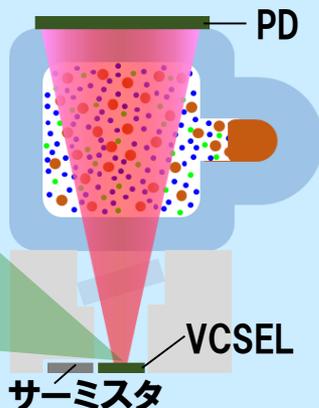
《時刻精度劣化要因②: ライトシフト変動》

【原因】VCSELからの励起光の**強度**や**変調度**の変動

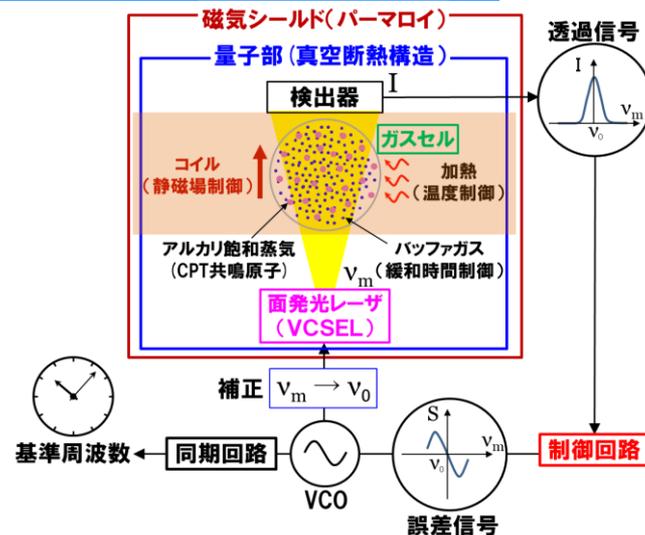
- ACシュタルクシフトが光強度に依存
- 1次光の比率が変調度に依存



変調したVCSELからの出射光分布



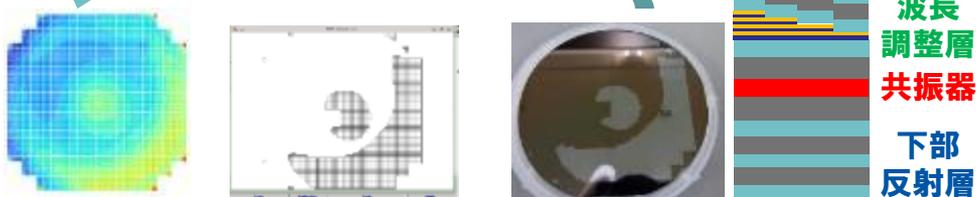
《超小型原子時計の原理》



《波長: VCSEL波長調整プロセス》

VCSEL開発

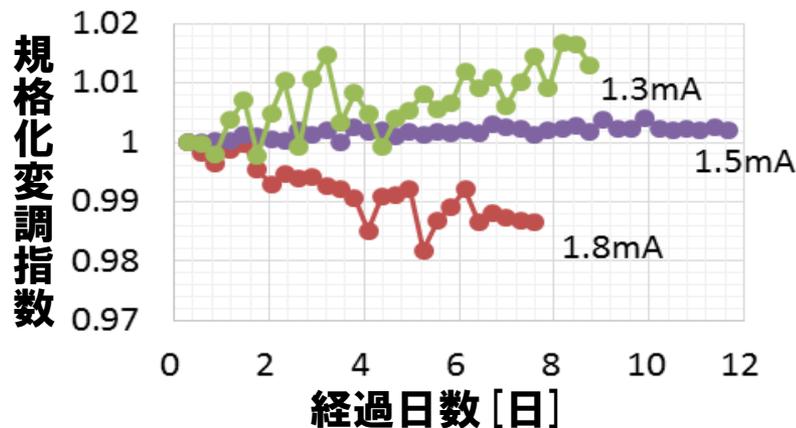
3回繰り返す



励起原子の波長に調整

ガス励起用レーザーVCSELの波長調整方法

《強度・変調度: VCSEL安定化駆動手法》

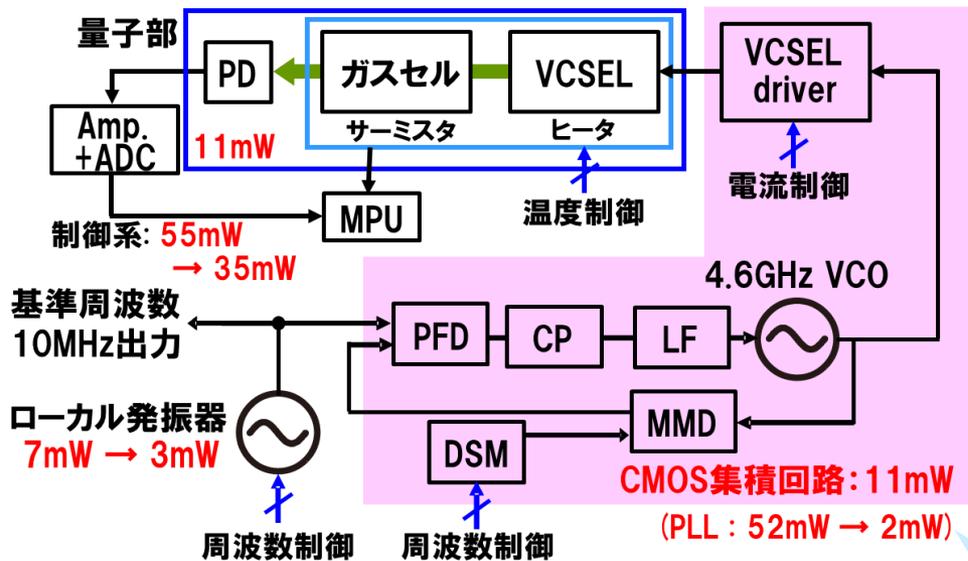


変調指数の経時変動の抑制条件

消費電力削減: CMOS集積化PLL回路

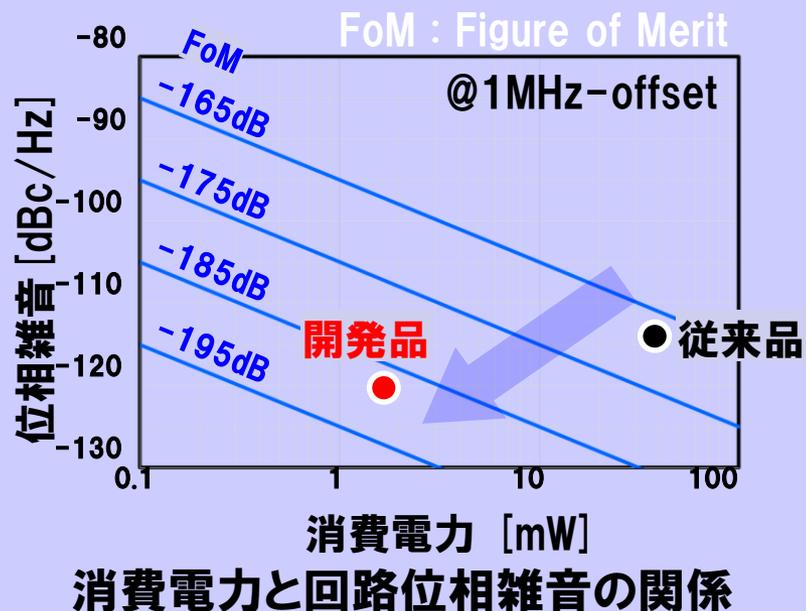
《消費電力: 制御回路の改善》

Tail-pump型VCO組込CMOS集積化PLL回路で、低位相雑音を維持しつつPLL回路の消費電力を50mW削減し、制御回路の改善と合わせて、原子時計プロトタイプ消費電力60mWを実現した。



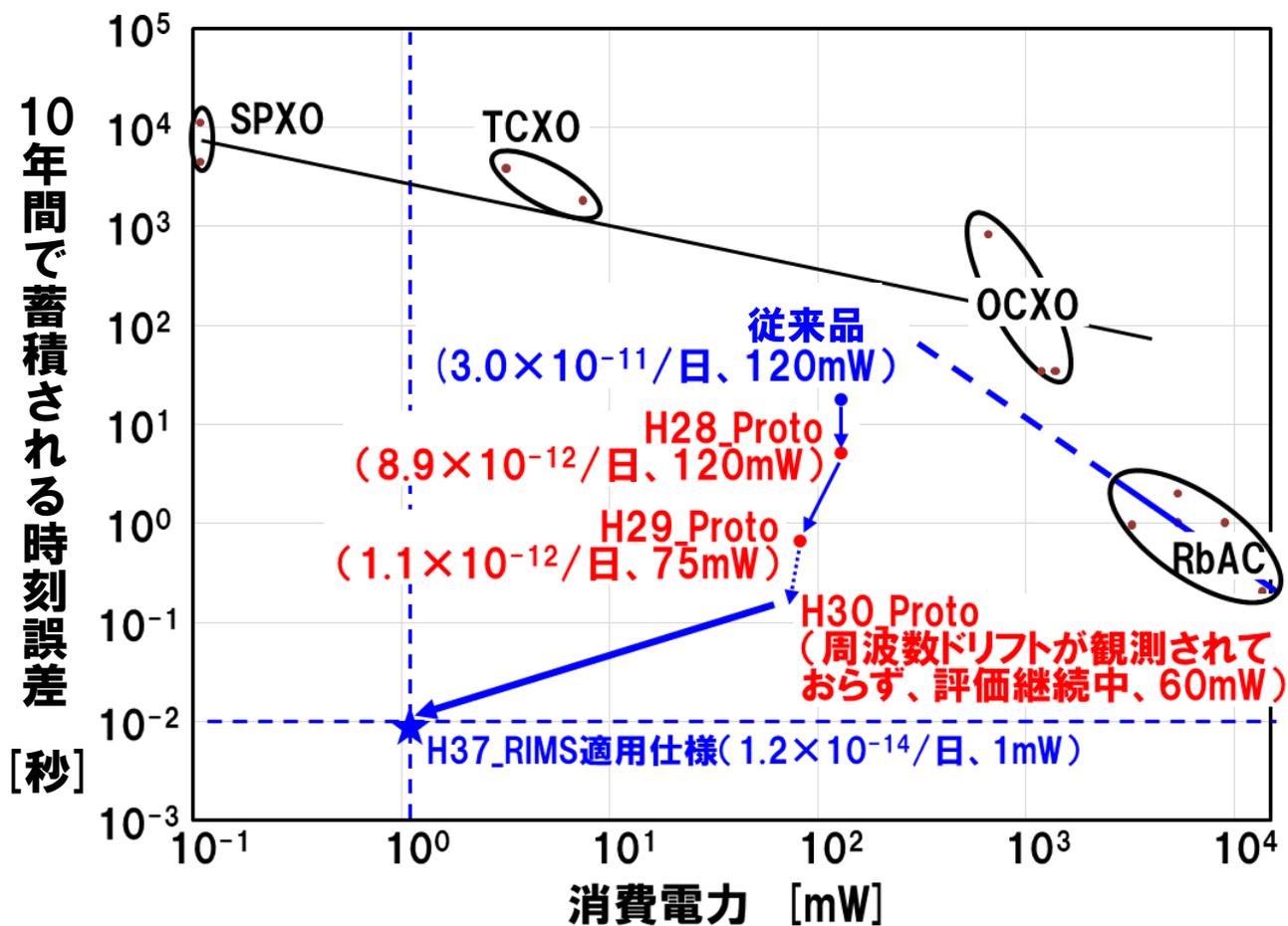
原子時計の電力構成 (total: 60mW)
 (参考) 従来品: 120mW

低消費電力と低位相雑音を両立するPLL回路を実現し、電力1/2に大きく貢献



原子時計プロトタイプの基本性能(恒温槽内評価)

H29年度ULPAC(Ultra-Low Power Atomic Clock)プロトタイプにおいて、従来品に比べ、時刻誤差10msの維持期間が5倍弱に伸びたことを確認し、継続評価により更なる伸びを記録している。この成果は、H28年度ULPACプロトタイプの評価で解明したVCSEL起因の周波数ドリフトを低減するVCSEL安定化駆動手法を適用することで実現した。



原子時計プロトタイプの外での連続稼働による評価

- | | |
|--|---|
| 屋外評価装置
分解能
性能記録
制御記録
環境記録 | : 0.1 μ s (GPSの1PPS信号と比較)
: タイムスタンプ、時刻精度
: 原子時計の制御信号
: 原子時計設置環境の温度・湿度・加速度(振動)・磁気 |
|--|---|



設置場所①
 走行車両による振動や電磁ノイズが大きい環境



設置場所②
 太陽光による温度変化が大きい環境



設置場所③
 建屋設備からの振動や電磁ノイズが大きい環境



設置場所④
 温度や振動等の環境ノイズが小さく安定な環境

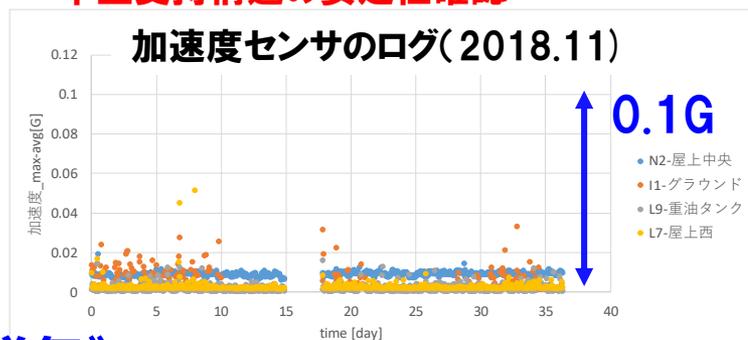
実証実験のまとめと解析、考察

加速度、磁場の変動の影響は、観測されていない。最も影響の大きかった温度特性は、補正制御の効果により、仕様内に抑制できることを確認した。

《加速度(振動)》

設置場所での最大加速度0.1Gに対して、時刻誤差は観測されなかった。

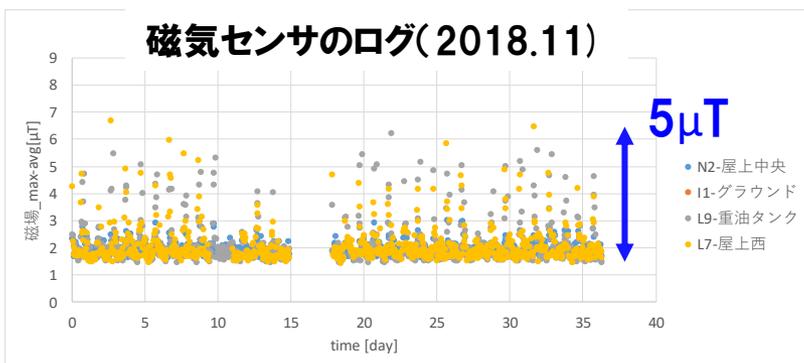
→ 中空支持構造の安定性確認



《磁気》

数 μ Tの磁気変動に対して、時刻誤差は観測されなかった。

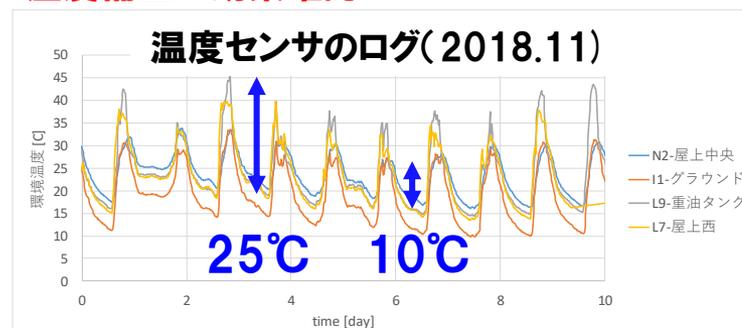
→ 磁気シールドの効果確認



《温度(1日変動)》

設置場所により、温度変動幅は10~25 $^{\circ}$ Cとばらついたが、恒温槽内評価を基準とした時刻誤差に差異は観測されなかった。

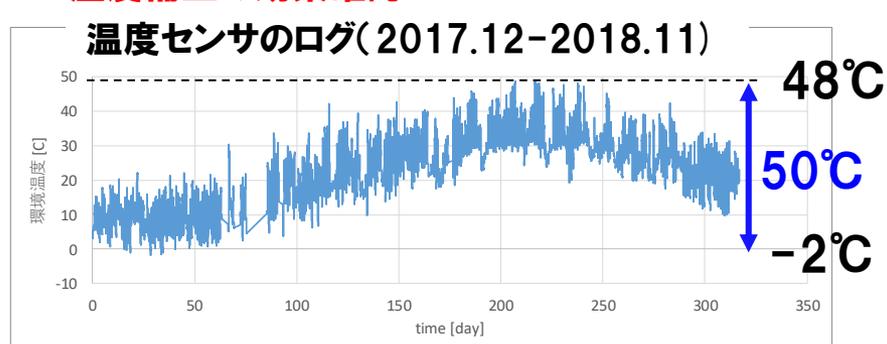
→ 温度補正の効果確認



《温度(季節変動)》

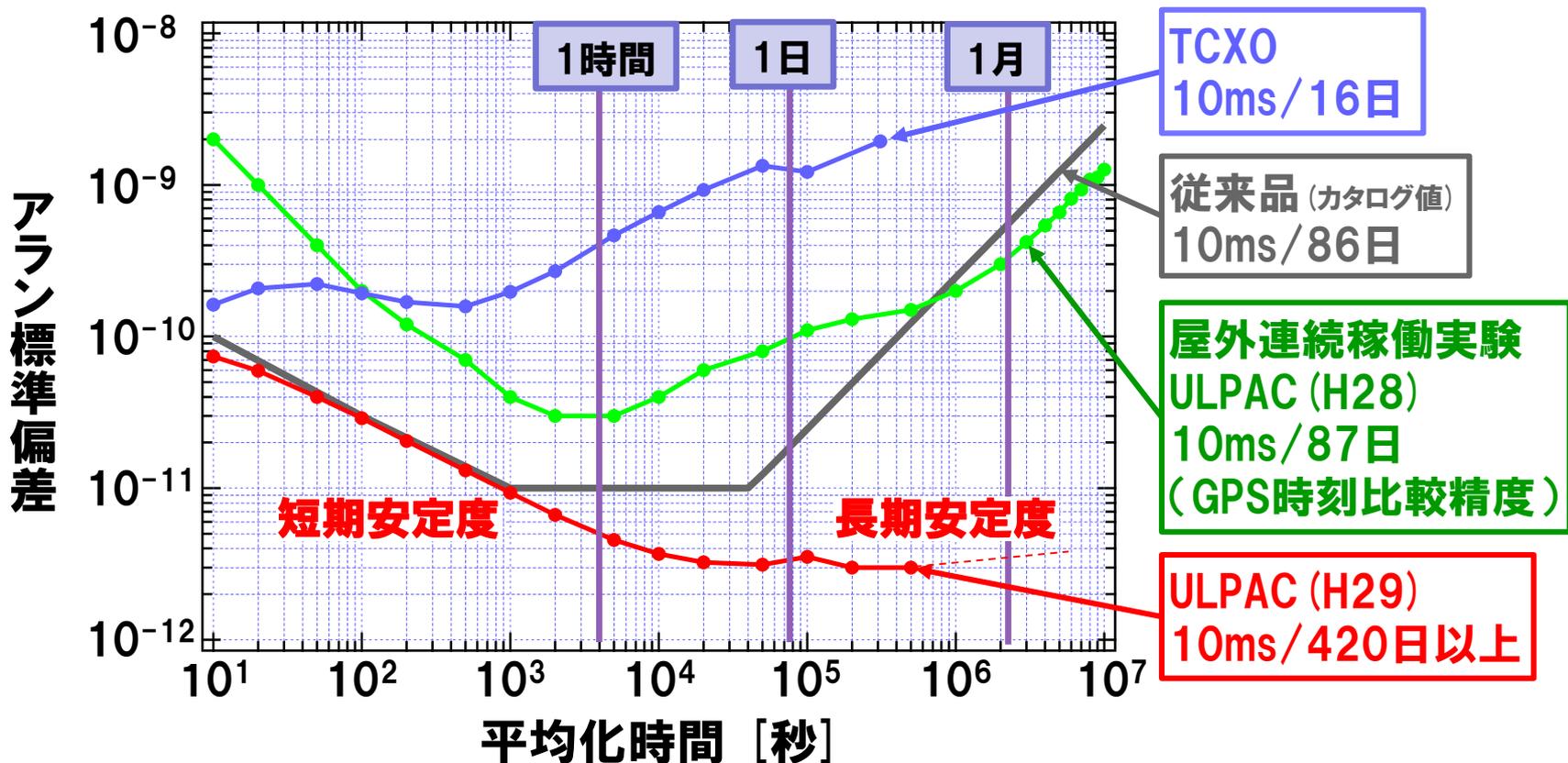
1年間の環境温度の変動(-2 $^{\circ}$ C~48 $^{\circ}$ C)に対して、恒温槽内評価との差異は観察されなかった。

→ 温度補正の効果確認



屋外連続稼働実験での評価

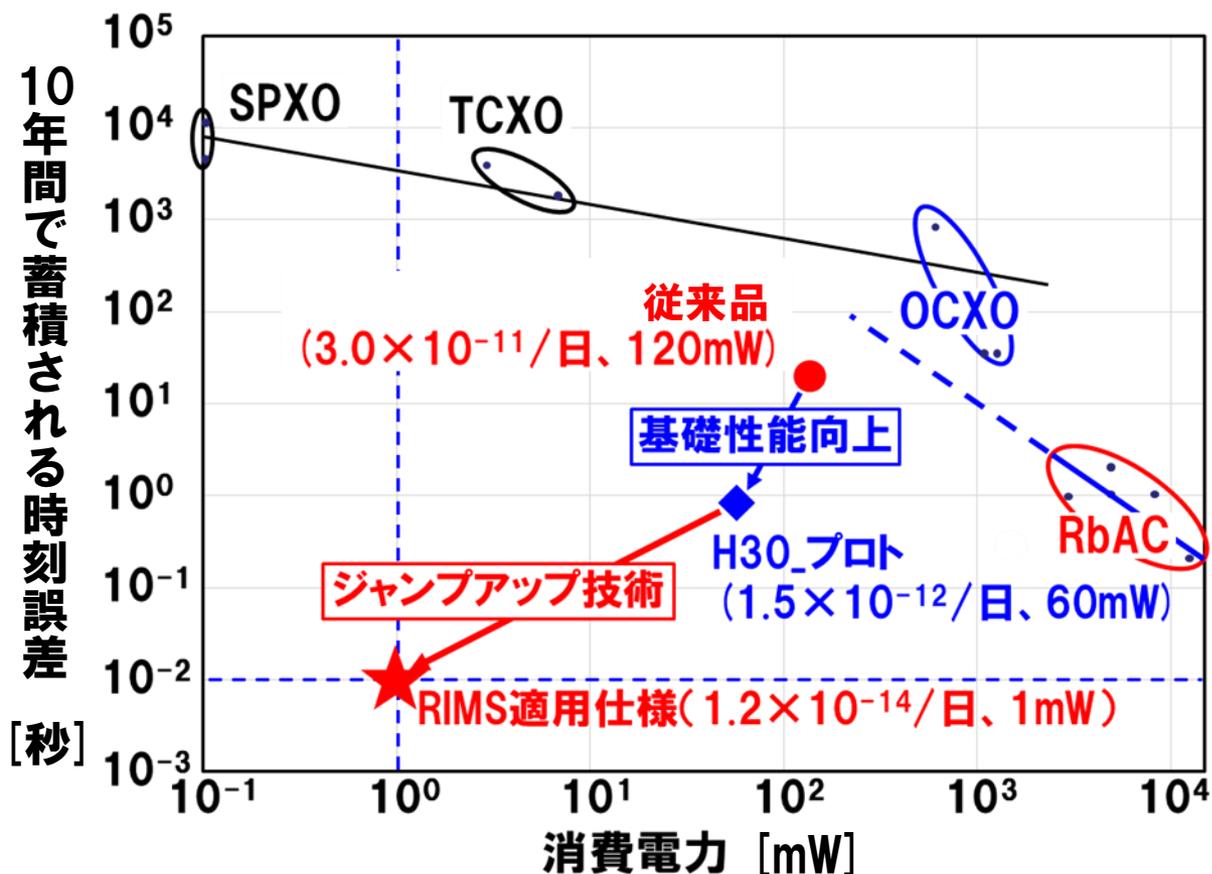
H28年度の原子時計プロトタイプを用いた1年以上にわたる屋外連続稼働実験において、10ms/87日、117ms/365日の時刻精度を確認した。従来品の恒温槽内での基本特性データを基にした推定値(10ms/86日、174ms/365日)と比べて同等以上H29年度の原子時計プロトタイプも屋外連続稼働実験により評価中



各種周波数安定度の比較

センサ端末同期用原子時計の仕様

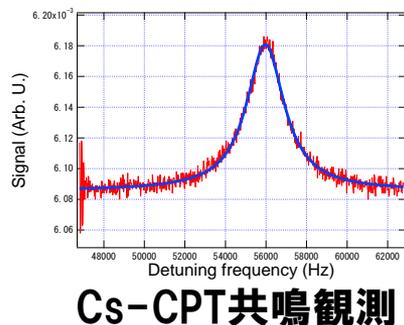
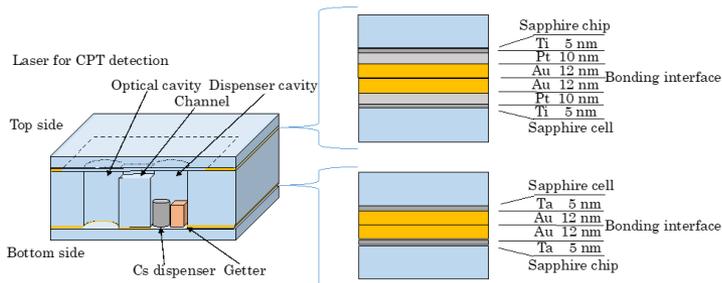
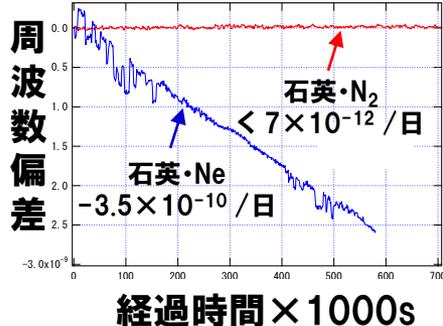
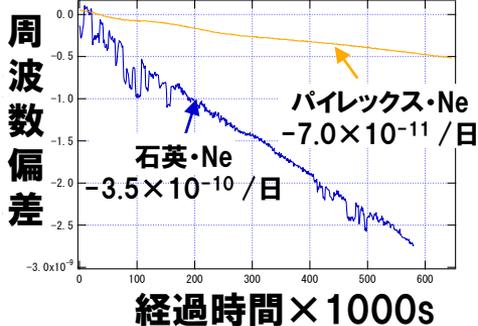
- ① 基盤技術による限界性能の追求 → 原子時計プロトタイプによる検証
 ◆:普及しているRb原子時計(基地局など)と同等の時刻精度と二桁小さな消費電力
- ② ジャンプアップ技術による未知領域の実現 → 要素試作による実現能性の検証
 ★:センサ端末への搭載が可能な仕様を実現するための基盤技術



時刻精度向上:ジャンプアップ技術

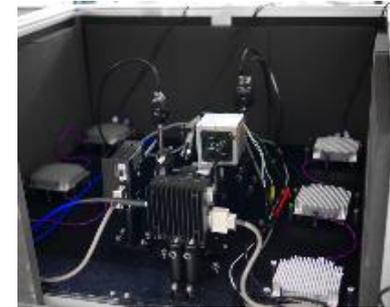
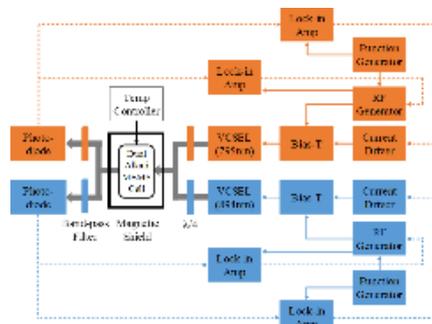
【低ガス透過型拡散結合方式ガスセル】

[成果] 長期安定度を画期的に改善可能な化学的に安定でガス透過性の小さなサファイアによるセシウムガスセルの試作に成功

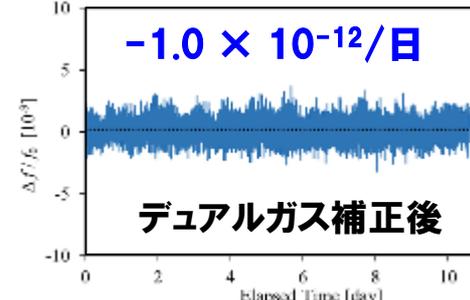
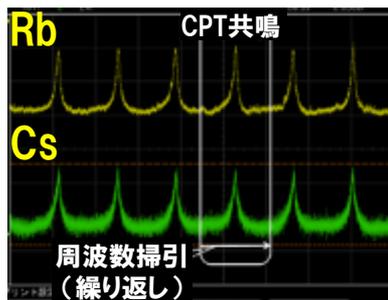


【デュアルガス補正法】

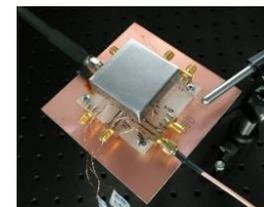
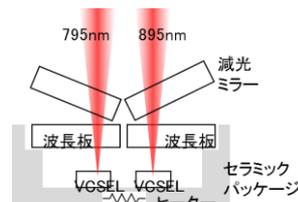
[成果] ガスセル内部の変動を検出・補正し、長期安定度を飛躍的に改善



デスクトップ型デュアルガス補正のリアルタイム処理系



Cs・Rb-原子共鳴同時観測 Cs-原子共鳴周波数



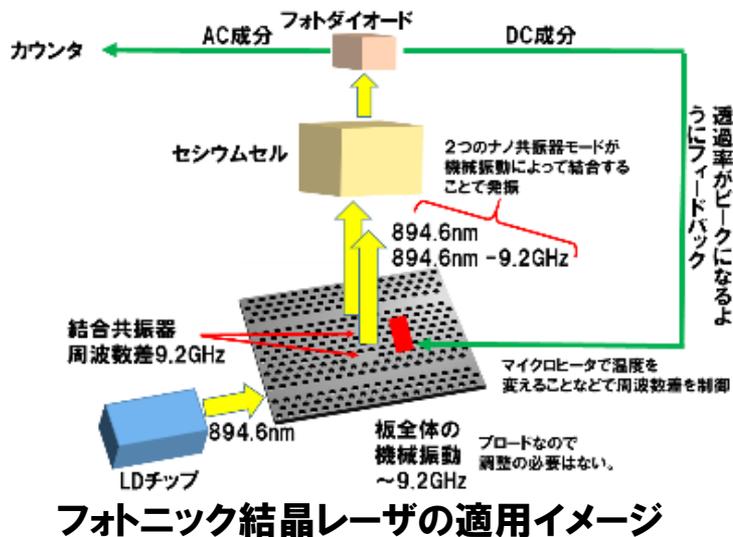
ポータブル型デュアルガス補正用量子部

消費電力削減：ジャンプアップ技術

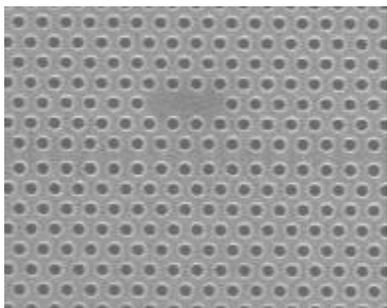
【フォトニック結晶レーザ】

【成果】SiCフォトニック結晶製造技術確立

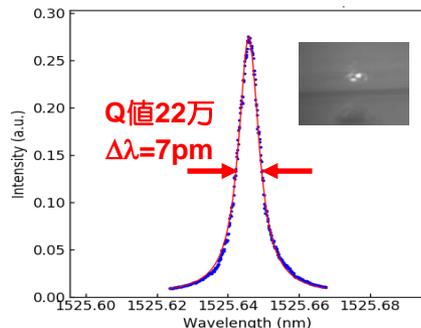
1) Si → SiC による短波長化(894nm)
低欠陥SiCフォトニック結晶製作技術



フォトニック結晶レーザの適用イメージ



SiCフォトニック結晶



Q値観測結果

【原子時計の間欠駆動制御】

【成果】間欠駆動適用時、消費電力を通常動作の1/4以下へ低減できる可能性を確認

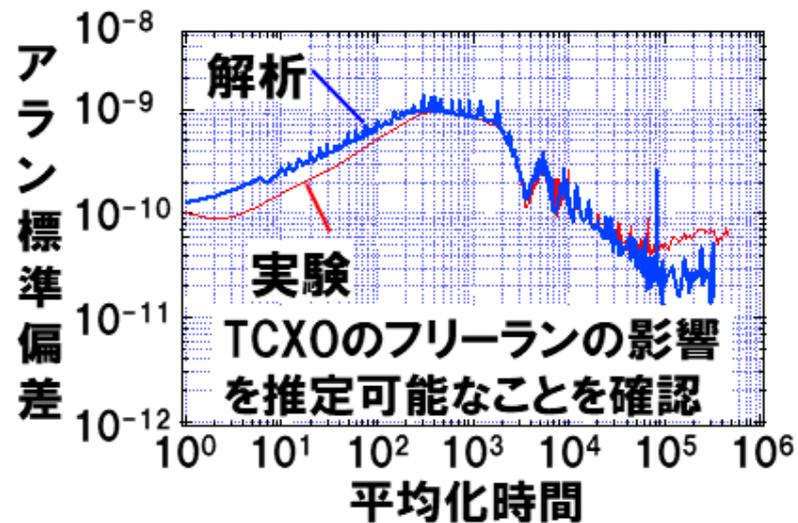
駆動条件：1時間周期

【稼働時】300秒/3600秒、120mW

解析では、瞬時に再現性良く立ち上がると仮定

【休止時】3300秒/3600秒、7mW

解析では、TCXOのフリーランにより周波数を刻む



間欠駆動でのアラン標準偏差の推定

まとめ

目的

センサネットワークにおける「データ間の時刻の整合性」や「端末間のデータ通信の高信頼・高効率化」を担保する時刻同期を不要にすることで、ネットワークの設置や運用の労力を画期的に削減する。

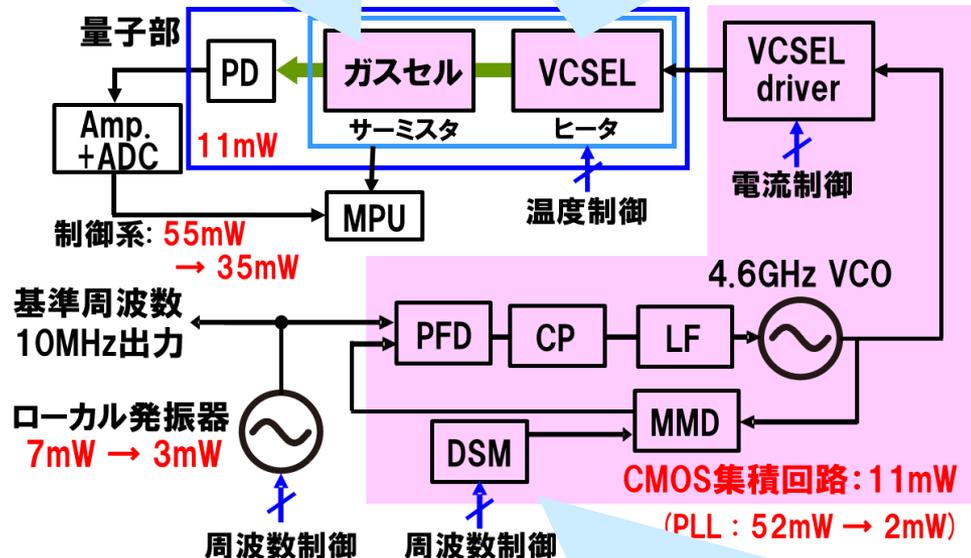
アプローチと成果

センサ端末に搭載可能な原子時計の実現に向け、基盤技術の課題に徹底的に対策することで、運搬可能な小型原子時計のデファクトスタンダードであるRb原子時計を圧倒的に凌駕する原子時計を開発した。

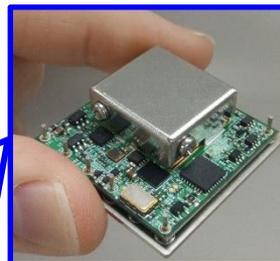
原子時計の基盤性能の極限を狙うアプローチ

不純物を極限まで排除し、
衝突シフト変動を極小化

VCSEL経時変動抑制技術により、
ライトシフト変動を極小化



低消費電力と位相絶音を両立するPLL回路を中核として、全ての回路ブロックで消費電力を削減し、従来型原子時計を半減



H30年度原子時計プロトタイプ

時刻精度	10ミリ秒/420日
消費電力	60mW
サイズ	30×30×11mm ³

プロトタイプのリモコンへの適用イメージ

GNSS連動タイムサーバーの電源が確保できない場所や、GNSS信号が天候の影響を受けやすい場所などでの道路インフラのモニタリング実験などに適用

H30_ULPAC
 3×3×1.1cm³
 ≦0.6ミリ秒@3ヶ月

容量: 2.5W
 ソーラ: 1W/時
 (平均2W/日の発電量を想定)

自立駆動原子時計セット

開発した原子時計プロトタイプの実用可能な事業領域

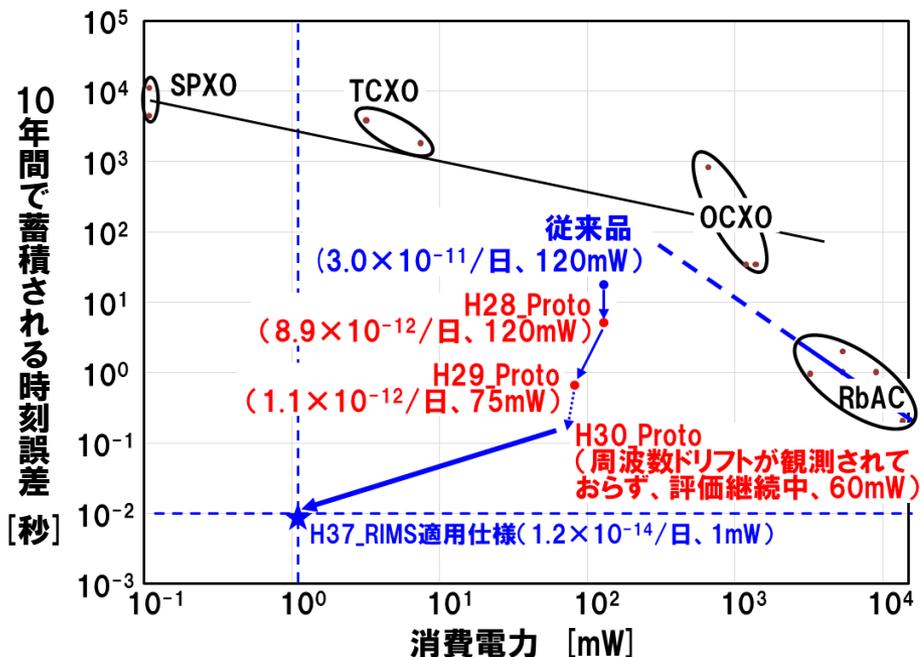
2025年度以降の実現を目指して、RIMS適用仕様に向けた研究開発を継続予定だが、本年度までに開発した原子時計プロトタイプでも以下の展開可能な民生領域が想定できる。

①小型原子時計のデファクトスタンダードであるルビジウム原子時計の時刻精度を維持しつつ、消費電力を2桁低減

→ルビジウム原子時計市場（**基地局、計測器等**）：54MUSD@、年率7%拡大@2017

②従来品と比較して時刻精度、消費電力ともに大幅に更新

→ 従来品が切り拓いた**油田用海底探査ノード市場**



本プロジェクトにおけるプロトタイプの基本性能

ルビジウム原子時計の民生用途(残りは軍用)

Mobile Infrastructure	: 24.7%	} 50.8%
Wired Communication	: 10.7%	
Instrumentation	: 2.7%	
Research/Medical	: 3.9%	
Aerospace	: 8.8%	

出典: Global Atomic Clock Sales Market Report 2018



出典: fairfield

RIMS適用の仕様を満足した時の適用可能な事業領域

《時刻の高精度さを生かした事業領域》

《時刻同期》

【効果】各種センサーネットワークでの時刻同期による作業効率向上(通信回数削減、消費電力、コスト削減)

センサーネットワーク
(環境、資源、インフラ
等モニタリング)

スマートグリッド
(電力送電網)

交通システム
(ITSなど)

ロボットの協調作業

【効果】GNSSとの通信遮断やGNSSレス環境での自律的な時刻同期による高信頼化

測位・ナビゲーション
(航空機、自動車、人などの移動)

防衛
(暗号化やジャミング対策)

《時刻配信》

【効果】タイムスタンプの精度向上による安全かつ正確な情報処理によるデータの高信頼化

移動体通信基地局

商取引・金融取引

クラウドサービス

通信ネットワーク(パソコンなど)

《時間計測》

【効果】電波・音波の到着時間測定精度向上による発信源・受信源の計測精度の向上

地震・津波・波浪計測機器

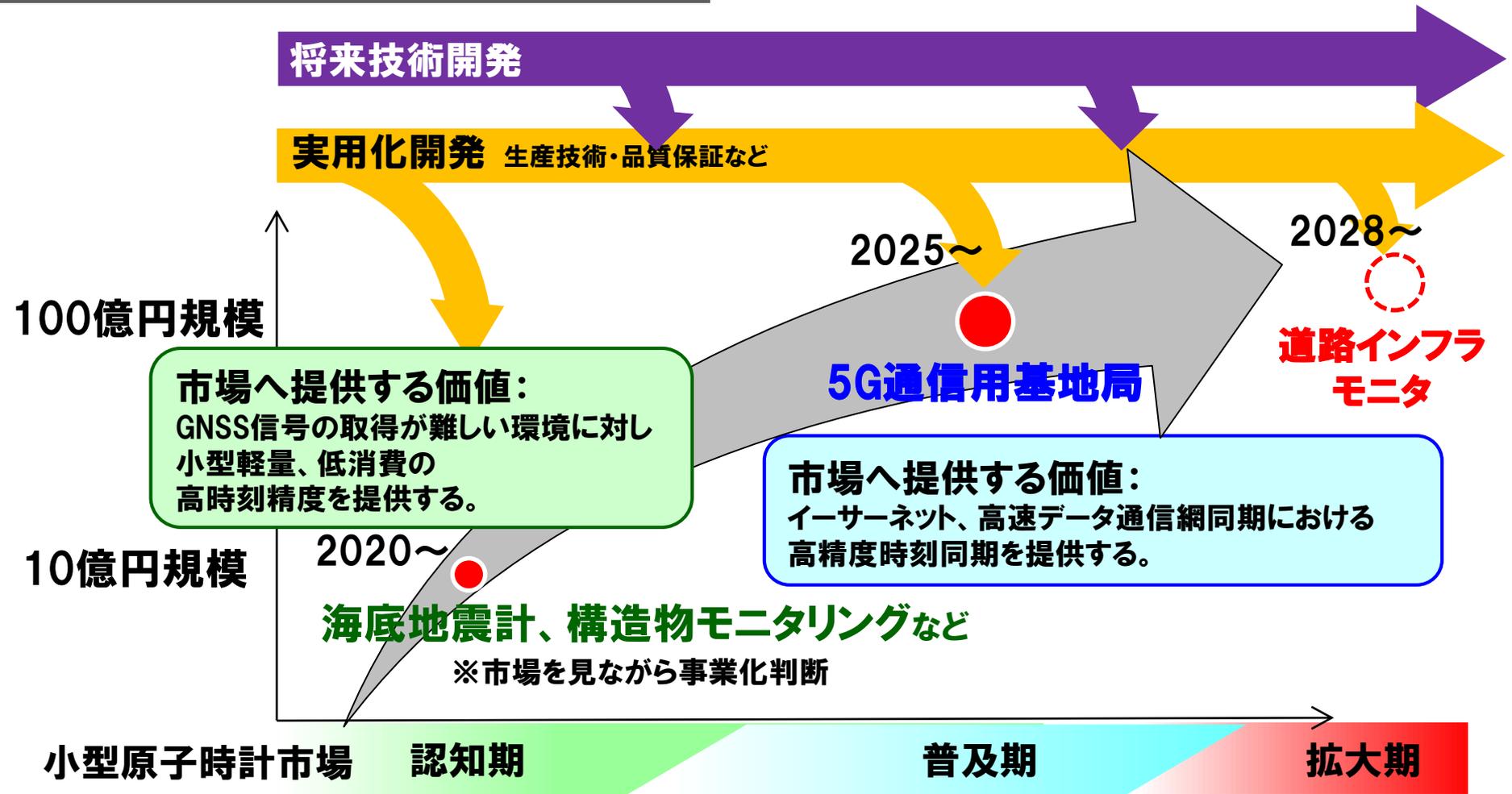
重力計測器

資源探査システム

測長システム

今後の事業化、実用化について

市場へのデバイス認知、そしてジャンプ



道路インフラモニタの目標仕様に向けた開発とともに、
現状の性能仕様で適用可能な応用分野への導入を図り、市場を見ながら事業化を判断する。

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られた成果です。