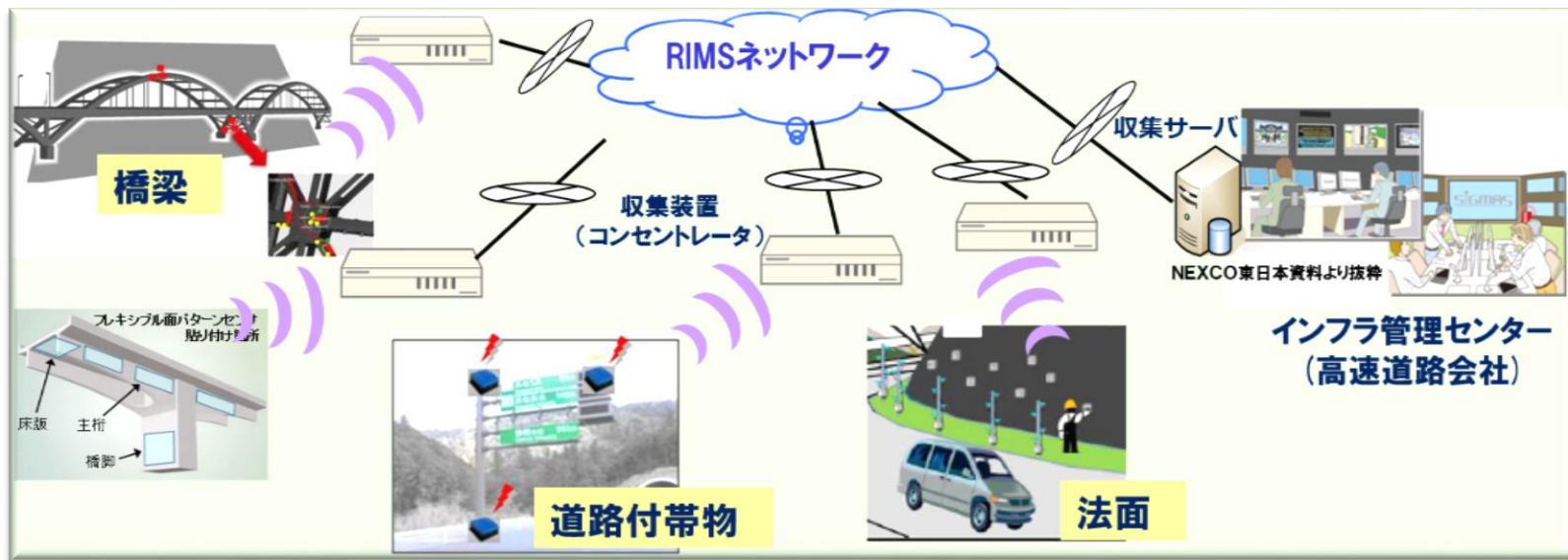


モニタリングシステムの構築・運用の革新を目指す センサ端末同期用原子時計の研究開発

国立研究開発法人産業技術総合研究所
計量標準総合センター物理計測標準研究部門
柳町 真也

2016年9月15日パシフィコ横浜
MEMSセンシング&ネットワークシステム展

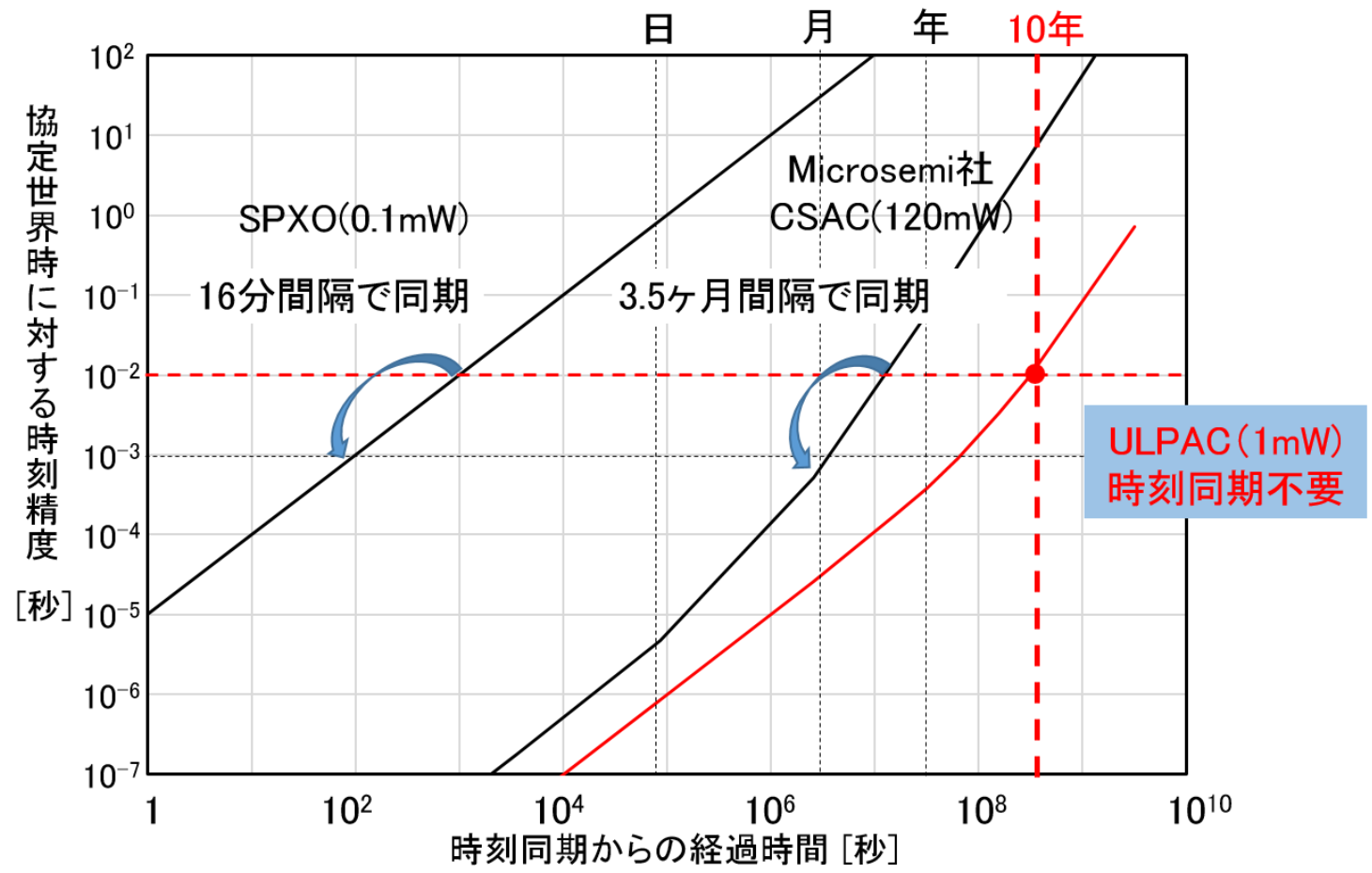
【RIMS概要】



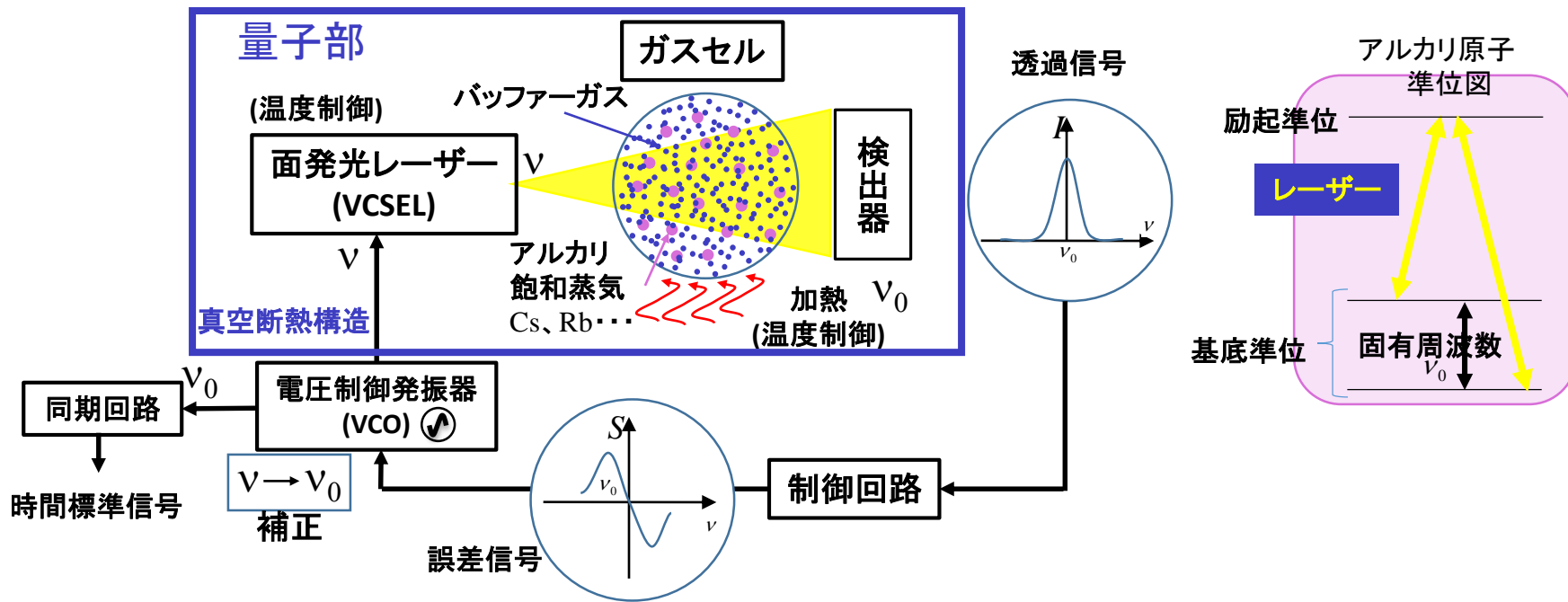
- * 橋梁: センシングシステム内の時刻同期性能の向上 → より広範囲なデータ処理
- * 道路付帯構造物: 無線同期システムの代替 → モニタリングシステム構築の簡略化
- * 法面: 有線同期システムの代替 → モニタリングシステム構築の簡略化
- * 収集サーバ: 自律分散的な時刻同期システム → システム運用のセキュリティー強化

* 10ms維持、10年メンテナンスフリー、1mWを目標

【各種基準時計を利用した場合の時刻同期形態】



* 先行販売されている小型原子時計比で、約3桁の時刻同期性能向上、約2桁の低消費電力化が求められる。



* VCSELとアルカリ原子が封入されたガスセルを用いることで、省スペースで普遍性の高い固有周波数を参照することが可能となる。

パラメータ	周波数シフト*	周波数変動 1×10^{-11} の許容量	変動要因	検出手段
バッファガス圧力 P_0	3.9 kHz/kPa	2.4×10^{-2} Pa(ほぼNe)	圧力変動、 圧力差	無し
温度 T_0	0.075 Hz/(kPa K)	6.1×10^{-3} K (@10kPa, 50°C)	環境温度	サーミスタ
レーザー光強度 I_0	-5.7 Hz/(μ W/cm ²)	1.6×10^{-8} W/cm ²	VCSEL電流 (温度)	フォトディ テクタ
磁場 B_0	0.043Hz/(μ T) ²	3.6×10^{-7} T(@3 μ T)	コイル電流	電流メータ
レーザー周波数 ν_0	0.02Hz/MHz	4.6×10^6 Hz	VCSEL電流 (温度)	フォトディ テクタ
マイクロ波強度 m_{RF}	10Hz/mW	9.2×10^{-6} W	温度他	パワー メータ

*周波数シフトはThesis, Svenija Akkira Knappe, Dark Resonance Magnetometers and Atomic Clocks, May 2001 & Advanced Techniquesによる

参画機関



国立研究開発法人
産業技術総合研究所



国立大学法人
京都大学



一般財団法人
マイクロマシンセンター 株式会社リコー

RICOH



東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

国立大学法人
東京工業大学



TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY
首都大学東京

公立大学法人
首都大学東京

技術開
発項目

長期時刻同期
性能の高度化

低消費電力化

小型・低コスト化

課題

周波数ドリフトの低減

制御回路、及び量子部
温度維持電力の低減

構成部品の高歩留化、
組み立技術の高度化

取り組み

- ・ガスセル内環境安定化技術の開発
- ・サーミスタ、VCSEL等量子部構成部品の安定性検討
- ・ガスセル内環境計測・発振周波数補正技術の開発
- ・量子部温度制御技術の開発

- ・低消費電力と低位相雑音を両立した制御回路の開発
- ・PLL回路を用いない制御回路の開発
- ・高断熱型量子部の開発
- ・ガラス加工方式ガスセルの小型化
- ・アルカリ原子励起用フォトリソニック結晶レーザーの基礎検討

- ・高断熱型量子部の開発
- ・VCSELの高歩留化
- ・低ガス透過性材料を用いたウェハー加工方式ガスセルの開発
- ・制御回路のCMOS集積化

ガスセル内環境安定化技術の開発

【ガラス加工方式ガスセル製造装置立ち上げ】



- ・高純度Cs封入
- ・ガスセル素材や、封入バッファガスの特性調査
- ・古くから実績のあるバーナ封じ切りによるガラス加工方式

【27年度ガスセル試作φ5×9mm³】



素材：石英、パイレックス
封入バッファガス：Ne、N₂、Ar

【ガスセル内環境変動要因のモデル構築】

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

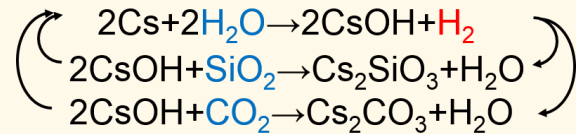
β : 圧力係数 δ : 1次温度係数 γ : 2次温度係数

フィックの第一法則によるガス圧 $P(t)$ の推定

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{L}{P_a V_0} (P_{ext} - P(t)) \quad L = \frac{KA}{d} P_a^2$$

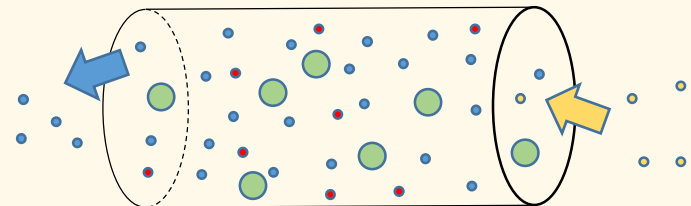
L permeation rate (Pa · m³/s) V_0 cell volume K permeation constant (m² s⁻¹ Pa⁻¹)
 d membrane thickness P_a normalization pressure (103 kPa) A membrane area

- 1 メインバッファガスの流出
- 2 セル外からの流入
- 3 Csと不純ガスの化学反応による水素の生成、或は壁面からのアウトガス

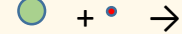


1 流出

● Cs原子 ● 不要ガス
● メインバッファガス



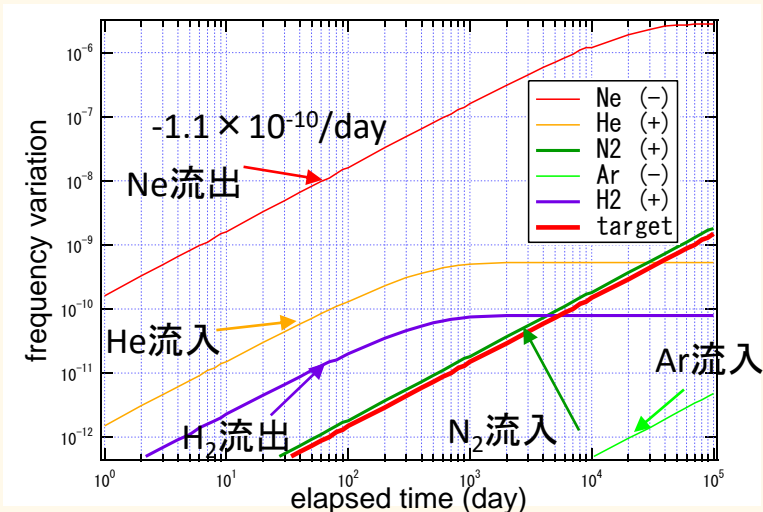
3



2 流入

ガスセル内環境安定化技術の開発

【Ne封入セルによる周波数ドリフト発生 の推定】

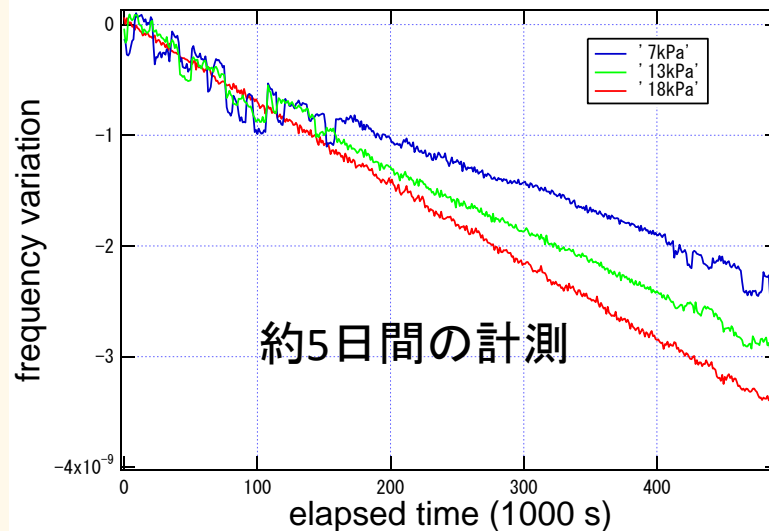


セル外環境: 大気を想定

ガス種	Partial pressure (Pa)
N ₂	8.0 × 10 ⁴
O ₂	2.1 × 10 ⁴
Ar	9.6 × 10 ²
CO ₂	4.0 × 10 ¹

ガス種	Partial pressure (Pa)
Ne	1.9
He	5.4 × 10 ⁻¹
H ₂	5.2 × 10 ⁻²

【周波数ドリフトの初期封入圧力依存性】

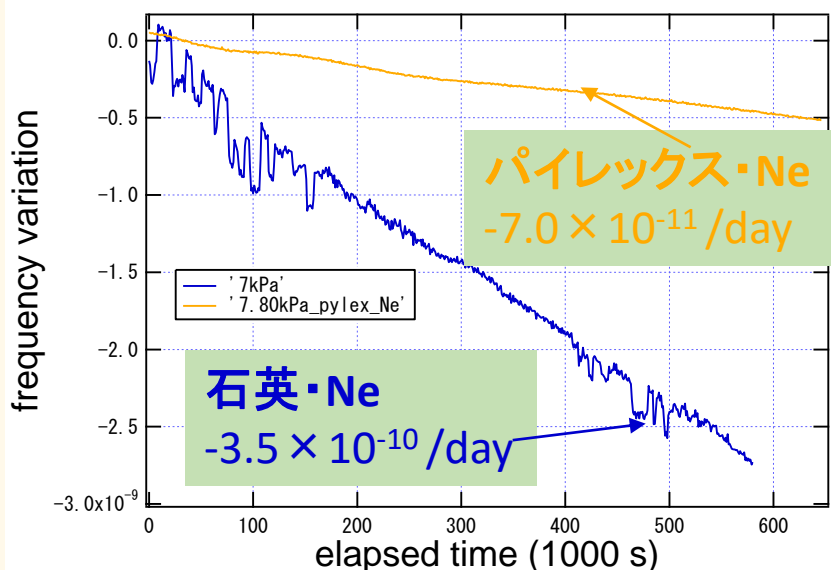


Ne封入圧力	ドリフトレート予測値(/day)	ドリフトレート実測値(/day)
7 kPa	-1.1 × 10 ⁻¹⁰	-3.5 × 10 ⁻¹⁰
13 kPa	-2.0 × 10 ⁻¹⁰	-5.0 × 10 ⁻¹⁰
18 kPa	-2.8 × 10 ⁻¹⁰	-5.9 × 10 ⁻¹⁰

* 全て負性ドリフトが観測され、ドリフトレートは封入圧力に依存する傾向が得られた。モデルの有用性を確認。

ガスセル内環境安定化技術の開発

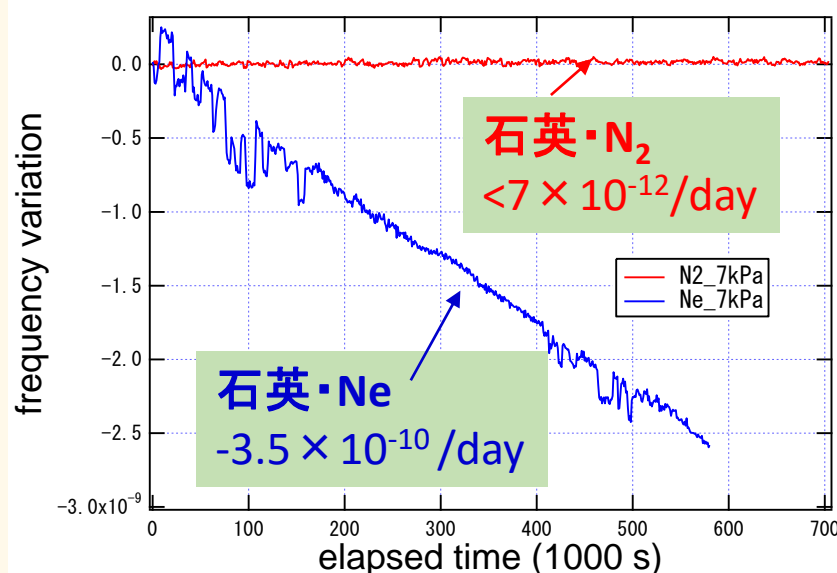
【素材による違い】



材料による傾向(for He)(文献値)

材料	透過定数 (相対値)
石英	1
パイレックス	0.1
アルミノケイ酸ガラス	5×10^{-4}

【ガス種による違い】

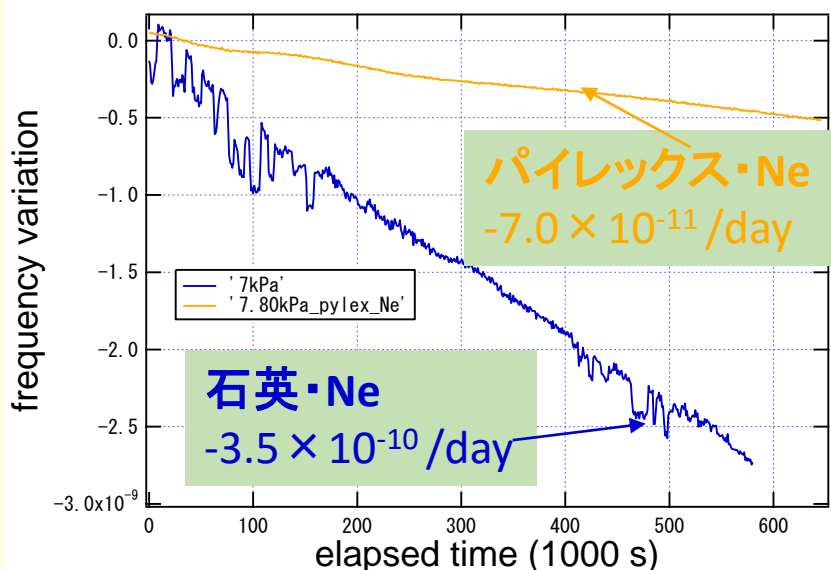


ガス種による傾向(fused silica@700°C)(文献値)

ガス種	透過定数 (相対値)	ガス種	透過定数 (相対値)
He	1	Ar	$<10^{-7}$
H ₂	0.1	O ₂	$<10^{-7}$
Ne	2×10^{-2}	N ₂	$<10^{-7}$

ガスセル内環境安定化技術の開発

【素材による違い】

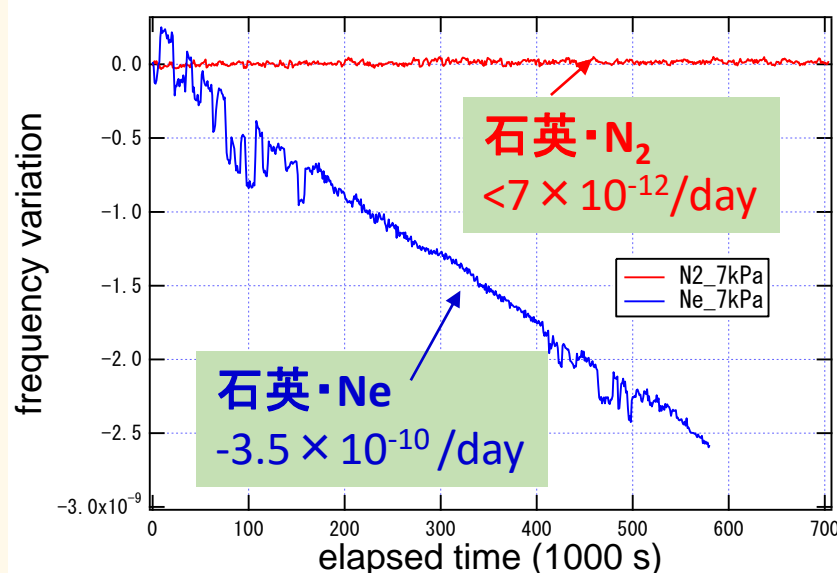


材料による傾向(for He)(文献値)

材料	透過定数 (相対値)
アルミノケイ酸ガラス	5×10^{-4}

* 石英よりもパイレックスがガス透過特性が良好なことを実験的に確認

【ガス種による違い】



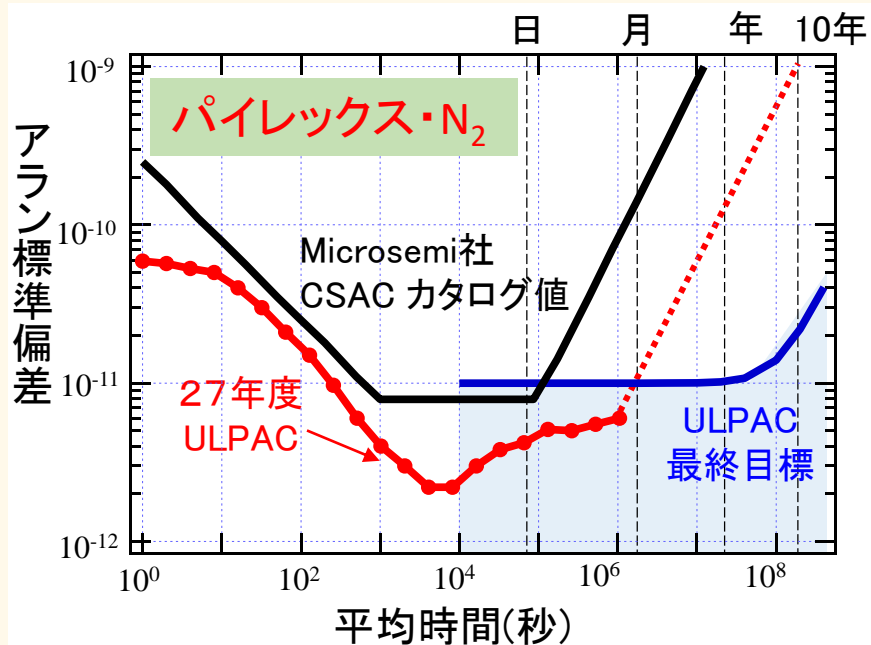
ガス種による傾向(fused silica@700°C)(文献値)

ガス種	透過定数	ガス種	透過定数
Ne	2×10^{-2}	N ₂	$< 10^{-7}$

* NeよりもN2のガス透過特性が良好なことを実験的に確認

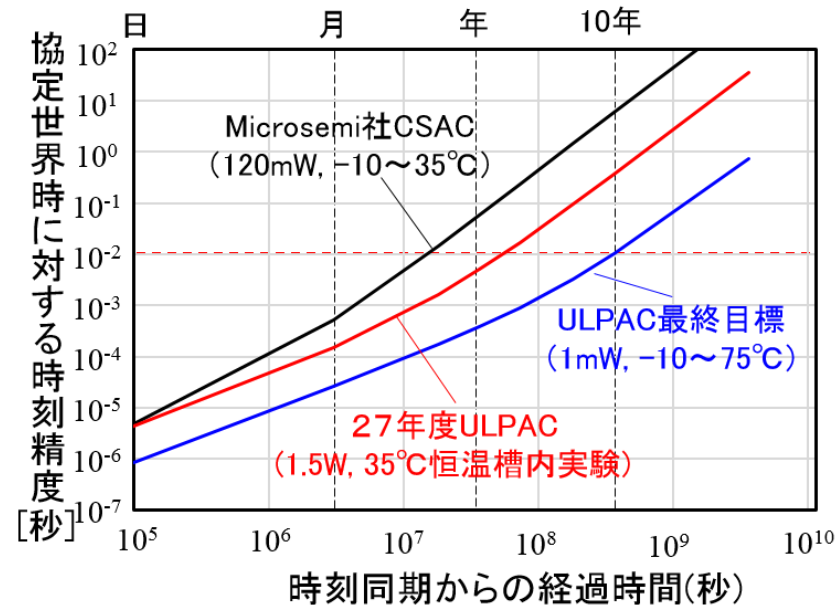
RICOH H27年度ULPACプロト評価

【周波数安定度による評価】



・ドリフトレート $1 \times 10^{-12}/\text{day}$ 以下となることを実験的に確認

【周波数安定度から推定される長期時刻同期性能の推移】

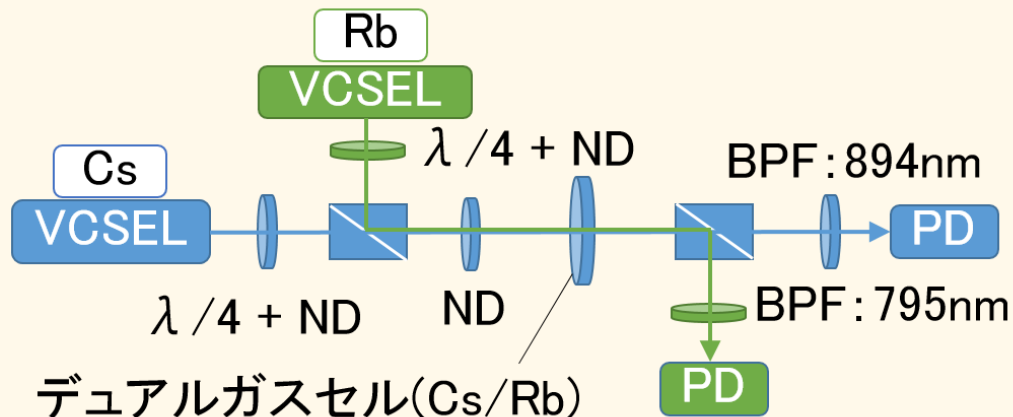


・H27年度プロトタイプでは、10年、1秒以下の時刻同期性能を保持する試算。

- * 時刻同期性能として大気中Heリミットに近いレベルを確認。
- * ガス低透過性材料(アルミノケイ酸ガラス)を利用すると、最終目標達成の見込み。

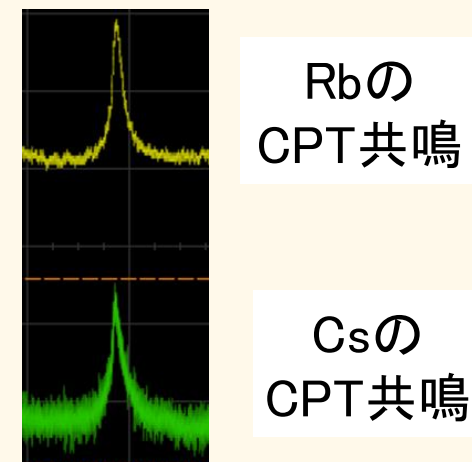
デュアルガスセルによる周波数補正技術の考案、基礎検討・実験

【考案されたデュアルガスセル方式原子時計の光学系】



CPT : Coherent Population Trapping BPF : Band-Pass Filter

【同時検出されたCs/RbのCPT共鳴信号】



【実験により算出された圧力変動と周波数差の関係】

$$\Delta\nu = \Delta P (\alpha_{Cs} - \alpha_{Rb}) \approx 2.12 \Delta P$$

$\Delta\nu$: Cs・Rb共鳴周波数差 ΔP : バファガス圧変動

α_{Cs} : Csの圧力係数

α_{Rb} : Rbの圧力係数

- * CsとRbのCPT共鳴を同時計測し、その周波数差から共鳴周波数の変動量を推定。
- * 周波数ドリフト抑制の到達レベルを1桁向上(単独セル比)の見込み。
- * 基準周波数の補正精度を検証実験中。

低消費電力と低位相雑音を両立した制御回路の開発

【消費電力一覧(CSAC)】

system	power
量子部	11mW
VCO+PLL	53(=32+21)mW
Control Logic + Regulator	54mW
10MHz Crystal Osc.	7mW
Total	125mW

制御回路

* 原子時計消費電力の90%以上が回路によるもの

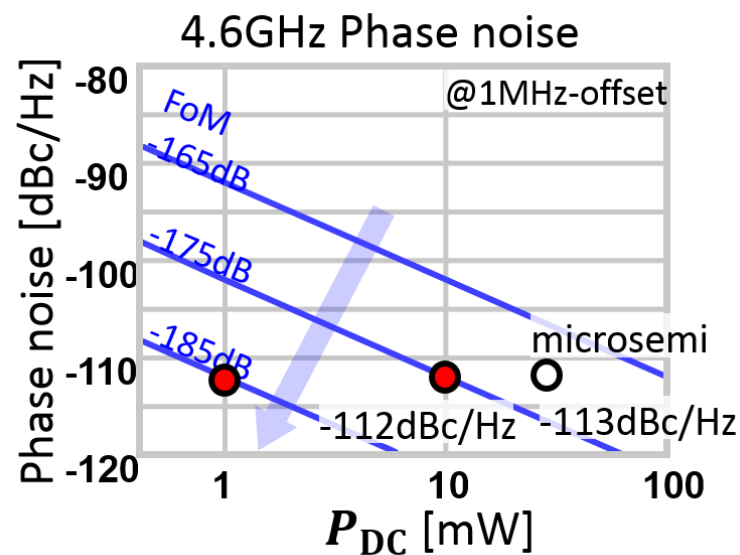
* 構成部品の見直し

* 逐次、モノシック化を推進

* 削減効果、及び工夫の余地が大きい

VCO改良から

【VCO消費電力削減の検討】

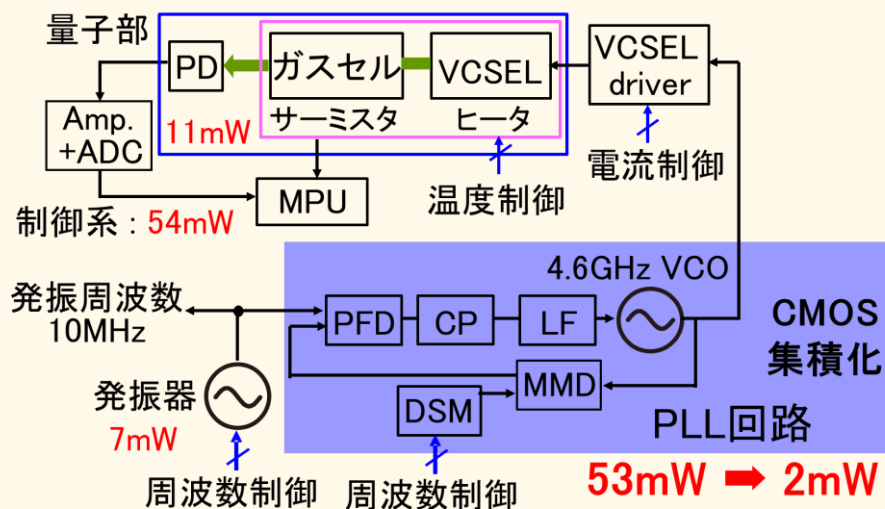


- Microsemi 32mW, -113dBc/Hz
- Target @ 2015 10mW, -112dBc/Hz
- Target @ 2017 1mW, -112dBc/Hz

* VCO回路方式の改良により、FoMの向上を図り、位相雑音を維持しつつ低消費電力化を検討。

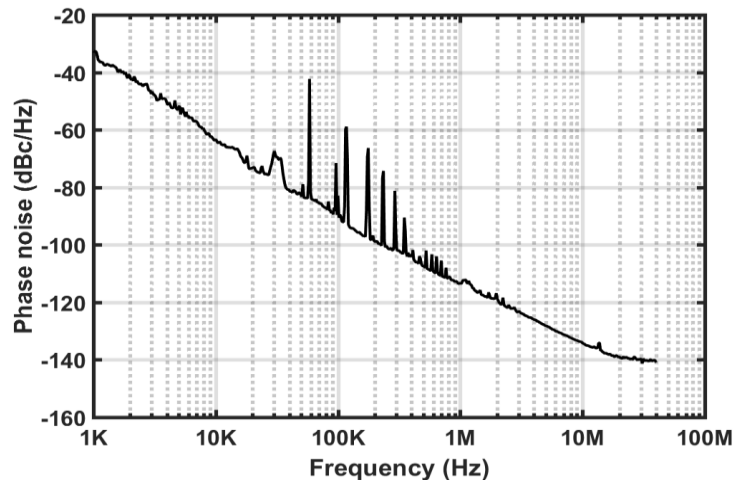
低消費電力と低位相雑音を両立した制御回路の開発/CMOS集積化

【ULPAC内ブロックダイアグラム】



H28年度取り組み部分

【VCO単体試作完了】



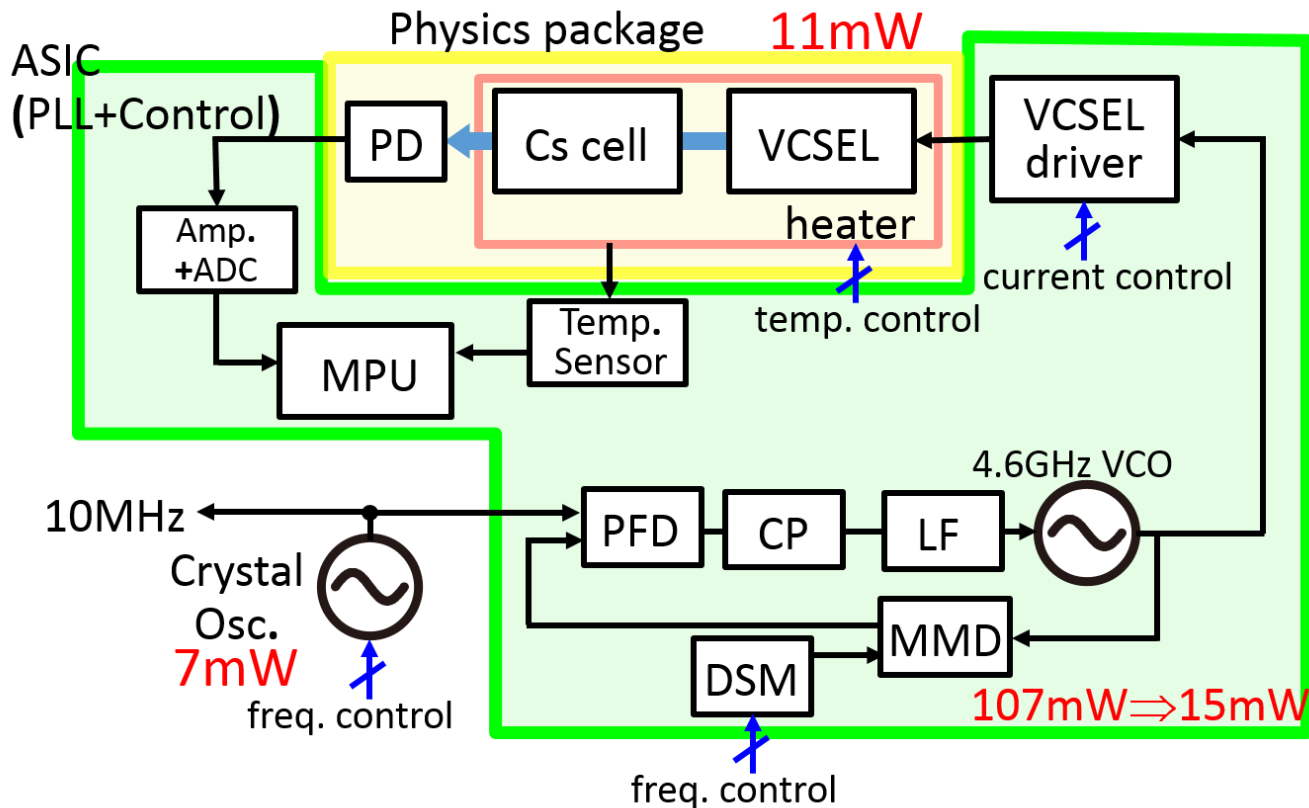
Frequency	Phase noise (1MHz offset)	Power consumption
4.6 GHz	-113.2 dBc/Hz	0.52 mW

・ほぼ、シミュレーション通りの評価結果を確認

- * VCO+PLLで消費電力2mW(トータル約80mW)の試算。
- * 回路シミュレータにより動作確認済み。現在、試作中。
- * VCO単体試作完了。消費電力は世界最小レベル。
- * H30年までにプロト機へ実装。

低消費電力と低位相雑音を両立した制御回路の開発/CMOS集積化

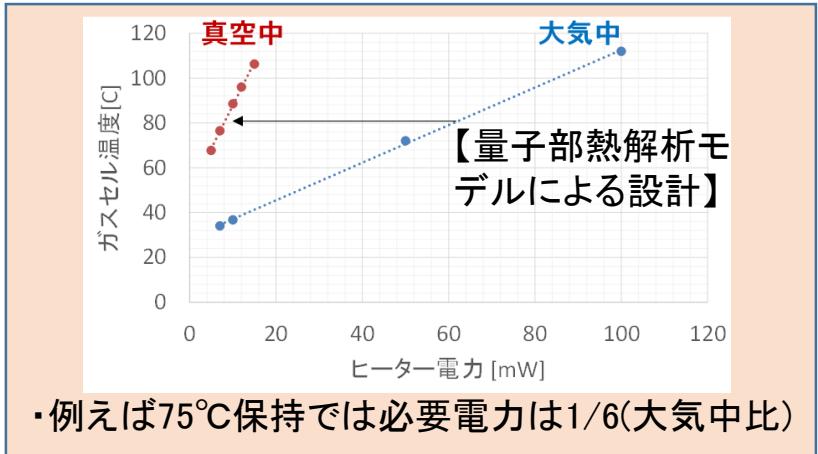
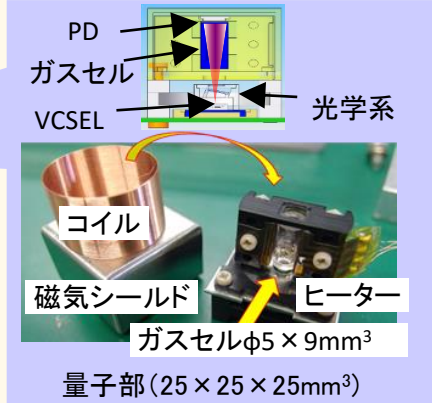
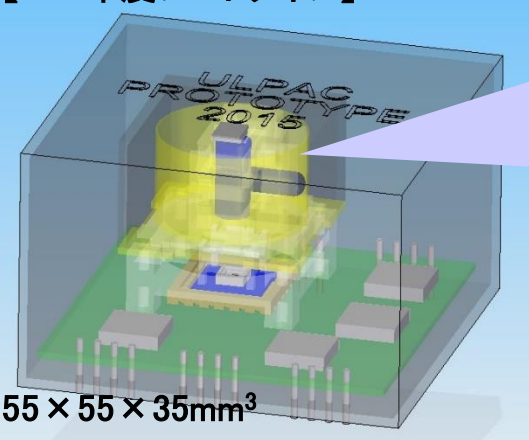
【制御回路の将来イメージ(トータル消費電力約30mW)】



* プロト機への実装と平行して、来年度以降、PLL等のモノリシック化試作を進める。

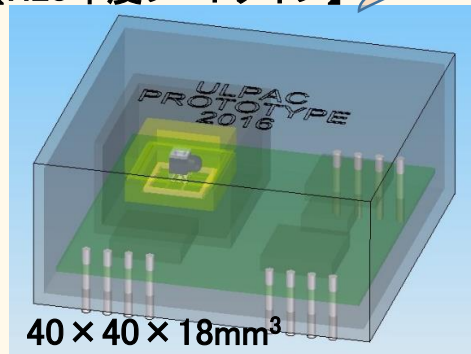
RICOH **ガスセルの小型化、真空封止による量子部の高断熱化**

【H27年度プロトタイプ】



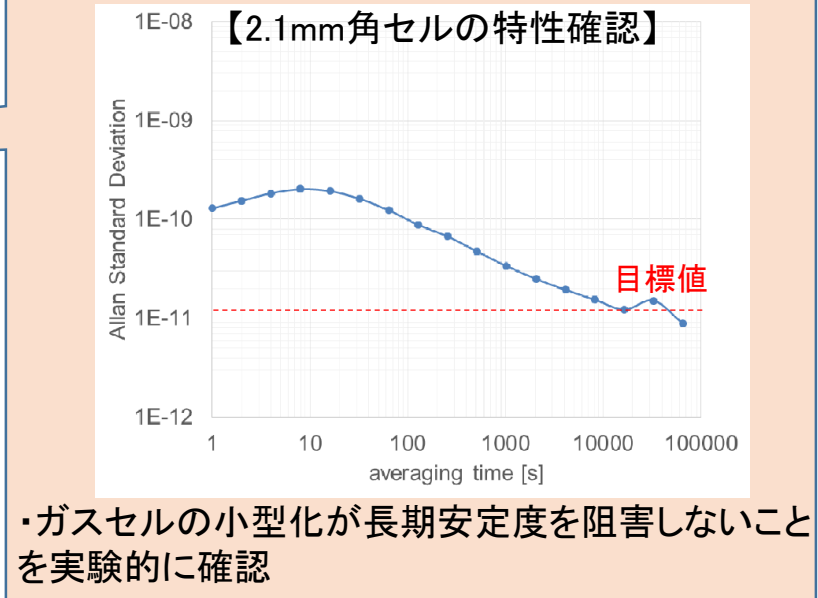
- ・ガスセル可換型・大気中設置・種々の基礎データ取得に使用
- ・ガスセル温度維持消費電力は約900mW

【H28年度プロトタイプ】



28年度ガスセル
φ2×2×2mm³

- ・機密封止による高断熱型量子部 (<0.1Pa)
- ・2mm角ガスセル(ガラス加工方式)作製
- ・拡散結合方式ガスセル検討、及び作製

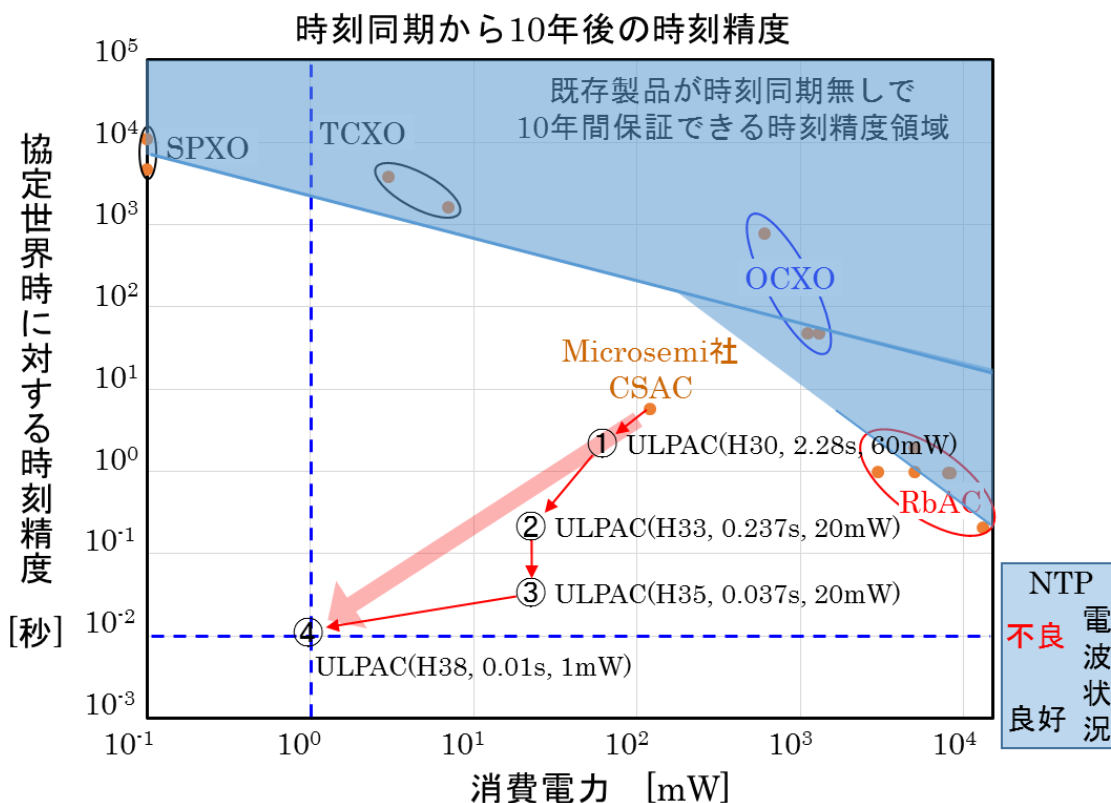


*** H28年度プロトタイプは、現在、製作中。消費電力はトータルでCSACと同等見込み。**



事業化に向けた技術ロードマップ策定

仕様項目	H28年 (M社CSAC)	H30年(ULPAC)	H33年(ULPAC)	H38年以降(ULPAC)
長期安定度	0.01秒/5ヶ月	0.01秒/8ヶ月	0.01秒/2年	0.01秒/10年
消費電力	120mW	60mW	20mW	1mW
サイズ	40×35×12mm ³	30×30×11mm ³	20×20×10mm ³	15×15×5mm ³



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)の委託研究業務の結果得られた成果です。

ご清聴ありがとうございます。
より詳細はパネル展示スペースにてご説明申し上げます。