

「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」

第2回ライフラインコアモニタリング プロジェクト成果報告会

～ライフライン系都市インフラへの
自立電源無線モニタリングシステムの活用～

コアモニタリング研究体
研究体長 伊藤 寿浩
(国立研究開発法人 産業技術総合研究所)

2016年9月15日

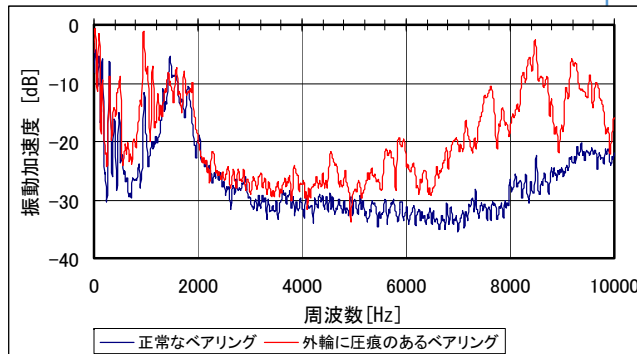
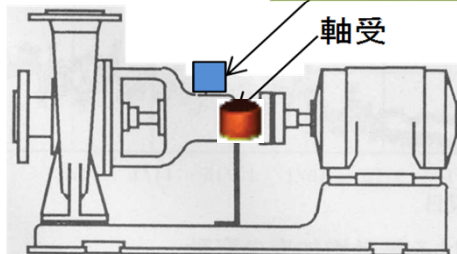
プロジェクトの目的

- **都市インフラ【ライフライン】**は、経験にもとづく目視・聴音点検が主体であり、近年各種の遠隔管理システムが進化しているとはいえ、普及については緒に就いたばかり。
- 病院、地域エネルギー供給施設等のインフラはその公共性も高く、その中核となる発電機、**ボイラ、ポンプ等の回転機器をコア**としたシステムの保全が都市機能の安定化・安全化に重要な役割を担う。
- 本研究開発では、ライフラインのコア設備の早期異常検知、健全性確保が行える、低コストの常時モニタリングシステムの開発を目的とする。

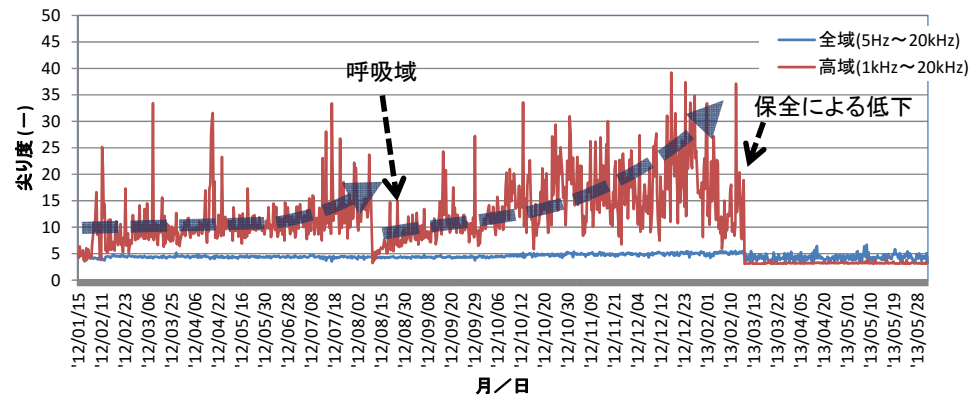
ライフラインコア＝ポンプのモニタリング



センサ端末



- ・ 従来は保守員が振動音や機器温度の異常から判断
 - － 月1回の定期点検、年2回の精密検査、日常は保守員が振動音や機器温度を確認
- ・ 振動周波数解析による故障モード分析
研究例の蓄積
(お金をかければ可能なことは判っている)



【劣化の進行に伴う振動特性(尖り度)の増加の実例】

◆尖り度: 振動波形の衝撃性として、正規分布からのずれを示す。

$$\text{尖り度} = \frac{\sum (|X_i| - X)^4}{(N-1)X_{\text{rms}}^4}$$

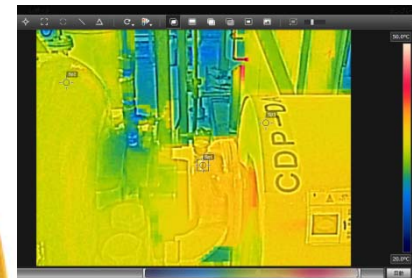
従来の保守メンテナンスの課題

定期巡回

【保守メンテナンス】

従来の劣化診断は定期巡回において、保守員の経験と勘に頼っているのが現状で異常を発見した時には、既に遅く被害が甚大となっている場合が多い。

- 機器
 - ・定期巡回による目視、異常音の確認、電流値の検針
 - ・スポットにて簡易振動計による振動測定
- 電気設備
 - ・定期点検における絶縁抵抗値の測定
 - ・定期巡回による電流値の検針、異常音の確認
- 配管
 - ・定期巡回による配管内温度の検針
 - ・漏水検知による発報



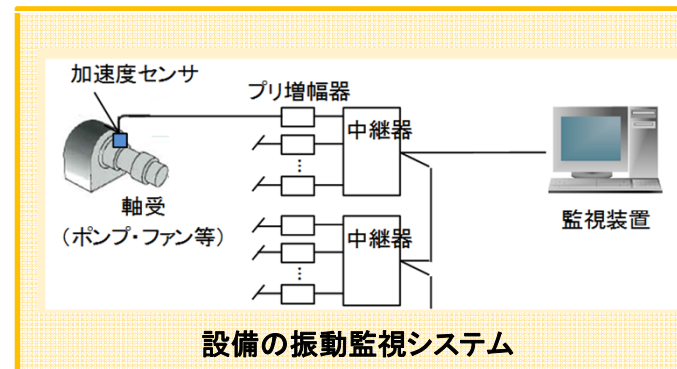
サーモカメラ

ペン型振動計



【診断システム】

センサ端末や設置工事に費用がかかると共に、建物に合わせたシステムの構築が必要となるため、投資費用が高くなり普及が進んでいない。



◆計測に対して

- ・常時・継続して計測したい事象は、振動、表面温度、電流、漏水
- ・計測項目は、振動・温度・電流の変化、漏水検知で、具体的な位置を示して欲しい
- ・計測データ、収集方法は、無線によるリアルタイム計測
- ・計測間隔は、日常計測において1日1回は必要

◆データ処理、活用

- ・日常管理では、通常値からの変化にて劣化度合いを診断し予防保全を行う
- ・非日常監視では、震災などの非常時後の状態を診断し、早期に対策を施す
- ・振動値や管理基準を分かりやすく表示
- ・振動値の変化とポンプ・モータの不具合の関連を表示

◆監視システムの運用

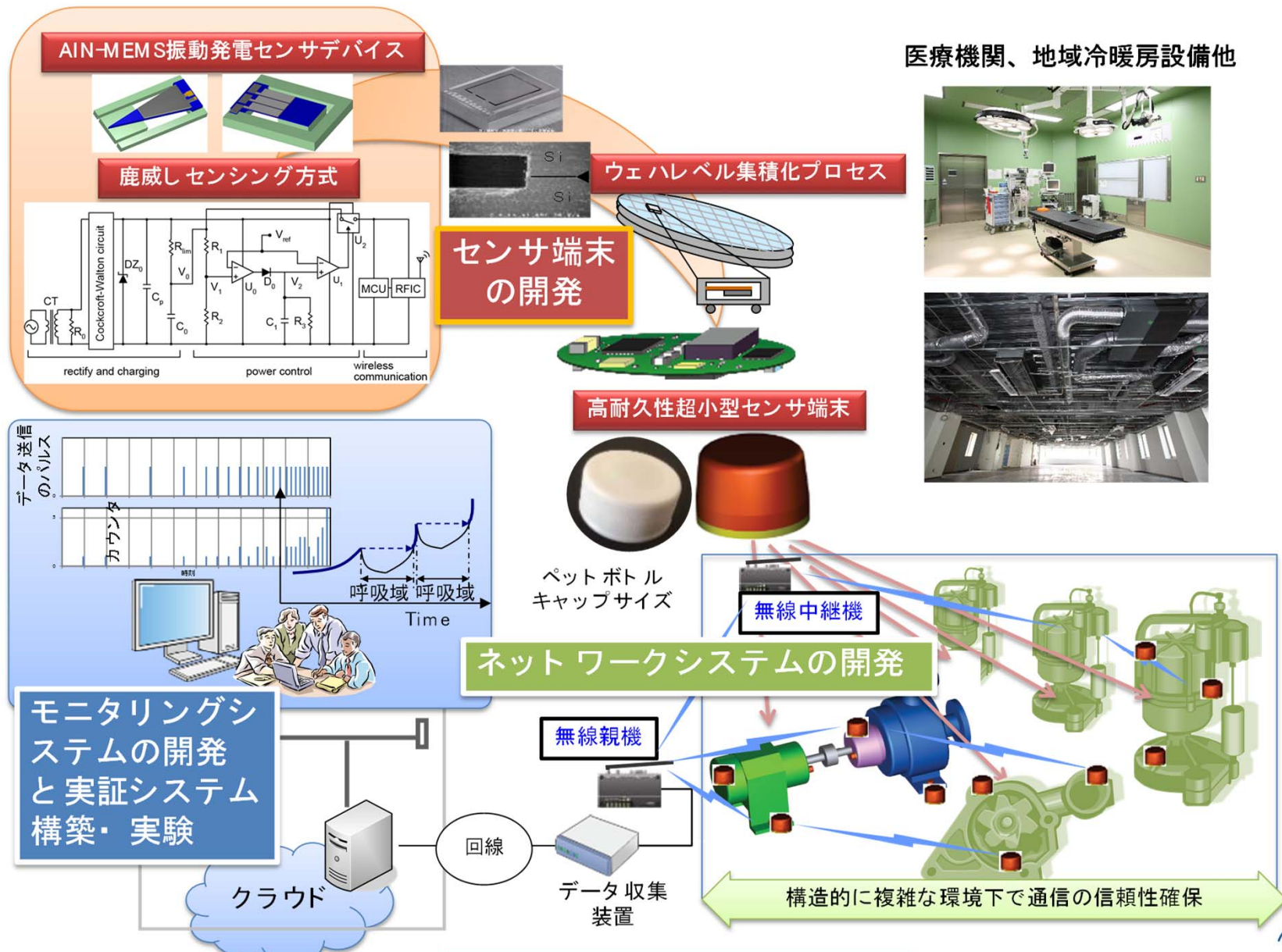
- ・設置環境は、屋内外の機器、盤内、配管表面
- ・立型ポンプ、横型ポンプ、多段ポンプなど各種ポンプへの対応
- ・インバータポンプへの対応、水中ポンプへの対応
- ・電源はハーベスト、耐久性は10年程度
- ・センサ単体は数千円、システム価格としては一千万以下

開発課題

- 有線の(モニタリング)システム:敷設コストを含め100点程度のモニタリングシステムで1000~2000万円
→普及のためには一桁安価にする必要あり
- 無線システムの課題
 - ✓ (敷設コストは低いが)有線と同じデータ通信容量・品質は得られない。品質を上げようとするれば、無線センサ端末の消費電力の増加/サイズ増大/高コスト化を招く, 端末の自立電源が困難になり、電池交換等の(端末の)メンテナンスコストが増大
 - ✓ 端末に供給される電力量が限られるため、取得データ量も(著しく)制限される

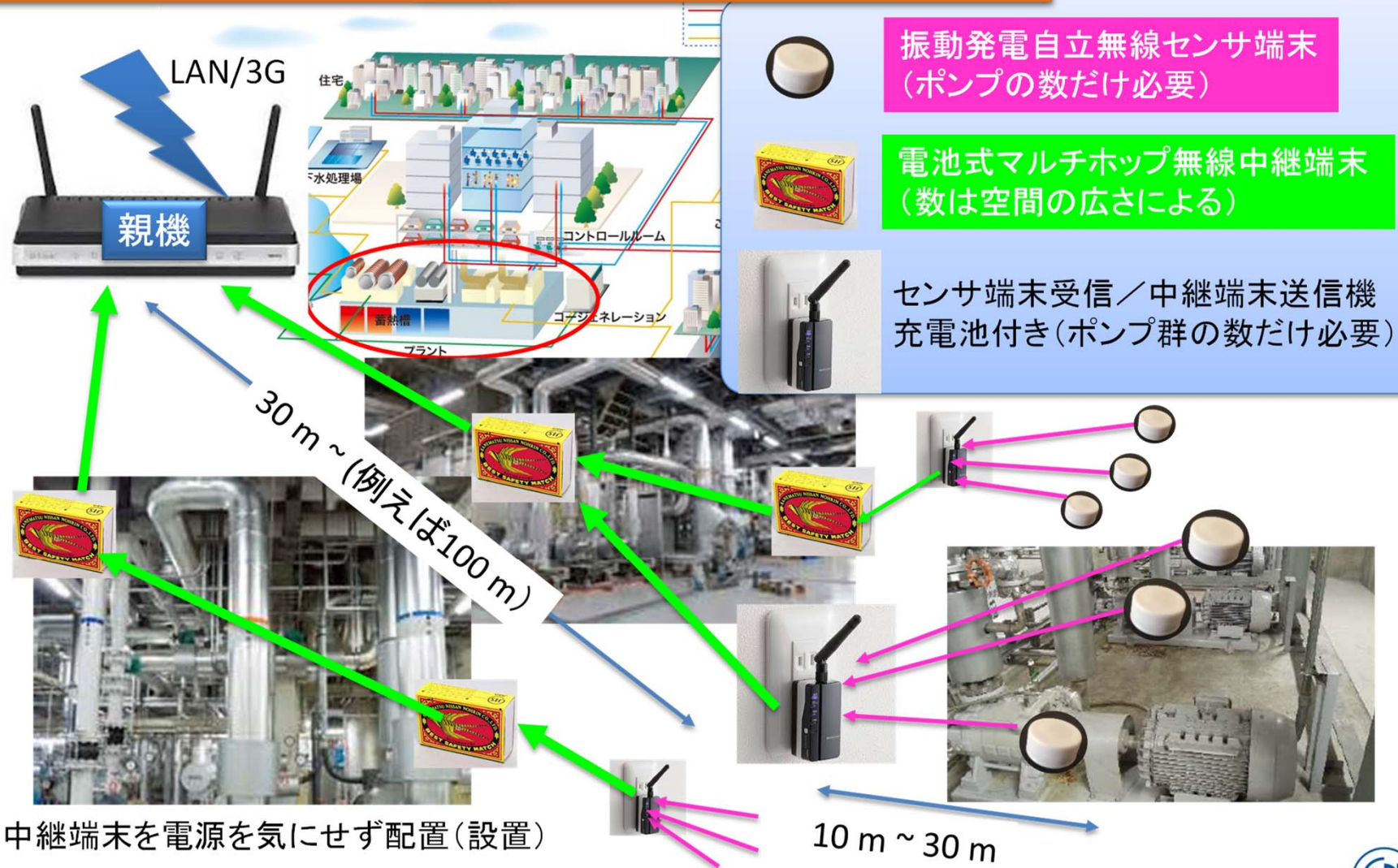
- ◆ 限られたデータ量で状態モニタリングを可能にする技術
- ◆ 限られた発電量で自立動作する低コスト端末
- ◆ 低コスト・低消費電力の高信頼性無線通信システム
などを開発する必要

プロジェクトの開発項目




無線センサネットワークシステム

柔軟なルーティングが可能なマルチホップ中継端末と片方向通信（低コスト）センサ端末を適切に組み合わせてネットワークを構成



目標とする端末

基本計画端末仕様	研究終了時の端末(P型)
振動または変位＋温度計測機能	圧電発電型振動センサ＋半導体温度センサ
1回/時以上の無線通信	10分に1回程度の非同期送信可 (鹿威し方式)
自立電源動作	センサの振動発電のみで動作 (端末消費電力:5 μW)
地震等の突発事象検出	圧電センサ(震度4相当の地震で動作)
サイズ:概ね7cmx10cmx5cm以下	ペットボトルキャップ大 
無線通信:免許不要、通信距離30 m以上	920MHz特定小電力, 直接30m以上通信できる箇所に適用
信頼性:10年以上	実環境下で10年以上
(想定端末コスト)	(1000円前後)

体制・役割分担

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

- ・研究実施場所: 集積マイクロシステム研究センター
- ・研究項目: センシング・発電デバイスの開発

(一財)マイクロマシンセンター

- ・研究管理全体: 産業インフラ研究センター
- ・研究実施場所: MNOIC開発センター
- ・研究項目: AlN・ScAlN圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発



明星電気(株)

- ・研究実施場所: 技術本部
- ・研究項目: センサ端末の開発

沖電気工業(株)

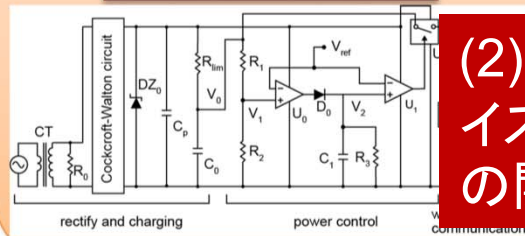
- ・研究実施場所: OKIシステムセンタ、OKI関西テクノロジーセンター
- ・研究項目: ネットワークシステムの開発

高砂熱学工業(株)

- ・研究実施場所: 技術本部技術研究所、技術本部新技術開発部、横浜支店技術部
- ・研究項目: コアモニタリングシステムの開発、地域・病院エネルギー供給設備診断のためのモニタリングシステムの開発

AIN-MEMS振動発電センサデバイス

(1) コアモニタリング用センシング・
発電デバイスの開発(産総研)



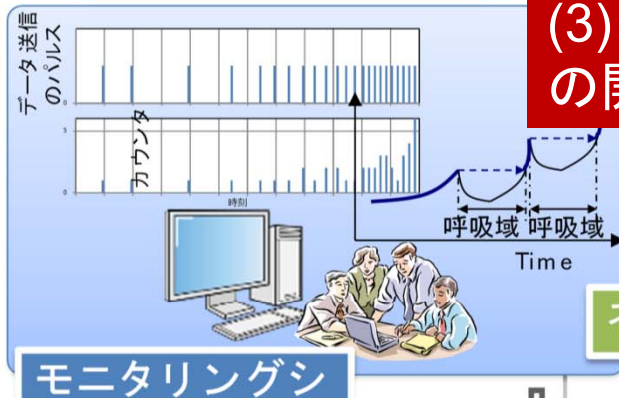
ウェハレベル集積化プロセス

(2) コアモニタリング用AIN圧電デバ
イスのウェハレベルパッケージ技術
の開発(マイクロマシンセンター)

医療機関、地域冷暖房設備他



(3) コアモニタリング用センサ端末
の開発(明星電気)



ペットボトル
キャップ
ネット

(4) コアモニタリング用ネットワーク
システムの開発(沖電気工業)

(5) コアモニタリングシステムの開発
と実証(高砂熱学工業)

クラウド

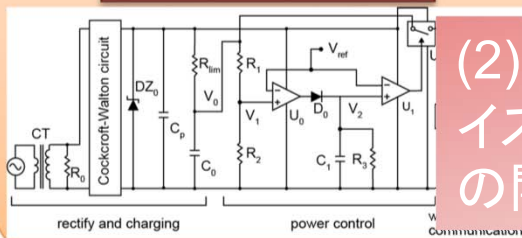
無線親機
データ収集
装置

構造的に複雑な環境下で通信の信頼性確保

コアモニタリング研究体

AIN-MEMS振動発電センサデバイス

(1) コアモニタリング用センシング・
発電デバイスの開発(産総研)



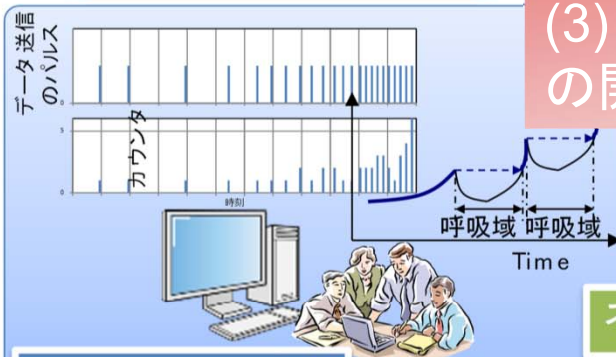
ウェハレベル集積化プロセス

(2) コアモニタリング用AIN圧電デバイスのウェハレベルパッケージ技術の開発(マイクロマシンセンター)

医療機関、地域冷暖房設備他



(3) コアモニタリング用センサ端末の開発(明星電気)



モニタリングシ

(5) コアモニタリングシステムの開発
と実証(高砂熱学工業)

(4) コアモニタリング用ネットワーク
システムの開発(沖電気工業)

無線親機

データ収集
装置

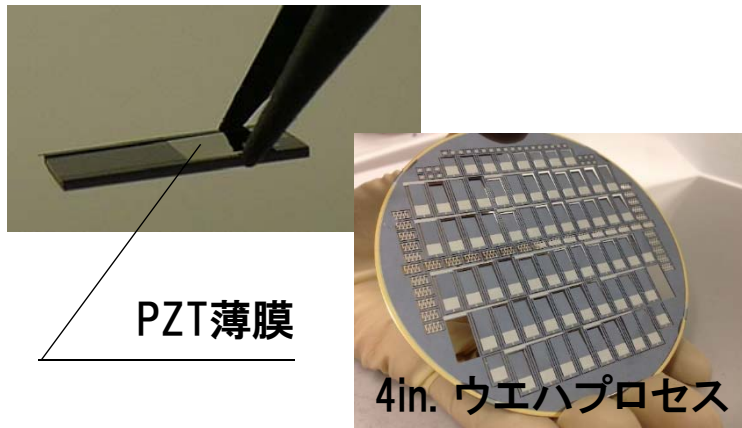
構造的に複雑な環境下で通信の信頼性確保

クラウド

コアモニタリング研究体

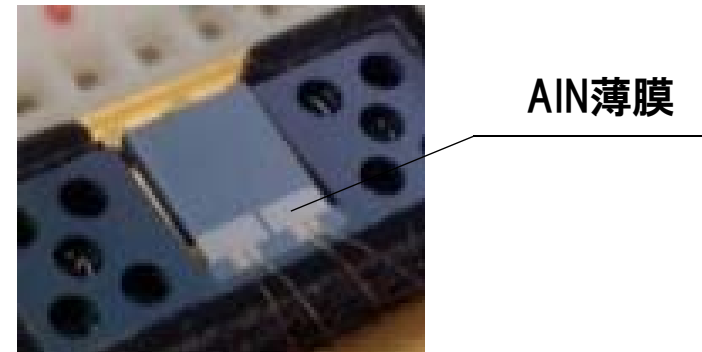
H26年度:

電圧0.1V、発電量0.001 μ W



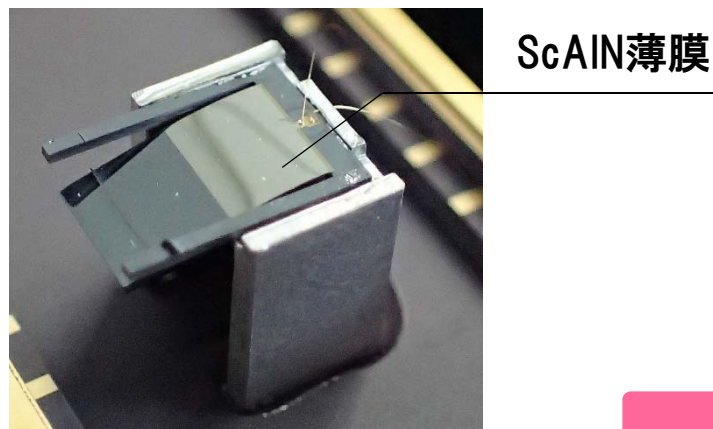
H27年度:

電圧1V、発電量0.1 μ W



H28年度:

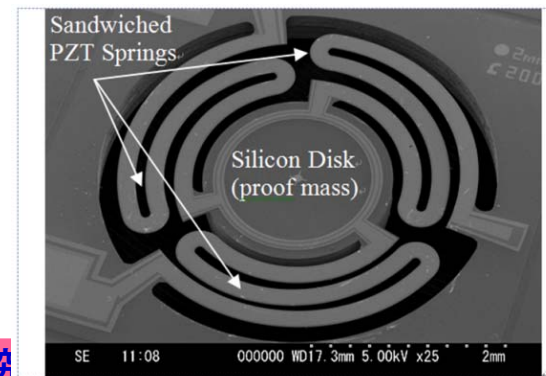
電圧2V、発電量0.5 μ W



H30年度:

帯域 \pm 5Hz

(電圧1.6V、発電量0.2 μ W)



超小型な電池レス無線振動センシング端末

- ① 超低消費電力電源制御回路
鹿威し方式
超低消費電力アナログ回路

<技術的課題>

⇒ 駆動電圧以下時の回路動作
⇒ 市販品では電池レス動作は不可能

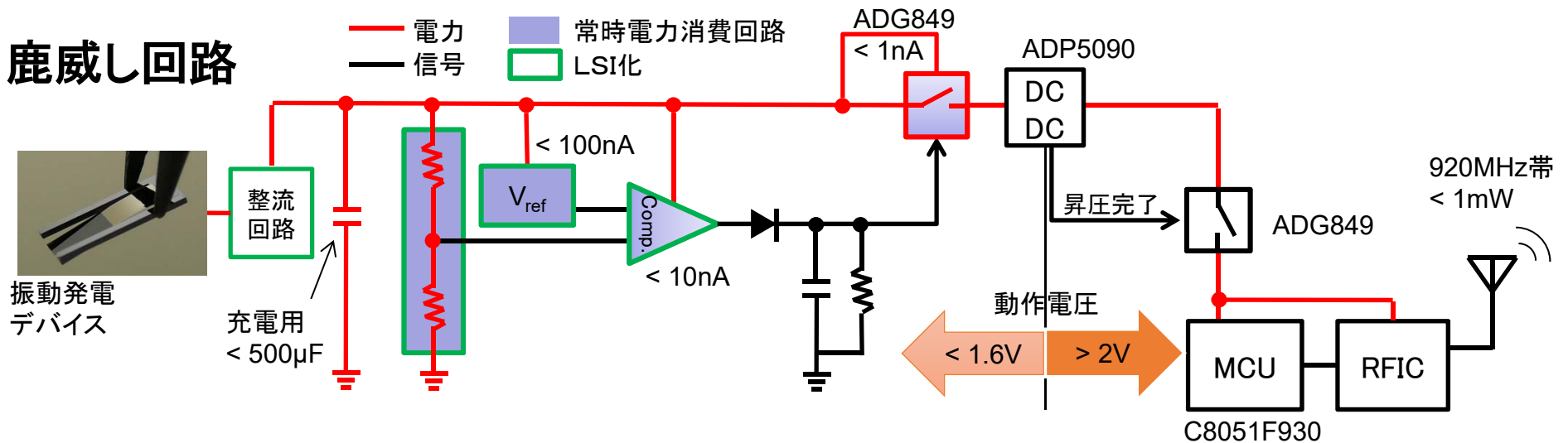
- ② 高効率振動発電
高効率振動発電デバイス
高効率整流回路

<技術的課題>

⇒ ScAlN薄膜成膜、周波数応答の広帯域化
⇒ 低電流出力に対応した整流回路

研究開発成果:超低消費電力アナログ回路

鹿威し回路



- ✓ 振動発電デバイスにMOSFETを最適化
- ✓ ブリッジ回路構成を工夫

- ✓ バイアス電流を大幅カット
- ✓ 弱反転領域を使用

整流回路

出力電圧(V)

本試作	3.01
振動発電用チップ	1.25
ディスクリートMOSFET	2.72

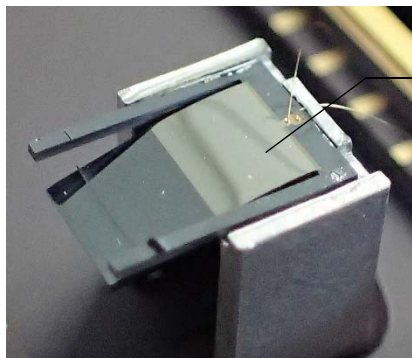
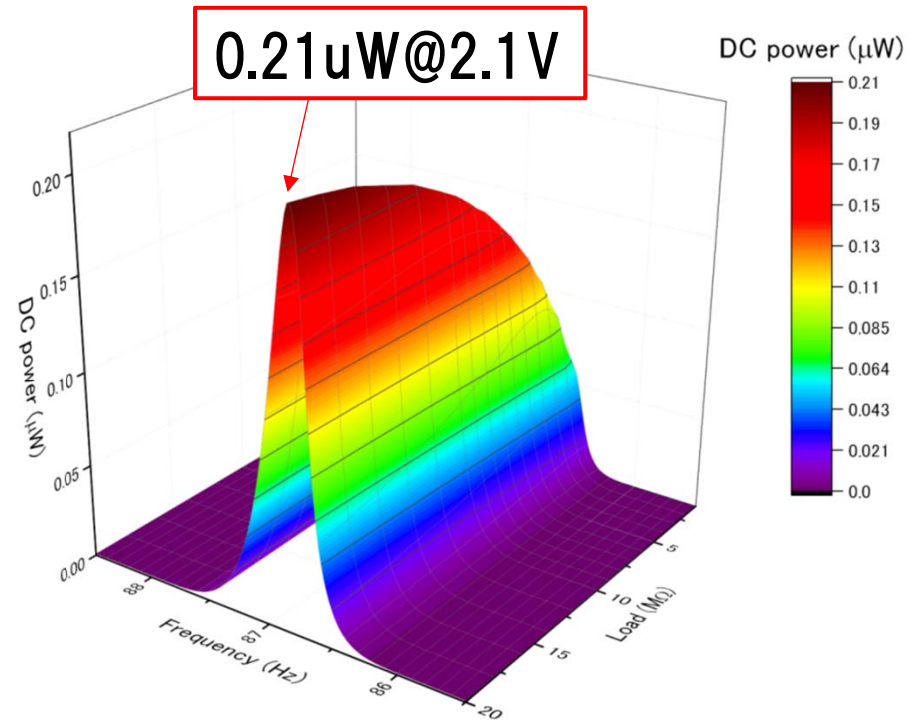
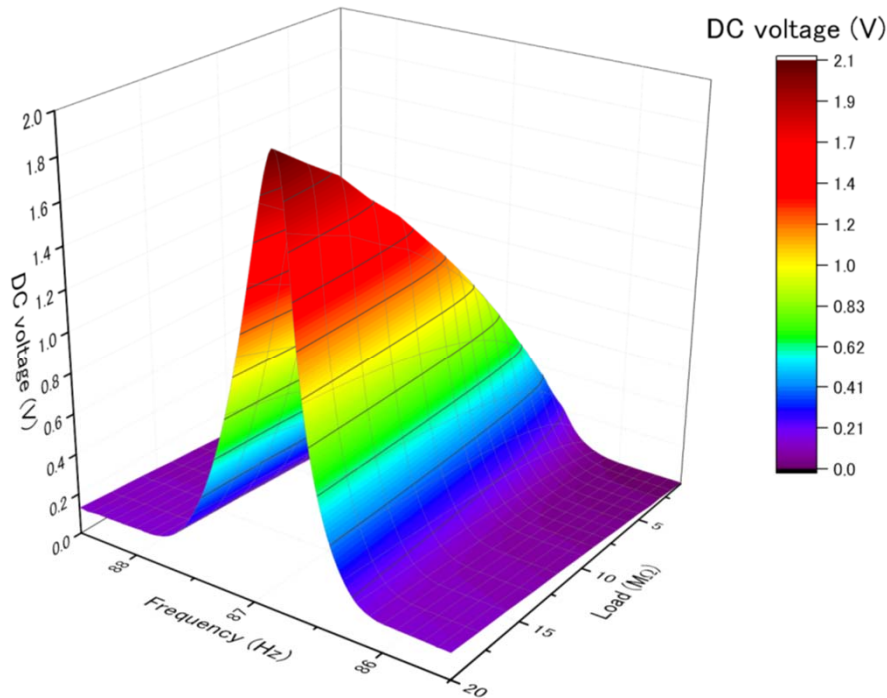
※AIN発電デバイスによる評価

消費電流 (nA)

	コンパレータ	参照電圧
本試作	13	45
従来品	112	1240

$$\text{消費電力: } 13\text{nA} + 45\text{nA} + 16\text{nA} \\ = 74\text{nA}@1.6\text{V} \Rightarrow \mathbf{118\text{nW}}$$

AlNの5倍の圧電定数

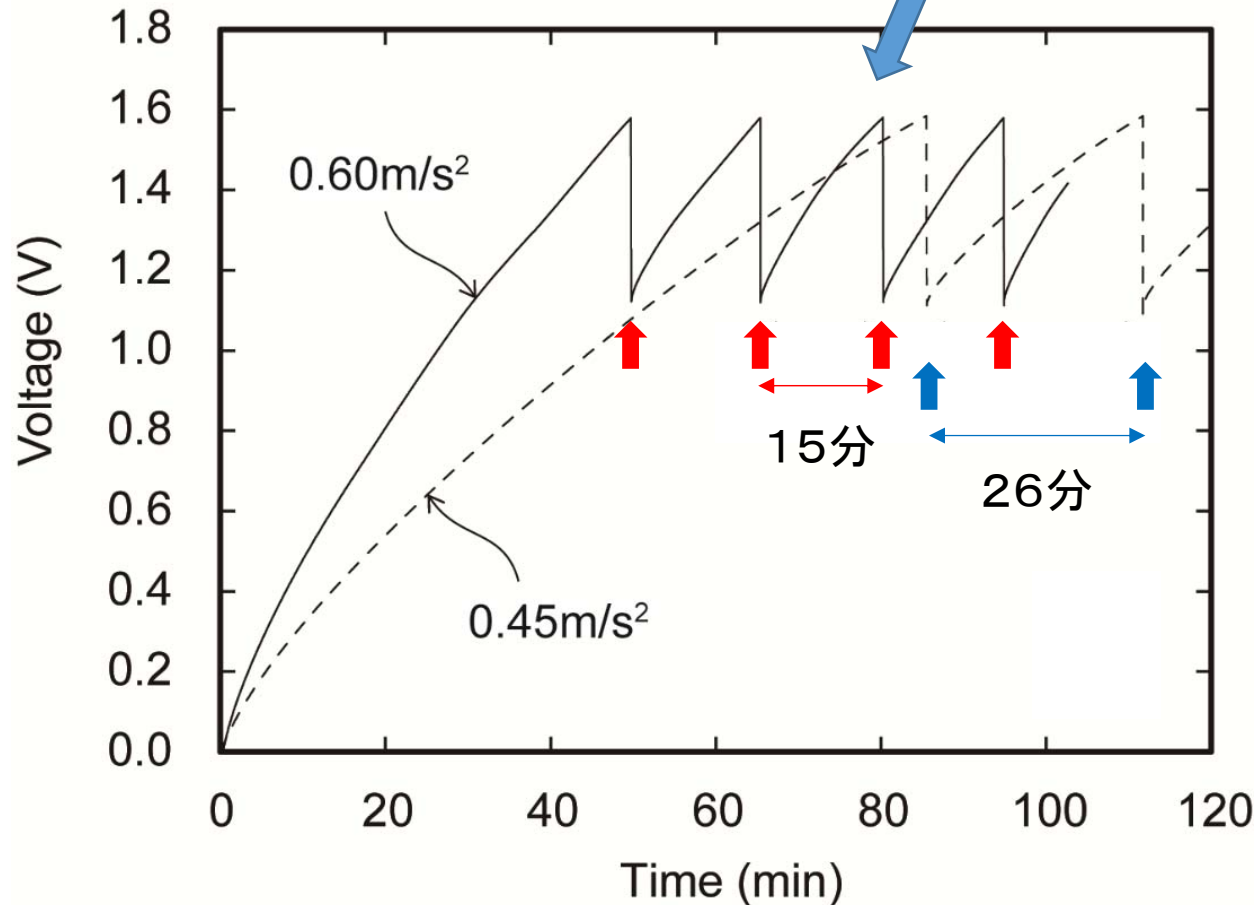


ScAlN薄膜

入力振動加速度: 0.5m/s^2 (変位 $\sim 2\mu\text{m}$)

鹿威し回路の消費電力($0.12\mu\text{W}$, 1.6V)
を上回る発電性能を達成

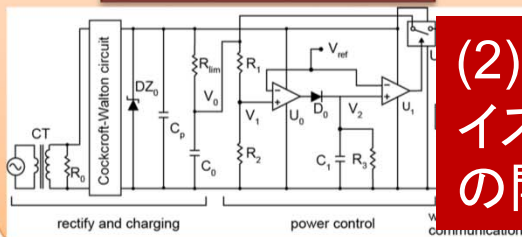
キャパシタの電力を消費して無線通信



振動加速度の違いにより、無線送信の頻度が変化

AIN-MEMS振動発電センサデバイス

(1) コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発(産総研)



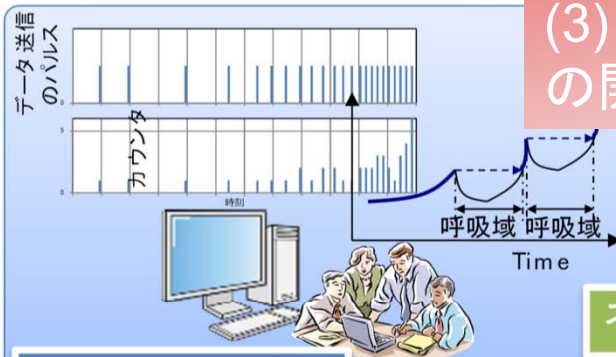
ウェハレベル集積化プロセス

(2) コアモニタリング用AIN圧電デバイスのウェハレベルパッケージ技術の開発(マイクロマシンセンター)

医療機関、地域冷暖房設備他



(3) コアモニタリング用センサ端末の開発(明星電気)



モニタリングシ

(5) コアモニタリングシステムの開発と実証(高砂熱学工業)

(4) コアモニタリング用ネットワークシステムの開発(沖電気工業)

無線親機

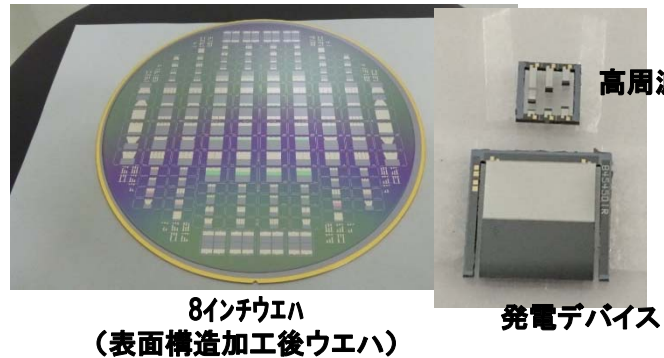
データ収集装置

構造的に複雑な環境下で通信の信頼性確保

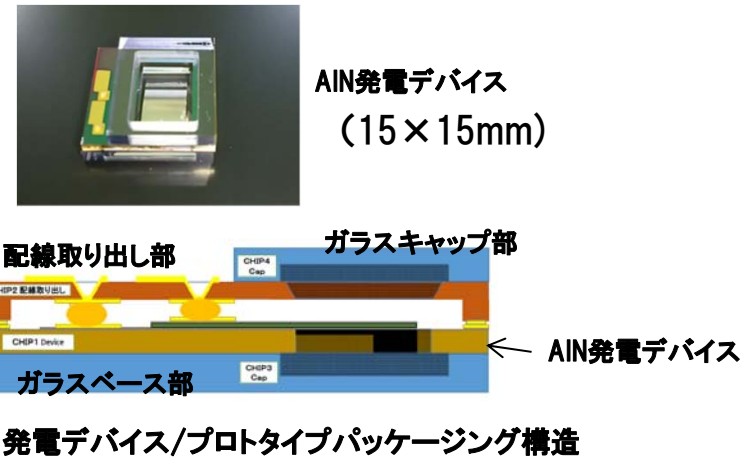
クラウド

コアモニタリング研究体

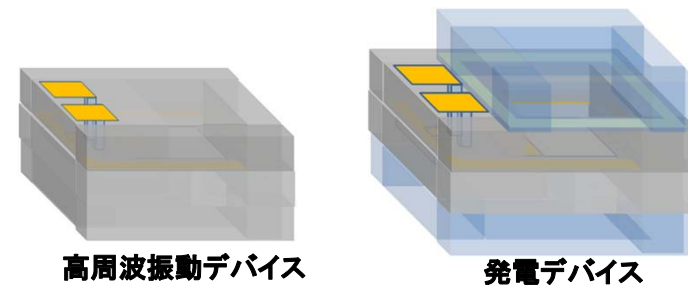
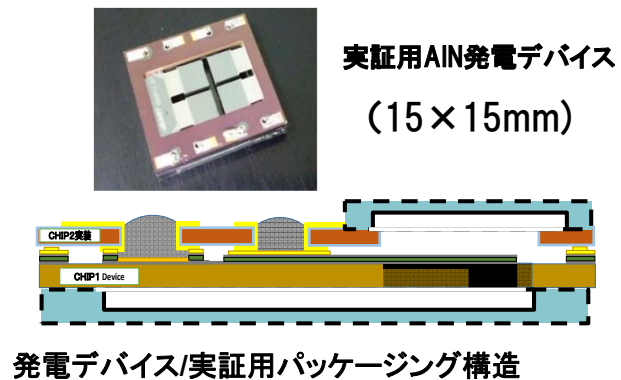
H26年度: 8in AIN圧電オールドライウ
エハプロセス開発



H27年度: 8in AIN圧電オールドライウ
エハプロセス改善 / C to C実装



H28年度: C to W実装
/ScAINカンチレバープロセス



H30年度: W to W 真空パッケージ

コアモニタリング用AIN圧電デバイスの ウエハレベルパッケージ技術の開発

< 技術的課題 >

①コアモニタリング用AIN圧電
デバイス量産プロセス開発
・AIN, ScAIN圧電デバイスの
オールドライプロセスの完成

・8インチ基板で均一なデバイス
特性(圧電特性、機械特性)、
高歩留り加工条件の確立

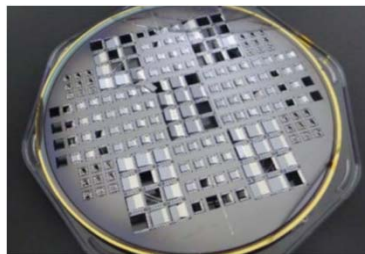
②高信頼性ウエハレベルパッ
ケージングプロセス開発
・圧電デバイスを気密/真空封
止するパッケージング工程確
立

・ウエハレベルTSV構造/真
空封止プロセスの確立
・圧電デバイスへダメージが
無い、低温実装技術確立

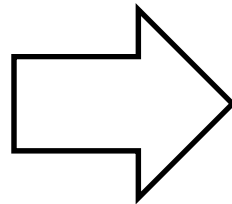
オールドライのAlN圧電一貫工程プロセスを開発。
低周波用及び高周波用カンチレバーチップを試作し、産総研、
明星電気に提供。

Ar + Cl₂系ガスによる
Pt電極、AlN圧電薄膜の
ドライエッチング技術確立

8インチ基板でAlN圧電カンチレバーを試作

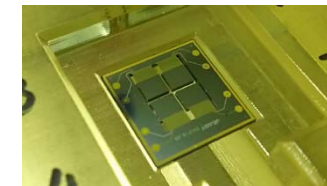
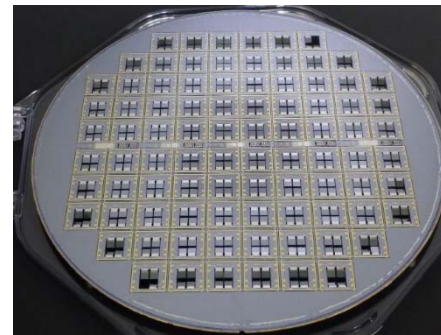


カンチレバー形状不良 多
錘破損、カンチレバー反り大
形状歩留り 約15%



Pt/AlN/Pt 積層膜成膜技術確立

DC/rf 連続スパッタ成膜条件を改善し、
AlN圧電電極構造の残留応力低減、均一化



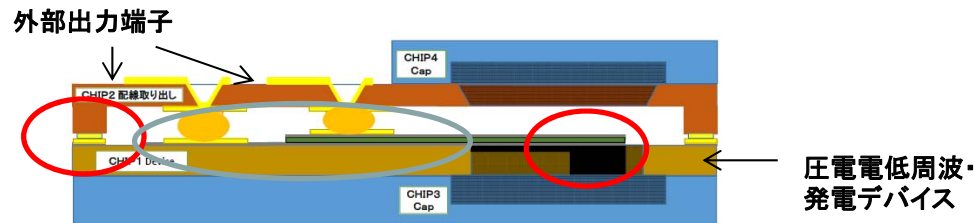
低周波、発電用カンチレバー
(15×15mm)

カンチレバー形状 歩留り 70%
(最外周にやや大きな反りが残る)
圧電特性 ウエハ 80%以上の領域 d₃₃:>6.4(pm/V)

プラズマ活性化低温Au-Au接合により、良好な封止特性、低抵抗電気接合を実現 TSVによる信号取り出し構造と封止構造を有するAlN圧電デバイスパッケージ構造を開発

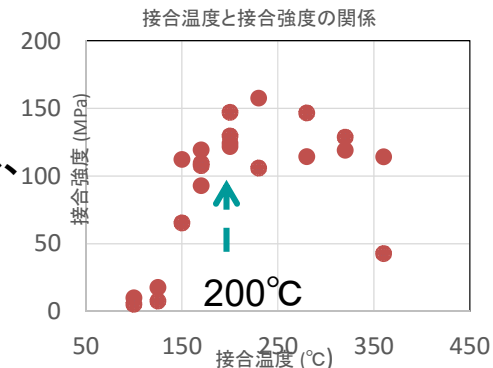
AlN圧電デバイスパッケージ構造の要件

- ・カンチレバー反り量の変化無い、低温接合が必要
(最終加熱工程270°Cで反り増大、150°Cでは変化無し、
目標:約200°C)
- ・信頼性確保のため気密封止構造と圧電デバイスからの出力取り出し構造が必要



低周波発電デバイス/パッケージング構造検討例

○ 封止接合部 ○ 電気接続部



Au-Au接合実験結果(温度vs接合強度)

Au-Au接合実験結果(温度vs封止リーク特性)

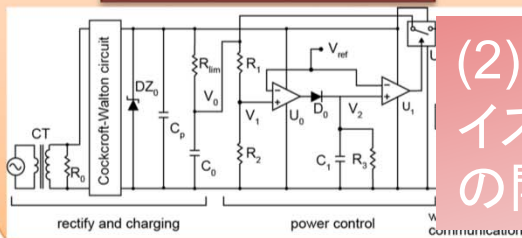
条件	1	2	3
接合温度(°C)	170	200	230
試料1	<6.0E-11	<6.0E-11	<6.0E-11
試料2	<6.0E-11	<6.0E-11	<6.0E-11
試料3	<6.0E-11	6.0E-06	<6.0E-11

JIS合格判定基準: $1 \sim 2 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

チップレベルの接合実験で、W to W接合にも適用可能な200°Cのプラズマ活性化低温Au-Au接合で、良好な接合強度、封止特性が得られた。

AIN-MEMS振動発電センサデバイス

(1) コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発(産総研)



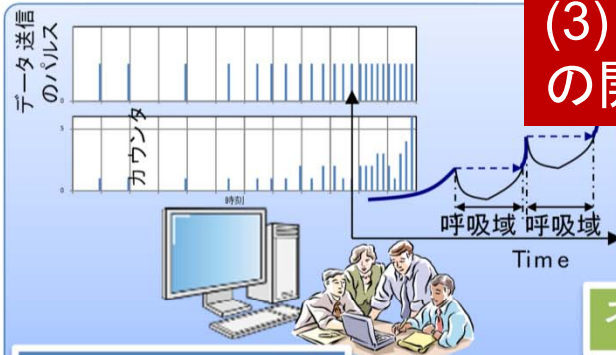
ウェハレベル集積化プロセス

(2) コアモニタリング用AIN圧電デバイスのウェハレベルパッケージ技術の開発(マイクロマシンセンター)

医療機関、地域冷暖房設備他



(3) コアモニタリング用センサ端末の開発(明星電気)



モニタリングシ

(5) コアモニタリングシステムの開発と実証(高砂熱学工業)

(4) コアモニタリング用ネットワークシステムの開発(沖電気工業)

無線親機

データ収集装置

構造的に複雑な環境下で通信の信頼性確保

クラウド

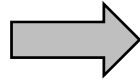
コアモニタリング研究体

～コアモニタリング用センサ端末の開発～

H26年度



センサ評価端末試作



H27年度



P型センサ端末
外形モデル

H28年度（端末の試作）



P型センサ試作端末



センサデータ
収集端末

H30年度（最終年度）



P型センサ端末

項目	端末仕様
通信距離	30m(見通し)
送信頻度	1時間に1度以上の通信
電源	振動自立発電
外形寸法	30φ、20mm
耐久性	実使用10年以上

P型センサ端末 開発試作

低周波振動センサ、高周波振動およびサーミスタ搭載して発電素子からのトリガで無線送信する端末を開発試作した。

取組⇒ 8KHzまでの高周波振動特性を振動シミュレーションにより伝達特性を確認し、モデル製作後 振動試験により伝達特性を確認した。

センサデータ収集端末 開発試作

P型センサ端末から送信された(ID,振動データ、表面温度)データを受信時刻を付加し、複数台のP型センサ端末のデータをまとめM型中継端末に送信するセンサデータ端末を開発試作した。

P型センサ端末 およびセンサデータ収集端末を開発したことにより
回転機器に取付けモニタリングの実証を開始できた。

H28年度 P型センサ端末試作 内観 チップアンテナ

電源部

振動発電量を補うためボタン電池を使用。最終では削減する

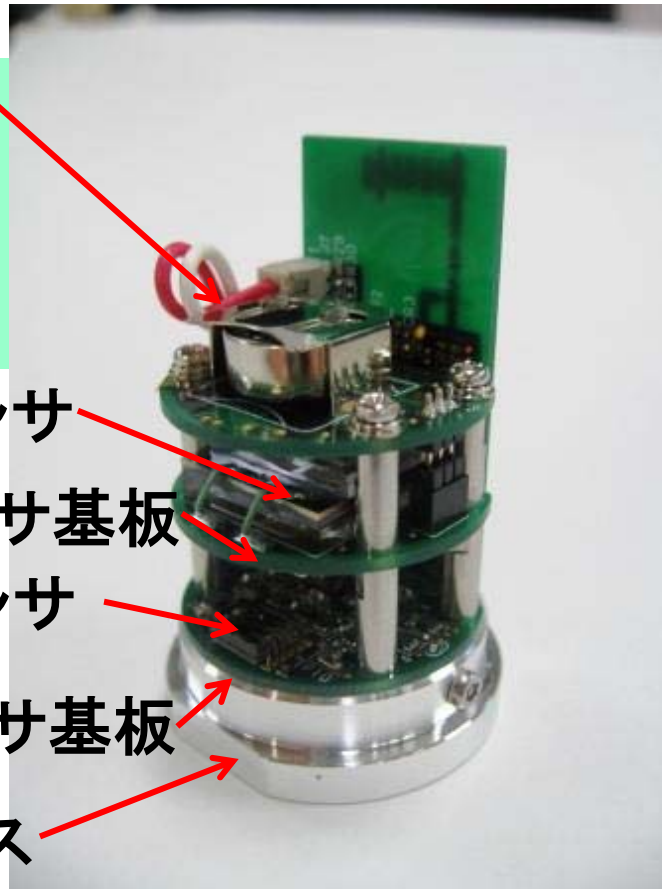
低周波センサ

低周波センサ基板

高周波センサ

高周波センサ基板

取付ベース



直径30mm、高さ50mm

内観 チップアンテナ



電波の飛びを優先してチップアンテナを最上位に配置。

通信距離を確認できたため基板背低化をすすめる。

920MHz無線部

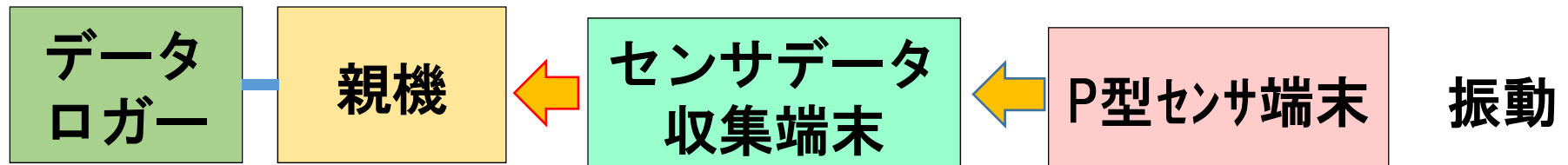
高周波計測するために取付ベース寸法を直径30mmとした。振動伝達特性を優先して高周波センサ基板をベース直接取り付けした。

【成果】

P型センサ端末とセンサデータ収集端末の試作開発実施して、基本動作の一つ低周波振動加速度変化を無線を通して測定できた。

920MHz同期通信

920MHz

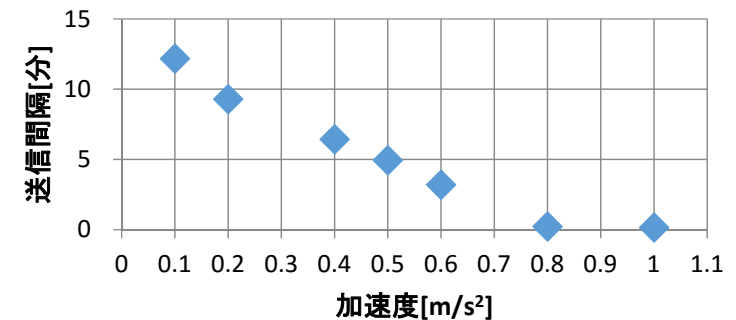


黄:無線
青:有線

振動加振器

加振試験環境

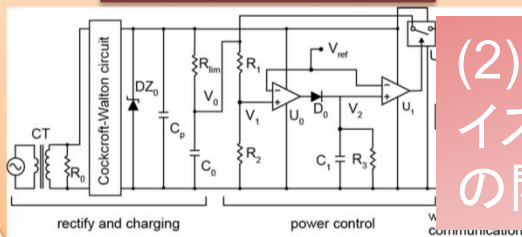
加振試験で取得したデータ



一般的な回転機器の正常振動範囲の0.1m/s²~1.0m/s²の範囲をモニターできている。(周波数換算)

AIN-MEMS振動発電センサデバイス

(1) コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発(産総研)



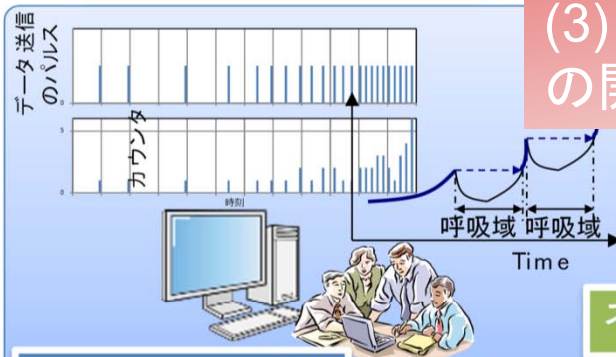
ウェハレベル集積化プロセス

(2) コアモニタリング用AIN圧電デバイスのウェハレベルパッケージ技術の開発(マイクロマシンセンター)

医療機関、地域冷暖房設備他



(3) コアモニタリング用センサ端末の開発(明星電気)



モニタリングシ

(5) コアモニタリングシステムの開発と実証(高砂熱学工業)

(4) コアモニタリング用ネットワークシステムの開発(沖電気工業)

無線親機

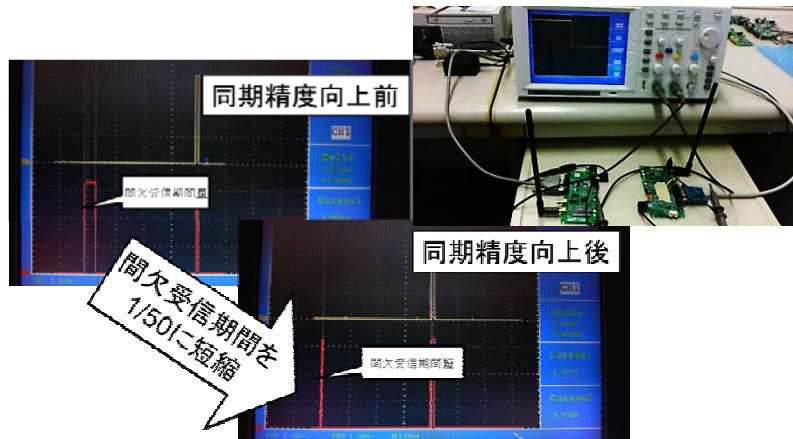
データ収集装置

構造的に複雑な環境下で通信の信頼性確保

クラウド

～コアモニタリング用ネットワークシステムの開発～

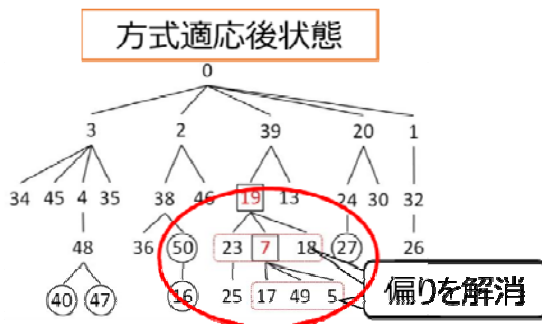
H26年度:時刻同期型省電力無線通
方式のパラメータ最適化



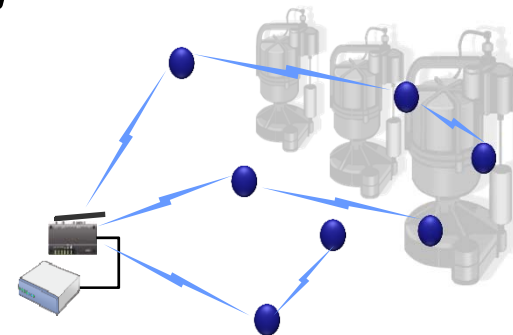
H27年度:時刻同期型省電力無線通信
方式のマルチホップ対応(M型端末試作)



H28年度:再送を伴わない衝突
回避制御方式の開発



H30年度:10年間稼動するM型中継機
の開発



■ モニタリングシステムの導入

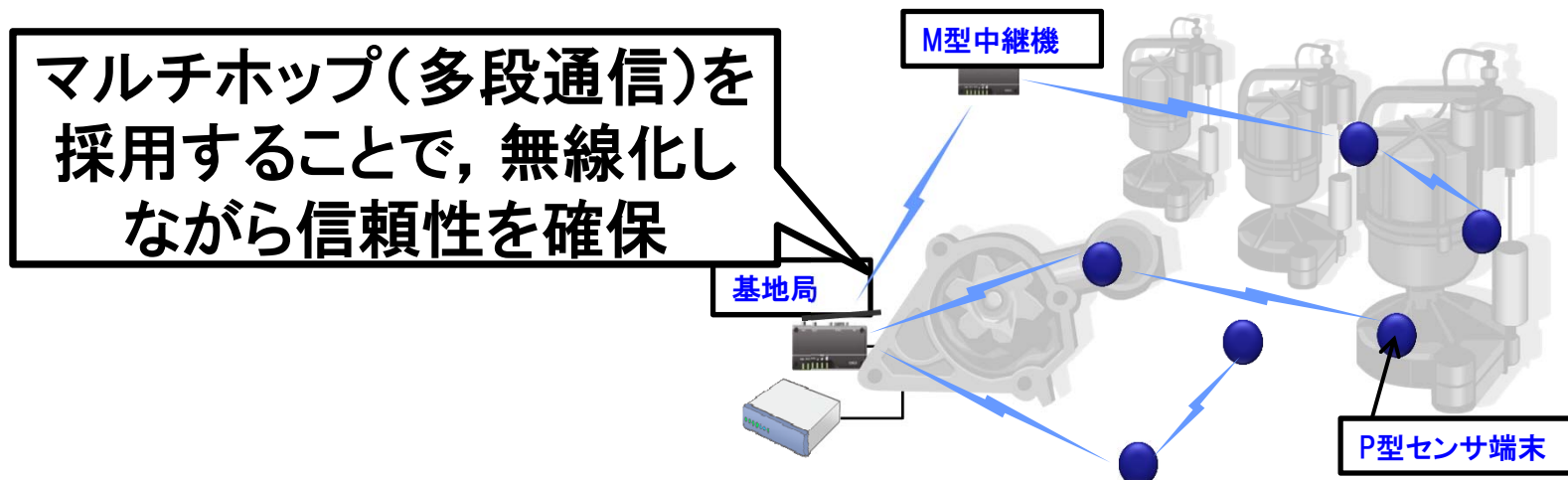
⇒システム導入コスト削減が課題

⇒ポンプ等の設置環境は構造的に複雑で遮蔽物が存在

■ 対策：マルチホップ無線化

- 電池利用で完全ケーブルレス

- マルチホップで障害物を回り込んで通信を継続

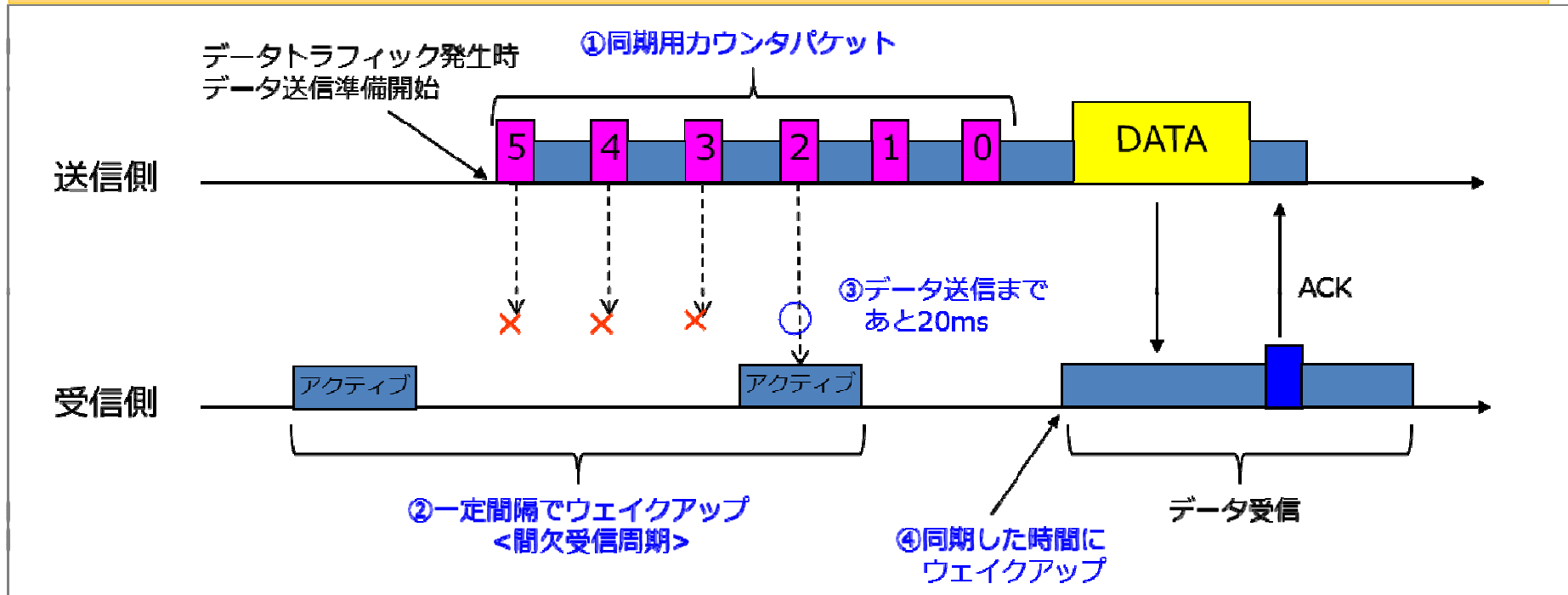


■ マルチホップ無線ネットワークの省電力化

● 時刻同期型省電力無線方式の開発

送信側が受信側のウェイクアップタイミングに同期してパケットを送信 ⇒ 受信側がスリープ動作可能となり省電力化

(平均消費電力 従来: $2500 \mu W$ → 本方式: $154 \mu W$)



■ マルチホップ無線ネットワークの省電力化

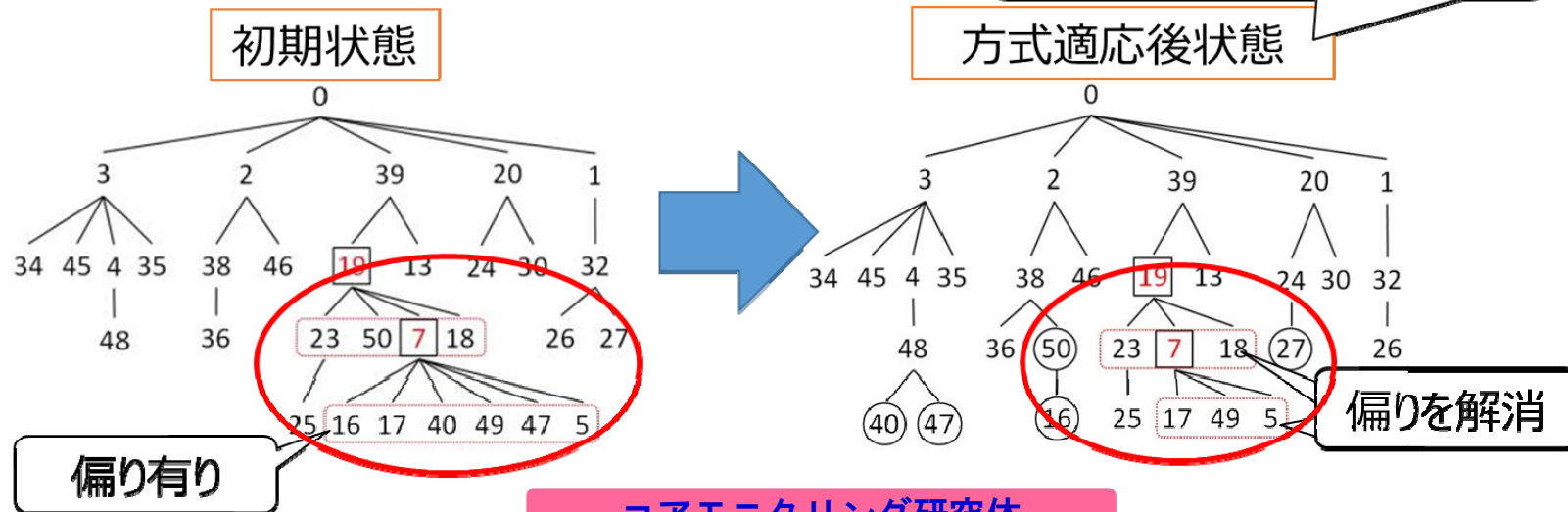
● 再送を伴わない衝突回避制御方式の開発

ノードの偏りを解消する方式を考案し効果(送信電力および衝突確率が減少)を確認した

■ 本方式の特徴

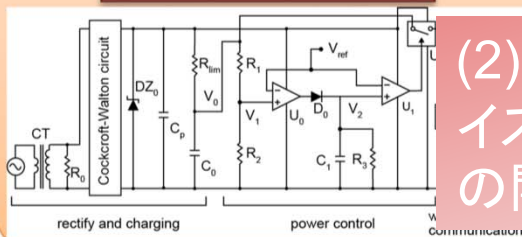
- ✓ ノード数が少なくても効果大
- ✓ 既存NWへ機能追加が容易

5分に1回程度の送信で・・・
送信電力 1/2
衝突発生確率 1/4



AIN-MEMS振動発電センサデバイス

(1) コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発(産総研)



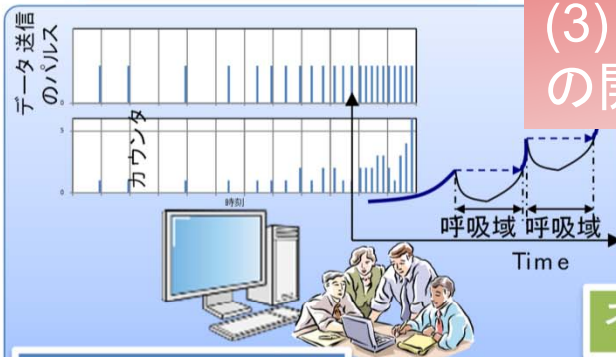
ウェハレベル集積化プロセス

(2) コアモニタリング用AIN圧電デバイスのウェハレベルパッケージ技術の開発(マイクロマシンセンター)

医療機関、地域冷暖房設備他



(3) コアモニタリング用センサ端末の開発(明星電気)



(4) コアモニタリング用ネットワークシステムの開発(沖電気工業)

(5) コアモニタリングシステムの開発と実証(高砂熱学工業)

モニタリングシ

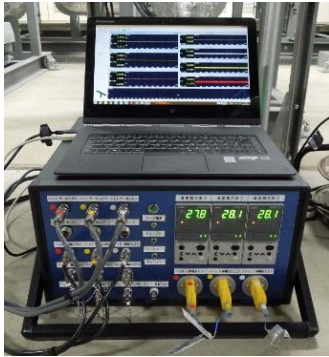
無線親機

データ収集装置

クラウド

構造的に複雑な環境下で通信の信頼性確保

H26年度：データのフィルタリング



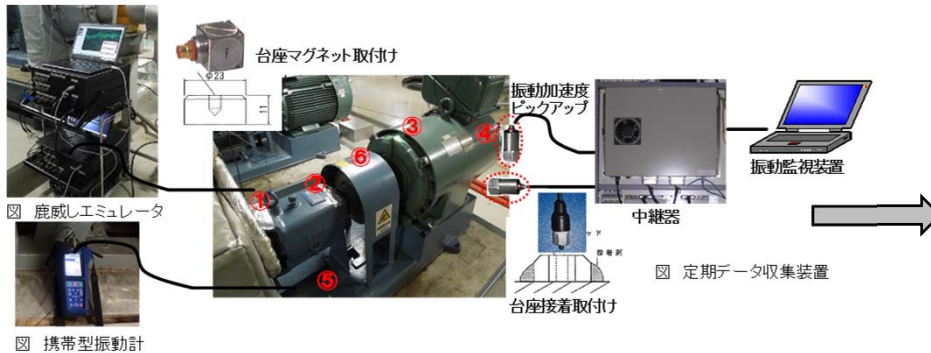
鹿威しセンサエミュ
レータの開発

H27年度：検知ロジックの開発



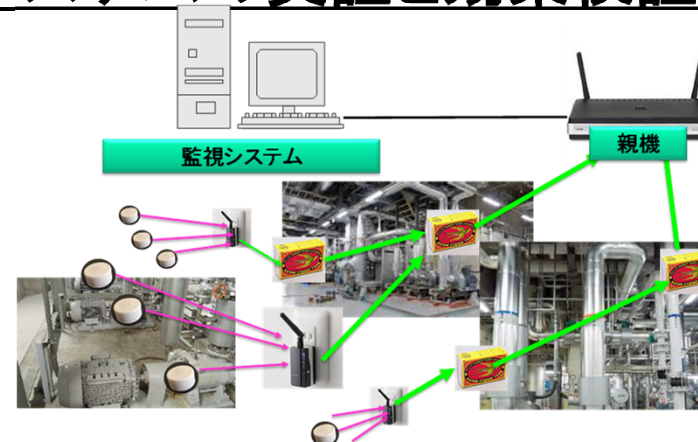
多ch鹿威しエミュ
レータによる振動
伝播の把握

H28年度：監視仕様の特定と試行



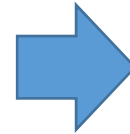
データ収集診断処理システム
のプロトタイプ構築

H30年度：鹿威し方式モニタリング
システムの実証と効果検証



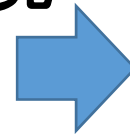
コアモニタリングシステムの開発

① 圧電振動発電センサデバイス
を用いた監視技術の開発



＜技術的課題＞
不連続な鹿威し方式データの
フィルタリングと
異常検知ロジック

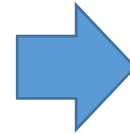
② 汎用モニタリングシステムの開発



＜技術的課題＞
簡便な初期設定で、
データ収集から異常検知、
余裕時間予測までを
シームレスに処理

コアモニタリングシステムの構築と実証

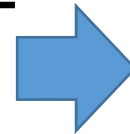
①顧客のBCP(Business Continuity Plan-事業継続計画)対応に合致



＜技術的課題＞

熱エネルギーの安定供給が求められる病院施設、
地域熱供給を対象とした
実証実験

②都市インフラの安全な維持管理



＜技術的課題＞

熱エネルギー供給の重要機器
(ポンプ)に加え、圧縮機など
の回転機器、配管、を対象に
安価な監視システムを提供

データ収集診断処理システムのプロトタイプ構築

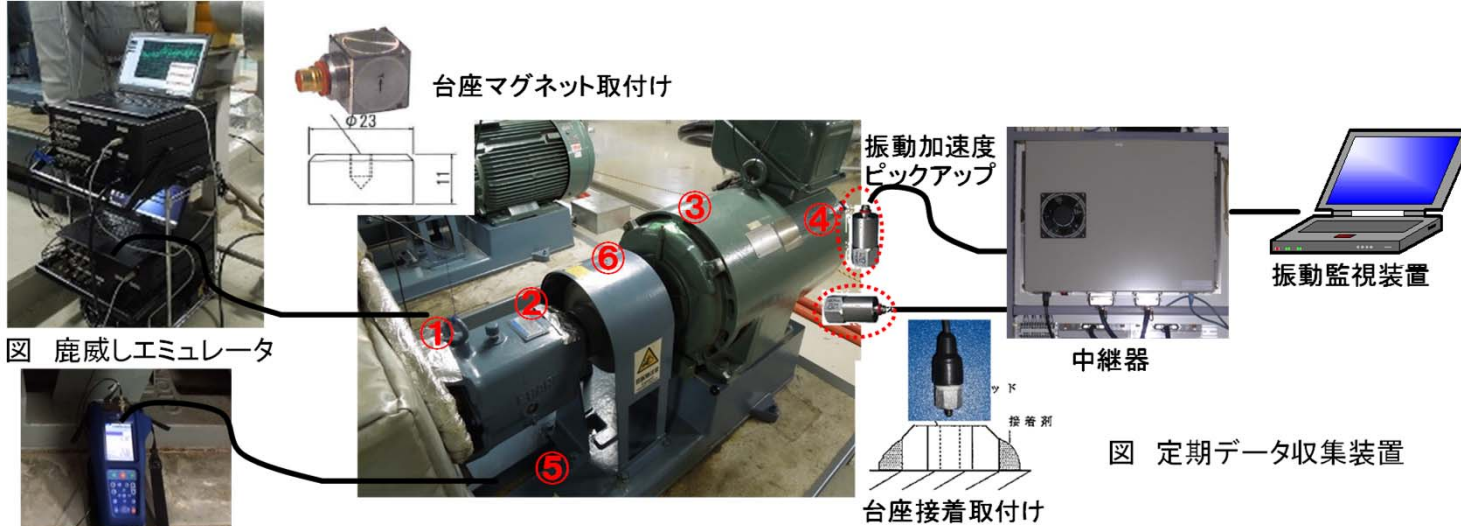
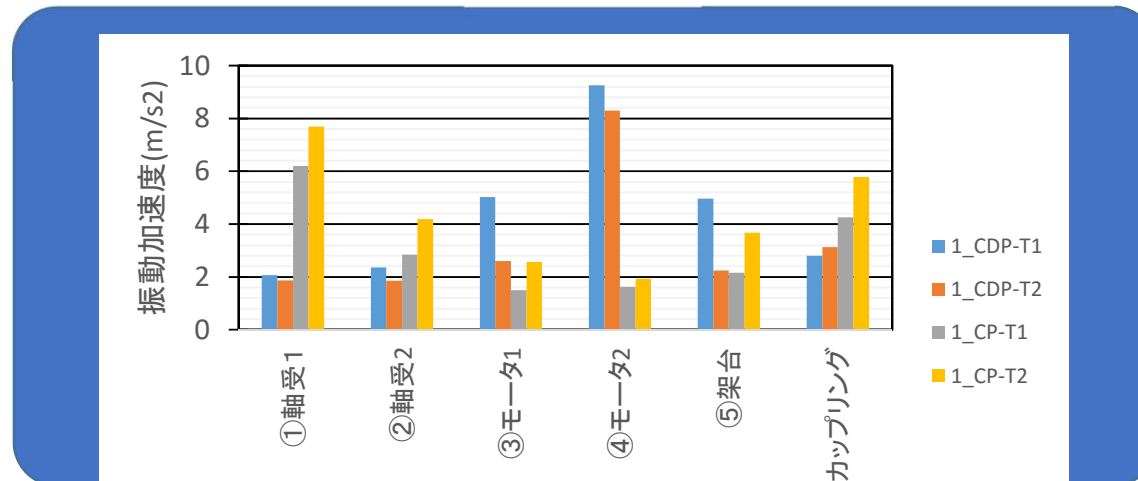


図 鹿威しエミュレータ



図 携帯型振動計

図 定期データ収集装置



大型ポンプ各所の振動データを収集⇒振動特性を把握、実証用プロトタイプを構築

コアモニタリングシステムを実稼動設備で実証

【平成26年度から実証試験施設】
病院施設内の機械室に分散する
中小型冷温水ポンプ



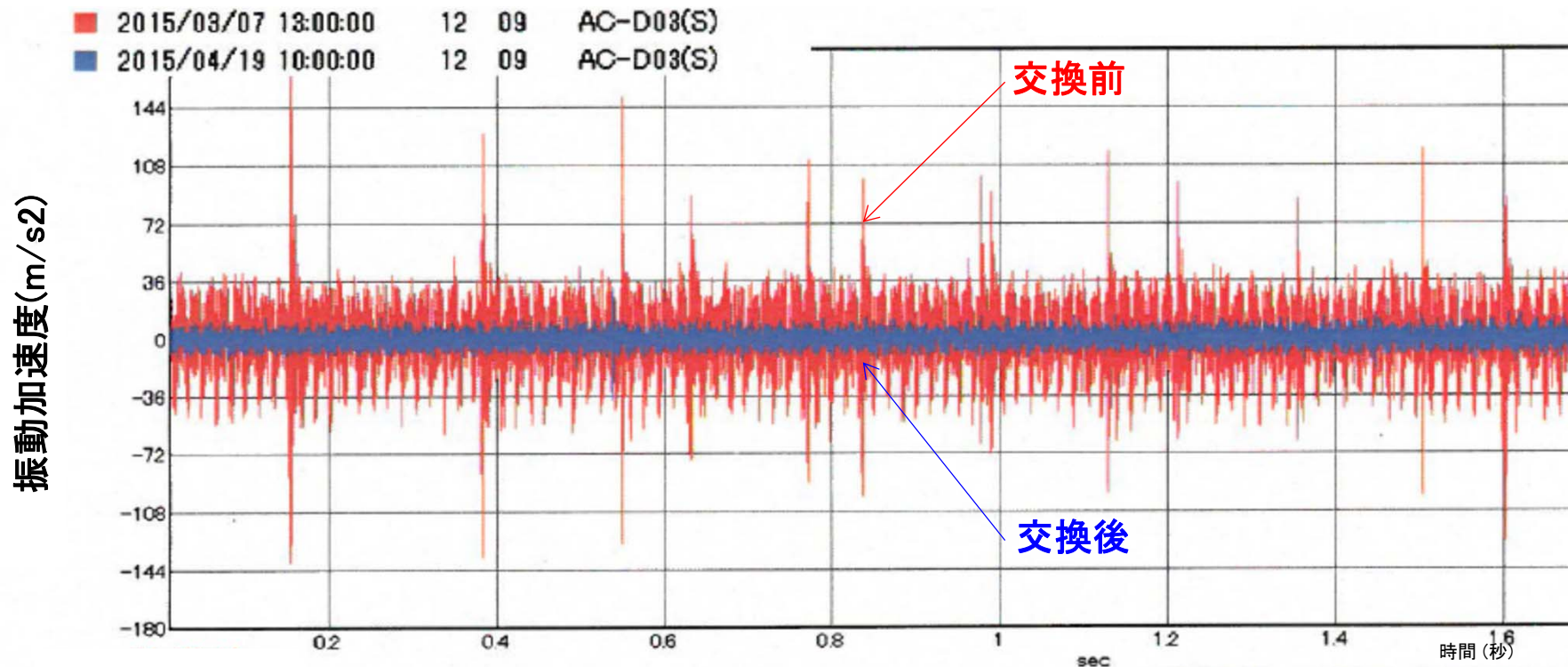
【平成27年度からは
地域熱供給施設での実証試験】



機械室に大型のポンプが多数設置

振動データに現れるポンプ異常の兆候

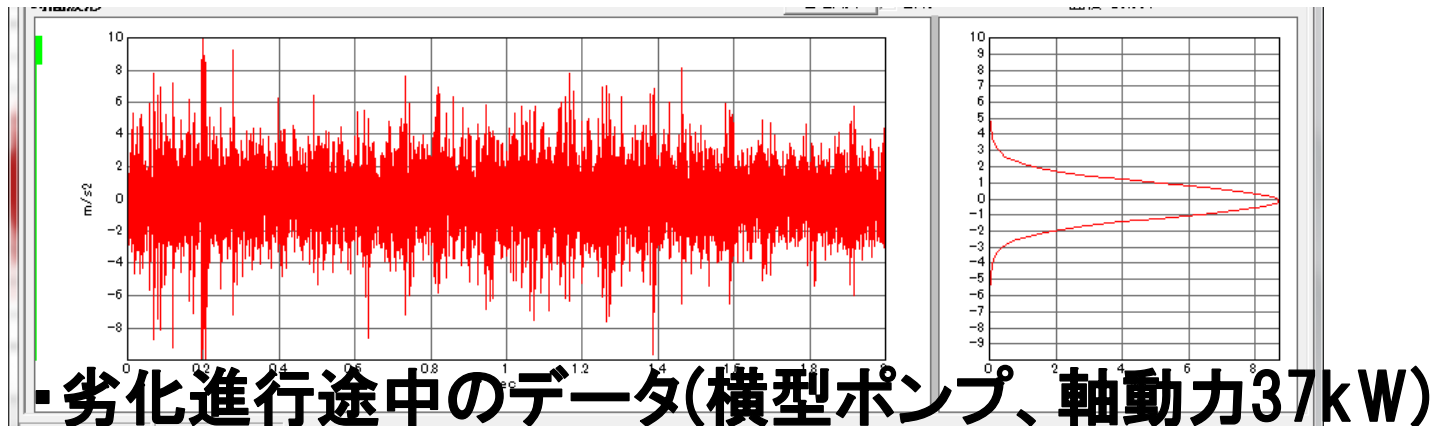
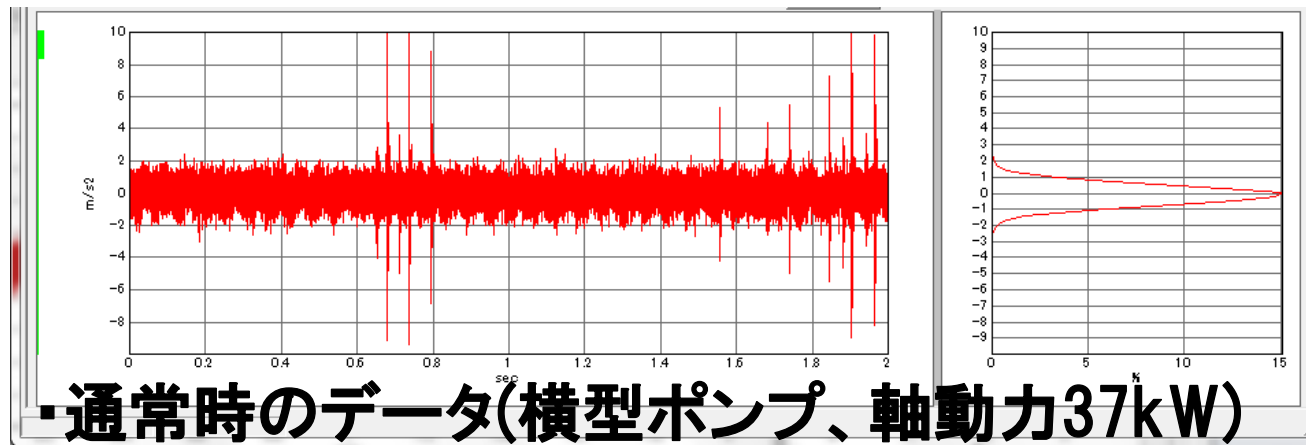
事例1: 軸受交換前(異常時)後(正常時)の変化



軸受交換前での高周波成分の定期的な衝撃波が交換後は減少
⇒プロトタイプでは高周波成分の振動センサを用いて軸受劣化の兆候検知

振動データに現れるポンプ異常の兆候

事例2:劣化の進行に伴う衝撃波の変化



劣化の進行に伴い、衝撃波の発生頻度と振幅が増加
⇒プロトタイプでは鹿威し方式データの時間監視で劣化の一次診断が見える化

まとめ

実証現場で実験が可能なプロトタイプ端末／ネットワークシステムの試作が完了

(1) コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発(産総研)

(1) 必要性能を満たしうるScAINデバイス製造プロセスと、専用の高効率・低消費電力回路とを開発

(2) コアモニタリング用AIN圧電デバイスのウェハレベルパッケージ技術の開発(マイクロマシンセンター)

(2) ウェハレベルパッケージ(W2W)に対応した圧電デバイスプロセス及び低温実装技術を開発

(3) コアモニタリング用センサ端末の開発(明星電気)

(3) フットプリント30φのプロトタイプP型センサ端末を実現(基本動作を確認)

(4) コアモニタリング用ネットワークシステムの開発(沖電気工業)

(4) 応用環境に適した省電力マルチホップネットワーク(中継)技術(“再送を伴わない衝突回避方式”)を開発

(5) コアモニタリングシステムの開発と実証(高砂熱学工業)

(5) データ収集診断処理システムのプロトタイプを構築