

地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた  
開発実証に係る工場分野におけるローカル5G等の  
技術的条件等に関する調査検討の請負  
(MR技術を活用した遠隔作業支援の実現)

報告書

---

概要版

2021年3月

トヨタ自動車株式会社  
(ローカル5G×MR実証実験コンソーシアム)

---

---

# 実証概要

# 地域課題の解決

MRシステムの活用を推進し、地域製造業が抱える課題の解決に資する。

地域製造業においては、人手不足解消(生産効率化・省人化)及び多様なニーズ(多品種少量生産)へ対応することの競争力強化が求められている。地域製造業の課題を以下に示す。

- ① ものづくりの現場においては、熟練技工人等のスキルを活用する等、属人的な力に頼っていた現状がある。現在、技工人の高齢化や後進育成がなかなか進まない状況により、後継者不在問題や人手不足が深刻化している。
- ② 一般に、平日日中帯等の工場稼働中には、現場の改善活動を行うことはできない。そのため、稼働していない休日に出勤して対応する等、生産現場における制約により、工場における働き方改革が進んでいない。
- ③ 消費者ニーズの多様化により、異分野を複合した商品開発や、多品種少量生産に対応していく必要があり、ICTを活用し生産準備工程や開発工程を効率化する必要に迫られている。
- ④ 新型コロナウイルスの流行に伴い、製造工場等への出張に制限が発生し、関係者が集合した形式で各種検討・実作業を進めることが困難となった。そのため、検討・実作業の品質が低下し、業務のやり直しが増加している。

このような状況を踏まえ、トヨタ自動車株式会社(以下、当社という)は、製造現場におけるICT、特にMRシステムの活用を推進し、工場現場における業務の改善活動を行っている。

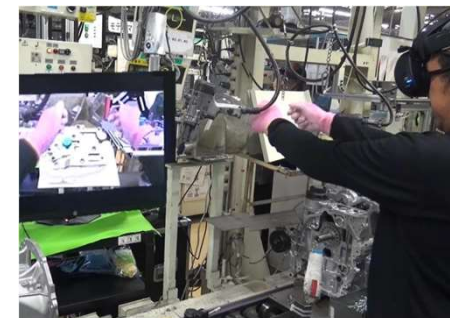
# 当社におけるMRシステムの活用

工場現場でのMRシステム活用における問題を解決するために、ローカル5Gと組み合わせた実証を行う。

MRシステムを工場現場で活用することで、安全な作業の確立以外に、従来、設備等の現物を製作した後にしか評価確認できなかった作業性・視認性、保全性等の検証を、作業者自らが現物製作前の早いタイミングで実施できるようになった(いつでも、どこでも、だれでも、短時間で)。これにより、設計や製作のやり直しの抑止とともに、作業期間・工数・コスト等の削減を図ることができている。

一方で、MRシステムの工場現場における活用を推進するために、依然として以下の問題を認識している。

工場現場におけるMRシステムの活用



## 工場活用時の問題

HMD装着者の安全確保のために、HMDとサーバを接続する光ファイバケーブルを複数人で取り回す必要がある。

HMDの光ファイバケーブル長に限界があり、移動可能範囲や検証可能範囲が制限されている。

MRシステムを都度移設して利用しなければならず、準備・撤収に時間がかかる。

工場現場には高精細・大容量の映像データをやり取りするための十分な無線ネットワーク環境(範囲とスピード)が整備されていない。

## 問題解決のための検討項目

MRシステムの無線化

MRシステム導入及び活用に係る運用プロセスの見直し

工場で高精細・大容量の映像データを遅延なくやり取りするネットワークの検討

当社では、これらの問題を総合的に解決するため、MRシステムと超高速・超低遅延・多数同時接続という特徴を持つローカル5Gを組み合わせた実証が必要になると考えている。

# 本調査検討の実施内容

本調査検討では、工場現場へ課題解決システムを導入するにあたっての技術課題の解決に資するための検討と、課題解決システムを導入した際の気づき及び直面した問題を踏まえた課題の抽出、今後のローカル5Gの在り方を見据えた検討を行う。

前頁までの内容を踏まえ、本実証において検討すべき課題を以下に示す。

## 工場現場へのMRシステム及びローカル5G導入を実現するための技術課題

- ✓ ローカル5Gを用いてMRシステムとHMD間における高精細・大容量の映像データ及びMR合成映像データをネットワーク上でやり取りする仕組みの構築。
- ✓ 上記を遅延なくやり取りするための映像圧縮・伸長技術等の実現。
- ✓ HMD装着者の移動範囲並びに検証可能範囲を拡大するための、HMD装着者が単独で作業可能なハードウェア構成等の実現。
- ✓ 屋内・工場現場においてMRシステムを活用するに当たり求められる、ローカル5Gの電波伝搬特性や性能の実現。

また課題解決システムを実際に工場内に構築した際の気づき及び直面した問題を踏まえた課題の抽出や、今後のローカル5Gの在り方を見据え、以下の観点でも検討を実施する。

## 課題解決システム(ローカル5G+MRシステム)を構築した際の制度面・運用面の検討

- ✓ 課題解決システムの工場現場導入に必要な、制度や運用プロセスの課題解決に関する検討。
- ✓ 今後のMRシステム及びローカル5G普及展開に関する検討。

# ユースケース

実証にあたり、ユースケース候補の中から、「生産設備(初号機)製作途中の不具合確認」、「生産設備製作時の配線作業遠隔支援」という2つのユースケースを選定した。

製造業が抱える地域課題の解決に資することを旨とし、本実証においては、複数のMRシステムユースケース候補の中から2つのユースケースを選定し、実証にあたった。

|          | ユースケース1   | ユースケース2   |
|----------|---|---|
| 名称       | 生産設備(初号機)製作途中の不具合確認   | 生産設備製作時の配線作業遠隔支援  |
| 説明       | 製作設備横にMRシステムで設備を再現し、作業員自らが現実と比較しながら確認する。  | 製作設備の組立作業時にMRシステムで組付部品を再現し、他者が作業姿勢・配線方法等を遠隔から指導する。  |
| 期待効果     | ローカル5Gで無線化されたMRシステムを用いることで、従来よりも現場作業員の移動範囲や動作自由度が広がり、実際の設備製作前に、不具合確認作業の効率化や安全性の向上とともに実機製作後のやり直し削減が期待できる。  | ローカル5Gで無線化されたMRシステムを用いることで、熟練技術者が遠隔から、現場作業員に作業姿勢・組立方法等を指導可能となり、工場現場に足を運ぶ手間や時間、移動費用の削減が期待できる。                    |
| イメージ     |  <p>設備の結合部カバーに隙</p>  | <p>作業性の確認<br/>(作業姿勢指示)</p>  |
| 該当する地域課題 | <ul style="list-style-type: none"> <li>① 工場における後継者不在問題・人手不足の解消</li> <li>② 工場現場における働き方改革(現場の改善活動)の実施</li> <li>③ 多品種少量生産に対応するための、生産準備工程や開発工程の効率化</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>④ 遠隔地からの各種検討・実作業支援</li> </ul>  |

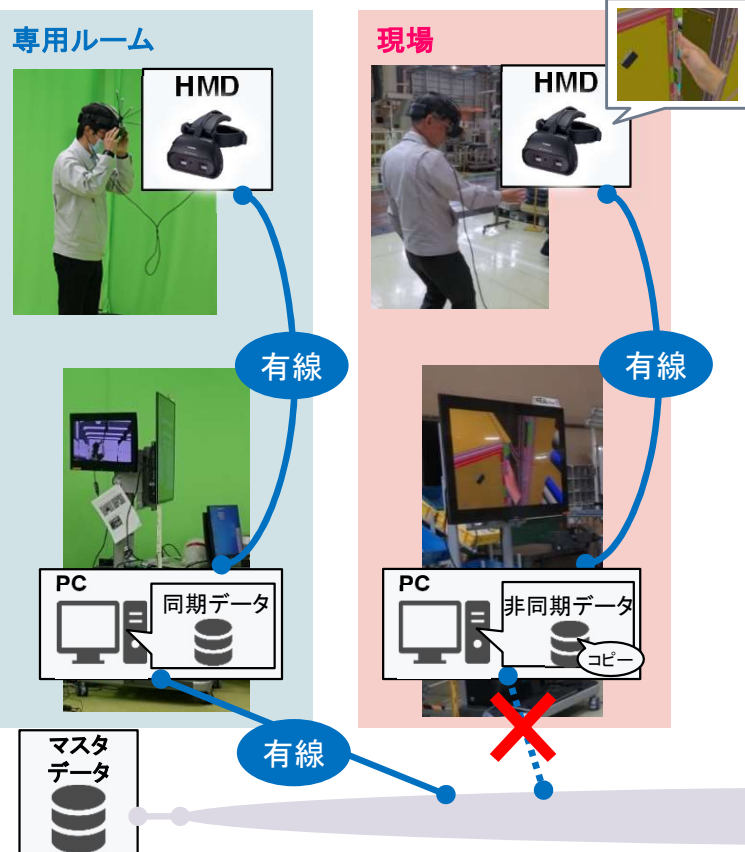


# MRシステムの目指す姿と本実証における構成

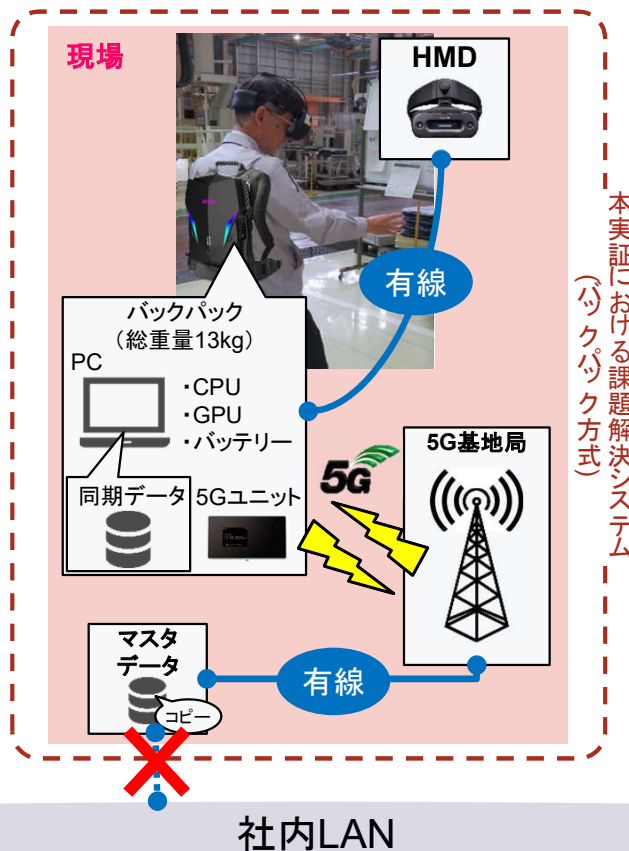
目指す姿(ToBe)の実現を見据え、課題抽出及び解決策を検討するための課題解決システムを構築し、AsIs(現状)とCanBe(本実証における課題解決システム)の比較検証を実施した。

現状(AsIs)は、専用ルームあるいは工場現場でMRシステムを利用する際、HMDとPCサーバが有線で接続されている状態である。当社としては、目指す姿(ToBe)のように、HMDに5Gユニットを搭載し、完全無線化したシステムの実現を期待しているが、本実証実施時点では技術的な不確定要素があり、短期的にシステム開発することが難しく、目指す姿を用いた実証は困難であった。そのため、実証環境として、PCサーバとCADデータのやり取り部分を無線化したバックパック方式による課題解決システム(CanBe)を構築し、実証にあたった。またあわせて、MRシステムが実現すべき機能・性能を検証するための疑似HMD方式のシステムも構築し、実証にあたっている。

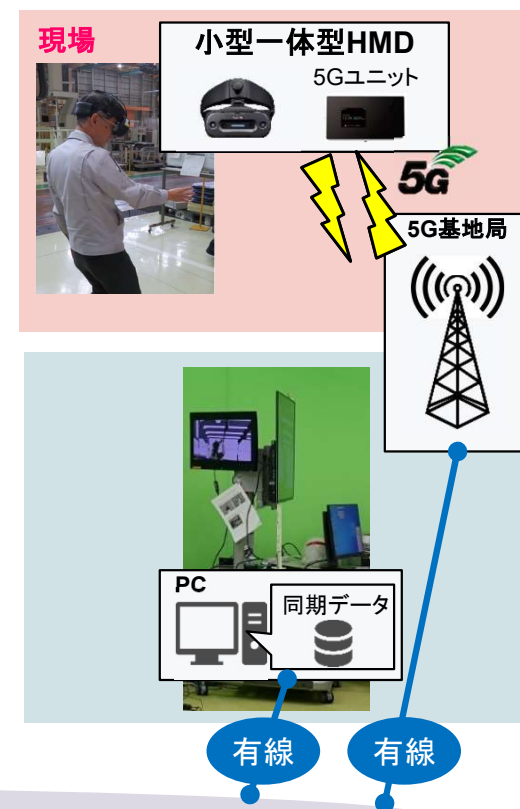
現在(AsIs)



2021年時点(CanBe)

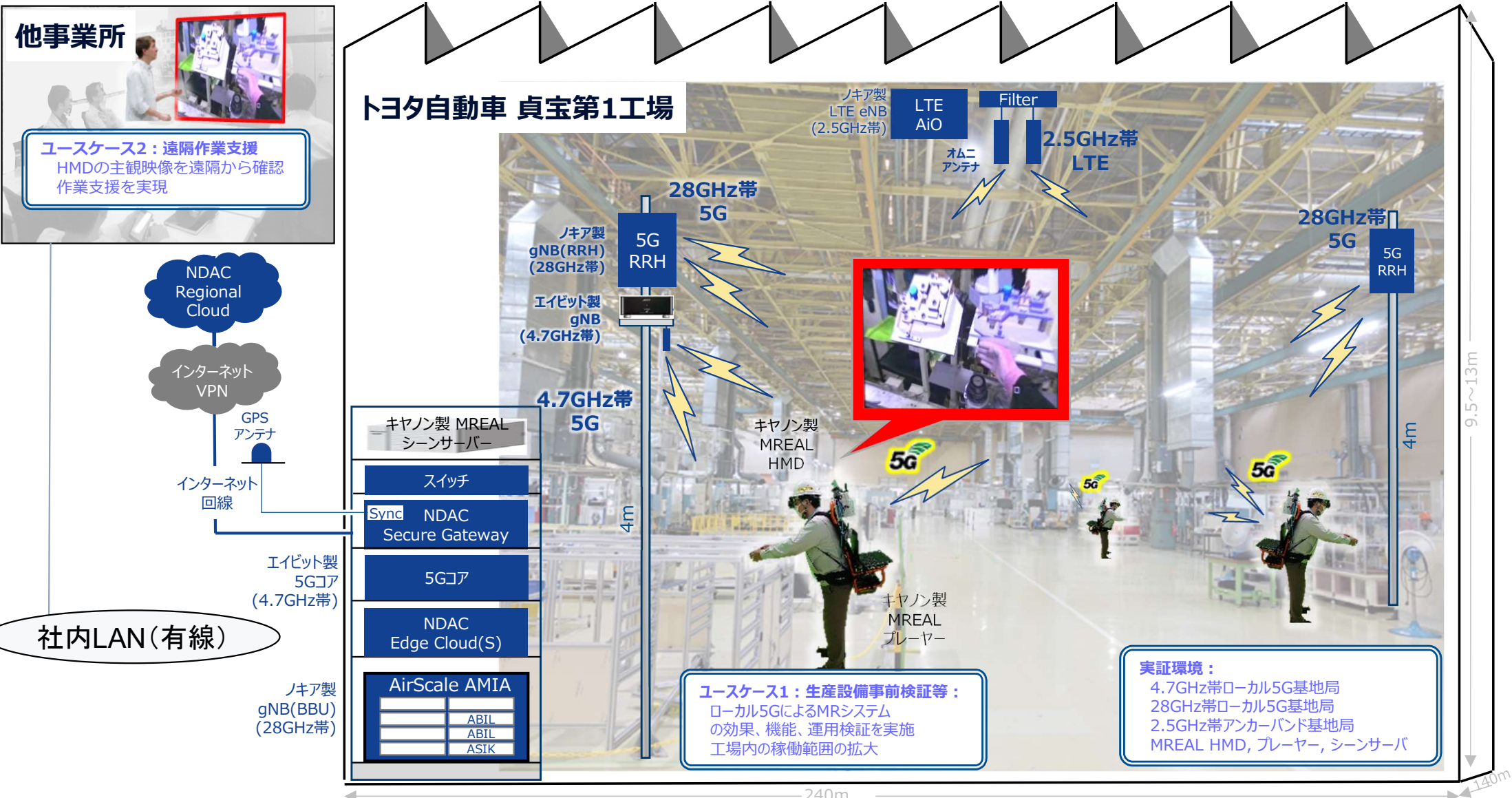


目指す姿(ToBe)



# システム全体

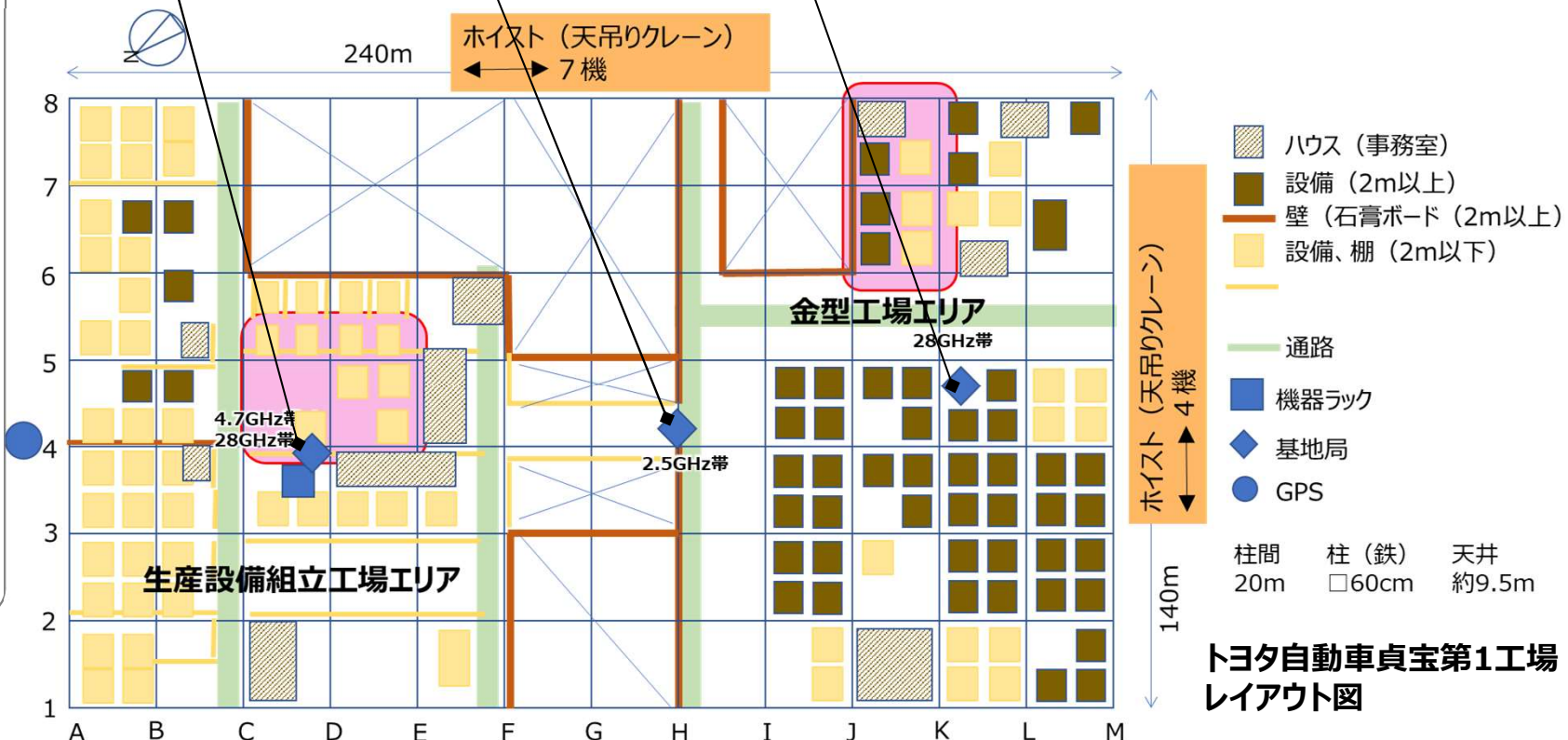
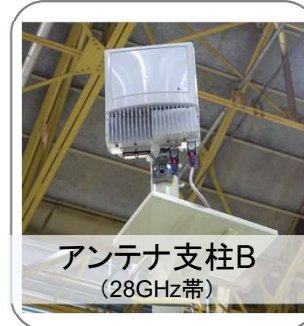
トヨタ自動車貞宝第1工場内に課題解決システムを構築した。  
また、ローカル5G周波数帯として4.7GHz帯と28GHz帯を採用している。





# 工場内レイアウト

工場内二箇所のアンテナ支柱(高さ4m)に対し、  
アンテナ支柱Aには4.7GHz帯基地局及び28GHz帯基地局、アンテナ支柱Bには28GHz帯基地局を設置した。



# 使用機器について

4.7GHz帯にエイビット社、28GHz帯にノキア社製のローカル5Gシステムを採用した。  
また、MRシステムとしてキヤノン社製MREALを採用した。

| 項目       | 4.7GHz帯ローカル5Gシステム   | 28GHz帯ローカル5Gシステム  |
|----------|---|---|
| 概要       | エイビット社製 4.7GHz帯ローカル5G PoCシステムを利用する。SA方式・非同期運用の5Gシステムとなる。  | ノキア社製 Nokia Digital Automation Cloudサービス(以下「NDAC」という。)にて28GHz帯ローカル5Gシステムを利用する。NSA方式・同期運用のシステムとなり、アンカーとして自営BWA基地局を設置する。                                  |
| 基地局      | エイビット社製AU-500gNBを使用。ローカル5Gの4.7GHz帯の無線通信が可能。帯域幅が100MHzのため、高速通信が可能。<br><br>【数量】 1局(独自実証時は2局設置)<br>【設置形態】 固定       | ノキア社製AWEUAを使用。ローカル5Gの28GHz帯の無線通信が可能。帯域幅が400MHzと広いため、超高速通信が可能。<br><br>【数量】 2局<br>【設置形態】 固定   |
| 端末       | エイビット社製AU-500gNBを使用。ローカル5Gの4.7GHz帯の無線通信が可能。Ethernetポートを有し課題解決検証に向けたアプリケーションとの接続が容易。<br><br>【数量】 4台<br>【設置形態】 可搬 | シャープ社製ローカル5G対応無線ルータを使用。ローカル5Gの28GHz帯及び自営BWAの2.5GHz帯の無線通信が可能。Wi-Fi 接続、USB 接続 機能 並びに Ethernetポートを有し課題解決検証に向けたアプリケーションとの接続が容易。<br><br>【数量】 4台<br>【設置形態】 可搬 |
| コアネットワーク | エイビット社製 AU-500 5GCを使用。SA方式の5GC機能を提供。<br><br>【数量】 1台<br>【設置形態】固定   | ノキア社製 NDACを使用。NSA方式に対応したEPC機能を提供。クラウドとの通信断に備えエッジサーバにて機能代用可能な構成を取る。<br><br>【数量】 1サービス(NDAC)、1台(エッジサーバ)<br>【設置形態】 固定                                      |

| 項目                 | MRシステム  |
|--------------------|---|
| 概要                 | キヤノン社製MRシステム、MREALを使用。ビデオスルータイプのHMDにより現実空間と仮想空間を融合するMR映像を体験することが可能。仮想の設備を現実の設備と理解して実際と同じような作業検証ができる。<br><br>【数量】1セット<br>【設置形態】可搬  |
| ヘッドマウントディスプレイ(HMD) | 製品名: MREAL S1<br>表示解像度: 約3200 × 1200<br>(左右のディスプレイそれぞれに1600 × 1200映像を表示)<br>リフレッシュレート: 約120Hz<br>表示パネルの駆動周波数。撮像カメラとCGのフレームレートは60fps<br>撮像解像度: 約 4800 × 1984<br>重量: 約338g<br>(MREAL Display本体、およびヘッドマウントユニット)<br>動作範囲: 約10m<br>(インターフェースケーブルの長さ) |
| プレーヤー・シーンサーバー推奨環境  | CPU: ベースクロック 3.9GHz以上、8コア以上<br>グラフィックカード: NVIDIA Quadro RTX5000相当<br>メモリ: 32Gbyte以上   |
| タブレットプレーヤー推奨環境     | 製品名: Microsoft Surface Pro 4  |



---

# 課題解決システムの実証



# ユースケースに基づくローカル5Gの性能目標

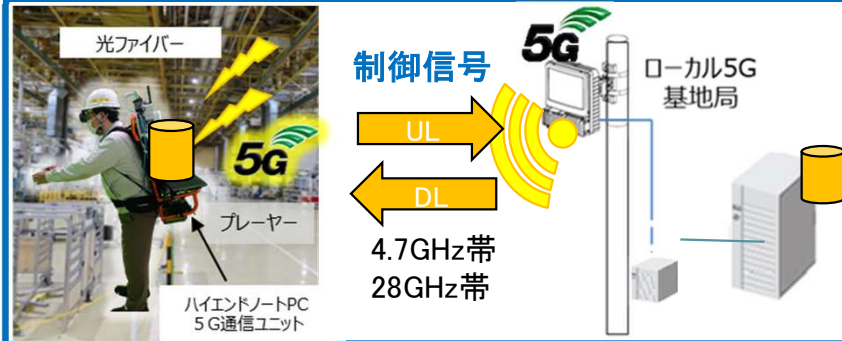
効果・運用検証は検討品質の向上や運用の効率化、機能検証はローカル5G性能把握を目標に実証を行った。

## 無線化への期待

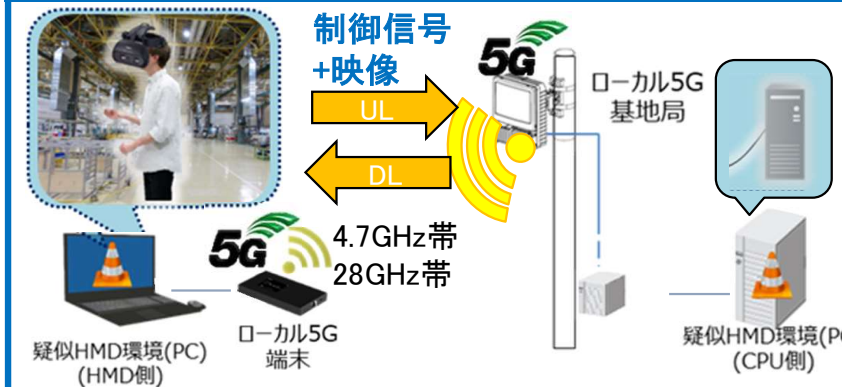
いつでも  
どこでも  
誰でも  
最短時間で

HMDでの  
表示性能の  
低下を最小に

### ①バックパック方式を用いた実務ユースケースに基づく実証 (CanBe)



### ②目指す姿(ToBe)の実現に向けた疑似HMD方式による事前技術検証



### 性能評価項目(目標)

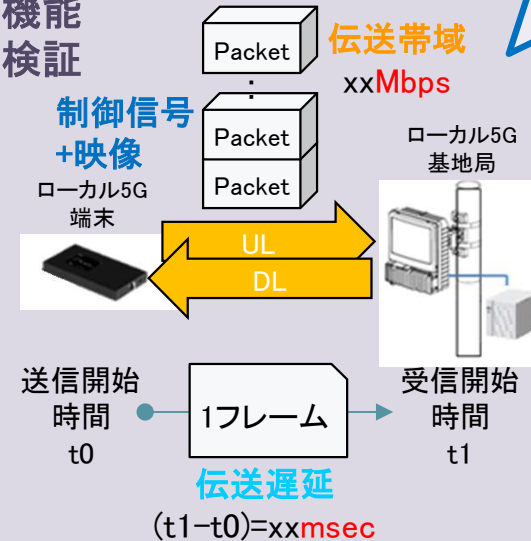
#### 効果検証

- ・連続使用可能時間 (30分以上)
- ・検討品質(やり直しゼロ)

#### 運用検証

- ・運用人員(1名)
- ・現地準備の片付け時間 (10分)

#### 機能検証



#### ①制御信号伝送の性能目標

伝送帯域  
UL 数十Mbps  
DL 数十Mbps

伝送遅延  
数十msec程度

#### ②制御+映像伝送の性能目標

伝送帯域  
(注: データ圧縮時)  
UL 約550Mbps  
DL 約350Mbps

伝送遅延  
17msec以下  
(注: 60fps時)

#### 効果検証

MRシステム利用する「設計者」「現場作業者」「設備製作者」を対象に実証実施

#### 運用検証

MRシステム利用を支える「MR技術担当者」「MR補助者」を対象に実証実施



# 課題解決システムの実証：効果検証

課題解決システムが、生産設備の製作における効率化や安全性の向上に寄与することを確認できた。  
一方で、新たな課題も確認した。

| ユースケース                     | 検証項目 | 最終目標      | 検証結果 ※             | 補記   |   |
|----------------------------|------|-----------|--------------------|--|---|
| (1)<br>生産設備(初号機)製作途中の不具合確認 | 安全   | 安全性       | 向上<br>／低下          | △<br>光ケーブル躓きの危険が解消され、足元の床を気にせずに確認作業が実施できるようになった。<br>一方、バックパックが重い(約13kg)ため屈伸が必要な下部の確認でバランスを崩す等のリスクを感じた。また、MRシステムを装着するとヘルメットをしっかりと被ることができず、安全性は確保されていない。 |   |
|                            | 品質   | 検討品質      | 作業性、視認性、保安全性やり直しゼロ | 向上   | ○<br>無線化によって現場で簡単に生産設備の3Dデータ入れ替えが可能になり、様々な検討が実施でき漏れがなくなった                           |
|                            |      | 移動可能範囲    | 制限なし               | 向上(10m⇒制限なし)<br>／低下  | △<br>ケーブル取り回しの制約がなくなり、足元の床を気にせずに作業を実施できるようになった。一方、大きなバックパックで背中が固定、作業姿勢が制限されることがあった。 |
|                            | コスト  | 連続使用可能時間  | 30分                | 低下(30分⇒20分)  | △<br>バックパックが重い(約13kg)ため連続作業が困難になり、1回当たりの作業時間に20分の上限を設けた。                            |
|                            |      | 人数        | 3名                 | 変化なし(3名⇒3名)  | ○<br>-  |
| (2)<br>生産設備製作時の配線作業遠隔支援    | 品質   | 検討品質      | 向上                 | ○<br>熟練技術者による的確な遠隔支援により、検討漏れがなくなり品質が向上した。遠隔支援者が客観視の映像を見ることができれば、更なる品質の向上に期待できる。  |   |
|                            |      | 映像品質(遠隔)  | 有線並                | 未達   | ×<br>無線通信の不安定さにより遅延・コマ落ち等、映像品質が落ちることがあった。   |
|                            | コスト  | 移動時間・出張費用 | 不要                 | 不要   | ○<br>遠隔支援により、熟練技術者が現地に移動する時間・交通費を削減することができる。  |
|                            |      | 作業時間      | 8H                 | 減少(12H⇒想定8H)   | ○<br>図面から3Dデータでの確認作業に置き換わり、現物が無くてもMRで重ねて/並べて確認できると作業イメージが湧く等、作業効率が向上した。             |
|                            |      | 人数        | 2名+遠隔1名            | 減少(3名⇒2名+遠隔1名)   | ○<br>課題解決システムの活用によって遠隔から支援できる目途が立った。  |

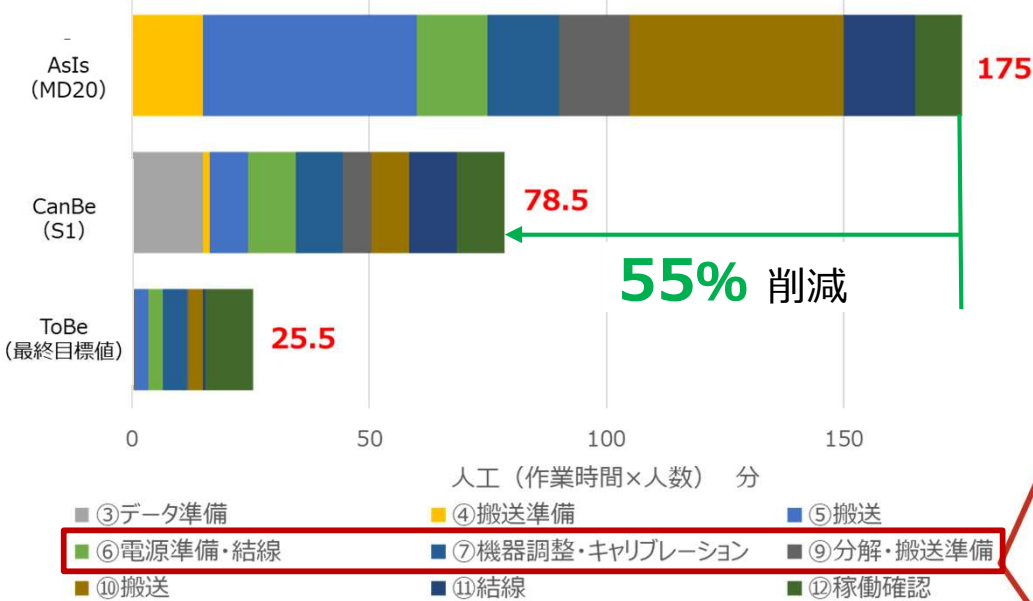
※実証の検証結果を抜粋

- ✓ 本実証(CanBe)を通じて、課題解決システムは生産設備の製作における現場作業者の安全性向上や作業効率化(コスト削減)を確認できた。また、熟練技術者による遠隔指導を実施できたことから、遠隔地にある工場への移動時間や出張費用の削減効果も期待できる。
- ✓ バックパック方式からさらに小型一体型ゴーグルのみでMR活用ができるようになれば、本実証で確認できた課題解決につながり、安全性や品質の向上、作業効率化及びコスト削減に一層の効果が期待できる。

# 課題解決システムの実証：運用検証

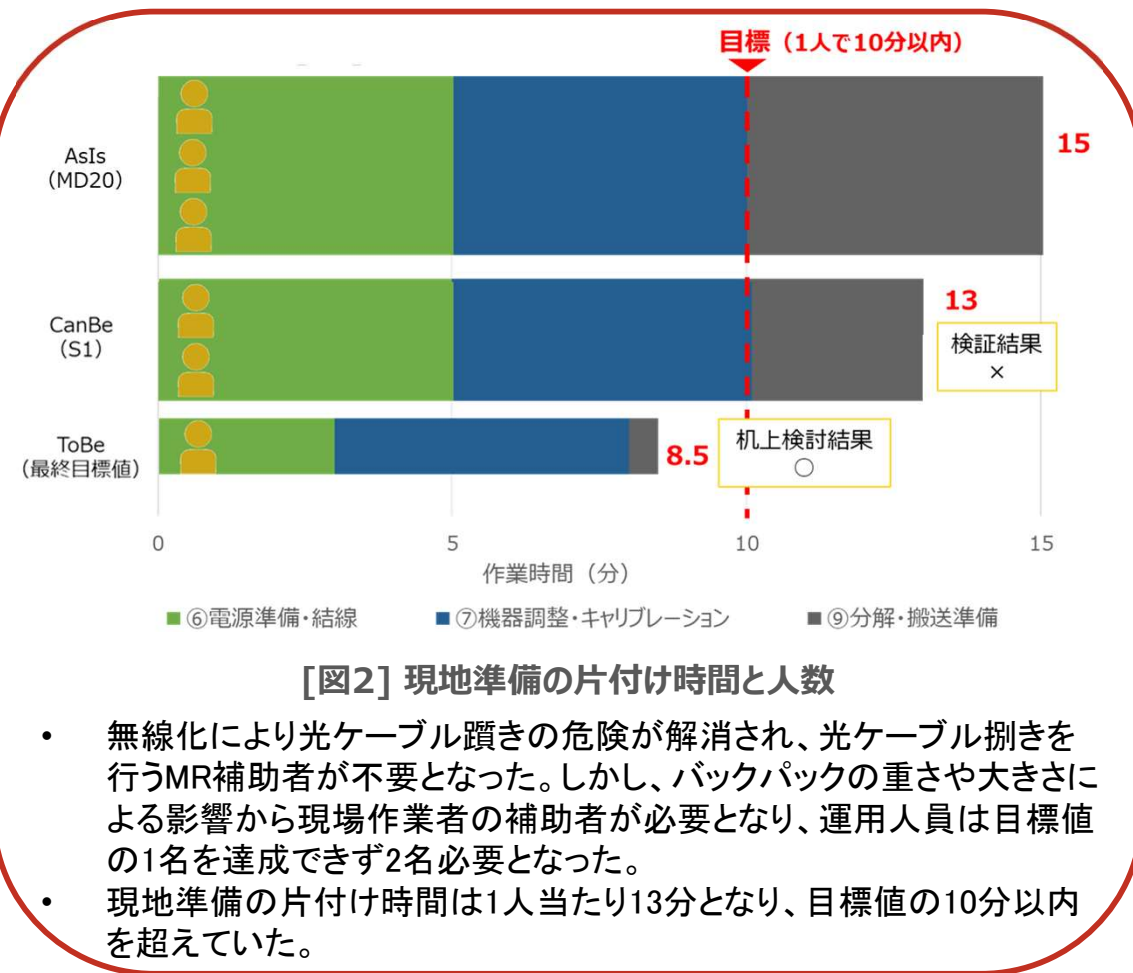
課題解決システムが、運用に係る業務効率化やコスト削減、安全性の向上に寄与することを確認できた。  
一方で、新たな課題も確認した。

準備・片付けに係る運用業務が効率化され、  
55%の人工削減効果があることが明らかになった



【図1】 準備・片付け人工 (作業時間×人数)

※準備・片付け作業工程のうち、AsIs/CanBe/ToBe共通の業務  
(3Dデータの準備時間 240分)は除く



【図2】 現地準備の片付け時間と人数

- 無線化により光ケーブル躓きの危険が解消され、光ケーブル捌きを行うMR補助者が不要となった。しかし、バックパックの重さや大きさによる影響から現場作業者の補助者が必要となり、運用人員は目標値の1名を達成できず2名必要となった。
- 現地準備の片付け時間は1人当たり13分となり、目標値の10分以内を超えていた。

- ✓ 本実証 (CanBe) を通じて、課題解決システムは運用業務の効率化やコスト削減、安全性の向上に寄与することを確認できた。
- ✓ 将来、ローカル5Gによる完全無線化 (ToBe) が実現し、小型一体型ゴーグルのみでMR活用ができるようになれば、搬送等に係る運用業務が不要となり、安全性・コスト面において一層の効果が期待できる。

# 課題解決システムの実証：機能検証

完全無線化の実現性を明らかにするため疑似HMD方式により測定を実施し、現システムの実力及び課題を明確にした。

**測定結果** 実効速度：28GHz帯の下りのみ目標達成  
 平均遅延：28GHz帯、4.7GHz帯どちらも伝送が安定している時は概ね目標達成  
 （実効速度以上の速度で伝送する等伝送が不安定な状態になると目標値に届かないこともあった）

| ローカル5G回線       | 検証項目     | 最終目標    | 検証結果 ※                      |        | 必要な圧縮率           | 補記                                |
|----------------|----------|---------|-----------------------------|--------|------------------|-----------------------------------|
| (1)<br>28GHz帯  | 実効速度(上り) | 550Mbps | 17~97Mbps                   | ×      | 1/980~1/172      | 端末を移動、あるいは端末と基地局間に障害物を置くと速度が低下する。 |
|                | 実効速度(下り) | 350Mbps | 472~509Mbps                 | ○      | 1/12~1/10        | 端末を移動、あるいは端末と基地局間に障害物を置いても安定している。 |
|                | 平均遅延(往復) | 17ms以下  | 安定時 18.63ms<br>不安定時 954.7ms | △<br>× | -                | 実効速度の上限に達する等通信が不安定になると遅延が大きくなる。   |
| (2)<br>4.7GHz帯 | 実効速度(上り) | 550Mbps | 11~70Mbps                   | ×      | 1/1518~<br>1/239 | 端末を移動、あるいは端末と基地局間に障害物を置くと速度が低下する。 |
|                | 実効速度(下り) | 350Mbps | 13~61Mbps                   | ×      | 1/423~1/90       | 端末を移動、あるいは端末と基地局間に障害物を置くと速度が低下する。 |
|                | 平均遅延(往復) | 17ms以下  | 安定時 7.51ms<br>不安定時 100.5ms  | ○<br>× | -                | 実効速度の上限に達する等通信が不安定になると遅延が大きくなる。   |

※ 検証結果には疑似HMD方式で使用するPCソフトウェア、ネットワーク機器の影響(遅延等)を含む

## MRシステムの課題

- ✓ HMD使用時の快適性を向上させるためには遅延を少なくすることや遅延の値を一定にすることが必要。
- ✓ 映像伝送時、往復で圧縮・伸長を2回行う事が必要であり、低遅延の圧縮・伸長方式が望ましい。(例えばフレーム内圧縮であるMJPEGやH.265のIフレーム等)

## ローカル5Gの課題

- ✓ MRシステムの完全無線化を実現するためには、上り速度の向上と安定化、遅延の縮小と安定化が必要。
- ✓ 端末及び基地局のアンテナの場所は、特に上りの伝送速度の確保に配慮した配置が必要。(基地局が見通せるよう端末のアンテナを頭部に配置する、反射波による通信が可能となる基地局配置とする等)

# 課題解決システムの実証：まとめ

製造現場において課題解決システムの有効性を確認。将来的に技術課題の解決によって更なる利活用促進が期待できる。

## MRシステムの利用者・運用者

安全、品質、コスト面において効果を確認できたが、本実証のシステム構成や環境の影響を受けた。

### □ 事前検証の効率化

- ✓ バックパック方式にすることで、安全、検討品質が向上した。
- ✓ バックパックの小型化を狙ったが、バックパック(周辺機器、バッテリー)のサイズが大きく重く(13kg) 当社安全基準値を超えた。
- ✓ 運用面でみると、今回のバックパック方式では、一人作業ができない。(バックパックの補助者が必要)

### □ 遠隔支援

- ✓ 熟練技術者が出張せずに遠隔支援が行えるようになり検討品質が向上した。
- ✓ 無線通信の不安定さにより遅延・コマ落ち等、映像品質が落ちることがあった。

## MRシステムのアプリケーション

完全無線化に向けた機能要件を明確化できた。一方で、技術課題も明らかになった。

### □ バックパック方式

- ✓ 高性能PCの小型化、低消費電力化が求められる。

### □ 完全無線化

- ✓ 無線通信で必要となる処理の確立(パケットロス、遅延変動の対応)を行う必要がある。
- ✓ 高圧縮の圧縮伸長技術と高速処理技術の確立が求められる。
- ✓ HMDと5Gユニットの一体化やHMDの低消費電力化が求められる。

## ローカル5Gの性能

工場現場でのMRシステムの利活用促進に向けて、ローカル5Gの更なる性能向上に期待する。

- ✓ 機能検証の測定結果から今後MRシステムを活用するためには、上り速度の向上が必要となる。
- ✓ 遠隔支援者がストレスなく業務を指導するためには、更なるローカル5G低遅延化及び通信の安定化が求められる。
- ✓ 工場現場でMRシステムの利活用を促進するためには、ローカル5G端末の小型化及び低消費電力化が求められる。



---

# ローカル5Gの性能評価等の技術実証

# ローカル5Gの性能評価等の技術実証：概要

ローカル5GによるMRシステムの無線化を実現するためのローカル5G性能を明らかにし、技術的な課題を明確にした上で、解決策を検討する。

## ■ 技術実証の実施概要

### ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等（仕様書ア）

工場内に設置した基地局（4.7GHz帯：1か所、28GHz帯：2か所）から半径50メートル以内にある20か所程度の測定地点におけるローカル5Gの受信電力、伝送スループットや伝送遅延時間を測定し、ローカル5Gの性能評価を行った。また、工場内でのローカル5Gの電波の回折や反射等による影響、屋外への電波の漏洩についても同様に評価を行った。

### ローカル5Gのエリア構築やシステム構成の検証等（仕様書イ）

総務省提供によるエリア算出法に基づき、複数の基地局について基地局ごとにカバーエリア及び調整対象区域の図を作成し、それぞれのエリア端における実際の受信レベルを測定した。これらのデータに基づき、工場内における最適なローカル5Gのエリア構築やシステム構成について、考察を行った。

### その他ローカル5Gに関する技術検証（仕様書ウ）

#### ①アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響

工場内でローカル5GによるMRシステムを利用するに当たり、場所の制約等がないことが望ましい。自由に移動しながらMRシステムを利用するため、異なるセル間の移動時にハンドオーバーが正しく機能し、MRシステムの利用にどのような影響があるのか28GHz帯の基地局間でのハンドオーバーの検証を行った。

#### ②柔軟なシステムの構築検討

同一工場内で用途の異なる多数のアプリケーションの利用が想定される一方で、工場内で使用するアプリケーションごとに無線システムに要求されるスループット、遅延等が異なるため、ローカル5Gの幅広いパラメータを柔軟に活用した最適なシステムの構築について考察を行った。

## ■ 技術実証の目標（詳細は次頁に記載）

- MRシステムのローカル5G化（現状の有線接続からローカル5Gによる無線化）を実現するためのローカル5G性能を明らかにすること。
- 技術基準等の見直しに資する新たな知見を得ること。

## ■ 技術実証での測定項目・方法

| 測定項目     | 測定方法   |
|----------|--|
| 受信電力     | 基地局から送信されている同期信号の受信電力SS-RSRP(dBm)を測定器を用いて測定する。アンリツ社製エリアテスタ(ML8780A)を使用 |
| 伝送スループット | iPerfを用いて上りと下りの伝送スループット(Mbit/s)を測定する。                                  |
| 伝送遅延時間   | Pingを用いて往復遅延時間(msec)を測定する。   |
| その他      | UEのログ取得(BLER、RSSI/RSRP、スループット等)を取得                                     |

# 技術実証の実証目標

MRシステムのローカル5G化(現状の有線接続からローカル5Gによる無線化)を実現するためのローカル5G性能を明らかにし、技術基準等の見直しに資する新たな知見を得ることを目標とする。

## 背景となる技術的課題

### (検討①)

ローカル5Gを用いてMRシステムとHMD間における高精細・大容量の映像データ及びMR合成映像データをネットワーク上でやり取りする仕組みの構築。

### (課題①)

工場環境下において、ローカル5Gの伝送スループット、伝送遅延等の性能が、ローカル5GによるMRシステムの無線化を実現するための性能に達しているかどうか、また制約や前提条件等があるかどうかを明確にする。

### (検討②)

工場屋内の現場においてMRシステムを活用するにあたり求められる、ローカル5Gの性能の実現。

### (課題②)

工場現場におけるローカル5Gの電波伝搬特性や性能を明確にする。また、工場屋内の現場での反射波の影響や、ハンドオーバー時のアプリケーションへの影響有無等を確認する。あわせて、工場屋外への電波漏えいがどの程度となるかを明らかにする。

### (検討③)

工場内のインフラ高度化の手段として今後ローカル5Gを捉える場合、MRシステム以外の様々なアプリケーション通信を混在し運用できることが期待され、これらを実現する仕組みの検討が必要となる。

### (課題③)

様々なアプリケーション通信を混在して運用できることが期待されるが、アプリケーションにより、ローカル5Gへの要求性能や機能が異なるため、実現方法が今後の課題となる。

## 実証目標

### 実証目標①(課題①、②に対応)

ローカル5GによるMRシステムを稼働させるために必要とされる通信インフラに求める伝送スループットや伝送遅延といったユースケースに基づく工場環境下におけるローカル5Gの性能を評価する。  
また、測定データ(受信電力、伝送スループット、伝送遅延)を取りまとめ、測定データから工場環境の電波伝搬損失特性を明らかにする。

## 技術基準等の見直しに資する新たな知見

### 実証目標②(課題①に対応)

工場環境における電波伝搬測定結果(SS-RSRP受信電力)、カバーエリア及び調整対象区域の調査より、総務省エリア算出式との差異を明らかにする。また、前提としている条件面も含めて、どの程度の差異があるのかを検証し、新たな知見を得る。

### 実証目標③(課題②に対応)

ハンドオーバー動作は、隣り合うセルの受信強度によって、振舞が変わると想定される。実際のハンドオーバー動作の結果より、MRシステムへのアプリケーションに対する技術要件を考察し、多様な条件下において有用となる知見を得ることを目指す。

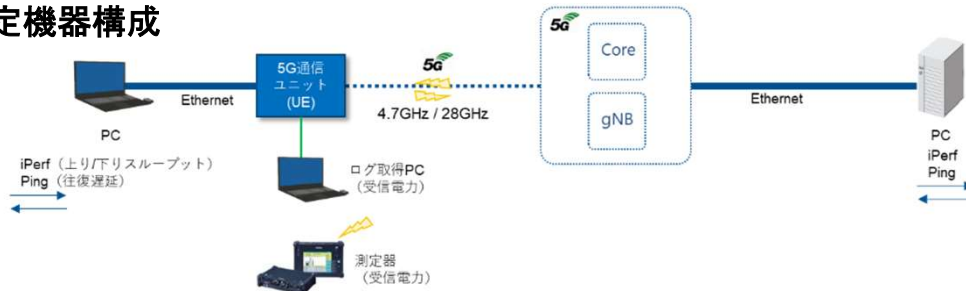
### 実証目標④(課題③に対応)

同一工場内で使用用途に応じた無線パラメータを設定し、システムを構築することが可能であることを確認する。また、使用するアプリケーションにより無線システムに要求されるスループット、遅延等が異なるため、ローカル5Gで実装可能な幅広いパラメータを柔軟に活用し、最適なシステムを構築する際の知見を得ることを目指す。

# ローカル5Gの性能評価等の技術実証： ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等

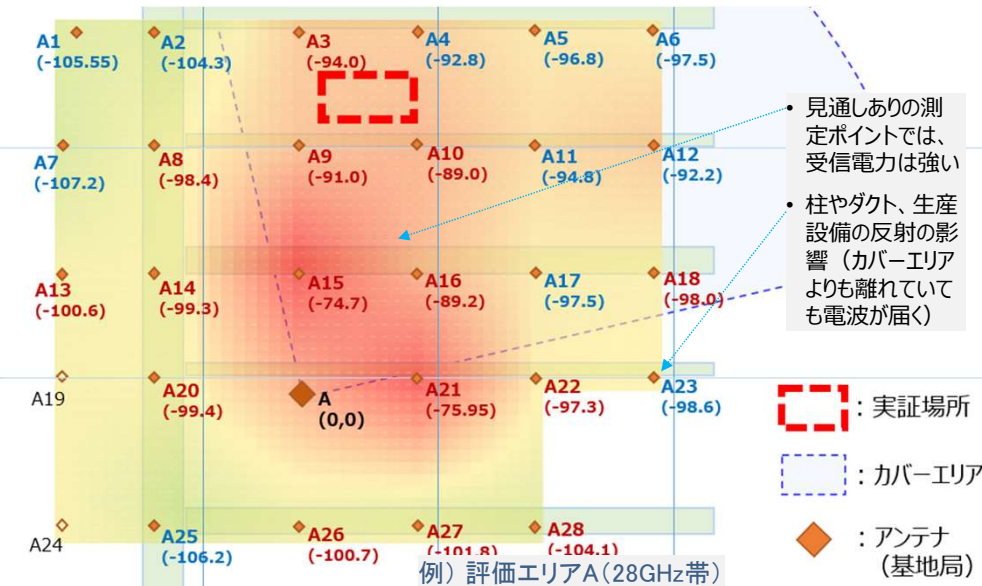
本実証で使用した機器において、工場屋内のローカル5Gの電波伝搬特性・性能測定を実施し、MRシステムのローカル5Gによる無線化を実現するための性能評価を実施した。

## ■測定機器構成



電波伝搬特性・性能測定の様子

## ■工場内の電波伝搬特性(受信電力ヒートマップ)



## ■MRシステムのローカル5Gによる完全無線化を実現するための性能評価

| 性能目標   | 技術実証結果  | 性能評価         |
|--|---|--------------|
| <b>伝送帯域</b><br>(データ圧縮目標)<br><b>UL 約550Mbps</b><br><b>DL 約350Mbps</b> | <b>UL 約20~80Mbps / DL 約300Mbps~1Gbps</b><br>(28GHz帯 ノキア・シャープ UL 100MHz幅, DL 100MHz幅 x 4、適応変調) | UL ×<br>DL ○ |
| <b>伝送遅延</b><br><b>十数msec程度</b><br>※60fpsで17msec                      | <b>10msec~50msecのRTT (平均 31.59msec)</b><br>(28GHz帯 ノキア・シャープ UL 100MHz幅, DL 100MHz幅 x 4、適応変調)  | △            |
|  | <b>10msec程度のRTT (平均 6.09msec)</b><br>(4.7GHz帯 Abit UL/DL 100MHz幅, MCS25固定)                    | ○            |

- 伝送遅延については、Pingによる往復遅延時間の測定結果から、28GHz帯では性能要件を満たしておらずパラメータ設定等による遅延の短縮と安定化が必要。

## MRシステムのローカル5Gによる完全無線化を実現するための性能評価の結果

- ✓4.7GHz帯(Abit社製基地局・端末)、28GHz帯(Nokia社製基地局・シャープ社製端末)にて、受信電力、伝送スループット、伝送遅延を測定し、電波伝搬特性・ローカル5Gの性能を明らかにした。
- ✓工場内の電波伝搬特性としては、柱やダクトといった構造物による反射の影響が明らかになり、カバーエリア外においても通信が可能なポイントがあった
- ✓ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価としては、アップリンクの伝送スループットの性能向上が必須ということが明らかになった。



# ローカル5Gの性能評価等の技術実証： ローカル5Gのエリア構築やシステム構成の検証等

総務省算出式と本実証環境における実測データの差分を比較し、エリア構築の検討・考え方を明らかにした。

## ■総務省エリア算出法との比較

|                                 | 基地局からの距離の地点<br>(算出式)での実測  | 差異 | 実際の距離  |
|---------------------------------|---|----|--|
| 4.7GHz帯<br>(カバーエリア<br>-84.6dBm) | カバーエリア41.87m地点での<br>受信電力<br>-59.472dBm  | あり | 82.2m<br>※-119.82dBm(SS-<br>RSRP換算値)を観測し<br>た地点                            |
| 4.7GHz帯<br>(調整対象区域<br>-91dBm)   | 調整対象区域 47.29m地点での<br>受信電力<br>-63.672dBm   | あり | 100.0m<br>※-119.82dBm(SS-<br>RSRP換算値)を観測し<br>た地点                           |
| 28GHz帯<br>(カバーエリア<br>-81.2dBm)  | 算出法 カバーエリア(1,057.6m地点)<br>測定未実施 ※真宝工場敷地外のため<br>※シミュレーション カバーエリア<br>(85.83m地点) -74.25dBm | あり | 47.65m(東4扉)<br>※-129dBm(SS-RSRP換<br>算値)を観測した地点、<br>屋内・見通しなし・遮蔽<br>物あり      |
| 28GHz帯<br>(調整対象区域<br>-90dBm)    | 調整対象区域(2,912.9m地点)<br>測定未実施 ※真宝工場敷地外のため<br>※シミュレーション 調整対象区域<br>(94.34m地点) -77.07dBm     | あり | 65.42m(東4扉18m)<br>※-137.1dBm(SS-RSRP<br>換算値)を観測した地点、<br>屋外・見通しなし・遮蔽<br>物あり |

- 総務省エリア算出法と実環境での実測データとの比較は、差異ありの結果となった。
- シミュレーションの結果と実環境の比較について、ほぼ合致していることが確認できた。
- 建物侵入損の減衰値の値をどの程度にするか考慮が必要。

## ■エリア構築の検討・考え方

本実証を通じて得られた電波伝搬特性(伝搬損失の特性)を元に、業務区域と基地局を設置する位置関係を検討することが重要となる。特に見通しありの場所が確保できることがポイントと考える。その上で反射特性を活用することも可能ではあるが、工場環境内の業務影響が最小となる工夫も必要。

なお、総務省算出式を用いて範囲を想定すると、実際との差異が確認された。この点については、本開発実証19案件の実測データ等から屋内・屋外等の条件に合わせた新たな算出式が導き出されることを期待する。

## ■工場内の通信特性



- 鉄製の柱やホイストクレーン等の構造物・設備があり、生産設備も多数設置されている環境
- 柱や工作機械などの遮蔽物によって見通しがいい地点では、受信電力は弱くなる。見通しがいいため、周囲の反射波を受けているためと考えられる。

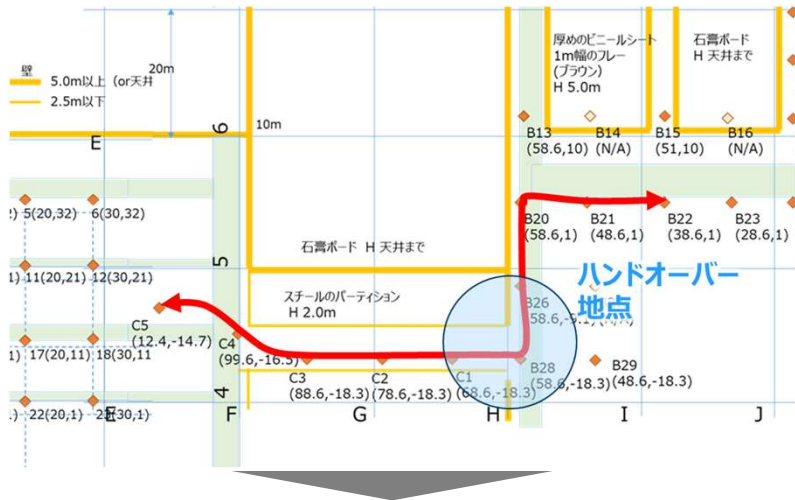
# ローカル5Gの性能評価等の技術実証： その他ローカル5Gに関する技術検証

独自実証として、ハンドオーバー動作の影響と柔軟なシステム構築検討を実施。  
工場内でローカル5G利用を促進するための知見を得ることができた。

## アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響

### 結果

- 2つの28GHz帯の基地局間でのハンドオーバーの検証を実施し、基地局間で5G⇄5Gのハンドオーバーが成功することを確認した。
- 通信状況については、ハンドオーバー地点に向かう時点でスループットが低下、ハンドオーバー(セルチェンジ)地点経過後、スループットが回復した。



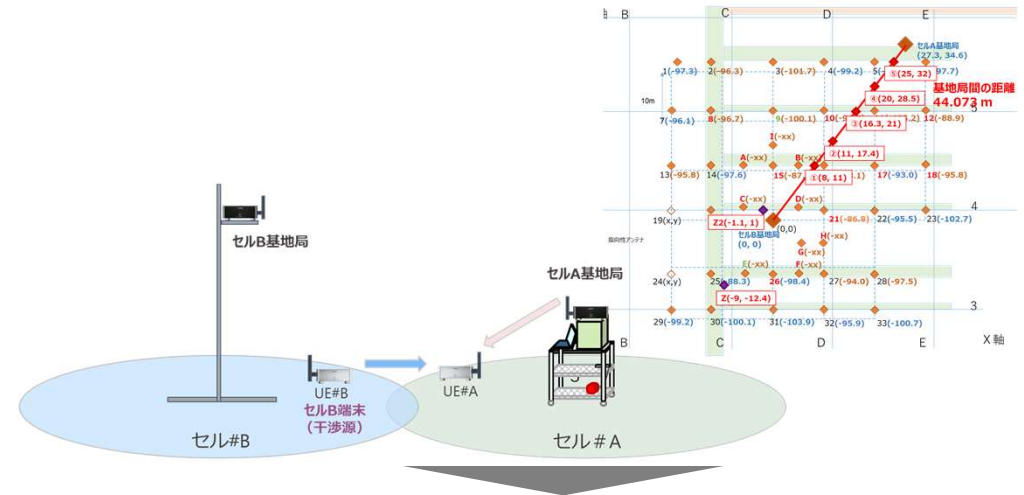
### 考察

- 本実証の結果より、スループット影響については、セル間の重なり(基地局の位置関係)を調整することで業務区域に合わせた設計を行うことが可能であるという知見を得られた。
- 異なるセル間の移動時にハンドオーバーが正しく機能する事が確認できた。MRシステムを利用するにあたり、場所の制約等がないことが望ましいため、技術的な前提として機能確認ができた。

## 柔軟なシステムの構築検討

### 結果

- MRやIoT(監視カメラ)等用途の違うIoTシステムを想定した異なる無線パラメータで運用されるセル間の干渉影響を調査した。
- その結果、お互いの干渉を受けることにより通信可能なエリアが小さくなることを確認した。また変調方式により、通信エリアの縮小幅に違いがあることが確認できた。



### 考察

- 本実証より、異なるパラメータの基地局を設置検討する際は、UE間の干渉を確認して干渉区域を調整することが重要であると確認できた。
- 一定の条件はあるものの、同一工場内での用途の違うアプリケーションを動作させるシステム構築は可能と考える。今後は実際のユースケースにあわせた実験を通じてローカル5Gの利活用、工場内の課題解決に寄与できるよう継続して検証を行う。

# ローカル5Gの性能評価等の技術実証：まとめ

MRシステムのローカル5Gによる無線化を実現するためのローカル5Gの性能を明らかにした。  
また、本技術実証を通じて判明した技術的な課題を明らかにした。

- ✓ 屋内・工場現場においてMRシステムを活用するにあたり求められる、ローカル5Gの電波伝搬特性や性能を把握することができた。
- ✓ 目指す姿(ToBe)の完全無線化の実現には、28GHz帯ではDL性能は満たせたが、UL性能は満たすことができなかった。
- ✓ 総務省算出式と本実証環境における実測データの差分を比較し、エリア構築の検討・考え方を明らかにした。
- ✓ 独自実証として、ハンドオーバー動作の影響と柔軟なシステム構築検討を実施。工場内でローカル5G利用を促進するための知見を得ることができた。

また、本実証を通じて判明した技術的な課題と解決方策(案)を以下に示す。

## 本実証を通じて判明した技術的な課題

28GHz帯においては、基地局と端末メーカーが違い、相互接続性確保が懸念であった。なお、本実証においては事前のPoC等を通じて動作確認を行うことで問題を回避した。

MRシステムの完全無線化を実現するためには、UL伝送スループットの増速が必要となる。

MRシステムの完全無線化を実現するためには、均一で安定した回線品質が必要となる。MRシステムにとって回線品質によるパケットロス等は位置情報のズレ、MR映像の表示、体感品質に影響を与えてしまう。

## 技術的な課題の解決方策(案)

今後の5Gの3GPP releaseに合わせ、ローカル5Gに必要な機能の機器メーカーによる機能実装、品質向上、相互接続性の確保等が期待される。

”準同期の拡張” / 非同期運用において無線フレームのULスロットアサインを確保することで帯域を確保し、キャリアアグリゲーションによる統合、MIMOによる多重化技術などの実装により帯域を確保する方策が考えられる。※特に非同期運用については、干渉調整等が重要となるため、屋内利用限定で運用可能とする等条件を整理してガイドライン化できると良いと考える。

業務区域をカバーエリアとし見通しを確保するような置局設計が重要。また、無線を前提とした上位層でのFEC処理の実装やトランスポート層での実装等も今後の解決方策と考えられる。

---

## 実装及び横展開に関する検討



# 実装及び横展開に関する検討：前提条件等

課題解決システムの実装及び横展開を検討するうえでの前提条件と、工場において課題解決システムを導入する際の要件を整理した。

実装及び横展開に関する検討に取り組むにあたり、課題解決システムの実証及び技術実証の結果を踏まえて検討を行った。また、その他の前提条件を以下の通り整理した。

## ◆用語定義：

- 本検討における課題解決システムは、ローカル5Gシステム + MRシステムを組み合わせた地域課題を解決するためのシステムとする。
- 事業モデルは、課題解決システムの自社導入を実現するモデルとする。
- 普及モデルは、課題解決システムの横展開を達成するためのモデルとする。

## ◆コンソーシアム・関係各社の考え・意向：

- 自社工場における事業モデルを構築するとともに、自社のグループ企業に対して横展開を図ることにより、企業グループとして地域課題の解決に取り組む。

## ◆制約条件等：

- 企業として、自立的に運用維持が可能となる費用対効果の実現できること。

課題解決システムの実証及び技術実証の結果を踏まえ、工場において課題解決システムを導入する際の要件は以下の通りとなる。

- MRシステムが有する以下の機能を無線接続により実現すること
  - HMDに製品および生産設備のCADデータを表示すること
  - HMDに現実映像とCADデータを重ねて表示すること
  - 現実映像とCADデータで奥行を識別して表示すること
  - HMDに表示される画像を遠隔地と共有すること
- 作業に支障が出ない程度の遅延時間内で映像表示すること
- 作業に支障が出ない程度の解像度で映像表示すること
- 無給電で必要時間使用可能なこと

今回の実証(バックパック方式)において、実現可能であることを確認

今回の実証において、**技術的な課題を解決すれば**実現可能であることを確認

今後、事業モデルの確立に向け、引き続き技術的課題の解決に向けた検討を行っていく。

# 実装及び横展開に関する検討：持続可能な事業モデル等の構築・計画

事業モデルの制約条件を検討するにあたり、ビジネスモデルキャンバスを用いて、  
 現行のMRシステムをローカル5G化するにあたってのコストと効果を試算し、費用対効果を評価した。

事業モデルを普及モデルへと導くために、費用対効果の観点で検討を進めた。例として、ローカル5G(28GHz帯)を用いてMRシステムが完全無線化した場合の検討結果を示す。

## ビジネスモデルキャンバス

|  |   |  |  |
|--|---|--|--|
| <b>KP</b><br>(キーパートナー)<br>・ 伝送システム提供者<br>・ WAN回線事業者                                    | <b>KA</b><br>(キーアクティビティ)<br>・ インフラ整備<br>・ 運用、保守<br>・ 免許取得・維持<br><br><b>KR</b><br>(キーリソース)<br>・ 通信インフラ<br>・ 通信デバイス<br>・ WAN回線<br>・ LAN | <b>VP</b><br>(提供価値)<br>・ 作業精度の向上<br>・ 準備時間の短縮<br>・ 工数の低下<br>・ 手戻り削減<br>・ 安全性の確認(高所作業等)<br>・ ネットワーク工事における安全性の確認(高所作業等)<br>・ 健康の確認(連続作業の負荷確認)<br>・ 対象範囲の拡大 | <b>CR</b><br>トヨタ自動車<br>・ 現場責任者<br>・ 作業員<br>・ 設備・治具の設計・開発者<br><br><b>CH</b><br>・ 工場管理者<br>・ 本社管理部門<br>・ 調達部門<br>・ ネットワーク維持管理者 |
| <b>CS</b><br>(コスト構造)<br>・ 導入コスト(インフラ構築費用、デバイス導入費用)<br>・ ランニングコスト(保守費、電波利用料、免許取得・維持費、等) |   | <b>RS</b><br>(収益の流れ)<br>・ 工数削減<br>・ 逸失利益の獲得<br>・ 安全管理に係るコストの低減<br>・ 出張費削減<br>・ 機会損失の削減   |  |

## コストの試算(28GHz帯設備の場合)

- ・ 一時費用: (基地局単価+ケーブル類+設置作業) × 基地局数 + コア装置 + 工事・設計費 + デバイス・移動局 + 設計・接続試験・免許申請経費等
- ・ 継続費用: 基地局数に応じたサブスクリプション/電波利用料 + デバイス/移動局数に応じた電波利用料 + 自営等BWA等基地局電波利用料 + コア装置/LTE基地局サブスクリプション

## 収益の試算

- ・ 工数削減: 機器準備、片付け、作業実施におけるサポート要員の削減等
- ・ 逸失利益の獲得: ライン停止時間の低減
- ・ 安全管理、既設インフラのコスト削減
- ・ 出張費削減: 遠隔地支援の実施による旅費、宿泊費等
- ・ 移動時間などによる機会損失の削減

## 検討結果

課題解決システムの費用対効果は、効果(収益)に対して費用(コスト)が15倍程度となった。工場内に複数基地局を設置して共通設備を按分した場合でも、9倍程度までの改善に止まった。この結果を踏まえると、課題解決システム(ローカル5G+MRシステム)単体では費用対効果を成立させることが困難である。

## 対応策

- ✓ MRシステム以外の複数IoTシステムでもローカル5Gを利用することで、ローカル5G導入コストを按分する。
- ✓ ローカル5Gを工場内の無線通信のインフラとして位置付け、工場内におけるさらなる利活用ユースケースを検討するために、今後リリース予定の多接続・低遅延などの機能の実証を行う。
- ✓ また、工場内の無線通信インフラを運用するという観点から、無線局免許取得や、安定稼働のための機器の保守・運用等のサポート面での検討を行う。

# 実装及び横展開に関する検討：横展開に資する普及モデルに関する検討

ローカル5Gを工場の無線接続インフラとしてとらえ、  
大規模企業型の工場に対して課題解決システムを展開するための普及モデルの検討を行った。

前頁の検討の結果、本実証における課題解決システムは費用対効果が見合わないことが判明した。また、この結果を踏まえ、課題解決システムの普及モデルを検討するにあたり、課題解決システムの構成要素のうち、ローカル5G部分を他のIoTシステムを収容可能な工場内の無線接続インフラとしてとらえる必要があると結論付けた。

工場内無線接続インフラとしてのローカル5Gシステムを、横展開可能な普及モデルとして確立するには、あわせて以下の要件が求められる。

- 障害時において速やかに対応すること
- 電波利用に関する種々の支援を提供すること
- 免許やライセンス等、更新が伴う手続きに関する支援を提供すること
- バックアップ等、障害対策や事業継続対策を講じること
- 機密情報の漏えい防止等、各種のセキュリティ対策を講じること
- 工場における使用に耐えうる施策が講じられていること

大規模企業型の工場に課題解決システムを展開するには、これらの整備が不可欠となる。また、これが実現できれば、地域への横展開にもつながると考える。

これまでの内容を踏まえ、今後実施すべき項目を以下に示す。

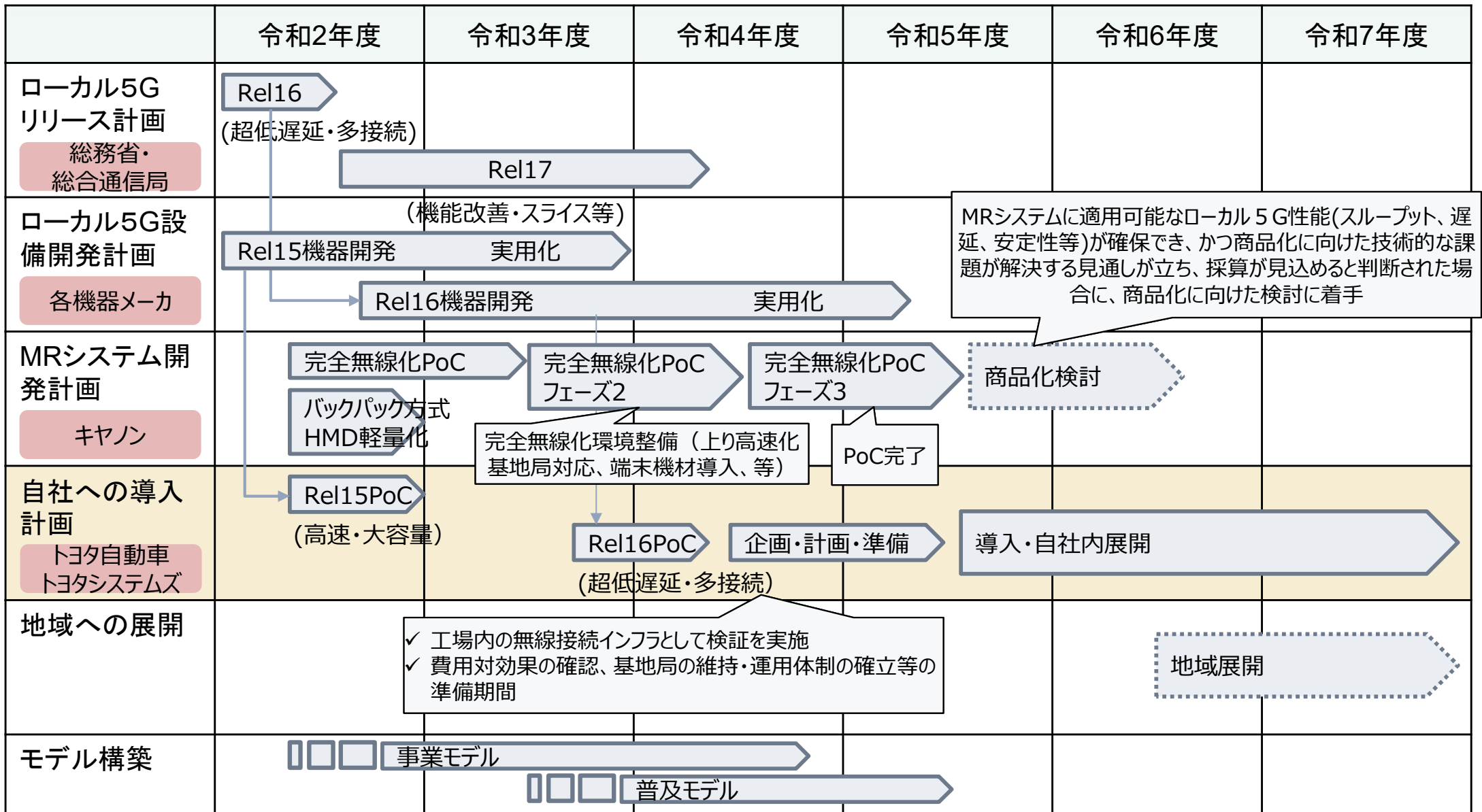
## 普及モデルの確立に向けた実施項目

- 事業モデル実現のための課題解決システムにおける技術的課題の解決。
- 工場内無線接続インフラとしてのローカル5G機能・性能評価の実施。
- 普及モデルの確立にあたり求められる各要件を実装するための検討。



# 実装及び横展開に関する検討：今後の計画

工場の無線接続インフラとしてとらえた場合の今後の展開計画を検討した。

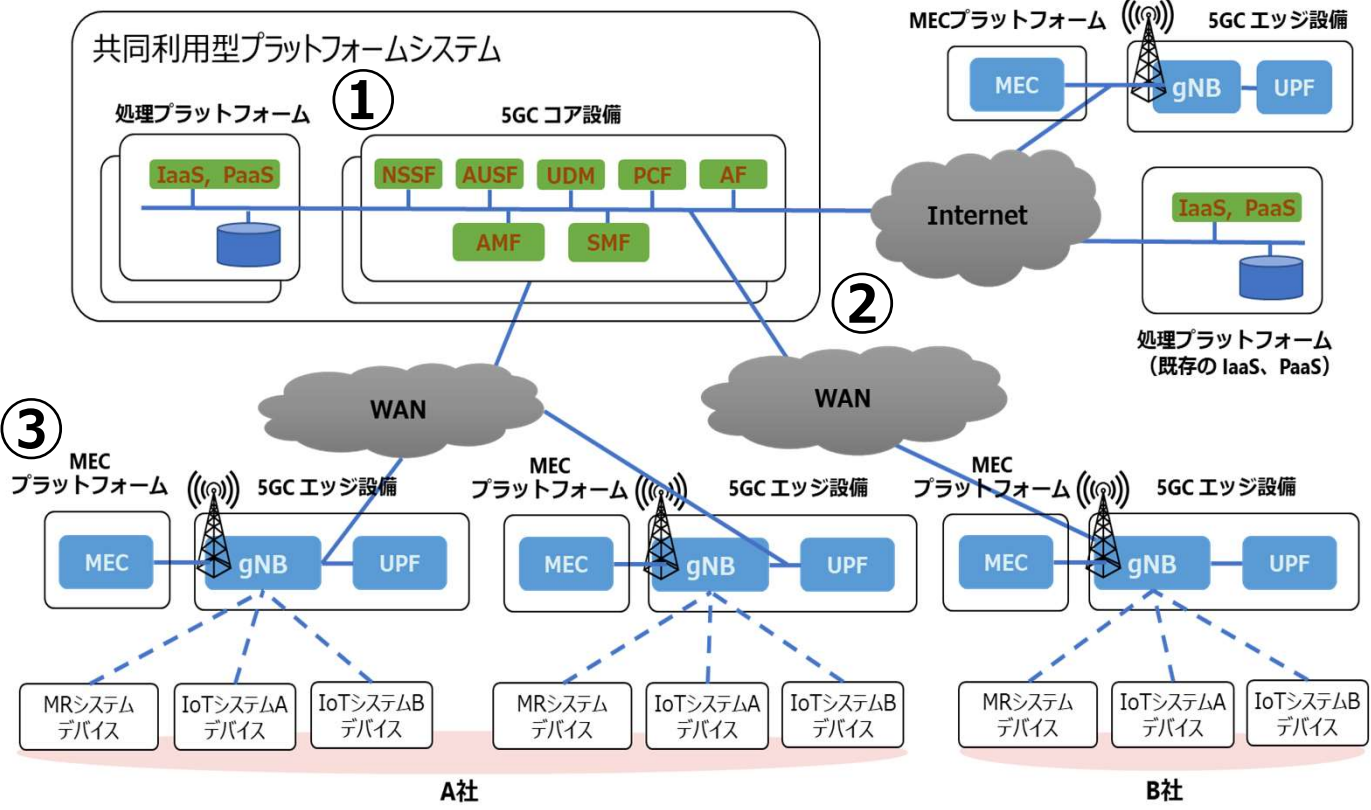




# 実装及び横展開に関する検討：共同利用型プラットフォームに関する検討

共同利用型プラットフォームシステムの要件は、5GCコア設備（ハードウェア、ソフトウェア）とアプリケーションの処理プラットフォームが収容できることとする。

前述したように、ローカル5Gの基地局とMRシステムとを1対1に対応付けたシステム構成では、採算性の確保が困難となる。このため、当コンソーシアムでは、共同利用型プラットフォームを、ローカル5G、MRシステム、その他のサービスを収容するシステムを包含するプラットフォームとして位置付け、在り方を検討した。



①-1 アプリケーションシステムやデータ処理システム等を実装するための処理プラットフォームを共同利用型プラットフォーム内に配置する。

①-2 5GCコア設備及び処理プラットフォームは、必要に応じて複数実装する場合がある。(グループ会社の工場における利用を想定した場合等)

② 共同利用型プラットフォームは、LAN/WAN/Internetを介して外部システムと接続する。このため、各ノード間を接続する機能に加えて、サイバーセキュリティに対応するための各種機能を実装する必要がある。

③-1 エッジデバイスに近い設置個所において処理が必要となるシステムは、MEC (Mobile Edge Computing) プラットフォーム上に構築される。

③-2 処理プラットフォームとMECプラットフォーム間の通信は、5GCコア設備と5GCエッジ設備を介して行われ、プレーヤーとIoTデバイス間の通信は、5GCエッジ設備を介して行われる。

---

# まとめ

# まとめ

- 地域製造業における課題である製造現場の人材不足や、熟練技術の承継、及び労働環境の改善等に対して、課題解決システム（ローカル5GによるMRシステムの無線化）を導入することで、作業者が現場で早く手軽にシステムを利用し、また、必要に応じて遠隔からの支援も受けられるようになり、地域課題解決につながる事が確認できた。
- 一方で、課題解決システムの実装及び横展開に向けては、技術面・運用面の課題が残っており、対応が必須であることを認識した。特に工場内での利用に際しては、ローカル5GのUL/DLの比率の最適化、機器・アプリケーションの多数同時接続等の機能追加が必要となるため、今後リリースされるローカル5G機能である多接続、低遅延等の早期の製品化についても期待を寄せている。
- また、ローカル5Gの実装・展開を図るには、機器・導入諸掛・運用など、各種コスト低減の検討も必要であることが判明した。

## MRシステム利用・運用者の観点

工場における熟練作業者の知見やノウハウの継承、効率化、検討レベルアップに貢献。

- ・MRシステムの無線化による効果を確認できた。ローカル5Gに対しては、更なる低遅延と速度の安定化が必要となる。
- ・完全無線化前段階であるバックパック方式においても一定の効果を確認したが、更なる小型化と安全装備の充実が必要となる。

## ローカル5Gシステム導入・運用者の観点

設備費や維持費が大きく、MRシステムのみでの利用を目的としたローカル5G導入は困難。

- ・複数の端末・アプリケーションによるローカル5G利用を確立できないと、費用対効果が見合わないことが判明した。
- ・今後は、多接続の確立、機器の低価格化、制度の簡素化等が必要。また、基地局の移設についても柔軟に対応できるとよい。
- ・ローカル5G設備の共同利用による導入コストの低減も可能と考える。

## MRシステム開発者の観点

完全無線化に向けた情報収集はできたが、技術課題も残る。

- ・ローカル5GにはULの速度向上（必須）、速度の安定化、低遅延化を求める。
- ・完全無線化に向けた技術開発として、通信情報の圧縮伸長や機器の小型化、安全対策が必要となる。

## ローカル5Gシステム提供者の観点

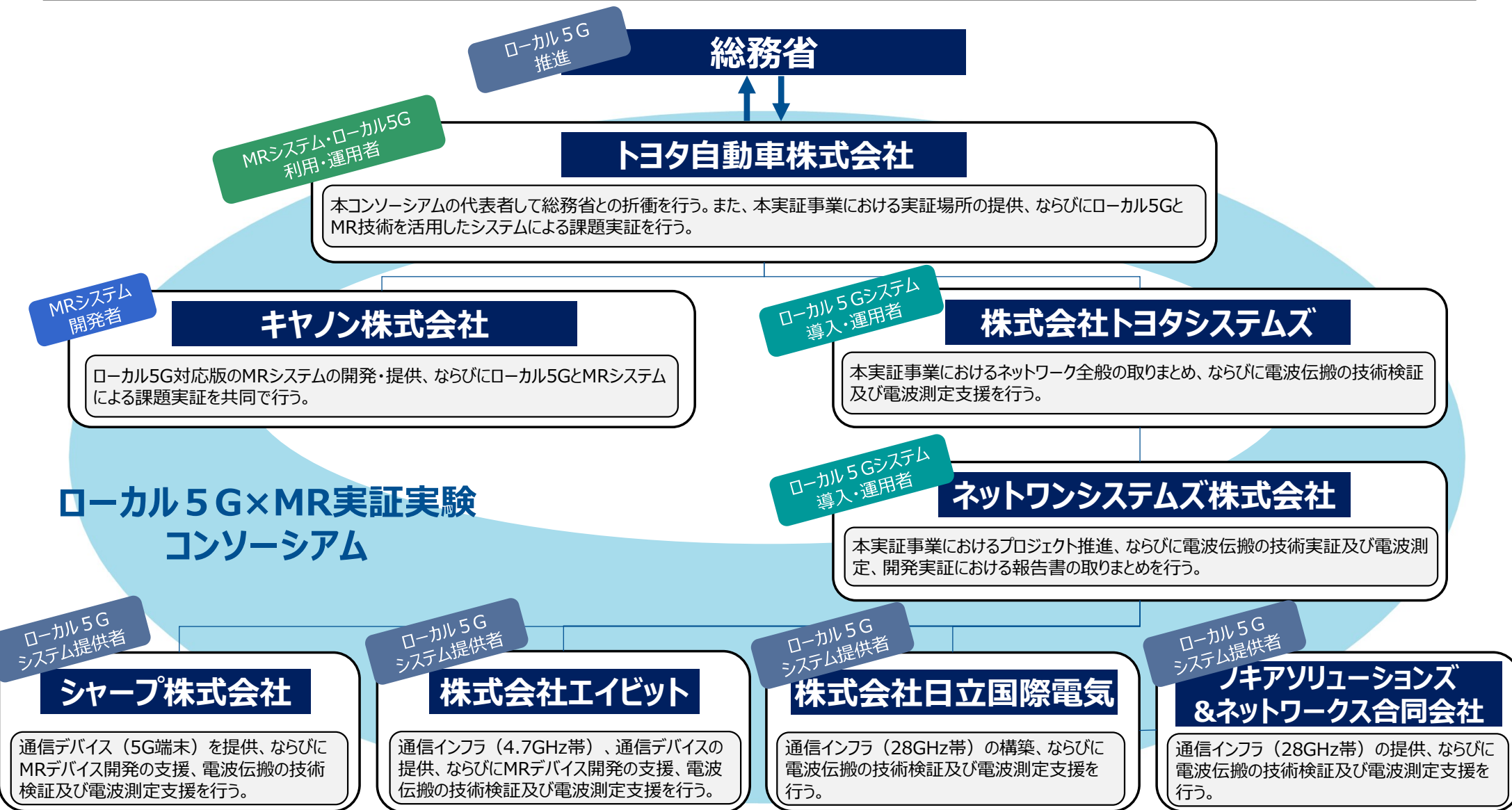
工場の通信接続インフラとして、さらなる技術開発・利活用の検証が必要。

- ・UL/DL比率の最適設定、エリア設計の為にヒートマップシミュレータ等の改善が必要となる。
- ・統一規格の制定、市場への製品投入の加速、他事業者による実績情報の積極的な共有、機器開発会社の多様化に期待する。

本開発実証の結果を踏まえて、引き続き、ローカル5Gに係る検討を進める。

# コンソーシアム体制

MRシステム・ローカル5Gの利用者、提供者、導入・運用者一体となるコンソーシアムを形成し、多角的な視点から調査検討を行った。





**END**