令和３年度　課題解決型ローカル５Ｇ等の実現に向けた開発実証

プラントの遠隔監視によるガス漏れ等設備異常の効率的検知の実現

成果報告書

令和 4 年 3 月 25 日

広島ガス株式会社

目次

1. 実証概要 1

1.1 背景・目的 1

1.2 実証の概要 1

1.2.1 課題実証 1

1.2.2 技術実証 1

2. 実証環境の構築 3

2.1 実施環境 3

2.2 ネットワーク・システム構成 3

2.2.1 ローカル５Ｇのネットワーク構成 4

2.2.2 基地局等の無線機器の調達先等 5

2.2.3 ローカル５Ｇの無線機器 6

2.2.4 基地局エリアカバレッジ 9

2.3 システム機能・性能・要件 10

2.3.1 複数カメラ搭載小型走行ロボットでの巡回による点検作業の効率化 10

2.3.2 ローカル５Ｇシステムの性能 12

2.4 免許及び各種許認可 12

2.5 その他要件 13

2.6 実証環境の運用 15

2.6.1 運用保守管理 15

2.6.2 運用保守の実施体制 15

2.6.3 ローカル５Ｇ保守・運用説明会の開催 16

2.6.4 実証期間中の問い合わせ事項 17

3. ローカル５Ｇの電波伝搬特性等に関する技術的検討（技術実証） 18

3.1 実証概要 18

3.2 実証環境 19

3.3 実証内容 25

3.3.1 ローカル５Ｇの電波伝搬特性等の測定 25

3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化 44

3.3.3 電波反射板によるエリア構築の柔軟化 87

3.3.4 準同期 TDD の追加パターンの開発 87

3.3.5 その他のテーマ 87

3.3.6 技術実証における追加提案 87

4. ローカル５Ｇ活用モデルの創出・実装に関する調査検討（課題実証） 88

4.1 実証概要 88

4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標 88

4.2.1 背景となる課題 88

4.2.2 ローカル５Ｇを活用した課題解決モデル 90
4.2.3 実装シナリオ及び実証目標 92
4.3 実証環境 93
4.4 実証内容 95
4.4.1 ローカル５Ｇを用いたソリューションの有効性等に関する検証 95
4.4.2 ローカル５Ｇを用いたソリューションの実装性に関する検証 143
4.4.3 ローカル５Ｇの実装に向けた課題の抽出及び解決策の検討 153
4.4.4 継続利用の見通し・実装計画 161
5. 普及啓発活動の実施 169
5.1 映像制作への協力 169
5.1.1 コメント映像の提供 169
5.1.2 実証映像の提供 169
5.2 実証視察会の実施 169
5.2.1 参加者一覧　※省庁・企業名のみ(コンソーシアム除く) 169
5.2.2 開催概要 170
5.3 その他普及啓発活動 170
5.3.1 プレス発表 170
5.3.2 セミナーなど 170
6. 実施体制 171
7. スケジュール 173

1. 実証概要

1.1 背景・目的

■ローカル５Ｇにより解決する課題・実現する将来像の概要

都市ガス事業者において、都市ガス製造工場における安全確保は最重要命題のひとつであり、将来にわたり保安対策を徹底していく。

ガス漏洩事故の防止・保安対策においては、最先端技術を活用し、人間の五感で認識できない異常の捕捉が可能となってきており、先端技術と人間の五感・技術による判断の双方を最大限活用し、漏洩の兆候の早期発見・事故防止・保安対策の品質向上へ繋げていきたいと考える。

■ローカル５Ｇの導入目的

ガス工場構内で、4K 高精細カメラの映像・音声データおよび赤外線カメラの映像データを中央制御室に転送するための高速大容量の無線通信として活用する。

無人監視の方法として、走行ロボットによる巡回作業・映像配信の実験を目指す。

1.2 実証の概要

本実証の概要を以下に示す。

1.2.1 課題実証

・ローカル５Ｇによる異常検知結果の高速送信

人間の五感で認識できない微細な設備の劣化・腐食等や、透明・無臭であるガスの漏洩を検知するため、4K 高精細カメラやガスの漏洩による温度低下を検知・可視化できる赤外線カメラ、近赤外線式メタン検知器を導入する。映像データをエッジで処理した後、ローカル５Ｇの高速通信により中央制御室に送信し、ガス漏洩の早期発見・事故防止へ繋げる。

・小型の走行ロボットによる無人監視

人による巡回では広い構内で常時監視を続けることは不可能であり、悪天候時などは巡回作業員の負担が大きいことから、小型の走行ロボットなどによる監視を検証する。高精細映像・赤外線カメラ・近赤外線式メタン検知器を搭載し、映像データをエッジで処理した後、ローカル５Ｇを通じて中央制御室に転送して活用し、巡回監視できる範囲・時間帯を増やしながら巡回作業員の作業負荷を軽減し、業務効率化・巡回作業員の安全性向上を目指す。

・ローデータの蓄積および AI による分析

4K 高詳細カメラや赤外線カメラにより取得する映像データのローデータを蓄積して AI 分析し、設備の老朽化などの兆候を発見・異常の検知を目指す。

1.2.2 技術実証

4.8GHz 帯における電波伝搬特性等の測定および電波伝搬モデルの精緻化を実施する。郊外(臨海部)の液化天然ガス（LNG）プラントである廿日市工場は、自己土地内に金属製の大型構造物やパイプ群が多数存在する屋外環境で、屋内に比べて理解が進んでいない屋外

の高反射環境におけるローカル５Ｇの電波伝搬を調査・検証するには好適な実証環境と考える。

本技術実証では、廿日市工場での電波伝搬測定を行い、現行のエリア算出法で規定するエリアカバレッジや調整対象区域が半屋外環境でどの程度実測と乖離しているかを確認すると共に、課題実証で要求される無線性能がエリアカバレッジ内で実現できているかを確認する。更に、現行のエリア算出法で規定されているパラメータのうち、周辺環境の影響を考慮するために基地局から 100m 以上の地点で適用される S を対象として、屋外の高反射環境に適した S の値の導出を狙った電波伝搬モデルの精緻化を行う。

2. 実証環境の構築

2.1 実施環境

本実証では、広島ガス株式会社 廿日市工場内にローカル５Ｇの基地局等無線通信システムを構築し、電波伝搬特性の検証ならびにローカル５Ｇを活用したソリューションについての課題実証を行った。同工場は、広島県廿日市市の臨海地帯に立地する LNG プラントであり、以下のような特徴がある。

- 敷地内には貯蔵タンクや製造設備等の大型の金属構造物が多数存在し、大小の金属パイプ群が密に敷設されており、複雑な電波伝搬環境を構成している
- 敷地内の大部分が防爆エリアに指定されており、基地局の設置位置が制限される
- 陸上だけでなく海上にも一部の設備が設置されている
- 他者土地との境界に壁などの障害物がないため、他者土地へ干渉となる電波が漏洩しやすい

これらの特徴から、自己土地内のカバーエリアの構築、他者土地への干渉漏洩抑制の観点で電波伝搬特性を把握し、ソリューションへの適用性を実証することで得られる知見は、同様の特徴を有する他分野の産業プラントへの横展開も期待できると考えられる。

2.2 ネットワーク・システム構成

本実証で使用した基地局の概要を**表 2.2-1** に示す。

表 2.2-1　ローカル５Ｇシステム（基地局）の概要

	PW-320-DU PW331-48L4A-SRU
製造ベンダ	富士通
台数	3 台
設置場所 （屋内/屋外）	屋外
同期/準同期	同期
UL：DL 比率	1:4
周波数帯	4.8-4.9GHz
SA/NSA	SA
UL 周波数	4.8-4.9GHz
DL 周波数	
UL 帯域幅	100MHz
DL 帯域幅	
UL 中心周波数	4.85GHz
DL 中心周波数	
UL 変調方式	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM
DL 変調方式	
MIMO	DL 4Layer UL 2Layer

2.2.1　ローカル５Ｇのネットワーク構成

本実証で使用したネットワーク構成を**図 2.2-1** に示す。

ローカル５Ｇシステムは、主にコアサーバー装置（5GC）、基地局装置（CU、DU、RU）及び監視装置（EMS）で構成される。

走行ロボットは、走行部、Edge サーバ、カメラ(4K 高精細カメラ、近赤外線カメラ、赤外線カメラ)、５Ｇモバイルルータで構成される。

走行ロボットでは、各カメラで撮影した映像データを Edge サーバで処理し、カメラ映像に応じた異常検知を行う。

また、異常の内容に応じて映像データを圧縮した上で(詳細は 2.3.1　を参照)、５Ｇモバイルルータを経由してローカル５Ｇへデータ伝送を行う。

ローカル５Ｇシステムでは、５Ｇモバイルルータから基地局装置へ無線によるデータ伝送を行った上で、5GC を経由して中央制御室の分析動画蓄積サーバへ映像データの伝送を行う。

5GC はオンプレミス型を選択している。選択理由としては、ローカルでデータ処理を行うことでクラウド型に比べ公衆網の影響を受けにくく、本実証の検証に適していると考えたためである。

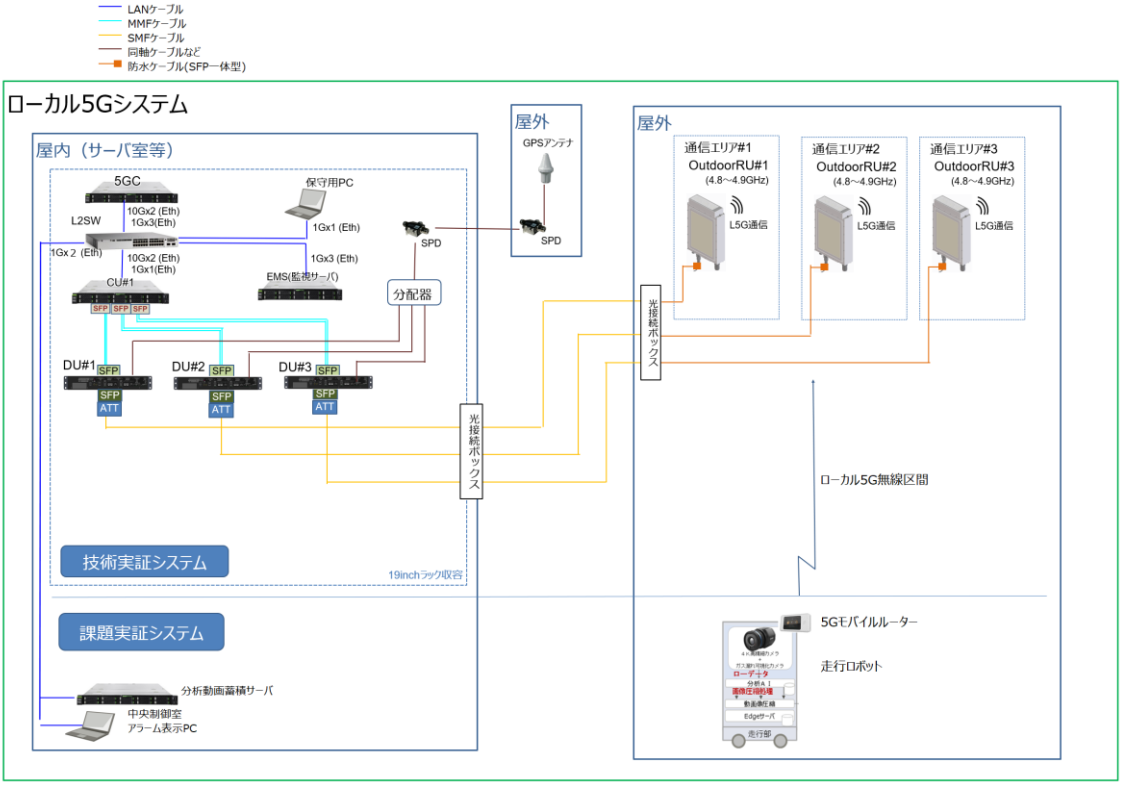


図 2.2-1　ローカル５Ｇのネットワーク構成

2.2.2 基地局等の無線機器の調達先等

本実証で使用した基地局等の無線機器の一覧を**表 2.2-2** に示す。

表 2.2-2 ローカル５G使用機器一覧

No	設置場所	使用機器	調達先	数量	設置形態	備考
1	電気室	EMS	富士通	1	固定	
2		5GC	富士通	1	固定	
3		CU	富士通	1	固定	
4		DU	富士通	3	固定	
5		UPS	富士通	2	固定	
6	管理棟屋上、ボイラー室屋上、リサイクルセンターとの境界付近に各 1 台	屋外 RU	富士通	3	固定	
7	電気室屋上	GPS アンテナ	富士通	1	固定	
8	工場敷地内で使用	UE	富士通	2	可搬	

2.2.3 ローカル５Ｇの無線機器

本実証におけるローカル５ＧシステムはSA(Stand Alone)方式のシステムである。
基本仕様として3GPP Release15に準拠する。
以下、ローカル５Ｇシステムを構成する機器について記載する。

（1）5GC

端末接続時の認証、セッション管理、パケット転送などの機能を担う。
本実証で使用する5GCは汎用サーバ上でソフトウェアにより実現される。
5GCの主な諸元値を**表 2.2-3**に示す。

表 2.2-3　5GCの主な諸元値

項目	諸元値
サポート機能	AMF, SMF, UPF, UDM, UDR, AUSF, NRF
ユーザー数	同時接続数256(登録数512)
装置としての最大スループット	4.4Gbps(DL/UL合計)
最大接続CU数	5
項目	諸元値
サポート機能	AMF, SMF, UPF, UDM, UDR, AUSF, NRF
ユーザー数	同時接続数256(登録数512)
装置としての最大スループット	4.4Gbps(DL/UL合計)
最大接続CU数	5

（2）CU

無線リソース制御を担う。
本実証で使用するCUは汎用サーバ上でソフトウェアにより実現される。
CUの主な諸元値を**表 2.2-4**に示す。

表 2.2-4　CUの主な諸元値

項目	諸元値
ユーザー数	256
装置としての最大スループット	2.0Gbps(DL/UL合計)
最大接続DU数	4

（3）DU

ベースバンド処理を担う。
ハードウェア外観を**図 2.2-2** に示す。
主な諸元値を**表 2.2-5** に示す。

図 2.2-2　DU のハードウェア外観

表 2.2-5　DU の主な諸元

項目	諸元値
ユーザー数	64
最大スループット理論値	DL:1.7Gbps、UL:0.2Gbps(スロット数比率 DL:UL:S=7:2:1)
帯域幅	100MHz
MIMO レイヤ数	DL:4 レイヤ UL:2 レイヤ
MCS	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM
Beam数	6
接続 RU数	1

※最大スループット理論値は、無線レイヤにおける最大スループットの理論値である。実運用での無線環境におけるスループットについては 2.3 に記載する。

（4）屋外 RU

RF 処理とアンテナ部が一体となった屋外向け無線機である。
ハードウェア外観を**図 2.2-3** に示す。
主な諸元値を**表 2.2-6** に示す。

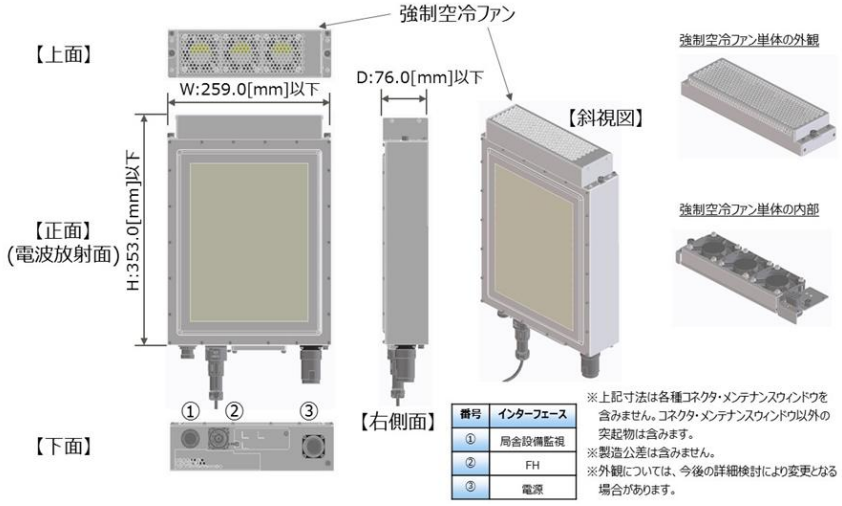


図 2.2-3　屋外 RU のハードウェア外観

表 2.2-6　屋外 RU の主な諸元値

項目	諸元値
周波数帯	4.8-4.9GHz
TRX数	4TRX
帯域幅	100MHz
ストリーム数	4
CC数	1
トータル EIRP	+39.2dBm
システム空中線電力	24.9dBm(4.9dBm/MHz)
EIS	-101.9dBm
送信電力	+31.9dBm
給電	AC100/200V +/-10%
消費電力	150W typ.
重さ	<6.9kg (6kg typ.)
大きさ	259 x 353 x 76 mm
冷却	強制空冷
温度	-10℃ to + 50℃

（5）EMS

ローカル５Ｇシステムの各装置を監視/保守するための機能を提供する。
汎用サーバ上のソフトウェアにより実現される。
主な諸元値を**表 2.2-7** に示す。

表 2.2-7　EMS の主な諸元値

項目	諸元値
監視対象ノード	5GC、CU、DU(RU)
機能	状態監視、障害管理、構成管理

（6）UE

Compal Electronics 社製のモバイルルータ型端末である。
ハードウェア外観を**図 2.2-4** に示す。
主な諸元値を**表 2.2-8** に示す。

図 2.2-4　UE のハードウェア外観

表 2.2-8　UE の主な諸元値

項目	諸元値
Size	119 x 72 x 23.5mm
Weight	235G
SIM card type	Nano SIM
Operating Band	n79, n257, B38, B41
Connectivity	USB(type-C), Ethernet(RJ45), Wi-Fi
Battery	5300mAh(typ.)

2.2.4　基地局エリアカバレッジ

3.2 で後述するように、本提案の実証を行う広島ガス廿日市工場は、LNG 貯槽や液化石油ガス（LPG）タンク、ガスホルダー等の大型の金属構造物に加え、各種設備を接続する大小の金属パイプ群が密に敷設されており、電波の遮蔽や反射の多い環境と予想された。また、敷地内の大部分が防爆エリアに指定されており、RU の設置場所に制限がある。

課題実証で扱うユースケースは、点検・メンテナンスの重要性が高いエリア(重点点検区

域)に絞って実施するため、ローカル５Ｇのエリアカバレッジは工場全域ではなく、重点点検区域を優先的にカバーするエリア設計を行った。これらの点を考慮して、指向性ビームフォーミングアンテナを持つ屋外 RU の設置場所を**図 2.2-5** のように設定した。

図面上部にある管理棟の屋上(地上高約 26m)に設置する RU1 は海上のタンカー接岸設備に向かって伸びるパイプラインの方向を主にカバーする。図面右上の大型ボイラー室の屋上(地上高約 10m)に設置する RU2 は、重点点検エリアの中央付近に向けた。敷地中央の左右に伸びる道路をカバーする RU3 は隣接する他者土地との境界に近い場所に電柱を立てて水平方向に照射するよう設置した(地上高約 5m)。このようにアンテナ指向性を持つ 3 台の屋外 RU を使って、課題実証が行われる敷地中央～上部の重点点検区域(図中ピンク色で示す)をカバーするローカル５Ｇエリアを構築した。

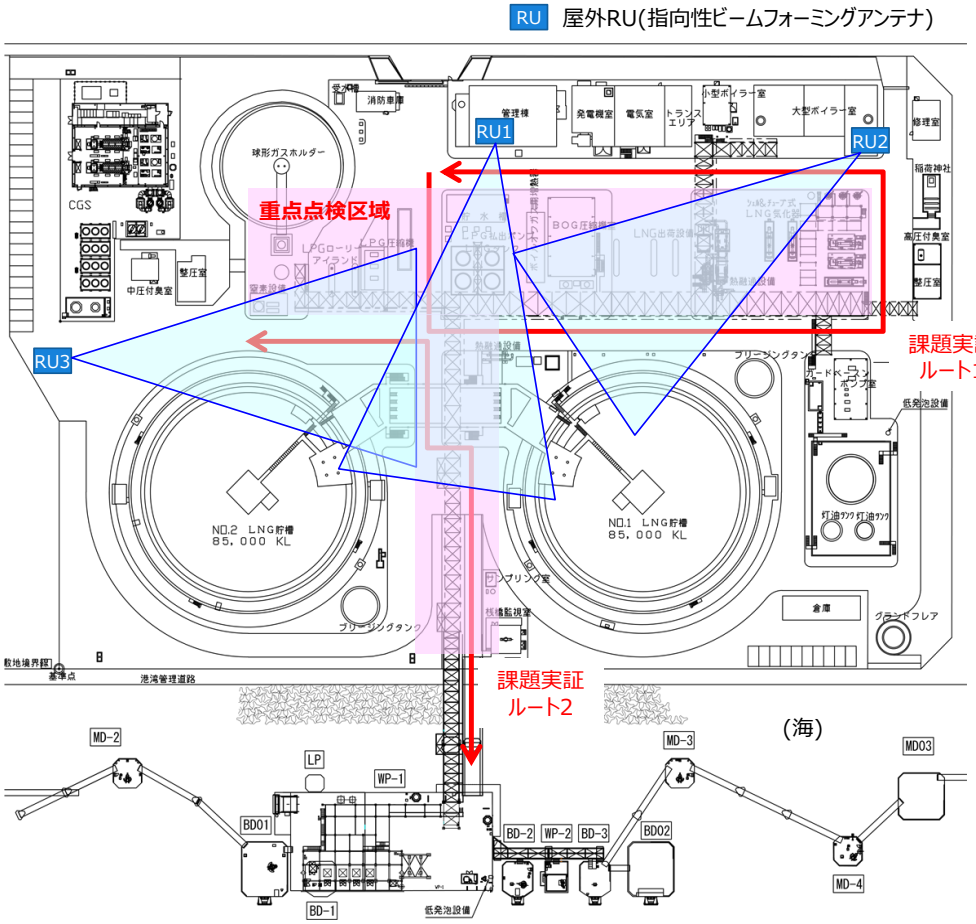


図 2.2-5　廿日市工場におけるエリアカバレッジ

2.3 システム機能・性能・要件

本実証における課題解決システムで必要とされる要件、および構築するローカル５Ｇシステムの性能は下記の通りである。

2.3.1 複数カメラ搭載小型走行ロボットでの巡回による点検作業の効率化

課題実証のユースケースで使用する小型走行ロボットは検知対象のガス（LNG、LPG、都市ガス）に対応した複数のカメラを搭載した。外観検査用 AI に使用する 4K 高精細カメラ、ガス漏洩による温度変化を検出する赤外線カメラで撮影・圧縮した動画を伝送して効率的な検知を実現するには、ローカル５Ｇシステムに必要な UL 伝送レートは 50Mbps 程度と考えた。データ伝送の内訳を**表 2.3-1** に示す。

走行ロボットではエッジ処理にて異常検出時に、異常の内容に応じた映像を伝送した。(赤外線カメラと近赤外線カメラは検出対象となるガスが異なるため、同時に伝送する映像としては 4K 高精細カメラ+赤外線カメラまたは、4K 高精細カメラ+近赤外線カメラとなる。)

なお、課題実証では UL を主に使用しており、DL のデータ伝送は行っていない。

将来的なプラント設備内のカバーエリアの拡大及び、小型走行ロボットの追加を視野に入れ、安定した通信で 50Mbps 程度の UL が確保できる通信手段としてローカル５Ｇが適していると考えた。

表 2.3-1　ローカル５Ｇによるデータ伝送の内訳

カメラ種別	データ伝送内容	伝送レート
4K 高精細カメラ	映像データ(圧縮)を常に伝送 Edge サーバで外観の異常を検出するとアラートを伝送	30Mbps 程度
赤外線カメラ	Edge サーバでガス漏洩による温度低下を検出した場合にのみ、映像データを伝送 同時にアラートを伝送	20Mbps 程度

2.3.2 ローカル５Ｇシステムの性能

本実証で使用するローカル５Ｇシステムにおけるスループット理論値を**表 2.3-2** に示す。

複数カメラ搭載小型走行ロボットでの映像データは UL 回線で転送される。

良好な電波環境での実質的なスループットとして理論値の 50%である 100Mbps 程度を実効スループットと想定した。これは上記ユースケースで必要な 50Mbps を満たしており、ローカル５ＧシステムのUL回線の性能で実現可能と考えている。

表 2.3-2　ローカル５Ｇシステムのスループット理論値

DLスループット	UL スループット	条件
1.7Gbps	0.2Gbps	・帯域幅100MHz ・TDDスロット比率　D:U:S=7:2:1 ・MIMOレイヤ数 DL:4、UL:2 ・256QAM（DL/ULとも）

2.4 免許及び各種許認可

本提案においては広島ガス株式会社を免許人として、4.7GHz 帯システム(4.8～4.9GHz 帯)の実験試験局免許の取得を行った。無線局免許の取得にあたっては、ローカル５Ｇ無線局の設置場所周辺に携帯電話事業者である NTT docomo が開局しており、NTT docomo の確認と合意を得た上で総務省中国総合通信局に無線局免許申請を行い、実証試験開始までに無線局免許を取得した。

実証試験終了後は実証結果の精査を行った上で、引き続き廿日市工場内にてローカル５Ｇの実運用を行う予定である。そのため実証試験終了後、商用局免許の取得に向けた無線局免許申請を行う。

2.5 その他要件

本提案におけるローカル５Ｇシステムについては、3GPP（Release15）に準拠しており、標準化された無線インターフェースが具備されたものを採用した。

また本システムの基地局、コア設備等については特定高度情報通信技術活用システムの開発供給及び導入の促進に関する法律（令和 2 年法律第 37 号）に基づく開発供給計画認定を受けた実績を有する事業者が開発供給した機器であり、同認定を取得しているシステムを採用した。

１．認定の日付
令和 3 年 3 月 15 日

２．開発供給計画認定番号
2021 開 1 総経第 0002 号－1

３．認定開発供給事業者の名称
富士通株式会社

４．認定開発供給計画の概要
一般企業、自治体向けに、製造業（スマートファクトリーでの活用を想定）をはじめとして地域活性化のための様々な事業領域に適用可能なローカル５Ｇシステムに供する設備として以下の設備を開発供給した。

５．開発供給を行う特定高度情報通信技術活用システムの内容
本提案で導入するシステムについては、「IT 調達に係る国の物品等又は役務の調達方針及び調達手続に関する申合せ」（2018 年 12 月 10 日関係省庁申合せ）等に留意し、サプライチェーンリスク対応を含む十分なサイバーセキュリティ対策を講じている。

表 2.5-1　開発供給を行った設備一覧

メーカー	種別	型番・型式	主な仕様等（概要）
富士通	特定基地局以外の基地局の無線設備	PW300-CU	・CU
富士通	特定基地局以外の基地局の無線設備	PW300-DU	・DU
富士通	特定基地局以外の基地局の無線設備	PW300-RU-O	・RU ・4.8-4.9 GHz 帯用 ・アンテナ一体型 ・屋外設置用
富士通	交換設備	PW300-5GC	・オンプレミス型 ・５Ｇ SA 方式
富士通	交換設備	PW300-EMS	・オンプレミス型 ・５Ｇ SA 方式

また、本課題実証に際してローカル５Ｇ専用の閉域ネットワークを利用した。外部のネットワークへのデータ伝送を伴う接続は行っていないため、追加のサイバーセキュリティ対策は不要である。

実証に用いる機材の事前品質担保のため、実証前のラボでの動作確認に先立って１週間程度の日程を設け、2021 年 11 月 16 日～2021 年 11 月 29 日で下表に示す内容の事前品質確認を行った。

表 2.5-2　実証に用いた機材の事前品質確認の内容

No	分類	機材	品質確認方法	確認結果
1	測定器	エリアテスタ	校正されていることを確認する。 既設のローカル５Ｇシステムにおいて SS-RSRP の測定データが所定の周期で所定のサンプル数として取得できることを確認する。	問題無し (SS-RSRP の測定データが 100ms 周期で 2 分 20 秒以内に 1000 サンプル取得できることを確認した)
2		Nemo Outdoor	既設のローカル５Ｇシステムにおいてスループット測定ができることを確認する。	問題無し (MAC レイヤの UL スループットが測定できることを確認した)
3	ローカル５Ｇ通信	スループット性能	UE に接続した PC と N6 インターフェースに接続した PC との間のデータ通信において正常なスループット値が得られることを確認する。	UL 50Mbps 以上のスループットを確認した。
4		遅延性能	UE に接続した PC と N6 インターフェースに接続した PC との間のデータ通信において正常な遅延時間値が得られることを確認する。	遅延時間が 500msec 以内であることを確認した。

2.6 実証環境の運用

ローカル５Ｇ運用に先立ち、実証参加者に対する保守・運用に関する説明会を実施し、システムの概要、電波送信・停止手順などの基本操作、障害発生時の対応方法などについて説明を行った。

実証期間中、ヘルプデスク窓口を設置し、実証参加者等からの問合せ等に対応するとともに、不具合が発生した場合に備え、迅速な対応体制を整備し、原因を特定し対処した。実証期間中の実証環境に係る不具合や問合せ等は記録し、実証成果の取りまとめを行った。

2.6.1 運用保守管理

以下を対象範囲として、運用保守管理を行った。

- 電波送信　…停電等でシステム起動を行う際に必要な RU 電波の送信操作
- 電波停止　…停電等でシステム停止を行う際に必要な RU 電波の停止操作
- 保守交換　…装置故障時の原因調査、代替装置の準備・交換

2.6.2 運用保守の実施体制

本実証では以下の体制で運用保守を実施した。

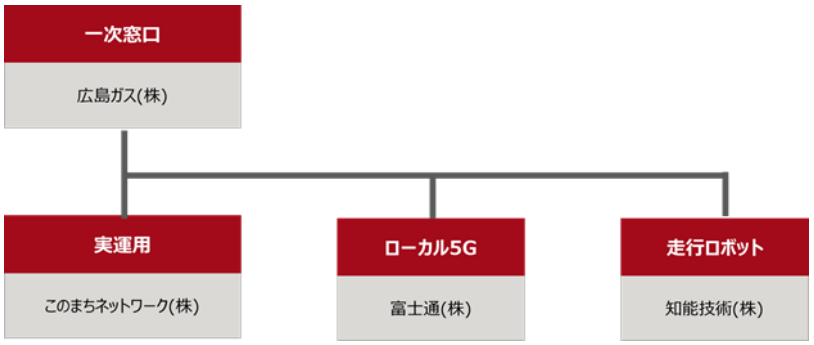


図 2.6-1　実証における運用保守の実施体制

2.6.3 ローカル５Ｇ保守・運用説明会の開催

以下の要領で、ローカル５Ｇ保守・運用説明会を開催した。

・実施日時

2022 年 2 月 18 日 14:15~15:15

・実施場所

広島ガス 廿日市工場 管理棟 1F

・参加者

広島ガス、このまちネットワーク　7 名

・説明者

富士通　　2 名

・資料

ローカル５Ｇ保守運用説明会資料

Local ５Ｇシステム PW300 保守運用マニュアル

・実施内容

上記資料による座学での説明を実施後、電気室に移動しローカル５Ｇ機器の実物による外観説明および操作説明を実施した。説明会における質疑内容を**表 2.6-1** に示す。

表 2.6-1　ローカル５Ｇ保守運用説明会質疑事項

	質問事項	回答
1	電波の停止/発射のためDUのLock/Unlockを行うが、電波停止/発射を行うRUとの関係は？	広島ガス様の構成では、DUとRUを1対1に接続する構成としている。
2	装置障害が発生した際に、Webで見に行かなくても障害発生を知る方法はあるか？	表示灯のような外部装置を接続し、障害時にそれを光らせて知らせることが可能。
3	基地局で障害が発生し対処のためにDUのリセットが必要な場合、説明会資料に記載があるシステム全体の停止/開始を実施する必要があるか？	特定のDUだけをリセットすることが可能。手順はローカル5G保守運用マニュアルに記載している。

2.6.4 実証期間中の問い合わせ事項

実証期間中におけるローカル５Ｇに関する問い合わせ内容および対応内容を**表 2.6-2** に示す。

表 2.6-2　ローカル５Ｇ問い合わせ・対応事項

	問い合わせ内容	対応	対応日
1	電気室に設置したPCから、ローカル5Gルータに接続したPCへのpingが疎通しない。	ローカル5GルータのNAT設定値と接続されたPCのIPアドレス不一致が原因。 NAT設定値に合わせる形でPCのIPアドレスを修正し解決。	2022/2/18

3. ローカル５Ｇの電波伝搬特性等に関する技術的検討（技術実証）

3.1 実証概要

構築したローカル５Ｇの実証環境において、4.8GHz 帯における電波伝搬特性等の測定および電波伝搬モデルの精緻化を実施した。郊外(臨海部)の LNG プラントである廿日市工場は、自己土地内に金属製の大型構造物やパイプ群が多数存在する屋外環境であることから、屋内に比べて理解が進んでいない屋外の高反射環境におけるローカル５Ｇの電波伝搬を調査・検証するには好適な実証環境と考えた。

本技術実証では、まず廿日市工場での電波伝搬測定を行い、現行のエリア算出法で規定するエリアカバレッジや調整対象区域が屋外環境でどの程度実測と乖離しているかを確認すると共に、課題実証で要求される無線性能がエリアカバレッジ内で実現できているかを確認した。

更に、現行のエリア算出法で規定されているパラメータのうち、周辺環境の影響を考慮するために基地局から 100m 以上の地点で適用される S を対象として、屋外の高反射環境に適した S の値の導出を狙った電波伝搬モデルの精緻化を行った。

技術実証を行った項目を以下に示す。

表 3.1-1　技術実証の概要

項目			該当（○、×）
技術実証の実施環境	周波数帯	4.7GHz 帯	○
		28GHz 帯	×
		キャリア５Ｇの周波数帯	×
	屋内外	屋内	×
		屋外	○
		半屋内	×
	周辺環境	都市部	×
		郊外	○
		開放地	×
		その他	×
テーマ別実証	I.電波伝搬モデルの精緻化	K の精緻化	×
		S の精緻化	○
		R の精緻化	×
		その他の精緻化	×
	II.電波反射板によるエリア構築の柔軟化	実施の有無	×
	III.準同期 TDD の追加パターンの開発	TDD2 の検討	×
		TDD3 の検討	×
		TDD2、3 以外のパターンの検討	×
		追加パターンを具備した実機での検証	×
	IV.その他のテーマ	実施の有無	×

3.2 実証環境

本提案でローカル５Ｇを用いたソリューションの課題実証を行う広島ガス廿日市工場は、以下のような特徴を持っている。これらの特徴の幾つかは他分野の産業プラントでも共通して見られる特徴であるため、実証成果の横展開の観点で本工場での実証は意義のある環境と言える。

- 地方都市の臨海地帯に存在する LNG プラントで、区画面積が広い
- 敷地内には貯蔵タンクや製造設備等の大型の金属構造物が多数存在し、大小の金属パイプ群が密に敷設されている
- 敷地内の大部分が防爆エリアに指定されている
- 陸上だけでなく海上にも一部の設備が設置されている
- 他者土地との境界に壁などの障害物がなく、周辺には高さのある建物が少ない

これらの特徴が及ぼす影響を技術実証の観点で捉え、自己土地内の無線環境と他者土地への電波漏洩について以下に考察した。

（1）自己土地内の無線環境

図 3.2-1 に廿日市工場の全景を示す。廿日市工場は区画面積が約 37,000 m² の陸地部分とタンカーが接岸する海上部分で構成される臨海地帯のガスプラントである。

図 3.2-1　廿日市工場全景

工場敷地内には**図 3.2-2** に示すような高さ・幅のある大型金属構造物が多数存在している。これらの大型金属構造物は RU からの電波を反射するため、当該構造物の裏側に RU からの直接パスが期待できない見通し外エリアが形成される。

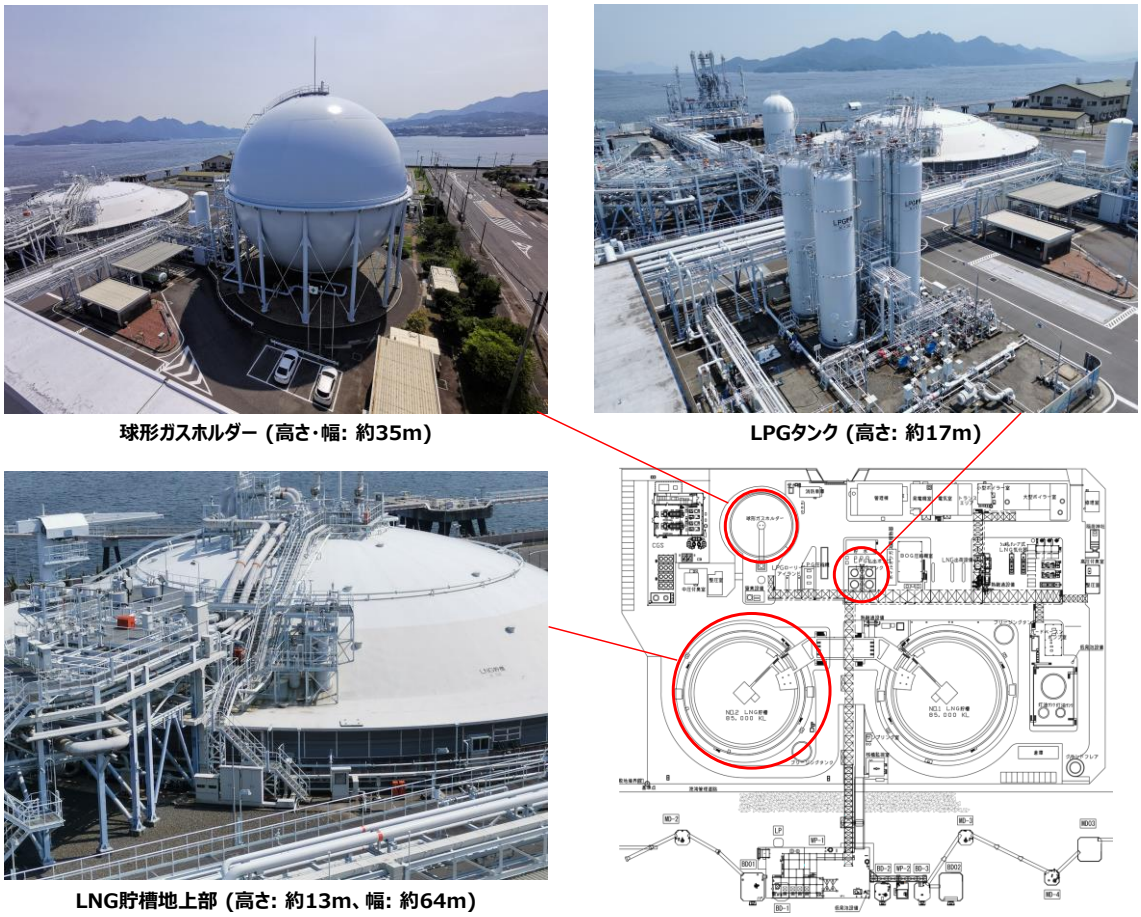


図 3.2-2　大型金属構造物の例

また、**図 3.2-3** に示すように、敷地内はガス生成のための各種設備が点在し、それらを接続する大小の金属パイプ群が密に敷設されている。これらのパイプ群も同様に遮蔽の要因となる。このような見通し外エリアは、周辺に金属構造物がある程度集まる敷地中央では反射による回り込みが期待できる可能性があるが、2 基ある LNG 貯槽の海側エリアのように隣接する他者土地からの反射が期待できない場所では弱電界となってカバレッジホールが発生した。一方で、反射によってマルチパスリッチな環境になることのデメリットも存在し、受信レベルの時間的・場所的な変動が大きくなるため、端末の移動を伴うユースケースではスループットの安定性に影響する可能性があった。

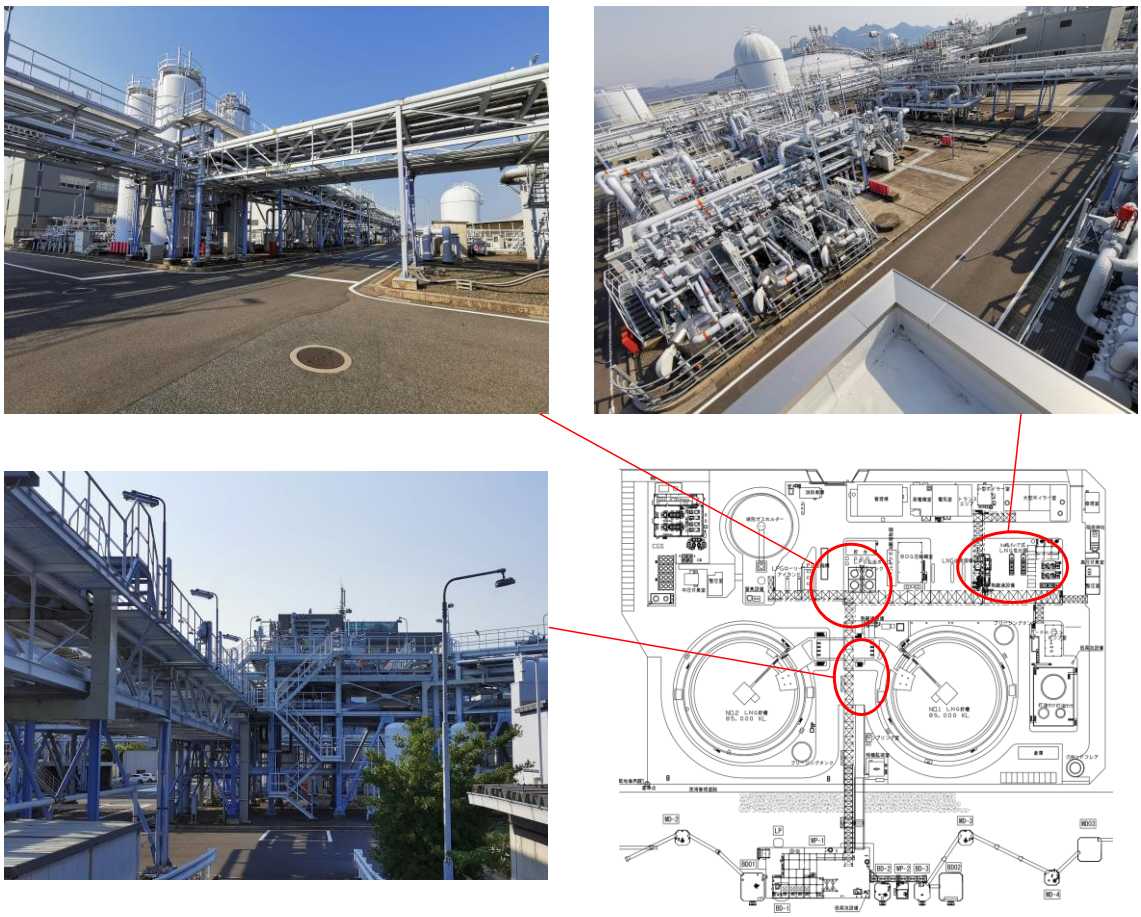


図 3.2-3　パイプ群の例

更に、廿日市工場は可燃性ガスを扱う危険場所であるため、**図 3.2-4** に示すように敷地内の多くが防爆エリアに指定されている。防爆エリア内に RU 等の基地局装置を設置する場合、耐圧防爆構造・本質安全防爆構造の防爆対応製品を用いる必要があり、低コストでのローカル５Ｇエリア構築の障壁となる。本実証では防爆エリア外での RU の設置を前提とするが、これによって RU の設置場所が制限され、自己土地内のエリアカバレッジ設計の自由度に影響を与える。

廿日市工場には LNG を搭載したタンカーが入船できる海上施設を備えている。工場前の海上は占有許可を得ており、自己土地相当と考えられる。課題実証で想定している点検・メンテナンスのユースケースの対象エリアに含まれるため、少なくとも桟橋部分まではローカル５Ｇのカバーエリアを構築する必要があった。陸地の敷地内に設置した RU から電波を放射しても、陸地から海上施設までの距離が短いため、海面による伝搬への影響は無視できると考えた。

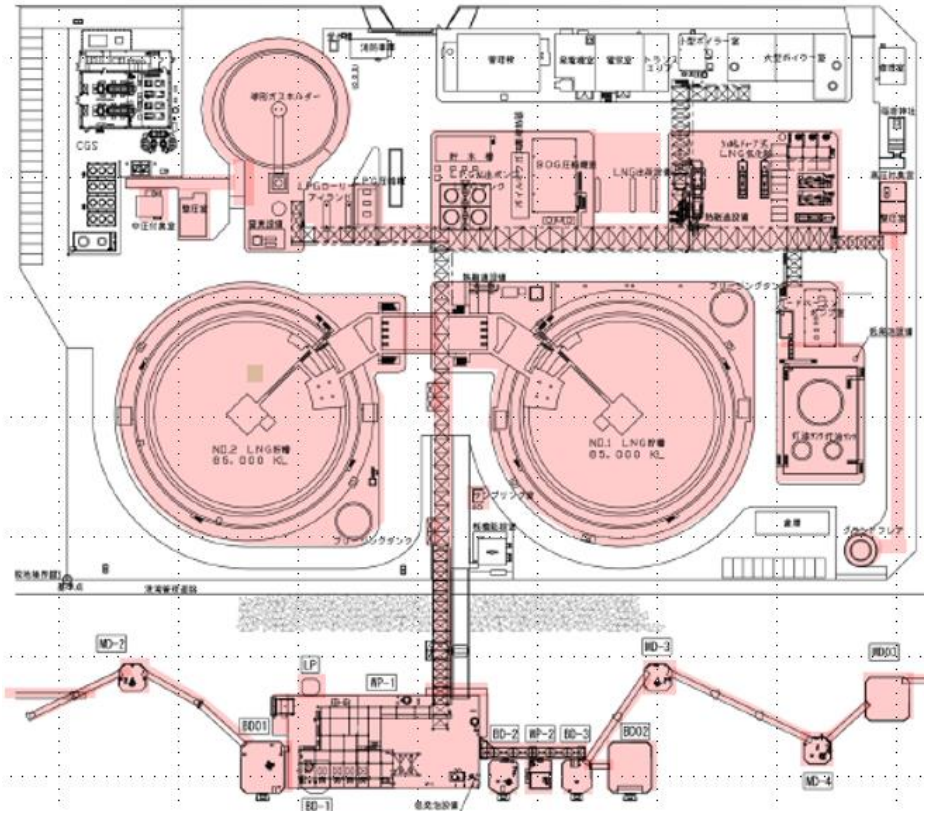


図 3.2-4　防爆エリア(赤色部分)

（2）他者土地への干渉漏洩

図 3.2-5 に示すように、風の強い臨海部に位置する廿日市工場は、自己土地の境界部分に金網フェンスが使用されている。フェンスは電波的な観点で障害物とはならないため、自己土地から放射されたローカル５Ｇの電波の一部や大型金属構造物によって反射された電波は、境界部分での透過損なしで他者土地に漏洩する。郊外地のため、周辺の他者土地内に大きさ・高さのある建物や反射物があまり存在せず、他者土地に侵入した自己土地からのローカル５Ｇの電波は、広範囲に伝搬すると考えた。

図 3.2-5　自己土地の境界部分

3.3 実証内容

3.3.1 ローカル５Ｇの電波伝搬特性等の測定

本実証では **2.3** で示したように、廿日市工場内の管理棟屋上、ボイラー室屋上、リサイクルセンターとの境界付近のそれぞれに 1 台ずつ屋外 RU を設置した。これにより、課題実証のユースケースである複数カメラ搭載小型走行ロボットの重点点検エリアを中心にカバーエリアを構成した。

電波法関係審査基準（平成 13 年度総務省訓令第 67 号）が規定するエリア算出法（以下、エリア算出法と記載）に基づき、各 RU によるカバーエリアおよび調整対象区域を表す図面を作成した。

この図面に示されるエリアに関して、以下の検証を行った。

（1）エリア算出法の閾値の検証

エリア算出法によるカバーエリア端および調整対象区域端における実際の受信電力を測定し、エリア算出法における閾値との比較および閾値が実測される位置を確認することにより、エリア算出法における閾値の検証を行った。

（2）カバーエリア内のローカル５Ｇの性能評価

カバーエリア内の 29 か所の測定点において、受信電力および伝送性能（アップリンク（以下、UL）/ダウンリンク（以下、DL）別の伝送スループット、伝送遅延）を測定し、課題実証システムで要求される性能を実現できるかどうかを検証した。要求性能を実現できない場合は実測データに基づき必要なローカル５Ｇを構築する方策を導出した。

3.3.1.1 実証目標

本実証においては、課題実証システムで求められるローカル５Ｇの性能として、**表 3.3-1** に示す性能を満たすことを目標とした。

表 3.3-1　ローカル５Ｇの所要性能

項目	小型走行ロボット	備考
上りスループット	50Mbps	根拠は 2.3.1 を参照
端末-コアネットワーク間の伝送遅延時間	500ms	

3.3.1.2 評価・検証項目

本章の実証を通じて評価・検証した項目を以下に示す。

（1）エリア算出法の閾値の検証

本検証では受信電力として**表 3.3-2** に示す項目を評価・検証した。

表 3.3-2　エリア算出法の閾値の検証における評価・検証項目

	評価・検証項目	説明
1	SS-RSRP [dBm]	1 リソースエレメントあたりの Secondary Synchronization Signal の受信電力

（2）カバーエリア内のローカル５Ｇの性能評価

本検証では**表 3.3-2** で示した受信電力のほか、**表 3.3-3** に示す項目を評価・検証した。

表 3.3-3　カバーエリア内のローカル５Ｇの性能評価における評価・検証項目

	評価・検証項目	説明
1	UL スループット [Mbps]	Nemo Outdoor ツールを使用して PUSCH 上の MAC レイヤにおけるスループットを測定
2	DL スループット [Mbps]	Nemo Outdoor ツールを使用して PDSCH 上の MAC レイヤにおけるスループットを測定
3	遅延時間 [ms]	QXDM ツールを使用して端末ログデータから MAC レイヤにおける往復の遅延時間を抽出

3.3.1.3 評価・検証方法

（1）エリア算出法の閾値の検証

以下の各ステップを実施することにより検証した。

本検証においては、測定に際しては対象となる 1 つの RU のみ電波を発射している状態とし、他の RU については停波しておくものとした。

1）カバーエリアおよび調整対象区域のエリア端位置の図示

屋外 RU を設置する廿日市工場内および隣接土地において、それぞれの RU からの距離に応じた電界強度をエリア算出法の計算式から机上計算で算出し、カバーエリアおよび調整対象区域となる閾値相当の位置を平面図上にプロットした。カバーエリア、調整対象区域の各閾値を**表 3.3-4** に示す。

表 3.3-4　エリア端の閾値

閾値種別	閾値（RSRP 換算）
カバーエリア	-119.8dBm
調整対象区域	-126.2dBm

2）各エリア端位置での電界強度の実測

各 RU について、エリア端位置に相当する 5 地点以上の地点を選択し、選択した地点において、**表 3.3-2** に記載の測定項目を測定した。測定には電界強度測定器(アンリツ社製のエリアテスタ ML8780A)を使用した。測定は 0.1 秒間隔で 2 分間の測定値を取得し、合計 1000 サンプルの測定結果に対し、中央値、σ、上位 10%値、下位 10%値を求めた。定在波の影響を避けるため、一つの測定点において、10λ(λは波長)の範囲で測定位置を動かしながら、得られた測定値すべてのサンプルを統計処理した。

3）実測値とエリア算出式における閾値との比較

測定した実測値とエリア算出式における各エリア端に相当する閾値（**表 3.3-4**）とを比較した。

4）閾値が得られる実測地点の確認

3)の結果、実測値と閾値が 3dB 以上異なる場合は、RU と実測値が得られた地点の周辺を移動し、閾値が得られる地点の位置を確認した。

5）実測と閾値の得られる地点の平面図上へのプロット

エリア算出式で閾値となる地点と、実測にて閾値が得られる地点について、平面図上にプロットした。

（2）カバーエリア内のローカル５Ｇの性能評価

カバーエリアに相当するエリアについて、主にカバーエリアとなる自己土地内について 29 か所の測定地点を設け、各測定地点での受信電力およびスループット、遅延時間を測定した。本評価ではエリアのカバレッジを確認する観点から、すべての RU の電波を送信状態として実施した。

工場内における測定地点の例を**図 3.3-1** に示す。実際の測定地点については、課題実証で使用する小型走行ロボットの走行コース、柱や設備等の位置、遮蔽物の有無等による電波伝搬への影響条件を考慮して選定した。

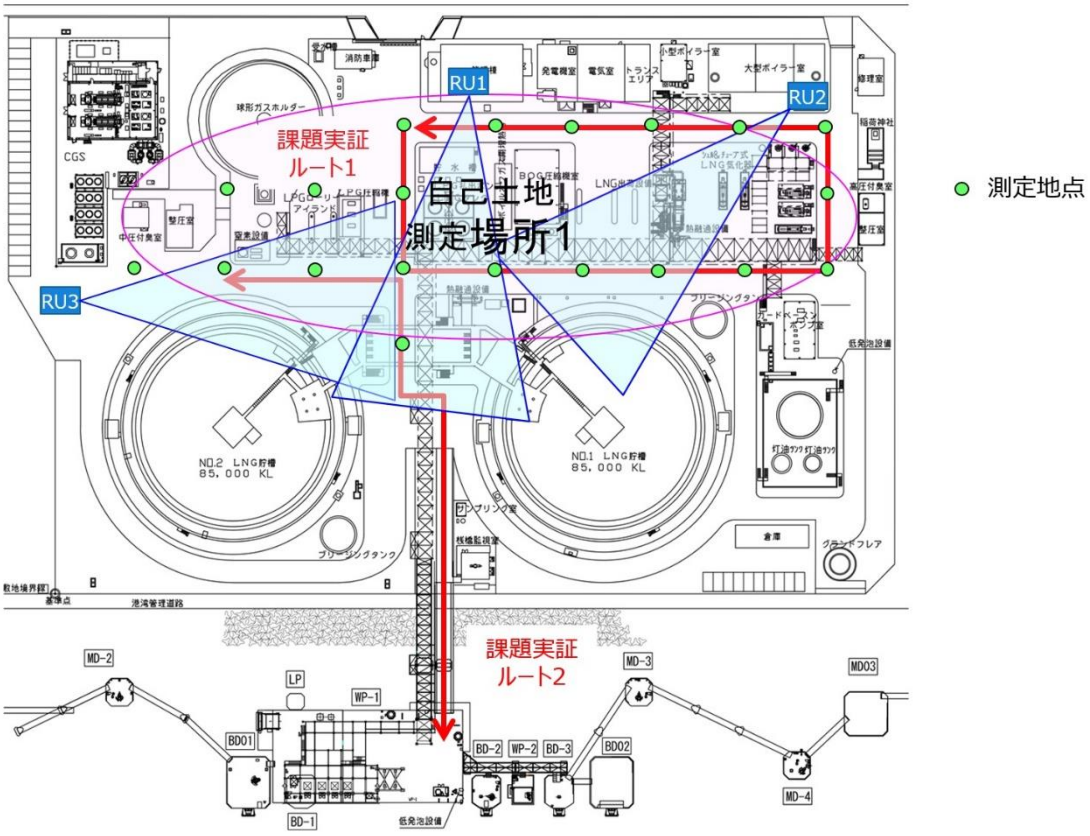


図 3.3-1　工場内における測定地点の例

1) 電界強度測定

表 3.3-2 の受信電力測定については電界強度測定器（アンリツ社製のエリアテスタ(ML8780A)）により測定した(**図 3.3-2**)。測定は 0.1 秒間隔で 2 分 20 秒間の測定値を取得し、合計 1000 サンプルの測定結果に対し、中央値、σ、上位 10%値、下位 10%値を求めた。測定値すべてについて統計処理を行った。また、一つの測定点において、定在波の影響を避けるため、**図 3.3-3** の通り、10λ(λは波長)の範囲で測定位置を動かすため、測定ワゴンと三脚を用いて測定を行った。測定手順は以下の通りである。

1. 測定ワゴン上に三脚及び測定器具を設置し、エリアテスタアンテナを地上高 1.5m に調整する
2. 測定ワゴン及びエリアテスタアンテナを測定対象の RU を望む方向に向ける
3. 電界強度のデータ取得を 2 分 20 秒間行う
   測定中はエリアテスタアンテナを 10λ（4.85GHz 帯の場合 60cm 程度）ずつ水平方向に動かすことで定在波対策を行う

(a)エリアテスタ本体(ML8780A)

(b)アンテナ(Z1911B)

図 3.3-2　　エリアテスタ(ML8780A)

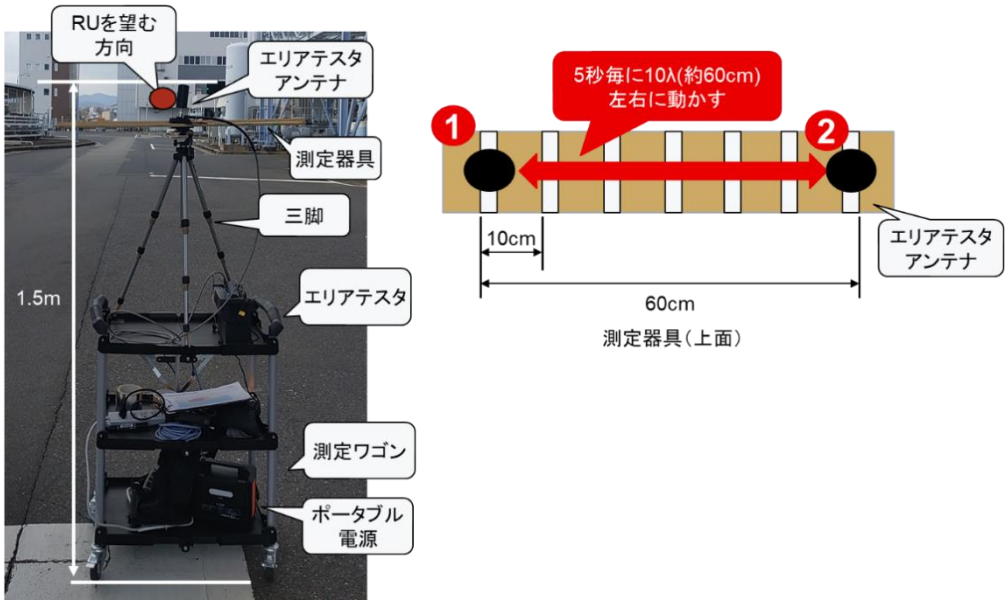
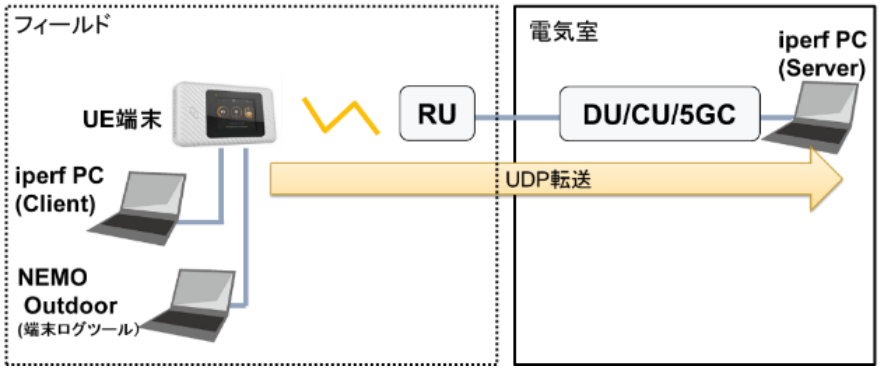


図 3.3-3　受信強度測定方法

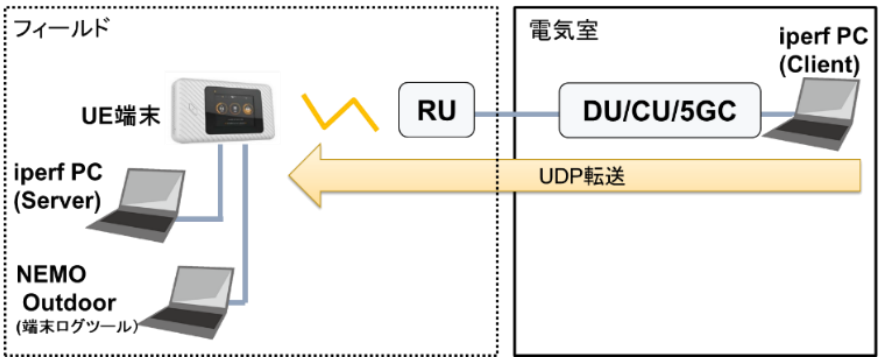
2) スループット測定(UL/DL)

測定するスループットについては**表 3.3-3** の No.1 および No.2 の項目をスループット測定ツールである iperf および無線伝送部分のスループットを測定できるツール（キーサイト社製の Nemo Outdoor）により測定した。測定構成を**図 3.3-4** に示す。

iperf ツールおよび Nemo Outdoor ツールを使用する際、端末に接続した PC とコアネットワーク側の L3SW に接続した PC のそれぞれで iperf ツールをサーバーモードまたはクライアントモードで実行することとし、上り方向、下り方向それぞれについて UDP モードによる試験データを送信し、端末に接続した PC 上の Nemo Outdoor ツールによって PUSCH/PDSCH 上の MAC レイヤにおけるスループットを測定した。測定時間は 1 測定地点あたり上り/下り各 1 分間とした。



(a)UL スループット測定



(b)DL スループット測定

図 3.3-4 スループット測定方法

3) 遅延時間測定

遅延時間について測定構成を**図 3.3-5** に示す。端末に接続した PC とコアネットワーク側の L3SW に接続した PC のそれぞれで iperf ツールをサーバーモードまたはクライアントモードで実行することとし、上り方向について UDP モードによる試験データを送信し、端末に接続した PC 上の端末ログツールにてログを取得した。取得したログから HARQ の再送遅延時間の平均値を取得した。測定時間は 1 測定地点あたり 1 分間とした。

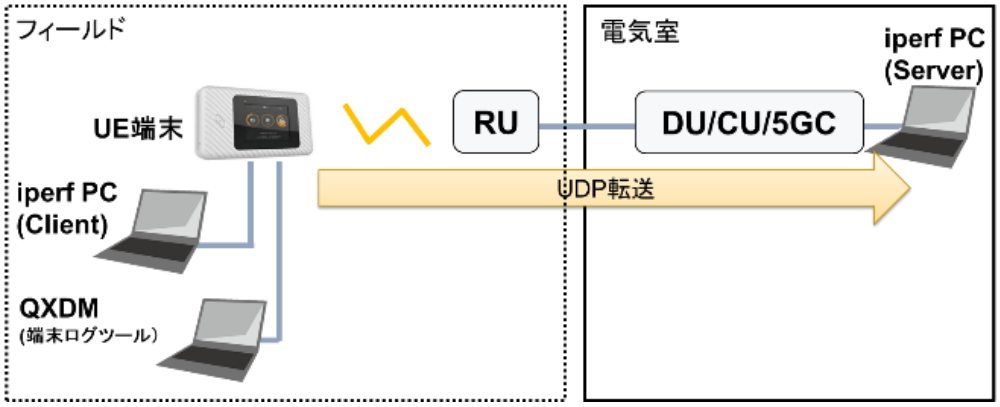


図 3.3-5 遅延時間測定方法

3.3.1.4 実証結果及び考察

（1）エリア算出法の閾値の検証

1）カバーエリアおよび調整対象区域のエリア端位置の図示

図 3.3-6、**図 3.3-7**、**図 3.3-8** に RU1、RU2、RU3 のカバーエリアおよび調整対象区域の図を示す。

図中の青線はエリア算出式により算出したカバーエリア端、赤線は調整対象区域端を示す。エリア算出式におけるパラメータ S の値は廿日市工場の立地条件に基づき S=12.3(郊外地)とした。

図中の赤点は電界強度の測定を行った測定地点を示す。赤矢印は測定を行った際の向きを示す。各測定地点には S1-6(例)といった形で識別番号を付与した。

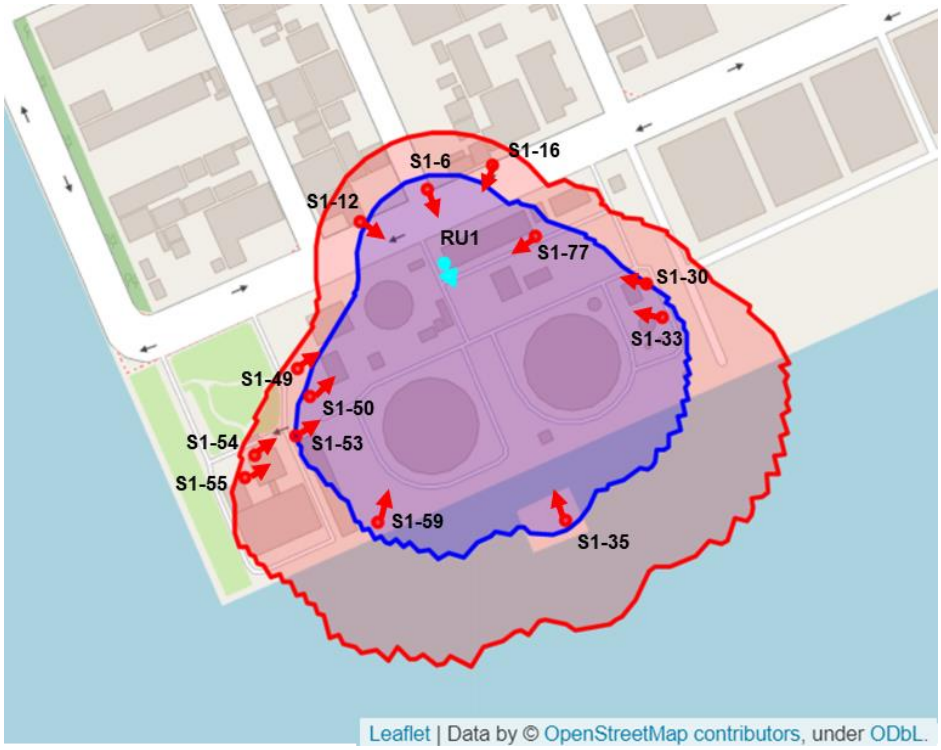


図 3.3-6　RU1 のカバーエリアおよび調整対象区域の図

図 3.3-7 RU2 のカバーエリアおよび調整対象区域の図

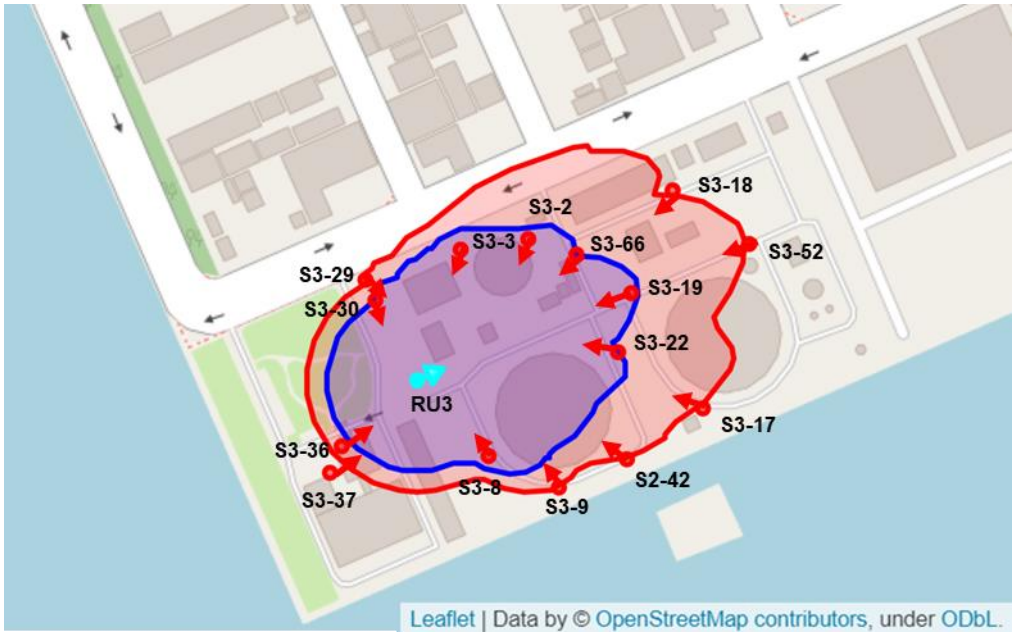


図 3.3-8　RU3 のカバーエリアおよび調整対象区域の図

2）各エリア端位置での電界強度の実測

表 3.3-5、**表 3.3-6**、**表 3.3-7** に RU1、RU2、RU3 のエリア算出式により算出した値と実測値を比較した表を示す。誤差Δはエリア算出式による受信電力と実測の中央値の差分を示している。

表中の測定点 ID は**図 3.3-6**、**図 3.3-7**、**図 3.3-8** に記した各測定地点の識別番号を示す。エリア算出式におけるパラメータ S の値は廿日市工場の立地条件に基づき S=12.3(郊外地)とした。

表 3.3-5　RU1 のエリア算出式による値と実測値

測定点 ID	算出式による受信電力 [dBm]	実測値					誤差Δ
		中央値 [dBm]	平均値 [dBm]	標準偏差	上位 10%値 [dBm]	下位 10%値 [dBm]	
S1-6	-116.6	-102.1	-102.2	2.2	-99.3	-105.1	-14.5
S1-12	-120.3	-103.3	-103.2	2.3	-100.3	-106.3	-17.0
S1-16	-122.9	-112.3	-112.2	1.6	-109.9	-114.3	-10.6
S1-30	-119.3	-102.2	-102.4	2.4	-99.2	-105.7	-17.1
S1-33	-117.6	-101.9	-102.3	2.6	-99.3	-105.7	-15.7
S1-35	-118.9	-91.2	-91.7	3.6	-87.3	-96.6	-27.7
S1-49	-122.8	-114.7	-114.6	2.4	-111.6	-117.5	-8.1
S1-50	-117.8	-108.7	-108.4	2.7	-104.6	-111.7	-9.1
S1-53	-119.3	-107.1	-106.8	3.0	-102.6	-110.5	-12.2
S1-54	-123.9	-105.6	-106.2	3.4	-102.2	-111.2	-18.3
S1-55	-124.7	-106.1	-106.3	2.9	-102.6	-110.2	-18.6
S1-59	-118.4	-103.5	-103.6	2.5	-100.3	-106.9	-14.9
S1-60	-119.0	-99.2	-99.2	3.4	-94.6	-103.5	-19.8

表 3.3-6　RU2 のエリア算出式による値と実測値

測定点 ID	算出式による受信電力 [dBm]	実測値					誤差Δ
		中央値 [dBm]	平均値 [dBm]	標準偏差	上位 10%値 [dBm]	下位 10%値 [dBm]	
S2-5	-119.9	-100.9	-102.8	6.0	-96.2	-111.4	-19.0
S2-9	-120.9	-106.8	-108.3	6.2	-100.9	-116.8	-14.1
S2-10	-126.5	-118.2	-118.1	1.8	-115.7	-120.1	-8.3
S2-15	-121.4	-111.2	-111.1	0.6	-110.3	-112.1	-10.2
S2-16	-126.3	-110.8	-111.2	3.2	-108.6	-113.4	-15.5
S2-17	-122.8	-104.0	-104.1	0.7	-103.3	-105.3	-18.8
S2-18	-122.4	-103.8	-104.3	2.7	-101.3	-107.7	-18.6
S2-39	-118.3	-96.7	-98.3	5.0	-93.9	-107.0	-21.6
S2-41	-127.5	-99.2	-99.7	3.4	-95.6	-104.4	-28.3
S2-42	-126.0	-115.4	-115.6	2.3	-112.6	-118.7	-10.6
S2-45	-125.9	-111.4	-113.0	5.3	-107.8	-122.1	-14.5
S2-48	-125.2	-96.5	-96.4	2.8	-92.7	-99.8	-28.7
S2-50	-120.9	-95.7	-95.8	2.9	-92.3	-99.2	-25.2

表 3.3-7　RU3 のエリア算出式による値と実測値

測定点 ID	算出式による受信電力 [dBm]	実測値					誤差 Δ
		中央値 [dBm]	平均値 [dBm]	標準偏差	上位 10%値 [dBm]	下位 10%値 [dBm]	
S3-2	-117.7	-96.1	-96.6	2.8	-93.4	-100.3	-21.6
S3-3	-114.2	-95.7	-95.7	2.9	-91.8	-99.3	-18.5
S3-8	-112.2	-93.5	-93.7	2.6	-90.5	-97.1	-18.7
S3-9	-126.2	-110.0	-110.2	2.6	-107.1	-114.0	-16.2
S3-10	-126.4	-108.1	-108.2	2.8	-104.7	-112.0	-18.3
S3-17	-126.2	-109.8	-110.0	1.6	-107.9	-112.2	-16.4
S3-18	-126.2	-100.7	-100.9	2.3	-98.0	-104.1	-25.5
S3-19	-118.9	-85.6	-85.7	3.2	-81.6	-90.2	-33.3
S3-22	-119.2	-91.6	-91.6	2.9	-87.8	-95.5	-27.6
S3-29	-126.9	-99.6	-100.0	2.6	-96.9	-103.8	-27.3
S3-36	-122.3	-94.6	-94.8	2.0	-92.2	-97.3	-27.7
S3-37	-130.5	-100.0	-100.0	2.0	-97.4	-102.4	-30.5
S3-38	-132.6	-97.4	-97.6	2.2	-94.8	-100.6	-35.2
S3-52	-126.0	-81.4	-81.6	1.3	-80.6	-82.8	-44.6
S3-66	-119.2	-94.1	-94.3	2.7	-91.0	-98.1	-25.1

3）実測値とエリア算出式における閾値との比較

RU1、RU2、RU3 いずれにおいても、エリア算出式における値に比べ、実測値が上回る結果となった。

これは廿日市工場の立地条件が「郊外」に相当することに対し、敷地内に大型の金属構造物が多く存在するプラント工場の無線環境の特徴は、これに相当しないことを示している。

また、仮説では廿日市工場の「敷地内に大型金属構造物が多く存在する」特徴により、「市街地」に近い実測結果が得られることを想定していたが、エリア算出式値に比べ実測値が上回る結果が出たことで、この仮説とも異なる結果が得られたことになる。

この後の仮説検証は、エリア算出式におけるパラメータ S を「開放地」とした場合の傾向の確認を含め、この特徴に相当する S の値を検証する。

なお工場敷地外で測定を実施し、調整対象区域端に相当する閾値(RSRP -126.2) 相当の値が得られた測定地点を**図 3.3-9** に示す。

敷地外は工場地帯であり業務車両が多く走行しているため、測定作業中に危険の無い場所に絞る形で測定地点を設けた。また、廿日市工場の西側および北側は海に面しているため、南側および東側に対し閾値が得られる地点の測定を行った。

測定の結果、南側は測定地点 O3-6(RU3 から距離 609m、実測値 -126.6dBm)、東側は測定地点 O1-7（RU1 から距離 836.5m、実測値 -128.9dBm）、測定地点 O2-5(RU2 から距離 259.6m、実測値-120.7dBm)にて閾値相当の値を測定した。

図 3.3-9　実測値による調整対象区域端

図 3.3-10、**図 3.3-11**、**図 3.3-12** にパラメータ S を「開放地」(S=32.5)とした際のエリア算出式により求めた調整対象区域端の図を示す。

測定点 O3-6、O2-5、O1-7 ともに調整対象区域端より外に位置しており、この結果からもパラメータ S を「開放地」またはそれより大きな値とすることが適切であることが想定される。

なお、測定地点 O1-7 では RU1 からの電波を観測したが、**図 3.3-9** に示すように RU1 の調整対象区域からは東に大きく外れている。これは RU1 から発射された電波が RU1 正面の LPG タンクや正面やや東側にある LPG 貯槽に反射し、敷地外まで大きく到達しているものと考えられる。

測定地点 O2-5 では、RU2 からの電波を観測したが、**図 3.3-11** に示すように RU2 の調整対象区域からは東に大きく外れている。これは RU2 から発射された電波が RU2 正面の金属パイプ群に反射し、敷地外まで大きく到達しているものと考えられる。

測定地点 O3-6 では、RU3 からの電波を観測したが、**図 3.3-12** に示すように RU3 の調整対象区域からは南に大きく外れている。これは RU3 から発射された電波が RU3 正面の LPG 貯槽や正面やや北側の球形ガスホルダーに反射し、敷地外まで大きく到達しているものと考えられる。

この後の仮説検証では、エリア算出式におけるパラメータ S を「開放地」とした場合の傾向の確認を含め廿日市工場で適切な S の値を検証する。

図 3.3-10　S=32.5(開放地)による調整対象区域の図(RU1)

図 3.3-11　S=32.5(開放地)による調整対象区域の図(RU2)

図 3.3-12　S=32.5(開放地)による調整対象区域の図(RU3)

この実証により、敷地内に金属構造物が多く存在する廿日市工場のような場所では「開放地」に近い形で敷地外に電波が届くことが分かったが、この点はローカル５Ｇを利用する別の事業者が隣接地に存在する場合に課題となるケースがあるものと考える。

廿日市工場においては隣接する場所に別のローカル５Ｇ事業者が存在しないことを確認済みだが、同様の特徴を持つ場所でローカル５Ｇ事業者が隣接する場合は、例えばアンテナの高さやチルト角の調整を行うことにより電波が敷地外に極力漏えいしないような対策が必要と考える。

（2）カバーエリア内のローカル５Ｇの性能評価

1）UL スループットの評価結果

3.3.1.3(2)に記載したように、工場内のカバーエリア内における各測定地点での UL スループットの測定値を平面図上に色分けしてプロットした図面を**図 3.3-13** に示す。
また、各測定地点の測定値を**表 3.3-8**、**表 3.3-9** に示す。

各測定地点は課題実証における走行ロボットの走行ルート（以下、課題実証ルート）1,2 上を中心に、29 か所を設けた。

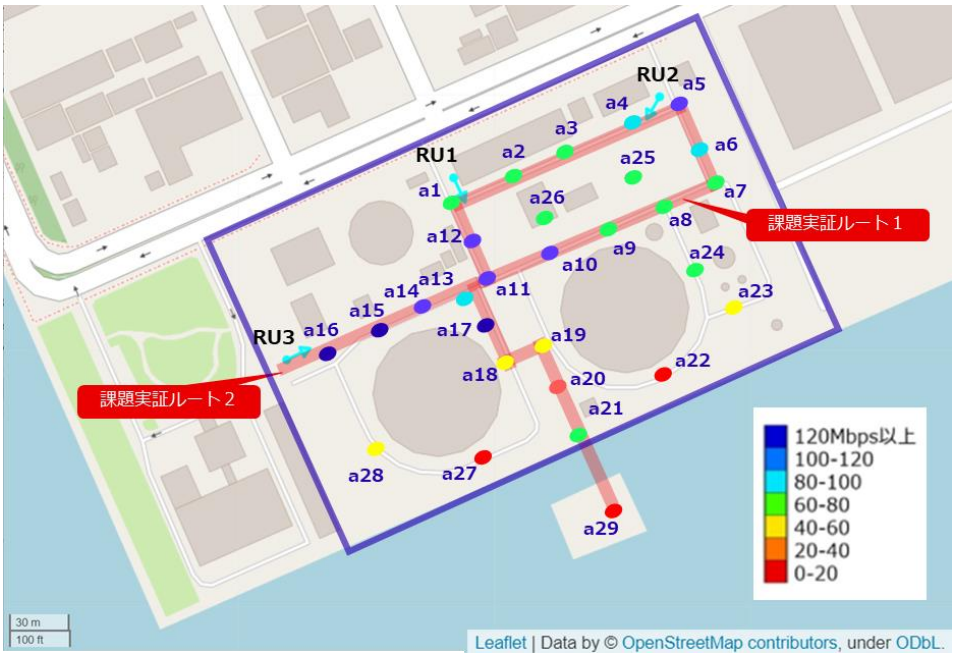


図 3.3-13　UL スループットの測定結果によるプロット図

表 3.3-8　UL スループットの測定値一覧

測定点	測定値	測定点	測定値	測定点	測定値
a1	67.6	a11	100.5	a21	74.0
a2	71.2	a12	117.9	a22	9.1
a3	71.0	a13	94.2	a23	48.0
a4	90.4	a14	114.4	a24	66.4
a5	100.3	a15	165.8	a25	75.9
a6	96.0	a16	147.3	a26	74.3
a7	75.8	a17	141.2	a27	14.1
a8	73.1	a18	55.1	a28	59.1
a9	74.0	a19	51.3	a29	15.1
a10	119.5	a20	31.3		

(単位: Mbps)

表 3.3-9　受信電力の測定値一覧

測定点	測定値	測定点	測定値	測定点	測定値
a1	-93.4	a11	-80.0	a21	-92.3
a2	-90.0	a12	-78.1	a22	-110.1
a3	-81.9	a13	-77.5	a23	-100.4
a4	-66.1	a14	-80.5	a24	-97.4
a5	-83.4	a15	-73.6	a25	-90.7
a6	-85.1	a16	-63.5	a26	-90.0
a7	-88.0	a17	-81.2	a27	-99.3
a8	-88.5	a18	-92.8	a28	-94.2
a9	-89.0	a19	-88.5	a29	-89.8
a10	-86.2	a20	-95.1		

(単位: dBm)

課題実証ルート 1 上の測定地点(a1～a12)では、いずれもローカル５Ｇの所要性能の目標値(上りスループット 50Mbps 以上)を満たすことを確認した。また、RU 近傍もしくは見通しが良く、良好な電波環境の測定点では 100Mbps 以上を測定した。

課題実証ルート 2 上の測定地点(a13～a21,a29)においては、一部の海側の測定点を除き 50Mbps 以上であることを確認した。

a20,a29 地点については 50Mbps に到達していない。場所の特徴として桟橋上またはその先の埠頭上に位置しており、東西を LNG 貯槽に囲まれ、北側からは LNG タンクおよび敷地中央部に密集する金属構造物により見通しを遮られていることで、各 RU からの直接または反射による電波が届きづらい環境になっているためと考えられる。

また、a22,a27 は課題実証ルートではないものの 50Mbps に到達していない。場所の特徴として海沿いに位置することで、a20,a29 と同様に RU1～3 からの電波環境が悪く、海側からの反射の恩恵も受けないため、低いスループット値を測定したものと考える。

受信電力の測定結果については、概ね UL スループットと同様の傾向が見られた。a16 地点では UL スループットで 165.8Mbps、受信電力で-63.5dBm とそれぞれ高い値を測定している。その反面、a22 地点では UL スループットで 9.1Mbps、受信電力で-110dBm とそれぞれ低い値を測定している。

今回の実証では防爆エリア外の RU 設置を前提とするなど低コストのローカル５Ｇエリア構築を意識したことで、敷地の南側(海沿い)にカバレッジホールが多く存在する形になっており、この点はエリア設計上の課題と考える。

本課題の対処方法としては、**図 3.3-14** に示すように RU 案①または RU 案②の場所に RU を追加設置することで現状海沿いのカバレッジホールとなっている部分をカバーする形が考えられる。また、カバレッジホールをカバーする形で反射板を設置することも有効な対処方法のひとつであると考えられる。

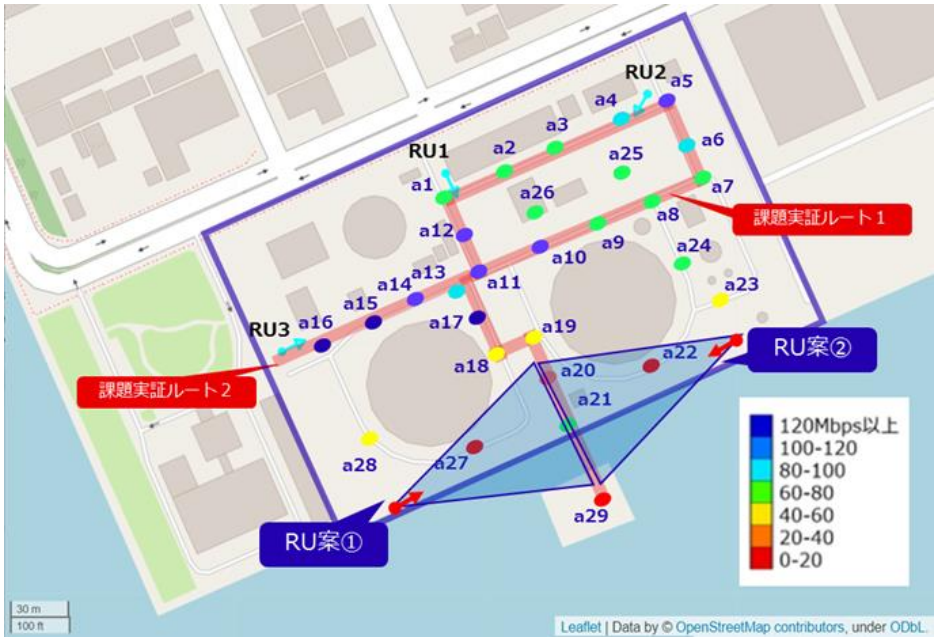


図 3.3-14　RU 追加設置場所の案

2）DL スループットの評価結果

1)UL スループットの評価と同様に課題実証ルート 1、2 上を中心とした 29 か所の測定地点で DL スループットの測定を行った。
各測定地点での DL スループットの測定値を平面図上に色分けしてプロットした図面を**図 3.3-15** に示す。また、各測定地点の測定値を**表 3.3-10** に示す。

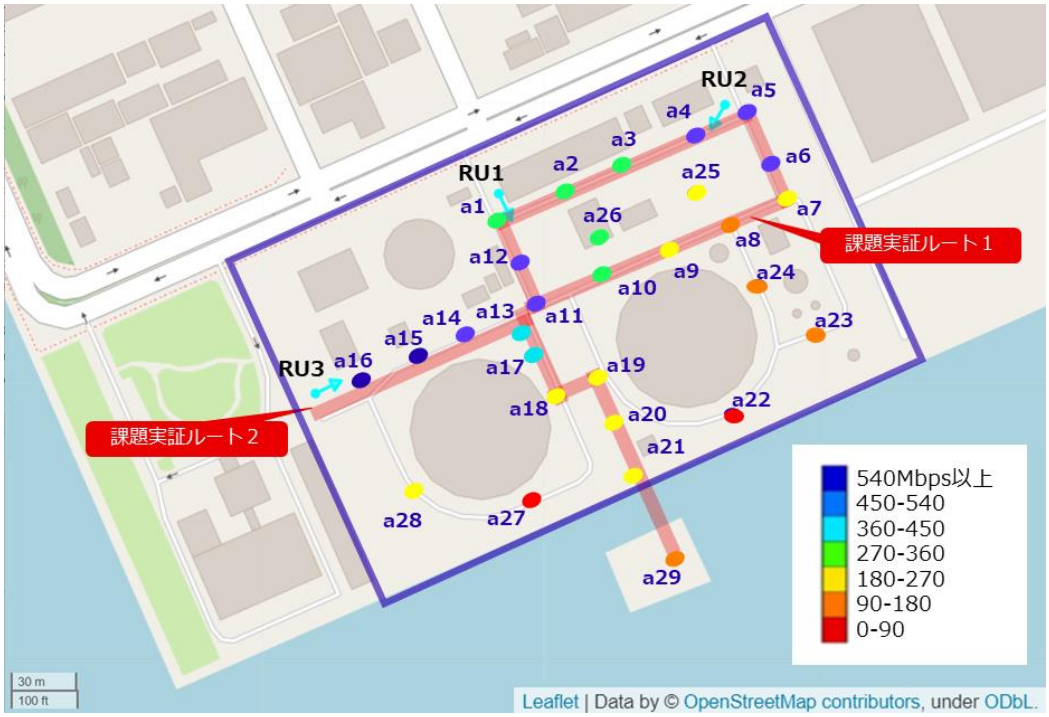


図 3.3-15　DL スループットの測定結果によるプロット図

表 3.3-10　DL スループットの測定値一覧

測定点	測定値	測定点	測定値	測定点	測定値
a1	329.0	a11	505.9	a21	242.5
a2	327.0	a12	527.3	a22	46.8
a3	343.0	a13	382.9	a23	96.1
a4	589.0	a14	475.8	a24	143.0
a5	450.6	a15	570.1	a25	180.4
a6	464.6	a16	572.8	a26	298.6
a7	214.5	a17	425.1	a27	83.5
a8	173.1	a18	204.4	a28	245.1
a9	228.4	a19	243.8	a29	136.6
a10	315.7	a20	201.5		

(単位: Mbps)

今回の課題実証では映像配信など主に UL によるデータ伝送を行い、DL データ伝送は行わないため DL スループットの目標値は設けていないが、課題実証ルート 1、2 上の主だった測定地点では良好な値(200～590Mbps 程度)を測定した。

また、RU 近傍もしくは見通しが良く、良好な電波環境の測定点では 500Mbps 以上を測定した。

一方で、南側(海沿い)の一部の測定地点(a13～a21,a29)においては、100Mbps を下回るといった低い値を測定した地点があるなど、UL スループットの評価結果と同様の傾向が見られた。

3）遅延時間の評価結果

1)UL スループットの評価と同様に課題実証ルート 1、2 上を中心とした 29 か所の測定地点で遅延時間の測定を行った。

表 3.3-11　遅延時間の測定値一覧

測定点	測定値	測定点	測定値	測定点	測定値
a1	1.26	a11	0.83	a21	1.12
a2	1.11	a12	1.39	a22	2.01
a3	1.32	a13	1.12	a23	0.63
a4	1.06	a14	1.40	a24	1.10
a5	1.19	a15	0.48	a25	0.82
a6	1.07	a16	0.90	a26	1.20
a7	2.66	a17	1.38	a27	0.57
a8	1.11	a18	1.14	a28	0.63
a9	1.13	a19	0.97	a29	0.99
a10	2.28	a20	0.77		

(単位: msec)

課題実証ルート 1、2 上の測定地点を含む、全ての測定地点でローカル 5 G の所要性能の目標値(500msec 未満)を満たすことを確認した。

3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化

3.3.2.1 実証の目的・目標

（1）背景となる技術的課題と実証目的

3.2 に記載したように、実証場所の廿日市工場は、区画面積が広い臨海部(郊外)に位置し、自己土地内にある金属製の大型構造物やパイプ群によって、自己土地内での遮蔽や反射による他者土地への干渉漏洩が想定される無線環境である。

しかしながら、現行のエリア算出法は、金属のような反射係数の高い構造物が多数存在する屋外環境の電波伝搬は想定しておらず、当該環境にローカル５Ｇのエリアを構築するケースに対応可能か十分に検証ができていない。具体的には、現行のエリア算出法で定義されている各種パラメータをどのように設定すれば高反射環境の電波伝搬を近似できるのか、新たなパラメータの導入を含めた当該環境に適したエリア算出法の修正が必要なのか等が明確化されておらず、調整対象区域の見積もりが精度良く行えていなかった。

そこで本実証では、多くの産業プラントで共通して見られる地理的・構造的な特徴を多数有する廿日市工場での電波伝搬を測定・評価することにより、郊外の反射物の多い屋外環境における電波伝搬モデルを精緻化することを目的とした。

（2）実証目標

現行のエリア算出法で規定された Sub-6 帯における電波伝搬損の計算式を以下に示す。

① d_{xy} ≦ 0.04Km の場合

$$L = L0 = 32.4 + \log_{10}(f) + 10\log_{10}\left\{(d_{xy})^2 + (H_b - H_m)^2/10^6\right\} + R \cdots (1.1)$$

② 0.04Km ＜ d_{xy} ＜ 0.1 km の場合

$$L = L0 + \left\{2.51 \times \log_{10}(d_{xy}) + 3.51\right\} \times \{L_H - L0\} \cdots (1.2)$$

③ d_{xy} ≧ 0.1 km の場合

$$L = L_H = 46.3 + 33.9\log_{10}(2000) + 10\log_{10}\left(\frac{f}{2000}\right) - 13.82\log_{10}\left(\max(30, H_b)\right) + \left\{44.9 - 6.55\log_{10}\left(\max(30, H_b)\right)\right\}\left(\log_{10}(d_{xy})\right)^{\alpha} - a(H_m) - b(H_b) + R - K - S \cdots (1.3)$$

表 3.3-12　伝搬損計算式における変数・パラメータ

変数・パラメータ	単位	値	説明	備考
f	[MHz]		中心周波数	
H_b	[m]		基地局の空中線地上高	
H_m	[m]	1.5	移動局の空中線地上高	
d_{xy}	[km]		基地局と移動局の間の 2 次元距離	
α		1	遠距離を考慮する係数	d_{xy}≦20km
$a(H_m)$	[dB]	0.057 -0.00092	移動局項に対して考慮する補正項	中小都市 大都市
$b(H_b)$	[dB]	0 $20\log_{10}(H_b/30)$	基地局高に対して考慮する補正項	H_b≧30m H_b < 30m
K	[dB]		地形の影響等の補正値	通常は 0
S	[dB]	0 12.3 32.5	市街地、郊外地、および開放地に対して考慮する補正値	市街地 郊外地 開放地
R	[dB]	16.3	基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損	実際の侵入損が明確な場合は建物に応じた値を適用

実証環境は臨海部(郊外)の屋外であるため、パラメータ R は対象外とした。廿日市工場には海上に一部の施設が存在するが、陸地部分との距離は 30m 程度と短いため海面による伝搬影響は殆どないと考えられる。また、周辺には樹高のある植生は存在しないため、パラメータ K も対象外とした。

本実証では、敷地内に金属構造物が多数存在する郊外環境に着目し、パラメータ S を精緻化の対象として選択した。式③のとおり、S は基地局からの距離が 100m 以上の地点に対して定義されている。廿日市工場の敷地は横 240m、縦 150m の広さであるため、自己土地の一部と他者土地が S による補正の対象とした。自己土地と他者土地での電波伝搬が大きく異なることが想定される本実証環境で、S の選択基準の妥当性の検証を行った。更に、パラメータ S に加えて、自己土地内の大型の金属構造物による反射が他者土地に及ぼす干渉影響を評価検証した。

3.3.2.2 実証仮説

精緻化の対象として選択したパラメータ S と、自己土地による反射が他者土地に及ぼす干渉影響について、実証する仮説設定を以下に示す。

（1）仮説①: 「周辺環境ではなく、自己土地内の伝搬環境に基づいてパラメータ S を選択する方が実測との差分が小さい」

現行のエリア算出法が基づく拡張秦式は、ある程度一様な伝搬環境を前提に構築されていると考えられ、自己土地の立地環境を判断基準としてパラメータ S の値を選択することになっている。しかし、本実証を行う廿日市工場は区画面積が大きい郊外に位置するものの、敷地内に存在する大型の金属構造物やパイプ群によって遮蔽や複雑な反射・回折の発生が予想され、自己土地内の伝搬環境は郊外地よりも市街地に近い(伝搬損が大きい)と推測される。このような、自己土地と周辺環境の電波伝搬特性が大きく異なると見込まれる状況下で、現行のように周辺環境に基づいて S の値を選択すると、カバーエリアおよび調整対象区域を過剰に見積ってしまい、周波数資源の効率的活用を阻害することになる。

拡張秦式では距離 100m 以降は環境によらず一律で 3.5 乗減衰で近似されており、パラメータ S は環境によって異なる伝搬損のオフセットを与える切片の役目を果たしていると言える。つまり、エリア算出式で S が適用されるのは距離 100m 以降であるが、S は距離 100m までの伝搬を距離 100m 以降に反映するためのパラメータと捉えることができる。

そこで、本案件のような自己土地と周辺環境の電波伝搬特性が大きく異なることが見込まれる環境では、周辺環境ではなく自己土地を含む距離 100m 以下の伝搬環境を基に S の値を選択するのが妥当ではないかという仮説を立てた。具体的には、廿日市工場(自己土地)敷地内の伝搬環境が市街地相当と予想し、現行のエリア算出法が想定する郊外地相当の S=12.3[dB]ではなく、市街地相当の S=0[dB]を適用することにより、カバーエリアおよび調整対象区域のエッジ位置における実測との差分が減少するかを検証した。

（2）仮説②:「RU 近傍での反射による他者土地への干渉漏洩は、現行のエリア算出式では表現困難」

仮説①が対象とするパラメータ S は現行のエリア算出法では基地局から距離 100m 以遠の地点で適用されるが、RU 近傍での反射による影響には対応していない。例えば、アンテナ指向性を持つ RU を自己土地と他者土地の境界付近に設置し、自己土地の中心が高ゲイン方向となるように設定する場合、RU の近傍に**図 3.2-2** に示すような大型の金属構造物が存在すると、当該構造物で反射された電波は、高レベルの干渉として他者土地に漏洩する可能性がある。具体的には、現行のエリア算出法に基づいて受信電力を計算する際、伝搬損や RU の送信アンテナゲインは RU と端末を結んだ直線距離や方向で決まる値を用いるが、本実証のようにアンテナ指向性を持つ RU を自己土地の中心部に向けて設置する場合、RU の裏側方向は送信アンテナゲインが低いため、直接波による他者土地での受信電力は低く見積もられる。しかし、送信アンテナゲインが高い自己土地中心方向に照射された電波が RU 近傍の金属構造物で反射して他者土地方向に飛ぶと、エリア算出法で見積もった直接波よりも大きい受信電力の反射波が測定されると推測される。

そこで、自己土地内の大型金属構造物での反射の影響が大きいと予想される他者土地ではエリア算出法よりも高い受信電力が観測されるという仮説を設定し、主に距離 100m 以内の他者土地での干渉影響の評価検証を行った。

（3）精緻化によって予想されるカバーエリアおよび調整対象区域の差異

自己土地を含む距離 100m 以下の伝搬環境に応じた S の値を適用したエリア算出式を使用し(仮説①)、RU 近傍に存在する大型の金属構造物による反射影響を考慮した場合(仮説②)に、精緻化によって予想されるカバーエリアおよび調整対象区域の差異は**図 3.3-16** のようになると考えた。自己土地内の電波伝搬環境(市街地相当)に応じた S の値を適用することで、カバーエリアおよび調整対象区域のエッジまでの距離(以下、エッジ距離)は縮減し、RU 近傍の金属構造物による反射が想定される他者土地エリアでは、エッジ距離が伸長する見込みとした。

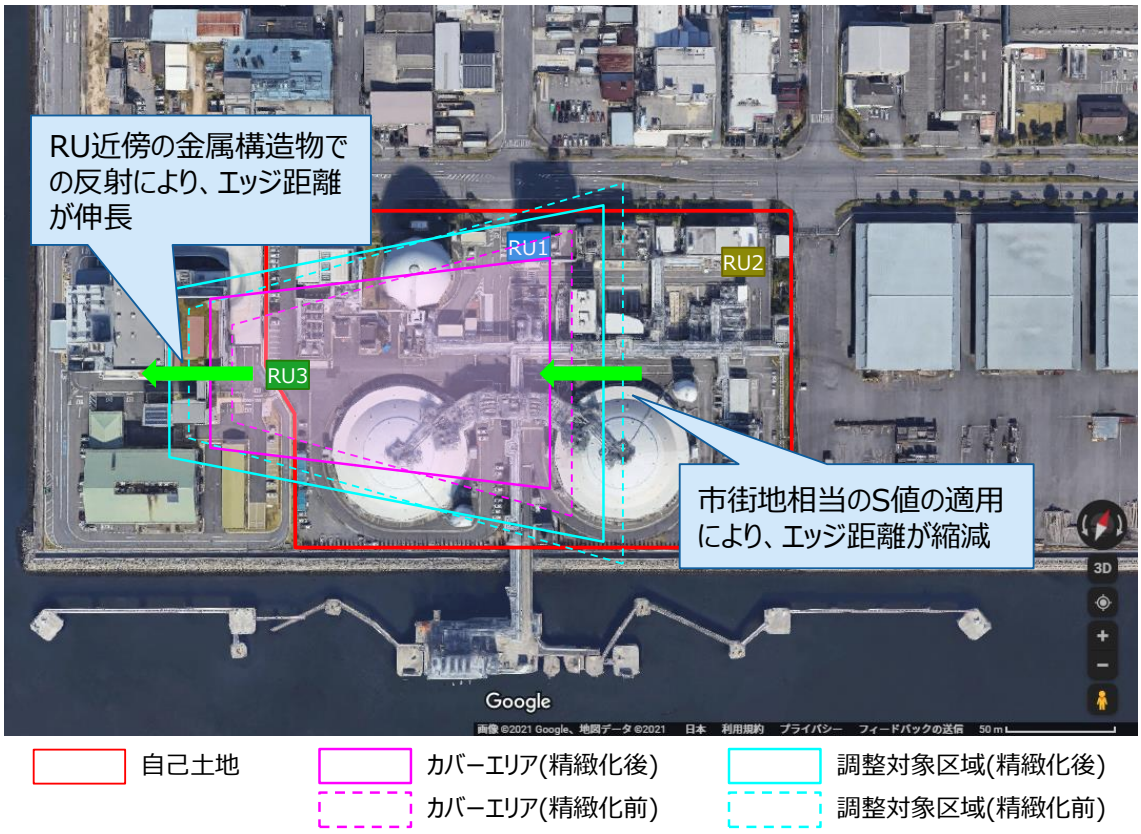


図 3.3-16　精緻化によって予想されるカバーエリアおよび調整対象区域の差異

3.3.2.3 評価・検証項目

本実証では、基地局から測定点までの間の電波伝搬損失を算出するために、測定点における基地局からの受信電力として**表 3.3-13** に示す項目を測定した。

表 3.3-13　伝搬精緻化のために測定する項目

	評価・検証項目	説明
1	SS-RSRP [dBm]	1 リソースエレメントあたりの Secondary Synchronization Signal の受信電力

エリア算出法で規定された下式と測定した受信電力を基に、測定点における伝搬損失 L を算出した。

$$L = P_t + G_t - L_f + G_r - P_r - 8 \cdots (1.4)$$

表 3.3-14　伝搬損失計算式の変数

変数	単位	説明
P_t	[dBm]	送信電力(基地局の空中線電力)
P_r	[dBm]	測定点における受信電力
G_t	[dB]	送信アンテナ利得
G_r	[dB]	受信アンテナ利得
L_f	[dB]	基地局の給電線損失

上記方法で取得した本実証環境の伝搬損のデータを基に、仮説の妥当性の検証を目的として、以下の項目についての評価・検証を行った。

■仮説①についての評価検証項目

郊外プラント(廿日市工場)での最適な S の値、および自己土地を含む距離 100m 以内の伝搬環境との関係

■仮説②についての評価検証項目

RU から距離 100m 以内の他者土地でエリア算出式と実測との受信電力差が大きい場所と、近傍の大型金属構造物との関係

3.3.2.4 評価・検証方法

（1）受信電力の測定

自己土地および他者土地において、全 RU から電波を吹いた状態で、受信電力を各 RU について測定した。測定には電界強度測定器(アンリツ社製のエリアテスタ ML8780A)を使用した。測定は 0.1 秒間隔で 2 分 20 秒間の測定値を取得し、合計 1000 サンプルの測定結果に対し、中央値、σ、上位 10%値、下位 10%値を求めた。定在波の影響を避けるため、一つの測定点において、10λ(λは波長)の範囲で測定位置を動かしながら得られた測定値すべてのサンプルを統計処理した。測定結果については予め準備したデータ処理ツールを用いて測定位置に対する測定値として図に表示し、シミュレーション結果と照合することで異常値となっていないかどうかを現地で確認できるようにした。

測定地点については基本的に干渉調整を行うエリア端を決める算出式のパラメータ精緻化が目的であることに鑑み、基地局からの方向の異なる複数の地点で、仮説検証に必要なデータが取得できることを狙った位置に設けた。具体的な測定点の位置については後述の(2)、(3)における各パラメータの仮説検証方法の中で説明する。なお、カバーエリアおよび調整対象区域の閾値と一致する受信電力が得られる場所が他者土地内と推測される測定地点については、海側を除く廿日市工場の周辺で他者土地の測定を実施した。自己土地の境界に電波が減衰する障害物がなく、隣接する左右の他者土地への伝搬範囲は広いと予想されたため、許可を得た上で他者土地に立ち入って測定を行った。

各測定点での測定に際しては、LOS/NLOS の状況を記録し、基地局を望む方向の写真を撮影するとともに、測定点の受信電力に影響が予想される周辺環境について記録した。

（2）仮説①の検証方法

仮説①の検証は、以下の 2 ステップの手順で進めた。

[Step-1] 廿日市工場全体でパラメータ S を最適化した場合の評価

自己土地内に大型の金属構造物が多数存在する廿日市工場の伝搬は、巨視的には市街地相当の S の値が妥当ではないかという仮説を検証した。

[Step-2] RU からの距離 100m までの伝搬と、100m 以降の伝搬の関係の調査

自己土地内の距離 100m までの伝搬環境の違いが距離 100m 以降の伝搬にどう関係するかを調査することにより、距離 100m までの伝搬環境をパラメータ S の値の判断基準とすることが可能かどうかを検証した。

1）Step-1 の実施内容

本ステップでは、実測したカバーエリアおよび調整対象区域の各エッジ位置における、エリア算出式で推定した受信電力とエッジ閾値電力の誤差Δを使用した。

1）廿日市工場全域で最適化した S の値の評価

エッジ位置の測定を 1RU あたり 5 か所(方向)で行った場合、全体では 3RU × 5 か所/RU × 2(エッジ&調整区域) = 30 箇所のエッジ位置における誤差Δが存在する。これらの二乗和が最小となる S を算出することで、廿日市工場全域を対象とする S の最適値が計算できる。S の最適値が予想どおり市街地相当(S≒0[dB])と言えるかを判定し、値のずれが生じる場合はその理由を考察した。例えば、大型金属構造物による強い反射の影響を受けると考えられるエッジ位置でのデータが含まれる場合は、当該データを除いて最適化した場合に S の値がどう変化するかを評価した。

2）RU 毎で最適化した S の値の評価

今回実証で使用した 3 台の RU は、地上高や放射方向、RU 周辺の金属構造物の配置や密度などがそれぞれ異なる場所に設置される。そこで、各 RU における、5 か所/RU × 2(エッジ&調整区域) = 10 箇所のエッジ位置での誤差Δの二乗和が最小となる S の値を算出することで、RU 毎に最適化した S の値を把握することが可能になる。各 RU の放射方向に存在する金属構造物の高さや形状、配置密度などの情報と、RU 毎の S の最適値との関係を評価することにより、伝搬環境の違いによる S の値への影響を考察した。

2）Step-2 の実施内容

本ステップでは、RU からの距離 100m 以内の伝搬環境と 100m 以降の伝搬損の距離特性の関係を評価することで、距離 100m までの伝搬環境をパラメータ S の値の判断基準とすることが可能かどうかを検証した。

調査のためのデータとして、各 RU において、RU を基点に複数方向に伸びる各直線上で約 20m 間隔、最大 10 か所にて受信電力を測定し、方向毎の測定データのまとまりとして扱った。**図 3.3-17** は RU3 についての 5 方向の当該測定点のまとまりと、RU3 を中心とする半径 100m の円を例示したものである。

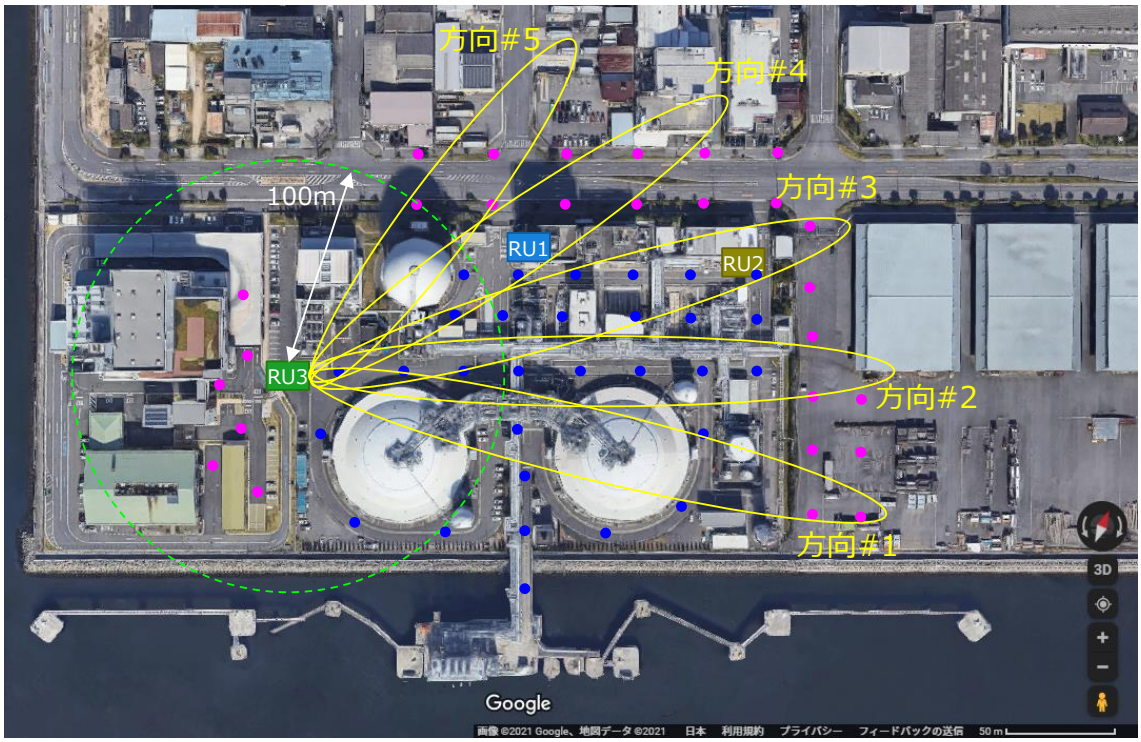


図 3.3-17　RU を起点とする複数方向での測定位置の例

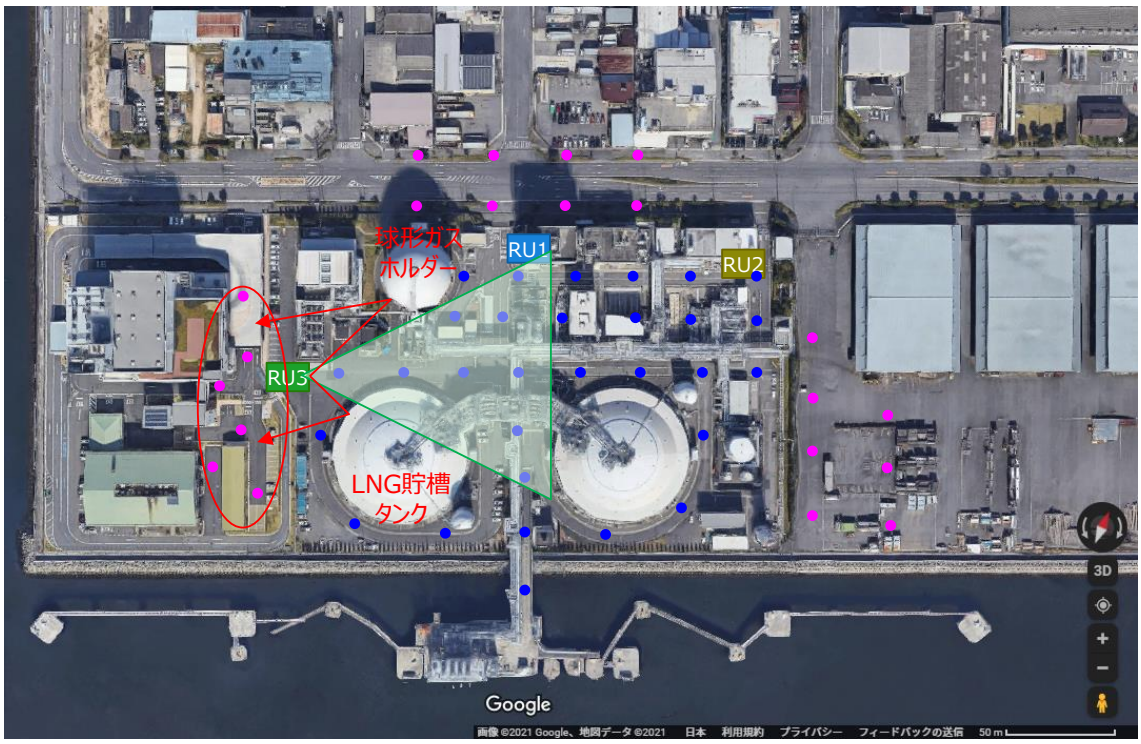
ここで、各方向(方向#1～方向#5)の測定データのうち、RU からの距離が 100m 以内のデータに類似性が見られる方向を抽出した。上記類似性は、例えば RU から距離 100m までの測定データでプロットした伝搬特性や、各方向に存在する伝搬に影響を及ぼし得る建物や大型金属構造物の寸法、形状、密集度やそれらによる遮蔽度などで判断し、最大 3 グループ程度に分類した。**図 3.3-17** を例にすると、方向#1 と方向#5 は距離 100m 以内に球形ガスホルダーや LNG 貯槽タンクが存在するので同等の反射影響を受ける可能性があるグループ、方向#2 と方向#4 は比較的見通しが得られるグループというように、距離 100m までの伝搬環境に類似性が見られる方向のデータをグルーピングして集約した。

次に、距離 100m までの伝搬環境に類似性が見られる各グループのデータから 100m 以降のデータを抽出して、当該データの受信電力を伝搬損に換算して基地局からの水平距離に対してプロットし、エリア算出式で計算した伝搬損が最もフィットする S の値を決定した。各グループにフィットした S の値を比較し、距離 100m までの伝搬環境が異なるグループ間で有意差のある S の値がフィッティングされていれば、距離 100m までの伝搬環境 S の値を選別できる可能性があると考えた。

（3）仮説②の検証方法

仮説②を検証するために、自己土地内において RU の近傍に大型の金属構造物が存在する場所の周辺に絞り、当該金属構造物による反射の影響が予想される他者土地での測定点を抽出した。**図 3.3-18** は RU3 を例として、RU 近傍の大型金属構造物である球形ガスホルダーと LNG 貯槽タンクよって左側に隣接する他者土地に干渉を及ぼしていると予想されるエリアの測定位置を示している。RU1、RU2 についても同様に反射の影響を受けていると予想される他者土地エリアがあるかを検討し、被疑箇所がある場合は候補となる測定位置の絞り込みを行った。

上記で抽出した他者土地エリアでの受信電力を伝搬損に換算し、エリア算出式で計算した伝搬損との差分を評価することで、自己土地内の大型金属構造物での反射の影響が及ぶと予想される他者土地ではエリア算出法よりも受信電力が高いという仮説の妥当性を検証した。RU と大型金属構造物との位置関係、RU から送信される指向性ビームの入射角、他者土地内での伝搬環境などを基に、反射による他者土地への干渉が発生しうる条件について、解析・考察を行った。



● 測定候補位置(自己土地)
● 測定候補位置(他者土地)

図 3.3-18　RU 近傍の大型金属構造物による反射の影響が予想される他者土地の例

3.3.2.5 実証結果及び考察

（1）仮説①の検証結果

自己土地内に大型の金属構造物が多数存在する廿日市工場の伝搬は、巨視的には市街地相当の S の値(S=0)が妥当ではないかという仮説を基に検証を行った。

1）[Step-1]廿日市工場全体でパラメータ S を最適化した場合の検証結果

3RU のカバーエリアおよび調整対象区域のエッジ上に設定した測定地点計 41 カ所(RU1×13 カ所、RU2×13 カ所、RU3×15 カ所)における、エリア算出式で算出した値と実測値の誤差Δを使用し、これらの二乗和が最小となる S の値を求めた結果を**図 3.3-19** に示す。

図 3.3-11 のグラフの横軸は精緻化対象の S 値、縦軸は二乗平均平方根誤差(RMSE:Root Mean Squared Error)を示す。RMSE は下記(1.5)式より測定地点計 41 地点分のエリア算出式の受信電力(RSRP 換算)と実測値の誤差Δから求められる。

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}\left(R_i^{'} - R_i\right)^2} \quad \cdots\cdots (1.5)$$

（Ri' …エリア算出式の受信電力(RSRP 換算)、Ri…実測 RSRP、n…データ総数）

図 3.3-19 のグラフは、3.3.2.1（2）の現行エリア算出式の(1.1)～(1.3)式に対して、S 項を 0～50[dB]に変化させて RMSE が最小の S 値を探したものである。また**図 3.3-20**、**図 3.3-21** はそれぞれ基地局へ見通し外(NLOS)の測定地点(33 箇所)、基地局へ見通し（LOS）の測定地点(8 箇所)にて上記と同じ要領で S 値の最適化を行ったものである。

仮説①において、工場内の金属構造物は RU が発射する電波の遮へい物となり、各測定地点の受信電力が低下することで、現行エリア算出式で使用した郊外地(S=12.3[dB])に対して市街地(S=0[dB])のカバーエリア及び調整対象区域の方が実測に合致することを想定していた。しかし、実際には各エッジ位置の誤差Δは、**表 3.3-5～表 3.3-7 に**示す通り、全体的に算出式の受信電力(RSRP 換算)より実測値の方が大きく、パラメータ S は S=40[dB]以上のとき RMSE が最小となり S=45～50[dB]では誤差がこれ以上縮小しないことが分かった。また、NLOS 環境の測定地点における最適化結果は S=35[dB]、LOS 環境の測定地点における最適化結果は S=40[dB]となった。

つまり、廿日市工場の電波伝搬環境は市街地(S=0[dB])ではなく、S=40 または S=35[dB]の方が適していると言える。

S値	RMSE
0	31.7
5	27.5
10	23.4
12.3	21.2
15	19.5
20	15.8
25	12.6
30	10.6
32.5	10.0
35	9.5
40	9.1
45	9.1
50	9.1

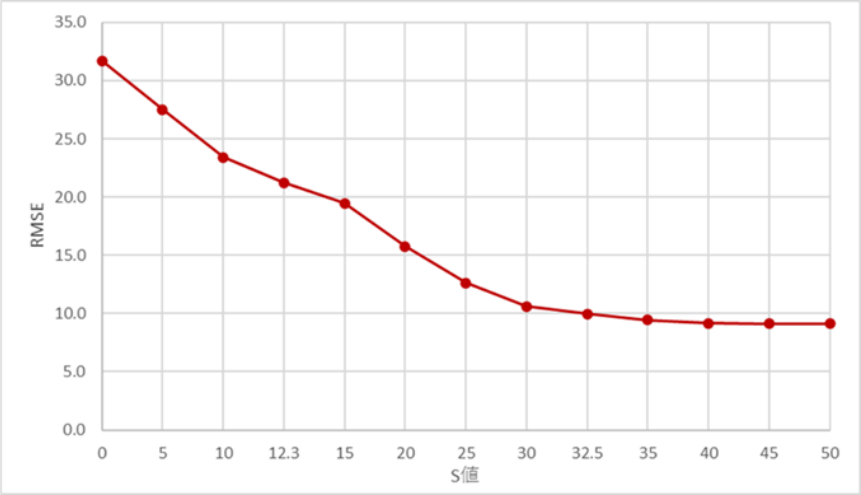


図 3.3-19 RMSE－S 値(全体)

S値	RMSE
0	29.3
5	24.9
10	20.6
12.3	18.3
15	16.5
20	12.6
25	9.4
30	7.6
32.5	7.4
35	7.2
40	7.4
45	7.4
50	7.4

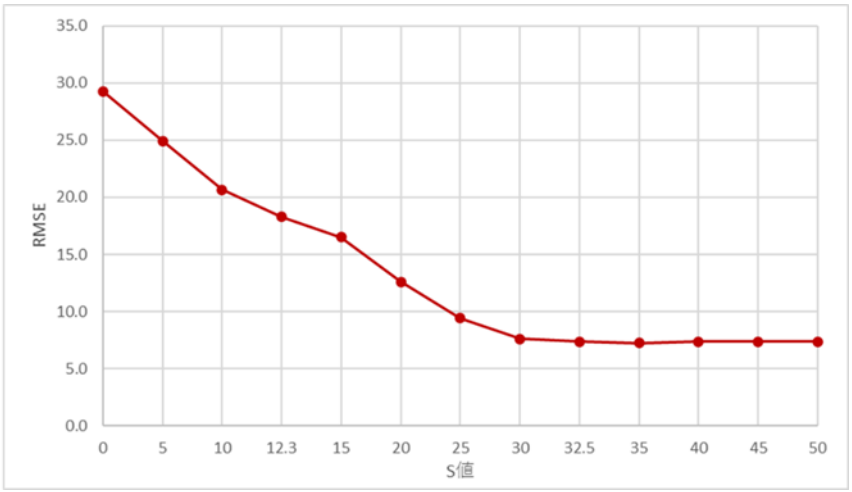


図 3.3-20 RMSE－S 値(全体) NLOS のみ

S値	RMSE
0	40.2
5	36.3
10	32.4
12.3	30.6
15	28.6
20	24.9
25	21.2
30	18.3
32.5	16.9
35	15.6
40	14.3
45	14.3
50	14.3

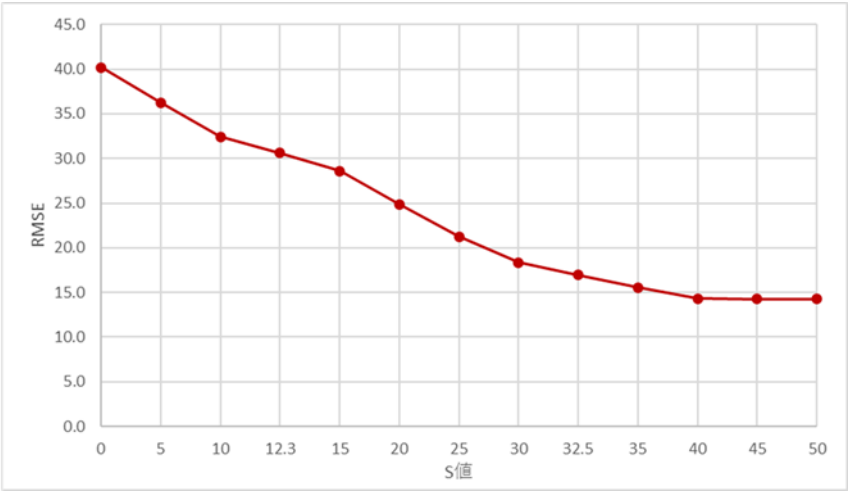


図 3.3-21 RMSE－S 値(全体) LOS のみ

2）[Step-1]RU 毎でパラメータ S を最適化した場合の検証結果

本項では、各 RU におけるパラメータ S の最適化及び電波伝搬環境について考察を行った。

算出式のカバーエリアおよび調整対象区域のエッジ位置の測定地点(RU1×13 カ所、RU2×13 カ所、RU3×15 カ所)について RU 毎に考察をそれぞれ行った。検証では、1)と同様に RMSE と精緻化対象の S 値の関係から S 値の最適化を行った。

■RU1 の場合

RU1 のエッジ位置の測定地点(RU1×13 カ所)における、S 値最適化について**図 3.3-22**、**図 3.3-23**、**図 3.3-24** のグラフに結果を示す。

図 3.3-22 のグラフの横軸は精緻化対象の S 値、縦軸は二乗平均平方根誤差(RMSE)である。RMSE は 3.3.2.5 1)の(1.5)式と同様に求めた。このとき、S=30[dB]で RMSE は最小となることが分かった。つまり、RU1 のカバーエリア及び干渉調整区域のエッジ位置は市街地(S≒0[dB])ではなく、S=30[dB]の方が適していると言える。

また、**図 3.3-23**、**図 3.3-24** はそれぞれ基地局へ見通し外(NLOS)の測定地点(11 箇所)、基地局へ見通し（LOS）の測定地点(2 箇所)にて上記と同じ要領で S 値の最適化を行ったものである。NLOS 環境および LOS 環境における最適化結果も上記と同様に S=30[dB]が得られた。

S値	RMSE
0	27.1
5	22.7
10	18.4
12.3	16.4
15	14.2
20	10.3
25	7.7
30	7.6
32.5	7.6
35	7.6
40	7.6
45	7.6
50	7.6

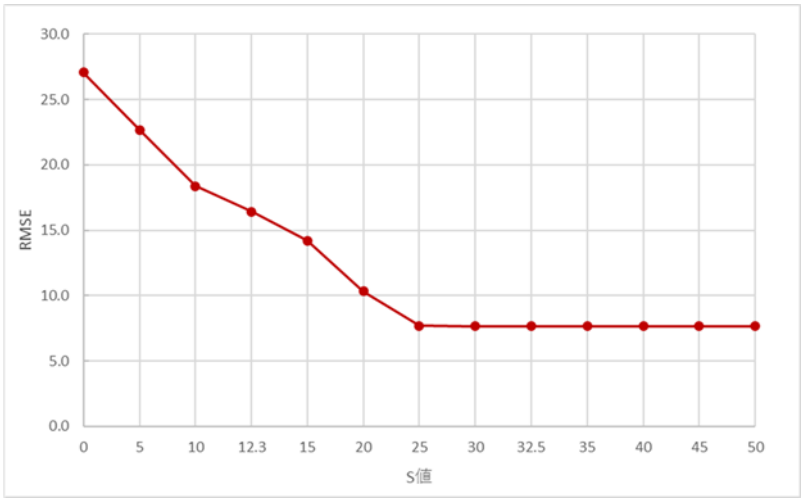


図 3.3-22 RMSE-S 値(RU1)

S値	RMSE
0	25.0
5	20.8
10	16.5
12.3	14.6
15	12.5
20	8.7
25	6.7
30	6.6
32.5	6.6
35	6.6
40	6.6
45	6.6
50	6.6

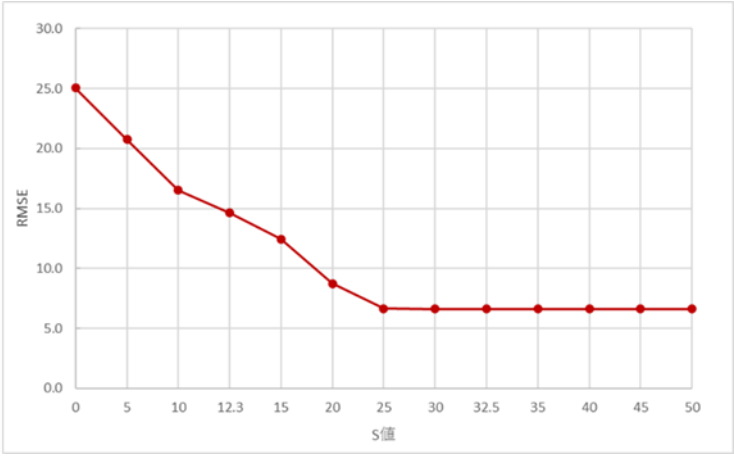


図 3.3-23 RMSE-S 値(RU1) NLOS のみ

S値	RMSE
0	36.3
5	31.3
10	26.4
12.3	24.1
15	21.4
20	16.5
25	11.9
30	11.8
32.5	11.8
35	11.8
40	11.8
45	11.8
50	11.8

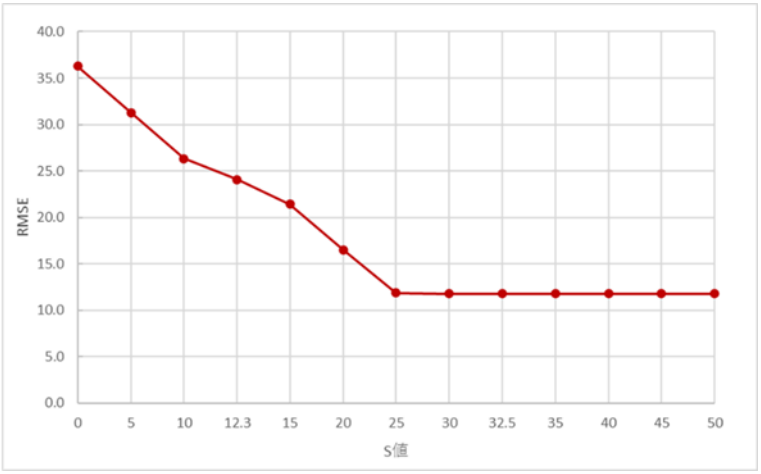
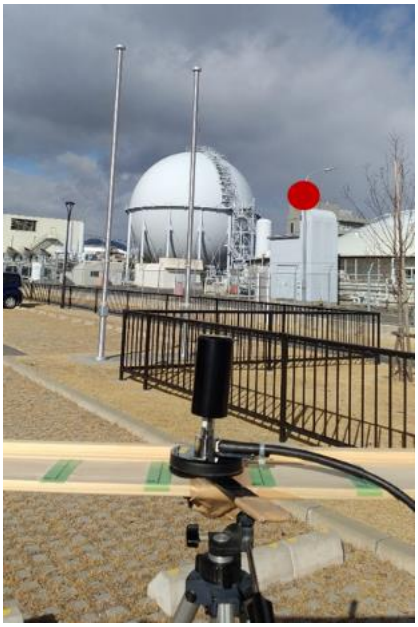


図 3.3-24 RMSE-S 値(RU1) LOS のみ

また、RU1 の伝搬環境を考察する上で、**表 3.3-5** で誤差Δの大きい S1-35、S1-60 地点の特徴と伝搬損失への影響を考える。S1-35 地点(LOS 環境)は算出式上のカバーエリア端、S1-60 地点(LOS 環境)は算出式の調整対象区域で、それぞれ誤差Δが最大となる場所である。これらの地点で誤差Δが大きくなった理由は、**図 3.3-25**、**図 3.3-26** の通り、測定地点から RU1 を望む方向に LNG 貯槽地上部（高さ: 約 13m、幅: 約 64m）とパイプ群の金属構造物がある。RU1 の電波がこれらの金属構造物に反射をすることで測定地点の実測 RSRP 値が大きくなり、誤差Δが大きくなったと考えられる。

図 3.3-25 RU1 の伝搬環境(S1-35、S1-60 地点)

(a)S1-35 地点　LOS 環境



(b)S1-60 地点　LOS 環境

図 3.3-26 RU1 測定地点

■RU2 の場合

RU2 のエッジ位置の測定地点(RU2×13 カ所)における、S 値最適化について**図 3.3-27** のグラフに結果を示す。

図 3.3-27 のグラフの横軸は精緻化対象の S 値、縦軸は二乗平均平方根誤差(RMSE)である。RMSE は 3.3.2.5 1)の(1.5)式と同様に求めた。このとき、S=30[dB]で RMSE は最小になることが分かった。つまり、RU2 のカバーエリア及び干渉調整区域のエッジ位置は市街地(S=0[dB])ではなく、S=30[dB]の方が適していると言える。

なお、ここでの測定地点(13 カ所)は全て基地局へ見通し外(NLOS)である。

S値	RMSE
0	29.8
5	25.4
10	21.0
12.3	19.1
15	16.8
20	12.8
25	9.3
30	7.3
32.5	7.4
35	7.4
40	7.4
45	7.4
50	7.4

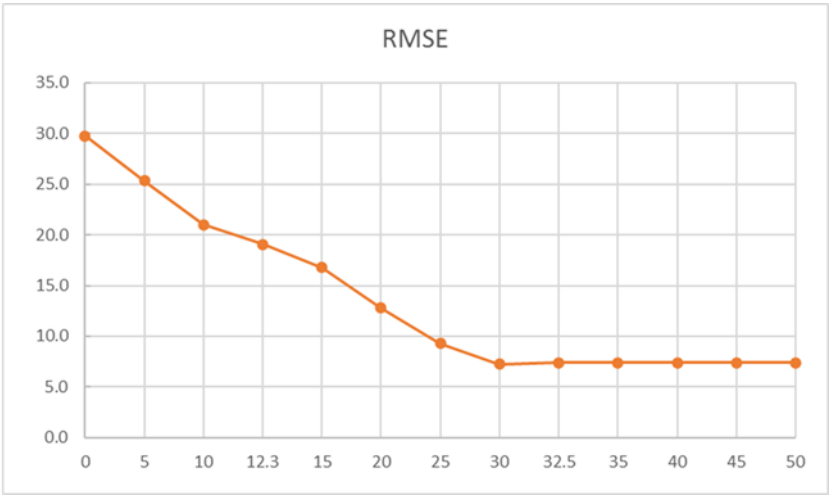


図 3.3-27 RMSE-S 値(RU2)

また、RU2 の伝搬環境を考察する上で、**表 3.3-6** で誤差Δの大きい S2-41、S2-48 地点の特徴と伝搬損失への影響を代表として考える。**図 3.3-28** に示すように、S1-41、S2-48 地点はそれぞれ金属パイプ群により測定地点から RU への見通しがさえぎられており NLOS 環境である。この 2 点の誤差Δが大きくなった要因としては、RU2 を望む方向に**図 3.2-3** のような金属パイプ群が存在し、これらに RU2 の電波が反射することで測定地点に強い電波が届いたためと考えられる。

図 3.3-28 RU2 の伝搬環境（S2-41、S2-48）

（a） S2-41 地点
NLOS 環境

（b） S2-48 地点
NLOS 環境

図 3.3-29 RU2 測定地点

■RU3 の場合

RU3 のエッジ位置の測定地点(RU3×15 カ所)における、S 値最適化について図 3.3-30、図 3.3-31、図 3.3-32 のグラフに結果を示す。

図 3.3-30 のグラフの横軸は精緻化対象の S 値、縦軸は二乗平均平方根誤差(RMSE)である。RMSE は 3.3.2.5 1)の(1.5)式と同様に求めた。このとき、S=38[dB]で RMSE は最小となることが分かった。また図 3.3-31、図 3.3-32 はそれぞれ基地局へ見通し外(NLOS)の測定地点(12 箇所)、基地局へ見通し（LOS）の測定地点(3 箇所)にて上記と同じ要領で S 値の最適化を行ったものである。LOS 環境および LOS 環境における最適化結果はそれぞれ S=35、S=38[dB]が得られた。つまり、RU3 のカバーエリア及び調整対象区域のエッジ位置は市街地(S≒0[dB])ではなく、S=35 または S=38[dB]の方が適していると言える。

S値	RMSE
0	36.6
5	32.6
10	28.7
12.3	26.2
15	24.8
20	21.1
25	17.6
30	14.5
32.5	13.2
35	12.1
38	11.6
40	11.4
45	11.4
50	11.4

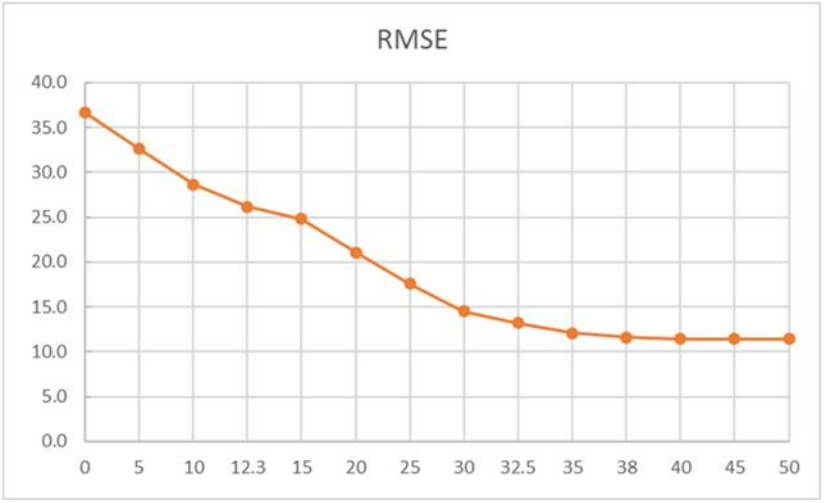


図 3.3-30 RMSE-S 値(RU3)

S値	RMSE
0	33.1
5	28.7
10	24.3
12.3	26.2
15	20.0
20	15.9
25	12.1
30	9.1
32.5	8.1
35	7.8
38	8.1
40	8.2
45	8.2
50	8.2

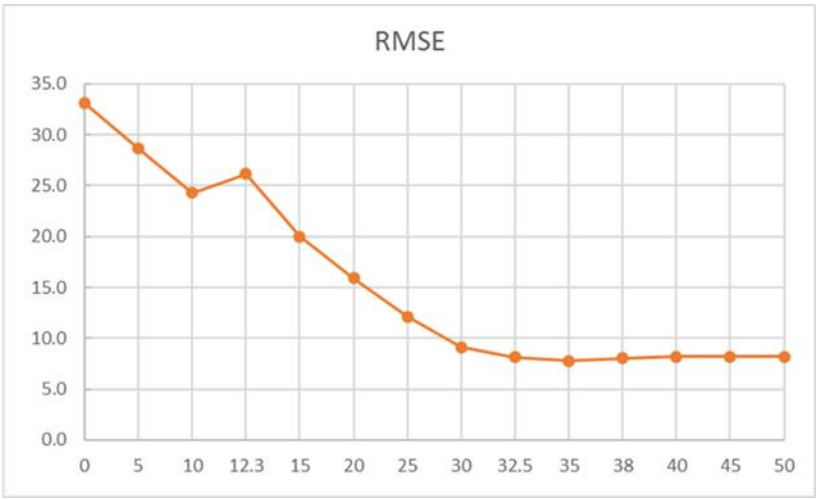


図 3.3-31 RMSE-S 値(RU3) NLOS のみ

S値	RMSE
0	41.4
5	37.8
10	34.2
12.3	26.2
15	30.6
20	27.1
25	23.6
30	20.1
32.5	18.3
35	16.6
38	14.6
40	15.1
45	15.0
50	15.0

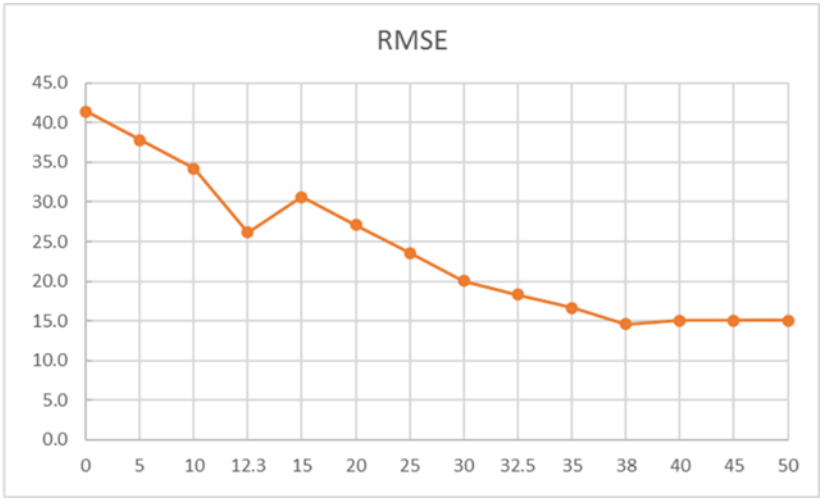


図 3.3-32 RMSE-S 値(RU3) LOS のみ

また、RU3 の伝搬環境を考察する上で、**表 3.3-7** で誤差Δの大きい S3-38、S3-52 地点の特徴と伝搬損失への影響を考える。**図 3.3-33**、**図 3.3-34** の通り、S3-38、S3-52 地点はともに LOS 環境である。この 2 点の誤差Δが大きくなった要因としては、RU3 を望む方向に S3-38 地点では、LNG 貯槽地上部（高さ: 約 13m、幅: 約 64m）、S3-52 地点では、LNG 貯槽地上部に加えて、**図 3.2-3** のようなパイプ群が存在し、これらに RU3 の電波が反射することで測定地点に強い電波が届いたと考えられる。

図 3.3-33 RU3 の伝搬環境(S3-48、S3-52)

(a)　S3-38 地点
LOS 環境

(b)　S3-52 地点
LOS 環境

図 3.3-34 RU3 の測定地点

3）[Step-2] RU からの距離毎の伝搬環境と、伝搬損の距離特性の関係を評価

■グループ 1:RU1 方向#1(正面方向)

RU1 での検討結果を**図 3.3-35**、**図 3.3-36**、**図 3.3-37**、**図 3.3-38** に示す。

図 3.3-35 は、実測値(RSRP)から伝搬損失 L を求めたグラフとエリア算出式の受信電力(RSRP 換算)から伝搬損失 L を求めたグラフを比較したものである。グラフは、それぞれ実測の伝搬損失（赤色線）、伝搬損失 S=0[dB]（黄色線）、伝搬損失 S=12.3[dB]（緑色線）、伝搬損失 S=32.5[dB]（藍色線）、伝搬損失 S=40[dB]（グレー線）、伝搬損失 S=40[dB](制限なし)（青色線）、対数近似（黒色線）を示す。

実際の伝搬損失（赤線）と各 S 値のグラフの作成にあたり、実測の伝搬損失は、3.3.2.3 の (1.4)式より、実測の受信電力（RSRP 値を受信電力に換算したもの）を Pr、現行エリア算出式で使用した各パラメーター（Pt、Gt、Gr、Lf）を用いて求めた。また、各 S 値の伝搬損失は、各測定地点の RU からの水平距離 dxy に応じて、3.3.2.1（2）の現行エリア算出式(1.1)～(1.3)式を適用して求めた。

図 3.3-35 のグラフを比較すると、実測の伝搬損失のグラフは、市街地(S=0[dB])、郊外(S=12.3[dB])、開放地(S=32.5[dB])のグラフよりも伝搬損失が低い傾向であり、伝搬損失 S=40[dB](制限なし)（青色線）が最も近い結果となった。この理由として、エリア算出式で計算した伝搬損失がパラメータ S 値変更の影響を受けなくなったと考えられる。具体的に説明すると、エリア算出式による伝搬損失は 3.3.2.1（2）の現行のエリア算出式より求められ、**表 3.3-15** の関係を持つ。伝搬損失 L は RU からの水平距離 dxy に応じて以下の 3 種類の計算式が存在する。

表 3.3-15 エリア算出式の区分

項	求める伝搬損失	選択条件	S項の関係
①	L0	$d_{xy} \leqq 40m$	S 項なし
②	L	$40m < d_{xy} < 100m$ 但し、L < L0 の時 L0 を選択	$L_H - L0$ の差分として影響
③	L_H	$d_{xy} \geqq 100m$ 但し、L_H < L0 の時 L0 を選択	S 項あり

※ S … 市街地、郊外地、および開放地に対して考慮する補正値

※ d_{xy}……RU からの水平距離（m）

上記について、パラメータ S 値の観点では、3.3.2.1（2）の①式には S 項は入っておらず、③式には存在する違いがある。そして、②式は、①式と③式を補完するように①式と③式の差分を代入する計算式となっている。また、②式と③式を計算する場合、①式の計算も行い比較した結果、①式の伝搬損失が低い場合は①の伝搬損失 L0 を選択する制限が存在する。つまり、**図 3.3-35** において、S=32.5[dB]と S=40[dB]の 2 つのグラフは重なっているが、これは上記の通り②、③で計算した伝搬損失 L と L_H が①式の L0 より小さく、測定地点の $40m < dxy < 100m$、$dxy \geqq 100m$ において、伝搬損失 L0 が選択されたためパラメータ S 値変更の影響を受けなくなったと考えられる。

これに対し、**図 3.3-35** の伝搬損失 S=40[dB](制限なし)のグラフでは、以下のように仮定して計算を行った。現行のエリア算出式においては、上記に示すように RU から 100m 未満の距離における伝搬損失の算出にて S 値の適用を制限する条件になっているが、廿日市工場のように RU の近傍 100m 以内に大型の金属構造物といった高反射物が多数存在する環境では、100m 未満の距離でも S 値の適用を制限しないほうが適切な伝搬損失値を求められるのではないかと仮定した。つまり、表 3.3-19 の②式、③式の L0 を選択する制限

を無視した場合の算出値である。グラフより、伝搬損失 L の L0 選択を無視することで、実測値のグラフに近い値が得られることが確認できた。この結果は、前述の過程が正しいことを示唆するものと考える。

また、**図 3.3-35** の実測値の伝搬損失のグラフにおいて、100m 以内の測定データにより 100m 以降の傾向がプロットできるかを近似曲線により確認を行った。具体的には、100m 以内の測定地点のデータを対数近似することで、100m 以降の伝搬損失の予測値をプロットした。この予測値と実測の伝搬損失のグラフの傾きを比較することでデータの妥当性の確認を行った。結果として、**図 3.3-35** では、対数近似（黒線）と実測の伝搬損失（赤線）の 100m 以降の伝搬損失のデータと同じ傾向になった。

つまり、この測定グループでは、自己土地を含む距離 100m 以下の伝搬環境を基に S の値を選択するのが妥当ではないかという仮説に対して、予想していた市街地(S=0)ではないものの最適化出来ていると考えられる。

また、**図 3.3-36、図 3.3-37** ではそれぞれ基地局へ見通し外(NLOS)の測定地点(6 箇所)、基地局へ見通し（LOS）の測定地点(7 箇所)にて上記と同じ要領で各測定地点の基地局からの距離に対する伝搬損失を比較したものである。結果としては上記と概ね同様の傾向が得られた。

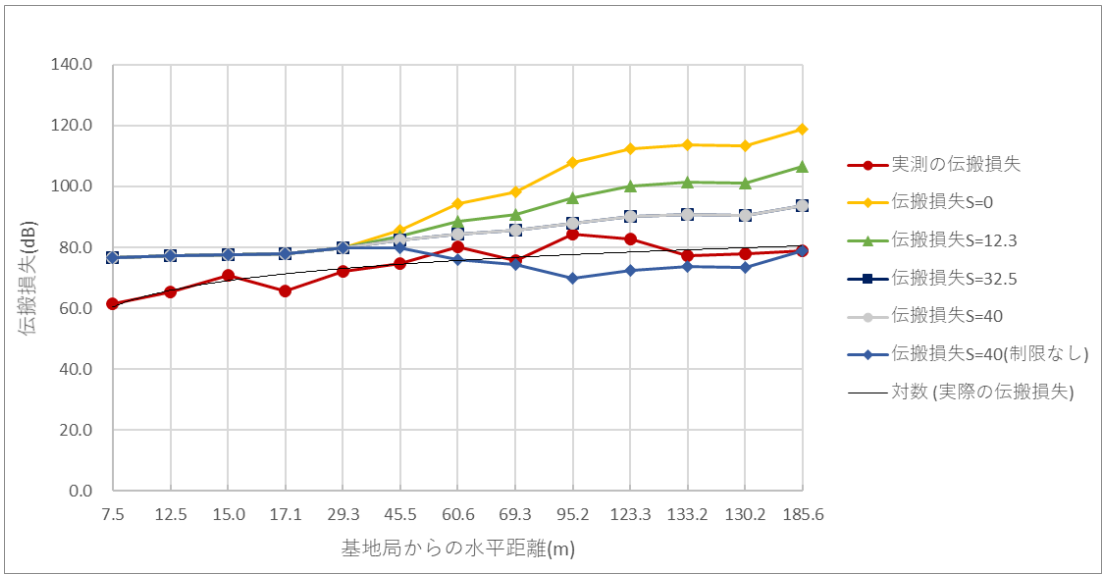


図 3.3-35　基地局からの水平距離―伝搬損失 L(RU1 方向#1)

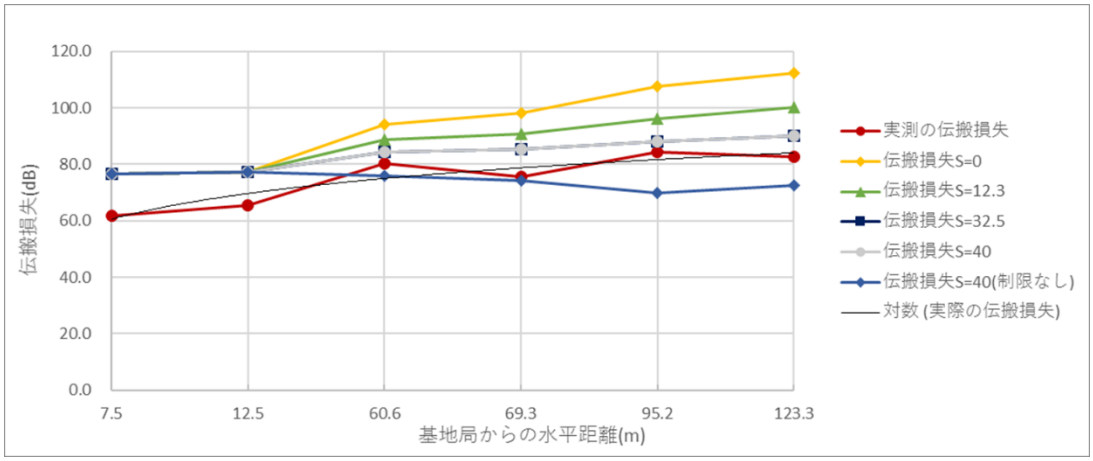


図 3.3-36　基地局からの水平距離―伝搬損失 L(RU1 方向#1) NLOS のみ

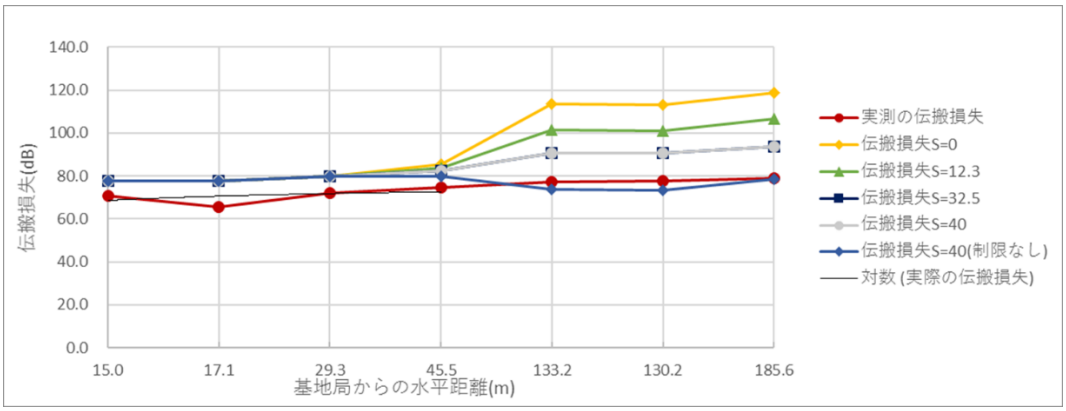


図 3.3-37　基地局からの水平距離―伝搬損失 L(RU1 方向#1) LOS のみ

図 3.3-38 RU1 方向#1 測定箇所

図 3.3-35 のグラフより、実測の伝搬損失と S=40[dB](制限なし)のグラフを比較したところ、95.2m 地点(S1-20 地点)で S=40[dB](制限なし)より実測値の伝搬損失値の方が高く差分が大きかった。したがって下記に測定地点の伝搬環境を考察した。

S1-20 地点を図 3.3-39、図 3.3-40 に示す。S1-20 地点の RU1 を望む方向には LNG タンク及びパイプ群が存在する。この地点は NLOS 環境で測定地点正面に LNG 廿日市工場内の十字路にあり開けている場所のため、金属構造物による RU1 の電波反射が少ないと思われる。そのため、得られる反射波が少なく伝搬損失が高くなったと考えられる。

図 3.3-39　RU1 の伝搬環境

図 3.3-40　S1-20 地点(95m 地点) NLOS 環境

■グループ 2:RU2 方向#1(RU2 左方向)

RU2 での検討結果を図 3.3-41、図 3.3-42、図 3.3-43 に示す。

図 3.3-41 は、実測値(RSRP)から伝搬損失 L を求めたグラフとエリア算出式の受信電力(RSRP 換算)から伝搬損失 L を求めたグラフを比較したものである。グラフは、それぞれ実測の伝搬損失（赤色線)、伝搬損失 S=0[dB]（黄色線)、伝搬損失 S=12.3[dB]（緑色線)、伝搬損失 S=32.5[dB]（藍色線)、対数近似（黒色線）を示す。また、各伝搬損失の算出方法はグループ 1 と同様である。

図 3.3-41 のグラフを比較すると、実測の伝搬損失は市街地(S=0[dB])、郊外(S=12.3[dB])より開放地(S=32.5[dB])に近い傾向があることが分かる。さらに、100m 以内の測定地点のデータより対数近似を行い、各グラフを比較したところ対数近似曲線は約 80m 以降の S=32.5[dB]のグラフのプロットと重なる。つまり、このことから S=32.5[dB]がこのグループでは適切と言え、グループ 1 で述べた仮説と考察と同様に RU からの水平距離が 100m 以内の伝搬損失の傾向より 100m 以降の伝搬損失を予想することが可能と言える。

また、実測の伝搬損失と S=32.5[dB]のグラフでは、100m 以降の 116.6m の地点（S2-41 地点）で伝搬損失が 10dB 程度低下している。この地点は**図 3.3-44**、**図 3.3-45** の通り、RU2 を望む方向にパイプ群があるため NLOS 環境である。S2-41 地点は、RU2 の電波がパイプ群及び金属タンクまで反射を行った結果、強い電波が測定地点まで届き伝搬損失が小さくなったと考えられる。

なお、**図 3.3-42** のグラフは基地局へ見通し外(NLOS)の測定地点について上記と同様に基地局からの距離と伝搬損失を比較したものだが、このグループは大部分の測定地点が NLOS(15 カ所中 12 カ所)のため**図 3.3-41** と同様の傾向が得られた。

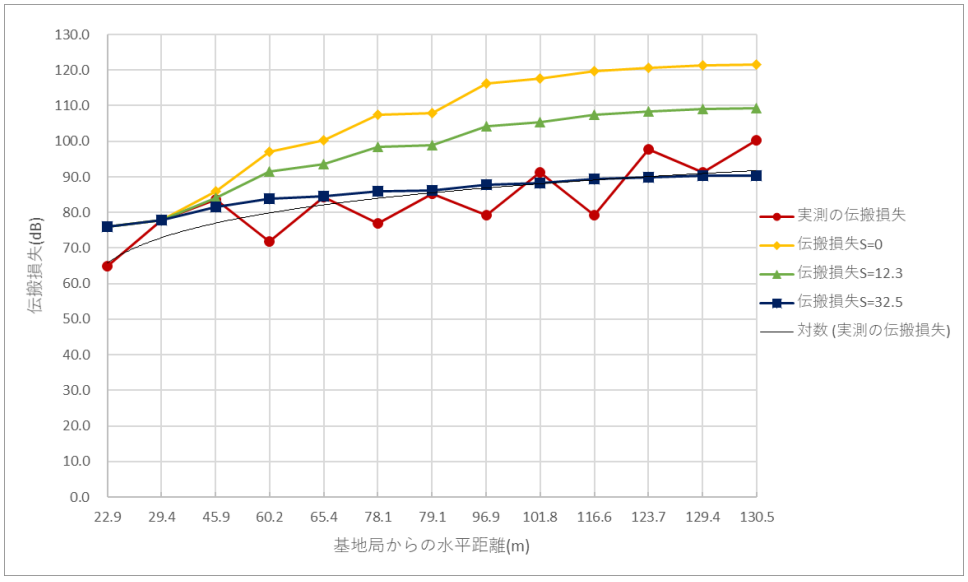


図 3.3-41　基地局からの水平距離―伝搬損失 L(RU2 方向#1)

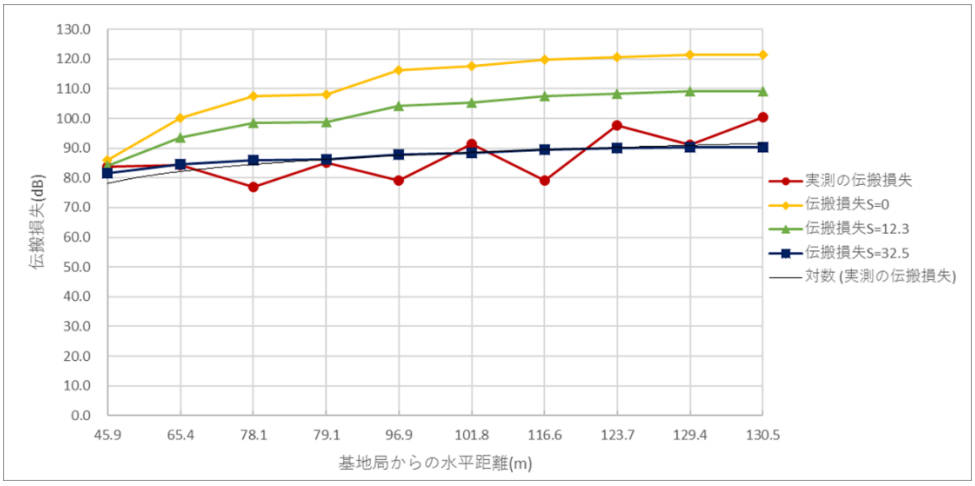


図 3.3-42　基地局からの水平距離―伝搬損失 L(RU2 方向#1) NLOS のみ

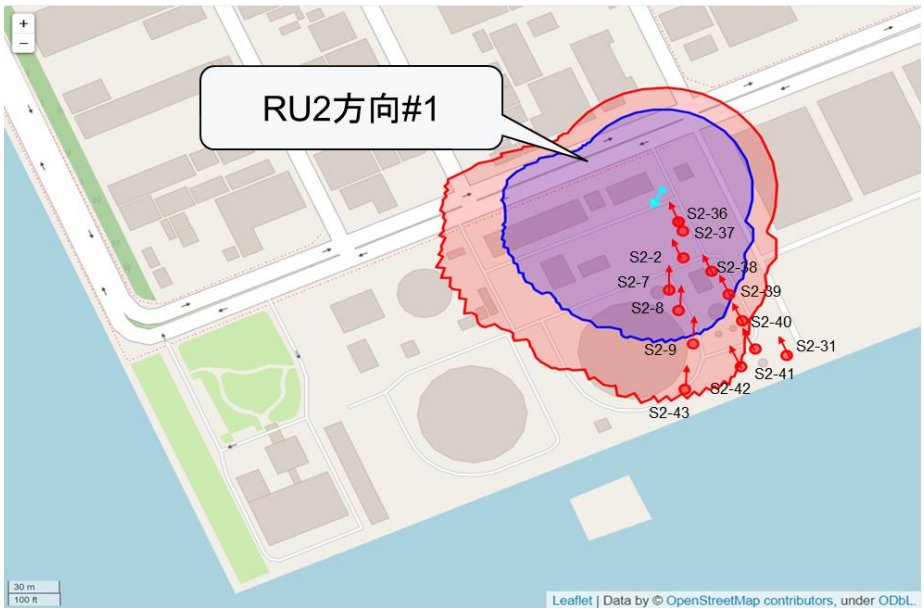


図 3.3-43 RU2 方向#1 の測定マップ

図 3.3-44　S2-41 地点(116.6m 地点) NLOS 環境

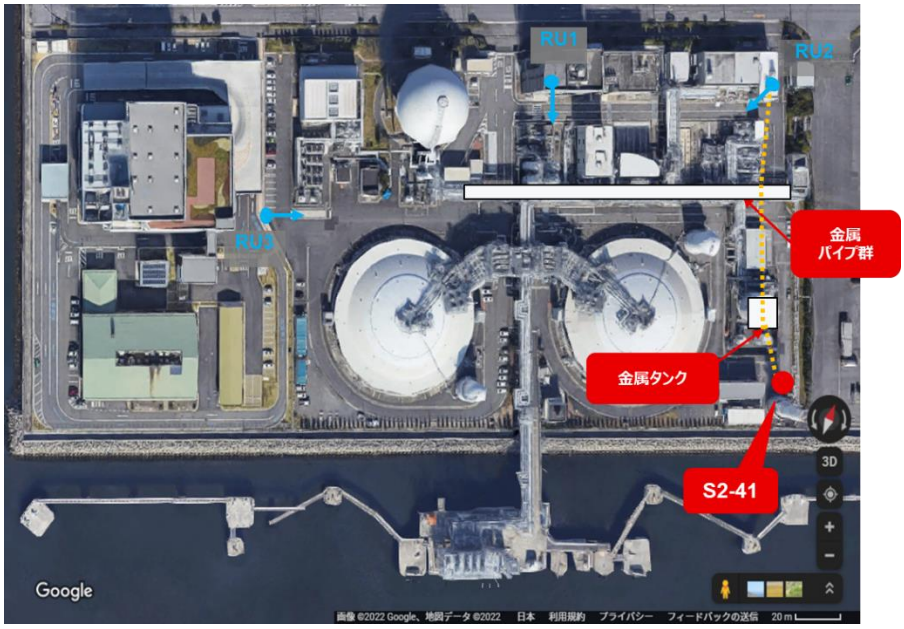


図 3.3-45 RU2 方向#1 の測定マップ

■グループ 3:RU3#方向 1

RU3 での検討結果を**図 3.3-46**、**図 3.3-47**、**図 3.3-48** に示す。

図 3.3-46 は、実測値(RSRP)から伝搬損失 L を求めたグラフとエリア算出式の受信電力(RSRP 換算)から伝搬損失 L を求めたグラフを比較したものである。グラフは、それぞれ実測の伝搬損失（赤色線)、伝搬損失 S=0[dB]（黄色線)、伝搬損失 S=12.3[dB]（緑色線)、伝搬損失 S=32.5[dB]（藍色線)、対数近似（赤色点線）を示す。また、各伝搬損失の算出方法はグループ 1 と同様である。

図 3.3-46 のグラフを比較すると、実測の伝搬損失のグラフは S=0、12.3、32.5[dB]のいずれよりも伝搬損失が低い傾向である。さらに、97.1m 以降の地点で通常であれば伝搬損失は距離が遠くなるほど増加するはずだが、グラフの傾きが右肩下がりの傾向である。このため、100m 以内の伝搬損失値のデータより対数近似を行い、各グラフを再比較したところ対数近似のグラフは、開放地(S=32.5[dB])のグラフに最も近い傾向となることが分かった。つまり、このことから、このグループでは、S=32.5[dB]が適切と言えるが、100m 以降の実測の伝搬損失値は伝搬環境固有の差分があると考えられる。

したがって、100m 以降の伝搬損失値の低下の考察を行った。実測の伝搬損失と S=32.5 の伝搬損失のグラフについて、変化点である 97.1m の S3-64 地点、122m の S3-47 地点に注目した。S3-64 地点と S3-47 地点は、**図 3.3-49** の通り RU3 を望む方向にパイプ群があるため NLOS 環境である。S3-64 地点は、RU3 を望む方向に金属パイプ群及び金属タンクが存在するが、廿日市工場内の道路の十字路で開けた空間にあるため、反射波はある程度しか見込めない環境である。これに対して、S-46 地点は、廿日市工場の中央に位置する道路上にあり、左右が金属パイプ群と LNG 貯槽に囲まれた環境であり、RU3 の電波がトンネル効果のように反射しながら届く。つまり、S-46 地点は S-64 地点より強い電波が得られやすい環境であり、これが実測値と対数近似のグラフの差分となって表れたと考えられる。

なお、**図 3.3-47** のグラフは基地局へ見通し(LOS)の測定地点について上記と同様に基地局からの距離と伝搬損失を比較したものだが、このグループは S=40 よりもさらに低い伝搬損失の傾向が見られた。**図 3.3-46** に対し RU 近傍の LOS 環境の測定地点 3 カ所を取り除いたことで対数の曲線がなだらかになったためと考えられる。

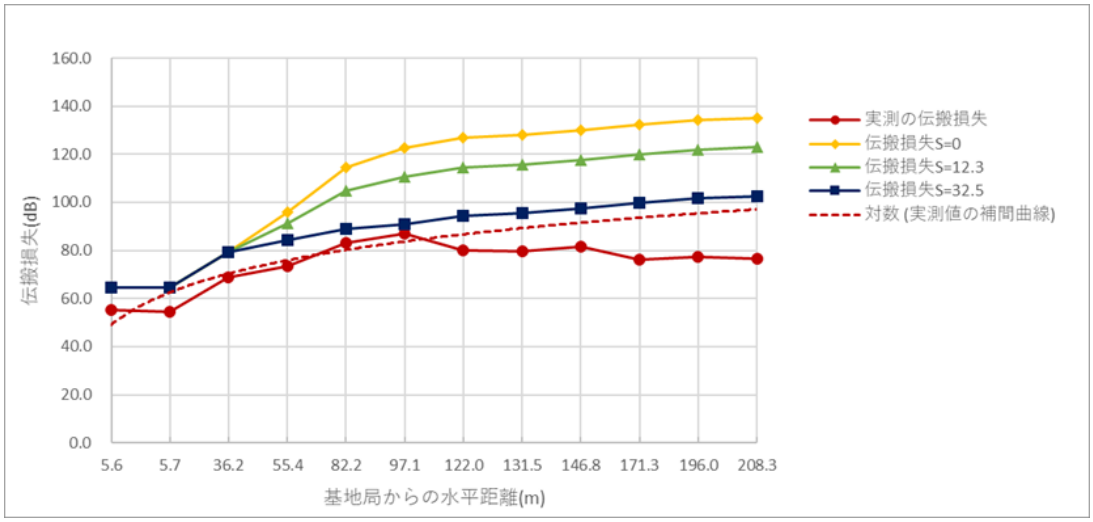


図 3.3-46　基地局からの水平距離―伝搬損失 L(RU3 方向#1)

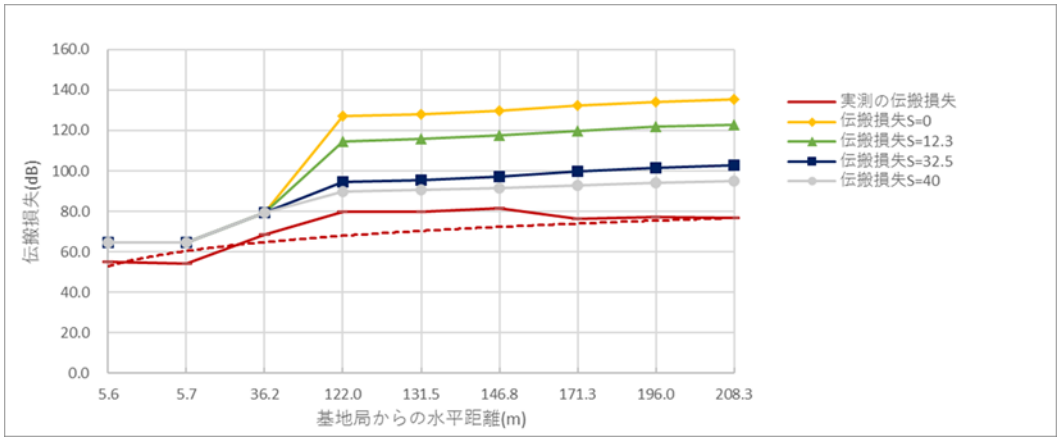


図 3.3-47　基地局からの水平距離―伝搬損失 L(RU3 方向#1) LOS のみ

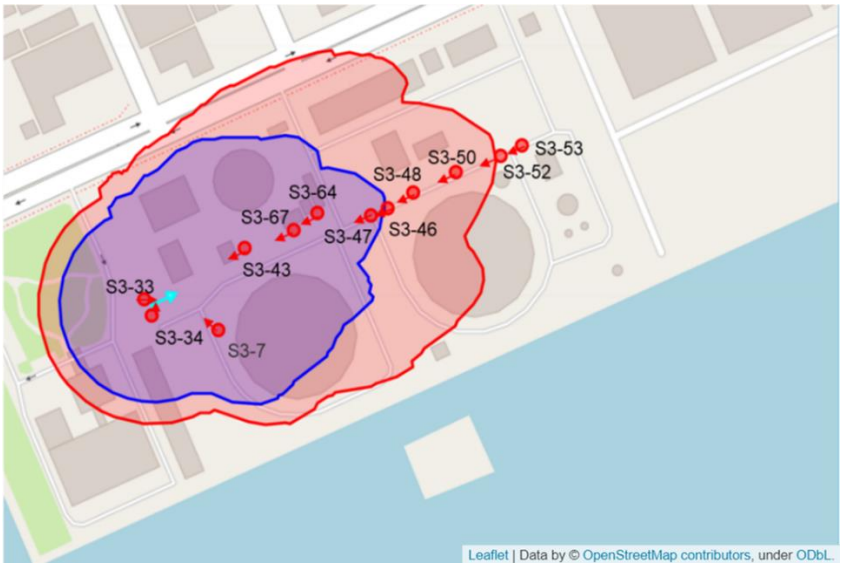


図 3.3-48 RU3 方向 1 の測定マップ

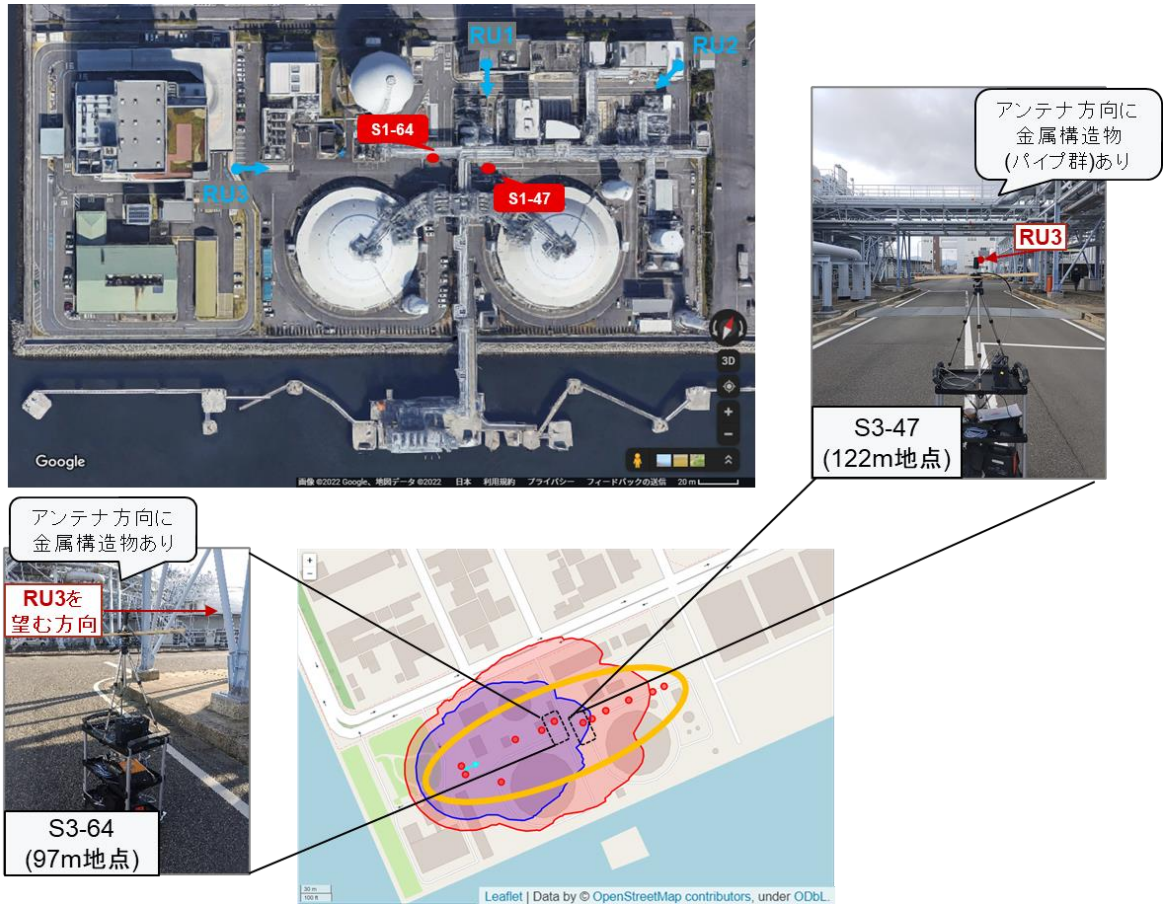


図 3.3-49　RU3 電波伝搬環境について

3)仮説①の検証結果

仮説①「周辺環境ではなく、自己土地内の伝搬環境に基づいてパラメータ S を選択する方が実測との差分が小さい」の妥当性を Step1、Step2 の結果より述べる。

まず、Step1 において、誤差Δを用いて二乗和が最小となる S 値を求めたところ、RU1～RU3 全体で S=40[dB] (NLOS のみ S=35、LOS のみ S=40)、RU 毎の精緻化は、RU1 で S=30[dB] (NLOS のみ S=30、LOS のみ S=30)、RU2 で S=30[dB] (NLOS のみ)、RU3 で S=40[dB] (NLOS のみ S=35、LOS のみ S=38)となり、自己土地の立地環境を判断基準として選択したパラメータ S の値である郊外地（S=12.3[dB]）より高い結果となった。ただし、各エッジ位置は RU を望む方向の伝搬環境が大きく異なるため、誤差が大きい地点も含む。

そのため、次に、Step2 の検討を行い、100m 以内の伝搬環境のグループを作り、より正確なパラメータ S の精緻化を行った。Step2 では、グループ 1(RU1)では S=40[dB]、グループ 2（RU2）では S=32.5[dB]、グループ 3（RU3）では S=32.5[dB]が最適値となった。グループ 1、2 では、100m 以内の測定データを用いた対数近似グラフにより、100m 以降の伝搬損失値の予測も行えた。

Step1、2 の上記結果より、パラメータ S 値は当初、敷地内に存在する大型の金属構造物やパイプ群が遮へい方向に働き、伝搬損失が大きくなる市街地（S≒0[dB]）と想定していたが、廿日市工場内ではトンネル効果など強い反射波が得られやすく、開放地（S=32.5[dB]以上の補正が必要な伝搬環境であることが分かった。

つまり、廿日市工場のように RU の近傍 100m 以内に大型の金属構造物といった高反射物が多数存在する環境では、現行のエリア算出法が基づく拡張秦式のある程度一様な伝搬環境ではなく、自己土地内の伝搬環境に基づいてパラメータ S を選択する方が実測との差分が小さいという仮説通りの結果となった。

ただし、今回の結果では、100m 以内の伝搬環境の適切な S 値にバラつきがあり、現行のエリア算出法が基づく拡張秦式の S 値の適用条件には表 3.3-19 の伝搬損失 L の制限が存在するため、S 値の適用条件自体を変更するためには今後さらに自己土地内の 100m 以内の伝搬環境の測定をおこない、実証結果による裏付けにより、自己土地内の伝搬環境におけるエリア算出式の精度を高める必要があると考える。

なお、まとめとして工場敷地内における具体的な伝搬環境の特徴と、そのような場所に適した S 値の考察を**表 3.3-16** に示す。

表 3.3-16 伝搬環境の特徴とその場所に適したS値について

精緻化グループ	精緻化 step-1 S値	精緻化 step-2 S値	伝搬環境の特徴	考察
RU1	30	32.5	・工場敷地の中心部であり、敷地内の無線エリアには構造物が密集している。 ・RU正面に大型の金属製タンクやパイプ群などの金属構造物が多く存在し、それらにより基地局が見通し外(NLOS)となる地点が多く存在する。また、構造物の隙間に基地局が見通し(LOS)となる場所が点在する。	左記の特徴を持つ場所ではS=32.5(開放地)が適していると考えられる。
RU1(NLOSのみ)	30	32.5		
RU1(LOSのみ)	30	32.5		
RU2	30	32.5	・工場敷地の端部であり、敷地内の無線エリアには構造物が密集しているが、敷地外方向は開けている。 ・RU正面に大型の金属製タンクやパイプ群などの金属構造物が多く存在し、それらにより基地局が見通し外(NLOS)となる地点が多く存在する。また、構造物の隙間に基地局が見通し(LOS)となる場所が点在する。	左記の特徴を持つ場所ではS=32.5(開放地)が適していると考えられる。
RU2 (NLOS)	-	32.5		
RU3	40	32.5	・工場敷地の中心部であり、敷地内の無線エリアには構造物が密集している。 ・RU正面に敷地内の通路が伸びており、真正面方向はRUが見通し(LOS)となっているが、正面方向以外はパイプ群などの金属構造物が多く存在し、それらによりRUが見通し外(NLOS)となる地点が多く存在する。また、構造物の隙間にRUが見通し(LOS)となる場所が点在する。	左記の特徴を持つ場所ではS=32.5(開放地)が適していると考えられる。 ただし、RU正面が工場内の通路等で見通しであり通路側部が金属構造物で囲まれている場合、正面方向の受信電力が高くなる傾向があるため、該当方向の他者土地に他事業者が存在する場合は電波漏洩の配慮が必要と考えられる。(アンテナ高・チルト角の調整、敷地境界部に壁の設置等)
RU3(NLOSのみ)	35	40以上		
RU3(LOSのみ)	38	-		

図 3.3-50、図 3.3-51 に基地局からの距離と伝搬損失の分布について示す。(各々NLOS環境のみ、LOS環境のみの測定地点の分布を示す)

NLOS環境、LOS環境のいずれも基地局からの距離に対し伝搬損失の顕著な増加は見られなかった。これは敷地内に存在する金属構造物への反射の影響で基地局から離れた場所にも電波が強く届いていることが考えられる。この結果は敷地内に金属構造物が多く存在する環境下ではS値を高い値(今回はS=32.5)が適していることを裏付けているものと考える。

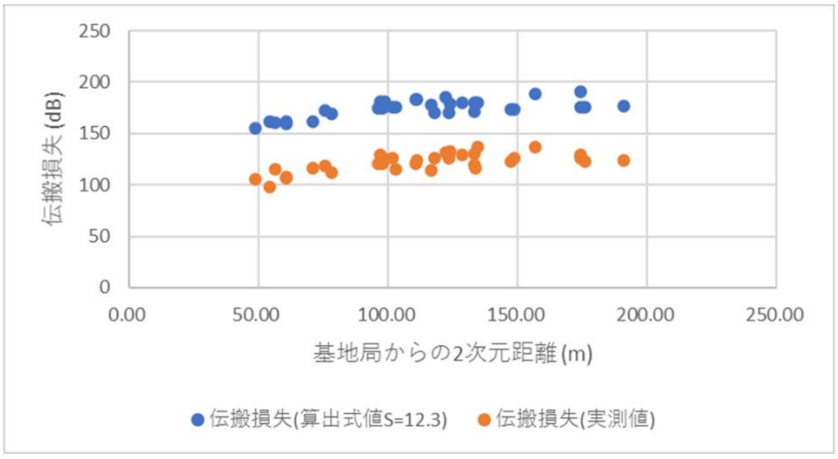


図 3.3-50　基地局からの距離と伝搬損失の分布について NLOS のみ

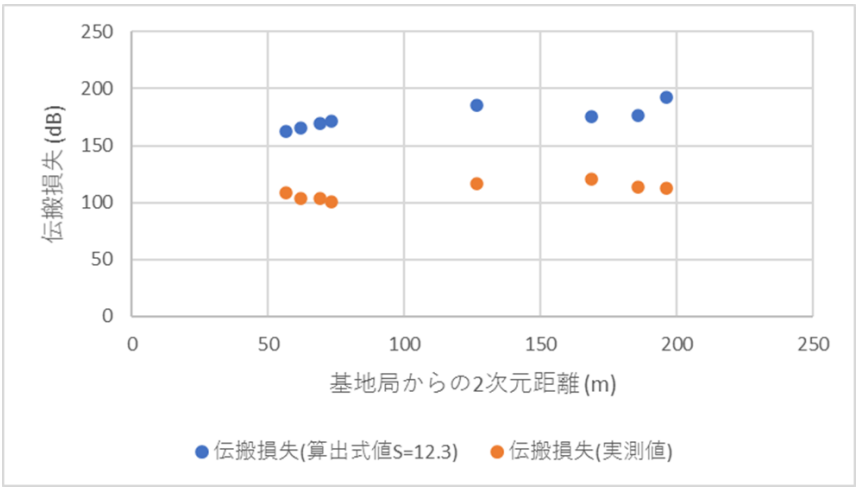


図 3.3-51　基地局からの距離と伝搬損失の分布について LOS のみ

最後に、現行のエリア算出式で選択可能な開放地（S=32.5[dB]）を採用した場合のエリア算出式におけるカバーエリア及び干渉調整区域を図 3.3-52、図 3.3-53、図 3.3-54 に示す。

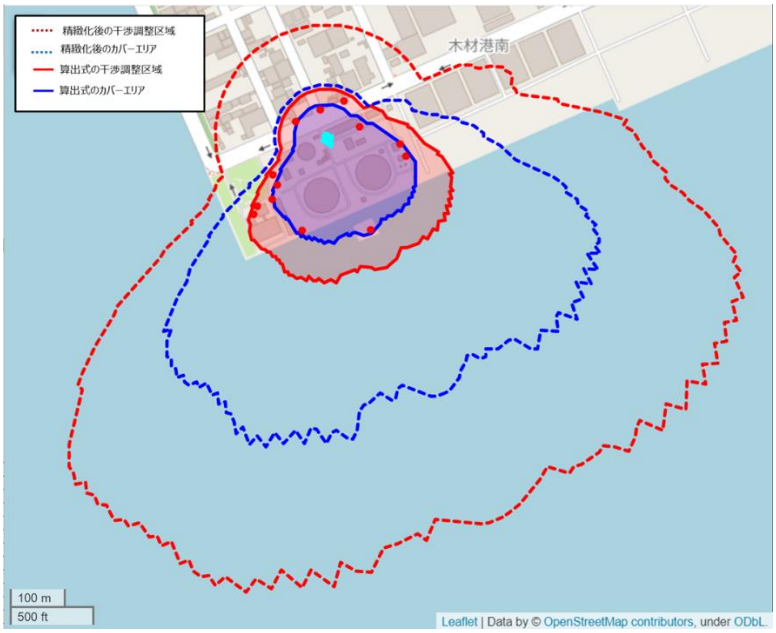


図 3.3-52 S=32.5[dB]精緻化後の算出式のカバーエリア/干渉調整区域（RU1）

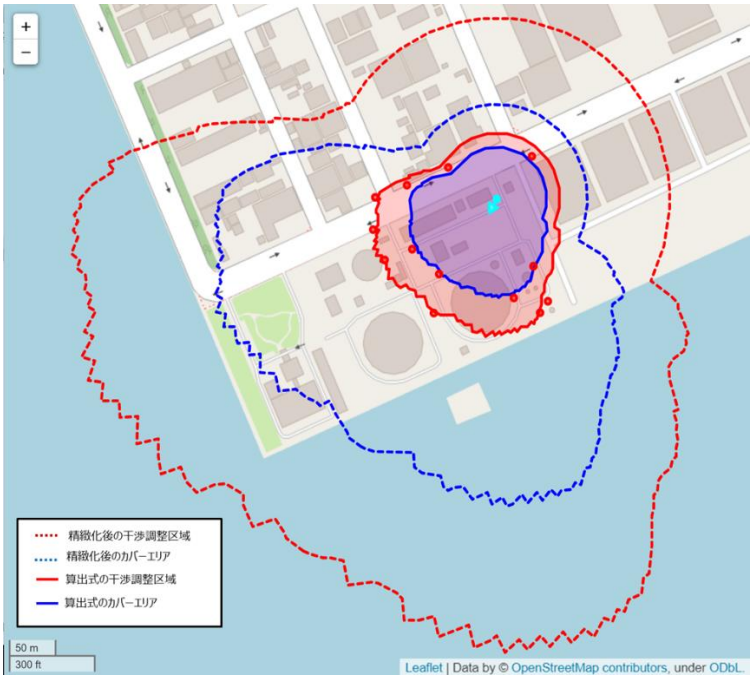


図 3.3-53 S=32.5[dB]精緻化後の算出式のカバーエリア/干渉調整区域（RU2）

図 3.3-54 S=32.5[dB]精緻化後の算出式のカバーエリア/干渉調整区域（RU3）

（2）仮説②の検証結果

仮説②の検証として、RU 近傍に大型金属構造物が存在しないエリア付近の他者土地での受信電力と比較し、自己土地内の反射による他者土地への干渉影響の仮説妥当性の確認を行った。

ただし、廿日市工場敷地内の各 RU の近傍には大型金属構造物が存在しているため、比較対象とすべき「RU 近傍に大型金属構造物が存在しない他者土地」が存在しない。

RU1：前方正面に LPG タンク(高さ 17m)が存在する

RU2：前方正面に多数の金属構造物が存在する

RU3：前方右側に LPG 貯槽(高さ 13m)が存在する

■RU1 正面

■RU2 正面

■RU3 正面

図 3.3-55　各 RU 正面の図

そこで、RU 近傍の大型金属構造物からの反射の影響を受けにくいと思われる測定点として、自己土地内ではあるが RU1 裏面(管理棟屋上)に位置する測定地点 A を比較対象として測定を行った。

RU1 は管理棟屋上に設置されており、海側(南南東)方向を指向方向、ダウンチルト 30 度としている。

測定地点 A は管理棟屋上の RU1 後方 4.9m の地点とした。

図 3.3-56 に示すように RU1 の正面に大型の金属構造物(LPG タンク)が存在するが、管理棟建物により本測定地点は死角となっており、LPG タンク等敷地内の大型金属構造物からの反射の影響は少ないものと考えられる。

■測定地点 A 上空からの図

■測定地点 A から RU1(後方)を見た図

図 3.3-56　測定地点 A の図

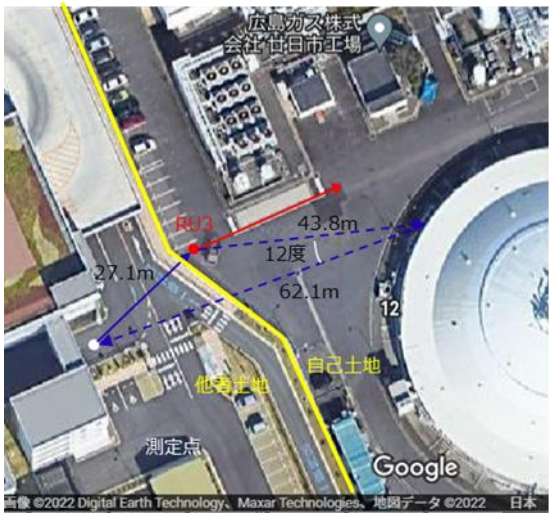
これに対し、RU 近傍に大型金属構造物が存在し反射の影響を受けると考えられるエリア付近の他者土地に位置する測定地点として、測定地点 B(RU3 近傍)、測定地点 C(RU1 近傍)、測定地点 D(RU2 近傍)を比較対象とした。

RU3 は工場敷地内西側境界付近の駐車場に隣接する形で設置されており、東北東方向を指向方向としている。

測定地点 B は他者土地(隣接するクリーンセンター)内に位置し、RU3 の後方 27.1m の地点とした。

RU3 の正面右側に大型の金属構造物(LNG 貯槽)が存在しており、この反射による影響があることを想定し測定を行った。

■測定地点 B 上空からの図



■測定地点 B から RU3(後方)を見た図

図 3.3-57　測定地点 B の図

RU1 は工場敷地内北側境界付近の管理棟屋上に設置されており、南南東方向を指向方向としている。

測定地点 C は他者土地(敷地外の道路)に位置し、RU1 の後方 4.9m の地点とした。

測定地点 C から RU1 は見通し外(NLOS)だが、RU 1 の正面に大型の金属構造物(LNG タンク)が存在しており、この反射による影響があることを想定し測定を行った。

図 3.3-58　RU1 近傍の他者土地上の測定地点 C の図

RU2 は工場敷地内東側境界付近のボイラー棟屋上に設置されており、南西方向を指向方向としている。

測定地点 D は他者土地(敷地外の道路)に位置し、RU2 の後方 56.5m の地点とした。

測定地点 D から RU2 は見通し外(NLOS)だが、RU2 の正面に大型の金属構造物群が存在しており、この反射による影響があることを想定し測定を行った。

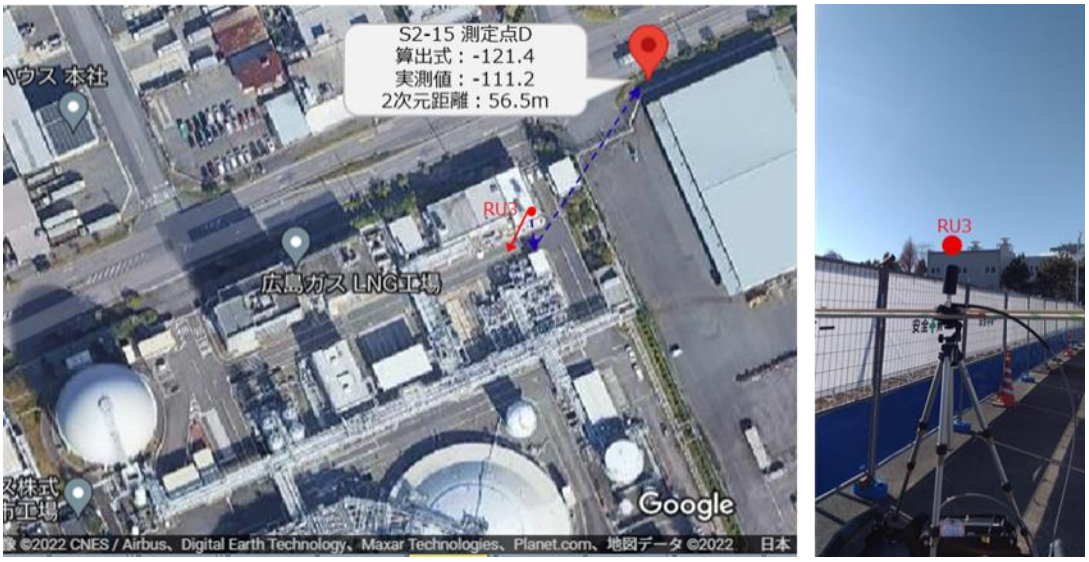


図 3.3-59　RU2 近傍の他者土地上の測定地点 D の図

測定点 A、B、C、D における受信電力の実測値、エリア算出式による算出値およびそれらの差分、RU からの距離の比較を**表 3.3-17** に示す。

各測定点におけるエリア算出式による値と実測値を比較すると、測定点 A がほぼ差分が無いのに対し、測定点 B、C、D について、いずれも 10~17dB 程度実測値の方が高い結果を測定した。

これは測定点 B、C、D において、各 RU 正面付近の大型構造物による反射の影響を受けているものと考えられる。

仮説の通り、自己土地内の RU から自己土地中心方向に照射されて電波が RU 近傍の大型構造物に反射され、隣接する他者土地においてエリア算出法で見積もった直接波よりも高い受信電力が観測できた。

この結果により、仮説②の検証の結果として仮説で考えた通りに敷地内の RU 近傍に存在する大型金属構造物による反射の影響を受け、隣接する他者土地における調整対象区域のエッジ位置が伸長することが確認できたものと考える。

なお**表 3.3-17** で示す通り LOS/NLOS の違いや RU からの距離にかかわらずエリア算出式による値と実測値の差分はまちまちとなっている。これは RU から測定地点に届く直接波と反射波がそれぞれのパスに存在する構造物の影響を受けているためと推察されるが、このようなパス毎に受信電力を測定できれば各パス上の構造物の特徴と比較することで、反射波による受信電力への影響をより正確に把握し、エッジ位置の伸長度を定量的に求めることができるものと考える。パス毎の受信電力の測定方法については、技術的な面を含め今後の検討課題であると考える。

表 3.3-17 各測定点における値の比較

	近傍RU	RU正面付近の大型金属構造物	エリア算出式値(dBm)	実測値(dBm)	差分(dB)	RUからの2次元距離(m)	近傍RUへの見通し
測定点A	RU1	-	-93.6	-93.3	-0.3	4.9	有り(LOS)
測定点B	RU3	LNG貯槽	-108.4	-93.6	-14.8	27.1	有り(LOS)
測定点C	RU1	LNGタンク	-120.3	-103.3	-17.0	60.8	無し(NLOS)
測定点D	RU2	金属パイプ群	-121.4	-111.2	-10.2	56.5	無し(NLOS)

図 3.3-60 に RU3 から敷地外の測定地点(O3-6)に向けた電波の反射方向の図を示す。

図 3.3-61 に RU1 から敷地外の測定地点(O1-7)に向けた電波の反射方向の図を示す。

これらに示すように、敷地内の大型金属構造物により反射した電波が敷地外に大きく届いていることが敷地外における実測結果から得られている。これらの実測結果によると、測定地点は RU の後方または横方向に位置しているが、RU から測定地点までの距離は開放地(S=32.5)の伝搬モデルにおける RU 正面方向の調整対象区域端に相当する距離となっている。これは RU のごく近傍に大型金属構造物が存在し、電波が反射する方向が開けている場合、指向性アンテナの指向方向に相当する距離まで反射した電波が到達する可能性を示しているものと考えられる。

なお、RU の後方または横方向にエッジ位置がどの程度伸長するかを定量的に求めるためには、今後廿日市工場と同様の特徴を持つ場所において、仮説①の最適化により得られ

たS値(今回はS=32.5)によるエッジ付近相当の距離の他者土地(RU後方)での測定を行い、他者土地への電波到達の傾向を検証する必要があると考える。

図 3.3-60　RU3から敷地外への電波反射経路

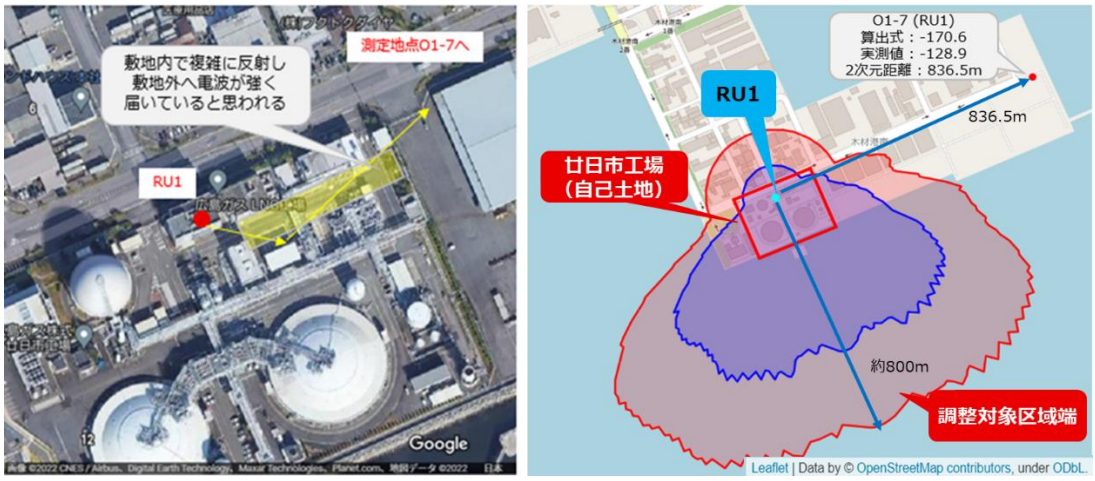


図 3.3-61　RU1から敷地外への電波反射経路

3.3.3 電波反射板によるエリア構築の柔軟化

本テーマには取り組まなかった

3.3.4 準同期 TDD の追加パターンの開発

本テーマには取り組まなかった

3.3.5 その他のテーマ

本テーマには取り組まなかった

3.3.6 技術実証における追加提案

技術実証における追加提案には取り組まなかった

4. ローカル５Ｇ活用モデルの創出・実装に関する調査検討（課題実証）

4.1 実証概要

課題実証を行う廿日市工場は、弊社最大の LNG の受け入れ拠点である。都市ガス事業者において、都市ガス製造工場における安全確保は最重要課題のひとつであり、将来にわたり保安対策を徹底していく必要がある。弊社は 2030 年ビジョン及び中期経営計画（2021 年度から 2023 年度までの 3 か年）において、「安心安全の更なる追求」として「保安レベルの向上」を掲げている。

本実証では、この「保安レベルの向上」に関する現場課題の解決策として、廿日市工場における保守保全業務におけるガス漏洩の早期発見・事故防止・保安対策のための課題解決モデルを実装・検証した。

4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標

背景となる課題、その課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標を以下に示す。

4.2.1 背景となる課題

（1）我が国のガス事業における保安の確保

我が国のガス事業者は、国民生活と産業活動に不可欠なエネルギーを供給する担い手としての役割を果たすと同時に、ガス事業の根幹である保安の確保には十分な配慮を行ってきた。その結果、保安レベルは国際的にも高水準にあるが、安全・安心に対する国民の意識の高まりに応えるためにも、更に向上していく取り組みを行う必要がある。

以下の図に示すとおり、死亡事故や人身事故のような重大な事故については着実に改善が見られ、製造段階での死亡事故は 2010 年以降発生していない。しかし、未だ重大な事故の撲滅には至っておらず、今後も一層の安全高度化が求められている。

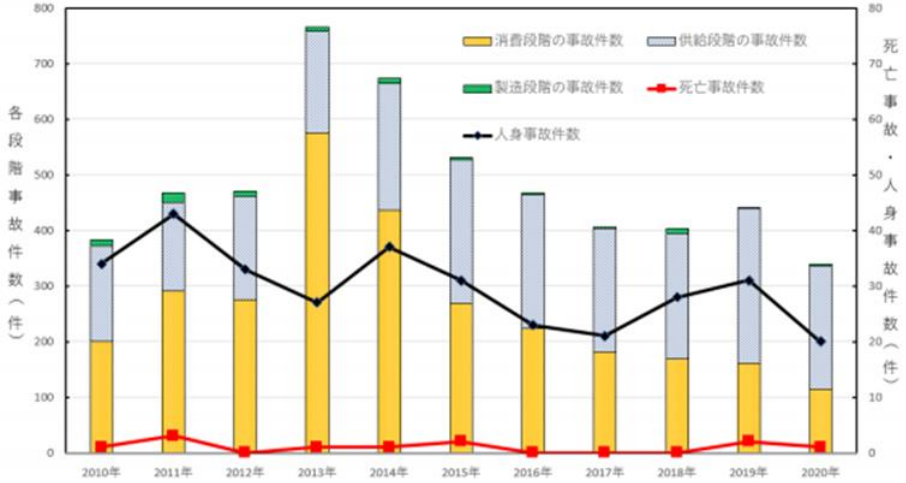


図 4.2-1　事故件数等の推移

出典：産業構造審議会保安・消費生活製品安全分科会ガス安全小委員会
「ガス安全高度化計画 2030」（2021 年 3 月）

（2）現状の課題と将来像の認識

弊社においてもその保安レベルは非常に高水準にある。これは毎日の巡回とガス漏洩検査の徹底という作業員のたゆまぬ努力の結果、維持されている。人による巡回では、広い構内で常時監視を続けることは不可能であり、検査直後に漏洩が発生する可能性もゼロではないなど作業員の心理的負担も大きくなっている。近年、赤外線カメラなどの最新技術を活用し、漏洩の兆候の捕捉が可能となってきており、最新技術を活用することで人間による検知の限界を超えることが可能になっている。経済産業省の政策[1] としても最新技術を活用したスマート保安導入によるガス工作物の巡視・点検・検査頻度の合理化が求められている。

本事業を通じて、最新技術と人間の五感・技術による判断の双方を最大限活用できる課題解決モデルを構築し、漏洩の兆候の早期発見・事故防止・保安対策の品質向上に繋げることで将来的に保安レベルをさらに向上させることを目指す。

図 4.2-2　現状の課題と将来像のイメージ

[1] 経済産業省産業保安グループガス安全室「ガス分野におけるスマート保安について」（2020 年 12 月 8 日）参照

4.2.2　ローカル５Ｇを活用した課題解決モデル

廿日市工場の安全は、毎日の巡回とガス漏洩検査によって確保されている。現在は、2 名で 2 時間超を要する定例巡回を 4 組 3 班体制の交替勤務により 1 日 3 回実施しているが、広い構内で常時監視を続けることは不可能である。また、検査器を用いたガス漏洩検査は 3 か月に 1 回の実施に限定され、普段は作業員の五感が頼りであり、心理的負担も大きくなっている。保安レベルのさらなる向上に係る課題を展開したイシューツリーを以下に示す。

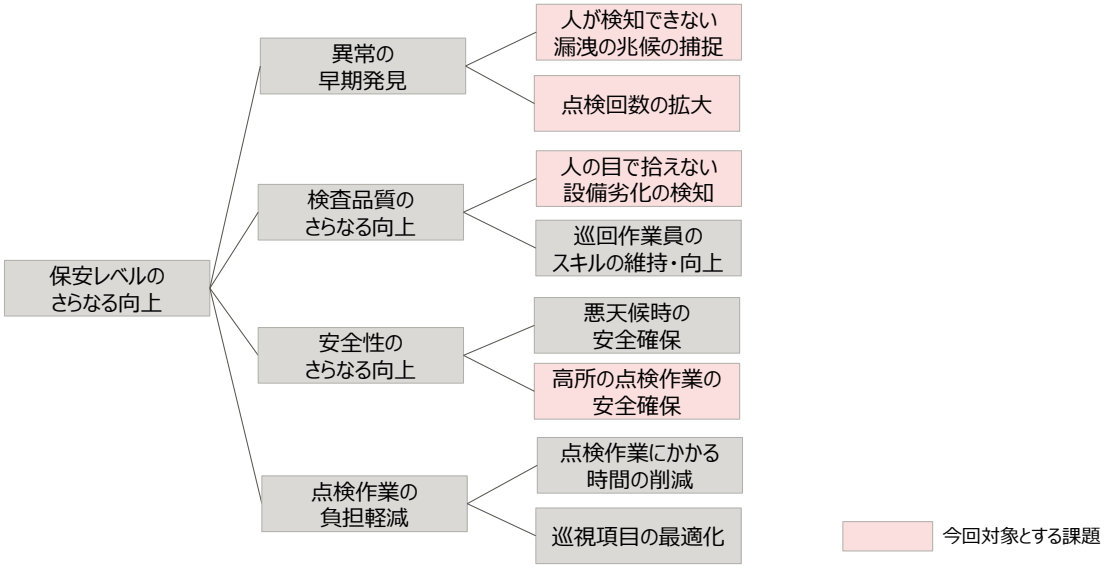


図 4.2-3　保安レベル向上のイシューツリー

今回の実証では、人が検知できない漏洩の兆候の捕捉、点検回数の拡大、人の目で拾えない設備劣化の検知、高所での点検作業の安全確保を目指して、以下の図に示すような、走行ロボットで点検区域を巡回し、カメラ映像から AI を活用して設備異常や劣化を検知する課題解決モデルを検証した。

ローカル５Ｇは、ガス工場構内で、4K 高精細カメラの映像データなどをエッジ処理した後、圧縮した映像とアラートを中央制御室に高速送信するための無線通信として活用した。なお、カメラシステムを組み合わせた走行ロボットを活用したのは、配管・遮蔽物が多いプラント設備において、有線・定点カメラでは工場全体のカバーが困難であるためである。

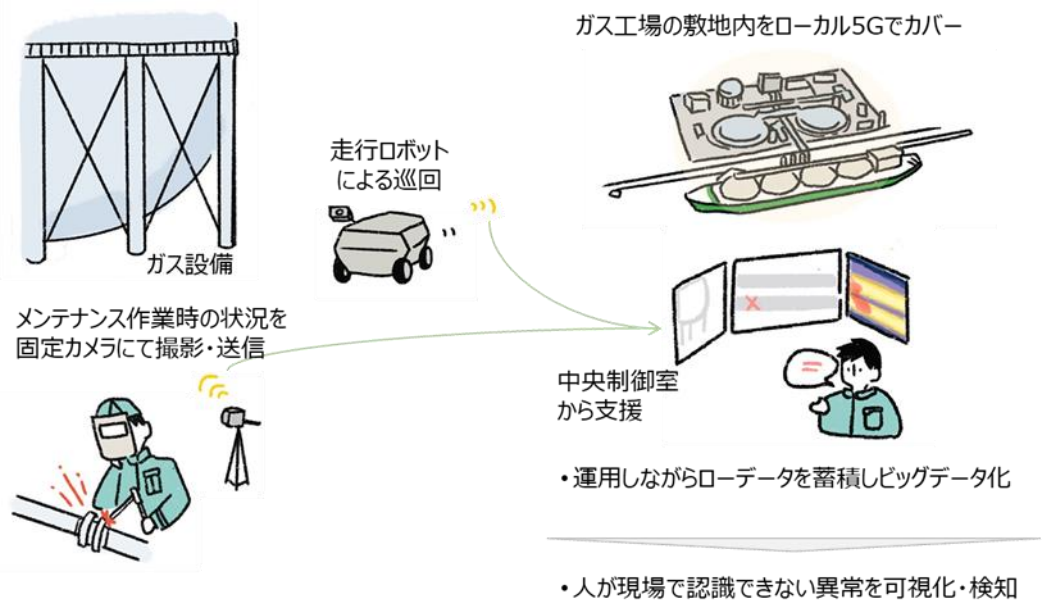


図 4.2-4　ローカル５Ｇを活用した課題解決モデル

4.2.3 実装シナリオ及び実証目標

上記の課題解決モデルの実装により、ガス事業者のガス漏洩検査や巡回業務へのローカル５Ｇ等の導入を促進し、保安レベルの維持・向上というガス事業者の最重要課題における業務効率化や作業員の安全性向上等の課題解決に寄与することを目指す。この実現のため、監視によって異常を発見し、発見した異常をいち早く中央制御室に伝えることが重要である。

以上を踏まえ、実装に向けた道筋及び実証目標を以下に示す。本実証では、①走行ロボットで取得した映像を用いた、ガス製造設備からのガス漏れ検知および設備劣化検知の可否と有効性検証、②ローカル５Ｇを用いた、高速通信による中央制御室への異常の即時通知と異常エリアの早期特定の可否の検証、を目標とした。具体的には、赤外線カメラで具体的な場所の特定および濃度表示(レベル表示)による重要度・緊急度の可視化により、既存の定置式検知器のアラート通知に比べ、通知後のガス漏れ対応等の迅速化に寄与することを目指した。なお、実証を通じて、当該ソリューションの導入による点検業務の見直しも検討した。

実証後は、1～2 年程度、実運用を行い、2～3 年後には自社内の他工場に展開することを目指している。本実証では、巡回作業員による点検をサポートすることを目標としたが、実運用以降では、巡回作業員による点検を走行ロボットが一部代替することも含めて検討する。

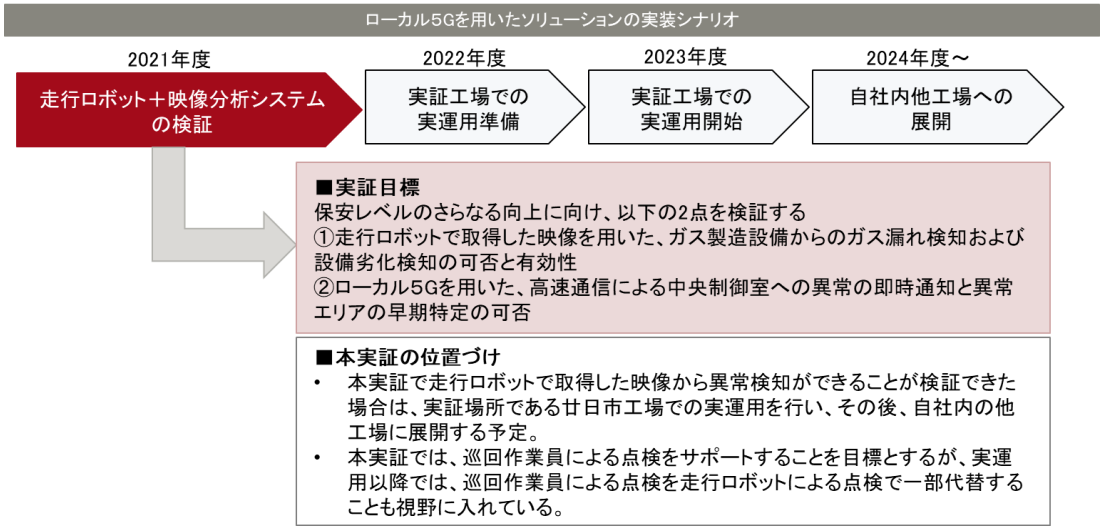


図 4.2-5　実装シナリオ及び実証目標

4.3 実証環境

ガス工場構内はガス生産設備が数多くあり、固定局と移動体であるロボット間のローカル５Ｇ通信では障害物となる。また、金属製設備のためマルチパスも発生しやすい。そこで、移動体通信はミリ波ではなく Sub6 を使うことで一定の効果が期待できる。また、複数の固定局設置により見通し外が減り、スループットの向上が期待できる。

一方、Sub6の周波数は固定局から見て設備の陰になる部分では回折などは期待できない。また、ロボットは今後自律走行を目指すため、RTK による固定局との通信に加え、自己位置データ、走行中の動画像、ガス漏れ検出結果データ、設備劣化診断データなど様々なデータ通信をロボット搭載移動局と工場構内に設置した固定局間で行う必要がある。この時、Sub6の物理的通信速度の制約に加え、ロボットの移動による電界強度が常時大きく変動すること、マルチパスの発生や設備の影などによる通信の不安定さなど、一定通信速度を常時確保することは難しい。

ガス工場は爆発性のガスを取り扱っているため、場合によっては遅滞の無い対応が必要となる。そのため、ローカル５Ｇの通信品質が重要な要素となる。

実証結果を他の都市ガス事業者の工場への横展開を図る観点から、弊社最大の LNG の受け入れ拠点である廿日市工場の構内で実証を行った。

実証を行うプラントの俯瞰図とユースケース 1 のカメラ付き走行ロボットの移動経路を**図 4.3-1** に示す。 LNG や LPG などの重要設備の密集するエリア、かつ非防爆のロボットの走行エリアから監視できる範囲を重点点検区域とし、2 つのルートでロボットを走行させた。

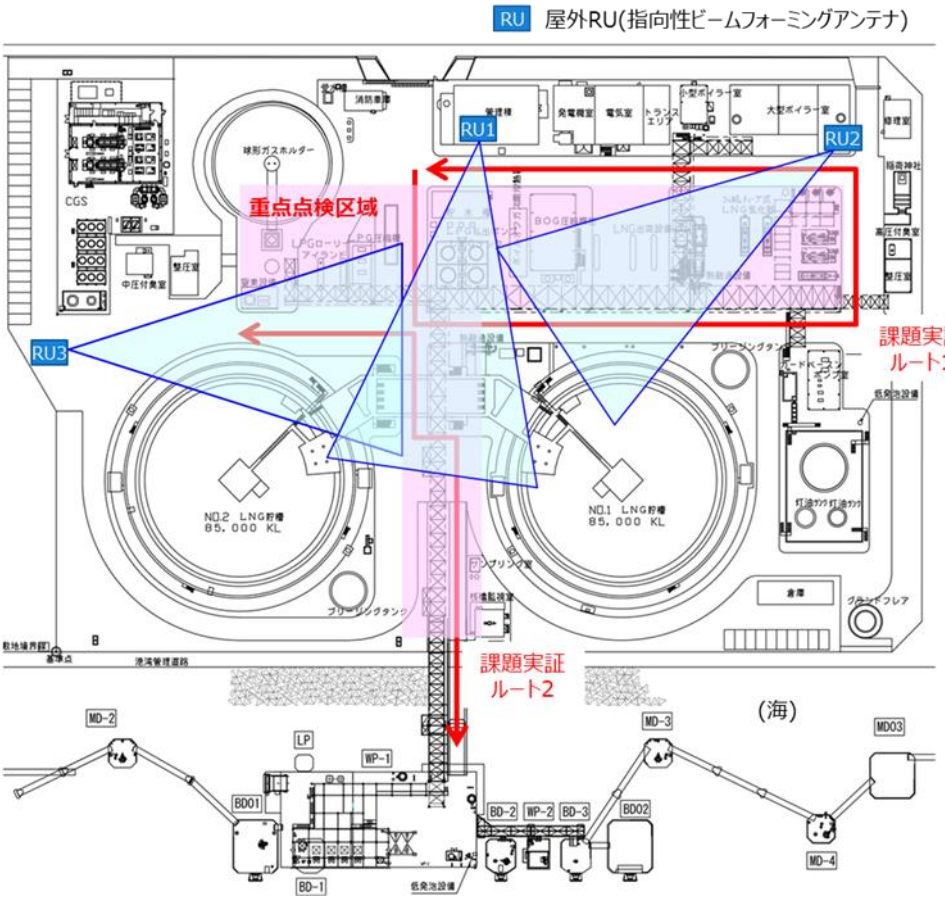


図 4.3-1　プラントの俯瞰図

4.4 実証内容

4.4.1 ローカル５Ｇを用いたソリューションの有効性等に関する検証

4.4.1.1 ローカル５Ｇを用いたソリューションとユースケース

（1）検証を実施したユースケース

前項 4.2 を踏まえ、以下の 2 つをユースケースとして設定した。

ユースケース①　カメラ付走行ロボットと AI による設備異常検知

赤外線カメラと 4K カメラを搭載した走行ロボットで点検エリアを走行、エッジ AI でガス漏れと設備劣化を検知し、ローカル５Ｇで中央監視室に送信する。

ユースケース②　カメラ映像を用いた中央制御室からの遠隔作業支援

メンテナンス作業時の状況をカメラで撮影、ローカル５Ｇを用いて中央制御室に送信し、遠隔で作業支援を行う。

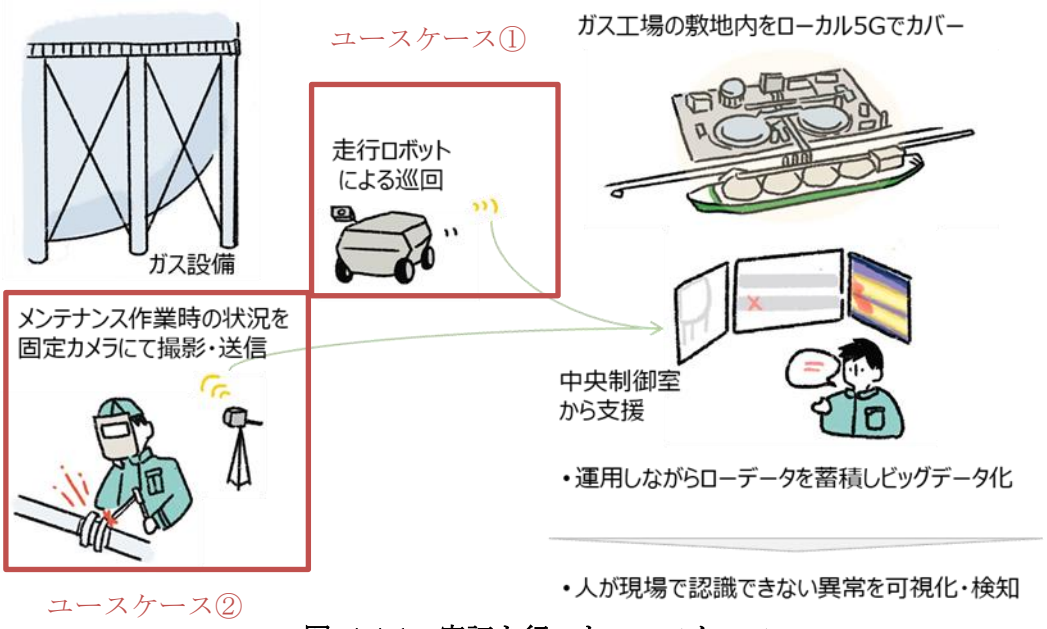


図 4.4-1　実証を行ったユースケース

（2）検証を実施したローカル５Ｇを用いたソリューション

1）ソリューションの全体像

本実証では、前項のユースケースの実証を可能とするため、以下のような映像分析システムを構築した。

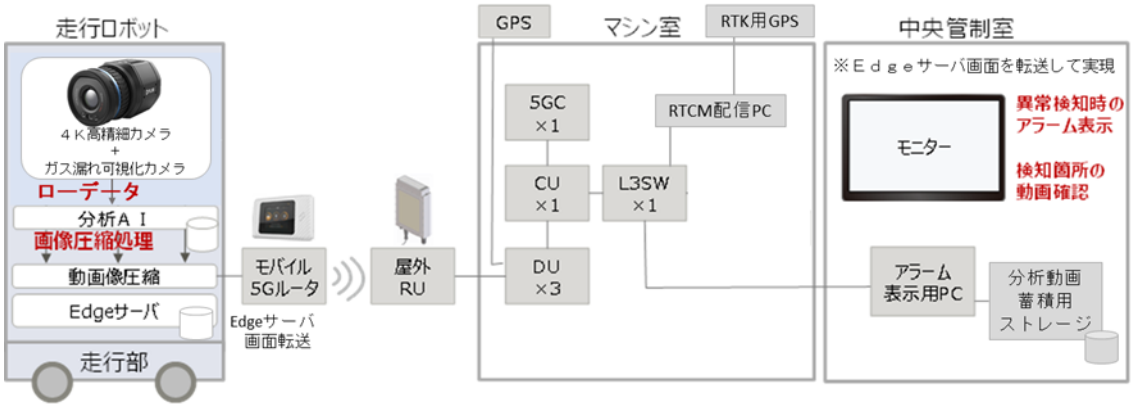


図 4.4-2　本実証で用いた映像分析システム

2）カメラシステム

本カメラシステムで採用したカメラは、4K 高精細カメラと、検知対象のガス（LNG、LPG、都市ガス）すべての異常を検知するためのガス漏れ可視化カメラが一体となった構成となっており、積載スペースや積載重量が限られる走行ロボットに適したものとなっている。

図 4.4-3　カメラシステムの組合せイメージ

ガス漏れ可視化カメラは、漏洩 LNG、LPG、都市ガスのガス漏洩によって生じる特有な赤外線吸収スペクトルをとらえることで漏洩したガスの検知を目指すものとなっている。また、4K 高精細カメラは、多点検知が可能な 4K 画像に対して外観検査用 AI を動作させることで、AI による異常検知を目指したものとなっている。

上記システムを構内で移動させて検証するため、移動用の機構に前述のカメラシステムを組み合わせた。走行場所の特性や運搬するカメラシステム等を考慮すると、移動部は以下の条件を満たす必要があった。

- 上部に物が載せられること
- ペイロードが 10kg 以上あること
- 路面にある 2、3 センチの段差を超えられること
- 多少の雨でも移動可能であること

3）ローカル５Ｇ

本実証では各種ローデータ（ガス漏れ可視化画像、4K 画像）を走行ロボット上のエッジコンピューターで処理し、処理状況や走行状況のデータを遅延なく中央に伝送する必要があり、以下のような条件を満たすローカル５Ｇ通信を構築する必要があった。

- 人による目視点検～中央制御室への連絡フローに対して、短時間で不具合被疑箇所の通知ができること
- 工場内に多数のアンテナを立てずに済むこと

4）走行ロボット

ロボットについては、初めて走行させる環境下での自律走行は困難であることが想定されるため、電波が届きづらい場所では、ラジコンや台車など手動で走行を行うことも想定した。

5）分析 AI

ガス漏れ検証は、カメラシステムを静止させた状態での測定とした。設備の劣化診断については、検証期間中に自然には設備に劣化が表れないことが想定されたため、検証のために劣化を模擬した状況（模擬劣化）を準備した。この対象設備について正常な状態の写真を、時間による違い、天候による違いなど多くの状況が網羅可能なように 2000 枚以上を撮影し、AI に学習させた。最終的に、学習した AI によって模擬劣化の検出精度を検証した。

AI にて判断されたアラート群については、そのアラートが実際にガスの漏えい/設備の劣化であるのかをオペレーターが判断し、点検業務で活用可能かを評価した。

4.4.1.2 効果検証

（1）評価・検証項目

前述の実証目標を踏まえて、巡視・点検・検査頻度の合理化、作業員の負担軽減、異常の早期発見、人や現状の検知器で検知できない異常の検知の 4 つの観点から評価・検証項目を設定した。ユースケースごとの評価・検証項目を以下に示す。

なお、経済産業省において、スマート保安を進めるための制度環境整備の検討が進められているところであるが、本成果報告書作成時点では、具体的な要件・水準・指標までは定められていないため、業務で活用できるレベルを想定した上で、まずは本実証で目指すレベルを目標として設定した。

表 4.4-1　効果検証の評価・検証項目：ユースケース①
カメラ付走行ロボットと AI による設備異常検知

評価・検証の観点	評価・検証項目	実証での目標
巡視・点検・検査頻度の合理化	走行ロボットでの点検にかかる時間	以下の異常を検査しつつ、2時間以内に巡回を完了できること。 ●ガスの漏えい ・気化ガス：13A、LPG ・液化ガス：LNG、LPG ●外面上の劣化 ・錆や腐食など、ガス製造設備の外面上の劣化を検知
作業員の負担軽減	作業員の心理的負担	作業員が、ロボット巡回を追加したことで、点検後にガス漏れが発生しているかもしれないという心理的負担の低減を感じること
異常の早期発見	異常検知にかかる時間	一つの視野あたり30秒以内で異常を検知できること。
人や現状の検知器で検知できない異常の検知	各設備・配管の傷の検知	以下の異常を検知できること。 ・配管本体の錆、腐食などの劣化
	ガス漏れ箇所の判別	以下のガス漏えいを検知できること。 （検知率は背景にも依存するため、数パターンの背景で確認する必要あり） LEL20%以上のガス漏洩の検知 ・CH4（1vol%） ・C4H10（0.36vol%）

表 4.4-2　効果検証の評価・検証項目：ユースケース②
カメラ映像を用いた遠隔作業支援

評価・検証の観点	評価・検証項目	実証での目標
作業員の負担軽減	現場作業員の心理的負担の軽減	現場作業員が、熟練した作業員の助言を受けることで、1人でメンテナンス作業を行うことへの心理的負担の低減を感じること
	中央制御室作業員の作業効率の向上	中央制御室の作業員が現場に行かずに支援できることによって業務効率が向上すると感じること

(2) 評価・検証方法

評価・検証方法を評価・検証の観点、評価・検証項目ごとに、以下に示す。

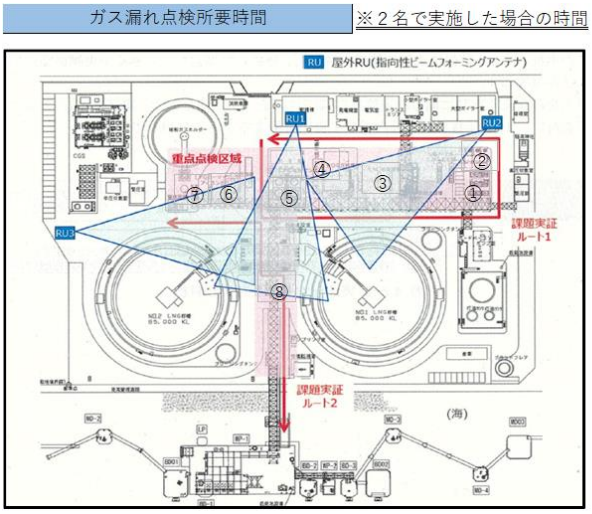
1) ユースケース①カメラ付走行ロボットと AI による異常検知

a) 巡視・点検・検査頻度の合理化

① 走行ロボットでの点検にかかる時間

本実証は、巡回作業員による点検を代替するものでなく、巡回作業員による点検に加えて、走行ロボットによる点検を実施し、点検にかかる時間を計測した。

なお、追加の点検を仮に人が実施した場合、1 回あたり 10.5 時間の工数を要する。巡回作業員が実施する場合の工数(時間)を以下に示す。



①S＆T気化器５基	5	時間
②高圧LNGポンプ	1.5	時間
③LNG出荷ヤード	1	時間
④BOG熱調設備	1	時間
⑤LPG貯槽下部	0.5	時間
⑥LPG受入設備	0.5	時間
⑦中圧送出ガバナ付近	0.5	時間
⑧No.1.2貯槽下部とサプラック	0.5	時間
合計	10.5	時間

図 4.4-4　走行ロボットによる追加点検を巡回作業員が実施する場合の時間

b）作業員の負担軽減

① 作業員の心理的負担

実証後に作業員へのグループインタビューにより検証した。グループインタビューの対象者、実施日、実施方法は以下の通りである。

○対象者：廿日市工場にて巡回業務および中央制御室業務に従事している、実証参加者以外の作業員 9 名
○実施日時：2022 年 3 月 2 日　15:00-16:30
○実施方法：オンラインでのグループインタビューにて実施。実証風景の動画を視聴してもらい、インタビューを行った。

c）異常の早期発見

① 異常検知にかかる時間

異常状態をエミュレートして、検知からアラート表示までの時間を測定した。

d）人や現状の検知器で検知できない異常の検知

① 各設備・配管の傷の検知

4K 高精細カメラ映像から AI が異常検知した結果をもとに、巡回作業員が確認した。AI による異常検知は、正常な状態を AI に学習させ、そこから外れた状態を異常として検知する方式で行った。

② ガス漏れ箇所の判別

現状は定置式の検知器を設置しているが、風の影響により、どこからガスが漏れているかまでは明確に分からないため、AI でのカス漏れ検知結果からガス漏れ箇所を判別できるか検証した。

試験ガスとして、窒素とメタンの混合ガス、窒素とブタンの混合ガスを噴出し、検知率を確認した。窒素は安全のため不活化ガスとして使用し、窒素が検知に影響を与えるかどうかも検証を行った。

2）ユースケース②カメラ映像を用いた中央制御室からの遠隔作業支援

a）現場作業員の心理的負担の軽減

実証後に作業員へのグループインタビューにより検証した。インタビューの要領は 4.4.1.2. (2) 1) b)①に記載の通り。

b）中央制御室作業員の作業効率の向上

実証後に作業員へのグループインタビューにより検証した。インタビューの要領は 4.4.1.2. (2) 1) b)①に記載の通り。

(3) 実証結果及び考察

実証結果及び考察を評価・検証の観点、評価・検証項目ごとに、以下に示す。

1) ユースケース①カメラ付走行ロボットと AI による異常検知

a) 巡視・点検・検査頻度の合理化

① 走行ロボットでの点検にかかる時間

今回設定した重点点検区域のルート上に 6 か所の点検ポイントを設置、当該点検ポイントでの走行ロボットによるガスの漏洩検査と設備劣化の点検時間を計測したところ、点検ポイントでの停止から測定開始～測定終了まで、異常検知時のアラート発報を含めた場合でも、1 か所あたり 10 秒以内での点検が完了し、上記点検作業を含めた総走行時間についても目標の 2 時間以内での巡回完了を達成していることも確認した。

図 4.4-4 に示したガス漏れ点検箇所については、トータルで 10.5 時間相当の点検員による検査に加え、走行ロボットによる点検(総走行時間 2 時間程度)が加わることにより、保安レベルのさらなる向上を見込むことができる。

図 4.4-5　走行ロボットによる点検作業風景①

図 4.4-6　走行ロボットによる点検作業風景②

b）作業員の負担軽減

①　作業員の心理的負担

現行運用は、4 組 3 班体制の交替勤務で 1 日 3 回実施している定例巡回や、3 か月に 1 回実施している検査器を用いたガス漏洩検査などにより、高い保安レベルを保っている。

それらの人の五感による点検作業や計器による実測作業に加え、今回の走行ロボットと AI による異常検知システムを導入することで、点検担当者の心理的な負担は軽減される。

また、点検員の安全の確保が重要となる高所での点検においても、約 10m の距離でのガス漏洩検査でも一定の結果が出ていることより、高所での点検の心理的負担を軽減できる（詳細な結果は 4.4.1.3 機能検証 b）‐②‐1）センサーの性能評価、2）設備のガス漏れ検出実験を参照）。

作業員グループインタビューにおいても以下の意見が得られた。

- 人間が点検できないところをロボットで点検できるようになればかなり人間の負担が減るため助かる。
- パトローラーが設備点検時の設備劣化、錆、漏水を確認するが、ロボットが実装されると点検者の負担が軽減されていくと感じる。

ただし、4.4.1.3 に記載の通り、悪天候時(具体的には降雨や強風時)の検知結果が、平常時に比べ劣ることが判明したため、悪天候時にも走行ロボットによる点検を活用し、作業員の心理的な負担を軽減するには精度向上が今後の課題の一つだと認識している。

c）異常の早期発見

①　異常検知にかかる時間

前述の a)①のとおり、点検ポイントでの停止から測定開始～測定終了まで、1 か所あたり 10 秒以内での点検が完了し、目標値であった 1 視野あたり 30 秒をクリアしていることを確認した。

また、同時に現地のリアルタイムの映像と異常検知アラートを中央制御室でも共有が可能であるため、異常発生時の遠隔支援、後続作業への迅速な展開を図ることができる。

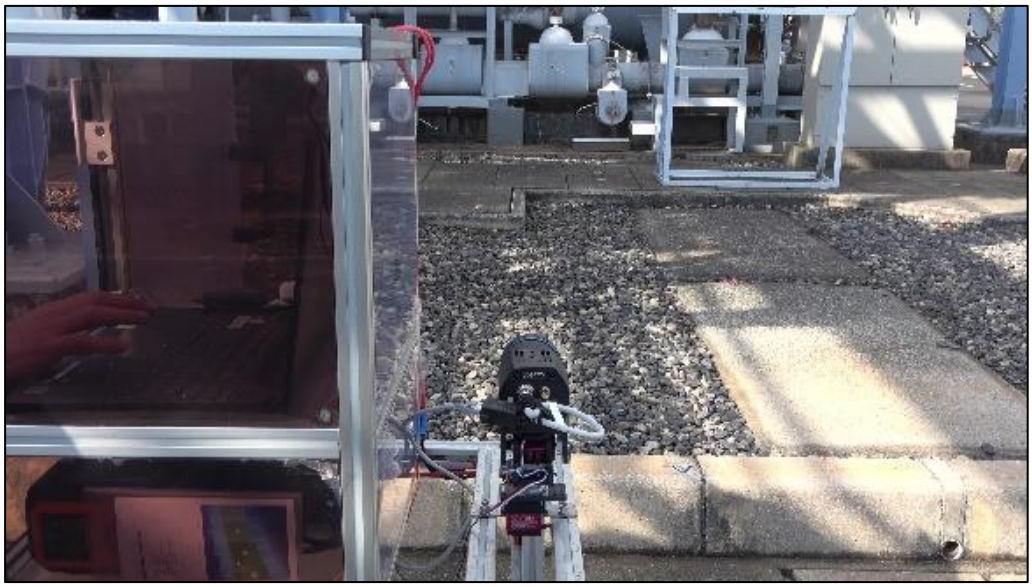


図 4.4-7　走行ロボットによるガス漏洩検査

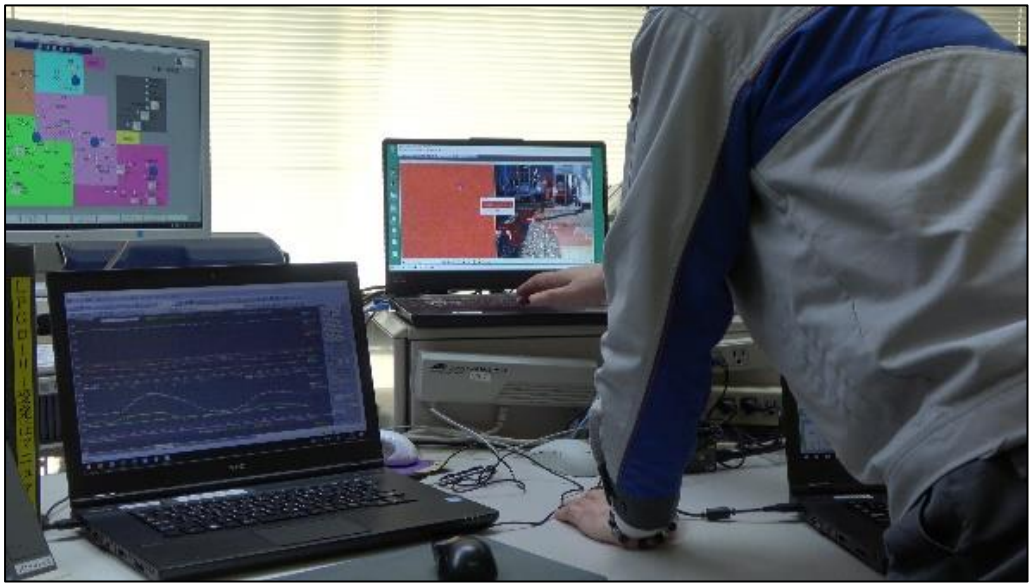


図 4.4-8　走行ロボットによるガス漏洩検査

d）人や現状の検知器で検知できない異常の検知

① 各設備・配管の傷の検知

4 組 3 班体制の交替勤務で 1 日 3 回実施している定例巡回では、ガス製造設備などの設備における外面上の劣化や変形、破損、損傷、腐食、汚れ、保冷材の劣化等についての点検を実施している。

今回は設備劣化の代表的な例として、錆による劣化の検知について検証を実施し、検知することができた（詳細な結果は 4.4.1.3 機能検証-(3)-1）-c）設備劣化検知を参照）

また、走行ロボット制御用 PC には、異常発生時発報されるアラートに加え、実カメラ映像と AI の着目画面が並べて表示されることにより、おおよその劣化箇所の可視化についても確認することができた。

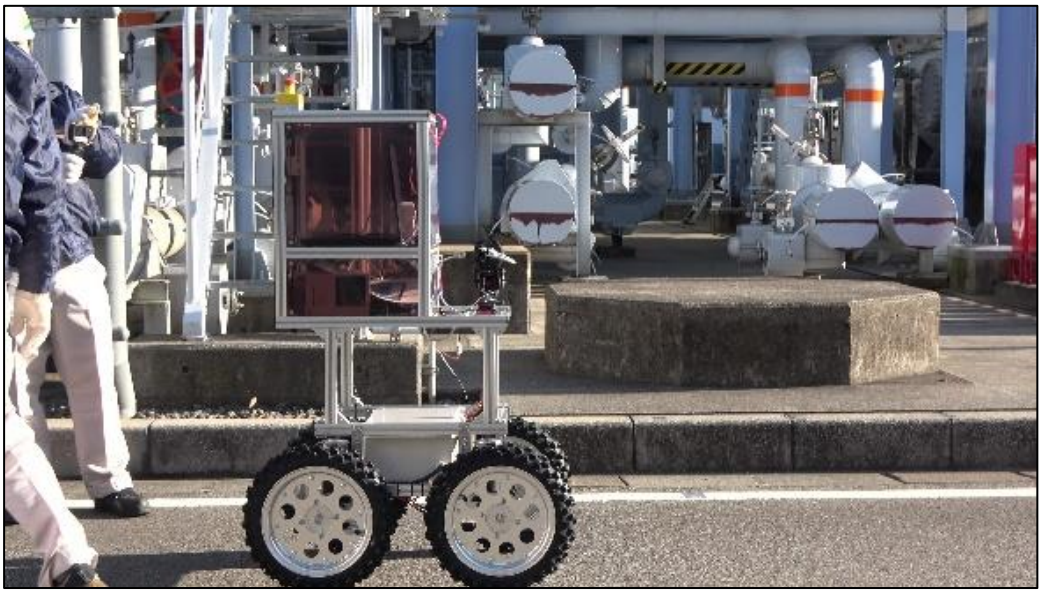


図 4.4-9　走行ロボットによる設備劣化検査

図 4.4-10　制御 PC 画面

② ガス漏れ箇所の判別

3 か月に 1 回実施している検査器を用いたガス漏洩検査を補完するため、走行ロボットと AI によるガスの漏洩検知を検証した。

前述した設備劣化同様、異常発生時に発報されるアラートに加え、ガスの漏洩を判断した動画像が表されることにより、おおよその漏洩箇所の可視化についても確認することができた。

図 4.4-11 走行ロボットによるガス漏洩検査

図 4.4-12 ガス漏洩検査対象設備

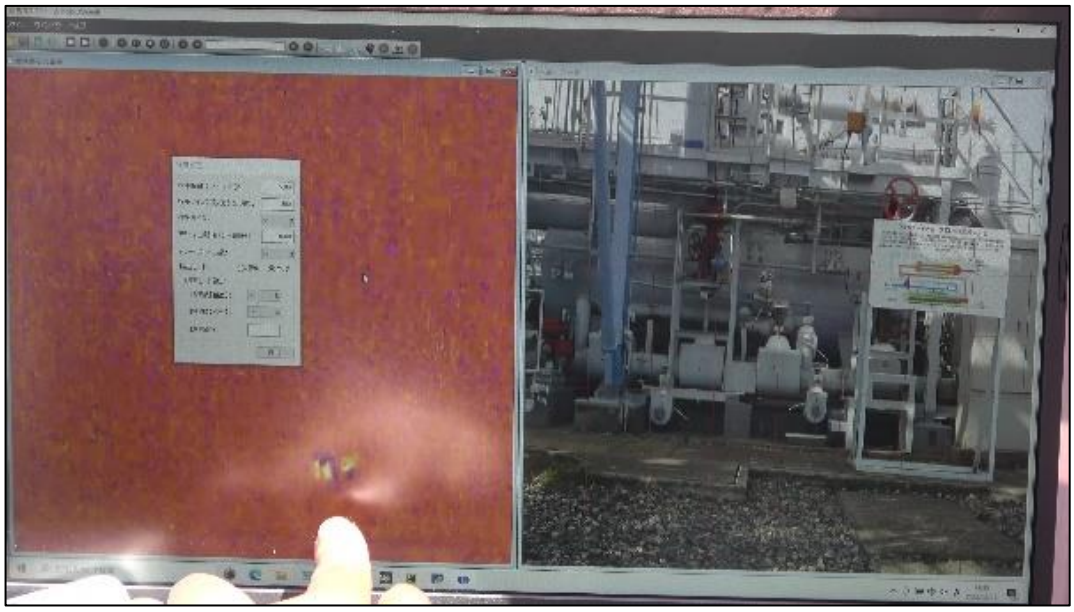


図 4.4-13　ガス漏洩の可視化の様子

2）ユースケース②カメラ映像を用いた中央制御室からの遠隔作業支援

a）現場作業員の心理的負担の軽減

現状は現場作業員が無線を持って中央制御室のオペレーターとコミュニケーションしながらメンテナンスをしているが、音声のみである。そこで、映像を見ながらコミュニケーションすることで、現場作業員が気付かない場合も迅速に対応できたり、きちんとバルブを閉めているか等を中央制御室のオペレーターがチェックできたりすることで、現場作業員の心理的負担を軽減できる可能性が確認できた。

b）中央制御室作業員の業務効率の向上

定期的に発生する場内のメンテナンス作業の現場に当該走行ロボットを持ち込むことで、現場で立会する担当者と中央制御室間での作業内容の共有、作業進捗の確認、問題発生時の作業指示と迅速な対処等の実現に向けた可能性が高いことが確認できた。

作業員グループインタビューにおいても以下の意見が得られた。

- 中央制御室への映像転送は大変ありがたいと思う。
- 中央制御室で使用しているパソコンから録画データが見られるとよい。
- 製造業務をしつつ、リアルタイムで映像を見て作業支援ができるのはとてもありがたい。建屋内全て走行できるとありがたい。例えば管理棟あたりのエリア。（敷地の北側の RU1 から RU2 の範囲）

c）その他の効果

遠隔作業支援の際に撮影した動画を蓄積し、保安人材の教育用コンテンツとして活用する等、人材育成への効果も考えられる。

4.4.1.3 機能検証

（1）評価・検証項目

評価・検証方法を点検対象、評価・検証項目ごとに、以下に示す。なお、経済産業省において、スマート保安を進めるための制度環境整備の検討が進められているところであるが、本成果報告書作成時点では、具体的な要件・水準・指標までは定められていないため、業務で活用できるレベルを想定した上で、まずは本実証で目指すレベルを目標として設定した。

表 4.4-3　機能検証の評価・検証項目

ユースケース	点検対象	構成要素	評価・検証項目	実証での目標
1.カメラ付走行ロボットとAIによる異常検知	共通	走行ロボット	継続して走行可能な時間	走行可能距離：600m以上　走行速度：0.1m/s以上
			海風の走行への影響	風速10m以下で運用可能
		ローカル5G	通信速度	UL伝送レート50Mbps程度
		Edge サーバ	動画像読み出し～AI分析の処理時間	10秒以下
	ガス漏れ	カメラシステム	カメラ感度	異常を検出できる
			撮影距離	対象物から10m以上離れ検出できる
			雨天時の機能低下	雨天時でも検出できる
		分析AI	異常検知の精度	ガス漏洩検知濃度：LEL20%（CH4：1vol%、C4H10：0.36vol%）を100%検知し､30秒以内にアラート
			夜間の映像（赤外線カメラ）からの異常検知	昼夜間共に同等の検査精度を有する
	設備劣化	カメラシス	カメラ解像度	異常を検出できる

ユースケース	点検対象	構成要素	評価・検証項目	実証での目標
		テム	撮影距離	指定位置（近接道路の最近接縁石から約 1 m）以上離れた場所から検出できる
			雨天時の機能低下	雨天時でも検出できる
		分析 AI	異常検知の精度	設備の腐食（錆）を検知できる
2.カメラ映像を用いた中央制御室からの遠隔作業支援	ー	走行ロボット	メンテナンス現場などへの容易な移動	設定された点検ルート以外への 4K 高精細カメラ機能の汎用的な利活用と遠隔監視ができる

（2）評価・検証方法

評価・検証方法を点検対象、評価・検証項目ごとに、以下に示す。

1）ユースケース①カメラ付走行ロボットと AI による異常検知

a）共通（ガス漏れ検知と設備劣化検知）

①　走行ロボットが継続して走行可能な時間

検査を行いながらルート上を走行させて完走できるかガス工場内で測定し確認した。

②　海風の走行ロボットへの影響

工場内に設置した風速計のデータと照合し、最大何 m の風速下での走行に支障が無かったかを確認した。

③　ローカル５Ｇの通信速度

課題実証のルート上の複数のポイントで、測定器を使用しスループットを測定した。

④　動画像読み出し～AI 分析の処理時間

実際の検査の処理時間について、出力されたログファイルを解析して確認した。

b）ガス漏れ検知

①　カメラの感度

ボンベを準備して窒素とメタンの混合ガス、窒素とブタンの混合ガスを噴出し、10m 以上離れた場所に設置したカメラシステムから異常を識別できるか確認した。

②　カメラの撮影距離

ボンベを準備して窒素とメタンの混合ガス、窒素とブタンの混合ガスを噴出し、10m 以上離れた場所に設置したカメラシステムから異常を識別できるか確認した。

③　カメラの荒天時の機能低下

水に濡らした箇所からのガス漏れを検出する。必要であれば、カメラとボンベの間をホースで放水しながら撮影し、カメラの視野に水滴が映りこんでいる場合でも検出できるか確認した。

④　異常検知の精度

ボンベを準備して窒素とメタンの混合ガス、窒素とブタンの混合ガスを噴出し、ガスを検知できるか確認した。

⑤　夜間の映像（赤外線カメラ）からの異常検知

夜間、屋外にてボンベを準備して窒素とメタンの混合ガス、窒素とブタンの混合ガスを噴出し、ガスを検知できるか確認した。

c）設備劣化検知

①　カメラの解像度

模擬劣化を施した設備を指定位置（近接道路の最近接縁石から約 1 m）以上離れた場所に設置したカメラシステムから異常を識別できるか確認した。

②　カメラの撮影距離

雨の日の正常な状態の画像を学習させ、晴天時の検知とどの程度精度に差異があるか確認した。

③　カメラの荒天時の機能低下

雨の日の正常な状態の画像を学習させ、晴天時の検知とどの程度精度に差異があるか確認した。

④　異常検知の精度

模擬劣化を施した設備を用意し、劣化を検知できるか確認した。

2）ユースケース②カメラ映像を用いた中央制御室からの遠隔作業支援

a）現場変更時のカメラの切り替えやすさ

作業時間を計測した。

(3) 実証結果及び考察

1) ユースケース①カメラ付走行ロボットと AI による異常検知

a) 共通（ガス漏れ検知と設備劣化検知）

① 走行ロボットが継続して走行可能な時間

走行ロボットを課題実証ルート 1（図 4.4-14）及び課題実証ルート 2（図 4.4-14）に沿って走行させて完走できるかどうかを確認したところ、いずれのルートにおいても完走することができた。

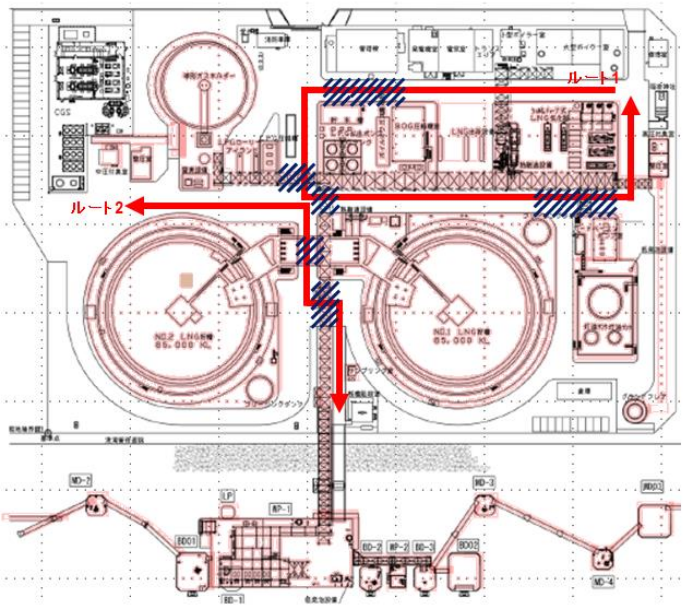


図 4.4-14 課題実証で使用したルート

今回の実証において、ルート 1 は 1 周約 300m の中に 6 つの点検ポイントが存在するルートとなっている。ロボットは各点検ポイントで停止し、カメラを設備方向に向けてガス漏れ検知及び劣化検知の点検を実施する。点検は自動点検による場合と手動操作による場合の両方の方法を交えて行った。また、走行方法は基本的に自律走行によるが、自律走行が困難となる一部区間（図 4.4-14 青色斜線部分）においてはリモコンによる手動走行を交えて行った。このような方法で走行と点検を行ったところ、1 周に要した時間は約 80 分であった。

ルート 2 は片道約 115m、往復約 230m を走行するルートとなっている。今回の実証においては、当ルート上に点検ポイントは設定されていないため、走行のみの実証となる。走行方法は基本的に自律走行によるが、自律走行が困難となる一部区間（図 4.4-14 青色斜線部分）においてはリモコンによる手動走行を交えて行った。このような方法で走行したところ、約 15 分間の走行時間で完走することができた。

これらの結果から、カメラシステムを搭載した走行ロボットは、(a)300m 以上の距離

を断続的に走行可能であること、(b)80 分間以上連続稼働できること、を確認した。また、いろいろなテストを行うために、実際にはルート 1 を 2 周以上走行させたり、リモコンによる手動モードにて位置を戻したり別の場所に移動させたりといったルート補正を繰り返していたため、確実に 600m 以上は問題なく走行できる能力を有していることは確認している。また、走行速度については、ロボットの制御の設定にて最大速度を 0.3m/s と設定しているため、走行速度は 0.1m/s 以上となっている。

従って、走行可能距離：600m 以上、走行速度：0.1m/s 以上を達成した。

なお、図 4.4-14 に青色斜線で示した区間は自律走行が困難な区間となっている。その原因として考えられることは、主に次の 2 点である。

- 建物やタンクや配管などの設備によって上空が遮蔽され捕捉衛星数が減少する
- 建物や設備などで衛生信号が反射してマルチパスが発生する

例えば、ルート 1 の管理棟南側エリアは、管理棟によって北側上空が遮蔽され捕捉衛星数が減少すると共に、管理棟による反射の影響でマルチパスが発生し、RTK による測位精度が低下するものと考えられる。このような自律走行が困難な区間については、SLAM の導入や、マーカーを用いた自律走行などの手法を追加導入することで、自律走行を補完することができると思われる。

② 海風の走行ロボットへの影響

ロボットが走行していた時間帯は次のとおり[2]。

2 月 15 日　15:43～16:35
2 月 16 日　09:18～09:58、11:30～11:36、14:27～16:05
2 月 17 日　09:20～11:45、13:35～16:00

これらの時間帯を廿日市工場の風速データと照合すると、最も風の強かった時間帯は 2 月 16 日 14:27～16:05 であり、そのときの平均風速は 7.5m/s、最大風速は 10.2m/s であった[3]。このため、少なくともロボットは風速 10m/s の強風下で運用可能であることを確認した。

③ ローカル５Ｇの通信速度

重要点検区域の複数のポイントにおける、このたび構築したローカル５Ｇのアップロード側の伝送速度について、走行ロボットからの高精細な 4K 相当のファイルを転送する高負荷方式で実測した結果、電波環境の良いポイントでは 130～150Mbps、環境の悪いポイントでも 80Mbps 程度の伝送速度を確認した。

④ 動画像読み出し～AI 分析の処理時間

AI による分析は、画像読み出し～前処理～AI による推論というシーケンスになっている。ログファイルを解析すると、1 シーケンスあたり平均約 0.2sec を要していることが分かった。

従って、動画像読み出し～AI 分析の処理時間が 10 秒以下であることを確認した。

*2 実際にはこの時間帯以外にも走行しているが、記録上確認できるものに限って列挙した
*3 廿日市工場の風速データは 1 分間ごとの平均風速となっており、瞬間的な最大風速とは異なる。

b）ガス漏れ検知

① カメラの感度

本実証実験を行うに先立ち、令和 3 年 3 月に広島ガス株式会社と知能技術株式会社はガス漏れ検出手法の検討を廿日市工場にて行った。LNG プラントであるため、外気温に比べ温度の低いガスが漏れていることを想定してサーモグラフィーを使った温度の違いを検出することで漏れが検出できると考えていた。しかし、現地調査の結果、製造後のガスは外気温とほぼ同様の温度であり、サーモグラフィーで計測した結果、漏れが検出できないことが判明した。

そこで、本実証実験においては温度以外の手法でセンシングする手法を検討した。検討を行うにあたり、次の条件を満たす必要があった。

1) ガス工場の特性上、非防爆エリアからの測定が必要である。非防爆エリアから対象設備までの距離は離れているもので概ね 10m 程度離れるため、10m 離れた場所からのガスを検出できる性能を持つセンサーである必要がある。

2) ロボット搭載できる小型軽量であること。ロボットは走行するため大きな装置を搭載することはできない。また、取り外して点検をしたい要望もあるため、ハンディである必要がある。

3) 外部へ画像やデータの出力が可能なセンサーであること。サーモグラフィーでは USB ポートを持たずリアルタイムでのデータ取り出しができないものも多い。また、そのメーカー特有の画像形式であることも多いため注意が必要である。本実証実験では常時エッジ側の PC と接続し、センターへの画像伝送やデータ伝送を行う必要があるため、汎用的な画像形式で、リアルタイムで伝送できる装置を選定する必要がある。

4) 常温の外気と温度差が無いガスの検出ができること。ガス工場では一般的にガス検知器を使っている。職員は現場での点検等の作業ではガス検知器を携帯している。携帯型ガス検知器はガスに近接しなければ検知できない。また、設備近くにも設置型ガス検知装置が設置されているが、非防爆エリアなど離れた場所からの検知能力はない。

そこで、上記 1)～4) の条件を満たすセンサーの検索を行った。本実証実験期間内で実験を行うためには新規開発では間に合わないため、既存装置でかつ本期間中に入手できるものを検討した。

購入前に実験も行った結果、FLIR GF77a を選定した。FLIR GF77a のガス検出の原理は、周囲環境とガス漏れ場所の温度差ではなく、ガスが特定波長の赤外線を吸収する特性を生かし、センサーで設備周囲を撮像した時に外気だけでは著しく吸収される赤外線波長が無いが、ガスが存在する場所では特定赤外線が吸収されていることを検出することでガスが存在することを検知する。しかしながら、ガスは噴出後空中に拡散してしまうため濃度が低く太陽光下では瞬時のガス漏れの検出は難しい。また、光は距離の二乗で減衰するため、ガス漏れ箇所からセンサーまでの距離が離れると検出が困

難になる。当該センサーはこの課題を克服するため、瞬時のデータだけでなく、ガスが時間の経過とともに移動や拡散する性質を利用して、変化していく状態の差分を取ることで微小な赤外線吸収の変化を捉えることができるようになっている。

この製品は図 4.4-15 に示すように動画像イメージで出力される。この画像の場合、中央下の黄色や黒い部分がガス漏れを表しており、ガス漏れを検出できることが確認できた。しかしながら、この画像で誰でも検出を見つけることは難しい。

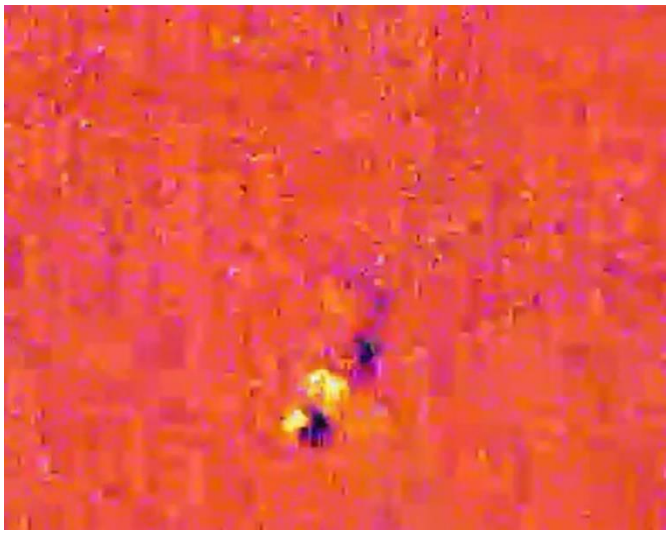


図 4.4-15　センサーで廿日市工場設備のガス漏れを検出した画像

そこで、この出力を前提として、AI を使ったアラート出力の開発を行った。利用したソフトウェアで出力されるのは図 4.4-15 に示すような画面までであるため、ガス漏れ検出した場合、アラートとして出力する UI（user interface）を準備し、走行ロボットの制御 PC 上に表示するとともに、中央制御室内に設置した遠隔監視用の PC にもリアルタイムで連携・表示した。

ガス漏れの検出結果については、次項②カメラの撮影距離に示す。

② カメラの撮影距離

1)センサーの性能評価

選定したセンサーが LNG と LPG ガスが検出できるか、できる場合どの濃度まで検出できるかセンサーの性能評価を行った。

表 4.4-4 にガス種類、ボンベ及びガス噴出口からセンサー及びエッジコンピューターまでの距離、ガス別濃度、測定結果を示す。測定日は 2022 年 2 月 15 日 13 時から 16 時、平均風速は 0.5m、気温 5℃。下記各項目の OK は図 4.4-15 同様、センサーのグラフィック表示で確認できた。NG は測定できなかったことを示す。

表 4.4-4 ガス種別、各濃度別の検出結果一覧

	屋外距離 2ｍ	屋外距離 5m	屋外距離 10m	降雨屋外距離 10m	夜間模擬実験 10m	実設備 9.4m	実設備 11.5m	ガス放出方式
メタン 1.5%	○	○	○	—	—	—	—	ボンベ
メタン 1.0%	×	○	○	×	×	—	×	ボンベ
メタン 0.5%	×	○	×	—	—	—	—	ボンベ
ブタン 0.56%	×	○	○	—	—	—	—	ボンベ
ブタン 0.36%	○	○	×	×	×	—	×	ボンベ
ブタン 0.18%	×	○	×	—	—	—	—	ボンベ
LNG 生ガス	—	—	—	—	—	○	—	実装置
LPG 生ガス	—	—	—	—	—	×	—	実装置
LPG	—	—	—	—	—	—	×	ボンベ
13A (参考)	○	—	—	—	—	—	○	構内設備から

（考察）
同濃度で近い距離が NG であるにもかかわらず遠い距離で検出できているのはセンサーのセンシング能力より検出時の風の強さが影響して、強風によってガスが吹き飛ばされ希釈するため検出できないと考えられる。
測定状況は図 4.4-16 に示す。

図 4.4-16　ガス漏れ検出実験風景

2)設備のガス漏れ検出実験

ロボットが走行時に検査する場所において実際に設備から生 LNG 及び生 LPG を放出させ検出できるか実験を行った。また、これらのガスに加え 1)項で実験を行ったメタンガス 1%及びブタンガス 0.36%のボンベを持ち込み検出の可否を実験した。加えて 13A ガスの検出も確認した。

測定日は 2022 年 2 月 16 日 11 時から 12 時、平均風速は 6.3m～9.5m、気温 3.5℃。下記各項目の OK は図 4.4-15 同様センサーのグラフィック表示で確認できた。NG は測定できなかったことを示す。ロボット搭載時に道路から設備を巡回点検することを想定し、センサーは道路上で高さ 70cm に設置した。

使用したガス種と濃度、測定距離別の測定結果は**表 4.4-4** を参照すること。実験風景は図 4.4-17 から**図 4.4-19** に示す。

図 4.4-17　生 LNG 測定

図 4.4-18　生 LPG 測定

図 4.4-19　設備 2 階でメタン、ブタン、13A 測定

（考察）一定量のガス漏れであれば実設備でも検出可能である。
なお、強風のためガスの拡散が大きく少量では確認できなかったと考える。

③　カメラの荒天時の機能低下

雨天を再現させるため、ガス放出口近辺で散水をした。日時は 2022 年 2 月 16 日 9 時 15 分から 10 時 15 分まで、平均風速 5m～7m、気温 3.5℃であった。ガスは、ブタン 0.36%、メタン 1%の 2 種類、距離は 10m とした。

（結果）放水前はガスを 10m から検出したが、放水すると水に反応しガスと区別ができなくなった。

（考察）本センサーの原理は自然光の光の中の特定の赤外線の吸収を検出している。多量の水が空中に放出されることで、水がガスを流してしまいガスが空中を漂う状況を作れていない。そのため、ガス濃度が著しく低下し検出できていないと思われる。

実験風景は図 4.4-20 による。

図 4.4-20　散水時のガス検出実験風景

④　異常検知の精度

屋内での実験ではガスの検出は困難だった。この原因については当センサーの検出原理から考察すると、太陽光の照射が抑えられた屋内では、吸収スペクトルに相当する自然光の量が少ないため、バックグランドとの差が表れにくいことが原因だと考えられる。そのため、精度の測定はできなかった。また、屋外での実験では、**表 4.4-4** に示すように、ガス種別、濃度、距離の違いによる検出の可否を調査したが、分析 AI のパラメータや風などの外乱の影響があったため、定量的な評価とはなっておらず、精度を測定することは困難だった。精度を測定するには、現場での実験により分析 AI のパラ

メータを決定した上で、当該パラメータを用いて、ガス種別、濃度、距離の違いによる検出の可否を繰り返しテストし、N 回のテストで M 回検出できたことを確認し、検出精度を M/N と定める必要がある。その際、風向や風速、天気など、外乱の影響は一定になるようにしなければならない。このような精密な測定の実施は当該期間においては困難であったため、**表 4.4-4** に示すような性能評価とした。

⑤　夜間の映像（赤外線カメラ）からの異常検知

電気室で模擬の夜間環境を作りガス検出できるか実験を行った。
(結果)蛍光灯下、消灯下のいずれのガスも検出できなかった。距離　10m、5m、2m。
(考察) 蛍光灯の波長にセンシングに必要な波長が含まれないもしくは少ない。そのためセンサーは自然光下での光の散乱を検出するためアルゴリズムの検出できないと考えられる。
そのため、夜間はこのセンサーだけでは検出できないことが判明した。夜間はセンサーが反応する赤外線波長を含む照明で設備を照射し、その灯りの中で測定する必要がある。
図 4.4-21 で点灯時の実験風景、図 4.4-22 で消灯時の実験風景を示す。

図 4.4-21　電気室点灯時の実験風景

図 4.4-22　電気室消灯時の実験風景

c）設備劣化検知

① カメラの解像度

今回の設備劣化診断に用いたAIではモデルの学習と錆の検出に用いる画像のサイズは600×600 pixelsとしている。また、本検証におけるAIモデルのベースとなったネットワークであるResNet50では、通常は上限の画像サイズを224×224 pixelsとしており、このサイズを超える場合はリサイズが実施される。これらの条件において、本検証で用いたAIモデルは学習時に85.5 %の識別精度で未学習データを分類できたことが判明している。従って、本検証におけるカメラシステム上の可視光カメラの解像度は設備劣化診断用のAI動作に十分な解像度であったと言える。

② カメラの撮影距離

本検証では特定の2地点について、設備近接道路の最近接縁石から約1 m離れた位置から検査を実施した。

1地点目、及び、2地点目の設備画像を図 4.4-23の(a)及び(b)にそれぞれ示す。廿日市工場の設備群で図 4.4-23(a) は北東角（ボイラー室の向かい側）の地点であり、図4.4-23(b)は北西角（管理棟の向かい側）にある地点である。これら2地点の設備では、検証のため設備劣化の錆を模擬した塗装が施された（図 4.4-24）。

図 4.4-24の黄丸印で示したように、錆を模擬した塗装は実際に錆の発生しやすい設備構造上で段差のある部分に施された。これら2地点の画像を実際にAIモデルで処理した結果を図 4.4-25と図 4.4-26にそれぞれ示す。ここで、図 4.4-25及び図 4.4-26の(c)に示したヒートマップ画像とは本検証で用いた AI モデルが検証画像の中で着目したピクセルの位置を視覚的に表示しており、図 4.4-25 及び図 4.4-26 の(c)緑色の度合いが強い部分ほどより大きく着目した部分となっている。このヒートマップ画像の情報を実際の画像と照合するために合成したものが図 4.4-25 及び図 4.4-26 の(b)である。これらの結果から、今回学習させた AI モデルでは設備の H 字鋼やパイプラインに着目して錆の有無を判定していることがわかり（図 4.4-25及び図 4.4-26の(b)と(c)）、少なくとも今回検証した地点において正確な結果（錆あり判定）を出力したことがわかった。

なお、今回のAIモデルでは、出力結果は「錆あり」か「錆なし」の2つのみであるため、出力された確度はいずれも90 %を超える高めの数値が出力されてしまっている。このため実運用上で利用可能とするため閾値を設けており、アラーム出力は確度90 %を超える場合にのみ発生するようにしている。

一方でより詳細に設備劣化を判定するためには、学習データの分類を、例えば「錆あり NG」「錆あり OK」「錆なし」など、現状より増やして学習させるなどの対策が考えられ、このようにすることでより細かな分類を可能とすることが期待できる。

(a)　　(b)

図 4.4-23　検証地点の実際の画像
(a) 北東角（ボイラー室の向かい側）の地点、
(b)は北西角（管理棟の向かい側）にある地点

(a)　　(b)

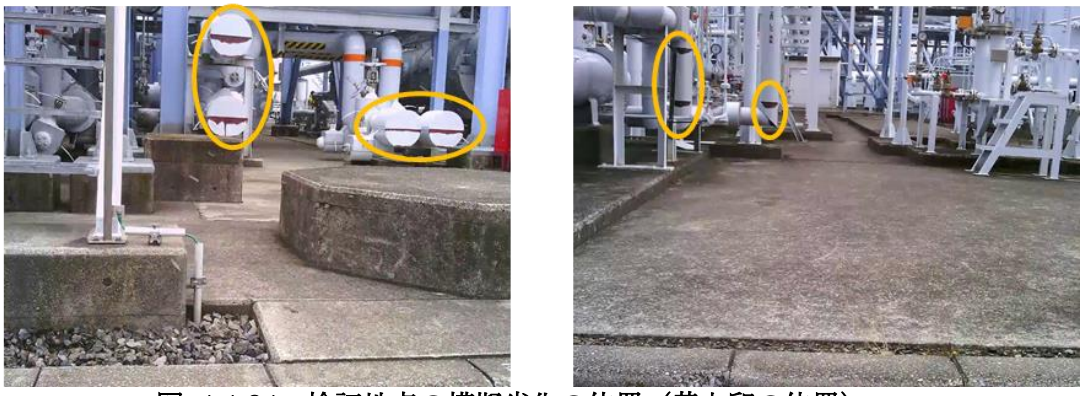


図 4.4-24　検証地点の模擬劣化の位置（黄丸印の位置）
(a) 設備の蓋部分、(b) 配管の接合部分

図 4.4-25　図 4.4-23(a)地点での設備劣化診断の結果、確度 97.1 %で錆ありと判定した(a)元画像、(b)AI の着目位置を着色した画像、(c) AI の着目位置のみ表すヒートマップ画像

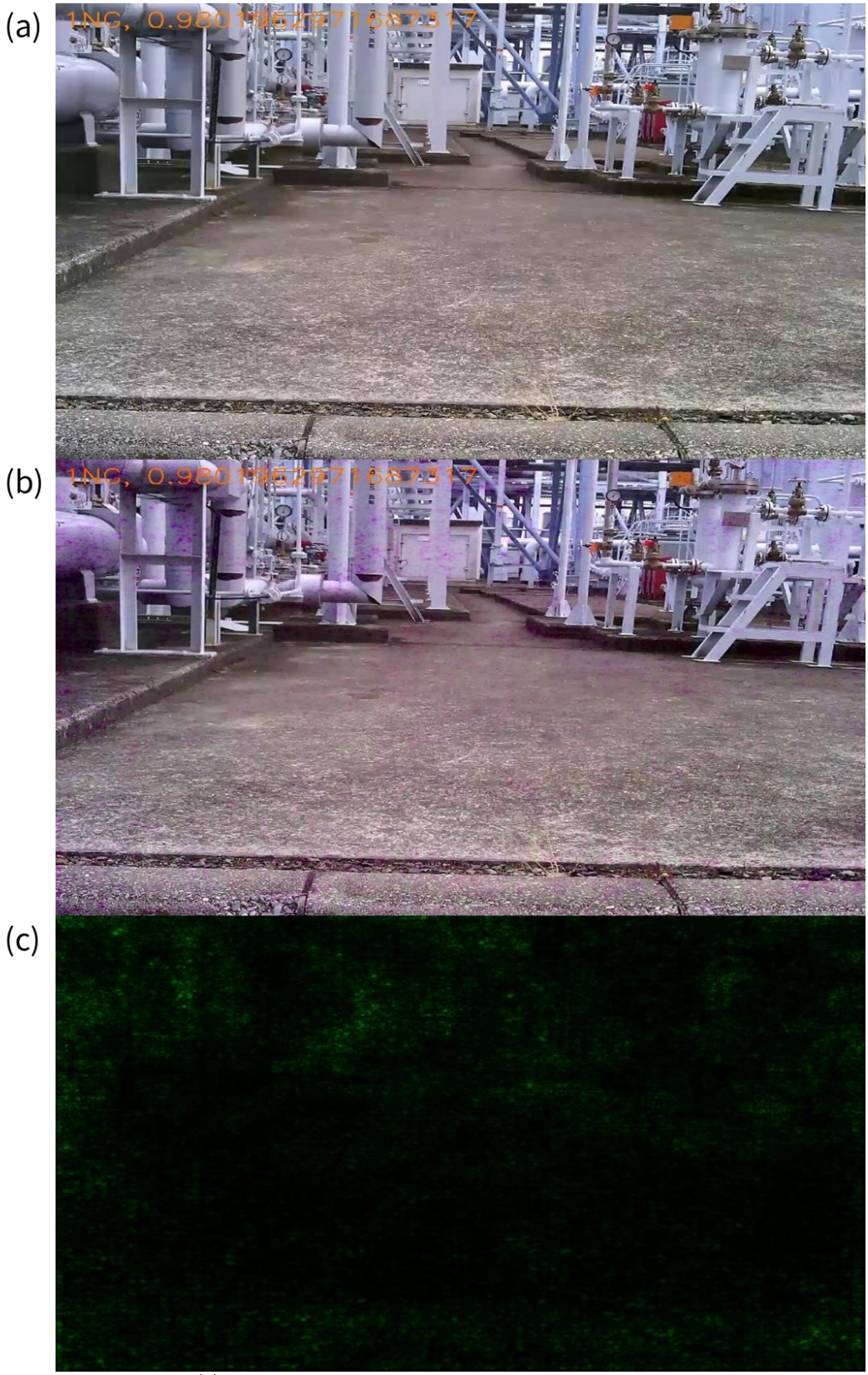


図 4.4-26　図 4.4-23(b)地点での設備劣化診断の結果、確度 98.0 %で錆ありと判定した(a)元画像、(b)AI の着目位置を着色した画像、(c) AI の着目位置のみ表すヒートマップ画像

③ カメラの荒天時の機能低下

今回の検証時には降雨がなかったため、降雨下での機能低下については検証ができなかった。一方で、検証日程中には降雪及び強風と荒天条件下での検証となった。この条件の下で、**図 4.4-25** 及び図 4.4-26 に示した通り、劣化を模擬した施設において100 %の精度で設備劣化を検出できたことから、今回条件の様な降雪・強風の条件においてはカメラシステムの機能低下は見られないことがわかった。

④ 異常検知の精度

今回検証した範囲においては、**図 4.4-25** 及び図 4.4-26 に示した通り、劣化を模擬した施設において 100 %の精度で設備劣化を検出することができた。本結果について考察すると、1) AI モデルの学習に用いた画像群には今回対象となった施設の画像が多数含まれていたこと、2) 錆を含む画像をインターネット上で取得可能な画像群より抽出し多数を AI モデルの学習させたことで錆のある設備異常検出に特化した AI モデルとなっていたこと、の 2 点の要因により精度よく検出できたものと推察される。従って、より詳しい精度については、本検証で用いた 2 地点のみならず、今後他の複数の地点での検証が必要であると考えている。

2) ユースケース②カメラ映像を用いた中央制御室からの遠隔作業支援

a) 構内メンテナンス現場など走行ロボットのカメラ機能の活用

今回設定した重点点検区域における、ガス漏えい検査や設備劣化検査のみならず、走行ロボットの 4K 高精細カメラ機能を活用した、中央制御室からの遠隔支援作業について検証した。

メンテナンス現場への移動については、走行ロボットの手動操作(ラジコン機能)により移動し、現地で走行ロボットの映す高精細な動画像を中央制御室に伝送、リアルタイムでの作業風景の共有を確認した。

当該機能については、後述する運用検証のユースケース②カメラ映像を用いた中央制御室からの遠隔作業や、現場担当者へのインタビューにおいてもその有効性を確認している。

4.4.1.4 運用検証

廿日市工場の管理者との事前協議により、課題解決システムが従来の巡回業務そのものを代替するではなく、人の五感による検知の限界を超えることが可能な最新技術の活用により、より一層の保安レベルの向上を目指すものであることを確認した。このため、現状のオペレーションは大きく変えずに隙間時間での運用を可能とすることが重要である。

以上を踏まえ、実運用に関する作業及びシステムのメンテナンス作業について、隙間時間での運用可能性に着目して評価・検証した。

(1) 評価・検証項目

2 つの作業分類別に評価・検証項目を以下のとおり設定する。

表 4.4-5　運用検証の評価・検証項目

観点	評価・検証項目
実運用に関する作業	システムの管理（起動、停止、バッテリーの充電など）
	異常検知のアラートの確認（アラート表示画面の分かりやすさ、監視体制など）
	アラートを受けた際の対応方法（対応パターン、オペレーションなど）
システムのメンテナンス作業	設置作業（メンテナンスエリアにおけるロボットの最適配置など）
	機器の管理（現場作業員とサービス提供者の役割分担、連携のスキームなど）
	ローカル５Ｇエリアの保守（サービスレベルなど）

(2) 評価・検証方法

評価・検証項目の評価・検証方法を観点別に以下に示す。

1) ユースケース①カメラ付走行ロボットと AI による異常検知

a) 実運用に関する作業

① システムの管理（起動、停止、バッテリーの充電など）

走行ロボットの巡回に必要な起動停止サイクルが実行できることを確認するために実際の走行ルートにて以下を検証した。

・走行ロボット保管場所での一連のシステム起動の手順の確認
・点検ルートのスタート地点への移動の手順の確認

・自律した巡回（走行と監視）による点検業務の実施　※電波が悪い所では手動操作
・巡回終了後の自動停止の確認
・保管場所への移動と次回巡回までのバッテリー充電等の手順確認

②　異常検知のアラートの確認（アラート表示画面の分かりやすさ、監視体制など）

走行ロボットが検知した異常を人間に理解可能な内容で通知できることを確認するために以下を検証した。

- 疑似的なガスの漏えい環境を準備し、ガス漏れの濃度レベルを色分けして表示する画面と可視光カメラの映像を並列で比較表示する画面をペーパープロトタイプで作成、異常発生時のアラートを表示して現場作業員にヒアリング
- 疑似的な設備劣化環境を準備し、正常時の設備画像と異常検知時の設備画像を比較表示する画面をペーパープロトタイプで作成、異常発生時のアラートを表示して現場作業員にヒアリング

③　アラートを受けた際の対応方法（対応パターン、オペレーションなど）

走行ロボットからの異常検知アラートを受けた際に現場作業員が適切に対応できることを確認するための運用手順を整理、現場作業員による試用・評価とヒアリングで検証した。

・ガス漏れ検知時のパターン

・設備劣化検知時のパターン

・異常なしのパターン

b）システムのメンテナンス作業

①　設置作業（メンテナンスエリアにおけるロボットの最適配置など）

システムメンテナンス作業の際、現場作業員と中央制御室が適切に連携できることを確認するために以下を検証した。

・走行ロボットが指定地点へ移動するための手動操作
・走行ロボットに搭載したカメラの首振りの手動操作
・中央制御室へのカメラ映像の送信と遠隔監視

②　機器の管理（現場作業員とサービス提供者の役割分担、連携のスキームなど）

走行ロボットに関する現場作業員の役割（ユーザーメンテナンス）が実際の現地で実施できるか、走行ロボット開発者の同行による現地での操作手順の習得を行った。

③　ローカル５Ｇエリアの保守（サービスレベルなど）

保守運用マニュアルを基に机上および実機(サーバーなど)で検証した。

2）ユースケース②カメラ映像を用いた中央制御室からの遠隔作業

a）定例の巡回とガス漏洩検査の遠隔作業支援

走行ロボットを用いた現地でのガスの漏洩と設備劣化の検査作業を、中央制御室内に設置した PC にて、リアルタイムで映像と異常検知時のアラートを共有、アラート発報時以降のオペレーションをシミュレートした運用検証を行った。

b）メンテナンス現場の遠隔支援作業

定期的に発生する場内のメンテナンス作業を走行ロボットのカメラ機能にて遠隔監視し、中央制御室内の PC にてリアルタイムでの作業とその進捗管理を検証した。

(3) 実証結果及び考察

1) ユースケース①カメラ付走行ロボットと AI による異常検知

a) 実運用に関する作業

① システムの管理（起動、停止、バッテリーの充電など）

■ 走行ロボット保管場所での一連のシステム起動の手順の確認

走行ロボットの保管場所は場内の修理室とし、走行ロボットによる点検作業開始時前の一連のシステム起動手順について以下の内容で整理、運用手順とした。

1. 100V 充電切り離し、走行ロボットのメイン電源を ON
2. 制御 PC(Windows)の起動
3. 各種アプリケーション起動
   ※ガス漏れ検知、設備劣化、自立走行の各種アプリケーション
4. 中央制御室の遠隔支援 PC の起動、ロボット側との同期を確認

■ 点検ルートのスタート地点への移動の手順の確認

保管場所から点検開始のスタート地点への移動について、以下の内容で整理、運用手順とした。

1. 保管場所から GPS が取得できる場所までの手動移動
   ※保管場所は GPS の位置情報が取得できないエリアのため
2. GPS の位置情報取得のステータスが良好であることを確認
3. 自立走行アプリ起動により、初回点検ポイントまでの移動を確認

■ 自律した巡回（走行と監視）による点検業務の実施　※電波が悪い所では手動操作

1. 自律走行アプリによる初回点検ポイント①から点検業務を実施
   ※GPS の信号をロストした場合などは、適宜ラジコン操作に切り替え
2. 点検ポイント毎の点検結果を確認
   ※異常発生時は発報音とともにアラート表示、ロボット停止
3. 以降、最終の点検ポイント⑥までの点検業務を実施

■ 巡回終了後の自動停止の確認

1. 最終点検ポイント⑥の点検完了を確認
2. 点検終了後の走行ロボット停止位置までの移動、走行停止を確認

■ 保管場所への移動と次回巡回までのバッテリー充電等の手順確認

1. 停止位置から保管場所への手動による移動
2. 起動時の逆の手順でシステム停止
3. 本体の 100V 充電、および予備バッテリーの充電

② 異常検知のアラートの確認

ガス漏れ検知について、現状使用している防災関連の管理画面をもとに、ポップアップで走行ロボット・AI が検知したガス漏れをポップアップで通知する画面のペーパープロトタイプを作成、現場作業員へのグループインタビュー結果を反映した画面イメージを以下に示す。作業員グループインタビューでは、「中央制御室のオペレーターは常時、管理画面を見ているわけではないので、ポップアップだけでなく音声でも通知があるとよい」などの意見が挙がった。

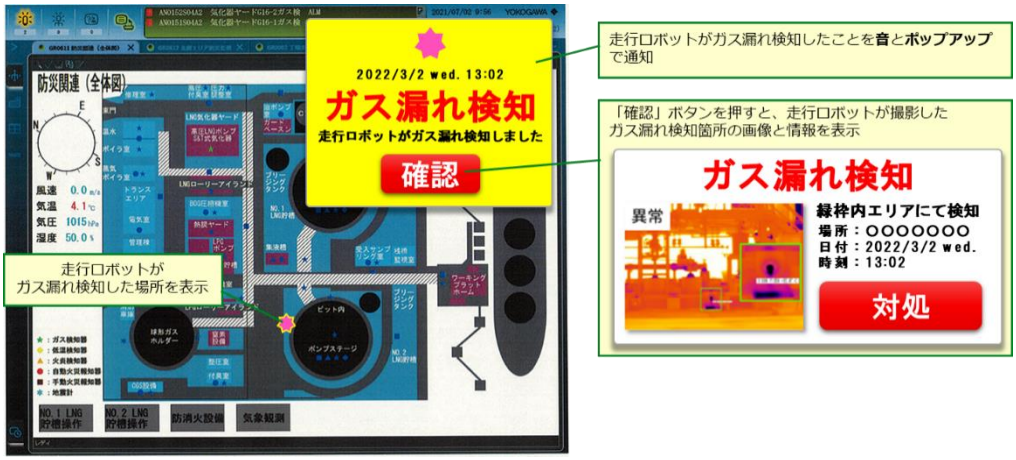


図 4.4-27　ガス漏れ検知の画面イメージ

設備劣化検知について、疑似的な設備劣化環境を準備し、正常時の設備画像と異常検知時の設備画像を比較表示する画面をペーパープロトタイプで作成、異常発生時のアラートを表示して現場作業員にグループインタビュー結果を反映した画面イメージを以下に示す。

作業員グループインタビューでは、「アラート表示後の確認の流れについて、確認状況と対応状況が分かる方がよい」、「確認済の検知場所はアラートを出さないようにする必要がある」「その日の点検結果がレポートとして出力されるとよい」などの意見が挙がった。

図 4.4-28　設備劣化検知の画面イメージ

③　アラートを受けた際の対応方法

■　ガス漏れ検知時のパターン

ポータブルガス漏れ検知器を携帯し現場へ移動、濃度検査を実施し、正確な漏洩箇所の特定と漏れ量を確認する。

（オペレーター対応可能な場合）

増し締め等対処可能な場合は対応後、再度濃度検査を行い漏れが無いことを確認する。

（オペレーター対応不可能な場合）

漏れが止まらない場合や対応が困難な場合は、必要に応じて設備の切替、停止を行い、保全担当へ対応を依頼する。

自社にて対応が困難な場合は、早期に施工業者へ連絡し、修繕を行う。

■　設備劣化検知時のパターン

現場へ移動し、アラート部位の劣化状況を確認、劣化があった場合、保全担当へ報告する。保全担当が早期の修繕の要否等を判断する。

（早期の対応が必要無い場合）

配管の錆等、小範囲のタッチアップ塗装により容易に対処可能な場合は、自社にて対応を行う。

保全担当が、長期的な視野で修繕計画を立案する。

（早期の対応が必要な場合）

必要に応じて設備の切替、停止を行い、直ちに修繕計画を立案、早期に施工業者へ連絡し、対応する。

■ 異常なしのパターン

（ガス漏れ検知）

ガス漏れ検知器を携帯し現場へ移動、濃度検査を実施し、異常が無い場合はアラート閾値の見直しを検討する。

（経年劣化検知）

現場へ移動し、アラート部位の劣化状況を確認、異常が無い場合はアラートの閾値の見直しを検討する。

b）システムのメンテナンス作業

① 設置作業（メンテナンスエリアにおけるロボットの最適配置など）

■ 走行ロボットが指定地点へ移動するための手動操作

上述の通り、保管場所から点検開始のスタート地点への移動について、以下の内容で整理、運用手順とした。

1. 保管場所から GPS が取得できる場所までの手動移動
   ※保管場所は GPS の位置情報が取得できないエリアのため
2. GPS の位置情報取得のステータスが良好であることを確認
3. 自立走行アプリ起動により、初回点検ポイントまでの移動を確認

これらの一連の手順完了後、中央制御室との連携を開始し、遠隔支援 PC の伝送される現場映像および異常発生時のアラートに基づき保守点検業務を運用する。

■ 走行ロボットに搭載したカメラの首振りの手動操作

走行ロボットの制御 PC 上で稼働している点検用アプリケーションのカメラ設定項目にて、パン・チルトの数値を入力し、点検対象物の監視を確認。

ただし、直観的かつリアルタイムな操作を目的とした設定値変更方法について今後さらなる検討を要する。

■ 中央制御室へのカメラ映像の送信と遠隔監視

エッジ側のシステム起動後に中央制御側の遠隔支援アプリケーションを起動、現地映像と検知アプリケーションの同期を確認。

② 機器の管理（現場作業員とサービス提供者の役割分担、連携のスキームなど）

今回開発した走行ロボットに搭載される各種機器の仕様説明に加え、2022 年 2 月 18 日に、走行ロボットの開発元である知能技術株式会社より、操作手順やトラブル時の運用について廿日市工場の点検担当者への操作・運用説明会を実施し、一連の操作について習得するとともに、操作マニュアルについての整理も行った。

③ ローカル５Ｇエリアの保守（サービスレベルなど）

2022 年 2 月 18 日に、今回のローカル５Ｇネットワーク網の設計と技術実証を実施した富士通株式会社にて、ローカル５Ｇの保守運用についての説明会を開催し、以下の内容で基本的な説明を受けた。

・ローカル５Ｇのシステム構成、各装置の機能・性能について
・装置障害の確認方法と、発生時の対応について
・ローカル　５Ｇ電波の停止・発射手順について
・システム停止・起動の流れについて

また、上記座学に加え、管理棟の電気室に設置したサーバにて、実機の操作と状態監視についての操作方法を習得した。

ユーザー事業者向けのローカル５Ｇ運用保守マニュアルの中から、ローカル５Ｇシステム起動の流れ、ローカル５Ｇシステム停止の流れ、監視装置画面を以下に示す。

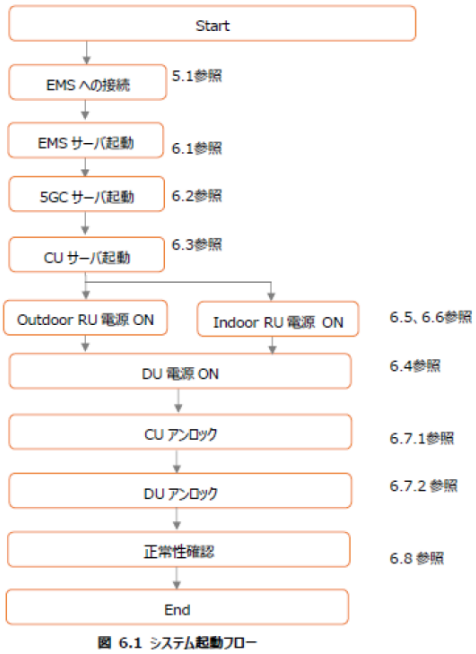


図 6.1 システム起動フロー

図 4.4-29　ローカル５Ｇシステム起動（電源投入）の際の流れ

図 5.1 システム停止フロー

図 4.4-30　停電等でローカル５Ｇシステムの停止（電源断）を行う際の流れ

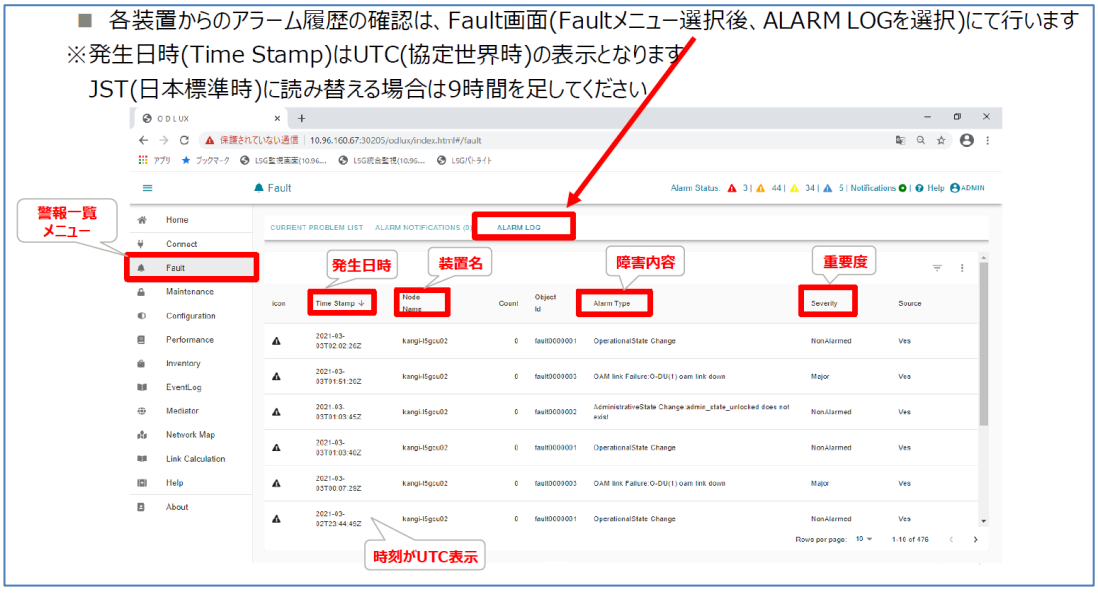


図 4.4-31　監視装置画面

2）ユースケース②カメラ映像を用いた中央制御室からの遠隔作業

a）定例の巡回とガス漏洩検査の遠隔作業支援

走行ロボットによるガスの漏洩と設備劣化の現地での運用検証の様子を、中央制御室内に設置した PC のモニターにてオペレーターが監視。リアルタイムでの高精細な動画と異常検知時のアラートの同期を確認、アラート発報時以降のオペレーションについては、現行のガス漏洩時の対応に準じたフローへの作業の落とし込みを確認した。

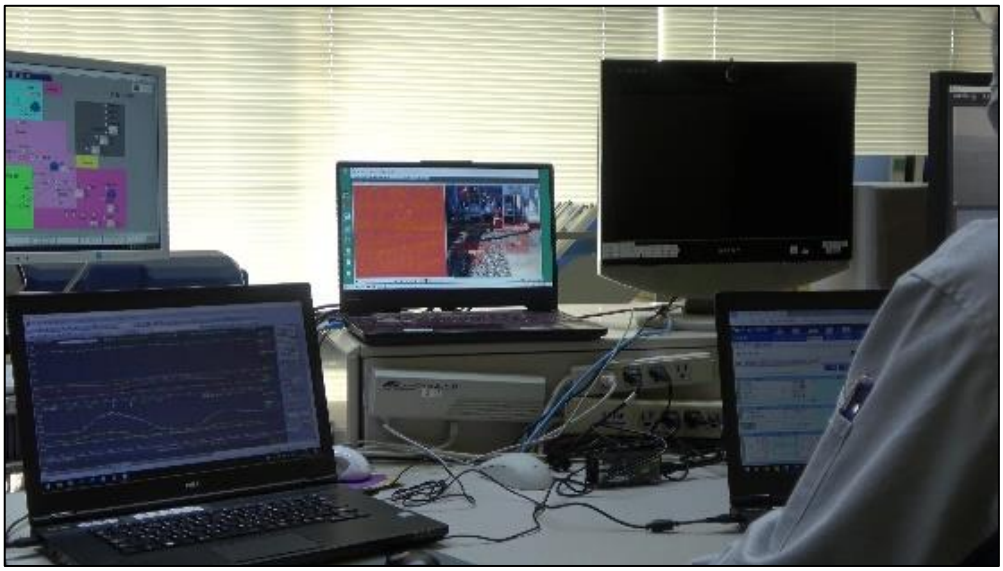


図 4.4-32　走行ロボットによるガス漏洩検査の遠隔監視

図 4.4-33　ガスの漏えい検知アラート画面

b）メンテナンス現場の遠隔支援作業

定期的に発生する場内のメンテナンス作業には以下のような作業がある。

・LNG ローリーへの充てん作業
・LNG 気化器定期自主検査
・高圧 LNG ポンプ点検整備
・高圧 LPG ポンプ点検整備
・LNG 出荷アーム点検整備

今回のメンテナンス現場の運用検証例として、LNG ローリーへの充てん作業を走行ロボットのカメラ機能にて遠隔監視し、中央制御室内の PC にてリアルタイムでの作業とその進捗管理を検証した。

現地での立会作業に加え、走行ロボットの映像を中央制御室で監視することで、より高い保安レベルの確保に寄与することが可能であることを確認した。

図 4.4-34　走行ロボットによるメンテナンス作業風景

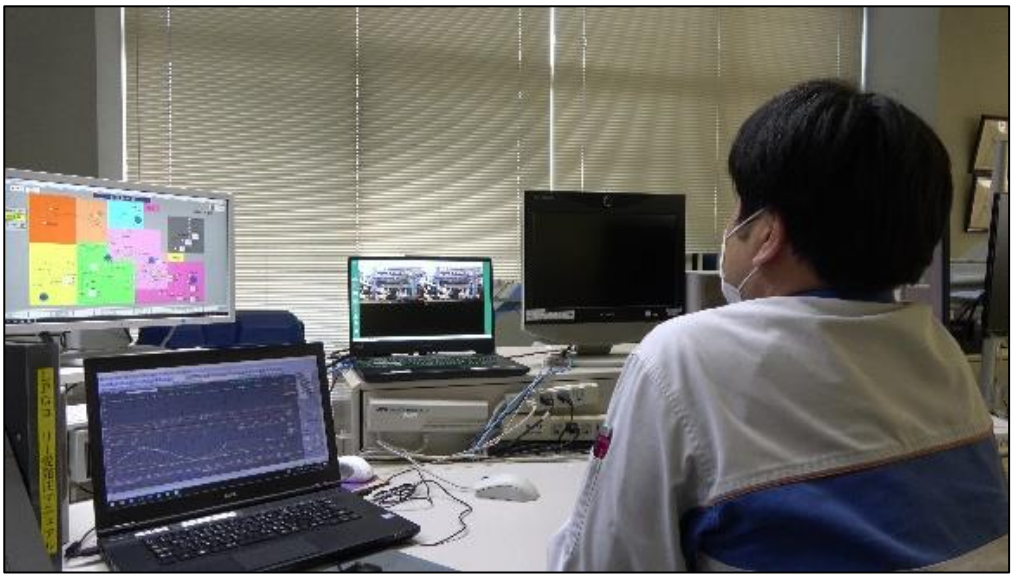


図 4.4-35　走行ロボットによるメンテナンス作業の遠隔監視

4.4.2 ローカル５Ｇを用いたソリューションの実装性に関する検証

4.4.2.1 ローカル５Ｇ活用モデルの構築・検証

本事業で実証したローカル５Ｇ活用ソリューションについて、想定される具体的な主体及びターゲット、現時点で想定している対象となるシステム、前提条件、標準モデル、体制・事業スキームのモデル、導入効果、課題と対応策を以下に示す。

（1）想定される具体的な主体及びターゲット（地域・市場・ユーザー等）

実証を行うユースケースは、ガス事業者共通の課題解決を目的としており、プラントを有する国内都市ガス事業者約 100 社への横展開が見込まれる。

また、本ソリューションは、搭載するカメラシステムの組合せを変更することで、ガス事業者に限らず LNG を用いる火力発電所等、他のプラント工場への横展開も期待される。

（2）対象となるシステム

①走行ロボット・AI による異常検知ソリューション、②カメラによる遠隔作業支援ソリューションの 2 つのソリューションがある。なお、ローカル５Ｇ設備の構築にかかる費用を考慮すると、②カメラによる遠隔作業支援ソリューションのみを導入することは考えにくいため、①と②のパッケージ、または、将来的な①の導入を視野に入れてまずは②から導入するパターンが想定される。

表 4.4-6　本実証成果をもとにしたローカル５Ｇ活用ソリューション

ソリューション	概要
①走行ロボット・AIによる異常検知ソリューション	赤外線カメラと4Kカメラを搭載した走行ロボットで点検エリアを走行、エッジAIでガス漏れと設備劣化を検知し、ローカル５Ｇで中央監視室に送信
②カメラによる遠隔作業支援ソリューション	4Kカメラで現場のメンテナンス作業の様子を撮影、ローカル５Ｇで中央監視室に送信し、中央監視室から現場作業員へのアドバイスを行う

（3）前提条件

本ソリューションの導入の前提条件は以下の通りである。

1）プラント設備を有すること

ガス漏れおよび錆や破損等の設備劣化を検知するものであるため、プラント設備を有することが前提条件となる。プラント設備を有する事業者であれば、前述の通り、ガス事業者に限らず LNG を用いる火力発電所等、他のプラント工場への横展開も期待される。なお、事業者の設備によって分析 AI はチューニングが必要になると想定される。

2）作業員による点検で保安レベルが維持されていること

将来的には、作業員による点検の一部を走行ロボットによる点検で代替することを視野に入れるが、当面は、作業員の点検に加えて走行ロボットによる点検を追加で行い、保安レベルのさらなる向上を図るものであるため、作業員による点検で保安レベルが維持されていることが条件となる。

3）中央監視が可能な体制を有すること

前項に記載の①走行ロボット・AI による異常検知ソリューションは、ガス漏れと設備劣化を検知し、ローカル５Ｇで中央監視室に通知するもの、②カメラによる遠隔作業支援ソリューションは 4K カメラで現場のメンテナンス作業の様子を撮影、ローカル５Ｇで中央監視室に送信し、中央監視室から現場作業員へのアドバイスを行うものであるため、中央監視が可能な体制を有することが条件となる。

（4）標準モデル

標準モデルとしては、本事業で実証したローカル５Ｇ活用ソリューションのネットワーク・システム構成を想定する。

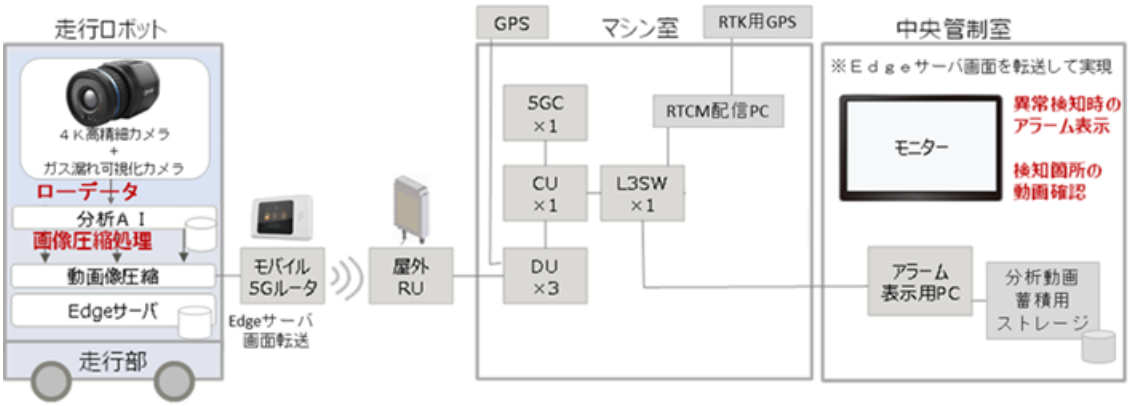


図 4.4-36　標準モデルの構成

システムを構成するローカル５Ｇ、走行ロボット、センサー、分析 AI のそれぞれについて、要件を以下に示す。

表 4.4-7　標準モデルの要件

要素	要件
ローカル５Ｇ	通信速度：上り50Mbps程度
走行ロボット	・　点検ルートは自律走行可能（起動、停止し、保管場所への人で対応可） ・　遠隔作業支援においては手動で動かせる ・　衝突防止・回避（通行人、他の走行車両、メンテナンス上の設置物等）
センサー	・　10m程度離れた位置からガス漏れ・設備異常を検出できること ・　夜間でもガス漏れを検出できること
分析AI	・　設備劣化について、錆、破損、変形を検出できること（断熱材はオプション） ・　ガス漏れ検知と設備劣化の両方について、異常のある箇所が明確に示されること

分析 AI は本事業で実証したものがベースとなるが、導入先の拠点や事業者によって設備が多少異なるため、チューニングは必要になるものと考えられる。

また、カメラを用いた遠隔作業支援について、本実証では、走行ロボットを移動させ、撮影したい場所に置いてカメラとして利用したが、標準モデルでも別途カメラを用意せず、走行ロボットを利用することを想定する。

業務・処理フロー、運用ノウハウ、実装方法・手順は、運用検証の結果に基づき、今後、運用への落とし込みを再度整理する。併せて、結果表示の UI 等も今後、作り込みが必要である。

（5）体制・事業スキームのモデル

想定される体制・事業スキームのモデルを以下に示す。持続性のあるモデルとするためには、ソリューション提供者が、ローカル５Ｇネットワーク、ロボット、AI、運用保守といった必要な要素をパッケージして提供する体制が望ましいと考える。ソリューション提供者は、プラント事業者、ローカル５Ｇネットワーク事業者、AI・ロボット事業者、運用保守事業者のいずれかが務めることもあるし、新たな組織体を組成することもあり得る。

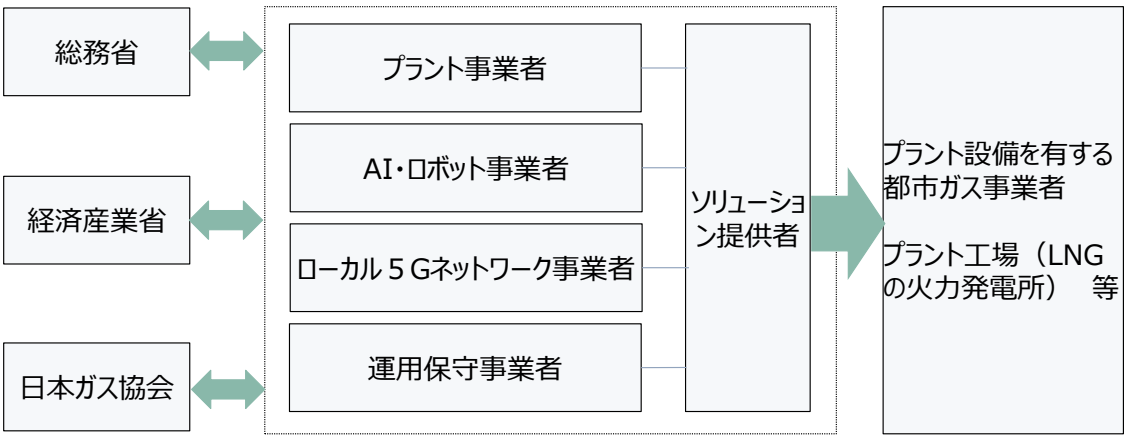


図 4.4-37　体制・事業スキームのモデル

プラント事業者は先行して本ソリューションを導入する事業者として、ガス漏れ検知 AI や設備劣化検知 AI の学習データを提供する。AI・ロボット事業者は、ガス漏れ検知 AI や設備劣化検知 AI を導入先の設備に応じてチューニングするとともに、それらを搭載した走行ロボットを提供する。ローカル５Ｇネットワーク事業者は、ローカル５Ｇシステムの構築を行う。運用保守事業者はローカル５Ｇ設備の運用保守を行う。

なお、本実証では、AI・ロボット事業者、ローカル５Ｇネットワーク事業者の役割をそれぞれ別の事業者が担当しており、また、実運用時の運用保守は弊社グループ会社が担うことを想定しているため、分けて記載しているが、この 3 者の役割を同一の事業者が担うこともあり得る。

また、ローカル５Ｇを活用したスマート保安は黎明期にあるため、その普及には、制度整備やプロモーションも必要になる。電波利用の監督省庁である総務省、産業保安の監督省庁である経済産業省、ガス事業者の業界団体である日本ガス協会等に対して、制度整備に向けた意見や実践事例を発信していくことが求められる。

(6) 導入効果

本ソリューションの導入により以下の効果が期待できる。

表 4.4-8　本ソリューションの導入による期待効果

効果	概要
巡視・点検・検査頻度の合理化	・　点検員による検査に加え、走行ロボットによる点検が加わることにより、保安レベルのさらなる向上を見込むことができる。 ・　将来的には、巡回作業員による点検を走行ロボットで一部代替できる可能性がある。
作業員の負担軽減	・　作業員が、ロボット巡回を追加したことで、点検後にガス漏れが発生しているかもしれないという心理的負担を低減できる。 ・　将来的に、巡回作業員による点検を走行ロボットで一部代替することで、高所や悪天候時の点検の負担を軽減することができる。 ・　現場作業員が、熟練した作業員の助言を受けることで、1人でメンテナンス作業を行うことへの心理的負担を低減できる。 ・　中央制御室の作業員が現場に行かずに支援できることによって業務効率が向上する。
異常の早期発見	ガス漏れや設備劣化を早期に発見できる。
人や現状の検知器で検知できない異常の検知	・　配管本体の錆、腐食などの劣化を検知できる。 ・　ガス漏れ箇所を判別できる。
保安人材育成	走行ロボットで撮影した点検映像を蓄積し、教育コンテンツとして活用できる。

(7) 課題と対応策

本モデルにおける技術面・機能面・運用面・制度面の課題と対応策は 4.4.3.に示す。

4.4.2.2 普及展開方策の検討

（1）最適なネットワーク等のエリア構築やシステム構成

導入費用の負担が導入の障壁となるため、ローカル５Ｇの基地局数（カバー範囲）の異なるサービスを用意し、やりたいことや負担可能な費用に応じて選べるようにすることが望ましいと考える。

今回は同期モデル（DL7:UL2:制御 1）を使用しているが、今後、準同期で 4:4:2、2:7:1というモデルもあり得る。ただし、キャリアの５Ｇ電波と干渉する恐れがあるため、干渉しない環境である必要がある。

走行ロボットは、搭載するガス漏れ検知センサー、オフロード対応の有無やバッテリー容量（走行可能時間に影響）、走行範囲によるルート入力作業、長距離を走行するための信頼性で機能差・価格差があり得る。分析 AI はガス漏れ検知・設備劣化検知を選択して利用することもあり得る。

なお、今回の実証場所である廿日市工場はコンパクトに設計されているが、大規模な工場では、敷地面積が相当広いため、走行時間が長くなると考えられる。

	梅モデル	竹モデル	松モデル
ローカル５Gの基地局数（カバー範囲）	局所エリア（最低、屋根のある玄関など1か所でOK）	規定ルート	工場全体
通信速度	同期	同期	準同期/非同期
走行ロボット（カメラ・AI搭載）	ガス漏れ検知	ガス漏れ検知・設備劣化検知（錆）	ガス漏れ検知・設備劣化検知（錆ほか）
価格	低	中	高

図 4.4-38　ローカル５Ｇソリューション導入モデルのパターン

（2）普及展開策

保安レベルの向上と巡回業務の効率化・合理化の両立を可能とする映像分析システムについて、自社内においてAIによる検知精度の向上や運用ノウハウの蓄積を継続的に行うため、まずは、廿日市工場での実運用を行い、その後、自社内の他工場への段階的な普及展開を図る。

また、自社内における実運用を通じて、このまちネットワーク・富士通グループ・知能技術の 3 者によりソリューションの更なる改善を図ると共に、本事業の普及促進活動や経済産業省のスマート保安の先進事例化などにより都市ガス事業者などの工場への横展開（導入）を図る予定である。

スマート保安の制度的環境整備については、経済産業省で検討が進められているところであるが、本成果報告書作成時点では、具体的な要件・水準・指標までは定められていないため、今後の動向を注視するとともに、情報提供を行っていく。

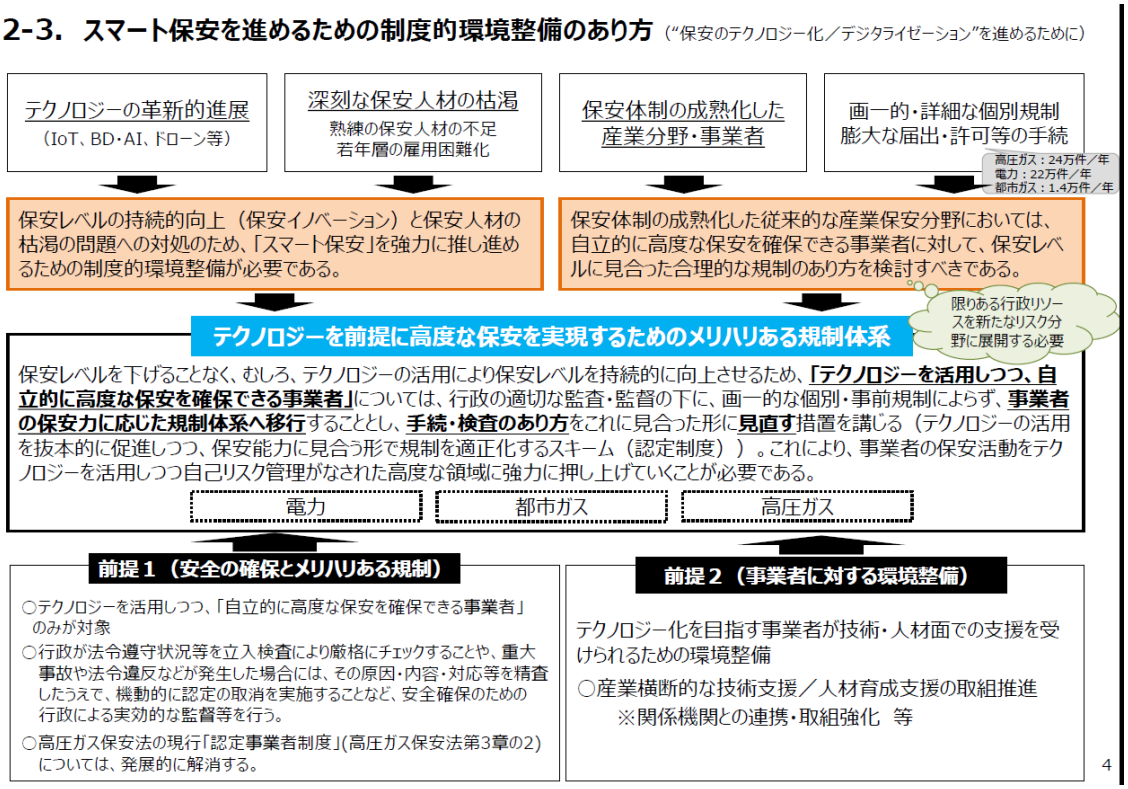


図 4.4-39　スマート保安を進めるための制度環境整備のあり方（出所：経済産業省「産業保安分野における当面の制度化に向けた取組と今後の重要課題の概要」2021 年 12 月 21 日）

また、ガス分野については、スマート保安官民協議会ガス安全部会において、2021 年 3 月に「ガス分野におけるスマート保安のアクションプラン」が取りまとめられている。現状は取り組むべき方向性や今後解決すべき課題が整理された段階であり、ガイドラインの作成等はこれからである。日本ガス協会会員企業においても、まだ取組事例が少なく、ガイドライン作成のインプットとなる情報が必要な状況であるため、日本ガス協会や会員企業に本実証成果の情報提供やプロモーションを行っていく。

「ガス分野におけるスマート保安のアクションプラン」において示されている、都市ガス分野に係るスマート保安の取組の考え方、スマート保安の範囲、今後のスマート保安の取組を以下に示す。

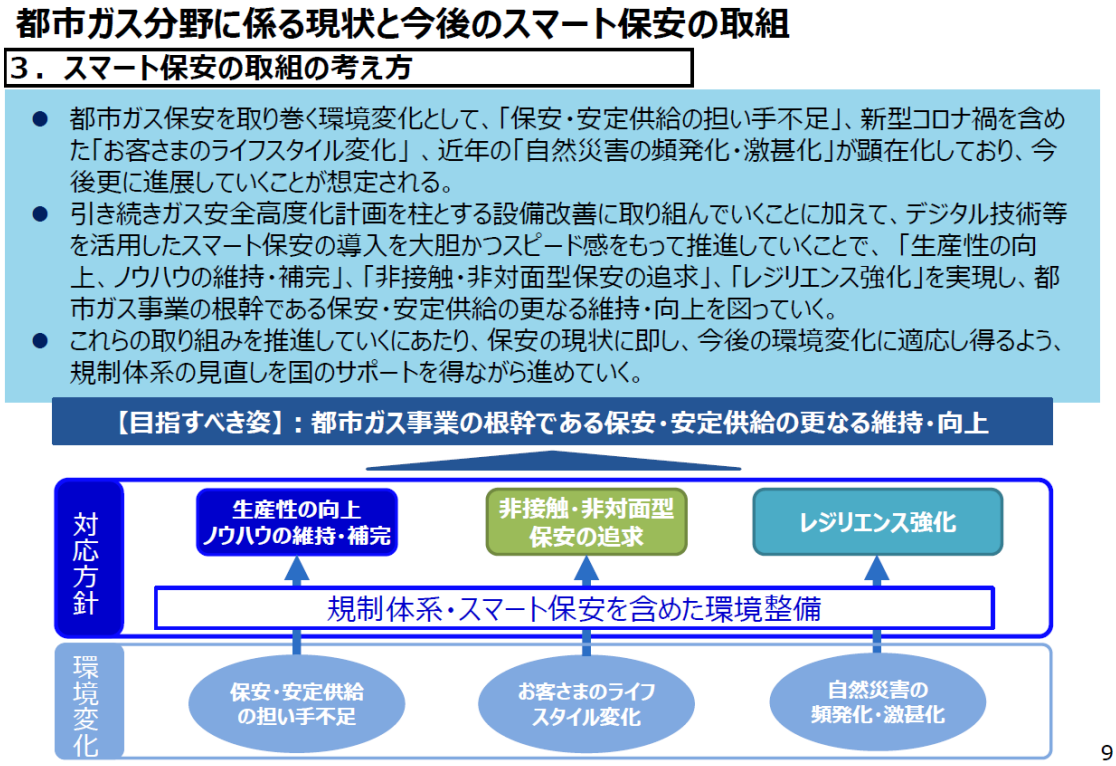


図 4.4-40　都市ガス分野に係るスマート保安の取組の考え方（出所：スマート保安官民協議会「ガス分野におけるスマート保安のアクションプラン」2021 年 3 月 31 日）

都市ガス分野に係る現状と今後のスマート保安の取組

4．スマート保安の範囲

- 都市ガス保安の現状と特徴を踏まえ、安全を確保しつつ、製造段階から消費段階に至る法令対象から自主保安対象まで幅広くスマート保安を導入していく。
- 技術基準に適合するか否かは、技術基準解釈例によらず、業界自主基準化を図ることでスピード感を持ってスマート保安技術を適用していく。

<table>
<tr><th></th><th>製造</th><th>供給
（外管・ガスメーター）</th><th>供給（内管）</th><th>消費</th></tr>
<tr><td>資産区分</td><td colspan="2">事業者</td><td colspan="2">お客さま</td></tr>
<tr><td>事業者の保安責任</td><td colspan="3">技術基準適合維持義務</td><td>周知・調査義務</td></tr>
<tr><td>法令対象範囲</td><td>①製造オペレーション＆メンテナンス
生産性の向上等</td><td colspan="2">②漏えい検査
生産性の向上等 非対面型保安の追求</td><td>③機器周知・調査、自主保安点検
生産性の向上等
非対面型保安の追求</td></tr>
<tr><td rowspan="5">自主保安対象範囲</td><td colspan="3">④災害・事故対応
レジリエンス強化</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">⑤ガス工作物の巡視・点検・検査、圧力測定・監視
生産性の向上等 非対面型保安の追求</td><td>—</td></tr>
<tr><td>—</td><td colspan="2">⑥他工事監視
生産性の向上等</td><td>—</td></tr>
<tr><td colspan="4">⑦その他保安業務
生産性の向上等 非対面型保安の追求</td></tr>
<tr><td colspan="4">—</td><td>—</td></tr>
</table>

10

図 4.4-41　都市ガス分野に係るスマート保安の範囲（出所：スマート保安官民協議会「ガス分野におけるスマート保安のアクションプラン」2021 年 3 月 31 日）

都市ガス分野に係る現状と今後のスマート保安の取組

5．今後のスマート保安の取組

【短期】：数年程度で対応する課題
【中期】：5年程度で対応する課題
【長期】：10年程度で対応する課題

検討対象業務	今後取組むべき方向性	解決すべき課題 ※官を含む関係者との連携により推進	期限
【法令】【自主】 ①製造O&M 生産性の向上等	● 遠隔化による、O&M業務の省力化・省人化 【製造】	● 監視制御業務の効率化による、運転体制の見直し（多地点拠点監視の一元化等）	中期
		● 法令の見直し（ガス主任技術者の選任等）	短期
【法令】 ②漏えい検査 生産性の向上等 非対面型保安追求	● 車載型ガス測定システム等による効率的な漏えい検査技術の実現 ● 車載型ガス測定等の導入で本支供給管と灯外内管の同時漏えい検査を実現 ● 上記適用範囲外で、可搬型レーザー式ガス検知器活用等も検討 ● 併せて、内管漏えい検査の合理化検討 【供給】【内管】	● 技術基準解釈例によらず、業界自主基準化	中期
		● 内管漏えい検査に関する法令等見直し	中期
	● 通信の活用による遠隔漏えい把握 【内管】	● 遠隔による早期漏えい把握	長期
【法令】【自主】 ③機器調査・周知、自主保安点検 生産性の向上等 非対面型保安追求	● スマートメーターシステム等の新技術の活用による事故防止 ● 併せて、内管漏えい検査・消費機器調査の合理化検討 【内管】【消費】	● 漏えいの早期把握による自主保安点検（灯内内管・ガス栓・接続具等の目視確認による漏えい着火防止）の代替 ● 内管漏えい検査・消費機器調査に関する法令等見直し	長期

11

図 4.4-42　都市ガス分野に係る今後のスマート保安の取組（出所：スマート保安官民協議会ガス安全部会「ガス分野におけるスマート保安のアクションプラン」2021 年 3 月 31 日）

（3）５Ｇソリューションセンターとの連携について

本ソリューションは産業保安という高い信頼性が求められる領域で使用するものであるため、他の用途との共用でなく、専用の環境が望ましいと考えられることから、現時点では、５Ｇソリューションセンターとの連携は想定していない。

本ソリューションのローカル５Ｇ設備と走行ロボット・AI の運用保守は、運用保守事業者が行う想定であるが、利用にあたってユーザー企業に必要なスキルセットとしては、マニュアルを参照してローカル５Ｇを利用するためのネットワークの基礎知識、マニュアルを参照して走行ロボット･AI を操作･管理するためのロボットの取扱いについての基礎知識、AI（機械学習）の基礎知識が挙げられる。

また、本ソリューション提供において想定される標準的な導入費用は、概ね以下の通りである。

ローカル５Ｇ設備工事：9.5 百万円程度
その他工事：8.3 百万円程度
ローカル５Ｇシステム構築・提供：45 百万円程度
走行ロボット・AI 提供：37 百万円程度

4.4.3　ローカル５Ｇの実装に向けた課題の抽出及び解決策の検討

ローカル５Ｇのガス業界のスマート保安分野での実装に向けた課題とその解決策について、「技術面」「機能面」「運用面」「制度面」の 4 つの観点から整理した結果を以下に示す。

4.4.3.1 技術面の課題

■課題 No.1-1：通信安定性

本課題実証では 2 つの課題実証ルートを設定し、実証を行った。また、本実証の実施前に電波伝搬の測定を行った。その結果、課題実証ルート 1 のスループットは問題なかったが、課題実証ルート 2 の一部（**図 4.4-43** の a20,a29 地点）は各 RU からの直接または反射による電波が届きづらい環境になっているためスループットが低くなることが分かった。詳細は 3.3.1.4 （2）を参照すること。

本課題の対処方法としては、RU または反射板を追加設置することでカバーする形が考えられるが、課題実証の結果は最大で 10 秒程度の遅延が生じ、モニターで画面が固まる程度で運用上の支障は生じていない。また、RU の追加設置コストを鑑みると、通信環境が悪い場合はデータをバッファしておき良好な電波状態になった時に纏めて送信する機能の実装が必要になると考える。

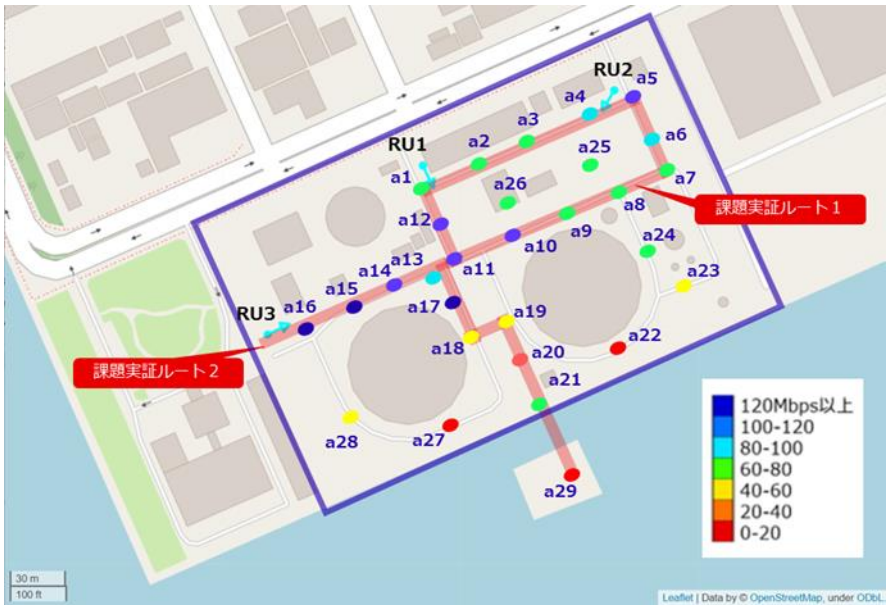


図 4.4-43　UL スループットの測定結果によるプロット図（再掲）

4.4.3.2 機能面の課題

機能面の課題について、「ガス漏れ検知」「設備劣化診断」「ロボットの自律走行」「その他」の観点から検討した結果を以下に示す。

（1）ガス漏れ検知

■課題 No.2-1：ガス漏れ検知精度の向上

気化ガスと液化ガスの漏洩試験を実施した結果、検知精度が目視に比べて低かった。ガス漏れ検知のアルゴリズムを改良することで下図のとおり、LNG ガスについては、改良前は検出できなかったガスが検出できるようになった。LPG ガスについては、改良後も検出できなかったため、更なるアルゴリズムの改良に加えてセンサーのアップグレードも検討が必要である。本実証で採用したセンサーは非冷却タイプだが、冷却タイプへのアップグレードによりガス漏れ検知の精度は向上すると考えられる。

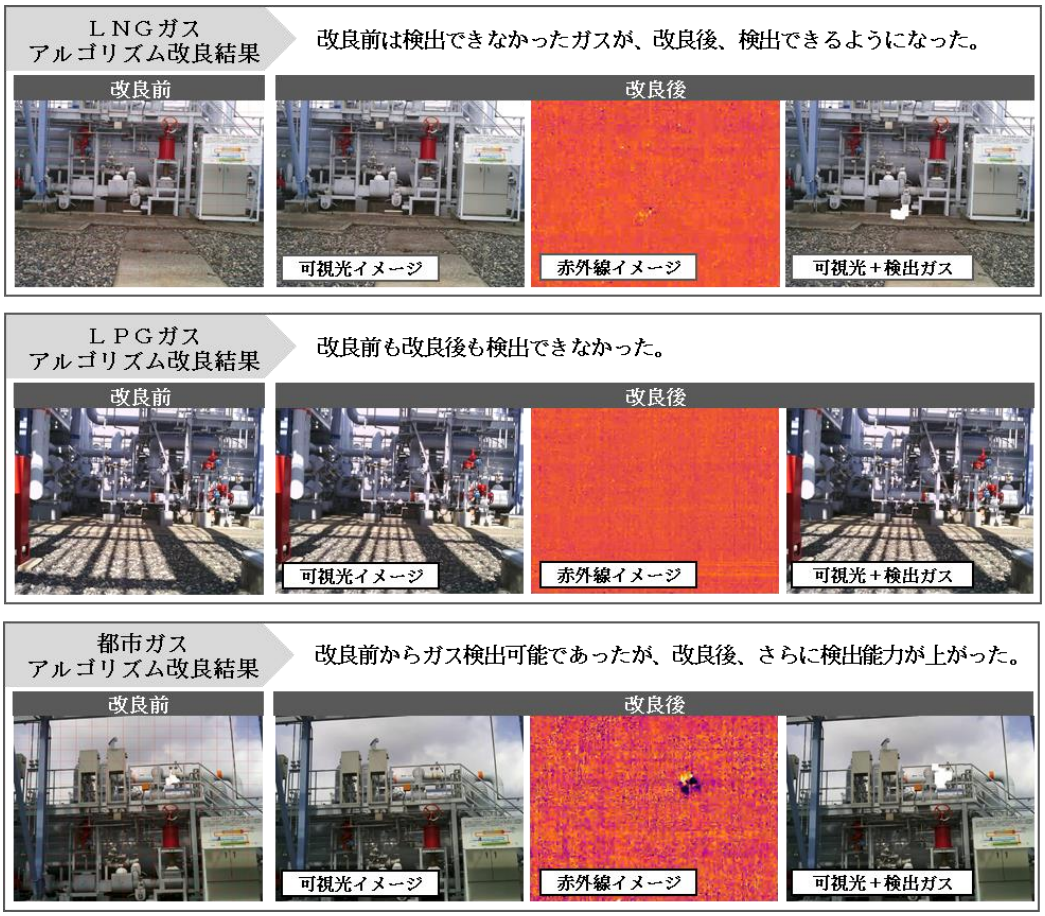


図 4.4-44 アルゴリズム改良結果

■課題 No.2-2：実運用を想定した赤外線センサーとの併用

本実証では、「常温の外気と温度差が無いガスの検出ができること」と「10m 程度離れた位置から検出できること」の 2 点の制約を踏まえて、自然光の中の特定の赤外線の吸収を検出するセンサーを採用した。また、当センサーに備わっている測定モードのうち、通常の測定モードでは対象とするガスの検出能力が低かったため、前後フレームの差分を取って吸収のゆらぎをより鮮明に表示するハイセンスモードを使用することにした。

実証の結果、以下のようなデメリットがあることが分かったため、引き続き、別のセンシング方法も検討する必要がある。

＜ハイセンスモードのデメリット＞

- 蛍光灯の波長にセンシングに必要な波長が含まれないもしくは少ないため、夜間や室内では検出できない。吸収スペクトルに相当する赤外線波長を含む照明で設備を照射する必要がある。
- 自然光下でも強風によってガスが吹き飛ばされ希釈されると検出できない。
- 雨天時は水を捉えてしまうため、ガスの検出が困難になる。また、水が動くためにハイセンスモードで誤検知の対象となり使用できない。※ただし、雨天時でも使用できるセンサーが他に存在しないと思われるため、デメリットとも言い切れないかもしれない

別のセンシング方法について、今回使用したの非冷却タイプの赤外線センサーであるが、課題 No.2-1 で述べた冷却タイプのセンサーであれば、希釈されたガスでも検出できる可能性がある。また、感度が上がれば、ハイセンスモードを利用しなくてもガスを検知できるようになる可能性もあるため、雨天時の水のような動くものに反応することもなくなると考える。

夜間に検査する方法としては、吸収スペクトルに相当する光を設備に当てるという方法が考えられる。ただし、適切な波長の光を十分な量、発光できるライトについては調査検討が必要であり、開発が必要になる場合もある。

（2）設備劣化診断

■課題 No.2-3：検知できる設備劣化パターンの拡大と発生箇所の表示

劣化診断 AI は廿日市工場内の 6 つのエリアで実証を行った。パターンとしては正常（天候別、車や人が通ったときの画像も含む)、異常（錆発生）それぞれで画像を学習させた。今回の AI モデルでは、出力結果は「錆あり」か「錆なし」の 2 つのみであり、より詳細に設備劣化を判定するためには、学習データの分類を、例えば「錆あり NG」「錆あり OK」「錆なし」など、現状より増やして学習させるなどの対策が考えられ、このようにすることでより細かな分類を可能とすることが期待できる。なお、錆発生の学習データは汎用的な画像を用いているため、前提となる設備の条件等は無い。

また、今回の実証では錆の場所や箇所数については表示できていないため、ユーザービリティの向上も今後の課題である。

更に、今後は錆発生以外の異常（苔付着、氷付着、設備の変形・損傷）のパターンについても学習させ、より汎用性の高い AI とすることが求められる。正常のパターンとして

はシート養生されている箇所も考えられるが、前提となる設備条件が多岐にわたり、学習は難しいと想定されるためエリアの指定・制限による対応を検討している。

■課題 No.2-4：設備内部の劣化診断

劣化診断 AI は、実証では外部からの画像を学習することで異常予兆の検知を行う前提で開発した。しかしながら、内部の劣化は人では分かりにくいため、熱画像から内部の劣化が分かればより合理的なメンテナンス計画を立てることが可能となることが想定される。現状は定期的にエリアを決めて交換（外部からは判断しにくい。保冷材が劣化すれば、冬場に保冷配管が着氷状態により、保冷が保たれていないことを外部からも分かることもある）を行っている。

カメラの熱画像から内部の劣化を診断することも技術的には可能であり、上記のメンテナンスの観点から有効であるため追加機能の開発が求められる。なお、今回採用したカメラはレンズに特殊なフィルタが付いているため、温度変化を検出する用途には向いていない。そのため、機器構成も見直す必要がある。具体的には、温度を測定するため、通常の赤外線センサーのうち、サーモグラフィカメラの採用を検討している。ガス検知機能を兼ねることはできないため、保冷配管の検査用に追加でロボットに搭載することになる。

（3）ロボットの自律走行

■課題 No.2-5：完全な自律走行の実現

本実証で開発した走行ロボットは RTK を利用することで cm 級の精度による制御が可能だが、GPS の測位精度が低下して走行が不安定になる区間においてはリモコンによる走行と手動操作による点検が必要になった。具体的には走行ロボット（GPS アンテナ）の上部に遮蔽物が存在する場合、走行が不安定になる。

GPS では完全な自律走行は難しいため、以下のようにその他の方法を組み合わせることで自動運転レベルを向上する必要がある。

表 4.4-9 採用を検討している方法

方法	概要
SLAM形式	SLAMは「Simultaneous Localization and Mapping」の略で、自己位置推定と環境地図作成を同時に行う技術の総称。 SLAM形式は、障害物検知センサーからの情報を融合することで、適切な制度の自己位置・姿勢を出力し、経路・目的地の計算を行う。
三次元センサー	ステレオカメラを使った三次元認識でロボットの制御を行う。

■課題 No.2-6：悪天候時の走行

本実証期間中に強風下での走行テストを行い、問題の無いことを確認した。雨天時の走行テストは実施していないため、今後検証が必要であるが、降雪時の走行には支障が無かった（積もってはいない）。なお、走行ロボットはアルミフレームで防水も実現している。

■課題 No.2-7：リスクアセスメントの実施

本実証は短期間での開発・実証であったため、実運用可能なレベルでのリスクアセスメントは実施できていない。本番運用に向けては「ロボットが対象物を指定位置よりずれた場所に設置した」等の想定不具合について、三次原因まで分解したリスク分析表に基づくリスクアセスメントを実施する必要がある。リスク評価は、経済産業省「リスクアセスメント・ハンドブック 実務編　R-Map 手法のリスク評価マトリックス」によるものを想定している。

（4）その他

■課題 No.2-8：保安に係る各種データの一元化

本実証では、ロボットの走行位置や診断結果等についてリアルタイム状況を監視できる独自の UI を開発したが、セキュリティの担保を優先し物理的に閉じたネットワークでの実証を行った。

廿日市工場では、異常や懸案事項が発生した際には電子操業日誌（システム）に事例、対応状況を時系列に記録、整理している。今後は保守メンテナンスの内容も記録予定で写真や動画を添付することも可能である。通常の数値化した点検記録についても電子操業日誌に反映して、設備の状態を共有できるようにしている。

本システムにロボット・AI の巡視点検結果を反映できれば、保安に係る各種データの一元化が可能となる。セキュリティの担保が前提とはなるが、スマート保安の実現に向けて、データの一元化についても今後検討を進める余地がある。

■課題 No.2-9：アラート表示画面の作成

本実証では、ガス漏れ検知と設備劣化検知のアラート表示画面についてのペーパープロトタイプを作成し、表示項目やレイアウト等の画面イメージを確認した。確認結果等の詳細は 4.4.1.4 （2）1）a）②を参照。

今後、本確認結果に基づきアラート表示画面を作成する必要がある。アラート表示画面には以下の機能を持たせることを検討している。

＜ガス漏れ検知のアラート表示画面＞

- 防災関連の管理画面上で走行ロボットがガス漏れを検知した場所を示す。
- 走行ロボットが検知したガス漏れをポップアップで通知する。
- 中央制御室のオペレーターは常時、管理画面を見ているわけではないので、ポップアップだけでなく音声でも通知する。

＜設備劣化検知のアラート表示画面＞

- 防災関連の管理画面上で走行ロボットが設備劣化を検知した場所を示し、確認ボタンを押すと、劣化場所の画像等の詳細な情報が見られるようにする。
- アラート表示後の確認の流れについて、確認状況と対応状況が分かるようにする。
- 確認済の検知場所はアラートを出さないようにする。
- その日の点検結果をレポートとして出力する。

4.4.3.3 運用面の課題

運用面の課題について検討した結果を以下に示す。

■課題 No.3-1：各種マニュアルや手順書の整理

今回の実証では、走行ロボットについては、操作マニュアルを整理し、システム起動手順等を運用手順として整理した。ローカル５Ｇシステムについては、ローカル５Ｇ運用保守マニュアルの中から、ローカル５Ｇシステム起動の流れとローカル５Ｇシステム停止の流れを確認した。

走行ロボットに搭載したカメラの首振りの手動操作については、直感的かつリアルタイムな操作を目的として設定値変更方法について今後さらなる検討を要する。

今後、4.4.4 に示す実運用に向けた準備の中で、システム改修実施時の運用への落とし込みを再度整理し、点検業務の運用マニュアルを改訂する。

将来的には、人の点検作業の一部を走行ロボットで代替することを視野に入れて、作業員と走行ロボットとの役割分担や連携方法を検討し、保守業務全体のフローを見直すことも考えている。

ただし、課題 No.4-1 で後述する通り、現状、点検業務は日本ガス協会保安規程参考例において、人が実施する内容として定められているため、一部の点検を走行ロボットで代替するためには、当該規定の見直しが必要になる。

■課題 No.3-2：従業員のトレーニング

ガス漏れ検知のモニタリングやロボットの走行位置の確認等、従業員（主に中央制御室）が新たに開発したシステムを使いこなせるようトレーニング等による支援が必要となる。

必要なスキルセットとしては、マニュアルを参照してローカル５Ｇを利用するためのネットワークの基礎知識、マニュアルを参照して走行ロボット・AI を操作・管理するためのロボットの取扱いについての基礎知識、AI（機械学習）の基礎知識が挙げられる。

今後、4.4.4 に示す実運用に向けた準備の中で、運用マニュアルの改訂とあわせて、要員計画や必要な教育プログラムも検討する。

■課題 No.3-3：巡回時間帯の検討

本番運用に向けてはトレーラーが走行する時間帯などを考慮して走行ロボットによる巡回時間帯を検討する必要がある。また、悪天候時は通常よりも点検に時間がかかるため、必然的にロボットが走行可能な時間帯が限られる点にも留意する必要がある。現時点では16:00~17:00 を想定している。

今後、4.4.4 に示す実運用に向けた準備の中で、16:00~17:00 に走行させて運用状況に問題が無いことを確認し、点検業務の運用マニュアルに反映する。

■課題 No.3-4：遠隔作業支援での活用

実証ではロボットが既定のルートに従って走行して点検を行ったが、運用としてはメンテナンス時に走行ロボットを持って行って遠隔（中央制御室）から作業支援することも想定している。

作業を進めるうえでメーカーの責任者と話をしながら立ち合いすることもあるが、簡易的な作業であれば現地に行かずともリモートで指示できれば負担軽減も考えられる。また、記録として当該映像を使える（不具合発生時に後から確認できる） 。大型メンテナンスでは自営による作業自体はほとんどないがクレーンの位置や開放の手順・方法など、記録を残すのに有効であると考えられる。

これらの活用を進める上では、管理棟などの建屋内での走行について継続的な運用検証が求められる。また、走行ロボットではなくウェアラブルカメラを活用することで、より小さいコストで実装することも検討し、建屋内全ての遠隔作業支援の実現性を高めることも考えられる。

■課題 No.3-5：運用体制の確立

本実証において、技術実証は富士通の要員、課題実証は知能技術の要員が設備等の導入やトラブル発生時のサポートを行った。今後は実運用を見据えて、各サービス提供者との連携スキームを検討する必要がある。以下に現時点で想定している運用体制を示す。

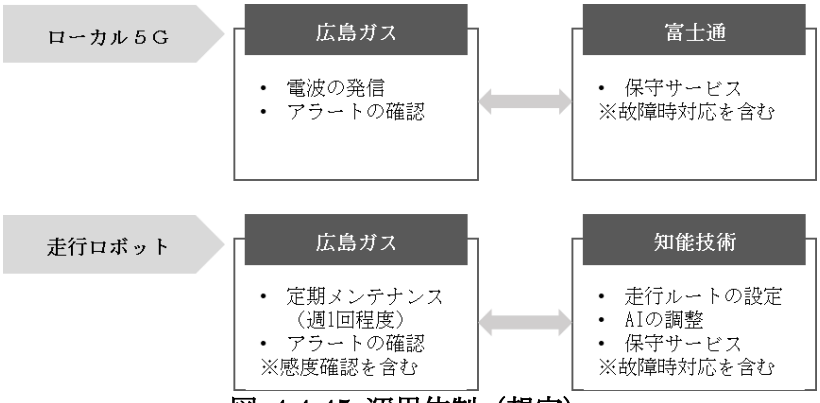


図 4.4-45 運用体制（想定）

4.4.3.4 制度面の課題

制度面の課題について検討した結果を以下に示す。

■課題 No.4-1：日本ガス協会保安規程参考例の見直し

ガス工作物の点検は、以下の図に示す通り、各事業者が保安規程の届出を行い、これを遵守して行うことが義務付けられている。保安規程は、日本ガス協会保安規程参考例に基づき策定しており、設備点検に関しては設備ごとに上限値・下限値を設定した数値が設定済みで、異常を検知するパトロールシステムを使用して巡視点検を行っている。本点検に関して、現状、日本ガス協会保安規程参考例において、人が実施する内容として定められているため、一部の点検を走行ロボットで代替するためには、当該規定の見直しが必要になる。

日本ガス協会もスマート保安の事例を収集しており、その他多数のガス会社からも本実証について情報提供の依頼を受けていることから、保安規程参考例の見直しも視野に業界全体であるべき姿を検討していく必要がある。

本課題は一企業で解決できる課題ではないため、保安規程参考例の見直しに向けて、日本ガス協会や他のガス会社に本実証成果の情報提供を行っていく。

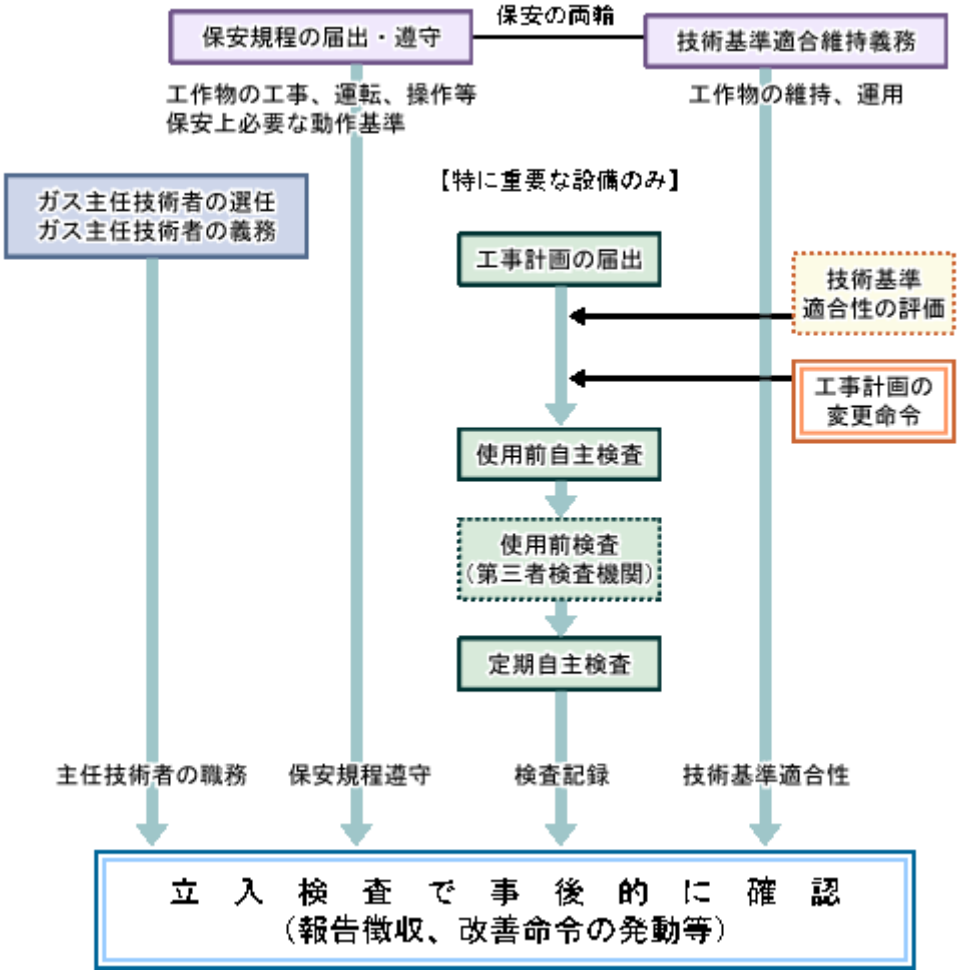


図 4.4-46 ガス工作物に関する規制の概要（出所：経済産業省公式サイト）

4.4.4　継続利用の見通し・実装計画

（1）継続利用についての方針

本事業で実証したローカル５Ｇ活用ソリューションのネットワーク・システム構成を標準モデルと想定し、まずは廿日市工場での実運用を目指し、ローカル５Ｇの利用を継続する。さらには、その後の自社内他工場への展開に向けた検討を進めつつ、将来的には、巡回作業員による点検を走行ロボットによる点検で一部代替することや、業界内のスマート保安に資するソリューションの提案も視野に入れる。

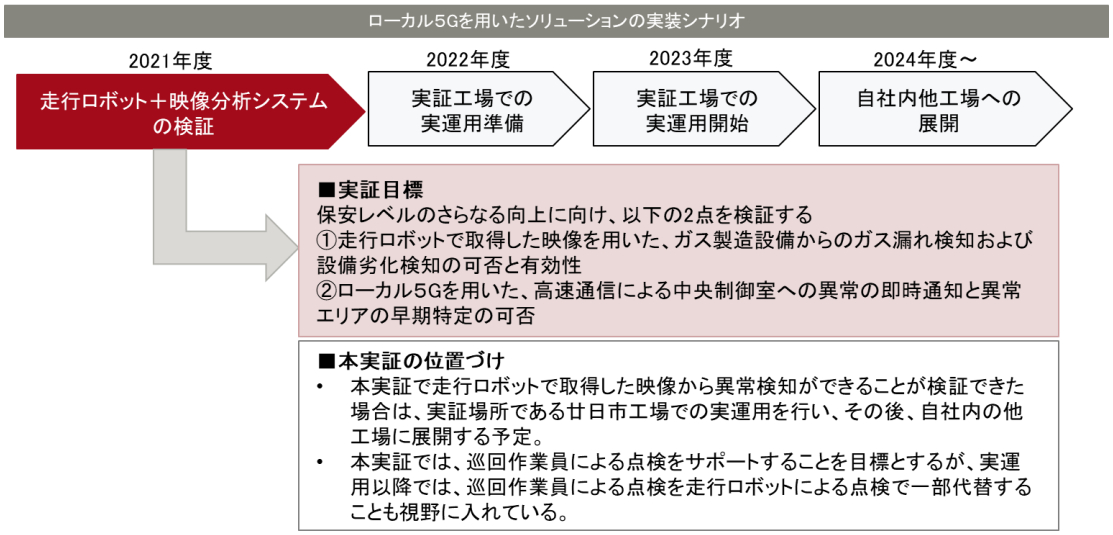


図 4.4-47　実装シナリオ及び実証目標（再掲）

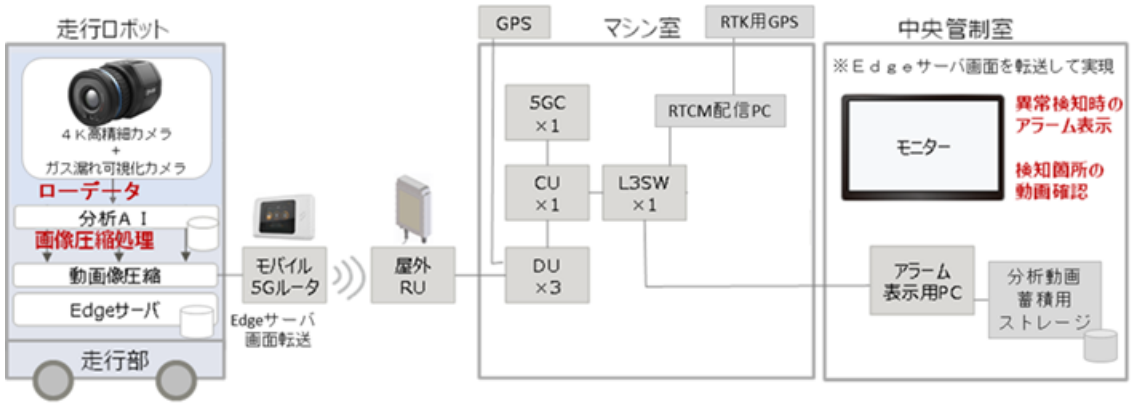


図 4.4-48　標準モデルの構成（再掲）

(2) 実装計画の概要

廿日市工場での本格実装、およびその後の自社内他拠点への展開期間として、2022 年度からの 5 ヵ年計画案を以下に示す。

なお、2024 年度以降の自社内他拠点への展開は、廿日市工場における稼働状況により、計画の時期・内容は変更になる可能性がある。

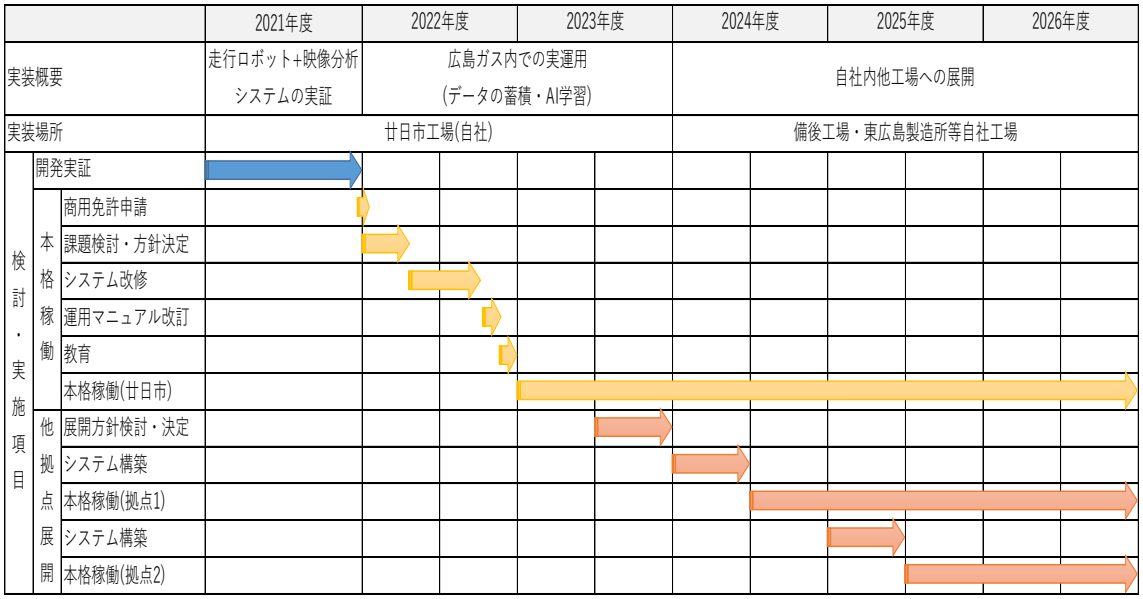


図 4.4-49 実装に向けた 5 ヵ年計画(案)

(3) 継続利用に向けた展開方策

前項(2)の実装計画に基づき、以下のステップで自社内の展開の検討を進める。各方策の内容を以下に示す。

1) STEP1 廿日市工場での実運用('22~23 年度)

a) 商用免許申請

2022 年度の本格実装を前提とした商用免許取得に向け、中国総合通信局との協議を開始している(2022 年 3 月現在)。

b) 課題検討・方針決定

以下の 3 つを本格実装への重点課題として位置づけ、ローカル 5 G活用システムの改修に係る費用の算出を行うとともに、その効果についての精査を実施する。

- 重点課題１：ガス漏れ検知のさらなる精度向上（課題 No.2-1）
  解決策として以下を検討している。
  ・ガス漏れ検知のアルゴリズム改良(近日中に実装予定)
  ・非冷却タイプのセンサーから冷却タイプへのアップグレードなどセンシング方法の再検討(リプレイスまたはアドオン)

- 重点課題２:設備劣化検知の精度向上と検知できる対象の拡大（課題 No.2-3）
  解決策として以下を検討している。
  ・更なる AI 学習のための疑似錆データの継続収集
  ・錆以外の異常(苔・氷付着、設備の変形・損傷)の劣化パターン追加
  ・劣化検知箇所の特定(見える化)と個所数の表示

- 重点課題３：ロボットの自律走行の安定化（課題 No.2-5）
  解決策として以下を検討している。
  ・GPS(位置補正の RTK)を補完する仕組みとの組合せ（SLAM 方式や三次元センサー）

c）システム改修

前項 b)の検討結果を踏まえ、以下の改修を行う。

- 走行ロボット・AI の改良
  前項 b)に示した重点課題への解決策を実装する。

- 実運用で利用するための UI 開発（課題 No.2-9）
  本実証における運用検証結果や前項 b)に示した重点課題２の検討結果をもとに、ガス漏れおよび設備劣化検知結果を作業員に適切に伝え、必要な対応を行うための UI を開発する。

- 既存の構内ネットワークとの連携
  今回の独立した閉域網のセキュリティは担保しつつも、既存の基幹系ネットワークとの連携を検討、柔軟な運用を目指す。

d）運用マニュアル改訂等

本実証における運用検証結果をもとに、上記改修実施時の運用への落とし込みを再度整理し、点検業務の運用マニュアルを改訂する（課題 No.3-1、課題 No.3-3、課題 No.3-4、）。あわせて、要員計画や必要な教育プログラムも検討、必要なトレーニングを行う（課題 No.3-2、課題 No.3-5）。

e）教育

本ソリューションを業務で活用する作業員を対象に、ローカル５Ｇの運用研修と走行ロボット・AI の運用研修をそれぞれ実施する。

2）STEP2 自社内他拠点への展開('24~26 年度)

a）展開方針の検討・決定

廿日市工場の実績をもとに、自社内他拠点への展開の検討を行い、方針を決定する。主な検討項目は以下を想定している。

- ローカル５Ｇの拠点間ネットワークの共有とコストダウンの検討

・廿日市工場のコア設備(5GC など)を共有、RU など周辺設備のみ現地に設置
※コア設備のセンター化構想によるコスト低減の検討

- 廿日市工場と他拠点の設備・運用の差分の洗い出し

・展開先の製造設備とその点検業務における廿日市工場との差を抽出
・異常発生時の運用フローにおける廿日市工場との差を抽出

- 上記差分に対応する AI の再設定・チューニングとその費用算出と改修の決定
※ローカル５Ｇのネットワーク設計を含む

- 他拠点における運用への落とし込みと要員計画・教育の検討

b）課題検討・方針決定

STEP1 の廿日市工場の本格実装時に対応した重点課題に加え、4.4.3 で整理した課題についての費用対効果等を含めた精査を実施するとともに、実運用の中で浮かび上がった新たな課題についての検討も実施する。

技術面の課題

- 課題 No.1-1：通信安定性
主な解決策
・通信状態が悪い環境下でのデータバッファと纏め送信機能の実装

機能面の課題

- 課題 No.2-2：実運用を想定した赤外線センサーとの併用
主な解決策
・非冷却タイプから冷却タイプのセンサーへの変更
・吸収スペクトルに相当する照明設備の構築

- 課題 No.2-4：設備内部の劣化診断
  主な解決策
  ・温度測定用の赤外線センサー(サーモグラフィ)の増設

- 課題 No.2-6：悪天候時の走行
  主な解決策
  ・強風と降雪以外の悪天候温時の走行テストによる防水性能の確認

- 課題 No.2-7：リスクアセスメントの実施
  主な解決策
  ・三次原因まで分解したリスク分析表の基づくリスクアセスメントの実施

- 課題 No.2-8：保安に係る各種データの一元化
  主な解決策
  ・電子操業日誌システムとのデータ連携・共有

c）システム構築

検討結果をもとに、システムの構築・改修を行う。

（4）実装に向けた資金調達

自社内展開のフェーズについては、民間独自で取り組む方針であり、廿日市工場における本格実装に際し、走行ロボット側のさらなる精度・機能向上のための改修費用と、ローカル５Ｇのネットワークの保守費用の予算化を予定している。ただし、本格的な実装に向けては、AI 検知による設備劣化基準の平準化と設備保全計画への寄与や、悪天候時の自動点検による作業員の心理的負担の軽減、構内のメンテナンス現場のリアルタイムの遠隔監視による労務費の低減など、その投資に対する定量的・定性的な効果を整理のうえ投資の判断をする。

■概算費用(案)

1．イニシャル　　単位：百万円

拠点	内容	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度
廿日市工場	走行ロボット改修費用	20.0				
拠点①	ローカル5G設備工事			17.8		
	ローカル5Gシステム構築			45.0		
	走行ロボット・AI構築			30.0		
拠点②	ローカル5G設備工事				17.8	
	ローカル5Gシステム構築				45.0	
	走行ロボット・AI構築				30.0	
		20.0	0.0	92.8	92.8	0.0

※走行ロボット・AIは廿日市工場同等仕様とする(1台)
※拠点①,②におけるローカル5Gの基地局は2局とする

2．ランニング　　単位：百万円

拠点	内容	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度
廿日市工場	運用保守費用(年額)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
拠点①				4.0	4.0	4.0
拠点②					4.0	4.0
		4.0	4.0	8.0	12.0	12.0

※運用保守費用はローカル5G網を対象とする

図 4.4-50 実装における概算費用(案)

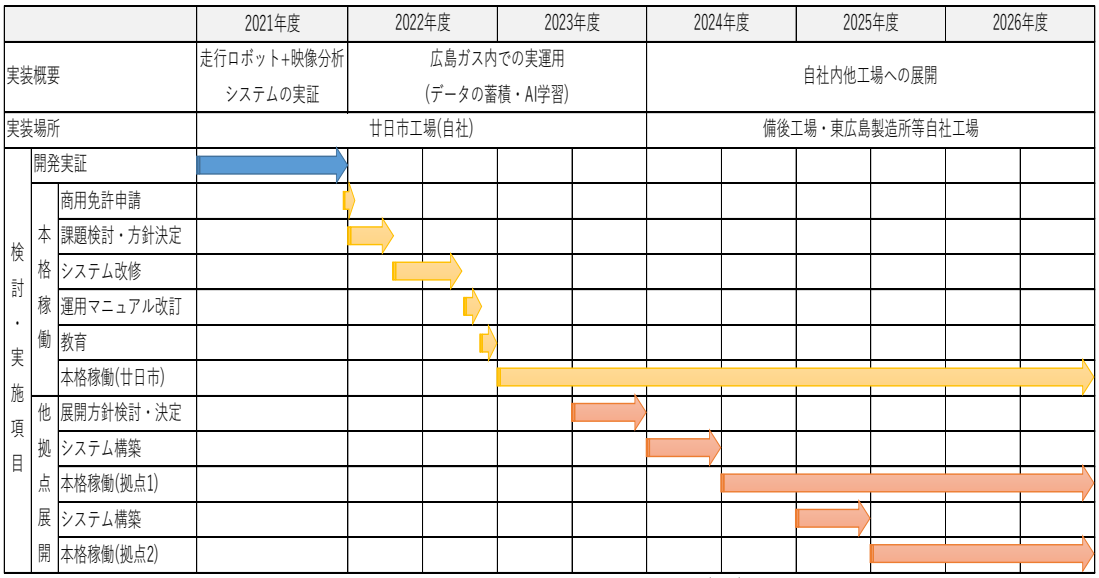


図 4.4-51 実装に向けた 5 ヵ年計画(案)　再掲

また、国・自治体の補助金についても引き続き注視し、適宜、活用を検討する。例えば、一般社団法人社会実装推進センター(JISSUI)の「産業保安高度化推進事業費補助金」等を想定している。

図 4.4-52 「産業保安高度化推進事業費補助金」類型イメージ

出典：一般社団法人社会実装推進センター(JISSUI)
「産業保安高度化推進事業費補助金」公募要領
https://jissui.or.jp/wp-content/uploads/2021/04/r2sh_kouboyouryou.pdf

（5）ガス業界への本ソリューションの普及に向けた情報発信

1）経済産業省への情報発信

スマート保安の制度的環境整備については、以下の図に示す通り、経済産業省で検討が進められているところであるが、本成果報告書作成時点では、具体的な要件・水準・指標までは定められていないため、今後の動向を注視するとともに、情報提供を行っていく。

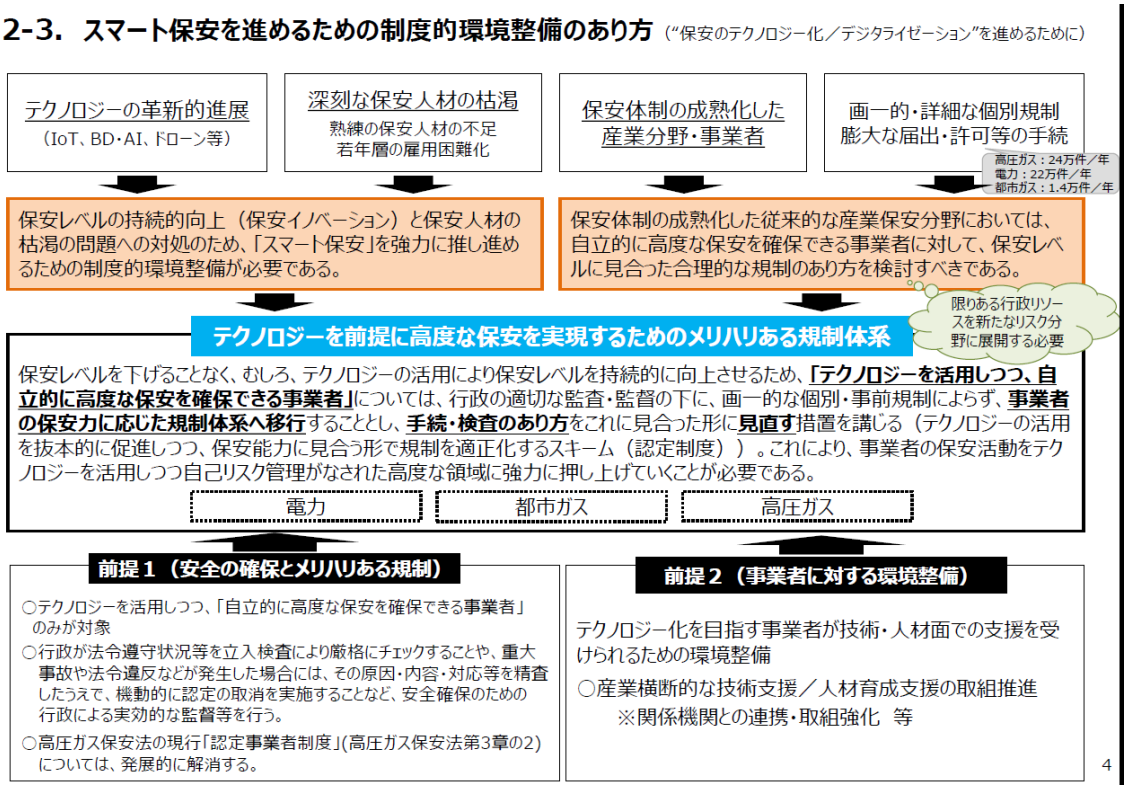


図 4.4-53　スマート保安を進めるための制度環境整備のあり方（再掲、出所：経済産業省「産業保安分野における当面の制度化に向けた取組と今後の重要課題の概要」2021 年 12 月 21 日）

2）ガス業界への情報発信

ガス業界におけるスマート保安の取組については、スマート保安官民協議会ガス安全部会において、2021 年 3 月に「ガス分野におけるスマート保安のアクションプラン」が取りまとめられているが、現状は取り組むべき方向性や今後解決すべき課題が整理された段階であり、ガイドラインの作成等はこれからである。日本ガス協会会員企業においても、まだまだ取組事例が少なく、ガイドライン作成のインプットとなる情報が必要な状況であるため、課題 No.4-1 に挙げた日本ガス協会保安規程参考例の見直しも視野に入れ、日本ガス協会や会員企業への本実証成果の情報提供やプロモーション、視察の受入れ、業界紙の取材対応等を行っていく。

5. 普及啓発活動の実施

5.1 映像制作への協力

ローカル５Ｇ普及の観点から、実証コンソーシアムの本事業に関する映像制作を行うにあたり、以下の内容で実証映像の素材提供や関係者へのインタビューの撮影等に協力を行った。

5.1.1 コメント映像の提供

5.1.2 実証映像の提供

① 工場の風景
② カメラ付きロボットの無人監視
③ 分析 AI 搭載ロボットのガス漏れ・設備劣化検知
④ ②と③のモニター画面
⑤ メンテナンスの撮影・送信
⑥ 管制室からの遠隔支援
⑦ ⑥の PC 画面

5.2 実証視察会の実施

ローカル５Ｇの導入に関心のある企業や、地方公共団体、関係省庁等に対する普及啓発の一環として、2022 年 1 月 27 日(木)に以下の内容でオンラインでの実証視察会を開催した。

5.2.1 参加者一覧　※省庁・企業名のみ(コンソーシアム除く)

総務省	情報流通行政局地域通信振興課デジタル経済推進室、総合通信基盤局電波部移動通信課
中国総合通信局	情報通信部情報通信振興課、陸上課
中国経済産業局	地域経済部製造・情報産業課
三菱総合研究所	デジタル・イノベーション本部　ICT インフラ戦略グループ
富士通ネットワークソリューションズ株式会社	次世代ワイヤレスネットワーク企画室
日本無線株式会社	ｿﾘｭｰｼｮﾝ事業部　事業企画開発部、マイクロ波通信技術部
日清紡ホールディングス(株)	デジタルビジネス推進室
日本電気通信システム株式会社	システム営業本部

5.2.2 開催概要

① 全体概要の説明
② 工場のご紹介(映像)
③ 技術実証（実証実験のご紹介）
④ 課題実証(開発状況のご紹介)

5.3 その他普及啓発活動

ローカル５Ｇ活用モデルの都市ガス事業者への普及展開に向けて、以下の内容で広報活動を実施した。

5.3.1 プレス発表

・電気新聞_新聞(2021/9/1)
・ガスエネルギー新聞_新聞(2021/9/6)
・プロパン産業新聞(2021/9/7)
・日刊工業新聞(2021/9/16)
・中国新聞(2021/9/22)
・日経産業新聞掲載(2021/12/20)

5.3.2 セミナーなど

・富士通中国地区ファミリ会での事例紹介(2021/10/29)
・PwC 主催「ローカル５Ｇ等導入計画策定支援に係るオンラインセミナー」登壇(2021/12/13)
・その他、同業他社を中心に現地視察の依頼を受けている

6. 実施体制

以下の体制にて実施した。

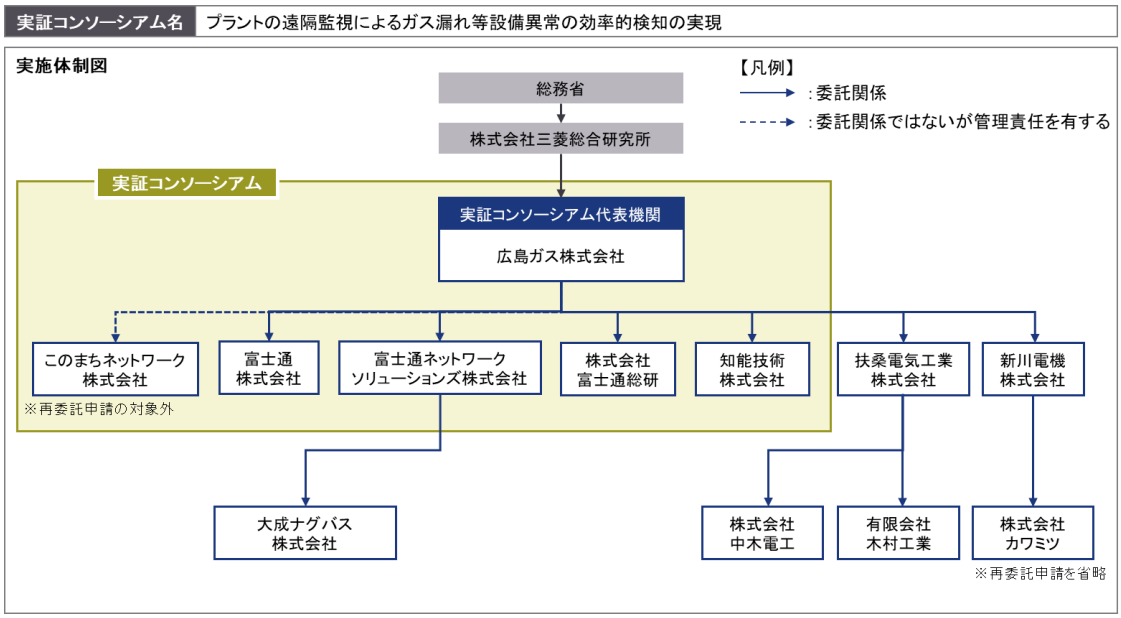


図　6-1　実施体制及び役割

表 6-1　コンソーシアム構成員の役割分担

会社名	役割	業務内容・範囲
広島ガス 株式会社	代表機関	「仕様書 「4 調査方法等」に記載の要件を踏まえた実証を実施する。具体的には、下記採択結果に係る報道に記載のテーマにおいて実証を実施する。 URL https://www.mri.co.jp/news/public_offering/20210831.html
富士通 株式会社	技術実証	技術実証のための計画策定・環境構築、および実装・普及展開検討への協力を行うとともに、ローカル５Ｇ機器提供、およびローカル５Ｇシステム設計・免許申請を行う
富士通ネットワークソリューションズ株式会社	ローカル５Ｇ施工管理	現地導入に伴う無線設備、電気設備、通信設備導入工事の施工管理を行う
株式会社富士通総研	プロジェクトマネジメント支援、成果報告書取りまとめ支援	プロジェクトマネジメント、ローカル５Ｇを用いたソリューションの有効性/実装性に関する検証、ローカル５Ｇの実装に向けた課題の抽出及び解決策の検討、成果報告書の取りまとめを支援する
知能技術 株式会社	課題実証	課題実証に用いる走行ロボットおよび異常検知用AIの開発を行う

7. スケジュール

実施スケジュールを以下に示す。

実施項目		2021年 9月	10月	11月	12月	2022年 1月	2月	3月
1. 実証環境の構築								
1.1.実証環境の構築								
1.1.1.	無線局免許の取得		→	→				
1.1.2.	ローカル5Gネットワーク環境の構築		→	→	→			
1.2.実証環境の運用								
2.1.1.	実証参加者への利用方法の説明				→			
2.1.2.	実証参加者からの問合せ対応				→	→	→	
2. ローカル５Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討（技術実証）								
2.1.技術実証計画の策定								
2.1.1.	ローカル5Gの電波伝搬特性等の性能評価項目・方法の検討		→	→				
2.1.2.	電波伝搬モデルの精緻化の検証項目・方法の検討		→	→				
2.1.3.	実証計画書(詳細)の作成		→	→				
2.2.技術実証の実施								
2.2.1.	ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定				→	→		
2.2.2.	電波伝搬モデルの精緻化(測定)					→	→	
2.3.技術実証結果の取りまとめ								
2.3.1.	ローカル5Gの電波伝搬特性等の結果評価・解析					→	→	
2.3.2.	電波伝搬モデル精緻化の結果評価・解析					→	→	
2.3.3.	技術実証報告書の作成						→	→
3. ローカル５G活用モデルの創出・実装に関する調査検討（課題実証）								
3.1.ローカル5Gを用いたソリューションの有効性等に関する検証								
3.1.1.	実証計画の策定			→	→			
3.1.2.	テストフィールド・試験装置・通信環境の準備			→	→			
3.1.3.	走行ロボット・AIのチューニング					→	→	
3.1.4.	ガス漏れ検知・設備劣化診断の検証						→	
3.1.5.	検証結果の取りまとめ						→	→
3.2.ローカル5Gを用いたソリューションの実装性に関する検証								
3.2.1.	ローカル5G活用モデルの構築・検証				→	→	→	
3.2.2.	普及展開方策の検討				→	→	→	
3.3.ローカル5Gの実装に向けた課題の抽出及び解決策の検討								
3.3.1.	ローカル5Gの実装に向けた課題整理					→	→	
3.3.2.	解決策の検討						→	→
3.4.ローカル5Gの実装シナリオの見直し								
3.4.1.	ローカル５G実装シナリオの見直し						→	→
4. 普及啓発活動の実施								
4.1.	映像制作への協力					→	→	
4.2.	実証視察会の実施					→	→	
4.3.	その他普及啓発活動					→	→	→
5. 成果報告書の作成								
5.1.	成果報告書の取りまとめ				→	→	→	
5.2.	成果報告書の修正							→
6. プロジェクト管理								
6.1.	進捗・課題報告	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆
6.2.	中間報告			→	☆			
6.3.	最終報告						→	☆