

5G／Beyond 5G 陸上移動無線システム等 の動向調査

令和2年3月

国立研究開発法人 情報通信研究機構
(北米連携センター)

目次

1	3GPP における関連議論	3
1.1	これまでの経緯	3
1.1.1	IMT-2020 ビジョン勧告とそれに基づく議論	3
1.1.2	3GPP における各リリースに関する議論	5
1.2	IoT や工場無線に関する取組と TR 策定状況	10
1.2.1	TR 38.825 (バージョン 16.0.0)	14
1.2.2	TR 22.804 (バージョン 16.2.0)	15
1.2.3	TR 23.745 (バージョン 0.7.0)	16
1.2.4	TS 22.104 (バージョン 17.2.0)	18
1.2.5	TR 22.832 (バージョン 17.1.0)	18
2	5G 通信を活用したスマートファクトリーの実現	20
2.1	スマートファクトリーを可能にする 5G ユースケース	21
2.1.1	大規模 IIoT によるリアルタイム且つ包括的な工程管理	22
2.1.2	ロボティクスや 3D 技術を活用したピッキング	23
2.1.3	VR/AR を活用した訓練、メンテナンス、データ視覚化	24
2.1.4	無人搬送車 (Automated guided vehicles: AGV) を活用した物資の搬送	24
2.1.5	カメラによる作業フロアの監視	24
2.2	各ユースケースに求められる 5G 通信要件	25
2.3	スマートファクトリーを可能にする技術・アーキテクチャ	27
2.3.1	クラウド、エッジコンピューティング	27
2.3.2	セキュリティ確保を目的としたローカルネットワーク	28
2.3.3	ソフトウェア・デファインド・ネットワーク (SDN) とネットワーク機能仮想化 (NFV)	29
2.3.4	AI と機械学習	29
2.4	スマートファクトリーの課題	29
2.4.1	製造業向け 5G の互換性改善	29
2.4.2	周波数の割り当てと活用	30
2.4.3	安全性とセキュリティ	30
2.4.4	エコシステム内外の連携強化	31
2.4.5	その他導入にあたっての現場の課題	31
3	6G 通信についての展望	31
3.1	通信要件および特徴	32
3.2	6G を可能にする技術	33
3.3	ユースケース	34
3.4	今後の方向性と課題	34

図表

図表 1	IMT-2020 ビジョン勧告が示す 3 つのシナリオに求められる機能・要件	3
図表 2	IMT-2020 ビジョン勧告で示された 3 種類の通信シナリオとその用途	5
図表 3	3GPP の各リリースにおける主要なトピック例	6
図表 4	リリース 15 で議論された NSA と SA シナリオ概要	7
図表 5	リリース 15 に向けて SA1 内部で議論されていたトピック	8
図表 6	リリース 16 に関する RAN と SA の役割分担	9
図表 7	Ericsson によるリリース 15 以降の標準化ビジョン	10
図表 8	3GPP リリース 16 へ向けた IoT や工場無線に関するプログラム例	11
図表 9	3GPP リリース 17 へ向けた IoT や工場無線に関するプログラム例	13
図表 10	未来の工場のアプリケーションと各技術・ユースケースとの対応	15
図表 11	産業自動化のためのローカル・タイプ b ネットワークを活用した未来の工場	16
図表 12	FF アプリケーションレイヤー機能モデル	17
図表 13	ワイヤレス通信による 4 種類の機械の協働概念図	18
図表 14	ロボット／AGV の協働搬送に必要な通信アーキテクチャ(PLMN も活用する場合)	19
図表 15	5G 導入で想定される通信アーキテクチャの変化(Qualcomm)	21
図表 16	各産業に求められる 5G ソリューションと重要度(Ericsson)	22
図表 17	スマートファクトリーの各ユースケースに求められる 5G 要件のまとめ(各組織案)	26
図表 18	スマートファクトリー向けの断層アーキテクチャ	27
図表 19	IIoT 用のワイヤレス・エッジ通信アーキテクチャ(Qualcomm)	28
図表 20	5G と 6G(案)の技術要件と特徴の比較	32

1 3GPP における関連議論

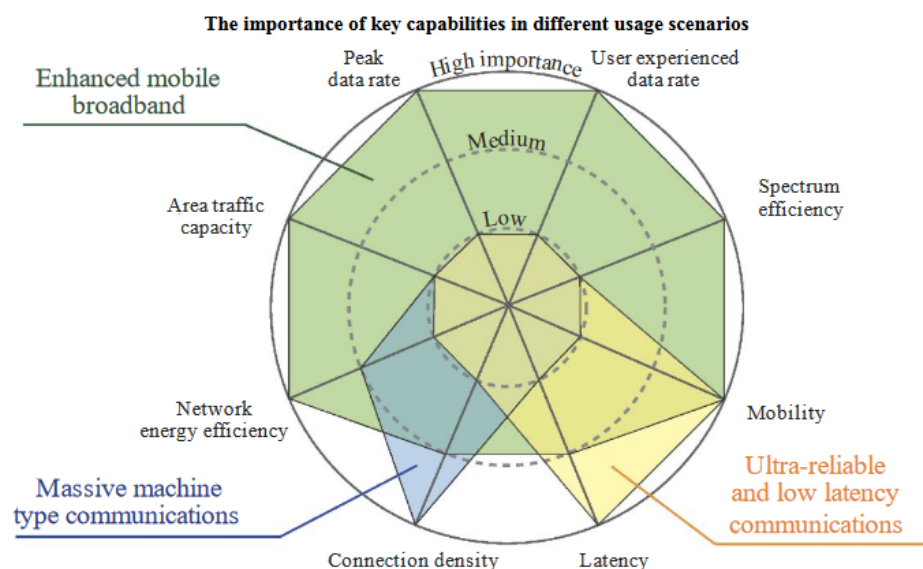
1.1 これまでの経緯

1.1.1 IMT-2020 ビジョン勧告とそれに基づく議論

2015 年 9 月、国際電気通信連合 (ITU) の無線通信担当部門である ITU-R は、2020 年およびそれ以降の移動通信システムについてのビジョンをまとめた「IMT-2020 ビジョン勧告 (Recommendation ITU-R M.2083-0)」を発表した。この中で ITU-R は、2020 年以降の無線通信の利用シナリオとして、モバイルブロードバンドの高度化 (Enhanced Mobile Broadband: eMBB)、超高信頼・低遅延通信 (Ultra-Reliable and Low Latency Communications: URLLC)、大量のマシンタイプ通信 (Massive Machine Type Communications: mMTC) を提示し、それぞれの定義や KPI (Key Performance Indicator) を設定した¹。

以下の図は、これら 3 つのシナリオに求められる機能・要件を図解したものであり、eMBB が高い通信速度やトラフィック容量を求められるのに対し、URLLC には高いモビリティと低いレイテンシ、mMTC には高い接続密度を求められることがわかる。ここでは、それぞれのシナリオの概要と KPI、シナリオの実現を支える技術や手法について整理する。

図表 1 IMT-2020 ビジョン勧告が示す 3 つのシナリオに求められる機能・要件



出典：ITU²

1. モバイルブロードバンドの高度化 (Enhanced Mobile Broadband: eMBB)

KPI: 下り最大通信速度 20 Gbps、上り最大通信速度 10 Gbps

¹ https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!!!PDF-E.pdf

<https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/3gpp-release-15-overview>

² https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!!!PDF-E.pdf

eMBB は、高画質の映像ストリーミング、仮想現実(virtual reality: VR)および拡張現実(augmented reality: AR)など、大量のデータを送信するアプリケーションを支える通信シナリオである。eMBB に求められる要件は、ユースケースによって多様化するとみられており、例えば極めて多くの機器が接続されるスポーツ・音楽イベント会場などに設置されたホットスポットを介した通信に関しては、可動性要件は低いものの、ネットワーク容量の要件は高くなる。逆に高速列車の乗客向けの通信サービスには、高度の可動性が必要とされるが、トラフィック容量の要件は低くなる³。

eMBB の実現を支援する主要な技術や方策としては、超高密度(ultra-dense)スモールセル、大規模 MIMO(massive MIMO)、ミリ波通信、全二重(full-duplex)ベース通信、新たな通信波形の活用などが提案され、3GPP においても議論されている⁴。

2. 超高信頼・低遅延通信(Ultra-Reliable and Low Latency Communications: URLLC)

KPI: 1 ミリ秒程度のレイテンシ

URLLC は、自動運転車、産業自動化、AR などのミッション・クリティカル・システムを支える要件通信シナリオであり、通信の高い信頼度と低レイテンシが求められる。小データパケット(数バイトなど)を特定の時間的間隔の中で持続的に伝送し、通信間の間隔を低減しながら、アップリンク・ダウンリンクの両方の通信速度を高いレベルで維持することが求められる。

URLLC を支える技術としては、多元接続技術(Multiple Radio Access Technology: Multi-RAT)、デュアル・コネクティビティ(dual-connectivity: DC)、遅延低減ソリューションである端末間直接(device-to-device: D2D)通信などが提案されており、3GPP のリリース 16 や 17 に向けた取組の中で活発な議論が行われている⁵。

3. 大量のマシンタイプ通信(Massive Machine Type Communications: mMTC)

KPI: 100 万台/km² の接続機器

mMTC は、膨大な数の IoT 機器の接続をサポートすることを目的とした通信シナリオである。スマートシティやスマート農業の mMTC ユースケースにおいては、センシングと監視が重要であり、スマートグリッドにおいては正確な計測が不可欠とされている。実際の導入にあたっては、mMTC の要件には接続密度のほか、4G からの 20dB 程度のカバレッジ改善、長めのバッテリー寿命(5~10 年)などが含まれることが想定される。mMTC を実現する無線技術やプロトコルについては、異なる業界標準が定義・展開されており、主な標準としては以下が挙げられる⁶。

- 3GPP 以外の標準: LoRA、Sigfox、Ingenu、Weightless、WI-SUN、802.11ah、802.15.4
- 3GPP 標準(プロトコルスタック): Cat-M1、NB-IoT、ECGSM-IoT

³ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁴ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁵ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

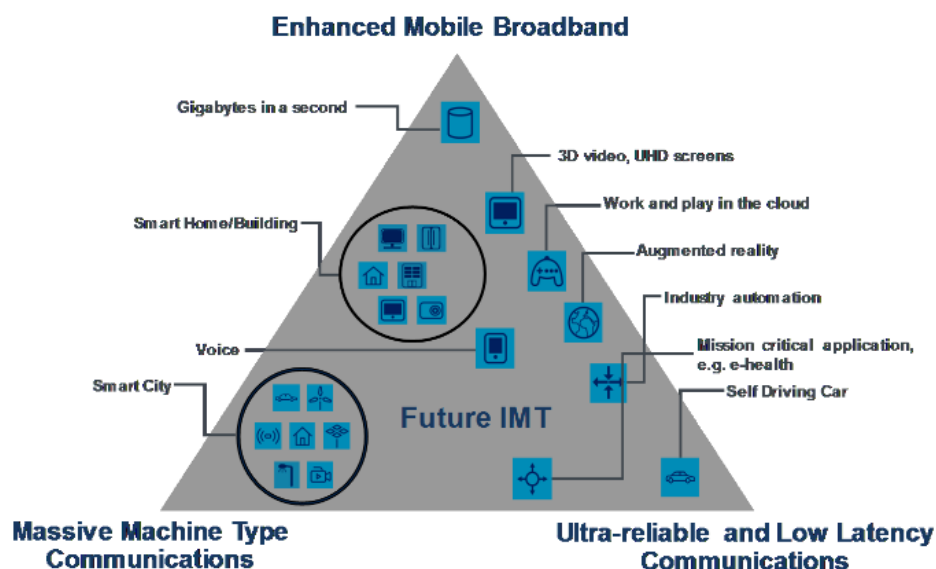
⁶ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

- インターネット技術特別調査委員会 (Internet Engineering Task Force: IETF) によるプロトコル標準: CoAP、HTTP/2、QUIC、LPWAN 経由の IPv6

mMTC を活用したアプリケーションの場合、特定のサービスエリアにおいて多数の機器を接続しつつ、求められる通信要件を確保することが重要である。この目的に向け、スパース符号多元接続 (Sparse Code Multiple Access: SCMA)、mMTC 用に設計された多元接続プロトコル (MAC プロトコル)、スケジューリングアルゴリズムなどの手法が研究されている⁷。

以下の図は、これら 3 つの通信シナリオごとの用途を図解したものである。この図により、用途によっては、2 つもしくは 3 つのシナリオやその要件をバランスよく活用する必要があることがわかる。多様なユースケースに対応するためには、ネットワークに高度な柔軟性が求められており、システムやリソースの最適化を助けるソフトウェア・デファインド技術や機会学習・AI の活用も検討されている⁸。

図表 2 IMT-2020 ビジョン勧告で示された 3 種類の通信シナリオとその用途



出典: ITU⁹

1.1.2 3GPP における各リリースに関する議論

3GPP は、ITU-R の標準化の取組を支援する立場にある国際標準化団体である。3GPP では、2020 年以降に主流になると考えられる第 5 世代移動通信システム (5G) の仕様策定において、IMT-2020 ビジョン勧告を含む以下の 4 つの要素に配慮しながら議論を行っている¹⁰。特に 3 点目の通信業界から提起されている要素や、4 点目の多分野への応用は、4G から 5G を分ける重要な特徴となっている。

⁷ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁸ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁹ https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/Events/2017/06_Saint_Petersburg/Presentations/ITU%20Workshop%2019.06%20-%20Denis%20Andreev%202.pdf

¹⁰ https://www.atis.org/01_news_events/webinar-pptslides/5g-slides7312019.pdf

- IMT-2020 ビジョン勧告の内容や、それが求める要件(eMBB、URLLC、mMTC)
- 第4世代移動通信システム(4G)と5Gの関係(5Gは基本的に4Gの機能をすべてカバーし、4Gの上位互換でなくてはならない)
- 通信業界から提起される、5G向けの新しいアーキテクチャ、要件、サービス(ネットワークスライシング、サービス基盤のアーキテクチャ、サービスの質の向上、レイテンシの低減、セキュリティ向上、ユーザープレーンとコントロールプレーン[UP/CP]の分離など)
- 多様な分野(バーティカル産業[vertical industry]、公共安全、交通、医療、産業など)への5Gの応用とそれに求められる細かいアーキテクチャ、要件など

以下の表では、3GPP のリリース 15~17 における焦点議題の例と、具体的な議論内容について整理する。

図表 3 3GPP の各リリースにおける主要なトピック例

	リリース 15 (2019 年 6 月完了)	リリース 16 (2020 年 6 月完了予定)	リリース 17 (2021 年 9 月完了予定)
焦点例	▪ 4G→5G への転換 ▪ 主に eMBB、次点で mMTC (URLLC は持越し)	▪ 多様なユースケースの検討 ▪ URLLC に関する議論 ▪ 通信・運用効率の向上	• 更なるユースケースの検討 • 各産業への実際の導入を想定した細かい仕様検討
具体的な内容例	▪ NR(New Radio) ▪ 5G システム(フェーズ 1) ▪ mMTC と IoT ▪ V2X 通信(フェーズ 2) ▪ ミッション・クリティカル(MC) インターワーキングとレガシーシステム ▪ WLAN と免許不要周波数の利用 ▪ スライシング(ローカルなエンドツーエンド・ネットワーク) ▪ API 公開(第三者による 5G サービスへのアクセス) ▪ サービス・ベース・アーキテクチャ(SBA) ▪ 更なる LTE 通信改善 ▪ 鉄道用モバイル通信システム(FRMCS) など	▪ 5G システム(フェーズ 2) ▪ V2X 通信(フェーズ 3、拡張センサー、自動・リモート運転) ▪ 産業 IoT ▪ URLLC 拡張 ▪ 免許不要周波における NR ▪ 5G 通信効率(干渉、緩和、SON、eMIMO、ロケーションとポジショニング、電力消費、eDual コネクティビティ、機器能力変化) ▪ 3GPP Northbound APIs (eCAPIF) のための API 拡張 ▪ FRMCS(フェーズ 2) など	• NR MIMO • NR サイドリンク拡張 • 既存波形を用いた 52.6-71GHz 利用 • ダイナミック周波数共有(DSS)拡張 • 産業 IoT(URLLC 拡張) • 研究...非地上ネットワーク(NTN)における IoT • 非地上ネットワーク(NTN)における NR • NR ポジショニング拡張 • 節電 • NB-IoT と LTE-MTC 拡張 • 5G マルチキャスト・ブロードバンド • マルチ無線 DCCA 拡張 • マルチ SIM など

出典：3GPP などの資料を基に作成¹¹

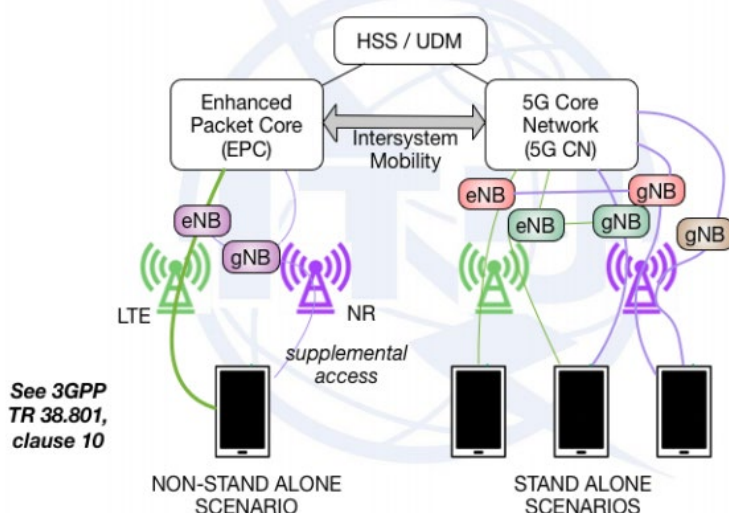
¹¹https://www.3gpp.org/ftp/Information/presentations/presentations_2020/Poster_2020_MWC_v6_OPTIMIZED.pdf

リリース 14、15 に関する議論

3GPP はリリース 14 の検討段階において、5G 向けの無線通信方式である NR (New Radio) や関連技術、要件についての基礎的検討を実施し¹²、リリース 15 において本格的な仕様検討を開始した。リリース 15 は 5G システムに関する議論のフェーズ 1 (リリース 16 向けの議論はフェーズ 2) と言われており、特に 4G と 5G の併用や、4G から 5G への移行に焦点が当てられている。

例えば、4G と 5G の併用を想定したノンスタンドアロン (NSA、接続方式 Option 3) シナリオ¹³と、5G 単体での利用を想定したスタンドアロン (SA、接続方式 Option 2、4、7)¹⁴シナリオの両方のシナリオについての検討が行われたほか (以下の図参照)、両方のシナリオ間の相互運用性についても議論された。同時にリリース 15 では、前述の IMT-2020 勧告が提示した 3 種類の通信シナリオうち、特に eMBB に焦点が当てられ、次点で mMTC についても IoT の利活用という観点から議論が行われたが、URLLC については包括的な議論をするには至らず、リリース 16 以降への持越しとなった¹⁵。

図表 4 リリース 15 で議論された NSA と SA シナリオ概要



出典：3GPP/Samsung Electronics R&D Institute¹⁶

3GPP 内部にあるワーキンググループ¹⁷の中で、サービス要件についての議論を担当する SA1 は、リリース 15 に関する審議の中で、eMBB、mMTC (mIoT)、重要コミュニケーション (Critical Communications)、ネットワーク・オペレーション (Network Operation) の 4 つのトピックに分けて議論を進めた。以下の図は、それぞれのトピックに関して SA1 が議論を行っていた分野を示している。

¹² <https://www.3gpp.org/release-14>

<https://www.ericsson.com/en/blog/2015/6/release-14--the-start-of-5g-standardization>

¹³ 既存の LTE と新しい NR (New Radio、5G 向け無線通信方式) の組み合わせで運用するような、複数の無線技術の活用を想定した通信形態。

¹⁴ NR 単体で運用することを想定した通信形態。

¹⁵ https://www.atis.org/01_news_events/webinar-pptslides/5g-slides7312019.pdf

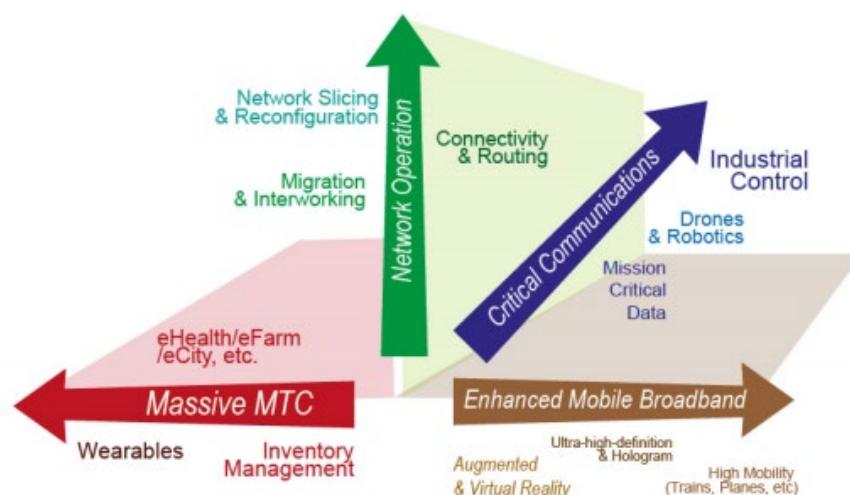
<https://www.3gpp.org/release-15>

¹⁶ https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201807/Documents/3_Erik_Guttman.pdf

¹⁷ 3GPP 内部のワーキンググループは、①無線アクセスネットワーク (Radio Access Network: RAN)、②サービス & システム (Service & Systems Aspects: SA)、③コアネットワーク & ターミナル (Core Network & Terminals: CT) の大きく 3 つに分けられている。<https://www.3gpp.org/specifications-groups>

mMTC では、NB-IoT や eMTC など踏まえた IoT を活用した在庫管理やウェアラブル機器の利用について議論が行われ、重要コミュニケーションの中では産業自動化やタッチインターネット (Tactile Internet)¹⁸などに焦点が当てられた¹⁹。

図表 5 リリース 15 に向けて SA1 内部で議論されていたトピック



出典：ATIS²⁰

リリース 16 に関する議論

2020 年 6 月を目途に策定が進められているリリース 16 では、リリース 15 を土台に、更なる通信容量の拡張や運用効率の向上、多くの産業分野への応用についての詳細な議論が進められており、5G システムに関する仕様議論のフェーズ 2 と位置付けられている。特にリリース 15 から持ち越しとなっていた URLLC についての仕様検討のほか、衛星などの非地上ネットワークやより多くの分野やドメインの統合、産業 IoT の運用に求められる通信要件等についての議論が行われている。リリース 16 で新たに追加される予定の主な 5G に関する機能や特徴、仕様は以下のとおりである²¹。

- 産業自動化や電力系統への 5G の応用
- 新しい KPI や、非公共ネットワーク(プライベートネットワーク)の新しいアーキテクチャ
- 屋内、屋外通信の正確な位置特定に関する新しい要件、KPI、周波数利活用
- 高い信頼度を求められるサービス向けのタイムセンシティブ・ネットワーク(TSN)とサービスの質(QoS)に関する予測と監視
- 新たな分野(海上通信、オーディオ・ビジュアル業界、テレビ配信、スマートシティ、水資源・エネルギー管理など)でのユースケースの検討

¹⁸ タッチインターネットとは、2014 年 8 月に ITU-R が定義したアプリケーションの種類の一つであり、高度の利用可能性 (high availability)、信頼性 (reliability)、セキュリティを満たしつつ、レイテンシが非常に低い通信によって実現されるアプリケーションを指す。アプリケーションの具体例としては、コネクテッドカーや VR/AR、スマートグリッドなどがある。

¹⁹ https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000230001PDFE.pdf

²⁰ <https://www.3gpp.org/DynaReport/GanttChart-Level-2.htm#bm820025>

²¹ https://www.atis.org/01_news_events/webinar-pptslides/5g-slides7312019.pdf

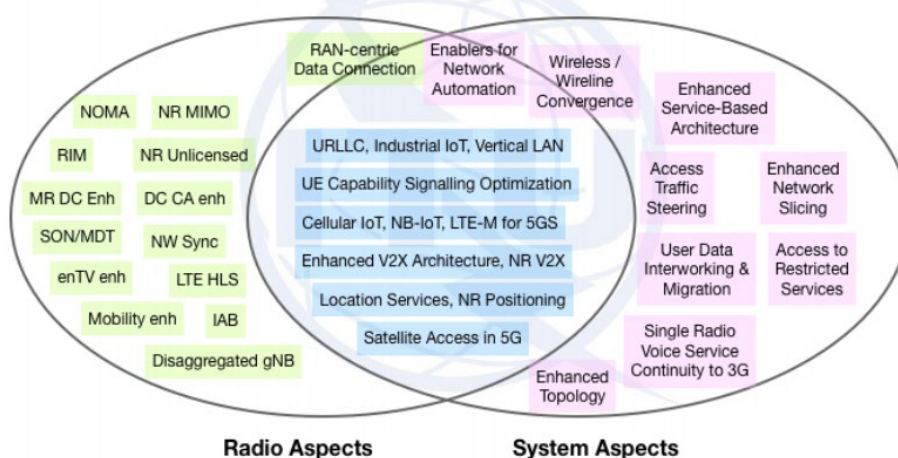
²² https://www.atis.org/01_news_events/webinar-pptslides/5g-slides7312019.pdf

²³ https://www.atis.org/01_news_events/webinar-pptslides/5g-slides7312019.pdf

- URLLC 拡張に役立つバーティカル・ドメインにおけるサイバーフィジカル管制アプリケーション
- 5G と衛星の統合(RAN と SA2 などのワーキンググループが議論を主導)
- (リリース 15 までは対応してきた免許が必要帯域のみではなく)免許不要の周波数帯域や共有帯域も対象とした NR など

以下の図は、3GPP 内部に創設設置されている無線アクセスネットワーク(Radio Access Network: RAN)ワーキンググループと、サービス&システム(Service & Systems Aspects: SA)ワーキンググループがそれぞれリリース 16 に向けて議論したトピックを整理したものである。両グループの議論が統合される分野として、URLLC、産業 IoT(IIoT)、セルラーIoT、5G と衛星の統合などが挙げられている。

図表 6 リリース 16 に関する RAN と SA の役割分担



出典：3GPP/Samsung Electronics R&D Institute²²

リリース 17 に関する議論

2021 年 9 月を目途に策定されているリリース 17 に関しては、現時点では様々な審議案件が検討されているところであるが、5G サービスの実際の提供が始まることにより、それぞれのユースケースに沿った細かい要件に関する議論が想定されている。リリース 17 に向けては、以下の様な内容の検討が想定されている²³。

- 非地上ネットワーク、無人機などへの NR の拡張
- 制限された機能のみを持つ NR 機器(NR-LIGHT)
- 医療、エネルギーなどの各産業分野、ユースケースに沿った詳細な IoT 仕様、産業ワイヤレス・センサーネットワーク(Industrial Wireless Sensor Network: IWSN)
- 小データ通信の拡張
- サイドリンクの拡張

²² https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201807/Documents/3_Erik_Guttman.pdf

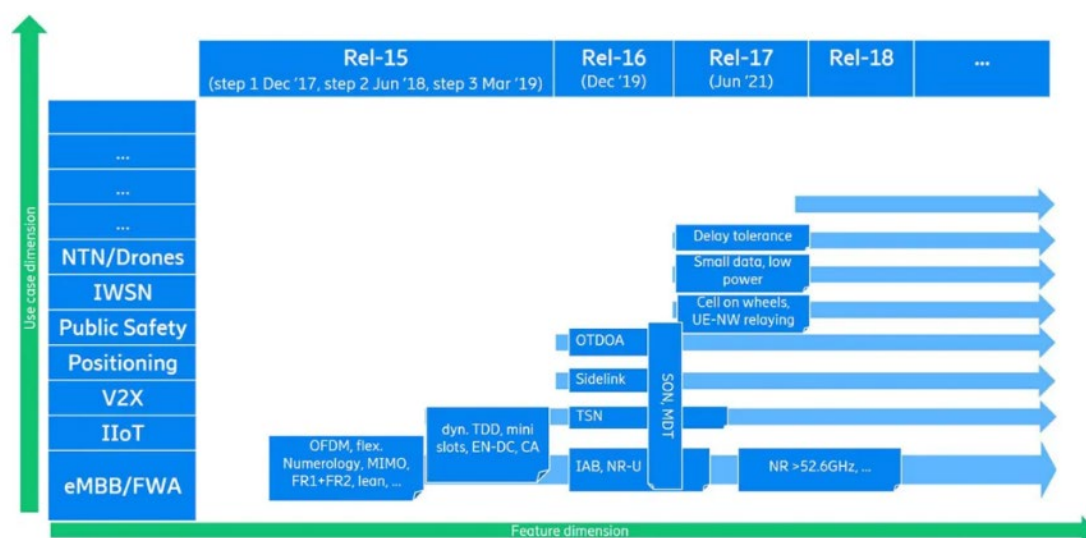
²³ https://www.atiss.org/01_news_events/webinar-pptslides/5g-slides7312019.pdf (p.20)

https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/5G_Americas_White_Paper_on_5G_IOT_FINAL_7.16.pdf

- 高周波数(52.6 GHz 以上)に関する検討
- ダイナミック周波数共用 など

また以下の図は、スマートファクトリーや IIoT などに関する業界の議論をけん引している Ericsson が示す、リリース 15 以降の 3GPP における標準化のビジョンである。ユースケースごとの進捗がわかりやすく整理されており、リリース 17 に向けて IWSN については小データの伝送や低電力通信についての議論が深まるとみられている。また IIoT には自己組織ネットワーク(Self-Organizing Network: SON)やドライブテストの最小化(Minimization of Drive Test: MDT)なども適応されるとみられている。

図表 7 Ericsson によるリリース 15 以降の標準化ビジョン



出典: Ericsson²⁴

1.2 IIoT や工場無線に関する取組と TR 策定状況

以下の表では、3GPP のリリース 16、リリース 17 に向けて設置されている、IIoT や工場無線に関連する作業プログラムの略称、ID、主導ワーキンググループ(WG)、名称、目的と概要、2020 年 3 月時点での進捗度、主な関連文書を整理する。なお、目的・概要部分に登場する TR は技術報告書(Technical Report)、TS は技術仕様(Technical Specification)を指す。

²⁴ <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/12/3gpp-rel-17>

図表 8 3GPP リリース 16 へ向けた IoT や工場無線に関するプログラム例

略称・ID・WG	名称	目的・概要	進捗度 ²⁵
FS_NR_IIOT (800098) ²⁶ RAN2	新無線(NR)産業 IoT についての研究(Study on NR Industrial Internet of Things (IoT))	IoTを活用した URLLC 実現を目指し、リリース 15 には VR/AR のユースケースを含めたが、リリース 16 ではさらに高い要件を求める工場自動化、運輸産業、電力配電のユースケースについて検討を行う。高レイア・マルチ通信 (high layer multi connectivity)、アップリンク・ダウンリンクにおける機器の優先度付けなどを検討し、正確性、スケジュール管理(トラフィックパターンの把握)などにも配慮する。	100% 関連文書 38.825
NR_IIOT-Core (830180) ²⁷ RAN2	コアパート: NR における作業 IoT の支援 (Core part: Support of NR Industrial Internet of Things (IoT))	上記の FS_NR_IIOT と同様の背景に基づく。高信頼度、低レイテンシの実現のため、リリース 16 では柔軟性と効率向上を目指して PDCP 重複拡張 (PDCP duplication enhancement) に言及する。この作業では、PDCP 重複のためのメカニズムや要件を特定する。	0%
FS_CAV (750004) ²⁸ SA1	バーティカルドメイン (CAV) における自動化のための通信についての研究 (Study on Communication for Automation in Vertical Domains)	TR 22.891、TS 22.261、TR 22.862 などの既存の仕様において、バーティカルドメインにおける 5G ユースケースや要件はいくつか特定されているが、ネットワーク監視インターフェースなどのサービスの要件やセキュリティ要件を検討する必要があるほか、ユースケース数も増やす必要がある。本件ではこれらに関する研究を行う。	100% 関連文書 22.804
FS_IIIoT_CM (810060) ²⁹ RAN1	屋内産業シナリオにおけるチャンネル・モデリングについての研究 (Study on channel modeling for indoor industrial scenarios)	既存の TR38.901 は、Urban Macro や Urban Micro、Rural Macro、屋内ホットスポットなどのシナリオにおける一般的なチャンネルモデルを示しているが、産業関連のシナリオを含んでいない。このため、本研究では、URLLC/IIoT 拡張のための産業シナリオとユースケースを検討する。対象周波数は 100GHz までとし、特に 52.6GHz 以下に焦点を当てる。	100% 関連文書 38.825 38.901
FS_CIoT_5G (770038) ³⁰ SA2	5G システムのためのセルラー IoT 支援と革新についての研究 (Study on 5G_CIoT)	SA1 によって TS22.261 に定義された 5G サービス向けの IoT 要件を、5G コアネットワークも満たす必要があり、これは TR 38.913 とともに連動させる必要がある。この研究の中で、①CIoT/MTC (Machine Type Communication) の 5G における機能の特定、②eMTC/NB-IoT の 5G への統合、③5G サービス要件検討のためのシステム拡張 (IoT 機器のリモート・プロビジョニング登録の検討など)を目指す。	100% 関連文書 23.724

²⁵ 2020 年 3 月時点。 <https://www.3gpp.org/DynaReport/GanttChart-Level-2.htm#bm820025>²⁶ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--800098.htm>²⁷ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--830180.htm>²⁸ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--750004.htm>²⁹ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--810060.htm>³⁰ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--770038.htm>

略称・ID・WG	名称	目的・概要	進捗度 ²⁵
FS_CIoT_sec_5G (800033) ³¹ SA3	5G システムのためのセルラ ーIoT セキュリティの進化に 関する研究 (Study on evolution of Cellular IoT security for the 5G System)	上記の FS_CIoT_5G の研究結果なども 基にして、5G システムにおける EPS (Evolved Packet System) を活用した CIoT/MTC の運用に際するセキュリティに ついて研究を行う。具体的には、小デー タの伝送におけるセキュリティ、ユーザブ レーンの 5G NAS (Non-Access Stratum) 上の移動、5G コアネットワークにおけ るユーザプレーンに対するセキュリティ施 策などについて検討を行う。	95% 関連文書 33.861
FS_MBMS_IoT (760040) ³² SA4	IoT のための MBMS ユーザ ーサービスについての研究 (Study on MBMS User Services for IoT)	TS 26.346 は、eMBMS (evolved Multimedia Broadcast Multicast Service) に関するプロトコルやコードをま とめているが、既存の MBMS ユーザサ ービスは、比較的高いコンピューティング 能力を持つ機器を想定しており、IoT に は適さない。このため、IoT の処理能力 やデータ保存能力、バッテリーなどに沿 ったものを新たに検討する。	100% 関連文書 26.8xx
FS_5GMSG (770004) ³³ SA1	MIoT のための 5G メッセ ージサービスについての研究 (Study on 5G message service for MIoT)	現在、いくつかの IoT アプリは、SMS を活用してメッセージの送信を行っている が、通信の容量やレイテンシの面で問題 があるため、MIoT 実装に向け、より適 切なメッセージサービスを検討する必要 がある。サービスには軽い動作や低いレ イテンシ、グループメッセージ機能を備 えていることなどが求められるため、そ れぞれのシナリオに関する研究を実施 する。	100% 関連文書 22.824
MSGin5G (810014) ³⁴ SA1	5G システム要件に沿ったメ ッセージサービス (Message Service Within the 5G System requirements)	TR 22.824 において、MIoT 向けのメ ッセージサービスの潜在的な要件を特定 したが、従来からある SMS や MMS、 新型の RMS は人対人のコミュニケーション 用に設計されており、MIoT には適さ ないほか、要件を満たさない。このた め、MIoT 向けのメッセージサービスを 新たに検討する。	100% 関連文書 22.262; 22.261

³¹ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--800033.htm>³² <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--760040.htm>³³ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--770004.htm>³⁴ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--810014.htm>

図表 9 3GPP リリース 17 へ向けた IoT や工場無線に関するプログラム例

略称・ID・WG	名称	目的・概要	進捗度 ³⁵
FS_FFAPP (820025) ³⁶ SA6	5G ネットワークにおける未来の工場に対するアプリケーション・レイヤー・サポートについての研究 (Study on application layer support for Factories of the Future in 5G network)	IIoT や Industry4.0 の枠組みでは、柔軟性向上、用途拡大、リソース効率の改善、作業員支援、質の改善などが目指されており、5G はそれに対する重要なツールとなり得る。TS22.104 や TS 22.261 では、バーティカルドメインにおけるサイバー・フィジカル管制アプリの要件やユースケースを特定したが、未来の工場を実現するため、より詳細なアーキテクチャの検討が必要となる。また、伝統的な有線通信で運営されている工場を無線化するためのソリューションも検討する必要がある。	40% 関連文書 23.745
eCAV(840050) ³⁷ SA1	バーティカル・ドメインにおけるサイバーフィジカル管制アプリの拡張 (Enhancements for cyber-physical control applications in vertical domains)	リリース 16 までの作業に追加する形で、バーティカル・ドメインにおける 5G システムの適応要件の拡張を目指す。具体的には、産業イーサネットの統合、プライベートネットワーク向けの要件の特定、産業用 IoT の位置特定などに焦点を当てる。	95% 関連文書 22.104; 22.261 22.832
FS_IIoT(850012) ³⁸ SA2	産業 IoT の拡張機能に関する研究 (Study on enhanced support of Industrial IoT)	リリース 16 に関連して策定した TR 23.734 の段階では、タイムセンシティブ通信に関する要件に関して合意に達することができなかった。また現在、SA1 がオーディオ・ビジュアルサービス向けのサイバーフィジカル管制アプリについての検討を実施している。これらのことから、改めてタイムセンシティブ通信の拡張について検討を行うほか、産業イーサネットの統合 (アップリンク、タイム同期やタイムセンシティブ通信に対応した UE、ユーザープレーン機能を介した UE ルーティングなどを含む) についても検討する必要がある。また、SA1 の検討結果についても随時確認を行う。	20% 23.700-20
NB_IOTenh4_LTE_eMTC6-Core (860144) ³⁹ RAN1	コアパート: NB-IoT と LTE-MTC の追加拡張 (Core part: Additional enhancements for NB-IoT and LTE-MTC)	(2020 年 3 月時点で公開情報見当たらず)	0%
NR_IIOT_URLLC_enh-Core (860145) ⁴⁰ RAN2	コアパート: NR のための拡張された IoT と URLLC (Core part: Enhanced Industrial Internet of Things (IoT) and ultra-reliable and low latency communication (URLLC) support for NR)	(2020 年 3 月時点で詳細情報見当たらず)	0%

³⁵ 2020 年 3 月時点。 <https://www.3gpp.org/DynaReport/GanttChart-Level-2.htm#bm820025>³⁶ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--820025.htm>³⁷ <https://www.3gpp.org/DynaReport/GanttChart-Level-2.htm#bm820025>³⁸ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--850012.htm>³⁹ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--860144.htm>⁴⁰ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--860145.htm>

略称・ID・WG	名称	目的・概要	進捗度 ³⁵
FS_LTE_NBIOT_eMTC_NTN (860033) ⁴¹	非地上ネットワーク(NTN)用の NB-IoT/eMTC に関する研究 (Study on NB-IoT/eMTC support for Non-Terrestrial Networks NTN)	(2020 年 3 月時点で詳細情報見当たらず)	0%

ここでは、これらのプログラムの中で策定・編集されている TR・TS 文書の中から、今回の調査対象となっているものや、特に重要とみられるもの、すでにある程度議論が進んでいるものを選出し、それらの概要をまとめる。なお、それぞれの文書については、2020 年 3 月時点で公開されているバージョンを参照している。

1.2.1 TR 38.825(バージョン 16.0.0)

リリース 16 に向けて作成されたこの TR「新無線(NR)産業 IoT についての研究」⁴²は、RAN2 によって取りまとめが主導されており、URLLC と産業 IoT 向けに NR を拡張することに焦点を当てている。本文書の結論部分でまとめられている内容の一例は、以下のとおりである⁴³。

- PDCCP 複製拡張…通信の信頼度を高めるため、最大で 4 コピーまでの PDCCP 複製拡張を行うことが望ましい。またこの複製プロセスにおいてリソース効率を高めるためのソリューションとして、この研究では、パケットごとの取捨選択複製(per packet selective duplication)や選択的廃棄メカニズム(selective discard mechanism)、PDCCP 複製のアクティベーションと無効化などが検討された。
- RAN への高レイヤ多元接続の影響…本研究を通じて、高レイヤ多元接続ソリューションについて分析を行い、RAN への影響も検討したが、SA2 や RAN2、RAN3 の作業状況によって、今後仕様の検討も必要となる可能性がある。
- ユーザー機器(UE)間の優先度付けと多重化(multiplexing)…UE 間の優先度付けと多重化に関し、5 つのシナリオを検討したが、通信トラフィックの種類や優先事項によって UE 間の優先度付けや多重化は可能という結論に至った。ただしシナリオによっては、起動している設定グラント(configured grant)が複数ある場合には、グラント間の対立が発生することも確認され、対策が求められている。
- 正確な基準時間規定(reference time provisioning)…5G/NR システムを活用して正確な時間同期を実現するには、NR 基地局(gNB)から UE へ正確な基準時間を伝送することが推奨される。この伝送には、直接放送および／またはユニキャスト RRC 信号通信(unicast RRC signalling)を用いることが検討できる。信号通信については、リリース 15 で特定された E-

⁴¹ <https://www.3gpp.org/DynaReport/WID-history--860033.htm>

⁴² <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3492>

⁴³ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3492>

UTRA(Evolved Universal Mobile Telecommunications System)向けの要件が基準として利用できるが、時間情報は 50 ナノ秒(50 ns)以下の精度を達成する必要がある。

1.2.2 TR 22.804(バージョン 16.2.0)

元々はリリース 15 向けに作成された本 TR「バーティカルドメイン(CAV)における自動化のための通信についての研究」⁴⁴に対しては、SA1 グループの主導で、リリース 16 に向けて各バーティカルドメインにおける新しいユースケースに関する議論が行われた。具体的には以下の様なユースケースが追加されている。

- 鉄道大量輸送
- ビル自動化
- 未来の工場
- スマートリビング(ヘルスケア)
- スマートシティ
- 電力分配
- 中央発電(central power generation)
- プログラム・メイキングと特殊イベント(PMSE)
- スマート農業

未来の工場に関しては、①工場自動化、②プロセス自動化、③ヒューマン・マシン・インターフェースと製造 IT、④ロジスティクスと倉庫、⑤監視とメンテナンスの 5 種類のアプリケーションに分けて議論を行っている。以下の表は、これらのアプリケーションのそれぞれが、どのような技術・ユースケースと関連しているかを示したものである。

図表 10 未来の工場のアプリケーションと各技術・ユースケースとの対応

	Motion control	Control-to-control	Mobile control panels with safety	Mobile robots	Massive wireless sensor networks	Remote access and maintenance	Augmented reality	Closed-loop process control	Process monitoring	Plant asset management
Factory automation	X	X		X	X					
Process automation				X	X			X	X	X
HMI and Production IT			X				X			
Logistics and warehousing		X		X						
Monitoring and maintenance					X	X				

出典: 3GPP⁴⁵

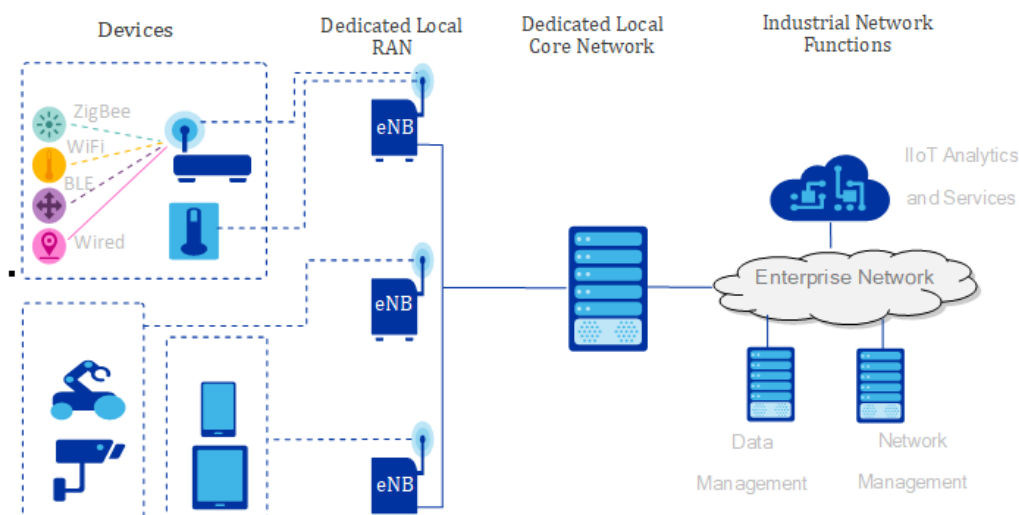
この TR では、計 20 の技術・ユースケースに関し、それぞれの概要、前提条件、サービスフロー、事後条件、課題、潜在要件がまとめられている。多数のセンサーや機器、機械、ロボット、アクチュエータ、ターミナルが存在する工場フロアにおける通信(Connectivity for the factory floor)に関しては、以下の様なプライベートネットワーク・アーキテクチャを提示しており、5G 導入の課題として、既存の LAN(特に

⁴⁴ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3187>

⁴⁵ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3187>

リアルタイム・イーサネット)と5Gの統合、産業要件に見合うローカル・ネットワーク用のKPIの設定、ローカルネットワークをセキュアに守るためのファイアウォールの設置などが挙げられている⁴⁶。

図表 11 産業自動化のためのローカル・タイプb ネットワークを活用した未来の工場



出典：3GPP⁴⁷

1.2.3 TR 23.745(バージョン 0.7.0)

リリース 16 に向けて策定されたこの TR「5G ネットワークにおける未来の工場に対するアプリケーション・レイヤー・サポートについての研究」⁴⁸は、主に SA6 グループが策定を主導している。バージョン 0.7.0 はまだ作業中の草稿で、進捗度は 2020 年 3 月時点で 40%程度となっており、今後更なる追記・編集が想定されているが、同バージョンでは TS22.104 と TS22.261 を基に、以下の様な 12 の主要課題(key issues)と 6 つのソリューションについて議論を行っている。

- 主要課題 1 未来の工場アプリ(FFAPP: Factories of the Future Application)のためのネットワークスライシングの利用
- 主要課題 2 地理的位置とポジショニング情報支援
- 主要課題 3 時計シンクロナイズーション
- 主要課題 4 タイムセンシティブ・サポート
- 主要課題 5 QoS モニタリング
- 主要課題 6 5GLAN グループ管理
- 主要課題 7 機器オンボーディング(device onboarding)
- 主要課題 8 5G システムにおける FFAPP の通信要件

⁴⁶ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3187>

⁴⁷ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3187>

⁴⁸ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3586>

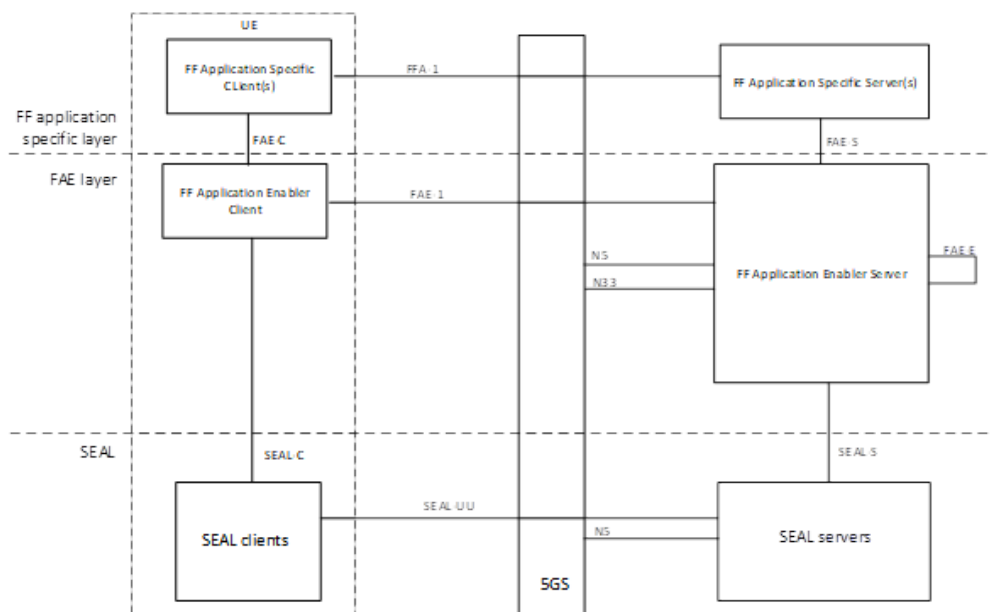
- 主要課題 9 エッジ配置と通信サービス
- 主要課題 10 既存のオペレーション技術との統合
- 主要課題 11 QoS 調整
- 主要課題 12 ユーザー認可

これらの課題の解消のために、同 TR では以下の 6 つの解決策を提示している。

- 解決策 1 未来の工場(FF)アプリケーションレイヤー機能モデル
- 解決策 2 FF アプリケーション向けサーバー要件を満たす通信の確立
- 解決策 3 FF アプリケーションレイヤーにおける UE-to-UE 直接通信の支援
- 解決策 4 FF における機器オンボーディングの支援
- 解決策 5 FFAPP 内部におけるエッジ配備
- 解決策 6 エッジデータ・ネットワーク・コンフィギュレーションにおける FFAPP の規定

例えば解決策 1 については、同 TR では以下の様なアーキテクチャが提示されている。

図表 12 FF アプリケーションレイヤー機能モデル



出典：3GPP⁴⁹

⁴⁹ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3586>

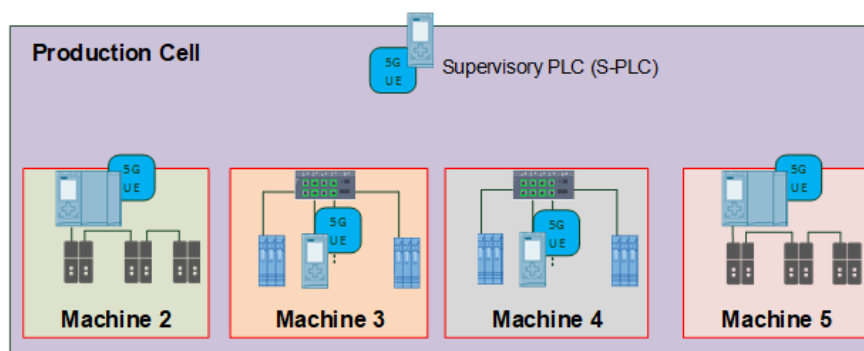
1.2.4 TS 22.104(バージョン 17.2.0)

元々リリース 16 向けに策定された本 TS「バーティカル・ドメインにおけるサイバーフィジカル管制アプリのサービス要件」⁵⁰に対しては、SA1 を中心としたグループによって、リリース 17 に向けた追記・編集が行われている。リリース 17 に向けた議論では、以下の様な議論が行われている。

- 5G サービスに求められるポジショニング要件(リリース 16 への追記)
- 5G サービスに求められるネットワークパフォーマンスに関する要件
- 産業ワイヤレスセンサーに求められるパフォーマンス要件
- スマート製造・第 4 産業革命(Industry 4.0)を想定した有線からワイヤレス通信への置換に求められる要件
- 産業用イーサネット統合のための 5G サービス要件(時計同期、タイムセンシティブ通信) など

スマート製造・Industry 4.0 を想定した有線通信からワイヤレス通信への置換に関しては、最終的にワイヤレス通信に切り替わる中で、以下の様なアーキテクチャが想定されている。それぞれの機械(Machine 2~5)とプログラマブル・ロジック・コントローラ(PLC)に設置された 5G 対応 UE を基に、周期的・非周期的な通信が行われるというシナリオが設定されている。通信が行われる部屋の想定は 100 メートル×30 メートル×10 メートルとなっており、通信速度や周期的・非周期的通信の割合ごとに複数のシナリオが検討され、それぞれの要件案が提示されている⁵¹。

図表 13 ワイヤレス通信による 4 種類の機械の協働概念図



出典：3GPP⁵²

1.2.5 TR 22.832(バージョン 17.1.0)

リリース 17 に向けた作業の中で策定されている本 TR「バーティカル・ドメインにおけるサイバーフィジカル管制アプリの拡張に関する研究」⁵³は、SA1 が策定を主導している。産業自動化に必要な通信要件の拡張が主眼となっており、TS 22.104 や TS22.261 で特定された KPI が統合されつつ、以下の様な

⁵⁰ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3528>

⁵¹ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3528>

⁵² <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3528>

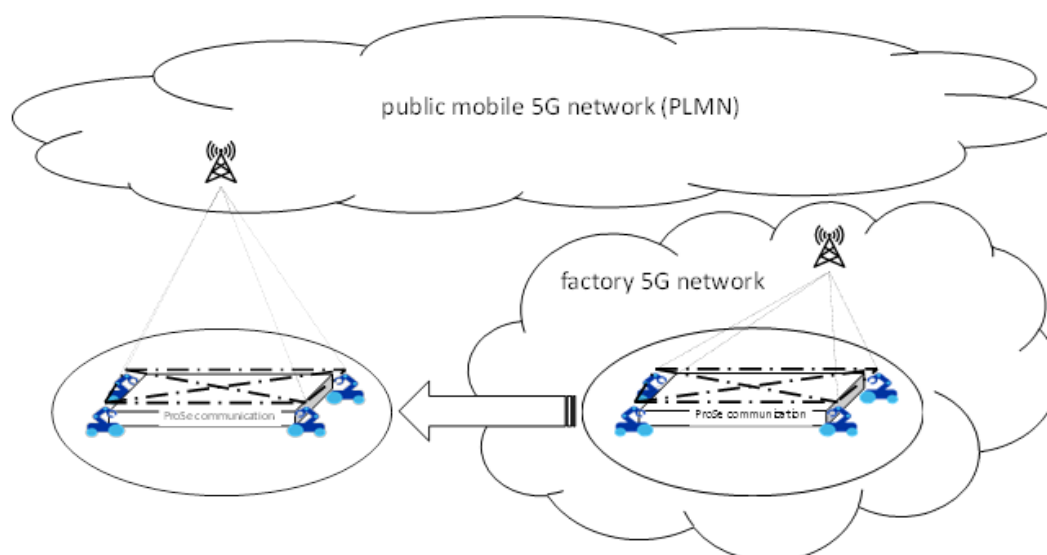
⁵³ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3629>

合計 20 ユースケースについての概要、前提条件、サービスフロー、事後条件、潜在要件などが議論されている。

- TSN ネットワークと 5G ネットワークの統合(時間同期)
- gNB における複数のクロックドメインの運用
- 稼働中のクロックドメインの統合
- サイバーフィジカル管制(CAV)アプリケーションのための通信監視
- アプリケーション支援を活用したネットワークのエネルギー効率とリソース最適化
- 製造ラインのためのモバイルオペレーション・パネル
- CAV アプリケーションのための近接距離における D2D 通信
- 複数のロボットもしくは AGV を利用した物資の協働搬送
- ロボット自動化のための多元接続ユースケース など

複数の車輪付きロボットもしくは AGV を利用した物資の協働搬送に関しては、工場内部から屋外までのような比較的長い距離を移動する場合、工場内部の 5G ネットワーク(非公共ネットワーク)にあるアンテナと、公共無線 5G ネットワーク(PLMN)にあるアンテナの両方を活用する必要があるとして、以下の様なアーキテクチャが想定されている。重い物資を複数のロボット/AGV が運搬する場合、各ロボット/AGV それぞれが 5G 通信に対応した UE を内蔵し、お互いにステータス情報やコントロール・コマンドなどを直接通信(ProSe Communication)する必要がある。このため、非常に高い通信信頼度(99,9999 %)や低レイテンシ(< 0.5* Transfer interval)を維持しつつ、2.5 Mbps 程度の通信を確保する必要があるという⁵⁴。

図表 14 ロボット/AGV の協働搬送に必要な通信アーキテクチャ(PLMN も活用する場合)



出典: 3GPP⁵⁵

⁵⁴ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3629>

⁵⁵ <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3629>

2 5G 通信を活用したスマートファクトリーの実現

5G ワイヤレス通信、自動化技術、AI などの新技術の台頭により、製造業における Industry 4.0 の到来は必至となっている。AI、データアナリティクス、高度ロボティクスなどを統合して運用される予定のスマートファクトリー（smart factory もしくは未来の工場〔Factories of the Future〕）では、工場内の生産ラインの効率化だけでなく、複数のプラントにまたがる生産プロセスのリアルタイム管理や最適化も達成可能とみられている。5G 無線通信が 2030 年までの製造業にもたらす経済効果は、GDP にして 4,000 億ドルから 6,500 億ドルにも及ぶという分析もある⁵⁶。

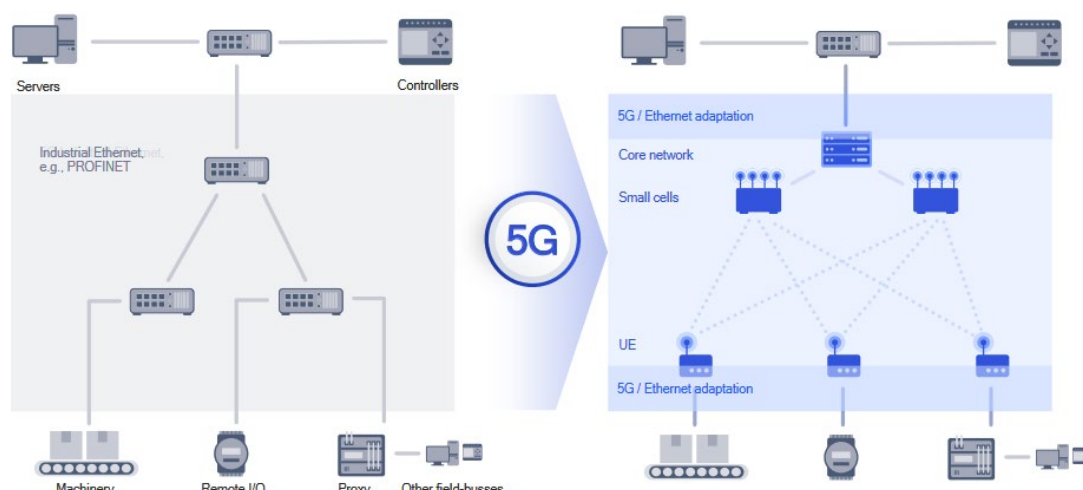
今日の工場の多くは、比較的安価ではあるものの、運用デメリットのある有線ネットワークや産業用 Wi-Fi ネットワークに依存している。有線ネットワークは管理が複雑で、特に大規模製造環境では管理費用も高騰し易いという欠点がある。一方 Wi-Fi は、特に密集環境で干渉を受けやすいという問題を抱えている。製造現場へ 5G ワイヤレス通信を導入することにより、信頼性の高い通信手段が確立され、工作機械や製造ロボットの無線制御などが可能になると期待されている。産業用モバイルアプリケーションに加え、工場面積が広い場合や広範囲に及ぶ製造アセットの移動を含む場合など、有線ネットワークによる通信が困難な場合にも、高帯域 5G の導入は有益である⁵⁷。

以下の図は、米 Qualcomm が提示する 5G 導入で想定される工場内部の通信アーキテクチャの変化を示したものであり、コアネットワーク側と機器・端末側の両方において、5G とイーサネットの融合が起こり、またこれまでイーサネットが対応していた通信をスモールセルによる高速・大容量通信が代替する様子が示されている。

⁵⁶https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

⁵⁷https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

図表 15 5G 導入で想定される通信アーキテクチャの変化 (Qualcomm)

出典: Qualcomm⁵⁸

また、産業分野における 5G 導入にあたっては、各企業が通信事業者に頼らず、特定の建物や敷地内など限られた範囲で利用可能な独自の 5G ネットワークを構築するローカル 5G もしくはプライベート 5G (Local 5G、Private 5G) の活用にも期待が寄せられている。ローカル 5G では、データが公共ネットワークを介さずに処理されるため、生産関連データをセキュアに保つことができ、独自のアプリケーションを開発するための柔軟性や信頼性確保が可能となる⁵⁹。

自動車メーカーの中には、すでにローカル 5G ネットワークを活用して生産システム間でデータをリンクし、組立ライン上の製品の動きを追跡している企業もある。また、一部の国の規制当局は、大手メーカーにローカル 5G ネットワーク向けの周波数を個別に割り当て、運用を後押ししている。帯域の割り当てが開始されれば、大手メーカーの多くは速やかにローカル 5G ネットワークの導入に乗り出すとされているが、その一方で中小企業がそれに追随するには、さらに 3、4 年がかかると見込まれている⁶⁰。

2.1 スマートファクトリーを可能にする 5G ユースケース

センサーを活用した工程監視やメンテナンス、エッジでのデータ分析を活用したロボット制御、AR/VR やビデオ監視を活用した安全性やセキュリティ確保に至るまで、5G 通信がスマートファクトリーの実現を支えることのできる領域は多数存在する。Ericsson が製造企業の経営層に対して実施したアンケート調査によれば、工場における 5G 通信の活用特に期待を寄せる分野として、製造機器・機材のビデオ監視やストリーミングの拡大 (78%)、より高性能な機械間通信 (72%)、リモートからの安全性とセキュリティ確保 (68%) が挙げられた⁶¹。また以下の図は Ericsson が発表しているものであり、10 つの主要産

⁵⁸ <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/how-5g-will-transform-industrial-iiot.pdf>

⁵⁹ https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

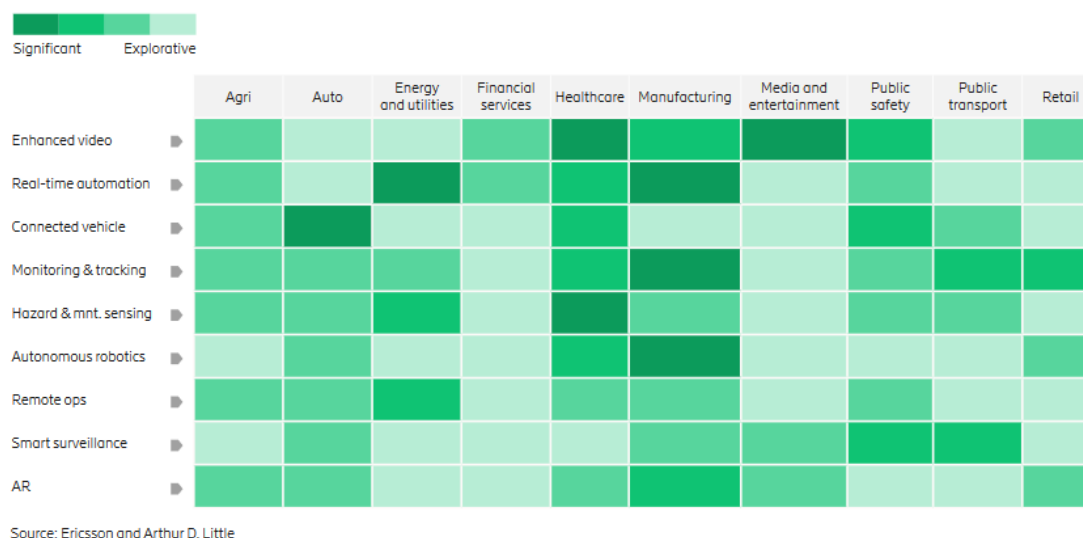
⁶⁰ https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

⁶¹ https://wearepragma.co.uk/wp-content/uploads/2016/09/5g_industry_survey_report_final.pdf

業が求める 5G ソリューションとその重要度を示している。製造業 (Manufacturing) に関しては、特にリアルタイム自動化、監視・追跡、自動ロボティクスが重要とされている。

図表 16 各産業に求められる 5G ソリューションと重要度 (Ericsson)

Figure 7: 5G-enabled industry digitalization addressable opportunity (telco global service creator role)



出典: Ericsson⁶²

ここでは、スマートファクトリーを実現するための 5G 通信のユースケースとその概要、それぞれのユースケースで生み出されることが想定されている経済効果などをまとめる。

2.1.1 大規模 IIoT によるリアルタイム且つ包括的な工程管理

既存の大規模工場の中にも、膨大な数の IoT 機器が導入されている工場は存在する。シームレスな多数端末接続を実現する mMTC 通信によって、これらすべての機器を単一の大規模 IIoT ネットワークに接続することができるになれば、サプライチェーンに関するより細かい分析を行うことが可能となるほか、厳しい生産・管理要件を満たすことも可能になる。例えば、物流チェーン内での盗難防止、品質の監視だけでなく、工場における予測メンテナンスの実施や運用効率改善も可能となる⁶³。

既存の工場に大規模 IIoT を導入するには、既存の機器・機材にセンサーを取り付けたり、センサーとの通信を確保するなどの措置を施す必要があるが、これらの措置を施せば、センサーから集められるデータを活用して、工場の運用効率を上げる様々な分析を実施することが可能である。このような方式での IIoT の導入は、同じ機器を長年に亘って保有・使用し、広範な生産フロアにまたがる複雑で高価な有線ネットワークを構築している製造・加工業界においては特に重要となると考えられている。リアルタイム

⁶² https://www.ericsson.com/en/5g/forms/5gforbusiness-2019-report?utm_source=twitter&utm_medium=social_paid&utm_campaign=5g-business_Global_BA+Networks_20171025 (報告書ダウンロードには情報入力が必要あり)

⁶³ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

の生産プロセス管理の実現により、欠陥、やり直し、故障などの大幅な削減が可能になることから、推定経済効果は約 1,300 億から 2,000 億ドルに上るとされている⁶⁴。

IIoT ワイヤレスネットワークにおいては、異なる要件を持つ多様な産業用コンポーネントが 5G を介して互いに通信し合う。多様なコンポーネントの要件をそれぞれに満たす必要があるため、産業用無線ネットワーク(IWN)統合には課題も多い。IIoT ワイヤレスネットワークにおけるリソース不足の問題への対処策として、干渉認識に基づくリソース割り当て、キャッシュを利用したリソース割り当て、デッドロック防止によるリソース確保などが提案されている。また、ネットワークのオーバーヘッドを削減し、レイテンシを低減し、信頼性を向上させることができるという点で、ソフトウェア・デファインド・ネットワーク (Software Defined Network: SDN) やネットワーク機能の仮想化 (Network Function Virtualization: NFV) の概念は、IIoT における有望技術と考えられている⁶⁵。

2.1.2 ロボティクスや 3D 技術を活用したピッキング

スマートファクトリー向けのワイヤレスロボットを運用するにあたり、5G ネットワークは超高速・超低遅延で信頼性の高い通信を提供する。また 5G 導入により、計算処理をエッジサーバーにオフロードすることが可能になる⁶⁶。5G 環境下で実現が見込まれるロボットの一例として、3D ビンピッキングロボットが挙げられる。現在、多くの工場では、固定された場所から部品を取り出す場合にのみ産業用ロボットが活用されているが、5G 通信の実現により、ロボットが高度な 3D ビジョンシステムを使用し、場所に関係なくバラ積みされた部品を見つけだし、ピッキングすることが可能になる。例えばベルギーのロボットソフトウェア開発企業の Pickit⁶⁷は、コンピュータービジョンで部品を見つけることができる HD カメラを搭載したロボットの製作を行っている。5G 環境下では、クラウドまたはエッジサーバーでのデータ分析が可能になるため、ロボット自体の処理能力は最小限に抑えることができる。3D ビンピッキングの実現による生産性の向上は、300 億から 500 億ドルの経済効果を生み出すと推定されている⁶⁸。

スマートファクトリーにおける自動ロボットの稼働を可能にするためには、厳しい URLLC 要件を満たすことが必須となる。2017 年に開催されたコンピュータサイエンスとインテリジェント制御についての国際シンポジウム (International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls: ISCSIC) で発表された論文⁶⁹では、5G ネットワークの URLLC 機能を活用し、時間がかかる計算処理をロボットからクラウドへとオフロードすることにより、ロボットにかかる負荷を減らすスキームが提案された。

⁶⁴https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

⁶⁵<https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁶⁶<https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁶⁷<https://www.pickit3d.com/>

⁶⁸https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

⁶⁹<https://ieeexplore.ieee.org/document/8294162>

2.1.3 VR/AR を活用した訓練、メンテナンス、データ視覚化

VR/AR は、訓練、機械設計及びメンテナンス、データ視覚化など、製造過程の中で幅広く活用されている。5G ネットワークは、これを可能にするデータ通信量やレイテンシの要件を満たすだけでなく、VR/AR 機器の無線化により、工場のどこでも作業ができるようになる⁷⁰。

VR/AR と 5G の統合により、AR 技術によって各作業員に求められる作業を段階ごとに視覚的にガイドするような訓練方法も実現するとみられている。これにより、現場の作業員が、専門エンジニアの到着を待たずに高度なタスクを実行できるようになり、機械のダウンタイム削減につながる。つまり、質の高い知識や作業指示を必要ときに正確に作業員と共有することが可能になり、スキル訓練をかつてないほど迅速、安全、かつ効果的に行うことが可能になる⁷¹。また、作業員による品質検査を AR 機器によって補佐することも想定されている。AR 技術を生産、ロジスティクス、および研究開発に適用することで、約 450 億から 750 億ドルの経済効果が見込まれるという⁷²。

2.1.4 無人搬送車(Automated guided vehicles: AGV)を活用した物資の搬送

現在、多くの工場では、主として固定経路で動作する搬送車、もしくはルート最適化のための基本的な機能のみを備えた搬送車に依存している。5G 通信によってクラウドやエッジサーバー上での高度なデータ分析が実現すれば、多数の次世代 AGV を工場内に展開することが可能になる。これらの車両は、ネットワーク上の他の機械や AGV から受け取るリアルタイムデータに基づいて、ナビゲーションや他機器・車両との調整についての複雑な決定を行うことができる。5G 導入による通信環境の改善と AGV の展開により、物流の生産性が向上し、1,300 億ドルから 2,000 億ドルの経済効果が生まれると推定されている⁷³。

2.1.5 カメラによる作業フロアの監視

5G は、リアルタイムでのクラウドへのデータストリーミングとライブビデオ分析を可能とする。これにより、例えば工場内のセキュリティカメラが障害を検知し、差し迫った脅威・危険の有無を分析・判断し、無人機を派遣したり、状況を確認するよう作業員に警告したりすることが可能になる。同じカメラを活用して、サイクルタイムの測定やプロセスからの逸脱の監視のためのより効率的なメカニズムを運用することができるようになる⁷⁴。

⁷⁰ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁷¹ <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/operations-blog/five-ways-that-5g-will-revolutionize-manufacturing>

⁷² https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

⁷³ https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

⁷⁴ <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/operations-blog/five-ways-that-5g-will-revolutionize-manufacturing>

2.2 各ユースケースに求められる 5G 通信要件

以下の表では、関連する業界団体が提示している、各ユースケース向けの通信要件を整理する⁷⁵。

⁷⁵ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

図表 17 スマートファクトリーの各ユースケースに求められる 5G 要件のまとめ(各組織案)

出典	ユースケース	レイテンシ (ms)	信頼性	利用可能性 (availability)	機器密度	トラフィック密度	通信速度	可動性 (Mobility)
3GPP TR 22.804 (v16.2.0)	製造セル	5	10 ⁻⁹	> 99.9999%	0.33-3/m ²	N/S	N/S	<30 km/h
	工作機械	0.5	10 ⁻⁹	> 99.9999%	0.33-3/m ²	N/S	N/S	<30 km/h
	印刷機	2	10 ⁻⁹	> 99.9999%	0.33-3/m ²	N/S	N/S	<30 km/h
	包装機	1	10 ⁻⁹	> 99.9999%	0.33-3/m ²	N/S	N/S	<30 km/h
3GPP TS22.261 (v16.6.0)	プロセス自動化- 監視	50	10 ⁻³	99.9%	10000/plant	10Gbps/km ²	1 Mbps	<5 km/h
	プロセス自動化- 遠隔操作	50	10 ⁻⁵	99.999%	1000/km ²	100Gbps/km ²	<100 Mbps	<5 km/h
5G-ACIA/ ZVEI	協調運動制御 (Cooperative motion control)	1	10 ⁻⁹	> 99.9999%	0.33-3/m ²	N/S	N/S	<30 km/h
	ビデオ式遠隔操作	10-100	10 ⁻⁹	> 99.9999%	0.33-3/m ²	N/S	N/S	<30 km/h
	組み立てロボット・フライス盤	4-8	10 ⁻⁹	> 99.9999%	0.33-3/m ²	N/S	N/S	<30 km/h
	移動式クレーン	12	10 ⁻⁹	> 99.9999%	0.33-3/m ²	N/S	N/S	<30 km/h
ATIS	温度、圧力、振動 超音波センサー(eMTC)	ベストエフォ ート	(情報なし)	ベストエフォート	≥10,000 /km ²	(情報なし)	<100 Kbps	固定
	各種製造機械埋め込みセンサ ー(URLLM 主導、一部 eMBB)	<10 ms	(情報なし)	95-99.999%	≥10,000 /km ²	(情報なし)	10-50 Mbps	固定
	各種製造機械埋め込みセンサ ー(eMBB)	ベストエフォ ート	(情報なし)	ベストエフォート	≥10,000 /km ²	(情報なし)	10-50 Mbps	固定
	製品または包装材埋め込みセ ンサー(eMTC)	ベストエフォ ート	(情報なし)	ベストエフォート	≥10,000 /km ²	(情報なし)	<10 Mbps	>0-10 km/h
Qualcomm	センサー(プロセス監視)	~100	(情報なし)	99.99%	(情報なし)	(情報なし)	kbps	(情報なし)
	産業用ロボット(URLLM)	<1	(情報なし)	99.9999%	(情報なし)	(情報なし)	Mbps-kbps	(情報なし)
	ハンディ端末(安全確保用)	<10	(情報なし)	99.9999%	(情報なし)	(情報なし)	Mbps-kbps	(情報なし)
	ヘッドマウントディスプレイ(AR 用)	<10	(情報なし)	99.9%	(情報なし)	(情報なし)	Gbps-Mbps	(情報なし)

出典: IEEE⁷⁶、ATIS⁷⁷、Qualcomm⁷⁸を基に作成⁷⁶ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>⁷⁷ https://access.atis.org/apps/group_public/download.php/51129/ATIS-I-0000075.pdf⁷⁸ <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/how-5g-will-transform-industrial-iiot.pdf>

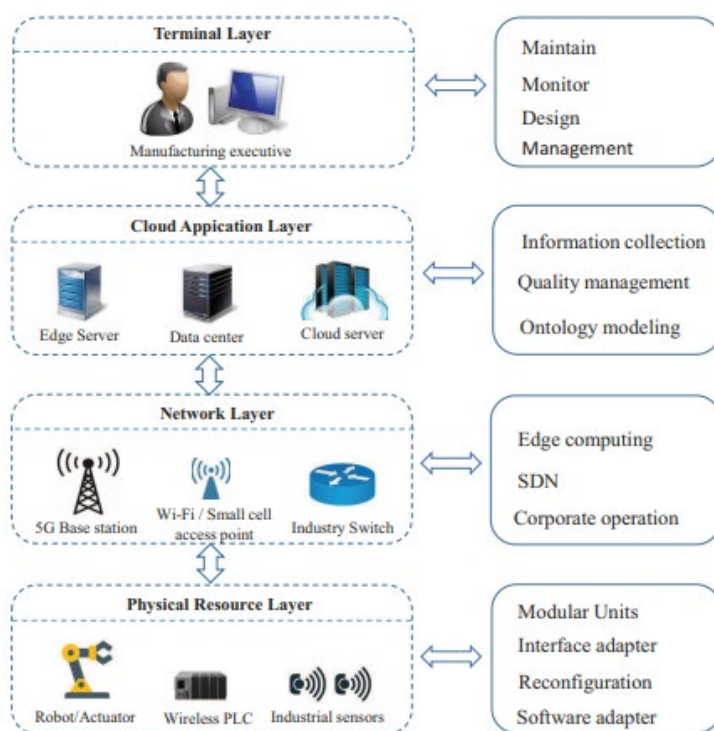
2.3 スマートファクトリーを可能にする技術・アーキテクチャ

ここでは、近年業界で注目されているスマートファクトリーを可能にする技術やアーキテクチャについてまとめる。これらの技術やアーキテクチャについては、様々な組織で研究開発が行われており、3GPPなどの標準化団体の議論にも徐々に統合が行われていくとみられる。

2.3.1 クラウド、エッジコンピューティング

スマートファクトリーに関連する工作機械、スマートセンサー及びロボットプラットフォームは、生産ラインの監視・保守・管理を支える膨大な量のデータを生成する。5G 技術は大量のデータをリアルタイムで処理することを可能にするため、生産性向上のためにスマートファクトリーをエミュレートすることができる効率的なデータモデルが必要である。最新の研究では、製造関連のビッグデータ収集・活用ためにクラウドを活用するアーキテクチャが多く提案されている。例えば米国電気電子学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE) に所属する教授らが 2017 年に発表した論文⁷⁹では、以下の図の様な物理層、ネットワーク層、データアプリケーション層、端末層の 4 層からなるスマートファクトリー用アーキテクチャが提案されている。

図表 18 スマートファクトリー向けの断層アーキテクチャ



出典: IEEE⁸⁰

⁷⁹ <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8207346>

⁸⁰ <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8207346>

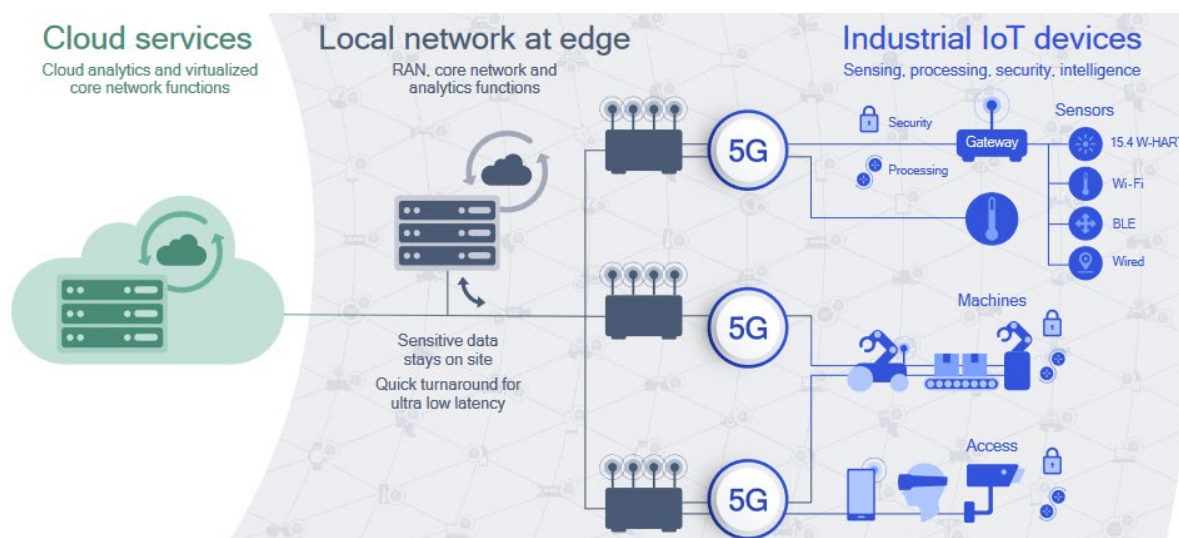
さらに、クラウドとエッジコンピューティングのハイブリッドモデルの研究も進められている。この方式では、データストレージ目的でクラウドを活用するほか、複数プロバイダの共有クラウドリソースを活用することにより、強力かつコスト効率の高いオフラインでのビッグデータ分析が可能になる。一方、エッジコンピューティングは、処理を中央から機器に近い場所に分散させることができ、スマートファクトリーの実現に必要な信頼性の高い低遅延接続、リアルタイム処理、プライバシー保護に関する要件の充足に役立つ⁸¹。

2.3.2 セキュリティ確保を目的としたローカルネットワーク

スマートファクトリーでは、製造プロセスにおけるリアルタイムの意思決定を促進するため、クラウド型データストレージとデータ分析に依存する。一方で機密性の高いデータは、クラウドではなくオンサイトのローカル（もしくはプライベート）ネットワークに保存することで、セキュリティリスクを回避することが可能となる⁸²。

スマートファクトリーに関する業界の議論をけん引している Qualcomm は、IIoT の実装に向けて、セントラルクラウド（以下の図の左の緑部分）、エッジクラウドを含むローカルネットワーク（図の中心の灰色部分）、産業 IoT 機器（図の右側の青色部分）で構成される以下の図の様なアーキテクチャを提示しており、類似のアーキテクチャは 3GPP でも議論されている。セキュリティに配慮するため、データやタスクの大部分は IoT 機器部分で処理され、センシティブなデータはローカルネットワークに留まる想定である⁸³。

図表 19 IIoT 用のワイヤレス・エッジ通信アーキテクチャ(Qualcomm)



出典：Qualcomm⁸⁴

⁸¹ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁸² <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁸³ <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/how-5g-will-transform-industrial-iiot.pdf>

⁸⁴ <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/how-5g-will-transform-industrial-iiot.pdf>

2.3.3 ソフトウェア・デファインド・ネットワーク(SDN)とネットワーク機能仮想化(NFV)

スマートファクトリーにおける 5G 活用のメリットを検証するシステムレベル評価は、様々な組織によって行われており、結果も公表されている。これらの結果によれば、工場自動化アプリケーション(factory automation applications: FAA)を 5G ネットワーク上で動作させるのに有効な技術・措置は、ネットワークスライシングと SDN である⁸⁵。SDN、NFV、ネットワークスライシングといった概念は、産業環境における FAA の実現をサポートし、全体的なレイテンシの削減を促進することが期待されている⁸⁶。

2.3.4 AI と機械学習

5G を基盤とする大規模 IIoT ネットワークにおいて AI は、センサー、ロボット、その他の接続機器からのリアルタイムのデータ収集を支援する役割を果たし得る。機械学習の進歩と、信頼性とレイテンシの面で優れた 5G 環境の組み合わせにより、AI が製造過程中の異常を予知して警告を与えたり、その対処について判断を下したりすることが可能になる⁸⁷。5G は、大量のデータをほぼリアルタイムで取り込み、処理、実行することができることから、意思決定サイクルの時間を短縮することができる⁸⁸。例として重工業分野において、機械が稼働していない時間帯の中でエネルギー価格の分析を行い、過剰エネルギーをグリッドに売るといった工夫につなげることができる⁸⁹。

また AI の導入により、品質検査の大幅な改善も期待される。5G 通信は、品質管理システム内のリアルタイム分析の性能を向上させ、複数ユニットが処理される前に偏差をすばやく発見することが可能になる。従来の機械品質検査モデルの開発は複雑で、開発に約 8 か月かかったが、それに対し AI アルゴリズムは数週間のうちにトレーニング・展開が可能である。AI による品質検査の導入により、生産性が向上し、500 億から 1,000 億ドルのコスト削減につながると推定されている⁸⁹。

2.4 スマートファクトリーの課題

スマートファクトリー分野での 5G の可能性を最大限に引き出すためには、依然としていくつかの大きな課題に取り組む必要がある⁹⁰。主なものについて以下に整理する。

2.4.1 製造業向け 5G の互換性改善

5G に関する標準化と技術ソリューションの開発にあたっては、製造業界において必要とされる特定の要件、特に業界内の業種ごとの要件の違いに注意を向ける必要がある。これまでに行われた産業分野におけるユースケースと要件を検証する取り組みとしては、3GPP による TR「バーティカルドメインにおける自動化のための通信についての研究(3GPP TR 22.804)」及び「5G における LAN サポートに関

⁸⁵ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁸⁶ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁸⁷ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁸⁸ <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/operations-blog/five-ways-that-5g-will-revolutionize-manufacturing>

⁸⁹ https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

⁹⁰ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

するフィージビリティ調査(3GPP TR 22.821)」などがある。今後は、これらの知見をもとに産業界と学術界が密に協力し、慎重な調整に基づき産業用 5G の標準化に向けた取り組みが必要となる⁹¹。

2.4.2 周波数の割り当てと活用

膨大な種類、数の IIoT 及び IWSN を含む IWN によって求められるレイテンシと信頼性に関する厳しい要件を満たすためには、新たな周波数帯(免許要・不要の帯域を含む)を利用可能にする必要がある。あらゆる産業用機器が 5G を介して通信する IIoT 環境では、高速・低遅延・高信頼の接続を可能にするミリ波の活用が最適だと考えられるが、その一方でスマートファクトリーにおいてミリ波通信を活用するためのイネープリング技術の設計には困難が多く、さらなる研究が求められる分野となっている⁹²。

適切な無線周波数の割り当ては、FAA における URLLC 要件を満たすための重要な方策の 1 つとされており、効率的な無線リソースの割り当て方式についての研究も行われている。IIoT およびサイバーフィジカルシステム(cyber-physical system: CPS)の分野に特化した無線リソースの割り当ての研究も行われており、2018 年 7 月に IEEE の研究紀要に発表された論文⁹³では、非直交多元接続(Non-orthogonal Multiple Access: NOMA)方式の無線アクセスの在り方としてインターリーブグリッド多元接続(interleave-grid multiple access: IGMA)が提案された。同方式は、セル間干渉を軽減し、高密度の IIoT シナリオでのスペクトル効率を改善できるとされている。

多数の産業用コンポーネントを接続する IWN において 5G を成功裏に活用するためには、いくつかの課題を克服する必要がある。たとえばフィンランドのタンペレ工科大学で実施されているある研究⁹⁴では、産業用コンポーネントの大きさや密度の観点から分類した軽～重工業の環境下における 28 GHz および 60 GHz の要免許および免許不要帯域におけるミリ波チャネルの特性評価が行われた。

2.4.3 安全性とセキュリティ

製造プロセスに 5G 技術を統合することにより、スマートファクトリーの多くのコンポーネントがサイバー攻撃の危険に晒される。このため、スマートファクトリーの運用にあたって、適切なサイバーセキュリティ対策の実施は極めて重要な課題である。5G ネットワークに接続されたコンポーネントに対する侵入やサイバー攻撃を自動検出する技術の研究開発が求められる⁹⁵。セキュリティ問題への対応策として、ローカル 5G ネットワークの活用が挙げられるが、この方法は高価であるため、中小製造企業にとっては導入のハードルが高いという運用上の課題がある⁹⁶。

⁹¹ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁹² <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁹³ <https://ieeexplore.ieee.org/document/8416715>

⁹⁴ <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8377337>

⁹⁵ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

⁹⁶ https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

2.4.4 エコシステム内外の連携強化

製造現場における 5G ユースケースの実装のためには、通常のサプライヤーエコシステムを超えた新たな種類のパートナーとのコラボレーションが求められる場合が多い。たとえば、AGV を使用した高度な倉庫管理には、インフラプロバイダ、テクノロジープロバイダ、車両および機器メーカーなどとの連携の上で、最終的な実装と継続的な運用のための専任チームの関与が必要となる。それに伴い、作業員向けの新しいトレーニングが必要になる場合もある⁹⁷。

2.4.5 その他導入にあたっての現場の課題

新たなテクノロジーの導入にあたっては、多くの企業が投資価値の見極めに苦労する。5G の実装に向けた推定コストに対する最終的な利益の明確な評価を行うことが困難であることは、導入を検討する製造企業にとっては大きなハードルである。多くの製造企業は、大規模で広範な製造アセットを保有しており、回収の可能性がない埋没コスト(sunk cost)を抱えていることから、機器やプロセスのアップグレードは容易ではない。また、大企業におけるデジタル化や自動化を始めとする重要な意思決定に携わる人の多さや、トップダウンの組織構造もまた 5G の採用・展開を遅らせる要因になり得る⁹⁸。

3 6G 通信についての展望

5G については、ベースラインシステムは既に導入が開始されており、将来的に産業向けのより幅広い要求条件に柔軟に対応できるよう、さらなる技術開発が進められている。同時に、5G が抱えるいくつかの課題や制限を克服し、自律型空中車両(autonomous aerial vehicles: AAV)を含む自律システムにおいて用いられる新しい拡張現実(eXtended Reality: XR)サービスをはじめとする「すべてのインターネット(Internet of Everything: IoE)」の新たなアプリケーションを可能にする第 6 世代移動通信システム(6G)技術についても議論が始まっている⁹⁹。

5G のライフサイクルは 10 年程度とみられており、6G の定義や求められる要件は今後大きく変わる可能性があるものの¹⁰⁰、現時点では 6G システムは、マイクロ秒レベルの超低遅延とテラビット級のスループットという前例のないパフォーマンス目標を満たすことで、上記のようなアプリケーションをサポートすることができると想定されている。5G の eMBB、URLLC、mMTC に加えて、eMBB、URLLC の要求条件をさらに進化させたモバイルブロードバンド高信頼低遅延通信(Mobile Broadband Reliable Low Latency Communication: MBRLLC)、多数接続高信頼低遅延通信(Massive URLLC: mURLLC)、ヒューマンセントリックサービス(Human-Centric Services: HCS)、多目的通信・計算・制

⁹⁷ https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

⁹⁸ https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/telecommunications/our%20insights/connected%20world%20an%20evolution%20in%20connectivity%20beyond%20the%205g%20revolution/mgi_connected-world_discussion-paper_february-2020.ashx

⁹⁹ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

¹⁰⁰ 有識者に対するヒアリングに基づく情報。

御・ローカリゼーションおよびセンシング(3CLS)やエネルギーサービス(MPS)などの実現が期待されている¹⁰¹。

5Gの技術基盤をさらに発展させ、AIに支えられた6G技術は、近い将来のスマート社会実現に向け複数のパーティカル領域をサポートすることが期待されている。6Gの普及によって、10億に上るIoT機器が接続されたスマートシティ、スマートファクトリーとIndustry 4.0、遠隔医療およびスマートヘルスケア、完全自立車両を含むコネクテッド自律システムなどが現実のものとなると言われている¹⁰²。

3.1 通信要件および特徴

以下の表は、5Gの通信要件と、現時点で議論されている6Gに求められるであろう通信要件および主な特徴を比較整理したものである。

図表 20 5Gと6G(案)の技術要件と特徴の比較

要件	5G	6G
通信種別	eMBB/mMTC/uRLLC	MBRLLC/mURLLC/HCS/MPS
個別データ通信速度	1 Gbps	100 Gbps
最大ダウンロード速度	20 Gbps	>1 Tbps
レイテンシ	5 ms	<1 ms
可動性(Mobility)	500 km/h	up to 1000 km/h
信頼性	最大 99.9999 %	最大 99.99999 %
周波数帯域	- sub-6GHz 帯域 - 固定アクセス用ミリ波 ≤ 28 GHz	- sub-6GHz 帯域 - モバイルアクセス用ミリ波 - sub-THz 帯域 - 無線周波以外(例: 光学、VLC、レーザー)
電力消費	定義なし	極めて低い
処理遅延	≤ 100 ns	≤ 10 ns
ネットワークアーキテクチャ	- 6GHz 帯域で高密度・超高密度 - ≤ 100-m ミリ波セル	- ミリ波周波数帯のセルフリースマートサーフェス - 無人機ベースのホットスポット、テザードバルーン - 衛星ネットワーク - 極小 THz セル
セキュリティとプライバシー	高い	非常に高い
ネットワーク指向	ユーザー中心	サービス中心
無線送電・無線充電	非対応	対応(送電は基地局)
スマートシティのコンポーネント	独立	統合
自動運転 V2X 技術	部分対応	完全対応

出典: IEEE¹⁰³

¹⁰¹ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

¹⁰² <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

¹⁰³ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

また、フィンランドのオウル大学が主催する 6G に関する研究開発プログラム「6G フラッグシップ (6G Flagship) ¹⁰⁴」では、上記に加えて次のような 6G の利点が挙げられている。

- 電池寿命を 20 年にまで延長
- エネルギー効率約 10 倍に
- 100/m³ の高機器密度を実現
- ジッター±10 ns を達成
- 10,000 倍のトラフィックを実現
- リンクバジェット+40 dB を達成

こうした 6G の特色により、電力消費を押さえ、グリーンなマテリアル、製造プロセス、商品の実現に貢献するほか、接続の質の向上によって様々な技術の使いやすさが向上し、これまで収入が芳しくなかった分野においても生産性の向上が期待できるとしている。加えて、遠隔地や既存インフラが十分でない地域においても通信が可能になるとされている ¹⁰⁵。

3.2 6G を可能にする技術

6G の要求条件を満たし、多くの革新的アプリケーションを提供するために、さまざまな有望ソリューションが提案されている。それらについて以下に概要をまとめる。

- 1) **AI によるホリスティックシステムの最適化：** 物理層の設計からリソースの割り当てに至るまで、無線通信分野での AI 活用に関連する多くの研究が行われている。AI は、完全自律型 (空中) 車両や、スマートファクトリーや医療現場で使われる自律型ロボット向けに設計される 6G システムの最適化において重要な役割を果たすものと考えられている ¹⁰⁶。
- 2) **テラヘルツ (THz) 帯域：** 6G におけるマルチメディアアプリケーションの爆発的な増加に伴うデータ通信需要の上昇に対応するため、短距離通信におけるテラヘルツ (THz) 帯域の使用が検討されている。THz 帯域においては、小さな半径のアトセル (attocell) が使用される ¹⁰⁷。
- 3) **可視光通信 (Visible light communication: VLC)、Li-Fi：** VLC とは、発光ダイオード (LED) を使用してデータをワイヤレスで送信する方式で、Li-Fi と呼ばれることもある。Li-Fi 技術は、単一のマイクロ LED から 3 Gbps を超える下り通信速度を達成できるため、特に LED 帯域幅が改善された場合には、6G の通信速度要件を満たす上で有望なソリューションになり得る ¹⁰⁸。
- 4) **セルフリーネットワーク：** シームレスなユビキタス通信およびカバレッジを実現するために、セルという概念をなくし、複数の基地局が地域でグループを形成して連携し合い、ひとまとまりのモバイル

¹⁰⁴ <https://www.oulu.fi/6gflagship/>

¹⁰⁵ https://www.sat5g-project.eu/wp-content/uploads/2020/02/2020.02.06_Sat5G-workshop-Oulu.pdf

¹⁰⁶ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

¹⁰⁷ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

¹⁰⁸ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

端末にサービスを提供するモデルが考えられる。この技術を実装する方法としては、複数の基地局が協力してひとまとまりのモバイルユーザーにサービスを提供するための SDN コントローラーの採用、セルを用いない大規模 MIMO 技術の使用、NOMA に基づく分散・協調型マルチポイント送信方式の採用などが考えられる¹⁰⁹。

- 5) 無線での送電・給電技術：6G ネットワークでは、アトセルの通信距離は 5G の場合よりもはるかに短くなる。したがって、6G 基地局から接続機器への送電・給電がより現実的になる¹¹⁰。

3.3 ユースケース

オウル大学の研究開発プログラム「6G フラッグシップ」によると、6G は通信サービスを含むあらゆるサービスのあり方に影響をもたらすフレームワークになるとされている。6G では、各ユーザー向けの演算やインテリジェンスはすべてエッジクラウドに移行する可能性があると考えられ、高精度のセンシング、イメージング、ポジショニングにモビリティが組み合わされることにより、無数の新たなアプリケーションが誕生することが想定される。なお、信頼とプライバシーの確立が、6G サービスプラットフォームを成功させるための重要な前提条件であるとされている。以下は、同プログラムが想定する様々な 6G のユースケースとアプリケーションのリストである¹¹¹。

- AR/VR エッジ演算
- AR/VR ローカル演算
- 4D イメージング、画像投影、XR 技術によるリモートテレプレゼンスおよびホログラフィック投影
- THz イメージングによる点群計測
- センチ単位以下のポジショニング
- 音響信号による位置と方向の測定
- アンビエントセンシングなどの新たなセンサー技術
- アクセスリンク：画像、モデル、音声、制御、測定
- ファイバー・ミリ波バックホール
- 拡張 URLLC (extreme URLLC)
- ヒューマン・ビルディング・インタラクション (human building interaction: HBI) および非機器中心コミュニケーション
- 触覚(ハプティック)インターネット
- スモールデータ AI (分散型ラーニング)
- 分散型ゼロエネルギー通信
- プロアクティブな意思決定および情報提供
- アイトラッキング・ハンドイメージング
- 広範なユーザー識別・認証
- RAN に依存しない (RAN agnostic) 自動調整型トランシーバー
- サイバーフィジカルセキュリティ
- ネット中立性のための新たな課金モデルの探求
- フルスペクトルフォトニック信号処理
- AI を活用するエアインターフェイス

3.4 今後の方向性と課題

6G システムの研究開発において、物理層の設計は重要な課題と考えられている。たとえば、THz 通信においては、THz 帯域における過度のパスロスを克服するために、新しいトランシーバ・アーキテクチャが必要となる。物理層設計におけるその他の課題としては、それぞれに異なる性質を持つ THz 波、ミリ

¹⁰⁹ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

¹¹⁰ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

¹¹¹ https://www.sat5g-project.eu/wp-content/uploads/2020/02/2020.02.06_Sat5G-workshop-Oulu.pdf

波、マイクロ波セルの共存の問題がある。さらに、あらゆるエア・インターフェースの主要要素である抜本的な新しい波形設計が必要となる¹¹²。

また、従来の地上移動通信システムを、衛星システムや空中の飛行機を使った「モバイル基地局」と統合するという概念も提案されている。この実現のためには、物理層のイネーブリング技術とネットワークソリューションの両分野において、さらに多くの研究が必要である。空対空無線通信については、かなりの未使用周波数帯域があるミリ波帯域、あるいは自由空間光通信(free space-optical : FSO)ソリューションのいずれかを用いることが検討されている。今後さらなる研究が必要とされる分野として、VLCシステム、インデックス変調、空間変調、全二重トランシーバが挙げられている¹¹³。

¹¹² <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>

¹¹³ <https://arxiv.org/pdf/1907.10102.pdf>