

6G Radio Technology Project “Radio Device Working Group”

Version 1.0
May 28, 2025

XG Mobile Promotion Forum



XG モバイル推進フォーラム 6G 無線技術プロジェクト 無線デバイスWG

株式会社日本触媒 高田亮介
株式会社村田製作所 片淵啓介
京セラ株式会社 平松信樹
株式会社パナソニックシステムネットワークス開発研究所 浅野弘明
株式会社 NTT ドコモ 須山聡

目次

第 1 章

- 1.1 背景・目的
- 1.2 「諦めている課題」の言語化
- 1.3 次世代通信における現状と課題

第 2 章 基地局の諦めている課題の深掘り

- 2.1 基地局の敷設に関する課題
- 2.2 基地局のサイズ・重量の課題
- 2.3 基地局の消費電力の課題
- 2.4 基地局の熱に関する課題

第 3 章 端末の諦めている課題の深掘り

- 3.1 スマートフォン市場における日本企業の現状
- 3.2 スマートフォンのサイズ・重量の課題
- 3.3 スマートフォンの複雑化・肥大化に関する課題
- 3.4 スマートフォンの製造・コストに関する課題
- 3.5 スマートフォン以外の端末の課題

第1章

1.1 背景・目的

従来、通信ビジネスにおけるバリューチェーンは素材メーカーから上位レイヤーまで長く且つ複雑であり、水平分業により各レイヤーがより良い技術を作ること競争し、技術を練磨しながら発展してきた。一方で、昨今の 5G および 6G に向けた技術開発においては、周波数やマイグレーションへの対応、消費電力、サーマルマネジメントなど、課題が複雑化し、従来の水平分業による開発では根本的な解決が難しい課題が増えてきている。

そこで、本 WG では、それらの課題に対して、個社技術や既存技術の延長だけでなく、抜本的な技術開発やそれらの組み合わせ、さらに日本の強みである素材/モノづくりも巻き込むことで、従来解決困難だった課題に挑戦できるのではないかと考えた。しかし、従来の水平分業ビジネスでの成功により、素材・化学メーカーから通信事業者まで、バリューチェーンの各レイヤーの企業が一連となって直接対話する機会は非常に限られている。本 WG の活動は、この壁を取り除くための試みである。

異なる知識、言語、常識による隔たりを克服し、バリューチェーン全体で相互に同じ未来を見据えることが必要である。これにより各企業が自らの技術や強みを磨きながら、対話を重ねて良き未来の実現へと進むことができると考える。この活動は単なる情報共有ではなく、新しい価値創造へ向けた挑戦として位置づけられるべきであり、業界全体の成長につなげるものを意図している。

1.2 「諦めている課題」の言語化

今回議論を進めるうえで、「諦めている課題」をキーワードとした。「諦めている課題」とは、従来の水平分業且つ競争開発の中で設定していた「条件」により、検討対象から外していた課題である。つまり、既存の素材技術、既存のモノづくり技術、サイズ/重量、コストなど、業界における「常識」と扱われている制約条件によって、達成不可能と見なされている課題であり、そのほとんどは共通認識として言語化されていない。

それらの「諦めている課題」の中には、従来の制約条件を取り払い、例えばバリューチェーンにおける他のレイヤーと一緒に解決手段を議論することで、「諦めなくてよい課題」とすることができる可能性がある。

そこで、本 WG では、「諦めている課題」に着目し、その言語化に取り組んだ。

1.3 次世代通信における現状と課題

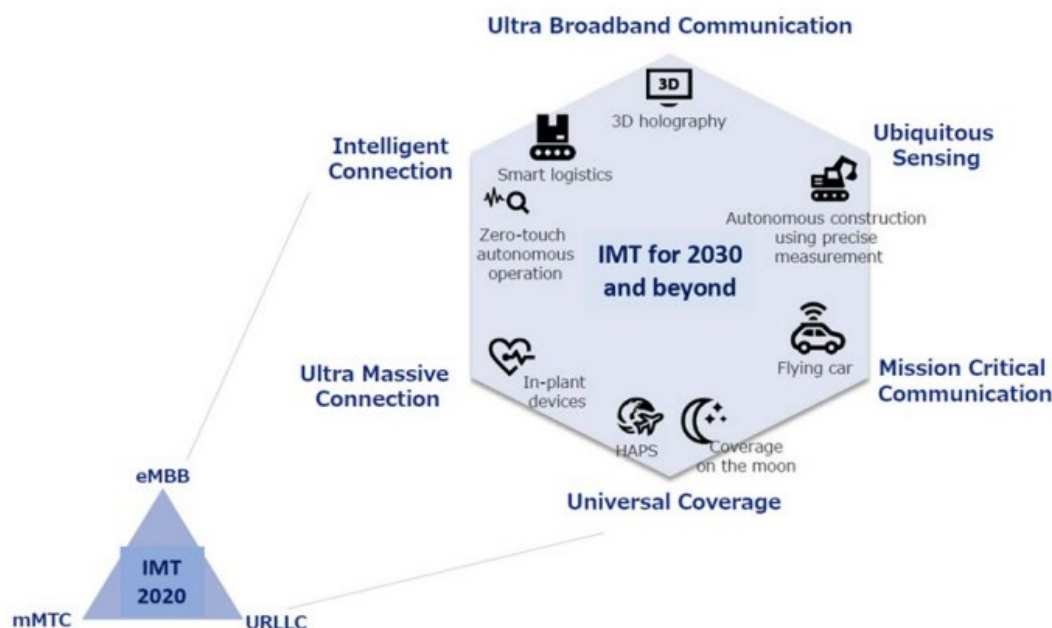


図 1-3. Beyond5G を象徴する図と利用シナリオ（XGMF 白書”Beyond 5G ホワイトペーパー ～2030 年代へのメッセージ～ 4.0 版”より）

Beyond5G 時代に期待される社会を実現するために乗り越えなければならない課題を大別すると、技術課題と社会実装課題に分類できる。前者は、Beyond5G における 6 つの利用シナリオ（図 1-3）を実現するための超高速・大容量や超低遅延、超低消費電力などの KPI を達成するための技術課題である。後者は、前者も含め、新たな技術やデバイスを社会実装する際に、解決しなければならない、インフラ整備、メンテナンス、コストやビジネスモデル、ユースケースの創出といった課題である。技術課題と社会実装課題は両方解決しなければならないが、特に難しい技術課題の解決の為に、例えばサイズや消費電力といった社会実装にも関与する課題を諦めてしまうことも少なくない。通信全体における現状と諦めている課題についての具体例を以下に示す。

6G への世代移行に対する課題については、各所で盛んに議論が行われているところではあるが、4G から 5G への世代移行時のように NSA（Non-Standalone）方式で推進するのか、初めから SA（Standalone）方式で推進するのかは、まさに既存インフラの活用や投資コストの観点も含めた課題であるといえる。

ミリ波の通信カバレッジ改善についても、現在の通信業界ではミリ波やテラヘルツ波が「飛ばない」という技術的制約が共通認識として「諦めている課題」と捉える向きもある。しかし、この課題は依然として解決すべきテーマであり、多くの技術的アプローチが議論されている。具体的な解決策として、RIS（Reconfigurable Intelligent Surface）、DAS（Distributed Antenna System）、リピーターの活用などが挙げられている。これらは通信距離やエリアカバレッジ拡大に向けた有望な手法とされているが、それぞれ実用化

には技術的課題のみならず、コスト課題やサイズや重量の重厚長大化といった社会実装課題も伴う。

他に「諦めている課題」と思われている事例の一つに通信の安定性が挙げられる。ゲームや XR、自動運転などのインタラクティブなアプリケーションへ通信を介して実行するには、通信の安定性が重要な課題となる。具体的には、熱暴走、通信エリアのカバレッジ不足、ハンドオーバー時に発生する通信断期間、用途に合わせた最適な QoS の提供といったシステム課題に対する技術的な対処に加えて、ゲーム、メディア、産業用途などで通信の安定性に価値を感じるユーザーやユースケースと言った社会実装実績はまだ不足しており、これを増やす努力も必要である。

これらの通信全体の現状を背景として、より具体的な「諦めている課題」を深掘り・言語化し、バリューチェーン全体での解決に向けた議論を展開する為に、本 WG では、基地局および端末の開発状況および課題を基に議論を開始した。基地局および端末は次世代通信の為に多くの技術的な課題を抱えつつ、許容コストや許容サイズ/重量の制約、直接顧客のレイヤーに違いがあるため、広く課題感が議論できると考えた。なお、基地局および端末の開発状況、課題の共有を基地局は富士通株式会社 関氏、日本電気株式会社 丹治氏、端末はシャープセミコンダクターイノベーション株式会社 柴田氏に議論のご協力を頂いた。

第2章 基地局の諦めている課題の深掘り

5G 基地局は、5G 通信システムを支える重要なインフラであり、高速通信、低遅延、大容量、多数接続を実現する役割を担っている。従来の 4G 基地局と比較し、より高い周波数帯域（ミリ波など）やキャリアアグリゲーションによる複数の周波数帯域を使用し、広い帯域幅を確保することで高速通信の提供を可能としている。また、ミリ波に対してはアレイアンテナを用いてビーム幅、方向を制御出来るビームフォーミングや MIMO（Massive Input Massive Output）技術により、高速通信とカバレッジ向上が図られている。

トレンドとして、小型化・分散化された「スモールセル」基地局の導入が進んでおり、都市部や高密度地域では、小型基地局を高密度に配置することで、ネットワーク容量とカバレッジの最適化が図られている。一方で農村部や過疎地では、大規模マクロセル基地局が引き続き使用されている。また、エネルギー効率向上への取り組みも活発化しており、省電力設計や AI による運用最適化技術が導入されているところである。

さらに Open RAN（オープン無線アクセスネットワーク）の採用が注目されており、多様なベンダー間の相互運用性とコスト削減に注目されている。このように 5G 基地局は高度な技術革新と柔軟性を備えつつ、多様な利用シナリオに対応できる形へ進化している。

本 WG では基地局の課題として、基地局アンテナの敷設に関する課題（2.1）、基地局のサイズ、重量に関する課題（2.2）、基地局の消費電力に関する課題（2.3）、基地局の熱に関する課題（2.4）として分類し記述する。

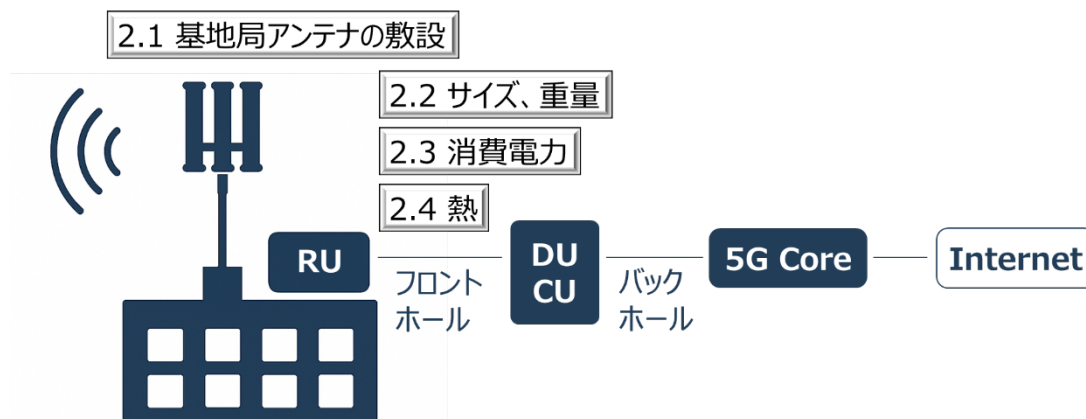


図 2 5G 基地局の構成図及び課題の概要

2.1 基地局アンテナの敷設に関する課題

新規通信システムや周波数バンドの追加実装に際して、事業者にとって基地局インフラへの投資コスト抑制が極めて重要な課題である。特に、新規サイトを確保する場合には、土地（ビル屋上やタワー）の交渉コストや労力が非常に大きい。また、美観や心理的障壁も存在するため、基地局サイト数を増やすことなく既存施設を活用しながら機能更新を進めることが事業者としての基本的なニーズとなっている。

さらに、基地局設置場所の提供者であるビルオーナーやビル内住民・利用者などへメリットを感じてもらえるような新しいビジネスモデルやサービスの創出も重要な課題であり、それは同時に新たなビジネス機会でもある。本 WG では、ビルの窓や壁面に基地局を設置し、ビル内外へ無線サービスを提供するというアイデアも議論された。

地域ごとの敷設傾向についても特徴的な違いが見られる。欧州では美観への配慮が厳しく、電柱やタワー型よりもビル屋上への敷設が受け入れられやすい。一方、日本では電柱への敷設が多く行われている。また米国では平坦で見通しの良い地形が主流であるため、大型マクロ基地局による広域エリア形成が可能だが、日本は狭く複雑な地形と都市部特有の建物影響によって基地局配置計画が細かく求められる。さらに、日本では設置後も周辺環境変化に応じた調整・マネジメント継続が必要となる。基地局敷設は技術的側面だけでなく経済性・社会性とのバランスも求められている。

ミリ波においてはビームフォーミングの実装の為に多くのアンテナ素子数を実装、制御する必要があり、設置運用コスト、部品/回路技術、消費電力、熱の課題も示唆された。

また、5G 基地局を構成する各ユニット（例：Radio Unit (RU)、Base Band Unit (CU/DC) など）は、高速光伝送網で接続されることが求められる。この要件は、5G の高いデータ転送速度、低遅延、大容量通信を実現するために不可欠となっている。高速光伝送網の構築には大規模な設備投資が必要である。その為、光ファイバー敷設やネットワーク機器導入の初期費用が高く、特に田舎や過疎地では採算性確保が難しい場合がある。光以外にミリ波を合わせて活用するコンセプトや NTN (Non-Terrestrial Network) の活用の検討が行われているところである。

2.2 基地局のサイズ、重量の課題

5G～6G に向けて、1.3 項のように周波数バンドの増加、ビームフォーミングによるアンテナ数の増加等により、基地局のサイズや重量は増加し、消費電力は大きくなる傾向である。一方で、2.1 項のように基地局の設置において、設置場所に関する制約事項により、サイズ、重量、コストは大きく出来ないのが現状である。これらの制約要因が 5G 対応基地局を計画通りに設置できていない原因でもあり、本来目指すところの 5G サービス普及に遅れを生じさせていると考えている。これら課題はトレードオフの関係にあり諦めている課題となりつつあるが、5G～6G の汎用化のためには諦めてはいけない課題である。よって本 WG で取り上げる各構成デバイスにおける抜本的な改善が必要な領域と考えている。4G で用意した基地局と体積、重量、消費電力が劣化しない形で、4G に加え、5G 機能にも

対応する基地局が用意出来ることが望ましく、そのためには複数バンドの共用アンテナ（チューナブルアンテナ）や既存構成材料の小型・軽量化が望まれる。一方で、小型・軽量化するにしてもコストや耐久性を重視する傾向があり、各レイヤーでの技術の組み合わせ含めバリューチェーン全体でブレイクスルーが必要な領域と考える。

2.3 基地局の消費電力の課題

基地局の機能の中で RU に関して昨今のグリーン化の流れから、低消費電力化が重要視されている。ただし、あくまで最優先はトータルでのコストという面もあるのが実情であり、コストが上がらない範囲での改善が基地局メーカーに対しては求められている。主な開発取り組みとしては、材料面からの改善として、高効率半導体材料である GaN の高性能化が取り組まれている。一方で、前述のようにコストなどの制約が課題となっている。また、設計面での高効率化の観点において、ドハティ型増幅器の構成を前提としたものや、材料における低ロス化、高効率化も取り組まれている。さらにアウトフェーシング増幅器での高効率化も検討しているが、広帯域化、高周波対応に向かないという様な特徴もあり、いずれの取り組みも性能とコストの両立が大きな課題となっている。

前述の高負荷状態（頻繁に送受信している状態）での効率改善が物理的な限界に近づいてきている中で、高負荷状態だけでなく、低負荷状態（送受信頻度が低い状態）の高効率化、低消費電力化や利用状況に応じて、動作する必要が無い基地局の特定と制御最適化による効率化にも取り組んでいる。材料やデバイス構成だけでなく、通信網全体における各々の基地局の最適な使われ方やシステム制御を含めたトータルでの課題解決が求められる。

また、本 WG において Analog-RoF (Radio over fiber) についても低消費電力の解決手段の一つとして議論された。この方式は Digital RoF とは異なり、フロントホールにおいてデジタル化処理や符号化などの手順を不要とするためシンプルな構造となり、電力削減への寄与が期待されるものである。一方で標準化やエコシステムなど現行方式が前提となっており、既存技術に対する壁の存在も議論された。

2.4 基地局の熱に関する課題

無線通信の高周波化、高出力化に伴い、デバイスの効率性能が悪化し、入力エネルギーの大部分が熱として排出される傾向があり、筐体の排熱はさらに問題となっている。デジタル系でも Massive MIMO になると処理能力への負荷及び発熱が増加する傾向であり、アナログ/デジタル両面でサーマルマネジメントの重要性は増している。

サーマルマネジメントの重要性は既に広く認知されており、各レイヤーでの解決対策が検討されている。現在採用されているサーマルマネジメント関係の材料技術としては、金属ポストやヒートパイプ、ベーパーチャンバーによる対策が主ではあるが、一方でこれらの対策部材はどれも重厚長大になってしまい、デバイスとしてのサイズや重量への影響

が大きい。社会実装に向けては、前述のように小型化、軽量化が必須である事から、これらの対策技術については非常に限られた用途にしか適用できない事が危惧される。

そこで、本 WG での議論では、従来のサーマルマネジメント材料の指標である熱伝導率の絶対値だけでなく重量も含めて、軽くても熱を十分に逃がすことができる材料が求められていると考えた。また、高熱伝導材料だけでなく、発熱源と冷却媒体の伝熱経路の設計も必要である。

これらの課題解決に対しては、例えば宇宙のサーマルマネジメントが参考になる。宇宙では、放熱媒体である空気が無く、重量制約が非常に大きいなど、地上環境では諦めている課題に対して真摯に向き合う必要があるため、非常によく研究されている分野である。

また、従来議論されてきた発熱源としては半導体 IC に着目されがちだったが、実際の基地局やデバイスにおける冷却対象は、半導体 IC 起因の発熱よりも、むしろ環境起因の熱（太陽光による温度上昇等）による影響が大きいとの示唆も得られた。グリーン基地局の研究ではトラフィックのピークは朝と夕方にも関わらず、電力が一番消費されるのは太陽光による発熱を冷やすための電力が必要な昼間だという結果もある。サーマルマネジメントについても、本質的な課題は何か、効果的な打ち手は何かを意識して、多面的に取り組む事で解決出来るのではないかと考える。

本質的な課題の一つとして超高効率半導体材料の開発も諦めずに推進すべきである。熱に強い半導体および高効率な半導体として、Ga_N、InP さらにダイヤモンド半導体の研究も進んでおり、材料技術開発と併せて社会実装に向けた課題を早期に抽出し取り組んでいく必要がある。

第3章 端末の諦めている課題の深掘り

最後に端末の課題について、本 WG で議論した内容をまとめる。

現在、無線通信端末市場の大部分はスマートフォンが占めているが、将来的にはスマートフォン以外の端末（IoT（Internet of Things）端末やウェアラブル端末）が伸びていくことが期待されている。

本章では、まずスマートフォン市場における日本企業の現状について述べる(3.1)。次にスマートフォンの課題として、サイズ・重量の課題(3.2)、複雑化・肥大化に関する課題(3.3)、製造・コストに関する課題(3.4)に分類して記述し、最後にスマートフォン以外の端末の課題について述べる(3.5)（図3）。



図3. 端末の課題の全体像と各節の位置づけ

3.1 スマートフォン市場における日本企業の現状

現在グローバルスマートフォン市場は、Apple（米国）、Samsung（韓国）、Xiaomi、OPPO、VIVO、Huawei（中国）といった米国およびアジア諸国の企業が主要シェアを占めており、近年構造的な変化はほとんど見られていない。また、日本国内市場においてもAppleが2023年時点で約69%のシェアを占め、競争優位性を維持している（「令和6年版情報通信白書」（総務省））。

一方、半導体プロセッサ市場を俯瞰すると、Apple、Samsung、Huaweiが自社製品を活用するほか、市場全体ではQualcomm（米国）およびMediaTek（台湾）がほぼ独占的な地位を占めている。これらの企業は、エコシステムによる囲い込み戦略、半導体のプラットフォーム化、および中国企業によるコスト競争力など、それぞれの強みを活かしながら優位性を確保している。

こうした市場環境の中で、日本企業は端末メーカーおよびプラットフォームプロバイダーとしての競争力向上に課題を抱えている。一方で、カメラセンサー、ディスプレイ技術、

電子部品、化学素材といった部品・素材分野においては、依然として高い技術力と競争力を誇り、これらの製品はグローバル市場においても高く評価されている。この競争力の維持およびさらなる強化は日本企業にとって重要な戦略課題であり、本 WG ではこれらの分野での競争力強化を重要課題として捉えている。

3.2 スマートフォンのサイズ・重量の課題

スマートフォンはサイズ・重量の制約が大きく、新しい無線規格の導入や高機能化の要求による搭載部品の増大によって、端末設計の難易度が増大している。特に複数周波数対応やミリ波導入に関連するアンテナ設計の技術的課題について議論および技術開発が推進されている。

端末の開発においては、新しい無線規格の導入をしつつ既存のレガシー方式にも対応する必要がある。複数の周波数帯を一つのデバイスに統合することを求められるため、アンテナ設計の難易度は著しく高くなっている。アンテナそのものの設計だけでなく、周辺部品の影響にも配慮する必要がある。アンテナチューニング技術を活用することで帯域の拡大や通信品質の向上が図られているが、CA（Carrier Aggregation）技術で使用される CC（Component Carrier）の全組み合わせをカバーすることは依然として困難である。

5G で導入されたミリ波は基板内配線における損失が大きいと、RF モジュールの導入が必要となっている。ミリ波 RF モジュールに要求されるサイズは小型であるが、放熱能力や放射特性をサイズの犠牲を生じさせず実現するという課題がある。またミリ波の波長が筐体の厚さに近いと、筐体の厚さやクリアランスを考慮した設計が必要となっている。さらに、部品・開発環境・開発費用などのコスト増大により、ローエンド機種へのミリ波対応が困難であるという課題も指摘された。

3.3 スマートフォンの複雑化・肥大化に関する課題

スマートフォン端末は、消費者ニーズの多様化および付加機能の増加に伴い、構造が複雑化し、デバイスの肥大化が進んでいる。一方で、通信機能は標準的な要件として認識され、製品間の差別化が難しくなっている。

本 WG では、カメラなどセンサー機能に特化するアプローチやエンターテインメントなど機能や対象ユーザーを絞り込むアプローチが紹介された。また、通信機能を端末外部に分離することで、端末のコスト削減や軽量化、消費電力の削減を図るアイデア等も議論された。さらに、ウェアラブルデバイスを 5G/6G インフラに直接接続し、スマートフォンの役割を限定する新たな使用形態も提案された。

3.4 スマートフォンの製造・コストに関する課題

現在のスマートフォン市場は、コモディティ化が進み価格競争の厳しい市場である。一般消費者に対して低コストにて供給する為に少品種大量生産による汎用品が中心であり、

グローバル市場における最大公約数的なニーズに基づく製品仕様が主流となっている。その為に「自分だけの独自ニーズ」を満たす様なユニークで多様な端末やサービスへのアクセスは依然として制約が多い。

現状、少量多品種の製品やサービスを提供するための仕組みは業界全体で十分に確立されておらず、これは「諦めている課題」の一例と言えるかもしれない。この問題の解決には、新たな製造技術やモジュール設計思想、そしてカスタマイズ可能なプラットフォーム構築といった革新的アプローチが求められるだろう。

3.5 スマートフォン以外の端末の課題

「次世代 IoT 端末向け SoC の研究開発」と題した講演で、IoT 端末の取り組みと課題が紹介された。IoT 端末用途として、RedCap (Reduced Capability) の標準化と商用化が進展しており、産業 IoT における 5G 活用への期待が高まっている。しかし、この市場ではユースケースの発掘と成熟が課題となっている一方で、半導体や端末選択肢が限定されており、「ユースケースという鶏」を育てるための「端末という卵」が不足している状況である。この課題に対し、シャープセミコンダクターイノベーション株式会社では SDR (Software Defined Radio) 化した端末を活用することで、多様な IoT ユースケースにフレキシブルかつカスタム対応可能な SoC を提供するアプローチを提案している。この技術はアジャイル型開発によってユースケースに最適化された通信機能を迅速かつ効率的に実現・提供することを目指しており、「鶏と卵」の関係性を打破する鍵となり得る。また、この取り組みにより 5G ユースケースの拡大につながり、市場普及促進へ向けた好循環が期待されている。

スマートフォンに続く次世代端末の形態についてはグラス型やイヤホン型端末が挙げられるが、これらの実現にはより高度な小型化技術が必要であり、素材・モノづくり技術の革新が不可欠である。そのような新しい端末の普及に向けての議論もなされた。新しい形態のデバイスは 1 社のみの取り組みでは普及が困難であり、「このようなデバイスが必要だ」という共通認識の形成が必要である。日本企業が市場形成において積極的な提案を行い、リーダーシップを発揮することが重要である。

新しい技術やコンセプトを導入・検討する際には、同様の需要を満たす旧来の成熟技術との競争が避けられない。標準規格や法制度が従来技術を前提としており、新規技術を拒む障壁となり得る。この競争によって、新規技術は局所的な実装にとどまり、広範囲な普及やスケール化が難しい状況に陥りやすい傾向がある。この状態から脱するためには、新規技術の利点を明確化し、その独自性と価値を市場やユーザーへ具体的に示しながら標準化、法制度も見据えた普及促進とする必要がある。