

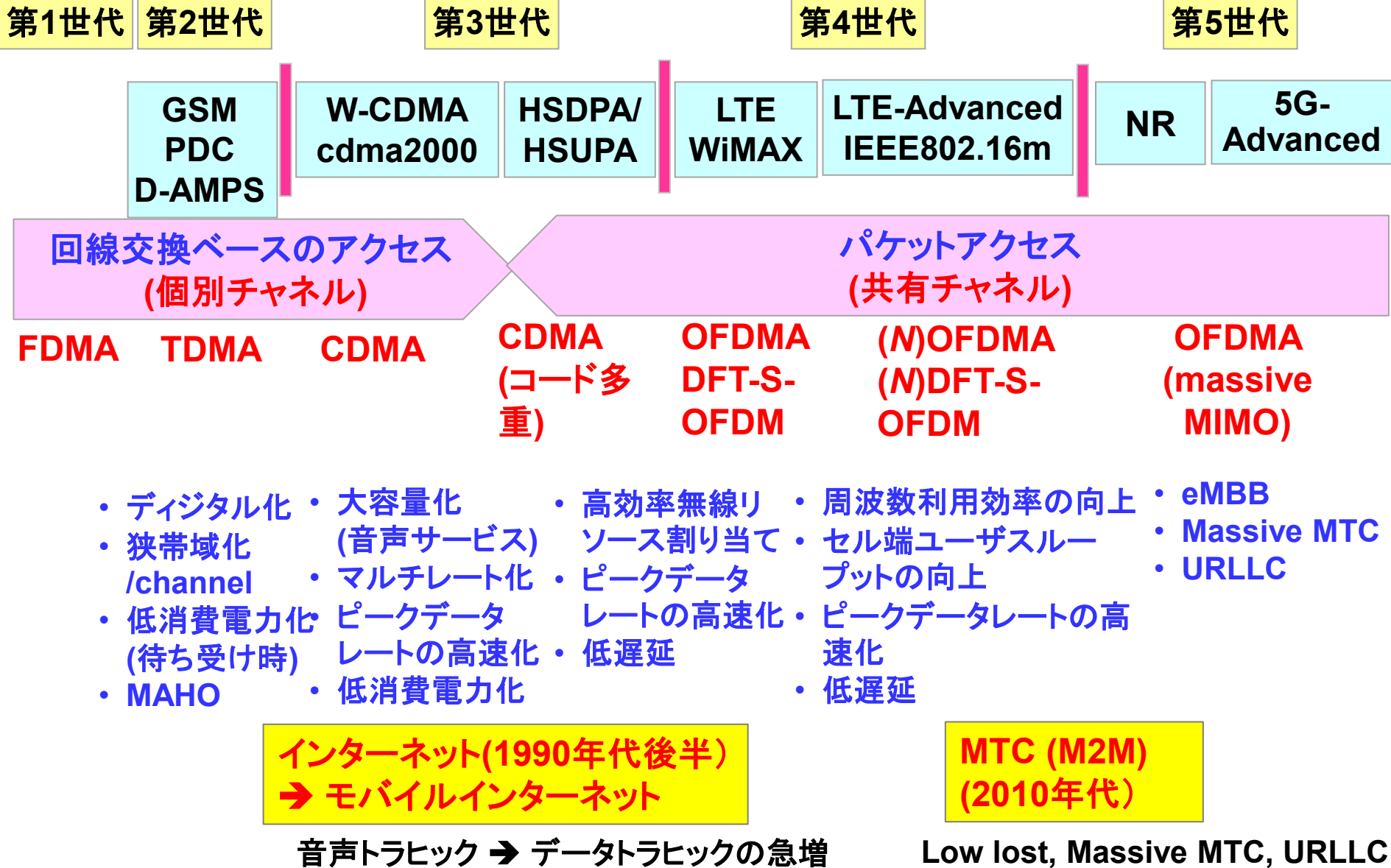
# 移動通信方式における物理レイヤ技術の変遷と課題

佐和橋 衛  
東京都市大学

## 発表内容

- 3G W-CDMAの研究開発
- 4G LTEの研究開発
- 5G NRの研究
- Beyond 5Gの研究開発に向けて

# セルラ方式のEvolution



---

# 3G W-CDMAの研究開発

# 3G UMTSの無線インタフェースの標準化プロセス

- **日本(ARIB)における3G無線伝送方式のコンテスト(vote)**
  - 1996年にARIBにおける無線伝送方式検討会のコンテスト  
→ W-CDMA方式が決定
- **欧州ETSIにおける3G無線伝送方式のコンテスト**
  - 1998年にETSI SMG (European Telecommunications Standards Institute Special Mobile Group)における無線伝送方式のコンテスト → FDDにW-CDMA方式が決定



- **3GPPにおける無線インタフェースの標準化**
  - 1998年12月より, 3GPPにおいて3G UMTSの無線インタフェースの標準化開始
  - 3GPP Release 99仕様でUTRA (W-CDMA)無線インタフェースが策定

# 日本における標準化の結論

## - ARIBにおける無線伝送方式検討会の提案 -

### FPLMTS無線方式検討会

- TDMA分科会
- CDMA分科会

F無検4-5

取扱注意

### FPLMTS用無線伝送方式の検討結果

(案)

平成8年11月21日

FPLMTS無線方式検討会

### CDMA分科会作業報告(案)

#### (1)活動の概要

分科会2では、FDD WG(兼議長:NTT DoCoMo)とTDD WG(本間議長:松下通信工業)の二つのWGを設置して平成6年10月からCDMA方式の検討を行っている。

ROUND2活動としては、FDD WGでは、コアA案を中心にコアB、C案の3つのコア方式に対して、技術検討課題を抽出し、シミュレーション及び実験により検討を進めてきた。このまとめとして、本年11月の方式検討会に向けて、各提案方式の特徴、テンプレートと記述根拠資料を作成し、これを基に標準化を継続するのに適当か否かの判定評価を投票により行った。この結果をもとに、本年11月18日のCDMA分科会第6回会合において、CDMA-FDD方式はコアA案を核にして、コアB、C案をコアA案にマージすることにより全体として一つのより良い方式にまとめあげていくことが合意された。

一方、TDD WGでもシミュレーション及び実験により特性向上、方式改良を進め、方式検討会に向けて、方式特徴、テンプレートと記述根拠資料をとりまとめた。

上記第6回会合において、CDMA-TDD方式はシステムの基本パラメータが、FDDコアA案のシステムと共通化が可能であり、かつTDDであるためFPLMTS帯域の有効活用という大きなメリットを活かしてFDD方式とセットの提案とした旨要望があり了承された。

#### (2)活動の経過

- ① 第6回会合(平成8年11月18日)
  - TG8/1 第11回(21st)会合報告
  - FDD-WG及びTDD-WGの検討報告(ROUND2活動報告)
  - 無線方式検討会に向けてCDMA方式としてのまとめ

### CDMA分科会の決定

# 日本における標準化の結論

## - ARIBにおける無線伝送方式検討会の提案 -

- **CDMA A案 (ドコモ案)の主要技術**
  - 基地局間非同期運用のための2ステップセルサーチ
  - SINRベースの送信電力制御
  - パイロット信号を用いるコヒーレントRake受信
  - 下りリンクの直交可変拡散率(OVSF)の拡散符号割り当て
  - システム容量増大技術(干渉キャンセラ, アダプティブアレー)

### ■ 無線伝送方式検討会の結論(1996年11月)

- **CDMA (FDDのB案、C案はA案へマージ, TDDはFDDの補完)は、今後、詳細検討に入る。**
- MTDMA(A案)は高速伝送の期待されるP及びO環境で実現性を示しましたが、支持少なく検討中止(97年7月に判断)。
- BDMA(TDMA-B案)は実験データが示されず、かつ支持がなく検討中止(97年12月)。

# Results of the UTRA vote at SMG#24 bis held on 28 Jan. 1998

## Proposal for a Consensus Decision on UTRA

• <b>Alpha (W-CDMA)</b>	<b>61.1%</b>	<b>930</b>
• <b>Beta (OFDMA)</b>	<b>0 %</b>	<b>0</b>
• <b>Gamma (W-TDMA)</b>	<b>0.2%</b>	<b>3</b>
• <b>Delta (TD-CDMA)</b>	<b>38.7%</b>	<b>590</b>
• <b>Total</b>	<b>100 %</b>	<b>1523</b>

- The voting weight of members who abstained was of 163

### ■ Proposal

1. **In the Paired band (FDD) :W-CDMA**
2. **In the unpaired band (TDD) : TD-CDMA**
3. The objective in the process to select the technical parameters  
Low cost terminal, Harmonization with GSM, FDD/TDD dual mode operation, Fit into 2\*5 MHz spectrum allocation
4. To provide agreed guidelines for the handling of IPRs essential to the UTRA.

# 当時の学会の主な研究の対象と標準化技術

## ■ Qualcomm社のCDMA方式におけるキー技術

- 上りリンクの送信電力制御
- Rake受信
- ソフトハンドオーバー
- 送信ダイバーシチ, 受信ダイバーシチ(パスダイバーシチ)

## ■ CDMAは干渉リミテッドなシステムであるため, システム容量増大のためには, 干渉キャンセラは必要

- Multiuser Detection (MUD),
- 直交化フィルタ (Orthogonal filter)

## ■ しかし, W-CDMAで採用された技術は, 確実な技術(コスト, 演算量, 処理遅延, 各UEの受信品質等)

- SINRベースの送信電力制御
- パイロット信号を用いるコヒーレントRake受信
- 下りリンクの直交可変拡散率(OVSF)拡散符号割り当て
- ターボ符号 → 繰り返し数による要求BER (BLER)の制御
- 受信ダイバーシチ → 最初のUEは受信ダイバーシチ無し
- 送信ダイバーシチ: STBC

# W-CDMAとcdma2000のHarmonization

3G W-CDMA及びcdma2000とのharmonizationで議論となった仕様

## ■ チップレート

- W-CDMA: 4.096 Mchip/s
- cdma2000: 3.6864 Mchip/s
- **3.84 Mchip/s** → その結果, 15 slots /10 ms

## ■ 基地局間同期

- W-CDMA: 基地局間非同期運用 → 屋内への柔軟な展開を考慮して, GPS信号に頼らない無線アクセスネットワークの構築
- cdma2000: 基地局間非同期運用
- **基地局間非同期運用をベース**

Q社とのディスカッションでは, 初期セルサーチよりも待ち受け時の周辺セルサーチが議論 → 周辺セルのセルIDの通知

## ■ 下りリンクCDM共通パイロット

- W-CDMA: TDMの個別パイロット
- cdma2000: CDMの共通パイロット
- メインの音声サービス(低速レート)の場合は, CDMの共通パイロットの優位性が主張, 誤り率に加えて, TDM個別パイロットは最適なパイロットシンボル長に対する拡散率の調整が必要
- **CDMの共通パイロットが採用**

# サービス需要の変動の予測

## IMT-2000の要求条件と目的

- 現状システムより高度に発展した音声やデータサービスを可能とする能力
- パケットやマルチメディアを含む音声および非音声サービス
- 高いサービス品質
- 固定網相当の品質と信頼性
- 極度に高いユーザビットレート
- 柔軟な無線ベアラ
- 低速の無線呼びだしから高速なビデオやファイル転送を可能とする要求に応じて帯域を与えること
- 非対称データ伝送
- 高度なセキュリティ
- 運用の容易性の改善
- インテリジェントネットワークを基にしたサービス創造と、サービスプロファイル管理
- 統一性あるシステム管理

モバイルインターネットの記述無し

- 音声サービスを対象とした個別チャネルのリソース割り当て → CDMA
- 1990年代後半のインターネットの急速な普及, データトラヒックの急増を想定できたら, 共有チャネル → OFDM waveform

# W-CDMA無線インタフェースの研究開発の経験から

## ■ 無線方式は、要素技術の結集

- 1つの技術で無線方式を作ろうとしても困難
- 個々の技術の性能改善の総和であるものの、顕著な性能改善を実現するキー技術がある。

## ■ 数字(Numerology)が重要

- Numerologyは最初のReleaseで策定 → 後続のReleaseで採用される技術は、Numerologyに依存
- システム要求条件、適用周波数スペクトルに依存する最適なNumerologyを策定することが必要。

## ■ 確実な技術

- 実用システムの仕様で採用される技術は、学会でのトレンドと必ずしも合致していない。
- 顕著な性能改善は素より、コスト、演算量、処理遅延等、総合的に決定。

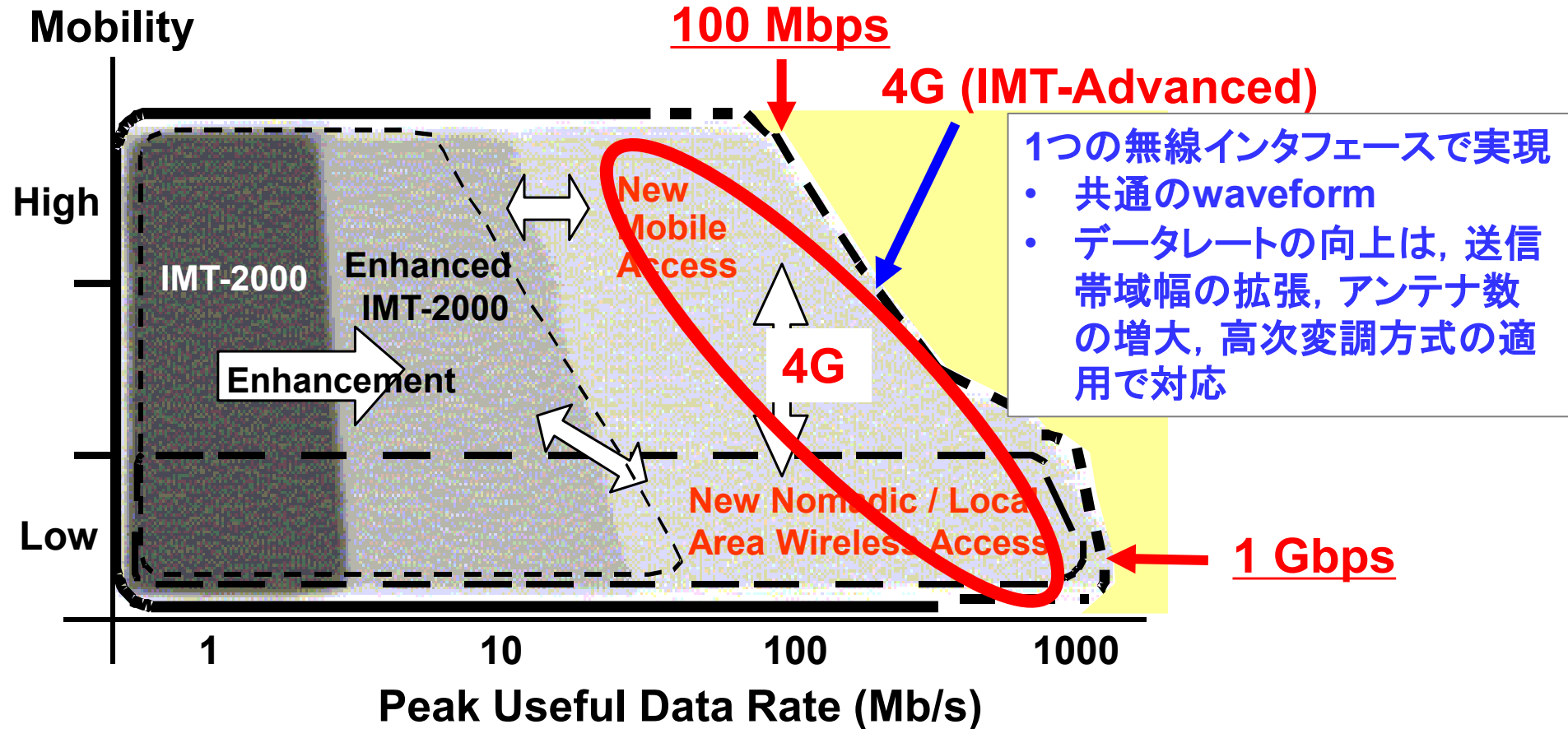
---

# 4G LTEの研究開発

# IMT-Advancedの目標データレート

## ■ 国際電気通信連合・無線通信部門(ITU-R)のフレームワーク勧告 (ITU-R Recommendation M.1645)

(ITU-R: International Telecommunication Union-Radio communication sector)



Extracted from ITU-R Recommendation M.1645

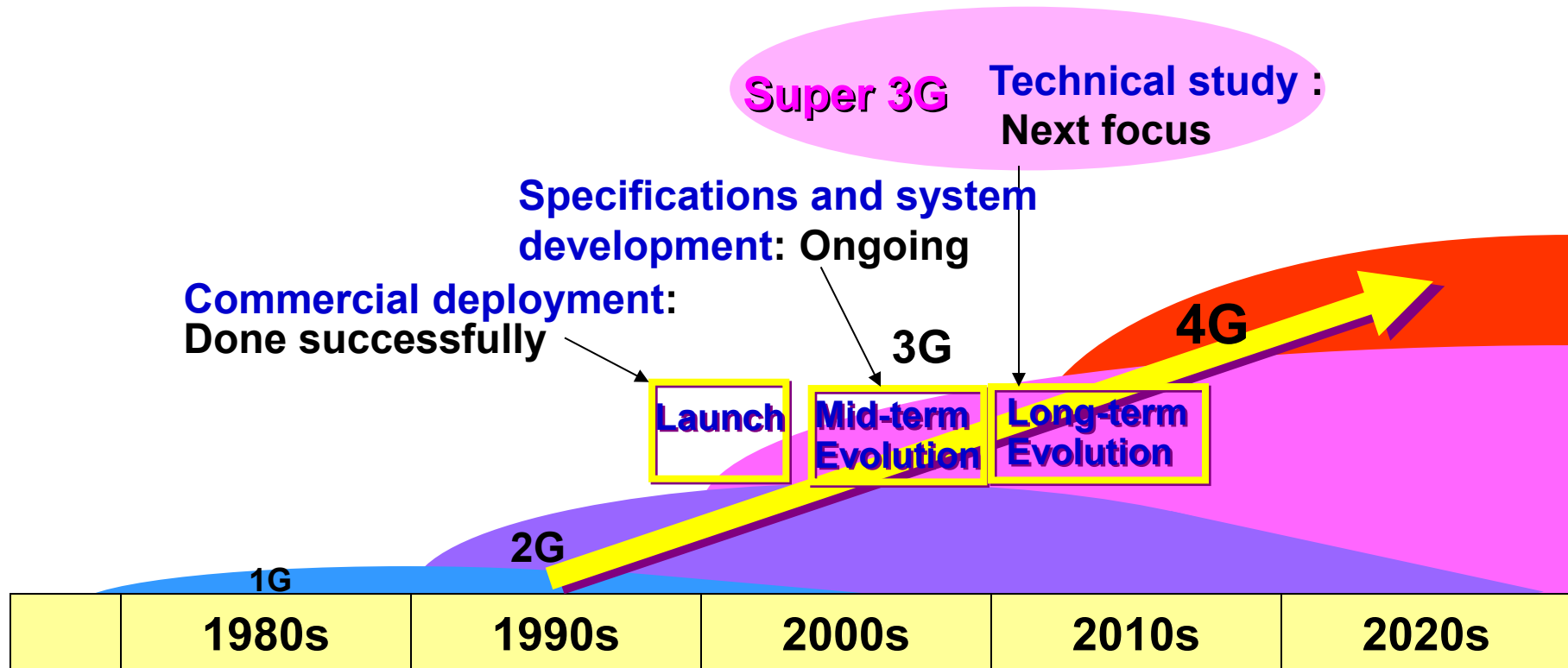
# LTEの標準化開始に向けて

- 2003年までに、NTTドコモが、屋外実験(移動速度は40 km/h, 横須賀中央で実施)で、100Mbps, 1Gbpsの伝送実験に成功
  - **100Mbps (LTEの目標ピークデータレート)**: 100, 200, 及び300 Mbpsのスループットを実現(QPSK, 16QAM, 64QAM, ターボ符号化率 3/4, 101.5 MHzの送信帯域)
  - **1Gbps (LTE-Aの目標ピークデータレート)**: 16QAM, ターボ符号化率 8/9, 4-by-4 MIMO, 101.5 MHzの送信帯域
- 2004年の1月に、NTTドコモ社内で、CTOから3Gの周波数スペクトルで4Gの無線アクセス技術を導入したサービスを実施するとの指示.
- 2004年 Springから、国内、国外のメーカーさんと4Gの標準化の開始の必要性を議論(説得)
  - 3GPPでは、HSDPA/HSUPAの標準化仕様が策定した直後 → 当然、猛烈な反対
  - OFDMが、CDMAに比較して、共有チャネル(Shared Channel)を用いるパケット伝送に適している(高いスループットを実現できる)ことをシミュレーション結果とともに説明.

# 3G Long-Term Evolution (S3G)の位置づけ

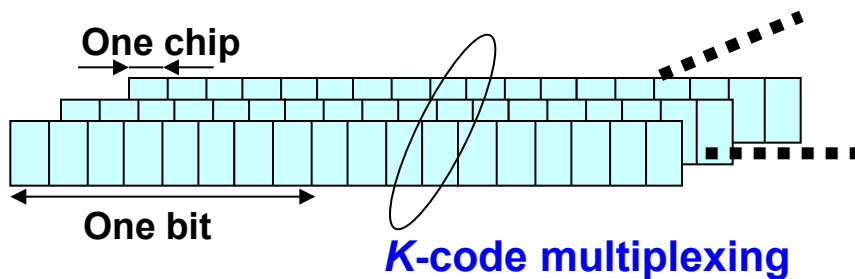
## ■ Long-term technology evolution for keeping the continuous growth of mobile communication industry

- 3G方式のLong-term evolution → 3G方式の周波数を使用
- 将来の4G方式に対しても競争力のある技術の導入

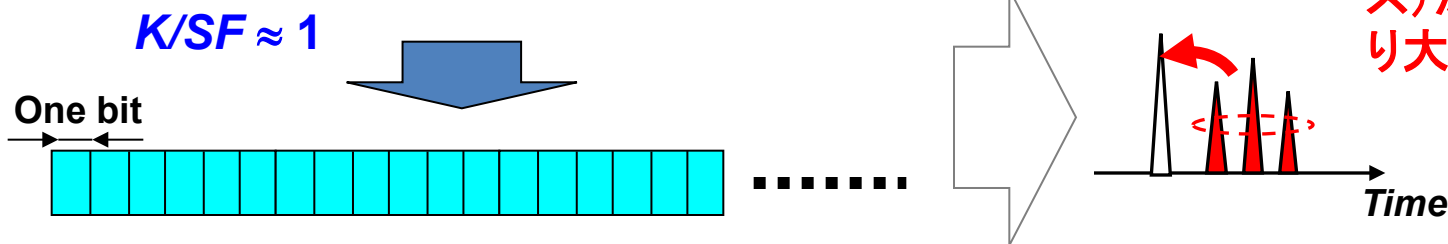


# DS-CDMAを用いるパケット伝送

- 広帯域信号に拡散して、受信機では逆拡散の過程で“拡散利得”により干渉および雑音を抑圧 → DS-CDMAは、ランダムに生じるトラヒックに対して多数の低レートチャネル(音声)を複数UE間で干渉の平均化効果(統計多重効果)を用いて効率よく收容するのに適する
- 共有チャネルを用いるパケットアクセスでは、**ピークのデータレートをあげるため、コード多重を用いる**



拡散率(SF)倍の帯域に拡大しても、K個のコードを多重



**No spreading gain (CDMAのメリットが得られない → 実効的には高速TDMA)**

# 3GPPにおけるLTE無線インタフェースの検討

---

---

- 2004年10月のキャリア, メーカー会議(全10社の非公式会議)で, 3GPPでの標準化の開始を決定
- 2004年12月の3GPP TSG RAN会合でLTEの無線インタフェースの検討を開始することが承認
- 2005年3月の3GPP WG1会合で, LTEの無線インタフェースの検討を開始.

# Rel. 8仕様のLTEのシステム要求条件

- マルチ周波数帯域幅: 1.4 (1.25), 3 (2.5), 5, 10, 15, 20 MHz
- Packet-switching (PS) モードのみのサポート
  - VoIP capability in PS domain
    - ➔ 音声は, VoIPでサポートするため低伝送遅延が必要
- 低遅延(Low latency)
  - 伝送遅延: ユーザデータプレーンの遅延(U-plane latency)
    - ✓ Latency in RAN is less than 5 ms one way (RAN内の片道遅延は 5 ms以内)
  - 接続遅延の短縮:制御プレーンの状態遷移遅延(C-plane latency)
    - ✓ Idle to active (待ち受けから通信状態): less than 100 ms
    - ✓ Dormant to active (間欠受信から通信状態): less than 50 ms
- 周波数利用効率(Frequency efficiency)
  - Release 6 HSDPA, HSUPAに対して, 3 - 4 倍 (DL) , 2 - 3倍 (UL)
- ピークデータレート
  - 100 Mbps (DL), 50 Mbps (UL)
- ユーザスループット
  - Release 6 HSDPA, HSUPAに対して,
    - Cell edge user throughput: 2 - 3 倍 (DL), 2 - 3 倍 (UL)
    - Average user throughput: 3 - 4 倍 (DL), 2 - 3 倍 (UL)

# LTEのWaveform (1)

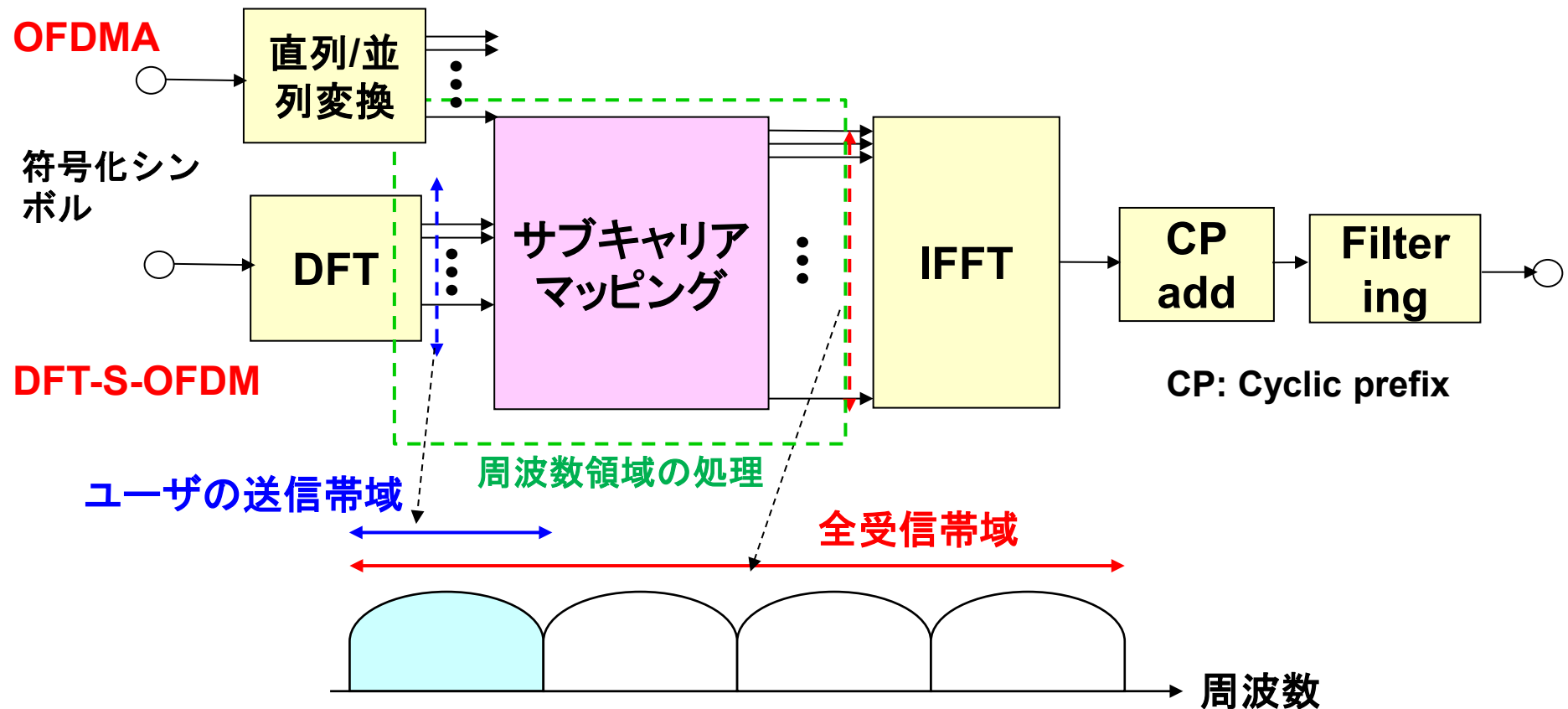
- 共有チャネル(Shared Channel)では, ピークのデータレートを向上.
- セルスループット, セル端のユーザスループットを向上するために, 同一周波数を用いる同一チャネル干渉の低減
  - 同一セル内のマルチユーザ間干渉: 周波数および時間領域の直交化
    - 下りOFDMA: サブキャリア当たり狭帯域・低シンボルレート化 + Cyclic prefix (CP) → シンボル間干渉を抑圧
    - 上りDFT-Spread OFDM: ブロック化周波数領域等化(FDE) + Cyclic prefixによるブロック間干渉抑圧
  - 周辺セル干渉: ベースはセル固有のスクランブルコードによる白色雑音化  
隣接セル間の干渉低減: 周波数及び時間領域のセル間干渉制御, 集中制御局セルとRemote Radio Head (RRH)を用いたリモートセル間における, 無線リソースの集中制御(CoMP送受信, マルチユーザMIMOを含む)

		W-CDMA	LTE	LTE-Advanced
Intra-cell	DL	(Partially) orthogonal	Orthogonal	Orthogonal
	UL	Non-orthogonal	Orthogonal	Orthogonal
Inter-cell	DL	Non-orthogonal	Non-orthogonal	(Partially)-orthogonal
	UL	Non-orthogonal	Non-orthogonal	(Partially)-orthogonal

# LTEのWaveform (2)

## OFDM waveform

- 下りリンク: **OFDMA** → 周波数領域スケジューリング
- 上りリンク: **DFT-Spread OFDM** → 周波数領域処理によるリソース割り当て



- 周波数領域で、連続的に“ゼロ”信号を挿入するとLocalized FDMAに、離散的に“ゼロ”信号を挿入するとDistributed FDMA信号になる

# LTEにおけるCP-OFDMのNumerology

## ■ CP (Cyclic prefix)-OFDMの低遅延化

- **スロット(TTI: Transmission Time Interval)長を短縮化** → 再送に伴う往復伝搬遅延 (RTD: Round Trip Delay)の低減
- **OFDMシンボル数/スロット**のシンボル数を増大するために、サブキャリア間隔を増大 → 位相雑音は、サブキャリア間隔の増大することにより緩和されるものの、Cyclic prefix (CP)の挿入損失が増大

## ● サブキャリア間隔(SCS: Subcarrier spacing)

**狭帯域化の限界** (有効OFDMシンボル長は長く)

- 位相雑音による誤り率の劣化
- ドップラ周波数による誤り率の劣化
- OFDMシンボル数/スロットの減少
- ✓ CPの挿入損失の観点からは有利

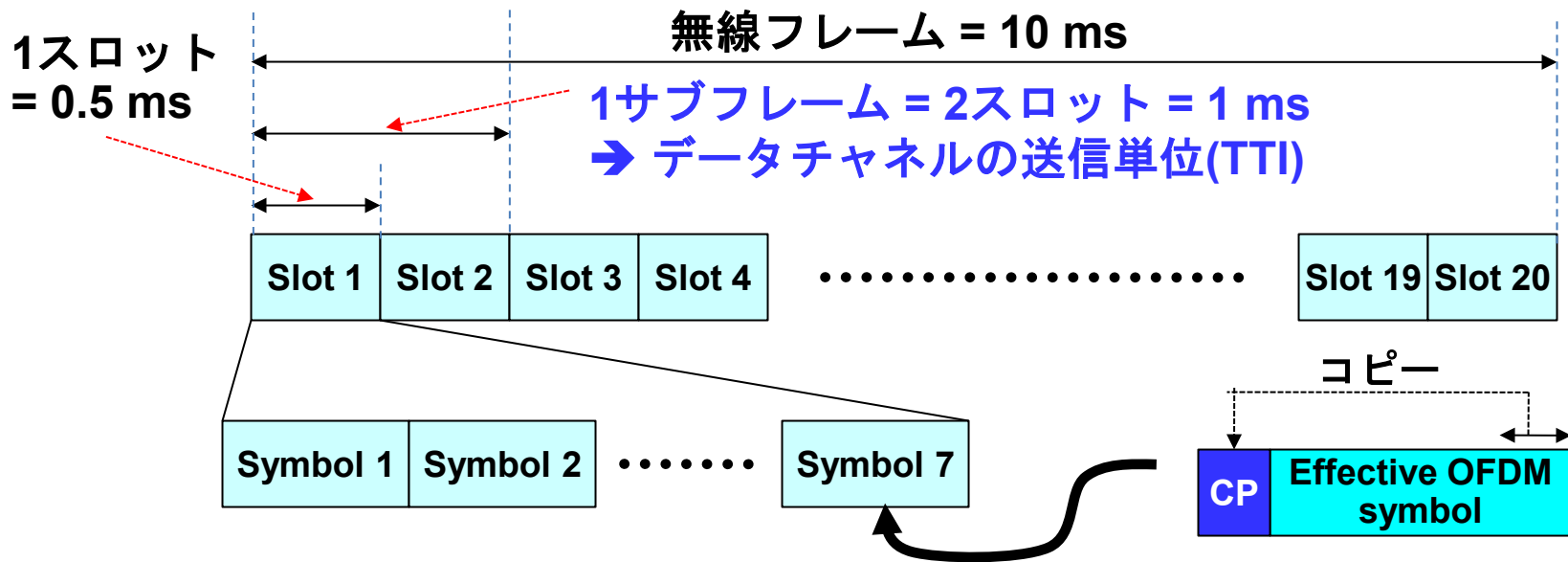
**広帯域化の限界** (有効OFDMシンボル長は短く)

- CPの挿入損失の増大
- ✓ OFDMシンボル数/スロットを増大可能

## ■ **SCS: 13 - 15 kHzで最適化** → 各社提案

ただし、セル間距離10 km程度までのマクロセル環境のサポートを想定  
→ **3G OFDMのSIの評価条件の15 kHzのSCSを採用**

# LTEのフレーム構成



- **FDDとTDDで共通のフレーム構成**
- 無線フレーム長10 msは、W-CDMAと同様
- スロット長0.5msで、W-CDMAの0.667msとの共通性無し
- 実装の観点から、**Transmission Time Interval (TTI)はサブフレーム長の1ms (2スロット長) → TTI長はHSDPAの1/2**
- シンボル間干渉を抑圧するためにCyclic prefix (CP)を挿入する**CP-OFDM**
- MBMSおよび大セル用の長いCPを適用するシンボル数が少ないサブフレームも定義

# W-CDMAで採用されずにLTEで採用された技術

## ■ 3G UMTSにおける無線伝送方式の候補にOFDMが提案

- 欧州 (ETSI)におけるUMTS地上系無線アクセスのグループ

$\alpha$  : Wideband CDMA

$\beta$  : OFDM → 国内では, BDMAでOFDMが提案

$\gamma$  : Wideband TDMA

$\delta$  : Wideband TDMA/CDMA

$\varepsilon$  : ODMA (Opportunity Driven Multiple Access)

- 多数の音声サービス(低速レート)の個別チャンネルでは採用されずに, 高いピークデータが必要な共有チャンネル(Shared Channel)で採用

## ■ CAZAC系列

- W-CDMAでは低速レートの音声サービスチャンネルの大容量化が最も重要な要求条件であったため, 個別チャンネル数が多くとれることが優先 → セル固有のスクランブルコードを用いる2階層の拡散符号割り当て

- 一方, LTEでは, 共有チャンネルを用いるパケットアクセス

- 同時アクセスチャンネル数が限定されるため, LTEのPRACH, PUCCHではCAZAC系列であるZadoff-Chu系列を採用

CAZAC: Constant Amplitude Zero-Autocorrelation

# LTE(Rel. 8)のシステム要求条件を実現する技術

## ■ ピークデータレートの向上

- 下りリンク: 100 Mbps
  - 広帯域化 (20 MHz), **2-by-2 MIMO 多重**, 64QAM変調
- 上りリンク: 50 Mbps
  - 広帯域化 (20 MHz), **1-by-2 SIMO**, 16QAM変調

## ■ セル平均, セル端ユーザスループット, 周波数利用効率の向上 (対Rel. 6 HSDPA, HSUPA)

- 下りリンク
  - セル内直交マルチアクセス(OFDMA)
  - 周波数領域スケジューリングの適用
  - 64QAM変調 (Rel. 6 HSDPA: 16QAM)
  - **2-by-2, 4-by-2, 4-by-4 MIMO 多重/ダイバーシチ** (Rel. 6 HSDPA: 1-by-2 SIMO)
- 上りリンク
  - セル内直交マルチアクセス(DFT-Spread OFDM)
  - 周波数領域スケジューリングの適用
  - 16QAM変調 (Rel. 6 HSUPA: QPSK)
  - 1-by-2, **1-by-4 SIMO ダイバーシチ** (Rel. 6 HSUPA: 1-by-2 SIMO)

# 3GPPにおけるRel. 8 LTEの性能評価結果

## ■ システム容量 (bps/Hz/cell)

下り:

(要求条件: Rel. 6 HSDPAに対して3 – 4倍)

セル半径	500 m		1732 m	
	値	倍率	値	倍率
HSDPA 1-by-2	0.53	-	0.52	-
LTE 2-by-2 MIMO	1.69	x 3.2	1.56	x 3.0
LTE 4-by-2 MIMO	1.87	x 3.5	1.85	x 3.6
LTE 4-by-4 MIMO	2.67	x 5.0	2.41	x 4.6

上り:

(要求条件: Rel. 6 HSUPAに対して2 – 3倍)

セル半径	500 m		1732 m	
	値	倍率	値	倍率
HSUPA 2 Rx div	0.33	-	0.32	-
LTE 2 Rx div	0.74	x 2.2	0.68	x 2.2
LTE 4 Rx div	1.10	x 3.3	1.04	x 3.3

## ■ Voice容量 (ユーザ/5 MHz)

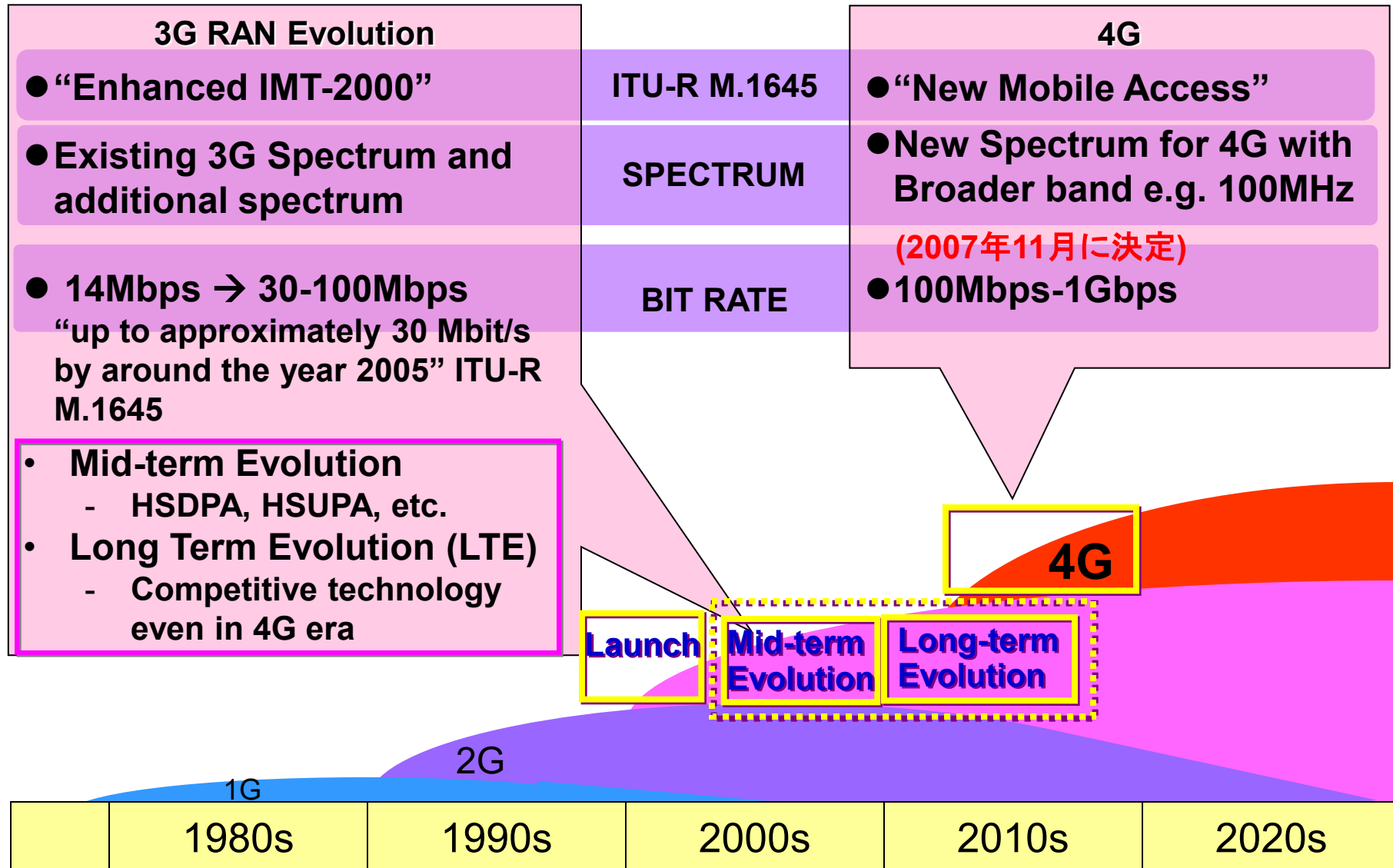
セル半径	下り	上り
500 m	317	241
1732 m	289	123

## ■ 伝送遅延 (RAN内の片道伝送遅延)

(要求条件: 5 ms)

	0% HARQ	30% HARQ
RAN内の片道伝送遅延	3.5 ms	5 ms

# 4G (LTE-Advanced)へのシナリオ



# LTE-A (Rel.10)のシステム性能の要求条件 (1)

## ■ ピークデータレートおよびピーク周波数利用効率

		Rel. 8 LTEシステム性能	LTE-Advanced要求条件	IMT-Advanced要求条件
ピークデータレート	下り	300 Mbps	1 Gbps	(1 Gbps) <sup>(*1)</sup>
	上り	75 Mbps	500 Mbps	
ピーク周波数利用効率 [bps/Hz]	下り	15	30	15
	上り	3.75	15	6.75

(\*1)ノマディック/ローカルエリア環境で1 Gbpsをターゲットとすることがサーキュラターに記載

### ■ ピークデータレート

- 4-by-4 MIMOおよび帯域幅約70 MHzのとき1 Gbpsを実現

### ■ ピーク周波数利用効率

- 下り: Rel. 8 LTEでIMT-Advancedの要求条件を満足 → 3GPPの要求条件は 30 bps/Hz.
- 上り: IMT-Advanced要求条件を満たすためにRel. 8 LTEに対して2倍にすることが必要

# LTE-A (Rel.10)のシステム性能の要求条件 (2)

## ■ システム容量およびセル端ユーザスループット

		アンテナ構成	Rel. 8 LTEシステム性能 <sup>(*1)</sup>	LTE-Advanced要求条件 <sup>(*2)</sup>	IMT-Advanced要求条件 <sup>(*3)</sup>
システム容量 [bps/Hz/cell]	下り	2-by-2	1.69	2.4	-
		4-by-2	1.87	2.6	2.2
		4-by-4	2.67	3.7	-
	上り	1-by-2	0.74	1.2	-
		2-by-4	-	2.0	1.4
セル端ユーザ スループット [bps/Hz/cell/u ser]	下り	2-by-2	0.05	0.07	-
		4-by-2	0.06	0.09	0.06
		4-by-4	0.08	0.12	-
	上り	1-by-2	0.024	0.04	-
		2-by-4	-	0.07	0.03

x1.4-1.6

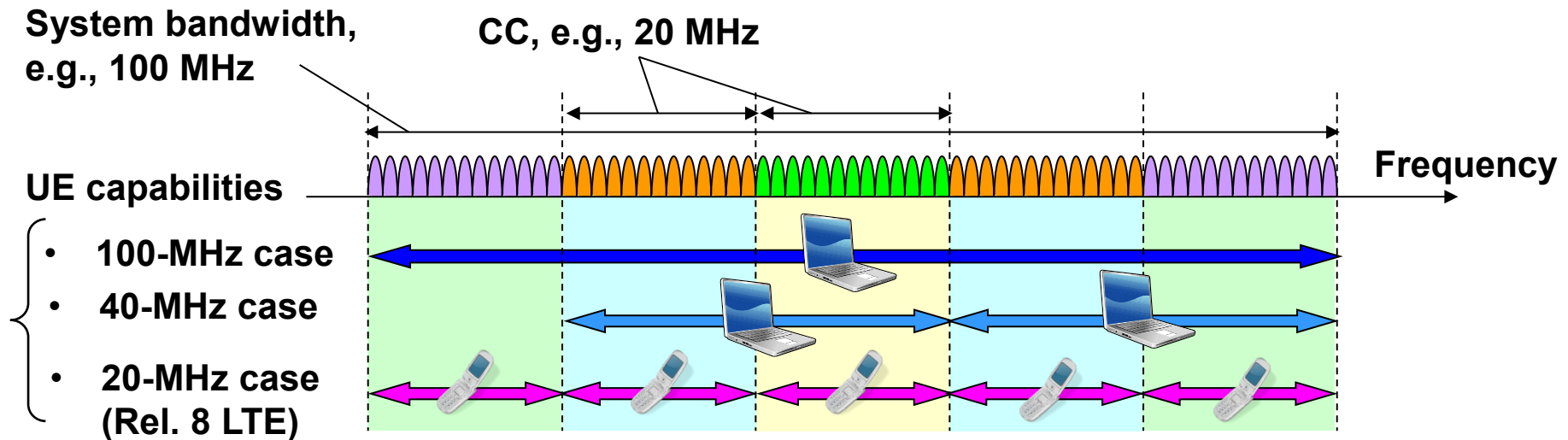
<sup>(\*1)</sup>3GPP TR25.912 (Case 1), <sup>(\*2)</sup>3GPP TR36.913 (Case 1), <sup>(\*3)</sup>ITU-R M.2135 (Base coverage urban)

- 下り/上り: IMT-Advancedの要求条件に対して, 3GPPのLTE-Advancedではより高い要求条件が規定.

# LTE-Advancedにおける広帯域化

## ■ キャリアアグリゲーション(Carrier Aggregation)

- 複数の周波数ブロック(CC: Component Carrier)を用いることで最大100 MHz程度までの広帯域化
  - ➔ 下り1 Gbps / 上り500 Mbpsのピークデータレート要求条件の実現
- 各CCは基本的にRel. 8 LTEとバックワードコンパチブルな構成
  - Rel. 8 LTE仕様のUEは, 1CCを用いてRel.10 LTE-Aの基地局に接続.
  - Rel.10 LTE-Aの仕様のUEは, 20MHz帯域の1CCを用いてRel. 8 LTEの基地局に接続



# LTE-A (Rel.10)の要求条件を満たすための技術

## ■ 広帯域化(キャリアアグリゲーション)

- 複数のComponent Carrier (CC)を用いた広帯域化
  - 異なる周波数帯を用いた広帯域化(Spectrum Aggregation)もサポート
- ピークデータレート, 柔軟なスペクトラム割り当て

## ■ マルチアクセス方式および無線パラメータ

- CC単位では, 基本的にRel. 8 LTEと同一のマルチアクセス方式, 無線パラメータを適用
- Rel. 8 LTEとのバックワードコンパチビリティ

## ■ マルチアンテナ送信技術(MIMO)の拡張

- 下りリンクにおけるMIMO空間多重数の増大(最大8レイヤ/UE)
  - 上りリンクにおけるMIMO空間多重の導入(最大4レイヤ/UE)
  - マルチユーザMIMOへの最適化(参照信号, UEフィードバックの拡張)
- ピークデータレート, システム容量, セル端ユーザスループット

## ■ セル間協調(CoMP: Coordinated Multipoint)送受信

- 下り/上りリンクにおける複数セル協調送信/受信
  - Heterogeneous networkにおける干渉制御
- セル端ユーザスループット, カバレッジ拡張, 柔軟なシステム展開

## ■ リレー

- “Type 1 relay”(リレー局が独立なセルを形成)のサポート
- カバレッジ拡張, コスト

# 3GPPにおけるLTE-Advancedの性能評価結果

## ■ IMT-Advanced要求条件とLTE-Advancedのシステム性能評価結果 (Base coverage urban)

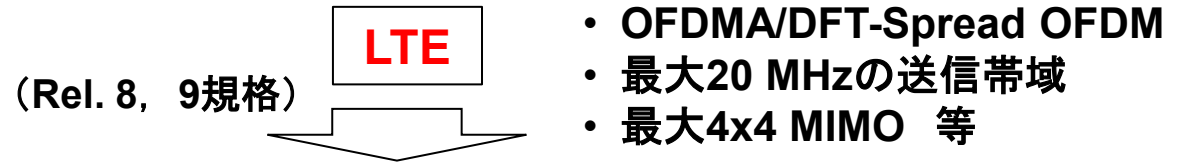
	下り/ 上り	アンテナ 構成	IMT-Advanced 要求条件 <sup>(*1)</sup>	LTE-Advanced システム性能 <sup>(*2)</sup> (対Rel. 8 LTE比)
ピーク周波数利用効率 [bps/Hz]	下り	4-by-2	15	16.3 (1.0)
	上り	2-by-4	6.75	8.4 (2.0)
システム容量 [bps/Hz/cell]	下り	4-by-2	2.2	2.2 – 2.7 (1.4 – 1.7): 4-by-2 2.6 – 3.3 (1.6 – 2.1): 8-by-2
	上り	2-by-4	1.4	1.5 – 2.0 (1.1 – 1.4): 1-by-4 1.6 – 2.1 (1.1 – 1.5): 2-by-4
セル端ユーザスループット [bps/Hz/cell/user]	下り	4-by-2	0.06	0.056 – 0.083 (1.0 – 1.8): 4-by-2 0.070 – 0.10 (1.5 – 2.2): 8-by-2
	上り	2-by-4	0.03	0.063 – 0.096 (1.0 – 1.5): 1-by-4 0.069 – 0.10 (1.1 – 1.6): 2-by-4

(\*1)ITU-R M.2135, (\*2)3GPP TR36.912 (FDD)

## ■ LTE-Advancedのシステム性能 (3GPPにおける自己評価結果)

- ピーク周波数利用効率, システム容量, セル端ユーザスループットのいずれもIMT-Advanced要求条件を満足 (他の, "Indoor", "Microcellular", "High speed"の3環境についても満たすことを確認)
- 主な特性改善技術
  - ✓ ピーク周波数利用効率 : Single user (SU)-MIMO(上り)
  - ✓ システム容量 : MU-MIMO(下り), SU-MIMO (上り)
  - ✓ セル端ユーザスループット : CoMP送信, 送信ダイバーシチ(上り)

# 3GPPにおけるLTE無線インタフェースの更新 (1)



## ■ピークデータレート, システム容量の増大

### **LTE-Advanced** (Rel. 10規格)

- Carrier aggregation
- 最大100 MHzの送信帯域
- 最大8 x 8 MIMO等

### **EPDCCH** (Rel. 11規格)

- 下り制御チャネルの拡張 (Enhanced PDCCH)

### **Advanced UE receiver**

- 高機能UE受信 (Rel. 11規格)

### **FD-MIMO** (Rel. 13規格)

- 2次元指向性ビーム送信

## ■ヘテロジニアスネットワーク (HetNet), 小セルの積極的展開, セル端ユーザスループットの向上

### **ICIC** (Rel. 8規格)

- 周波数領域のICIC

### **HetNet (小セルの有効展開)**

- Cell range extension (Rel. 10規格)

### **Enhanced ICIC** (Rel. 10規格)

- 時間領域のICIC

### **CoMP送信** (Rel. 11規格)

- HetNetにおける協調基地局送信

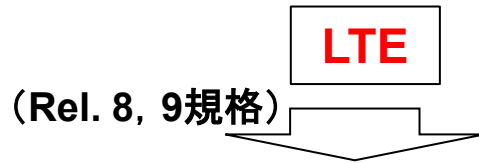
## ■カバレッジエリアの拡張

### **Relay技術**

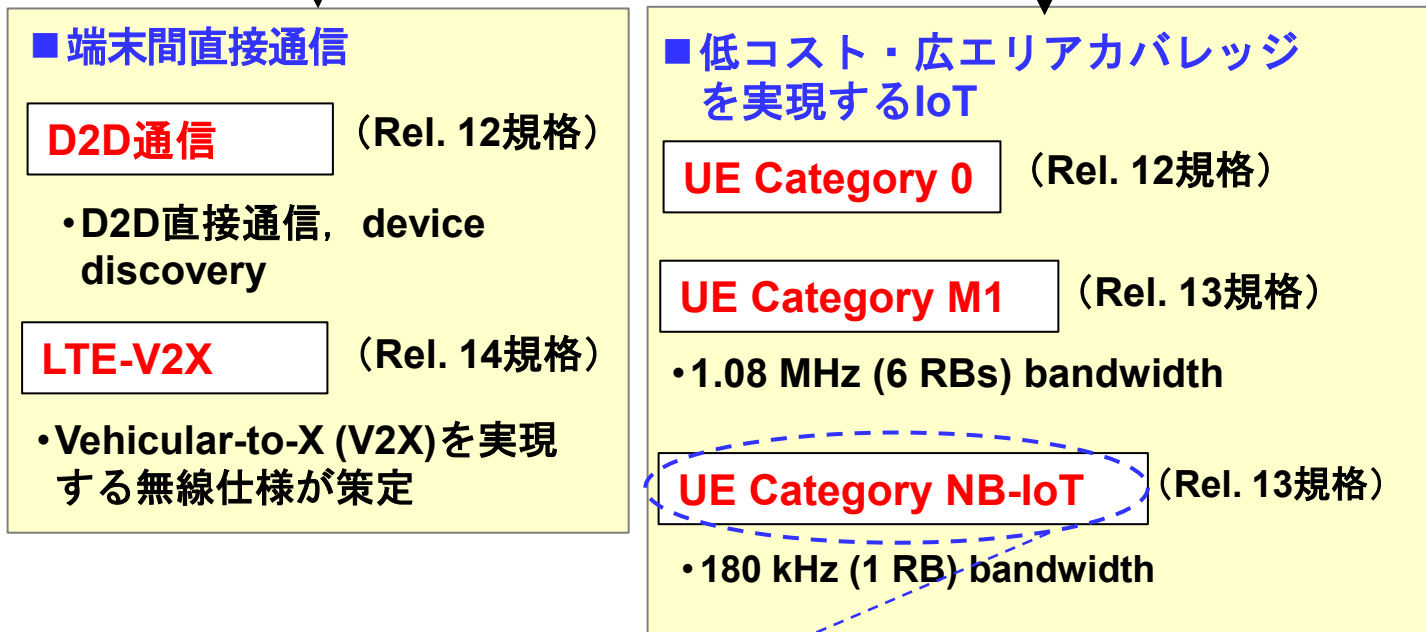
(Rel. 10規格)

- バックホール回線とアクセス回線が同一の運用周波数を用いる場合のリレー技術

# 3GPPにおけるLTE無線インタフェースの更新 (2)



- OFDMA/DFT-Spread OFDM
- 最大20 MHzの送信帯域
- 最大4x4 MIMO 等



- セルラーLPWA (Low Power Wide Area) **LoRaWAN**と実現性能, サービスがバッテリー

---

# 5G NRの研究

# 3GPP NR Use Cases

## ■ Enhanced Mobile Broadband (eMBB)

- Peak data rate of greater than **10 – 20 Gbps**
- **100 Mbps** whenever needed
- Traffic increase of **10,000 times**
- Support of **heterogeneous networks** with macro cell and small cell
- Support of high mobility up to 500 km/h
- Network energy saving by 100 times

## ■ Massive Machine Type Communication (mMTC)

- High density of devices of  **$2 \times 10^5 - 10^6/\text{km}^2$**
- **Long range**
- Low data rate of 1 – 100 kbps
- **Ultra low cost**
- **10 years battery**
- Asynchronous access

## ■ Ultra Reliable and Low Latency Case (URLLC)

- Air interface latency of less than **1 ms**
- End-to-End latency of less than **5 ms**
- Ultra reliability of **99.9999%**
- Low to medium data rate of 50 kbps – 10 Mbps
- High speed mobility

# 5G NR無線インタフェースのWaveform

## ■ 5Gのマルチアクセス方式 (Waveform)

- **CP-OFDM with a scalable numerology** (subcarrier spacing and CP length)
- **DFT-Spread OFDM** (UL with single stream transmission only)
  - ✓ Windowingの適用 ← チャネル帯域幅に対して信号の占有帯域幅が90 %以上になることが規定

## ● マルチアクセス方式の決定の根拠

- **低遅延(low latency)** ← スケジューリングベースのRB割り当てを前提
  - **mMTCの低コストUEの実装を考慮して, CP-OFDMを採用**
    - CPの挿入損失(約10 %)
  - **上りリンクにおけるスケジューリングの柔軟性, MIMO多重の適用を重視して, CP-OFDMの採用**
- ミリ波への適用には, Beamformingを用いるカバレッジエリアの増大が必要であり, MIMO多重は各サブキャリアをフラットフェージング化できるOFDMが, DFT-Spread OFDMに比較して低演算量の処理.

# NR無線インタフェースのNumerology

## ■ Scalable subcarrier spacing

$$\Delta f = 2^\mu \cdot 15 \text{ (kHz)}$$

- Subcarrier spacing (SCS)  $\rightarrow \mu$ をパラメータ
- Cyclic prefix: Normal / Extended

	$\mu$	サブキャリア間隔 $\Delta f = 2^\mu \cdot 15 \text{ (kHz)}$	有効OFDM シンボル長	CP長	
同期信号 < 6GHz	0	15	66.67 $\mu\text{s}$	Normal	Data channel < 6GHz
	1	30	33.33 $\mu\text{s}$	Normal	
同期信号 > 6GHz	2	60	16.67 $\mu\text{s}$	Normal/Extended	Data channel > 6GHz
	3	120	8.33 $\mu\text{s}$	Normal	
	4	240	4.17 $\mu\text{s}$	Normal	
同期信号 52.6 – 71GHz	5	480	2.08 $\mu\text{s}$	Normal	Data channel 52.6 – 71GHz
	6	960	1.04 $\mu\text{s}$	Normal	

同期信号  
52.6 – 71GHz

# Numerologyの変遷

	無線フレーム	スロット長(サブフレーム長)	スロット数/無線フレーム	OFDMシンボル数/スロット	OFDMシンボル長
3G W-CDMA	10 ms	0.667 ms	15		
3G HSDPA	10 ms	2 ms	5		
4G LTE	10 ms	1 ms	10	14	66.67 $\mu$ s
5G NR	10 ms	$1/2^k$ ms	$10 \times 2^k$	14	$66.67/2^k$ $\mu$ s

## NR無線インタフェース

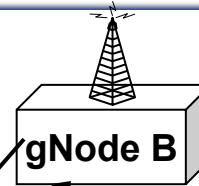
- スロット内のOFDMシンボル数は14
- 広帯域SCSは、低遅延が要求されるURLLCに適用

# NRにおける物理チャネル

## DL Physical Channels

- **PDSCH**  
Physical DL Shared Channel
- **PBCH**  
Physical Broadcast Channel
- **PDCCH**  
Physical DL Control Channel

UE (User Equipment)



Base Station

## UL Physical Channels

- **PUSCH**  
Physical UL Shared Channel
- **PUCCH**  
Physical UL Control Channel
- **PRACH**  
Physical Random Access Channel

## DL Physical Signals

- **DMRS**  
Demodulation Reference Signal
- **PTRS**  
Phase-Tracking Reference Signal
- **CSIRS**  
Channel State Information Reference Signal
- **PSS**  
Primary Synchronization Signal
- **SSS**  
Secondary Synchronization Signal

## UL Physical Signals

- **DMRS**  
Demodulation Reference Signal
- **PTRS**  
Phase-Tracking Reference Signal
- **SRS**  
Sounding Reference Signal

# NRとLTEの物理チャネルの差分

- LTEの下りリンクで規定されていた4レイヤ(4送信アンテナ)までのセル固有参照信号(CSRS: Cell-specific RS)が, NRでは廃止
  - 全てのセルで, 1ms長のサブフレーム毎に送信する参照信号. NRでは異なるサブキャリア間隔が採用されたため.
- 位相トラッキング参照信号 (PTRS: Phase-Tracking Reference Signal) が規定
  - ミリ波帯の周波数スペクトルでは位相雑音, 周波数オフセットの影響が大きいため

# URLLCの要求条件 (1)

## ■ Definition of requirements of latency and reliability

- Reliability can be evaluated by **the success probability of transmitting X bytes within a certain delay**, which is the time it takes to deliver a small data packet from the radio protocol layer 2/3 SDU ingress point to the radio protocol layer 2/3 SDU egress point of the radio interface, **at a certain channel quality** (e.g., coverage-edge).
- 「X bytesの packetsを一定時間以下の遅延で受信に成功する確率」
- 遅延の定義: 無線区間遅延 → 送信側における無線のプロトコルレイヤ2のサービスデータユニットの処理開始から, 受信側において packetsを正常に受信するまでに要した時間. packetsの受信に失敗した場合には1回以上の再送に要した時間を含む.

## ■ Requirements of URLLC based on Release 15 specifications

- A general URLLC reliability requirement **for one transmission of a packet is  $1 - 10^{-5}$  for 32 bytes** with a user plane latency of **1ms**.
- 「32 bytesの packetsを送信時に, 1ms以下の無線区間値遅延, かつ 99.999 %以上 ( $10^{-5}$ 以下) の packets受信成功確率の達成」

# URLLCの要求条件 (2)

## ■ Requirements of URLLC based on Release 16 specifications

Industry	Use cases	Latency	Reliability (Packet loss rete)	Packet data size
Factory automation	Robot/motion control, communications between industrial controllers	Up to 2 ms end-to-end latency	$10^{-6}$ to $10^{-8}$ outage probability	Up to 32 bytes
Transport industry	Remote driving, traffic management, wireless roadside infrastructure backhaul	Up to 10 ms end-to-end latency	$10^{-5}$ outage probability	Up to 5220 bytes
Electrical power distribution	Grid fault and outage management, distributed voltage control in smart grid	Up to 15 ms end-to-end latency	$10^{-5}$ to $10^{-6}$ outage probability	Up to 250 bytes
Entertainment industry	Virtual reality (VR)/augmented reality (AR), online gaming	Up to 10 ms end-to-end latency	$10^{-3}$ to $10^{-5}$ outage probability	Up to 10,000 bytes

# Latency Improvement

## ■ Rel. 15 specifications

### ① Frequent transmission opportunities

- Shorter Transmission Time Interval (TTI) length **短いTTI長** **柔軟な制御情報の割り当て**
- Flexible time and frequency resource configuration of PDCCH
- Flexible multiplexing of PDSCH and PUSCH within a slot **UEの処理時間の短縮**

### ② Two types of PDSCH/PUSCH processing → Smaller processing timing gaps can be supported by more advanced UE that is suitable for URLLC service.

**他UEの送信をinterruptする優先送信**

### ③ Interrupted transmission indication for downlink → Defines DL control information (DCI) format 2\_1 for notifying the time/frequency resource where previous reception might be corrupted by urgent traffic of another UE.

### ④ UE Configured Grant (CG) scheduling → Periodic UL resource is pre-configured so that a UE can PUSCH on the resource without UL grant whenever UL traffic occurs.

**送信毎のGrantの省略**

## ■ Rel. 16 specifications

### ① Increased PDCCH monitoring capability

**UEのモニタ機能の向上**

### ② Advanced PUSCH repetition scheme

**フィードバック情報の送信機会**

### ③ Multiple transmissions with HARQ feedback in a slot

**の増大**

### ④ Enhanced CG (Configured Grant) for UL

### ⑤ Intra-UE transmission priorities

### ⑥ Inter-UE traffic prioritization for UL

**UE内, UE間の優先的送信**

# Reliability Enhancement

## ■ Rel. 15 specifications

### ① CQI /MCS table for lower BLER target

低いBLERに対するCQIテーブル,  
MCSテーブル

- CQI table: Block error rate (BLER) target of channel state information (CSI) report for URLLC is such as 0.001 % ( $10^{-5}$ ) while that for eMBB is 10 %.
- Modulation and Coding Scheme (MCS) table

### ② Slot aggregation and slot-based repetition

Repetitionによる受  
信SNRの向上

- Adopted slot aggregation for PDSCH/PUSCH and slot-based repetition for PUCCH.

## ■ Rel. 16 specifications

### ① Multiple transmission and reception points (TRPs)

複数アンテナポートを  
用いる送受信

- Adopt simultaneous transmission of PDSCH/PDCCH from multiple TRPs or simultaneous reception of PUSCH/PUCCH at multiple TRPs.

### ② New DCI (Downlink Control Information) format

新規のDCIフォーマット

- Defined DCI format 0\_2/1\_2 that accommodates smaller DCI payload size compared to DCI format 0\_1/1\_1 of Rel. 15 specification. → Improvement in achievable reliability by increasing the coding gain.

---

---

# **Beyond 5Gの研究開発に向けて**

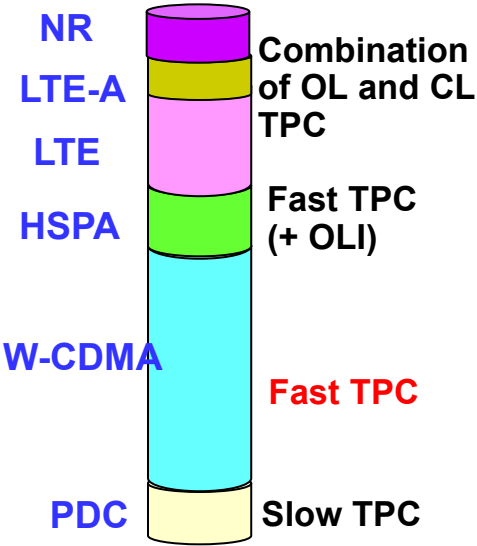
# 3GPP無線インタフェースの特徴 (1)

## ■ 要素技術のPillar

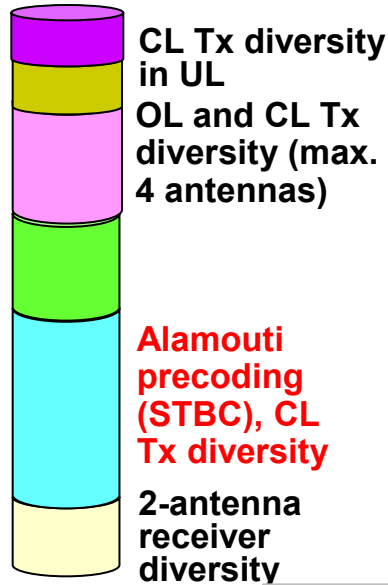
- 世代に応じて効果の大きな特徴的技術は異なるものの、無線インタフェースは要素技術の総合であるため技術のPillarは変わらないと考える。
    - 送信電力
    - 周波数のリソース割り当て
    - 変調 (Constellation)
    - チャネル符号化 (誤り訂正符号化)
    - 時間/周波数/スペースダイバーシチ
    - マルチアンテナ技術
    - 同期 (タイミング制御) 等
- Beyond 5G方式でどのPillar技術がキーになるかの見極めが必要.

# 2G – 5G方式における無線アクセス技術のPillar

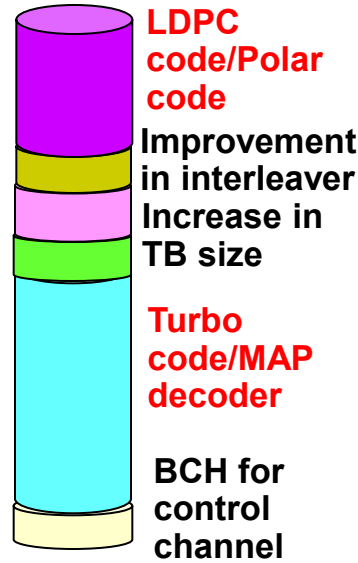
## Transmission power control



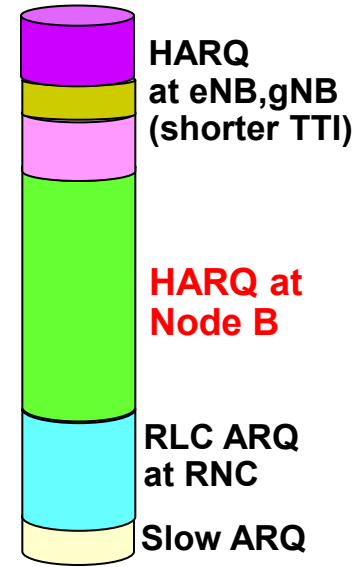
## Tx/Rx diversity



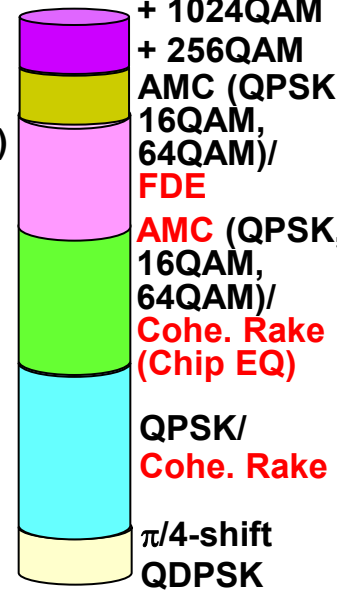
## Channel coding (FEC)



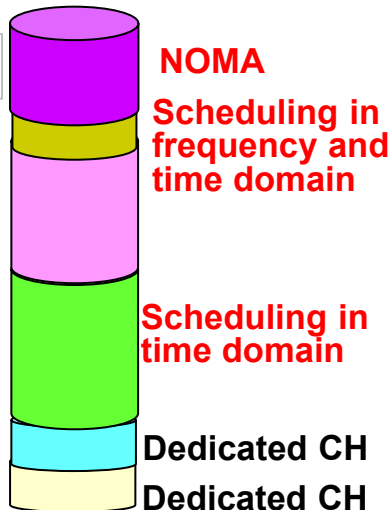
## ARQ



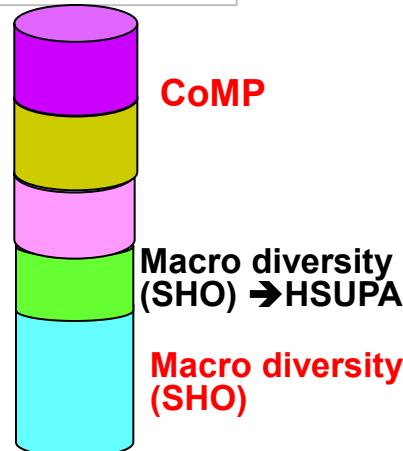
## Mod. / Demod.



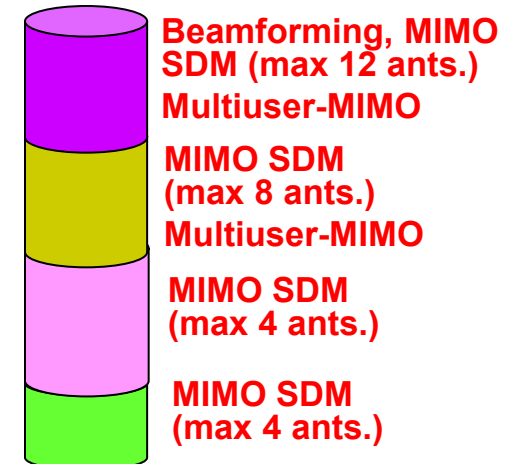
## Scheduling



## Macro diversity ICIC



## MIMO/Beamforming



# マルチアクセスのキー技術 (3GPP)

	W-CDMA cdma2000	HSDPA/ HSUPA	LTE	LTE- Advanced	NR
大容量化 /周波数利用 効率の向上	<ul style="list-style-type: none"> <li>適応送信電力制御</li> <li>パイロットRake受信</li> <li>OVSF</li> <li>ターボ符号</li> <li>送信ダイバーシチ(STBC, precoding)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>共有チャネル</li> <li>高速スケジューリング(Node B)</li> <li>適応変調・符号化</li> <li>MIMO多重/送信ダイバーシチ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>周波数スケジューリング(eNode B)</li> <li>セル内直交マルチアクセス</li> <li>送信ダイバーシチ(SFBC, precoding)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>マルチユーザMIMO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ミリ波</li> <li>Beamforming</li> <li>マルチユーザMIMO</li> <li>LDPC符号/Polar符号</li> <li>NOMA</li> </ul>
ピークデータ レートの向上		<ul style="list-style-type: none"> <li>多値変調(16QAM, 64QAM)</li> <li>MIMO多重</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広帯域化(Max 20 MHz)</li> <li>MIMO多重(Max 4)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広帯域(100 MHz以下)</li> <li>MIMO多重(Max 8)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広帯域(400 MHz以下)</li> <li>MIMO多重(Max 12)</li> </ul>
セル端ユー ザスルー プットの向上	<ul style="list-style-type: none"> <li>マクロダイバーシチ(ソフトハンドオーバー)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>周波数スケジューリング</li> <li>送信ダイバーシチ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>セル間協調送受信(CoMP)</li> <li>リレー</li> </ul>	
低遅延化		<ul style="list-style-type: none"> <li>短TTI (2 ms)</li> <li>ハイブリッドARQ (Node B)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>短TTI (1 ms)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>広帯域サブキャリア間隔 → 超短TTI (1/2<sup>k</sup> ms)</li> </ul>

# 3GPP無線インタフェースの特徴 (2)

## ■ 技術提案のタイミング

- **OFDM**: 3G UMTS無線方式の日本, 欧州のコンテストではOFDMが提案されていた. 3G方式では音声トラヒックのシステム容量の増大が最も主要な要求条件であったためCDMAが採用
- **LDPC符号**: LTEのSIでLDPC符号が提案されていた. LDPC符号はターボ符号とほぼ同等な誤り率を実現できることは認めながらも, UEの実装の観点からLTEではターボ符号が採用
- **上りリンクにおけるDFT-S-OFDMとOFDMのハイブリット**: NR仕様の上りリンクでは1送信ストリーム数の場合にはOFDMに加えてDFT-S-OFDMが策定されているが, LTEのSIに同様の提案
- **CoMP**: 3G CDMAにおけるソフトハンドオーバーは, Rel. 8 LTEで一旦, 基地局間の協調送受信は無くなり, LTE-Aで形を変えてCoMPが採用



- システムの**サービス(トラヒックタイプ)目標, 実用時期のLSI実装技術を考慮したタイムリーな技術提案が必要**

# 3GPP無線インタフェースの特徴 (3)

## ■ 受信機技術

- 無線インタフェースは, waveform, 信号フォーマット, シグナリング等を決定するため, 受信機技術は, 標準化対象外.
- しかし, LTEのDFT-S-OFDMのサブフレーム構成, 参照信号(RS)は, 周波数領域等化(FDE)の適用を前提とした構成.
- 受信技術は, Performance規定で縛るが, 最先端技術を用いた場合の規定値にはなっていないように思える → 演算量, 設計コスト, 消費電力, 処理遅延等の総合性能の観点



- 受信機技術の採用は難しい. しかし, 目標の誤り率を満たすための所要受信SNRの低減のためには, 技術開発が必要
  - ターボFDE
  - MIMO信号分離の最尤検出(MLD: Maximum Likelihood Detection)
- FDE等, 無線インタフェースの前提技術として採用されれば大きな成果(特許).

# Beyond 5Gの物理レイヤの課題 (1)

## ■ 伝搬チャネルモデルの構築

- RF回路の劣化要因(電力増幅器の非線形歪み, 位相雑音, ADC等)がデバイスの実測性能を基にモデルが確立
- 伝搬チャネルモデル(電力遅延プロファイル, パスの角度広がり等)があれば, 計算機シミュレーションの性能(BER, BLER)は, 屋外実験結果とかなり一致
- 適用周波数スペクトル, 環境における伝搬チャネルモデルが, 物理レイヤ技術の評価に必須.
- NR無線インタフェースの性能評価用の100 GHzまでの伝搬チャネルモデルが規定. → 距離減衰, 及びFD-MIMO用の送信機及び受信機のelevation及びazimuthの角度広がりを考慮した伝搬チャネルモデルが規定.
- ミリ波帯及びサブTHz帯周波数におけるLOS環境のバックホールリンク, アクセスリンクにおける性能評価のシミュレーション用の伝搬チャネルモデルの構築が必要.

# Beyond 5Gの物理レイヤの課題 (2)

## ■ マルチ周波数スペクトル

- 4G及び5G方式は、800MHz帯のプラチナバンドを含む6GHz以下の周波数、及び28GHz、60 GHz帯のミリ波帯等多数の周波数が使用されている。サブTHz帯周波数の適用も想定。



- 周波数帯応じて伝搬損失、電波の反射、回折特性が異なるので、屋外あるいは屋内環境、セルサイズ、UEのモビリティ等に応じた最適な周波数スペクトルの使用が必要。
- 上り及び下りリンクの特徴(最大送信電力、同報/個別送信)の違い及びNR無線インタフェースで採用されているControl plane (C-Plane)とUser plane (U-Plane)を分離するC/U分離の活用が有効

# Beyond 5Gの物理レイヤの課題 (3)

## ■ Numerology

- 適用する周波数帯及びその周波数におけるデバイスの性能, ピークデータレート, 周波数利用効率, 遅延(latency)等のシステム要求条件を考慮した, **最適なnumerologyを作成することが必要**
- NR無線インタフェースの2のべき乗倍のSCSはシステム要求条件を実現する洗練されたnumerology → 無線フレーム当たりのスロット数, スロット当たりのOFDM (あるいはDFT-S-OFDM)シンボル数等, **2のべき乗**の値は処理の観点からは望ましい.

## ■ Backward/Forward Compatibility

- LTE及びLTE-Advancedは, 基地局, UEともに, Backward及びForward compatibilityを実現できる優れた無線インタフェースが構築
  - Beyond 5G方式のUEは, NR方式とのデュアルモードあるいはトリプルモードになると想定
- **適用技術, コスト等を考慮してBackward及びForward compatibilityの必要性を検討する必要.**

# Beyond 5Gの物理レイヤの課題 (4)

## ■ RF無線機Hardwareの劣化要因の推定・補償

- 無線通信ではアンテナ利得が受信品質, カバレッジ距離に大きな影響を与えるため, 高効率なアンテナ及びbeamforming技術が必要であることは当然.
- ミリ波帯及びサブTHz帯周波数ではRF無線機の電力増幅器の非線形歪み, ローカル発振器で生じる位相雑音, In-phase及びQuadrature成分のI/Q imbalance等の影響が大きくなると想定される. 過去数10年に渡り, 非線形歪補償, 位相雑音補償, I/Q imbalance補償技術が提案.



- 無線バックホールリンクに加えてアクセスリンクにおいてもURLLC等, 所要のBERが $10^{-6}$ 程度以下の高品質受信の実現が要求.  
→ BERが $10^{-6}$ 程度以下の高品質受信を実現するには, RF回路の劣化要因のさらに低レベルに抑圧する必要.

# Beyond 5Gの物理レイヤの課題 (5)

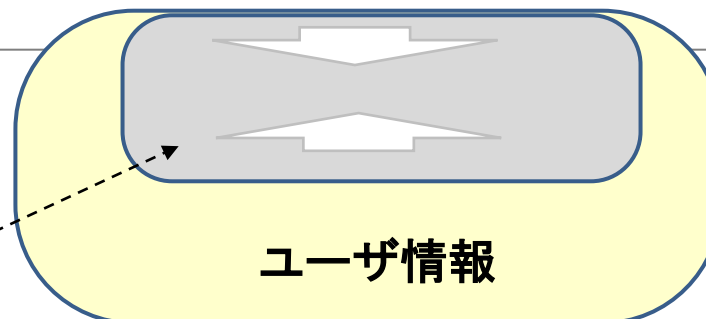
## ■ 制御情報及び参照信号のオーバーヘッドの低減

- トラフィック需要, 伝搬チャネル状態, 適用環境, 要求品質に応じた最適なアンテナ数, マルチアクセス(物理チャネル多重), 無線パラメータ, 変調方式, チャネル符号化, 最適なシグナリング構成の適用
  - 送信帯域の広帯域化, 特に基地局における実装アンテナ数の増大に伴い, FDDの場合は品質情報のフィードバック情報, TDDの場合は品質測定用の sounding信号, チャネル応答測定用の復調用参照信号(DMRS)のオーバーヘッドが増大.
  - 高周波数スペクトルの適用に伴うチャンネル応答, 位相雑音, 周波数オフセット, CSI (CQI, PMI, RI)の高精度推定 → 周波数スケジューリング, AMC等のチャネル情報を用いる技術の利得を最大限に引き出すには, CSIの高精度な推定が必要
- RS及び制御情報の増大を招くため, 機械学習(ML)によるRS及び制御情報のオーバーヘッドの低減が有効

共有チャネルの大容量化

→ 20 Gbps – 100 Gbps – 1T bps

制御情報, 参照信号のオーバーヘッド



# Beyond 5Gの物理レイヤの課題 (6)

## ■ セル間干渉制御

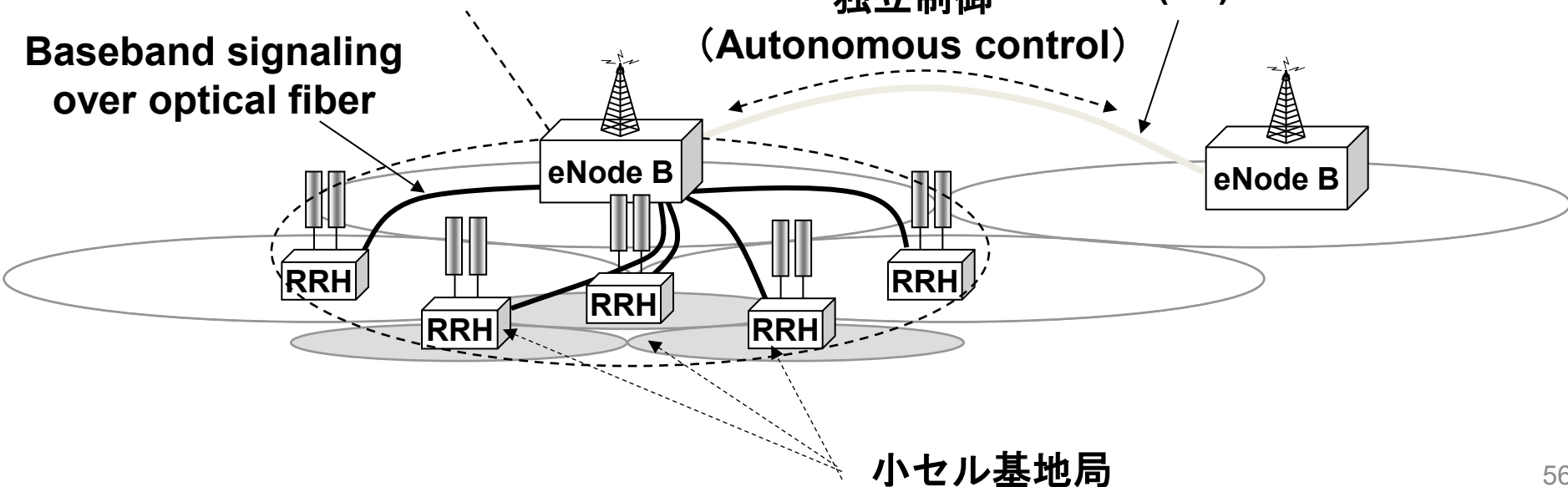
- 完全(ほぼ完全)な集中制御 → 過去の3GPPの採用技術を見ると実現性は低いと考える,
  - 集中制御を行うノードの実装, タイミング制御
- ベースはセル固有スクランブルコードを用いるセル間干渉の白色化
  - 局所的なエリアでの干渉制御 (CoMP)
  - 自律分散干渉制御: AI/MLを用いるセル間干渉の推定, 及びスケジューリング, 送信電力制御

集中基地局：マクロセル基地局  
(Centralized control)

Inter-eNode B  
(X2) インタフェース

Baseband signaling  
over optical fiber

独立制御  
(Autonomous control)



# まとめ：超高速・大容量化，低遅延

## ■ ピークデータレート → 「共有チャネル」の太さ

- HSDPA : 10 Mbps以上
- LTE: 100 Mbps以上 → 実現性能300 Mbps以上
- LTE-Advanced: 1 Gbps以上 → 実現性能3 Gbps以上
- 5G NR: 数10 Gbps以上 → 100 Gbps程度の拡張性

## ■ 超高速・大容量化 (ピークデータレート・周波数利用効率の一層の向上), 遅延の短縮のための技術開発は必要 (Dull pipeではない).

- 情報1ビット当たりのコストの低減
  - ネットワークであることを意識させないRAN (遅延, データレート, 制御)
  - 出現する新規サービス(触覚ホログラフィなど)のサポート
- 人間の脳の速度まで

新システムの  
要求条件



サービス, アプリケーション

セルラネットワーク  
(CN, RAN)

新たなサービスが出現  
(技術と関係ない金儲け)



予測の範囲で想定される  
サービスを実現する超高速・  
大容量化, 低遅延化RAN

# 最後に

---

---

前職, 及び現在の東京都市大学での研究遂行に際し, RCS 研究会の役員, 研究専門委員の方々には, 貴重なコメント, ご指摘を多数いただきました.

眞田委員長, 役員, 研究専門委員の皆様, 歴代の委員長, 役員, 研究専門委員, 及びご関連の皆様に, 心より御礼申し上げます.