

情報通信技術研究交流会  
第201例会

テラヘルツ波帯の実利用に向けて  
－最新技術動向と課題－

2013. 7. 5



NTT マイクロシステムインテグレーション研究所  
○久々津 直哉、枚田 明彦

# 謝辞

本資料を作成するに際し、

1. 平成18年度～平成21年度に実施した総務省の「電波資源拡大のための研究開発」による委託研究の一環として推進した「ミリ波帯高精細映像伝送技術の研究開発」
2. 平成20年度に開催されたテラヘルツ技術動向調査委員会の情報通信分野調査部会
3. 総務省近畿総合通信局にて平成21年度、22年度に開催された「テラヘルツ波帯の情報通信利用に関する調査」

以上の施策に、研究員、委員として参加した際の成果を一部、参考にしております。  
各々の施策において、ご尽力いただきました皆様にあらためて感謝いたします。

# アウトライン

---

1. テラヘルツ波研究を取り巻く状況
2. テラヘルツ波の通信応用に向けた最新動向
3. NTTにおける研究のアプローチと成果
4. テラヘルツ通信実現に向けた課題
5. まとめ

# アウトライン

---

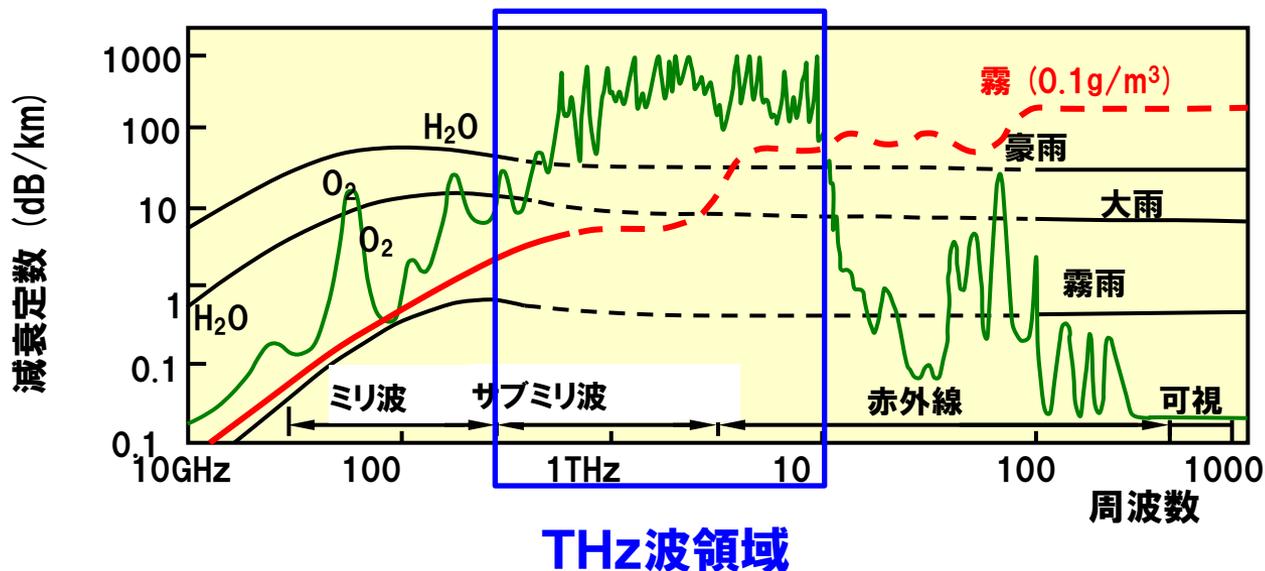
1. **テラヘルツ波研究を取り巻く状況**
2. テラヘルツ波の通信応用に向けた最新動向
3. NTTにおける研究のアプローチと成果
4. テラヘルツ通信実現に向けた課題
5. まとめ

# 宇宙には、THz波がいっぱい

98 percent of the photons released since the big bang reside in the submillimeter and far-infrared bands by astronomer David Leisawitz at NASA Goddard Space Flight Center.

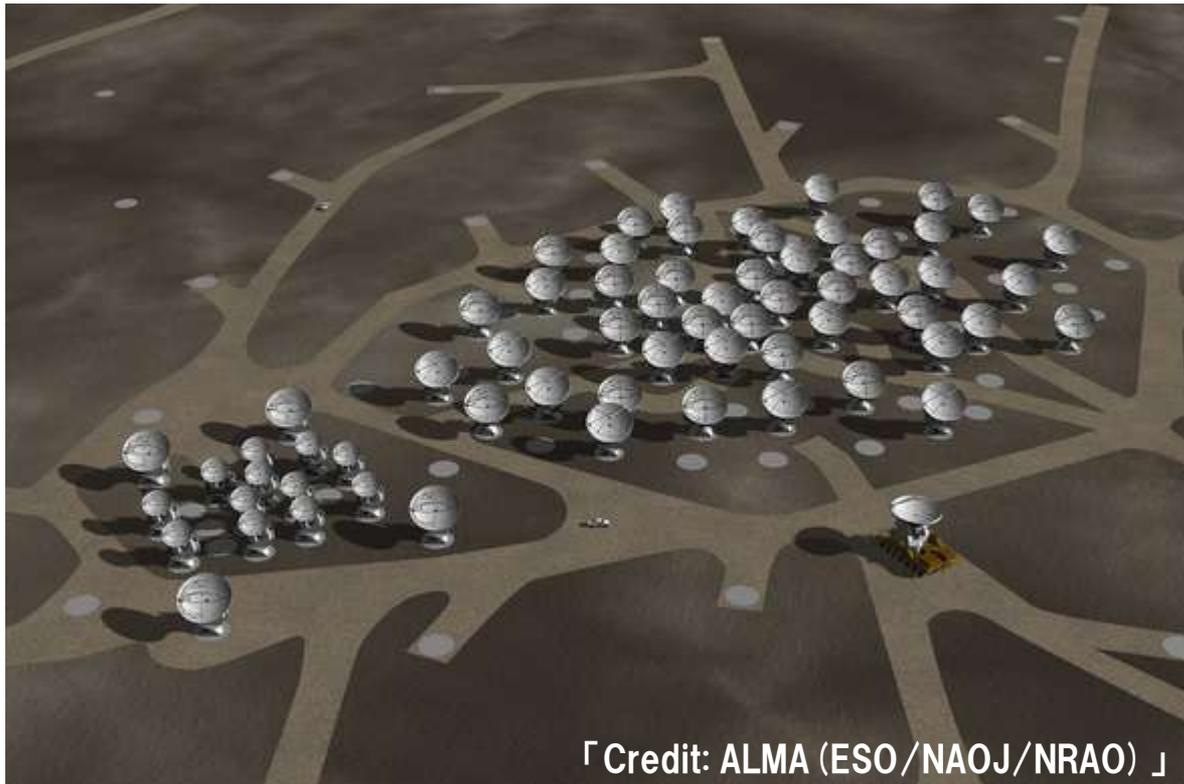
しかし、

地上では、大気、雨による減衰が非常に大きいため、観測が困難。



# ALMAプロジェクト

標高5000mの高原で、年間降水量100mm以下のほぼ年中晴天というミリ波、サブミリ波を地上で観測するには最適なチリのアタカマ砂漠に、パラボラアンテナ66台を組み合わせる干渉計方式の巨大電波望遠鏡を作り、光の望遠鏡で見ることにはできない冷たい塵やガスを観測し、暗黒の宇宙の姿を明らかにするプロジェクト。



「Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)」

アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

# THz波帯の定義は？

## 波長でネーミング

- ミリ波: 1 mm ~ 10 mm (30 GHz ~ 300 GHz)
- サブミリ波: 0.1 mm ~ 1 mm (300 GHz ~ 3 THz)

## 周波数でネーミング

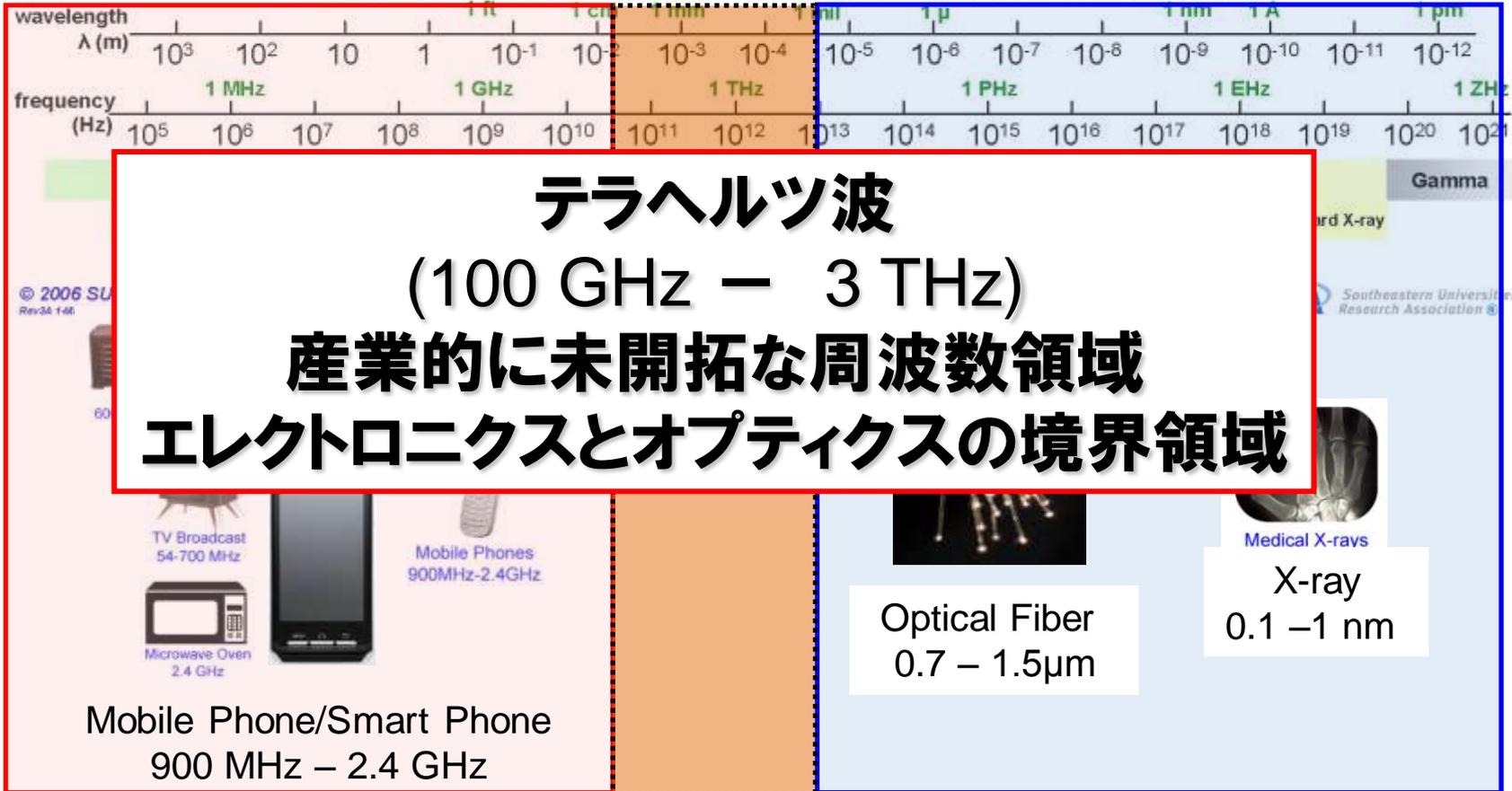
- テラヘルツ波: 100 GHz ~ 10 THz (30  $\mu$ m ~ 3 mm)  
300 GHz ~ 3 THz (0.1 mm ~ 1 mm)  
1 THz ~ 10 THz (30  $\mu$ m ~ 0.3 mm)

## 色でネーミング

- 赤外線: 750 nm ~ 1 mm (300 GHz ~ 405 THz)
- 可視光: 390 nm ~ 750 nm (405 THz ~ 790 THz)
- 紫外線: 10 nm ~ 390 nm (790 THz ~ 30 EHz)

# 電波と光線

Chart of the Electromagnetic Spectrum



**テラヘルツ波**  
 (100 GHz - 3 THz)  
**産業的に未開拓な周波数領域**  
**エレクトロニクスとオプティクスの境界領域**

**エレクトロニクス**  
 【Electron】  
 周波数 (Hz)

**オプティクス**  
 【Phonon】  
 波長 (m)

# ミリ波・テラヘルツ波の特徴

	電波	ミリ波・THz波	光線
イメージング (形状を把握)	m 物質透過性	mm 非破壊検査	空間分解能 $\mu\text{m}$
センシング (素材を把握)	分子の回転 物質透過性	分子間結合 化学物質識別 (医薬錠剤等)	識別分子構造数 分子内結合
通信 (信号を送る)	G bps km 通信エリア確保 の容易性	T bps m 近接大容量 無線	大容量性 P bps mm

# アウトライン

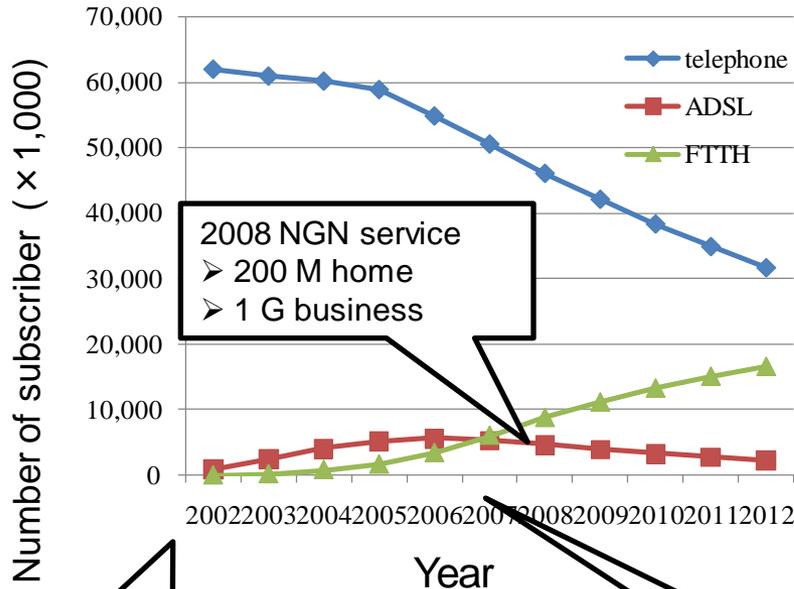
---

1. テラヘルツ波研究を取り巻く状況
- 2. テラヘルツ波の通信応用に向けた最新動向**
3. NTTにおける研究のアプローチと成果
4. テラヘルツ通信実現に向けた課題
5. まとめ

# NTT NTTグループにおけるネットワークサービスの推移

NTTアニュアルレポート参照<http://www.ntt.co.jp/ir/library/annual/index.html>

## 固定網



2008 NGN service  
 > 200 M home  
 > 1 G business

2001 FTTH service  
 > 10 M home  
 > 100 M business

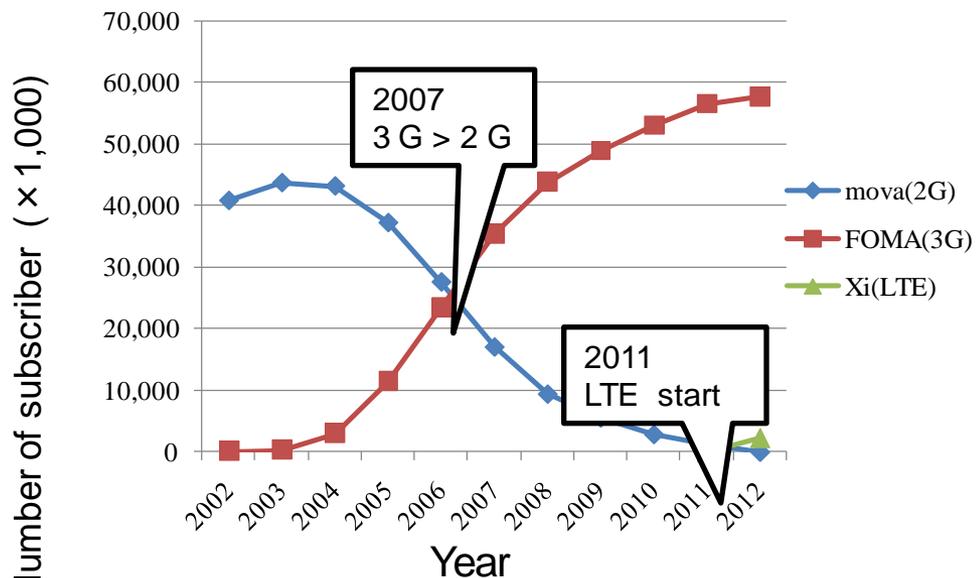
2007  
 FTTH > ADSL

いつ、FTTHが固定電話を超えるか？



10GEPONサービスがいつ始まるか？

## 移動体網



2007  
 3G > 2G

2011  
 LTE start

5年で逆転

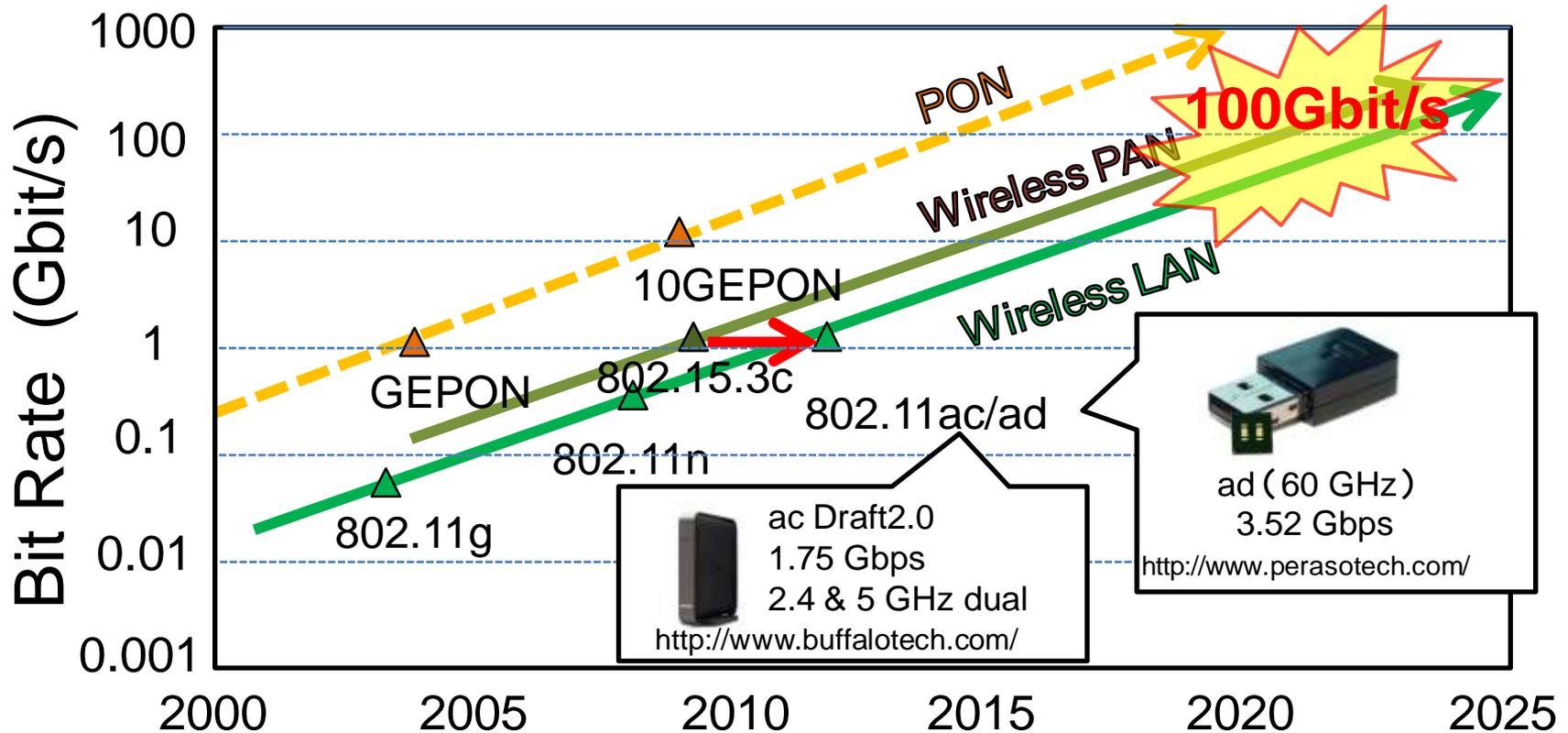
10年で入れ替わり

いつ、LTEが3Gを超えるか？



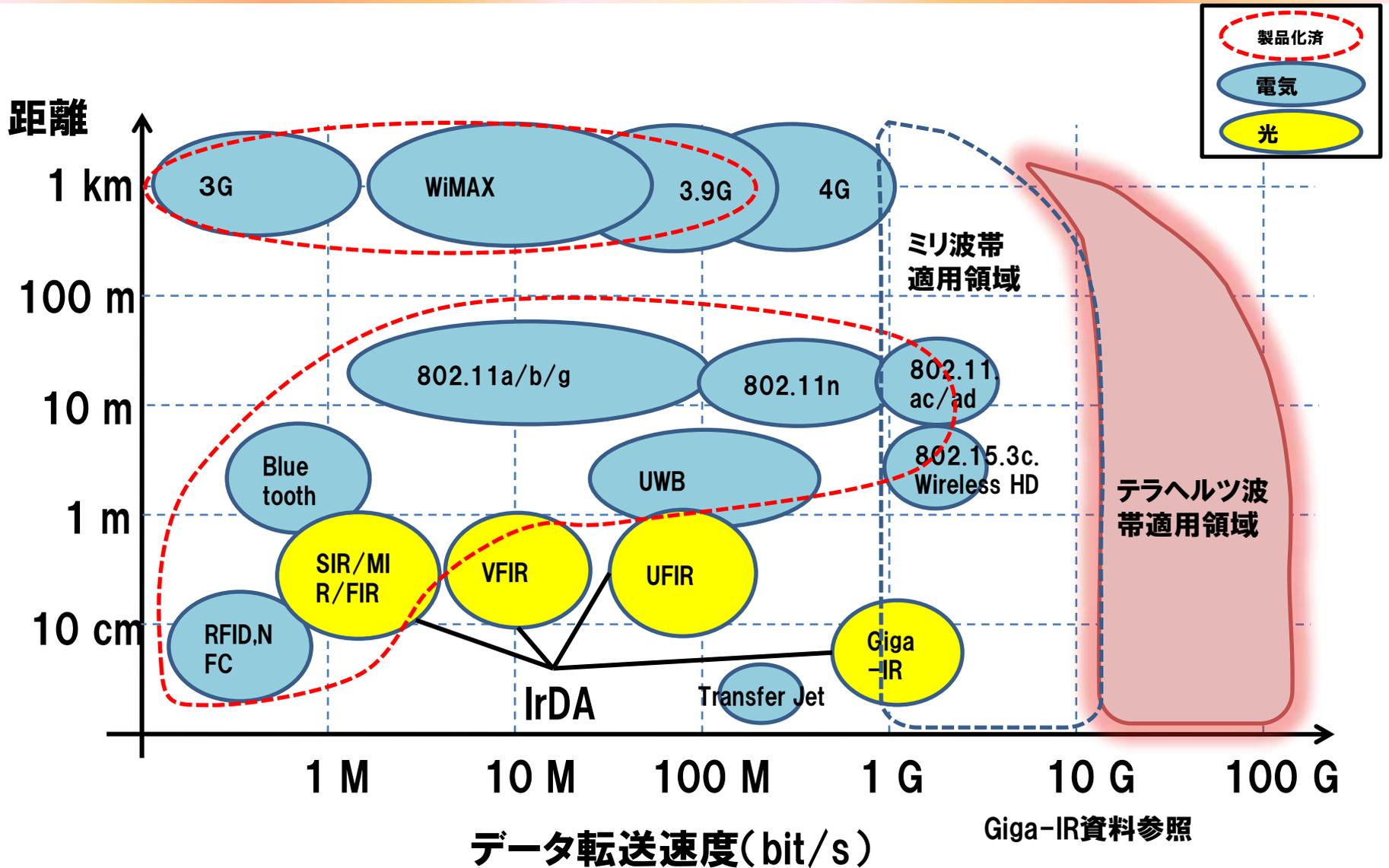
LTE-advanced (4G) サービス (1Gbps) は  
 2015年にスタート

# アクセスネットワークの標準化動向



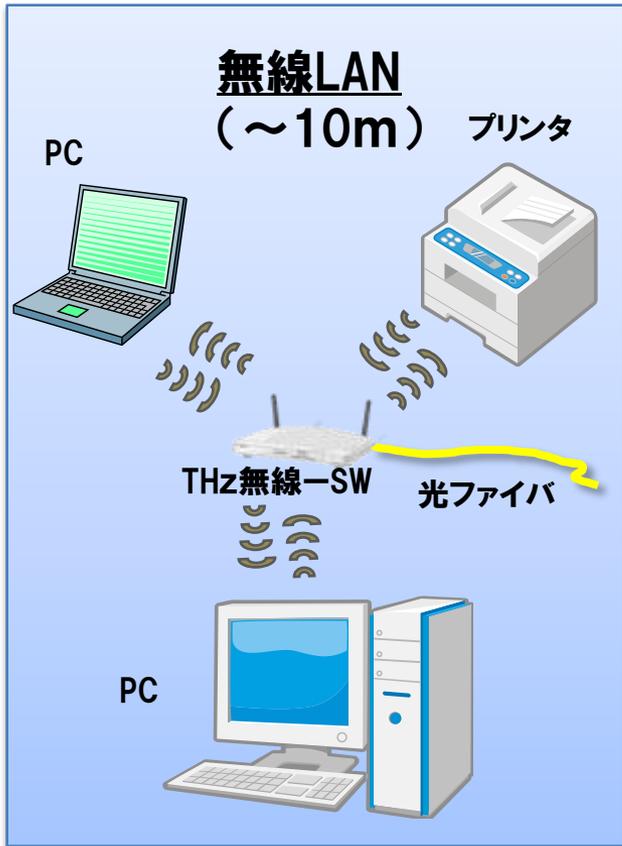
2025年頃には、100 Gbit/sの世界へ  
光とシームレスな無線ネットワークへ

# テラヘルツ波の適用領域

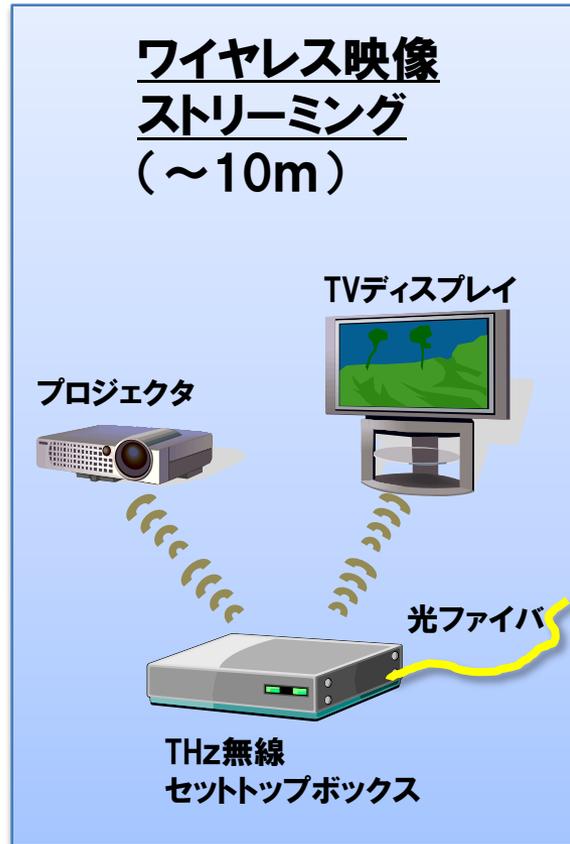


# 近距離通信&近接転送

## 一般ユーザによる利用



IEEE802.11.ad

IEEE802.15.3c  
Wireless HD

Transfer Jet, Giga-IR

# 転送速度比較

5GB (single DVD)

100 Gbit/s



10 Gbit/s



1 Gbit/s  
(Giga-IR, WirelessHD)



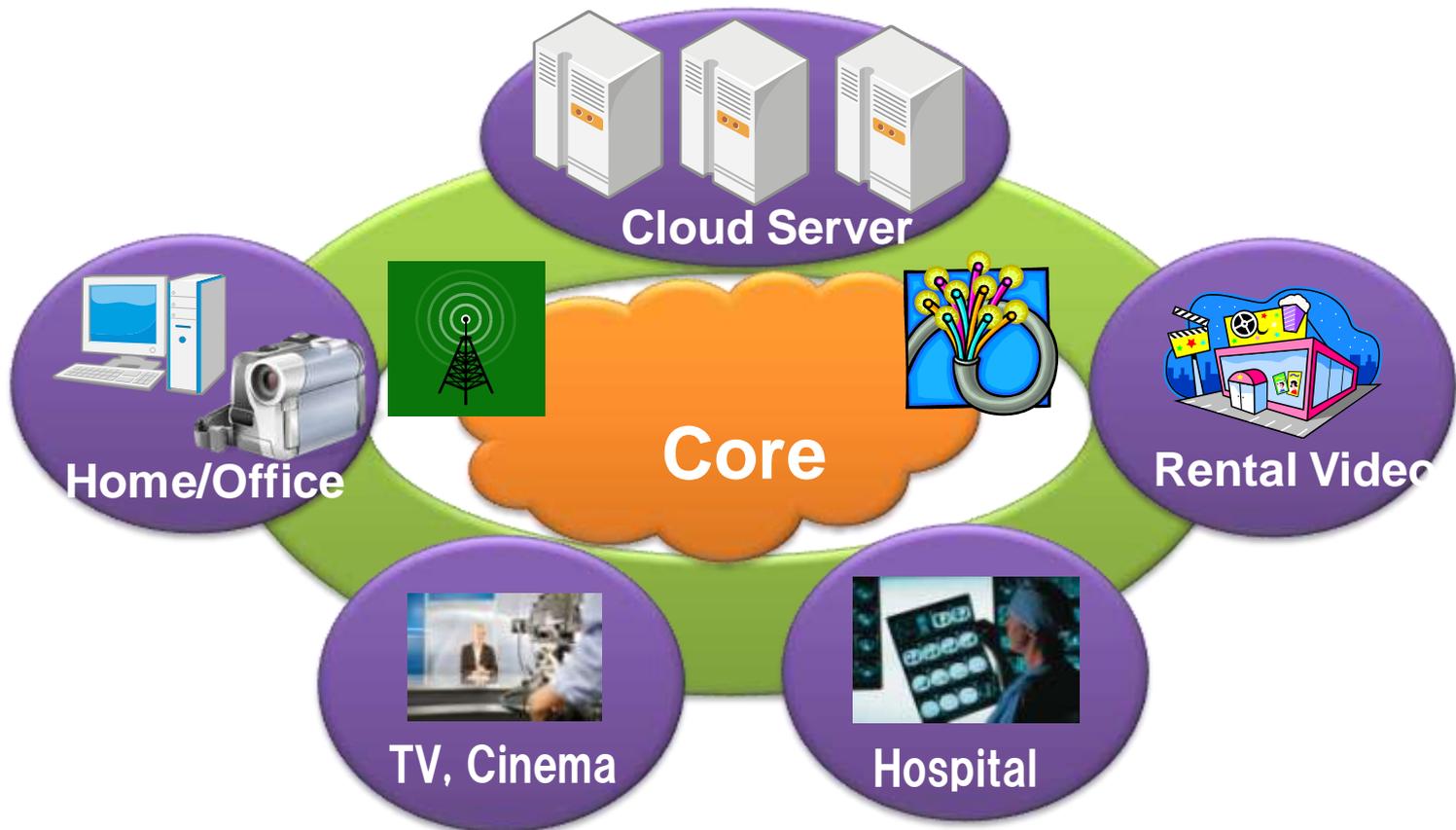
500 Mbit/s  
(Transfer Jet)



100 Mbit/s  
(LTE downstream)



# 遍在する大容量データ



今後、益々ローカルにリッチコンテンツが蓄積され、これらの大容量データが、ネットワークに流れ込むことでコアネットワークがひっ迫。

# 医療現場への応用①

—近畿総合通信局の調査検討会報告書より—

## ①手術・治療現場への高度ICT導入のニーズ

- ・ 手術現場のケーブルレス化
- ・ リアルタイム無線伝送  
高精細3D映像  
マルチチャネル手術・患者情報

## ②医療情報データベースクラウドへの高速アクセスのニーズ

- ・ 手術・診察中の高速アクセス
- ・ 遠隔医療の促進、地域医療の向上



(写真提供:東京女子医大 伊関 先生)

■ ダビンチのコントロール部分(左) ロボットアーム部分(右)



(写真提供:神戸大学 杉本真樹)



Apple Inc. web site より転用 (<http://www.apple.com/science/profiles/maki/>)

近畿総合通信局

テラヘルツ帯の情報通信利用に関する調査検討会報告書より抜粋

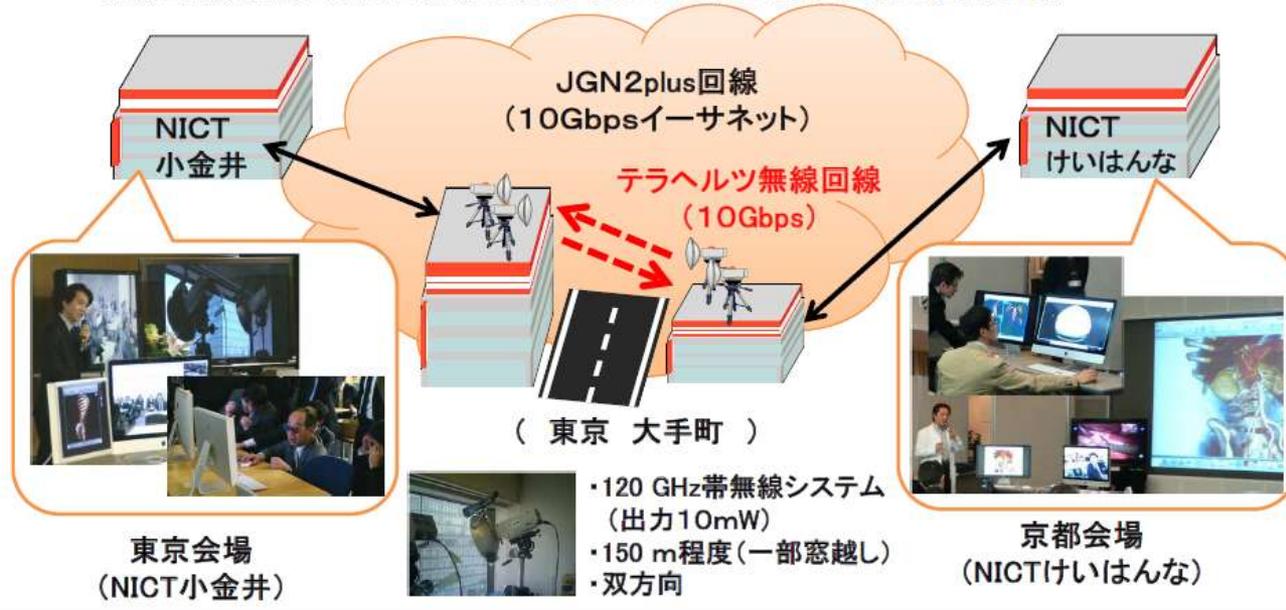
# 医療現場への応用②

—近畿総合通信局の調査検討会報告書より—

エンド・ツー・エンドで10Gbps通信を実現することで、3D高精細映像などの大容量データをリアルタイムに自由にハンドリングできることを実証。

## 公開実験：世界初の双方向の有線無線融合の高速回線

情報通信研究機構（NICT）の本部（東京）とけいはんな研究所（京都）間を、高速光回線（JGN2plus）と高速無線回線（テラヘルツ無線）で結び、公開実験を実施。有線と無線を融合した世界初の双方向の10Gbit/sの高速回線を実現した。



近畿総合通信局

テラヘルツ帯の情報通信利用に関する調査検討会報告書より抜粋

# 災害時報道への応用

## マイクロ波を利用した従来の伝送 (被災地がマイクロ波伝送エリア外の場合)



## テラヘルツを利用した映像伝送イメージ (被災地がマイクロ波伝送エリア外の場合)



近畿総合通信局 テラヘルツ帯の情報通信利用に関する調査検討会報告書より抜粋

50～150 Mbps(マイクロ波FPU)であり、  
HDTV, 4K, 8Kなどの大容量データの転送  
には、時間がかかる。

伝送のための待機飛行時間の増大

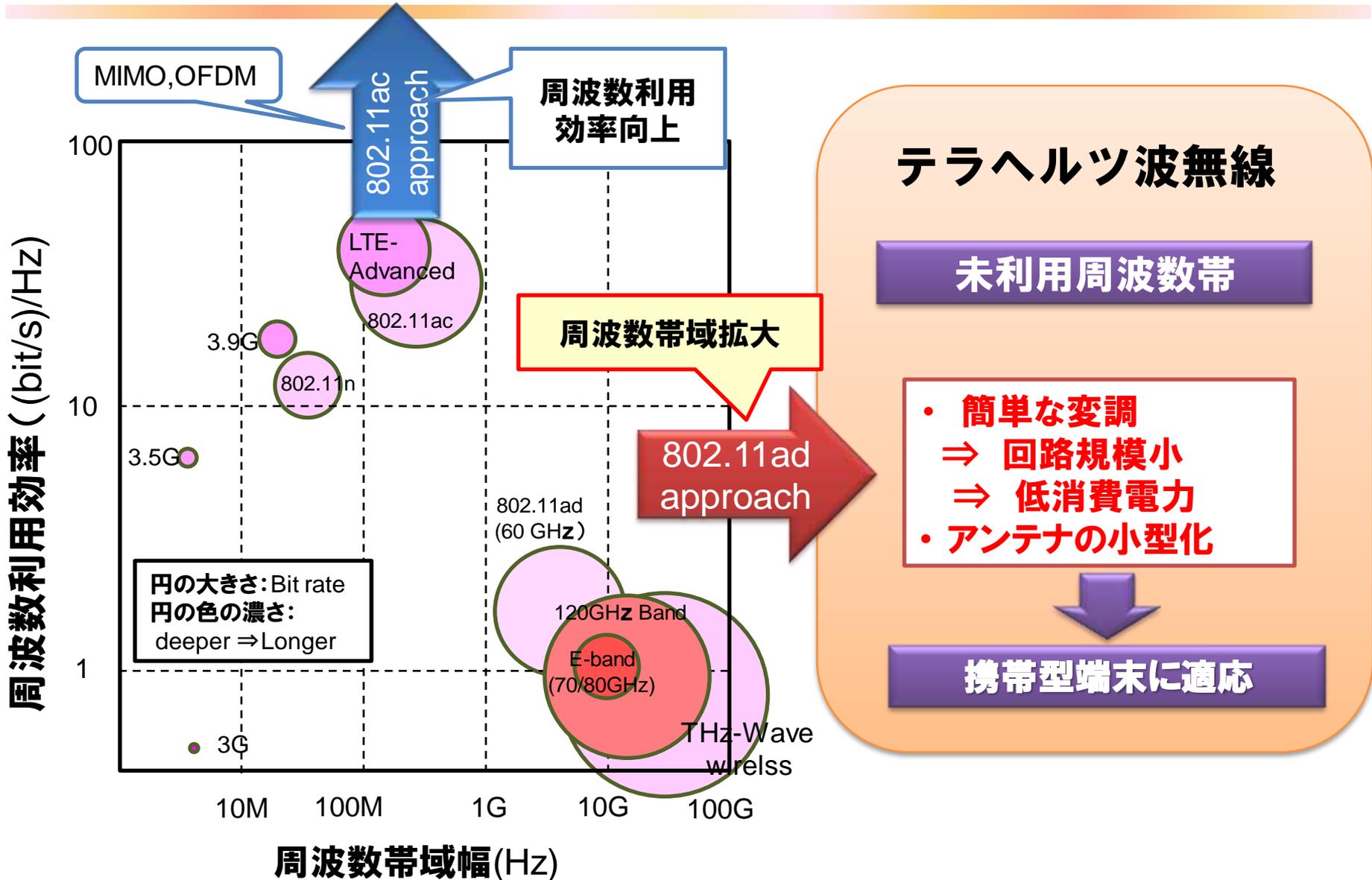
- ヘリの燃料コスト増大
- 取材のための移動に制限

10Gbps以上の転送能力があれば、  
HDTV, 4K, 8Kなどの大容量データを  
瞬時に転送可能となる。

伝送のための待機飛行時間の不要

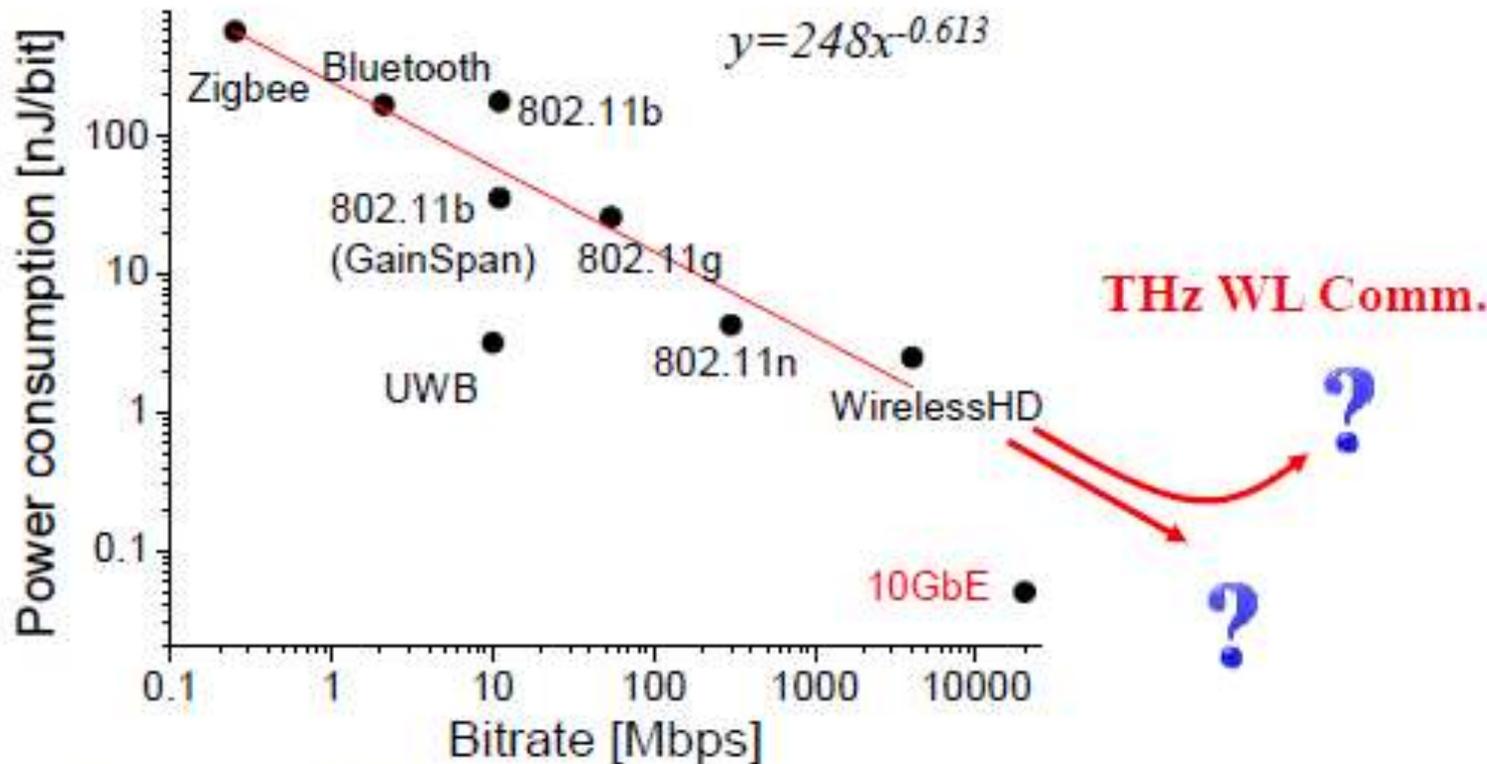
- ヘリの燃料は、基地への移動のみ
- 多地点への素早い移動が可能

# 超高速無線通信の技術動向



# NTT ビット当たりの消費電力とビットレートの関係

Fitted by Zigbee, Bluetooth, 802.11b (GainSpan), 802.11g, 802.11n, Wireless HD



By Dr. Tetsuya Kawanishi of NICT

Dr. Tetsuya Kawanishi of NICT

<http://www.soumu.go.jp/soutsu/kinki/studygroup/2010/THz/index.html>

# DARPAのプロジェクト(米国)

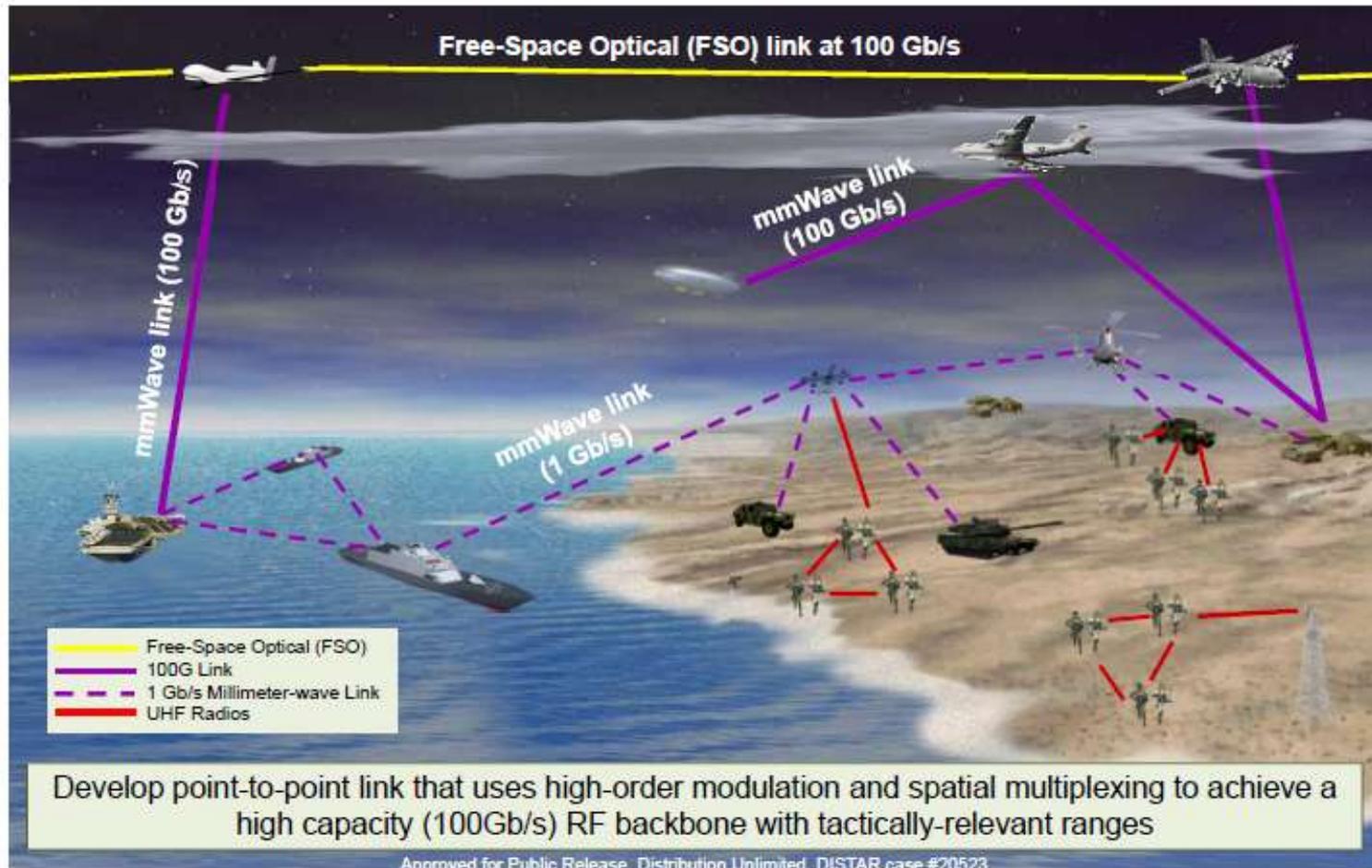
## 100 Gb/s RF Backbone (100G)

- **Federal Agency Name** – Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), Strategic Technology Office (STO)
- **Announcement Type** – Initial Announcement
- **Funding Opportunity Number** – Broad Agency Announcement (BAA) 13-15
- **Dates** o Posting Date **January 3, 2013**
  - o **Proposers' Day:** January 9, 2013
- **Concise description of the funding opportunity** – DARPA is soliciting innovative research proposals for developing a communications link capable of transmitting data at **a rate of 100 Gb/s within a single radio frequency channel**. The proposed program, 100G, should investigate innovative approaches for using high-order modulation together with spatial multiplexing to achieve **spectral efficiencies greater than 20 bits-per-second-per hertz**.
- **Total amount of money to be awarded:** **\$18,300,000 is currently available for Phase 1**

# DARPAのプロジェクト(米国)



100G vision: fiber-optics-equivalent RF Backbone



# Giga Korea (韓国)

## Giga Korea - Field Trials Plan



Giga Koreaは、平昌(ピョンチャン)で2018年に開催されるオリンピックをフィールドトライアルとした未来のギガ級無線環境に必要な設備、部品、サービスなどモバイルエコシステム全般における世界市場を先導するための韓国の中長期的なR&Dプロジェクト(2012~2020年)。

1Gbpsクラスの無線サービスの実現

出展 APMP2013 Keynote Speech Dr. Bongtae Kim (ETRI), Korea  
Title: Giga Korea Initiative & 5G Mobile Network

# NTT Toward 5G Mobile Network(韓国)

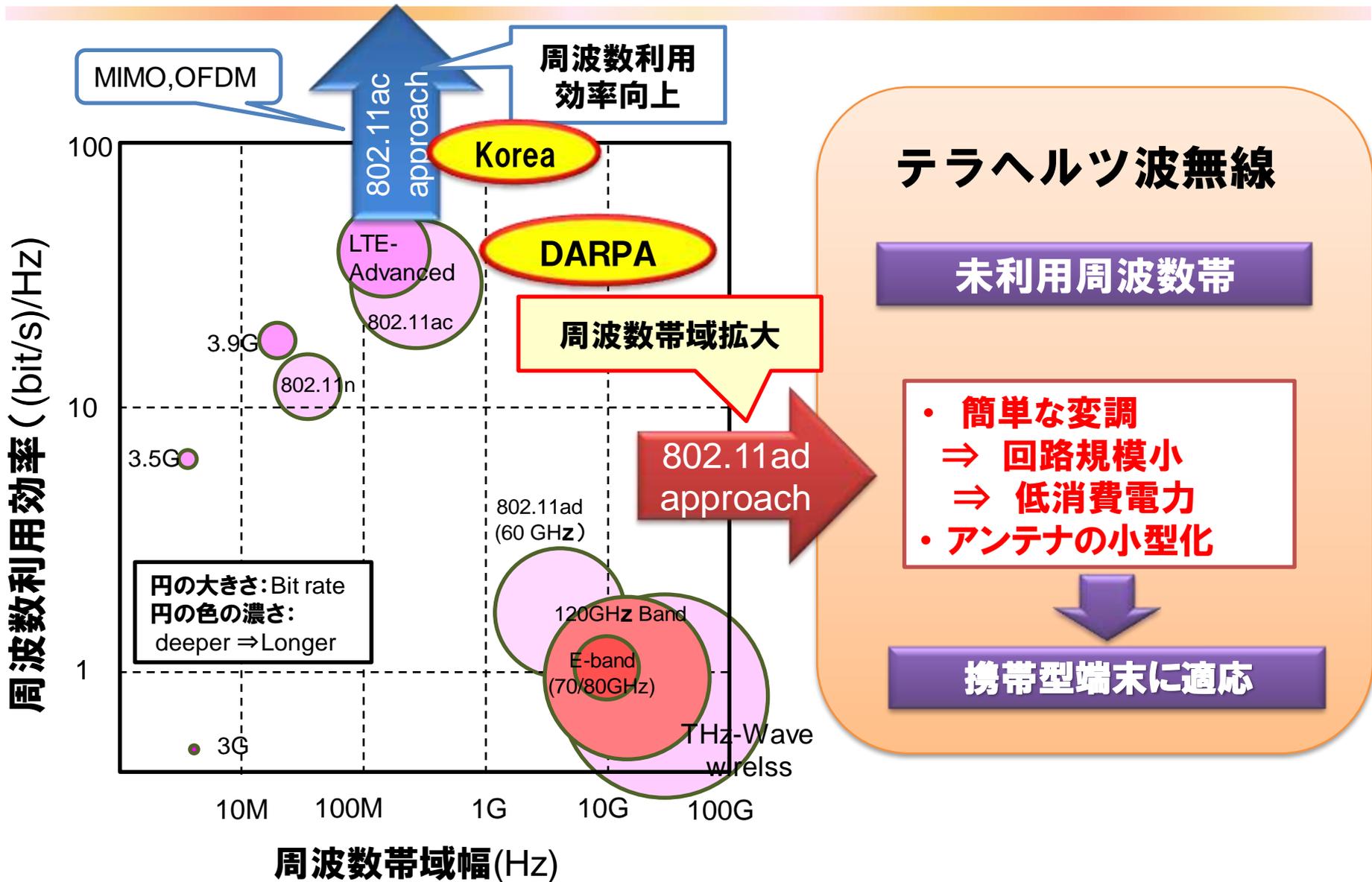
## 5G Mobile – Radio Tech.

### System Parameters (100 Gbps/cell)

- How to achieve the max. data rate, 100 Gbps/cell (c.f. LTE Req. = 100 Mbps/cell)?
  - Max. Spectrum Efficiency = 100 bps/Hz/cell ← 20 times higher than LTE (LTE Req. = 5 bps/Hz/cell)
  - Bandwidth = 1 GHz Bandwidth ← 50 times wider than LTE (LTE Req. = 20 MHz)

Bandwidth (except Guard Band)	1 GHz (0.9 GHz)
CP Overhead	12.5%
Control Channel Overhead (Common Control Channels, Reference Signals)	20%
Code Rate	5/6
Max. Spectrum Efficiency / beam	3.15 bps/Hz for 64QAM
	(4.2 bps/Hz for 256QAM)
# of Beams required	36 Beams for 64QAM
	(24 Beams for 256QAM)
Max. Spectrum Efficiency / cell	100 bps/Hz/cell
Max. Data Rate / cell	100 Gbps/cell

# 超高速無線通信の技術動向



# THz related national projects

## Terahertz room-temperature integrated parametric source (EU): 2010 ~ 2013

€ 2.3M (total)

UNIVERSITE PARIS DIDEROT (Paris 7), DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET, JULIUS-MAXIMILIANS UNIVERSITAET WUERZBURG

## MILLILINK (Germany):

Jan. 2010 ~ Feb. 2013

€ 2.9M (total for 3 years)

40 Gbps over 1 Km in 200~260 GHz band  
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Siemens, Fraunhofer-Institut für Angewandte (IAF), KATHREIN-Werke, RPG Radiometer physics GmbH

## Multi-ten gigabit wireless communications technology at sub-terahertz frequencies :

2011~ 2016 (Japan)

JPY 200M / year

NTT, Fujitsu, NICT

## THz electronics (USA, Phase II): 2011 ~ 2014

\$ 12.5M (total for 3 years)

1.03 THz compact, high-performance electronic circuits  
 Northrop Grumman Space & Mission Systems

## Towards Innovative Development of Terahertz-wave Technologies and Applications : 2010 ~ 2020 ( by JST)(Japan)

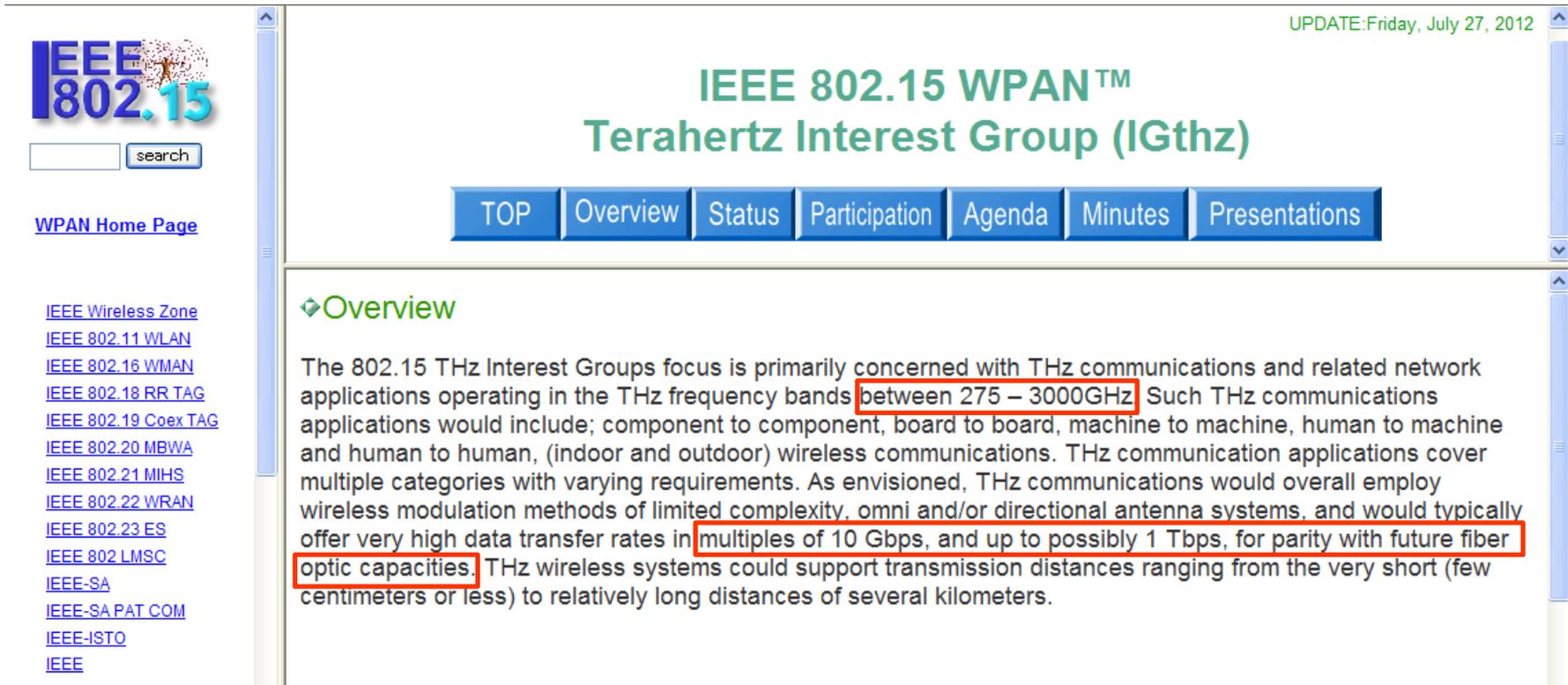
JPY 300M / year

Osaka Univ., Kyoto Univ.,RIKEN, etc

## Research on THz Bio system (Korea) : 2009 ~ 2018

KRW 1200M (~\$1M) / year  
 SNU, KAIST, POSTECH, etc

# IEEE 802.15(WPAN)での IGthz



UPDATE: Friday, July 27, 2012

## IEEE 802.15 WPAN™ Terahertz Interest Group (IGthz)

[TOP](#) [Overview](#) [Status](#) [Participation](#) [Agenda](#) [Minutes](#) [Presentations](#)

### ◆ Overview

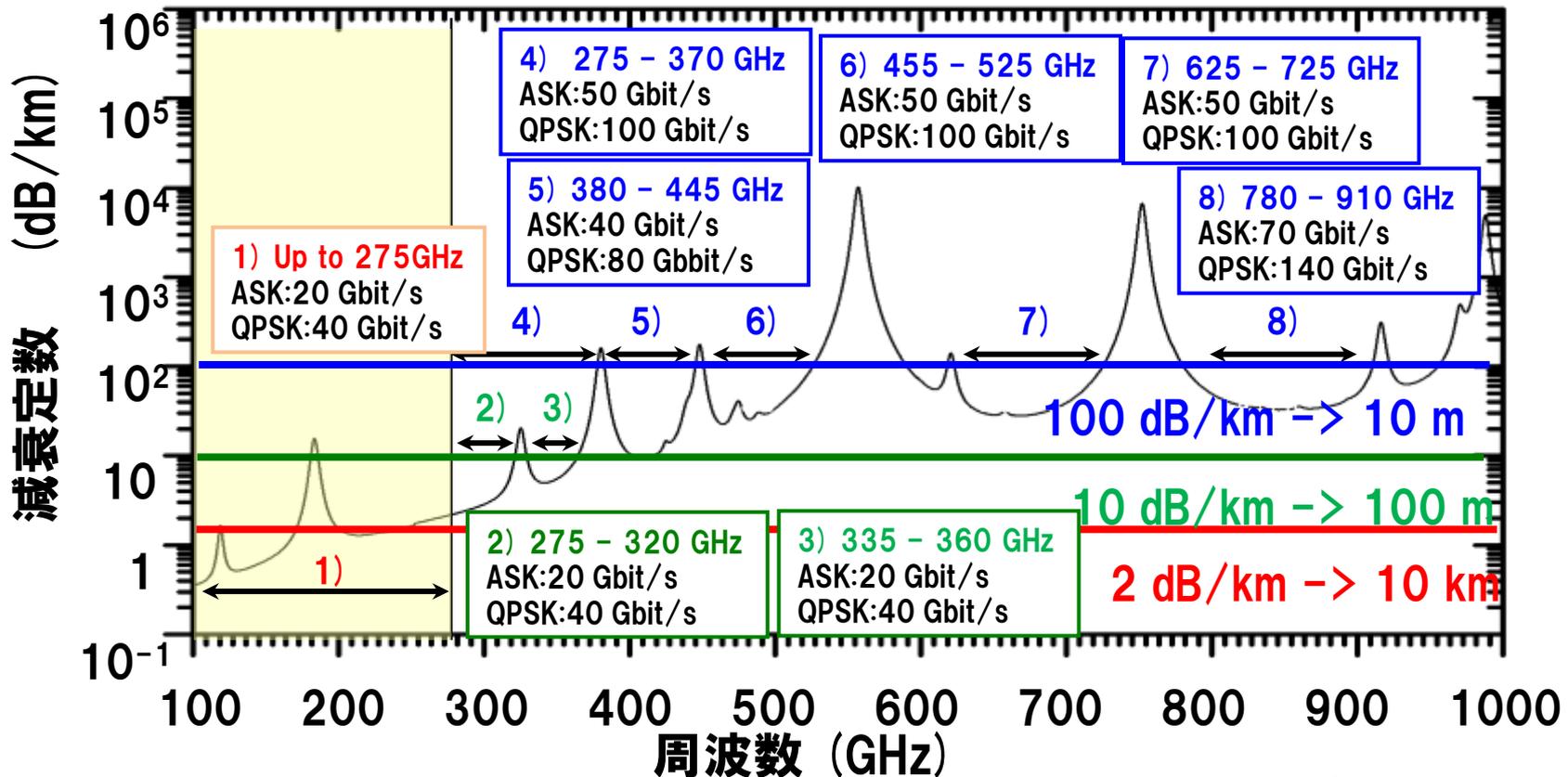
The 802.15 THz Interest Groups focus is primarily concerned with THz communications and related network applications operating in the THz frequency bands **between 275 – 3000GHz**. Such THz communications applications would include; component to component, board to board, machine to machine, human to machine and human to human, (indoor and outdoor) wireless communications. THz communication applications cover multiple categories with varying requirements. As envisioned, THz communications would overall employ wireless modulation methods of **limited complexity, omni and/or directional antenna systems, and would typically offer very high data transfer rates in multiples of 10 Gbps, and up to possibly 1 Tbps, for parity with future fiber optic capacities.** THz wireless systems could support transmission distances ranging from the very short (few centimeters or less) to relatively long distances of several kilometers.

[IEEE Wireless Zone](#)  
[IEEE 802.11 WLAN](#)  
[IEEE 802.16 WMAN](#)  
[IEEE 802.18 RR TAG](#)  
[IEEE 802.19 Coex TAG](#)  
[IEEE 802.20 MBWA](#)  
[IEEE 802.21 MIHS](#)  
[IEEE 802.22 WRAN](#)  
[IEEE 802.23 ES](#)  
[IEEE 802 LMSC](#)  
[IEEE-SA](#)  
[IEEE-SA PAT.COM](#)  
[IEEE-ISTO](#)  
[IEEE](#)

<http://www.ieee802.org/15/pub/IGthz.html>

# 275GHz以上のテラヘルツ波無線

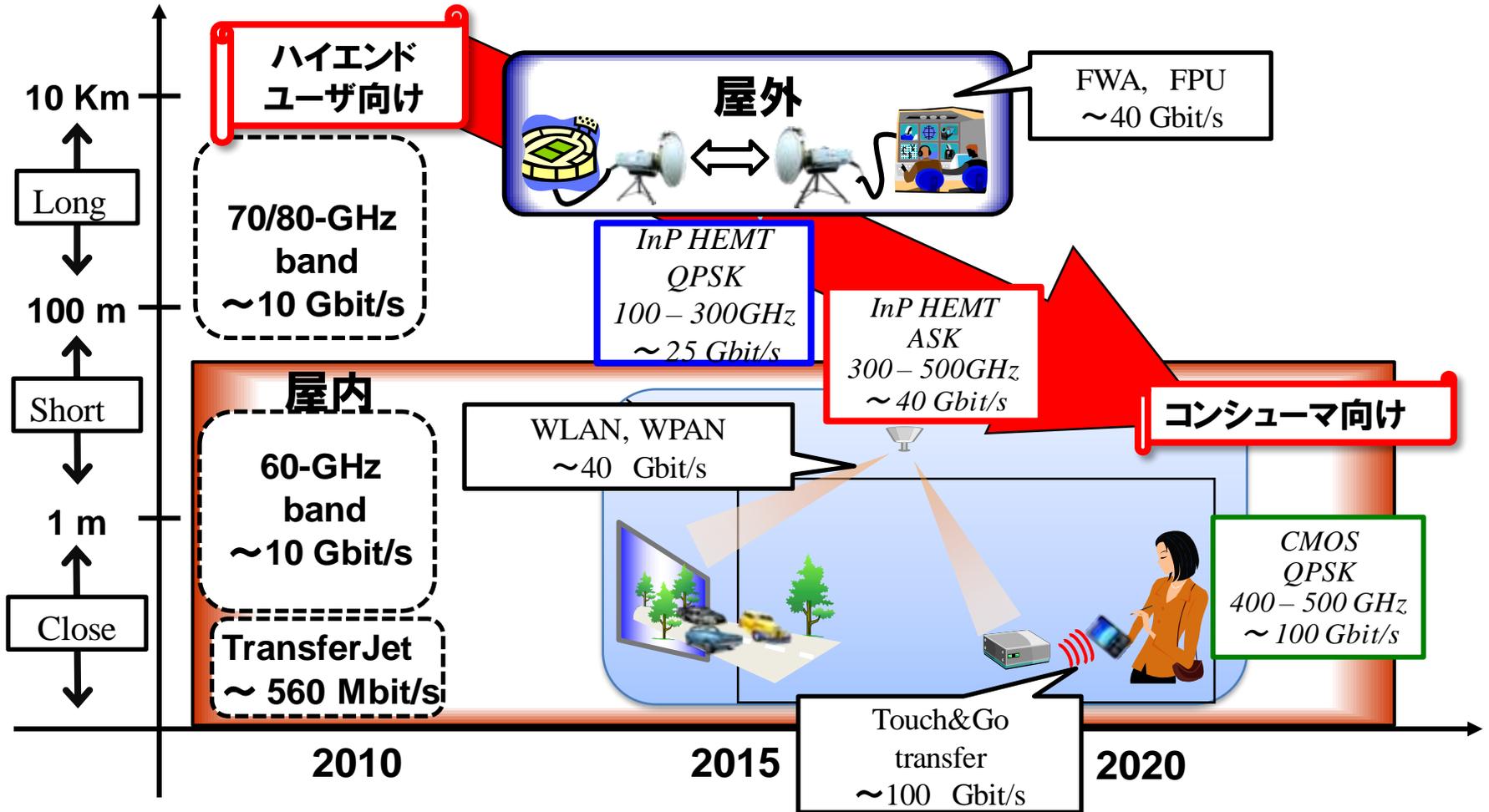
## テラヘルツ波の大気減衰特性(100~1000GHz)



テラヘルツ技術動向調査報告書 平成21年3月より

数10Gbit/s~100Gbit/s超の近距離無線へ

# THz波無線技術のロードマップ

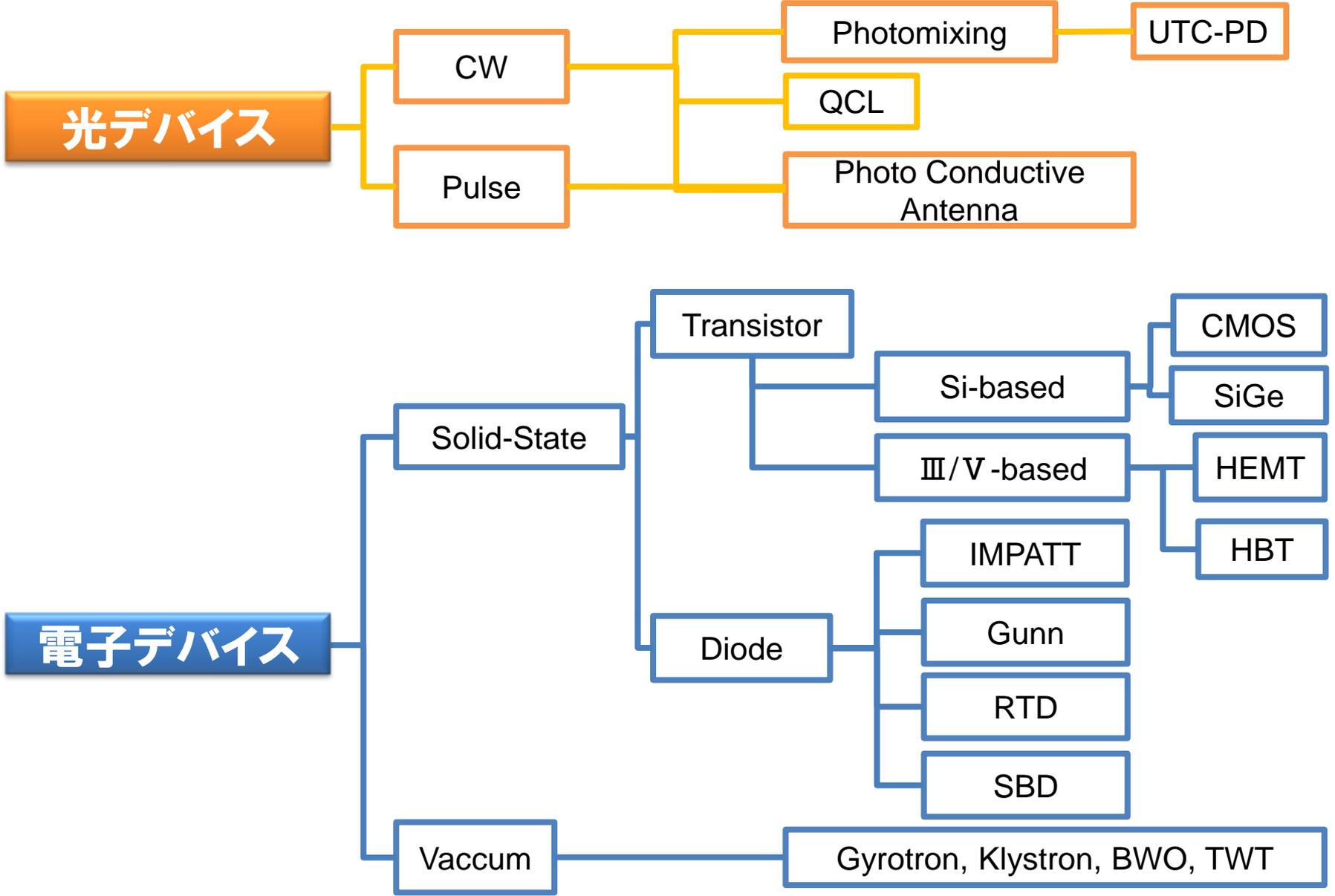


# アウトライン

---

1. テラヘルツ波研究を取り巻く状況
2. テラヘルツ波の通信応用に向けた最新動向
- 3. NTTにおける研究のアプローチと成果**
4. テラヘルツ通信実現に向けた課題
5. まとめ

# NTT 様々なテラヘルツ波発生・検出技術



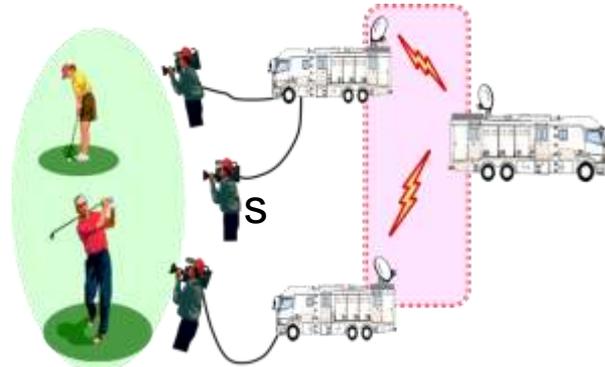
# テラヘルツ波の通信応用

# 120GHz帯無線

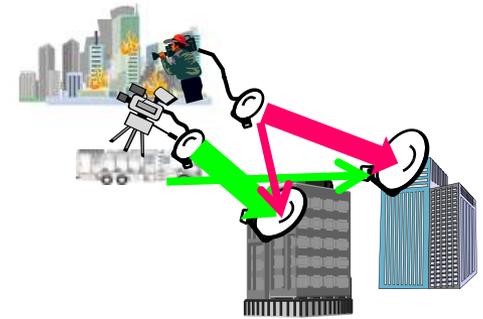
## 10Gbit/s級の 無線通信のニーズ

### 放送用途

- ・ 3D TV (>3 Gbps)
- ・ 4K TV (6 Gbps)
- ・ Super HiVison (8K)  
(>24 Gbps)



Sports events

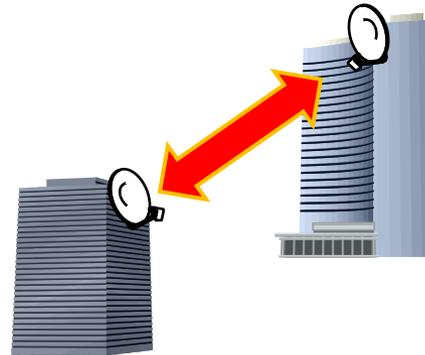


News

### 固定無線通信

### 移動体通信( backhaul )

- 10G Ethernet (10 Gbps)
- 40G Ethernet (40 Gbps)
- 100G Ethernet (100 Gbps)



Telecommunications



4G mobile wireless backhaul

# 120GHz帯無線システム開発の変遷

## Photonics-based system



MMW



10-Gbit/s wireless transmission  
(first in the world)

(a) Confirmation of principle of MMW transmission using photonic technology (2002)

2004/7

- The 1st experimental radio station over 100 GHz in Japan
- Output power: 1 mW

(b) Indoor system

Transmitter



Receiver

Outdoor

2008/5



Transmitter



Controller

(e) Easy-to-set-up system

2005/8

- Output power: 10 mW
  - Distance: ~2 km
  - Power consumption: 600 W
- (c) Outdoor system

Transmitter Core



Photonic MMW Generator

Data Modulator

Battery Available

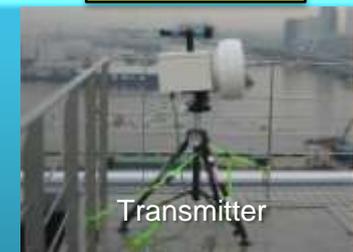
Mobility, Portability

Volume: 1/6 Weight: 1/2

2007/1

- Output power: 10 mW
- Distance: 2.2 km
- Power consumption: 60 W

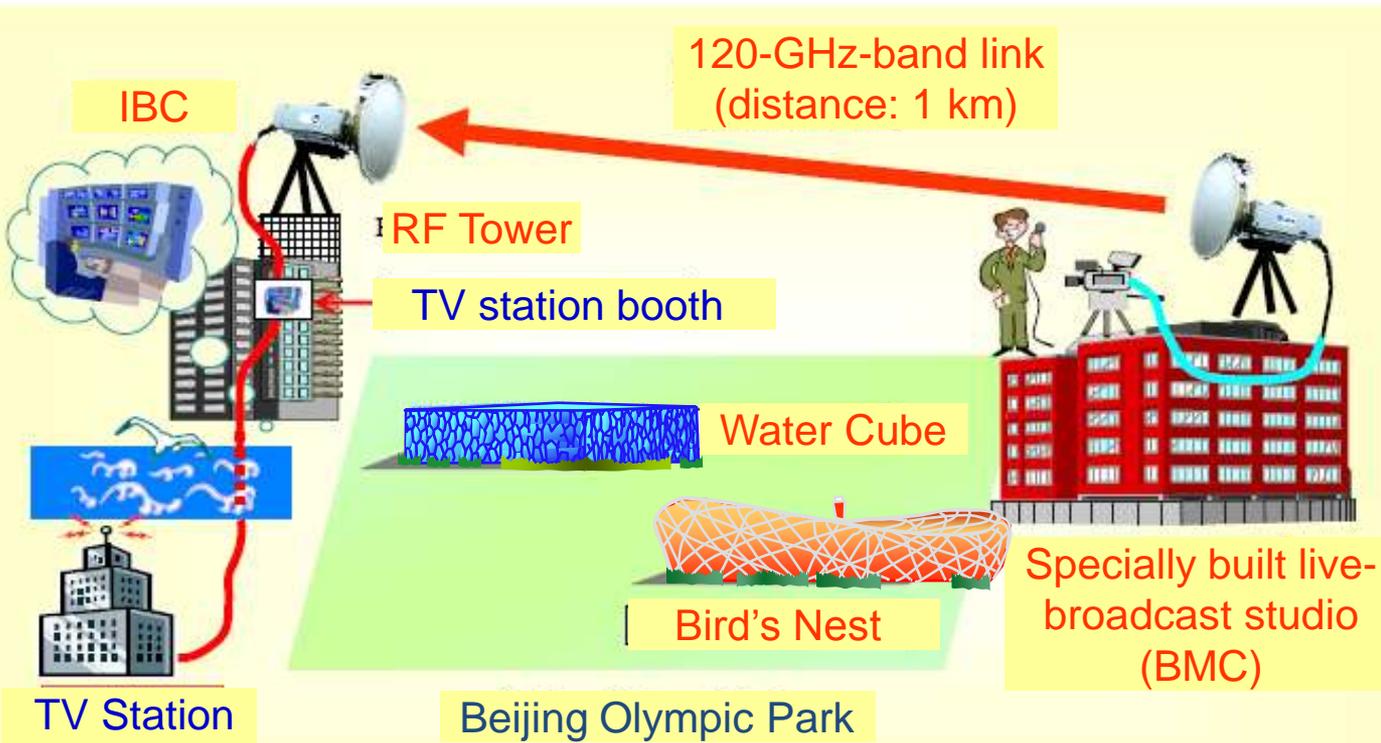
(d) Portable system



Transmitter

All-electronic system

# 非圧縮ハイビジョン伝送実験 (2008年北京五輪)



Delay of real time video transmission

① 120-GHz band (Uncompressed)



② Microwaves (Compressed)



View from BMC

本成果は、電波資源拡大に向けた研究開発(総務省)の技術の一部を利用しました。

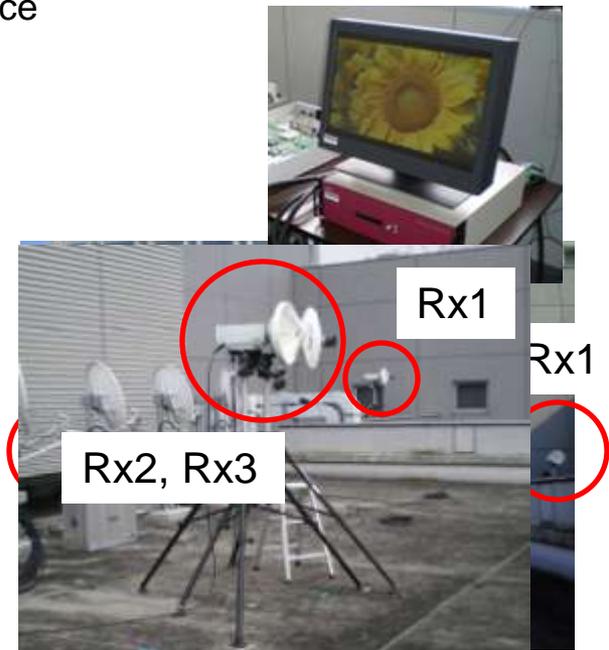
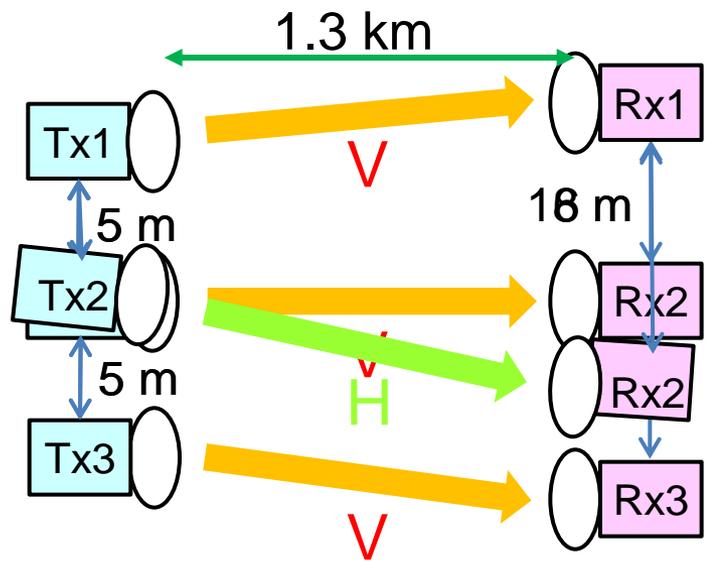
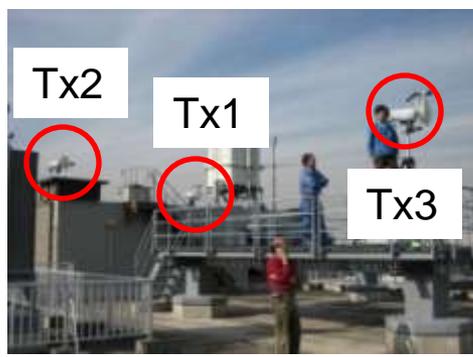
# NTT スーパーハイビジョンの非圧縮無線伝送実験

NHK放送技術研究所との共同実験

Super Hi-vision: Ultra-high-definition television

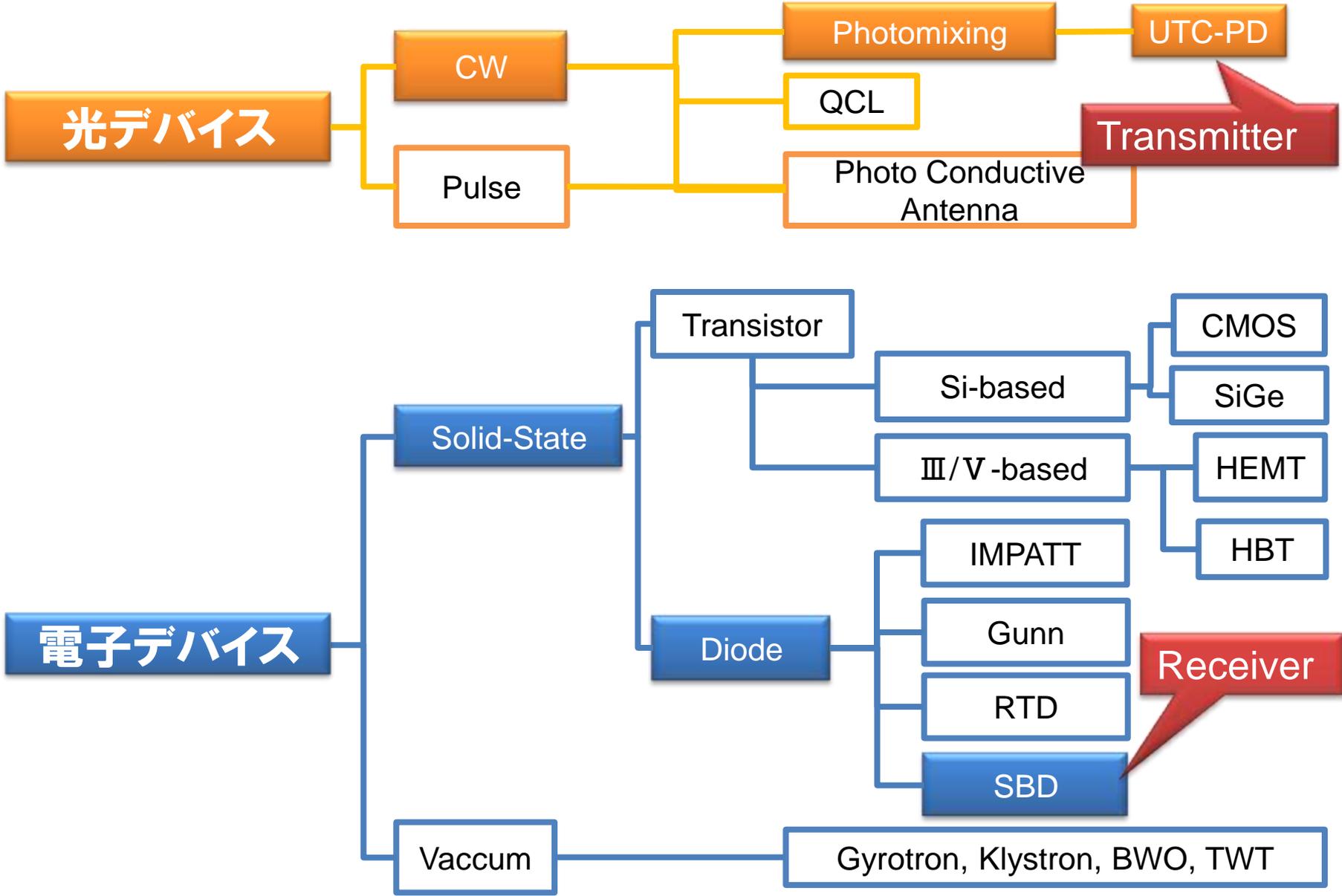
- ◆ ハイビジョンの16倍の解像度
- ◆ 伝送速度: 24 Gbit/s (デュアルグリーン方式, 16-ch HD-SDI )
- 伝送距離: 1.3 km
- V 偏波のみ: Rx の離隔距離: 8 m
- V & H 偏波利用: Rx の離隔距離: <1 m

T. Nakatogawa, S. Okabe et al., IBC 2010 Conference



# 300GHz帯の利用に向けて

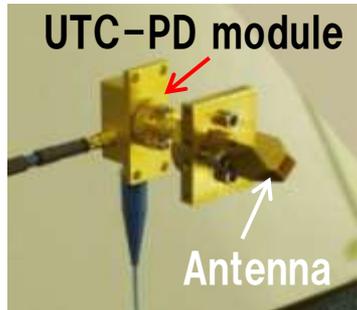
# NTT 様々なテラヘルツ波発生・検出技術



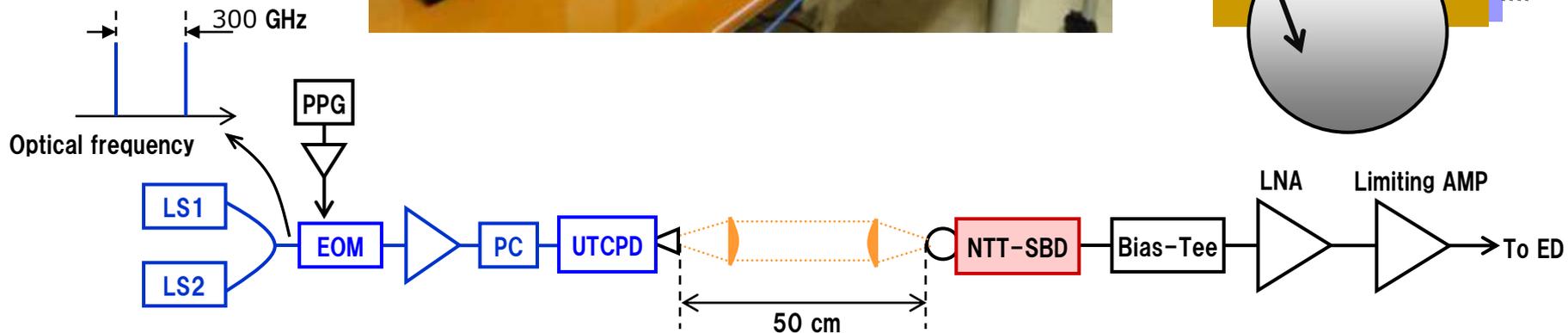
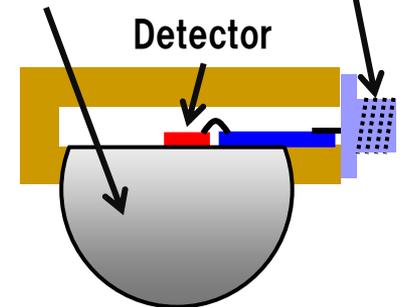
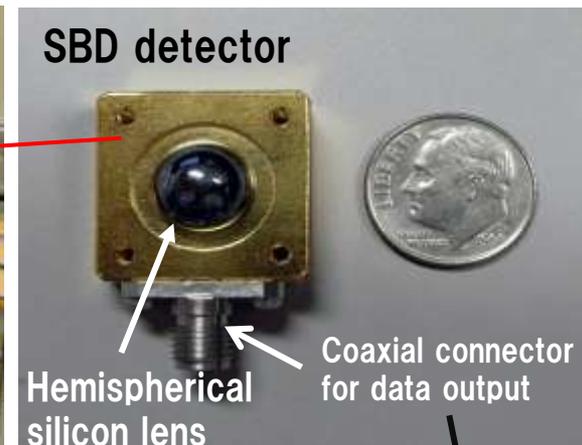
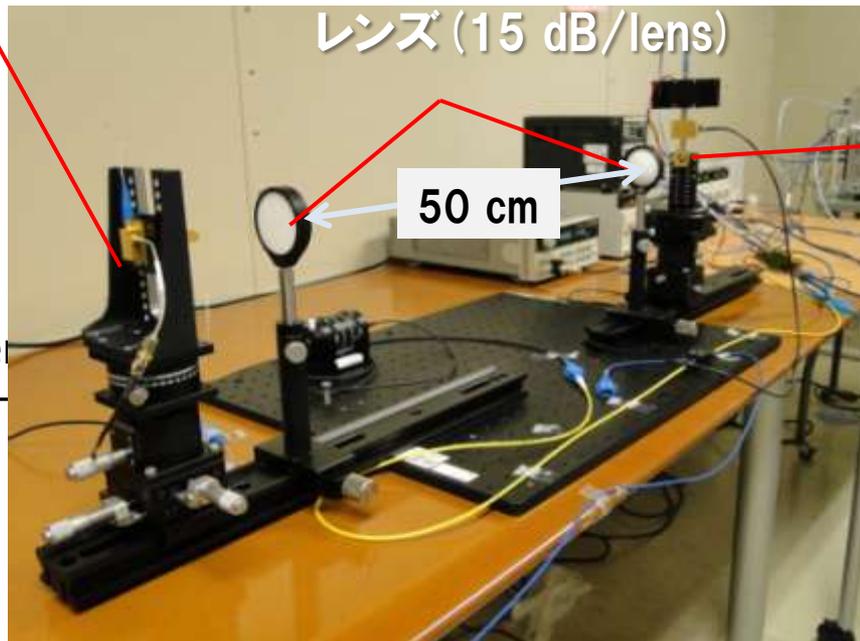
# UTC-PDを用いた300GHz帯無線伝送実験



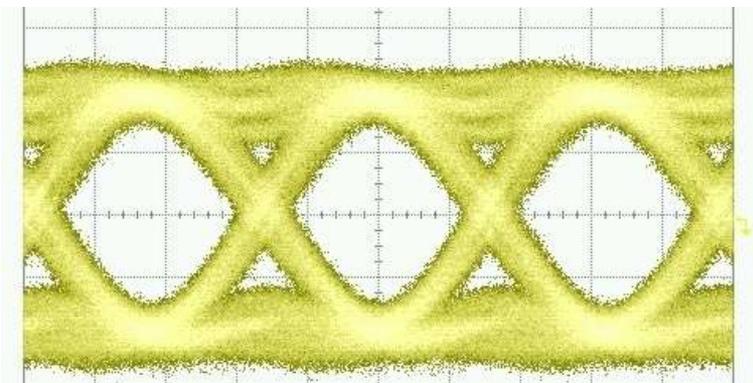
## - 実験構成 -



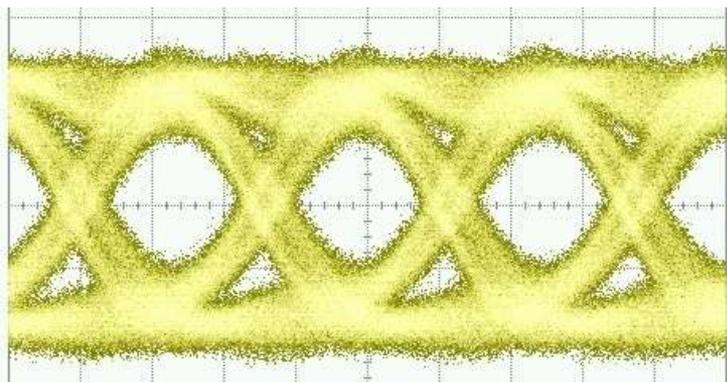
Max. output power  
500  $\mu$ W @ 300 GHz



UTC-PD: Uni-Traveling-Carrier Photodiode SBD: Schottky Barrier Diode PPG: Pulse Pattern Generator  
, ED: Error Detector EOM: Electro-Optic modulator PC: Phase Controller LS: Laser Source

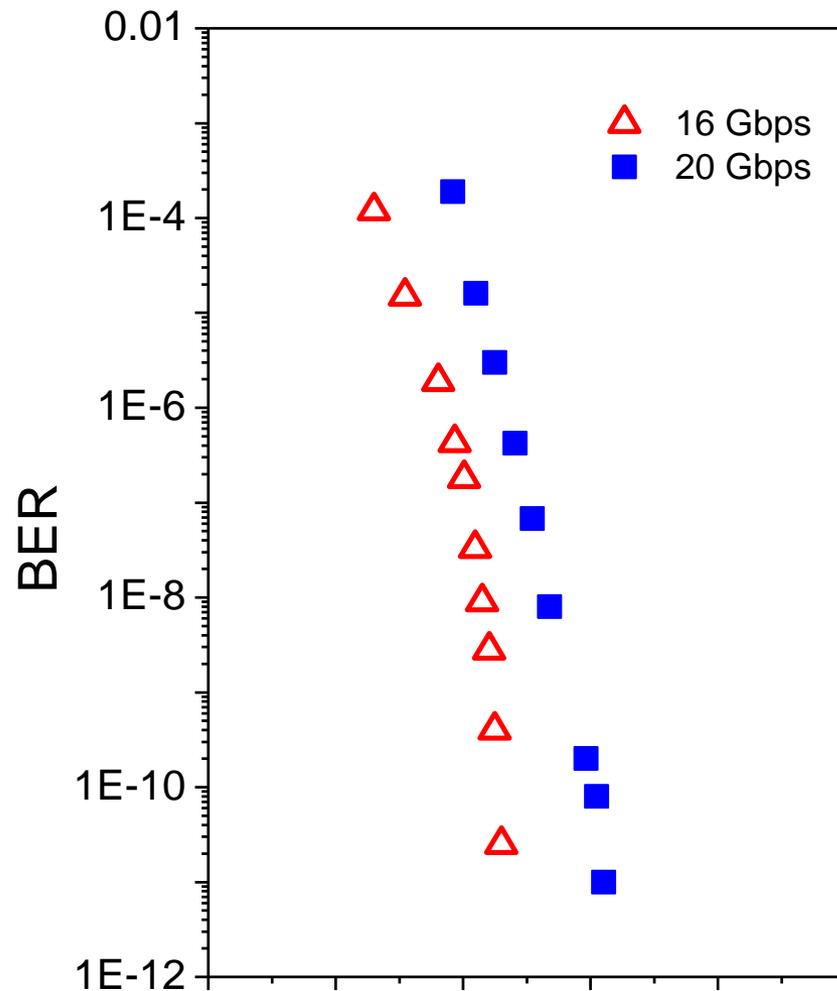


(a) 16 Gbps



(b) 20 Gbps

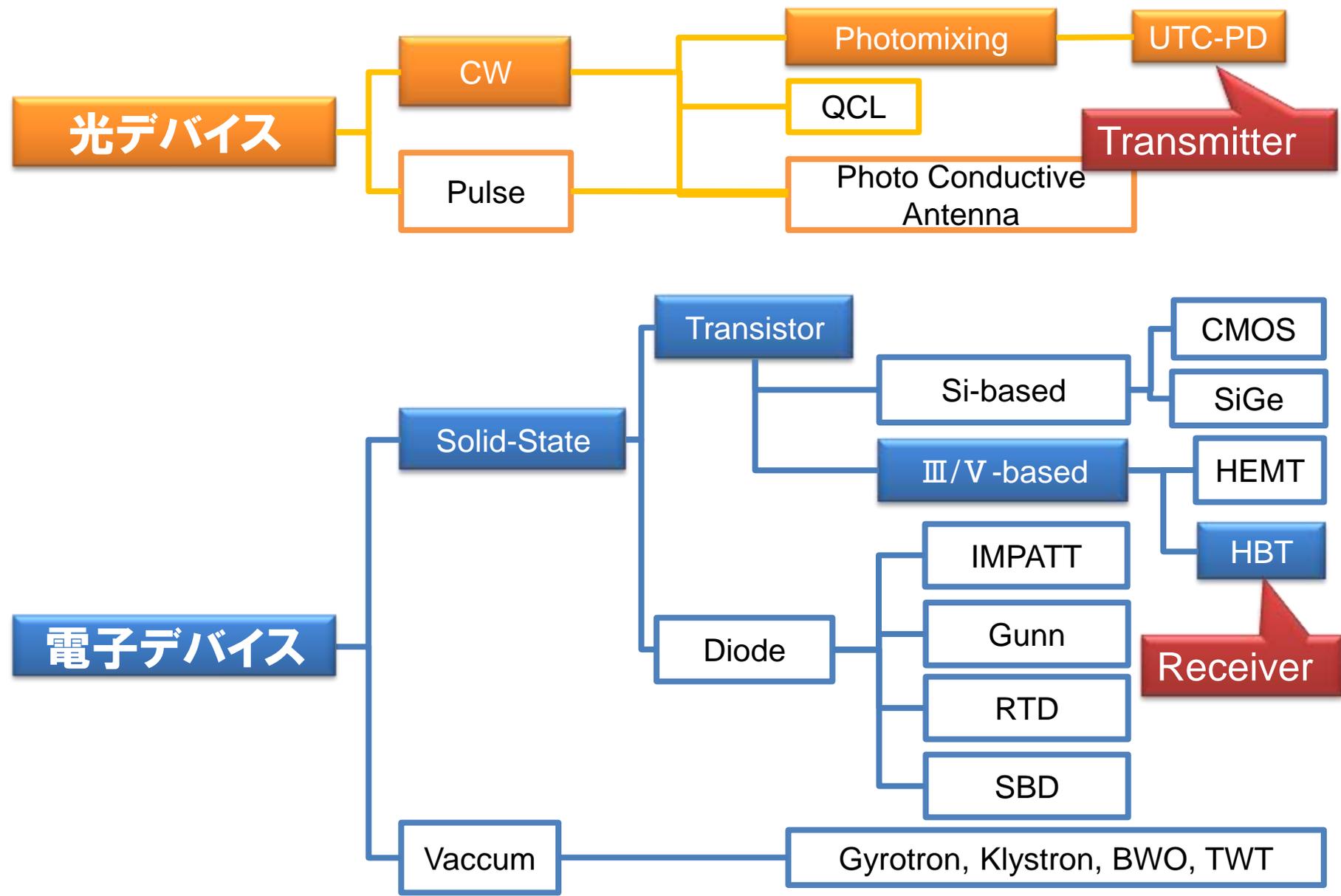
アイパターン



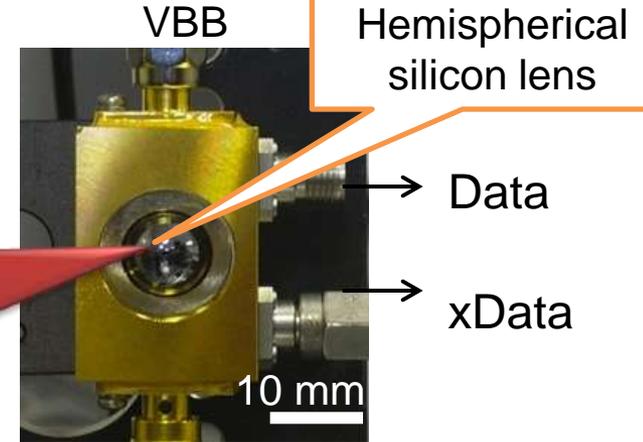
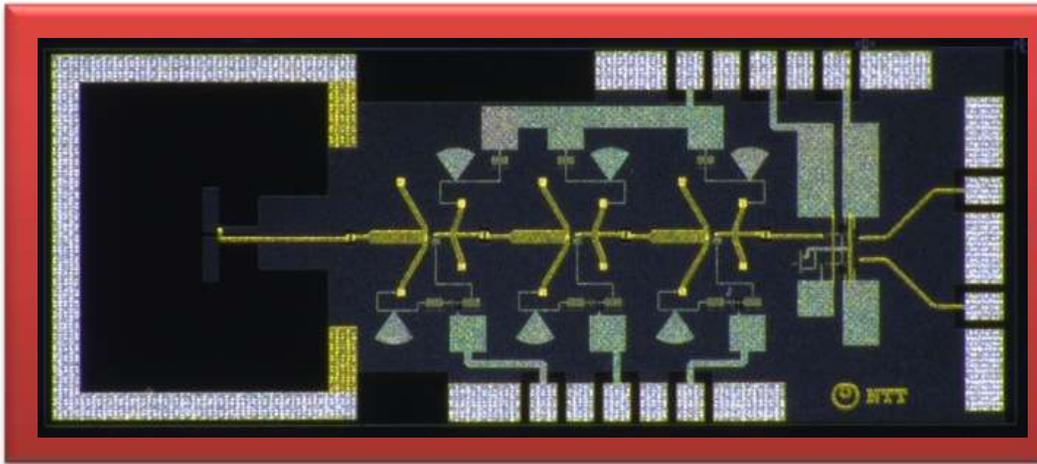
ビットエラー特性



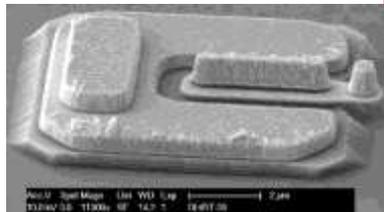
# 様々なテラヘルツ波発生・検出技術



# 受信MMIC & Module構成



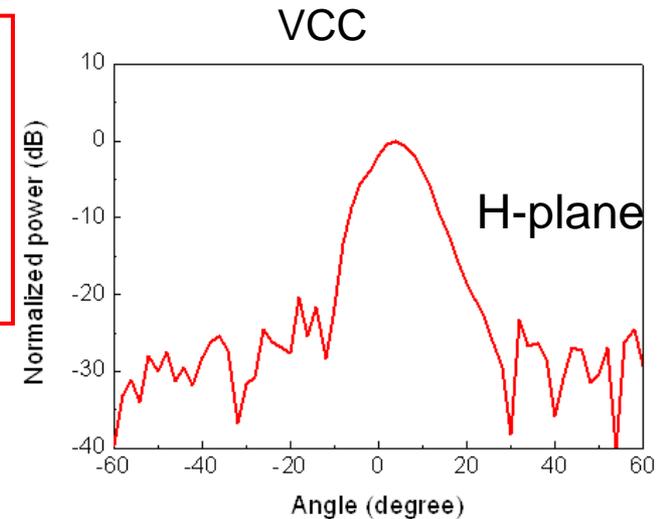
- 集積化: アンテナ, RFアンプ, 受信回路、差動データアンプ
- サイズ: 1 mm x 2.5 mm
- 3.3 V single power supply (<90 mA)



250-nm InP HBT

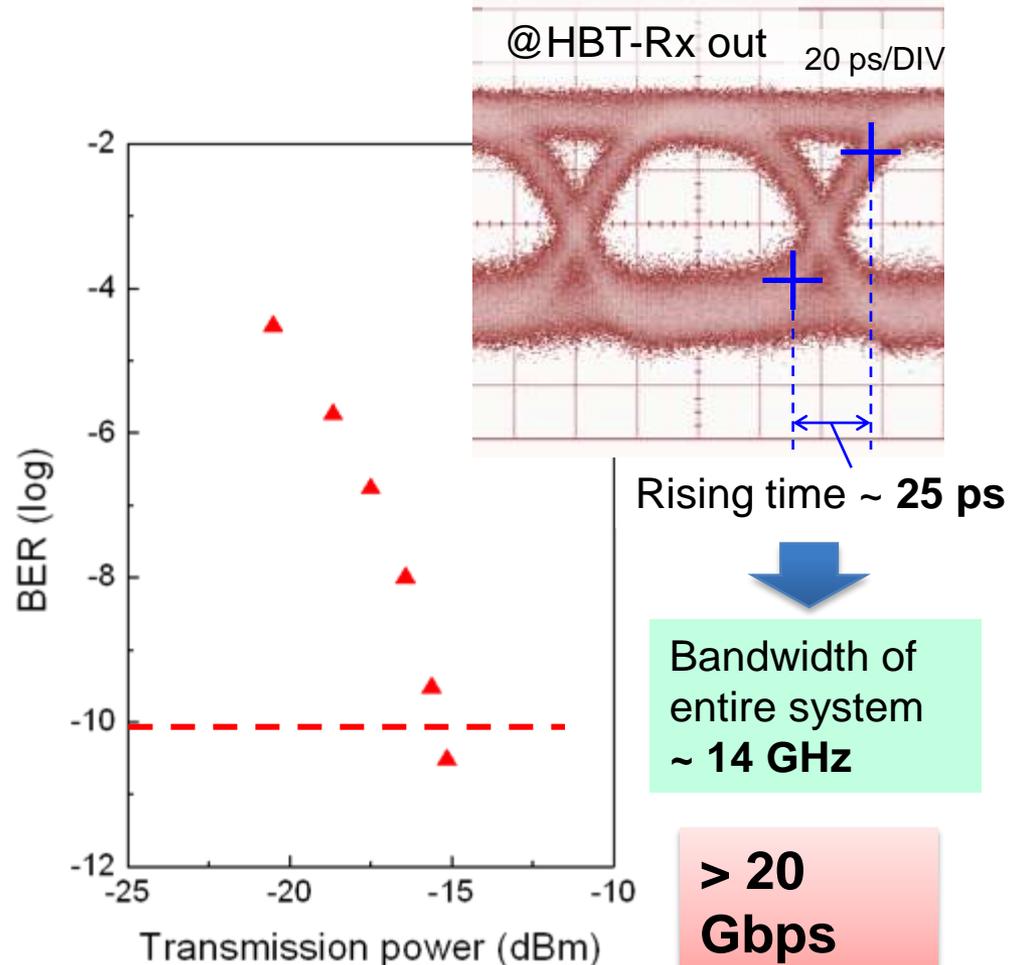
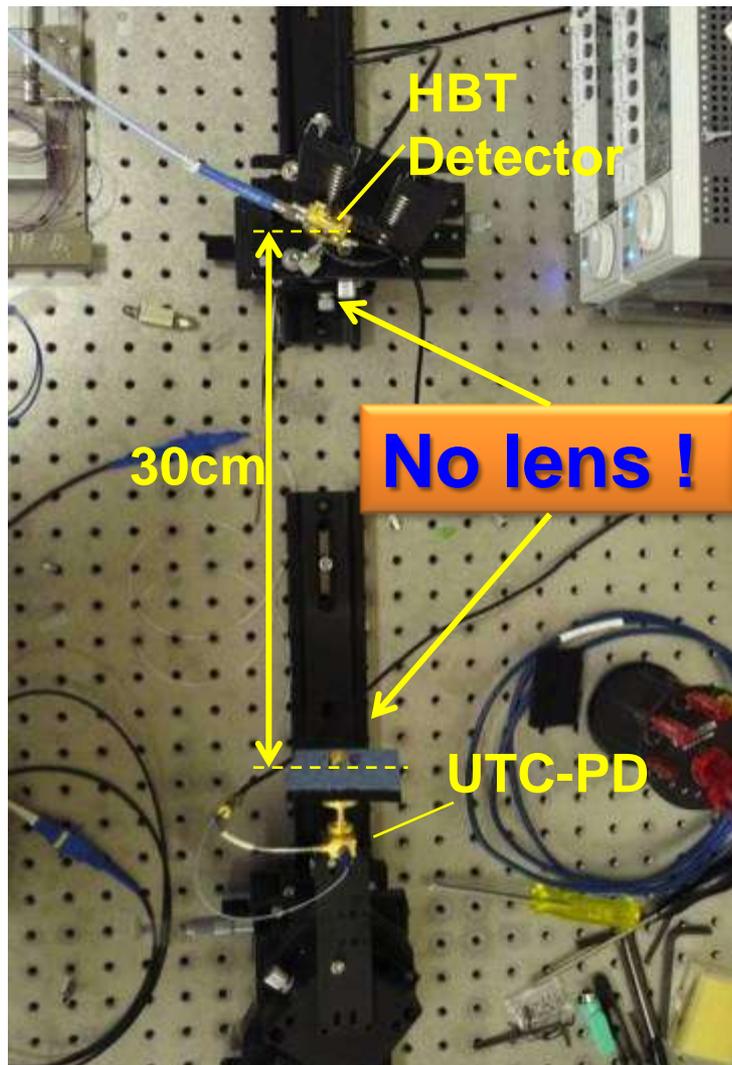
$f_T/f_{\max} > 350/650$  GHz

H.-J. Song et al., IEEE T-THz 2013 (in press)



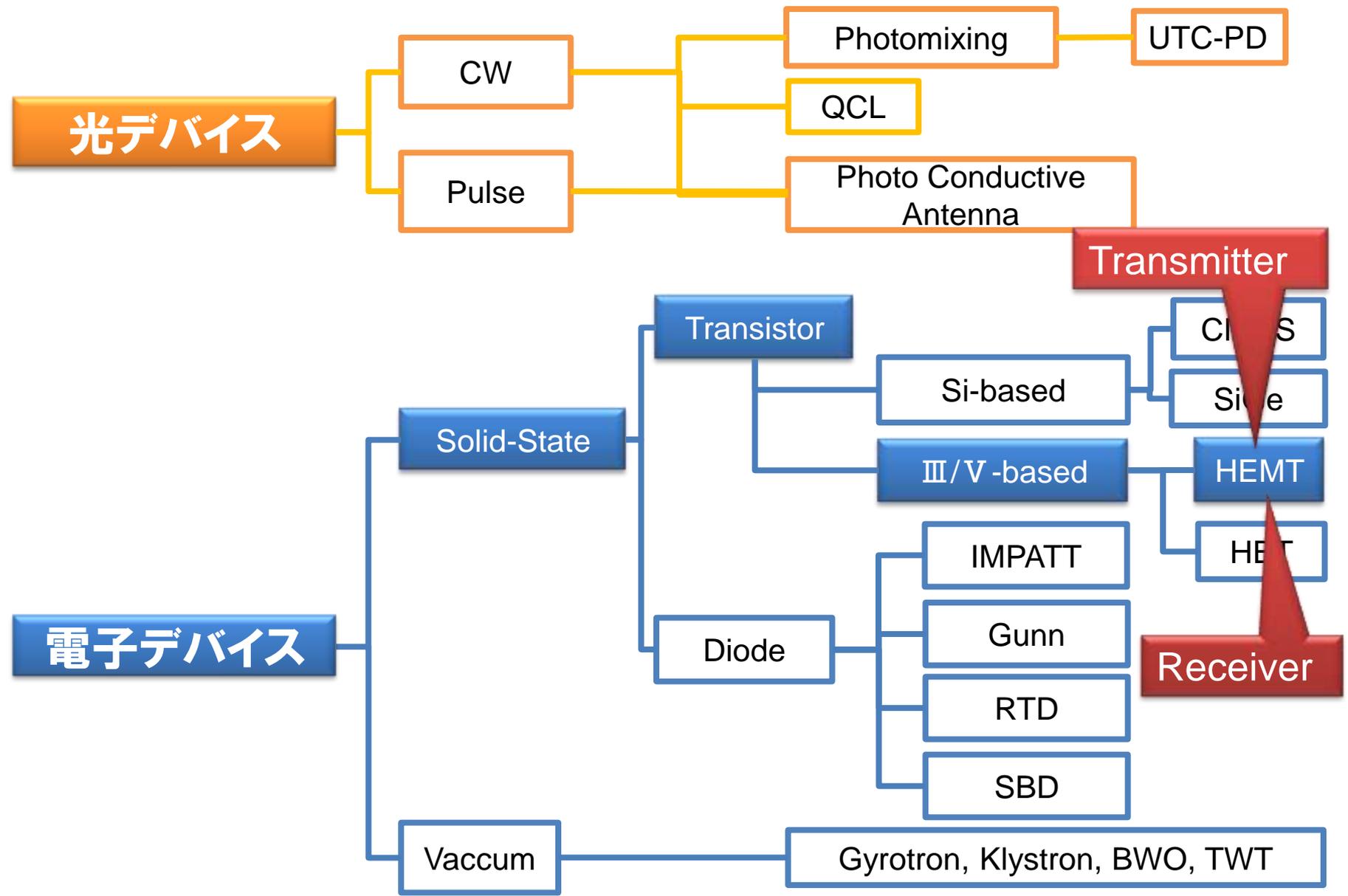
- ✓ FWHM ~ 12° in H-plane
  - Estimated directivity ~ 24 dBi

# NTT 伝送実験 12.5 Gbps without Lens



Error free at -15-dBm Tx power  
(EIRP = 10 dBm)

# 様々なテラヘルツ波発生・検出技術

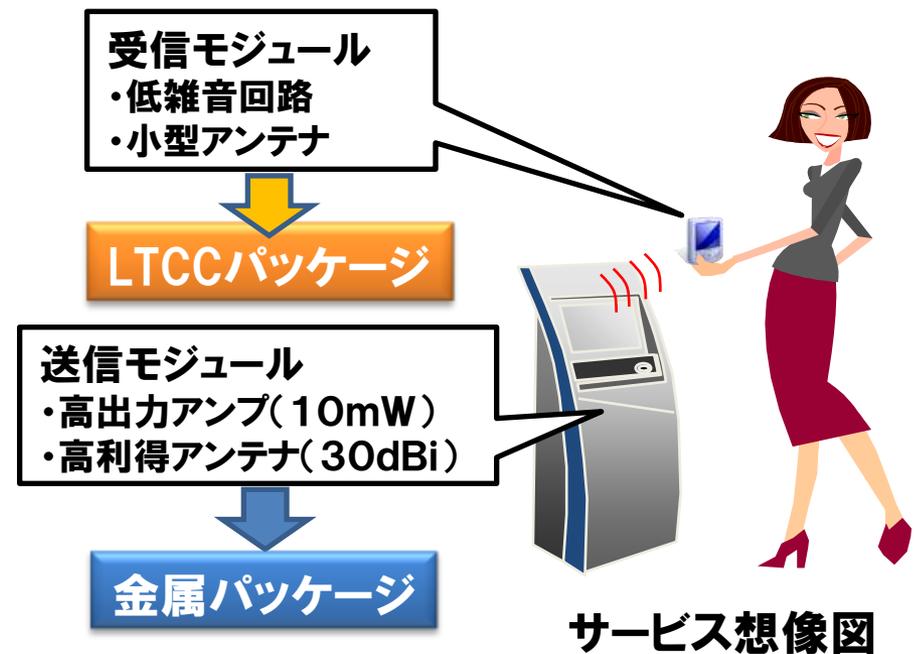


# 電波資源拡大に向けた研究開発

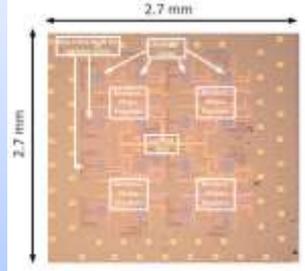
## 超高周波搬送波による数十ギガビット無線伝送技術の研究開発 (2011-2015)

### 目標

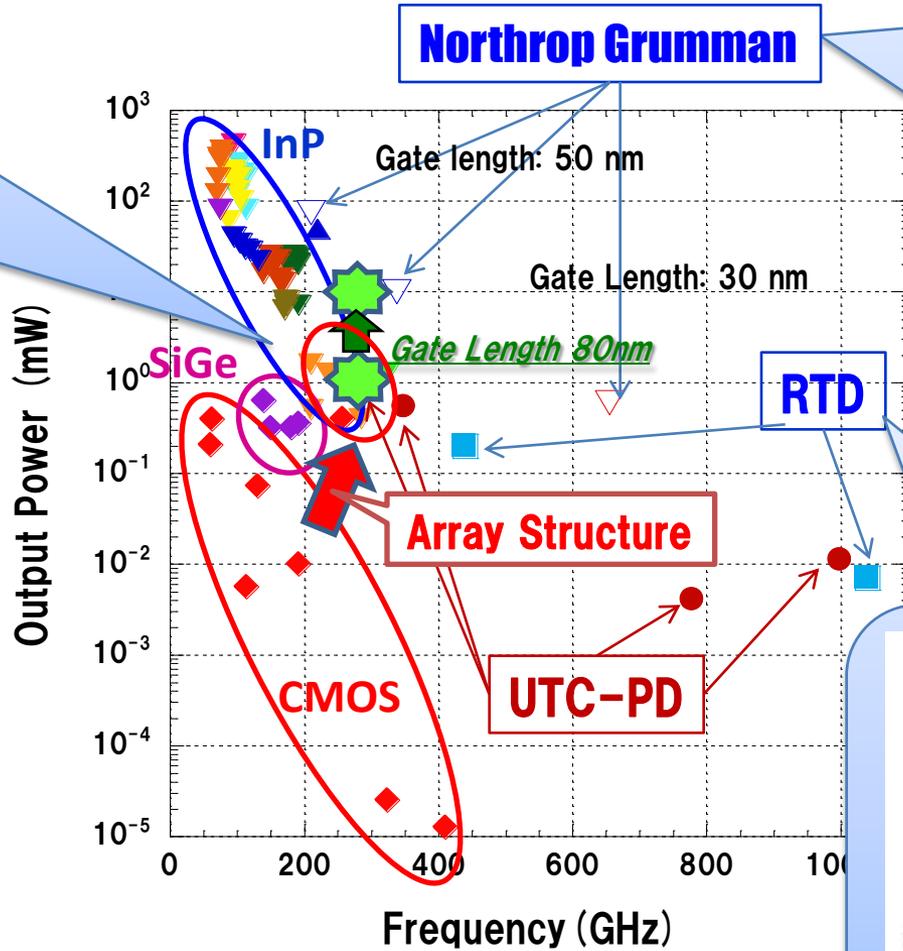
- ◆ 動作周波数: 300-GHz帯
- ◆ 電子デバイスによる送信  
(10mW)
- ◆ 小型受信モジュール
- ◆ 20Gbps@1m



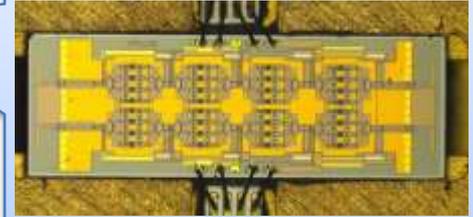
# デバイスのトレンド - 送信電力 -



16 array CMOS  
0.19 mW@280 GHz  
by California Institute  
of Technology

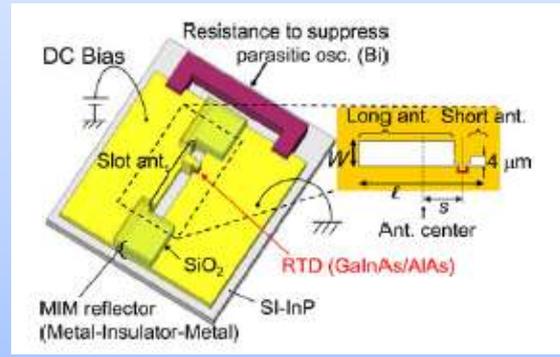


**Northrop Grumman**



MMIC PA  
>100 mW@220 GHz  
by Northrop Grumman.

**RTD**



**RTD**

>0.18 mW@810 GHz  
by Tokyo Institute of Technology

# アウトライン

---

1. テラヘルツ波研究を取り巻く状況
2. テラヘルツ波の通信応用に向けた最新動向
3. NTTにおける研究のアプローチと成果
- 4. テラヘルツ通信実現に向けた課題**
5. まとめ

# NTT テラヘルツ通信実現に向けた課題

## 1. チャンネルモデリング

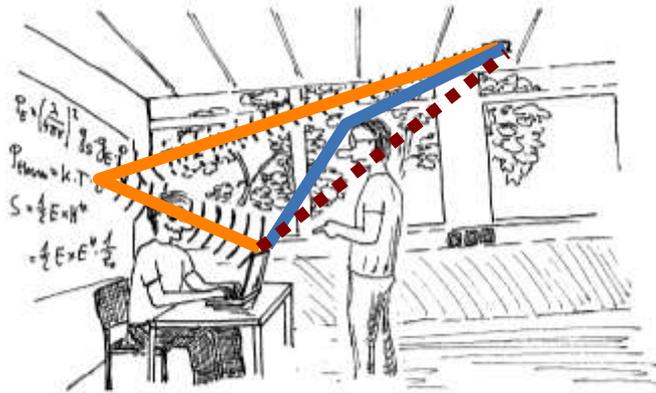
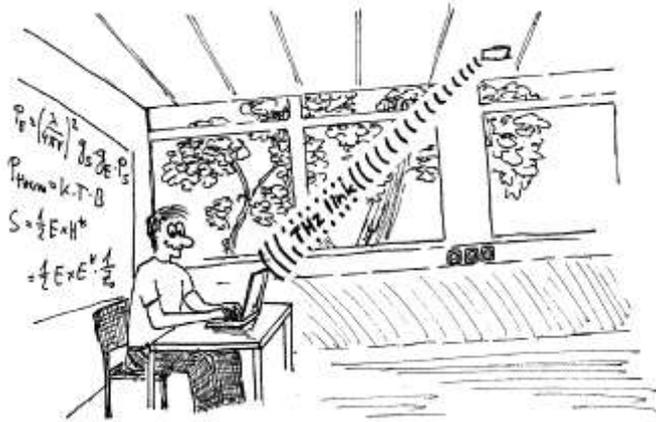
- ✓ 無線LAN、ストリーミングモデルなどでは、屋内でNLOS (Non-Line-of-Sight)通信を実現させる必要があり、反射・散乱・干渉を考慮したチャンネルモデリングが必要。

## 2. MACレイヤ以上の上位レイヤ処理の開発

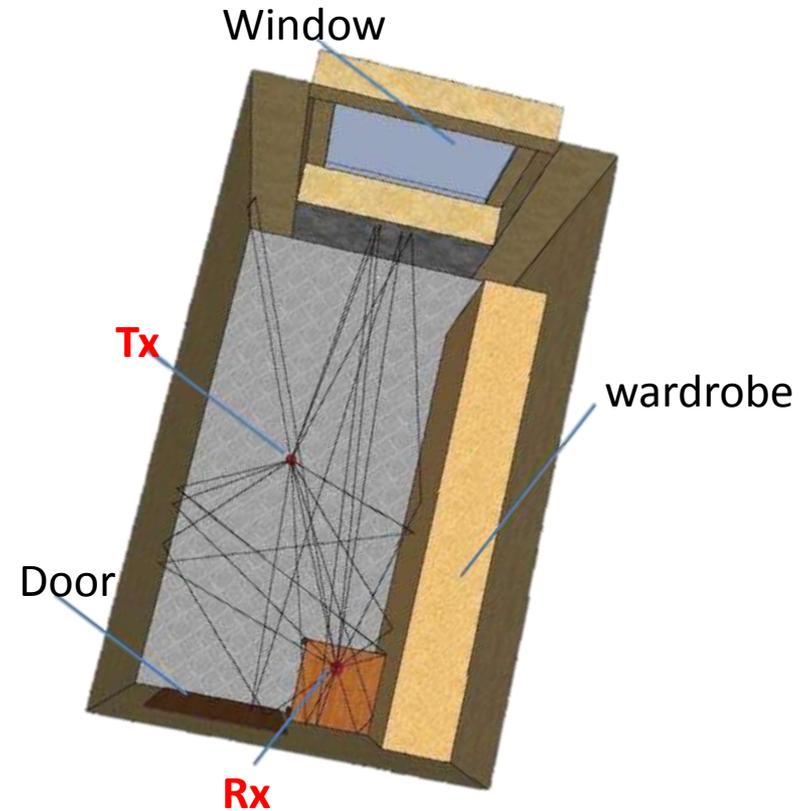
## 3. 周辺技術の醸成

## 4. 周波数利用の制度面での整備

# チャンネルモデリング



© MK 06

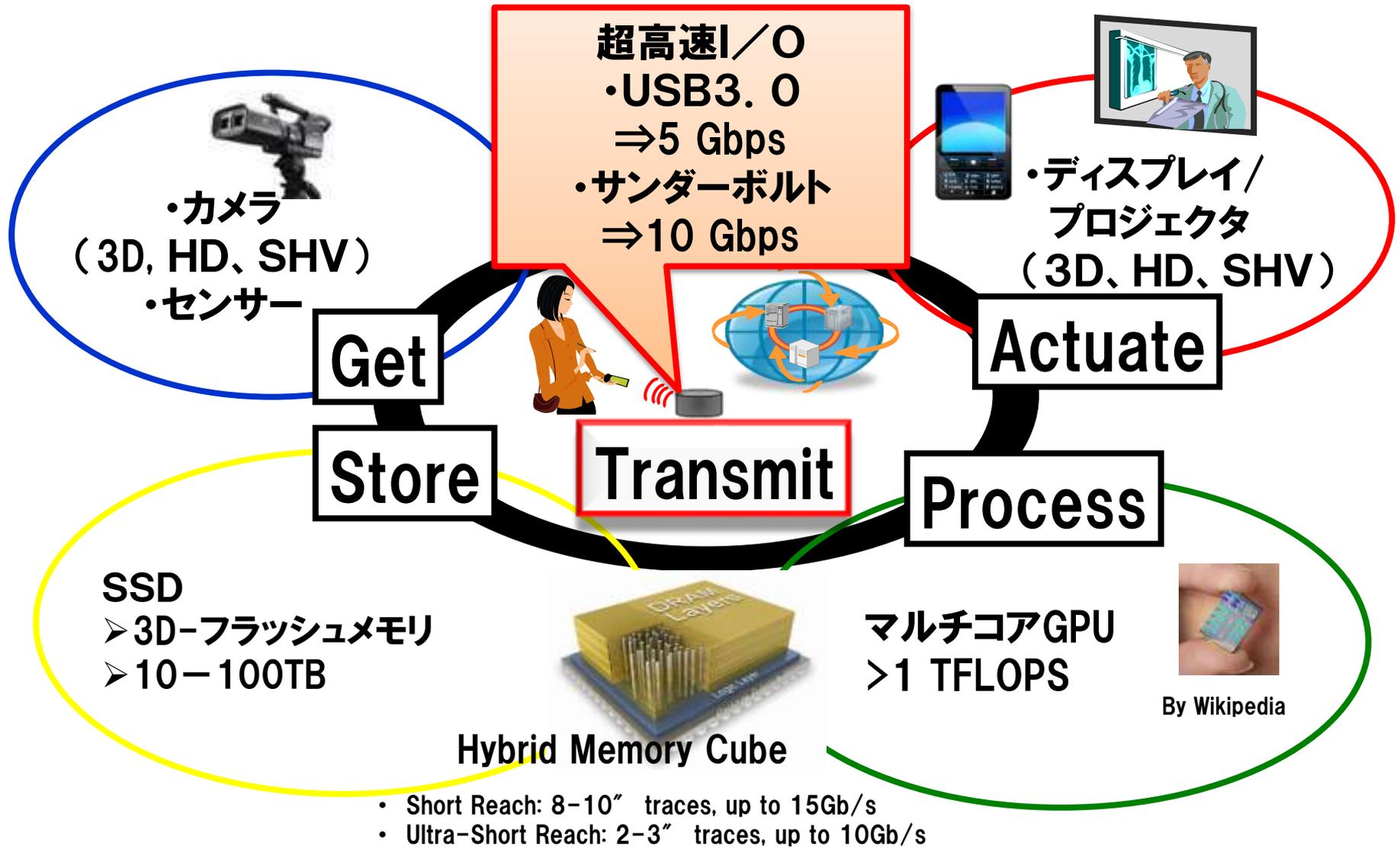


Terahertz Communications Lab

Prof. T.Kürner, TUB, Germany

## 60GHzのスケールモデルとして扱えるものか？

# 周辺技術の醸成



# 周波数利用の制度面整備

---

**275GHz以上の周波数帯利用に関する国際的、  
国内的な制度面の整備**

**⇒ ITU-Rにおける議論、WRC議題**

**⇒ 国内電波法の整備**

# アウトライン

---

1. テラヘルツ波研究を取り巻く状況
2. テラヘルツ波の通信応用に向けた最新動向
3. NTTにおける研究のアプローチと成果
4. テラヘルツ通信実現に向けた課題
5. **まとめ**

# まとめ

## 1. テラヘルツ波およびミリ波の特徴について説明

- 「帯に短し、襷に長し」からの脱却

## 2. 無線通信応用について

- シリコン系テラヘルツデバイスの台頭
- デバイス開発中心からシステム開発へ

## 3. NTTにおける技術アプローチと通信分野へのアクティビティ紹介

- 120 GHz帯での10 Gbps伝送(放送用途)
- 100 Gbpsの将来ターゲットを目指した300GHz帯応用

## 4. テラヘルツ通信実現に向けた課題

- 伝搬特性解析に基づくチャンネルモデリング
- 上位レイヤ処理
- 周辺技術の醸成

**御清聴ありがとうございました。**