

## テラヘルツ技術：基礎、現状、将来展望

### Terahertz technology: its fundamentals, current status and future developments

寶迫 巖<sup>†</sup>

Iwao HOSAKO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 情報通信研究機構 Beyond 5G 研究開発推進ユニット

#### 概要

テラヘルツ技術という言葉が少なくとも学术界で使われるようになってから、20～30年程度の時間が経過している。テラヘルツ技術という言葉が示す内容、テラヘルツ技術を構成する様々な技術の基礎・基盤や研究開発の経緯、そしてテラヘルツ技術の今後の展望について、極めて広範な技術範囲が対象となるが、筆者の知る限りにおいて、それらを述べる。

#### Number of articles published (Google Scholar: “Terahertz”)

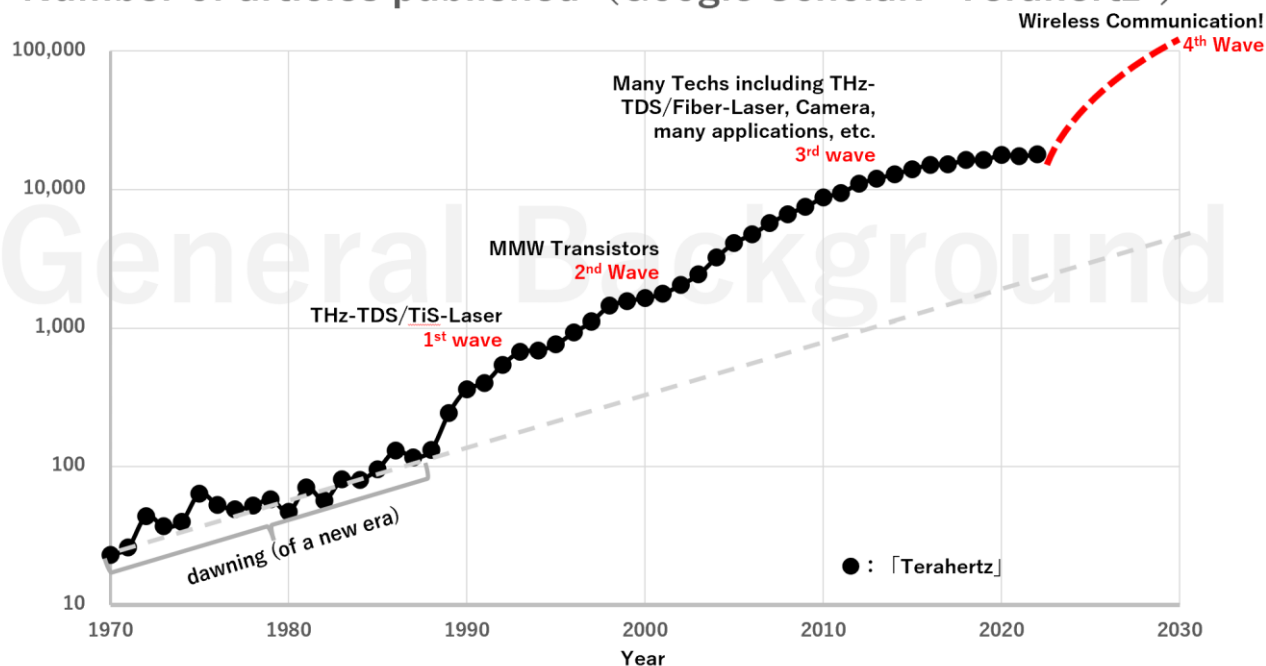


図 Google Scholar において“Terahertz”を検索キーワードとして、ヒットした件数を、西暦 1970 年以降、年毎に片対数グラフにプロットしたもの。現在までの 3 つ程度の「バンプ」があり興味深い。

#### Abstract

It has been about 20 to 30 years since the term “terahertz technology” began to be used, at least in academic circles. The content of the term “terahertz technology,” the fundamentals and foundations of the various technologies that comprise terahertz technology, the history of research and development, and the future prospects of terahertz technology cover an extremely broad range of technologies. To the best of my knowledge, I will discuss these topics.

# テラヘルツ技術：基礎、現状、将来展望

Terahertz technology: its fundamentals, current status and future developments



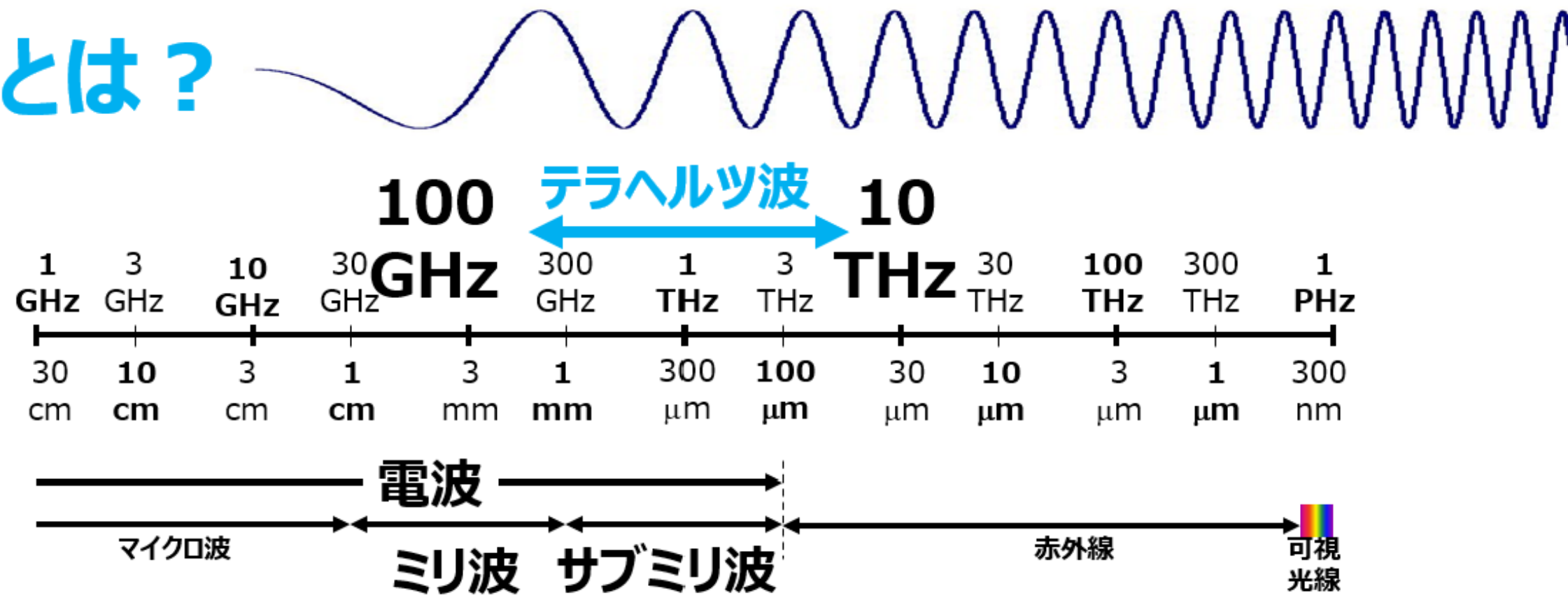
寶迫 巖†

• Iwao HOSAKO†

†NICT Beyond 5G研究開発推進ユニット

[hosaako@nict.go.jp](mailto:hosaako@nict.go.jp)

# THzとは？



**【電波法】**  
第二条 この法律及びこの法律に基づく命令の規定の解釈に関しては、次の定義に従うものとする。  
一 「電波」とは、**三百万メガヘルツ**以下の周波数の電磁波をいう。

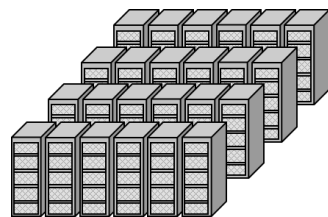
**三百万メガヘルツ**  
10<sup>6</sup> 10<sup>6</sup>  
**10<sup>12</sup>**  
**テラ**

# 理化学応用の他にテラヘルツ技術で何ができるのか？

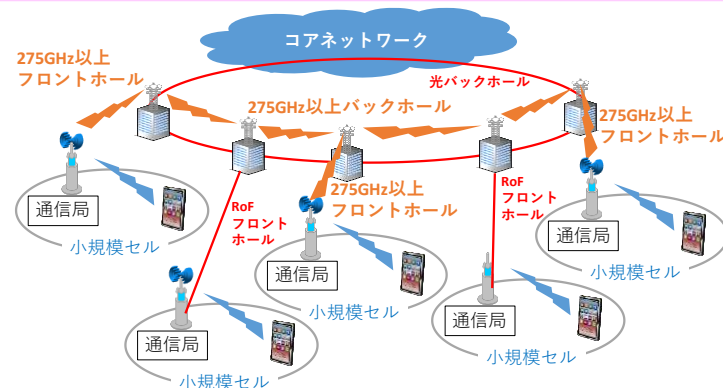
光ファイバー級（100Gbit/s～1Tbit/s級）超高速無線



瞬時データ転送  
(ムービー、画像、OS等)



再構成可能な  
データセンター



Beyond 5G/6Gネットワーク  
(アクセス・バック/フロントホール)



衛星/HAPS/航空機

RR: FN5.564A

非破壊・非接触センシング（ミリメートル級の高空間分機能） RESOLUTION 663 (WRC-19)

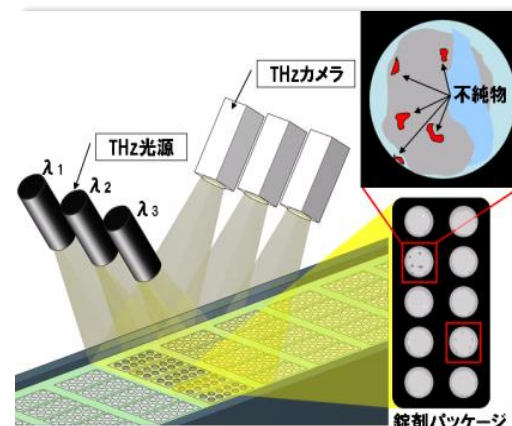


物流

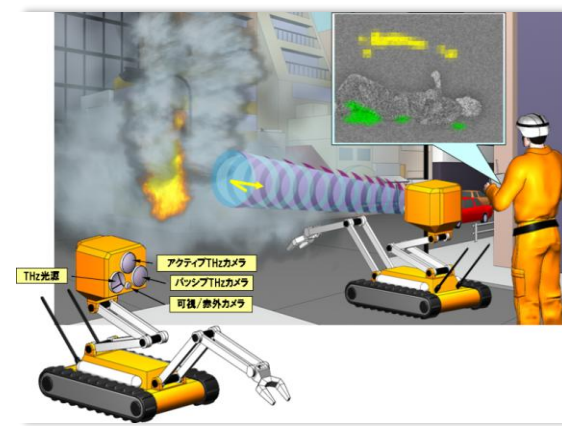


安全・安心

人流



製造工程

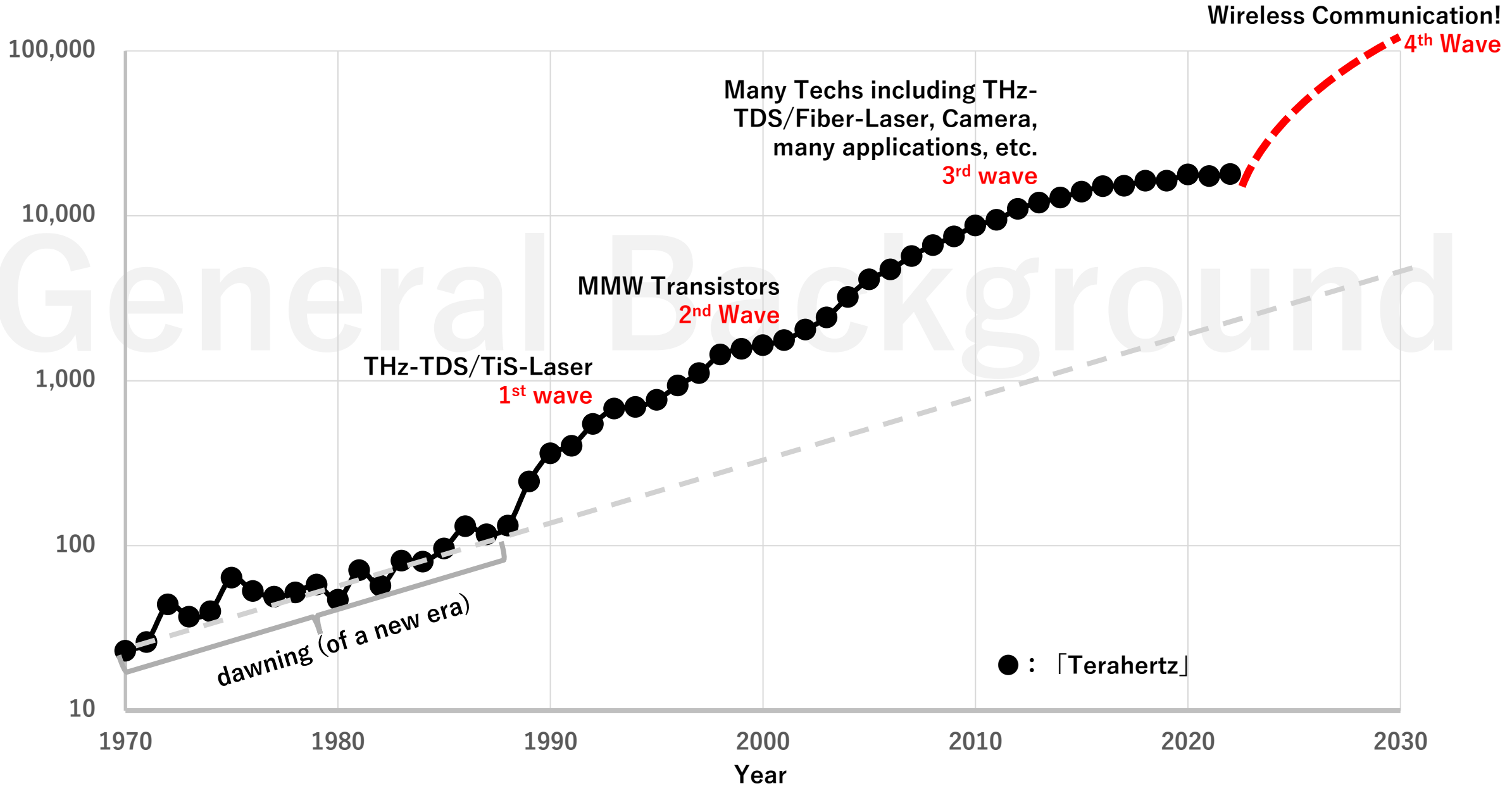


災害現場（レーダー）

## 言葉の問題：「テラヘルツ」の別名？

- 高マイクロ波           ： 役所言葉   他政策とのデマケのため
  - 高ミリ波               ： 役所言葉   他政策とのデマケのため
- ※デマケ（役所言葉：物事の境目を定めたり、線引きをすること）
- サブテラヘルツ       ： 主に通信業界で使われる   1THzより低い周波数帯を示す
  - サブミリ波            ： 波長1mm～0.1mm（周波数300GHz～3THz）天文等で使われてきた
  - 遠赤外線              ： 中赤外線が開発が進んだ技術のカバーする波数範囲よりも低い波数の領域をざっくりと表す

# Number of articles published (Google Scholar: "Terahertz")



# もくじ

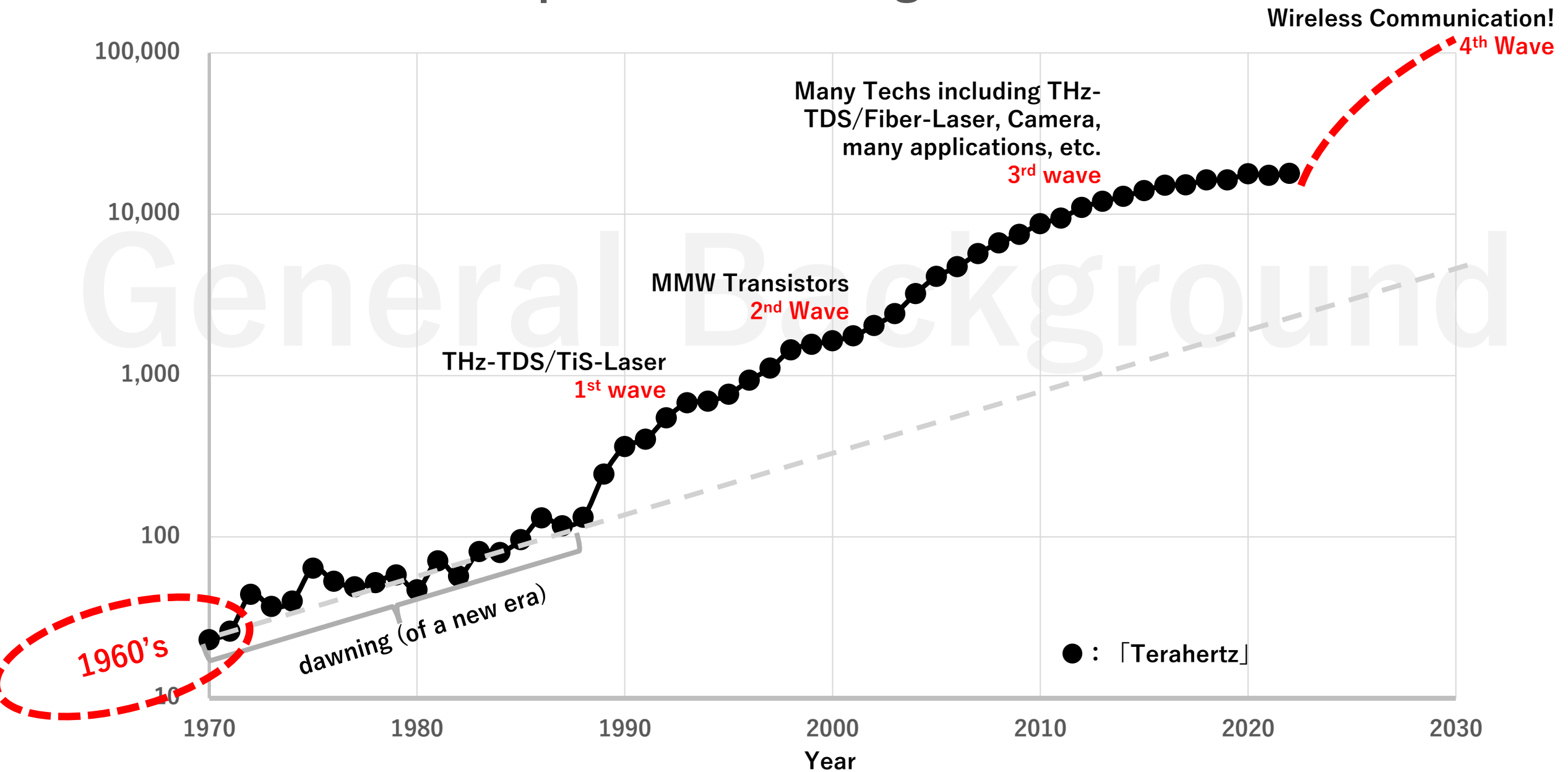
## 要素技術

- ・ 時間軸に沿った主要な技術的发展の説明
  - ・ FTIR
  - ・ 炭酸ガスレーザー励起分子レーザー
  - ・ THz-TDS
  - ・ 超高周波トランジスタ（HBT、HEMT）
  - ・ THz無線通信
  - ・ 他：カメラ、各種検出器（）、QCL、パラメトリック発振器、自由電子レーザー、放射光
  - ・ レーダ（FMCW、合成開口）

## 応用展開

- ・ 天文、地球観測
- ・ 分析（@理化学分野、@生産技術分野）
- ・ セキュリティー
- ・ 無線通信

# Number of articles published (Google Scholar: "Terahertz")



## 1960年代の動き

分光器：分散型 → FTIR（フーリエ）分光へ  
中赤外→遠赤外へ

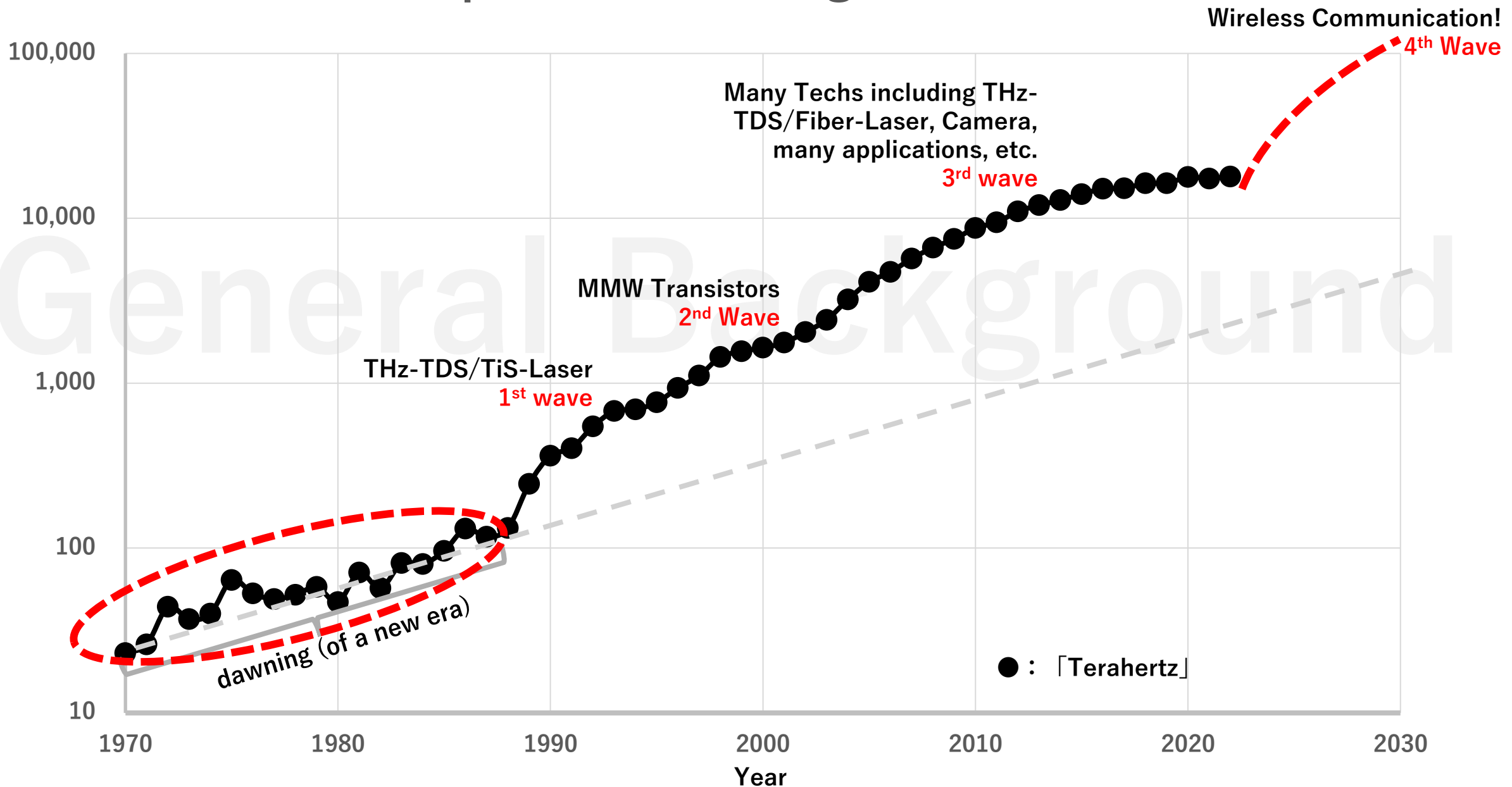
金属メッシュフィルター  
液体He冷却ボロメーター

分散型分光器では、グレーティング等で光束の一部が選択され、それが検出器に入力される

一方、FTIRでは全光束を使うので「明るい」  
同じ検出感度でも効率が良い

背景：  
高速フーリエ変換のアルゴリズム  
デジタル計算機技術の進展

# Number of articles published (Google Scholar: "Terahertz")



## 1970～1980年代の動き

光源：放電励起分子レーザー→炭酸ガスレーザー励起分子レーザー

放電励起より励起効率が高く、様々な分子ガスを用い多数の発振線が見つかる。

但し、実用となる強い発振線は限られる。

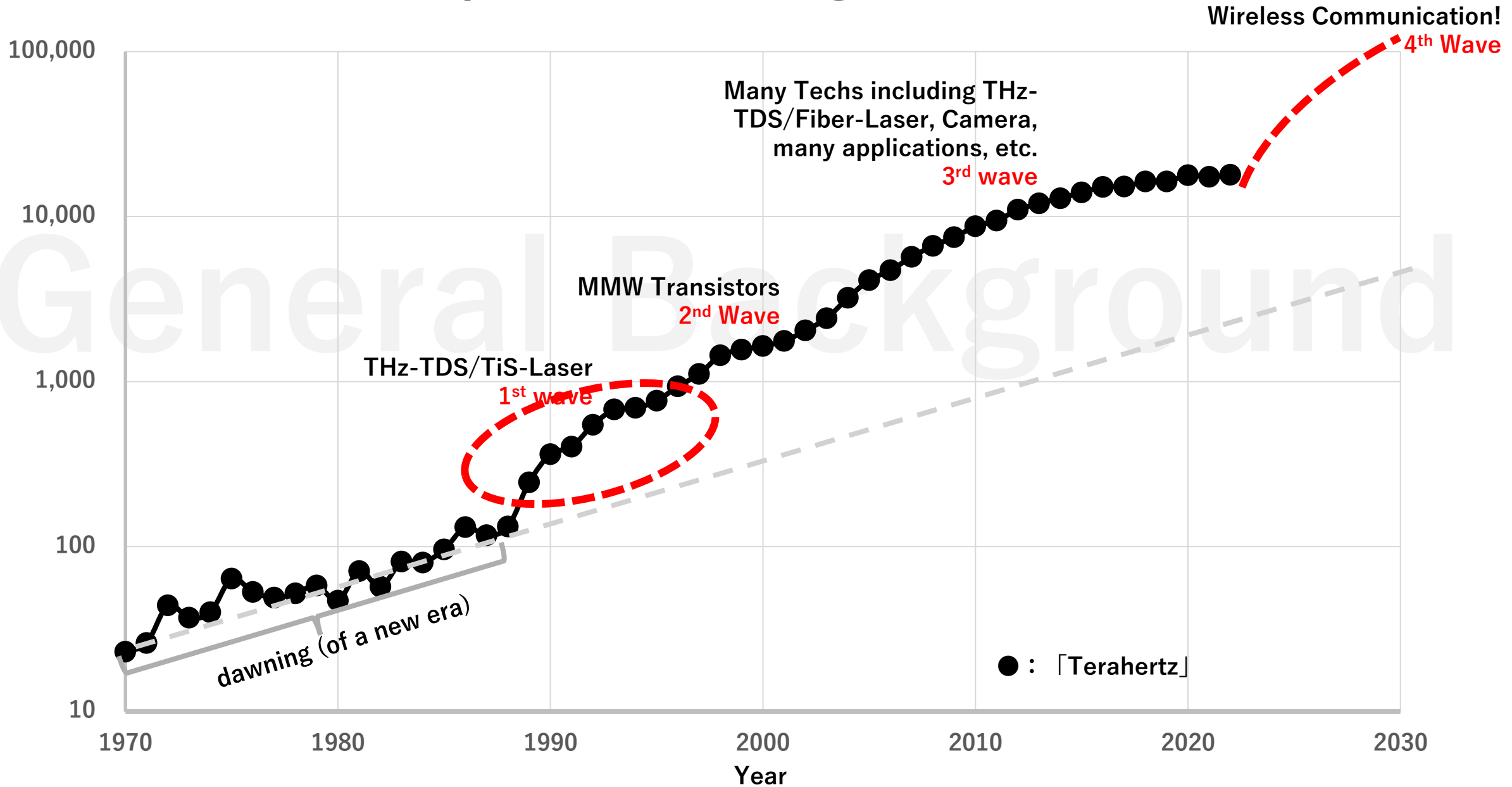
背景：

炭酸ガスレーザー（@1964年ベル研）の発展

→産業応用（レーザー加工・溶接）

→応用の1つとしての炭酸ガスレーザー励起分子レーザー

# Number of articles published (Google Scholar: "Terahertz")



# THz-TDSの出現

分光技術：FTIR → THz-TDSへ

フェムト秒超短パルスレーザによるピコ秒ハーフサイクル/シングルサイクルパルス生成と光ゲートサンプリング

常温動作デバイスのみ（不用：液体He冷却ボロメータ）

FTIRで不定性原因であったMM変換が不用に

高いSNと広帯域性を両立→分光のみならずイメージも可能に

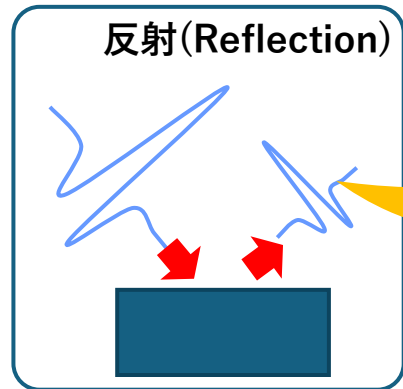
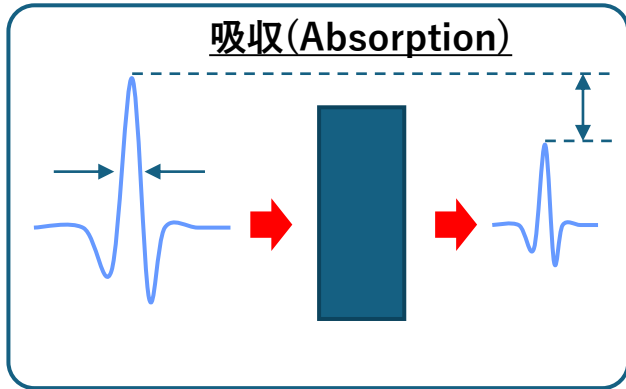
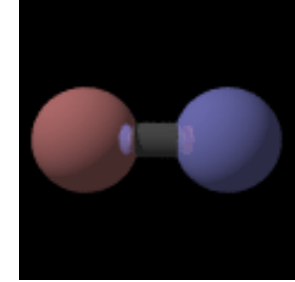
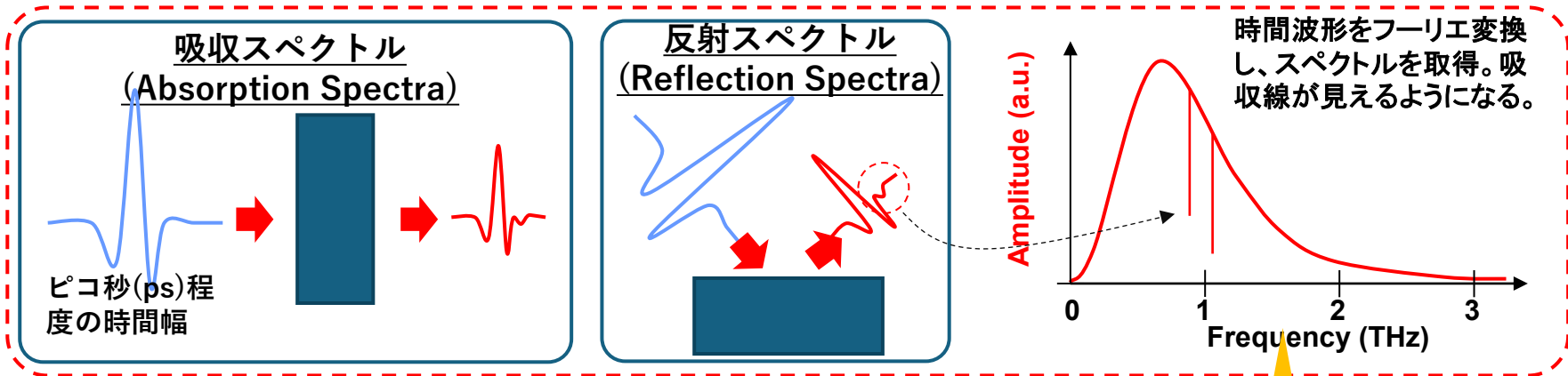
→ピコ秒パルスのTime of Flightで奥行方向の情報も取得

背景：

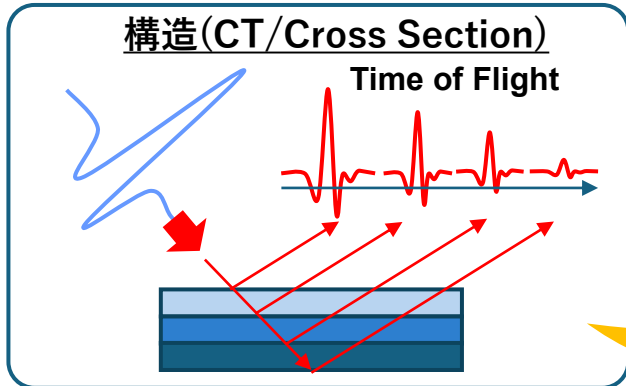
超短パルスレーザ技術の進展

色素レーザ、チタンサファイアレーザ（励起用グリーンレーザ）、

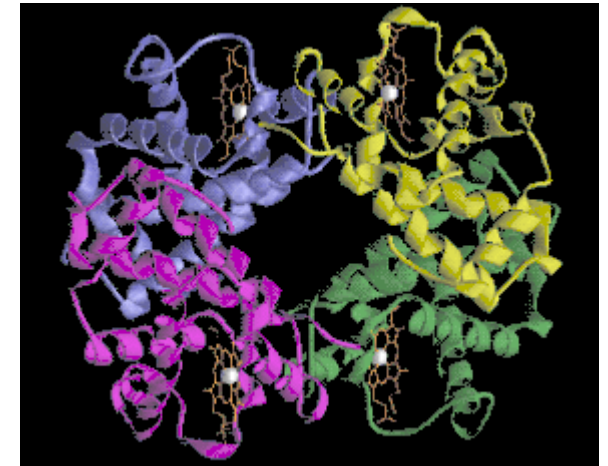
# テラヘルツ（ピコ秒）パルスで様々な物理量を可視化！



各種物理量の  
2次元分布図



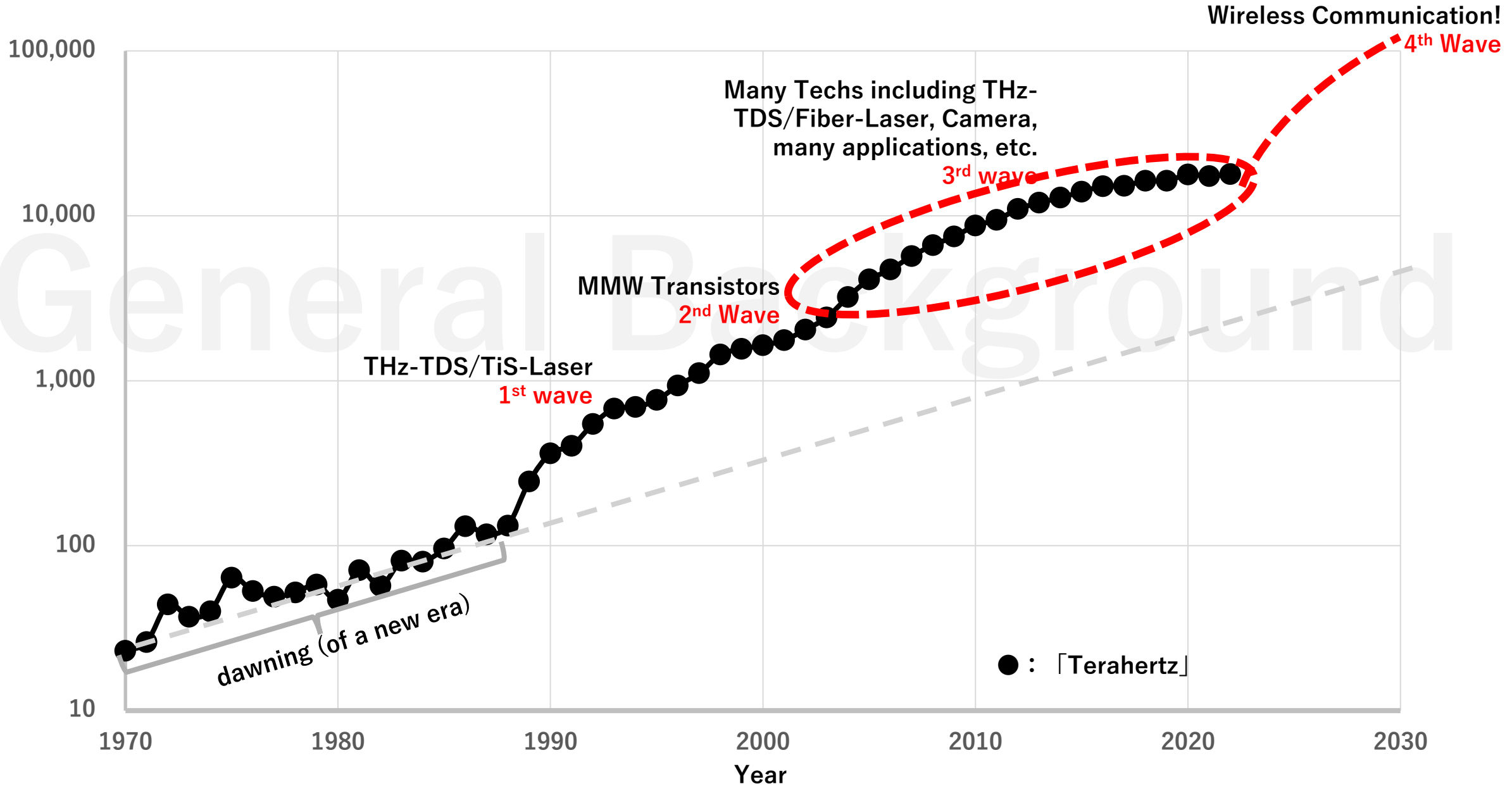
非破壊検査応用へ



分子をソフトに非破壊で観察

トモグラフィー、断面図

# Number of articles published (Google Scholar: "Terahertz")



# THz-TDSの進展

THz-TDS技術：学術利用 → 普及へ

派生技術① モードロックファイバレーザによるフェムト秒パルス発生

派生技術② ファイバ結合型

派生技術③ THz顕微鏡 (LTEM)

背景：

光ファイバ通信の進展

←エルビウム添加光ファイバアンプ (EDFA)

→モードロックファイバレーザ (@1550nm、@1040nm)

の実現とその応用

→加工用の他、THz-TDSの小型化・可搬化・低価格化

# THz-TDSの進展：ファイバ結合型装置の産業応用例



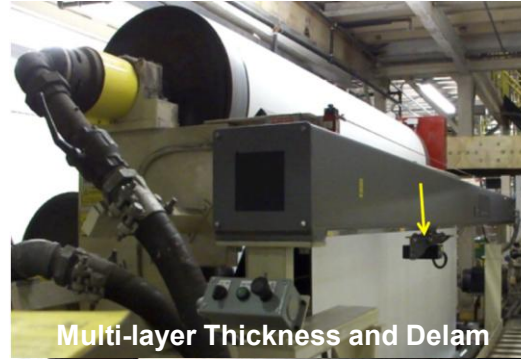
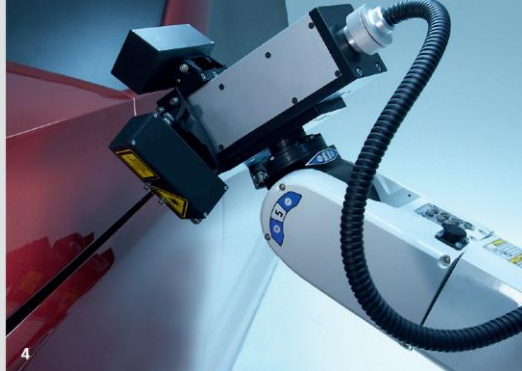
**Paint coating** – Single or multi-layer, wet or dry  
**Ceramic coatings** – PVD or thermally sprayed  
**Plastic layers** – soft or solid  
**Component thickness** – single layer or multi-layer



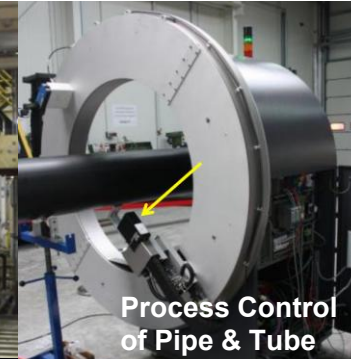
© MTU Aero Engine GmbH



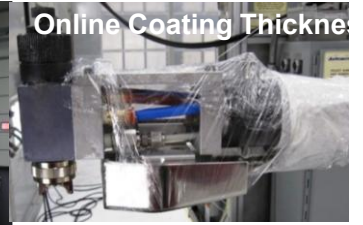
© BMW Group



Multi-layer Thickness and Delam



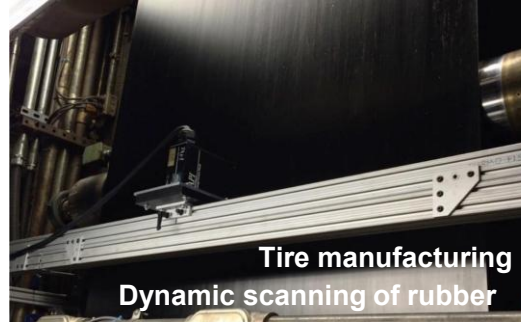
Process Control of Pipe & Tube



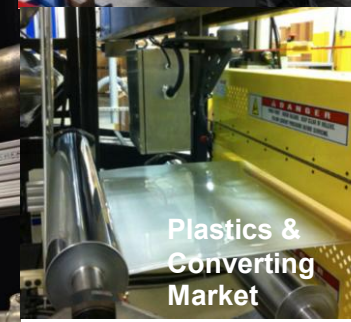
Online Coating Thickness

Aerospace/NDT Market

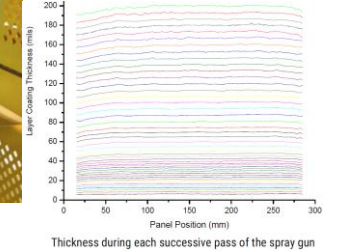
Developed for use on the F-35



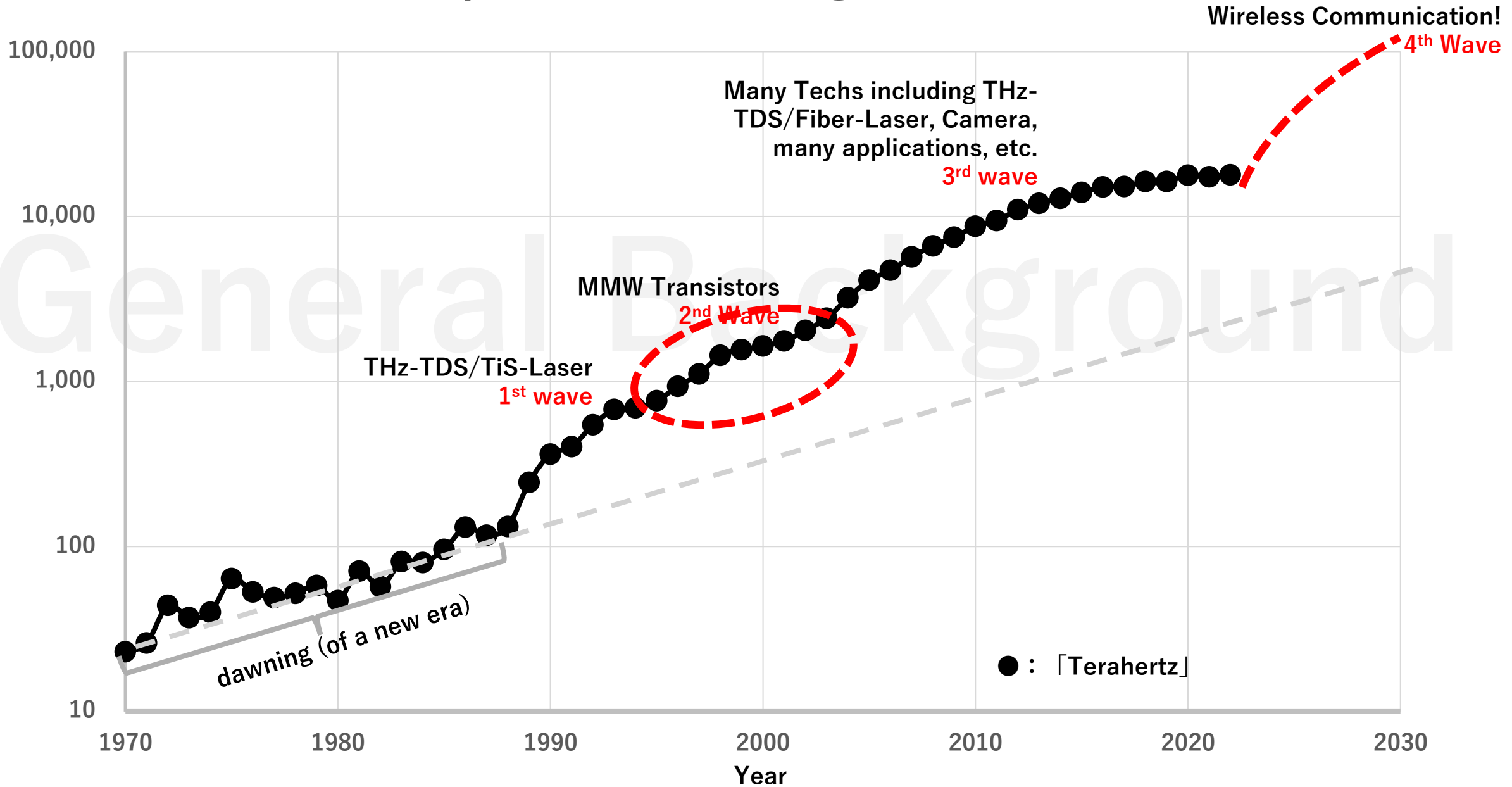
Tire manufacturing  
Dynamic scanning of rubber



Plastics & Converting Market



# Number of articles published (Google Scholar: "Terahertz")



# 超高速化合物トランジスタ（HBT、HEMT）の開発

## HBT

光ファイバー通信信号処理速度向上

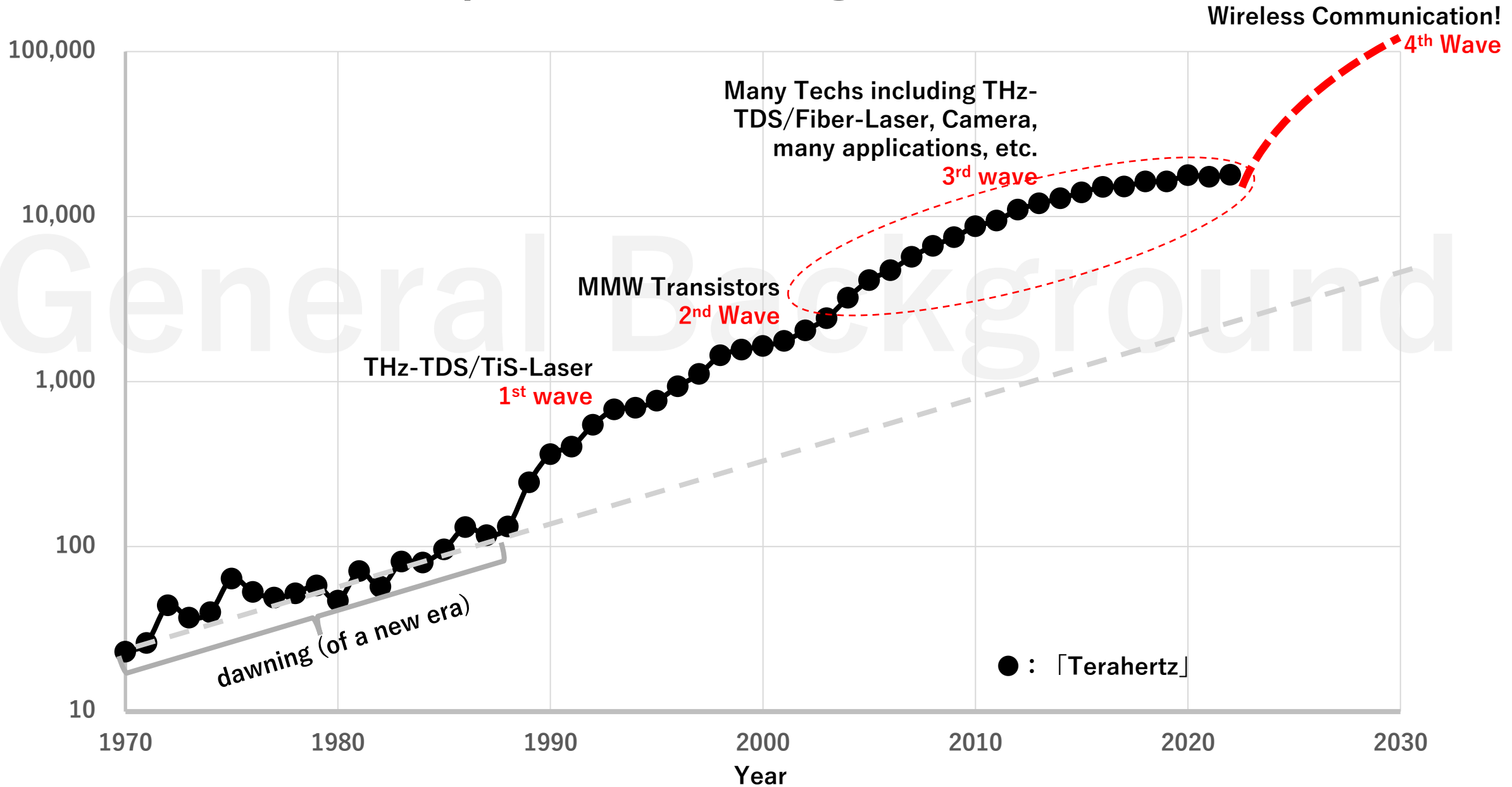
※UTC-PDはHBTの派生技術と言っても良い

## HEMT

ミリ波帯無線通信・ミリ波帯レーダへの期待

背景：キャリア（電子、正孔）の移動度や飽和速度がSiベースの半導体より大きく、より高周波（より広いバンド幅）を使える。

# Number of articles published (Google Scholar: "Terahertz")



# MMW/THz-カメラ・イメージャ・レーダの進展

## MMW帯

FMCWレーダ、合成開口レーダ、逆合成開口レーダ

## THz帯

カメラ、照明用光源（QCL、RTD、他）

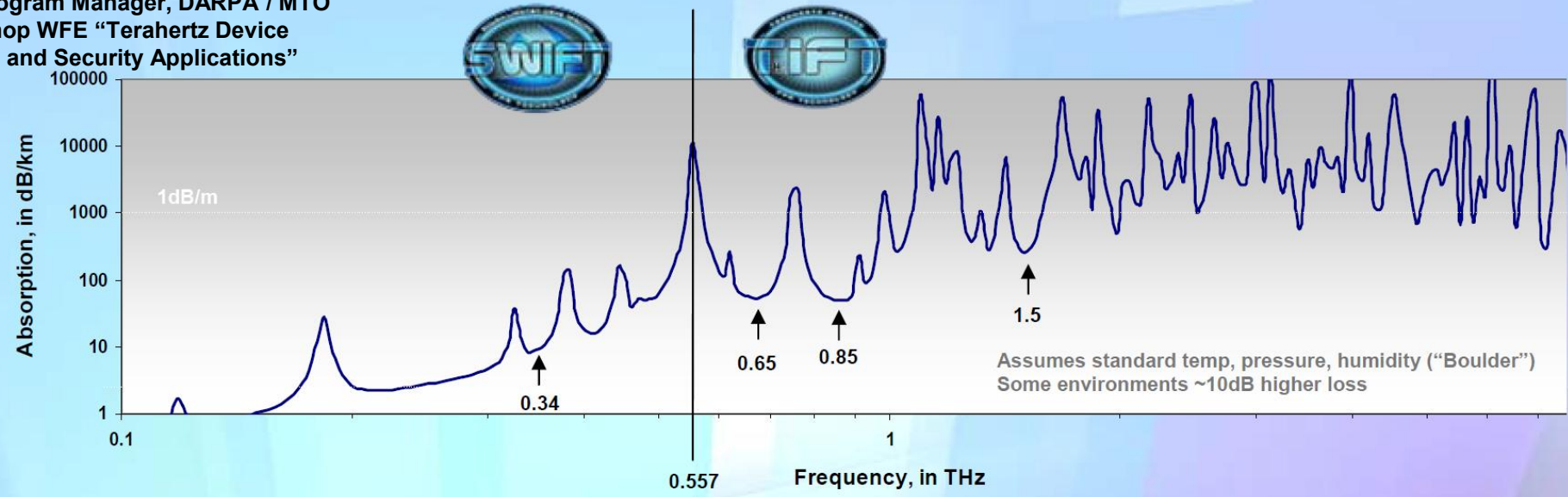
## 背景：

- ・ 2010年代のDARPA/MTOのMMW/THzイメージャプロジェクト
- ・ 化合物半導体電子デバイスの進展
- ・ マイクロボロメータ（熱赤外）カメラの進展

# 背景：2010年代のDARPA/MTOのMMW/THzイメージャプロジェクト

Mark Rosker, Program Manager, DARPA / MTO  
 IMS2007 Workshop WFE "Terahertz Device  
 Characterization and Security Applications"

Phenomenology



Applications

Ranges up to 1 km			Ranges < 100m	
<p>Concealed Weapons Detection at Range</p>	<p>All-Weather Look-Down ISR</p>	<p>Aircraft Terrain Avoidance</p>	<p>Concealed Weapons Detection</p>	<p>Convoy Collision Avoidance</p>

Technologies

<p>Electronic Upconversion</p>	<p>RF MMICs</p>	<p>Micromachined Vacuum Electronics</p>	<p>Photonic Downconversion</p>
--------------------------------	-----------------	---	--------------------------------

# DARPA's Video Synthetic Aperture Radar (ViSAR) program



DARPA's Video Synthetic Aperture Radar (ViSAR) program seeks to develop and demonstrate an Extremely High Frequency (EHF) targeting sensor which operates through clouds as effectively as today's infrared (IR) sensors operate in clear weather.

<http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2012/05/01.aspx>

## ●国防総省、悪天候でも敵機探知できるレーダーの開発をL-3に発注 【Nextgov, 2013/07/11】

国防総省の契約申請書によると、同省は対地専用攻撃機が雲や埃で視界を覆われた状況でも敵機を探知できる総額260万ドルのレーダー・システム構築を計画している。

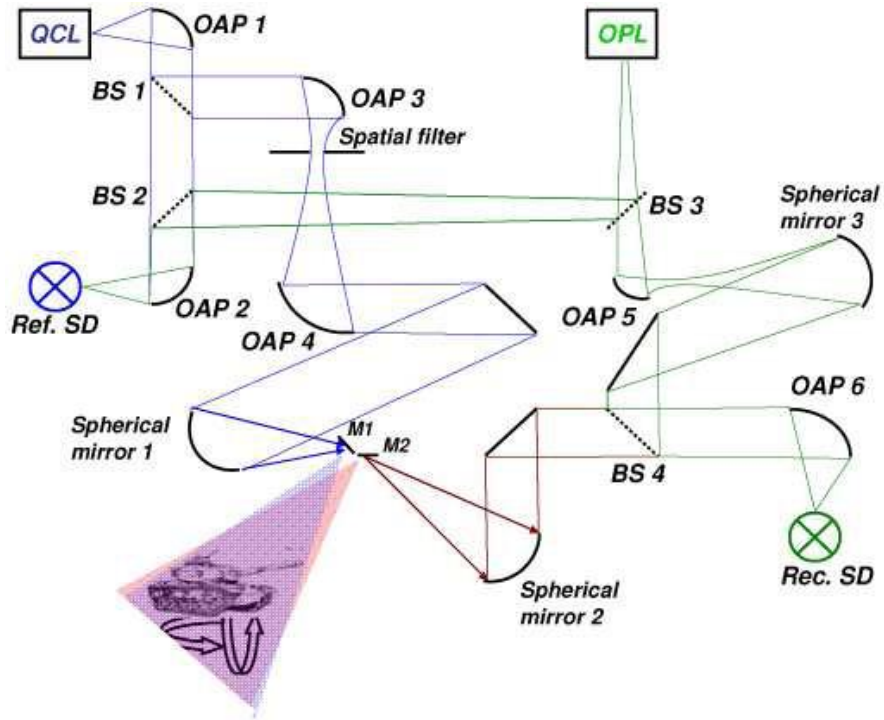
AC-130用に「Video Synthetic Aperture Radar (ViSAR)」開発を受注したのはL-3コミュニケーションズ。国防高等研究計画局 (DARPA) によると、世界では1日の大半が雲で覆い隠されている地域もあり、戦闘中の爆発や弾幕により赤外線映像が乱れる場合もあるが、今回発注した超高周波を使うレーダー・システムはこのような問題を解決することが期待されており、晴天時の赤外線目標捕捉システムと同等の視認性を提供できるという。

L-3には、レーダー・システムが**231.5~235GHz**で稼働すると実証することが義務付けられている。

<http://www.nextgov.com/emerging-tech/2013/07/ground-attack-aircraft-radar-outmaneuver-overcast-skies/66407/>

# テラヘルツ波を利用した逆合成開口レーダーの実施例

ミニチュアを使い反射断面積等を計測

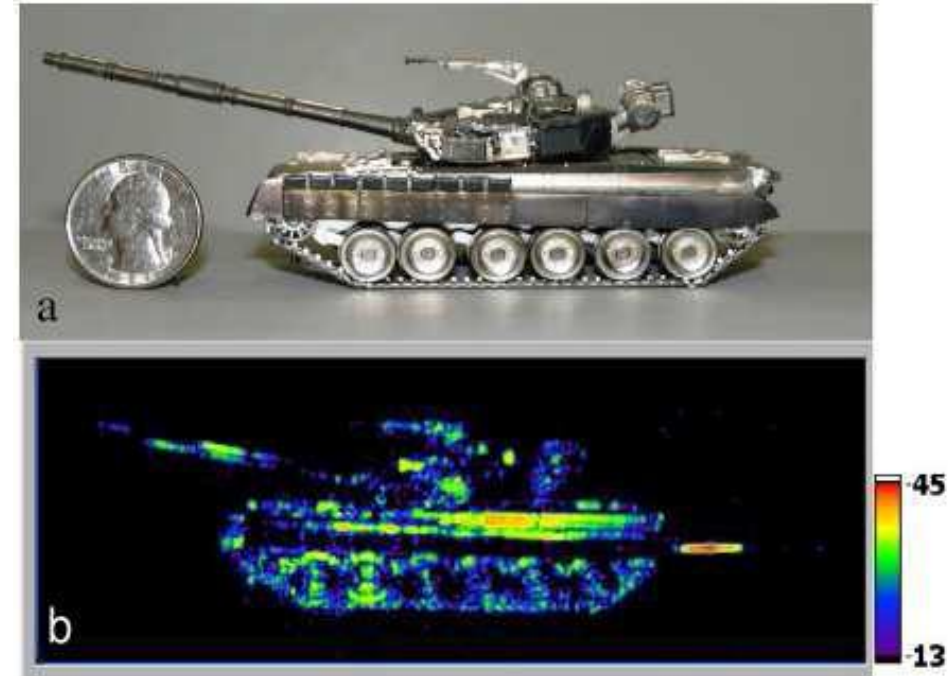


$$\sin \theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

$\theta$  : 角度分解能

$\lambda$  : 波長

D : 口径



(a) photograph of a 1/72nd scale model T-80BV tank, (b) 2.4 THz Azimuth/ Elevation imagery of the scale model tank with pixel resolution of 0.4x0.6 mm. A calibration object (dihedron) is located to the right of the image.

# テラヘルツカメラで透視！



アクティブ： カメラ + 照明

パッシブ： カメラ (+ 自然照明)

※人体を対象としており、X線では問題が多い

# テラヘルツ帯のイメージングを考える際に重要な基本事項

## ①パッシブかアクティブか

- ・パッシブは赤外線カメラと同様に被写体が放つ黒体輻射を検出する（放射計）
- ・アクティブは、可視カメラ（レーダ）と同様に、照明（発振器）から被写体に電磁波を照射する

## ②検出器感度及び雑音

- ・熱的検出（ボロメータ）、量子的検出（バンドギャップや不純物準位等を用いる）、コヒーレント検出（ヘテロダイン/ホモダイン）、他と様々な方式の検出器があり、それぞれ周波数の提供範囲、感度、雑音が異なるため、応用における周波数帯、取得したい像のS/Nやダイナミックレンジ、像取得にかかる時間に対する要求等が変わる。

## ③どの部分を2次元化するか

- ・2次元の像を得るためには、照明、空間フィルター、検出器のいずれかを2次元化する。良くある話は、検出器を2次元アレイにするというもの。1次元アレイを用いてスキャンする（ある種の空間フィルター）ことも、そのバリエーションです。検出器は0次元（単一素子）として、2次元の可変空間フィルターもしくは可変構造化照明を用いる方法もあります。

## ④光学系

- ・レンズ系（材料の屈折率、反射防止膜等も込みで。）、反射系、ビームスキャン、空間フィルター、周波数フィルター、明るい光学系（F値が小さい）、テレセントリック、等

## ⑤コスト

- ・ハードからソフトへ転換可能なものは何か（計算コストは年々下がって行くので、ハードを維持するよりもソフトで実現した方が良い場合があるはず。例えばレンズを計算に置き換えることは可能。）
- ・目的とする応用において、取得したイメージが生み出す価値は、イメージングに掛かるコストを上回るか
- ・利用可能な既存技術は何か

上記以外にもある様々な項目がある。いずれにしても検討すべき項目は多数あり、どこから攻めるかは「見たいもの」次第。

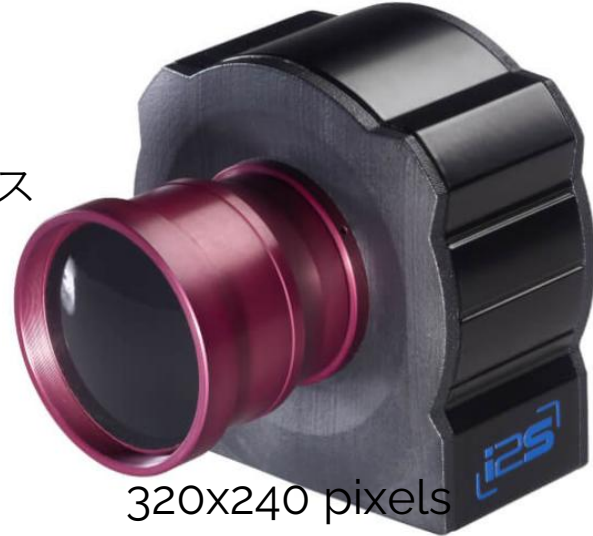
# テラヘルツカメラの開発事例

**NICT**の委託研究によりテラヘルツカメラの開発→開発に先鞭をつけた



Leti Dr. Francois SIMOENS

フランス



320x240 pixels  
<https://www.i2s.fr>



カナダ

384 x 288-pixel  
<https://www.ino.ca>



NEC 小田直樹 博士

日本



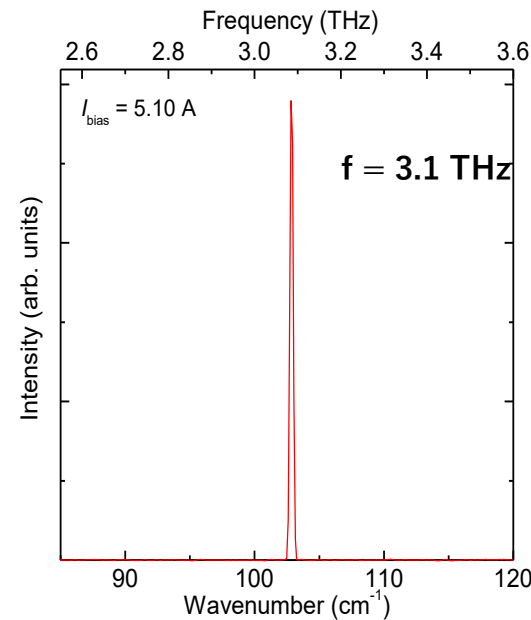
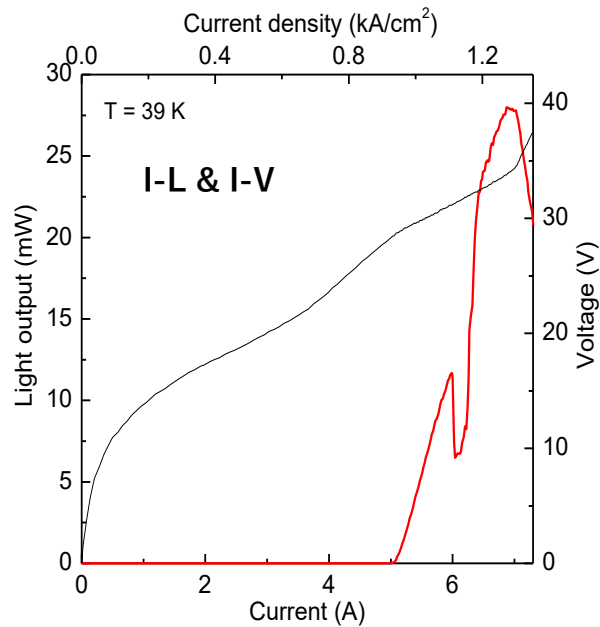
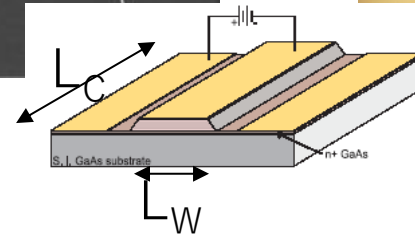
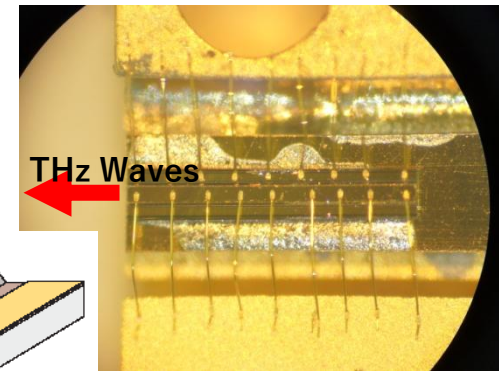
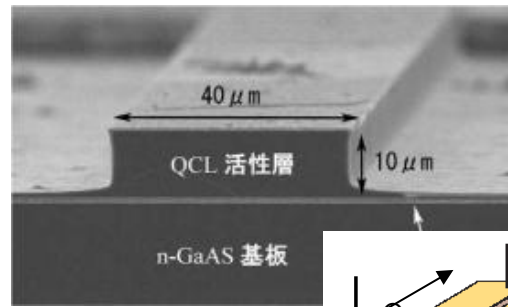
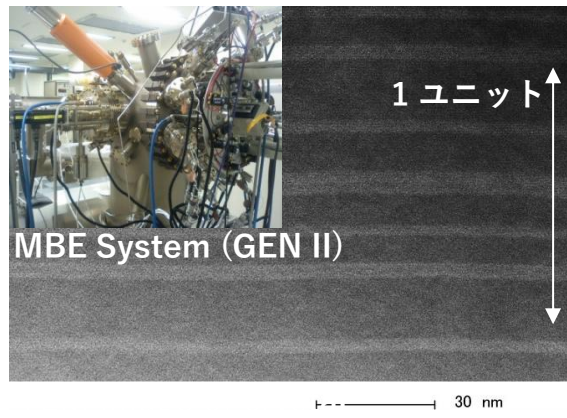
320x240 / 640x480 pixels  
<https://www.nec.com>



ロシア→米国

32x32 pixels  
<http://terasense.com>

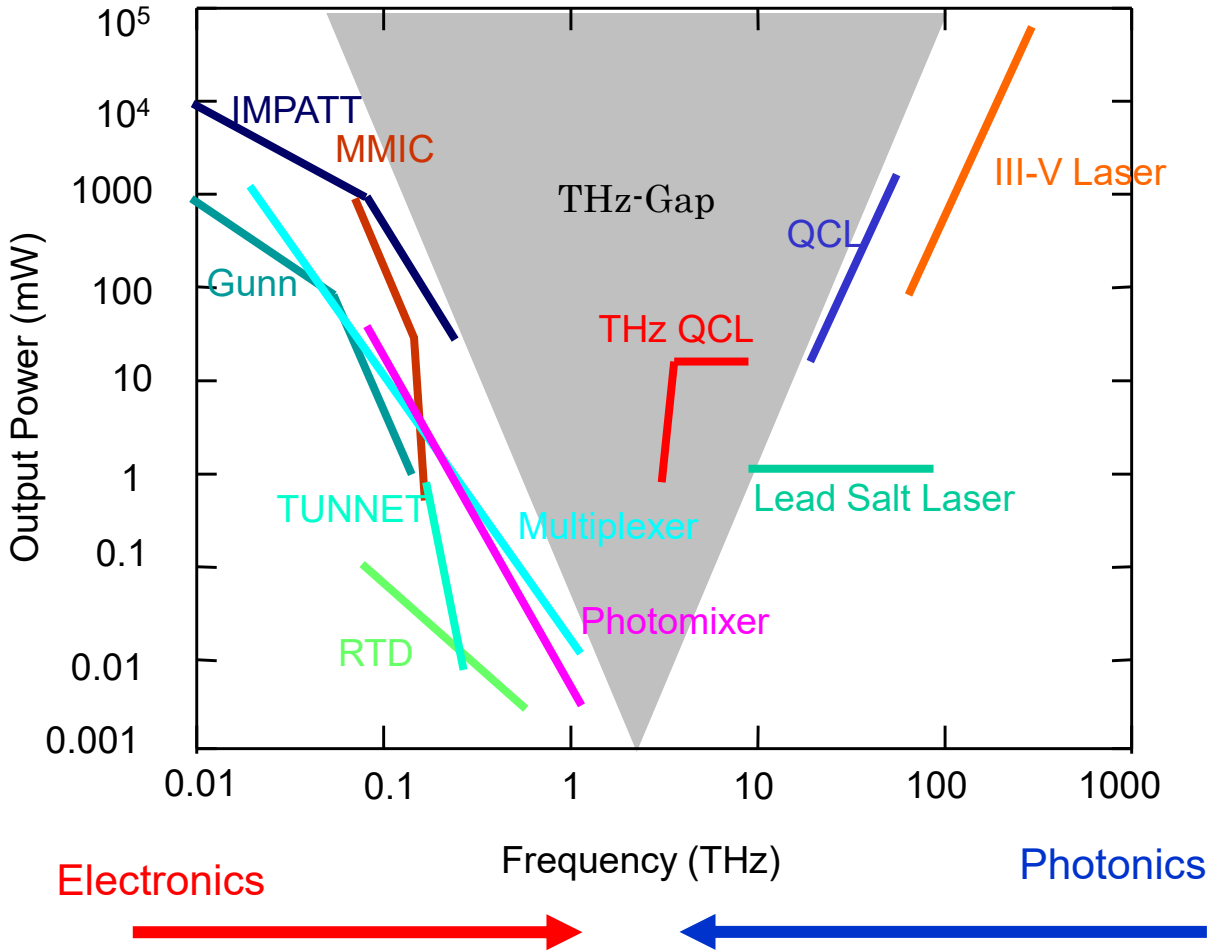
# テラヘルツカメラ用照明 (THz-QCL) の開発事例



液体窒素冷却光源システム  
時間平均出力  $\sim 3 \mu\text{W}$

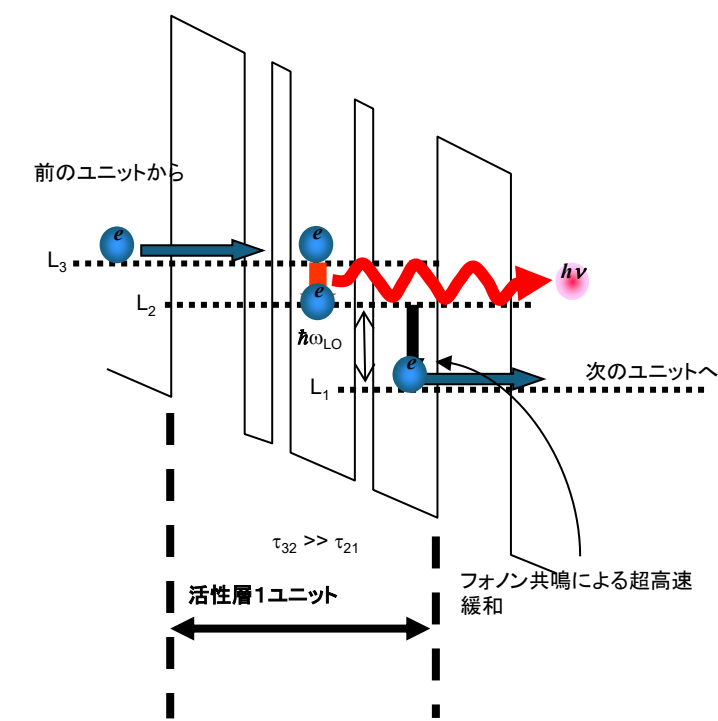
# THz-QCLの開発事例：位置付けと原理

テラヘルツ帯における半導体光源(発振器)



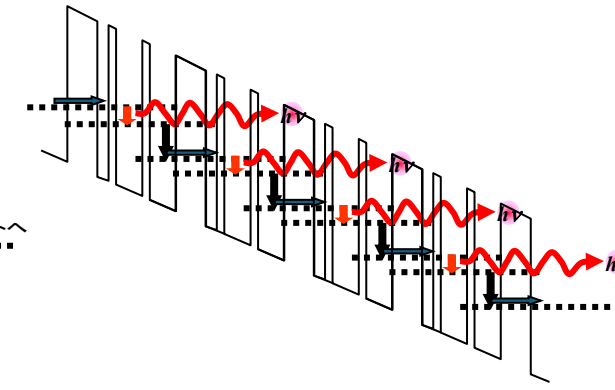
活性層1ユニット(共鳴フォノン型)

- ・サブバンド間遷移
- ・短いキャリア寿命：数 ps

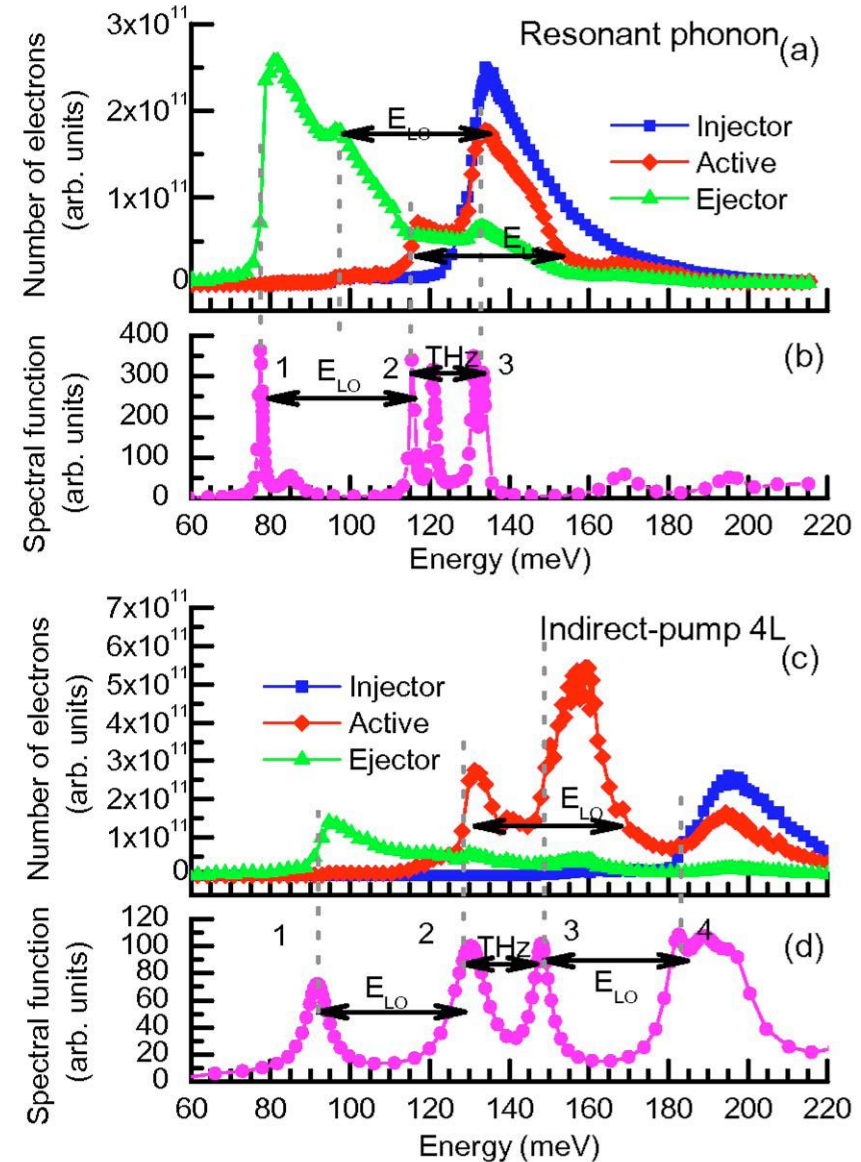
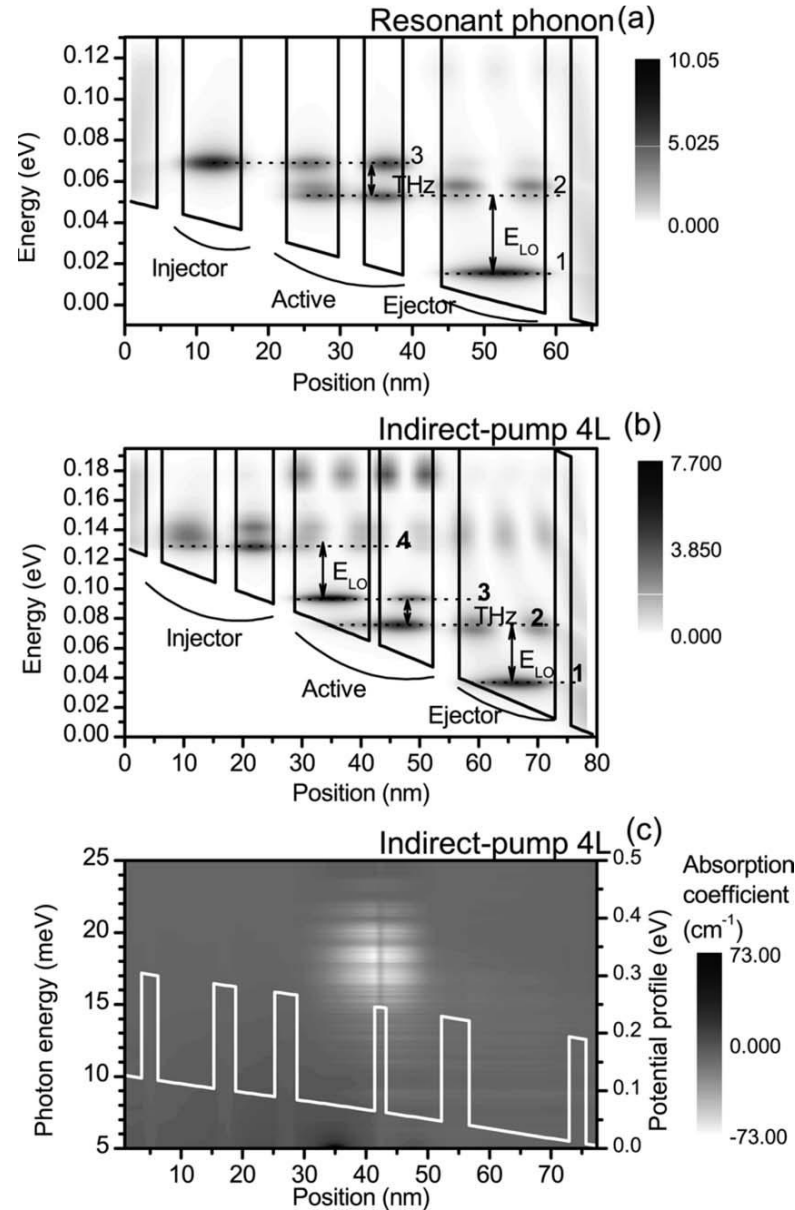


複数の活性ユニットを連結

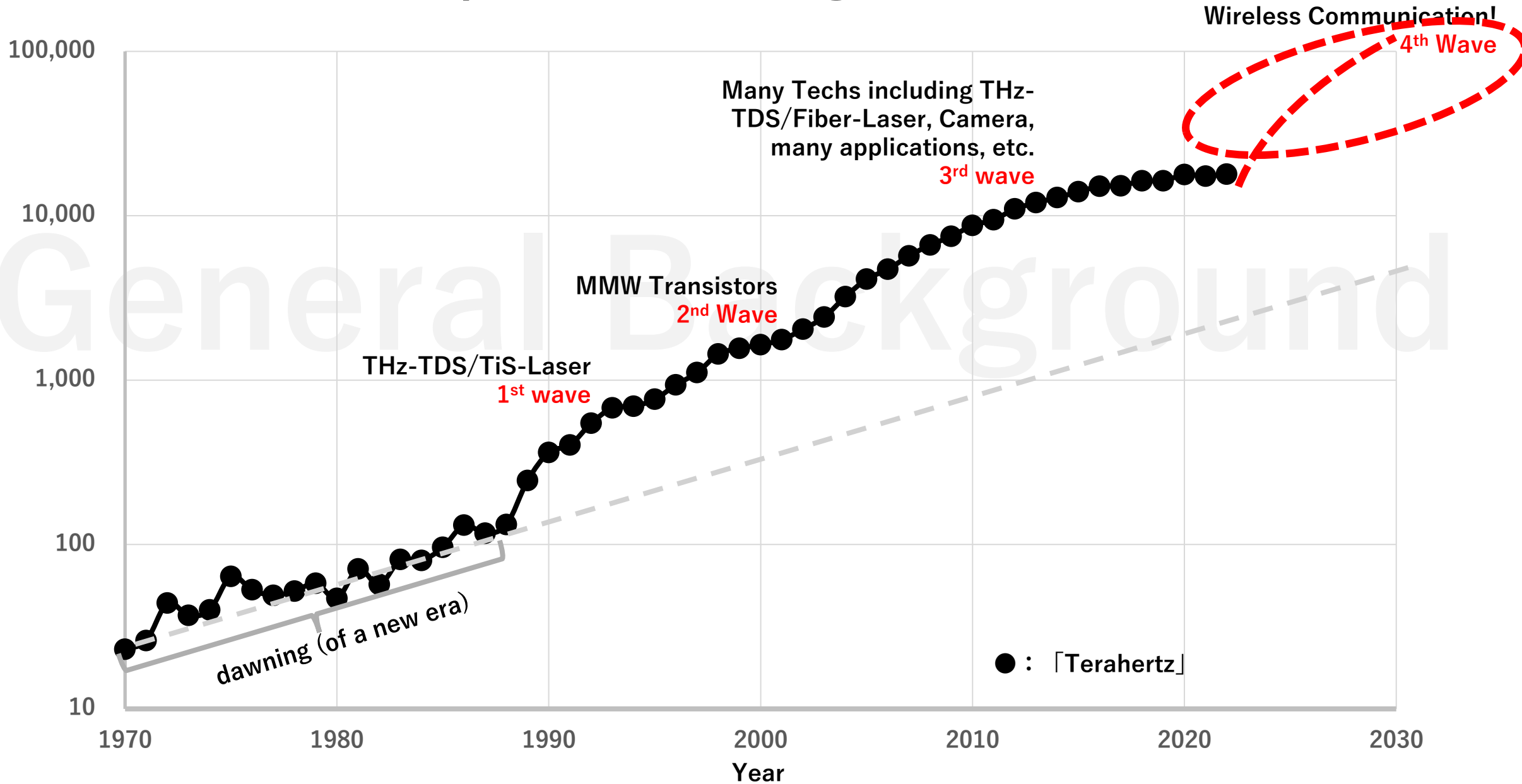
- ・カスケード構造：キャリアの再利用
- ・出力は活性層数と注入電流に比例



# THz-QCLの開発事例：NEGFシミュレーション



# Number of articles published (Google Scholar: "Terahertz")



# THz-無線通信への期待

## 第6世代移動通信システム(6G)

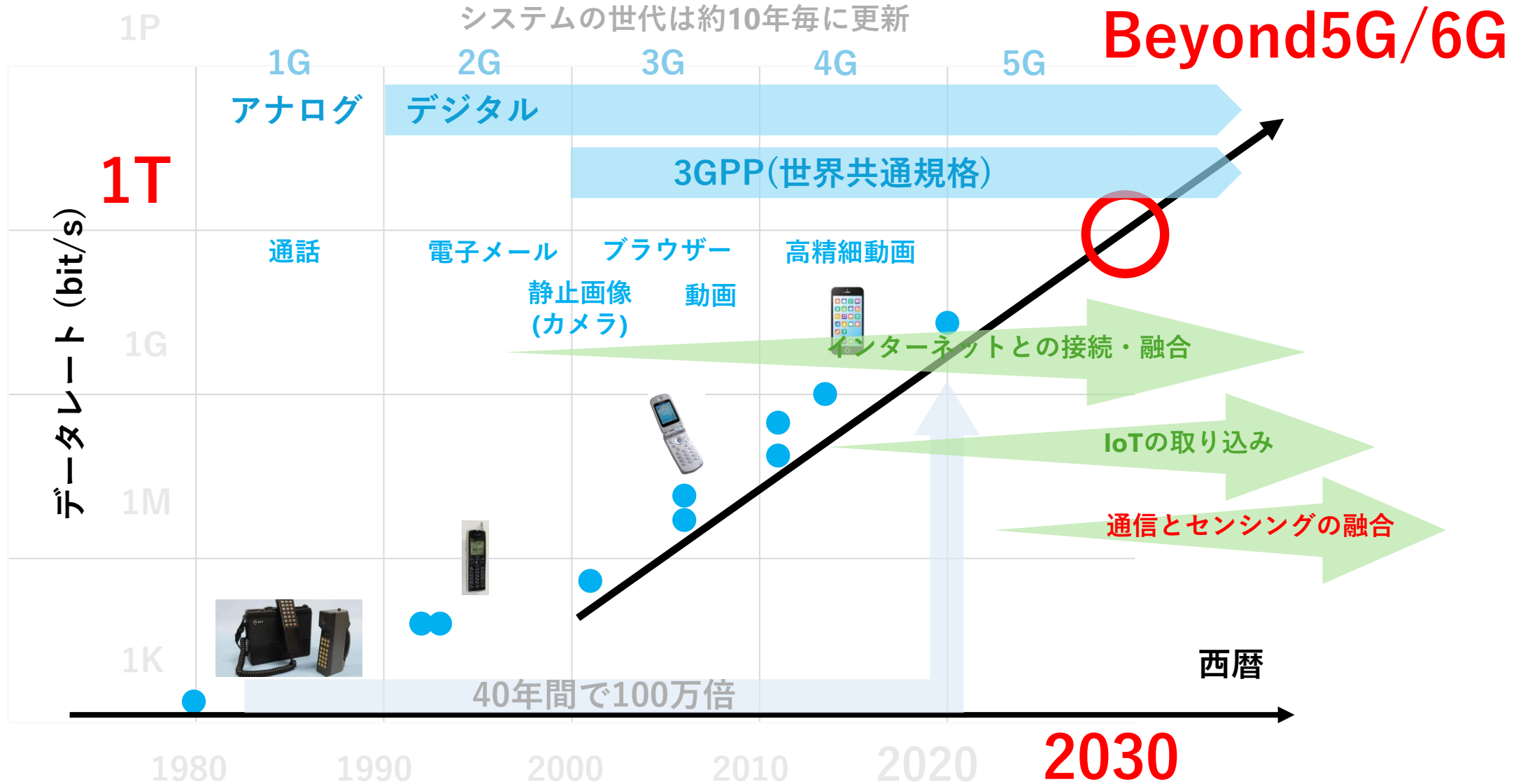
データレートのトレンド：1Tbps@2030

## IEEE802.15.3-2023

X-haul、データセンタ、デバイス間、キオスクDL等

背景：周波数資源のひっ迫、高周波デバイス技術の進展、  
5Gでのミリ波の導入、

# 移動体通信システムの発展



# 世界無線会議2023 (WRC-2023) のTHz関連決議

## World Radiocommunication Conference 2023 (WRC-23)

Provisional Final Acts

- WRC-23では、MMW & THz帯に関連するいくつかの決定がなされた。
- WRC-23の結果を受けて、今後どのような対応が求められるかを検討し、それぞれの対応に対応したグループを作る必要がある。
- WRC-23におけるMWとTHzの結果概要

- RESOLUTION COM6/23 (WRC-23) : WRC-27年の議題

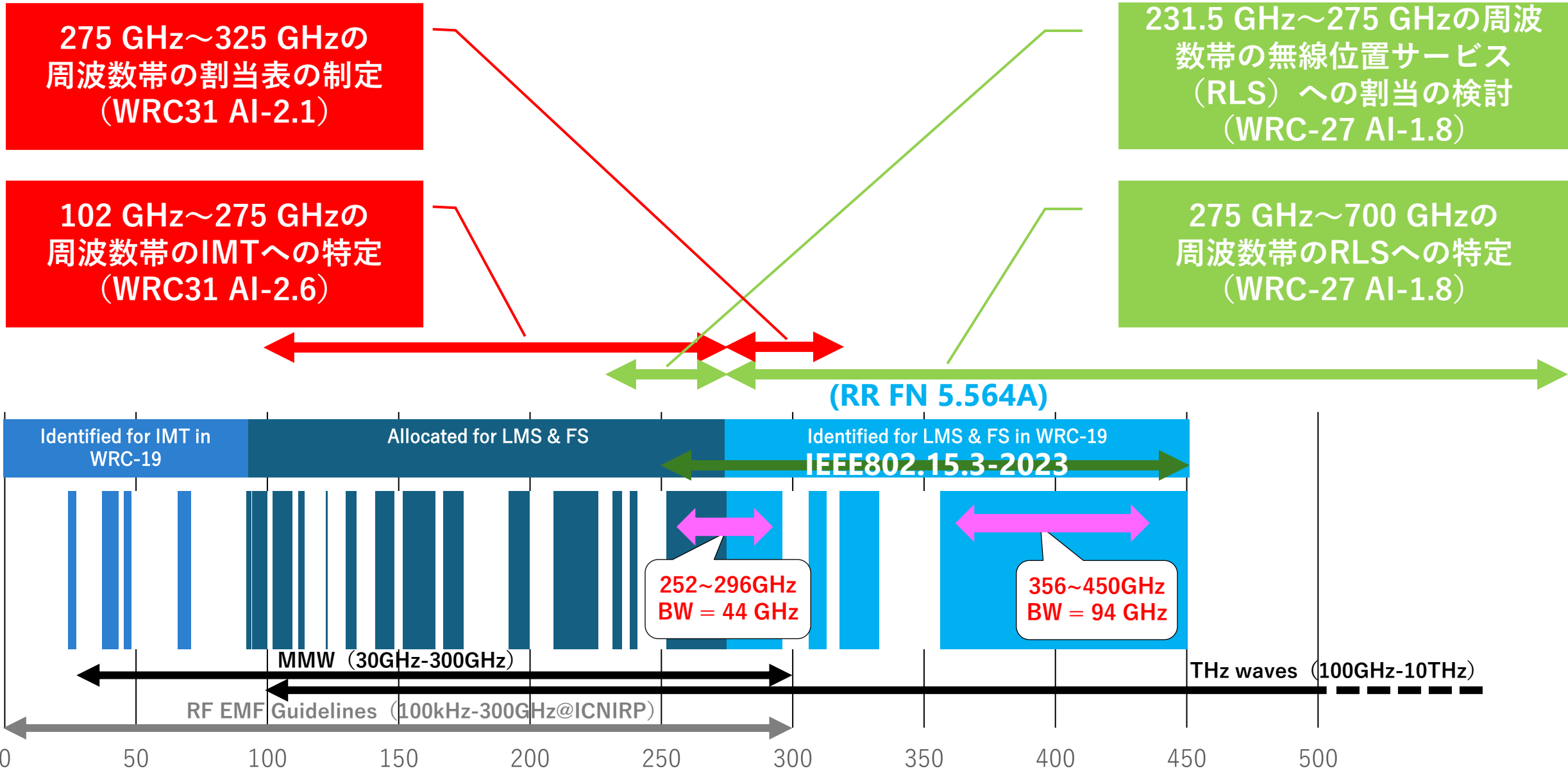
議題1.8 : 決議663 (Rev.WRC-23) に従い、**周波数範囲231.5~275GHz**において、**ラジオロケーション・サービス(RLS)**への追加周波数の1次割り当ての可能性を検討する。さらに**周波数範囲275~700GHz**において、**ミリ波及びサブミリ波イメージングシステム**を対象とした**RLS**への新規特定の可能性を検討する。

- RESOLUTION COM6/25 (WRC-23) : WRC-31年の暫定議題

議題2.1 : 決議COM6/13 (WRC-23)に従い、電波法の周波数割当表の周波数範囲**275~325GHz**において、**固定、移動、ラジオロケーション、アマチュア、アマチュア衛星、電波天文学、地球探査衛星 (パッシブおよびアクティブ) および宇宙研究 (パッシブ) サービス**に対する新規割当の可能性を検討し、**Nos. 5.149, 5.340, 5.564A 及び 5.565**の派生的更新を行う。

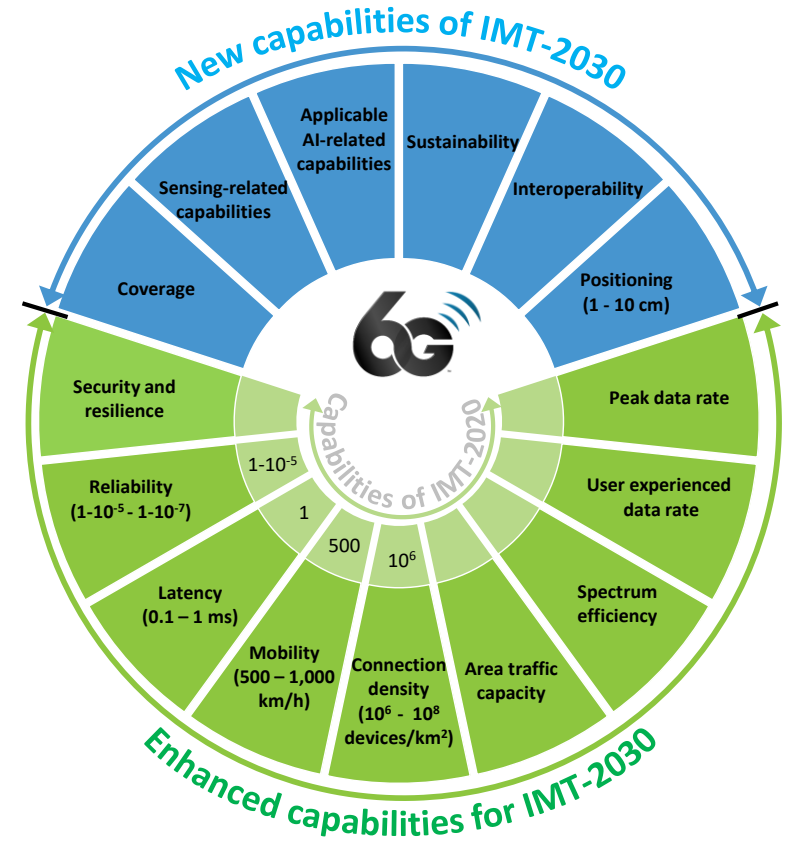
議題2.6 : 決議COM6/17 (WRC-23)に従い、**IMT用の周波数帯域**として**周波数範囲 [102~109.5 GHz、151.5~164 GHz、167~174.8 GHz、209~226 GHz、252~275 GHz]**を特定することを検討する。

# WRC-23後のITU-RにおけるMMW波とTHz波のスペクトル研究の方向性



# IMT-2030フレームワーク新勧告案の概要②（目標能力）

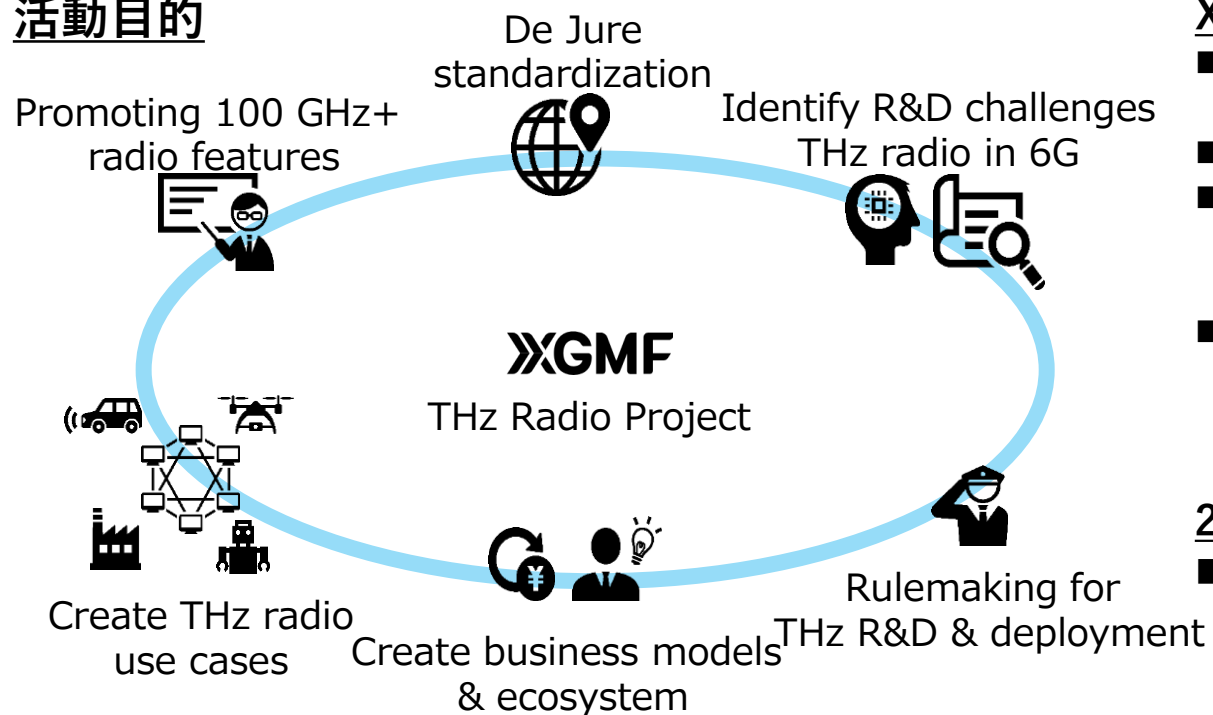
THz? Capabilities	Targets in IMT-2030	IMT-2020 (Rec.M.2083)	5D/1217, June 2019 Self evaluation of 3GPP 5G-RIT (maximum values)
Peak data rate (Gbit/s)	Ex. 50, <b>100</b> , 200 Gbit/s	20 Gbps	<b>171.2 Gbit/s @ FR2, DL, 6 layers, 748MHz BW**</b>
User experienced data rate (Mbit/s)	Ex. 300, 500 Mbit/s	100 Mbps	
Spectrum efficiency	Ex. 1.5-3 times of IMT-2020	3 times of IMT-Advanced	
Area traffic capacity (Mbit/s/m <sup>2</sup> )	Ex. 30, 50 Mbit/s/m <sup>2</sup>	10 Mbit/s/m <sup>2</sup>	
Connection density (UEs/km <sup>2</sup> )	10 <sup>6</sup> - 10 <sup>8</sup> UEs/km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> UEs/km <sup>2</sup>	
Mobility (km/h)	500 - 1000 km/h	500 km/h	
Latency (ms)	0.1 - 1 ms	1ms	
Reliability	1-10 <sup>-5</sup> ~ 1-10 <sup>-7</sup>	1-10 <sup>-5</sup>	
Positioning (cm)	1 - 10 cm	NA	



# テラヘルツ波無線プロジェクト (XGMF-PJ2417)



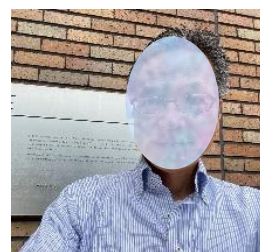
## 活動目的



## リーダーシップ

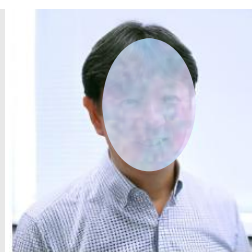


プロジェクトリーダー  
国立研究開発法人 情報通信研究機構 (NICT)  
寛迫 巖



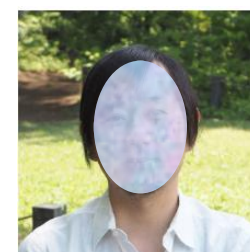
サブリーダー  
国立研究開発法人 情報通信研究機構 (NICT)  
高橋 和晃  
※2024.10まで  
パナソニック

産



サブリーダー  
早稲田大学  
川西 哲也

学



サブリーダー  
国立研究開発法人 情報通信研究機構 (NICT)  
荘司 洋三

官

## XGMFでのテラヘルツ無線 (mmWを含む) の位置づけ

- 6Gにおける超広帯域・超低遅延通信を実現するための重要な周波数資源 (Day-2)
- 狭ビーム・高伝搬損失という特性をいかに克服し、有効活用するかが鍵
- テラヘルツ無線に対する要求を明確にするため、昨年度は想定されるユースケースや高周波数活用が実現する価値について重点的に議論
- キーテクノロジーの1つの側面は、デバイスと材料技術  
→FY2025ではCOCN (推進テーマ: 超安全な社会を目指した次世代高速通信デバイス向け革新技術の開発) と連携

## 2025年度計画の進行状況

- 会合: 第10回会合 (10月21日15:30~@京都駅前ビル/Online)  
※ (ローム様に会場を準備いただいた。)
  - COCN、NEDO-PJ (材料系) から情報入力
  - ユースケースの議論 (F/b-haul、DC)
  - 実装促進のためのルール作り (電波法関連)

## 参加メンバー

約30団体から50名以上のメンバーが参加

(ネットワーク事業者、システムインテグレーター、機器サプライヤー、デバイス/材料メーカー、学術機関、政府機関)

# What is the IEEE 802.15.3-2023 (High Data Rate)

Initial project started March 2000  
– New MAC/PHY combination

Completed 2003  
=> **IEEE Std 802.15.3-2003**

1<sup>st</sup> Revision project  
– Roll-up of all amendments  
=> **IEEE Std 802.15.3-2016**

2<sup>nd</sup> Revision project  
– Roll-up of all amendments  
– With Amendment for a THz-PHY

- Include all new frequency bands above 275 GHz identified by WRC 2019
- Fix RIFS timing parameter issue
- Replace reference to IEEE Std 802.1D by reference to IEEE Std 802.1Q
- Introduce two new modulation schemes (16-APSK, 32-APSK)

=> **IEEE Std 802.15.3-2023**



300 GHz Band +

1<sup>st</sup> amendment failed to complete  
– UWB PHY, but unable to get 75% approval

Piconet

3<sup>rd</sup> amendment added MMW alternative PHY  
– Supports beam forming, aggregation  
=> IEEE Std 802.15.3c-2009

5<sup>th</sup> amendment for a THz-PHY  
– MAC inherited from IEEE Std 802.15.3e-2017  
=> IEEE Std 802.15.3d-2017

2<sup>nd</sup> amendment to fix MAC issues  
=> IEEE Std 802.15.3b-2005

2.4 GHz Band

Pairnet

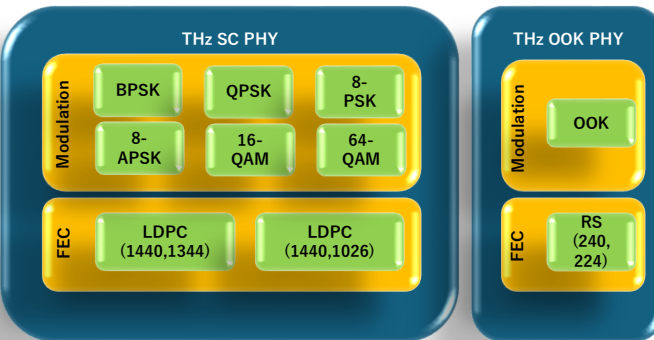
4<sup>th</sup> amendment for a specific 60 GHz PHY  
– for High-Rate Close Proximity (HRCP)  
=> IEEE Std 802.15.3e-2017

6<sup>th</sup> amendment to extend MMW  
– up to 71 GHz  
=> IEEE Std 802.15.3f-2017

60 GHz Band +



# 「802.15.3d-2017 - IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks--Amendment 2: 100 Gb/s Wireless Switched Point-to-Point Physical Layer」のWRC-19における新たな周波数帯特定を受けた改訂



V. Petrov, T. Kürner and I. Hosako, "IEEE 802.15.3d: First Standardization Efforts for Sub-Terahertz Band Communications toward 6G," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 11, pp. 28-33, November 2020

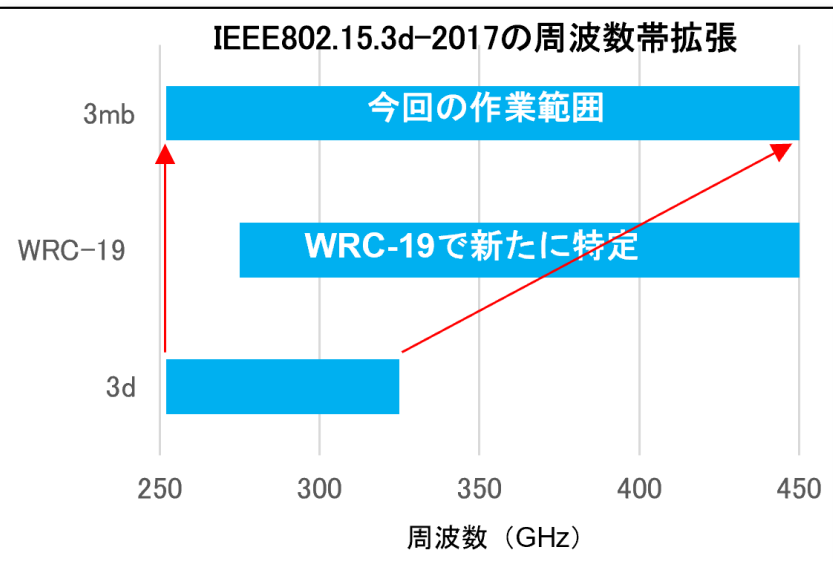
- IEEE Std 802.15.3e-2016のPair-Netを継承
- ※Transfer Jet X: 3eをベースとした60GHz無線
  - P2Pリンク
  - リンク確立～数ミリ秒
  - ナロービームの特性を上手に利用
  - 3eの信号をアップコンバートすると3dに



<https://www.sony-semicon.com/ja/technology/iot-com/transfer-jet.html>

## 802.15.3 (High Data Rate)

- 802.15.3a } 802.15.3dの改訂作業のため、IEEE802のルールにより、802.15.3全体の改訂作業を実施
- 802.15.3b }
- 802.15.3c }
- 802.15.3d** }
  - 新たな周波数帯の追加 (325~450GHz)
  - 新たな帯域幅のチャンネルを定義 : 34.56GHz
  - 変調方式の追加 : 16-APSK, 32-APSK
  - インターフレーム待機時間の修正
- 802.15.3e }
- 802.15.3f }



<https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/22/15-22-0414-00-03ma-ieee802-15-3ma-channel-plan.xlsx>を基に編集

## リトライ・インターフレーム・スペース(RIFS)の見直し

MAC Parameter	Corresponding PHY Parameter	Definition	
SIFS	$pPHYSIFSTime$	11a.2.6.3	
RIFS	PRC	$2 * pPHYSIFSTime + 3.01 \mu s$	7.4.1
	DEV	$4 * pPHYSIFSTime + 9.05 \mu s$	



MAC Parameter	Corresponding PHY Parameter	Definition	
SIFS	$pPHYSIFSTime$	11a.2.6.3	
RIFS	PRC	$2 * pPHYSIFSTime + 69.7 \mu s$	7.4.1
	DEV	$4 * pPHYSIFSTime + 142 \mu s$	

doc.: IEEE 802.15-21-0131-02-03ma-Proposal\_RIFS\_extension

※日欧共同公募プロジェクト「ThoR (2018-2022)」の成果を受けた見直し。  
 ※本共同公募案はNICTからの提案による。

**Sponsor Committee**  
 C/LAN/MAN - LAN/MAN Standards Committee

**Status**  
 Active Standard

**PAR Approval**  
 2021-12-08

**Superseding**  
 802.15.3-2016

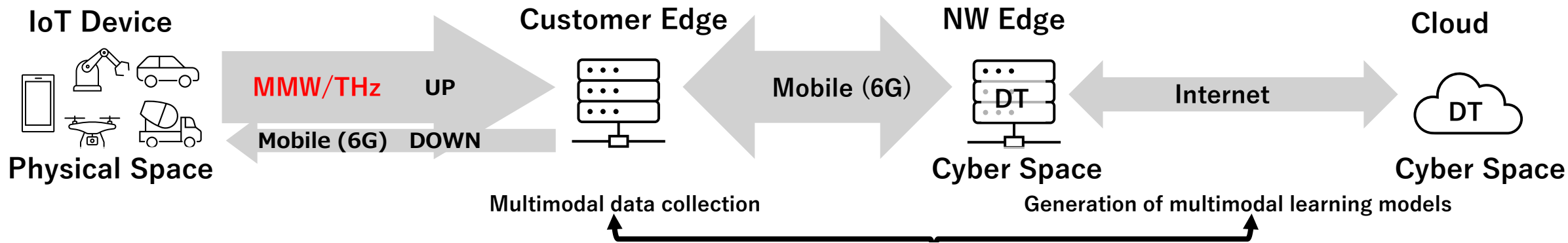
**Board Approval**  
 2023-09-21

**History Published:**  
 2024-02-22

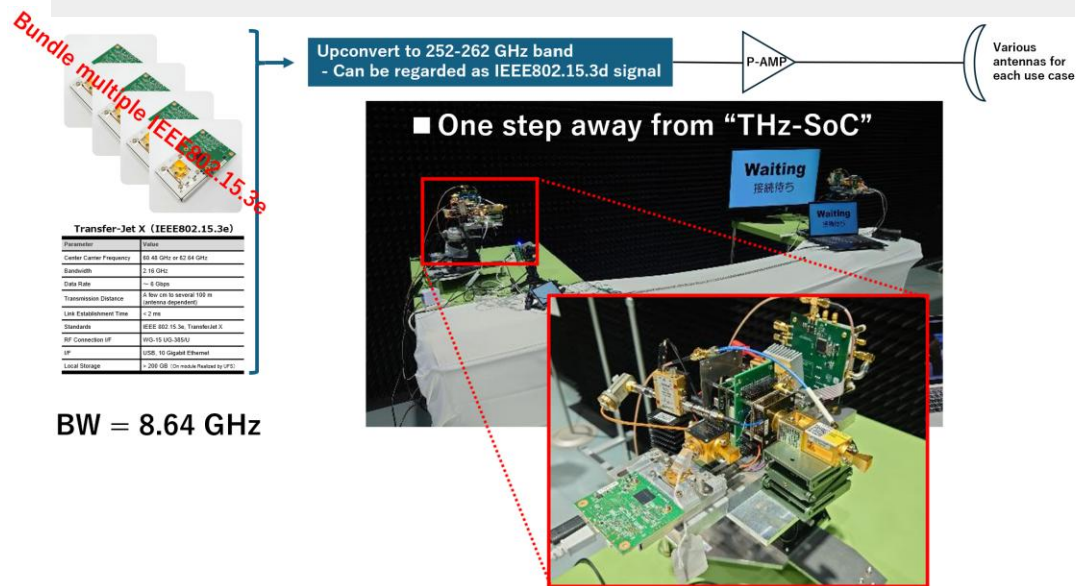
# IEEE802に基づく未来社会における需要と新たな収益源

補完的な使用

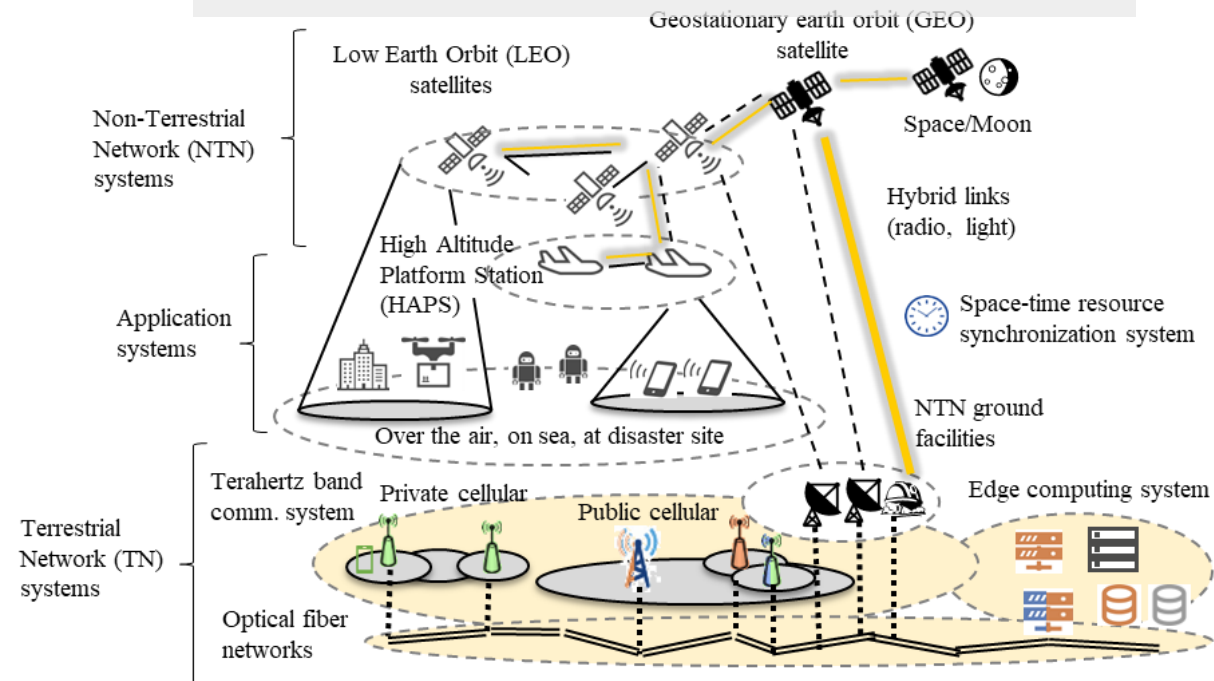
## Cyber-Physical System Loop



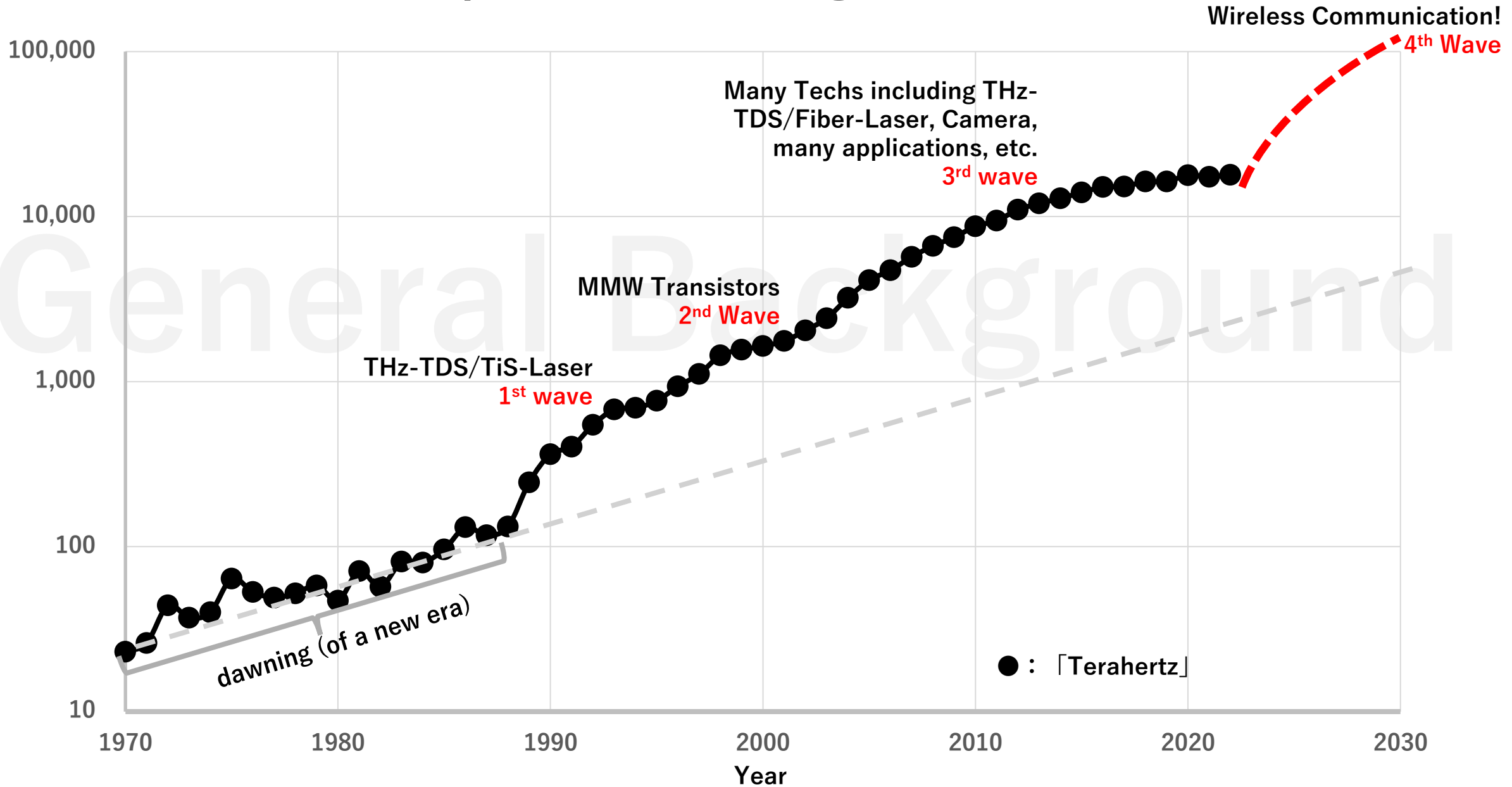
## スケーラブルな展開戦略



## 6Gとの補完的使用



# Number of articles published (Google Scholar: "Terahertz")



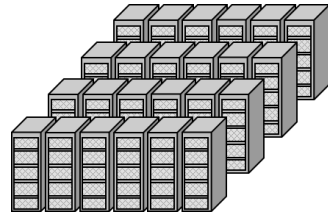
# THz技術の将来展望：皆さんに使ってもらえるデバイスが出てきた！

開発者が思いつかないユースケースが重要！！

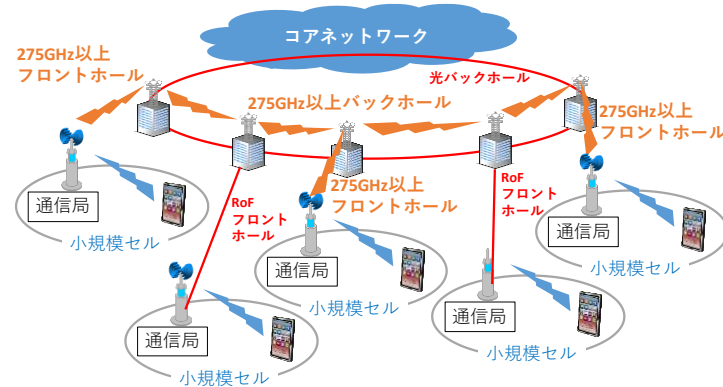
## 光ファイバー級（100Gbit/s～1Tbit/s級）超高速無線



瞬時データ転送  
(ムービー、画像、OS等)



再構成可能な  
データセンター



Beyond 5G/6Gネットワーク  
(アクセス・バック/フロントホール)



衛星/HAPS/航空機

RR: FN5.564A

## 非破壊・非接触センシング（ミリメートル級の高空間分機能） RESOLUTION 663 (WRC-19)

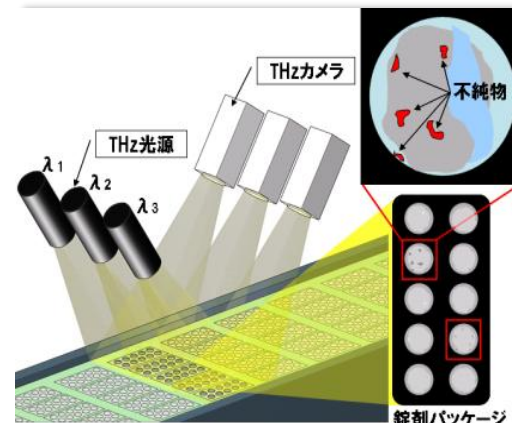


物流

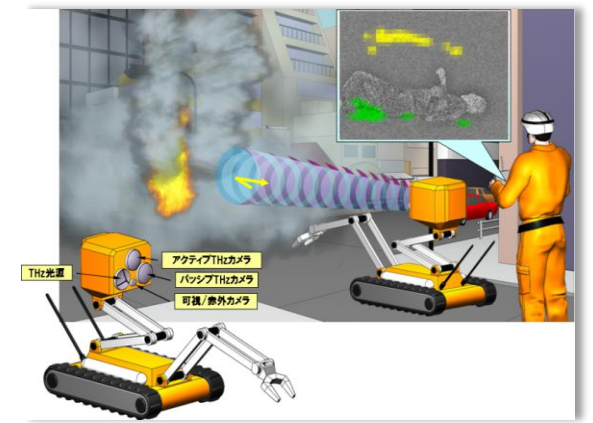


安全・安心

人流



製造工程



災害現場（レーダー）