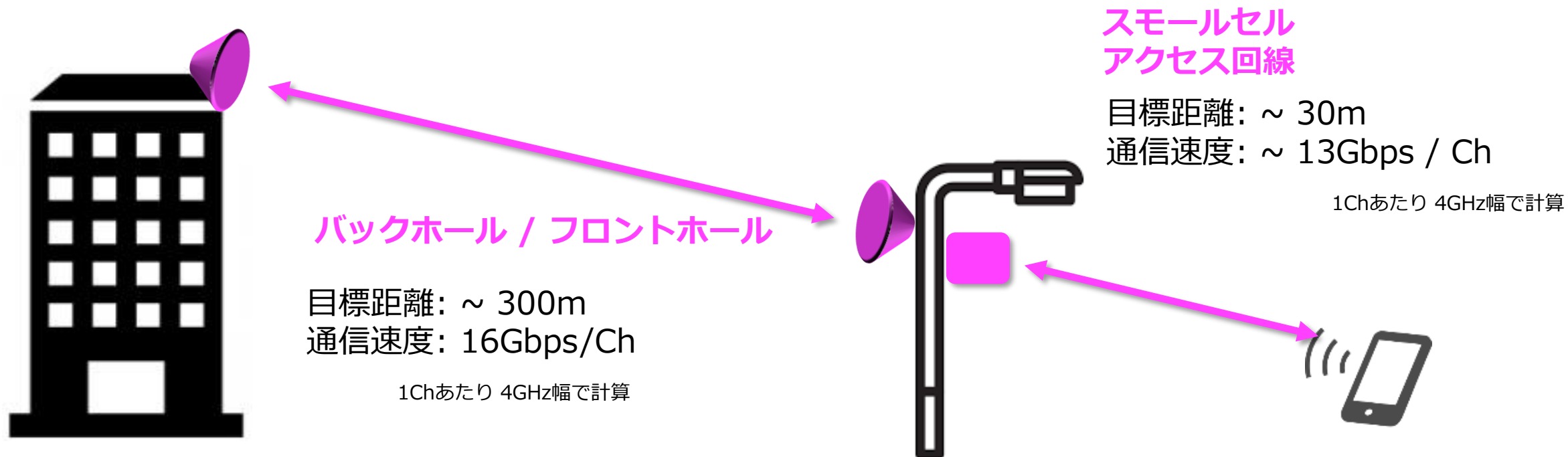


システムGまとめ

2023.02.24

想定ユースケース

システムGで議論した内容として想定したユースケースは、下記 2種類の無線回線部分



テラヘルツスモールセルは、光回線バックホールを使うことも考えられるため、バックホールよりも高速になることがある。

想定ユースケースと予測リンクバジェット

フロントホール / バックホール利用

スモールセルアクセス回線利用

半導体アンプ利用の場合

伝送パラメータ	数値	単位
伝送距離	300	m
帯域幅	4	GHz
周波数	300	GHz
所要SNR	13	dB
Nf	15	dB

リンクバジェット

送信アンプ出力	11.5	dBm
送信器インプリロス	10	dB
Tx Ant. 利得	45	dBi
伝搬損失 (自動計算)	131.5	dB
Fading Margin	20	dB
Rx Ant. 利得	45	dBi
LNA 利得	20	dB
受信器インプリロス	10	dB
符号化利得	0	dB

真空管アンプ利用の場合

伝送パラメータ	数値	単位
伝送距離	2500	m
帯域幅	4	GHz
周波数	300	GHz
所要SNR	13	dB
Nf	15	dB

リンクバジェット

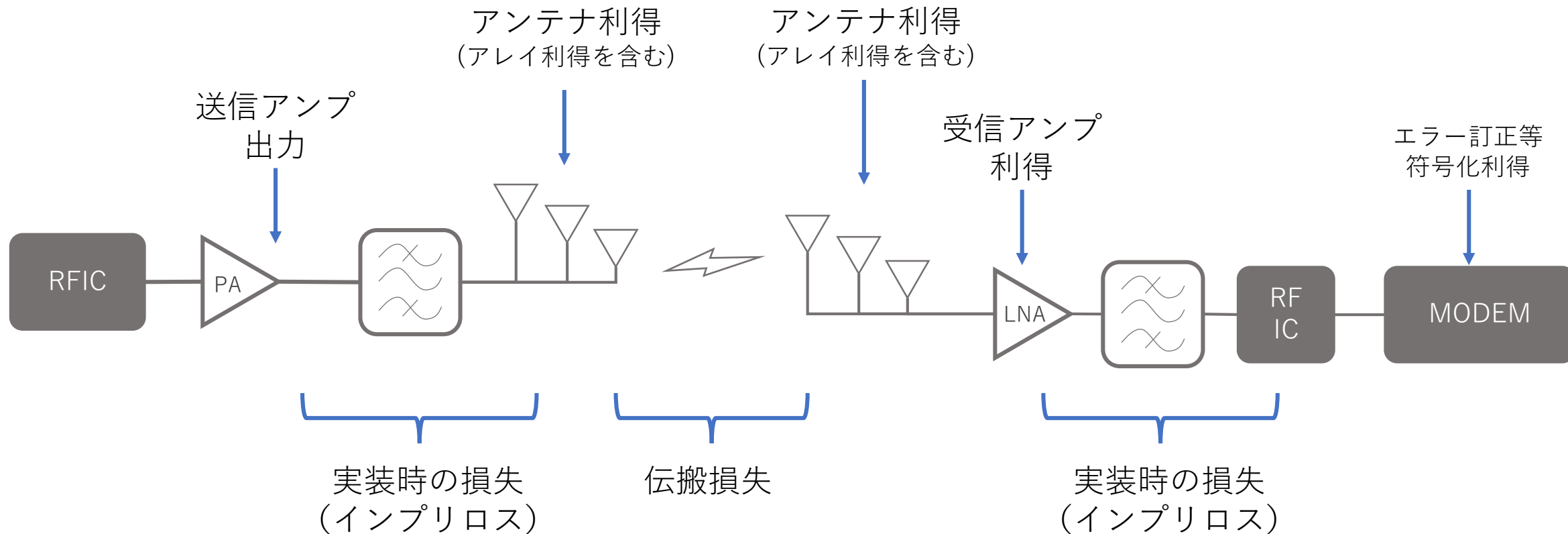
送信アンプ出力	30	dBm
送信器インプリロス	10	dB
Tx Ant. 利得	45	dBi
伝搬損失 (自動計算)	149.9	dB
Fading Margin	20	dB
Rx Ant. 利得	45	dBi
LNA 利得	20	dB
受信器インプリロス	10	dB
符号化利得	0	dB

伝送パラメータ	数値	単位
伝送距離	30	m
帯域幅	4	GHz
周波数	300	GHz
所要SNR	13	dB
Nf	15	dB

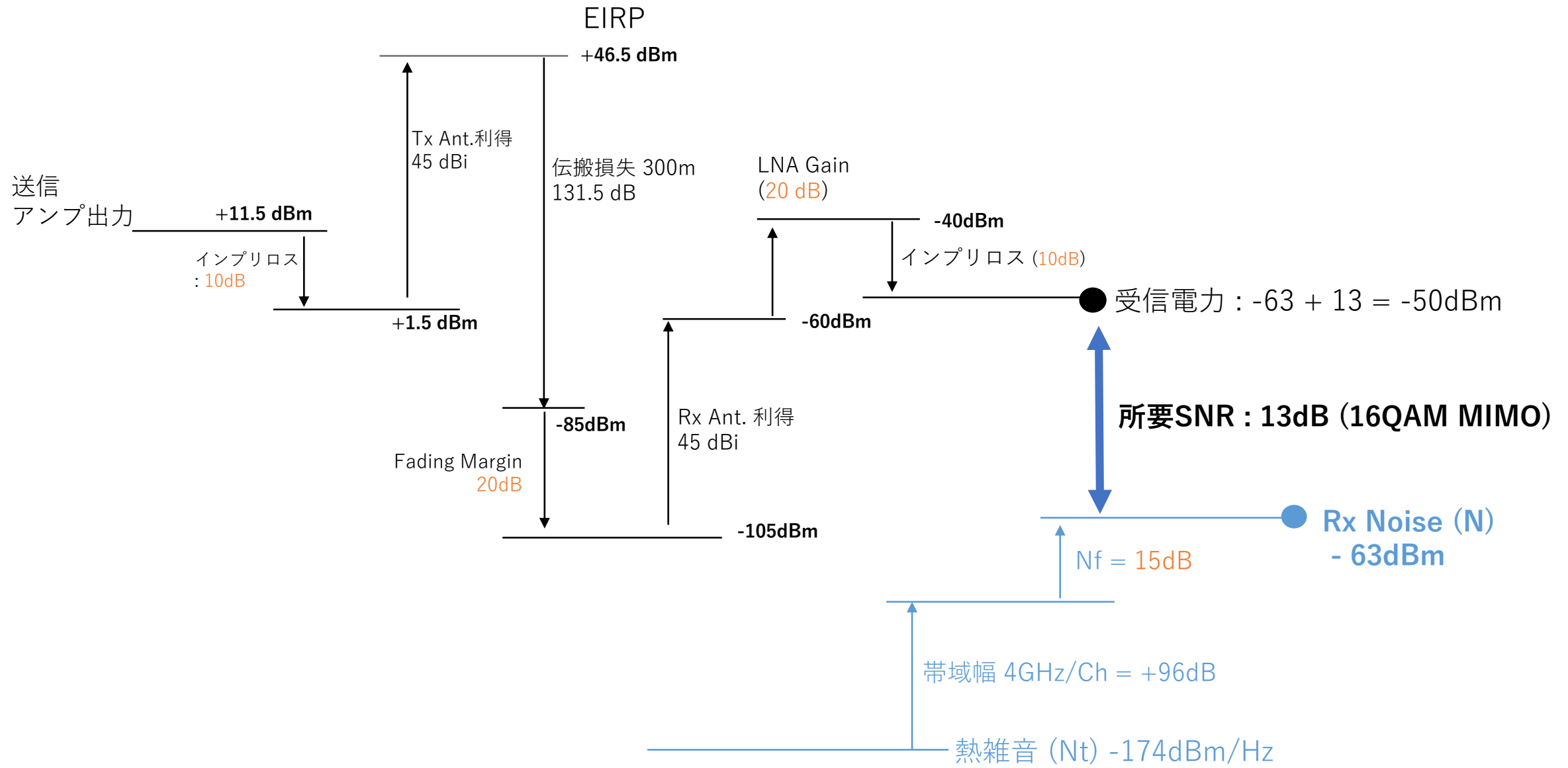
リンクバジェット

送信アンプ出力	16.5	dBm
送信器インプリロス	10	dB
Tx Ant. 利得	25	dBi
伝搬損失 (自動計算)	111.5	dB
Fading Margin	5	dB
Rx Ant. 利得	25	dBi
LNA 利得	20	dB
受信器インプリロス	10	dB
符号化利得	0	dB

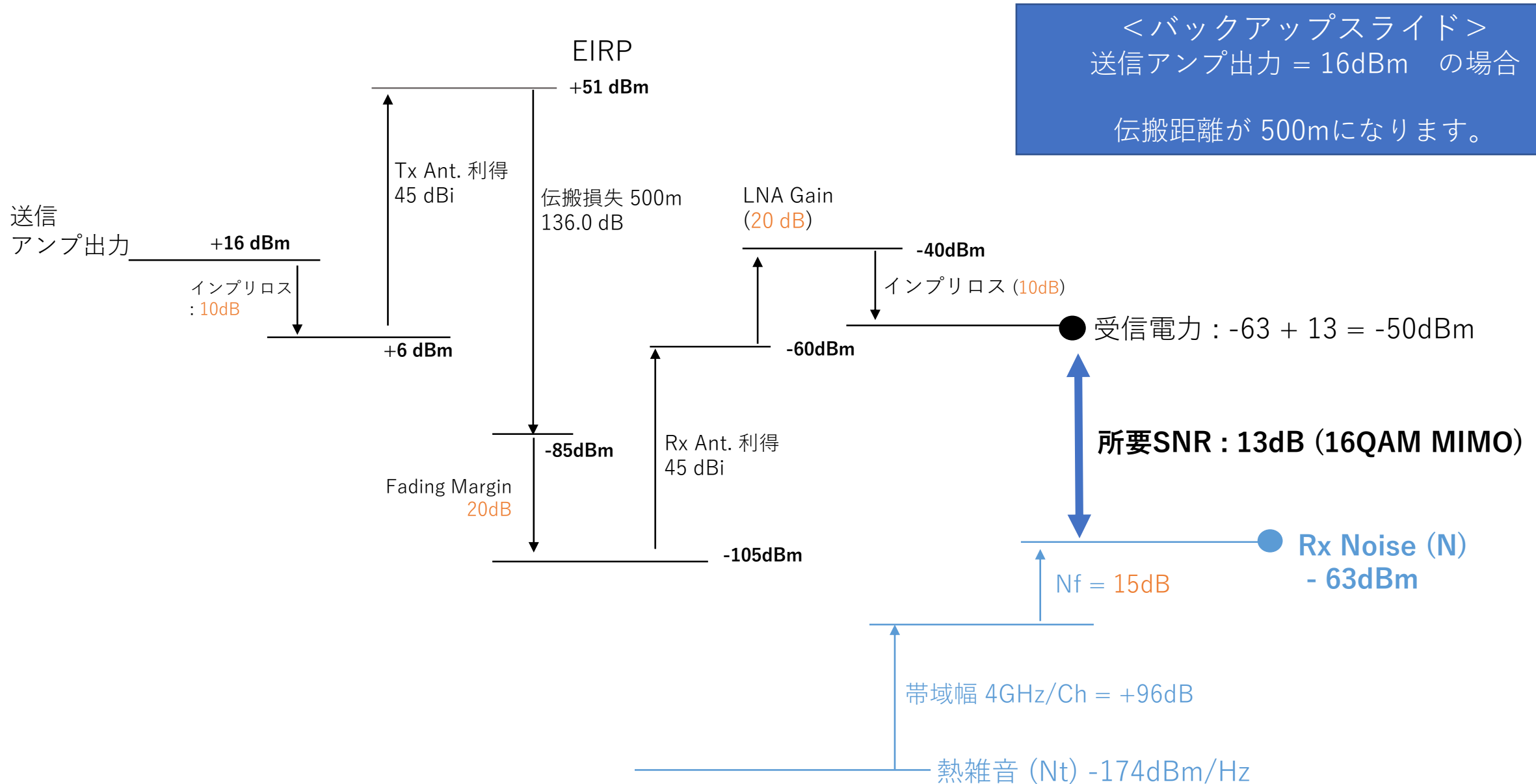
リンクバジェットイメージ



フロントホール / バックホール利用に向けたリンクバジェット計算

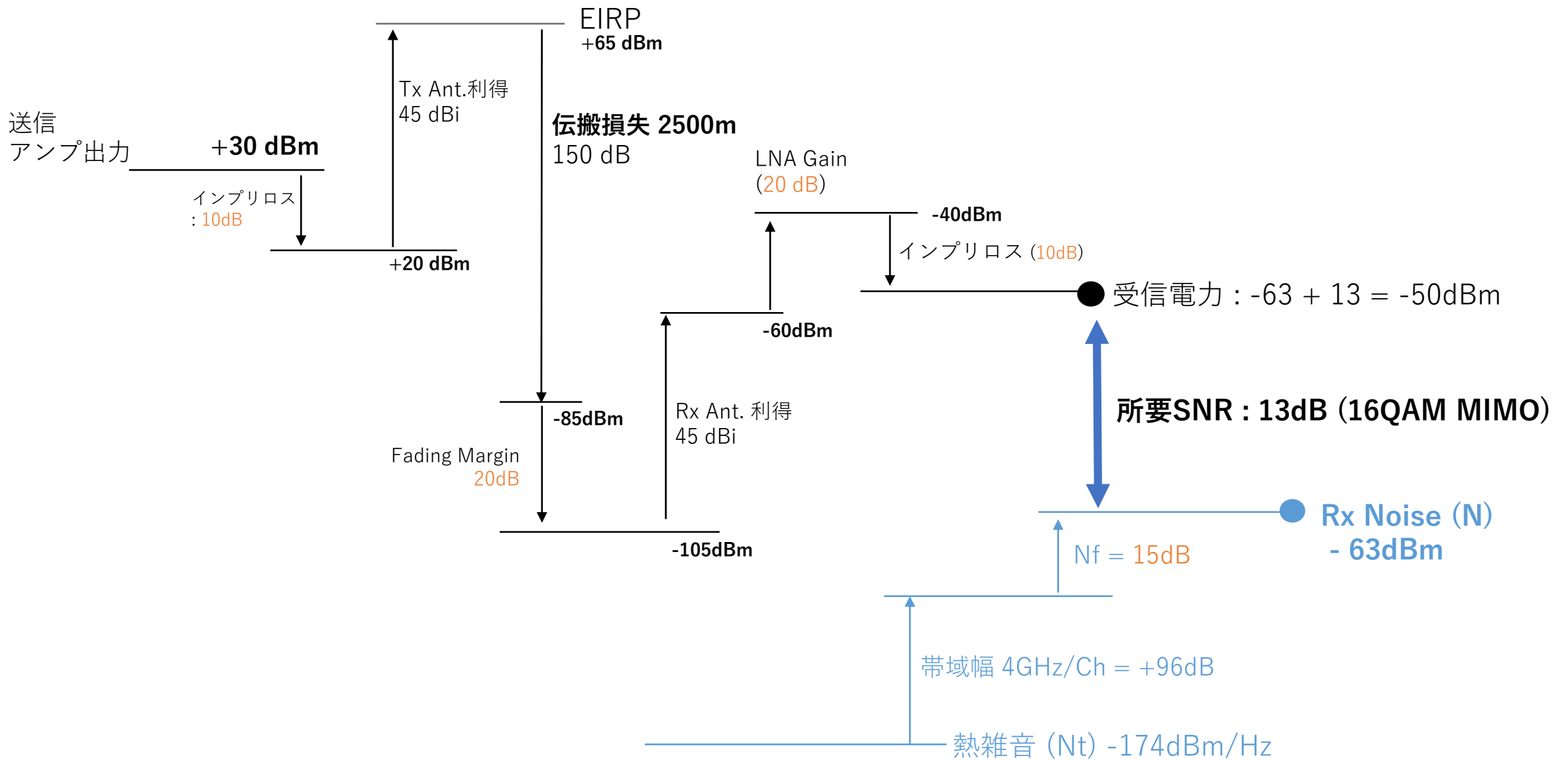


フロントホール / バックホール利用に向けたリンクバジェット計算

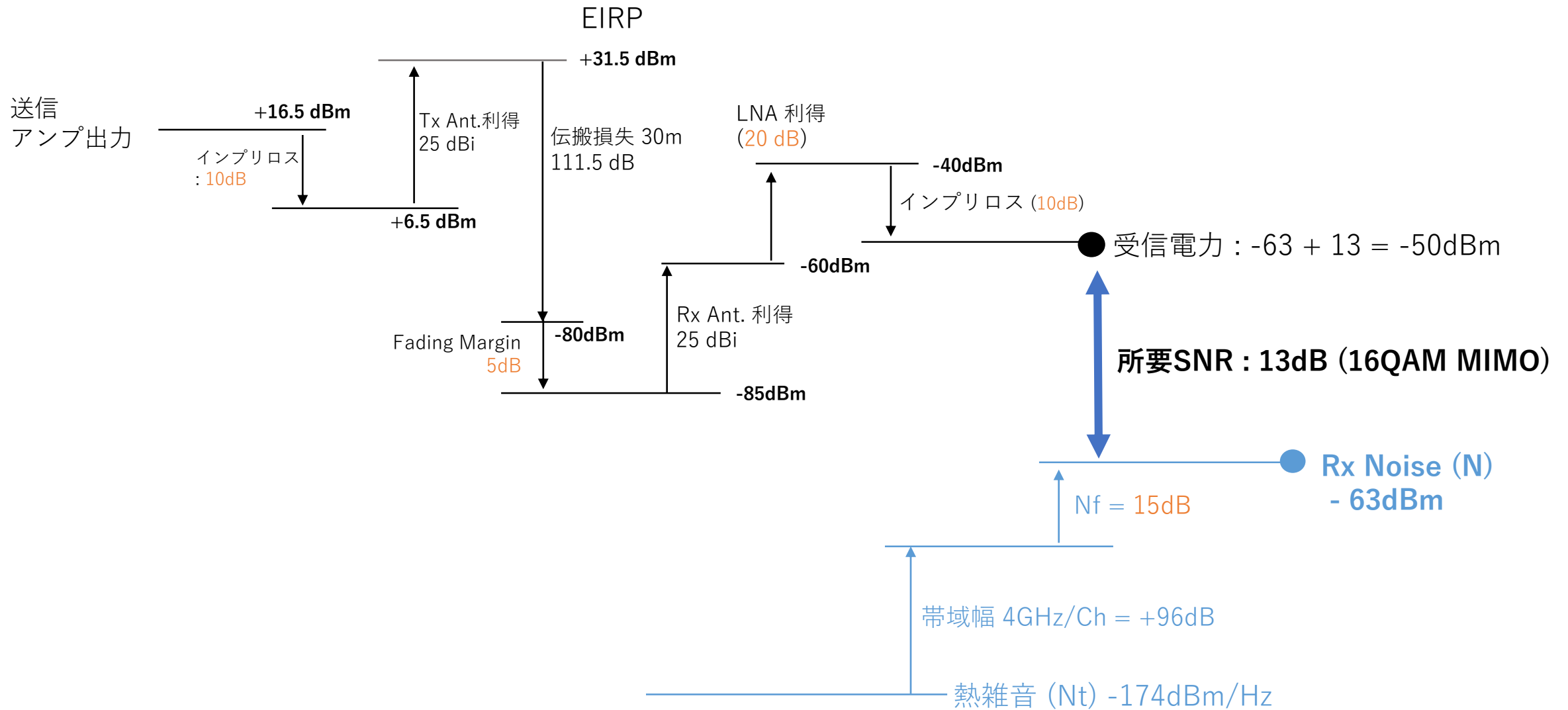


<バックアップスライド>
送信アンプ出力 = 16dBm の場合
伝搬距離が 500mになります。

フロントホール / バックホール利用に向けたリンクバジェット計算 (真空管利用による、距離の延伸)



移動体通信利用に向けたリンクバジェット計算



符号化利得の考え方

- 今回のリンクバジェットでは考慮していないが、3GPP規格では符号化率 (code rate) が規定されており、符号化率を下げることで所要SNRを下げる事が可能

3GPPで規定されているコードレート
(3GPPにはSNRの記載は無い)

< 38.214 - Table 5.1.3.1-2: MCS index table 2 for PDSCH >

MCS Index I _{MCS}	Modulation Order Q _m	Target code Rate x [1024] R	Spectral efficiency
0	2	120	0.2344
1	2	193	0.377
2	2	308	0.6016
3	2	449	0.877
4	2	602	1.1758
5	4	378	1.4766
6	4	434	1.6953
7	4	490	1.9141
8	4	553	2.1602
9	4	616	2.4063
10	4	658	2.5703
11	6	466	2.7305
12	6	517	3.0293
13	6	567	3.3223
14	6	616	3.6094
15	6	666	3.9023
16	6	719	4.2129
17	6	772	4.5234
18	6	822	4.8164
19	6	873	5.1152
20	8	682.5	5.332
21	8	711	5.5547
22	8	754	5.8906
23	8	797	6.2266
24	8	841	6.5703
25	8	885	6.9141
26	8	916.5	7.1602
27	8	948	7.4063

コードレートに対するSNR
同じ変調(16QM, QPSK)でも、所要SNRが下がることが記載されている。

CQI	MCS	Spectral efficiency	SNR in dB
0	Out of range		
1	QPSK, 78/1024	0.15237	-9.478
2	QPSK, 120/1024	0.2344	-6.658
3	QPSK, 193/1024	0.377	-4.098
4	QPSK, 308/1024	0.6016	-1.798
5	QPSK, 449/1024	0.877	0.399
6	QPSK, 602/1024	1.1758	2.424
7	16QAM, 378/1024	1.4766	4.489
8	16QAM, 490/1024	1.9141	6.367
9	16QAM, 616/1024	2.4063	8.456
10	16QAM, 466/1024	2.7305	10.266
11	16QAM, 567/1024	3.3223	12.218
12	16QAM, 666/1024	3.9023	14.122
13	16QAM, 772/1024	4.5234	15.849
14	16QAM, 873/1024	5.1152	17.786
15	16QAM, 948/1024	5.5547	19.809

所要SNR [dB]

テラヘルツ通信の使い方の例

アップリンクの通信速度の補完という考え方

- これまでの通信の使われ方は、下り上りのトラフィック比率がDL:UL=10:1程度だったため、既存の通信周波数では下りの通信速度優先で設計されている。
- 昨今ではモバイル通信の産業利用など、社会における通信の役割の変化を背景に、上りのトラフィック需要が上がってきている。
- 上りのトラフィック逼迫に対応するため、テラヘルツの広大な周波数を使うことで、上りの通信を超高速化する。という考え方がある。
- 一方で、テラヘルツ帯は伝搬損失が大きいため、ミリ波よりもさらにアップリンクのリンクバジェットが不足する。
- これは先に示したcode rateを落とすことでリンクバジェットを確保することが可能で、特にテラヘルツ帯は周波数幅を広く取れるため、低code rateによる通信速度の低下を補うことが可能である。

下り特化の通信という考え方

- テラヘルツのカバーエリアは非常に限られることは明確であり全国カバーという考えは現実的ではない。
- 限られた場所ではあるが、使えるときだけ超高速に通信できる。例えば、新幹線のホームで、これから新幹線の中でユーザーが見るコンテンツを予め大量にダウンロードしておく。（空港のゲート前も同様）という使い方にも対応可能。
- LTE / 5G NRでは、SDL : Supplementally Down-Link が設定されている。これは他の周波数の下り通信の速度補完としてCarrier Aggregation前提で利用するアイデア。
- これをテラヘルツに適応すると、モバイル通信のまま、通信を切り替えることなく、必要に応じてテラヘルツ高速通信を利用することが可能となる。

WiFiとモバイルの考え方の違い

- WiFiとモバイル通信の大きな違いは、モビリティ（ハンドオーバーによる、基地局間の移動）である。
- テラヘルツのカバーエリアが限定的であるならば、移動してもシームレスに通信ができる必要がある。
- 6G（第6世代移動通信）として、4G, 5Gとの連携は必須だと考える。

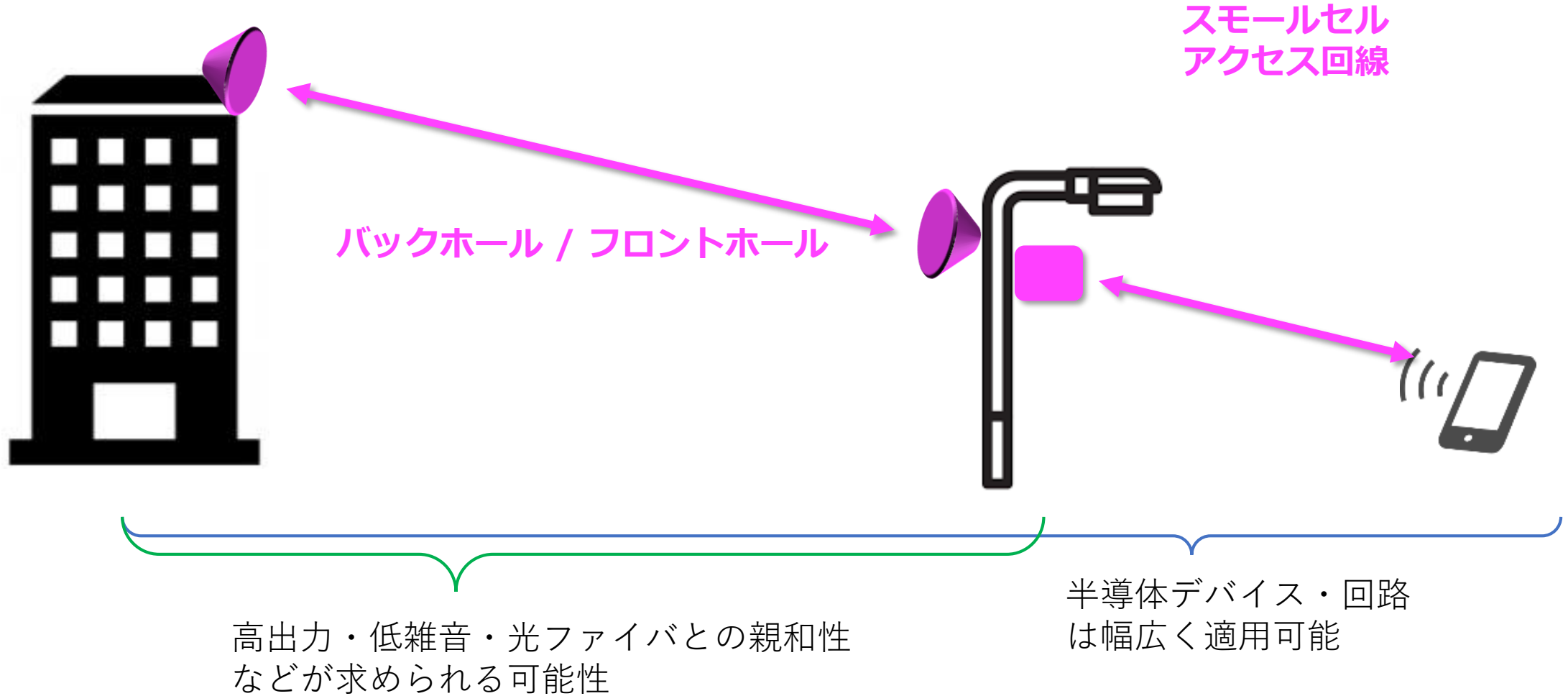
まとめ

- テラヘルツの通信システムとして、典型的なユースケースの検討を行い、それぞれリンクバジェットの計算を行った。
- 典型的なユースケースにおいて、アンプの利得など、デバイス側への要求を具体化した。
- テラヘルツ通信の活用例を示した。

IC・デバイスG

2022年度6GWG議論内容とりまとめ

想定ユースケース（システムGより）



ICデバイスGでの議論内容

- テラヘルツ帯の無線通信に用いられる可能性のある信号源および受信器に関して調査し、今後のデバイス開発の見通しや性能予測を行った。アンテナ・実装等については今回は取り扱わず、今後の調査項目とした。

信号源まとめ

取りまとめの方針

- 信号源として、単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD)、マイクロ光コム (Micro-comb)、量子カスケードレーザー (QCL)、共鳴トンネルダイオード (RTD)、トランジスタ (Si CMOS、SiGeヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT)、InP HBT、InP 高電子移動度トランジスタ (HEMT)、メタモルフィックHEMT (mHEMT)、GaN HEMT) を調査
- 周波数、出力、効率、チップ面積当たりの出力 (電力密度) で評価した (UTC-PDは外部光源の性能にも依るため、効率・チップ面積当たりの出力についてはまとめなかった)
- 日本における開発状況を知るため、簡単に示せるものだけに限り、日本と海外でプロットを分けたグラフも作成した
- 送信側ではパワーアンプ (PA) を用いることで大幅な出力向上ができるため、化合物PA、真空管アンプ (TWTA) についても取りまとめた

電力密度について



出力を大きくするなら大きいチップが必要、でも大きいチップは高い

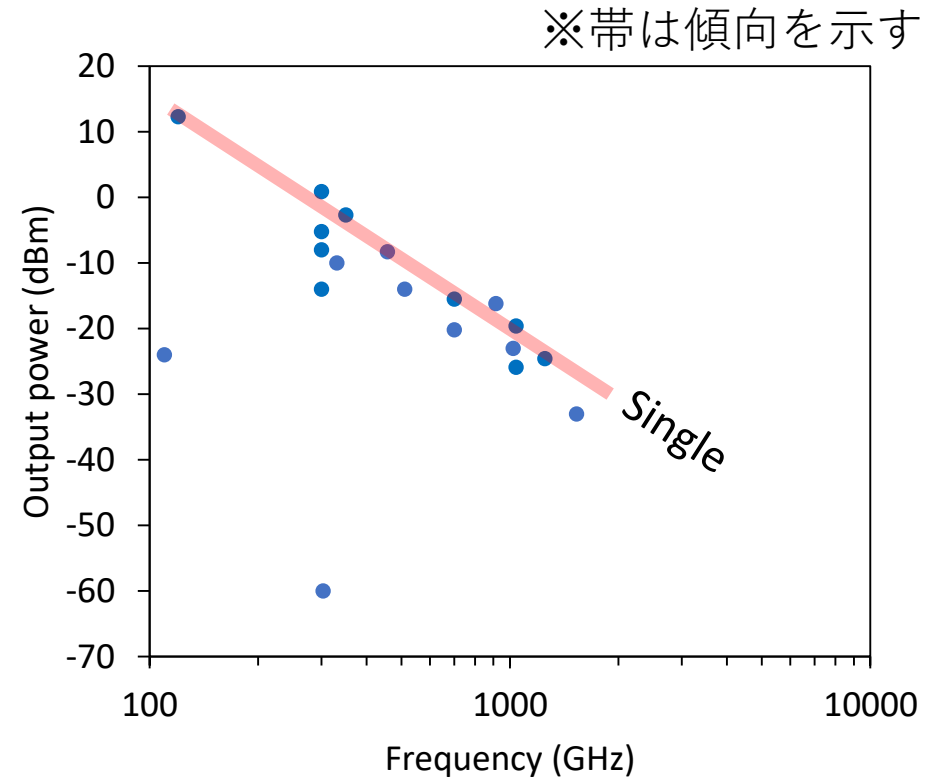
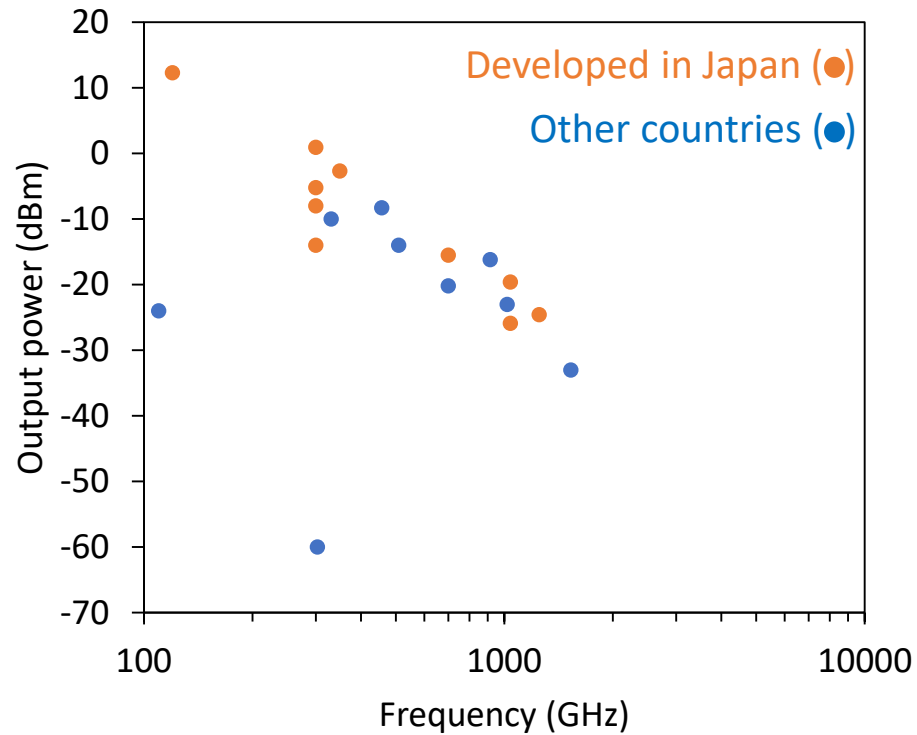
- 半導体チップの価格は半導体の種類、チップのサイズによって決定される。通信に必要な出力はユースケースによって決まるが、移動体通信に使う場合~20dBmの出力が必要になる。チップ面積を大きくすれば出力は大きくなるが、価格も高くなる。そのため、チップ面積に対してどれだけの出力を取り出せるか=単位面積当たりの出力（電力密度）が価格を決めるポイントになる。
- 現在、異なる半導体（シリコン・化合物）のハイブリッドが検討されている。シリコンに比べて、化合物の価格は~10倍高い（今後、詳細な調査が必要）
→化合物のチップを使う場合は10倍以上の電力密度にする必要がある

⇒電力密度での比較と価格差の考慮が必要

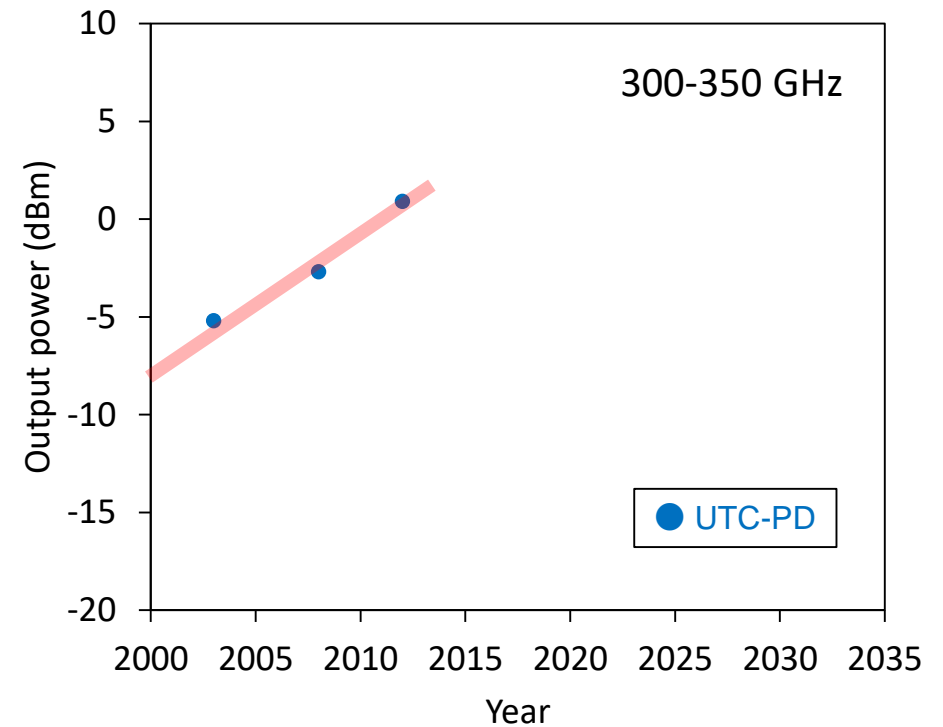
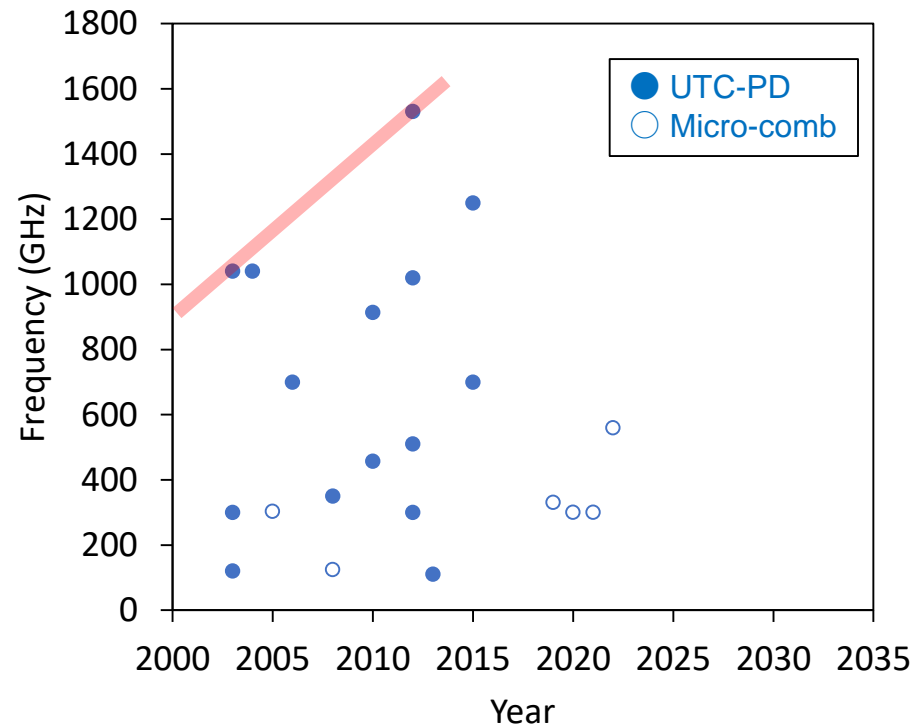
単一走行キャリアフォトダイオード、
マイクロ光コム

UTC-PD & Micro-comb

UTC-PD & Micro-combの開発状況



UTC-PD & Micro-combの年次発展傾向



- 6Gで想定される周波数帯まで既に到達している。Comb信号源も進展

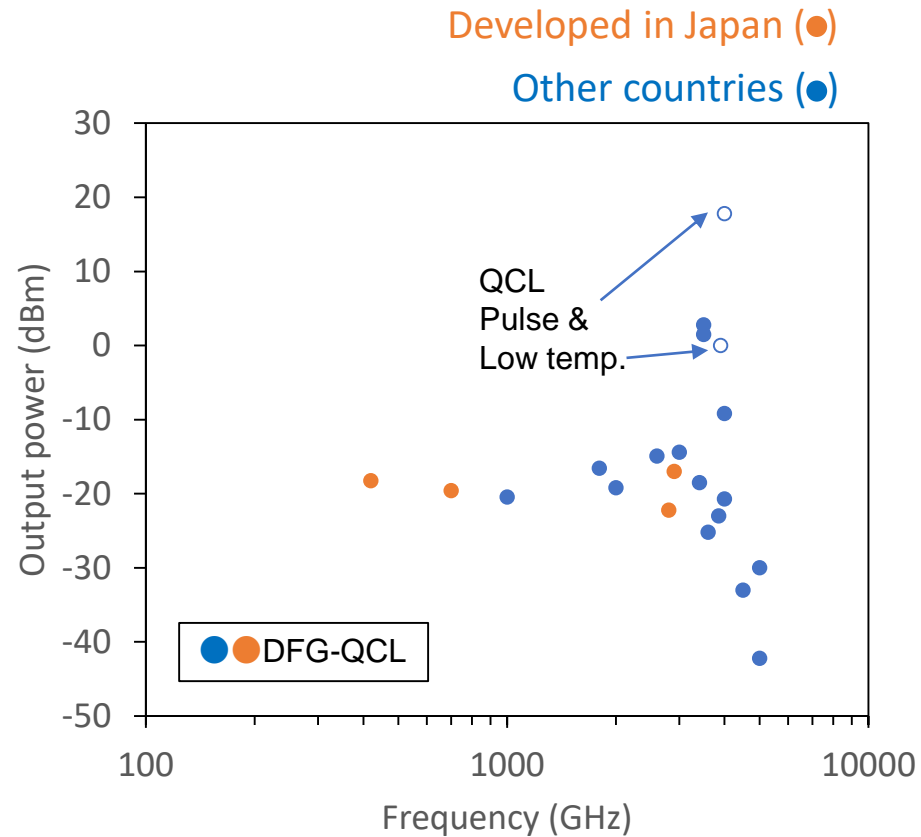
- 出力向上には新たなアプローチが必要

UTC-PD & Micro-combまとめ

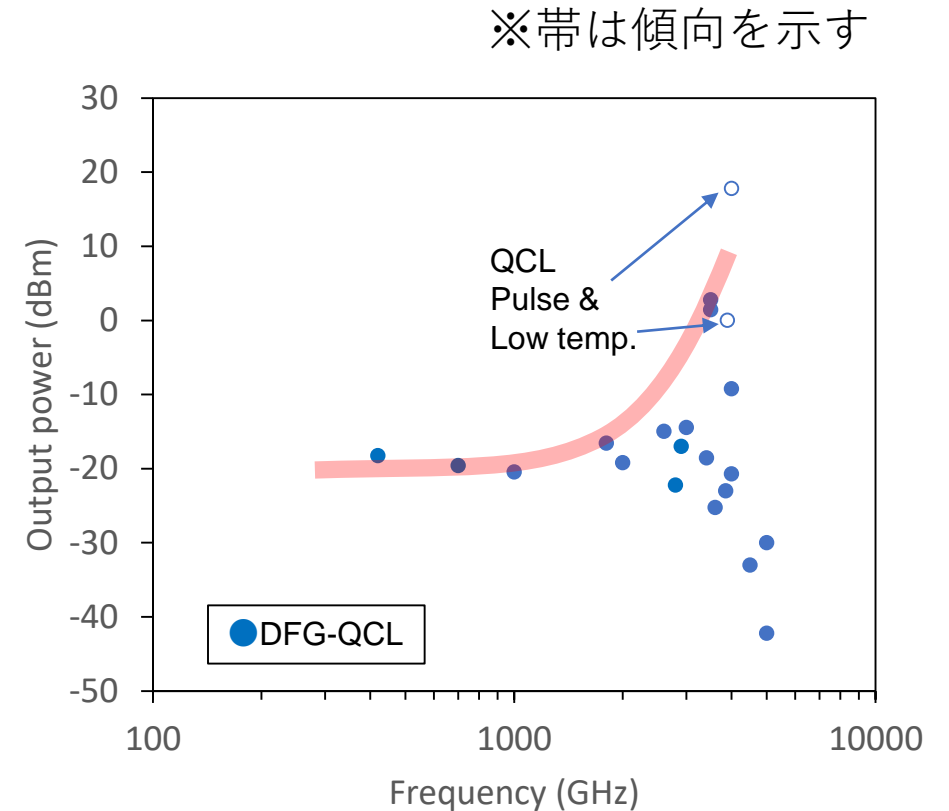
- 2つのレーザ光のフォトミキシングによる差周波発生
- 300GHz帯では $>1\text{mW}$ が可能、周波数は $>1\text{THz}$ も発生可能
- 1素子で広帯域（数オクターブ）をカバー可能。最終的には出力部（アンテナ等）の帯域で決定される
- 光ファイバー・光導波路により高周波信号の低損失・長距離伝送が可能
- 光源側で広帯域で多様な変調方式適用が可能
- 微小共振器を用いたマイクロ光コム技術を用いることで大幅に低位相雑音化（300GHz帯で $-100\text{ dBc/Hz}@10\text{kHz offset}$ など）が可能
- 今後、アレイ化による出力向上、コム技術の進展によるさらなる低位相雑音化やその特性を用いた通信などが発展する可能性

量子カスケードレーザー、差周波QCL
QCL & DFG-QCL

QCL & DFG-QCLの開発状況

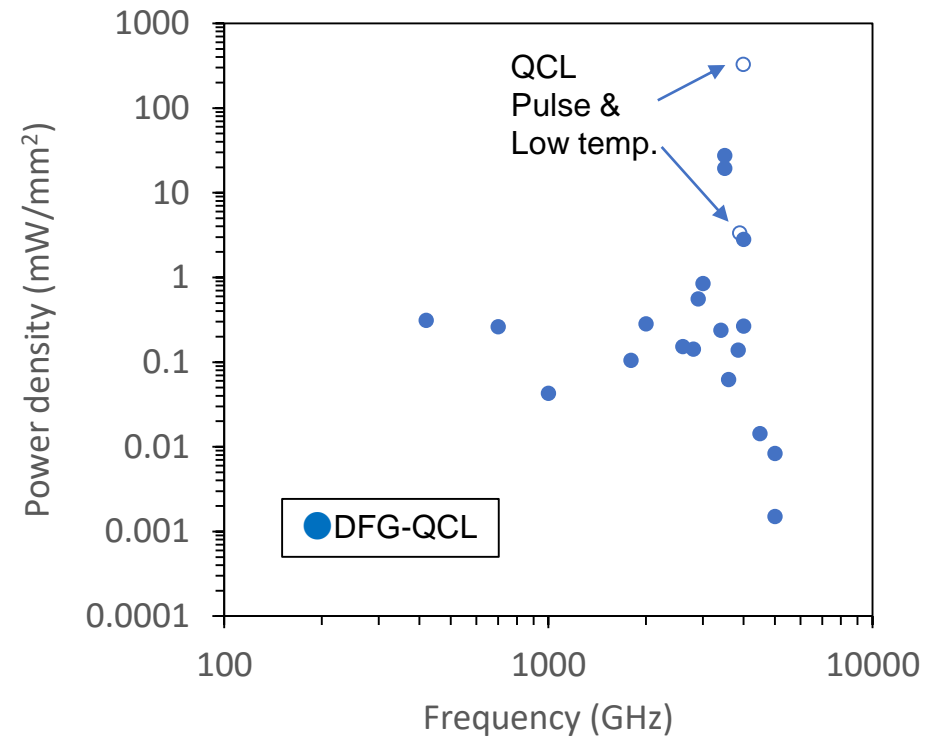
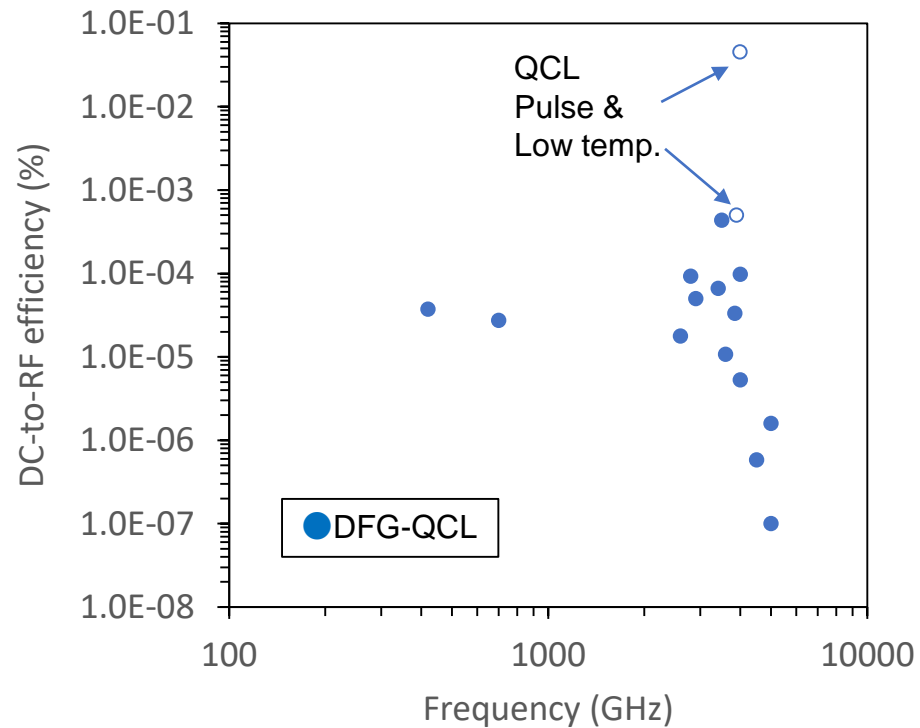


- 300GHz帯までDFG-QCLで到達

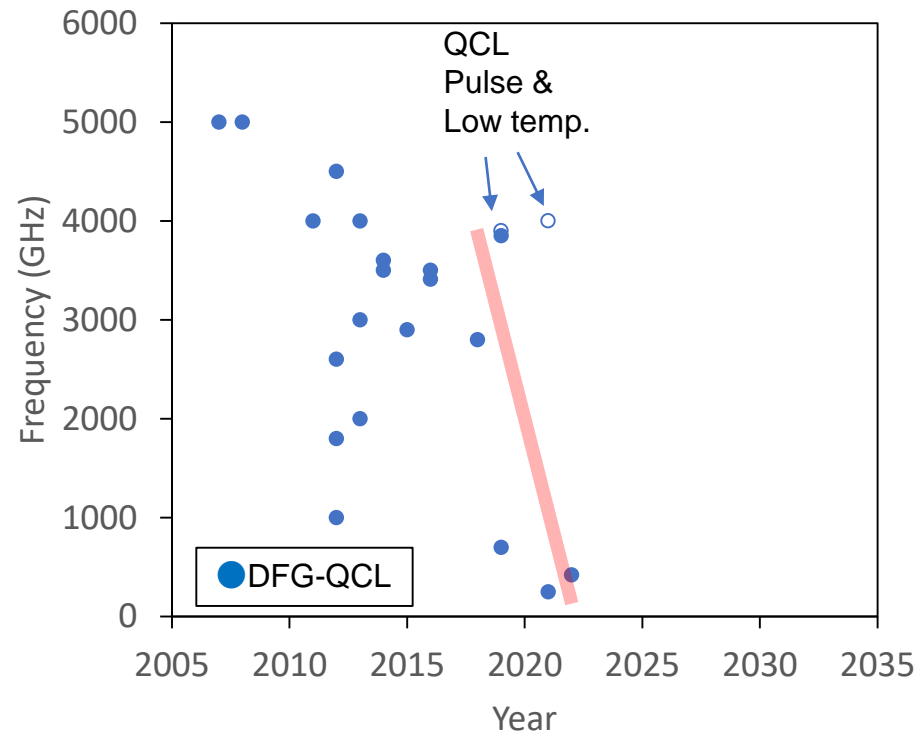


- 高周波において高出力

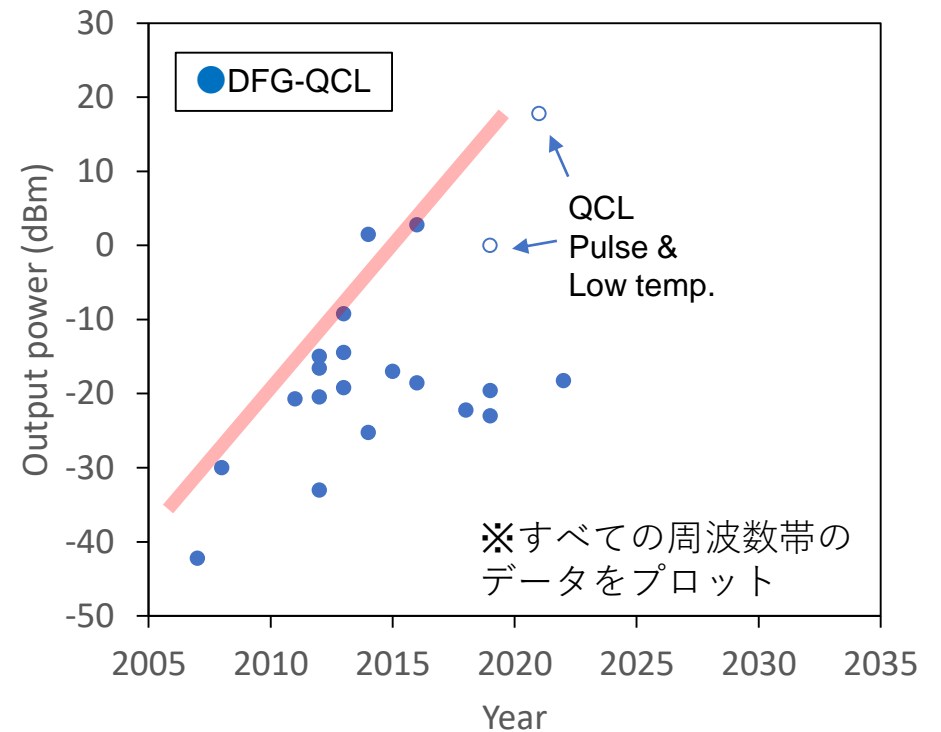
QCL & DFG-QCLの電力効率・面積効率



QCL & DFG-QCLの年次発展傾向



- 300GHz帯までDFG-QCLで到達



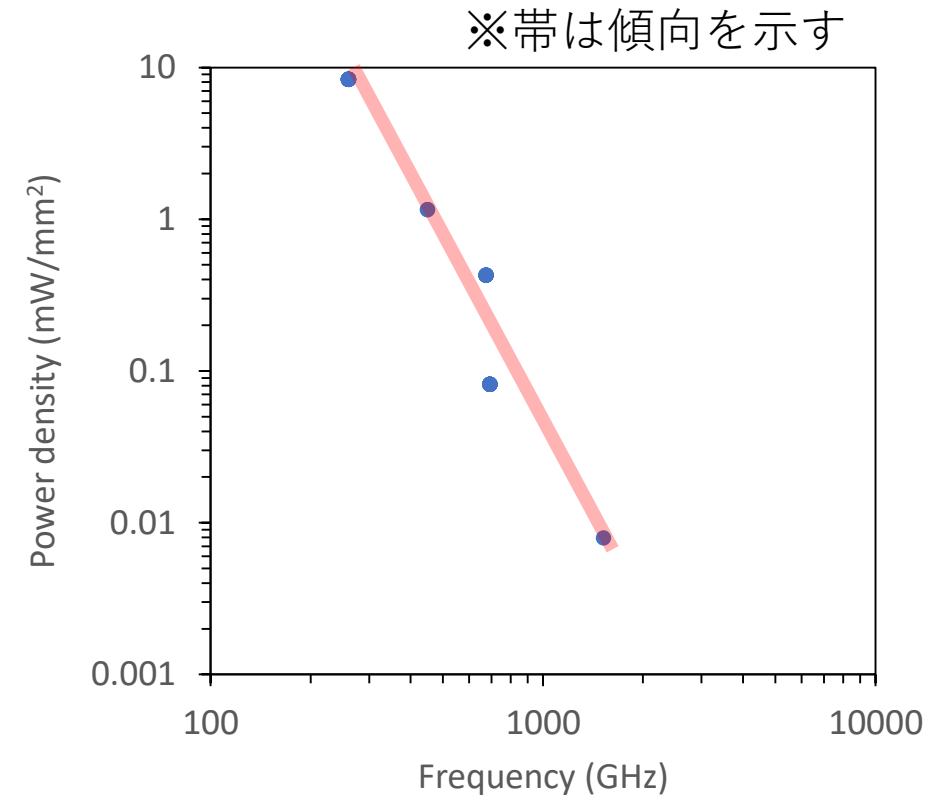
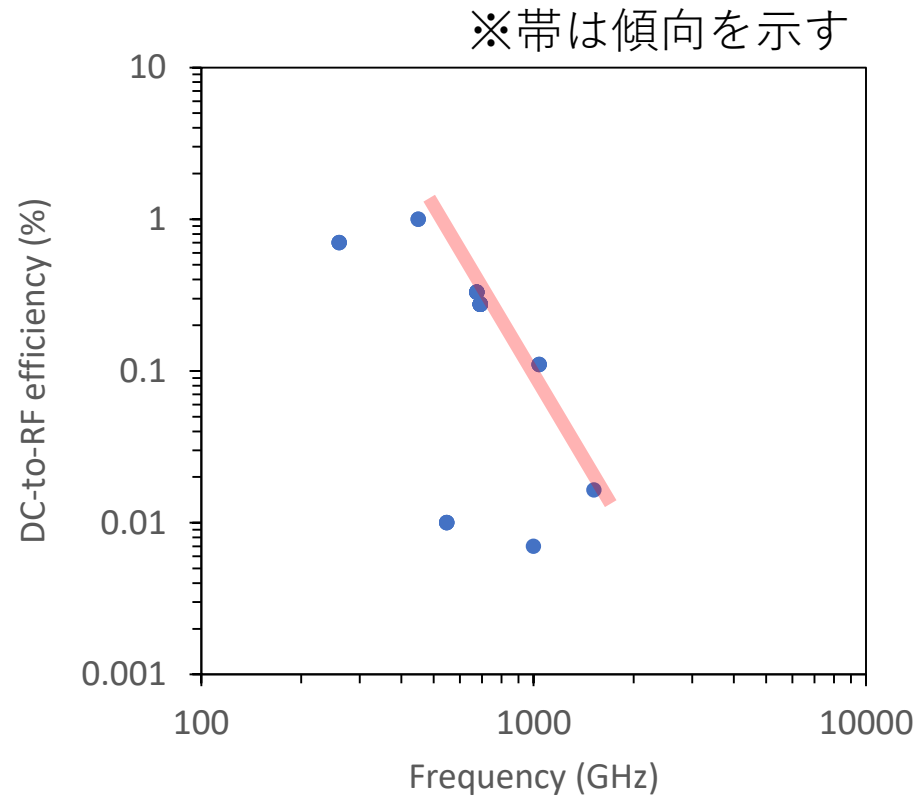
- 3-4THz付近での出力向上の報告が多く、やはり、高周波での応用向け

QCL&DFG-QCLまとめ

- QCLはサブバンド間遷移を用いたレーザ、DFG-QCLは中赤外2波長発振QCLを用いた差周波発生
- QCLは室温発振は未達成（ $\sim 3\text{-}4\text{THz}$ で $\sim 250\text{K}$ が最高）
- DFG-QCLは室温THz発生が可能、 $\sim 400\text{GHz}$ まで発生
- 今後、さらに低周波化・高出力化が進む可能性
- 無線通信のターゲットである 300GHz 帯などでは電子デバイスの方が効率が高くなる

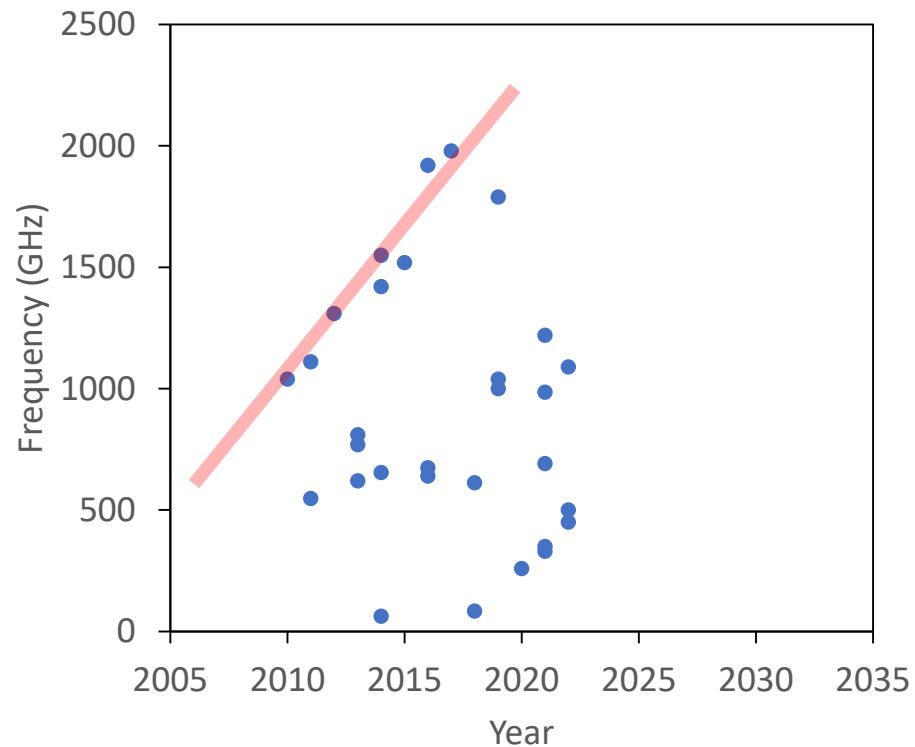
共鳴トンネルダイオード
RTD

RTDの電力効率・面積効率

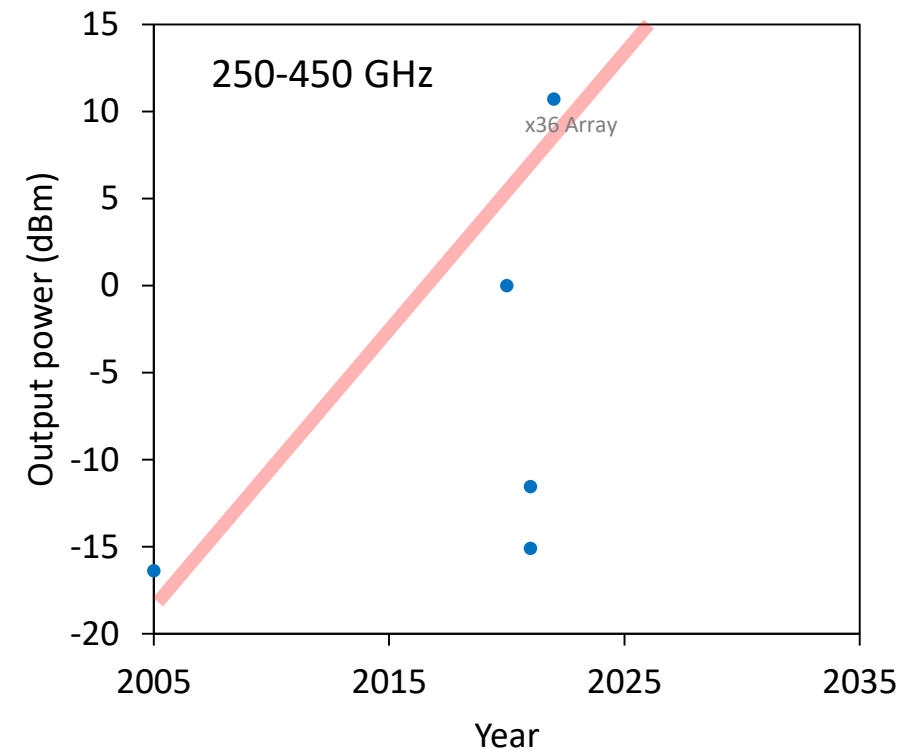


- 450GHzで1%の高い効率を達成

RTDの年次発展傾向



- 6Gで想定される周波数帯まで既に到達している



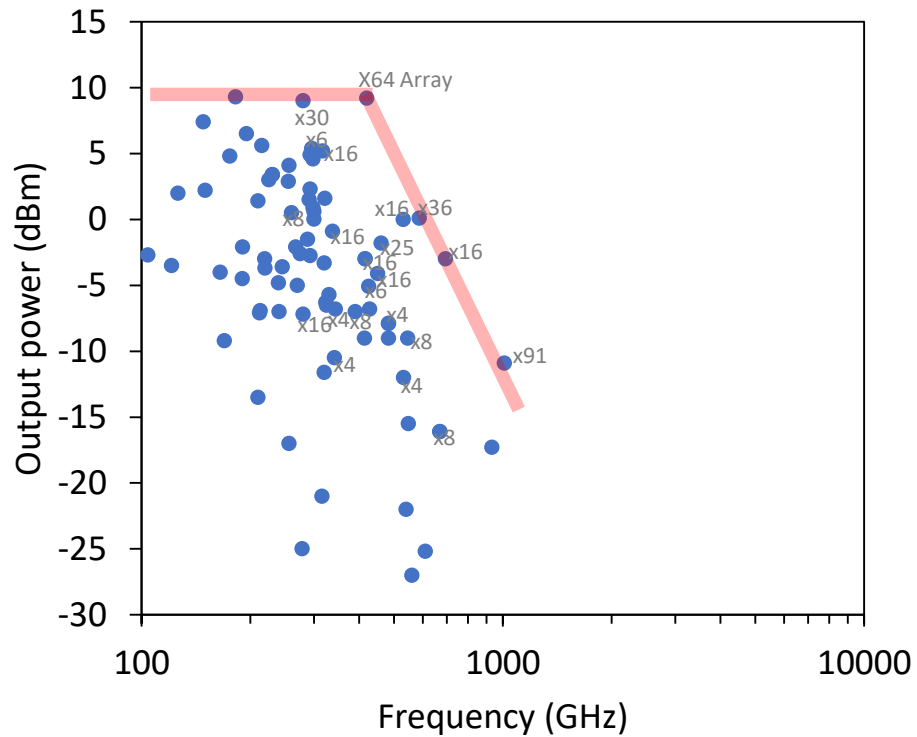
- 出力は年々増加、既に>10dBm

RTDまとめ

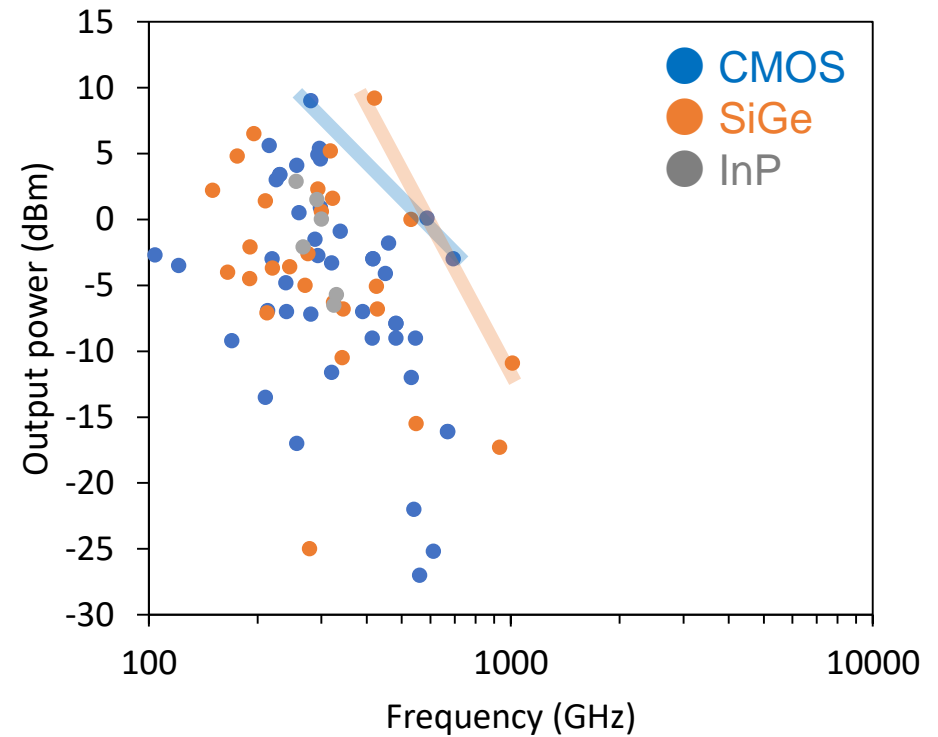
- RTDは微分負性抵抗特性を持つダイオード
- ~2THzまで基本波発振を達成
- アレイ化により>10mW高出力@450GHz (+効率1%) を達成
- 面積あたりの出力（電力密度）は明確なチップ面積を示したデータが少ない
- 今後、さらに高出力化が進む可能性

トランジスタ

トランジスタ信号源の開発状況



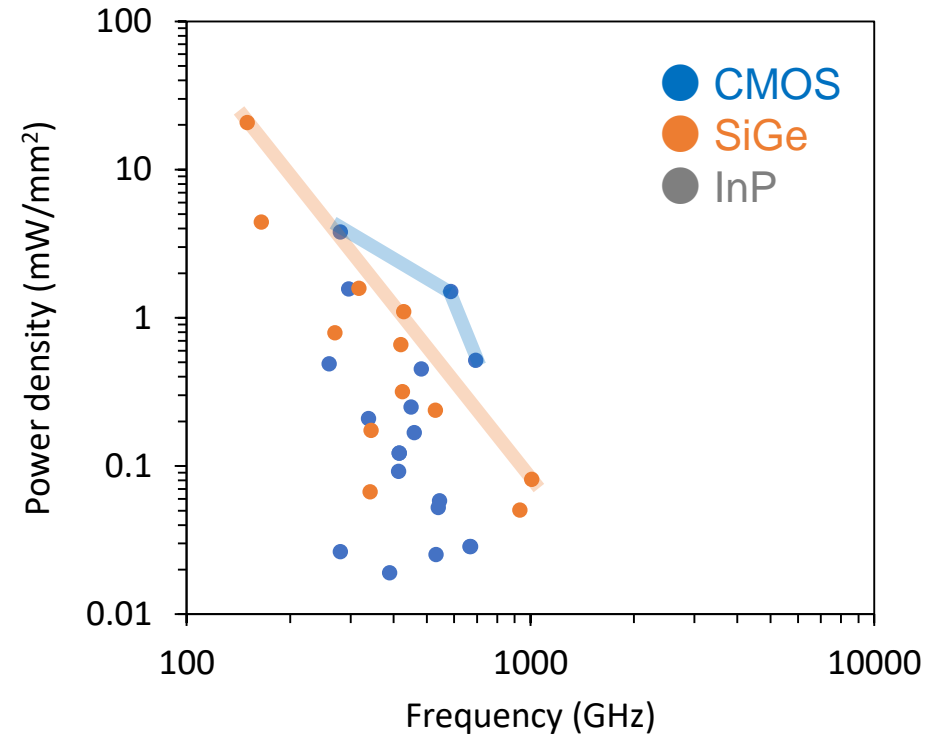
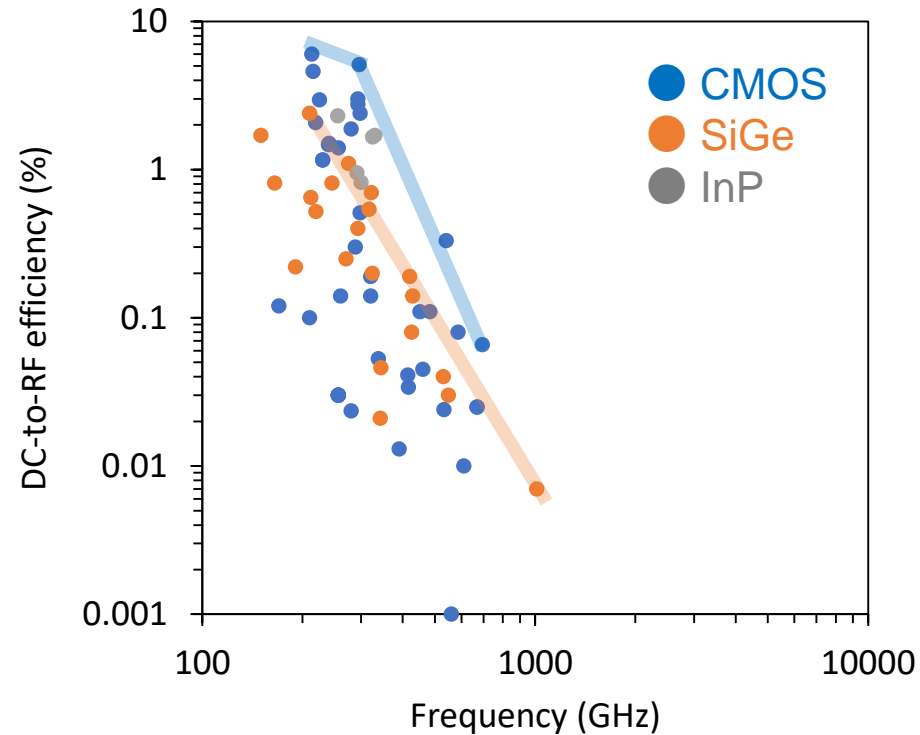
アレイ化によって出力向上



化合物による優位性は今のところみられない

※Georgia Tech Electronics and Micro-System Lab (GEMS), PA_Survey_v6のデータを含む

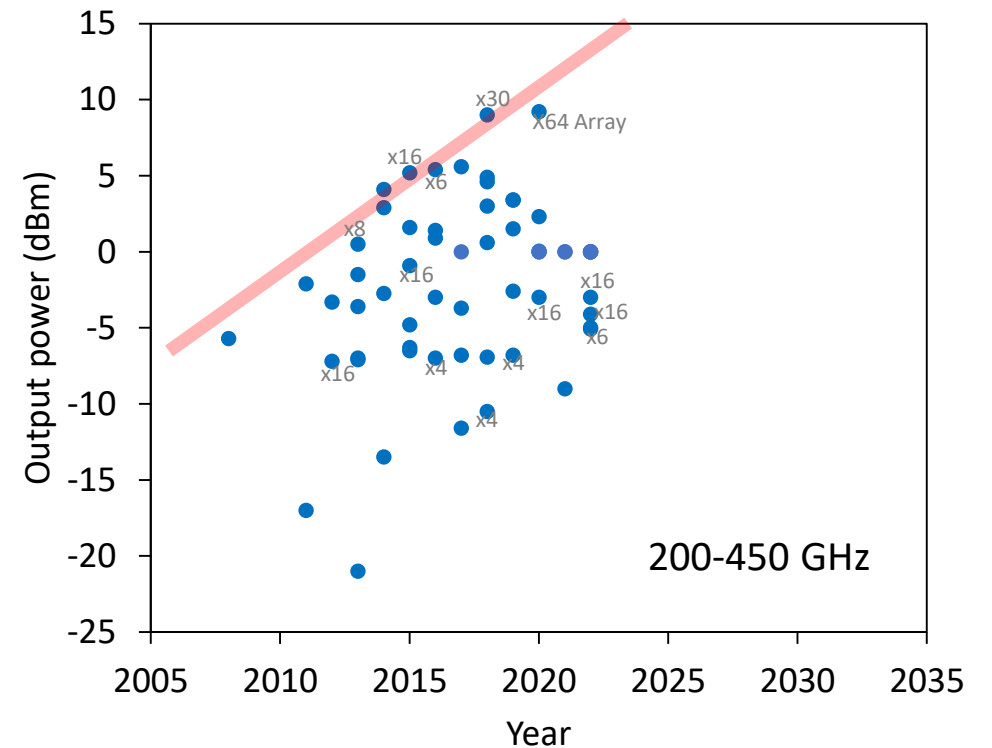
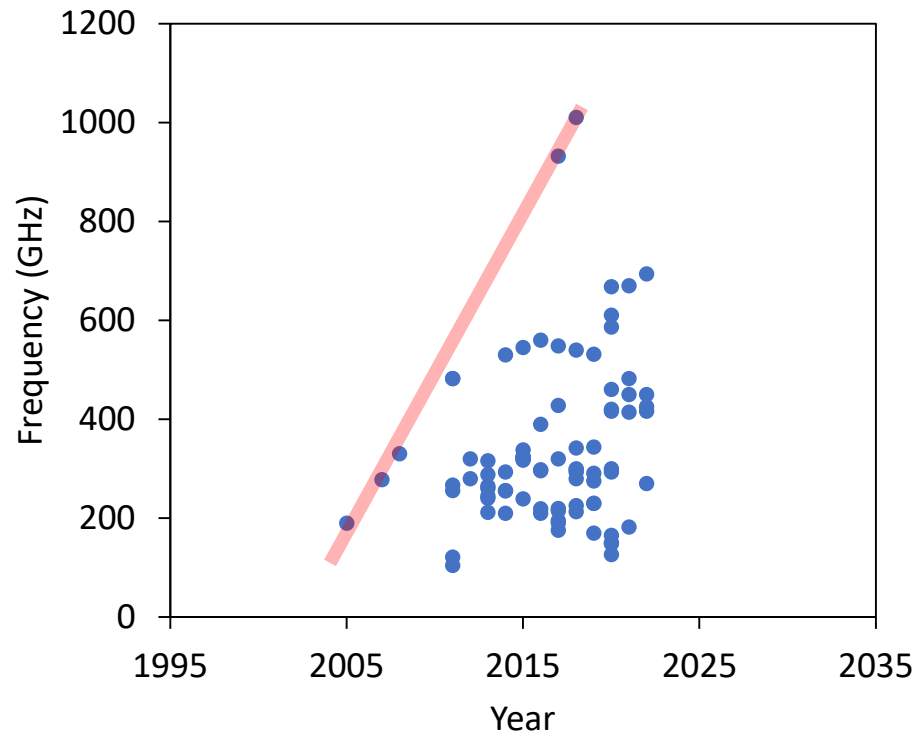
トランジスタ信号源の開発状況



300GHzにおいて数%の高い効率

※Georgia Tech Electronics and Micro-System Lab (GEMS), PA_Survey_v6のデータを含む

トランジスタ信号源の年次発展傾向



- 6Gで想定される周波数帯まで既に到達している

- 出力は年々増加、既に>10dBm

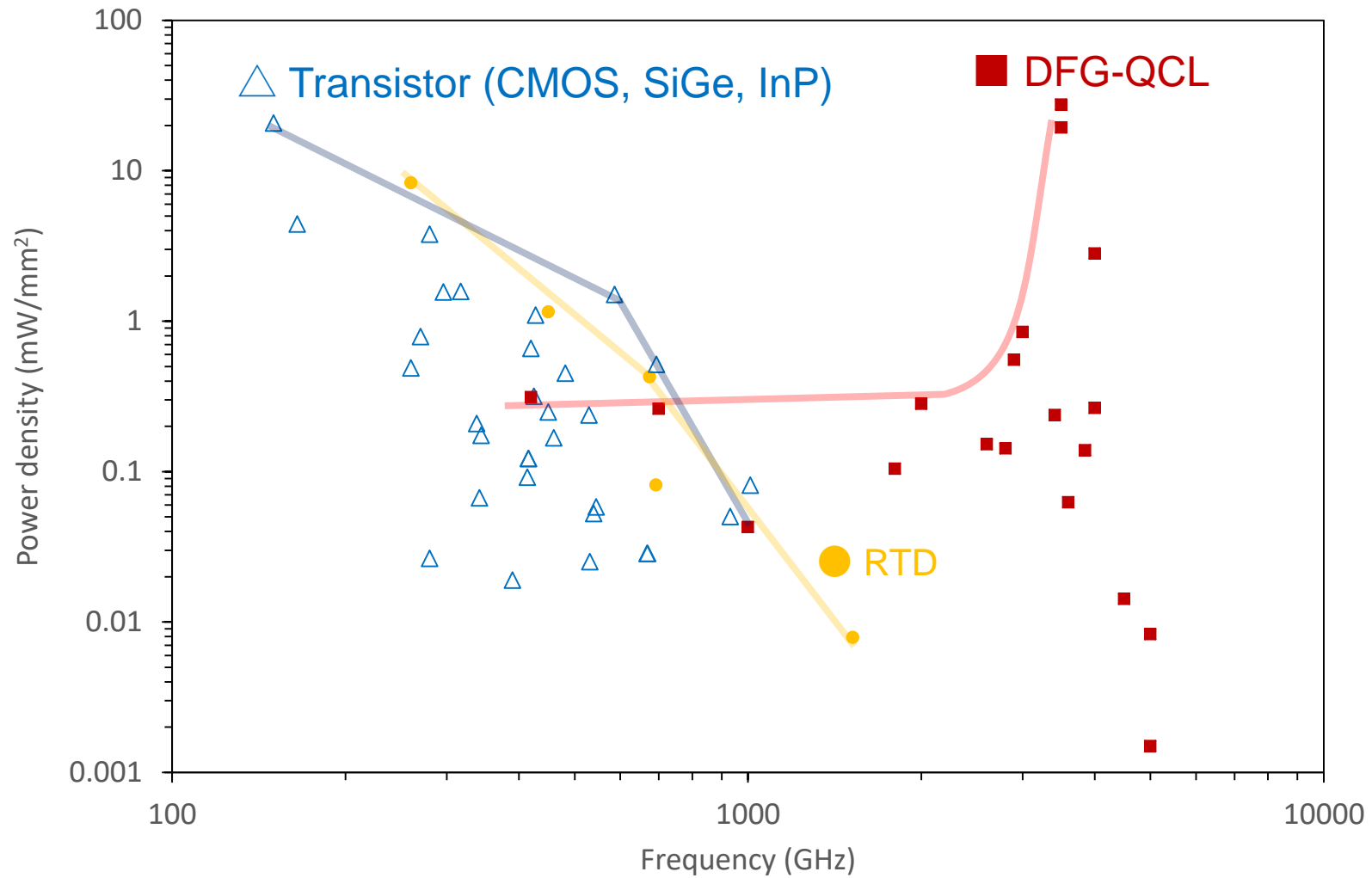
※Georgia Tech Electronics and Micro-System Lab (GEMS), PA_Survey_v6のデータを含む

トランジスタまとめ

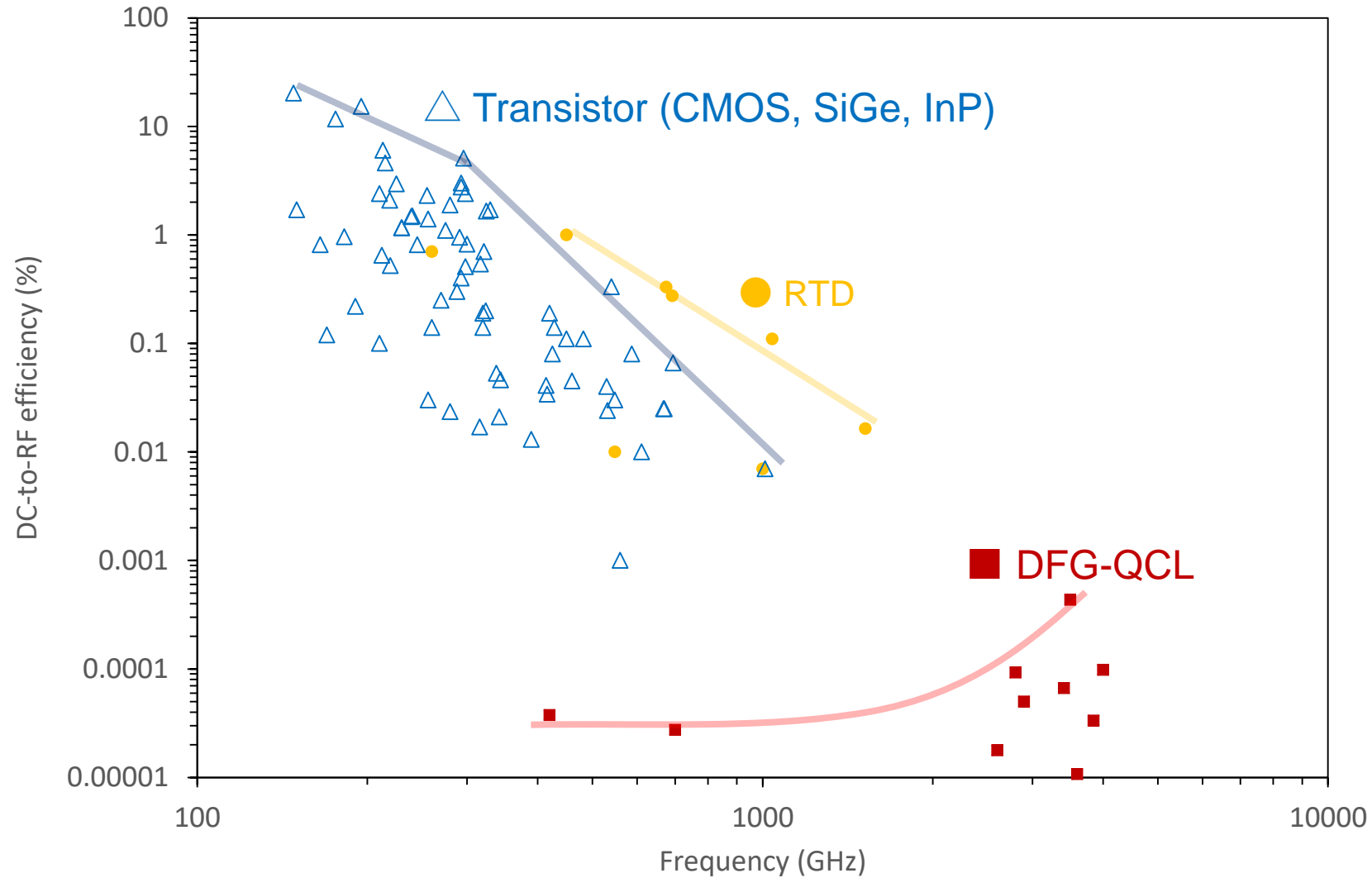
- アレイによりSi系でも300-400GHz帯で~10dBmの高出力が可能、200GHz帯では単体で~5dBmも
- 300GHz帯で~5%の高い効率
- 今後もアレイによる高出力化が進むと考えられる
- Si系MMICトランスミッターでは高度な回路技術により、各種変調、ビームフォーミングなどが可能であり、出力以外の面で大きなアドバンテージを持つ
- Si系MMICの出力向上の方法として化合物PAとのハイブリッド集積が300GHz程度の周波数から検討が進んでいる

信号源まとめグラフ

信号源まとめ (電力密度)



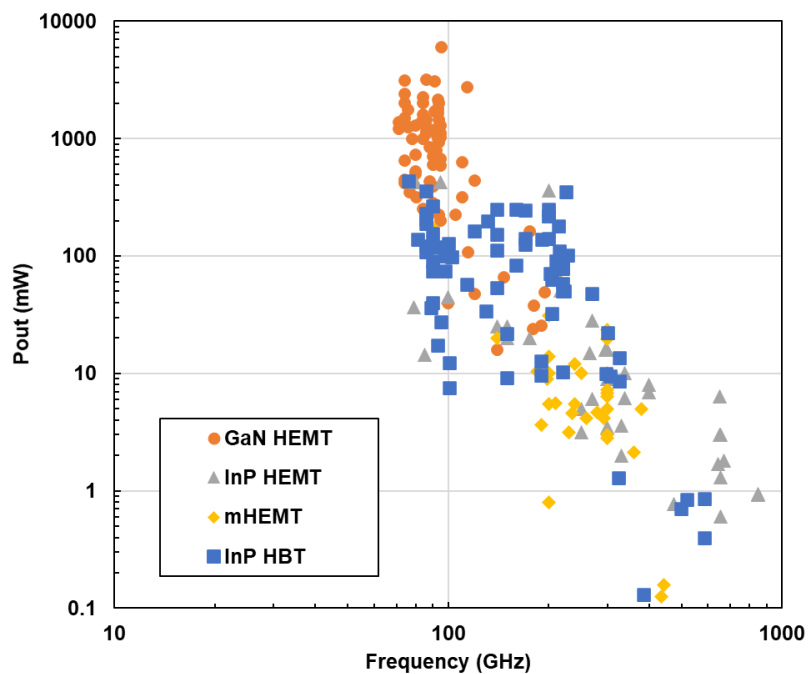
信号源まとめ (効率)



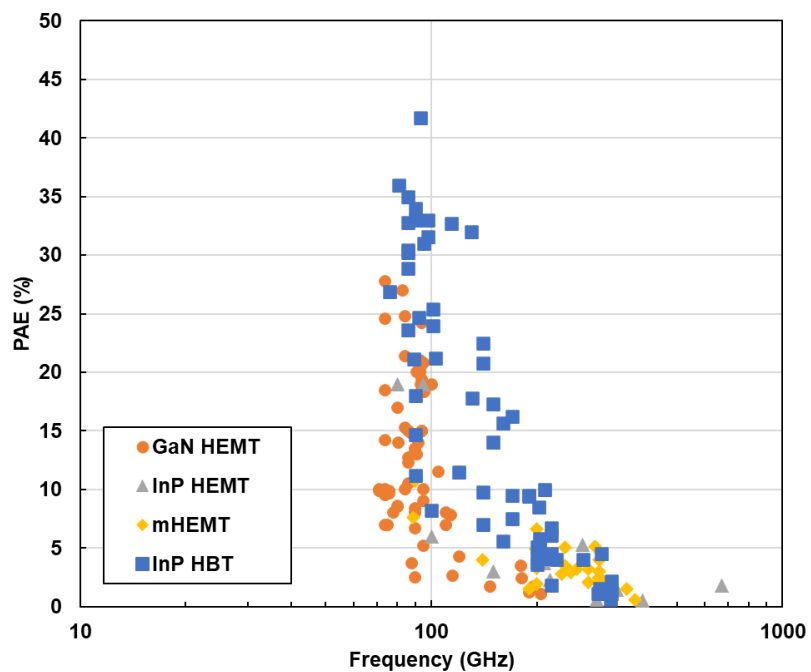
化合物トランジスタ
パワーアンプPA

化合物系PA 比較

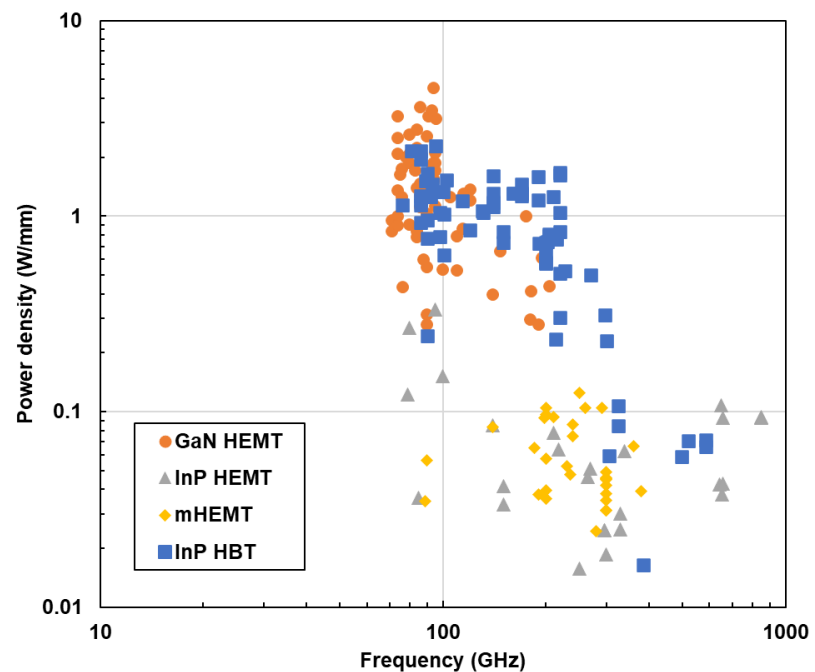
Poutの周波数依存性



PAEの周波数依存性

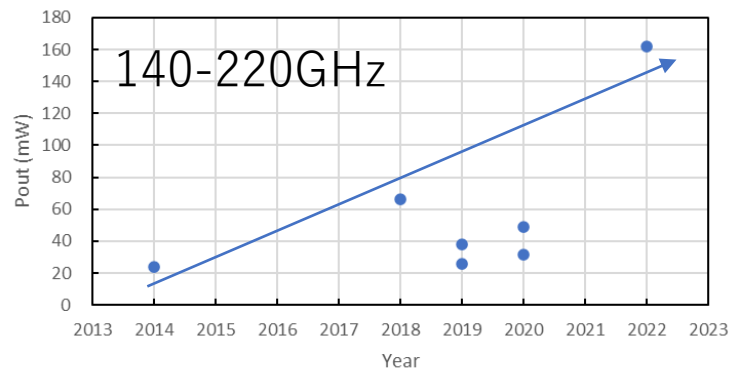


ゲート幅に対する
Power densityの周波数依存性

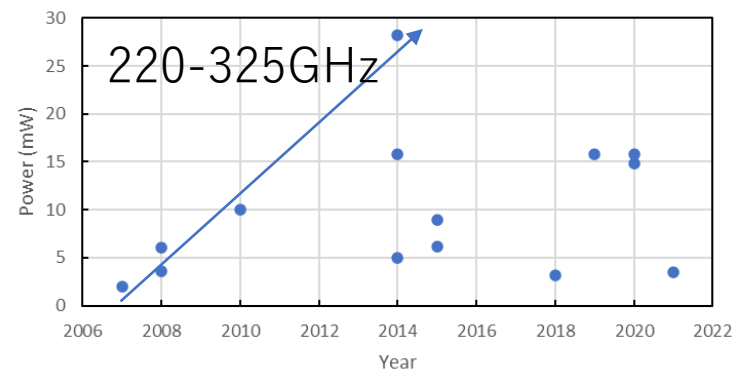


化合物系PA 推移

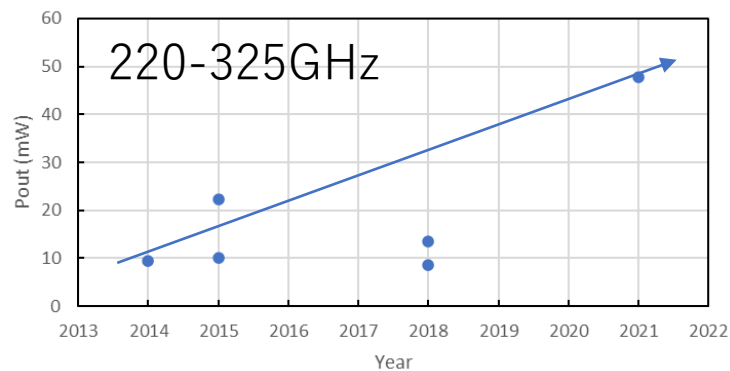
GaN HEMT



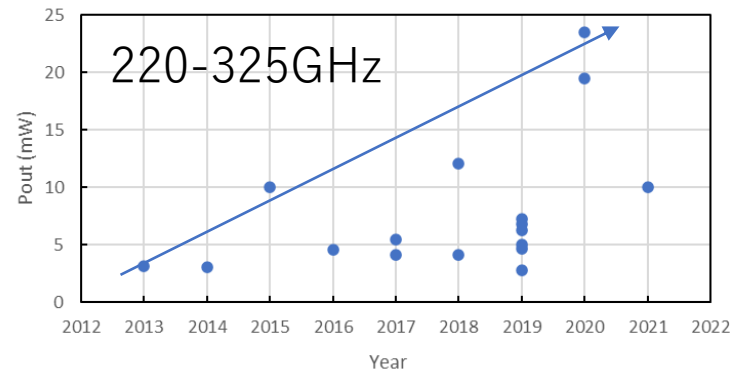
InP HEMT



InP HBT

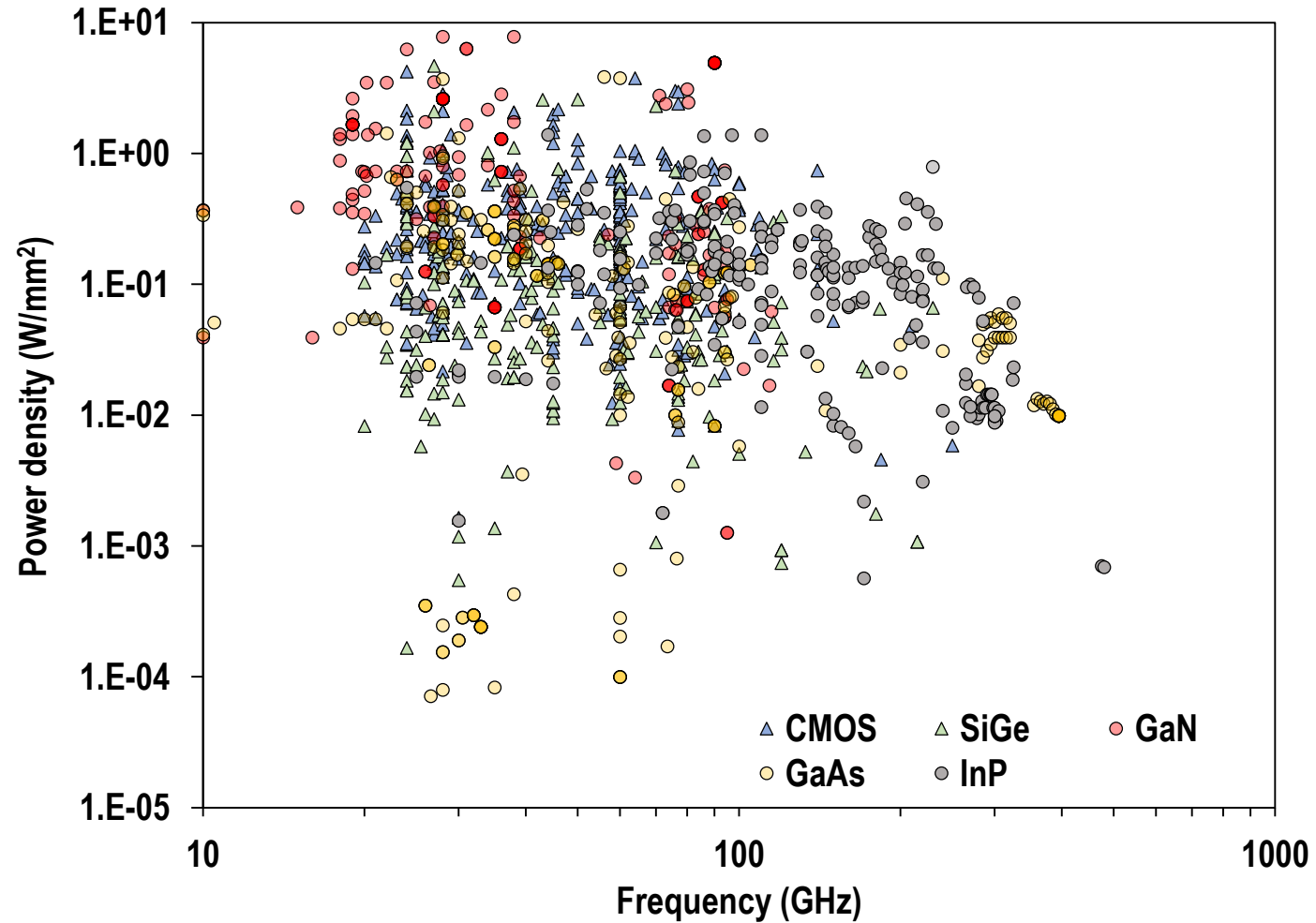


mHEMT



- どの周波数帯でも出力は年々増加傾向にあり、開発が精力的に進められている。

Si・化合物PA 電力密度比較



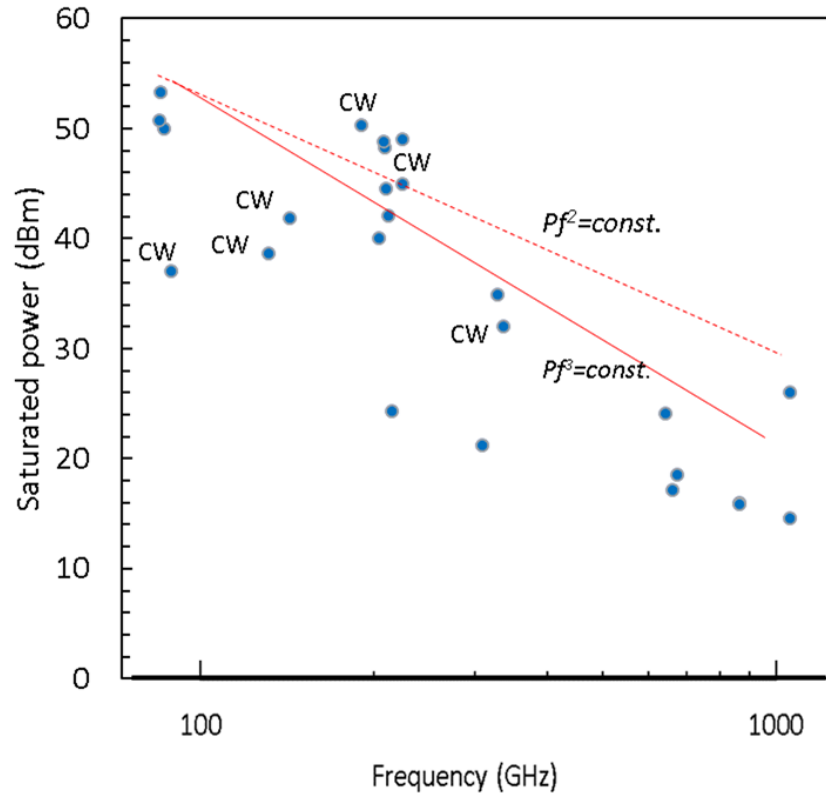
※Georgia Tech Electronics and Micro-System Lab (GEMS), PA_Survey_v6のデータより

化合物PAまとめ

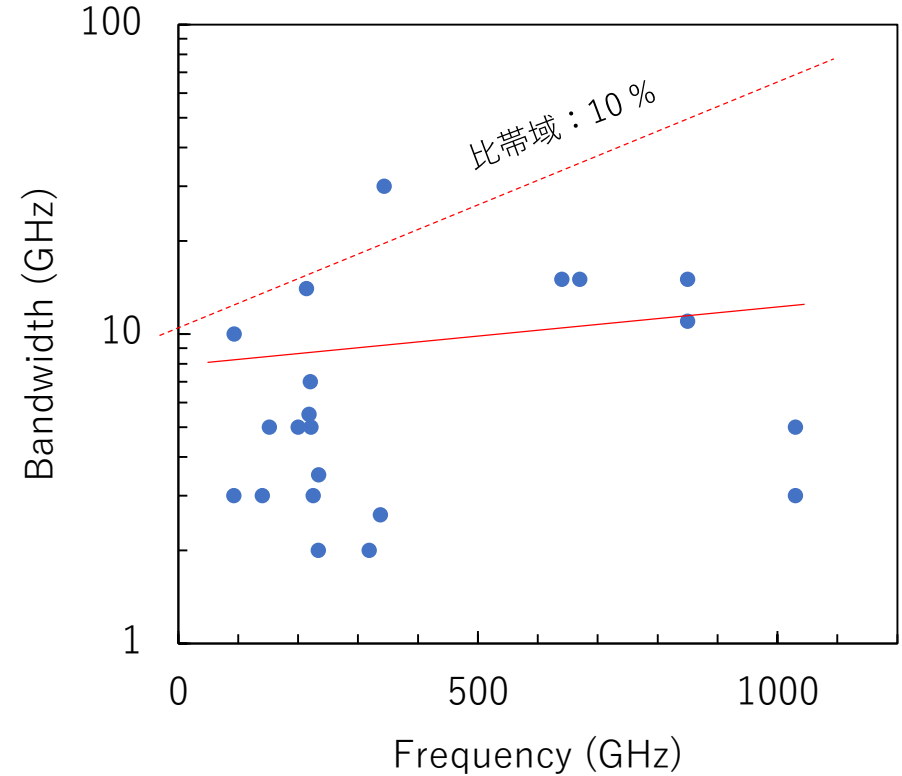
- 化合物PAは特にInP系HBT, HEMT, mHEMTが $>300\text{GHz}$ で動作可能であり P_{sat} は $>10\text{dBm}$ に達する
- GaNは100-200GHz帯の報告が多いが $\sim 300\text{GHz}$ 帯は報告なし
- 300GHz帯でInP系PAのPAEは $\sim 5\%$ と高い
- シリコン系MMICの出力向上の方法として化合物PAとのハイブリッド集積が300GHz程度の周波数から広く検討が進んでいる

進行波管增幅器TWTA

TWTAの開発状況

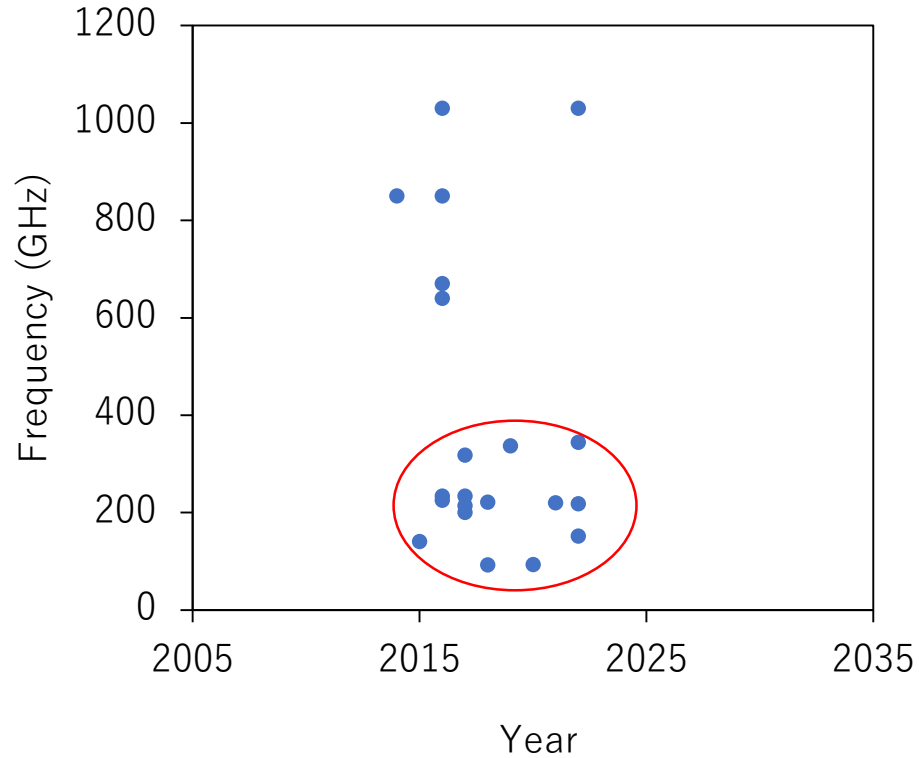


最大1030 GHzまでの開発実績がある。
周波数の増加に伴い出力レベルは低下している。
300 GHz帯以下ではCW動作の報告も増加している

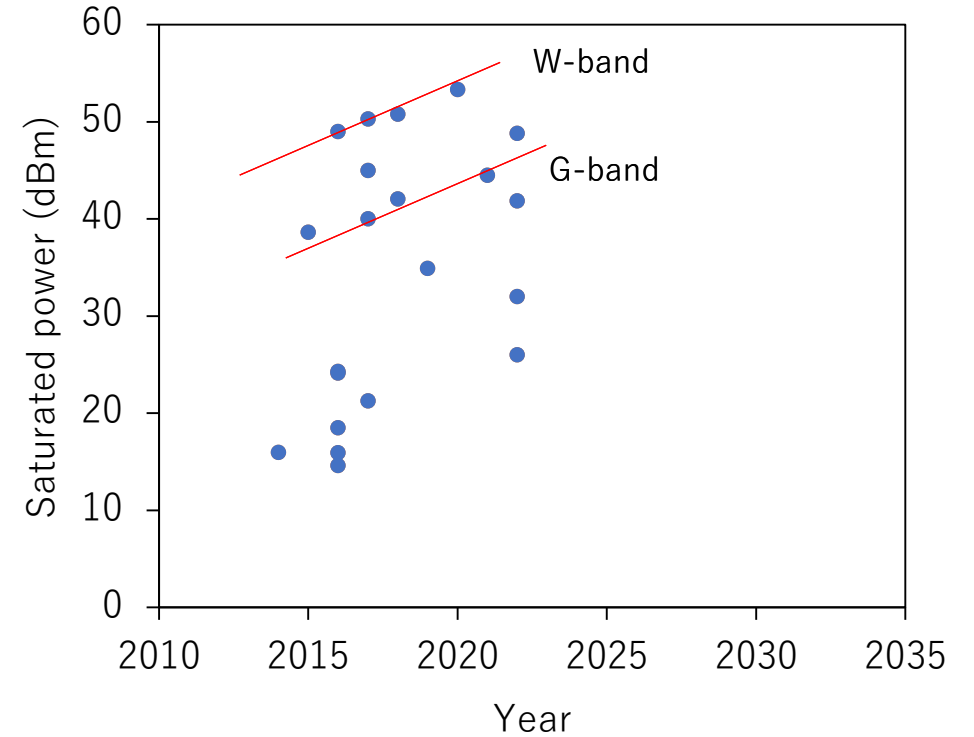


周波数の増加に伴い、帯域幅は僅かに増加傾向にある。ただし、動作周波数に対する割合は減少している。

TWTA



開発する周波数帯は100-400 GHzの領域を中心に行われている。



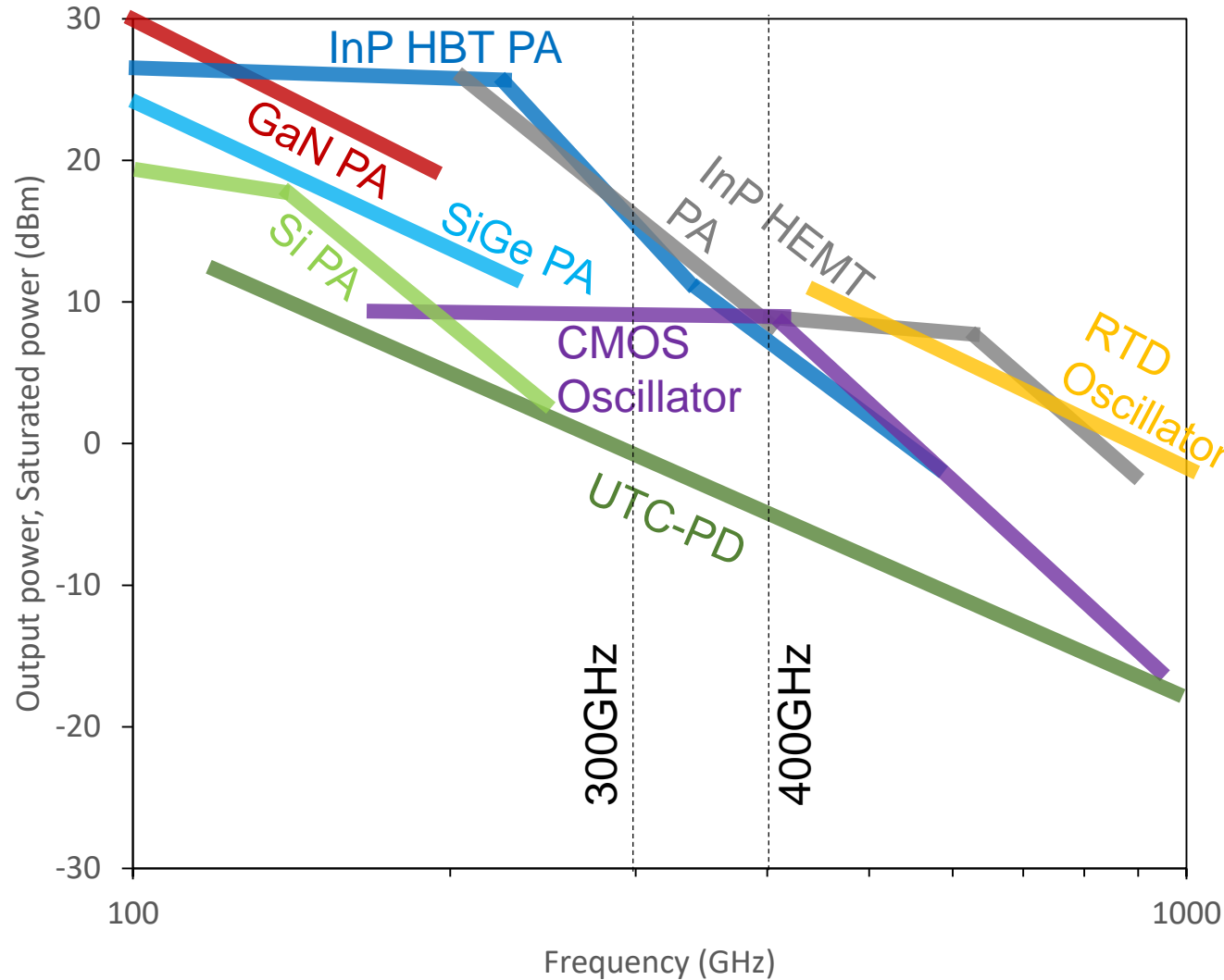
周波数帯毎に飽和出力は増加傾向(1.2dB/年)にある。

TWTAまとめ

- 電子ビームと電磁波の相互作用による増幅、遅波回路をMEMS技術により形成
- 大きな出力 $>30\text{dBm}@300\text{GHz}$ 、 $>50\text{dBm}@200\text{GHz}$ が可能
- 300GHz帯でのCW動作が実現され、出力電力も年々増加傾向であり、長距離通信などに活用できる

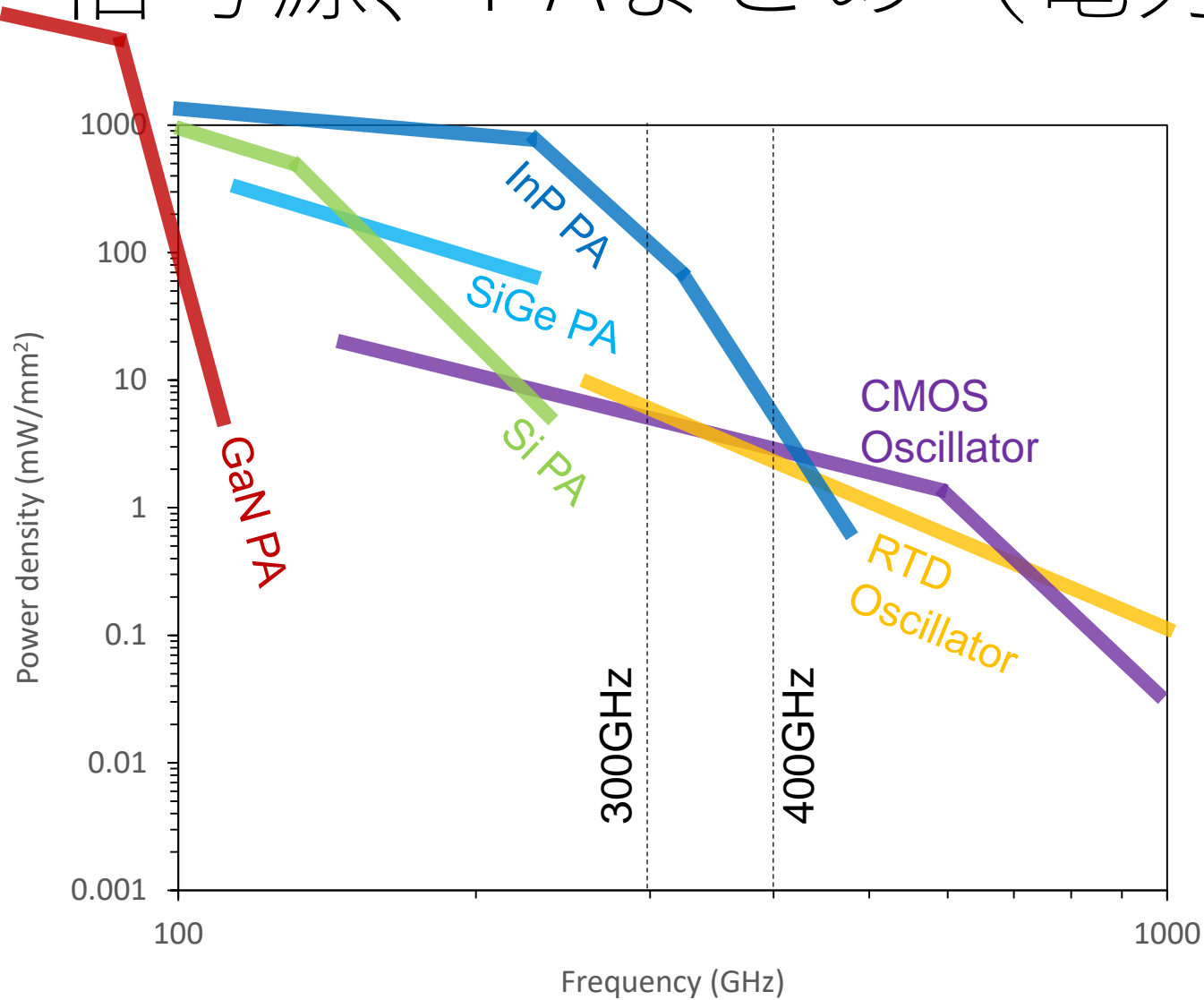
信号源、PAまとめ

信号源、PAまとめグラフ



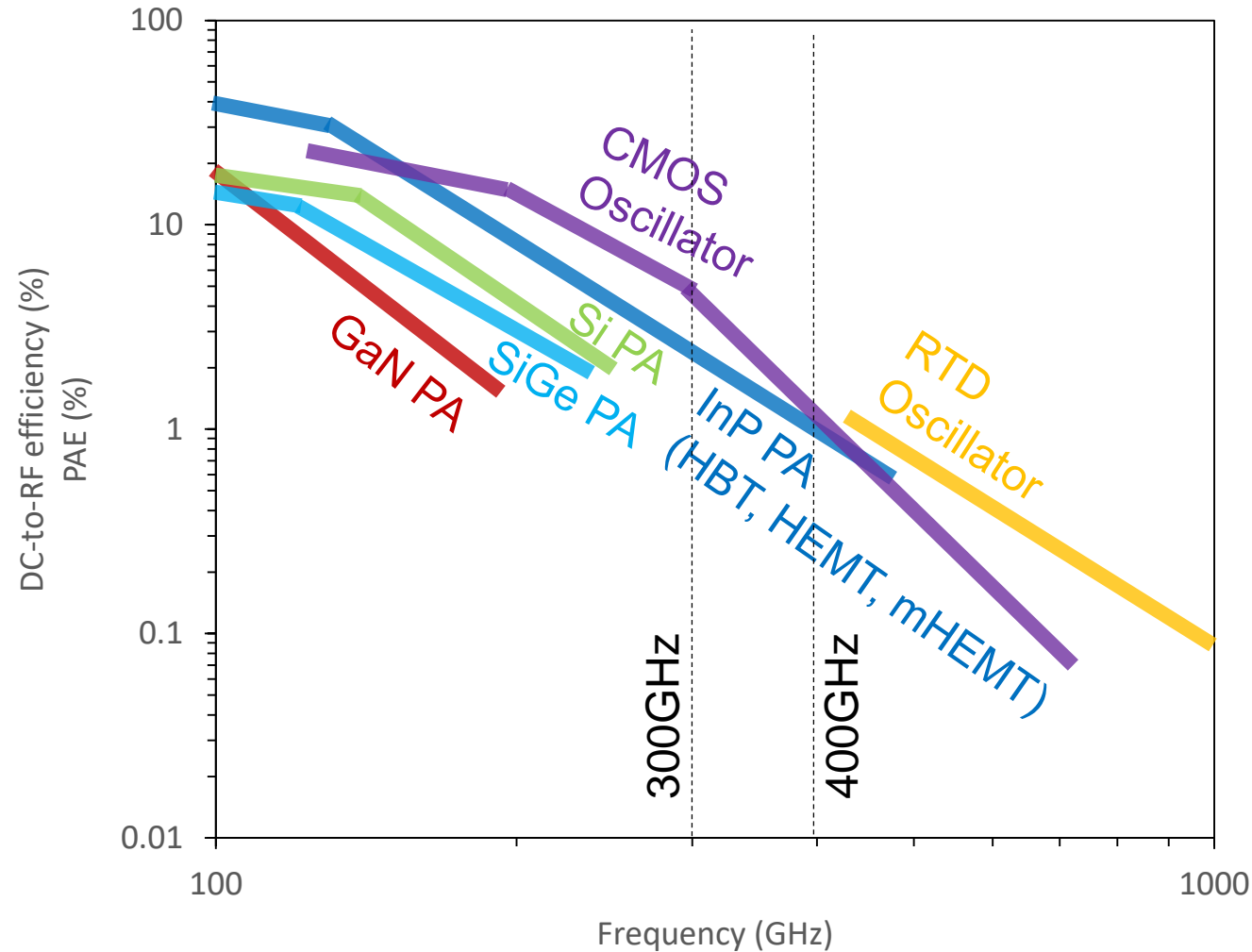
- 集積化の観点から半導体デバイスに絞ってプロット
- 信号源とPAの出力を比べた場合、300GHz程度まではPAの出力が高いため、PA集積した構成が良い可能性がある
- ただし、発振器はCMOS、RTDともアレイ構成によって出力向上しており、PAもチップサイズが発振器とは異なるため、フェアな比較を行うには電力密度によって比較を行うべき

信号源、PAまとめ（電力密度）



- 信号源とPAを電力密度で比べた場合、200GHz程度まではSi(SiGe)が動作するが、300GHzの場合は発振器出力よりも小さくなる。そのため、InP PAとの組み合わせが有利になる。
- 400GHz以上は発振器の電力密度が大きくなるため、さらなる発展がなければ化合物PA構成ではなく、発振器だけで構成することになる。

信号源、PAまとめ (効率)



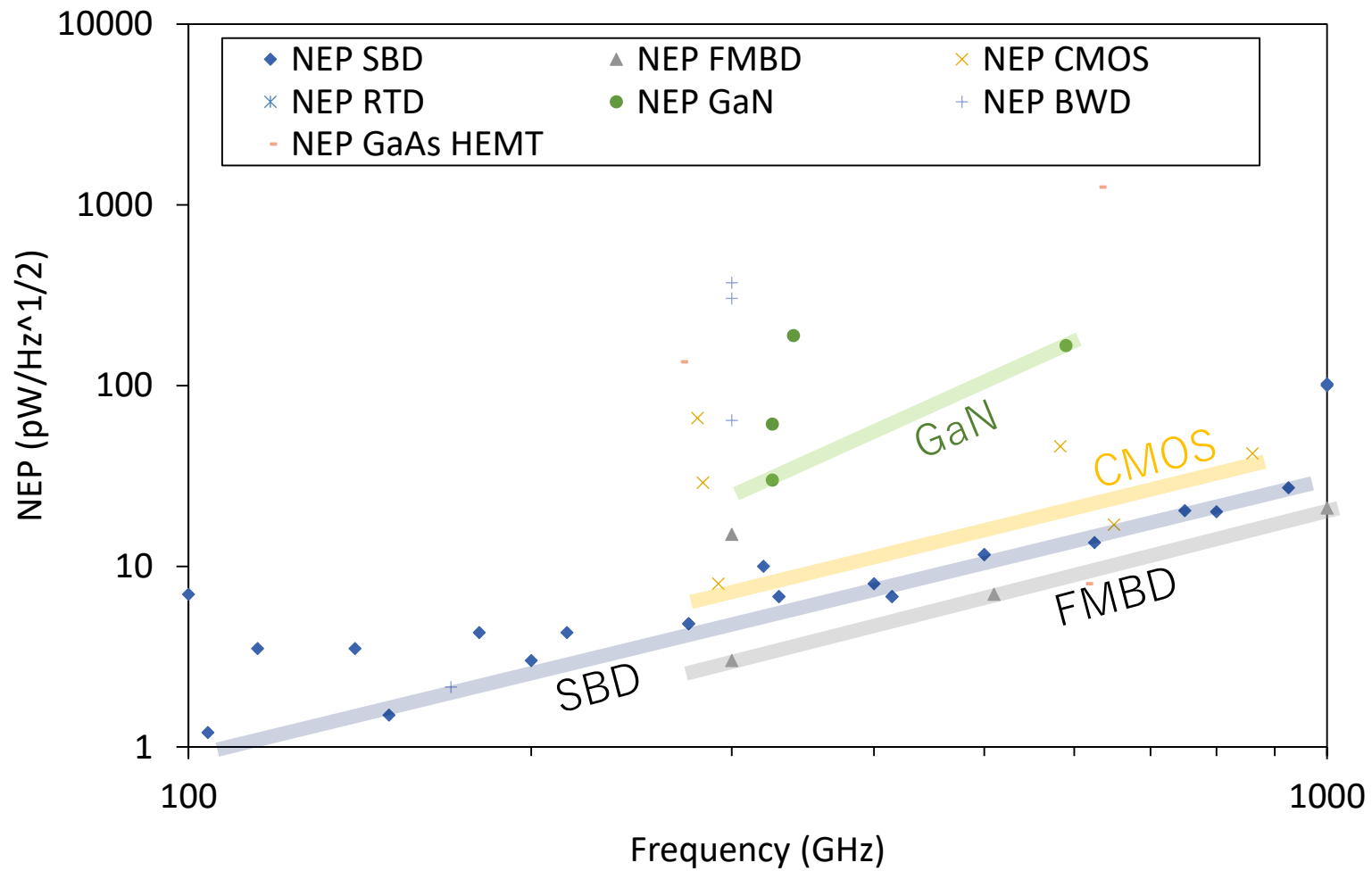
- 信号源とPAをDC-RF変換効率と電力付加効率で比較すると、基本的に、高周波になるに従って落ちる傾向は同じ。やはりInP系のPAの効率が良いが、信号源の値も同じ程度である。したがって、PAを用いるシステムが有効かは効率からは判断できない。

信号源、PAまとめ

- 信号源において、UTC-PD, RTD, トランジスタとも300GHz帯ではmWを超える出力が可能
- UTC-PDはコム技術により超低位相雑音が可能
- 化合物PAを用いることで300GHz帯では>10dBmの出力が得られる
- シリコン系MMICトランスミッターでは高度な回路技術により、各種変調、ビームフォーミングなどが可能であり、出力以外の面で大きなアドバンテージを持つ
- シリコン系MMICの出力向上の方法として化合物PAとのハイブリッド集積が300GHz程度の周波数から広く検討が進んでいる
※補助資料_Heterogeneous Integration
- ハイブリッドにする場合、シリコンと化合物の価格差は大きいいため、化合物の回路面積はシリコンに比べて小さくする必要がある

受信器まとめ

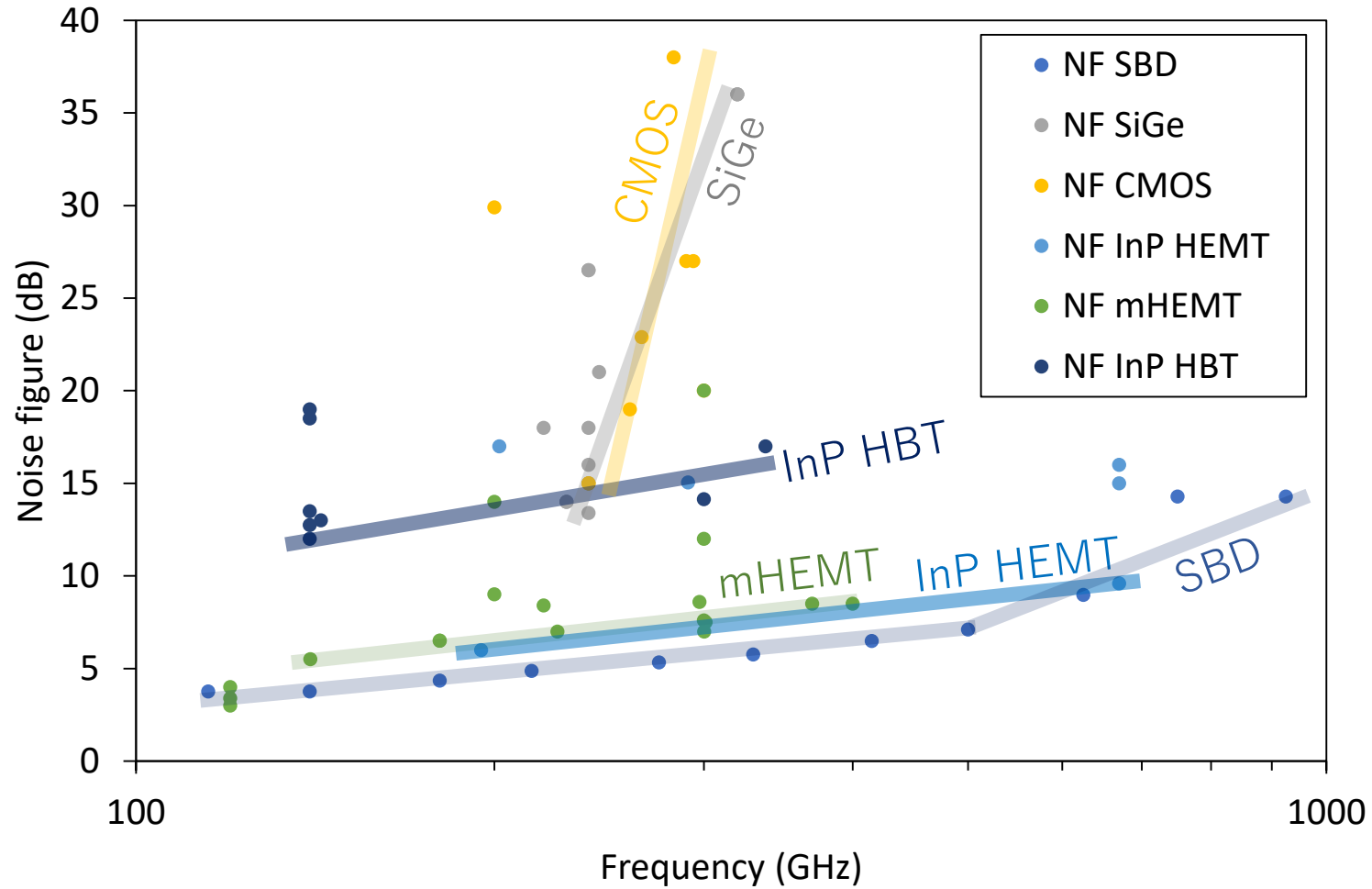
直接検波



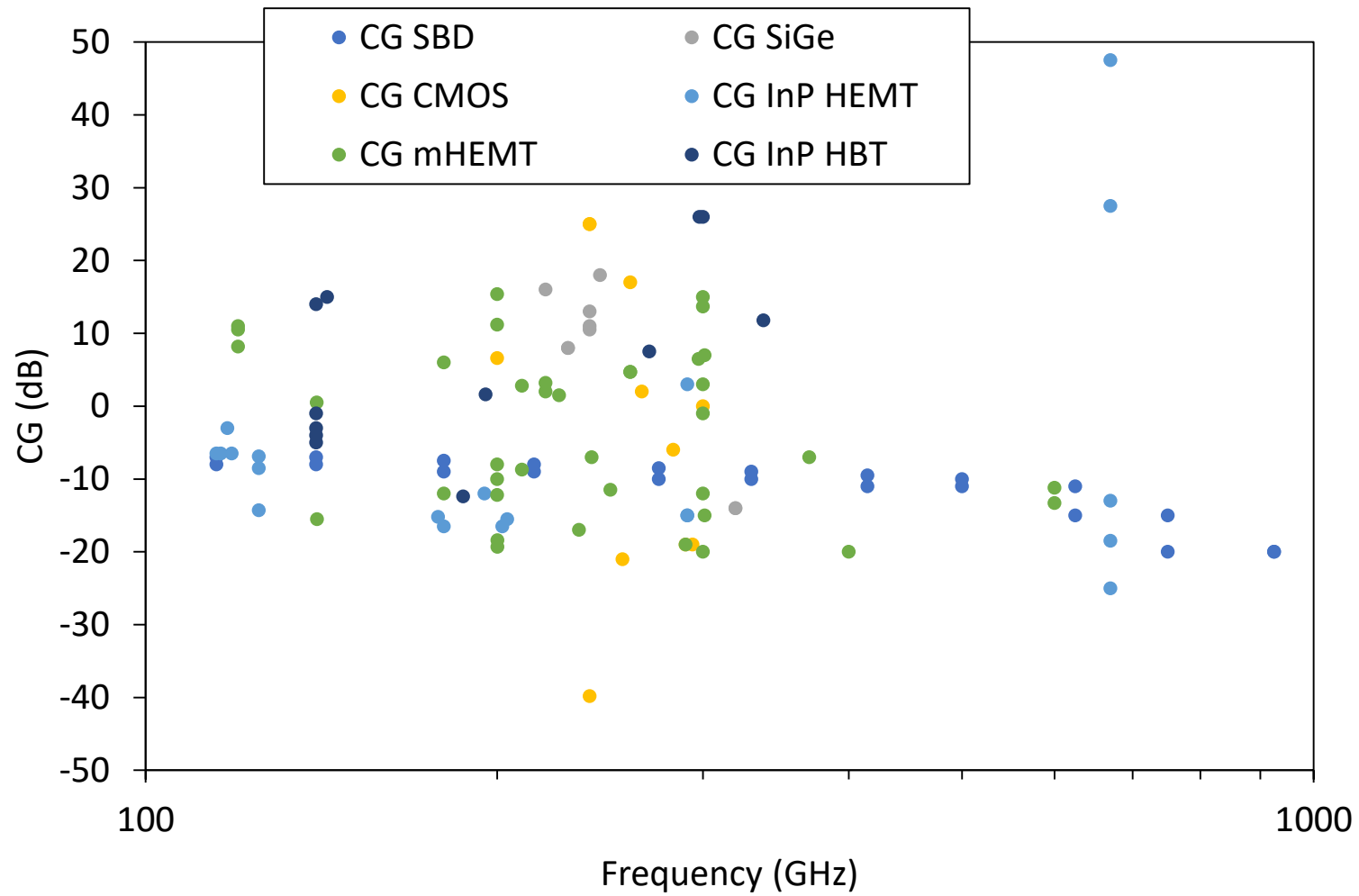
直接検波まとめ

- SBDが標準的に用いられているが、FMBDのNEPは300GHz~1THzにおいてSBDよりも良い値を示している
- 直接検波は基本的に構成がシンプルなため消費電力を下げるのが可能かもしれない
→短距離通信のユースケース（今後検討）

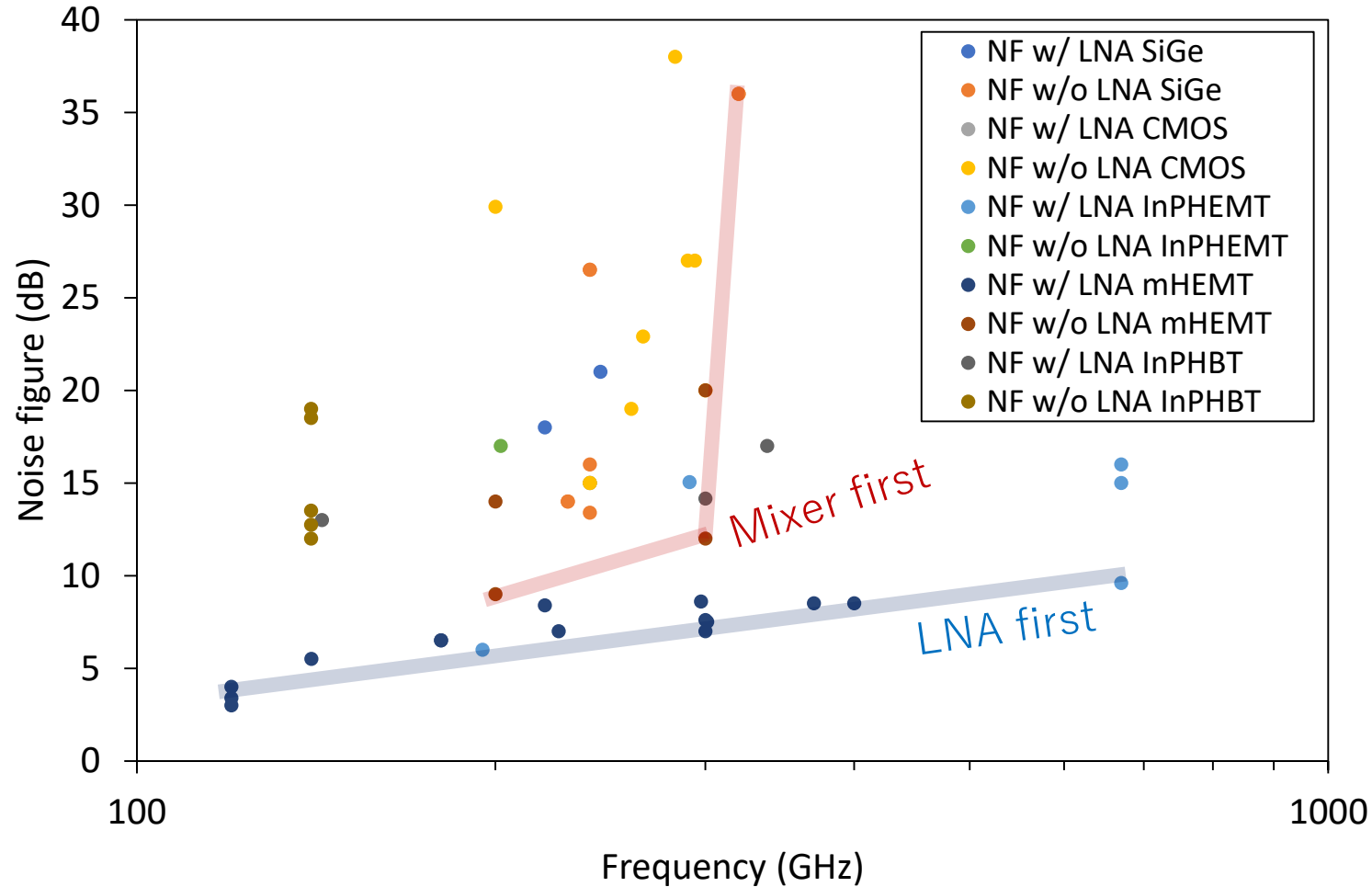
ミキサ・レシーバ (雑音指数)



ミキサ・レシーバ (変換利得)

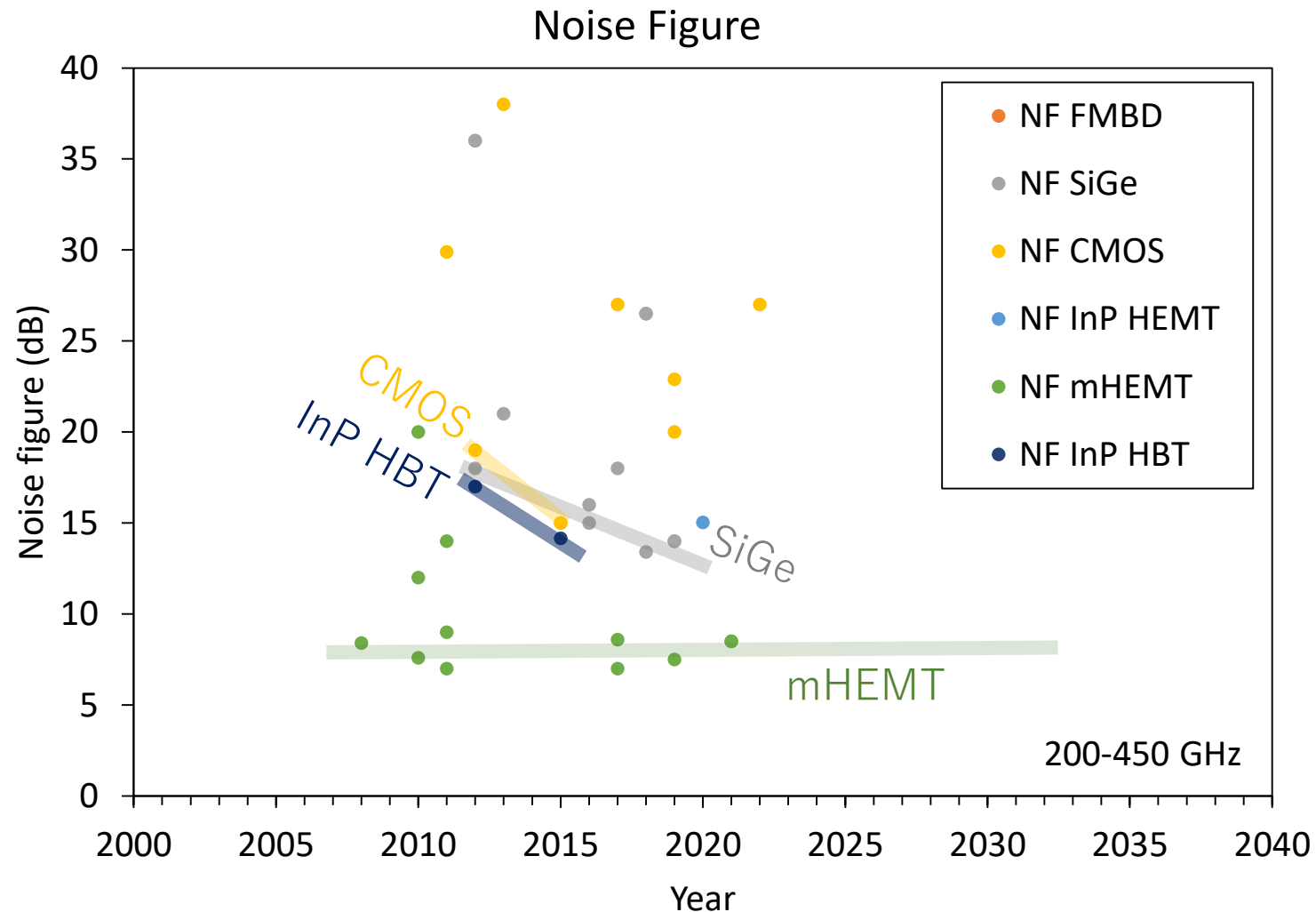


レシーバ構成 LNA/Mixer first



- アンテナで受信後はLNAで増幅する方がNF良いが、LNAを使わずミキサに入れて受信することもNFは悪化するが可能

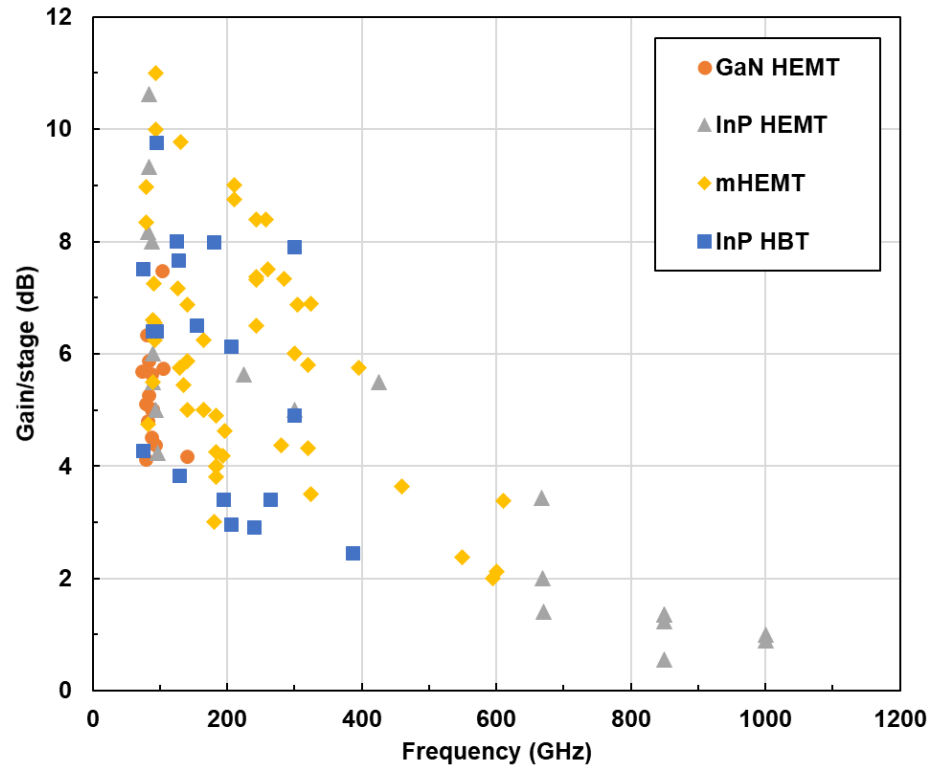
レシーバ年次開発



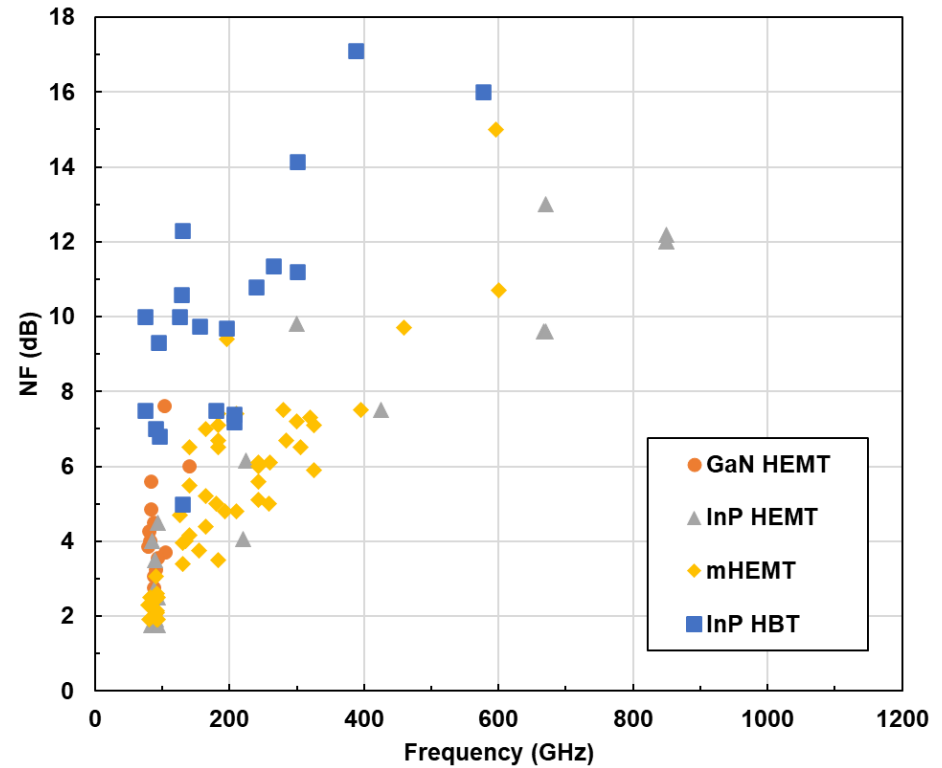
- mHEMTレシーバはNF<10dBを達成（このあたりが限界？）、Si系は~10-15dBが目指せるか？

化合物系LNA 比較

Gain/stageの周波数依存性



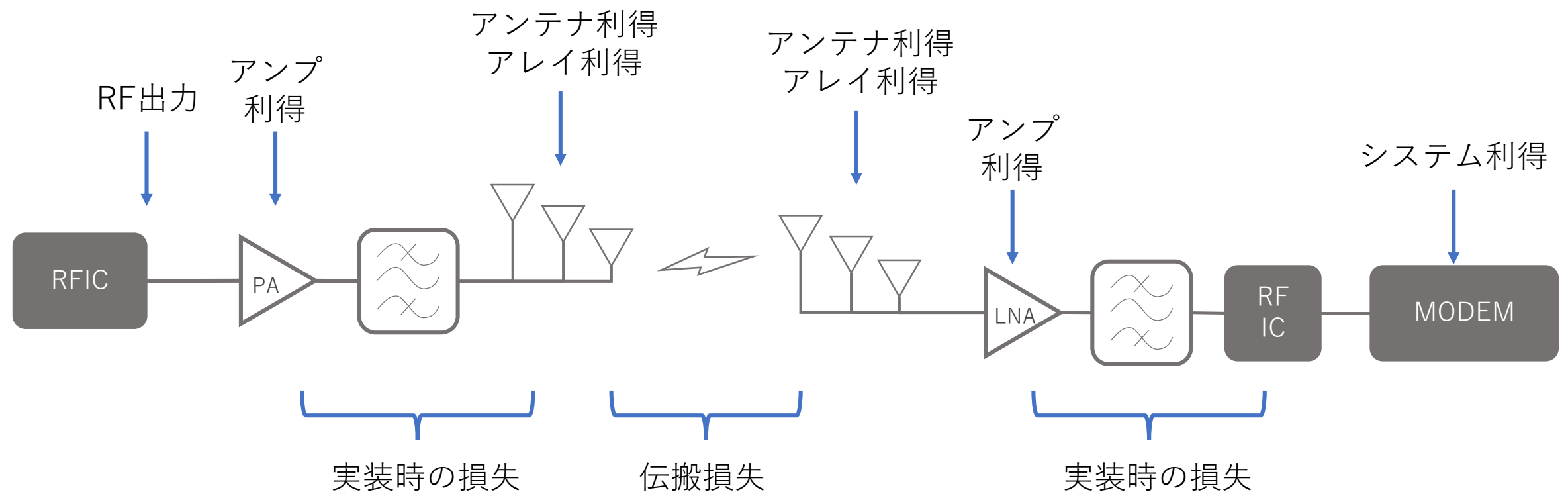
NFの周波数依存性



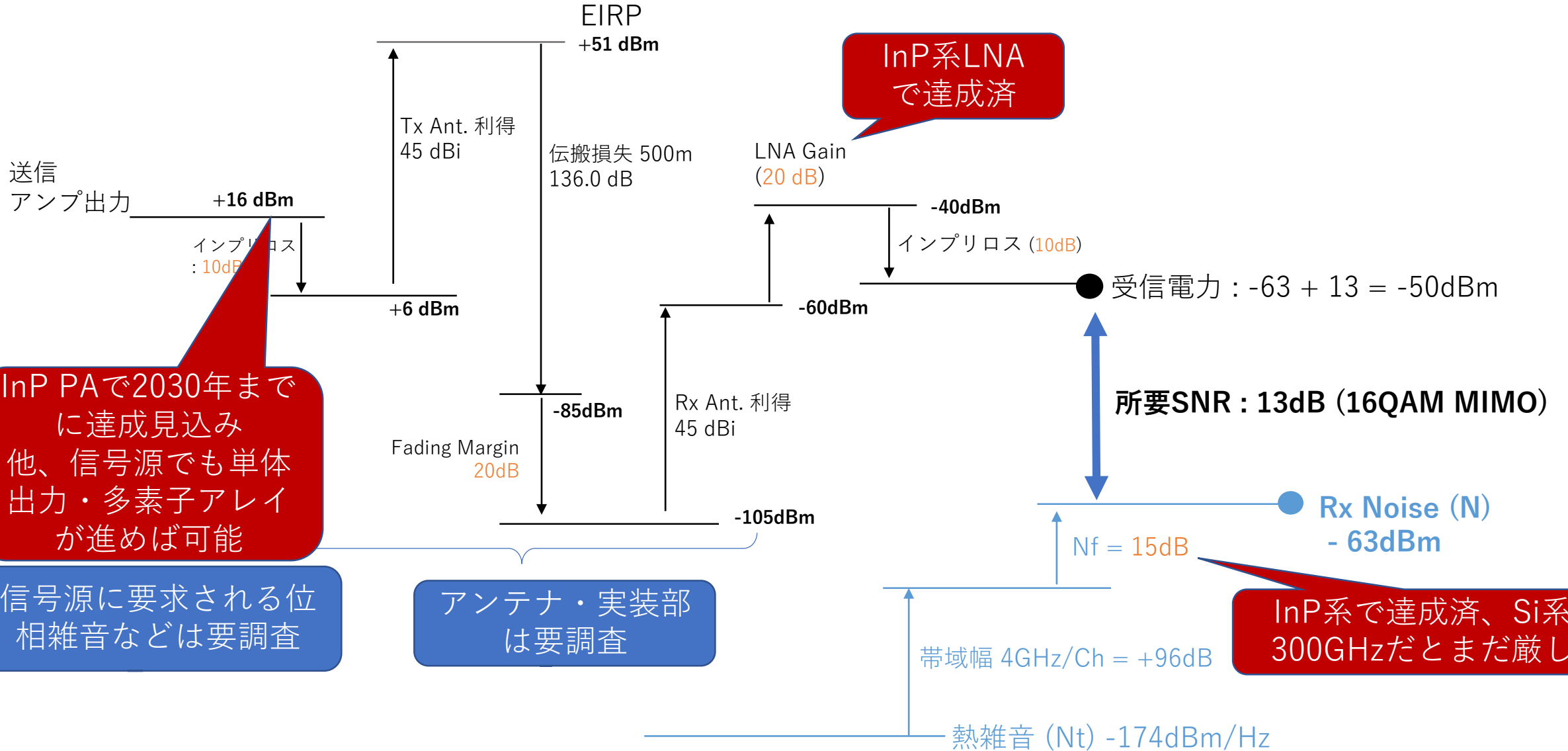
ミキサ・レシーバまとめ

- LNAファーストが良いが、ミキサファースト構成もとれる
 - InP HEMT, mHEMTのMMICでは良好な特性のLNAを用いることができるため300GHz帯で10dB以下のNFが実現されている
 - Si系MMICレシーバは200GHz程度までは良好なNFが得られているが、300GHz帯ではLNAの動作が困難になってくるためNFが急速に悪化する
 - 300GHz帯におけるSi系ミキサの開発次第でSi系のみで構成するか、送信器側と同じでSi系と化合物のハイブリッドが行われるか両方可可能性がある
- ※補助資料_Heterogeneous Integration

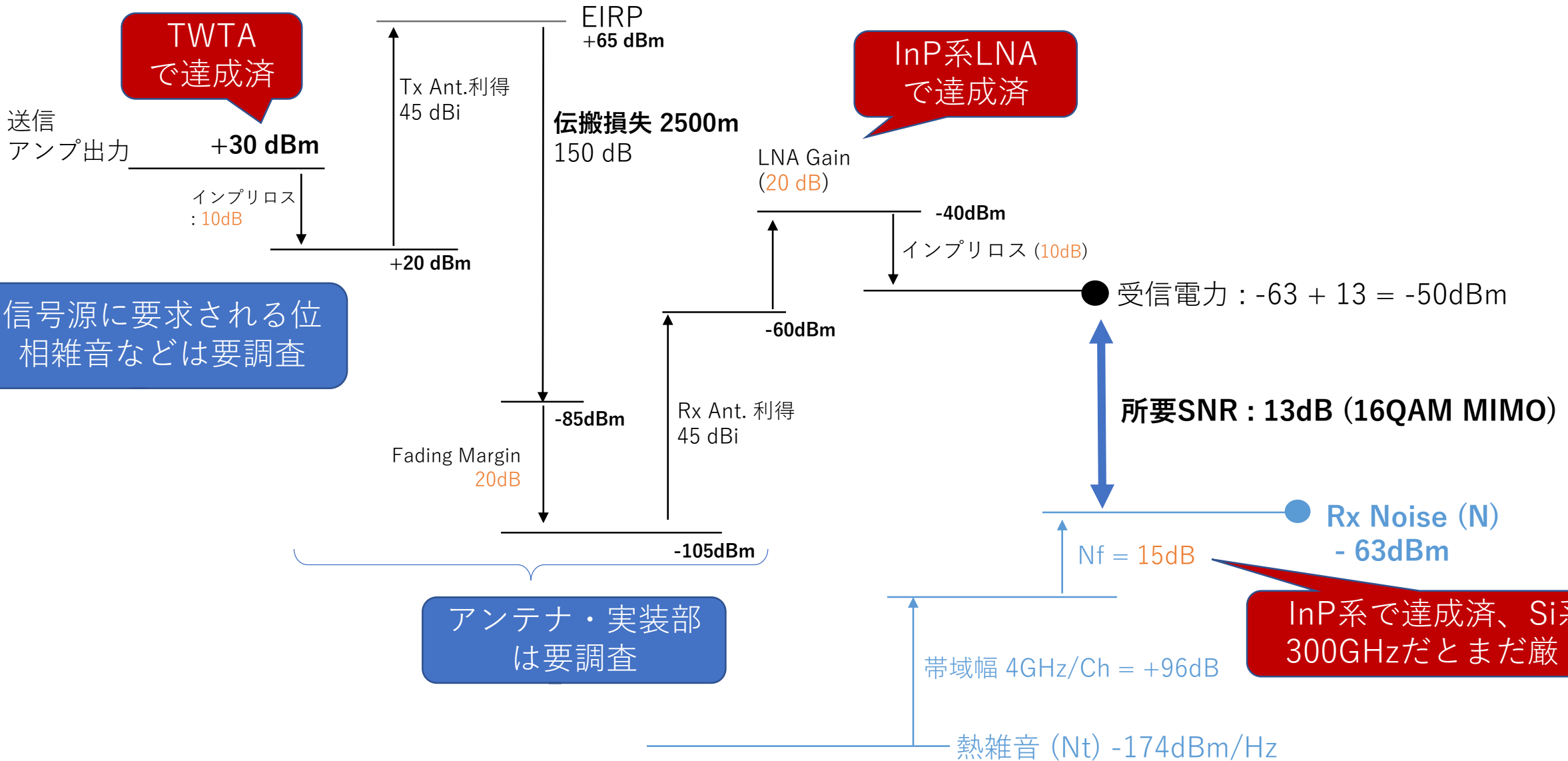
リンクバジェット



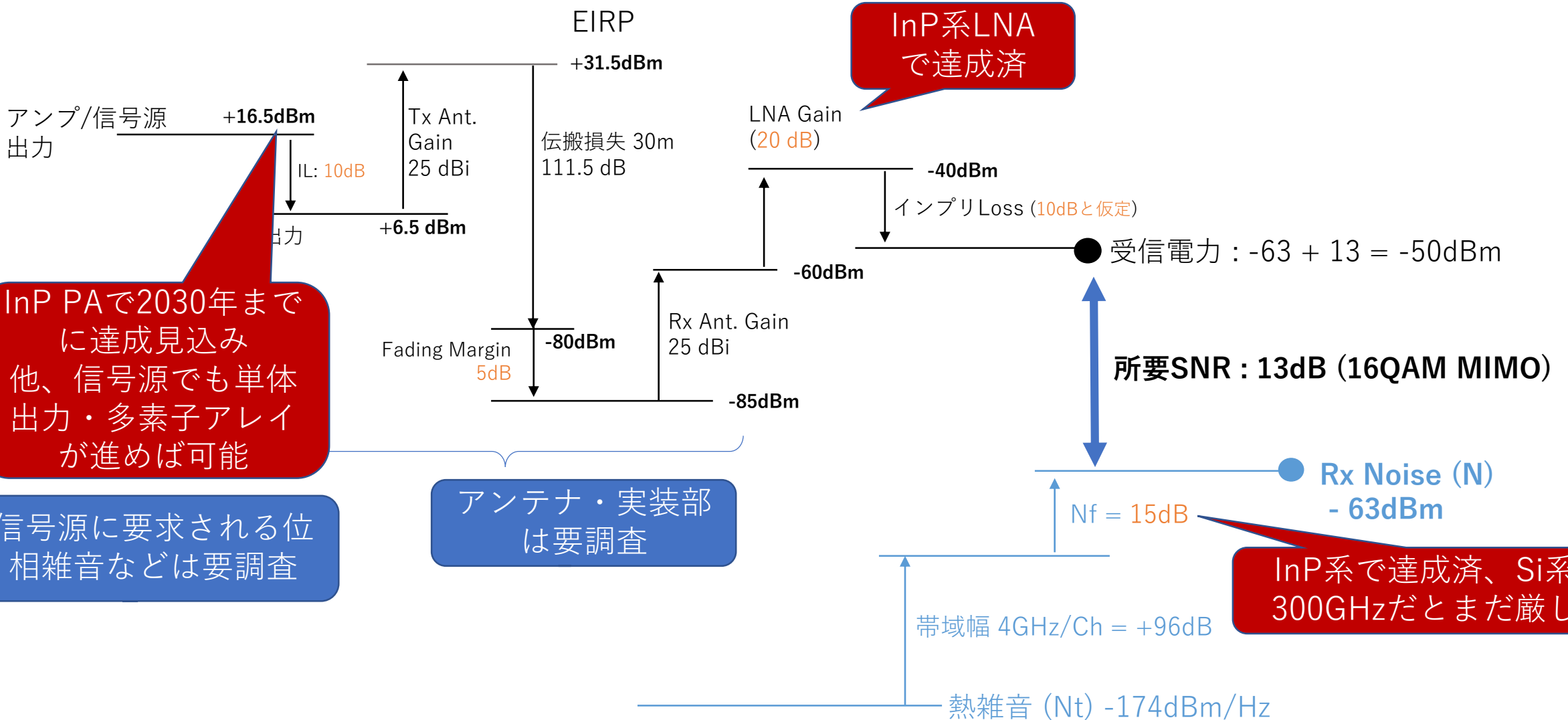
Fronthaul / Backhaulのケース 1



Fronthaul / Backhaulのケース 2



移動体通信のケース



InP系LNA
で達成済

InP PAで2030年までに達成見込み
 他、信号源でも単体出力・多素子アレイが進めば可能

信号源に要求される位相雑音などは要調査

アンテナ・実装部は要調査

InP系で達成済、Si系は300GHzだとまだ厳しい

調査まとめ（300GHz帯について）

- 送信側（信号源・増幅器）、受信側について調査した。
- バックホール・フロントホールにおいて、送信側TWTAおよび受信側InP系Si系レーザの利用により、既にリンクバジェットを満たすことは可能だが、さらなる帯域拡大には高出力化は引き続き必要。
- 移動体通信応用について、受信側はInP系レーザは要求を満たす。送信側についてはさらなるPA出力・信号源出力向上、アレイ化が必要だが、このまま2030年までには十分達成可能。
- 発展状況は逐次変わるため、引き続きのデータ収集が必要。
- アンテナ・実装部、位相雑音・歪み、熱・排熱などについては今後の調査が必要。

略語、用語一覧

- Si、InP、GaAs、GaN：半導体
- UTC-PD：単一走行キャリアフォトダイオード
- Comb：周波数コム
- QCL：量子カスケードレーザー
- DFG-QCL：差周波量子カスケードレーザー
- RTD：共鳴トンネルダイオード
- CMOS：相補型MOSトランジスタ
- HEMT：高電子移動度トランジスタ
- HBT：ヘテロ接合バイポーラトランジスタ
- MMIC：モノリシックマイクロ波集積回路
- PA：パワーアンプ
- LNA：ローノイズアンプ
- TWTA：進行波管増幅器
- PAE：電力付加効率
- DC-to-RF efficiency：直流-RF変換効率
- SBD：ショットキーバリアダイオード
- FMBD：フェルミレベル制御バリアダイオード
- BWD：バックワードダイオード
- NEP：雑音等価電力
- NF：ノイズフィギュア
- CG：コンバージョンゲイン 変換利得
- EIRP：等価等方放射電力or実効等方放射電力