

## ムーンショット型研究開発事業 目標6

「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」

公開シンポジウム2025

2025年3月4日 @ベルサール秋葉原

研究開発プロジェクト

# 「量子計算網構築のための量子インターフェース開発」

プロジェクトマネージャー

小坂英男



横浜国立大学 量子情報研究センター・センター長/教授



研究代表者



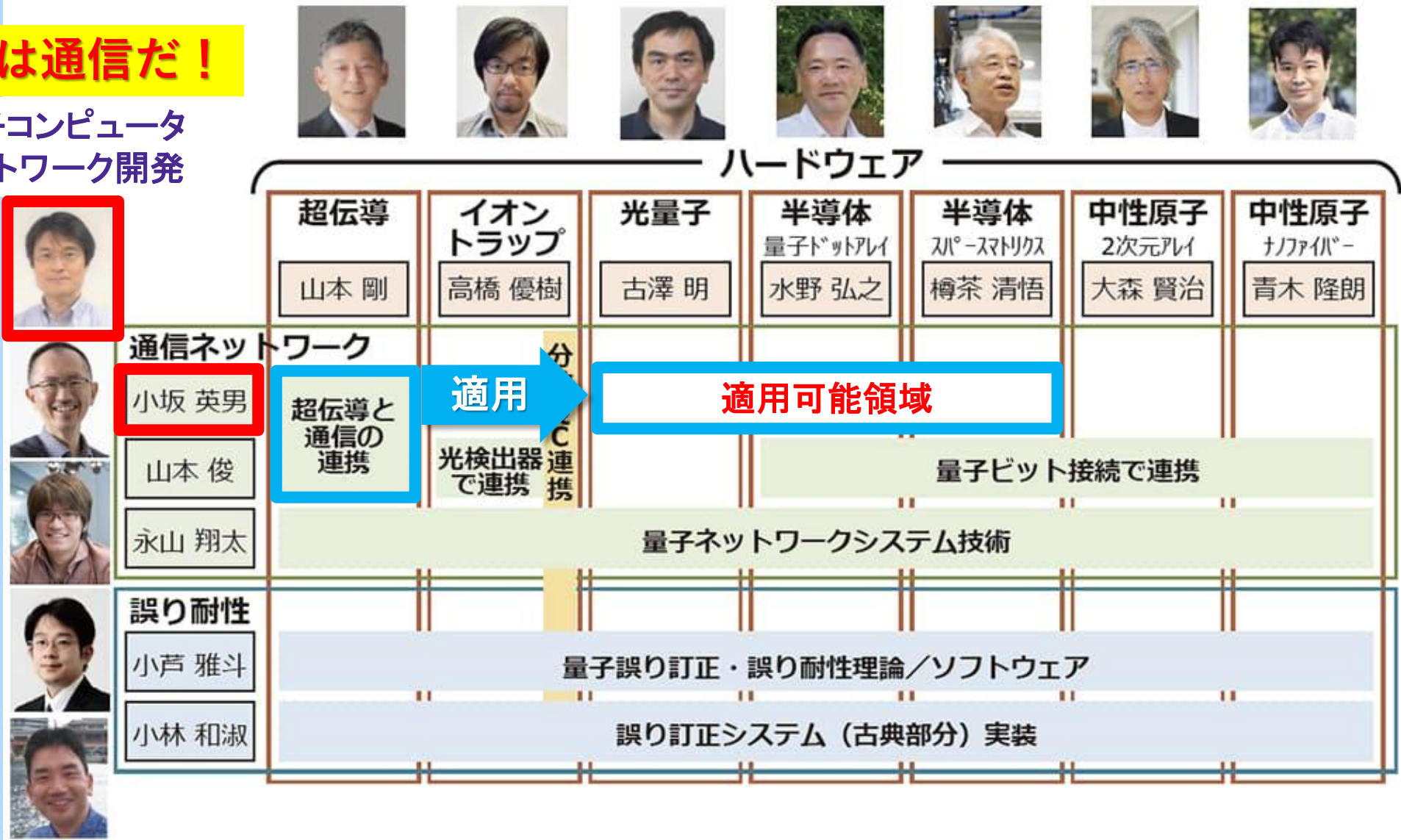
横浜国立大学、東京大学、東京科学大学  
産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、量子科学技術研究開発機構

1. 研究体制
2. 研究目的
3. 研究の狙い
4. 研究計画
5. 進捗概要
6. 今後の方針
7. マネージメント

# 1. 研究体制: ムーンショット6全体

計算は通信だ！

量子コンピュータ  
ネットワーク開発



# 1. 研究体制: 小坂プロジェクト



MOONSHOT  
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM  
JPMJMS2062

## ダイヤモンド基盤技術

## オプトメカニカル結晶

**9 PIs**  
94 members



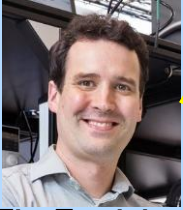
Satoshi Fujii



### 冷却イオン注入 色中心形成



Kazumasa Narumi



Tim Taminiau



Yuhei Sekiguchi

### 量子構造 準量産化



Shinobu Onoda  
25 members



Tokuyuki Teraji  
2 members



Hiromitsu Kato  
14 members

### NV-光 結合



Kazuki Koshino  
2 members

### 理論

## 超伝導回路基盤技術



Hideo Kosaka  
27 members



Satoshi Iwamoto  
9 members

### 超伝導-NV 結合



Nobuyuki Yoshikawa  
3 members

### 電子集積回路



Masahiro Nomura  
6 members



Toshihiko Baba  
6 members

### フォノン結晶



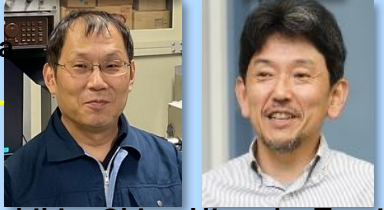
Hodaka Kurokawa

### 光結合回路

### 3次元実装



Fumihiko Inoue

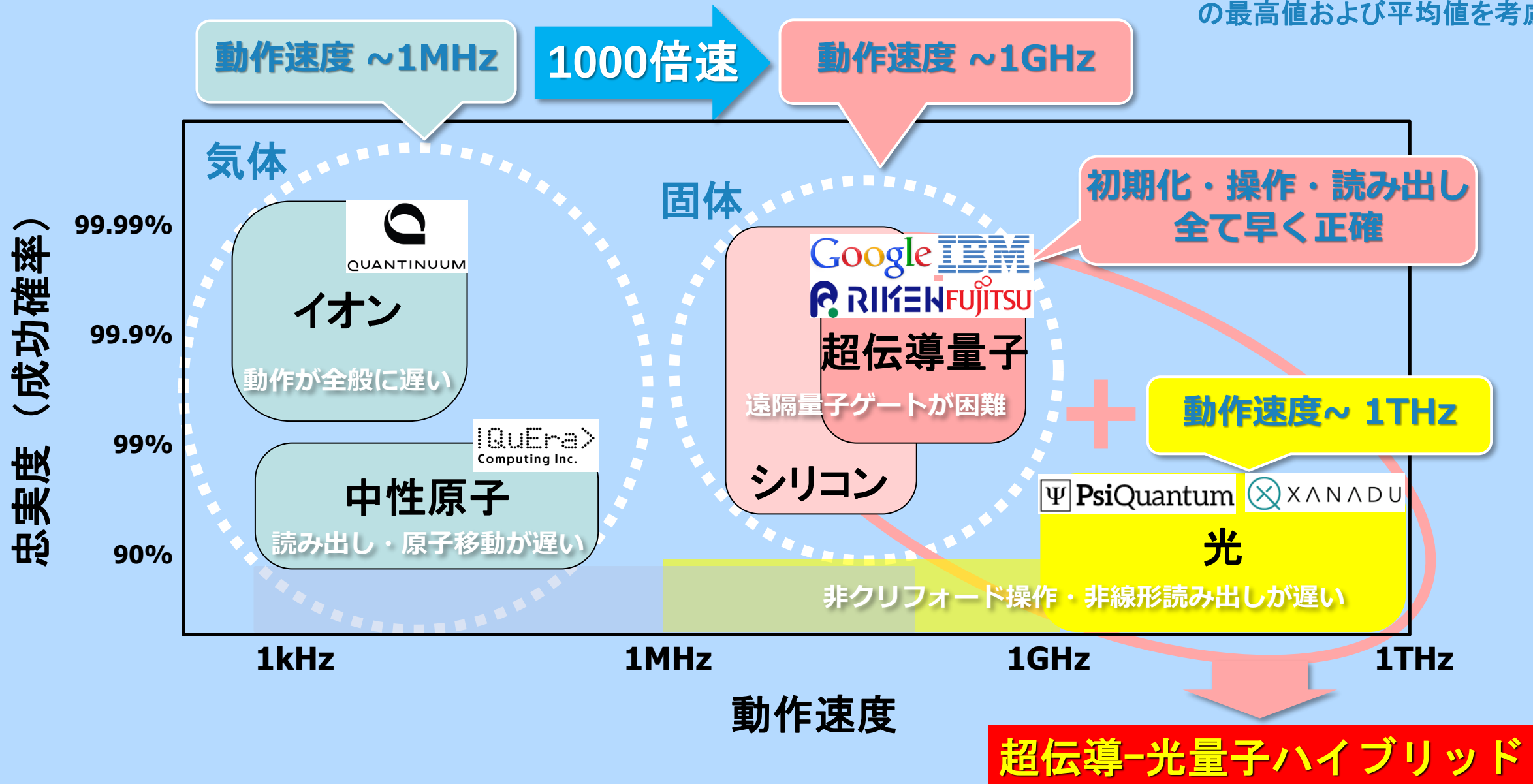


Hiroto Teraoka



## 2. 研究目的: 量子コンピュータのハードウェア比較

初期化・一量子/二量子操作・読み出し  
の最高値および平均値を考慮



## 2. 研究目的: 超伝導量子ビット間の光接続



MOONSHOT  
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM  
JPMJMS2062

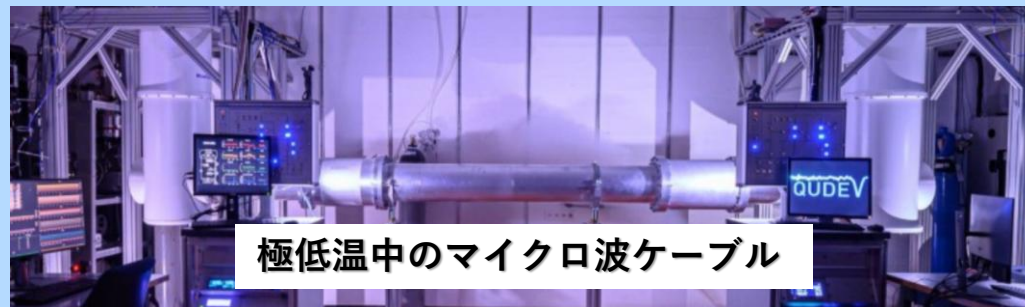
スーパーコンピューター

光接続  
分散処理



富士通「富岳」

理研HP: [www.riken.jp/pr/news/2021/20210309\\_2/index.html](http://www.riken.jp/pr/news/2021/20210309_2/index.html)



極低温中のマイクロ波ケーブル

Wallraff ETH

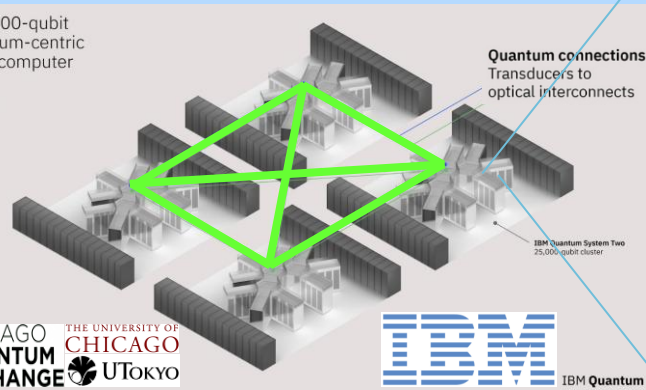
P. Magnard et. al., Phys Rev. Lett. 125, 260502 (2020)

室温中の光ファイバーに置き換え

柔軟かつ高速な光接続を実現

超伝導量子コンピューター

100,000-qubit  
quantum-centric  
supercomputer  
—  
2033



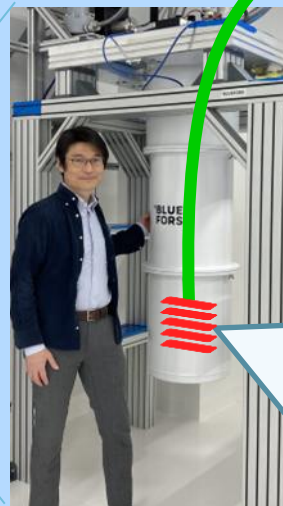
CHICAGO  
QUANTUM  
EXCHANGE

THE UNIVERSITY OF  
CHICAGO

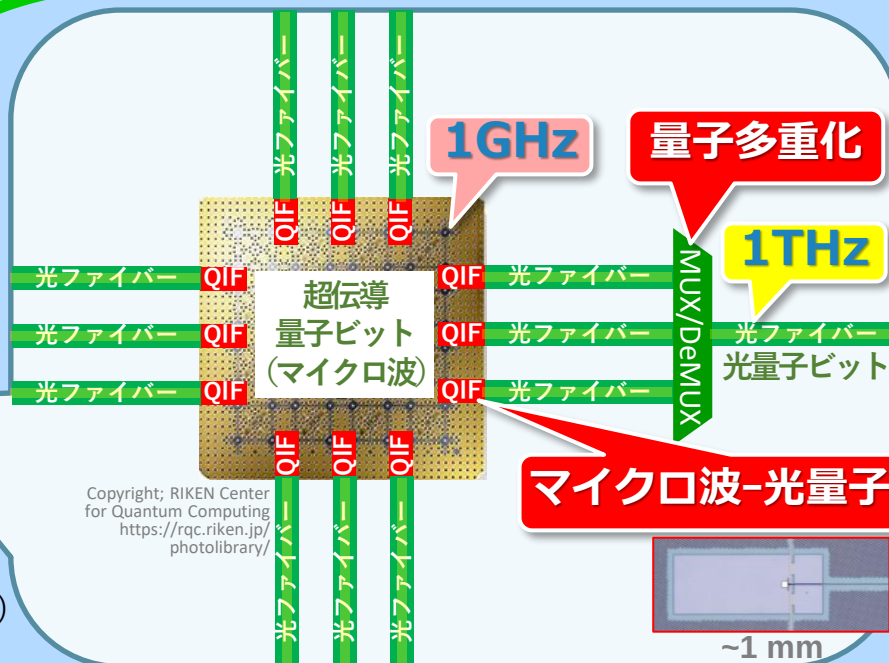
IBM

IBM Quantum

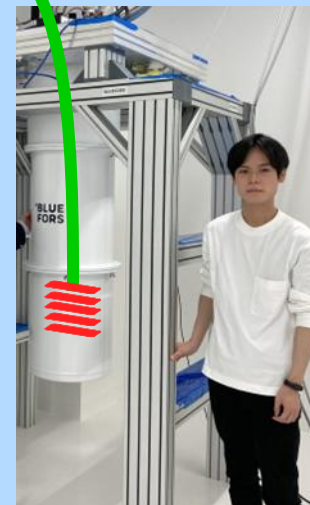
IBM HP: [newsroom.ibm.com/2023-05-21-IBM-Launches-100-Million-Partnership-with-Global-Universities-to-Develop-Novel-Technologies-Towards-a-100,000-Qubit-Quantum-Centric-Supercomputer](https://newsroom.ibm.com/2023-05-21-IBM-Launches-100-Million-Partnership-with-Global-Universities-to-Develop-Novel-Technologies-Towards-a-100,000-Qubit-Quantum-Centric-Supercomputer)



希釈冷凍機 (～10mK)



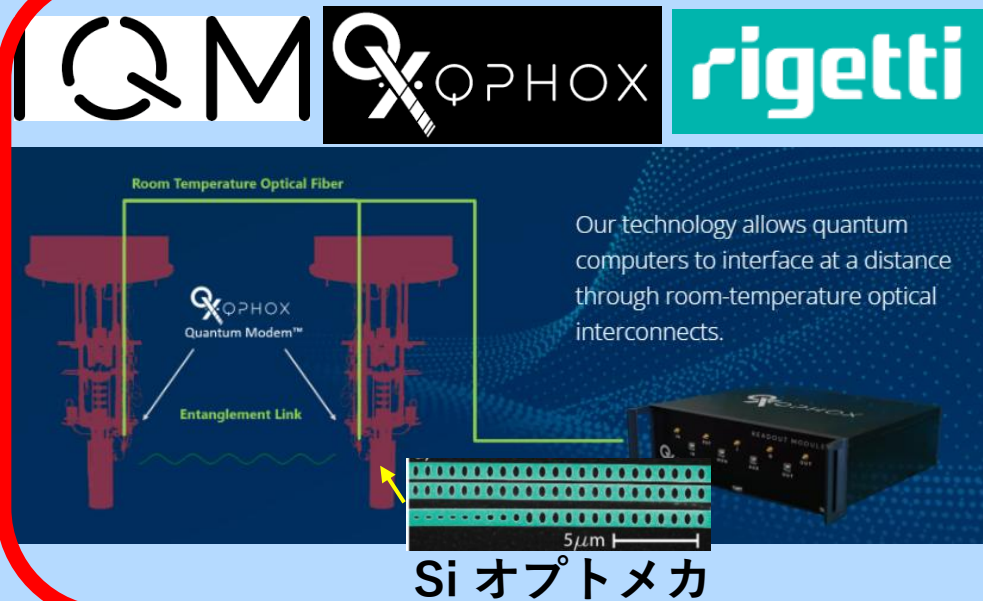
Copyright; RIKEN Center  
for Quantum Computing  
<https://rqc.riken.jp/photolibrary/>



希釈冷凍機 (～10mK)

# 3. 世界動向：マイクロ波-光量子インターフェース

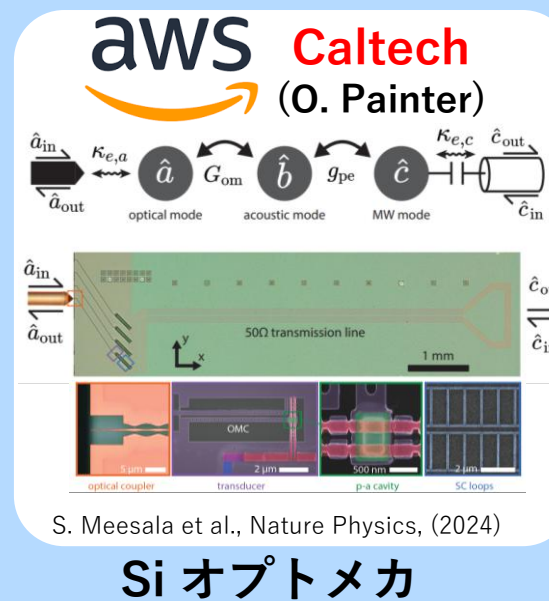
## 光量子接続



**QPHOX Quantum Modem™**

Our technology allows quantum computers to interface at a distance through room-temperature optical interconnects.

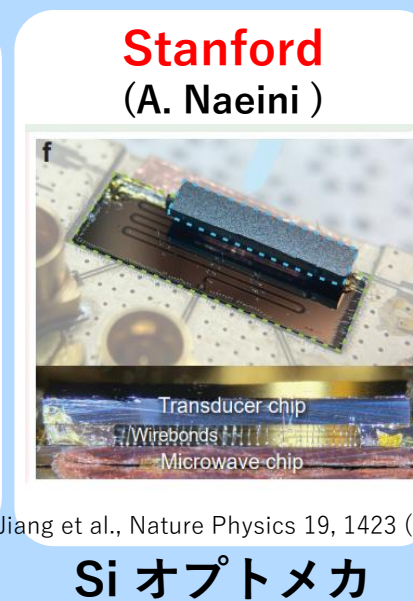
**Si オプトメカ**



**aws Caltech (O. Painter)**

Diagram showing the interaction between optical, acoustic, and microwave modes.

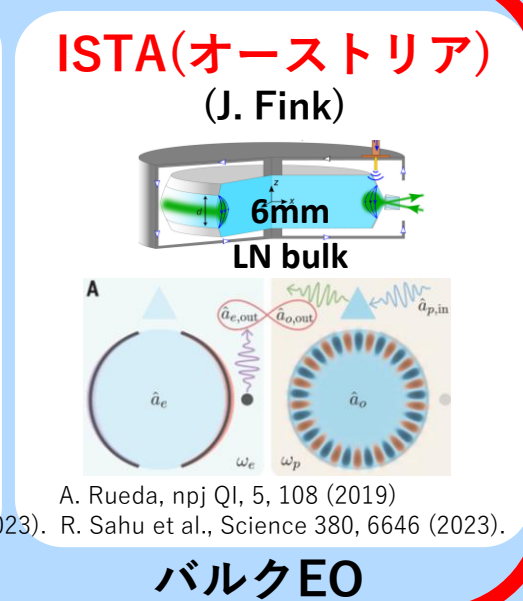
**Si オプトメカ**



**Stanford (A. Naeini)**

Diagram showing the transducer chip, wirebonds, and microwave chip.

**Si オプトメカ**



**ISTA(オーストラリア) (J. Fink)**

Diagram showing the LN bulk and the interaction between optical and microwave modes.

**バルクEO**



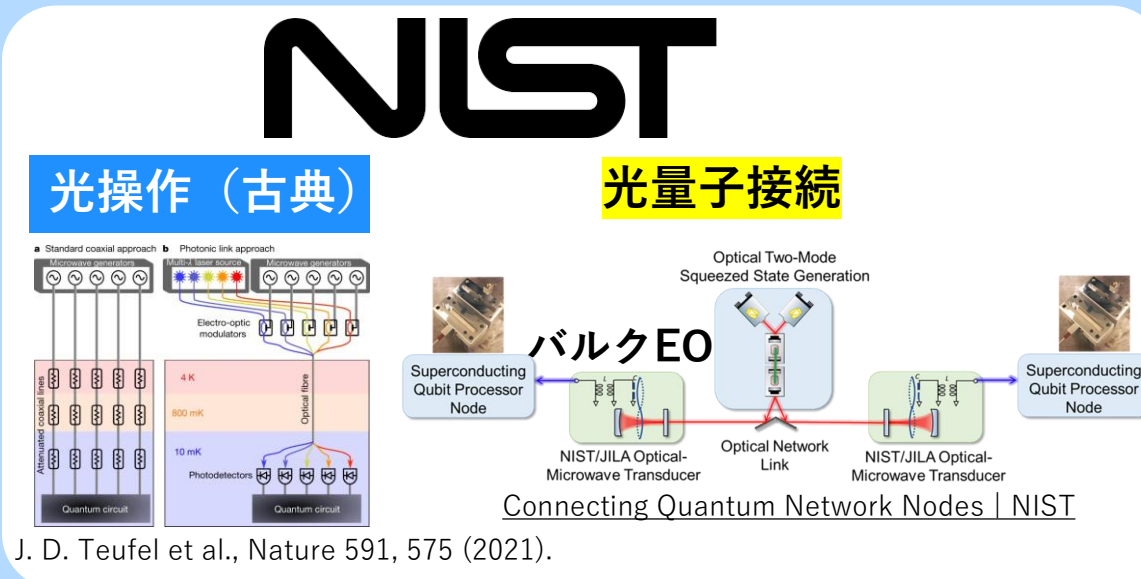
**rigetti**

**Harvard (M. Loncar)**

**光操作 (古典)**

Diagram showing the LN waveguide EO and the interaction between optical and microwave modes.

H. K. Warner et al., arxiv.org/pdf/2310.16155



**NIST**

**光操作 (古典)**

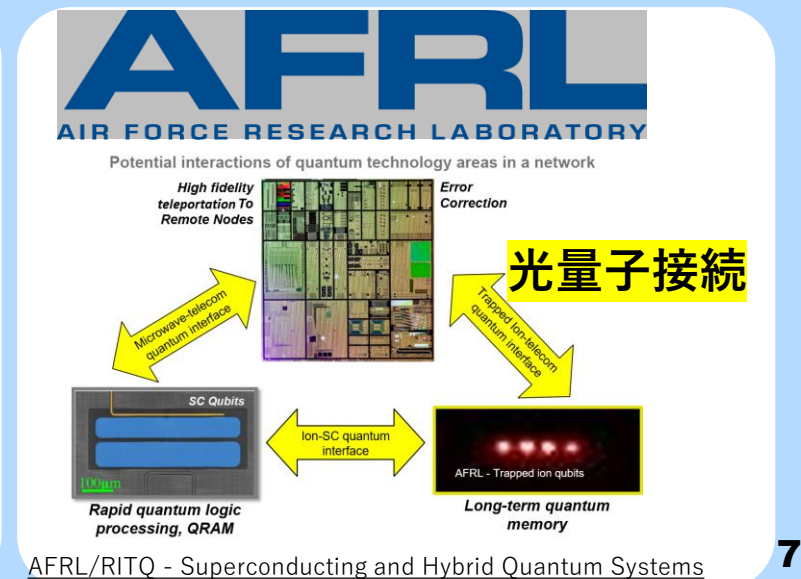
**光量子接続**

Diagram showing the connection between two superconducting qubit processor nodes via an optical network link.

**バルクEO**

Connecting Quantum Network Nodes | NIST

J. D. Teufel et al., Nature 591, 575 (2021).



**AFRL**

**AIR FORCE RESEARCH LABORATORY**

Potential interactions of quantum technology areas in a network

Diagram showing the interaction between various quantum technologies: High fidelity teleportation To Remote Nodes, Error Correction, Trapped ion-telecom quantum interface, SC Qubits, Rapid quantum logic processing, QRAM, Ion-SC quantum interface, and AFRL - Trapped ion qubits.

**光量子接続**

AFRL/RITQ - Superconducting and Hybrid Quantum Systems

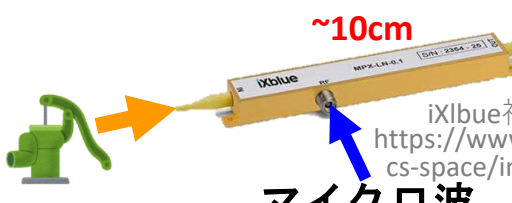


# 3. 世界動向：量子インターフェースの進化ー変調器から量子変換器へー

## マイクロ波光子(〜10GHz)から可視光子(〜500THz)への量子周波数変換器

**従来の変調器**  
W級のポンプ光が必要  
量子変換できない

**EO (電気光学) 変調器**



〜10cm  
光波  
マイクロ波  
ixblue社HPより引用  
<https://www.ixblue.com/photonic-space/intensity-modulators/>

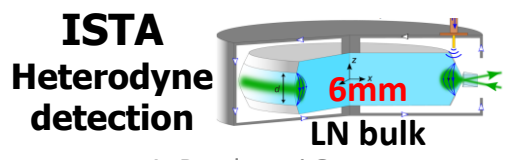
**AO (音響光学) 変調器**



光波  
マイクロ波  
Gooch&Housego社  
HPより引用  
<https://gandh.com/products/acousto-optics/modulators>

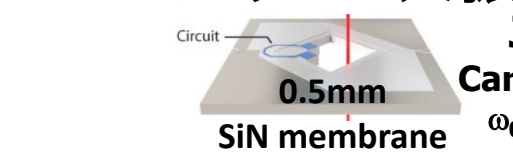
**バルク共振器**  
量子変換が可能も  
mW級のポンプ光が必要

**バルクEO共振器**



ISTA  
Heterodyne detection  
6mm  
LN bulk  
A. Rueda, npj Quantum Information, 5, 108 (2019)

**バルクAO共振器**



JILA  
Carrier freq.  $\omega_0 \sim 1\text{MHz}$   
0.5mm  
SiN membrane  
A. P. Higginbotham et. al., Nature Physics, 14, 1038 (2018)

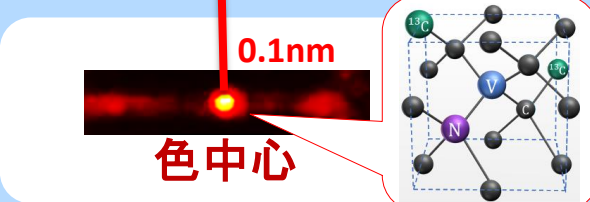
**ナノ共振器**  
 $\mu\text{W}$ 級にポンプ光を低減

**ナノEO・EOM・OM(オプトメカ)共振器**

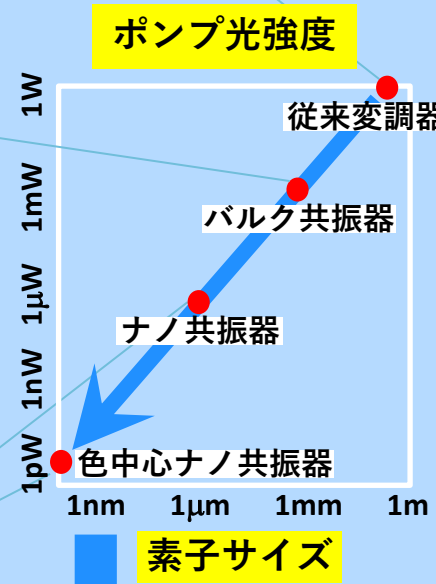


1 $\mu\text{m}$

**色中心ナノ共振器**  
pW級(1ポンプ光〜1光子)に低減



0.1nm  
色中心



雑音光子数低減

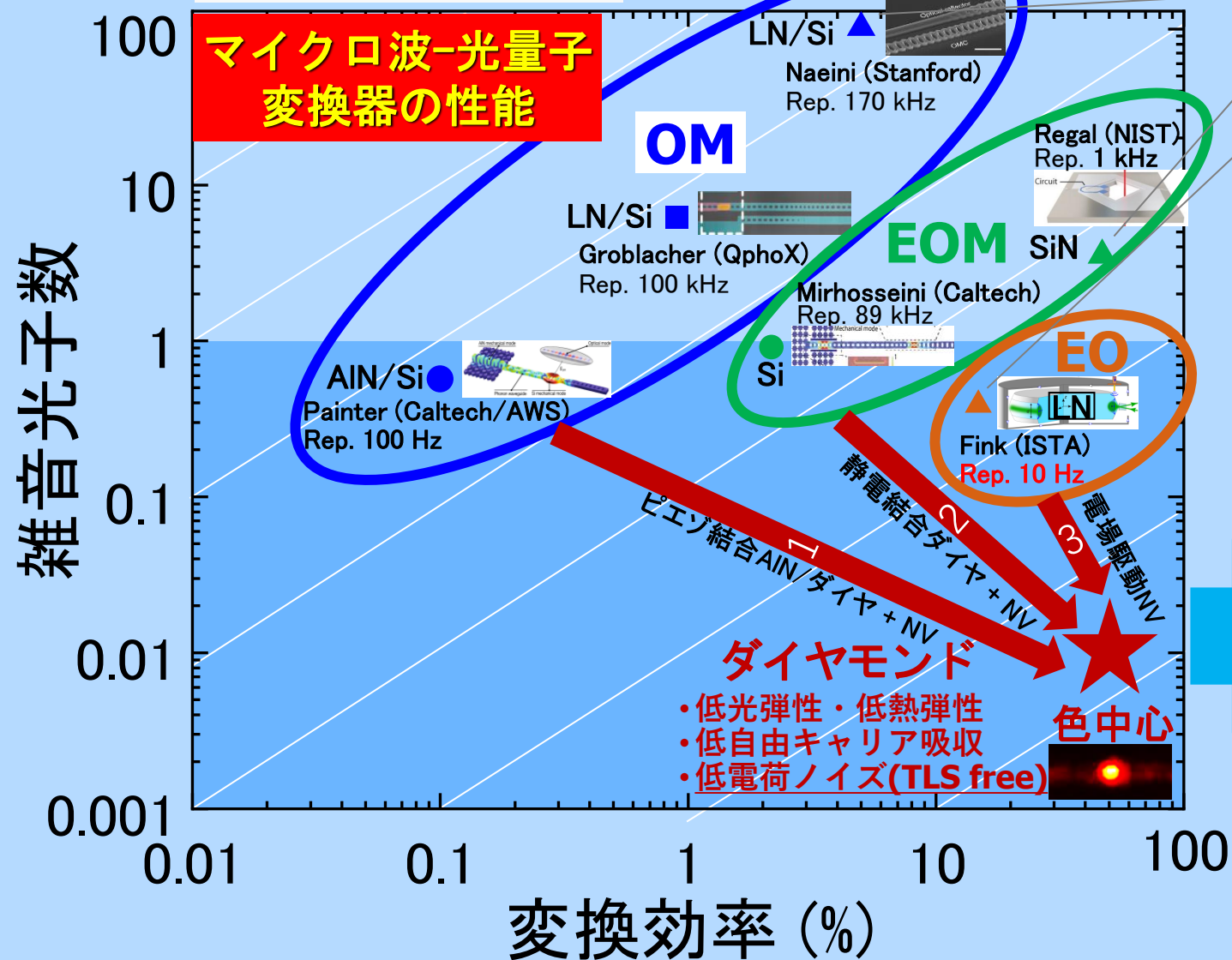


# 3. 世界動向：本研究の狙いーダイヤモンド色中心の導入ー

OM: Opto-Mechanical transducer

EOM: Electro-Opto-Mechanical transducer

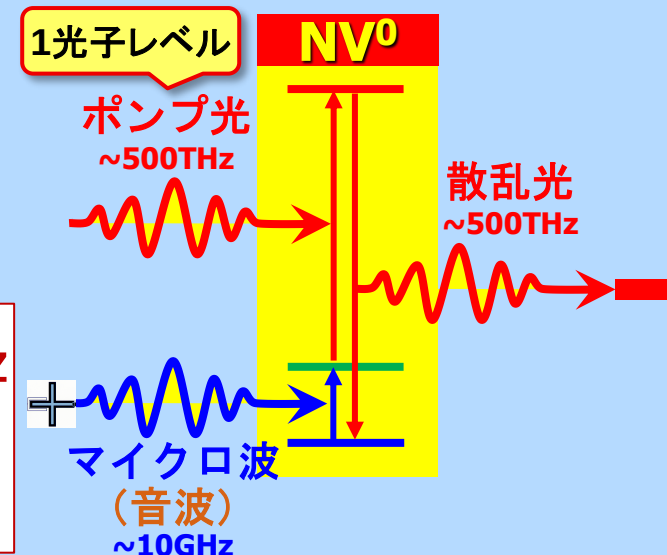
EO: Electro-Optic transducer



現状のトップデータ(別構造)

- ▲ レート 170 kHz
- ▲ 変換効率 50%
- ▲ 雑音光子数 0.3 (忠実度 80%)

三準位系による  
二重共鳴和周波発生



レート ~1MHz  
効率 ~50%  
雑音 <0.01

- Mirhosseini & Painter, Nature 588, 599 (2020)
- ▲ Sahu & Fink, Nature Com. 13, 1276 (2022)
- ▲ Brubaker & Regal, Phys. Rev. X 12, 021062 (2022)
- ▲ Jiang & Naeini, Nature Physics 19, 1423 (2023)
- Weaver, Groblacher & Stockill, Nat. Nano. 19, 166 (2024)
- Zhao & Mirhosseini, arXiv:2406.02704 (2024)

# 4. 年次計画

4年

2025(R7)

プロジェクト年次

2021(R3)

2022(R4)

2023(R5)

2024(R6)

12月

11月

保証

✓量子メモリ要素機能  
原理実証

✓ piezoelectric effect を利用した  
スピン操作

✓ 音子-スピン-光子  
量子メディア変換

✓超伝導量子ビット  
接続準備

超伝導量子ビット  
接続テスト

素子化技術

✓ 素子設計  
シミュレーション  
装置開発

✓ 光結合回路設計

✓ 光結合回路試作

✓ 光結合回路作製

✓フォトニック結晶試作

✓フォトニック/フォノニック  
結晶同一構造試作

✓フォノニック結晶設計

✓ piezoelectric wave  
共振器試作

✓ piezoelectric microwave  
共振器試作

✓ ダイヤモンド  
オプトメカニカル結晶  
共振器試作

✓ マイクロ波共振器  
試作

✓ マイクロ波共振器  
作製(調整機能付)

✓ マイクロ波共振器  
作製(高周波化)

✓ マイクロ波制御回路  
設計

✓ マイクロ波制御回路  
試作(5K動作)

マイクロ波制御回路  
作製(20mK動作)

✓ 転写プリンティングテスト

✓ 転写プリンティング技術開発

3次元  
ハイブリッド  
実装

ダイヤモンド  
光結合回路  
マイクロ波共振器  
マイクロ波制御回路

基盤技術

✓ ダイヤモンド精密微細加工技術開発

ダイヤモンド微細加工均一化・低ダメージ化

✓ ダイヤモンド精密イオン注入技術開発

ダイヤモンド単一イオン注入・低ダメージ化

✓ ダイヤモンド高純度結晶成長技術開発

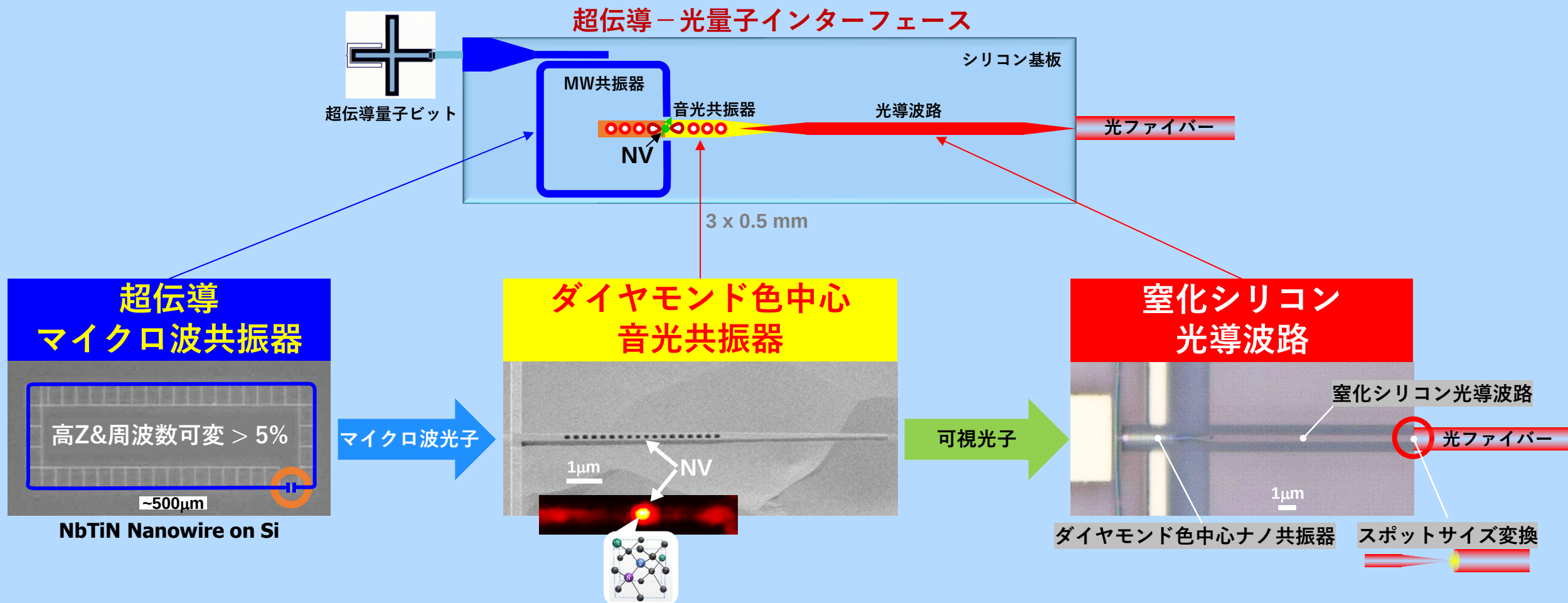
ダイヤモンド量子結晶高機能化・低ダメージ化

✓ 量子インターフェース基礎理論開発

量子インターフェース高効率化・高機能化理論開発

# 5. 進捗概要: 要素部品の開発状況

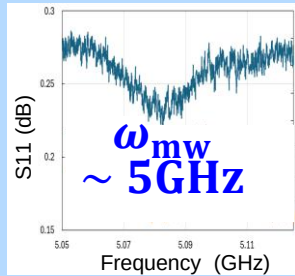
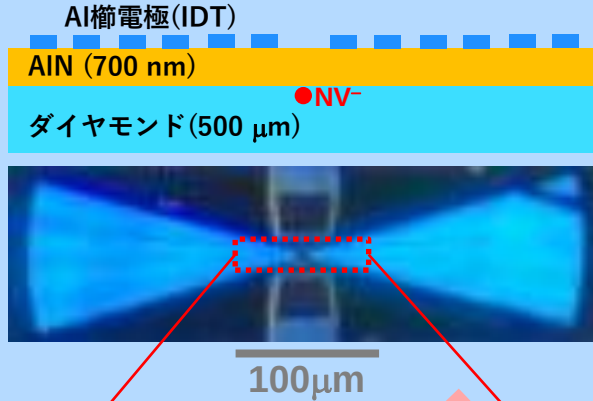
超伝導-光量子インターフェースのコア部品を開発。計画通りの性能を達成。



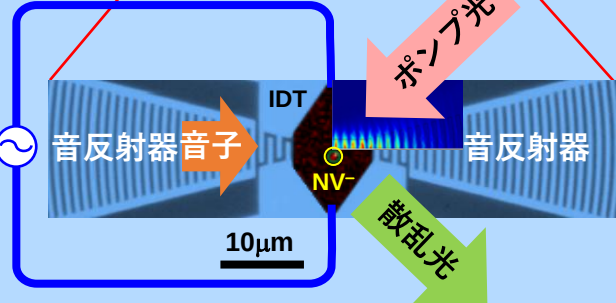


# 5. 進捗概要: 量子変換の原理実証実験と要素部品の性能評価

ダイヤモンド音共振器  
+  
色中心 (NV<sup>-</sup>)

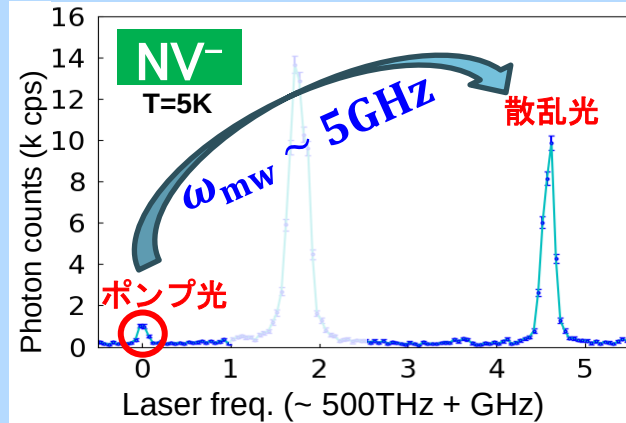


マイクロ波

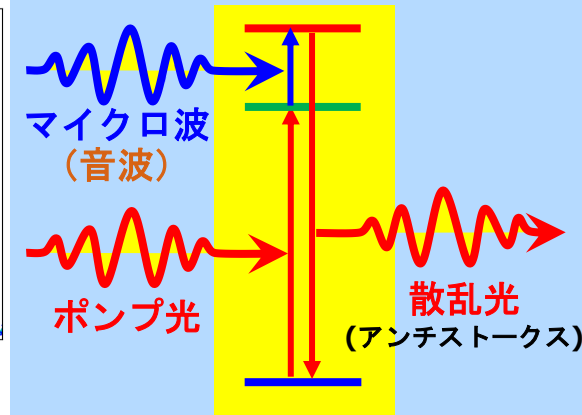


現状の単体効率(BS) ~  $10^{-10}$

光学系の効率補正、NVの深さ補正含む



二重共鳴誘導ラマン散乱  
(和周波発生)



超伝導  
マイクロ波共振器

評価中

ダイヤモンド  
音共振器(フォノン結晶)

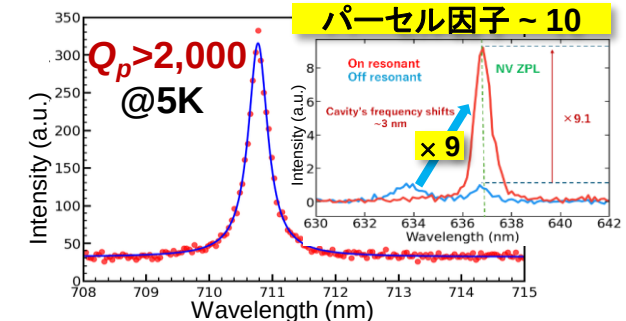
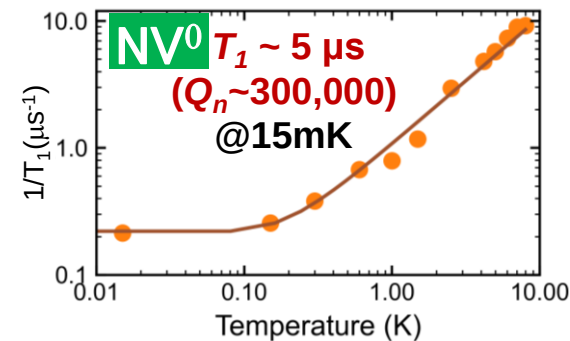
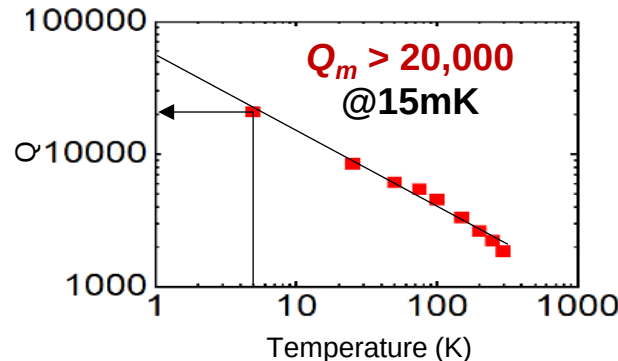
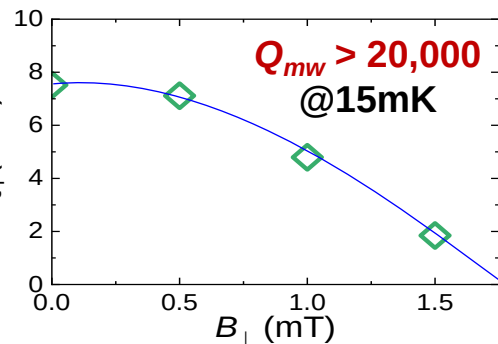
評価中

ダイヤモンド  
色中心

実証済

ダイヤモンド  
光共振器(フォトン結晶)

パーセル因子 ~ 10

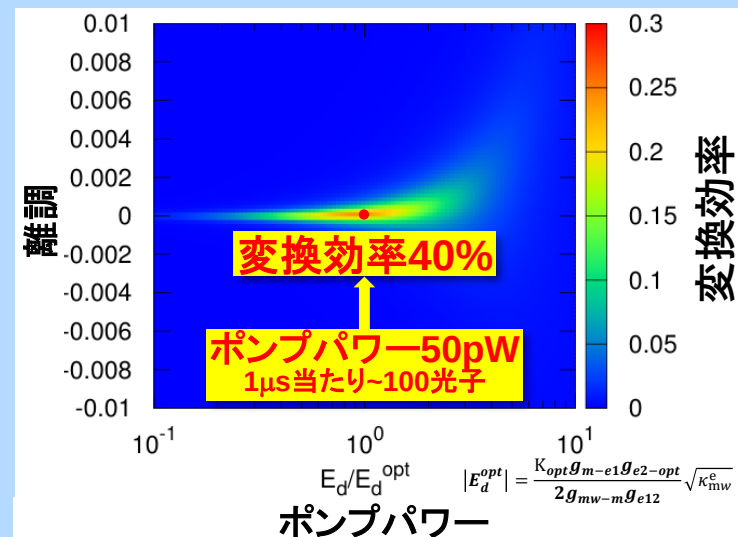
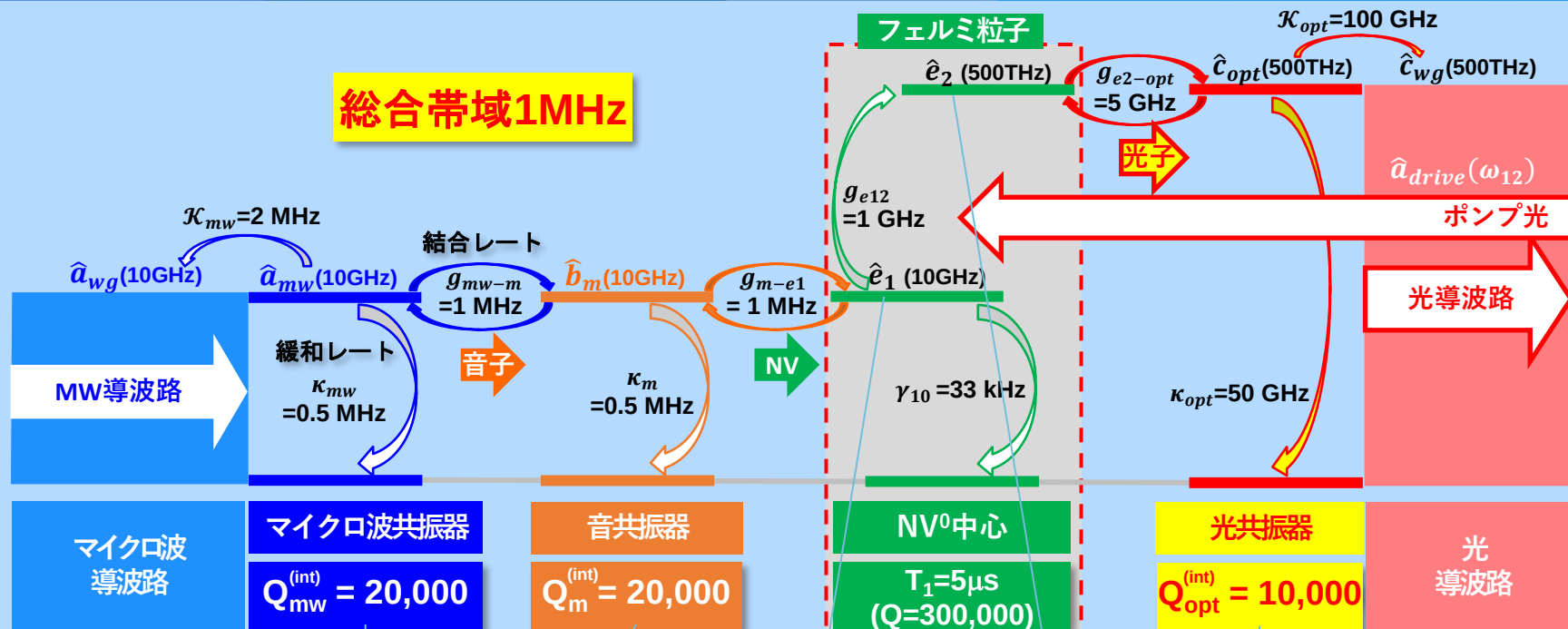


# 5. 進捗概要: 変換効率の見積もり



越野和樹 黒川穂高

総合帯域1MHz



NV<sup>0</sup>を介することで  
ポンプ光を~100光子に低減

変換効率

$$\eta = \frac{\kappa_{ex}^{in}}{\kappa_{tot}^{in}} \frac{4C_1C_2C_3C_4}{\{(1+C_1+C_2)(1+C_4)+C_3(1+C_1)\}^2} \frac{\kappa_{ex}^{out}}{\kappa_{tot}^{out}}$$

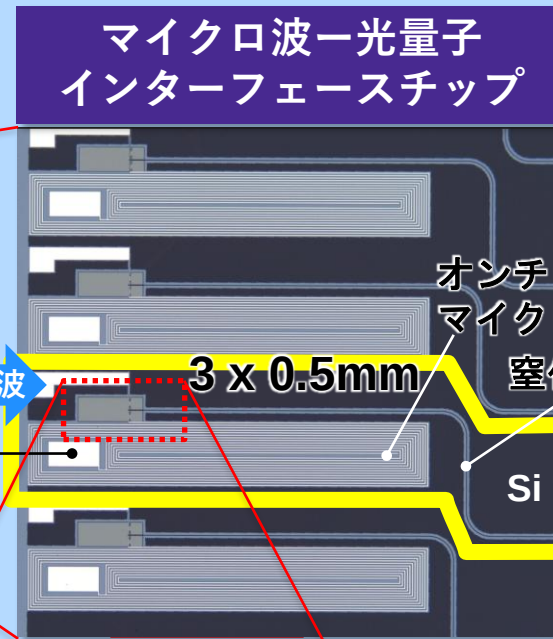
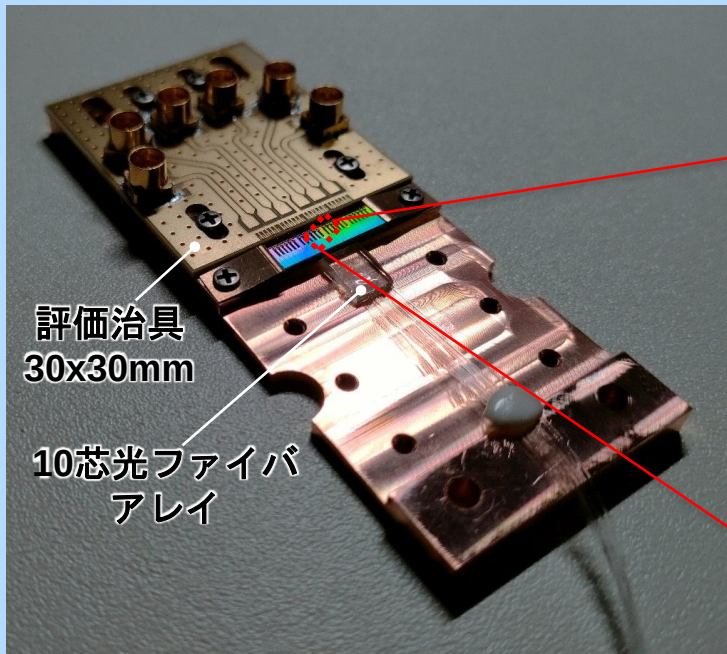
臨界条件  $(1+C_1+C_2)(1+C_4) = C_3(1+C_1)$

JC 模型  
+  
入出力理論

$$H_0 = \omega_{mw} a^\dagger a + \omega_m b^\dagger b + \omega_{e1} e_1^\dagger e_1 + \omega_{e2} e_2^\dagger e_2 + \omega_{opt} c^\dagger c$$

$$H_{int} = g_{mw-m}(a^\dagger b + b^\dagger a) + g_{m-e1}(b^\dagger e_1 + e_1^\dagger b) + g_{e2-opt}(e_2^\dagger c + c^\dagger e_2) + \langle a_{opt} \rangle g_{e12}(e_2^\dagger e_1 c + c^\dagger e_1^\dagger e_2) + \sqrt{\mathcal{K}_{mw}}(a^\dagger a_{wg} + a_{wg}^\dagger a) + \sqrt{\mathcal{K}_{opt}}(c^\dagger c_{wg} + c_{wg}^\dagger c)$$

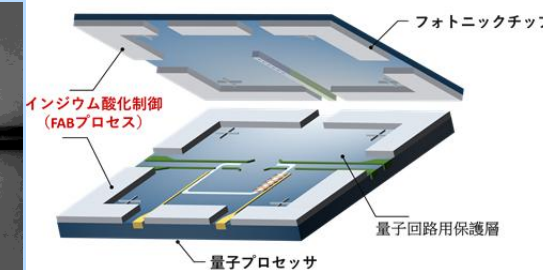
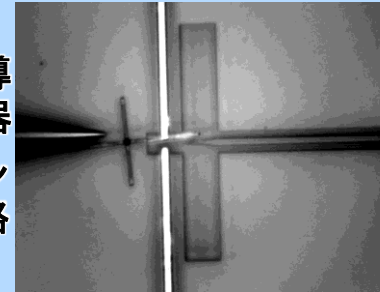
# 5. 進捗概要: 3次元ハイブリッド実装の開発状況



## 課題2. 実装精度

P&P 後のプローバー  
による調整精度 ~100nm

3Dチップレット集積プロセス開発  
(インジウムBEOL配線)

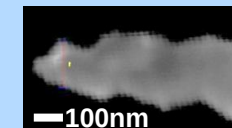
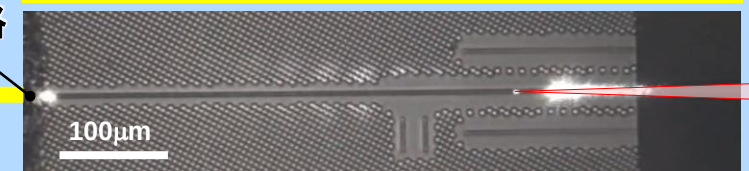


アライメント精度  $\pm 0.5 \mu\text{m}$  での3D集積

レーザ光  
変換光

## 課題3. 光結合損失

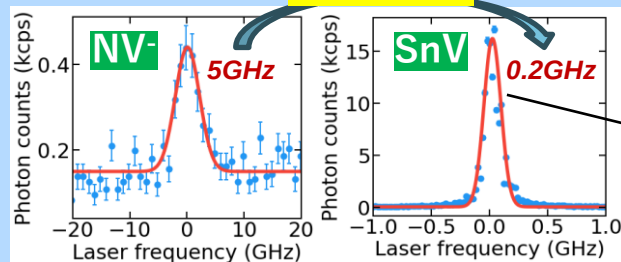
光導波路と光ファイバーの断熱結合



テーパ付き光ファイバーの開発  
(透過率90%が可能な設計)

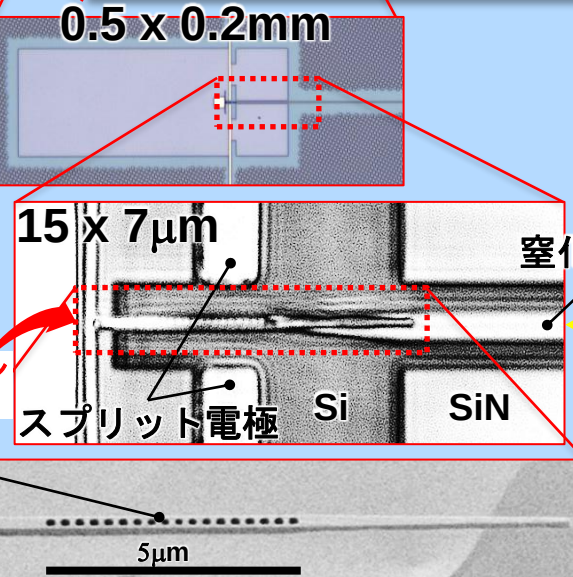
## 課題1. 色中心スペクトル揺らぎ

1/25に低減



強歪み・磁場が必要

転写プリン  
ティング



ダイヤモンド色中心ナノ共振器



# 5. 進捗概要: 課題と対策

## 課題4. 周波数整合

MW共振器と音共振器  
離調制御法

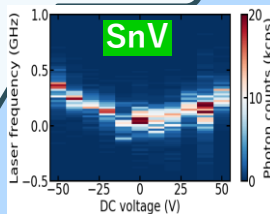
音共振器と色中心  
離調制御法

色中心と光共振器  
離調制御法

超伝導コイル  
による磁場印加  
~300MHz

スプリット電極  
による電界印加  
~1GHz

ガスライン  
によるガス吸着  
~2THz (~3nm)



## 結合部の構造

## 課題5. MW共振器と音共振器の結合強度

- ・ピエゾ結合方式: ~1 MHz (AlN30nm, Lk~500)
- ・静電結合・歪み結合: 計算中 (~0.4 MHz/100V @Si)

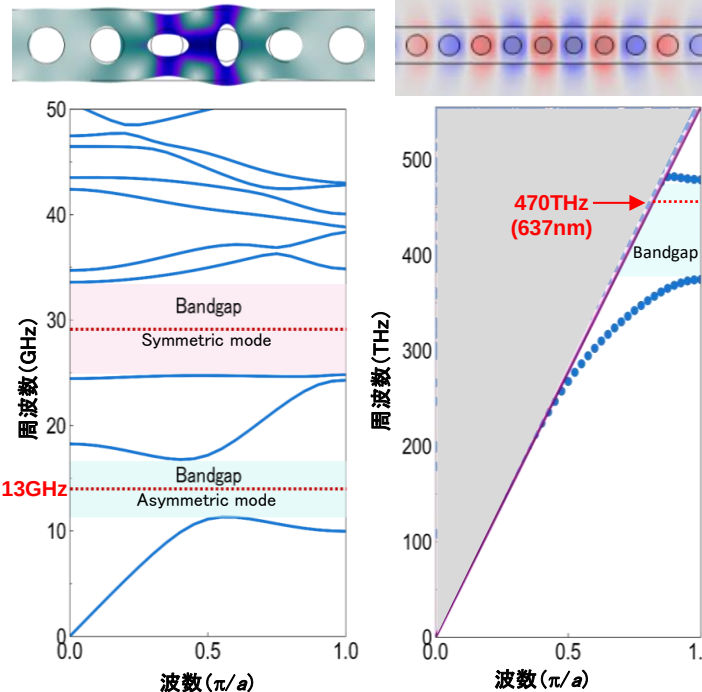
## 課題6. 音共振器と光共振器の両立

### Plan A

ダイヤモンド音光両立構造



フォノンニック結晶  $Q_m=30,000$       フォトニック結晶  $Q_p=6,200$



加工技術が向上し楕円等が可能になれば、Q値やピエゾ結合が大きいでSymmetricモードも利用可。

### Plan B

シリコン音光両立構造



### Plan C

LNバルクEO

(希釈冷凍機に導入可能な光モジュール)

LiNbO<sub>3</sub>光共振器

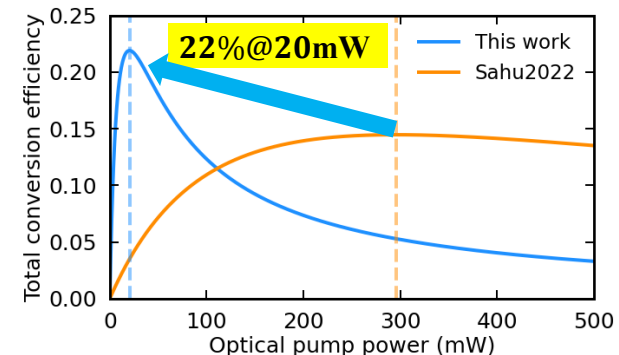
$Q>10^8$ @1550 nm

5mm

マイクロ波共振器

$Q>500$  @ 11 GHz

変換効率(推定値)のポンプパワー依存性



# 5. 進捗概要: 基盤技術開発

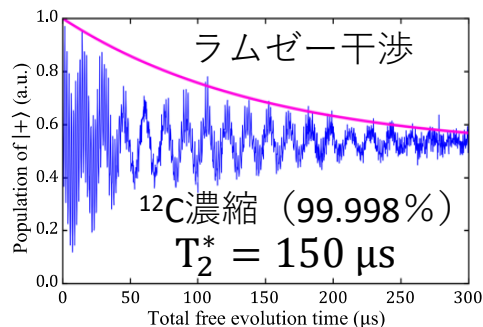
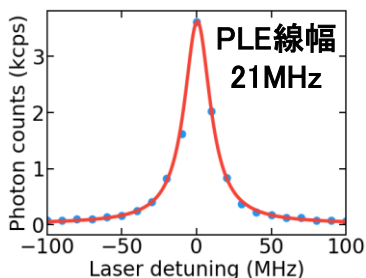
## 寺地PI (物材機構)



### 超高純度ダイヤモンドの製造技術開発

世界トップの品質  
電荷安定性

$^{12}\text{C}$ 同位体濃縮による  
長コヒーレント時間

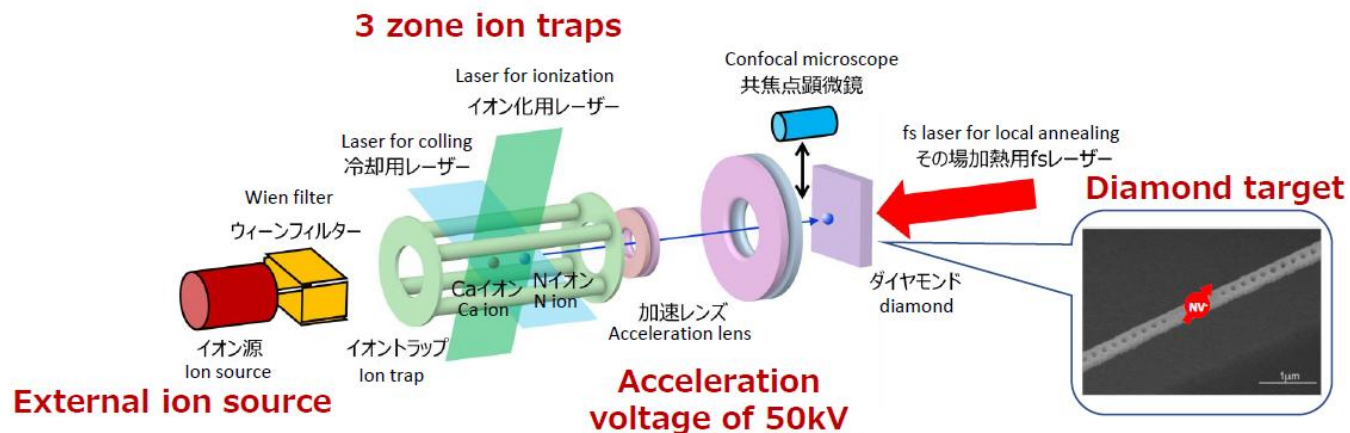


$T_2^*$ : 150 $\mu\text{s}$ 、 $T_2$ : 1.5ms達成

## 小野田PI (量研機構)



### レーザ冷却イオンビームによる高精度単一イオン注入装置の開発

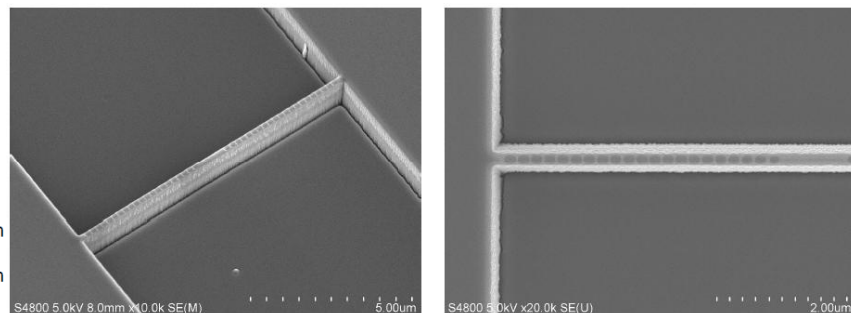


## 加藤PI (産総研)



### ダイヤモンドOMCの準量産化に向けた超精密加工技術開発

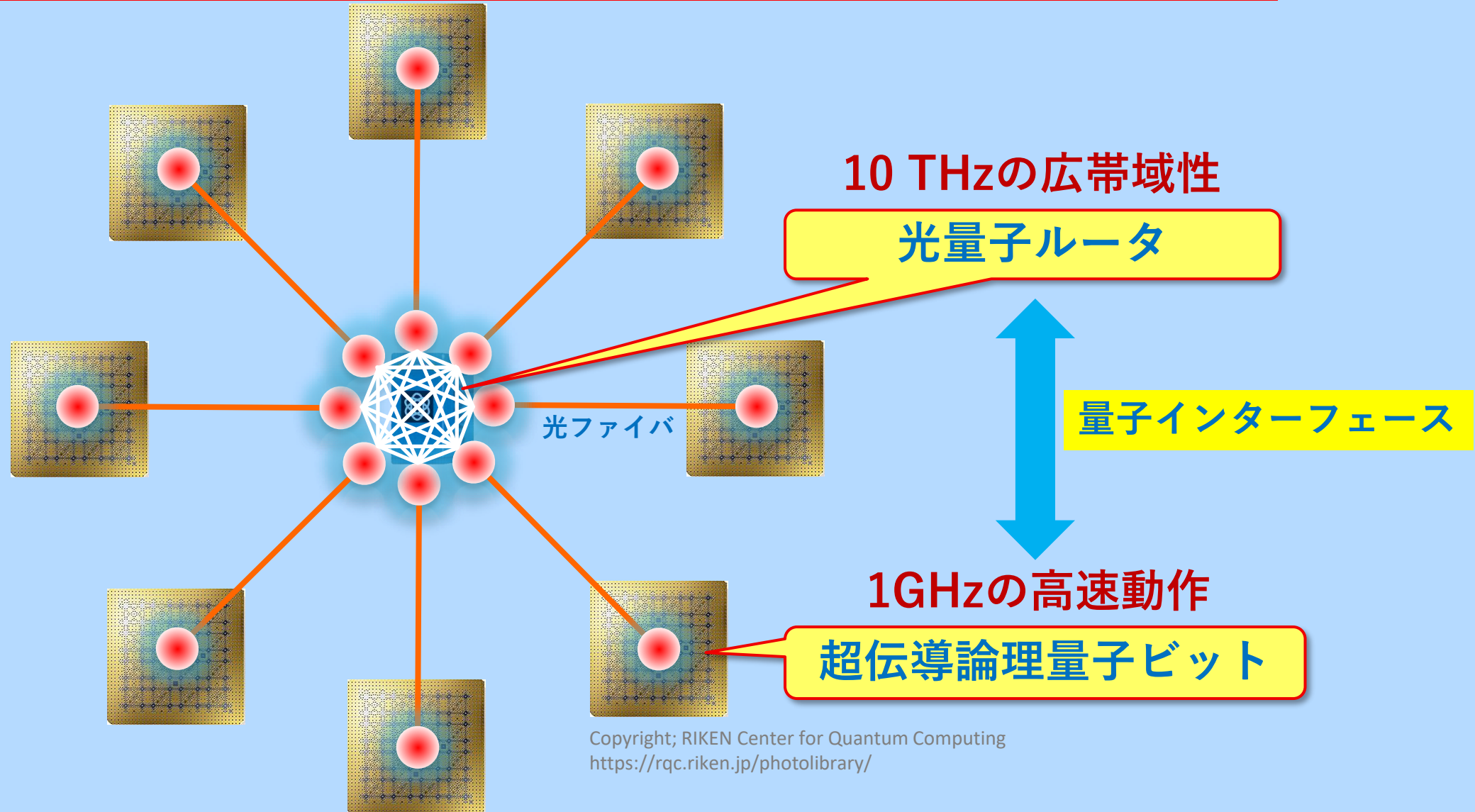
ドライエッチングによるナノ構造の転写



多くのQIH機関と  
連携したモノづくり

## 6. 今後の方針

### 超伝導-光量子ハイブリッド量子コンピュータの開発





# 6. 今後の方針

2030年

超伝導-光ハイブリッド  
量子コンピュータ

再構成可能な非局所接続で動的qLDPC符号を実現

2025年

マイクロ波-光量子接続

超伝導-光量子  
インターフェース

時間多重

QI QI QI QI QI

QI QI QI QI QI

超伝導  
量子ルータ

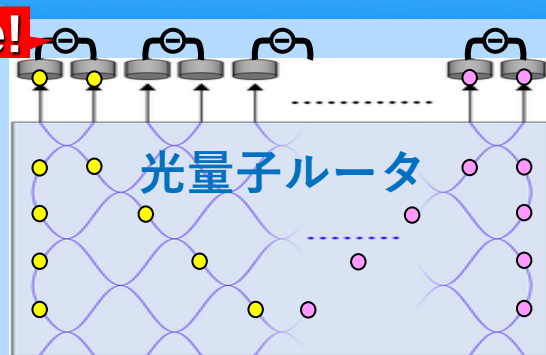
JSTから特許出願  
2025年2月

超伝導  
論理量子ビット

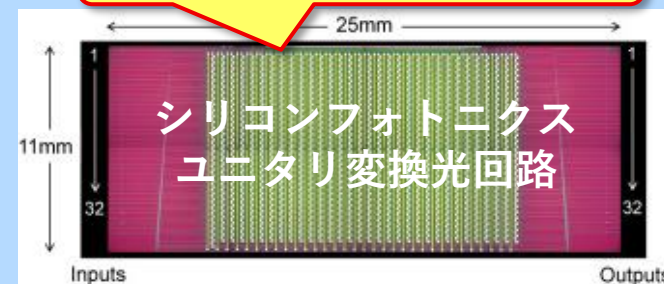
非局所  
二量子  
ゲート



Fire!



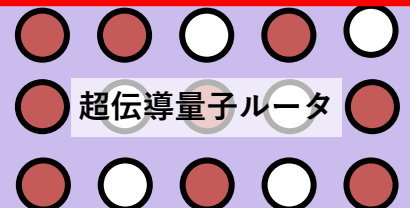
ボソンサンプリングにも利用可



32×32 strictly-non-blocking Si optical switch  
Optics Express, 23, 17599 (2015)

光ファイバ

シリコン光結合導波路



超伝導  
論理量子ビット



Copyright; RIKEN

# 7. マネージメント:量子情報研究センター



## 運営

### センター長



小坂英男

### 国際連携

#### 非常勤教員



Myalitsin Anton

### 国際広報

#### 非常勤教員



Volders Annelies

### 知財戦略

#### 客員研究員



熊澤金也

### 産学官連携

#### 産学官連携 コーディネーター



川崎恭正

### マネージメント

#### 助教



金野晃之

#### 助教



関口雄平

#### 助教



黒川穂高

#### 助教



上牧瑛

#### 助教



Abdul Nasir  
Kuzhiyan Thadathil

## 大学（国内）

### 教授



馬場俊彦

### 教授



吉川信行

### 教授



堀切智之

### 教授



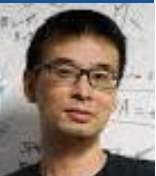
山梨裕希

### 教授



南野彰宏

### 准教授



赤松大輔

### 准教授



井上史大

### 准教授



島津佳弘

### 准教授



西島喜明

### 助教



金野晃之

### 助教



関口雄平

### 助教



黒川穂高

### 助教



上牧瑛

### 助教



Abdul Nasir  
Kuzhiyan Thadathil

## 国立研究所

### 客員教授



岩本敏



### 客員教授



野村政宏



### 客員准教授



越野和樹



### 客員教授



牧野俊晴



### 客員教授



寺地徳之



### 客員教授



加藤宙光



### 客員准教授



小野田忍



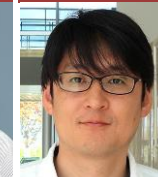
### 客員教授



寺井弘高



### 客員教授



三木茂人



### 客員研究員



佐々木遼



## 大学（海外）

### 招聘教授



Finley Jonathan



### 招聘教授



Jelezko Fedor



### 招聘教授



Mueller Kai



### 招聘教授



Becher Christoph



アドバイザーボード  
としての機能

## 民間企業

### 客員教授



味村裕



### 客員准教授



鯨岡真美子



## 連携協定



## 共同研究契約





# 7. マネージメント: 国際連携 (YNU国際ネットワーク拠点)

## Industry



連携協定締結中



MS6連携



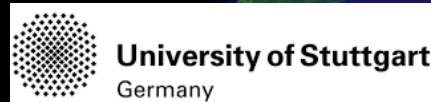
共同研究契約

TOSHIBA



## Academia

### ASPIRE Program (日独)



連携協定



MS6連携



連携協定



連携協定



連携協定



拠点長



ASPIRE連携



MS6連携



連携協定



MS6連携



連携協定



共同研究契約



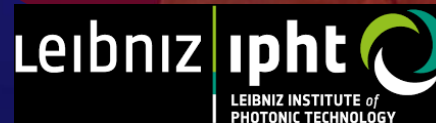
共同研究契約



招聘教員



共同研究



共同研究



共同研究

## Consortium



連携協定締結中



連携準備中

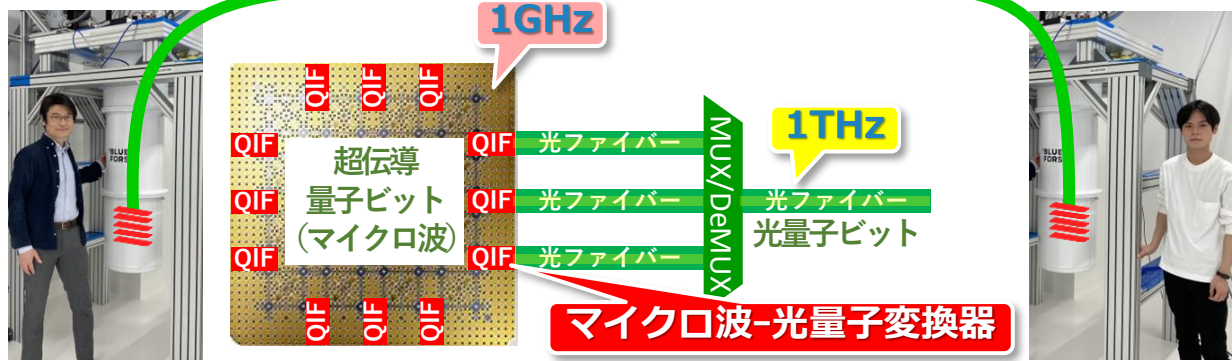




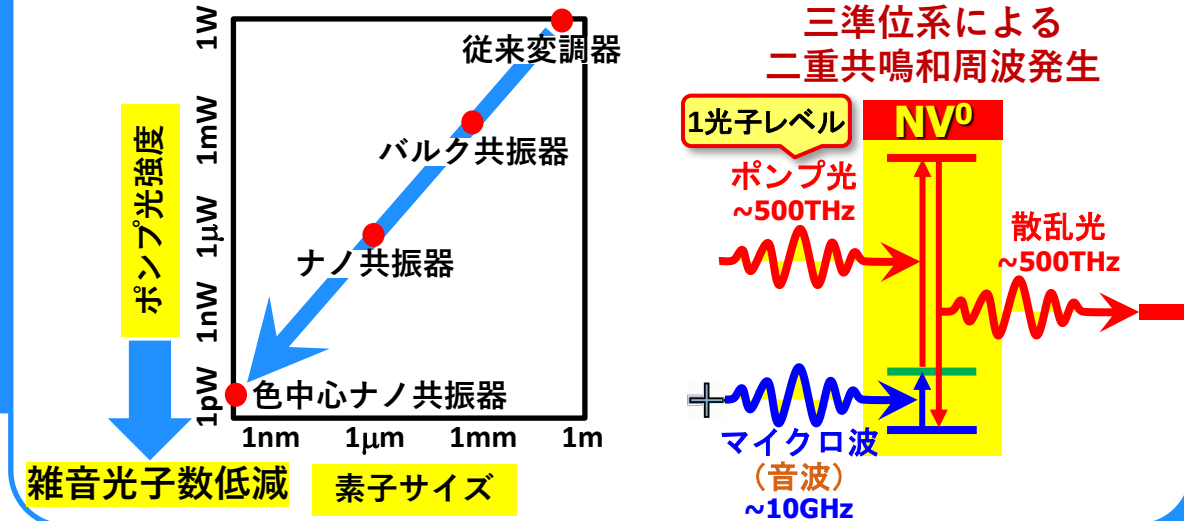
# 小坂PJ 原著論文（抜粋）

| 著者                       | 論文誌                                                 | Title                                                                                                                                                             |
|--------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Y. Sekiguchi, et al.     | <a href="#">Commun. Phys. 4, 264 (2021)</a>         | Geometric entanglement of a photon and spin qubits in diamond                                                                                                     |
| C. Shinei, et al.        | Appl. Phys. Lett. 119, 254001 (2021)                | Equilibrium charge state of NV centers in diamond                                                                                                                 |
| T. Kageura, et al.       | Carbon 192, 473 (2022)                              | Charge Stability of Shallow Single Nitrogen-Vacancy Centers in Lightly Boron-Doped Diamond                                                                        |
| T. Nakazato, et al.      | <a href="#">Commun. Phys. 5, 102 (2022)</a>         | Quantum error correction of spin quantum memories in diamond under a zero magnetic field                                                                          |
| R. Reyes, et al.         | Appl. Phys. Lett. 120, 194002 (2022)                | Complete Bell state measurement of diamond nuclear spins under a complete spatial symmetry at zero magnetic field                                                 |
| K. Kimura, et al.        | Appl. Phys. Express 15, 066501 (2022)               | Creation of multiple NV centers by phthalocyanine ion implantation                                                                                                |
| K. Ichikawa, et al.      | J. Appl. Phys. 132, 025302 (2022)                   | Propagation of dislocations in diamond (111) homoepitaxial layer                                                                                                  |
| N. Mikata, et al.        | Diamond Relat. Mater. 127, 109188 (2022)            | Effect of surface irregularities on diamond Schottky barrier diode with threading dislocations                                                                    |
| Y. Sekiguchi, et al.     | <a href="#">Nat. Photonics 16, 662 (2022)</a>       | Optically addressable universal holonomic quantum gates on diamond spins                                                                                          |
| Y. Shimazu and S. Ono    | Phys. Lett. A 452, 128444 (2022)                    | Strong temperature dependence of transfer characteristics and time constants near freezing point of ionic liquid in an ambipolar electric double layer transistor |
| H. Kurokawa, et al.      | <a href="#">Phys. Rev. Appl. 18, 064039 (2022)</a>  | Remote Entanglement of Superconducting Qubits via Solid-State Spin Quantum Memories                                                                               |
| C. Shinei, et al.        | J. Appl. Phys. 132, 214402 (2022)                   | Nitrogen related paramagnetic defects: Decoherence source of ensemble of NV- center                                                                               |
| Y. Narita, et al.        | <a href="#">Phys. Rev. Appl. 19, 024061 (2023)</a>  | Multiple tin-vacancy centers in diamond with nearly identical photon frequency and linewidth                                                                      |
| Y. Shimazu               | AIP Adv. 13, 035015 (2023)                          | Analysis of capacitance and charge accumulation for an electric double layer on porous electrode                                                                  |
| M. Haruyama, et al.      | Appl. Phys. Lett. 122, 141601 (2023)                | Charge stabilization of shallow nitrogen-vacancy centers using graphene/diamond junctions                                                                         |
| T. Teraji and C. Shinei  | J. Appl. Phys. 133, 165101 (2023)                   | Nitrogen-related point defects in homoepitaxial diamond (001) freestanding single crystals                                                                        |
| K. Sasaki, et al.        | Phys. Rev. A 107, 053113 (2023)                     | Demonstration of geometric diabatic control of quantum states                                                                                                     |
| Y. Ishii, et al.         | Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 541, 200 (2023) | Design of an apertureless two-stage acceleration lens for a single-ion implantation system                                                                        |
| K. Muroo, et al.         | Prog. Theor. Exp. Phys. 063G01 (2023)               | Simulation study of ultrahigh-precision single-ion extraction from a linear Paul trap                                                                             |
| N. Miyawaki, et al.      | Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 542, 183 (2023) | Calculation study of selective ion extraction from ion source with Paul-trap-type laser cooling device                                                            |
| S. Ito, et al.           | J. Phys. Soc. Jpn. 92, 084701 (2023)                | Optical-power-dependent Splitting of Magnetic Resonance in Nitrogen-vacancy Centers in Diamond                                                                    |
| A. Kunihiro, et al.      | IEEE Trans. Appl. Supercond. 33, 1701105 (2023)     | Pulse-Density-Modulated Microwave Generator Using Single-Flux-Quantum Circuits for Controlling Qubits                                                             |
| A. Chanuntranont, et al. | Appl. Phys. Express,16, 082006 (2023)               | Enhancing photon collection from single shallow nitrogen-vacancy centers in diamond nanopillars for quantum heterodyne measurements                               |
| Y. Shimazu, et al.       | AIP Adv. 13, 085321 (2023)                          | Tunneling spectroscopy of field-induced superconductivity in molybdenum disulfide using top metal contacts                                                        |
| A. Kamimaki, et al.      | <a href="#">npj Quantum Inf. 9, 101 (2023)</a>      | Deterministic Bell state measurement with a single quantum memory                                                                                                 |
| Byunggi Kim, et al.      | <a href="#">Phys. Rev. Appl. 20, 044037 (2023)</a>  | Diamond optomechanical cavity with a color center for coherent microwave-to-optical quantum interfaces                                                            |
| C. Shinei, et al.        | Diamond Relat. Mater. 140, 110523 (2023)            | Change in charge state of NV center caused by monovacancy formation                                                                                               |
| M. Yamamoto, et al.      | <a href="#">J. Appl. Phys. 134, 215104 (2023)</a>   | Low-Temperature Characteristics of an AlN/Diamond Surface Acoustic Wave Resonator                                                                                 |
| T. Teraji, et al.        | Philos. Trans. R. Soc. A 382, 20220322 (2023)       | Nitrogen concentration control during diamond growth for NV- centre formation                                                                                     |
| J. Liu, et al.           | IEEE Trans. Electron Devices 71, 1764 (2024)        | Suppression of High Threshold Voltage for Boron-Doped Diamond MOSFETs                                                                                             |
| J. W. Liu, et al.        | Appl. Phys. Lett. 124, 072103 (2024)                | Electrical property improvement for boron-doped diamond metal–oxide–semiconductor field-effect transistors                                                        |
| D. Y. M. Peng, et al.    | Phys. Rev. A 109, 023723 (2024)                     | All-optical determination of one or two emitters using polarization-enhanced photon correlations of nitrogen-vacancy centers in diamond                           |
| P. Wang, et al.          | <a href="#">Phys. Rev. Lett. 132, 073601 (2024)</a> | Transform-limited photon emission from a lead-vacancy center in diamond above 10 K                                                                                |
| T. Kageura, et al.       | ACS Appl. Mater. Interfaces 16, 13212 (2024)        | Spin-State Control of Shallow Single NV Centers in Hydrogen-Terminated Diamond                                                                                    |
| H. Kurokawa, et al.      | <a href="#">Nat. Commun. 15, 4039 (2024)</a>        | Coherent electric field control of orbital state of a neutral nitrogen-vacancy center                                                                             |
| M. Diego, et al.         | <a href="#">Phys. Rev. Appl. 21, 064064 (2024)</a>  | Piezoelectrically driven diamond phononic nanocavity by phonon-matching scheme for quantum applications                                                           |
| M. Diego, et al.         | ACS Nano 18, 18307 (2024)                           | Tailoring Phonon Dispersion of a Genetically Designed Nanophononic Metasurface                                                                                    |
| Jun Chen, et al.         | Diamond Relat. Mater. 148, 111476 (2024)            | Appearance of spectral dip in the cathodoluminescence spectrum of negatively charged nitrogen-vacancy centers in diamonds                                         |
| T. Baba, et al.          | Phys. Status Solidi A 2024, 2400303 (2024)          | Annealing Time Dependence on Creation of SiV, GeV, and SnV in Diamond by Atmospheric Annealing at 1800 °C                                                         |

## 研究目的：超伝導量子ビット間の光接続



## 研究の狙い：色中心ナノ共振器

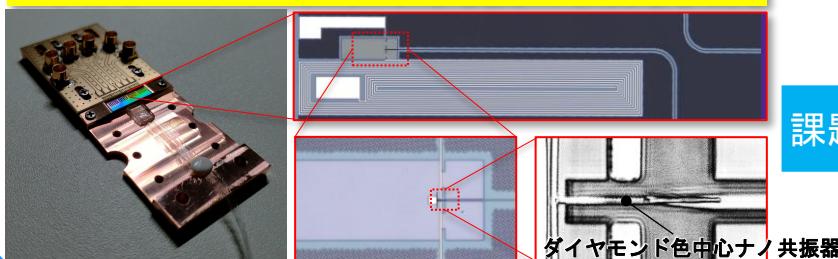


## 進捗概要：要素部品の開発状況と性能評価

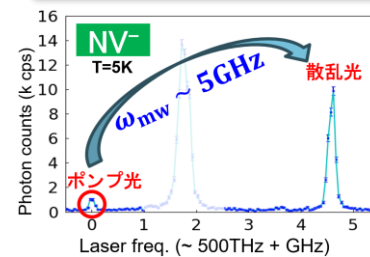
### 主要部品はほぼ完成



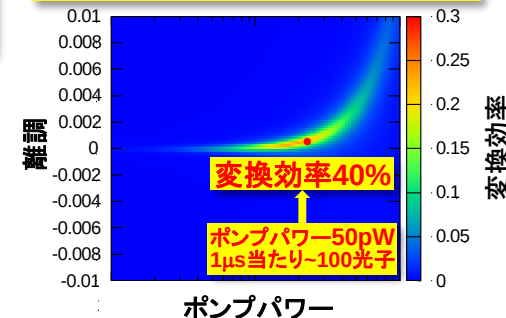
### 3次元ハイブリッド実装の開発状況



### 原理実証実験に成功



### 変換効率の見積もり



### 課題明確化

1. 色中心スペクトル揺らぎ
2. 実装精度
3. 光結合損失
4. 周波数整合
5. MW共振器と音共振器の結合強度
6. 音共振器と光共振器の両立

## 今後の方針：超伝導-光ハイブリッド量子計算機

