



## ムーンショット型研究開発事業 目標6

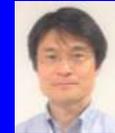
「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」

公開シンポジウム2024

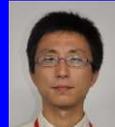
2024年3月27日

# 量子計算網構築のための量子インターフェース開発

PM：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



横浜国立大学、東京大学、東京医歯大、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、情報通信研究機構 他

MANUAL

体制・目標

研究概要

研究計画

研究進捗

# 量子ネットワーク小坂プロジェクト

PI 9名

ダイヤモンドナノ加工

設計・評価

ダイヤモンドフォトリソニック結晶

ダイヤモンドフォノニック結晶

ダイヤモンド結晶成長

ダイヤモンドイオン注入



寺地徳之  
小野田忍



加藤宙光



牧野俊晴



小坂英男



岩本敏



野村政宏



馬場俊彦

光結合回路

ダイヤモンド

光結合回路

マイクロ波共振器/制御回路

3次元ハイブリッド実装



三木茂人



寺井弘高

マイクロ波共振器



越野 和樹



井上史大



菊地 克弥  
(R6参加予定)



島津佳弘



吉川信行



光子検出器



マイクロ波制御回路

ダイヤモンドSAW



藤井智



理論



3次元実装



Tim Taminiau  
蘭 デルフト大  
2024年度より参加

# ムーンショット目標6

## 【ネットワーク小坂Pj】

3年目マイルストーン

量子光源・検出器



量子メモリ



5年目マイルストーン

量子インターフェース



10年目マイルストーン

量子ネットワーク

2050

大規模化を達成し、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現

2040

分散処理型NISQ量子コンピュータの実証  
量子誤り訂正下での有用タスク計算

2030

一定規模のNISQ量子コンピュータの開発と量子誤り訂正の有効性実証

**量子ネットワーク接続で量子コンピュータの分散処理を可能に**

### ネットワーク

量子メモリの開発、光子と量子メモリ間の量子インターフェイス技術の確立

### ハードウェア

量子誤り訂正システムの設計・実装、量子ビット・量子ゲート基盤の確立

### ソフトウェア

低オーバーヘッド量子誤り訂正符号や量子アルゴリズムの開発



小坂

量子光源・検出器

量子メモリ

量子インターフェース

量子ネットワーク

超伝導  
量子  
ビット

#### ステージゲート

適切で実現可能性のある物理系を見極める

光量子  
ビット

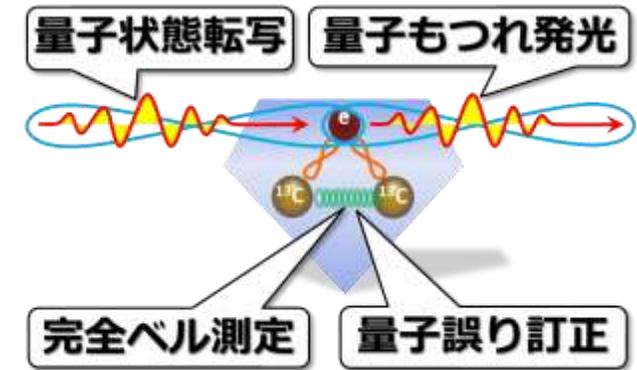
イオン  
トラップ

半導体  
量子  
ビット

関連する量子技術

# 3年目（2023）、5年目（2025）及び10年目（2030）のマイルストーン

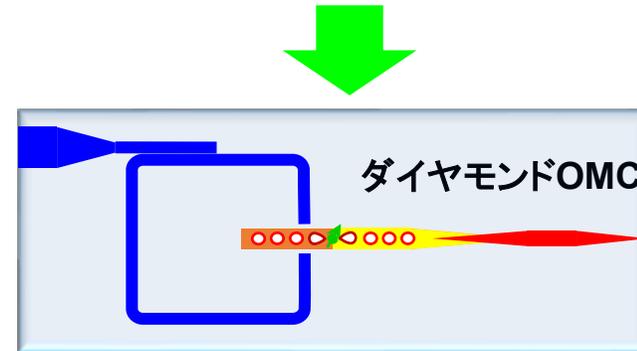
**3年目マイルストーン**：多数の量子ビットを接続させるための**ハイブリッド量子インターフェースの要素技術**を開発



目標値

量子ビットとして超伝導量子、シリコン、イオン、光量子を含む異種物理量子ビット間での量子接続が可能な**ダイヤモンド量子光源**、**誤り耐性万能量子ゲート操作**と**測定技術**の開発

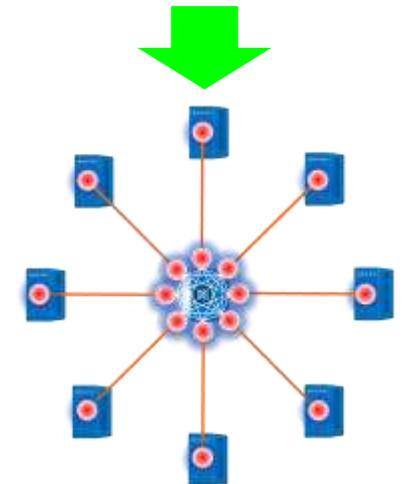
**5年目マイルストーン**：誤り訂正に必要な規模まで量子ビット数の拡張が可能であることを示すため、**ハイブリッド量子インターフェースによる量子接続**を実現



目標値

1. 通信用光子を介した**量子メモリ同士の量子的な結合**を実現
2. **フォトリック／フォノリック結晶（オプトメカニカル結晶）共振器**による光子／音子と量子メモリの結合の増強

**10年目マイルストーン**：ハイブリッド量子インターフェースと大容量量子メモリの実現により、**分散処理型量子コンピュータ**を可能とする**光接続技術**を確立



目標値

1. 量子インターフェースによる多数の**量子コンピュータ間の光接続技術**を確立
2. 量子メモリによる広帯域な**量子もつれ交換技術**を確立

# 量子コンピュータ間の光接続

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

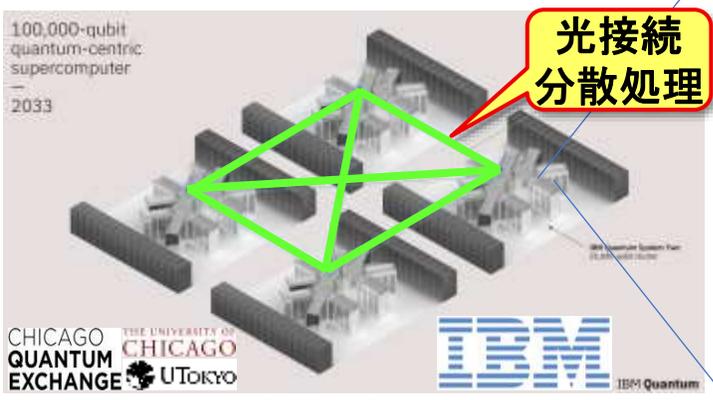
Wallraff ETH

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

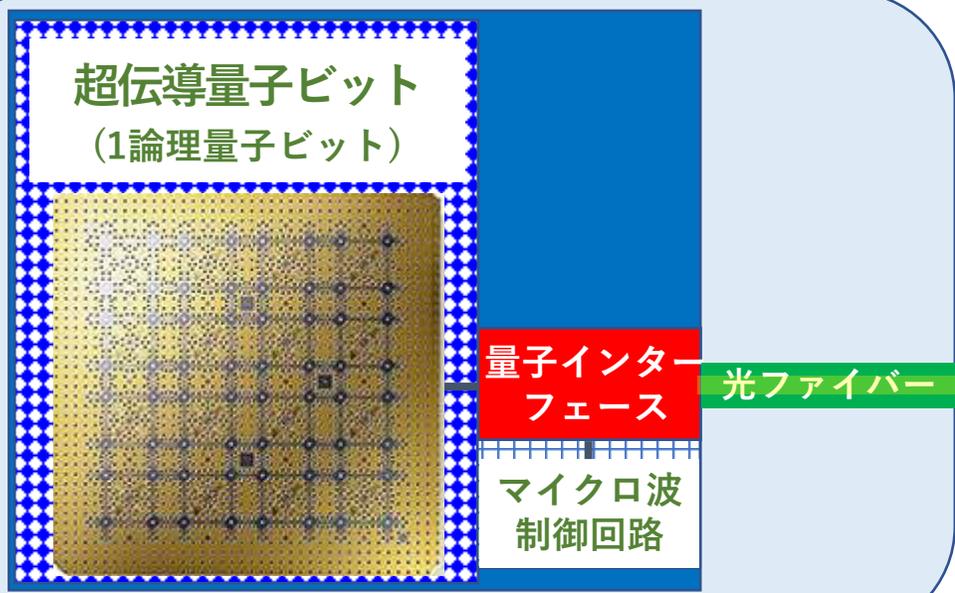
柔軟かつ高速な光接続を実現

超伝導量子コンピューター  
(IBM, Microsoft, AWS: 光接続)



光接続  
分散処理

希釈冷凍機 (~10mK)



Copyright; RIKEN Center for Quantum Computing

<https://rqc.riken.jp/photolibrary/>

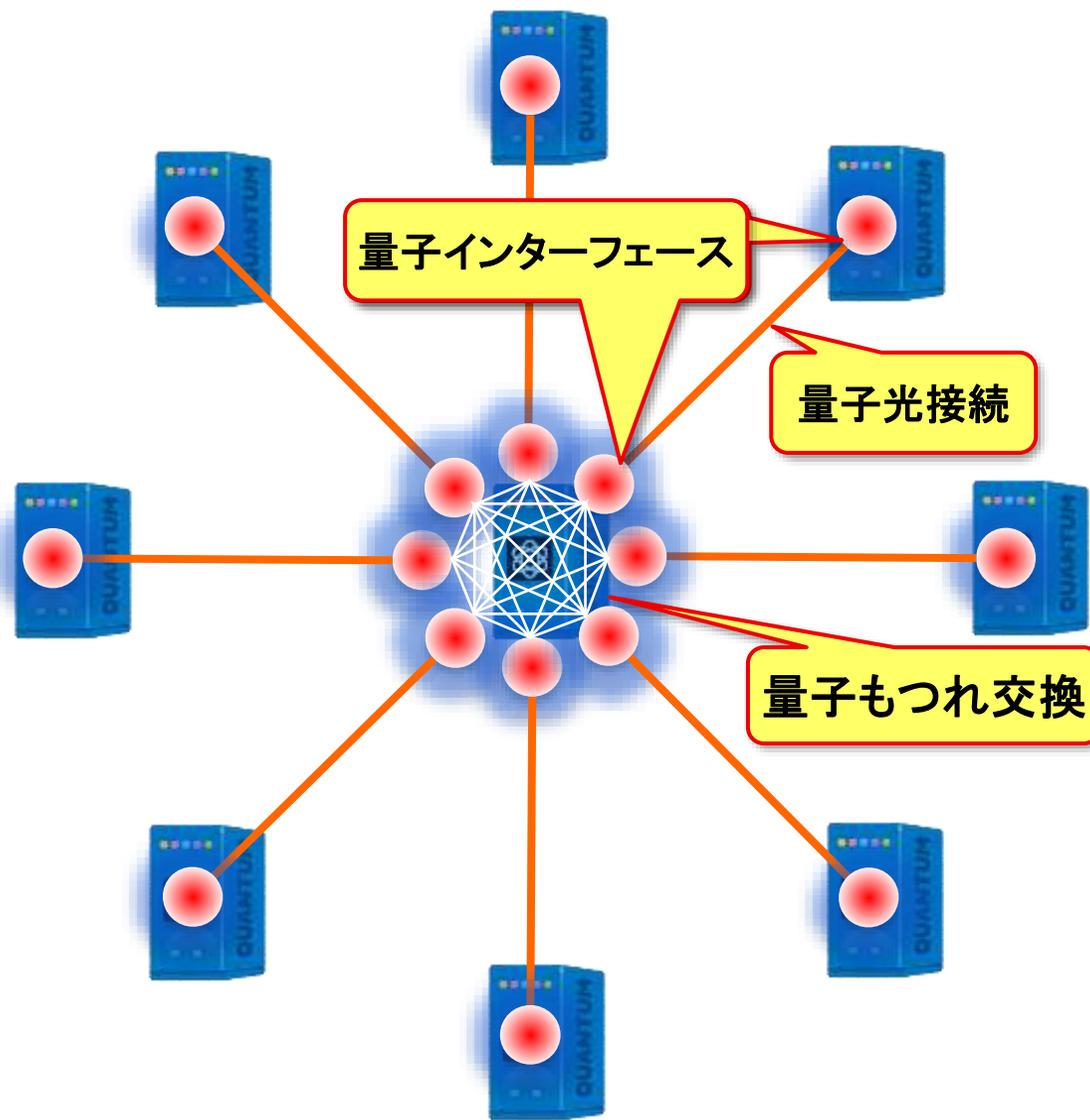


希釈冷凍機 (~10mK)

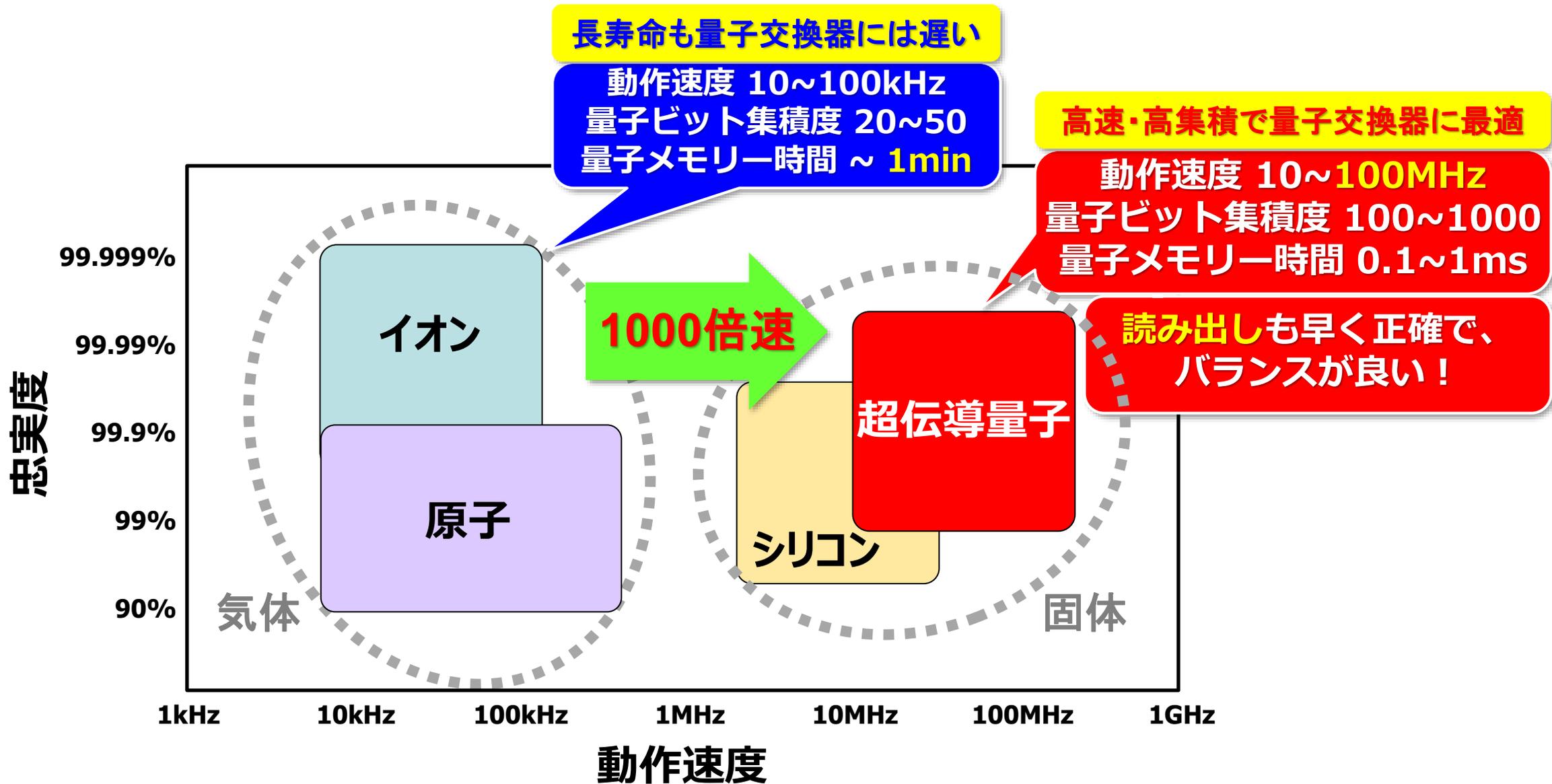
100,000-qubit quantum-centric supercomputer - 2033  
CHICAGO QUANTUM EXCHANGE THE UNIVERSITY OF CHICAGO UTOKYO IBM Quantum  
IBM HP: [newsroom.ibm.com/2023-05-21-IBM-Launches-100-Million-Partnership-with-Global-Universities-to-Develop-Novel-Technologies-Towards-a-100,000-Qubit-Quantum-Centric-Supercomputer](https://newsroom.ibm.com/2023-05-21-IBM-Launches-100-Million-Partnership-with-Global-Universities-to-Develop-Novel-Technologies-Towards-a-100,000-Qubit-Quantum-Centric-Supercomputer)

# 分散処理型量子コンピュータ

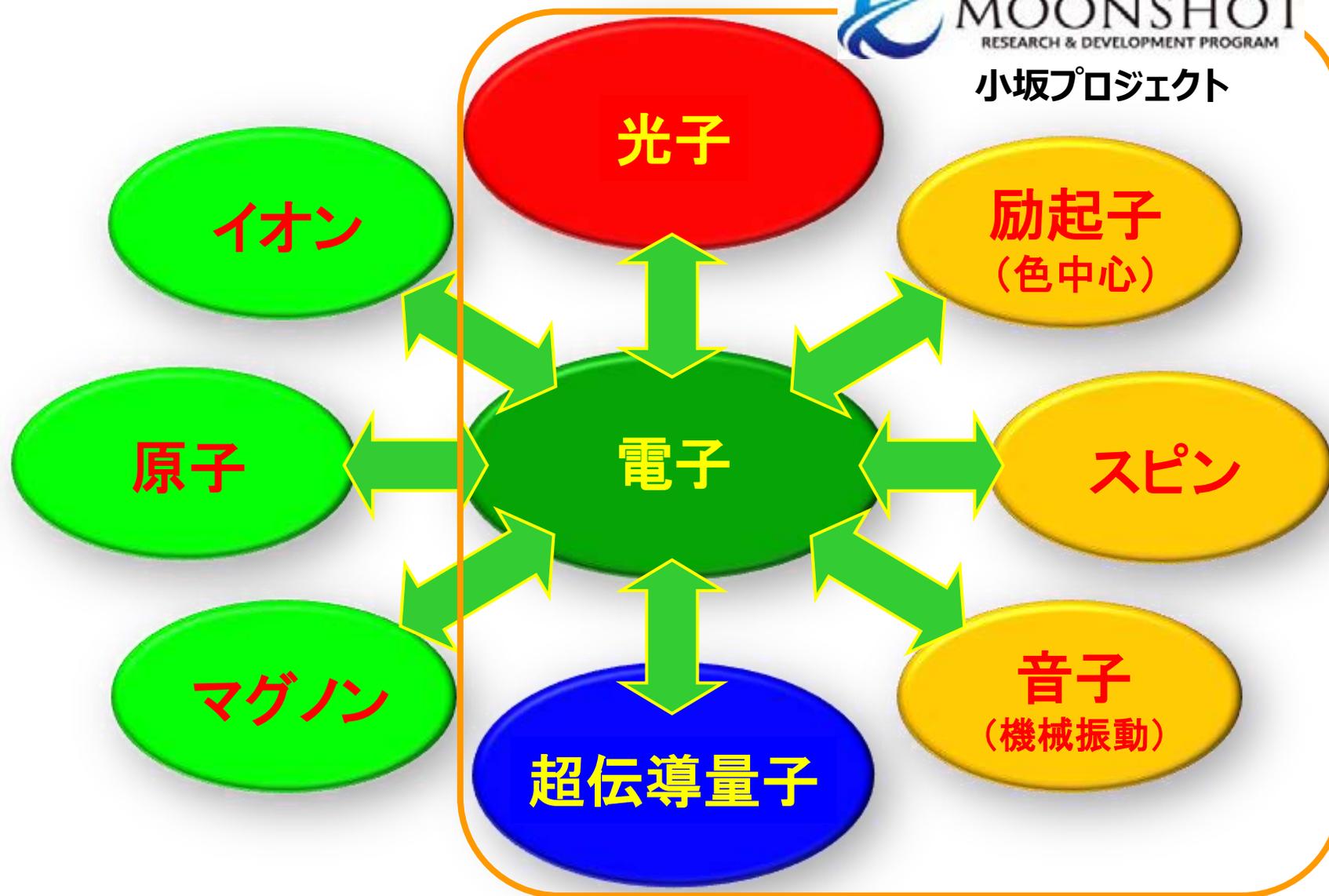
光接続することで分散処理された誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現



# 量子もつれ交換用の量子ビット



# 量子インターフェース原理 = 量子メディア変換



- 様々な量子メディアの間で量子変換
- 本Pjの目的：  
光子と超伝導量子を  
量子接続
- 電子だけでなく  
励起子・スピン・音子  
が重要な役割を果たす

# 量子インターフェースの進化

マイクロ波帯 (~10GHz) 光子  
から可視帯 (~500THz) 光子への  
量子周波数変換器

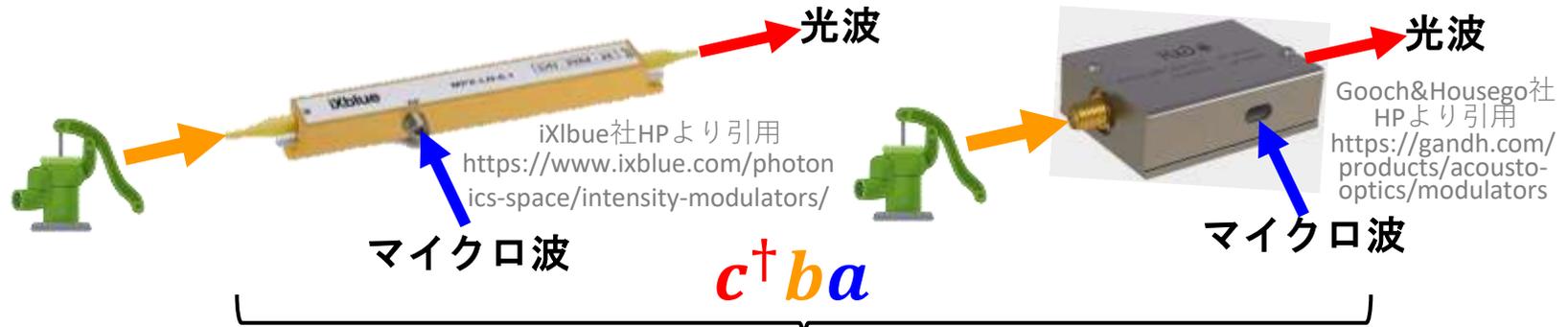
既存のEO・AO変調器は  
強いポンプ光で熱雑音が発生

マクロな共振器(EO/AO共振器)で  
ポンプ光を低減し熱雑音抑制

音波(機械振動)と光波の微小共振器  
オプトメカニカル結晶で  
ポンプ光をさらに低減

EO (電気光学) 変調器

AO (音響光学) 変調器

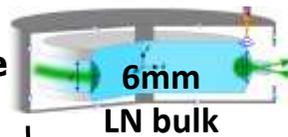


熱雑音発生

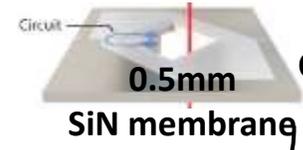
EO共振器

AO共振器

ISTA  
Heterodyne  
detection



A. Rueda, npj Quantum  
Information, 5, 108 (2019)



JILA  
Carrier freq.  
 $\omega_0 \sim 1\text{MHz}$

A. P. Higginbotham et. al.,  
Nature Physics, 14, 1038 (2018)

ポンプ光低減

オプトメカニカル結晶 (OMC)

マイクロ波  
光子



Mechanical / Optical wave

1μm

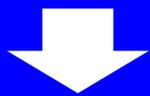
光学帯光子

# ダイヤモンドオプトメカニカル結晶

シリコンベースの  
オプトメカニカル結晶は  
熱雑音で忠実度が劣化

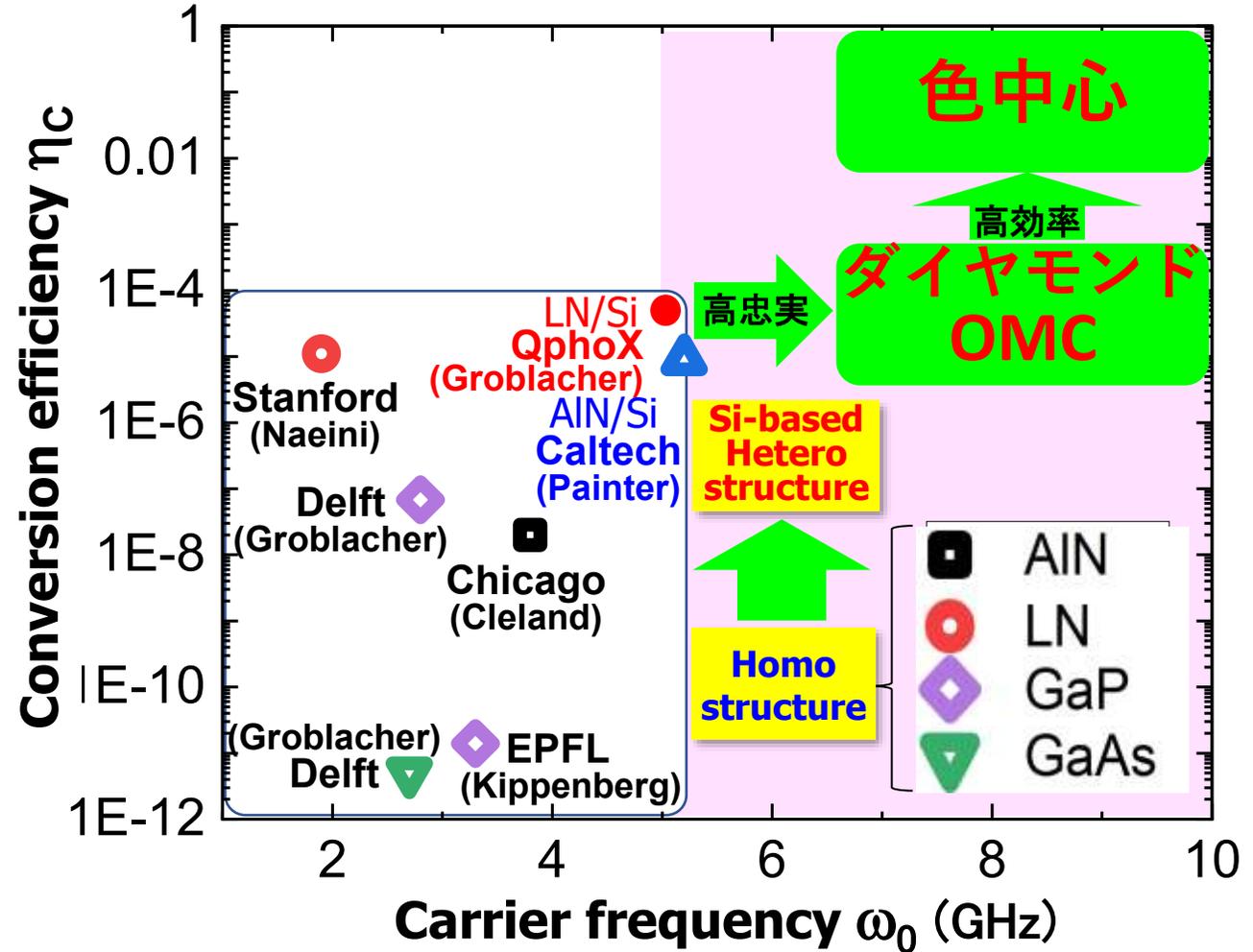


ダイヤモンドベースと  
することで熱雑音を抑制し  
高忠実化



色中心の導入により  
さらなる高効率化が可能

## 量子変換効率のキャリア周波数依存性



# ダイヤモンドの優位性

Siはキャリア周波数5GHz  
で熱雑音が1光子程度

ダイヤモンドは  
誘電損失 (電場振動が減衰)  
熱弾性 (機械振動が減衰)  
が低く高周波で動作

+

放熱性が高い (高音速)

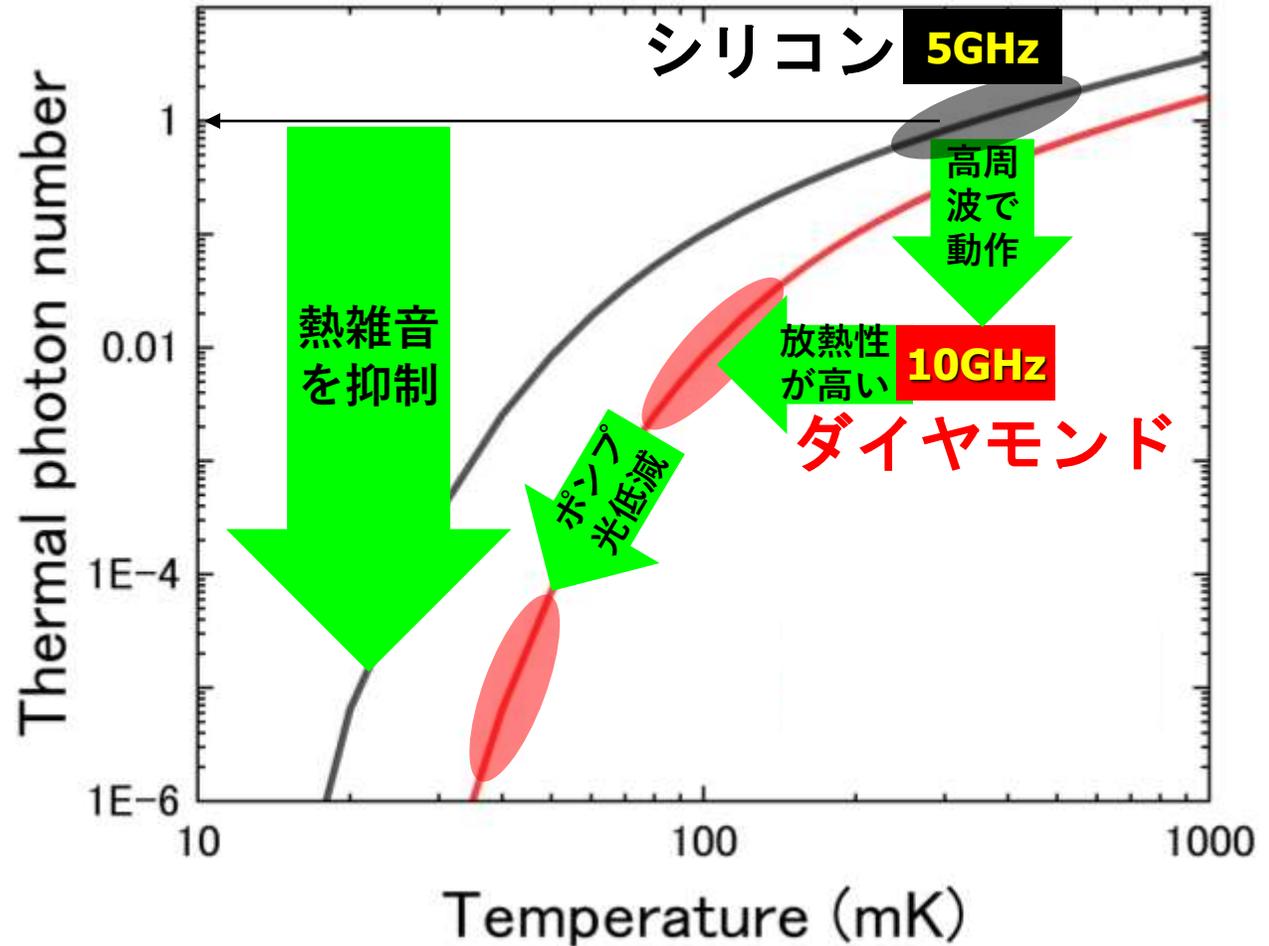
+

色中心でポンプ光が低減



熱雑音を抑制

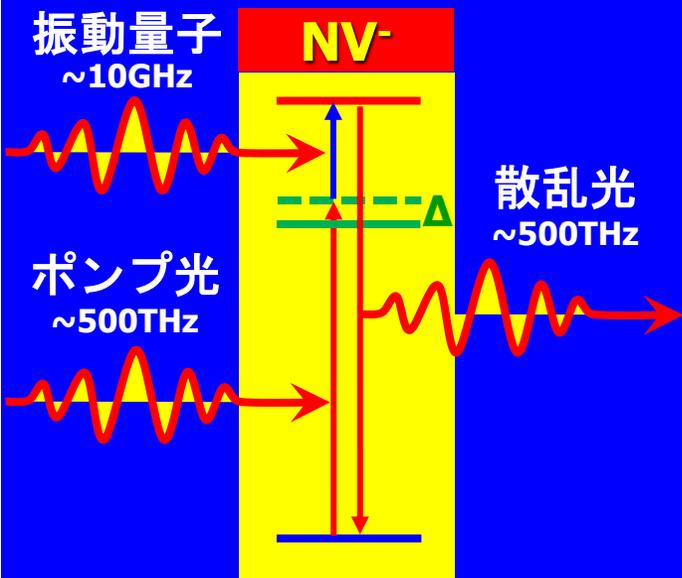
## 熱雑音光子の温度依存性



# ダイヤモンドオプトメカニカル結晶の先行例

さらに、

色中心は10GHz, 500THz  
で二重の電気双極子を有する



高效率量子変換

**Loncar (Harvard) NV-** B. J. M. Hausmann et al. Nano Lett. (2013)  
M. J. Burek et al., Optica 3, 1404 (2016)

Triangle cross-section nanobeam

Optical Q = 176,000 @ 1,529 nm  
Mechanical Q = 4,100 @ 5.5 GHz @RT

**S. Naeini J. Vuckvic (Stanford) NV-, SnV** J. Cady et al., Quantum Science and Technology 4, 024009 (2019).

Rectangular cross-section nanobeam (etched down method)

Optical Q = 42,000 @ 1,542 nm  
Mechanical Q = 118 @ 5.9 GHz @RT

**Loncar (Harvard) SiV, SnV** A. Siphahigil et al., Science (2016) triangle  
G. Joe et al., CLEO (2021) rectangle

Optomechanical crystal with implanted silicon vacancy center  
Diamond waveguide taper  
Rectangular cross-section nanobeam (Quasi-isotropic undercut etching)

Optical mode Mechanical mode

Optical Q = 15,000 @ 1,544 nm  
Mechanical Q = 440,000 @ 6 GHz @50 mK

**D. Englund (MIT) NV-, SiV, GeV** S. Mouradian et al., APL, 111, 021103 (2017)  
Wan et al., Nature(2020)

Silicon Photonic Integrated Circuit  
Diamond

Rectangular (undercut)

Theoretical  
S. Krastanov, PRL (2021)  
T. Neuman, npjQI (2021)  
H. Raniwala, Arxiv(2022)

Optical Q = 14,000 @ 637 nm (NV)

**Hanson/Groblacher (QuTech/QphoX)** APS meeting (2023)

Rectangular (undercut)

SnV 737 nm

# 研究開発計画

		12月 2021(R3) <small>プロジェクト年次</small> 11月	2022(R4)	2023(R5)	3年	2024(R6)	2025(R7)	5年
証 実		量子メモリ要素機能 原理実証	piezoelectric effect 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		ダイヤモンド オプトメカニカル結晶 共振器試作	3次元 ハイブリッド 実装	
		フォトニック結晶試作	フォトニック/フォノンニック 結晶同一構造試作					
		フォノンニック結晶設計						
		piezoelectric wave 共振器試作	piezoelectric microwave 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(20mK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					
基盤技術	ダイヤモンド精密微細加工技術開発	ダイヤモンド精密微細加工均一化・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						

# 3年目(2023年度)の各項目の進捗状況

## ・項目1 ダイヤモンド量子メモリ

【マイルストーン】量子もつれ光源、誤り耐性万能量子ゲート操作、量子もつれ測定技術の開発、  
レーザー照射ダイヤモンド色中心生成

【目標設定の理由】

【検証方法・評価方法】

量子もつれ光源90%以上の忠実度	→達成(98%)
量子ゲート操作99.7%以上の忠実度	→達成(99.97%)
完全ベル測定90%以上の忠実度	→達成(90%)
レーザー照射による単一NV中心生成	→達成
ピエゾ効果を利用したNVスピン操作	→達成

MS6NW目標に掲げられた量子光源・検出器、量子メモリの開発。量子インターフェースの構成要素として不可欠。

## ・項目2 オプトメカニカル結晶共振器

【マイルストーン】オプトメカニカル結晶の構造詳細設計、試作・評価

【検証方法・評価方法】

フォトリック/フォノリック結晶試作	→達成
NV中心劣化が顕著でないことを確認する評価	→達成
ダイヤモンドOMCと光ファイバー結合回路試作	→達成
転写プリンティングの基盤技術開発	→開始

MS6NW目標に掲げられた量子インターフェースのコア技術となるダイヤモンドオプトメカニカル結晶の開発。

## ・項目3 ピエゾマイクロ波共振器

【マイルストーン】ピエゾマイクロ波共振器構造詳細設計、試作・評価

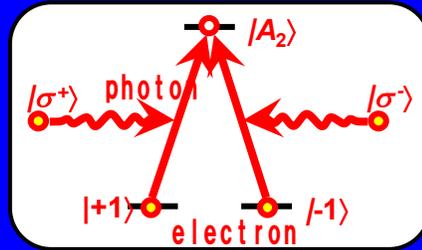
【検証方法・評価方法】

ピエゾマイクロ波共振器の試作・評価	→達成
音子-スピン-光子間の量子メディア変換	→達成
5 K動作量子制御電子集積回路設計	→達成

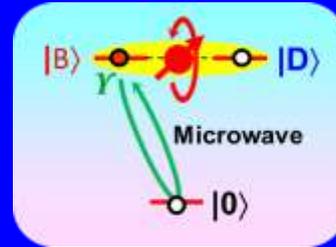
MS6NW目標に掲げられた量子インターフェースのコア技術となるピエゾマイクロ波共振の開発。

# ダイヤモンドNV中心による量子もつれ交換

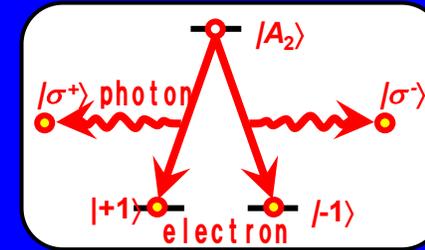
## ゼロ磁場における誤り耐性のある幾何学的スピン量子ビット



Physical Review Letters, 114, 053603 (2015)



Nature Communications, 7, 11668 (2016)



Communications Physics, 4, 264 (2021)

量子状態転写

94%

誤り耐性型量子ゲート

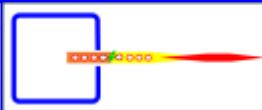
99.97%

量子もつれ発光

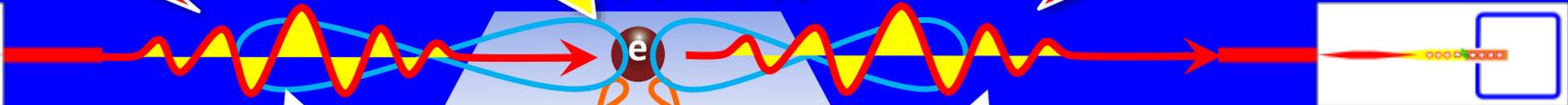
98%



超伝導量子ビット



量子インターフェース



量子インターフェース



超伝導量子ビット

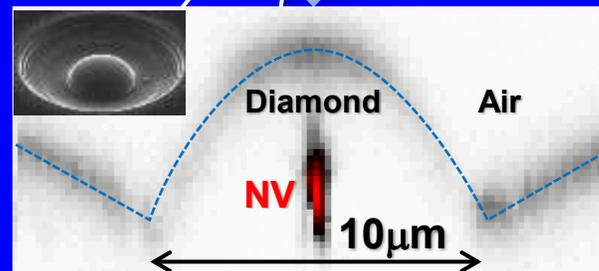
量子もつれ交換

~70%(Preliminary)

初期化と読み出し

99.7%

Appl. Phys. Lett. 120, 194002 (2022)

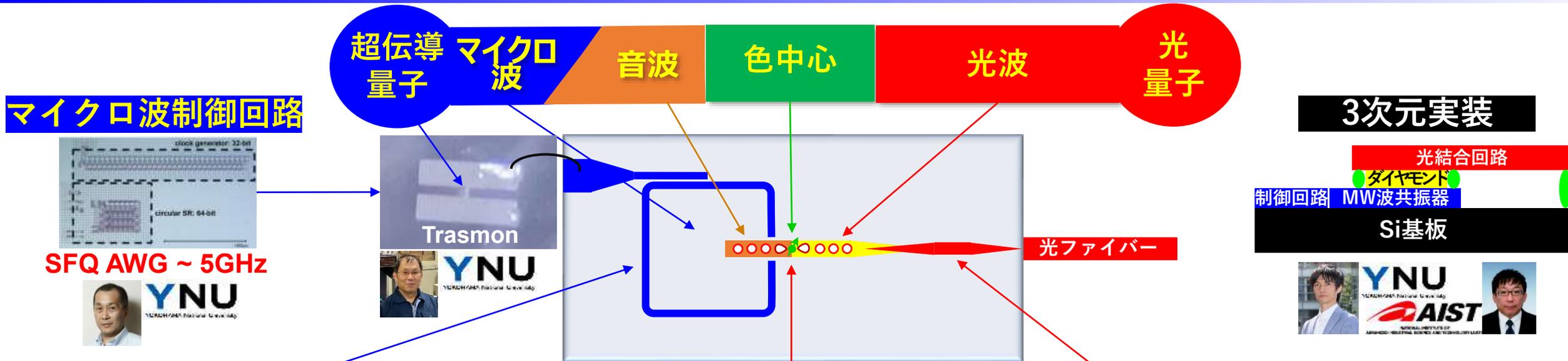


量子誤り訂正

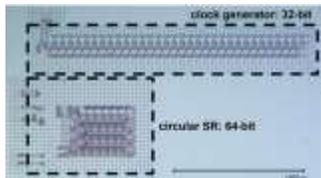
83%

Communications Physics, 5, 102 (2022)

# 量子インターフェース開発の全体進捗概要



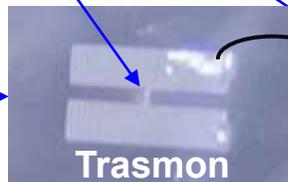
## マイクロ波制御回路



SFQ AWG ~ 5GHz



## 超伝導量子



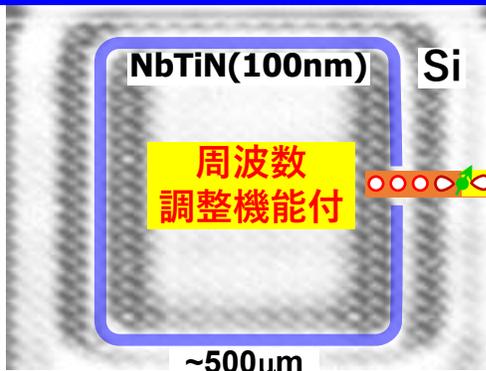
## 音波

## 色中心

## 光波

## 光子

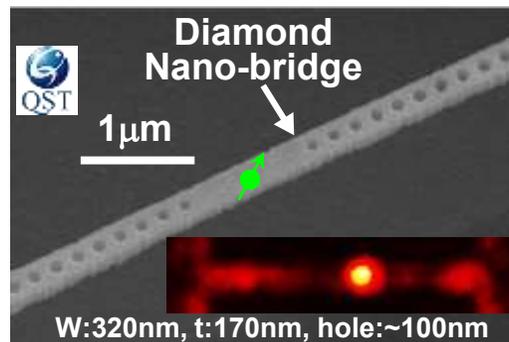
## マイクロ波共振器



$Q_{MW} = 80,000 @ 8GHz (5\% \text{ 可変}), 15mK$



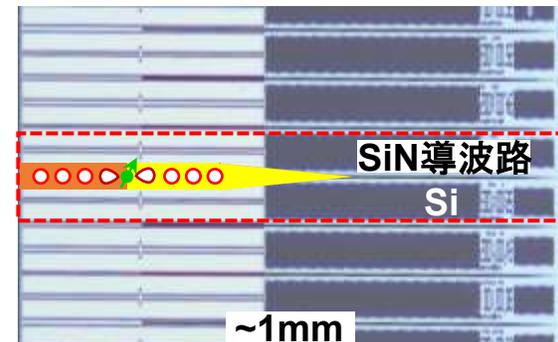
## ダイヤモンドオプトメカニカル結晶



$Q_{opt} = 200 @ RT$



## 光結合回路



Coupling Loss < 1dB (評価中)



# マイクロ波共振器

✓ NbTiNナノワイヤーで  
マイクロ波共振器作製

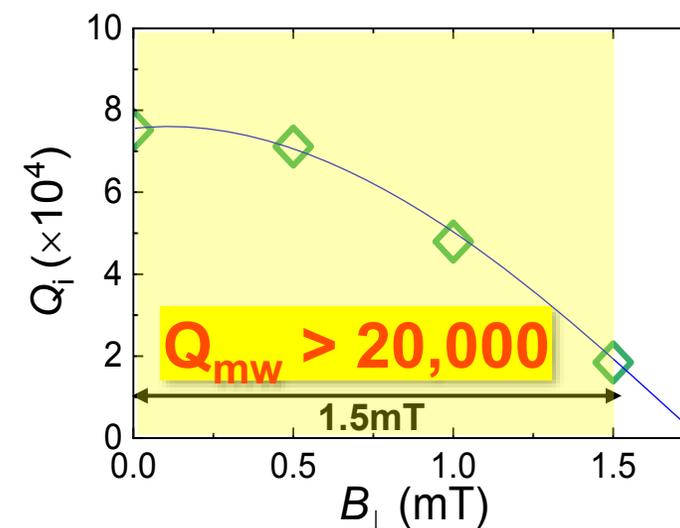
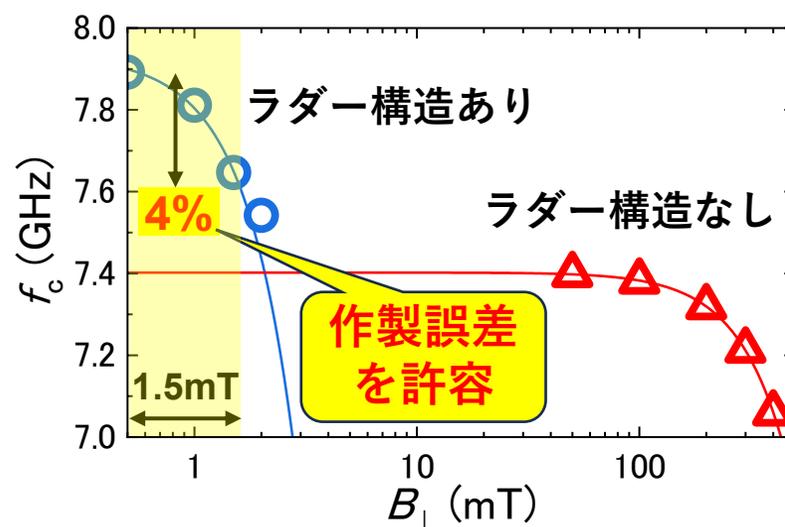
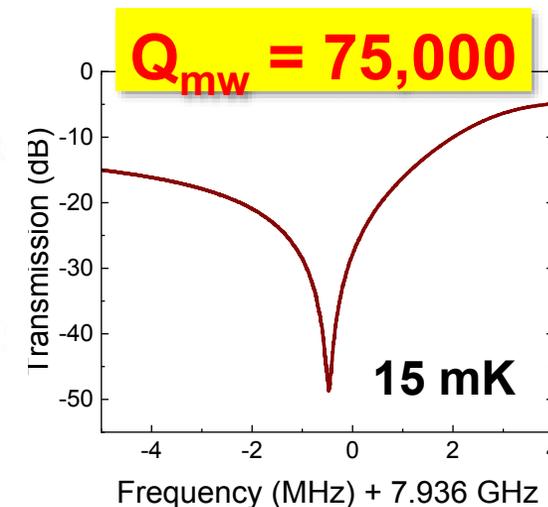
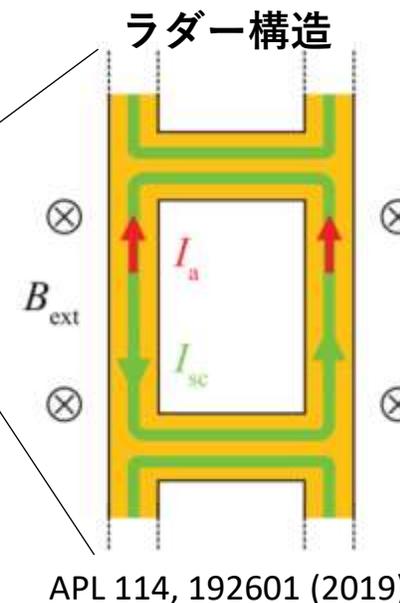
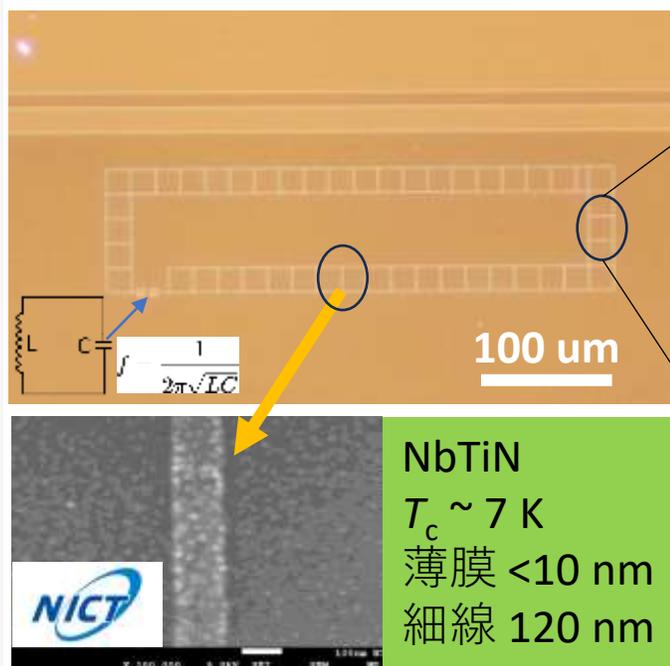
✓ 高インダクタンスLで  
OMCに高電圧を印加

$$V_{zpf} \propto \sqrt{Z} \propto \sqrt{\frac{L}{C}} \sim 20 \mu\text{V}$$

✓ 機械Q値7.5万を  
15mKで実現

✓ ラダー構造への  
磁束侵入で電流増加

✓ 4%(0.3GHz)の周波数  
可変かつQ値2万以上を  
1.5mTの低磁場で実現



# ダイヤモンドオプトメカニカル結晶

ダイヤモンド  
オプトメカニカル  
結晶の試作に成功



中央部のNVからの  
発光を観測



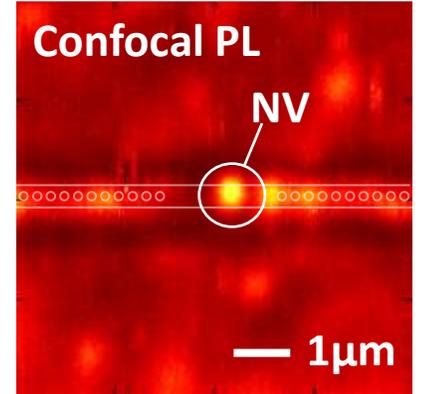
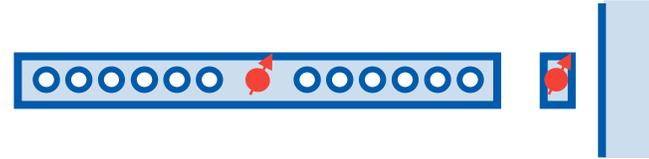
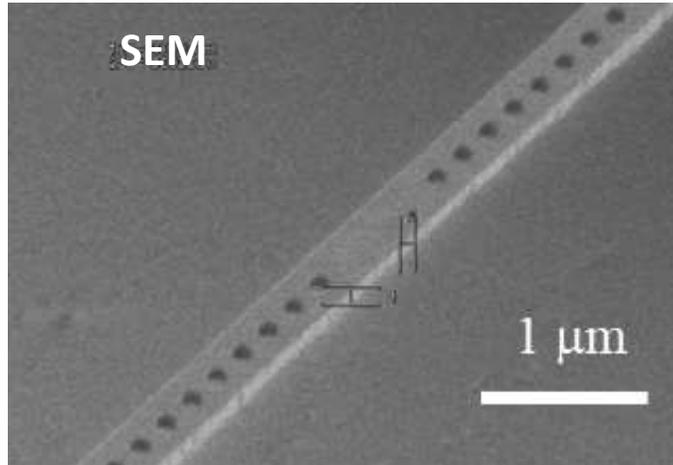
光Q値400を実現



NV発光を10倍増強



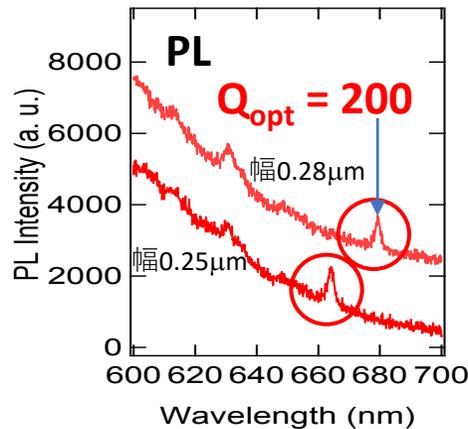
裏面エッチング前  
はNV発光の線幅  
劣化は顕著でない



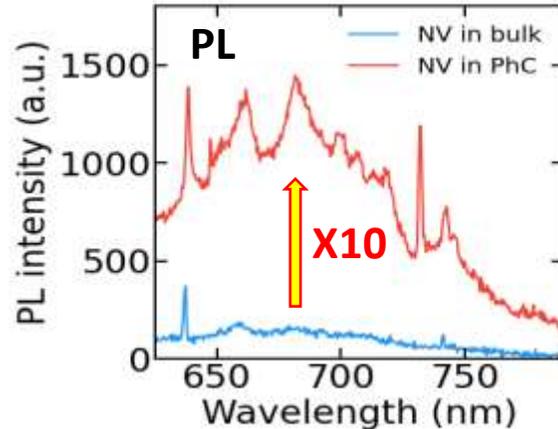
光共振器のQ値  
400を実現

NV中心からの発光  
10倍増強

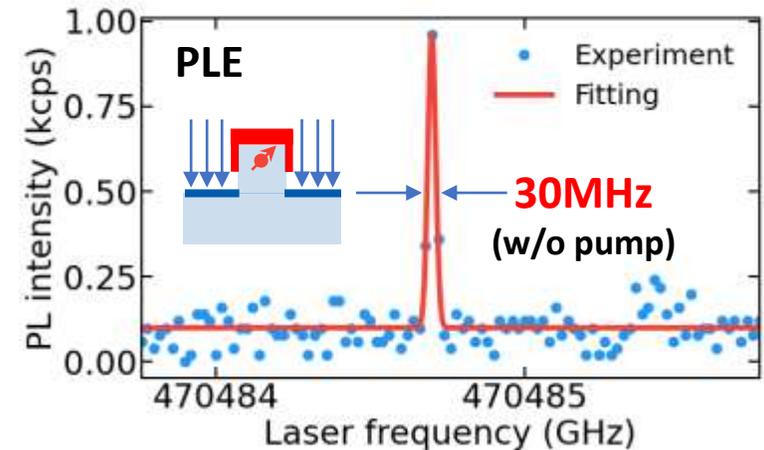
裏面エッチング前はNV発光  
線幅劣化はない



NV波長合わせ必要



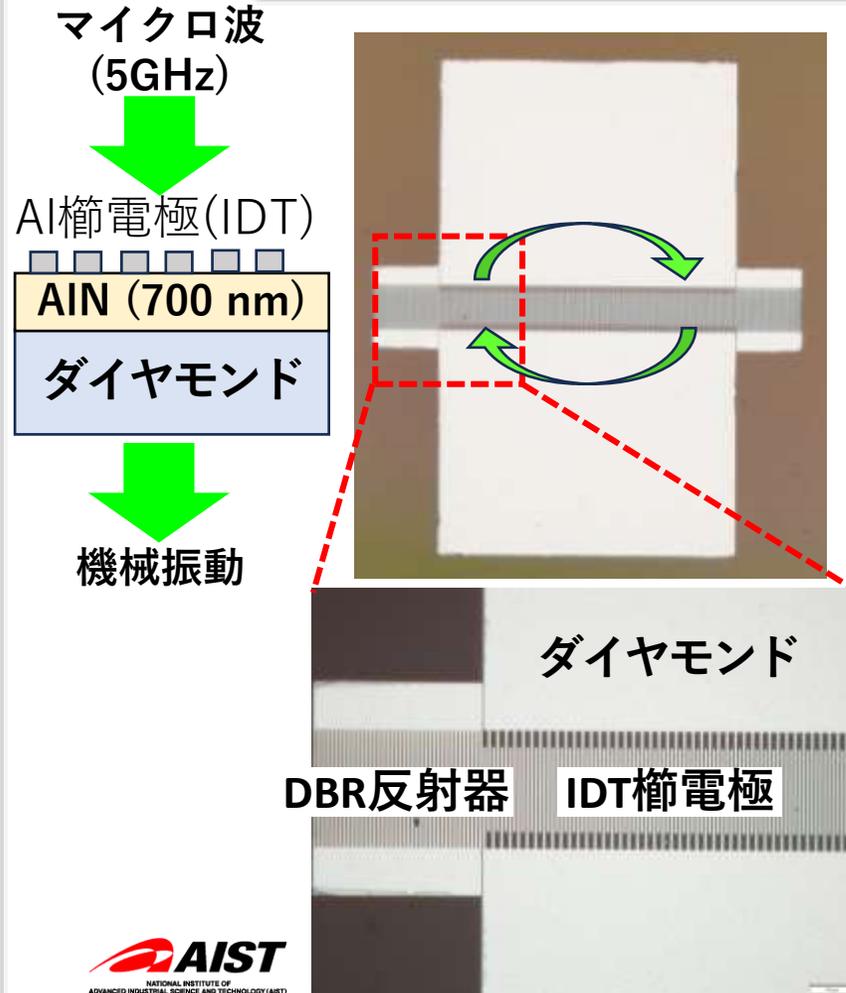
NV位置・偏光合わせ必要



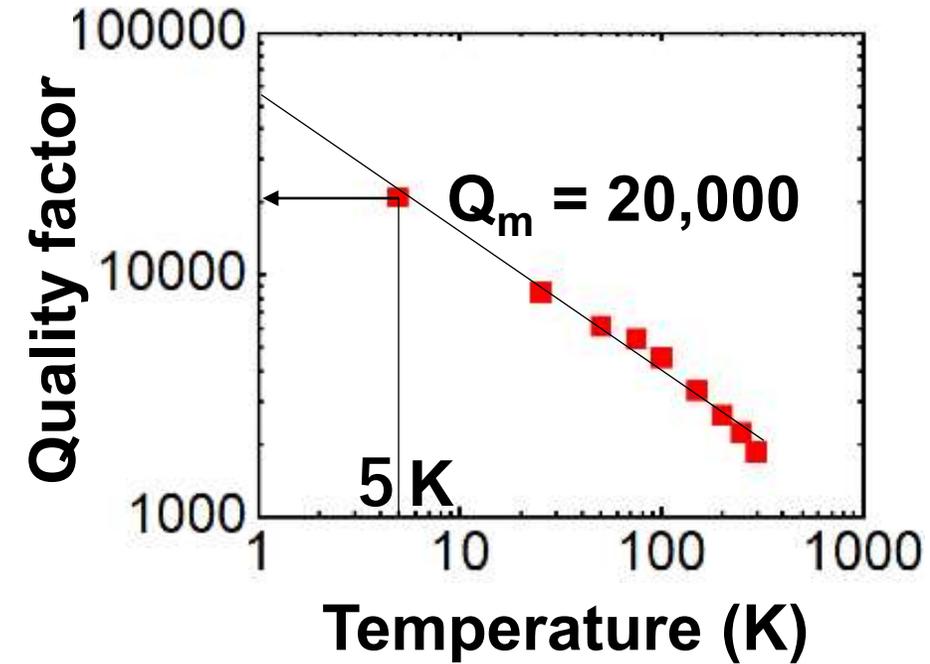
裏面エッチングの工夫必要 19

# ダイヤモンドピエゾ共振器

## ダイヤモンド機械共振器



## 機械共振器のQ値20,000実現



圧電材料 (AIN) で  
マイクロ波電場を  
機械振動 (音波) に変換



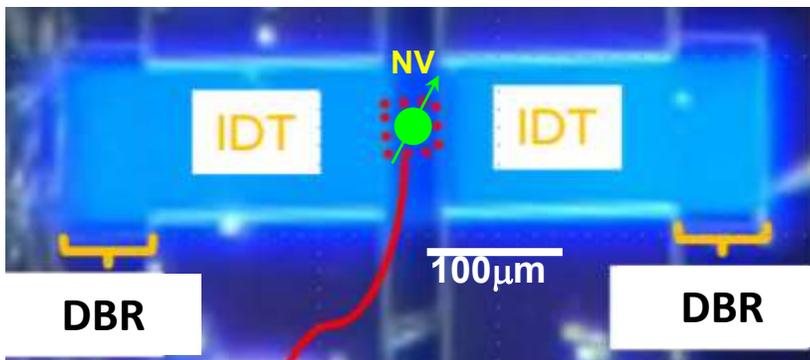
機械共振器を  
ダイヤモンドで作製



5Kで機械Q値2万  
を実現

# ピエゾ効果を利用したNV量子操作

## ダイヤモンド機械共振器



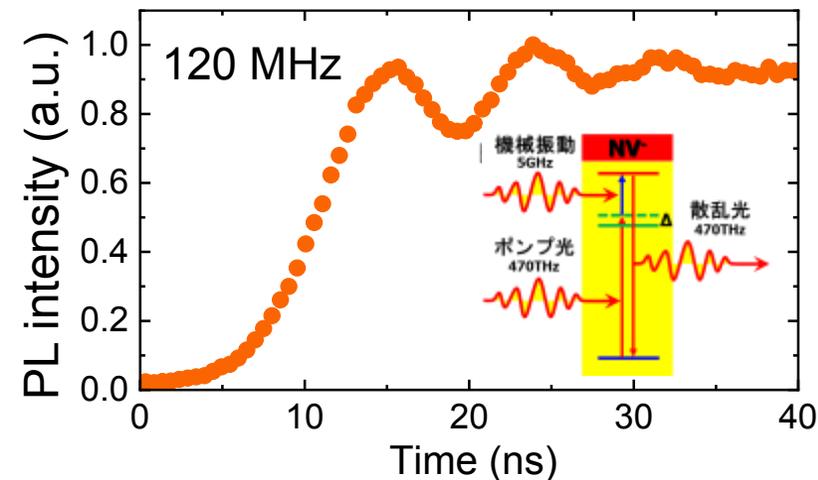
AIST  
NATIONAL INSTITUTE OF  
ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

- ✓ 機械振動（5GHzの音波）でNV-を駆動し  
フォノンサイドバンドラビ振動を観測
- ✓ 機械振動の位相変調で干渉を観測

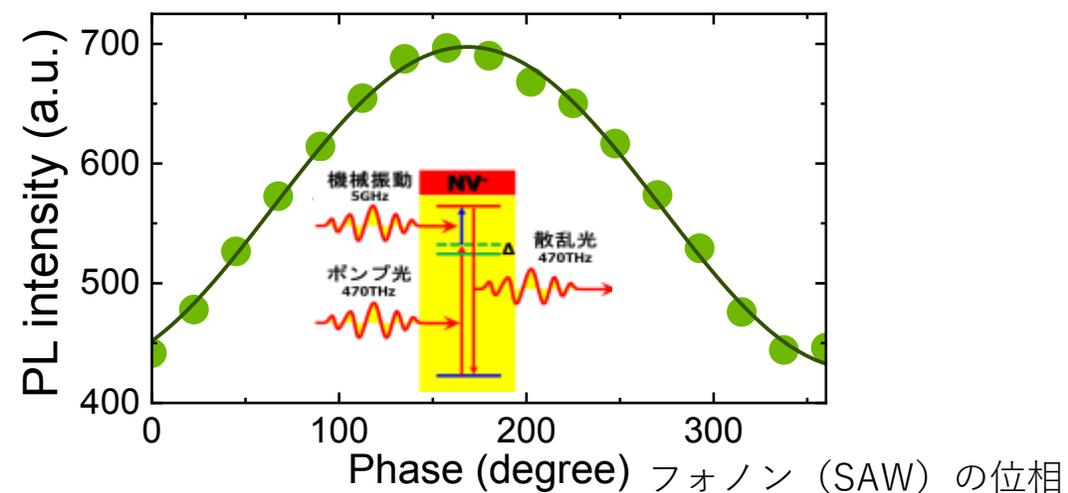


ピエゾ効果を利用した  
マイクロ波帯(5GHz)の機械振動による  
NVスピンのコヒーレントな量子操作を実現

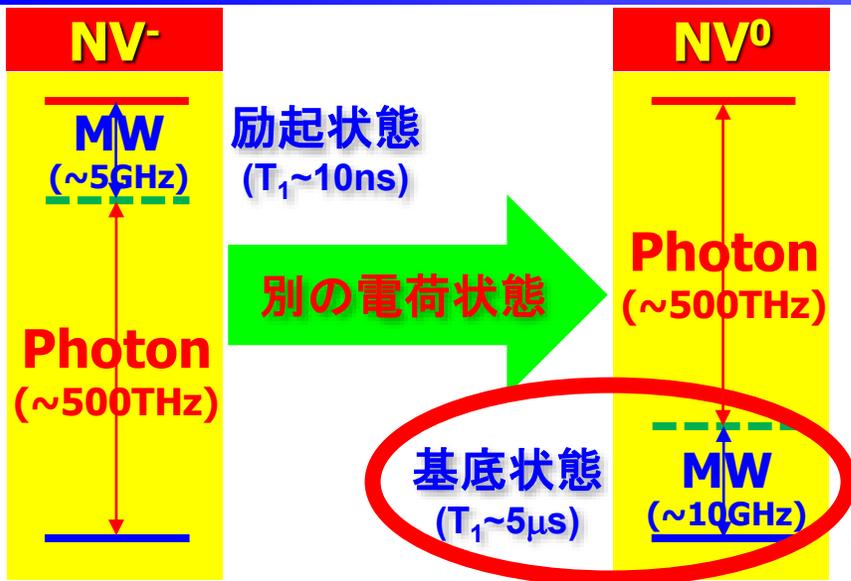
## (レッド) フォノンサイドバンドラビ振動



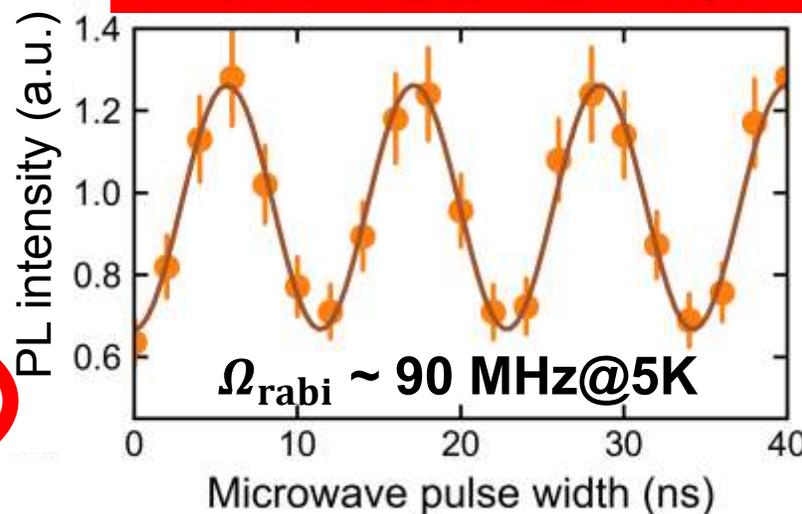
## フォノンサイドバンド発光の位相依存



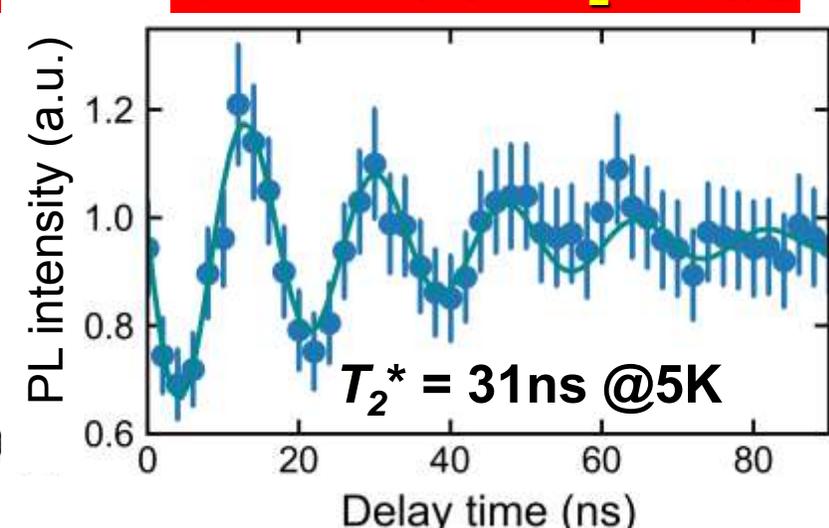
# 新規NV中心（中性電荷NV<sup>0</sup>）の量子操作



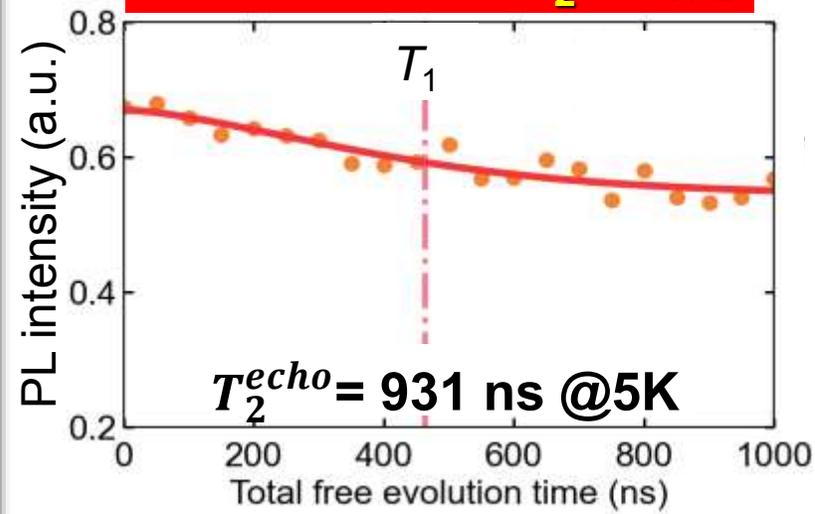
## ラビ振動（電場で量子制御）



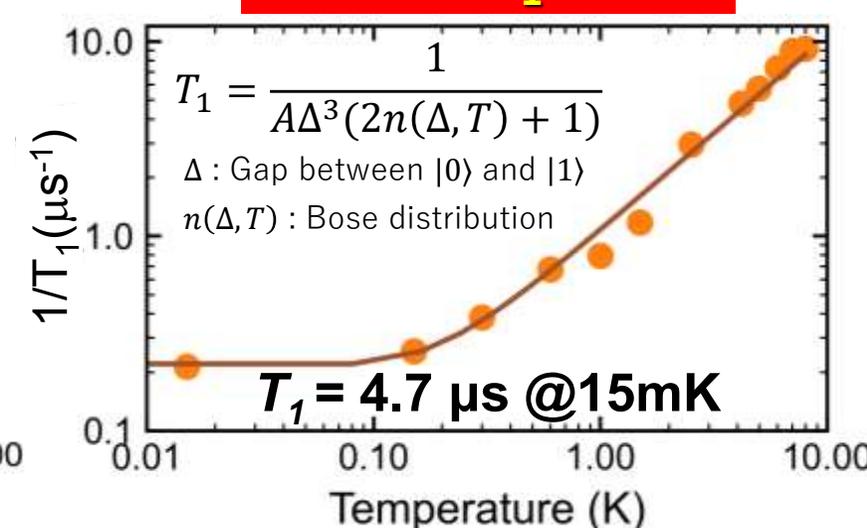
## ラムゼー干渉 ( $T_2^*$ ) 測定



## ハーンエコー ( $T_2$ ) 測定



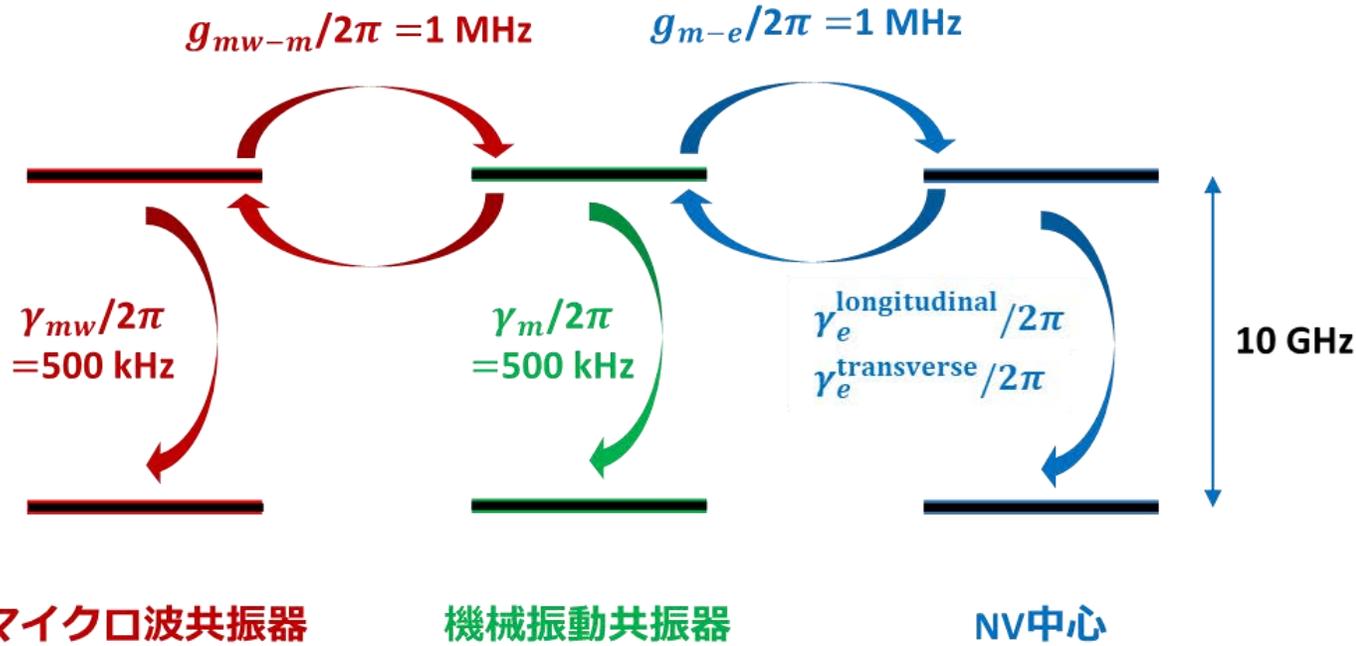
## 縦緩和 ( $T_1$ ) 測定



- ✓ NV<sup>0</sup>の電場による軌道操作に成功（磁場より3桁低パワー）
- ✓ ハーンエコーにより $T_2^*$ より30倍長い $T_2$ を実現
- ✓ 希釈冷凍機温度（15mK）で $T_1 \sim 5\mu\text{s}$ を実現

# 量子インターフェースの効率見積もり

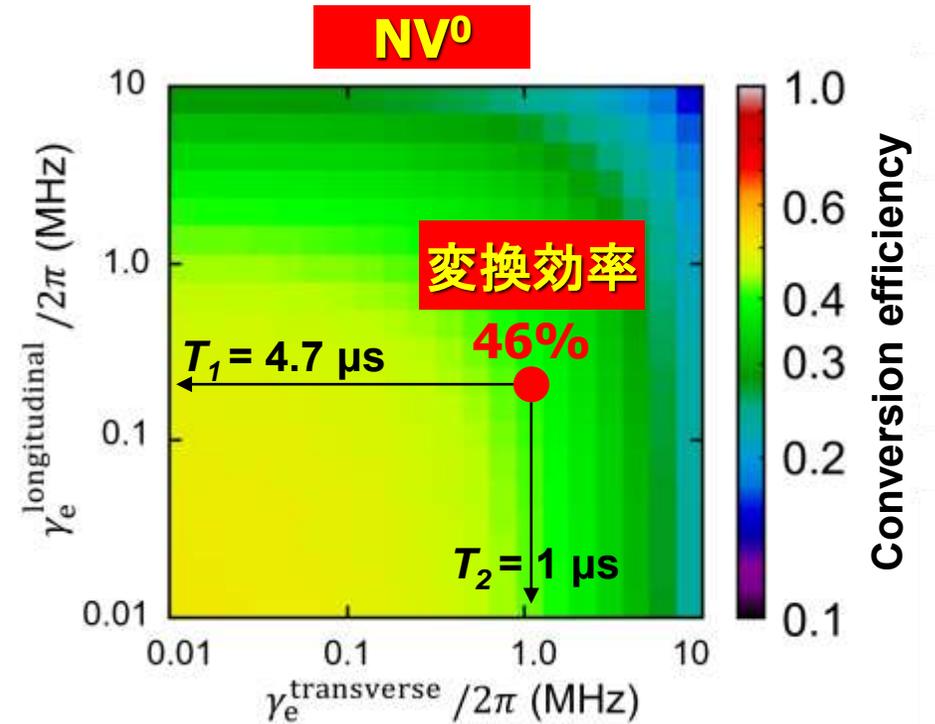
量子IFの変換効率が従来より2桁以上向上し~50%が可能



$Q_{mw} = 20,000$

$Q_m = 20,000$

$Q_{opt} \sim 2,000$   
(現状400)



(ZPLの取り出し効率~1を仮定)

## ●Jaynes-Cummings model

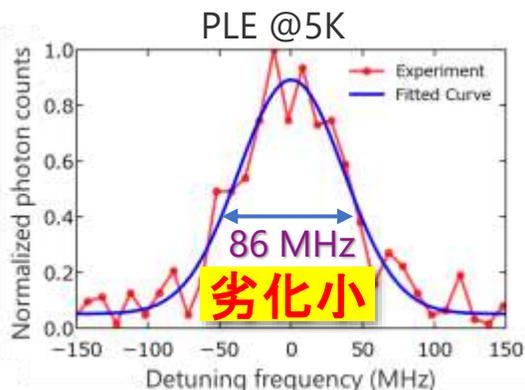
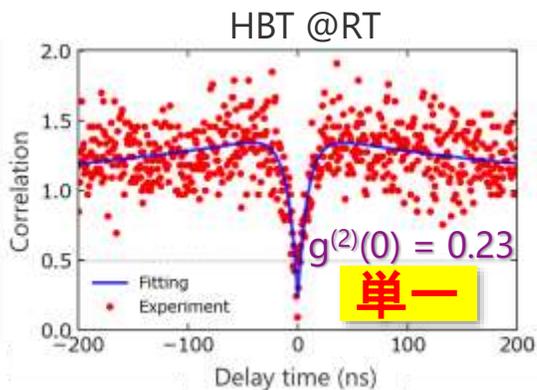
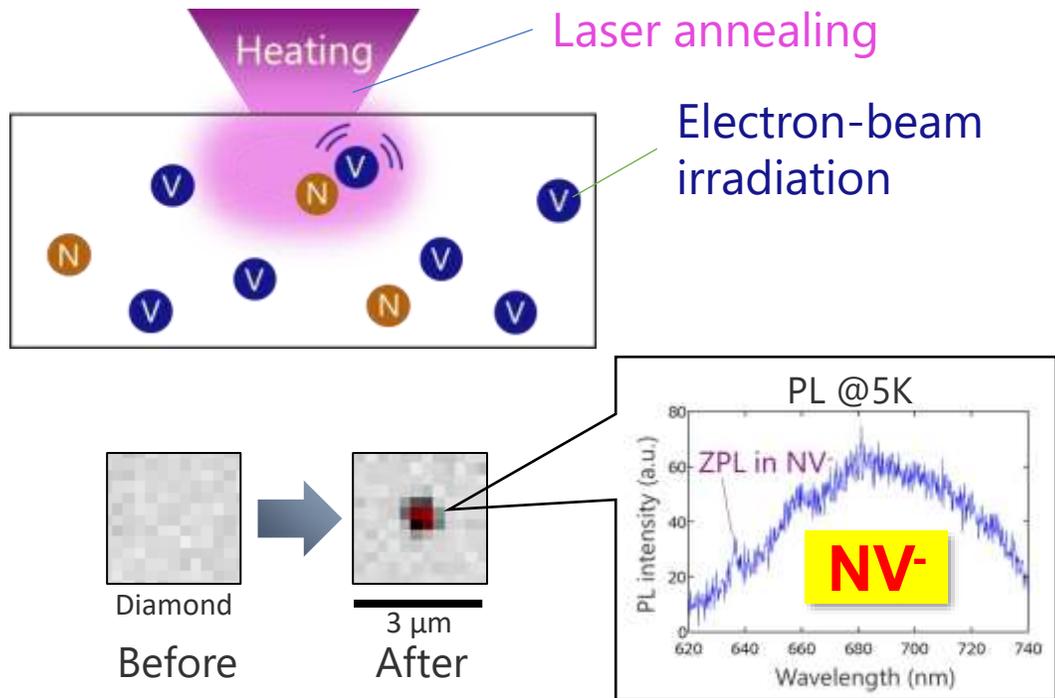
$$H = \omega_{mw} a^\dagger a + \omega_m b^\dagger b + \omega_e \sigma_e^+ \sigma_e + g_{mw-m} (a_{mw}^\dagger b_m + a_{mw} b_m^\dagger) + g_{m-e} (b_m^\dagger \sigma_e + b_m \sigma_e^+)$$

H. Kurokawa, M. Yamamoto, Y. Sekiguchi, and H. Kosaka, Phys. Rev. Applied, 18, 064039 (2022)

B. Kim, H. Kurokawa, K. Sakai, K. Koshino, H. Kosaka, and M. Nomura, Phys. Rev. Applied, 20, 044037 (2023)

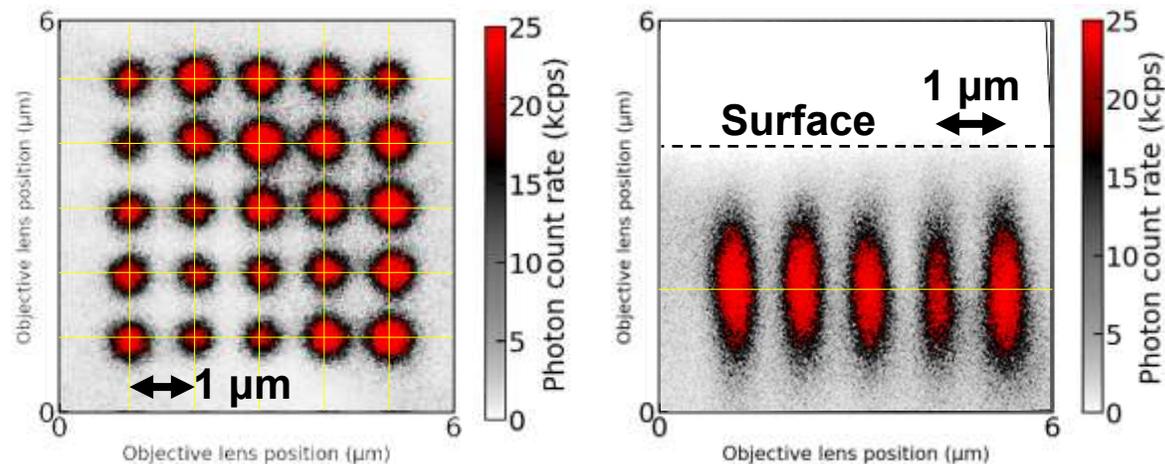
# レーザー照射による単一NV中心生成

## レーザー照射による単一NV中心生成

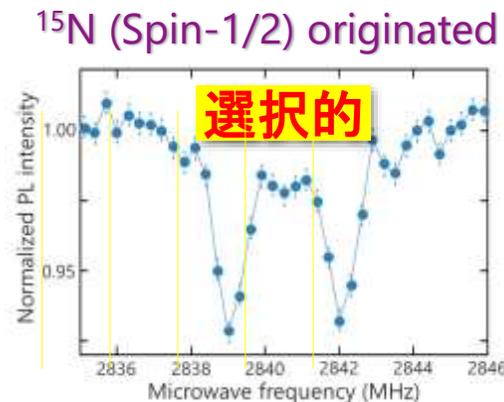
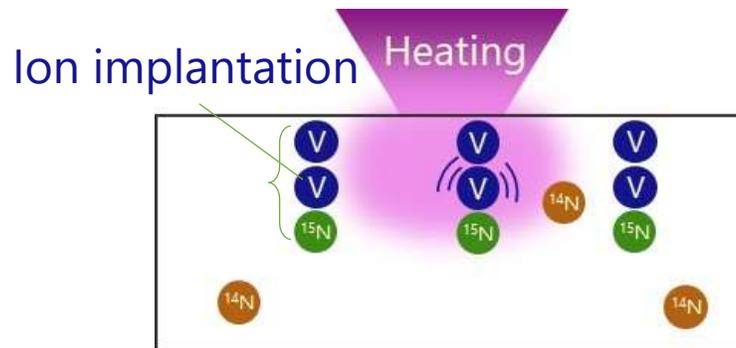


## レーザー生成したNVの位置精度

面内精度 < 0.1  $\mu\text{m}$ 、奥行き精度 < 0.3  $\mu\text{m}$

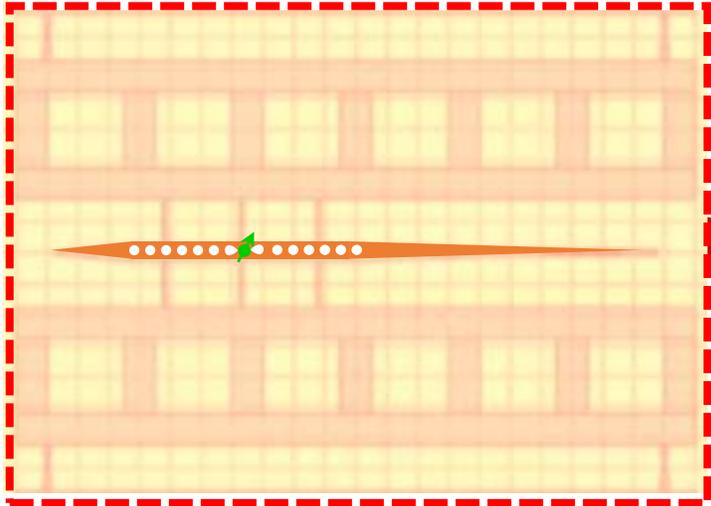


## 窒素イオン注入 + レーザー照射

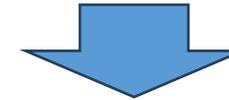


# 3次元ハイブリッドチップレット実装量子インターフェース

ダイヤモンドOMC薄膜 (~0.2 $\mu\text{m}$ )



ダイヤモンドOMCマイクロチップレットを光結合回路チップレットに実装



マイクロ波共振器チップレット上に実装

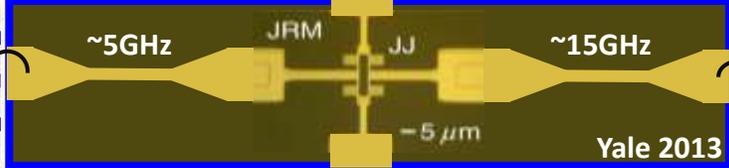
転写プリンティング  
(Pick and Place法)



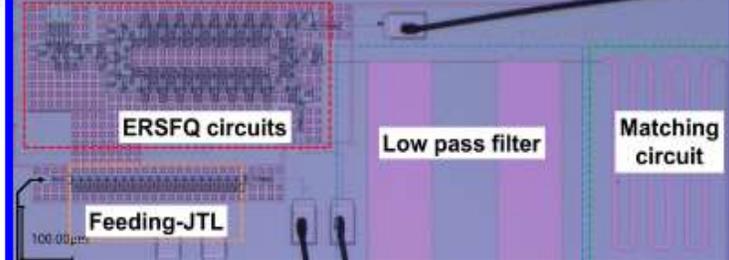
~100 $\mu\text{m}$

~30mm

マイクロ波周波数変換器



超伝導  
量子ビット



マイクロ波制御回路

マイクロ  
波共振器

マイクロ波共振器

光結合回路

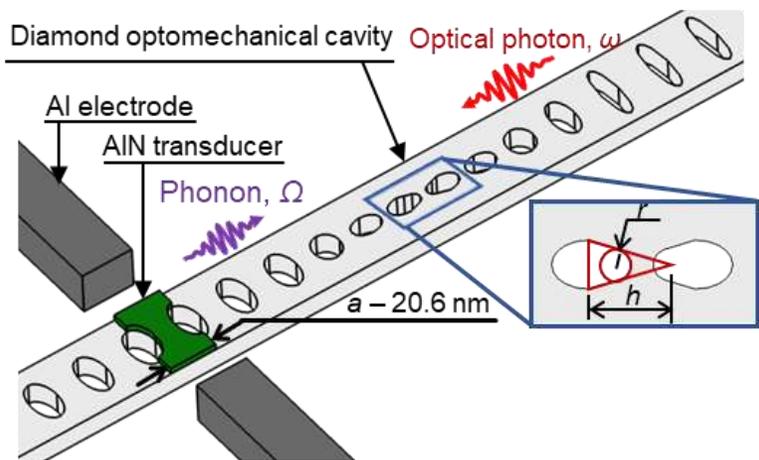
光導波路(SiN/Si)

光ファイバー

~2.5mm

超伝導-光量子インターフェースチップ (~5x1mm)

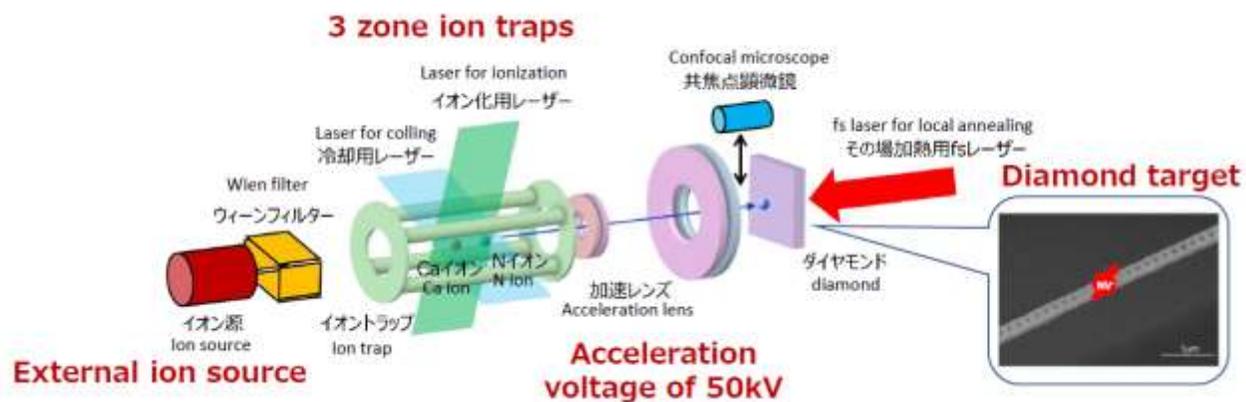
## 野村PI (東大)



B. Kim, HK et al., PRApplied 20, 044037 (2023).

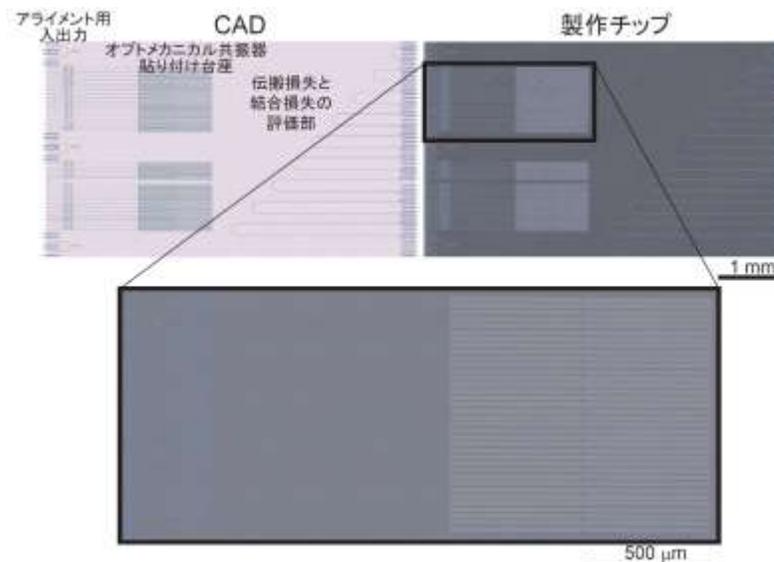
ダイヤモンドオプトメカ的设计 → 効率**15%**

## 小野田PI (QST)



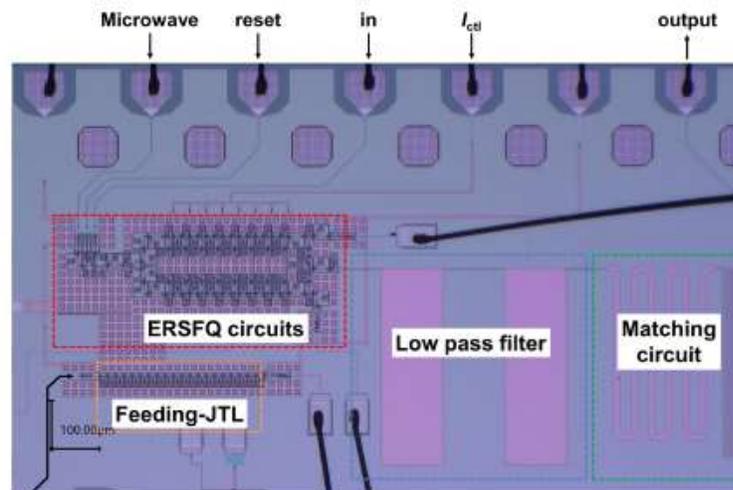
レーザ冷却イオンビームの開発

## 馬場PI (横国大)



フォトニック結晶実装用SiN導波路基板の試作

## 吉川PI (横国大)



CLK(Feeding-JTL)

極低温動作マイクロ波パルス生成回路の試作

## 運営

センター長



小坂英男

PM補佐

非常勤教員



Anton Myalitsin

国際連携

非常勤教員



Volders Annelies

産学官連携

産学官連携  
コーディネーター



川崎恭正

知財戦略

客員研究員



熊澤金也

## 国内大学

教授



馬場俊彦

教授



吉川信行

准教授



山梨裕希

准教授



井上史大

准教授



西島 喜明

IAS准教授



Ayala Christopher

IAS准教授



竹内 尚輝

准教授



島津佳弘

助教



関口雄平

IAS助教



黒川穂高

IAS助教



上牧 瑛

IAS助教



Abdul Nasir

IAS助教



Alban Lafuente

IAS助教



Jowesh Avisheik

IAS助教



Michael Johnston

## 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



客員准教授



小野田忍



客員教授



加藤宙光



客員教授



寺地徳之



客員教授



牧野俊晴

客員教授



三木茂人



客員教授



寺井弘高



客員研究員



佐々木遼

## 民間企業

客員准教授



鯨岡真美子



客員教授



味村裕



招聘教授



Finley Jonathan



招聘教授



Mueller Kai



招聘教授



Jelezko Fedor



招聘教授



Becher Christoph



アドバイザーボード  
としての機能

QuINT  
Quantum INTerfaces

MOONSHOT  
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM

# 量子情報研究センター（YNU国際ネットワークハブ認定）



共同研究契約



招聘



連携協定  
(協議中)



招聘



招聘



MIC連携



リサーチフェロー



連携協定



MIC連携



連携協定



MS6連携



連携交渉中



連携協定  
(協議中)



連携交渉中



共同研究契約



MS6連携



MS6連携



共同研究



連携交渉中



共同研究契約



連携交渉予定



連携交渉中



共同研究



連携交渉予定