

2022年9月7日

18:30-19:00

第2回量子ソフトウェア社会人講座：  
ゲート型量子コンピュータの理論・実現構想



# ムーンショット型研究開発事業について

日本電気株式会社

セキュアシステムプラットフォーム研究所

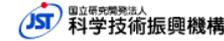
山本剛

## 内容

1. ムーンショットプロジェクト全体紹介
2. 超伝導量子ビットについて
3. 集積化に向けた課題
4. 超伝導プロジェクトでの取り組み

# プロジェクト全体紹介

<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/index.html>



リンク | お問い合わせ

事業について プログラム紹介 ▾ 公募情報 ▾ 新着情報 刊行物 関係者向け ENGLISH

ムーンショット型研究開発事業 > プログラム紹介 > ムーンショット目標6

## プログラム紹介

ムーンショット目標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

2020年12月開始  
5年間（最長10年間）

北川勝浩 PD



### プログラム紹介動画

- アニメーション >
- PD解説 >

### イラストレーション

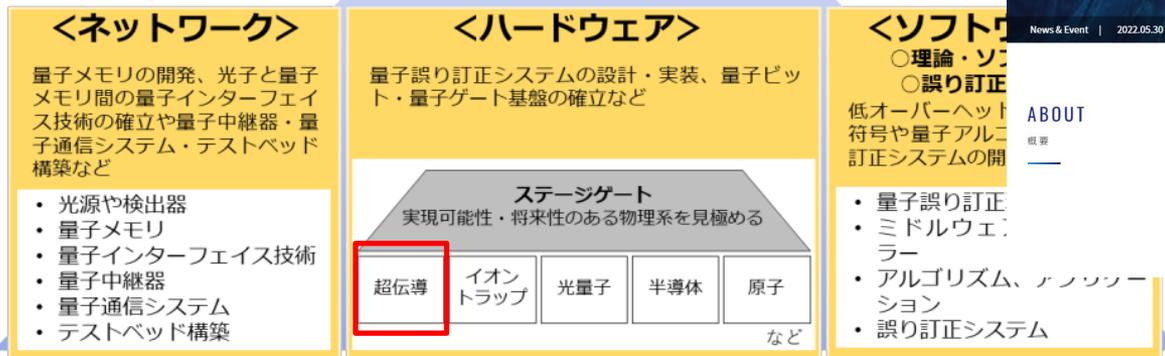
- 2050年の社会 (677KB) >
- 解説1 (749KB) >
- 解説2 (773KB) >
- 解説3 (579KB) >

※左のイラストをクリックするとPDFが表示されます

# 超伝導カテゴリ

<https://ms-iscqc.jp/>

- 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
- 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



ムーンショット目標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

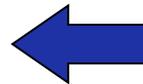
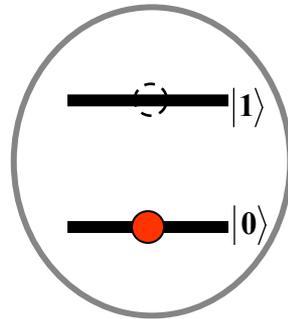
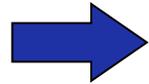
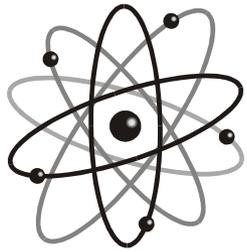
MESSAGE  
代表取締役メッセージ

近年、世界中で超伝導量子コンピュータ実現に向けた活発な取り組みがなされています。現在の開発ターゲットはNISQマシンに限りますが、将来的に誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するためには、さらにより汎用的なプラットフォームが必要です。そこで必要となる物理系は、超伝導量子ビットから始めたいと考えています。ソフトウェア、実装、評価検証など幅広い分野で、超伝導系に注力して開発を進めています。本プロジェクトでは、様々な物理系を持つ開発者より、誤り耐性型汎用量子コンピュータ実現という共通の目的の下で技術の磨り合わせを行いながら、プラットフォームを多様な物理系の実現を目指します。

山本 隆 代表取締役社長  
日本電気株式会社 システムプラットフォーム部 研究  
主任研究員



# How to build practical quantum computers?



Nakamura et al., Nature **398**, 786 (1999).

## Microscopic

- atoms
- ions
- electrons

....

good coherence  
uniform  
integration?

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

## Macroscopic (Mesoscopic) solid-state devices

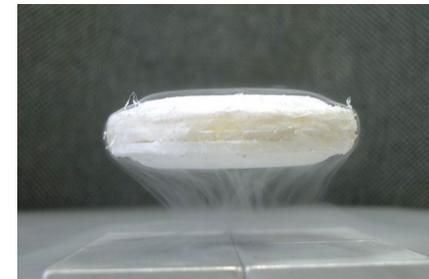
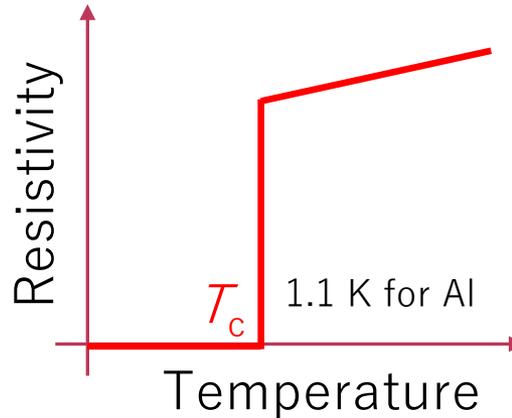
amenable to integration  
high controllability  
coherence?  
qubit to qubit variation

# Superconductivity

- ◆ Dissipationless ( $R=0$  @ dc)
- ◆ Perfect diamagnetism
- ◆ Phase coherent
- ◆ BCS theory (1957)

**Superconductivity Transition Temperatures and Critical Fields**

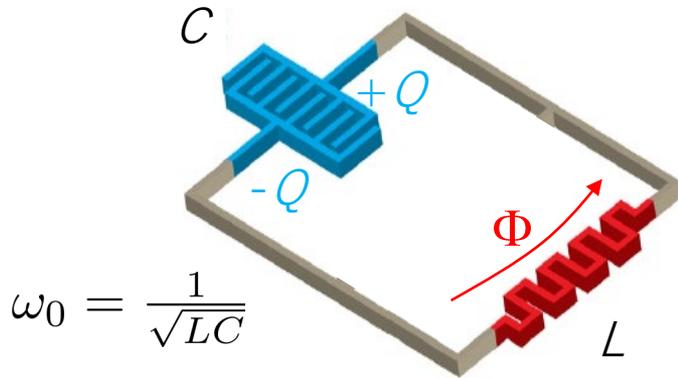
Li		Superconductivity parameters for elements										B	C	N	O	F	Ne
...	0.026	Transition temperature in Kelvin										...	...	...	...	...	...
...	...	Critical magnetic field in gauss ( $10^{-4}$ tesla)										...	...	...	...	...	...
Na	Mg	...										Al	Si*	P*	S*	Cl	Ar
...	...	...										1.140	7	5	...	...	...
...	...	...										105	...	...	...	...	...
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr*	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge*	As*	Se*	Br	Kr
...	...	...	0.39	5.38	...	...	...	...	...	...	0.875	1.091	5	0.5	7	...	...
...	...	...	100	1420	...	...	...	...	...	...	53	51	...	...	...	...	...
Rb	Sr	Y*	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn (w)	Sb*	Te*	I	Xe
...	...	...	0.546	9.50	0.90	7.77	0.51	0.0003	...	...	0.56	3.4035	3.722	3.5	4	...	...
...	...	...	47	1980	95	1410	70	0.049	...	...	30	293	309	...	...	...	...
Cs*	Ba*	La (fcc)	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi*	Po	At	Rn
1.5	5	6.00	0.12	4.483	0.012	1.4	0.655	0.14	...	...	4.153	2.39	7.193	8	...	...	...
...	...	1100	...	830	1.07	198	65	19	...	...	412	171	803	...	...	...	...
Fr	Ra	Ac	also, NbN, TiN, NbTiN, ...														



<https://www.mirai-kougaku.jp/laboratory/pages/180507.php>

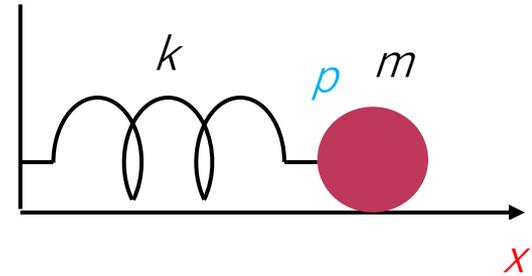
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/supcon.html>

# Harmonic oscillator



$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

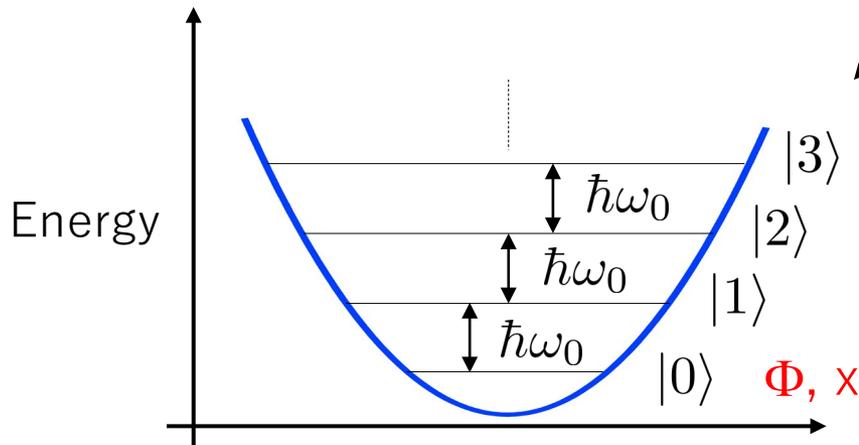


$$\mathcal{H} = \frac{\Phi^2}{2L} + \frac{Q^2}{2C}$$

$$\mathcal{H} = \frac{kx^2}{2} + \frac{p^2}{2m}$$

$$[\hat{\Phi}, \hat{Q}] = i\hbar$$

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$$



# Quantum harmonic oscillator

P. Bertet  
Summer school

◆ To be in quantum regime,

$$1. Q \gg 1$$

dissipation must be negligible

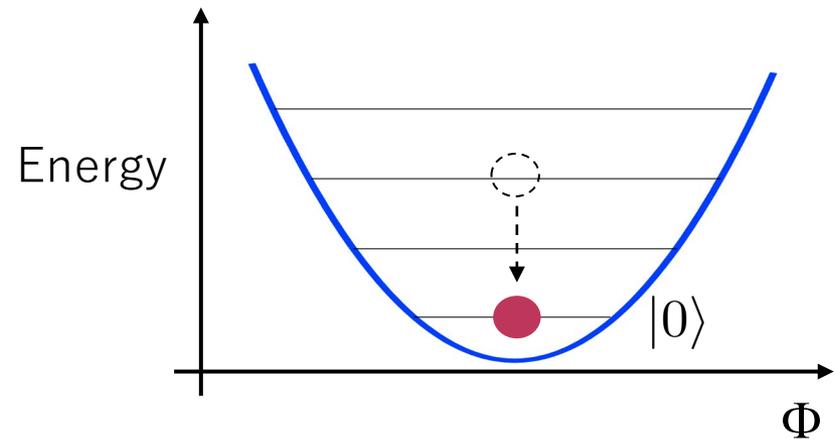
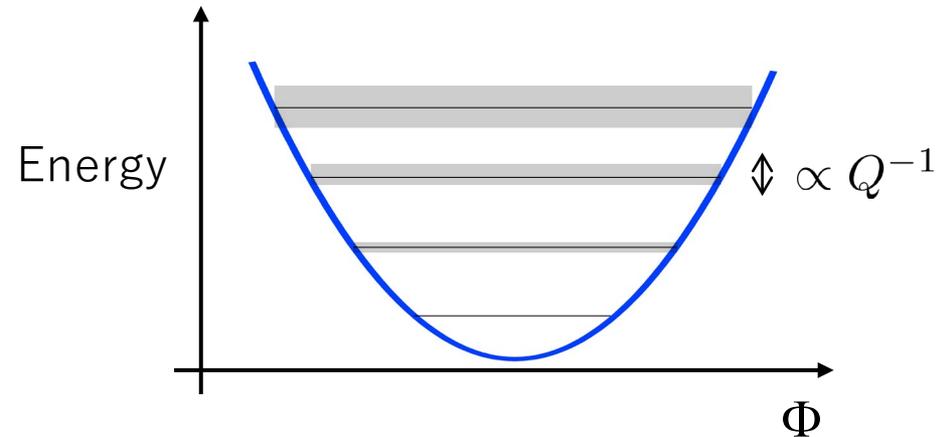
➔ superconductor at  $T \ll T_c$

$$2. k_B T \ll \hbar \omega_0$$

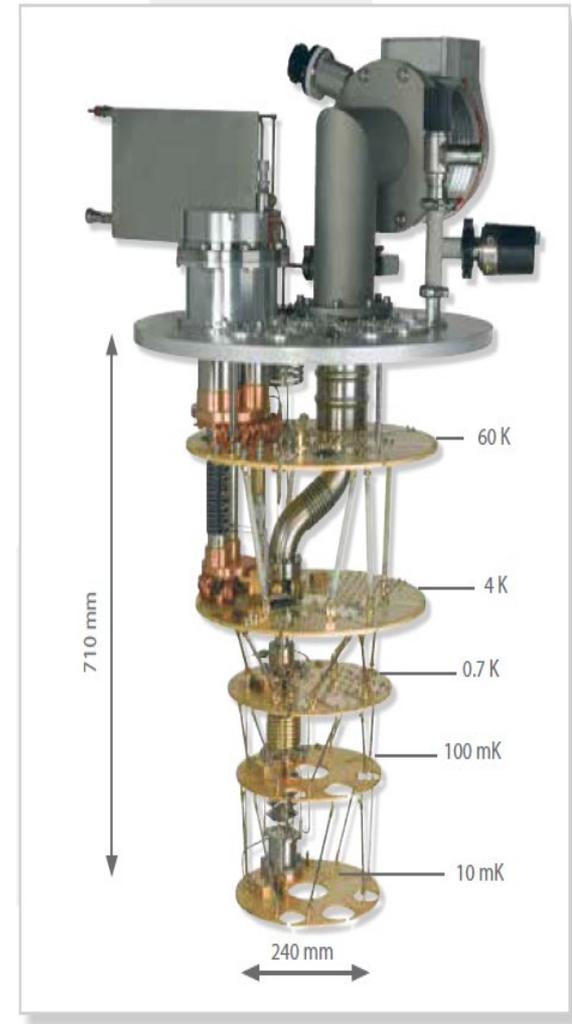
typically,  $L \sim \text{nH}$ ,  $C \sim \text{pF}$ ,  $\omega_0/2\pi \sim \text{GHz}$

➔  $T \ll \sim 0.1 \text{ K}$

➔ dilution refrigerator



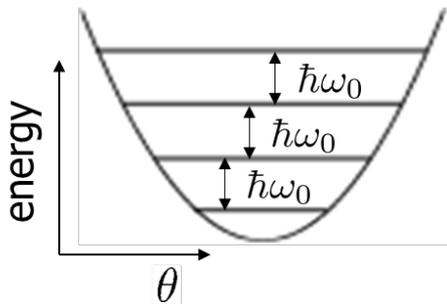
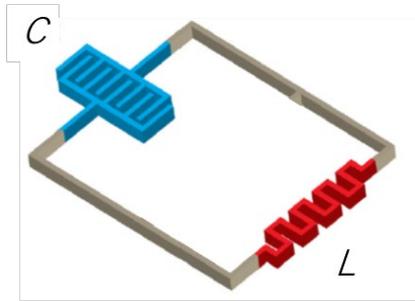
# Dilution refrigerator



Principles of dilution refrigeration, Oxford Instruments

# Superconducting qubits

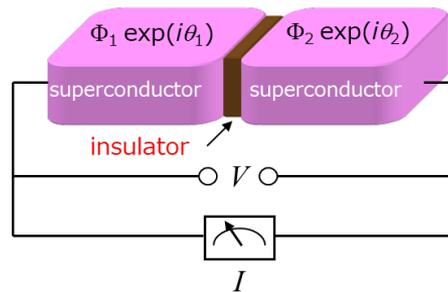
quantum harmonic oscillator



$$\omega_0/2\pi \sim 5 \text{ GHz}$$

$$\hbar\omega_0/k_B \sim 250 \text{ mK}$$

Josephson junction is a nonlinear inductor



$$I = I_c \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

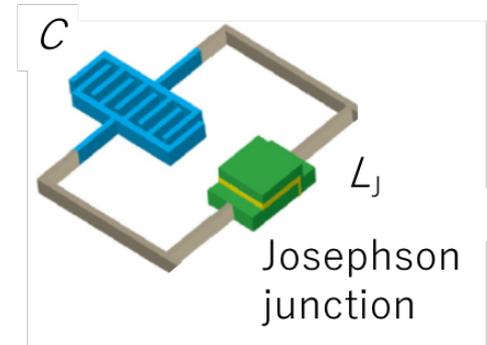
$$V = \frac{\Phi_0}{2\pi} \frac{d(\theta_1 - \theta_2)}{dt}$$



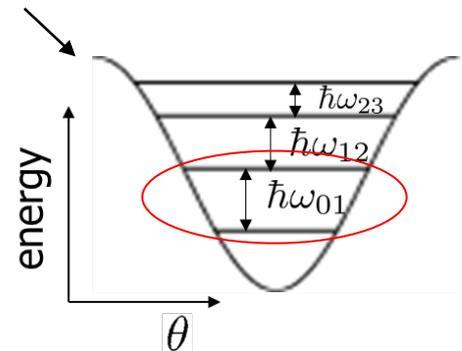
$$V = L_J \frac{dI}{dt}$$

$$L_J = \frac{\Phi_0}{2\pi I_c \cos(\theta_1 - \theta_2)}$$

transmon

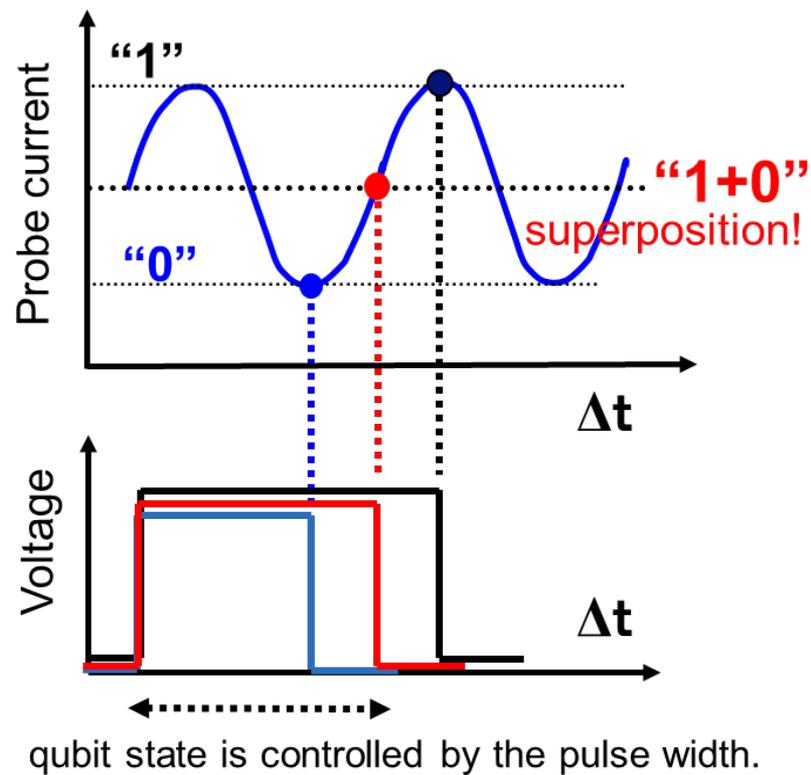
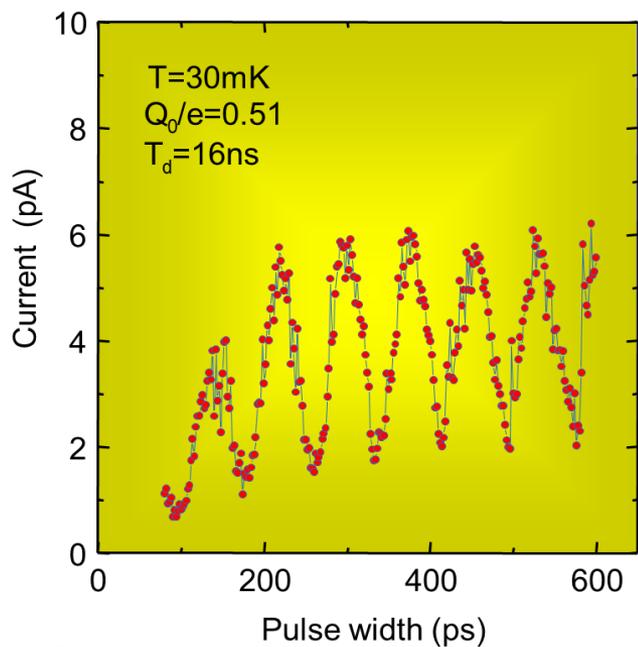
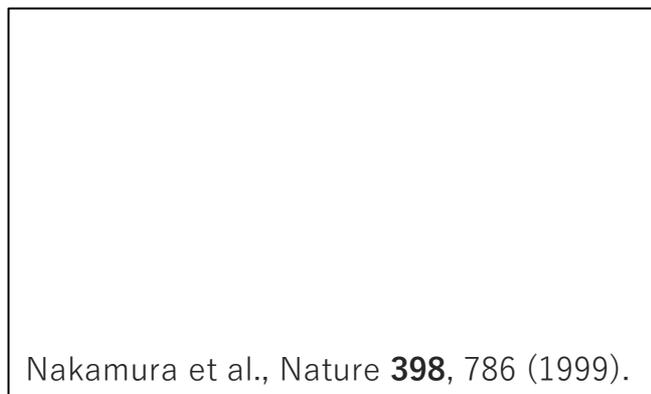


cosine potential



effective two-level system

# 超伝導量子ビット



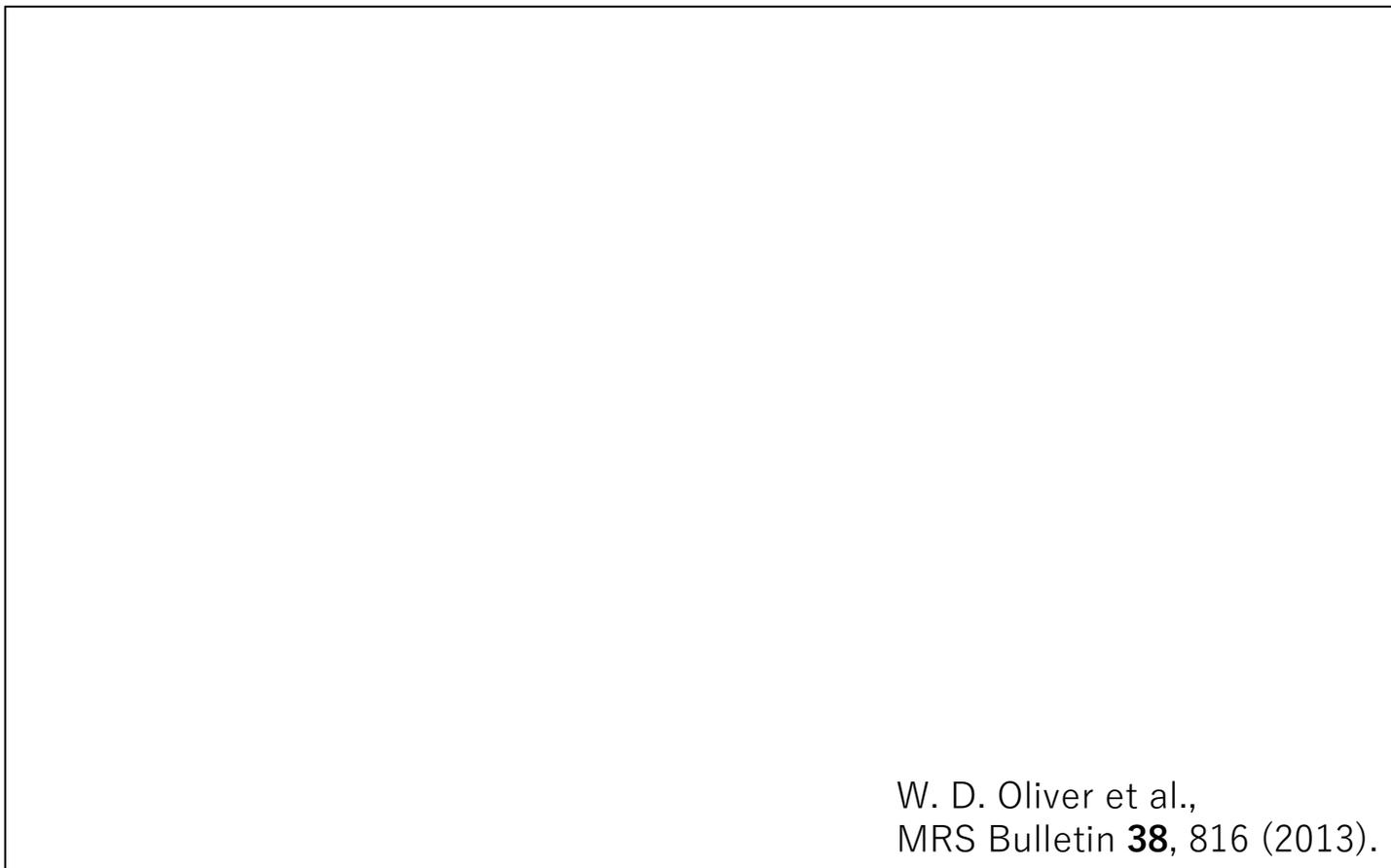
# Scalable qubits

「量子コンピューティング」  
嶋田義皓

Quantum version of Moore's law

# Long decoherence time

---



W. D. Oliver et al.,  
MRS Bulletin **38**, 816 (2013).

# Requirements for quantum bit

- Scalable qubits

D. P. DiVincenzo (1997)

- Initialization

- preparation of  $|0\rangle$  state

R. Barends et al.,  
Nature 508, 500 (2014).

- Universal quantum gate

- one-qubit gate and two-qubit gate

Fidelity  
99.92% for 1-qubit gate  
99.4% for 2-qubit gate

- Readout: projective measurement

- $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \Rightarrow$  0 with probability  $|\alpha|^2$       ~99% for readout  
1 with probability  $|\beta|^2$

- Long decoherence time

- much longer than gate operation time  
 $\sim 10^4 - 10^6$  times

: threshold for applicability of quantum error correction

# 超伝導NISQプロセッサ

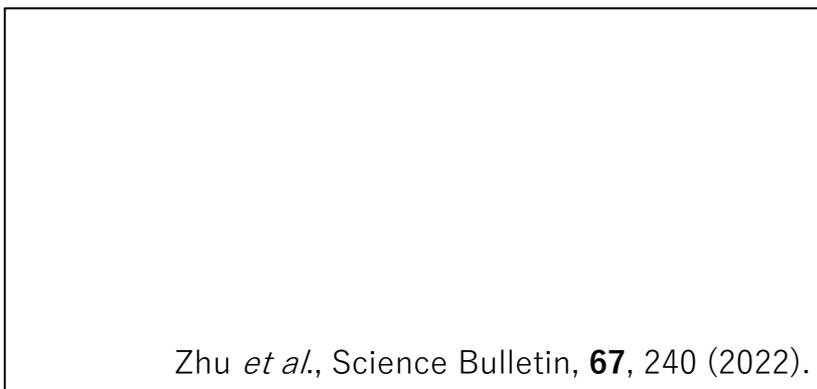
Google



IBM 127 qubit chip



USTC 66 qubits



# NISQを超えて

量子ビット数

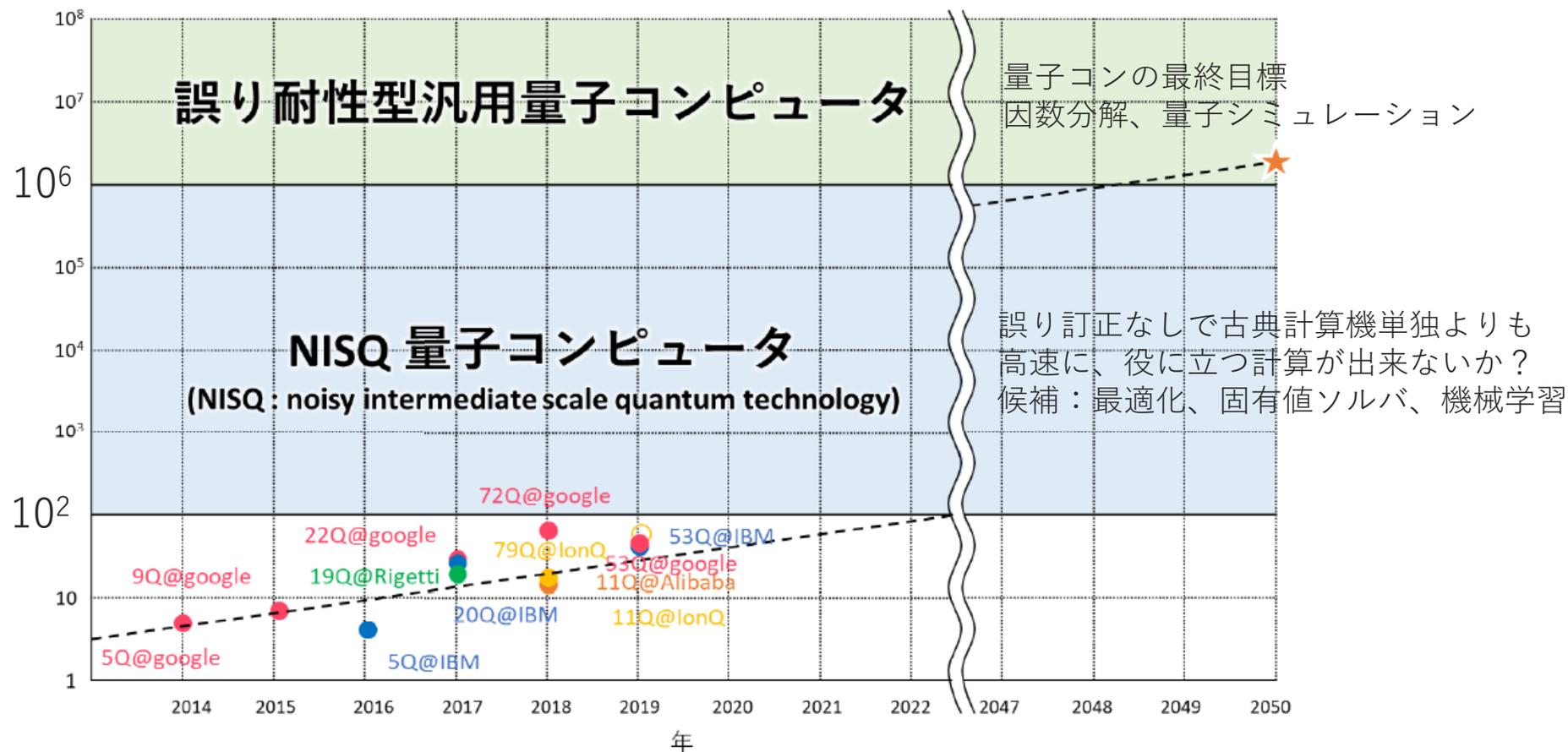


図 8. 量子版ムーアの法則

[https://www.jst.go.jp/moonshot/koubo/202002/pdf/pd\\_wg6.pdf](https://www.jst.go.jp/moonshot/koubo/202002/pdf/pd_wg6.pdf)

# 誤り耐性量子計算へのマイルストーン

M. H. Devoret et al., Science **339**, 1169 (2013).

# Exponential suppression of bit or phase errors with cyclic error correction

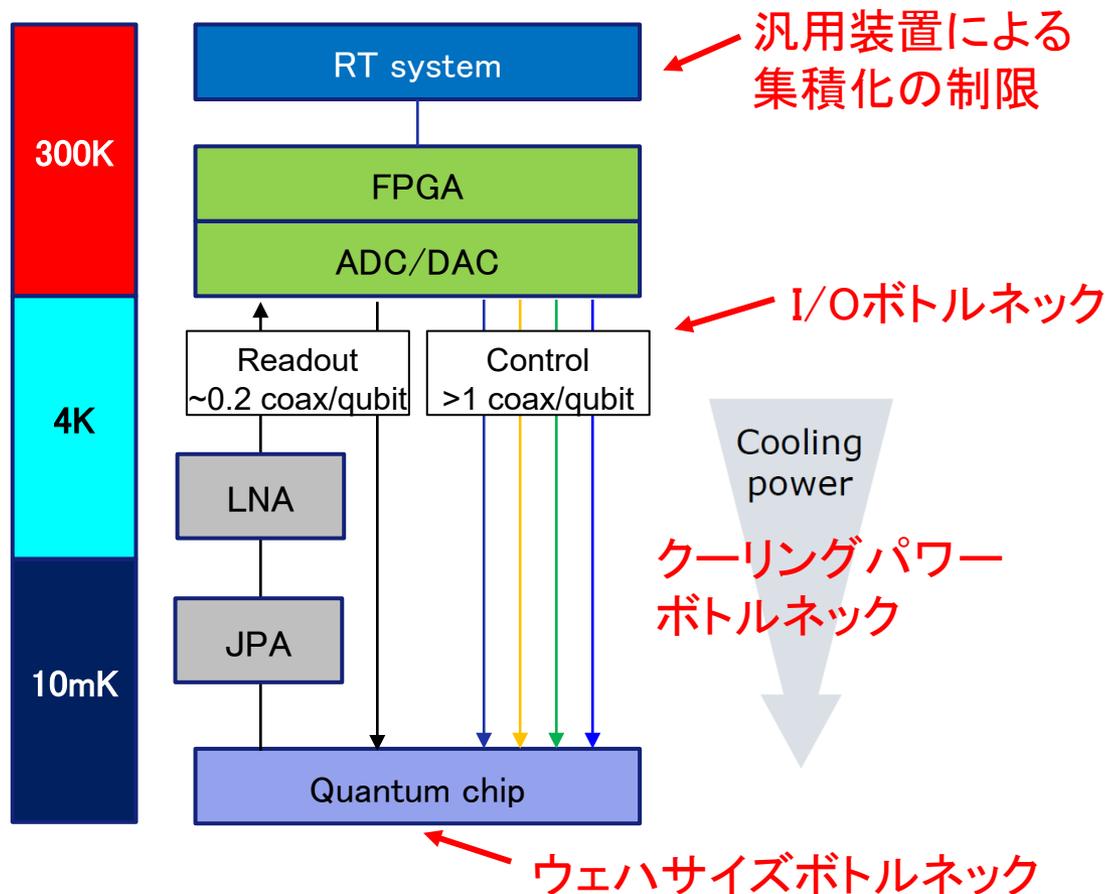
- ◆ Sycamore processor (54 qubits)の一部を使用
- ◆ 以前に比べてreadout errorが半分に改善
- ◆ ancilla qubit測定後に能動的reset
- ◆ ロジカルエラーが、code distance  $d$ に対して指数関数的に減少することを確認
- ◆ surface codeで閾値を切るためには、個々のエラーを現状より~30%減少させる必要がある。

$$\epsilon_L \propto (p/p_{th})^{\frac{d+1}{2}}$$

Google Quantum AI, Nature **595**, 383 (2021).

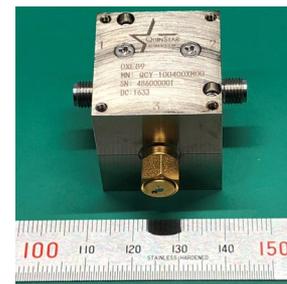
# 超伝導誤り耐性量子計算機実現にむけた**周辺技術**の課題

- ◆ 希釈冷凍機の冷凍能力 (1 mW@100 mK) や試料スペース ( $\sim 0.5^3 \text{ m}^3$  at 10 mK) の制約。
- ◆ 室温の(半カスタム)エレクトロニクスもスケールしない。消費電力: $\sim 100 \text{ W/量子ビット}$
- ◆ ウェハサイズ制限による量子ビット数の限界。300 mmウェハに2 mmピッチで敷き詰めて $10^4$ 量子ビット



制御：1量子ビットにつき  
>1本の同軸ケーブルをmK  
と室温の間に配線

読出し：数量子ビットに1  
本の読出しライン。ライン  
毎に低温アンプや複数の  
サーキュレータ等  
( $\sim 10 \text{ cm}^3$ )が必要



# 現行方式で何ビットまで冷やせるのか？

RESEARCH

Open Access

## Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems



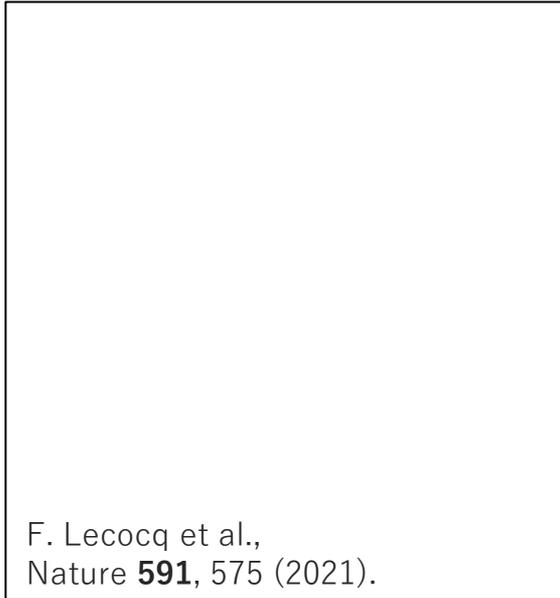
S. Krinner<sup>1\*</sup>, S. Storz<sup>1</sup>, P. Kurpiers<sup>1</sup>, P. Magnard<sup>1</sup>, J. Heinsoo<sup>1</sup>, R. Keller<sup>1</sup>, J. Lütolf<sup>1</sup>, C. Eichler<sup>1</sup> and A. Wallraff<sup>1</sup>

- ◆ 周波数可変型transmon量子ビット集積回路動作を念頭に置いた希釈冷凍機のセットアップにおいて、同軸ケーブル配線によるpassive heat loadと量子ビット操作/読出しによるactive heat load両方について、見積もりと実測を行い、50量子ビットまでの範囲で両者がよく一致することを確認。
- ◆ セットアップの単純な拡張により**150量子ビット**程度は可能と思われる。更にいくつかの改善を行うことにより、**数100量子ビット**まではいけるかも。

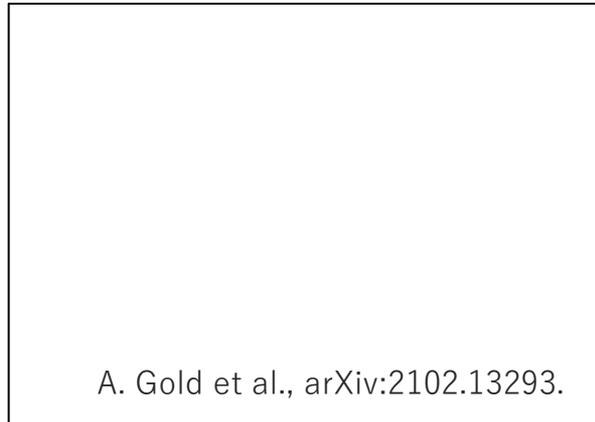
EPJ Quantum Technology volume **6**, 2 (2019).

# ボトルネック打破のための取り組み

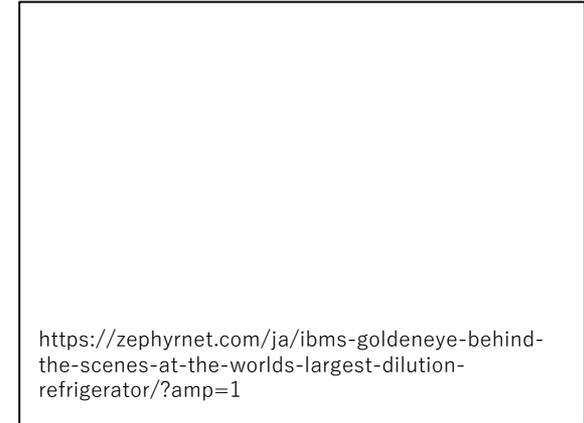
光ファイバーを経由した超伝導量子ビット制御



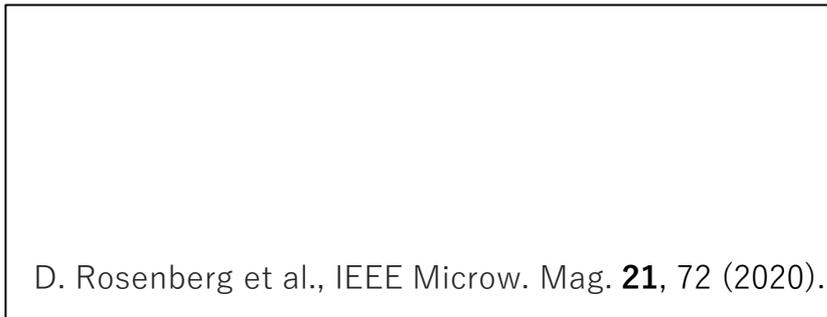
チップ間コヒーレント接続



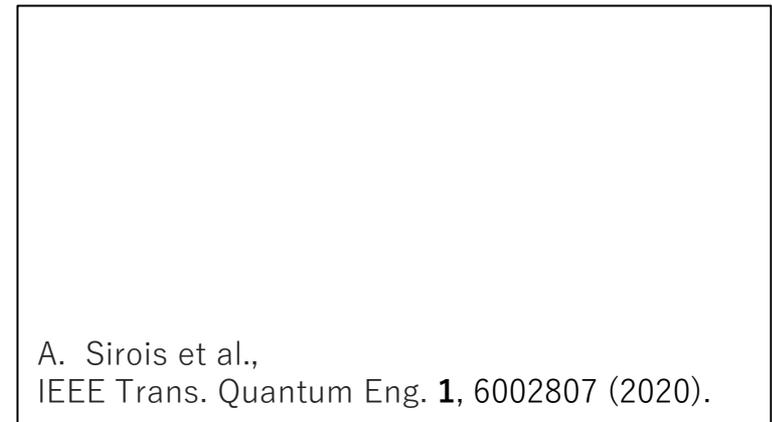
大型希釈冷凍機 (IBM)



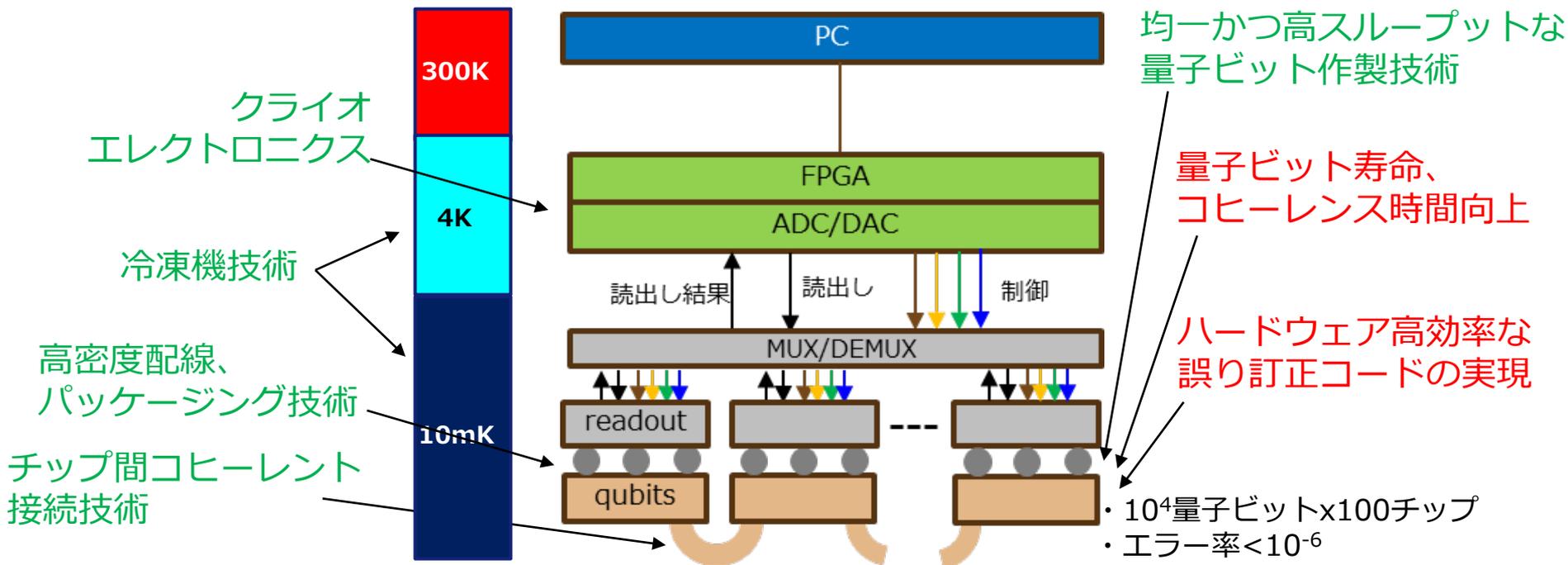
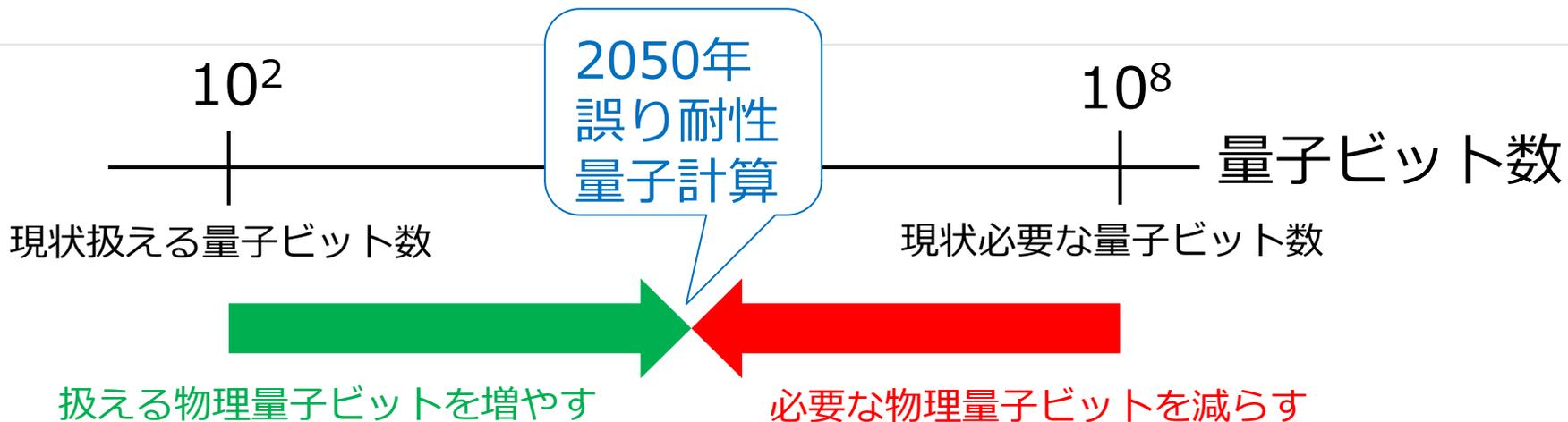
積層チップ構造



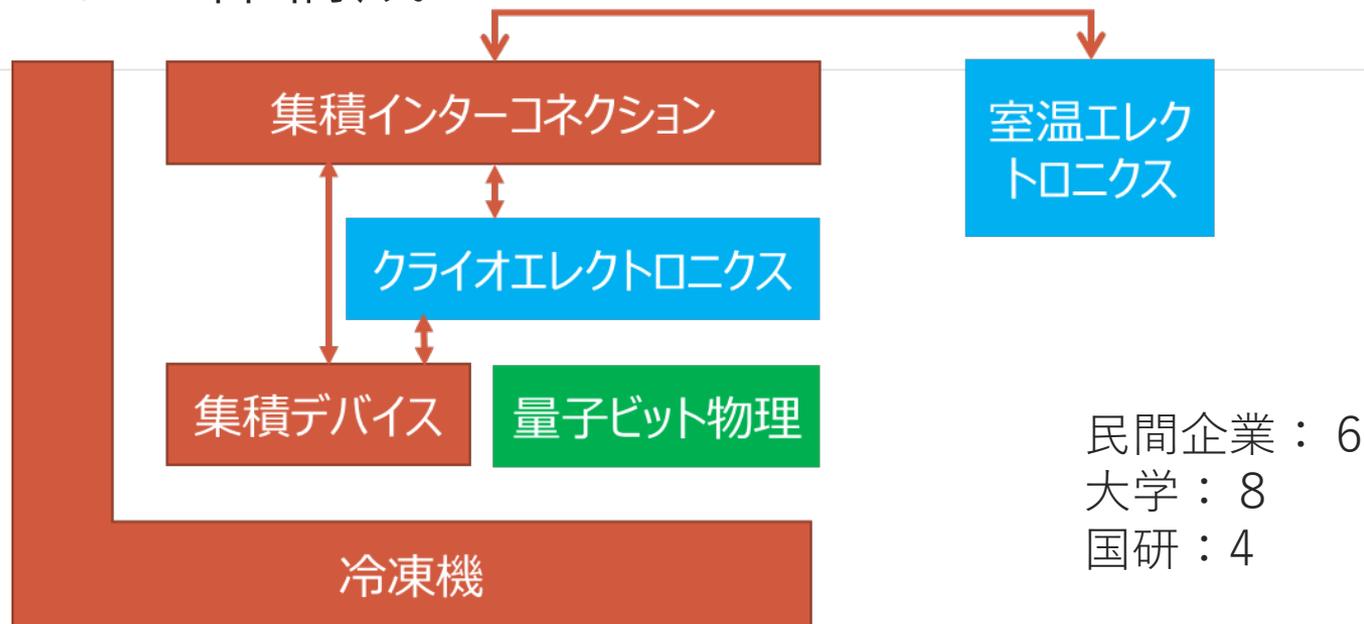
JAWS回路による低温マイクロ波源



# プロジェクトで取り組む課題と目指すシステム



# プロジェクト全体構成



## ● 誤り耐性量子コンピュータ用量子ビット回路の研究開発

- 日本電気株式会社、産業技術総合研究所、日本電信電話株式会社、情報通信研究機構、理化学研究所、東京理科大学、株式会社ニコン、東京医科歯科大、東北大学

## ● 量子ビット集積ハードウェアシステムの研究開発

- 理化学研究所、アルバック・クライオ株式会社、株式会社アルバック、国立天文台、情報通信研究機構

## ● 量子誤り訂正用エレクトロニクスの研究開発

- 名古屋大学、ナノブリッジセミコンダクター株式会社、日本電気株式会社、大阪大学、東京大学、慶応大学、九州大学

# まとめ

## ◆ 超伝導量子ビット

- 超伝導現象に由来する強固な量子コヒーレンスと固体素子であるが故の集積回路作製容易性を併せ持つ。
- 非線形インダクタであるジョセフソン接合を用いた非線形共振器。
- 1999年の1ビット動作に始まり、集積度、コヒーレンス時間など、この20年間で劇的に進歩した。

## ◆ 近年は50~100量子ビット回路を用いて、誤り訂正無しで実用的課題への応用を目指すNISQマシンの研究がメインテーマ

## ◆ さらに大規模な回路実現のためには、様々な(特に実装上の)課題が山積み

# \Orchestrating a brighter world

NECは、安全・安心・公平・効率という社会価値を創造し、  
誰もが人間性を十分に発揮できる持続可能な社会の実現を目指します。

\Orchestrating a brighter world

**NEC**