



量子コンピュータと医科学

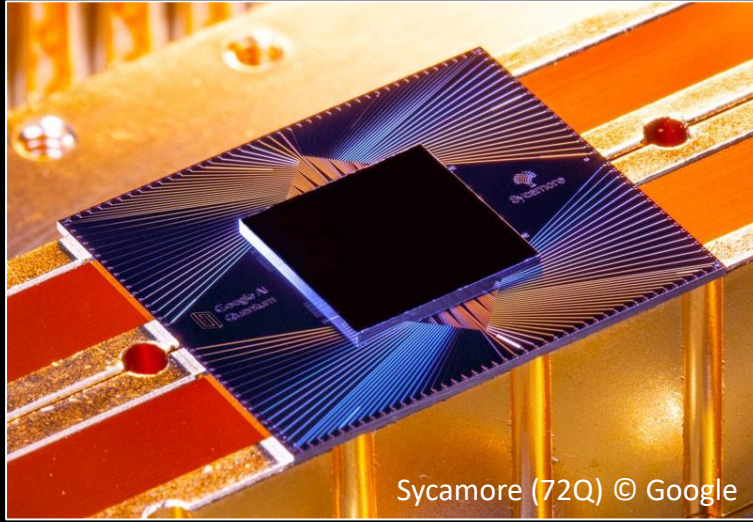
阿部英介

理化学研究所量子コンピュータ研究センター

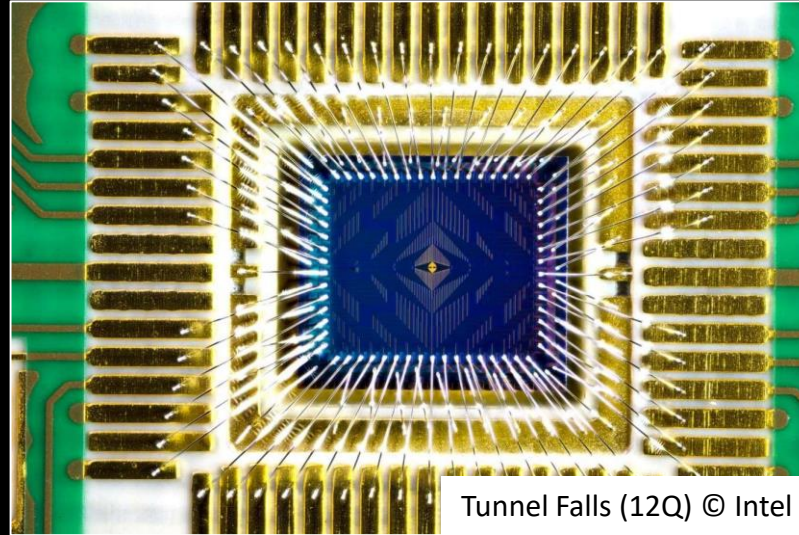
2023年12月8日(金)

日本量子医科学会第3回学術大会
「基礎科学研究が支える量子医科学」

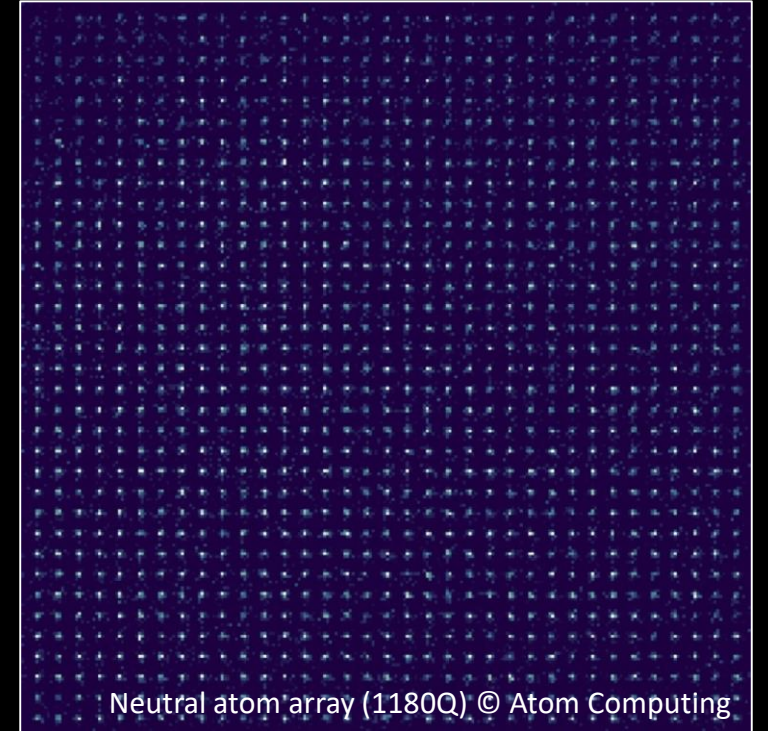
加速する量子コンピュータ開発



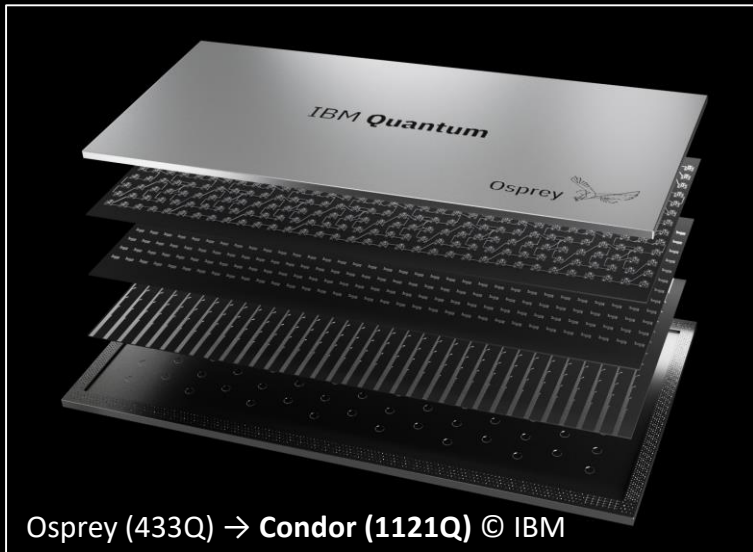
Sycamore (72Q) © Google



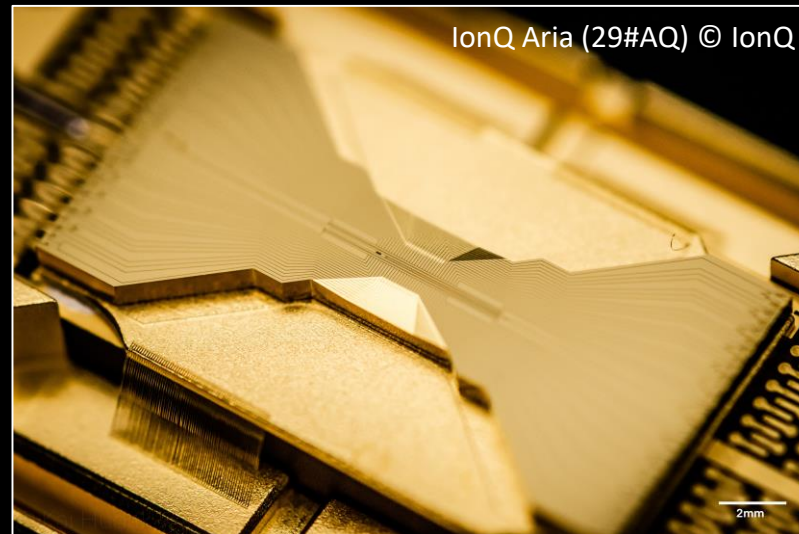
Tunnel Falls (12Q) © Intel



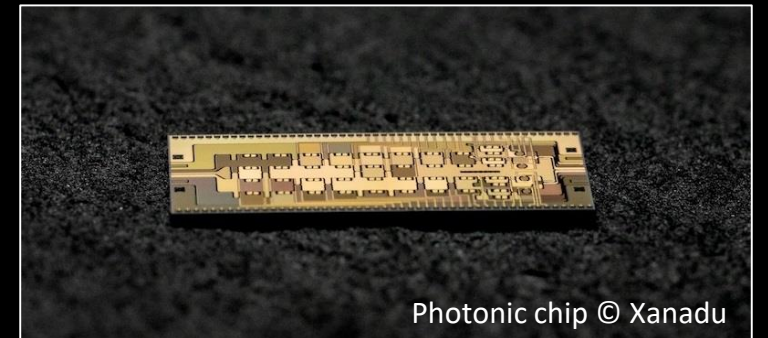
Neutral atom array (1180Q) © Atom Computing



Osprey (433Q) → Condor (1121Q) © IBM



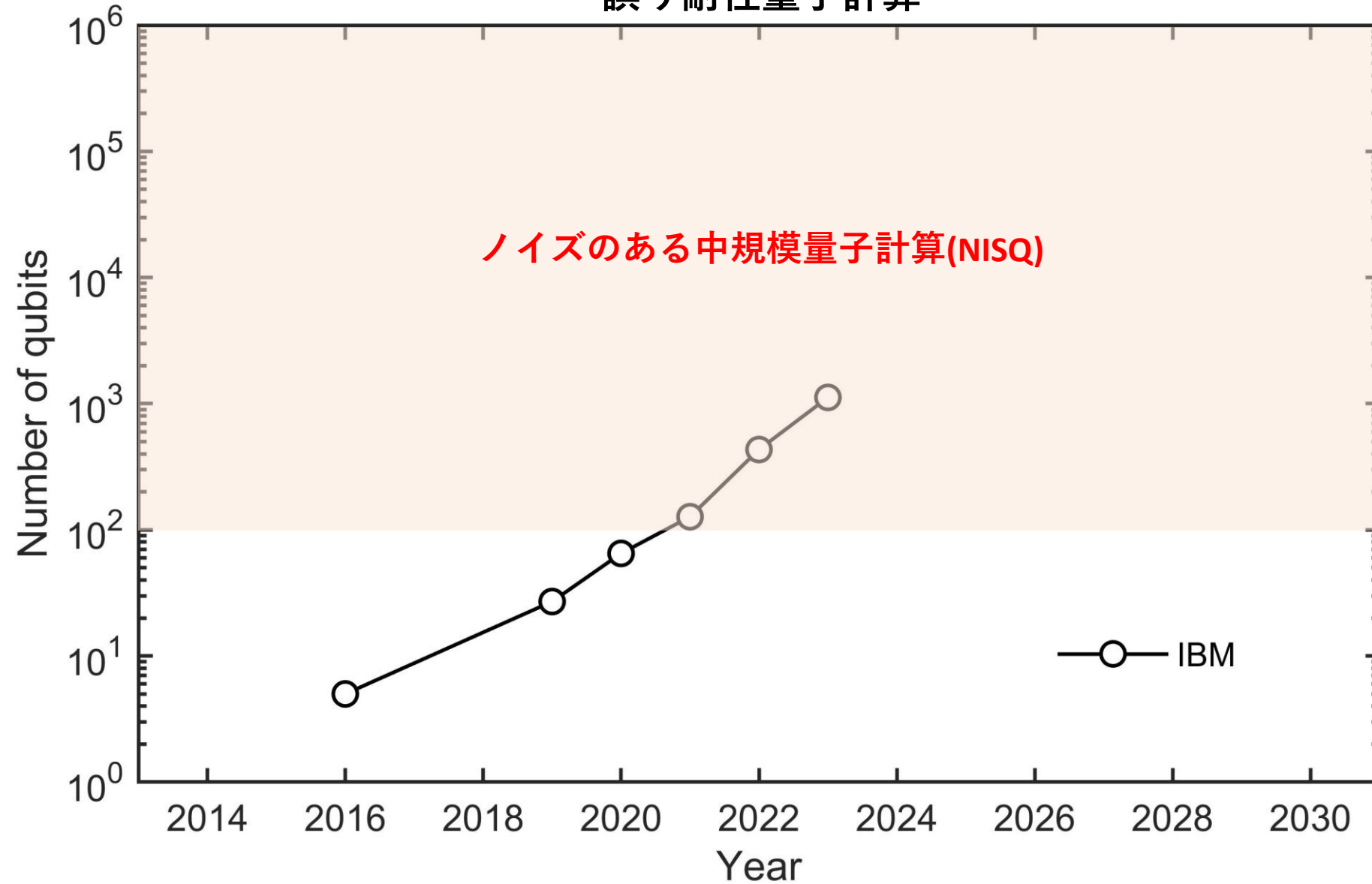
IonQ Aria (29#AQ) © IonQ



Photonic chip © Xanadu

量子ビット数の拡大

誤り耐性量子計算



日本物理学会誌

- 量子物性の物理II
- 乱れによる臨界現象
- 重力マイクロレンズ効果を利用した暗い天体と太陽系外惑星の探索

BUTSURI

第60巻 第12号(通巻 657号) ISSN 0029-0181
昭和30年6月13日 第3種郵便物認可
平成17年12月5日発行 毎月5日発行

2005 VOL. 60 NO.

12

日本物理学会誌 60, 928 (2005) 山本

シリーズ「日本の物理学 100年とこれから」

量子物性の物理 II——量子力学と工学との接点で——

山本喜久 <スタンフォード大 Edward L. Ginzton Laboratory, Stanford University, Stanford, CA 94305-4085, U.S.A.

e-mail: yosihisa@stanford.edu>

本稿では、物理学と工学の境界領域で量子力学が本質的な役割を演じ、そして成功を収めたいくつかの事例を取り上げる。具体的には、核磁気共鳴、レーザー、量子情報、の3つの分野を概観する。この3つの分野に着目したのには2つの理由がある。その第一は、過去60年にわたって、時系列的に発展してきたこれら3つの分野の基本概念・原理には驚くほど共通するものが多いことである。第二の理由は、これらの分野で基礎研究から応用へ至る道筋で、新しい時代を切り開いてきた研究者間のバトンタッチのあり様にも、やはり共通したものがあり興味深いからである。



<https://www.rd.ntt/organization/authority/008.html>

ちなみに...

- 日本磁気共鳴医学会
 - 日本レーザー医学会
 - 日本量子医科学会
- と揃っている

ノーベル賞と核磁気共鳴、量子情報

凝縮系の核磁気共鳴

F. Bloch



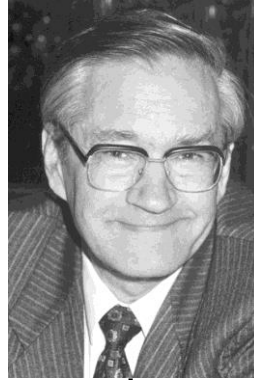
E. M. Purcell



1952 ↓

高分解能NMR

R. R. Ernst



1991 ↓

タンパク質構造解析

K. Wüthrich



2002 ↓

磁気共鳴イメージング(MRI)

P. Mansfield



2003 ↓

P. C. Lauterbur



医科学

1944 ↑



I. I. Rabi

核磁気共鳴

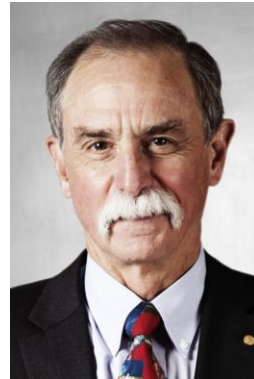
1989 ↑



N. F. Ramsey

ラムゼー干渉法

2012 ↑



D. J. Wineland

個別量子系の制御



S. Haroche



J. F. Clauser

量子もつれとベルの不等式の破れ

2022 ↑



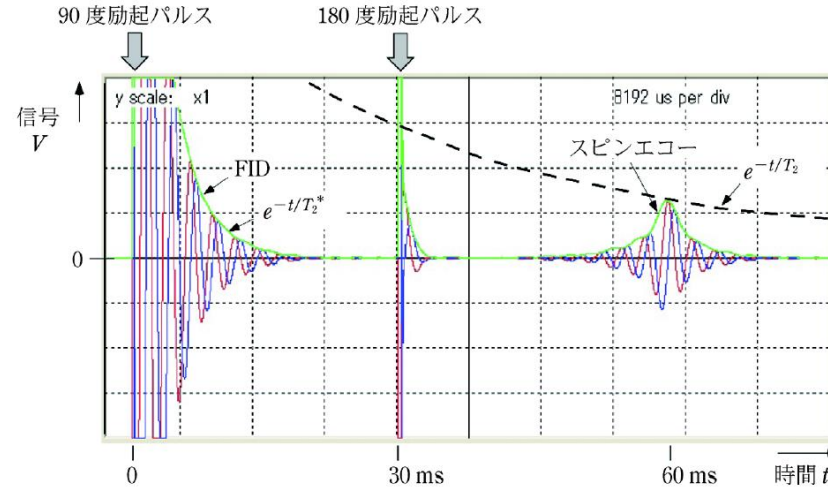
A. Aspect



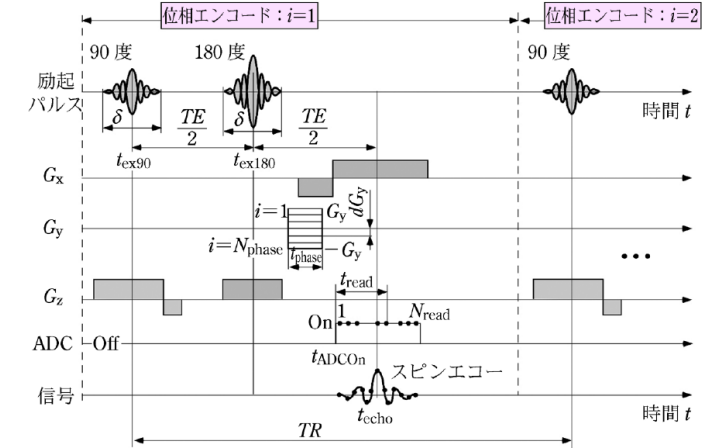
A. Zeilinger

量子情報

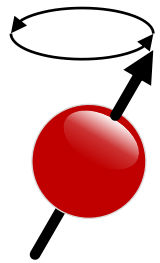
磁気共鳴イメージング



MRI で水を計測した際に観測された FID とスピネコー信号

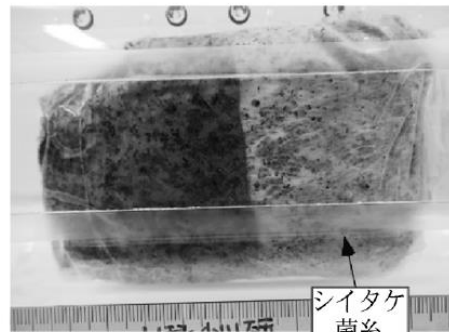


スライス選択励起スピネコー法のシーケンス例



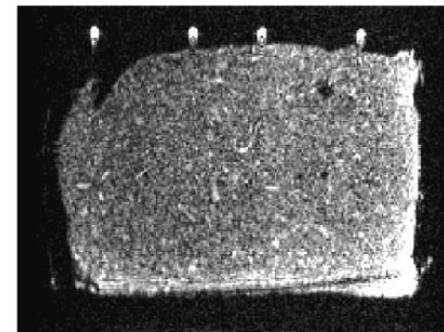
核スピン

(a) シイタケ菌床の写真

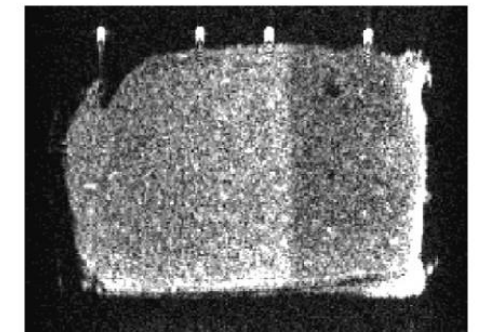


130 mm

(b) $TR=400$ ms の MR 画像



(c) $TR=54$ ms (T_1 強調) の MR 画像



シイタケ菌糸

シイタケ菌床の MR 画像

核磁気共鳴量子コンピュータ

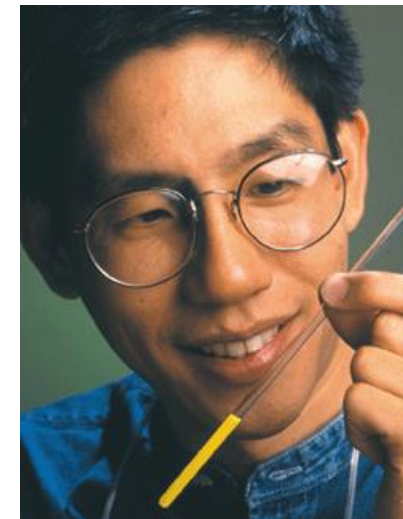
I. L. Chuang

RESEARCH ARTICLES

Bulk Spin-Resonance Quantum Computation

Neil A. Gershenfeld and Isaac L. Chuang*

Science **275**, 350 (1997) Gershenfeld & Chuang



<https://physicsworld.com/a/quantum-computing-with-solids/>

Ensemble quantum computing by NMR spectroscopy

(NMR/quantum computing/DNA computing/nondeterministic polynomial-time complete)

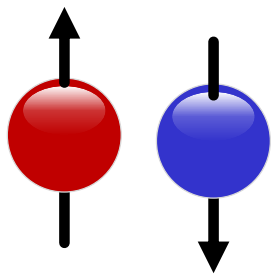
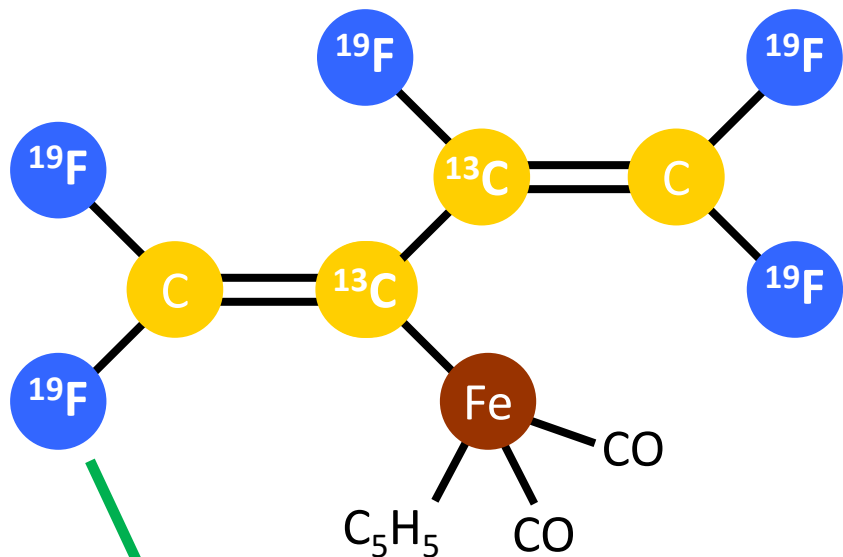
DAVID G. CORY[‡], AMR F. FAHMY[§], AND TIMOTHY F. HAVEL^{§¶}

[‡]Department of Nuclear Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139; and [§]Biological Chemistry and Molecular Pharmacology, Harvard Medical School, Boston, MA 02115

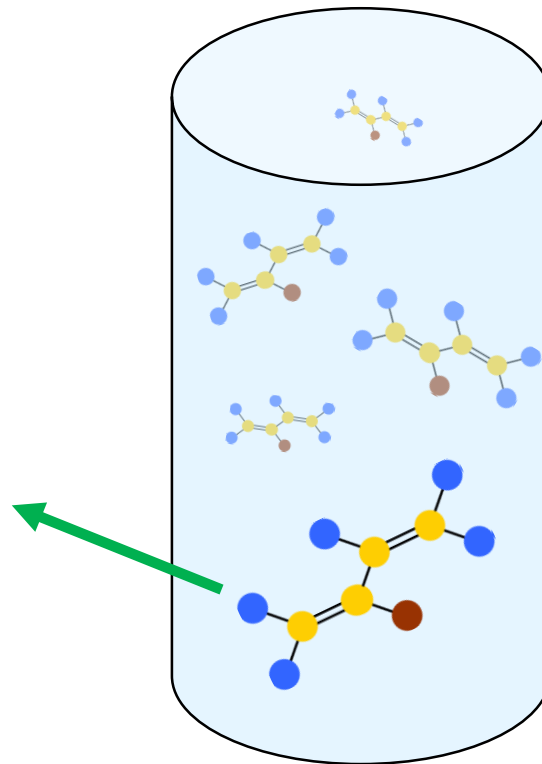
PNAS **94**, 1634 (1997) Cory *et al.*

核磁気共鳴量子コンピュータ

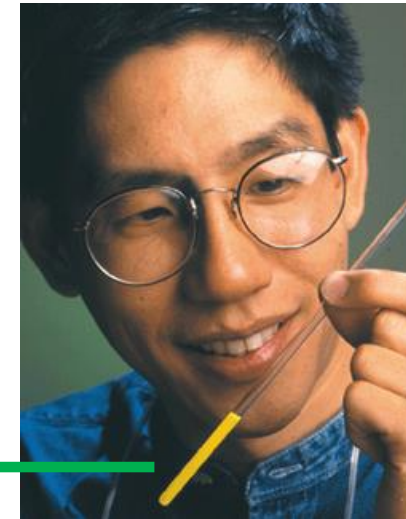
7量子ビット分子量子コンピュータ



量子ビット: 核スピン $\frac{1}{2}$ の
上向き・下向き状態



I. L. Chuang



<https://physicsworld.com/a/quantum-computing-with-solids/>

長所

- スピン緩和時間(T_1 , T_2)が長い
- 数100MHzのラジオ波パルス発生技術が確立している

短所

- 単一核スピンの測定困難 → 多数の分子の平均信号を読み出す(bulk, ensemble)
- 分極率の低さ
- 分子のサイズで量子ビット数が決まる

核磁気共鳴量子コンピュータ

Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance

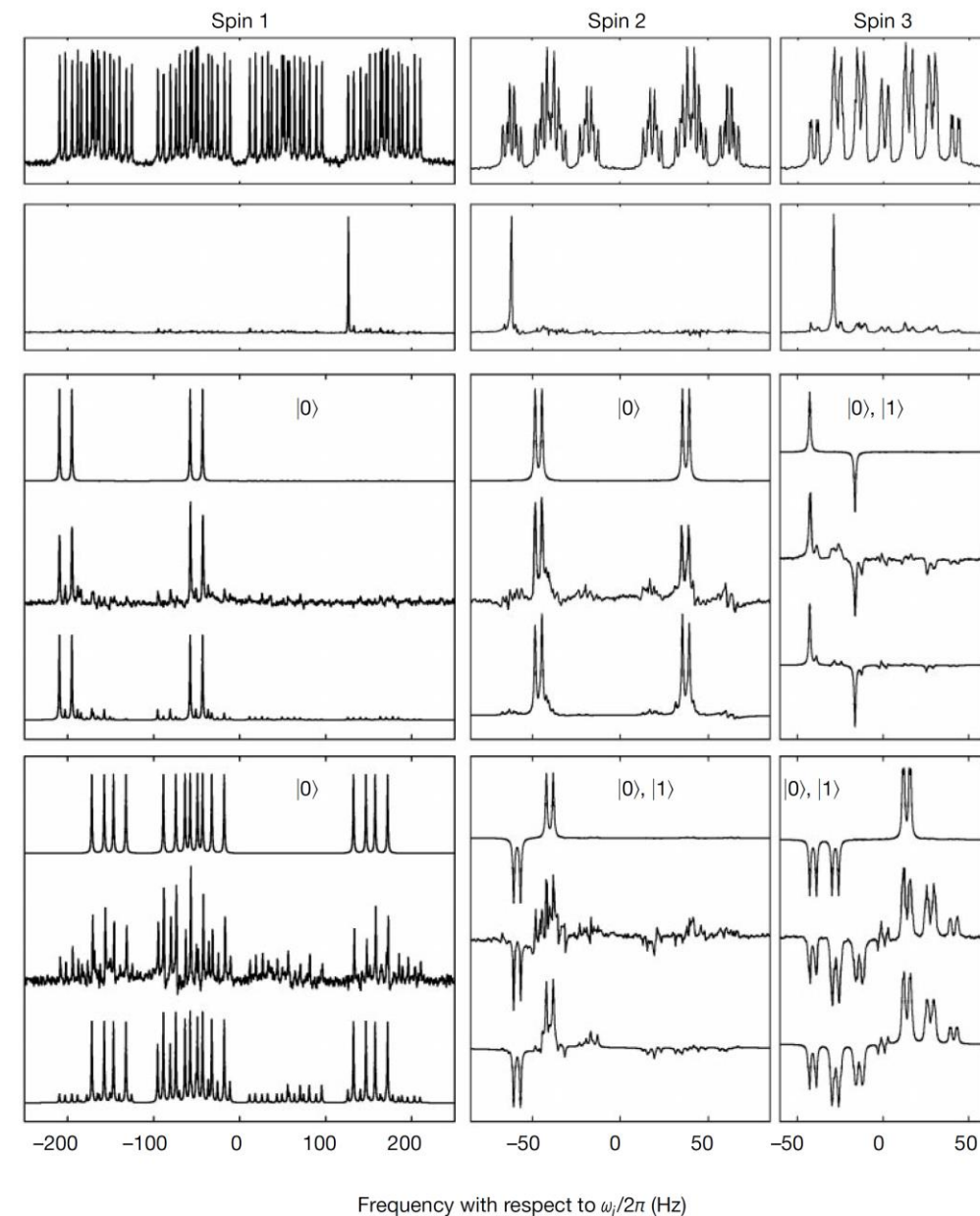
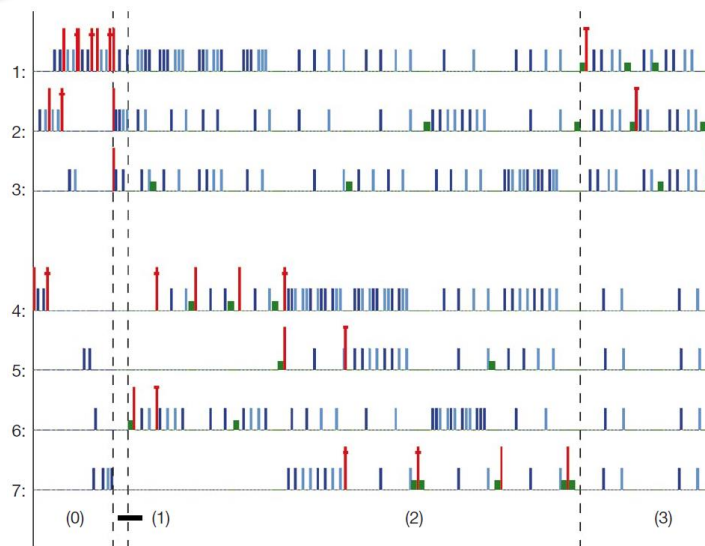
Lieven M. K. Vandersypen^{*†}, Matthias Steffen^{*†}, Gregory Breyta^{*}, Costantino S. Yannoni^{*}, Mark H. Sherwood^{*} & Isaac L. Chuang^{*†}

^{*} IBM Almaden Research Center, San Jose, California 95120, USA

[†] Solid State and Photonics Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305-4075, USA

Nature **414**, 883 (2001) Vandersypen *et al.*

$$15 = 5 \times 3$$



核磁気共鳴量子コンピュータの役割

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 76, OCTOBER 2004

NMR techniques for quantum control and computation

L. M. K. Vandersypen*

Kavli Institute of NanoScience, Delft University of Technology, 2628 CJ Delft, The Netherlands

I. L. Chuang†

Center for Bits and Atoms and Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA

(Published 12 January 2005)

Fifty years of developments in nuclear magnetic resonance (NMR) have resulted in an unrivaled degree of control of the dynamics of coupled two-level quantum systems. This coherent control of nuclear spin dynamics has recently been taken to a new level, motivated by the interest in quantum information processing. NMR has been the workhorse for the experimental implementation of quantum protocols, allowing exquisite control of systems up to seven qubits in size. This article surveys and summarizes a broad variety of pulse control and tomographic techniques which have been developed for, and used in, NMR quantum computation. Many of these will be useful in other quantum systems now being considered for the implementation of quantum information processing tasks.

Rev. Mod Phys. **76**, 1037 (2004) Vandersypen & Chuang

今後、量子情報の研究が核磁気共鳴やレーザーと同様に、大きなインパクトを社会へ及ぼす本物の技術へと発展するものなのかどうかは現時点（2005年7月）では全く未知である。 ひとつだけ確かなことは、量子情報システムがもしひとつでも将来実現されるようなことがあれば、それを構築する具体的実現手段は、そのほとんどすべての概念・原理・実験技術を、この2つの分野（核磁気共鳴とレーザー分光）から相続して踏襲しているだろうことである。 これは、例えば、光ポンピングや二重共鳴による量子状態の初期化、マイクロ波や光パルスによる二準位量子系のコヒーレントなユニタリ制御、スピネコーなど様々なデコヒーレンスを抑圧する技術、単一量子系の射影測定、などの量子情報システムの構築に欠かせない原理と技術は、この2つの分野で生まれ育ってきたものだからである。

日本物理学会誌 **60**, 928 (2005) 山本

全シリコン量子コンピュータ

VOLUME 89, NUMBER 1

PHYSICAL REVIEW LETTERS

1 JULY 2002

All-Silicon Quantum Computer

T. D. Ladd,* J. R. Goldman, F. Yamaguchi, and Y. Yamamoto†

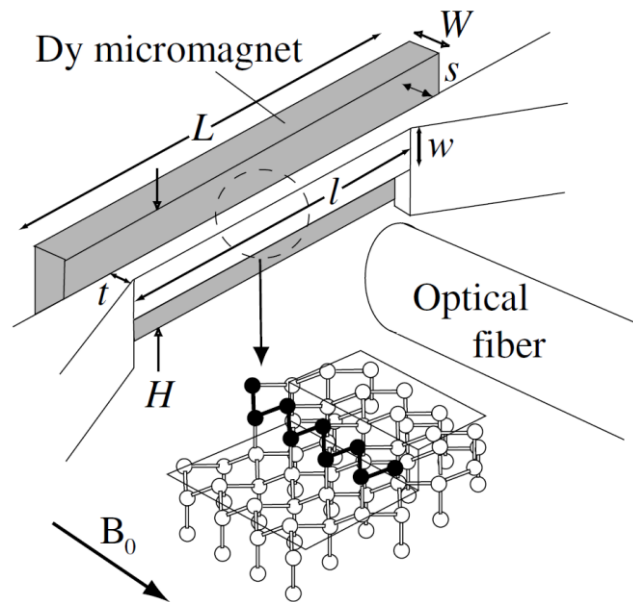
Quantum Entanglement Project, ICORP, JST, Edward L. Ginzton Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305-4085

E. Abe and K. M. Itoh‡

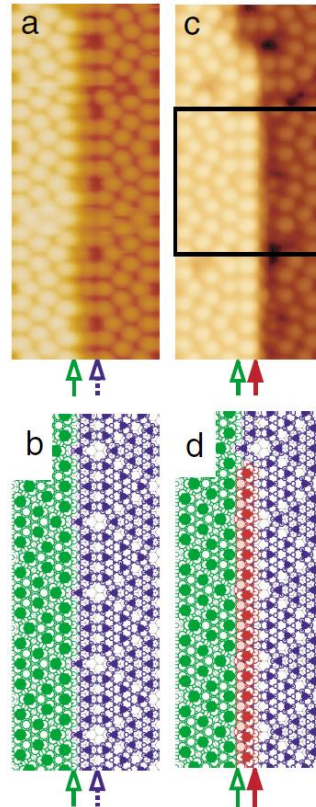
Department of Applied Physics and Physico-Informatics, Keio University, Yokohama 223-8522, Japan

(Received 10 September 2001; published 12 June 2002)

Phys. Rev. Lett. **89**, 017901 (2002) Ladd *et al.*



Phys. Rev. Lett. **95**, 106101 (2005) Sekiguchi *et al.*



PHYSICAL REVIEW B **71**, 014401 (2005)

Coherence time of decoupled nuclear spins in silicon

T. D. Ladd,* D. Maryenko,† and Y. Yamamoto‡

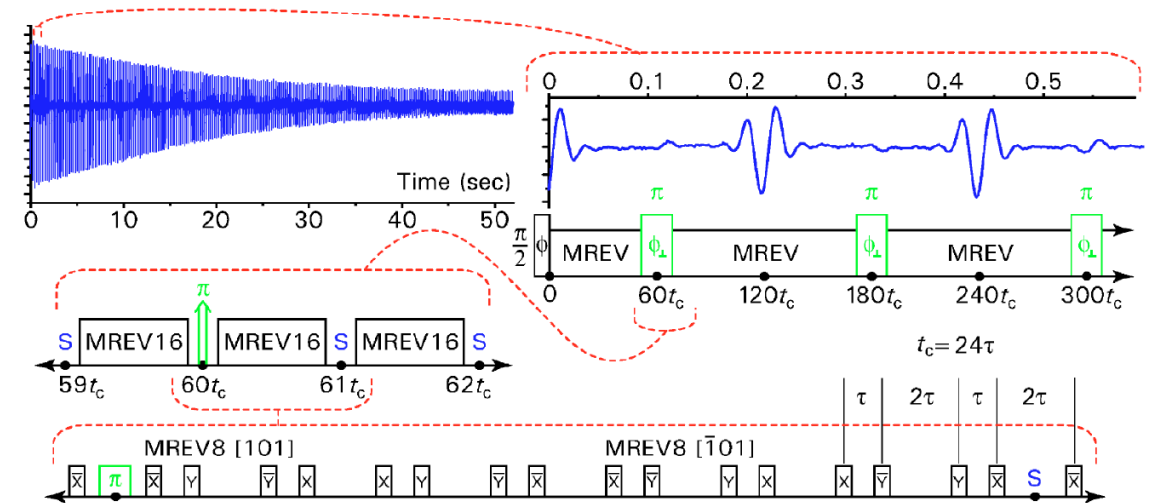
Quantum Entanglement Project, SORST, JST, Edward L. Ginzton Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305-4085, USA

E. Abe and K. M. Itoh

Department of Applied Physics and Physico-Informatics, CREST, JST, Keio University, Yokohama, 223-8522, Japan

(Received 18 August 2004; published 4 January 2005)

Phys. Rev. B **71**, 014401 (2005) Ladd *et al.*



MREV = Mansfield-Rhim-Elleman-Vaughan

研究者たちのその後

Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance

Lieven M. K. Vandersypen^{*†}, Matthias Steffen^{*†}, Gregory Breyta^{*}, Costantino S. Yannoni^{*}, Mark H. Sherwood^{*} & Isaac L. Chuang^{*†}

^{*} IBM Almaden Research Center, San Jose, California 95120, USA

[†] Solid State and Photonics Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305-4075, USA

Nature **414**, 883 (2001) Vandersypen *et al.*

- **Lieven M. K. Vandersypen** (デルフト工科大)
→ シリコン量子コンピュータ開発
- **Matthias Steffen** (IBM)
→ 超伝導量子コンピュータ開発
- **Isaac Chuang** (MIT)
→ イオントラップ量子コンピュータ開発

https://www.ibm.com/ibm/ideasfromibm/us/ibm_fellows/2017/matthias_steffen.html



<https://qutech.nl/person/lieven-vandersypen/>



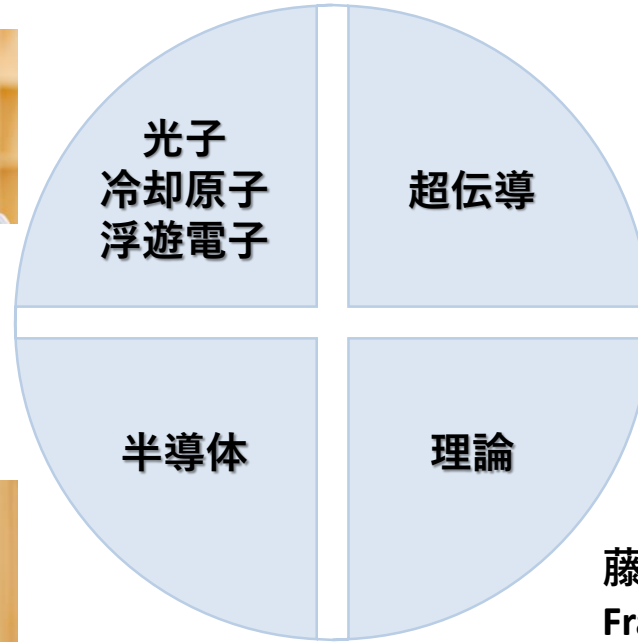
<https://web.mit.edu/~cua/www/quanta/people.html>

野口篤史



古澤明 (副センター長)
米澤英宏
福原武
川上恵里加 (白眉)

中村泰信 (センター長)
蔡兆申
阿部英介
田淵豊



萬伸一 (副センター長)



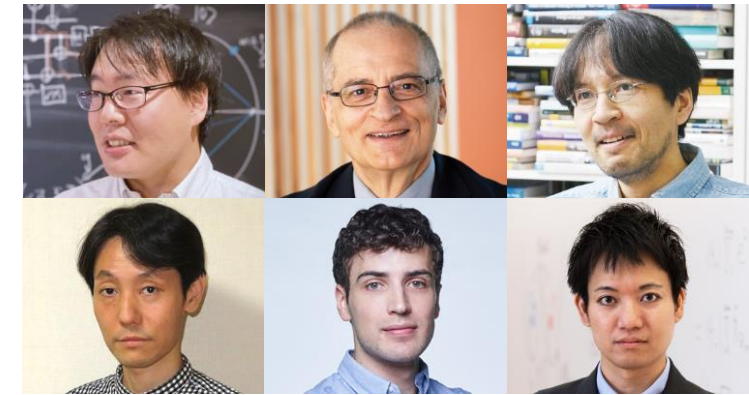
樽茶清吾



Daniel Loss



藤井啓祐
Franco Nori
柚木清司
後藤隼人
Bartosz Regula (白眉)
桑原知剛 (白眉)



佐藤信太郎
(理研RQC-富士通連携センター副センター長)



古澤明 (副)

川上寛



萬伸一 (副センター長)



佐藤信太郎
(理研RQC-富士通連携センター副センター長)

letters to nature

Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box

Y. Nakamura^{*}, Yu. A. Pashkin[†] & J. S. Tsai^{*}

^{*} NEC Fundamental Research Laboratories, Tsukuba, Ibaraki 305-8051, Japan

[†] CREST, Japan Science and Technology Corporation (JST), Kawaguchi, Saitama 332-0012, Japan

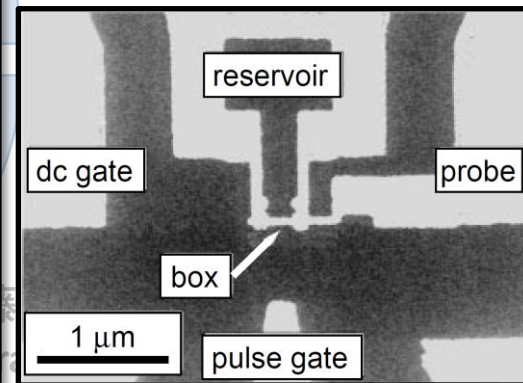
A nanometre-scale superconducting electrode connected to a reservoir via a Josephson junction constitutes an artificial two-level electronic system: a single-Cooper-pair box. The two levels consist of charge states (differing by $2e$, where e is the electronic charge) that are coupled by tunnelling of Cooper pairs through the junction. Although the two-level system is macroscopic, containing a large number of electrons, the two charge states can be coherently superposed¹⁻⁴. The Cooper-pair box has therefore been suggested⁵⁻⁷ as a candidate for a quantum bit or 'qubit'—the basic component of a quantum computer. Here we

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



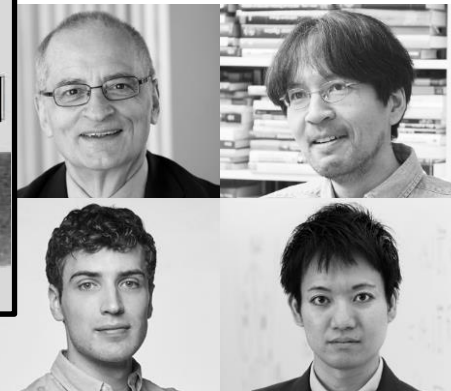
中村泰信 (センター長)

蔡兆申
阿部英介
田淵豊



柚木清司
後藤隼人

Bartosz Regula (白眉)
桑原知剛 (白眉)

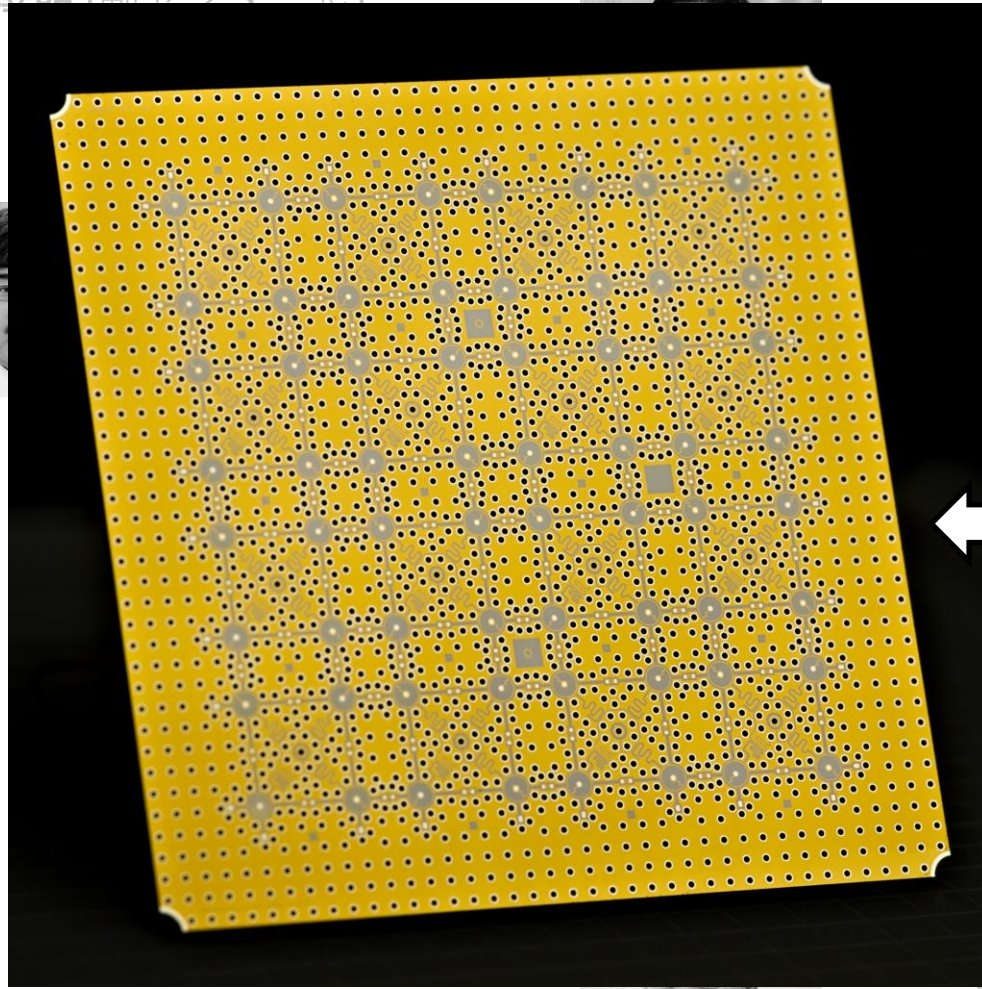
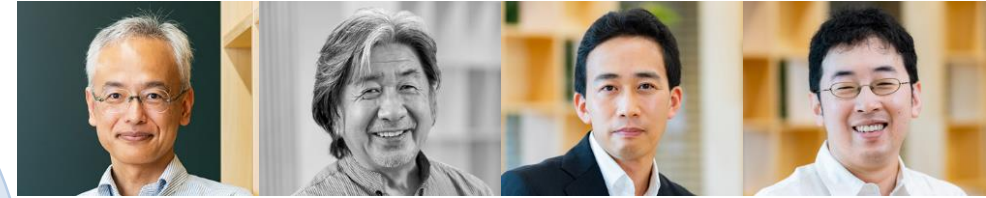


野口篤史

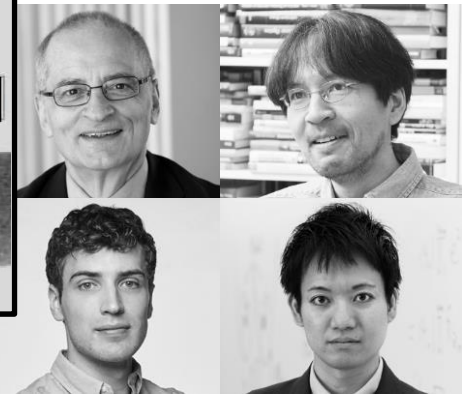
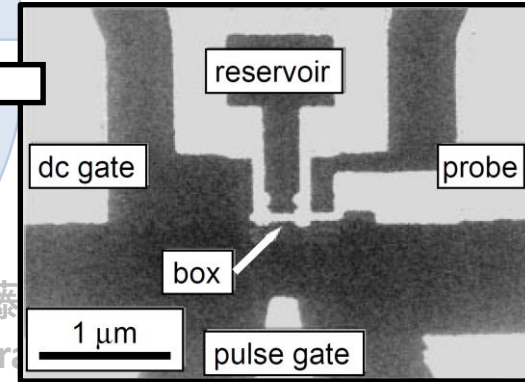
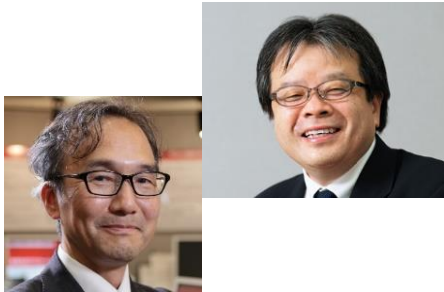
古澤明 (副センター長)

中村泰信 (センター長)

蔡兆申
阿部英介
田淵豊



萬伸一 (副センター長)

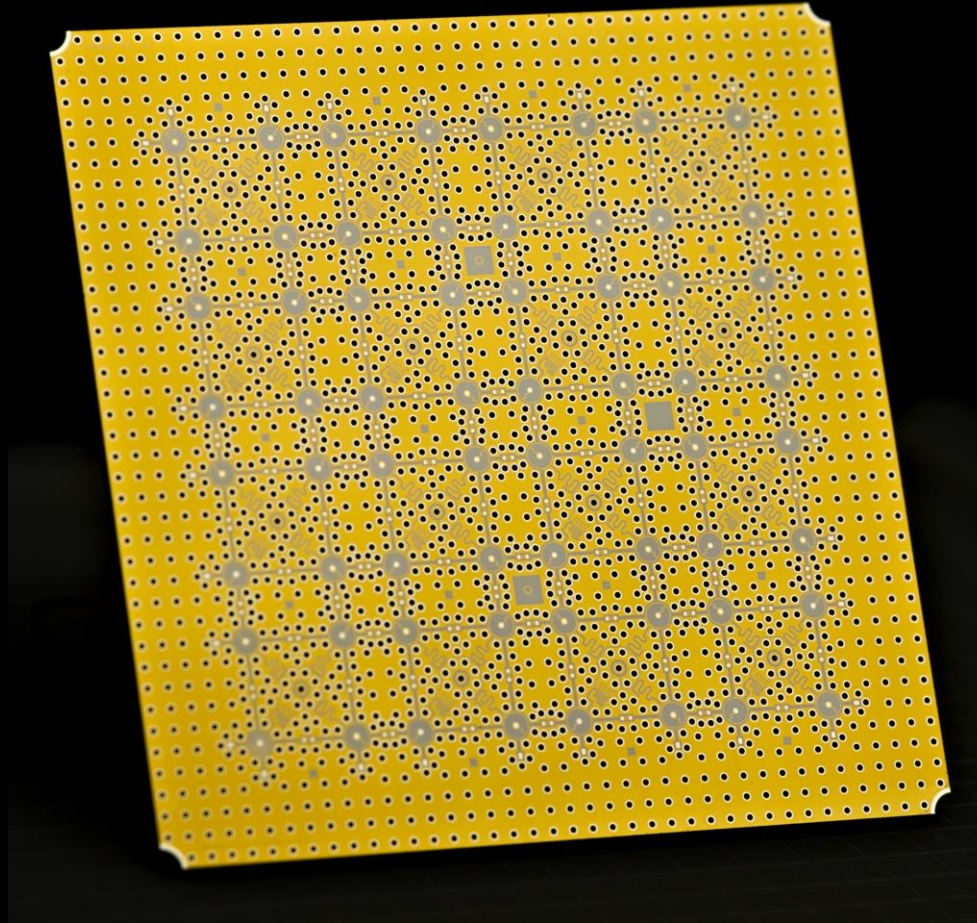


佐藤信太郎
(理研RQC-富士通連携センター副センター長)

artosz Regula (白眉)
桑原知剛 (白眉)



64量子ビットチップ

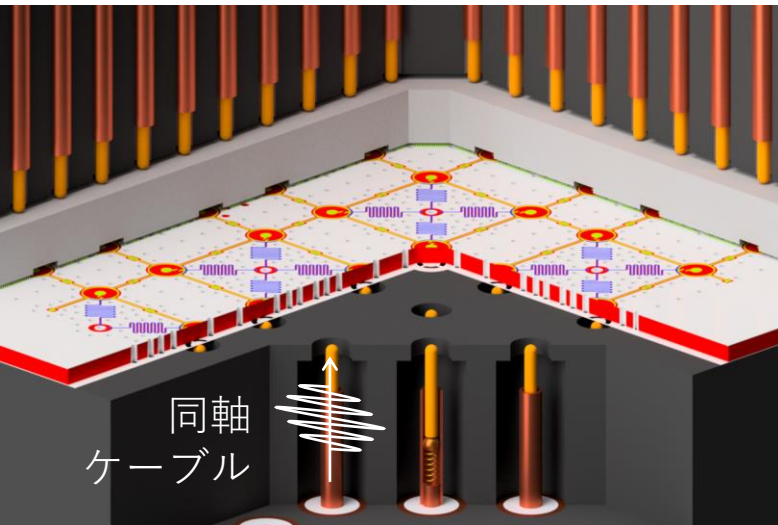
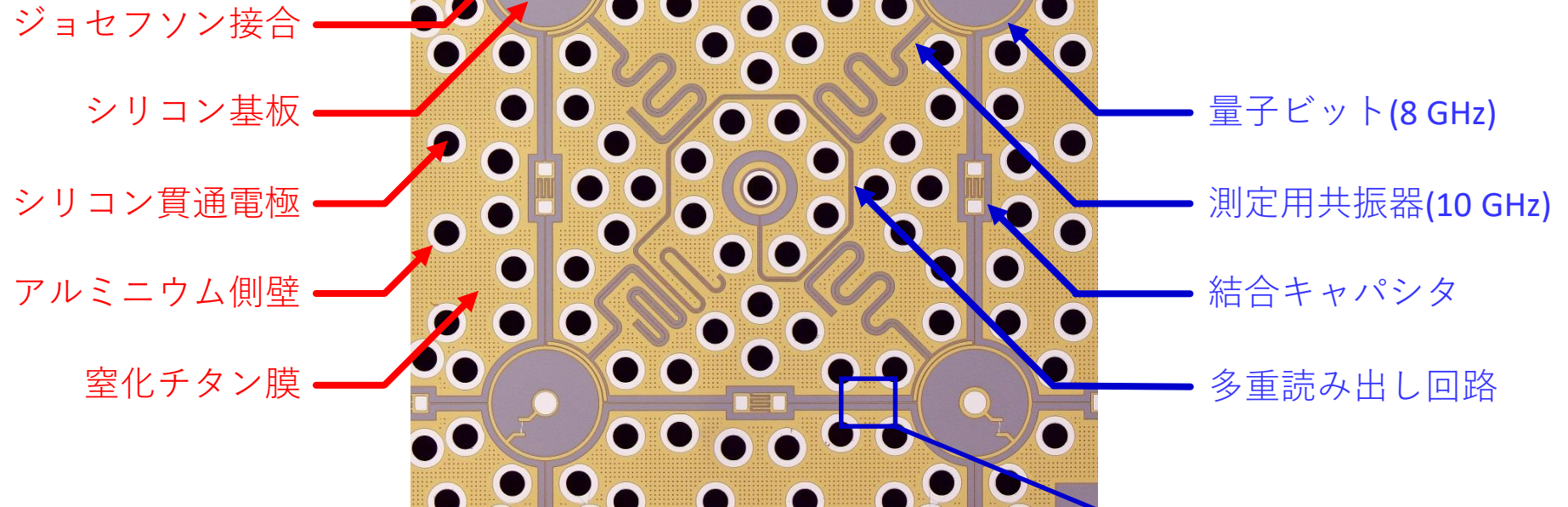
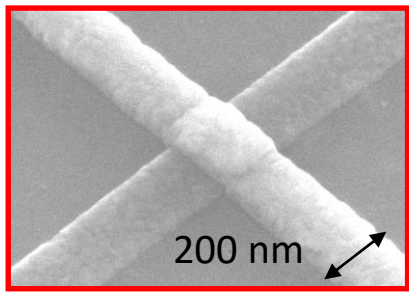


2022年6月2日 首相官邸

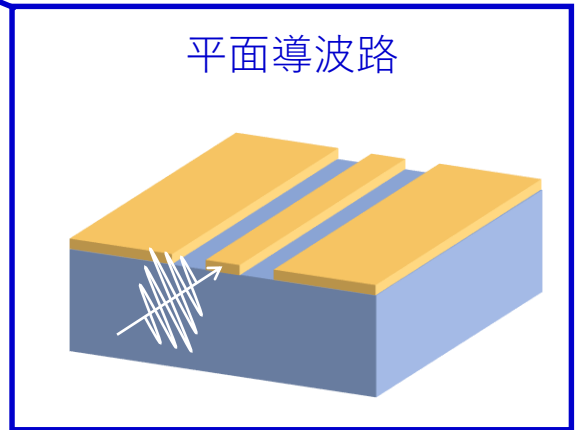


https://www.kantei.go.jp/jp/101_kishida/actions/202206/02kagaku.html

量子プロセッサ



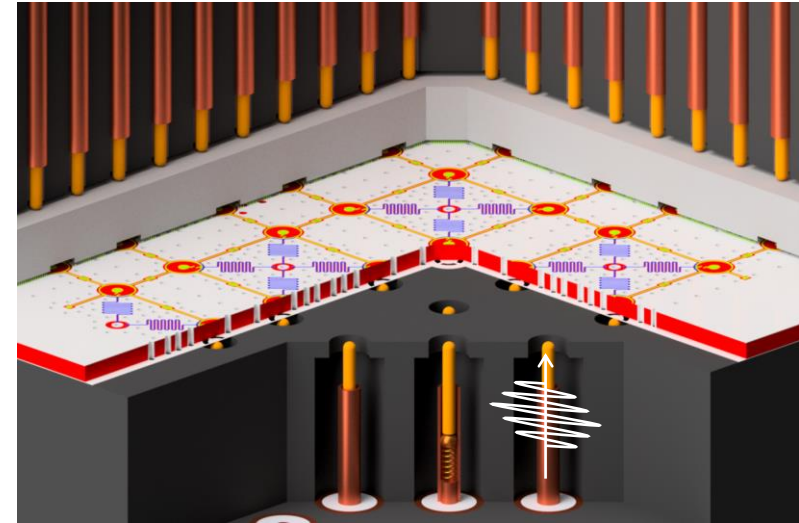
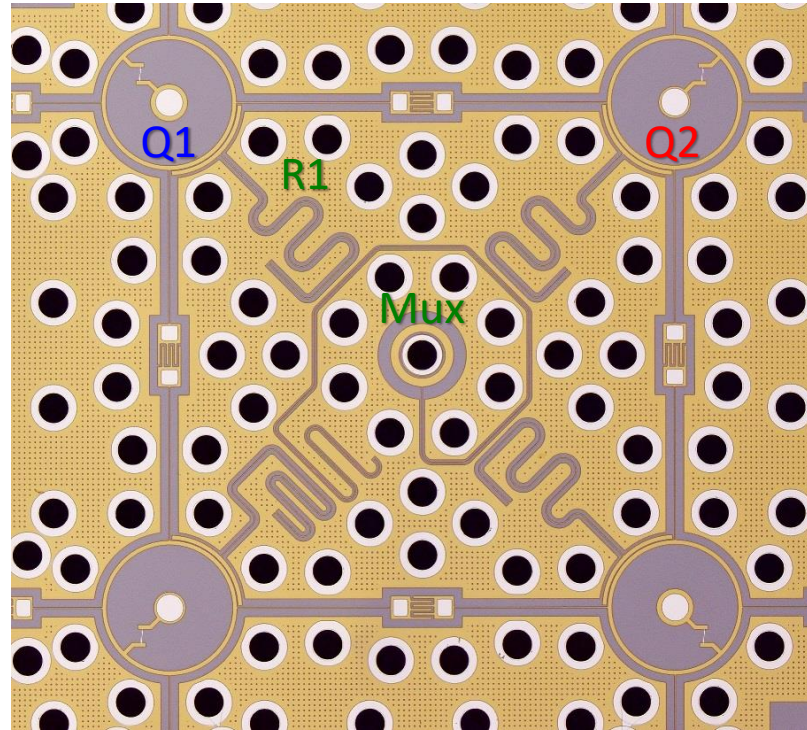
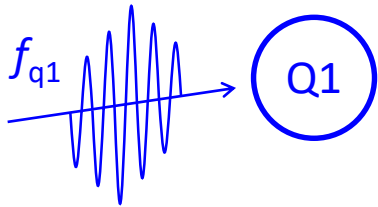
マイクロ波の“道”が量子ビットを繋ぐ



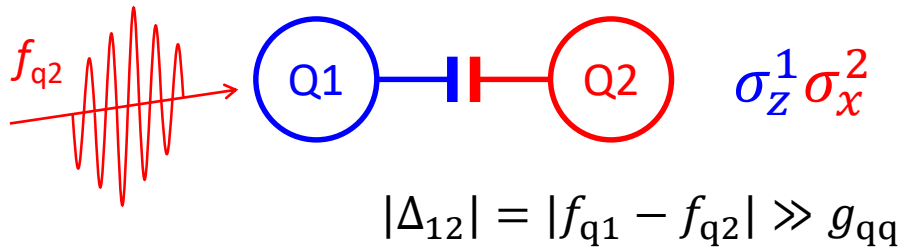
量子プロセッサ

- 周波数固定量子ビット
- マイクロ波のみで実行可能
- チップ上にDC配線が不要

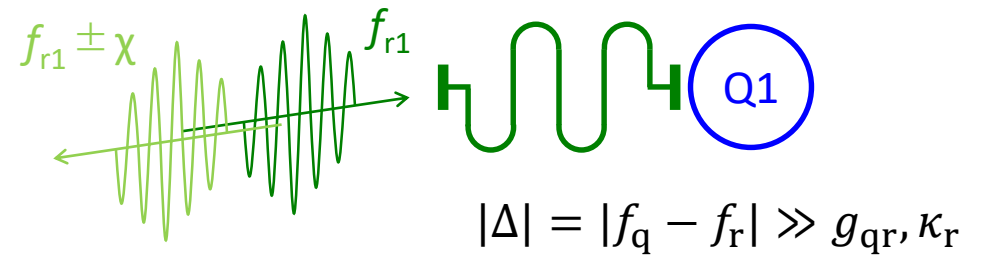
1Qゲート (ラビ振動)



2Qゲート (交差共鳴, CR)



状態測定 (分散シフト)

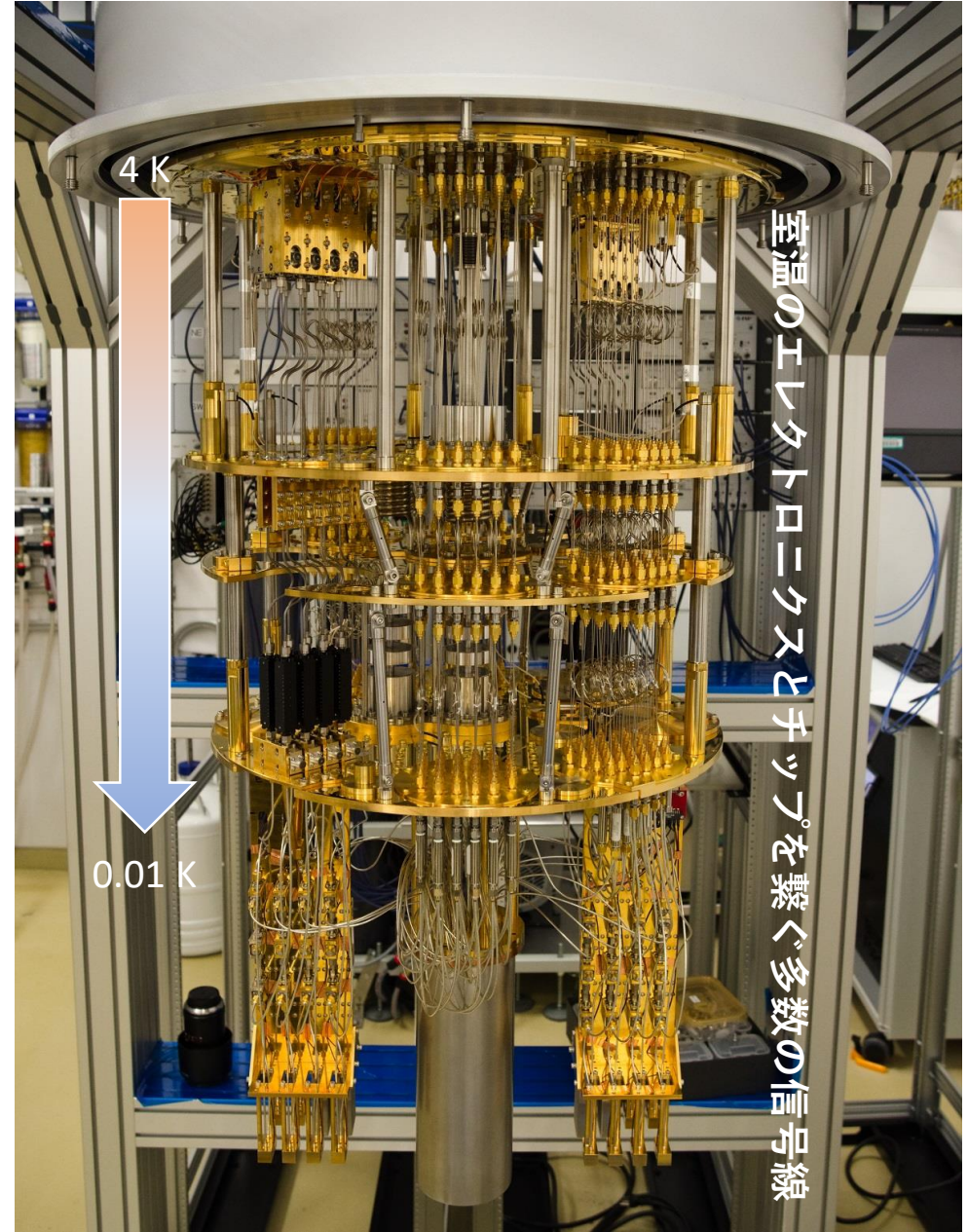


理研超伝導量子コンピュータ

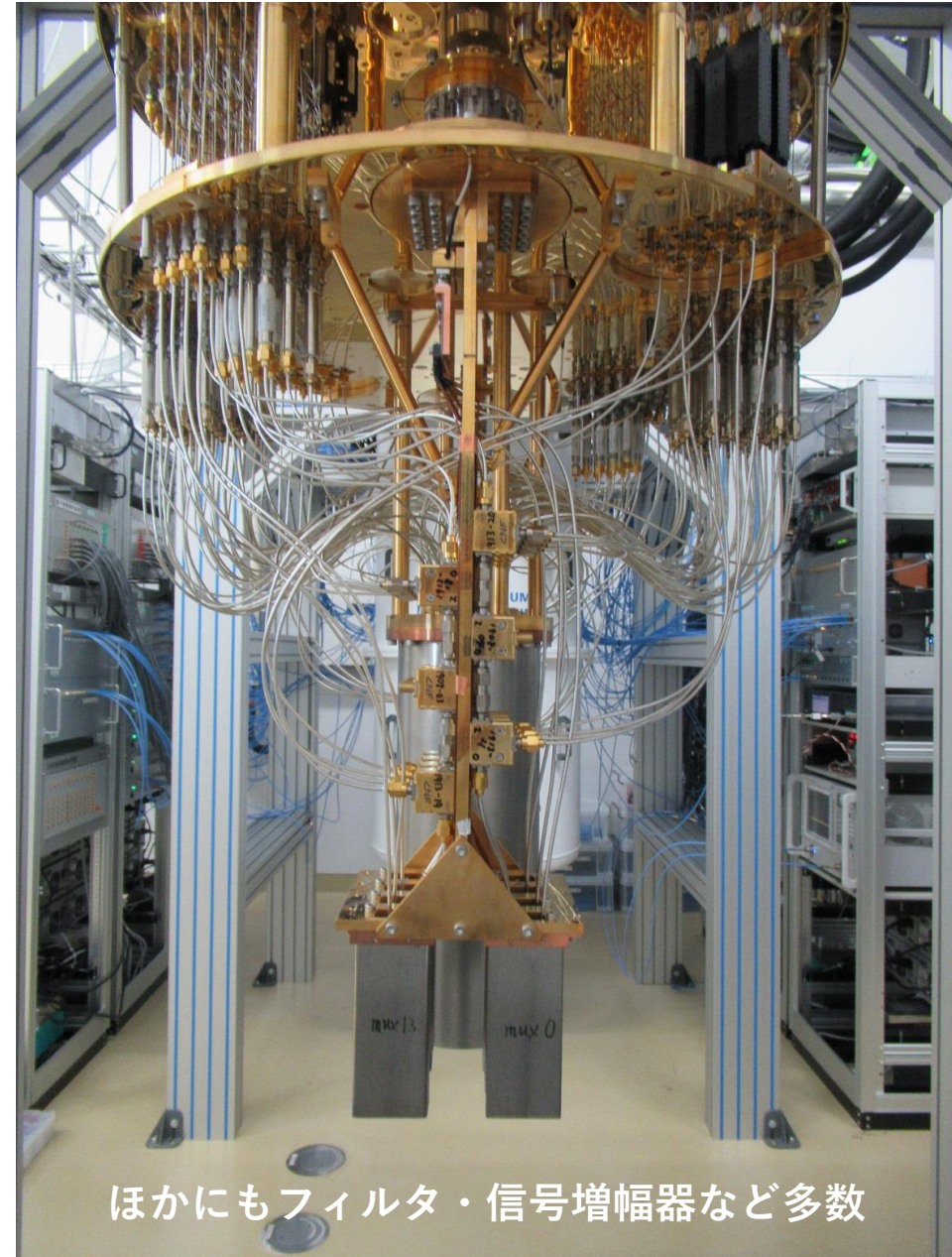
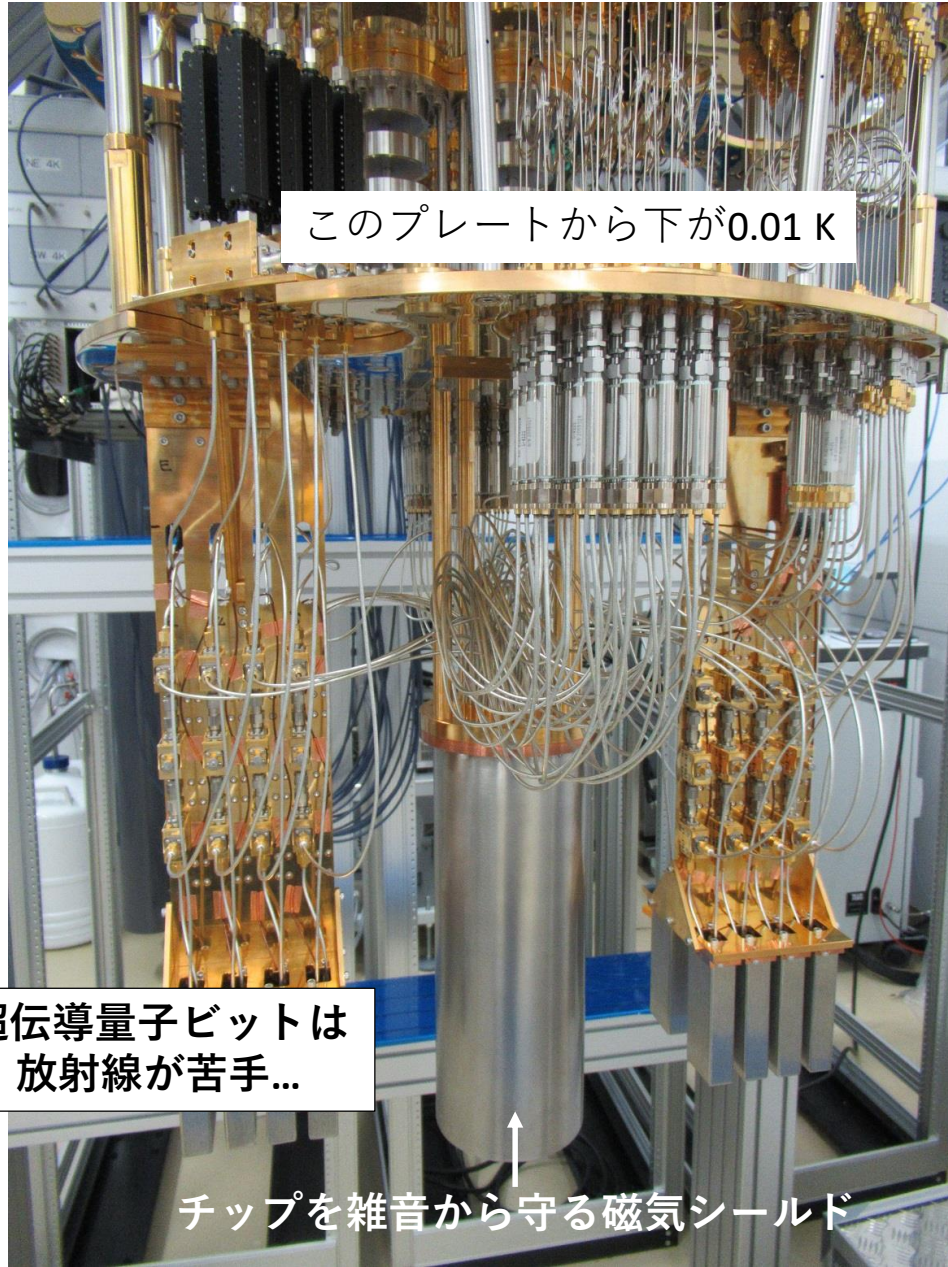
冷却装置温度 = 0.01 K (摂氏-273.15度より0.01度高い) \leftrightarrow エネルギー = 10 GHz = 0.48 K



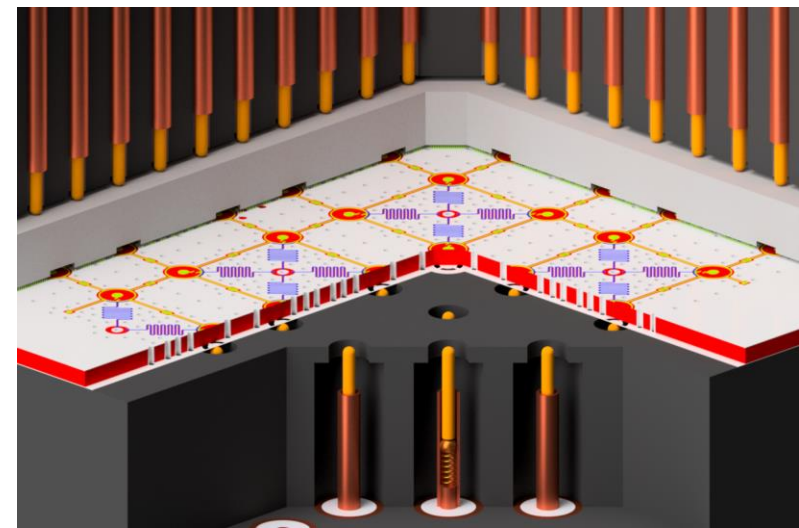
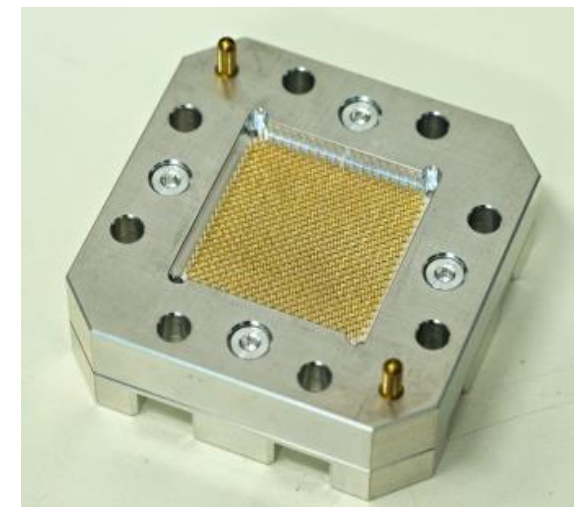
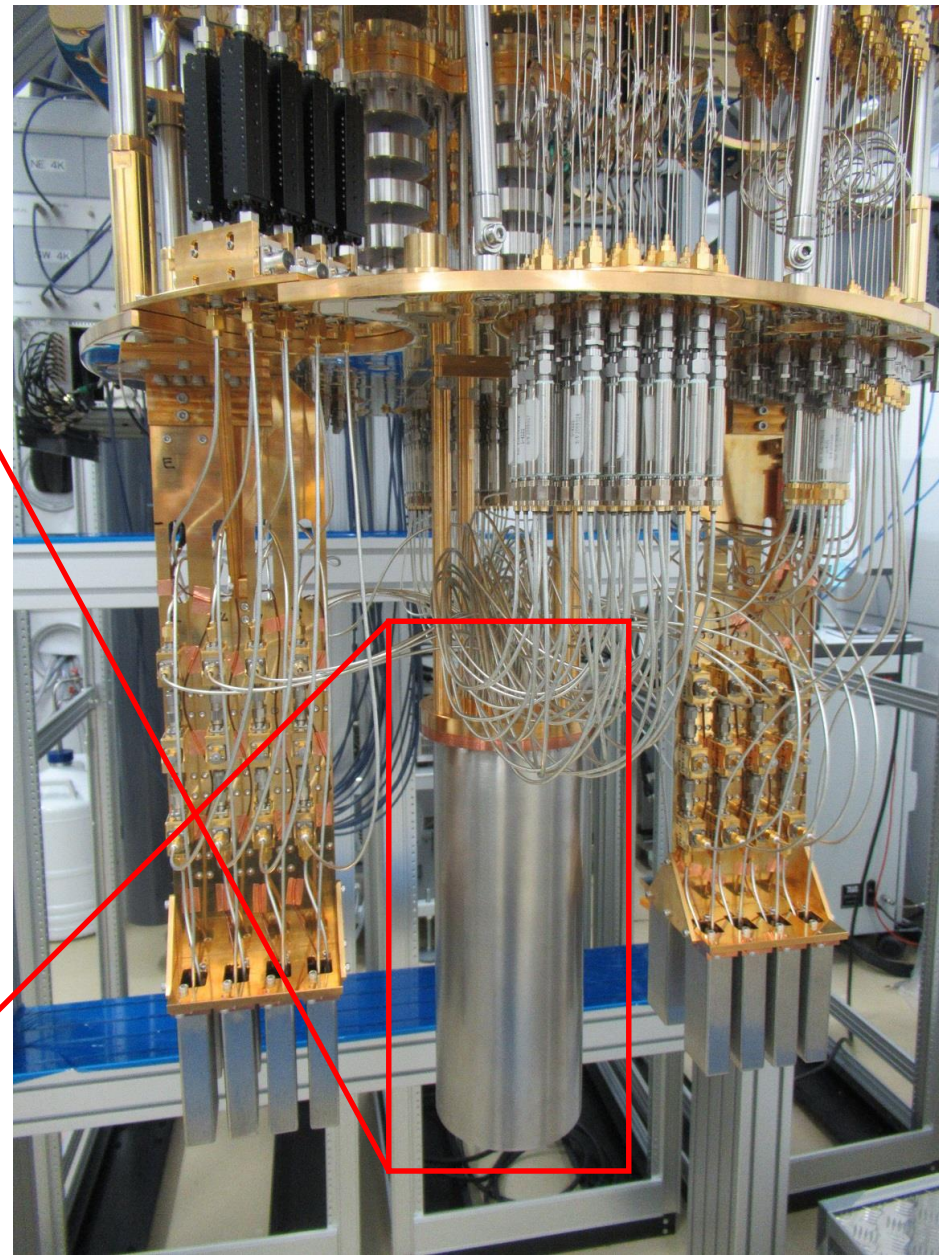
量子コンピュータの中身



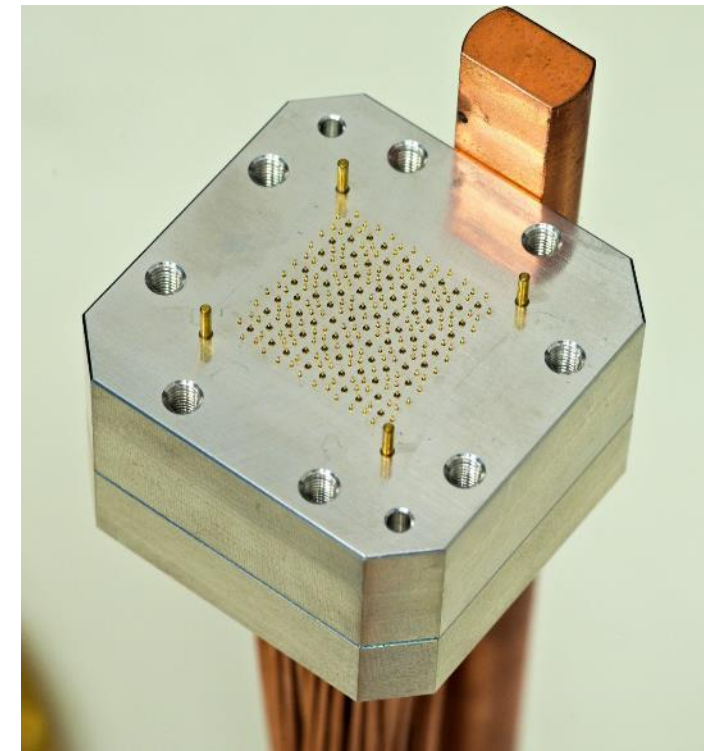
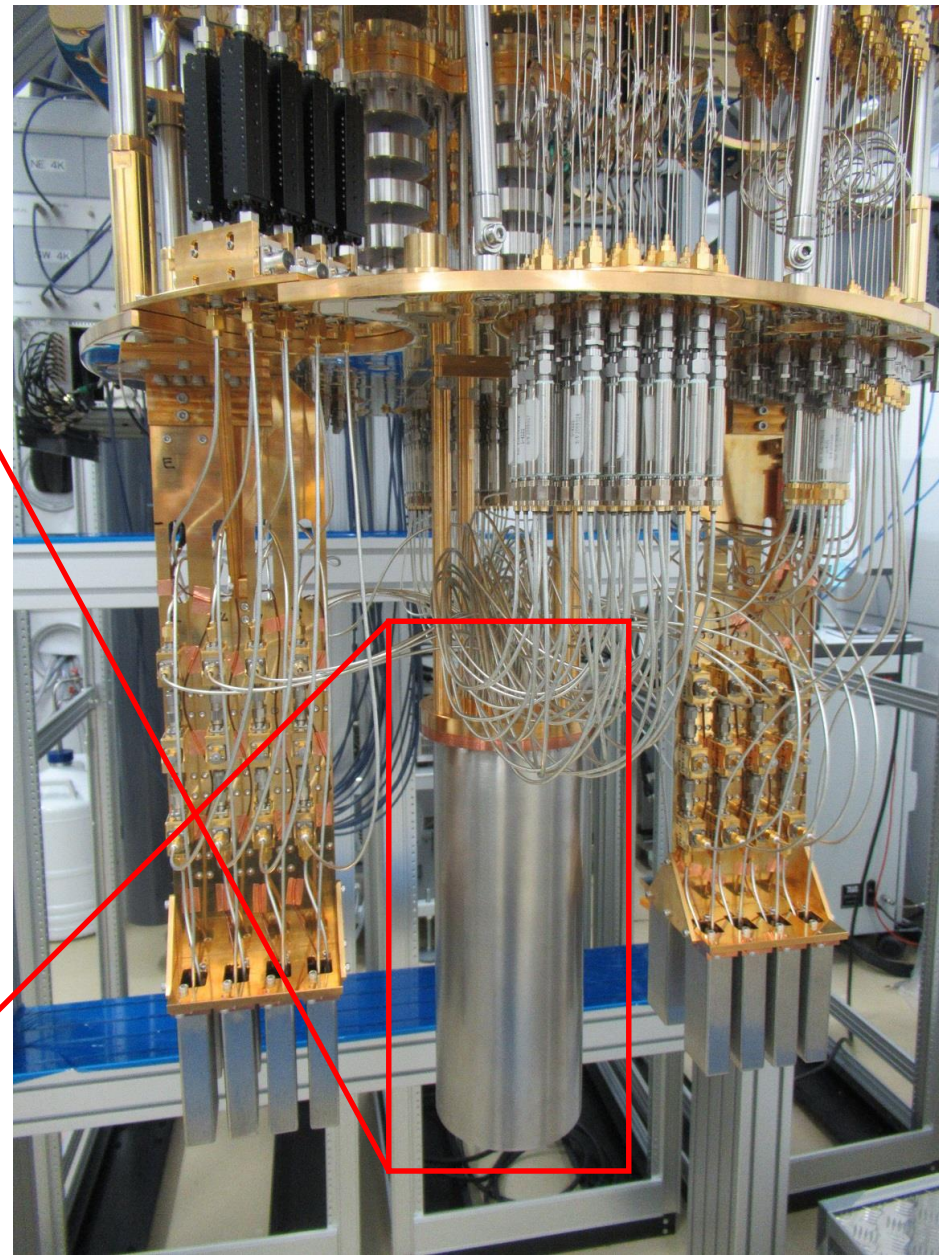
量子コンピュータの中身



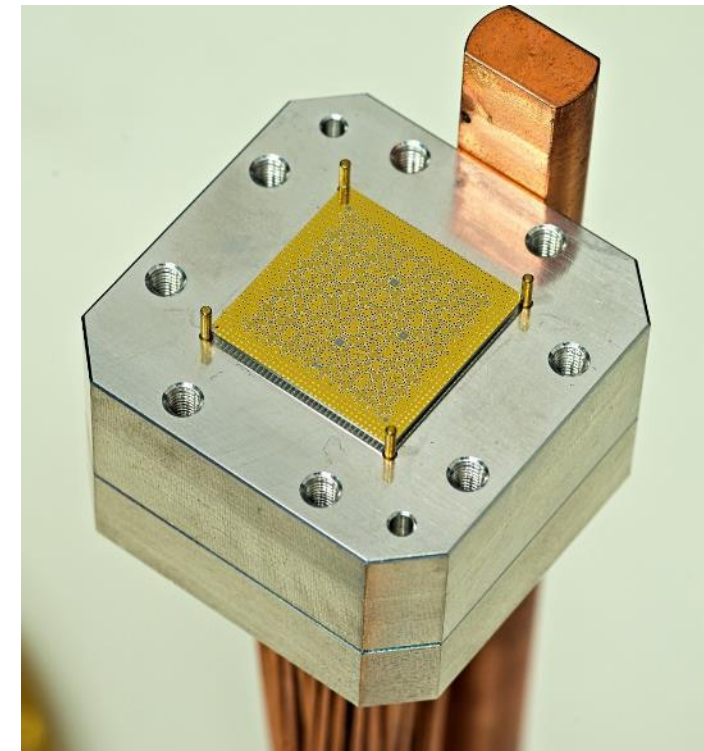
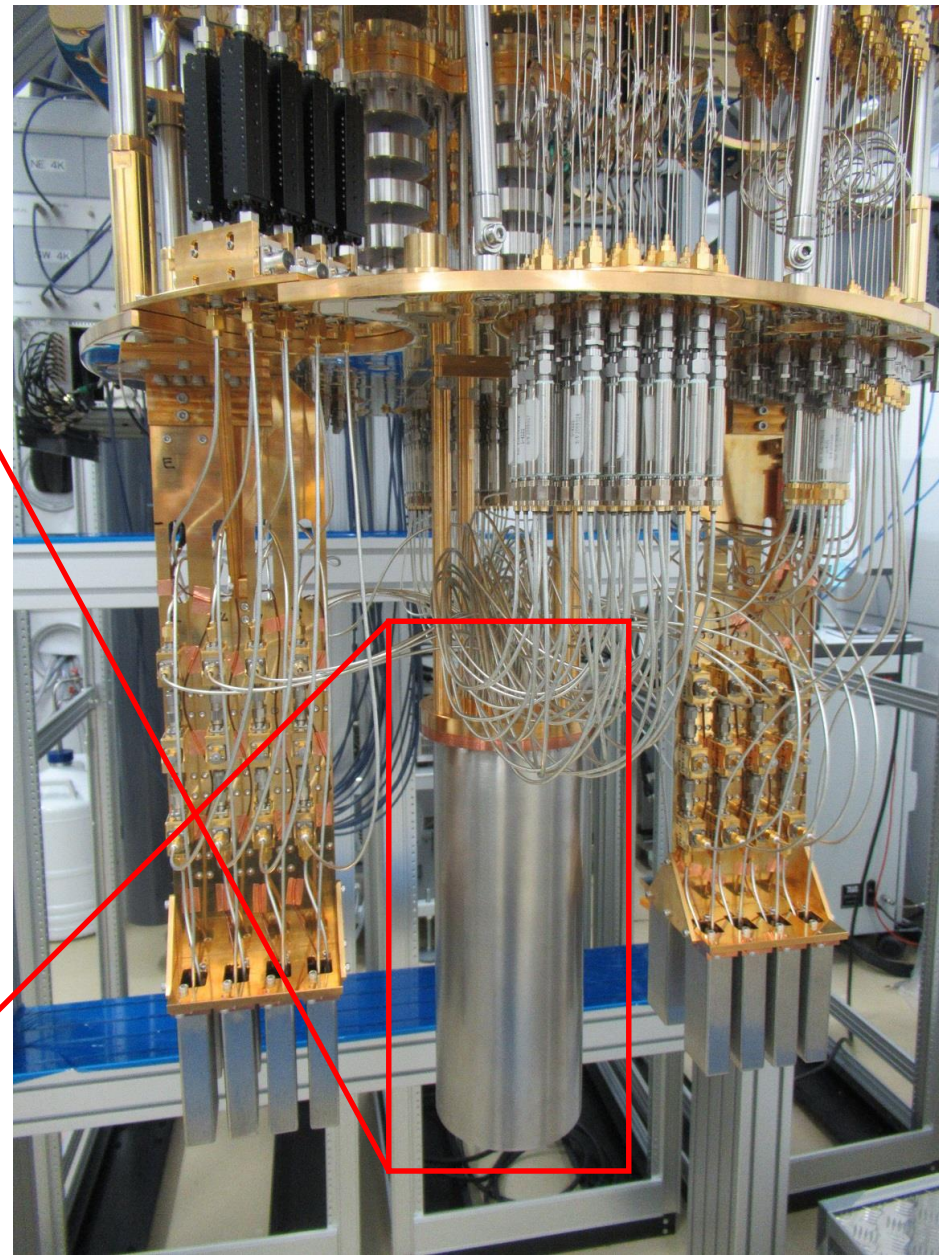
量子コンピュータの中身



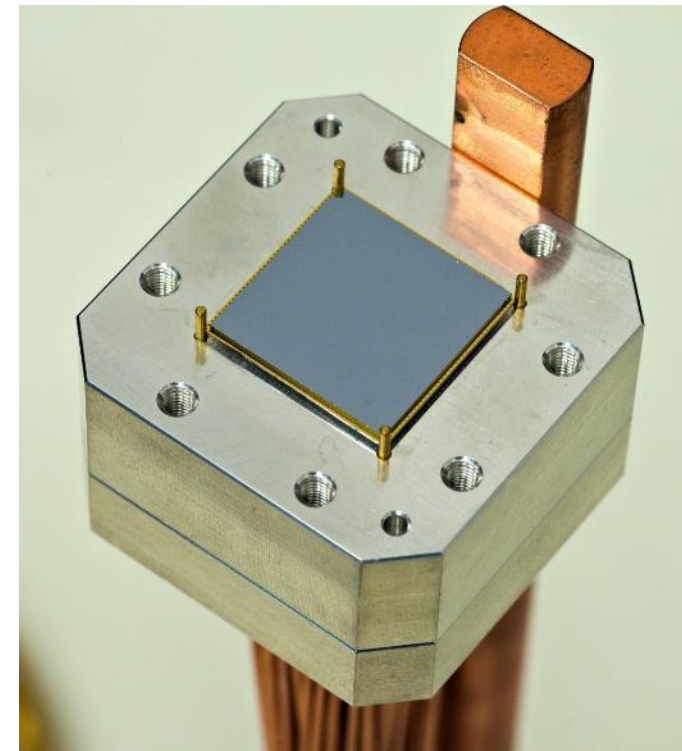
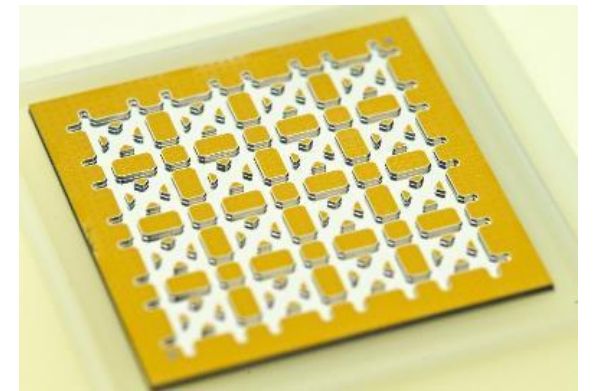
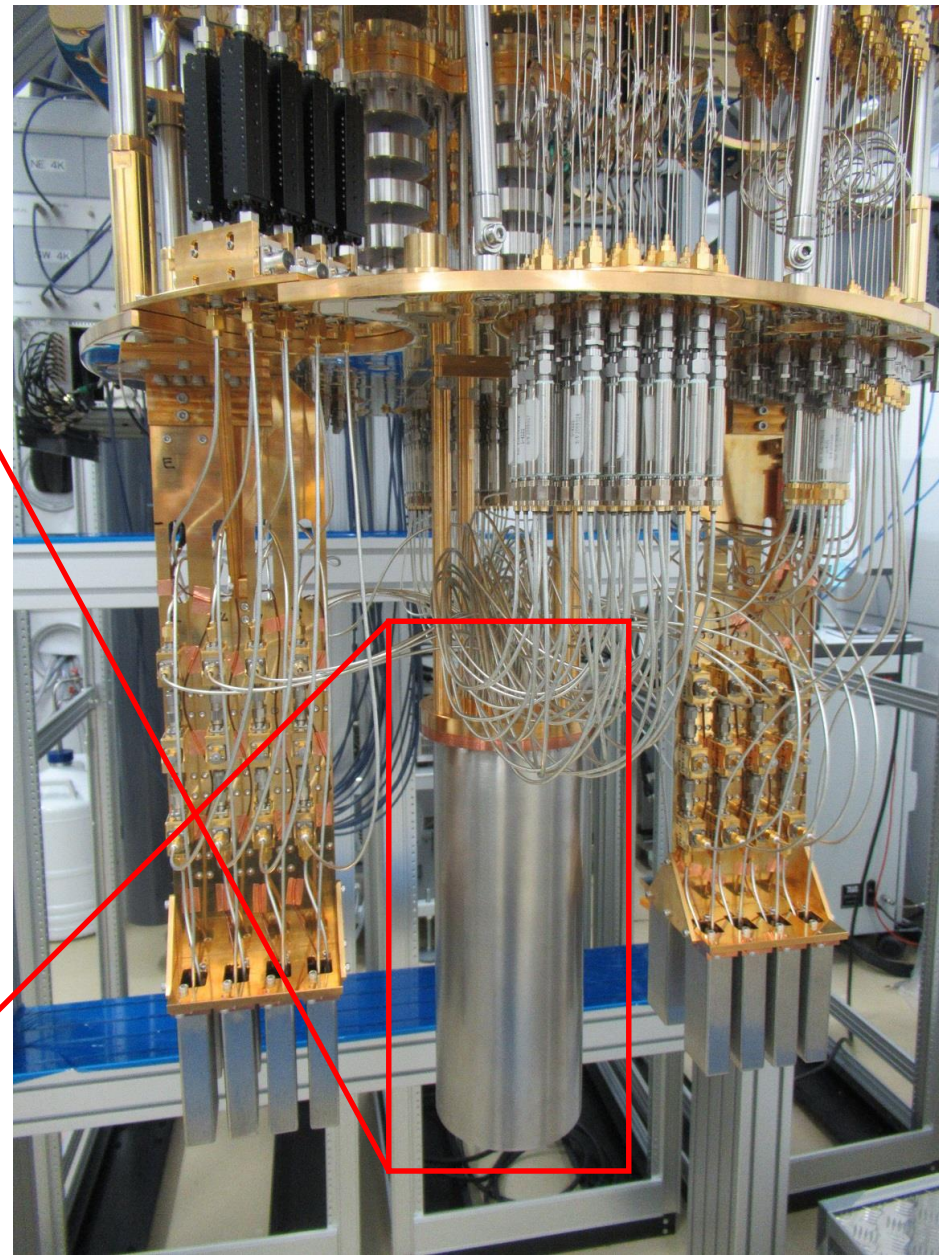
量子コンピュータの中身



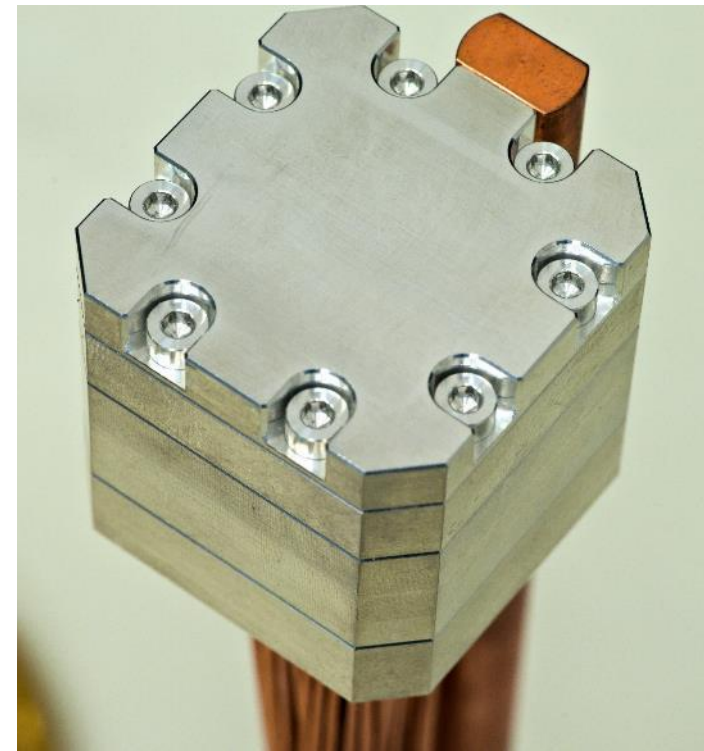
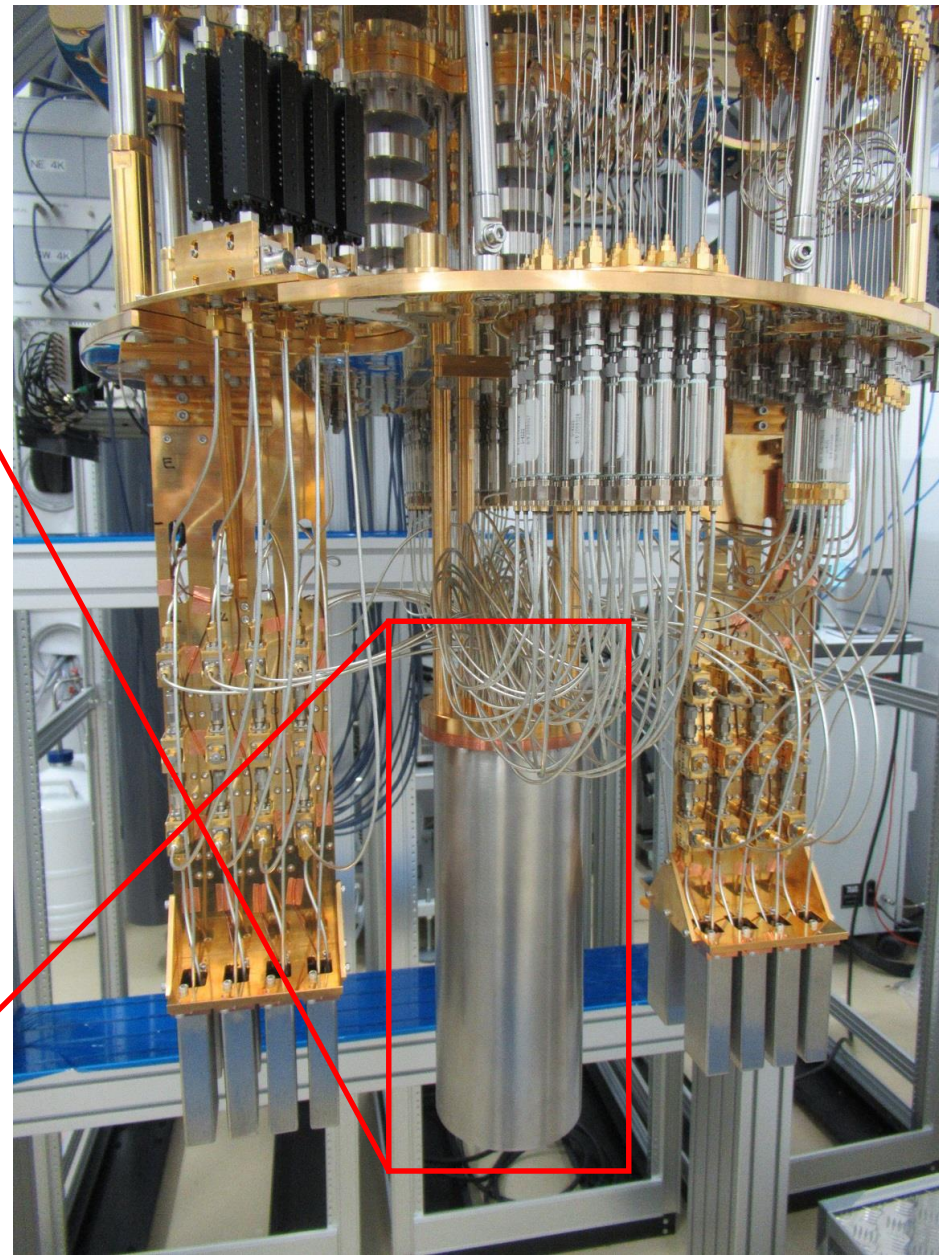
量子コンピュータの中身



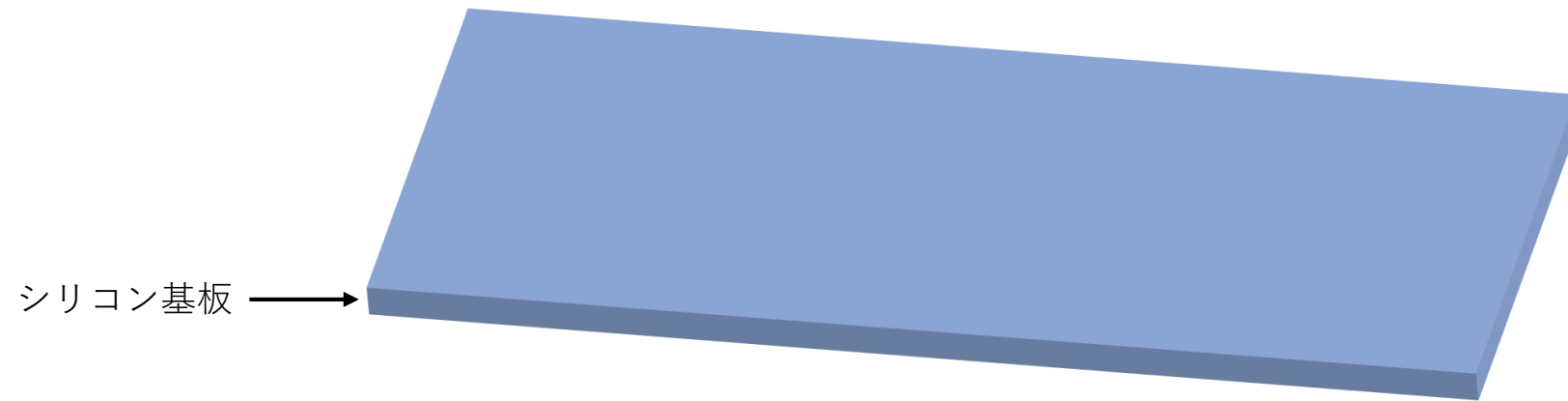
量子コンピュータの中身



量子コンピュータの中身



量子コンピュータの作り方

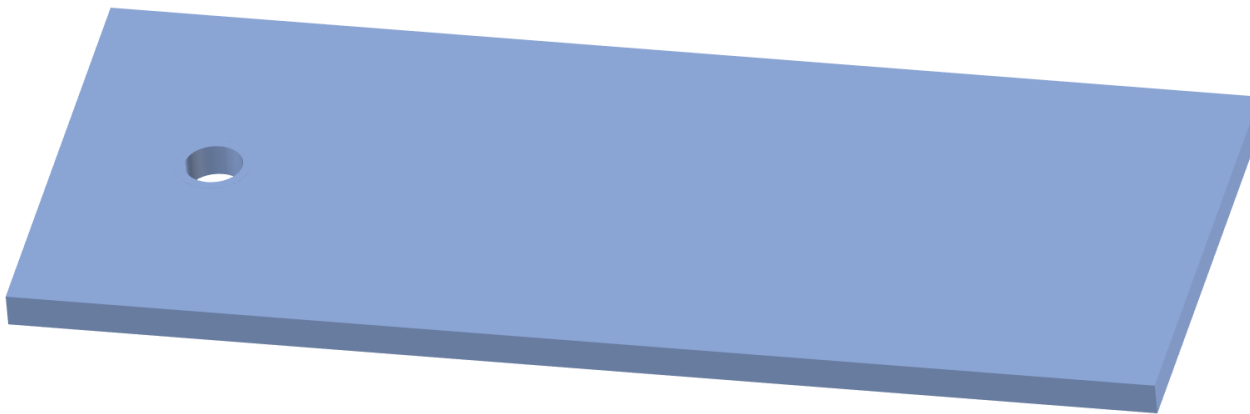


量子コンピュータの作り方



貫通穴パターン描画と加工

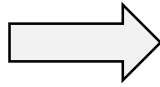
シリコン基板



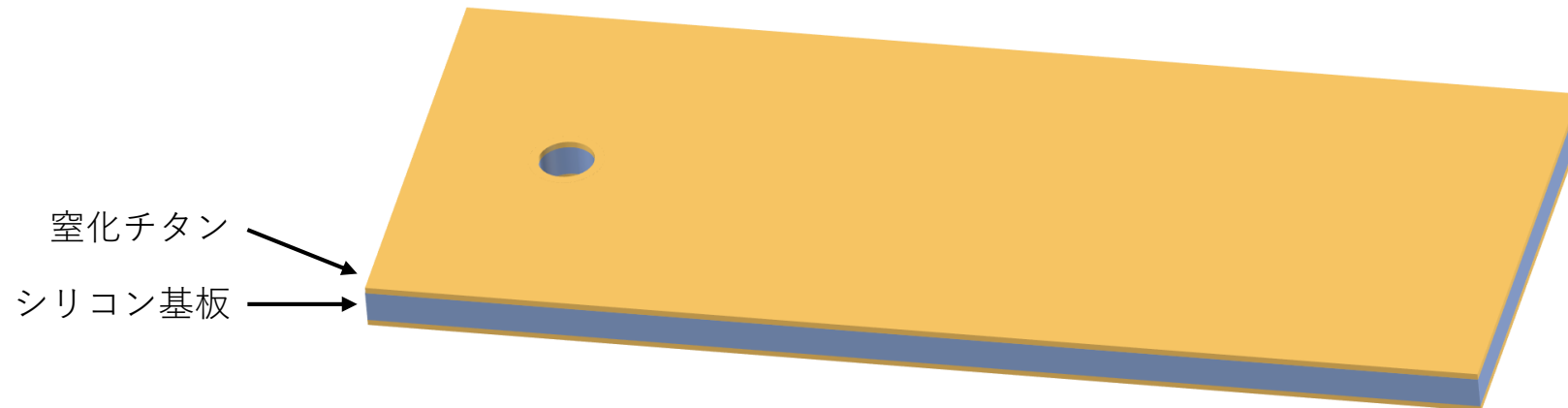
量子コンピュータの作り方



貫通穴パターン描画と加工



窒化チタン膜蒸着



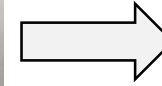
量子コンピュータの作り方



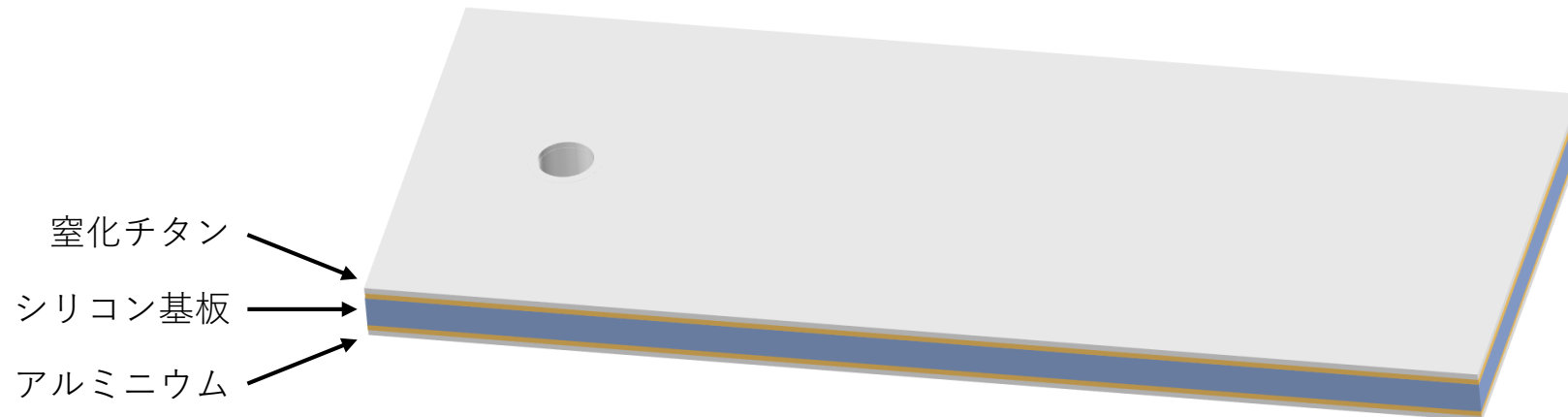
貫通穴パターン描画と加工



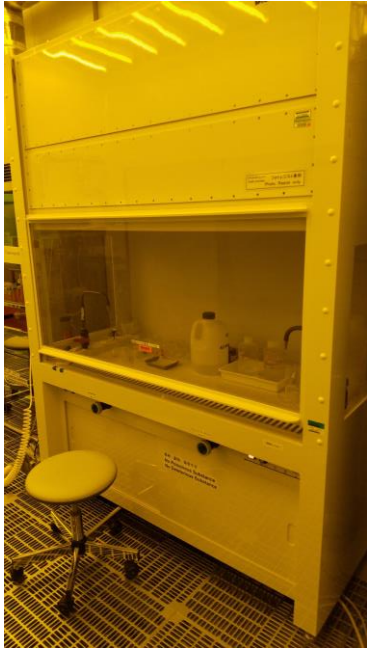
窒化チタン膜蒸着



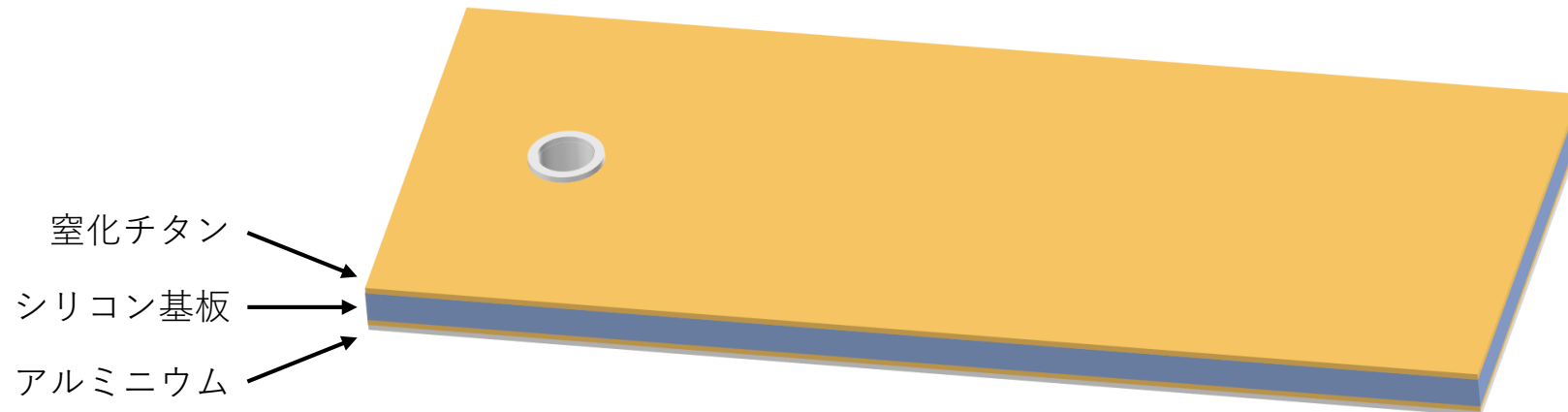
アルミニウム膜蒸着



量子コンピュータの作り方



側壁パターン描画と加工

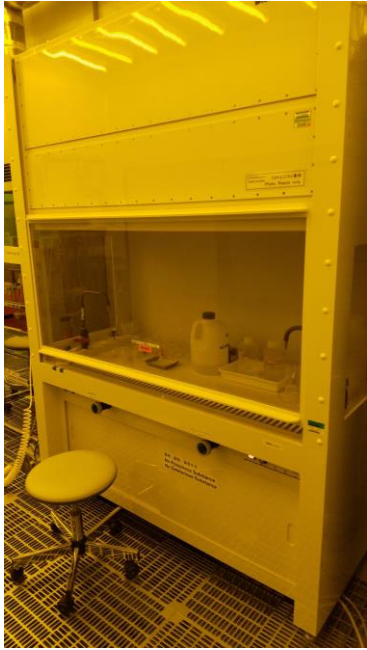


窒化チタン

シリコン基板

アルミニウム

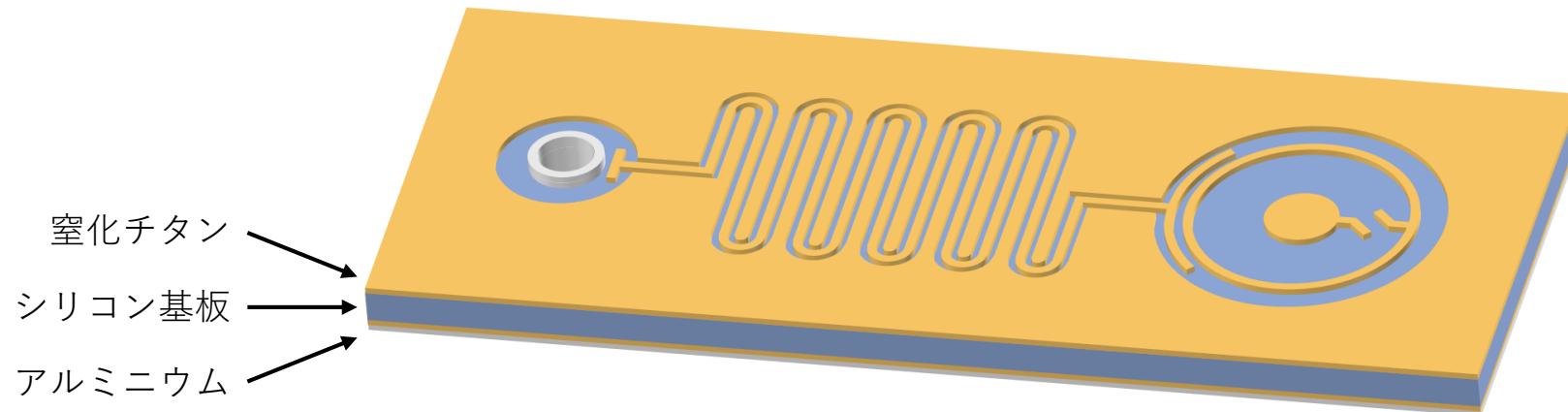
量子コンピュータの作り方



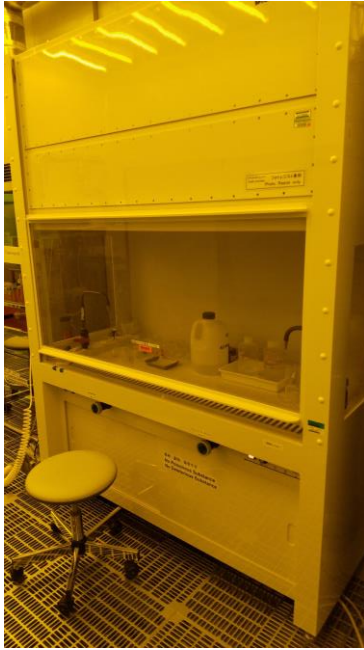
側壁パターン描画と加工



導波路パターン描画と加工



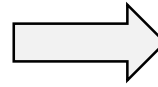
量子コンピュータの作り方



側壁パターン描画と加工



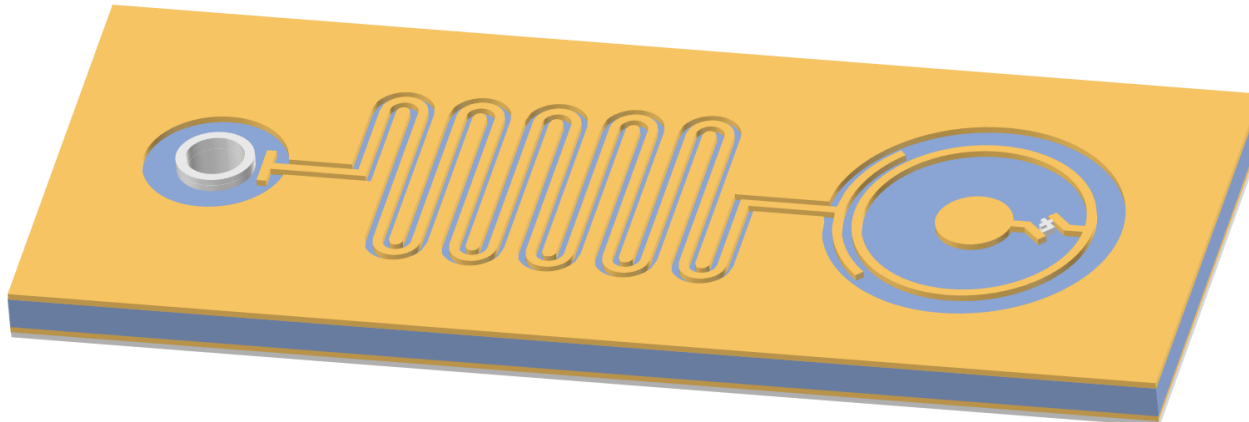
導波路パターン描画と加工



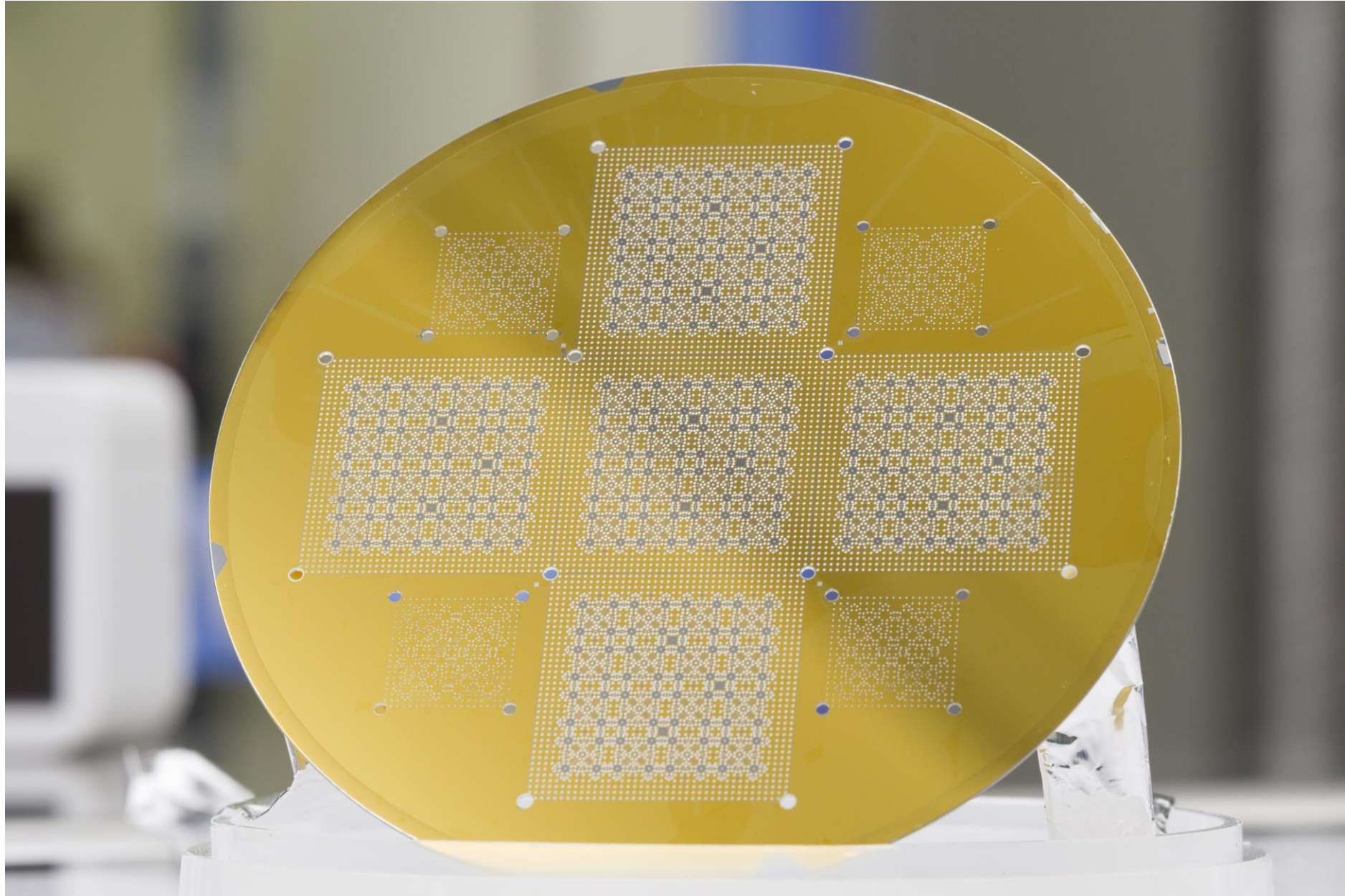
ジョセフソン接合パターン描画と蒸着



- 窒化チタン
- シリコン基板
- アルミニウム



完成



量子コンピュータの拓く未来

物質設計



量子を量子のまま扱える優位性

- 高温超伝導
- 触媒反応
- 創薬

データサイエンス



量子情報化社会の到来!?

セキュリティ



計算量クラスの優位性

- 暗号解読

大量のデータを一度に扱える優位性

- データ検索
- 人工知能
- 物流・交通量最適化

医科学への応用の可能性

量子化学計算

- 素因数分解にも用いられる位相推定アルゴリズムによりエネルギー固有値を効率求める
- 創薬、化学反応、光合成...

量子機械学習(量子AI)

- 連立一次方程式を効率的に解く Harrow-Hassidim-Lloyd(HHL) アルゴリズムを利用
- 画像解析、診断...

医療研究に特化した量子コンピューターの設置



<https://jp.newsroom.ibm.com/2023-03-22-Cleveland-Clinic-and-IBM-Unveil-First-Quantum-Computer-Dedicated-to-Healthcare-Research>

Drug design on quantum computers

Raffaele Santagati,^{1,*} Alan Aspuru-Guzik,² Ryan Babbush,³ Matthias Degroote,¹ Leticia González,⁴ Elica Kyoseva,^{1,†} Nikolaj Moll,¹ Markus Oppel,⁴ Robert M. Parrish,⁵ Nicholas C. Rubin,³ Michael Streif,¹ Christofer S. Tautermann,^{6,7} Horst Weiss,⁸ Nathan Wiebe,² and Clemens Utschig-Utschig¹

¹Quantum Lab, Boehringer Ingelheim, 55218 Ingelheim am Rhein, Germany

²Department of Computer Science, University of Toronto, Canada

³Google Quantum AI, Venice, CA 90291, United States

⁴Institute of Theoretical Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Vienna, Währinger Straße 17, 1090 Vienna, Austria

⁵QC Ware Corp, Palo Alto, CA 94306, United States


⁶Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co KG, Birkendorfer Strasse 65, 88397 Biberach, Germany

⁷Department of General, Inorganic and Theoretical Chemistry, University of Innsbruck, 6020 Innsbruck, Austria

⁸Next Generation Computing in Global Digitalization, BASF SE, Carl-Bosch-Strasse 38, 67056 Ludwigshafen am Rhein, Germany

arXiv:2301.04114 Santagati *et al.*

The state of quantum computing applications in health and medicine

Frederik F. Flöther 

IBM Quantum, IBM Research, Rüschlikon, Switzerland and QuantumBasel, uptownBasel Infinity Corp., Arlesheim, Switzerland

Research Directions: Quantum Technologies 1, e10 (2023) Flöther

量子コンピュータの現在地

- IBMが**1121量子ビット**プロセッサを発表
- Harvard大学を中心とするグループが**280量子ビット**の中性原子量子コンピュータで**48論理量子ビット**を構成

物質設計

- まだまだ新規材料開発とまではいかない
- 通常のコンピュータと連携させて計算 → 量子・古典ハイブリッド

データサイエンス

- 最適化問題専用マシンの開発 → 量子アニーリング
- “量子データ”の扱いでは比較的すぐに優位性が出るかもしれない

セキュリティ

- 100万量子ビット以上のエラー訂正可能な量子コンピュータが必要
- 将来の量子コンピュータでも破られない暗号の開発 → 耐量子セキュリティ

理研の取り組み

- トランスフォーマティブ・リサーチ・イノベーション・プラットフォーム(TRIP)
- 量子を含めた研究データの蓄積・統合・活用

