

これからの量子科学技術に求められること

～ 半導体集積デバイス技術の視点から ～

森 貴洋

産業技術総合研究所 先端半導体研究センター（SFRC）

2026年6月29日

文部科学省・量子科学技術委員会

量子コンピュータ研究開発の「これまで」

- Q-LEAP PJが「アカデミアが実機を作る時代」を支え、一定の成功を得た
- 現代コンピュータでも、初期はアカデミアが「実機」を作っていた
- その後、「実機」の主役は民間企業に移っていく
- 量子コンピュータも、今まさに「実機製造の主役交代」が起きている



量子コンピュータ研究開発の「これから」

- 量子コンピュータの研究開発はまだ始まったばかり
- 現状1000量子ビット級、最終目標100万量子ビット超、**1000倍増**が必要
- 仮に、トランジスタと同速度で発展したとして、**15～20年**かかる計算
- デバイス技術・集積化技術・製造技術の3技術を同時並行に開発していく必要があるが、量子ビット候補毎に製造技術のハードルが異なり、発展速度が変わってくると予想される

ムーアの法則： トランジスタ集積度増加の指標

- インテル創業者のひとりであるゴードン・ムーアが提唱
- 半導体の集積率は1.5年（～2年）で2倍になるという予測
- 半導体産業界はこれを指標とし、長年にわたり持続的集積度増加を実現した

次に起こることは、技術の「階層分離」と「要素分解」

次に起こることは何か

- 1つの機関、特にアカデミアの **1機関が量子コンピュータの全技術を抑えることは不可能**に
- 集積数競争にアカデミアが参戦するのは最早ナンセンス
- 今後の量子コンピュータ開発は、1機関では賄いきれない大勢の研究者・技術者による集団戦に
- それに伴い、技術が「**階層分離**」「**要素分解**」されるようになり、それぞれの専門家が誕生する
- コアとなる量子ビット自身も、コンピュータという視点からは一要素に過ぎない

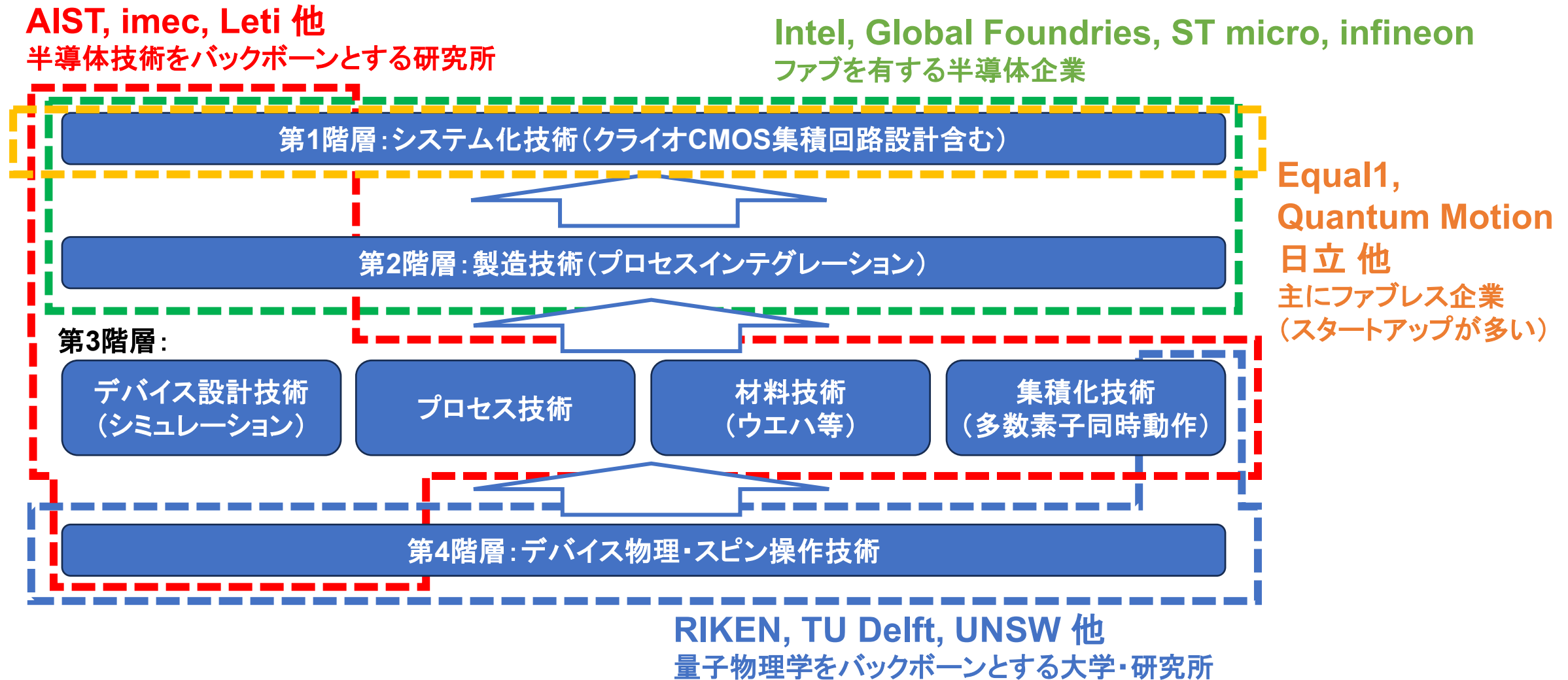
現代コンピュータに見る「階層分離」

- 大きくは、アーキテクチャ・集積回路・集積デバイスの3階層
- 階層ごとに専門家が生まれ、研究開発実施も分離していく（例えば、アーキテクチャの松岡聡教授・理研／東京科学大、集積回路の小林和淑教授・京都工繊大、集積デバイスの平本俊郎教授・東大といったように）

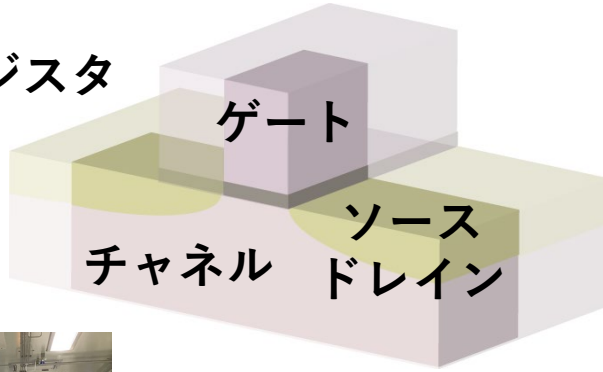
現代集積デバイスに見る「要素分解」

- 1つの階層を担う技術も、さらに「要素分解」され、それぞれに専門家が存在する
- 例えばトランジスタであれば、3大パーツ（ゲートなど）それぞれに専門家が存在、大学の1研究室を担える規模の研究開発を実施

シリコン量子コンピュータ研究開発の主要プレーヤーをやや強引に分類してみると

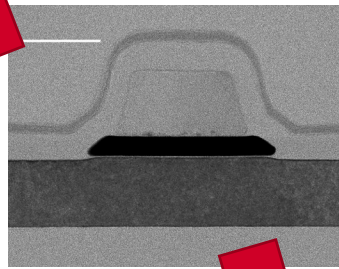


電界効果トランジスタ (MOSFET)

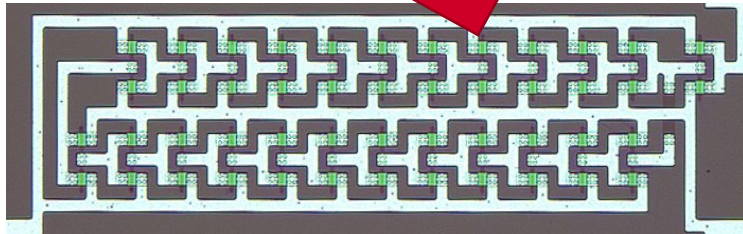


個々の要素技術開発

デバイス単体レベルの プロセスインテグ



小規模集積回路レベルの デバイスインテグ



現代の集積デバイス＝トランジスタ技術の要素分解

- デバイス設計
シミュレーション技術(TCAD)
- プロセス技術
リソグラフィ、エッチング、成膜、etc...
- 材料技術
ウエハ、ゲート（絶縁膜&金属）、チャネル、etc...
- 評価技術
電気測定、顕微鏡技術、分析技術、etc...

それぞれに大学 1 研究室規模を担える専門家が存在
あるいは 1 企業が存在する場合も

- 高度なデバイスや小規模集積回路として技術を「まとめあげる」大学・研究機関の存在は貴重

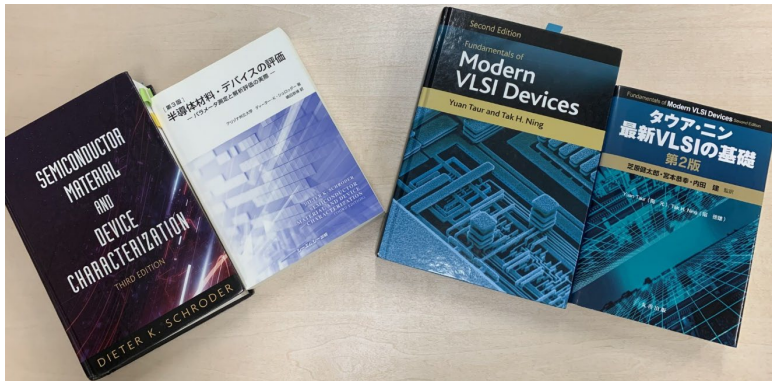
簡易的デバイスではなく、本格的なデバイスを試作研究できる
高度なインテグレーション技術を有するラボは重要
→ 新技術の高度な実験実証・要素技術企業との連携

研究者・技術者の人口を増やす

- 量子コンピュータを支える「要素技術」に関わる人間が多数いる状況を生み出す必要がある
- 今は実地修業が中心にならざるを得ないが、量子コンピュータの「工学」を学びやすくし、入口のハードルを下げなければならない

工学的学理の構築

- ものづくりは、必ず「〇〇工学」という学問に立脚
例) 建築工学、土木工学、電子工学、化学工学、宇宙工学、、、
- 体系化された学問は、その教科書の存在と共に、当該分野の学びのハードルを下げる
- 量子コンピュータの「工学」は発展途上、体系化はこれから、アカデミアに重要な役割がある



半導体集積デバイスには定番の教科書があり、日本語でも読める
(左) 材料・デバイスの評価技術を総覧できる教科書
(右) 半導体デバイス特性を学ぶ教科書

- トランジスタ開発では、アカデミアが担う「先を見た研究」が「実機製造企業の未来」を支える
- 時には、アカデミアの専門家が次世代技術開発を先導するプロジェクトをリードする
- 実機製造企業にはアカデミアが必要、もしくは次世代実機を担う企業がアカデミアから生まれる？
- 特に要素技術を扱う会社は多数に渡るため、これを支え得るアカデミアの規模も重要
- コアとなる量子ビットも、発展の余地が多分にあり、現行の量子ビットが最終解とは限らない
- 「先を見た研究」を経験した学生が、未来の量子産業の基盤人材となっていく

新原理トランジスタ開発ブーム（2005～2020頃）

- 超低消費電力性を持つポストMOSFET技術の開発競争、多数の候補デバイスが乱立した
- 半数以上が「アカデミア発」の新技術であった

TFET：T.Baba (NEC) and J.J. Quinn ([Brown U](#))

IMOS：K. Gopalakrishnan (IBM)

Feedback FET：C. Hu and T.-J. King Liu ([UCB](#))

NC-FET：S. Salahuddin and S. Datta ([Purdue U](#))

アカデミアがリードする半導体研究プロジェクト

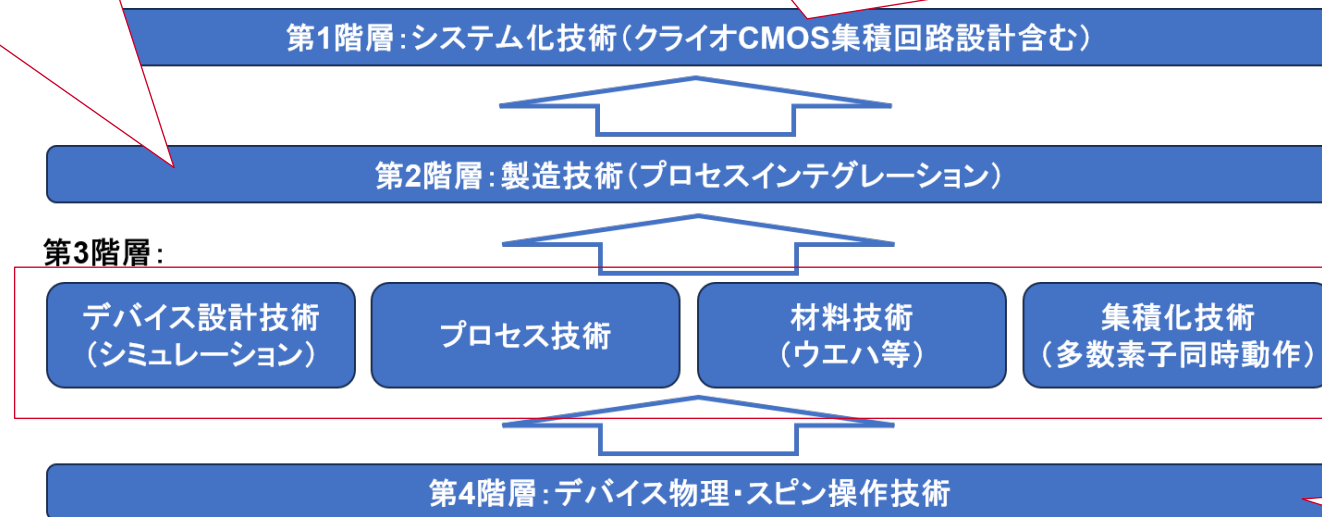
- 超LSI共同研究所（1976～1980）
リーダー：垂井康夫（[電総研](#)）
電子線描画、縮小投影露光など、リソグラフィの基盤技術・要素技術が開発された
- 半導体MIRAI・第1～2期（2001～2007）
リーダー：廣瀬全孝（[広島大学](#)）
高誘電率絶縁膜、歪シリコンなど、次世代トランジスタの基盤技術・要素技術が研究された

各階層を活発化する施策の必要性

- 現状では、候補ハード毎に大きなPJを実施している
- 引き続き各ハードについての一定の規模感のある研究実施はアカデミアでも必要、但し集積数競争を担う必要はなく、次世代高性能ハードの探求的研究開発（量子ビット単体 or 小規模集積デモ）や工学的学理構築を主眼とするべき
- それと共に、近々に起きる中小規模の要素技術研究が多数実施される状況にも対応していく必要がある

一定の集積（最小演算規模・10～50量子ビット？）を狙える実力を持つ研究機関によるフラッグシップ的次世代ハード研究開発（電子デバイス工学的）。

回路・アーキテクチャ（システム）・ソフトといった上位階層を意識した技術開発を行うプロジェクト（電子回路工学・情報工学的）。大型の研究開発PJも必ず必要になる。



要素技術を実施する研究開発。ここが最も多くの数が必要。理論的研究やFS的研究開発も含む。

「デバイス物理」の研究機関が必要。実験・理論には拘らない。あくまで「工学の基礎となる物理」であって「基礎物理学」であってはならない。ただし、未来に向けて「基礎物理学」的研究はまた別途行う必要はあり。

- ※ 同時に、施設整備は極めて重要。実験的研究開発の進展は設備依存性高い。
- ※ 要素技術の研究開発は実用化されない技術も多数。それでも「母数」を増やす。

- 集積量子ビット数は良い指標だが、それがすべてではない
- 特にアカデミアは、集積量子ビット数に惑わされず、量子技術の未来に向けた意義のある研究実施を
- ○○社が10億トランジスタ集積したから、○○研はそれを超えろ、ということはありません
- スタートアップ企業のすべてが成功しないように、研究開発の成功率は基本的に低い
- それでもベンチャースピリットを持った多数の研究開発がなされることが国の強みとなる
- 量子技術は、これから15～20年の長い年月を見据える
- この年月は、半導体業界においても覇権企業が変わっていくに充分長い
- 今の状況に囚われず、最終的に「勝ち得る技術」は何か、技術的本質を探究していく役割を大学・国研が担っていくことが重要だと考える