

「ナノ・電子情報材料戦略」検討会 報告書

平成18年8月5日(土)開催



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

Executive Summary

- 「電子情報処理デバイス」、すなわち半導体デバイスにおいては、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) が基盤技術であり、今後のデバイス開発においても、CMOSをベースとする半導体集積回路のさらなる高性能化・高集積化 (More Moore) を目指した製造プロセス開発が継続されると思われる。しかし、CMOSトランジスタ動作原理の微細化限界が近づき、超高集積化システムを構成するための材料特性を維持するのが困難な状況である。高集積化・微細化加工技術を中心としたロードマップは見直しの時期を迎え、超高集積化・超微細化加工技術、材料・界面解析など基礎物性解析及びサイエンスベースでの新原理・新概念創出等の融合の促進が必要である。

More Mooreとは、CMOS技術の高度化により、微細化の極限を追求する分野の技術を意味する。

- 一方、高集積化・微細化のみならず、デバイス機能の多様性 (More than Moore) が求められ、それらを実現するための材料要素技術開発の重要性が増している。シリコン材料をベースに、さらに多様な新機能を付加するナノ製造技術は、産業分野においても未着手であり、着想及び基礎研究も不十分である。これら融合領域は、イノベーション創出の潜在的な領域でもあり、今後新たなロードマップを描く必要がある。近い将来、CMOSトランジスタ動作原理の微細化限界を迎える際には、これまでに蓄積された優れた研究資産を活用し、超高集積化・超微細化の技術開発とナノサイエンス、ナノ構造、電子輸送、界面制御など材料物性基礎研究との分野融合／統合を目指した中長期的な開発展望を明確に示すことが重要である。

More than Mooreとは、半導体デバイス上に異種機能素子 (例: MEMS、センサー等) を融合集積化する技術を意味する。

- 諸外国、特に米国ではエレクトロニクス主要各社が基礎サイエンスを担当するNSF (National Science Foundation) を巻き込んで、複数の産学連携組織による「ハイリスク・ハイリターン」な研究開発の拠点作りを進めている。シリコンCMOSの延長では対応できない「次世代エレクトロニクス (Beyond CMOS) への壁」を突破できた国こそが、10～15年後のエレクトロニクスの覇権を握ると認識しているからに他ならない。

Beyond CMOSとは、新原理・新概念により従来のCMOS技術を超える技術を意味する。

- ナノスケールの微細構造形成技術や革新的ナノプロセスおよび集積化技術を活用することにより、これまでの情報処理や通信システムの性能を飛躍的に高める新概念・新構造に基づく次世代デバイス創製の道筋を明確にすることが求められている。そのために必要とするエレクトロニクス用異種材料・プロセスの創製に係わる分野融合／統合における重要な視点として以下の点が挙げられる。

①究極性能のトランジスタをナノテクノロジー (新機能材料の設計) で構築。

- ②置き換え技術ではなく、従来のシリコン技術に融合するナノテクが重要。
- ③異種分野融合をCMOSベースのシリコン上で展開。
- ④Beyond CMOSは、ナノサイエンスに基づく新原理・新概念の創出によりCMOSを凌駕・補完できる技術に注力。
- ⑤More Than Moore (X on Si) は、シンセシス型研究によるCMOSの多機能化に注力。
- ⑥蓄積されたMore Mooreによる知見・技術を適宜融合。
- ⑦エレクトロニクスに特化した共同利用施設（ファシリティ）の構築。
- ⑧府省連携で異分野間の学際研究システムの構築及び促進させる政策的誘導。

以上の項目を包含する、次世代のナノ・エレクトロニクス研究開発を、CMOS Evolution (CMOSの進化型) と名付け、オールジャパンでの研究開発の推進を提言する。

今後、「次世代ナノ・エレクトロニクスへの進化」の道筋を示し、エレクトロニクス大国から、ナノエレクトロニクス先進国への明確なビジョンを提示することが重要である。若手研究者に夢を与え、自由な発想により大胆かつ挑戦的な研究に取り組める研究環境の構築も必要である。

- さらに、研究推進基盤の整備が重要である。「ものづくり」としての目標を明確にした機能デバイス研究開発を効率的に進めるための研究プロジェクトを総括するリーダー選出の仕組み、中長期を見越した戦略的投資、研究システムの工夫などが不可欠である。
 - ・ナノサイエンスに基づいた材料研究を中心とした大学における基礎研究のみでは、イノベーションを誘発することは困難である。明確な「ものづくり」の目標を設定した研究拠点を中心としたコンソーシアムや産学連携による目的志向型の研究が必要である。
 - ・全体を俯瞰できるリーダーの強力なイニシアチブのもと、互いのグループ間の連携を密にして、ときには共通インフラも使いながら融合効果を出すことが必要となる。基礎（大学）、応用（企業）の明確な役割分担と会話、理論と実験の融合、産学官の連携、人材の交流等、研究投資が有効に成果につながるための融合・連携を加速する具体的なシステムの構築が必要である。これにより、更なる基礎研究の活性化も期待される。
 - ・ナノ・電子情報材料分野の研究開発戦略において、産学連携のみならず、様々な状況・立場からの新たな連携モデルが必要である。例えば、縦割り行政を乗り越えた府省庁間連携やファンディングにおける基礎と応用の技術融合を目指した「ものづくり」のための連携など新たなファンディングシステムが望まれる。
 - ・学際研究システムにおける融合連携を促進させる政策的誘導が必要である。

目 次

Executive Summary	i
1 本検討会の趣旨及び問題提起	1
2 「ナノ・電子情報材料戦略」検討会	
2.1 はじめに	4
／田中一宜 (JST-CRDS)	4
／榊裕之 (東大)	5
3 第1部 超高速・超微細・超集積化デバイス開拓の課題	
主査 平本俊郎／田中一宜	
3.1 界面制御によるブレークスルー	
超微細・超集積化デバイスが抱える課題	6
／金山敏彦 (産総研)	6
3.2 超高速化デバイス	
記録とスイッチの機能を持つトランジスタの可能性と課題	
1) 磁性材料について	7
／宮崎照宣 (東北大)	7
2) 半導体電子デバイスの超高速化について	9
／宮本恭幸 (東工大)	9
3) 超伝導材料 実用化に向けた課題	11
／藤巻朗 (名大)	11
3.3 課題提起－イノベーションについて (企業の立場から)	
／西野壽一 (日立ディスプレイズ)	13
3.4 課題提起	14
／平本俊郎 (東大)	14
3.5 第1部討論	17
4 第2部 新概念・量子構造デバイス開拓の課題	
主査 安藤功兒／田中一宜	
4.1 Emerging Research Devices 電子素子 (Logic)	20
／伊藤公平 (慶大)	20
4.2 高性能量子ドットレーザと量子ドット光増幅器	21
／菅原充 (QDレーザ)	21
4.3 不揮発性機能とスピントロニクス	23
／安藤功兒 (産総研)	23
4.4 ナノカーボン系を事例として	25
／松本和彦 (阪大)	25
4.5 課題提起－「量子位相制御」と「ナノダイナミクス」	27
／吉田博 (阪大)	27
4.6 課題提起－テラヘルツの技術	28
／平川一彦 (東大)	28
4.7 第2部討論	29

5 第3部 新材料系機能開拓の課題

主査 小林功郎／田中一宜

5.1 有機エレクトロニクス材料	
ー技術課題克服にむけた材料開発・評価技術開発のアプローチ	
	／関一彦（名大）……32
5.2 ワイドギャップ半導体ー低電力損失、高温動作、高速制御の材料的課題	
	／葛原正明（福井大）……33
5.3 フォトニクス機能制御材料	
1) 光の電磁領域を拡げる、新機能・光機能材料から	／小林功郎（東工大）……35
2) 新材料系機能開拓の課題	／金光義彦（京大）……37
5.4 強相関電子材料	／赤穂博司（産総研）……38
5.5 課題提起ー有機系材料サイドから	／中西八郎（東北大）……40
5.6 課題提起ー結晶成長の視点から	／西永頌（豊橋技科大）……41
5.7 第3部討論	……43

6 第4部 総合討論：共同利用施設と分野融合・研究システム・産官学連携・ファンディング

主査 榊裕之／田中一宜

6.1 課題提起ーデバイス・イノベーションへ向けて	
“分野融合を実現するナノファクトリー機能”	／曾根純一（日本電気）……45
6.2 課題提起ーナノ・電子情報材料戦略	／栗野祐二（富士通）……46
6.3 課題提起ー産学連携の課題	／村上正紀（京大／JST-CRDS）……47
6.4 第4部討論	……49

7 まとめ

<ナノエレクトロニクス>	……54
<ナノ・電子情報材料開発戦略への留意点、課題>	……55
<重要研究課題>	……56

Appendix

1 本検討会の開催日時・場所、プログラム、参加者の構成	……61
2 俯瞰WSに基づいたナノ・エレクトロニクス領域まとめ資料	……64

1 本検討会の趣旨及び問題提起

最先端の半導体集積回路（LSI）等の電子情報材料は、ナノテクノロジー分野において、実用化への出口が明確であり、イノベーション創出における社会的インパクトが大変強く、今日の国民の生活を支える基盤材料となっている。国の科学技術重点分野においても大きな位置を占めている。その中でシリコン材料は電子情報材料の今日の発展において欠かせない材料である。CMOSという半導体製造技術の高度化により、微細化等の加工技術はナノの領域まで進み、シリコン単体における要素技術は確立されて、ナノテクノロジーの基盤技術の一つとして数えられており、現在電子情報材料産業の根幹を支えている。

しかしシリコンCMOSを基盤とするエレクトロニクス技術には、近い将来にhp（ハーフピッチ）45nm以細において、微細化等の限界が訪れることが明確となった。諸外国、特に米国では、この困難を解決する新概念・新機能のエレクトロニクス材料・デバイスの開拓に、企業側から立ち上がり^{＊)}、産学連携のハイリスク・ハイリターンな研究開発の動きが非常に盛んである。これは、基礎サイエンスを担当するNSFが大企業と組んでイニシアティブとして位置づけようとしているところに特徴がある。つまり現在のシリコンCMOSの延長では解決できない次世代ナノ・エレクトロニクスの壁を、先端ナノサイエンスを駆使して突破した国こそ10～15年後のエレクトロニクスの覇権を握るという共通認識のためである。

一方、国際的には我が国の電子情報材料研究のレベルは依然として高い水準を誇る。それら強い材料・ものづくり技術を活かし、国としての新たなシナリオとコーディネーションの下に人材を結集して戦略的な体制を整備することができれば、変化の早い企業ニーズに対応しうる新しい研究インフラが自ら生まれ、ひいては、イノベーションの創出や電子情報材料研究者層の拡大という好循環が大きく期待される。

JST研究開発戦略センターのミッションは、単なる科学技術の調査にとどまらず、それを戦略にまで練り上げて戦略プロポーザルとして世に発信することであり、オールジャパンの立場で提言を行うことである。そのための最初のステップが“研究俯瞰マップ”の作成である。ナノテクノロジー・材料関係では、(1)物質材料、(2)技術要素、(3)社会・経済の3つの軸で研究全体を俯瞰する。作成過程で“俯瞰ワークショップ”を実施し、そこでの有識者、研究者の方々の意見を取り入れて、グループで蓄積してきたデータベースを元にマップを完成させ、1年毎に見直しを行う。

＊) 米国にナノ・エレクトロニクス・リサーチ・コーポレーション（NERC）が存在する。

これは、IBM、インテル、TIなどを含んだ6社が共同体を形成し、ナノ・エレクトロニクスリサーチ・イニシアチブを発信している。具体的な共同体として、カリフォルニア州にWestern Institute of Nanoelectronics（WIN）、ニューヨーク州にInstitute for Nanoelectronic Discovery and Exploration（INDEX）、テキサス州にSouthwest Academy for Nanoelectronics（SWAN）が存在する。

ナノテクノロジー・材料研究開発戦略俯瞰図

【プログラム戦略構成分野／ ナノテクノロジー・材料達成目標】																				関連する 共通基本課題																												
①		②ナノ構造・材料					③ナノバイオ・システム					④ナノ材料・加工プロセス					⑤ナノデバイス・システム					⑥設計・探索		⑦計測・評価・標準																								
ナノサイエンス		1 人エナノ構造	2 超分子	3 ハイブリッドナノ構造	4 ソフトマター	5 微粒子・クラスター	6 有機・生体関連分子	7 ナノカーボン	1 生体内送達治療材料	2 医療診断プローブ材料	3 生体適用材料	4 材料 生体物質を基盤とする高機能	5 複合バイオシステム	1 機械的ナノ加工技術	2 自己組織化・自己集合技術	3 ナノ粒子の複合化材料技術	4 高次ナノ構造制御材料技術	5 ナノ構造・ナノ材料分離技術	1 設計・微細加工・製造技術	2 半導体複合デバイス	3 エネルギー変換デバイス	4 光機能デバイス	5 新材料用いた複合デバイス	1 材料設計シミュレーション	2 DBの構築と新材料設計	3 材料探索手法の開発	1 SPMシステム開発	2 リアルタイム計測・3次元計測技術	3 超高感度・極微量分析技術	4 超高速・チップ利用計測技術	5 開発及び 標準化の計測技術研究 工業標準戦略技術研究																	
																				☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆		

ナノ・電子情報材料戦略検討会

図1-1 ナノテクノロジー材料研究開発戦略俯瞰図

物質材料軸と技術要素軸を合体させ、社会・経済軸に対して作成した2軸俯瞰図の一例であり、本「ナノ・電子情報材料戦略」検討会は「情報・通信」を横串としたナノテクノロジー・材料の俯瞰を目的としている（図1-1）。

さらに縦軸にデバイスとしての機能発現単位サイズ、横軸にはデバイスの実現までの到達時間により表されたナノ・電子情報材料俯瞰図を示す。本検討会のコーディネーターである榊教授のアドバイスにより、①超高速・超微細・超集積化デバイス、②新概念・量子構造デバイス、③新材料系機能の3つの技術領域における電子情報材料の相対的な位置関係を示す。これに基づき、本WSを構成した（図1-2）。



図1-2 ナノ電子情報材料

また、研究課題の効率的な解決を図るための新しい仕組みやファンディングシステムについて議論する総合討論のセッションを設け、企業からの視点、コンソーシアムからの視点さらに研究システム・産学連携の各視点から3人のコメンテーターに問題提起をして頂き、投資された研究予算の有効利用、あるいはプロジェクトの効率的な推進法及びその新しい仕組み等についても議論をおこなった。本検討会の内容は、JST研究開発戦略センターにおける戦略立案の際に重要なベースとして用いられ、戦略プロポーザルに反映される。

2 「ナノ・電子情報材料戦略」検討会

2.1 はじめに

田中一宜（JST-CRDS）

CRDS（Center for Research and Development Strategy、研究開発戦略センター）は、2003年にJST内に設置された機関である。戦略的施策のもとにファンディングをしている。本検討会は、CRDSの「ナノテク・材料」グループが企画した。グループでは、始めに技術全般を見渡す研究開発領域俯瞰図を作成する。その過程で、科学技術政策立案者や研究者、各省庁とコミュニケーションを深め、「オールジャパン」で技術戦略やファンドの戦略を提案する。本検討会では、①超高速・超微細・超集積化デバイス、②新概念・量子構造デバイス、③新材料系機能、以上3点における研究開発の現状と今後を俯瞰し、時間スケールを意識した重要研究課題の抽出を行う。また、研究課題の効率的な解決を図るための新しいしくみやファンディングシステムについても議論する。議論は後日、JST研究開発戦略センターにおける戦略立案のベースとして活用される。

議論をするにあたり、言葉の定義を示す。

“More Moore” は「ムーアの法則を限界まで極める技術」。CMOS（Complimentary Metal-Oxide-Semiconductor）技術の高度化により、微細化の極限を追及する分野の技術と「定義」する。材料にはSi（シリコン）系、非Si系を含む。

“More than Moore” は「ムーアの法則を超える技術」。FET（Field Effect Transistor、電界効果トランジスタ）とは異なる原理の素子（例えばスピントランジスタ）をLSIに取り込む試み、及び、FET系デバイスと異種機能素子（例：MEMS（Micro Electro Mechanical System）、センサ等）を融合集積化する技術と「定義」する。材料にはSi系と非Si系を含む（図2-1）。

※“Beyond CMOS” という用語は、当検討会では使わない予定であったが、発表者から多く発言されたために以降、掲出した。CMOS（Complimentary Metal-Oxide-Semiconductor）を新原理・新概念により超える技術という意味である。

LSI技術の将来像を表現する用語とその定義

今検討会では以下の2つに仮分類する。

- ・ **More Moore** (Mooreの法則をその限界まで極める技術)
CMOS技術^{*1}の高度化により、微細化の極限を追求する分野の技術と「定義」する。材料にはSi系と非Si系を含む。
- ・ **More than Moore** (Mooreの法則を超える技術)
FETとは異なる原理の素子(例えばスピントランジスタ)をLSIに取り込む試み、及びFET系デバイスと異種機能素子(例:MEMS、センサー等)を融合集積化する技術と「定義」する。材料にはSi系と非Si系を含む。

今回は、Post CMOSやBeyond CMOS^{*2}の用語は定義使用しない。

^{*1} FETを代表とする電荷制御系デバイス、SET系の素子をMore MooreとするかMore than Mooreとするかは、いくらかの任意性がある。

^{*2} 但し、Beyond CMOSは新原理・新概念によるCMOSを超える技術の総称として使われ始めている。

図2-1 LSI技術の将来像を表現する用語とその定義

榊裕之(東大)

JSTの最も重要な任務は、研究者にとって力を発揮できる研究システムを構築することであるが、日本の研究機関では、大学の置かれている立場、国立研究所の置かれている立場、また産業界の置かれている立場はそれぞれ大きく異なっており、それぞれ個別の問題を抱えている。有限のリソースの中で個別の課題をどのように克服するべきかを考える。

本来、東大も含め、大きな大学は多分野にわたる研究者がいることにより、ナノテク・材料の学際的な研究を推進するのに最も理想的な場所の一つである。しかし実際はその強さが生かされるほど学際的に機能しないという状況がある。これについては、意識の問題もあれば、スペースの問題、時間の問題等いろいろあるが、学際的な分野融合を誘発するためにどういう工夫があるか、産学も含め、組織を超えて本気でつき合うためにはどういふことが必要であるか意見を頂き、既に見事なコーディネーションをされている研究者もいるので、それらを参考にしながら、国際的な連携あるいは大学の連携を含め、学際的な分野融合を進めることが必要である。

第一部の「①超高速・超微細・超集積化デバイス開拓」では、電子材料で技術の根幹をなす部分である。LSIや光デバイスのように、すでに大きな貢献をしている分野で微細化が進むことにより、産業分野が強くなり、技術が進展する。第二部の「②新概念・量子構造デバイス開拓」では、出口が見えているものに微細化を徹底させるような流れのもの。第三部の「③新材料系機能開拓」では、新材料系に伴う新しい可能性のあるもの。以上の構成で議論をおこなう。

3 第1部 超高速・超微細・超集積化デバイス開拓の課題

主査 平本俊郎/田中一宣

3.1 界面制御によるブレイクスルー 超微細・超集積化デバイスが抱える課題

/金山敏彦（産総研）

シリコンLSIは、シリコンのウエハ表面に作製したトランジスタを電氣的なスイッチとして用いることで機能している。現状では実際のトランジスタのゲート長は50nm以下の寸法となっている。

トランジスタの動作原理そのものの微細化限界は、今後も簡単にはやって来ないと思われる。しかしながら、微細なシリコンMOSでは超高集積システムを構成するのに使える特性を全うするのが困難になっている。トランジスタのゲート長が10nm、あるいは、ゲート絶縁膜が1nmの寸法にまでなると、微細化に伴う材料的な物性限界がどの段階で出てくるかが問題になってくる。従来、MOSトランジスタは、シリコンやシリコン系化合物で構成していたが、現在、すでに材料的な限界に到達しており、単純な意味でのスケールアップ技術は破綻している。次世代半導体研究センターでは、次のとおり、シリコン系とは別の材料を用いるための研究開発をしている。

従来、ゲート絶縁膜には SiO_2 （酸化シリコン）が使われて来た。だが、膜厚を1nm程度にすると、トンネル効果で電流が抜けてしまい、絶縁膜としての特性が期待できなくなる。そのため、シリコンをいわゆる「High-k（高誘電率）材料」で置き換えることで、物理的な膜厚を確保し、電氣的に等価な膜厚を下げる研究をしている。この置き換えにより、界面の原子的・電子的構造を人工的に制御しなければならなくなるという課題に直面している。

シリコンを熱酸化すると、酸素はシリコン-シリコン結合の中に潜り込む。これにより、原理的には結合が保たれる。また、シリコンと酸素の間では電子の偏りが生じるが、大きな問題にはならないことがわかっている。実際に SiO_2 界面でのバンドギャップを計算した結果、理論的に滑らかであり、界面状態が異常とならないことがわかっている。しかしながら、トランジェントな領域が0.5nm程度あり、このレベルの寸法になると、絶縁性を確保するのが難しくなる。そのため、別の誘電率の高い材料に置き換えることを考えているが、誘電率が1000や2000にもなって絶縁性の優れた物質は、自然界には存在しない。現在、対象となる材料はハフニウム系酸化物に収束してきてはいるが、ここでも界面制御が重要であることがわかる。

他にも、シリコン界面の急速な酸化や、高誘電率絶縁膜とゲート電極の界面での接触電位の制御などの界面に関する問題がある。これらを解決しなければ、従来のトランジスタのような集積システムを構成するための特性が実現できない。

また、LSIの特性を、配線が左右するようになってきている。現在、使用している銅の配線を、誘電率を下げるために多孔質化した絶縁膜で支えようとする、銅との界面を制御するという大きな課題が出てくる。界面の制御性が確保できれば、銅の配線の質も向上

するだろう。

極微細トランジスタは小さくなればなるほど、ナノオーダーの本質的なポテンシャルの“バラツキ”が顕在化してくる。バラツキを顕在化させないように、安定した構造となるしくみを組み込むことが特に重要となる。

研究の進め方としては、幅広い知恵を出し合う中で、実用的な技術につながる目標を定めていくのがよい。検討すべき技術的課題の数は膨大になる。知識が集約されるようなしかけをつくっていかなければならない。現在、苦労しているのは、優れた研究成果が実用化に結びつくとは限らないということである。500もあるといわれているLSI製造工程の中で、開発側が優れた要素技術の存在に気付く確率は極めて低い。研究を実用化に結びつけるには、(メーカーなどの産業界が)早い時期から、技術開発に参加する必要がある。そのためには、幅広い分野の研究者から革新的なアイデアやコンセプトを募るためのオープンなシステムと、実用技術開発に向けて産業界が本気で参加するためのクローズドシステムを、同時進行させることが必要となる(図3-1)。

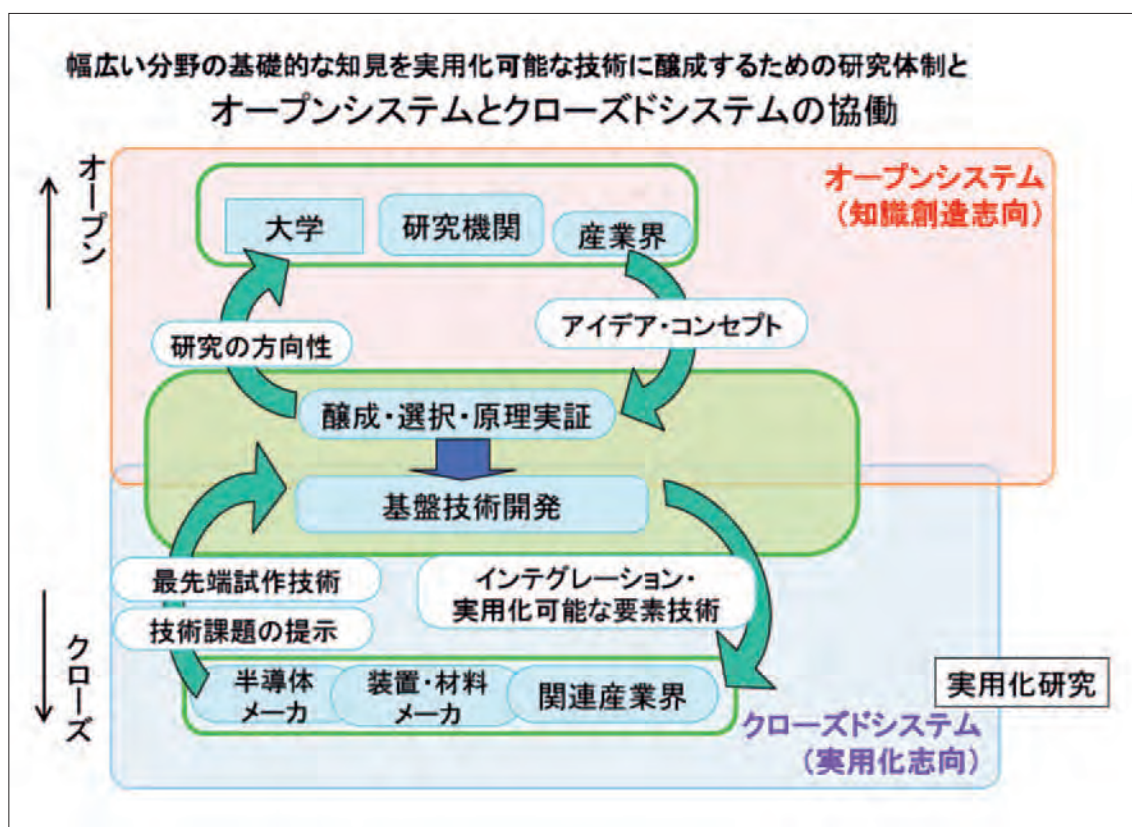


図3-1 オープンシステムとクローズドシステムの協働

3.2 超高速化デバイス 記録とスイッチの機能を持つトランジスタの可能性と課題

1) 磁性材料について/宮崎照宣（東北大）

磁性材料は、金属・合金、金属間化合物、化合物、酸化物、アモルファス合金の5種類に分類できる。それぞれの種類で、これまで無数の研究がなされてきた(図3-2)。

磁性材料

- 金属・合金：3d遷移金属(**Fe, Ni, Co**), 希土類
- 金属間化合物 (**SmCo₅**)
- 化合物：3d-IIIb(**Nd₂Fe₁₄B**), 3d-IVb(**Co₂MnSi**), 3d-Vb(**Fe₄N**), 3d-VI(**FeS**)
- 酸化物：スピネル型(**MO·Fe₂O₃**), ガーネット型(**YIG**), 六方晶マグネトプランバイト系, その他(コランダム型, ペロベスカイト型, ルチル型)
- アモルファス合金 (**Co-Fe-B**)

図3-2 磁性材料

金属・合金が種類としてはもっとも有名であり、鉄、ニッケル、コバルトの3d遷移金属と、希土類がある。金属間化合物では、永久磁石として使われるサマリウムコバルト(SmCo_5)がある。化合物では、3d遷移金属が中心で、ボロンの入った $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ の3d-IIIb、やシリコンの入った Co_2MnSi の3d-IVbなどがある。酸化物で代表的なものとしては、ガーネット型のイットリウム鉄ガーネット(YIG)などがある。アモルファス合金に関しては研究が落ち着いている。主な磁性材料研究の歴史としては、1923年にパーマロイ(21.5Fe-Ni)の発見、1975年までのアモルファス金属・合金の研究、1984年の $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ 強力永久磁石の研究などがある。磁性薄膜の応用研究の歴史としては、1970年の希土類-遷移金属アモルファス薄膜の磁気・光材料への応用、1988年の人工金属格子のHDDへの応用、1994年にトンネル接合を用いた研究のHDDやMRAM(磁気抵抗メモリ)への応用などがある。HDDはすでに実用化されたため、将来はMRAMへの応用がどの程度発展するかが課題となる。

スピンと電荷を用いた研究はスピントロニクスが契機となっている。今後の磁性材料を用いた研究開発には、スピントロニクス材料が関わってくる。磁気工学の研究において、多くの分野が研究し尽くされたなかで、抵抗やスピン分極率や磁化などが運動の要素となるスピントロニクスが注目される。放棄された材料からも、応用が可能になる(図3-3)。

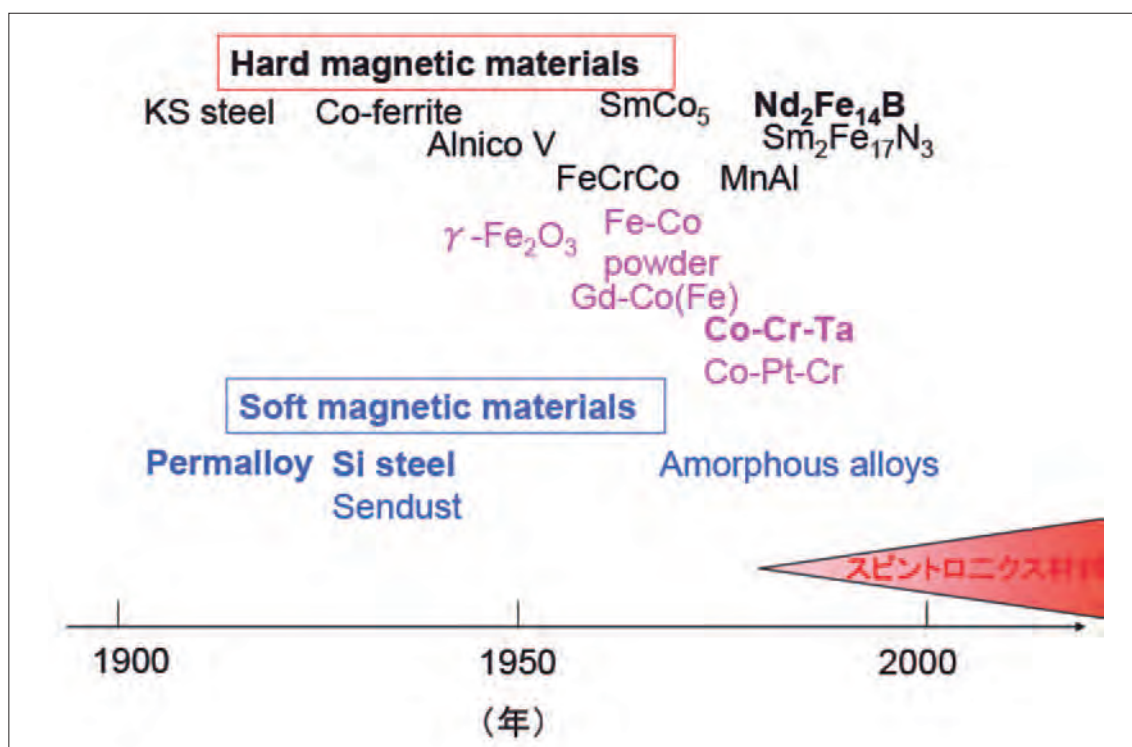


図3-3 磁性材料とスピントロニクス材料

20世紀初頭から研究されてきたホイスラー合金がハーフメタルであることに着目し、トンネル磁気抵抗効果を調べたところ、スピン分極率が100%近くまで上ることが解明された。トンネル磁気効果に関しては、2000年頃から産業技術総合研究所が酸化マグネシウム（MgO）を用いて優れた研究をしている。ホイスラー合金や酸化マグネシウムは、三端子素子や磁性体による記憶機能に応用される。

今後の展望としては、注入電流 J_{co} の低減、セルの熱的安定性の確保、スピンRAM（大容量メモリ）の実現、また、スピントランジスタ等の新しいデバイスの可能性探索、さらには、全く新しい磁性材料（MRAM材料としての）の探索などが挙げられる。

2) 半導体電子デバイスの超高速化について/宮本恭幸（東工大）

GaAsに代表される化合物半導体の電子デバイスは、次世代のトランジスタと期待されながら、約10年前に日本ではデジタル応用の研究が頓挫している。しかしながら、最近、シリコン系にノンシリコン材料を導入するという開発の傾向が出てきている。

最近のゲートSiO₂膜厚1nm程度でのリークの問題から、SiO₂から高誘電率材料への置き換えが始まっている。また、シリコンゲルマニウム（SiGe）の導入で移動度も向上した。SiO₂/Siの絶対的地位が揺らぎ、それ以外の材料も活用すべきことを意味する。2014年頃には、化合物オンシリコンの形で、ゲルマニウムやⅢ-V族のような高移動度の材料が必要になると予測されている。また、カーボンナノチューブやナノワイヤのような材料が必要になるとも予測されている。

インテルによると、通常の化合物半導体の基盤上にInSbを使った場合、現在、遮断周波数が340GHz程度となっている。ゲート長は85nmである。室温においてInSbのバン

ドギャップは0.18eVでしかない。開発したトランジスタを、トランスファークラップ、サブスレッショルドスロープ、DIBL (drain induced barrier lowering) など、シリコンと類似した形式で評価している。遮断周波数を50%増幅し、10分の1に低パワー化した論理回路を目標としている（図3-4）。

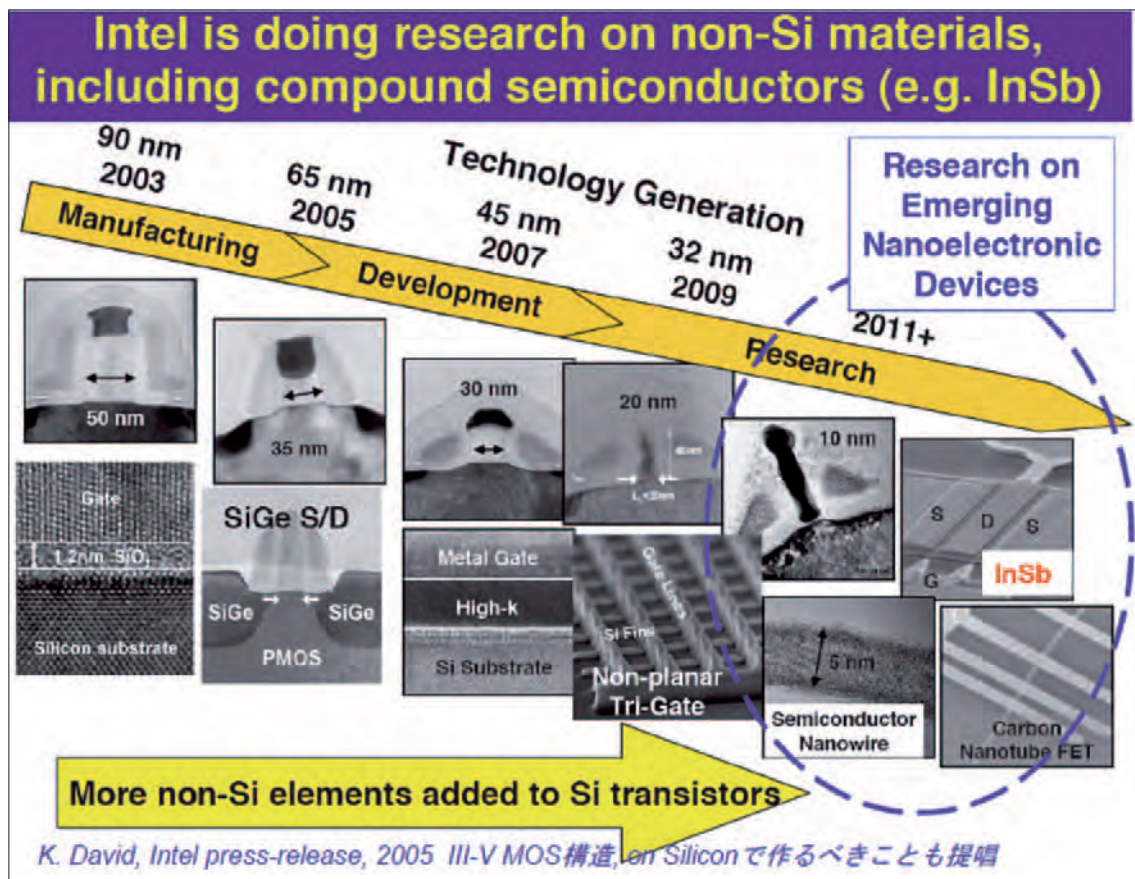


図3-4 Intel is doing research on non-Si materials, including compound semiconductors

インテル以外の研究開発の動向を見ると、化合物半導体材料のInPが、電界効果型トランジスタ（FET）の最高速を記録している。2002年、富士通が通信総合研究所（CRL）と共同で、遮断周波数562GHzの最高速を記録した。ただし、2002年以降、記録は更新されていない。

一方、InPを用いたヘテロ接合バイポーラ・トランジスタ（HBT）では、イリノイ州立大が2005年、遮断周波数710GHzの最高速を記録した。スケールダウンを進めてのことである。

シリコンCMOSの遮断周波数は、300GHz台を優に超えていると思われる。シリコンのスケージングの限界値などに関しては断定できない。アナログで200GHz、デジタルで100Gbpsまで動作する回路では、シリコンを用いることが可能であろう。ただし、電圧が必要な際の耐圧向上については、シリコン以外の化合物半導体材料の使用も考えられる。

より高い周波数を出せる化合物半導体が期待されている。たとえば、米国軍関係ブログ

ラムTFAST (Technology for Frequency Agile Digitally Synthesized Transmitters) では、軍用レーダーなどの通信分野で高速情報処理を試みている。また、民生用では、光通信用MUX/DEMUX関係で、160Gbps程度の周波数を出すことが期待されている。製作方法を向上させ、歩留まり率を上げる方法としては、シリコンで用いている優良な技術を用いることがある。トランジスタのさらなる高速化のために、InGaAsを散乱なしの状態にして、電子ランチャを用いて、速度を2倍に上げることが望ましい。

化合物半導体電子デバイスは、過去に日本からも多くの投資がされ、多くの遺産がある分野である。しかしながら、現在は投資が少なくなり、関与している研究者が減りつつある。シリコン技術の模倣を考えながら、化合物半導体界面特性などをより詳細に理解した上で、ナノメートルオーダーでの選択成長などの素子作製技術の開発や高速性・低消費電力を生かす素子設計・プロセス開発が必要である。

3) 超伝導材料 実用化に向けた課題/藤巻朗（名大）

超伝導リング中の磁束が量子化されたものを磁束量子という。単一磁束粒子 (SFQ) 回路は、リングに磁束量子1個がある状態を情報の「1」に、ない状態を「0」に対応させて演算を行うというものである。超伝導なので、磁束が存在してもエネルギーを消費しない。クロック周波数は～500GHzと超高速で、消費電力も動作のときに電圧が発生するのみなので、半導体の1000分の1以下と超低消費である。実証レベルで、遮断周波数760GHzのT型フリップフロップが製作されている。

最近ではSFQ回路の配線技術に顕著な発展が見られた。そこでは光の速度での信号伝搬が可能である。研究室の学生（当時）のアイデアに基づく開発により、ファンナウトも4程度まで可能になった。このようにSFQ回路の大規模化に向けての障害は減ってきている。

化合物あるいはシリコンのLSIには、発熱（電力密度）、配線遅延、複雑さという三つの問題がある。SFQ回路の意義は、それらの問題の解決が困難な箇所に用いることにある。動作周波数100GHz以上、集積度 $10^6 \sim 10^7$ となるSFQ回路の開発を目指していく（図3-5）。

SFQ-LSIの開発ターゲット

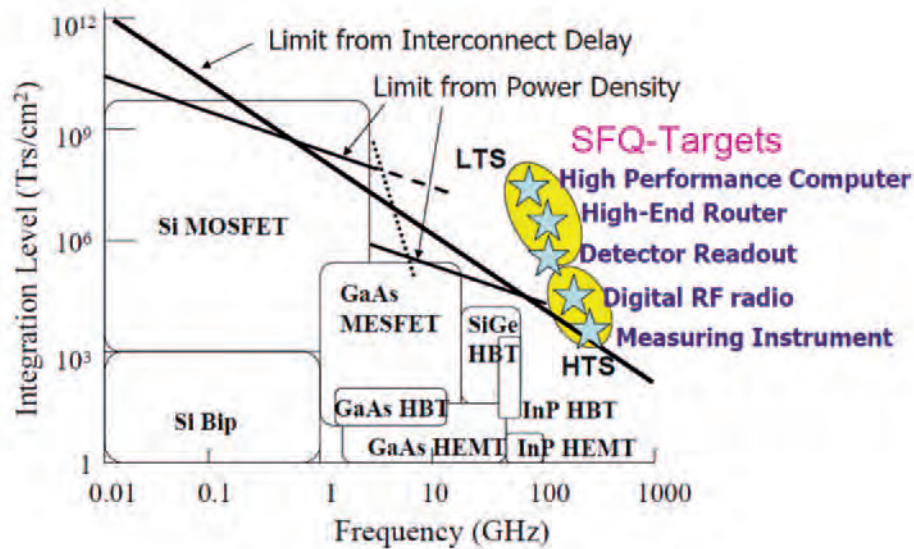


図3-5 SFQ-LSIの開発ターゲット

超伝導のデジタル応用は、以前から実施されてきた。非SFQの論理回路の開発が行われていたが、1997年に振興調整費により本格的なSFQ回路の開発が始まった。ニオブを用いた集積回路のプロセスを、プロジェクトの中で開発した。1999年に産学官連携グループが結成され、未確立だった設計技術を確認し、集積回路を開発することとなった。2003年に世界初のSFQマイクロプロセッサを開発し、2005年に120GHzシフトレジスタを実証した（図3-6）。

Nb/AIOx/Nb-単一磁束量子集積回路 開発の歴史

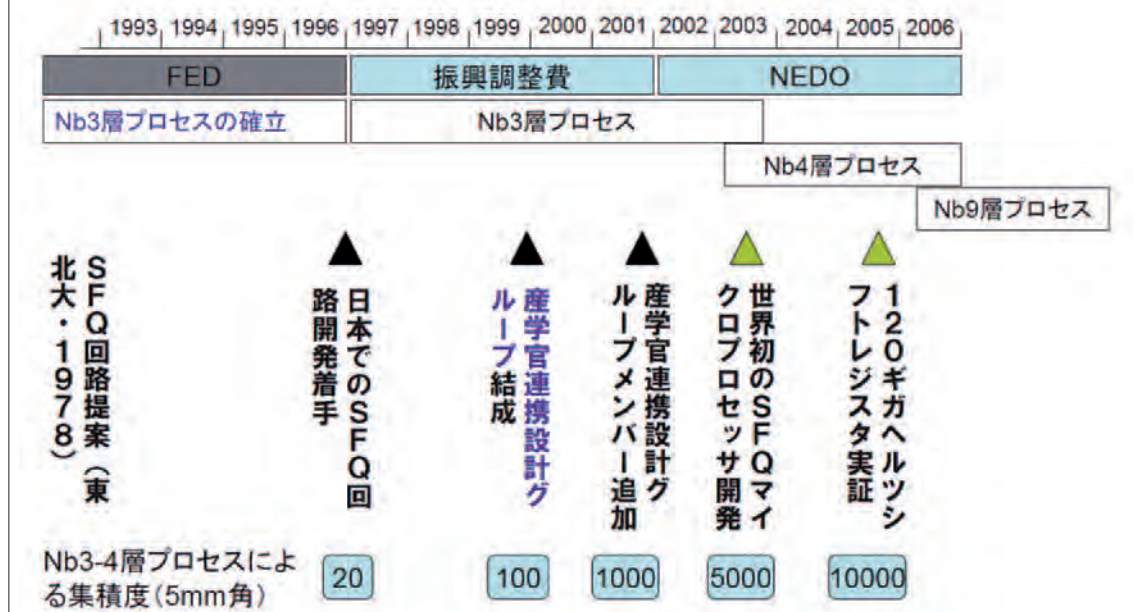


図3-6 Nb/AIOx/Nb-単一磁束量子集積回路開発の歴史

NECの「標準プロセス」(現・超電導工学研究所(SRL)標準プロセス)を基に、名古屋大学、横浜国立大学、情報通信研究機構(NICT)、超伝導工学研究所で、産学官連携体制を組み、設計技術の蓄積をしていった。プロセス維持コストは年間約1億7,000万円で、開発要員はテクニシャンを含めて計7名。設計開発コストは大学等の5研究機関への委託が年間約2,600万円。開発要員は学生を含め計25名。うちスタッフは7名である。学生は実力を発揮し、安価なコストかつ短期間で責務を果たした。

SFQ回路の技術的課題として、スケールを小さくして集積度を上げていくのが基本的な考え方である。現況では本質的な問題は見当たらない。ある程度の集積規模がないとSFQ回路の意義が出てこないのも、1チップで最低でも数百万接合の集積回路を開発しなければならない。冷凍機を含めたシステムも必要である。現在の30名程度のSFQ回路従事研究者の底辺を拡大するため、SFQ版VDEC(大規模集積システム設計教育研究センター、VLSI Design and Education Center)のようなシステムづくりを模索している。他分野からの研究者が参加しやすい環境を作る必要がある。ある時期からは集中投資もしていただきたい。こちらからも他分野研究者に協力依頼をしている。

SFQ以外の超伝導材料に関して、MTS(Medium Temperature Superconductor)では主な材料に窒化ニオブ(NbN)やニホウ化マグネシウム(MgB₂)などがある。日本は接合技術において世界一の高いレベルにあるが、集積回路という観点ではさらに基礎研究が必要と思われる。また、HTS(高温超伝導体)ではニオブの限界を超える高速性のポテンシャルがある。ただ、大規模化のためには、パラメータばらつきや再現性の課題を克服するため、薄膜制御技術や界面等の制御技術確立の必要性がある。高速性が必要なところにMTSやHTSの小中規模集積回路を利用し、より大規模な演算はLTS(低温超伝導体)－SFQ回路で実現するというハイブリッドの形式をとるのが現実的な解である。

3.3 課題提起－イノベーションについて(企業の立場から)

／西野壽一(日立ディスプレイズ)

「界面制御によるブレークスルー 超微細・超集積化デバイスが抱える課題」(金山氏)については、シリコン半導体の現状がわかりやすく説明されていた。実用化に現実的な分野とそうでない分野とがある。現在、半導体などの工場の建設は一度に1,500億円程の費用が掛かる。工場の中身を取り替えることはできない。気軽に発展しやすい分野と、大きくテクノロジーが変革する時期でなければ発展しにくい分野がある。上手な議論をできる人物が介在して、方向付けをするほうがフラストレーションは少ない。

「超高速デバイス 記録とスイッチの機能を持つトランジスタの可能性と課題」(宮崎教授)については、歴史ある日本の磁性体分野で生き残った研究分野は何であることをレビューする意義が大きい。イノベーションの中で、日本はどの研究分野を残すのかという議論は必要である。

「半導体電子デバイスの超高速化について」(宮本助教授)では、半導体は製品により月販売個数に偏りがあるという状況を考えた。月数百から数千個程度を販売する製品の群が

あるが、もう一段大規模になると、月10万から100万個を販売する群となってしまう。大規模なビジネスについては、出口が見えづらいという産業構造の理解を含め、誰かが研究を行うべきである。

「超伝導材料 実用化に向けた課題」（藤巻教授）については、産学連携の成功例が示された。研究開発の規模が小さい段階でどれほど効率を上げるかを示す重要な結果が出た。企業にとっては、イノベーションを現在の活動に入れていかなければ生き残れない状況となっている。重要な点は、イノベーションの出発点どのように生み出しあるいは獲得するか、また、いかにして企業活動に取り入れて価値を生み出すものとして定着させるかということである。さらに、イノベーションの強化には領域の選択や、日本で育成しやすい分野であるかといった地域性の視点も含めた規模感も必要である。

海外の大学などでは、研究開発が小規模の製品群の段階で対外的に進出した後、大規模の製品の群にどのように合流していくかということに関して工夫をしている（図3-7）。

イノベーションについて(企業の立場から):

イノベーション:企業の継続的な発展に対する
必須要件のひとつ

重要なことは、

- (1)その出発点どのように生み出し
あるいは獲得するか
- (2)いかにして企業活動に取り入れ
価値を生み出すものとして定着させるか
- (3)強化には規模感も必要(領域の選択、地域性)

図3-7 イノベーションについて（企業の立場から）

3.4 課題提起/平本俊郎（東大）

ナノデバイスを議論する際には、アプリケーションごとに分けて議論するのが望ましい。まず、「情報処理デバイス」つまりトランジスタ（メモリは含まない）では、エネルギー効率の点でCMOSが圧倒的に優れている。長い将来まで、CMOSをベースとする状態が続くと思われる。現在トランジスタは、リソグラフィやエッチングなどのトップダウン型加工で製作されている。ただ、将来（スライドでは2018年頃）に、セルフアセンブリー型でサイズが決定するトランジスタも考えられる。例えば、カーボンナノチューブのトランジスタが開発されたときには、回路としてCMOS回路が用いられると思われる。この

場合、トランジスタの動作原理は変わらないので「CMOSベース」であるが、作製方法が変革する。その先（スライドでは2025年頃）に、CMOSではないが電荷ベースであるデバイスが現れる可能性があるが、CMOSベースとの間に大きな技術ギャップが存在する。さらにその先（スライドでは2030年頃）に、電荷以外を用いるデバイスが現れるかも知れないが、さらに大きな技術ギャップが存在するであろう。（図3-8）。

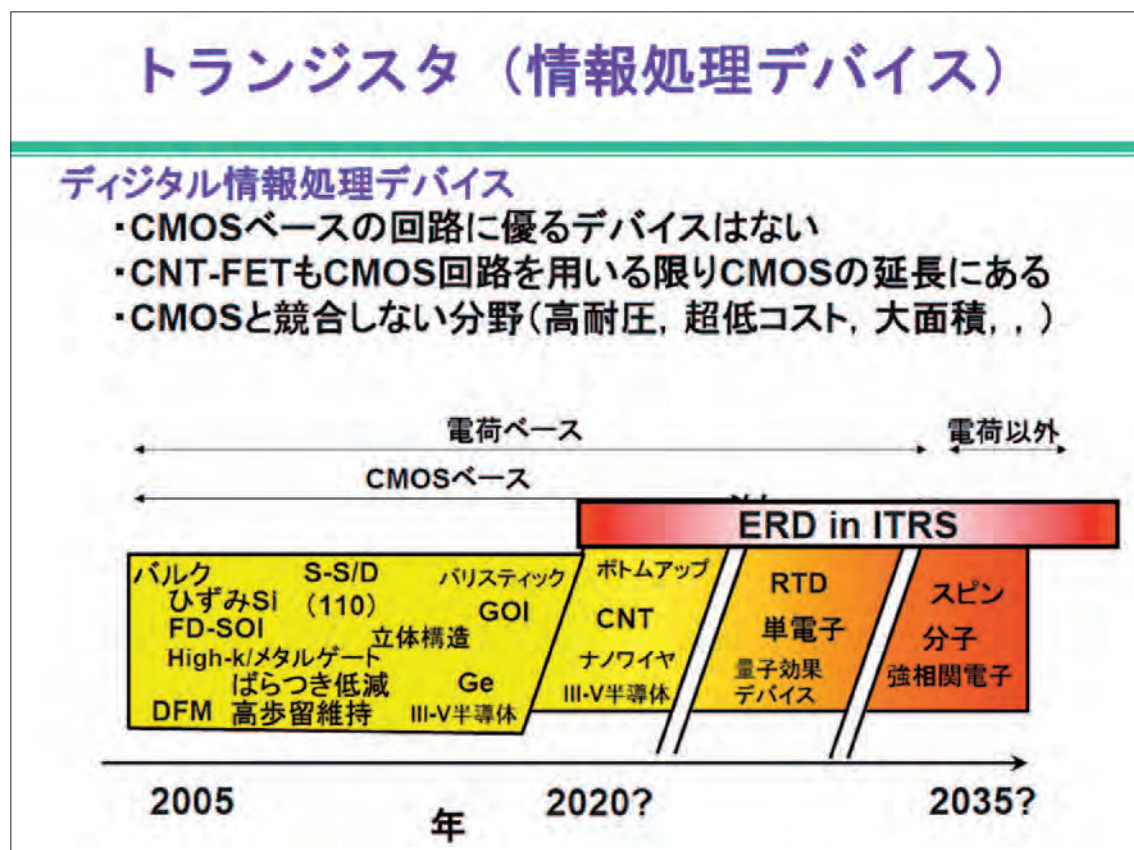


図3-8 トランジスタ（情報処理デバイス）

「メモリ」では、将来的にトランジスタで予測されるような大きな技術ギャップはないであろう。メモリセルの部分はMRAMやFRAMなどの新材料が導入される。一方、メモリセル以外の周辺回路はCMOS回路が使われることが前提となっている。したがって、メモリの製作は新材料と従来のCMOSの融合技術である（図3-9）。

メモリ（情報記憶デバイス）

情報記憶デバイス

- ・メモリセルには新構造, 新材料, 新現象,
- ・メモリセル以外は従来のCMOSベース
- ・少しでも双安定状態が実現できれば, あとは回路で補える?
- ・重要なポイントはコスト.
- ・新材料の研究が必須. 特に不揮発性メモリ.

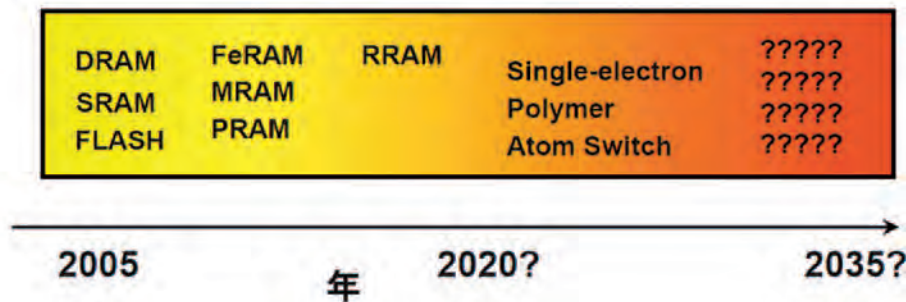


図3-9 メモリ（情報記憶デバイス）

「配線」については、将来的な技術が見当たらない。現状では、配線はCu/low-kの絶縁膜で成り立つが、アンチスケール（レイヤー上層のサイズが大きくなること）となる。近い将来（図では2008年頃）、カーボンナノチューブの導入といった作成方法の変換が起きるであろう。その後（図では2012年頃）、電気配線を使用しない光配線の導入など、パラダイムの変換がおこる可能性がある。配線では、このような技術ギャップを克服する技術がトランジスタより早く現れる可能性が高い（図3-10）。

配線技術

信号伝達手段

- ・配線はCu/low-kの延長線上の技術が見あたらない
- ・パラダイムの変換がトランジスタよりも早く起こる?
- ・新材料の導入: CNT(ボトムアップのナノテク)
- 新信号伝送方式: 光

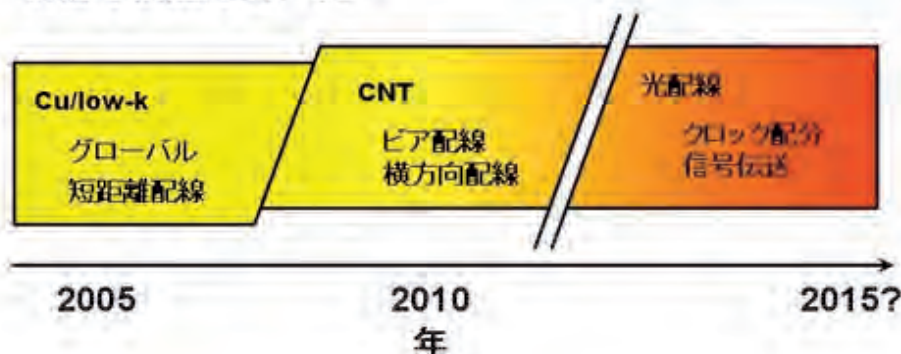


図3-10 配線技術

トランジスタにおける研究分野は3分野に分けられる。まず、"CMOS Extension (CMOS研究の延長)"である。つぎに"Beyond CMOS"である。さらなる軸が、"Added to CMOS (CMOSに新機能を付加すること)"である。CMOSにセンサやMEMS、スピンの応用デバイスなどをCMOSに付随させるものである(図3-11)。

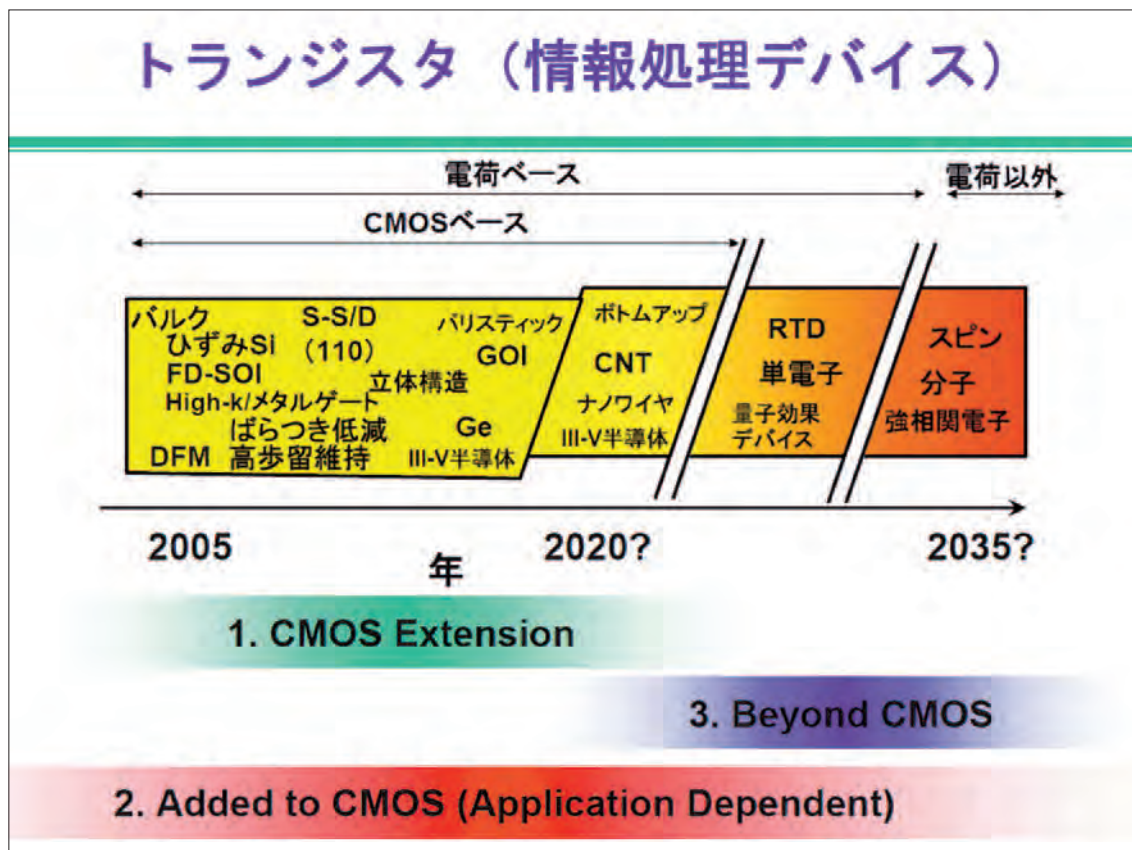


図3-11 トランジスタ（情報処理デバイス）

社会（海外）での“More than Moore”の位置付けは、“Added to CMOS”に近い。米国で組織されたNRI（Nanoelectronics Research Initiative）は注目に値する。大学ではなく、企業が立ち上げた。非電荷の情報処理の研究に特化しており、研究対象は“Beyond CMOS”領域に含まれる。また、どのような研究が必要化をトップダウンで検討する「リサーチニーズ」という方法を採用している。日本でも、シリコンの技術を超えるために何をすべきであるかをトップダウンで検討すると、研究プロジェクト体制も変容するであろう。

3.5 第1部討論

<各分野の展望>

シリコンに関して、米国の産業はNRIをアウトソーシング先にして大学や公的機関と連携すること、米国のナノテクノロジー予算の相当の部分をシリコンの延長の研究開発のために獲得すること、以上の二つの目的を持つ。日本では、大学がイニシアティブを取って、シリコンに代わる新しい情報処理技術を促進することが必要である。

磁気関係に関しては、これまで磁気記録の分野が研究開発の対象として大半を占めていたが、最近では、スピントロニクス分野が相当なウェイトを占めている。磁気記録分野とスピントロニクス分野の両者が互いを理解し、研究分野の仕分けなどをしないと、分野の成長は望めない。

化合物半導体分野に関して、Ⅲ-V族の半導体は、現在は携帯電話の出力部にしか電子デバイスに応用されていない。コンピュータ用電子デバイスはCMOSが使われている。InPの電子デバイス分野での産業化はされていない。厳しい状況であるという認識がある。

超伝導分野に関しては、CMOSでは機能しない部分を補う、“By CMOS”（CMOSとの共存）という領域が存在する。“By CMOS”の領域で産業化されたものがないことは問題点である。ただし、センサの分野では、超伝導技術でしか成立しないセンサがある。信号処理の分野から開発を進めていき、最終的には10～100テラフロップスの計算機を製作する過程が考えられる。ハイパフォーマンスの領域に、SFQ技術の活路がある。

<InSbの現状>

InSbは、飽和速度や移動度において良質の材料である。だが研究例が少なく、現在、日本では1、2機関においてしか研究が実施されていない。化合物半導体分野において主要となる材料は、E-k関係（エネルギーと運動量の関係）における移動度の群速度により決定されるであろう。その場合はどの材料も大差はない。非平衡状態を基本に考えると、また条件が変わるであろう。

スタンフォード大学では、化合物半導体のFETに関するプロジェクトがシリコン分野の研究者を中心にして開始されようとしている。最近、絶縁膜の技術の進歩により、非シリコン系材料を容易にシリコン絶縁膜に付加することが可能となった。このため、最近、化合物が注目されている。

5年程前までは、nMOSとpMOS共通のプロセスが考えられていたが、今後は、nMOSとpMOSにおいて、別の材料を付加する方向で研究が進むであろう。

化合物半導体において、電流を多く確保するためには、状態密度の大きいソースとドレインをいかに作るかが重要となる。短いチャネルを作りにくい点、化合物半導体の大きな問題であると認識している。バンドオフセットを用いて電荷供給が可能になるような構造を作らなければならない。

<融合領域とNRI>

今後は、融合領域に関してのロードマップを描けるようにならなければならない。融合領域は、様々なイノベーションが起きる可能性が高い領域である。

インテルやテキサス・インスツルメンツは、シリコン技術の延長にあるものを見据えている。将来、CMOS分野に限界が来ることがわかっているので、先手を打っている。NRIは、NSF（米国科学財団、National Science Foundation）との提携や、NERC（北米電力安定供給協議会、North American Electric Reliability Council）との共同研究

開発を実施している。米国の企業は、基礎研究者の不足に危機意識を持っているため、NRIを通じて、大学側に今後の企業研究の方向性を示し、学生たちに夢を与えるような中長期的な展開を考えている。

<半導体の動作速度と消費電力>

動作速度が上がれば、消費電力は増加する。消費電力の問題とばらつきの問題にどう対処するかは現時点での問題である。デバイス単体では解決できない。リーク電流が発生する前提で装置を設計するトータル技術である。

<化合物半導体研究の課題>

化合物半導体の研究分野では約10年前、様々な問題を抱えて集積化が進展しなかった。現在の化合物分野の研究者は、再度ゼロから研究を進める覚悟があるのか。また、化合物を大きな結晶にする技術の問題が全ては解決されているわけではない。研究は進歩している。完全に無転位のGaAsオンシリコンが製作されたという報告がある。ソース・ドレイン間の数十～100nmといった部分において無欠陥で薄膜成長を行うことができれば、化合物半導体を用いて集積化が可能である。また、シリコンの要所部分で、化合物半導体やカーボンナノチューブを、正確に成長させる技術が確立されれば、状況は変わるであろう。こうした課題を解決しなければならない。

<「ウサギ型」研究と「カメ型」研究>

“Beyond CMOS”の研究は、いつどのような成果が起きるか予想が付かず、失敗も多い。「ウサギとカメ」で喩えた場合の「ウサギ型」の研究と言える。一方、“Added to CMOS”の研究には「カメ型」の研究の要素も含まれる。米国は「ウサギ型」研究の必要性を認識している。日本の得意な研究方法は「カメ型」であるが、戦略的基礎研究分野の研究者が「ウサギ型」研究をする覚悟があるのか。また「ウサギ型」研究を支援する体制はどうか。科研費による研究においては、研究内容は研究者に委ねられている。一方、各省庁は研究者を政策誘導する立場にある。各研究者に研究内容を任せるべきか、国が大規模に政策を誘導するべきか、この点を議論したい。日本も「ウサギ型」研究に取り組まなければならない。「ウサギ型」研究の資金を減額してしまえば、国として再投資する意味が見出せなくなる。IBMやインテルなどの米国企業は「ウサギ型」研究のリスクも考えた、研究のポートフォリオを持つ。

<第1部討論まとめ>

融合や連携に見られるような、様々な知識を複合的に組み合わせて新しいものを創出する仕組みや努力が日本では欠けている。「ウサギ型」研究あるいは“Beyond CMOS”分野の研究をするには、その仕組みを十分検討しなければならない。

ナノカーボン系、量子細線系、量子ドット系、スピントロニクスを事例として量子性を利用した機能実証へむけたアプローチと新しいデバイスの課題と展望

4.1 Emerging Research Devices 電子素子 (Logic) /伊藤公平 (慶大)

ITRS (国際半導体技術ロードマップ、International Technology Roadmap for Semiconductors) のEmerging Research Device (ERD) 部会は、今後のエレクトロニクスの発展が従来通りに電荷移動に頼るのであれば15年はシリコンCMOSに頼らざるをえないと結論づけた。そして、その後の発展には、全く異なる概念の素子を開発し、従来のシリコン素子に付加していく必要となるであろうと予測している。この流れではシリコンは、2030年頃、1個の原子に1ビットを含めなければならなくなる。これは必然的に量子コンピュータとなる。15年間のシリコン素子発展においては、マイクロ素子時代に蓄積したノウハウの一部が、ナノスケールでは非定常状態となり適用不可能となることを認識し、その克服を目指した基礎研究を早急に行う必要がある。

シリコンは ^{28}Si 、 ^{29}Si 、 ^{30}Si の同位体からなるが、SIMS (2次イオン質量分析) では、 ^{28}Si と ^{30}Si を交互に重ねたうえで、イオンを注入し、どの部分のシリコンがどのように移動するかを観測する。これを解析し、熱処理を加えていくと、ナノスケールにおけるシリコン移動の情報が明らかになり、その振る舞いがマイクロスケールとは異なることが明らかになる。 ^{28}Si と ^{30}Si が何層にわたり積層されているかがわかっているため、不純物やエネルギーの深度に関する情報を得ることができる。また、シリコンの拡散の仕方の情報も得ることができる。さらに、シリコン基板上の熱酸化膜では、界面に近いほどシリコンの自己拡散は速く、界面から遠いほど遅くなる。これまでの定常状態の数値が通用しない場合があることがわかってきた。これらの物理的情報は、ナノシリコン素子の効率的な開発に不可欠なプロセスシミュレータにフィードバックされる。

5～15年後の実用化を目指す中期的な研究として、東北大学流体科学研究所・寒川誠二教授の持つトップダウン加工技術と、武蔵工業大学総合研究所・白木靖寛所長の持つゲルマニウム等の積層技術を組み合わせることにより、CMOS研究を推進していきたい。

2002年、“Beyond CMOS” の領域に関して、シリコン同位体を用いた量子コンピュータを提案した。シリコン構造の中に、磁石である ^{29}Si を並べ、上向きを0、下向きを1とすれば、量子ビットとしての情報をもたせることができると考えられる。情報の読み出し方に関しては、 ^{29}Si に近接した箇所にリンを付置すると、電子スピンを核スピンの読み出しをということを実験で示した。また、 ^{29}Si の0と1の情報の保持に関しては、25秒の量子情報を保持できることを実験で示した。電子スピンに関しても、8Kで1ミリ秒程度であれば状態を保持できることがわかっている。また、デバイス製作に関しては、電荷移動などにより、原子スケールで階段状になった基板をつくり、その上に ^{29}Si を乗せてみた。温度状態や乗せる物質の種類を変えて実験を重ねた結果、表面の結晶成長の様相が解明さ

れ、実現可能性が見えてきた。さらに、核スピンの読み取りに関しては、リンに光を当て高分解能分光計測をすることで実現化することを目標としている。光電流で観測しても同様の現象が見られる。

今後の展開として、熱平衡状態と非熱平衡状態の利用方法の確立が挙げられる。ITRSのロードマップ委員会も、非熱平衡状態を使うのに適した材料を探索し、熱平衡状態の利用方法を探索している。スピンに関しては、磁性とは異なるパラメータが必要となる。量子情報を長時間保持するためには、対象に光を瞬間的に当て、「壊して揃えて」を繰り返すような方法を実現化することが戦略的目標となる。ロードマップ委員会は、デジタル化したものに、アナログなど非デジタルな原理を再び導入することを模索している。例えば、強相関で特定の時間内、一定量の計算をさせておき、最後に結果を読み取るといった方法が考えられる。0と1の2進数に頼るブール代数から脱却して、ナノスケールで多値演算が実行できる固体素子向けのアーキテクチャが開発されれば、従来のシリコン素子への付加価値としてエレクトロニクス発展に大きく寄与することが期待されている（図4-1）。

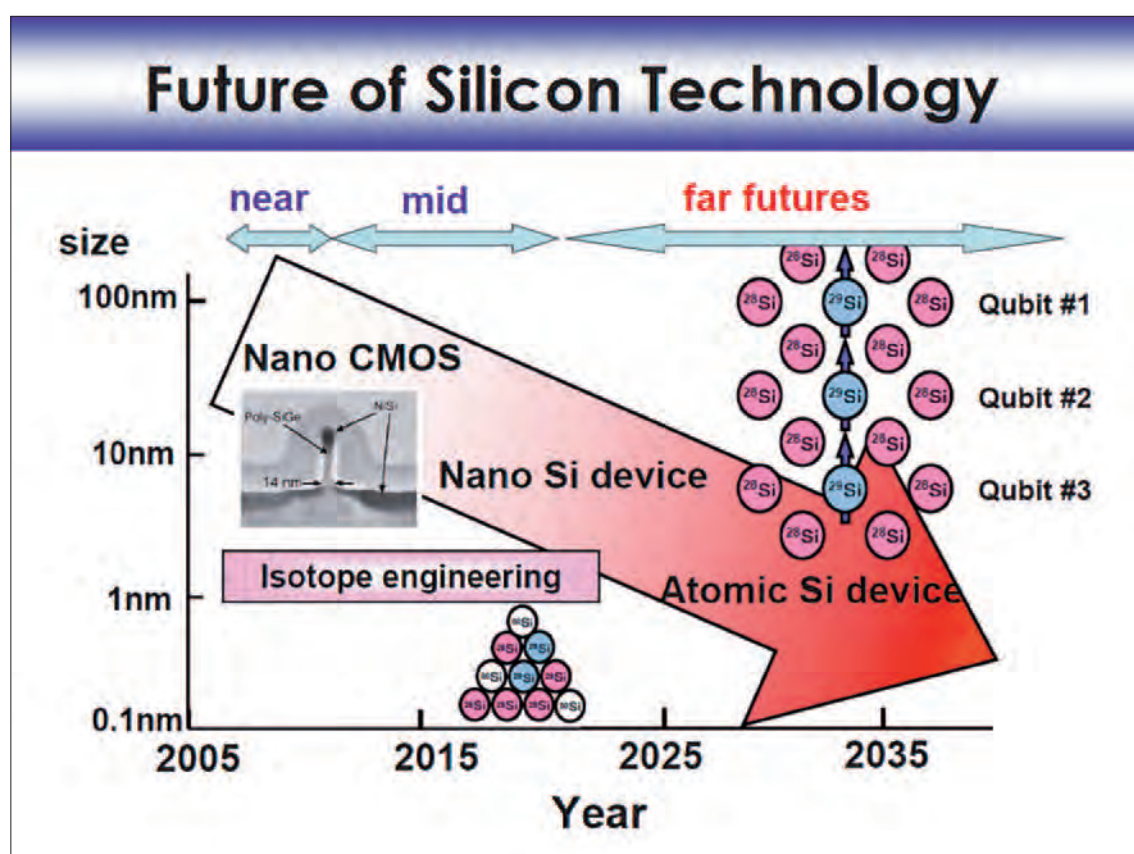


図4-1 Future of Silicon Technology

4.2 高性能量子ドットレーザと量子ドット光増幅器/菅原充（QDレーザ）

量子ドットは電子の熱的エネルギーの広がりを抑制し、レーザの温度無依存、低消費電力、高速化、長距離伝達をもたらす。1992年までに、自己形成の量子ドットが使えることが発見された。1994年頃に、光通信で使用可能な $1.3\mu\text{m}$ で発光する量子ドットを発

見た。その後、レーザの実現に向け、密度を増やしたり、結晶成長の方向に多層化させて光通過部分を増やしたり、という研究開発を行っている。当初、量子ドットは平らなレンズ状であったが、重層して球状を形成することが可能となった。これにより、光通信で使われるあらゆる偏波に対応できるようになり、1～1.8μmの波長帯をほぼカバーできるまで材料技術が進歩した。ローカルステートを取り扱ったデバイス理論の構築も行い、2004年、“Physical Review B”に掲載された（図4-2）。

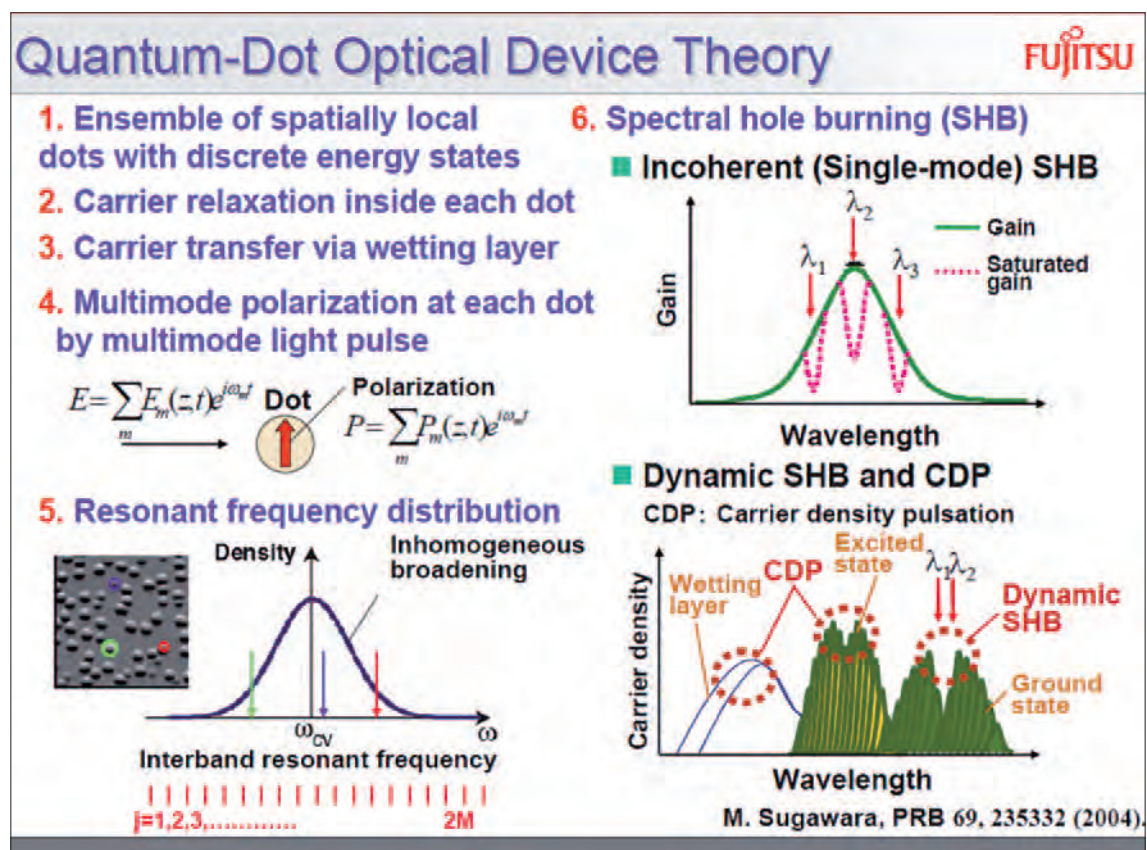


図4-2 Quantum-Dot Optical Device Theory

一例として、低温で量子ドットレーザを発信すると幅広い発信スペクトルとなり、室温で発信すると狭小なスペクトルとなる現象を解明した。数百万の量子ドットを詰め込んだキャビティ中でレーザを製作し、温度により特性が変化しない状態を実現した。現在は、10Gbpsの速度で作動し、0と1のランダムパターンを光に変換するデバイスの実現が可能となった。20～90℃の広い温度範囲において、動作変化が見られないため、冷却機能や調整用電流回路も不要である。応用としては、ビル内の光LANを検討している。建物構内に引かれたマルチモードファイバーに1Gbpsの速度の光を入れる。この速度を10Gbpsにまで向上させる。新しい規格とアプリケーションで、保守的な業界に効果を認知させる予定である。その後も、市場を家庭まで拡大したり、性能を向上させる。量子ドット増幅器は、高出力であることが特徴である。量子井戸デバイスでは不可能であった、23dBmの出力が可能である。光通信の波長帯域は、EDFA（エルビウム添加光ファイバー増幅器、Erbium Doped Fiber Amplifier）の帯域に集中している（図4-3）。

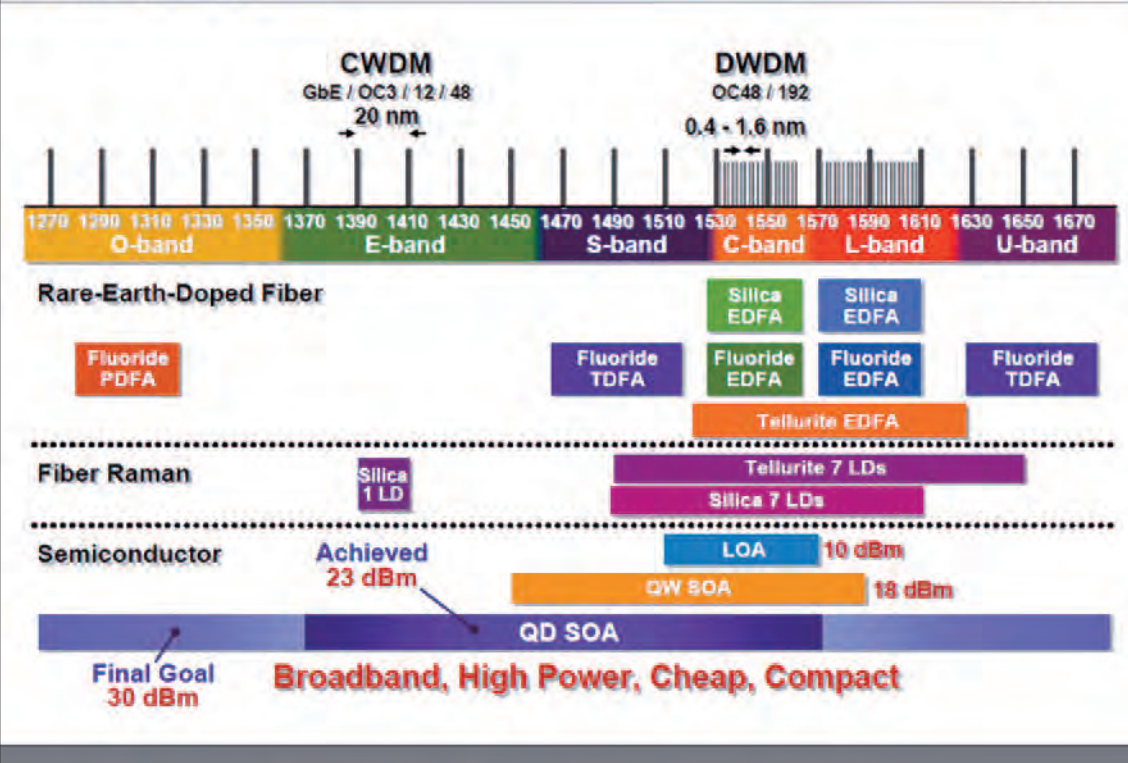


図4-3 広帯域増幅

アプリケーションの開発が進めば、帯域が広い、EDFAに代わる新しい増幅器が実現可能となる。この点においても、量子ドットを球状に製作し、どのような光の偏波であっても、同じ状態で増幅させることが重要である。2006年4月24日、富士通と三井物産の提携で、QDレーザ社が設立した。研究開発向上、ファンドリー創設、マーケティング開拓等を並行しながら推進していくことが重要である。

4.3 不揮発性機能とスピントロニクス/安藤功児（産総研）

技術的ポートフォリオの他に、予算面のポートフォリオを作ることが重要である。

社会ニーズを考えながら、電子情報エレクトロニクスの研究開発をしていかなければならない。20年後の社会ニーズ（実現すべき機能）を予測することは、さほど困難ではない。一方、その機能を実現するための技術がどこまで実現するかを予測することは困難である。ニーズを実現するための技術ポートフォリオを検討することが重要である。

20年後の社会では、ネットワークの高速化、コンテンツの大容量化、流通形態の変化などに伴い、サーバの役割が重要になるとされる。これらに対応して、モバイル機器の進化も予測される。また、機械に埋め込まれて「見えなくなるコンピュータ」や、「ありとあらゆるところにあるコンピュータ」が使用されているだろう。社会ニーズのため、どのような機能を産出するかを考えることが重要となる。電力の供給方法がチャレンジングな課題となる。その意味で、不揮発性メモリ市場は、巨大なものになるであろう。

CPUの発展に伴う発熱の問題にも取り組まなければならない。シリコンテクノロジー

分野でもこの問題は検討されているが、電源のオン・オフを前提にしなければならないので、電源電圧や周波数を低下させることは可能であっても、ゼロにはならないであろう。この周辺に不揮発性技術の大きな可能性が存在する。ノーマリー・オフ・コンピュータの発想が、10～20年後、大きな市場をもたらす。全ての電子デバイスや光デバイスに不揮発性を導入し研究するというのが、産総研エレクトロニクス部門における基本的なアプローチである。

不揮発性現象の起源の中に、強磁性ヒステリシスがあり、高速にスピンの向きを変えることができる。また、無限回の動作をしても壊れないことは、他のメモリにはない特長である。しかしながら、磁気と電気は直接的なカップリングが非常に弱い。この問題は、コイルを使わず量子力学的なレベルでのカップリングを実現するスピントロニクス技術が解決しそうである。

スピントロニクス技術では、1994年、磁気情報を電氣的に読み込む方法が東北大学・宮崎照宣教授（第1部）により発見された（室温TMR効果の発見）。また当初、絶縁物はアルミニウムと酸素によるガラスであったが、産総研が酸化マグネシウム（MgO）でのオール単結晶化に成功し、4倍程度の抵抗変化が簡単に実現した。キヤノンアネルバと共同開発で量産技術を確立しており、2007年には製品が搭載されたハードディスクが市販されるであろう。酸化マグネシウムの単結晶は対称性がある。これにより、トンネルする電子の対称性を限定できる。半導体のバンドエンジニアリングが強磁性金属で可能になるという大きな意味合いがある。

スピントロニクス技術による磁気情報の読み込みは可能となったが、書き込みの実現化が大きな課題である。だが最近では、MgO系MTJ（磁気トンネル接合素子、Magnetic Tunnel Junction）におけるスピン注入磁化反転により、書き込みも可能になってきている。書き込み電流が量産に耐える程度まで低電流化すれば、大容量、高速、無限回書き込み可能の夢のメモリが実現する。このメモリへの取り組みが最大のテーマである。

また産総研では、スピントランジスタ（不揮発性を有するトランジスタ）の研究開発も実施している。強磁性金属を使用した一体型のスピントランジスタの実現化を目指しているが、増幅度がまだ不十分である。また、強磁性半導体系スピントランジスタの実験も実施している。

スピントロニクス技術では現在、不揮発性機能が非常に重視されている。社会ニーズに合わせた、様々な機能を含めた技術的ポートフォリオを組む必要がある（図4-4）。

不揮発性機能とスピントロニクス

不揮発性機能の重要性とそのための実現技術

メタル系スピントロニクス

実用化の実績(HDD、MRAM)

バンドエンジニアリング技術

実験と理論の強力なタッグ

新現象・新技術

MgO-MTJ、ハーフメタル、スピン注入磁化反転&磁壁移動

超Gb-MRAMとスピントランジスタへの挑戦

半導体系スピントロニクス

大きな期待

新材料開発の必要性

多様な(非スピン系)不揮発現象のデバイスへ応用

アプリに対応する技術ポートフォリオ

図4-4 不揮発性機能とスピントロニクス

4.4 ナノカーボン系を事例として/松本和彦（阪大）

量子構造デバイスの三原則がある。「量子構造デバイスの実用化には室温動作が必要不可欠」「シリコンができないことを目指す」「集積化は避ける。集積化は次世代の課題。集積化せずに意味のあるデバイスを目指す」である。

単一電子トランジスタの室温動作研究に関して、1997年にベル研究所のヨーが開発したものは、分解能が100nm、動作温度は4Kであった。また2006年に、デルシングのグループが開発したものは、分解能が1nm、動作温度は2Kであった。大阪大学産業科学研究所では、歩留まりは低い室温で動作する単電子トランジスタを開発している。更なる工夫があれば、5年以内に室温でも容易に動作する、実用化に近いレベルが達成可能となる。課題点は、直径1~2nmレベルまで達しているボトムアップ加工技術に整合させやすくするため、トップダウン加工サイズ10nm以下を、容易に実現させることにある。

カーボンナノチューブには、シリコンにないコヒーレント伝導の特性がある。金属的カーボンナノチューブでは、電子がファブリーペロー共振をする。500nmや230nmといった長さに渡り、電子のコヒーレンスが保持される。半導体的カーボンナノチューブ(正孔)においても、4 μ mに渡り、コヒーレンスが保持される。スピンバルブやスピントランジスタへの応用が考えられるが、それ以外にも、長いコヒーレント長の特性を活かした新デバイスのアイデアが欲しい。この研究の成果は10年以内を目標としている。カーボンナノチューブは理想的な1次元構造を持つ。1次元量子伝導を利用したデバイス開発の成果は、10~20年以内を目標としている。カーボンナノチューブ電界効果トランジス

タ（CNTFET）の開発はIBMが力を入れており、遮断周波数900GHz程度を達成し、超高速デバイスへの期待があると発表している。ただし、カーボンナノチューブのFETリング発信器では、デルフト工科大学のp型が5Hz、スタンフォード大学の相補型が220Hzであることから、IBMの相補型で52MHzという状況を考慮すると、CNTFETの超高速、超高周波応用はもう少し慎重に議論する必要がある。CNTFETでは、シリコンMOSFETで不可能であったタンパク質の検知等が可能となった。単一電荷での測定が可能となることも考えられる。CNTFETのバイオセンサへの応用は、5年以内に実用化に近いレベルに到達することが可能である。

カーボンナノチューブ分野の問題点と課題に関しては、カーボンナノチューブ素子の安定性や作製プロセスの確立の点で、ヒステリシスの改善と安定性の改善が挙げられる。カーボンナノチューブの位置・方向・本数制御や、集積性、カイラリティ制御も課題である。位置の制御に関しては、NECが1nmの鉄微粒子を位置指定し、カーボンナノチューブの位置を指定成長させる技術を確認している。

50年間に渡るトランジスタ開発の発展は、物理、電子工学、化学、材料科学などの異分野間の連携で達成された。純粋科学から工学への応用へと移行するカーボンナノチューブの開発も、物理、電子工学、化学、生物、材料科学などの異分野間の連携で達成される（図4-5）。

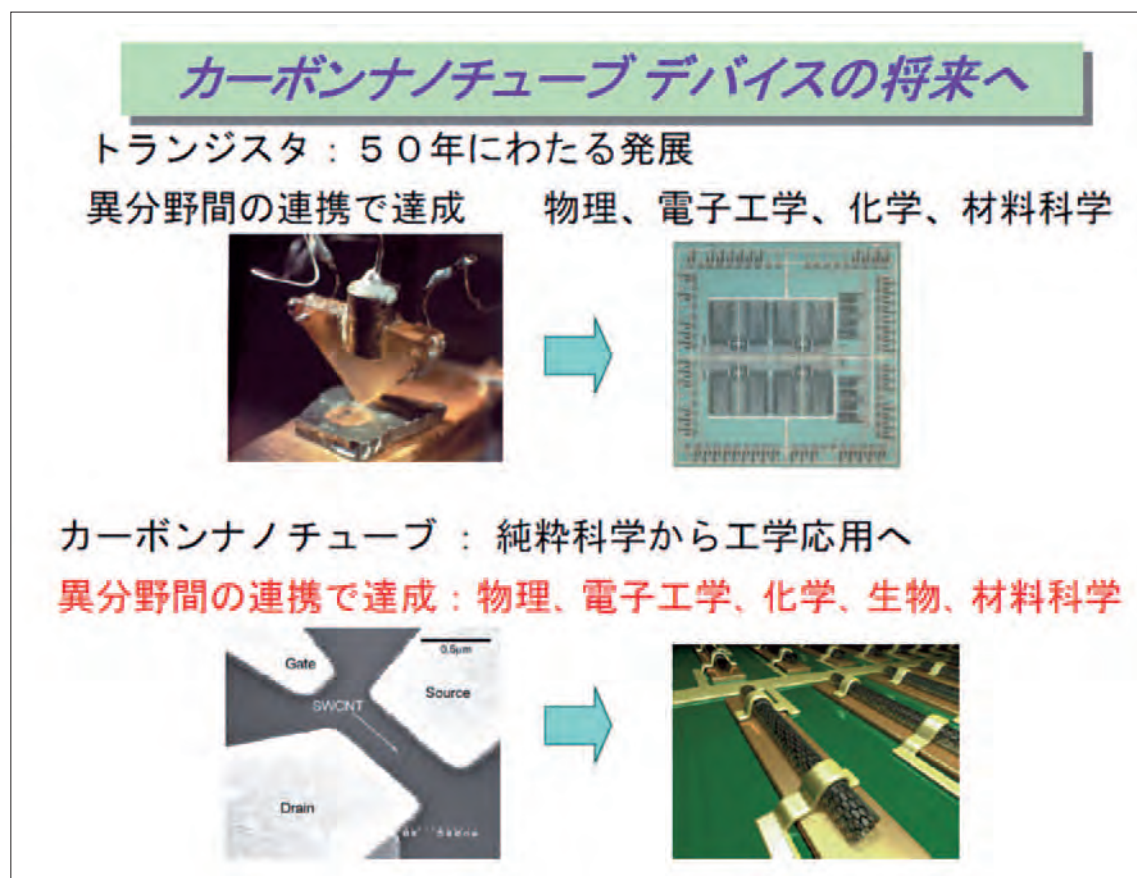


図4-5 カーボンナノチューブ デバイスの未来へ

4.5 課題提起-「量子位相制御」と「ナノダイナミックス」/吉田博（阪大）

量子シミュレーション・ソフトウェアを用いて、メカニズムを解明し、それを基にマテリアルデザインを研究している。量子シミュレーションを基礎としたデザインに基づいて、新物質を予測し、実験による検証と組み合わせて新物質を効率よく開発する、デザインにもとづいた物作りが不可欠である。

2020年頃に予測されるシリコンCMOS半導体技術におけるゴードン・ムーアの法則の限界という壁を超えるのは、半導体スピントロニクス、モルトロニクス（有機分子エレクトロニクス）、クワントロニクス（量子計算・量子情報処理）などの技術であろう（図4-6）。

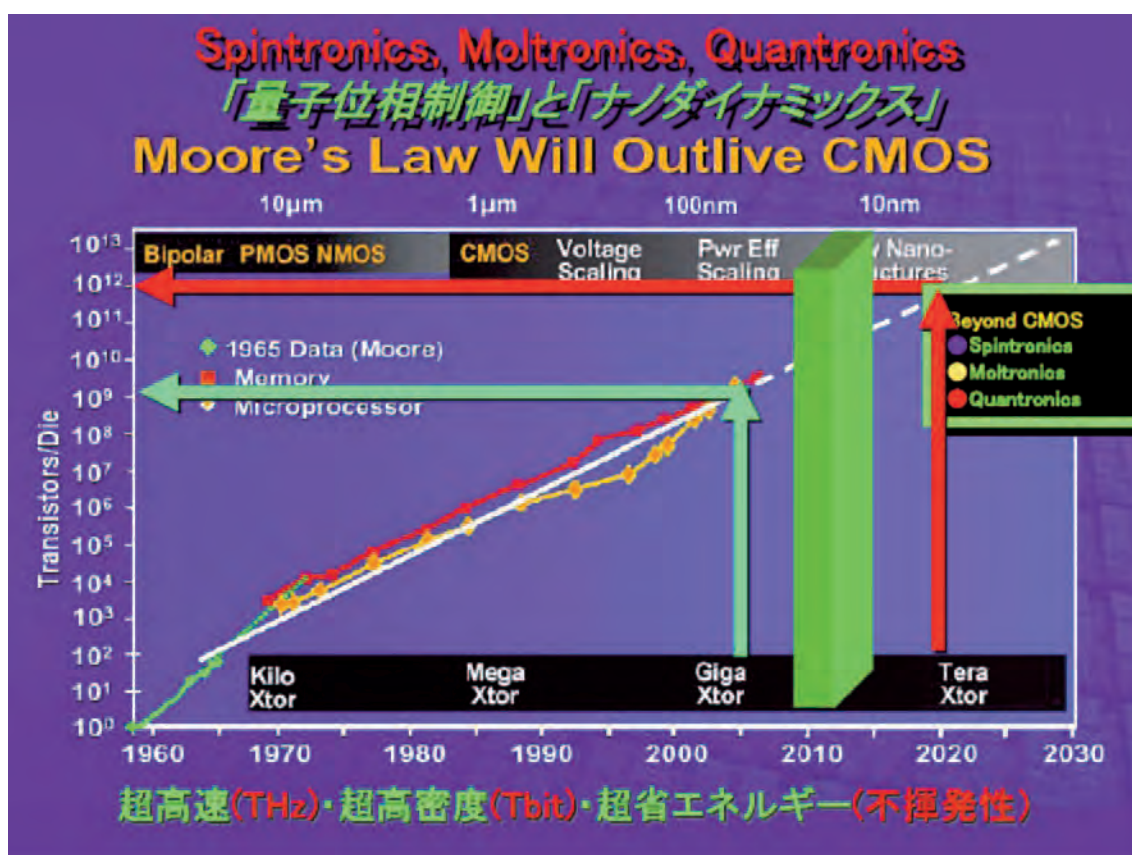


図4-6 「量子位相制御」と「ナノダイナミックス」

最近、電子集団の量子状態の物性を特徴づける物理量は量子位相であるという新しい概念から、スピンホール効果などが予測され、実証実験も行われている。現時点では、電荷とスピンは各自独立に制御されているが、ナノ超構造を使って電荷とスピンを量子位相制御とナノダイナミックス制御によりコントロールし、電場を使ってスピンを自由に制御すれば、スピン間の相互作用はテラヘルツ～10テラヘルツレベルの領域となるため超高速の演算が可能となる。また、ナノダイナミックス制御により、ナノスケールサイズのスピノーダル分解を用いると、100テラビットの集積度を持つナノ超構造デバイスを自己組織化によるボトムアップナノテクノロジーで作ることができる。また、スピンは不揮発性であり、超省エネルギーのエレクトロニクスが可能である。ボトムアップのナノテクノロジー

技術では、ナノスケールのスピノーダル分解を用いて、3次元の量子ドットの集積体を作り、100テラビット程度の密度のナノ超構造物質を作るデザインをしている。最近、実証実験にも成功している。

一方、レイヤー・バイ・レイヤーの結晶成長では、ナノスケールサイズのスピノーダル成長で結晶成長面内での2次元性の濃淡を作り、レイヤー・バイ・レイヤーで成長させると1次元のナノ超構造をもつスピノーダル構造が出来る。100万個程度の磁性体イオン高濃度に並べることが可能であり、室温をはるかに超えた高い強磁性転移温度やブロッキング温度の実現が可能である。これらも、実証実験が行われ、1次元ナノ超構造の存在が確認されている。

現在までの共同研究システムでは、傘下組織の中の個人研究者が集合する構造のため、自由な討論や共同研究が補償されず、成功しない。傘下組織の中から個人の資格で研究者が出て、共同研究機構を作り、研究規約や知的財産の配分等を明文化するなどした新しい制度のもとでの自由な討論と共同研究を可能にする枠組みを作り、プロジェクトを進めないと、真のイノベーションを創出するためのプロジェクトは機能しない。研究面では、量子位相制御技術とナノダイナミクス制御技術なしに、次世代エレクトロニクスや半導体スピントロニクスの将来はないであろう。

4.6 課題提起—テラヘルツの技術/平川一彦（東大）

系のサイズがマイクロメートルのオーダーの場合、アンサンブル平均により構造は同一に機能するが、より小さいオーダーの場合、統計的な揺らぎが発生するとともに、信号も小さくなる。検出すべき信号をどのように測るかが問題。しかし、さらに系のサイズが単一量子に近づくと、量子力学的に制御された物理量が観察可能となる。単一の量子素子に関して、リソグラフィを用いて作製する量子ドットがあるが、最近ではさらに量子閉じ込めが強いナノロッドやナノチューブも研究が活発になされている。また近年では、単一分子をドットとするデバイスも研究が進んでいる。単一量子にどのような機能を期待するかに合わせて、どのレベルの単一量子（リソグラフィードット、自己組織化ドット、ナノロッド、カーボンナノチューブ、単一分子）を用いるのが最適であるかを考えていくべきである。

単一分子トランジスタが実現化した場合、元素の核スピンや元素中の電子スピンを電氣的に読み取る可能性がある。また、分子振動も周波数がテラヘルツ領域になるため、量子力学的な機械的振動子となる。テラヘルツの技術で制御可能となれば、量子計算の一方法となるであろう。

分子から電気信号を読み出す技術は非常に重要である。金属の電極に電流を流し、エレクトロマイグレーション技術で極微細金属接合を焼き切る段階で、金属原子1つずつをはずしていくことが可能になりつつある。逆にこの知見を活かして、エレクトロマイグレーションにより配線が切断しないための技術の知見も得られつつある。分子接合は魅力的であるが、電極上で原子が動き、抵抗が激しく変化してしまう問題点がある。原子の動作を

安定・保持させるパッシベーションする技術の確立が最大の課題である。

日本のエレクトロニクスは、情報通信に比重が置かれていたが、今後は我々の生活を豊かにする応用が重要となる。環境、セキュリティ、農業、バイオ、医療等の分野をエレクトロニクスの対象とすべきである。科学技術に貢献するエレクトロニクスも重要な研究課題である。それを支える技術としては、テラヘルツ技術が重要な課題と考えている。さらに、テラヘルツ技術を量子計算に応用すると、位相を制御した任意の長さのテラヘルツパルス光を発生させる技術も重要となる。

テラヘルツの技術に関しては、目標が幾つかある。単一トランジスタを用いて微弱な光を検出しているが、対象を様々な波長に拡大する努力がされつつある。また、近接場の技術を用いた分子レベル情報の読み出しも検討されている。光源に関しては、量子遷移的な概念と電子デバイスの概念を結ぶようなブロッホレーザが、各レーザ技術の波長範囲のすき間（テラヘルツギャップ）を埋める可能性がある。テラヘルツ技術で大きく遅れているのは検出器の技術である。テラヘルツのカメラ用の検出器をこれから研究するべきである（図4-7）。

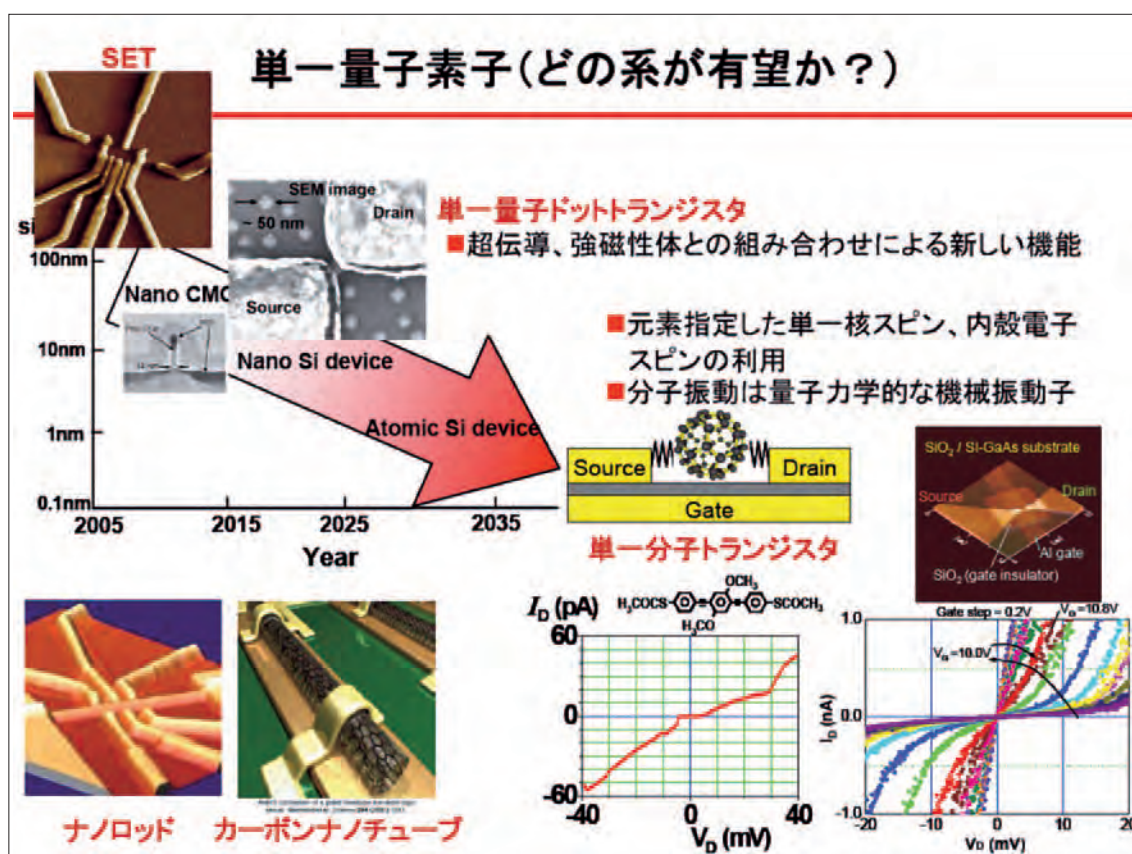


図4-7 単一量子素子（どの系が有望か？）

4.7 第2部討論

<研究のネットワークづくり>

新技術の応用分野を見つけていくことが重要と考える。米国では、MRAMの開発が開始した際に、軍のファンドが設立されたが、日本でも、将来の大規模な技術に社会が出資

することも視野に入れるべきである。分野としては、健康関係が期待できる。長年に渡り共同研究をしているグループでは、企業側のバイオの知識と大学側のカーボンナノチューブデバイスの技術を組み合わせることで、対等で良好な共同研究となる。無理な形で企業側と連携してもうまくはいかない。人と人との信頼関係があると、スムーズな連携が可能となる。JSTの「CREST」でも、自由に企業側との連携や、企業との仲介をおこなっている。領域総括アドバイザーのアドバイスと、領域事務所のメンバーの企業側との交渉などの具体的作業が大変助かる。最適の共同研究者を求めると、自然に世界の研究者との結びつきが生じる。

JSTの「さきがけ」や「CREST」での研究を考えると、「ウサギ型」研究（第1部参照）を最初から目指していたのでは、企業からの資金などは貰えなかったであろう。高い目標を設定して基礎研究をしていると、企業側が参加するようになった。

ITRSでは、量子計算技術において、複数の協調現象を用いた論理や、「0と1」の先にありながらも、量子計算よりは手前にあるような協調現象を用いた理論などを、中心的課題に据えている。これからの戦略として必要な課題である。計算科学や物性分野など、さまざまな研究者が集合して、実現への方法を検討していかなければならない。

企業側のニーズと大学側のシーズをマッチングさせてビジネスにする機関として「ナノテクビジネス推進協議会」などがある。ただ、戦略的なプロジェクト以外にも、小口でベストマッチングが果たせるような枠組みも可能である。

<企業の新技術への着手>

大企業は、信頼性などへの顧客からの要求が強く、新技術の着手は難しい。例えば5兆円の売上有る企業が、10億円の売上しかない分野に着手しようとはしない。その点、少人数でスピーディに新技術に着手できるベンチャーには期待が持てる。産学連携を繰り返し、技術を高性能化し、市場の認知を得て、大口の顧客が満足する製品を作製する、といった過程が重要であろう。大企業が取ることができるスキームとして、技術のライセンスがある。自社の技術を外部に出せば、相当のライセンス収入が生じる。

米国には、カリフォルニア大学バークレー校の教員がスピンアウトして設立したカーボンナノチューブのバイオセンサ関連企業がある。IBMの元研究員などが退職後に参加し、ファンドを持ってきて上手に運用している。米国ではベンチャーに対して2種類の考えがある。上場寸前の企業の技術を買取るものと、基礎的技術に投資してその成果を別の企業に売却するものと、これらの枠組みで動いている。日本でも、新しい技術が市場に出て行く枠組みをもつことが大事である。米国では、20年などの長期間にわたる研究を、国策で創設されたと思われるベンチャーが行っている。ストックオプションにより研究費の提供を受け、売り上げがない段階でIPO（株式公開）をする。ベンチャーに協力した大学教授などは、そこからストックオプションを行使し、相当な額を得る。国の戦略にしたがって受注するので、売り上げも計上でき、長期間に渡る研究が可能となる。また、研究の多様なチャネルやチャンスやインフラがある。テクニシャンが置かれるなど共同利用施設が

発達しており、安価な賃貸料で優れた計器を使いながら、事業に直結する研究をすることが可能となる。日本では、こうした共同研究施設への投資がほとんどなされていない。

日本の場合、大企業が研究に着手しても、魅力的に感じられなくなる段階で中止してしまう。米国では、ベンチャーが着手して発展すれば成功となるし、頓挫しても国が研究所を設置したという位置付けになる。また、大学発ベンチャーを展開するとき、利益相反に対する考えが極めて厳しい。研究者にインセンティブを与える形式になっていない。大学側も企業側も、「ウサギ型」研究を進める上で、中長期ビジョンの戦略が必要となる。

<大企業の研究分野への進出>

中小企業は、ビジネスで大成功を収めると、大手企業がその分野に進出してくるので、危険な状況になるという。10億～15億円程度の売上の技術を複数備えて、それを回転させて運営している企業もある。大企業の進出に対処するのは難しい。どこかの企業と提携などを検討しなければならない。

<大学院生の進路と給料>

大学院に在籍している学生が、10～15年後に「ウサギ型」の研究をする機会を確保するためには、日本の研究環境の工夫や改善が重要であり、「さきがけ」などのプロジェクトは重要な役割果たすと思われる。また、関連プロセスの比較的安価での導入や、研究パートナーの協力しやすいような環境づくりが重要である。現在の若手研究者は、30歳台半ばまで大プロジェクトの一員であり続けなければならず、独自の研究をするには以前より難しい環境に置かれている。

学生たちに、30歳程度までは冒険的な研究を経験することで成長し、30歳台以降はその成果を活用して別の機関に就くというストーリーも伝えなければ、状況は行き詰まるであろう。日本の学生は非常に優秀であるが、博士課程への進学率が低い。米国では大学院生の給料付き研究は当たり前であるが、日本では研究に興味ある人だけが、無給で研究をしている。彼らが企業に就職すれば、よい意味での「技術おたく」として、研究に興味をもちながら仕事をする。

5.1 有機エレクトロニクス材料—技術課題克服にむけた材料開発・評価技術開発のアプローチ /関一彦（名大）

有機エレクトロニクスの近代的研究は、約半世紀前に、日本の赤松秀雄、英国のD.イーレイ、ソ連のバルタニヤンなどの研究者が開始した。1980年代後半に様々なデバイスが開発され、注目を集め出した。

有機電界発光（EL）素子は、次世代フラットカメラディスプレイとして実用化されている。蛍光灯の代替照明としても注目されている。その他、有機太陽電池や有機電界効果トランジスタなどの研究もされている。さらに先の開発分野としては、1個の分子に電気を流すといった分子スケールデバイスがある。有機物質の薄膜を見ると、炭素を中心とする原子の集積があり、分子という中間単位を形成している。このときの結合は共有結合である。この部分のプロセスは合成化学分野でよく制御することが可能である。デバイスを組織する際は、分子を集めて固体にする。このときの相互作用は一般的に弱い力のファンデルワールス相互作用となり、構造の制御が容易ではない。有機材料の一般的な長所としては、高い分子設計性、簡便なプロセスの可能性などが挙げられる。一方、短所としては、低い耐熱性・耐候性、精製・純度決定の困難さ、集合体構造制御法が未確立であることなどが挙げられる。電子機能性有機材料の現状としては、厚さも広がりもナノスケールである分子スケール素子、単一分子素子、ナノチューブ FETなどの実用化はかなり先の話となる。一方、厚さも広がりもある有機超伝導体や有機伝導体などは、基礎科学では興味ある分野であるが、実用化はされていない。広がりや厚さはマクロスケール、厚さはナノスケールの、有機半導体、有機EL素子、有機太陽電池、有機FETといった超薄膜は、実用化がされている。有機物の分子の中には分子軌道ができる。分子間の波動関数の重なりは小さいため、電子構造は固体になっても保持される。有機エレクトロニクスの対象となる物質としては、TPDやフタロシアニンなどの小分子系と、ポリアセチレンやPPPなどの高分子系があり、様々なエネルギーパラメータで使用されている。

材料開発の視点では、素子性能に都合のよい電子構造を作るためにバンドギャップやドーパントなどをどのように制御するかの問題がある。光吸収・発光性の点では、発光度を高くするには、分子が剛直性である方がよい。また、真空蒸着法で生成された多結晶に大電流を掛けると素子が劣化するので、むしろ非晶膜にする法がよい、といった問題が生じる。このような、集合状態、結晶性・非晶性の制御や、プロセス適合性といった問題が実際のデバイスを作る上では大切である。酸素や水の影響を受けやすい素子には、それらの物質の封止技術も必要となる。

評価技術開発の視点では、精製法・純度の同定や化学種・構造・電子構造の解明が必要である。また、脆弱であるという有機物質の特徴に対応して、ソフトな手法・高感度化の技術が必要となる。

多層膜構造の場合、電子もホールも界面を通過するため、界面の制御が大切になる。金属と有機物層の間には、電気二重層が形成され、電子やホールの注入効率に影響する。有機物は正に帯電する場合が多く、この場合、電子注入は容易に、ホールの注入は困難になる。分子の金属電極上での配向や配列を計測する必要もあり、赤外分光や低速電子回折などの技術が用いられる。後者では低損傷化した特殊装置も開発されている。最近の評価技術開発の傾向としては、高分解能化、顕微鏡開発による局所情報の入手、気体雰囲気下や電圧印下での測定などが進歩している。

研究開発システムの視点では、学際性を認識し、異分野間で接触することが必要である。化学、物理学、電子工学、表面界面科学などの分野が関係してくる。また、材料・プロセス・デバイス・基礎の分野が協力して進歩していかなければならない。各分野の研究者が研究拠点に集合して研究することが大事である（図5-1）。

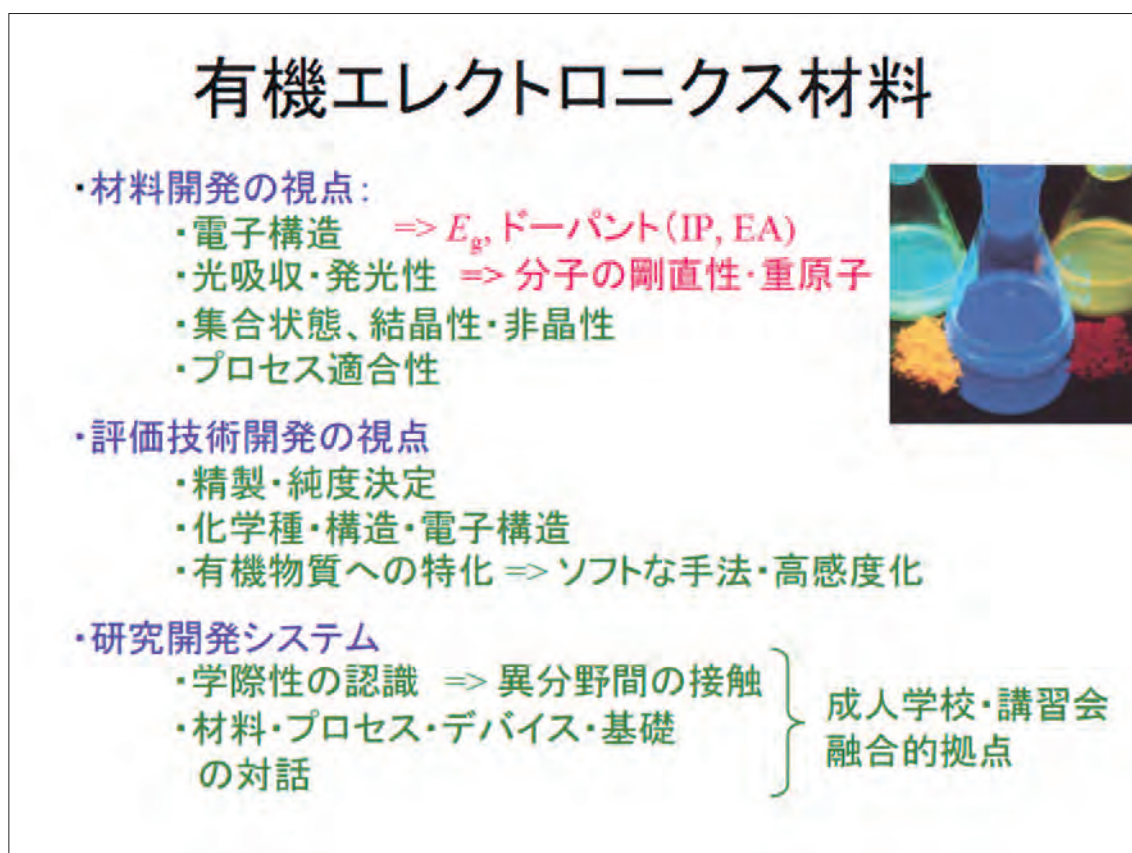


図5-1 有機エレクトロニクス材料

5.2 ワイドギャップ半導体—低電力損失、高温動作、高速制御の材料的課題

/葛原正明（福井大）

「CMOSの時代が終わり、次の時代に突入する」というような明確な時代区分はない。現状でも、携帯電話や基地局などにはCMOSが化合物半導体市場に随時参入を繰り返している。

ワイドギャップとは、バンドギャップが3eVあたりから上の領域を指すと考えられる。3eVの領域にGaN（窒化ガリウム）が登場した。光デバイスだけでなく、電子デバイスにもバンドエンジニアリングは重要な要素である。GaN、InN、AlNは、Ⅲ族ナイトライ

ド半導体の特徴づける代表材料であり、この3材料を相互に組み合わせる研究に期待が持てる。InNは、移動度が $1880\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、またピーク速度は $4.2 \times 10^7\text{cm/s}$ を達成している。非定常状態ではさらに大きな数値が期待できる。ただし、問題は良品質の材料がないということであるが、今後改善されていくであろう。

窒化物は、光分野では実用化され、役割を果たしている。今後は、高周波応用に加えてパワーエレクトロニクス分野への応用が期待される。後者では抵抗と耐圧の他、周波数が関係してくる。例えば、現在のエアコン等に使われているインバータは、L（コイル）とC（コンデンサ）のサイズが大きく体積を取っているが、窒化物が応用されれば、高周波化により小型化も可能となるであろう。燃料自動車などにも応用することが可能である。また、宇宙マイクロ波送電や携帯電子レンジなど、大出力マイクロ波が必要な製品にも窒化物の応用が期待される。

GaN HEMT（高電子移動度トランジスタ）の特徴として、小型で大出力ということが第一に挙げられる。GaAsが 0.5W/mm であるのに対して、GaN HEMTは 32.2W/mm である（ゲート幅）。また、電圧も 200V を達成している。RFでの出力はCW級で 230W 、パルス級で 368W が報告されている。ミリ波では 30GHz で 8W が報告されている。GaNは、GaAsの性能を10倍以上上回るといっても過言ではない。GaN FETの応用は、携帯電話基地局を中心に既に始まっている。

今後の窒化物新素材への期待としては、AlGaN/GaN系が中心で実用化を推進するGroup1、超高速応用のGroup2、高耐圧・高温応用のGroup3に分類できる（図5-2）。

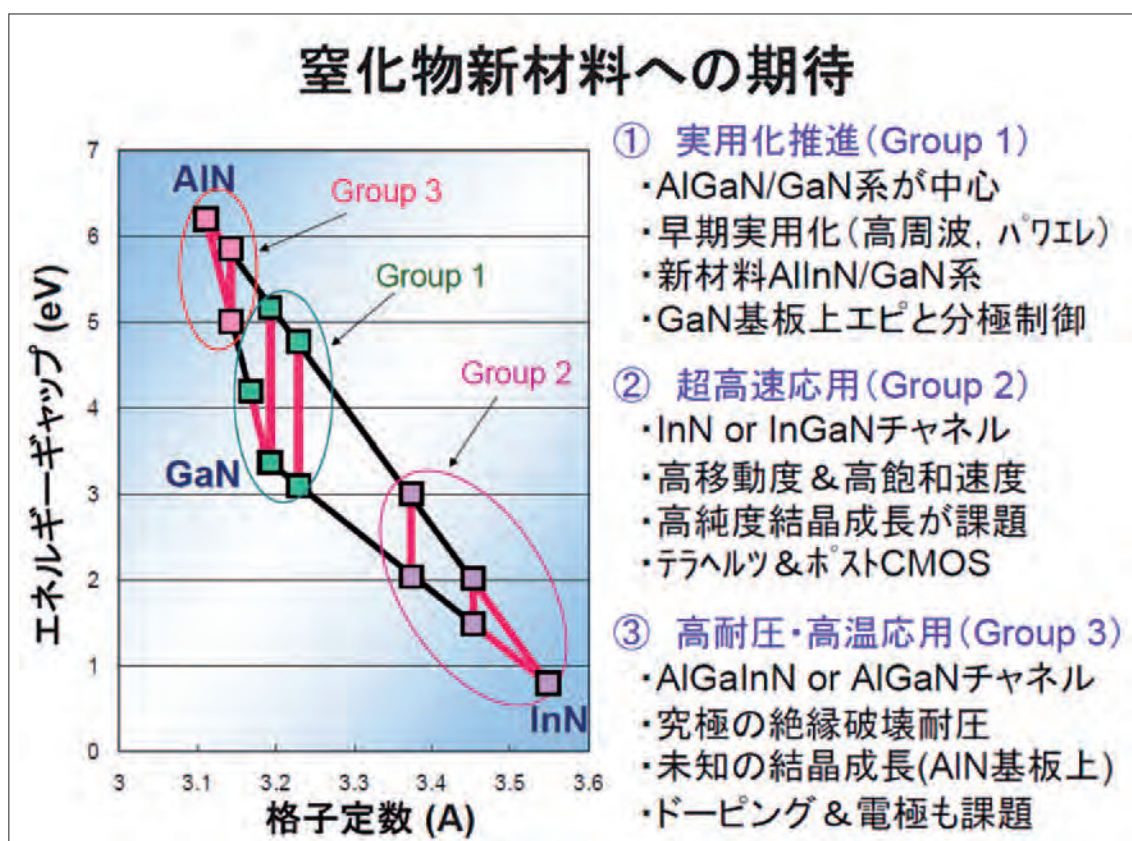


図5-2 窒化物新素材への期待

Group1とGroup3は、GaN基板とAlN基板との格子整合が可能である。Group2では、InNまたはInGaNがチャネル材料として適材であろう。Group3は研究が遅れているが、AlNの基板上に、ヘテロ接合を用いると、ダイヤモンドのバンドギャップを超越するようなチャネルを持ったトランジスタを実現することも可能となる。

現状としては、日本では光デバイスの実用化で先行している。また、電子デバイスでは日米が開発フェーズで先行している。企業はAlGaIn/GaN系FETの製品化に奮闘している。

大学間の研究インフラに格差が生じ、地方大学は教育が中心となり研究は名目化している。一方で有能な人材の地方流出は今後も続くであろうが、「最初の一步」が踏み出せない状況もある。やる気のある研究者に対して、JSTは機会や環境を与えてほしい。JSTが管理する共同実験室が設置されれば、その設備を前提にしたアイデア・計画も可能となる。

5.3 フォトニクス機能制御材料

1) 光の電磁領域を広げる、新機能・光機能材料から/小林功郎（東工大）

将来の材料やデバイスとは、どの分野で使われるかを念頭において研究されるものである。ナノ分野とフォトニクス分野の融合領域は重要である。現在の情報インフラを支持しているのは、ワイヤレス技術と光技術である。

光技術は、伝送系と、ネットワークノードにおける信号処理に、大きく分類される。伝送系に関しては、振幅変調の信号の時間多重・波長多重伝送により、数百Gbps～1Tbpsが実用として達成されている。ネットワークノードでの信号処理に関しては、光ファイバーの光を一旦フォトダイオードで電気に変換し、シリコンLSIで信号処理を行い、方向を定めて光に再度変換して伝送する。インターネットのデータ情報量（トラフィック）は、大容量コンテンツの増加に伴い、増加し続けている。現在の個人レベルでの10Mbpsという情報量は、1Gbpsとなる時代が到来する。伝送系は現在の状態が長く保持されるであろうが、ネットワークノードでの信号処理は、相当負担が増えることが考えられる。ネットワークノードの信号処理を中心に描かれたロードマップ（東京大学大学院 青山教授による）では、信号処理の制御を細かくして、パケットの集合にラベルを付けて伝送する方法、さらには、パケット・バイ・パケットで処理を行い、パケットごとに行き先を変える方法が提言されている。信号処理を光技術で置き換えていくことが、ネットワークノードでの重要な技術課題である。速度、スループット、消費電力が、フォトリックネットワークにおける今後の課題の対象となる（図5-3）。

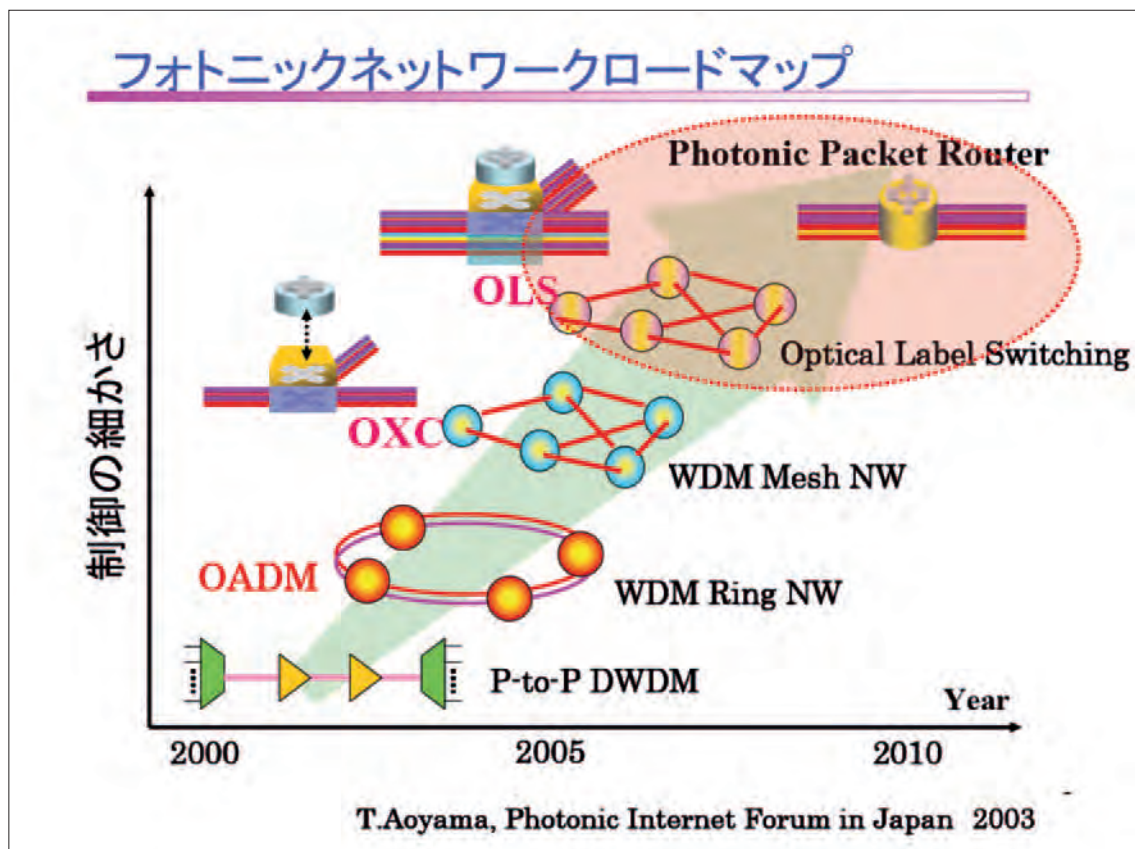


図5-3 フォトニックネットワークロードマップ

シリコンのLSIに関しては、速度に関しての心配はさほどないが、消費電力に関しては相当心配である。1Tbpsのスループットでは、約10kwの消費電力となる。一方、光ファイバーは、100kmで10Tbps、10,000kmで1Tbpsを達成しており、伝送の点では大成功を収めている。反面、光信号処理は得意分野となるかどうか予想が付かない。信号処理に光技術を導入することを提案する。光ラベル・光パケットスイッチングにおいて、電気が使用されているパケット処理の段階にも光技術を導入することが望まれる。信号、光の入力出力の他、制御も光技術で行うことが望まれる。光デバイスの主要基本動作機構は非線形光学効果である。効果の向上が、材料の観点から重要となる。最近では、量子ドットの分散に関する高非線形性が注目される。光と電気の相互長の増大には、光ファイバーの使用、スローライトによる相互作用の強化、共振器の反復といった方法がある。主要な光デバイスの実現に向け、広い波長帯域をもつ半導体光源での光非線形位相変調と光干渉効果を利用する方法（SOA-MZI。NECによる）、量子井戸のサブバンド間遷移の利用（産総研による）、近接場光による量子ドット間エネルギー移動の利用（東大による）などの方法がある。SOA-MZIの課題は、低制御光パワー化、小型化、多数集積化である。フォトニック結晶をベースにして導波路を作り、その一部に量子ドットを選択的に付けることにより、量子ドットが非線形性を使うという研究結果が産総研から報告されている。量子井戸のサブバンド間遷移の利用の課題は、低挿入損失化、高消光比化、多数集積化である。

バッファメモリに関しては、フォトニック結晶などの周期構造における高分散・低群速

度利用（横浜国大による）、3準位原子系の量子干渉効果による高分散利用、Vertical Cavity Surface Emitting Laser（面発光レーザ）の偏波面切り替え利用（奈良先端大による）がある。光スイッチの検討課題として、向こう5年で、導波路型SOA-MZI性能実証、5～10年で、フォトニック結晶導波路低損失化、Si-SOI（Silicon on Insulator）・フォトニック結晶の任意場所への化合物量子ドットのエピタキシャル集積、化合物半導体フォトニック結晶の任意場所への化合物量子ドットのエピタキシャル集積、10～20年では、近接場光フォトニクスデバイス実証・集積・回路機能実現がある。光バッファメモリの検討課題としては、向こう5年は、偏波面スイッチング双安定メモリ（1～10Gbps）の開発、5～10年では、フォトニック結晶遅延線メモリが40Gbpsで5ns/cmを達成すること、10～20年では、フォトニック結晶遅延線メモリが40Gbpsで25ns/cmを達成することである。

2) 新材料系機能開拓の課題／金光義彦（京大）

発光材料は、無機発光材料、有機発光材料、局在中心材料の3種に分類できる（図3-4）。

無機発光材料は、発光ダイオード（LED）やレーザーダイオード（LD）に応用される。しかし、現状では希少元素を使用している。また、効率的な発光のためにはナノ構造が適している。

有機発光材料は、EL（Electroluminescence）として実用化されている。有機分子は、最低励起状態が3重項状態となり、この状態からは禁制遷移の燐光で弱く発光する。重元素を使い遷移確率を変化させることにより、最低励起状態からの発光を有効利用し、より発光効率を向上させる努力がなされている。局在中心材料は、希土類イオンや遷移金属イオンを絶縁体の中に入れた材料で、蛍光体として使われ、照明分野などに広く利用されている。禁制光学遷移であるが、母体材料次第で輝度は非常に高くなる。半導体と光の相互作用においては、バンドギャップエネルギーが重要である。混晶化合物半導体の組成を変化させたり、ナノ構造にしてサイズを変化させたりすることで、バンドギャップを変化させることが可能となる。半導体発光材料として、化学的に合成されたナノ粒子（量子ドットとは別）が注目されている。導体、絶縁体、または半導体などの基板上に、ナノ粒子（カーボンナノチューブを含む）を置く。このようなナノ構造では、周りとは必ずヘテロ界面を作る。材料の特徴を安定的に抽出するには、ヘテロ界面を制御する化学の知識が必要となる。

ナノ粒子（あるいは有機物）は、高効率性の実現や、大量に存在する元素を使用できる利点がある。ナノ粒子を新しい要素や基盤材料として研究開発する科学技術は議論されるべきである。例えば、ナノ物質ヘドーピングできれば、局在中心材料のエネルギー増を効率よく実現する、高発光効率のデバイスが可能となる。さらに、磁性不純物をドーピングすれば、光磁気効果や電気伝導性により、新しいデバイスへの応用が可能となる。しかし、

直径3nm程度のナノ粒子中に不純物を入れる作業では、不純物の表面析出が生じる。表面析出の問題は、バンドギャップの高い半導体で表面を囲むことにより解決できる。多

試料作製に基板を必要としないナノ粒子は、MBEなどにより作製される量子ドットにない特徴を付与させることが可能となる(図5-4)。

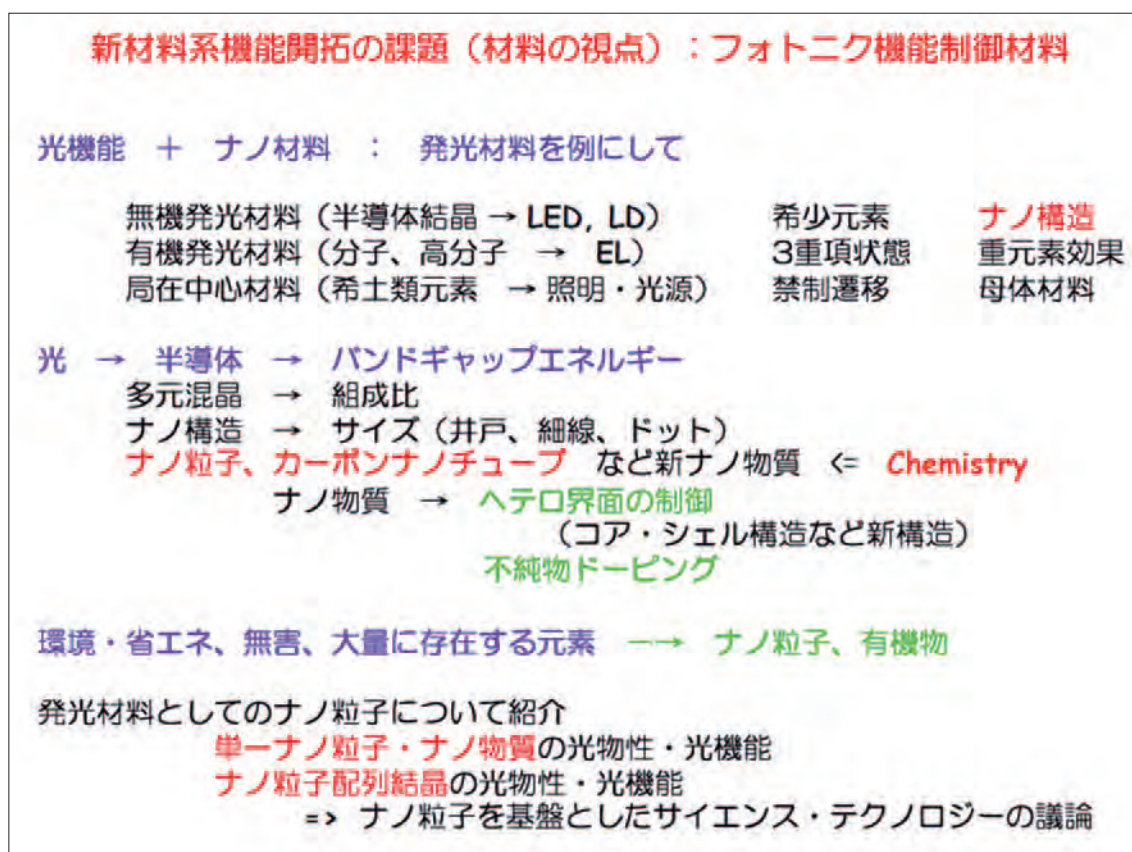


図5-4 新材料系機能開拓の課題（材料の視点）：フォトリソ機能制御材料

強相関電子系とは、非常に多数の電子が相互作用により強い相関を持った状態である。この電子集団は電子相と呼ばれ、二種以上の電子相が競合する臨界点では、外部からの刺

激により相変化が生じる。その際、巨大かつ超高速の変化が生じる。相の形成のためには、ペロブスカイト格子 40nm^3 に、 10^6 程度の電子で充分である。

強相関電子系の特徴としては、多重臨界性の相制御と多自由度性の制御とに大別される。

多重臨界性の相制御においては、電場相制御、磁場相制御、光相制御により磁化や伝導などが巨大応答を示す。巨大応答の例として、磁場で伝導が巨大に変化する、超巨大磁気抵抗 (CMR) 効果がある。また、電場で伝導が変化する、超巨大電界誘起抵抗変化 (CER) 効果がある。CER効果は、不揮発性高速メモリ (Resistance RAM) への応用が期待されている。さらに、強相関酸化物のハーフメタル性は、巨大なTMR (トンネル磁気抵抗) 素子への応用が可能である。その他、電界効果によるキャリア注入により、絶縁体から金属への相転移の実証を行っている。

多自由度性の制御においては、電気－磁気－光－熱の各物性・機能を相互に結びつける交差相関物性を利用することで、例えば、磁場により伝導や分極が変化したり、電気により磁化が変化したりするなどの現象が生じる。

交差相関物性利用の例としては、光照射による超高速物性スイッチング素子への応用があり、透過率を変化させたりスピンの状態を変化させたりすることが可能である。また、磁場で分極を変化させるマルチフェロイック効果を用いた、電場制御によるスピントロニクス素子への応用が考えられる。

強相関電子材料による電子デバイス実現化への課題としては、新原理の開拓と解明、薄膜・微細加工技術の開発、計測・評価技術の開発が挙げられる。

新原理の開拓と解明の例として、トポロジカル異常ホール効果やトポロジカルスピンホール効果、また光のホール効果を導き出すためのベリー位相エンジニアリングの研究が行われている。

薄膜・微細加工技術の開発の例として、平坦な表面や急峻な界面を作製するための薄膜作製技術の開発、界面局所磁性評価技術の確立や界面デザイン技術の確立を実現するための界面エンジニアリング、酸化物デバイス作製に向けて、リソグラフィ、エッチング技術などの微細加工技術が挙げられる。

計測・評価技術の開発の例として、高分解能スピン計測をするためのスピンSEM (スピン偏極走査電子顕微鏡) の開発や、超高速スピン計測機器の開発などがある。

プラットフォームの設置は非常に重要である。研究機関にて培われてきた人的資源・ネットワーク、研究インフラを活用して、当該分野の開かれた研究拠点を形成すべきである。他機関同士の技術開発成果を結びつけるには、外部からの支援が重要である。プラットフォームが設置された場合、文部科学省や経済産業省などの個別の支援のみならず、トータル的なシステムとして、機関の垣根を超えた形で維持していくことができれば、我々の持っているインフラ・ネットワークも有効に活用でき、多くの研究成果が期待できる (図5-5)。



図5-5 1つの提言

5.5 課題提起-有機系材料サイドから/中西八郎（東北大）

有機系材料の分野が無機半導体系デバイスと同じようなサイズに近づこうとすると、単分子レベルが目標となる。そのレベルへのアクセスと解析・評価技術を開発することが重要である。特に、再現性、安定性、耐久性などに心配があり、現在の半導体の延長上にいる研究者のデータと同様には扱えない。答えは、複数分子か無機とのハイブリッドで使うべきか？ 有機系材料の研究者は多種多様の分子化合物を開発するので、対象特性に最適のものをフィルタリングするためにも、単分子レベルへのアクセス・アドレスと評価に絞って、公募などで研究者を募り、的確に、世界を先導する必要がある（図5-6）。

新材料系機能開拓の課題：有機系材料サイドから

1. どこまで小さく？

- ・有機系の単位は分子で、本来その形状内で閉じている
→極限は単分子(複数ヶ、nm?)
- ・無機系の単位は原子で、原子集団内に開かれている
→極限は単原子(原子集団、nm?)

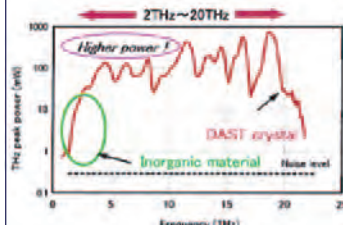
2. 競合かそれとも固有の特性か？

- ・競合→信頼性、安定性が課題：例えば、
THz発生、色材、フォトクロなどでは克服？
- ・固有→キラリティ、バイオ(脳、神経)など
- ・融合→長期的課題

3. 重要課題

- ・単分子レベルへの**アクセスと(界面)解析技術**の開発：
素子化共通基盤技術として
- ・日本が**リードしている分野**：ナノカーボン、単分子
メモリー、自己組織化(ナノ空間構築他)など
- ・Newへの期待：ナノコンポ、**ナノハイブリッド材料**
- ・その他：POF, PWG, OEL, OFET、ナノ粒子・結晶等**結実**
→フォトニック、量子相関機能制御など**New**へ

有機イオン性結晶DASTは、
無機結晶より高帯域・高出力の
THz発生が可



T. Taniuchi *et al.*, EL,
40(1), 60 (2004)

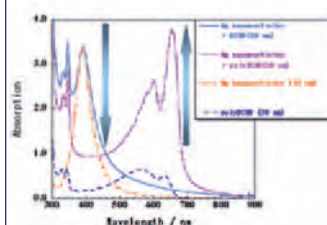
分子設計により、実用性能を有する
単分子フォトクロミズムの実現



- ・保存安定性
長期保存：3ヶ月 at 80℃
短期保存：200℃
- ・繰り返し耐久性
繰り返し回数： 10^3 回
- ・高感度性
量子収率：0.1 - 0.5
吸光係数： $>10^4$
- ・高速応答性
着色・退色速度： $<10^{-11}$ sec
- ・単結晶フォトクロミズム

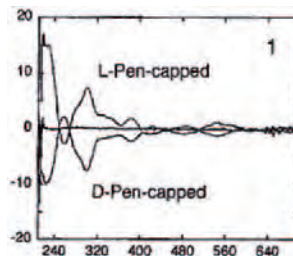
九大、入江教授ら

銀粒子を共役高分子ナノ結晶で
キャップするとプラズモンが消失
し π 電子の吸収が増大



A. Masuhara *et al.*, JJAP,
40, L1129 (2004)

金粒子をペニシラニンでキャッ
プすると円偏光二色性が生じる



H. Yao *et al.*, JACS,
127, 15536 (2005)

図5-6 新材料系機能開拓の課題：有機系材料サイドから

幸い、日本には高いポテンシャルの先行成果・技術も存在する。その点を踏まえて、リードしていく分野を育てればよい。また、投資を無駄にしないためにも、プロジェクトの融合や継続性などの問題にも包括的に取り組めば、成果がステップアップされるであろう。有機分野も無機分野も、投資の成果を着実に結実させつつ、また新しいものを創出することが望ましい。金粒子をペニシラニンでキャップすると円偏光二色性が生じるというような研究例や、有機と金属の複合ナノ結晶での特異な吸収挙動など、ナノサイズの複合からハイブリッドな効果が発揮される材料を研究する領域が日本にはかなりの数ある。大事にして頂きたい。

共同事業のセンターは開かれた拠点であることが望ましい。

5.6 課題提起-結晶成長の視点から/西永頌（豊橋技科大）

電子材料分野において、結晶成長は、重要な技術である。トランジスタの発明もゲルマニウムの単結晶があって始めて実現した。最近では、赤崎教授による窒化ガリウム（ガリウムナイトライド）の低温バッファ層技術により初めてp型伝導が実現し、その結果、青色LEDが誕生した。

高齢化社会、持続可能社会、高度医療社会、高度情報化社会などへと社会が進む中で、

現在技術の改良というボトムアップ的な展開と、社会的ニーズから生まれる新しい技術の創成というトップダウン的展開がある。トップダウン的展開には既存技術の異分野への適用によりもたらされる新しい技術の誕生の場合が多い。ムーアの法則に沿ってさらに進歩させてゆくというボトムアップ的展開に加え、社会的ニーズから生まれるトップダウン的展開が求められる分野が広く存在している。この両方を視野に置く必要がある。

ボトムアップ的技術の展開として、ナノ構造の結晶成長技術がある。ナノ構造をコントロールしながら結晶成長を用いて形成することが求められる。結晶成長はダイナミック（動的）な現象である。結晶の表面は従来スタティック（静的）なものとして研究されてきた。しかし、結晶成長は結晶表面で起こるダイナミックな現象である。ナノ構造の形成に重要な働きをするファセットは成長ではダイナミカルな面間拡散と言う現象により決められる。ナノ構造を決める結晶成長というダイナミカルな現象の研究には高い表面観察技術が求められ学問としても底が深い。今後大きく発展する分野である（図5-7）。

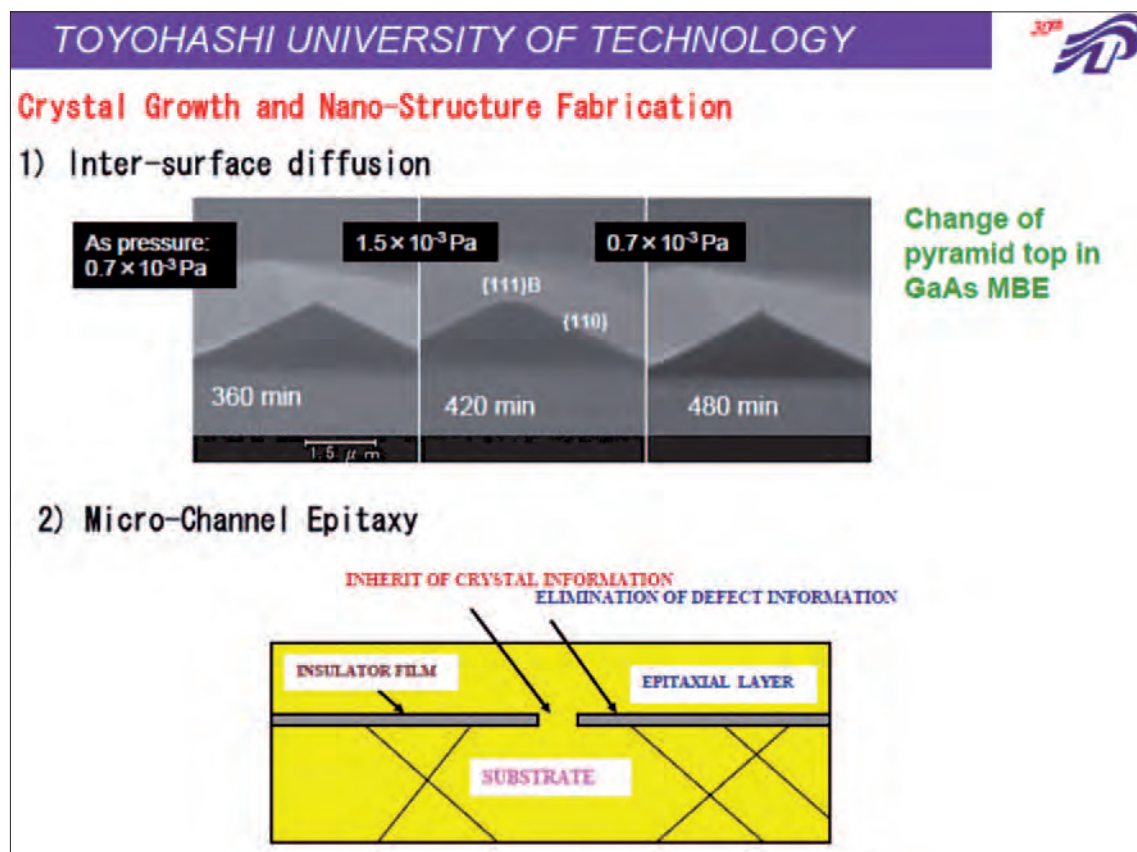


図5-7 結晶成長を用いたナノ構造の作製

トップダウン的技術の創生の例として、豊橋技術科学大学の集積回路製造施設で製作した結晶成長技術と集積回路技術の組み合わせによる生命科学研究用集積回路の例を示す（図5-8）。

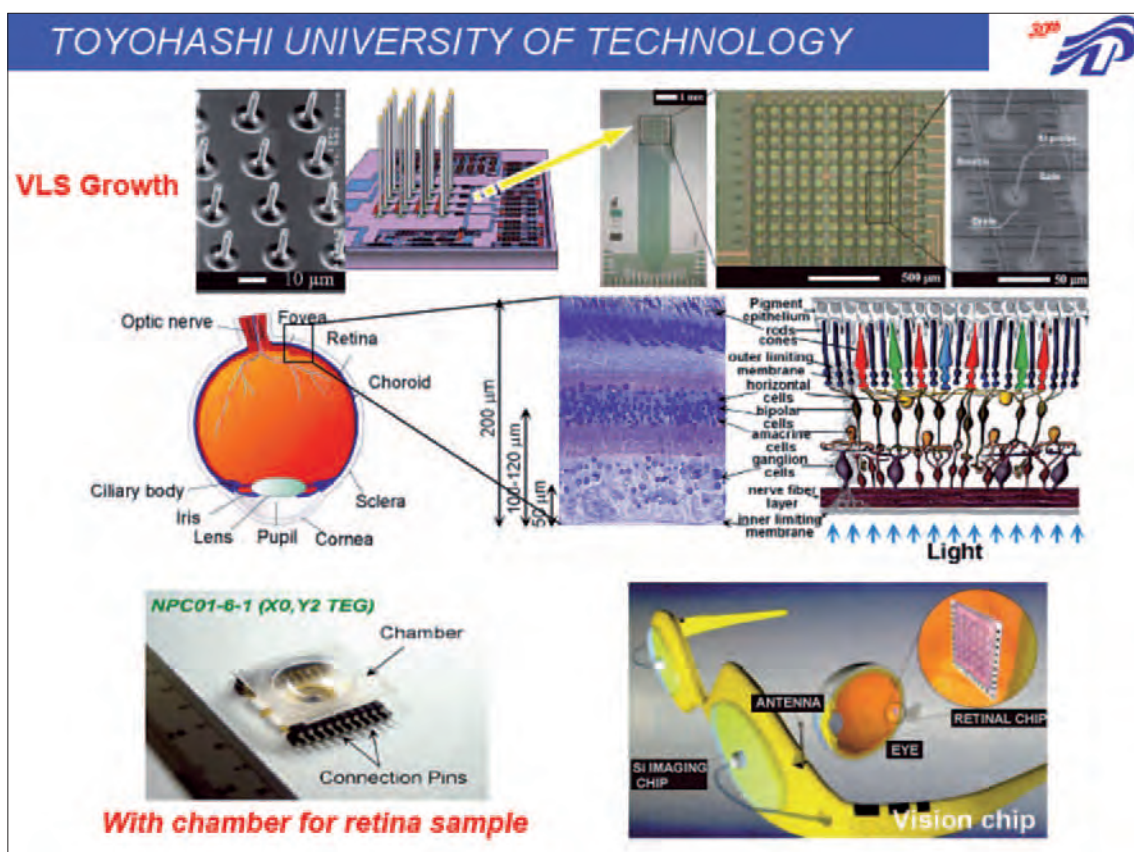


図5-8 鯉の網膜からの信号の検出と網膜損傷患者の視力回復に関する研究

細い単結晶の針を結晶成長技術（VLS成長）により集積回路基板に成長させる。この針を鯉の網膜の細胞に差込み、単色光をあてることにより鯉が何色に反応するかが明らかにされた。イメージセンサー集積回路基板に同様に針状の結晶を成長させ、その信号を網膜が損傷した患者の視神経に差し込むことにより視力を回復させる研究が行われている。このような研究は世界的に行われているが、本学で開発したような細く強い針を多数集積回路に植えつけることには成功していない。

5.7 第3部討論

<光デバイス分野の今後>

20年程、高速系の化合物分野のコミュニティとレーザ分野のコミュニティが化合物の技術を相互で支え合ってきた。しかしナイトライド以外は厳しい状況にある。高度技術を今後5～10年にわたり存続させるため工夫が必要な状況か、もしくは光デバイスの市場だけで技術は保持されていく状況である。GaAs系化合物は、携帯電話のパワーアップに限れば70%程度のシェアはある。携帯電話の出口・入口付近のパワー消費があるデバイスでは、まだ使用されている。一方、携帯電話の基地局のほうは、シリコンのシェアが上回っている。

携帯電話のスイッチは化合物が使用されているが、化合物に限らず「ソリューションを提案した人がシェアを勝ちとれる」という風潮である。化合物は市場で善戦はしているが伸びてはいない。光デバイスでは、DVD（赤色半導体レーザ）や青色DVD（青色半導体レー

ザ)、通信用半導体などの市場では、相応のビジネスではなかろうか。電子デバイスという点では、光通信関係の技術は崩壊状態である。企業によっては、光デバイスに必要な化合物半導体の技術者は、他分野へ移籍してしまい技術が消滅しつつある。また、マックス/デマックスの技術にはシリコンCMOSが必要であるが、国産のチップが無い状態である。電子デバイス分野は、光通信でイーサネットが発達してくることを考えると、非常に危険な状況にある。

<強相関と光スイッチ>

強相関の原理を用いた光スイッチの場合、スイッチングの高速反応が特徴的であろう。光デバイスの研究者でも、強相関フォトリクスの知識がない状況にある。双方が密に情報を交換しなければならない。

6 第4部 総合討論：共同利用施設と分野融合・研究システム・産官学連携・ファンディング 主査 榊裕之/田中一宣

6.1 課題提起—デバイス・イノベーションへ向けて“分野融合を実現するナノファンドリー機能” /曾根純一（日本電気）

約10年後のユビキタス情報社会では、ITネットワークが、個々人の生活やビジネススタイルに大きな変革をもたらすと思われる。そこでは、センサ、マイクロバッテリー、アクチュエーター、ウェアラブル端末、ディスプレイ、MEMS、レーザ、半導体など、多くのデバイスが必要となり、これらを実現する材料技術が重要になってくる。“More than Moore”と言われるように、シリコンLSIだけでなくそれを超えるデバイスがユビキタス情報社会を作る上で重要になってくるのではないかと思います。

こうした社会を実現するうえで「ナノ融合ファンドリーの必要性」が出てくる。ナノテクノロジーという言葉に代表されるように、半導体の「ロードマップ」以外のところから大きなイノベーションが創出されるとの期待がある。しかしながら、現状では、ナノテクノロジーを活かしてデバイス機能を具現化する共通の「仕組み」ができておらず、プロトタイプや集積化システム試作機能、またポストシリコンや非シリコンなどのような、デバイス機能を具現化するファンドリーが必要となる。また、このような目的には真の産官学連携も重要になってくる。エレクトロニクス、機能材料、バイオなどの各分野で、設計から、材料、成膜・加工、インテグレーション、計測・評価にいたるまでの一貫したプロセスをサポートできるような、いろいろな研究機関がネットワークをもつ、融合ファンドリーが必要になる。

ナノ融合ファンドリーは、柔軟性、拡張性、迅速性をもつことが条件である。ナノ融合ファンドリーの中には、標準プロセスラインが整備されている、その標準プロセスラインをサポートする仕組みもできている、また、ファンドリーの中にはいろいろな企業や国家プロジェクトが入ってくる、そのような仕組みが必要である。そのためには海外のMINATECプロジェクトのような大きな施設が必要である。よいアイデアさえあれば、“ワンストップ”でアイデアが具現化できる場所、あるいは「あそこに行けば何かが生まれる」と思える施設としてのナノファンドリーが必要である。ナノ融合ファンドリーのファンディングの仕組みは、よく検討する必要がある。最初は国が援助をしているいろいろな装置や施設を用意し、運営固定費も出すが、その後はファンドリーの利用者が負担していく、国に頼らないで運営できるようにする。利用者負担で運用するには、皆がそのファンドリーを使いたくなるような有益性を示さなければならない（図6-1）。

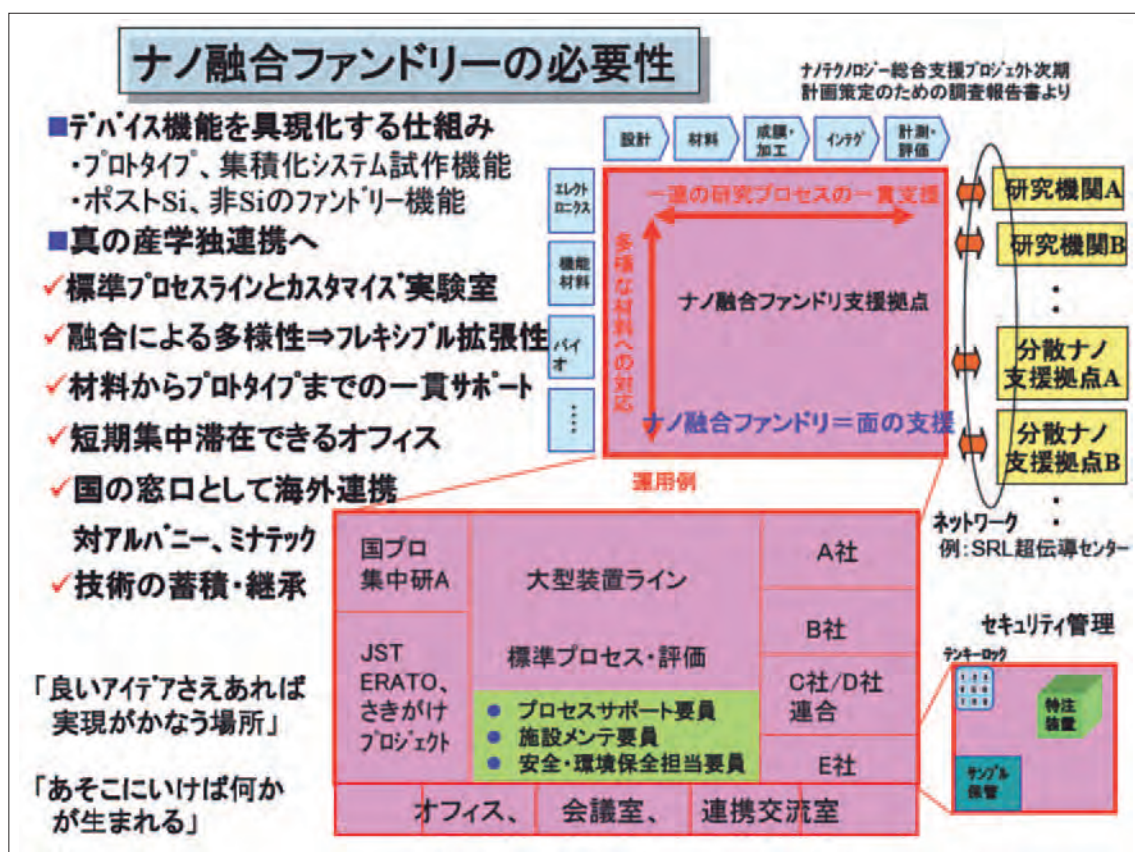


図6-1 ナノ融合ファンドリーの必要性

6.2 課題提起ーナノ・電子情報材料戦略/栗野祐二（富士通）

ITRS（International Technology Roadmap for Semiconductors、国際半導体技術ロードマップ）をもとに課題を提起する。

世界の潮流としては、製品に近いところのテーマは産業界が受け持つ。少し先の世代のテーマはプロジェクトが公的ファンドを使う。今日の検討会で議論したナノ・エレクトロニクスはその先にあり、ここに“Beyond CMOS”と“More than Moore”がある。米国や欧州では、すでにナノ・エレクトロニクスに関して拠点を設けている。米国では、NRI（Nanoelectronics Research Initiative）にインテル、IBM、テキサス・インスツルメンツが入り、これら3社とNSF（National Science Foundation、米国国立科学財団）のファンドが参加している。3社それぞれ主導のプロジェクトが立ち上がり始めていて、“Beyond CMOS”のテーマについても着手している。他にも研究拠点として、SEMATECH（半導体の産業界コンソーシアム）、ダルファーなどがあり、州が資金を出して、フォーカストリサイズセンターで何テーマかを研究している。欧州は、ENIAC（European Nanoelectronics Initiative Advisory Council）という機関に、EUからのファンドが投入されている。ENIACでの研究テーマに関して、産業界はSTマイクロエレクトロニクスやインフィニオン、フィリップスなどの企業が何をすべきかを相談しながら方針を決定するのが現状である。ENIACには、“Beyond CMOS”の研究グループもあれば、“More than Moore”の研究グループも存在する。

一方、日本は対策がすこし遅れている状況にある。産業界に近いテーマではSelete（半

導体先端テクノロジーズ)の「あすかプロジェクト」があり、先の世代のテーマではNEDOのSelete/MIRAI共同研究などがある。また、JSTとJSPS(日本学術振興会)により、ナノ・エレクトロニクス分野の個人の研究に対し、ファンドされてはいるが、まとまった基金という形で戦略的にファンドされていない。

フラッグシップ型のプロジェクトが、ナノ・エレクトロニクスの分野では必要である。すなわち、アプローチのしかたにこだわらず、日本にある「学」の豊富な資源を利用できるようなプロジェクトである。ただし、テーマはニーズにマッチさせる必要がある。そのためには、どんなニーズがあるかを産業側が提示しなければならない。産業側だけでは力不足の点は、「産」と「学」で協力してテーマを決めるべきである。“More than Moore”については、この軸にどのようなテーマを当てはめるか、それ自体を決めることがプロジェクトになる。各種ロードマップでも、“More than Moore”はいろいろなところに点在し、複雑な状況にある。その周辺にビジネスがあることを誰もが認識してはいるが、戦略性は無い(図6-2)。

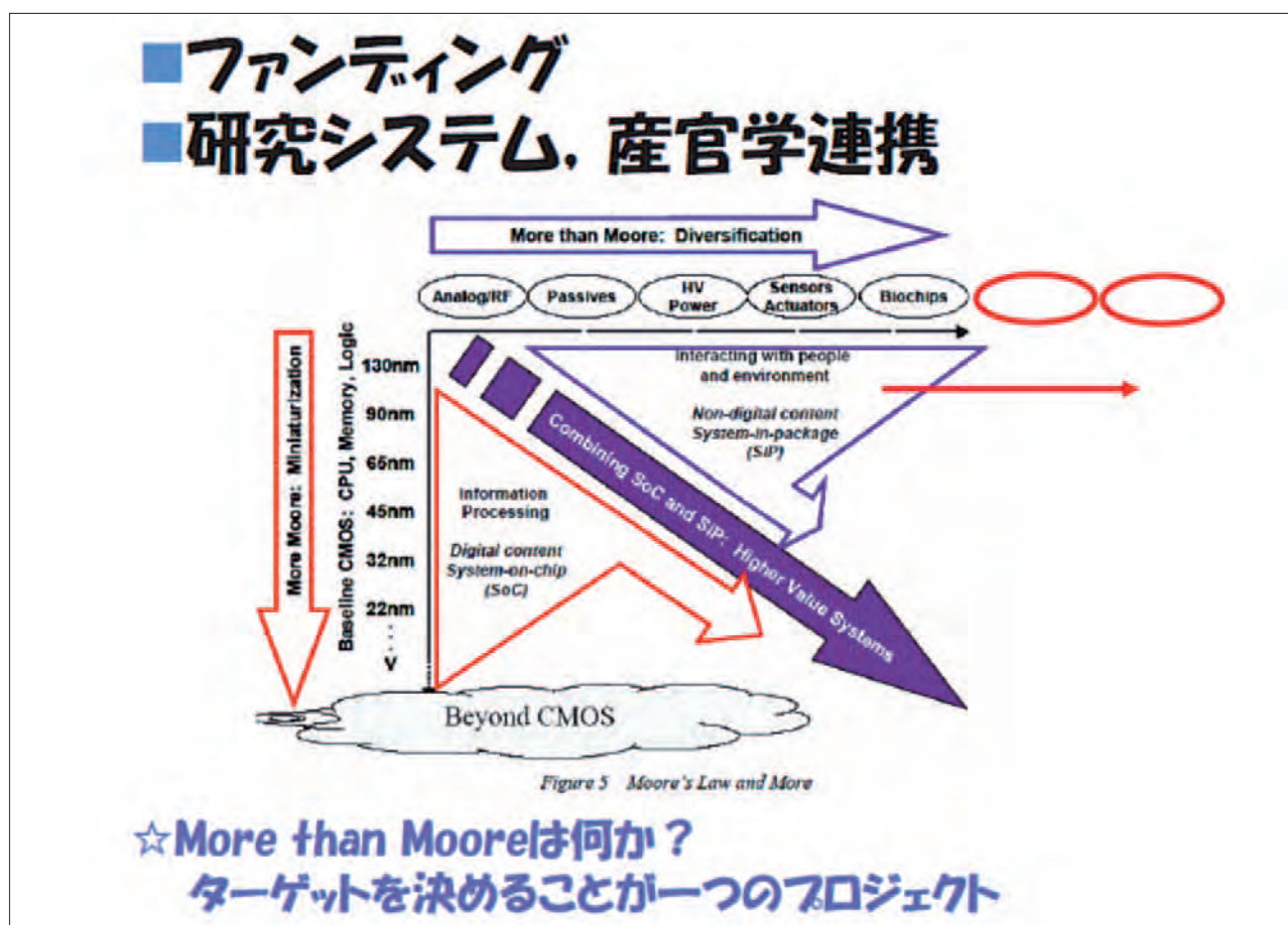


図6-2 ITRS(国際半導体技術ロードマップ)とプロジェクト

6.3 課題提起-産学連携の課題/村上正紀(京大/JST-CRDS)

企業での経験と大学での経験を踏まえて、日本での産学連携体制の形態区分と企業側のメリットを考えたい。

企業軸には「萌芽」から「開発」までがある。大学軸には「基礎」から「応用」までがある。すなわち、「萌芽×基礎」「萌芽×応用」「開発×基礎」「開発×応用」の4区分がで

きる。どの組み合わせが良い悪いということではなく、産学連携のなかで、その連携はどの位置にあるかということを確認しなくてはならない。「萌芽×基礎」は、かなり機能する。うまく行く。将来のことがわからないため、大学側は自由な発想で取り組むことができるし、企業側は萌芽的研究にともなうリスクを大学に転嫁する可能性をもつことができるからである。この組み合わせは、国家プロジェクトがあれば意見を差し挟まないほうが円滑に進む。「萌芽×応用」は、成功率が非常に小さく、企業側にとってはデメリットになる。企業側は事業のスピードアップ化や大学側の高度な技術の活用を望んでいるが、これらは現実的に困難である。「開発×基礎」は、要素技術の点で企業に大きなメリットがある。企業は要素技術の分野で未開発な点が多く、状況は30年前と変わらない。要素技術における科学の限界が把握できていないからである。そこで、大学側だけが把握している要素技術を企業側が活用すればよい。「開発×応用」は、成功する確率がとても低い。大学側と企業側の文化の差が激しいからである。企業は、開発段階ともなれば、非常に強いマネジメント力で連携を押し進めようとしてくる。一方、大学側は研究者の個人主張が強いため企業への思惑通りにはならない。企業は、大学の研究者にきちんとインセンティブを与えない限り、うまく機能しない（図6-3）。

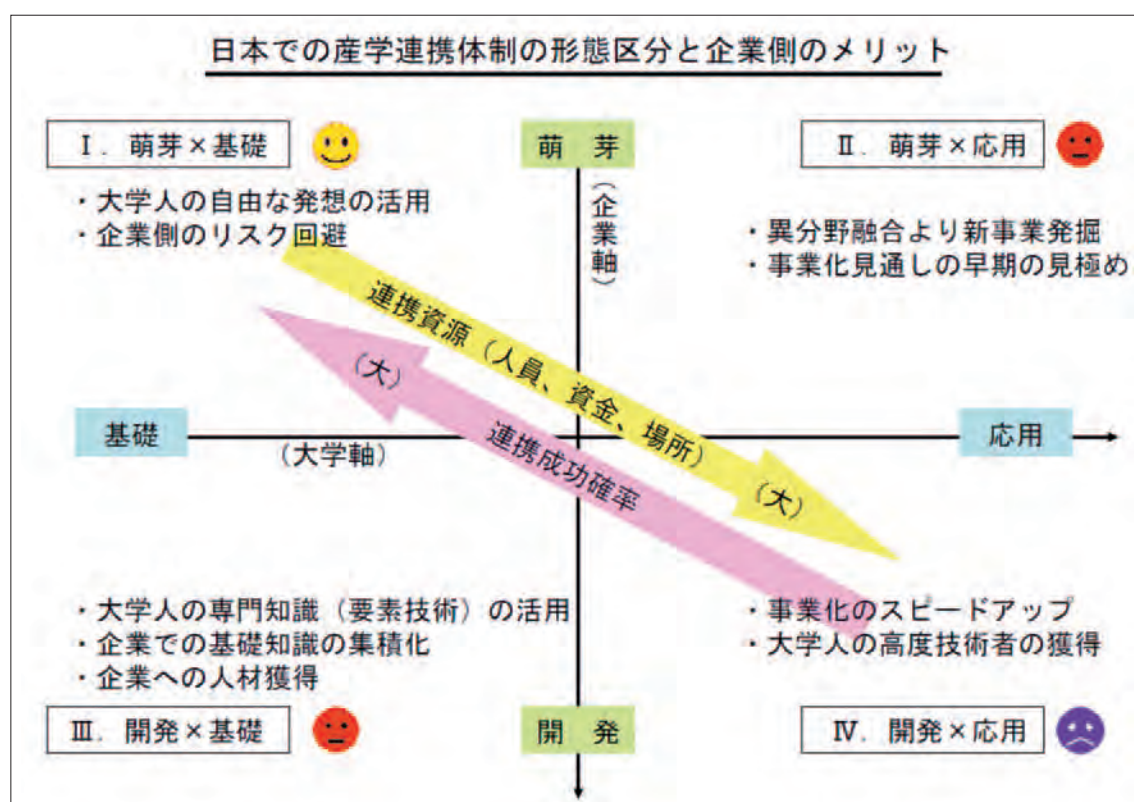


図6-3 日本での産学連携体制の形態区分と企業側のメリット

京都大学は、大型プロジェクトに対する命令系統を明確化して、「開発×応用」の連携でも、企業側に喜んでもらえるように努力している。ただし、大型プロジェクトでは大学が主導権をとってもあまり意味がない。つまり、企業が主導権を強化し、事業化へのロードマップや、主体性をもって取り組まなければならない。

6.4 第4部討論

<ナノ融合ファンドリー>

超伝導は過去20年来の技術である。1996年に優良な技術を展開するために、NECのラインを使ってもらったことが超伝導技術の転機となった。設計技術の分野に、大学の教員やNECを含めた企業技術者が集まり、標準化の研究開発を進めた。こうしたファンドリー機能の存在が、日本の技術を進めた。ただし、こうした機能をビジネスにするには、ひと山もふた山も超えなければならない。「死の谷」をいくつも超えていくための戦略が必要である。いい技術をキープするシナリオも必要であり、超伝導がいい技術をキープする例になればと思う。今後は、役に立つための「出口」を考えていかなければならない。ベースになる技術はできたので、いまは世界に勝てるシナリオをつくる時期である。

「ナノテク総合支援プロジェクト」は、文部科学省が平成14年度から5か年計画で進めてきた。「超高圧透過型電子顕微鏡グループ」「放射光グループ」「極微細加工・造形グループ」「分子・物質総合合成・解析グループ」の4グループに分けて技術的サポートをしている。技術支援の件数は年間800件程度である。対象の内訳は大学関係が約60%、企業が約30%、公的機関が約10%。ナノテク総合支援センターはネットワークの核として、研究者の交流の場の形成や人材育成をおこなう。次の計画のために意見を集約している段階である。

東京工業大学は、ナノテク総合支援プロジェクトで、電子ビーム露光を中心とした「極微細加工・造形グループ」を担当している。技術支援件数は年間約50件である。電子ビーム露光装置の維持費が高いため、維持費の捻出も応募動機の一つである。電子ビーム露光装置を中心に使ってもらうものであるが、夜間は研究室の人間が使うため、昼間に電子露光のサービスを提供している。装置の維持は学生がおこない、パーマネントスタッフに比べると安い報酬しか払っていないのが現状である。にもかかわらず、研究を続けるため装置を維持することができる。装置が中古品ならば、研究者のやる気は落ちるだろう。研究のために必死になって良い装置を作ろうと思っているから、いちばん良い水準を保っている。コスト面では、ナノ融合ファンドリー機能を大学が担うと、コストが少なくなる。

もう一つの問題は、設備使用に関するものである。米国のNNIN (National Nanotechnology Infrastructure Network、全米ナノテク・インフラ・ネットワーク) やNNUN (National Nanofabrication Users Network、全米ナノ組立ユーザー・ネットワーク) は、クリーンルームのオープン化から始まった。大学の部門にクリーンルームは一つしかないのも、みんなが装置を持ち寄り、維持費を出しながら運営する。学生がクリーンルームの使用料を払う米国のような状況が日本にはまだない。米国では、外部から維持費を取るのでもうまく機能している。日本ではクリーンルーム内を粗雑に扱われることを嫌う。現在のところ、外部者を入れているのは、産総研くらいである。日本は設備使用の面でまだまだ途中段階にある。

ナノテク総合支援プロジェクトのサービス提供は、宣伝が足りないのかもしれないが、思ったほど利用者が少ないのが現状である。ナノ融合ファンドリー機能は、単なる支援の

形態ではない。「イノベーションをそこで生み出す、強力なドライビングの場を作りたい」という意味で提案をした。

ナノ融合ファンドリーが目指すのは、インテグレーション（一貫化）である。1枚の膜を作るだけや、集積度を上げるだけの施設ではない。企業が「これは使える」と判断するようなものを実現するためにはコストが掛かる。オープン・ラボラトリーは、すべての材料を揃えるだけではないことが問題である。すべての材料を揃えようすると、逆にいろいろな問題が発生し装置が維持できない。

ナノテク総合支援プロジェクトでは、いろいろなシーズが出ており、ナノテクノロジーの裾野を広げるのに貢献した。文部科学省では、このシーズを先につなげる策を考えている。ナノ融合ファンドリーもその一つの候補として検討している。

<大学の活用>

豊橋技術科学大学の集積回路作成装置は、NEC（日本電気）から譲り受けた中古品である。簿価を払ったところ、NECの生産技術部の担当が、全ての装置が作動するように準備してくれた。豊橋技術科学大学が、企業で使用しなくなった装置を活用できているのは、「大講座制」というグループ体制をとっているからである。たとえば、教授3人、助教授3人、助手1人の下で学生たちが多人数で装置をメンテナンスしている。教官が一人で装置の管理を担当しても限界がある。大学単体でも自助努力すれば運営は可能である。学生が生計を立てるために、修士課程あたりから奨学金や授業料免除などの制度が日本にも必要である。

大学のセンター機能的役割について、大学において安価に研究をするという方法は逆効果である。大学は、企業側にコストが安いことをアピールするよりは、優秀なプロの研究者を育てることをアピールしたほうがよい。特に電気工学系などは人気が凋落気味なので、「日本の電気産業を強くするプロを育てる」といった面に重点を置いたほうがよい。センター的機能が加われば、学生も仕事が増えるので、相応の報酬を支払うことが望ましい。米国のNNINは、学生だけでなく、テクニシャンも施設に従事しており能力も高い。同じことを日本で試みるには、キャリアパスなどをそれぞれの法人が様々な角度から研究し、検討する必要がある。

産総研やスタンフォード大のCIS（Center for Integrated Systems）の装置は、誰もが使えるオープンな雰囲気になっている。同じシステムを日本の大学で作ろうとすると、当該グループ以外の人しか使わない傾向にあるので、この問題を解決しないと、オープンなシステムにはならない。

CISでは、装置の利用をサポートする人が数多くおり、装置に不具合が生じてても修理する。日本でも、シニアの方たちを活用する形で、装置のサポートをする体制を作ることが重要だ。装置を導入する際、壊れた場合の補修費用を払い続ける制度がないため、導入する側は壊れることを怖れて厳重に装置を管理してきた経緯がある。

スタンフォード大学への米国政府からの資金提供のように、米国と日本の大学では精神

的側面だけでなく、財政的な余裕の面でも差がある。コストパフォーマンスのよい形で大学の財政課題を克服する方法を、新たなファンディングにより解決する必要がある。

日本の大学では40年ほど前から、分析センター等の機関を設立してきたが、成功したことがない。大学の職員がその機関の担当になるからである。外部からの依頼を引き受けたら忙しくなるので、なるべく引き受けないように、様々な理由をつけて利用を拒む。

ナノ融合ファンドリーは課金システムにすべきである。文部科学省によく検討してもらうことで、今後は、大学がどうナノファンドリーに関わっていくかが期待される。ナノ融合ファンドリーのような共同利用設備の使用目的が何であるかにより、設備の使い方も変わる。大学の研究者は、自分の研究の発展のために自由に装置を使えるほうを好むが、事業化が必要な研究では、それほど自由には使えないことも認識する必要がある。目的によって装置の使い方を決めるべきである。

新しいモノを作るときには、技術蓄積や技能者雇用に投資するコストが必要である。研究に新材料が次々と導入されることもあり、プロフェッショナル的な知識が必要であり、大学の学生に担当させることは危険である。

<『海外比較調査報告書』と研究開発拠点>

配布した『海外比較調査報告書』では、ナノテクノロジー総合支援プロジェクトや物質・材料研究機構（NIMS）、大学関係者の協力で、今年2006年3月に米国東海岸、欧州、さらにアジア地域の共同利用施設の機能と運営実態を調べた結果を付録として記載した（図6-4）。

「研究開発拠点」とは、「ナノスケールの加工・計測・造形・製造を可能とする先端設備を集積し、課金制度による充実したサービスと共同研究の場を提供する共同利用施設、あるいはその施設を利用して共同研究を推進する研究者集団」をさす。「拠点型」と「ネットワーク型」がある。たとえば米国のNNIN（National Nanotechnology Infrastructure Network）は13の拠点がある。コンピュータ関連では7拠点、エネルギー省関連では5拠点がある。「イノベーション創出のためには融合の実現が不可欠」と記載している。「ナノテクノロジー学」はないが、イノベーション創出のためには融合が非常に重要である。さらに、「研究開発拠点は融合の場を提供し、融合を加速する」と記載した。米国ではそうした立場から研究開発拠点が設計されている。「異分野融合」「基礎と応用（出口）の会話」「理論と実験の協力」「産学官の連携」「人材の交流」「拠点の全国ネットワーク化による地域との連携」のいずれもが、米国の研究開発拠点に盛り込まれている。

研究開発拠点の構築を日本で行うためには、次の2点が必要不可欠である。1点目が「予算増による格段の設備・人材充実」である。各国政府のナノテクノロジーへの総投資額のうち、インフラの投資は、米国では15～16%である。欧州ではMINATECが約550億円の総工費で、2006年6月にオープンした。ドイツや英国では自立を求めるような「ネットワーク型」を組織している。予算増による格段の設備・人材充実は絶対に重要である。「ナノスケールの加工・計測・造形・製造の全てが可能な設備群となって初めて利用が増え

るだろう」と記載した。また、「拠点運営の核となる人材の質と量の向上」とは、経営の経験がある人または経営のプロを起用することである。英国のMNT（Micro Nano Technology）ネットワークが典型である。ここでは5年間サポートして、その後は独立を目指すように促す。「支援員の育成とキャリアパスの確立」は、日本では難しい課題である。国立大学は独立行政法人になり、急には変わらないが、トップの判断で給与制度などを設計することも可能である。2点目が、「支援強化と自立を目指す運営の確立」である。「また箱物をつくるのか」という批判を防ぐために、1点目と必ず並行的に考えなければならない。「オープンラボが、融合を明確に指向した、個人研究を限定して支援」とある。米国だとポストドクが1,000万円以下のファンドを携えてきたとき、支援施設を使って支援委員の助けを借りて、相当に質の高いプロジェクトをしている。また、「コンソーシアムが融合を明確に指向したプロジェクト型の共同研究を実施する場合、場を提供、あるいはそういうものに優先的に投資する」とある。こうしたプロジェクトに優先的に投資することを、ファンディング側が仕掛けとして行う。

課金制度も絶対に重要である。米国NNINの運営費のうち、政府からの金額は50%以下である。それ以外は、アカデミックベースとコマーシャルベースの課金制度、地方のマッチングファンド、寄附による。コーネル大学では、同じニューヨーク州の他の研究機関が、その施設を使う場合には課金システムを優遇するなど、様々なマッチングファンドがある。「支援強化と自立を目指す運営の確立」と「予算増による格段の設備・人材の向上」は一体になって取り組む必要がある。「質」と「量」の両方を伴ったナノ融合ファンドリー等の施設の運営を、日本でも行う必要がある。融合研究を条件として、ファンディング側が仕掛ける形態もあり得る。共同利用施設の場合に、引き受ける法人のトップマネジメン

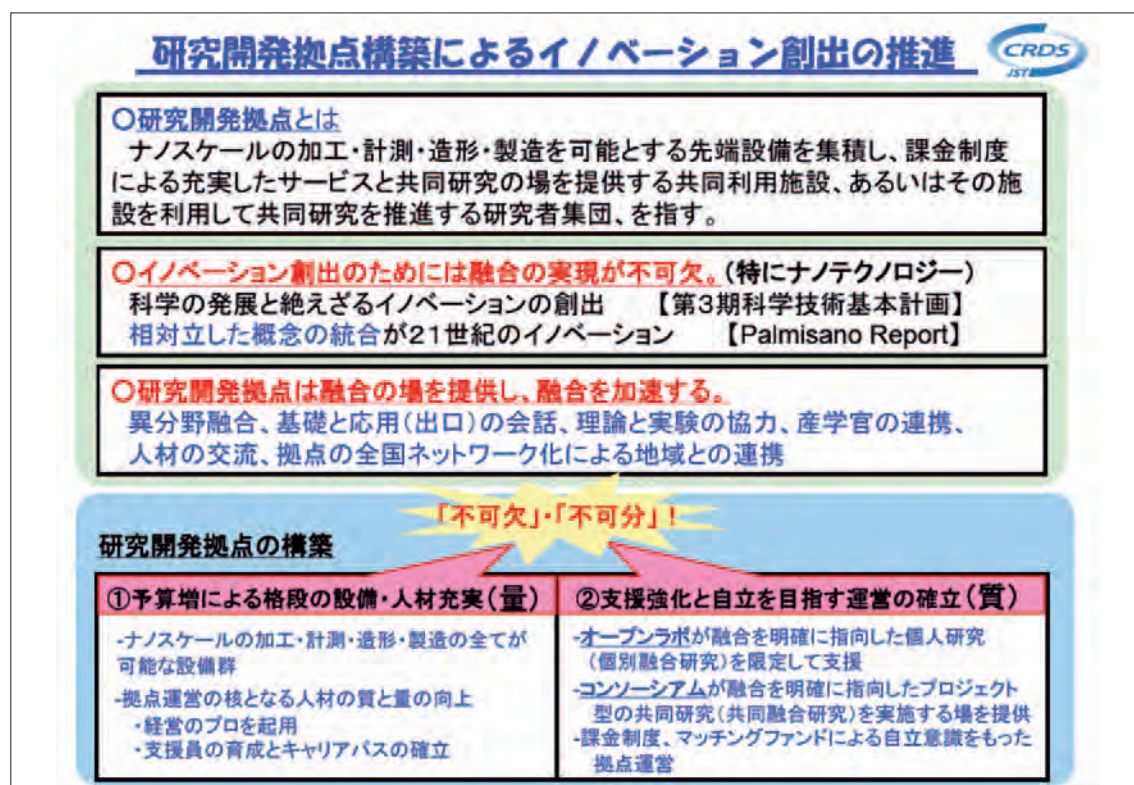


図6-4 開発拠点構築によるイノベーション創出の推進

トがマッチングファンドのときに例えば10%~20%の資金拠出を前提とする公募も検討する必要がある（図6-4）。

＜異分野融合的競争資金＞

2点の質問に関して。

1点目は、共同利用施設について、既存の大学設備や公的研究機関の施設ファシリティーをネットワーク化して、相互に利用するということは可能か。

→可能である。ナノテク総合支援センターの制度では、大学の既存設備と国研の既存設備から、設備を使わない時間を提供してもらい、フル活用している。

2点目は、異分野融合の形態でないと申請できない競争的資金を考えている。どのようなインセンティブがあれば、若手の研究者が応募するか。

→融合的プロジェクトの場合、「こちら側の分野のプレーヤーはこういう陣容だが、パートナーとして参加してはどうか」と誘うようなしくみがあると、様々な状況が変わると思う。研究者はわがままな面もあり自由にやらせていただくのが望ましい。今の研究が、将来どういう異分野に広がるかわからない点があるので、そのあたりを考慮すればよい。

＜人材育成＞

若い人を鍛えて、科学技術で国際的リーダーになるように育てることは基本的に大事である。そのとき、誤解を感じるのは、日本のお金の投資だけを考えることである。たとえば、米国でも現地で研究している中国人などに投資金は流れている。日本の若い人はあまり海外に行かなくなっているが、外国の投資金も活用するような工夫をすべきである。

7 まとめ

各章ごとに論点は整理した。「ナノ・電子情報材料」の現状認識と今後の研究開発の方向性について次のように総括される。

<ナノエレクトロニクス>

「情報処理デバイス」、つまりトランジスタ（メモリは含まれない）では、CMOSが優れており、中長期のデバイス開発において、CMOSをベースとする半導体デバイスのさらなる高性能化・高集積化を目指した製造プロセス開発が継続されると思われる。半導体製造技術のより高度化により、微細化等の加工技術はナノの領域まで進み、シリコン単体における要素技術は確立されて、ナノテクノロジーの基盤技術の一つとして、現在も、電子情報材料産業の根幹を支えている。

しかし、CMOSトランジスタ動作原理の微細化限界が近づき、超高集積化システムを構成するための材料特性を維持するのが困難な状況になっている。当該技術分野を俯瞰したロードマップとしては、日米欧韓台の5極が共同で作成しているものとして国際半導体技術ロードマップ（ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors）が存在する。これは電子情報材料産業における研究開発の重要な指針となっている。これまでのように高集積化・微細化加工技術のみのトレンドを中心としたITRSロードマップは見直しの時期にきており、超高集積化・超微細化加工技術に異種材料集積化や材料・界面解析など基礎物性解析等との技術融合を促進しなければならない状況になっている。その一方において、デバイス機能の多様性が求められ、それらを実現するための材料要素技術開発の重要性が増している。シリコン材料を用い、さらに多様な新機能を付加するためのナノ製造技術は、産業分野においても手つかずにあり、着想及び基礎研究も不十分であり、今後イノベーション創出の潜在的な領域となっている。

米国では半導体6社が中心となりNanoelectronics Research Initiative (NRI) を発信し、非電荷の情報処理の研究に特化したBeyond CMOS研究領域における研究開発の強化を大学等にアウトソーシングしている。また、半導体集積回路の最大手の米国のインテルがシリコン基盤と化合物半導体を組み合わせることによりLSIの高性能化を大学との共同研究で模索を始めている。これらは、現在のシリコンCMOSの延長では解決できない次世代ナノエレクトロニクス（Beyond CMOS）の壁を、先端ナノサイエンスを駆使して突破した国こそ10～15年後のエレクトロニクスの覇権を握るという共通認識のためであろう。

基礎材料物性にに基づいた新原理・新機能の材料開発研究を産学連携より推進することが世界的な認識となっているが、一方、日本では、大学の研究者は静観しており、Beyond CMOS、More than Moore を目指した、リスクの大きい研究開発に企業が着手出来ない状況に陥っているが、しかし、過去5～10年の多くの優れた萌芽的研究により、ナノエレクトロニクス材料研究では世界のトップを走る日本にとって、これら材料研究を高度

に融合しBeyond CMOSデバイス材料への道筋をつける戦略目標は、まさに、今後取り組むべき重要課題である。

また、化合物半導体電子デバイスについては、過去に多くの投資がなされ、多くの遺産がある分野である。しかしながら現在は投資が少なくなり、関与している研究者も減りつつある。しかし化合物半導体のマーケットは小さく、企業だけでこの領域の技術を維持するのは難しい。80年代に日本の電気メーカーで行われた化合物半導体基礎研究の遺産は、暗黙知を含めて膨大にあり、これまでに培われた技術を実実に継承し、発展させるためには国としての戦略的な技術支援を今行なうことが重要である。これら日本が強みとする材料技術を活かし、これまでに蓄積された知的資産を有効に活用するためには、CMOS技術の高度化により、微細化の極限を追求するMore Moore研究開発に機能材料の高集積化を目指したMore than MooreとBeyond CMOS研究を統合融合させる創造的「ものづくり」によるシンセシス型研究が必要である。そのためには、明確な「ものづくり」の目標を設定した研究拠点、産学連携コンソーシアムなど中心としたプラットフォームの構築が重要である。

世界で誰もなしえないような機能材料をシリコン上に堆積/付与/固定すること、および新しいエレクトロニクス用デバイスをシリコン基板上で創成することが重要である。これと並行し、既存材料および既存デバイスをシリコンベースで実現する研究も、その重要性・将来性を判断した上で強力に推進すべきである。この分野で欧米の公的研究機関や大学はしのぎを削っているが、日本は出遅れている。これはLSIとの集積化に関する研究ができる研究拠点や共同研究施設が、日本には整っていないことも原因にある。

<ナノ・電子情報材料開発戦略への留意点、課題>

- ・ CMOSトランジスタ動作原理の微細化限界が近づき、超高集積システムを構成する材料特性を維持することが困難な状況になり、微細化技術開発において、異種材料集積化や基礎物性解析等の技術融合が促進され、これまでの開発ロードマップに質的な変化が起きている。
- ・ 欧、米、(亜) いずれも、新概念・新機能のエレクトロニクス材料・デバイス開拓 (Beyond CMOS) など基礎研究を含むシリコンCMOSの新たなプラットフォーム作りを目指し、研究拠点、ナノファブセンターが構築されている。
- ・ ナノサイエンスに基づいた材料研究を中心とした大学における基礎研究のみでは、早期のOutputにはつながらない。それには明確な「ものづくり」の目標を設定した研究拠点を中心としたコンソーシアムや産学連携による目的志向型の研究が必要である。
- ・ さらに領域統括の強力なイニシアチブのもと、互いのグループ間の連携を密にして、ときには共通インフラも使いながら融合効果を出すことが必要となる。基礎 (大学)、応用 (企業) の明確な役割分担と会話、理論と実験の協力、産学官の連携、人材の交流等、研究投資が有効に成果につながるための融合・連携を加速する具体的なシステムが共通インフラストラクチャーとして喫緊に必要である。これらの研究を通して、更なる基礎

研究の活性化にもつながると期待されるだろう。

- ・一方、日本の現状は、シリコンCMOSと半導体基礎研究の乖離、Beyond CMOSを含む産学連携拠点の未整備や、大学院教育における集積化センター実習教育の欠如など多くの問題点・課題点が明確にされてきている。
- ・ナノ・電子情報材料分野の研究開発戦略において、産学連携のみにとどまらず、様々な状況・立場からの新たな連携モデルが必要となっている。例えば、縦割り行政を乗り越えた省庁間連携やファンディングにおける基礎と応用の技術融合を目指した「ものづくり」のための連携など新たなファンディングシステムが望まれている。

以上の留意点や課題を考慮し、現在、ナノテクバーチャルラボの転換期を向かえ、日本が強みとする材料技術を、実用化にむけて正しい方向に導くためには、More Moore研究開発に機能材料の高集積化を目指したMore than MooreとBeyond CMOS研究を統合・融合させるシンセシス型研究/蓄積された知見・技術を総動員するための異分野間の学際研究システムとしての「創造的ものづくりのためのナノシンセシス研究」を継続することが重要である。

<重要研究課題>

時系列でまとめた本検討会は1日の開催であり、限られた時間内で効率良く議論を行なうために、検討会の前に参加者全員に設定された3つの技術領域（①超高速・超微細・超集積化デバイス開拓、②新概念・量子構造デバイス開拓、③新材料系機能開拓）の5年、10年、さらに20年後の重要研究課題についてアンケート調査を実施した。結果は3つの技術領域ごとに一つの表としてまとめた。

また、重要研究課題として抽出されたナノ・電子情報材料のキーワードを本検討会で得られた技術情報を基にナノ・電子情報材料におけるMore than Moore研究開発戦略俯瞰図（図7-1）、および本検討会で検討された3つのナノ・電子情報材料の技術領域に関する改訂ナノ・電子情報材料俯瞰図（図7-2）としてまとめた。2つの俯瞰図は横軸にデバイス機能発現単位をパラメータ、縦軸は電子デバイス機能として求められる付加的機能をパラメータとして図式化されている。今回の検討会を通して、電子デバイスの開発戦略の大きな流れは“More Moore”と“More than Moore”の方向にあることが明らかにされた。Beyond CMOSについては現在のSiテクノロジーとのスタンスについてイノベーションの立場から早急に位置づけが図られるべきであるが、現時点での議論をベースに図に反映させてある。

ナノ・電子情報材料開発俯瞰図

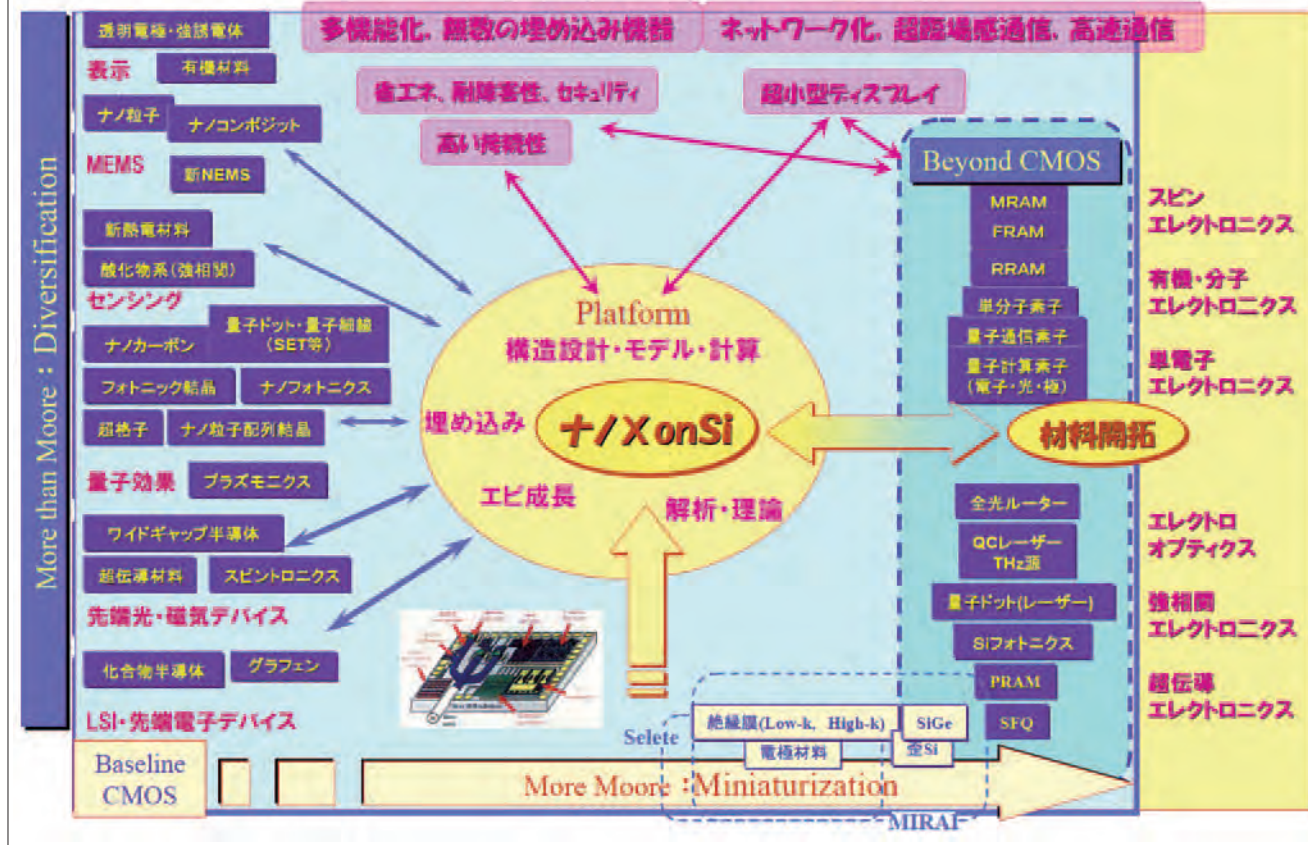


図7-1 ナノ・電子情報材料におけるMore than Moore研究開発戦略俯瞰図

ナノ・電子情報材料俯瞰図

Version 4.2

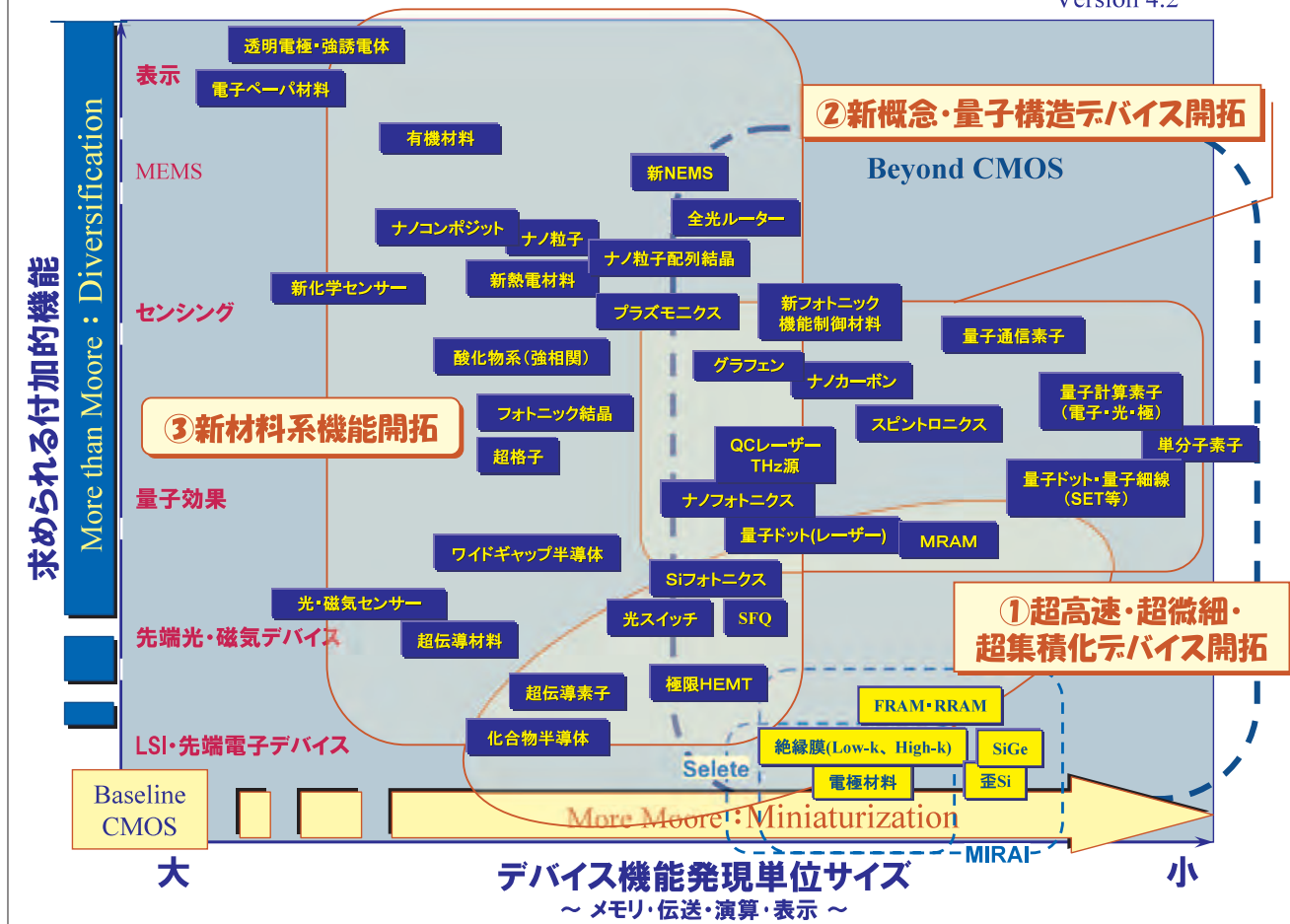


図7-2 検討会で得られた技術情報を基に、改訂されたナノ・電子情報材料俯瞰図

	～ 5年	5 ～ 10年	10 ～ 20年
	More Moore ・省電力かつ発熱対応技術 ・化合物半導体、カーボンナノチューブ、グラファ烯 ・絶縁膜 (low k, high k) ・歪みSi, SiGe チャンネル素子、ナノブリッジ素子 ・ナノCMOS用新材料技術 (ゲートスタック・チャネル・ソースドレイン) ・LSI内配線材料・界面制御、リコンフィグラブル配線、フラッシュメモリ ・ダメージフリー・ナノ加工技術 (中性イオンビームエッチングなど) 半導体リソングラフィ ・～45nmレベルの半導体微細加工技術 ・高分子合成分野での新規フォトリジスト開発 ・ナノプリント・ナノ流体プロセス More than Moore Beyond CMOS ・量子ドットレーザー ・ナノ量子構造を使った超色再現 ディスプレイのプロトタイプ ・PRAM, MRAM (< 数100Mb 磁界型) (研究開発) ・HDD (垂直記録+MgOヘッド、 < 500Gbps) 超伝導 低温超伝導 (LTS) 回路 ・0.7μm接合プロセスによる40万接合集積回路開発 ・光とのインターフェイスを含めた広帯域実装技術 - 中・高温超伝導 (MTS, HTS) 回路 ・高信頼サブテラヘルツ小規模回路実証 出口： ADCに基づく検出システム プロセス・モデリング・シミュレーション ・非熱平衡現象を取り入れたナノCMOSプロセス・デバイスシミュレータの開発 ・新材料界面を含むナノデバイスの原子レベル計測・評価技術および物理モデリング ・上記に対応する材料プロセスデータベース・シミュレーション ・デバイスの3次元化と新規システムインテグレーション法の開発 ・化合物半導体論理素子の高集積化技術 ・非平衡・不均質ナノ超構造ポトムアップ結晶成長法の開発	More Moore ・高速低消費電力配線 ・化合物半導体、カーボンナノチューブ、グラファ烯 ・Ge チャンネル素子、3D閉じ込めチャンネル素子 ・ナノCMOS最適材料・構造創製 半導体リソングラフィ ・～32nmレベルの半導体微細加工技術 ・EUVの為に高解像度・低揺らぎフォトリジストと高精度X線光学技術 ・ナノコンタクトプリントによる量産技術 ・自己組織的リソングラフィ・レジスト材料 More than Moore Beyond CMOS ・10Tb/in² 級のストレージとその媒体材料、加工技術、ポトムアップ・ナノテクノロジーによるTHz/Tbit/Non-volatile デバイスの創成とシステムインテグレーション法の開発 ・PRAM, MRAM (実用化) ・超高速光スイッチ ・ナノ超構造におけるスピン量子物性 ・Siフォトニクス ・体内用IC ・自己組織化 超伝導 低温超伝導 (LTS) 回路 ・0.5μm接合プロセスによる200万接合集積回路開発 ・3次元実装技術・フレキシブル基板上回路 - 中・高温超伝導 (MTS, HTS) 回路 ・サブテラヘルツMTS/HTS回路とLTS大規模回路のハイブリッド回路実証 出口： 多入力・多機能検出・演算システム、ハイエンドレータ ・高温超伝導材料での素子プロセス技術開発と超伝導材料の転移温度上昇 プロセス・モデリング・シミュレーション ・ナノ材料デバイスシミュレーション ・固体中電子素子での高速化極限の探求 ・揺らぎを最小化できる材料プロセス	More Moore ・半導体同位体技術 ・高速リコンフィグラブル・自己修復配線技術 ・ナノワイヤ素子 半導体リソングラフィ ・EUVの為に高解像度・低揺らぎフォトリジストと高精度X線光学技術 More than Moore Beyond CMOS ・シリコンと異物質との融合技術。特に磁気ドメイン、誘電体ドメインなどのメモリ応用との融合。 ・半導体ナノスピントロニクス 超伝導 低温超伝導 (LTS) 回路 ・0.2μm接合プロセスによる1000万超接合集積回路開発 ・3次元回路技術 - 中・高温超伝導 (MTS, HTS) 回路 ・サブテラヘルツMTS/HTS回路とLTS大規模回路の3次元ハイブリッド回路 出口： デスクサイドスーパーコンピュータなど ・高温超伝導材料での素子プロセス技術開発と超伝導材料の転移温度上昇 プロセス・モデリング・シミュレーション ・ナノデバイス・プロセスのトータルシミュレーション ・固体中電子素子での高速化極限の探求 ・ナノCMOSの原子レベル構築技術

① 超高速・超微細・超集積化デバイスの開拓

ナノ・電子情報材料の研究開発ビジョン ～今後、重要になると思われる科学・技術領域の俯瞰～ 第2版

	～ 5年	5 ～ 10年	10 ～ 20年
② 新原理・量子構造デバイスの開拓	電子系 ・単一電子トランジスタによるメモリ、ロジック(室温) - 単一電荷ブローピング、バイオセンシング ・超高速・極低消費電力カータデバイス ・非熱平衡現象を果敢に利用した室温新概念素子の提案 ・位相制御電磁波パルス発生技術(可視・近赤外、テラヘルツ) 光系 ・テラヘルツ光源・検出器の開発と応用探索 ・単一光子発光・検知技術 ・フォトニック結晶 ・S-Kモード成長量子ドットの均一性向上 ・量子暗号 磁気・スピン系 ・MRAM(<数100Mb 磁界型) ・単一スピン計測技術 ・HDD(垂直記録+MgOヘッド、 <500Gbps) ・スピン・メモリ、半導体中電子スピンのコヒーレンス制御、大きなフアラデー回転を示すナノ構造、量子位相制御技術の開発、原子・電荷・スピンのナノ・ダイナミックスの制御法開発 その他 ・単一原子レベルの加工技術 ・単一フォノン計測技術 ・近接場光技術 ・ナノインプリント技術 ・有機導体・強誘電体の研究、金属と有機分子との結合形成 ・燃料電池	電子系 ・Si/Ge系のナノ電子素子 ・単一電子素子、量子構造素子 ・高効率有機EL素子(実用化)、有機光電子素子、有機(分子)素子技術 ・異種量子ビット間のエンタングルメント制御技術 ・電子ノ正孔のコヒーレント伝導制御 デバイス ・誘電体オービトロニクス 光系 ・THz、赤外分光技術(イメージング、近接場、センササイザーなど) - 光源・検出器の開発と応用探索 ・Si/Ge系ナノ発光素子 ・S-Kモード成長量子ドットの均一性向上 ・異種量子ビット間のエンタングルメント制御技術 磁気・スピン系 ・MRAM(>1Gb スピン注入型) ・不揮発性メモリ(RRAMを含む)、論理回路(メモリ+Tr型) ・異種量子ビット間の量子エンタングルメント制御技術 ・HDD(ポストMgOヘッド+熱アシスト or パターン媒体) >Tbps) ・磁壁移動型ストレージ ・スピン・メモリ、スピントランジスタ(金属)の実現、スピンのコヒーレンス利用デバイス ・スピンqubit量子コンピュータ ・室温強磁性半導体 ・マルチフェロイクス、強相関利用情報処理デバイス(低消費電力、高速論理演算など) ・半導体・金属ナノスピントロニクス その他 ・単一原子レベルの加工技術 ・バイオエレクトロニクス、ナノバイオチップ、インテリジェントセンサー ・ナノカーボンデバイス、CNT平面ディスプレイ ・コヒーレント・フォノン制御技術 ・量子構造や分子系、生態系分子のダイナミクス、原子・分子ナノダイナミックスを利用した高次機能エレクトロニクス ・超伝導素子技術 ・量子通信 ・単一量子素子を用いた量子情報処理技術 ・実用レベルのフレキシブル・ディスプレイ	電子系 ・一次元量子伝導制御デバイス ・誘電体ドメインなどの ロジック・メモリ応用技術 ・有機(分子)素子技術、情報処理 ・電荷qubit量子コンピュータ 光系 ・超多層光ストレージ ・S-Kモード成長量子ドットの均一性向上 磁気・スピン系 ・不揮発性論理回路(メタルTr型) ・磁気ドメインなどの ロジック・メモリ応用技術 ・スピン・メモリ、スピン・トランジスタ(半導体)、スピン流素子の実現 ・強相関を用いた情報処理デバイスの実用化 ・半導体ナノスピントロニクス その他 ・原子レベルでの構造安定化技術 ・バイオデバイス、バイオ融合エレクトロニクス ・ブローブ・ストレージ ・量子通信・計算(実用化)、量子演算を用いた専用プロセッサ、単一量子情報処理デバイスの集積化

ナノ・電子情報材料の研究開発ビジョン ～今後、重要になると思われる科学・技術領域の俯瞰～ 第2版

	～ 5年	5 ～ 10年	10 ～ 20年
③ 新材料系機能の開拓	Si, Ge系半導体 ・ナノSi/Ge ・半導体・金属同位体利用技術 強相関材料 ・交差相関新材料、巨大磁気抵抗を示す物質の探索(非平衡・不均質ナノ超構造)・超高感度な磁場センサー、強相関接合・超格子の新機能創製、巨大な光反応(一つのフォトンで100万個のスピンをそろえる)を示す磁性半導体の開発 ・強相関フォトニクス材料 ・巨大熱電・熱磁変換効果、多重臨界性の相制御 フォトニック材料 ・シリコンフォトニクス(研究開発) 有機材料 ・有機EL(大画面照明) ・有機FET ・POF(プラスチック光ファイバー) ・PWG ナノカーボン系 ・グラフェンの半導体化(研究開発) 化合物半導体 ・AlGaIn/GaNヘテロ接合FETの性能改善(高耐圧化、コラプス低減、エンバンスメント化、縦型FET化など)、GaN/AlGaIn系での分極を持たないヘテロ構造とそれに沿ったデバイス構造(縦型か?)(研究開発)、新材料AlInN/GaN系FETの基礎検討と可能性実証 ・ワイドギャップ半導体(SiC,ダイヤモンド)(研究開発) その他 ・電子ペーパー材料 ・透明電極、強誘電体 ・大面積化に適した低抵抗新配線材料 ・第1世代(現在メモリ応用)RRAM,PRAM ・電源(電池・エネルギー変換デバイス)とCMOSとの集積化 ・半導体チップの物理的セキュリティ保障 ・非線形光学材料 ・希薄磁性半導体 ・ナノガラス ・センシング機能材料(バイオモニター・環境モニター) ナノレベル原子位置・化学反応の計測および制御技術 ・低コスト燃料電池用材料 ・触媒材料 ・エネルギー貯蔵・変換材料	Si, Ge系半導体 ・ナノSi/Ge材料 ・ナノ半導体・誘電体・金属技術と同位体利用素子(研究開発) 強相関材料 ・強相関電子による交差相関制御 ・強相関スピントランジスタ、モットランジスタ、超高速光スイッチ、熱電素子 フォトニック材料 ・シリコンフォトニクス(試作) ・フォトニッククリスタル 有機材料 ・有機ナノレーザー ナノカーボン系 ・ナノカーボンと同様の性質を持ち平面薄膜に出来るグラフェン(試作) 化合物半導体 ・InGaIn(含むInN)をチャネルとするヘテロ接合FETの検討(結晶成長、高純度結晶化、基礎物性評価、高速電子輸送評価、ナノゲートデバイス試作)GaN/AlGaIn系での分極を持たないヘテロ構造とそれに沿ったデバイス構造(縦型か?)(試作) ・ワイドギャップ半導体(SiC,ダイヤモンド)(試作) その他 ・熱電材料($Z \cdot T > 3.0$) ・低コスト透明電極用材料と形成プロセス(含む有機物材料) ・ナノ粒子、ナノコンボジット ・第2世代(フラッシュ代替応用)RRAM, SRAM代替不揮発メモリ ・自己組織化を利用したデバイスレベルのナノ超構造創製法 ・デバイスレベルの新しいナノスピントロニクス・デバイス材料の探索 ・ガラスに代わるディスプレイ用基板材料 ・バイオセンシング機能のCMOS LSI集積、そのための材料界面制御 ・THzテクノロジー ・高効率水素発生用触媒 ・超高密度キャパシタ用ナノ材料	Si, Ge系半導体 ・ナノSi/Ge材料 ・ナノ半導体・誘電体・金属技術と同位体利用素子(試作) 強相関材料 ・強相関エレクトロニクス(強相関スピントロニクス、強相関オービットロニクス)強相関電子ユニバーサルメモリ フォトニック材料 ・シリコンフォトニクス(実用化) ・フォトニック機能制御材料 有機材料 ナノカーボン系 ・ナノカーボンと同様の性質を持ち平面薄膜に出来るグラフェン(実用化) 化合物半導体 ・AlGaInIn(含むAlGaIn)をチャネルとするヘテロ接合FETの検討(結晶成長、低抵抗n形化、基礎材料物性評価、高耐圧デバイス設計、パワーエレクトロニクスへの応用研究)GaN/AlGaIn系での分極を持たないヘテロ構造とそれに沿ったデバイス構造(縦型か?)(実用化) ・ワイドギャップ半導体(SiC,ダイヤモンド)(実用化) その他 ・ナノハイブリッド材料 ・量子相関機能材料

1 本検討会の開催日時・場所、プログラム、参加者の構成

日時：平成18年8月5日（土） 9時50分～19時00分

会場：研究開発戦略センター 2階大会議室

表1 本検討会のプログラム

プロローグ		9:50～10:00	
開会の挨拶及び趣旨説明		田中 一宜 榊 裕之	
第一部「超高速・超微細・超集積化デバイス開拓の課題」		10:00～12:00 主査：平本 俊郎 田中 一宜	
「界面制御によるブレイクスルー 超微細・超集積化デバイスが抱える課題」		金山 敏彦	
超高速化デバイス 記録とスイッチの機能を持つトランジスタの可能性と課題 「磁性材料について」 「半導体電子デバイスの超高速化について」 「超伝導材料 実用化に向けた課題」		宮崎 照宜 宮本 恭幸 藤巻 朗	
討論 「課題提起」		西野 壽一 平本 俊郎	
第二部「新概念・量子構造デバイス開拓の課題」		13:00～15:00 主査：安藤 功兒 田中 一宜	
「Emerging Research Devices 電子素子（Logic）」		伊藤 公平	
「高性能量子ドットレーザと量子ドット光増幅器」		菅原 充	
「不揮発性機能とスピントロニクス」		安藤 功兒	
「ナノカーボン系を事例として」		松本 和彦	
討論 「課題提起」		吉田 博 平川 一彦	
第三部「新材料系機能開拓の課題」		15:15～17:30 主査：小林 功郎 田中 一宜	
「有機エレクトロニクス材料 一技術課題克服にむけた材料開発・評価技術開発のアプローチ」		関 一彦	
「ワイドギャップ半導体 一低電力損失、高温動作、高速制御の材料的課題」		葛原 正明	
フォトン機能制御材料 「光の電磁領域を拡げる、新機能・光機能材料から」 「新材料系機能開拓の課題」		小林 功郎 金光 義彦	
「強相関電子材料」（原理的可能性とデバイス化の課題）		赤穂 博司	
討論 「課題提起」		中西 八郎 西永 頌	
第四部「総合討論：共同利用施設と分野融合・研究システム・産官学連携・ファンディング」		17:45～19:00 主査：榊 裕之 田中 一宜	
「課題提起」：企業からの視点より		曾根 純一	
「課題提起」：コンソーシアムからの視点より		栗野 祐二	
「課題提起」：研究システム・産官学連携の視点より		村上 正紀	

表2 本検討会参加者一覧

(a) 発表者

氏名	所属・役職（いずれも検討会開催当時）
赤穂 博司	(独)産業技術総合研究所 強相関電子技術研究センター 副センター長
栗野 祐二	富士通(株)ナノテクノロジー研究センター 主管研究員
安藤 功兒	(独)産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 副部門長
伊藤 公平	慶応義塾大学 理工学部 物理情報工学科 助教授
金山 敏彦	(独)産業技術総合研究所 次世代半導体センター 副センター長
金光 義彦	京都大学 化学研究所 元素科学国際研究センター 教授
葛原 正明	福井大学 工学部 電気・電子工学科 教授
小林 功郎	東京工業大学 精密工学研究所 教授
榊 裕之	東京大学 生産技術研究所 教授
菅原 充	富士通(株)ナノテクノロジー研究センター 副センター長/(株)QDレーザ 社長
関 一彦	名古屋大学大学院 理学研究科 物質理学専攻（化学系） 教授
曽根 純一	日本電気(株) 筑波研究所 基礎・環境研究所 所長
中西 八郎	東北大学 多元物質科学研究所 教授
西永 頌	豊橋技術科学大学 学長
西野 壽一	(株)日立ディスプレイズ 常務取締役CTO
平川 一彦	東京大学 情報・エレクトロニクス系部門 教授
平本 俊郎	東京大学 生産技術研究所 教授
藤巻 朗	名古屋大学大学院 工学研究科 量子工学専攻 教授
松本 和彦	大阪大学 産業科学研究所 教授
宮崎 照宜	東北大学大学院 工学研究科 応用物理専攻 教授
宮本 恭幸	東京工業大学 精密工学研究所 助教授
吉田 博	大阪大学 産業科学研究所 教授

(b) その他の参加者

	氏名	所属・役職（いずれも検討会開催当時）
内 閣 府	森本 立男	内閣府 総合科学技術会議事務局 政策企画調査官
	猿田 紀子	内閣府 総合科学技術会議事務局 政策統括官付参事官補佐
文部科学省	野田 武司	文部科学省 研究振興局 基礎基盤研究課 ナノテクノロジー・材料開発推進室 科学技術・学術行政調査官
	河本 洋	文部科学省 科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター ナノテクノロジー・材料ユニット 特別研究員／リーダー
経済産業省	山田 豊	経済産業省 製造産業局 ナノテクノロジー・材料戦略室 経済産業技官
	大江 朋久	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課／ナノテクノロジー・材料戦略室 技術係
N B C I	佐藤 進	ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局 事務局長代理
物質・材料 研究機構	小嶋 典夫	ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター 副センター長
	北村 孝雄	ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター 調査部門長
	平原奎治郎	ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター 企画部門長
	黒澤 景	ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター 運営主席
科 学 技 術 振 興 機 構	野口 義博	(独)科学技術振興機構 特別プロジェクト推進室 調査役
	荒岡 礼	(独)科学技術振興機構 特別プロジェクト推進室 主査
	金子 博之	(独)科学技術振興機構 研究領域総合運営室 調査役
	落合 幸徳	(独)科学技術振興機構 科学技術振興調整費業務室 科学技術振興調整費プログラム主管
	田中 一宜	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 上席フェロー
	井下 猛	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	江口 健	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	松村 光雄	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	鯉沼 秀臣	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	成瀬雄二郎	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	村井 眞二	(独)科学技術振興機構 研究成果活用プラザ大阪 館長 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
	木村 茂行	(社)未踏科学技術協会 理事長 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
	田中 秀治	東北大学大学院 工学研究科 ナノメカニクス専攻 助教授 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
	福崎英一郎	大阪大学大学院 工学研究科 応用生物工学専攻 助教授 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
	宮本 宏	(独)産業技術総合研究所 評価部 首席評価役 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
	村上 正紀	京都大学大学院 工学研究科 材料工学専攻 教授 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
	伊東 義曜	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 主任調査員
	雄山 泰直	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
	中山 智弘	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
	永井 康介	東北大学 金属材料研究所 助教授 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
	横田 修	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター アソシエイトフェロー
	石田 千織	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 事務補助



俯瞰WS ナノ・エレクトロニクス領域

コーディネーター 平本俊郎 東大 生産技術研究所 教授
 コメンテーター 渡辺久恒 (株)半導体先端テクノロジーズ 代表取締役社長
 金山敏彦 産総研 次世代半導体研究センター 副センター長
 知京豊裕 物材機構 半導体材料センター センター長
 湯本潤司 NTT 物性科学基礎研究所 所長
 大野英男 東北大 電気通信研究所 教授
 樽茶清悟 東大大学院 工学系研究科物理工学専攻 教授

曾根純一 NEC 基礎・環境研究所 所長
 安達千波矢 九大 未来化学創造センター 教授

1



過去5年間の進展状況と日本の貢献

研究シーズ		進捗	ナノ・サイエンス	エンジニアリング
ナノ構造・材料開発	High-k/ メタルゲート	○	・金属ゲート/ゲート酸化膜界面/SiのGCNLモデル理論。	・HfO ₂ 系ゲート酸化膜のリーク原因は粒界ではなく、酸化物中の空孔。
		課題	・界面状態の理解と制御。	・ゲート酸化膜やメタルゲート、界面制御、構造に関する研究。 ・新材料の独創的な発想やアイデアの実証において、欧米の後塵を拝す。サポートする施設・組織がない。
	CNT	○	・バリスティック電導等、物性解明と構造制御。 ・高純度・大量生産技術の確立。	・自己集合化技術。
		課題	・カイラリティーの制御。	・界面制御・電極とのコンタクト技術。 ・低コスト化技術。
	スピン メモリ	○	・巨大トンネル磁気抵抗の理論的な予測を実験により確認。 ・高い強磁性転移温度を持つ強磁性半導体創製。	・Fe/MgO/Feのエピタキシャル構造で巨大トンネル磁気抵抗効果。
		課題	・スピン流ナノ物理の確立。	・低電流駆動スピン注入磁化反転。
	量子現象	○	・量子井戸構造、量子ドット構造におけるスピン現象の解明と制御。 ・単一スピン間の交換相互作用の制御、スピンホール効果と理論的貢献。	
	有機半導体	○		・材料開発からデバイス化まで日本が牽引。
		課題	・動作機構の理論的理解が不十分。 ・機能設計を中心とした新しい有機材料領域の創成。	・デバイスの耐久性の解析が不十分。 ・知識の共有化も進んでいない。
強相関材料	○	○	・超巨大電界誘起抵抗変化(CER)効果。	・不揮発性高速メモリ(Resistance RAM)。
		課題		・界面デザイン技術の確立を実現するための界面エンジニアリング。 ・酸化物デバイス作製に向けた、微細加工技術。
	化合物半導体	○		・ブルーレーザーの実用化。
		課題	・融合領域に関するロードマップが描かれていない。 様々なイノベーションが起きる可能性が高い領域。	・オンシリコンで、選択的な無欠陥薄膜結晶の作製。

2

過去5年間の進展状況と日本の課題

1. デバイス化技術

- ・ひずみ Si：微細化に頼らずCMOS性能を向上させる技術。IntelのPentiumに搭載済み。極めて短時間に実用化され、微細化一辺倒のCMOS開発の流れを一変。
- ・三次元構造 MOSFET：
日本発のアイデア、しかし開発では日本の企業は出遅れた。米欧が先行。
- ・半導体や超伝導を用いた量子コンピュータ用デバイス(qubit)の物理解明。
出口問題：デバイス／アーキテクチャを総合的に管理できる人材育成の遅れ。
- ・有機太陽電池の開発に出遅れた。欧州が先行、巨大なファンディング。
- ・量子ドットレーザの特性向上と、そのビジネス化の進展。

2. 半導体事業

- ・半導体そのものよりも、エレクトロニクス消費大国である状態は維持・継続。
- ・マーケットニーズを把握できず、適格なデバイスを市場に供給できない。
- ・半導体技術と経営戦略のミスマッチ、戦略的連携関係は弱い、地に着いた国家開発戦略が必要。

3

中長期研究開発戦略の視点

1. ナノテクノロジーのインパクト

- ・広い適応範囲。
- ・ナノエレで伸ばしたい産業：ハードウェア開発を通じて、感性、高齢社会、環境分野へ。
- ・ナノ本来の機能を生かして新原理コンセプト・アイデアの創製。
- ・エレクトロニクス大国から、ナノエレクトロニクス先進国への進化(ブロードバンド、モバイル、ゲーム、スーパーコンピュータ、材料)。
- ・ナノエレクトロニクスコンピュータ：様々な分野の活用可能(スピン、DNA、量子など)。高速化のみならず、低消費電力が最重要課題。

2. CMOS機能の多様性の観点から

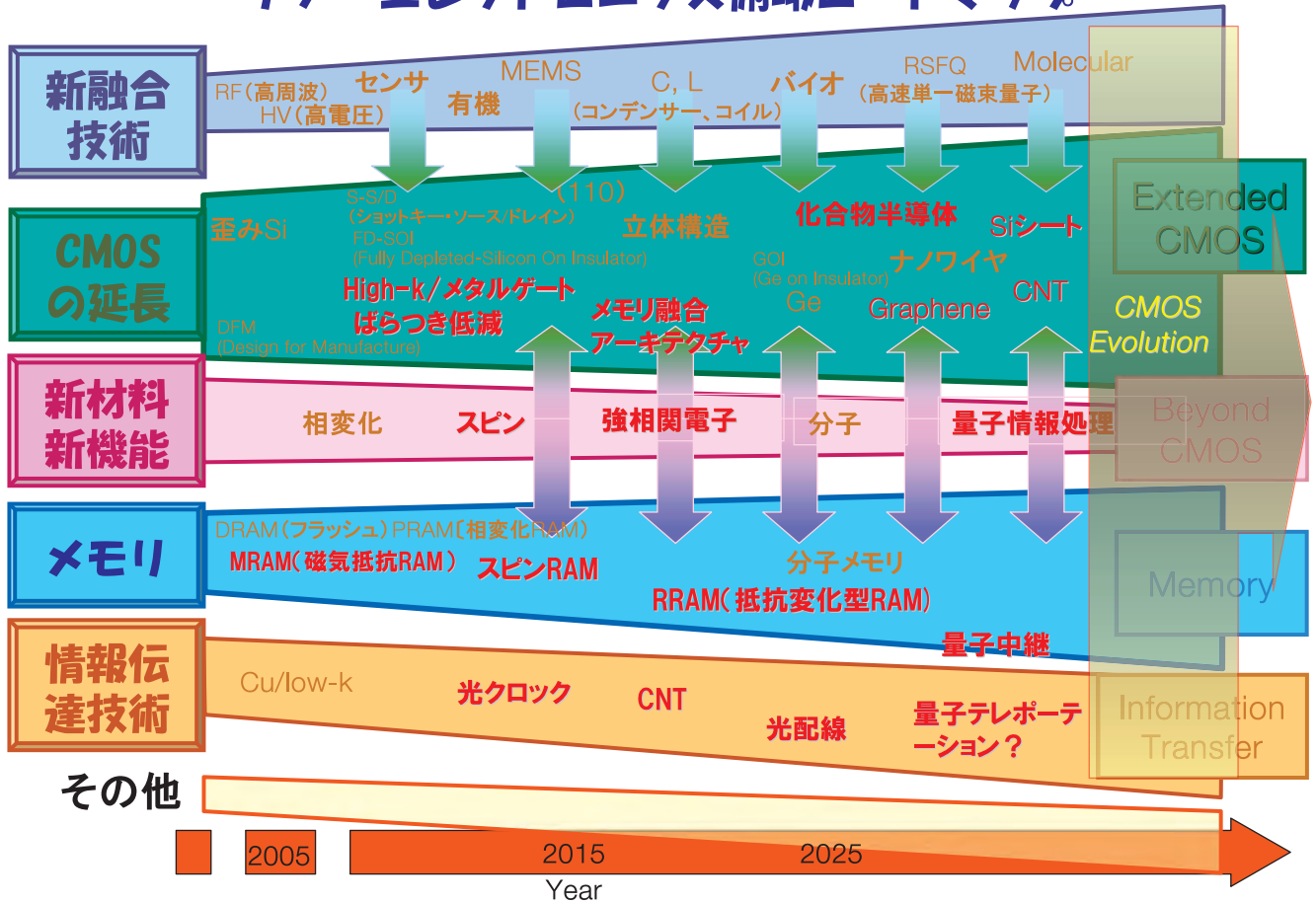
- ・More Moore:微細化+材料、More than Moore:MEMS、バイオ。
- ・究極性能のトランジスタをナノ技術(新機能材料の設計)で構築。
- ・置き換え技術ではなく、Siにアドオンするナノテクが重要。
- ・異種分野融合をオンSi、CMOSで進める。
- ・コストの問題：ロードマップに従う必要はない、時間が必要。

3. ナノ研究の方向性・体制

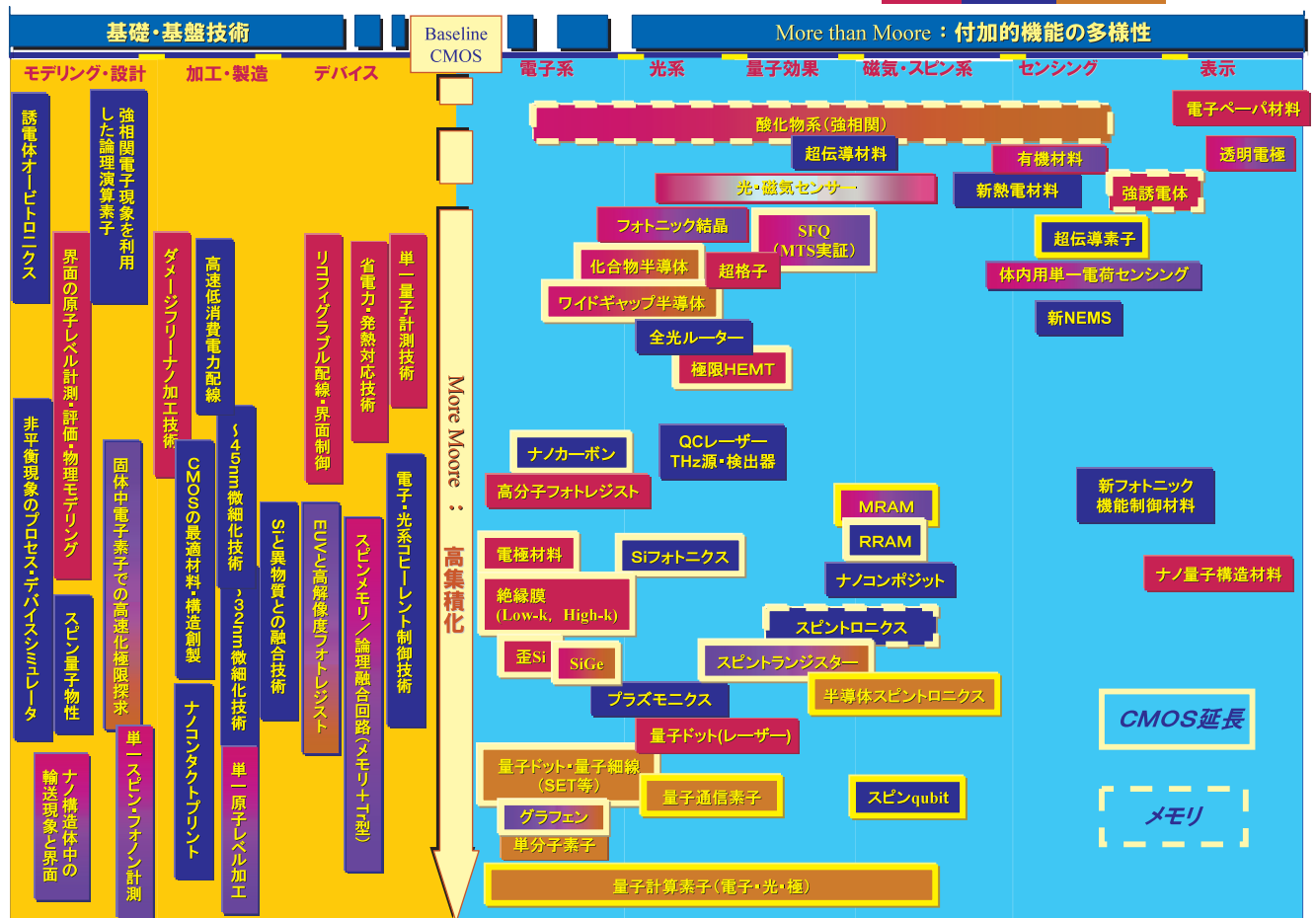
- ・“on Si”でナノテクを展開。
- ・具体的な製品ターゲット(システム)からブレイクダウン。個別デバイスに注力。
- ・日本のナノ研究に欠けているもの：成熟を目指した実用化へのシフトの欠如。欧米はベンチャーキャピタル、ベンチャー、ファウンドリで実用化。
- ・明確な「ものづくり」の目標を設定した研究拠点、産学連携コンソーシアムの設立。
- ・公的研究機関、大学院における集積化センター実習教育、Si CMOSとナノ構造とサイエンスとの融合。
- ・開発は日本だけでなくアジアとの連携も。

4

ナノ・エレクトロニクス俯瞰ロードマップ



ナノ・電子情報材料分野の科学・技術領域の俯瞰



「ナノ・電子情報材料」の開発戦略

More Moore

- ・CMOSトランジスタ動作原理の微細化限界：異種材料超高集積システム。
- ・微細化技術と異種材料集積化・界面制御と基礎物性解析等の技術融合。
- ・低消費電力と低コスト化を目指したCMOS設計（アーキテクチャ）。

☆ CMOS Evolution（CMOSの進化型）をめざして。

- ・Beyond CMOS→CMOSを凌駕・補完できる技術に注力。
- ・More Than Moore(X on Si)/シンセシス型研究によるCMOSの多機能化に注力。
- ・蓄積されたMore Mooreによる知見・技術を適宜融合。
- ・府省連携で異分野間の学際研究システム及び共同利用施設（ファシリティ）の構築をめざすイニシアティブ。
- ・ナノ構造、電子輸送、界面制御等のサイエンスをまきこむ研究開発。

- ・“XonSi”による異種材料・異分野融合のためのコンソーシアム。
- ・スピン融合不揮発性・超低消費電力ロジック。
- ・省電力技術、さらに低コスト化、高速化、高集積化の追及。
- ・機能の多様性を目指した要素材料技術開発。
- ・材料物性基礎開発研究との融合。サイエンス、ナノ構造、電子輸送、界面制御。

More than Moore / Beyond CMOS

研究開発戦略センター報告書

**「ナノ・電子情報材料戦略」検討会
報告書**

CRDS-FY2006-WR-13

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター

平成19年3月

田中グループ

(ナノテクノロジー・材料分野担当)

〒102-0084 東京都千代田区二番町3番地

電話 03-5214-7483

ファクス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

平成19年3月

©2006 JST/CRDS

許可なく複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
