

ちよつとひと息・電子技術の話

Ver4.0

(C) 1996-2018 Sumiaki Takei All rights reserved

- MOS 微細化限界とスケーリングの話
- 青色発光ダイオードの話
- 球面半導体の話
- 電気二重層キャパシタの話
- 私の会社時代と技術の栄枯盛衰
- 世界最初の電子式デジタルコンピュータの
発明者は誰か。(ENIAC 神話崩れる)
- 日本人が先にダーリントン回路を考案していた

MOS 微細化限界とスケーリング技術

なぜ微細化するといのか

MOS トランジスタ等を微細化し、同時に電源電圧や不純物濃度などがある一定の比率で変えると、集積回路はより高性能・高集積になる。デバイスを微細化することをスケーリングと呼んでいる。

最近の雑誌等を見ていると CMOS の微細化限界は $0.02\ \mu\text{m}$ 前後と言われています。14 年前(1989 年 5 月号)の日経マイクロデバイスの記事を見ると $0.1\ \mu\text{m}$ が限界であるといった記事が掲載されていた。この間に技術が進歩しさらなる微細化が可能になったのであろう。

私が会社に入社(1978 年)した時に電卓用の CMOS・LSI の設計を確か $6\ \mu\text{m}$ ルールでやっていた。1989 年 3 月に辞める時にはマスク ROM を確か $2\ \mu\text{m}$ で設計していたと思います。私の実体験としてこの 11 年間だけでチャンネル長は $1/3$ に短縮されている。

なぜ、スケーリングするのかを考えてみましょう。

デバイスの高速化によるチップの高性能化 [なぜ、微細化で高速化・高性能化されるかは次の Dennard のスケーリング理論のところで紹介します]、チップサイズの縮小又は集積度向上による機能単価の低減・コストダウンそれに大規模システムのワンチップ化が可能になるといった利点がある。

集積度の向上については、2003 年には 1 チップ当り 1 億トランジスタ、2010 年頃には 50 億トランジスタ、2015 年頃には人間の脳のニューロン数 150 億を越えると言われています。これだけのトランジスタを実装すれば計り知れないシステム・人工知能が実現できるであろう。過去 30 年の間に約 150 万倍の集積密度の進展を見せ、30 トン以上もあった計算機が 1 キログラム以下で実現でき性能も向上している。

インテル社のゴードン・ムーアによって提唱された法則 (Moore の法則) に沿って現在までの 25 年間発展してきた。この法則は「LSI に集積可能なトランジスタ数は 1.5 年で 2 倍ずつ増え続ける」という経験則である。

キルビーによる集積回路の発明からわずか 50 年あまりでこのような想像を絶する集積回路が実現するとだれが予想できたでしょう。微細化技術の発展に負うところが大きい。

DRAM についてはスケーリングによって集積度が向上し、ビット単価の低減が継続的に実現されてきた。1M ビット品までは各世代のチップ単価は約 1.57 ドル ($\sqrt{2}$)、いわゆるルールであったが 1M ビット品以降はチップ単価が前世代の 2 倍の価格になる、いわゆるバイルールになってきた。DRAM の価格の推移を見るとスケーリングによるビット単価の低下でユーザー側にメリットがあったことはもちろんであるが、実はメーカー側にもメリット(利益)があった。これはチップの面積あたりの単価が上昇しており、チップ面積自体が各世代で約 1.2 倍になることからメーカーにも利益が出る理想的な状況が続いていた。

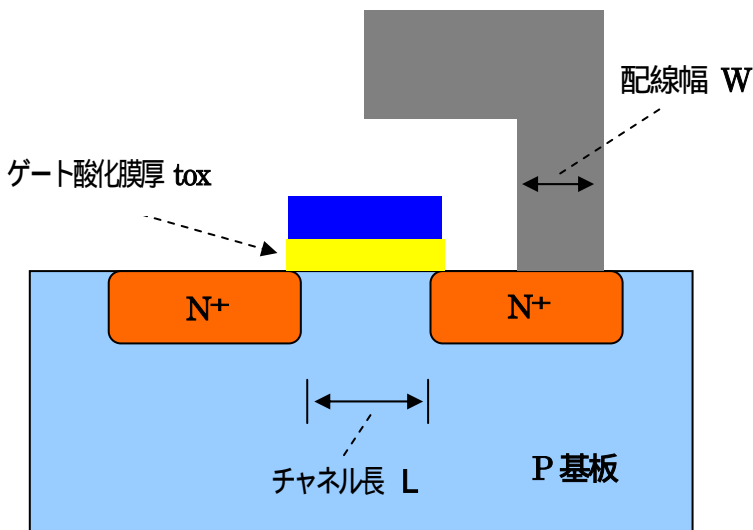
DRAM はスケーリングにより大きな市場に拡大し、過去 20 年以上 25% という驚異的な成長を遂げてきた。

ただ、スケーリングで性能向上が約束されるのは真性の MOSFET であって、配線・コンタクト・電極などの外因性の要素はその対象になっていない。従って寄生抵抗や寄生容量が性能向上を阻害する要因になっている。詳細は次のスケーリング理論のところで紹介する。

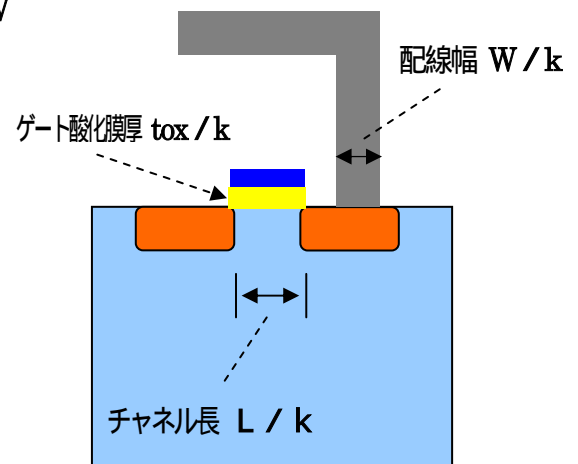
Denard のスケーリング理論

ロードマップという言葉がDRAMやマイクロコンピュータの容量・性能に関してよく目にする。ある線上に沿って開発していくというものであるが、その道を指し示した第一原理はデナードのスケーリング理論であった。このスケーリング（微細化）を達成すべく技術が発達してきた。

スケーリング前の NMOS



スケーリング後の NMOS



スケーリング(比例縮小則) については IBM 社のデナード(R.H.Dennard) により 1974 年に初めて提案された。MOS トランジスタを 3 次元的に微細化し、同時に電源電圧や不純物濃度を系統的に変化させることにより、MOS デバイスの高集積化・高性能化が可能であることが発表された。彼の発想の原点は MOS のチャネル長を短くすれば信号がドレインからソースに伝達する時間が短くなり動作スピードが向上するはずだというものである。

今、**デバイスの寸法** (チャネル長 L ・チャネル幅 W ・ゲート酸化膜の膜厚 t_{ox}) と電源電圧 V_{cc} を $1/k$ 倍に、**不純物密度** を k 倍にすると他の電気パラメータがどのように向上するのか計算してみよう。

(イ) 集積密度

$$\frac{\text{スケーリング後の面積}}{\text{スケーリング前の面積}} = \frac{\frac{L}{k} \times \frac{W}{k}}{L \times W} = \frac{1}{k^2}$$

$\Rightarrow \frac{1}{k^2}$ に面積が縮小できる。

(ロ) 電 流 I_{DS} (飽和領域で計算)

$$\frac{\text{スケーリング後の電流}}{\text{スケーリング前の電流}} = \frac{\frac{1}{2} \frac{\epsilon}{(\frac{t_o}{k})} \mu \frac{(\frac{W}{k})}{(\frac{L}{k})} (\frac{V_{GS}}{k} - V_{th})^2}{\frac{1}{2} \frac{\epsilon}{t_o} \mu \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2} = \frac{1}{k}$$

⇒ 電流は $\frac{1}{k}$ になり消費電力が減る

$V_{GS} \gg V_{th}$ とし V_{th} はスケーリングしない
誘電率 ϵ , 移動度 μ は変動なしの設定。

(ハ) ゲート容量 C_g

$$\frac{\text{スケーリング後のゲート容量}}{\text{スケーリング前のゲート容量}} = \frac{\frac{\epsilon(\frac{W}{k})(\frac{L}{k})}{\frac{t_{ox}}{k}}}{\frac{\epsilon WL}{t_{ox}}} = \frac{1}{k}$$

⇒ ゲート容量は $\frac{1}{k}$ に減少する

(ニ) 消費電力/ゲート P

$$\frac{\text{スケーリング後の消費電力}}{\text{スケーリング前の消費電力}} = \frac{(\frac{I_{DS}}{k})(\frac{V_{CC}}{k})}{I_{DS} V_{CC}} = \frac{1}{k^2}$$

⇒ 消費電力は $\frac{1}{k^2}$ に減少する

(ホ) 配線抵抗 R

$$\frac{\text{スケーリング後の配線抵抗}}{\text{スケーリング前の配線抵抗}} = \frac{\frac{\rho(\frac{l}{k})}{(\frac{t}{k})(\frac{w}{k})}}{\rho \frac{l}{A}} = k$$

ただし、 ρ : 抵抗率 t : 配線厚 l : 配線長 w : 配線幅
 A : 配線断面積

⇒ 配線抵抗は k 倍になる

(へ) 回路遅延

$$\frac{\text{スケーリング後の遅延時間}}{\text{スケーリング前の遅延時間}} = \frac{\frac{(\frac{C}{k})(\frac{V_{cc}}{k})}{\frac{I_{DS}}{k}}}{\frac{CV_{cc}}{I_{DS}}} = \frac{1}{k}$$

⇒ 回路遅延は $\frac{1}{k}$ 倍され高速化

この他、詳細な計算は紹介しないが下記パラメータのスケーリング結果を示す。

配線電流密度	k 倍	配線遅延	1 倍
コンタクト抵抗	k ² 倍	消費電力密度	1 倍

少し複雑な式も入っていますが、上記の計算結果よりスケーリングにより特性の向上が図れることが理解できると思います。また一方で配線抵抗は単純なスケーリングでは配線抵抗等が増大することも明らかになりました。

従って一律にスケーリングするのではなく、選択されたパラメータのみをスケーリングする方法が行われています。

スケーリングの問題点と今後の微細化プロセス技術

1980 年代、DRAM 等では TTL ロジックとのコンパティビリティ（直接接続）のため電源電圧は 5 V が標準であった。1970 年代後半からデバイス寸法等はスケーリングが実施されてきたが電源電圧はスケーリングされなかった。微細化によりデバイス内部の電界強度は増大し続け信頼性の確保が難しくなって来た。とうとう 1990 年代初めにチャネル長が 0.5 μm の段階になって電源電圧は 3.3 V に移行し始めた。2000 年代に入りチャネル長が 0.15 μm 程度になると電源電圧は 1.5 V 程度に低下させている。現在（2003 年）はチャネル長 0.1 μm、電源電圧 1 V の時代に突入している。

その間、ウェーハ径はチップ面積の増大と共に長大化して大量生産による低コスト化に寄与し、電源電圧は微細化に合わせて低減化され低消費電力化に貢献しました。

また、微細プロセスでの高歩留り化のために、メモリ集積回路を中心に冗長構成技術が開発され、ギガ bit 級の DRAM 開発が可能になりました。

トランジスタを極限まで微細化していくと、さまざまな問題が起きてきます。たとえば、スケーリング則に従って、ゲート絶縁膜を薄くしすぎると、電子のトンネル効果によってトンネル電流が流れてしまい、絶縁膜の絶縁体としての働きは失われ、トランジスタとして機能しなくなってしまう。（量子効果）

発熱の問題もあります。現在、コンピュータの CPU の単位面積あたりの発熱量は、ホットプレートと同じ程度と言われています。しかし、集積度をそのまま上げていくと、CPU の発熱量は、さらに大きいものになってしまい、単位面積あたりの発熱量は、原子炉と同程度にまでなると予想されます。

今後さらにスケールリングを進めるにはいくつかの課題を克服しなければなりません。ここでは4つの新しい技術について紹介します。

(イ) **配線抵抗の増大対策**・・・配線を単純にスケールリングすると配線抵抗が増大することは先ほどの計算で明らかになりました。

銅の抵抗率 (1.67×10^{-6} Ω・cm) は従来のアルミニウム配線に比べ60%程度抵抗が低いいため、配線遅延を減らす手段として注目されています。又、銅配線は信頼性の面でも有効である。配線に電流が流れる時、電子の衝突によって金属原子が移動するエレクトロマイグレーションという現象があるが、銅配線はアルミニウム配線よりこの現象が起こりにくいと言われている。

1998年IBM社は銅配線を世界に先駆けて製品に導入しました。

(ロ) **low - k 材料**・・・寸法をスケールリングする時に、配線間の間隔(横・縦方向)が短縮されると配線間の容量は増大する。配線による信号遅延は配線抵抗と配線にぶら下がっている負荷容量や寄生容量の積で決まる。寄生容量を減らすために配線の層間絶縁膜の誘電率を下げる必要がある。従来から使われている二酸化シリコン SiO_2 では限界にきたのである。

容量Cは $C = \epsilon \cdot S / d$ で表され、誘電率と配線の面積に比例し、配線の間隔に反比例する。微細化によって配線間の距離が小さくなるため寄生容量は増大する。配線面積が小さくなるので多少緩和されるが効果は小さい。そこで誘電率の低い材料を使おうと各社が研究している。シリコンの比誘電率は約4.0であるが、最近注目されているのが比誘電率が約2.0とシリコンの半分の値を持つ有機熱硬化性樹脂である。

(ハ) **high - k 材料**・・・配線に関してはlow - k材料が必要であるが、MOSトランジスタにおいてはスケールリングによってゲート酸化膜が薄くなりすぎるといいう問題が生じる。先ほども少し触れましたが量子効果により物理的に絶縁膜としての機能がなくなってしまう。ゲート電極と基板の間に恒常的に漏れ電流が流れるため消費電流が増大してしまう。現在の二酸化シリコン SiO_2 よりも誘電率が高い材料をゲート酸化膜材として使うことにより解決できると言われている。 Al_2O_3 など多くの材料が研究されているが、ゲート電極材との相性の問題もあり現在模索状態である。

(ニ) **SOI 基板**・・・集積回路の動作速度と消費電力を解決する方法としてSOI基板が注目されている。SOI基板とはシリコン基板とトランジスタの間に SiO_2 を挿入した構造の基板である。トランジスタの寄生容量が減らせるので通常集積回路より動作速度で30%アップ、消費電力で半減が可能と言われている。

トランジスタの空乏部分の違いで、部分空乏型と完全空乏型の2種類がある。

●GaN系青色発光ダイオード基本特許

1. GaN系青色発光デバイス開発の歴史

1993年暮れ、四国の一中小化学メーカーが世界をアッ！と言わせた。実現は21世紀と言われていた高輝度青色発光ダイオード（現在光度2cd）を開発し、量産に乗り出したのだ。開発したのが中小企業であったことと、高輝度青色発光ダイオードの材料が期待されていたZnSeでなくGaNであったことに二度驚いた。さらに1995年には6cdという高輝度の緑色発光ダイオードも開発している。そして1998年末にはGaN系青紫色レーザーのサンプル出荷が始まった。GaN系発光デバイスの開発、量産で**日亜化学工業**はダントツのトップを走り続けている。その中心人物が**中村修二**である。彼については本ページの独創的日本人達でも紹介している。

それまでの青色発光ダイオードはSiCを材料として使っていたが、光度が10mcd程度ときわめて低かった。LED自体は今から約30年前の1968年にGaAsPによる赤色ダイオードが初めて製品化されている。GaNなどのⅢ族窒化物半導体はウルツ鉱構造を形成した場合、直接遷移型バンド構造となり可視光領域および近紫外域の光が伝導帯と価電子帯の遷移間エネルギーに対応することからZnSe, ZnSのⅡ－Ⅵ族半導体と並んで1960年代後半から研究されていた。GaNの発光が初めて報告されたのは、1971年スタンフォード大学のH. P. MaruskaとRCA研究所のJ. I. PankoveらによるMIS構造のダイオードであった。しかし基板との格子不整合に起因する数々の問題のため、1970年代後半には多くの研究者がZnSe系の研究に移っていた。そんな中で、あくまでGaN系の研究を精力的に続けていたのが**赤崎勇**である。1989年にはGaN系のPN接合で青色発光ダイオードを低輝度ではあるが作成している。ただ実用化できるほどの高輝度青色発光ダイオードにおいて日亜化学工業の中村修二に先を越されたため、最近は新聞などにあまり出ることはないが、彼の基礎研究が後の研究者たちの成果につながったことは間違いない。彼はGaN系発光デバイスの基礎を築いた功労者なのである。

発光ダイオードの光度を高めるためにはMIS構造でなくPN接合構造が必要である。しかし1980年代半ばではn型GaNはできても**p型GaNは何故か作成が困難**であった。この問題も赤崎らによりGaNにMgをドーブ後、電子線照射により可能となることが報告された。1989年に作成したPN接合での青色発光では1%程度の量子効率を得ている。しかし中村修二は電子線照射のなす本質的意味を見抜き、電子線照射をしなくても熱処理（アニール）だけでp型化できることを発見した。実はこのアニール処理でよいというのが、日亜化学工業が1998年に取得したGaN系発光ダイオードの**基本特許(特開平05－183189)**である。これについては後でもう少し詳しく述べる。

現在GaN系の発光ダイオードはPN接合形からInGaN/AlGaInダブルヘテロ構造、さらに単一量子井戸構造（SQW）へと発展し、青色で光度2cd、緑色で6cdが日亜化学工業により、開発、量産されている。

2. 青色発光デバイスが注目される理由

(1) DVD用記録再生用の光源

CD, DVDといった光ディスクの記録密度は一般にレーザー光の発振波長の逆数の二乗に比例する。発振波長が半分になれば記録密度は約4倍になると言われている。光ディスク装置は対物レンズで小さく絞り込んだレーザー光によってディスク上の微細なピットを記録再生する。つまりレーザー光が小さくなればそれだけディスクの記録密度が高められる。

現在のCDの光源は波長780nmの近赤外半導体レーザーだが、もし**GaN青紫色レーザーを使えば波長が410nm**前後であるため今のCDの4倍程度の面記録密度が期待できる。（さらにディスクの改良で面記録密度は高くなる）。**現行のDVDは波長640nm**程度の赤色半導体レーザーで規格を決めたので、単純に青紫レーザーを使うだけで現行のDVDの約2.5倍の面記録密度が得られる。次世代のDVDは21世紀に登場するでしょうが、片面15GB程度のものが出てくるでしょう。

GaN系デバイスは、20年以上前から光励起でレーザー発振が観測されたのみで、電流注入によるレーザー発振の報告はこれまでなかった。**1995年末にGaN系の青紫色半導体レーザーによる室温パルス発振**が、中村修二により世界で初めて報告され1998年末には8000時間以上の寿命が確認された。発振波長は420nm、光出力は約20mWである。1998年末からサンプル出荷が始まり、1999年2月からは紫色レーザー（波長400nm、出力30mW）が製品として販売される。いよいよ実用化は目前に迫った。

(2) フルカラーディスプレイの実現

2cdの青色、6cdの緑色の発光ダイオードが登場したことで、既存の赤色発光ダイオードと組み合わせることで、数cd以上のフルカラー表示が可能になった。具体的な用途としてはビル、球場などに設置する100インチ以上のディスプレイ、信号機、各種機器の表示用（例えば自動車のブレーキランプや液晶パネル用光源など）またイメージセンサ用光源など用途が格段に広がった。

日亜化学工業では**将来の照明用電球の置き換え**を狙っている。赤、青、緑の3色を混合すれば白色が得られる。これを照明に使うというのである。また日亜化学工業では青色ダイオードと得意の蛍光体を組み合わせて、白色ダイオードを実際に作成している。確かに従来の白熱電球や蛍光灯といった光源は真空管方式であるため、信頼性、耐久性、発光効率がよくない。電気回路のほとんどが固体素子に置き換わっている現在、固体化されていないのは光源だけである。

3. GaN系高輝度青色発光ダイオードの開発

ここでは日亜化学工業の中村修二による高輝度青色発光ダイオードの開発について、なぜ実現できたのかその技術的背景について2点に絞って述べる。1つは高品位GaN膜の作成技術、2つめはp型GaN膜の作成技術である。また、日亜化学工業はGaN系デバイスに関する数多くの特許を有しており私が調べただけでも100件以上あった。その一部を下記に一覧で示した。興味ある方は中身を調べてみて下さい。

(1) Two-Flow-MOCVD法によるGaN膜作成技術

中村はGaN膜を作成する上でTwo-Flow法というやり方を考案した。これは2つのノズルから別々に原料ガスを供給する。原料ガスは基板に対してほぼ平行に流れるガス（Main-Flow）と基板に対して上から主流を押圧するガス（Sub-Flow）とに分けて供給される。この方法は高温になった基板周辺の熱対流を副流が押さえることにより、基板表面上に充分な原料を供給することができる。結果として成長速度の制御性がよくなり、結晶欠陥も低減する。

当時平滑な膜を作るためにGaN膜の下に下地層（バッファ層）を設ける方法が赤崎らにより行われていたが、彼らはバッファ層としてAlN膜を使っていた。AlN層は成長条件が広く作りやすかったが、高品位膜は出来なかった。何故同じGaN膜を使わなかったのか。使っても彼らがやっていた当時の作り方では出来なかったのである。中村はだれもが考えるようにバッファ層としてGaN膜を使うことにした。低温で成長したアモルファス状態のGaN膜上に高温でGaN単結晶を成長させてみよう思い、Two-Flow法でやってみると意外にもあっさり出来た。実はバッファ層にGaN層が使えたのは当時中村のやり方だけだったのである。本当にラッキーだと言える。

(2) アニール(熱処理)による p 型GaN膜の作成

PN接合で発光ダイオードを作るには n 型、 p 型のGaNが必要である。 n 型はGaN膜に不純物をドーブすれば容易に製作できた。しかし p 型GaN膜は製作が何故か困難であった。当時赤崎らのグループはGaN膜に不純物としてMgを加え、電子線を照射すれば p 型GaN膜ができることを報告していた。中村はこの方法を追試したがうまく p 型化しない。たまたま試料台が加熱されている時に電子線を照射すると試料が p 型化した。ここで中村はいろいろ調べ検討した結果、電子線を照射するから p 型化するのではなく、試料が高温になるつまりアニールされるから p 型化されるのだという結論に達する。この結論は直ちに特許出願され 1 9 9 8 年までに日本、アメリカ、ヨーロッパ各国で成立している。
(特開平05－183189 U. S. Patent 5, 3 0 6, 6 6 2)
この特許は今のところGaNを p 型化する唯一の量産技術である。したがってGaN系発光デバイスの基本特許となる可能性がある。

中村は従来GaN膜が p 型化出来なかった原因を突き止め、明快な理論を発表しており他の研究機関でもこの考えが容認されている。
簡単に説明すると、水素原子によるパッシベーションという p 型化補償機構の理論である。反応ガスに使っているアンモニアガスが分解してできたHがGaN中のMgに結合してMg-Hを形成し、アクセプターを不活性化し抵抗率が高抵抗になる。400度以上の温度でアニールするとMgHから水素原子が解離されMgアクセプタが活性化し抵抗率は低抵抗へ変化する。
つまりMgアクセプタを活性化(GaNの p 型化)するには400度以上の温度でアニール処理して水素解離してやればよいということであり、それまで赤崎らが主張していた電子線照射によるMg原子のGaサイトへの移動による p 型化という考えは完全に否定された。

●日亜化学工業の有する特許例

- 特開平10 - 284801 窒化物半導体レーザダイオード
- 特開平10 - 256608 L E D 表示器及びそれを用いた信号灯
- 特開平10 - 242587 窒化物半導体素子及び半導体レーザダイオード
- 特開平10 - 242513 発光ダイオード及びそれを用いた表示装置
- 特開平10 - 233549 窒化物半導体レーザダイオード
- 特開平10 - 228249 発光ダイオード及びそれを用いた L E D 表示装置
- 特開平10 - 190066 発光ダイオード及びそれを用いた L E D 表示装置
- 特開平10 - 178203 発光素子及びそれを用いた発光ダイオード
- 特開平10 - 163531 周縁に電極を有する発光ダイオード
- 特開平10 - 107406 フロー半田用基板及び L E D 表示器
- 特開平10 - 093138 窒化物半導体発光ダイオードを備えた表示装置
- 特開平10 - 091091 発光ダイオードを用いたディスプレイ
- 特開平10 - 056208 発光ダイオードの製造方法
- 特開平10 - 022529 発光ダイオード及びそれを用いた表示装置
- 特開平09 - 283806 L E D 表示器及びそれを用いた表示装置
- 特開平09 - 246604 発光ダイオード及びそれを用いた表示装置
- 特開平09 - 181394 窒化物半導体レーザダイオード
- 特開平09 - 148247 n 型窒化物半導体の成長方法
- 特開平08 - 335720 窒化物半導体発光ダイオード
- 特開平08 - 335719 窒化物半導体発光ダイオード
- 特開平08 - 162671 窒化物半導体発光ダイオード
- 特開平08 - 148717 青色発光ダイオード
- 特開平07 - 235729 窒化ガリウム系化合物半導体レーザ素子
- 特開平07 - 212537 読取用標準光源の作成方法及び光源装置
- 特開平06 - 244458 青色発光ダイオード
- 特開平05 - 110139 窒化ガリウムアルミニウム半導体の結晶成長方法。
- 特開平05 - 063236 青色発光ダイオード

4. 赤崎勇と豊田合成の関係

1 9 9 8 年現在GaN系の青色発光ダイオードを量産、販売しているのは世界で3社しかない。日亜化学工業、豊田合成、アメリカのCreeResearch Inc. の3社である。高輝度緑色発光ダイオードを量産、販売しているのは日亜化学工業1社である。
この中で豊田合成という会社について私自身不勉強のため、このGaNダイオードの資料調査をするまで知らなかった。この会社は1995年10月からGaN系高輝度青色発光ダイオードを量産、販売している。特許を調べていて気がついたのですが、この会社はGaN系のデバイスに関して赤崎勇との共同出願特許が大変多い。いろいろ調べると赤崎教授が技術指導しているとのこと。そのおかげでここまでの実力を付けてきたようである。

ここで彼について少し紹介しておきます。
京大理学部卒業。1964年名古屋大学・電子工学科・助教授から松下電器産業に転身し、このころからGaN系デバイスの研究をしていたようである。1981年にはまた名古屋大学に教授としてもどり、1992年定年退職後は名城大学の教授として活躍されている。大学と企業が共同研究し、特許も共同出願するというアメリカ形のやり方で大変素晴らしいなと思います。赤崎勇さんにはGaN系デバイスの第一人者として、中村修二さんをアッ！と言わせる逆転満塁大ホームランの発明・発見を期待しております。赤崎教授と豊田合成の共同出願特許をいくつかあげましたので興味ある方は中身を調べられたらと思います。

●赤崎勇と豊田合成との共同特許例

- 特開平10 - 215000 窒化ガリウム系化合物半導体の結晶成長方法
- 特開平10 - 173227 G a N 系素子
- 特開平10 - 163577 3 族窒化物半導体レーザ素子
- 特開平10 - 145004 G a N 系発光素子
- 特開平10 - 041584 3 族窒化物半導体レーザダイオードの製造方法
- 特開平10 - 032189 3 族窒化物半導体のドライエッチング方法及び素子
- 特開平10 - 027924 窒素－3 族元素化合物半導体発光素子
- 特開平10 - 027923 3 族窒化物半導体発光素子
- 特開平09 - 199759 3 族窒化物半導体の製造方法及び半導体素子
- 特開平09 - 172200 窒化ガリウム系化合物半導体発光素子
- 特開平09 - 148625 3 族窒化物半導体発光素子
- 特開平09 - 129924 3 族窒化物半導体のエッチング方法及び発光素子の製造方法
- 特開平09 - 036424 3 族窒化物半導体発光素子及びその製造方法
- 特開平08 - 153933 窒化ガリウム系化合物半導体レーザダイオード
- 特開平08 - 116089 3 族窒化物半導体発光素子の製造方法
- 特開平07 - 297495 窒化ガリウム系化合物半導体レーザダイオード
- 特開平07 - 273366 I I I 族窒化物発光素子の製造方法
- 特開平07 - 202325 窒化ガリウム系化合物半導体レーザダイオード

球面半導体・基本特許

(1)球面半導体とは

ボール・セミコンダクター社は1996年10月に、**石川 明**によって設立されたベンチャー企業である。本社はアメリカ・テキサス州アレン市にある。石川はこの企業を起こす前まで、米国の大手半導体メーカー、テキサス・インスツルメント社の上級副社長であった。

彼が会社を退社(退職とは言いたくないそうだ)して起業すると言った時、家族は大反対であった。だってその時59歳で、日本で言えば定年退職して年金で悠々自適の生活をすると思うのが普通だろう。しかもシリコンボールに半導体集積回路を作る会社であると言えば、家族でなくてもそんな物にはできるはずがないと考えるのが普通である。「**普通**」という言葉を2度続けて使ったが、彼が普通でないからできた会社でもある。彼のイノベーションを信ずる先見の明がある方たちの名前が雑誌等でよく登場する。京セラの稲盛名誉会長、ICの発明でノーベル賞を受賞したジャック・キルビー、三井ハイテックの三井孝昭社長、ディスコの関家会長などさまざまな方がエールを送っている。

彼は40年近く、半導体関係の企業で働いてきて思うところがあった。

1つは、半導体集積回路の微細化技術が進むにつれ半導体工場を作るのに莫大な投資(数1000億円)が必要で、これに耐えられる企業は絞られてくるであろうということ。現在の半導体産業はマネジメントが入り込む余地はなく、投資力だけが勝負を決する産業になってしまった。しかもウェーハの大口径化が今後も進んだ場合、15インチ以上になるとインゴット生成から現状の技術では不可能という限界点を迎える。今の半導体技術は微細化と大ウェーハ化という技術面と莫大な投資というコスト面の両方で限界が見えている。

2つ目は、自分が長年温めてきたアイデアである球面半導体を自分の手でやってみたい。しかも球面半導体であれば新工場を作るのに100～200億円の投資で済む。さらに大事な事は、今の半導体・**集積回路は各社の特許の網**で保護されており、新規に半導体会社を起業することは特許訴訟のリスクを負いながらということになる。球面半導体であれば独自技術であり何の特許にも抵触しない。(つまり石川 明が球面半導体の特許を出願するまでそのような特許は存在しなかった。)

従来の半導体チップは4角形のシリコンチップの表面を平坦に加工して作る2次元集積回路である。これに対し球面半導体はシリコンを球状に加工し、その表面に集積回路を作製する**3次元集積回路**である。例えば従来のシリコンチップで1 mm角であればチップ面積は1 mm² である。球面半導体で直径が1 mmであれば表面積は4πr² であるから3.14 mm² となり3倍以上の面積が得られ**集積度を格段に向上**できる。現在直径1mmのボールシリコンを使っているが、小さいサイズのボールシリコンについては、遺伝子治療などを視野に入れた脳細胞と同じサイズの直径20μmのICを作製することを計画している。

1998年7月にシリコン球のサンプル製作、10月13日には球面トランジスタ(単体)形成に成功した。この意義は大きい。ジャック・キルビーが IC (集積回路) を発明してちょうど40年後である。**新しい集積回路の歴史**が日本人の頭脳で始まろうとしている。

1999年3月にはNMOSインバータ回路の動作を確認、年末には複数の回路を同時に動かすIC化にも成功、またこの年の10月には太陽電池用ソーラセルをサンプル出荷し2000年より量産、2000年12月には3次元加速度センサーのサンプル出荷、2001年初めには3次元傾斜計を試作、2001年末から量産を予定している。

石川 明は強調する。
「新しい発想をこのまま埋もれさせておくのは惜しかった。ジャック・キルビーが40年前にICを開発したとき誰もこれが今日最大の産業になるとは思わなかったし、本人もそう思っていませんでした。同じくらいのインパクトをもたらす力が、ボールにもあると信じています。
ベンチャー企業が成功するためには社員が120%の力を出すことが重要である。そのために、管理社会に反対し、社員の自己管理・自己責任を徹底させている。現在のところ、会社には組織図らしきものは一切ない。社員は結果させ出せば何時に出社しようが退社しようが自由である。」
人間主義と実力主義の調和が石川 明の経営哲学である。

●平面半導体と球面半導体の比較

	平面半導体	球面半導体
チップ形状	平面(2D)	球面(3D)
半導体材料	8-12インチウェーハ	直径1mmの単結晶シリコン
製造上の特許制約	あり	なし
投資額	数1000億円	数100億円
クリーンルーム	あり	なし(チューブを使用)
生産ライン	各製造工程で自動化	全工程自動化
パッケージ	あり	なし

(2)球面半導体の応用分野

形状が球であるが故の応用は結構あると思う。球面半導体を機械的に加工したり、シリコンボールを導体で巻いてコイルを作ると、各種センサーが開発できる。現在ボール社が開発しているのは3次元の加速度センサーや温度センサーなど各種センサー、医療分野並びに光発電分野である。

①**加速度・傾斜センサー**・・・球の特性を生かして3次元の静電浮上型・加速度・傾斜センサーが実現できる。これはシリコンボールの外側に特殊な外殻(シェル)を形成し、マイクロマシン技術を用いてシリコンボールとシェルの間に数 μm の空間を作り、シリコンボールはシェルの中で自由に動ける。加速されたり傾斜した時、シリコンボールがシェル内で転がることにより、ボールとシェルの間隔が変化するのでその静電容量変化を検出して電気信号処理するというものである。これが製品化されれば車、エレベーター、遊技場、灯油ストーブなどの安全装置やおもちゃ、医療用ペースメーカーなど応用分野はかなり広い。球であるため、球面の南極・北極・赤道上の4箇所に均等に電極が配置できるので、精度の高いセンサーが実現できる。

②**無線温度センサー**・・・温度検出回路、制御回路、RF回路を球面半導体に作り込み、コイルを巻けば電源を持たずに外部との無線通信が可能になる。つまり、高校物理で習ったように電波がコイルを貫くとコイルに電流が流れる。外部の送信機から電波を送れば球面半導体のコイルに起電力が発生し電流が流れる。この電源で球面半導体のトランジスタ回路を動作させることができる。そのためには、動作電圧が低く・消費電流の小さいCMOSTランジスタ回路を実装する必要があります。ただ、ある程度の電圧またはパワーがないと球面半導体から発する電波が遠くに届かないという課題がある。

温度を測定する用途というのはあらゆる所に存在する。空調、物流、人体、工場また最近話題のウェアラブルアプリケーションなど多岐にわたる。

③**太陽電池**・・・PN接合が出来れば太陽電池が作れる。ボール社として初の量産品として出荷している。球なので太陽光の受光面積が広くとれ平面よりは有利である。従来の太陽電池はそれを作製するためのエネルギーのほうが光発電より大きかったが、球面半導体による太陽電池は製造するエネルギーより発電できるエネルギーのほうが大きい。これは、変換効率が上がる単結晶をシリコンボールで作りやすいことも関係している。

ところで、私は提案します。**球面CCD**を作れば360度近くを同時に監視できる警報・監視または検査装置が実現できる。これらの装置はたくさんの応用分野があると思うが。

④**医療分野**・・・電子スポンジカウントと呼ぶコイルを巻き付けたボール半導体をサンプル出荷している。このICは医療機器(メス、はさみ、手袋など)に取り付けておき、手術の際に体内に置き忘れないかどうかを調べることが出来る。

将来的にはマイクロマシン技術と組合わせて薬と球面半導体(直径数 $10\mu\text{m}$)を体の患部に直接届けて、外部からの指示で薬を投与するドラッグ・デリバリー・システム(DDS)を構想している。

皮膚に埋め込んだり、錠剤とともに飲み込んだりして血液や胃腸などの体内の情報を収集し、体外へ情報発信できるセンサーチップの開発も進めている。これらのセンサーについては2002年の商品化を目指している。医療用の球面半導体を彼らは「メディカルボール」と呼んでいる。

ところで、私は提案します。**ファイアーボール**(私が勝手に命名)を作ればメスで外から体を切開することなく治療できるのではと思う。シリコンボールを体内に注入後、患部に到達したら外部から命令信号を送りシリコンボールの一部または全体を何らかの方法で100度近くまで熱して患部を焼き切る。治療が終われば常温に戻り、体外へ排出する。シリコン系のLSIであればかなりの高温でも動作させることは可能だと思う。昔見た「ミクロの決死圏」とかいった映画を思い出した。

(3)球面半導体の製造技術

ボールセミコンダクター社では、1998年の ”Ball Semiconductor Technology Conference” で球面半導体を製造する上で5つのキーになるテクノロジー(要素技術)を挙げている。

①Sphere Single Crystal

②No Contact Processing

③3D VLSI Design

④Spherical Lithography

⑤3D VLSI Clustering

①Sphere Single Crystal … シリコンウェーハはいくつかの会社で製造されているが、1 mm のシリコンボールはどれも作っていない。自分たちで製造するしかない。まず、直径2 mm のガラスチューブ(彼らはクリーンパイプと呼んでいる)に多結晶のシリコンを投入する。シリコンを熔融させるため高温プラズマ装置のトーチ内で上からシリコンの小粒を落とす。落ちていく途中で、一度熱を加えて溶ける寸前までもってきて、その後トーチの中でプラズマの炎により多結晶シリコンは熔融しながら自由落下(無重力状態)する。その後徐々に冷やして単結晶を製造する。もちろんこの状態では真球になっていないので、化学的・機械的に加工してほとんど凹凸のないシリコンボールを完成させる。最終的な精度は1mm± 0.1μm という真球である。

②No Contact Processing … 球面半導体の製造において一番の特徴はクリーンルームが不要ということだろう。2 mmのガラスチューブの中で全ての製造工程を全自動で行うというのだ。なかなかイメージが湧かない。しかもシリコンボールはガラスチューブの中で側面にぶつかることも無く浮いた状態で搬送し、最後まで連続処理できるという。これには流体力学の原理が使われている。CVD (Chemical Vapor Deposition ; 化学的気相成長)、エッチング、ドーピングや熱処理などを、各工程で必要なガスや液体をガラス管に封入して処理する。ガスにより酸化膜を作ったり薄膜をCVDする。液体が現像液や薬液であればそれぞれ現像やエッチングが出来る。次工程へは水と一緒にシリコンボールを次のガラスチューブまで搬送する。もちろん先ほども書いたように非接触で全てを行うそうだ。

図1に球面半導体の製造方法の概略図を示した。

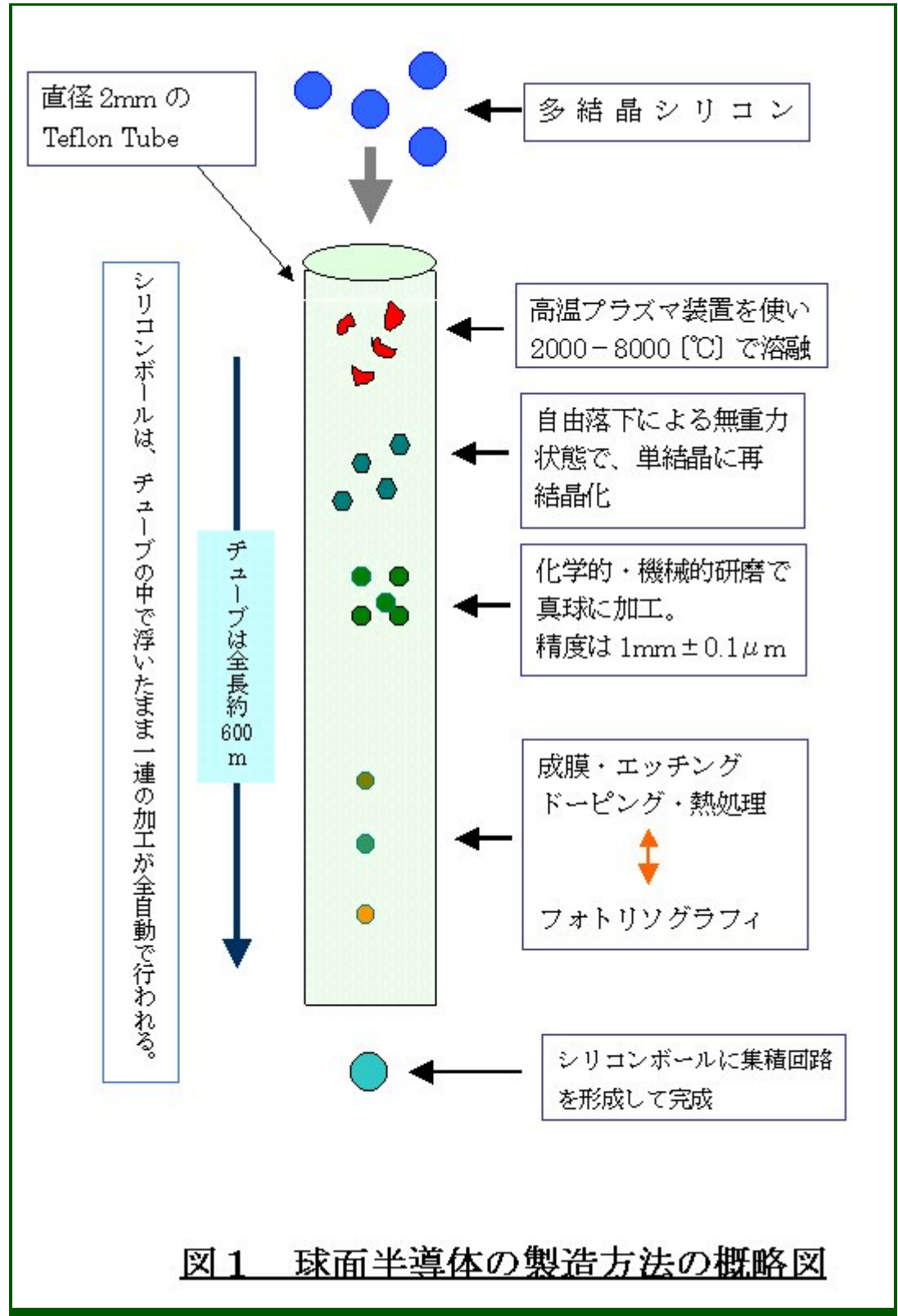


③3D VLSI Design … ボール社では、球面全体にひずみなく回路が作れ、レイアウト設計も自由に行えるABLE (Advanced Ball Layout Editor) というデザインツールを自社開発して使っている。このソフトの特徴は経度・緯度の絶対座標軸に加え、自由に原点移動ができ、相対座標軸もあるので設計の自由度が高い。しかも設計したデータを露光装置に送りそのまま露光できる。

④Spherical Lithography … 従来のLSIは何十枚というマスクを使って多くの前工程プロセスを処理しているが、対象物が平面でなく球面の場合の露光は不可能である。初期の頃は多面(45面)ミラー露光システムを使うことによって、1回の露光で球面の60%を処理していた。現在は、マスクを使わないシステムを開発して1回で全面露光している。ボール社はシリコン球にパターンを形成する露光技術の特許を有している。その基幹技術がDMD (微細な鏡を多数集めて光反射素子とする高速スイッチング素子)である。テキサスインスツルメント社の映像技術であるDLP (Digital Light Processor) 技術と組合わせて、DMDにより微細なドットを光学系で制御してシリコン球に露光するのである。DLPは投射型ディスプレイで使われている技術である。6個のDLPをマスクに見立て、CADから6分割されたビットマップ情報で各DLPのミラーをドライブして一括全面露光している。

ただ、②で非接触プロセスについて書いたが、実は露光についてはガラスチューブに入ったままでは技術的に難しくまだ実現していない。現在開発中とのこと。

⑤3D VLSI Clustering … 機能の異なる球面半導体をいくつも結合させて使うクラスタリングが今後の多機能化には重要である。結合には金のマイクロボールバンプ(直径80μm)を球面半導体の特定の場所につけ、それをお互いに熱圧着で接触させて機能の増加をはかる。現在16ピンを開発中である。平面集積回路だと違う種類のデバイスをオンチップに搭載することはプロセスが複雑になったり、コスト的に高くなり基本的に製造が難しい。ボール社では多機能を実現する手段としてこのクラスタリングを考えている。全く異なるデバイスでもクラスタリングで結合し1つのシステムとして構築できると考えている。



(4)球面半導体の基本特許

石川 明は1996年夏に長年勤めていたテキサス・インスツルメント社・上級副社長を退職し、その年末には球面半導体の特許を数件出願している。それらの特許は1999年ごろから特許成立しており、現在までかなりの特許を有している。今まで全く例の無かった技術なので、全ての特許が基本特許といってもよいが、ここでは石川 明が会社を設立した初期の頃に出願して成立した特許を基本特許と呼ぶことにする。その特許を4件ほど紹介します。

- US6004396 : Spherical shaped semiconductor integrated circuit
- US6069682 : Spherical shaped semiconductor integrated circuit
- US5945725 : Spherical shaped integrated circuit utilizing an inductor
- US5955776 : Spherical shaped semiconductor integrated circuit

ボール・セミコンダクター社では現在までに300件近くの特許を出願中とのこと。その中の一部を取り上げてみました。内容に興味ある方は調べて見て下さい。

球面半導体の特許一覧

Patent	Title
US5975011	Apparatus for fabricating spherical shaped semiconductor integrated circuits
US6052517	Spherical cell design for VLSI circuit design on a spherical semiconductor
US6030013	Method and apparatus for contactless capturing and handling of spherical-shaped objects
US6015464	Film growth system and method for spherical-shaped semiconductor integrated circuits
US5986348	Magnetic alignment system for bumps on an integrated circuit device
US5949557	Total internal reflection holography method and apparatus for lithography on 3-D spherical shaped integrated circuitl
US5877943	Clustering adapter for spherical shaped devices
US6136617	Alignment system for a spherical shaped device
US6130742	Exposure apparatus for a ball shaped substrate
US6117772	Method and apparatus for blanket aluminum CVD on spherical integrated circuits
US6077388	System and method for plasma etch on a spherical shaped device
US6074476	Non-contact processing of crystal materials
US6071315	Two-dimensional to three-dimensional VLSI design
US6061118	Reflection system for imaging on a nonplanar substrate
US6055928	Plasma immersion ion processor for fabricating semiconductor integrated circuits
US6053123	Plasma-assisted metallic film deposition
US6049996	Device and fluid separator for processing spherical shaped devices

石川 明はこう述べている。

「業界にいる知人に聞いても“発想は面白いが実際に作るのは無理だよ”と誰も相手にされなかった。これは、日本でもアメリカでもそうだったし、技術者でも経営者でもとにかく常識的に仕事をしている人はみんな同じことを言った。しかしやってみなければわからないし、成功すれば世の中を変えられると思った。そんな夢を私たちは事業化しようとしている。イノベーションやブレイクスルーには年齢は関係ない。心身ともに健康で、夢と、科学的合理性に裏付けられた目標を持ち、計算し尽くされたリスク・テイキングと目標を必達する意思があればそれは可能だと信じている。」

ナノゲート・キャパシタによる蓄電システム

● 二次電池の歴史

従来の二次電池は化学反応を使っており、充放電を数百回繰り返すと完全には元の状態には戻らず長持ちしない欠点があります

2次電池の歴史は1859年フランスのG.Planteによる鉛蓄電池の発明に始まります。この基本的原理は現在まで145年間変更がありません。これは長年基本原理が変わらず使われているという面では八木アンテナとよく似ている。

1899年にはW.Jungnerによるニッケル・カドミウム蓄電池、1901年にはT.A.Edisonによる鉄・ニッケル蓄電池が発明されている。1990年には松下電池工業や三洋電機、東芝電池からニッケル水素電池が発売されました。この年リチウム・イオン電池が旭化成の吉野 彰らによって発明されましたが、製品化はソニーエナジーテックが先に製品化しています。

1992年正月に電気二重層キャパシタに着目した岡村 勉は、エネルギー密度を高める方法を模索していました。今から10年以上も前に新電池としての電気二重層キャパシタに注目していたのです。岡村さんは、私が教員に転職して何かやりたいなと思っていた1990年の初めのころCQ出版のトランジスタ技術でパソコンによるPspiceの紹介をしていたので、よく存じ上げている人でした。

トランジスタ技術 (CQ出版) に1995年3月号から連載された電気二重層を使った電池に関するSPICEシミュレーションの記事をもう一度引っ張り出して読んでみましたが、今雑誌や新聞等で騒がれている基本的な内容が全て書かれていました。2001年2月号から連載された記事には実際の実験セットを使った解説があり、理論をそのまま実物へと実証しているところがすごい。

● 電気二重層キャパシタによる蓄電

電解液に導体を浸すと、導体に接する領域(界面)に1分子が並んだ薄い層を生じ、その外側の電解液に拡散層が広がる形になる。この内層と外層をまとめて電気二重層と呼ぶ。Helmholtzが1879年の論文で電気二重層 (Electric Double Layer) と名付けています。電気二重層の内層は電気分解が起こる電圧より低い範囲では電流は流れず、ほぼ完全な絶縁状態です。実際の電気二重層キャパシタ(図1参照)はこれを絶縁膜として正負極それぞれのキャパシタが直列になった状態のものを言います。2つのキャパシタをつないでいるのは電解液である。

電極として活性炭のような比表面積の大きな材料を使い、電解液中にある電極は酸化還元を伴わない非ファラデー反応により蓄積することを原理とするため信頼性が高く、高容量が期待できる。

1990年以前の電気二重層キャパシタは1～2 Wh/kg程度のエネルギー密度だった。鉛蓄電池の実力値が24 Wh/kgであるから約1/20程度であった。それまでの電気二重層キャパシタの目指したものは、内部抵抗が低く出力密度の高いキャパシタであった。内部抵抗が無視できない状態で電子回路を動作させるには問題があり電池の代替用などという考えは全くなかった。

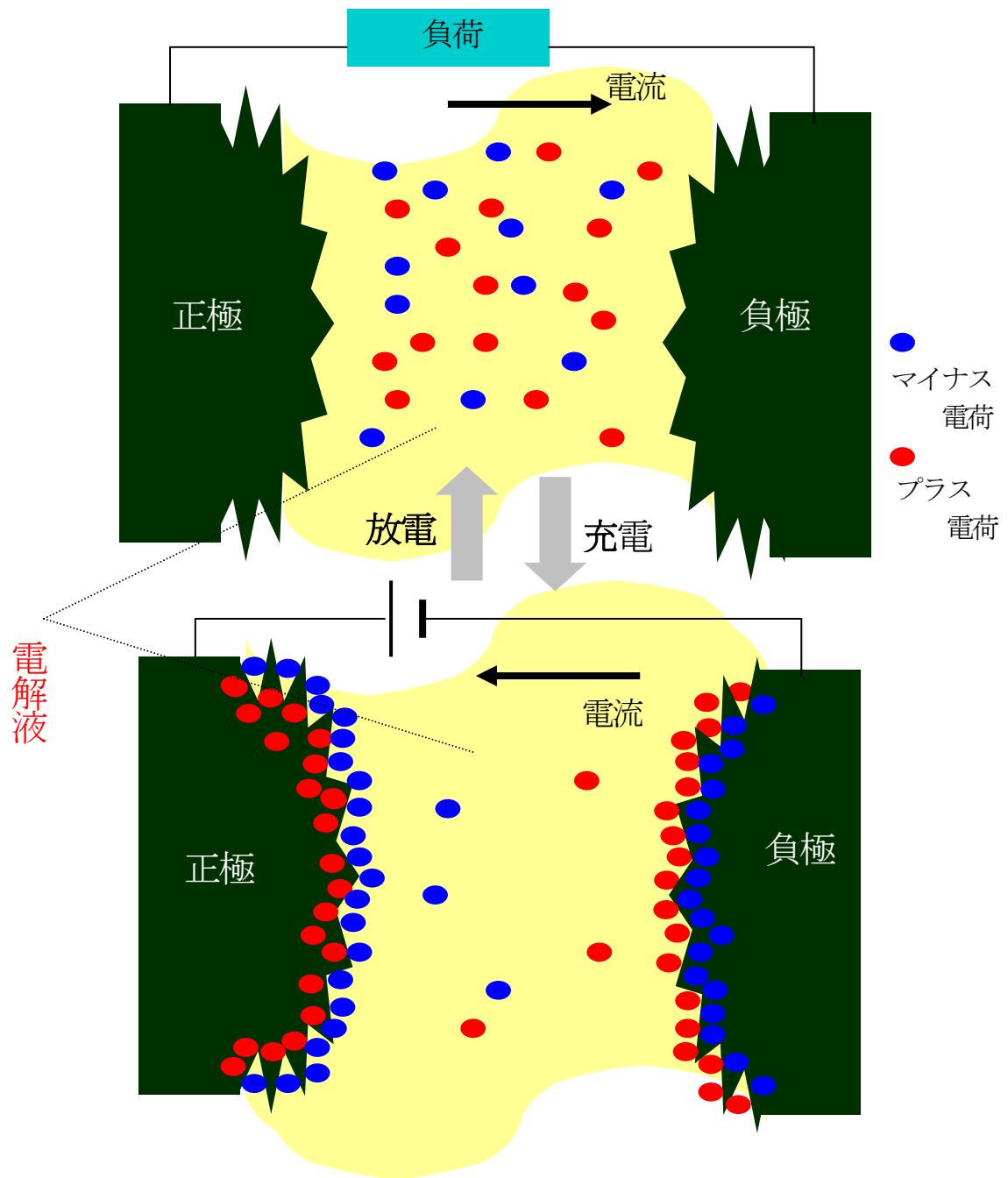


図1 電気二重層キャパシタの原理

電気二重層コンデンサは、従来のコンデンサで用いられているような固有物質の誘電体は存在せず、また電池のように化学反応を利用したものでもありません。特徴としては次のようなことがあげられます。

長所としては、

- (1) 小形でファラド(F)単位の静電容量が得られます。（表面積Sの大きい活性炭の使用と、誘電体の距離 d が極めて短い）
誘電率を ϵ として蓄えられる静電容量をCを求めると

$$C = \frac{\epsilon}{d} S$$

であるから容量が大きくなることがわかると思う。

- (2) 過充電、過放電を行っても電池の様に寿命に影響することがありません。
- (3) 温度特性が良好
- (4) 安全性
- (5) 残量予測が正確
- (6) 環境性に優れたクリーンエネルギーです。
- (7) 電子部品としてはんだ付けできることから、電池の様に脱落や接続不安定になりません。

短所としては、

- (1) 電解液を使用しているので寿命は有限です。
- (2) 電子回路を付加するので体積が大きくなる。

● ECaSS (Energy Capacitor Systems) の考案

ECaSS は岡村廸夫が 1992 年に発明した次世代の蓄電技術で、従来の電気二重層コンデンサで不充分とされていたエネルギー密度を、飛躍的に向上させるシステムです。技術的にはすでに完成している。

キャパシタにエネルギー密度を求めるのは無理だから、低い内部抵抗による瞬発力を利用し電池を補うのに使おうという考え方は以前からあった。米国では DOE (Department of Energy) が巨額の予算と 4 つの国立研究所を含む 13 企業を擁して 1992 年から Ultracapacitor プログラムを積極的に進めていたが、成功の見込みがないとして目標未達のため 1998 年で終了した。これは日本および欧州のこの分野の関連各社にとって大きな衝撃であった。

岡村廸夫の ECaSS (Energy Capacitor Systems) は、電気二重層コンデンサと電子回路を組み合わせ、貯蔵できるエネルギーを従来の数 10 倍にする技術です。しかし信号は増幅できても電気エネルギーを増幅することはできないはずだというのが一般的な常識です。確かにその通りではあるが。

コンデンサに効率よく充電するには定電圧源よりも定電流源で充電するほうがはるかに効率はよい。また蓄えられたエネルギーを有効に取り出すには、コンデンサの端子電圧が

かなり低くなるまで使うことである。充電と放電を効率よく行わせるために ECaSS（前は ECS と呼んでいた）ではスイッチングレギュレータや DC-DC コンバータなどを駆使して実現している。

エネルギー密度をトータルで 20 倍(電子回路で 4 倍、キャパシタの改良で 5 倍)にするために、構成要因を 1 次独立型の伝達関数つまり相互に関係しない 2 つの要素に分けてその積を 20 倍にしたらいと考えた。
基本原理は直列のキャパシタに並列モニターと呼ばれる制御回路とスイッチングコンバータを使った電流ポンプと呼ばれる充放電制御を行う。

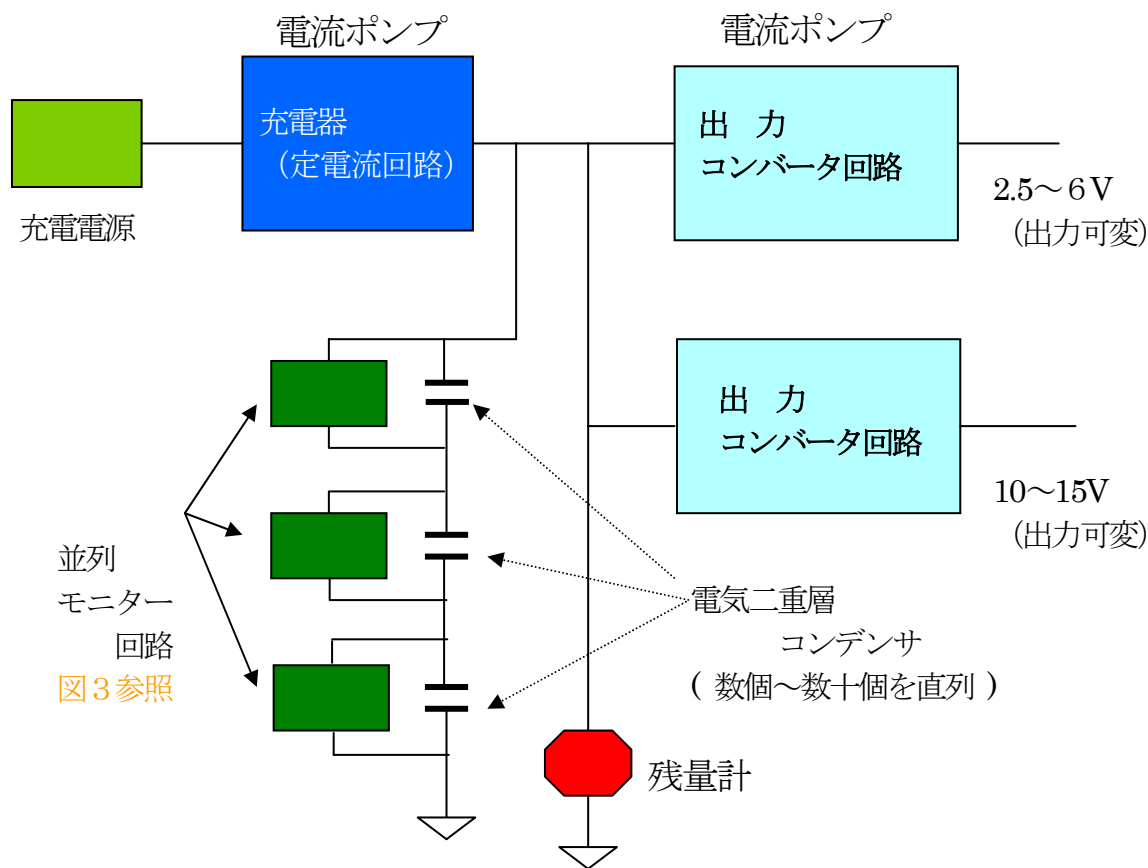


図2 ECaSSの基本構成

岡村廸夫は従来の発想を転換して、内部抵抗は大きくてもエネルギー密度を高めることを目指しました。内部抵抗が大きいと $I^2 R$ の熱損失が出ると誰もが考えます。しかし内部抵抗が大きくても低損失で充放電する方法があります。

キャパシタへの充電には効率のよい電流源が使われる。定電流 I で t 時間充電または放電を行った時の電荷を Q とすると

$$Q = I \times t \quad \text{-----} \quad \textcircled{1}$$

キャパシタに蓄えられる電力量 W は

$$W = \frac{Q^2}{2C} \quad \text{-----} \quad \textcircled{2}$$

です。抵抗 R によるジュール損（電力量 L ）は

$$L = I^2 \times R \times t = \frac{R \times Q^2}{t} \quad \text{-----} \quad \textcircled{3}$$

式②、③式より充電時と放電時のエネルギー効率 K を計算してみる。

充電時の効率 K_c は

$$K_c = \frac{W}{W + L} = \frac{\frac{Q^2}{2C}}{\frac{Q^2}{2C} + \frac{RQ^2}{t}} = \frac{t}{t + 2CR} = \frac{1}{1 + \frac{2CR}{t}} \quad \text{-----} \quad \textcircled{4}$$

放電時の効率 K_d は

$$K_d = \frac{W - L}{W} = \frac{\frac{Q^2}{2C} - \frac{RQ^2}{t}}{\frac{Q^2}{2C}} = 1 - \frac{2RC}{t} \quad \text{-----} \quad \textcircled{5}$$

④、⑤式から言えることは充放電時間 t が長くなると効率 K が 1（100%）に近づくことがわかります。つまり内部抵抗 R が大きくても充放電時間 t を長くすれば効率 K を向上させることができます。このことは今までの電気二重層コンデンサの開発技術者には無かった発想です。私のホームページで紹介している[断熱充電](#)と同じ原理でもあります。

いろいろな内部抵抗を持つ電気二重層コンデンサに対して、それぞれの用途に応じて必要な最短充電時間（充放電制御回路を使って）で最大のエネルギー密度を持つように設計した電気二重層キャパシタを使えばよいという設計思想である。

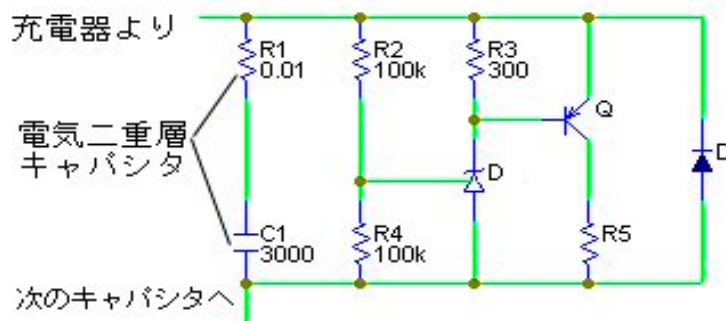


図3 並列モニタ回路の例

● 他の電池との比較と今後

2003年10月に日本電子はニッケル水素二次電池並みのエネルギー密度を持つ電気二重層キャパシタを開発したと発表した。質量エネルギー密度は 88Wh/kg と高く、今までの数倍以上の性能であり、従来の機器メーカーは大変驚いた。これは従来の二次電池の代わりになる可能性を秘めていたからである。

現在、デジカメや携帯電話など多くの電子機器で使われているLiイオン二次電池と電気二重層キャパシタ（もちろんECaSS装備）との性能比較表を下に示した。

	<u>Li イオン二次電池</u> (化学二次電池)	<u>電気二重層キャパシタ</u> (ECaSS)
充電時間	数10分～数時間	数分～数時間
充放電 サイクル寿命	数百回～数千回	数十万回
コスト	中（希少金属使用）	小（活性炭など）
安全性	中（Liの発熱・発火の危険性）	大
実装の自由度	低い	高い
環境負荷	高い	低い
出力密度	数百W～数kW/kg	数kW～ 10kW/kg
質量 エネルギー密度	最大 160Wh/kg	最大 88Wh/kg

表から言えることは、電気二重層キャパシタには従来の化学二次電池にはない、優れた特性項目を多く備えているということである。充電時間は製品仕様によっていろいろあるが、早い場合1分程度で充電できる。充放電サイクルは化学反応を使った従来の二次電池と違って、数万回以上が当たり前で長期間使用できる。長期間使用できるということは環境負荷も軽いといえることができる。瞬時に大電流を放出する指標である出力密度はリチウム二次電池に比べ10倍以上大きい。充放電サイクルと出力密度の特徴を生かして車にまず使われている（日産ディーゼル工業のハイブリッド車やホンダの燃料電池車）。

価格も使われている材料が炭やアルミニウム等ありふれた材料なので、今後大量生産が始まれば従来の電池以下の価格になる可能性はある。

欠点はないのかと言えば、体積当たりのエネルギー密度が低いことである。従って今のところ体積に余裕のある機器にしか使用できない。車はその点で余裕があり、先ほどの理由とあいまって使用されたのであろう。

従来の電気二重層キャパシタは電極材料である活性炭の比表面積を増やすことで静電容量を増やそうという試みが続けられてきた。しかし、岡村迪夫たちは特別な処理（**電解賦活：electric activation**）を行ってできた材料（**非多孔性材料 = ナノゲート・カーボン**）を開発することによって、従来の活性炭の比表面積と比べて少ないにもかかわらず大きな静電容量が得られる現象を発見した。この現象を利用した電気二重層キャパシタを**ナノゲート・キャパシタ**と名付けた。発案したのはオムロンの土居 仁とのこと。今後この技術を使って質量エネルギー密度を100～200Wh/kgを目標に開発が加速すると考えられる。

ただ、問題点として①充電時の電極の体積膨張と②放電時の静電容量の減少（**スナップバック現象**）があげられる。まだ、試作品が出来たばかりであり量産した場合の特性がどれくらいのものが得られるか、よく見極めなければならない。また、ナノゲート・キャパシタの静電容量の形成原理もまだはっきりしておらず、理論的な解明もこれから進むと考えられる。

● 電気二重層キャパシタ基本特許

岡村迪夫さんの特許を中心に電気二重層キャパシタの基本的な特許をいくつか紹介しましょう。

特許出願番号	出願年	タイトル	出願人
USP 2800616	1957	Low Voltage Electrolytic Capacitor	G E 社
USP 3634736	1972	Electrochemical Capacitor having Carbon Paste Electrode	Standard Oil 社

特願平 09-286878	1998	電気二重層コンデンサ	岡村 勉夫
USP 6075378	2000	Electrical Energy Storage Capacitor Power Supply Capable of shorting out Defective Capacitors	Michio Okamura
特開平 09-320906	1998	電気二重層コンデンサ電極用活性炭並びにその製造方法および電気二重層コンデンサ電極	野口 実 沖 尚彦 他
特開平 10-336900	1998	補助電源装置併用給電システム	山岸政章 山崎清美 他
特願平 06-249887	1996	電気二重層コンデンサ	岡村 勉夫
特願平 06-262703	1994	電気二重層コンデンサ	岡村 勉夫
特願平 06-289261	1994	電気自動車	岡村勉夫 他
特願平 09-285041	1997	コンデンサ蓄電装置	岡村勉夫 他
特願 2000-198551	2000	キャパシタ蓄電装置の充電制御方法	岡村勉夫 他
特願 2000-334128	2000	電気二重層キャパシタの製造方法	岡村勉夫 他
特願 2002-288784	2002	電気二重層キャパシタおよびその製造方法	岡村勉夫 他

最後に、岡村勉夫さんの話を少し載せようと思う。

「私は人のやらないことばかりやってきた。電気二重層コンデンサのエネルギー密度を高めようなどという研究者は、当時（1990年代初め）ほとんどいなかった。電気関連の学会誌に傍流扱いされたこともある。

研究というのは、人のやらないことをやるから意味があると私は思っている。みんなと同じ研究に手を染めてもあまり意味がない。日本の研究者は、皆同じような研究を行う隣百姓が多い気がする。

最近、どうしたら学生の理科系離れを食い止められるか、議論を投げかけられることがある。原因は生徒ではなく、教育者自身にあると思う。大学教育では科学でなく、科学史を教えている。昔の常識にとらわれ、新しい事実を認めない風潮がある。

技術は経営ではなく信念である。時流に流されることなく、世の中で役に立つものをしっかり探し直して下さい。きっと見つかるはずです。」

私の会社時代と技術の栄枯盛衰

●会社時代の集積回路と未来

私が半導体の会社に入ったのが1970年代後半です。70年代中頃にオイルショックがあり、景気低迷で半導体の需要が一時減速しました。私が入社した頃は、電卓、時計、ワープロ専用機並びにデスクトップパソコン等の集積回路の需要が徐々に増加し始め、各半導体メーカは増産体制を整えていきました。日本の半導体産業は80年代の黄金期を経て、90年代にバブルがはじけて半導体不況に陥るといふ劇的な成長と後退を経験しました。それからずっと日本の半導体メーカは元気がありません。私の会社時代はまさに80年代の黄金期だったので楽しく、有意義な経験をさせてもらいました。

職場には活気があり、新しい技術をどんどん開発しなさいというチャレンジ精神があふれていました。新しいアイデアを考案すると、すぐ試作させてもらいました。効果を確認すると本来の仕事は後回しして、特許明細を書かされました。

集積回路は、爪の大ききくらいのシリコンの板（チップ）の中にトランジスタや抵抗、コンデンサ、配線などを配置、埋め込みしたもので、個々のトランジスタが小さければそれだけたくさんトランジスタをチップの中に配置できる。つまり集積度が上がるわけです。

私が入社した時のトランジスタ（CMOS）の大きさは6ミクロン程度でした。11年間会社中に在籍しましたが、退職した時のトランジスタの大きさは2ミクロン程度だったと記憶しています。11年間で約9倍（面積比）の集積度の向上です。ちなみに、人間の髪の毛の太さは50ミクロン程度です。

現在の最新の製造プロセスでは、トランジスタサイズは0.014ミクロンまで微細化されており、会社時代の400分の1のサイズまで縮小されているのである。

過去30年の間に約150万倍の集積密度の進展を見せ、30トン以上もあった計算機が1キログラム以下で実現でき性能も飛躍的に向上している。

なぜ、集積回路の製造寸法を微細化するのか。たくさんトランジスタが搭載できることはもちろんですが、ほかにも利点がたくさんあるのです。ただ、寸法だけを縮小するのではなく、電源電圧、不純物濃度、酸化膜厚などを一定比率で変えてやることにより、集積回路の高集積化はもとより、高速化、低消費電力、高耐圧などの性能が得られるのです。各パラメータの調整は各企業のノウハウとして公開されません。ちなみに電源電圧は、30年前は5ボルト駆動だったものが、現在の集積回路は1ボルト以下で動かしている。

また、経済的な面で言えば、チップサイズの縮小または集積度向上によって機能単価が低減される。また、コストダウン効果それに大規模システムのワンチップ化が可能になるといった利点があります。

集積回路の集積度は、インテル社の創業者の一人、ゴードン・ムーアによって提唱された**ムーアの法則**に沿って現在までの40年間発展してきました。この法則は

「チップに集積可能なトランジスタ数は二年で二倍ずつ増える」という経験則である。現在でもこの法則は維持されている。どこまで微細化競争は続くのだろうか。今後10年間で0.005ミクロンまでは目途が立っているようだ。トランジスタサイズが原子数個分という限界に近づいていることは確かだ。

キルビーによる集積回路の発明からわずか60年足らずで、このような想像を絶する集積回路が実現するとだれが予想できたでしょう。キルビー自身も2000年のノーベル賞受賞の時に、このような発展は全く想像していなかったと述べている。

●マイクロマシンの活用

集積回路の別の展開も紹介しておこう。MEMSまたはマイクロマシンと呼ばれている技術である。これは集積回路のチップに機械的な物を作ろうという技術である。たとえば数ミクロンのアクチュエータ(モータやハサミ等)が代表例である。

マイクロマシンの一番の利用先は医療分野だろう。昔見た、映画「ミクロの決死圏」のようなことが実現するイメージである。人間は小さくならないが(映画では人間も小さくなったが)、映画で出てくる潜水艦のようなものが体内に入って悪いところを切ったり、焼いたり、接合して治療したり、薬品注入できるようになる。マイクロマシンのカメラで確認しながら、作業命令は外から電波で指示を出す。終了後は自力で体外に脱出する。

ちなみに動物の細胞は数 10 ナノメートルでそれ位のマイクロマシンは開発可能になってきたので、開発されれば、細胞内さらに染色体内まで潜りこんでDNAの修復作業だって可能になるかもしれない。

問題は体内で自走できなければいけない。動かす動力源が必要である。電磁誘導による電力供給が常識的には考えられるが、バクテリアの鞭毛のしくみを研究している技術者もいる。鞭毛の根元が回転するモータのようになっており、その構造とエネルギー源がわかれば活用できると考えている。またマイクロマシンとその微生物そのものを活用するバイオハイブリッドシステムを開発した大学もある。

●人工知能の恐怖

集積度の向上については、2003年には1チップ当り1億トランジスタ、2010年頃には50億トランジスタ、2020年頃には人間の脳のニューロン数である150億トランジスタを越えると言われています。これだけのトランジスタを実装すれば計り知れないシステム・人工知能が実現できるであろう。

今でも人工知能はあるが、人間の智慧に迫る人工知能が出来た場合は、新薬の開発、地球環境の予想、宇宙の真理探究など人間では思いつかない発明、解明をする可能性がある。それには今後50年以上かかると思われる。その前に、自動車の自動運転が20年以内に実用化するだろう。自動運転には、人間と同じ外部環境認識、判断そして制御処理が必要です。現在の人工知能による外部環境認識性能は小学生程度しかなく、今後の実用化の鍵を握っています。

ただ、良いことばかりではなく、全世界がネットワークで繋がれている現在、人工知能に乗っ取られて世界戦争になるとか、核ミサイルを勝手に発射するとか、大変なことになる可能性もある。多くの学者が警笛をならしている。

2015年、イーロン・マスク氏(テスラモーター社長で電気自動車の開拓者)、ビル・ゲイツ氏(マイクロソフト会長)、スティーヴン・ホーキング博士(ブラックホールの研究で有名な宇宙物理学者)、および学者や研究者などが、人工知能を扱う産業の安全基準に対する公開状を書き、人工知能の誤動作によって人間に危険が及ぶのを防ぐため、いつでも人工知能を安全に制御できるフェールセーフのシステムを開発研究すべきだと要求しました。

イーロン・マスク氏は、

「人工知能は核兵器よりも潜在的な危険をはらむため、我々は細心の注意を払う必要がある」と言っています。また、ホーキング博士は、

「今後百年以内に人工知能が人間を超えるだろう。その時人類と協力する目的を持たせる必要があり、人工知能の開発は人類がコントロールできるように進めるべきだ。私たちの将来は技術の振興勢力と技術を利用する知恵の争いになる。」

と述べています。

まさに、映画ターミネータで出てくる防衛システム（スカイネット）が自我に目覚め人類を滅ぼそうとする話もSFとして片づけられない時代が来るのである。人工知能との戦争があり得ることを学者たちは本音で心配している。

●技術の栄枯盛衰

電子技術は当然進歩し、それに伴って電子機器も変わっていく。消えていく技術、製品も多々ある。しかたのないことである。ここではいくつかの例を挙げながら振り返ってみたいと思います。

- ・テレビがアナログ放送からデジタル放送へ
- ・表示画面がブラウン管から液晶へ
- ・固定電話が携帯電話、スマホへ
- ・自動車はガソリンエンジンからハイブリッド、電気自動車へ
- ・乾電池はマンガン電池、アルカリ電池、ニッケル水素電池、そしてリチウムイオン電池へ
- カメラの撮像デバイスはフィルムからCCD、CMOSへ
- 発電方法に再生可能な太陽光発電（ソーラ発電）が台頭
- 商品タグがバーコードからICタグへ
- 記憶装置が磁気テープ、フロッピーディスク、ハードディスクそして個体メモリー（フラッシュメモリー）へ
- 音楽データはレコード、CDそして、個体メモリーへ
- コンピュータの演算素子は真空管からトランジスタそして集積回路へ
- 照明は白熱電球から蛍光灯そして、LED照明へ

いろいろありますね。赤色で示した項目で気が付いたことがありますか。光変換、エネルギー変換、データ記憶、演算機能そして照明、これらの機能はシリコンチップで実現されています。つまりシリコン（珪素）という石で実現されているのです。そのため、現代社会を新石器時代と呼ぶことがあります。

さて、電子技術を中心に技術の変遷を示してきました。130年前に発明され、現在まで生き残ってきた白熱電球も終わりを迎えようとしています。政府は昨年、白熱電球の生産を中止するよう各企業に通達を出しました。省エネのためには必要な措置です。

昨年のノーベル賞で日本人3人が受賞した青色発光ダイオード（青色LED）の発明により、これからの照明は確実にLEDが普及していくでしょう。家の照明だけでなく、信号機や車のライトなど各分野で普及しています。

では昔からある技術で、未だに廃れていない技術はあるのでしょうか。あります。それが八木アンテナなのです。

●永遠の技術・八木アンテナ

八木アンテナという名前は聞いたことがありますよね。家の屋根の上に串刺し状の棒が何本か交差した状態の物です。どこの家にもある日常光景として定着しています。地上波のテレビアンテナ用としてこれに代わるものは他にありません。90年前に発明されて、基本原理、基本形が変わらないまま現在まで使われています。

1953年に放送が開始された、アナログ方式のテレビジョン放送から一般家庭では使われており、2003年の地上デジタル放送開始後も今まで使っていた八木アンテナが機能し、我々はそのまま使っている。地上波の指向性アンテナとして、いまだにこれ以上のアンテナが現れないという点を見ても、いかに画期的発明であるかがわかる。

その八木アンテナについて紹介しましょう。

東北大学時代、1924 年八木の助手をしていた杉本武雄が、アンテナの実験中、波長計の位置で電波の強弱が、変化することを八木に報告した。八木は波長計のコイルが共振して強い電波を出すと考え、さらにコイルの代わりに導体棒を櫛状にして、使うことを考案した。これが八木アンテナの発明である（**特許 6 9 1 1 5 号**）。八木が突き止めたことを整理すると、

1. 発射された電波の波長の 1/2 以上の長さの導体棒は、その電波を反射する。
2. 同じく 1/2 未満の長さの導体棒は、その電波を集中的に発射（または受信）する。

という事実だった。

もっとも、当時は短波の利用さえ実用化されていない時代に、一挙に超短波領域における指向性アンテナを発明しても、日本の学会や工業会では、注目されなかった。もちろん、軍部も興味はなかった。発明があまりにも先端的すぎたのだ。欧米の学会や軍部のみがこの技術に注目した。

◆エピソード①（敵が使っていた八木アンテナ）

昭和 17 年、日本軍は破竹の勢いで進撃を続け、東洋の英国植民地であるシンガポール島を占領した。そこを視察した陸軍は、見たこともないアンテナ装置を見つけ、更に焼却炉に残っていたノートを発見した。

そのノートには、レーダー技術のことがいろいろ記されていたが、その中に「**YAG I**」という言葉を見つけ、その意味を英国人捕虜ニューマンに問きただしたところ「あなたたちは、この日本人を知らないのか？」と言われ、驚嘆したという話が伝わっている。

まさしく YAG I は八木のことで、八木の特許、論文でレーダー用アンテナとしての価値に気付き実用化していたのだ。日本人の発明が、日本人の知らない間に、敵の新兵器に使われていた。軍部が唖然としたのも当然である。日本がこのレーダー技術で敗戦したと言っても過言ではない。また、八木アンテナという呼称も、日本人が付けたものではなく、欧米人が付けた名称である。

◆エピソード②（八木 - 宇田アンテナと呼ぶべし）

八木アンテナの基本発明は、八木秀次であることは、間違いない。八木は、基本原理の発明・発見には大変鋭い洞察力、探求心を持ち合わせていたが応用に関する研究には、あまり興味がなかった。

そこで当時、八木研究室にいた講師の宇田新太郎に、八木アンテナの応用研究、実用化についてやらせて、全て宇田の単独名で論文を出させた。（普通は八木との連名で発表する。）

宇田は、現在テレビ受信に使われている、八木アンテナの実用化に成功し、自分自身も八木アンテナの貢献者であるという自負があった。

しかし、八木アンテナが発明された時、八木の単独名で、国内外に特許を提出したため、まず海外で八木が有名になり、海外の人々によって、八木アンテナという呼称が、広まった。当然日本でも、八木アンテナと呼ばれるようになり、広く一般の人々に知られるようになった。

宇田は晩年、八木アンテナという呼称に我慢ならず、あのアンテナは八木 - 宇田アンテナと呼ぶべきだと主張した。近年、学会もそれを認めて、学術書等には、八木 - 宇田アンテナと記されています。ちなみに、工業高校の教科書には、まだ八木アンテナになっているものがある。

ENIACは世界最初の電子式デジタルコンピュータではなかった！

1. アール・ラーソン判事の判決

1973年10月19日、ミネアポリス地方裁判所判事のアール・ラーソン判事は、6年半におよぶ審理の結論を下した。その内容を一言で言えば、
「**ENIAC特許はアタナソフ博士のアイデアを模倣したものであり、無効である。**」

ENIACは世界最初の電子式コンピュータであり、開発したのは、プレスパー・エッカートとジョン・W・モークリーである。と、どの本にも書いてあるし、私の周りの誰に聞いてもそう答える。それほどENIACのことは一般世間の人には浸透している。判決があって25年以上経っているのにこのありさまである。それにはいろいろ理由があるが、1つはラーソン判事の判決があった翌日の新聞にこの重大な記事が取り扱われなかったことが上げられる。当時ニクソン大統領のウォーターゲート事件で世間が荒れ狂っていた時期で、新聞の一面トップは、ウォーターゲート事件の検察官であるアーチボルト・コックスが解任されたという内容であった。そのためコンピュータ技術にとって大変重要なニュースが全米のみならず世界の人にも知れ渡ることなく埋もれてしまった。

もともとこの裁判は**ENIACの特許(USP. 2629827, J.Presper.Eckert, John.Mauchly 1947年)**を有していたスペリーランド社とこの特許の無効を訴えていたハネウェル社の争いから始まったもので、この裁判の過程で**アタナソフ・ベリーコンピュータ(ABCマシン)**の存在が明るみにされ、ENIACで使われていた技術は、モークリーがアタナソフのコンピュータを模倣したものであることが明らかにされた。この特許は情報を蓄積するために回転の原理を組み込んだドラム型キャパシタ記憶装置に関するもので、ENIACより前にアタナソフがABCコンピュータに組み込んでいた。キャパシタを使ったのは、コンデンサが安く手に入り、しかも耐久性が半永久であったからである。コンデンサの電荷は時間が経つと放電してしまうが、アタナソフは再充電の原理を考案しており、これは現在のDRAMにおけるリフレッシュに相当する技術で現在でも通用するメモリー技術である。

ENIACは確かに世界最初の汎用電子計算機であり、いろいろな意味で偉業であることは間違いない。ただモークリーが最後までアタナソフの業績を認めようとしなかったのは、技術者としていただけない。自分がアタナソフより前に発明していたという証拠を1つも提出出来なかったにもかかわらず、裁判が終わったあとも欺瞞を繰り返した彼の人間性は疑われる。

もしアメリカが日本やヨーロッパのように特許の先願主義を採用していれば、このような裁判はなかったはずで、モークリーやエッカートの業績は何ら傷つけられることはなかった。そしてアタナソフ・ベリーコンピュータも歴史の闇に埋もれたままになっていたでしょう。アメリカだけが何故**先発明主義**にこだわるのか。いろいろ理由はあるだろうが、特許に関する基本的考えを世界的に統一しないと今後いろいろトラブルが起きるのではないだろうか。アメリカは従来外国における発明について、外国での発明日を認めていなかったが、WTOにともなって、1996年からWTO加盟国での発明日を認めることになり、多少問題性は減少したが、ブッシュ政権時に先願主義に移行する予定であったが、クリントン政権になって撤回され、現在もアメリカだけ先発明主義を採用している。

2. デジタルコンピュータの歴史

米国における初期の計算機開発は、業務計算や科学計算の要求により進んだ。その中でデジタル計算機を生み出すきっかけは第2次世界大戦のための兵器開発であった。特に大砲などの発射体の弾道計算は、発射体の速度が増加するにつれ次第に複雑になってきた。これは空中戦の到来により高速度で移動する目標に対する弾道計算が必要になってきたからであった。

1944年にはベル研究所の**アンドリュースとスティビッツ**が電気機械式のリレー式コンピュータ(モデルⅢ)を完成させた。このコンピュータは9000個のリレーを使用し、1つの弾道計算に40分かかった。また同時期にIBMとハーバード大学では**マークⅠ**、**マークⅡ**を完成させている。マークⅠは80万個の部品からなり、23桁の10進数を処理でき乗算を3秒で実行出来た。

一方、ペンシルバニア大学のムーア電気工学科では1930年代から陸軍やミサイル研究所と協同で弾道計算の問題に取り組んでいた。アーシナス大学の教授だったモークリーはペンシルバニア大学のムーア電気工学科で行われていた、政府支援の工学・科学・戦争管理訓練プログラムに参加しており、そこで大学院生のエッカートと知り合い電子回路によるコンピュータという着想を構築する。そして1943年に政府とENIACの開発契約(W-670-ODR-4926)を結んだ。この契約で、エッカートは主任工学技術

者として採用されている。彼は全プロジェクトの中心メンバーであった。一方モークリーはENIAC工学チームの正規メンバーではなく、主幹コンサルタントという立場であった。彼の仕事はENIACの着想をいかに実行に移すかということに関して幅広い知識を提供した。

1940年当初は第2次世界大戦が熾烈を極め、軍事計算の需要が逼迫していた。当時モークリー32歳、エッカート23歳という若者による提案は平時であれば、非現実的として受け入れられなかったであろう。軍部の後押しで製作に着手することができた。エッカートとモークリーは2年という歳月と20万人を超える人達の協力、総額49万ドルの開発費を投じて1946年にENIACを完成させた。開発は戦争終了までに完了しなかった。その時点で開発中止になるところであるが、軍はENIACの大きな可能性に気づき開発プロジェクトを続行させた。

問題はモークリーがENIACの開発において、アイオワ州立大学教授であるアタナソフが、1940年頃製作していた電子式デジタルコンピュータのいろんなアイデアを模倣してENIACに応用していたという事実であり、またそのアイデアを特許化していたことである。これについては後で詳しく述べる。

イギリスではもっとさかのぼり1839年にチャールズ・バベッジが機械式デジタルコンピュータを設計、開発していた。彼はそれを差分機と呼んだが、目的は微分方程式問題を解くためであった。また英国情報機関では1943年、Colossus と呼ばれる大型電子式機械コンピュータを組み立てている。この計算機はドイツ軍の暗号解読機(Enigma)に対抗するための機密電文の暗号解読を目的としていた。

このColossus を世界最初の電子式デジタルコンピュータと主張している人もいる。

3. ENIAC神話の崩壊

1946年2月15日、ペンシルバニア大学でENIACの完成式が行われた。あれから53年の年月が過ぎた。ENIACの果たした役割はいささかも疑う余地はない。コンピュータ技術の発展に大きく寄与し、その後新しい技術が次々と開花した。ENIACは電子回路で論理回路を実現するというアイデア(実はこのアイデアもアタナソフからの盗用と言われている)のために何と18000本の真空管を使って作られた。モークリーは電子回路に詳しくなかったため、当時ペンシルバニア大学の大学院生だったJ. P. エッカートが電子回路全般を担当している。エッカートはアタナソフとは1回しか合っており、アタナソフ・ペリーコンピュータ技術の盗用とは関係ない。J. W. モークリーはENIAC全体の論理回路設計を含む全般の取りまとめをしているが、彼はアタナソフのアイデアを盗用したということで裁判で断罪された。

モークリーはもともとコンピュータが専門ではなく気象問題を解くことに興味があった。これは彼の父親が気象問題を解く研究をしていたことに影響されている。気象問題を解くためのコンピュータについて彼は悩んでいた。そんな時、アイオワ州立大学のジョン・アタナソフと出会っている。1940年ペンシルバニア大学での気象に関する学会で、モークリーの論文に興味を持ったアタナソフがモークリーに合い、意見交換したのが初めての出会いであった。その時アタナソフは自分が開発している電子式デジタルコンピュータのことを話した。モークリーは大変興味を持ち、見学することを希望した。1941年に入り、モークリーはアタナソフの勤めているアイオワ州立大学を訪れて、アタナソフのコンピュータをじっくり見学している。彼はそれまでにこのような機械を見たことも作ったこともなかったが、いろいろ説明を聞くうちにこれをもっと応用すれば汎用のコンピュータが出来るのではという考えが芽生えたのは間違いない。何故ならモークリーは裁判で、この時期より前にアタナソフが使ったいろいろなアイデアを自分が持っていたという証拠を提出できなかったのであるから。

多くのENIAC特許の中で、特に電子計算機の再生記憶に回転ドラムを使用するというエッカート・モークリー特許(USP.2629827)は、コンピュータには必須の基本特許として知られていた。この特許は1947年に申請されたが、軍事秘密ということで実際に公告されたのは1964年である。裁判で明らかになるが、この磁気ドラムはアタナソフが考案したキャパシタ型記憶装置と仕様まで同じものであった。アタナソフが考案、製作した記憶再生装置は、直径9インチ、長さ11インチのドラムであり32ヶ所あるトラックごとに51ヶずつのコンデンサを合計1632個搭載していた。ドラムが回転して信号を計算機の回路に伝えるために真鍮製の短い突起が並んでいた。2進数はコンデンサが持っているプラスとマイナスの電荷で表現され、ドラムが回転するたびに演算の結果から電荷を再生したり反転したりするようになっていた。

裁判は1967年に、ハネウェル社がスペリーランド社を訴えたことにより始まった。その内容はスペリーランド社(現ユニシス)が法外な特許使用料を要求すること、ENIAC特許申請の1年以上前から水爆開発という公開されたプロジェクトに使用されていたのだから特許は無効である、またIBMなどとクロスライセンスを結んでコンピュータ業界に事実上寡占状態を作っているというものだった。そうした裁判の過程でアタナソフ・ペリーコンピュータ(ABCマシン)の存在が明らかにされ、再生記憶や論理回路等においてENIACはこのABCマシンのアイデアを模倣していることが明らかになった。裁判の

過程で、アタナソフの書いた当時の設計図でABCマシンを実際に復元して動作も完璧であることが確認された。

ラーソン判事はこう断言した。

「ここで審理したENIAC特許に関する件では、ハネウェル社はモークリーがアタナソフから教えられたことを明確に示して、ENIAC特許を得る資格はないことを証明した。その代表的な例として、**ENIAC特許8号及び89号**は、ENIACの開発作業およびENIACの特許効力が発効する以前から、モークリーが知っていたアタナソフの業績そのものである。」

4. アタナソフ・ペリーコンピュータの開発

1937年～1938年に、アイオワ州立大学教授であったアタナソフは計数型電子計算機の原理を考案した。1939年10月には同大学の大学院生クリフォード・ペリーの助力を得てその原理で動作する試作機を製作した。それは最高30個までの変数をもつ連立線形方程式を解けるよう設計してあった。1942年には改良した電子式デジタルコンピュータがほぼ完成している。このコンピュータ技術には、

①電子式デジタル処理 ②2進法の処理 ③コンデンサによる再生記憶(リフレッシュ技術) ④論理回路の採用

といった現代のコンピュータに通じる基本原理を確立していた。もう少し詳しく紹介すると、●時計部分は機械的になっているが、演算機構は全て電子的に行っている。●演算機構に初めて真空管が使用された。●数々の利点がある2進法が初めて採用された。●演算機構に初めて論理回路(加減算回路)が使用された。●全ての演算が順次に処理された。●記憶素子としてコンデンサが使用され、リフレッシュ技術が初めて使用された。●回転ドラム記憶装置にキャパシタが使用された。

裁判では特に、論理回路と回転ドラムに関するアタナソフのアイデアがENIACに盗用された点が明らかになった。

アタナソフはコンピュータが完成間近の時期に、これらのアイデアについて特許局で調査した。その結果、今までにない技術であることがわかり**1941年に特許出願の準備に取り掛かった**。ちょうどこの年の12月7日に日本軍が真珠湾を爆撃した。アタナソフは必要な書類を準備した後、海軍兵器研究所で仕事をするため大学を離れた。その後、特許弁護士に特許申請の進み具合を確認していたが、戦時中ということもあり、大学当局が特許申請に全く関心を失ったため、**申請されず**うやむやになってしまった。

アタナソフ・ペリーコンピュータという名称を最初から使ってきたが、このペリーとは誰なのか。彼はアイオワ州立大学の大学院生で、電気工学の教授たちから一目置かれるほど優秀な生徒であった。アタナソフ教授は自分の考案したコンピュータ原理を実現するための、協力者を探していた。他の教授からの紹介で会ったアタナソフはこの青年の能力に感心してすぐに助手に採用した。彼の製作能力なくしてABCマシンは完成しなかったであろうことはアタナソフ自身が認めている。後になってアタナソフはペリーが製作において大変貢献したということで、自分と対等の立場でこのコンピュータの名前にペリーの名前も付加して**アタナソフ・ペリーコンピュータ**と呼んだ。略してABCマシンと呼ぶ場合もある。ペリーは裁判が始まる4年前の1963年に謎の死を遂げている。警察が調査したのですが、結局自殺ということで処理されている。

晩年のアタナソフは徐々に名誉が回復された。全米電気電子技術者協会(IEEE)はコンピュータ・パイオニア賞を授与、またスミソニアン学術協会から表彰されたり、技術部門の大統領メダルを授与されたりしている。名誉が回復されてきた証拠として、アタナソフが死去した時の新聞(1995年6月15日)があげられる。

「世界初のコンピュータ開発者・ジョン・アタナソフ死去」と新聞に出ていた。社会的にも認識されてきたのかなと思った。エッカートは12日前の6月3日に死去している。またモークリーは1980年に亡くなっているが、2人が死去した時の新聞はどういう扱いだったのだろうか。

私は工業高校の教員をしているが、**教科書でアタナソフという名称は見たことがない**。教科書に載るまではアタナソフの名誉回復は道半ばと言わざるを得ない。

ダーリントン特許と渡辺 寧

(戦後の混乱期に米国からの有名特許申請を拒絶できたアイデア回路)

渡辺 寧（わたなべ やすし） 1896年茨城県生に生まれる。日本における電子工学の先駆者で、日本でのトランジスタ研究の最初期の研究を統括した。前に紹介した西澤潤一の指導教授でもあった。

渡辺は戦後の1948年に、ゲルマニウム半導体を用いた増幅素子が発明されたニュースをGHQより得た。このことは真空管を置き換えるかもしれないことを察知し、弟子たちに早々半導体の研究に着手する必要を説いた。その時、東北大学の渡辺研究室に所属していた、本田波雄と桂重俊にトランジスタの増幅理論の研究を、西澤潤一と中野朝安にトランジスタ形成法を研究するように指示している。

しかも、渡辺は面白い研究アプローチをしている。トランジスタのコレクタ側を西澤潤一に、エミッタ側を中野朝安に分けて研究させている。当時、半導体に興味を持って取り組んだのは電気試験所、電電公社の電気通信研究所等で、企業では神戸工業とソニー(当時は東京通信工業)だけで、他のメーカーは成り行きを眺めていました。トンネルダイオードを発明した江崎玲於奈はこの東京通信工業にいた時の業績です。

渡辺は従来の真空管を用いた増幅回路等と異なり、トランジスタを用いる回路はヒーターがないだけに設計の自由度が多いことに気づいていた。トランジスタを多様な組み合わせをした結合法を薄汚いザラ紙に謄写版による印刷で発表しました(1952年)。この原本は今でも東北大学に残っているそうです。この回路の基本的な着想は、まずトランジスタの3本の電極の結合は自由にできるということ、また、真空管回路の帰還方式による回路研究で考案した二重帰還の回路に基づいて各種作成したそうです。

トランジスタ応用が発展するに従い、各製品に使うための多くの新しい回路がアメリカで特許申請され、日本にも同様に申請してきました。それらの回路の中で最も有名なのがダーリントン回路特許です。大きな電流増幅率が得られるため、電力増幅等に必ず使われる回路です。

ダーリントン回路特許 (USP 第 2663806 号 ウェスタンエレクトリック社)

渡辺のこの印刷物が、アメリカからの有力特許を跳ね除ける証拠となりました。少し無理があったと思いますが。渡辺が書き残した結合回路を次ページに示しました。

【トランジスタ開発物語 中野朝安より引用】。

アメリカから日本に出願申請されたダーリントン回路特許について、特許庁は既知の技術であると言って、強引に特許権を拒否しました。その根拠になったのが渡辺が作成したガリ版刷りの回路です。（下図参照）

当時、日本の半導体技術は製造においても回路設計においても、アメリカに比べれば赤子のようなもので、無力に近い状態でした。もしこのような汎用性がある基本的な回路を特許として認めてしまえば、大変なことになるのでは、という危機感からのやむを得ない竹槍的防衛手段でした。このザラ紙が日本の半導体産業防衛に役立ったことは、トランジスタ創成期における功労として記憶に残るものである。

渡辺 寧が考案した結合回路

※「トランジスタ開発物語」 中野朝安 東京電機大学出版局から引用

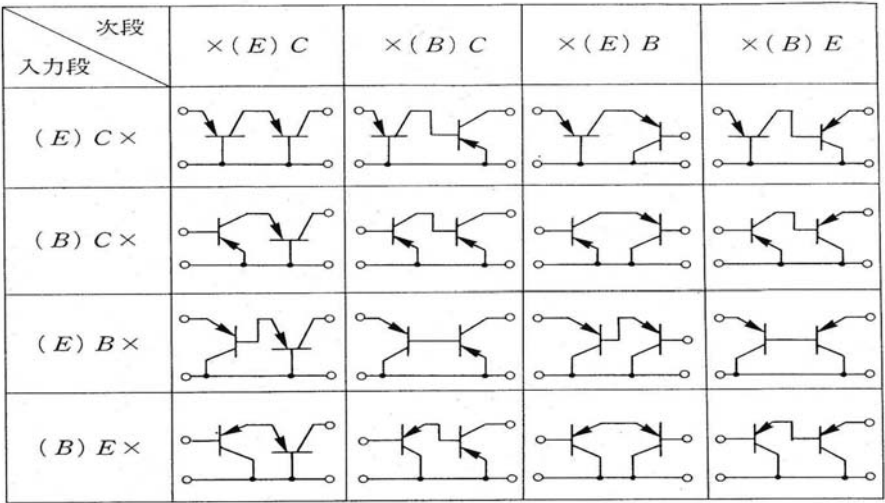


図17 トランジスタのカスケード増幅の組合せ回路
 [(E) C×：エミッタ入力コレクタ出力]