

人工知能，ロボット，情報通信技術は 縮小社会に有効か？ -Artificial Intelligence, Robot and ICT are Effective in Shrinking Society?

尾崎雄三（縮小社会研究会理事）

〔Abstract〕

In many countries, digital technologies are promoted for economic growth. However, digital technologies have many problems, energy consumption for producing LSI and operating computers, sever centers and AI, for example. Digital technologies also exert unfavorable influence upon society and human beings.

〔はじめに〕

人工知能（AI；Artificial Intelligence），ロボット，情報通信技術（ICT；Information and Communication Technology）の発展はすさまじく，新聞やテレビの話題にならない日はない。これらの技術の開発が推進されている理由はいろいろあるが，大きな理由は，現在の社会で経済成長するにはこれしかないと考えられているからである。1960年代から始まった高度経済成長期においては，テレビ，電気冷蔵庫などの家電製品や自動車が爆発的に売れ，その後はパソコン，普通紙複写機，携帯電話，スマートホンなどが続いた。しかし，これらも社会に行きわたってもはや高度経済成長期の家電製品などのように爆発的に売れるものはなくなり，住居の中では衣類，履物，食器類が余り，

住居では空き家までもが増加している。加えて途上国の経済と製造業の発展もあって日本をはじめとする先進国では経済成長が望めなくなっている。このような状況において、人間の欲求である便利、快適を満たす新たな商品として市場の拡大が期待でき、かつ広く利用することで生産性が向上し、経済成長が期待できることから、コンピューター技術である AI、ロボット、ICT 関連製品の開発が推進されている。

AI、ロボット、ICT は、いずれもコンピューターと通信技術の進歩により、急速に発展し、世界的に普及しているものではあるが、AI についてはシンギュラリティー到来や労働者の失業のおそれ、ICT についてはサイバー攻撃や個人情報漏洩、監視社会化などの様々な問題が指摘され、現に引き起こしている。一方でこれらの技術について、資源とエネルギーの消費の問題についてはあまり言及されていない。しかし、コンピューターの生産、使用による資源、エネルギーの消費はかなり大きく、石油資源が枯渇に向かっているなかで大きなマイナス面として考慮すべきである。本稿では、専門的すぎてわかりにくいのであまり知られていないコンピューターの生産とこれを使用した AI やサーバーの稼働に要する資源、エネルギー消費を中心に紹介してみたい。

コンピューターは、本体、ディスプレイ、ハードディスクなどの情報記録装置などから構成され、本体の心臓部は半導体集積回路とこれを他の部品とともにプリント配線板に取り付けて接続したプリント回路板（マザーボードとも呼ばれる）である。半導体集積回路は、当初は IC (Integrated Circuit) と称されていたが、集積度が高くなり、大規模集積 (Large Scale Integration ; LSI) が IC と同じ意味で使用され、半導体 LSI または単に LSI といわれるようになっている。

半導体 LSI やこれを内蔵した半導体パッケージ、さらには半導体パッケージ

を装着したプリント回路板の製造においては、あまりなじみのない化学物質や資材、装置の名称が出てくる。これらについて正確に理解できなくても資源とエネルギー消費がいかに大きいかはご理解いただけると思うが、〔4〕以降を読むだけでも十分であろう。

〔1〕 半導体パッケージの製造における資源、エネルギー消費

半導体パッケージの製造工程は、LSIのベースとなるシリコンウエハーの製造工程、シリコンウエハー上にトランジスタなどの素子とこれらを接続する配線を形成して半導体LSIチップとする前工程、形成された半導体LSIチップを半導体パッケージとする後工程、および前工程において使用するフォトマスクを製造する工程から構成される。

LSIには、メモリーLSI、プロセッサLSIなどいろいろな種類があるが、基本的にウエハーと称されるシリコン基板上にトランジスタ、抵抗、キャパシタを形成し、これを金属の配線で接続して電子回路を構成したものであり、最近の集積度の高いプロセッサLSIでは1000万個、メモリーLSIでは10億個にも及ぶトランジスタが集積されている。

半導体LSIの製造については、一般にはあまり知られていない技術用語があるので先に簡単に解説し、その後半導体パッケージの製造工程とその製造に必要な設備や材料、薬品などについて説明する。

<用語の説明>

① CVD (Chemical Vapor Deposition : 化学気相蒸着)

CVDは、CVD装置を使用して、ウエハーを収容した装置の容器(チャンバー)内を真空にし、2種以上の原料を気体として注入してエネルギー(高

周波電力)を加えて反応させ、生成した成分をウエハーに蒸着させて薄膜とする方法である。例えばウエハーに絶縁膜として酸化ケイ素(SiO_2)膜を形成する場合には、原料としてシラン(SiH_4)と酸素(O_2)を注入して反応させると酸化ケイ素(SiO_2)と水(H_2O)が生成する。酸化ケイ素はウエハーに付着して絶縁層を形成し、水は揮発性であるから真空により気化して容器外に排出される。

② PVD (Physical Vapor Deposition : 物理気相蒸着)

PVD装置の容器(チャンバー)内にウエハーを収容するとともに膜形成材料も収容し、容器内を真空にした後に膜形成材料を加熱することで蒸気としてウエハーに蒸着させて薄膜とする方法である。

PVDの1方法であるスパッタリングは、高電圧をかけてイオン化させたアルゴンなどの希ガス元素や窒素を膜形成材料(ターゲット)に衝突させてターゲット表面の原子をはじき飛ばしてウエハーに到達させ、製膜する方法である。

③ フォトリソグラフィ(Photolithography)

LSIを構成するトランジスタの半導体や電極、抵抗、キャパシター、配線は、ウエハー上にCVD、PVDなどにより形成されるが、これらの方法ではウエハーの全面に素子構成材料の皮膜が形成される。設計されたパターンとするためには不要な部分をエッチングにより除去する必要があり、エッチングしない部分をフォトレジスト(単に「レジスト」ともいう)という樹脂で被覆・保護する必要がある。フォトレジストには、光(レーザーや紫外線)の照射により化学変化を起こし、樹脂であったものが現像液に溶解するようになる「ネガ型レジスト」と、逆に現像液に不溶な樹脂となる「ポジ型レジスト」の2種類があり、目的に応じて使い分けられる。

このレジストの光反応性を利用し、ウエハー表面にレジスト原液を塗布し

て形成した膜から不要な部分を現像液で除去してパターンを形成するため、光照射時に影となる部分をつくるのがフォトマスクである。フォトレジスト原液の膜にフォトマスク介して光照射し、可溶部を現像液で除去してフォトレジスト樹脂のパターンを形成する一連の工程をフォトリソグラフィという。写真の焼き付けと類似しており、ネガフィルムに相当するのがフォトマスクである。

フォトリソグラフィにはレジスト塗布現像装置が使用される。

④ エッチング

フォトマスクで被覆されていないウエハー表面部分を化学的に除去する工程であり、酸化ケイ素膜を除去したり、さらにはその下のケイ素を削り取って溝や孔を形成することが行われる。エッチングにはウェットエッチングとドライエッチングがあり、現在はドライエッチングが多く使用されている。例えば導電性のポリシリコンや絶縁性の酸化ケイ素をドライエッチングで除去する場合には、ドライエッチング装置を使用し、チャンバー内にレジストでパターンを形成したウエハーを入れ、減圧にしたのちに四フッ化炭素 (CF_4) などのエッチング剤を注入して高周波電力によりフッ素のプラズマを発生させ、このプラズマをウエハー表面に衝突、反応させてケイ素や酸化ケイ素を揮発性の四フッ化ケイ素 (SiF_4) に変えて除去する。フォトレジストで保護された部分はエッチングされずに残り、ポリシリコン膜の場合にはフォトレジストで形成されたパターンの電気配線が形成される。

⑤ CMP (Chemical Mechanical Polishing : 化学機械研磨)

エッチングにより形成された凹部がある上に次の膜層を PVD や CVD により形成すると、ウエハー全面にほぼ同じ厚さで膜が形成されるために、表面には凹凸が残り、そのままではその上に形成する次の膜に不良部が出る。したがってこの凹凸をなくす必要があり、そのために行われるのが CMP であ

る。

CMP には CMP 装置を使用する。CMP 装置はウエハーを載せて回転させるテーブルとウエハーの上面に研磨パッドを接触させる回転プレートから構成されている。CMP ではウエハーをテーブル上で回転させるとともに上面から回転プレートに取り付けた研磨パッドをウエハーに接触させ、砥粒を含むスラリー（研磨液）をその間に供給することで、砥粒の機械的作用と研磨液に含まれる化学成分の化学的作用によってウエハーの表面が高速かつ平滑に研磨される。

（1）シリコンウエハー製造工程

シリコンウエハーの製造工程には、高純度シリコンの製造、シリコン単結晶の製造、ウエハーの製造の各工程があり、さらに原料からシリコンを製造する際に必要な黒鉛電極の製造も必要である。

① シリコンの製造

シリコン（ケイ素）は地球上に最も多くある元素であり、酸化物である酸化ケイ素（ SiO_2 ）として存在する。ウエハー製造に使用するのは金属ケイ素（以下、単に「ケイ素」という）であるから、酸化ケイ素を還元しなければならない。原料の酸化ケイ素には不純物として他の金属の酸化物が含まれており、還元の際にはこれらの不純物も同時にエネルギーを消費して還元されるので、無駄なエネルギーを使わないためにも、また後の精製（高純度化）を容易に行うためにも、できるだけ純度の高い酸化ケイ素を原料として使用することが好ましい。このような純度の高い酸化ケイ素の産地は世界でもノルウェーやブラジルなど少数の国に限られている。

酸化ケイ素還元工程では、還元剤としての役目もする黒鉛電極を備えたルツボに原料鉱石を入れて電極に電流を流して約 1900°C に加熱し、(反応式 1)

のように酸化ケイ素を還元することで純度約 98%のケイ素が得られる。



この反応においては、理論通りに反応してエネルギーロスがないとしてもケイ素 1 キログラム当たり 32.5MJ (約 9 kWh) という大きな電力が必要であり、実際にはエネルギーロスもあるのでもっと大きな電力 (11~15kWh) を消費する。ウエハーを製造するためには、このケイ素はさらに精製する必要があり、高度な技術を有し、さらにウエハーを製造できる国へ、エネルギーを使って輸送しなければならない。

② 黒鉛電極の製造

酸化ケイ素を還元してケイ素とするために使用する黒鉛電極は以下の工程で製造される。

まず出発原料である石炭からコークスを製造し、これを粉碎して粗粒, 中粒, 微粉に分粒したのち、これらとピッチコークスを所定の比率にて混合し、液状成分としてコールタールピッチを加えて流動可能な状態に混練して成形する。

石炭からコークスを製造するには、木から木炭をつくる場合と同様に、1300℃以上で乾留（空気の供給を絶ったの燃焼）する。乾留では原料石炭の多くは燃焼して灰となるが、発生する燃焼熱で石炭をコークス化する。乾留の際に発生する油煙は副産物のコールタールとなり、原料の石炭から得られるコークスはわずか 20%ほどである。

名称が紛らわしいピッチコークスとコールタールピッチは、ともに副産物のコールタールから得られるもので、コールタールを加熱・蒸留したときに蒸発せずに残るものがコールタールピッチであり、コールタールピッチを乾留して得られるものがピッチコークスである。いずれも炭素からできていてピッチコークスは固体であるが、コールタールピッチは加熱すると、

黒鉛化に適した炭素だけの粘性の液体となるので粉粒状のコークスとピッチコークスの混練成分として使用される。

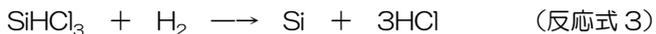
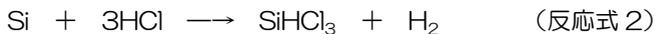
黒鉛電極の製造においては、まず成形により得られた成形体を約 1000℃に加熱・焼成する。焼成後の成形体は多孔質であり、冷却後にコールタールピッチを含浸（浸み込ませる）して再び焼成する。ピッチ含浸と焼成を2～3度繰返して微細孔をできるだけ少なくしたのち、2700～3000℃に加熱処理することにより成形体を黒鉛化する。この加熱は乾留とは異なるもので、別に熱源が必要である。

黒鉛化した成形体は切削加工などの外面加工をして所定の形状に仕上げ、耐酸化性、耐薬品性、通電性などの改善のために薬品、樹脂、金属などを含浸する特殊処理を行って製品の黒鉛電極とする。

黒鉛は炭素のみでできていて導電性であり、電極として通電による加熱を可能とすると同時にこの炭素が還元剤として酸化ケイ素から酸素を奪ってケイ素を生成し、自らは（反応式 1）のように炭酸ガスとなって消耗する。（反応式 1）をもとに計算すると、金属ケイ素 1 キログラムを製造するために必要な黒鉛は 428 グラムである。

③ シリコンの精製

ウエハーに使用するシリコンは高純度であることが必要であり、鉍石から還元して得られた純度 98%のシリコンはさらに「超」がつくほどの高純度に精製される。一般的な精製方法は、（反応式 2）のようにシリコンを塩化水素（HCl）と反応させて常温液状の三塩化ケイ素（ SiHCl_3 ；沸点 31.8℃）とし、蒸留・精製（繰返しの精留）した後に（反応式 3）のように水素で還元して高純度（イレブン・ナイン：純度 99%の小数点以下 9 が 9 個並び）シリコン（Si）とする。不純物は沸点が異なるので精留の際に分離除去される。



(反応式 3) は (反応式 2) の逆反応の吸熱反応であり、反応させるには熱エネルギーが必要で、精製後の三塩化ケイ素と高純度の水素を反応容器に入れて、内部に設置したシリコン芯線を通電加熱すると、シリコン芯線の表面に高純度の多結晶シリコンが析出する。

この精製工程で使用する塩化水素 (HCl) は、飽和食塩水の電気分解 (イオン交換膜法) により製造した塩素 (Cl₂) と水素を反応させて製造する。水素は、日本ではメタンと水蒸気をニッケルなどの金属触媒を使用して 1000℃ 以上に加熱して水素を発生させる水蒸気改質法で製造され、電気分解による塩素の製造とともに大きなエネルギーを必要とするものである。

④ シリコンウエハーの製造

シリコンウエハーは、シリコン単結晶を LP レコードのような円盤状に裁断することにより製造する。精製により得られた高純度の多結晶シリコンを加熱炉に入れて約 1420℃ に加熱・熔融し、チョクラルスキー法 (CZ 法) により円筒状のシリコン単結晶 (現在実用化されている大きいものは直径 30cm 以上で重量 100kg を超える) を製造する。製造時に生じた表面の波状の凹凸があるシリコン単結晶の外周を切削して所定の外径 (最大 30cm) の円筒にしたのちに厚さ約 0.6~0.8mm の円板に裁断し、表面を鏡面に研磨することで半導体製造用のウエハーが得られる。

シリコン単結晶の製造には、原料の高純度シリコンの熔融や単結晶形成のために厳密な温度コントロールが必要であり、また裁断、研磨、その後の洗浄などにもエネルギーが消費される。

(2) フォトマスク製造工程

半導体 LSI の製造は設計から始まり、最初に素子であるトランジスター、抵抗、キャパシターの配置とこれらを接続する配線が決定され、配線をどのような層構造にするかが設計される。そしてその素子の配置や層構造に応じたパターンを設計してフォトマスクが製造される。

フォトリソグラフィーに使用するフォトマスクは、露光時に影となるパターンを金属クロム膜で形成したガラス板である。写真機実用化の初期に使用された写真感板に似たものであり、製造は以下のように行われる。

ガラス基板の表面に遮光材である金属クロム膜をスパッタリングにより形成し、その上にフォトレジスト膜を形成し、電子線またはレーザーを使用した描画装置でフォトマスクのパターンを描画した後に現像し、エッチングにより影になる部分以外の金属クロム膜を除去することでフォトマスクが作成される。フォトマスクはフォトリソグラフィー実行回数分だけ作成することが必要であり、最近では 100 枚以上にも及ぶことがある。

(3) 前工程

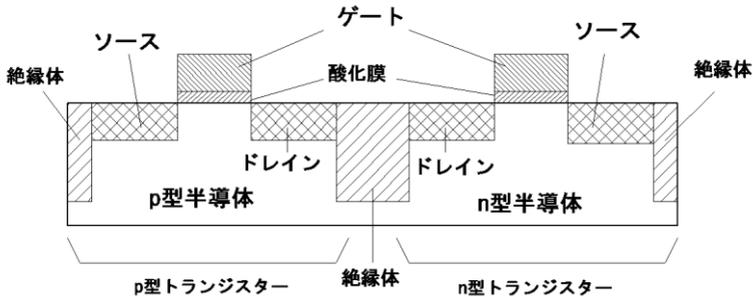
前工程はトランジスター、抵抗、キャパシターとこれらを結ぶ配線を形成する工程であり、トランジスターなどの素子を形成する基板工程と配線を形成する配線工程に分かれる。

A. 基板工程

この工程において製造する半導体 LSI の素子であるトランジスターは、ウエハーのシリコンにイオンを打ち込んで形成した半導体とその上の一部に形成される酸化膜（絶縁膜）、酸化膜の上に形成される電極のゲート、半導体の上に形成される電極のソースとドレイン、隣接するトランジスターとの区画である絶縁体から構成されている。参考図 1 は、最近の LSI でよく使用される p 型と n 型の 2 つのトランジスターからなる CMOS（Complementary Metal

Oxide Semiconductor：相補型 MOS）1 素子の断面を示したものである。CMOSはシリコンウエハー上にp型半導体とn型半導体が絶縁体を間にして並んで形成されており、それぞれの半導体の中央上部に薄い酸化膜とその上に形成されたゲートがあり、各半導体の上にはゲートの両側にソースとドレインが形成されてp型とn型のトランジスターとなっている。

参考図 1 CMOS の断面



このようなトランジスターを構成する半導体，ゲート，ソース，ドレインは以下の工程で順につくられ，抵抗やキャパシターも同様な工程によりつくられる。

① 酸化膜・窒化膜形成

酸化炉を使用してシリコンウエハー表面に酸素を供給，反応させて酸化ケイ素膜を形成し，次いでCVDによりシラン (SiH_4) とアンモニア (NH_3) を反応させて窒化ケイ素 (Si_3N_4) の絶縁膜を形成する。

② フォトリソグラフィ

レジスト塗布現像装置を使用してフォトリソグラフィによりウエハー上にエッチングしない部分のフォトリソグラフィーのパターンを形成する。

③ エッチング

最初のエッチングでは、ウエハー上に形成された酸化膜を除去し、さらにその下のウエハーを構成するケイ素の層の一部までエッチングし、半導体形成可能にする。

④ イオン注入

トランジスターを構成するp型半導体またはn型半導体を形成するために、エッチングで露出したシリコン層にイオン注入装置を使用して不純物成分を注入する。p型半導体とする場合にはホウ素（B）イオンを、n型半導体とする場合には、リン（P）イオンまたはヒ素（As）イオンを注入する。イオン注入装置は、不純物成分の原料からイオンを発生させるイオン源、発生したイオンから目的とするイオンだけを取り出す質量分析器、イオンをビーム状に加速してシリコンに注入する電界加速器から構成されている。

異なるイオンは同時に注入することはできないので、一方のイオン、例えばホウ素イオンの注入を先に行う。その場合、他のイオンを注入する部分はレジストで被覆し、ホウ素イオン注入したのちにレジストを除去し、改めてフォトリソグラフィーにより先にホウ素イオン注入した部分を保護した後、別の、例えばリンイオン注入の工程を行う必要がある。

イオン注入だけではシリコンは半導体の性能を発揮できず、イオン注入された不純物に目的とする特性を発揮させるとともにイオン注入により乱されたシリコンの結晶構造を修復するために、窒素やアルゴンなどの不活性気体中で加熱するアニールを行う。アニールによりイオン注入されたシリコンは半導体となる。

⑤ レジスト剥離・洗浄

不要になったレジストをレジスト剥離洗浄装置により剥離・除去する。

⑥ 絶縁膜形成

半導体の上にCVDにより絶縁性酸化膜を形成する。

⑦ 平坦化 (CMP)

トランジスタ層はエッチングにより凹となっていて表面には凹凸があり、その上にCVDで絶縁性酸化膜を形成すると膜に凹凸がのこるのでCMP装置により研磨して平坦化する。

⑧ 洗浄

CMP後の研磨面を洗浄して残存する砥粒や研磨液、研磨屑を除去する。

⑨ ゲート形成

CVDにより、ポリシリコンなどの導電性材料によりゲートを形成する。

基板工程においては、トランジスタを構成する2種の半導体とゲート、ソース、ドレインという電極や絶縁材料による酸化膜の形成、隣接するトランジスタ間の区画の絶縁体、さらにキャパシター（コンデンサー）や抵抗なども形成する必要がある。これらの素子は導電性材料や絶縁性材料を目的に応じて選択してCVDやPVDにより形成するので、フォトリソグラフィーによるレジストパターン形成、エッチング、PVDまたはCVDによる膜形成、レジスト除去、CMPによる平坦化、洗浄が繰り返し実行される。

B. 配線工程

トランジスタや他の素子が形成された基板の上には、ウエハー面に平行に配線層が形成されるが、そのためには基板層の上に絶縁層を設ける必要があり、CVD装置を使用して酸化ケイ素 (SiO_2) や窒化ケイ素 (Si_3N_4) の絶縁層が作成される。

LSIの回路形成には、絶縁層の下にあるトランジスタの電極と絶縁層上の配線層と接続する必要がある。この接続は、フォトリソグラフィーとエッチングにより絶縁層に穴をあけてコンタクト孔を形成し、CVDにより導電材で

あるポリシリコンをこのコンタクト孔に充てんすることにより行われる。

CMPによりポリシリコン層を平坦化したのち、フォトリソグラフィによりパターンを形成してエッチングし、配線層の一層が形成される。その後、絶縁膜形成、フォトリソグラフィ、エッチング（コンタクト孔形成）、導電層形成、CMPを繰り返して配線を積層形成する。配線層は集積されるトランジスタなどが多くなるほど数が多くなる。DRAMでは少なくとも5層は形成されるようであり、最近では量産化されたフラッシュメモリーでは総計72層も形成された例がある¹。

配線工程の終了でウエハー上でのLSIチップの形成が完了する。

（4）後工程

前工程で製造された半導体LSIのチップ1個が4mm角と小さく、30cmウエハーの場合には形成されるLSIチップの数は4260個にもなる。

後工程では、まずLSIチップを裁断、分離するが、チップ1個は小さすぎてそのままでは利用できないのでこのLSIチップを内蔵し、接続用のアウターリード（脚）を露出して樹脂で封止した半導体パッケージに加工する。

① ダイシング

ウエハーに形成されたLSIチップを、ダイシングソーを使用して個々に裁断、分離する。

② ダイボンディング

分離後のLSIチップを金属製のリードフレームのダイパッドにダイボンダーを使用した接着により固定する。リードフレームには、ダイパッド、インナーリードおよびアウターリードがあり、インナーリードはLSIチップのボンディングパッド（接続端子）と接続され、アウターリードはプリント配線板に接続される。インナーリードとアウターリードは一体の導電材

の両端である。

③ ワイヤボンディング

LSI チップのボンディングパッドは微小で密集して形成されており、そのままではプリント配線板に接続できない。そのためボンディングパッドとリードフレームに設けられたインナーリードを、ワイヤーボンダーを使用してボンディングワイヤ（純金の細線）で接続する。これで LSI チップはアウターリードを通じてプリント配線板と接続可能になる。

④ モールド（樹脂封止）

ワイヤボンディング後の LSI チップとボンディングワイヤは露出した状態であり、汚染や腐食、破損を防ぐためには保護する必要がある。そのため、モールド装置を使用して、プリント配線板に固定・接続するアウターリードを残し、LSI チップとインナーリード、ボンディングワイヤをエポキシ樹脂で封止することにより半導体パッケージが完成する。よく知られている半導体パッケージの一例（参考図 2）は、厚さ 1cm 弱、長さ 5cm ほどの直方体で、アウターリードが下向きに並んでいる DIP（Dual In-line Package）と呼ばれるものである。直方体のパッケージから下方に出ているのがアウターリードである。



参考図 2

（5）LSI の生産に必要な設備、原料、薬品、その他の資材

半導体 LSI は、イレブン・ナインという「超」高純度のシリコンを基材としたウエハーを使用し、前述のように直径 30cm のウエハーに 4200 個を超え

る4mm角のLSIチップとして作られる。さらにLSIのチップ1個に集積されるトランジスターも1000万個を超えるので、この中に1個でも不良があるとチップ全体が不良になり、1枚のウエハーから製造できるLSIチップの歩留まりが低下する。LSIチップの大きさと集積されるトランジスターの数から、個々のトランジスターの大きさはごく微小であることは明らかで、鉄などの金属不純物や埃微粒子がわずかでもあるとどれかのトランジスター素子に不良が発生することは容易に想像できる。したがってウエハー構成材料であるシリコンの純度（イレブン・ナイン）を確保するとともに、製造過程においても不純物や埃微粒子の混入は極力回避しなければならず、生産は不純物の混入しないクリーンな設備を使用し、原料や薬品も高純度のものが要求される。

<原料、薬品>

半導体LSIの製造工程では、多くの原料や薬品が使用される。

① フォトレジスト，封止用エポキシ樹脂

これらはいずれも石油化学製品であり、石油精製時に得られる石油ナフサや芳香族留分を出発原料として多くの工程を経て生産されるものである。

② CVD，PVD 使用材料

CVDにより例えばソース，ドレインを導電材であるポリシリコンで形成する場合にはシラン（ SiH_4 ）などが使用され、配線はポリシリコンのほかにアルミニウムや銅で形成される場合もあり、PVD、スパッタリングの材料として高純度のアルミニウムや銅が使用される。

③ エッチング剤

ドライエッチングには四フッ化炭素（ CF_4 ）などが、ウェットエッチングにおいてはフッ化水素（HF）が使用される。

フッ化水素は、原料鉱石である螢石（フッ化カルシウム； CaF_2 ）と濃硫酸

を反応させることにより製造される。ウエハーのウェットエッチングに使用するフッ化水素酸（フッ化水素水溶液）も高純度であることが必要で、純度が 99.999%（ファイブ・ナイン）以上の高純度品をつくる技術を持っているのは現状では世界の中で日本のメーカーだけである。

四フッ化炭素はフッ化水素の電気分解によりフッ素（ F_2 ）を製造し、これを炭素または一酸化炭素（CO）と反応させることで製造される。

④ 超純水

CMP 工程やエッチングの後など、素子形成中のウエハーでは汚れや異物除去のために何度も洗浄が行われる。この洗浄に使用される水も金属成分や微粒子を除去した高純度のものが必要であり、極限まで純度を高めた超純水と呼ばれる水が使用される。超純水は工業用水、市水、井水などを原料として使用し、

前処理システム → 一次純水システム → サブシステム

の順に通過させて製造される。まず前処理システムにおいて浮遊物質を凝集したのち濾過して除去し、一次純水システムにおいてイオン交換樹脂塔を通したイオン成分除去、逆浸透膜を通過させることによる微粒子、細菌、有機物の除去、脱気装置による溶存酸素の除去を行う。次いでサブシステムにおいて、紫外線照射装置により溶解している有機物を分解して有機酸や炭酸ガスとし、これらをイオン交換装置を通して除去することで超純水が得られ、洗浄装置に供給される。

ウエハーの洗浄に使用する超純水は滞留すると細菌増殖などの汚染が起こるので、必要量以上を製造して供給し、余剰水は循環させて再利用する。洗浄装置からの余剰水は排水回収システムに送って純度を高めたのちに、再度一次純水システムに供給するようになっている。排水回収システムでは余剰水を生物処理装置を通して有機物を除去し、生物処理装置から流出

する菌体を限外濾過膜（UF： Ultrafiltration Membrane）を通して除去する。

イオン交換樹脂，逆浸透膜，限外濾過膜などはいずれも樹脂製品であり，紫外線照射装置の製造と稼働，送水，循環にも資源とエネルギーが必要である。

<生産設備>

① クリーンルーム

半導体 LSI の製造工程では，不良 LSI チップ発生防止のために不純物の混入や埃微粒子を極力排除するクリーンルームの使用が欠かせない。

半導体 LSI の製造に必要とされるクリーンルームは米国連邦規格のクラス 100 以下，すなわち空気 1 立方フィート（約 28 リットル）中の $0.5\mu\text{m}$ 以上の粒子の数が 100 個以下であり，クリーン度が高いものである。クリーンルームは外部からの汚染物質や埃などの微粒子の侵入を防ぐ構造であることが求められ，空気は除塵のために HEPA フィルター（High Efficiency Particulate Air Filter）などの高性能フィルターを通して送り込まれる。また建物や部屋の隙間は完全にはなくせないため，この隙間からの侵入防止のために内部は外気圧より高くなるように与圧されている。空気の濾過に使用される HEPA フィルターはガラス繊維で形成されており，後述するプリント配線板材料のガラス繊維と同様に製造には地下資源やエネルギーが多く消費される。

② レジスト塗布現像装置

レジスト塗布現像装置においてレジスト原液塗布には，スピンコーターが使用される。円盤状のウエハーの中心に一定量のレジスト原液を供給し，ウエハーを高速回転（スピン）させて薄膜とする装置である。フォトマスクを介したレジスト膜の露光にはステッパーが使用される。

③ 防振装置

レジスト原液の膜にステッパーを使用して露光する場合、LSIの集積度が高くなるほど配線の幅が狭くなって、現在は約10ナノメートル（100万分の1ミリ）レベルであるため、露光時のわずかな振動でも設計通りの配線を形成することができなくなる。このため、露光装置には振動を防止するための高性能の防振装置が欠かせない。

④ ウエハー搬送装置

LSIの製造工程では上記の多くの工程があり、各工程で使用する装置間でウエハーの移動や搬送が必要である。ウエハーの移動、搬送においては人の接触による汚染を回避するためにすべて機械やロボットが行うようになっており、これらの設備や制御装置の製造、稼働にも資源、エネルギーを必要とする。またクリーンルームから出して搬送する場合には、密閉されたクリーンな専用容器が使用される。

⑤ CVD装置、PVD装置

CVDやPVDを行う装置である。これらの装置には、いずれもウエハーに蒸着を行うチャンバー（反応容器）を真空にするための真空ポンプが必要である。またPVD装置はターゲットを照射するため、またCVDでは高周波電力発生のための電力源が必要であり、真空ポンプの稼働にも電力を必要とする。

<その他の資材>

① CMP用研磨パッド

CMPにおいて使用する消耗品である研磨パッドはポリウレタン樹脂製であり、いずれも石油成分を出発物質として多くの工程を経由して製造された芳香族ジイソシアネート化合物、ポリオール化合物、芳香族ジアミン、気泡形

成化合物を混合して反応，硬化させてブロック状の微細気泡を有するポリウレタン樹脂とし，円盤状にスライス後，表面を研磨することで直径約 30 cm，厚さ数ミリの円盤状の研磨パッドが製造される。

② 研磨液

CMP において使用する研磨液（スラリー）は，砥粒としてヒュームドシリカという超微粒子シリカ（酸化ケイ素）を含む。ヒュームドシリカも純度の高い酸化ケイ素を原料として使用して不純物が入らないように製造される。研磨液を構成する薬剤と水も高純度のものが使用される。

以上のように，LSI チップの製造とそれを半導体パッケージとする数多くの工程，およびこれらの工程に使用する設備，原料，薬品，資材だけをみても，大量の石油などの地下資源や水，エネルギーを消費することがわかる。

〔2〕 プリント配線板の製造における資源，エネルギー消費

LSI を内蔵する半導体パッケージは，単独ではコンピューターなどの機器は動かさないため，用途に応じた電子回路を構成する他の電子部品と共に，プリント配線板に実装（固定・接続）し，プリント回路板としてパソコンなどの電子機器に装着して使用される。

プリント配線板は配線を構成する導電層と絶縁体から構成され，絶縁体は樹脂または樹脂と他の基材との複合体である。現在最も多く使用されているのが，ガラスクロスとエポキシ樹脂の複合材であるガラスエポキシ基板である。

ガラスエポキシ基板構成材料のガラスクロスはガラス長繊維を使用して製造される。ガラス長繊維は，ガラス原料を熔融炉に入れて加熱熔融し，炉の下部に設けられた白金製ノズルから新幹線並みの速度で引き取ってフィラメン

トとし、これを複数本束ねてアブリケーターと呼ばれる回転ローラーで糊付けして巻取り、次いで必要なフィラメント数になるように束ねて織り糸とする。織り糸を織機にセットし、有機繊維の平織りと同じ方法でガラス織布を製造したのちに糊を除去してガラスクロスとする。

ガラスの熔融温度は 1000℃を超え、熔融したガラスを一定温度に保つ必要があるために炉の修理期間以外は年中休むことなく連続してガラス繊維が生産されており、ガラス繊維の原料は炉内のガラスの量が一定になるように常時供給される。

絶縁体を構成するエポキシ樹脂は石油化学製品であり、石油を出発原料として多くの工程を経て合成される。エポキシ樹脂は 2 液型接着剤としても広く市販されているものである。ガラスエポキシ基板は、流動性のあるエポキシ化合物と硬化剤の 2 成分を使用時に混合してガラス織布と複合化して硬化させるか、あるいはガラス織布と反応硬化性のエポキシ樹脂を複合化したプリプレグを作成し、これを加熱して硬化させることで製造する。

プリント配線板の導電層はガラスエポキシ基板に銅箔を接着積層するか銅メッキをすることにより形成される。

配線は、レジストにより導電層にパターンを形成し、エッチングにより配線部分を残すことにより形成する。プリント配線板の配線の幅は LSI の配線より桁違いに広いので配線のパターンはスクリーン印刷などの印刷技術によりレジストを塗布して形成することができる。

プリント配線板の配線には、半導体パッケージや他の電子部品をはんだ付けする際に、不要な部分にはんだが付着しないようにソルダーレジスト加工も行われる。

以上のことから、ガラス織布の製造、エポキシ樹脂の製造、複合されたガラスエポキシ基板の製造、並びにその表面に配線を形成したプリント配線板にお

いても、多くの資源とエネルギーが必要であることが理解いただけると思う。

〔3〕 ディスプレイの製造における資源、エネルギー消費

コンピューターを操作して使用するにはディスプレイは欠かせないものである。現在ディスプレイとして最も多く使用されているのは、カラー液晶ディスプレイである。

液晶ディスプレイの基本原理は、光源であるバックライトから供給される光を、偏光板を通して偏光したのち、液晶シャッターの制御により画像を形成するものであり、液晶を微小な画素に区分し、画素ごとに液晶シャッターの制御を行うことで液晶の配向を変化させることで、例えば電卓のモノクロ画像が形成される。カラーディスプレイでは、画素をさらに RGB（赤緑青）のカラーフィルターを備えたサブ画素に分割し、3原色を制御してカラー画像を形成するようになっている。

液晶ディスプレイは、大きくはバックライト／液晶シャッター／画質向上フィルム層から構成されており、それぞれの層はさらに複数の部材で構成されている。

① バックライト

液晶ディスプレイの光源は白色光を供給するバックライトである。バックライトの構成の一例は、冷陰極管（発光体）と導光板、液晶シャッター側の拡散板、プリズムシートから構成される。冷陰極管は導光板（長方形の板状）の一端端部に配置され、この端部から導光板の内部に光を送り込むようになっている。導光板の裏面には反射板が接着積層されていて送り込まれた光をすべて反射して表面側（液晶シャッター側）に送り出すようになっている。導光板の表面側（反射板の反対側）には、導光板から放射される光がディス

プレートの前面でできるだけ均一になるように拡散シート、プリズムシートが積層されている。

プリズムシートは表面にプリズム構造が形成されていて、導光板、拡散シートなどを通して斜めに出てきた光を反射して液晶層に垂直に光を向けることで、ディスプレイの輝度を向上させる効果を有するものである。プリズムシートや拡散板には透明性の高い樹脂であるポリエチレンテレフタレート（PET）樹脂やポリカーボネート樹脂などが使用されている。

②液晶シャッター

液晶シャッターの構成の一例は以下のようなものである。

ガラス基板／偏光板／透明電極（画素電極）／液晶／配向膜／
透明電極（対向電極）／カラーフィルター／偏光板／
ガラス基板

液晶を間に挟んだ2つの透明電極は、光源側が画素ごとに駆動 TFT（Thin Film Transistor；薄膜トランジスター）が形成された画素電極、反対側が対向電極で、この間に電圧が負荷されるようになっている。画像の形成は、画素電極の駆動 TFT により対向電極との間で液晶にかかる電圧を変化させて液晶分子の配向を変え、配向変化による光学的性質の変化を利用して偏光板を通過した光の透過量を制御することによりおこなわれる。液晶分子は、透明電極間に電圧をかけない時はガラス面と平行に並んでいて光を透過するが、電圧をかけるとガラス面と垂直な方向に配向して光の透過量を減少ないし遮断する。カラーディスプレイでは各サブ画素の液晶を動かすために、サブ画素毎に 1 個の駆動 TFT が必要となる。TFT は半導体素子の一種で、各サブ画素の液晶に適切な電圧をかけるためのスイッチの役目を果たす。

液晶シャッターを構成するガラス基板は、厚さが 0.7mm である。

偏光板は、TAC（トリアセチルセルロース）フィルム，PVA（ポリビニルアルコール）偏光フィルム，TAC フィルムの3枚

のフィルムが、PVA系の接着剤層で接着積層されたものであり、全厚さは0.2mmである。

TACは天然材料のセルロースを原料とし、化学薬品でセルロースをアセチルセルロースとして製造される。これを溶剤に溶かして薄い膜としたのち乾燥することでTACフィルムが製造される。

偏向フィルムや接着剤として使用されるポリビニルアルコールは、石油留分のナフサを出発原料として多数の工程を経て製造される樹脂である。

透明導電膜は、PET（ポリエチレンテレフタレート）フィルムの上に透明導電性材料、多くはITO（Indium Tin Oxide；酸化インジウム錫）の薄膜を形成したものであり、インジウム、錫ともに原料鉱石から製造される。

画素電極である駆動TFTは、ガラス基板にCVDによりポリシリコン膜を形成した後にLSIの製造におけるトランジスタの形成と同様の方法で作成される。

配向膜は、石油化学製品であるポリアミド樹脂などで作成されたものである。

液晶は、ビフェニル系化合物、エステル系化合物などいずれも石油化学製品であり、液晶層の厚さはわずか0.005mmである。

② 画質向上フィルム層

液晶ディスプレイの表面には画質向上のために種々の機能を有するフィルムが積層される。

・反射防止フィルム

最前面の偏光板の表面に貼付されるもので、外光・蛍光灯の映り込み、反射の眩しさを抑制する機能を有する。PET、TACなどの透明な樹脂を使用し

てつくられている。

- 位相差フィルム

視覚方向によって生じる表示の着色，視野角特性を改善し，斜め方向から見ても良好な画像が得られるようにする機能を有する。ポリカーボネート，シクロオレフィン樹脂，液晶ポリマーなどの石油化学製品を使用してつくられている。

- ③ タッチパネル

近年急速に普及しているスマートホンは，携帯電話というよりコンピューターというべきものであって心臓部は LSI を装着したプリント回路板であり，画面は液晶ディスプレイの上に操作用のタッチパネルが積層されている。タッチパネルは金融機関に設置されている現金自動預け払い機（ATM）やタブレットなどにも使用されている。

タッチパネルの構造もいくつか種類があるが，例えば抵抗膜式タッチパネルの場合，基本構造は以下のようにになっている。

下部電極板（ガラス板）／透明電極膜（ITO 膜）／

ドットスペーサー／透明電極膜（ITO 膜）／

上部電極板（PET フィルム）／ハードコート（タッチ側）

透明電極膜は，それぞれ下部電極板（ガラス）の上部電極板側表面と上部電極板（PET フィルム）の下部電極側表面に形成されており，PET フィルムは柔軟性があるので上部電極板にタッチすると変形してドットスペーサー（点々と配置されているスペーサー）のないところで上部と下部の電極膜が接触して電気が流れ，タッチした位置が特定される。

ハードコートは繰り返し行われるタッチ操作から上部電極板の PET フィルムに発生する傷を防止するものであり，紫外線硬化樹脂が多く使用されている。

液晶ディスプレイの製造においては、各層間の接着・積層時に微粒子状の異物が入るとそこは画面上で輝点となり、画像不良となる。当然、大画面で1か所でも輝点があると全体が不良となる。ディスプレイが高性能のハイビジョン画面になって画素が小さくなるほど、それまで問題にならなかった微小な粒子が不良原因となるため、生産の際には、LSIの製造工程ほどではないが高レベルのクリーンルームの使用は欠かせない。

以上のように、パソコンなどに使用されている液晶ディスプレイは、各層を接着するための接着剤層を含めると数十層から構成されており、各層を構成する材料はほとんどが石油化学製品であるし、その製造においても不良発生防止のための高性能の設備が必要であり、ここでも多くの資源とエネルギーを必要とすることがわかる。

〔4〕 半導体の製造、コンピューター（スマートフォン含む）使用におけるエネルギー消費

先進国の成長が鈍化する中で世界的に、経済成長のために技術のイノベーションに大きな期待が寄せられており、コンピューターを利用したデジタル技術である「AI」や「IoT」「5G 通信ネットワーク」「ブロックチェーン」といったICT（情報通信技術）、ロボット技術の成長と拡大が推進されている。しかし、これらを製造し、稼働させるためには地下資源とエネルギー消費は避けられない。石油経済研究会の星野克美氏は電力消費について以下のように指摘している。

自動車分野では「電動車」「自動運転」「MaaS（モビリティ・アズ・ア・サービス）」などがテーマだ。「Internet-connected Robot」「RPA(Robotic Process Automation)」などロボットの活用も新たな段階が視野に入ってきた。

これらのデバイスは内蔵するAIのほか、クラウドサーバー上のAIやデータベースを利用し自己制御される。無数のデバイスとそれにつながるネットワーク、そしてデバイスと交信するAIが、どれだけ多大な電力を消費することになるのか。2020年代に爆発するAI・IoT革命は電力を“爆食”する可能性がある。

中国ファーウェイのエネルギー研究者であるアンドレ・アンドラエ氏は、世界のICT産業が世界の電力消費に占める割合が、2015年には8.2%だったものが、電力効率を飛躍的に向上できない最悪のケースで、2025年に20.7%まで高まるとしている（Anders Andrae, “Total Consumer Power Consumption Forecast”, Oct. 2017, Research Gate）。

その場合、ICTの電力消費の割合は、通信ネットワークが13%、製造生産が15%、消費者が14%だが、データセンターがそれらの合計（42%）を上回る58%と過半を占めると予測している。この勢いが続くと、2030～40年頃にはICTの電力消費は世界の電力消費の80～100%に達するような事態もあり得るといふ²。

半導体LSIの製造、コンピューター、サーバーなどの稼働にどれほどのエネルギーを消費するか、具体的に見てみよう。

① 半導体LSIの製造における資源・エネルギーの消費

「〔1〕半導体パッケージとプリント回路板の製造」での説明のように、半導体LSIの製造並びにこれを内蔵した半導体パッケージ、さらにこれを実装

したプリント回路板の製造には、驚くほど多くの工程があり、各工程で使われる装置も多く、技術用語はわからなくても、石油、石炭や金属材料などの地下資源、電力を主とするエネルギーを大量に消費することが理解いただけると思う。

LSI 製造の正確な電力消費量などは、製品の原価にかかわる企業秘密で公表されない。湯之上隆氏は、かつて LSI の開発に関与していた人の情報として、1990 年代、メモリー LSI の 1 種である DRAM を 1 チップ製造するのに必要な電力量は約 1kWh であり、集積度は高くなっているが省エネ化も進んでおり、現在も大きく変わっていないと推測した上で以下の予測を行っている。

世界の半導体 (LSI) 出荷個数は 2013 年に 7000 億個に達し、出荷数の推移から毎年約 250 億個ずつ増大している。この推移から半導体出荷個数は 2020 年には、8750 億個 (7000 億個 + (250 億個 × 7)) になると推計される。

また 2020 年には IoT などの拡大により 1 兆個のセンサーが世界で使用されると予想され、そのセンサーには、センシングしたデータをプロセッシングする CPU、メモリー、通信半導体が付帯される。したがって、1 兆個のセンサーを稼働するには、3 兆個の半導体 LSI が製造されると推計される。2016 年から 2020 年の 5 年間に 3 兆個の半導体 LSI を製造するには毎年 0.6 兆個を製造することになる。

以上を合計すると、2020 年の半導体 LSI の製造数は、 $8750 + 6000 = 1$ 兆 4750 億個と推測され、半導体 1 チップの製造に要する電力量が約 1kWh であるから、2020 年に世界で半導体製造に必要な電力量は 1 兆 4750 億 kWh になる。

2020年の世界の総発電量は約30兆kWhと予測されているから、世界の半導体LSI製造に必要な電力量1兆4750億kWhは、世界の電力量の4.9%となる³。

この予想消費電力量に、製造に必要な四フッ化炭素、シラン、フッ化水素などの薬品、資材であるフォトリソグラフィやガラス繊維、黒鉛電極、エッチング剤、研磨パッドなどの資材のほか、CVDやPVD、リソグラフィ塗布現像装置などの設備を製造する資源、エネルギー消費が含まれているかどうかは不明である。LSIの製造メーカーではそこまではわからないだろうし、「電力量」としか書かれていないので、考慮されていない可能性が高い。

② 人工知能の消費電力

人工知能の進歩は、「アルファ碁」で広く知られるようになったが、そのマイナス面である電力消費はほとんど報道されていない。

人工知能を稼働させる電力消費の大きさを、人間の頭脳と比較してみよう。人間の消費エネルギーはおよそ75W（基礎代謝）～100W（活動状態）であり、脳の消費エネルギーは思考時で21Wである。これに対して囲碁の名人を破った人工知能「アルファ碁」の消費電力は25万Wもあり、人間の脳の1万倍以上のエネルギーを消費する⁴。

さらにこのアルファ碁では、過去の棋譜などのデータベースを検索しながら最適解を見出すために1000台のサーバーが接続して使用されており、その消費電力量は10万kW以上であると推測されている³。

「アルファ碁」に代表されるAIは便利で驚異的な性能を有するものであるが、それを稼働させるだけでも膨大な電力を消費するものであることは理解しておく必要がある。

③ コンピューター

コンピューターは今や社会生活や経済活動の必需品ともいえるものであり、職場でも家庭でも膨大な数のコンピューターが使用されている。

ネットで調べるとコンピューターの消費電力は、デスクトップパソコンでは50～150W、ノートパソコンで20～30W、サーバーで約500W（待機時）～700W（負荷時）である。

JEITA（日本電子情報技術産業協会）公表の資料では、2014年から2018年までのパソコン（ノートパソコンとデスクトップパソコンの合計）の出荷台数は毎年700～900万台である。大雑把な計算として、1年の平均出荷台数を800万台とし、8年に1回買い替えされているとすると使用されているパソコンは約6400万台になる。1日の使用時間を6時間、1台の消費電力を60Wと仮定して計算すると、年間消費電力量は84億kWhとなる。

汎用されているパソコンは本体以外にハードディスクなどの情報記録装置とディスプレイおよびネット接続機器が必ず併用されるので、これらの製造にも資源とエネルギーが消費される。

パソコンより普及率が高いスマートフォンについても消費電力を試算してみたが、意外に小さかった。

④ サーバー

企業や官公庁でコンピューターを利用する場合には、データを集めて管理するサーバーは欠かせない。当初は各企業、官公庁ごとに設置されていたが、管理やセキュリティーの負担が大きいため、最近はデータセンターやクラウドコンピューターサービスが利用が広がっている。またIBM社の人工知能ワトソン（Watson）はクラウドにより提供されている。クラウドコンピュ

ーターは、世界中のクライアント・コンピューターとインターネットで接続された大量のサーバーが集積されたようなものであり、大量の電力を消費するために発熱量が大変大きく、冷却が必要であるので、寒冷で電気料金の安価な地域に設置されることが多い。

このデータセンターの消費する大量の電力について、湯之上隆氏は以下のよう

に述べている。

GREEN PEACE 2015 の資料によれば、データセンターが消費する電力量は、2015 年に 4162 億 kWh、2016 年に 4745 億 kWh、2017 年に 5409 億 kWh だったが、2020 年には、2015 年の 4.7 倍の 1 兆 9730 億 kWh になると予測されている。これは、世界の電力量の 6.6% に相当することになる³。

⑤ ロボット

ロボットは人工知能にフレームやアーム、カバー並びに駆動のためのサーボモーターなどから構成される駆動部が組み合わされる。駆動部を製造するには金属やプラスチックなどの資源とエネルギーが必要であるし、駆動に多用されるサーボモーターを作動させるためにもエネルギーが必要であり、作動させるエネルギー消費は人間の消費エネルギーよりはるかに大きい。

〔5〕 まとめ

日本では経産省が、2025 年パソコン、サーバー、ネットワーク機器の消費電力の合計は約 1300 億 kWh となると推定している。2011 年の日本の

総消費電力が 9410 億 kWh (3363 ペタジュール⁵) であって以後ほぼ横ばいであることから約 13%がこれらに消費され、以後も増加するものと予測される。

電力の問題は、一次エネルギーから発電する際の変換におけるエネルギーロスが約 60%もあり⁵、これに送電ロスが約 5%加わることである。つまり、電気はその消費量のおよそ 2.8 倍の石油や天然ガスなどの一次エネルギーを消費しており、使い勝手が良いものであるが、大きなマイナスも抱えているのである。

世界的に見ると、上述のように 2020 年の半導体 LSI の生産に必要な予測電力量は 1 兆 4750 億 kWh、世界のデータセンターでの予測消費電力量は 1 兆 9730 億 kWh であり、2020 年の半導体製造とデータセンターの消費電力量は合計約 3 兆 5000 億 kWh であるから、世界の電力量の 11.5%になると推定される³。

データ量の増加については、EMC(米 IT 企業)の調査結果(2014 年発表)では、デジタル情報量は 2013 年には 4 兆 4000 億 GB (ギガバイト)であったが、2020 年には 10 倍の 44 兆 GB に増加すると予測されている⁶。

経済成長の資源としてビッグデータの利用が重視され、個人のインターネットの利用履歴やクレジットカード利用などのデータがどんどん蓄積されている。したがって、人類が生み出すデータ量は消えることなく増え続ける一方であるから、記録して利用するにはデータサーバーを増やすしかなく、それを收容するデータセンターも増え続ける。データが増加すると、当然人間では処理できないので、AI に頼るしかなく、その AI も進化し、数も増える。データセンターとそこで使用するサーバー、パソコン、携帯端末、IoT に接続されるセンサー、並びにこれらに使用する半導体生産の急速な増加により 2020 年に

は世界的な電力危機が起こるとの予測もあり³、ITRS（世界半導体技術ロードマップ）は、このままの状況が続くと2040年までにコンピューターの電力消費が世界の電力供給を上回ると予測している²。

AIやICTのような端末の機器のセンサー、パソコンやスマートホンなどの携帯端末、データサーバー、並びに情報通信中継機器を世界的に接続して形成される巨大なシステムにおいては、必ずボトルネックとなる弱点が発生するが、最大の弱点は電力供給である。またシステムの弱点を突いた悪意の攻撃も防ぐのは難しく、ハッキングやマルウェア（ウイルス）による混乱も、また自然災害による電気供給システムや機器の破損もリスクである。停止すればこのシステムに頼り切った状況にある社会活動に大きな混乱が生じ、紛争発生恐れや流通の阻害、医療レベルの低下により人命にも危機が生じる。

世界的には、石油や金属などの地下資源が減少し、廃棄物による環境汚染が増加しつつあり、コンピューター利用技術によるAI、ロボット、ICTの発展には莫大な地下資源とエネルギーの消費を伴うことを考慮する必要がある。地下資源は枯渇に向かい、電力供給も必ず限界を迎えると思われるが、指摘されたリスクは経済界ではほとんど顧みられておらず、資源とエネルギーの消費を必要とする経済成長に猪突猛進の状況である。他の多くの問題も考え合わせると、AI、ロボット、ICT技術の成長拡大を続けることは、電力の供給能力からみてもおそらく不可能であり、今世紀半ばまでには破綻するには至らなくとも成長は限界に達すると推測される。そして、成長が止まったとしても、資源とエネルギー源が枯渇に向かうのであるから、その状態を維持しようとするれば、資源とエネルギー源の争奪戦の起こる可能性が大きい。このような紛争による悲劇を回避するためには、早急にAI、ロボット、ICT技術の成長拡大を抑制して縮小社会に向かって進むしかないだろう。

引用文献

- 1) 日本経済新聞 2016年12月23日
- 2) 星野克美「AI・IoT 革命が電力を爆食する」
日経エネルギーNEXT, 2019年5月23日
- 3) 湯之上 隆「2020年に世界を襲う電力危機、資源地は半導体
だ」JB Press, 2018年9月7日
- 4) 「AIと世界」日本経済新聞 2017年7月27日
- 5) NEDO「再生可能エネルギー技術白書第2版」
- 6) マイナビ ニュース 2014年4月11日
(<https://news.mynavi.jp/article/20140411-a234/>)

参考文献

- 1) 「半導体 LSI のできるまで」編集委員会編著
「よくわかる半導体 LSI のできるまで」
日刊工業新聞社, 2001年1月12日
- 2) 大見忠弘監修「半導体製造プロセスと材料」
CMC 出版, 2005年10月25日
- 3) 西久保靖彦「よくわかる最新ディスプレイ技術の基本と仕組み」
秀和システム, 2009年10月1日