

Automation in Semiconductor Manufacturing

IEDM San Francisco, 1982

Keynote Speech

解説

IEDMはISSCCと並んで、半導体分野におけるもっとも伝統的な学会であり、デバイス・プロセス系の技術を中心に例年12月に開かれる。基調講演は初日に行われるが、北米、欧州、アジアから選ばれた3名がこれを行うのが慣例となっている。この年は米国のIBM、ドイツのシーメンス、そして日本からは日立が選ばれた。

1981年には日本がメモリ分野で世界のトップに立ったこともあって、日本の製造技術に大きな注目が集まっていた。特に日立は3ミクロンの先端デバイス(64K DRAMや16K SRAMなど)でリーダーとなっていたため、お鉢が回ってきたのだと思う。予稿集の論文は生産技術部長の長友宏人氏との連名であり、スピーチは私が行った。

海外における2000名規模の大きな学会でのスピーチは初めての経験であったが、1時間に及ぶ持ち時間を飽きさせることなく話し続けることは容易ではない。充実した内容であることがもっとも大事ではあるが、適度なユーモアを盛り込んで、会場の雰囲気や和らげるような工夫も必要である。冒頭のスライドや、最後のスライドはそのような意図で作られたものであり、途中でも笑いを誘うような趣向を取り入れたので、ご参考にしていただきたい。

結果としてこの基調講演は大変好評であった。講演の終了後にプログラム委員長のマイケル・アドラーからは次のような礼状をいただいた:

「———特に貴殿のスピーチについては、これまでのIEDMでもっとも優れたものであるということ、多くの人から聞かされました。内容が素晴らしかっただけでなく、時にユーモアを交えての発表が好評でした。アメリカ流のユーモアについての理解の深さに多くの人が驚いていました。———」

これは単に私のスピーチへの賛辞というよりも、当時世界のトップレベルに達していた日本の半導体技術に対する評価をいただいたものだと思う。

AUTOMATION IN SEMICONDUCTOR MANUFACTURING

HITACHI

半導体製造における自動化

1982年、IEDM における基調講演。アジア地区を代表して行ったもの。

先端デバイスの製造の自動化について総合的な観点からの講演である。

米国からはIBM(LSI向けのデバイス技術)、欧州からはシーメンス(パワーデバイス)からの講演が行われた。



HOW TO COOK SI WAFERS ?

Siウエーハを如何に料理するか？

冒頭には意表をつくスライドを配置して、会場の笑いと拍手を誘った。
「今日の私の話は如何にすれば美味しい料理が作れるかについてのシェフの話と同じです。
いろいろな台所用品やその使い方について伝授いたしましょう。
しかしながら、伝家の秘宝の味付けは別ですからね！」

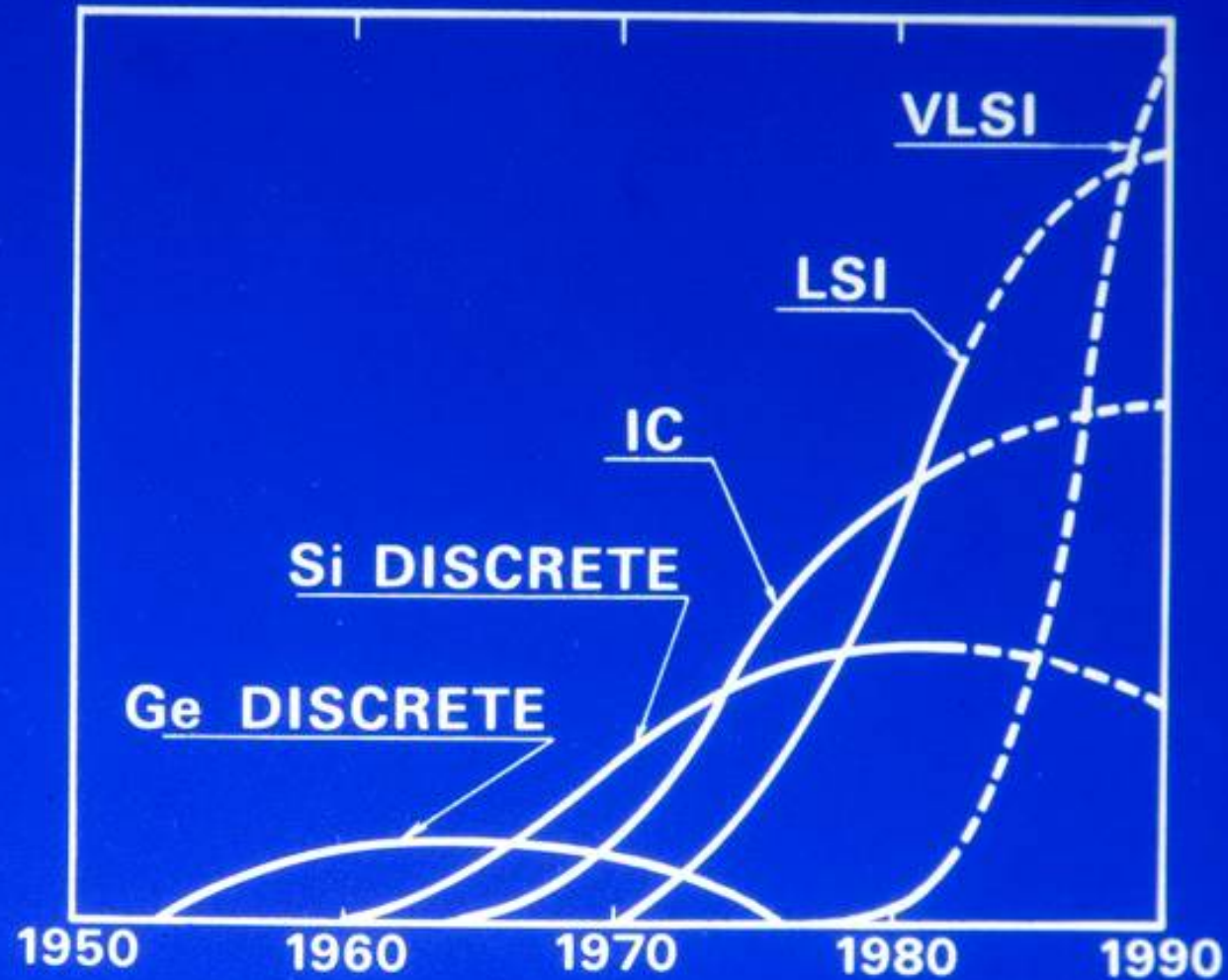
- **CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR TECHNOLOGIES**
- **AUTOMATION IN WAFER-FAB**
- **AUTOMATION IN ASSEMBLING**
- **FUTURE PROBLEMS AND OPPORTUNITIES**

CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR TECHNOLOGIES

半導体技術の特質

半導体分野の技術にはいくつかの特質がある。
自動化に先立ってその点を押さえておかなければならない。

BUSINESS SIZE

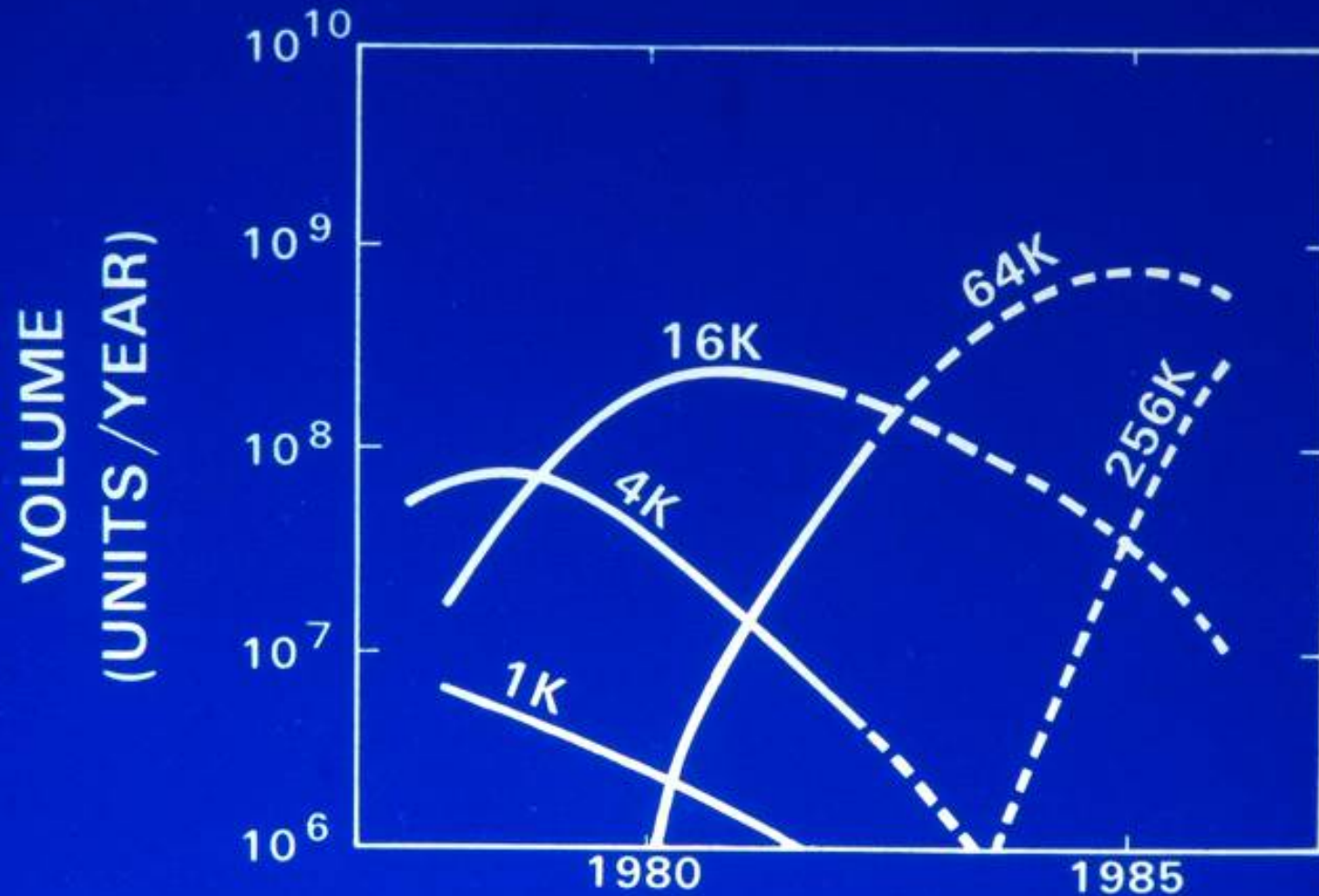


"TECHNOLOGY WAVES" IN SEMICONDUCTOR

半導体の技術の波

半導体技術の進歩は極めて速く、ほぼ7年の周期で新しい波が立ち上がる。Geトランジスタに始まって、Siトランジスタ、IC、LSIを経てVLSIが立ち上がり始めた。90年代にはVLSIが最大のセグメントになるだろう。

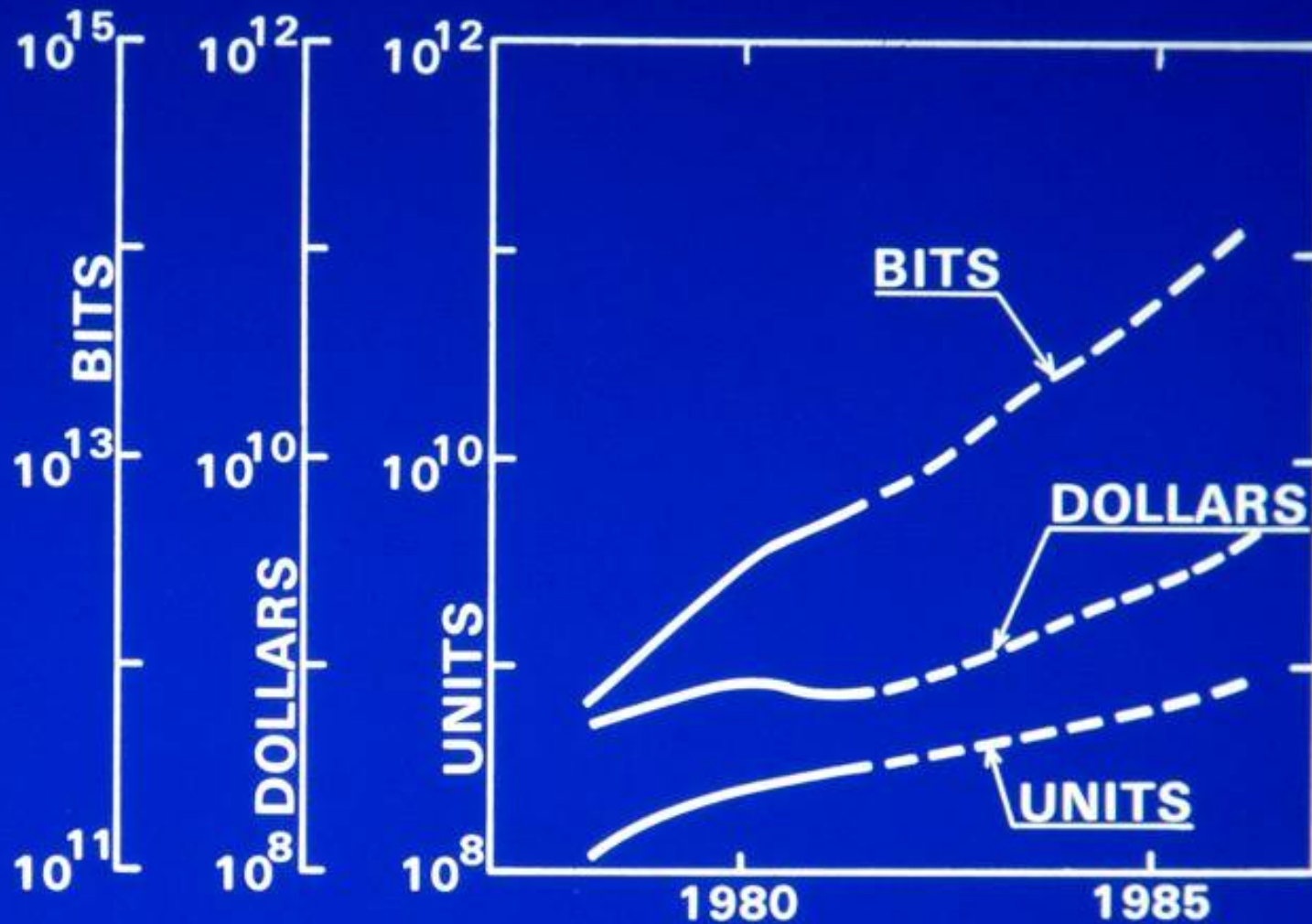
自動化を進めるに当たっては技術の陳腐化を考慮しなければならない。



GENERATION CHANGES IN MOS DYNAMIC RAM

DRAMにおける世代交代

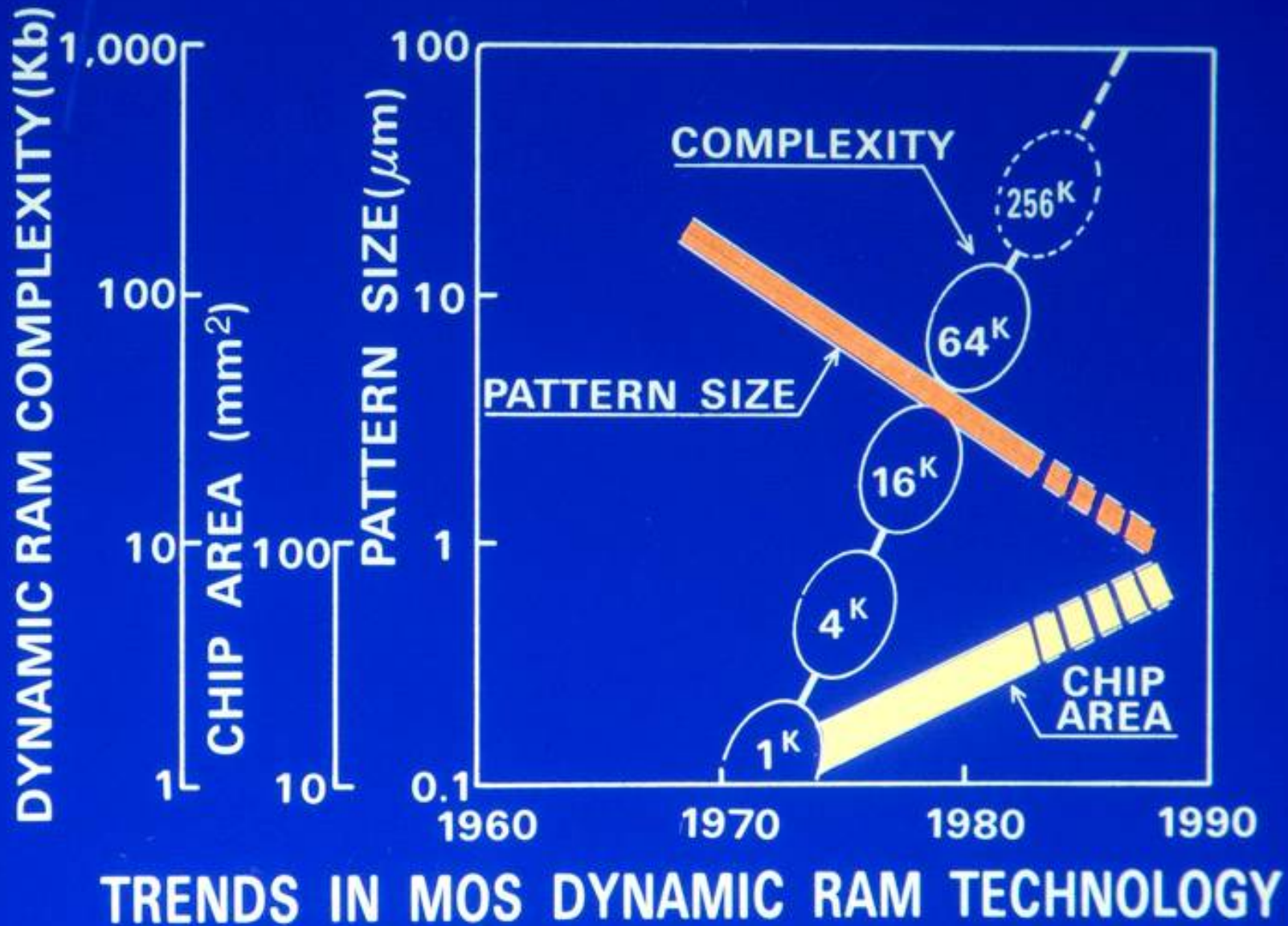
1Kビットから始まったDRAMは4K、16Kを経て64Kビットが立ち上がり始めている。しかし、数年以内には次世代の256Kビットが64Kビットを凌駕するだろう。



MOS DYNAMIC RAM CONSUMPTION

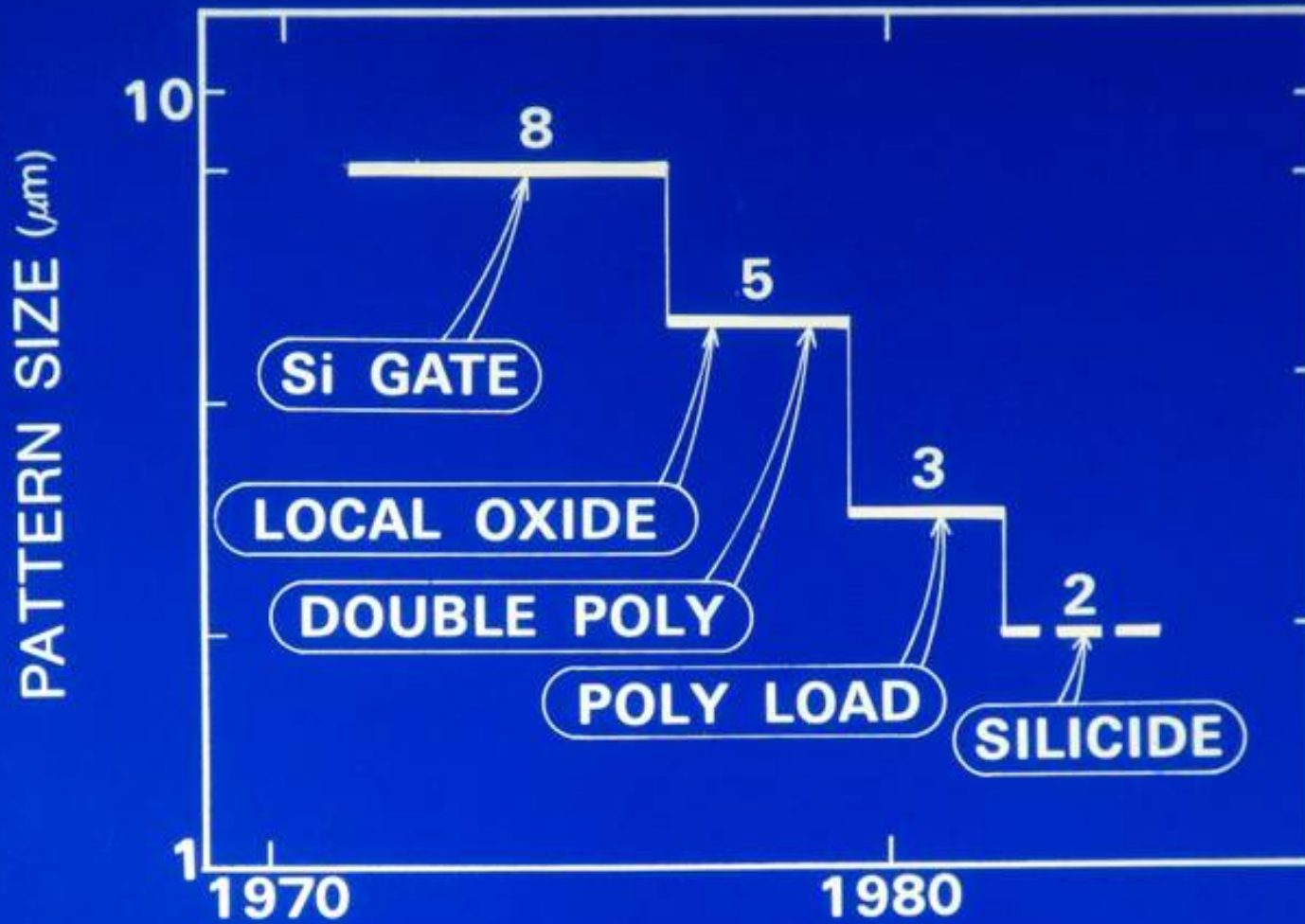
MOS DRAMの消費量

ビット数は急速に伸びるが、金額ベースと数量ベースの伸びは緩やかである。それはビット当たりのコストが下がり続け、集積度は上がって行くからである。この点も自動化において考慮すべき点である。



DRAMの技術トレンド

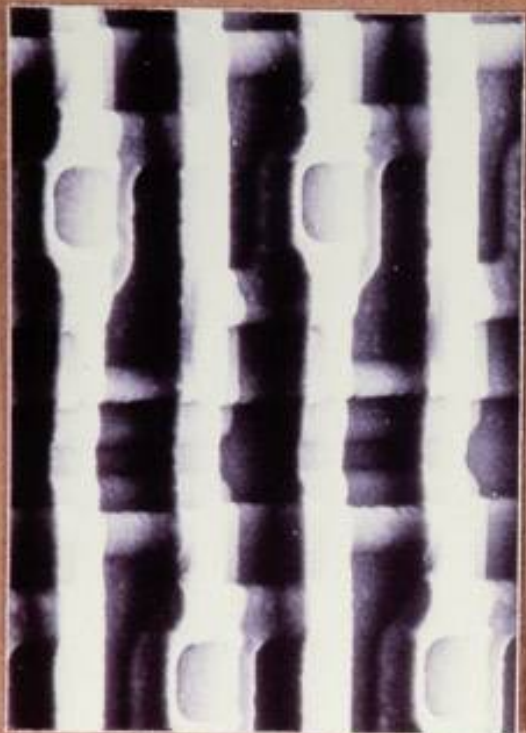
1Kビットから256Kビットに至るDRAMの集積度、加工寸法、チップ面積のトレンドを示す。
集積度は3年で4倍、加工寸法は3年で70%縮小(密度は2倍)、チップ面積は3年で2倍である。



INTRODUCTION OF NEW TECHNOLOGIES

新技術の導入

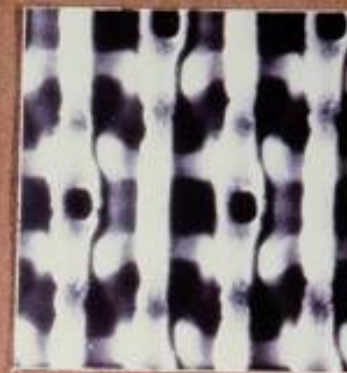
1970年以降に導入された新技術のトレンドを示す。
 いずれの技術も導入当時は「画期的」とされたものである。



16K



64K



256K



1M

DYNAMIC RAM PATTERNS

DRAMのメモリセルの写真

実はこのスライドも会場からの爆笑を誘った一つである。

「皆さん、これは16K以降のメモリセルの写真を示しています。世代ごとにどんどん小さくなっています。

1Mビットのセルはあまりに小さくて、皆さんの席からはおそらく見る事ができないでしょう」

- DECREASED YIELD
- LOW THROUGHPUT
- HIGH INVESTMENT COST



CHALLENGES FOR AUTOMATION

自動化における課題

課題として次の3点を挙げている。

1)歩留の低下、2)スループットの低下、3)投資額の増大

AUTOMATION IN WAFER PROCESSING

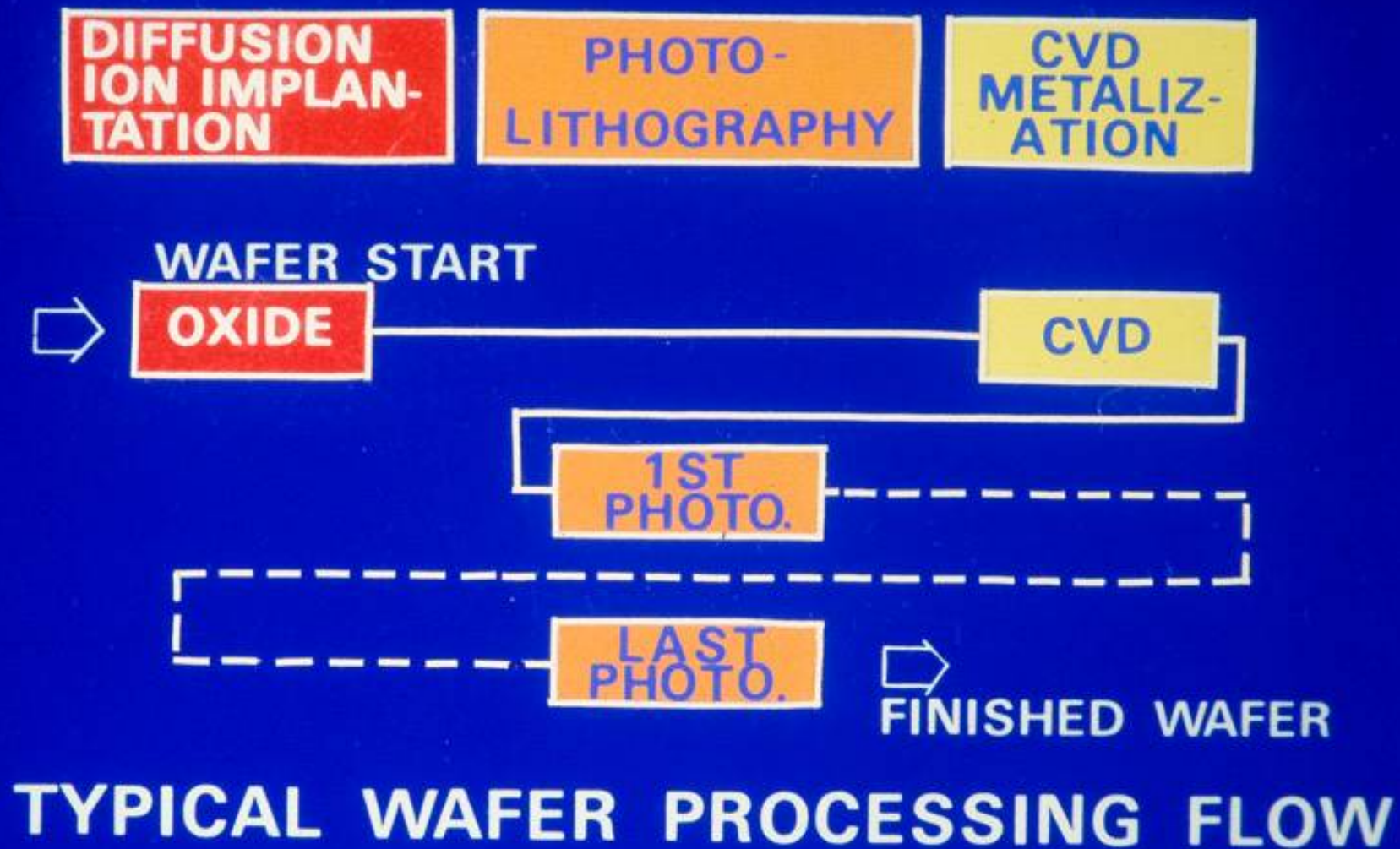
前工程の自動化

● FEATURES OF WAFER PROCESSING

● BASIC CONSIDERATIONS AND
IMPLEMENTATIONS

● OVERALL EFFECTIVENESS AND PROBLEMS

- 1) ウェーハプロセスの特徴
- 2) 基本的な考察と実行
- 3) 総合効率と問題点



典型的なウエーハプロセスのフロー

ウエーハ工程の基本は下記の三つのプロセスが繰り返し行われことである。

1) 拡散・インプラ、2) ホトリソグラフィ、3) 成膜(CVD、メタライゼーション)



酸化プロセス

酸化プロセスの素工程を示す。



PHOTOLITHOGRAPHY PROCESS

ホトリソ工程のプロセス

ホトリソ行程の素工程を示す。

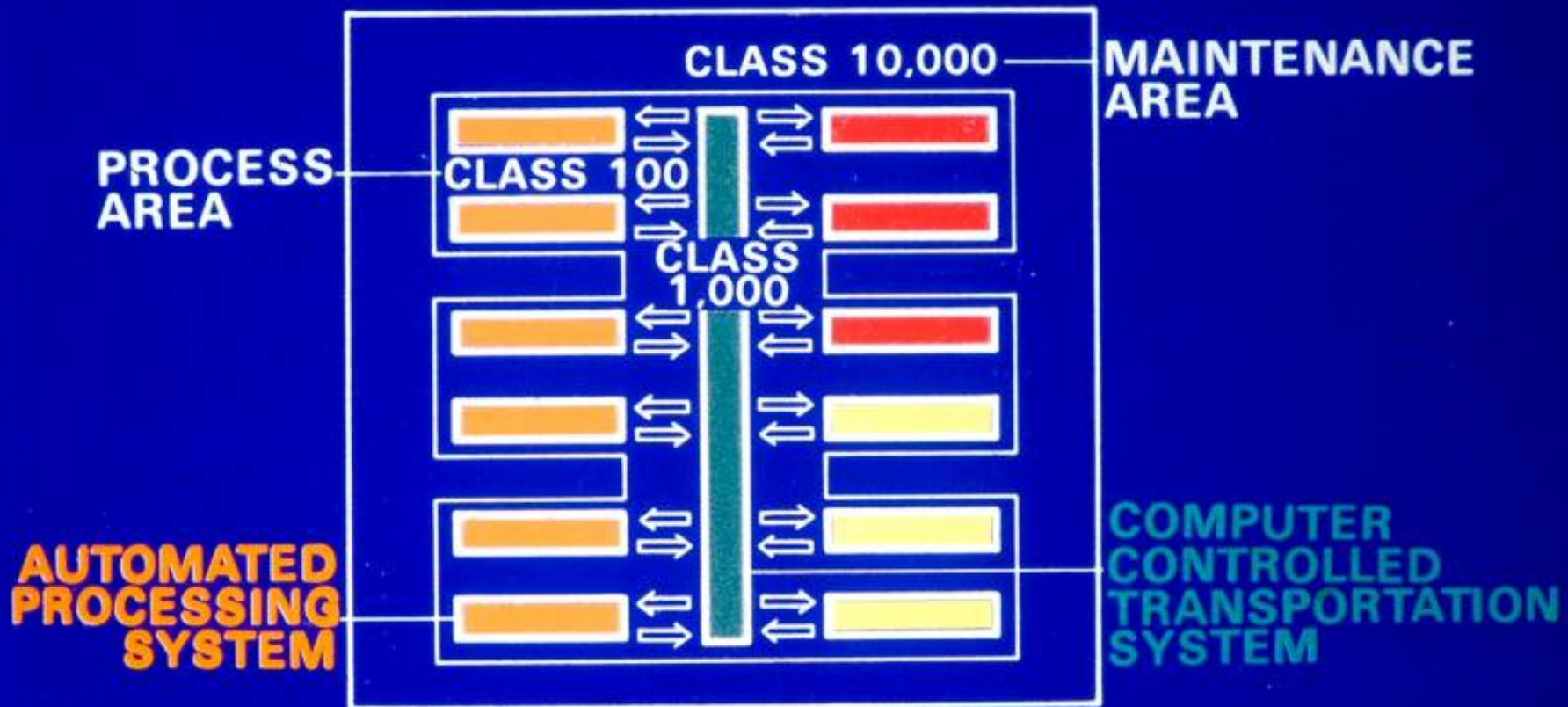
BASIC PHILOSOPHY FOR AUTOMATION IN WAFER-FAB

- **CLEAN AUTOMATION**
- **HIGH PRECISION AND ACCURACY EQUIPMENT**
- **INTEGRATION OF PROCESSES**
- **ADAPTABILITY TO NEW TECHNOLOGY**
- **INTEGRATED EFFORT**
BETWEEN PROCESS AND EQUIPMENT ENGINEERS
- **COMPUTER CONTROLLED TRANSPORTATION**
ROBOT

ウエーハプロセスの基本的な考え方

考慮すべき重点項目を6点示す。

1) 自動清浄化、2) 装置の高精密化と高精度、3) プロセスの統合化、4) 新技術への対応、5) プロセスエンジニアと装置エンジニアとの連携、6) コンピュータ制御の搬送ロボット



CONCEPTUAL OUTLINE OF THE MOS WAFER-FAB

MOS製造ラインの概要

中央にクラス1,000のプロセス・エリアと、外側にクラス10,000のメンテナンス・エリアがある。作業エリア間のウエーハ搬送はコンピュータ制御の搬送システムによって行われる。



MOS WAFER-FAB—CENTRAL ZONE

MOS製造ラインの中心部

作業エリアの左右にプロセス装置が配置され、自動搬送システム(右側中ほどのロボット)が作業エリア間のウエーハの運搬を行う。このスライドも会場の爆笑を誘った1枚。

「皆さんはこの製造ラインに人が一人もいないことに強い印象を持たれたことと思います」。一呼吸おいて。

「実を申しますと、この写真は工場が休みの日に撮影したものであります」

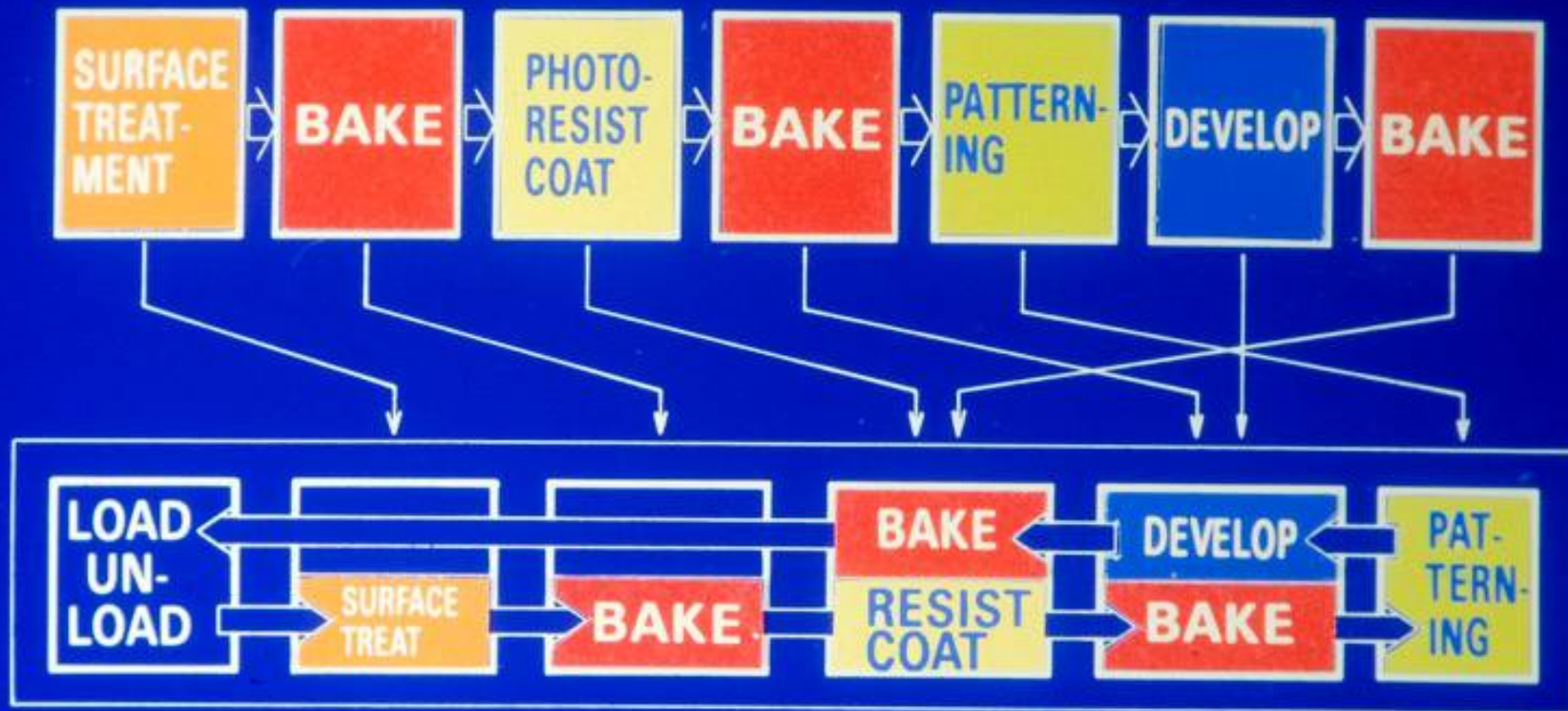


MOS WAFER-FAB—WORKING ZONE

MOS製造ラインの作業ゾーンの内部

作業ゾーン内のプロセスは一貫システムによって行われる。

CONVENTIONAL LINE



AUTOMATED PHOTOLITHOGRAPHY SYSTEM

ホトリソ工程の一貫自動システム

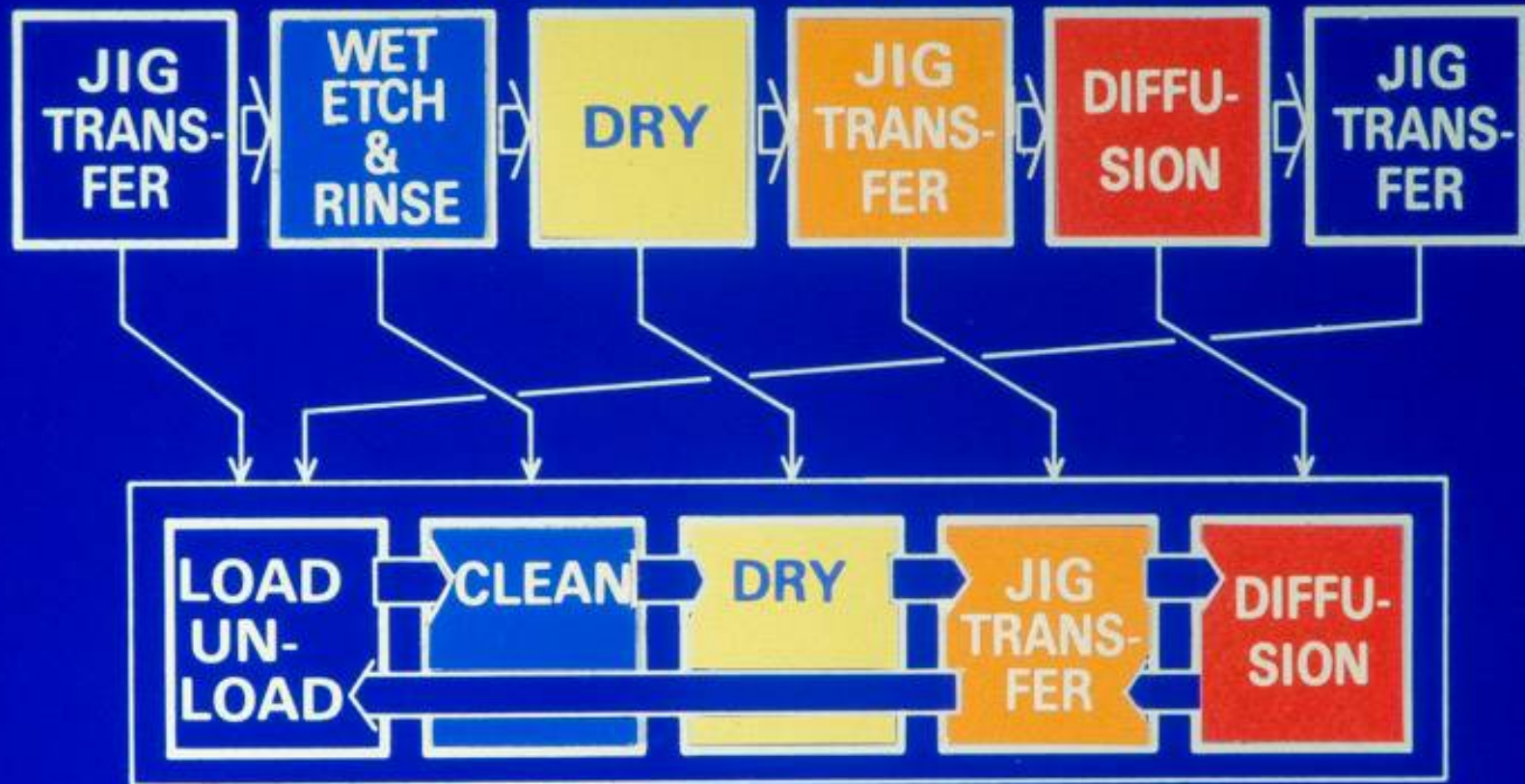
左側からウエーハがロードされ一往復する間に、すべての処理が行われ、左側からアンロードされる。
この間にウエーハが人手に触れることはない。



AUTOMATED PHOTOLITHOGRAPHY SYSTEM

自動ホトリソシステム

CONVENTIONAL LINE



AUTOMATED DIFFUSION SYSTEM

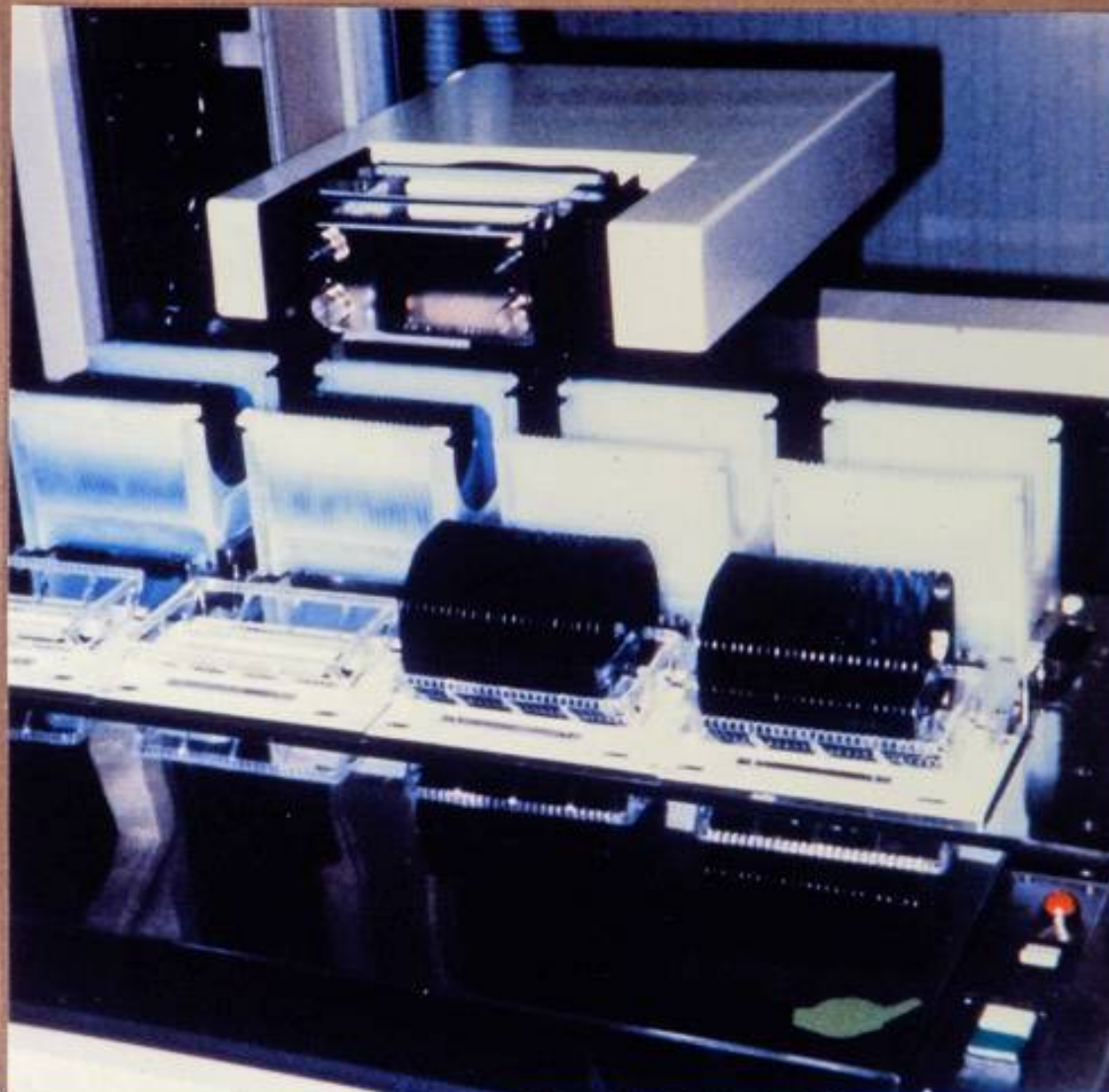
自動拡散システム

ローディングからアンローディングまで人手を介さずに行われる。



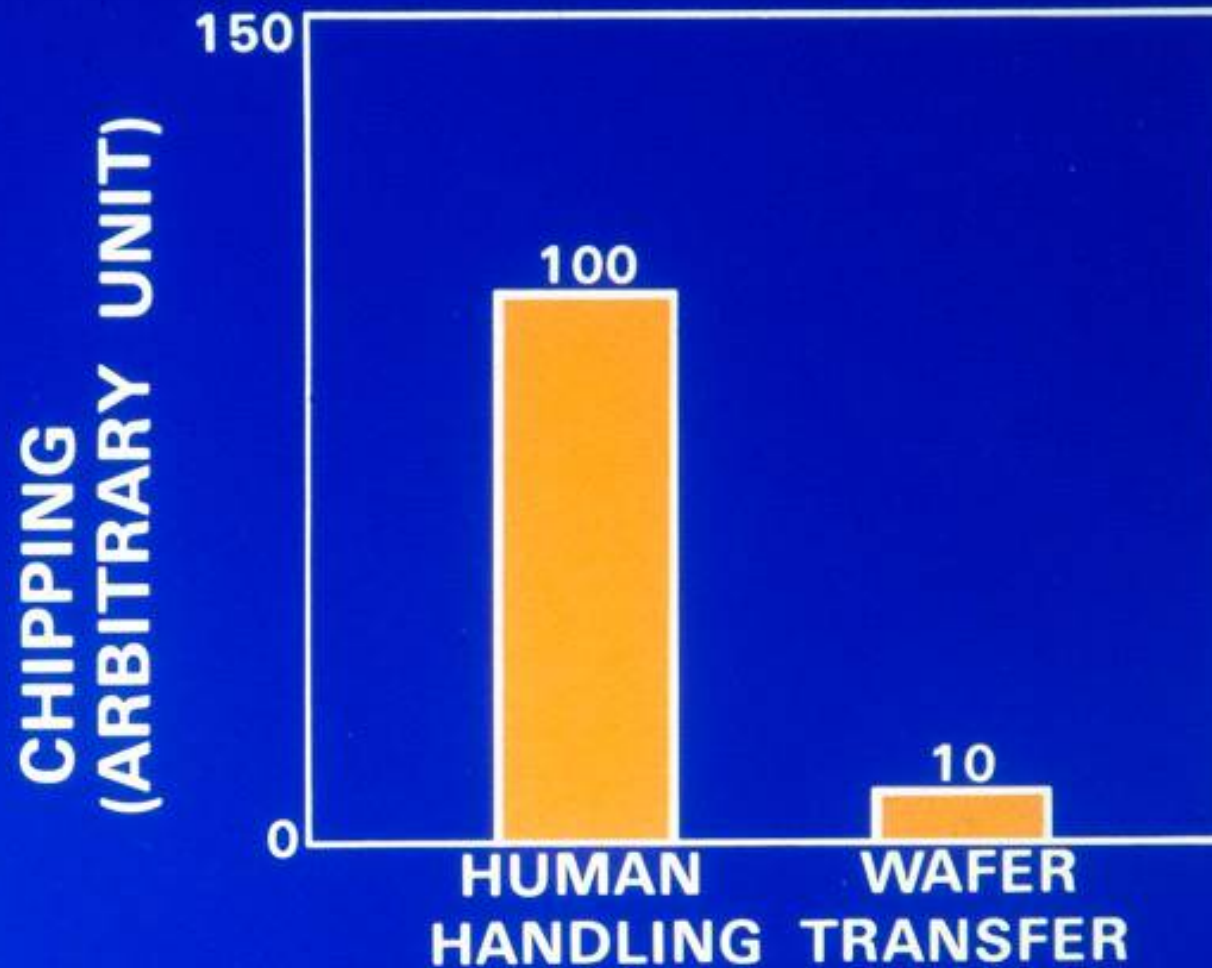
AUTOMATED DIFFUSION SYSTEM

自動拡散システム



WAFER TRANSFER MACHINE

ウエーハ運搬装置



IMPROVEMENT IN CHIPPING OF WAFER EDGE

チップングの改善

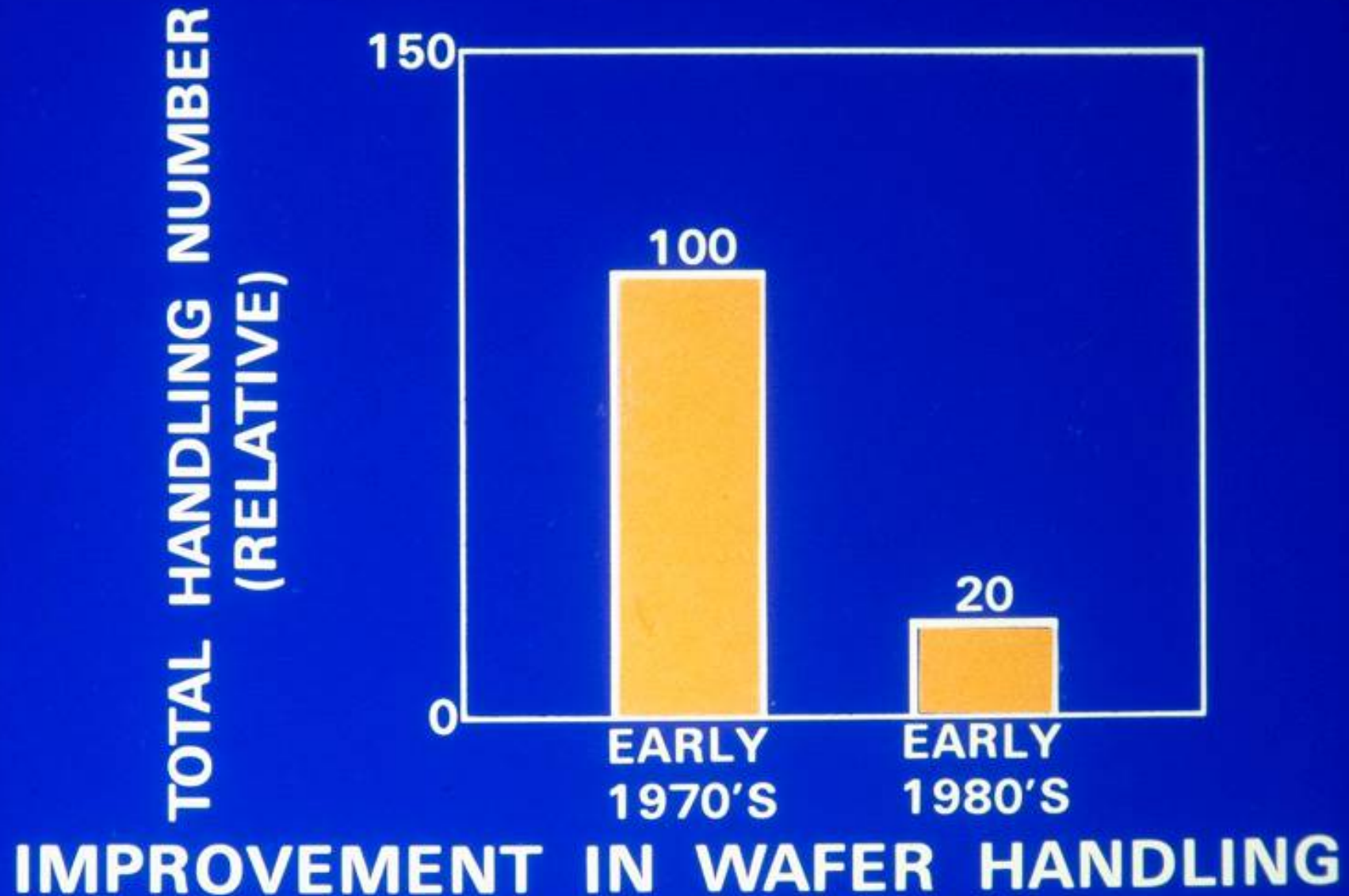
人手の作業に比べて、自動化の場合のウエーハ端のチップング(欠け)は1/10に減少する。自動化が品質向上に寄与することの一例として紹介したもの。



COMPUTER CONTROLLED TRANSPORTATION ROBOT

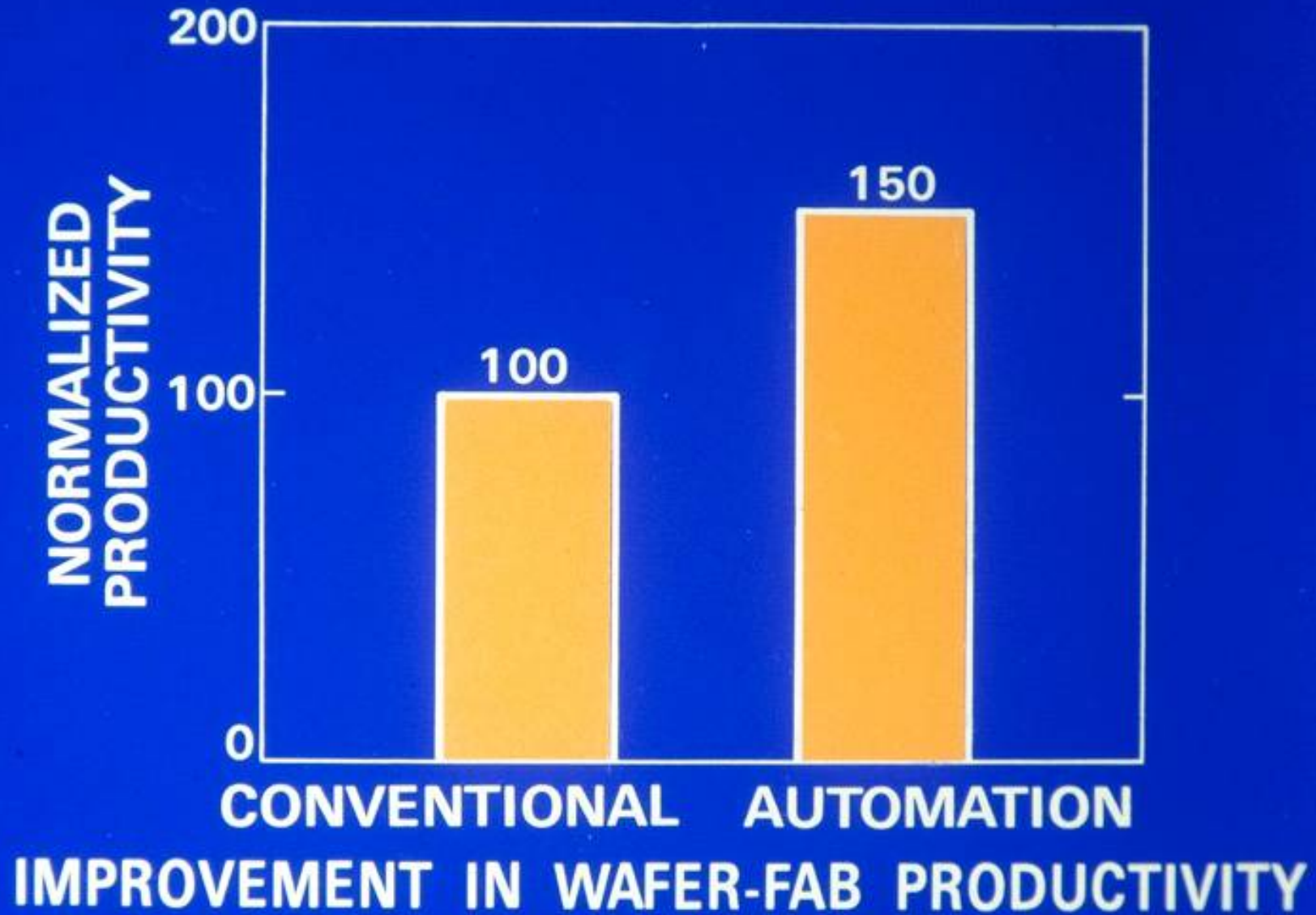
コンピュータ制御の搬送ロボット

ウェーハの搬送を自動的に行うロボット。前方の二つの目で障害物などを確認しつつ、軌道上を進む。



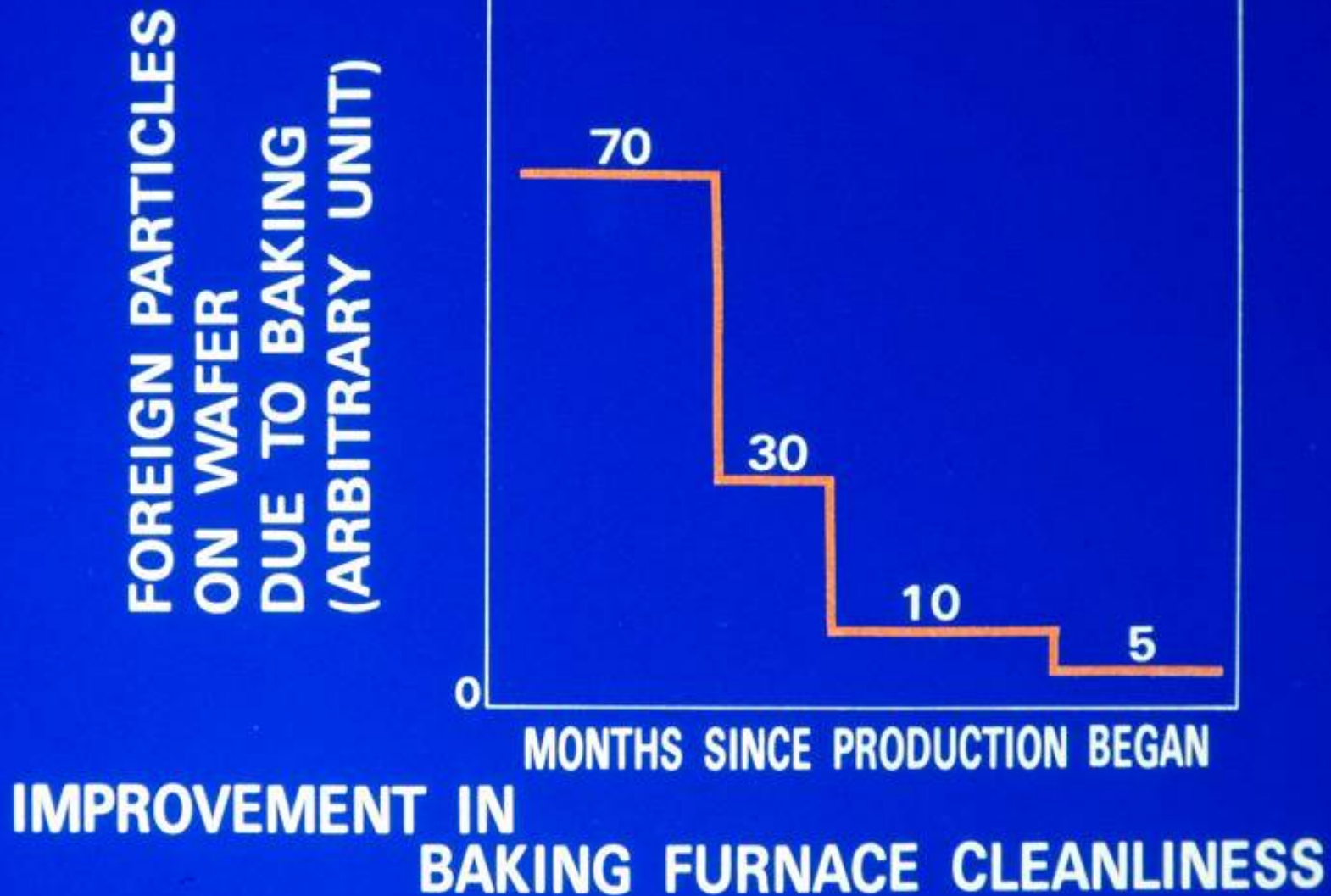
ウエーハ・ハンドリングの減少

自動化の導入によって、人手によるハンドリングが、70年代初期から80年代初期にかけての10年間で1/5に減少した。



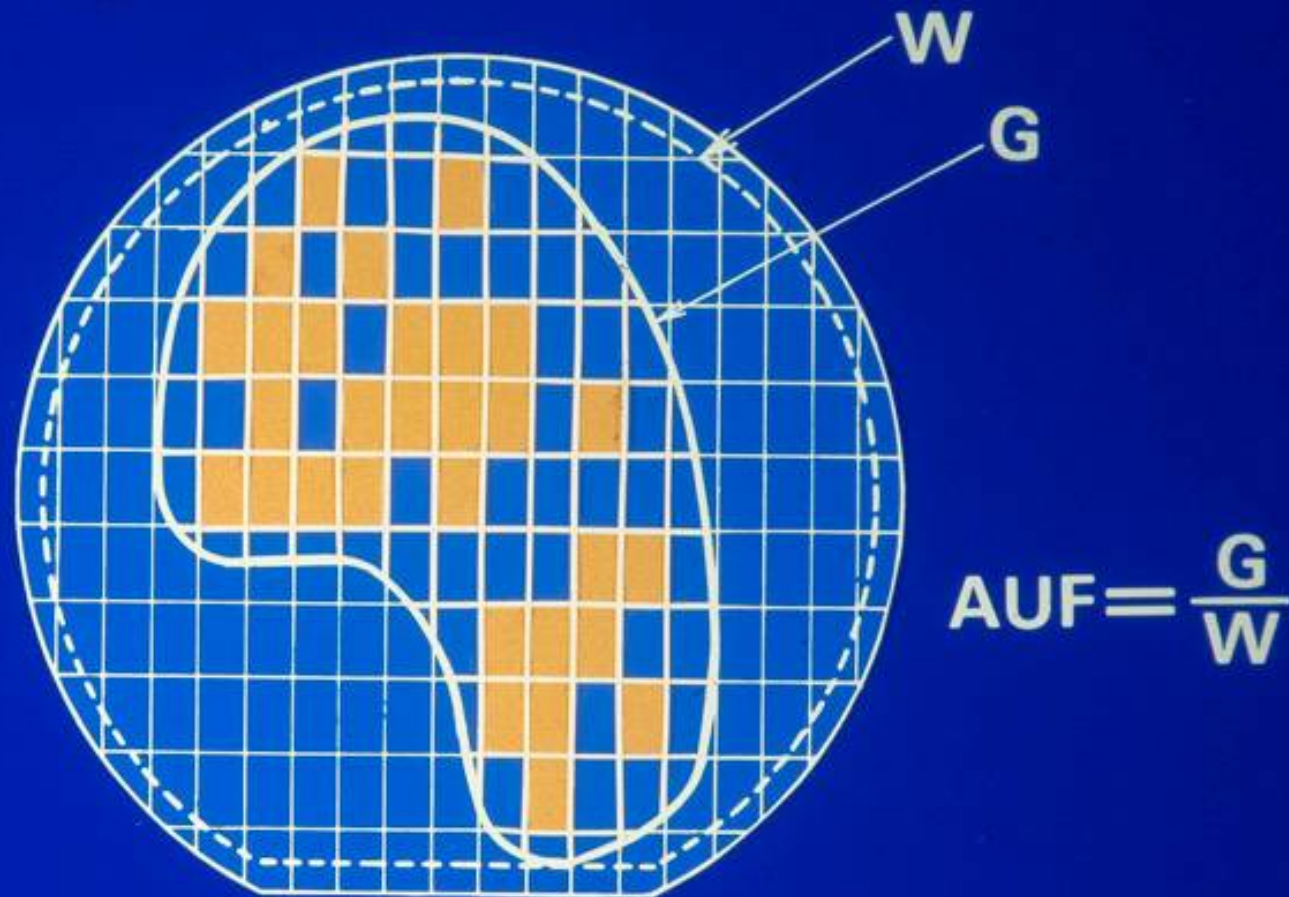
前工程の生産性の改善

従来方式に比べ、自動化方式では生産性が1.5倍に改善されることを示す。



ベイキング工程における清浄度の改善

自動化によってウエーハ上の異物の数が、70→30→10→5 と月を追って低減したことを示す。



YIELD MAP ON A WAFER

ウエーハ上の良品分布

このスライドからの数枚はLSIの歩留に関するもので、私の得意とするテーマでもあった。

この図はウエーハ上の欠陥分布を表現したもので、ウエーハ全体の面積(W)の中に良品が取れる可能性のある領域(G)があり、その比率 $G/W=AUF$ は有効面積率と呼ぶ。Gの中での欠陥分布はポアソン分布(確率的分布)であると仮定する。

$$Y = AUF \cdot \exp(-A \cdot D)$$

$$D = D_0 \cdot n / \ell^2$$

Y : YIELD

AUF: AREA USAGE FACTOR

A : CHIP AREA

D : ACTUAL DEFECT DENSITY

D₀ : NORMALIZED DEFECT DENSITY

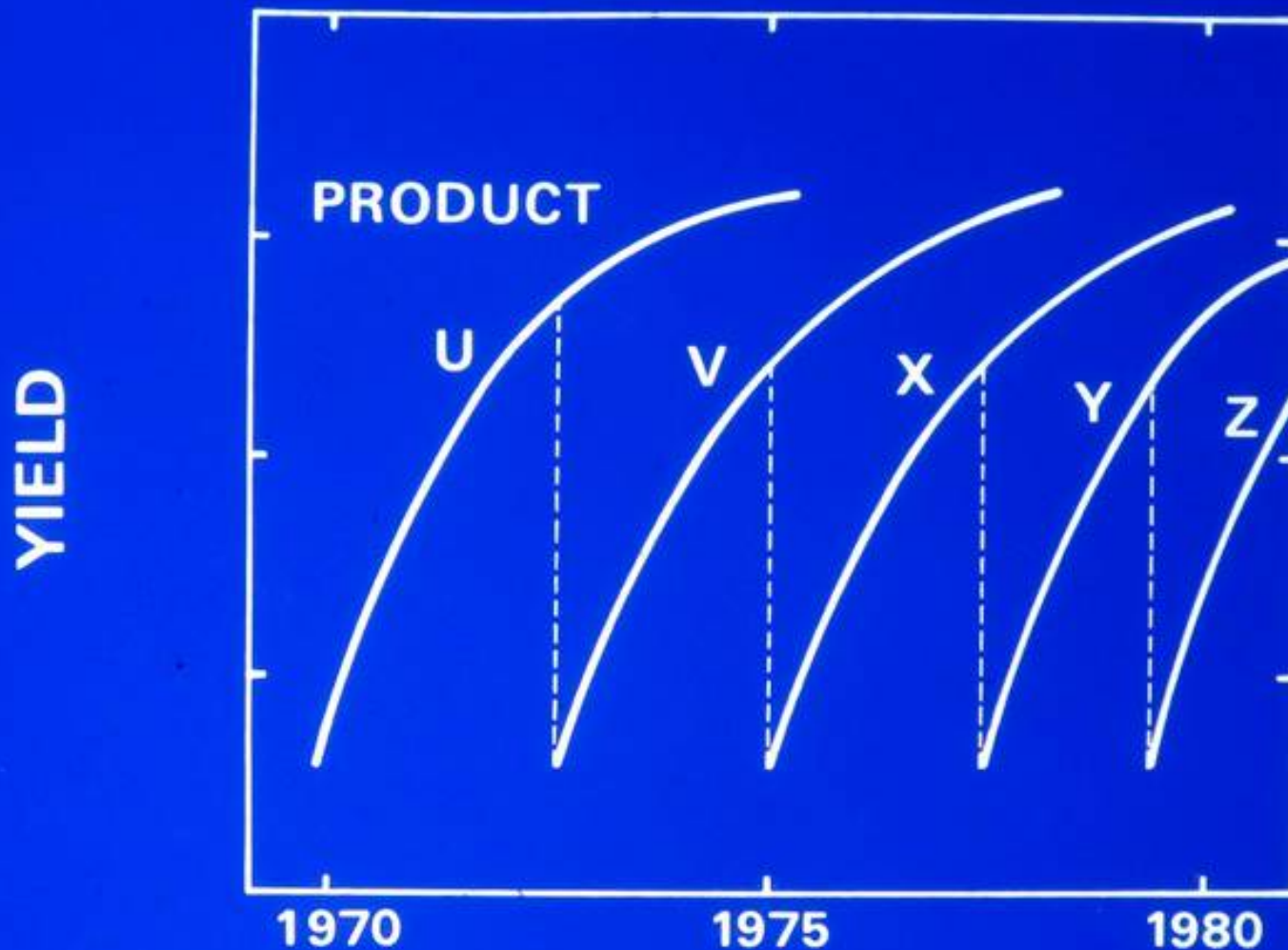
n : NUMBER OF CRITICAL PROCESS STEPS

ℓ : TYPICAL PATTERN SIZE

歩留の数式表現

これは当時、歩留解析の基礎として使われた式であるが、今日でもその基本は生きている。

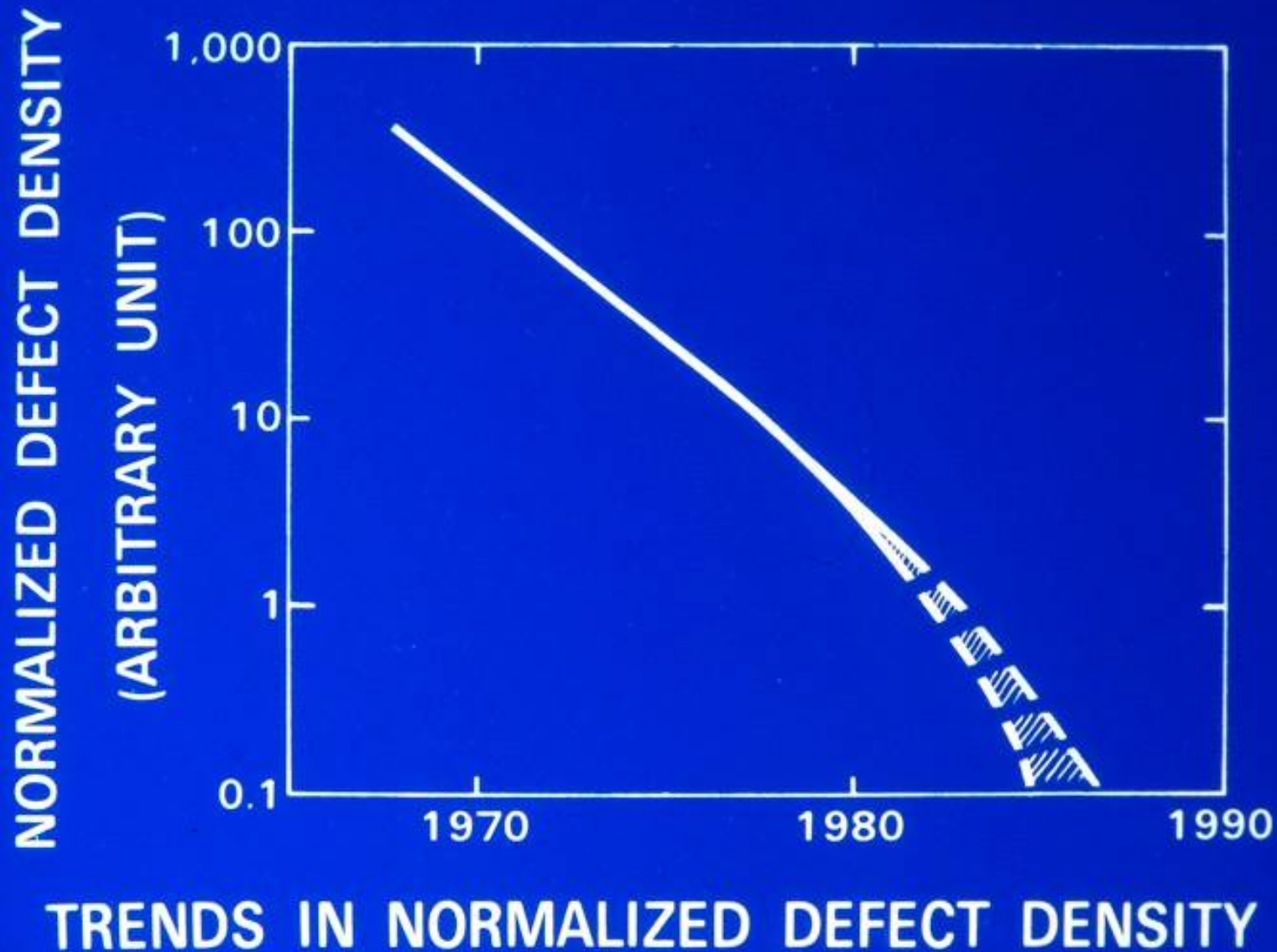
Gの領域内での歩留はチップ面積Aと欠陥密度Dの積が大きくなると指数関数的に減少する。全体の歩留Yは面積有効率AUFとG内における歩留の積となる。



HISTORY OF PROBING YIELD

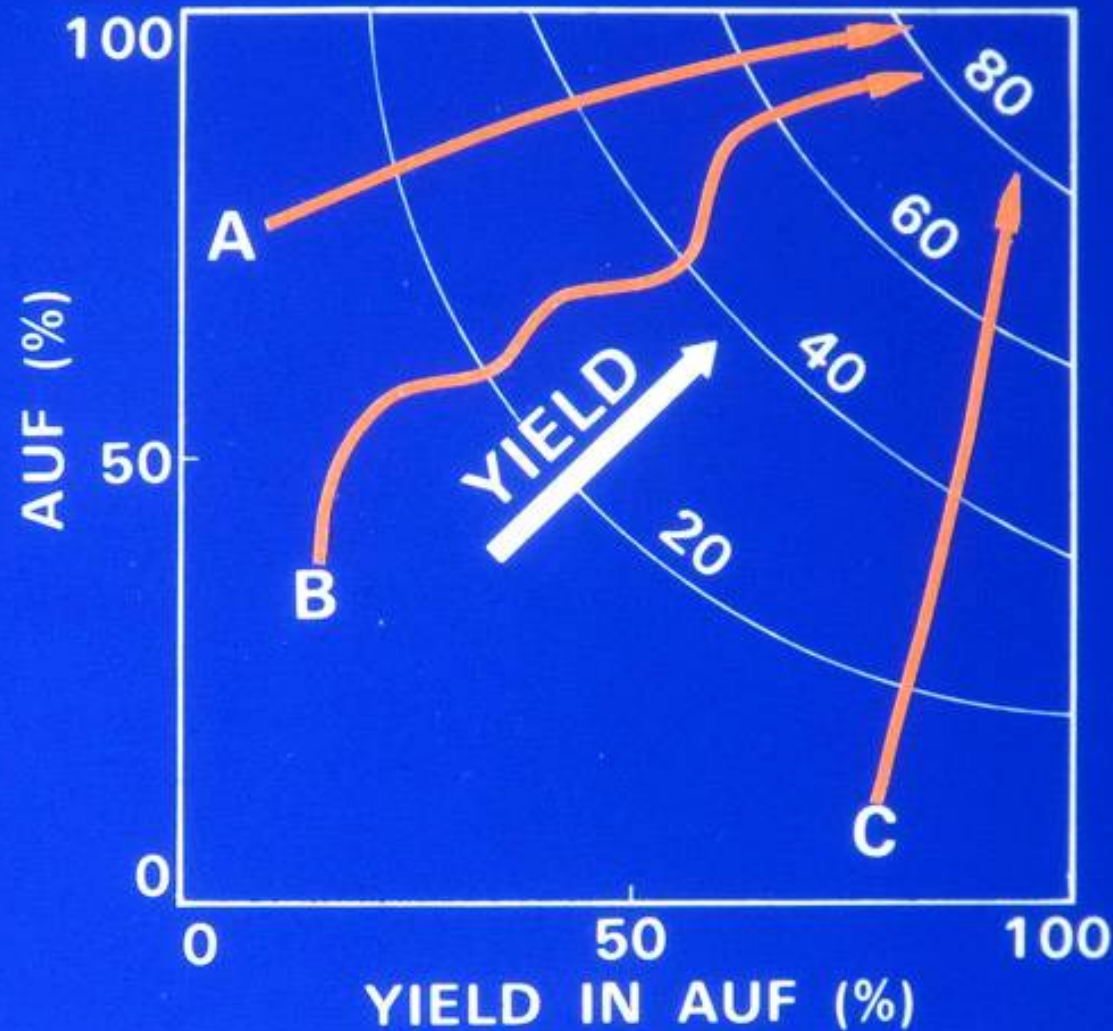
プローブ歩留の推移

新製品が立ち上がる時、歩留は最初は低く、その後は習熟曲線に沿って向上することを示す。
たとえば、メモリの場合、1K、4K、16K、64K…などとイメージすればよい。



欠陥密度の推移

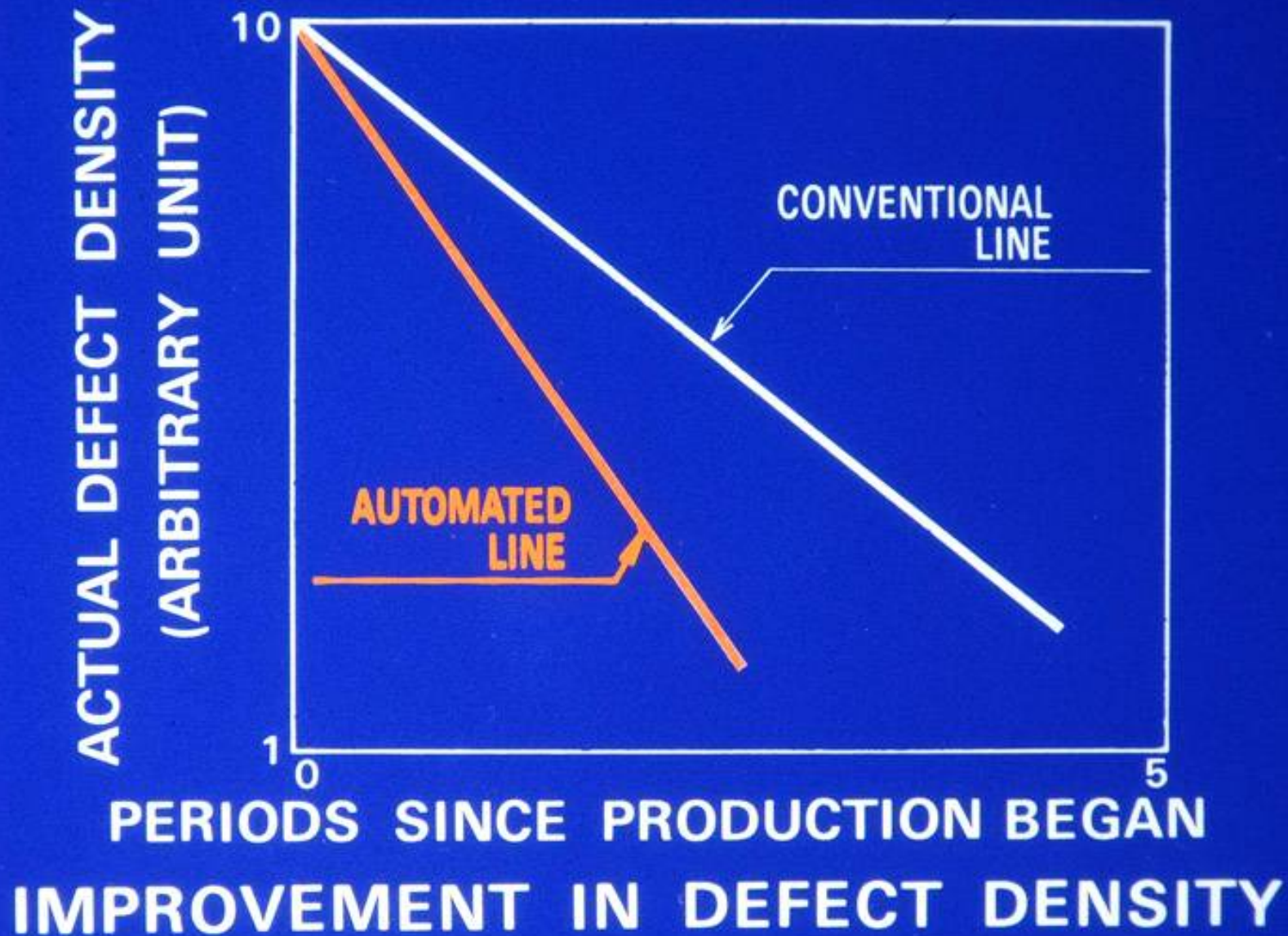
過去10年間で欠陥密度が約1桁低減されたことを示す。この傾向は今後さらに加速されるであろうと予測。



EXAMPLES OF YIELD IMPROVEMENT TRACKS

歩留改善の軌跡の事例

歩留のタイプを典型的な三つに分類して示す。AはAUFは高いがG内の欠陥が多いケース、CはG内の欠陥は少ないがAUFが低いケース。Bはその中間である。歩留改善の軌跡をプロットすることによって、改善の効果を見ることができる。歩留改善はチームで進めることが多いので、この図をチームの全員が共有することが大事である。



欠陥密度の改善

通常の製造ラインと自動化ラインにおける欠陥密度の改善のペースを示す。

自動化ラインの低減速度が2倍近く速いことを示している。

自動化の効果は省力化のみならず、品質向上の効果も大きいことを強調した資料である。

PROBLEMS OF AUTOMATION IN WAFER-FAB

- DUST FREE MECHANISM
- RIGHT COMBINATION OF CHANGES AT A TIME
- CLEANLINESS OF CHEMICALS, WATER, GAS, ETC.
- RIGHT COMBINATION OF EQUIPMENT,
PROCESS AND MATERIALS
- ADAPTABILITY OF EQUIPMENT
TO PROCESS CHANGES
- VISUAL INSPECTION DEPENDING ON HUMAN EYES

前工程自動化の課題

1) 無塵の機構導入、2) 最適な同時変更の組み合わせ(例えば、微細化と大口径化など)、3) 薬品、水、ガスなどの清浄化、4) 装置、プロセス、材料の最適な組み合わせ、5) プロセス変更への装置の対応性、6) 外観検査は未だに目視以上6点を前工程自動化の課題として取り上げた。

AUTOMATION IN ASSEMBLING

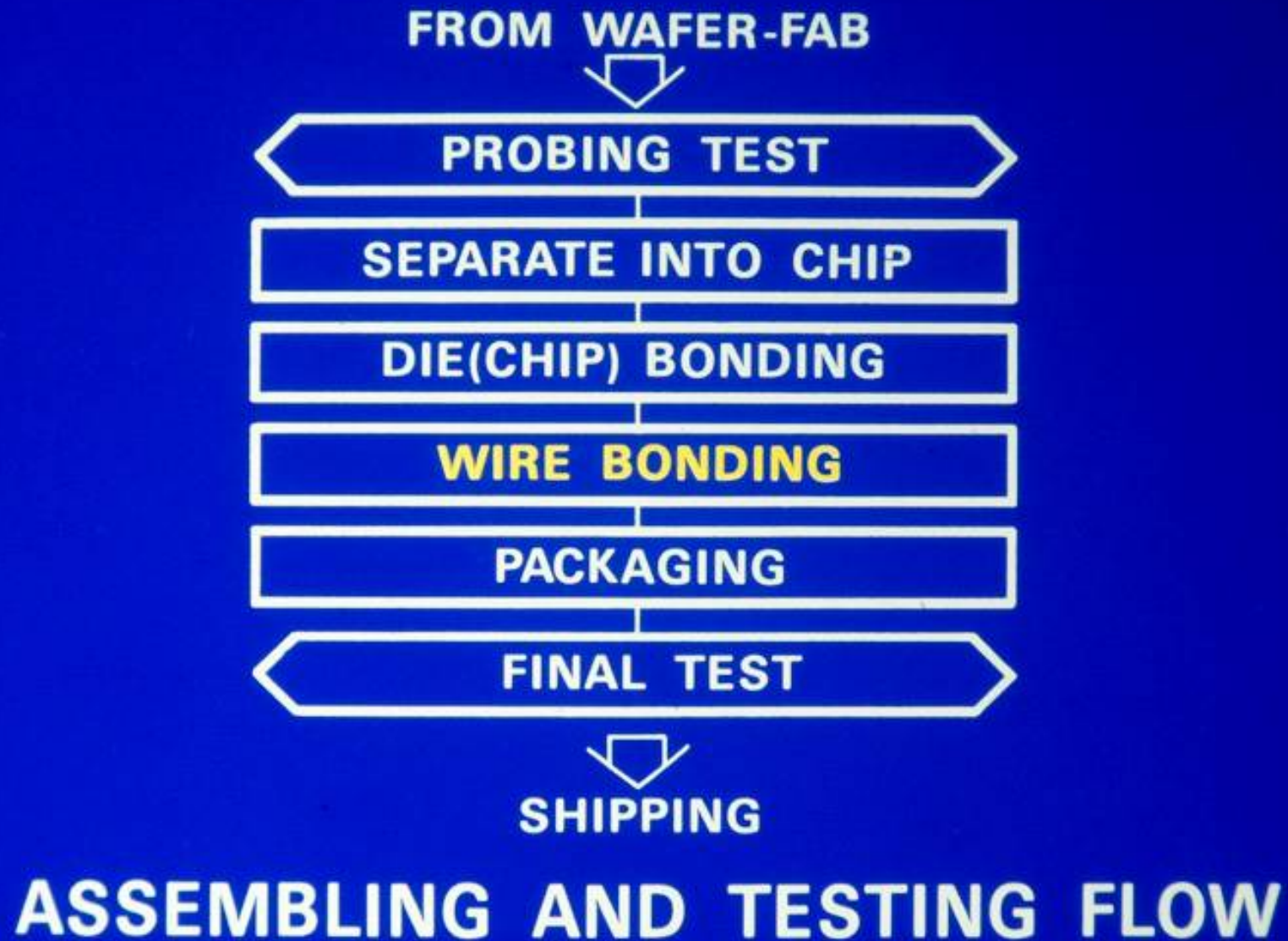
後工程の自動化

● FEATURES OF ASSEMBLING

● BASIC CONSIDERATIONS AND
IMPLEMENTATIONS

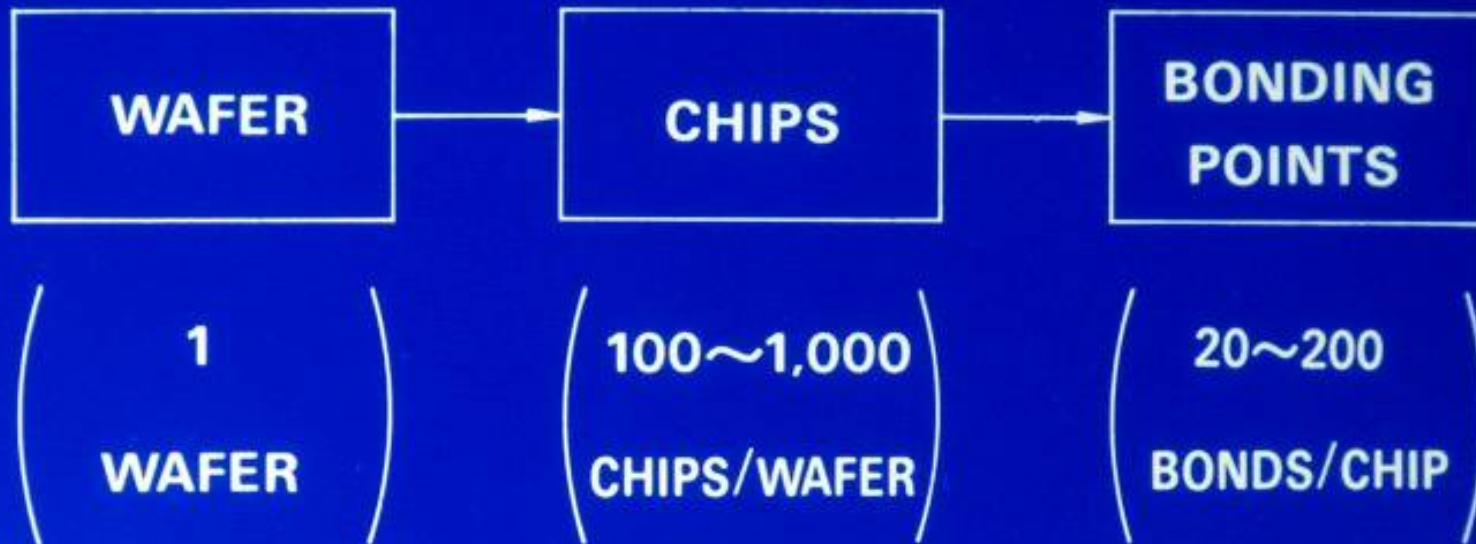
● OVERALL EFFECTIVENESS

- 1) 組み立て工程の特徴
- 2) 基本的な考察と実行
- 3) 総合的な効率化



組立・テスト工程のフロー

プローブ・テストから最終テストにおける後工程フローを示す。最大の難所はワイヤ・ボンディングである。

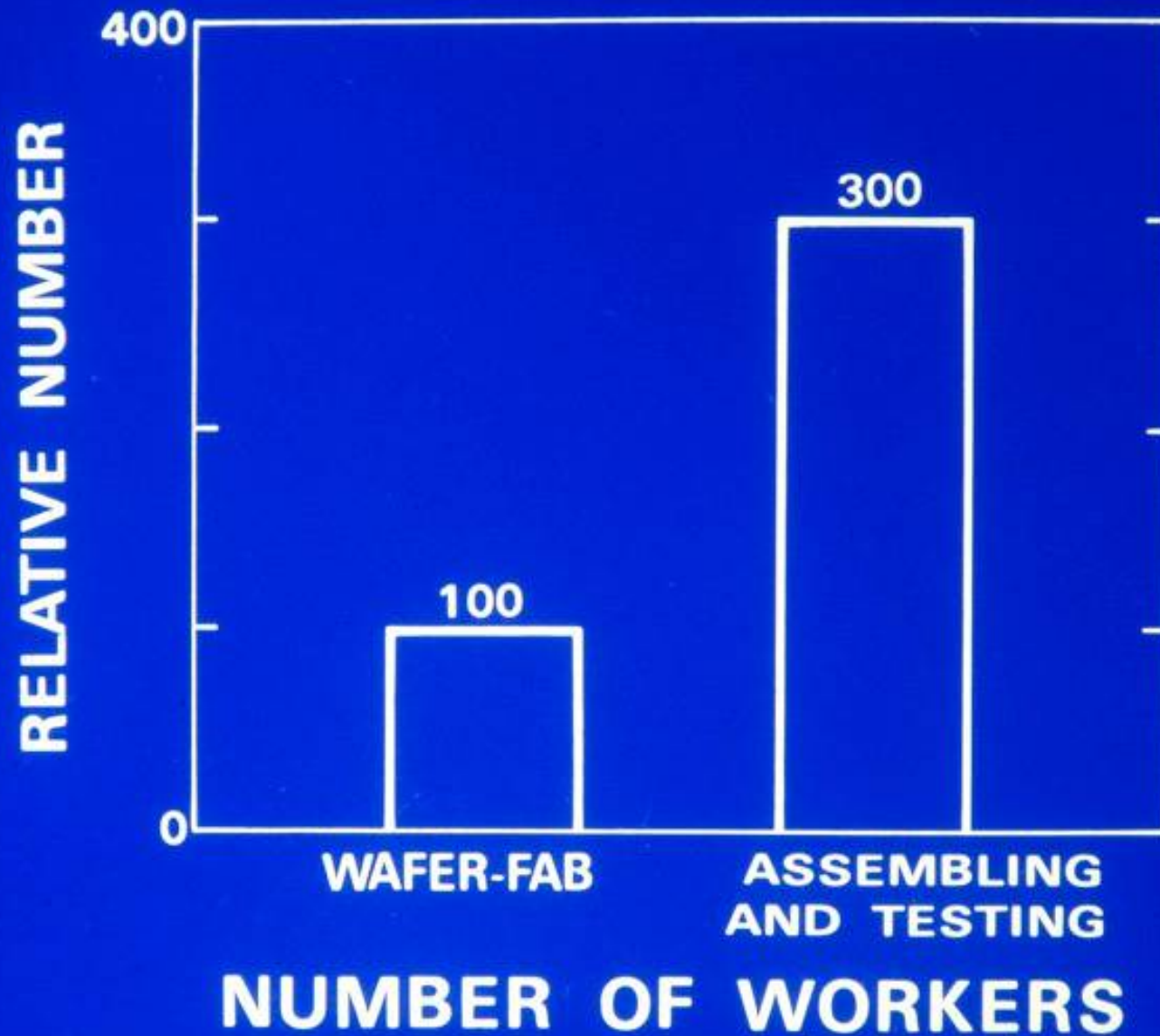


1 WAFER REQUIRES ABOUT 20,000 BONDS.

INCREASE IN NUMBER OF HANDLING

ハンドリングの数の増大

1枚のウエーハから100~1,000個のチップが取れ、1チップあたり20~200回のボンディングが必要である。即ち、1枚のウエーハには約20,000回のボンディングが必要となる。これが挑戦すべき課題。



作業者の数

後工程の作業者は前工程の約3倍である。ここに自動化の課題がある。

- LARGE NUMBER OF HANDLING
- LARGE NUMBER OF WORKERS
- LACK OF UNIFORMITY



CHALLENGES FOR AUTOMATION

自動化の挑戦課題

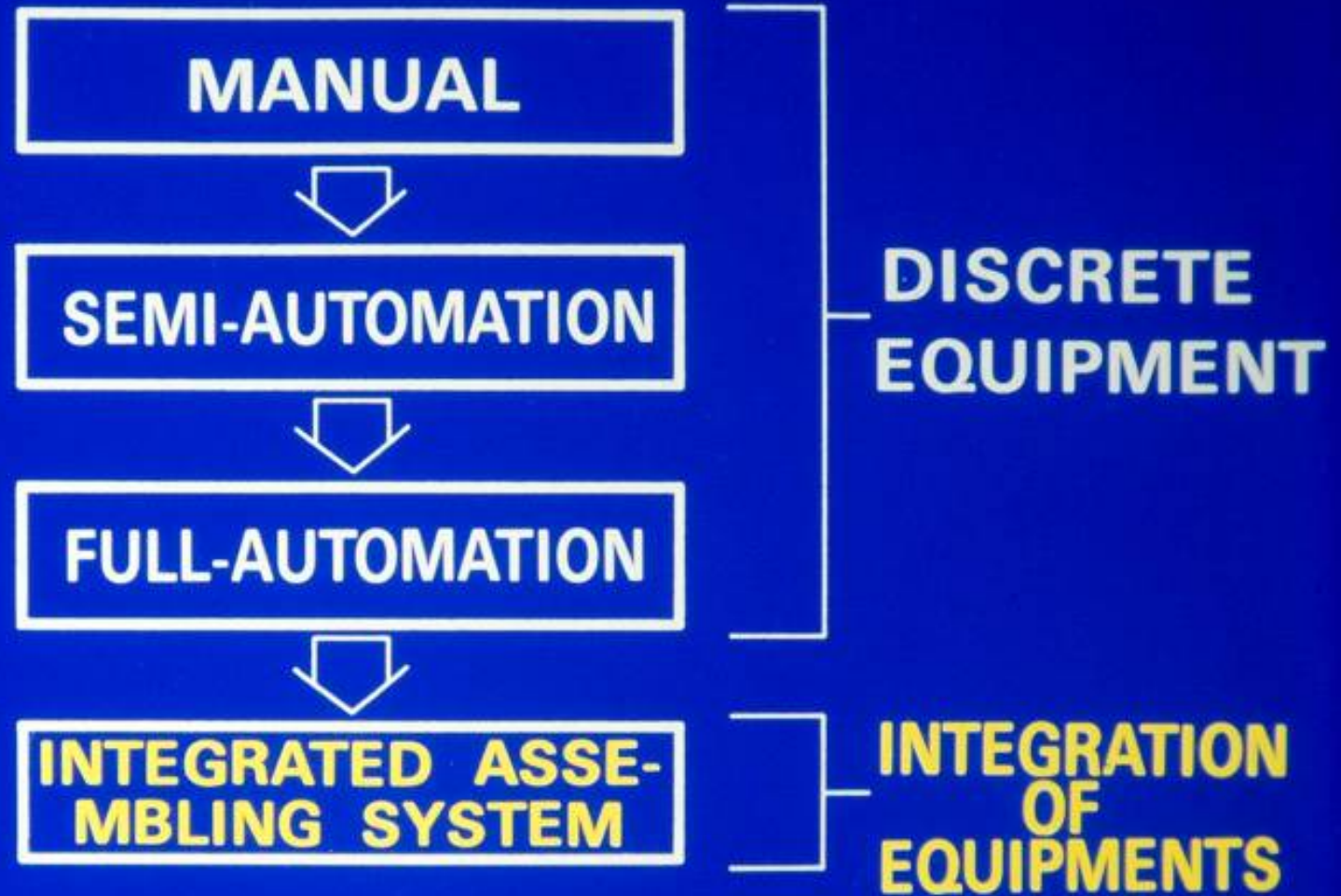
1)ハンドリングの数が多いこと、2)作業者の数が多いこと、 3)均一性が失われ、バラツキが増えること



ASSEMBLING LINE IN 1960'S

1960年代の組立ライン

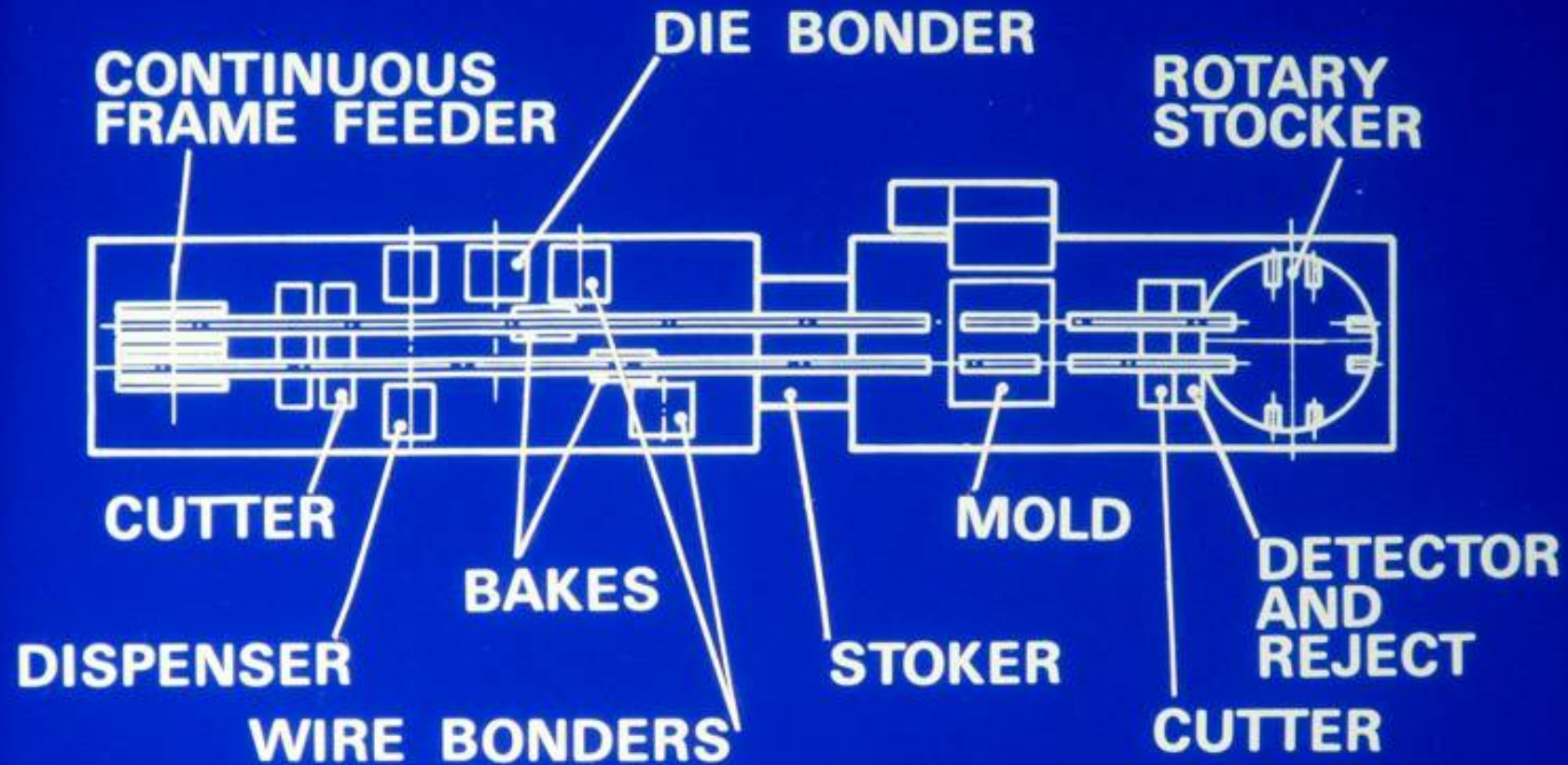
この時期は自動化がなされず、若年女子の手作業に頼っていた。彼女らは「トランジスタ・ガール」と呼ばれ、「金の卵」として重宝されていた。半導体を搭載したテレビやラジオが日本の外貨稼ぎに貢献していた時代である。余談であるが、「トランジスタ・ガール」は「小柄でかわいい女の子」を意味しており、人気の的でもあったのです。・・・ここで会場の雰囲気や和らぐ。



ADVANCE IN WIRE BONDING AUTOMATION

ワイヤボンディング自動化の進展

自動化は以下のようなプロセスで進化してきた。
手作業→半自動→完全自動→一貫システム



INTEGRATED ASSEMBLING SYSTEM

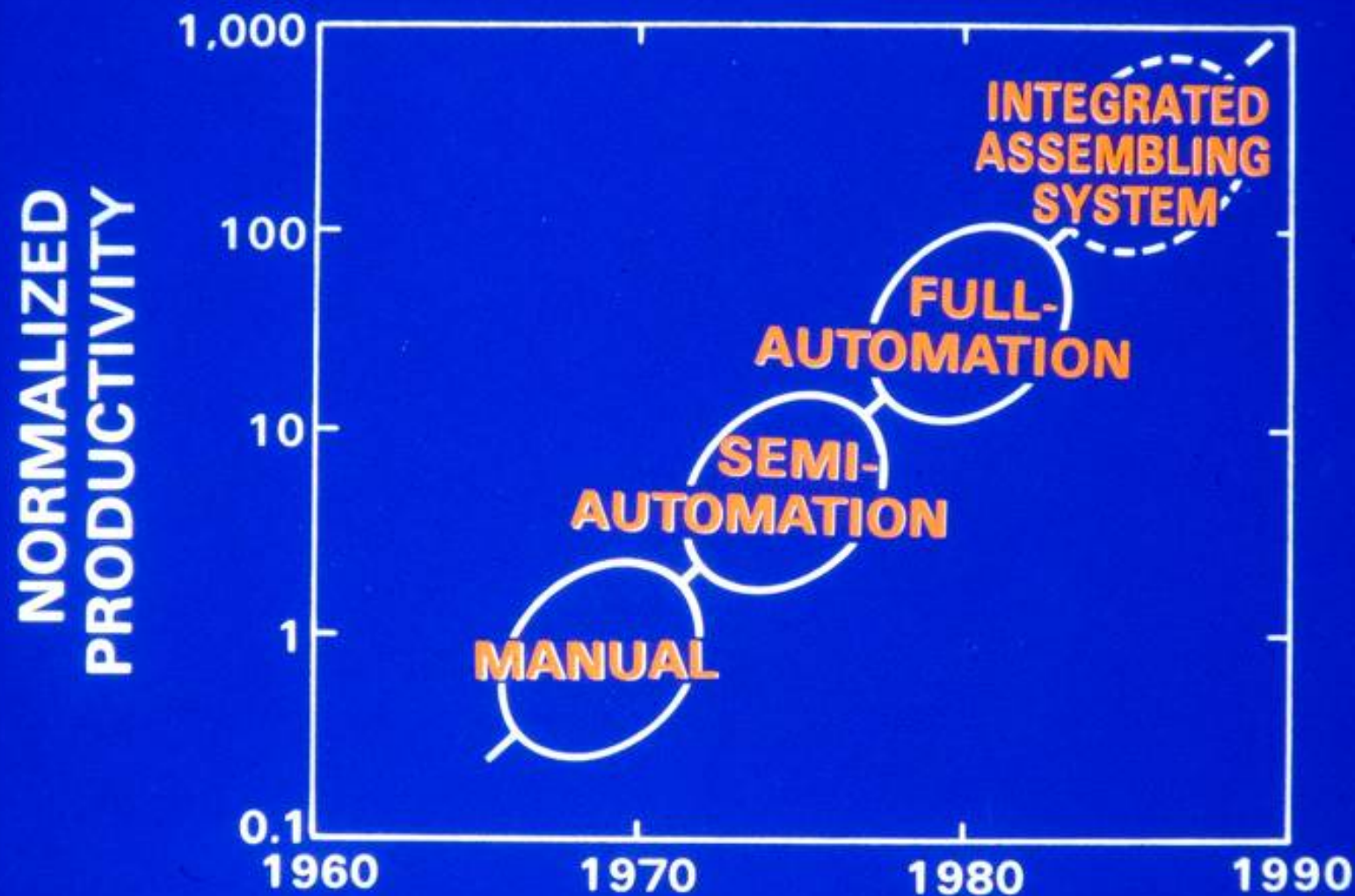
一貫組立システム

チップの供給から組立、モールド、切断までの一貫システムの概要を示す。



INTEGRATED ASSEMBLING SYSTEM

一貫組立システムの外観

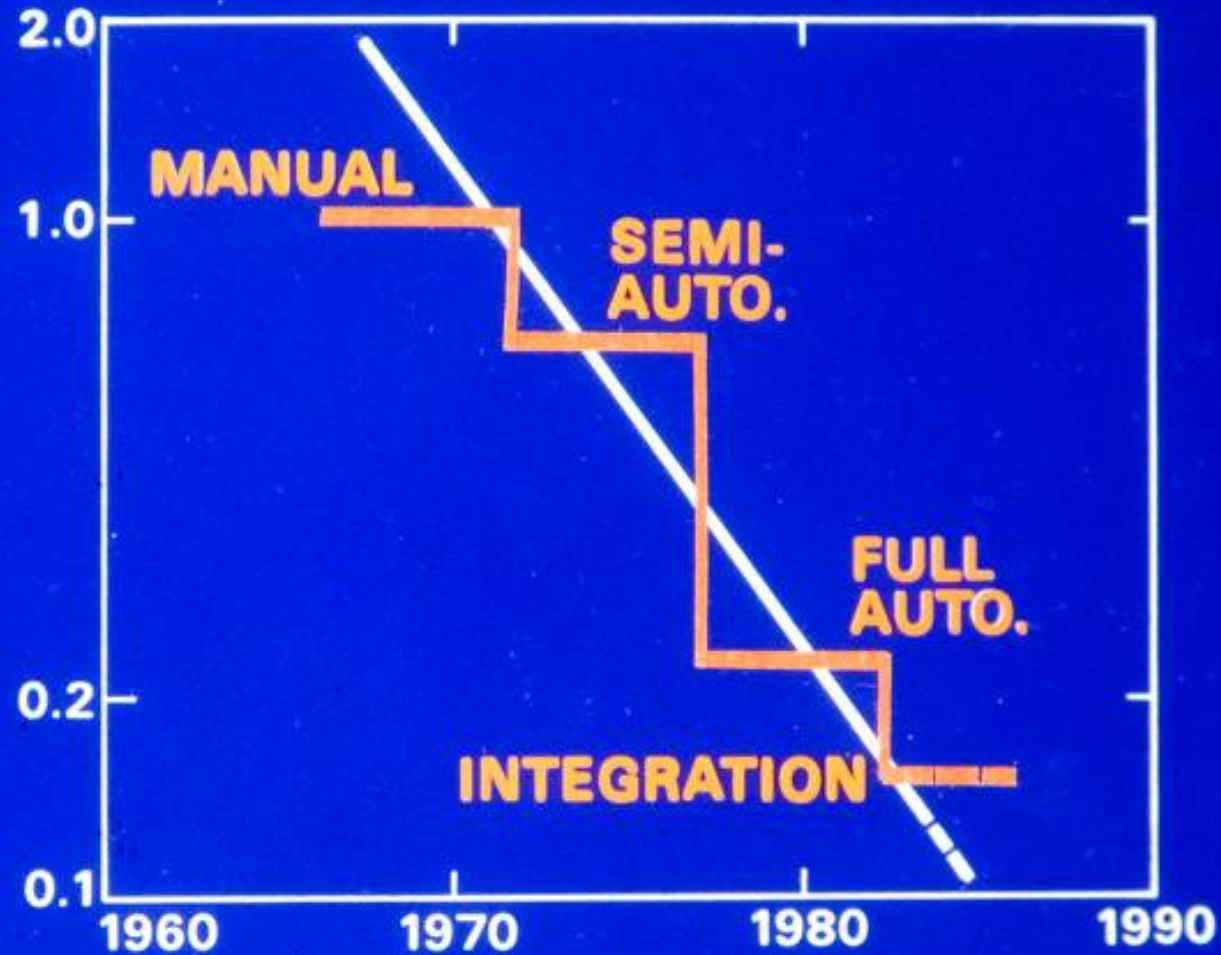


IMPROVEMENT IN BONDING PRODUCTIVITY

ボンディング工程の生産性向上

手作業～半自動～完全自動～一貫システムと進むごとに生産性が桁違いに向上することを示す。

WIRE BONDING SPEED
(SEC/WIRE)



IMPROVEMENT IN BONDING SPEED PER WIRE

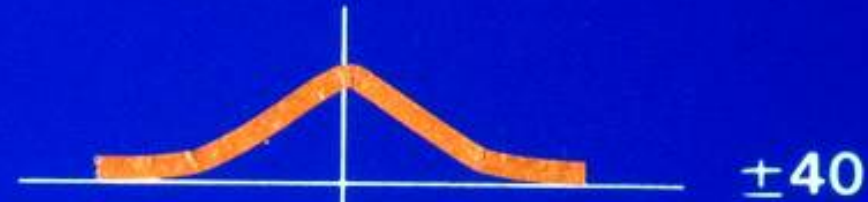
ボンディング・スピードの向上

手作業ではボンディング・スピードは1秒/ワイヤ程度であるが、完全自動では0.2秒/ワイヤとなり、一貫システムではさらなる向上が見込まれる。

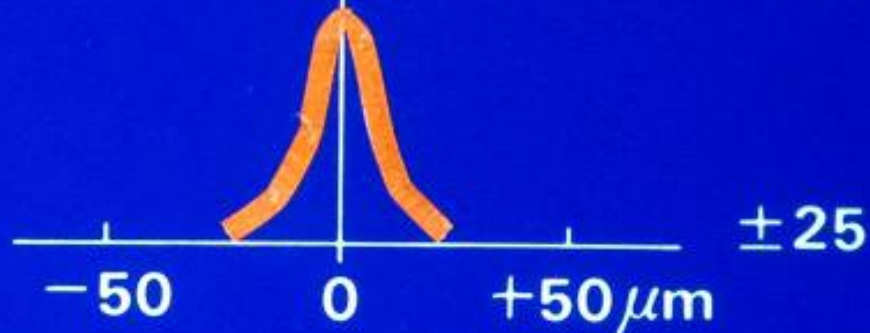
MANUAL



SEMI-AUTOMATION



FULL-AUTOMATION



IMPROVEMENT IN BONDING ACCURACY

ボンディング精度の向上

自動化の大きな効果の一つはボンディング精度の向上にある。手作業における位置決め精度は(3σ)で 60μ であるが、完全自動では 25μ に改善される。

FUTURE DIRECTIONS IN AUTOMATION

自動化の将来方向

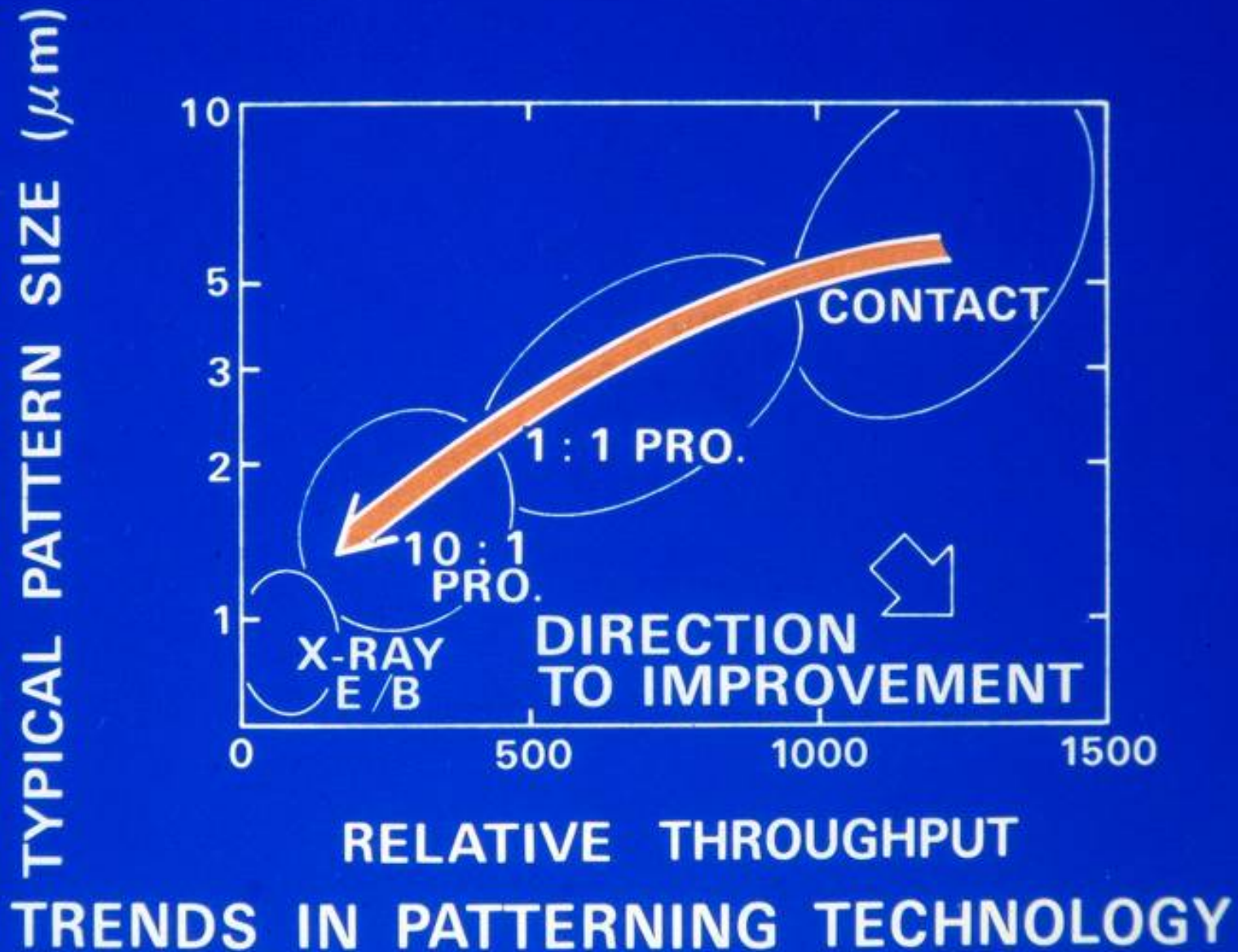
● FUTURE DIRECTIONS IN SEMICONDUCTOR DEVICES

● FUTURE DIRECTIONS IN AUTOMATION

● FUTURE PROBLEMS

● FUTURE OPPORTUNITIES

- 1) 半導体デバイスの将来方向
- 2) 自動化の将来方向
- 3) 将来に向けての課題
- 4) 将来における機会



リソグラフィー技術の動向

加工寸法の微細化に伴ってリソグラフィー・ツールは次のように変わる。
 コンタクト方式→等倍プロジェクション→10対1縮小プロジェクション→X線またはEB
 最大の課題はスループットの低下であり、図の右下に向けての改善が必要である。
 今日の視点からは、将来のツールとしてX線を上げているのは明らかな間違いである。

FUTURE DIRECTIONS IN SEMICONDUCTOR DEVICES

● MEMORY PRODUCTS

STEADY INCREASE IN NUMBER OF BITS

STEADY INCREASE IN VOLUME

● GATE ARRAY PRODUCTS

SMALL VOLUME PER PRODUCT TYPE

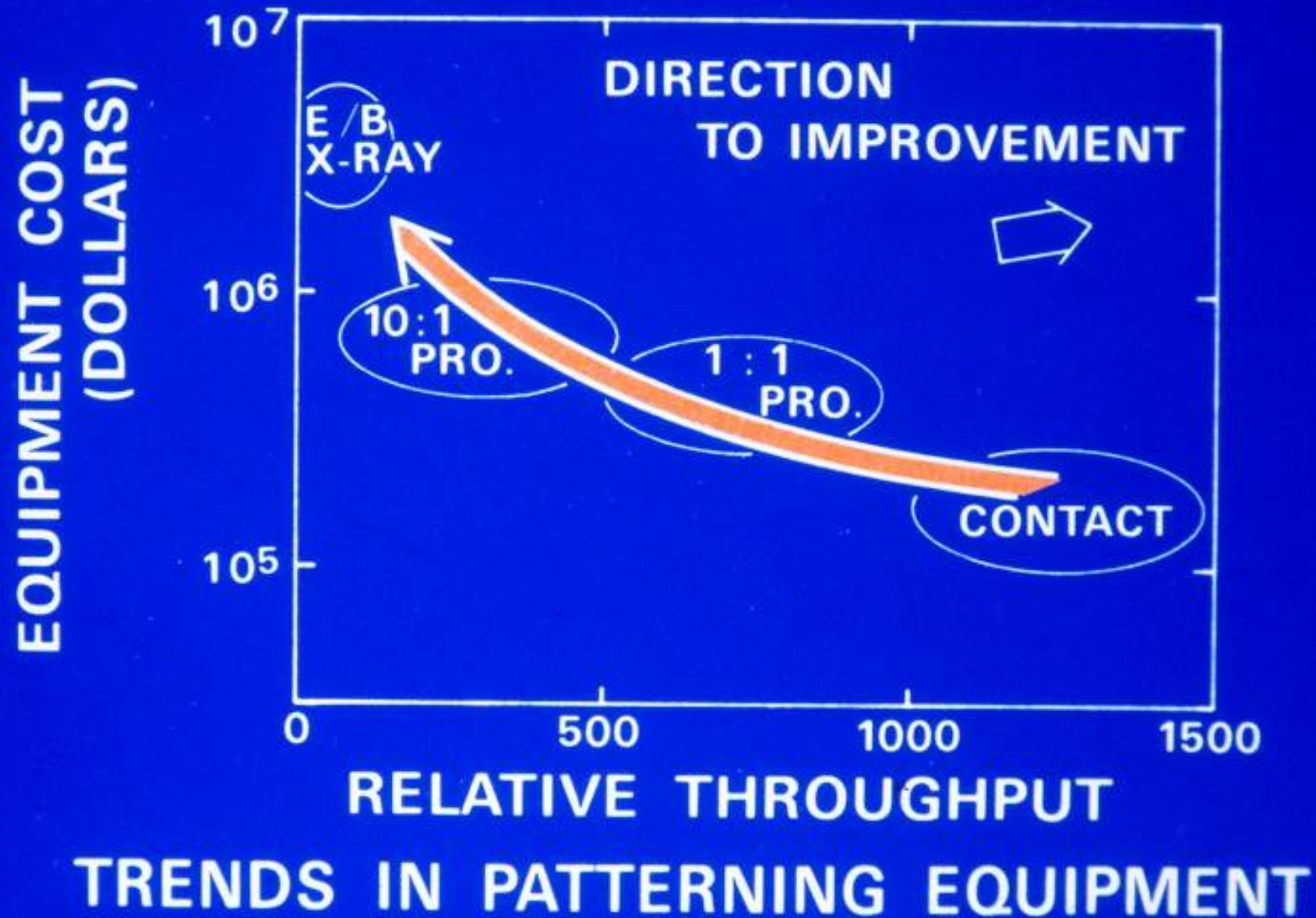
AND QUICK TURN AROUND TIME

半導体デバイスの将来方向

メモリについては「ビット数の増大」と「数量の増大」が並行して起こる。

ゲイトアレイについては「多種少量生産」と「ターンアラウンドタイムの短縮」が必要である。

自動化はこのような方向に答えなければならない。



リソグラフィー・ツールの動向

これまでのリソ・ツールのトレンドでは「スループットは低下し、装置コストは上がる」方向であった。改善方向は図に示す矢印の方向でなければならない。

- TESTING TIME
- NUMBER OF PINS
- COMPLEXITY
- OPERATING SPEED



- DECREASE IN THROUGHPUT
- INCREASE IN INVESTMENT COST

PROBLEMS IN TESTING AREA

テスト工程における問題点

テストタイム、ピン数、集積度、周波数などの増大によってスループットは低下し、投資コストは嵩む。

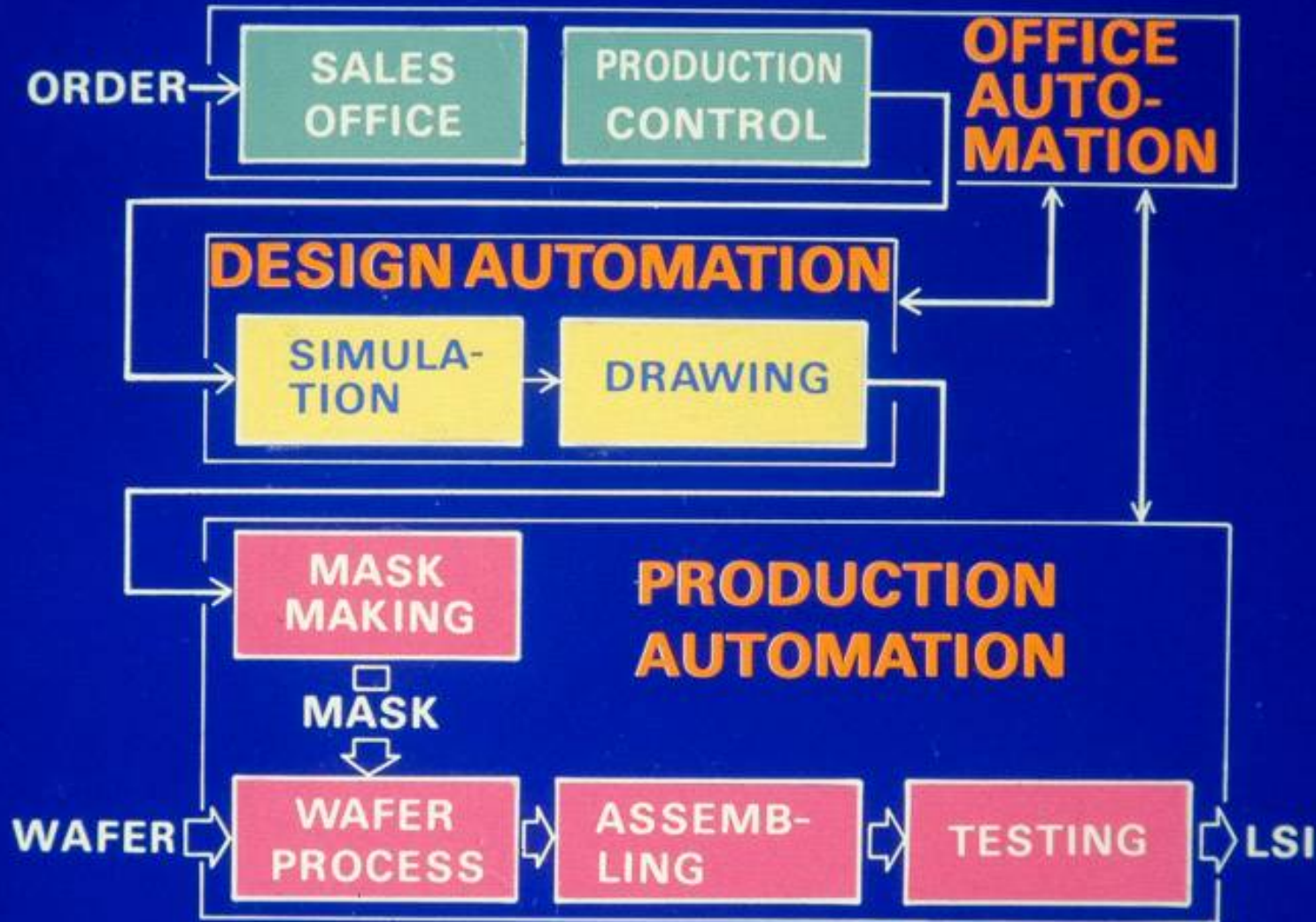
FUTURE DIRECTIONS IN AUTOMATION

- **CLEANER AUTOMATION IN WAFER-FAB**
- **MORE FLEXIBLE AUTOMATION**
ADAPTABLE TO TECHNOLOGY CHANGES
ADAPTABLE FOR VARIOUS PACKAGES
- **DIRECT CONNECTION BETWEEN D.A. AND
P.A. FOR QUICK TURN AROUND TIME**
- **HIGHER THROUGHPUT EQUIPMENT**
- **MORE ACCURATE AND SPACE SAVING
EQUIPMENT**

自動化の将来方向

自動化を進めるに当たっては次の5点を考慮に入れるべきである。

1) 前工程におけるクリーンな自動化、2) フレキシブルな自動化(技術変化、パッケージ変化への対応)、3) ターンアラウンドタイムの短縮のために設計自動化と生産自動化の直結、4) スループットの高い装置、5) 高精度でスペース効率の高い装置



FACTORY AUTOMATION IN SEMICONDUCTOR MANUFACTURING

半導体製造における工場の自動化

顧客からの注文を受け、出荷するまでの完全自動化工場のイメージを記す。注文処理はOAで処理、設計はDAで対応、生産はPAで行うようにつながっている。ウエーハをインプットすればテスト済みの完成品が出てくる。この当時は夢のような話として受け止められたと思うが、最近のインダストリー4.0のイメージに近いものである。



PEOPLE'S ROLE IN MANUFACTURING

製造における人間の役割

工場の自動化が進んだとき、人間は何をすべきなのか？

機械に命令した後は、これを監視して支援し、教える。自ら考えた上で次のことを計画するのが人の役割である。

PRODUCTION

DESIGN

CUSTOMER



SEMICONDUCTOR MANUFACTURING IN THE FUTURE

半導体製造の将来像(最終スライド)

工場自動化の将来イメージを戯画風に描いたものであり、すべての作業はロボットが行う。ここで最後の爆笑を誘ったのはセールス・ロボットである。この当時は64K DRAMが主流であったが、その1,000倍にあたる64M DRAMがようやく完成し、納期遅れを出さないように、汗をかきながら顧客へ製品を届けるロボットのイメージが笑いを誘い、大きな拍手の中で無事に講演が終了した。