

第3章 IMEC (Interuniversity Microelectronics Center)

- 世界の半導体企業にとって魅力ある独立研究機関 -

IMEC(Interuniversity Microelectronics Center) vzw は、フランダース地方政府が策定したマイクロエレクトロニクス産業を強化するための包括的なプログラムに基づいて、1984年に設立された。IMECのミッションは「マイクロエレクトロニクス、ナノテクノロジー、情報通信システムの設計手法と設計技術において産業界が必要とする時期よりも3年から10年先行する研究開発を行うこと」であった。

設立当初からクリーンルームを持ち、半導体の設計のみならず製造技術の研究開発も行なった。最先端の半導体製造装置を備えた24時間稼働のパイロットラインを持ち、半導体企業や半導体製造装置企業・材料企業と多くの共同開発を行なった。フランダース地方政府からの助成金は全収入の2割以下であり、8割以上は企業からの研究資金などでまかなうようになった。IMECは公的資金に支えられた研究機関ではなく、製造技術の確立も含めて巨大な開発投資を必要とする半導体企業のプレコンペティティブな領域を受け持つ大きな独立研究機関という存在になった。

IMECの発展の経緯を追いながら、その成功の理由の考察を試みた。

1. フランダース地方とIMECの設立

まず、IMECが設立されたフランダース地方について少し説明する。16世紀、フランダース地方は、スペインに占領されていたが、ブリュッセルとアントワープはヨーロッパの経済活動の中心地であった。その後、オーストリアとフランスの支配を受けた。フランスの支配は1815年ナポレオンがワーテルローの戦いで敗れるまで続き、それ以降はオランダの一部となった。1830年にベルギーが独立するにあたって、フランダースもその一部として自主統治を回復した。

1970年代にベルギーは連邦制に移行した。権限主体としてフランダース地域、ワローニャ地域、ブリュッセル首都地域の三つの地域がある。さらに、人口グループによる共同体として、フランダース共同体、フランス語共同体、ドイツ語共同体の三つの共同体がある。フランダースは、「フランダース地域」とブリュッセルのオランダ語人口を含むフランダース共同体であり、フランダース議会と政府を持っている。オランダ語を話すフランダース共同体とフランダース地方は一致するため、ひとつのフランダース地方政府としたのである。

連邦政府とフランダース地方政府は対等に権限を分担しており、防衛や司法は連邦政府、文化や教育や産業はフランダース地方政府が担当している。¹フランダース地方は、ヨーロッパにおける貿易の中継地として特別な立地条件にあり、企業の誘致にも熱心である。フォードは1922年にフランダースに進出しT型フォードを生産したという歴史がある。

1982年にフランダース地方政府は、フランダースのマイクロエレクトロニクス産業を強化するための包括的なプログラムを決めた。この決定は、マイクロエレクトロニクスが産業界にとって戦略的に重要であることと、この分野での開発を続けるためには大きな投資が必要であることが

ら行われた。²

このプログラムは、マイクロエレクトロニクスの先進的な研究所を創立すること(IMEC)、半導体ファウンダリを設立すること(MIETECⁱ)、VLSI 設計技術者の教育プログラムを組織することの3項目からなっていた。この包括的なプログラムに基づいて、1984年に産業界とフランダース地方の大学とフランダース地方政府の代表からなる理事会の下に、非営利組織としてIMECⁱⁱが設立された。

「マイクロエレクトロニクス、ナノテクノロジー、情報通信システムの設計手法と設計技術において産業界が必要とする時期よりも3年から10年先行する研究開発を行うこと」がIMECのミッションステートメントであった。³このミッションステートメントは現在でも変わっていない。フランダース地方政府が資金を提供しながら、IMEC独自の研究活動を可能にするように上記のミッションを設定した。

IMECの初代社長ⁱⁱⁱにはカトリック・ルーヴェン大学のフォン・オベルシュトラテン(Van Overstraeten)教授が就任した。教授は、1937年生まれで、1960年にカトリック・ルーヴェン大学を卒業し同年スタンフォード大学に留学した。1963年にモル教授の下で博士号を取得した後、1965年にカトリック・ルーヴェン大学助教授、1968年同大学教授となった。

教授は、半導体技術がエレクトロニクス産業に大きなインパクトを与えることを実感し、フランダース地方でIC設計と製造の研究開発を行なうことが必要であると考えていた。1969年にカトリック・ルーヴェン大学電気工学科にIC用のクリーンルームを持つ研究室をスタートさせた。この研究室では、テレビのリモートコントロールの設計とか、ベルテレフォンの半導体交換機の設計など、先駆的な仕事をした。ICの設計にはコンピュータを使った設計支援が必要であると考え、後にカリフォルニアを拠点とする最初のCAD会社のひとつとなる新しい研究チームを発足させたりもしている。1976年に、これらの半導体研究室はカトリック・ルーヴェン大学のESAT^{iv}となった。その頃、フランダース地方の他の大学でもクリーンルームを持つようになった。しかし、それぞれの大学でクリーンルームを持つのでは、小さなクリーンルームしか持つことが出来ないの、ひとつのクリーンルームを共同で使おうという動きが出てきた。これが、Interuniversity Microelectronics CenterつまりIMEC設立の動きのひとつとなった。

教授はIMECの初代社長として、1999年に62歳で亡くなるまで、IMECを世界有数の独立研究機関に育てることに大きな貢献をした。⁴

ⁱ その後1990年にAlcAtelに買収されAlcAtel MIETECとなり、2002年にSTマイクロエレクトロニクスに買収された。

<http://smithsonianchips.si.edu/ice/cd/PROF96/EUROPE.PDF>

<http://techon.nikkeibp.co.jp/members/01db/200204/1000803/>

ⁱⁱ 正式にはIMEC vzwである

ⁱⁱⁱ IMECは非営利組織であるが、IMECが用いている日本語表記では、Presidentを社長と表記しているのでそれに従った。

^{iv} Electronics, Systems, Automation, and Technology

2. IMEC の初期のプロジェクト

IMEC の初期のプロジェクトでは、アメリカ勢が主流を占めているメモリやプロセッサは狙わなかった。しかし、デバイスの試作ラインをはじめから持っており、設計だけでなく試作までを行っていた。初期の開発プログラムの中には、CATHEDRALというデジタル信号処理 ASICs のための自動設計システムの開発、HiMOS という CMOS プロセスの不揮発性フラッシュメモリ開発、ASIPⁱというアプリケーションに適合するように命令語セットを変えることができるプロセッサの開発などがあった。

CATHEDRAL というプログラムは 1986 年に開始した。デジタル信号処理 ASICs のための自動化システム設計技術の開発であった。このプログラムで開発された技術は、数年後にルーベンにあるメンターグラフィックス社のヨーロッパ開発センターに譲渡された。デジタル信号処理用のプロセッサ (DSP) としては、1980 年にベル研が試作品を開発し、NEC が製品を発表、1983 年にテキサスインスツルメンツが高性能の DSP を発売して、この市場に参入している。⁵したがって、IMEC は DSP そのものとしてはそれほど早い時期に開発を始めたわけではない。しかし、デジタル信号処理が ASICs の中でも行われるであろうと予測し、そのための設計ツールを用意したことは、DSP の普及の次に来るものを予測していたと言えるであろう。

1988 年に、IMEC は CMOS プロセスで不揮発性フラッシュメモリを実現するための HiMOSTMを発明した。1990 年に最初の HiMOSTMセルを、1.2 μm プロセスを使って製造した。その後、CMOS の微細化とともに、0.7 μm 、0.35 μm 、0.18 μm 、90 nm 技術を使い、4M ビットまでの試作回路を実現した。東芝にいた舩岡がフラッシュメモリを IEDM で発表したのが、1984 年 12 月であるから、時期的には遅いが、CMOS プロセスで製造が出来るところに特徴があった。

1991 年に、市場よりも約 10 年早くアプリケーションに応じて命令語セットを変えることができるプロセッサである ASIP の設計自動化の研究を開始した。5 年後の 1996 年に、この技術を基に自動化 ASIP 設計を提供する IC 設計業界で最初の会社、Target Compiler Technologies をスピンオフ企業として設立した。1997 年に商品化した C コンパイラ Chess と命令語シミュレータ Checkers からなる設計ツールが中核となっている。最初の顧客はモトローラで、第 2 世代携帯電話 (GSM) の音声コーディング用のプロセッサの設計とプログラム開発のために使われた。DSP を使うシステムの設計に使われることが多いが、Chess/Checkers の特徴は、プロセッサの命令語セットを書き換えることが出来、IP コアを外部から購入せず、自分の IP コアを設計出来る点である。⁶

3. 露光技術の開発

IMEC の研究開発は多岐にわたっているが、ここでは CMOS 開発、特に露光プロセス技術の開発について述べる。

IMEC は、1986 年に 125mm ウェーハ用の 3500m² のクリーンルームを開設した。このク

ⁱ Application-Specific Instruction-set Processor

ーンルームは現在の 200mm ウェーハ用のクリーンルームである。このクリーンルームに ASML 社の露光機など、実際に半導体デバイスを製作する設備を導入し、半導体デバイスの製作までの研究を行った。産業界の 3 年から 10 年先の要求にこたえるような研究開発をやるために、機器メーカーや材料メーカーのアルファ機器やベータ機器も導入して半導体製造プロセスの研究開発にも力を入れた。半導体の微細化が進むにつれて、半導体製造プロセス技術の開発は巨大な投資を必要とするようになっていった。その結果、すべてのプロセス技術の開発を 1 社で行なうことは難しくなり、各社共通の部分は、プレコンペティティブな開発として共同で行なうようになった。IMEC はそのプレコンペティティブな部分の開発の中心となる組織としての機能を果たすようになっていった。また、2004 年には 300mm ウェーハ用のクリーンルームを新設した。

3.1 ASML 社との長年の戦略的パートナーシップ

IMEC も ASML 社も 1984 年に設立された。ASML 社は、フリップス社からのスピンオフ企業として設立され、IMEC はフランダース地方政府の出資によって設立された。その後今日まで長年の戦略的パートナーシップを続けており、図 1 のように開発初期の露光機は IMEC に出荷され、IMEC の試作ラインで使われ多くの情報が ASML 社にフィードバックされている。その結果、ASML 社が露光機で世界ナンバーワンになることにも大きな貢献をしたと思われる。

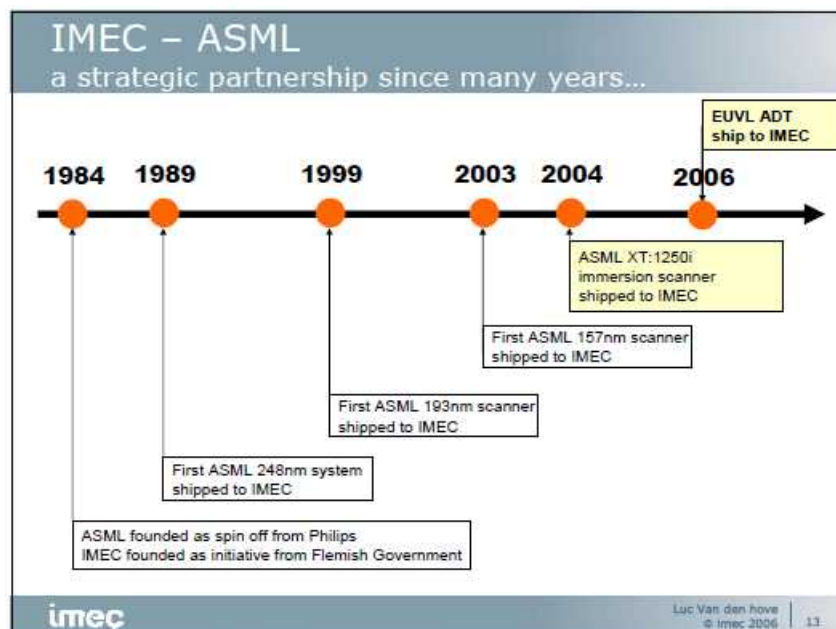


図 1 IMEC と ASML の戦略的パートナーシップ⁷

3.2 KrF 露光プロセス開発

1989 年には、ASML の最初の KrF 露光機 PAS5000/70 が IMEC に出荷された。KrF 露光機を使う露光プロセス開発ではマイクロリソグラフィー、ドライエッチング、シャロージャンクシ

オン形成、メタライゼーション、プロセス、デバイスシミュレーションなどそれぞれのプロセスステップに対する高度な制御が必要であった。その中で戦略的に重要な4つの領域、露光技術開発にジャンクション生成、ゲート酸化物の品質とウルトラクリーン、製造技術のためのソフトウェアパッケージの3つを加えた4つの領域を選び、集中的に開発を行なった。⁸1991年から、開発費用、リスク、開発能力、知的財産権を共同利用することを狙いとした産業界との共同研究の新しいビジネスモデルとしてIIAP(IMEC Industrial Affiliation Program)を策定した。⁹CMOS開発の分野では、4つ領域を含むIIAPをつくり共同研究する企業を募集した。露光技術開発では、レジストの評価を継続的に行い、位相シフトマスクの使用も研究した。DEC、Wacker、ソニー、BOC、Ashland、ASMなどがこのIIAPに参加した。¹⁰このKrF露光機を中心とするCMOSプロセス共同研究のネットワークと実績がArF露光機を中心とするIIAPプログラムにつながっていった。また、1982年の包括的プログラムでファウンダリとして設立されたMIETECとは、サブミクロンCMOSの分野で4年間の基本契約を結び、CMOS技術開発で密接に共同開発することになった。¹¹



図 2 IMEC に納入された ASML の露光機 PAS5000/70
(IMEC Annual Report 1991 より)

3.3 ArF 露光プロセス開発

1997年に、IMECとASMLは波長193nmのArF露光プロセスの共同開発プログラムを始めることになった。¹²130nmのデザインルールを可能とするプロセスを開発することを目的と

した。IMEC は、このプログラムを中核にして ArF 露光プロセス開発の IAP プログラムを作り、主要な半導体メーカーに参加するように呼びかけた。IMEC の試作ラインに設置した ArF 露光機を使って共同開発することで、次世代の露光プロセス開発の情報を早期に得ることが出来るというメリットを訴えた。また、IMEC は ArF 露光プロセス開発の核心技術の一つであるレジストについて先端的な評価技術を持っていたことも IAP プログラムのメリットとなった。この IAP プログラムは、二つのフェーズに分けられ、第一フェーズでは、130nm デザインルールのための露光プロセスの開発に焦点をあてた。

1998 年に KLA-Tencor が検査と測定技術を IMEC に提供する契約を結んだ。¹³同じ年に、ASML の露光機で 0.12 μ m の分解能が得られた。¹⁴

1998 年の終わりには、最初の ASML PAS5500/900ArF 露光機が IMEC に設置されメンバー企業は 15 社となった。¹⁵この ArF 露光機は、1999 年夏には稼動し始めた。この露光機と東京エレクトロンの Act8 を結合させた。主要なレジストベンダーからレジストサンプルを集め、最初にゲートレベル、次にコンタクトレベル、メタルレベルのレジストのスクリーニングを行った。フルフィールド ArF 露光機の評価のための詳細なモニタリングプログラムが作成された。特に Lambda Physik 社のエキシマレーザを含む光学コンポーネントの安定性と品質を詳しく調べた。¹⁶PAS5500/900 と IMEC の既存の試作ラインと統合してフロントエンドとバックエンドを備えた試作ラインの開発を行った。この IAP プログラムの参加者は 25 社の半導体メーカー、機器メーカー、材料メーカーとなった。¹⁷

2000 年には、レジストメーカーが改良されたレジストを次々に開発し、大きな進歩があった。試作ラインにおける PAS5500/900 の性能を評価する活動が多く行われた。/900 レンズを 0.63NA の/950 レンズにアップグレードすることで大きな改善が得られた。2000 年の後半には、130nm の第一フェーズの目標を超えて 100nm の第二フェーズへ進んだ。¹⁸

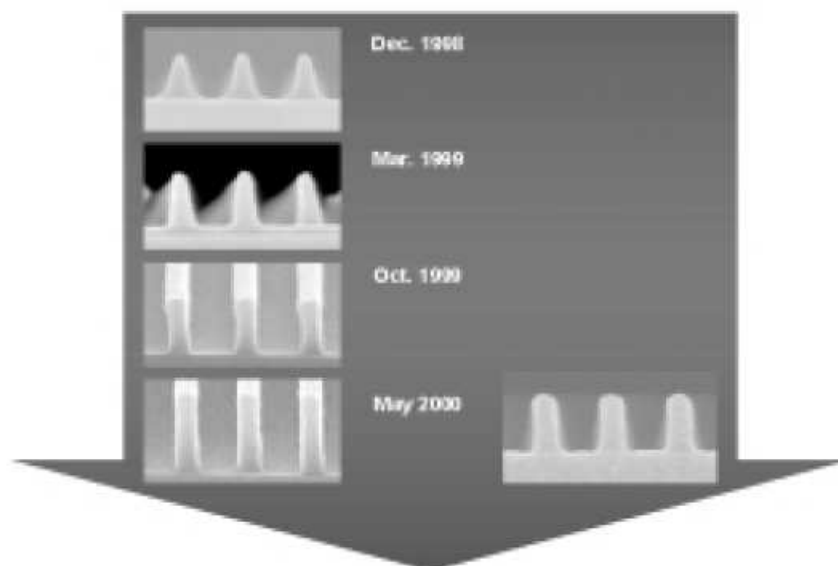


図 3 レジストの進歩による形成パターンの精度向上

(IMEC Scientific Report 2000 より)

2000年には、ASMLはウェーハをのせるステージを二つ持つユニークなTWINSCAN露光機を導入した。一つのウェーハで露光をしている間に、もう一つのウェーハで露光に必要な計測を行うことが出来る露光機で、ウェーハを並列に処理できるので処理能力を大幅に高めることが出来た。このTWINSCANの導入後、2002年には、ニコン、キャノンを追い越し、ASMLは露光機で50%のマーケットシェアを持つようになった。¹⁹

2002年には、ArF露光システムはIMECの90nm試作ラインに組み込まれた。ArF露光プロセス開発プログラムは、65nmデザインルールを実現する研究に取り組んだ。より高いNA(0.75)のASML PAS550/110をIMECに設置した。NAが0.75の場合、90から70nmのデザインルールの実現が可能となる。そのための新しいレジストを評価し、分解能を向上させる技術を適用することが出来た。²⁰

3.4 F2 露光プロセス開発

ArF露光プロセス開発のプログラムが成功したので、2001年中ごろから新しいF2露光を使うF2露光プロセス開発のIIAPプログラムをASMLの密接な協力の下にスタートさせた。レジストメーカーとマスクメーカーを募集し、2003年に製造ラインで使えるF2露光プロセスを開発するのが目標であった。当時はF2露光が、デザインルール70nmの露光プロセスの有力な候補であると考えられていた。一番の障害はF2露光用のレジストがタイムリーに使えるようになるかどうかであった。プログラムは、レジストを早期に使えるようにすることと、いろいろな方法で製造されたレチクルの印刷性能を比較することに焦点を当てた。東京エレクトロンがプログラムに参加することになり、IMECと共同でレジストコーティングの厚さとCD均一性の最適化に取り組んだ。また、東京エレクトロンの有名なクリーントラックACT8プラットフォームをミッドフルード露光機と接続させた。このIIAPには、AMD、インフィニオン、インテル、マイクロン、モトローラ、フィリップス、STマイクロエレクトロニクスなど9社の半導体メーカーが参加した。²¹

2002年に第3回リソグラフィシンポジウムが開かれた。ここでのコンセンサスは、製造ラインでの実用の主な障害は取り除かれたが、まだ重要なチャレンジが残っている、ということであった。IMECの開発プログラムはこれの中で大きな役割を果たした。

2003年には、ASMLが業界初のF2フルフィールド露光機(Microscan VII)をIMECに設置した。²²この装置を使った実験結果がASMLにおける製造用露光機の開発にフィードバックされた。²³

3.5 ArF 液浸露光

F2露光プロセスを開発していたMITリンカーンラボのロスチャイルドが2001年に、フッ素系の液体を用いた液浸F2露光の実験を行った。EUV露光でのみ可能と思われていた微細なデザインルールの領域までF2露光を利用することが目的であった。その結果、液浸技術の

有効性に気づいたロスチャイルド等は、ArF 液浸露光の研究を行い、純水が ArF の波長 193 nm の光に透明であり、高い屈折率を持つことを突き止めて、2002 年の SPIE で F2 液浸露光結果とともに発表した²⁴。TSMC は 2002 年 9 月のシンポジウムで ArF 液浸露光を推進する発表を行った²⁵。ニコンは、同じシンポジウムで NA が 1.05 の ArF 液浸露光は、NA が 0.85 の F2 露光と同等の解像力を持つというシミュレーション結果を発表した²⁶。これらの発表を契機に ArF 液浸露光の研究開発が急速に立ち上がった。

IMEC はこれらのフィージビリティ・スタディに注意は払っていたが、2003 年の時点では ArF 液浸露光についてはまだたくさんの疑問があると考えており、また F2 露光を使った開発に忙しく、ArF 液浸露光の開発は行なっていなかった。2004 年 1 月にロサンゼルスで開かれたリソグラフィのフォーラム²⁷で TSMC やニコンの ArF 液浸露光についてのフィージビリティ・スタディの結果が発表された。ArF 液浸露光は見込みのあるものであるとの認識が広がり、ArF 液浸に支持が集まり、F2 露光は支持を失った。²⁸

これを見て、IMEC では F2 露光プロセスの開発を直ちに中止し、ArF 液浸露光プロセスの開発に転換した。F2 露光プロセス開発プログラムに参加していた企業は全部 ArF 液浸露光プロセス開発プログラムに移ったので、新しくメンバー企業を募集する必要はなかった。その時に、日本から松下、ソニー、NEC が IMEC のプログラムに参加した。F2 フルフィールド露光機は 3 ヶ月稼動しただけで、撤去された。

ASML が作った最初の ArF 液浸露光機は 1150i で 2004 年 8 月にアメリカのオルバニナノテグに出荷された。これはプロトタイプで半年後には時代遅れになってしまうので、ASML で開発している次の本格的な液浸露光機 1250i の第 1 号機を IMEC に納入して貰うことにした。

IMEC は露光プロセス開発では長い経験を持っていたので、ArF 液浸露光プロセスのどこに問題があるかを早期に突き止め解決策を見つけることが出来た。IC メーカーだけでなくレジストメーカーのようなところも、実際の露光機を使うことが出来るので参加した。レジストと水の相互作用についても研究を行い、ダイナミック・リーチング法²⁹を開発した。これは、各社で標準として使われ、各社の結果を相互比較することが可能になった。

また、2004 年 8 月にカナダのバンクーバーで開催された国際シンポジウムでは、IMEC はコアパートナーとともに 5 つの発表を行った³⁰。

IMEC のカート・ロンゼは筆者らのインタビューに答えて「F2 露光から ArF 液浸露光への転換については、正しい時期に正しい意思決定をしたと思っている。この時点でも、まだリスクのある決定ではあった。実際様々な欠陥の問題が発生し、それらの問題を理解しそれらを解決するのに 2 年かかった」と語っている。³¹

IMEC は、ArF 液浸露光プロセス開発 IIAP プログラムを 2004 年はじめに発表し、7 月から稼動させた。ASML との密接な協力の下で生産用液浸露光機 TWIN SCAN XT:1250i を 2004 年 12 月に IMEC の 300mm クリーンルームに設置した。また、ASML は 2004 年 11 月には 1250i を TSMC にも出荷している。³²

ⁱ ニューヨーク州立大学オルバニー校にある Albany NanoTechcomplex

IMEC の ArF 液浸露光プロセス開発プログラムには多くの半導体メーカーがコアパートナーとして参加した。2004 年の IIAP 開始時点では、インフィニオン、インテル、フィリップス、サムソン電子、ST マイクロエレクトロニクスに、松下と TI がコアパートナーに加わり、コアパートナーは 7 社であった。2005 年 10 月には、TSMC が 8 番目のコアパートナーとなった。2006 年には、マイクロンが 9 番目のコアパートナーとなり、キモンダがインフィニオンから分離され両社ともコアパートナーとなった。2007 年には、エルピーダとハイニクスがコアパートナーとなり、コアパートナーは 12 社となった。

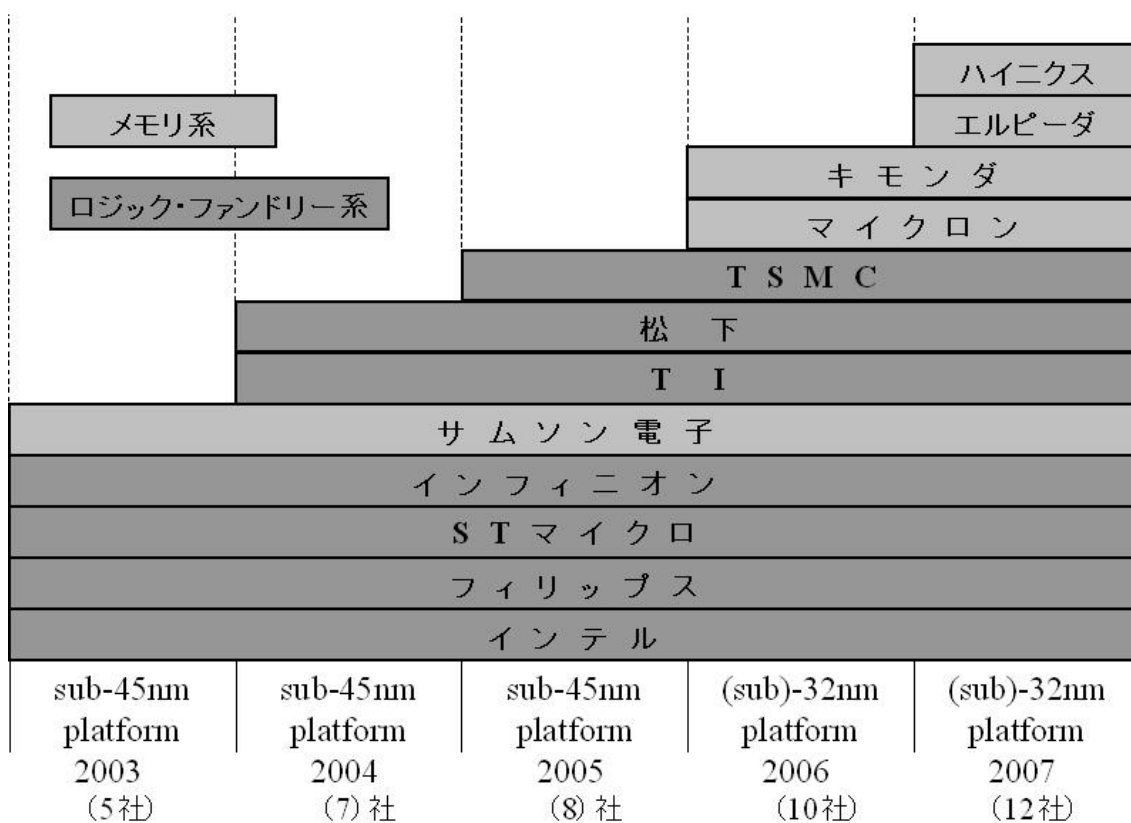


図 4 液浸プログラムのコアパートナー

2004 年には、機器メーカー 10 社と戦略パートナー契約を結んだ。AIXTRON AG、Applied Materials Inc、ASM International、ASM-Lithography、大日本スクリーン、FEI Company、KLA Tencor、Lam Research Corporation、東京エレクトロン、SEZ の 10 社である。³³

2005 年には、ASML の XT:1250i をアップグレードすることで、欠陥を劇的に減らし、ArF 液浸露光が 65nm から 45nm 線幅のパターンで受け入れられるための障害を取り除いた。

2006 年には、サブ 45nm まで ArF 液浸露光は使えると考えられ、プログラムの焦点は、45nm から 32nm に移った。2006 年の半ばには、NA1.2 の ASML XT:1700i が設置された。

純水を使ったArF液浸露光のダブルパターンングが32nmの中間的な解決策であると考えられている。IMECではダブルパターンングのためにチップ設計データからパターンを自動的に分ける技術を研究している。また、ダブルパターンングの工程のコストを下げるためにレジストフリーzingのプロセスを開発した。最初の露光で残したレジストを処理してその上に2回目の露光のためのレジストコーティングを行い、パターンを形成する技術である。途中でのエッチングが不要になるというメリットがある。平行して高屈折率液浸の研究を進めており、ASMLとの連携関係を進め、2008年にASMLの1900i(1.35NA)をIMECに設置する予定である。高屈折率液体については、少なくとも一つの液体がリソグラフィと相互作用での判断基準をクリアしていると考えられている。³⁴

IMECは、液浸露光プロセス開発の成果から、17件の特許を出願し、2007年11月現在で11件が公開されている。

3.6 EUV 露光

2006年にIIAPプログラムを開始し、半導体メーカ、材料メーカ、マスクメーカ、リソグラフィ周辺機器メーカに参加を呼びかけた。45nmプロセスノードまでは、ArF液浸露光で可能だが、22nm以降では、EUVが唯一の露光技術であると思われる。

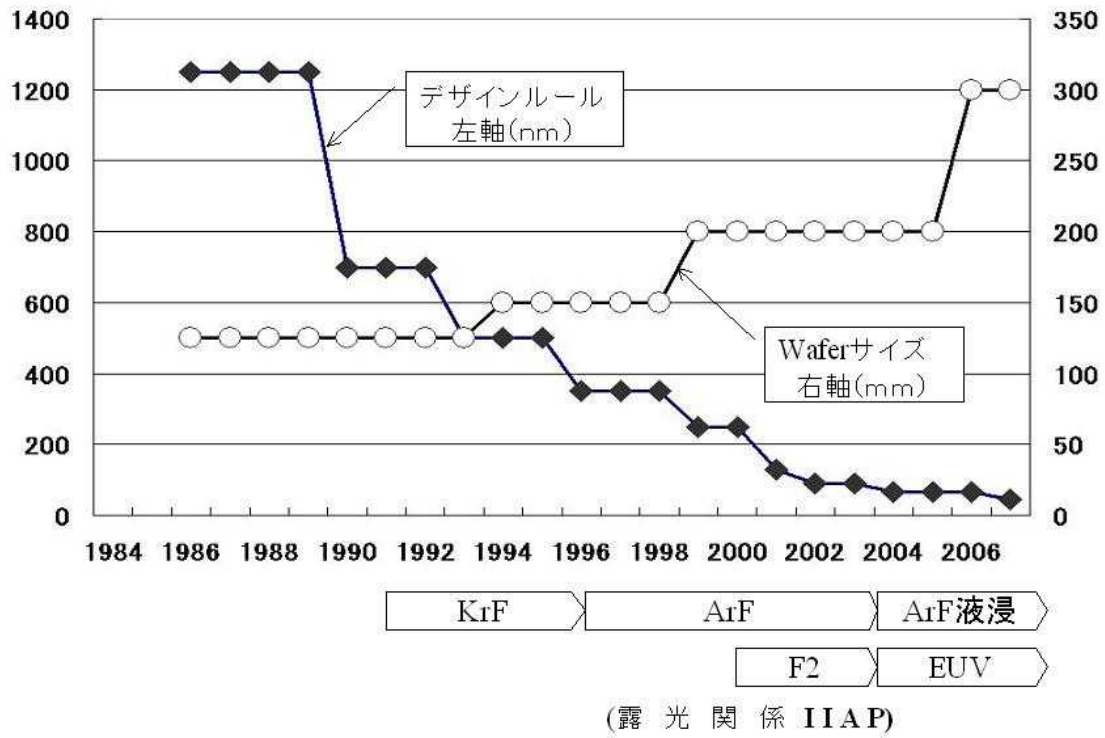
2006年8月に、ASMLが実用的な露光領域を持ったフルフィールドシステムの世界最初のアルファ機をIMECに出荷した。ASMLはほとんど同時にオルバニナノテクにもアルファ機を出荷した。

2007年のセミコンウェストでIMECの副社長で最高運営責任者のルーク・ファンデンホーヴは、IMECではこのアルファ機にEUV光源を組み込む最終段階に入ったと語った。³⁵

3.7 IMECパイロットラインと露光関係のIIAP

IMECのパイロットラインのデザインルールとウェファーサイズの変遷とIIAPプログラムを重ねたものが図5である。2004年5月に300mm試作ラインが出来た。これまでの200mm試作ラインも稼動しており、二つのシリコン試作ラインを持っている。その他に、マルチチップモジュール、窒化ガリウムHEMT、シリコン太陽光発電セルの試作ラインも持っている。IMECの試作ラインは、56人のオペレータが4シフトで稼動をサポートし、週7日24時間稼動している。³⁶歩留まりの議論が出来る試作ラインは、研究機関としてはIMECのものだけであると言われている。

ⁱ マスクのパターンを2枚に分けて1枚のパターンが必要とする精細度を下げる方法。32nmのパターンを描くことができるが、マスクを分けて2枚にするため製造コストが高くなる。



注³⁷

図 5 IMEC 試作ラインと関連する IIAP

IMEC の露光関連 IIAP プログラムと試作ラインで使った露光機を年代順に整理したものが表 1 である。

Year	IIAP Program	Stepper at IMEC
1991	Optical lithography	PAS5000/70 365nm
1992	Advanced optical lithography	PAS5000/70 365nm
1993	Optical lithography	PAS5000/70 365nm
1994	Optical lithography	PAS5000/70 365nm
1995	Optical lithography	PAS5500/60 365nm 0.54NA
1996	Optical lithography	PAS5500/200 365nm 0.48-0.6NA PAS5500/300 248nm 0.42-0.57NA
1997	193nm optical lithography	
1998	193nm lithography	(PAS5500/900 193nm at ASML)
1999	Development of 193nm lithography	PAS5500/900 193nm
2000	Development of 193nm and 157nm lithography	PAS5500/950 193nm 0.63NA
2001	Development of 193nm and 157nm lithography	PA5500/1100 193nm 0.75NA
2002	Development of 193nm and 157nm lithography	PA5500/1100 193nm 0.75NA
2003	Advanced lithography 157nm optical lithography, EUV lithography 193 immersion lithography	Micrascan V 157nm PA5500/1100 193nm 0.75NA
2004	Advanced lithography 193 immersion lithography EUV lithography	TWINSCAN XT:1250Di (i0) 193nm Immersion 0.85NA
2005	Advanced lithography 193nm immersion lithography EUV lithography	TWINSCAN XT:1250Di (i2) 193nm Immersion 0.85NA
2006	Advanced lithography hyper-NA immersion lithography 1.55-1.60NA EUV lithography double patterning 193nm lithography	EUV ADT TWINSCAN XT:1700i 1.2NA
2007	Advanced lithography Immersion lithography extendibility Double-patterning lithography EUV lithography Resist fundamentals	EUV ADT TWINSCAN XT:1700i 1.2NA

表 1 露光関連の IIAP と IMEC に設置された ASML の露光機

4. CMOS 以外の最近の主なプロジェクト

ムーアの法則にしたがって強力に微細化を進める(More Moore)とともに、ムーアの法則を超えた開発(More than Moore)にも取り組もうとしている。半導体市場が微細化を進めることなくシステムの機能を増やす技術に関心を持つようになってきていることにも対応している。130nm/90nmCMOS の 200mmシリコン試作ラインに他のプロセスモジュールやデバイスを組み込んでアプリケーション向けのデモンストレーションとなる開発を行なっている。先進的なパッケージング技術と相互接続技術、バイオエレクトロニクス、窒化ガリウム電力素子、大面積有機エレクトロニクスなどの組み合わせがこの例である。

その他、マルチモード・マルチメディア(M4)プログラム(multi-mode multimedia (M4) program、現在のプログラム名はApollo)では、携帯端末がさまざまな通信モードとコンテンツのフォーマットの柔軟に対応できるプロセッサアーキテクチャを開発した。このプロセッサに対応した C コンパイラが開発されており、省電力高性能な携帯端末を開発できる。この技術によりマルチメディアがいつでもどこでも使える環境を構築できるマルチモード・マルチメディア端末の技術開発が可能となる。命令語セットとプログラムを変えることで様々な無線通信環境に対応できるので、無線通信環境が変わっても切れ目なく通信することが出来る。

また、超小型センサーを人体に貼り付けたり、挿入したりして、常時計測したデータをセンターに送ることが出来るプラットフォーム、ワイヤレスセンサーノードの開発を行っている。このために必要な技術開発は、超低消費電力無線通信、超低消費電力信号処理、超小型電源システム、センサーとアクチュエータ、統合センサープラットフォーム(2次元および3次元)である。これを、身に着けたネットワーク(BAN, Body Area Network)に使う。身体に超小型の電源付センサーとアクチュエータを埋め込み、身に付けたセンサーノードと通信する。センサーノードから、ネットワークと通信する。BAN を使って、病気の診断とか、フィットネス運動の記録とかのサービスを行なう。

2050年には、電力総需要の20から30パーセントを太陽光発電素子で賄うことが期待されている。そのためには、さらなるコストダウンが必要であり、シリコン太陽光発電素子、曲げることが出来る有機太陽光発電素子、高効率な太陽光発電スタックの3つ研究開発を行なっている。

5. IMEC で研究する大学院生

IMECでは、フランダース地方やベルギー、オランダなどのオランダ語圏ばかりでなく世界中からの大学院学生を受け入れている。修士課程学生のテーマと博士課程用のテーマをIMECが提示して、学生がやりたいテーマを選んで応募する。

	博士課程学生研究員数	博士号取得者数
2006	213	33
2005	212	26
2004	210	29
2003	185	21

表 2 IMEC の博士課程学生研究員数と博士号取得者数

表 2 は、2003 年から 2006 年までの IMEC で研究した博士課程の学生研究員数と博士号取得者数である。IMEC は大学ではないので博士号を授与することは出来ないから、出身大学との共同プロジェクトとして研究を行い、出身大学が博士号を授与する。毎年 30 名ぐらいの博士号取得者がいることになる。

IMEC で研究する博士課程学生研究員に対しては、生活費、住居費、医療保険、片道の旅費を IMEC が負担する。³⁸

6. IMEC はメジャーな独立研究機関となった

後述のようにフランダース地方政府による IMEC の評価を 5 年ごとに行い、それに基づいて次の 5 年間の助成金が決定される。2006 年にこの評価が行なわれた。フランダース地方政府が IMEC の 2001 年から 2006 年の活動を評価しその結果に基づいて 2007 年の始めに新しい契約を結び、2007 年から 2011 年までのフランダース地方政府からの助成金が決められた。フランダース地方政府は 2007 年には 2006 年の 3 千 5 百 56 万ユーロ(1 ユーロ 160 円とすると約 57 億円)に比べて 11%増の 3 千 8 百 90 万ユーロ(約 62 億万円)の助成金を提供し、2008 年には更に 4 百 37 万ユーロ(約 7 億円)を追加して 2006 年の 20%増の助成金を提供することになった。³⁹

ベルギーの GDP は 2006 年のデータで日本の約 10 分の 1、約 3100 億ユーロ(約 49 兆円)である。その 60 パーセントはフランダースの GDP であるといわれているので⁴⁰、GDP の 1 万分の 2 ぐらいを助成金としていることになる。

また、フランダース政府の 2006 年の年間予算が約 200 億ユーロ(約 3 兆 2 千億円)であるので、政府予算の約 0.2 パーセントを助成金として支出していることになる。

	ベルギー	日本
人口	10,379,067	127,433,494
GNP(百万ユーロ)	311,016	
GNP(兆円、1 ユーロ = 160 円換算)	¥49.763	¥507.546
一人当たり GNP(万円)	¥479	¥398

表 3 ベルギーと日本の GDP⁴¹

2006 年では、IMEC の全体収入は 2 億 2 千 6 百 90 万ユーロ(約 363 億円)で、フランダ

ース地方政府からはその約 16%の 3 千 5 百 56 万ユーロ(約 57 億円)の助成金を受け、約 84%の 1 億 9 千 134 万ユーロ(約 306 億円)はパートナー企業などからの研究資金となっている。図 6 は IMEC の全体収入の推移である。助成金以外の収入が毎年増えているのがわかる。2006 年のパートナー企業からの収入の大半は(sub)32nm 微細化プログラムに係るものである。⁴²

IMEC の存在はフランダース地方政府が進めている外国企業の誘致にも大きな役割を果たしている。フランダース政府貿易投資局のホームページでも「マイクロエレクトロニクス、ナノテクノロジー、ICT システムの設計手法や技術開発に関するヨーロッパ最大の独立研究センターである IMEC」として紹介されている。⁴³

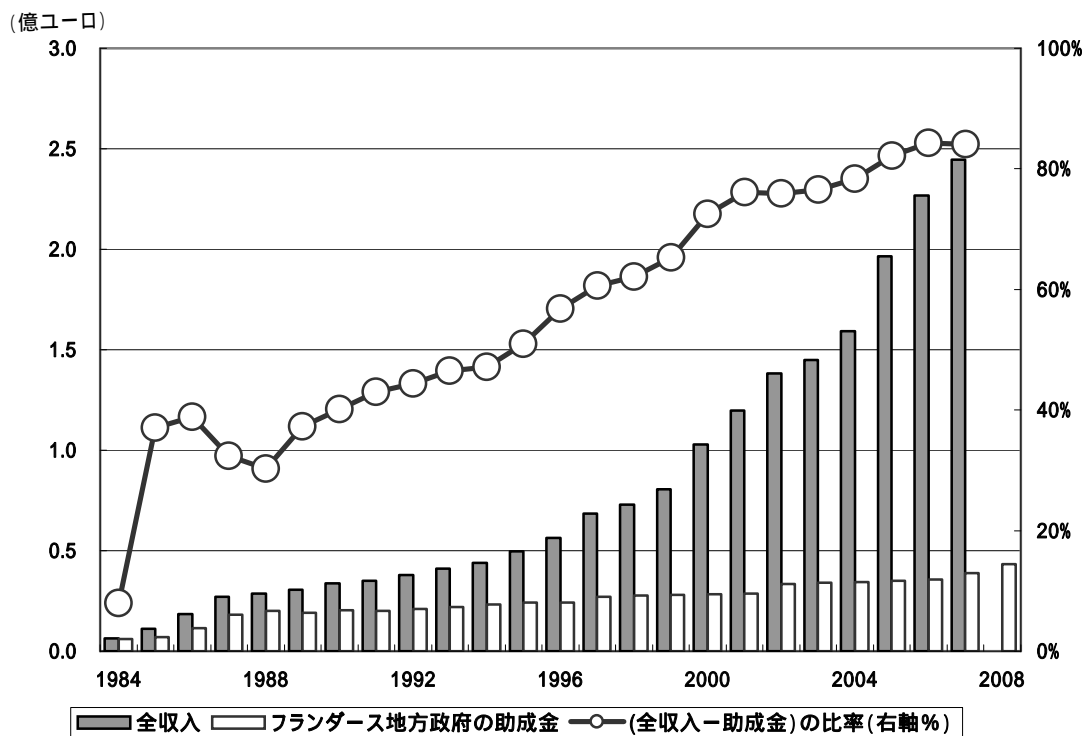


図 6 IMEC の売上と助成金の推移

(IMEC2007 年年次報告書から作成)

この収入の伸びと 12 社の主要な半導体メーカーが IIA P のコアパートナーとして参加していることから、IMEC はメジャーな独立研究機関となったと言えるであろう。

7. なぜ、IMEC は成功しているか

7.1 先見の明のある方向付け

ArF 液浸露光で先端を走っている IMEC だが、それには IMEC 創立者で初代社長だったフォン・オベルシュトラテンの先見の明がある方向付けがあった。1998 年に、IMEC はグローバルな研究開発センターにならなければならないと次のように述べている。⁴⁴

1998年頃は、米国はPCに力をいれ、プロセッサとメモリを中心とした半導体事業を行っていた。それに対してヨーロッパの半導体産業は、プロセッサとメモリよりも通信や自動車関連の半導体に力を入れてきた。プロセッサとメモリは価格の低下が激しい。PCに替わってインターネットとマルチメディアが半導体産業を成長させるだろう。

半導体の微細化が進むにつれて、研究開発コストが急激に増大する。一社でその研究開発コストをまかなうことは難しくなる。IMECやSEMATECHのような大規模な研究開発センターの果たすべき役割が大きくなる。特に中規模の半導体メーカーにとってはそうだ。世界のトップクラスの半導体メーカー以外は、大規模研究開発センターと共同で研究開発を行うようになるだろう。ファブレス半導体メーカーと半導体ファウンダリの果たす役割も大きくなるが、ファウンダリも研究開発コストをあまりかけることができなくなるので、大規模研究開発センターと共同するようになる。半導体製造装置メーカーにとっても、技術の変革が早くなるので、最新のプロセスのための機器を提供しなければならない。これらのメーカーにとっても、例えばインテルのような大きな半導体メーカーと共同するか、IMECやSEMATECHのような大規模研究開発センターと共同するようになる。IMECは世界中の企業と共同する。製造がグローバル化すれば、研究開発もグローバル化しなければならない。

この方向付けに基づいて、前述のように露光技術を中心とするCMOSナノエレクトロニクス関係のIIAPを作り、半導体メーカーや半導体装置および半導体関連メーカーに参加を呼びかけ実行してきた。メーカーにとって魅力のあるIIAPを作り、またメーカーが必要とする共同研究を行なうことでメーカーを引きつけた。24時間稼働の試作ラインに開発したばかりの最先端の半導体製造装置をメーカーが設置し半導体製造システムとして稼働させることができ、そのフィードバックを受け取ることが出来る。IMECの2006年の収入の約84パーセントをIMECが自分で集めており、このことからIIAPに参加している企業がIMECの活動を評価していることがうかがえる。

IMECは公的資金に支えられた研究機関ではなく、製造技術の確立も含めて巨大な開発投資を必要とするデバイスメーカーのプレコンペティティブな領域を受け持つ大きな独立研究機関という存在になっている。そうなる以外に、このような研究機関が存在する意義がないし、存続も出来ない、と考えている。したがって、フランダース地方や、ヨーロッパに軸足を置きながらも、全世界の半導体関連メーカーにとって頼りになる独立研究機関になろうとしており、視線は当然世界を向いている。

7.2 製造を視野にいれた開発

製造までを視野に入れて世の中がどう変化し、産業界がどう変化するかを予測している。その上で産業界の要求に応える研究開発は何かを考えてテーマを決めている。特にプレコンペティティブなテーマを選んでいく。また、開発された技術を使って製品を製造するところまでの一連の流れの中で、共同研究機関としてやるべきテーマを選択している。半導体製造のように、微細化が進み巨大な投資が必要になると、共同研究機関としてやるべきテーマはより製

造ラインに近いところまでをカバーしなければならなくなる。リソグラフィの露光装置の開発をすればよいというものではなく、レジストの問題やパターンの形の問題や、たくさん問題が複合してくる。これらをそれぞれの専門メーカーと協力しながら解決していくことが求められる。IMECでは、たくさんの大学院学生を受け入れており、彼らが試作ラインの基本的な特性の計測を行っている。一方企業の研究者は、この基本的な特性のデータを使って最先端の開発を行うことができる。問題が起これば、大学の研究者によるアカデミックな解析も期待できる。大学の研究者にとっては、企業の最先端の開発から興味深い研究テーマを見つけることができる。このような、フィードバックループがあることで、相互にメリットのある関係が出来る。IIAPにたくさんの企業が参加するかどうかによって、企業が欲しいと思っている研究開発をやっているかどうか分かる。

7.3. リスクとコストを共同で負担しIPを共有するIIAP

企業とIMECの研究開発協力では、IIAPと1～2社と協力して行なう研究プロジェクトがある。

IIAPでは、IMECの研究者と大学の研究者と企業の研究者がプリコンペティティブな領域の研究開発を協力して行なう。IMECのそれまでの研究成果をもとに産業界が必要と思われる領域のプログラムを策定する。パートナーとなる企業は、IMECに1名以上の研究者を出向させ研究プログラムに参加する。IMECが開発したそのIIAPのための知的財産とそのIIAPで開発した知的財産は、参加企業の間で共有され、自由に使うことができるが、非独占的で譲渡不能である。特定の企業との研究プロジェクトの場合はその企業の独自の知的財産となる。技術情報はコンピュータシステムで管理され、アクセスできる情報には手軽にアクセスできる。

7.4 有効な評価

IMECのミッションステートメントは設立当初から「マイクロエレクトロニクス、ナノテクノロジー、情報通信システムの設計手法と設計技術において産業界が必要とする時期よりも3年から10年先行する研究開発を行うこと」であり、このミッションステートメントは現在でも変わっていない。

このミッションを実現しているかどうかを評価する以下のような評価項目と評価基準が定められている。1996年からは、5年毎に評価を行なうことになり、2006年にもそれまでの5年間の評価が行なわれた。

評価項目1 世界的なセンターオブエクセレンスであること

評価基準は、IIAPなどの共同研究契約金額の総額、論文の発表数、招待論文の数である。

評価項目2 教育的な仕事においてエクセレントであること

評価基準は、博士号取得者の数、大学との共同プロジェクト数、共著論文発表数である。

評価項目 3 地元産業へのインパクト

評価基準は、新しいスピノフ企業、共同研究、トレーニングである。

この評価項目は、研究開発自体がうまく行なわれたかどうかではなく、どのような結果を周りに与えたかを評価しようとして設定されている。したがって、研究開発自体は成功だったが、その結果を使ってくれる企業がなかった、というような場合は評価されない仕組みになっている。むしろ変化する周りの状況にすばやく対応して成果が上がれば評価される。F2 露光から ArF 液浸露光に切り替えた時も、IMEC は液浸を最初にやっていたわけではなかったが、試作ラインを持っている特徴を生かして大きな成果を挙げることが出来、それが 2006 年の良い評価結果につながっている。

この評価に基づいて、次の5年間の基本契約がフランダース地方政府との間で結ばれ、フランダース地方政府からの助成金が提供される。毎年助成金が変わるのではなく、5年間安定した助成金があることで長期的な見通しに基づいた研究開発が可能になる。

7.5 独立研究機関としての経営

前述のように IMEC がなぜ成功しているかについては、様々な要因がある。これらの要因の基盤になっているものは、独立した研究機関として継続的に発展していくという経営的な視点と意思決定であると思われる。ミッションステートメントにあるとおり、「産業界が必要とする時期よりも3年から10年先行する研究開発を行なうこと」を狙いとするのであるから、単なる技術的な先見の明だけでなく、産業界がどのように発展していくかということに関する経営的な先見の明に基づいて研究テーマを選択し、状況が変わればそれに応じて研究テーマを変更して産業界が3年から10年先に必要とする研究開発にしていかなければならない。プレコンペティティブな領域は技術だけで決まるものではない、露光プロセス開発にしても始めは共同開発を必要とするようなプレコンペティティブな領域ではなかった。それが、半導体製造装置がだんだん高価になり、1社ですべての開発をまかなうことが出来なくなった結果、プレコンペティティブな領域とせざるを得なくなったのである。このように、技術的な要素と経営的な要素を総合的に考えて方向性を決めていかなければならない。最近の半導体業界の動向としては微細化だけに頼らないでシステムとしての機能をいかに実現するかに軸足を移し始めているとも言われる。

事実、IMEC の社長のギルバート・デクラーク (Gilbert Declerk) 教授は、「半導体の微細化だけに頼らないシステムの機能を半導体マーケットは求めるようになっている。様々な分野の研究を行なっている IMEC はそのような変化に答えられる主導的な地位にあり、様々な分野が交流する研究開発を加速するために分野ごとに分かれていた組織を有機的に結合されたひとつの組織に改変した。」と延べている。図 7 に 2007 年の IMEC の組織図を示す。

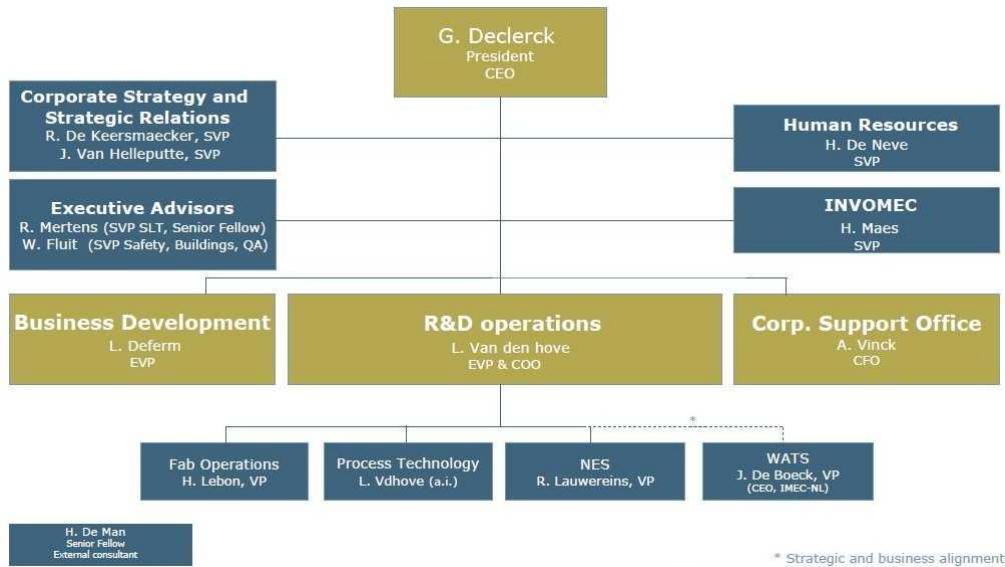


図 7 2007 年の IMEC 組織図⁴⁵

現在の収入の主力である(sub-)32nm の IIAP の次に産業界が必要とするものを提供できるような研究開発を進めようとしているわけである。そのための IMEC の努力を表すと思われるので、IMEC の 2007 年現在の研究開発テーマ全体を表 4 にまとめた。

共同開発したほうが良い領域(つまりプリコンペティティブな領域)は何かを見定め、その領域の研究開発を主導していく経営的な判断が共同開発プロジェクトの成功の鍵であることを IMEC の例は示していると思われる。(赤城三男)

CMOS ベースのナノエレクトロニクス (CMOS-based nanoelectronics)
ナノテクノロジーとポスト-CMOS ナノエレクトロニクス (Nanotechnology and post-CMOS nanoelectronics)
物質とデバイスの特性解析、信頼性、モデリング (Characterization, reliability and modeling)
マルチモード・マルチメディア(M4)技術 (Multi-mode multimedia (M4) technologies)
無線自律送受信機 (Wireless autonomous transducer solutions)
太陽光発電素子 (Solar cells)
先端実装技術と相互接続技術 (Advanced packaging and interconnection technologies)
III-V 族化合物(GaN)を使った高効率電力素子 (Power-efficient devices based on III-V materials (GaN))
バイオエレクトロニクス (Bioelectronics)
有機エレクトロニクス (Organic electronics)
RF デバイスと技術開発 (RF devices and technology)
設計技術 (Design technologies)

表 4 IMEC の研究テーマ⁴⁶

注

- 1 <http://www.flanders.jp/jp/flanders/index.html>
- 2 IMEC history <http://www.imec.be/wwwinter/about/en/IMEChistory.shtml>
- 3 http://www.imec.be/ovinter/static_general/about_IMEC.shtml
- 4 IMEC Newsletter, No.24 July 1999
- 5 ウィキペディア
- 6 <http://www.retarget.com/press-981019.html>
- 7 IMEC Executive Seminar 2006 資料
- 8 IMEC Newsletter No.3, Jan. 1992
- 9 20 Years IMEC
- 10 IMEC Annual Report 1991
- 11 IMEC Annual Report 1991, IMEC Newsletter, No.3, Jan. 1992
- 12 IMEC Newsletter, No.18 April 1997
- 13 IMEC Newsletter, No.22 July 1998
- 14 IMEC Newsletter, No.23 Nov. 1998
- 15 IMEC Newsletter, No.24 July 1998
- 16 IMEC Scientific Report 1999
- 17 IMEC Newsletter, No.25 Oct. 1999
- 18 IMEC Scientific Report 2000
- 19 <http://journal.mycom.co.jp/articles/2007/06/21/asml/index.html>
- 20 IMEC Annual Report 2002
- 21 IMEC Newsletter, No.28 Oct. 2000
- 22 IMEC Annual Report 2003
- 23 IMEC Scientific Report 2003
- 24 “Resolution enhancement of 157-nm lithography by liquid immersion”, M. Switkes and M. Rothschild, MIT Lincoln Lab. Proceedings of SPIE -- Volume 4691, Optical Microlithography XV, July 2002, pp. 459-465 など
- 25 “Semiconductor foundry, lithography, and partners”, B. J. Lin, TSMC, Proceedings of SPIE -- Volume 4688, Emerging Lithographic Technologies VI, July 2002, pp. 11-24
- 26 <http://techon.nikkeibp.co.jp/members/NMDNEWS/20040130/101768/>
- 27 International SEMATECH Lithography Forum, January 27-29, 2004
- 28 <http://techon.nikkeibp.co.jp/members/NMDNEWS/20040130/101768/>
- 29 <http://www.microelectronics.be/wwwinter/mediacenter/en/SR2006/681408.html>
- 30 IMEC Newsletter, No.40, Oct. 2004, p4
- 31 2007年11月12日 カート・ロンゼ(Kurt Ronse PhD, Director Lithography Department, Process Technology Division, IMEC)インタビュー
- 32 <http://www.asml.com/asml/show.do?ctx=13559&rid=10668>
- 33 IMEC Newsletter, No. 40 Oct. 2007 p3
- 34 http://www.imec.be/wwwinter/mediacenter/en/SemiLitho_2007.shtml
- 35 http://www.imec.be/wwwinter/mediacenter/en/SemiLitho_2007.shtml
- 36 2006年11月14日 カトリーン・マレン(Ms. Katrien Marent Corporate Communications Director, IMEC)インタビュー
- 37 デザインルール: 微細化の表現方法は、技術の発展とともに線幅やハーフピッチなどと変化しているが、それらを総称してデザインルールとした。
- 38 IMEC ホームページ (<http://www.imec.be/wwwinter/microsystems/phd/phd.shtml>)、IMEC Annual Report、カトリーン・マレン(Ms. Katrien Marent, Corporate Communications Director, Business Development, IMEC)からのデータより作成

39

http://www.smalltimes.com/articles/article_display.cfm?Section=ONART&C=RD&ARTICLE_ID=287197&p=109

40

<http://www.investinlanders.com/jp/facts%5F%5F%5Ffigures/20%5Ffacts%5Fon%5F%5Flanders/>

⁴¹ 2006年のデータ、出典は以下の通り

人口: U.S. Census Bureau

<http://www.census.gov/ipc/www/idb/tables.html>

GDP: ベルギーナショナル銀行及び総理府統計

<http://www.nbb.be/belgostat/PublicatieSelectieLinker?LinkID=430000034|91000082&Lang=E>

<http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/qe073/gaku-mcy0731.csv>

⁴² IMEC Annual Report 2006

⁴³ http://www.investinlanders.com/jp/sectors_activities/ict/default.aspx

⁴⁴ IMEC Newsletter, No.22, July 1998

⁴⁵ Gilbert Declerck presentation at IMEC Executive Seminar 2007 in Tokyo

⁴⁶ http://www.imec.be/ovinter/static_research/research.shtml