

Title	生成AIとチップレット時代におけるEB直描アプローチの検討
Author(s)	若林, 秀樹
Citation	年次学術大会講演要旨集, 40: 452-457
Issue Date	2025-11-08
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	https://hdl.handle.net/10119/20233
Rights	本著作物は研究・イノベーション学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Research Policy and Innovation Management.
Description	一般講演要旨

生成 AI とチップレット時代における EB 直描アプローチの検討

○若林秀樹(熊本大学 半導体デジタル研究教育機構)

wakawaka@kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

半導体産業は Moore 則の中、微細化を中心とした巨額先行投資競争の結果、ファブレスは NVIDIA、ファウンドリは TSMC、製造装置は ASML と、三大寡占企業に依存する構造が強まっている。巨額な投資負担と高価なマスク代から EUVL¹による製造は基本的に CPU や GPU やメモリなど汎用チップの小品種大量生産が向いており、ASIC など少量多品種には不向きで、GPU の雄 NVIDIA が有利となる。これでは資金規模が少ないベンチャーはチップの自社開生産は難しい。多様なアイデアニーズに対応するイノベーションは停滞する。安全保障視点では国家覇権を決める高度 AI 先端半導体チップの製造が地政学リスクのある台湾 TSMC と蘭 ASML だけに依存するのも好ましいとは言えない。更に電力の大量消費が大問題である。脱 TSMC 一極依存の観点ではラピダスが設立、立上げ中で世界から期待されている。脱 EUV ではキヤノンのナノインプリント商用化はあるが部分的な工程に留まっている。

他方、生成 AI 時代を迎え、学習はクラウド、推論はエッジ側でアプリケーション特化という新たなトレンドが生まれ専用 AI チップが注目されつつある。また Moore 則も 60 年近く転換点にありチップレットはじめ More than Moore への技術トレンドが注目される。そこで生成 AI とチップレットの組み合わせによるビジネスモデルを生み出すことが必要である。こうした大変革期にこそ過去の先行投資と量産競争から脱し新たなビジネスモデルを考えなければならない。そこに日本復活の機会もある。

生成 AI とチップレットにマスクレスな EB 直描²を組み合わせれば、柔軟性に富み多品種少量向き低価格で電力消費も少ない生産が可能になる。EB 直描はスループットが課題だがヘテロジニアスも含めたチップレットと組み合わせることでボトルネックを除く。この新ビジネスモデルは半導体業界にスマートな新たなトレンドをもたらす。特に多品種少量を目指すラピダスには効果が大きい。

2. 先行研究

半導体ビジネスモデルについてはアカデミアの論文の他、ムーアの著作 [1]、アナリストレポートも含め多くの先行研究がある。ビジネスモデル一覧を示す(図表 1)。ここでは生成 AI やチップレットに関連したビジネスモデルと EB 直描の事業化に関する先行研究に絞って論じる。

図表 1 ビジネスモデル一覧 (出所)若林秀樹

	日本				ソ連	米国			台湾	中国	
	70年代	80年代	90年代以降	これから	ソ連	基本	90年代	2000年代	イスラエル、ウクライナも類似	伝統	2010年以降
戦略	米学び+品質量産政府	大型先行投資コストダウン	戦略不在	短TAT変種変量変価格	丸ごとコピー	ハイテク覇権	先行逃げ切りロードマップ	チップ・タック戦略	高株価+M&A 水平分業	ハイテクシールド米と同輪 水平分業を支える	ハイテク導入 不動産投資モデル
補足	通産省+電通研	低金利と低期待 ROE	日米摩擦、バブル崩壊		社会主義国家の限界	軍事、DARPA	水平分業を韓国台湾と同輪で主導、ビジネスモデル利用	ファブレスはウォールストリートと同輪	米と補完	知財等何でも	工場投資は政府工場都市で地価アップ政府資金回収

チップレットを活かしたビジネスモデルについては、若林の研究がある[2]。チップレットならではの前工程 FEOL (Front End of Line : トランジスタ)と BEOL (Back end of line : 配線)の並列・短 TAT (turn-around-time)生産を先端ロジック半導体工場に導入想定し、財務シミュレーションで効果を検証した。稼働率を下げて 1.25~1.4 倍の値上げでフル生産と短 TAT 生産で 5 年間の累損は同じ営業利益率は安定することを示した。複数のケースで並列生産の効果を確認、通常生産に対し黒字化が 1 年早まり、累損 1/3 となることを示した。効果の背景は、①無駄な投資無し②歩留まりや需要に応じた最適生産である。しかしラピダスには、マスク代や EUV 投資負担によるコスト増を懸念する指摘も多かった。

¹ EUVL: Extreme ultraviolet lithography 数十の世界拠点から部品を集め、立上げに数百人のエンジニアと数か月が必要。一台 500 億円以上な金額と製造に大量の消費電力が必要。先行巨額投資モデルの象徴

² Electron Beam でマスクを使わずに lithography(リソ : パターン形成)を行う。

EB 直描の可能性については、光リソ等の比較など、理工学系の学会などで多くの先行研究がある。日立評論 1994 年 7 月で、①微細加工性と高精度な重ね合わせ、②パターニング多様性とスループット改善により、クォーターミクロン時代には光リソ限界で、6φで ASIC1 品種当たり総ウェハー投入枚数 250 枚以下では有利になると論じた[3]。その後 2006 年には光リソ限界と EUV 開発の困難、システム LSI 期待からアドバンテストは新たに 65nm/45nm 製造プロセスに対応した EB 装置を開発、富士通と共同で EB 直描技術対応プロセスを開発するイー・シャトル社を共同設立した[4]。2013 年には 1xnm プロセス対応 EB 装置を東大や京大などから受注、現在も大学や研究機関で稼働している。

しかし、現在、EB 直描はマスク製造の他、MEMS、6φの小口径、大学研究所の試作サービスには有効利用されているが 300mm 量産ラインへの導入は無い。その後、光リソは ArF 液浸パターニング等の技術開発がなされた。多くの問題点を指摘された EUVL も ASML の不断の長期に亘る開発成果により最先端では独壇場となった。EB 直描はスループット問題から適用範囲はマスク、MEMS、試作等に留まっており、EB 直描によるビジネスは議論出尽くしの感がある。

それゆえ生成 AI とチップレットを生かす EB 直描アプローチに関して議論が無かったが、垂井康夫元超 LSI 研究組合所長が「ラピダスが目指す主要な用途は AI であり、AI 半導体は多品種少量生産であり、そこでは EUV もいいが最近性能向上が著しい EB を使いた立体構造が鍵になることを考えると、AI 半導体に向けた EB による微細化と立体構造のための共同研究所が必要だ」[5]と提案した。ただし詳細な議論やビジネスモデルの議論は無い。そこで、このアイデアをヒントに可能性を検証する。

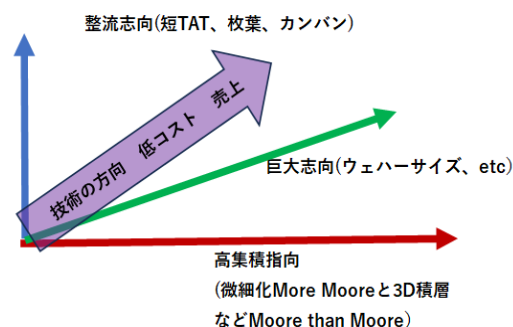
3. 生成 AI とチップレットを生かす EB 直描アプローチとビジネスモデル

これまで EB 直描が何度も期待されながらも光リソに破れたのは先行研究が指摘する低スループットであり光リソ弱点に対する相対メリットが期待されたが、光リソ側が多くの課題を克服した(図表 2)。また、スループットや大面積化は大量生産コストダウンのビジネスの方向性であり(図表 3)は EB 直描が不利に働く方向性であった。他方で 2000 年以降、ウェハー大面積化は 300mm で飽和、450mm 化は消えた。Moore 法則、微細化も周波数特性飽和からモノリシックでの集積化ではないチップレットアプローチが普及し始めている。このチップレットも含めて 3D 実装など More than Moore は大きなトレンド変化であり、過去は EB 直描が難しかった前提条件が一変する可能性がある。もちろん、カーボンニュートラルや国家安全保障からの脱 ASML 依存も大きな風向きの変化である。

図表 2 EB 直描のこれまでこれから(出所)若林秀樹

これまで		これから
90年代	一括露光の難しさから機会 ⇒ステッパ重ね合わせ克服	2025年以降 チップレット
2000年代	EUVの難しさや高コスト、 電力の問題から機会 ⇒EUV実用、あとは無視	スループットは遅いが、マルチ化で 改善、小さく多様なダイを作りあと で統合、段差や複雑なパターン、 RDLや検査テストや修正リペアとも シナジー
スループットの致命的遅さを他の利点 で補おうとしたが		

図表 3 技術の 3つの方向性 (出所)若林秀樹



どのようなニーズや技術トレンドが EB 直描に有利か不利かを示すが、チップレットによるダイの小面積化や 3D による段差などは有利である。

図表 4 EB 直描に有利か不利か (出所)若林秀樹

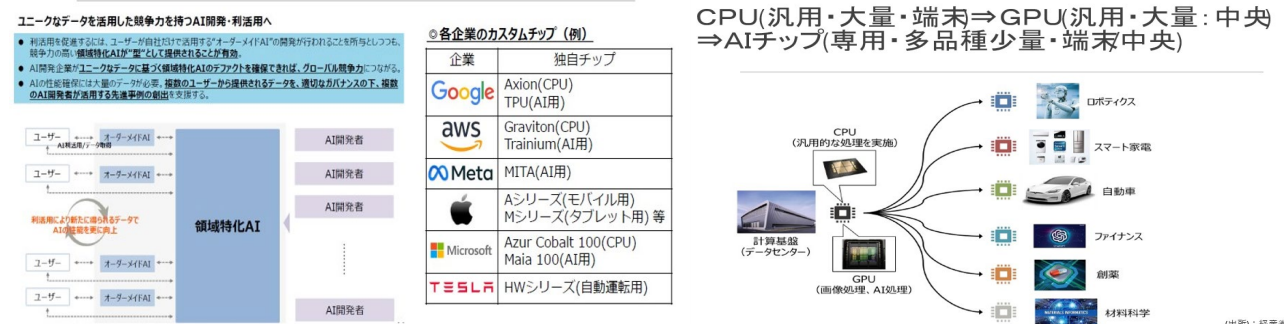
EB直描 有利		EB直描 不利		EUV 有利
ニーズ	低スループットでも可	高 スループット	高 電力でも可	大量生産 コスト志向
	省 電力		修正頻度少ない	
	変形パターン		同一パターン	
	精度・微細 重要		精度・微細 粗い	
	凹凸・段差・トレンチ		平面	
チップ レット	小面積	大面積化(ウェハー)	大面積化(ダイサイズ)	技術の進化
	小面積(ダイサイズ)		EUVも不利だが克服	

カスタマイズ多品種少量となるエッジ AI 半導体

需要面では、これまで EB 直描の適用は多品種少量の ASIC や FPGA 向けが期待されてきたが、巨大な市場でなくメインは依然、CPU や GPU、DRAM や NAND フラッシュといった大量生産製品である。需要が拡大している生成 AI でも DC 向けは NVIDIA の GPU や HBM であり大量生産である。

しかし、生成系 AI は、新応用分野である DC のあり方を変えつつある。2000 年以降は Web 閲覧やメールを処理するインターネット DC だったものが、2020 年から現在は、クラウド処理のハイパースケーラー DC、そして 2025 年以降は、生成系 AI 時代が本格化、学習推論の AI-DC となり、学習はセンター(量子と共存)、推論はエッジとなる。そこでは、クラウド側では GAFAM が支配する汎用 GPU の世界だが、エッジ側、端末側、あるいは、エッジ側の分散型 DC では、アプリケーションに特化することから GAFAM は自社専用チップを開発、生成 AI カスタムチップ多品種少量が必然になる(図表 5)。

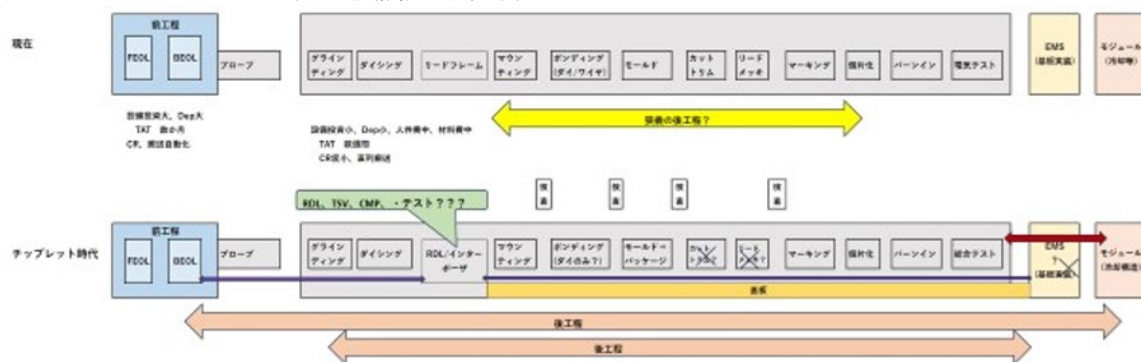
図表 5 生成 AI 専用チップ CPU⇒GPU⇒AI チップ (出所)経産省



前工程と中・後工程が一体化し設計と結びつくチップレット技術

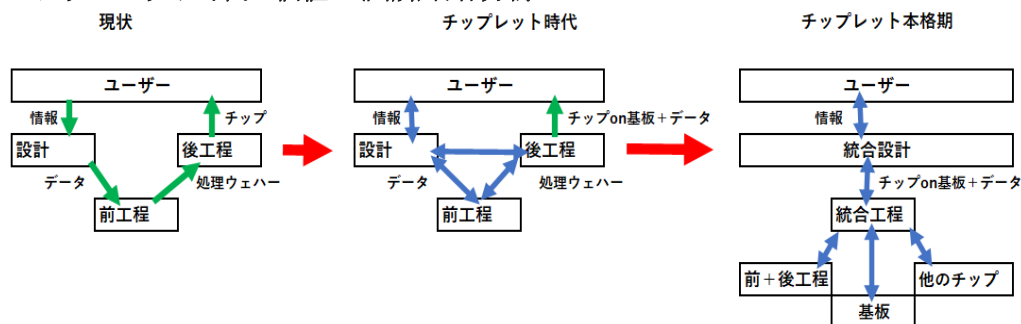
チップレットは異なる前工程で製造したダイをプリント基板上で RD インターポーザ³に搭載するため(図表 6)、パッケージチップを別のプリント基板上に搭載する可能性は減り EMS 工程が変わる。熱問題から冷却構造が鍵でありパワーモジュールの冷却部品工程も必要である。RDL 形成を中工程と呼ぶが、リソや CMP などが必要で装置構成は前工程に近い。基板上に先端ロジックやメモリだけでなくパワーや光チップも搭載が可能となる。

図表 6 チップレットと工程 (出所)若林秀樹



チップレット化で前工程優位の生産から中・後工程へ価値がシフト、設計が前工程だけでなく中・後工程と直結する。また、チップレットは前後工程融合や異種チップ接合、設計と後工程の融合が起きる。

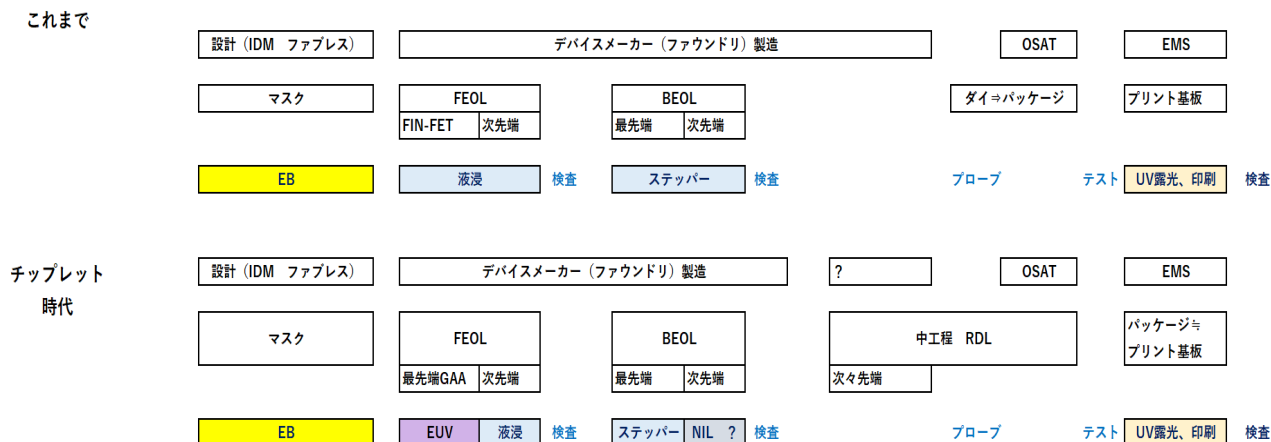
図表 7 チップレット時代の価値 (出所)若林秀樹



³ Re Distribution Layer Interposer(再配線層インターポーザ)

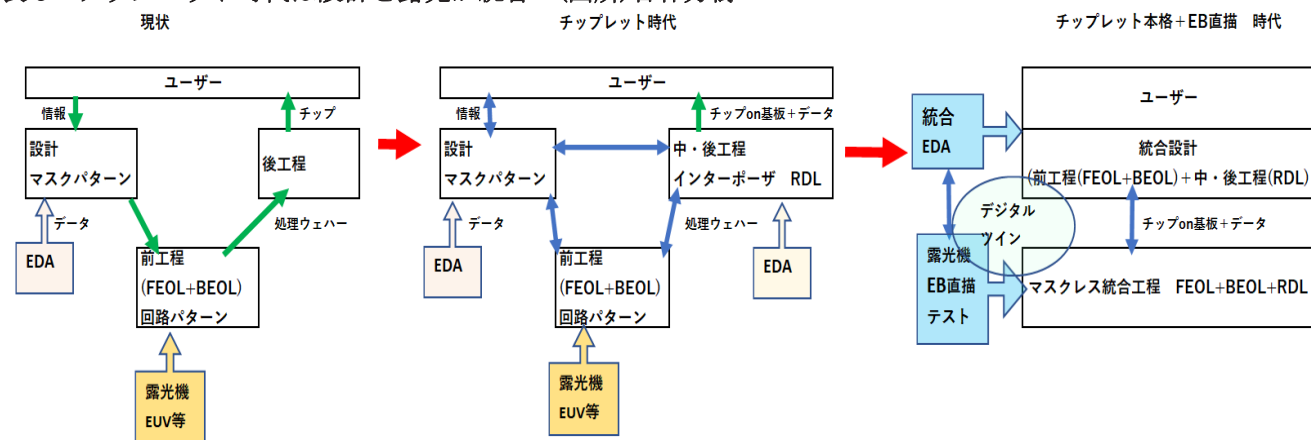
これを微細化の観点で考えると現状では設計はユーザーニーズに基づき EDA ツールを生かしマスクを EB により製造する。これがマスクセット数億円から最近は数十億円と高価である。また、前工程では EB でなく EUV や液浸によるリソである。後工程はプリント基板の配線パターン別のリソ技術で形成している(図表 8)。

図表 8 チップレット時代の EB 直描効果 (出所)若林秀樹



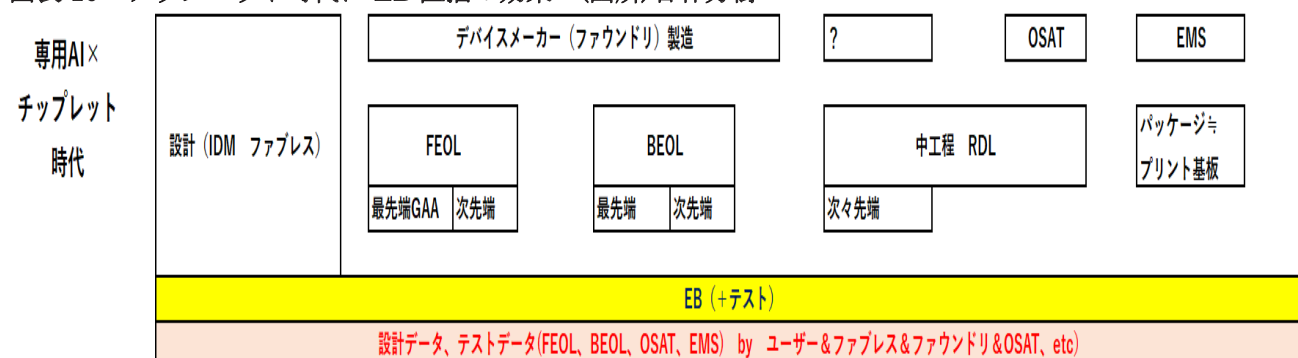
これがチップレット時代には、後工程に RDL が必要となり光リソやナノインプリントが描く。配線幅は前工程 BEOL が RDL に近い。RDL 向け EDA が必要だが熱や強度設計が重要になる。現状では設計データが前工程と後工程では十分に連携されず EDA も別である。チップレットでは多様なチップを後から統合するためテストが重要である。更にチップレット本格時代には EDA は統合され、FEOL と BEOL と RDL のデータも一体化、設計データから生まれるデジタルツインと実チップを比較、テストデータの特性データが設計データにフィードバックされるであろう(図表 9)。

図表 9 チップレット時代は設計と露光が統合 (出所)若林秀樹



そこではリソ一体運用されるメリットが生まれてくる。もし EB 直描が全工程に導入されれば、設計、FEOL、BEOL、OSAT、EMS で別々だったパターン形成が全て EB に統一、テストも統合、リペアなども容易になる可能性がある(図表 10)。

図表 10 チップレット時代に EB 直描の効果 (出所)若林秀樹



4. 効果検証によるビジネスモデル成立領域

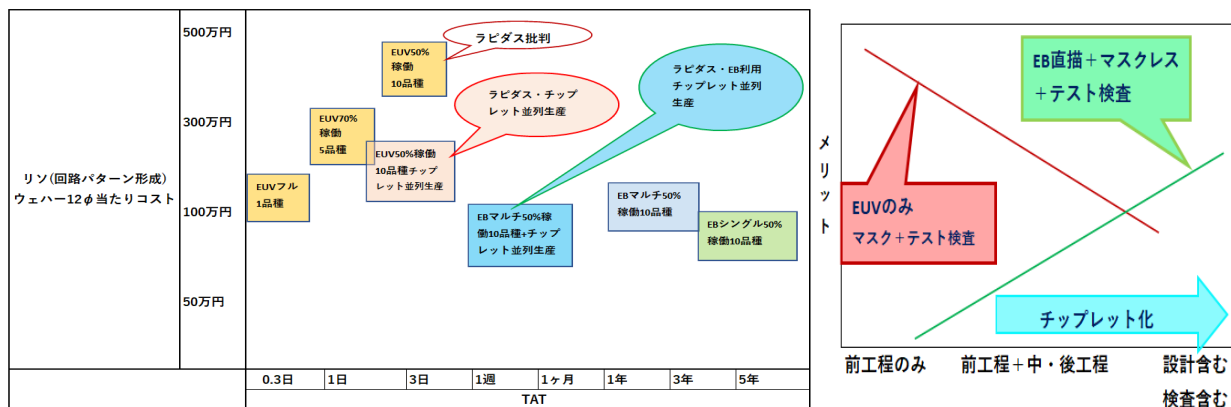
EB 直描のメリットは多いが、低スループットの問題から、EUV を上回るには、多品種少量の程度やチップレット活用の並列生産が必要である。そこで、ここでは、EB 直描ビジネスモデルの成立領域を考える。公開情報を参考に、EUV や EB、マスクのコスト、TAT 等、幾つかの前提をおいて、ケーススタディを行った (図表 11)。なお、実際は各社で異なり、あくまで成立条件の傾向を示すに過ぎない。評価の二軸マップとしてウェハー(300mm)当たり露光コストと露光時間を選び、多品種を 1、5、10 とし、それに応じた稼働率を設定、チップレット並列生産も加味し、財務シミュレーションを行った。

図表 11 EB 直描と EUV の財務シミュレーションとケース (出所)若林秀樹

	EUV				EB			
	EUV 量産1品種 フル稼働	EUV 量産5品種 稼働70%	EUV 10品種 50%稼働	EUV 10品種50%稼働 並列生産	10品種50%稼働 EB直描マルチ	10品種50%稼働 EB直描マルチ +チップレット 並列生産	10品種50%稼働 EB直描シングル	10品種50%稼働EB 直描シングル+ チップレット並列 生産
年間Wキャパ 100万枚	100	70	50	50	50	50	50	50
稼働率	100%	70%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
品種数	1	5	10	10	10	10	10	10
露光時間(マスク取り換え時間5分+1分/EB直描)	6	6	6	6	600	60	6000	600
コスト 年間 億円	11250	16250	22500	22500	50	50	5	5
ウェハー当たり 万円(リソのみ)	113	232	450	158	100	35	100	35
TAT 日	0.3	1.7	3.3	1.7	333.3	16.7	1666.7	166.7

EUV の 1 品種フル稼働では約 100 万円強で TAT は 1 日以下であり、多品種少量にすると、TAT はやや長くなるが、それ以上にマスク代や稼働率低下によるコストアップが大きく 10 品種では 450 万円と高く難しい。これが、まさにラピダスが多品種少量で採算が難しいと指摘されている点である。EB 直描は EUV に比べ装置代は 1/10 以下であり、償却負担やメンテコスト、マスク代も不要で、コストは安い。しかしマルチビームでも 1 年、シングルビームでは 5 年近くかかり非現実的であるのは指摘されている通りである。しかし、これに、GAA (Gate All Around) 中心の FEOL と配線中心の BEOL を分けて並列生産する、チップレットを組み合わせれば、マルチビームなら、2 週間程度、シングルでも半年と現実的になる。更に、これに全工程 EDA データ共有化やテストニング、リペア等の効果を加えれば、チップレットを考慮していけば、EB 直描が成立する領域が見えてこよう (図表 12)。

図表 12 コストと TAT で棲み分けだがチップレット化で広がる (出所)若林秀樹



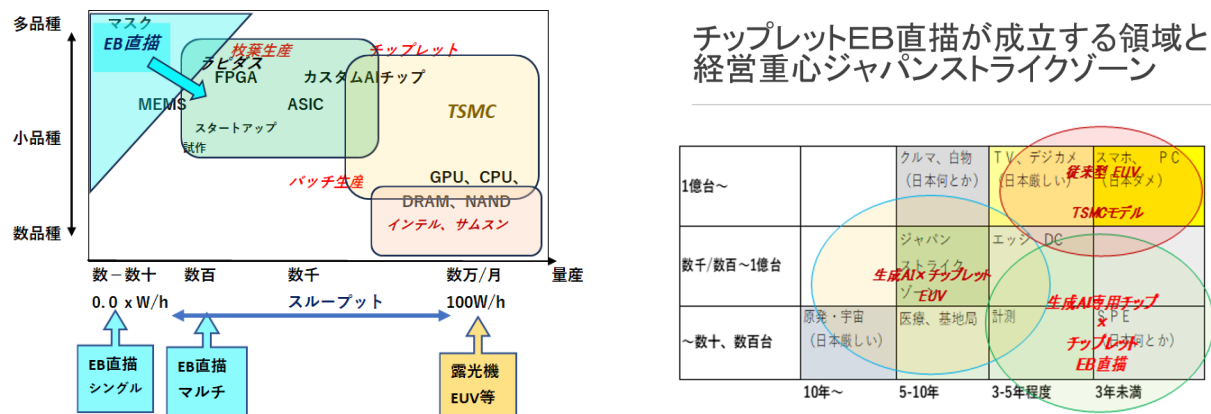
技術面でのメリット定量分析は難しいが考慮に入れる必要がある。まず設計の柔軟性と変更反映時間の短縮である。エッジ AI 向け統合チップでは AI コアと FPGA の混載チップにおいて、AI 部が高頻度で設計変更に対し FPGA 部分は安定設計が求められるが、EB 直描の部分露光により AI 領域のみを迅速に更新でき、AI コア最適化サイクル加速に有効である。データ変換時間短縮も大きい。また、GAA フィン構造はナノ幅制御が可能である。位置合わせ精度は 3D 積層に必須だが、異種チップの統合ではインターポーザ上での微細 TSV 形成にも有効である。RDL の多様なパッド配置に EB の柔軟性が効く。前工程のゲートコンタクト層に EB を重点導入、チップレット接続部の高精度位置合わせに EB を活用、配線層形成では 1xnm 層は EB、上層を EUV とするハイブリッド方式もある。

スループット以外に課題も多い。荷電効果では高抵抗材料による位置ずれ発生、プロセス統合では EB レジストと EUV 現像液の互換性問題や界面剥離リスクもある。

5. ラピダスが勝てるビジネスモデル

ラピダス RUMS (Rapid & Unified Manufacturing Service)モデルに EB 直描チップレット並列生産を組み合わせることで更に成功確率は高まる。縦軸に品種数、横軸に生産数量をとると、左上が多品種極少生産でありマスクや MEMS など EB 直描の領域である。右下が CPU や GPU の小品種大量生産 EUV 領域の TSMC がある。この間に多品種適量市場のラピダスのストライクゾーンがある(図表 13)。

図表 13 ラピダスと TSMC の棲み分け チップレット EB 直描成立領域と経営重心 (出所)若林秀樹



新たな時代には EB 直描とチップレット並列生産導入によるビジネスモデル、エコシステム形成が求められる(図表 14)。市場特性もサプライチェーンも異なる。極論すれば、低スループットの欠点が無くなる 6σ未満で作成、チップレットで並べれば良い。AI チップのコア部のサイズ次第であるといえる。

図表 14 新たな時代のエコシステムとビジネスモデルの対比 (出所)若林秀樹

	汎用最先端 ASSP 的 市場	中間の市場	専用最先端 生成AI×チップレット FPGA 的 市場
市場の特性	スマホ、PCなど、数億、1個 数千円 1億から数億個のボリューム 2-3年サイクル、設計変更少 大量生産、過大性能、熱多くても可	クルマ、ロボット、医療、SPE等 1000万~1億個ボリューム 5-10年サイクル	DC、基地局、スタートアップ向け 数百万個のボリューム 2-3年サイクル、設計変更多
生産の特徴、サプライチェーン	見込み生産、在庫、トライ&エラー 需給管理難、在庫リスク、低コスト リスクある長サプライチェーン	⇔	設計とOSATが近く、早くエラーを回せる生成AIで サプライチェーン最適化 カンバン、一見、高コストだが地産地消 リスク小の短サプライチェーン
ビジネスモデル	価値は高価な装置、Depから 水平分業 ファブレス/ファンドリ モデル 先行巨大投資 M&A	⇔	価値は組合せや設計から 新垂直統合、チップレット モデル 工程最適(BEOL/BEOL、ノード別)投資
露光 EUVモデルかEB	量産 EUV EUVは蘭、ステッパーとマスクは日本 検査・テストは日米 マイナス要素：消費電力、メンテ、マスク代 長TAT プラス要素：高稼働、既存エコシステム(既存EDA)	⇔	マスクレス EB直描 (テスト一体) EBは日米(日本電子&IMS、ニューフレア) 検査・テストは日米 マイナス要素：低稼働 新EDA プラス要素：低消費電力、短TAT、リペア可

6. おわりに

本検討により、エッジAI専用チップ向け多品種少量市場にチップレットを利用した並列生産導入で、EB 直描が戦略的選択肢となり得ることを示した。マルチ方式でスループットが高め、デジタルツイン等を導入し一体 EDA とテストを組み合わせれば優位性がある。今後の技術進化次第では EUV 依存度を下げられる。また、ラピダスが勝てる戦略の選択肢になるだろう。

超 LSI 研究組合時代には EB かステッパーかの議論であり、当時は大量生産の DRAM ゆえに光リソのステッパーだったが、枚葉多品種少量低稼働なら EB が見直されることは温故知新である。この考察を踏まえ、NEDO や JST 等でプロジェクトとすることが期待される。

参考文献 URL は 2025 年 9 月 22 日アクセス

- [1] ムーア「インテルとともに：ゴードン・ムーア私の半導体人生」1995 日経
- [2] [JAIST Repository: 新時代の半導体ビジネスモデル：チップレットの影響と稼働率とカスタム性の関係：大型設備投資と大量生産時代から抜け出し、新たな価値を](#)
- [3] [日立評論 1994 年 7 月号:高スループットを実現した電子ビーム直接描画システム](#)
- [4] [65nm 以降の EB 直描に賭けるイー・シャトル・セミコンポータル](#)