

Title	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
Author(s)	若林, 秀樹
Citation	年次学術大会講演要旨集, 38: 259-264
Issue Date	2023-10-28
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/19227
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

1 D 0 6

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

○若林秀樹(東京理科大 MOT)
wakabayashi.hideki@rs.tus.ac.jp

1. はじめに

半導体産業は、激しい技術革新競争と先行投資の中、成長率がプラスマイナス 10～30%という激しいシリコンサイクルの中で長期的に成長してきた。昨今、競争の舞台は、民間企業から国家レベルに移り、国家間の設備投資競争にもなっている。半導体産業は 2030 年に 100 兆円¹レベルになる中で、これまで同様の振幅では、市場規模は 10～30 兆円レベルで増減することになる。これは民間どころか国家財政にも影響が及ぶ。企業においては、メモリ事業では営業利益率が好況時は 70～80%、不況時は同レベルの赤字幅²であり、数兆円の売上なら売上増減 1～2 兆円、赤字幅 1 兆円となり債務超過リスクもある。

シリコンサイクルの 3 年程度の周期の中で黒字でも、単年度会計で常に黒字を維持することは難しいが、赤字にこそ先行投資できるか否かが半導体事業のジレンマでもあった。他方ファブレス/ファンドリによる水平分業ではエコシステム構築、特にファブレスでは M&A が成長の鍵となっている。

半導体産業を巡る環境変化は、米中摩擦や国家安全保障だけでない。Moore 則も 60 年近く転換点にある。チップレットはじめ前後工程融合、More than Moore への技術トレンド、サプライチェーン重視の中で短 TAT³化も注目されている。カーボンニュートラルや環境問題対応もある。こうした大変革期にこそ大規模先行投資や量産競争といった「高血圧」体質あるいは「赤の女王仮説⁴」的戦略から脱し、新たな半導体ビジネスモデルを考えなければならない。

これまでのビジネスモデルの特性を総括した上で、新たな可能性として、近年のチップレット⁵による並列生産や前後工程融合を短 TAT に利用することを提案する。短 TAT 化では稼働率を下げなければならないため価格維持が重要である。どの程度の価格で稼働率をどこまで下がられるか、並列生産による歩留まり改善効果及び TAT 短縮効果をシミュレーションで示す。先端ロジックを想定、2025 年から 2030 年の財務数字から、累損解消時期が早まり収益変動が抑えられる等の効果が大きく、検討すべき新たなビジネスモデルであるので報告する。将来に向けては、OSAT⁶や EMS⁷の統合や、かつては行われていた混流生産等も提言する。

2. 先行研究

半導体のビジネスモデルについては、アカデミアによる論文の他、業界経営者のムーア等の著作⁸[1]、アナリストレポート等も含め、色々な視点から多くの先行研究がある。ファブレス/ファンドリや水平分業モデルについて、TSMC の興隆につれ特にファウンドリ中心に、2005 年頃から岸本千佳司等の数多くの研究⁹[2]がある。日本の半導体の敗因や過去を総括したものは極めて多い。米セマテックや日本の成功事例である超 LSI 研究組合について機械振興協会井上弘基の事例研究¹⁰[3]も多い。シリコンサイクルとの関係も若林秀樹¹¹の報告もある。しかし新技術やイノベーションからビジネスモデルを変えようという未来志向の論文は意外と少ない。

¹ 経済産業省資料 [第 9 回 半導体・デジタル産業戦略検討会議 \(METI/経済産業省\)](#)

² 2023 年 1Q、2Q ではサムスンやハイニックスのメモリはこの赤字レベルとアナリスト推定 [IR < SK hynix](#)

³ turn-around-time 半導体の生産に要する時間、通常、ウェハーを投入して出荷まで

⁴ 生物学用語「鏡の国のアリス」の赤の女王「全力で走り続けなければならない」から軍拡競争等比喻

⁵ Chiplet、半導体の新技術 [チップレット設計基盤構築に向けた技術開発事業 | 事業 | NEDO](#)

⁶ Outsourced Semiconductor Assembly & Test、半導体の後工程を担う業者 台湾に多い

⁷ Electronics Manufacturing Service、電子機器の製造受託の業者、シャープ買収の鴻海が代表

⁸ 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

⁹ 岸本「台湾半導体企業の競争戦略---戦略の進化と能力構築」2017 日本評論社

¹⁰ 井上 機械振興協会 機械経済研究 [prepareDownload \(ndl.go.jp\)](#)

¹¹ 若林秀樹 日経新聞経済教室「半導体、本格回復は 97 年後半～潜在供給過剰は続く」1997

短 TAT に関しては、小池はじめ見方のミニマルファブは大見研究室での成果¹² [4] が大きい。最近では、黒田¹³ [5] も設計の民主化も含めて、短 TAT について論じている。

しかし、短 TAT をチップレット並列生産に関連させ、後工程も含めたサプライチェーンを考慮し、これまでのビジネスモデルからの転換からの視点の研究例¹⁴ [6-7] はまだ少ない。

3. 短 TAT 影響～稼働率

先端ロジックの Rapidus 社¹⁵の成功の鍵は短 TAT にある。それは前工程だけでなく、設計から後工程、そして経営判断、キャッシュフロー回収(CCC)、米からの技術移転と全ての迅速化である。設計ではシリコンコンパイラ¹⁶からオープン AI も最大限活用しなければならない。オープン EDA¹⁷センターを設置することも必要だろう。

前工程での短 TAT において重要なことは稼働率をフルにしないことであることは、業界常識であり、個々に技術的には研究されているが、半導体工場の最適稼働率と TAT 関係式は見当たらない。

しかし、西成による渋滞学¹⁸を適用すれば、TAT と最適稼働率の関係は導かれるだろう。渋滞では、車のスピード(交通量)と車の密度(車間距離)の関係で密度を横軸に縦軸に流量を取ると、ある密度を超えると渋滞が起こる。半導体工場で、車を半導体のロットと考え、車のスピードのバラツキ(車間距離が生じ密度分布が生まれる)を、装置毎の稼働率の差と見做せば同様に扱うことができるだろう。道路渋滞では道路は動かず車が動くが半導体生産ラインで、いわば装置と見做す道路が動くと考えればよい。渋滞学では一般に稼働率上限は 70~80%とされ業界の常識と合う。装置構成が多様化し、多品種になれば、最適な稼働率上限は下がるであろう(車の速度バラツキが半導体の品種や装置構成のバラツキ)。

短 TAT を実現すると、これまでは DRAM や MCU に代表される標準品の工場が多かったこともあり、装置を有効活用すべく、フル稼働にしていた。このため、見かけ上 1 年間のコストは下がったが、結果、在庫を積み、シリコンサイクルの中で、評価損となり、数年のレンジで見れば、マイナス面も多かった。

カスタム性が強いロジックの工場ではフル稼働にしない運営が成されている。ロームは、これまでも、80%以下に抑え、それを超えると危険だと認識していたし、90 年代東芝でも、ロジック中心だった岩手東芝の工場では、フル稼働を良しとする DRAM の四日市や大分工場とは異なる運営をしていた。

世界初の 12φ 工場で、短 TAT によるロジック生産を手掛けていたトレセンティ¹⁹も、そうした発想だったが、需要を埋めるべくメモリを生産しフル稼働をしたので短 TAT 技術の強みが生かせなかった。

図表 1 短 TAT の効果をどう使うか (出所)若林秀樹 2023

短TAT
 ①生産能力増、もし、量産シェアアップが、OK しか、量が無ければ意味なし
 <過去、短TATを生産能力アップして、動線が増えた?>
 ②生産能力 機は1 難しいモノをやる、ミクス改善あるは 価格アップ

価格	高い		狙う			
	現状			現在		
	安い	これまでのやり方				
		生産増	生産不変		生産減	
		短い	不変	長い		
TAT						

そこで、問題は、短 TAT で稼働率を下げた場合の影響であり、短 TAT によるユーザーメリットをどこまで訴求できるかである。つまり、値上げ幅と稼働率低下を比較分析しなければならない。

QCD²⁰と言われるが、サプライチェーン混乱が起きた近年では、デリバリーの重要性に対する認識は高まっている。

¹² 小池淳義 博士論文「多品種,少量,超短時間半導体生産方式の研究」2002 [T1H142894.pdf](#)

¹³ 黒田忠弘 半導体超進化論 世界を制する技術の未来 (日経プレミアシリーズ) 2023/5/9

¹⁴ 若林秀樹 JCPA NEWS 2023Apr 「日本半導体復活の勝ち筋~短 TAT チップレット」

¹⁵ [Rapidus 株式会社](#) Rapidus は迅速の意

¹⁶ Electronic Design Automation、設計ツール、業界はケイデンスやシノプシス等、米が強い

¹⁷ 半導体設計自動ツール、プログラムを書くチップ生成、CALTECH の Dave Johannsen による

¹⁸ 西成活裕 [東大西成総研 \(u-tokyo.ac.jp\)](#)

¹⁹ 世界初の 300mm 生産会社として日立が設立、小池淳義が社長、[HITACHI : News Release : 6/25](#)

²⁰ Quality(品質)、Cost(コスト)、Deliver(納期) 短 TAT は納期の価値を訴求

鉄道運賃も特急料金があり、インターネットでも CPU でもスピードに価値がある。そうであれば、半導体のデリバリーでも同様であろう。これまでは、特急デリバリーの料金はあったが、それを、通常モードでも、デリバリー差で価格体系を考えなければならない。いわば、「冷めたピザより暖かいピザ」に価値があるのは当然だ。しかも、「標準的なピザの作り貯めでなく注文に応じたお好みのピザ」を最適温度で届けられれば、それなりの価値があつて当然であろう。それが桁違いであれば、需要は無いかもしれないが、数倍なら十分な可能性があり、1.5 倍以下なら顧客次第だろう。

そこで、Rapidus 等、新たに立上る先端ロジックメーカーを想定し、2025~2029 年度の業績モデルを作成した。ウェハー単価(安めの 80 万円)として、フル稼働(5 年で 86%)でコスト下げ、かつ若干値下げと、短 TAT で稼働率は下がり(5 年で 66%)、その分、Dep も遅れ、歩留まり上昇は低くなる等を想定して、シミュレーションを行った。

図表 2 フル生産値下げと短 TAT 中稼働で価格維持の比較(1 兆円投資 5 万枚) (出所)若林秀樹 2023

	1兆円投資 5万枚						1兆円投資 5万枚					
	フル稼働 単価下げ					累計	短TAT 中稼働 単価高め維持					累計
	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度		2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	
単価 万円	80	80	80	75	70		100	100	100	100	100	
変動費(材料) 万円	2	2	2	2	2		2	2	2	2	2	
キャパ 12φ投入(万枚/月)	5	5	5	5	5		5	5	5	5	5	
稼働率 %	70%	80%	90%	95%	95%	86%	50%	60%	70%	75%	75%	66%
歩留まり %	30%	50%	80%	90%	95%		30%	40%	70%	80%	90%	
売上 億円	1008	1920	3456	3848	3791		900	1440	2940	3600	4050	
変動費	84	96	108	114	114		60	72	84	90	90	
Dep 億円	2100	2400	2700	1200	1200		1500	1800	2100	2100	2100	
		4500	7200	8400	9600			3300	5400	7500	9600	
	208%	125%	78%	31%	32%		167%	125%	71%	58%	52%	
他固定費(電力その他) 150億円/万枚	525	600	675	712.5	712.5		375	450	525	562.5	562.5	
労務費	35	40	45	47.5	47.5		25	30	35	37.5	37.5	
1人コスト 万円	1000	1000	1000	1000	1000		1000	1000	1000	1000	1000	
人員 人	500	500	500	500	500		500	500	500	500	500	
R&D 億円 売上15%	151	288	518	577	569		135	216	441	540	608	
営業利益	-1887	-1504	-590	1196	1148	-1637	-1195	-1128	-245	270	653	-1646
	-187%	-78%	-17%	31%	30%		-133%	-78%	-8%	8%	16%	

結果は、80~70 万円を 100 万円維持、すなわち 1.25~1.45 倍であれば、5 年間の累積は同じであり、十分に同様の業績結果が達成される。むしろ営業利益率は安定する。

ここでは、在庫リスクは想定しておらず、シリコンサイクルの中で在庫評価損や、さらに、フリー CF の改善なども考えればメリットは大きい。値上げ幅も 1.3 倍程度であれば、リーズナブルであろう。

4. チップレットの影響

チップレットでこれまで一般にはあまり言及されていないが、並列生産が可能になり、結果として、短 TAT 化は大きなメリットである。最先端で低歩留まりの Tr 工程中心の FEOL と配線が中心の BEOL に分けると、全体の歩留まりは上昇の可能性もある。設計コストや、チップレット化のコストはある。プラス面は①歩留まり向上、②短 TAT ③無駄な在庫なし、マイナス面(課題)はノード別設計できるか、そのコスト増であり、最大の課題はチップレットでの組立、検査の技術開発とコスト増である。

問題は、FEOL と BEOL を分けて、並列生産にした場合のコストメリットや業績に与える影響度合が実際どの位になるかである。そこで下記の前段でシミュレーションを行った。前提は、総合歩留まりは、FEOL は歩留まり 70%と低いが汎用性あり、稼働率アップで在庫もつ、BEOL が無い分で歩留まりアップ、TAT も短い、BEOL は品種カスタマイズ受注生産、FEOL 無い分歩留まり高いとする。単価 80 万円を、FEOL と BEOL で配分分けケース並列生産工場に分け、全体最適を目指す、FEOL フル稼働工場と BEOL 適切投資適切稼働工場の合算である。

図表 3 チップレットでノード別の並列生産の前提と期待される効果 (出所)若林秀樹 2023

<p>TATの長さをTn(物理TAT+搬送+待ちetc)、歩留まりをYnとする</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コアのトランジスタ部分(GAA ビオンド2nm): TAT: T₁、歩留まりy₁低い、EUVいる ・配線部分(7nm): T₂、y₂、I/O部分: T₃、y₃ * T₁ > T₂ > T₃、通常、y₁ < y₂ < y₃ <p>チップレットがなく、モノリシックで作る場合</p> <p>全TAT = T₁ + T₂ + T₃ + α(搬送や待ちの要素)、全歩留まり = y₁ × y₂ × y₃、</p> <p>チップレットで、プロセスノードを集約、並列生産、ジョブフロー・枚葉の場合</p> <p>全TAT = T₁ + α(T₁、T₂、T₃の最長、と搬送や待ち要素)、全歩留まり = y₁ >> y₁ × y₂ × y₃</p> <p>< TAT = 物理TAT + 長距離搬送 + 待ち ⇒ 物理TAT + 短距離搬送 + α ></p>	<p>FEOL/BEOLノード別 並列生産</p> <ul style="list-style-type: none"> ・プラス面: ①歩留まり向上、②短TAT ③無駄な在庫なし ・マイナス面(課題): ノード別に設計できるか、そのコスト増? ・最大の課題: チップレットでの組立、検査 <p>(A) FEOL: 最先端Tr構造: 10nmから数nm 複雑な材料 イオン注入、拡散炉 全体TATの1/3 歩留まり低い 70%</p> <p>(B) BEOL: 多層配線: 15~40? nm 銅配線、CMP、TSV、エッチ 全体TATの1/3~1/2 歩留まり中 90%</p> <p>(C) BEOL: 電源回り: 数μm? 後工程パッケージに近い? 全体TATの1/3以下? 歩留まり高い 95%以上</p>
---	---

シナリオ1の前提は、①1兆円投資のFEOLは5000億円、BEOLは5000億円(既存と比べ高コスト)、②単価はFEOLで40万円、BEOLで40万円、③その他固定費や人件費は按分、④歩留まりはFEOL低く、BEOL高い、⑤FEOLはフル稼働、BEOLは中稼働(短TAT)である。

シナリオ2の前提は、①1兆円投資のFEOLは7000億円、BEOLは3000億円(既存と比べ高コスト)、②単価はFEOLで50万円、BEOLで30万円、③その他固定費や人件費は按分、④歩留まりはFEOL低く、BEOL高い、⑤FEOLはフル稼働、BEOLは中稼働(短TAT)である。

図表4 シミュレーション シナリオ1結果 (出所)若林秀樹 2023

シミュレーション シナリオ1 結果
前提 ①1兆円投資のFEOLは5000億円、BEOLは5000億円(既存と比べ高コスト)、②単価はFEOLで40万円、BEOLで40万円、③その他固定費や人件費は按分、④歩留まりはFEOL低く、BEOL高い、⑤FEOLはフル稼働、BEOLは中稼働(短TAT)

	FEOLのみ 5000億円投資(1xだけ) 5万枚						BEOLのみ 5000億円投資(無敷がある、既存使う) 5万枚						トータル					
	フル稼働					累計	短TAT 中稼働 単価高め維持					累計	2025年度 2026年度 2027年度 2028年度 2029年度 累計					
2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2025年度		2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2025年度		2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	累計	
単価 万円	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40				
変動費(材料) 万円	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
キャパ 12ヶ月投入(万枚/月)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5				
稼働率 %	70%	80%	95%	95%	95%	50%	60%	70%	75%	75%								
歩留まり %	40%	60%	80%	85%	90%	90%	95%	95%	95%	95%								
売上 億円	672	1152	1824	1838	2052	7638	1080	1368	1596	1710	1710	7464						
変動費	42	48	57	57	57		30	36	42	45	45							
Dep 億円	1400	1600	950	525	525		750	900	1050	1175	1125							
		3000	3950	4475	5000			1650	2700	3875	5000							
	208%	139%	52%	27%	26%		69%	66%	66%	69%	66%							
他固定費(電力その他) 50億円/万枚	175	200	237.5	237.5	237.5		250	300	350	375	375							
分務費	25	25	25	25	25		25	25	25	25	25							
1人コスト 万円	1000	1000	1000	1000	1000		1000	1000	1000	1000	1000							
人員 人	250	250	250	250	250		250	250	250	250	250							
R&D 億円 売上15%	101	173	274	291	308		162	205	239	257	257							
営業利益	-1071	-894	281	803	900	19	-137	-98	-110	-167	-117	-629						
	-159%	-78%	15%	41%	44%		-12%	-7%	-7%	-10%	-7%							
売上 億円	1752	2520	3420	3648	3762	15102												
変動費	72	84	99	102	102													
Dep 億円	2150	2500	2000	1700	1650													
		4650	6650	8350	10000													
他固定費	425	500	587.5	612.5	612.5													
分務費	50	50	50	50	50													
R&D 億円	263	378	513	547	564													
営業利益	-1208	-992	171	636	783	-610												
	-69%	-39%	5%	17%	21%													

図表5 シミュレーション シナリオ1結果 (出所)若林秀樹 2023

シミュレーション シナリオ2 結果
前提 ①1兆円投資のFEOLは7000億円、BEOLは3000億円(既存と比べ高コスト)、②単価はFEOLで50万円、BEOLで30万円、③その他固定費や人件費は按分、④歩留まりはFEOL低く、BEOL高い、⑤FEOLはフル稼働、BEOLは中稼働(短TAT)

	FEOLのみ 7000億円投資(1xだけ) 5万枚						BEOLのみ 3000億円投資(無敷がある、既存使う) 5万枚						トータル					
	フル稼働					累計	短TAT 中稼働 単価高め維持					累計	2025年度 2026年度 2027年度 2028年度 2029年度 累計					
2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2025年度		2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2025年度		2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	累計	
単価 万円	50	50	50	50	50		30	30	30	30	30							
変動費(材料) 万円	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1							
キャパ 12ヶ月投入(万枚/月)	5	5	5	5	5		5	5	5	5	5							
稼働率 %	70%	80%	95%	95%	95%		50%	60%	70%	75%	75%							
歩留まり %	40%	60%	80%	85%	90%		90%	95%	95%	95%	95%							
売上 億円	840	1440	2280	2423	2565	9548	810	1026	1197	1283	1283	5598						
変動費	42	48	57	57	57		30	36	42	45	45							
Dep 億円	1750	2000	1425	1000	825		500	600	700	600	600							
		3750	5175	6175	7000			1100	1800	2400	3000							
	208%	139%	63%	41%	32%		62%	58%	58%	47%	47%							
他固定費(電力その他) 50億円/万枚	175	200	237.5	237.5	237.5		250	300	350	375	375							
分務費	25	25	25	25	25		25	25	25	25	25							
1人コスト 万円	1000	1000	1000	1000	1000		1000	1000	1000	1000	1000							
人員 人	250	250	250	250	250		250	250	250	250	250							
R&D 億円 売上15%	126	216	342	363	385		122	154	180	192	192							
営業利益	-1278	-1049	194	740	1036	-358	-117	-89	-100	45	45	-215						
	-152%	-73%	8%	31%	40%		-14%	-9%	-8%	4%	4%							
売上 億円	1650	2466	3477	3705	3848	15146												
変動費	72	84	99	102	102													
Dep 億円	2250	2600	2125	1600	1425													
		4850	6975	8575	10000													
他固定費	425	500	587.5	612.5	612.5													
分務費	50	50	50	50	50													
R&D 億円																		
営業利益	-1395	-1138	94	785	1081	-573												
	-85%	-46%	3%	21%	28%													

結果として、並列生産(FEOLフルとBEOL適正稼働+短TAT)と通常生産比較だが、要はローリスクローリターン vs ハイリスクハイリターンである。並列生産では、27年度黒字、累積600億円に対し、通常生産では、28年度黒字、累積は1700億円である。

これは、並列生産では、①無駄な投資なし、②歩留まりや需要に応じた最適生産の効果である。なお、短TATによる値上げは織り込んでいない。他にも色々なシミュレーションができるが少なくとも可能性はあるだろう。

図表 6 並列生産・短 TAT と通常生産比較

(出所)若林秀樹 2023

並列生産(FEOLフルとBEOL適正稼働+短TAT)と通常生産比較
 ローリスクローリターンvsハイリスクハイリターン
 27年度黒字、累損600億円vs28年度黒字、累損解消1700億円
 ①無駄な投資なし、②歩留まりや需要に応じた最適生産
 ＊なお短TATによる値上げは織り込まず

トータル 並列生産 50万円と30万円						
	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	累計
売上 億円	1650	2466	3477	3705	3848	15146
変動費	72	84	99	102	102	
Dep 億円	2250	2600	2125	1600	1425	
	4850	4850	6975	8575	10000	
	136%	105%	61%	43%	37%	
他固定費	425	500	587.5	612.5	612.5	
労務費	50	50	50	50	50	
R&D 億円	248	370	522	556	577	
	15%	15%	15%	15%	15%	
営業利益	-1395	-1138	94	785	1081	-573
	-85%	-46%	3%	21%	28%	

通常生産 80万円						
	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	累計
売上 億円	1210	2189	3466	3682	3899	14445
変動費	84	96	114	114	114	
Dep 億円	2100	2400	2850	1400	1250	
	4500	4500	7350	8750	10000	
	174%	110%	82%	38%	32%	
他固定費	525	600	712.5	712.5	712.5	
労務費	50	50	50	50	50	
R&D 億円	181	328	520	552	585	
	15%	15%	15%	15%	15%	
営業利益	-1731	-1286	-781	853	1187	-1756
	-143%	-59%	-23%	23%	30%	

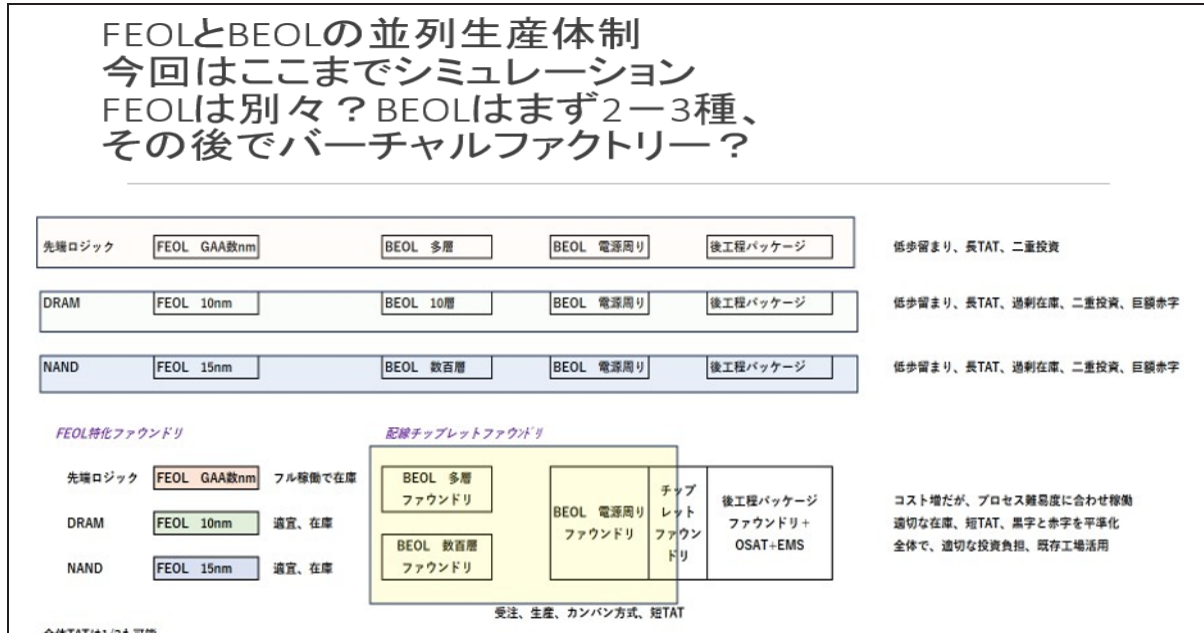
トータル 並列生産 40万円と40万円						
	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	累計
売上 億円	1752	2520	3420	3648	3762	15102
変動費	72	84	99	102	102	
Dep 億円	2150	2500	2000	1700	1650	
	4650	4650	6650	8350	10000	
	123%	99%	58%	47%	44%	
他固定費	425	500	587.5	612.5	612.5	
労務費	50	50	50	50	50	
R&D 億円	262.8	378	513	547.2	564.3	
	15%	15%	15%	15%	15%	
営業利益	-1207.8	-992	170.5	636.3	783.2	-609.8
	-69%	-39%	5%	17%	21%	

これをベースに、チップレットを活用した FEOL と BEOL の並列生産体制の研究を本格的に考えるべきではないか。シミュレーションではなく、ミニマルファブ等を利用した実証が必要であろう。

現状は、先端ロジックを想定しているが、配線工程は、メモリでも同様な部分が多い。トランジスタ工程のロジック、メモリ(DRAM と NAND でも異なる)の FEOL は別々でもいいが、BEOL は、2-3種から始め、バーチャルファブ的に統合することも検討すべきだろう。さらに、OSAT や EMS の工程との統合もあるだろう。

図表 7 FEOL と BEOL の並列生産体制

(出所)若林秀樹 2023



多くのファウンドリが対象とするのは、ファブレス企業向けのロジック半導体である。その多くは、微細加工ルール別やウェハー口径で分かれている。クリーンルームの中は、装置毎に区切られている。このため、先端ロジック半導体とコモディティの半導体の差は微細加工負担度合でイオン注入等は同様でマスク枚数、配線工程に関係する成膜やエッチングの装置が異なる。最先端ラインでコモディティ半導体を製造できなくはなく共通部分もある。異なるのは設計やレシピである。

メモリとの差は、NAND では 3D 化に関するところ、DRAM ではキャパシタが異なる。それゆえ、ロジック半導体とメモリでも 5 割程度は共通の装置があり、NAND と DRAM も類似のプロセスがある。

実際かつての NEC 広島では、DRAM とロジックを混流生産していたし、サムスンも DRAM と NAND を同じ工場生産していた。しかし混流ラインは非効率ゆえ最近では製品に特化したラインが主である。しかし、昨今の工場火災を踏まえ、需給変動の激しいメモリ工場の安定稼働を考えた場合、これまでの TSMC 等と同様のファウンドリ工場か、あるいは効率性やコスト面では劣るが非常事態を考え混流生産の再検討さらには、総合ファウンドリ工場を検討することも一考の価値があるのではないか。各社各工場 5-7 割は専用だが、3-5 割は標準化、いざという場合に他の工場と連結して、バーチャル One ファクトリーとして使えるような発想はできないだろうか。

5. 考察

半導体のビジネスモデルは大規模先行投資をイメージしがちだが、各国の事情や成長段階で異なる。日本は、欧米に学び、政府支援、それから、大規模先行投資という第一フェーズでのビジネスモデルは、他の産業でも同様であり、かつ、韓国台湾などでもみられる。肝心なのは第二フェーズだが、日本は米との摩擦後、同パターンを小ぶりに続け、独自の戦略や日本ならではのビジョンがなかった。ソ連は、技術だけをコピーし、肝心なエコシステムや市場創造体制、特に軍需中心の B2G から B2B 更に B2C への発展は共産主義国家ゆえコピーできなかった²¹ [8]。中国も当初はソ連と同様だったが、鄧小平の近代化で発展した。しかし 2010 年以降は不動産投資モデルの強みが災い更に米中摩擦があった。台湾は強国を隣国に持つというイスラエルやウクライナと同様の宿命もあり、ハイテクシールド政策で米と両輪補完関係である。米はハイテク覇権の中で先行逃げ切りからプラットフォーム、ロードマップ提示、さらに、M&A や金融も含めた総動員戦略だ。この中で、日本はどうするべきかを、国家戦略の中で、産業政策だけでなく金融や教育とベクトルを揃えて考えなければならない。

この 20 年はファブレス/ファウンドリモデルの中で、TSMC の先端ロジックに特化する工場は完成の域に近づいただろうが、2030 年以降を見据えた工場体制の在り方を、まだ日本の混流ラインの現場に関わった技術者が健在である今こそ、そうした知恵を振り返り、TSMC 等とも連携して日本が貢献でき、リードできる道を目指すべきではないか。インテルもファウンドリに参入したが、TSMC やインテル・ファウンドリとも差別化するためには、先端ロジックだけでなくメモリやイメージセンサ、アナログさらに、後工程パッケージまで対応可能な次世代総合ファウンドリを検討すべきだろう。

世界のファウンドリは地政学リスクがある台湾から日米という三極でバランスが取れた状態になっていくだろう。最終アプリケーション、ファブレスユーザーに近いそれぞれの地域で、独自性を発揮すべきだ。台湾はスマホ、日本はクルマ産機、IoT インフラ向けと、広いアプリケーションと、技術ではメモリやセンサも可能な後工程や EMS も連携した新たなファウンドリを考えるべきではないか。

6. おわりに

チップレット技術を活用し、前工程の FEOL と BEOL を並列生産することで、先端ロジック半導体工場を想定し、短 TAT の経済効果を財務モデルでシミュレーションした。稼働率を下げて 1.25~1.4 倍の値上げ程度でフル生産と短 TAT が同様の損益であることを示した。次に複数のケースで並列生産の効果を確認できた。これまでのフル生産がハイリスクハイリターンであるのに対しローリスクであり、早期の黒字化と累損を減らせる。並列生産では、①無駄な投資なし、②歩留まりや需要に応じた最適生産の効果もある。今後の課題は実際の工場での実証である。

参考文献 URL は 2023 年 9 月 14 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] 岸本「台湾半導体企業の競争戦略——戦略の進化と能力構築」2017 日本評論社
- [3] 井上 機械振興協会 機械経済研究 [prepareDownload \(ndl.go.jp\)](https://www.ndl.go.jp/prepareDownload)
- [4] 小池淳義 博士論文「多品種,少量,超短時間半導体生産方式の研究」2002 [T1H142894.pdf](https://www.ndl.go.jp/prepareDownload)
- [5] 黒田忠弘 半導体超進化論 世界を制する技術の未来 (日経プレミアシリーズ) 2023/5/9
- [6] 若林秀樹 JCPA NEWS 2023Apr 「日本半導体復活の勝ち筋~短 TAT チップレット」
- [7] 若林秀樹/日経 BP 総研 「デジタル列島進化論」2022
- [8] クリスマラー「半導体戦争」2023 ダイヤモンド社

²¹ クリスマラー「半導体戦争」2023 ダイヤモンド社