

オープンソース PDKの歩き方



読む・触る・作る・遊び続けるために

ほうた@ SIGの遊び場

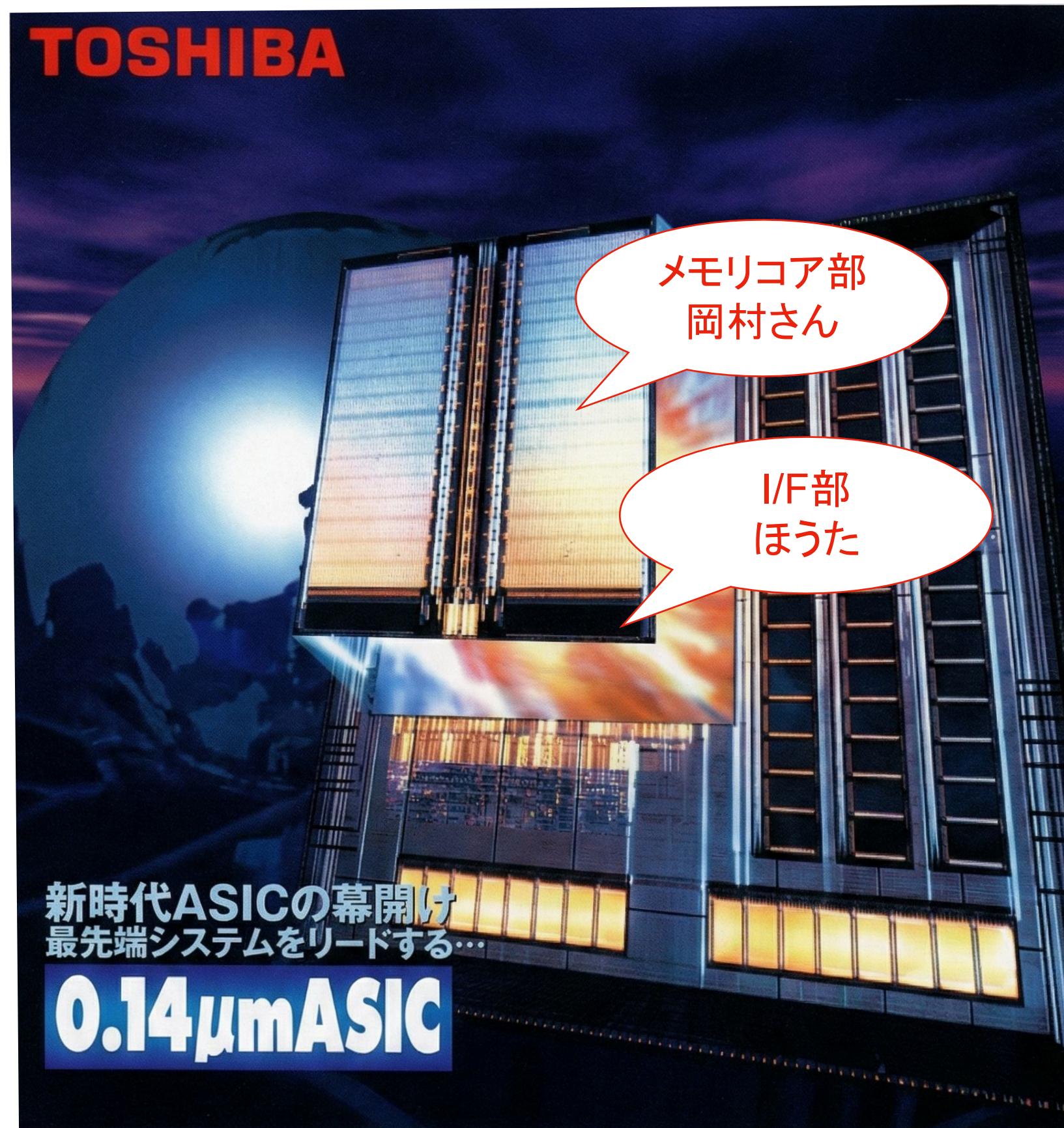
自己紹介

ほうた@SIGの遊び場

謎のコメント

そういえば「ISHI会一周年記念イベント～大討論会～」で「北城 岳彦（ほうじょう たけひこ）

- ・1990年 総合電機メーカーに入社し、半導体事業部へ。
デザインルール、ゲートアレイ、スタンダードセル開発部門に配属。
- ・最初の担当は、レジスタファイル(小容量メモリ)開発。
- ・その後、DRAMを搭載した ASIC(当時としては大規模メモリ混載)を開発するプロジェクトが始まり、ここで 岡村さんと出会うことになる。
- ・



■高集積、超低消費電力、高達を同時に実現する東芝CMOS ASIC<TC260シリーズ>
デジタル・モバイルシステムの高機能、高速、超低消費電力、省スペースを実現する 0.14μmASIC <TC260 シリーズ>、ゲート当たり 3.4倍の高集成化、約 1/5 の超低消費電力、約 30% の高速化を達成（当社 0.25μmASIC・TC240 シリーズ比）メカゲート時代のシステムASIC をリードする新世代 ASIC です。

- ゲート長 0.14 μm の CMOS プロセスルールを技術、6 層アルミ絶縁による発売 ASIC
 - ・ゲート取を達成（3.4 倍の高集成化）
 - ・ゲート当たり 1/5 の超低消費電力
 - ・ゲート当たり 30% の高速化
- プロセスインテグレーション
 - ・CMOS はシックプロセスと DRAM プロセスの属性を兼ねる最適プロセス使用で、MPU コア、DRAM コア、アナログ回路をそれぞれの性能を犠牲なく組み合わせて構成
- メモリコアの充実
 - ・高密度 BRAM (最大 500MHz)、1 ポート & 2 ポート U 型垂直構造 BRAM (従来社 1/2 の面積、1 ポート & 2 ポート) を構成
 - ・TC560 シリーズにおける消費電力削減

EDA TechnoFair '99

東芝CMOS ASIC

ADDRESS ▶ お問い合わせは、株式会社 東芝 セミコンダクター社 システムLSI部・株式会社 シコムLSI製造第二部社
TEL:03-5167-9422 ライブイン/ T100-9001 直通番号: 1-1-1 東芝セミコンダクター

1999年雑誌広告
(白黒コピーをAIでカラー化)

こんなものを作っていました

• その後も PDK・ライブラリ（スタセル、メモリ、IOなどのいろいろな基本部品）開発に携わる事になり、今に至る。

• そして――

四半世紀ぶりに岡村さんと再会し、

“オープンソース PDK” の世界を知ることになる。

そもそもPDKって？ (Process Design Kit)

半導体設計をするために必要なすべての技術情報をまとめたパッケージ

- トランジスタモデル (SPICE)
- デバイスパラメータ
- デザインルール
- DRC / LVS / ERCルール
- 寄生抽出ルール (LPE/PEX)
- 標準セル (デジタル設計に必要なライブラリ)
- 配置配線向け設定 (自動設計環境)



…などなど、半導体設計に必要なものすべてをパッケージ化されたもの

昔は「三種の神器」これだけで設計ができた時代

まだプロセスが比較的単純だった頃、IC設計に必要なのは以下の3つだけだった

デバイスパラメータ

- トランジスタの閾値、特性、寸法依存性など
- データシートやアプリケーションノートで提供されていた

デザインルール

- デバイス/配線の長さ/幅・間隔・コンタクトの最小サイズなど
- A4数枚～十数ページに収まる“単純なルール集”

SPICEモデル

- 回路シミュレーションができれば十分だった
- 1～3種類のモデルで事足りた

昔は“この三種の神器さえあれば”チップを作れた。

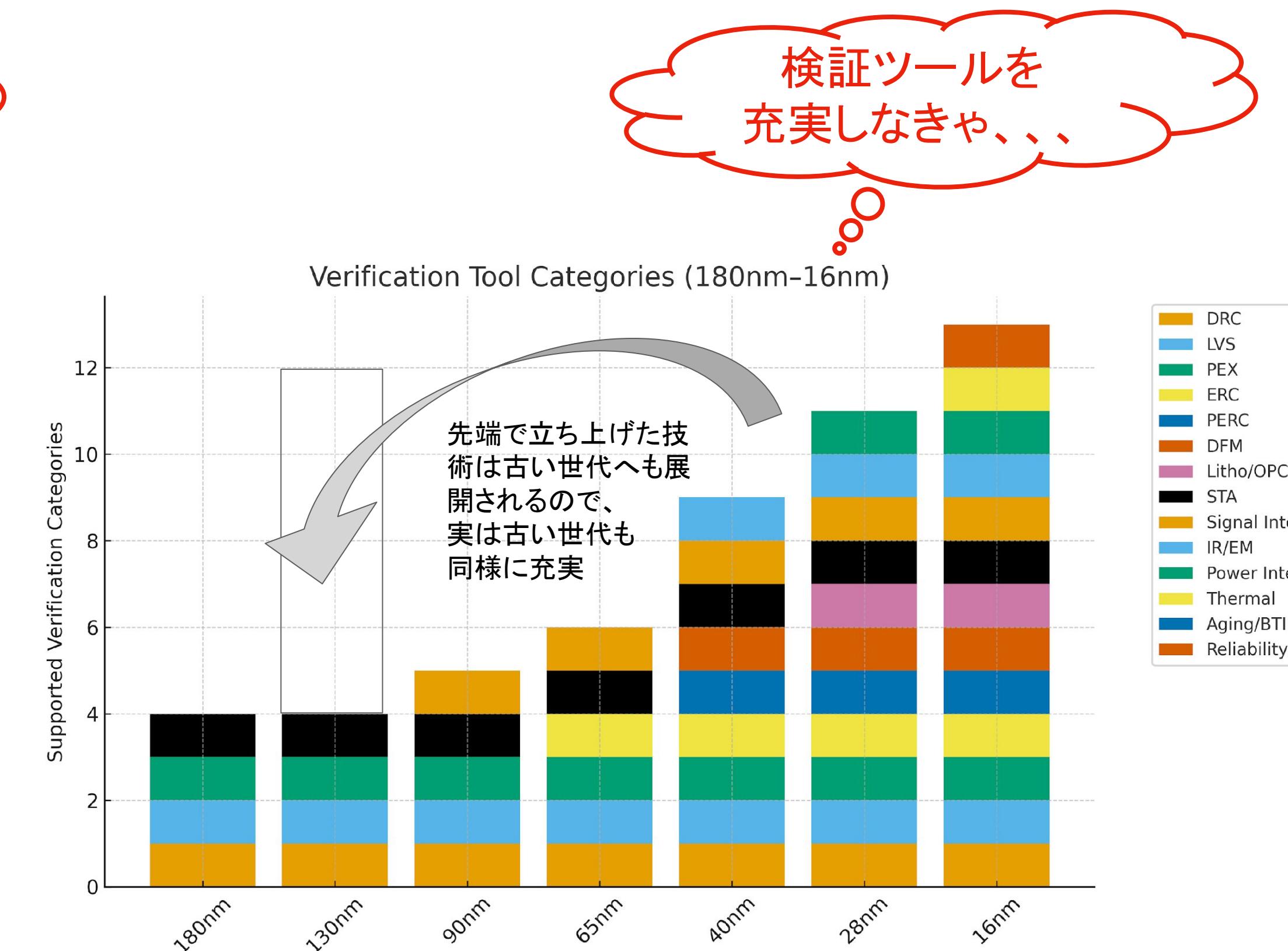


しかし微細化により激変⇨PDK充実の時代へ

プロセスが複雑化し、レイヤ数もデバイスタイプも増加。
さらにEDAツールが多数登場し、三種の神器だけでは対応不能に



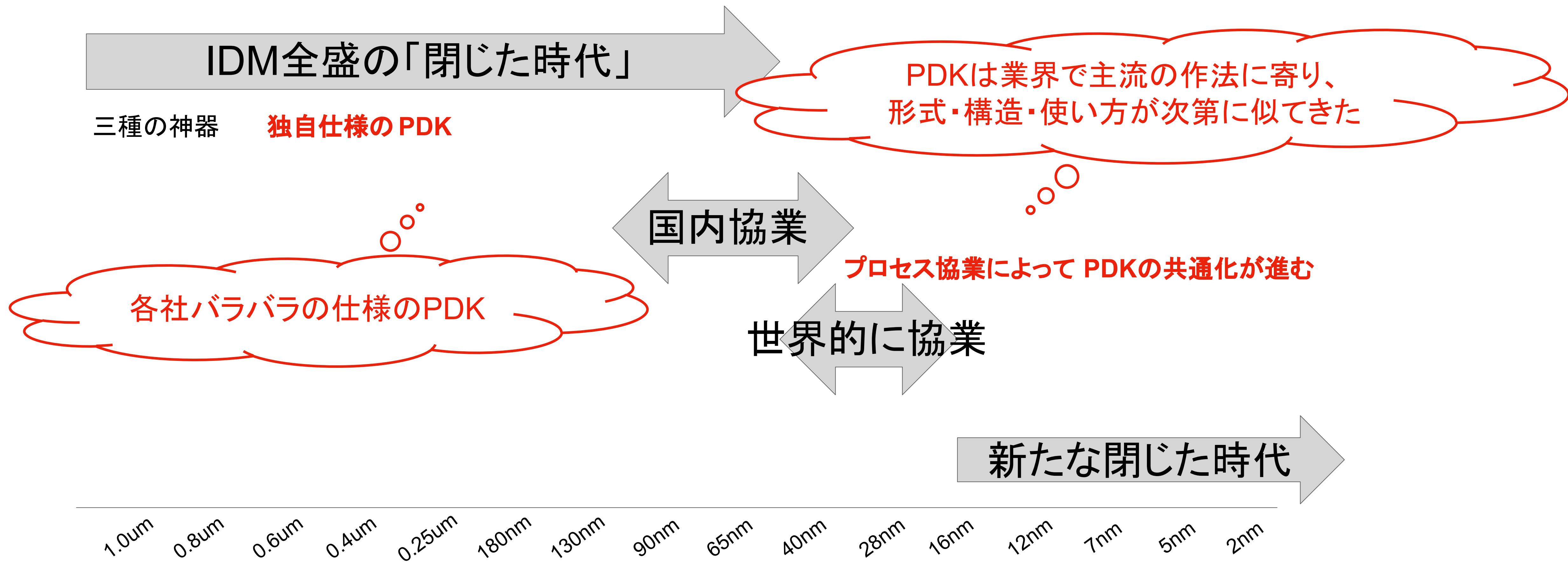
世代が進むとマスクコスト大幅にアップ (イメージ)



世代が進むと検証ツールも増加 (イメージ)

設計・検証に関わるものすべてがPDKに組み込まれるようになる

PDKのたどった道



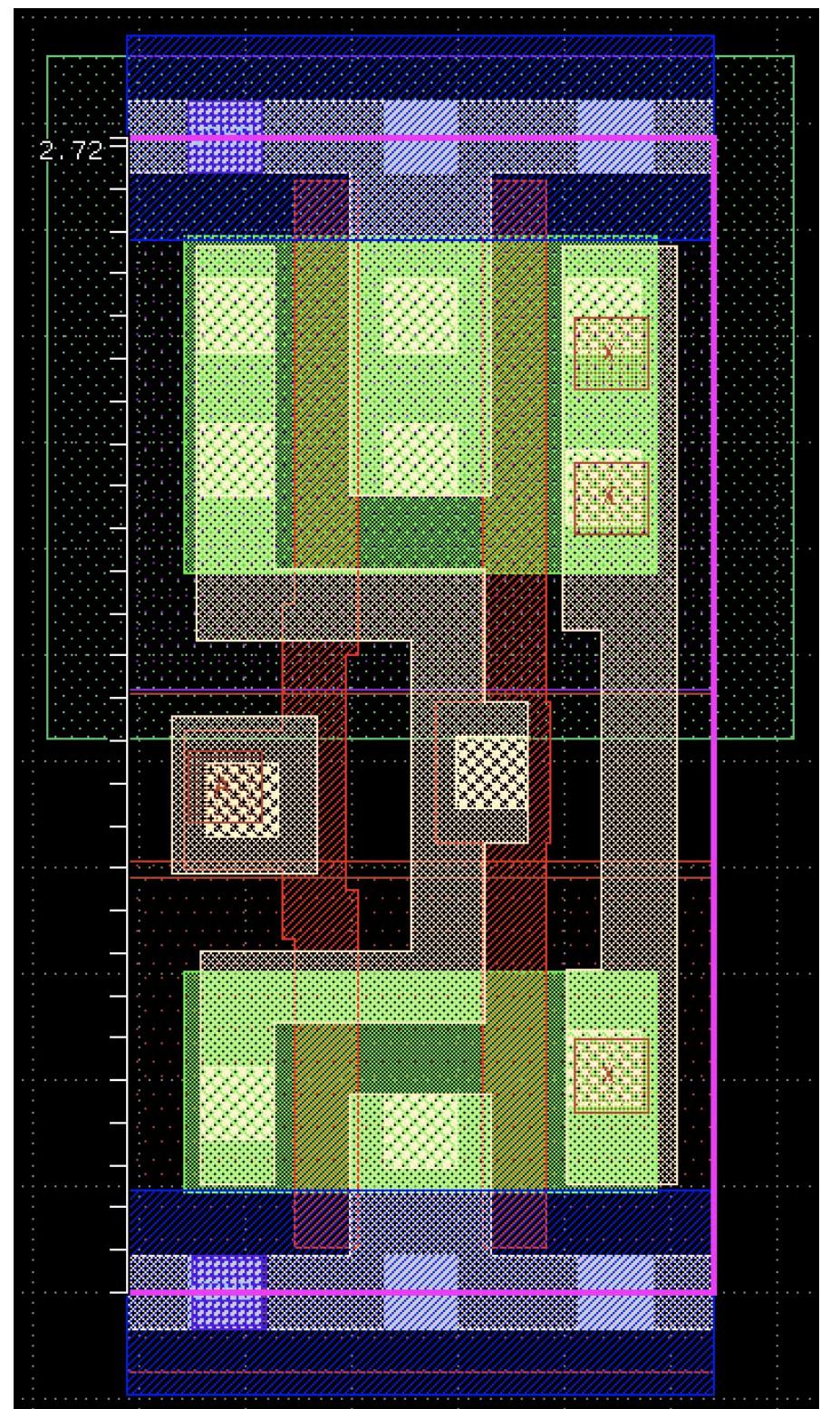
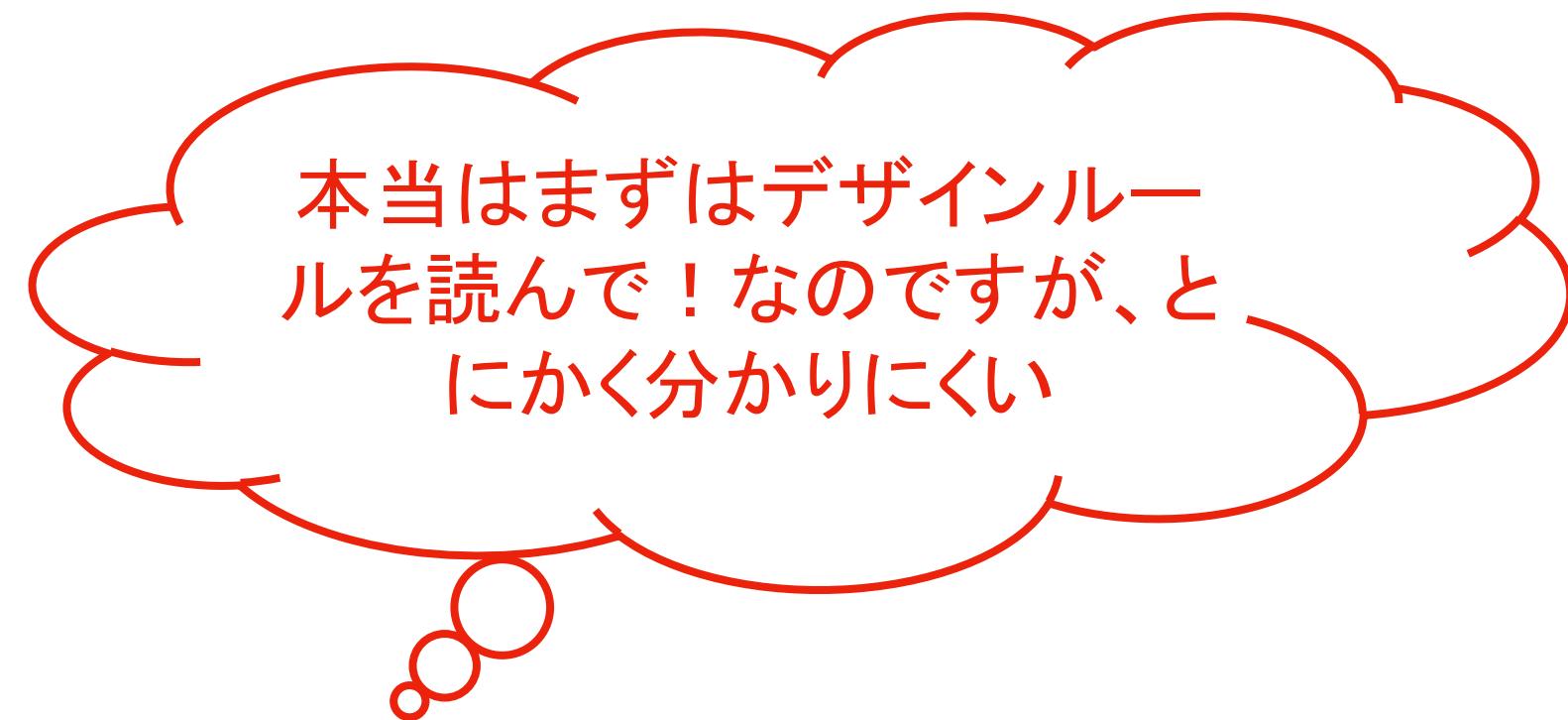
先端ノードでは協業とFoundryビジネスが進んだことで、PDKの形式・構造・使い方が“業界標準のスタイル”に寄っていった。
しかし、130nm 以前の世代は IDM 全盛期のため、各社が非公開の状態で独自進化 しており、現在オープン化が始まると バラバラさが課題になる。

PDKを“読む”ならどこから？①

レイアウトを眺めるのが最も速くいろいろとわかる

標準セル(スタンダードセル)から読み取れること

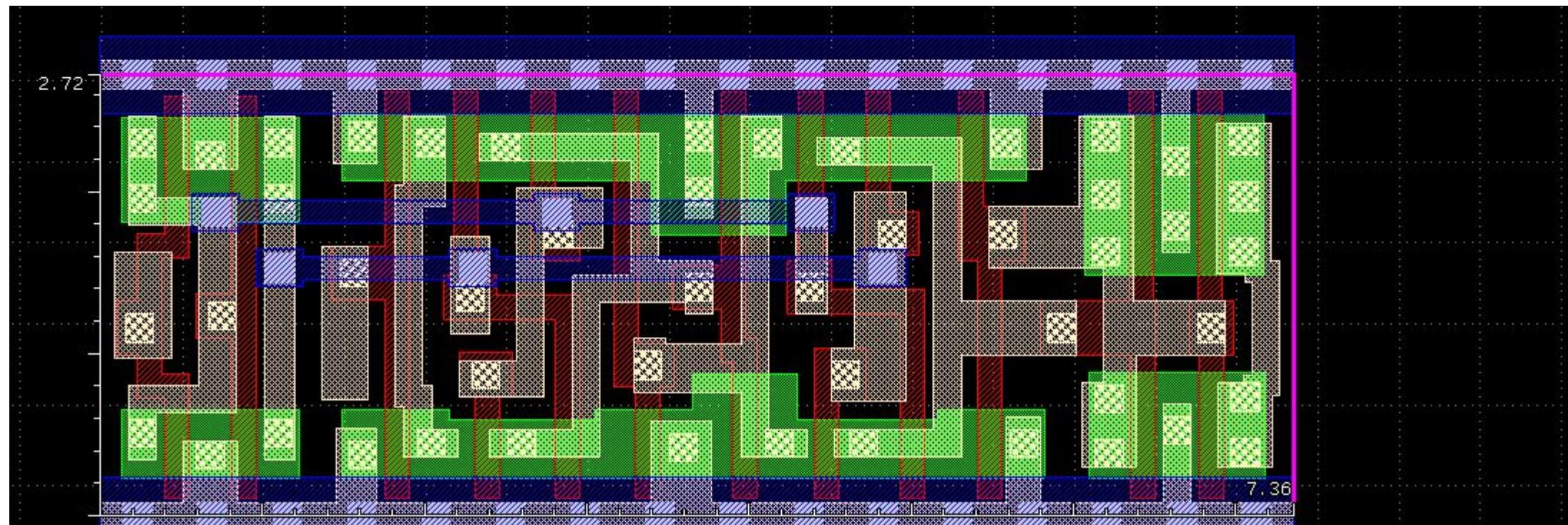
- レイヤー構成 → デザインレイヤーがわかる
- 最小ルール(長さ・幅・間隔・包含ルール)
- Metal ピッチと配線方向
- Poly 幅・ピッチ → 技術世代の見極め
- Well 構造・隔離構造



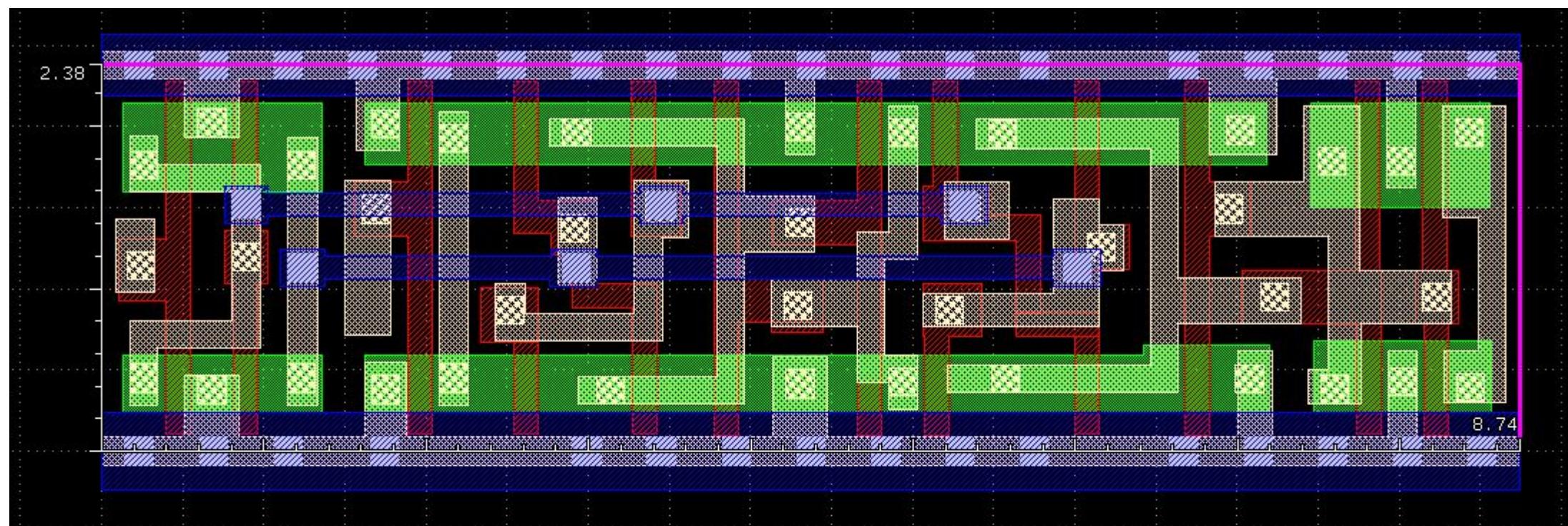
標準セルは多くがミニマムルールの塊なので、読むだけではなく“見ればわかる”のが強み。
ただし、謎のレイヤーも出てくるので、ここは頑張って調べる必要があります。

次に自分で描いてみる(スタンダードセル)

実際にレイアウトを描いてみると理解が飛躍的に深まります



8トラックセル



7トラックセル

デザインルールと睨めっこしながら描いてみる

こんなことやる人はいないと思いますが、、、
(やるには DRC が必要、、)もっと追いでみる

例) 8T → 7T など、標準セルのトラック数を削ってみる

これにより、

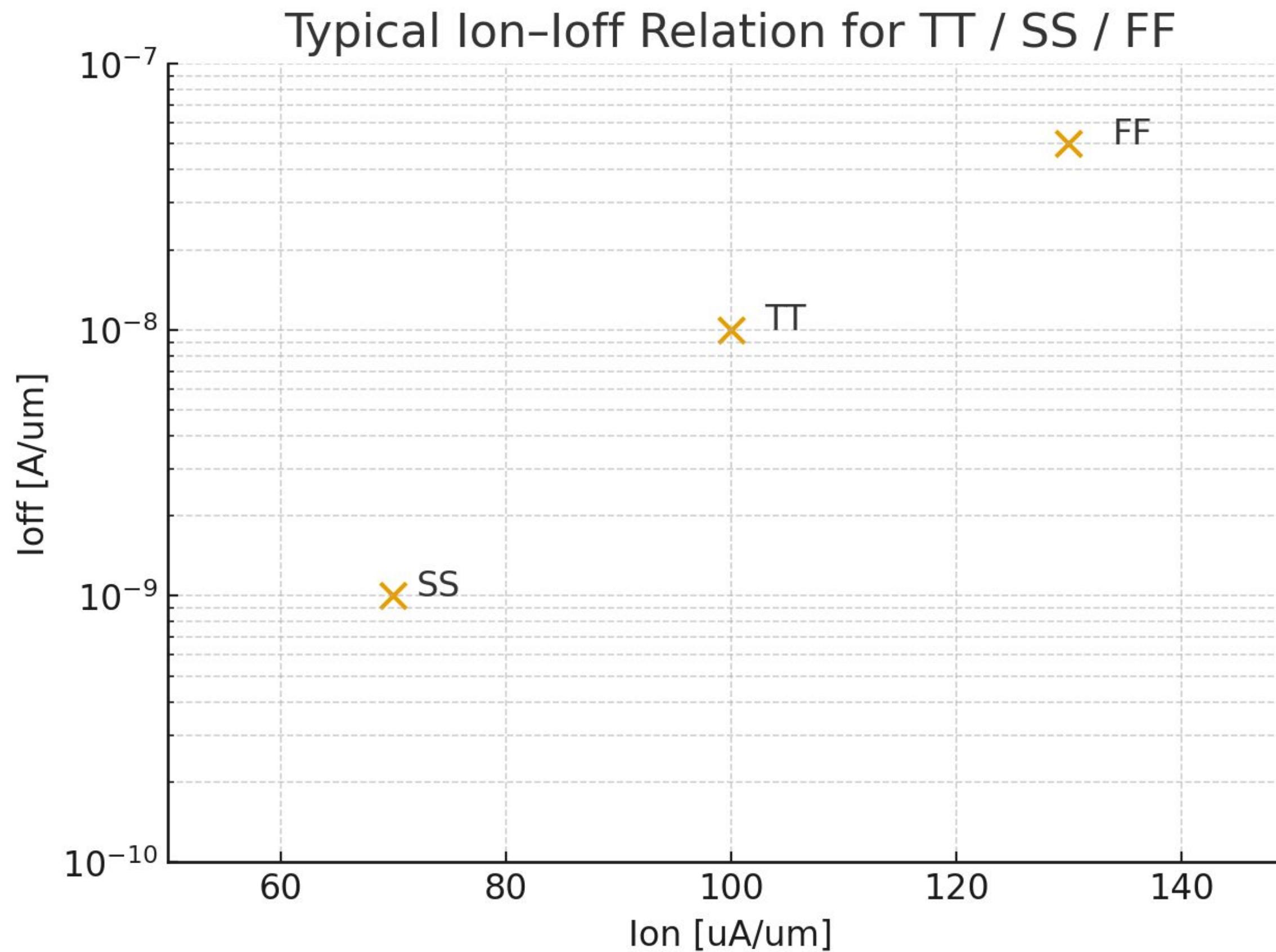
- どのルールが本質的に効いているのか
- Poly／Active／Contact/Metal の本当の限界
- 配線層で“絶対に譲れない条件”
- デザインルールのクセ(書きやすさ・書きにくさ)

が手を動かした瞬間に見えてきます。

デザインルールの“思想”を理解するにはうってつけ。

PDKを“読む”ならどこから？②

デバイスパラメータからデバイスの性格を読み取る



Ion(オン電流)とIoff(オフ電流)の関係を見る。

このグラフから見える3つの本質

①(デバイス)高速性とリークのトレードオフが可視化される

FFは高速だがリーク大 → 電力課題

SSは遅いがリーク小 → 安定性と省電力重視

②(回路)設計時のTpd・電力・動作周波数が推定できる

Ionが大きいほど遅延は短くなる

Ioffが大きいほど動作点設計がシビアになる

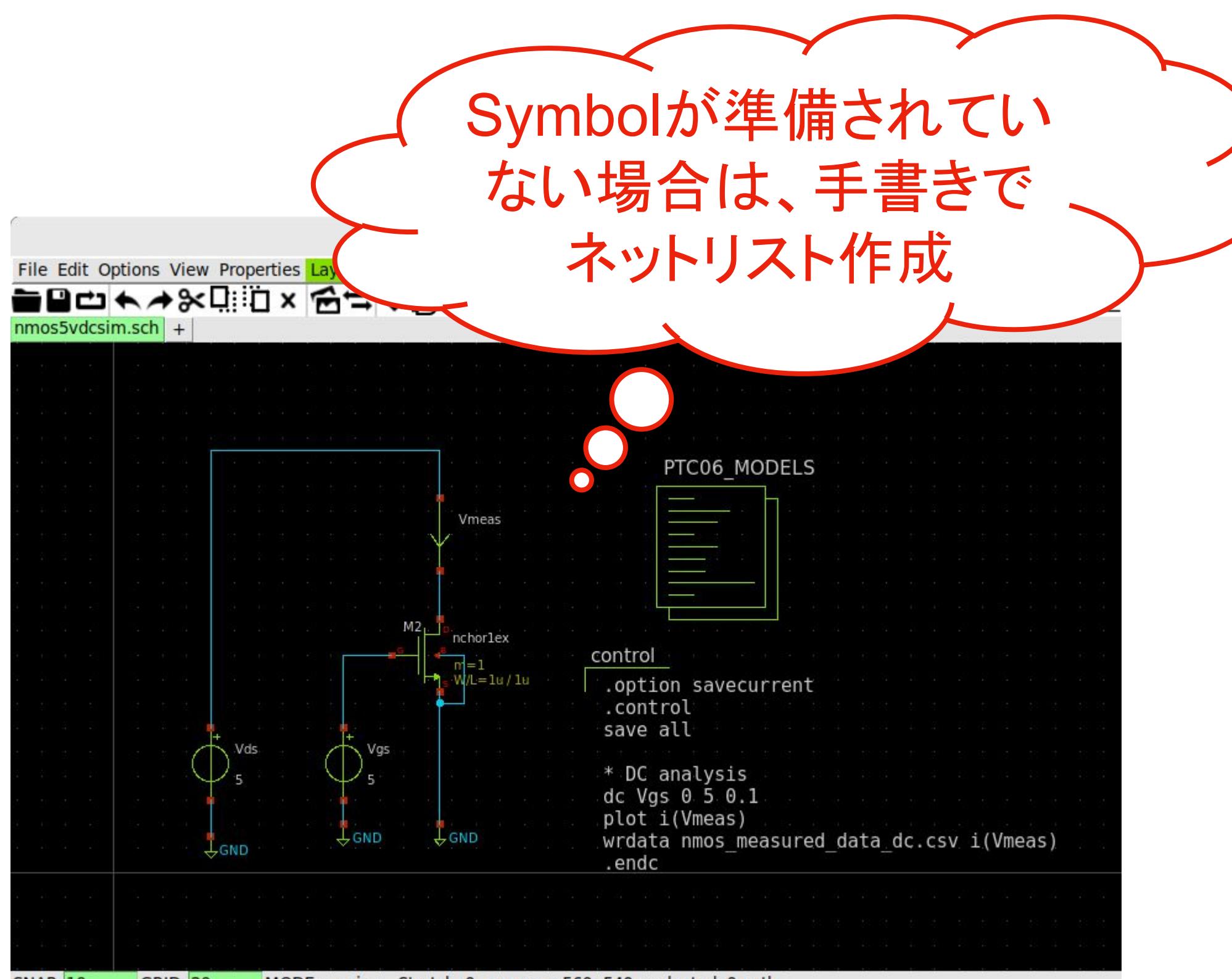
③(プロセス品質) Vthばらつきの窓が見えてくる

Ion/Ioffの差から、Vthのウインドウがどれくらいか推定できる

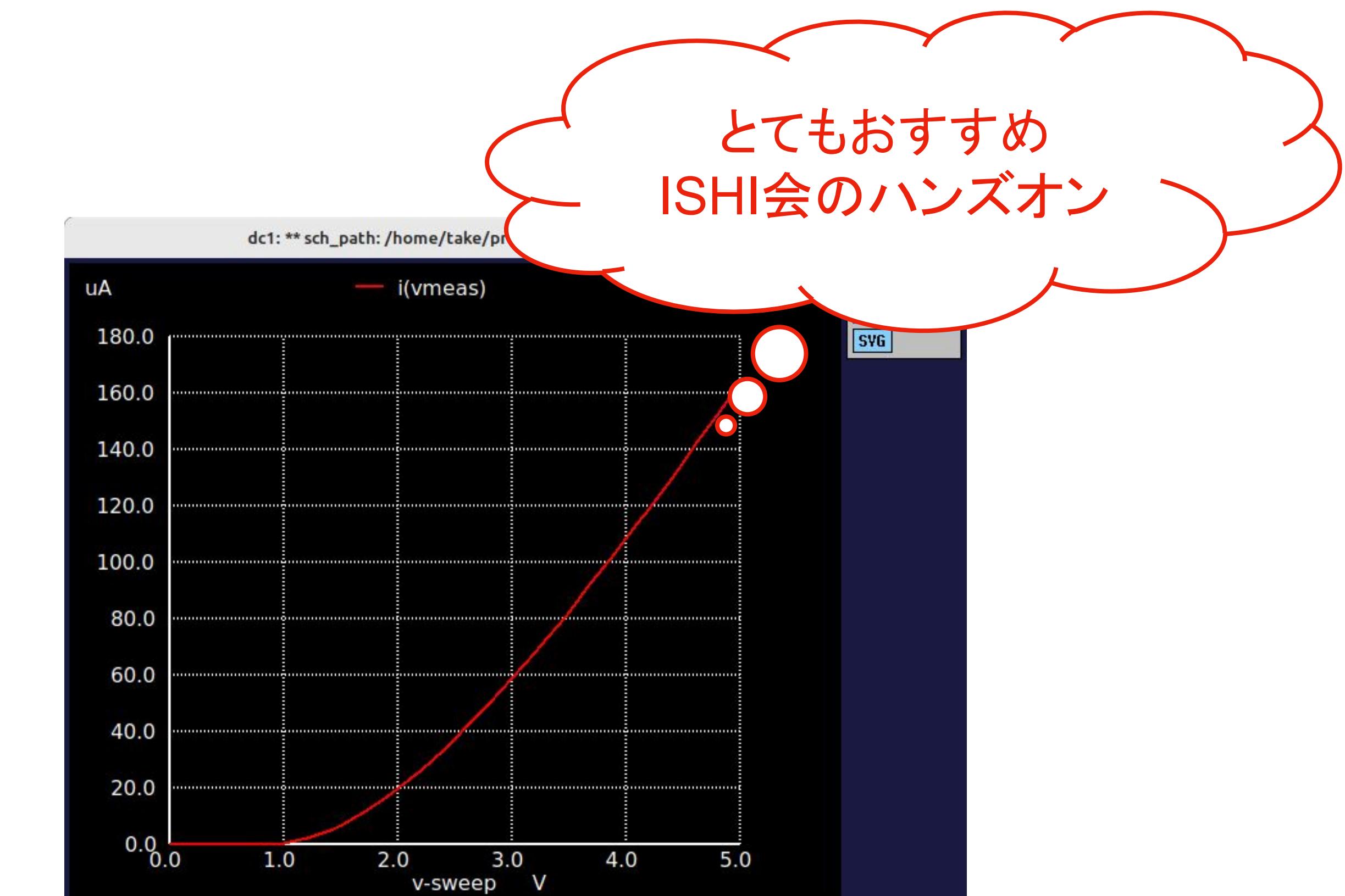
デバパラに載っていない場合は、SPICEと言う手もあるが、どこまで精度良く入っているかは？？

次にシミュレーションしてみる

実際にSPICEシミュレーションするとデバイスの詳細が見えてくる



I-V特性



シミュレーション結果

その他、スタンダードセルのスピード(T_{pd})を測るのも有効(パワーvsスピード)

このぐらい PDKを読んでおけば PDKの自作はしやすい

三種の神器(デババラ・デザインルール・SPICE)があるなら、あとは

DRC と LVS を整えて“ツールが使える PDK”に仕上げるだけ **

- レイアウトが描ける → DRC が必要
- 抽出して比較できる → LVS が必要
- Symbol / Pcell は後からでよい

→ まずは設計ツールが解釈できる最小PDKを作る

PDKを“自作”するなら何から？

レイヤ構造の最小セットを決める

① レイヤ定義 (Layer Map)

- レイヤ名・番号・色・GDSマップを決める
- デザインレイヤとマスクレイヤの対応を定義

まず必要なのは次の“最小構成”：

- 拡散層 (Active Area)
- N-WELL / P-WELL
- ゲート (POLY)
- N-/P- LDD implant
- N+/P+ S/D implant
- コンタクト
- 配線メタル (Metal1～)
- VIA (Via1～)



PDKの“世界観”がここで決まる(こだわりたいところ)

PDKを“自作”するなら何から？

続いて、DRC/LVSと検証用にスタンダードセル

こここの項目はパラって
作る事もできるフェーズ

② 最小DRCルール(WIDTH / SPACE / ENCLOSURE)

- 一般的なコマンドで構成する
- INV / NAND / DFFが描ければO.K
- 描けるPDKであるかの最初のチェックポイント

③ LVS抽出ルール(DEVICE / CONNECT)

- MOSデバイスの抽出(W/L取得)
- 接続(METAL / CONTACT)の抽出
- SPICEモデルと構造の整合が必要

④ 基本スタンダードセルのレイアウト

- レイヤ定義+最小DRC+LVSが機能するか
実際に描いて確認
- INV / NAND → ミニマムDRCの妥当性
- DFF → 実用レベルのセルが描けるかの最終確認

⑤ Symbol / Pcell(拡張・利便性向上)

- PDKを“使いやすく”するための要素
- Symbol:回路図入力を容易にする
 - Pcell:MOSなどのデバイスをサイズ指定で生成

ここまで出来れば以降は、誰もがどんどん拡張できる

オープンソース PDKで遊ぼう

仕事じゃないPDKの楽しみ方

- 半導体会社のPDK開発メンバー(SIGの遊び場)が、“仕事じゃない時間”にオープンソースPDKを触って遊んでいます。

仕事のPDK開発 vs SIGの遊び場

- 納期とスケジュール → 思いついたときに動く
- 正確さ・再現性が命 → 試して壊して笑う
- 社内ルールに縛られる → 自分ルールでOK
- 成果報告と検証 → 雑談と共有

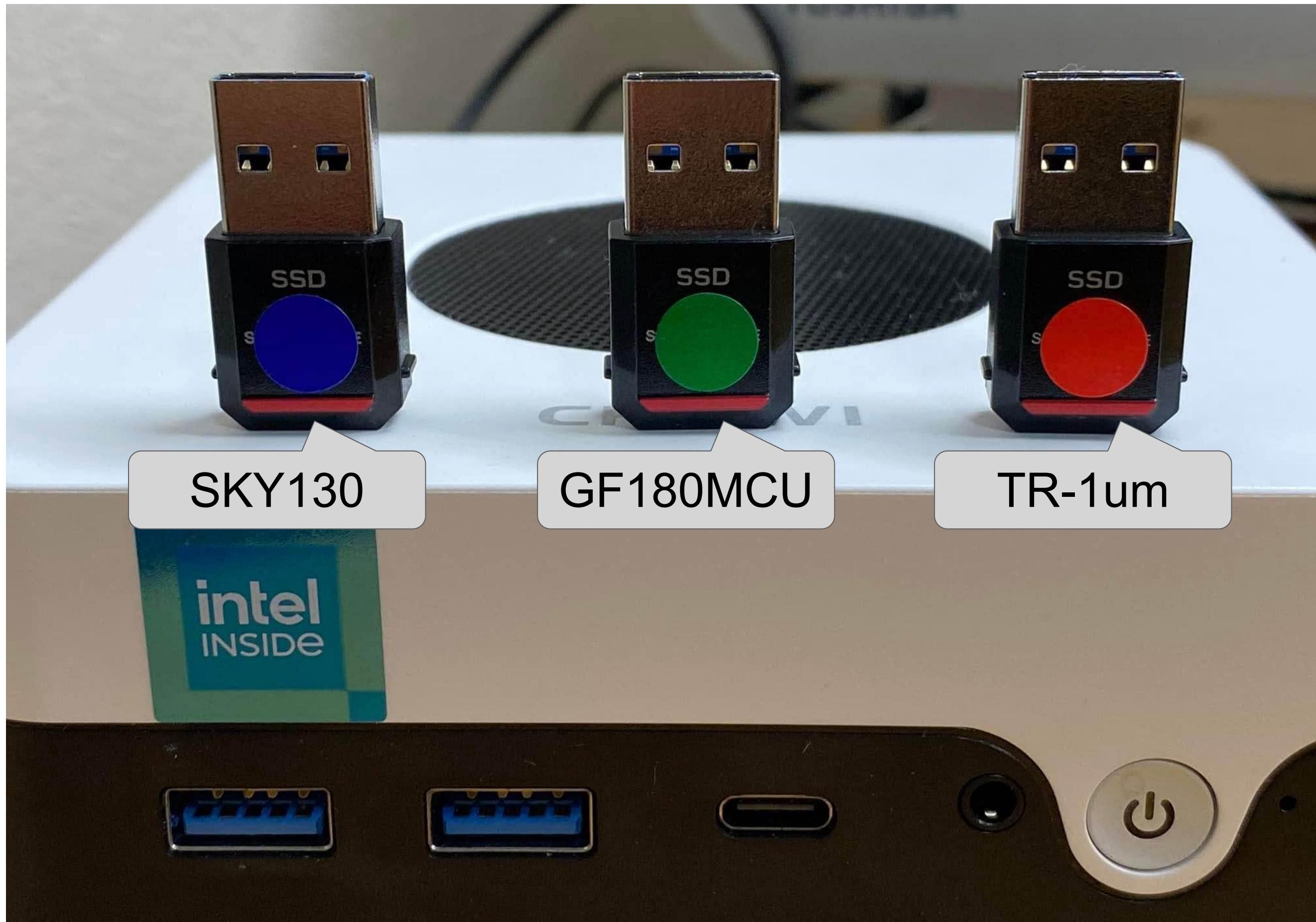


“ちゃんと動かす”より、“とりあえずやってみる”をモットー

オープンソースPDKを触ることで、仕事以上にPDKの理解が深まる（？？）

これまでオープンソース PDKで遊んできた事

ミニPCとミニSSDで設計環境を作って遊ぶ



ミニPC+ミニSSD

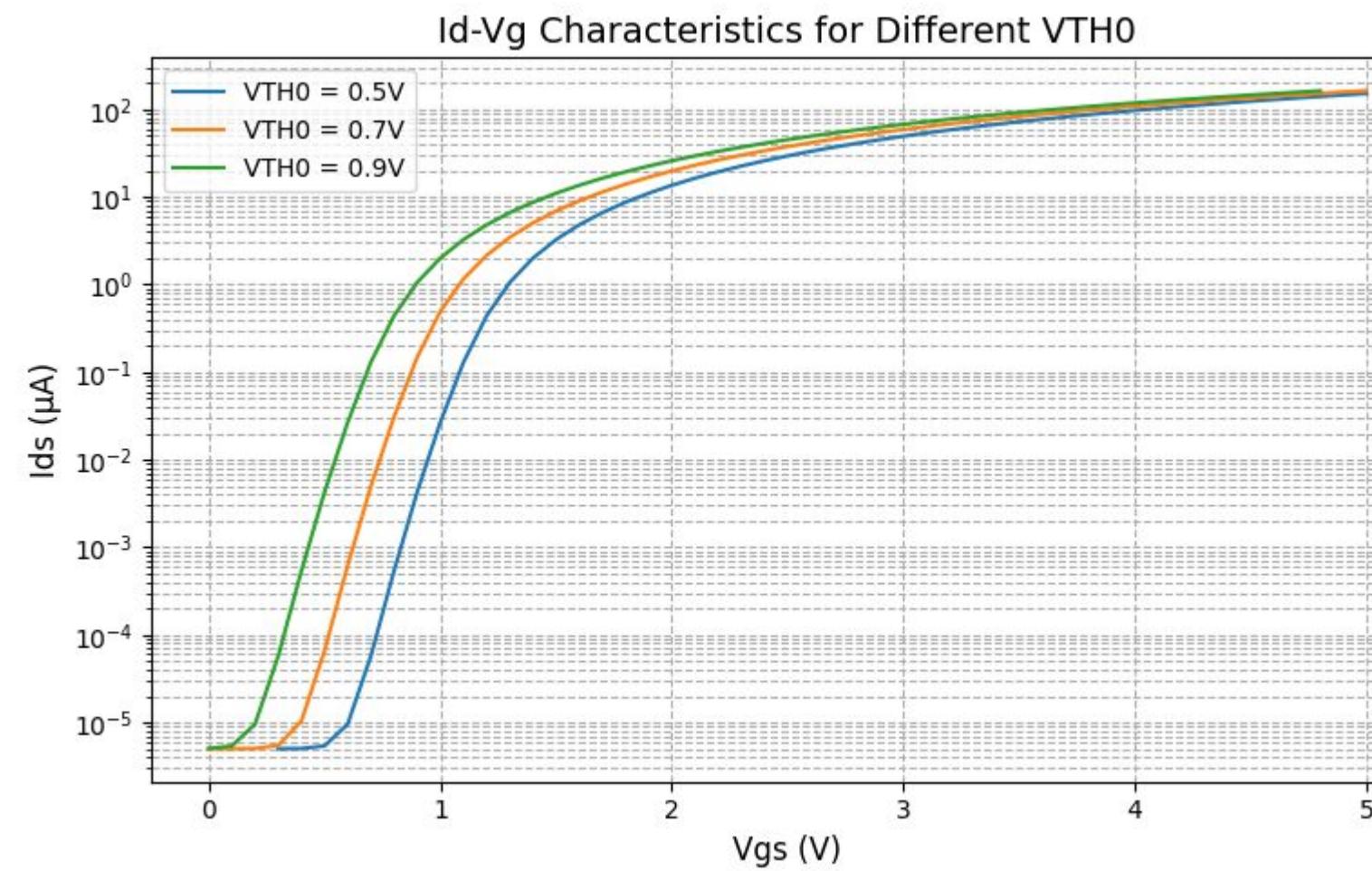
格安ミニPCを買って、ミニSSDにLinux(Mint)と各設計環境(PDK)を入れて、差し替えて楽しむ。



ノートに挿せば外出先でも

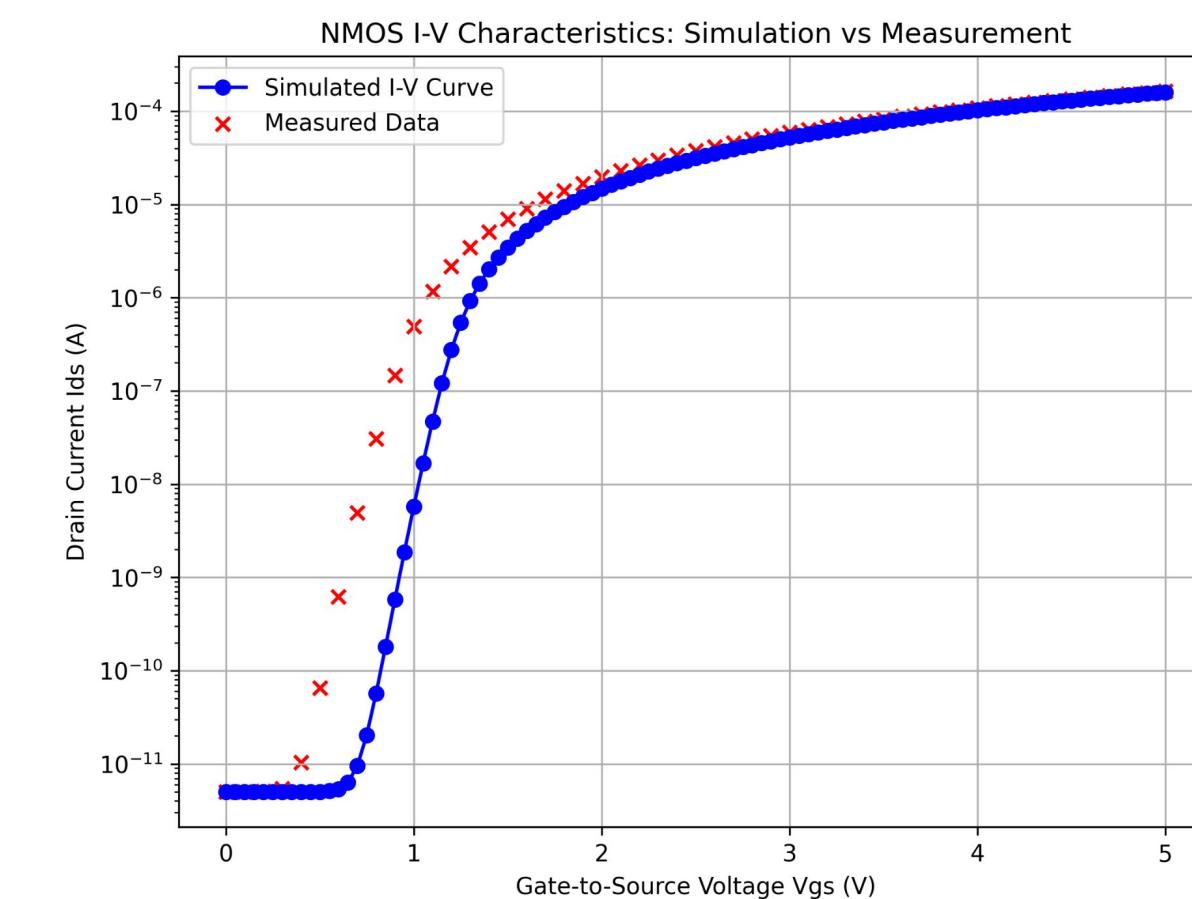
これまでオープンソース PDKで遊んできた事

SPICEモデルパラメータをいじって遊ぶ

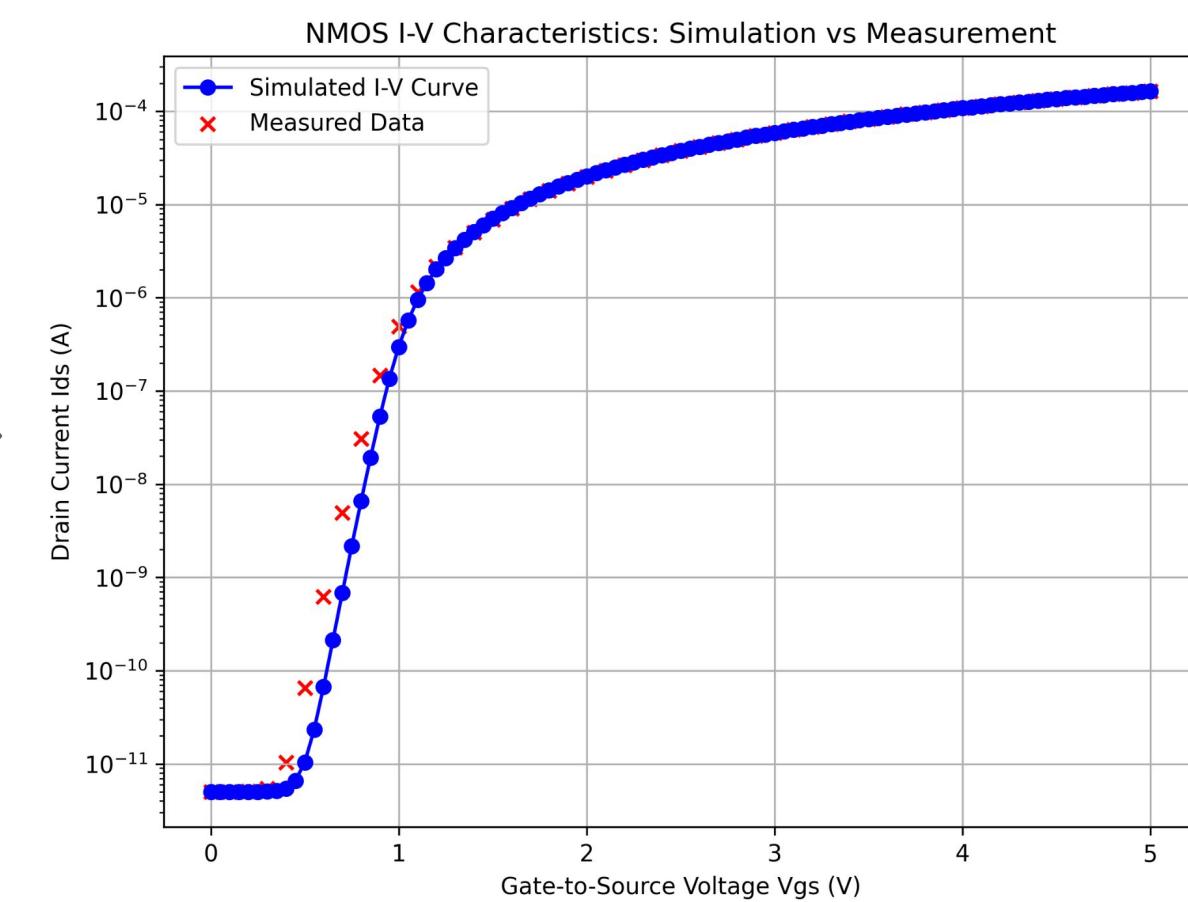


Vth0を変えてみる

いろいろとモデルパラメータを
変えるとどうなるか
シミュレーションしてみた



イニシャル

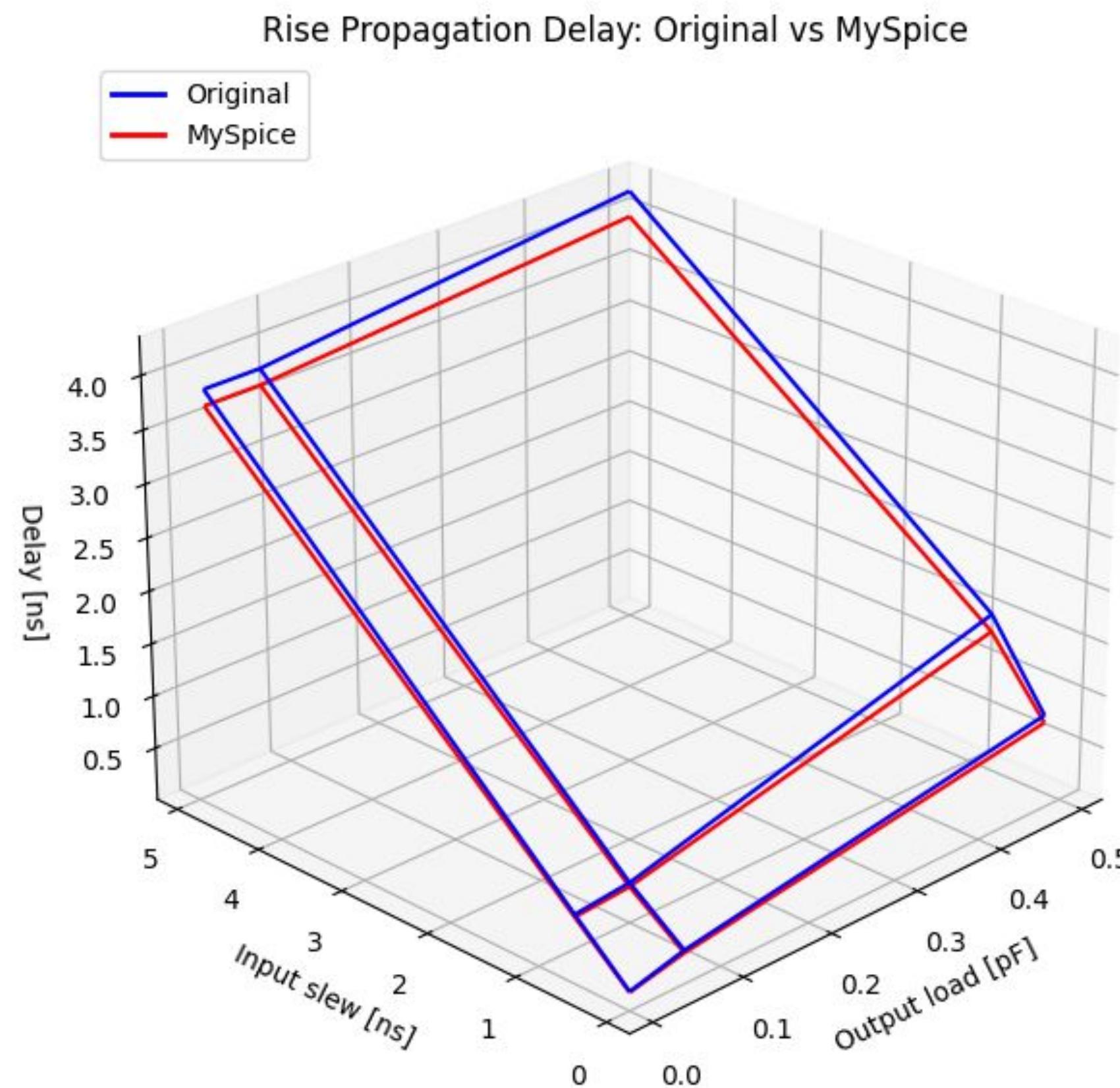


フィッティング

仮想測定値とSPICEシミュレーション結果のズレ
が最適になるVTH0とU0を探索させてみた(自作モ
デル? 作成)

これまでオープンソース PDKで遊んできた事

キャラクタライズツールLibrettoで遊ぶ

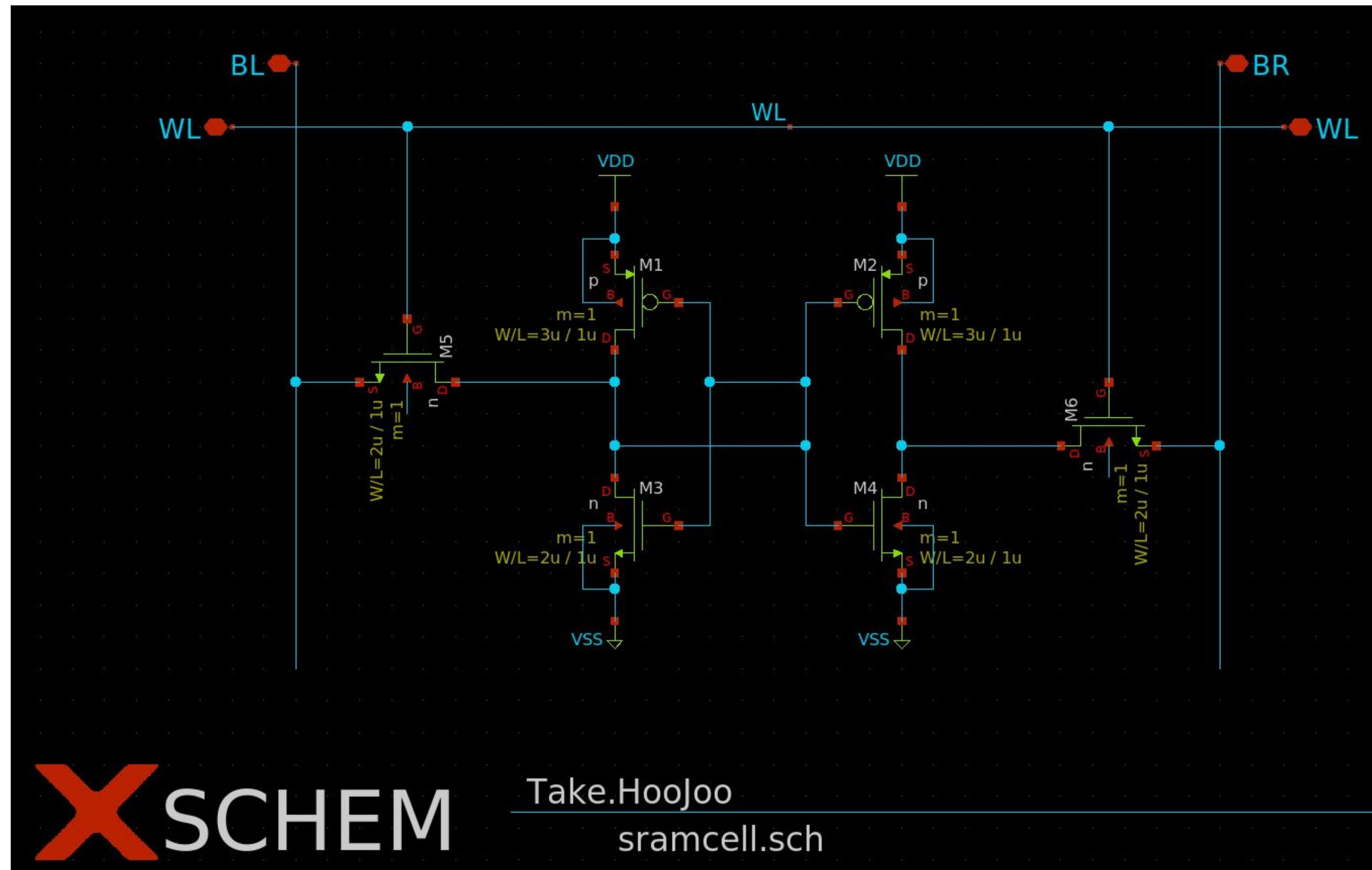


キャラクタライズ結果をオリジナルモデル
と自作モデルで比較してみた

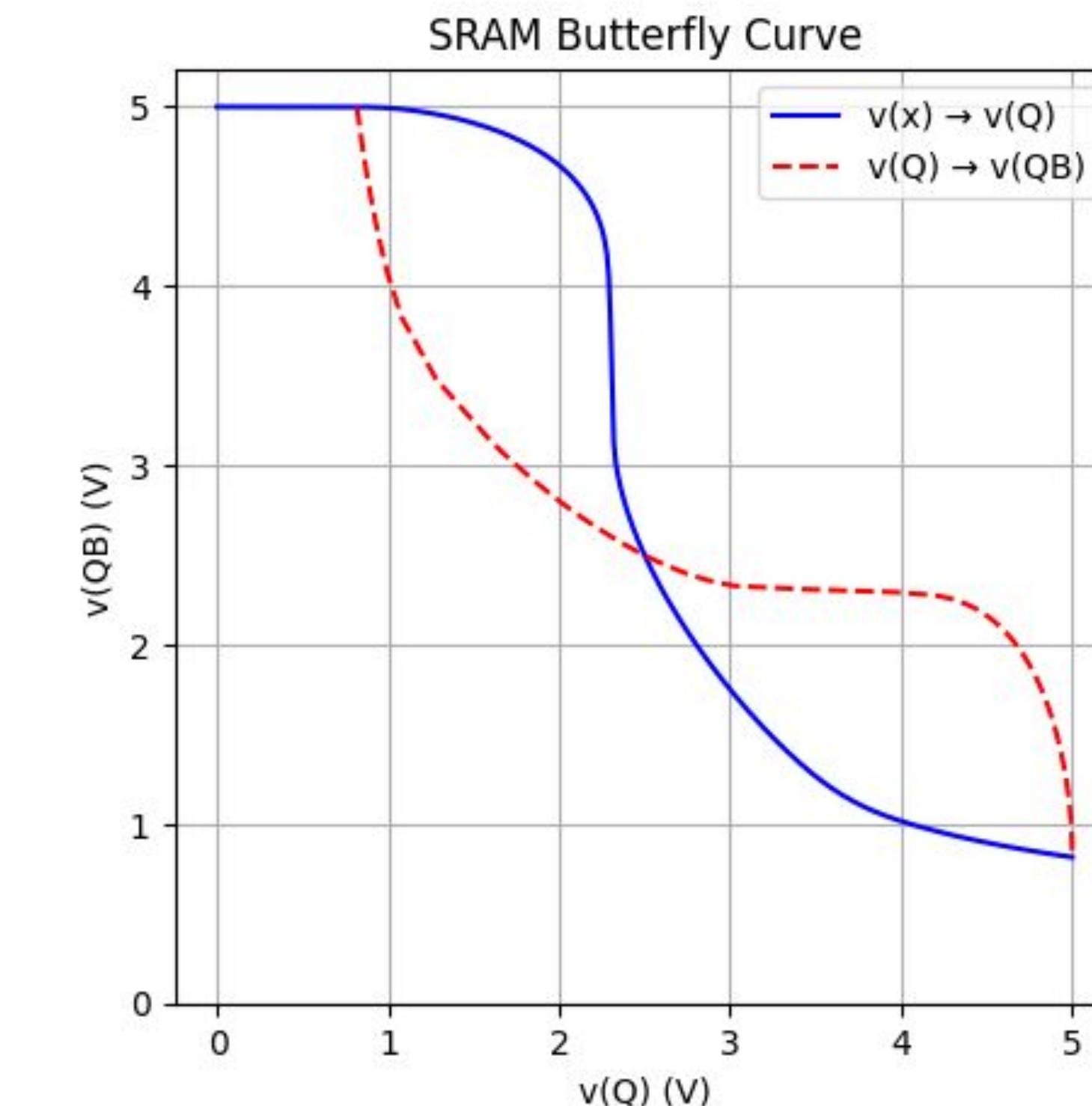
キャラクタライズツールLibrettoを使い自作モデルを使ってキャラクタライズしてみた

これまでオープンソース PDKで遊んできた事

SRAMのビットセルでメガネ特性を描いて遊ぶ



SRAM 6T ビットセル

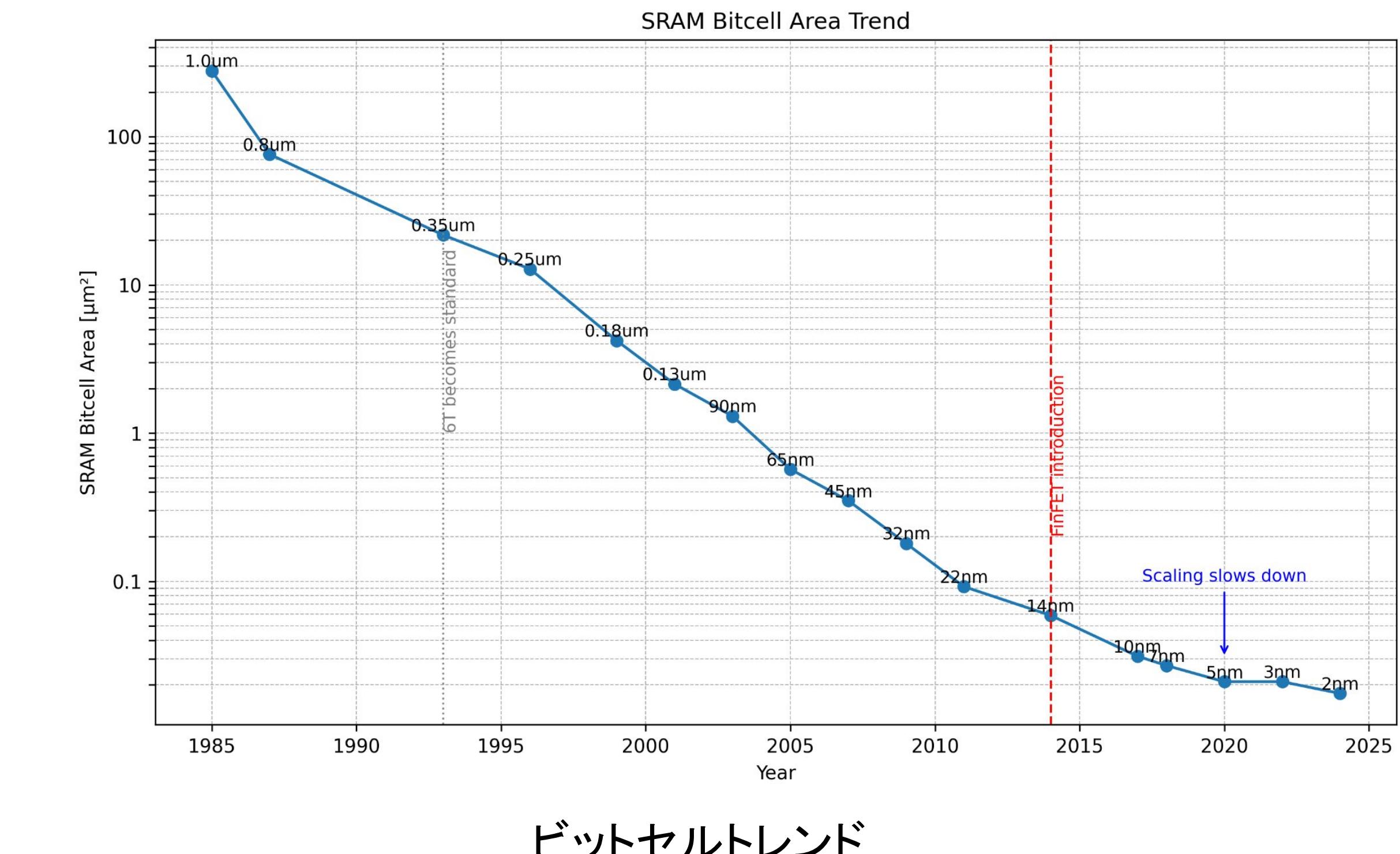
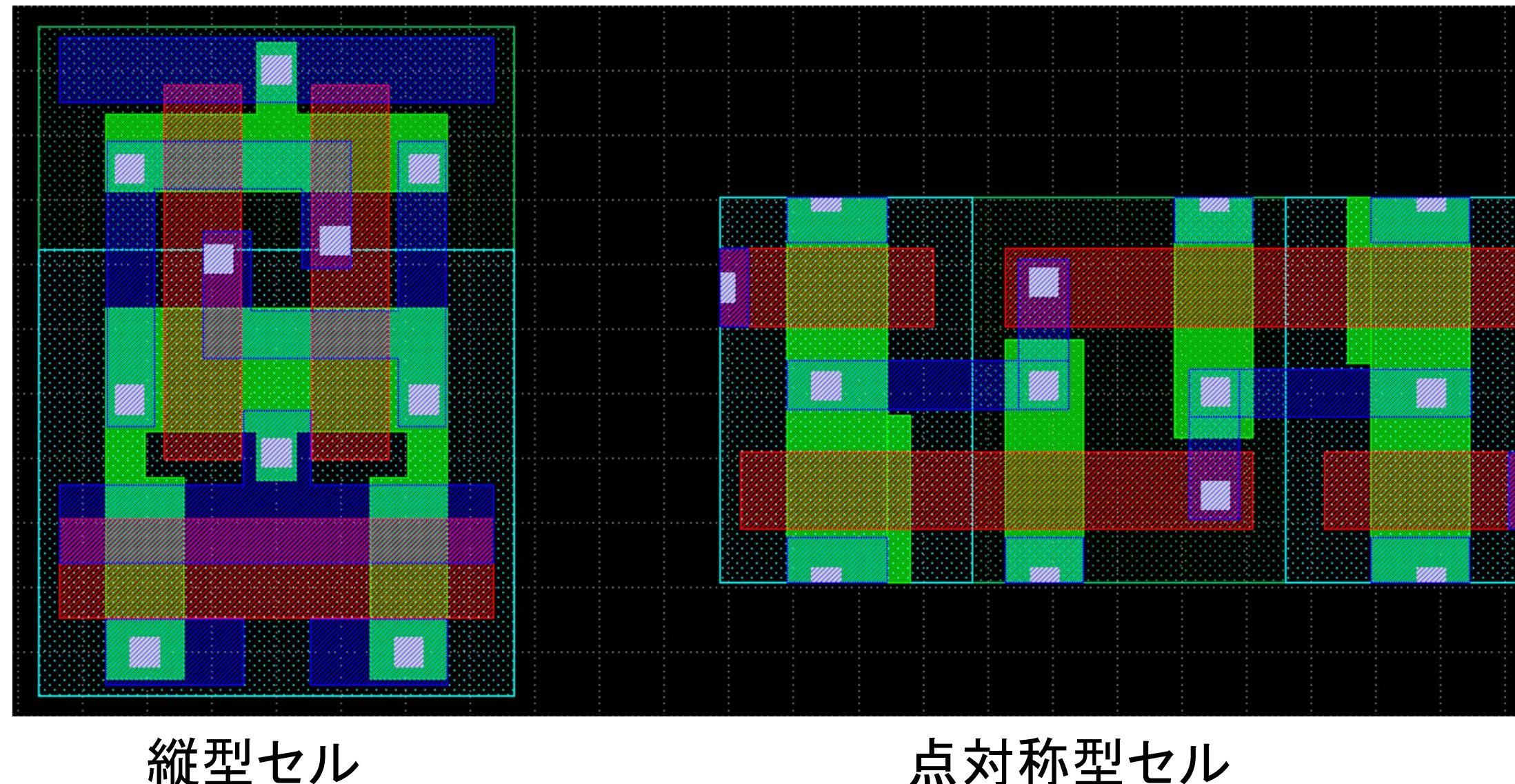


メガネ特性

SRAMビットセルの安定性SNM(Static Noise Margin)の評価してみた

これまでオープンソース PDKで遊んできた事

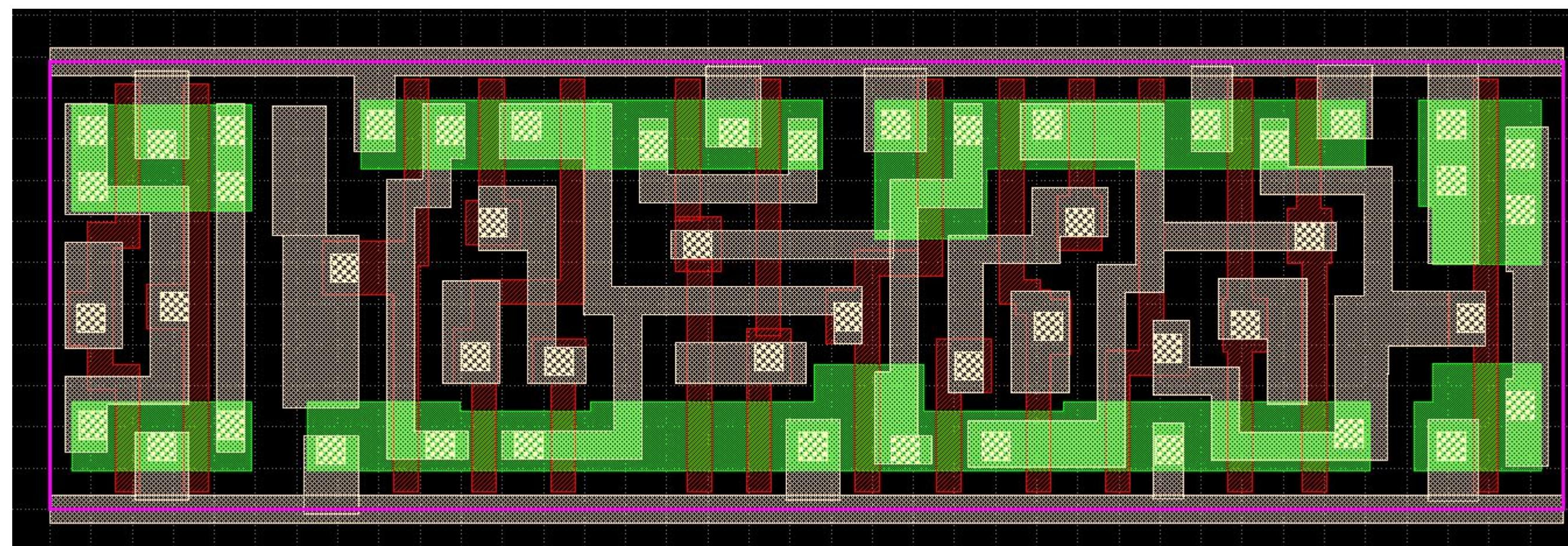
SRAMのビットセルをレイアウトして遊ぶ



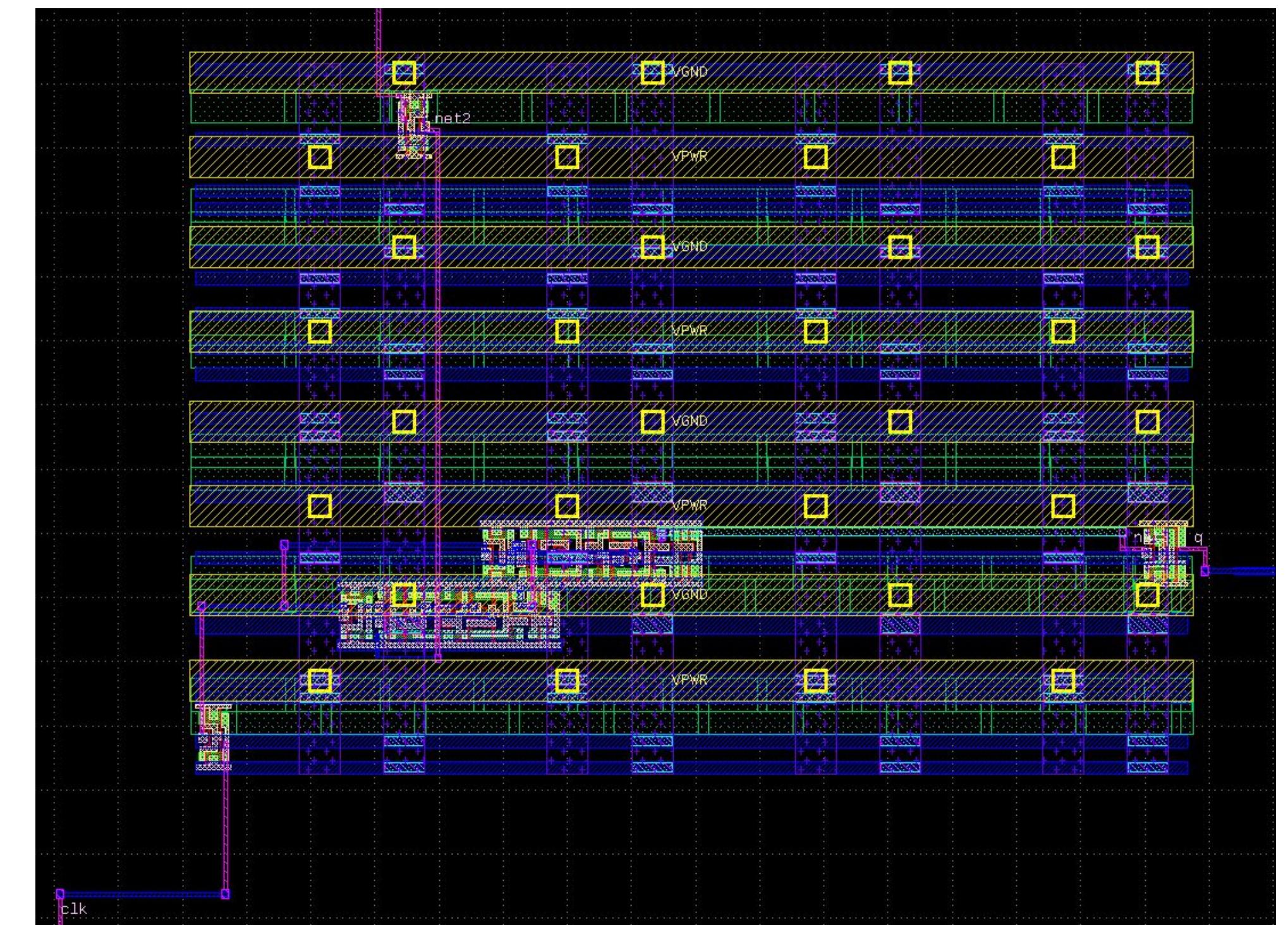
SRAMビットセルを縦型セルから点対称型セルにしてみた

これまでオープンソース PDKで遊んできた事

自作7トラックセルでOpenLaneのフローを流して遊ぶ



自作7トラックセル



自作7Tセルを使った配置配線結果

7Tセルのgds・LEF・.v・.libを作ってOpenLaneフローを流してみた

遊び続けるために

ここからは、後のPDK対談ネタかもしれません

オープンソースPDKでいろいろなことができるようになります。

とても楽しくなってきました。

ただ、この先も長く遊び続けていくためには、

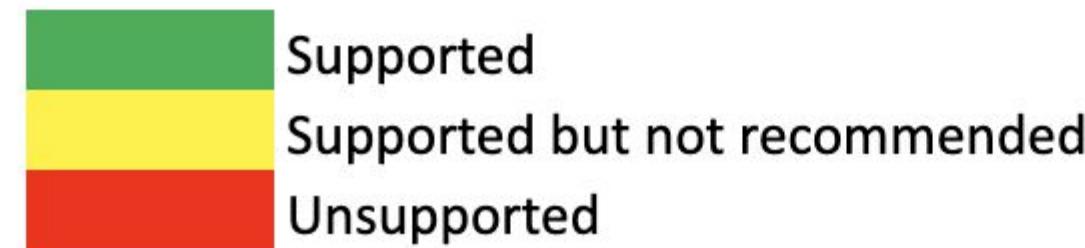
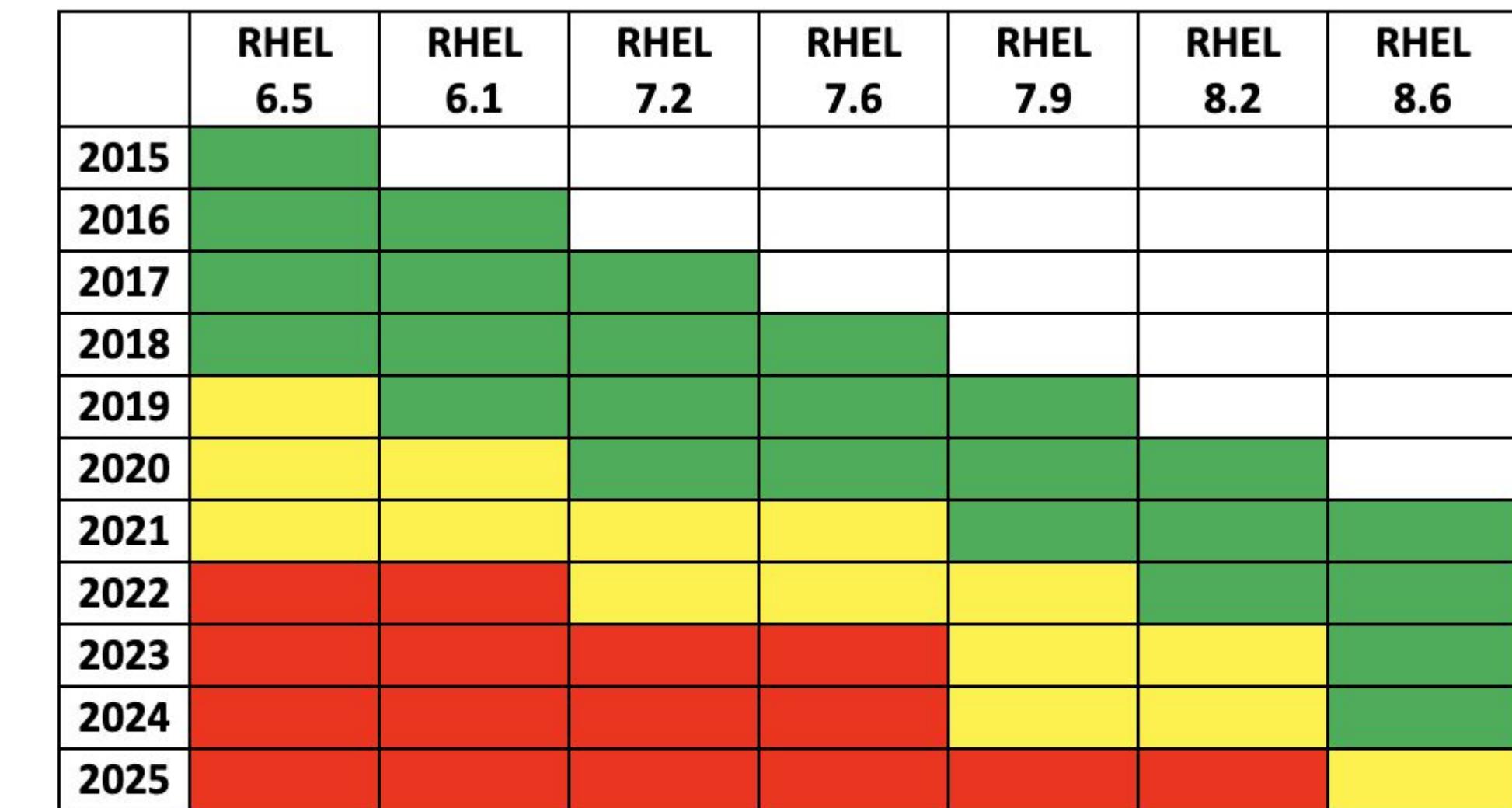
あらかじめ 考えておいた方がよさそうな点 もいくつかあります。

PDKは意外と短命

PDKはメンテナンスなしでは生き残れない

PDKはプロセスの更新だけでなく、

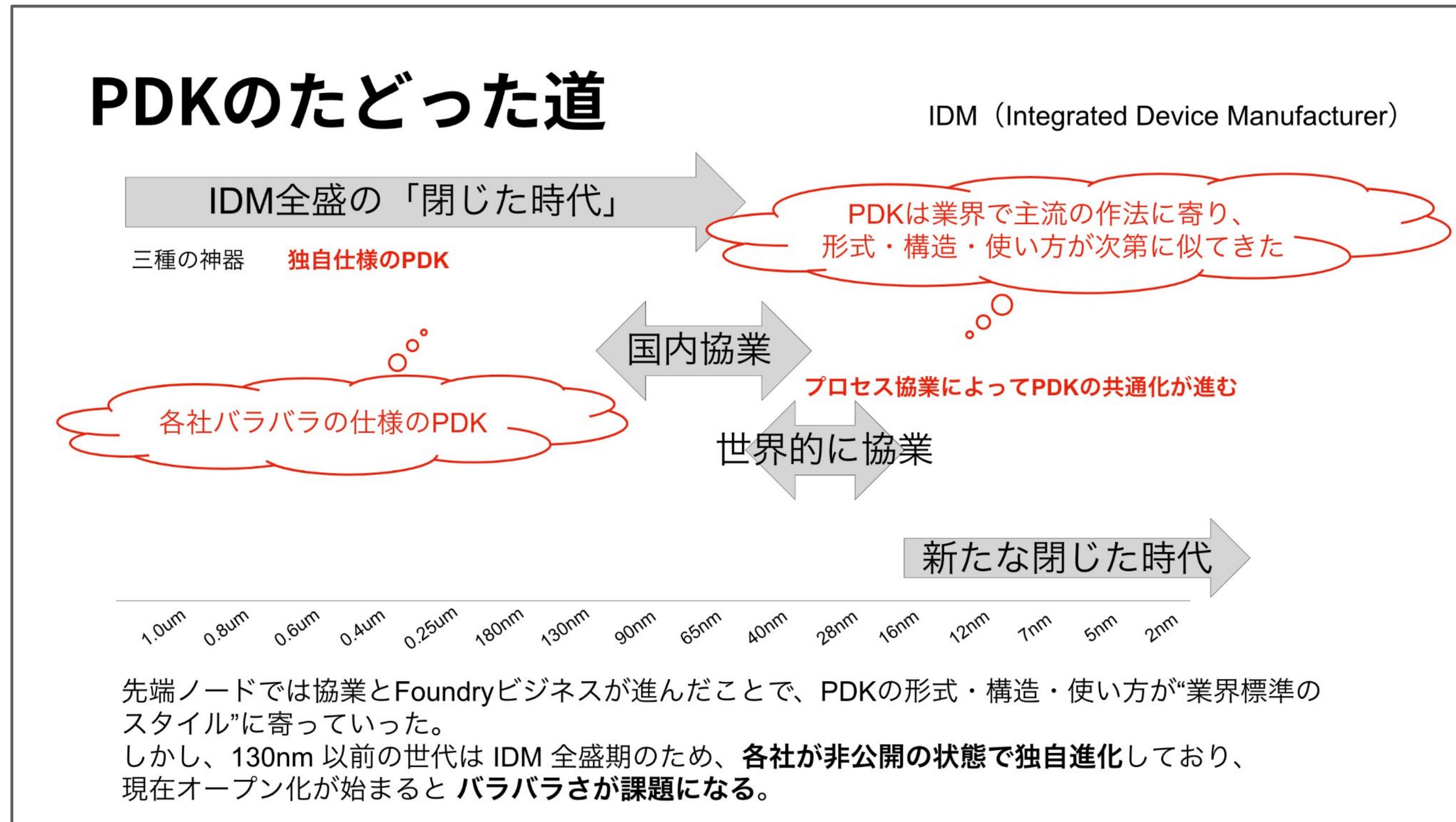
- ・OS
- ・EDAツール
- ・検証フローの変化にも追従が必要。



そうだとすると、メンテナンスしやすいPDKにしておく必要がある

独自仕様のPDKがオープン化

いろいろあると、ユーザ視点からは使いこなすのが大変。(メンテナンスも)

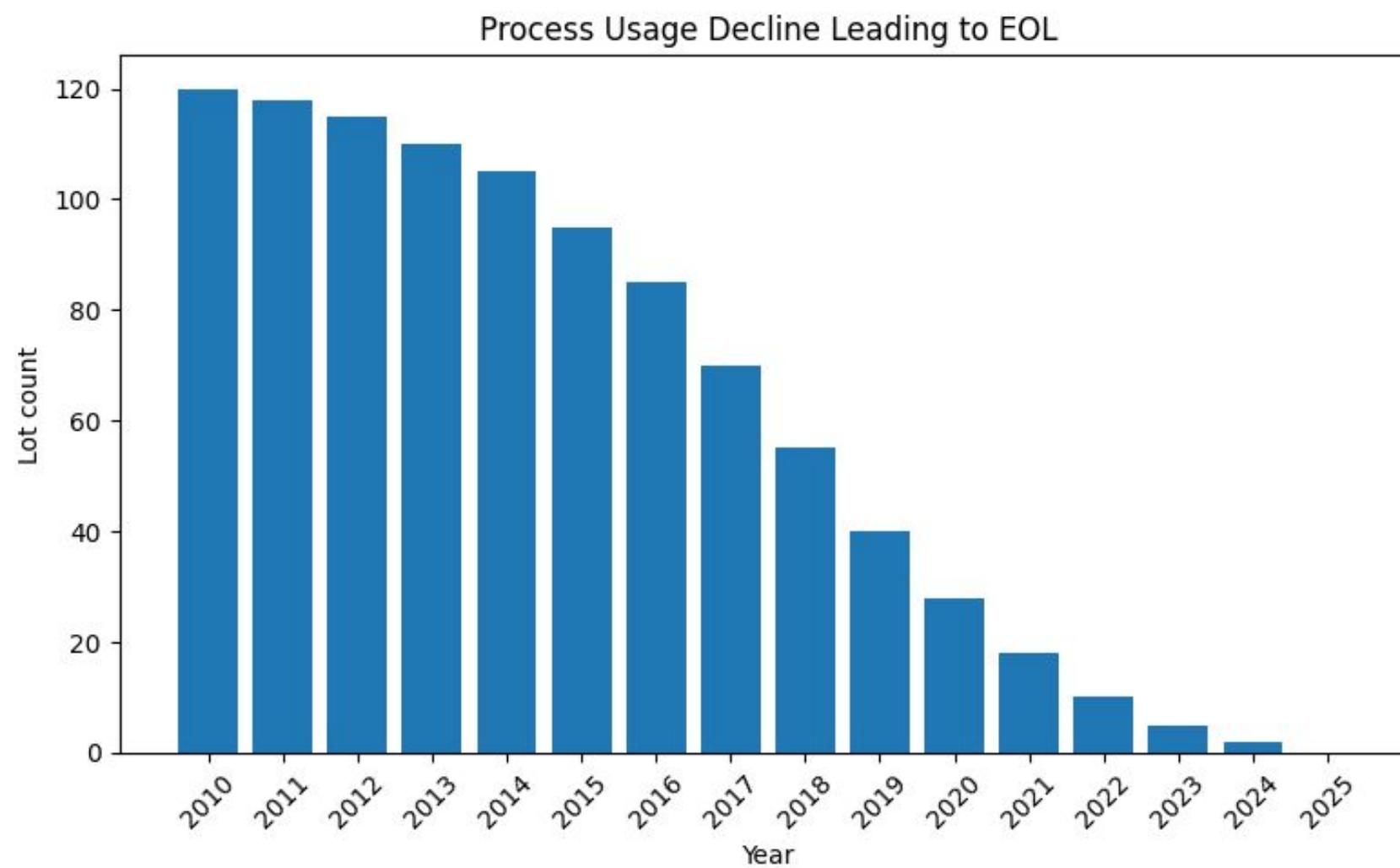


標準化を考える
必要は?

このままでは、オープンソースPDKは“使える人が限られる”世界になる。

そのプロセスの寿命は？魅力は？

プロセスは使われなくなるとEOL。オープンソースで使うプロセスは？



図が示していること

- プロセスは **量産ロットが多い間は維持・改善される**
- 年数とともにロット数が減少
- 一定水準を下回ると
→ **設備維持・人材・PDKメンテナンスが成り立たなくなる**
結果として **EOL(End of Life)を迎える**



魅力あれば、使われる。
どんなプロセス？

まとめ

① 三種の神器があれば、PDKは作れる

デバイスパラメータ・デザインルール・SPICEモデルが揃っていれば、
DRC / LVS を中心に、設計ツールで使えるPDKを構築することは可能。

② PDKは“作って終わり”ではない

PDKは時間とともに変化するため、継続的なメンテナンスが不可欠。オープンソースPDKが
増えるほど、メンテナンスしやすい構成・作り方を考えることが重要 になる。

③ この楽しみを続けるには、プロセスも重要

PDKを長く使い続けるためには、現在も量産され、今後も改善・拡張されていく “魅力的で
成長するプロセス ”であること が必要。

こんな事も考えつつ

オープンソース PDKで誰もが半導体設計を楽しめる世界へ