FUJITSU
shaping tomorrow with you

1, 10, 100 ･･･ 無限大？
- 指数関数的トレンドの光と影 -

2010-09-06

富士通研究所　田村泰孝

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

概要

FUJITSU

- 正帰還の力
  - ネズミ算、Mooreの法則、蓮の葉のクイズの錯覚
- 技術の流れ
  - デバイスどもが夢の跡：トランジスタって何？
  - 10年後が予測できますか？
- Connectivityボトルネック
  - Rent則と通信ボトルネック：高速I/O開発の落とし穴
  - ニューロコンピューティングの夢：爛柯
- 夢見た未来：ウルトラ警備隊の世界
  - 変わりゆくアナログ設計
- Conclusion：来るべき世界
  - 碁盤と棋譜と人間と

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

まずは簡単な自己紹介

FUJITSU

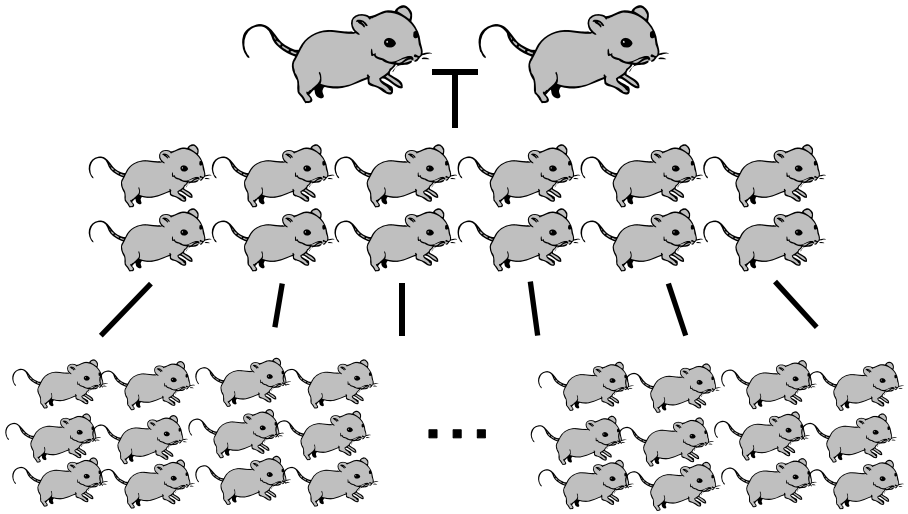
- 大学では電子工学を勉強
  - 卒論は神経回路網（遠い目・・・）
- 大学院では物性・デバイス寄りの勉強と研究
  - Josephson論理回路の研究
- 富士通研究所
  - 1982-1990　Josephsonコンピュータグループ
  - 1990-1995　量子効果デバイスグループ
  - 1995-1997　4G DRAM研究グループ
  - 1997-　CMOS高速I/O

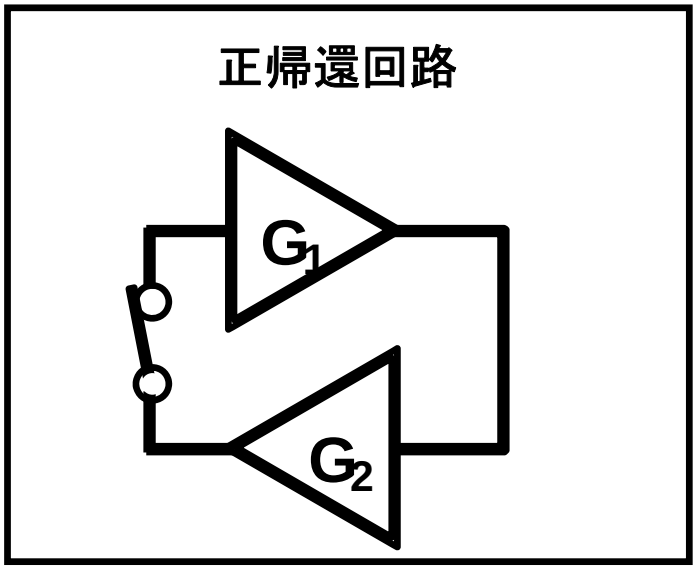
Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

10倍、100倍、1000倍・・・

FUJITSU

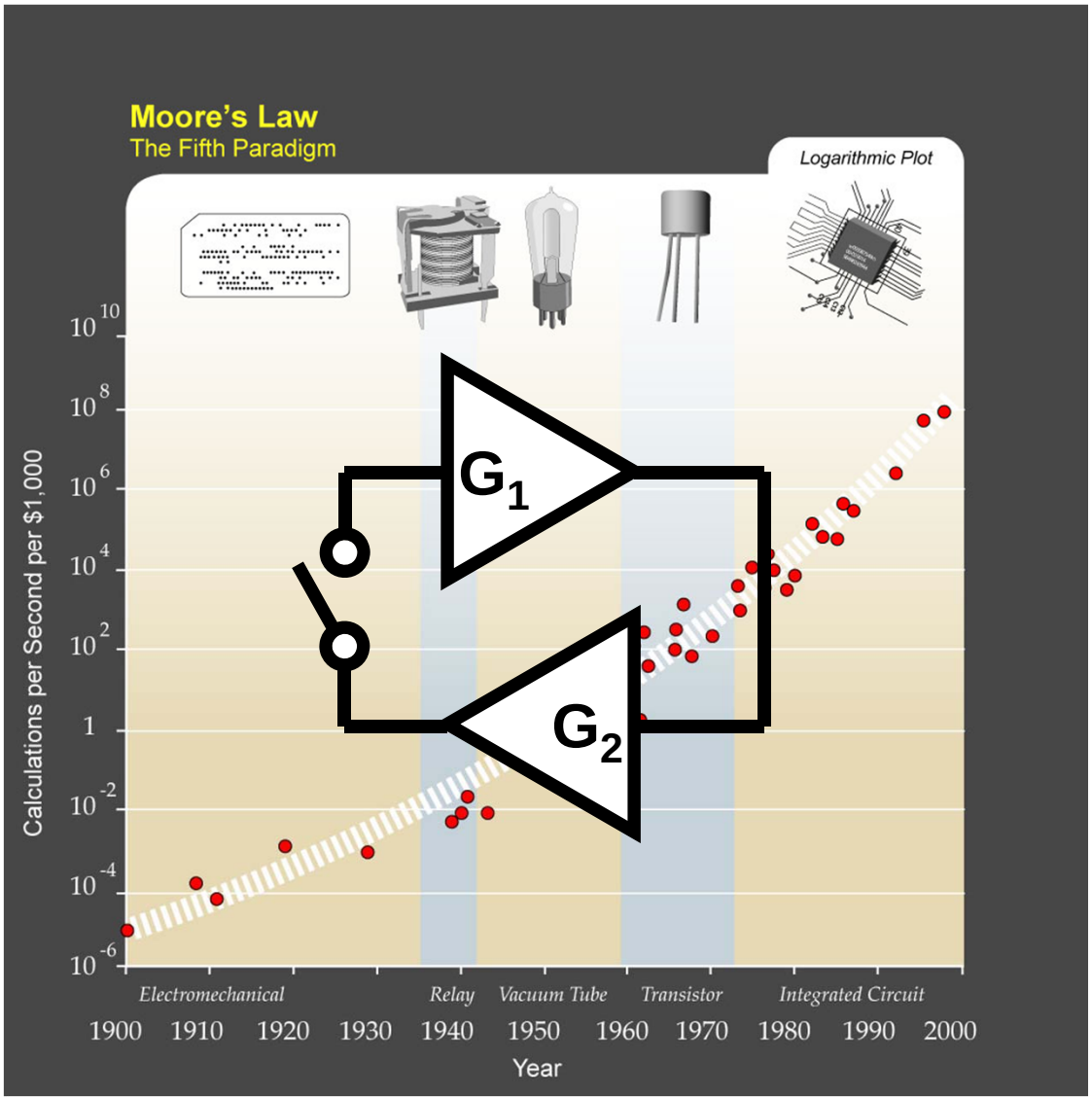
- 「今すぐ」実体のあるものを1000倍にするのは難しい
  - 例：PCの性能、HDDの容量、私の給料
  - 記号（数字）を1000倍にするのは簡単
  - 電気信号を1000倍に増幅は可能（将来の集積回路の中では？）
- ちょっと待ってもらえれば可能
  - ネズミ算（１枚が２枚、２枚が４枚・・・散るは桜の花吹雪）
  - 正帰還ループを使う





Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

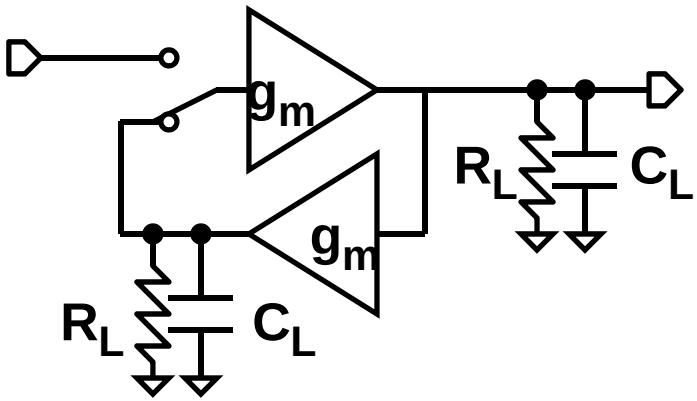
Mooreの法則


Moore's Law
The Fifth Paradigm
Logarithmic Plot
Calculations per Second per $1,000
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
10^{2}
1
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
Electromechanical
Relay
Vacuum Tube
Transistor
Integrated Circuit
1900 1910 1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000
Year
G_1
G_2

Regenerationの力

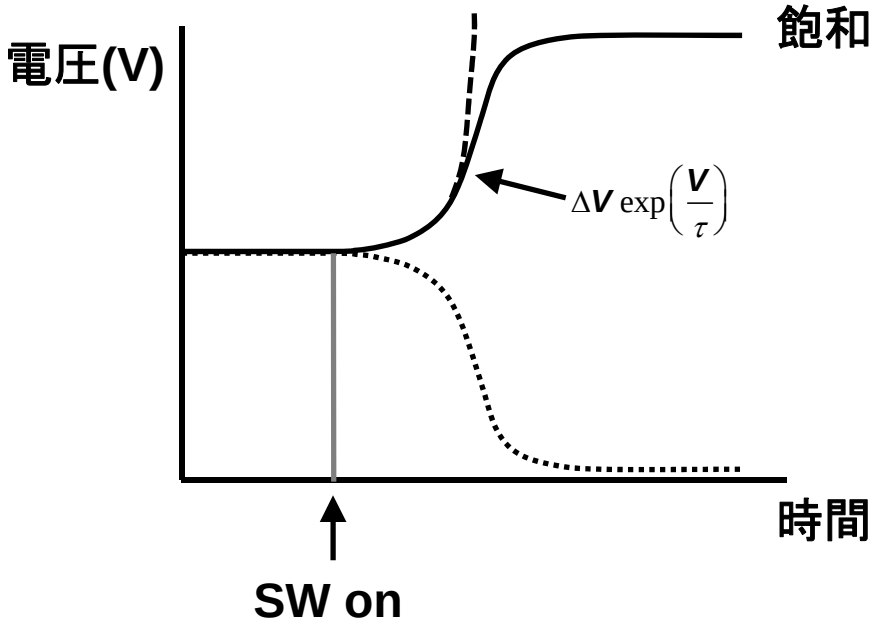
FUJITSU

再生型latch



$$\Delta V = \Delta V_0 \exp\left[(A-1)t/\tau\right]$$

$$\tau_{latch} = \frac{\tau}{A-1} \cong \frac{\tau}{A} = \frac{C_L R_L}{g_m R_L} = C_L / g_m$$

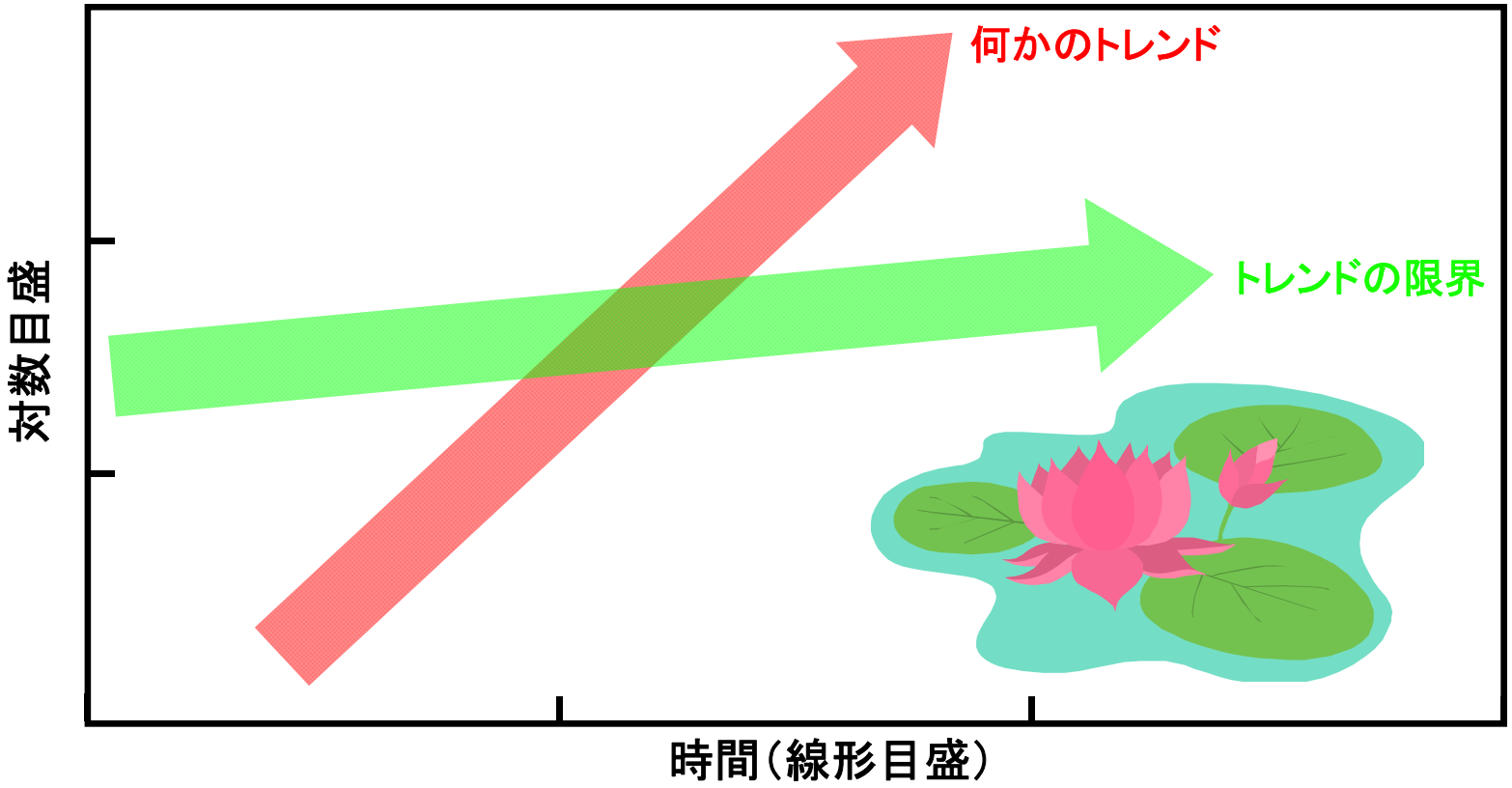


Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

増える蓮の葉：指数関数トレンドの落とし穴

FUJITSU

- 大きな池に蓮の葉
  - １日に1枚が2枚に増える、１年で池一面が埋まるとする
  - 池が半分埋まるのはいつ？
- 指数関数的トレンド：限界に達する直前まで気が付かない

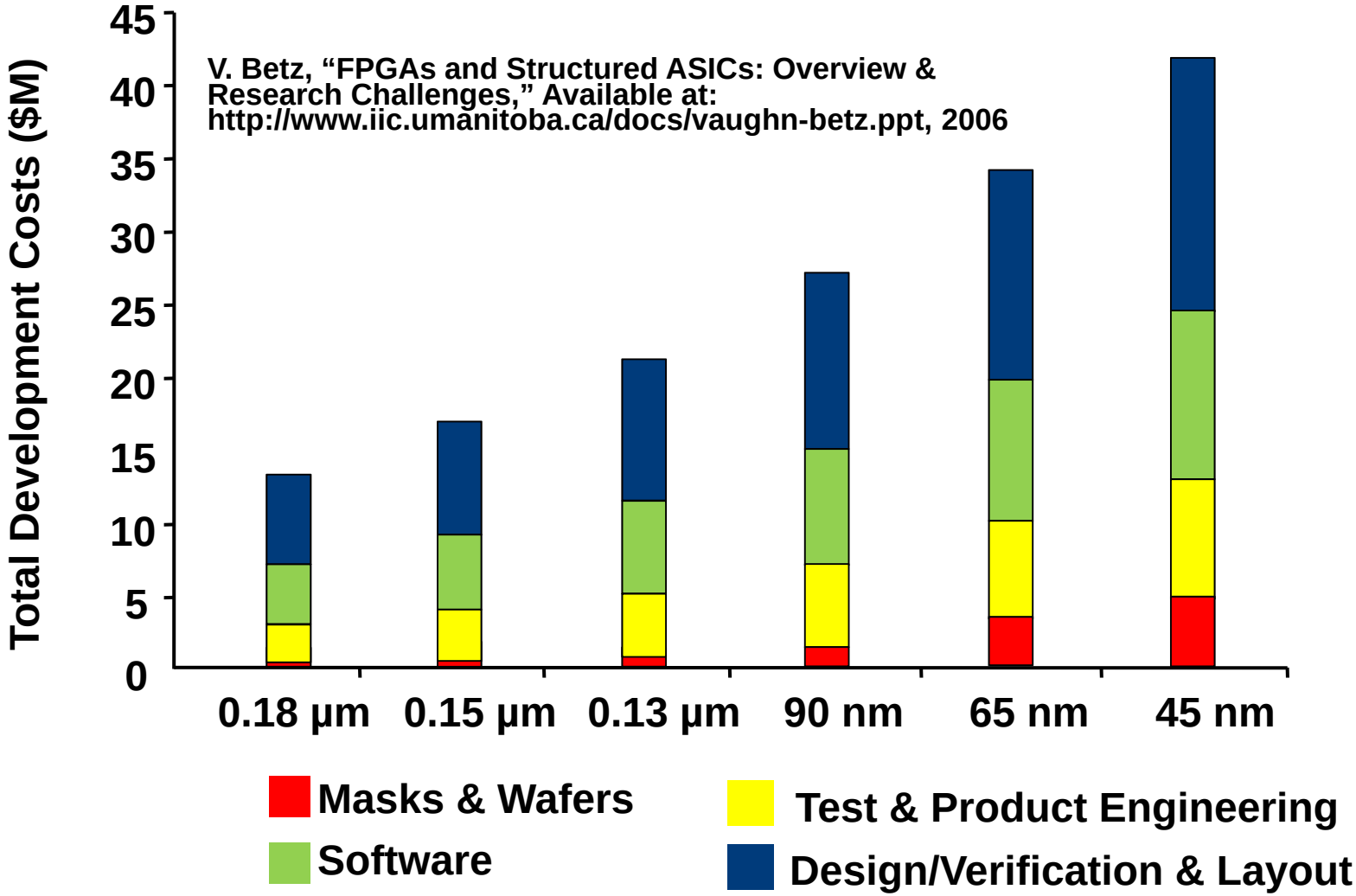


Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

Mooreの第二法則･･･あるいは半導体技術者の悪夢

FUJITSU

■ 集積回路の製造コストが指数関数的に増加



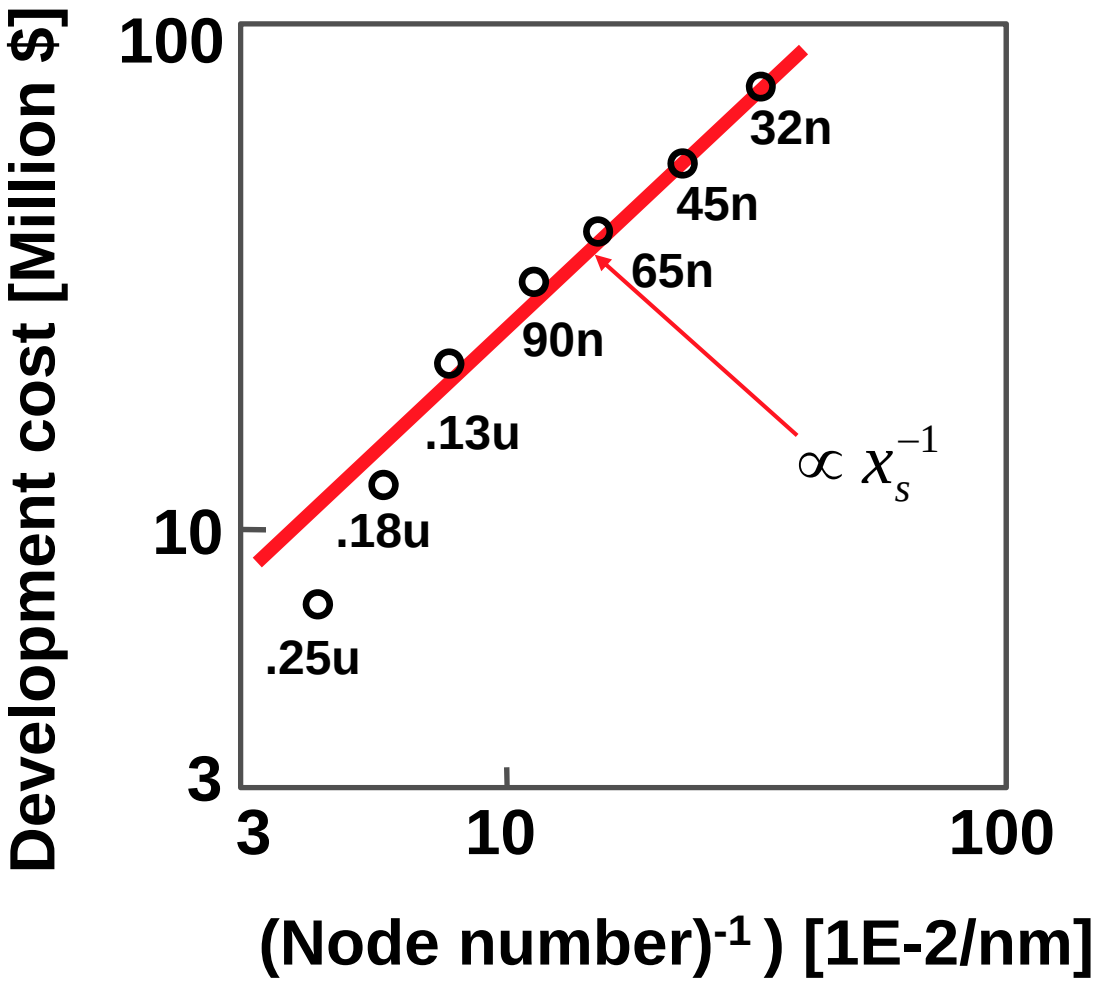
Note: Conservative estimate; does not include re-spins.

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

Mooreの第二法則

FUJITSU

■ 設計コスト：スケーリングファクタ x_sの逆数に比例



Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

概要

FUJITSU

- 正帰還の力
  - ネズミ算、Mooreの法則、蓮の葉の錯覚
- 技術の流れ
  - デバイスどもが夢の跡：トランジスタって何？
  - 10年後が予測できますか？
- Connectivityボトルネック
  - Rent則と通信ボトルネック：高速I/O開発の落とし穴
  - ニューロコンピューティングの夢：爛柯
- 夢見た未来：ウルトラ警備隊の世界
  - 変わりゆくアナログ設計
- Conclusion：来るべき世界
  - 碁盤と棋譜と人間と

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

技術の流れを振り返る

FUJITSU

- 1920年代：ラジオの黎明期（真空管）
- 1930年代：ラジオ普及期と真空管技術の進展
- 1940年代：ラジオと真空管の全盛時代

- 1950年代：トランジスタ登場、TV放送開始（CQ出版創立）
- 1960年代：トランジスタ台頭と真空管衰退
  - 雑誌「トランジスタ技術」創刊
- 1970年代：単体トランジスタ全盛期から集積回路へ

- 1980年代：大規模集積回路の台頭、マイクロプロセッサ革命
- 1990年代：集積回路から集積システムへ
- 2000年代：集積システム全盛期？次の主役の登場？

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

技術の寿命30年説？

FUJITSU

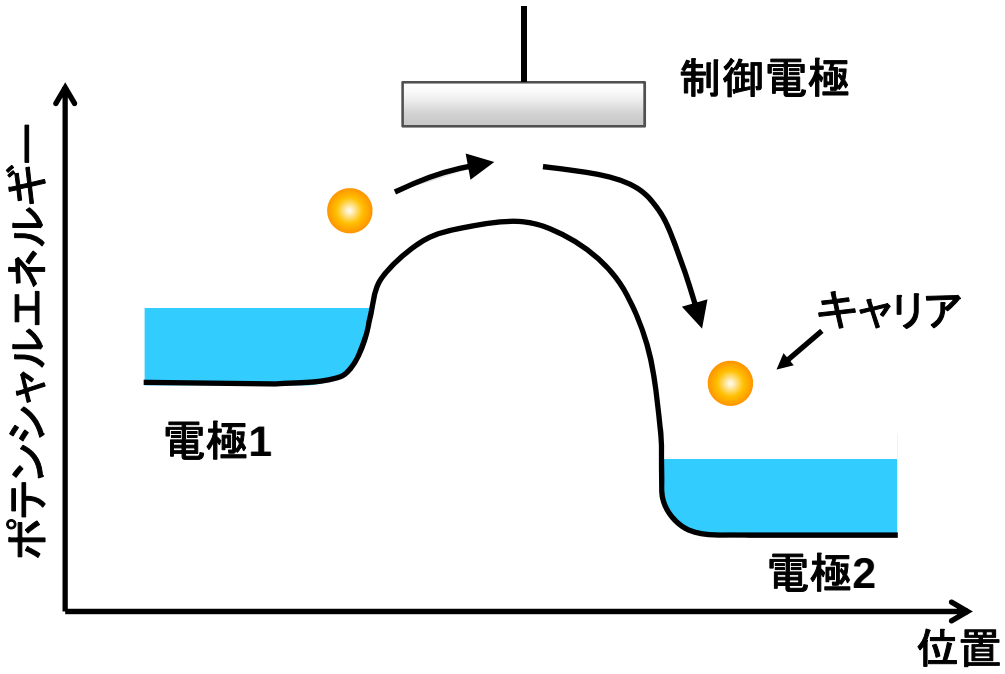
- 技術の流れを30年毎に区切ってみる:
  - 1920-1949:真空管時代
  - 1950-1979:単体トランジスタ時代
  - 1980-2009:集積回路時代
- 次の30年の主役は誰？
  - 集積回路ではない・・・多分
    - 集積回路がなくなるわけではない
  - 既に登場している可能性は高い

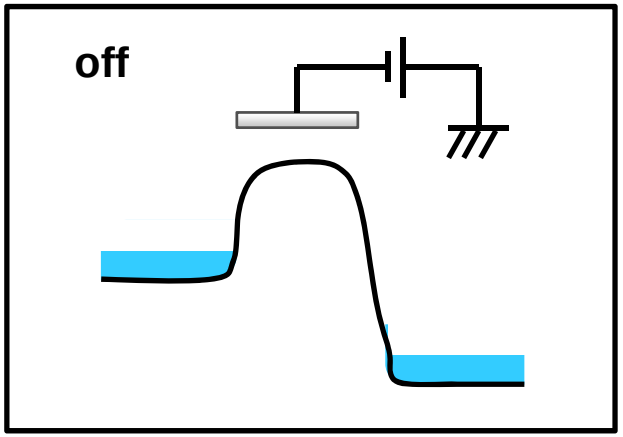
Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

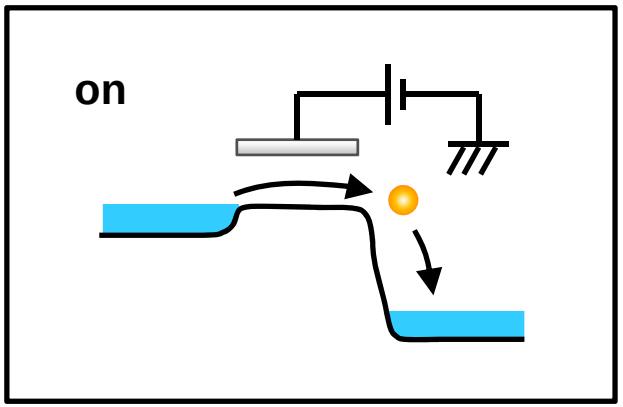
トランジスタって何？

FUJITSU

■ 身軽な電子、チャネルを移動、制御電極による電位制御





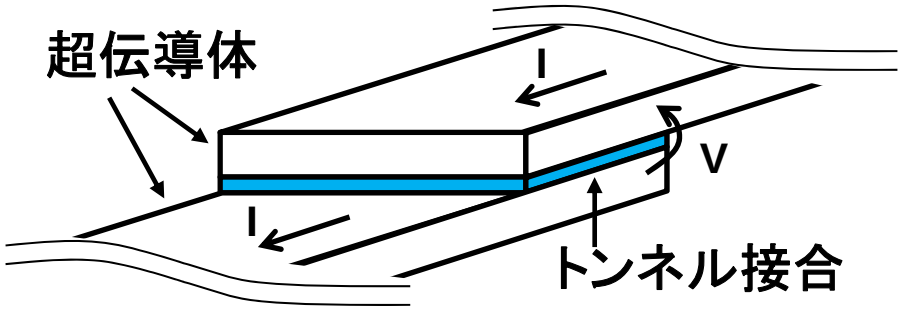


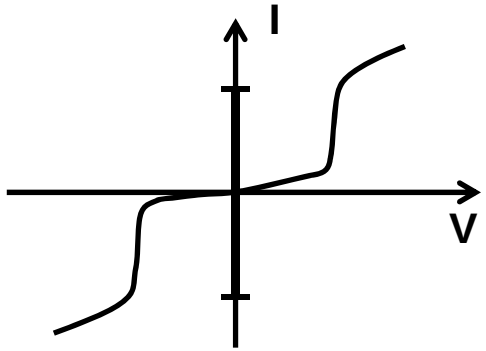
Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

デバイスどもが夢の後

FUJITSU

- 真空管からトランジスタへの移行は大成功
  - 80年代：新原理デバイスで一旗揚げようという動き
  - 実際は80年代以降の性能向上の源は集積回路（ = 数の暴力）
- Josephson素子、機能デバイス・・・





I-V特性

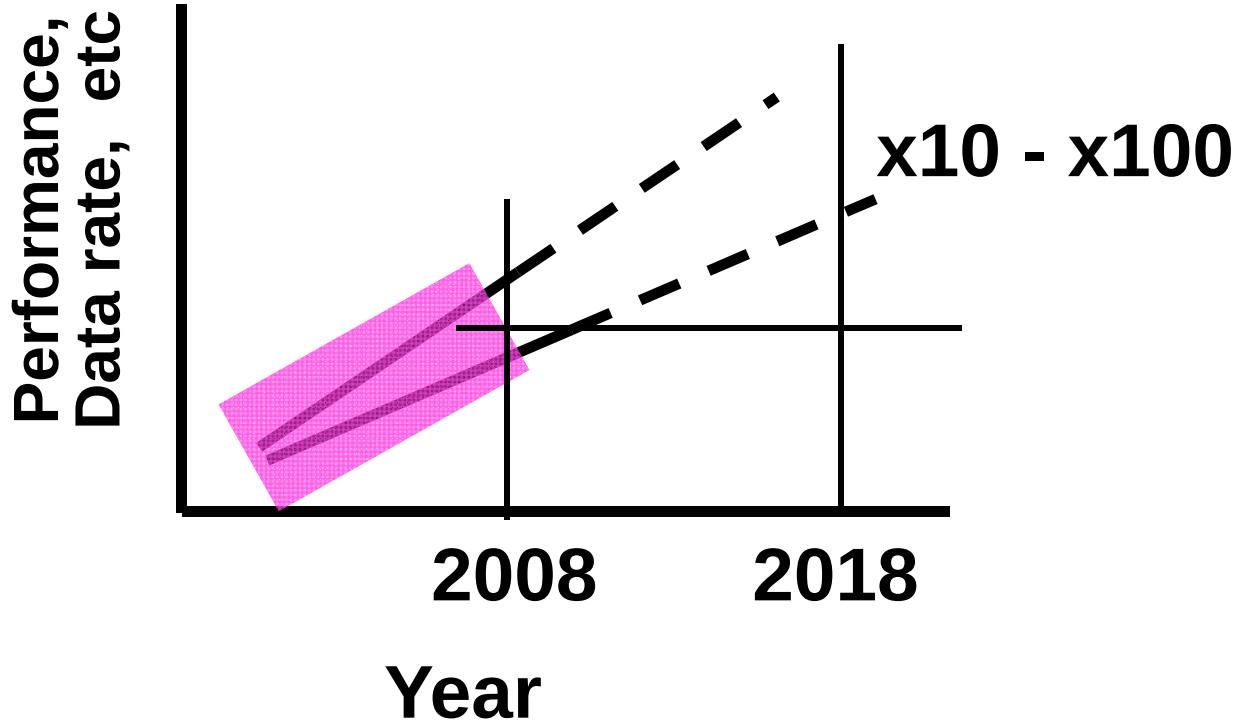
- これらのデバイス研究は無駄だったのか？
  - 無駄がない研究なんか無い
  - 何らかの形で先につながれば無駄ではない
    - 本当の意味で研究を「凍結」する技術が欲しい・・・

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

10年先の予想ができますか？

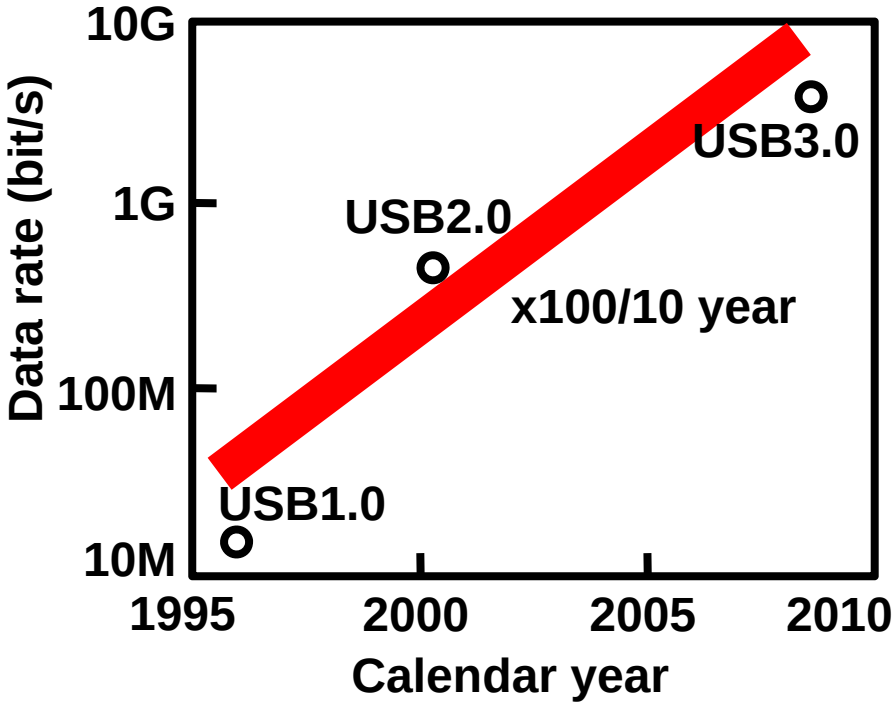
FUJITSU

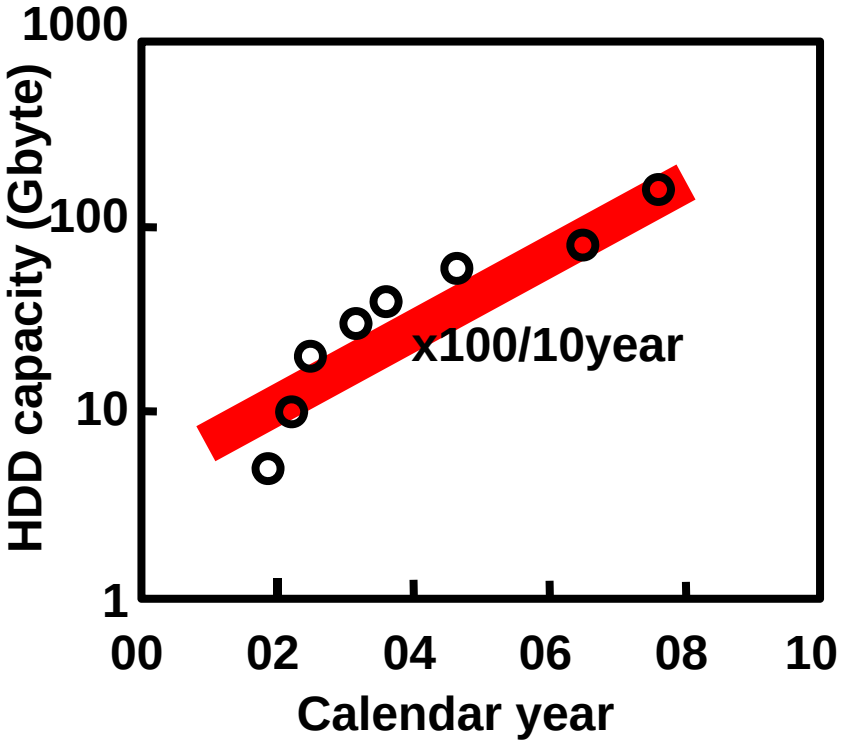
- 将来の~~予測~~ 外挿
  - 10年を外挿するのは不正確すぎる
  - 3年の外挿では面白くない
  - 予想（外挿）は今、何をするかを決めるのに有効



Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

x10 ~ x100/10年のトレンドの例





Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

概要

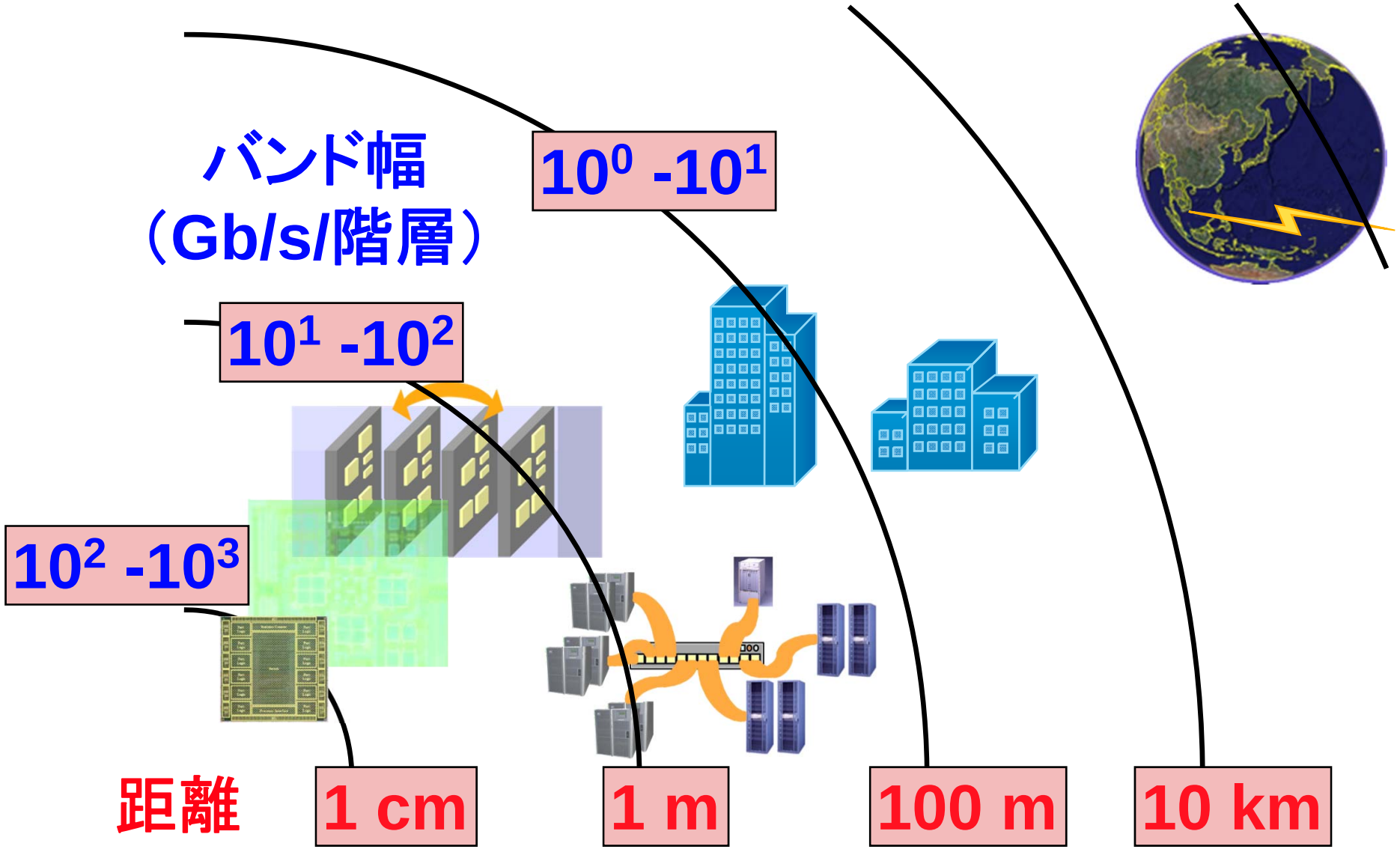
FUJITSU

- 正帰還の力
  - ネズミ算、Mooreの法則、蓮の葉のクイズの錯覚
- 技術の流れ
  - デバイスどもが夢の跡：トランジスタって何？
  - 10年後が予測できますか？
- **Connectivityボトルネック**
  - **Rent則と通信ボトルネック：高速I/O開発の落とし穴**
  - **ニューロコンピューティングの夢：爛柯**
- 夢見た未来：ウルトラ警備隊の世界
  - 変わりゆくアナログ設計
- Conclusion：来るべき世界
  - 碁盤と棋譜と人間と

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

インターコネクトの階層構造

FUJITSU

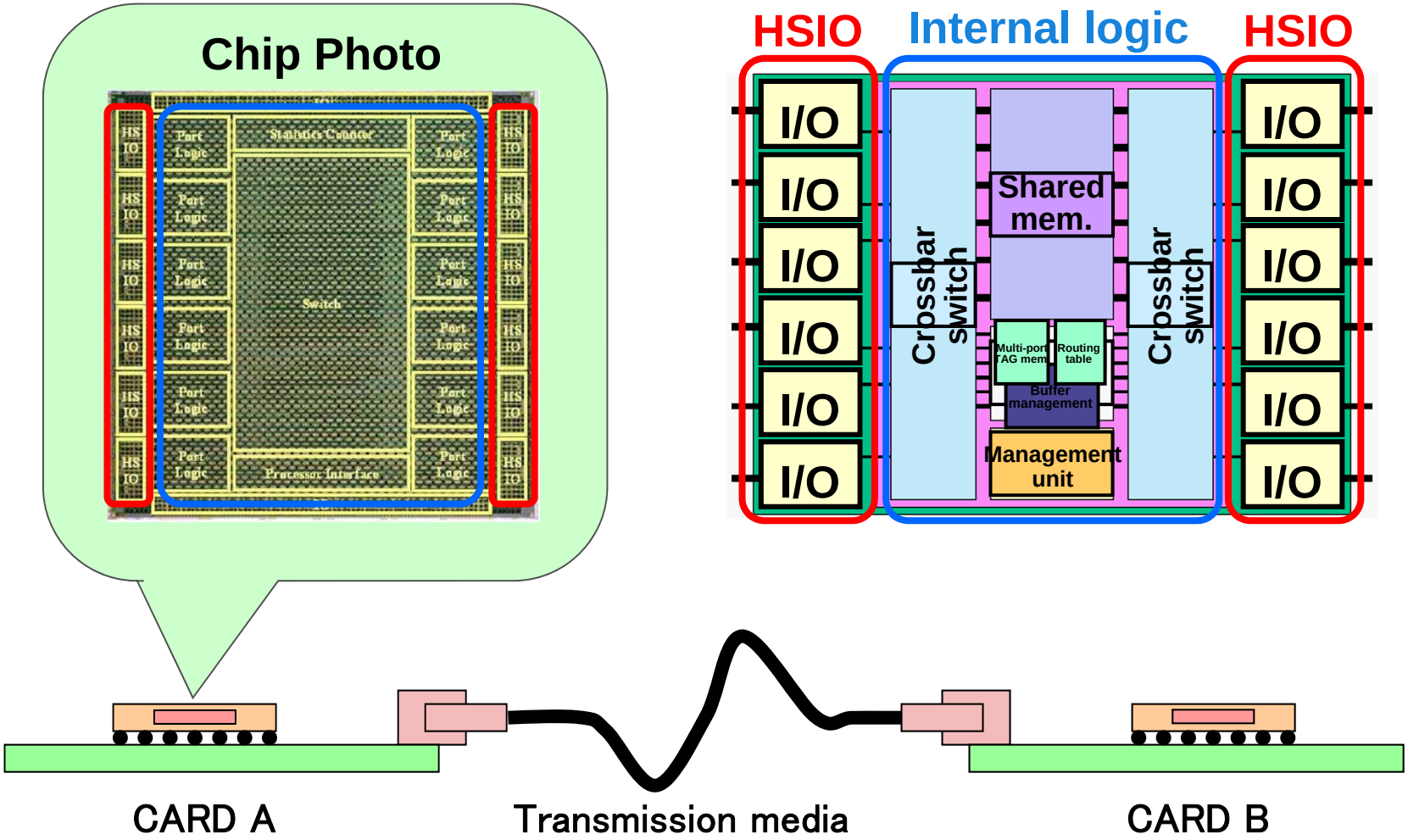


Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

高速I/O (High-Speed I/O: HSIO)

FUJITSU

■内部クロック周波数より高いデータレートを使用

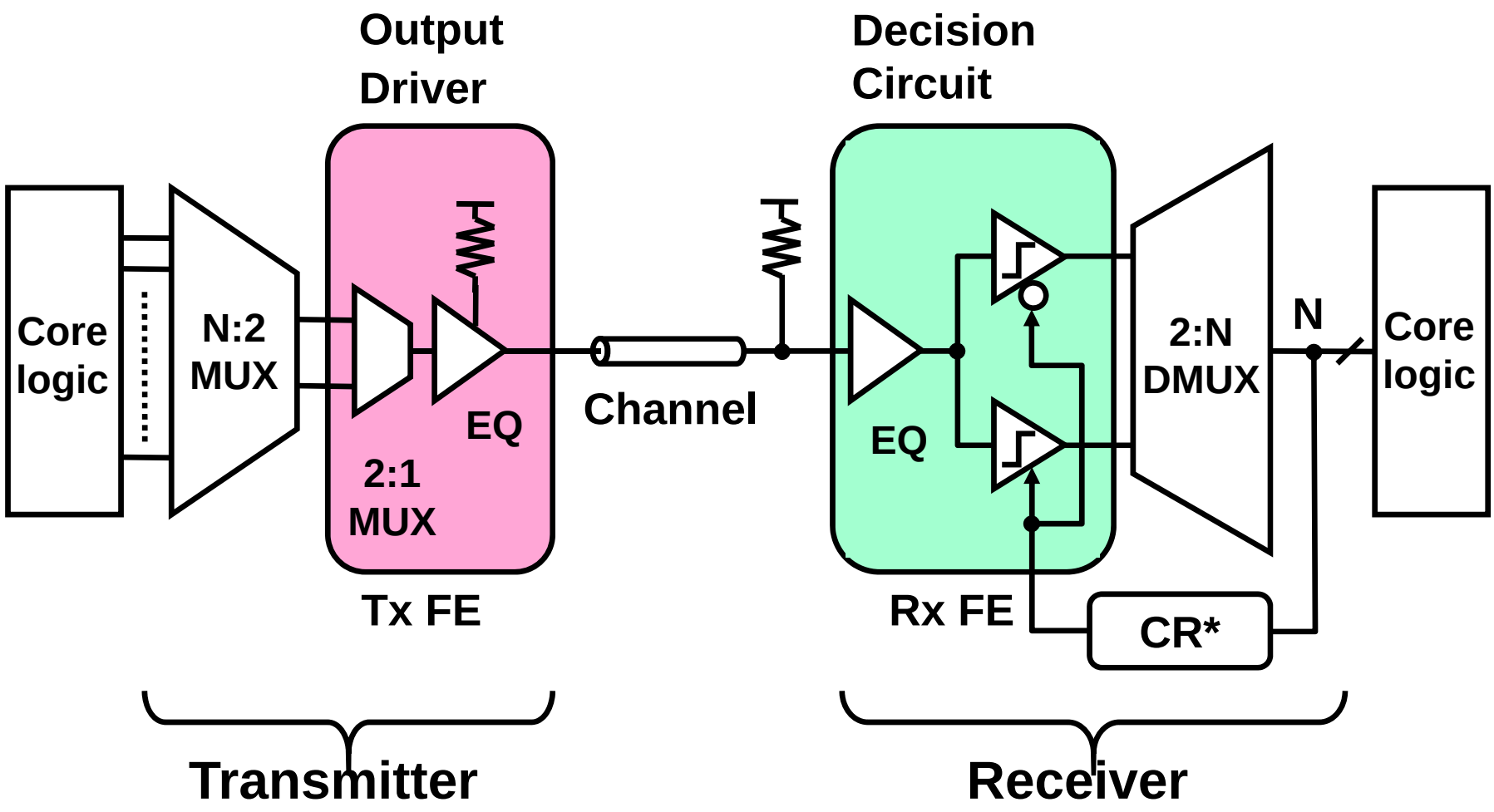


Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

高速I/Oトランシーバ

FUJITSU

■ フロントエンド, MUX, DEMUX, コントローラで構成

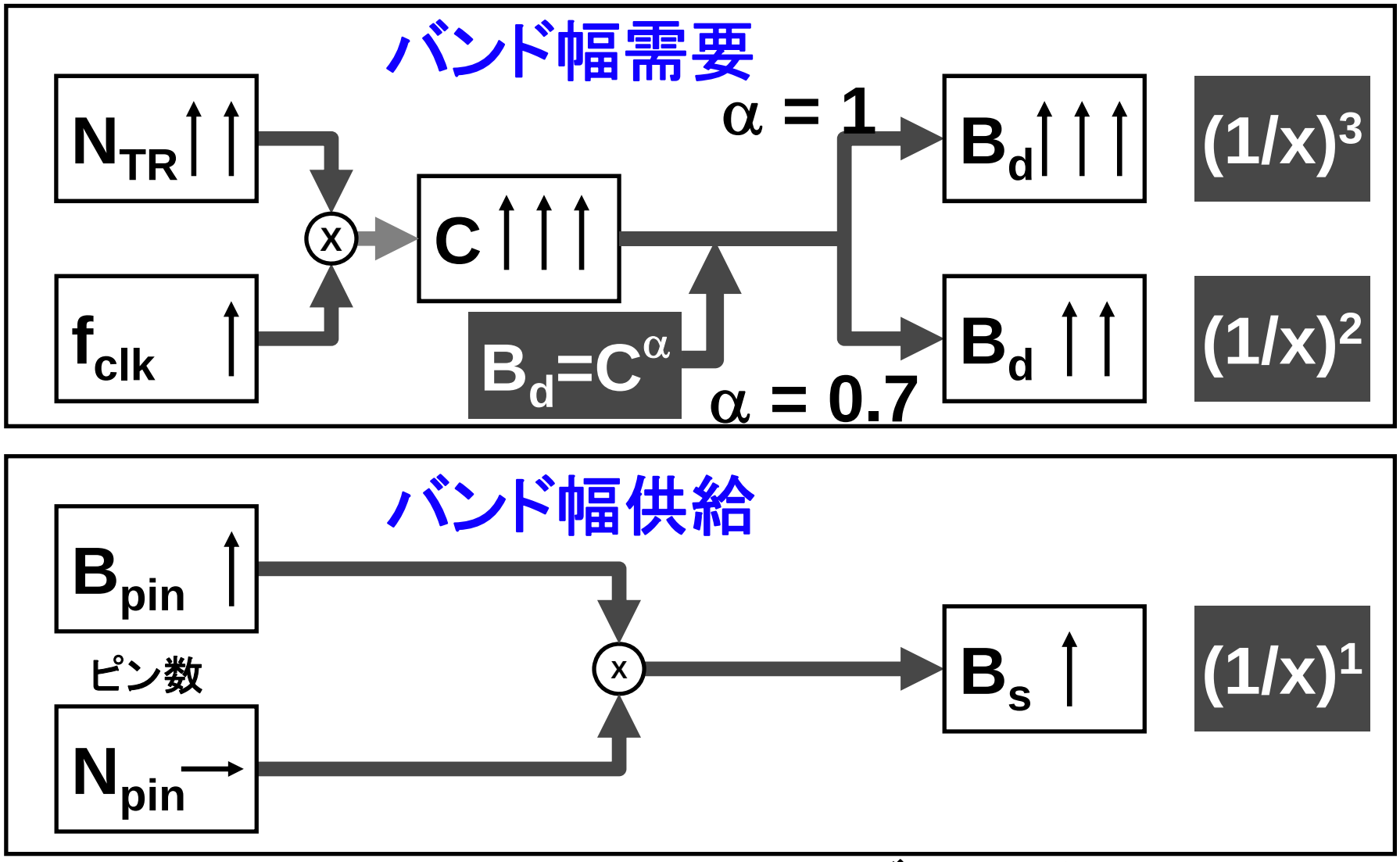


* CR: clock recovery

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

オフチップバンド幅のトレンド

FUJITSU



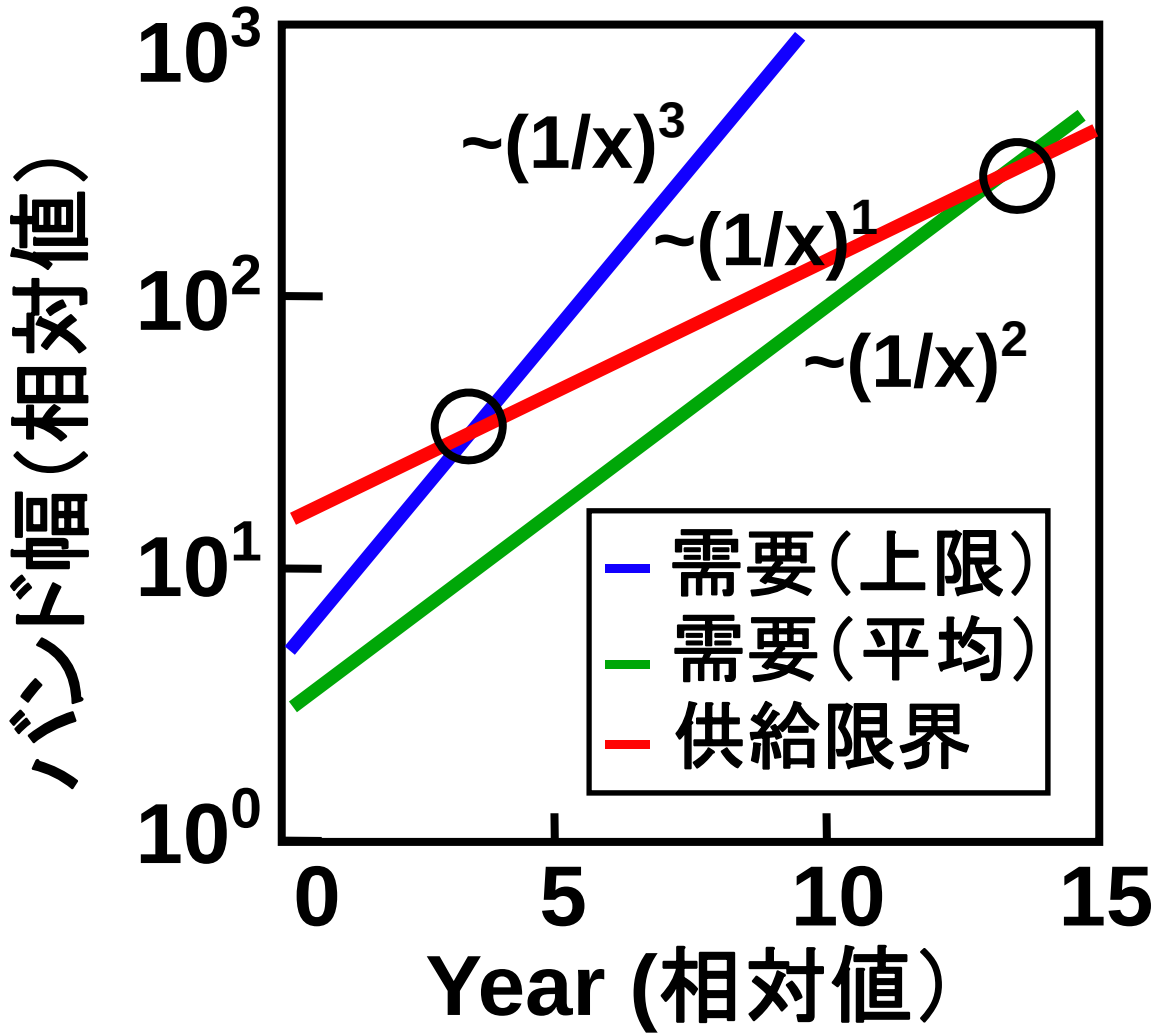
*xはスケーリングファクタ（=0.7/世代）

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

オフチップバンド幅の需給関係

FUJITSU

■ いずれは回路速度の限界に到達



Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

縦軸と横軸の話

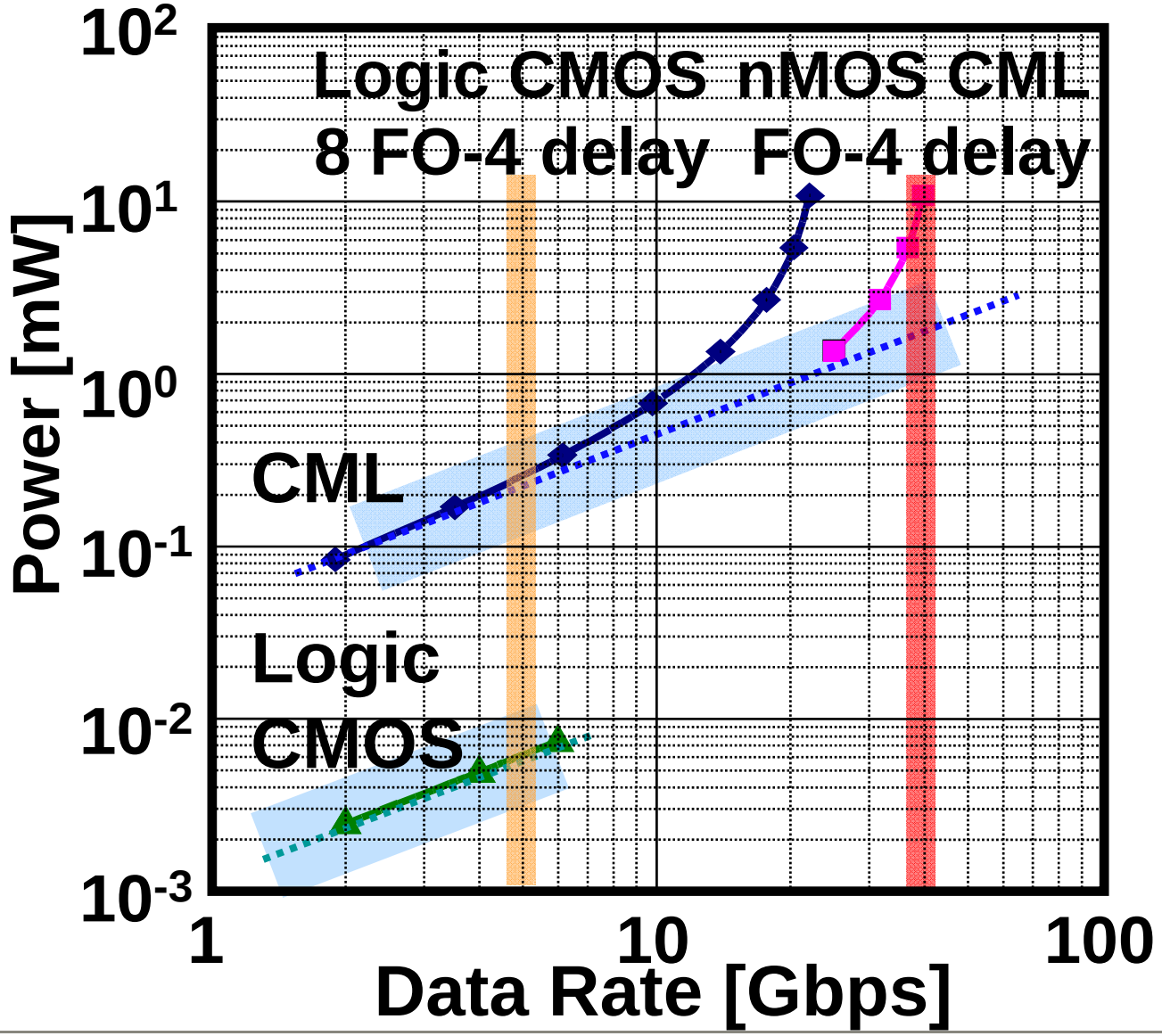
FUJITSU

- 指数関数的トレンドに基づく将来予測
  - 縦軸、横軸のスケールが相対値なのは簡単
  - でも役に立たない
- 縦軸、横軸のスケールを絶対値とするには？
  - 過去トレンドを使えば簡単
  - 限界の予測には業界の分析、educated guessが必要

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

CMOS回路の速度限界

FUJITSU

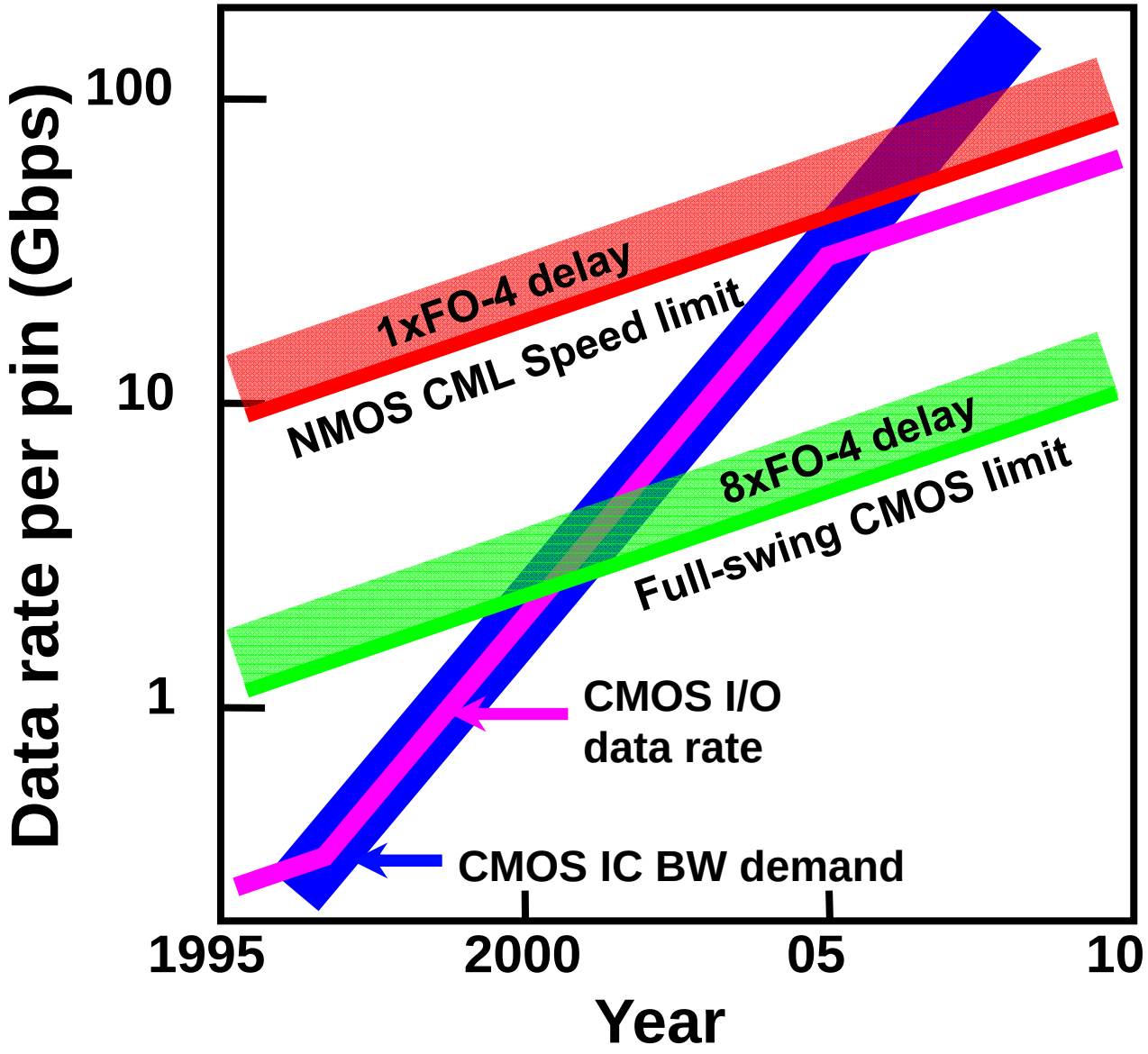


- CML
- CML w/ peaking
- CMOS inv.

$B_{pin} \sim (1/x)^1$

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

トレンドグラフの例（2010まで）

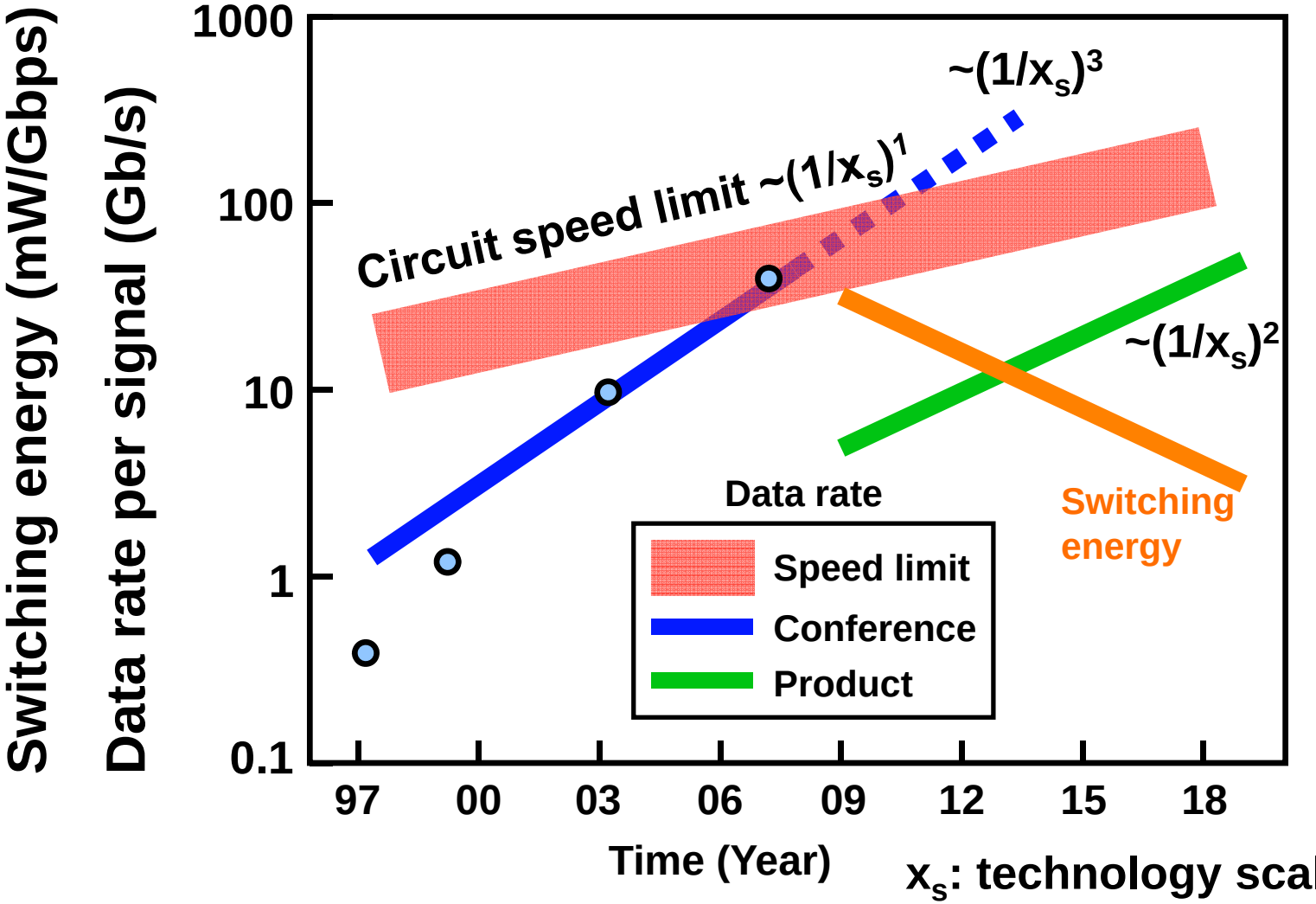


Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

2018年まで外挿してみた

FUJITSU

- **Bandwidth growth: 2x per generation**



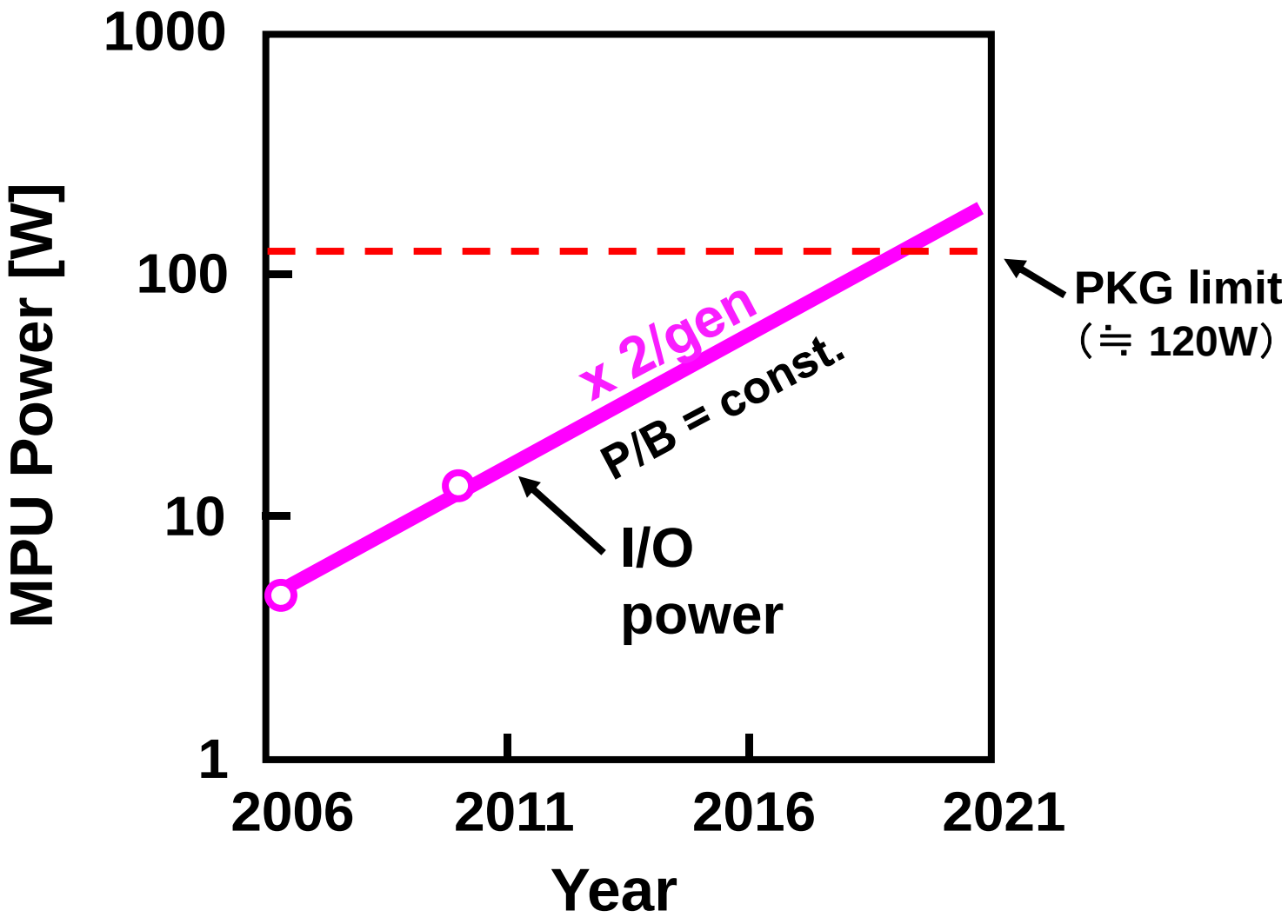
x_s: technology scaling factor

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

I/O電力限界

FUJITSU

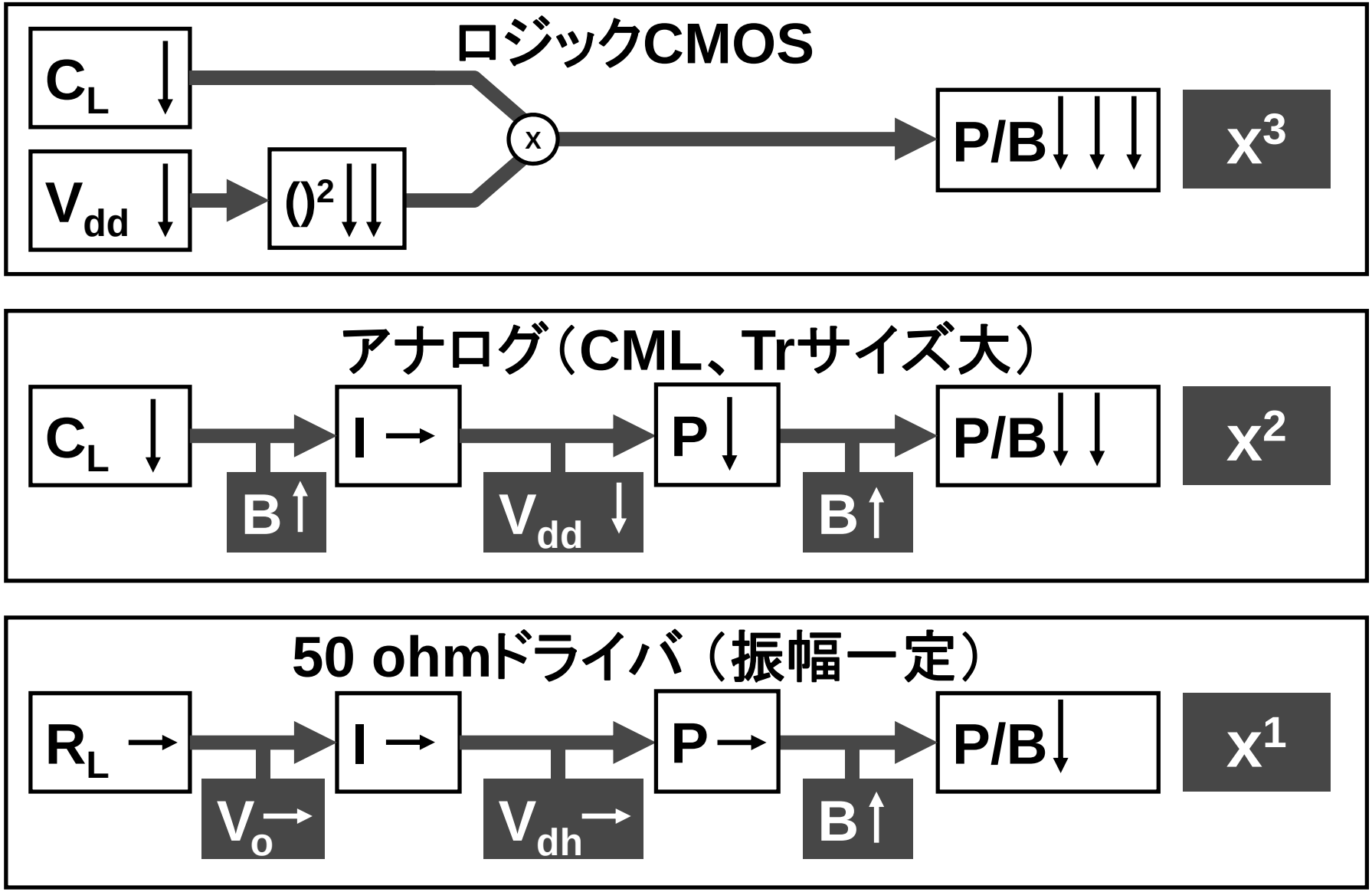
- Power per BW (P/B) should be halved (= x_s^2) per technology node



Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

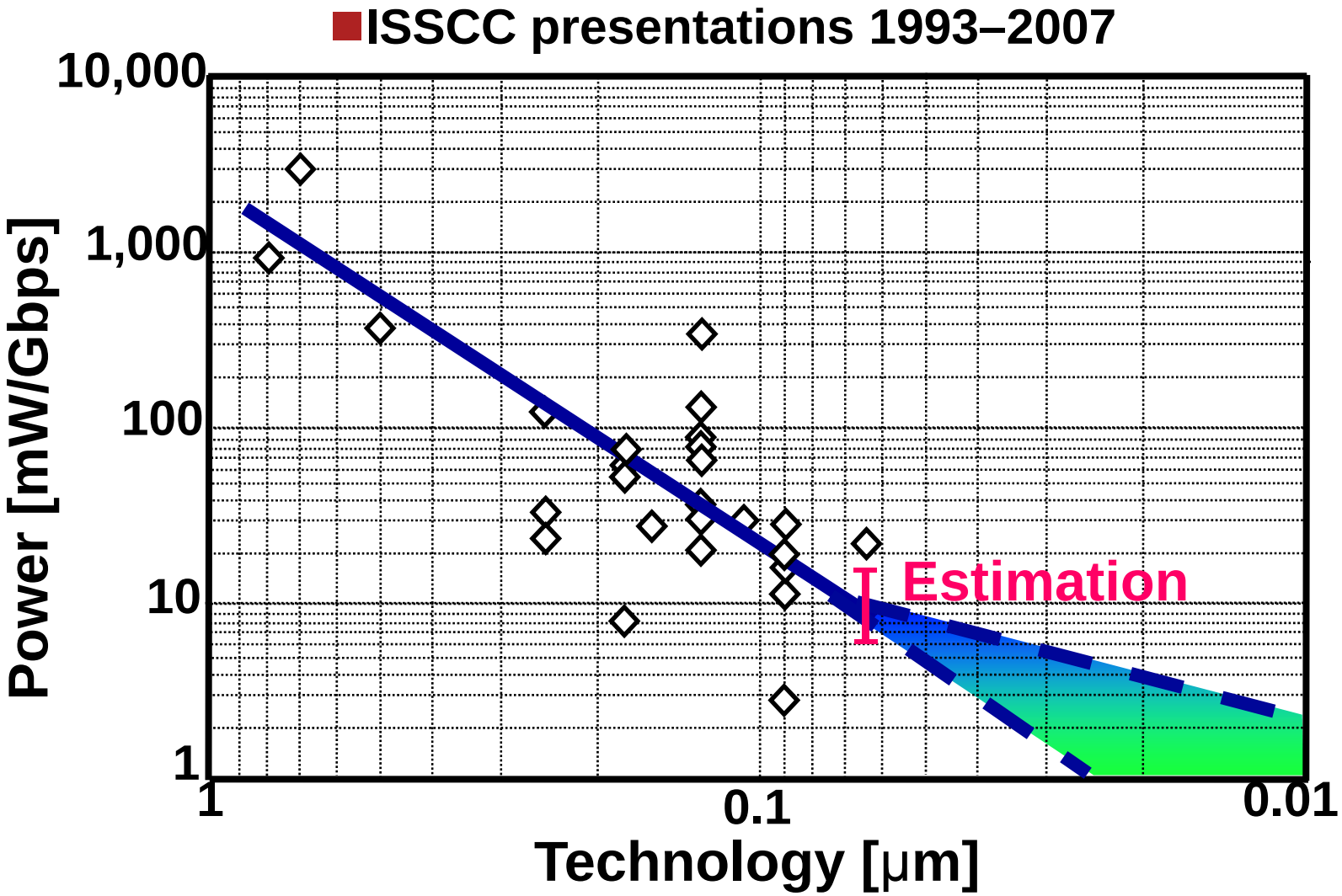
CMOS I/O電力効率（P/B）

FUJITSU



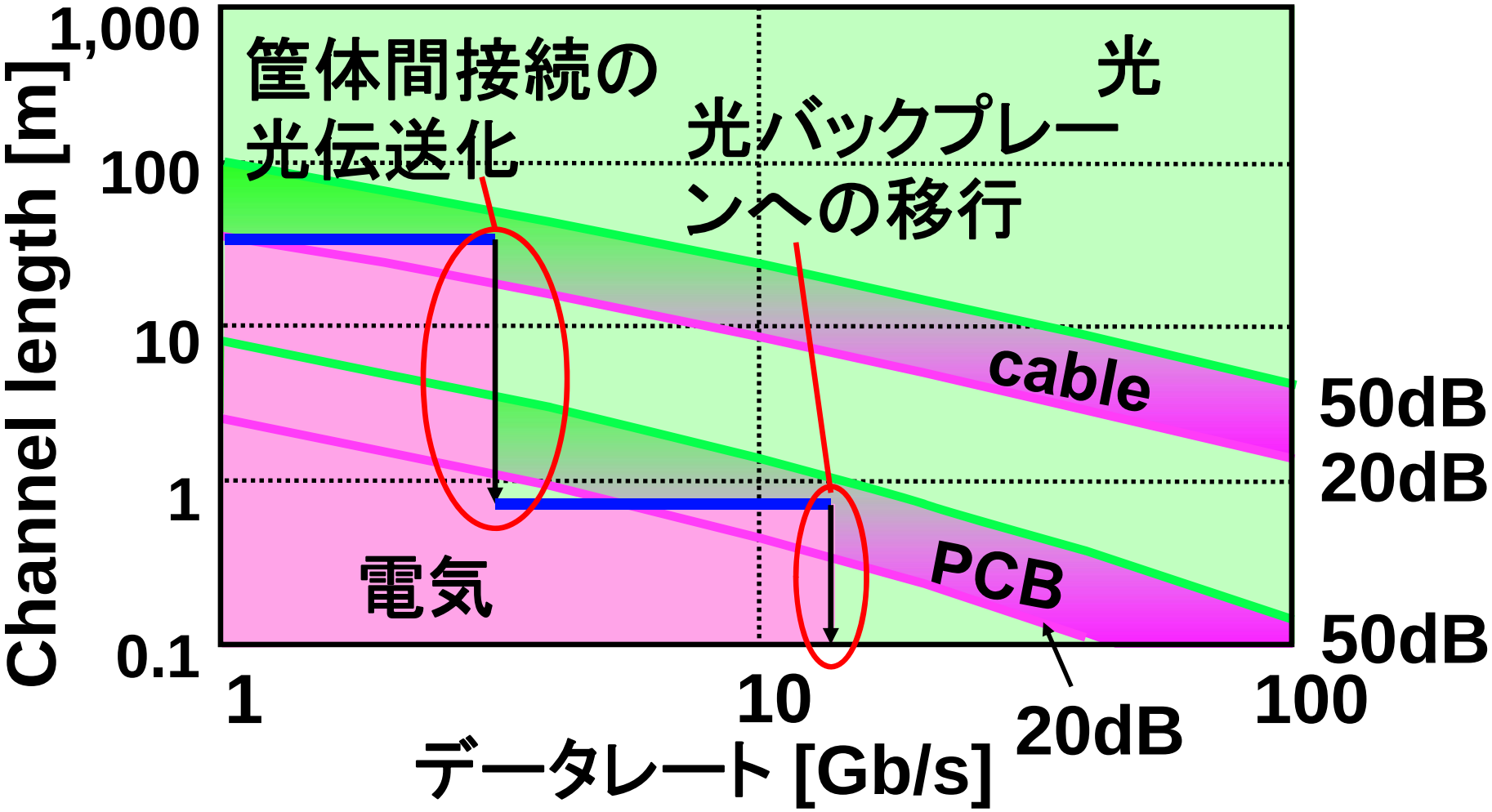
Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

CMOS I/O電力-帯域比（P/B）トレンド



Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

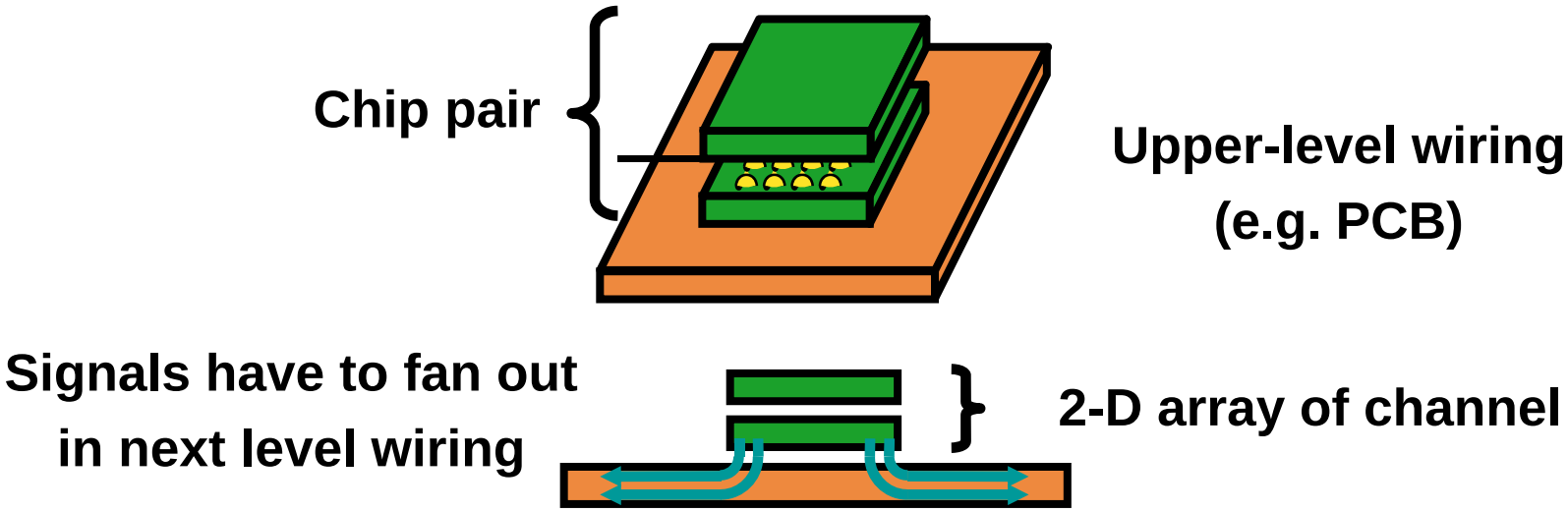
伝送路損失による限界



Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

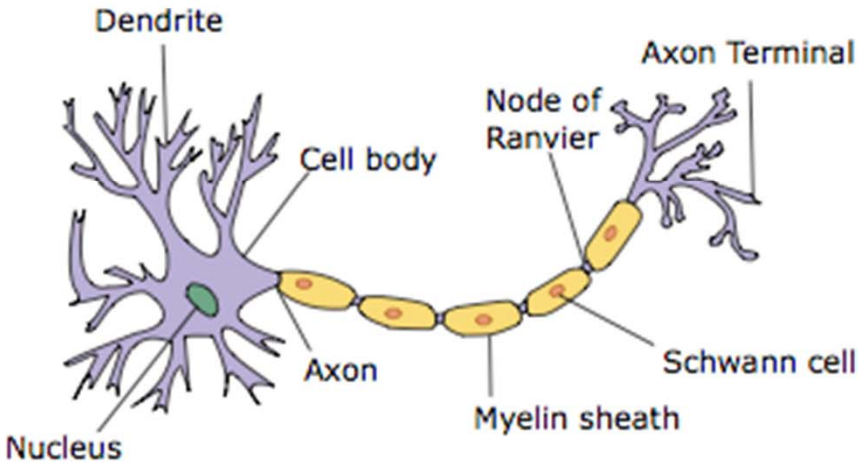
光接続は万能薬か？

- 伝送路損失の問題は回避できる
  - CMOS回路の速度制限、ピン数のボトルネックは存在
  - ボトルネック解消には光多重化をチップ内で行う必要がある
- TSV（Through-silicon VIA）による超多ピン接続
  - チップ対の間のボトルネックを解消（CPU-DRAM間接続）
  - 上位レベルへの接続には依然としてボトルネックあり

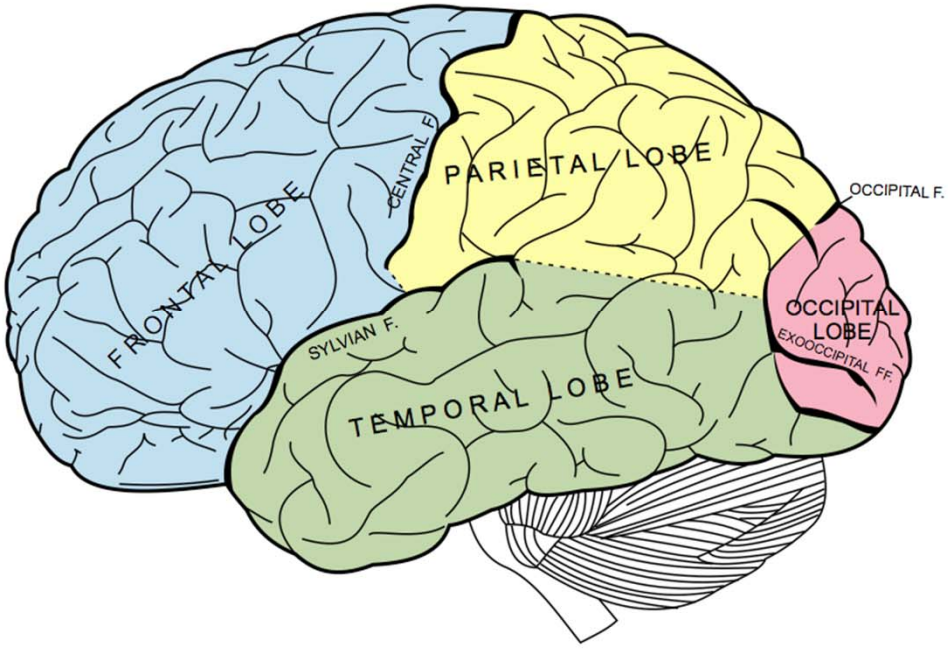


Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

脳とニューロン



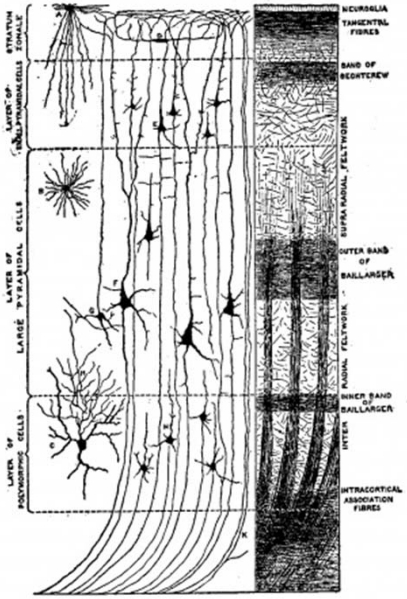
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neuron.svg



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gray728.svg

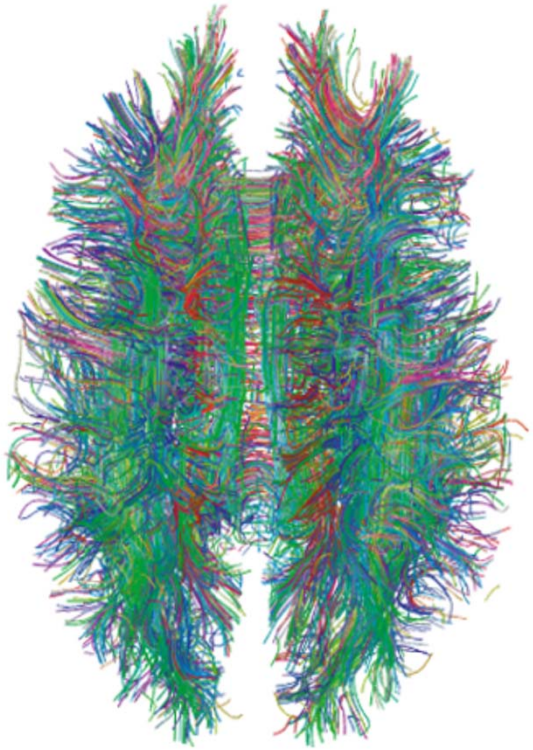
Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

大ざっぱな配線＋学習



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Minute_structure_of_the_cerebral_cortex.jpg

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_cerebral_cortex.png

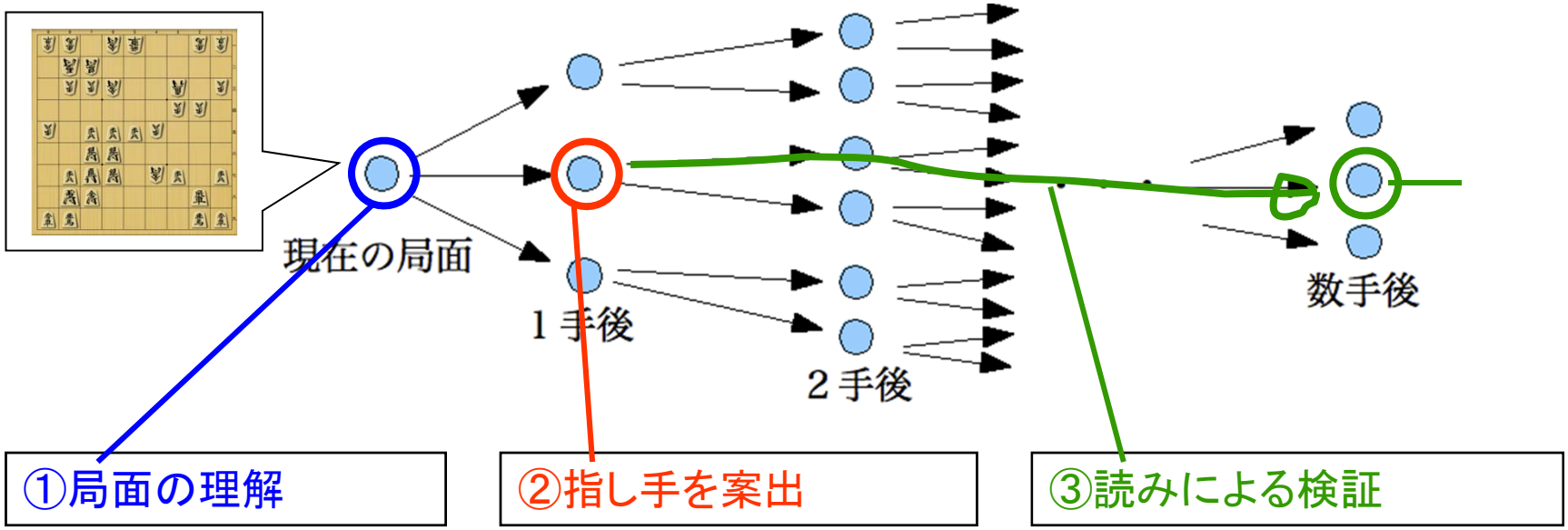


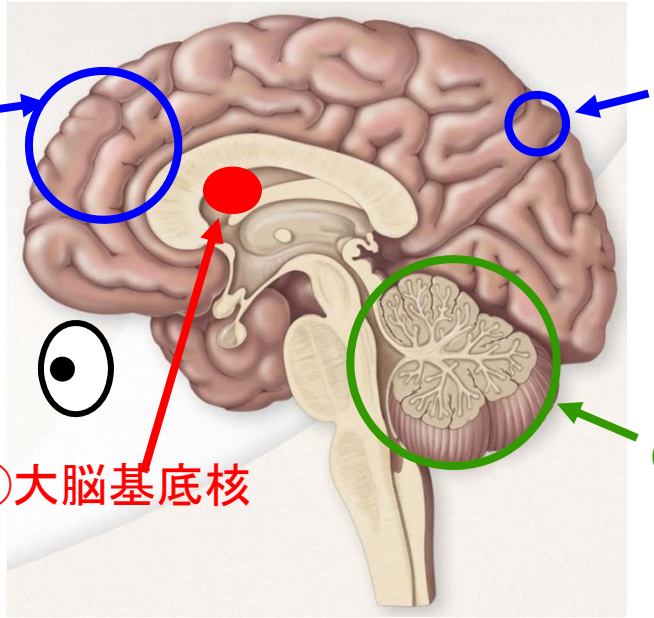
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:White_Matter_Connections_Obtained_with_MRI_Tractography.png

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

朽ちた斧の柄:指数関数的爆発への対処

FUJITSU





情報処理としの意味

- トップダウン情報(①a→b)が処理を効率化
- 直観の本質は古い脳が関与(動物と共通)

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

概要

FUJITSU

- 正帰還の力
  - ネズミ算、Mooreの法則、蓮の葉のクイズの錯覚
- 技術の流れ
  - デバイスどもが夢の跡：トランジスタって何？
- Connectivityボトルネック
  - Rent則と通信ボトルネック：高速I/O開発の落とし穴
  - ニューロコンピューティングの夢：爛柯
- 夢見た未来：ウルトラ警備隊の世界
  - 変わりゆくアナログ設計
- Conclusion：来るべき世界
  - 碁盤と棋譜と人間と

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED
Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

夢に見た未来:ウルトラ警備隊の世界

FUJITSU

1960年代の「夢」

[0]

2010年の「現実」

3D TV

[1]

Hi-Vision Movie

[2]

携帯電話

[3]

Navi

[4]

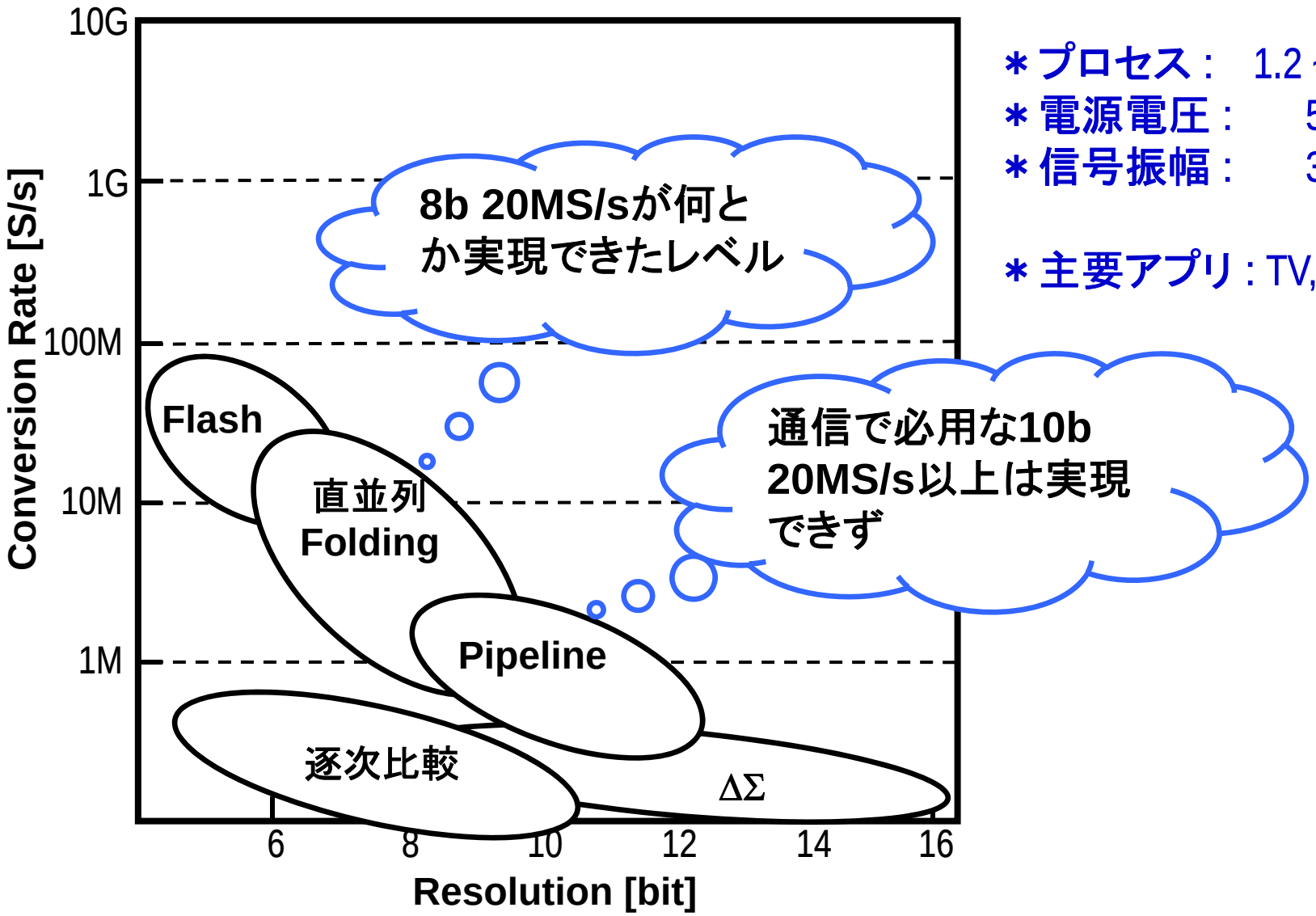
超音波診断装置

[5]

[0] http://wiki.livedoor.jp/ebatan/ (怪獣 Wiki特撮大百科事典)
[1] http://www.digitaltrends.com/home-theater/japanese-shrug-off-3d-tv-hype/
[2] http://jp.sanyo.com/xacti/products/lineup/index.html
[3] http://www.nttdocomo.co.jp/product/foma/prime/f04b/index.html
[4] http://www.gpsgazette.com/category/automotive-gps/
[5] http://fujifilm.jp/business/healthcare/ultrasonography/fazone_cb/feature.html

様々なADC (ADCの進化:1990年代初頭)

FUJITSU

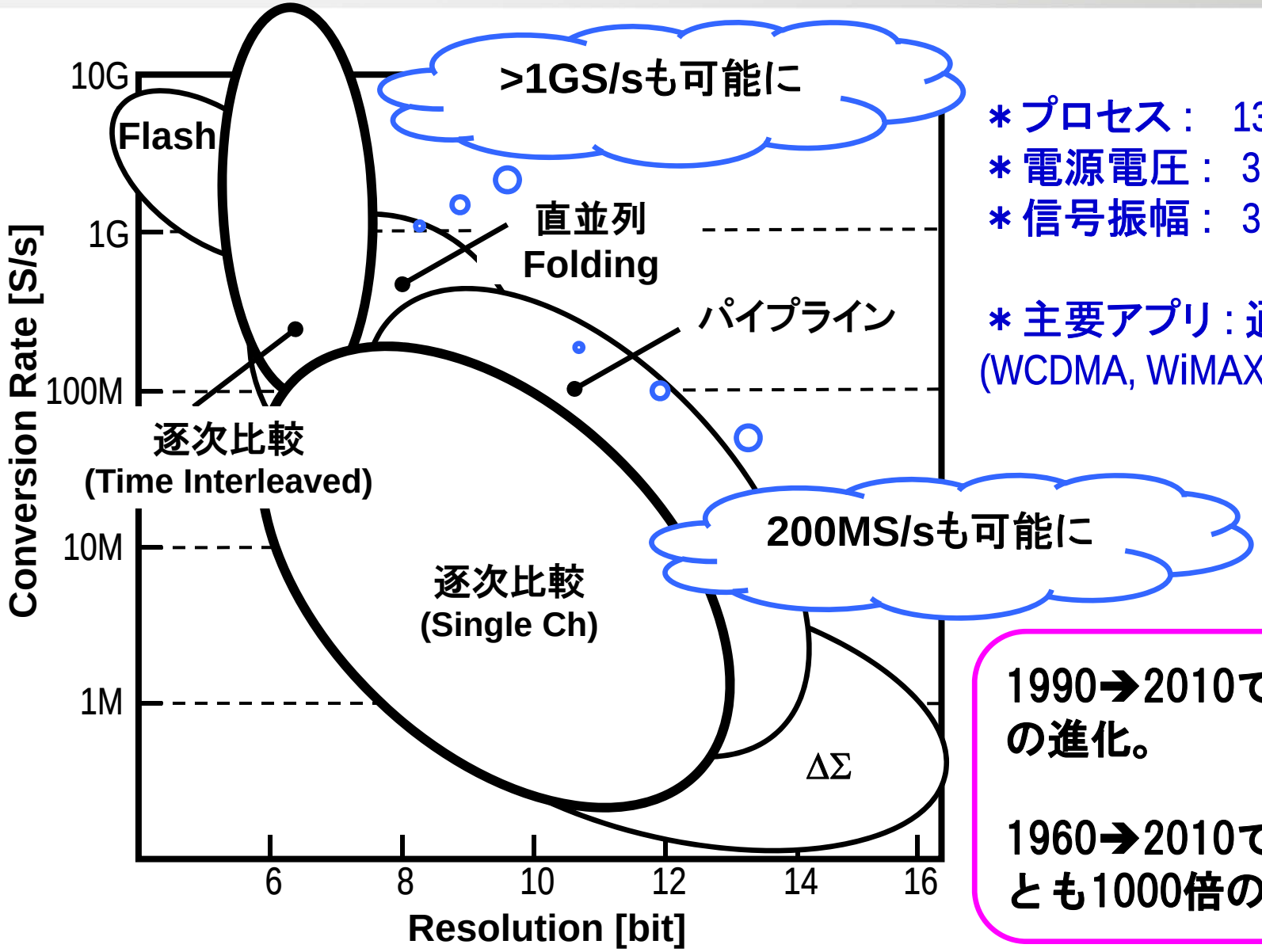


＊プロセス： 1.2 ~ 0.8um
＊電源電圧： 5V
＊信号振幅： 3V

＊主要アプリ : TV, Video

様々なADC (ADCの進化:2010年)

FUJITSU



＊プロセス： 130 ~ 65nm
＊電源電圧： 3 ~ 1.2V
＊信号振幅： 3 ~ 0.8 V

＊主要アプリ：通信
(WCDMA, WiMAX, DTV etc)

1990➔2010で約100倍の進化。

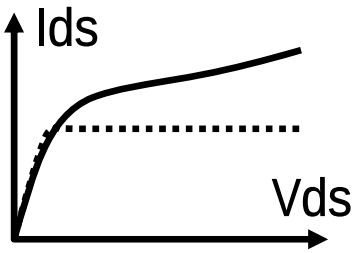
1960➔2010では少なくとも1000倍の進化？

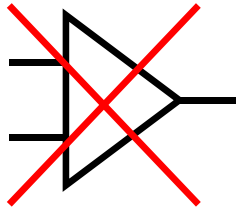
低電圧微細 CMOSの課題

FUJITSU

■トランジスタ特性が変
- 飽和が不十分
- アンプのゲインが不足

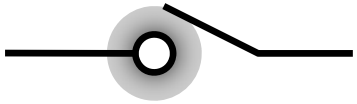
•アンプを使わない方式

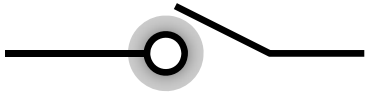




■トランジスタのスイッチング特性
- 完全なon-offができない
- 電荷の保持ができない

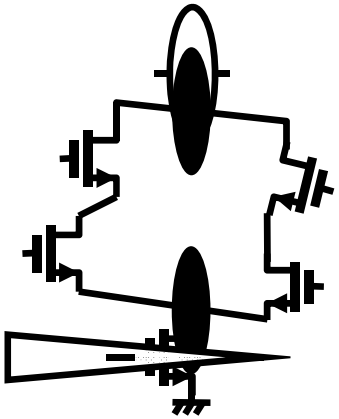
• Bootstrapping, body-bias control

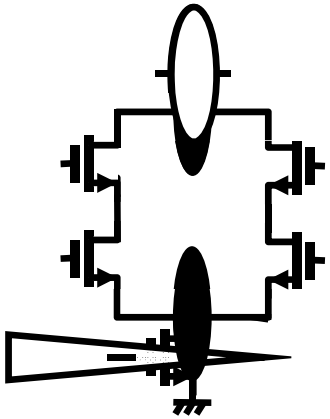




■特性バラツキ
- バラツキの増加
- 高精度のアナログ演算不可

•ディジタル回路による補償





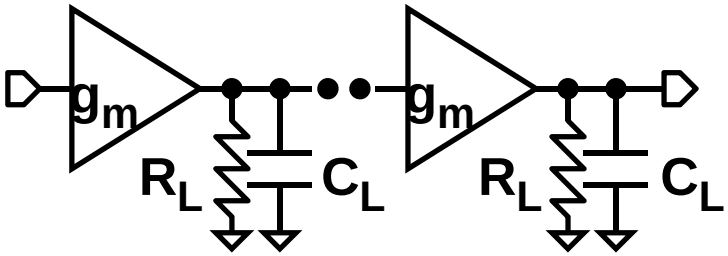
ゲイン100万倍(=1000x1000)を得るには？

FUJITSU

- 増幅回路か再生型latchか？
  - 同一テクノロジなら再生型latchの方が高速

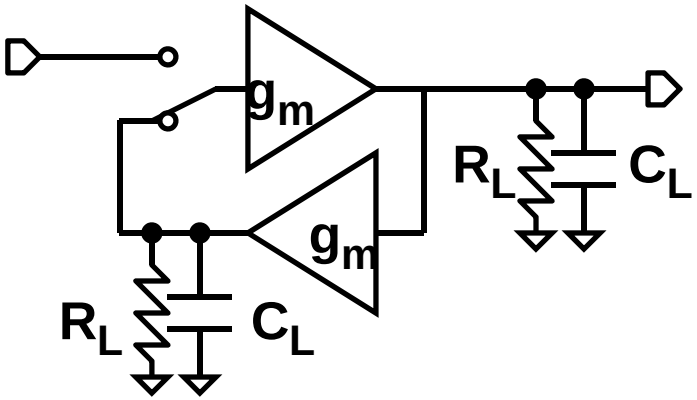
$$A \equiv g_m R_L,\ \tau \equiv R_L C_L,\ \tau_0 = C_L / g_m$$

n段増幅回路



$$\tau \cong n R_L C_L = n A \tau_0$$

再生型latch



$$\Delta V = \Delta V_0 \exp\left[(A-1)t/\tau\right]$$

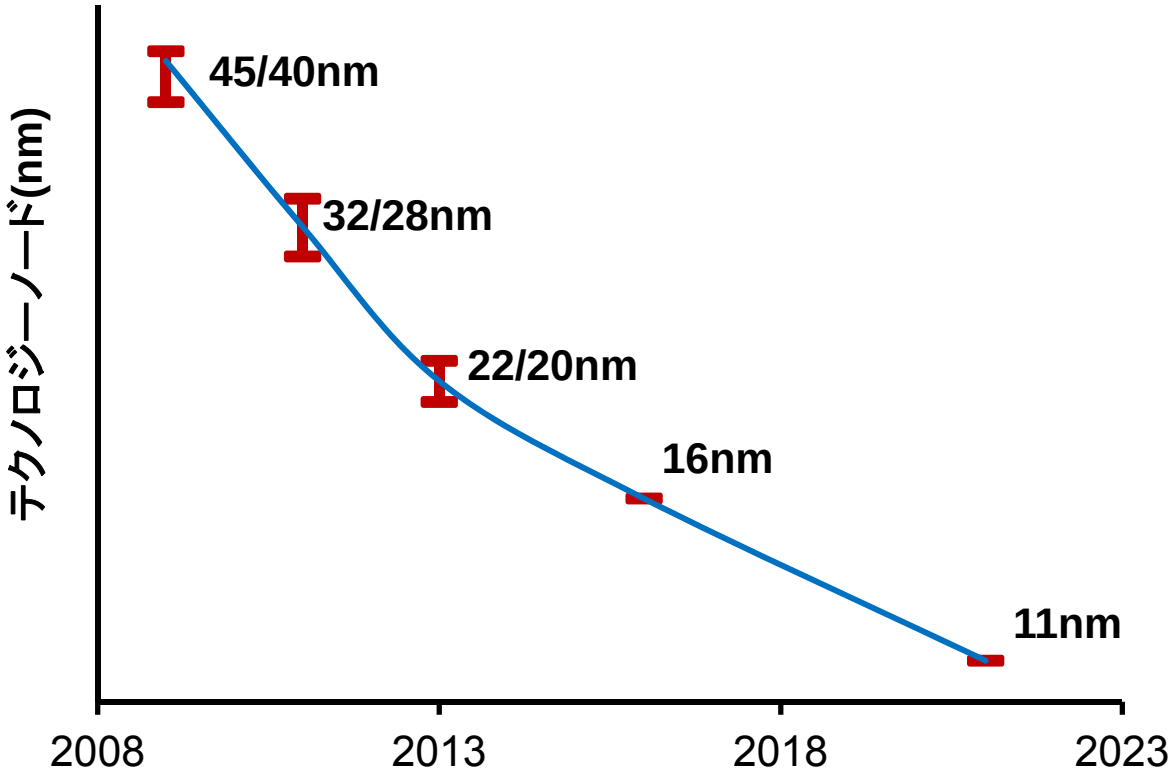
$$\tau_{latch} = \frac{\tau}{A-1} \cong \frac{\tau}{A} = \tau_0$$

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

来るべき世界

FUJITSU

- 正帰還の力で技術は進化
  - 限界に達するまで変化は続く:Moore則の終わり
- 性能向上の源泉が集積回路性能向上の源泉でなくなっただけ

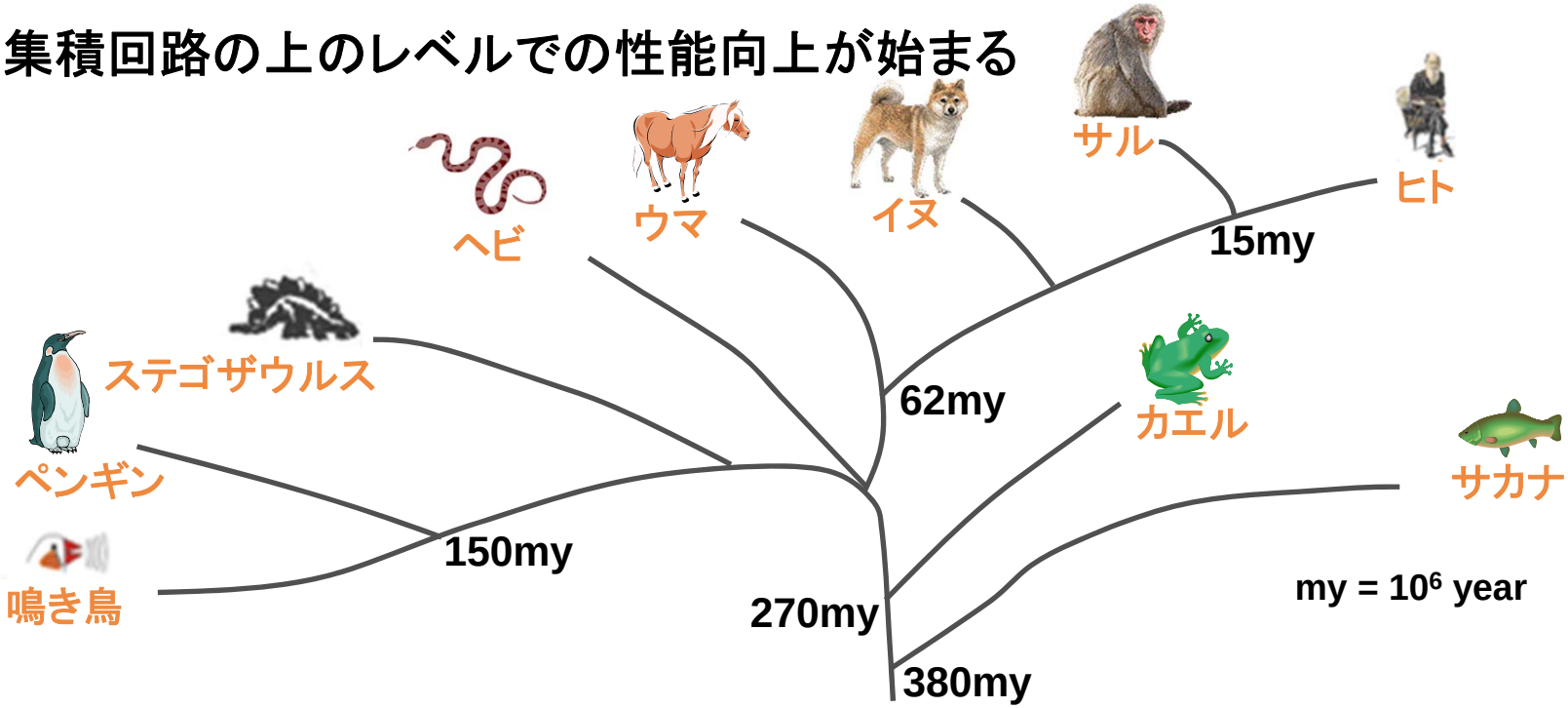


Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

ハードとソフトの関係：碁盤と棋譜と人間と

FUJITSU

- ハードは碁盤、ソフトは棋譜と人間
  - 碁盤のグリッドが19x19でストップして囲碁の世界は停滞したか？
  - アルファベットの数が26文字でストップして文学は停滞したか？
- 集積回路単体の性能向上が止まったらどうなる？
  - 集積回路の上のレベルでの性能向上が始まる

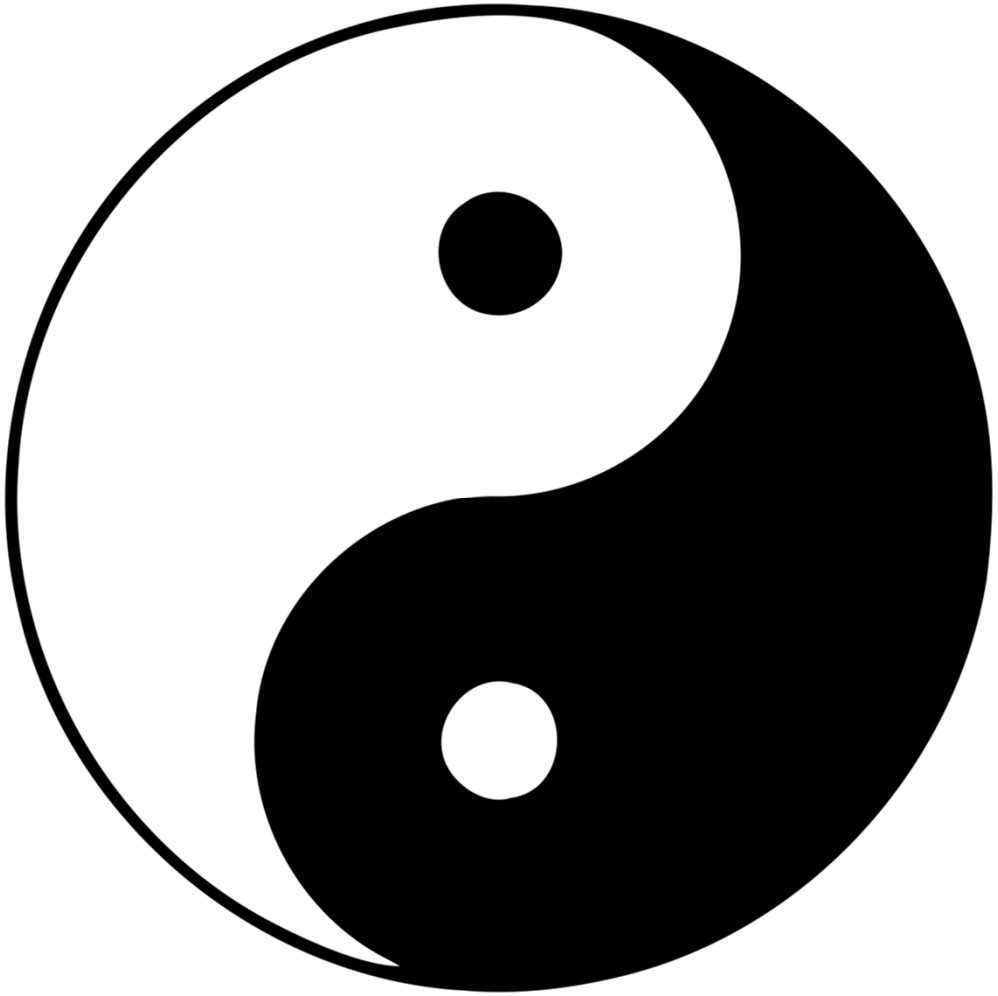


進化系統樹 http://www.riken.go.jp/r-world/info/release/press/2008/081001/detail.html

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

1, 10, 100, … 無限大!

- **Thank you!**



http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Yin_yang.svg

Copyright 2010 FUJITSU LIMITED

FUJITSU

shaping tomorrow with you