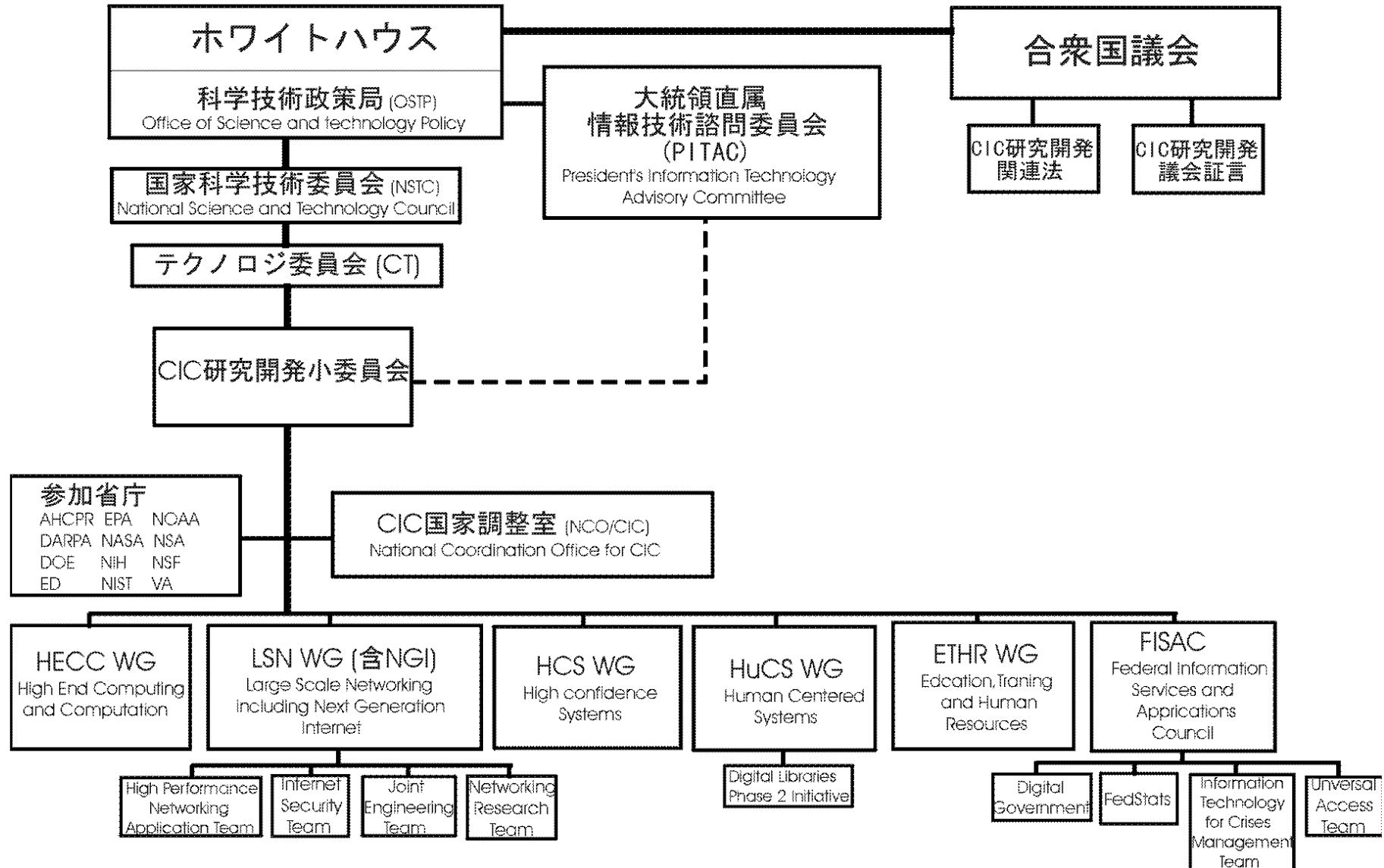


「米国におけるASCI計画、及び UltraScale Computing計画の概要」

先端情報技術研究所
技術調査部

米国科学技術政策立案・実行組織



大統領直属情報技術諮問委員会 (PITAC)

(President's Information Technology Advisory Committee)

設立 : 1997年2月

メンバー : 共同委員長 Bill Joy、Ken Kennedy
を含め、産学から選ばれた26名

中間報告書 : 1998年8月

最終報告書 : 1999年2月

調査結果

連邦政府の研究開発投資について

- 投資額が十分ではない
- 短期的な課題だけが重視されている

21世紀に向けての情報技術政策

(IT² : Information Technology for the Twenty-First Century)

指針

- 2000年度予算での情報技術研究政府投資の大幅な強化
- 前年度HPCC予算の28%増加に相当する\$366Mを支出する
新イニシアティブを創始

投資理由

- 過去の政府支援は膨大な経済的利益をもたらしている
- 情報技術は21世紀にはより利益をもたらす
- 現在の投資は少なすぎる
- 安全・高信頼を実現する
- 国家的R&Dのやり方を変え、情報技術労働者不足を緩和
- 情報革命は始まったばかり

IT² 研究強化項目

(1) 基礎研究

- (a) ソフトウェア
- (b) 人間の言葉の理解と会話、情報の可視化
- (c) 膨大な数のデバイスを含むネットワーク、制限のない接続、ツール
- (d) ハイエンド：ペタフロップス、生物・量子コンピューティング

(2) 科学、工学、国民のための先端コンピューティング

- (a) 非軍事研究者コミュニティに5 Tflops(2000年)、40 Tflops(2003年)
- (b) 気象変動予測、高精度天気予報、遺伝子機能解析、材料開発、宇宙モデル
- (c) システムアーキテクチャ/ソフトウェア、開発環境、アルゴリズム、可視化/データ管理
- (d) NII (National Information Infrastructure)アプリケーション

(3) 情報技術の経済・社会への適用と労働者教育

- (a) インターネットの非従来型管理、遠隔/仮想などの形態の影響、アクセスの不平等性、電子商取引
- (b) 情報技術労働力

HECCの重要研究項目

- ・ 物理的・化学的・生物学的モデリング
およびシミュレーションのためのアルゴリズム
- ・ 大量の情報を必要とする科学・工学のアプリケーション
- ・ 量子・生物・光コンピューティングの先進概念

研究プログラム具体例

DOE

- ・ **ASCI(Accelerated strategic Computing Initiative)**
- ・ MTA(Multi-Threaded Architecture)

NSA

- ・ HTMT(Hybrid Technology MultiThreaded) **アーキテクチャ**

DARPA

- ・ **ウルTRASケールコンピューティング**

ASCI

(Accelerated Strategic Computing Initiative)



ASCIとは

CTBT(包括的核実験禁止条約)批准の前提
Nuclear Weapons Stockpile Stewardshipプログラム
(1996)

- ・核兵器の安全性、信頼性、性能維持の確認を
実験によらず科学計算で行うための
最先端計算機モデリングおよびシミュレーション
開発プログラム

シミュレーション ー ー 要求と現状値

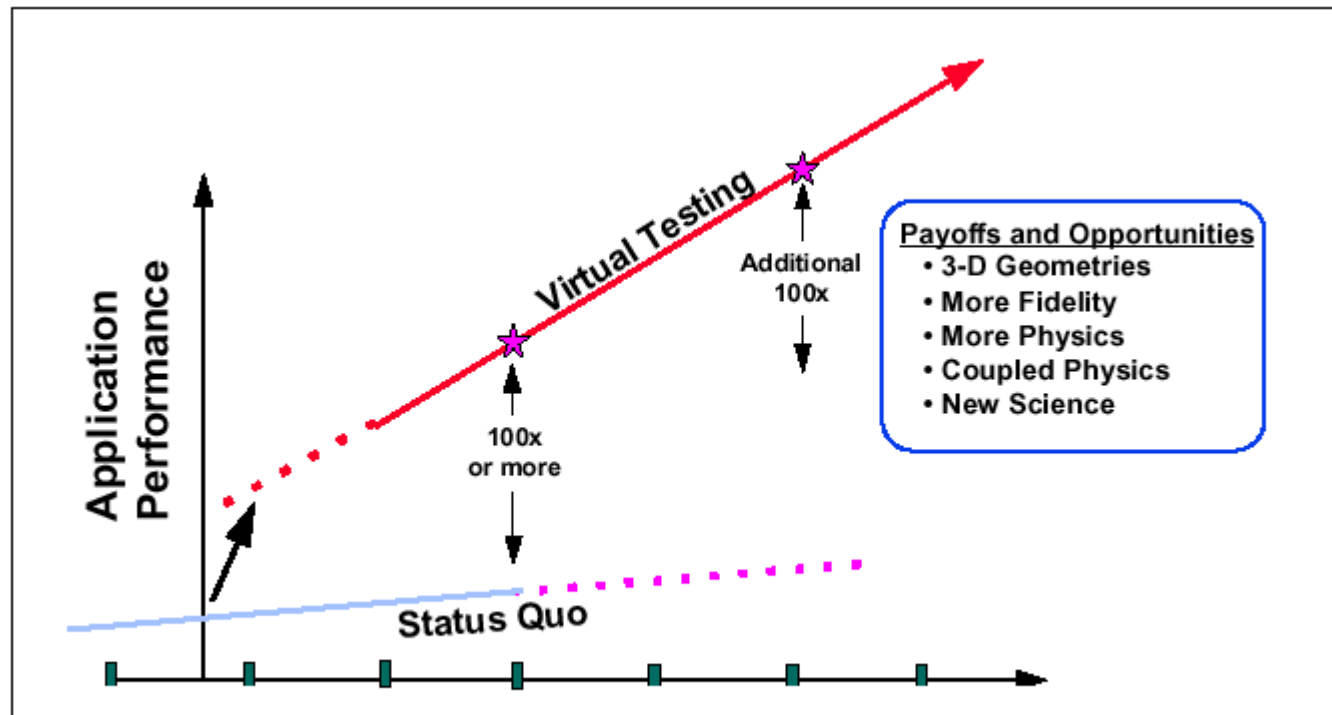


Figure 3. ASCI will require a significant leap in computational capabilities for virtual testing.

Pathforward 計画

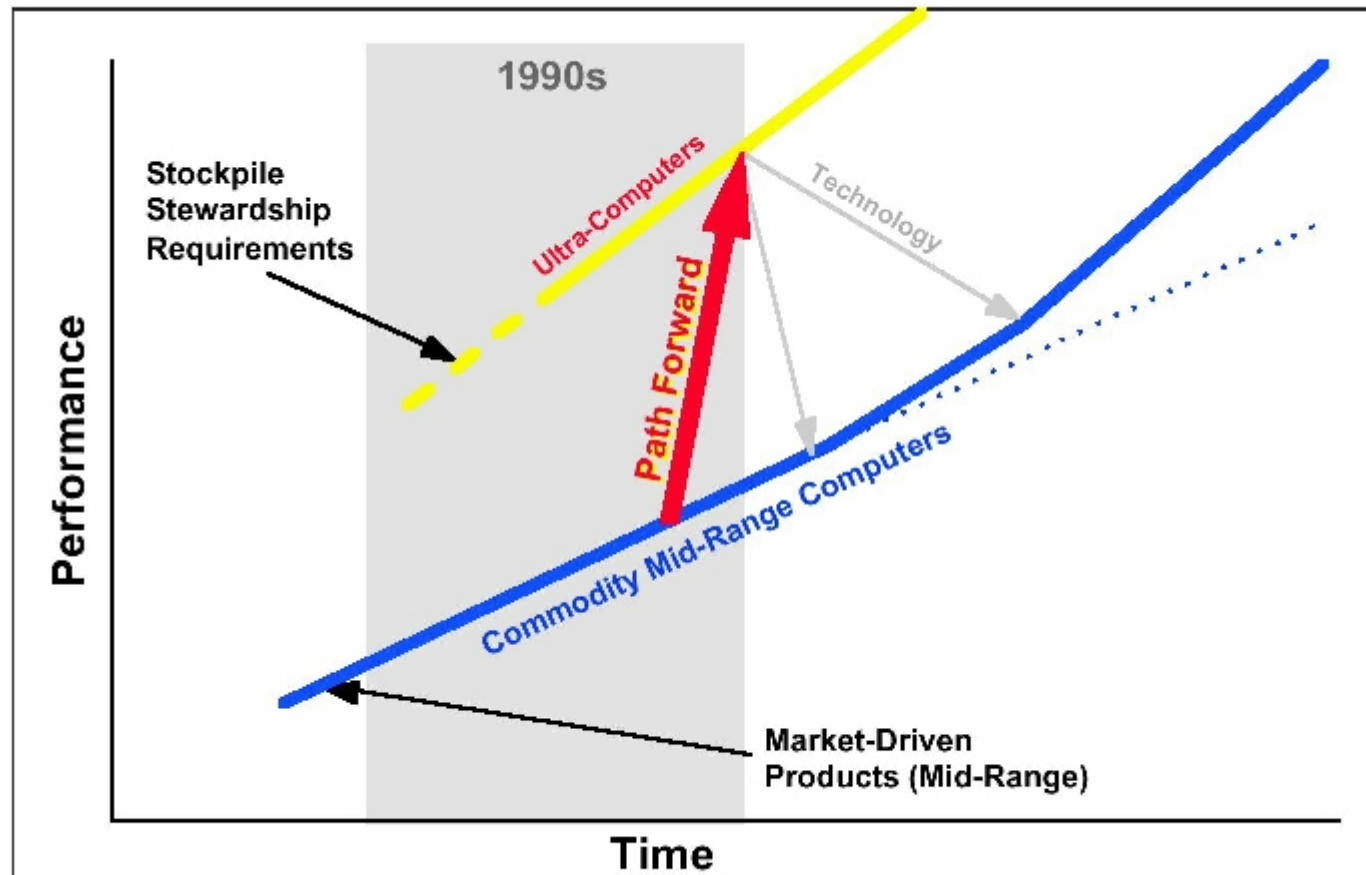


Figure 2: The PathForward Project

Pathforward 計画

計算能力

1999後半から2001に 10～30Tflops

2004に 100Tflops

構成

市販品(COTS : Commodity off the Shelf)使用

プロジェクト推進

官



Department
of Energy



University of California
Lawrence Livermore
National Laboratory



Sandia
National
Laboratories



学

Utah Illinois Stanford Chicago CalTech

産



SiliconGraphics intel



プラットフォーム開発ロードマップ

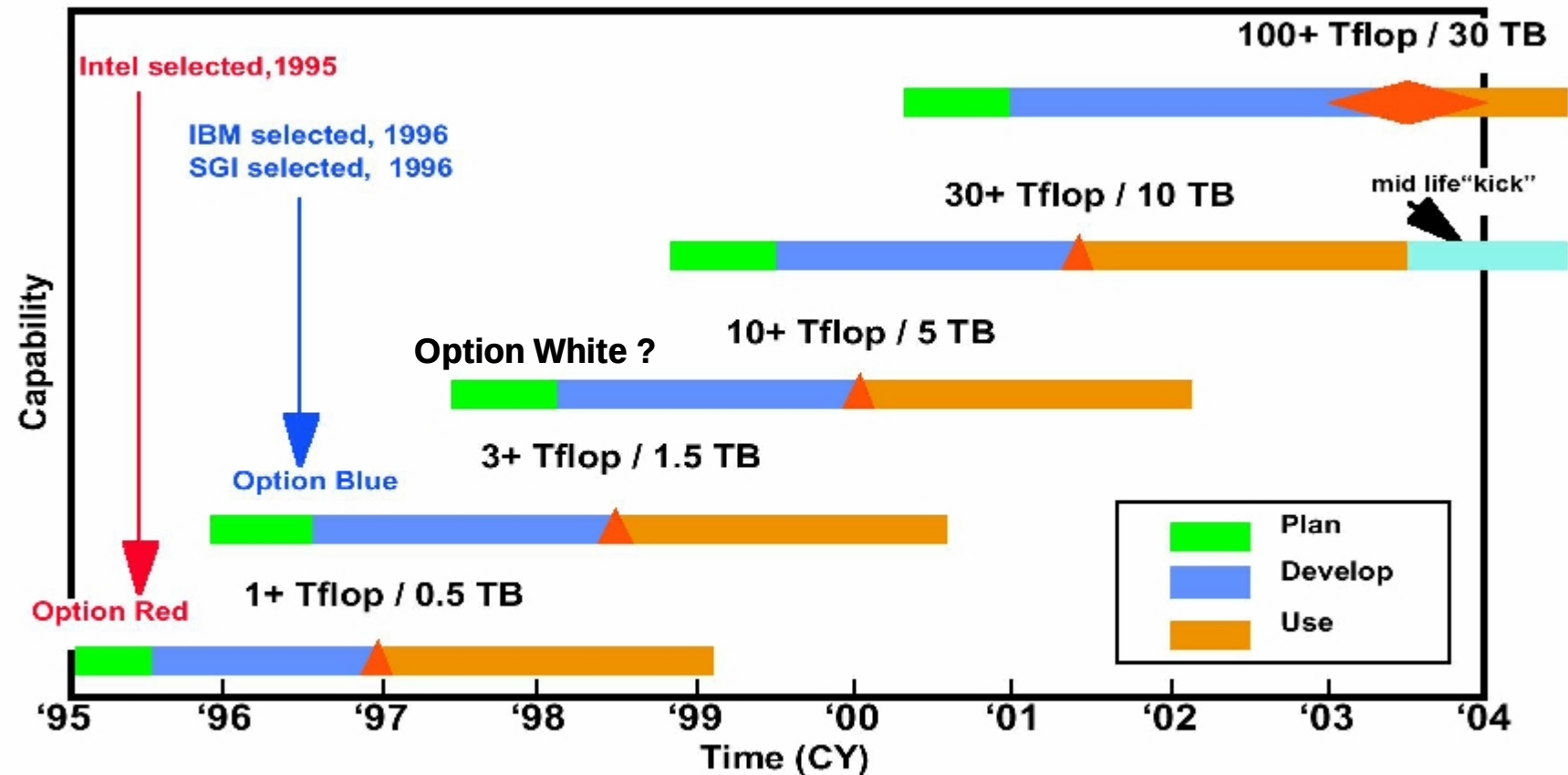


Figure 1: The ASCI roadmap for computing platforms.

ASCIマシン開発の現状

Red(Sandia)



1.34Tflops(1998年11月)

Blue-Pacific(Livermore)



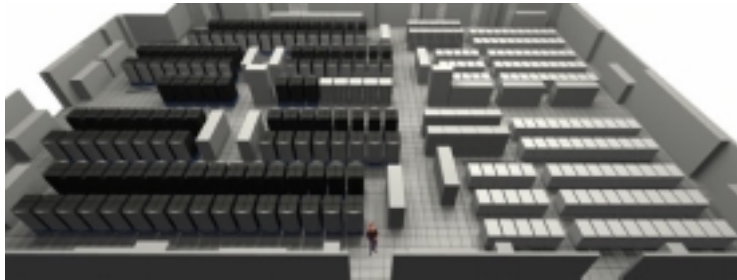
3.88 Tflops(1998年10月)

Blue-Mountain(Los Alamos)



1.6 TeraOps(1998年11月)

ASCI White (10 Tflops) (Livermore)



予定図

IBMのASCIマシン開発ロードマップ

	1999 年	2000 年	2002 年	2004 年
総合演算速度	3-4 Tflops	10+ Tflops	60+ Tflops	120+ Tflops
デバイス	1 GF/proc 1 GF/chip	1.3-1.6 倍	3+ 倍 6+ 倍	2 倍
SMP 構成	8 procs/SMP	2 倍	2 倍	同左
ノード性能	6-8 GF/node	2.5-3 倍	6-8 倍	2 倍
ノード数	512 nodes	同左	同左	同左

UltraScale Computing





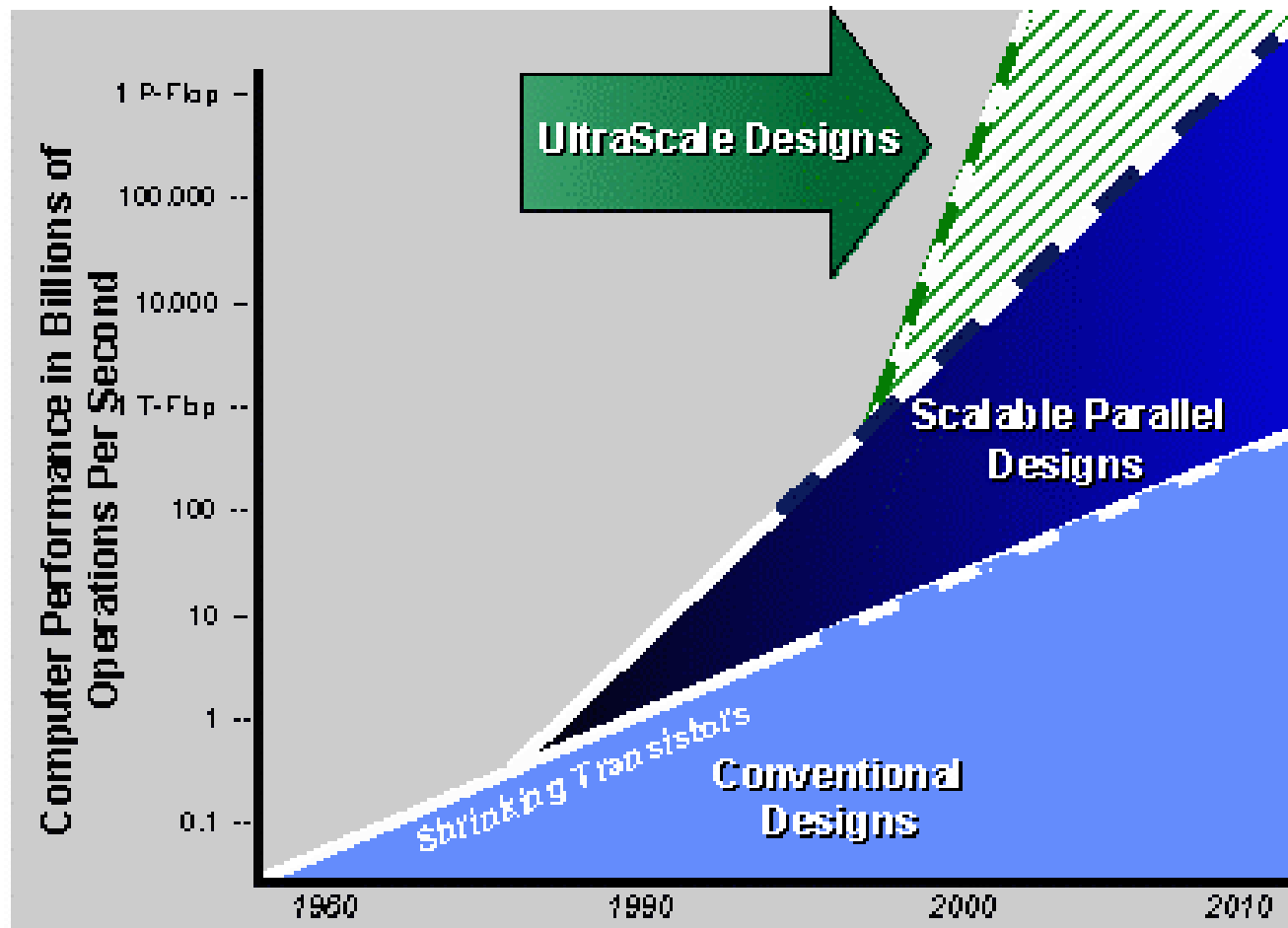
ウルトラスケールコンピューティング (DARPA)

目標: Exaflops

10^{21} Bits/cm³

非COTS

(量子、DNA、細胞、神経)





研究開発の目標



- 性能: 1 Exaflops (= 1,000 Petaflops)以上
- コンピューティングユニット数: 10^{11} processors 以上
- 素子の大きさ: 原子間距離レベル
- 消費電力: 10^{19} ops/joule 以下
- 複雑さ: 手に負えない複雑さを扱うことができるようにする
- 賢さ: 推量や創造性をもたせる



2つの主要研究分野



1. 計算法の新しいモデル

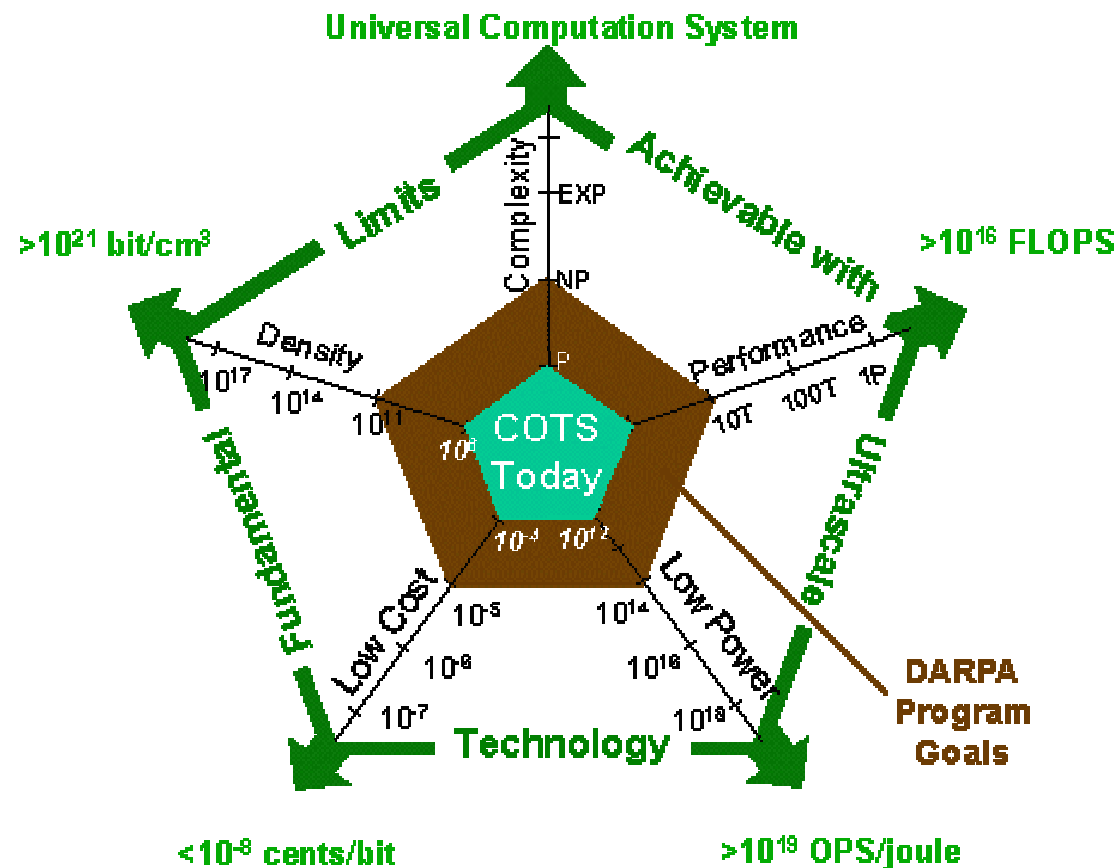
- ☐ 並列コンピューティング
- ☐ 群 (Swarm) コンピューティング
- ☐ 量子コンピューティング

2. 計算法の新しいメカニズム

- ☐ DNAコンピューティング
- ☐ 細胞工学
- ☐ ニューラルネットワーク



ウルTRASケールテクノロジーの目標値



UltraScale Computing Program Structure



Swarm Computing
Artificial Nervous System
Quantum Computing

Explore The
Upper
Reaches
Of Computer
Complexity



Inorganic
Machine
Inference &
Creativity

DNA Computing
Cellular Engineering
Living Neuronal Networks

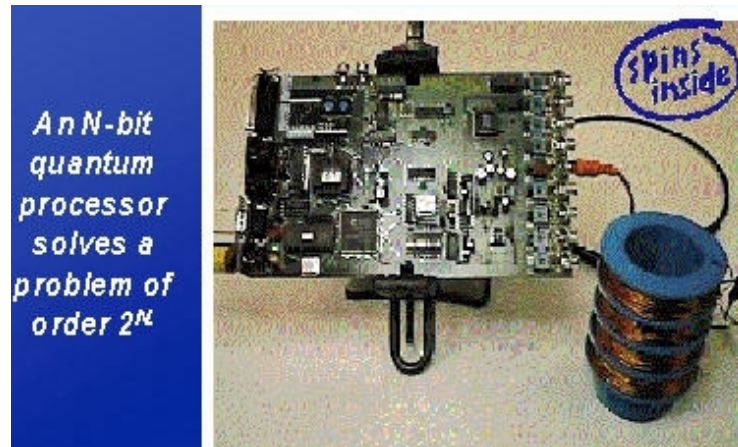
Enable
Computation
Based On
Biological
Material



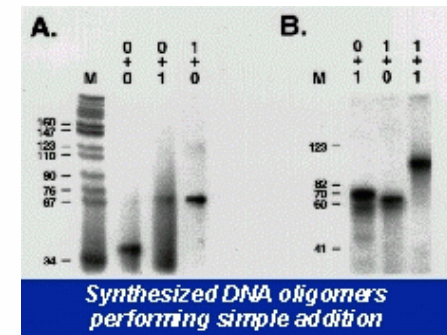
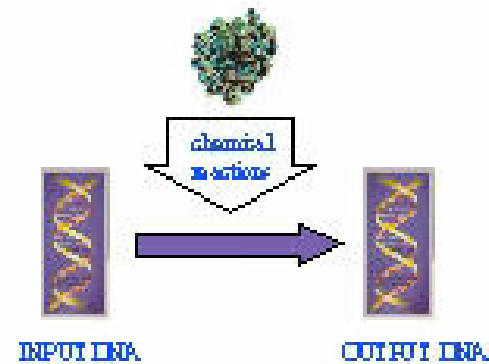
Organic
Biology
That
Computes



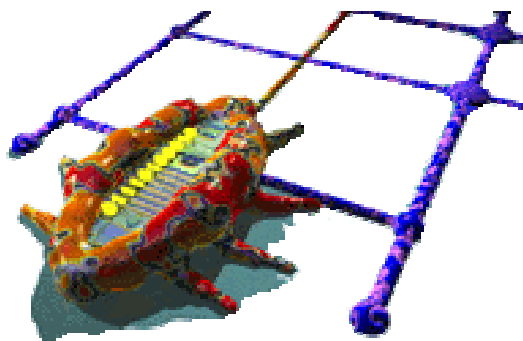
研究テーマ例



量子コンピューティング

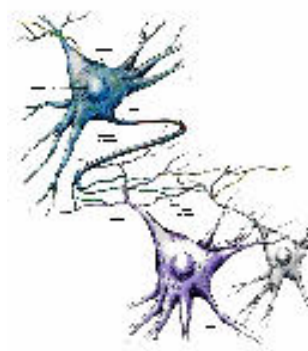


DNAコンピューティング

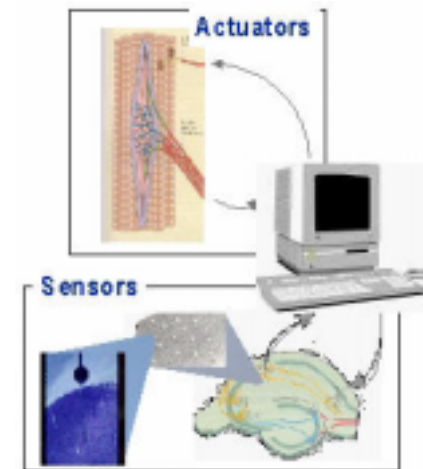


細胞工学

Hybrid Storage



ハイブリッド
ストレージ



ハイブリッド
ペリフェラル

量子コンピューティングの基本概念



◇状態の重ね合わせ

量子状態「0」と「1」の重ね合わせ状態もとりうる

→ 「ビット」の拡張

quantum-bit 短縮して qubit(キュービット)と呼ぶ

◇量子もつれ合い

N個のqubitで 2^N の演算空間が構成できる

→ 大規模並列計算が可能！

《参考文献》

日本物理学会誌 1999 Vol.54 No.4

Computer Today 1999 Vol.16 No.6

http://www.darpa.mil/ito/research/pdf_files/ultrascale_approved.pdf

量子コンピュータ入門 西野哲朗著 1997



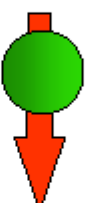
1 =



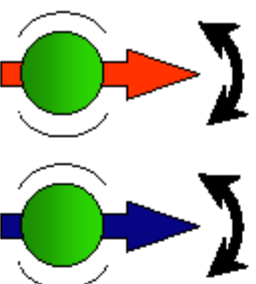
0 =



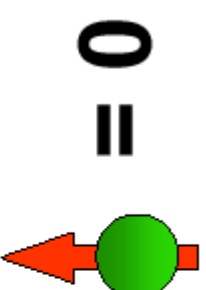
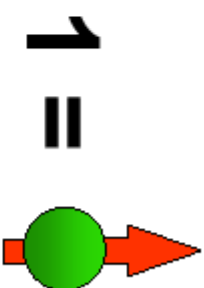
$$\text{Superposition of 0 and 1!} = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{0} + \frac{1}{\sqrt{2}} \text{1}$$



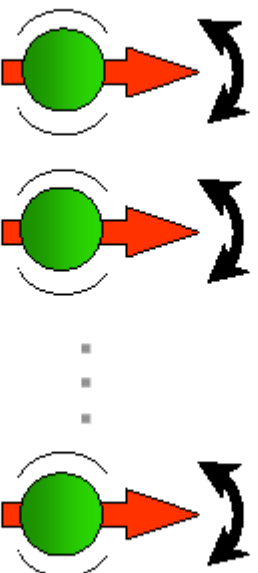
- Two spins: four states in superposition



$$c_0 | \text{00} \rangle + c_1 | \text{01} \rangle + c_2 | \text{10} \rangle + c_3 | \text{11} \rangle$$



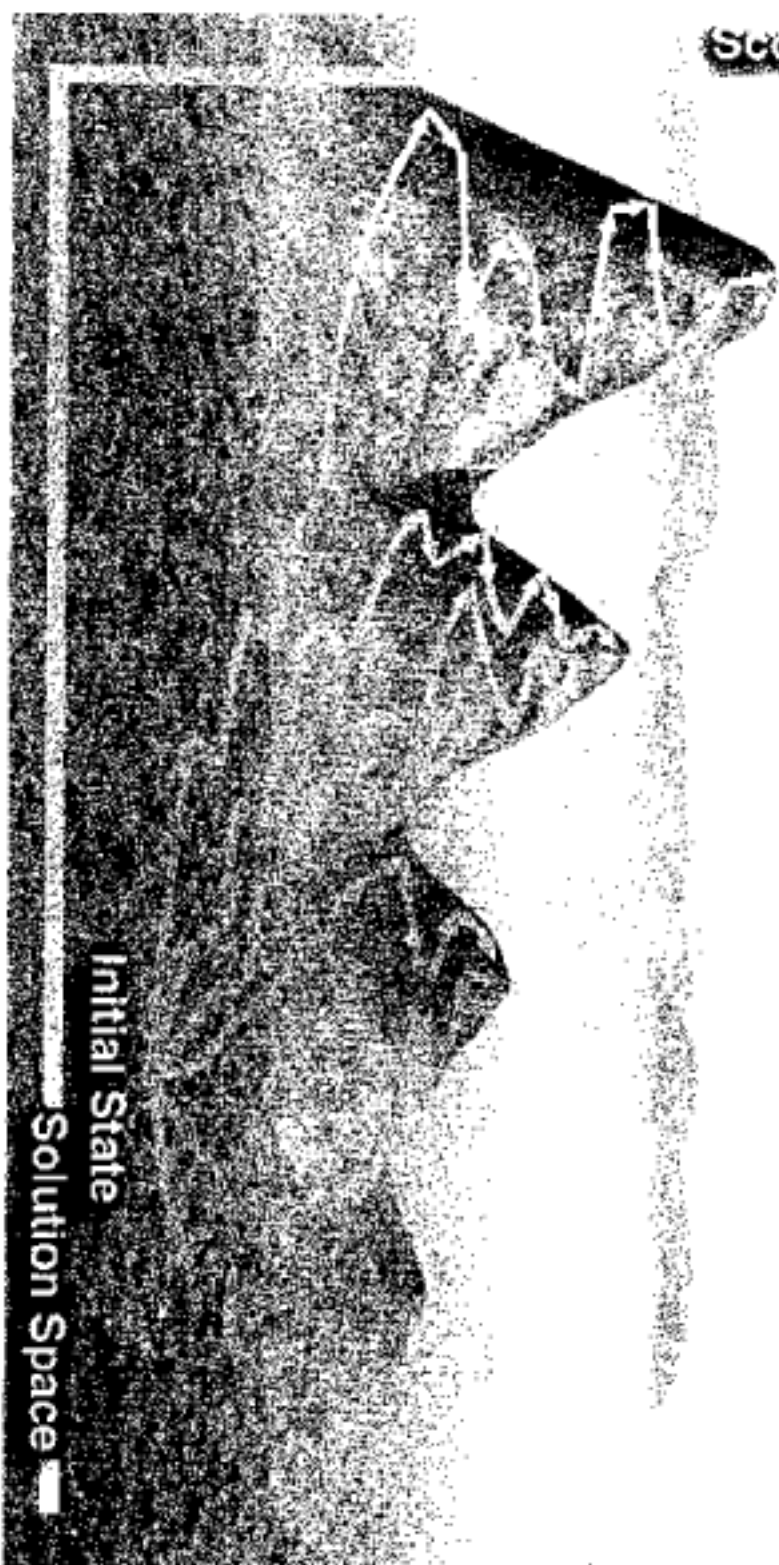
- **N spins -- 2^N states in superposition**



$$0\dots 00 + 0\dots 01 + \dots + 1\dots 11$$

Parallel Hill-climbing Search

Score



背景

- 1985 Deutsch 量子チューリングマシンを考案
- 1992 Deutsch これまでの計算機よりも速く計算が行われるような問題が存在することを示す
- 1994 Shor 因数分解の量子計算アルゴリズムを発見

➔ 200桁の整数の因数分解
桁数に比例する程度の時間(数分)で計算可能
現在最高速の計算機を使っても数十億年かかる

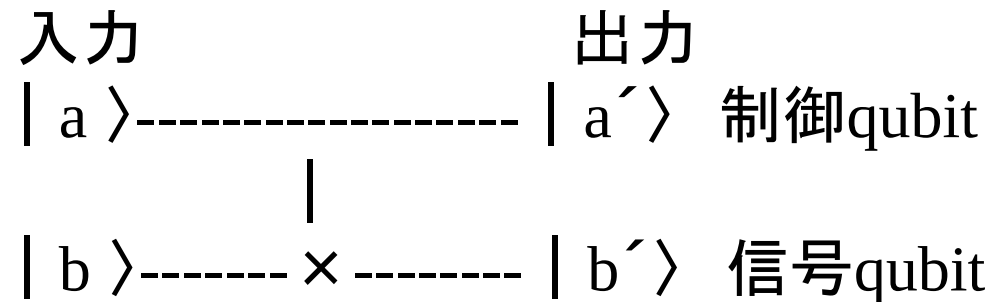
公開鍵システム、国家安全への脅威

量子計算機の構成要素 --- 2つの量子ゲート

◇位相シフタ

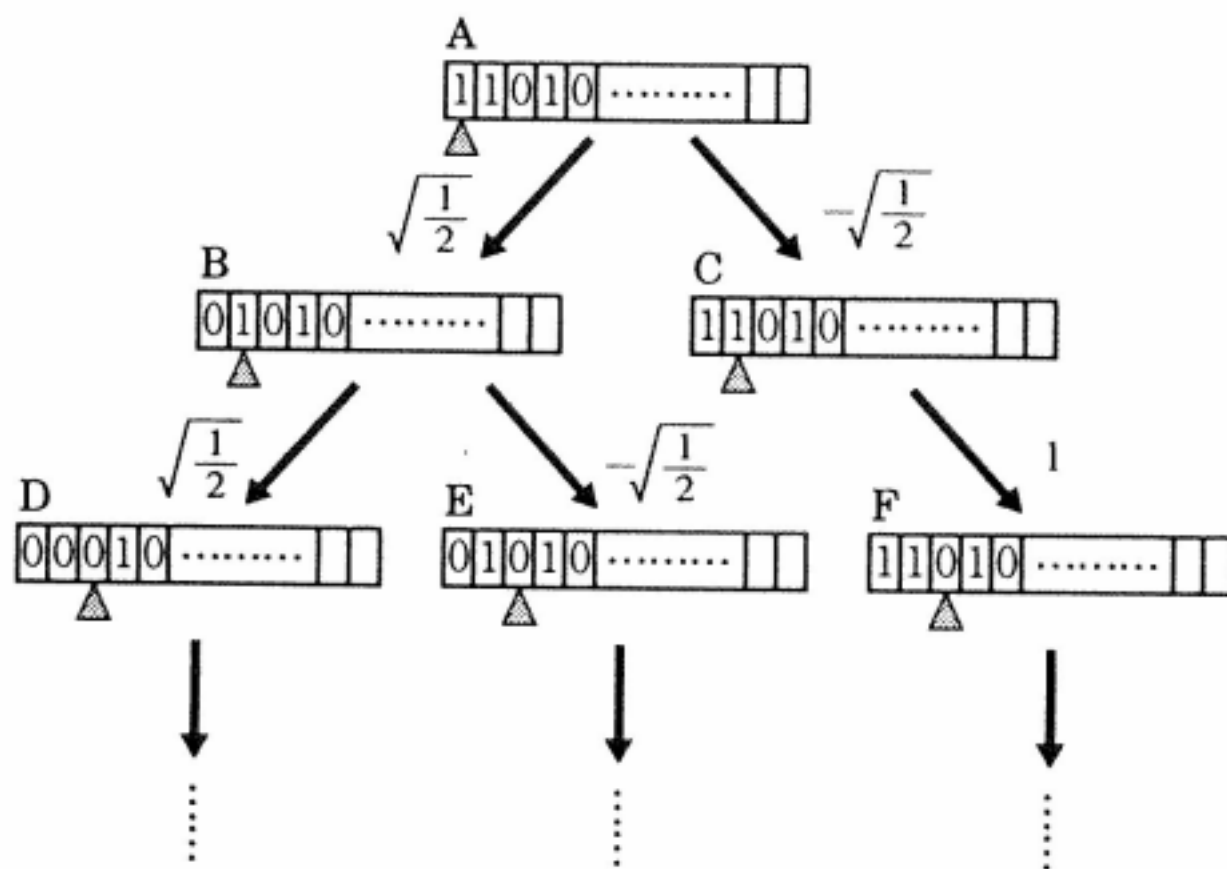
$$|a\rangle \xrightarrow{\text{Ry}(\pi/2)} |a'\rangle$$

◇制御NOT(2入力2出力)

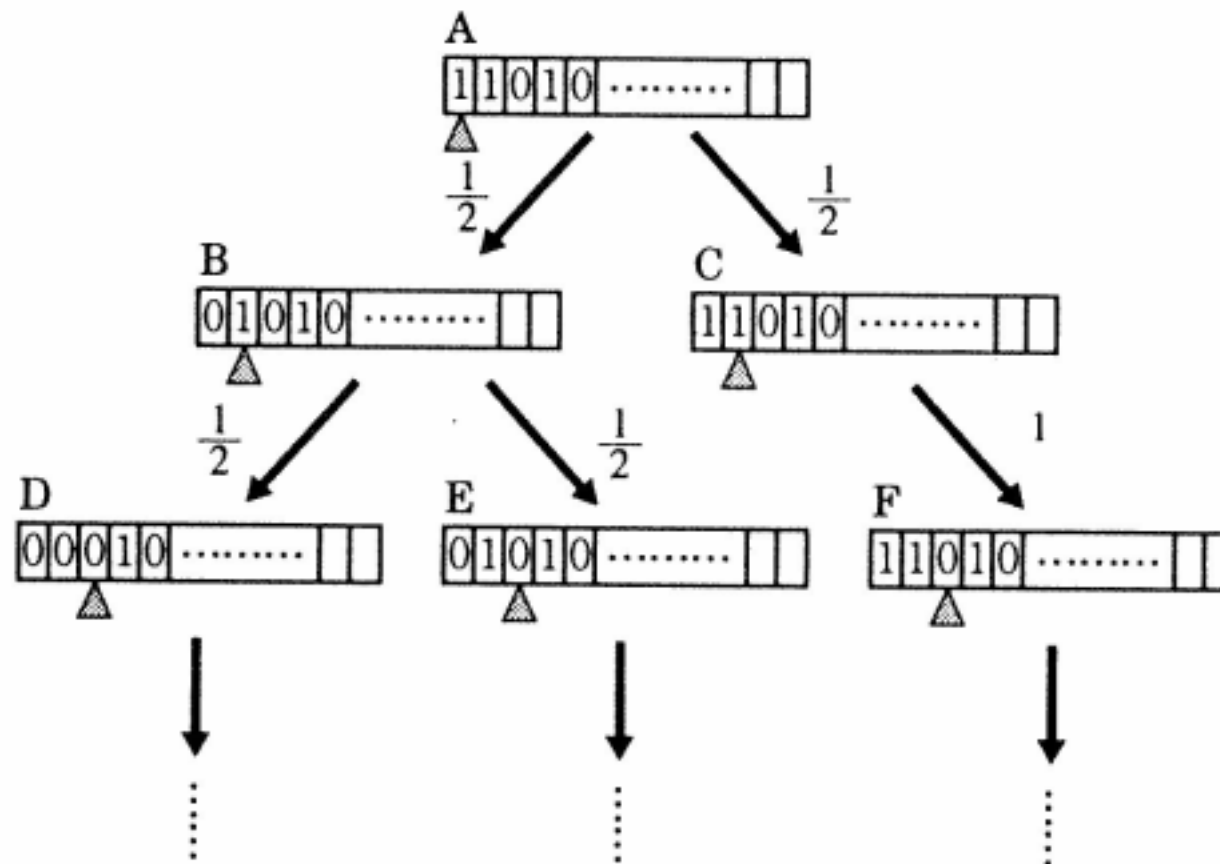


$ a\rangle$	$ b\rangle$		$ a'\rangle$	$ b'\rangle$
-----			-----	
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$		$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$		$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$		$ 1\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$		$ 1\rangle$	$ 0\rangle$

量子確率的計算



通常の確率的計算



量子計算機のスペック

1. 計算機的方式

◇固定型

qubitを担う粒子を固定

レーザー光などを当ててゲート操作を行う

レーザー光の照射順序や組み合わせ

◇弾道型(flying qubit)

qubitを移動させながら

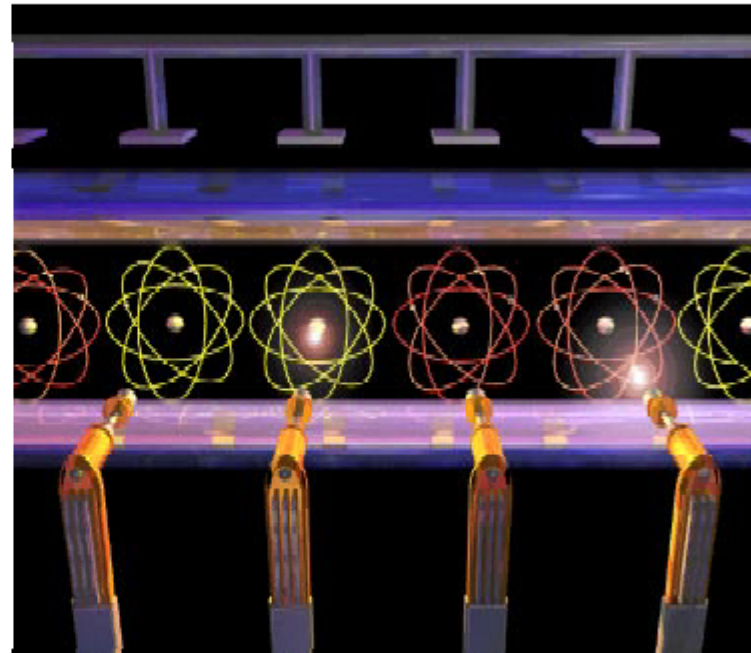
途中に設けたゲート素子で操作する

ゲート素子の配列

固定型の概念図 (イオントラップ量子計算機)

Quantum Computing

Expected Results:
An N-bit quantum
processor solves a
problem of order 2^N



量子計算機のスペック

2.qubitの種類

◇単一量子

光子、原子、イオン

◇バルク

熱平衡状態にある大量なスピンの集団

計算結果の観測が容易

多数の量子計算機が計算した結果の平均

➔ 実行に適さないアルゴリズムがある

量子計算機のスペック

3.緩和時間 τ --- 計算の継続実行時間

「重ね合わせ状態」がどれだけ保たれているか

◇縦緩和時間(振幅に関係する) T_1

◇横緩和時間(位相に関係する) T_2

どちらか短い方となる(一般に T_2 の方が短い)

4.ゲート時間 T_g

クロック周波数に相当するもの

◇固定型

レーザー光の照射時間

◇弾道型

qubitがゲート素子を通過するのにかかる時間

量子計算機のスペック

5. 最大ステップ数 $N_{\max}$

qubitにゲート操作を何回行えるか

$$N_{\max} \sim \tau / T_g$$

6. 拡張性

規模拡大によって生じる困難

- ・緩和時間減少 → 計算時間が確保できない
- ・装置の複雑化 → 実現困難

Why don't we have Quantum computers today?

- Coupling between quantum computation medium and physical world
 - Must be isolated during computation
 - Must be coupled for input/output
- Error correction
- Large scale packaging

今まで提案されている量子計算機

◇制御NOTの考え方を理解する

- ・量子井戸量子計算機 量子井戸中の電子準位

◇現在の計算機よりも優れた量子計算機の実現

最大ステップ数 $N_{\max} \sim \tau / T_g$

200ビットの整数を因数分解 $\rightarrow 10^{10}$ ステップ

最短のゲート時間 $T_g \sim 1\text{ps} \rightarrow \tau > \text{数}10\text{ms}$

- ・イオントラップ量子計算機 直線上に並べたイオンの電子状態
- ・半導体核スピン量子計算機
Si中にドーピングされた ^{31}P イオンの核スピン

◇量子計算アルゴリズムの検証

- ・線形光学素子量子計算機 光子の偏光と光路
- ・NMR量子計算機
溶媒に溶かしこまれた分子中の原子の核スピン

The Inorganic world

Swarm Computing
Artificial Nervous System
Quantum Computing



Quantum Computing *Two Representative Projects*



Bulk Quantum Computation with NMR Stanford, MIT, U-California-Berkeley

Context: Desktop quantum
computer with NMR I/O.

Quantum Information Computation CalTech, U-Southern California, MIT

Context: Quantum computers solve
problems impossible for classical
computers; quantum computation
impacts cryptographic security;
quantum communication enables new
secure cryptographic protocols

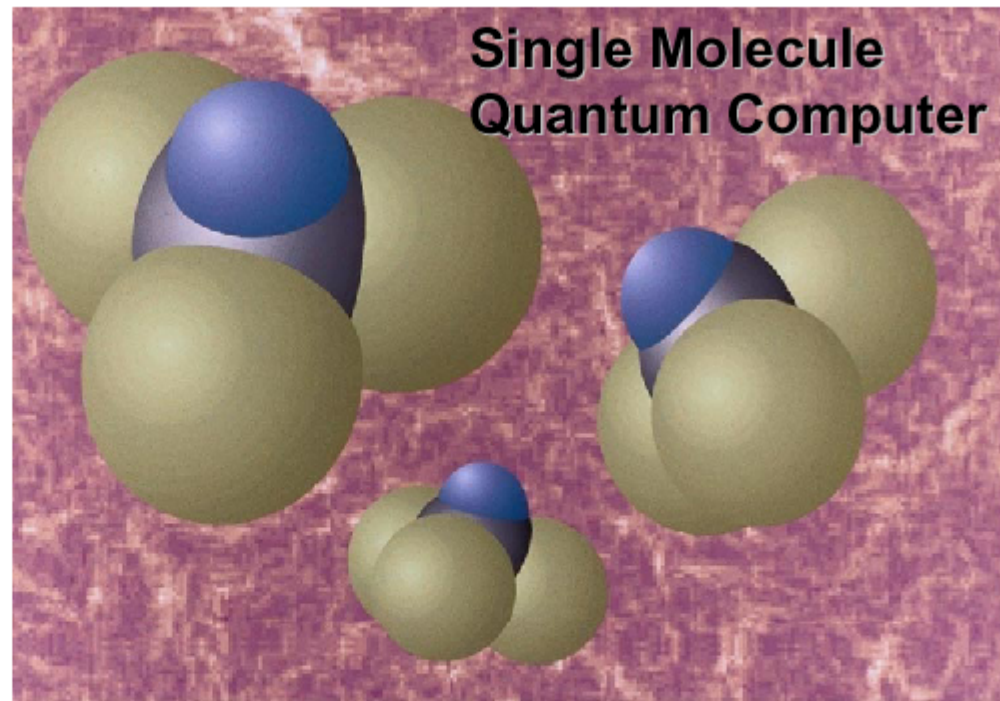


NMR量子計算機

(Gershenfeld and Chuang, Science 275, p.350, 1997)

1 = 

0 = 



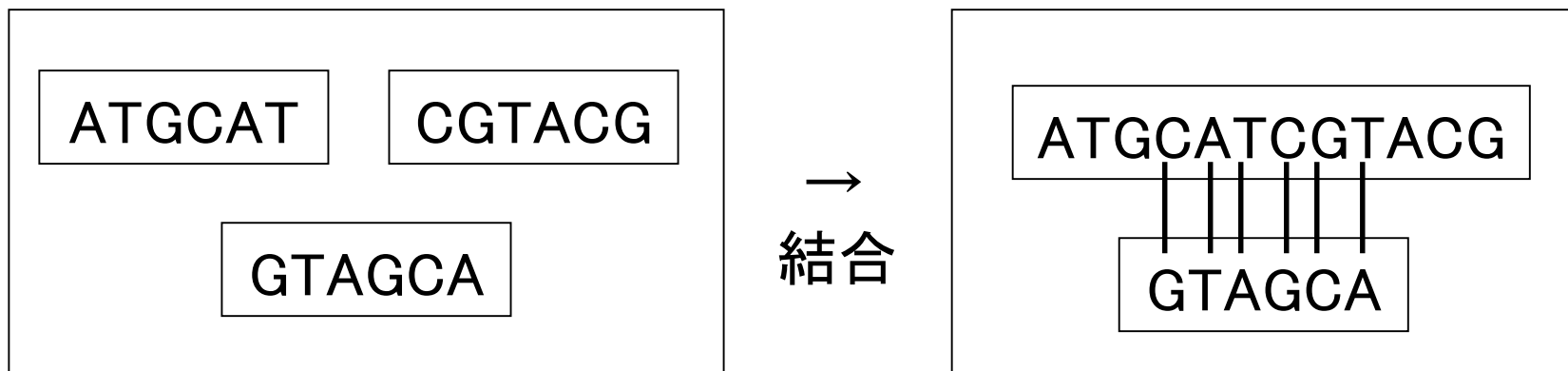
- Information (qubits) = Nuclear spins
- Interactions = Chemical bonds
- Circuits = Electromagnetic field pulses

DNAコンピューティング

- Adleman博士(南カリフォルニア大)がDNAコンピュータの実験に成功(1994年)
- ハミルトン経路問題の頂点と経路をDNA塩基配列で表現
- DNAと酵素で生物化学反応を起こし、正解を表現したDNA塩基配列を抽出

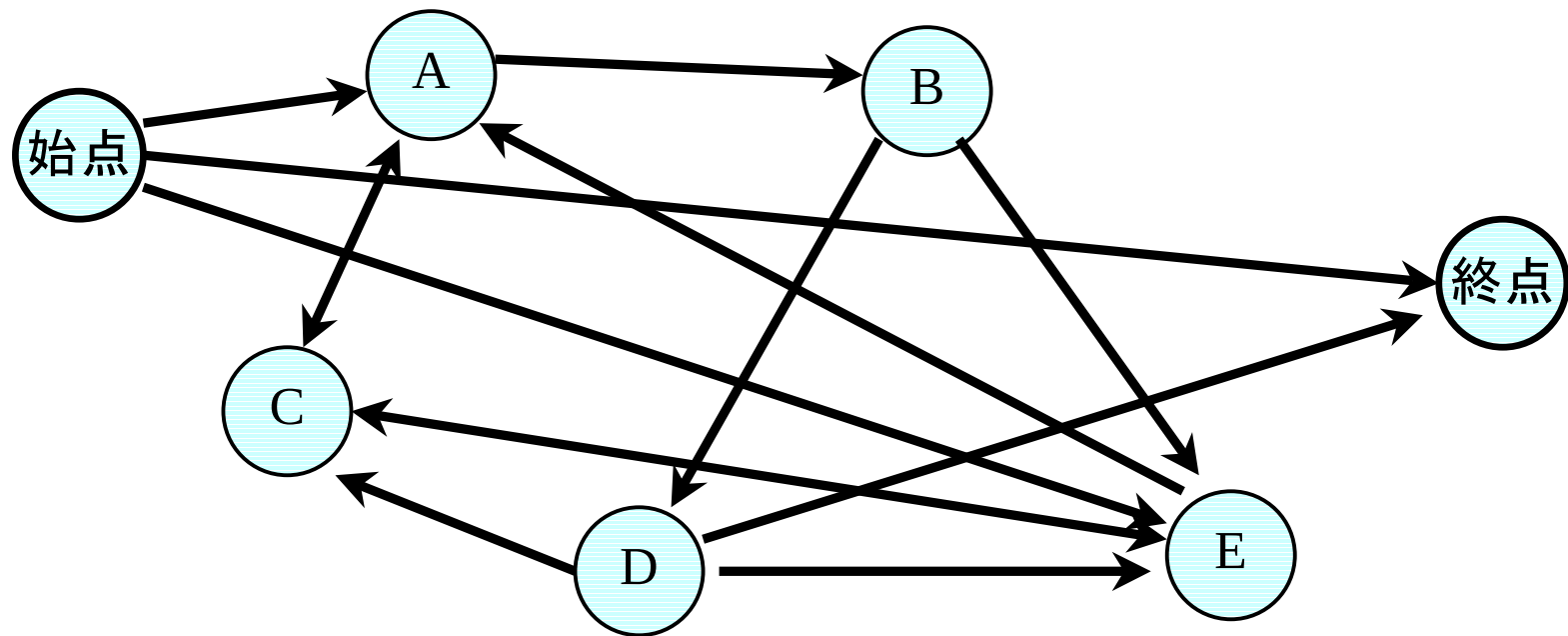
DNA塩基

- A(アデニン)、T(チミン)、G(グアニン)、C(シトシン)の4種
- ①AとT、②GとCが結合する性質を利用



ハミルトン経路問題

- 始点から終点までの道順の中から、全ての点を1度だけしか通らない道順を探索

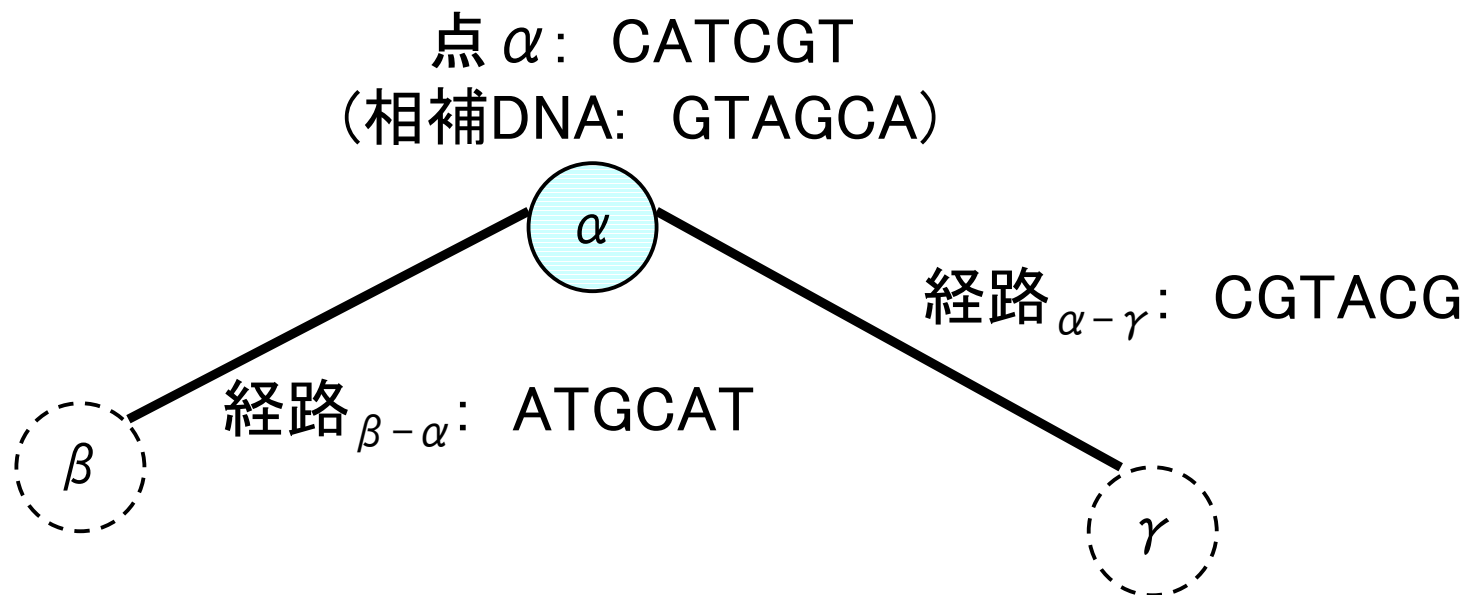


DNAコンピュータの原理

- Adleman博士の実験例(ハミルトン問題)
 - ①7頂点と14経路にDNAを割当て、酵素と反応させる
 - ②取りうる経路順にDNAが結合し、多数の組合せ(DNA)が揃う
 - ③後工程にて、正解のDNAを抽出

DNAの割当て

- 各点および各経路にDNAを割当てる



後工程

- PCR(Polymerase Chain Reaction)法
 - ◇始点で始まり終点で終わる配列のDNAを増幅
- 電気泳動
 - ◇7頂点を通る長さ(6)のDNAを抽出
- アフィニティ分離
 - ◇1つの頂点を含むDNAの分離を順次7回実施

DNAコンピュータへの期待

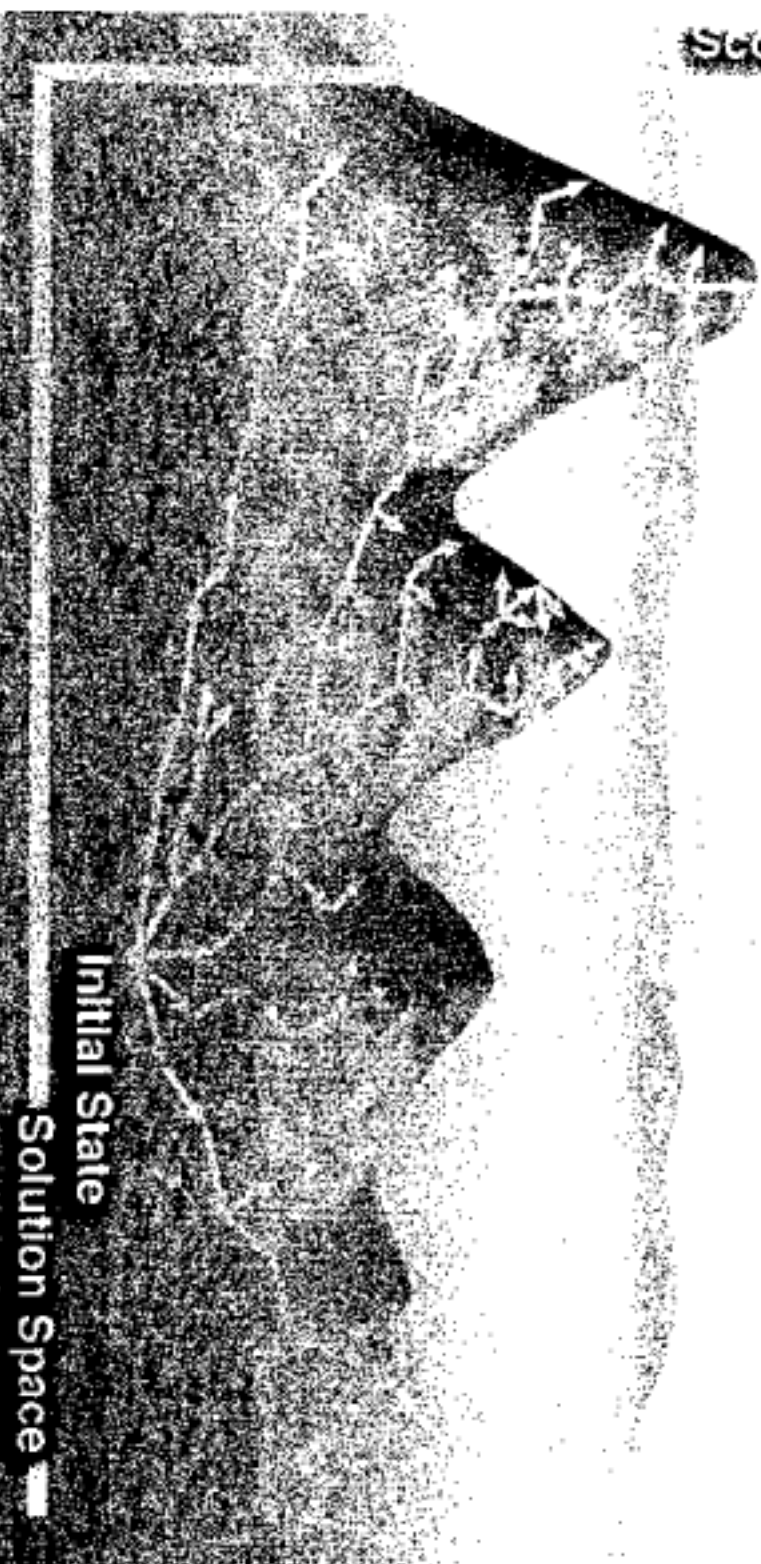
- 高密度化: 1g中に 10^{22} 個のDNA分子
(1gのSi基板상には 10^7 個トランジスタ)
- 発熱しにくい: DNA分子同士の自発的結合
を利用
- 大容量: 1gのDNAにCD-ROM4000億枚分
のデータが蓄積可能

DNAコンピュータの用途例

- 超並列高速コンピュータの演算素子
 - ◇遺伝子等の塩基配列の計算など
(現状、時間のかかる配列のデータ変換が不要になり超高速になる)
- DNAを入力データとする演算
 - ◇人体のDNAを入力し、パーソナルドラッグの合成や選択

Multi-group GA Search

Score



問題

- DNA自体の結合能力が不安定
 - ◇T-A、C-G以外の結合もありうる
- 電気泳動の分解能
 - ◇DNA上の塩基が結合して丸まり、うまく分解できない
- PCR法の副作用
 - ◇狙ったDNA以外の短いDNAが増幅される