

# 学術俯瞰講義

## 物質を作り利用する

東京大学 小宮山宏

第1回：物質製造プロセス 主な例：金属（鉄鋼）

第2回：複合化（デバイス）

主な例：半導体、無機材料

第3回：ソフトマター 主な例：半導体、液晶

第4回：地球持続の物質（デバイスシステム）

主な例：燃料電池、マイクロ化学チップ

「注:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

# 人口

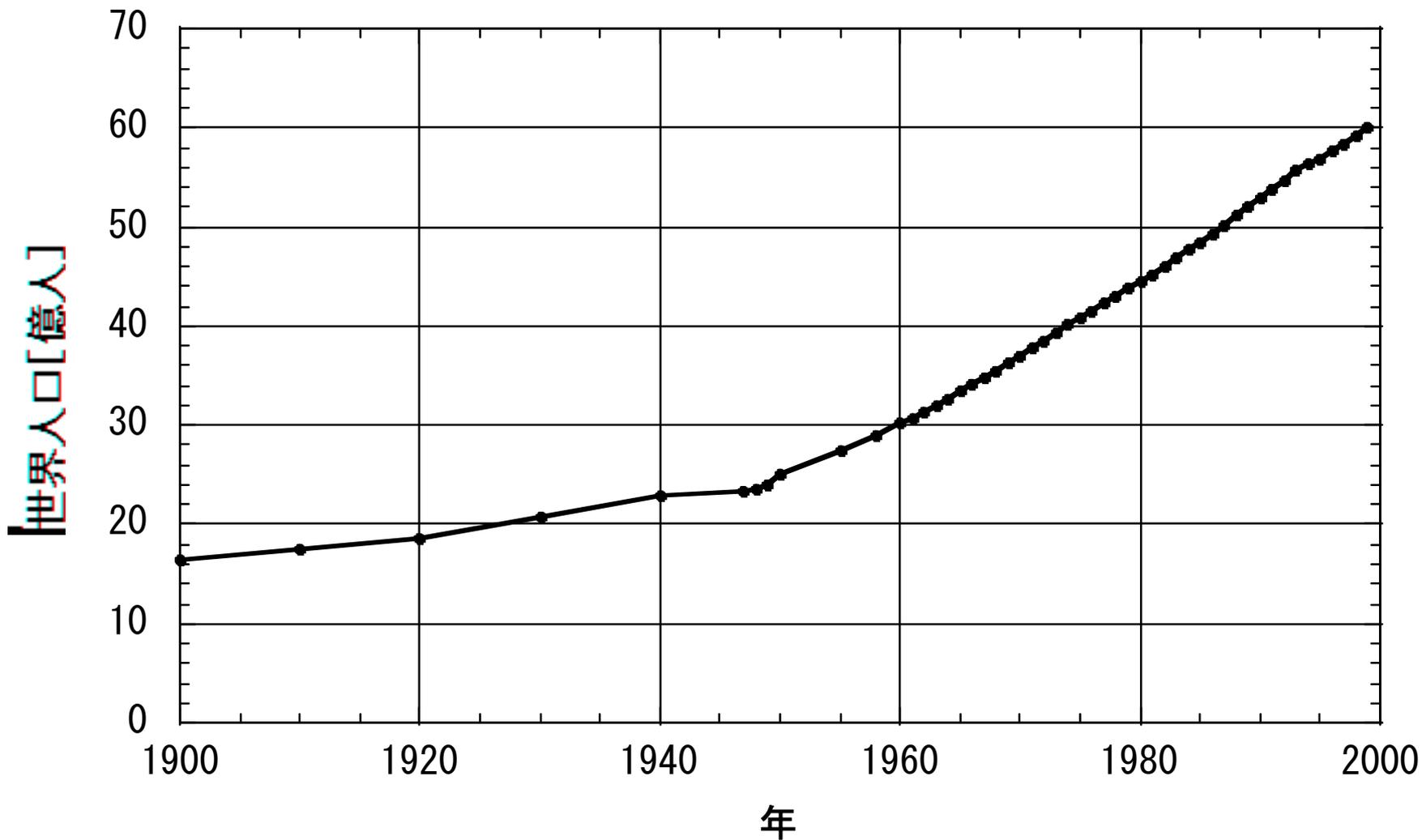


図 20世紀における世界人口の変化  
(世界統計年鑑、米務省のデータ、および国連の推計より)

# 鋼鉄生産量

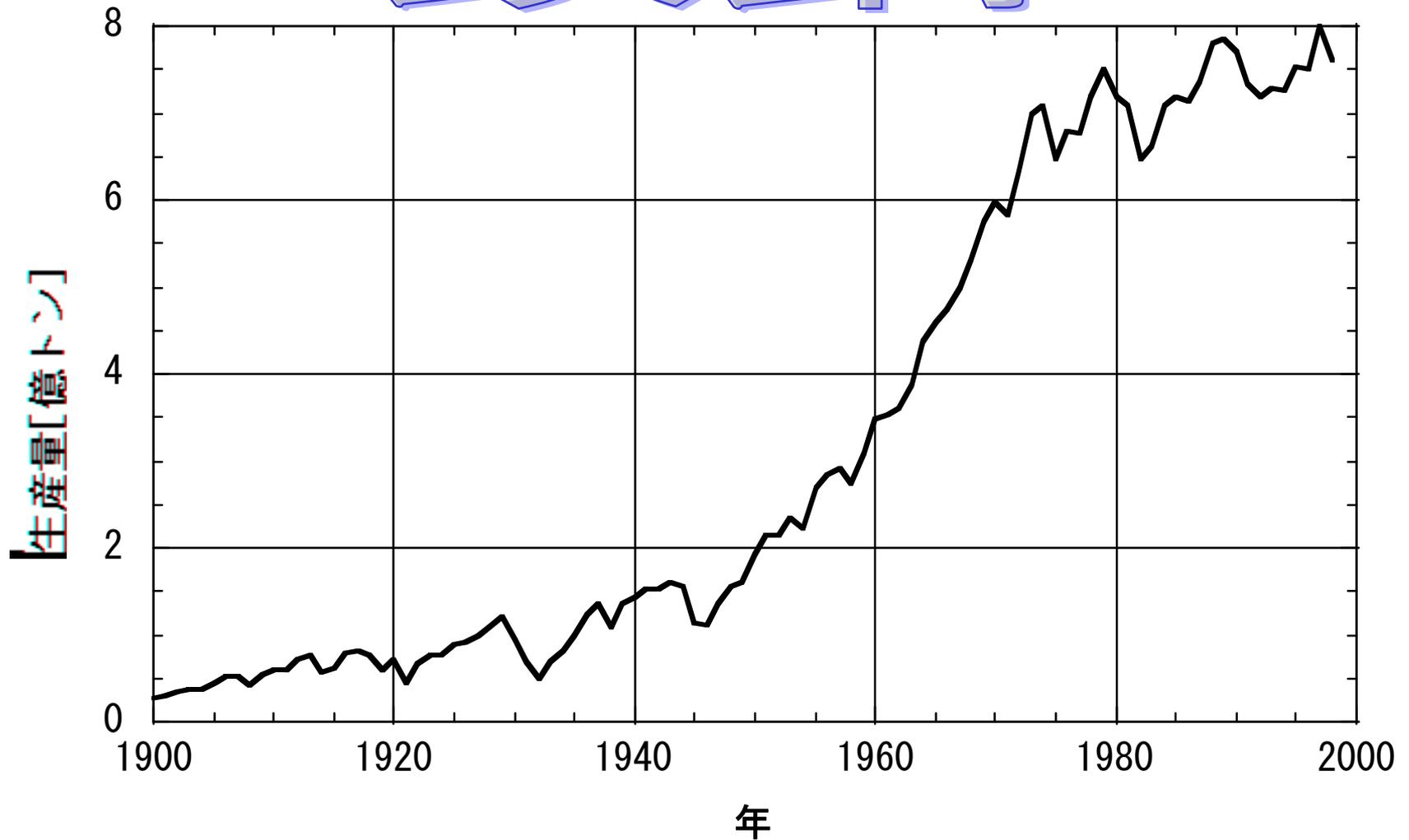
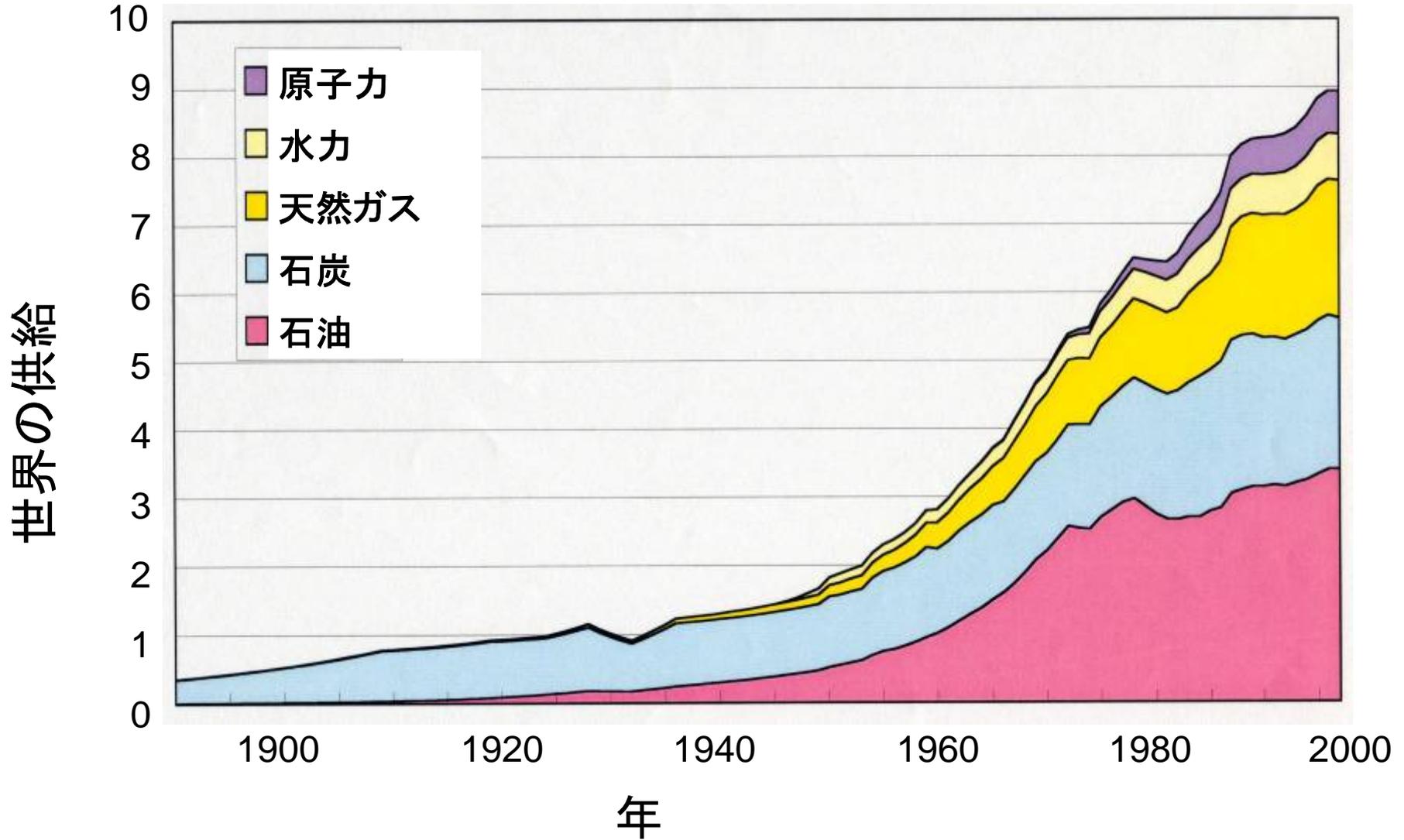


図2 粗鋼・銑鉄の世界生産量  
(世界歴史統計、世界統計年鑑より)

# エネルギー供給

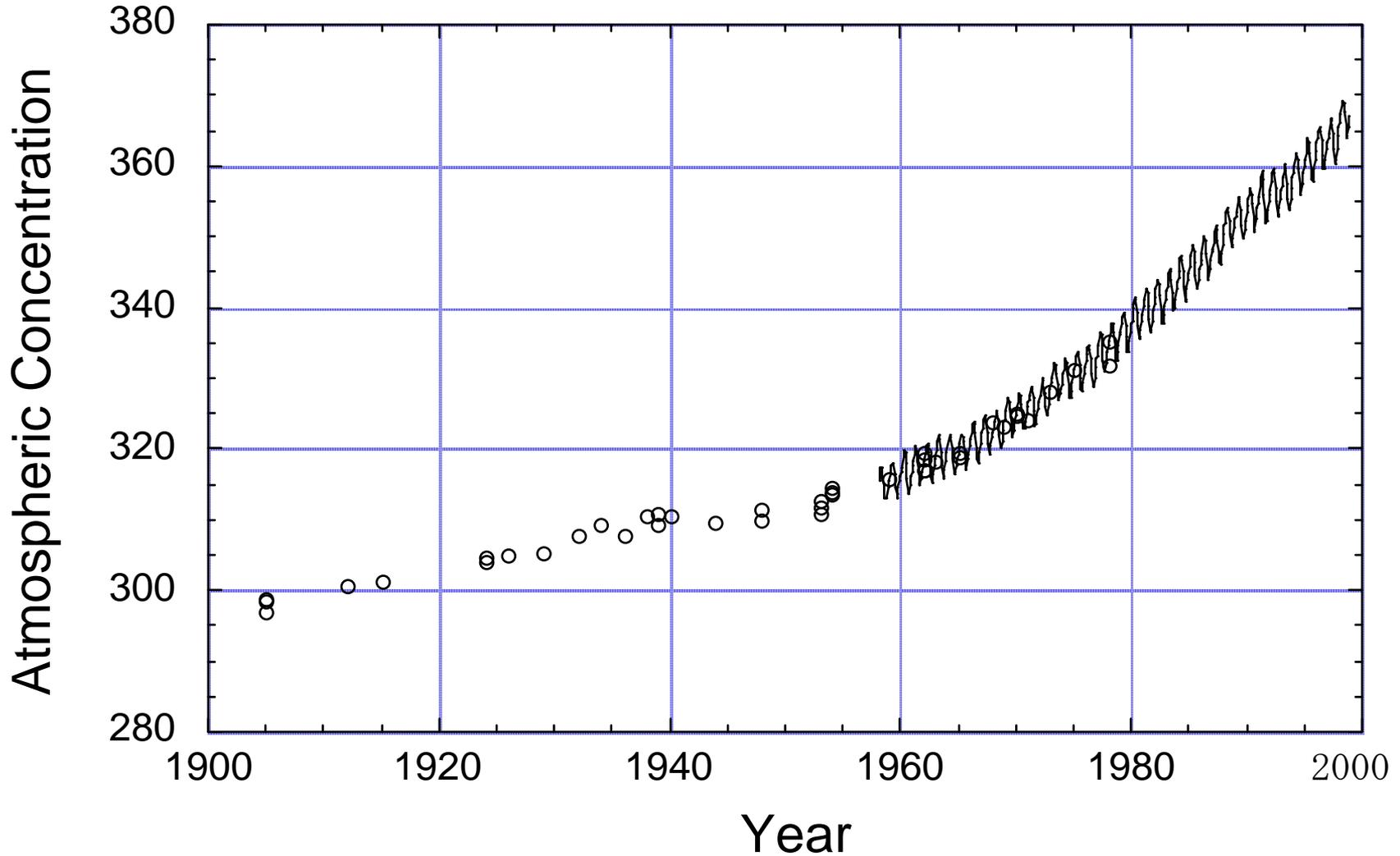
(billion tonnes,  
oil equivalent)



Sources: UN Statistical Yearbook, BP Statistical Review of the World Energy

# 二酸化炭素濃度

(ppm)



Source: National Oceanic and Atmospheric Organization

20世紀 人間活動膨張の世紀

21世紀 持続社会を実現する世紀

科学技術の役割は何か？

# エネルギー

エネルギー資源：一次エネルギー

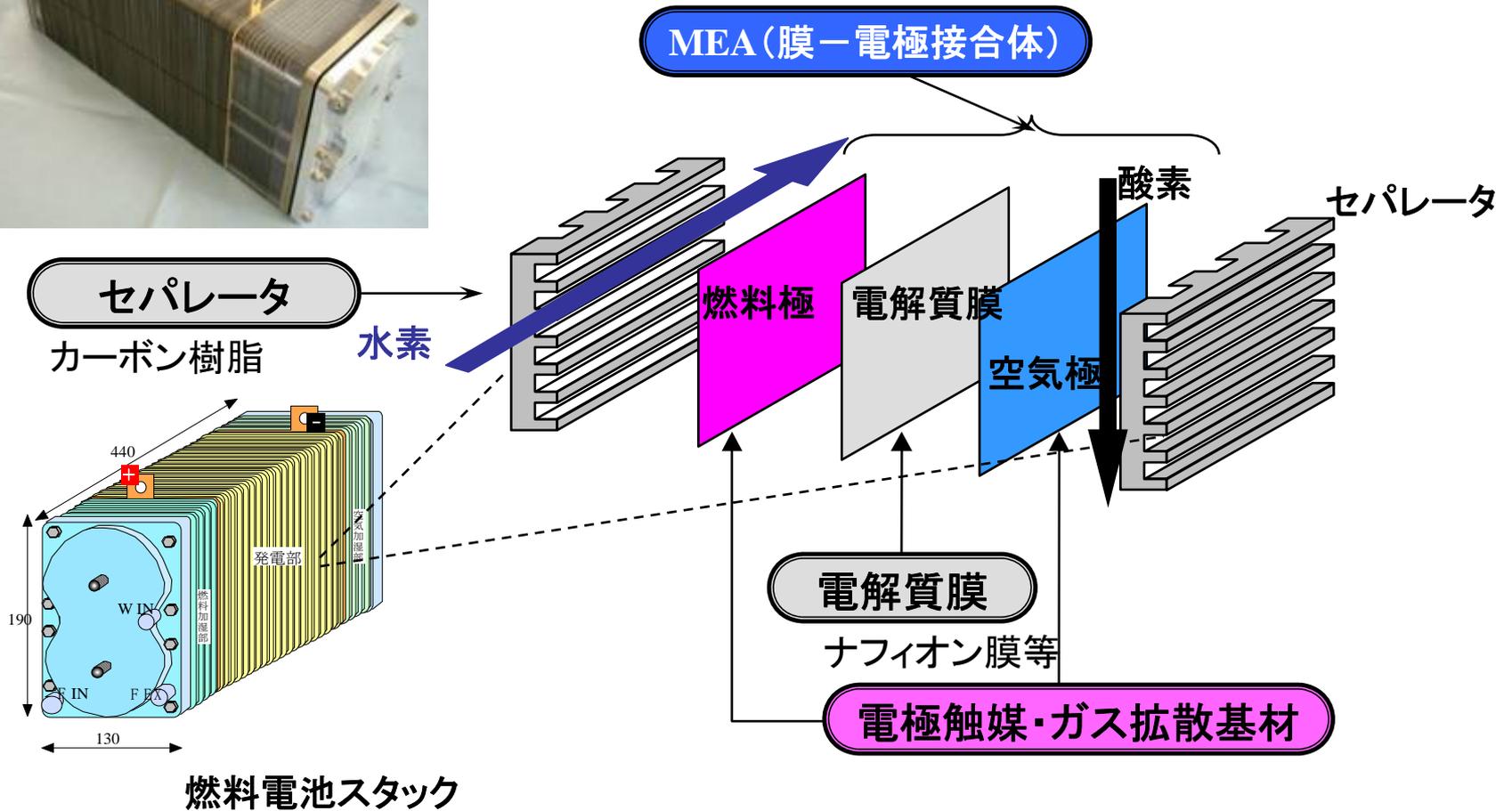
エネルギー：二次エネルギー

電気、水素、ガソリン

変換効率・・・発電、石油精製

利用効率・・・製鉄・自動車・冷暖房

# 燃料電池システムと材料



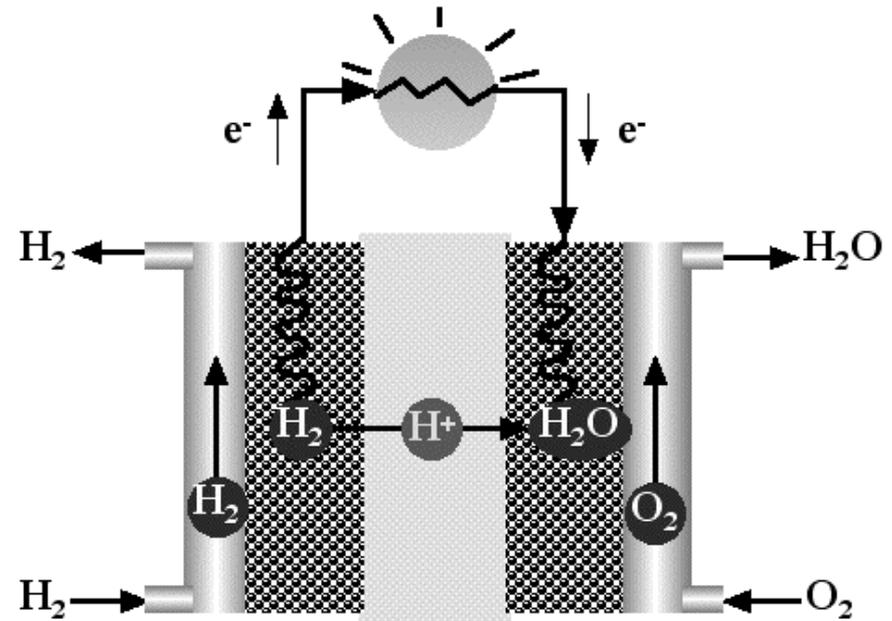
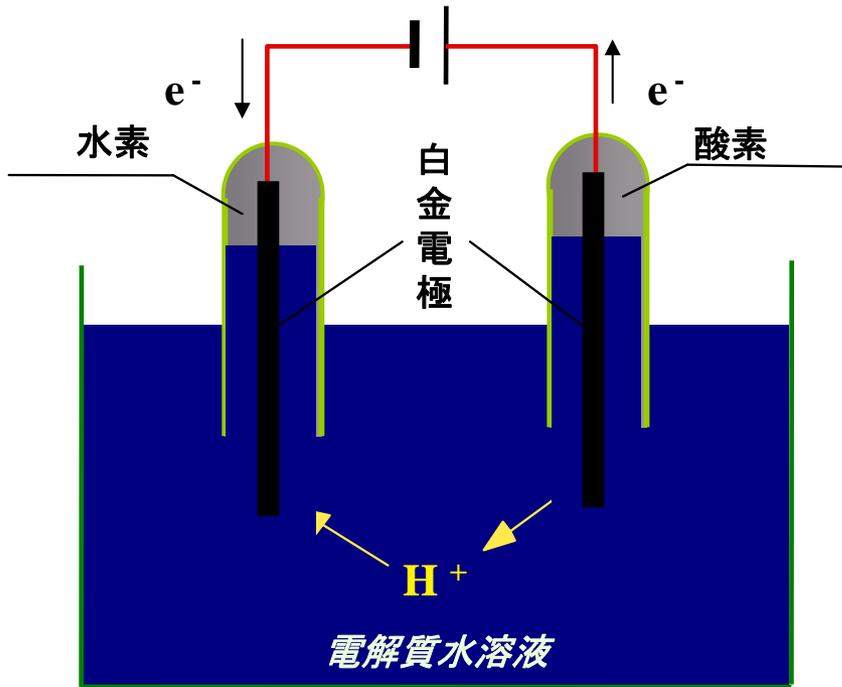
(提供：三菱電機株式会社)

# 燃料電池の原理

水の電気分解

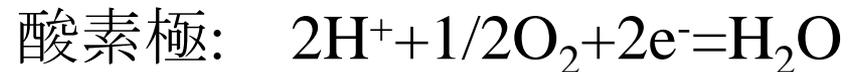
燃料電池

逆反応



1.2 V以上が必要

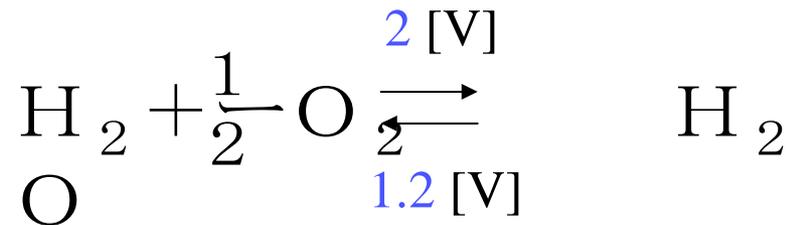
電気化学反応



# 理論最高効率

水の電解 最小1.2 [V] 最小エネルギー = 1.2 [V] × 電流 [A]

もし、2 [V]発電する燃料電池ができたとしたら、



一回、水の電気分解と燃料電池を回せば

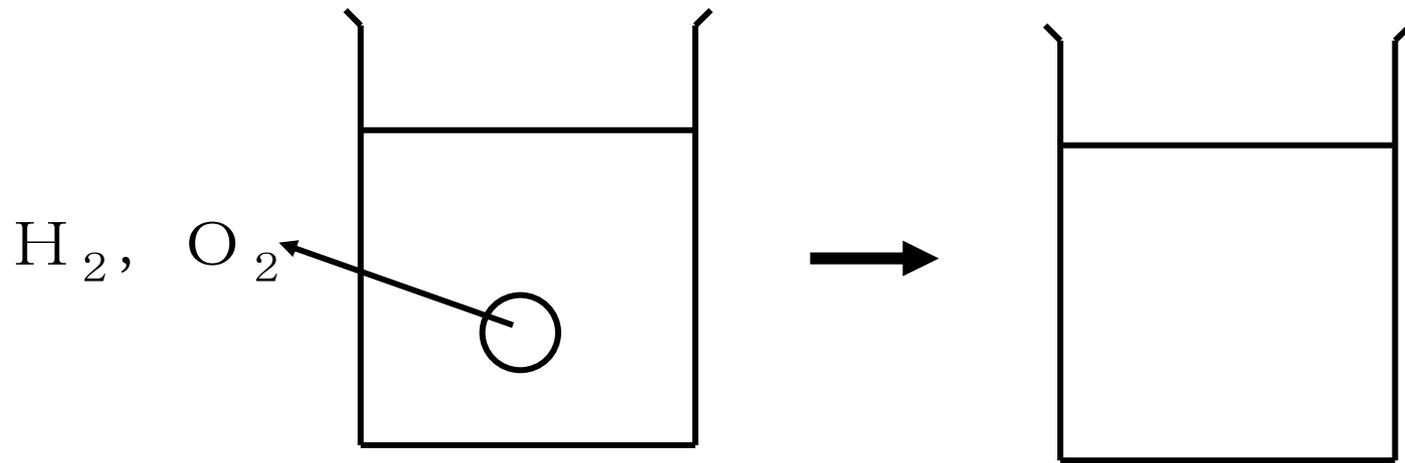
0.8 [V] × 電流のエネルギーを生み出せる

それは、エネルギー保存則に反する→できないはず。

1.2 [V]の燃料電池が、最高のエネルギー変換効率

# 効率ゼロのプロセス

- 1 起電力0ボルトの燃料電池
- 2 水の中で火をつけてただ燃やす



火をつける

実質的に何も変わらない  
水素と酸素が20度の水になった

# 熱力学



最初 ( $25^\circ\text{C}$ ) と最後 ( $25^\circ\text{C}$ ) だけで、変化の過程は関係ない

エネルギー発生量 = 電気 + 軸仕事 + 光 + 音 + ... + 熱

$$\Delta H (\text{一定}) = \Delta G + T \Delta S$$

仕事 (熱以外) として取り出しうる最大値!

$$\text{理論最高効率} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

熱発電でも燃料電池でも  
理論最高効率は同じ

# 燃料電池への期待

発電機の軸を回せば発電できる←自転車

火力発電←水蒸気や燃焼ガスのパワーでタービンを回転

←温度上げれば理想に接近

蒸気タービン

水蒸気温度が限界

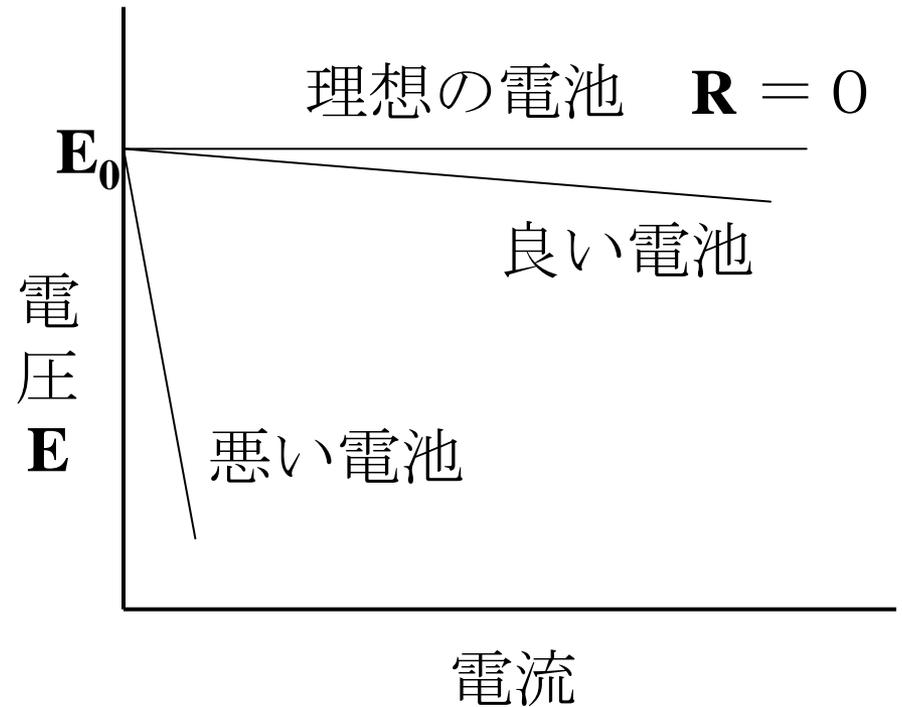
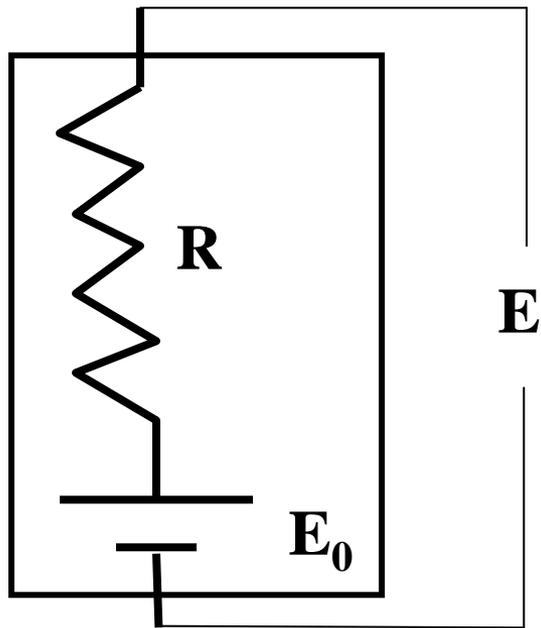
ガスタービン

材料が限界

燃料電池←熱にしないから、温度の制約なし

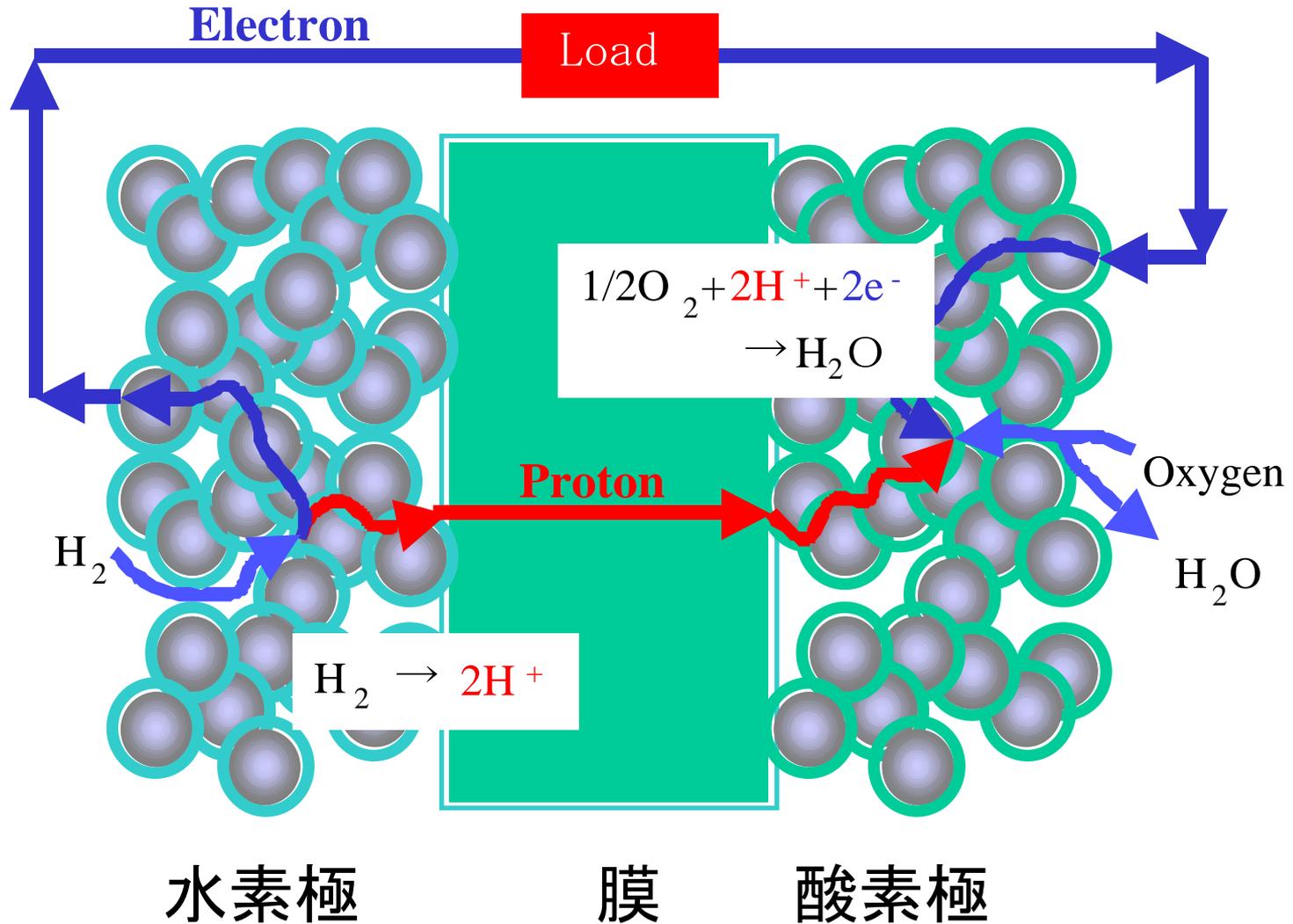
- 低温でも効率的に発電できる可能性
- 効率向上の筋道が見える（ような気がする）
- 小型化・移動用・分散定置型・ポータブルに応用可能  
負荷変動にも対応可能

# 効率 ( $E/E_0$ ) 低下の原因は内部抵抗



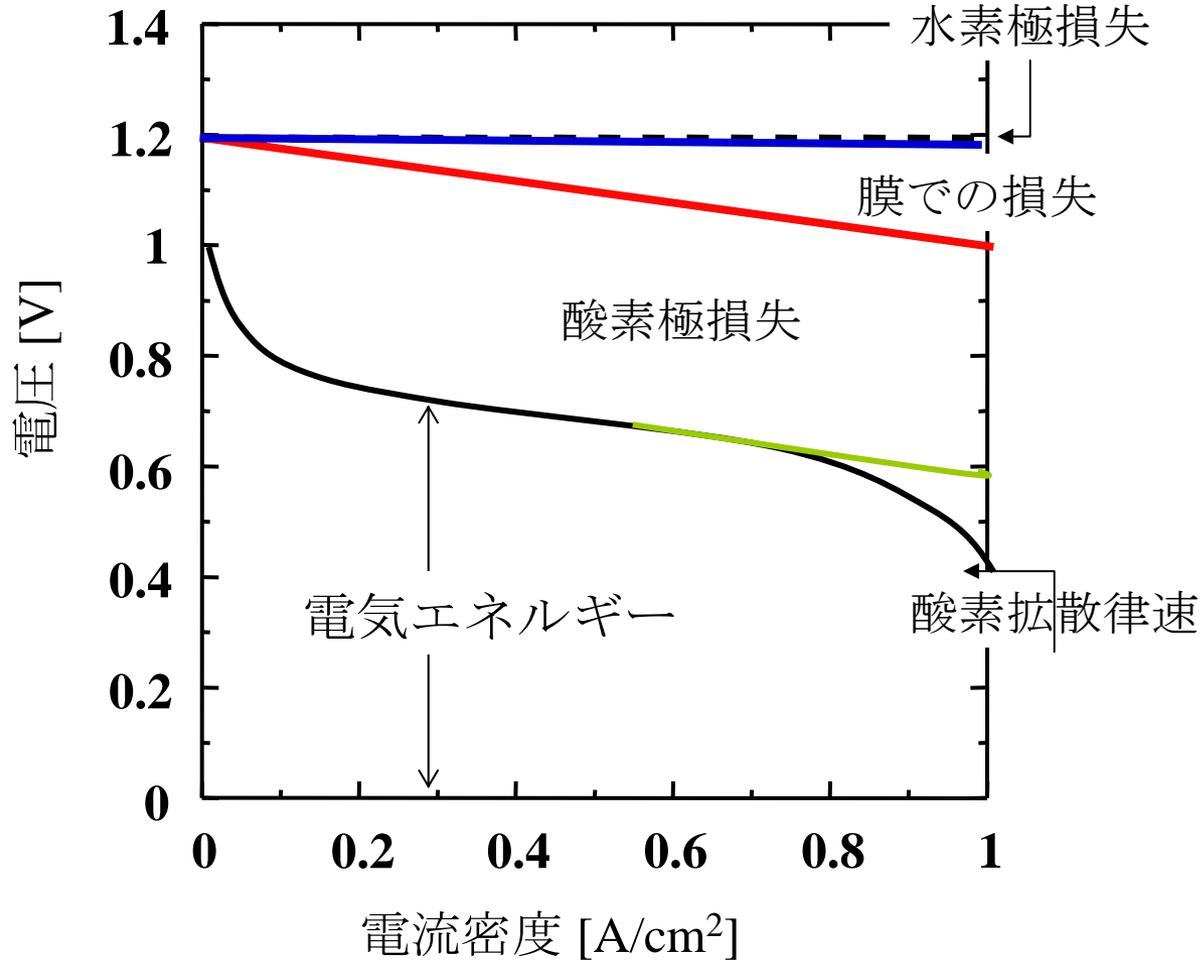
電流を取り出さなければ効率は上がるが、意味がない。

# 内部抵抗の本質は反応と拡散の速度



遅い過程が大きな抵抗 (律速)

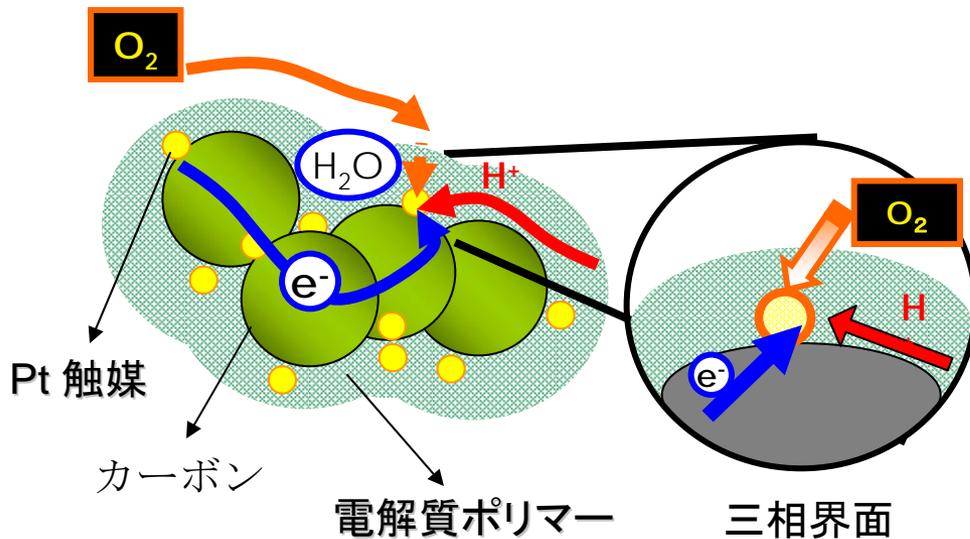
# 内部抵抗の分析



改良すべきは、酸素極→膜

# 分子・イオン・電子を白金・電解質・ガスに 同時接触させる

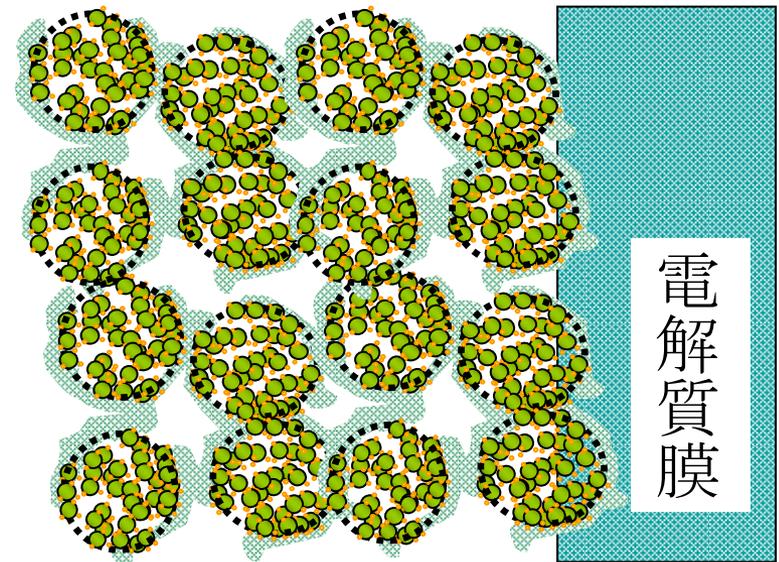
触媒層のナノレベル構造



原子レベル利用率向上のためのナノ化  
カーボン担体の大きさ： 30 nm  
Pt触媒粒径： 2~3 nm ←ほぼ100%露出

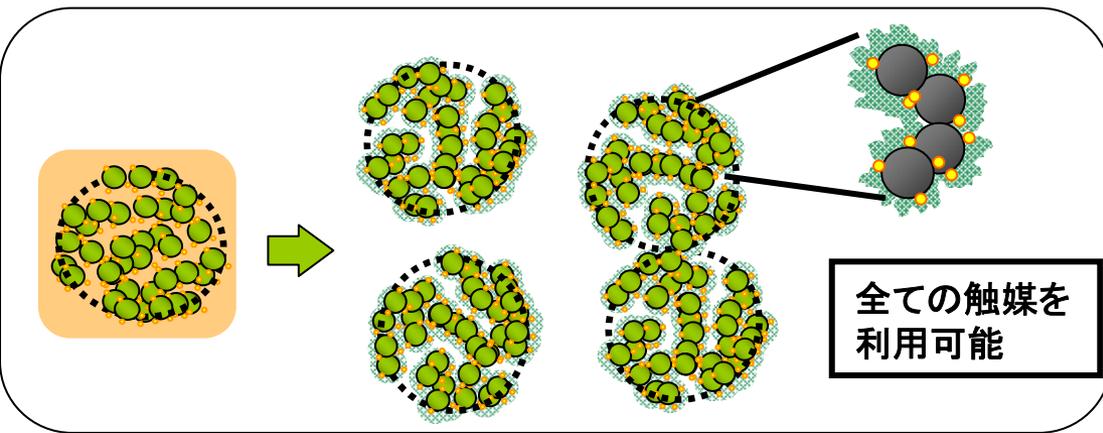
カーボン担体凝集し、  
電解質ポリマーが入れない

白金利用率 20~30%

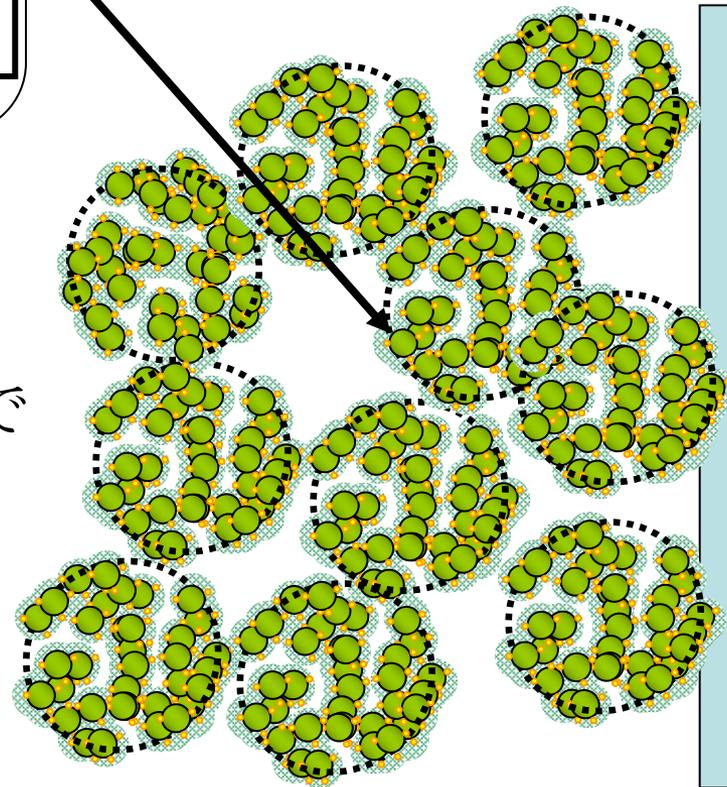


電  
解  
質  
膜

# ナノテクを用いた触媒層の構造制御

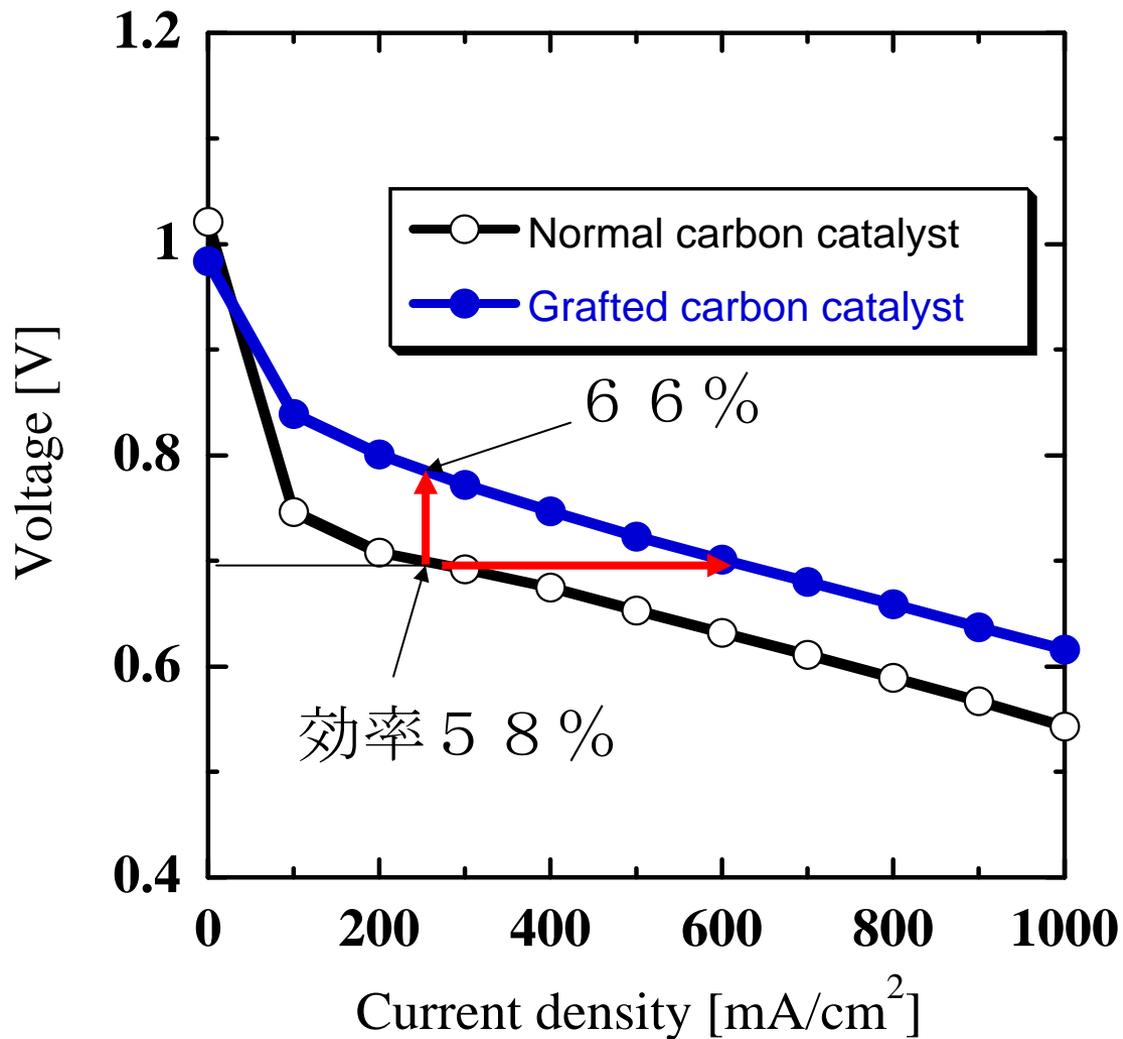


電解質ポリマーの原料である  
モノマー分子をカーボン凝集体上で  
重合させる  
そのためにカーボン表面を活性化



電解質膜

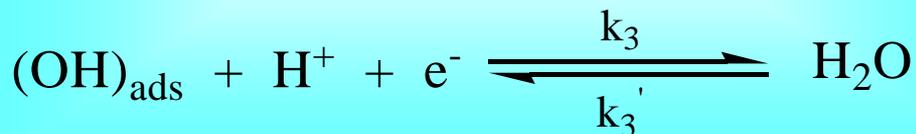
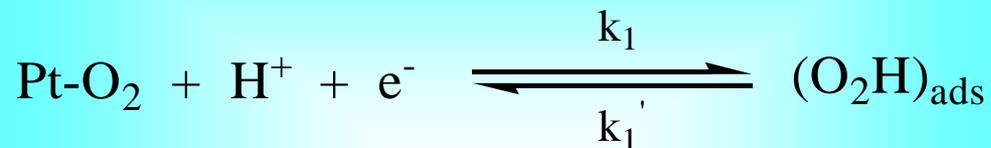
# 効率または容量の改良



他にも原因がある

# 酸素還元反応の律速を探る

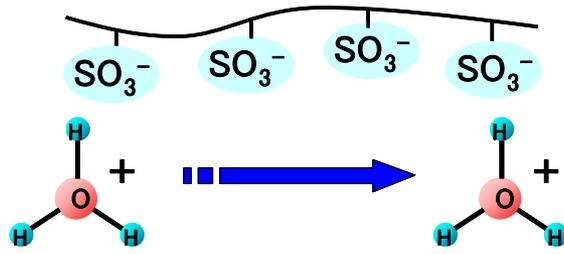
Pt表面での酸素還元反応



赤線の吸着が律速段階

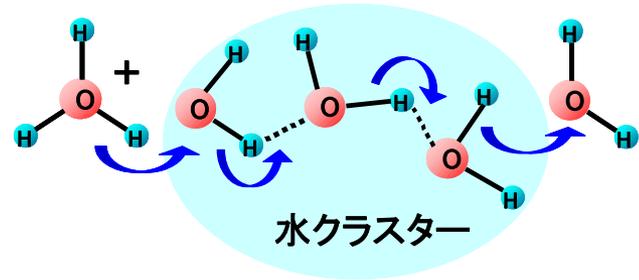
# 電解質ポリマー中プロトン伝導機構

ビークル機構

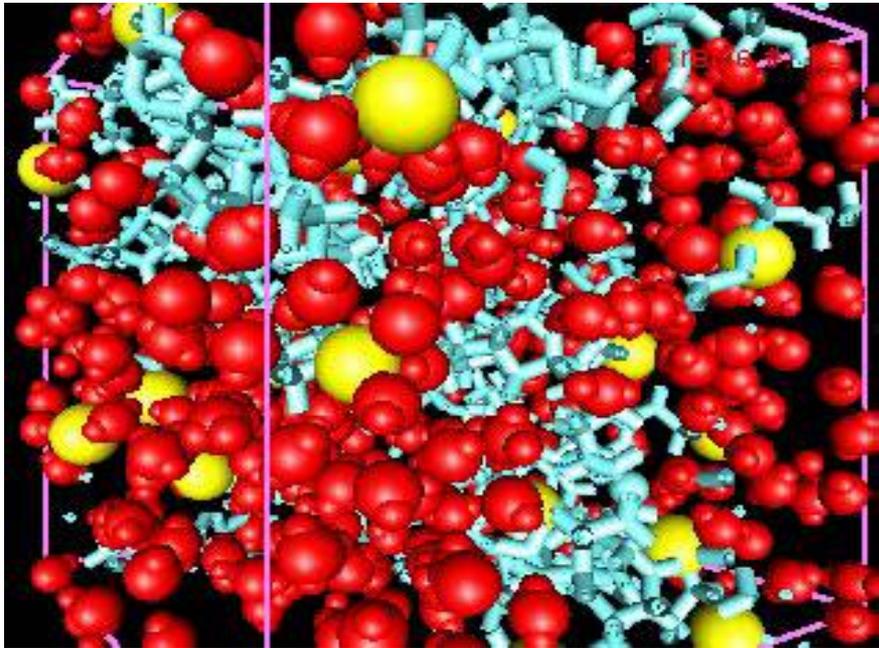


自由水が運搬

グロータス機構



スルホン酸基周辺の束縛水が運搬

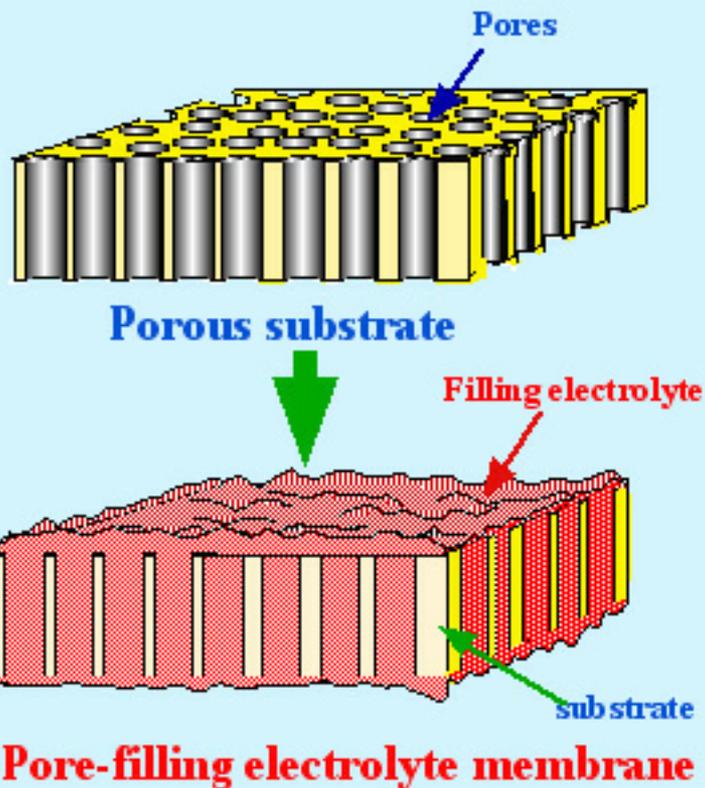


赤：水  
青：ポリマー骨格  
黄色：スルホン酸基

・水自身が $\text{H}_3\text{O}^+$ となって移動する（ビークル機構）

・水の水素が他の水の水素へ移動する（グロータス機構）

# ナノ多孔膜に電解質膜を充填



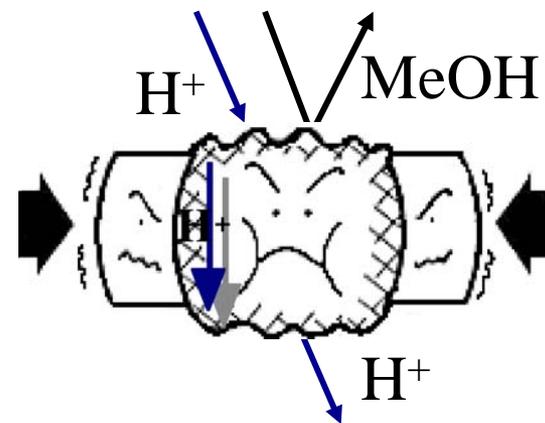
数十nmの細孔中に電解質ポリマーを充填

充填電解質ポリマーのミクロ構造・水構造を制御

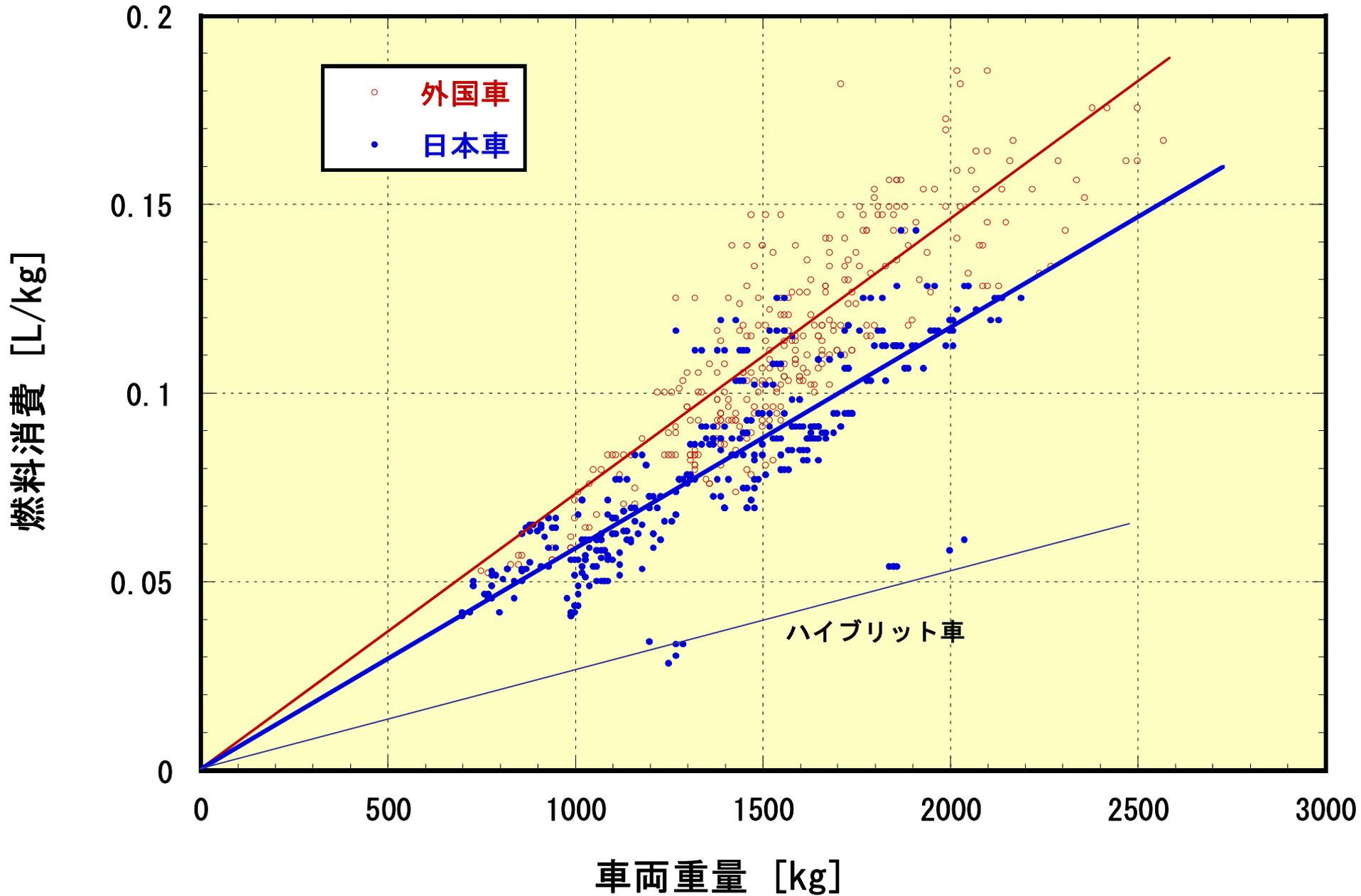
高いプロトン伝導性を維持しつつ、メタノール透過を従来膜の数百分のーに低減



乾燥状態の膜



膨潤状態の膜

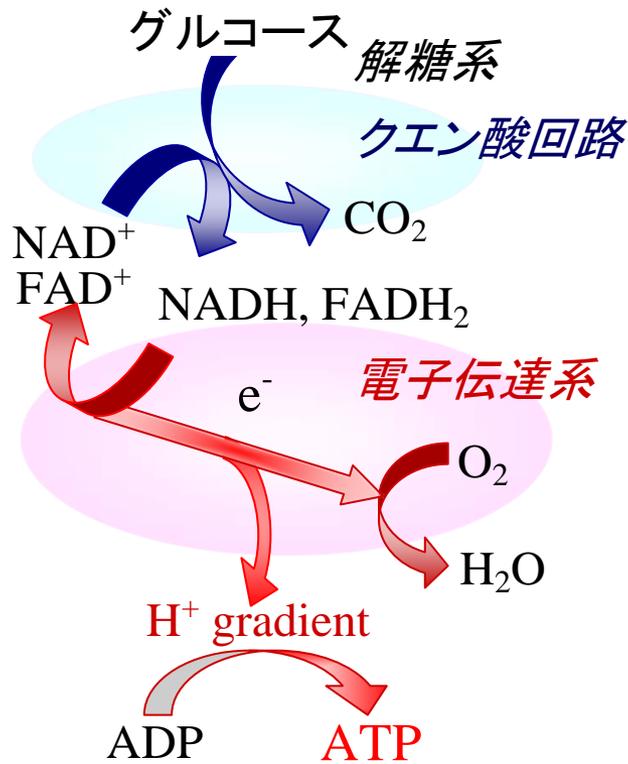


# 自動車のエネルギー効率 (tank to wheel)

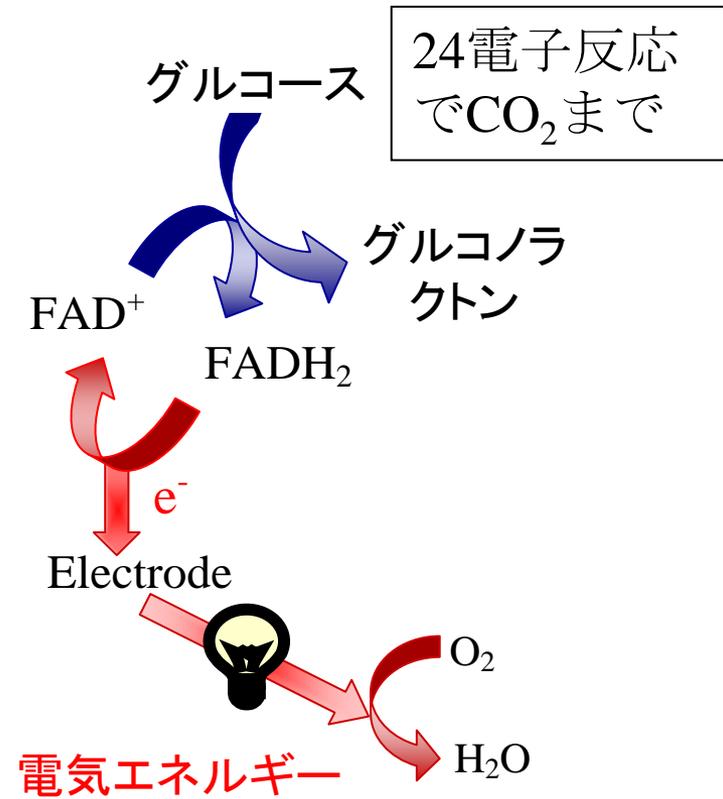
現在の自動車	13%	1倍
ハイブリッドの限界	35%	2.7倍
電圧0.96Vの燃料電池	80%	6倍
2分の1の軽量化		12倍

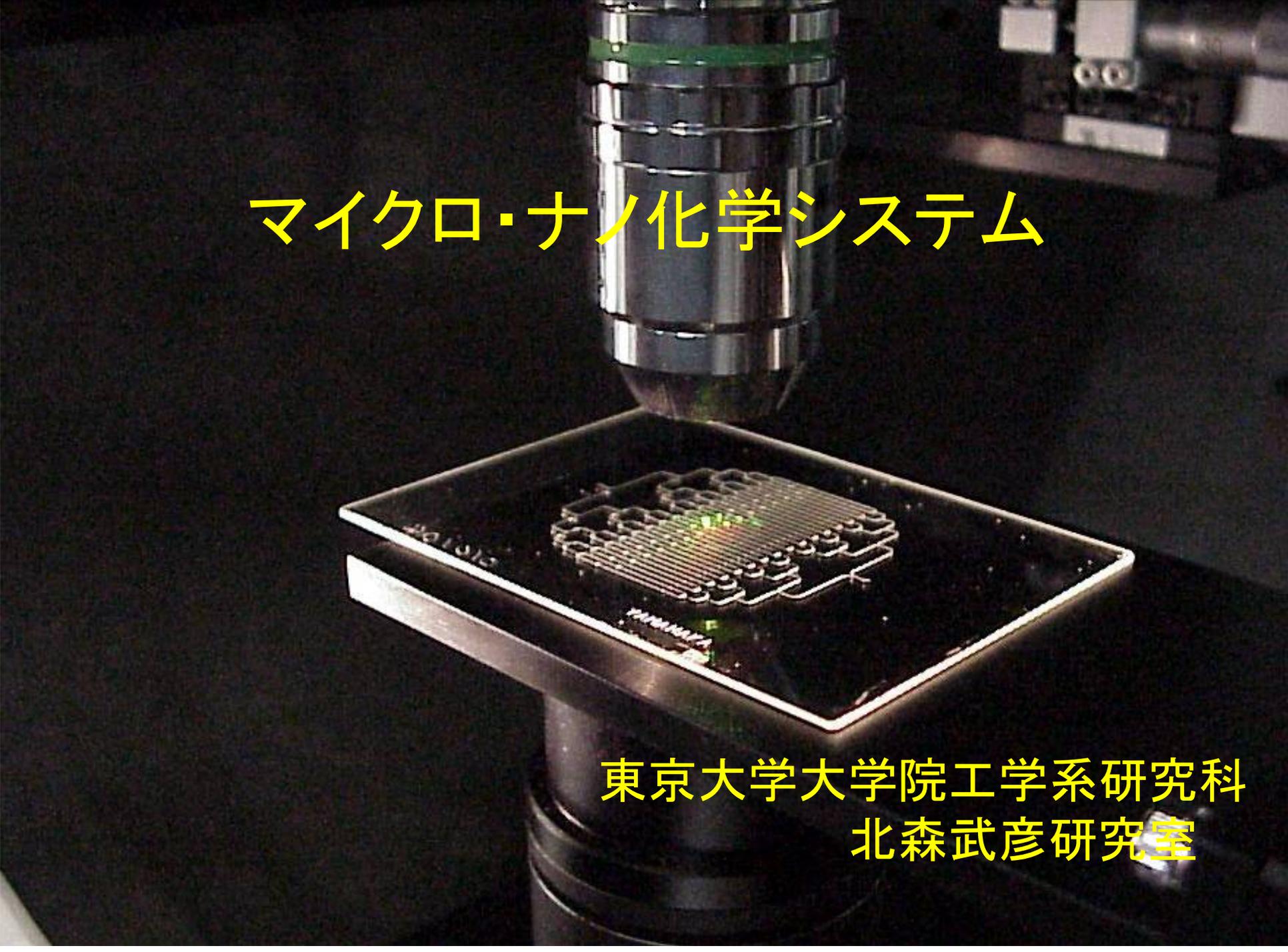
# バイオ燃料電池

< 生体 >



< バイオ燃料電池 >

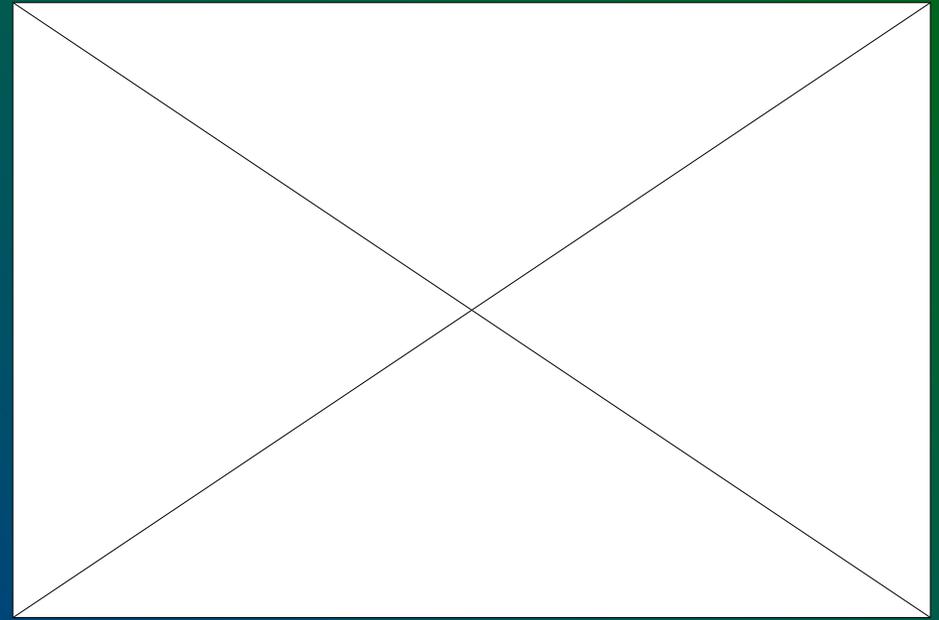
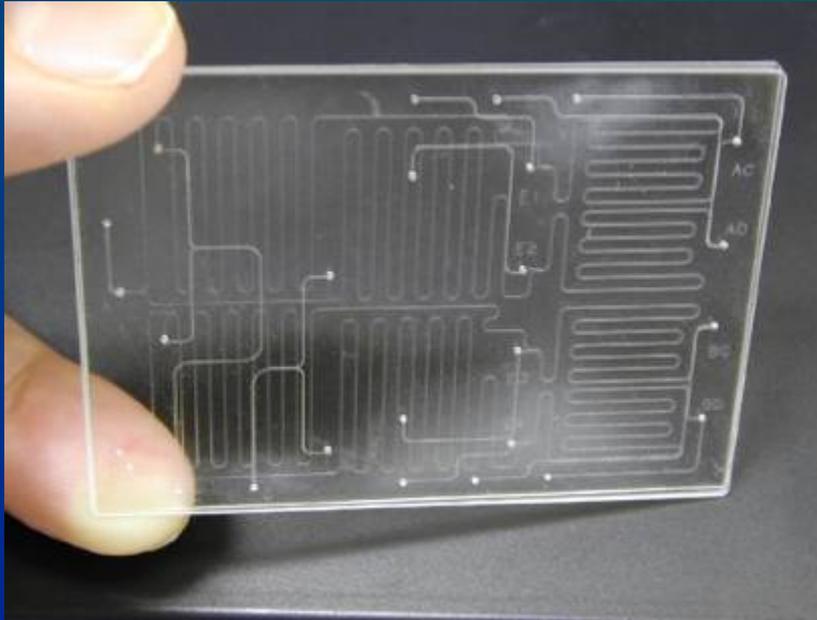


A scanning electron microscope (SEM) probe is positioned above a microchip on a sample stage. The probe is a cylindrical metal structure with a green band near the tip. The microchip is a square, dark-colored device with a grid of fine lines and a central square area. The background is dark, and the lighting highlights the metallic surfaces of the probe and the sample stage.

# マイクロ・ナノ化学システム

東京大学大学院工学系研究科  
北森武彦研究室

# 3次元マイクロ化学チップの例



## メリット

- ・高機能
- ・高制御性
- ・高設計性

## 独自技術

- ・マイクロ単位操作 (MUO)
- ・連続流化学プロセス (CFCP)
- ・熱レンズ顕微鏡 (TLM)

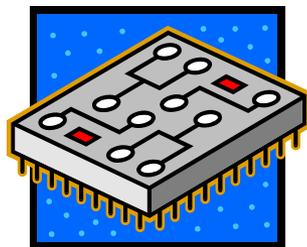
# エレクトロニクスとマイクロ化学チップとのアナロジー

エレクトロニクス



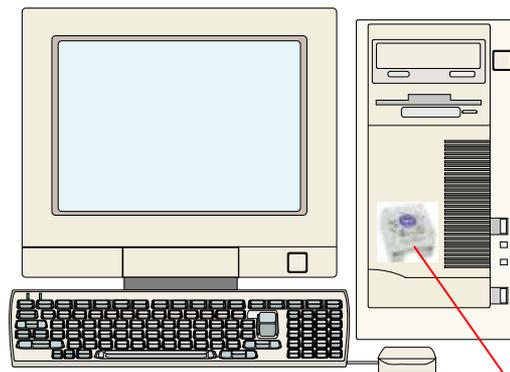
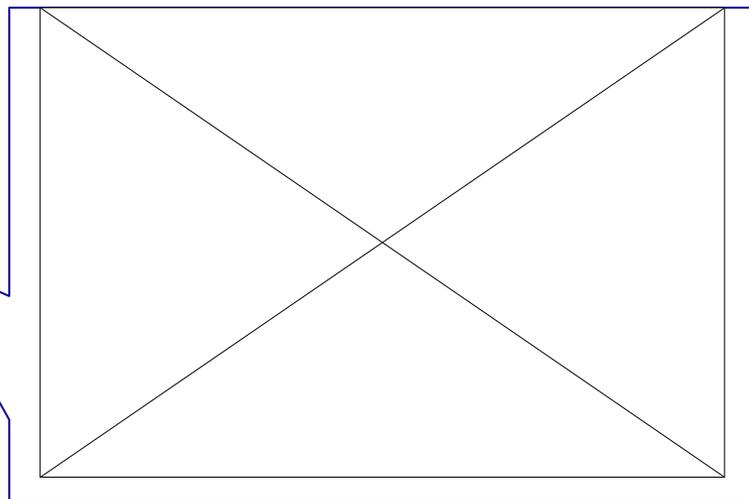
IC

抵抗・コンデンサ・ダイオードなど

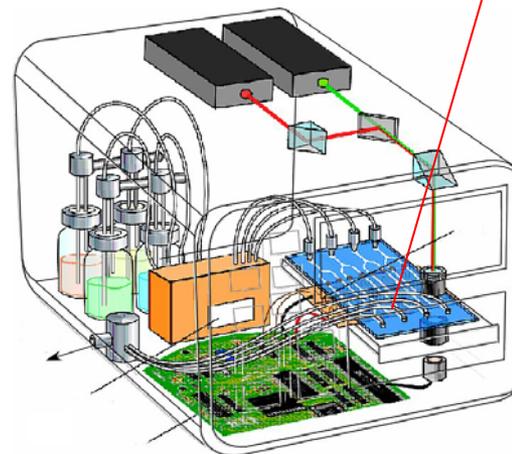


マイクロ化学チップ

反応・抽出・精製・蒸留, ...



CPU



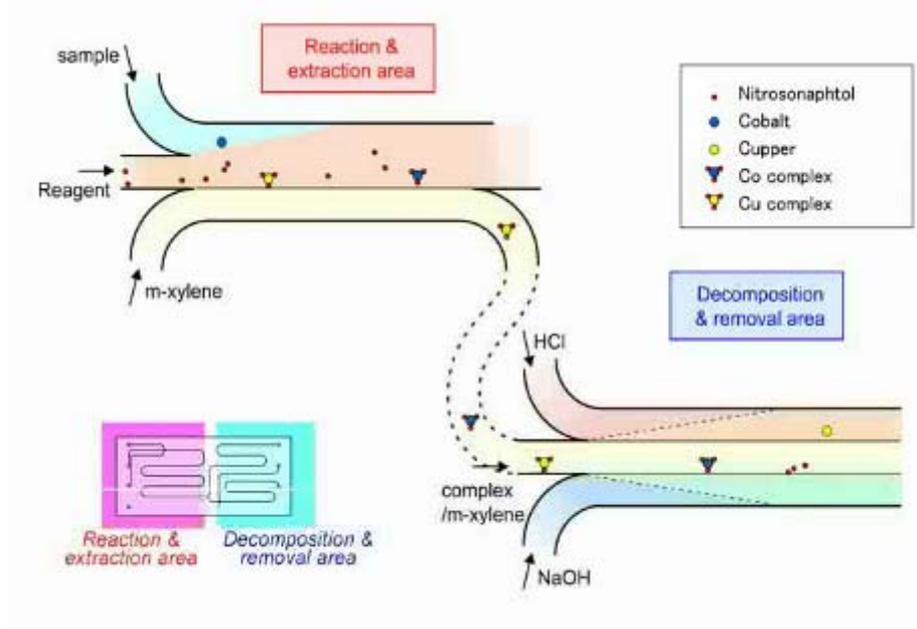
# マイクロ化学チップの集積部品と化学の集積回路

マイクロ単位操作 (MUO) = 集積部品

連続流化学プロセス (CFCP) = 集積回路

▶ マイクロ多相流によるMUOの自由な組合せ = 化学の集積回路

液液	相合流 	相分離 	
	混合・反応 	分子輸送・溶媒抽出 	
気液	相合流 	気液分離 	蒸発・濃縮 
	気液反応 	ガス吸収・濃縮 	気泡除去 
	蒸留 	凝縮 	
固液	カラム分離 	膜分離 	分子捕捉・固相抽出 
その他	加熱 	細胞培養 	

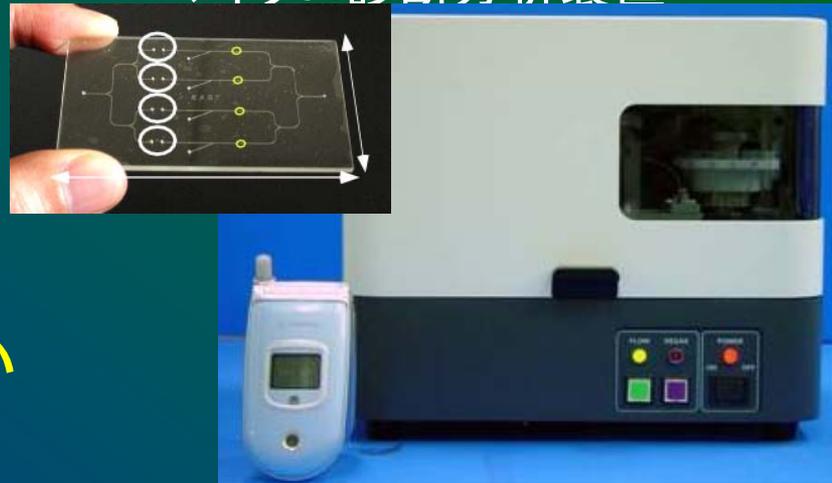


# マイクロ化学チップ搭載化学バイオ機器

$\mu$ -Extraction chip  
超小型環境水分析装置



$\mu$ -ELISA chip  
マイクロ診断分析装置

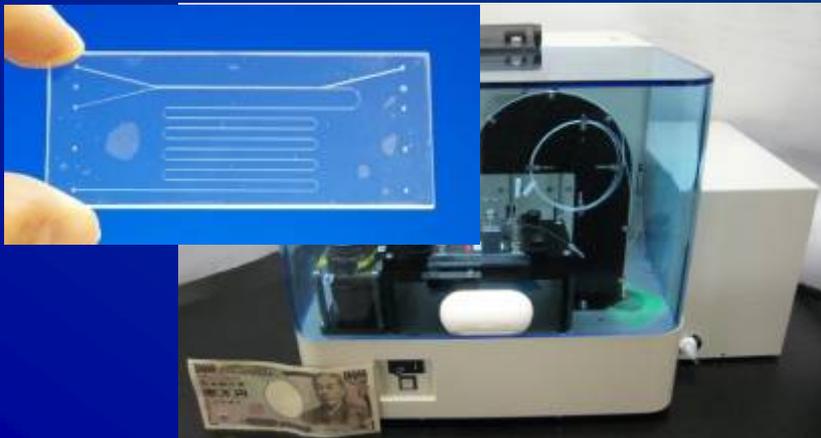


小さい

早い

簡単

$\mu$ -Gas extraction chip  
クリーンルームアンモニア分析装置



デスクトップ化学プラント  
(ゲル微粒子の生産30t/year)



1,500 チップ超並列搭載

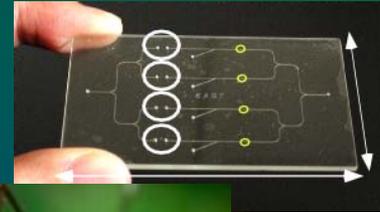
# 例1: マイクロ診断システム

癌、アレルギー、肝臓病、心臓病など

Conventional machine

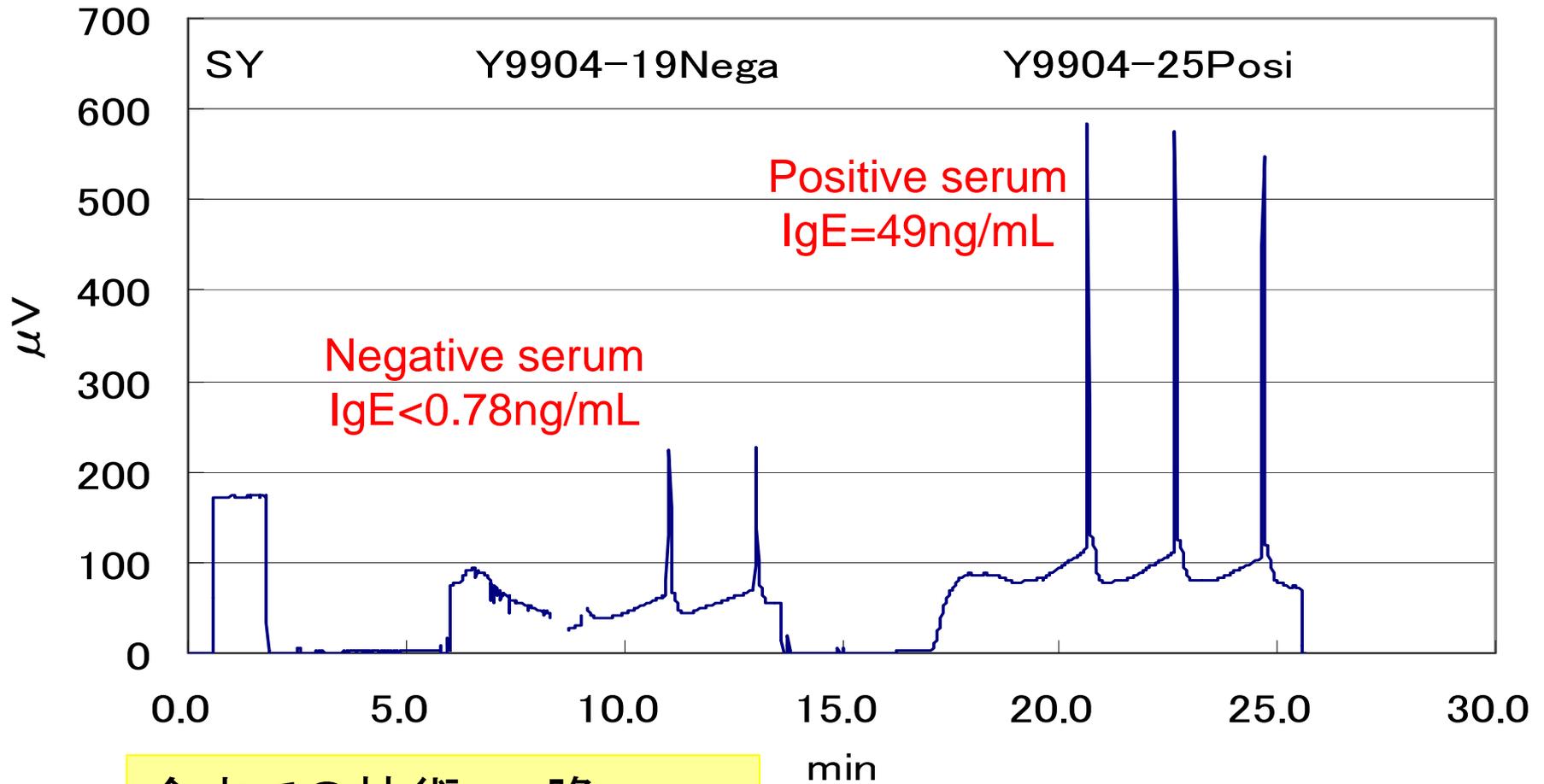


Microchip machine



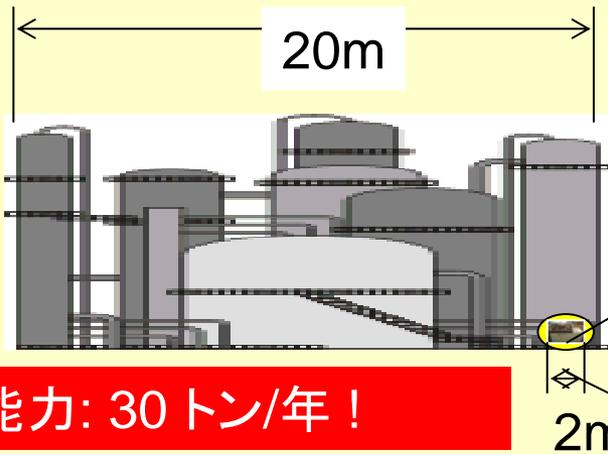
・血液(血漿)量	: mL	→	$\mu\text{L}$ 以下	無痛
・分析時間	: 日、時間	→	分、秒	その場
・操作	: 専門家	→	一般人	
・価格	: 1,000万円以上	→	100万円以下	
・ユーザー	: 大病院、分析会社	→	個人	検査のパーソナル化

# 高速アレルギー診断の例 - 花粉症特異抗体の検出 -



今までの技術：一晩  
マイクロ化学チップ：4分

# 工場をチップに

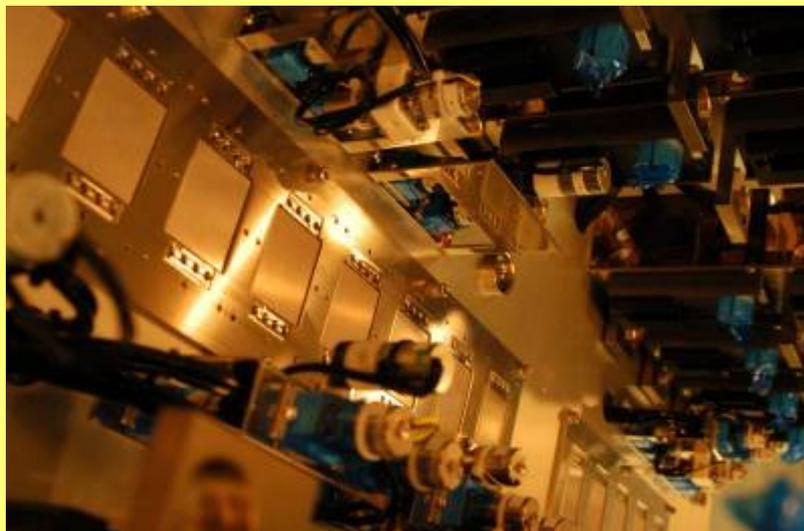


デスクトップ化学プラント



生産能力: 30トン/年!

- ・省スペース
- ・省エネルギー
- ・コスト削減



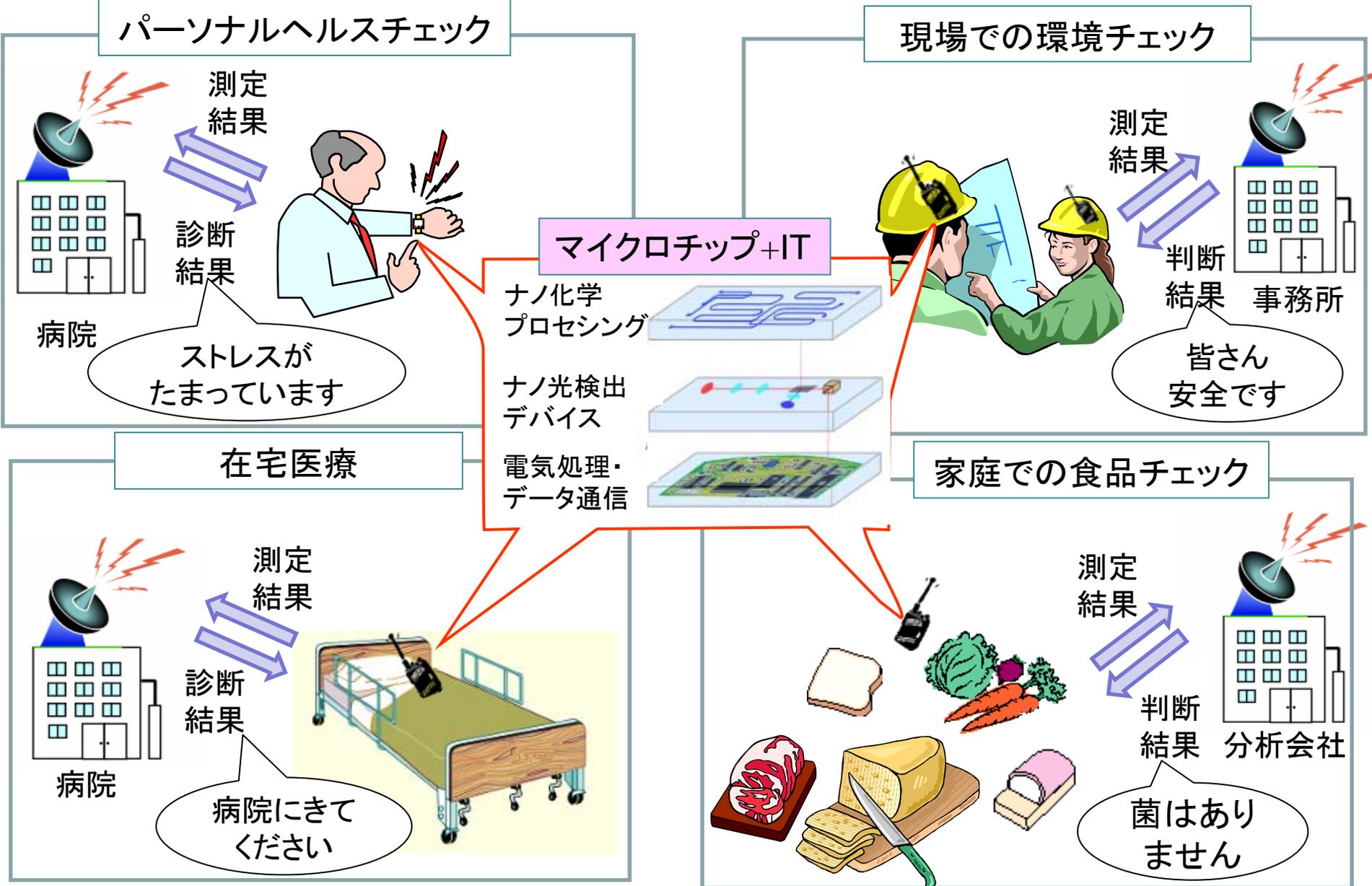
抗がん剤生産プラント  
有毒・爆発性

10kg/月 → 医薬品生産に充分量

- ・リスク低減
- ・オンデマンド操作

# 安全・安心な社会への貢献

## デバイスを使った分析・診断機能のネットワーク化

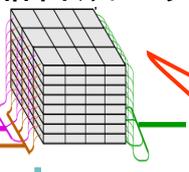


# 化学合成・製薬や資源・エネルギー問題への貢献

化学合成・製薬

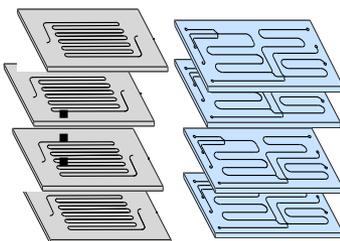
資源・エネルギー

病院内  
医薬品合成プラント



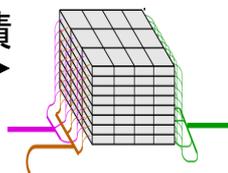
マイクロ化学プラント

マイクロチップ

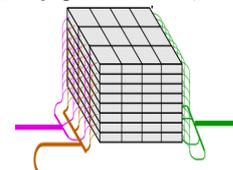


集積  
→

マイクロ  
化学プラント



溶媒抽出プラント



短寿命放射性診断薬の用事調整  
テーラーメイド医療

貴重資源を低エネルギーで回収  
(ウラン、レアメタルなど)

# 必要な科学・技術

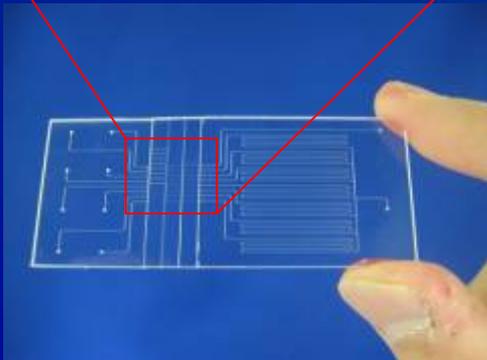
- |          |                      |
|----------|----------------------|
| 加工       | 1) マイクロ・ナノ加工         |
| 流体制御     | 2) マイクロ流体制御          |
|          | 3) マイクロ流体制御デバイス      |
| インターフェース | 4) 表面修飾              |
|          | 5) 界面流体制御            |
| 検出       | 6) 超高感度検出            |
| プロセス     | 7) 化学反応制御            |
|          | 8) 化学プロセス制御          |
| システム     | 9) システム設計・制御         |
| 科学       | 10) マイクロ・ナノ流体、化学、生化学 |

最強!

工学・理学の高度集約技術と新しい学術

# マイクロバルブ 無いものは自分達で作る

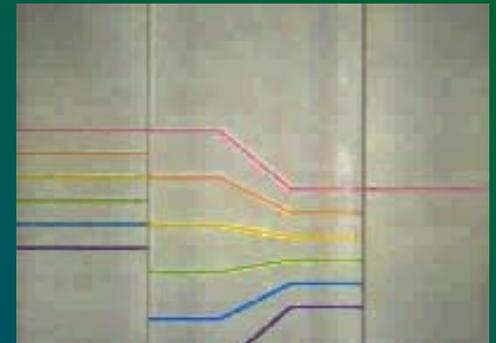
基盤構造



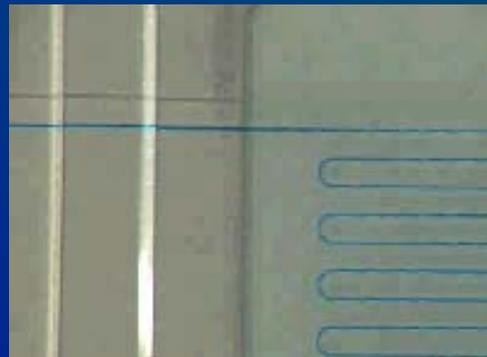
ナノインジェクター



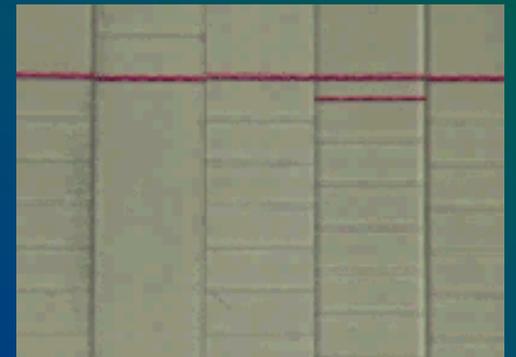
スイッチング



気体導入



ディスペンサー



様々なバルブの例

# サイズ階層とマイクロ・ナノ化学チップ



## 拡張ナノ空間の特性

- ・ナノ流体特性
- ・ナノ空間液体構造
- ・ナノ空間反応特性

常識がまだない世界

## マイクロ空間の特性

- ・極短物質・エネルギー拡散距離
- ・重力  $\ll$  界面張力
- ・層流

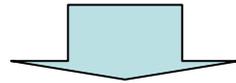
常識が重なり非常識になる世界

# マイクロチャネルの中の二相流

# 一流線追跡

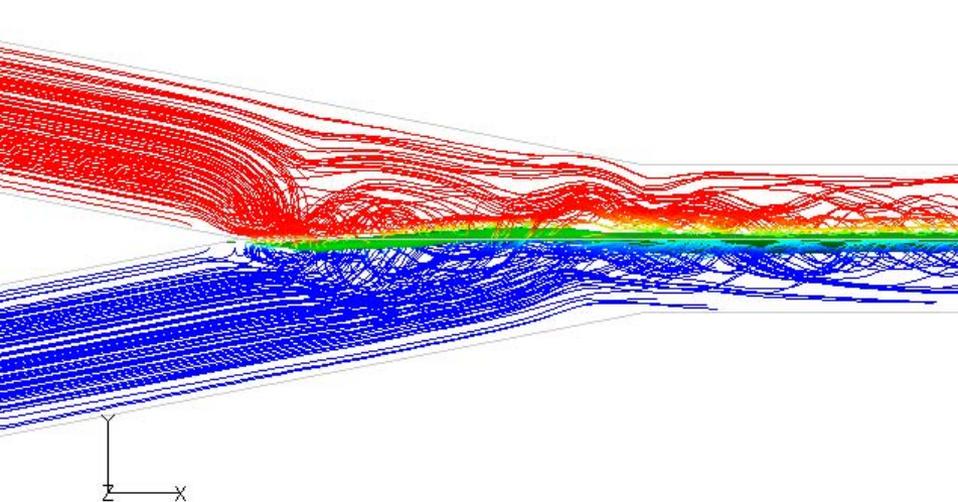
## 常識集

- ・重力は効かず界面張力支配 → 左右に並ぶ
- ・レイノルズ数はせいぜい5 → 層流

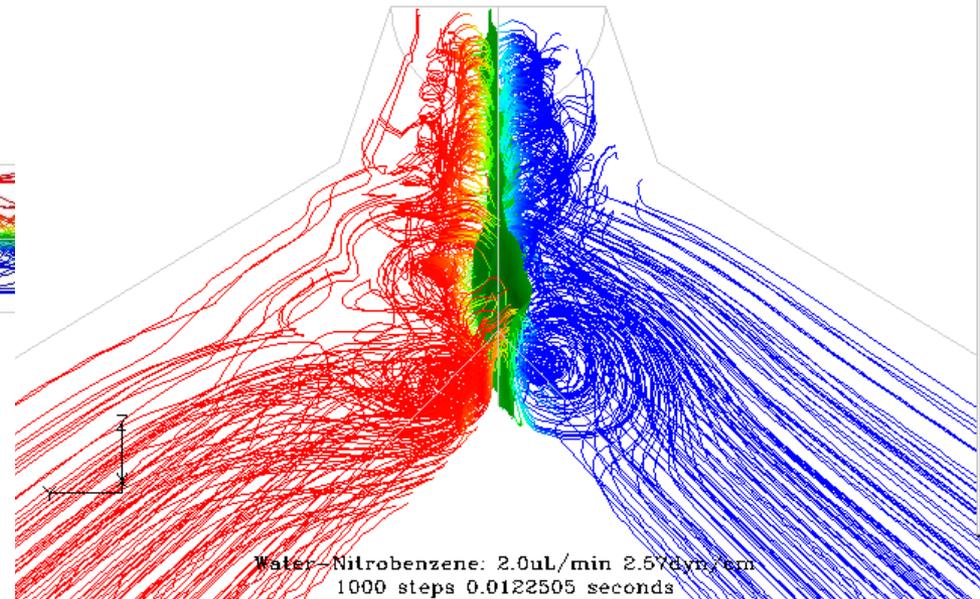


- ・層流が界面でかき混ぜられる → 乱流に見える(非常識)

部分的に見れば層流  
全体的に見れば乱流



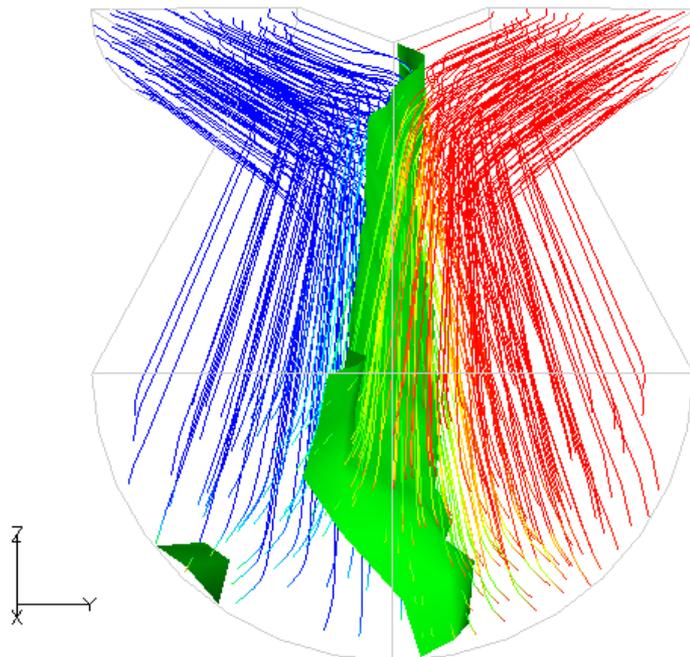
Water-Nitrobenzene: 2.0uL/min 2.57dyn/cm  
1000 steps 0.0122505 seconds



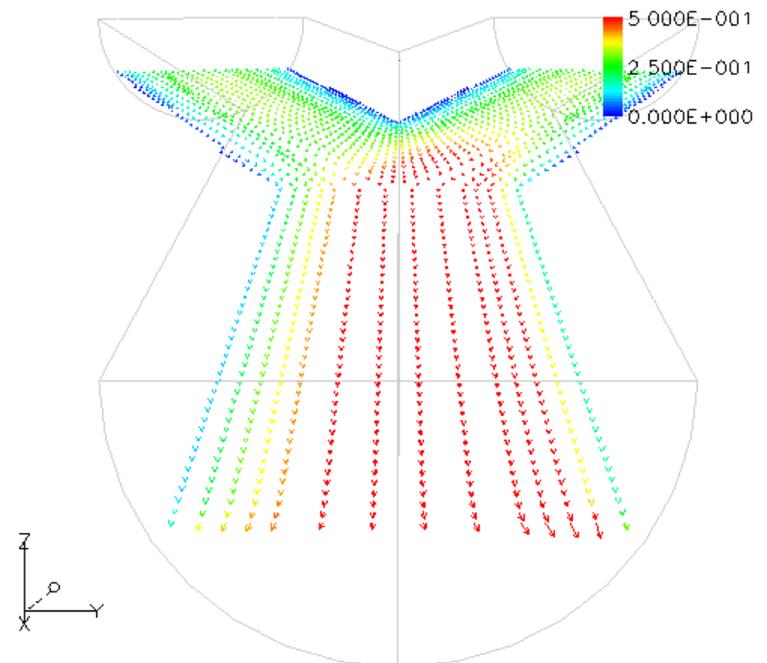
Water-Nitrobenzene: 2.0uL/min 2.57dyn/cm  
1000 steps 0.0122505 seconds

# マイクロ二相流の3次元シミュレーション

マクロの常識なら層流で  
流れは乱れない



Water-Nitrobenzene: 2.0uL/min 0.0dyn/cm  
1000 steps 0.233107 seconds

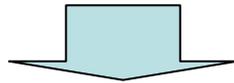


Water-Nitrobenzene: 2.0uL/min 0.0dyn/cm  
20 steps 0.00230042 seconds

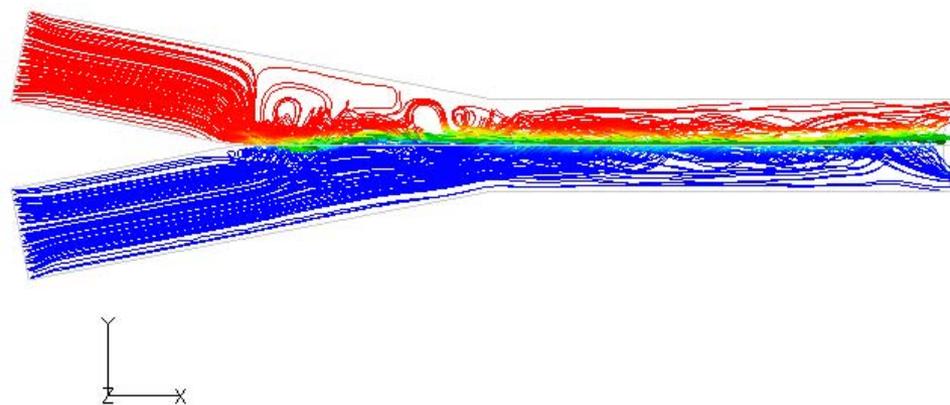
# マイクロ二相流の3次元シミュレーション

## 常識集

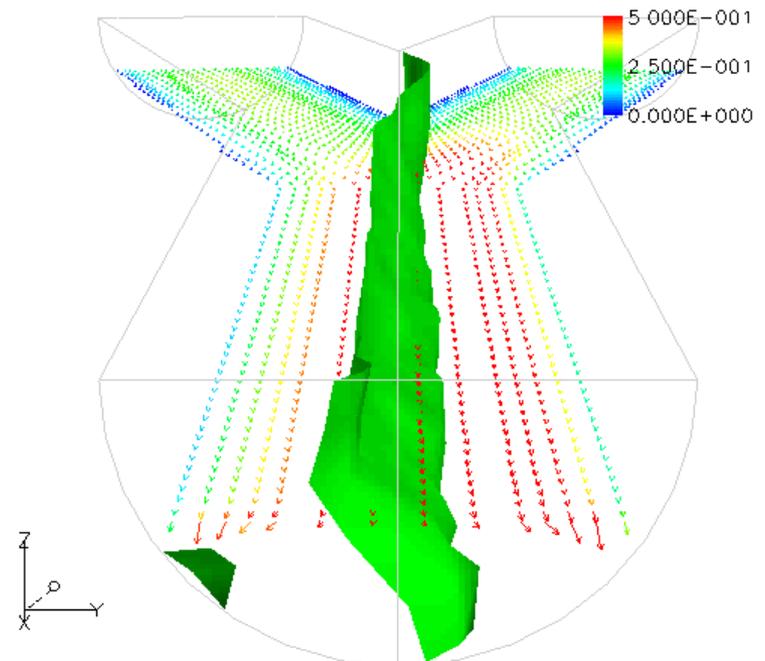
- ・重力は効かず界面張力支配 → 左右に並ぶ
- ・レイノルズ数はせいぜい5 → 層流



- ・層流が界面でかき混ぜられる → 乱流に見える(非常識)

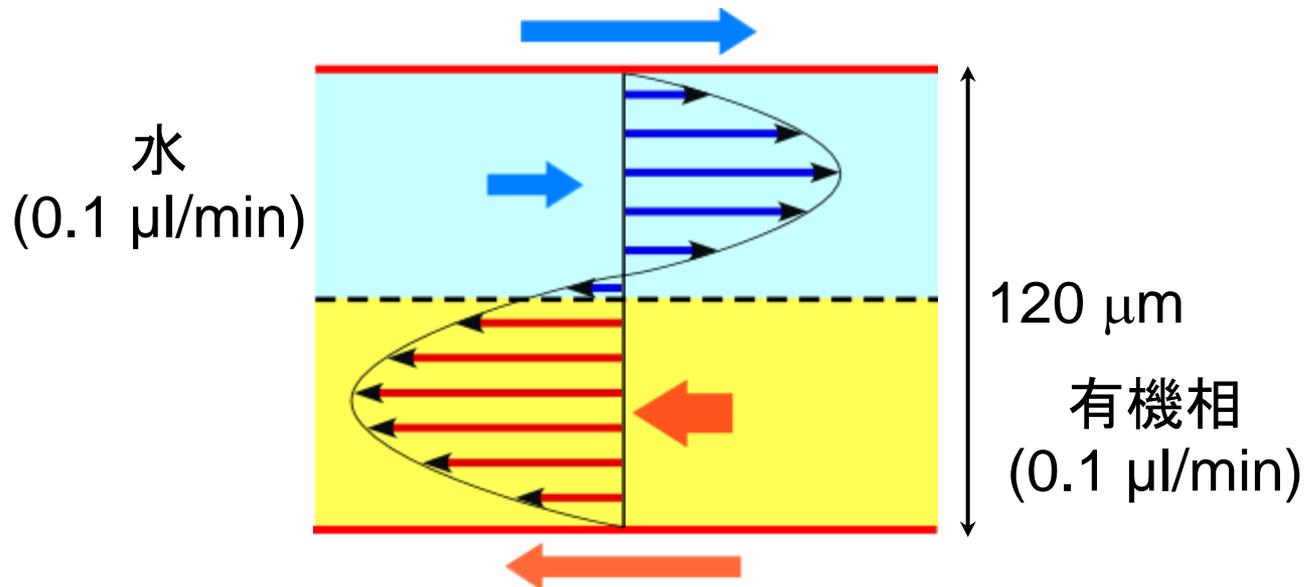
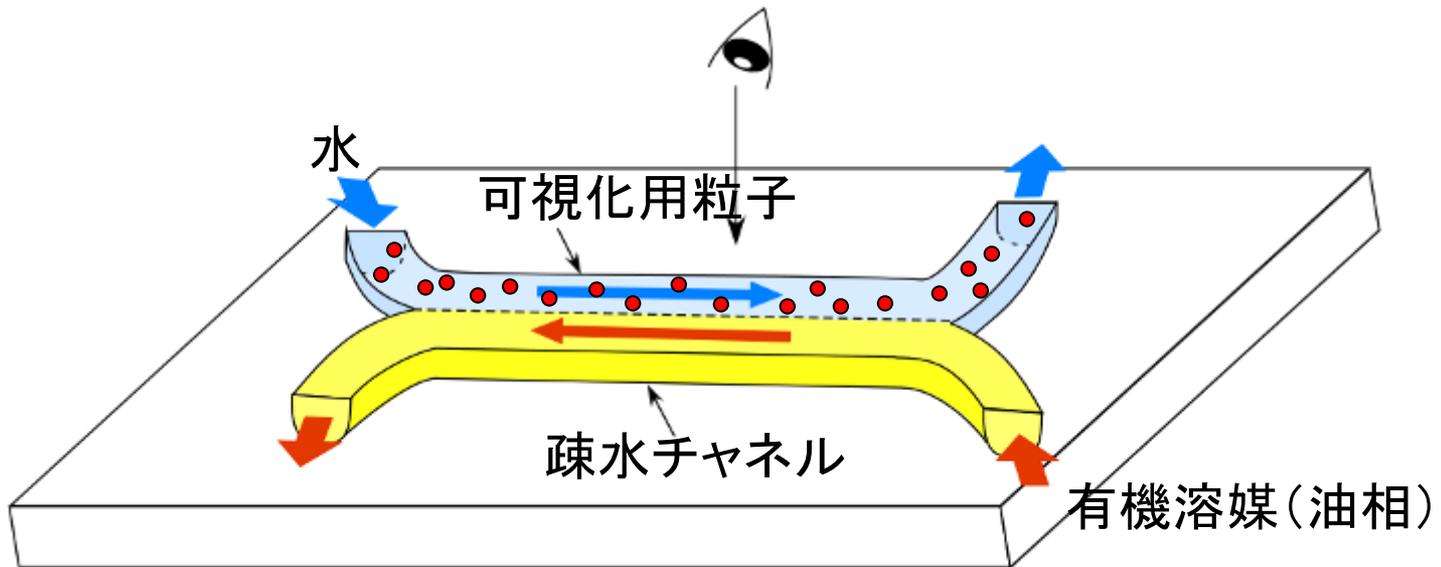


Water-Nitrobenzene: 2.0uL/min 2.57dyn/cm  
1000 steps 0.0065727 seconds

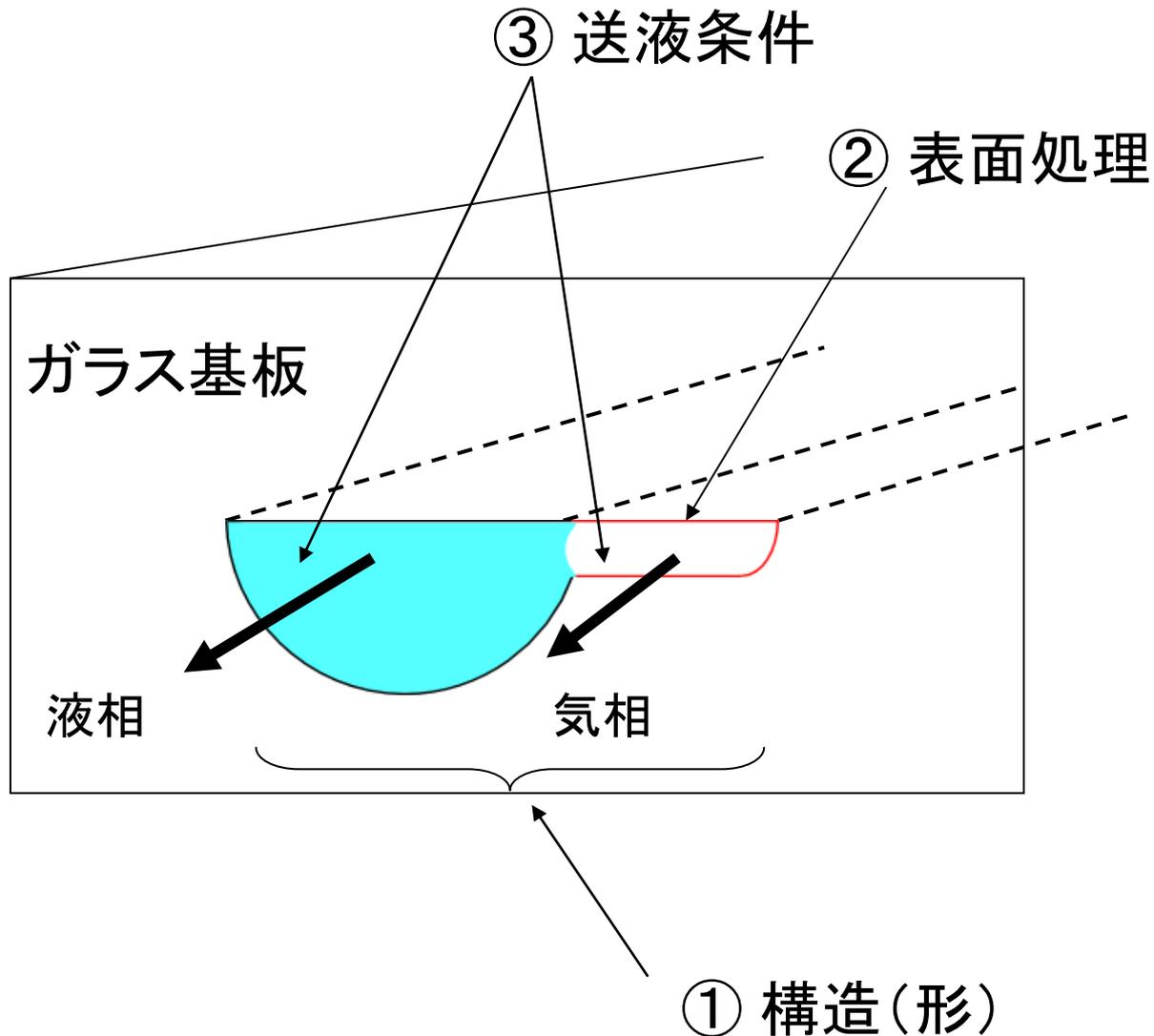


Water-Nitrobenzene: 2.0uL/min 2.57dyn/cm  
1 steps 1e-006 seconds

# 水と油の対向流



# 気相と液相の平行流も実現 (3つの条件)



# サイズ階層とマイクロ・ナノ化学チップ



## 拡張ナノ空間の特性

- ・ ナノ流体特性
- ・ ナノ空間液体構造
- ・ ナノ空間反応特性

常識がまだない世界

## マイクロ空間の特性

- ・ 極短物質・エネルギー拡散距離
- ・ 重力  $\ll$  界面張力
- ・ 層流

常識が重なり非常識になる世界

# Nano-in-Micro構造の構築と研究の目的

nm階層  
(トップダウン)

- 電子線描画
- ドライエッチング
- スパッタ

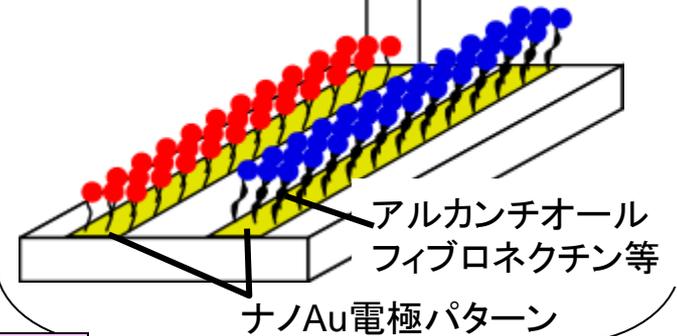
cm階層

μm階層

nm階層(ボトムアップ)

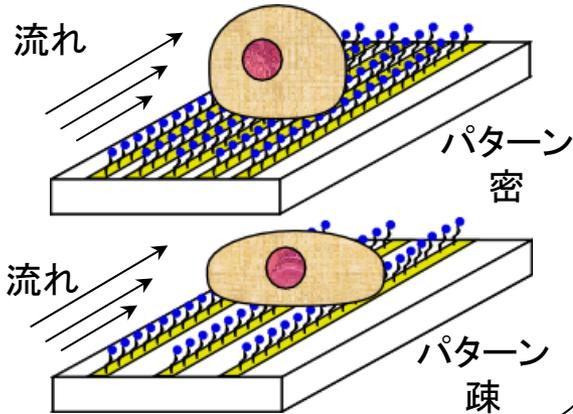
ナノ材料パターニング技術

10~100 nm



細胞増殖／分化制御

流れ



ナノ化学プロセス

液体

気体

相転移

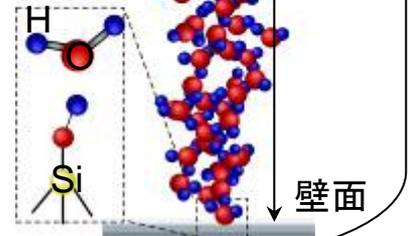
ナノ構造物

試薬A

試薬B

ナノチャネル  
10~100nm

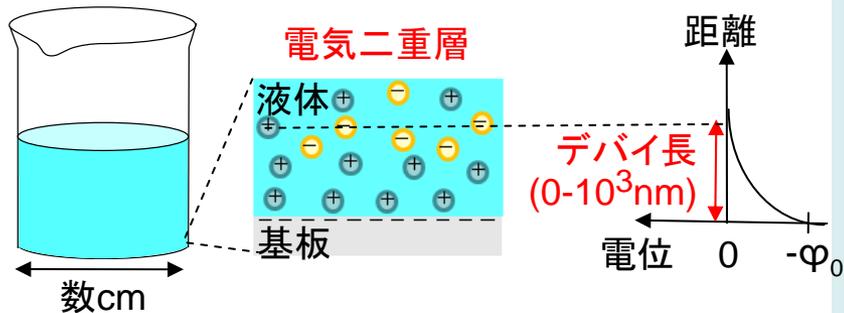
ナノ溶液物性



# 拡張ナノ空間流体工学の学術的位置づけ

## 化学と機械工学による研究

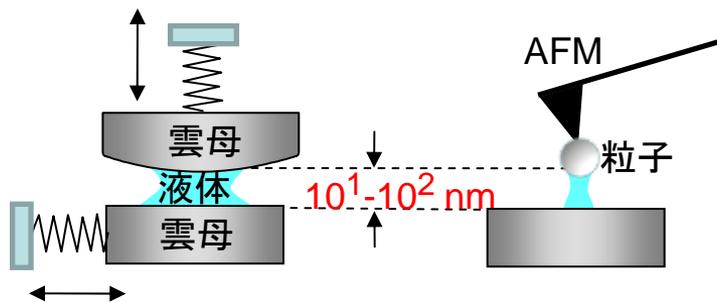
### (1) 表面近傍の化学熱力学



1960年より500報以上研究報告

開放空間(バルク液体と平衡)

### (2) ナノ空間の機械工学(トライポロジー)



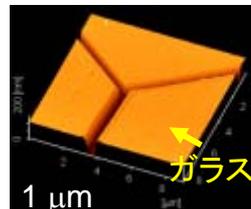
1980年より200報以上の研究報告

静止流体・動的化学プローブ  
反応などの化学操作は困難・対象外

## 拡張ナノ流体工学からのアプローチ

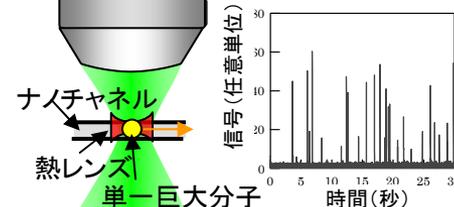
### 基本的実験ツール開発(つくる・はかる・ながす)

#### ナノ加工・張り合わせ



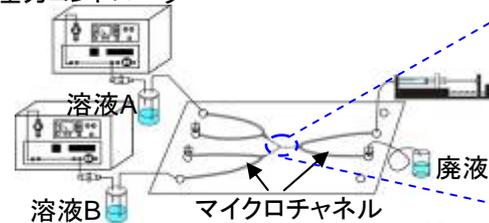
Anal.Chem.2002 Angew.Chem.Int.Ed 2007

#### 熱レンズ顕微鏡検出



Anal.Sci.2008 μTAS2007

#### 圧力駆動流体制御

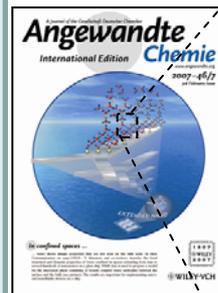


Anal.Bioanal.Chem2008 J.Chromatogr.A2006

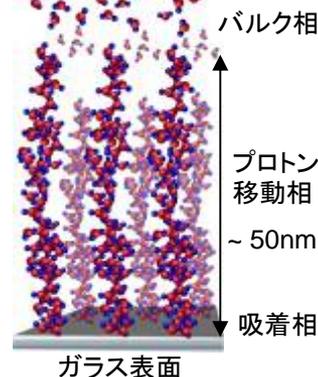
流量: 0.6 ~ 60pL/分



### 実験結果



2007年2月号



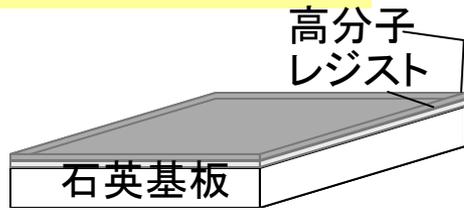
#### 見出した効果・現象

- ・水分子オーダリング  
Angew.Chem.Int.Ed 2007
- ・粘度上昇(4倍)  
Anal.Chem.2002
- ・誘電率低下(1/7倍)  
Anal.Chem.2002
- ・化学反応性変化  
Anal.Bioanal.Chem2008
- ・プロトン移動度の増大(20倍, NMR測定)  
Angew.Chem.Int.Ed 2007

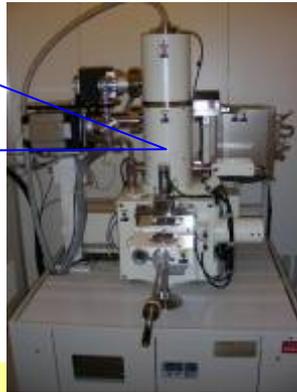
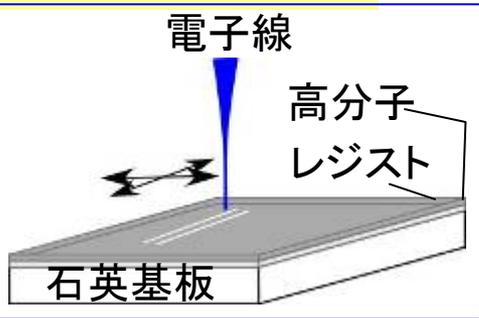
# 拡張ナノ空間の加工手順と結果

## 加工手順

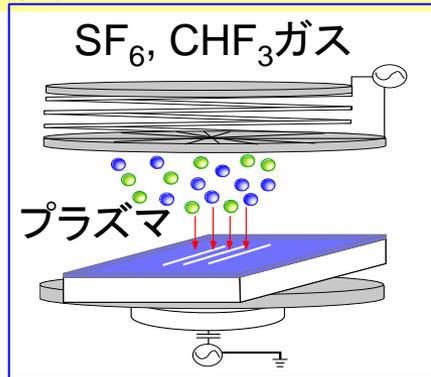
### (1) スピンコート



### (2) 電子線描画

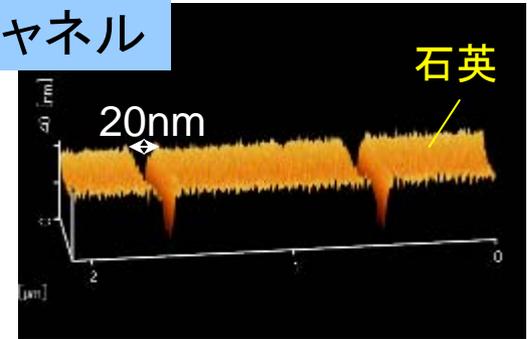


### (3) プラズマエッチング

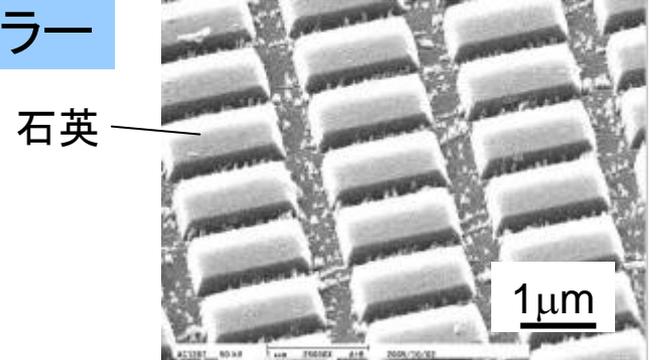


## 加工結果

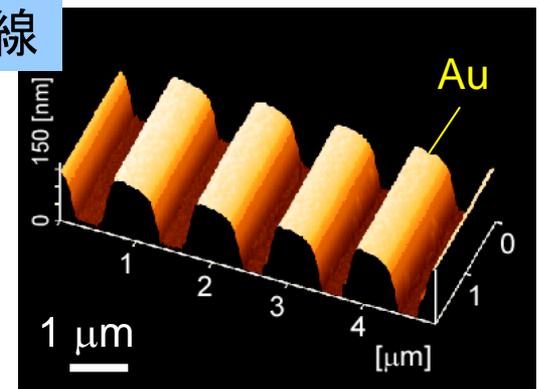
### 世界最小チャネル



### ナノピラー



### 金属ナノ細線



# 拡張ナノ空間工学と新機能デバイス創成

## 拡張ナノ空間工学

### テクノロジー・イノベーション

1. 拡張ナノ空間加工
2. ナノ空間内計測・分析
3. ナノ流体制御
4. ナノ構造体制御
5. ナノ表面制御

### システム・イノベーション

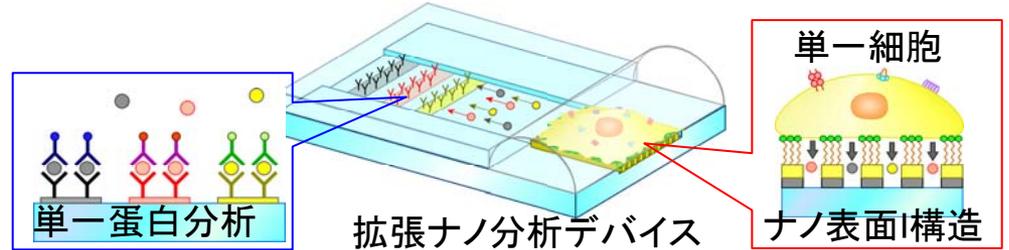
1. システム制御
2. システム統合
3. 巨微インターフェース
4. 機械化学インターフェース

### サイエンス・イノベーション

1. 拡張ナノ構造力学
2. 拡張ナノ流体力学
3. 拡張ナノ空間化学
4. 拡張ナノ空間細胞科学

## 新機能デバイス創成

### 単一細胞単一分子プロテオミクス(次世代バイオの鍵)



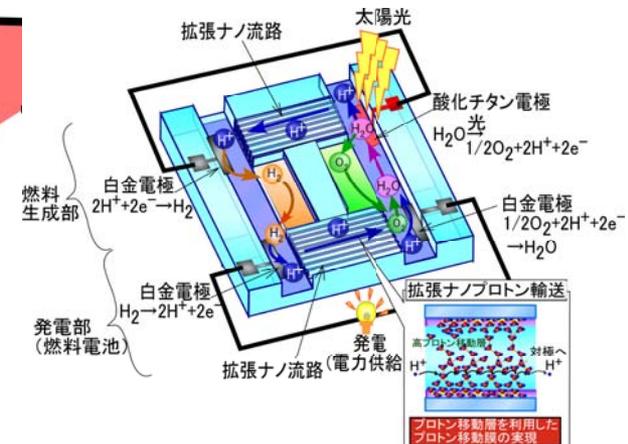
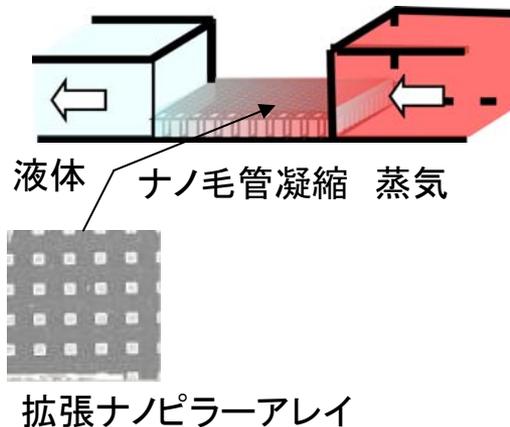
### 極微エネルギーデバイス(分散エネルギー生成・供給)

拡張ナノヒートパイプ

光燃料電池

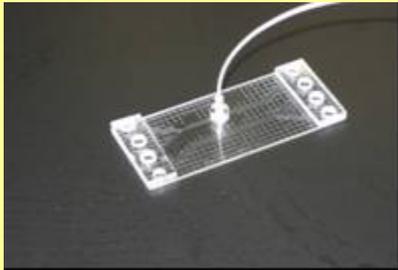
次世代半導体素子の  
超微細冷却デバイス

光と水で駆動する  
クリーン燃料電池



# マイクロ化学チップ搭載化学機器

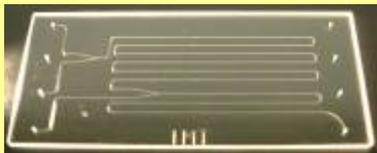
オンチップ  
熱レンズ顕微鏡



細胞培養チップ



不斉エポキシ化チップ



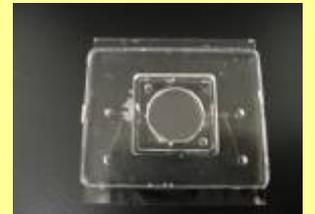
オンチップ膜分離



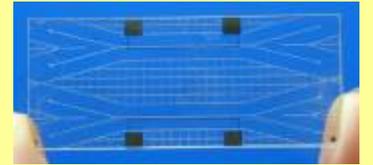
オンチップ  
充填カラム



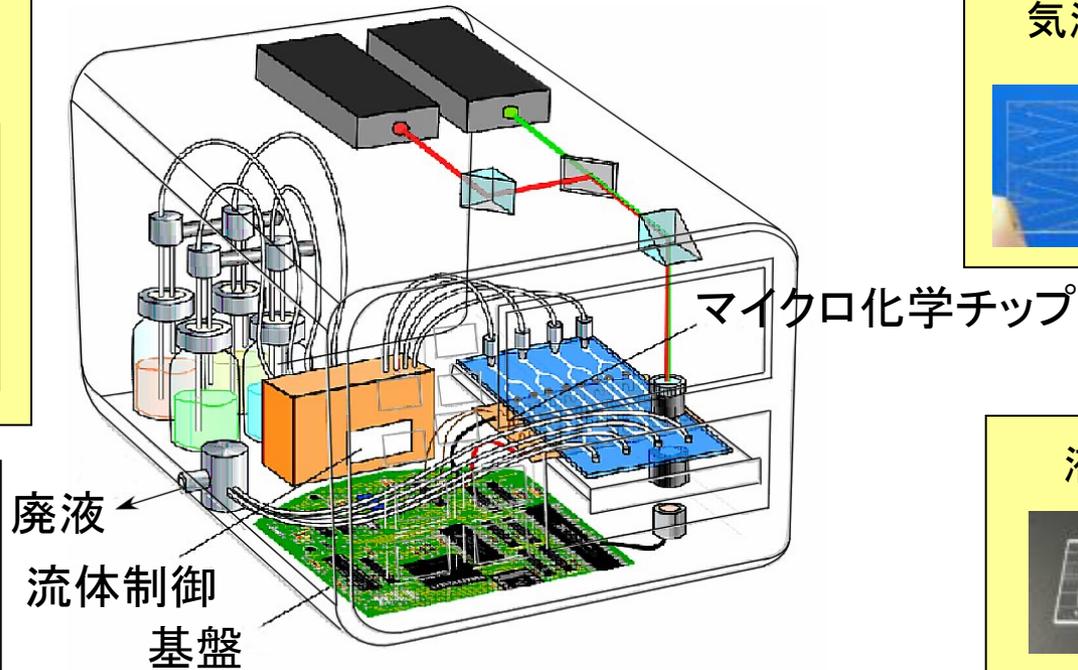
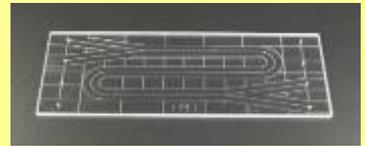
固液抽出チップ



気液濃縮チップ



液液抽出チップ



マイクロ化学チップ

廃液  
流体制御  
基盤

# 研究課題と産学連携

基礎学術研究

基盤技術研究

応用技術研究

マイクロ・ナノ化学

マイクロ・ナノ空間化学技術

マイクロ化学システム

超高感度分光分析

マイクロ・ナノ空間流体分子論  
マイクロ・ナノ空間反応化学  
マイクロ・ナノ界面流体化学  
マイクロ・細胞化学  
マイクロ・ナノ電気化学

マイクロ化学プロセス技術  
マイクロ化学プロセス制御技術  
マイクロ流体デバイス技術  
マイクロ流体制御技術  
マイクロ・ナノ加工技術  
マイクロ表面技術  
マイクロバイオプロセス技術  
マイクロ分析計測技術  
マイクロ化学システム設計技術

マイクロ診断システム  
マイクロ分析システム  
マイクロ化学合成システム  
マイクロコンビケムシステム  
マイクロバイオアッセイシステム  
マイクロ育種システム

東大

神奈川科学技術アカデミー

企業(国プロ)

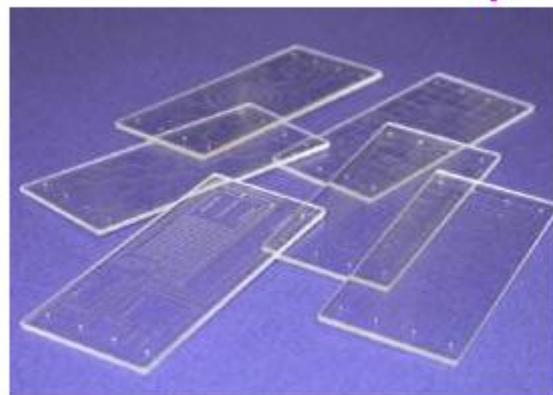
大学発ベンチャー企業  
マイクロ化学技研 (IMT社) による製品化



Institute of Microchemical Technology

[www.i-mt.co.jp](http://www.i-mt.co.jp)

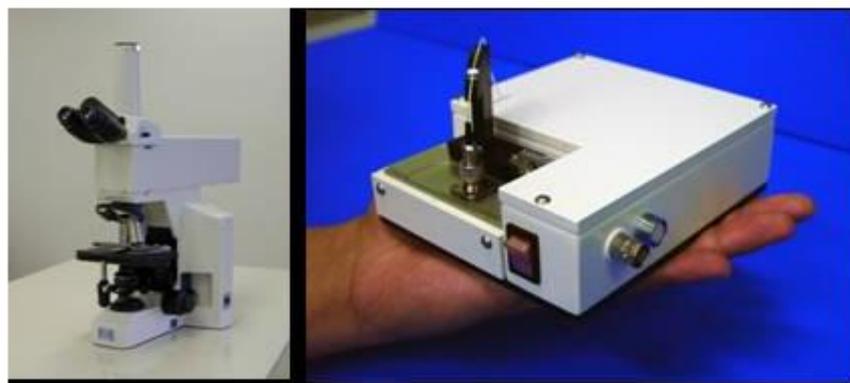
*Micro Chemical Chip*



*Peripheral Devices & Accessories*



*Detectors: TLM*



*Systems*



# 研究開発の連携（産学官連携と地域連携）

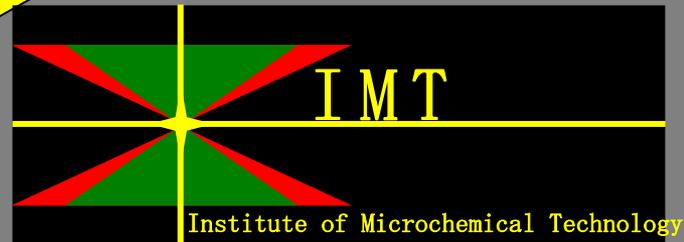
神奈川サイエンスパーク

各企業へ

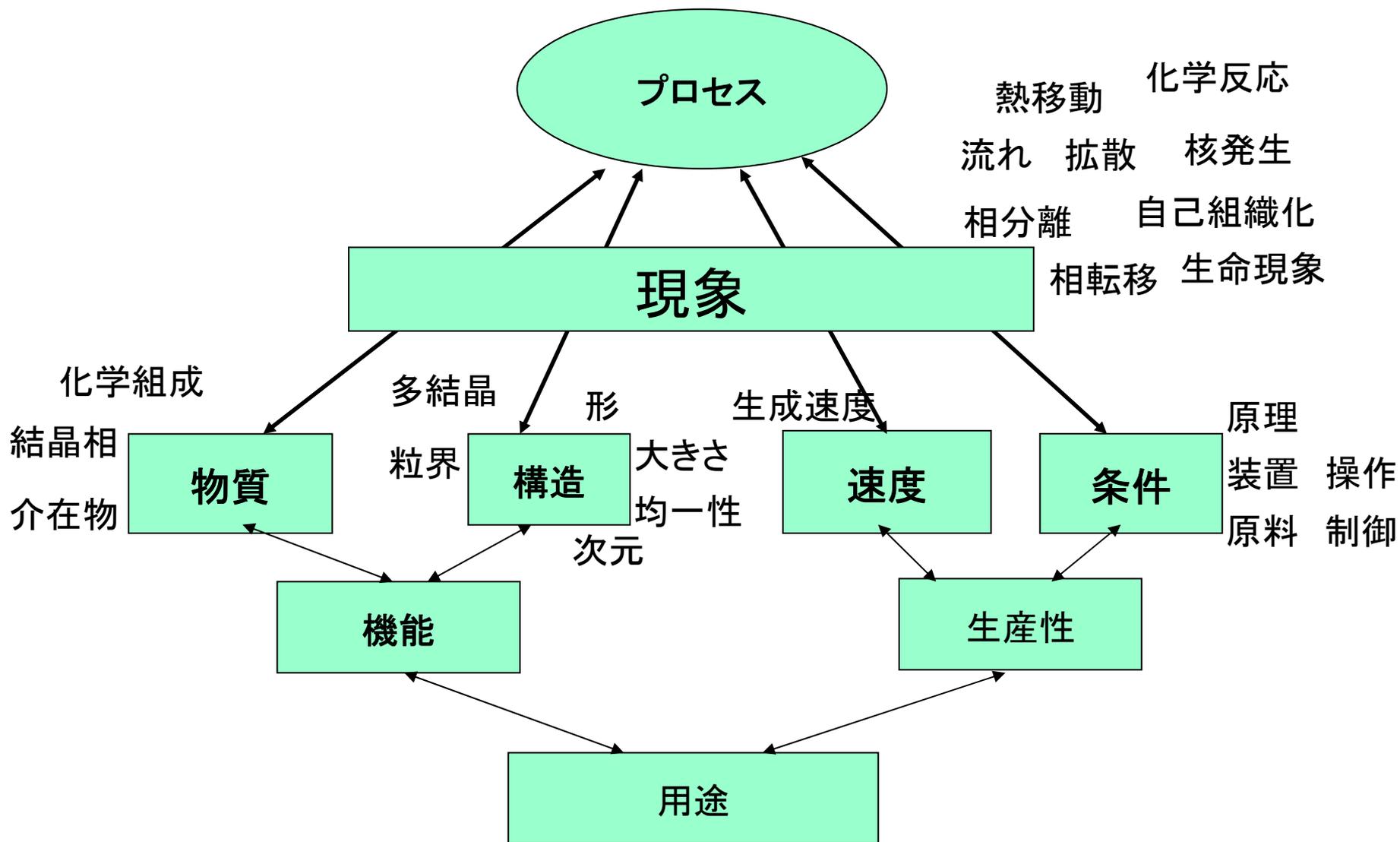
民間企業（センター）  
産業技術研究

神奈川県  
基盤技術研究

東京大学  
基礎研究



東大発ベンチャー



## 2 1 世紀エネルギーのマクロ像

エネルギー効率の徹底的な向上

エネルギー輸送問題

常温超伝導

マイクロ波輸送

化学変換

砂漠太陽電池発電

極地カタバ風風力発電

太陽電池衛星発電



# 21世紀における「物質」の意味

## 社会ニーズの時代変遷

通常機能品の大量生産

プロセスの効率化

省エネルギー、省資源、環境対応、自動化

高機能化

新たな要請

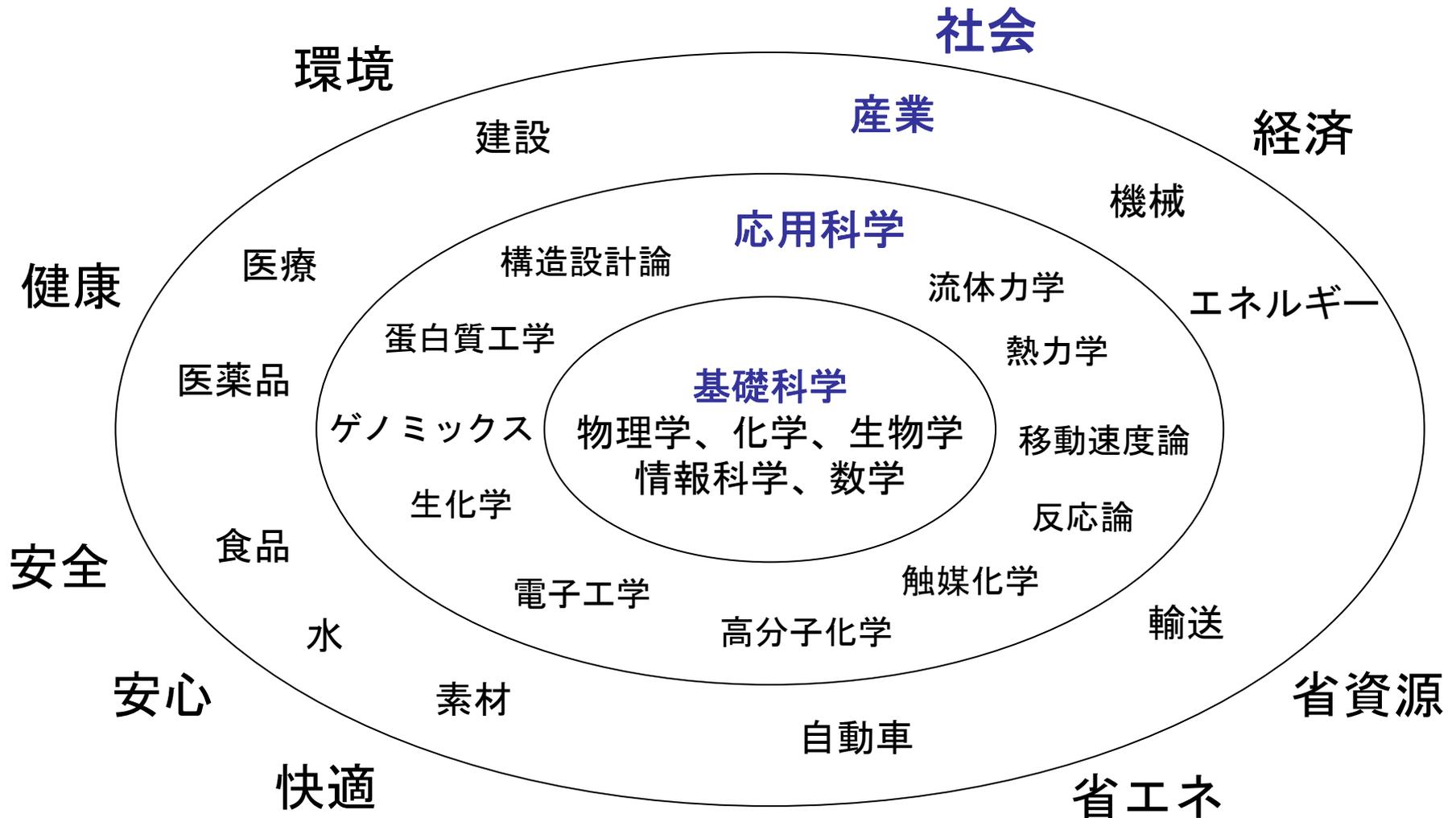
持続社会適合素材：エネルギー・環境

同時達成

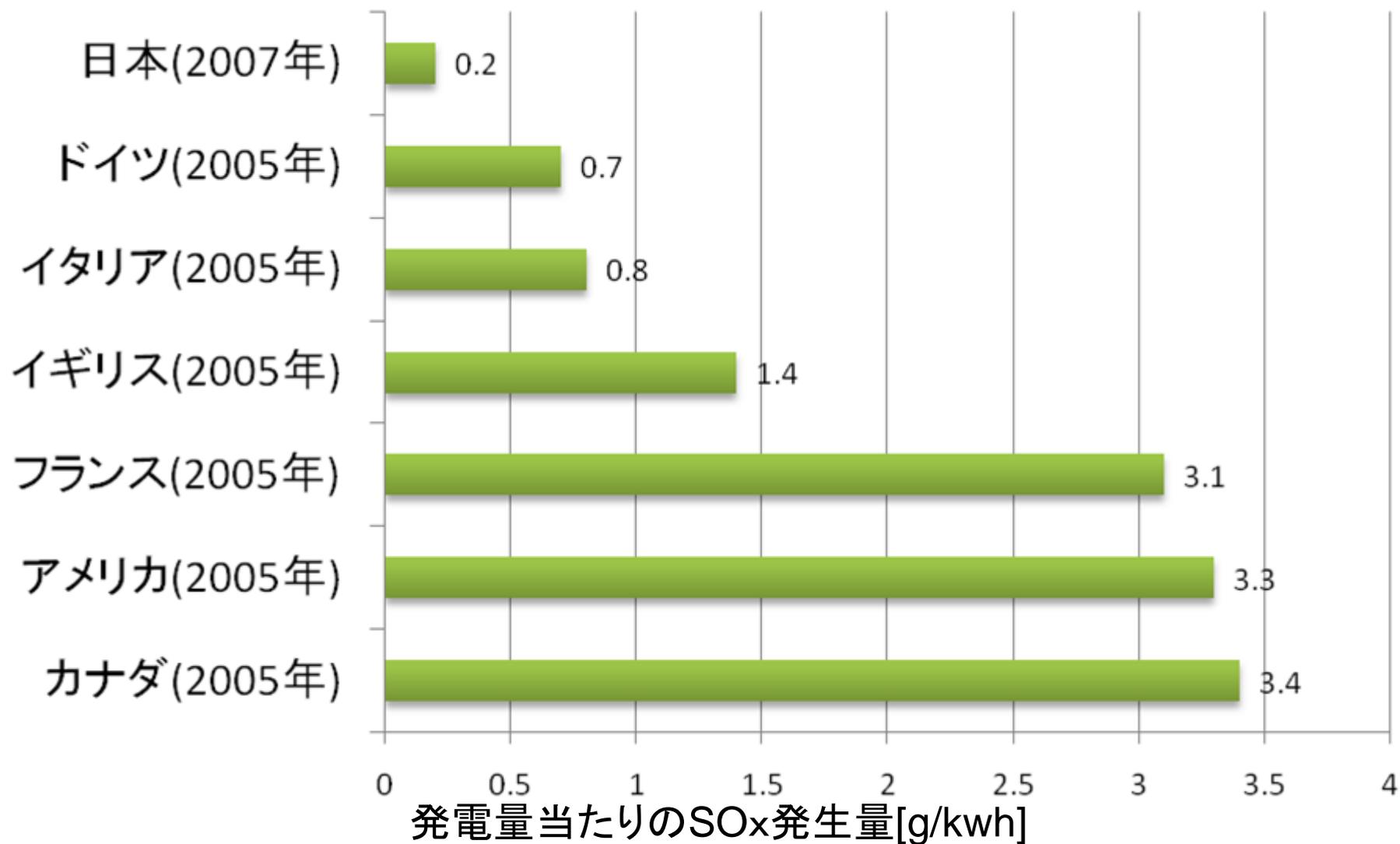
科学技術の役割は何か？

物質を制御し創成し基盤をつくる

# 物質の科学 学術俯瞰



## 火力発電所からの硫黄酸化物排出量の比較



# 「課題先進国」日本

資源が乏しく、人口密度の高い先進国

## 地球の未来像

成功すれば世界のモデル

日本の世界史的役割

世界の敬意と国際競争力の源泉

先頭に立つ勇氣