

*Synthetic Chemistry of Fine Particles, 2021*

# 微粒子合成化学・講義

**<http://www3.tagen.tohoku.ac.jp/~mura/kogi/>**  
**E-mail: [mura@tohoku.ac.jp](mailto:mura@tohoku.ac.jp)**

多元物質科学研究所 村松淳司

# 第13回小テスト実施中・・・

- ▶ 各Classroomの「課題」を見てください。
- ▶ 小テストは、9:10まで。
- ▶ 必ず全員回答し、送信して提出してください。
- ▶ そうしないと出席になりません。
- ▶ 9:10過ぎでの提出は減点対象です。
- ▶ 10:20を過ぎると、欠席となります。

# 講義計画

4月13日	第1回 講義紹介・物理化学の本質について 終了
4月20日	第2回 生活の周りのナノ粒子・コロイド 終了
4月27日	第3回 生活の周りのナノ粒子・コロイド 終了
5月11日	第4回 微粒子の分散・凝集
5月18日	第5回 微粒子の分散・凝集
5月25日	第6回 DLVO理論－詳説
6月1日	第7回 DLVO理論－詳説
6月8日	第8回 単分散粒子の合成理論
6月15日	第9回 機能性ナノ粒子の液相合成
6月22日	第10回 機能性ナノ粒子の液相合成
6月29日	第11回 触媒とは何か
7月6日	第12回 吸着現象と触媒
7月13日	第13回 次世代放射光とナノ材料研究
7月20日	第14回 単分散粒子合成と触媒調製法—休講(集中講義のため)
7月27日	第15回 特別講義『ゼオライトの合成と触媒利用』 大須賀遼太助教

# 触媒化学

2021/7/13

触媒とはいったい何？

# 触媒の歴史

# 触媒の歴史 その1

- **イェンス・ヤコブ・ベルセリウス (Jöns Jacob Berzelius, 1779年8月20日 – 1848年8月7日)**
  - スウェーデンの化学者、医者
  - 化学を有機化学と無機化学の2つに分け、ハロゲン・同素体・異性体・有機物・触媒・非結晶 (Amorphie) などの化学上重要な用語や概念を創案
- **ウィルアム・フレンドリッヒ・オストワルド (Friedrich Wilhelm Ostwald、ラトビア語: Vilhelms Ostvalds、1853年9月2日 – 1932年4月4日)**
  - ドイツ(バルト・ドイツ人)の化学者
  - 硝酸の製法であるオストヴァルト法を考案(1902年)
  - 触媒は速度論に従うことを言及

# 触媒の歴史 その2

- **1801**
  - ハンフリー・デービー(イギリス)による燃料電池の原理の発明
- **1817**
  - ハンフリー・デービー(イギリス)による、加熱白金線による発火点以下での水素, 一酸化炭素, エチレン, アルコール, エーテルなどの燃焼に関する公開実験
- **1836**
  - テオドール・シュワン(ドイツ)によるペプシンの発見
- **1839**
  - ウィリアム・ロバート・グローブ(イギリス)による燃料電池の発電実験の成功

# 触媒の歴史 その3

## ■ 1894

- 高峰讓吉による、麹菌からジアスターゼを抽出した、タカジアスターゼの発明

## ■ 1897

- ポール・サバチエ(フランス)による有機不飽和化合物の水素を添加する接触還元法の発見(サバチエ=サンドラン還元)

## ■ 1902

- フリッツ・ハーバーとカール・ボッシュ(ドイツ)による、鉄を主体とした触媒上で水素と窒素からアンモニアを生産する方法の発明

## ■ 1902

- ウィリアム・フレンドリッヒ・オストワルド(ドイツ)による、白金触媒によるアンモニアからの硝酸合成



# 触媒の歴史 その4

## ■ 1913

- ウィルアム・フレンドリッヒ・オストワルド(ドイツ)は、触媒は反応速度を変化させるが、平衡を変えない、と触媒の概念を発表

## ■ 1913

- BASF社のMittasch, Schneiderら: 酸化物触媒による、水性ガスからのメタノール合成

## ■ 1925

- フランツ・フィッシャーとハンス・トロプシュ(ドイツ)による一酸化炭素と水素からFe系触媒による液体炭化水素の合成

## ■ 1949

- 白金/アルミナ触媒によるナフサの接触改質

# 触媒の歴史 その5

## ■ 1953

- カール・ツィーグラール(ドイツ)によるエチレンの常圧重合法発明。その後、ジュリオ・ナッタ(イタリア)によるプロピレンの重合に成功。ツィーグラール・ナッタ触媒。

## ■ 1972

- 本多・藤嶋効果。水からの水素、酸素生成。

## ■ 1979

- パラジウム触媒を用いて有機ハロゲン化合物と有機ホウ素化合物を結び付ける「鈴木・宮浦カップリング」を発見

## ■ 1986

- 野依良治による、BINAP-ルテニウム触媒の発明

# 触媒は 社会に貢献する

# 四日市ぜんそく

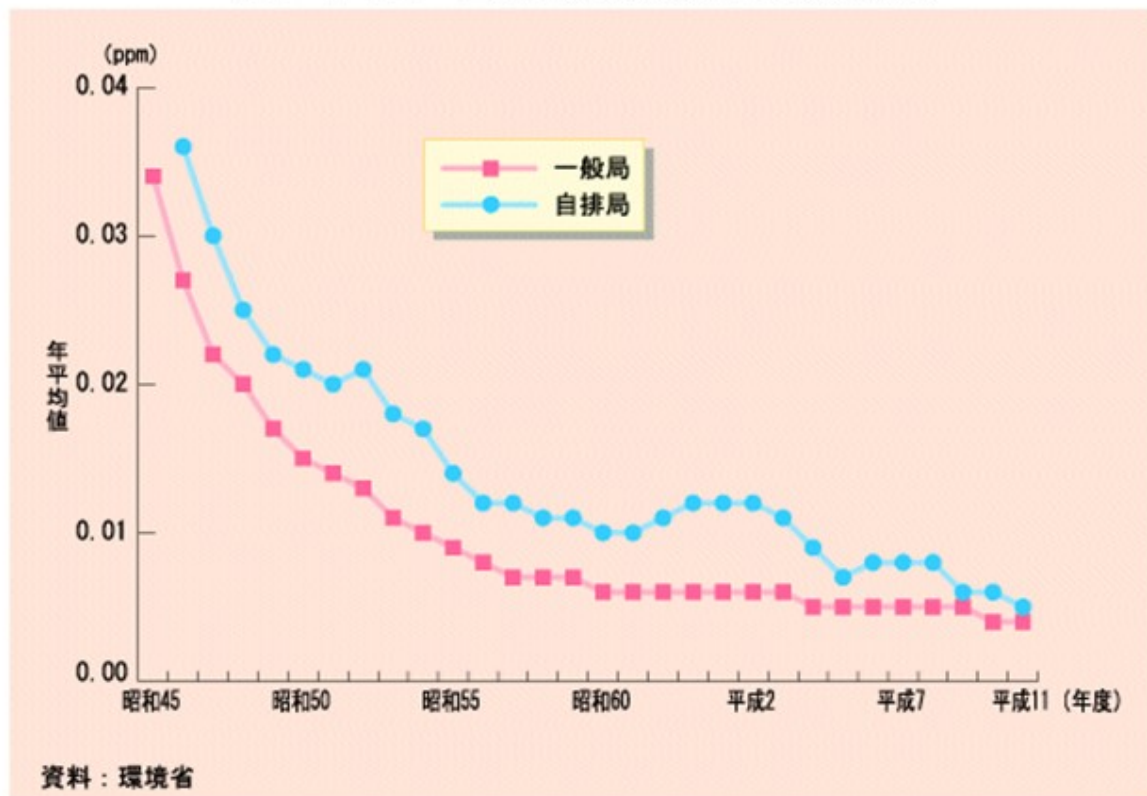


# 四日市ぜんそく

- 四日市ぜんそくで最初の犠牲者が出た1967年(昭和42年)、第2コンビナートの火力発電所で、排煙脱硫用の試験装置が稼動開始した。
- 排煙脱硫技術も開発研究が行われ、1968年(昭和43年)当時3%程度だった燃料中の硫黄分が、第2コンビナートの石油精製所に設置された重油間接脱硫装置(Ni-Mo-Co系脱硫触媒)を用いて、1.7%にまで低減させることに成功した。
- 四日市の大気汚染は、脱硫装置の導入、硫黄分の少ない高品質な燃料への切り替え等の数々の汚染防止への取り組みを実施した結果、飛躍的に改善された。

# 脱硫・脱硝触媒の実用化

図 1-1-2 1 二酸化硫黄濃度の年平均値の推移



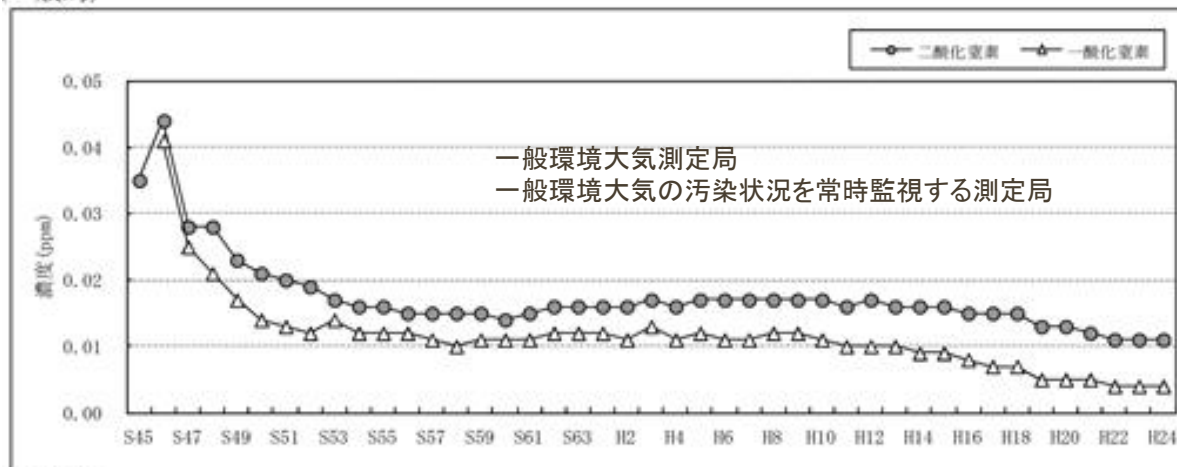
燃料油中の硫黄分を元から絶つ！

それが、  
脱硫触媒。  
Co-Mo-S

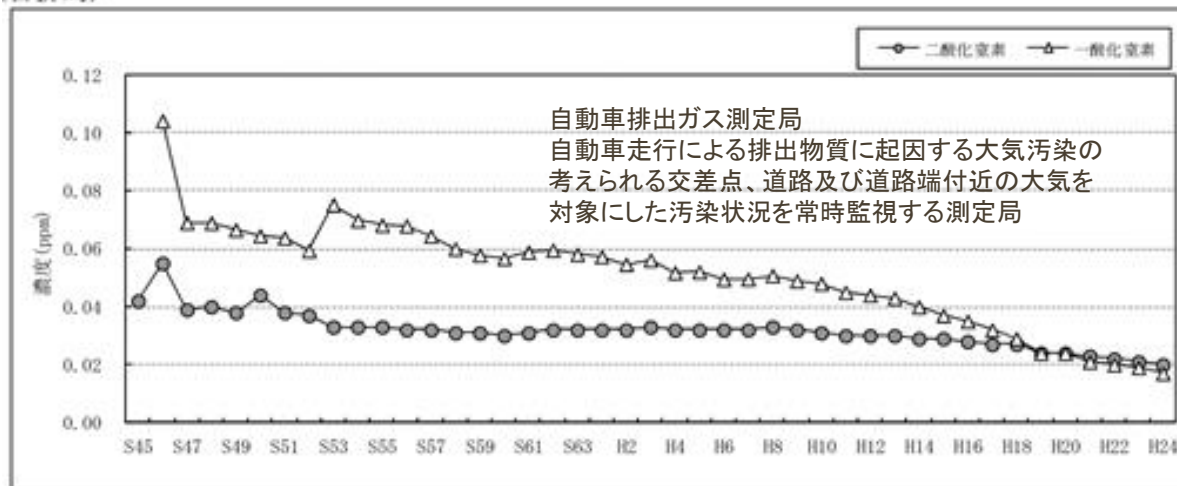
# 三元系自動車触媒

- エンジン排気ガスからのCO,NO<sub>x</sub>,HC除去触媒

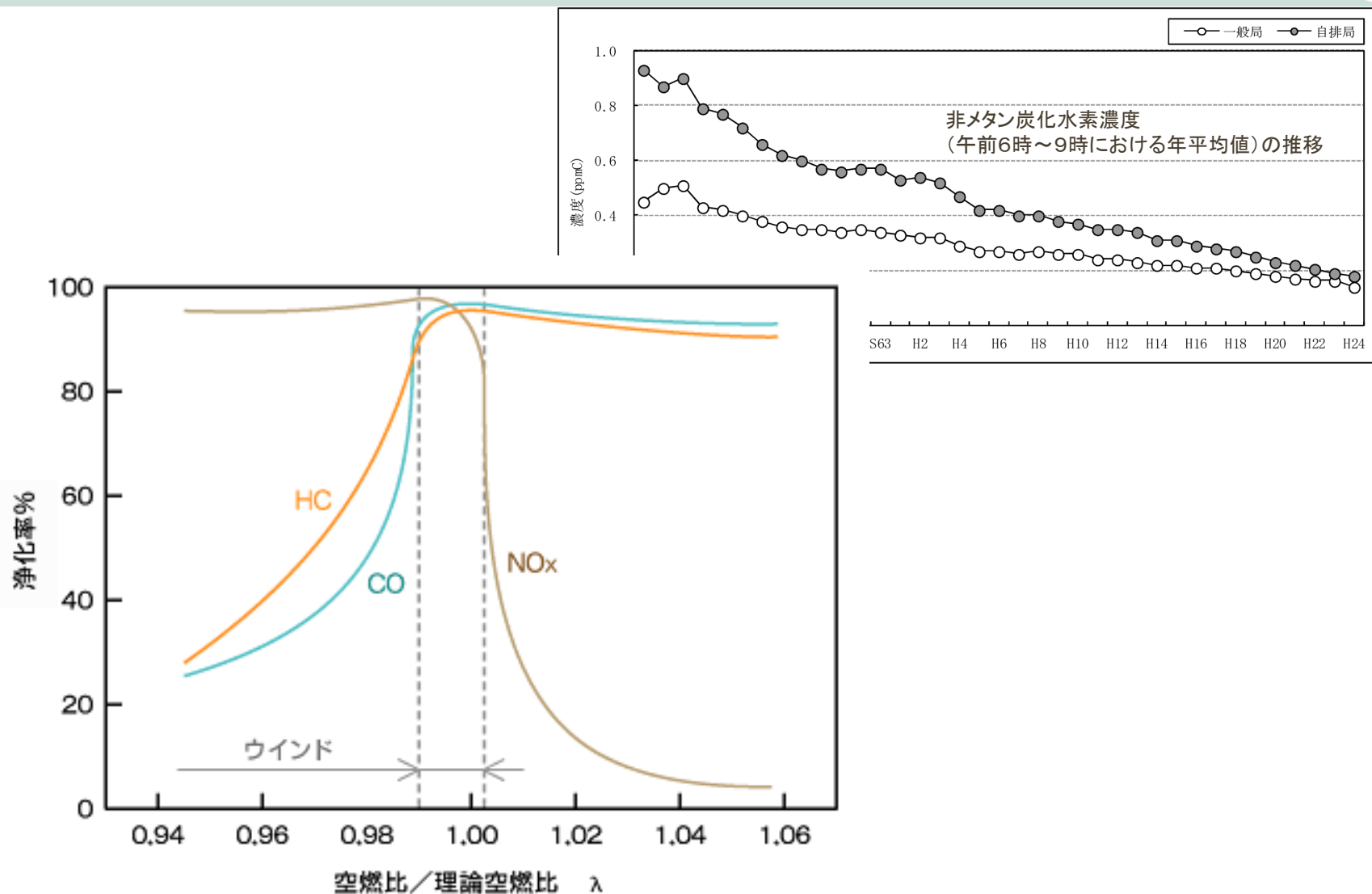
(一般局)



(自排局)



# 三元系自動車触媒



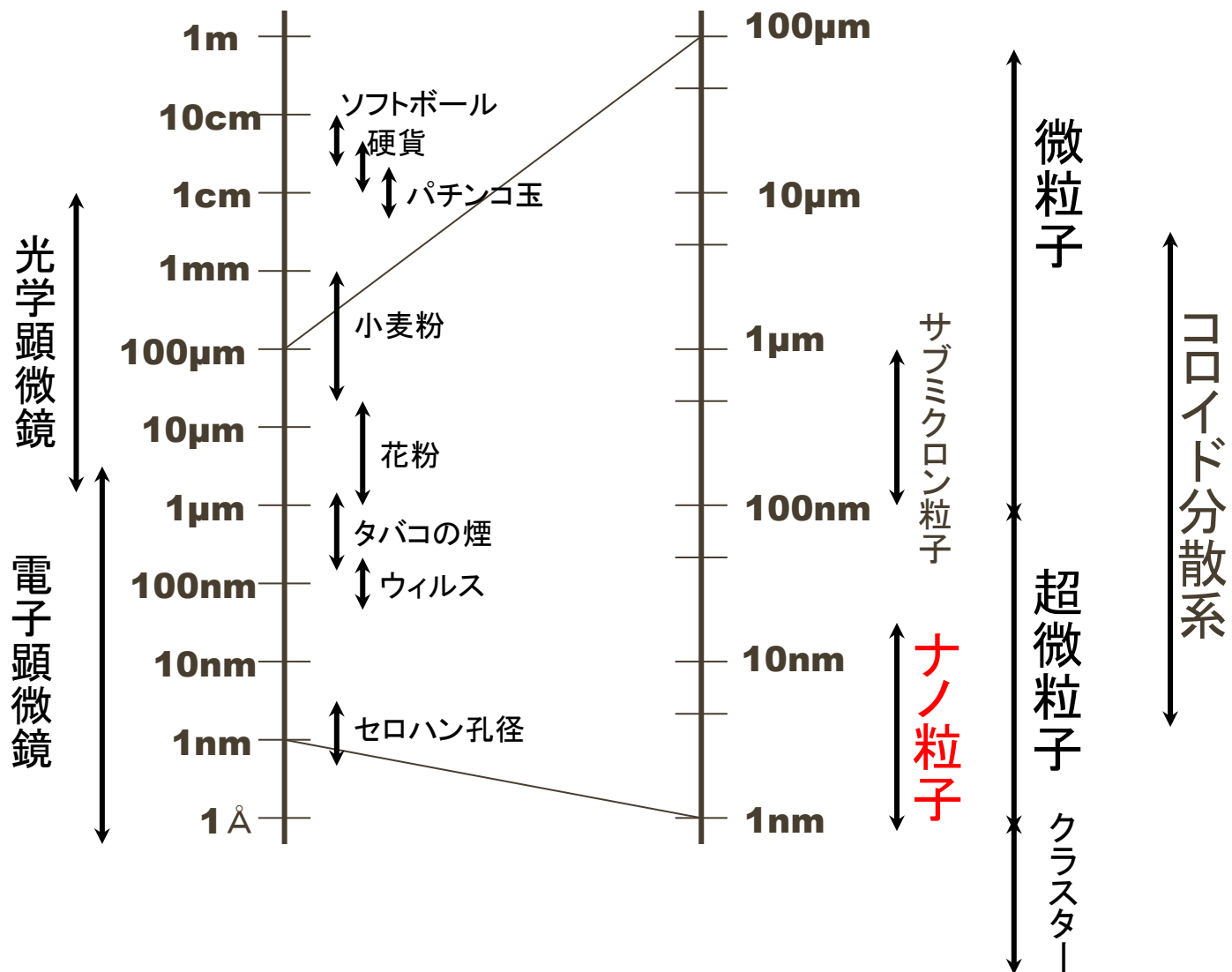


# 触媒材料

2021/7/13

触媒材料について考えよう！

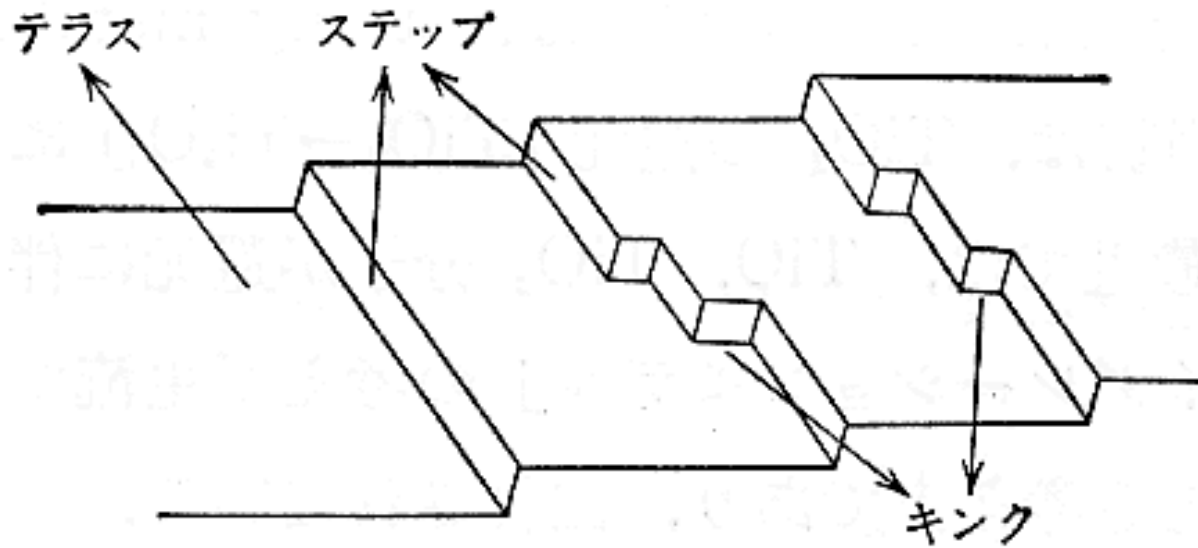
# 粒子径による粒子の分類



# ナノ粒子

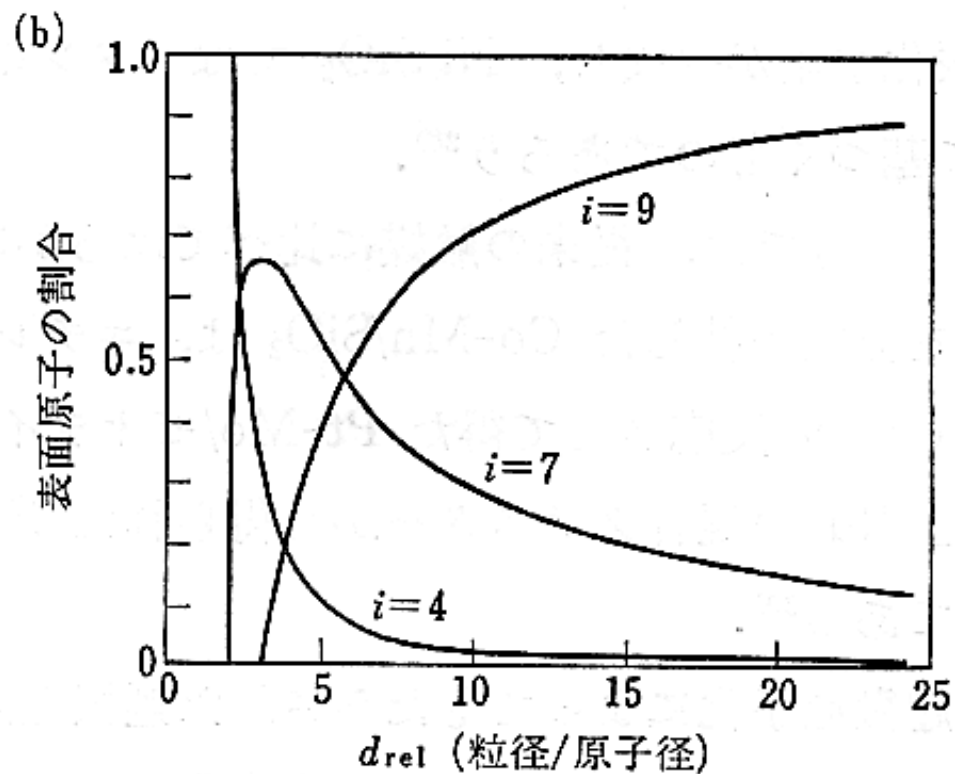
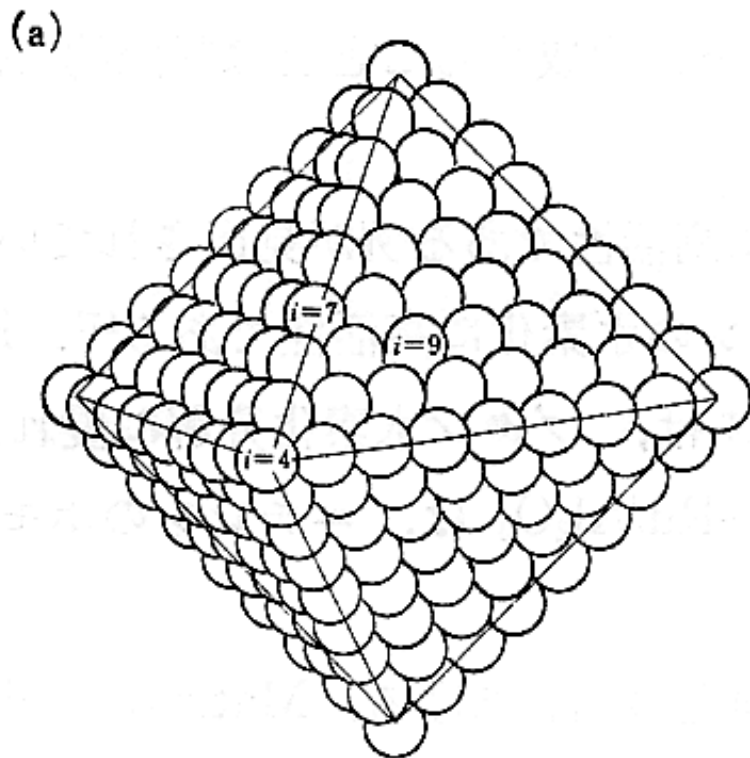
- $10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nm}$
- 10億分の1mの世界
- 原子が数～十数個集まった素材
- バルクとは異なる物性が期待される
- バルク原子数と表面原子数に差がなく、結合不飽和な原子が多く存在する

# 表面構造と触媒機能



金属単結晶表面上の原子.

# 表面構造と触媒機能



金属表面原子の構造と数.

# 比表面積の計算

$$A_S = 4\pi r^2, \quad V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$\text{比表面積} = \frac{A_S}{Vd} = \frac{3}{rd}$$

( $d$ は比重)

# 触媒

## ■ 工業触媒

- 活性、選択性、寿命、作業性

## ■ 触媒設計

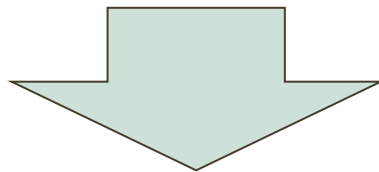
- 表面制御
- バルク制御

## ■ 表面制御

- 金属触媒 → 金属種、価数、組成、粒径など
  - 担体効果、アンサンブル効果、リガンド効果

# 活性

- **活性点1つあたりのturnover frequency**
  - 1サイトあたりの表面反応速度
- **触媒材料全体としての活性**



触媒全体の活性は全表面積に依存  
しかし、構造に強く依存する場合もある(後述)

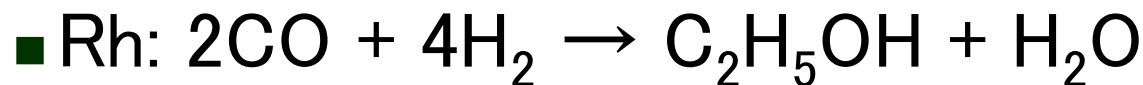
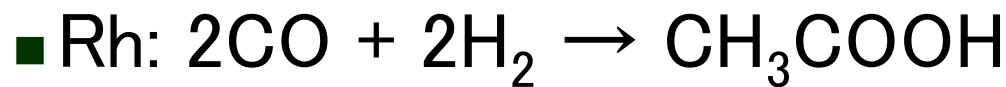
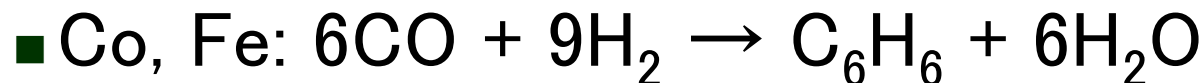
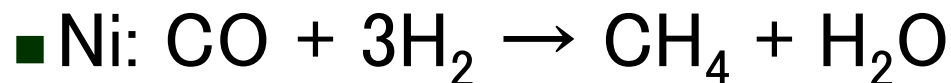
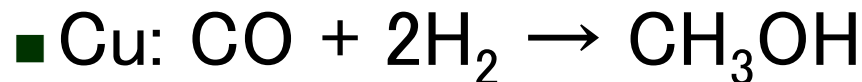


## ■ 触媒寿命

- 同じ活性選択性を持続する
- 工業的には数ヶ月から1年の寿命が必要
- 失活
  - 主にシンタリングや触媒物質自身の変化

## ■ 特定の反応速度だけを変化させる

– COの水素化反応



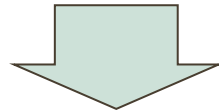
– 反応条件にも左右される

# サイズ制御

- 比表面積を大きくし全体の触媒活性を増大
- TOF (Turnover Frequency)がサイズに依存
  - 量子効果

# 触媒設計

- **表面情報の正確な把握**
- **精密な表面機能制御**



- **局所構造制御と評価が重要**

# 触媒の分類

## ■ 均一系触媒

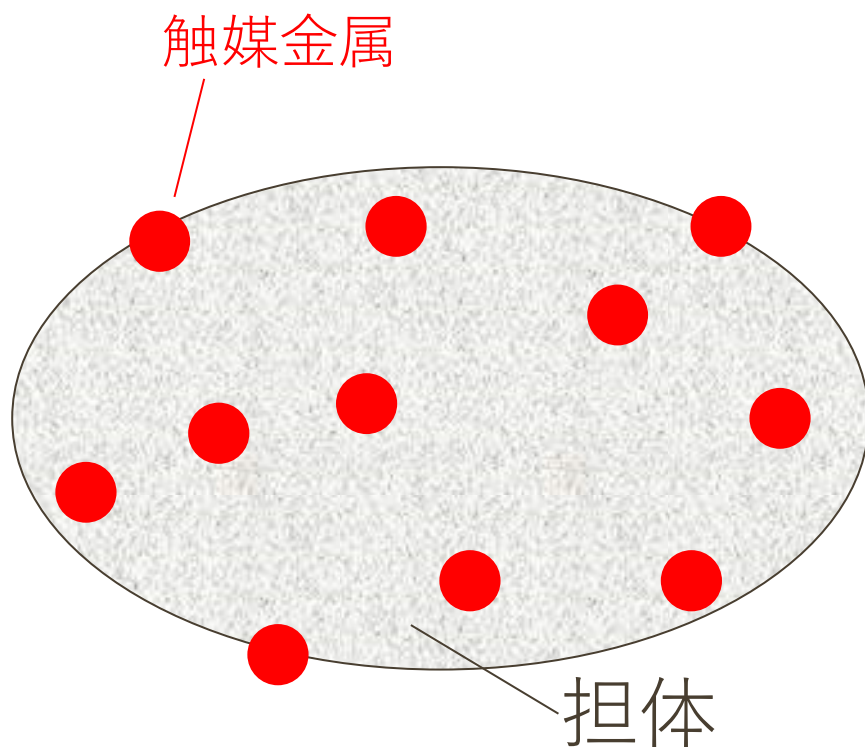
- 反応物、生成物と同じ相
- 例： 酢酸合成のロジウム触媒
  - 液相均一系 触媒も液体

## ■ 不均一系触媒

- 相が違ふもの
- 例： 固体触媒
  - 担持触媒、無担持触媒

# 担持金属触媒

- 担体物質上に、触媒金属が担持されている
- 担体は粉体か、塊状態である



# 担持金属触媒

## ■ 担体

- 金属酸化物が多い
- 細孔が発達しているものが多い
- 機械的強度に優れている

## ■ 触媒金属

- 担体上に担持、分散
- 数nm程度の大きさが理想とされる
- 実際は5～50nm程度の場合が多い

# 触媒反応の基礎



# 構造敏感・構造鈍感

- **構造鈍感**
  - 表面積が大きくなる効果のみ現れる
- **構造敏感**
  - 触媒活性は粒径に依存
    - 粒径が小さいほど大きい
    - 粒径が大きいほど大きい
    - ある粒径で最大となる

表 1 ターンオーバー頻度 (TOF) と粒径との関係

<b>I 型 (TOF は粒径に依存しない)</b>	
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Pt/SiO <sub>2</sub> <sup>a)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_8$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>b)</sup>
$\triangle + \square + \text{H}_2 \rightarrow \text{A}, \text{B}$	Pt/SiO <sub>2</sub> , Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>c)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>d)</sup>
<b>II 型 (TOF は粒径が小さいほど大きい)</b>	
$\text{C}_2\text{H}_4, \text{C}_2\text{H}_6 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$	Ni/SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>e)</sup> , Pt-black <sup>f)</sup>
$\text{A} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_2\text{H}_4$	Rh/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>g)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>h)</sup>
$\text{C}-\text{C}-\text{C} + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}-\text{C} + \text{CH}_4$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>i)</sup>
$\text{A} + \text{H}_2$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>j)</sup>
$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6$	Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>k)</sup>
<b>III 型 (TOF は粒径が小さいほど小さい)</b>	
$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>l)</sup>
$\text{C}_3\text{H}_8 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>m)</sup>
$\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	Pt/SiO <sub>2</sub> <sup>n)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2$	Ph/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>o)</sup>
$\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$	Ni/SiO <sub>2</sub> <sup>p)</sup>
$\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6$	Ru/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>q)</sup> , Co/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>r)</sup>
$\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	Rh/SiO <sub>2</sub> <sup>s)</sup>
$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$	Fe/MgO <sup>t)</sup>
<b>IV 型 (TOF はある粒径で最大となる)*</b>	
$\text{H}_2 + \text{D}_2 \rightleftharpoons 2\text{HD}$	Pd/C, Pd/SiO <sub>2</sub> (13 Å) <sup>u)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2$	Ni/SiO <sub>2</sub> (12 Å) <sup>v)</sup>
$\text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}_2$	Rh/SiO <sub>2</sub> (18 Å) <sup>w)</sup>

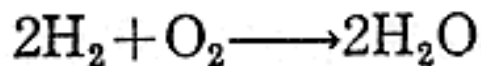
\* ( ) 内は最大の TOF を与える粒径。

文献): a) *Adv. Catal.*, 20, 153, b) *J. Catal.*, 5, 111 (1966), c) *J. Catal.*, 6, 92 (1966); 85, 530 (1984), d) *J. Catal.*, 5, 471 (1966), e) *J. Phys. Chem.*, 70, 2257 (1966), f) *J. Phys. Chem.*, 67, 841 (1963), g) *J. Catal.*, 56, 21 (1979), h) 5th I.C.C., 665 (1972), i) *J. Catal.*, 11, 35 (1968), j) 4th I.C.C., 385 (1971), k) *Chem. Lett.*, 1983, 265, l) 日化, 1979, 1646, m) *J. Catal.*, 53, 395 (1978), n) *J. Catal.*, 53, 414 (1978), o) *J. Catal.*, 68, 419 (1981); 87, 27 (1984), p) *J. Catal.*, 65, 335 (1980), q) *J. Catal.*, 51, 386 (1978); 75, 251 (1982); *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 57, 398 (1984), r) *J. Catal.*, 85, 78 (1984), s) *Chem. Lett.*, 1984, 1607, t) *J. Catal.*, 37, 513 (1975), u) 日化, 1984, 1011, v) 5th I.C.C., 671 (1972), w) *J. Catal.*, 69, 180 (1981).

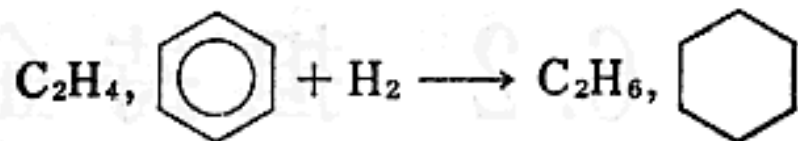
# 構造敏感・構造鈍感

ターンオーバー頻度 (TOF) と粒径との関係

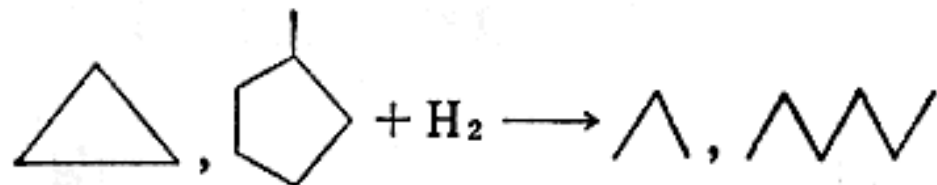
**I 型** (TOF は粒径に依存しない)



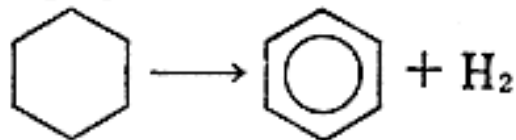
Pt/SiO<sub>2</sub><sup>a)</sup>



Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>b)</sup>



Pt/SiO<sub>2</sub>, Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>c)</sup>

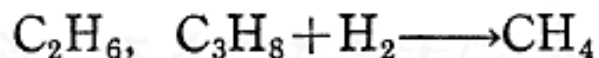


Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>d)</sup>

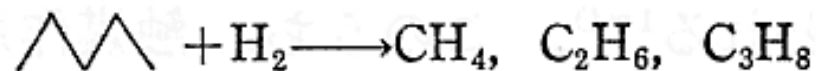
# 構造敏感・構造鈍感

ターンオーバー頻度 (TOF) と粒径との関係

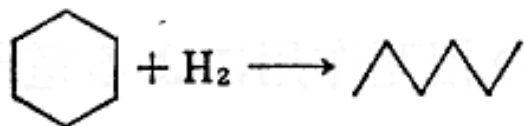
II型 (TOF は粒径が小さいほど大きい)



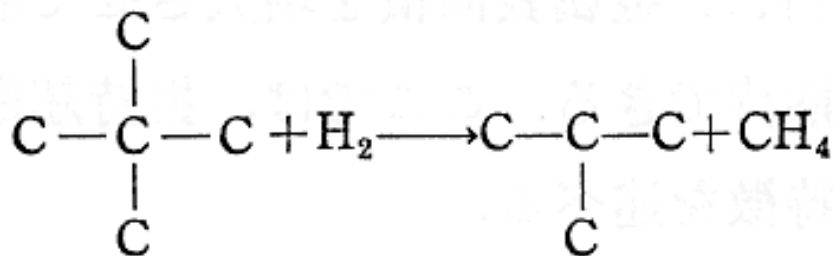
Ni/SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>e)</sup>, Pt-black<sup>f)</sup>



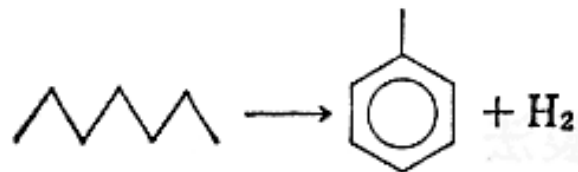
Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>g)</sup>



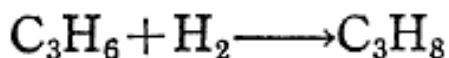
Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>h)</sup>



Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>i)</sup>



Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>j)</sup>

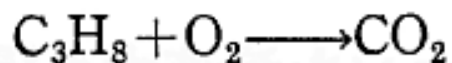


Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>k)</sup>

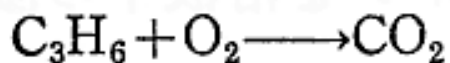
# 構造敏感・構造鈍感

ターンオーバー頻度 (TOF) と粒径との関係

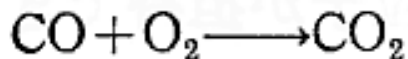
III型 (TOF は粒径が小さいほど小さい)



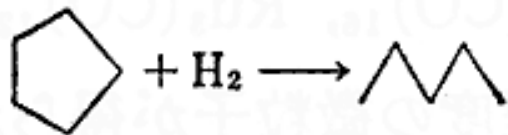
Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>1)</sup>



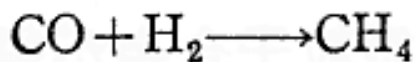
Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>m)</sup>



Pt/SiO<sub>2</sub><sup>n)</sup>



Ph/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>o)</sup>



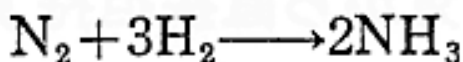
Ni/SiO<sub>2</sub><sup>p)</sup>



Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>q)</sup>, Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>r)</sup>



Rh/SiO<sub>2</sub><sup>s)</sup>

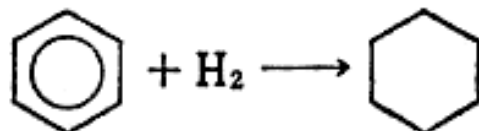
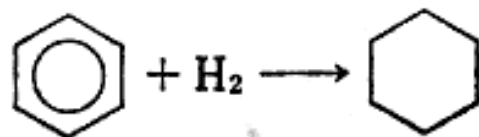
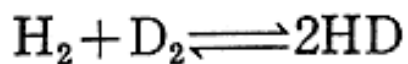


Fe/MgO<sup>t)</sup>

# 構造敏感・構造鈍感

ターンオーバー頻度 (TOF) と粒径との関係

IV型 (TOF はある粒径で最大となる)\*



Pd/C, (Pd/SiO<sub>2</sub>) (13 Å)<sup>u)</sup>

Ni/SiO<sub>2</sub> (12 Å)<sup>v)</sup>

Rh/SiO<sub>2</sub> (18 Å)<sup>w)</sup>

# 吸着と触媒反応

2021/7/13

不均一系—固体触媒の反応機構

# 吸着が始まり

- **物理吸着**

- 弱い吸着：必ず自然界にある

- **化学吸着**

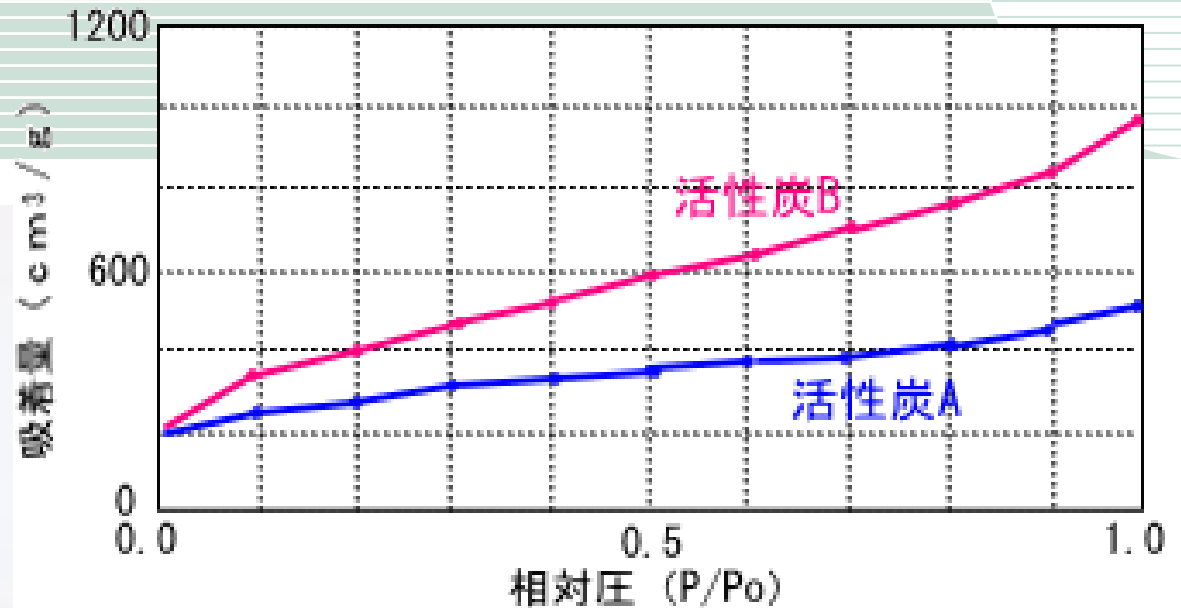
- 強い吸着：化学結合を伴う

# Table 化学吸着と物理吸着

吸着特性	化学吸着	物理吸着
吸着力	化学結合	ファン・デル・ワールス力
吸着場所	選択性あり	選択性なし
吸着層の構造	単分子層	多分子層も可能
吸着熱	10~100 kcal/mol	数kcal/mol
活性化エネルギー	大きい	小さい
吸着速度	遅い	速い
吸着・脱離	可逆または非可逆	可逆
代表的な吸着の型	ラングミュア型	BET型



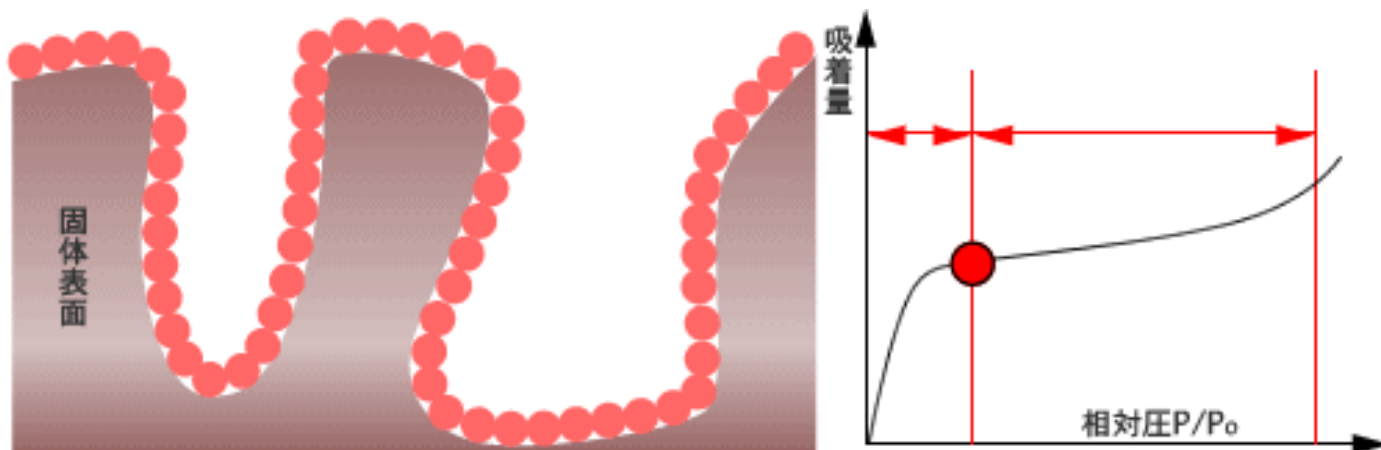
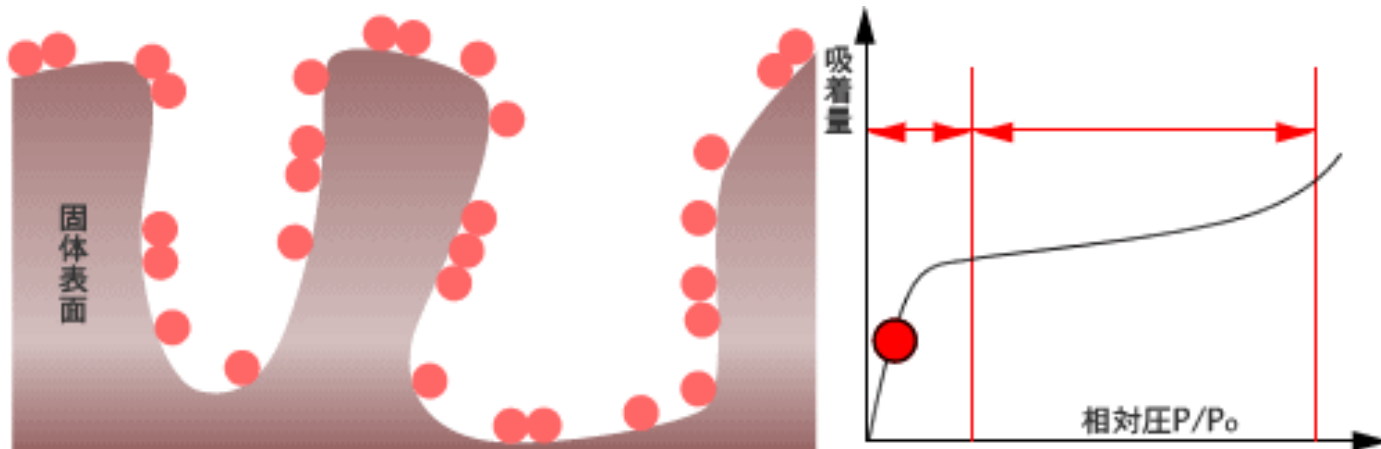
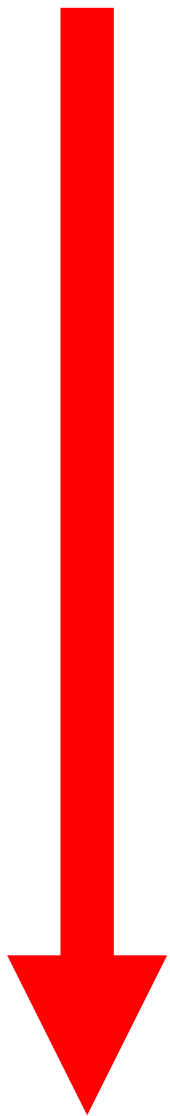
# 物理吸着



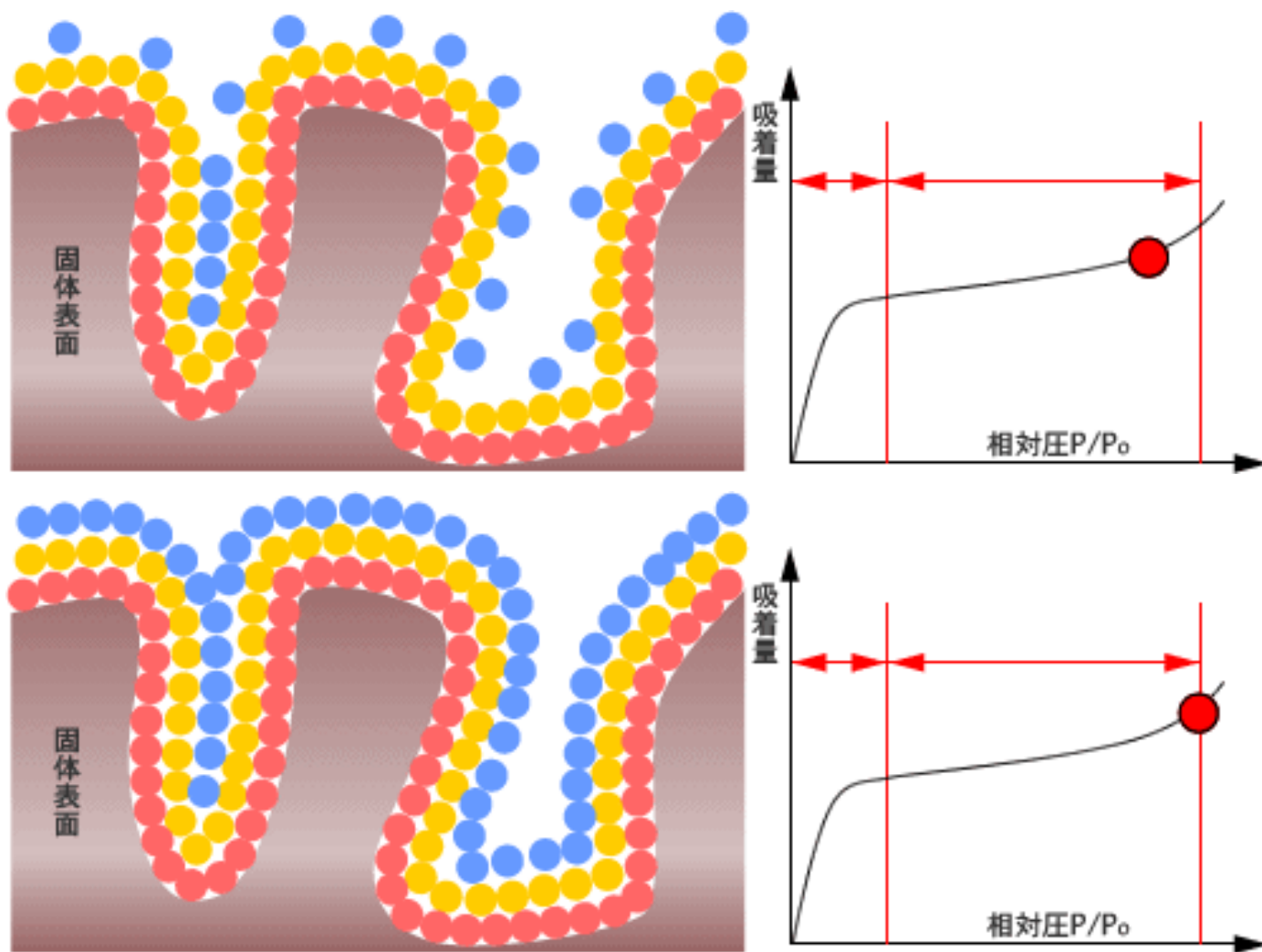
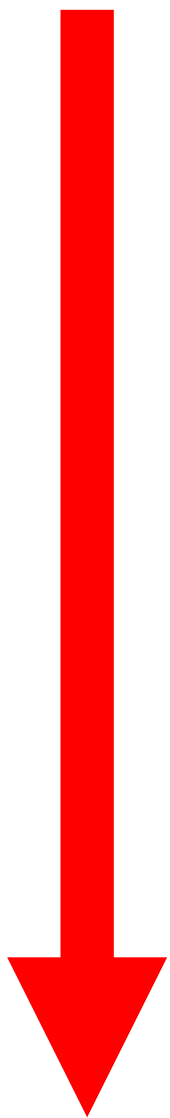
活性炭の吸着等温線

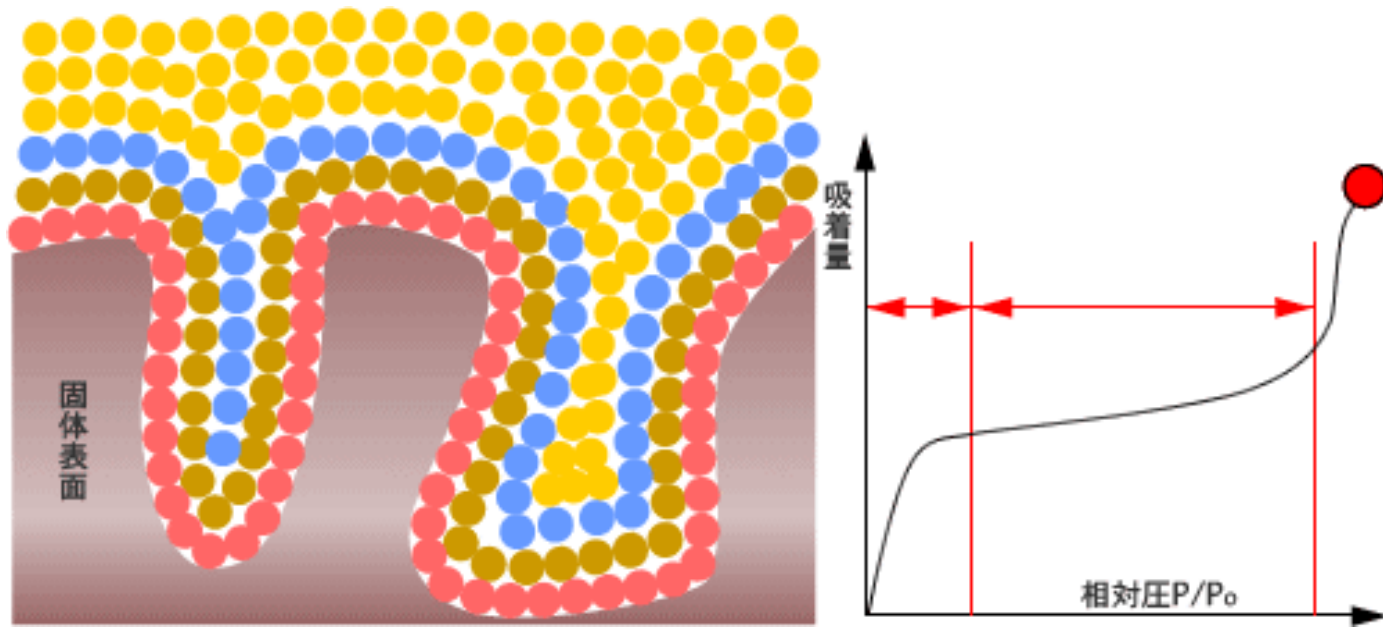
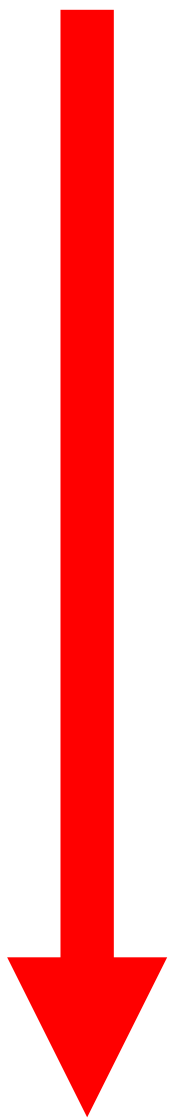
試料	比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	細孔容積 (ml/g)		平均細孔直径	資料質量 (g)
		BET法			
		メソポア 10_3000 Å	ミクロポア <10 Å		
1 活性炭A	1050	0.56	0.36	30	0.200
2 活性炭B	1600	1.48	0.27	35	0.210

# 物理吸着



# 物理吸着





# 物理吸着

BETの式：一定温度で吸着平衡状態であるとき、  
吸着平衡圧Pと、その圧力での吸着量Vの関係

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \left( \frac{C - 1}{V_m C} \right) \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

- 但し、
- $P_0$ ： 飽和蒸気圧
  - $V_m$ ： 単分子層吸着量、気体分子が固定表面で単分子層を形成した時の吸着量
  - $C$ ： 吸着熱などに関するパラメータ  $> 0$

この関係式は  $P/P_0$ ： 0.05～0.35の範囲でよく成立する

# 化学吸着

# 化学吸着

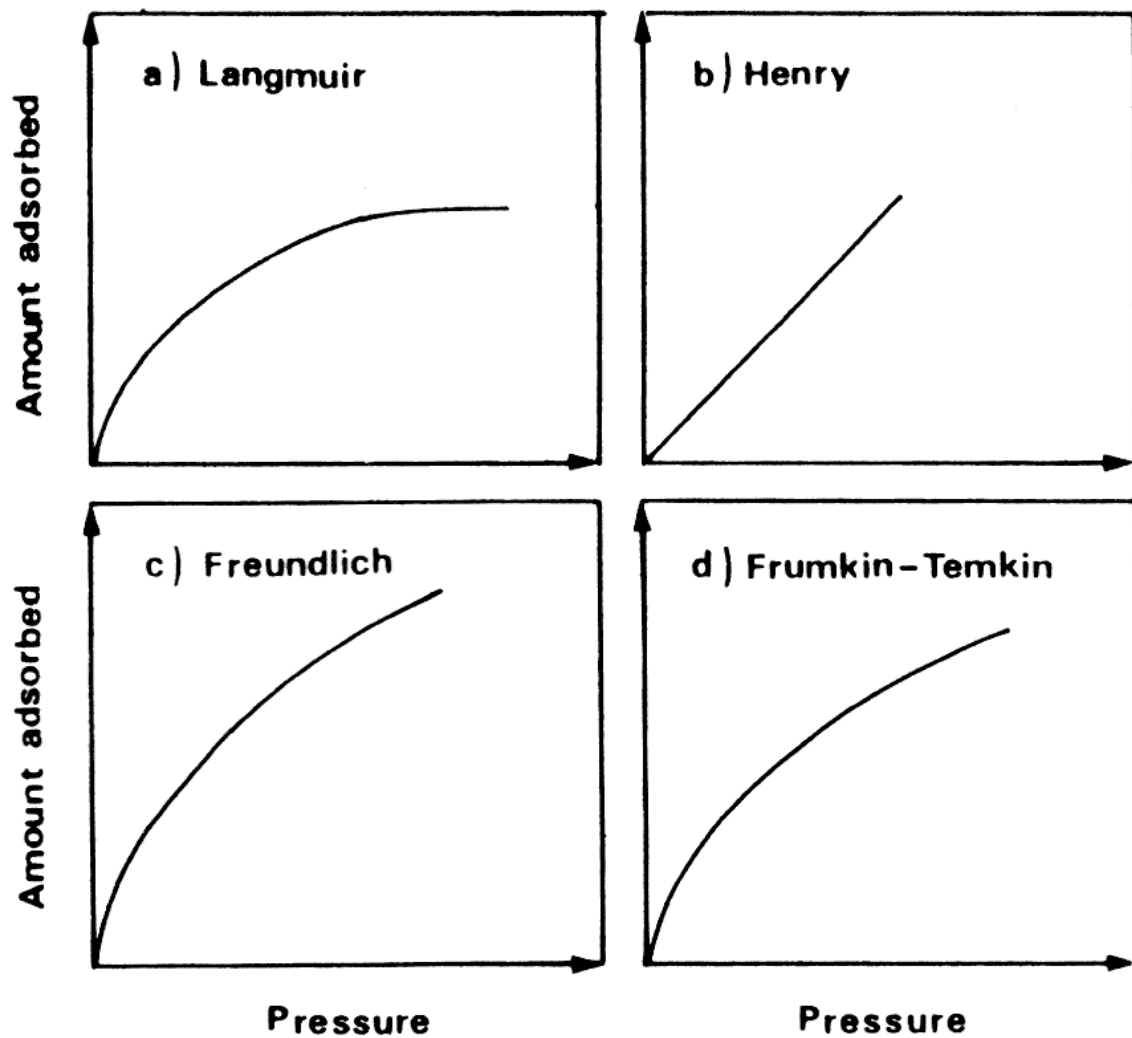
## ■ 解離吸着



## ■ 非解離吸着



# 吸着等温線





# 吸着等温式

- **Langmuir**

$$v = \frac{abp}{1 + ap}$$

$$v = \frac{ab\sqrt{p}}{1 + a\sqrt{p}}$$

$$\theta/(1 - \theta) = ap$$

$$\theta/(1 - \theta) = a\sqrt{p}$$

$p$ : 吸着平衡圧

$v$ : 吸着量

$b$ : 飽和吸着量

$\theta = v / b$

- **Henry**

$$\theta = ap$$

$\theta \ll 1$  のときに相当

- **Freundlich**

$$v = ap^{1/n} \quad (1 < n < 10)$$

- **Frumkin-Temkin**

$$v = A \ln Bp$$

# 吸着等温式

## ■ Langmuir

- ほとんどの化学吸着が該当する
- 吸着熱は吸着量に無関係であるのが理論であるが、必ずしも理論には合わない場合がある

## ■ Henry

- 直線的に吸着量が増加する式だが実際にはLangmuir型の一部とされている場合が多い

## ■ Freundlich

- 吸着熱は  $\ln v$  (吸着量) と直線関係にある
- 中間部分はLangmuir型に近いので見極めが難しい

## ■ Frumkin-Temkin

- 金属鉄上へのアンモニアや窒素吸着で提出された特殊なケース
- 吸着熱は吸着量とともに直線的に減少する

# 化学吸着

## Langmuir式 (理論式)

$$\frac{d\theta}{dt} = k_f(1-\theta)C_A - k_b\theta \quad (1)$$

$k_f$ ,  $k_b$ , 吸着および脱着反応速度定数

$$\theta = q / q_m \quad (2)$$

$q_m$ , 飽和吸着量

平衡状態において  $dq/dt = 0$  なので

$$q = q_m \theta = q_m \frac{K_A C_A}{1 + K_A C_A} \quad (3)$$

$K_A$ , 吸着定数

# 化学吸着

## ・Freundlich式(実験式)

$$Q = kC_A^n \quad (4)$$

$k$ ,  $n$ , フロインドリッヒ定数;  $C_A$ , 吸着質の平衡濃度  
(※吸着質(adsorbate): 吸着される物質のこと)

# 吸着から表面反応へ

# 触媒反応

- 物理吸着
- 化学吸着
- 表面反応
- 脱離

ここで終わったら、  
単なる吸着現象

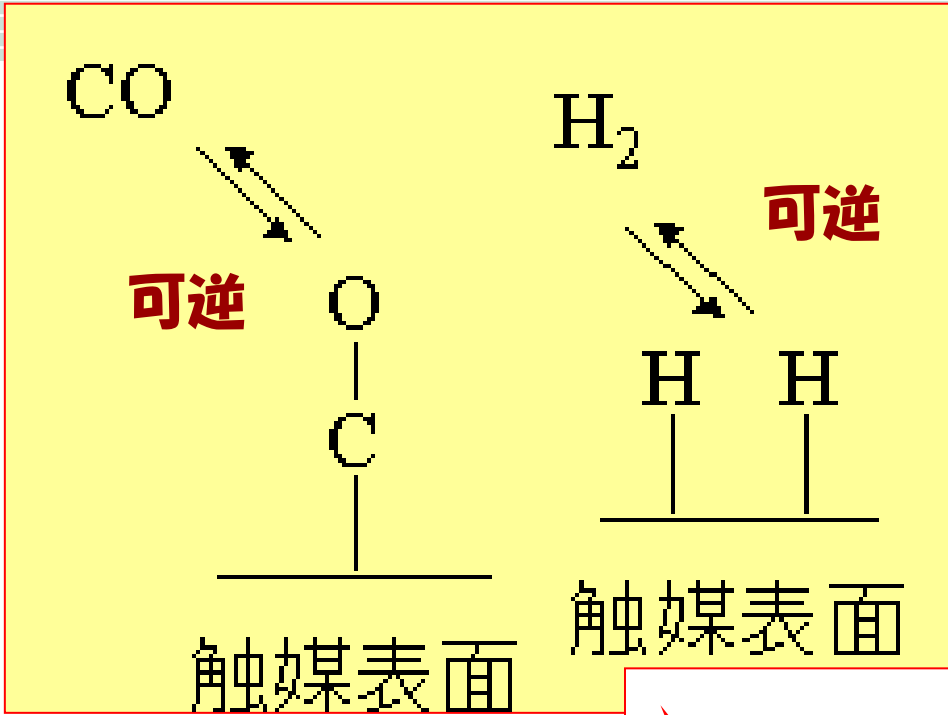


# 例：メタノール合成反応

- 合成ガスからメタノールを合成する反応



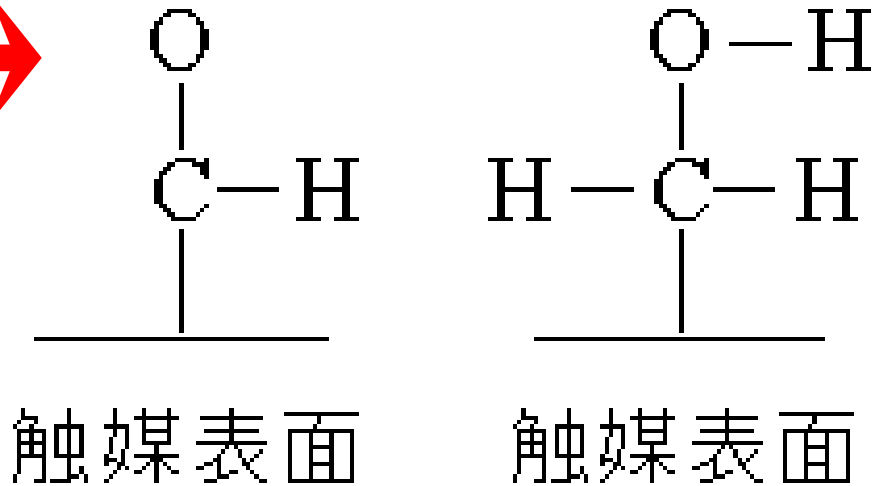
ポイントはC=O間の非解離。H-H間の解離



物理吸着  
→ 化学吸着

**CH<sub>3</sub>OH**

不可逆  
表面反应





# 表面反応

- **不可逆過程が多い**
  - 逆反応が圧倒的に不利な場合
- **表面反応が律速段階になる場合が多い**
  - 表面反応にも多くの段階がある
  - どこが律速段階か、は、アレニウスプロットで知ることができる

# 例: メタノール合成

- 合成ガスからメタノールを合成する反応



**CO**ガス→**CO**(化学吸着)

**H<sub>2</sub>**ガス→ **H<sub>2</sub>**(化学吸着)→**2H**(解離吸着)

**CO**(吸着)+**H**→**CHO**(吸着) <律速段階>

**CHO**(吸着)+**H**→**CH<sub>2</sub>O**(吸着)

**CH<sub>2</sub>O**(吸着)+**H**→**CH<sub>3</sub>O**(吸着)

**CH<sub>3</sub>O**(吸着)+**H**→ **CH<sub>3</sub>OH**(吸着)

**CH<sub>3</sub>OH**(吸着)→(脱離)**CH<sub>3</sub>OH**

# 活性化エネルギー

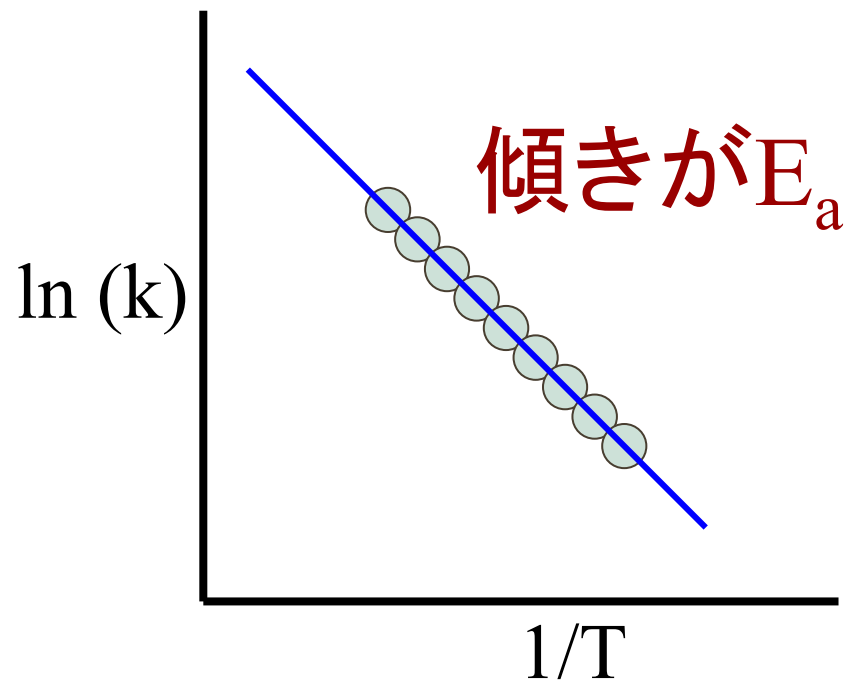
- **アレニウスの式**  
**反応速度定数  $k$**

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

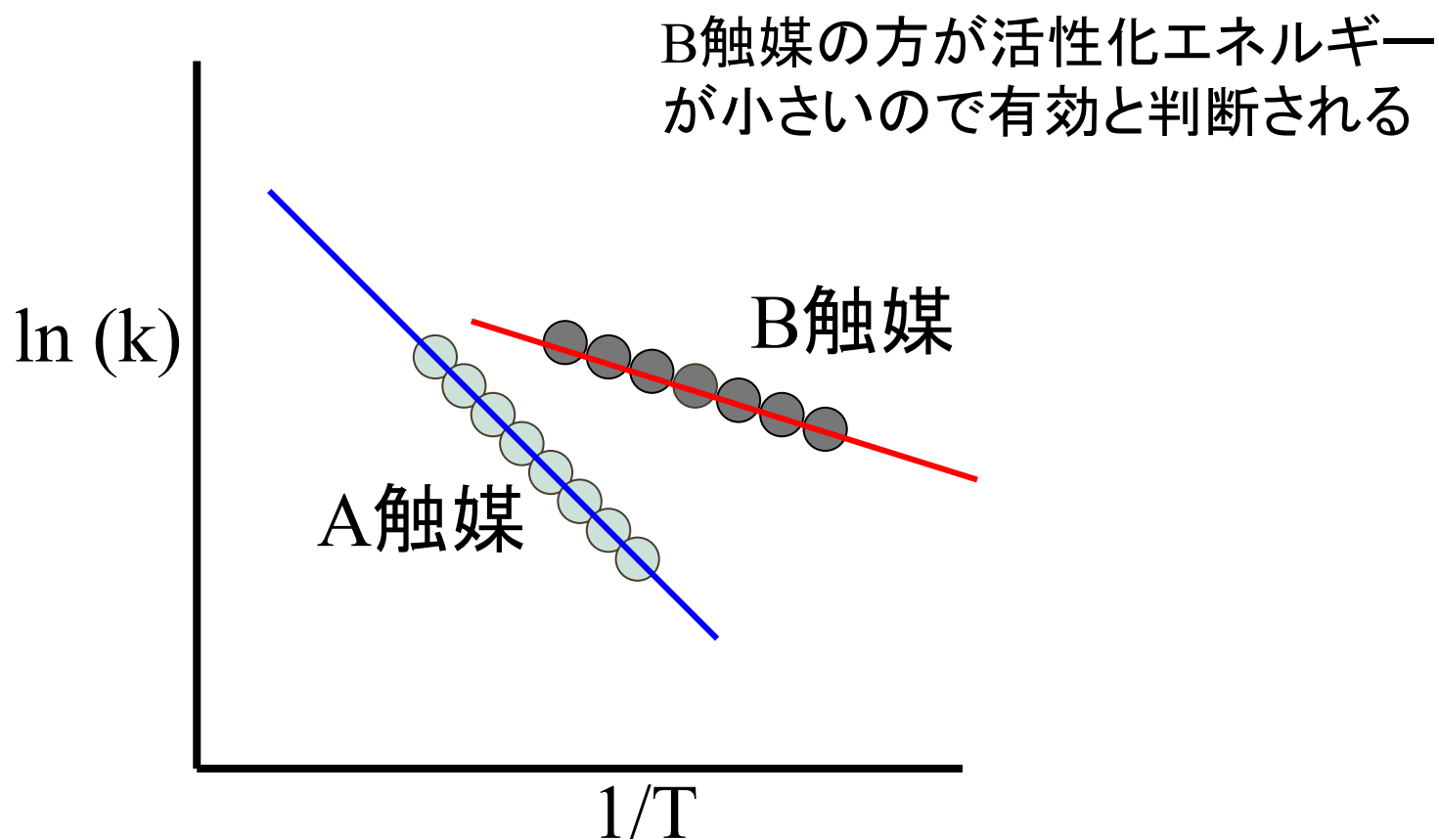
- ここで、 $A$  は頻度因子、 $E$  は活性化エネルギーである。この式は異なる温度での速度定数がわかれば、活性化エネルギーを求めることを示している。
- アレニウスの式は、ボルツマン分布の式と同じ形をしていることが重要である。活性化エネルギーは、反応が起きる途中の、中間体になるためのエネルギーであるが、その中間体の存在する割合が、反応速度を支配していると言っていることを示している。
- 反応速度の解析は、様々な物質が共存するような反応において、反応のメカニズムを解明する上で、重要となる

# 見かけの活性化エネルギー

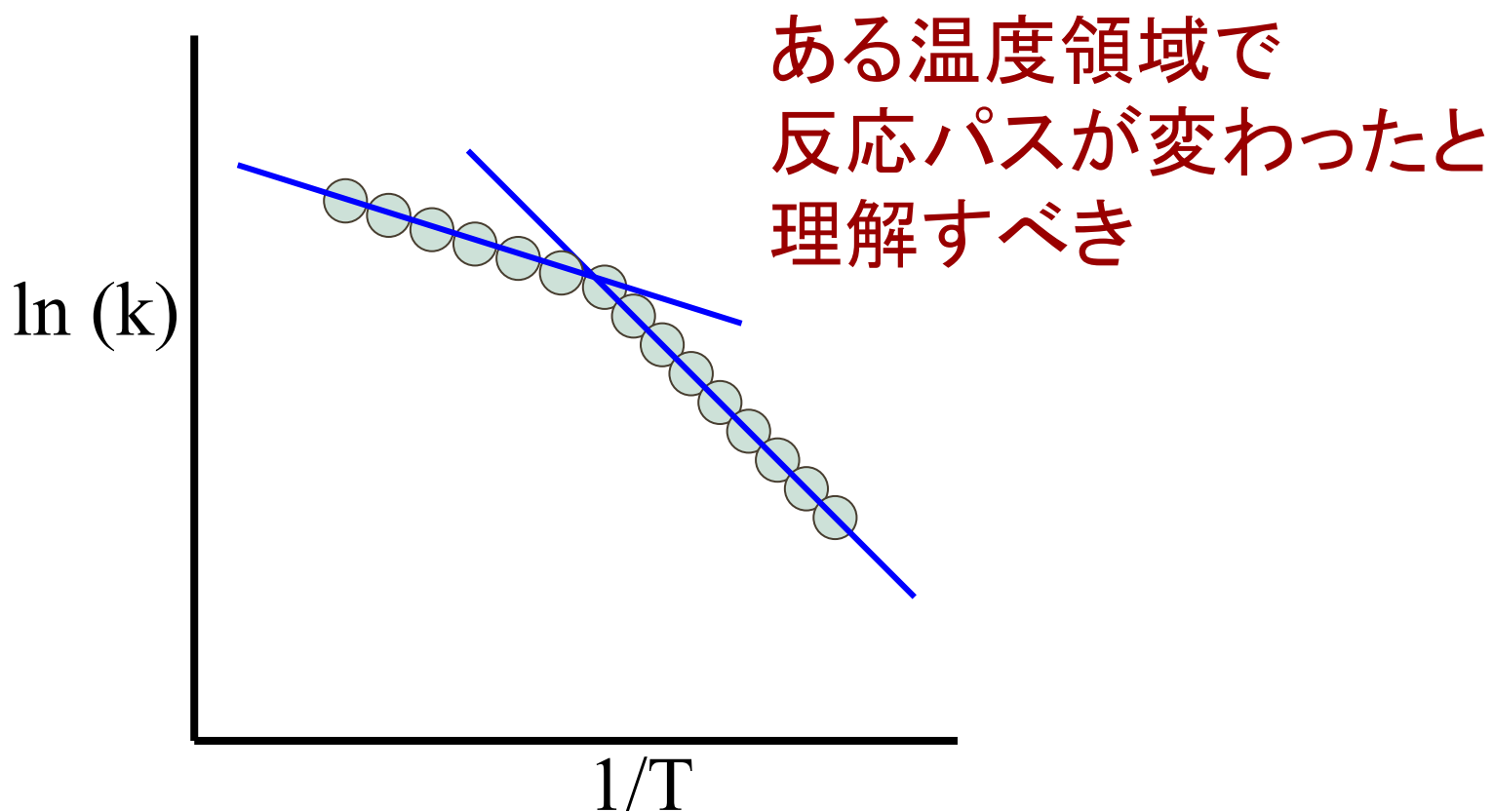
- 実験データから、 $\ln(k)$ =y軸、と $1/T$ =x軸のプロットをすると、傾きが $E_a$ =活性化エネルギーとなる



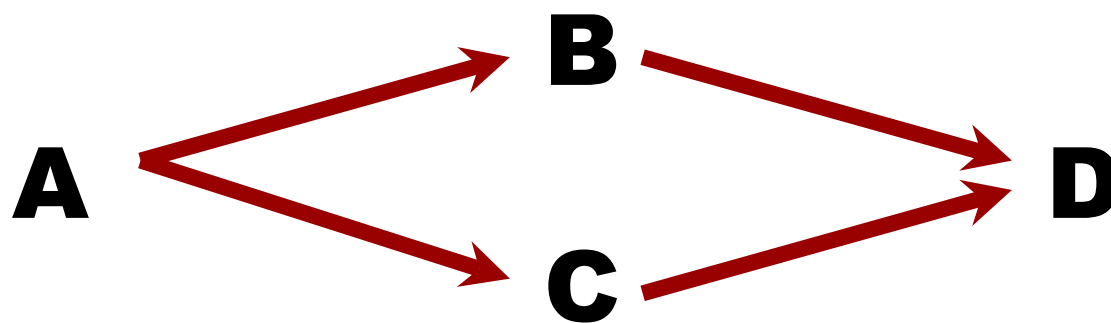
# 触媒の働き



# 活性化エネルギーが変わる？

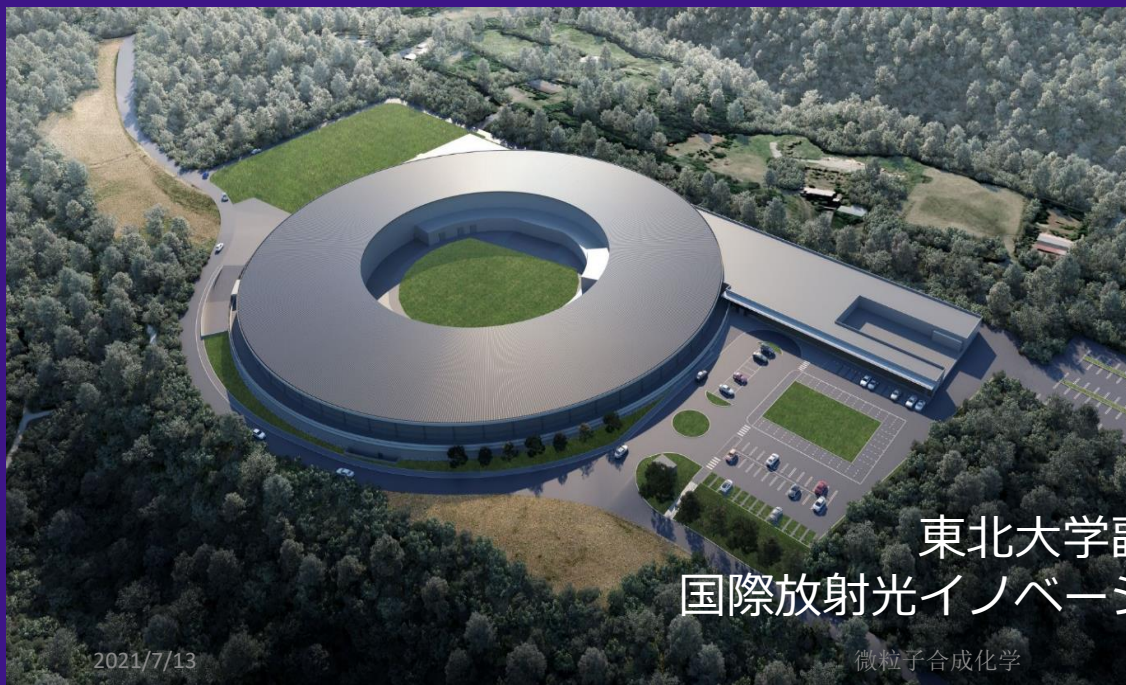


# 反応のパス



律速段階が変わると活性化エネルギーは変わる

# 次世代放射光と ナノ材料研究

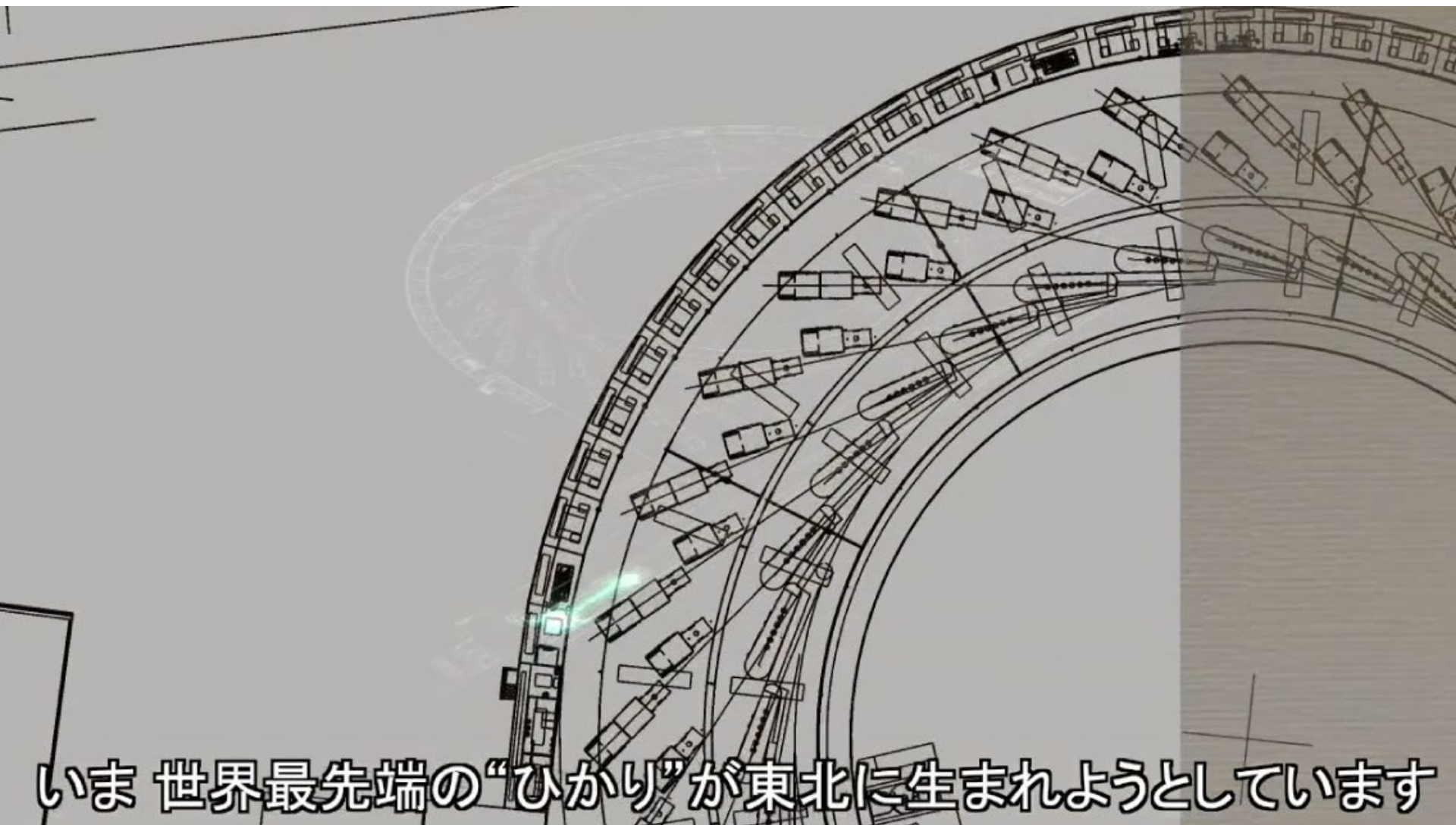


東北大学副理事（次世代放射光計画担当）  
国際放射光イノベーション・スマート研究センター長  
村松 淳司

2021/7/13

微粒子合成化学





いま 世界最先端の“ひかり”が東北に生まれようとしています

コロイド

サントリー ミセル  
山崎

酒



# SUNTORY WHISKY



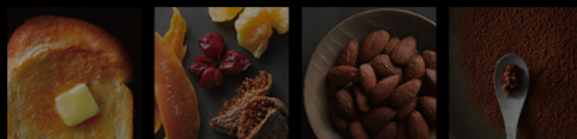
## 山崎25年

複雑かつ重厚、円熟の深い余韻。

酒齢25年を超える長期熟成シェリー樽原酒を厳選。丁寧にヴァットティングしたスーパープレミアムウイスキー。年間生産本数千数百本の限定品です。

### テイastingノート

シェリー樽熟成由来の甘美な芳香が馥郁と立ちのぼる。年月を誇る長期熟成原酒の甘味と苦みが織り成す複雑で重厚な香味。陶然とした余韻は長く、深い。



色	濃い赤褐色
香り	レーズン、イチゴジャム、ビターチョコレート
味	しっかりとした酸味、ほろ苦さ、厚み
フィニッシュ	ドライフルーツ、樽香、酸味、苦味、長く深い余韻

700ml・43度



緑茶でも、  
緑色レーザーで  
チンダル現象  
これと同じ！



緑色レーザーでチンダル現象  
⇒ 100~300 nm程度のナノ粒子や  
その大きさの何かの存在を示す...

# “まろやかさ”の原因って？

ウイスキーのまろやかさの経年増加が水、エタノール、樽由来成分の三要素の構造体形成によって結果的にエタノールがマスクキングされ、アルコール刺激が低減するのではないかと仮定した。

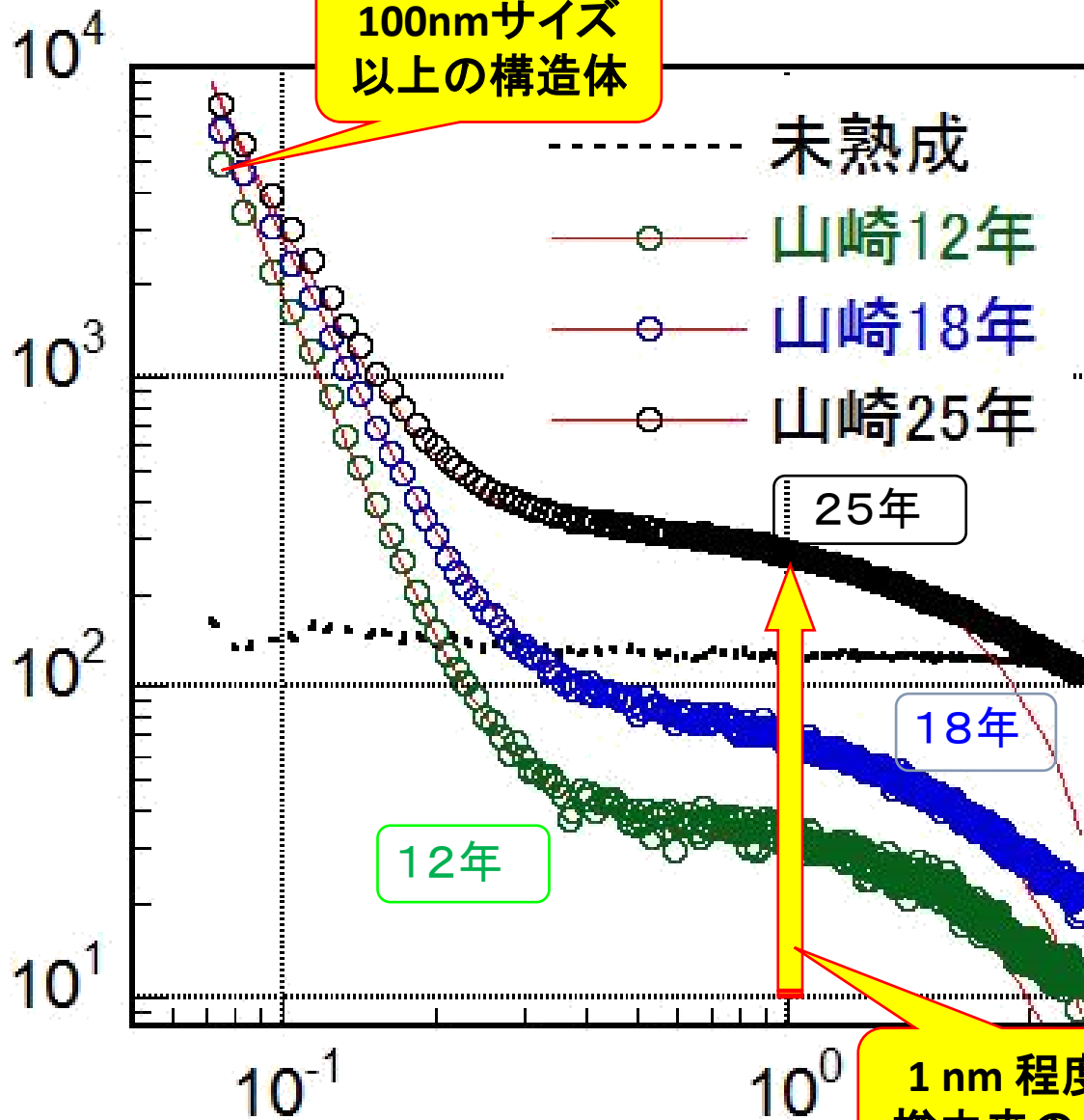
また、熟成に時間がかかる理由として、形成された構造が安定化するのに時間を要するためではないかと考えた。

## それを，SPring-8で解明した

# Spring-8

小角X線散乱測定法(SAXS)

放射光の強度



## 熟成過程:

- ・年月経過⇒樽由来の成分⇒ウイスキー中に溶出
- ・樽由来の成分⇒低分子, 1nm程度

## ミセル形成:

低分子成分の一部  
⇒疎水部を内側に、親水部を外側に配するミセルを形成

100 nm 超えのサイズ  
・エタノール分子や疎水性成分を多く取り込こむこと

⇒ 味覚としての刺激を抑えることが可能

まろやかさの原因!

小角散乱ベクトル q (nm<sup>-1</sup>)



# ミセル形成:

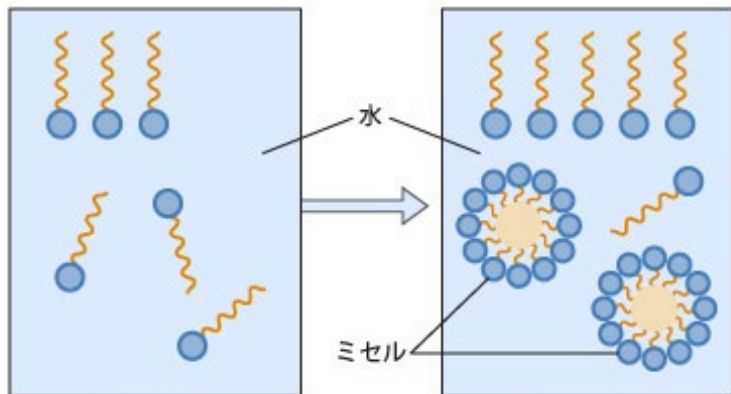
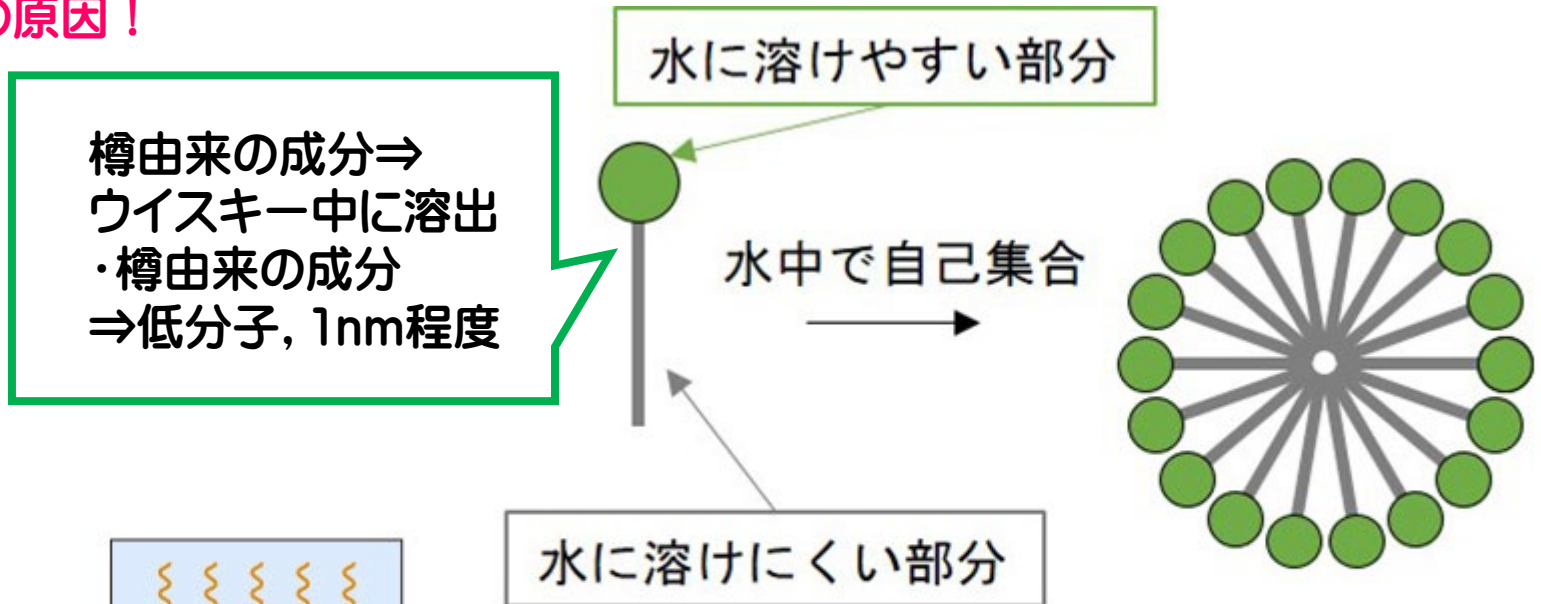
低分子成分の一部

⇒疎水部を内側に、親水部を外側に配するミセルを形成, 100 nm 超えのサイズ

・エタノール分子や疎水性成分を多く取り込こむこと

⇒ 味覚としての刺激を抑えることが可能

まろやかさの原因!



(会合数に関しては、特に好ましい値がなく、黒 (疎水) と緑 (親水) のバランスで決まる)

- ・親水基を外側に向けて安定化する
- ・ミセルの中に油性成分が可溶化する (とりこむ)

しかし、  
**SPring-8**では、  
測定に時間がかかり、  
不安定なミセルを  
完全には測定できて  
いなかった・・・

**2023年,  
SPring-8を凌ぐ  
新たな施設が  
仙台にできる！  
それが  
未来の光  
「次世代放射光」施設**

マテリアル

次世代放射光評価

東北大学青葉山新キャンパス

X線



# 東北大学 サイエンスパーク構想

映像



2023年度に運用開始が予定されている次世代放射光施設と対をなすサイエンスパークに世界的に競争力の高い民間企業/地域の研究機関/大学/自治体等を大規模に集積させることで我が国最大規模の研究コンプレックスを形成します

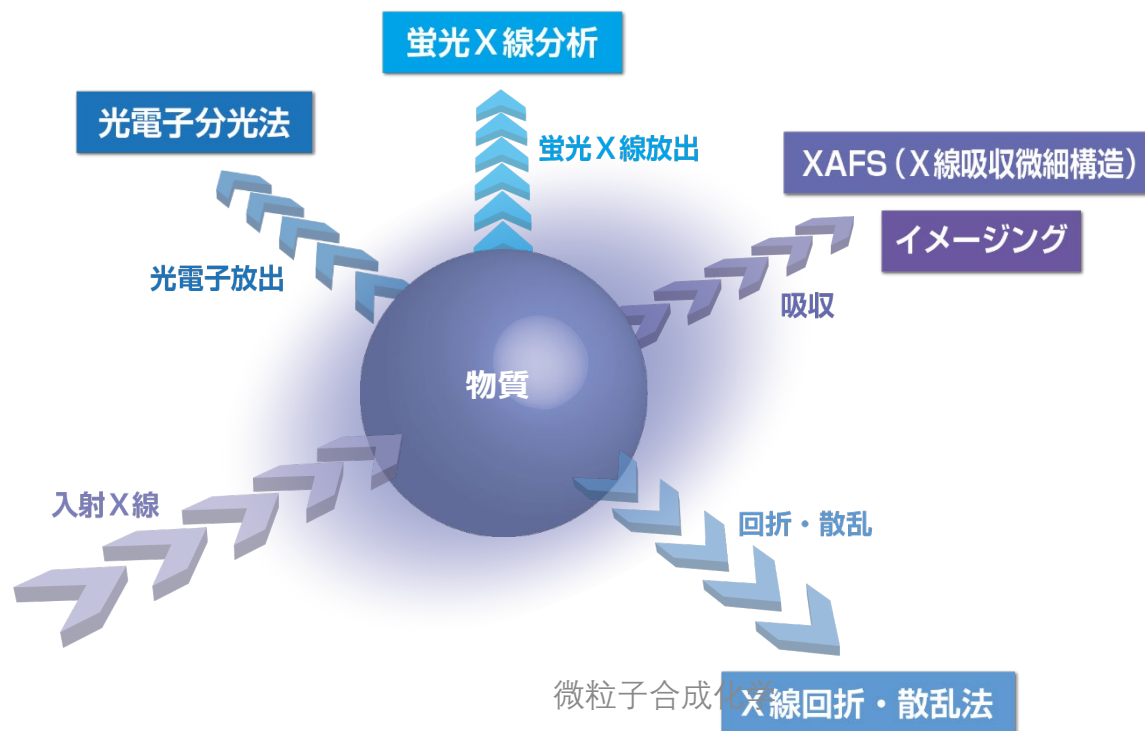
# これまでの施設を上回る性能

## 放射光(超高輝度X線)の性能

輝度: 実験室の装置の10億倍、SPring-8の100倍

分解能: ミクロンからナノまで

検出速度: ミリ秒から50ピコ秒まで



# 100倍明るい光で「モノの見え方」が変わる。

- 次世代放射光は、国産の先端技術の粋を集めた、最新の加速器技術を採用。
- 世界でも明るいと言われたSPring-8を100倍上回る光の輝度を 実現する。
- 光の計測機器の発展で、より高精細で大量のデータが高速で得られる ようになる。
- ナノの世界での“モノの見え方”を大きく変える。

2023年運用開始でSPring-8とともに、光の先端を拓く

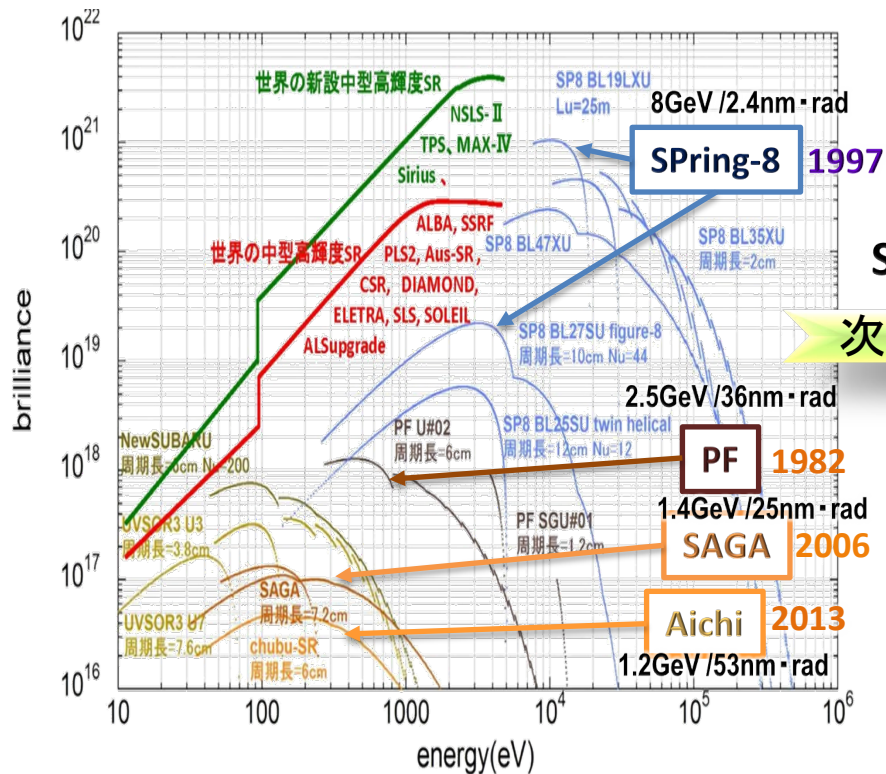
SPring-8、SACLAで磨いた技術で100倍の性能差を一気に逆転する。





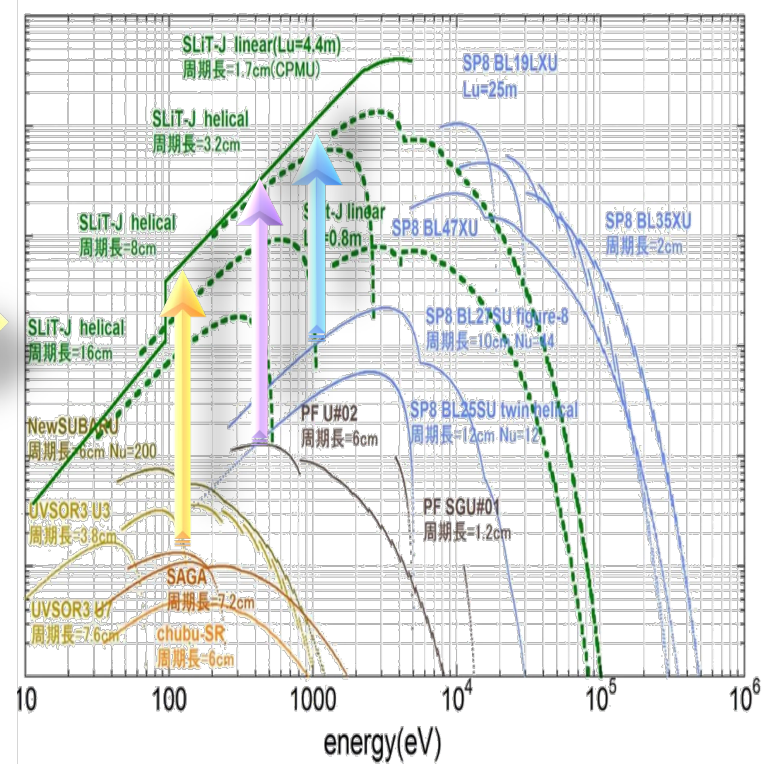
# 2013年～ SPring-8と次世代放射光が 硬X線領域と軟X線領域を重なり合いながら 光の先端性能を担う

## 日本の現状



SLIT-J  
次世代

## 次世代放射光の輝度

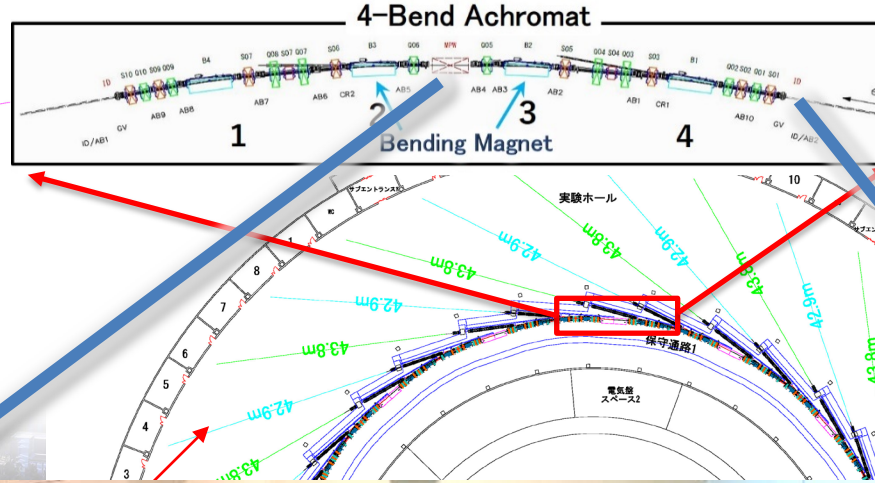


# 電子加速器、蓄積リングの設計は終了・発注中



SACLA & SPring-8の技術を結集しコンパクトで  
高性能な加速器を実現

電子エネルギー	3 GeV
蓄積電流	400 mA
方式	4バント・ア クロマツト
エミッタンス	1.1 nrad
周長	348.8 m
セル数	16
ビームライン数	26



加速器グループリーダー  
田中 均  
(QST/RIKEN)

加速器



2021/7/13

C-バンド直線加速器 (110m) フルエネルギー入射

微粒子合成化学

# 電子蓄積リングの進化: DBAからMBAへ

DBA: ダブルベントアクロマット (偏向電磁石2つ)

MBA: マルチベントアクロマット (偏向電磁石2つ以上)

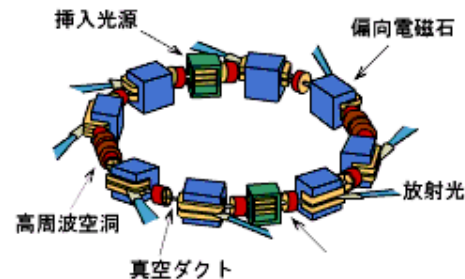
低エミッタンスリングへの主な決定の一つ

偏光電磁石の数 (Bend数) をいくつにするか?

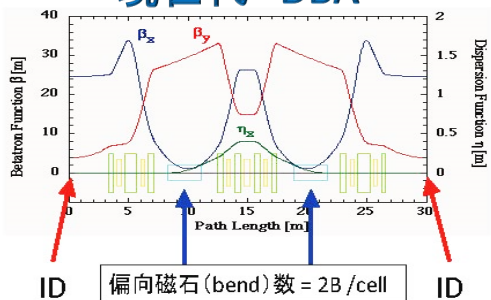
現代 -> DBA; DIAMOND Light Source (UK); TPS (台湾), NSLS-II (米国): 2,

次世代 -> MBA; SLiF-J: 4, SPring-8-II: 5, ESRF-U: H7, MAX-IV: 7, ALS-U: 9

電子ストレージリングと放射光発生の様子

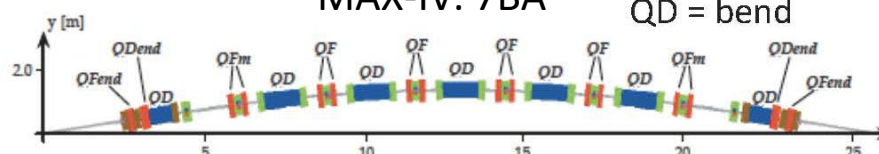


現代 DBA

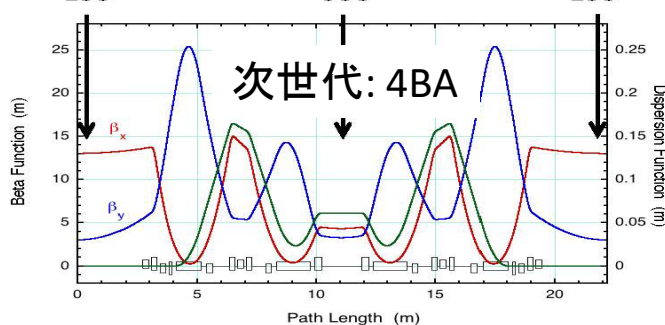


MAX-IV: 7BA

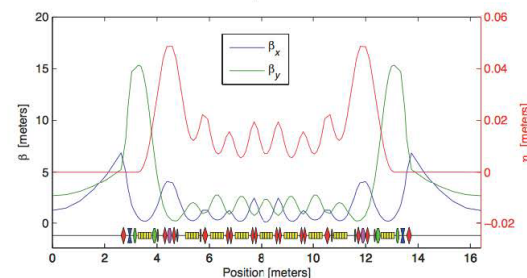
QD = bend



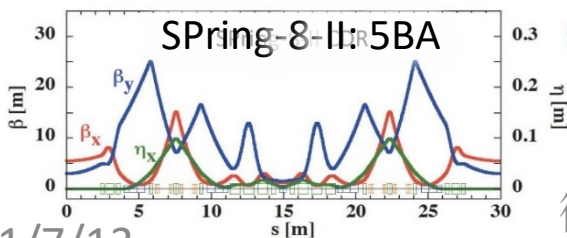
LSS SSS LSS



C. Steier et al., IPAC2014.



ALS-U: 9BA

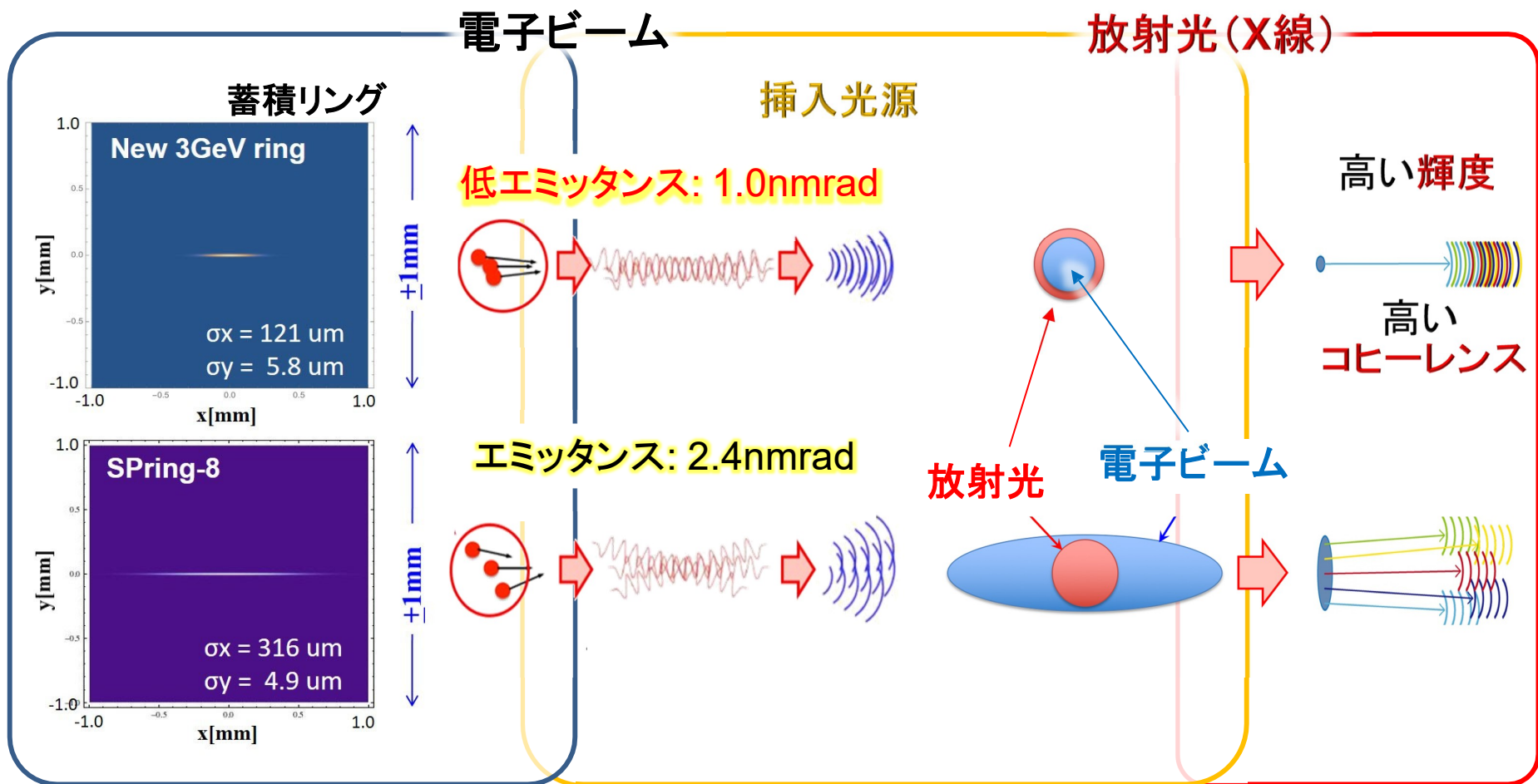


次世代放射光は、  
「安定」な低エミッタンス放射光を実現する  
4BA方式を提案

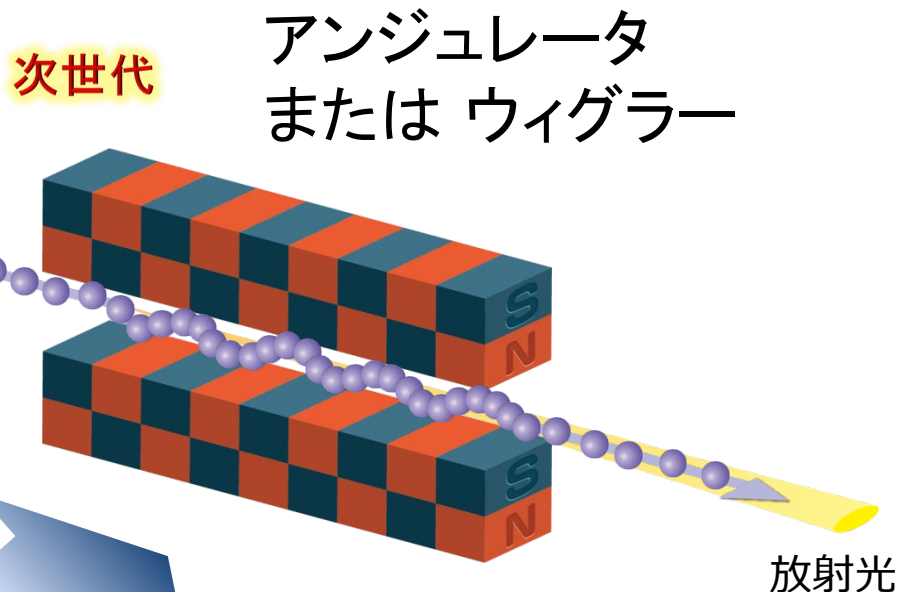
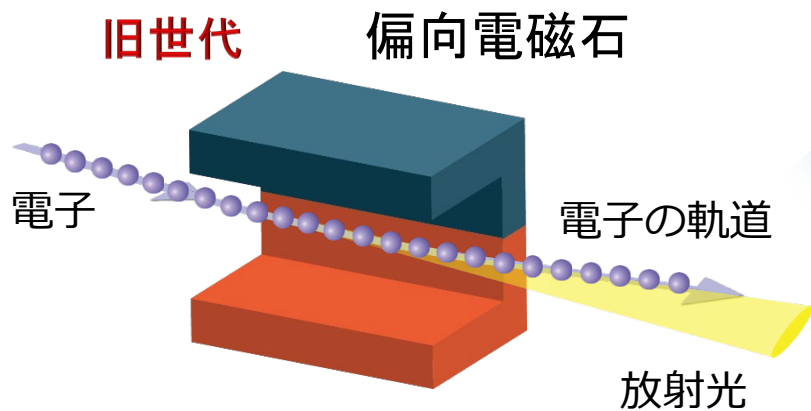
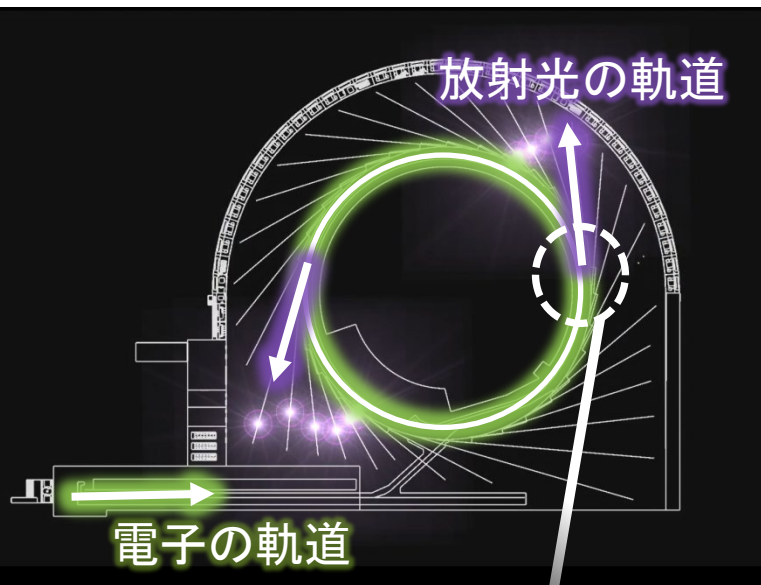
微粒子合成化学

# 低エミッタンス電子ビーム： SPring-8の100倍輝度とコヒーレンス(可干渉性)をもたらす光源

光源(電子ビーム)が絞られる(低エミッタンス)と、放射光の波が揃う

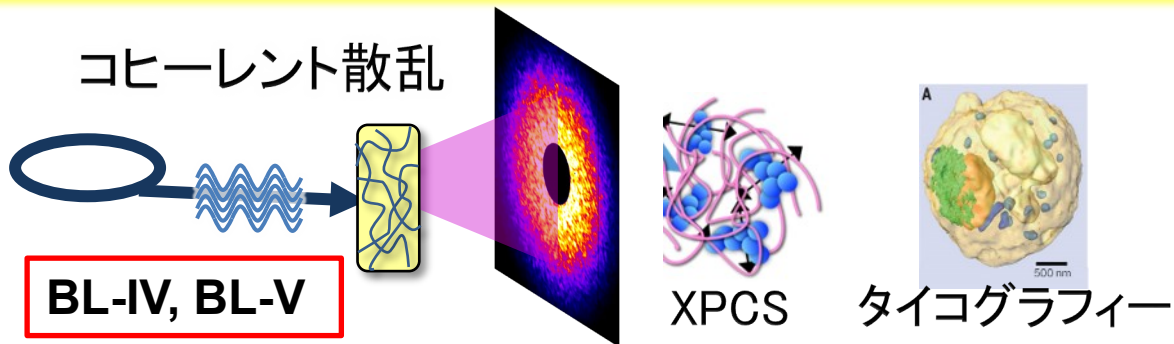
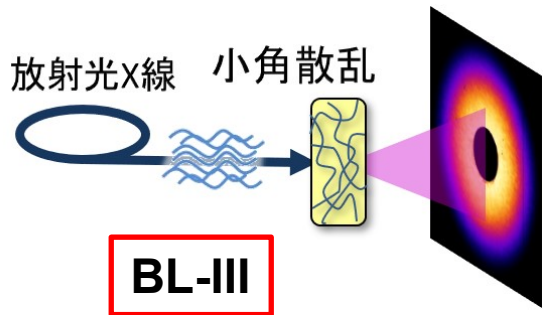


# 次世代放射光施設の光源はすべて挿入光源



- 輝度が100倍以上
- コヒーレントな光

# SPring-8との違い: 100倍のコヒーレンスを多面的に活用



分子・組織構造の可視化

小角X線散乱

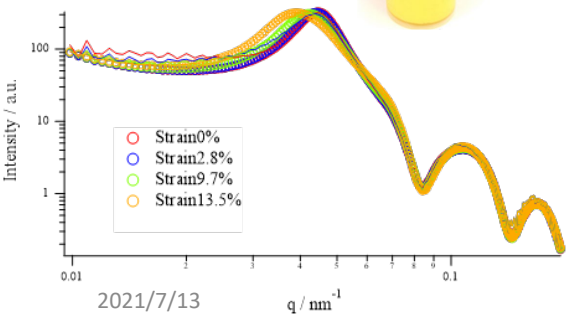
原子・分子レベルでの  
平均構造と物性の評価

粒子分散

小角X線散乱データ



顔料



組織動態の可視化

XPCS: X線光子相関法

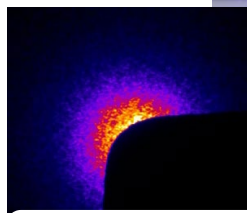
分子レベルでの硬さ・  
不均一性の評価

硬化  
メカニズム

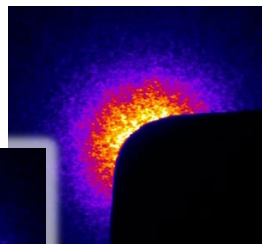
コロイドの運動



熱硬化樹脂



従来の改質剤



新規の改質剤

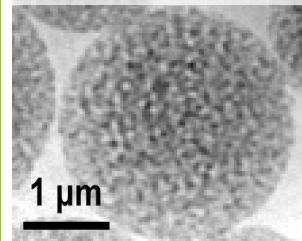
局所構造の2D/3D画像

タイコグラフィ

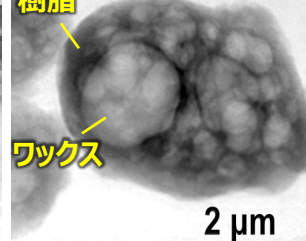
ナノスケール可視化による  
不規則な構造の詳細評価

ボイド・粒子分散・相分離構造

液クロ用シリカゲル



トナー粒子



31 nm / pixel

# 次世代放射光施設の光の特長

## ① 元素選択性の範囲が拡大する

硬X線向きのSPring-8 (8GeV)とは異なるエネルギー範囲にあるLi, C, O, Na, Mg, Al, Si, P, S等の軽元素と、重元素の外殻電子の電子状態が観測可能になる。

## ② 輝度が100倍になる

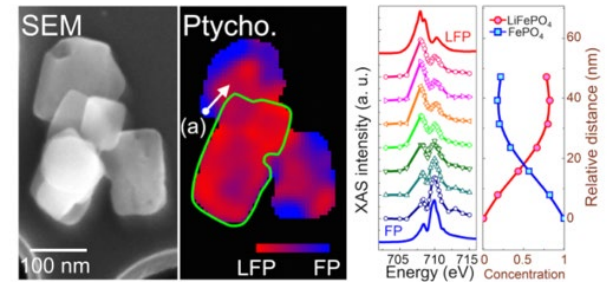
「高時間・空間分解計測」、「その場観察、オペランド計測」が可能となる。計測限界、計測精度が向上する。

## ③ 集光サイズがシングルナノになる

シングルナノの顕微分析が低エミッタンス (~1.0nmrad) 光源で実現する。

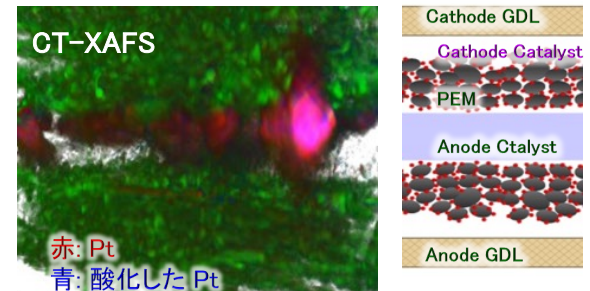
## ④ コヒーレンスが100倍になる

不均一構造や組織構造がナノで可視化が可能となる。ダイナミクスの可視化が可能となる。



Nano Lett. 15, 4282 (2015).

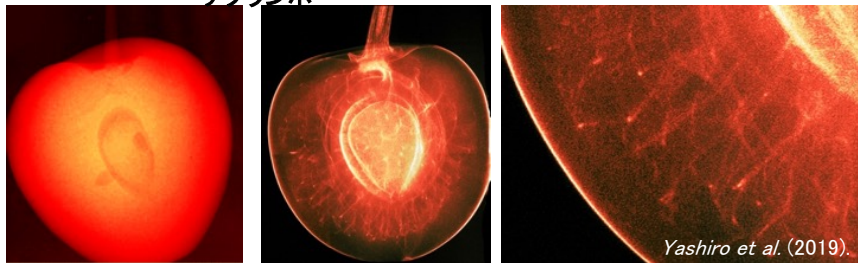
Liイオン電池の充放電中のナノ粒子の化学状態の変化



赤: Pt  
青: 酸化したPt  
緑: GDL, Anode, PEM

燃料電池セル内部のPtの化学状態  
SPring-8 Uruga and Tada et.al.

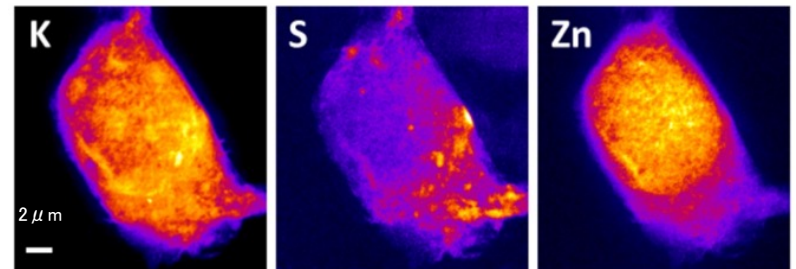
サクランボ



通常のX線透過像  
2021/7/13

コヒーレント光利用位相コントラスト像  
通道組織なども鮮明に観測可能

微粒子合成化学



ナノビームのスキャンによる凍結乾燥神経細胞の元素分布  
ESRF Caroline Bissardon et.al.

# 次世代放射光施設ビームライン Lineup

【分担】光科学イノベーションセンター(PhoSIC)が7本、量子科学技術研究開発機構(QST)が3本の計10本

【分岐】PhoSICのBL-I, II, III, V, VI, VIIの6本のビームラインは、各々、光源性能を最大限活用するマスターラインと、マスターラインに大きな影響を与えない範囲で残りのビームを有効利用するスレーブラインに分岐して利用者を増やす予定

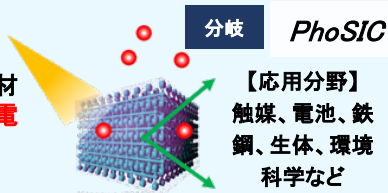
## BL-I X線オペランド分光

Beam Size: 100nm

硬X線: 2-20 keV

大気圧XPS,  
大気圧XAFS  
XRD

反応・動作条件下の材料内部の結晶構造と電子状態の両方を決定



分岐 PhoSIC

【応用分野】  
触媒、電池、鉄鋼、生体、環境科学など

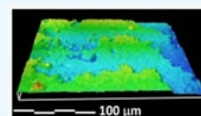
## BL-VI 軟X線電子状態解析

Beam Size: <50nm

軟X線: 0.05-1 keV

Nano-XPS,  
RIXS

オペランドで液相・固相の反応・機能の主役となる電子状態可視化



ゴム/金属界面

分岐 PhoSIC

【応用分野】  
電池触媒、水処理膜、生体親和材料など

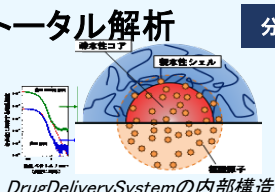
## BL-II X線構造-電子状態トータル解析

Beam Size: 50 μm

硬X線: 2-20 keV

STXM, XAFS  
SAXS, WAXS

配向・凝集状態と電子・化学状態



Drug Delivery Systemの内部構造

分岐 PhoSIC

【応用分野】  
フィルム、タイヤ、繊維、光学材料、金属材料など

## BL-VII 軟X線オペランド分光

Beam Size: <50nm

軟X線: 0.13-2 keV (偏光に依存)

準大気圧XPS,  
準大気圧XAFS  
XPS,

反応・動作条件下での材料表面のオペランド化学状態解析

分岐 PhoSIC

【応用分野】  
触媒、電池、人工バ  
イオ材、水素エネ  
ルギーなど

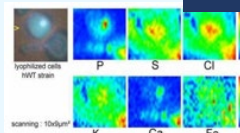
## BL-III X線階層的構造解析

Beam Size: 50 μm

硬X線: 4.4-30 keV

X-ray Phase Contrast imaging,  
XRF imaging, SXFM, XFH, XRD,  
SAXS, WAXS, CT

元素分布  
化学状態  
階層構造



酵母細胞内元素分布

分岐 PhoSIC

【応用分野】  
触媒、複合材  
料、接着、脳  
構造など

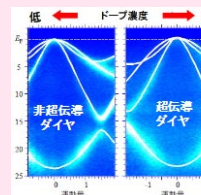
## BL-VIII 軟X線ナノ光電子分光

Beam Size: 50nm-10 μm

軟X線: 0.05-1 keV

Nano-Spin-ARPES,

半導体や材料の電子状態・電子スピ  
ン状態



QST

【応用分野】  
ナノスピント  
ロニクス、固体  
物理など

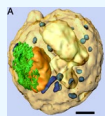
## BL-IV X線コヒーレントイメージング

Beam Size: 100nm or 50 μm

硬X線: 2-20 keV (偏光に依存)

X-ray Ptychography (XPG)  
XPG-XAFS, XMCD

3Dナノ構造  
機能相関



酵母胞子の内部構造

PhoSIC

【応用分野】  
排ガス触媒、  
細胞、電池、  
ナノ材料など

## BL-IX 軟X線ナノ吸収分光

Beam Size: 50nm-10 μm

軟X線: 0.13-2 keV (偏光に依存)

XAS, XMCD/XMLD,  
MO Kerr effect,

磁性の高速計測・  
ダイナミクス計測

QST

【応用分野】  
磁性材料、スピ  
ントロニクス、固  
体物理など

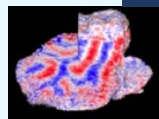
## BL-V 軟X線磁気イメージング

Beam Size: <50nm

軟X線: 0.18-2 keV (偏光に依存)

X-ray Phase Contrast imaging  
SXFM, XMCD/XMLD imaging  
XNCD imaging, MO Kerr effect

磁気構造・磁  
区、光学異性  
体分布



磁石粒子の磁区

分岐 PhoSIC

【応用分野】  
ストレージ、  
モータ、微生  
物など

## BL-X 軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱

Beam Size: <500nm

軟X線: 0.25-1 keV

超高分解能RIXS

価電子状態解析  
固体内の電子の素励起  
固液界面反応計測

QST

【応用分野】  
エレクトロニクス用材料、  
固体物理、触媒、電池な  
ど



# 次世代放射光による先端計測ソリューション

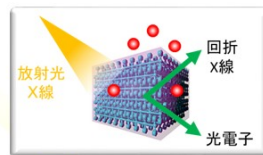
## コンセプト

複数の放射光施設をまたいでデータ収集するようなことが、PhoSICビームラインの横断的利用によって可能となる。最小限の時間で必要なデータが揃う。

### BL-I 材料内部の構造と電子状態

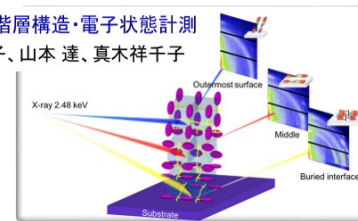
テンダーX線～硬X線  
オペランド光電子分光・回折計測

山本達、西堀麻衣子

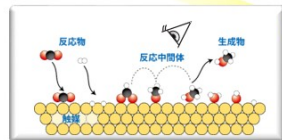


### BL-II 階層構造と電子状態・化学状態

テンダーX線～硬X線 階層構造・電子状態計測  
西堀麻衣子、山本 達、真木祥千子



### BL-VII 材料表面の電子状態・化学状態

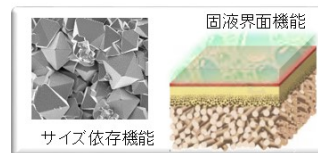


軟X線 雰囲気オペランド分光計測  
松田巖、山本達、虻川匡司



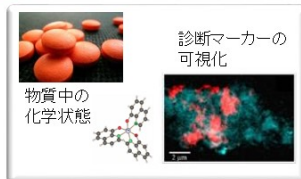
### BL-VI

ナノ空間の機能電子状態可視化



軟X線 高分解能電子状態計測 原田慈久、虻川匡司

### BL-III 物質と機能の階層構造

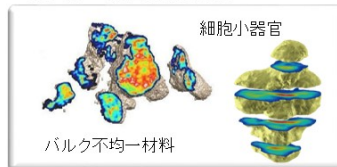


硬X線イメージング、  
トモグラフィ計測

矢代航、江島丈雄

### BL-IV

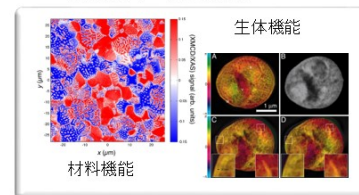
3次元ナノ構造-機能相関



テンダーX線～硬X線  
コヒーレントイメージング計測

高橋幸生、矢代航

### BL-V 機能分布・発現機構



軟X線～テンダーX線  
先端機能磁気イメージング計測

中村哲也、羽多野忠

## 方針

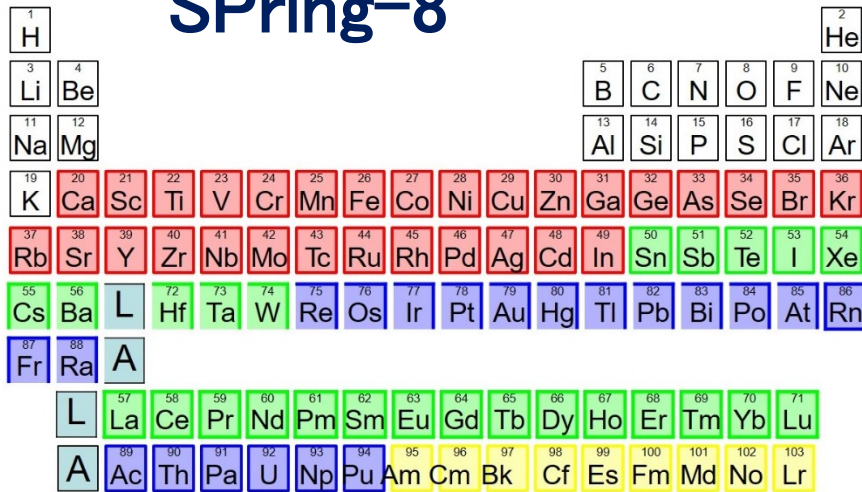
PhoSICビームラインの横断利用を最適化し  
総合的なデータ収集をユーザーに提供する。

to see Element から to see Chemistry へ

## 材料科学と親和性の高い3GeV放射光施設

今まで見えなかった、リチウムやカーボンの機能を可視化  
学術の知を、産業界の価値に変える

### SPring-8



測定エネルギー範囲: 3.8 – 72 keV

### Liから見える

次世代放射光

K-edge

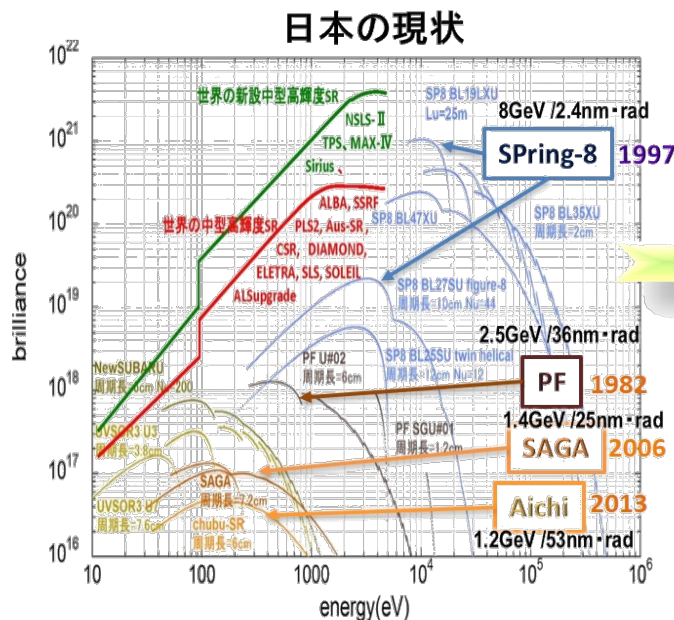
L-edge



Liから見える

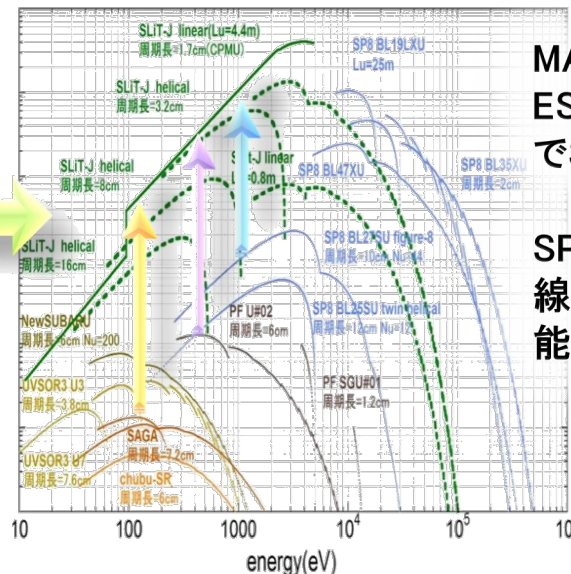
エネルギー範囲 50eV-30keV

# 光源性能 軟X線領域でSPring-8の100倍, 硬X線領域(~30keV)までカバー



## 2023年次世代放射光の運用開始

## 次世代放射光

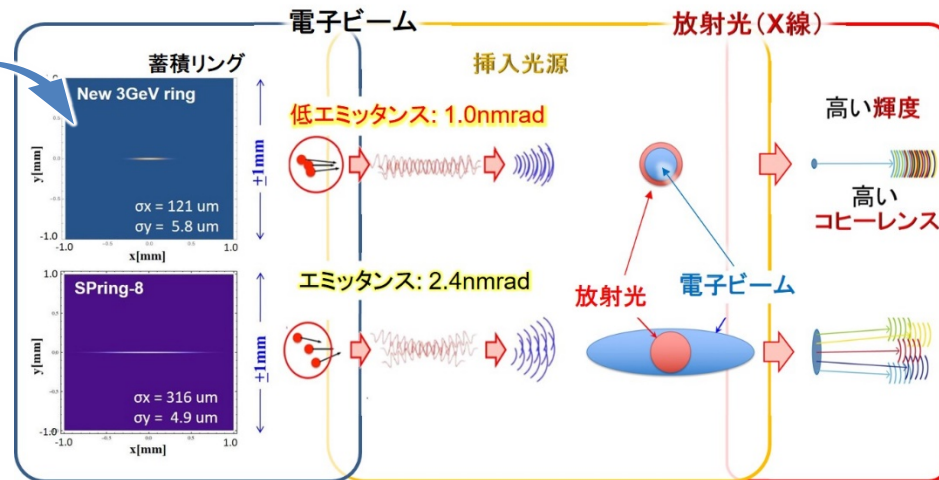
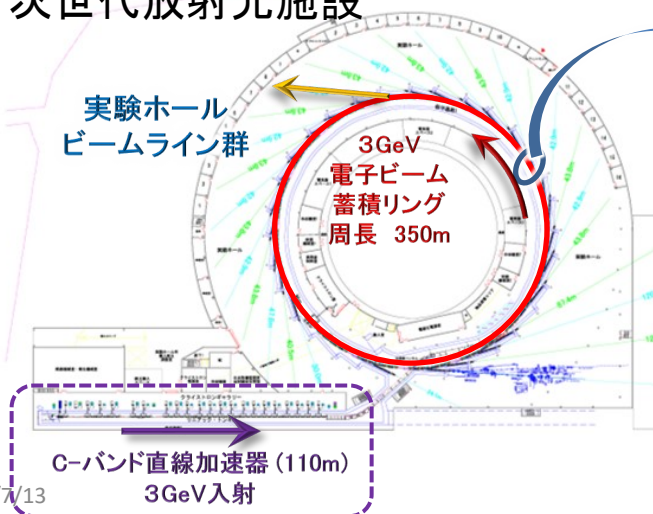


MAX-IV(スウェーデン), ESRF-EBS(EU)に次ぐ世界で3番目の次世代光源

SPring-8との2極体制で軟X線から硬X線光源の先端性能をカバーする

低エミッタンス(1.0nmrad)電子ビーム光源で, SPring-8の100倍の輝度・コヒーレンスを実現

## 次世代放射光施設



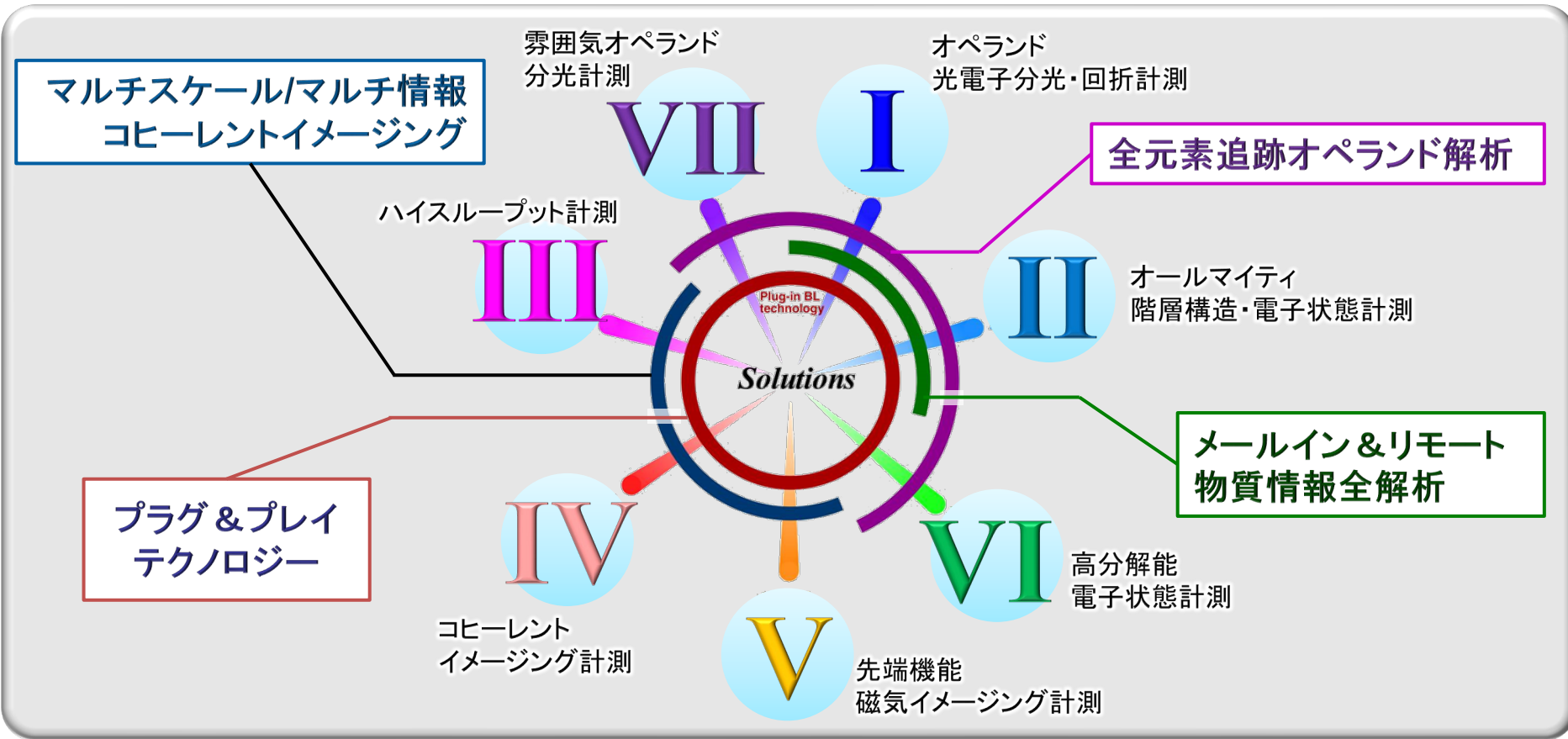
微粒子合成化学

# 次世代放射光による先端計測ソリューション

○ コアリジョンビームライン(BL)による利用の進化

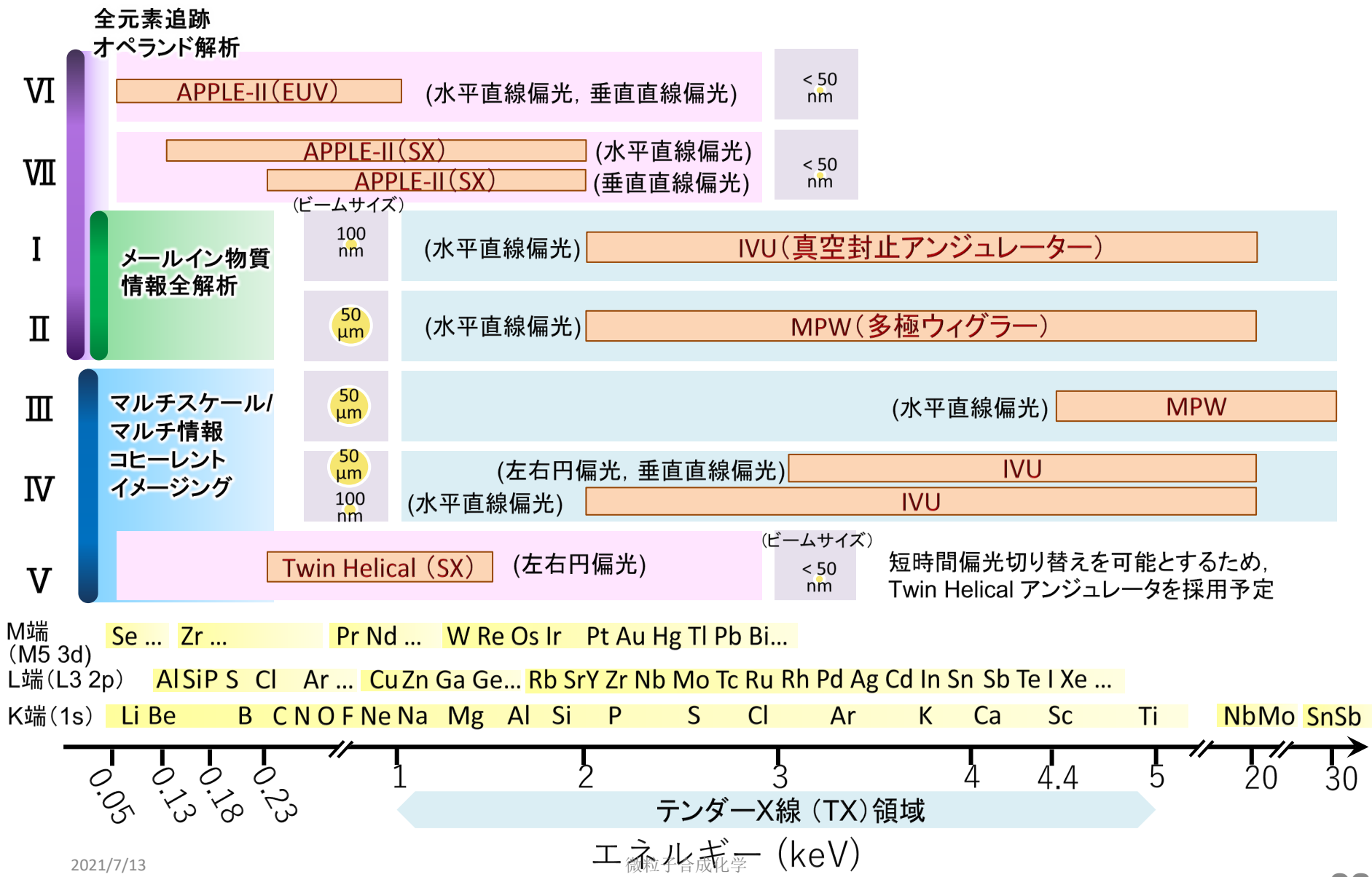
(従来) 複数の放射光施設をまたいでデータ収集

(次世代放射光) → 7本のコアリジョンBLの横断的利用により, 効率よく必要なデータを取得



横断利用に最適化したビームラインのラインナップをデザイン

# コアリションBLの光源とエネルギー範囲



## 地域パートナー COALITION Beamline 7本

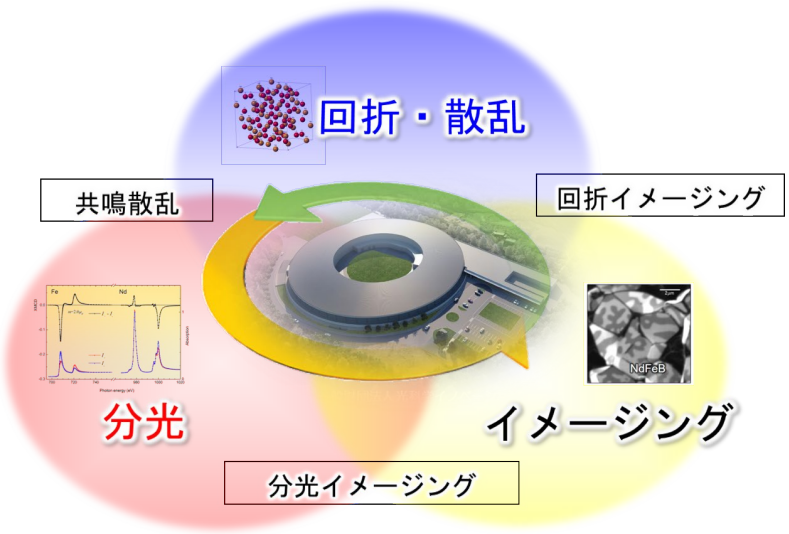
- BL-I (U) X線オペランド分光 分岐: メイン 1, ブランチ 1  
HX: 2-20 keV, Beam Size: 100 nm
- BL-II (W) X線構造-電子状態トータル解析 分岐: メイン 1, ブランチ 2  
HX: 2-20 keV, Beam Size: 50  $\mu$ m
- BL-III (W) X線階層的構造解析 分岐: メイン 1, ブランチ 2  
HX: 4.4-30 keV, Beam Size: 50  $\mu$ m
- BL-IV (U) X線コヒーレントイメージング  
HX: 2-20 keV (偏光に依存), Beam Size: 100 nm or 50  $\mu$ m
- BL-V (U) 軟X線磁気イメージング  
SX: 0.18-4 keV (円偏光), Beam Size: < 50 nm
- BL-VI (U) 軟X線電子状態解析 分岐: メイン 1, ブランチ 1  
SX: 0.05-1 keV, Beam Size: < 50 nm
- BL-VII (U) 軟X線オペランド分光 分岐: メイン 1, ブランチ 1  
SX: 0.13-1 keV (偏光に依存), Beam Size: < 50 nm

## 国が整備する Beamline 3本

- BL-VIII (U) 軟X線ナノ光電子分光  
SX : 0.05-1 keV, Beam Size: 50 nm - 10  $\mu$ m
- BL-IX (U) 軟X線ナノ吸収分光  
SX : 0.13-2 keV (偏光に依存), Beam Size : 50 nm - 10  $\mu$ m
- BL-X (U) 軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱  
SX : 0.25-1 keV, Beam Size : < 500 nm

# 産業界・学術の協働成果

優先度の高い計測技術を，コアリジョンビームラインとして初期整備．



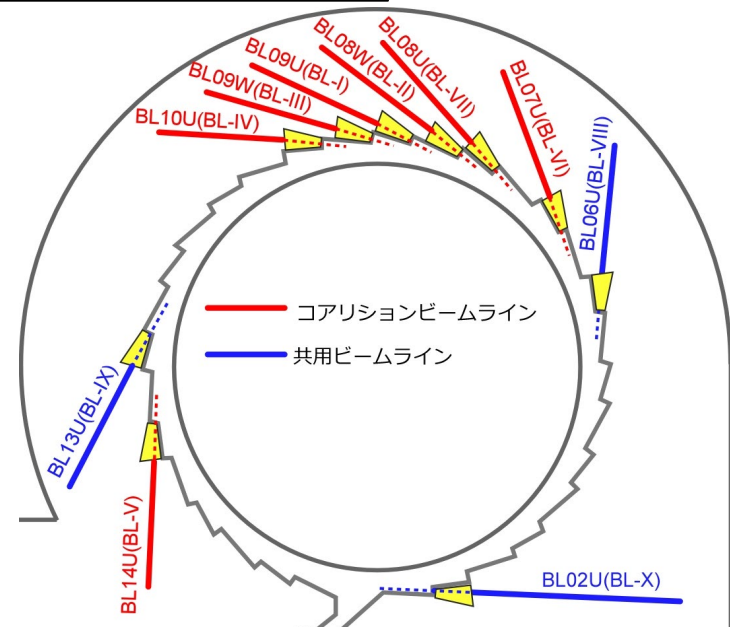
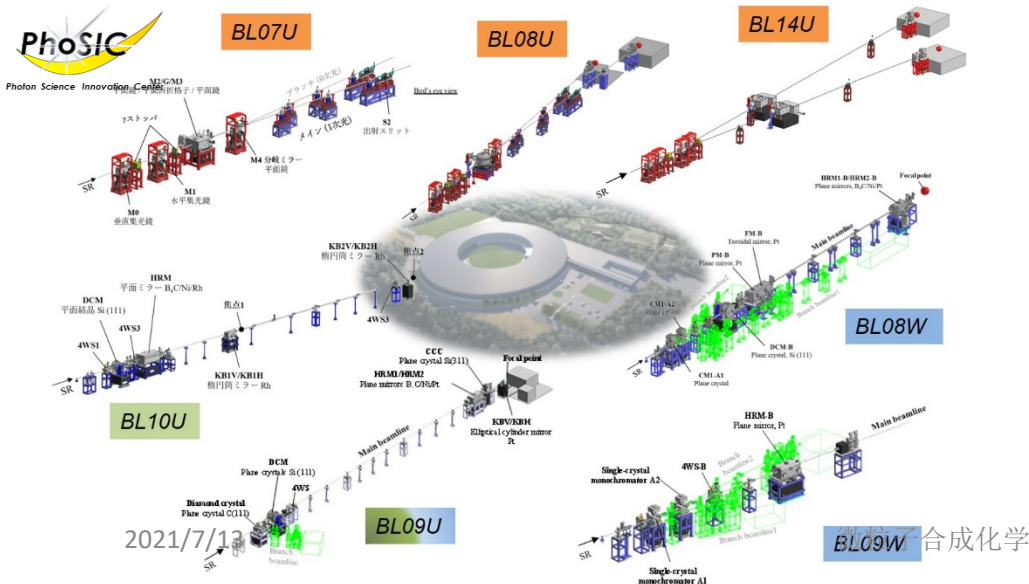
+ “コヒーレンス”の利用

○コアリジョンビームライン: 1つの測定技術だけでなく，多彩な計測技術にアクセスできる

- BL-I (09U): X線オペランド分光, HAXPES
- BL-II (08W): 構造解析, XAFS
- BL-III(09W): 階層構造, SAXS/WAXS
- BL-IV(10U): X線コヒーレントイメージング
- BL-V(14U): 軟X線イメージング
- BL-VI(07U): 軟X線電子状態解析
- BL-VII(08U): 軟X線オペランド分光

○国が整備する共用ビームライン

- BL-VIII(06U): ナノ軟X線PES
- BL-IX (13U): ナノ軟X線吸収分光
- BL-X (02U): 高分解能RIXS



2021/7/13

BL09W 合成化学

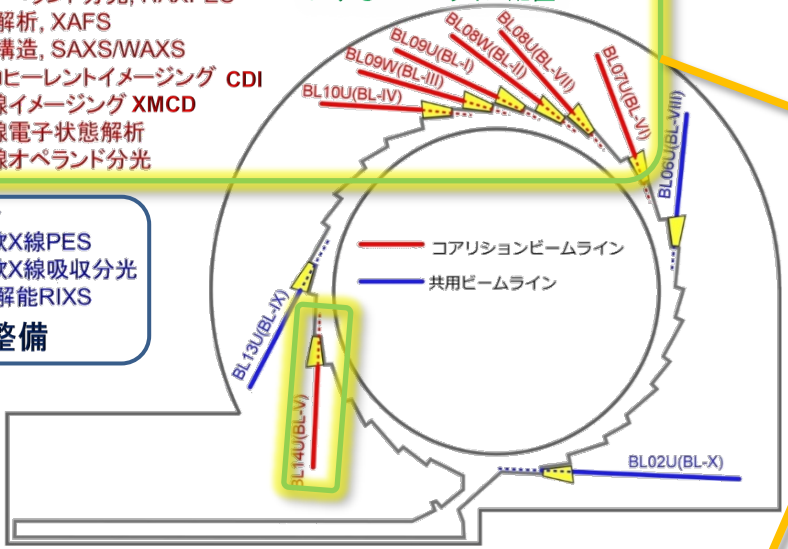
# コアリション (Coalition) ビームラインの構成

## 基盤ビームライン7本 (最大15ステーションを整備)

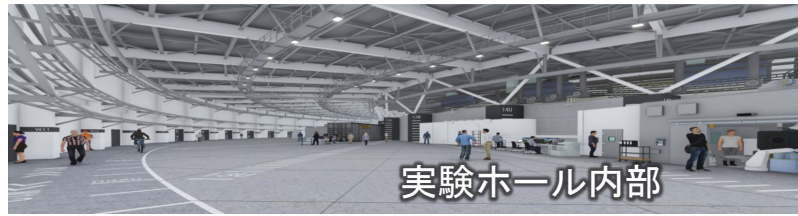
硬X線4本 (~30keV) 軟X線3本

- コアリションビームライン
- BL-I (硬): X線オペランド分光, HAXPES
  - BL-II (硬): 構造解析, XAFS
  - BL-III (硬): 階層構造, SAXS/WAXS
  - BL-IV (硬): X線コヒーレントイメージング CDI
  - BL-V (軟): 軟X線イメージング XMCD
  - BL-VI (軟): 軟X線電子状態解析
  - BL-VII (軟): 軟X線オペランド分光

マルチモーダル計測を容易にするビームライン配置



- 共用ビームライン
- BL-VIII (軟): ナノ軟X線PES
  - BL-IX (軟): ナノ軟X線吸収分光
  - BL-X (軟): 高分解能RIXS
- 国・QSTが整備



協力: 理化学研究所、東京大学物性研究所

DX時代の多彩な活用を実現するメイン・ブランチ分岐方式

メイン: 先端計測、イノベーションベンチの導入      ブランチ: ルーチン計測、リモート、メールイン

○ 真空封止型アンジュレータ光源 (BL-I) 2分岐を検計  
ダイヤモンド薄膜結晶による振幅分割

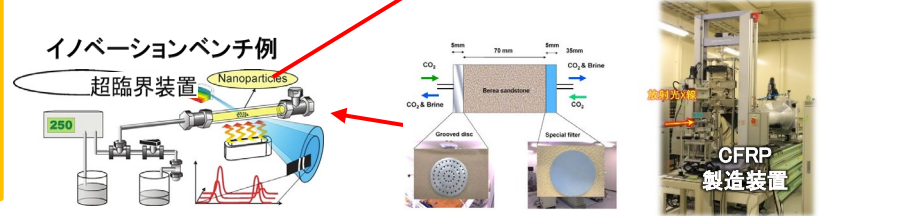
○ MPW光源 (BL-II, III) 3分岐を検計  
結晶分光器による波面分割

ブランチ分岐をリモートでDX化

ブランチでもSPRING-8を上回る強度 ( $5 \times 10^{11}$  光子/s)

### 活用分野

- BL-I: 触媒、電池、水素エネルギー、エレクトロニクスデバイス、構造材、新材料、細胞工学、創薬、構造生物学、歯学、環境科学、農学
- BL-II: 触媒、電池、水素エネルギー、エレクトロニクスデバイス、環境科学
- BL-III: 触媒、ソフトマター、アモルファス、食品科学、創薬・製薬、歯学、バイオテクノロジー、ヘルスケア、水素エネルギー、エレクトロニクスデバイス、文化財、考古学、芸術、環境科学
- BL-IV: 触媒、エレクトロニクス、ナノマシン、ナノ材料、生体軟組織、構造生物学、構造材、ソフトマター、農学、環境科学、レオロジー、トライボロジー
- BL-V: スピントロニクス、固体物理学、磁性、磁気記録、触媒、電池、食品科学、バイオテクノロジー、水素エネルギー、エレクトロニクスデバイス、ヘルスケア、医学、農学、構造生物学
- BL-VI: ナノテクノロジー、量子コンピューター、触媒、電池、バイオテクノロジー、食品科学、水和反応
- BL-VII: 触媒、電池、水素エネルギー、エレクトロニクスデバイス、環境科学、表面化学





# 分岐デザインとビームライン分岐の実例

## 硬X線ビームの分割方法

**振幅分割方式** BL-I で採用予定

分光結晶(ダイヤモンド単結晶) ⇒ 振幅分割方式

**波面分割方式** BL-II, III で採用予定

分光結晶(Si単結晶) ⇒ 波面分割方式

## 軟X線ビームの分割方法

**波面分割方式** BL-V, VII で採用予定

平面ミラー(表面Auコート) 反射率 約80% @ 1 keV

**エッジを鋭く研磨したミラー ⇒ 購入可能**

## 既存放射光施設におけるビームライン分岐の例

○ SPring-8 BL12XU **ダイヤモンド薄膜結晶による振幅分割**  
 C. Yong et al., AIP Conference Proceedings 705, 340 (2004).

エネルギー可変であるが、変更時間に時間と手間の問題  
 ⇒ **コアリジョン BL-I ではエネルギー固定で使用。**  
 上記問題を回避して効率的利用を実現。

○ SACLA: SXFEL (日本)、FLASH(独)  
**ミラーによる波面分割**

Delay: (-3 < 0 < 20) ps

R. Mitzner et al., Opt. Express 16, 19909 (2008).

○ Diamond Light Source (UK) I15

**分光結晶による分岐と類似原理**  
**マスクによる波面分割**

コアリジョン BL-II, III と同種光源  
 MPWビームラインでの分岐実例

2021/7/13 <https://www.diamond.ac.uk>

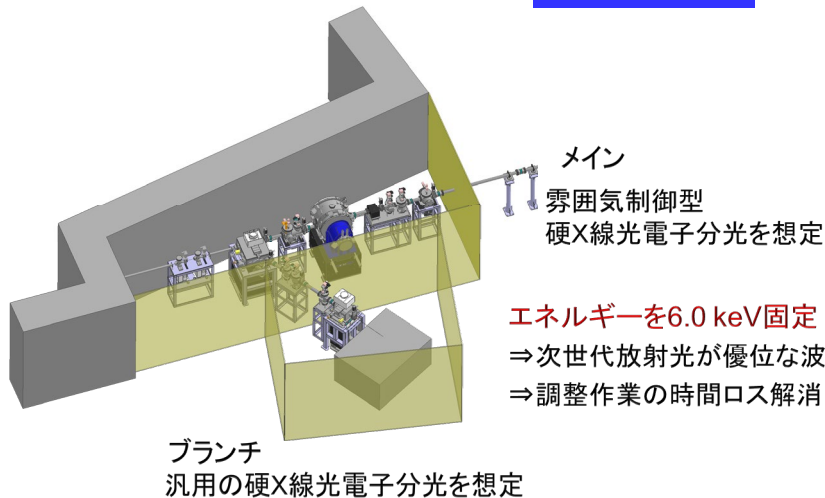
実例では、30~200 eVを対象としているが、エネルギー範囲はDelay回路によって制限されていると考えられるので、1000 eVでも実用可能と考える。

# 次世代放射光 コアリションビームラインの分岐技術

## BL-I (09U) X線オペランド分光ビームライン構成

ダイヤモンド薄膜結晶による振幅分割

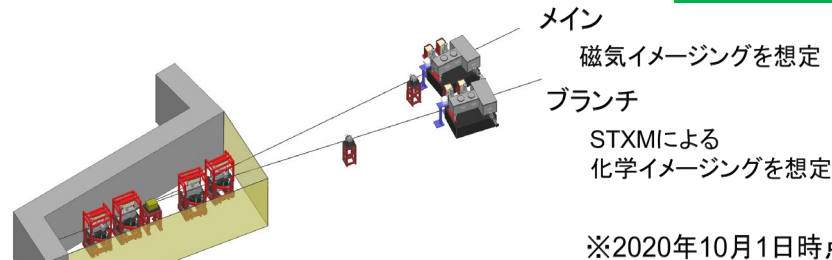
硬X線 2分岐



## BL-V (14U) 軟X線磁気イメージングビームライン構成

高精度エッジ処理ミラーによる波面分割

軟X線 2分岐



メインとブランチの集光ビームサイズ、エネルギー分解能、フラックスについて、レイトレースによるシミュレーションを実施して最適条件を検討中。

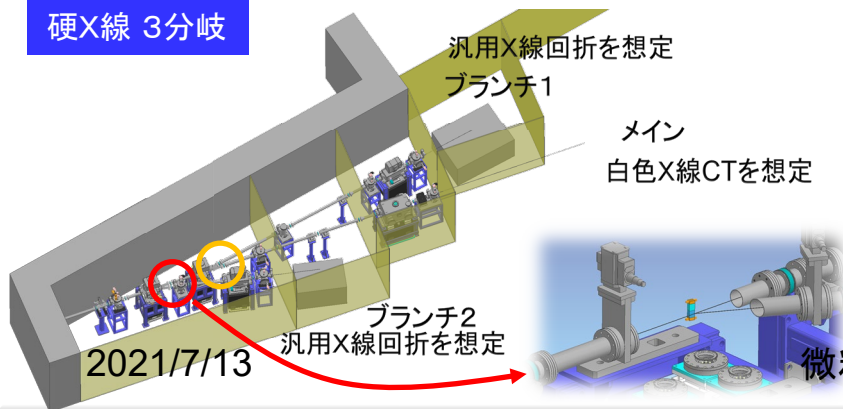
○今後の予定

BL-VII (08U) 軟X線オペランド分光ビームライン、BL-VI (07U) 軟X線電子状態解析ビームラインの分岐を含めたレイトレースによる光学系の最適化。

## BL-III (09W) X線階層的構造解析ビームライン構成 ⇒ BL-II (08W)も分岐方式は同様

Si分光結晶による波面分割

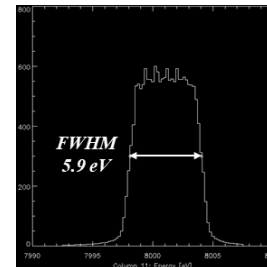
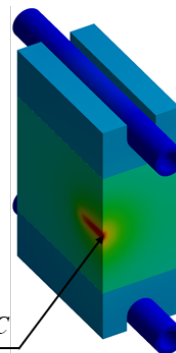
硬X線 3分岐



熱負荷評価

エネルギー分解能評価

光量評価



$5 \times 10^{11}$  Ph/s

上記の条件において、  
光量はSP8 BM-BLの  
典型値を約5倍上回る。

$$\Delta E/E = 7.3 \times 10^{-4}$$

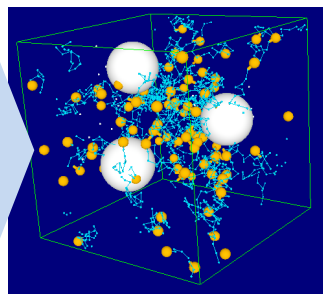
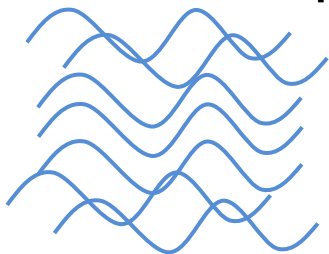
$$E = 8.0 \text{ keV } (\theta_B = 14.3 \text{ deg})$$

微粒子合成化学

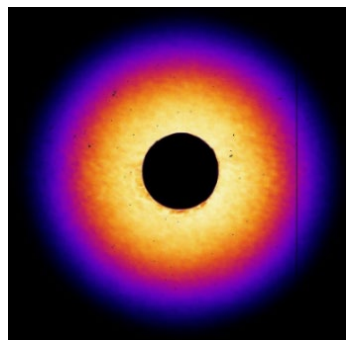
# モノの見え方が変わる Visualityによる革新

これまで

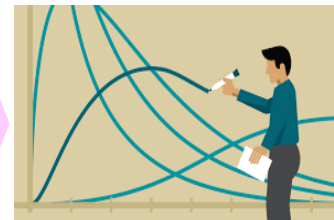
低コヒーレントX線



散乱データ

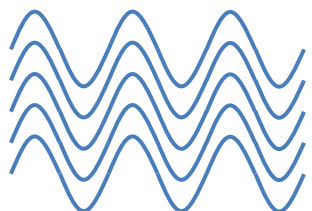


構造モデル  
仮説

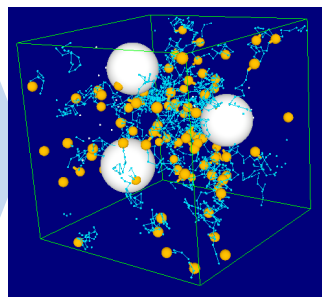


次世代

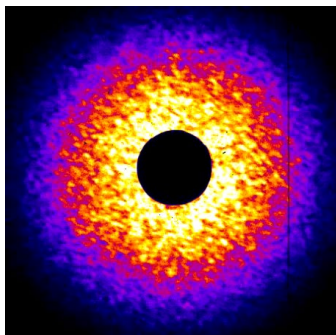
コヒーレントX線



~1 Å



スペックルデータ



Visuality  
可視化

