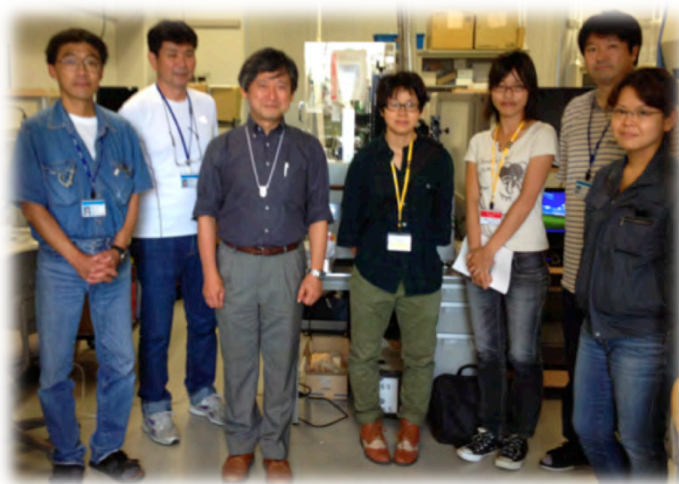


# 酸化亜鉛をコーティングしたボールベアリングと小型ジェットエンジン発電機応用

## ZnO Coated Ball Bearing for Application to Mini Jet Engine Generator

土佐 正弘 本田 博史 鈴木 裕 笠原 章 @ 構造材料研究拠点トライボロジーグループ

後藤 真宏 佐々木道子 @ 情報統合型物質・材料研究拠点伝熱制御・熱電材料グループ



# 酸化物結晶構造制御

## 環境・エネルギー問題



- ① 省エネルギー技術 → 材料の低摩擦化
- ② 使用環境の拡大 → 特殊環境への適応
- ③ 有害物質による環境汚染の問題 → 無害な摩擦材料の使用
- ④ 資源（レアメタル）の問題 → 豊富な摩擦材料の使用



【宇宙応用】  
MoS<sub>2</sub>など 原子状酸素の衝突

【高温・高湿度雰囲気】  
摩擦材料の酸化

→ 酸化による摩擦係数の増大の問題



一般的な金属の酸化物で低摩擦コーティングが実現できれば最高！

# ZnO トライボコーティング

## 【背景】

1996年 Suzuki et al.  $\mu$  (摩擦係数) = 0.26 (大気中)  
( ZnO coating by sputter、Zn target, Ar/O<sub>2</sub>=2:3, 0.36Pa, 3.6W/cm<sup>2</sup>)

2000年 Prasad et al.  $\mu$  (摩擦係数) = 0.1~0.2 (大気・真空中)  
(ZnO coating by PLD, Hot-pressed ZnO, Single crystal ZnO)  
ただし、圧子・基板共に SUS440C を使用

2000年 Zabinski et al.  $\mu$  (摩擦係数) = 0.2, 0.4 (真空中)  
(Single crystal ZnO (0001), (1010))

目安: 実用的な  $\mu$  は、0.3以下、これらの結果、ZnO → 実用化 ×

2003年 Goto et al.  $\mu$  (摩擦係数) = 0.09 (真空, 473K)  
(ZnO coating by sputter, 結晶配向制御, by LFM)

**結晶配向制御による低摩擦現象の発現!**

**ZnOの結晶配向性制御 → マクロな低摩擦現象をねらう!**

## 2. コンビナトリアルスパッタコーティング

- コーティング（成膜）プロセスの省力化
- 基板交換、およびコーティングプロセス

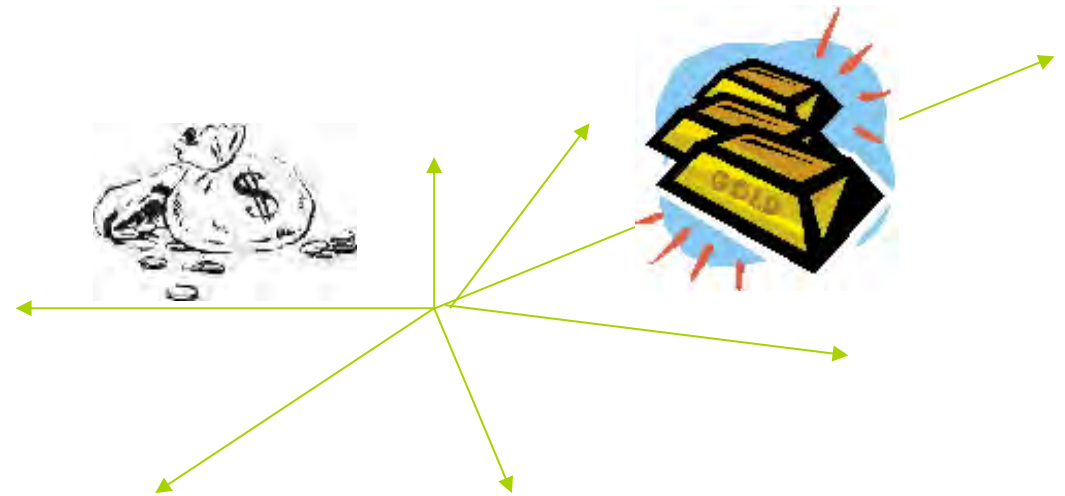
パラメータ全自動制御システム

- コンビナトリアルスパッタ成膜特性

# 背景

## 【スパッタコーティングの成膜パラメータ】

1. 基板温度
  2. スパッタガス種
  3. スパッタ混合ガスの分圧
  4. スパッタガスの全圧
  5. スパッタ時間
  6. 基板－ターゲット間距離
  7. 印加電力
  8. 基板のバイアス電圧
- など



<これまで>

多大な成膜パラメータ → 膨大な実験時間と労力

正確な成膜パラメータ制御が困難

# コンビナトリアルシステムの応用

起源：創薬分野（1990年代）

「組合せを利用して多種多様な化合物を合成することにより、短時間で有用な化合物を発見し、その発見した化合物を効率よく最適化作製するための技術」



薄膜合成への応用：その1

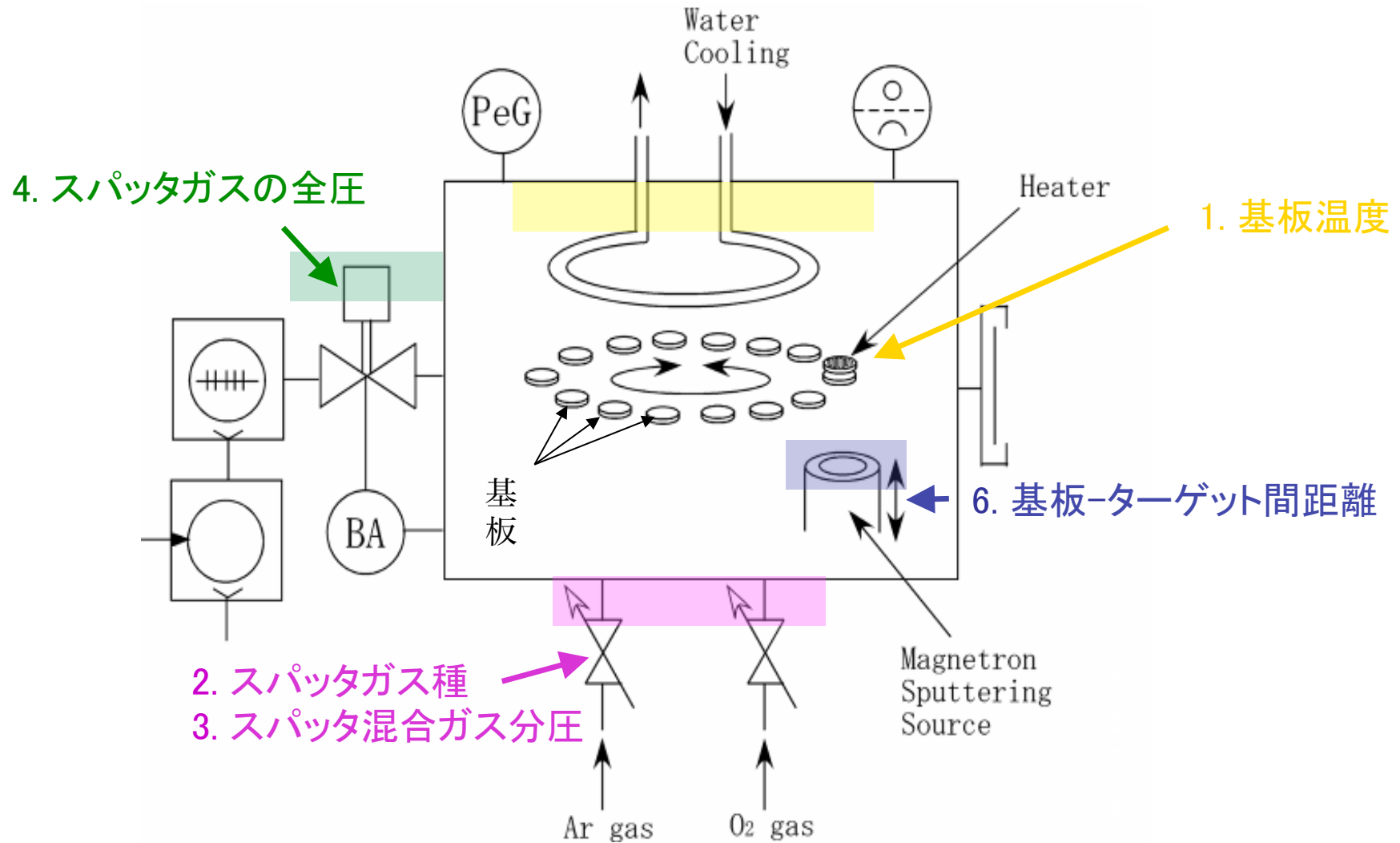
1枚の基板上に複数の条件をまとめて作製し評価することによって成膜条件探索のスループットを大きく向上



薄膜合成への応用：その2

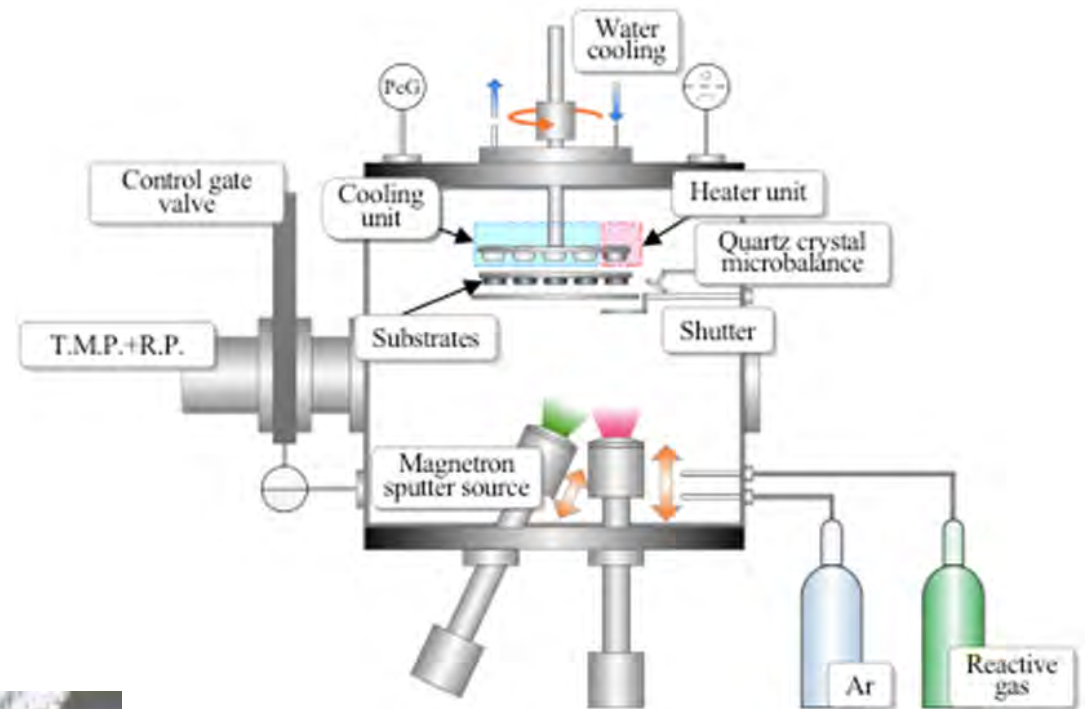
複数の条件に応じた基板を多数作製し評価することによって容易に供与可能な材料作製のスループットを大きく向上

# システム構成図



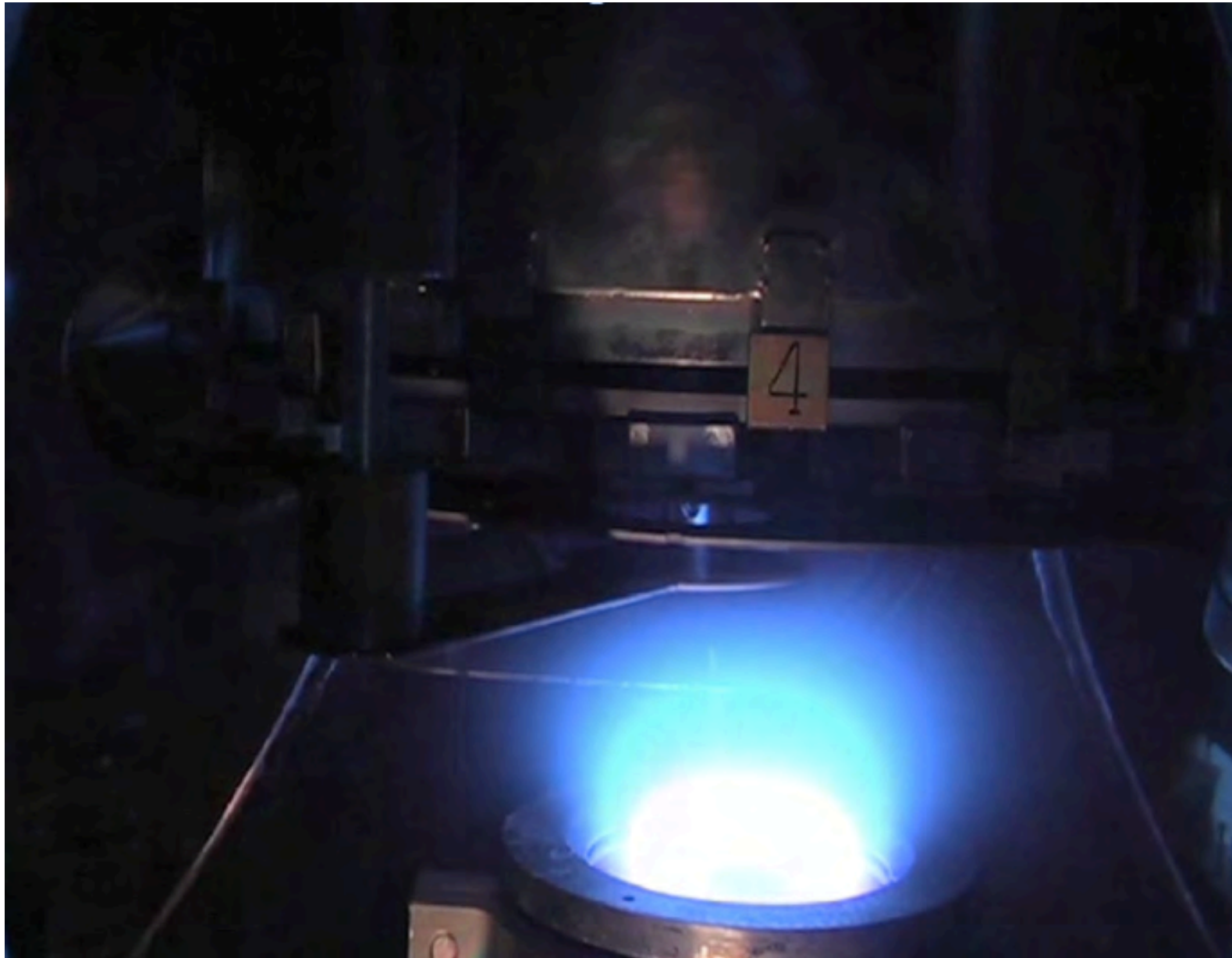
複数の条件に応じた基板を多数作製し評価することによって  
容易に最適条件下での材料作製が可能

# Combinatorial Sputter Coating System (COSCOS)



1. ガス（酸素+アルゴン）、全圧 0.4Pa
2. ターゲット：Zn 99.999%
3. ターゲット/基板間距離：55mm
4. 基板裏面温度：500°C
5. RF出力：100W
6. サンプルバイアス：無印可
7. 基板：SUS & Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>
8. ベース真空圧：2 × 10<sup>-5</sup>Pa
9. 膜厚：2 μm

# コンビナトリアルスパッタコーティングシステム

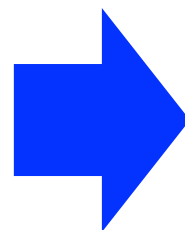


# コンビナトリアルスパッタコーティングシステムの利点

旧式スパッタ装置  
(当研究室)



1 サンプル / 日



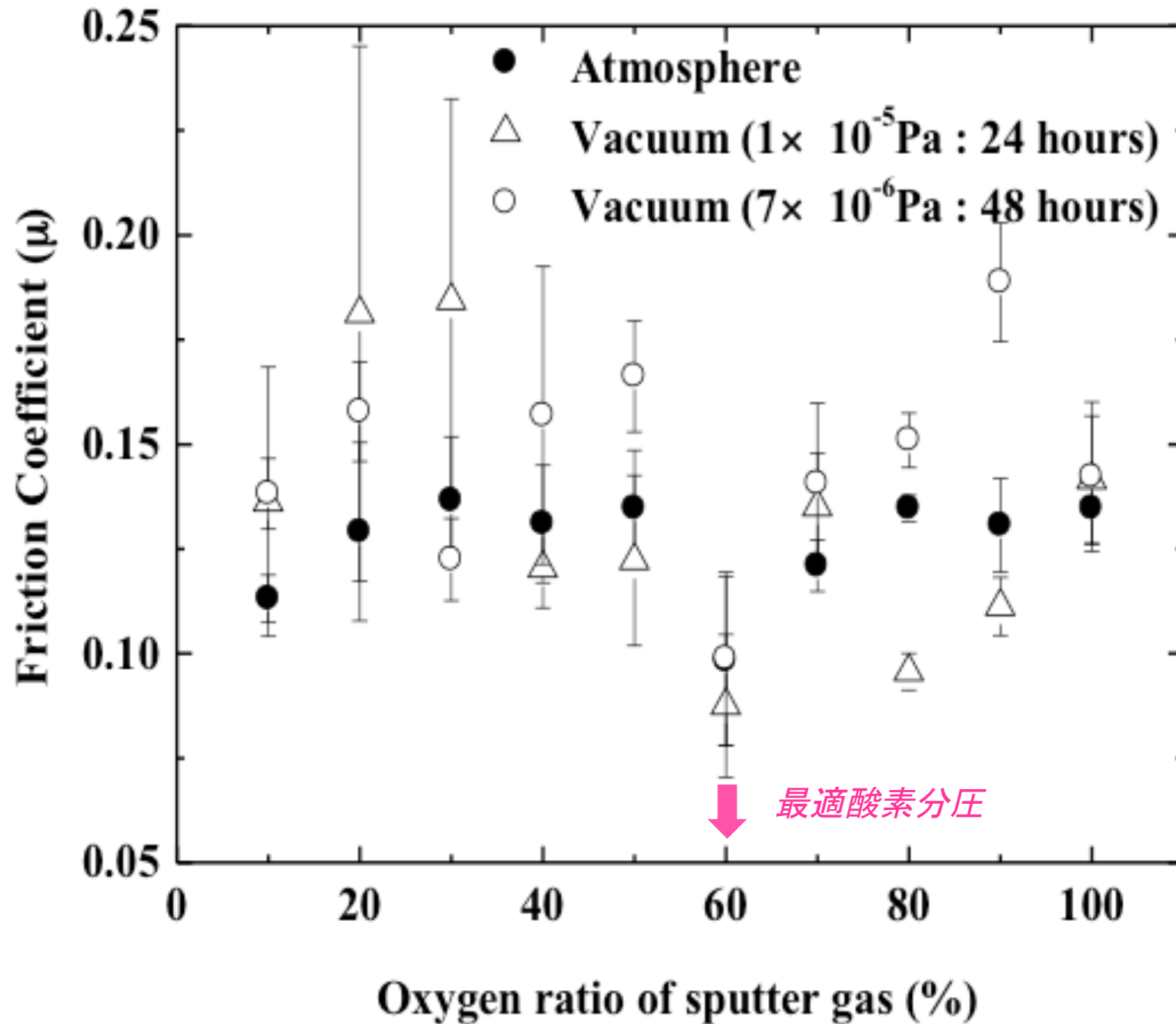
新規システム



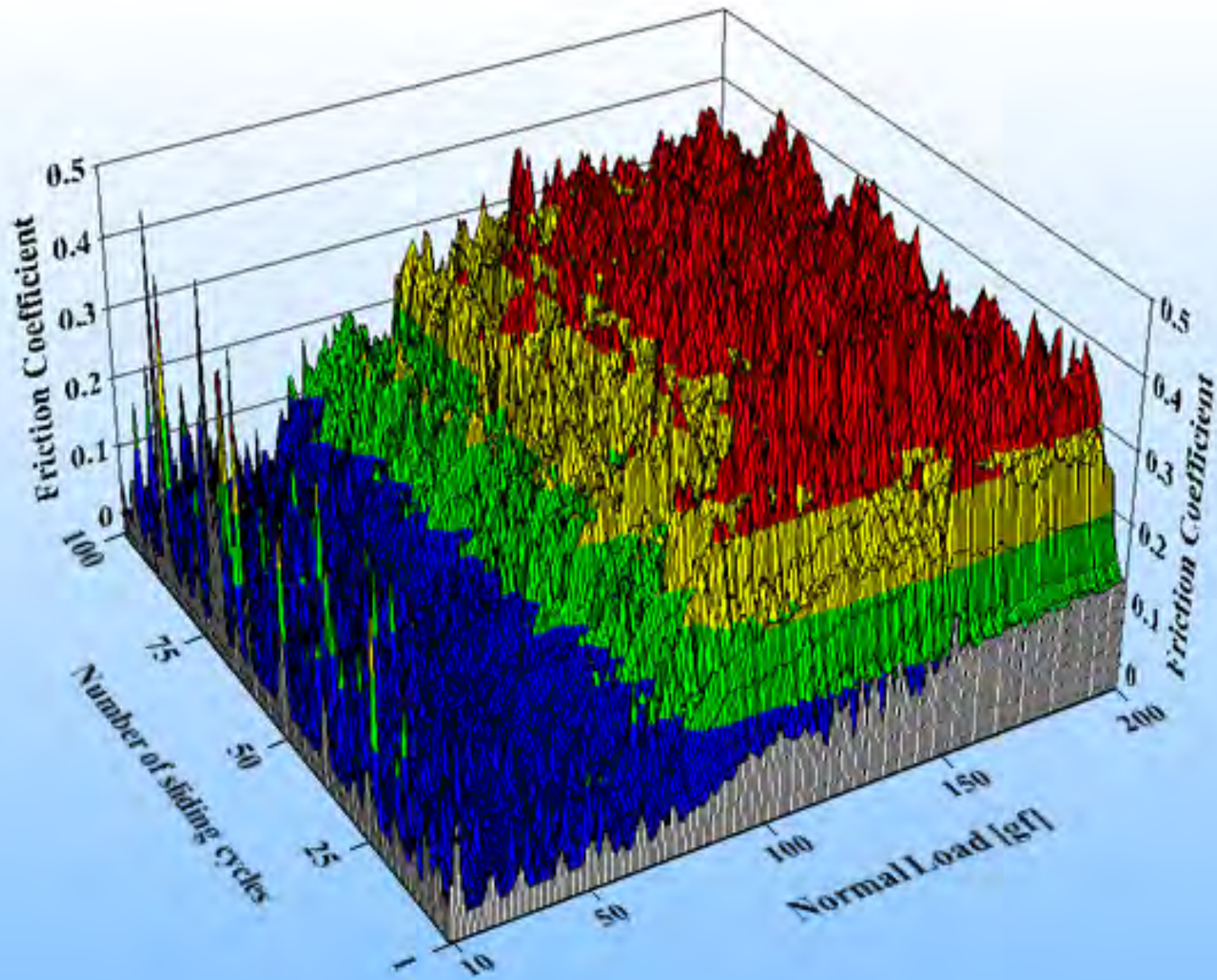
14 サンプル以上 / 日  
(全自動！)

様々なコーティング膜特性の最適化を短期間で、しかも、  
最小の人的資源にて効率的に行うことが可能！

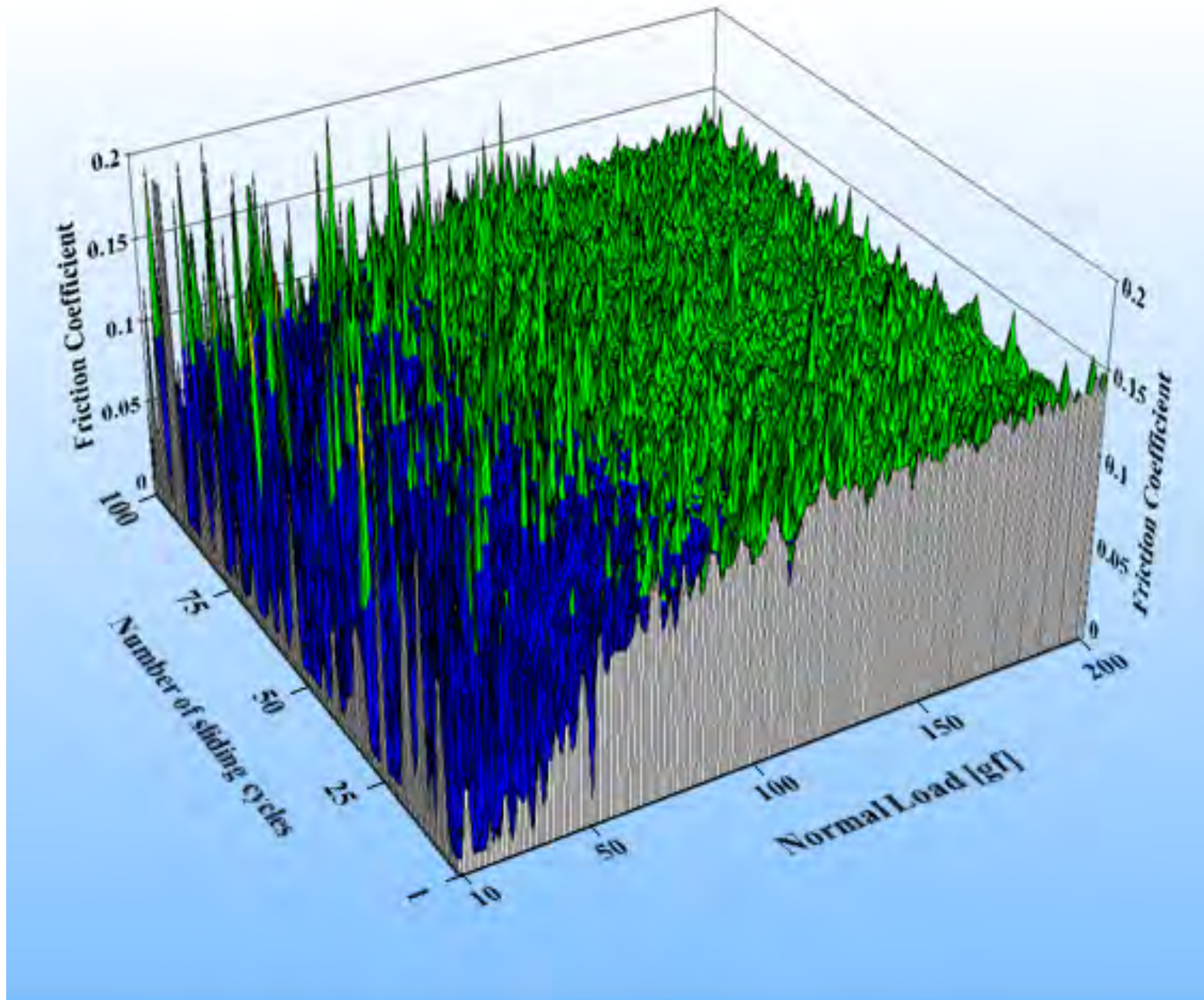
# 大氣 & 真空雰囲気中摩擦変化



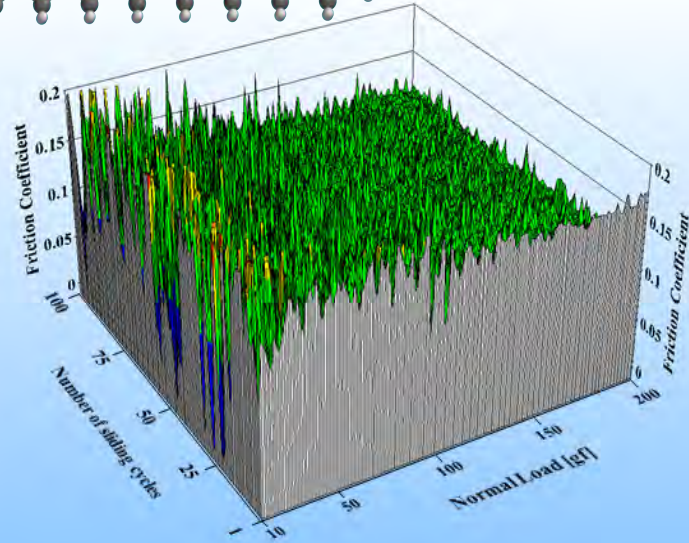
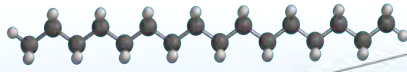
# SUS304ステンレス鋼基板の摩擦試験



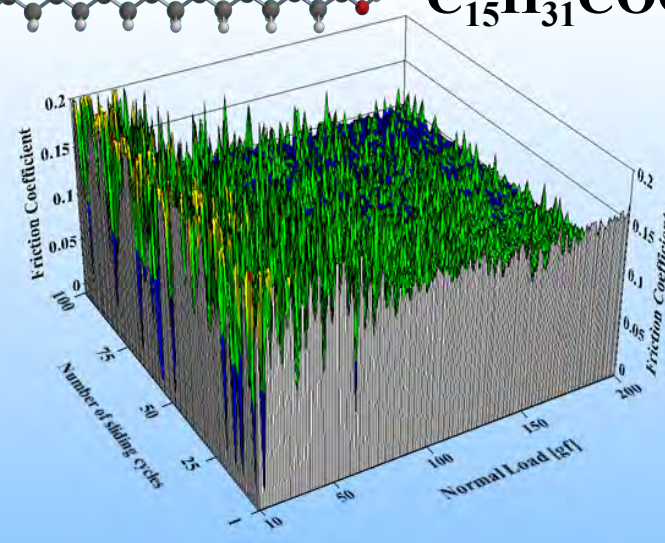
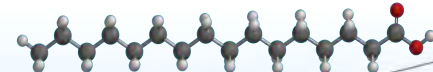
# ZnOコーティング(60%)SUS304鋼の摩擦試験



# 摩擦試験結果 <油中雰囲気:極性分子依存性>

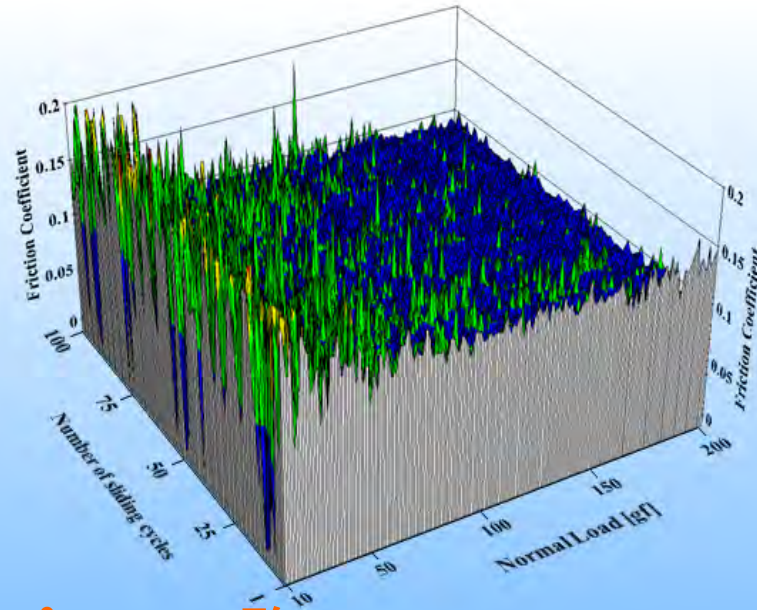


ヘキサデカン 100%

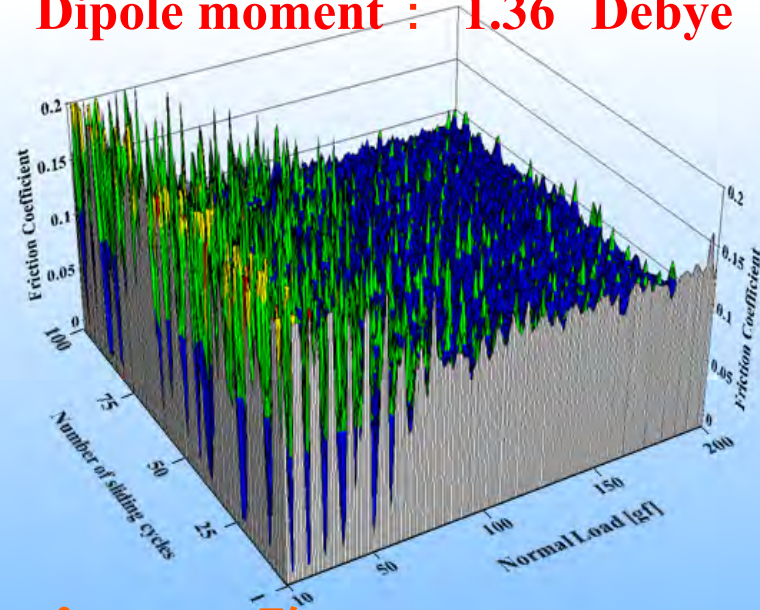


パルミチン酸 0.001 wt%

Dipole moment : 1.36 Debye



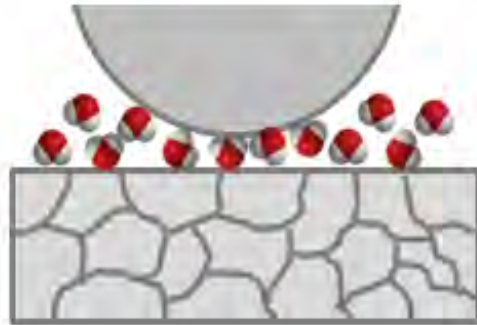
パルミチン酸 0.1 wt%



パルミチン酸 1 wt%

# ZnOコーティング低摩擦現象のモデル案

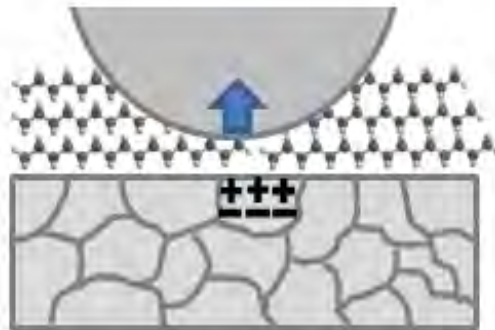
【大気中】  
吸着水による打ち消し



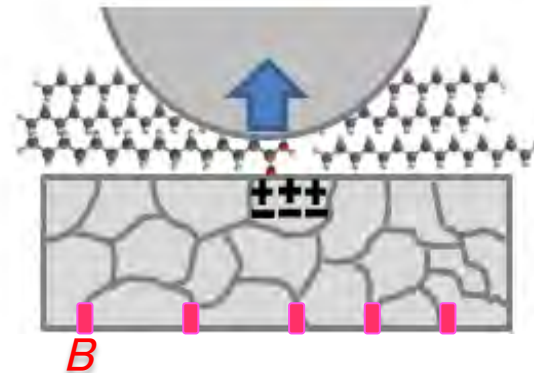
【真空中】  
表面電荷バランス変化による摩擦力の低下



【油中】  
真空中と同様に低下

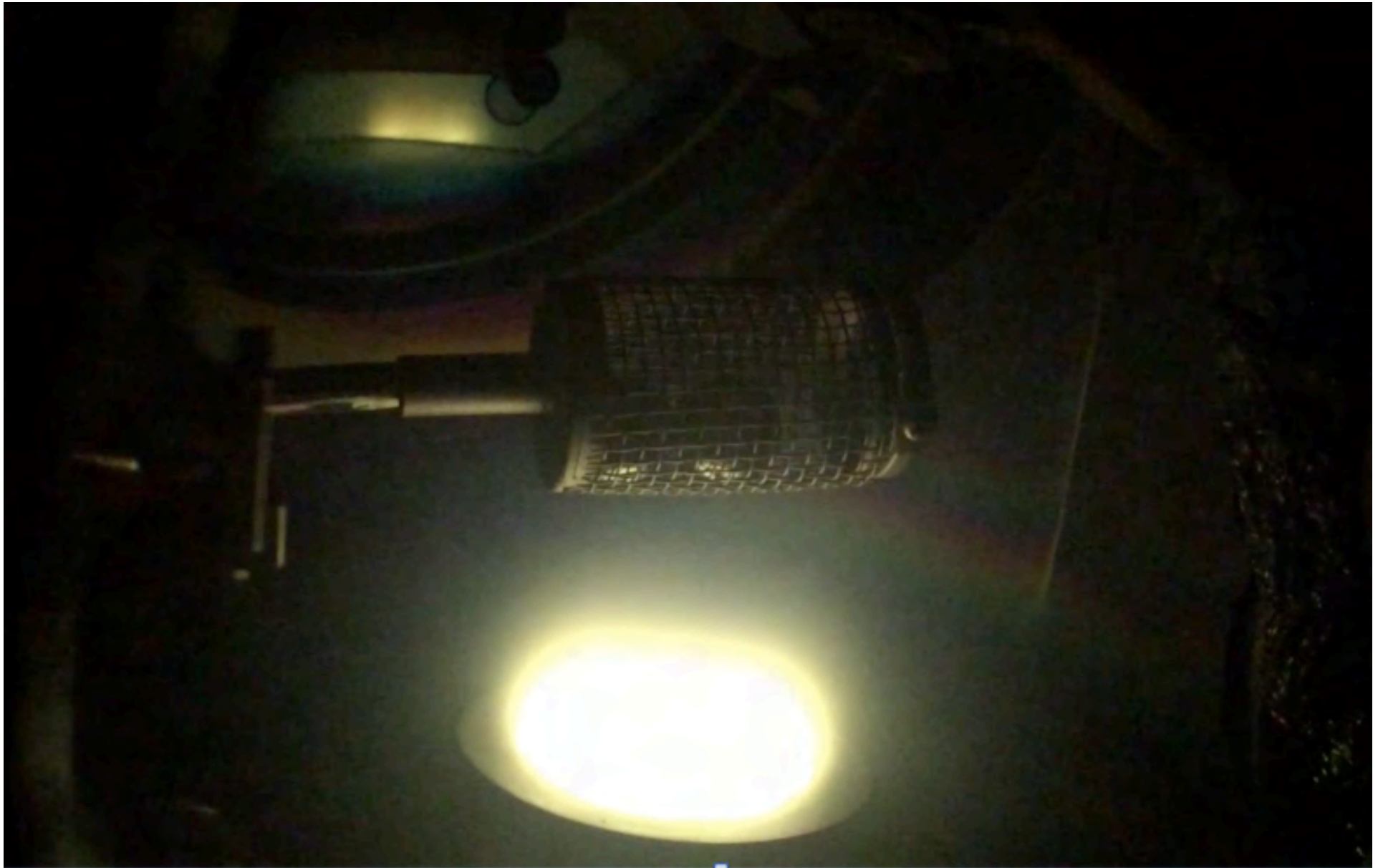


【油中+添加分子】  
さらなる摩擦力の低下



*B*の添加により圧電効果の観察

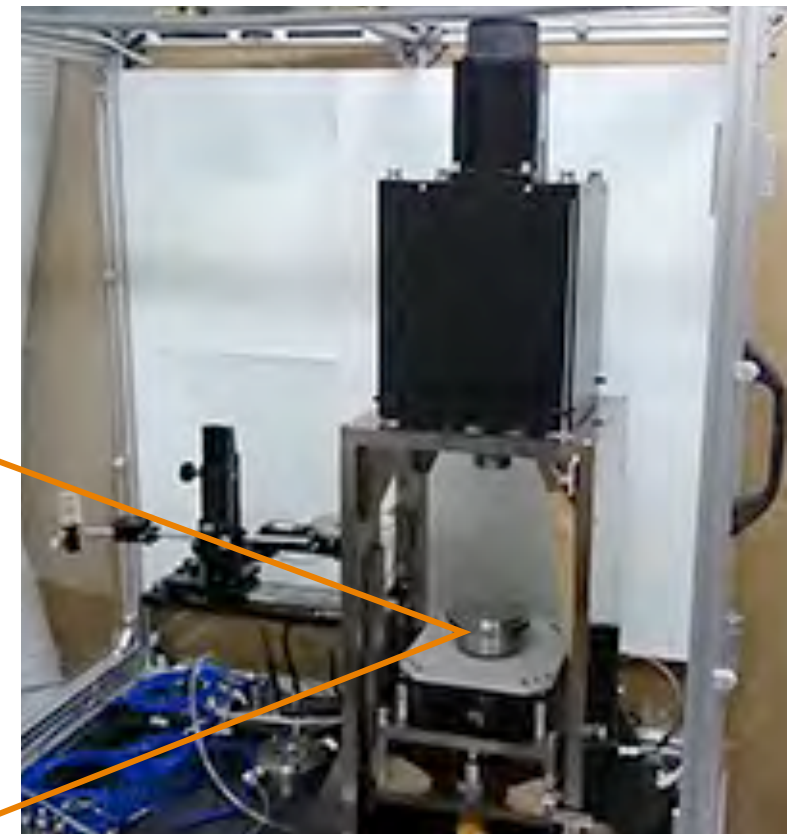
# ベアリンボールへのZnOスパッタコーティング



# 実機システムへの応用：ボールベアリング

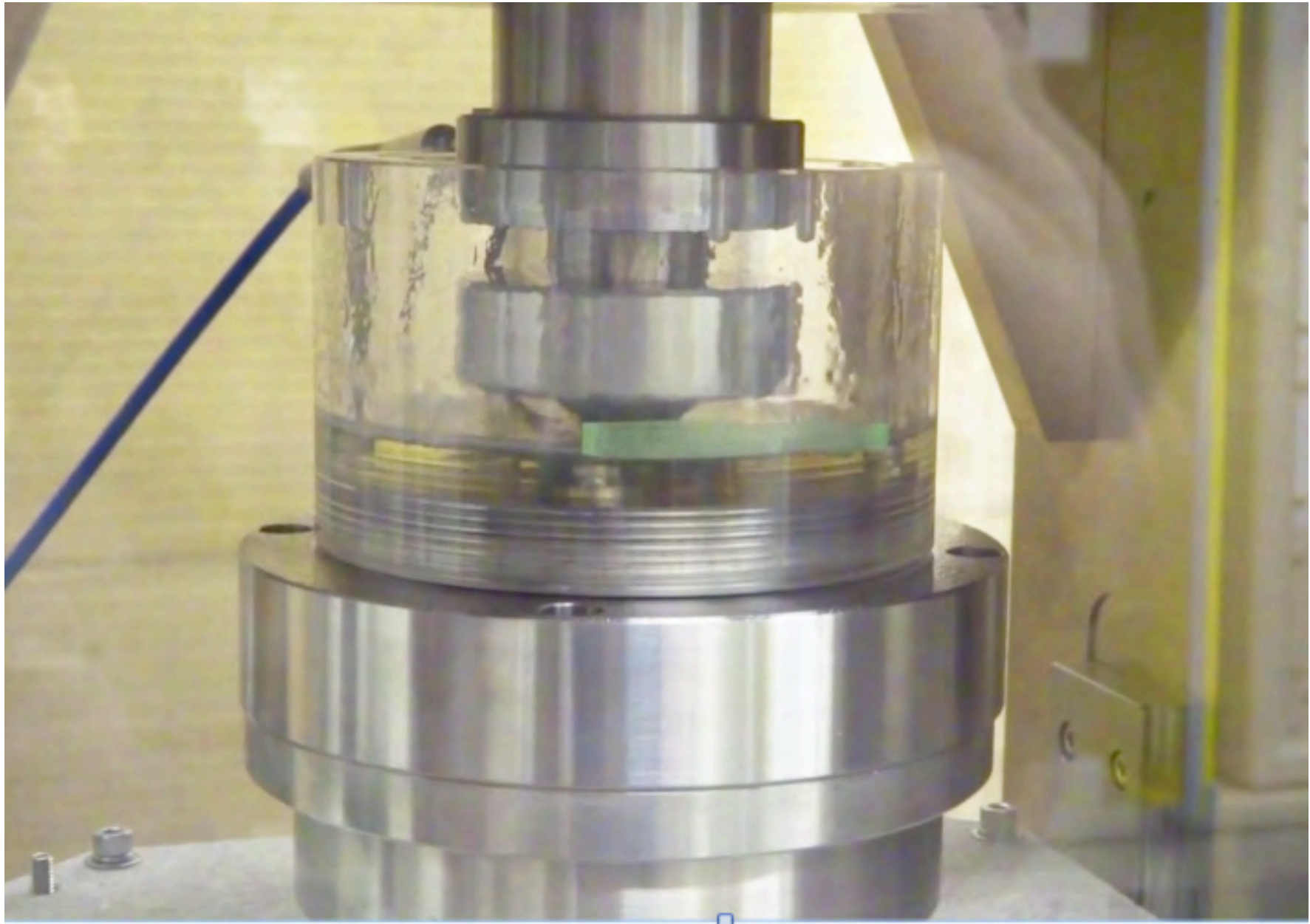


## ベアリング回転性能試験器



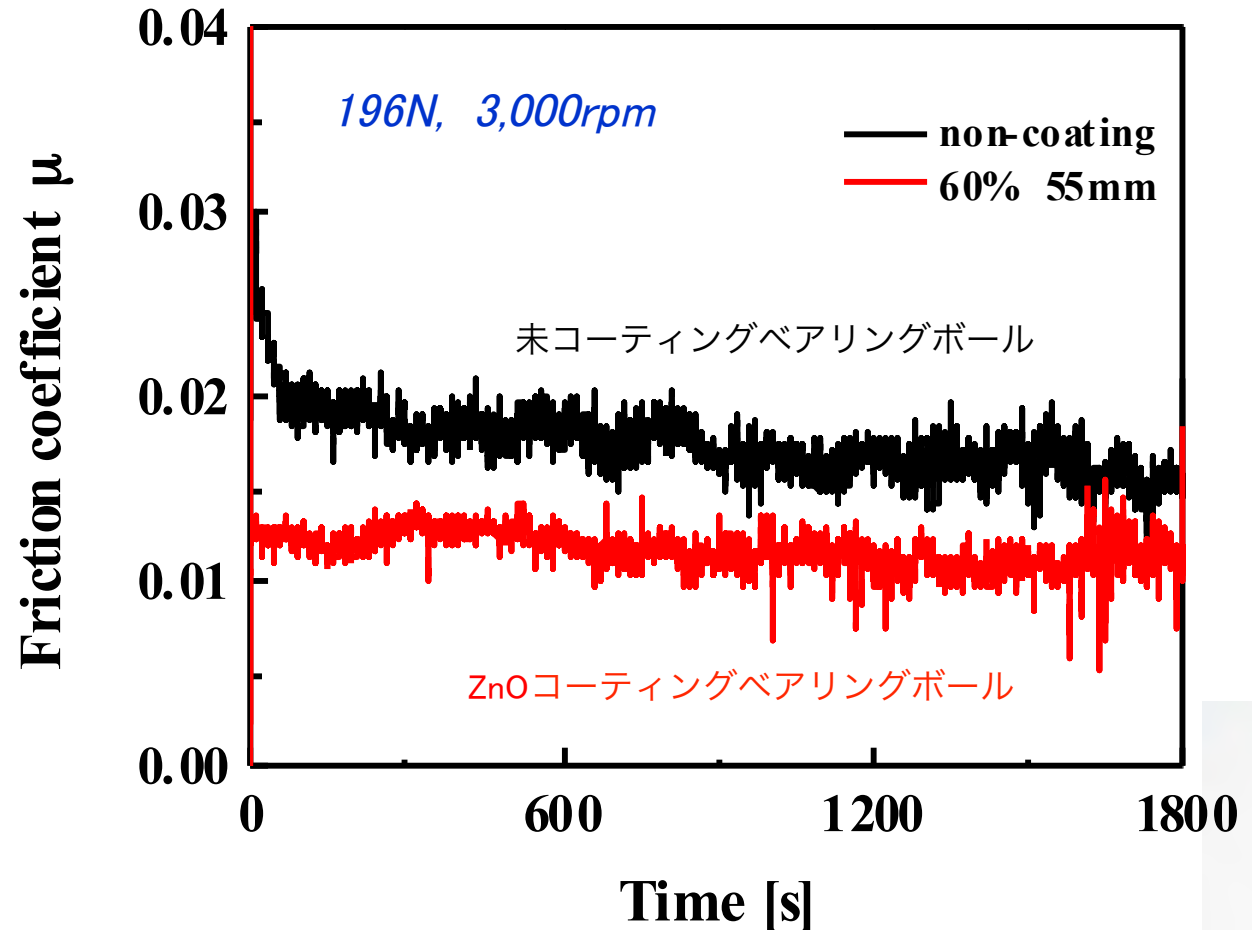
## ボールベアリング駆動試験

# ボールベアリング回転性能試験



# 実機システムへの応用：ボールベアリング性能試験

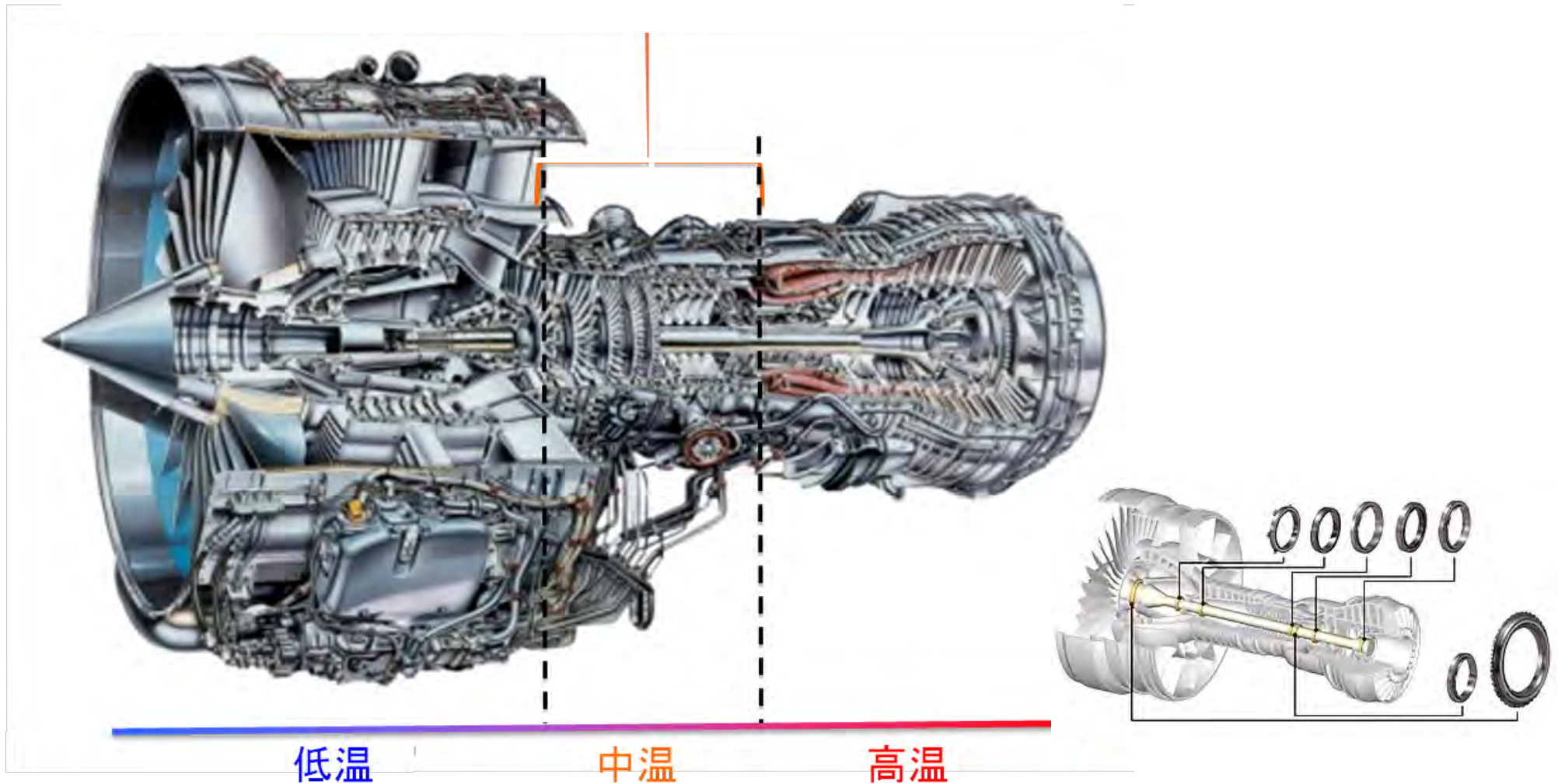
ZnOコーティングベアリング  
ボールを用いたボールベア  
リングシステム



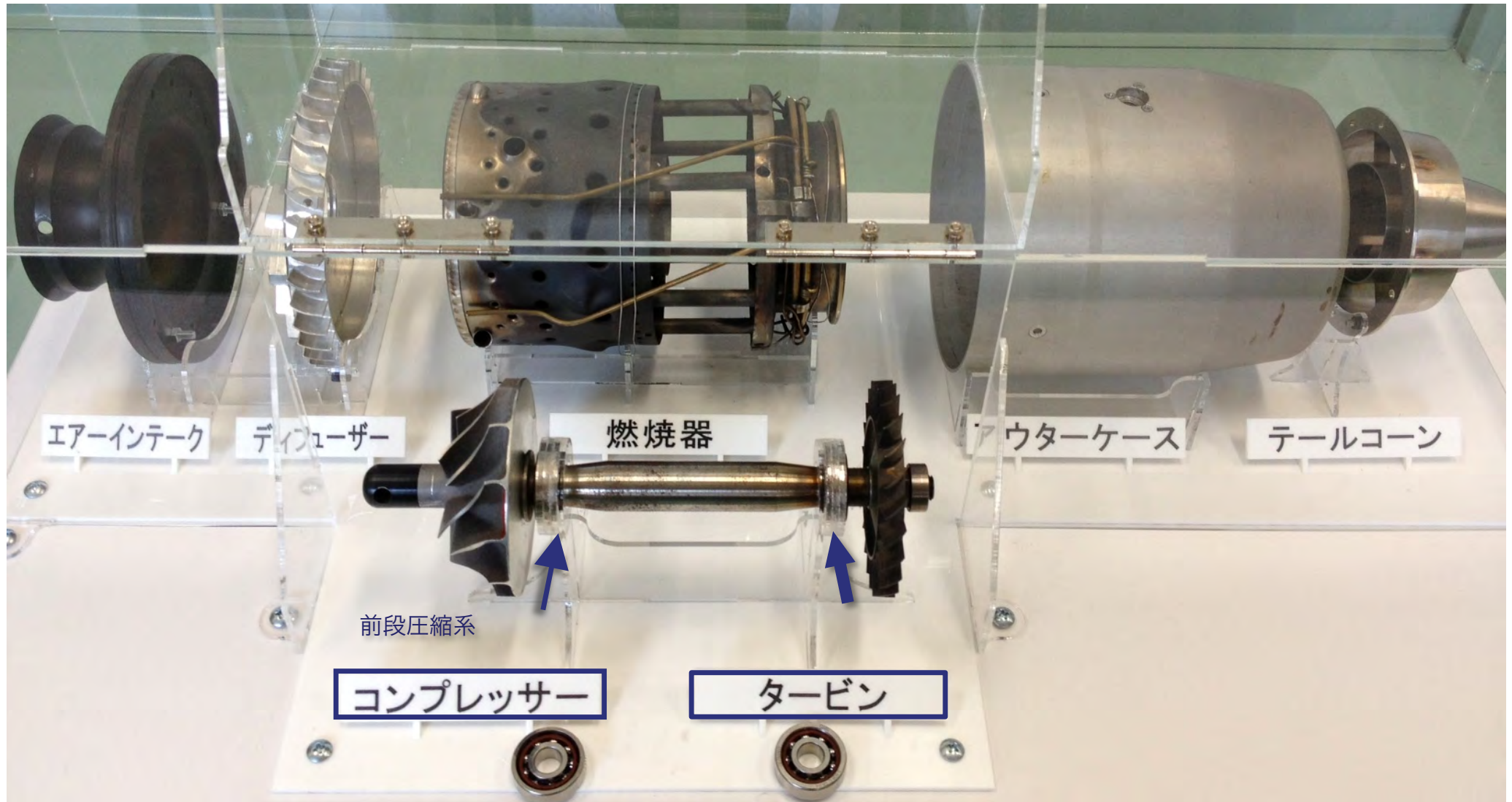
ZnOコーティングはベアリング回転摩擦を低減

# 産業システム：航空機ジェットエンジン

吸気 → 圧縮 → 燃焼 → 排気



# 産業システムへの応用：小型ジェットエンジン用ベアリング



# 低炭素社会実現に貢献：小型タービン発電機

エネルギー変換効率：  
~1%以上UPをめざす

ジェットエンジン

ベアリングを自在に  
交換できる構造設計

低摩擦化

ベアリング実証ベンチ

【ターゲット】アンギュラ玉軸受けへZnOハードコーティングと潤滑油へ添加によるZnOと潤滑油分子との電気的・化学的相互作用の発現による低摩擦化 → エネルギーロスの低減

【基材】SUS440Cステンレス鋼、SUJ2鋼、 $Si_3N_4$ セラミックボール

【ベアリング内径】10mm

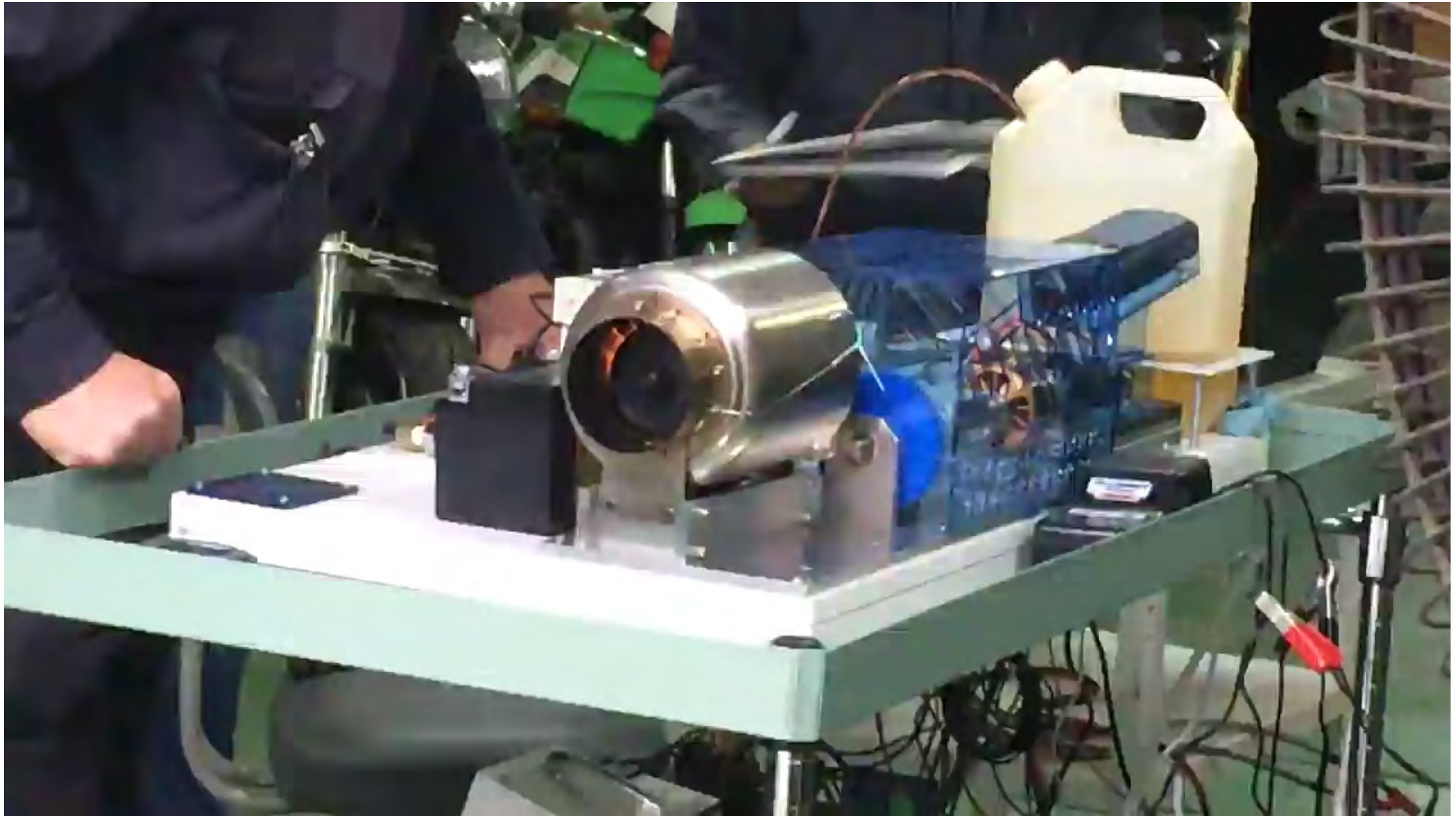
【ボール径】 $4.762\text{mm} + \text{ZnO}$ コーティング膜厚( $\sim 1\ \mu\text{m}$ )= $4.764\text{mm}$

【使用温度】室温-300~400°C

【最大接触応力】4GPa

【dn値】 $9 \times 10^5$  以上

# 小型タービン発電機による燃費試験



燃費を1%以上向上に成功

# まとめ

- 酸化物系ZnO潤滑コーティング
- コンビナトリアルスパッタコーティングシステム
- ボールベアリングへのZnOコーティング応用
- ジェットエンジン発電機への展開による燃費向上