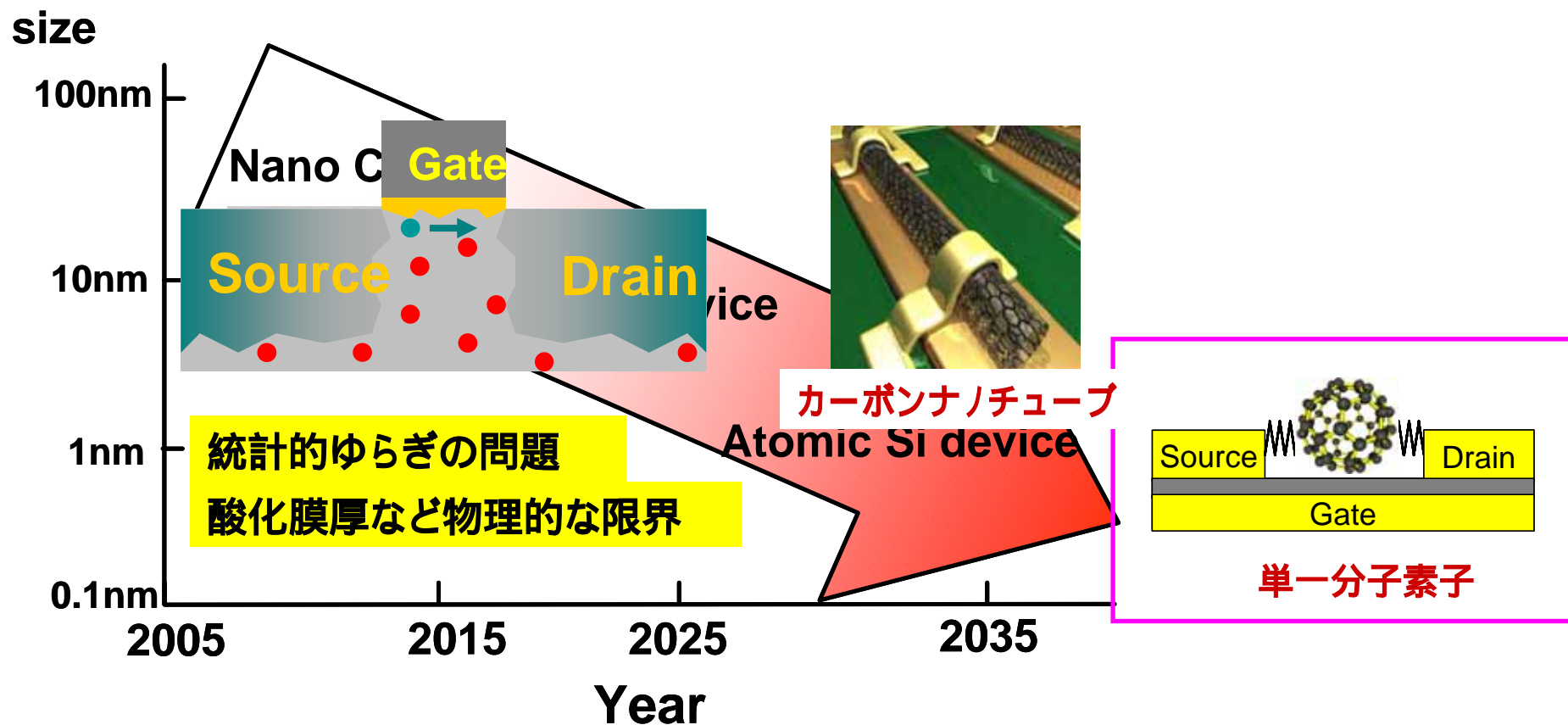


エレクトロマイグレーションの機構解明  
- 超LSIの信頼性向上や単一分子トランジスタへの  
展開 -

東京大学生産技術研究所  
教授 平川一彦

共同研究者： 梅野顕憲、吉田健治、坂田修一

# 超VLSIの微細化が進み、20年後には単一分子の大きさに！



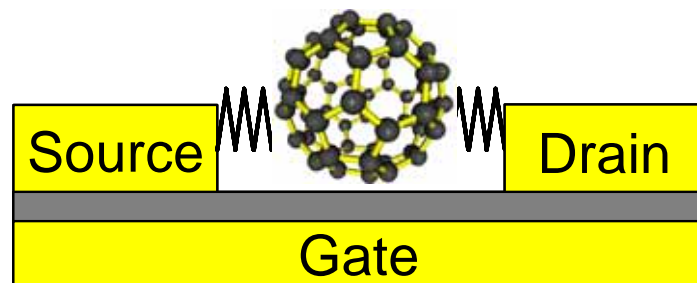
- 2030年頃には、シリコントランジスタのサイズが、分子レベルの寸法に達してしまう！次世代のトランジスタは？

# 単一分子デバイス作製に向けて

## 分子デバイスの特徴

- 分子そのものが機能を持っている
- 電子スピンや核スピンを用いた量子情報処理

→ エレクトロニクスに新しい可能性をもたらす素子として注目されている



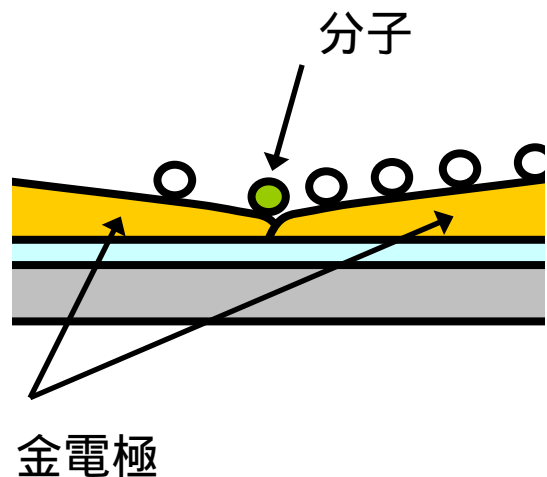
ただし、単一分子に金属電極を形成するのは非常に困難

- ・極微細である
- ・空間的にランダムに分布している
- ・再現性がない(歩留まり~1%)
- ・動作が不安定



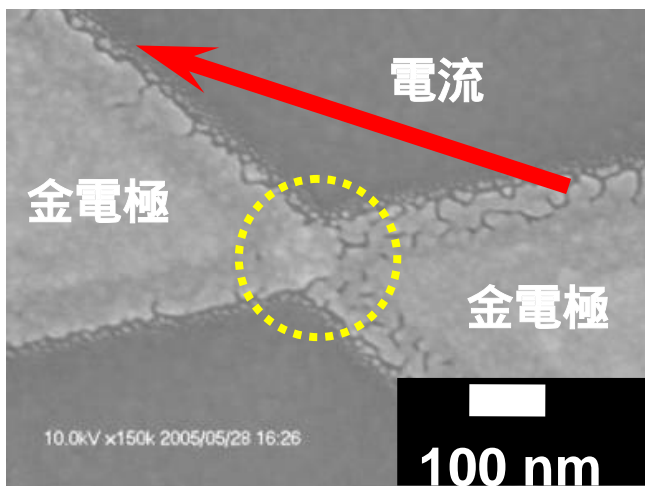
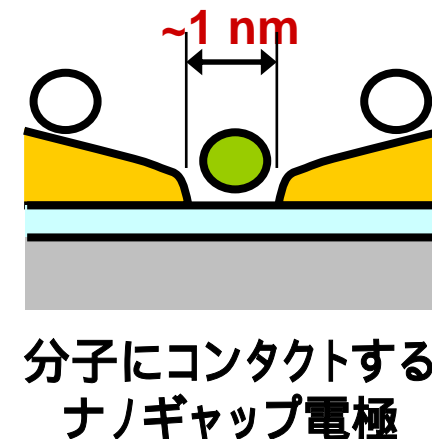
再現性・安定性に優れたナノギャップ電極作製技術の確立が不可欠

# 通電断線法を用いたナノギャップ電極の作製



電気的なストレス

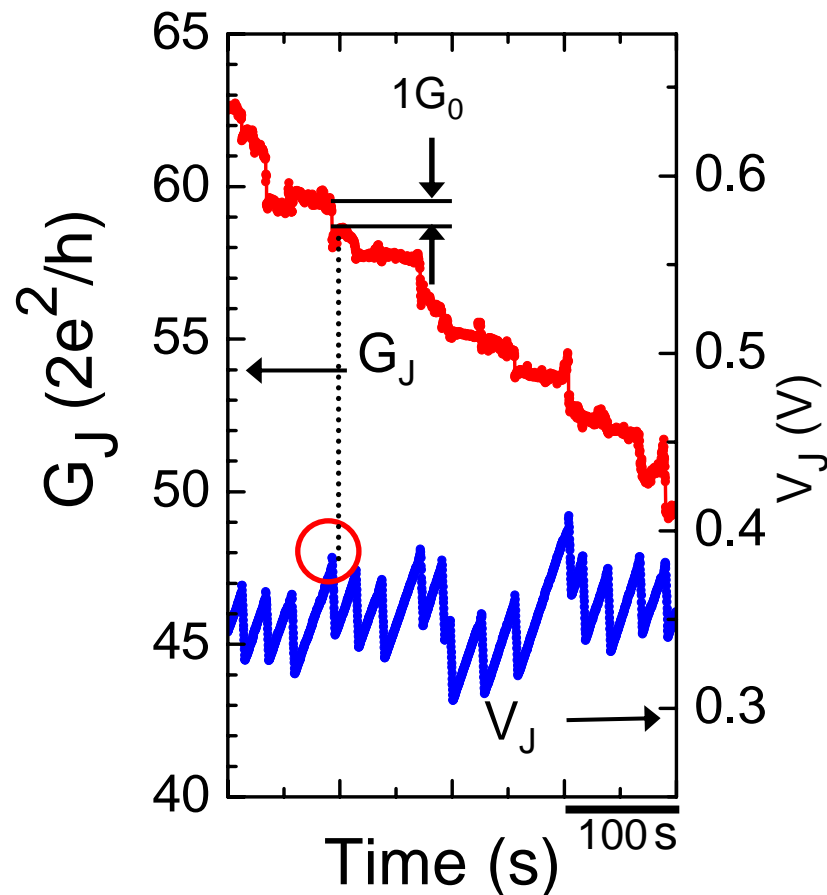
エレクトロマイグレーション



サブミクロンの金の接合を作製し、これに電気的なストレスを印加すると、エレクトロマイグレーション効果で、金属が断線する。断線して原子レベルのギャップができる確率が低い。エレクトロマイグレーションの機構は？

断線させる前の微細な金の接合の電子顕微鏡写真

# 通電断線プロセスの精密なフィードバック制御



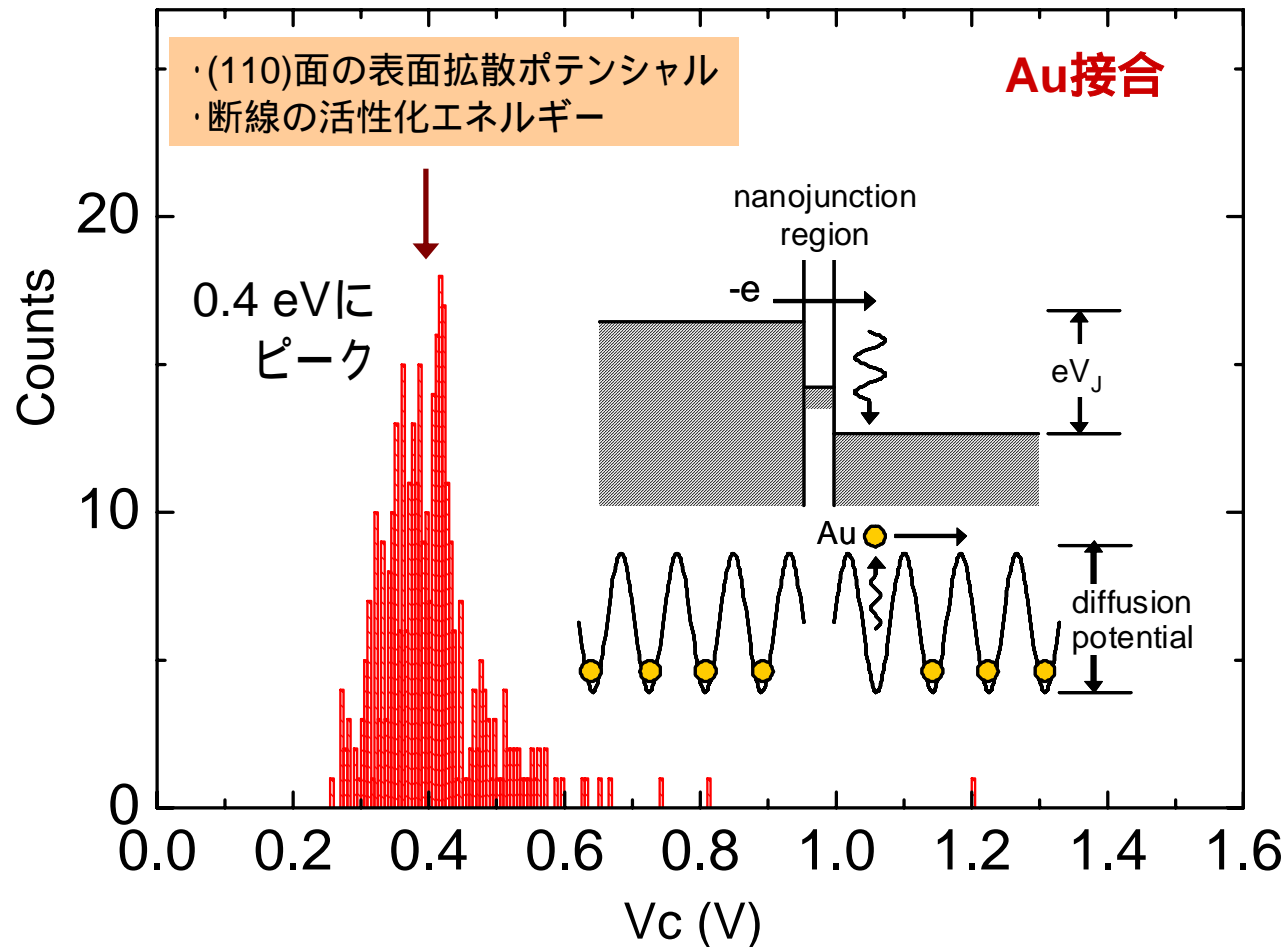
金接合のコンダクタンス(電流の流れやすさ; 赤線)をモニターしながら、印加する電圧 $V_J$ (青線)にフィードバックをかける。

コンダクタンスは、量子化コンダクタンス( $G_0 = 2e^2/h$ )で規格化されているので、縦軸は金原子の数に対応。  
 $e$ : 電荷素量、 $h$ : プランク定数

$1G_0$ 程度の大きさのステップを示しながら断線が進んでいくことから、精密に1原子ずつ原子をはずしていくことができています。

接合に約0.4 Vかかると、原子がはずれることが多いことが見て取れる。

# 原子がはずれるときの電圧のヒストグラム

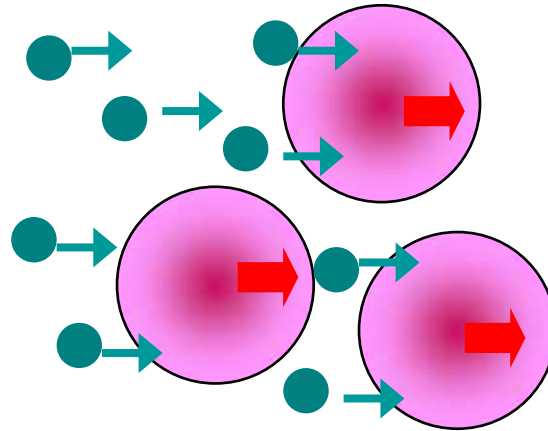


金接合に約0.4Vかかると、金原子がはずれることが多い。  
この電圧は、金原子表面を金原子が移動するために超えなければいけないエネルギー0.4 eVと整合。  
金線の断線寿命の活性化エネルギー0.4 eVとも整合

# エレクトロマイグレーションの機構

---

従来の  
Electron wind forceモデル

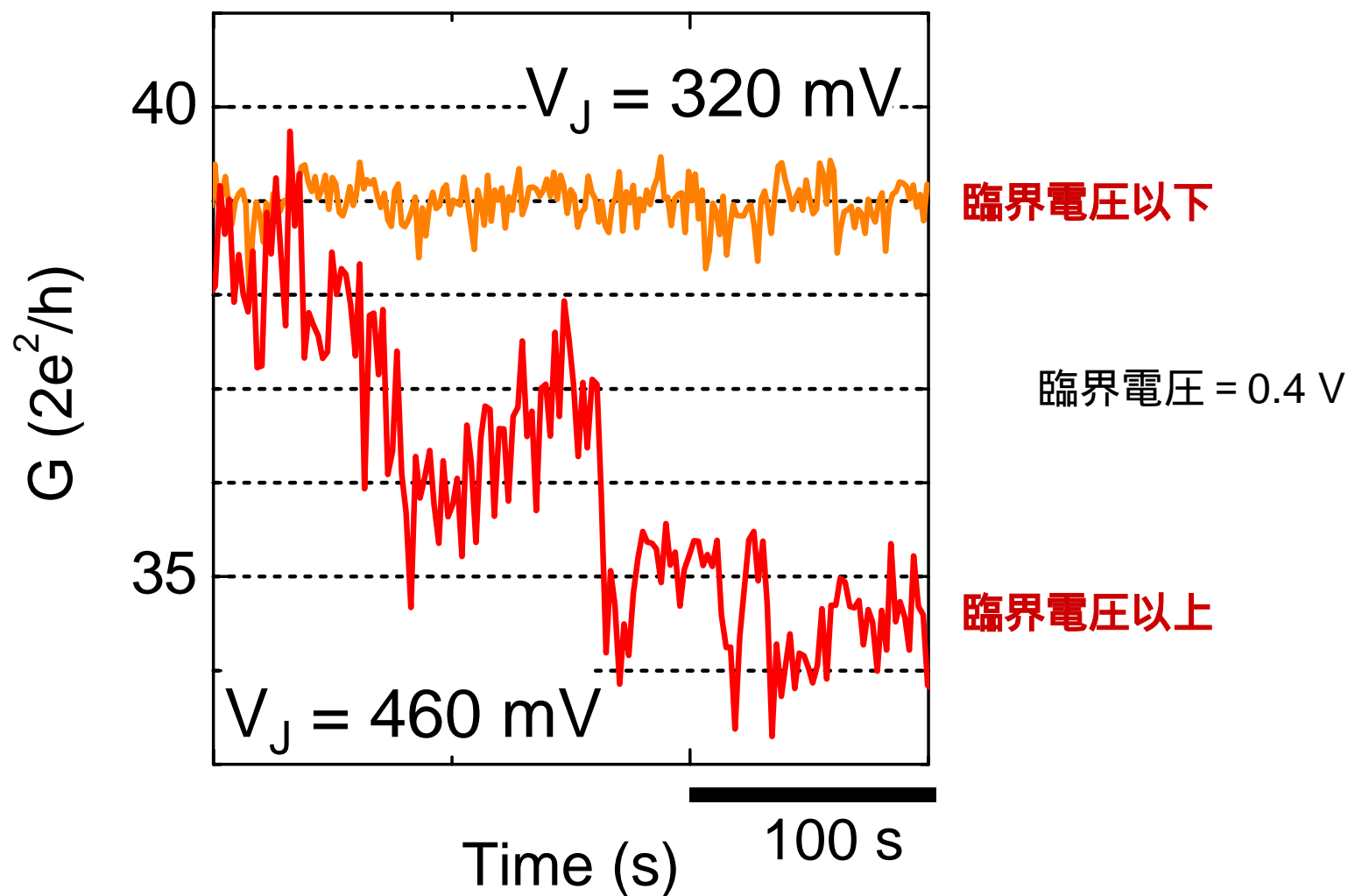


従来、エレクトロマイグレーションは、電子風 (electron wind force) モデルで説明されてきた。従って、電流密度が大きくなると断線すると考えられてきた。

今回の結果は電流密度よりも、むしろ接合にかかる電圧の方が重要であり、エレクトロマイグレーションが進行するための臨界電圧が金の場合には約 0.4 Vであることを示している。

断線電圧のヒストグラムは、原子がはずれるためにはある一定以上のエネルギーを持った電子が原子と衝突する必要があることを示している。

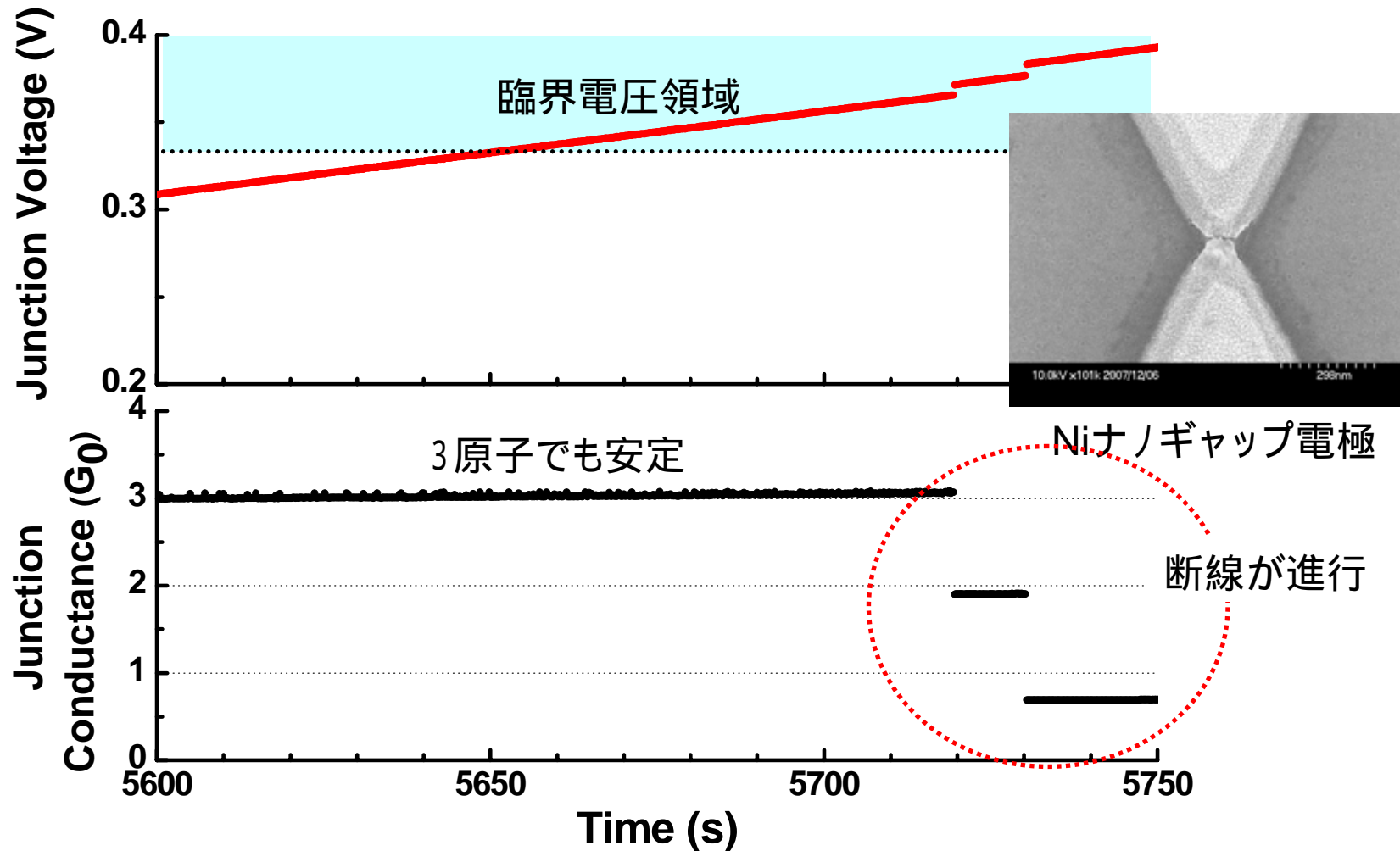
## 臨界電圧と金のエレクトロマイグレーションの進行



接合電圧が臨界電圧以上にならないとエレクトロマイグレーションが進行しない



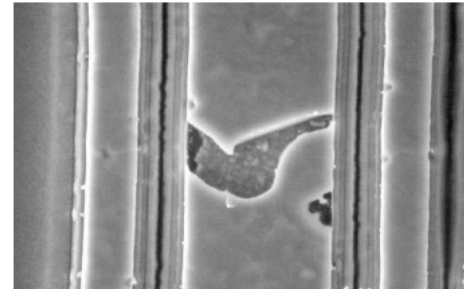
# ニッケル(Ni)ナノ接合の断線過程 (臨界電圧約0.33 V)



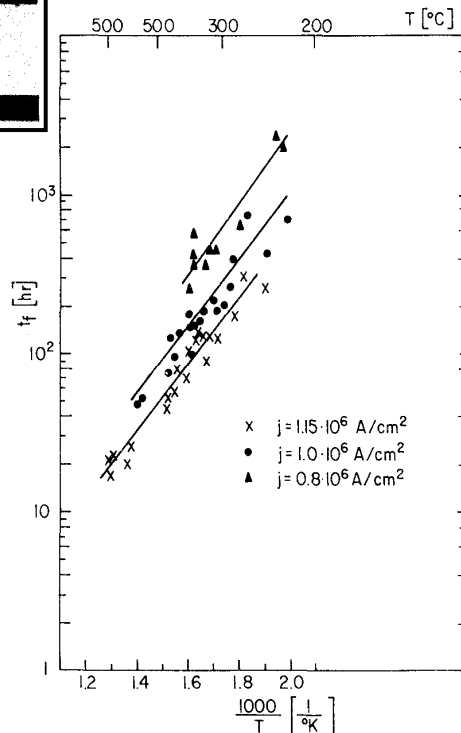
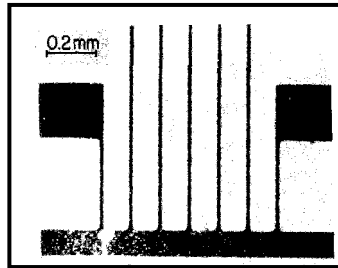
臨界電圧0.33V以下では、たった3原子の接合でも断線しないが、  
臨界電圧を超えると急激に断線が進行する。

# 超LSIに対する技術的インパクト

## VLSI断線に対する新しい信頼性評価手法



VLSIの配線の断線はelectromigrationによるもの



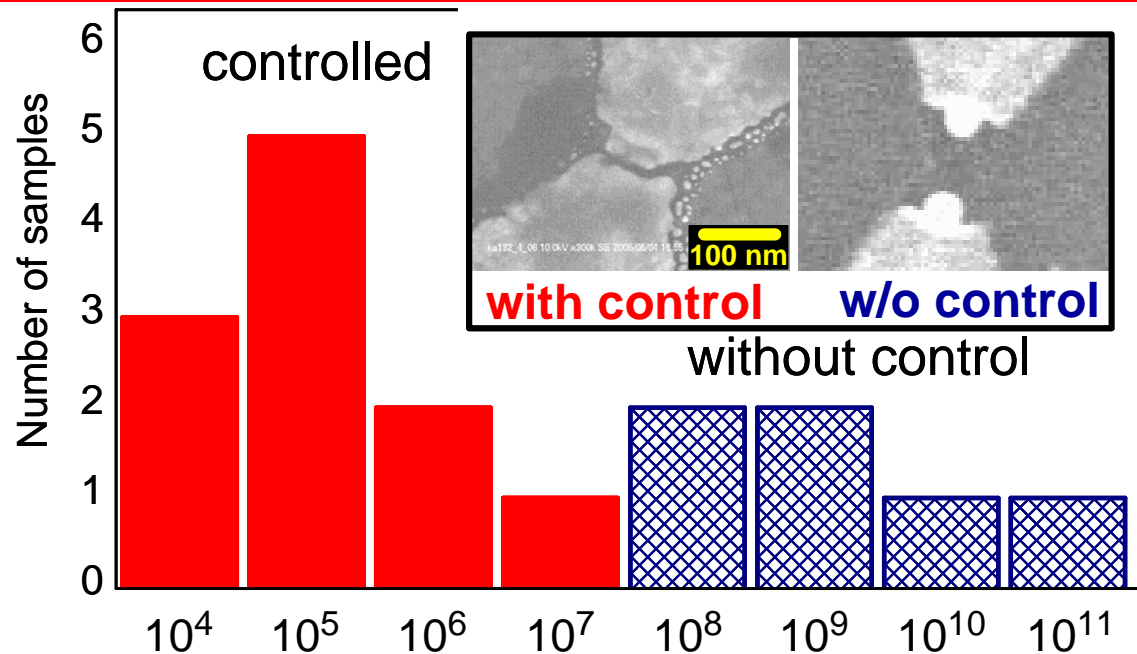
$$\tau \propto \exp(E_a / k_B T)$$

配線の断線に至るまでの加速試験(数千時間)の統計的処理から、断線の活性化エネルギー $E_a$ を求めている。



原子がはずれる電圧のヒストグラムを測るとい  
う新しい方法で、配線材料の断線の活性化エネ  
ルギーを決定する新しい手法の提案  
断線しない配線の使い方

# 精密に制御された原子レベルのナノギャップ電極の形成と 単一分子トランジスタへの応用



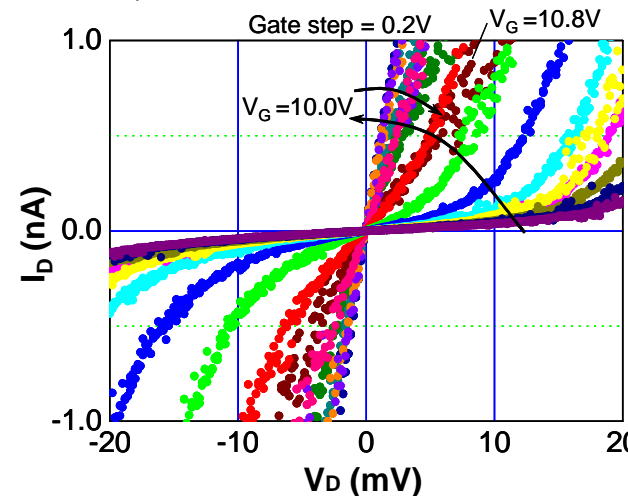
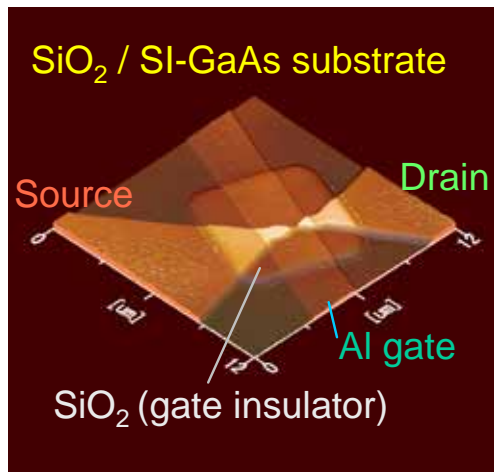
フィードバック制御により再現性よく原子レベルのギャップが作製できる。単一のフラーレン分子を用いたトランジスタの作製にも成功

ギャップの抵抗が小さいほど狭いギャップができていることに対応

ナノギャップ電極の抵抗 (オーム)



Fullerene 1 mg  
Toluene 4 ml



単一フラーレン分子トランジスタ

# まとめ

---

## エレクトロマイグレーションの素過程の解明

\* エレクトロマイグレーションは、ヒューズやフィラメントの断線など、大きな電流を流したときに金属が断線する一般的な現象。

\* 原子レベルでは、従来の電子風モデルは妥当ではない。

→ エレクトロマイグレーションは、一定以上のエネルギーを持った1個の電子が1個の原子に衝突するために発生することを見いだした。

→ エレクトロマイグレーションの進行には臨界電圧が存在し、その値は原子の表面拡散ポテンシャル(原子が表面を動くために超えなければいけないエネルギー)に等しい。

## 物理的・応用的展開

→ フィードバック制御による精密なエレクトロマイグレーション(EM)の制御により、再現性の高い分子デバイスの作製・動作が可能に

→ VLSIの配線の信頼性に大きな知見(材料の選択や動作条件)を与える