

研究背景

将来の X 線分光装置への要求

- ・ 微細構造線の分離 ⇒ 数 eV のエネルギー分解能
- ・ 広がった天体の観測 ⇒ 広視野撮像能力



TES 型 X 線マイクロカロリメータが有力

次世代 X 線天文衛星

DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)

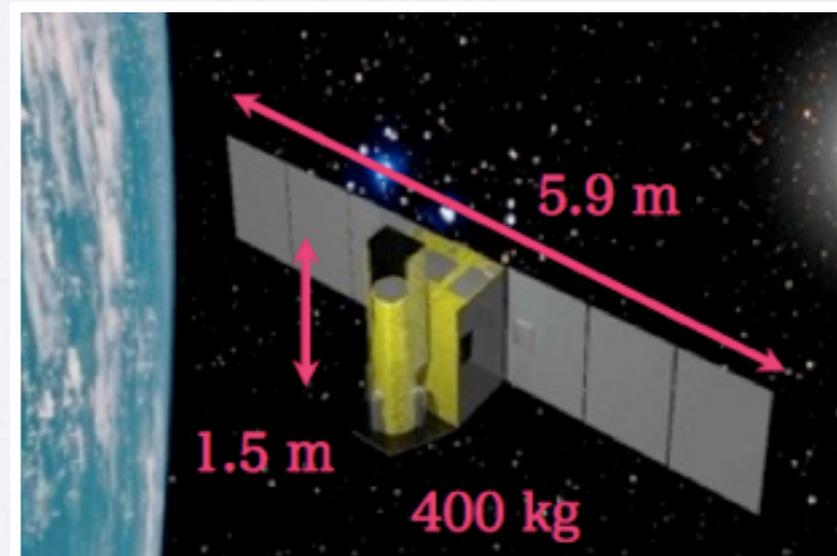
宇宙の大構造に沿って分布する

中高温銀河間物質からの酸素輝線を観測

搭載 X 線分光装置への要求

エネルギー分解能 → 2 eV 程度

広視野撮像能力 → 256素子のアレイ



DIOS (~2016) PI: 首都大 大橋

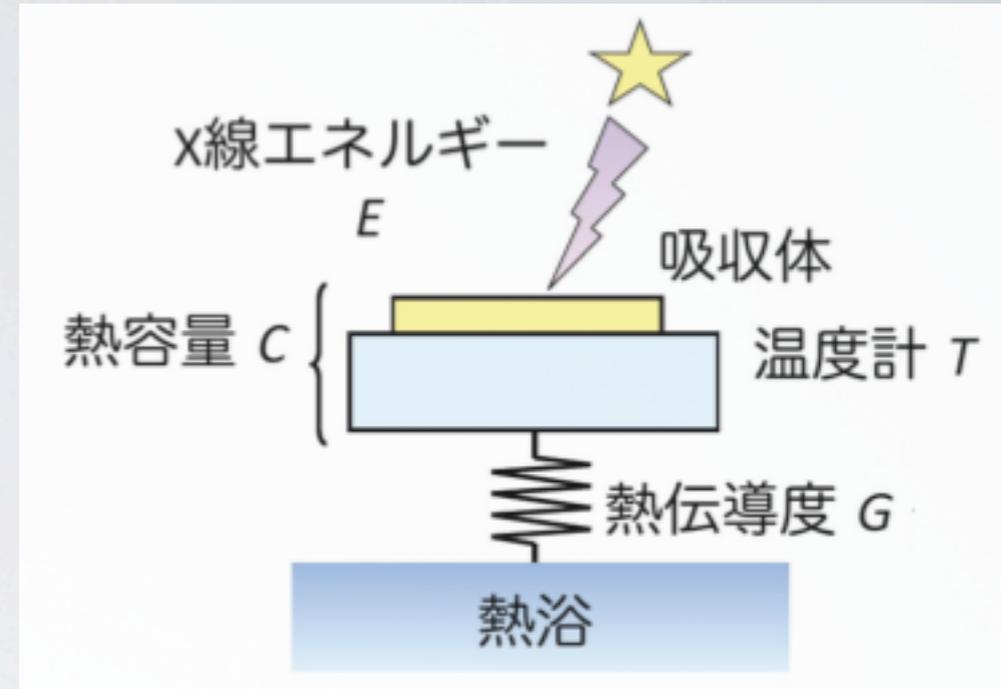
TES型X線マイクロカロリメータ

X線マイクロカロリメータ

入射した X 線光子の1つ1つのエネルギーを素子内部の微小な温度上昇として測る検出器

エネルギー分解能

$$\Delta E \propto \sqrt{\frac{k_B T^2 C}{\alpha}}$$



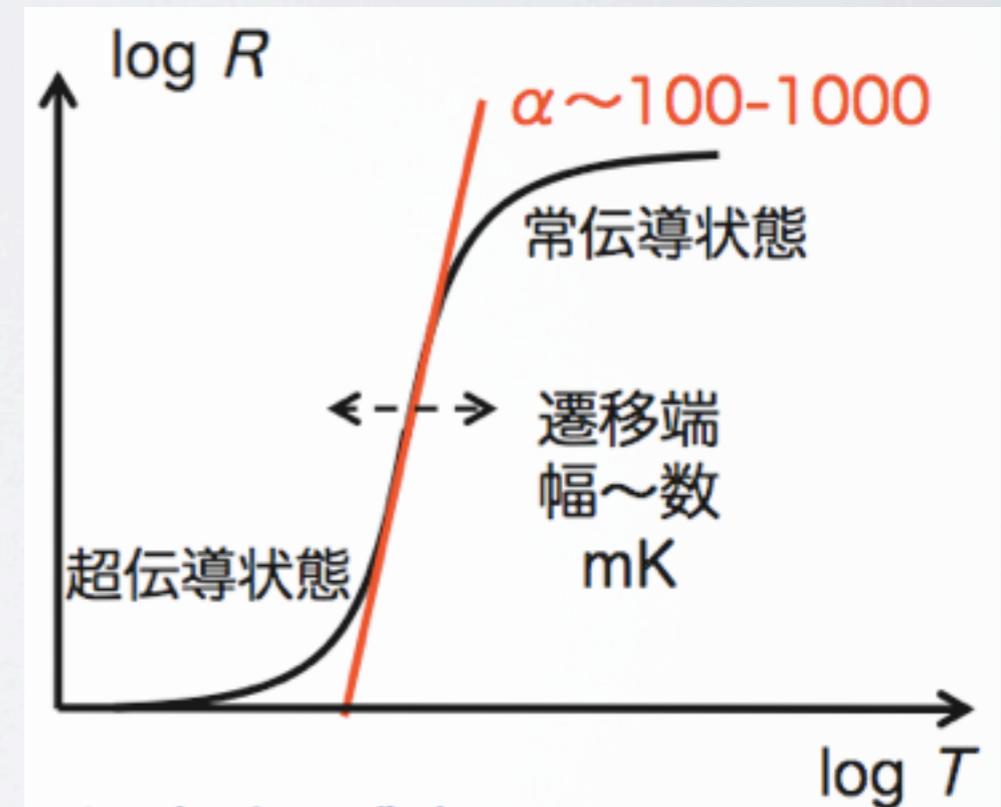
TES : Transition Edge Sensor

(超伝導遷移端温度計)

超伝導-常伝導遷移端での急激な抵抗変化により素子の温度上昇を計測

温度計感度

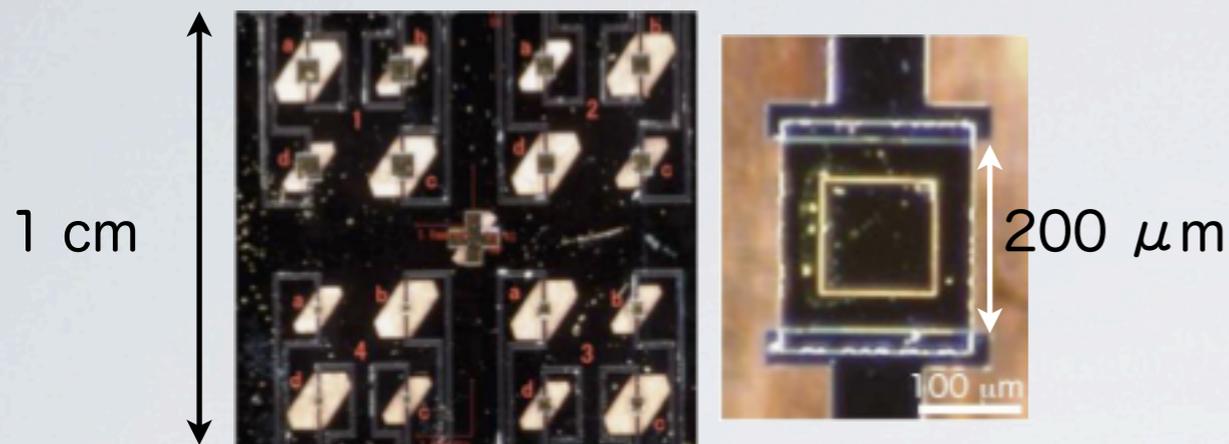
$$\alpha = \frac{\partial \ln R}{\partial \ln T}$$



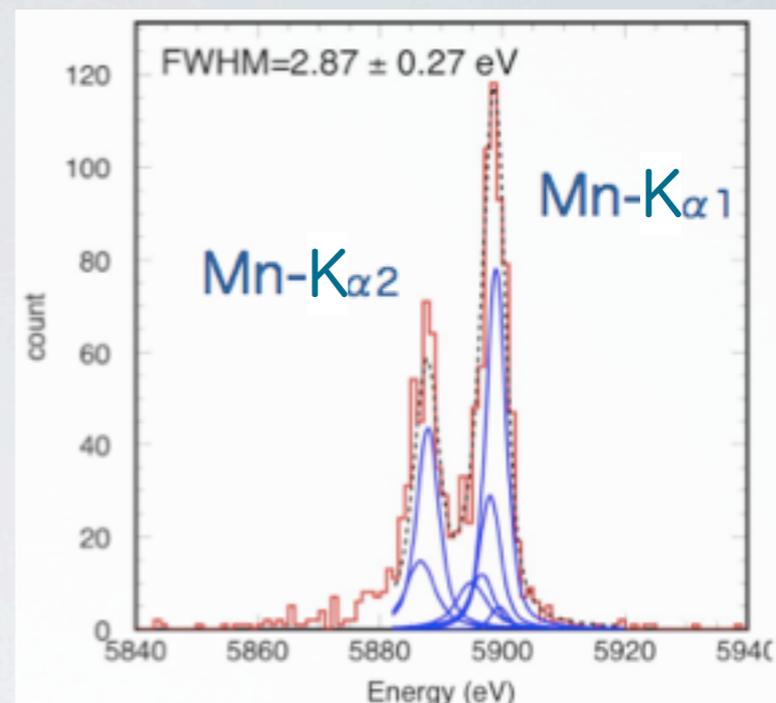
高分光性能 ⇒ 低い動作温度・小さい熱容量・高い温度計感度

単層配線型での成果

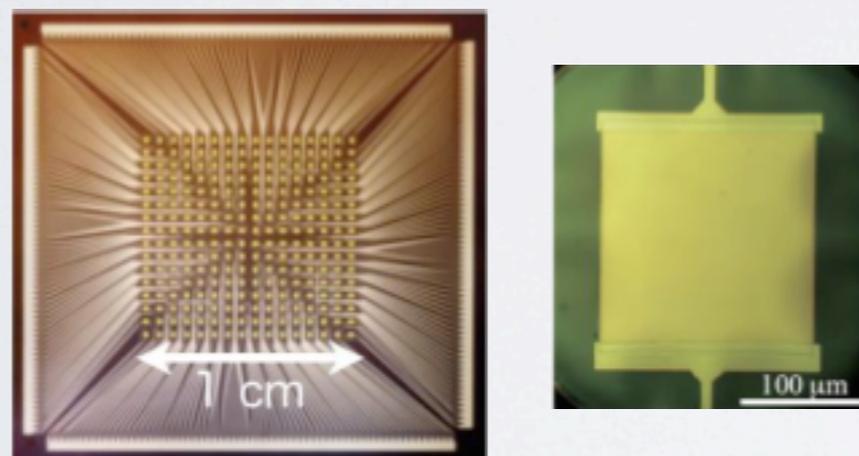
4×4 ピクセル



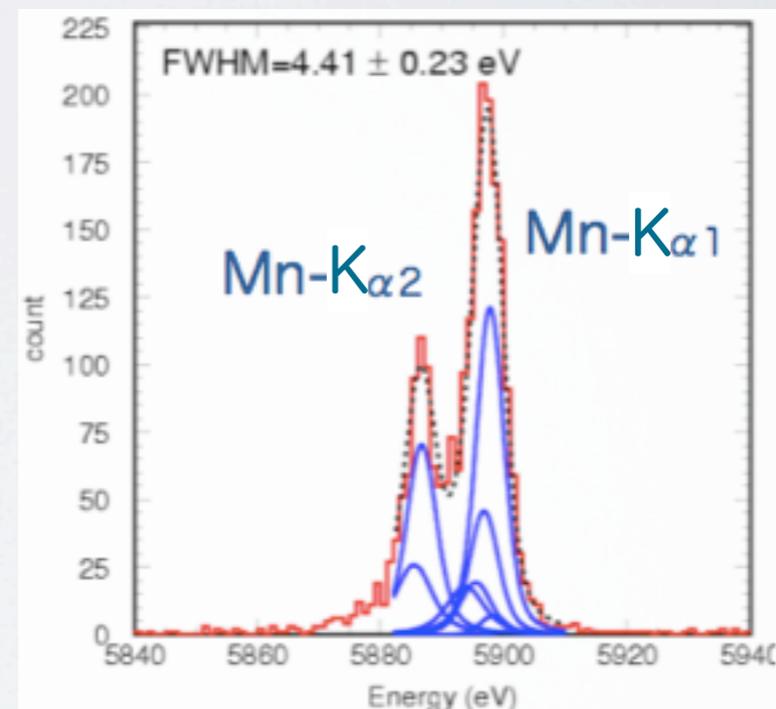
$\Delta E = 2.8 \text{ eV} @ 5.9 \text{ keV}$ を達成
Akamatu et al 2009



16×16 ピクセル



$\Delta E = 4.4 \text{ eV} @ 5.9 \text{ keV}$ を達成
Ezoe et al 2009



※世界最高性能 ⇒ NASA/GSFC : $\Delta E = 1.5 \text{ eV} @ 5.9 \text{ keV}$

受光面積の拡大

～さらなるアレイ化へ（16 × 16 以上のピクセル）～

問題点

1：配線スペースの限界で、16 × 16 ピクセルが限界

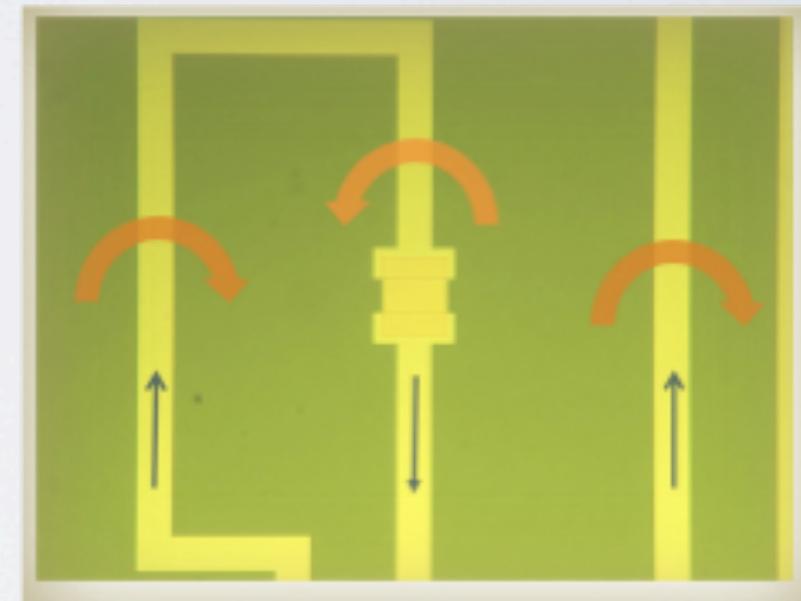
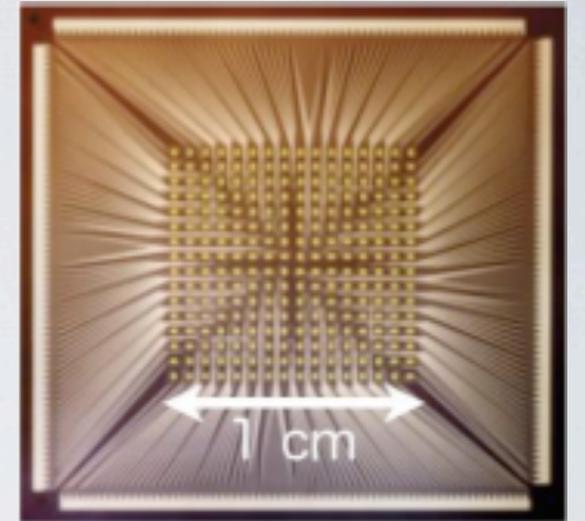
2：ピクセル間のクロストーク

・配線がループ ⇒ ノイズの原因になる
⇒ エネルギー分解能に影響

・ピクセルを増やす ⇒ 配線がさらに密集
⇒ 影響が増す



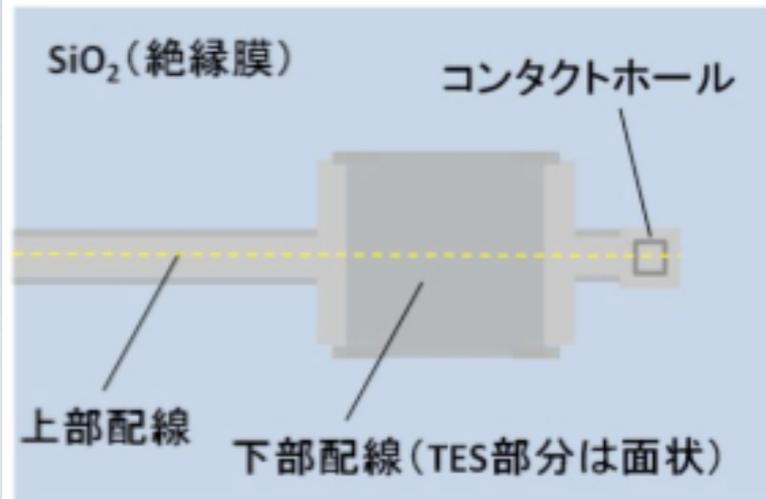
積層配線 (折り返し配線) を開発
(JAXA、セイコー、産総研と共同研究)



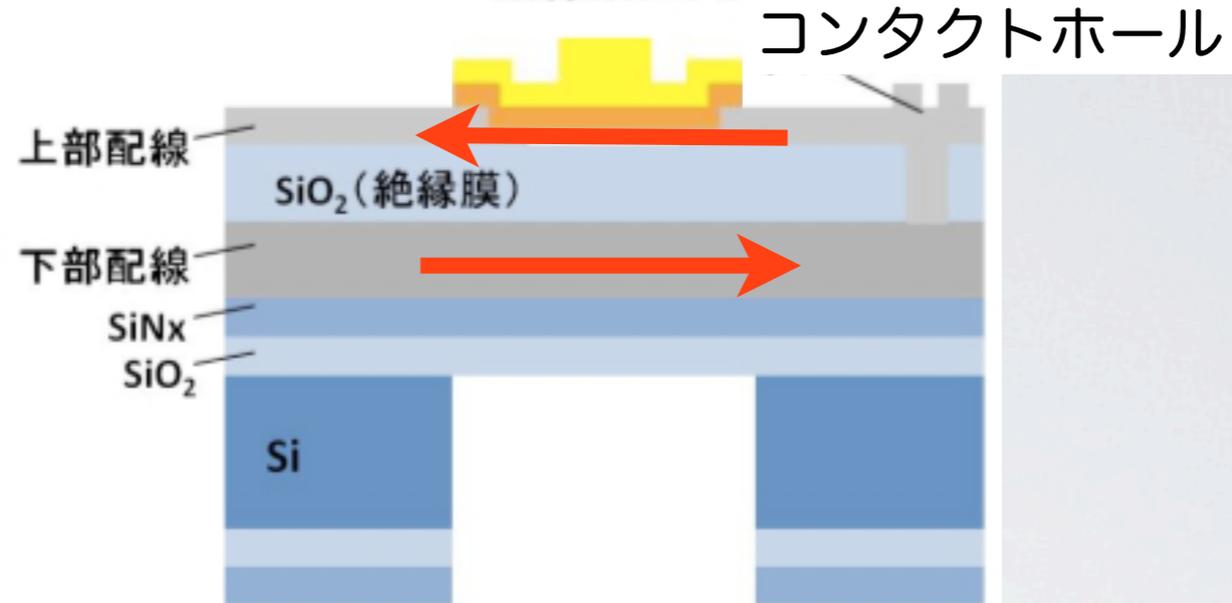
↷ : 磁場 ↑ : 配線電流

積層配線デザイン

見下ろし図

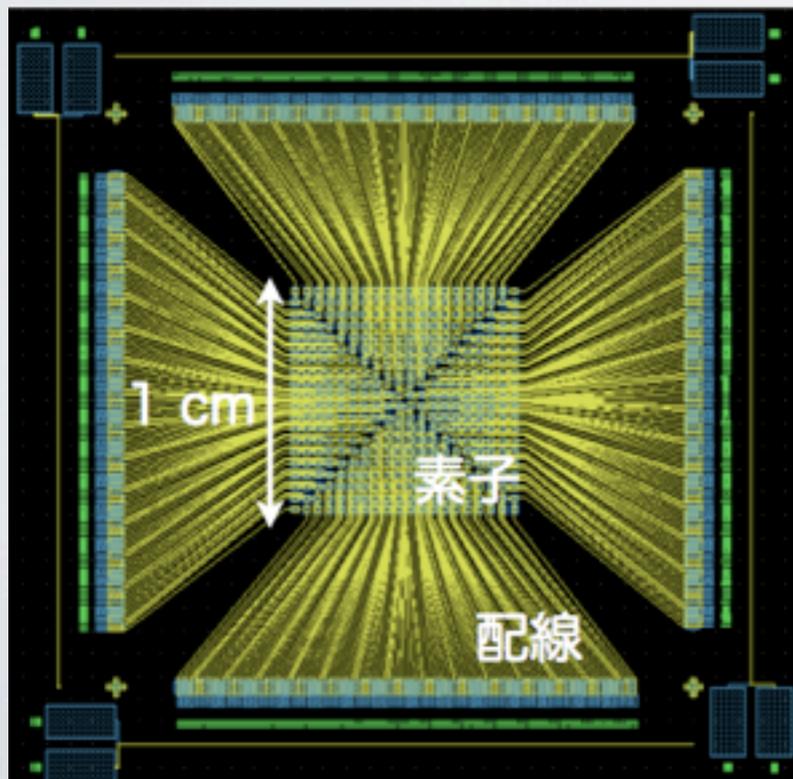


破線断面図



単ピクセルのイメージ

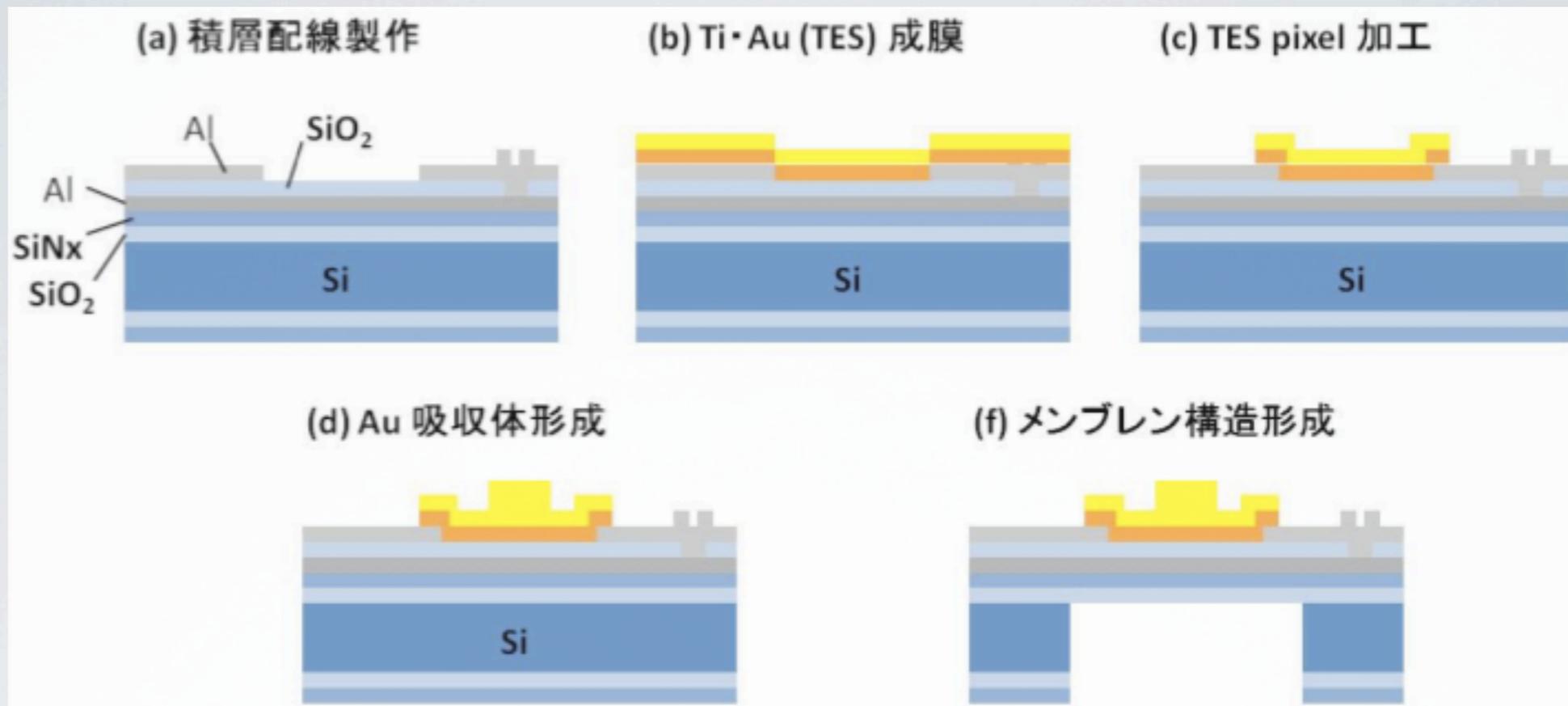
上部と下部の間に Si 酸化膜を挟んだサンドイッチ構造
⇒磁場をキャンセル



20×20 ピクセルアレイ基盤

従来型 (単層配線) と比べ、配線スペース削減

製作プロセス ～積層配線～



各プロセスにおいて、

- ・加工方法の確立
- ・超伝導転移試験

TES 成膜・加工 ～改良前～

(b) TES 成膜

- ・ 逆スパッタで基盤表面を洗浄
- ・ スパッタで Ti = 40 nm , Au = 80 nm を成膜



(c) TES ピクセル加工

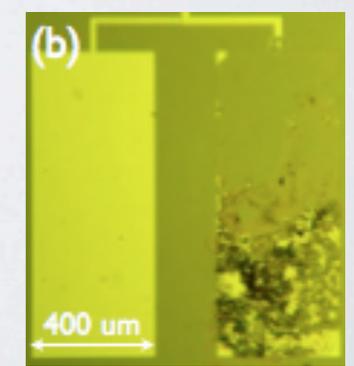
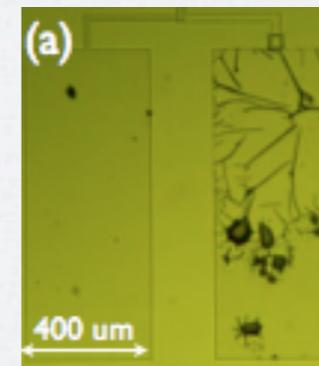
エッチングにより、TES 部分を加工
(単層配線と同様に加工)

- ・ Au には AURUM-101 (ヨウ素系)
- ・ Ti には H₂O₂ を使用



bonding pad が Au エッチングの時点で損傷し、
Ti エッチング後に消失

(AURUM-101 のエッチング率 : Au/Al = 20:1)



Au エッチング後

Ti エッチング後

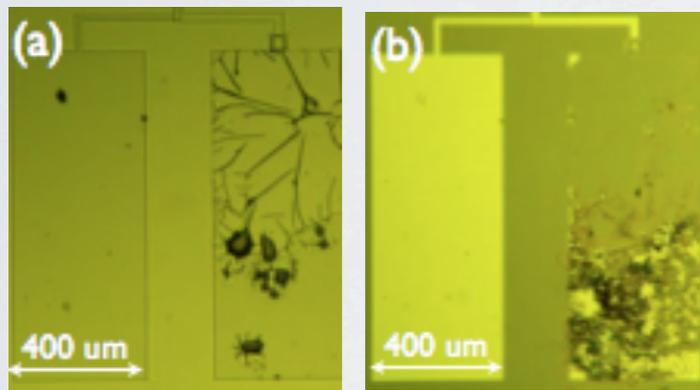
TES 成膜・加工 ～改良後～

変更

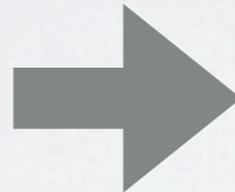
Au には AURUM-101



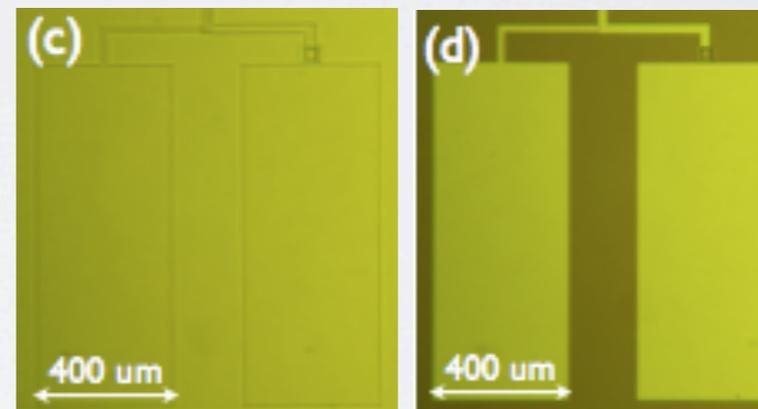
AURUM-101 + リン酸塩 (リン酸二水素アンモニウム, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)



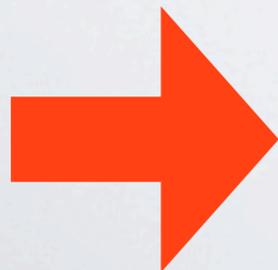
Au/Al = 20:1



✗ a,b は変更前
○ c,d は変更後



~100:1

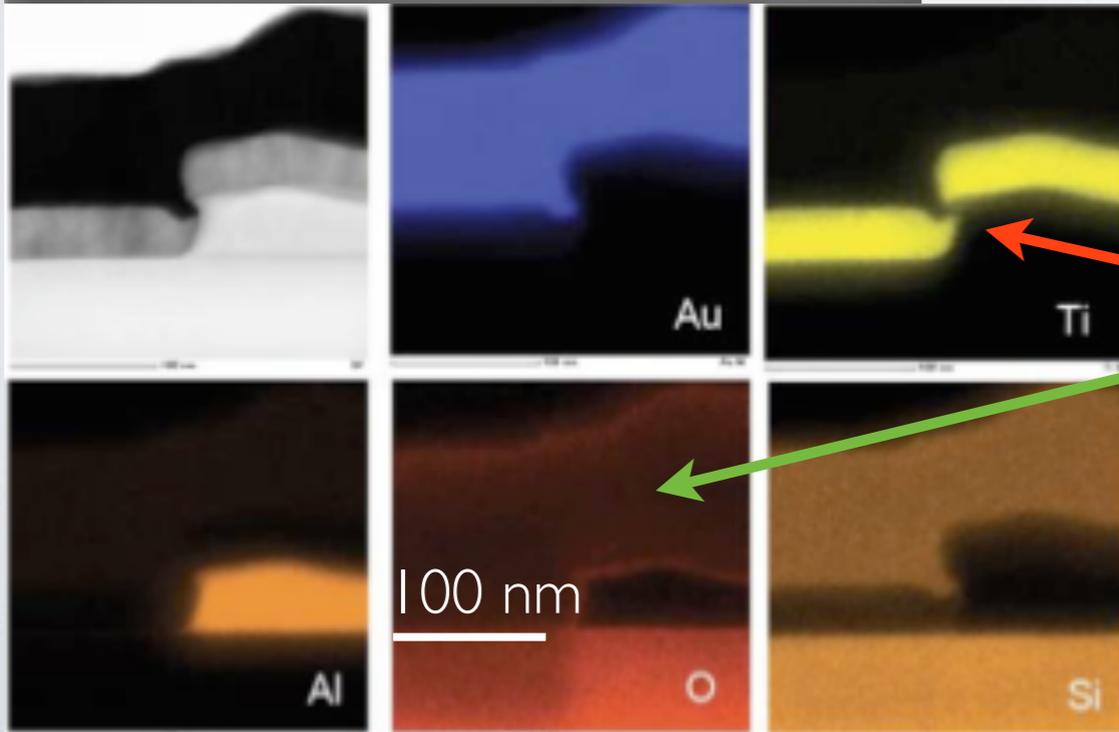
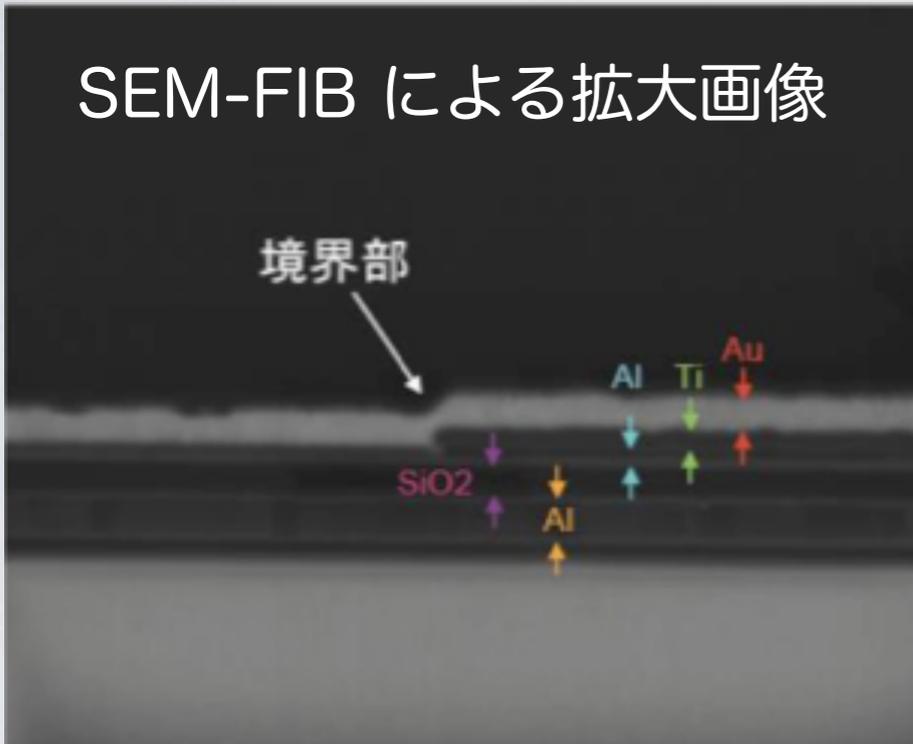


TES 加工後の超伝導転移試験へ

超伝導転移試験

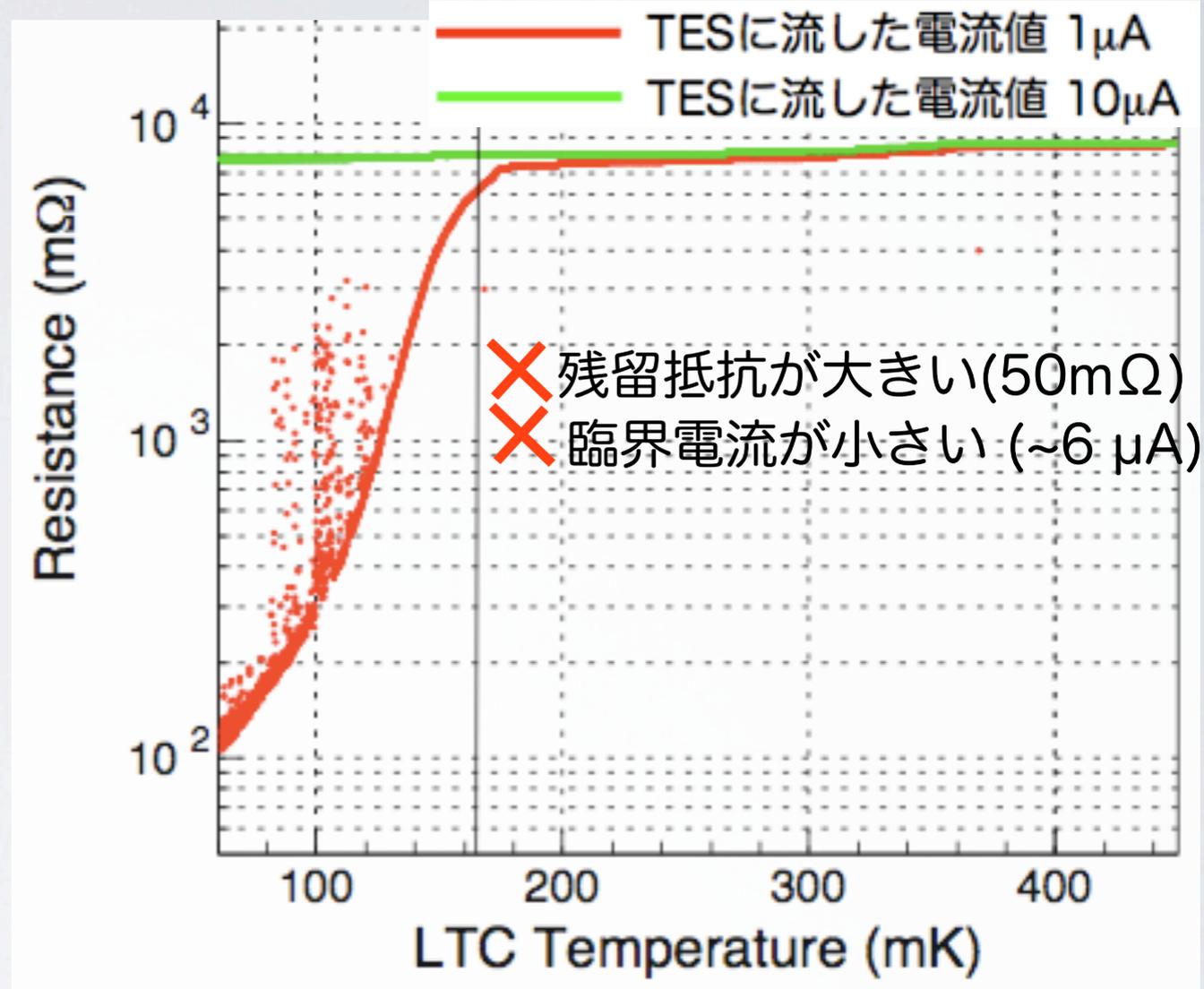
～変更前～

SEM-FIB による拡大画像



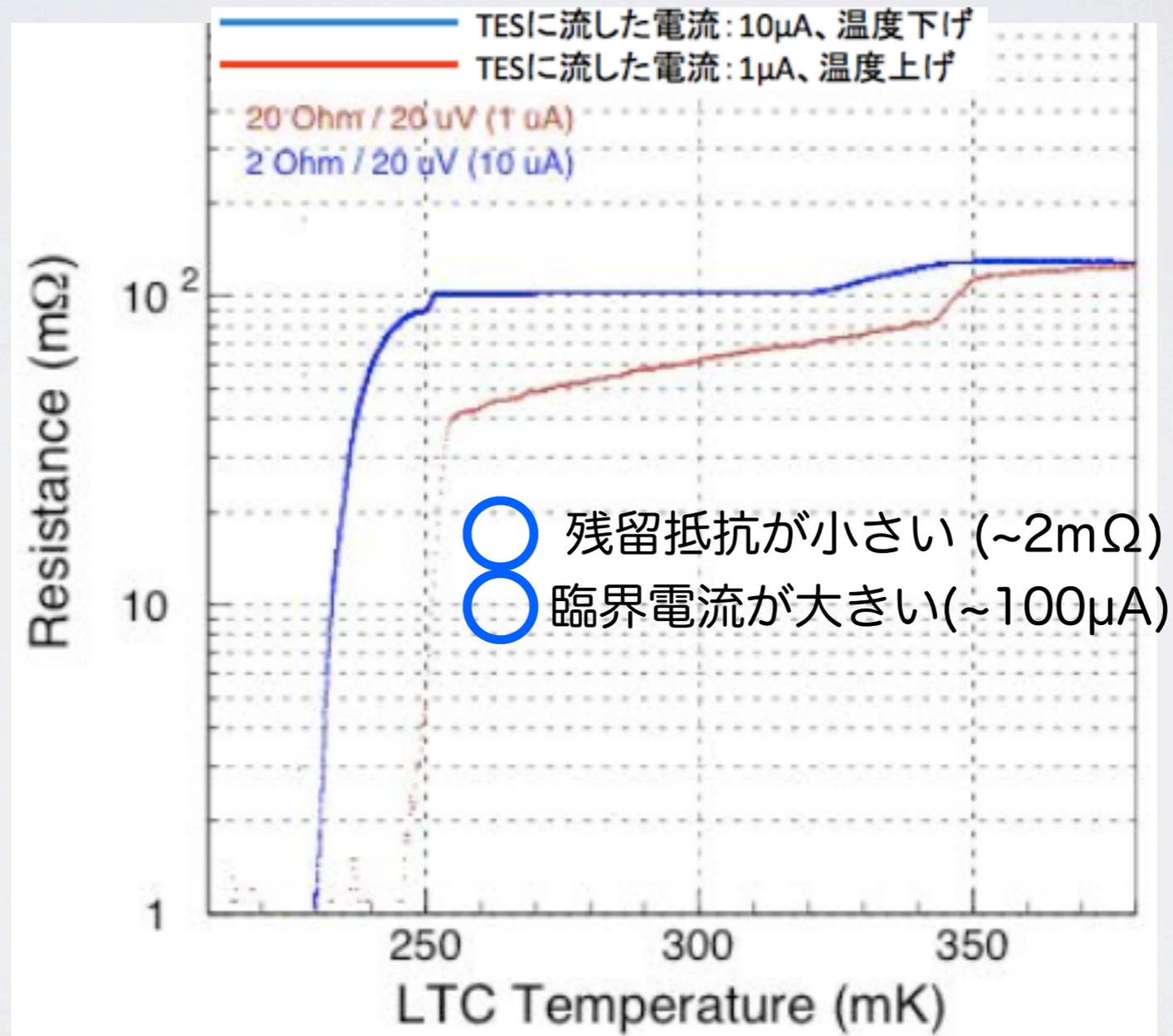
1 : TES の膜厚が足りず、Ti が段切れ

2 : TES と上部配線間に、Al の自然酸化膜が残留
→ 電気的接続を妨害



超伝導転移試験～変更後～

- 1 : TES 成膜前の逆スパッタを **100 W, 1min** ⇒ **150 W, 3min** に変更
⇒ 自然酸化膜を除去
- 2 : TES の膜厚を **Ti/Au: 40/80 nm** ⇒ **100/200 nm** に変更
⇒ 段切れを阻止



まとめと今後

TES 加工までのプロセスは確立



- 転移温度の制御 ⇒ 100 mK 程度を目標
- 吸収体、メンブレン構造 ⇒ 形成方法の確立
⇒ 超伝導転移試験