

# 次世代X線天文衛星DIOS搭載を目指した TES型X線マイクロカロリメータの開発現状

前久景星、林佑、村松はるか、山本亮、中島裕貴、満田和久、山崎典子(ISAS/JAXA)、大橋隆哉、石崎欣尚、  
江副祐一郎、山田真也、桑原啓介、宮崎直人、黒丸厳静、鈴木 翔太、細矢 祥平、小泉 祥人(首都大)、  
日高睦夫、佐藤哲郎(産総研)、野田博文(理研)、本間敬之、齋藤美紀子(早稲田)

## abstract

我々の研究グループでは、ダークバリオン探査衛星への搭載を目指した、TES (Transition Edge Sensor)型X線マイクロカロリメータの開発を行っている。DIOSでは2 eVのエネルギー分解能と1 cm角の検出器面積、数100 ピクセルの撮像能力が求められる。我々の研究グループでは、各ピクセルの配線に必要なスペースを大幅に削減できる配線技術と、高いX線検出効率を達成できるマッシュルーム型吸収体や多層膜吸収体の開発を行っている。

## 1. 研究背景 : Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor

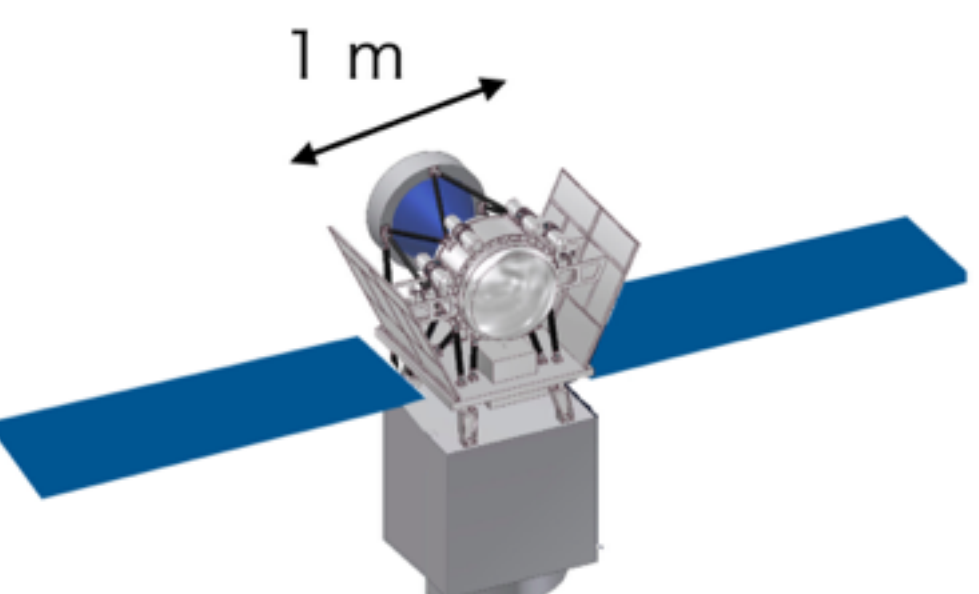


図1: DIOS衛星の模式図  
(Ohashi+14 SPIE)

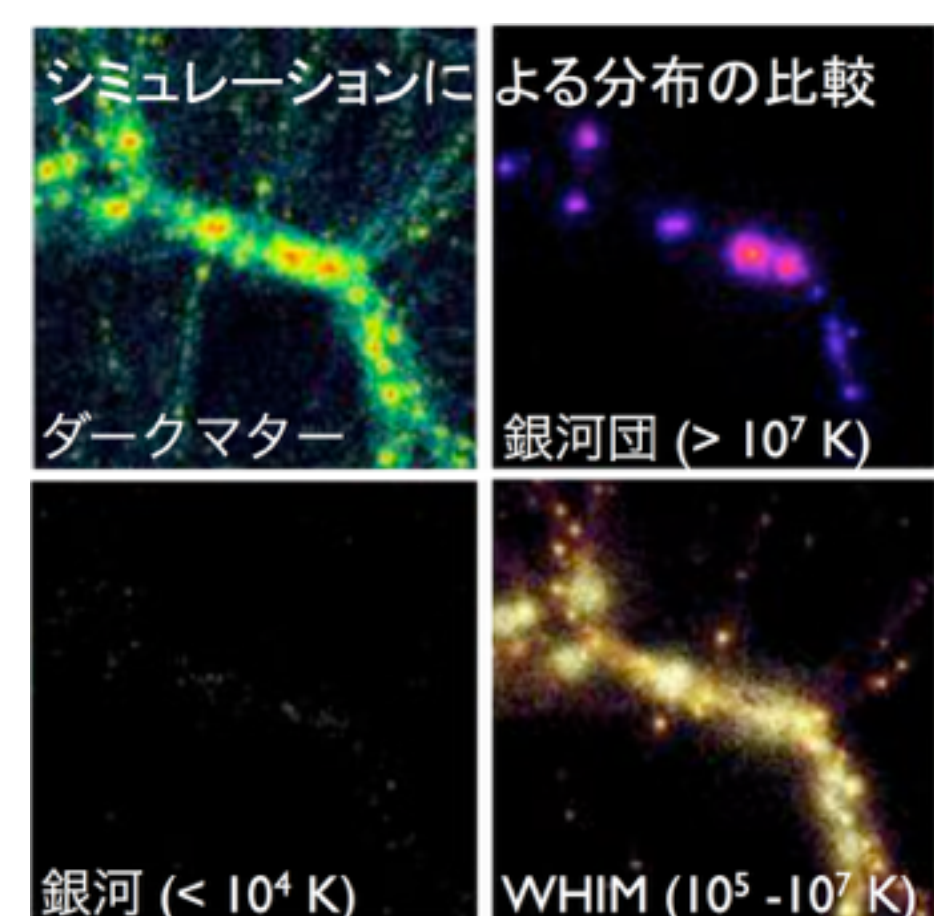


図2: 流体シミュレーションによる  
宇宙の大構造の物質分布  
(Yoshikawa+04)

**DIOS計画**は、宇宙に広がる電離した銀河間物質からの酸素輝線検出を通じて、中高温銀河間物質(WHIM: Warm Hot Intergalactic Medium)の存在と、その物理的諸性質を探る小型科学衛星である。酸素輝線を精密分光することで、 $0 < z < 0.3$  の範囲にあり宇宙の大構造に沿って分布するWHIMを直接検出できる。WHIMは100万度程度の温度をもつ希薄なガスで、現在の宇宙のバリオン量の約50 %を担っていると推定されている。

左図に示すように、WHIMは他の温度域のバリオンに比べて、暗黒物質が作る大構造のいいトレーサーになることが、宇宙流体シミュレーションから予測されている。

これらの観測を実現するためには、高いエネルギー分解能と撮像性能を兼ね備えた検出器が必須であり、『**TES型X線マイクロカロリメータ**』が最も有力である。

### DIOS衛星の要求性能

分光性能 → 2 eV (0.5 - 1.5 keV)  
検出器面積 → 1 cm角の有効面積  
撮像性能 → 16 × 16 素子以上のアレイ

## 2. 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**は入射したX線光子の1つ1つのエネルギーを、素子内部の温度上昇として測る検出器である。**TES** (Transition Edge Sensor) は超伝導-常伝導遷移端での数 mK 幅の急激な抵抗変化により素子の温度上昇を計測する。TES型X線マイクロカロリメータは熱雑音の低い極低温(~100 mK)で動作し、従来のX線CCDに比べて約50倍も優れたエネルギー分解能を達成することができる分光検出器である。

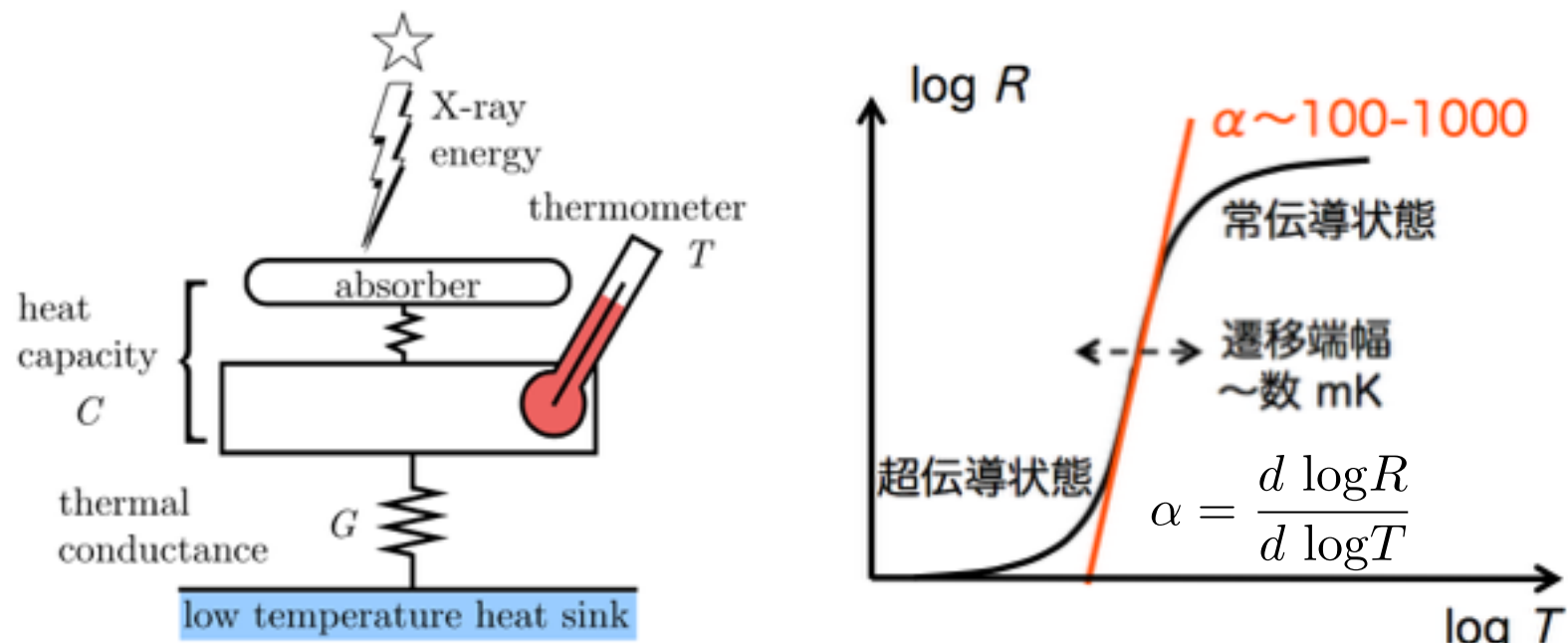


図3: X線マイクロカロリメータの構造(左)と超伝導遷移端(右)

### 原理的なエネルギー分解能

$$\Delta E = 2.35 \sqrt{\frac{4k_B T^2 C}{|\alpha|}} \sqrt{\frac{n}{2}}$$
$$= 1.3 \text{ eV} \left( \frac{T}{100 \text{ mK}} \right) \left( \frac{C}{1 \text{ pJ/K}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{|\alpha|}{100} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

※ n=5 (電子-フォノン相互作用)を仮定

製作面からの制限と、光学系からの角度分解能の要請から、DIOS衛星の要求性能を満たすTESカロリメータは、**1 cm角に~20×20 ピクセル**を敷き詰め、**吸収体のサイズを500 μm角**とするデザインである。

## 3. これまでの成果

我々は、素子製作のほぼ全てのプロセスをインハウスで行っている。単一素子でのベストエネルギー分解能としては、**2.8 eV (@5.9 keV)**を達成している。また16×16 ピクセルアレイを製作し、その内の1 ピクセルで**4.4 eV (@5.9 keV)**のエネルギー分解能を達成している(図5)。(Ezoe et al. 2009, Akamatsu et al. 2009)

また、8×8ピクセルアレイのうち7素子について超伝導転移測定を行い、転移温度のズレがδT=0.6 mKであることを確かめた(図6)。(Muramatsu+ LTD16 in press)

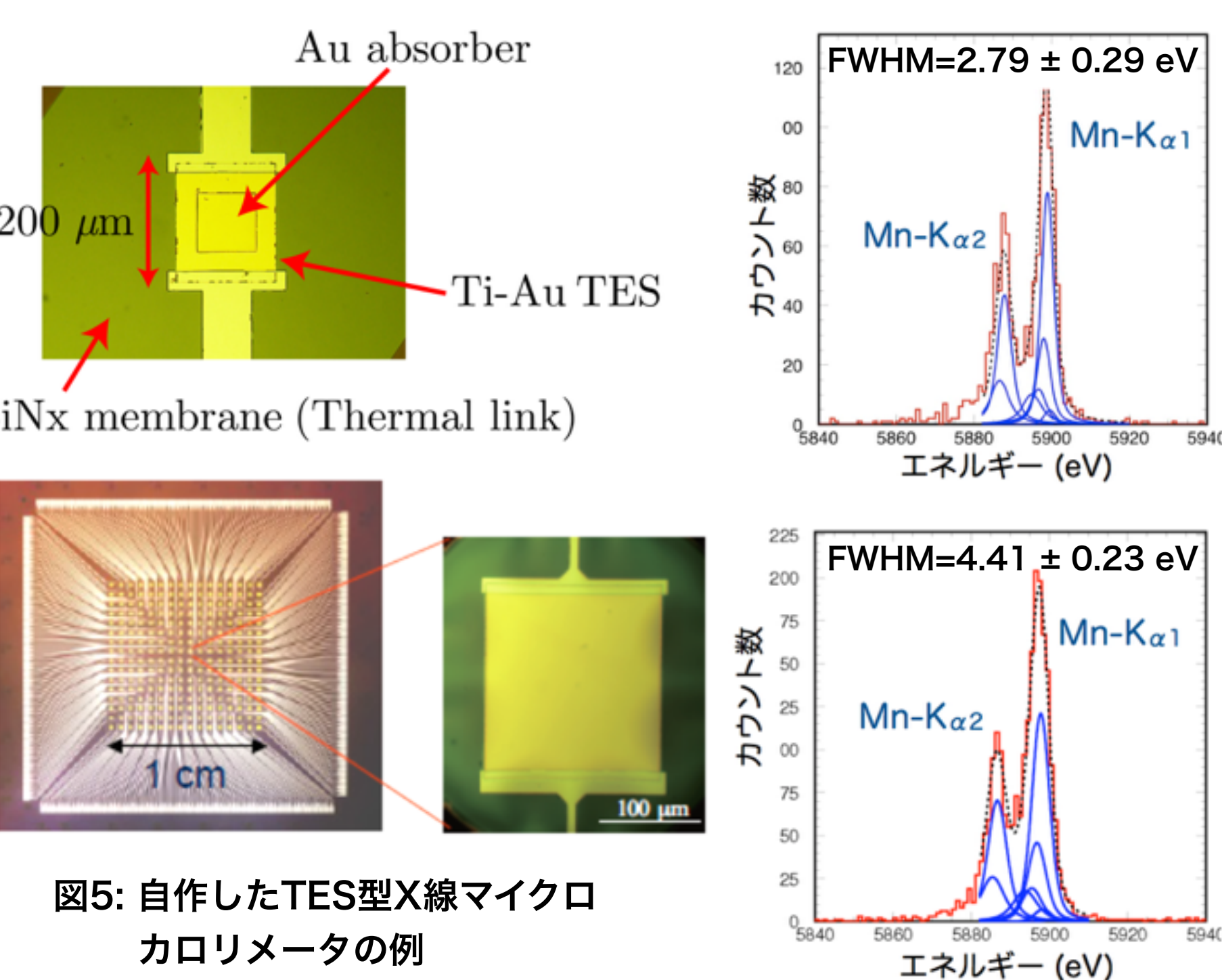


図5: 自作したTES型X線マイクロ  
カロリメータの例

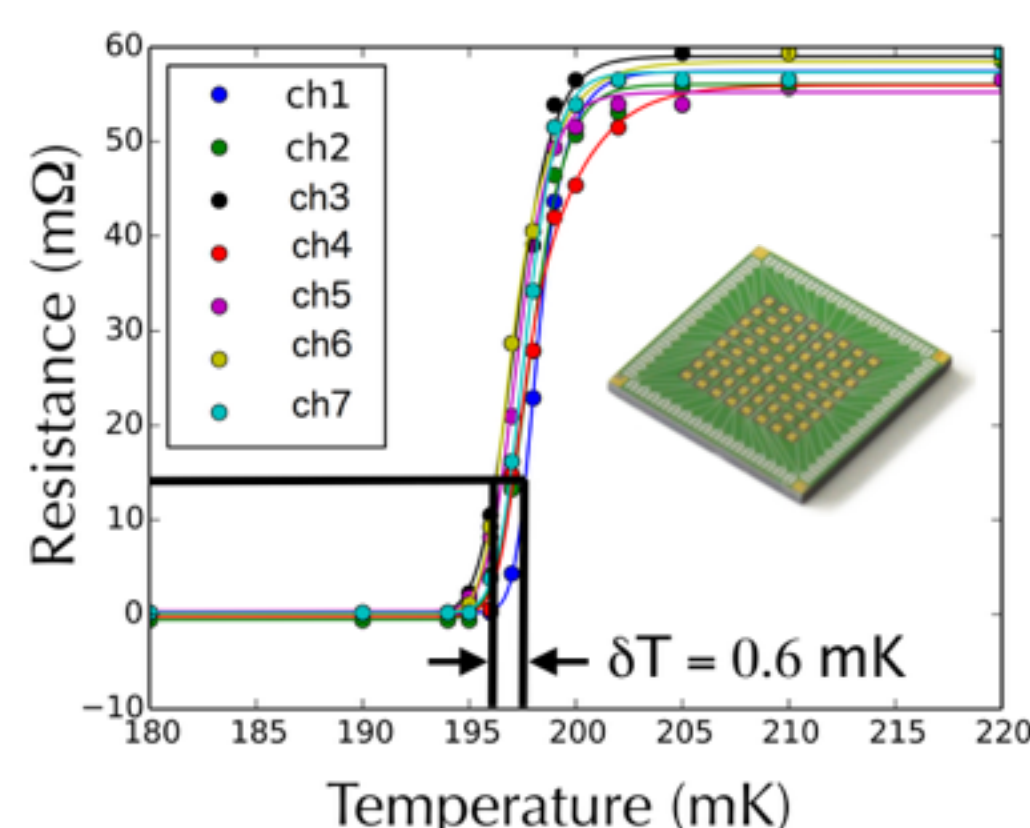


図6: TES7素子の転移温度の違い

倉林 2007 首都大修士論文  
吉野 2007 東大 修士論文  
吉武 2009 東大 修士論文  
赤松 2009 首都大修士論文

## 4. 開発要素 ① : 積層配線技術

20×20 ピクセルアレイを1 cm角の面積の中に実現するためには、非常に密集した読み出し配線が必要となる。そこで我々は、**自己・相互インダクタンスによる干渉の影響を抑え、スペースを最小化**するための絶縁膜を挟んだ**積層配線**を開発している(図7,8)。

我々はこれまでに、積層配線を用い、4×4 ピクセルアレイを製作してX線パルス取得、20×20 ピクセルアレイを製作して超伝導転移測定を行っている。(Ezoe+2014 LTD)

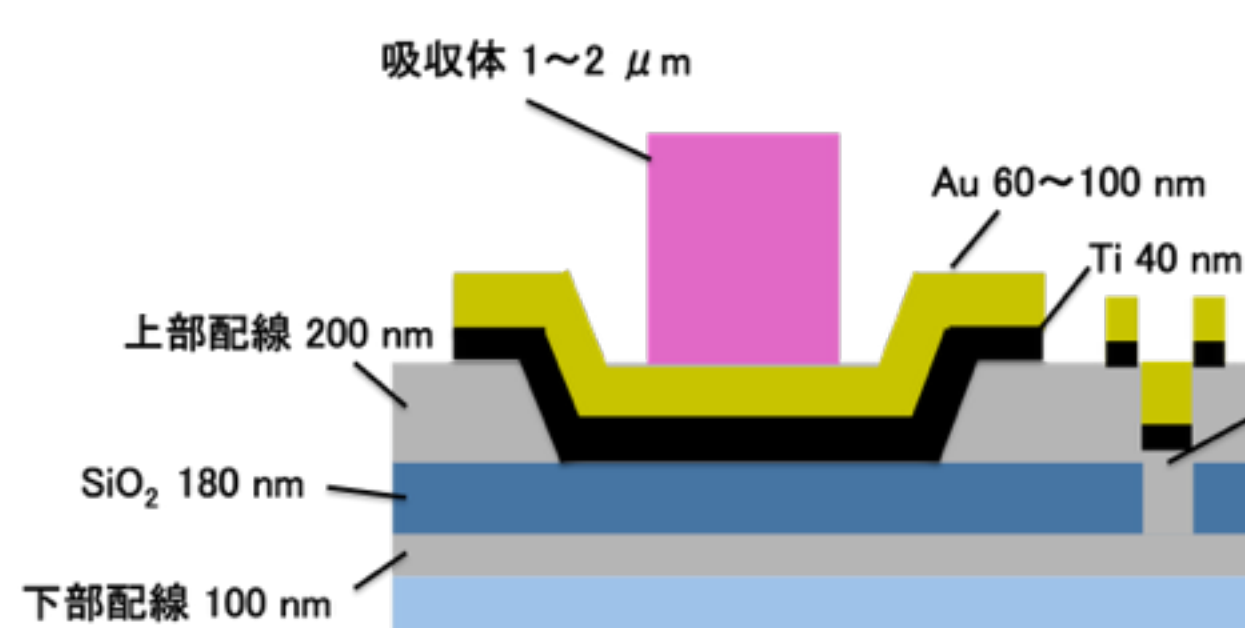


図7: 積層配線の断面模式図

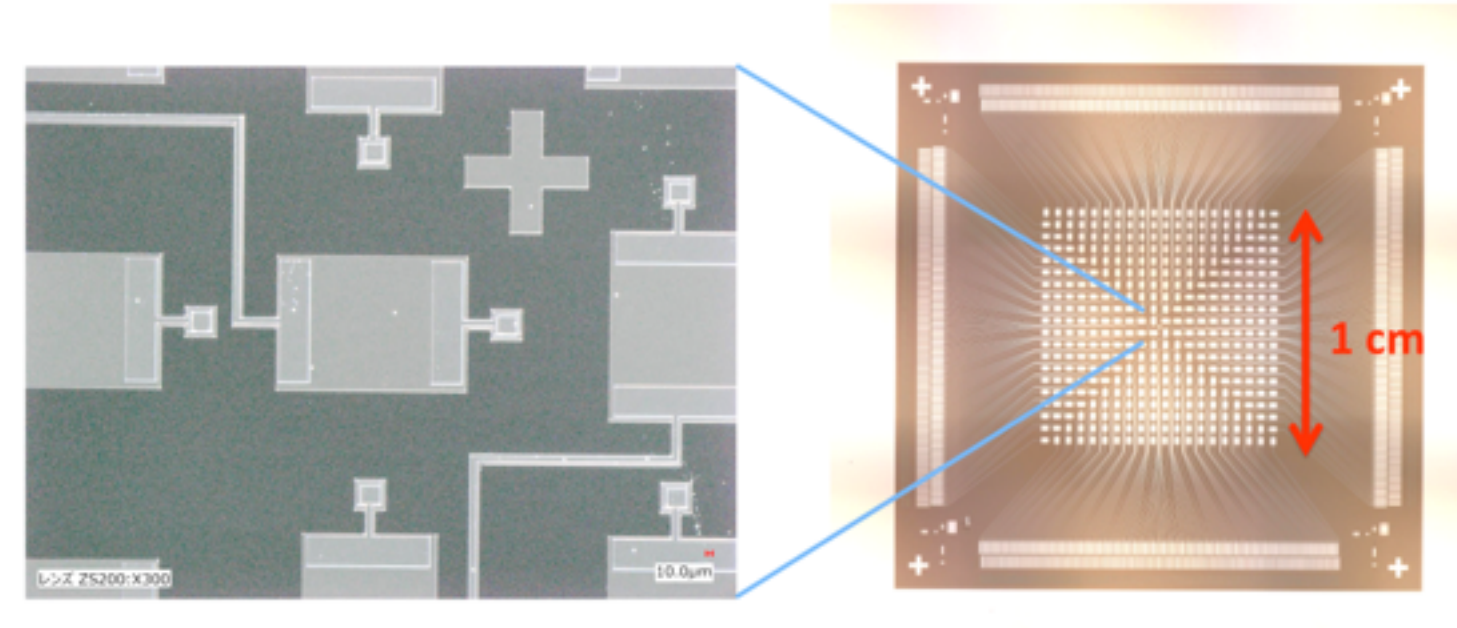


図8: 積層配線基板全体図(TESなし)

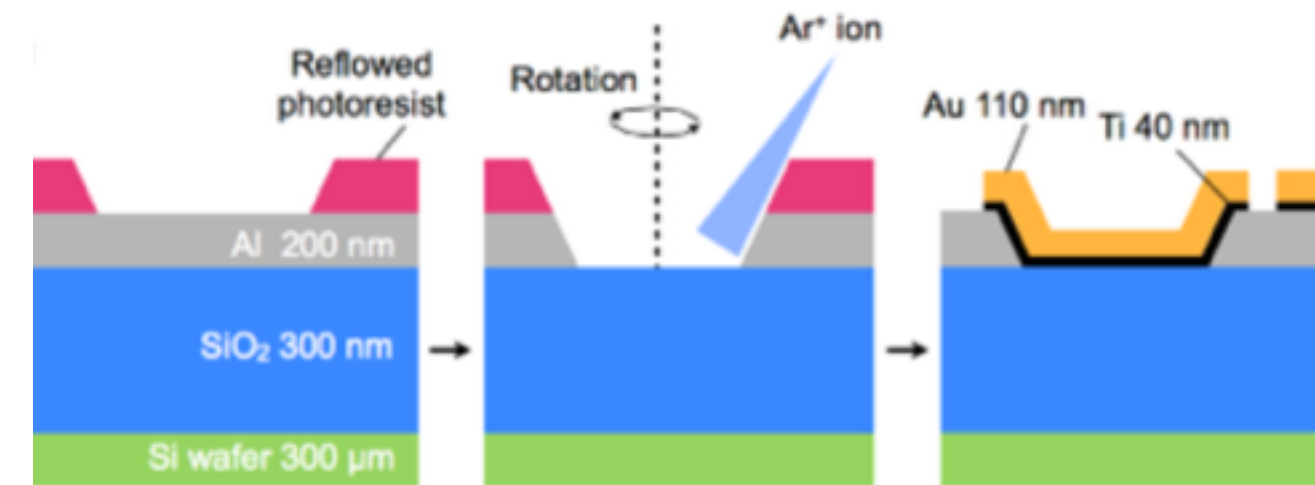


図9: イオンミリングを用いた傾斜型配線

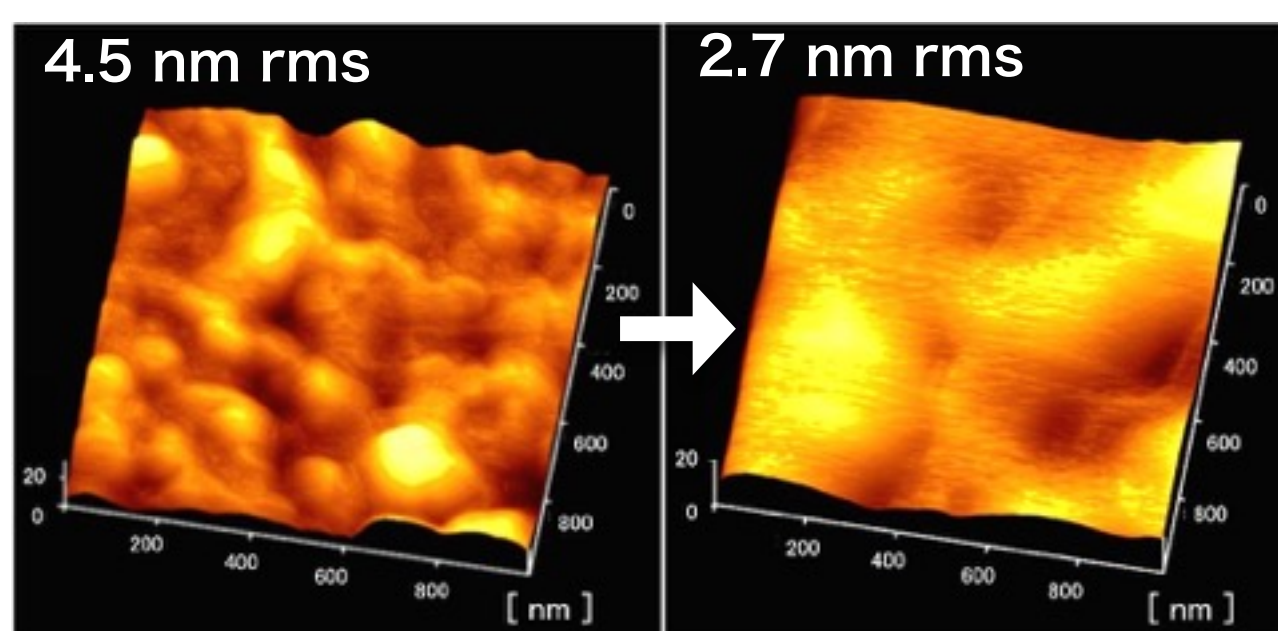


図10: 成膜前基板の表面粗さの比較  
イオンミリングなし(左),イオンミリングあり(右)

Yamada et al. 2014 (JLTP)  
Ezoe et al. 2015 (IEEE TAS)

超伝導遷移測定の結果、TESの転移温度が高く、残留抵抗が大きいなどの問題が明らかになった。調査の結果、基板の表面粗さがTESに引き継がれていることが原因であると判明した。

そこで配線素材をAlからNbに変更し、TESと上部配線のコンタクト部に傾斜を付ける『**イオンミリング**』プロセスの最適化により、粗さを抑えることに成功した(図9,10)。

現在、さらなる表面粗さ改善に向け、イオンミリング+RIE、CMP研磨といった2つの新プロセスを実施中である。

## 5. 開発要素 ② : 高い検出効率の吸収体

TESを1 cm角に400 素子並べただけでは、要求される有効面積を得ることができない。そこで、**マッシュルーム型吸収体**という、素子間のデッドスペースを覆うようにTESよりも大きく張り出した構造を持つ、開口率の飛躍的向上を目的とした吸収体が必要である(図11)。材質としては、低熱容量で高い吸収効率を持ったBiを主とし、熱伝導の良いCuやAuを組み合わせ、**多層膜**とする必要がある。

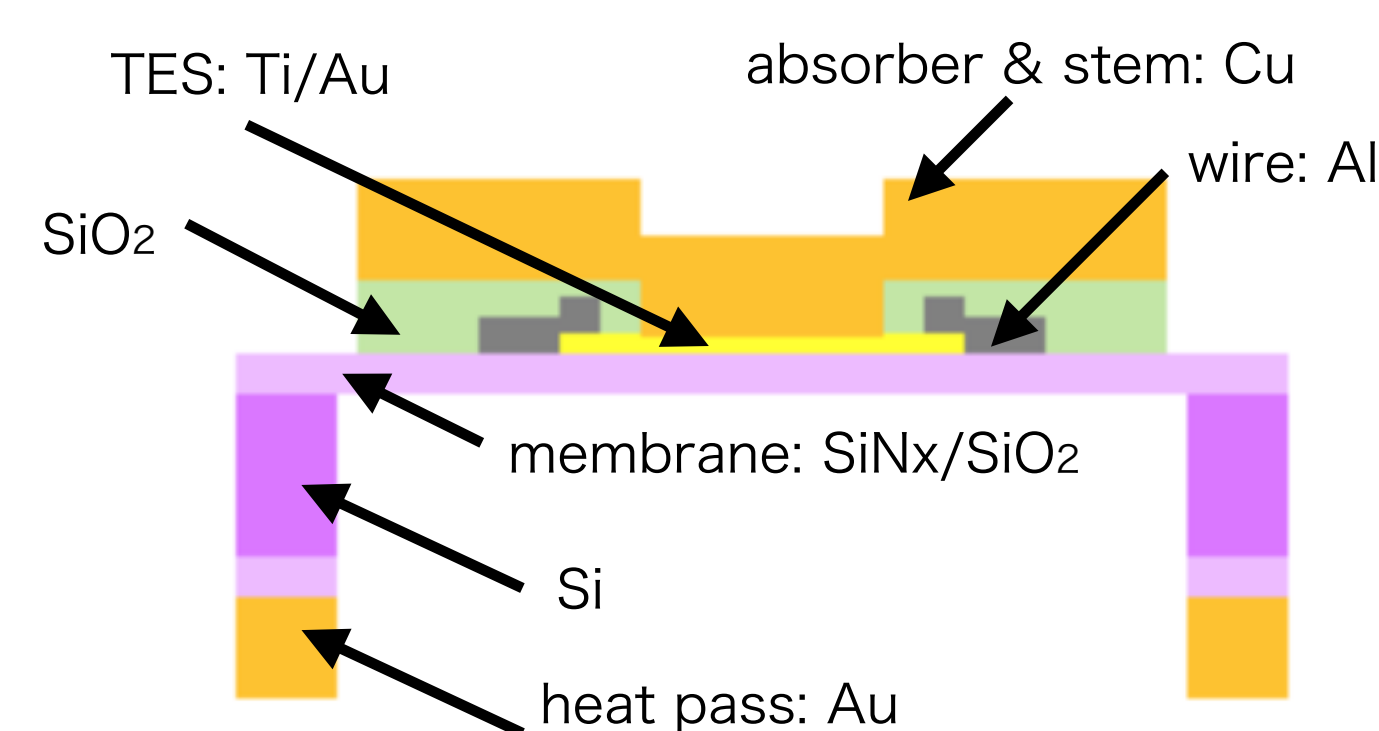


図11: マッシュルーム型吸収体の断面模式図

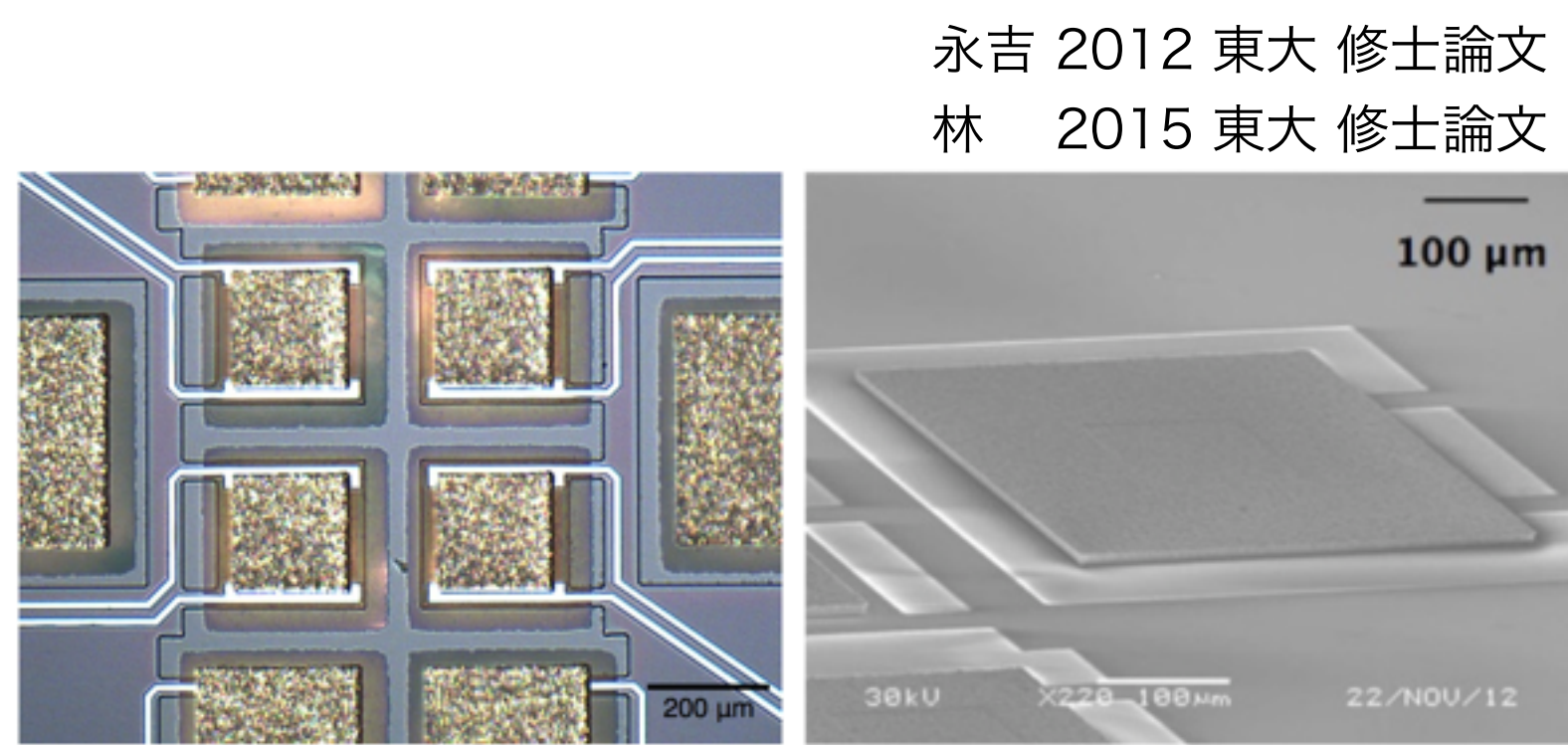


図12: Cu マッシュルーム型吸収体の試作

永吉 2012 東大 修士論文  
林 2015 東大 修士論文

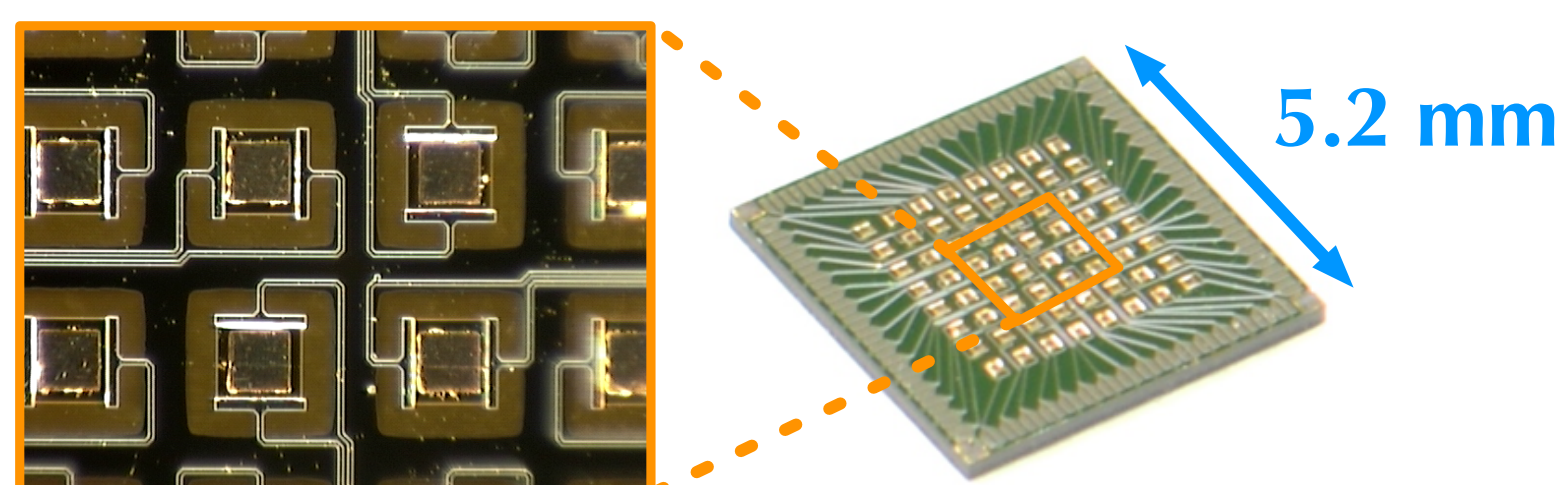


図13 : Cu/Bi吸収体の試作

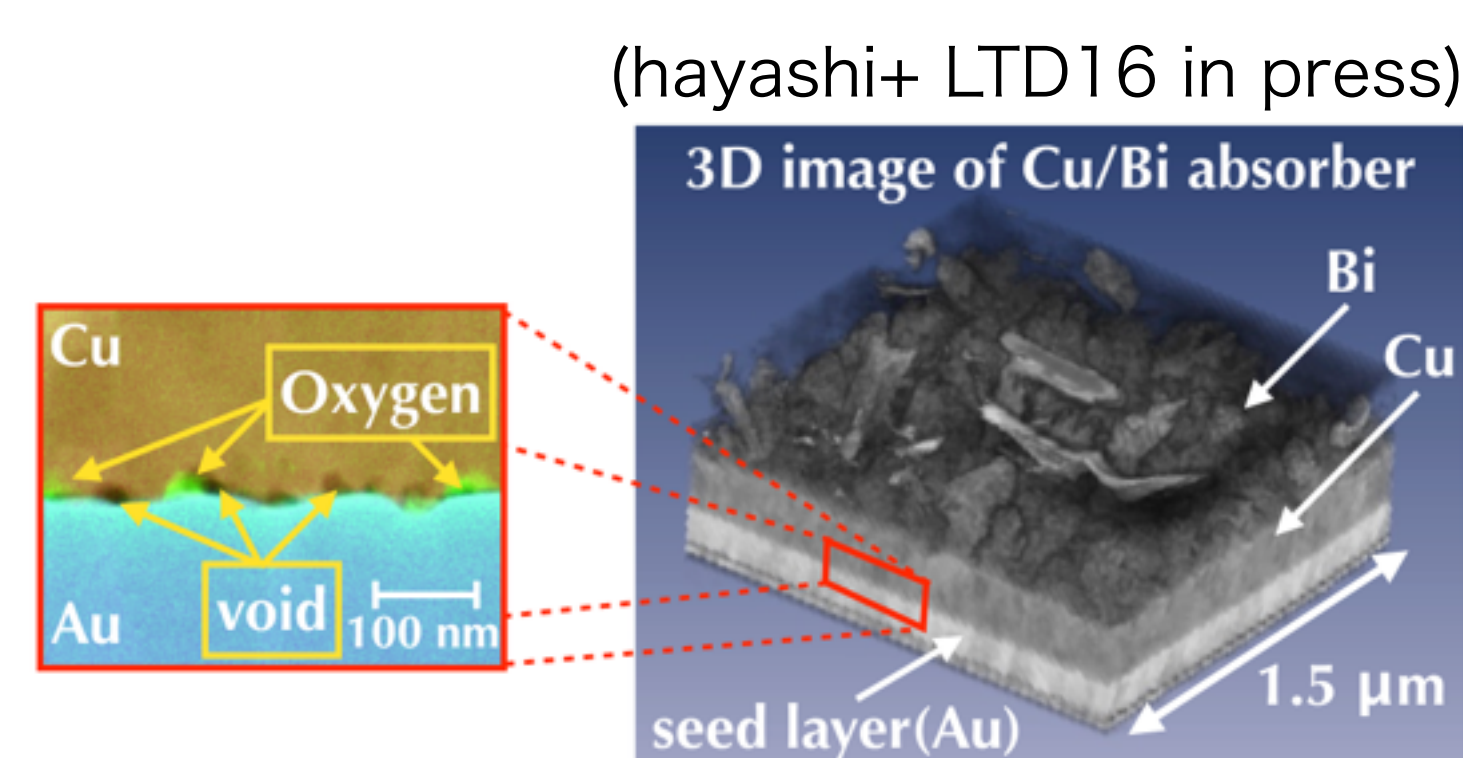


図14 : STEM-TESを用いた元素分析&マッピング(左)  
FIB-SEMによる3次元画像(右)

我々はこれまでに、電析Cuを用いた素子製作プロセスと、400 μm角までのマッシュルーム型吸収体の形成技術を確認している(図12)。

また、電析Cu/Biを用いたstem型の2層薄膜吸収体を製作し(図13)、パルス取得を行った結果、15.06 eV (@5.9 keV)のエネルギー分解能を得た。この結果については、Biの構造の荒さや、界面の密着性を改善することでさらに良くなると考え、現在成膜の条件出しを進めている(図14)。

今後は、Au/Bi や Cu/Bi を用いたマッシュルーム型吸収体を製作していく。