

放射線工学部会セッション

超伝導検出器の最新情報

The latest development of superconducting detector

(2) 超伝導遷移端検出器実用化と最近のトレンド

(2) Application and Recent Research Trend of Transition-Edge Sensors

*前畑 京介

九州大学

1. はじめに

100mK 程度の極低温に保持された吸収体で光子のエネルギーを吸収したときのわずかな温度上昇を、入射光子のエネルギーとして精度よく計測する放射線検出器がマイクロカロリメータである。マイクロカロリメータは、光子エネルギーを温度上昇に変換する吸収体と温度上昇を計測する温度計で構成される。吸収体の材質や形状は、測定する光子エネルギー領域、マイクロカロリメータ素子作成プロセスなどの条件に合わせて設計される。温度計は、吸収体で変換されたわずかな温度上昇をすぐれた感度と精度で計測する重要な構成要素である。超伝導相転移端温度計(TES)は、超伝導薄膜の電気抵抗が示す相転移温度領域における非常に急峻な温度依存性を活用したマイクロカロリメータの温度計の1つである。米国 NASA のグループが開発した TES 型マイクロカロリメータはエネルギーが 1.5 keV の X 線光子を半値全幅 (FWHM) で 0.9 eV という非常に優れたエネルギー分解能を達成している。現在、米国、欧州及び日本を中心に、様々なタイプの TES 型マイクロカロリメータが開発されているが、エネルギーが数 keV 領域の X 線を 10 eV FWHM より優れたエネルギー分解能で計測することは常識となっており、既に実用段階に入っている。

九州大学では、Pu 同位体などの超ウラン元素 (TRU) を非破壊で分析することを目的として、原子力研究開発機構(JAEA)、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) 等と共同で開発した TES 型マイクロカロリメータを活用して、様々な TRU から放射される LX 線のエネルギースペクトルを優れたエネルギー分解能で計測し、TRU の主要な LX 線ピークを明確に同定できることを実証した。また、物質・材料研究機構 (NIMS)、ISAS/JAXA、産業技術総合研究所 (AIST)、(株) 日立ハイテクノロジーズ及び大陽日酸 (株) と共同で、走査透過電子顕微鏡 (STEM) に搭載する TES 型マイクロカロリメータエネルギー分散型スペクトル計測 (TES-EDS) システムの開発研究を進めている。この STEM 搭載 TES-EDS システムでは、ナノスケールの極微領域において 10 eV FWHM より優れたエネルギー分解能での元素分布マップ取得を実証している。本講演では、TES 型マイクロカロリメータによる TRU LX 線スペクトル計測実験及び STEM 搭載 TES-EDS システム開発の現状と実用化に向けた研究のトレンドを報告する。

2. TES 型マイクロカロリメータを用いた TRU LX 線スペクトル測定

核燃料を扱う施設では、Pu 同位体などの TRU を非破壊で迅速に分析定量する技術が必要とされている。TRU は、そのほとんどが α 線を放出する核種であるが、 α 線は透過力が弱く試料に混在する TRU を外部から α 線スペクトル計測により分析することは不可能である。また、Pu 同位体は α 崩壊に伴う γ 線放射率が非常に低く、 γ 線スペクトル計測による微量分析は困難である。一方、Pu からは α 崩壊に伴う LX 線が放射されており、この LX 線を Ge 半導体検出器により検出する非破壊測定法が汚染トラブル時の体外放射線計測 (肺モニタ) に適用されている。しかしながら、Pu の LX 線はエネルギースペクトルに近接して多数のピークを有するので、Ge 半導体検出器のエネルギー分解能では正確な LX 線のピーク同定が困難である。さらに、非破壊測定法における LX 線のピーク強度解析に必要となる LX 線放出率の実験データも十分に整備されていない。そこで、我々は、高分解能を有する検出器である TES 型マイクロカロリメータによる TRU の高エネルギー分解能 LX 線スペクトル計測法について研究を進めている。計測対象となる TRU の LX 線はエネルギーが 10 から 20 keV の領域であり、主要な LX 線ピークを同定するために 100 eV FWHM より優れたエネルギー分解能が要求される。開発した TES 型マイクロカロリメータの TES は Ti/Au の二層薄膜構造

で超伝導転移温度は約 130mK である。また、20keV の X 線光子を 50%の効率で吸収できるように厚さを $5\mu\text{m}$ の Au を吸収体として TES 上に積層している。主要な核燃料物質及び混在する TRU として、 ^{237}Np 、 $^{238/239}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 及び ^{244}Cm それぞれの線源から放射される LX 線のエネルギースペクトルを測定した。図 1 に $^{238/239}\text{Pu}$ 及び ^{241}Am で構成される混合線源から放射される LX 線のエネルギースペクトルの測定結果を例として示す。使用した線源の α 崩壊後の元素である Np と U の LX 線エネルギーと対応づけることができた。図 1 のエネルギースペクトルでは Np- $L_{\beta 1}$ (17.75keV) ピークが 52 eV FWHM で計測されており、個々の主要な LX 線ピークが明確に同定されることがわかる。Np- $L_{\beta 1}$ (17.75keV) ピークの自然幅は 13 eV FWHM を考慮すると、開発した TES 型マイクロカロリメータのエネルギー分解能は 39 eV FWHM であることがわかった。他の線源についても測定で得られた LX 線エネルギースペクトルでは主要な LX 線ピークを明確に同定できることを示し、LX 線スペクトル計測による TRU 非破壊分析が可能であることが実証された。

3. STEM 搭載 TES-EDS システム

ナノスケールでの微細組織観察が可能となった分析型電子顕微鏡では、特性 X 線のエネルギー分散型スペクトル計測(EDS)による元素組成分析の精度向上が求められている。そこで我々は、図 2 に示すように STEM(Hitachi HD-2700)に搭載した TES 型マイクロカロリメータ EDS システムの開発研究を進めている。この開発研究では、STEM 像の元素分布マップ取得のために、TES 型マイクロカロリメータの計数率とエネルギー分解能の目標値を、それぞれ、5 kcps および 10 eV FWHM としている。10 eV FWHM より優れたエネルギー分解能で動作する TES 型マイクロカロリメータでは、検出信号パルスは 100 μs 程度の長さとなる。そこで、5 kcps の計数率を得るために、図 3 に示すような 64 ピクセルアレイの TES 型マイクロカロリメータを開発した。64 ピクセルアレイ TES 型マイクロカロリメータは、強い磁界が存在する STEM 鏡筒の外部に取り付ける必要がある。そのため、STEM 鏡筒内の試料から放射される X 線は、ポリキャピラリー X 線集光レンズにより、64 ピクセルアレイ TES 型マイクロカロリメータへと集光する。64 ピクセルアレイ TES 型マイクロカロリメータ素子の作製及びスノートへの実装技術やポリキャピラリー X 線集光レンズなどの要素技術の開発を進め、STEM 試料から放射される 0.5 から 12 keV のエネルギー範囲の X 線を 8 eV FWHM より優れたエネルギー分解能、5 kcps の計数率での EDS を達成している。図 4 には Si 系電子デバイス試料について 8 eV FWHM のエネルギー分解能で取得した元素分布マップを示す。Si 半導体検出器による EDS では分離

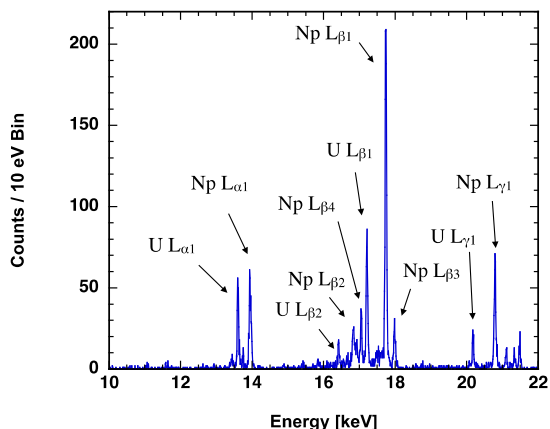


図 1 TES 型マイクロカロリメータで計測した $^{238/239}\text{Pu}$ 及び ^{241}Am で構成される混合線源から放射される LX 線のエネルギースペクトル

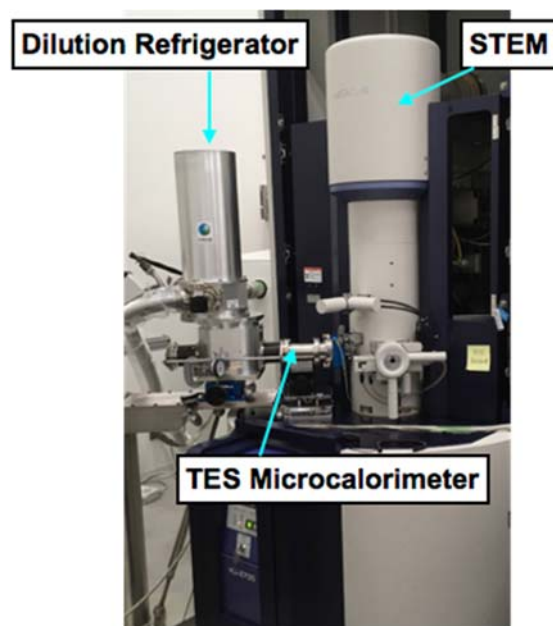


図 2 STEM(Hitachi HD-2700)に搭載した TES 型マイクロカロリメータ EDS システム

できない Si、W 及び Ti の元素を TES 型マイクロカロリメータ EDS では明確に分離することができ、幅 10 nm の Ti の元素分布マップが取得できることを示している。

3. 実用化に向けた研究のトレンド

エネルギーが数 keV 領域の光子を数 eV FWHM のエネルギー分解能で検出する TES 型マイクロカロリメータ素子の設計・作製技術はほぼ確立されている。しかしながら、マイクロカロリメータ素子の実効的熱容量を小さくする必要があるので、単一素子では X 線光子を検出する有感領域を大きくすることができない。さらに、検出信号のパルス長も 100 μ s 程度より短くすることは困難である。このような条件から、TES 型マイクロカロリメータを実用化するためには、多ピクセルアレイ化することで有感領域と計数率を実効的増加することが要求される。TES 型マイクロカロリメータの検出信号は、超伝導量子干渉素子

(SQUID) 増幅器を利用して読み出される。100 mK 領域の極低温に保持して動作する TES 型マイクロカロリメータを多ピクセルアレイ化するためには、TES 型マイクロ

カロリメータと SQUID 増幅器を駆動するために必要な配線数の削減や SQUID 増幅器の発熱の抑制などの課題を克服する必要がある。近年では、多ピクセルアレイ化された TES 型マイクロカロリメータ検出器の信号読み出し方式に関する研究がトレンドとなっている。配線数を削減するために、時間空間信号多重読み出し方式や周波数空間信号多重読み出し方式などが開発されている。一方、これらの信号多重読み出し方式に比べ、2-3 桁広い帯域、多重化数に依存しない信号対雑音比、無発熱 SQUID ベースの極低温回路の特長を持つマイクロ波帯周波数多重読み出し方式

(MW-Mux) は、1 本の信号線で大規模ピクセルの検出信号の同時読み出しへの応用が期待されており、AIST を中心に開発研究が進められている。MW-Mux の詳細については本企画セッションの次の講演「超伝導遷移端検出器のマイクロ波帯多重化読み出し回路」で報告される。

九州大学における TES 型マイクロカロリメータの開発研究では、JAEA 高崎浩司博士、ISAS/JAXA 満田和久教授、NIMS 原徹博士、AIST 日高睦夫博士、(株)日立ハイテクノロジーズ 田中啓一博士及び大陽日酸(株) 山中良浩博士をはじめとする多数の方々に協力を頂いております。ここに感謝申し上げます。

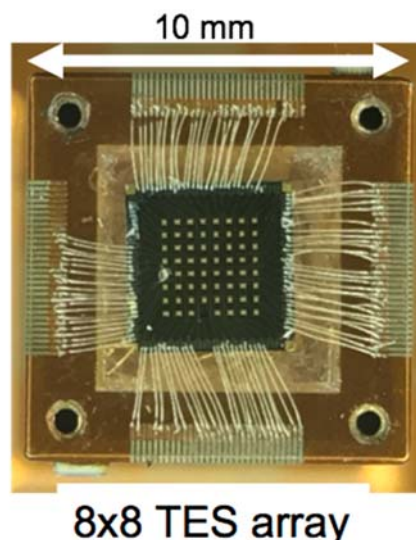


図 3 64 ピクセルアレイ TES 型マイクロカロリメータ素子

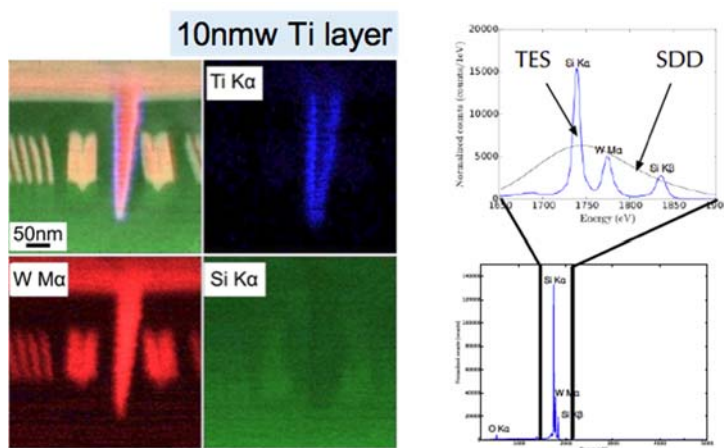


図 4 Si 系電子デバイス試料について 8 eV FWHM のエネルギー分解能で取得した元素分布マップ

*Keisuke Maehata

Kyushu Univ.