

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360397

研究課題名(和文) アルファ線スペクトルとL X線放射強度比を利用した革新的プルトニウム同位体分析法

研究課題名(英文) Innovative analysis method for plutonium isotopes with utilizing the alpha-ray spectroscopy and the intensity ratio of L X-ray emission.

研究代表者

前畑 京介 (Mahatma, Keisuke)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30190317

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：α線のエネルギースペクトルとL X線放射強度比とを利用する、新しいPu同位体分析法を提案した。この方法ではPu同位体やAm-241の崩壊で放射されるL X線の放射率に関する信頼性の高い実験データが必要である。開発したTES型マイクロカロリメータを用いてPu-238/239とAm-241混合線源から放射されるL X線のエネルギースペクトルを計測し、ピーク半値幅50eVより優れたエネルギー分解能が得られた。計測で得られたエネルギースペクトルではL X線の主要なピークが明確に同定され、解析によりL X線放射率に関する信頼性の高いデータが得られることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We proposed a new method of analyzing Pu isotopes with using the energy spectrum alpha-rays and the intensity ratio of L X-rays. It is required to obtain high-reliable data of the emission probability of L X-rays in decay of Pu isotopes and Am-241. Spectroscopic measurements of L X-rays emitted from a mixture source of Pu-238/239 and Am-241 were conducted with TES microcalorimeters which were developed in this work. The value of full-width at half maximum energy resolution was found to be better than 50 eV at peaks appear in experimental energy spectrum of L X-rays. Main peaks of L X-rays were clearly identified in the experimental energy spectrum. High-reliable data of the emission probability of L X-rays in decay of Pu isotopes and Am-241 are expected to be obtained by precise analysis of the experimental energy spectrum.

研究分野：放射線物理・計測学

キーワード：マイクロカロリメータ 超伝導転移端センサー プルトニウム同位体分析 L X線スペクトル計測 高エネルギー分解能

## 1. 研究開始当初の背景

## ①超ウラン元素の高エネルギー分解能 L X 線スペクトル計測の重要性

使用済み核燃料再処理施設やウラン(U)・プルトニウム(Pu)混合酸化物(MOX)燃料製造施設等のPuを取り扱う施設では、Pu同位体分析による計量管理が重要である。ほとんどのPuはエネルギーが4.9~5.8MeVの $\alpha$ 線を放射してUに壊変する。このときに、Pu同位体の $\alpha$ 崩壊生成核種であるUからの $\gamma$ 線放射率は $\alpha$ 崩壊あたり0.05%以下と非常に低い。一方、Pu同位体の $\alpha$ 崩壊生成物のU元素からは、内部転換によりエネルギーが13~17keVのL X線が $\alpha$ 崩壊あたり数%から10%程度の確率で放射される。通常、Pu取り扱い施設では、施設周辺の環境サンプリング試料から微量分析試料を作製し、 $\alpha$ 線スペクトルによりPuの漏洩を監視する。このとき、 $^{241}\text{Pu}$ の $\beta$ 崩壊生成核種である $^{241}\text{Am}$ と $^{238}\text{Pu}$ のそれぞれから放射される最大強度の $\alpha$ 線エネルギーは近接しているため、 $\alpha$ 線スペクトル測定による $^{238}\text{Pu}$ の弁別が困難となるので、煩雑な化学処理により $^{241}\text{Am}$ を分離する。作製した試料についてSi表面障壁型半導体検出器により $\alpha$ 線スペクトルを計測し、微量の核物質を分析する。Pu同位体から放射される $\alpha$ 線のエネルギースペクトルを計測することで、質量数が236、238、241及び242のPu同位体は弁別可能である。しかしながら質量数が239と240のPu同位体から放射される最大強度の $\alpha$ 線エネルギーは、それぞれ5.147MeVと5.159MeVであり、Si表面障壁型半導体検出器により計測されたエネルギースペクトルでは $^{239}\text{Pu}$ と $^{240}\text{Pu}$ の同位体弁別ができない。

Pu同位体や $^{241}\text{Am}$ の $\alpha$ 崩壊生成元素の内部転換により放射される多数のL X線は、個々のL X線の放射強度が同位体により異なる。そこで、Pu同位体試料のL X線エネルギースペクトルを計測して特性L X線の放射強度比を求め、 $\alpha$ 線エネルギースペクトルと組み合わせることで、Pu同位体の高度な分析が可能となる。この方法では、Pu同位体や $^{241}\text{Am}$ のL X線放射率の情報が非常に重要となる。Pu同位体の $\alpha$ 崩壊後に放射されるL X線のエネルギーは13.6 keV、17.4 keVおよび20.5 keVであり、不純物として必ず含まれる $^{241}\text{Am}$ の $\alpha$ 崩壊後に放射されるL X線のエネルギーは13.9 keV、17.8 keVおよび20.8 keVである。ところが、高純度ゲルマニウムやリチウムドリフト型シリコンなどの汎用高精度半導体検出器のエネルギー分解能では、Pu同位体のL X線と $^{241}\text{Am}$ のL X線との弁別が出来ない。このような理由で、Pu同位体と $^{241}\text{Am}$ の $\alpha$ 崩壊に伴うL X線放射率に関する実験データと理論計算値との一致が良くない[1]。超ウラン元素のL X線放射率を高い信頼性で評価するには、L X線を半値幅50eV程度の優れたエネルギー分解能でスペクトル計測し、内部転換によるL X線放射率のデータを蓄積するとともに、理論計算を検証することが必要で

ある。

②TES型マイクロカロリメータによるPu同位体と $^{241}\text{Am}$ 線源のL X線スペクトル計測

近年、高純度Ge半導体検出器より優れた検出感度とエネルギー分解能性能を達成するために、入射X線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超伝導転移端センサー(TES)により精度よく計測するTES型マイクロカロリメータの開発研究が活発に進められ、数keVのエネルギーを有するX線を半値幅2eVより優れたエネルギー分解能で計測可能であることを実証した[2]。米国国立標準技術研究所では、エネルギーが50keVから100keV領域のX線と $\gamma$ 線を検出するために、Sn吸収体を有する多ピクセルTES型マイクロカロリメータシステムを開発している[3]。

先行研究において前畑者等は、エネルギーが10keVから20keVのL X線光子を50%以上の吸収効率で検出するL X線用TES型マイクロカロリメータを開発し、日本原子力研究開発機構(JAEA)核燃料サイクル工学研究所において $^{241}\text{Am}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ 及び $^{239}\text{Pu}$ の $\alpha$ 崩壊に伴い放射されるエネルギーが10keVから20keVのL X線を半値幅50eVのエネルギー分解能でスペクトル計測し、L X線スペクトル計測によるAmとPuの元素分析が可能であることを実証し、 $^{238}\text{Pu}$ と $^{239}\text{Pu}$ それぞれの線源から放射される $L_{\alpha 1}$  X線と $L_{\beta 1}$  X線の強度の違いを実験的に確認した[4]。しかしながら、試作したL X線検出用TES型マイクロカロリメータは有感面積が0.3mm×0.3mmであり、検出効率が非常に小さいために、十分な統計のL X線検出事象数が得られなかった。Pu同位体試料のL X線放射率を高精度で評価するためには、Pu取扱施設において、有感面積が10mm<sup>2</sup>程度のTES型マイクロカロリメータを用いて、試料から放射されるL X線スペクトルを長時間にわたり計測する必要がある。

## 2. 研究の目的

Pu同位体の $\alpha$ 線スペクトルと $\alpha$ 崩壊生成物であるU元素の個々のエネルギーのL X線放射強度比とを利用する、新しいPu同位体分析法を提案する。提案を実証するために、多ピクセルTES型マイクロカロリメータを開発し、Pu同位体試料から放射されるU元素のL X線を半値幅50eVより優れたエネルギー分解能でスペクトル計測し、計測結果を詳細に解析する。さらに、半導体検出器で $\alpha$ 線スペクトル計測を行う。

## 3. 研究の方法

①L X線放射強度比と $\alpha$ 線エネルギースペクトルとを組み合わせたPu同位体分析法  
Pu同位体と $^{241}\text{Pu}$ の $\beta$ 崩壊生成核種である $^{241}\text{Am}$ から放射される $\alpha$ 線のエネルギーを表1に示す。また、Pu同位体や $^{241}\text{Am}$ の $\alpha$ 崩壊生成元素からは、内部転換により、エネルギーが10keVから20keVの領域に多数のL X線が放射される。表2に $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ 及び $^{241}\text{Am}$ の $\alpha$

崩壊生成同位体である  $^{235}\text{U}$ 、 $^{236}\text{U}$  及び  $^{237}\text{Np}$  それぞれから放射される  $L_{\alpha 1}$  と  $L_{\beta 1}$  の  $L$  X 線エネルギーと  $\alpha$  崩壊あたりの放射率の理論値を示すが、理論値と実験値の一致は良くない[1]。以下に、本研究で提案する Pu 同位体が含まれる試料の  $L$  X 線放射強度比と  $\alpha$  線エネルギースペクトルとを組み合わせることで、 $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{239}\text{Pu}$  及び  $^{240}\text{Pu}$  同位体を分析する方法を説明する。

表 1 Pu 同位体と  $^{241}\text{Am}$  から放射される  $\alpha$  線のエネルギー

核種	エネルギー [MeV]	放射率[%]
$^{236}\text{Pu}$	5.77	69
	5.72	31
$^{238}\text{Pu}$	5.49	72
	5.45	28
$^{239}\text{Pu}$	5.15	73
	5.13	15
	5.10	12
$^{240}\text{Pu}$	5.16	75
	5.12	25
$^{242}\text{Pu}$	4.90	76
	4.96	24
$^{241}\text{Am}$	5.49	85
	5.44	15

表 2  $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$  及び  $^{241}\text{Am}$  の  $\alpha$  崩壊に伴い放射される主要な  $L$  X 線エネルギーと  $\alpha$  崩壊あたりの放射率

核種	$L_{\alpha 1}$	$L_{\beta 1}$
$^{239}\text{Pu}$	U- $L_{\alpha 1}$ E=13.62 keV $\epsilon=1.69\%$	U- $L_{\beta 1}$ E=17.22 keV $\epsilon=1.40\%$
	U- $L_{\alpha 1}$ E=13.62 keV $\epsilon=3.30\%$	U- $L_{\beta 1}$ E=17.22 keV $\epsilon=4.11\%$
$^{241}\text{Am}$	Np- $L_{\alpha 1}$ E=13.95 keV $\epsilon=14.9\%$	U- $L_{\beta 1}$ E=17.75 keV $\epsilon=8.37\%$

(1)  $^{238}\text{Pu}$  の分析

Pu 同位体を含む試料について Si 表面障壁型半導体検出器により計測した  $\alpha$  線エネルギースペクトルのピーク強度から  $^{238}\text{Pu}$  と  $^{241}\text{Am}$  の濃度  $N(^{238}\text{Pu}+^{241}\text{Am})$  を求める。次に TES 型マイクロカロリメータにより計測した  $L$  X 線エネルギースペクトルの  $\text{Np-}L_{\alpha 1}$  と  $\text{Np-}L_{\beta 1}$  のピーク強度を解析して  $^{241}\text{Am}$  濃度  $N(^{241}\text{Am})$  を求め、 $N(^{238}\text{Pu}+^{241}\text{Am}) - N(^{241}\text{Am})$  より  $^{238}\text{Pu}$  濃度  $N(^{238}\text{Pu})$  を分析する。このとき、Pu 同位体の  $\alpha$  崩壊に伴い放射される  $U-L_{\alpha 1}$  と  $U-L_{\beta 1}$  のピークを弁別する必要がある。先行研究において前畑者等は、TES 型マイクロカロリメータのエネルギー分解能でピーク弁別が可能であることを実証している[4]。

(2)  $^{239}\text{Pu}$  と  $^{240}\text{Pu}$  の分析

Pu 同位体を含む試料について Si 表面障壁

型半導体検出器による  $\alpha$  線スペクトル計測と上記 (1) の結果より、 $N(^{236}\text{Pu})$ 、 $N(^{238}\text{Pu})$ 、 $N(^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu})$ 、 $N(^{242}\text{Pu})$  が得られる。次に TES 型マイクロカロリメータにより  $L$  X 線スペクトル計測を行う。測定で得られた  $U-L_{\alpha 1}$  と  $U-L_{\beta 1}$  の  $L$  X 線スペクトルのピーク強度は、Pu 同位体の  $\alpha$  崩壊に伴うそれぞれの  $U-L_{\alpha 1}$  と  $U-L_{\beta 1}$  の放射率と同位体濃度でフィッティングできる。 $^{239}\text{Pu}$  と  $^{240}\text{Pu}$  の濃度  $N(^{239}\text{Pu})$ 、 $N(^{240}\text{Pu})$  をパラメータとして  $U-L_{\alpha 1}$  と  $U-L_{\beta 1}$  の  $L$  X 線ピークフィッティングを行い、最も良い一致を示したときが  $N(^{239}\text{Pu})$  と  $N(^{240}\text{Pu})$  の求める値となる。

本研究で提案する  $L$  X 線放射強度比と  $\alpha$  線エネルギースペクトルとを組み合わせ Pu 同位体を分析方法では、Pu 同位体や  $^{241}\text{Am}$  の  $\alpha$  崩壊に伴う  $L$  X 線放射率に関する信頼性の高いデータベースが最も重要となる。

②多ピクセル TES 型マイクロカロリメータ

極低温に保持した吸収体に入射した X 線光子のエネルギーを、エネルギー吸収に伴う温度上昇として精度よく計測する検出器をマイクロカロリメータと呼ぶ。TES 型マイクロカロリメータでは、電気抵抗が超伝導-常伝導相転移領域において非常に急峻な温度依存性を示す超伝導薄膜を温度計として利用する。図 1 に TES 型マイクロカロリメータの X 線光子検出過程を概念的に示す。TES は入力コイル  $L$  と直列に接続され、バイパス抵抗  $R_B$  は TES と  $L$  に並列に接続されている。この回路に直流電流を通電すると、TES 素子内のジュール発熱と温度  $T_b$  の冷熱浴にコンダクタンス  $G$  を介して流れる熱流とのバランスで動作温度が決まる。X 線入射による吸収体の温度上昇  $\Delta T$  は TES の電気抵抗を  $\Delta R$  だけ増加させ、 $L$  を流れる電流変化に比例する磁束変化  $\Delta \phi$  が超伝導量子干渉素子 (SQUID) 増幅器により電圧パルスへと出力される。

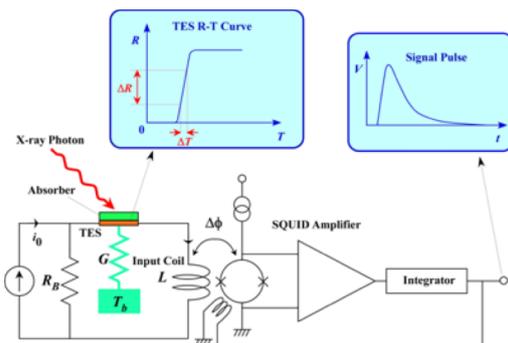


図 1 TES 型マイクロカロリメータの X 線光子検出過程

Pu 同位体と  $^{241}\text{Am}$  の  $\alpha$  崩壊に伴い放射されるエネルギーが 10keV から 20keV の  $L$  X 線ピークを精度よく同定するために、20keV の  $L$  X 線を半値幅 50eV 以下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を開発する。Pu 取扱施設での限られた時間内の計測実験で、スペクトル解析に必要な高い統計

精度の L X 線検出事象数を得るために、ピクセル配置により市販の CdTe 半導体検出器と同等の有感面積多を目指し、エネルギー20keV の X 線光子に対するピクセル当たりの吸収率を 50%以上とする。

#### 4. 研究成果

①単ピクセル TES 型マイクロカロリメータによる  $^{238/239}\text{Pu}$ - $^{241}\text{Am}$  混合線源の L X 線スペクトル計測

先行研究でエネルギーが 10 から 20keV の LX 線光子を半値幅 50eV より優れたエネルギー分解能でスペクトル計測するために、Au/Ti の 2 層薄膜の TES に Au 薄膜を吸収体として積層した構造の単ピクセル TES 型マイクロカロリメータを作製した [4]。面積が  $350 \times 350 \mu\text{m}^2$  の TES は厚さ  $1 \mu\text{m}$  の SiNx 膜上に積層されている。TES 上に積層した Au 吸収体の面積は  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$  で 20keV の X 線光子を 50%の効率で吸収できるように厚さを  $5 \mu\text{m}$  とした。この単ピクセル TES 型マイクロカロリメータチップと SQUID 増幅器チップを取り付けたホルダーの温度を 160mK に保持し、 $^{238}\text{Pu}$  及び  $^{238}\text{Pu}$  標準線源と  $^{241}\text{Am}$  から構成される  $^{238/239}\text{Pu}$ - $^{241}\text{Am}$  混合線源から放射される L X 線のエネルギースペクトルを計測した。図 2 に測定結果を示す。 $^{238/239}\text{Pu}$  と  $^{241}\text{Am}$  のそれぞれの  $\alpha$  崩壊に伴い放射される U L X 線と Np L X 線の  $L_{\alpha}$ ,  $L_{\beta}$  および  $L_{\gamma}$  ピークに対するエネルギー分解能は、それぞれ、100eV、63eV および 67eV であった。しかしながら、図 3 のエネルギースペクトルでは、U L X 線と Np L X 線の主要なピークが明確に同定され、L X 線スペクトル計測による Pu 同位体と  $^{241}\text{Am}$  の元素分析が可能であることを実証した。

② 4 ピクセル配置マッシュルーム吸収体 TES 型マイクロカロリメータの開発

エネルギー分解能を向上すること、X 線に対する有感面積を広くすることを目的として、ピクセル配置のマッシュルーム形状吸収体を有する TES 型マイクロカロリメータを開発した。本研究では、マッシュルーム形状吸収体傘部の変形による検出器性能劣化を防止するために、図 3 に示すような TES と吸収体傘

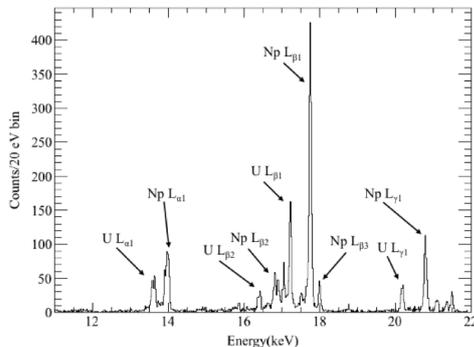


図 2 単ピクセル TES 型マイクロカロリメータで計測した  $^{238/239}\text{Pu}$ - $^{241}\text{Am}$  混合線源から放射される L X 線のエネルギースペクトル

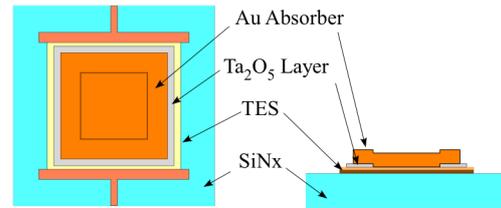


図 3 マッシュルーム吸収体 TES 型マイクロカロリメータの構造

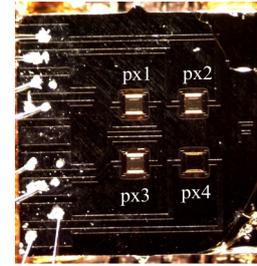


図 4 試作した 4 ピクセル配置マッシュルーム吸収体 TES 型マイクロカロリメータ

表 3 マッシュルーム吸収体 TES 型マイクロカロリメータの素子パラメータ

Elements	Dimensions
Au absorber thickness	$5 \mu\text{m}$
Au absorber surface area	$160 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m}$
Au absorber stem area	$100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> layer thickness	100 nm
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> layer perimeter	$180 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m}$
TES bilayer thickness	120 nm (Ti)/50 nm (Au)
TES surface area	$200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$
SiNx membrane thickness	$1 \mu\text{m}$
SiNx membrane surface area	$400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$

表 4 TES 転移温度  $T_c$ 、転移温度幅  $\Delta T_{trn}$ 、常伝導抵抗  $R_n$  および温度 128mK における TES 感度  $\alpha = d(\ln R)/d(\ln T)$  の測定値

px	$T_c$ (mK)	$\Delta T_{trn}$ (mK)	$R_n$ (m $\Omega$ )	$\alpha$ at 128 mK
1	128.4	2.8	115	102
2	128.0	2.8	130	160
3	127.6	2.4	125	260

部との間に挿入した絶縁体層による吸収体傘部の支持構造を考案した。超伝導薄膜温度センサである TES は SiNx 膜上に積層される。TES は Ti/Au の 2 層から構成され、2 層の近接効果を利用して超伝導転移温度を 100mK 近傍に設定している。TES の中央部には、マッシュルーム形状吸収体の柄部となる正方形断面の Au が積層される。マッシュルーム形状吸収体傘部と TES 外縁部との間には、厚さ 100nm の Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 層が挿入されている。図 4 には試作した 4 ピクセル配置マッシュルーム吸収体 TES 型マイクロカロリメータの写真を示す。ピクセルの素子パラメータを表 3 に示す。図 4 の px4 は吸収体が剥離したため、検出器として使用できなかった。表 4 には px1-px3 について測定した TES 転移温度  $T_c$ 、転移温度幅  $\Delta T_{trn}$ 、常伝導抵抗  $R_n$  および温度 128mK にお

る TES 感度  $\alpha = d(\ln R)/d(\ln T)$  の値を示す。  
 ③マッシュルーム吸収体 TES 型マイクロカロリメータによる  $^{238/239}\text{Pu}-^{241}\text{Am}$  混合線源の L X 線スペクトル計測

試作した 4 ピクセル配置マッシュルーム吸収体 TES 型マイクロカロリメータによる  $^{238/239}\text{Pu}-^{241}\text{Am}$  混合線源の L X 線スペクトル計測を実施した。測定では、4 ピクセル配置マッシュルーム吸収体 TES 型マイクロカロリメータチップと SQUID 増幅器チップを取り付けたホルダーの温度を 80mK に保持した。TES 型マイクロカロリメータの駆動および信号読み出し回路系は単ピクセル対応であるため、多ピクセル同時動作試験は実施できなかった。そこで、 $^{241}\text{Am}$  線源の L X 線スペクトル計測で  $\text{Np } L_{\beta 1}$  ピークについて半値幅 33eV のエネルギー分解能が得られた px2 から検出信号を読みだした。計測で得られた  $^{238/239}\text{Pu}-^{241}\text{Am}$  混合線源から放射される L X 線のエネルギースペクトルを図 5 に示す。図 5 のエネルギースペクトルでは、U L X 線と Np L X 線の主要なピークは半値幅 50 eV のエネルギー分解能で明確に同定された。U と Np の L X 線放射の自然幅を考慮してピーク解析を行って評価した TES 型マイクロカロリメータのインパルス応答に対するエネルギー分解能を表 5 に示す。L X 線放射率に関する信頼性の高いデータの評価値を得るため、エネルギースペクトルを解析中である。

<引用文献>

- [1] M. C. Lépy et al., Nucl. Instr. Meth., A353 (1994) 10-15.
- [2] S.R. Bandler et al., J. Low Temp. Phys., 151 (2008) 400-405.
- [3] M. K. Bacrania et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 56 (2009) 2299-2302
- [4] K. Maehata et al., J. Nucl. Sci. Tech., 47 (2010) 308-310.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ①M. Maeda, K. Maehata, N. Iyomoto, K. Ishibashi, K. Takasaki, K. Nakamura, K. Aoki, K. Mitsuda, K. Tanaka, Y. Yamanaka, Peak identification of L X-ray spectra of elemental Np and U, Journal of Nuclear Science and Technology, 査読有, Vol. 52, 2015, pp. 509-513  
DOI:10.1080/00223131.2014.957744
- ②K. Maehata, M. Maeda, N. Iyomoto, K. Ishibashi, K. Nakamura, K. Aoki, K. Takasaki, K. Mitsuda, K. Tanaka, Response of a Superconducting Transition-Edge Sensor Microcalorimeter with a Mushroom-shaped Absorber to L X-rays Emitted by Transuranium Elements, IEICE Transactions on Electronics, 査読有, Vol. E98-C, 2015, pp. 178-185  
DOI: 10.1587/transele. E98. C. 178

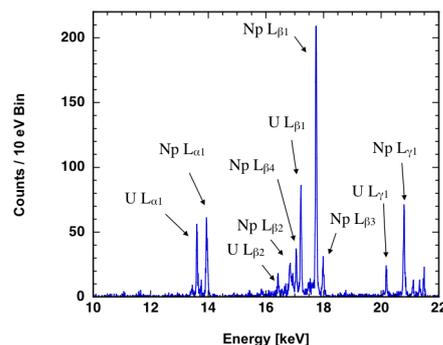


図 5 マッシュルーム吸収体 TES 型マイクロカロリメータで計測した  $^{238/239}\text{Pu}-^{241}\text{Am}$  混合線源の L X 線エネルギースペクトル

表 5 U と Np 元素の L X 線レベル、自然幅と TES 型マイクロカロリメータのインパルス応答に対するエネルギー分解能

Line	E (keV)	natural width (eV)	$\Delta E$ (eV)
U $L_{\alpha 1}$	13.618	11.7	$31.5 \pm 2.3$
U $L_{\beta 1}$	17.222	13.5	$39.2 \pm 1.3$
U $L_{\gamma 1}$	20.169	14.5	$33.5 \pm 2.6$
Np $L_{\alpha 1}$	13.946	11.8	$31.5 \pm 2.3$
Np $L_{\beta 1}$	17.751	13.4	$39.2 \pm 1.3$
Np $L_{\gamma 1}$	20.784	15.9	$33.5 \pm 2.6$

- ③K. Maehata, N. Iyomoto, M. Maeda, S. Ezaki, A. Takano, S. Matsumura, T. Hara, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, K. Tanaka, Development of 4-Pixel-Array TES Microcalorimeters with Mushroom-Shaped Absorbers with Insulating Layers Supporting Overhang Regions, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, Vol. 176, 2014, pp. 578-583  
DOI 10.1007/s10909-014-1113-9

- ④M. Maeda, K. Maehata, N. Iyomoto, K. Ishibashi, K. Takasaki, K. Aoki, K. Mitsuda, K. Tanaka, Spectroscopic Measurement of L X-rays Emitted by Transuranium Elements by Using TES Microcalorimeter, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, Vol. 176, 2014, pp. 1046-1052  
DOI: 10.1007/s10909-013-1012-5

- ⑤Makoto Maeda, Keisuke Maehata, Naoko Iyomoto Kenji Ishibashi, Koji Takasaki, Keisuke Nakamura, Katsunori Aoki, Kazuhisa Mitsuda, Keiichi Tanaka, SPECTROSCOPIC MEASUREMENT OF L X-RAYS EMITTED BY TRANSURANIUM ELEMENTS BY TES MICROCALORIMETER, Radiation Detectors and Their Uses, High Energy Accelerator Research Organization KEK Proceedings, 査読有, 2013-9, 2014, pp. 63-71

[学会発表] (計 11 件)

- ①杉本哲也, 前畑京介, 伊豫本直子, 石橋健二, 中村圭佑, 森下祐樹, 高崎浩司, 満田和久, TES 型マイクロカロリメータを用い

た超ウラン元素 L X 線の分析, 日本原子力学会 2016 年春の年会, 2016 年 3 月 27 日, 東北大学川内キャンパス(仙台市)

②前畑京介, 杉本哲也, 伊豫本直子, 石橋健二, 中村圭佑, 森下祐樹, 高崎浩司, 満田和久, TES 型マイクロカロリメータによる<sup>244</sup>Cm 線源の L X 線スペクトル計測, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 19 日, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京都)

③T. Sugimoto, K. Nakamura, M. Maeda, K. Maehata, N. Iyomoto, K. Ishibashi, K. Takasaki, K. Mitsuda, ANALYSIS OF L X-RAY SPECTRA OF TRANSURANIUM ELEMENTS MEASURED BY A MICROCALORIMETER, The First Symposium on Radiation Detectors and Their Uses, 2016 年 1 月 19 日, 高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパス(つくば市)

④中村圭佑, 前田 亮, 森下祐樹, 高崎浩司, 前畑京介, 伊豫本直子, 石橋 健二, 満田和久, TES 型マイクロカロリメータを用いた超ウラン元素 LX 線スペクトル測定, 日本原子力学会 2015 年秋の大会, 2015 年 9 月 10 日, 静岡大学静岡キャンパス(静岡市)

⑤K. Nakamura, M. Maeda, K. Maehata, N. Iyomoto, K. Ishibashi, K. Takasaki, K. Mitsuda, Development of a Microcalorimeter for Measurement of L X-Rays Emitted from Transuranium Elements, 2014 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference with the 21st Symposium on Room-Temperature Semiconductor X-Ray and Gamma-Ray Detectors, 2014 年 11 月 10 日, Washington State Convention Center (米国シアトル市)

⑥中村圭佑, 高崎浩司, 青木克憲, 前田 亮, 前畑 京介, 伊豫本直子, 石橋健二, 満田和久, 田中啓一, TES 型マイクロカロリメータを用いた超ウラン元素 LX 線スペクトル高精度分光分析に係る研究, 日本原子力学会 2014 年春の年会, 2014 年 3 月 27 日, 東京都市大学世田谷キャンパス(東京都)

⑦前田 亮, 前畑京介, 伊豫本直子, 石橋 健二, 高崎浩司, 中村圭佑, 青木克憲, 満田和久, 田中啓一, プルトニウム定量評価のための超ウラン元素 LX 線スペクトルの解析, 2013 年第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 2013 年 9 月 16 日, 同志社大学京田辺キャンパス(京田辺市)

⑧前田 亮, 前畑京介, 伊豫本直子, 石橋 健二, 高崎浩司, 中村圭佑, 青木克憲, 満田和久, 田中啓一, 高分解能超ウラン元素 LX 線スペクトルの解析, 日本原子力学会 2013 年秋の大会, 2013 年 9 月 5 日, 八戸工業大学(八戸市)

⑨M. Maeda, K. Maehata, N. Iyomoto, K. Ishibashi, K. Takasaki, K. Nakamura, K. Aoki, K. Mitsuda, K. Tanaka, Spectroscopic measurement of L X-rays emitted by transuranium elements by using

TES Microcalorimeter, 15th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2013 年 6 月 28 日, カリフォルニア工科大学(米国パサデナ市)

⑩前田 亮, 前畑京介, 伊豫本直子, 石橋健二, 高崎浩司, 中村圭佑, 青木克憲, 満田和久, 田中啓一, TES 型マイクロカロリメータによる超ウラン元素 LX 線分光分析, 2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2013 年 3 月 30 日, 神奈川工科大学(厚木市)

⑪前田 亮, 前畑京介, 伊豫本直子, 石橋健二, 高崎浩司, 中村圭佑, 青木克憲, 満田和久, 田中啓一, TES 型マイクロカロリメータを用いた超ウラン元素 LX 線分光分析, 日本原子力学会 2013 年春の年会, 2013 年 3 月 27 日, 近畿大学東大阪キャンパス(東大阪 市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

前畑 京介 (MAEHATA, Keisuke)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 30190317

### (2) 研究分担者

高崎 浩司 (TAKASAKI, Koji)  
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
構・大洗研究開発センター安全管理部・次長  
研究者番号: 00446444

### (3) 研究分担者

満田 和久 (MITSUDA, Kazuhisa)  
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・  
宇宙科学研究所・教授  
研究者番号: 80183961

### (3) 連携研究者

伊豫本 直子 (IYOMOTO, Naoko)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 40508173

### (4) 連携研究者

執行 信寛 (SHIGYO, Nobuhiro)  
九州大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 40508173