

【本件リリース先】

4月14日（水）15:00

（資料配布）

茨城県政記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会、  
経済産業記者会、九州大学記者クラブ

平成22年4月14日



独立行政法人 日本原子力研究開発機構

国立大学法人 九州大学

エスアイアイ・ナノテクノロジー 株式会社

## プルトニウム及びアメリシウムの LX 線を高分解能で測定（お知らせ）

独立行政法人日本原子力研究開発機構（理事長 岡崎俊雄、以下「原子力機構」という。）の東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所放射線管理部、国立大学法人九州大学（総長 有川節夫、以下「九州大学」という。）、エスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社（社長 北野進、以下「SII ナノテック」という。）の共同研究グループは、超ウラン元素（TRU）<sup>(1)</sup>測定用の超伝導相転移端温度計（TES）型マイクロカロリメーター<sup>(2)</sup>を開発し、世界に先駆けてプルトニウム（Pu）<sup>(3)</sup>及びアメリシウム-241（<sup>241</sup>Am）<sup>(4)</sup>から放出されるエルエックス線（LX 線）<sup>(5)</sup>のスペクトル<sup>(6)</sup>を従来の放射線測定器の約 1/5 の高分解能で測定しました。

核燃料物質<sup>(7)</sup>である Pu などの超ウラン元素からはアルファ（ $\alpha$ ）線<sup>(8)</sup>とともに微量の LX 線も放出されています。現在の Pu の分析では  $\alpha$  線測定法や質量分析法<sup>(9)</sup>を使用していますが、これらの方法では、Pu などを化学的に分離して測定する必要があります。一方、LX 線の測定であれば、物質の外側から非接触で測定することができます。しかしながら、従来の放射線測定器ではエネルギー分解能<sup>(10)</sup>が十分ではないため、Pu のそれぞれの LX 線や核燃料物質中に Pu と同時に存在する <sup>241</sup>Am の LX 線と識別ができず、一部の限られた用途の測定にしか利用されていませんでした。今回、原子力機構は、九州大学との共同研究により、超伝導<sup>(11)</sup>を利用した高分解能の放射線測定器である TES 型マイクロカロリメーターを超ウラン元素測定用に開発し、核燃料サイクル工学研究所において Pu の測定実験を行いました。実験の結果、従来の放射線測定器よりも高分解能（半値幅<sup>(12)</sup>：約 50eV）のスペクトルを測定し、Pu と <sup>241</sup>Am が識別できることを確認しました。

本研究成果は、超ウラン元素の LX 線の放出率<sup>(13)</sup>に関する物理学的な基礎データの整備への適用が期待できます。また、測定装置をスケールアップすることにより、これまでの Pu 測定では困難であった非破壊かつ非接触の測定によって、分析作業の簡便化、迅速化、被ばく線量の低減が期待できます。

本研究は、原子力機構の先行基礎工学研究課題<sup>(14)</sup>として原子力機構と九州大学との共同研究により実施され、その成果は、日本原子力学会誌（英文誌）2010 年 3 月号に掲載されました。

以上

- [Pu 及び <sup>241</sup>Am の LX 線を高分解能で測定](#)
- [補足説明](#)
- [用語説明](#)

【本件に関する問い合わせ先】

独立行政法人日本原子力研究開発機構

(研究内容) 東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部

線量計測課 課長 田子 格 TEL : 029-282-1861

(報道対応) 広報部 次長 須賀 信一 TEL : 03-3592-2346

国立大学法人九州大学

(研究内容) 大学院工学研究院 エネルギー量子工学部門

准教授 前畑 京介 TEL : 092-802-3481

(報道対応) 広報室 TEL : 092-642-2106

エスアイアイ・ナノテクノロジー 株式会社

(研究内容) 研究開発部 主任 田中 啓一 TEL : 0550-76-5009

(報道対応) セイコーインスツル株式会社

総合企画本部 秘書広報部 TEL : 043-211-1185

# 238Pu、239Pu及び241AmのLX線を高分解能で測定 —超伝導を利用した超ウラン元素の非破壊・非接触測定—



前畑京介  
九州大学准教授



中村圭佑  
原子力機構



高崎浩司  
原子力機構

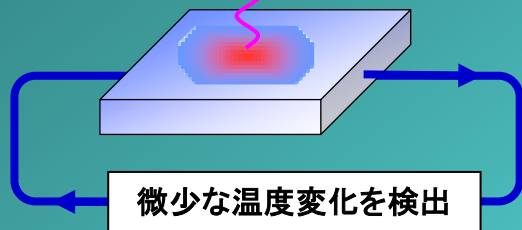


田中啓一  
SIITナノロジー

超伝導相転移端温度計( TES )型マイクロカロリメーターを用いてPu等から放出されるX線(10keV~20keVのLX線)のスペクトルを高分解能で測定

PuからのLX線

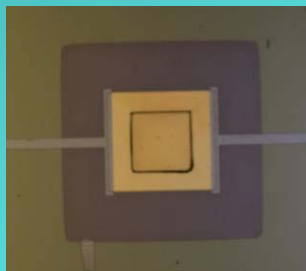
TES型マイクロカロリメーター  
約150mK (-273.0℃)に冷却



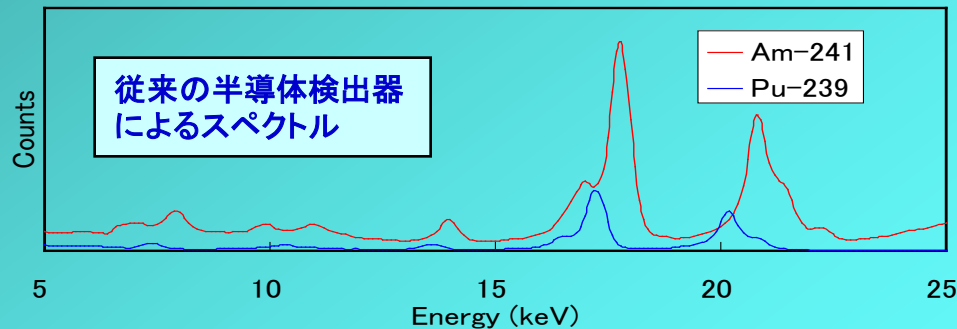
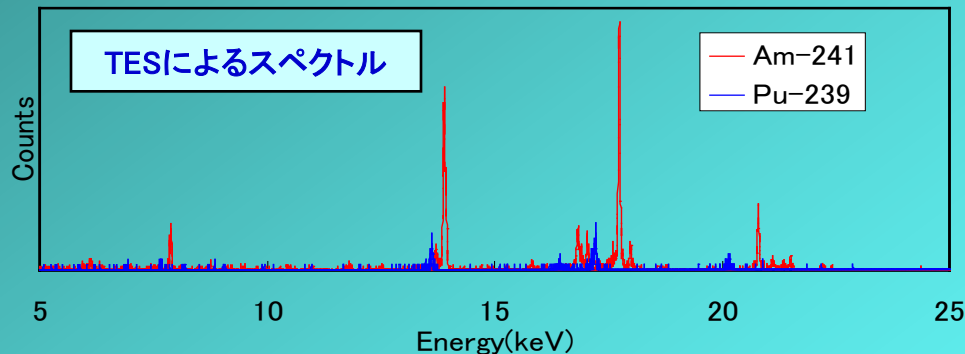
◆ わずかな温度Tの上昇で電気抵抗Rが急激に変化する現象を利用して微小なX線のエネルギーを測定

◆ 従来の半導体検出器の約1/5のエネルギー分解能

LX線測定用TESを設計・製作  
吸収効率(20keV光子): 約50%  
材質: Au, Ti



エスアイアイ・ナノテクノロジー(株)



## 研究成果

- 238Pu、239Pu及び241AmからのLX線を高分解能(半値幅: 約 50 eV)で測定し、PuとAmのLX線が分離測定できることを確認しました。LX線の高分解能測定は世界でも例がありません。
- Puの非破壊・非接触測定により分析作業の簡便化・迅速化・被ばく低減が期待できます。
- 更に、Puだけでなく、超ウラン元素のNp-237などの簡易な分析への適用も期待できます。

## 補足説明

### 【背景】

核燃料物質のPuなどの超ウラン元素からは $\alpha$ 線とともに微量のLX線が放出されています。現在のPuの分析では $\alpha$ 線測定や質量分析法で測定していますが、 $\alpha$ 線は物質中の透過力<sup>(15)</sup>が弱いため、試料を化学的に処理する必要があります。また質量分析法においてもPuなどを分離する必要があります。

一方、LX線は $\alpha$ 線に比べ物質を透過しやすいため、物質の外側からLX線を測定することができます。しかしながら、半導体検出器<sup>(16)</sup>などの従来の放射線測定器ではエネルギー分解能が十分ではないため、PuのX線や核燃料物質中にPuと同時に存在する $^{241}\text{Am}$ からのLX線との識別ができませんでした。このため、LX線によるPuの測定は肺モニタ<sup>(17)</sup>などの限られた用途の測定にしか利用されていませんでした。また、PuのLX線に関する高分解能の実測データがないことから、LX測定での精度向上のために必要なLX線放出率のデータが不足していました。

このように、化学処理などで時間と手間のかかる $\alpha$ 線測定や質量分析に代わって、LX線などの測定による非破壊・非接触のPuの分析法が望まれています。そのためにはエネルギー分解能の優れた放射線測定器とともに、高精度のLX線放出率のデータ整備が必要です。

### 【研究内容】

超伝導を利用したTES型マイクロカロリメーターは、従来の半導体検出器よりもエネルギー分解能に優れた放射線検出器で、X線望遠鏡<sup>(18)</sup>などへの適用のために世界で研究開発が進められています。

TES型マイクロカロリメーターは、特定の温度範囲においてわずかな温度上昇で電気抵抗が急激に変化する現象を利用し、微少なX線などのエネルギーを測定します(図1)。TES型カロリメーターのセンサー部は約150mK<sup>(19)</sup>(-273.0°C)の超低温に冷却され、センサー部に光子が入射すると温度が上昇し、電気抵抗が急激に変化します。この急激な電気抵抗の変化のために電流の流れが変化し、この微少な電流の変化を検出することによって光子のエネルギーを測定することができます。

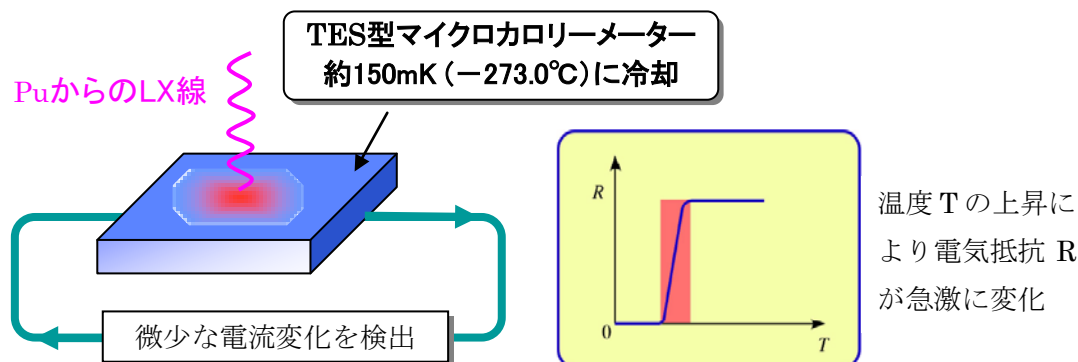
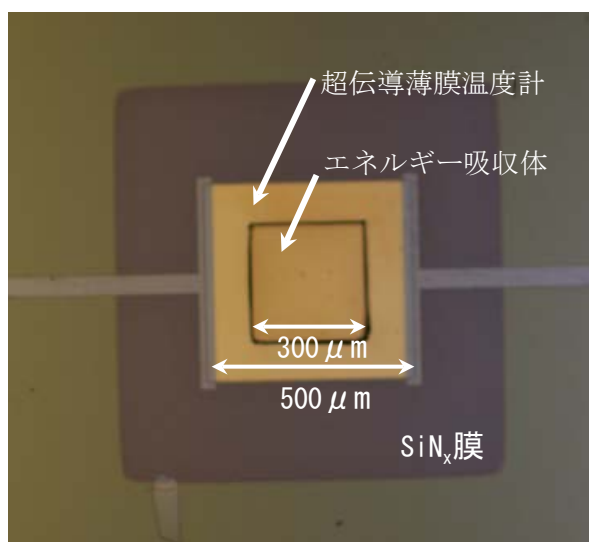


図1 TES型マイクロカロリメーターの原理

今回、超ウラン元素から放出される LX 線測定のために、10～20 keV<sup>(20)</sup> のエネルギーの LX 線測定に最適化した TES 型マイクロカロリメーター(図2)を設計・試作しました。これまでの TES 型マイクロカロリメーターの研究は 10keV 以下や 100keV 付近のエネルギーの光子の測定についてなされており、100 keV 付近の Pu の  $\gamma$  線測定に係る研究<sup>(21)</sup>はありましたが、本研究での LX 線のエネルギー(10～20 keV)の測定に着目した研究開発はなされていませんでした。



写真提供 エスアイアイ・ナノテクノロジー(株)

図2 試作した TES 型マイクロカロリメーター

本研究では、開発した TES 型マイクロカロリメーターを使って Pu(<sup>238</sup>Pu、<sup>239</sup>Pu) 及び <sup>241</sup>Am の線源から放射される LX 線の測定実験を実施しました。測定実験の結果、半値幅約 50 eV のエネルギー分解能でスペクトルを測定し、それぞれの LX 線を分離測定することができました(図3a)。従来の半導体検出器のエネルギー分解能は最高でも約 250eV(図3b)ですので、約 1/5 の高精細な LX 線のスペクトルを測定できたことになります。このような高分解能での Pu の LX 線の測定は世界でも例がありません。

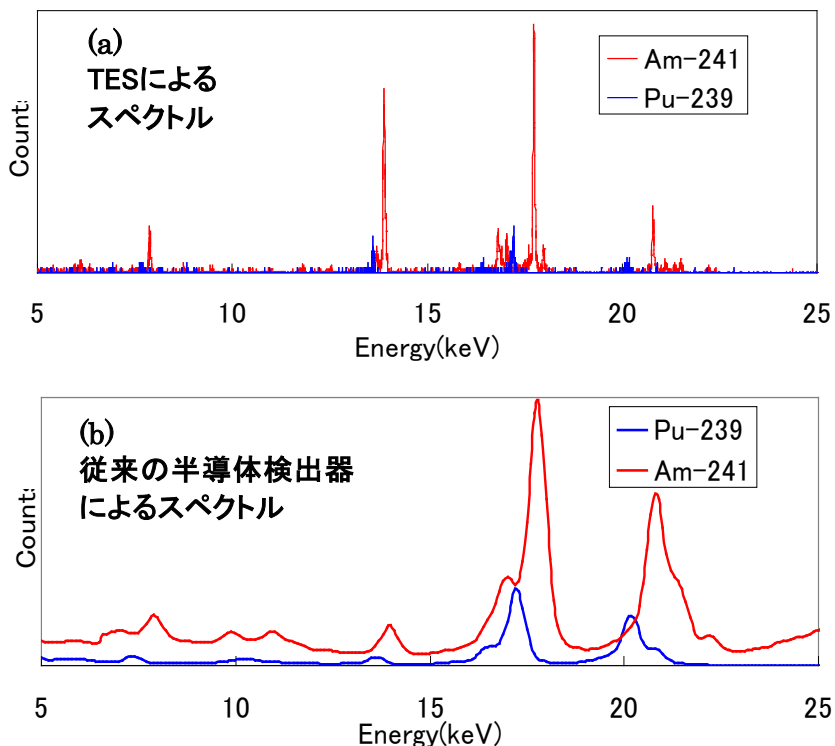


図3 プルトニウム等の測定試験結果

- (a) TES 型マイクロカロリメーターによるスペクトル
- (b) Ge 半導体検出器によるスペクトル

**【成果の波及効果】**

本研究の成果により超ウラン元素の LX 線の放出率に関する物理学的データの充実及び精度の向上が期待できます。また、本測定システムをスケールアップすることにより、従来の半導体検出器では困難であった LX 線の分析による非破壊かつ遠隔の測定によって、Pu の分析作業の簡便化、迅速化、被ばく線量の低減が期待できます。更に、<sup>237</sup>Np、<sup>244</sup>Cm<sup>(22)</sup> の測定にも対応でき、TRU の非破壊かつ非接触の分析測定への適用も可能となるものと期待されます。

**【成果のポイント】**

- (1) Pu などの超ウラン元素の LX 線測定用の TES 型マイクロカロリメーターを開発
- (2) 測定実験の結果、従来の測定器の約 1/5 である約 50eV の高分解能で測定
- (3) 従来の放射線測定器では不可能だった Pu と <sup>241</sup>Am を識別できることを確認
- (4) 本研究成果により Pu の基礎物性データの充実や簡便かつ迅速な測定システムなどへの発展が期待できます。

#### 【共同研究機関の役割】

本研究は、原子力機構の先行基礎工学研究として、原子力機構及び九州大学の2機関が共同して実施しました。九州大学はTES型マイクロカロリメーターの設計製作及び試験調整を、原子力機構は開発したTES型マイクロカロリメーターによるPu測定実験を担当しました。また、Puの測定実験においては、TES型マイクロカロリメーターのメーカーであるSIIナノテクが協力しました。

## 用語説明

(1) 超ウラン元素(TRU)

ウランの原子番号である 92 よりも原子番号の大きい元素。プルトニウムやアメリシウム、ネプツニウム、キュリウムなどがあります。TRU は transuranium の略。

(2) 超伝導相転移端温度計(TES)型マイクロカロリメーター

超伝導を利用して X 線などの微小な熱量を測定する熱量計。特に微小な熱量を測定する熱量計をマイクロカロリメーターといいます。

TES は Superconducting Phase Transition Edge Sensor の略。

(3) プルトニウム(Pu)

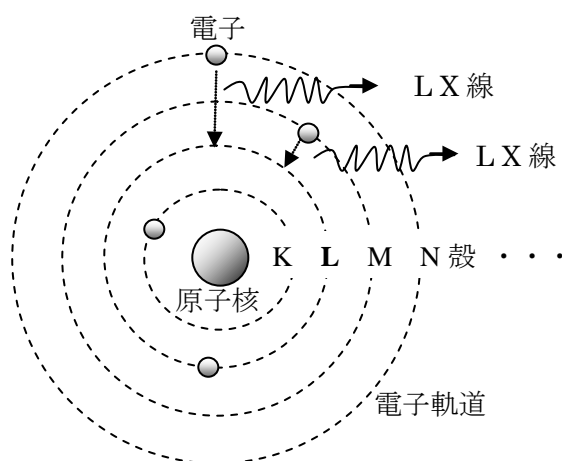
原子番号 94 の元素。元素記号は Pu。核燃料物質として高速増殖炉やプルサーマル発電炉に用いられます。核燃料物質中には Pu 同位体として  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  及び  $^{242}\text{Pu}$  が主に存在します。

(4) アメリシウム-241 ( $^{241}\text{Am}$ )

アメリシウムは原子番号 95 の元素。元素記号は Am。 $^{241}\text{Pu}$  の  $\beta$  崩壊から生成されるため、核燃料物質中では Pu とほぼ同時に存在します。

(5) エルエックス線(LX 線)

X 線は軌道電子の遷移を起源とする電磁波。プルトニウムは  $\alpha$  崩壊によってウランに変わりますが、LX 線はその崩壊に伴いウランの L 殻の軌道に電子が遷移して発生する X 線です。





(6) スペクトル

ここでは、 $\gamma$ 線やX線の放射線のエネルギーごとの強度の分布をいいます。

(7) 核燃料物質

ウランやプルトニウムなどの原子力発電所の燃料となる物質。

(8) アルファ( $\alpha$ )線

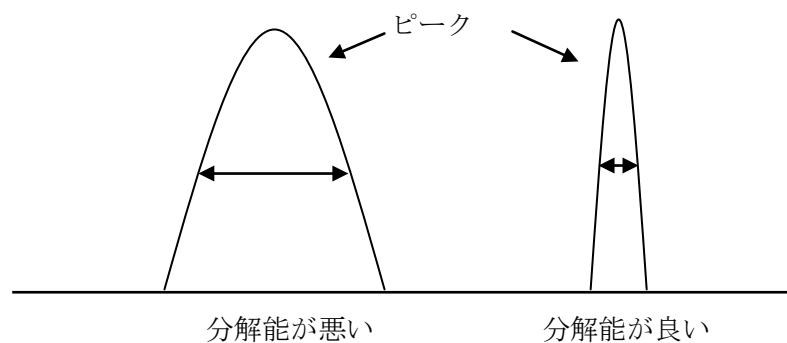
放射性物質の $\alpha$ 崩壊によって放出される放射線。 $\alpha$ 線は高い運動エネルギーを持つヘリウム4原子核です。物質を透過する力が弱く、紙などでも遮へいされます。

(9) 質量分析法

物質の質量の違いから物質の分析する方法。測定対象の物質をイオン化し、高電圧をかけた真空中で飛行させて、磁場等で質量毎に分離して測定します。測定対象物質をイオン化するための処理が必要です。

(10) エネルギー分解能

放射線検出器でX線などの放射線のエネルギーを測定するときに、X線のエネルギーを細かく識別できる能力。エネルギー分解能が良いほどスペクトル中のピークの幅が狭く鋭いピークになります。鋭いピークであればあるほど、他のピークとの識別が容易になります。



(11) 超伝導

特定の金属や化合物などの物質を超低温に冷却したときに、電気抵抗が急激にゼロになる現象。

(12) 半値幅

山形のピークの広がりの程度を表す指標。ピーク値の半分の高さでの幅で表されます。放射線測定ではエネルギー分解能を表すのに使われます。

- (13) LX線の放出率  
 $\alpha$ 崩壊に伴いLX線が放出される割合。Puの同位体ごとに放出率が異なります。
- (14) 先行基礎工学研究  
原子力機構の公募型の共同研究制度。原子力機構が取り組む研究開発プロジェクトに先行する基礎工学研究において、原子力機構が研究協力テーマを設定し、研究目的を達成する上で必要な研究協力課題を募集しています。
- (15) 透過力  
放射線の物質中を通り抜ける能力。X線は物質を透過しやすく、人体内部の撮影などに利用されていますが、 $\alpha$ 線は透過し難く、紙などでも遮へいされます。
- (16) 半導体検出器  
半導体の性質を利用した放射線測定器。従来の放射線測定器のなかでは最もエネルギー分解能が高く、 $\gamma$ 線やX線の分析測定に用いられています。
- (17) 肺モニタ  
人体の肺中のプルトニウム量を測定する装置。人体の外側から測定するためにPuから放出されるLX線を測定しています。主に身体汚染トラブルなどの緊急時に使用されます。
- (18) X線望遠鏡  
宇宙からのX線を観測する望遠鏡。現在、天文学では様々な波長での観測が行われ、電波望遠鏡、赤外線望遠鏡、可視光望遠鏡、紫外線望遠鏡、X線望遠鏡などが用いられています。
- (19) mK(ミリケルビン)  
温度を表す単位。国際単位系の基本単位の一つです。ケルビンはすべての分子の運動が停止する絶対零度を0ケルビン(K)とした温度で、0ケルビンは $-273.15^{\circ}\text{C}$ 。1ミリケルビンは1ケルビンの1/1000です。
- (20) keV(キロエレクトンボルト)  
エネルギーを表す単位。電子1つが1ボルトの電位差で受けるエネルギー。1キロエレクトンボルトは1エレクトンボルトの1000倍です。
- (21) Puの $\gamma$ 線測定に係る研究  
米国の国立標準研究所(NIST)などで核物質の探知を目的とした研究が行われています。(Scientific American 2006年11月号 参照)

Pu から放出される  $\gamma$  線や K 殻の X 線はエネルギーが高く、LX 線よりも透過力は強いのですが、放出割合は LX 線の 1/100 以下と低いために少ない量の分析には LX 線測定が有利です。一方、LX 線はエネルギーが低いために物質内での減衰があり、厚い物質を通しての測定では  $\gamma$  線などの測定が有利です。

$^{239}\text{Pu}$  から放出される X 線及び  $\gamma$  線の割合

	エネルギー (keV)	放出割合 (%)
LX 線	11.6~20.7	4.66
$K_{\alpha}$ X 線	94.7~98.4	0.0108
$K_{\beta}$ X 線	110~115	0.0182
$\gamma$ 線	38.7~129	0.0331

注)  $K_{\alpha}$  X 線や  $K_{\beta}$  X 線は K 軌道の遷移を起源とした X 線

(22)  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{244}\text{Cm}$

$^{237}\text{Np}$ 、 $^{244}\text{Cm}$  は超ウラン元素の核種。使用済燃料再処理後の放射性廃棄物となるので、MOX 燃料に混ぜ合わせて燃焼させることが研究されています。