

# M4 TORNADO<sup>PLUS</sup>

- Super Light Element Micro-XRF Spectrometer

# M4 TORNADO<sup>PLUS</sup> - $\mu$ -XRF の新時代へ



M4 TORNADO<sup>PLUS</sup> は炭素からアメリシウムまでの全元素範囲の検出と分析を可能にする世界で初めての $\mu$ -XRF分析装置です。  
(当社調べ、市販型として2018年6月現在)

10年間実績を積み重ねてきた  
M4 TORNADO ファミリーの最新メンバーとしてM4 TORNADO<sup>PLUS</sup> は、革新的なアパーチャー管理システム (AMS)、高感度スループット・パルス・プロセッサと試料交換が容易なクイックチェンジ・サンプル・ステージを提供します。

## M4 TORNADO<sup>PLUS</sup> のユニークな機能と利点

特徴	利点
超軽元素対応大口径デュアルSDD	炭素までの軽元素の検出と分析
ハイスループットパルスプロセッサ	測定時間の短縮向上
革新的なアパーチャー管理システム	凹凸のある試料を測定する際の深度焦点対応
クイックチェンジステージ	サンプル交換とセットアップ時間の短縮
自動4コリメータチェンジャー付第二X線管 (OP)	高エネルギーレンジ線分析への対応
プログラム式Heパージシステム (OP)	大気圧での軽元素分析

# より軽く、より速く、より深く

M4 TORNADO<sup>PLUS</sup> は軽元素の炭素までの検出を可能にする超軽元素用ウィンドウを有する大面積シリコンドリフト検出器 (SDD) を採用し、ウルトラハイパルススループット処理を実行することで大幅に高速化された測定速度を提供します。アパーチャーマネージメントシステム (AMS: 特許申請中) は、ポリキャピラリー光学系で初めて凹凸形状に対応した測定を可能にしました。

## カーボンからの超軽元素分析が可能

超軽元素用ウィンドウと大面積シリコンドリフト検出器を使用したデュアルディテクターや特に低エネルギー領域の励起効率に最適化されたRh X線管球を搭載した M4 TORNADO<sup>PLUS</sup> は、超軽元素の分析を実用化した世界初のμ-XRF分析装置です。

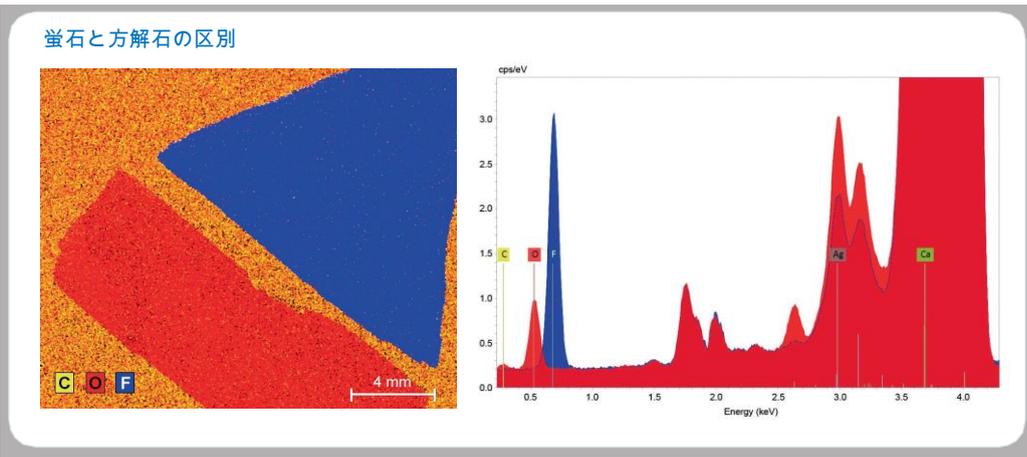
ナトリウムからの元素を検出するのに適した一般的なμ-XRFシステムとは異なり、M4 TORNADO<sup>PLUS</sup> はフッ素、酸素、窒素、炭素など原子番号11以下の元素も含め高エネルギー領域における感度やパフォーマンスを損なうことなく測定できます。

このパフォーマンスの向上により、μ-XRFの新しいアプリケーションが開かれました。例えば医学・薬学・生物学、ポリマー研究、半導体産業などの分野で幅広く使用されます。

## アプリケーション事例：フルオライト(蛍石) とカルサイト(方解石) の判別

蛍石 (CaF<sub>2</sub>) と方解石 (CaCO<sub>3</sub>) はいずれもカルシウムを主成分とする鉱物です。それらを区別するものは、軽元素であるフッ素および酸素/炭素です。Z < 11 (ナトリウム) の元素を検出することができないため、一般的なμ-XRFシステムでは、これらの2つの鉱物を区別することができません。蛍石および方解石の両方のスペクトルは、カルシウム線のみを示すでしょう。

超軽元素対応の検出器とX線管球により、M4 TORNADO<sup>PLUS</sup> はフッ素、酸素、炭素を検出することができ、二つの鉱物を区別することが可能です。



左：方解石 (赤色) と蛍石 (青色) の元素マップ; 画像サイズ: 20×12 mm<sup>2</sup>; スキャン解像度: 800 × 460ピクセル; ステップサイズ: 25 μm; 滞留時間: 25 ms /ピクセル; 励起: Ag LEチューブ、50 kV、500 μA  
右：二つの鉱物の蛍石 (青色) と方解石 (赤色) の軽元素スペクトル領域

# より軽く、より速く、より深く

## ウルトラハイスループットパルスプロセッサ が測定時間を高速化

最新の $\mu$ -XRFは高輝度のマイクロフォーカスX線源を用いて非常に高い蛍光X線強度を得ることができますが、一般には検出器およびパルスプロセッサはその出力計数率を90–100kcpsに制限します。

M4 TORNADOの以前のデュアル検出器バージョンはすでに最高260 kcpsの出力カウントレートをエネルギー分解能を犠牲にせずに提供していました。

計数強度最高1,200 kcpsの処理能力と最大550 kcpsのアウトプットカウントレートを提供する独自の能力、M4 TORNADO<sup>PLUS</sup>はこれらの制限をさらに押し上げさらに優れた強度取得速度と高速処理を実現します。

サンプルの蛍光X線強度が低いとき、低いパルスプロセッサのデッドタイムにより優れたパルススループットを実現します。つまり、あらゆる測定状況において、M4 TORNADO<sup>PLUS</sup>は同種の装置に比べて、より多くのデータを同時に提供したり、同じ時間に同じデータ量で結果を出すことができます。

## アパーチャーマネジメントシステム (AMS)

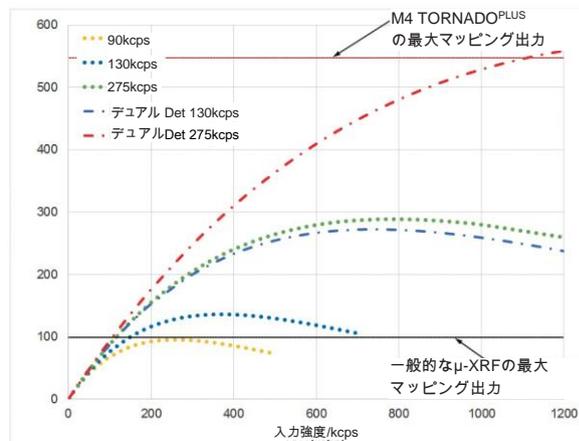
### - 被写界深度および空間分解能の向上

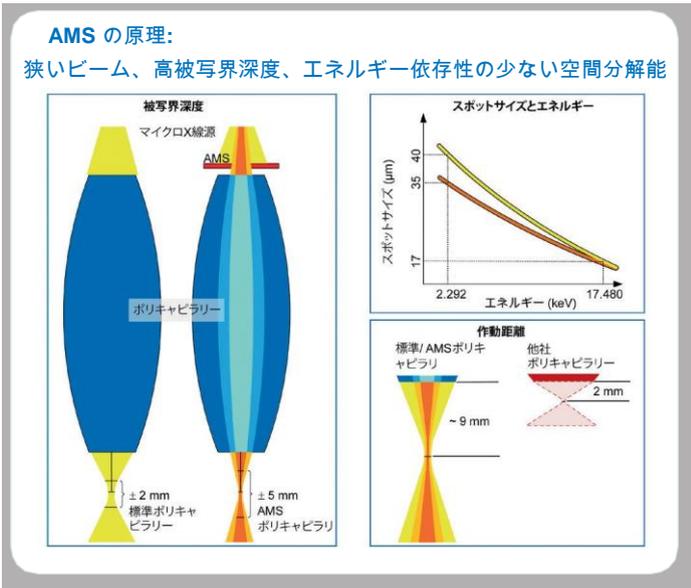
$\mu$ -XRFを使用して分析される多くの試料は、常に平らとは限りません。したがって、写真のように、被写界深度を生成するために使用されるX線光学システムにとって試料表面上の小さな励起スポットは重要なパラメーターとなります。

通常、7  $\mu$ m程度の高空間分解能X線光学系を備えた $\mu$ -XRFアナライザーでは、ワーキングディスタンスは2 mm程度と小さく、達成可能な被写界深度は1 mm未満です。

M4 TORNADO<sup>PLUS</sup>に搭載された革新的なソフトウェア制御のアパーチャーマネジメントシステム (AMS) は、約9 mmのワーキングディスタンスと最大 $\pm 5$  mmの被写界深度を可能にします。つまり、空間分解能はサンプルの表面が数mm変化しても、それほど変化しません。これにより、M4 TORNADO<sup>PLUS</sup>は、起伏の激しい試料、すなわち電子工学、法医学、または地球科学において測定されるさまざまな試料に柔軟に対応することができます。

M4 TORNADO<sup>PLUS</sup> パルスプロセッサによる入出力強度図





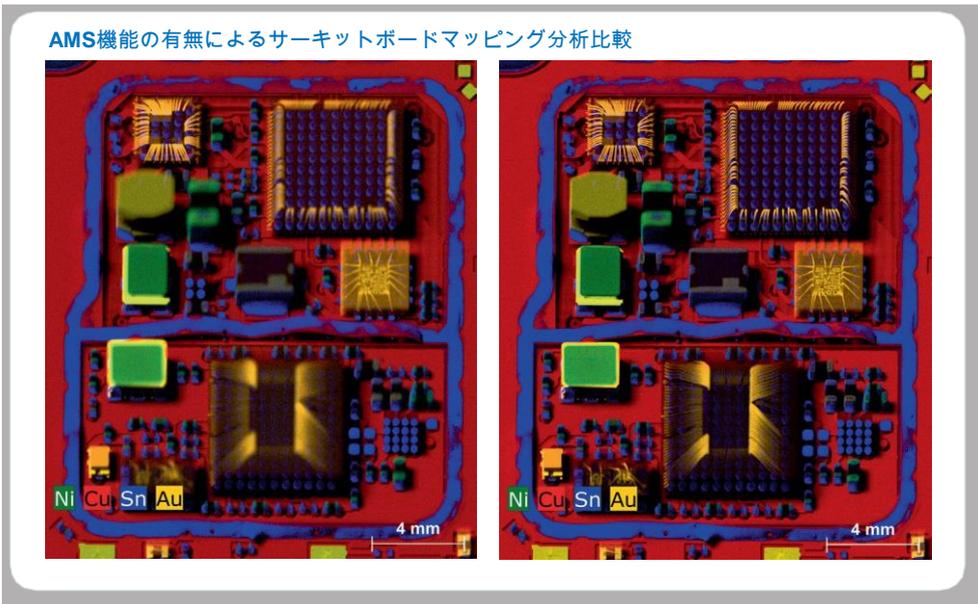
ポリキャピラリー内への放射入射角の減少は、かなり大きな被写界深度を実現します。

AMS機構付のポリキャピラリーシステムでは、エネルギー依存性スポットサイズの変動は無視できる程度になります。

**アプリケーション例：PCBボードマッピング**

AMSによる深い被写界深度のために、測定対象物の携帯電話回路基板のX線画像焦点は、AMSなしで測定された同じ回路基板の画像よりもはるかに詳細に焦点を当てています。

さらに、スポットサイズのエネルギー依存性は、励起されたX線光子の入射角および出射角が減少するため、あまり顕著にならず幅広いエネルギー領域での安定した空間分解能を得ることが可能です。



左：AMS機能の無いポリキャピラリーの焦点はPCBの基板位置にフォーカスしていたため、背の高いコンポーネントとボンドワイヤには焦点が合わず、ぼやけて見えます  
右：被写界深度の高いAMS機能の効果による画像で、すべてのコンポーネントがより深い範囲でピントが合っています

# より簡単、より拡大、より拡張

M4 TORNADO<sup>PLUS</sup> は、クイックチェンジステージによるサンプルの交換、位置決め、固定を容易にし、(オプションの)第二X線管球のスポットサイズと強度範囲をコリメーターチェンジャーで拡大し、真空引きにより変質する含水・油性試料に対してソフトウェア制御のHeガスパージシステムにより軽元素分析における応用範囲を拡張します。

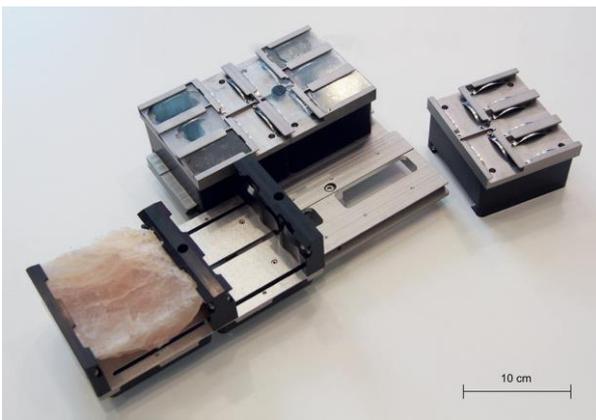
## クイックチェンジステージ：

### すばやく、簡単なサンプル交換

ほとんどの分析ラボでは、サンプルスループットを最大化し装置がアイドル状態になる時間を最小限に抑えるというアナリストのプレッシャーがあります。それ以外に、大きな、不規則な形状の標本の、または多数の薄いセクションをルーチン分析に組み入れることは、挑戦的で時間のかかる作業である可能性があります。

M4 TORNADO<sup>PLUS</sup> には、モジュール式のクイックチェンジ・ステージ・インターフェイスが付属しています。ダブテール・カップラーは、ステージ・プレートを取り外して簡単に再挿入することを可能にし、ツールを使用せずにすばやく簡単に試料をステージ上にセットすることができます。

ドリルコアホルダーと薄片ホルダーを搭載したクイックチェンジインターフェイス



クイックチェンジインターフェイス標準搭載



サンプル交換を容易にしたチェンジステージインターフェイスを標準装備

必要に応じて、追加のベースプレートがあり、これはドリルコアホルダーまたは薄いセクションキャリアに適しています。

ドリルコアサンプルホルダーが設置可能で、HQサイズ(2.5インチ)のドリルコアを保持するように調整することができます。これは1つまたは2つの半分で構成することができ、それぞれの半分または3つの半分または4つのドリルコア、ならびに端部片またはプラグを保持することができます。また、ベースプレートは、2つのウェーブスプリングによって固定された5つの薄い部分をそれぞれ保持することができ、最大4つの薄い部分キャリアを装備することができます。

ドリルコアホルダー、薄片ホルダーまたは両方の組み合わせを使用する場合でも、測定面は常に同じです。つまり、セットアップに費やす時間が短縮されます。フォーカスを変更することなくステージ全体を分析することができます。

## コリメーターチェンジャー付第二X線管球： 高エネルギー領域での感度向上

重・希土類元素(REE)の高エネルギー線を効果的に励起するために、コリメーターを備えたX線源が、ポリキャピラリーレンズで集光する際の高エネルギー部分の減衰を受けないので、より良い選択です。

より大きな視野の分析のために、より大きなスポットサイズが必要になることがあります。

そこでM4 TORNADO<sup>PLUS</sup>は、オプションの第二X線管球(W)にソフトウェア制御の4ポジションコリメーターチェンジャーを組み合わせました。コリメーターチェンジャーは500 μm、1 mm、2 mm、および4.5 mmのスポットサイズに設定することができ、小さなスポット分析から大きな高強度スポット径を備えたバルクXRF分析が可能です。

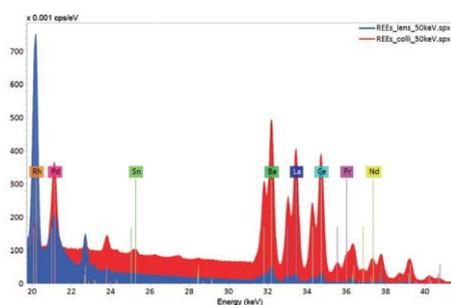
### 含水・油試料の低エネルギー領域での感度を上げるHeパージシステム

ある種の試料では、圧力変動に敏感であるか乾燥してしまう可能性があるため、真空中での測定には問題があります。大気中での測定は常に可能ですが、Caより下の軽元素の蛍光X線強度は著しく減衰するか、完全に吸収されて強度が計数されません。M4 TORNADO<sup>PLUS</sup>は、真空中での測定が難しいサンプルでも軽元素や炭素までの超軽元素を検出して、大気圧下での分析範囲を拡大するオプションのコンピュータ制御Heパージシステムを提供しています。

分析方法に応じた、最適な2種類のパージモードを使用することができます。迅速なシングルポイントはマルチポイント分析で低エネルギー領域のX線を確実に取得するには、測定位置の局所的な高流量パージが適しています。

一方、X線マッピングを行う場合、ステージの動きは乱気流を引き起こし、軽元素の検出条件が不安定になるため、第2のパージモードとして、測定チャンバー全体をHeで満たし、軽元素の感度を一定以上安定させることで高精度なデータを得ることが可能です。

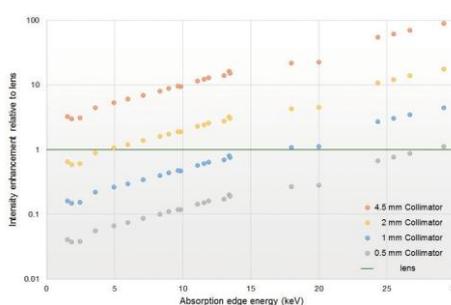
### コリメーター対レンズ：REE強度比較



ポリキャピラリーレンズ(青)とコリメーター(赤)による希土類元素分析線の比較

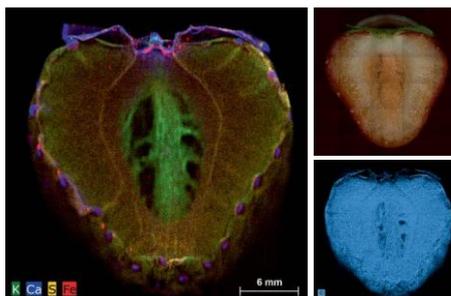
コリメーターによる分析では高エネルギー領域の強度が高感度です

### コリメーター強度比



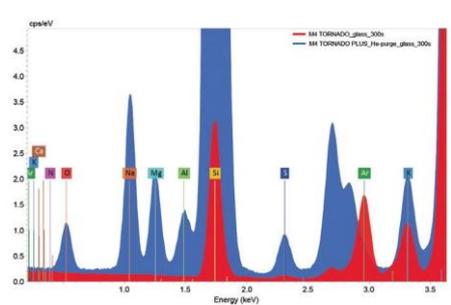
ポリキャピラリーレンズ(ライン1)と比較した異なるコリメーターサイズに対する一次X線強度相対比較

### Heパージ下における軽元素マッピング



イチゴのモザイク画像と元素マップ画像  
画像サイズ: 31.2 x 30.5 mm<sup>2</sup>, スキャン解像度: 1560 x 1525 ピクセル;  
ステップサイズ: 20 μm; 滞留時間: 10 ms/ピクセル;  
励起: Rh管球、50 kV、600 μA.

### NIST ガラス試料測定結果比較



NIST 620 ガラス標準サンプルを M4 TORNADO 標準仕様(大気下: 赤色)および M4 TORNADO<sup>PLUS</sup> (He パージ: 青色) で測定した結果のスペクトル比較

# 技術仕様



サンプルタイプ	固体、粒子、液体
試料室サイズ	幅x深さx高さ: 600 mm x 350 mm x 260 mm
ステージサイズ	幅x深さ: 330 mm x 170 mm, 最大重量負荷: 7 kg
測定メディア	標準装備 : 大気圧またはオイルフリーの真空、2分で20 mbar オプション : インテグレートHeパージシステム
サンプル測定 最大移動量 マッピング範囲 移動速度	試料上面からX線を照射する上面照射方式 幅x深さx高さ: 200 mm x 160 mm x 120 mm 幅x深さ : 190 mm x 160 mm Turbo Speedステージで最大100 mm/s
サンプルビュー	サンプルの観察と正確な位置決めのために異なる倍率で上から2つの同時ライブ画像 サンプルチャンバ内観察用正面扉裏魚眼カメラ (衝突防止)
励起	・ ポリキャピラリーX線光学系およびアパーチャーマネージメントシステム (AMS) を備えた高輝度、軽元素対応マイクロフォーカスX線管球 (Rh標準) ・4ポジションコリメータチェンジャー (0.5~4.5 mm) 付属 第2ファインフォーカスX線管球 (W標準) : 36S標準装備
励起パラメータ ターゲット材  チューブパラメータ スポットサイズ AMS フィルタ フィルター	40W高出力発生器搭載 第1管球: Rh (オプション: Ag)、第2管球: W (オプション: Rh、Mo、Cu、Cr) 50 kV600μA、30 W (コリメータの場合は50 kV700μA、35 W) ポリキャピラリーレンズを用いたMoKα (17.5 keV) で20 μm以下 500 μmおよび1 mmアパーチャ、および6つのフィルタ コリメータ用8フィルタ
検出	XFlash® 超軽元素対応シリコンドリフト検出器、CからAmへの検出、2つの検出器の同時使用 (液体窒素不要)
検出器パラメータ センシティブエリア エネルギー分解能 パルススループット	2 x 60 mm <sup>2</sup> 入力カウント数600,000 cpsで<145 eV@MnKα 最大550,000 cpsの出力
装置コントロール	最先端のPC、Windows 10
装置コントロールファンクション	励起パラメータ、管球フィルター、光学顕微鏡、試料照明および試料位置決め の完全な制御 (ソフトウェアによるZ軸上限設定で衝突防止)
データ解析	ピーク識別、アーティファクトおよびバックグラウンド補正、ピーク面積計算、 FP定量、XMethod (オプション) を使用した標準ベースおよび標準化モデル による較正済み定量。データは外部PCや媒体へコピー可能。
マッピング分析	「オンザフライ」測定、PTSハイパーマップ機能
結果表示	定量結果、統計的評価、元素分布 (ラインスキャン、マッピング)
電力要件	100-240 V (アース付1P)、50/60 Hz
寸法	幅x深さx高さ: 815 mm x 680 mm x 580 mm, 130 kg*
品質と安全	DIN EN ISO 9001:2008, CE 認定完全輻射保護システム。放射線 <1μSv/h

\*構成による重量差あり

## ● ブルカー・ジャパン株式会社

横浜〒221-0022 神奈川県横浜市神奈川区守屋町3-9

Phone +81 (45) 522 7711 (代)

Fax +81 (45) 453 1825

NanoAnalysis.BNA.jp@bruker.com

[www.bruker.com/m4tornado-plus](http://www.bruker.com/m4tornado-plus)

