

3D/4Dナノーマイクロイメージングを可能にする 放射光 X 線CT

JASRI/SPRING-8
竹内晃久
<http://www.spring8.or.jp>

**※本講演資料は未公開情報が含まれるため、講演者様のご意向により
該当部分を非公開として配布いたします。ご了承願えば幸いです。**

発表内容

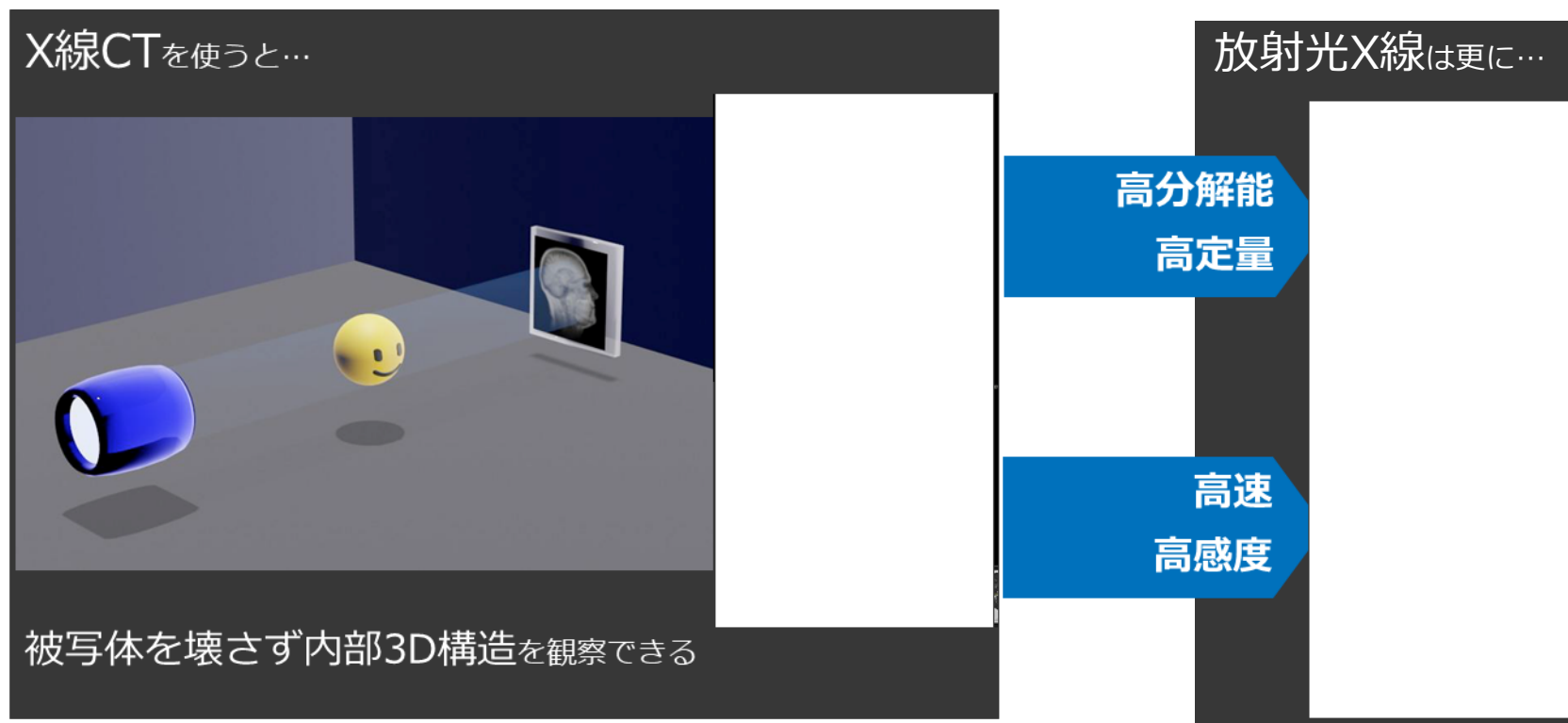
1. 放射光 X線CTについて
2. SPring-8のCT
3. 高エネルギーナノCT、
マルチスケールCT



CT: computed tomography
"tomo" はギリシャ語で"slice"

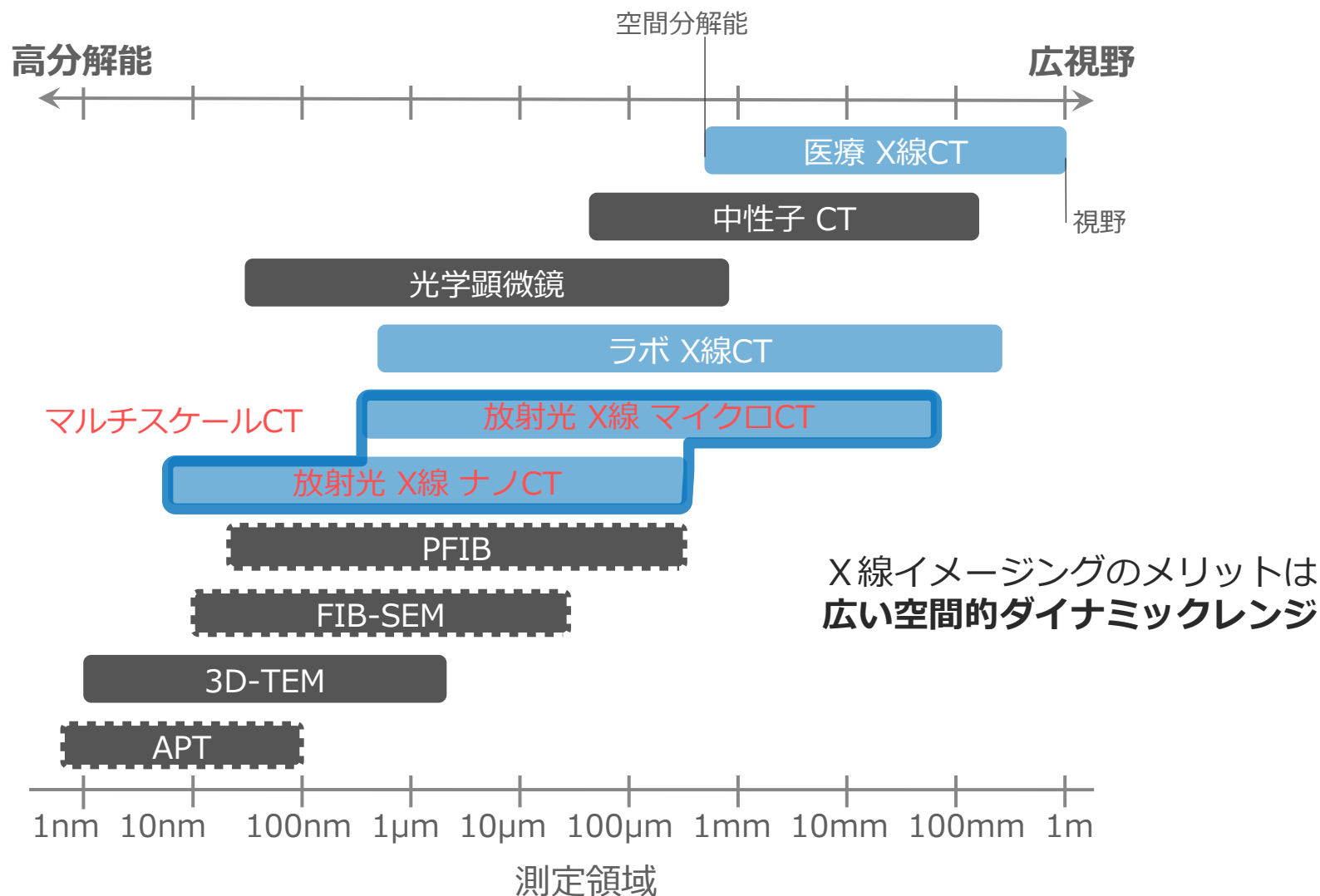
1. 放射光 X 線CTについて

放射光の利点：大強度、高い平行性、高い単色性、波長可変



※非公開情報を削除しております

各3次元イメージング手法: 測定領域の比較



ざっくり分けて2タイプ

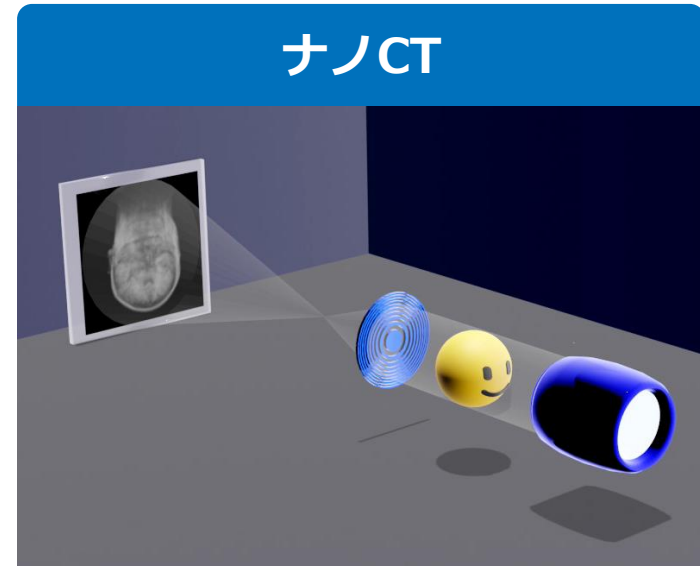


マイクロCT

投影光学系がベース

- 平行ビーム照明
- 密着投影
- 拡大投影

分解能: 1 μm



ナノCT

X線顕微鏡技術を導入

- 走査型
- 結像型
- ホログラフィ
- タイコグラフィ

分解能: 数10~100 nm

2. SPring-8のCT





偏向電磁石ビームライン

BL20B2

BL長200mを利用した
広視野&高感度

視野：10~300 mm

分解能：~数 μm

- μ -CT (<300mm FOV)
- In-situ, 4D-CT
- 位相コントラスト
- 高速撮影(from 2021)

生物・医療、材料科学、地
球惑星科学



偏向電磁石ビームライン

BL28B2

白色ビームによる
高エネ・高速

視野：5~50 mm

分解能：~20 μm

エネルギー 200keV

- μ -CT
- 高エネルギー
- 高速CT

考古学、材料科学、製品検
査



アンジュレータビームライン

BL20XU

BL長250mを利用した
高エネ&高分解能

視野：5 mm以下

分解能：0.2 ~2 μm

- μ - / nano-CT (<38keV)
- マルチスケールCT
- In-situ
- XRD-CT

構造材料、電池デバイス、
地球惑星科学



アンジュレータビームライン

BL47XU

大強度単色光を用いた
高分解能・高速

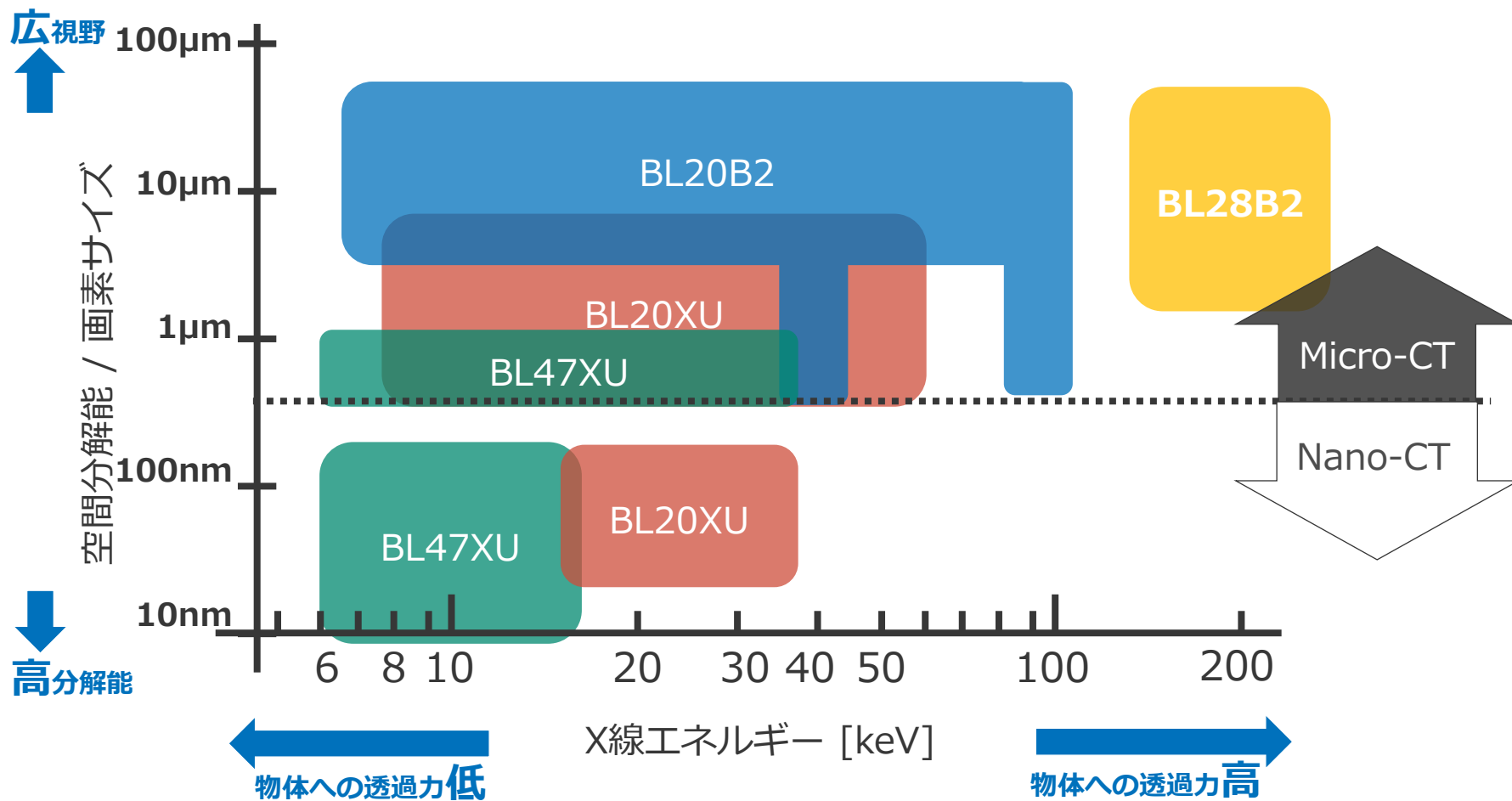
視野：1 mm以下

分解能：0.1~2 μm

- μ - / nano-CT (<15keV)
- マルチスケールCT
- 位相定量
- 高速撮像(20kHz)

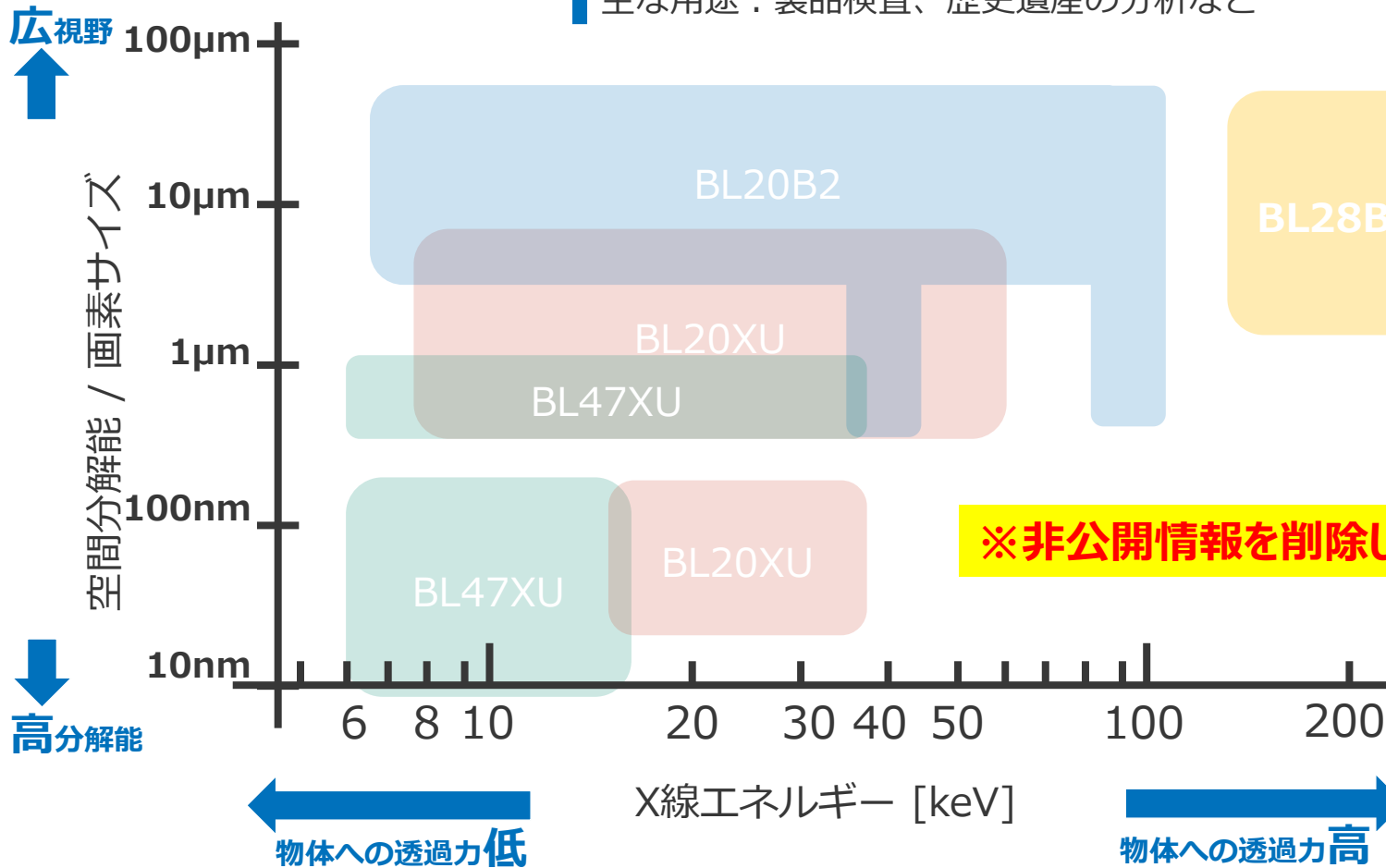
地球惑星科学、電池デバイ
ス、構造材料

イメージングビームライン：エネルギーvs空間分解能



高エネルギー X線CT

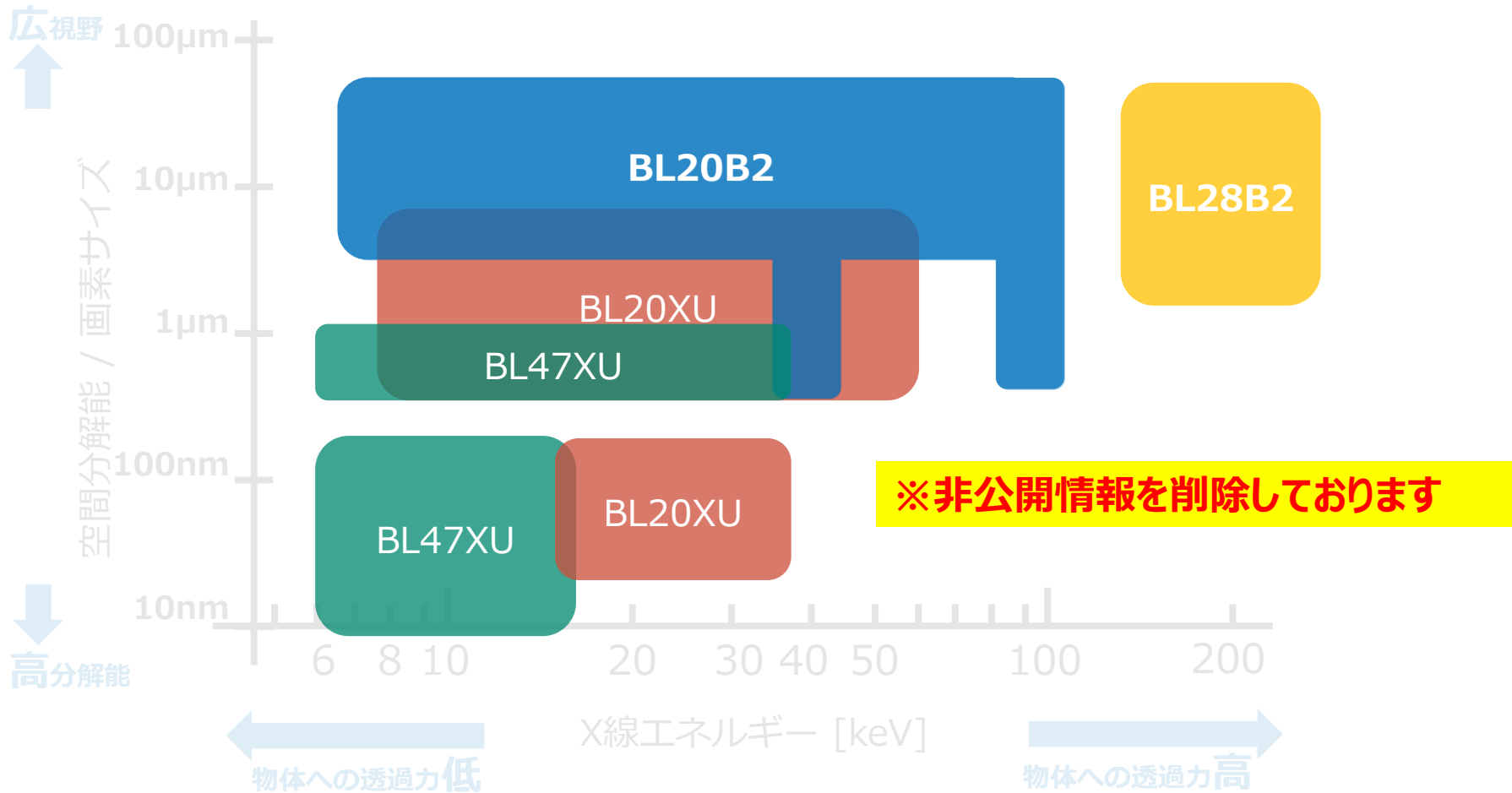
約200keVの非常に高いエネルギーのX線の高い透過力
 を利用し、比較的大型で金属製の試料の測定が可能。
 分解能10 μ m前後、試料サイズ数cm～数十cm。
 主な用途：製品検査、歴史遺産の分析など



※非公開情報を削除しております

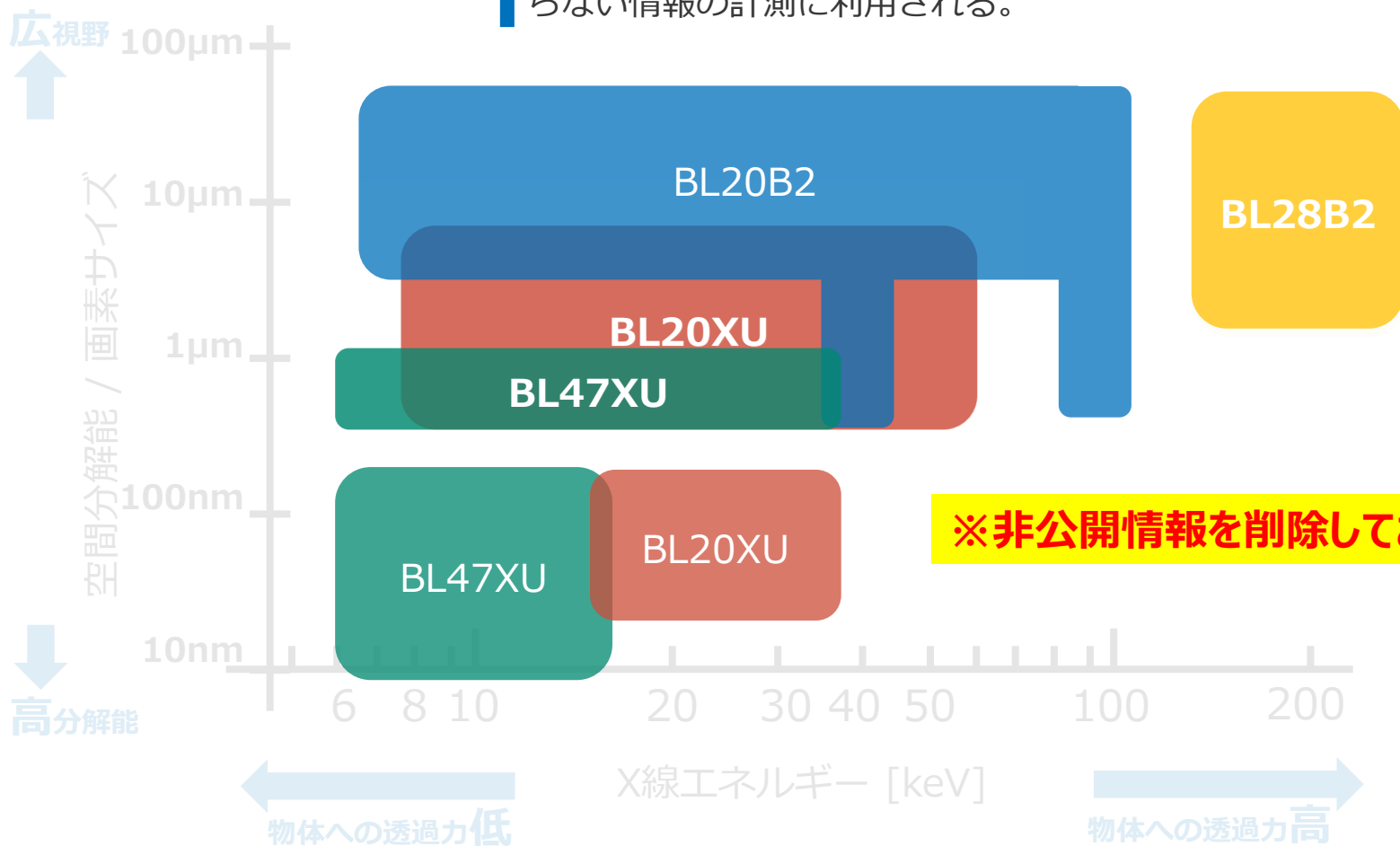
4D-CT In-situ, in-vivo

視野：数mm～十数cm、分解能：数 μm 。被写体の動きをとらえる4D-CT (3D + time)や、位相コントラストを使った高感度測定が可能。
主な利用：生物・医療、材料科学



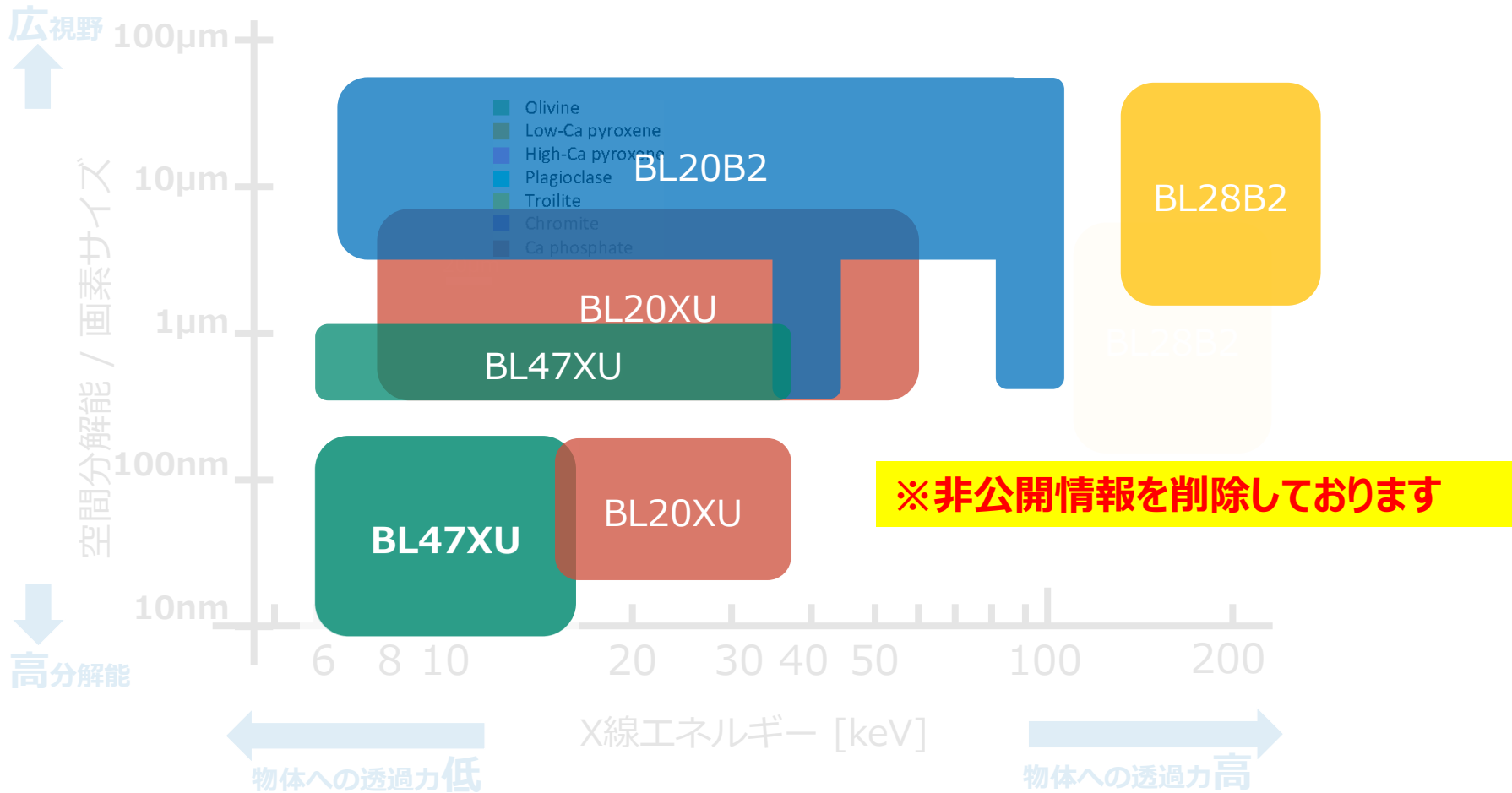
4D-CT, In-situ XRD-CT

視野：～1mm, 分解能～1 μ m。アンジュレータの高いフラックス密度を利用することでより高分解能・高速計測が可能。X線回折技術（XRD）と組み合わせたXRD-CTは結晶構造、化学組成の分布などCT単独ではわからない情報の計測に利用される。



nano-CT

視野：100 μ m以下、分解能 $\sim$ 100nm。X線エネルギー $\sim$ 10keV以下。
X線顕微鏡技術(BL47XU, 20XUでは結像型)をCTに組み合わせることで、
高分解能3次元計測が可能。

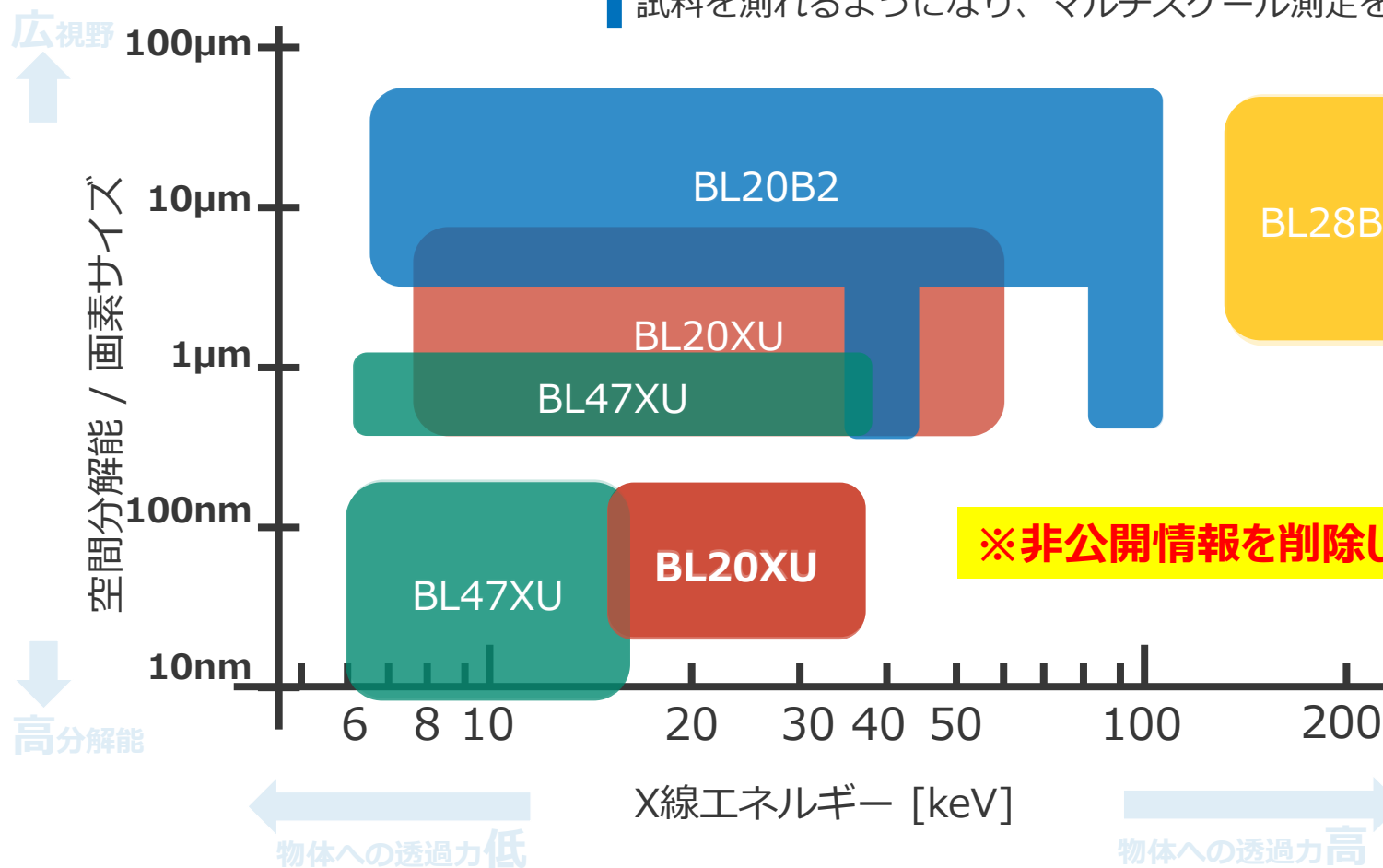


高エネルギーnano-CT

近年可能になった測定技術(2017~)。

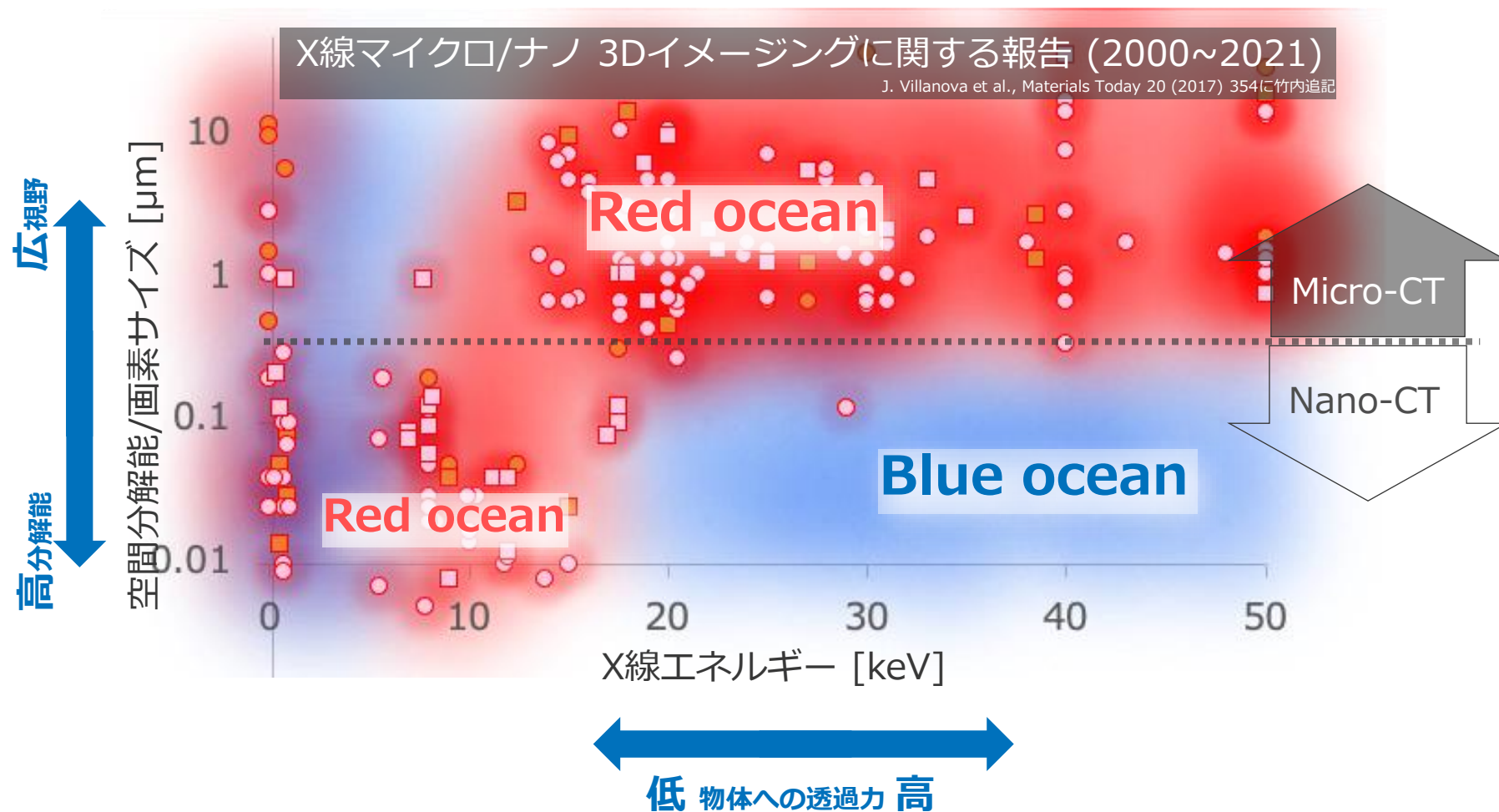
視野：~50 μm , 分解能~100nm。X線エネルギー15-37.7keV。

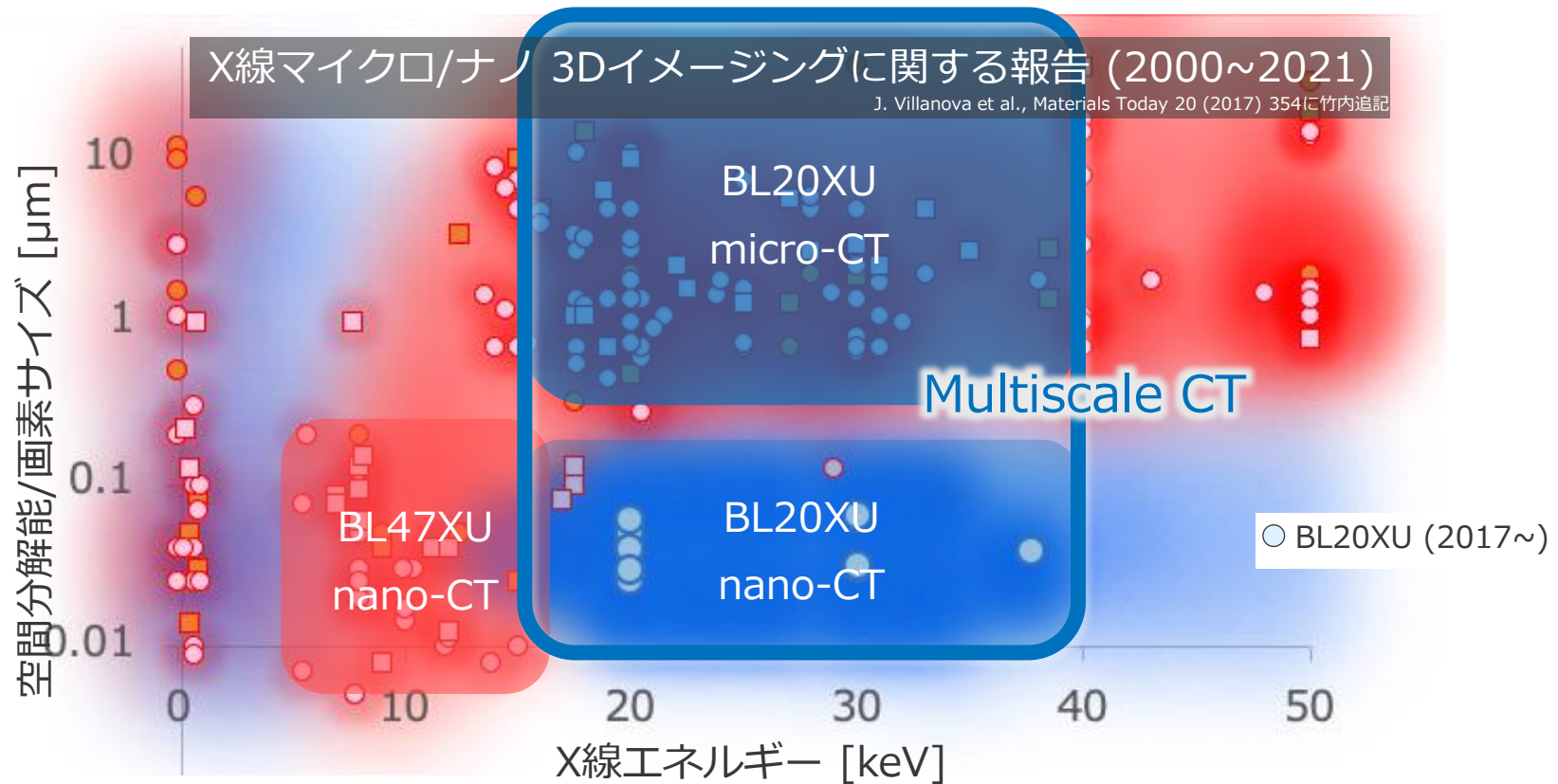
高エネルギー化により、従来のナノCTでは扱えなかった大きさの試料を測れるようになり、マルチスケール測定を可能にした。



3. 高エネルギーナノCT, マルチスケールCT







BL47XUのナノCT (2001~): Red-Oceanの先端を走る

BL20XUのナノCT (2017~): Blue-Oceanを新たに開拓

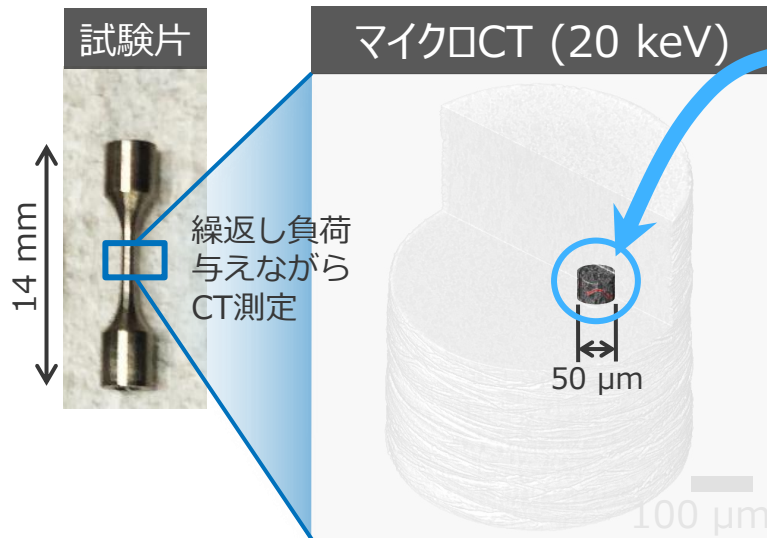
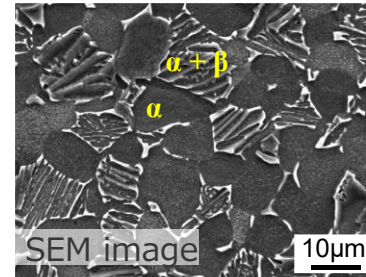
⇒ 広い分野で利用 : 材料、電池、デバイス、惑星科学、生物…

試料：チタン合金Ti-6Al-4V:

α 相 (HCP) と β 相(BCC)

高強度材料。航空機材料としても利用

問題： 10^7 サイクル以上の負荷で内部疲労亀裂



内部亀裂発見!

この挙動を高分解能で見たい!

しかし、従来のナノCT(10keV)の場合、
50 μmΦ程度に切り出さないといけない

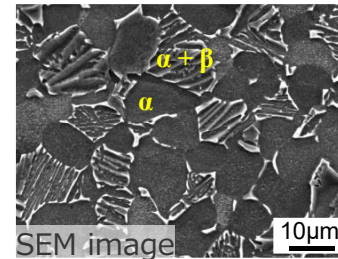
- 👤 切り出すのが大変
- 👤 その場観察が大変
- 👤 見たいものを壊す恐れ
- 👤 内部? 表面?
- 👤 その後の亀裂の成長が見れない

👤 とにかく測定が難しいうえ、うまくいったとしても
切り出したことで測定自体意味がなくなる場合も

試料: チタン合金Ti-6Al-4V:

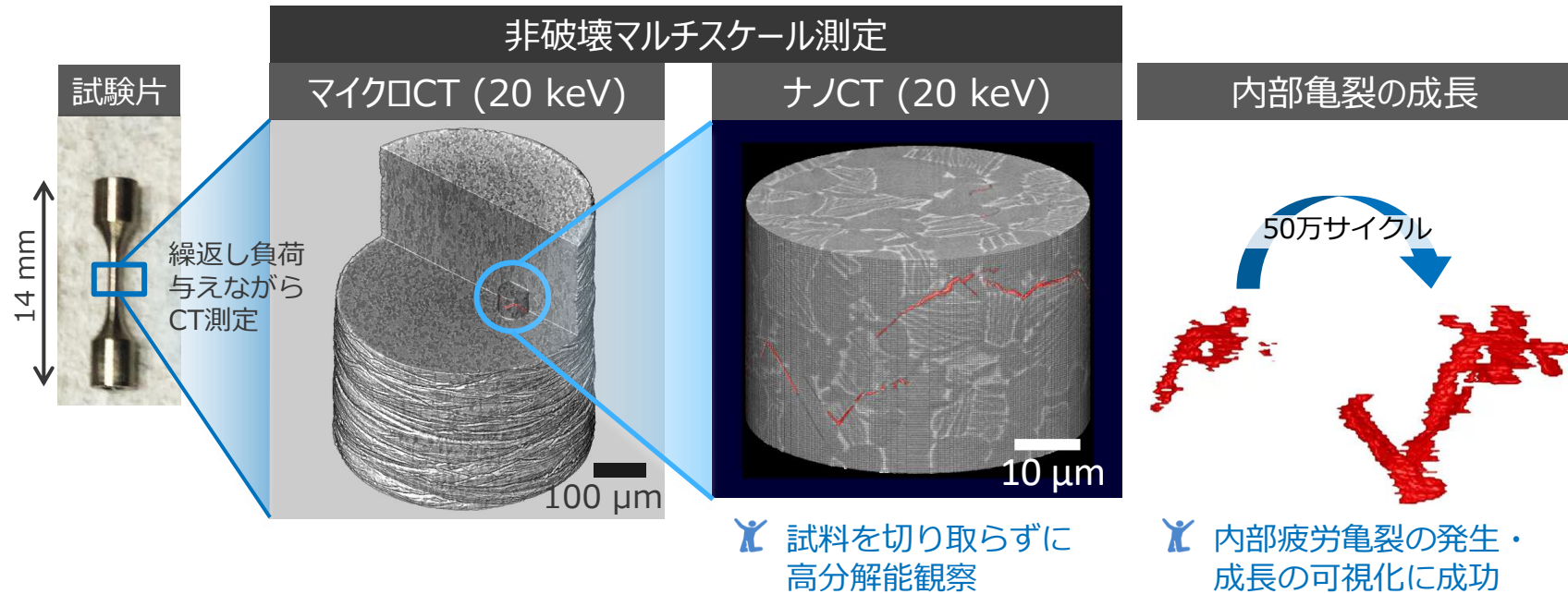
α 相 (HCP) と β 相(BCC)

高強度材料。航空機材料としても利用



問題： 10^7 サイクル以上の負荷で内部疲労亀裂

高エネルギーナノCTで関心領域を切り出さずに測定



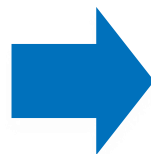
使い勝手の良さがin-situ, operando ナノCT計測を容易に

T. Nakamura et al

リチウムイオンバッテリー:

電極材料の充放電中の膨張/収縮

収縮でできるLi吸蔵材料の空隙が導電パス切れ・減少を引き起こして電池特性を悪化？



空隙サイズ分布と電池特性の変化の相関を調べる

nano-CT 30 keV
その場観察

空隙をサイズ毎に色分け



※非公開情報を削除しております

さいごに

放射光の特性を生かした高分解能・高速・高感度・高エネルギーのCT計測が可能です。
決してお手軽とは言えませんが、審査さえ通れば**安価に(~3万円/日)世界最高レベルの測定が可能ですし、お金を出して審査を免除する制度や、若手支援の制度もあります。**
お気軽にご利用ご検討ください。



高分解能、
階層構造

マイクロCT : 1 μ m,
ナノCT : 100nm
マルチスケールCT : nm-mm



高速

4D-CT
in-situ, in-vivo, operando



高感度

位相・屈折コントラスト
XRD-CT



高エネルギー

マイクロCT : <200keV
ナノCT : <37.7keV



装置が大規模

お手軽さに欠ける。
申請・審査が必要。