

# 計測システム研究会

## 特定分野に特化した検出器の検討：X線高速イメージング

---

浜松ホトニクス株式会社  
電子管技術部企画開発G  
奈良康永

2023.11.20

計測システム研究会 @RCNP/Zoom 2023/11/20-21

# 目次

---

- 浜松ホトニクスについて
- 計測器の特性と制限
  - 計測器の特性を制限する要素とその回避策
- 事例紹介：X線高速イメージング
  - 12nsec間隔でのX線高速バーストイメージング
- まとめ

売上高

2,088 億円

製品点数

15,000 点以上

製品点数：15,000点以上



光半導体素子



光電子増倍管



光源



イメージ機器



画像処理・計測装置

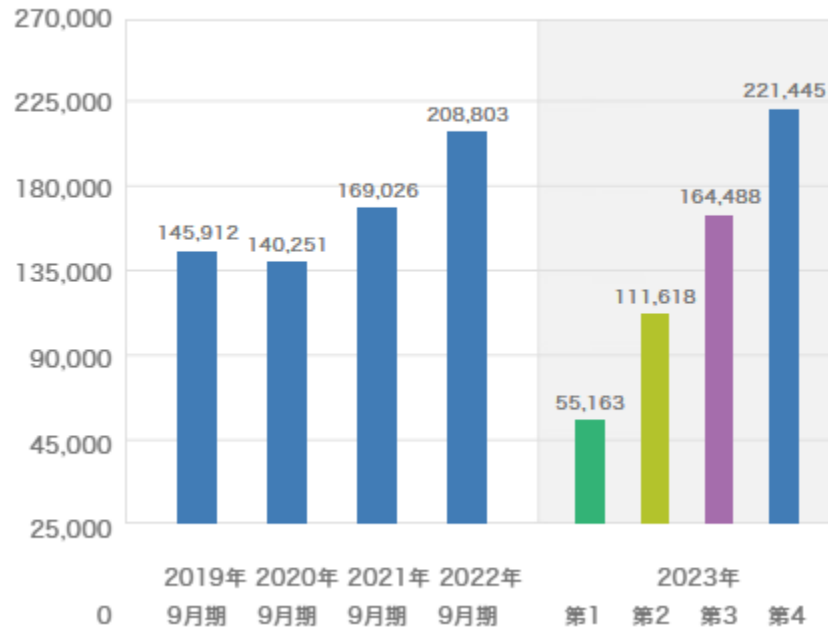
研究開発費の売上高比率

5.4%

従業員数

5,491 名

(百万円)



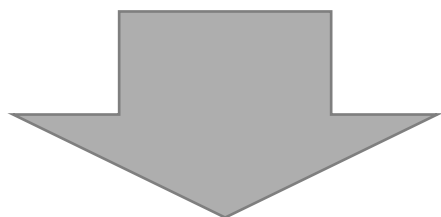
その他…輸送、通信情報、光学、民生機器向け

※2022年9月時点

光電子増倍管、光半導体素子、各種光源といった高性能デバイスから画像処理、計測機器まで様々な製品を、医用、産業、分析、計測、学術研究など幅広い分野に供給しています。

## 技術的制限

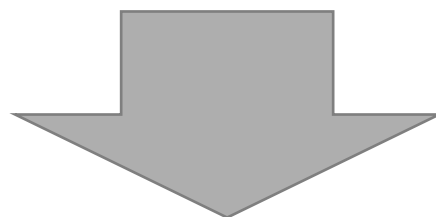
- 物理法則
- 歩留まり



特定用途への最適化

## 経済的制限

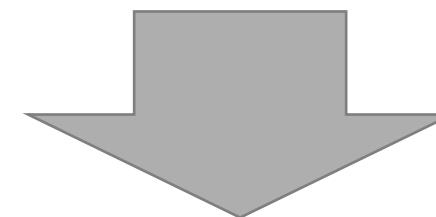
- 市場性
- 開発コスト



流用・組合せ

## 法令などの制限

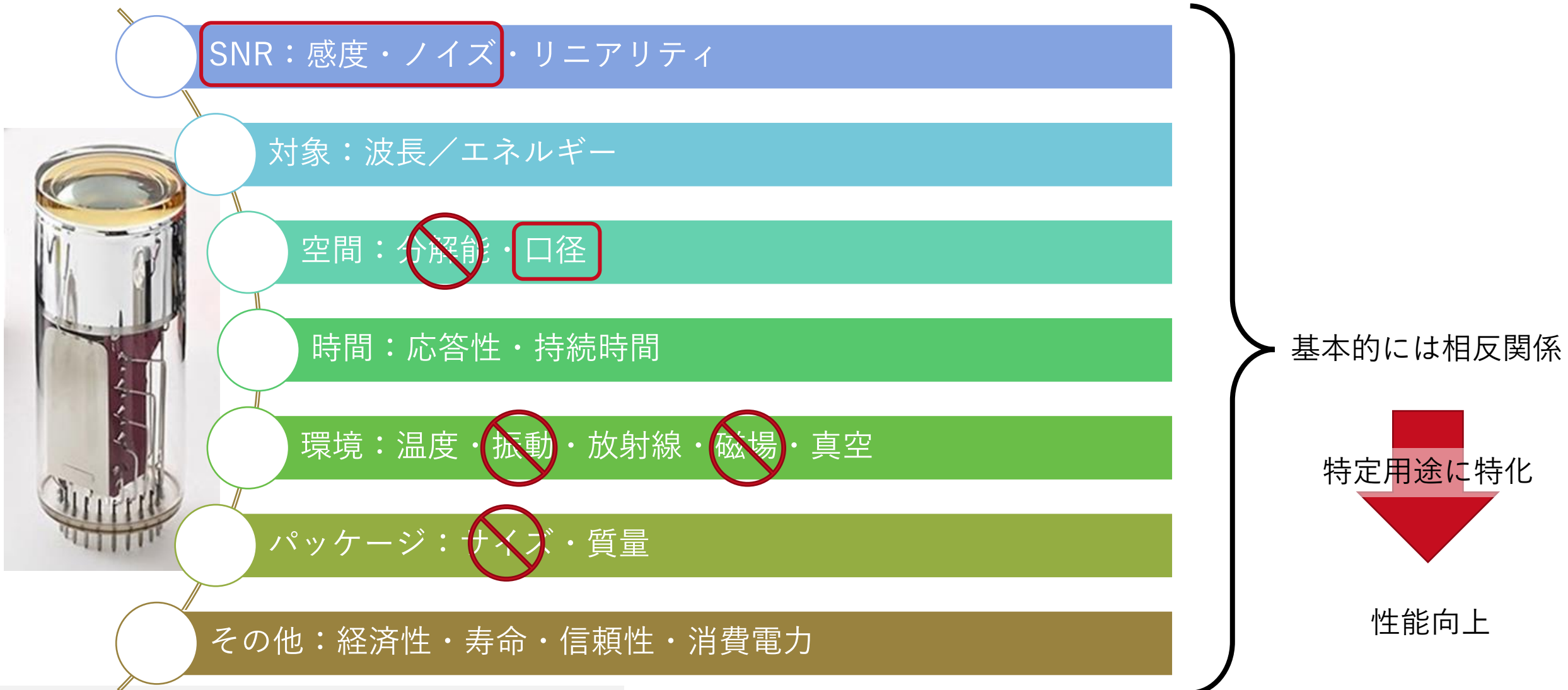
- 有害物質
- 輸出令



ユーザ・用途限定



# 計測器の方向付け：光電子増倍管の場合



# 特定用途向け検出器 Case 1 : 超低ノイズ検出器



ダークカウント : 1cph など

# 特定用途向け検出器 Case 2 : 超高速イメージング



フレームレート: 数百 Mfps



# 特定用途向け検出器 Case 3 : 大面積ディテクタアレイ



有効開口 : □1×1 m など

## 概要

- ・パルス光源による時分割計測技術の一種
- ・紫外～赤外光領域では実現されている（超短パルスレーザ）

## 特徴

- ・撮像中の不感時間なし → 見逃しなし，試料ダメージ抑制
- ・1ショット2Dイメージング → 非繰返し現象への適用が可能
- ・高空間分解能×高時間分解能×高感度 → 微小領域での高速現象を可視化

## 制限・課題

- ・画質 : 低解像度・低SNR → 感度向上
- ・撮像枚数 : 情報量に制限 → 対策実施中
- ・X線ダメージ : 高輝度X線による損傷 → 高感度化・遮蔽・配置
- ・実験機 : アライメント・設置サイズ → 対策実施中

- 透過性
- 短波長
- (集光性)
- 物質との相互作用

➔ 時間分解能を付加

## 他の量子ビーム利用分析法との比較

尾嶋私見

得られる情報	結晶構造解析	元素分析 定量分析	化学結合 状態	電子構造 バンド構造	磁気構造	微小部分析
<b>軟X線</b> 数10eV-数keV	○XAFS, 表面XD	◎軽元素 ◎遷移M	◎PES,X線 吸収XAS	◎ARPES, ARXES,XAS	◎円二色 性XMCD	○FZP 数10nm
<b>硬X線</b> 数keV以上	◎X線回 折XD	△軽元素 ○遷移M	◎PES、XAS	○HAXPES, XAS	○ XMCD	○KBミラー 数10nm
電子顕微鏡 TEM/STEM	◎軽元素 ◎重元素	◎ EDX	○ EELS	X	○ Lorentz 顕微鏡	◎ 0.1nm以下
オージェ電子 分光AES	△AE回 折AED	◎	○ 化学シフト	X	X	○ 30nm
二次イオン質 量分析法SIMS	X	◎	X	X	X	△TOF-SIMS 200nm
電子線マイク ロ分析EPMA	X	◎	△ 化学シフト	X	X	△ 1μm
SPM:STM/STS /AFM/MFM	△表面構 造	X	X	△ STS	○MFM、 スピンSTM	◎ 0.1nm
中性子散乱	◎ 水素可	X	X	△フォノン 分散関係	◎ 磁気散乱	X

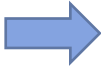
EDX:エネルギー分散型X線分析、ARPES:角度分解光電子分光、ARXES:角度分解発光分光<sup>4</sup>

[https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/090/shiryo/\\_icsFiles/fieldfile/2017/05/24/1386009\\_3.pdf](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/090/shiryo/_icsFiles/fieldfile/2017/05/24/1386009_3.pdf)

# 事例紹介：X線高速イメージング X線高速イメージング手法の比較

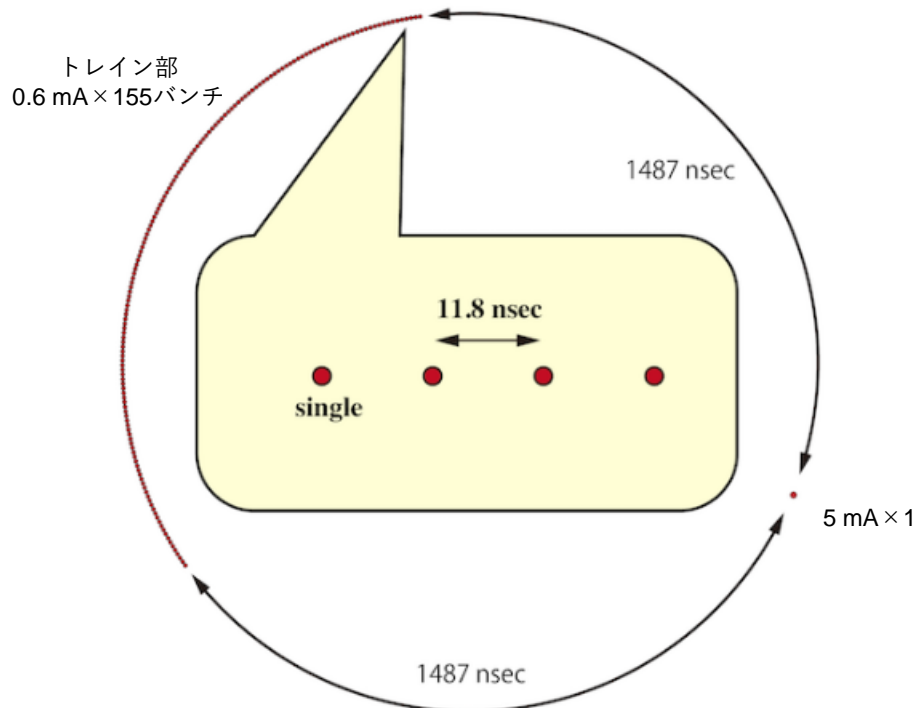
検出器	方式	撮像間隔	露光時間	単一現象	光利用効率	空間解像度	撮影枚数
半導体検出器	直接検出	100 $\mu$ s	10~20 $\mu$ s	○	★★★	▲	>1,000
可視域用 高速カメラ	蛍光体 + 可視高速カメラ	最短100 ns	最短50 ns	○	★	★★	256
ストリーク カメラ	1Dストリーク像 + 1軸走査の重ね合わせ	1.71 ps	1.71 ps?	×	★	★	512
ストリーク カメラ	マルチピンホール, 斜めスリット	2 ps (プラズマ)	2 ps?	○	▲	★	$\leq$ 480
<b>提案手法</b>		<b>ns</b>	<b>ps~ns</b>	○	★★★★★	★★	▲
sCMOSカメラ + LiF結晶	カラーセンター + ポンプ・プローブ法	<1 ps (XFEL)	10 fs (SACLA)	×	★★★★★	★★★★★	-

# 参考：X線時間波形と高速カメラによる計測 (SPring-8の運転モード：H-Mode)

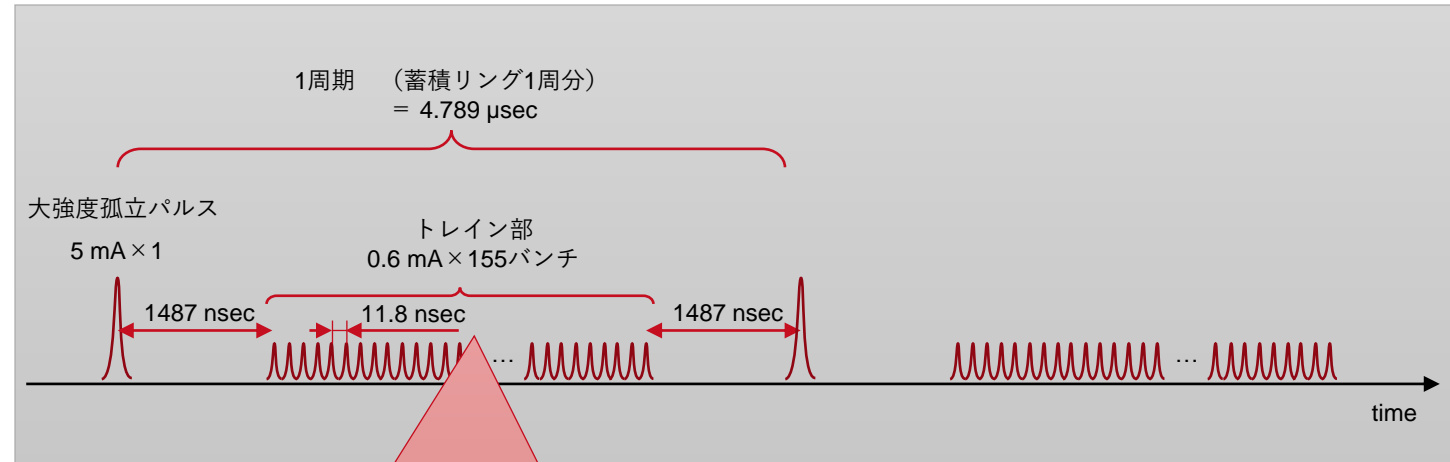
蓄積リングを周回する電子の配置 

406x11/29-bunches + 1 bunch

全周の11/29には、11.8 nsec(6パケット)間隔に約0.6mAずつ合計95mA - 相当の電子が入り、1箇所の孤立バンチには5mA - 相当の電子が入る。



出力されるX線の時間波形



十分に高速な検出器を組合わせることで、このパルス列（トレイン部）の1パルスごとに1枚の2次元画像を取得が可能  
→ 約84 Mfps

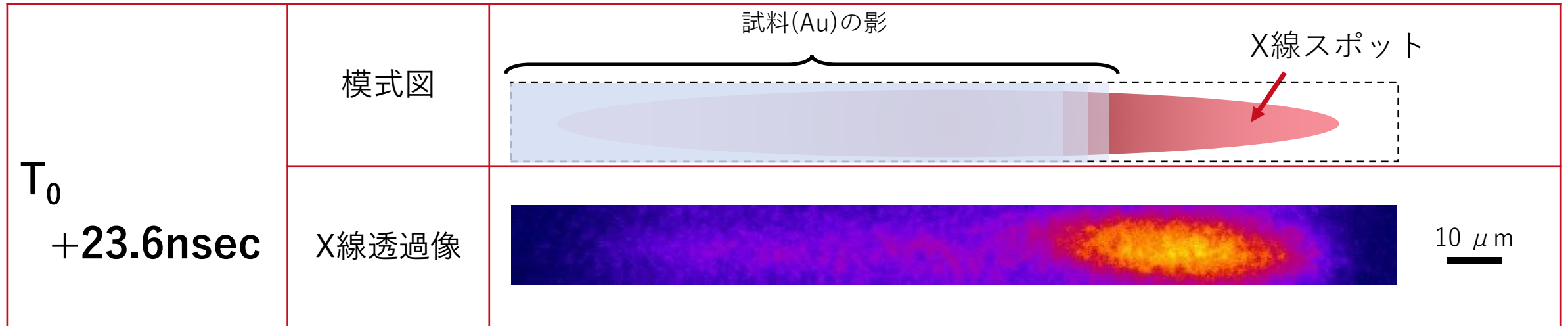
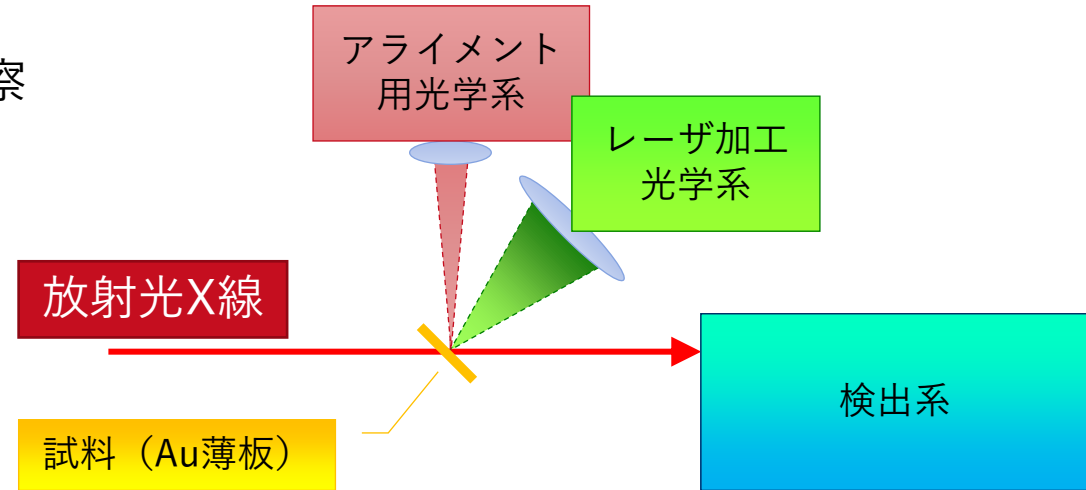
[406x11/29-bunches + 1 bunch — SPring-8 Web Site \(spring8.or.jp\)](http://spring8.or.jp)

[運転スケジュール — SPring-8 Web Site \(spring8.or.jp\)](http://spring8.or.jp)

# 事例紹介：X線高速イメージング ナノ秒パルスレーザーによるAu薄板除去過程の観察

ナノ秒レーザーパルスにより試料が除去される過程を観察

レーザー波長 : 532 nm  
X線エネルギー : 12.4 keV  
試料 : 金薄板



# 事例紹介：X線高速イメージング 想定されるアプリケーション



Industry

- 金属 3Dプリンタ, 溶接  
粉末焼結時にVoid欠陥が多数形成され, バルクの強度が実現できていない  
 $\mu\text{m}$ スケールで溶融・凝固過程を観察し欠陥の形成過程の解析へ
- 燃焼, 爆発  
X線では金属容器や発光に妨げられることなく観察可能
- 材料の破壊・修復 (特にCFRP, フィラー強化複合材)
- 触媒反応 (バッテリー・燃料電池・汚染物質吸着)
- 電気化学反応
- 磁気材料



Academi  
c

- 衝撃波伝搬, 微小液滴・気泡挙動
- 高速衝突 (航空・宇宙)
- 地震 (断層破壊)

どちらも不透明体の高速破壊現象であり, 高速での透視観察が必須  
強い透過力が求められ, 高エネルギー化の方向

## 機器開発における各種制限

- 不特定用途向けでは思い切った特性は出せない
- 技術的には可能であっても実現されないケースが多い
- 特定用途向けであればやり方によっては可能

## 特定用途向けに開発コスト捻出は困難

- 要素技術の流用，組合せ，又は市場性に期待

## 事例紹介

- X線高速イメージング



www.hamamatsu.com

ご清聴ありがとうございました

◆本件に関するお問合せ先◆

浜松ホトニクス株式会社 電子管事業部電子管技術部

奈良康永 [nara@etd.hpk.co.jp](mailto:nara@etd.hpk.co.jp)

[www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com)