

## NanoTerasuにおける ビームライン増設計画

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構  
次世代放射光施設整備開発センター

内海 涉  
センター長



一般財団法人光科学イノベーションセンター

高田 昌樹  
理事長



# NanoTerasu



# NanoTerasu ビームラインの現状

## 第1期整備 共用ビームライン (QSTが整備)

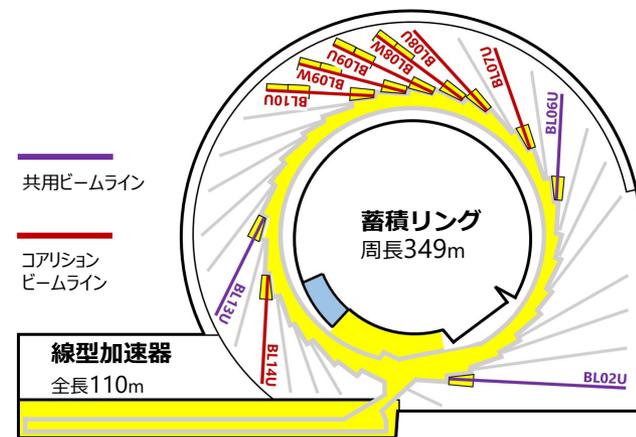
- ・世界トップクラスの性能
- ・科学の最先端領域を開拓
- ・高度な計測技術を探求

BL	目的	光源	エネルギー (eV)	主たる実験装置
BL02U	軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱 (RIXS)	APPLE-II アンジュレータ	250-2000	2D-RIXS分光器
BL06U	軟X線ナノ光電子分光 (ARPES)	APPLE-II アンジュレータ	50-1000	ナノ集光スピン分解ARPES マイクロ集光高分解能ARPES
BL13U	軟X線ナノ吸収分光 (XMCD)	分割APPLE-II アンジュレータ	180-2850	強磁場装置 XFMR STXM

## 第1期整備 コアリションビームライン (地域パートナーが整備)

- ・現実の社会課題解決、重要政策目標への対応
- ・広範な分野での活用
- ・データ科学などの異分野融合を課題解決型で

BL	目的	光源	エネルギー (eV)	主たる実験装置
BL07U	軟X線電子状態解析	APPLE-II アンジュレータ	50-1000	共鳴軟X線非弾性散乱 (RIXS) 軟X線吸収分光 (XAS) ナノX線光電子分光 (NanoESCA)
BL08U	軟X線オペランド分光	APPLE-II アンジュレータ	180-2000	雰囲気(軟X線)光電子分光 (AP-XPS) 高分解能(軟X線)光電子分光 (XPS) 汎用型nm~ $\mu$ m集光軟X線分光 (軟X線)吸収端近傍微細構造 (NEXAFS) インフオマティクス・ロボット制御
BL08W	構造解析	多極ウイグラ	2100-13000	X線吸収微細構造 (XAFS) 小角X線散乱 (SAXS) 広角X線散乱 (WAXD)
BL09U	X線オペランド分光	真空封止 アンジュレータ	2100-15000	硬X線光電子分光 (HAXPES)
BL09W	階層構造	多極ウイグラ	4400-30000	白色X線4DCT (サブミリ秒) 白色X線イメージング (マイクロ秒) 単色X線CT 単色X線イメージング 分散型XAFS 分散型SXR
BL10U	X線コヒーレントイメージング	真空封止 アンジュレータ	2100-15000	コヒーレント回折イメージング (CDI) X線吸収微細構造 (XAFS) 結像型透過X線顕微鏡 (TXM) 走査型蛍光X線顕微鏡 (SXFM) X線光子相関分光 (XPCS)
BL14U	軟X線イメージング	ツインヘリカル アンジュレータ	200-1400	軟X線イメージング (SXM, STXM) 軟X線吸収分光 (XAS) 軟X線磁気円二色性分光 (XMCD)

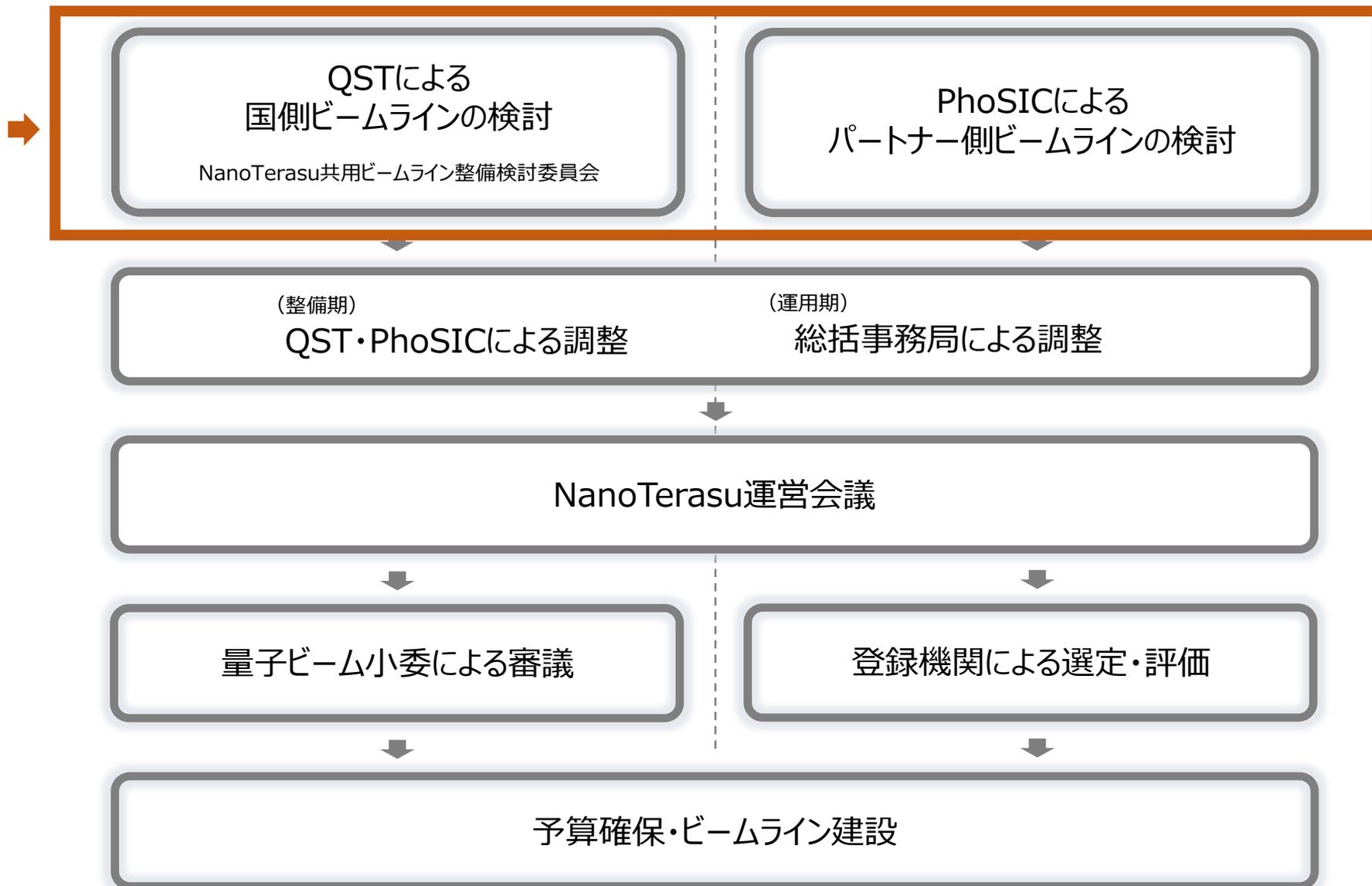


## 整備が可能なビームライン数

BL	アンジュレータポート数	ウイグラポート数	合計ポート数	
総数	14	14	28	
第1期整備	共用	3	0	3
	コアリション	5	2	7
残り	6	12	18	

- ・残り18本のビームラインの早急な整備が必要
- ・ウイグラを光源※とするビームラインの有効活用  
※ 5-6keVを中心とする中庸な強度 (SPring-8偏向磁石光源の約10倍)

# NanoTerasuにおけるビームライン増設計画に係る検討の流れ



## 第1期整備共用ビームライン

### 学術の最先端を開拓

- 国内において続いていた空白状態を取り戻す世界基準の高輝度軟X線光源の早急な整備と高度な計測基盤の提供

# 増 設

## 残りの空きポート早期整備で投資効率を最大化

### ユーザーニーズ

- NanoTerasu、SPring-8においても満たせないほどの需要が予想されるビームライン
- 国際競争が激しい国の戦略分野において、**研究機会を奪わないよう早期整備**  
(→参考2)

### 分野多様性

- 研究活動を活性化し、多様な分野で高インパクトな研究を生み出せるビームライン
- **半導体・デジタル産業、グリーンイノベーション、量子技術、バイオ・健康医療など国の戦略分野を加速すべく早期整備**  
(→参考3)

### NanoTerasuの強み

- 軟X線～テンダーX線領域での**高輝度コヒーレント光源**
- SPring-8等既存施設の偏向磁石光源の10倍の**3-25keV白色光源**  
(→参考4)

### 新規性開拓

- 量子技術など国の戦略分野の推進に必要とされる新たな先端計測を開拓する挑戦的ビームライン
- **10年後を見据え、革新的な光源開発に早期着手**  
(→参考5)

# 国の整備フェーズの考え方

		フェーズⅠ 2019-2023	フェーズⅡ 2024-2027	フェーズⅢ 2028-2030	フェーズⅣ 2031-
<b>整備期 共用BL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>国内における<b>高輝度軟X線利用研究の空白状態の解消</b></li> <li>軟X線分光の<b>主要測定手法をカバー</b></li> </ul>	建設・整備	<b>高度化</b> 早期に実現が求められる計画		
<b>高ユーザー ニーズ共用 BL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>全ての研究者への利用機会、需要</b>に応える測定基盤の提供</li> <li><b>半導体・デジタルなど国の戦略分野</b>における先端シーズ開拓に早期着手</li> </ul>		検討 建設・整備		
<b>応用拡大 共用BL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>拡大する応用範囲</b>への対応</li> <li>フェーズⅡの実施状況を見つつ、フェーズで対応すべき応用範囲を見極める</li> </ul>		<b>状況に応じ随時計画を見直し</b> フィージビリティスタディ 建設・整備		
<b>先端利用 共用BL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術開発を要する<b>先端的放射光利用</b></li> <li>マルチモーダル測定</li> </ul>		既存BLにおける <b>技術開発</b>		建設・整備
<b>R&amp;D BL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>新しい放射光利用の地平を拓く</b></li> <li>フェーズⅡ～Ⅲにおいて、フェーズⅣに必要な<b>研究開発</b>に着手する</li> </ul>		研究開発 建設・整備 共用化		

# 国が整備するNanoTerasu新規ビームラインラインアップ案（フェーズⅡ）

	ポート (例)	分類	光源	エネルギー	エンドステーション	特色・目的	国の戦略分野	ユーザー ニーズ	分野 多様性	Nano Terasu の強み	新規性 開拓
<b>フェーズⅡ(2024-2027)・高ニーズ共用BL</b>											
1	12W	XAFS	多極 ウイグラー	3- 25 keV	(quick) XAFS	全自動DX 自動試料交換	グリーンイノベーション マテリアル 量子技術 半導体・デジタル産業 バイオ・健康医療	◎	◎		
2	13W	X線回折	多極 ウイグラー	10-20 keV	X線回折・散乱	全自動DX 自動試料交換	グリーンイノベーション マテリアル 量子技術 半導体・デジタル産業 バイオ・健康医療	◎	◎		
3	11W	イメージング	多極 ウイグラー	5-30keV	X線CT（単色、準単色）、 位相差イメージング	階層イメージング 吸収端コントラスト利用	グリーンイノベーション マテリアル 量子技術 半導体・デジタル産業 バイオ・健康医療	○	◎		
4	12U	イメージング	APPLE-II アンジュレータ	250 -3000 eV	A: SXイメージング B: 共鳴軟X線散乱	軟X線コヒーレント回折イメージング、タイコグラフィ、 高分子材料・ポリマー小角散乱 ホログラフィー、共鳴磁気回折	グリーンイノベーション マテリアル 量子技術 半導体・デジタル産業 バイオ・健康医療	○	○	◎	○
5	05W	X線分光	多極 ウイグラー	3- 13 keV	HAXPES	全自動DX	グリーンイノベーション マテリアル 量子技術 半導体・デジタル産業 バイオ・健康医療	○	◎		

# 国が整備するNanoTerasu新規ビームラインラインアップ案（フェーズⅢ以降）

フェーズⅢ以降の整備計画については、状況に応じ随時計画を見直し

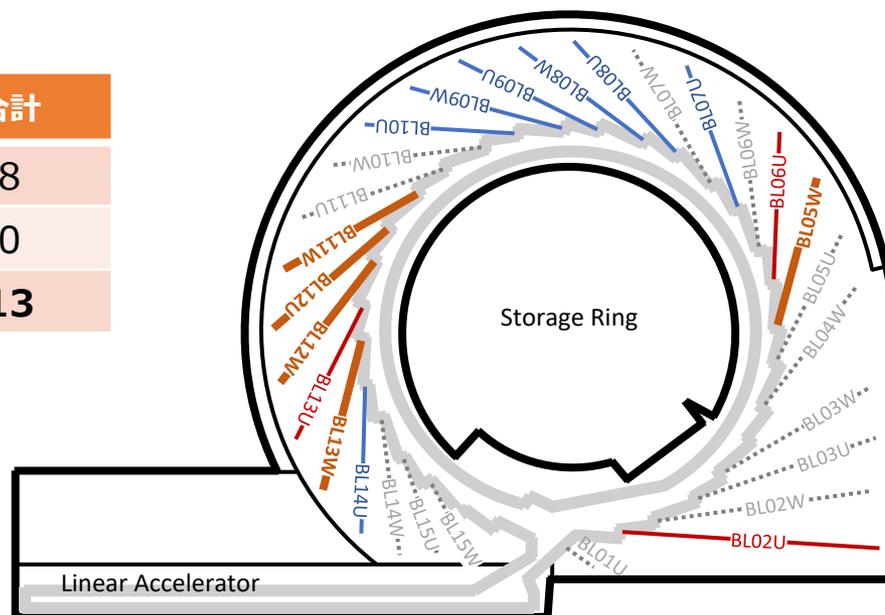
	分類	光源	エネルギー	エンドステーション	特色・目的	国の戦略分野	ユーザーニーズ	分野多様性	NanoTerasuの強み	新規性開拓
<b>フェーズⅢ(2028-2030)・応用拡大共用BL</b>										
6	XAFS	多極 ウイグラー	3- 25 keV	(quick) XAFS	特殊環境	グリーンイノベーション マテリアル バイオ・健康医療	○			
7	X線回折	多極 ウイグラー	10-20 keV	X線回折・散乱	特殊環境	グリーンイノベーション マテリアル バイオ・健康医療	○			
<b>フェーズⅣ(2031-)・先端利用共用BL</b>										
8	X線回折	多極 ウイグラー	10-20 keV	X線回折・散乱	タンパク結晶構造解析	バイオ・健康医療	○			
9	X線回折 X線散乱	真空封止 アンジュレータ	2.1-12 keV	コヒーレントX線回折 超小角散乱	コヒーレント回折イメージング、 タイコグラフィ、 X線光子相関分光	グリーンイノベーション マテリアル 量子技術 半導体・デジタル産業 バイオ・健康医療	○	○	◎	
10	イメージング	APPLE-II アンジュレータ	18-3000 eV	原子分子イメージング	マルチプローブ多機能 放射光SPM	マテリアル 量子技術				◎
11	X線分光	Helical8 アンジュレータ	10-100eV?	ARPES	高エネルギー分解能ARPES	マテリアル 量子技術	○			
<b>R&amp;D BL</b>										
1	研究開発	真空封止 アンジュレータ	1keV-5keV	TX光学素子開発 TAXPES, TXMCD	雰囲気下共鳴PES, XPS 生体必須元素 (S, P, Cl, K, Caなど)、4d を狙った分光等	グリーンイノベーション 半導体・デジタル産業 マテリアル 量子技術 バイオ・健康医療			◎	◎
2	研究開発	多極 ウイグラー	2.1-5.5keV 5-30keV	XAFS ウイグラー利用開発	テンダー-XAFS等	グリーンイノベーション 半導体・デジタル産業 マテリアル 量子技術 バイオ・健康医療			○	

# 国が整備するNanoTerasuビームライン本数（案）

## フェーズII（2027年）

	アンジュレータ	ウイグラー	合計
共用BL	4	4	8
R&D	0	0	0
残りポート	5	8	13

- コアリションBL（フェーズI）
- 共用BL（フェーズI）
- 共用BL（フェーズII）  
05W:X線分光、11W:イメージング、  
12U:イメージング、12W:XAFS、13W:X線回折



フェーズIII以降の整備計画については、状況に応じ随時計画を見直し

## フェーズIII（2030年）

	アンジュレータ	ウイグラー	合計
共用BL	4	6	10
R&D	0	0	0
残りポート	5	6	11

## フェーズIV（2031年～）

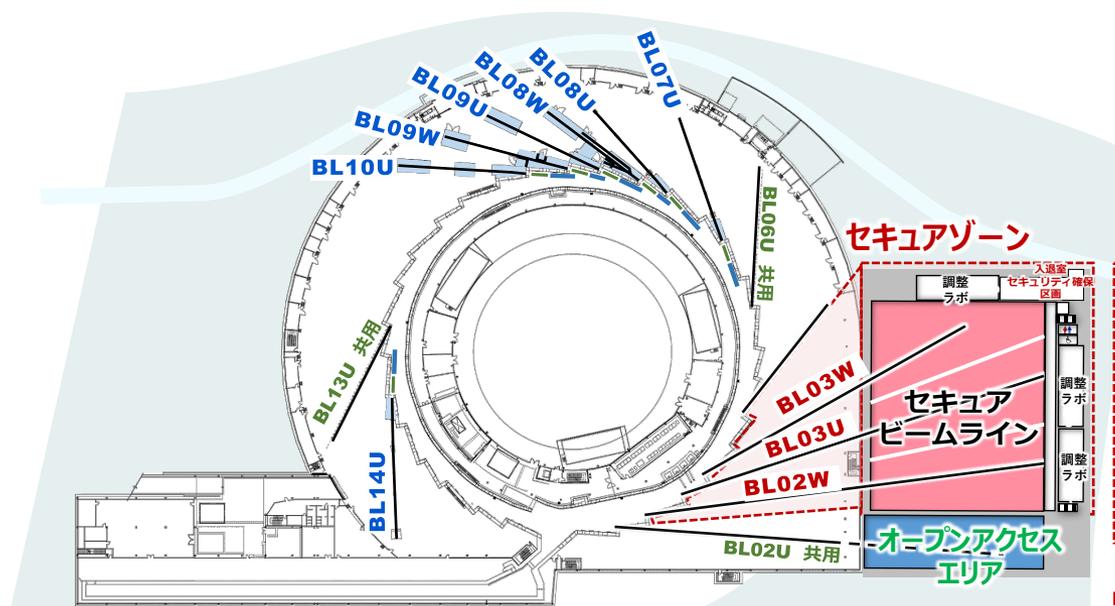
	アンジュレータ	ウイグラー	合計
共用BL	7	7	14
R&D	1	1	2
残りポート	1	4	5

# セキュアゾーン構想

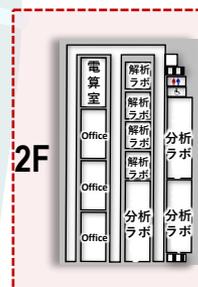
- 重要な機微技術の研究開発は、よりセキュアな環境で、という企業の要望
- 犯罪捜査、安全保障など公的機関による機密性の高い計測、研究開発の必要性

- 東側の拡張エリアにセキュアゾーンを設定し、セキュアな実験が可能なビームラインを新設
- 拡張エリアには、光源からのライン長さを活かした光学系のビームラインも設置（アンジュレータービームライン）
- セキュアゾーンは、共用制度、コアリション制度双方にニーズがあり、ビームラインの整備、運用等について、課題が存在するため、引き続き検討を進める

## セキュアゾーンに設置されるビームラインの例



長尺・ハイコヒーレンスを活かした結像型CT、ハイレゾリューション・タイコグラフィー-XAFS、X線ラマンイメージング等



人的・組織的セキュリティクリアランス、情報セキュリティ、データセキュリティの確保

# (参考1) NanoTerasu共用ビームライン整備検討委員会

## 委員会の目的

- (1) 現在整備中の NanoTerasu における共用ビームラインのあり方、役割について、放射光分野の専門的見地から提言を行う。
- (2) 今後整備すべき新規ビームラインの候補をまとめる。

## 委員名簿

氏名	所属
原田 慈久 (委員長)	東京大学 物性研究所極限コヒーレント光科学研究センター 教授 同 シンクロトン放射光連携研究機構 機構長
朝倉 清高	北海道大学 触媒科学研究所 教授
雨宮 健太	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 教授・副所長
金子 美智代	トヨタ自動車株式会社 電動化・環境材料技術部 材料基盤開発室 主査
解良 聡	自然科学研究機構 分子科学研究所 教授 同 極端紫外光研究施設 施設長
為則 雄祐	東京都立大学 総合研究推進機構 教授
西堀 英治	筑波大学 数理物質系物理学域 教授 同 エネルギー物質科学研究センター センター長
原田 昌彦	東北大学 大学院農学研究科 教授
松田 巖	東京大学 物性研究所極限コヒーレント光科学研究センター 教授
百生 敦	東北大学 多元物質科学研究所 教授
内海 涉	量研 次世代放射光施設整備開発センター センター長
高橋 正光	量研 次世代放射光施設整備開発センター 高輝度放射光研究開発部 次長
堀場 弘司	量研 次世代放射光施設整備開発センター 高輝度放射光研究開発部 ビームライングループ 上席研究員

## 委員会開催

第1回 令和5年9月29日

- ・ナノテラスビームラインの状況について
- ・今後整備すべき共用BLの方針・諸条件について
- 他

第2回 令和5年11月15日

- ・産業利用からのコメント
- ・国の科学技術施策の動向
- ・国内外の放射光施設の動向
- ・ビームライン技術開発の動向 他

第3回 令和5年12月22日

- ・新規整備が望まれるビームラインについて
- 他

## (参考2) ユーザーニーズ

### これまでに行われた主なニーズ調査

- 次世代放射光施設に関するニーズ調査報告書（H26量子ビーム利用推進小委員会）  
[https://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/ryoushi/detail/1357031.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/ryoushi/detail/1357031.htm)
- ビームライン意見公募（H30次世代放射光施設ビームライン検討委員会）  
<https://www.qst.go.jp/site/3gev/41909.html>
- 利用ニーズアンケート調査（R4文部科学省研究環境課）

- ① 超高真空、最表面層の克服
- ② 時間分解実験
- ③ 15-30keV付近のX線CT
- ④ 汎用XAFS
- ⑤ 蛋白質結晶構造
- ⑥ 粉末XRD、単結晶XRD、表面XRD
- ⑦ 半分は学術利用
- ⑧ レーザー光源との複合利用、補助的計測機器との連携
- ⑨ 小角～中角～広角の途切れのないX線散乱測定
- ⑩ テンダーX線の活用（例：Al-K殻、S-K殻領域の分光）

# (参考3) 分野多様性

## 国の科学技術政策として重要な研究開発領域

### ICT・エレクトロニクス領域

#### 関連施策

- AI戦略2022 (R4.4)
- 量子未来産業創出戦略 (R5.3)
- マテリアル革新力強化戦略 (R3.4)

#### 代表的な研究開発課題

##### 先進半導体材料・デバイス技術

X線分光 XAFS XRD

イメージング

##### 量子特有の性質の操作、制御、活用

X線分光

##### ナノスケール高機能材料

X線分光 XRD X線散乱 XAFS

##### バイオハイブリッドロボット

X線散乱 イメージング

### 環境・エネルギー領域

#### 関連施策

- 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (R3.6)
- 脱炭素成長型経済構造移行推進戦略 (R5.7)
- マテリアル革新力強化戦略 (R3.4)

#### 代表的な研究開発課題

##### 電気-物質エネルギー高度変換技術

X線分光 XRD X線散乱 XAFS

##### マルチスケール熱制御技術

X線分光 X線散乱

##### 資源循環・炭素循環を両立する材料技術

X線分光 XRD X線散乱 XAFS

##### 水素・アンモニアの製造・輸送・利用

X線分光 XRD X線散乱 XAFS

##### CO<sub>2</sub>の回収・貯留・有効利用

X線分光 XRD X線散乱 XAFS

##### 極限環境下の高信頼性材料

イメージング

### バイオ／生命科学・医療領域

#### 関連施策

- バイオ戦略2020 (R2.6)
- ワクチン開発・生産体制強化戦略 (R3.6)
- マテリアル革新力強化戦略 (R3.4)

#### 代表的な研究開発課題

##### 生体適合性の拡張的理解と制御

X線分光 X線散乱 イメージング

##### 生物機能を活かすハイブリッド材料

X線分光 X線散乱 イメージング

##### 将来のパンデミックに備えた、感染症研究の在り方

XRD イメージング

##### 新しい医薬モダリティの創出

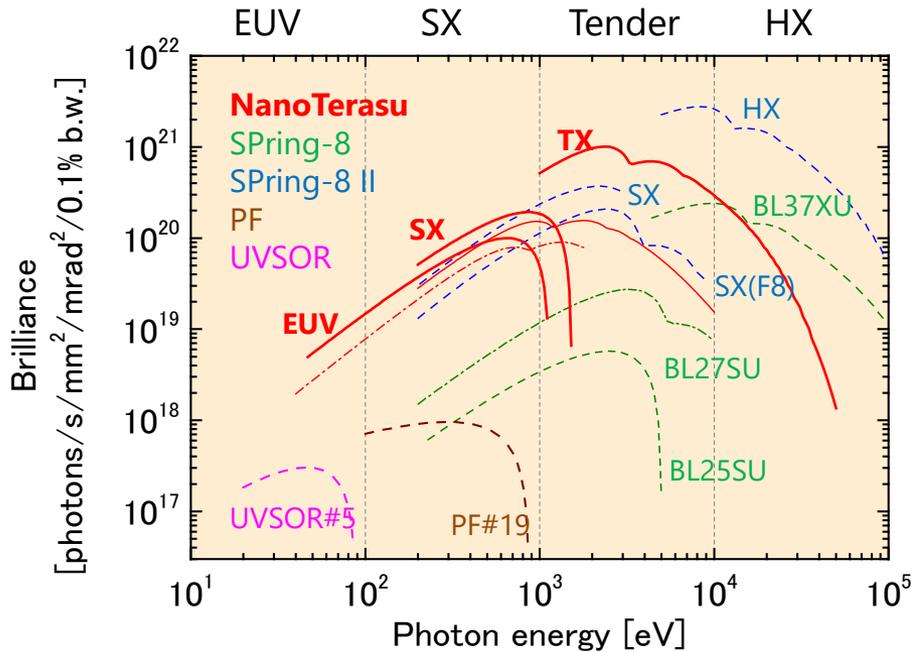
XRD

##### 農業・生物生産の持続性向上

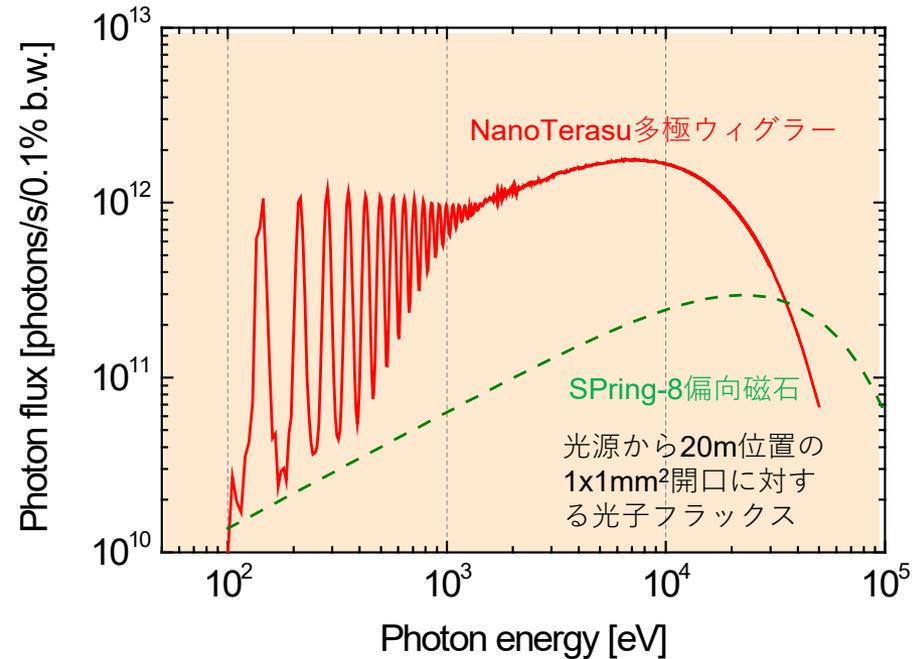
X線分光 X線散乱 イメージング

## (参考4) NanoTerasuの強み

準単色光源 (アンジュレーター)



白色光源



- NanoTerasuの長直線部 (4.2m) に設置されるアンジュレーターは軟X線～テンダーX線に強みを持つ高輝度光源
- NanoTerasuの短直線部 (0.6m) に設置される多極ウィグラーは3-10keV程度の領域に強みを持つ白色光源

# (参考5) 新規性開拓

## テnder-X線利用

### 学術・産業界からのニーズ

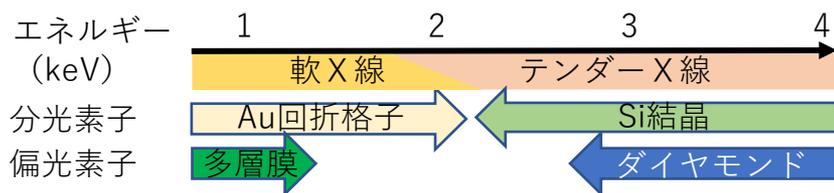
NanoTerasuの強みである光子エネルギー1-4keVのテnder-X線は、スピントロニクスをはじめとする量子科学技術研究にきわめて有用かつユニークなプローブとして期待されている。

### テnder-X線利用に係る技術的課題

#### 【高効率光学系開発の必要性】

軟X線に比べ高エネルギーのテnder-X線領域では、ビームライン光学系の効率が低いために試料上のフラックス不足を避けられない。

【光学素子による偏光制御の必要】NanoTerasuのような低エミッタンス光源では、挿入光源による偏光切り替えの際に生じる電子軌道（光源点）の揺れの影響が顕著になり、本来のビームライン性能を発揮できない。



テnder-X線用多層膜光学素子の開発及び実装により、磁性・スピントロニクス材料、トポロジカル物質等の電子状態分析や、磁気デバイス、二次電池、溶液電池セル等のオペランド分析等、広範な量子科学技術に利用されるテnder-X線ビームラインを整備

## マルチモーダル測定

### STMと放射光X線の融合による単一分子分光

原子分解能を有するが元素識別のできないSTMと、吸収端利用による元素選択性・化学状態選択性を有する放射光分光を組み合わせて、単一分子の分光測定を実現

### 米国APSの例



hν : 400-1900 eV  
Spot-size: 10 μm × 9 μm (800 eV)  
Flux: ~2 × 10<sup>12</sup> photons s<sup>-1</sup> (800 eV)

