

特定放射光施設NanoTerasuの 役割と展望

量子科学技術研究開発機構

NanoTerasuセンター

高橋正光

内容

1. NanoTerasuの光源特性
2. NanoTerasuの増強計画
 - a. 共用ビームラインの増設
 - b. R&Dプラットフォームの整備
3. 共用ユーザーのニーズ
4. まとめ

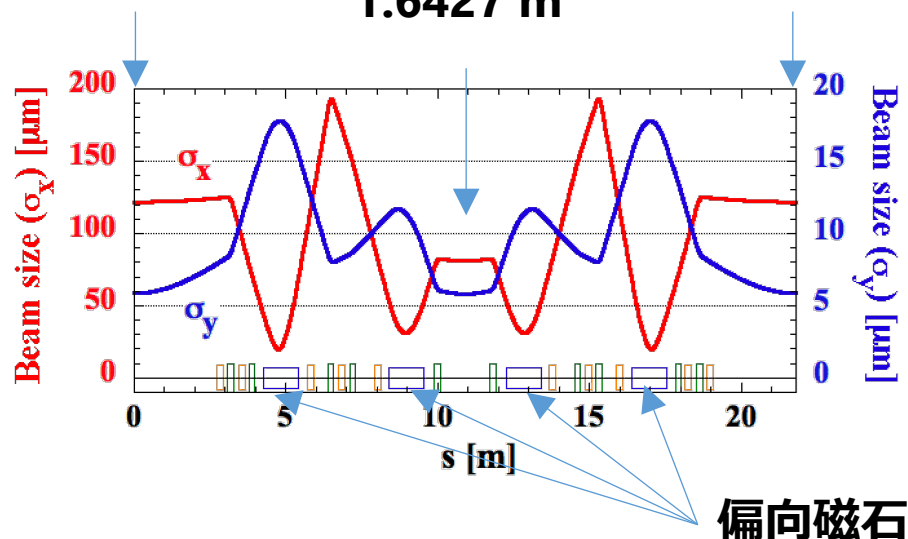
NanoTerasuの光源

ラティスユニットセル × 16

長直線部
5.44 m

短直線部
1.6427 m

長直線部
5.44 m



偏向磁石

光源として **利用しない**

挿入光源

長直線部 有効長4.2m×14か所
アンジュレータ
(可変エネルギー単色光源)

短直線部 有効長0.6m×14か所
多極ウィグラー
(広スペクトル光源)

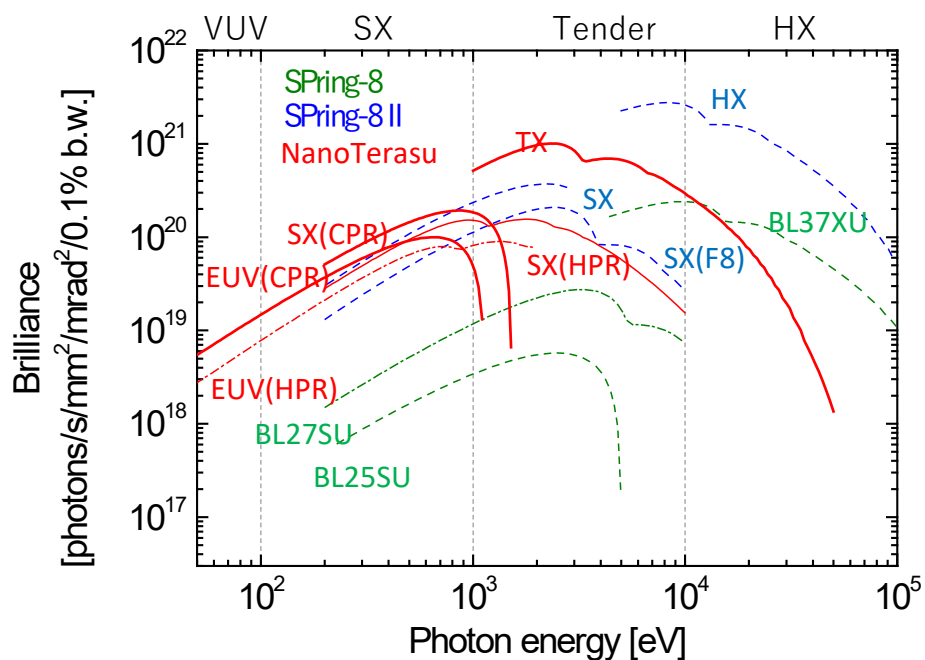


NanoTerasuの光源特性

- ✓ NanoTerasuの蓄積リングには長直線部（5.4m）と短直線部（1.6m）が存在
- ✓ 長直線部のアンジュレーターと短直線部の多極ウィグラーでは光源の性質が全く異なる

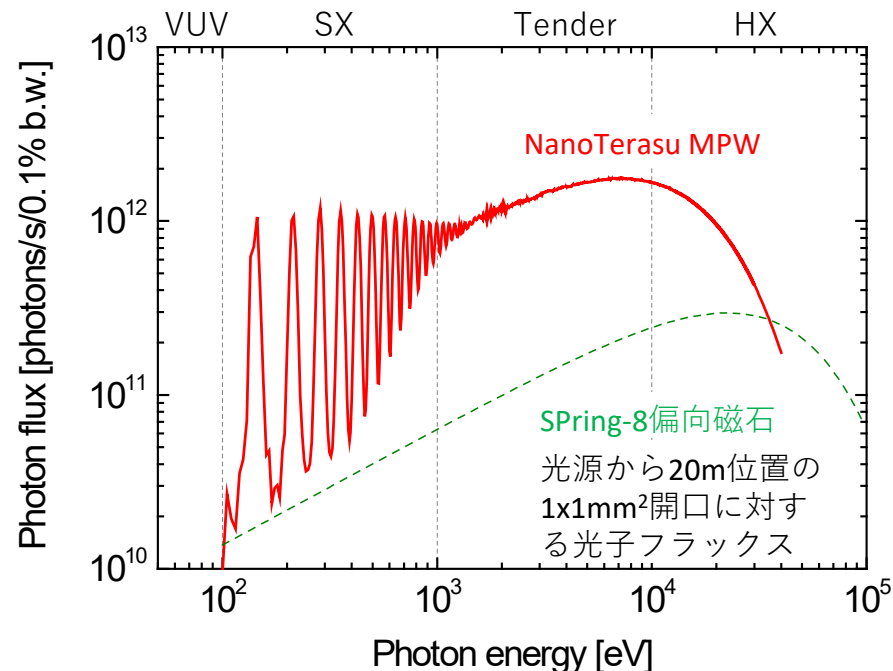
(a) アンジュレーター

軟X線～テンダー領域に強みを持つ
高輝度光源



(b) 多極ウィグラー

テンダーX線領域でSPring-8の
偏向磁光源の約10倍のフラックス



NanoTerasuのビームラインラインナップ（現状）

共用BL

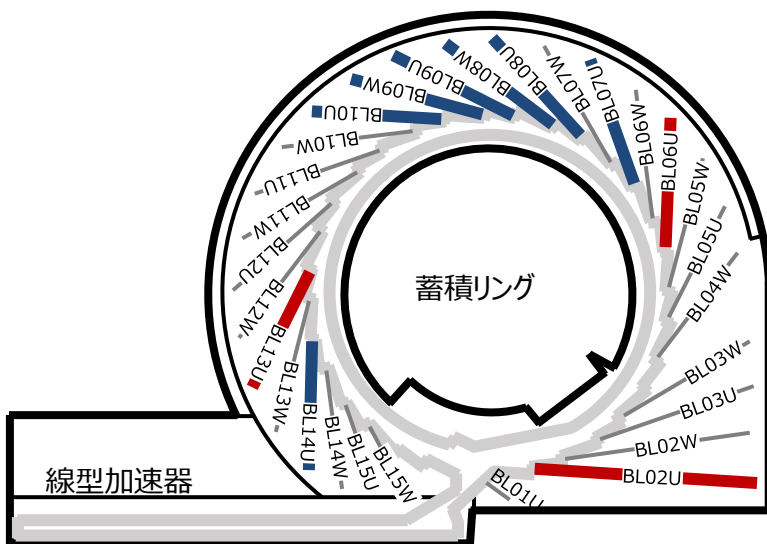
3本



広く産学官に開かれ最先端科学から
産業利用まで誰でも利用可能

BL02U 軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱
BL06U 軟X線ナノ光電子分光
BL13U 軟X線ナノ吸収分光

2025.3~



コアリションBL

7本



コアリション加入メンバーが
組織的に利用

- BL07U 軟X線電子状態解析
- BL08U 軟X線オペランド分光
- BL14U 軟X線イメージング
- BL10U X線コヒーレントイメージング
- BL08W X線構造-電子状態トータル解析
- BL09U X線オペランド分光
- BL09W X線階層的構造解析

2024.4~

2026年度~コアリションビームラインの共用利用

- 共用においても高輝度軟X線に加えて、テnder X線領域のアンジュレタ光、ウイグラー光が利用可能
- コアリションBLの共用利用は全ビームタイムの一部
- 同じ手法にもさまざまな発展形・応用形がありうる
- 量的にも質的にも共用ニーズのすべては満たさない

NanoTerasuのビームラインラインナップ（現状）

共用BL

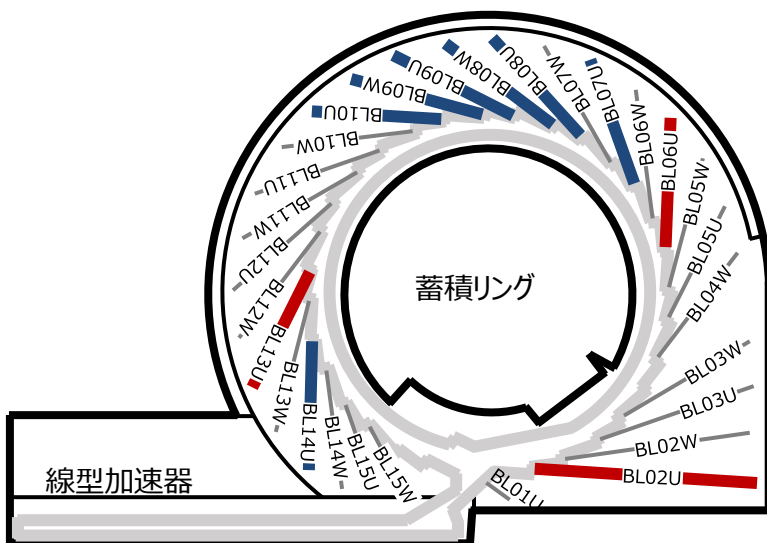
3本



広く産学官に開かれ最先端科学から
産業利用まで誰でも利用可能

BL02U 軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱
BL06U 軟X線ナノ光電子分光
BL13U 軟X線ナノ吸収分光

2025.3~



コアリションBL

7本



コアリション加入メンバーが
組織的に利用

- BL07U 軟X線電子状態解析
- BL08U 軟X線オペランド分光
- BL14U 軟X線イメージング
- BL10U X線コヒーレントイメージング
- BL08W X線構造-電子状態トータル解析
- BL09U X線オペランド分光
- BL09W X線階層的構造解析

2024.4~

BL		アンジュレータ ポート数	ウイグラー 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

早急に増設が必要

NanoTerasu共用ビームラインの整備計画の検討

NanoTerasu共用ビームライン整備検討委員会

- (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、施設設置者である QST としてのビジョンを定めるにあたり、放射光分野の専門的見地から 提言をおこなう。
- (2) 上記ビジョンをふまえ、今後整備すべき新規ビームラインの候補をまとめる。

構成

委員13名（QST職員、外部委員）

開催日程

- 第1回 令和5年9月29日
- 第2回 令和5年11月15日
- 第3回 令和5年12月22日

科学技術・学術審議会 研究・計画評価分科会 量子科学技術委員会 量子ビーム利用推進小委員会

令和6年5月17日

3GeV高輝度放射光施設NanoTerasuのビームラインの計画的な増設について 報告書

https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/090/houkoku/1406563_00003.htm

委員会における検討事項

(a) 共用促進法に基づく基準

- 先端性と汎用性のバランス

(b) ユーザーニーズ

- 複数回にわたるニーズ調査
- SPring-8における課題採択及び成果創出状況

(c) 国内外施設の動向

(d) 国の施策と放射光利用

- (国研) 科学技術振興機構 研究開発戦略センターがとりまとめた研究開発の俯瞰報告書(2023年5月)から、重要な研究開発を「ICT・エレクトロニクス」「環境・エネルギー」「バイオ／ライフサイエンス・医療」の3領域に抽出・分類し、放射光分析の活用が期待される課題として整理。
- ICT・エレクトロニクス領域：先進半導体材料・デバイス技術、量子特有の性質の操作・制御・活用、ナノスケール高機能材料、等
- 環境・エネルギー領域：電気-物質エネルギー高度変換技術、マルチスケール熱制御技術、水素・アンモニアの大量製造/輸送技術・利用技術深化、等
- バイオ／ライフサイエンス・医療領域：生物機能を活かすハイブリッド材料、新しい医薬モデルの創出、農業・生物生産の持続性向上、等

産業界からの共用ビームラインに対する要望

- SPring-8 等、他の放射光施設で行われている手法のレベルアップ
（オペランド時間分解、空間分解、軽元素）×（高輝度、コヒーレンス性、テnder領域）
手法としては新しいわけではないが、NanoTerasu だからこそ、このレベルまで計測できるという手法の確立を行い、共用化されることを期待。
- ニーズの高い解析手法の共用利用
（in-situ、ナノビーム、高エネルギー領域）×（イメージング、XAFS、XRD、SAXS）
産業界だけでなく全てのユーザーにとってニーズの高い解析手法は共用 BL として設置を希望。
- これまでなかった新規の手法開発
- コアレーションビームラインは、加入金を収めた企業しか利用できず、高額な加入金負担が困難な中小企業やスタートアップにとっては非常にハードルが高い。NanoTerasuの産業利用を促進するために、共用ビームラインにおいては、特にこれらのユーザーにも配慮したラインアップや、利用制度の構築をお願いしたい。

増設にあたり考慮すべきポイント

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**

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**

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**3-10keV白色光源**

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**

NanoTerasu共用BLの整備計画

		フェーズⅠ (整備期)	フェーズⅡ	フェーズⅢ	フェーズⅣ
整備期 共用BL (グループ1)	- 国内における高輝度軟X線利用研究の空白状態の解消 - 軟X線分光の主要測定手法をカバー RIXS, ARPES, XMCD	建設・整備	高度化		
高ユーザー ニーズ共用BL (グループ2)	- 全ての研究者への利用機会、需要に応える測定基盤の提供 - 半導体・デジタルなど国の戦略分野における先端シーズ開拓に早期着手 EXAFS, XRD, SX imaging, TX imaging, HXPES		早期に実現が求められる計画 検討 建設・整備		
応用拡大 共用BL (グループ3)	- 拡大する応用範囲への対応 - 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 EXAFS, XRD		状況に応じ随時計画を見直し フィージビリティスタディ	建設・整備	
先端利用 共用BL (グループ4)	- 技術開発を要する先端的放射光利用 - マルチモーダル測定 SR-SPM, CDI, ARPES, XRD		既存BLにおける技術開発		建設・整備
R&D BL	- 新しい放射光利用の地平を拓く - フェーズⅡ～Ⅲにおいて、必要な研究開発に着手する		研究開発	建設・整備	共用化

グループ2 ビームライン選定の考え方

- ・ 共用ビームラインの目的である、**個人探求型・シーズプッシュによる科学技術・学術の新しい研究分野の開拓**を可能にする、多くの利用者にかかれたビームラインを整備する。
- ・ フェーズⅡにおいては、「**幅広い研究者への利用機会の提供及び需要増に答える測定基盤の整備**」を基本的指針とする。
- ・ アンケート調査やSPRING-8ビームラインの競争率の状況などから、**利用ニーズが非常に高く、すでに需要に対してビーム供給が不足している分野のビームライン整備を優先**させるべき。
- ・ **ウィグラーポートの有効活用**を考えた場合、上記の利用ニーズの観点と合わせて、**放射光として汎用性の高いXAFS、X線回折、HAXPESのビームラインを、まず共用ビームラインとして早急に整備することが妥当**。これらは放射光施設におけるビームラインとして標準装備されているべきものであり、国の科学技術施策への貢献を含めて幅広い分野への適用が期待される基盤ツールである。
- ・ **軟X線イメージングは、NanoTerasuの特長を発揮できる先端的ビームラインであり、優先的に整備を進めるべき**。また、**硬X線（白色やピンク光を含む）を用いた種々のイメージングも近年需要が高く大きく発展している分野**であることから、**イメージングについては、軟X線と硬X線（テnder領域）の2本のビームラインをフェーズⅡにおいて並行して整備することが重要**。
- ・ 整備においては、ビームライン本体のみならず、ニーズを踏まえた**測定周辺環境の整備もあわせて行う必要がある**。また複数の測定手法を組み合わせた「マルチモーダル」についてもその方向性を見据えた検討が必要。
- ・ SPRING-8-Ⅱ改造による停止期間（2027年度想定）におけるSPRING-8利用者のNanoTerasuへの一部受け入れも想定して整備を進める。

グループ2 ビームラインラインナップ

	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
1	XAFS	多極 ウィグラー	3- 25 keV	(quick) XAFS	テンダーX線領域 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	X線回折	多極 ウィグラー	3-25 keV	X線回折・散乱	テンダーX線領域における共鳴X 線回折 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	イメージ ング	多極 ウィグラー	3-25 keV	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 テンダーX線領域における吸収端 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	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	X線分光	多極 ウィグラー	3- 13 keV	HAXPES	テンダーX線領域 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	○	◎		

グループ2 ビームラインラインナップ

	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
1	XAFS	多極 ウイグラー	3- 25 keV	(quick) XAFS	テンダーX線領域 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	X線回折	多極 ウイグラー	3-25 keV	X線回折・散乱	テンダーX線領域における共鳴X 線回折 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	イメージング	多極 ウイグラー	3-25 keV	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 テンダーX線領域における吸収端 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	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	X線分光	多極 ウイグラー	3- 13 keV	HAXPES	テンダーX線領域 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	○	◎		

グループ3ビームラインラインナップ

- ・フェーズⅢ以降の整備計画については、状況に応じて随時計画を見直すことを前提とする。
- ・フェーズⅢでは、「**拡大する応用範囲への対応**」を目的とした共用ビームラインを整備。測定における様々な需要（**極限環境、特殊環境、先進的利用など**）に対応できるXAFS、X線回折ビームラインの整備を実施。
- ・汎用性の高いXAFS、X線回折等の測定については、ガス雰囲気下や溶液中など、実際の使用環境・動作環境・製造環境に対応したオペランド測定やその場測定の利用ニーズは高く、技術的にも可能であるので、フェーズⅡで整備されるビームラインにおいても実施できるようにすべきであるものの、有毒・有害なガスに対する安全対策や排気されるガスの除害など、実験を実施するにあたり特殊な設備を必要とする場合がある。同様に、高圧高温などの極限環境や、ユーザーが工夫した特殊環境、放射光以外の測定手法と組み合わせるマルチモーダル測定などの先進的利用に対するニーズもある。それらを実現する設備をユーザーが交代するたびに入れ替えることは、ユーザーが多くビームタイムが逼迫しているビームラインにおいては、困難である。これをふまえ、極限環境や特殊環境を必要とする利用は、フェーズⅡにおける利用状況を見ながら、フェーズⅢで独立させる。

	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
グループ3 応用拡大共用BL										
6	XAFS	多極 ウイグラー	3- 25 keV	(quick) XAFS	テンダーX線領域 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	3- 25 keV	X線回折・散乱	テンダーX線領域 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	○			

グループ4ビームラインラインナップ

- ・ フェーズⅣの整備計画についても、状況に応じて随時計画を見直すことを前提とする。
- ・ フェーズⅣでは、それまでに蓄積された技術をベースとしてより先端的なビームラインを整備。**アンジュレータ光源を基本として、マルチプローブ多機能放射光走査プローブ顕微法（SPM）やコヒーレンスを活用した最先端イメージング技術などの手法を取り入れたサイエンスピークの創出を目指す。**
- ・ フェーズⅣのラインアップには、光子エネルギー範囲を拡大する光源技術、複数の測定手法を組み合わせる必要があるマルチモーダル測定技術や、高度な除振・安定化技術など、技術開発課題の解決を条件とするビームラインが含まれる。これらの課題は、解決に概ね5年程度の開発期間が見込まれるものが多く、それらの克服なしには共用ビームラインとしての整備が始められない。そのために、既存のNanoTerasuビームラインや他施設のビームラインも活用して**フェーズⅡの期間から研究開発に着手し**、フェーズⅣにおける確実な共用ビームライン整備につなげるべき。

	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
グループ4 先端利用共用BL										
8	X線回折	多極 ウィグラー	3- 25 keV	X線回折・散乱	タンパク結晶構造解析 （タンダーX線領域）	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	タンダーX線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 放射光軟X線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	○			

R&Dビームライン

- NanoTerasuとして、光源や光学系の開発や高度化のR&Dを主目的とするビームラインが存在することは**極めて重要**（ユーザー利用を主目的とする共用ビームラインにおいて、このような開発のみを目的としたビームタイムを長期時間確保することは難しい）。
- 特にNanoTerasuの強みである**テンダーX線の光学系・光学素子の開発は最重要課題**のひとつ。

	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
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XPS 共鳴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	XAFS ウイグラー利用開発	低エネルギーテンダー-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			○	

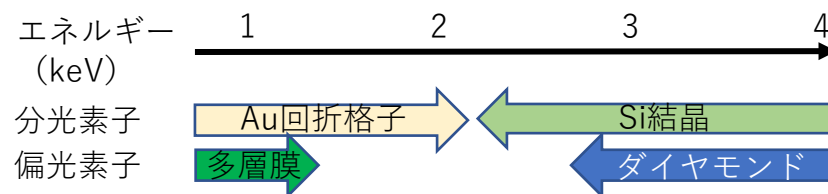
NanoTerasuの強みであるテンダーX線は、**スピントロニクスをはじめとする量子科学技術研究にきわめて有効かつユニークなプローブ**として期待。

【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ンダー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。



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
- 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
- 利用ニーズアンケート調査 R4文部科学省研究環境課
2022年2月22日～3月25日
- SPRUC各研究会代表者向けアンケート QST
2024年10月4日～10月10日
- 学協会利用ニーズアンケート調査 QST
2025年5月19日～6月23日

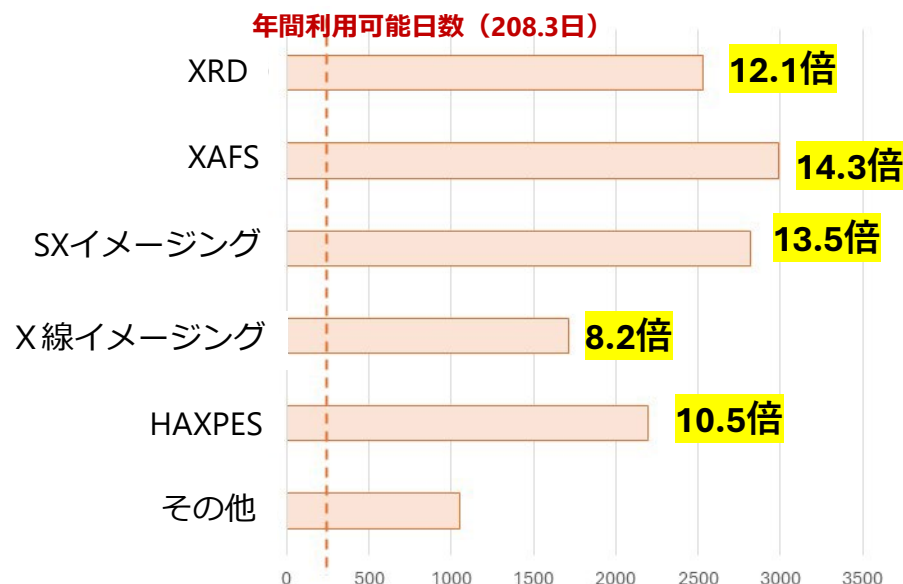
ユーザーニーズ（SPRUC研究会）

実施期間 2024年10月4日～10月10日

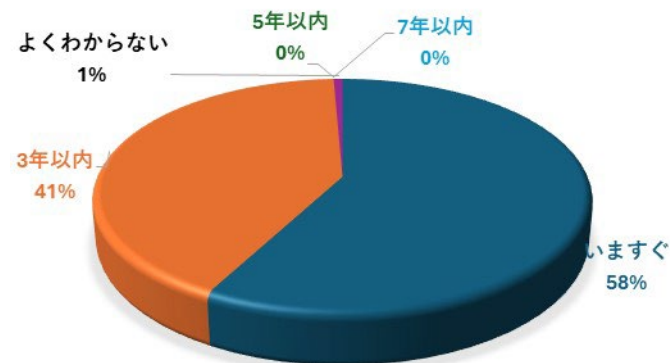
依頼先 SPRUC研究会代表者

- ビームラインごとに**約10倍**のニーズ
- ナノテラスユーザー候補：**5,269人**
- 希望日数総数：**約13,278日**

年間利用希望日数



増設BLの利用希望時期



ユーザーコミュニティからの要望

共通

- 施設主導で**共用性の高い装置**を導入して頂きたい。汎用性を担保するために全てが中途半端になることは避けて頂きたい。
- **ユーザーフレンドリーな設計**にしていだきたいです。
- **SPring-8アップデート停止期間にSPring-8代替として利用できる共用BL増設**を希望します。

X線回折

- **汎用的な回折ビームライン**は是非必要。

XAFS

- 硬X線XAFSなど産業利用が多い手法に関しては、早急な**複数本の整備**を希望します。
- XAFSについては、**汎用性**は誰もが認めるところで、ビームラインで高いニーズに応えることは必要
- X線発光分光/HERFD-XAFS/X線ラマン散乱など二次光学過程を利用したX線分光はXAFSから**一歩進んだ手法**であり、先端大型研究施設に相応しい実験手法。SPring-8での利用実績を考えるとこれから利用者の増加、利用分野の拡大が期待できる。

イメージング

- 特殊用途でなく、**汎用イメージングBL**を整備すると、多数の利用がある。

HAXPES

- XAFS、**HAXPES**の利用が見込める。

ユーザーコミュニティからの要望

放射光構造生物学

- タンパク質結晶のXRDビームラインが共用で設置されることを望む。

原子分解能ホログラフィー

- 原子分解能ホログラフィについても検討をいただきたい。

コンプトン散乱

- 高エネルギーX線（ $\sim 100\text{keV}$ ）を利用している方が多いので、ナノテラスにおけるエネルギー領域での利用は考えにくいですが、コンプトン-ラマン散乱の可能性があるのであれば、興味がある。

放射光赤外

- SPring-8(43IR)に変わるビームラインを増設してほしい。

NanoTerasu共用BL増設の道筋まとめ

1. 世界最高水準の軟X線向け放射光施設の恩恵を最大限に享受するためには、早期にビームラインの空きポートを計画的に埋めることが重要。
2. 共用ビームラインの増設計画は、 NanoTerasuの強み、ユーザーニーズ、分野多様性、新規性開拓の要素を考慮。
3. NanoTerasuの整備期をフェーズⅠとし、ビームラインの増設計画はフェーズⅡ、フェーズⅢ、フェーズⅣの3段階に分ける。
 - ① フェーズⅡでは、高ユーザーニーズという観点から放射光施設の基本的な用途を持ったビームラインを5本整備する。これらのビームラインは国の重点分野を推進のために、世界最高水準の研究機会・測定環境を提供する。また、フェーズⅢ以降の整備が想定されているビームラインのフィージビリティスタディや技術開発にも着手。
 - ② フェーズⅢ以降は状況に応じて計画を最適化することとし、フェーズⅢでは特殊環境下での実験ニーズに応えることを目的としたビームラインを増設する。
 - ③ 技術課題はあるが広範な分野への貢献が期待される計測技術について、エンドステーションの研究開発を主として行うものはフェーズⅣにて整備を行う。
 - ④ 光源、ビームライン光学系等の研究開発を要するものはR&DビームラインとしてフェーズⅡから研究開発を行いながら整備を進める。