

NanoTerasuの現状と今後

量子科学技術研究開発機構

NanoTerasuセンター

高橋正光

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

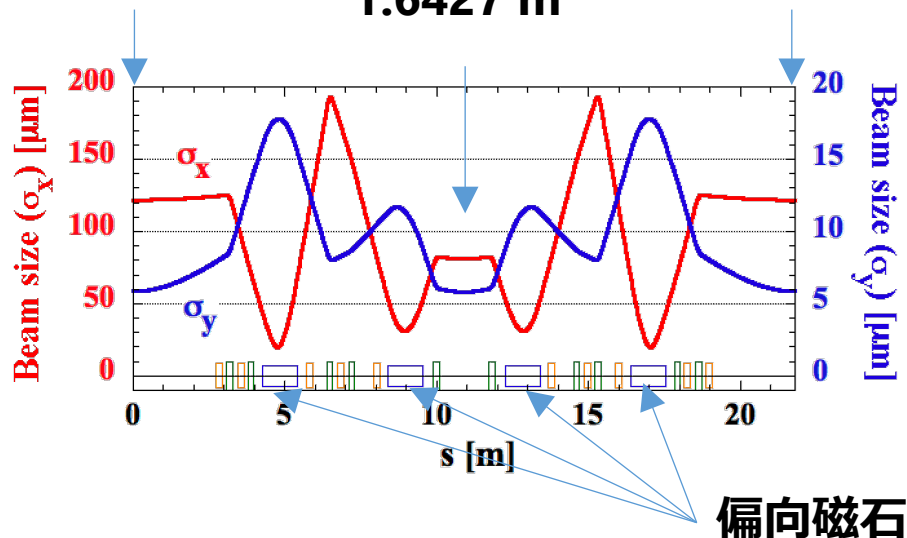
3GeV高輝度放射光施設NanoTerasuのビームラインの計画的な増設について 報告書

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

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)

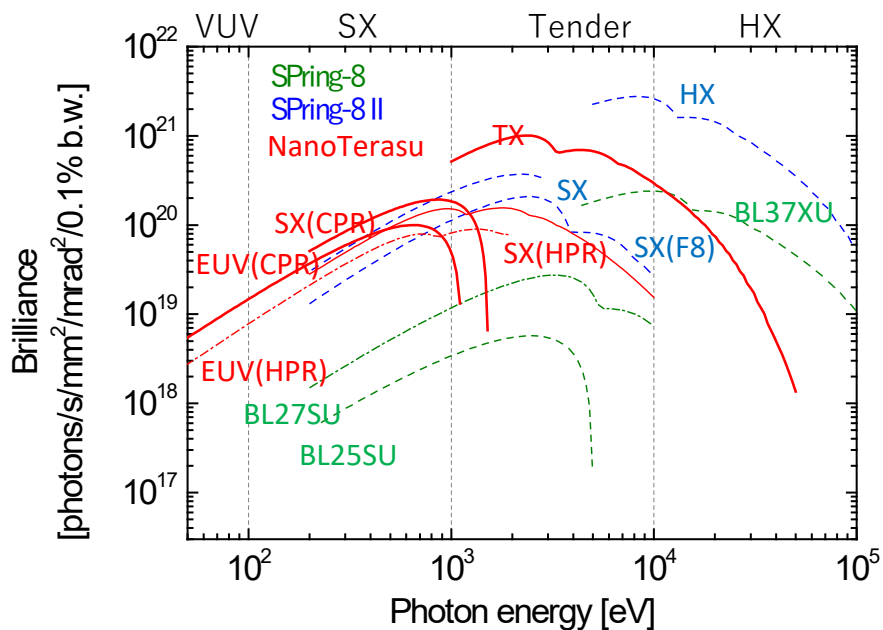
短直線部 有効長0.6m×14か所
多極ウィグラー
(広スペクトル光源)



NanoTerasuの光源特性

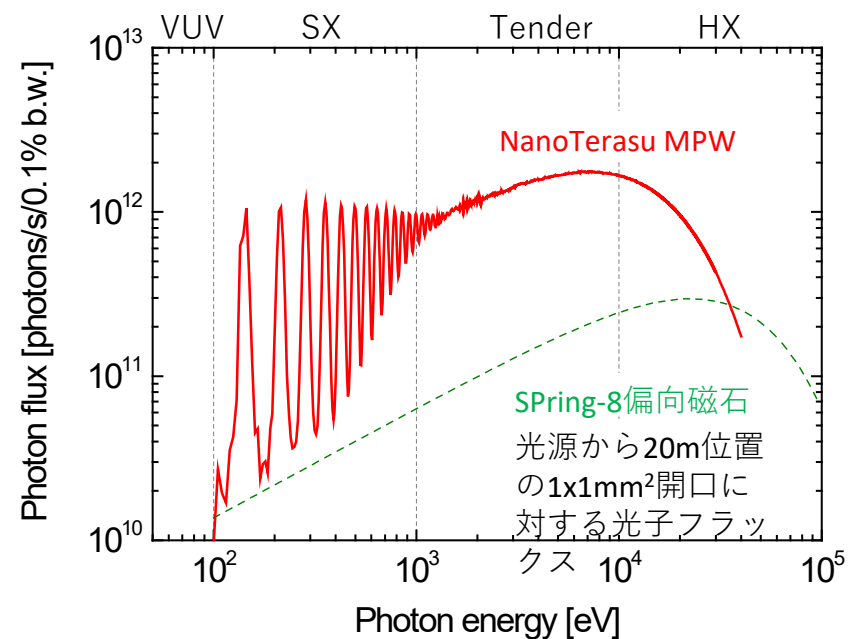
(a) アンジュレーター

軟X線～テンダー領域に強みを持つ
高輝度光源



(b) 多極ウイグラー

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 

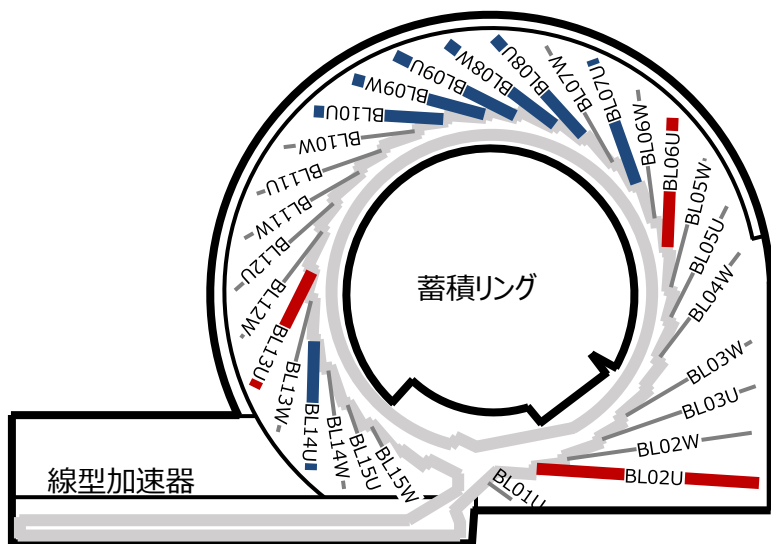
広く産学官に開かれ最先端科学から
産業利用まで誰でも利用可能

- 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

コアリジョンBL 7本 

コアリジ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



BL		アンジュレータ ポート数	ウィグラー 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
	コアリジョン	5	2	7
残り		6	12	18

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

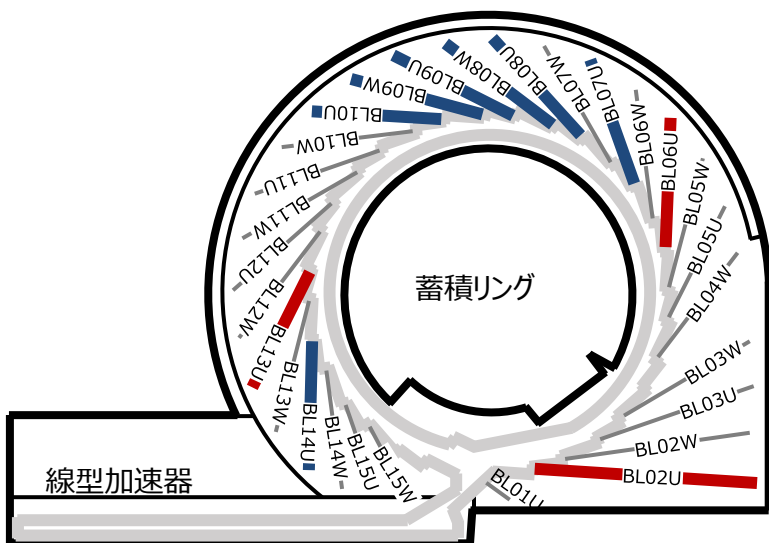
- BL02U** 軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱
- BL06U** 軟X線ナノ光電子分光
- BL13U** 軟X線ナノ吸収分光

コアリジョンBL 7本



コアリジ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



早急に増設が必要

BL		アンジュレータ ポート数	ウィグラー 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
	コアリジョン	5	2	7
残り		6	12	18

共用法適用施設としての役割

- ・「共用促進法」に基づく基準
 - 先端的な科学技術分野において比類のない性能 **(先端性)**
 - 科学技術の広範な分野における多様な研究等に活用 **(汎用性)**
 - (先端性と汎用性のバランス)**
 - ビームライン性能（エネルギー、輝度、コヒーレント性など）が適切か
 - 科学技術の現状・将来性と合致しているか
 - 学術研究・産業利用の質and/or量が見込まれるか
- ・ 第1期整備ビームラインでは、コアリションビームライン7本に対して共用ビームラインが3本しかなく、幅広い分野にまたがる共用ユーザーのニーズをとらえきれていない。コアリションビームラインは、原則コアリションメンバーにのみ利用可能であることから、**幅広い利用者の共用の観点で存在した方が良いビームラインについては、コアリションビームラインあるいは既存ビームラインと被ることがあっても新たな共用ビームラインとして整備すべき。**
- ・ 現状技術で建設可能なもの、R&Dの見通しが立っているもの、Breakthroughを必要とするものなど、技術的課題を正確に把握した上で、整備計画を立てる必要。

ユーザーニーズ

(a) 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
- 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）
- **先端性よりむしろ汎用性を求める声も多い**

(b) SPring-8における課題採択及び成果創出状況

- ビームラインごとの応募数と課題採択率（SPring-8/SACLA利用者情報）
- ビームラインごとの論文数及び被引用論文数
- **XAFS、XRD、イメージングの需要が多い。成果創出も期待される。**

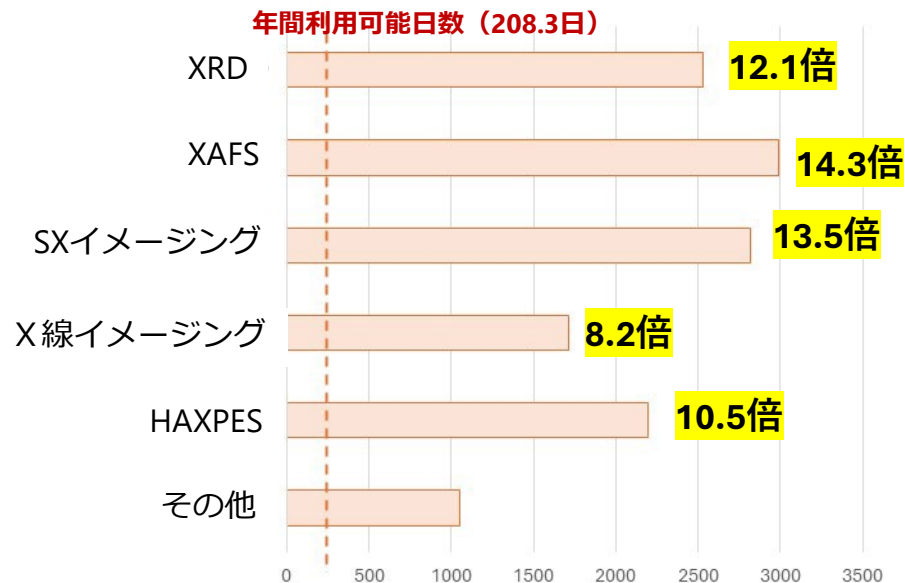
(c) 国の施策と放射光利用

- （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、新しい医薬モダリティの創出、農業・生物生産の持続性向上、等
- **重要施策に必要な放射光の利用機会をタイムリーに確保できるようにすべき**

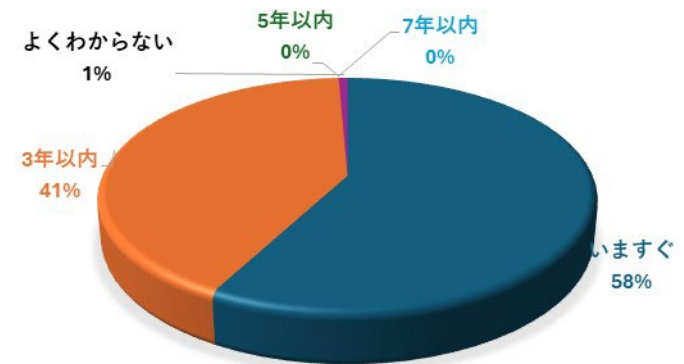
ユーザーニーズ (SPRUC研究会)

- 令和5年度末のアンケート調査
 - 第4世代の軟X線関連の分析手法全体の希望日数は **8,515日**
- 令和6年10月のアンケート調査(直近のニーズ)
 - 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



産業界からの要望

- 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、テンドー領域)
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
- **コアリ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～テングー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な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 2019-2023	フェーズⅡ 2024-2027	フェーズⅢ 2028-2030	フェーズⅣ 2031-
整備期 共用BL (グループ1)	<ul style="list-style-type: none"> 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)	<ul style="list-style-type: none"> 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 		<div style="border: 2px solid orange; padding: 5px;"> 早期に実現が求められる計画 検討 建設・整備 </div>		
応用拡大 共用BL (グループ3)	<ul style="list-style-type: none"> 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 		<div style="border: 2px dashed orange; padding: 5px;"> 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 </div>	建設・整備	
先端利用 共用BL (グループ4)	<ul style="list-style-type: none"> 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 		<div style="border: 2px dashed orange; padding: 5px;"> 既存BLにおける技術開発 </div>		建設・整備
R&D BL	<ul style="list-style-type: none"> 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 		<div style="border: 2px dashed orange; padding: 5px;"> 研究開発 </div>	<div style="border: 2px dashed orange; padding: 5px;"> 建設・整備 </div>	<div style="border: 2px dashed orange; padding: 5px;"> 共用化 </div>

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。
- **ウイ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

	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
1	12W	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	13W	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	11W	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	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	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	NanoTerasu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 ウイグラ	3- 25 keV	X線回折・散乱	タンパク結晶構造解析 テンダー-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	テンダー-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。
- R&Dビームラインとして整備する時期や実施方法については今後も引き続き検討。R&Dビームラインとして最初は整備し、いずれ共用化するというやり方もありうる。

	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	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	2.1-5.5keV	XAFS ウイグラ利用開発	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			○	

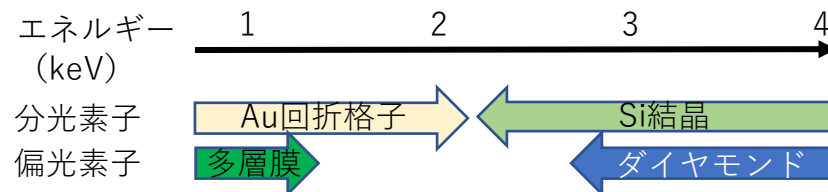
NanoTerasuの強みであるテンダーX線は、**スピントロニクスをはじめとする量子科学技術研究にきわめて有用かつユニークなプローブ**として期待。

【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。



NanoTerasuの共用ビームライン増設

令和6年度補正予算

8億円



現状・課題

- 官民地域パートナーシップにより整備され、令和6年度から運用を開始した3GeV高輝度放射光施設 NanoTerasu(ナノテラス)の持つ価値を最大化し、共用促進法に基づき多様なイノベーションの創出に貢献するためには、広範な分野における産学官の多様な研究者等に利用されることが必要である。
- NanoTerasuのビームラインの増設を進め、世界最高水準の軟X線向け放射光施設の性能を最大限生かした魅力的なイノベーション拠点とし、投資促進強化に貢献する。



NanoTerasu外観

事業内容

- NanoTerasuから生み出される成果を最大化するため、特にユーザーニーズの高い共用ビームラインの整備に着手する。

● 共用ビームラインの増設 8億円

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、燃料電池の開発をはじめとした**汎用的かつ広範な研究分野に対応可能な、特にユーザーニーズの高いビームラインの整備に着手**する。

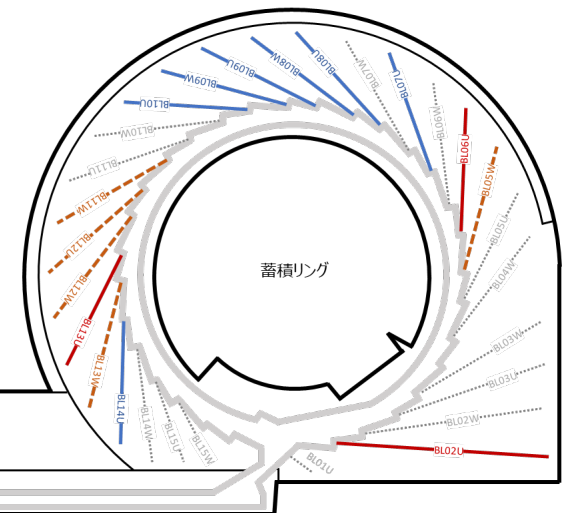
事業実施期間	令和6年度～令和8年度
交付先	(国研) 量子科学技術研究開発機構

NanoTerasuの現在のビームライン本数

ビームライン		ポート数
フェーズ I* 整備	共用	3
	コアリジョン	7

*：量子ビーム利用推進小委員会報告書（令和6年5月）にて、NanoTerasu整備期をフェーズ Iとし、フェーズ II～IVと段階的に共用ビームラインを増設していくことが望ましいとされている。今回の補正で、ユーザーニーズの高いフェーズ IIのうち1本の整備に着手。

- コアリジョンビームライン
- 共用ビームライン
- 共用ビームライン (フェーズ IIにて増設検討)





増設するビームラインで想定される成果
(燃料電池・リチウムイオン電池の例)

【これまでの課題】
既存の電池の研究が主で、新しい物質を多数探索することはできない。

↓

【ビームラインの増設で可能になること】
高速解析により新しい電解質の広範な探索が可能となり、低消費電力の電池開発に貢献。

(担当：科学技術・学術政策局研究環境課)