



NanoTerasu

NanoTerasuのBLの今後の方向性 ユーザーニーズと成果創出状況から

量子科学技術研究開発機構
NanoTerasuセンター
高橋正光

令和7年8月4日

目次

1. 共用ビームライン増設の必要性
2. ユーザーニーズ調査結果
3. 海外施設におけるビームラインポートフォリオ
4. 成果創出効率の検討

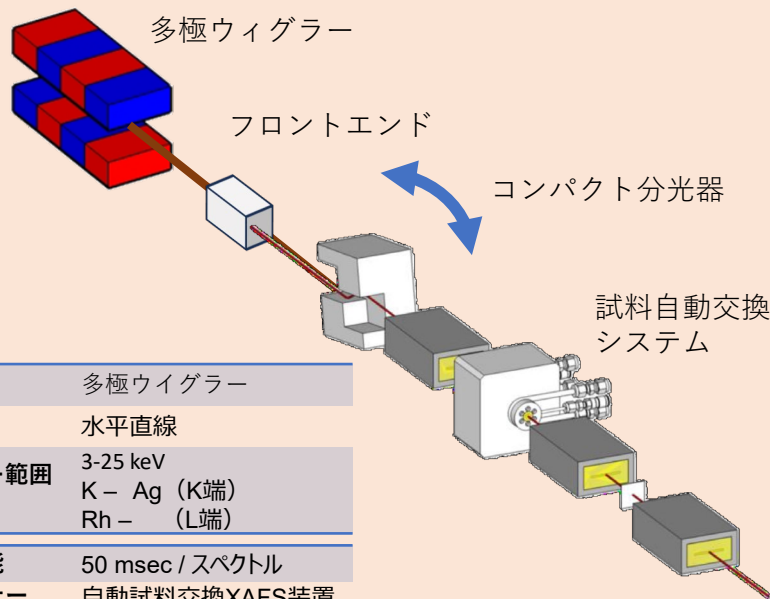
どのような施設増強が求められているか

- 令和6年5月17日に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 報告書とりまとめ（量子ビーム利用推進小委員会）
- 高ユーザーニーズという観点からXRD（整備中）、XAFS、イメージングU、イメージングW、X線分光のビームラインの整備が求められる

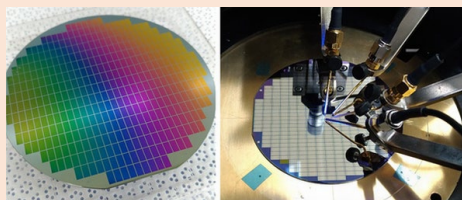
	分類	光源	エンドステーション	特色・目的
1	XAFS	多極ウィグラー	(quick) XAFS	テンダーX線領域 全自動DX 自動試料交換
2	X線回折	多極ウィグラー	X線回折・散乱	テンダーX線領域における共鳴X線回折 全自動DX 自動試料交換
3	イメージング	多極ウィグラー	X線CT（単色、準単色）、 位相差イメージング	階層イメージング テンダーX線領域における吸収端コントラスト利用
4	イメージング	APPLE-II アンジュレータ	A: SXイメージング B: 共鳴軟X線散乱	軟X線コヒーレント回折イメージング、タイコグラフィ、 高分子材料・ポリマー小角散乱、ホログラフィー、共鳴磁気回折
5	X線分光	多極ウィグラー	TXPES	テンダーX線領域 全自動DX

X線吸収端微細構造 (XAFS) ビームライン

- 高速スキャンによるサブ秒オーダーの化学反応がその場観察可能なXAFS測定システム
- 化学状態及び電子状態の高速・ハイスループット測定による大量解析



光源	多極ウィグラー
偏光	水平直線
エネルギー範囲	3-25 keV K - Ag (K端) Rh - (L端)
時間分解能	50 msec / スペクトル
エンドステーション	自動試料交換XAFS装置 オペランドXAFS装置



組成分散試料の一括評価による高速スクリーニング

高速XAFSによる化学状態・電子状態の高速スクリーニングと組み合わせ、マテリアルAI（マテリアルインフォマティクス）用のビッグデータ作製に応用

GX・水素燃料

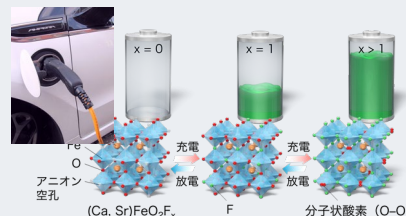
燃料電池電極の高性能化



X線の輝度が足りないため高速の分析ができず、表面で進む化学反応の追跡ができない。

化学反応を時分割で解析可能になり、高効率の触媒物質の開発へ。

高性能な全固体電池の開発



発火や爆発のリスクのある電解質液体を使わないEV等向け全固体二次電池

高速解析により新しい電極材料の広範な探索が可能となり、充放電特性に優れかつ安全な電池の開発へ。

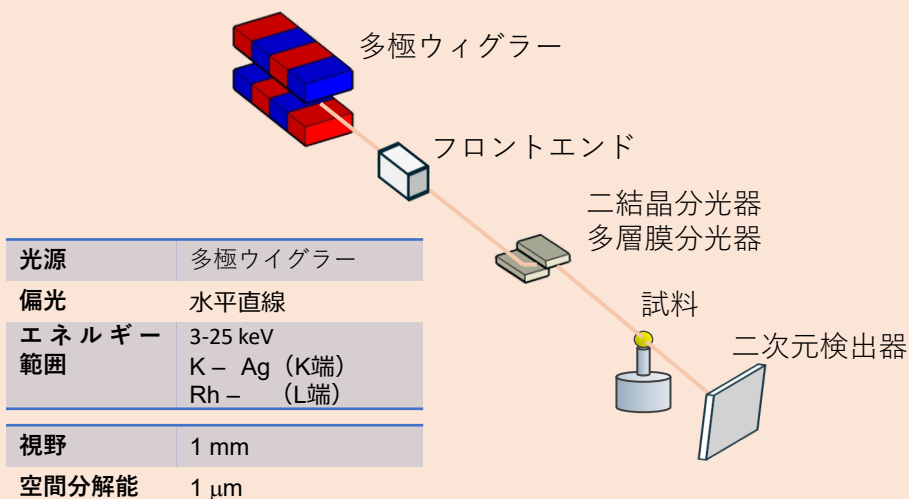
量子技術

AI・半導体

バイオエコノミー

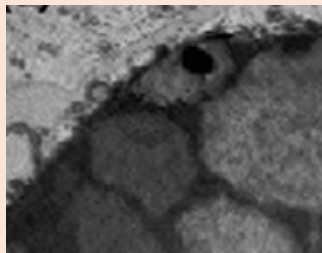
イメージングビームライン (W)

- 様々な波長のX線が利用可能で、元素・電子状態・化学状態を広視野で観察
- テンダー領域の単色X線の利用により軽元素の高いコントラスト画像
- 準単色分光器による大強度X線による高速・ハイスループット解析も可能



硬X線

透過力大きい
→ 軽元素のコントラスト小

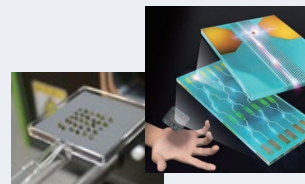


テンダーX線

重要な軽元素の吸収端
→ 着目する軽元素を強調

量子技術

量子センサの開発

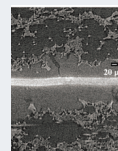


X線の輝度が足りないため広視野での評価ができず、測定に時間がかかってしまう。

結晶中の元素や電子状態を高速に分析し、温度や磁場を超高感度で計測できる量子センサの開発へ。

GX・水素燃料

燃料電池部材の高性能化



層構造や膜構造の全体像をミクロンレベルで把握する必要

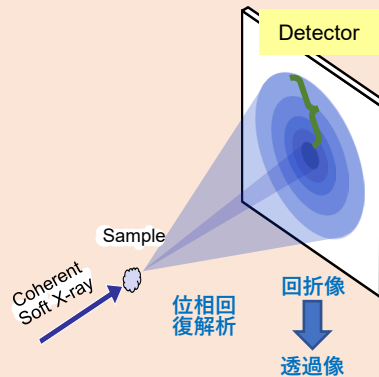
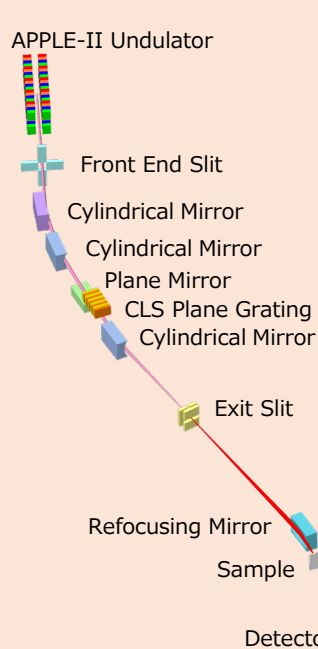
動作環境下の固体高分子形燃料電池部材のその場観察により、発電効率の向上や劣化機構の解明。

バイオエコノミー

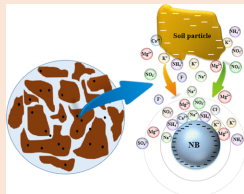
AI・半導体

イメージングビームライン (U)

- 高コヒーレントビームの利用により軽元素等のタイコグラフィー、ホログラフィーなどにより生物の細胞やウイルスの内部の3D画像の取得、構造変化を動画として観察可能
- スピントロニクスなど量子技術、二次電池の電極など環境・エネルギー技術にも有用



光源	APPLE-IIアンジュレータ
偏光	水平直線・垂直直線・左右円
エネルギー範囲	250 - 3000 eV C - Cl (K端) K - Mo (L端)
時間分解能	100 msec
空間分解能	5 nm

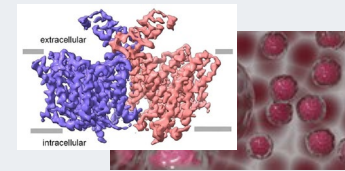


単なる構造ではなく、機能をにう部位・化学種の電子状態変化を可視化する“カラービデオイメージング”

	空間分解能	時間分解能
STXM	FZP (数十nm)	走査時間 (0.1Hz)
カラービデオイメージング	回折限界 (数nm)	CMOS検出器(10Hz)

バイオエコノミー

創薬

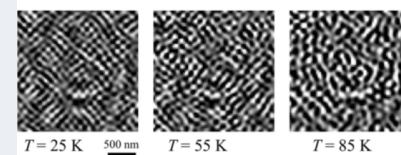


細胞内の薬剤分子などの動態の解明に、抗体を使った蛍光標識の適用限界のため、見たいものを見る手段がない。

複雑かつ多様な細胞構造を可視化することで、薬剤や生体现象の理解の深化へ。

量子技術

スピントロニクス材料



スピン秩序やその動的挙動を直接見る手段がない

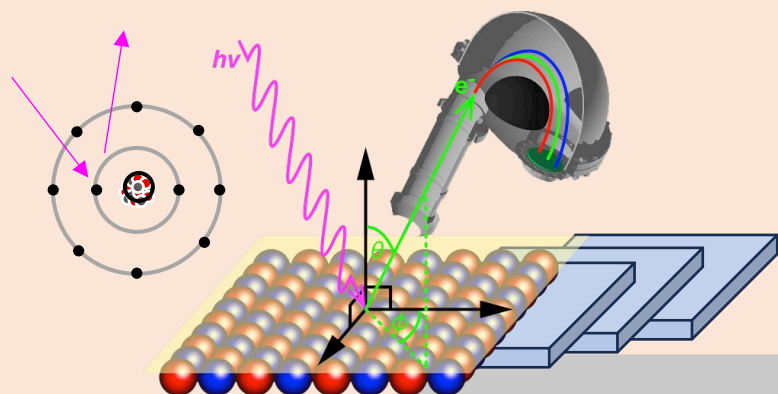
コヒーレント回折を用いた軟X線ビデオイメージングで、スピンダイナミクスを実時間観測。

AI・半導体

GX・水素燃料

X線分光（TXPES） ビームライン

- X線照射によって物質から飛び出す電子の状態から、物質の中での電子の振舞い（エネルギー状態）を解析
- テンダーX線により、動作環境中の解析やデバイス構造内の電子状態の測定が可能



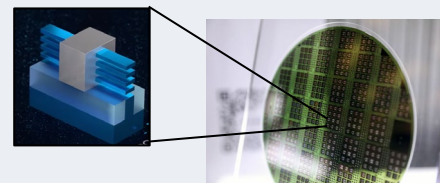
光源	多極ウイグラー
偏光	水平直線
エネルギー	3-13 keV
範囲	K – Se (K端) Ru – Ti (L端)

自動測定

- 最表面だけでなく、深さ方向、界面の情報が得られる。
- エネルギー可変の特徴を生かした共鳴光電子分光が可能。遷移金属のL殻など元素及び軌道選択的電子状態の情報が得られる。
- 全自動のオペレーションにより、多数の試料の高速・ハイスループット解析。マテリアルAI（マテリアルインフォマティクス）用のビッグデータ作製に応用

AI・半導体

次世代半導体の開発

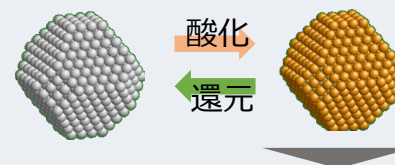


部品の静的な状態しかわからず、動作中の状態は経験則に頼らざるを得ない。

動作中の電極の接触抵抗を評価。PCで使用される電子部品の省電力化・高性能化へ。

GX・水素燃料

燃料電池触媒の高性能化



触媒粒子の凝集・粒径の増大による触媒性能の劣化

動作中の固体高分子形燃料電池の電極触媒の反応状態のその場観察により、反応機構、劣化過程などを解明し高性能触媒の開発へ。

量子技術

バイオエコノミー

ユーザーニーズ調査方法

実施期間 2025年5月19日～6月23日

依頼先

日本物理学会、日本化学会等、国内の44学協会及び特定放射光施設
ユーザーコミュニティ（SpRUC）の会員

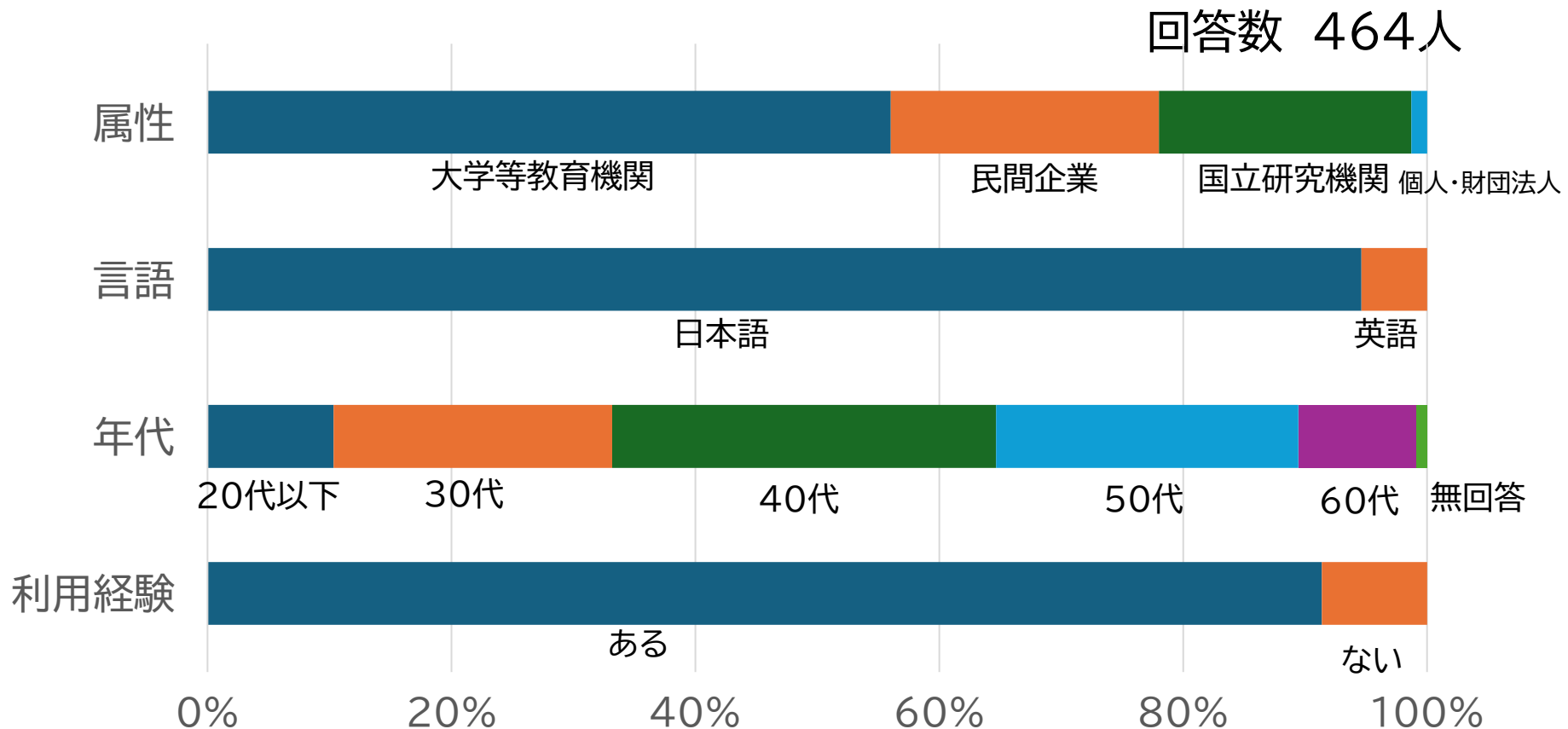
回答方法 Webフォームへの入力

質問項目

1. 所属する機関
2. 年代
3. 所属学会
4. 放射光の利用経験
5. NanoTerasuを利用して研究したい、分野、対象
6. NanoTerasuに整備を期待するビームライン及び実験ステーション
7. NanoTerasuの共用ビームライン増設に期待すること
8. NanoTerasuの共用ビームライン増設の希望時期

回答者属性

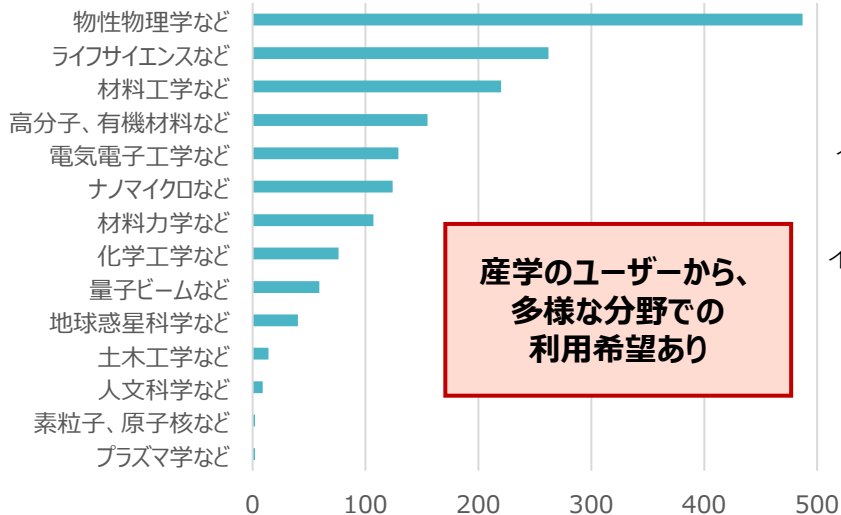
- 所属は**大学等研究機関**が半数以上
- 年齢は40代を中心に、30代～50代の範囲で、**現役の研究者層**が大半を占める
- 回答者の90%以上が**放射光利用経験者**



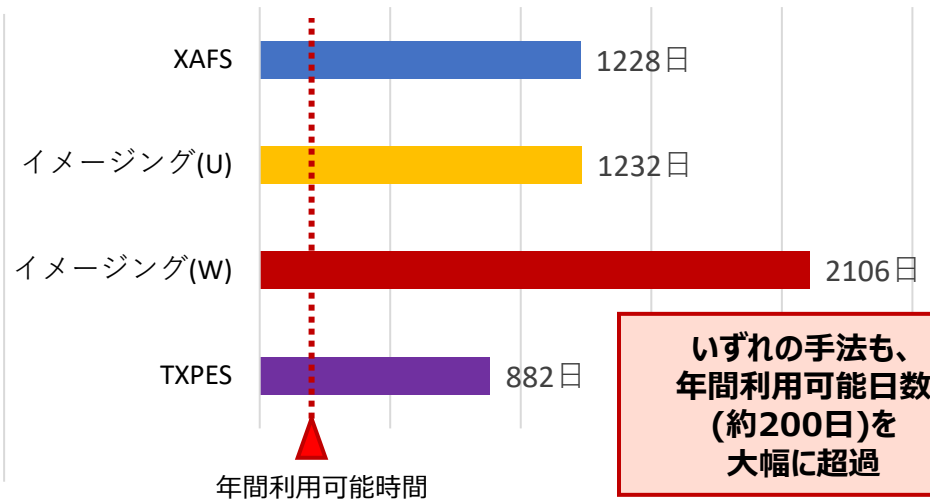
ビームラインニーズ

- XAFS、イメージング(U/W)、TXPESのビームラインを整備することで対応可能な利用希望日数が計5,448日分存在する。
- これは、令和7年度のユーザー利用可能日数の約9.7倍であり、既設の共用ビームラインと同様に、多くの研究者からの利用が見込まれるものである。
- 増設ビームラインの利用に関心がある研究者は、3年以内の利用開始を希望している。

NanoTerasuの利用希望分野



NanoTerasuの利用希望日数



NanoTerasuの共用ビームライン増設の希望時期(利用希望ありの回答者)



3年以内の
利用開始の希望が
76%を占める

海外施設のビームラインポートフォリオ

- NanoTerasuのビームライン増設計画に含まれるXAFS、XRD、イメージング、TXPESの手法は、海外の主要施設において、テンダーX線以上のエネルギー領域のラインナップの主軸を構成している。
- 既設の軟X線領域のRIXS、ARPES、XMCDとともにこれらを整備することによって、海外施設に伍する放射光測定基盤が国内において提供されるようになる。

	軟X線 (<~3keV)		X線 (>~3keV)	
SLS スイス	12	共鳴非弾性X線散乱, 角度分解光電子分光, X線吸収分光, X線発光分光, 光電子分光, 光電子回折, 光電子顕微鏡, X線磁気円二色性, 走査型透過X線顕微法, リソグラフィ	9	XRD, 小角散乱, コヒーレント回折イメージング, XAFS, イメージング
TPS 台湾	8	共鳴非弾性X線散乱, 角度分解光電子分光, 走査型透過X線顕微法, 光電子顕微鏡, X線吸収分光, X線磁気円二色性, コヒーレント回折イメージング, 雰囲気光電子分光	14	XRD, タンパク構造解析, 小角散乱, コヒーレント回折イメージング, X線光子相関分光, XAFS, イメージング, 光電子分光
SRIUS ブラジル	4	共鳴非弾性X線散乱, 角度分解光電子分光, X線吸収分光, X線磁気円二色性, イメージング, 赤外	10	XRD, タンパク構造解析, 小角散乱, コヒーレント回折イメージング, XAFS, イメージング
SOLEIL フランス	11	共鳴非弾性X線散乱, 角度分解光電子分光, 走査型透過X線顕微法, 光電子顕微鏡, X線吸収分光, 光電子回折, X線磁気円二色性, 小角散乱, X線共鳴磁気散乱, 赤外	18	XRD, タンパク構造解析, 小角散乱, コヒーレント回折イメージング, X線蛍光分析, XAFS, X線磁気円二色性, RIXS, 光電子分光
DIAMOND イギリス	6	共鳴非弾性X線散乱, 角度分解光電子分光, 走査型透過X線顕微法, 光電子顕微鏡, X線吸収分光, X線磁気円二色性, 軟X線回折, イメージング, 赤外	19	XRD, タンパク構造解析, 小角散乱, コヒーレント回折イメージング, XAFS, イメージング, 光電子分光
MAX-IV スウェーデン	8	共鳴非弾性X線散乱, 角度分解光電子分光, 走査型透過X線顕微法, X線吸収分光, コヒーレント回折イメージング, 雰囲気光電子分光, SPELEEM*)	8	XRD, タンパク構造解析, 小角散乱, コヒーレント回折イメージング, X線光子相関分光, XAFS, X線発光分光
NSLS-II アメリカ合衆国	6	共鳴非弾性X線散乱, 角度分解光電子分光, 光電子顕微鏡, X線吸収分光, 雰囲気光電子分光, 軟X線散乱	21	XRD, タンパク構造解析, 小角散乱, コヒーレント回折イメージング, X線光子相関分光, X線蛍光分析, X線非弾性散乱, XAFS, イメージング

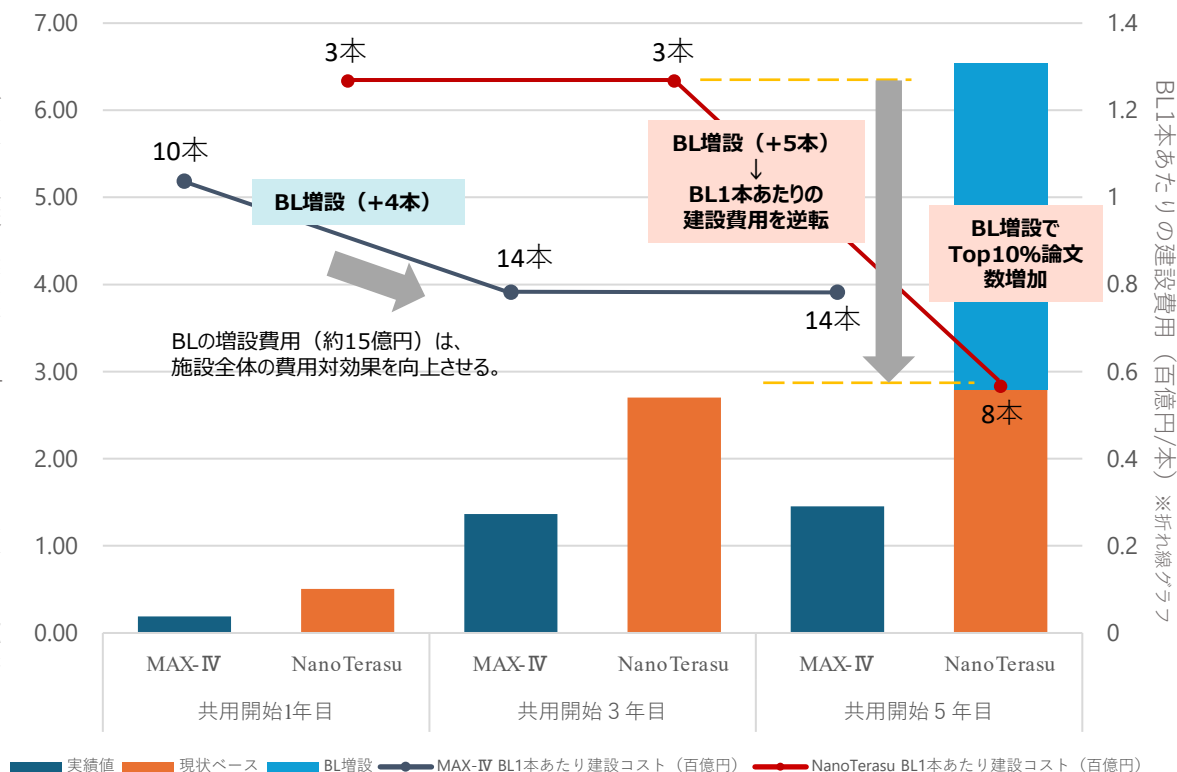
*) Spectroscopic photoemission and low energy electron microscope

第1期ビームライン3本がカバーする手法 増設ビームライン（4本目以降）がカバーする手法

成果創出効率のMAX IVとの比較

- 運用開始後5年間に於ける、国費投入額あたりのTop10%論文数と、BL1本あたりの建設費用（加速器等含む）をNanoTerasuとMAX IVで比較。
- 共用ビームラインを増設することによって、5年後においてもTop10%論文数の優位性を維持可能。

建設費用100億円あたりのTop10%論文数（報/100億円）※棒グラフ



- 第4世代放射光施設MAX-IVと国費投入額当たりのTop10%論文数を国際比較。
- 共用開始1年目は、NanoTerasuはMAX-IVに対して**2倍以上の差をつけて優位性を発揮**できる見通し。共用開始3年目には、MAX-IVのビームラインが4本増設されることで、MAX-IVの論文生産性が向上する見込みだが、NanoTerasuが引き続き2倍程度の優位性を保つ見込み。
- **高ユーザーニーズのビームラインを増設すれば、共用開始5年目にはMAX-IVの4.5倍の優位性を示すと期待される。**【左図棒グラフ参照】
- さらに、ビームライン増設により1本当たりの建設費用は減少し、MAX-IVよりも**費用対効果がより優れる**ことになる。【左図折れ線グラフ参照】

- NanoTerasuのTop10%論文割合は、SPRING-8の2024年4月1日までの共用ビームラインにおけるTop10%論文割合（11.4%）を準用して算出。（令和6年度における、コアリションビームラインにて創出された論文8報のうち、1報がTop10%論文。）
- NanoTerasuにおける課題実施後の論文文化率は1年以内：約23%、2年以内：約48%、3年以内：約68%、4年以内：約82%、5年以内：約87%で試算（SPRING-8の実績ベース）
- MAX IVのビームライン増設費用はNanoTerasuと同額（約15億円）を仮定。

増設ビームラインの方向性

- ユーザーニーズとして、XRD、XAFS、イメージング、TXPESは非常に高い。
- 海外施設においても、XRD、XAFS、イメージング、TXPESはビームラインラインナップの主軸を構成している。
- 先行する第4世代放射光施設（MAX IV）との比較から、ビームライン増設により、投入国費に対する成果創出効率の最大化が見込まれる。
- ユーザーニーズ、成果創出の生産性の面から、NanoTerasuの共用ビームラインラインナップにXRD、XAFS、イメージング、TXPESを加えることは必須である。

ユーザーコミュニティからの要望(1)

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。
- 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。
- (微小) 単結晶X線構造解析および汎用XAFS測定は化学系全般に必須の測定のためぜひ増設を頂きたい。
- 軟X線領域に強みをもつ施設であるが、数十keVの高エネルギー領域が使用できるビームラインを少数設置してXRD,XAFS,CT等をNanoTerasuでも実施可能にしていきたい。
- SPring8 II への改修工事が始まるまでには増設してもらえると嬉しいです。特に温度湿度電気等の環境制御の需要が高まっているため、個人的にはSAXS,XAFS等で持ち込み装置を組み込めるようなBLがあると嬉しいです。
- 第四世代なので汎用な手法も欲しいが放射光STMのようなここでしかできないようなものを開発して欲しい。

ユーザーコミュニティからの要望(2)

X線回折

- 汎用的な回折ビームラインは是非必要。
- 回折のビームラインを希望します。
- X線回折とメスバウアー分光が組み合わせてできるとありがたい。
- タンパク質の結晶構造解析について自動測定ができるようにしてほしい。
- 実験室系X線発生装置ではデータが取れないような小さい低分子結晶のXRDが出来るようにして欲しい。ビームが十分に細いビームラインはBL09U MX-ESがあるが全自動測定のみで低分子結晶は対応できない見込みなので。
- 新物質・新材料の構造解析を簡便にできるようにすることが必須だと思います。論文数も稼げると思います。
- 薄膜結晶構造解析の共用ビームラインを希望する。
- カメラ長40m以上のUSAXS、市販装置を持ち込んでのin-situSAXS/WAXS、マイクロビームSAXS/WAXSが出来るようになると嬉しいです
- PFと同程度の利用期間、Linkam社の温調ステージ設置、同ステージを使用した時分割SAXS/WAXS同時測定を希望します

XAFS

- SPring-8 II のためにシャットダウンされた際に、XAFSなどの需要が多い手法はNanoTerasuで受け皿になるように整備してほしい。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XAFSから一歩進んだX線分光手法は、先端大型研究施設に相応しい実験手法であり、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ので、ぜひXAFSのオプションとして併せて検討を希望。

ユーザーコミュニティからの要望(3)

X線イメージング

- 共用イメージング B L を一刻も早く建設することが必要。
- 特殊用途でなく、汎用イメージング BL を整備頂くと、多数の利用があると思われる。
- ナノ C T とマイクロ C T のニーズが多く、蛍光イメージング、時分割測定、CDI がそれに続く。

ユーザーコミュニティ内での独自アンケート結果



TXPES

- XAFS、HAXPESの利用が見込める。
- 8keV以上の HAXPES, 超小角散乱ビームラインの早期整備を期待します。
- 自身の研究と関連するので恐縮ですが、いわゆるHAXPESは今後多くのユーザーが見込まれると思うので迅速な増設が望ましいと思われます。

共用ビームライン増設に期待すること

- 共用ビームラインにもっとも期待されることは世界最高レベルのクオリティのデータが迅速に得られること

