



NanoTerasu

NanoTerasuのBLの今後の方向性

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6月30日

目次

I. R6年度補正予算の状況報告

1. 増設共用ビームラインの概要
2. 増設共用ビームラインの整備スケジュール

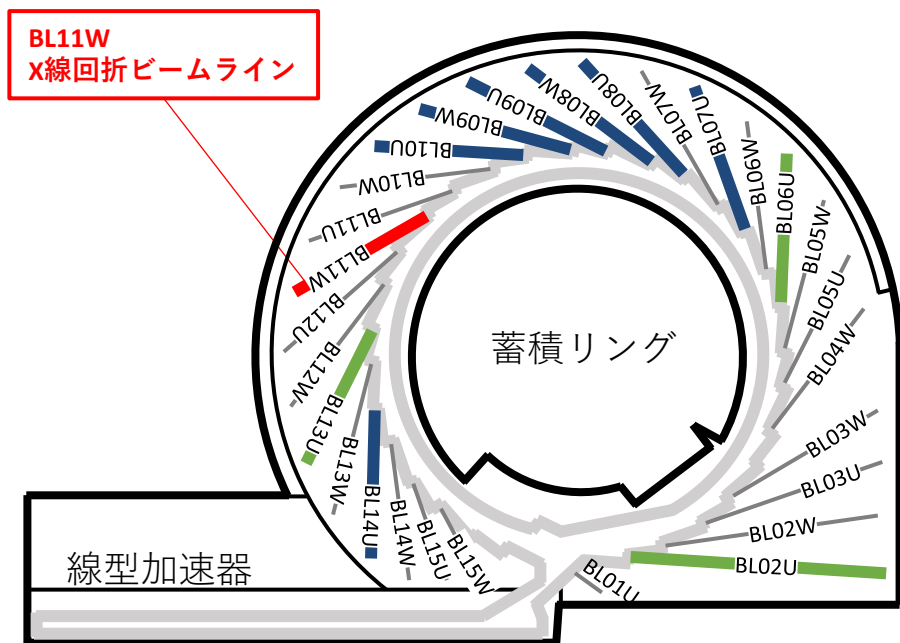
II. NanoTerasuの状況及び増設ビームラインの方針

1. 加速器運転状況
2. 共用ビームラインの性能達成状況
3. 試験的共用の成果創出状況
4. 共用課題申請・利用状況
5. 海外の動向（先行する第4世代放射光の成果創出状況、高度化・新設の動向）
6. 国の戦略分野とビームライン増設のニーズ

I. R6年度補正予算の状況報告

1.増設共用ビームラインの概要

- 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
 量子ビーム利用推進小委員会決定を踏まえて措置されたR6年度補正予算により、X線回折ビームライン1本の整備を開始
- 2027年度の共用開始を目指して整備が進行中



		BL11W X線回折
手法		X線回折、小角散乱
光源	構成	多極ウイグラー 120mm×5周期
	偏光	水平直線
光学系	分光器	Si(111)液体窒素冷却 二結晶分光器
	エネルギー	2.1 - 20 keV
	集光サイズ	~ 200 μm (H) × ~50 μm (V)
エンドステーション	構成	テンダーX線回折装置、 多軸X線回折装置、 小角散乱装置

既設共用ビームライン

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

2.増設共用ビームラインの整備スケジュール

FY	2024	2025	2026	2027
マイルストーン			ビーム導入	課題募集 共用開始
挿入光源・ 基幹チャンネル		契約・設計	製作 据付	
遮蔽ハッチ		契約・設計	製作 据付	
BL光学系・ 輸送チャンネル		契約・設計	製作 据付	
エンドステー ション		契約・設計	製作 据付	
				調整 共用

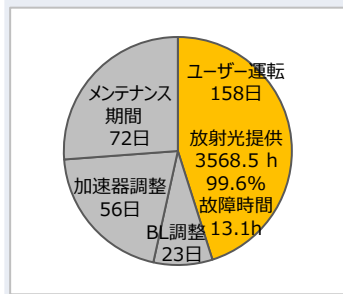
II. NanoTerasuの状況及び増設ビームラインの方針

1. 加速器運転状況

- 稼働初年度の2024年度から世界最高水準の安定度で高輝度軟X線を供給
- 2025年度における安定運転の継続及び蓄積電流値増加に向けた取り組みを実施中

2024年度運転実績

◎ 約**3,570時間**の
ユーザー運転



◎ 当初計画の**倍**の蓄積電流**200mA**達成

- ✓ 半年以上前倒して共用初年度の予定蓄積電流で放射光提供開始

◎ 国内既存施設の約**50倍**高輝度な放射光

- ✓ 設計どおりのエミッタンス
- ✓ 共用BL（試験的共用）及びコアリションBLでの成果創出に貢献

◎ 光源稼働率**99.6%**を達成

- ✓ 国内外の他施設と比べても遜色のない**高い光源稼働率**
- ✓ 令和6年度のMTBFは323時間で約2週間の連続実験可能

◎ 蓄積電流安定度**0.05% (σ)**を実現

- ✓ 電子を継ぎ足しながらも蓄積電流を一定に保つトップアップ運転の高度化、ビームを止めない運転などの**技術的課題解決**

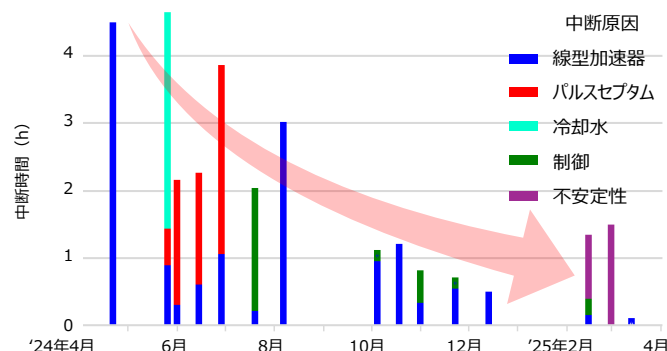
● 他施設との比較

放射光施設	光源稼働率	平均故障間隔
NanoTerasu	99.6%	323 h
SPring-8*)	99.4%	403 h
ESRF-EBS*)	99.3%	107 h

*) 2023年実績値

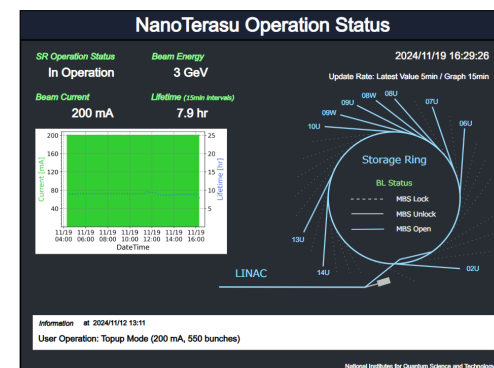
稼働初年度から**世界最高水準の安定運転**を実現

● トップアップ運転の中断時間



原因の特定、修正により**中断時間を大幅に減少**することに成功

● 施設運転状況

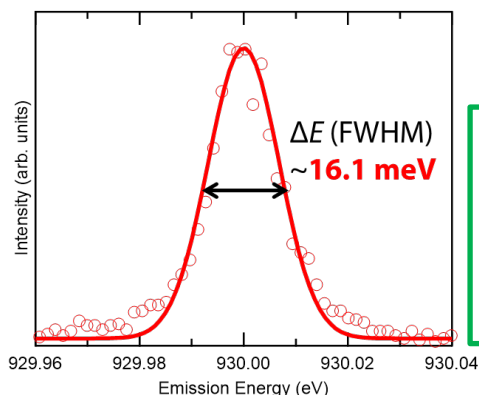


放射光の強度変動の小さい**安定なトップアップ運転**を実現

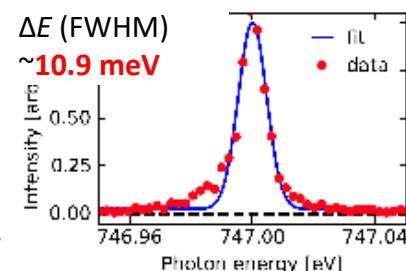
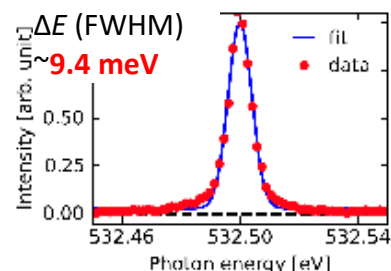
2. 共用ビームラインの性能達成状況

- 3本の共用ビームラインの立ち上げ・調整を着実に進め、世界最先端の高いビームライン性能を実現。
- 2025年3月3日から予定通りユーザーへ供用開始。

BL02U 軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱

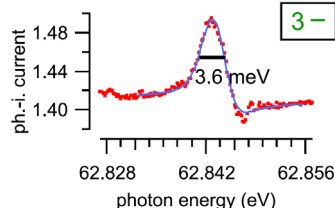
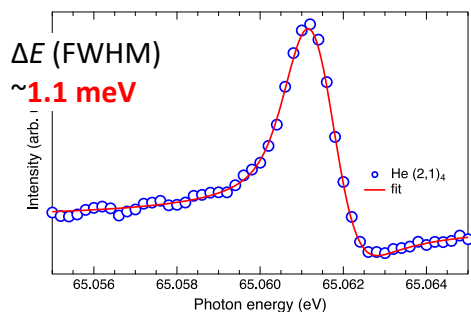


Cu L吸収端のエネルギーで
世界最高のエネルギー分解能
 $E/\Delta E = 930 \text{ eV}/16.1 \text{ meV}$
 $\sim 58,000$
を達成



Cu L端に加えて、Fe L端やO K端など様々なエネルギーにおいても超高分解能を達成

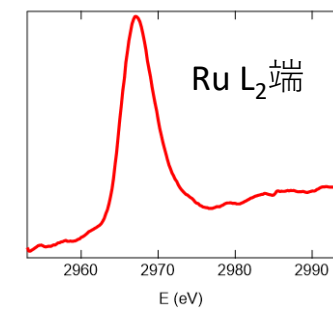
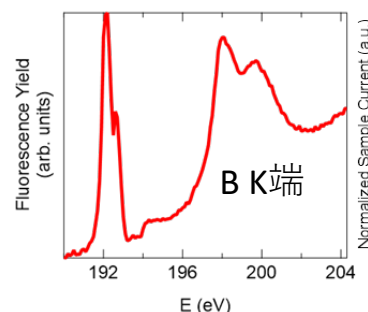
BL06U 軟X線ナノ光電子分光



参考：Diamond I05 (イギリス)
世界でトップレベルのアクティビティを有するARPESビームライン

設計理論分解能である $E/\Delta E > 50,000$ (@ 65 eV) を達成
50 eVで1 meVを切る電子状態計測が可能

BL13U 軟X線ナノ吸収分光



全エネルギー範囲 (180 eV ~ 3,000 eV) の吸収測定確認
軽元素 (ホウ素～硫黄) や4d遷移金属の吸収計測が可能

3. 試験的共用の成果創出状況

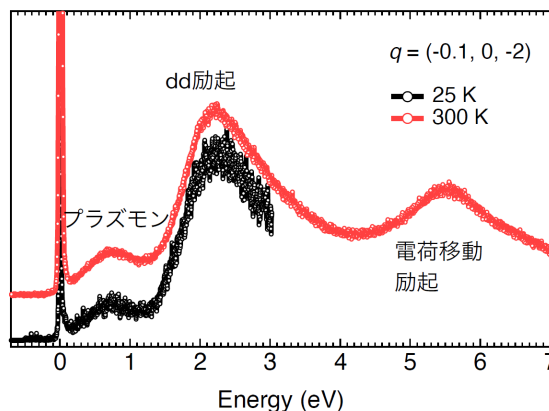
- 建設後の立ち上げから本格的共用開始までの間に、ビームラインの立ち上げ・調整を進めると共に、試験的な利用実験を行い、本格的共用における速やかな成果創出をめざす
- QST設置の委員会（外部有識者を含む）で選定した計10課題を2024年5月～2025年2月の期間に実施

	実施課題名	課題責任者
BL02U	オペランド計測系の導入による超高分解能RIXSのマルチモーダル化	原田慈久（東京大学・教授）
	銅酸化物高温超伝導体の集団励起の観測によるRIXS装置性能の実証	鈴木博人（東北大学・助教）
	超高エネルギー分解能RIXSによる銅酸化物高温超伝導体の素励起研究に向けたBL02Uの活用推進	藤田全基（東北大学・教授）、石井賢司（量研・上席研究員）
BL06U	ナノ空間電子計測による新奇トポロジカル量子現象の解明	佐藤宇史（東北大学・教授）
	外場印加を活用した顕微スピンARPES装置の開発	奥田太一（広島大学・教授）、岩澤英明（量研・上席研究員）
	BL06U原子層物質科学のための顕微ARPESシステム構築	石坂香子（東京大学・教授）
BL13U	分割アンジュレータを活かしたX線分光法の開拓	松田巖（東京大学・教授）
	軟X線ナノ吸収分光のためのギガピクセルX線顕微鏡	小野寛太（大阪大学・教授）
	コンビナトリアルXMCD分析基盤の開発	境誠司（量研・上席研究員）、上野哲朗（量研・主幹研究員）
	NanoTerasu BL13Uにおけるオペランド自動顕微測定システムの構築	一杉太郎（東京大学・教授）

超高分解能RIXSを用いて高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ の電子の振動を解明

高い超伝導転移温度を示す3枚の CuO_2 面を持つ銅酸化物超伝導体における電子振動（プラズモン励起）の特徴的な性質を特定

H. Suzuki et al., Phys. Rev. B 111, 165141 (2025).



NanoTerasu 共用ビームラインのRIXS装置の動作実証。今後、他の高温超伝導体や磁性材料等、様々な物質の機能解明への展開が期待。

4. 共用課題申請・利用状況

- 採択率約50%の高い競争率（【参考】SPring-8の2024B期の一般課題採択率 71.6%）
- スウェーデン、イギリス、スイスといった第3世代、第4世代放射光施設を有する諸外国からも応募
- 共用ビームラインに対するニーズの高さと、世界最先端の高性能に対する評価

2025A期 一般課題 応募・採択状況

公募期間2024年9月26日～11月6日

ビームライン	応 募	採 択	採択率
BL02U	25	10（4）	40.0%
BL06U	26	12（0）	46.2%
BL13U	24	16（0）	66.7%
合 計	75	38（4）	50.7%

注：（ ）内は外国からの課題数

2025B期 一般課題 応募状況

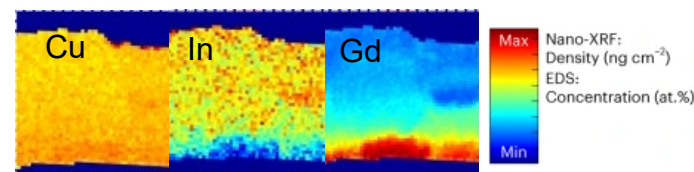
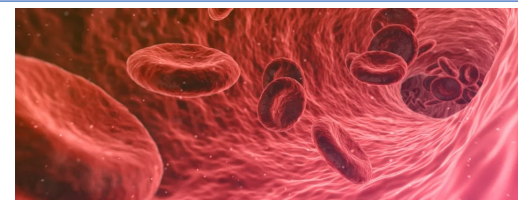
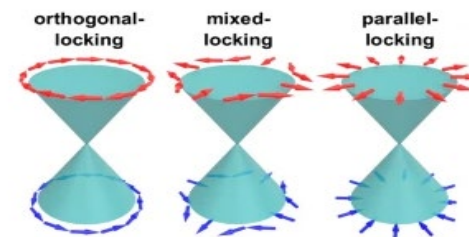
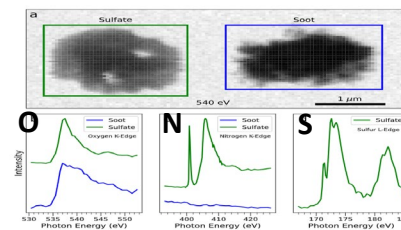
公募期間2025年4月17日～5月20日

ビームライン	応 募	採 択	採択率
BL02U	24	-	-
BL06U	28	-	-
BL13U	26	-	-
合 計	78	-	-

5.海外の動向1（先行する第4世代放射光の成果創出状況）

- 先行する海外の施設では半導体、量子材料、バイオ、環境などの分野で顕著な成果が出ている。
- 第4世代放射光施設では高い光源性能により、影響力の大きな成果の創出が期待できる。

施設	測定手法	成果概要
MAX IV SoftiMAX Top10%	イメージング XAFS	環境科学 海上輸送における硫黄、窒素の排ガス削減に向けて、ウェット・スクラビングのエンジン排気粒子に対する物理化学的性質及び雲の形成力に与える影響について解明。 J. GeoPhys. Res.:Atmos. (2024)
MAX IV BLOCH Top10%	ARPES	量子材料 Spin-ARPESにより非中心対称結晶における電子スピンの角運動と線形運動量の方向性の関係を初めて解明。効率の良いメモリやジョセフソンダイオードへの応用に期待。 Nature Comm. (2024)
MAX IV BioMAX Top10%	XRD	医学・バイオ Nano-XRDによりABO不適合血液の改質に必要な酵素の構造を決定、血液型を問わず誰にでも輸血可能な血液に変換。 Nature microbiology (2024)
MAX IV NanoMAX Top0.1%	イメージング	半導体・エネルギー Nano-XRFによるCIGSソーラーセルの元素分布を可視化し新しい世界記録23.64%の変換効率を記録。 Nature Energy (2024)



5.海外の動向2（第4世代放射光施設の建設・高度化状況）

- 3GeV級の第4世代放射光施設はNanoTerasuを含め 3 施設が運用中
- 今後5年程度のうちに、世界中で第3世代放射光の第4世代放射光への更新及び第4世代放射光の新設が多数計画

	施設名	状況	所在国	運用開始年	エネルギー[GeV]	エミッタンス [nm・rad]	ビームライン数		2023年 論文数
							現在	最大	
軟X線 第3世代 第4世代に 更新中	Diamond	2030 更新	英国	2007	3→ 3.5	2.7→ 0.15	32	33	1212
	SLS	2025 更新	瑞西	2001	2.4→ 2.7	3.0→ 0.16	16	16	387
	SOLEIL	2028 更新	仏国	2007	2.75→ 2.7	3.0→ 0.08	29	43	799
軟X線 第3.5世代	NSLS-II	運用中	米国	2015	3	1.0	28	58	634
	TPS	運用中	台湾	2016	3	1.5	16	40	214
軟X線 第4世代	MAX-IV	運用中	瑞典	2016	3	0.33	16	26	221
	SIRIUS	運用中	ブラジル	2019	3	0.25	14	38	147 (2022年)
	NanoTerasu	運用中	日本	2024	3	1.14	10	28	-
	HALF	計画中	中国	2027	2.4	0.0863	-	>30	-
	SPS-II	計画中	タイ	2027	3	0.97	-	23	-
	Korea-4GSR	計画中	韓国	2028	4	0.058	-	-	-

6. 国の戦略分野とビームライン増設のニーズ

- 国の戦略分野の推進において求められる様々な課題の解決にNanoTerasuの先端光源が必須
- 多極ウイグラー（従来の10倍強い白色光源）が可能にする高速・ハイスループットな化学状態可視化計測と、アンジュレータ（高輝度単色光源）による高精細イメージングにより課題解決へ

国の戦略分野（2030年ロードマップ）



AI・半導体

- ・ 国内企業の合計売上高15兆円超を実現
 - ・ 2ナノ以降の先端ロジック半導体を中心とした次世代半導体技術の確立
- （参考：令和5年6月 半導体・デジタル産業戦略）



量子技術

- ・ 国内の量子技術の利用者を1,000万人に
 - ・ 量子技術による生産額を50兆円規模に
 - ・ 量子計測・量子センシングの研究開発促進
- （参考：令和4年4月 量子未来社会ビジョン）



バイオエコノミー

- ・ 官民合わせて年間の投資規模を3兆円に拡大。
 - ・ 付加価値の源泉となる微生物の開発
 - ・ 基盤技術となるDNA、RNA合成やゲノム編集
- （参考：令和6年6月 バイオエコノミー戦略）



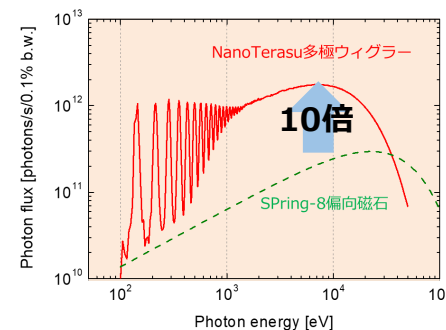
水素燃料

- ・ 最大300万トン/年の水素等導入目標
 - ・ 燃料電池、水素化合物等の水素コア技術が活用される世界を目指す
- （参考：令和5年6月 水素基本戦略）

NanoTerasu

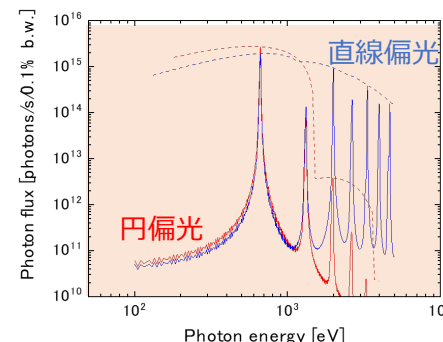
用途に応じた最先端光源

多極ウイグラー（10倍強度の白色光源）
高速・ハイスループットな化学状態・
イメージング等の計測



課題解決への
必須環境
の提供

アンジュレータ（偏光可変・単色光源）
コヒーレント光による高精細イメージング



増設ビームラインの方針

- 量子ビーム利用推進小委員会報告書（令和6年5月17日）において、高ユーザーニーズで国の戦略分野に貢献できるグループ2の5本のビームラインの早期実現が提言される

		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)	- 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, HAXPES		検討 建設・整備	早期に実現が求められる計画	
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		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		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		共用化
			建設・整備		

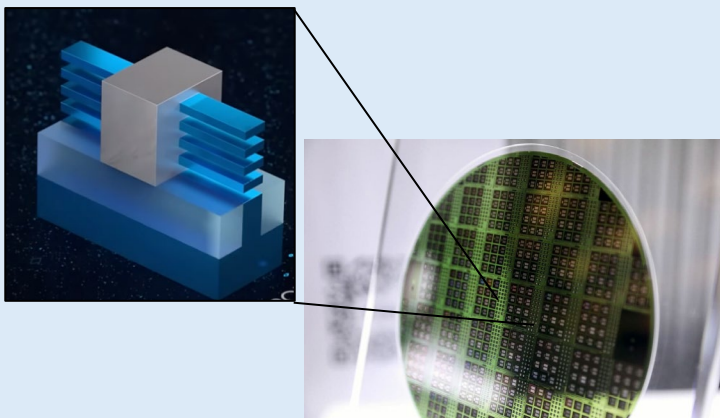


AI・半導体分野

- ・半導体開発では、材料分析・特性評価・シミュレーション・インフォマティクス等の一体的な推進が重要
- ・その中でナノテラスは**世界最先端の材料分析**を提供。ただし、**現状はナノスケール解析のみ**
- ・マイクロ～ミリスケール領域でも世界レベルの材料分析を提供し、ユーザーが活用しやすい環境を整備

現状・課題（一例）

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。

増設ビームラインによるソリューション

光電子分光（多極ウイグラー）

- 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
- 高速・ハイスループット解析

増設ビームラインで可能になること

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

重点分野への貢献

国内企業の合計売上高15 兆円超の目標に貢献

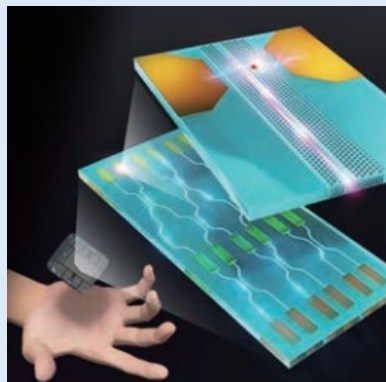
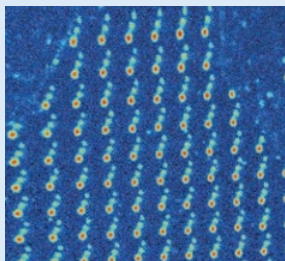


量子技術

- ・ 量子技術を用いた量子センサは細胞内のわずかな生命現象の変化や局所的な磁場・温度変化を計測可能
- ・ 量子センサの作製技術で国際競争が過熱。一方、X線の輝度が足りないため**量子センサの材料分析が課題**
- ・ ナノテラスの高輝度X線を活用した元素・電子状態・化学状態分析、可視化技術は我が国の大きな強みに

現状・課題（一例）

量子センサ



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。

増設ビームラインによるソリューション

イメージング（多極ウイグラー）

- 様々な波長のX線が利用可能で、試料の表面を広視野で観察
- 高速・ハイスループット解析

増設ビームラインで可能になること

結晶中の元素や電子状態を高速に分析することで、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。

重点分野への貢献

量子技術による生産額50兆円の目標に貢献

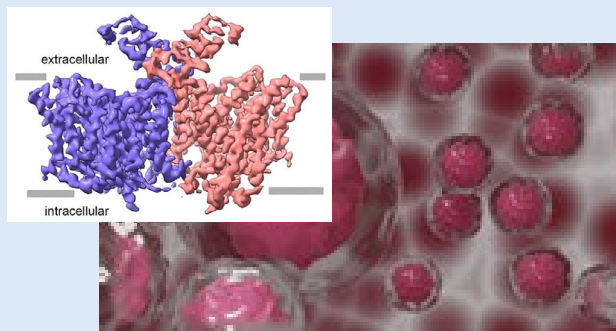


バイオエコノミー

- ・薬品や食品等のバイオ医薬品の他、高機能素材・プラスチック等のバイオもののづくりの急速拡大が予想
- ・従来は軟X線の輝度が弱いため低感度のデータを長時間かけて測定する等、研究開発の大きな弊害に
- ・ナノテラスでは高感度可視化データが得られるだけでなく、計算科学との融合により研究を一気に加速

現状・課題（一例）

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。

増設ビームラインによるソリューション

イメージング（アンジュレータ）

- 物質との相互作用が強い高輝度のX線により、局所的な物質の表面状態を、高分解能で鮮明に可視
- コヒーレント光による高精細イメージング

増設ビームラインで可能になること

複雑かつ多様な細胞構造を可視化することで、薬剤や生体現象の理解の深化へ。

重点分野への貢献

バイオもののづくりの加速により、官民からの年間投資3兆円の目標に貢献



水素燃料

- ・ GX社会の実現において、燃料電池や水素製造技術（水電解装置等）の高効率化・低コスト化が課題
- ・ 特に、燃料電池では触媒活性向上やプロトン伝導性向上等の課題解決に資する高度解析技術が必要
- ・ ナノテラスの高輝度軟～テンダーX線を駆使した時空間マルチスケール分析は研究加速の大きな力に

現状・課題（一例）

燃料電池



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

増設ビームラインによるソリューション

XAFS（多極ウイグラー）

- X線が物質に吸収される量から物質の化学結合などの化学状態を計測できる。
- 高速・ハイスループット解析

増設ビームラインで可能になること

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。

重点分野への貢献

燃料電池の生産量増により、年間最大300万トンの水素導入目標に貢献

まとめ

- 2024年4月の運用開始より、NanoTerasuの加速器の運転及び共用ビームラインの立ち上げ・調整は順調に進捗。
- 一方で、海外においては、第4世代放射光への高度化及び新設が着々と進んでおり、早急なNanoTerasuの機能強化が必要。
- NanoTerasuに整備される先端的なビームラインは、国の戦略分野の推進にあたり、基盤的なツールとして不可欠。その利用機会をタイムリーに確保することが求められる。
- 4本目の共用ビームライン（X線回折ビームライン）は整備が進行中。