

NanoTerasu共用ビームライン 増設計画の最適化について

量子科学技術研究開発機構

NanoTerasuセンター

高橋正光

3 GeV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

報告書のポイント

- ◆ NanoTerasuのビームラインは**運用開始時点で18本分が未整備**の状態であり、提案のあった**ビームライン増設計画は妥当**。
- ◆ 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NanoTerasuのビームラインの空きポートを埋めることが重要である**。

増設計画の概要

- ◆ 国側の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。
 - ✓ 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段階に分けることが望ましい**。
 - ✓ **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**することが望ましい。これらのビームラインは既存のSPRING-8で利用ニーズが高い測定手法にも対応しており、ユーザーに世界最高水準の研究機会・測定環境を提供することが期待できる。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すべきである。
 - ✓ **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ことが望ましい。
 - ✓ 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**を行い、**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ことが望ましい。
- ◆ パートナー側は、NanoTerasu東側の拡張エリアにて、セキュアな環境で利用可能なビームラインの整備を検討。

小委員会からの留意事項

- ◆ 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**。提案された計画は、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の計画として妥当。
- ◆ NanoTerasuは先端を常に目指すべきであり、**技術開発を要するビームラインについてはQSTとして早期に着手することが望ましい**。
- ◆ ビームラインの増設にあたっては、**各ビームラインの特徴や強みを分かりやすくユーザーに対して示す**べき。特にSPRING-8との比較・整備意図は丁寧に説明すべき。
- ◆ NanoTerasuのパフォーマンスを最大化するためには**既存ビームラインの高度化**も必要。自動化・遠隔化等の**研究環境整備**や**整備状況のユーザーへの情報発信**、運営・高度化を担う**人材の確保・育成**にも取り組む必要がある。

	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)	建設・整備	高度化		
高ユーザーニーズ共用BL(グループ2)	早期に実現が 求められる計画	検討 建設・整備	状況に応じて計画を最適化	
応用拡大共用BL(グループ3)		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)		既存BLにおける技術開発		建設・整備
R&D BL		研究開発	建設・整備	共用化

コアリションBL (フェーズⅠ) 7本

共用BL (フェーズⅠ) 3本

共用BL (フェーズⅡ) 5本

05W: X線分光

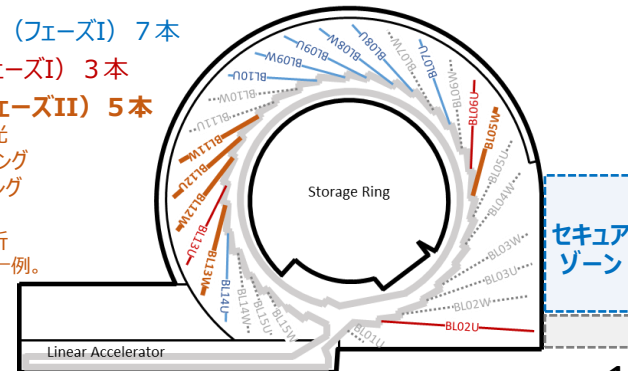
11W: イメージング

12U: イメージング

12W: XAFS

13W: X線回折

※ポート位置は一例。



NanoTerasu共用ビームライン増設の現状

フェーズI 整備期	共用BL (3本) 世界最先端の軟X線分光を国内ユーザーに
	コアリジョンBL (7本) コアリジョンメンバーで組織的に利用
フェーズII 高ニーズ共用BL	重要研究分野におけるニーズに対し、世界最高水準の研究機会・測定環境を提供
フェーズIII 応用拡大共用BL	拡大する応用範囲に対応するためのビームライン
フェーズIV 先端利用共用BL	R & Dの成果等をふまえ、先端的放射光利用を進めるためのビームライン
R & D	新しい放射光利用の地平を拓くため、先端的放射光利用技術の開発を行うビームライン

整備中および整備が決定したビームライン

年度		2024	2025	2026	2027	2028	2029
XRD (W)	調達・設置						
	ビーム調整・利用						
XAFS (W)	調達・設置						
	ビーム調整・利用						
SXビデオイメージング (U)	調達・設置						
	ビーム調整・利用						
R&D (U)	調達・設置						
	ビーム調整・利用						

2024年以降の状況の変化（国際状況）

世界的に3GeV級第4世代の整備が加速中。

施設名	所在国	運用開始年	エネルギー [GeV]	エミッタンス [nm rad]	状況
MAX IV	スウェーデン	2016	3	0.33	運用中
SIRIUS	ブラジル	2019	3	0.25	運用中
NanoTerasu	日本	2024	3	1.14	運用中
SLS	スイス	2026	2.4 → 2.7	3.0 → 0.16	まもなく 運用開始
HALF	中国	2027	2.4	0.0863	建設中
SOLEIL	フランス	2028	2.75 → 2.7	3.0 → 0.08	更新計画中
Korea-4GSR	韓国	2029	4	0.058	建設中
Diamond	イギリス	2030	3 → 3.5	2.7 → 0.15	更新中



MAX IV



SIRIUS

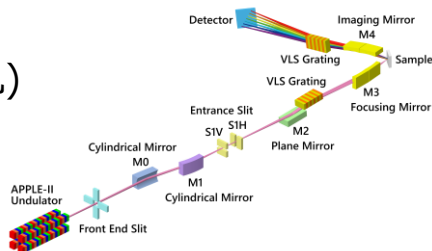
第4世代放射光NanoTerasuの強みを最大限に生かす先端的ビームラインの早期整備が待ったなしの状況

2024年4月以降の状況変化（共用ビームラインの申請）

運用中の共用ビームライン

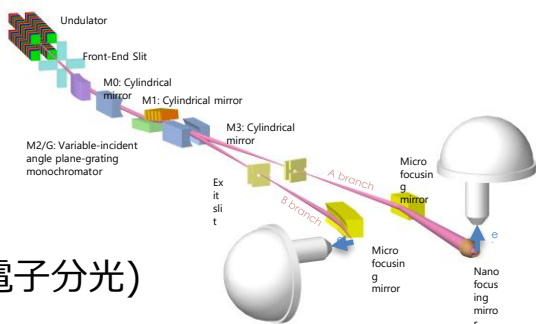
BL02U

RIXS
(共鳴非弾性X線散乱)



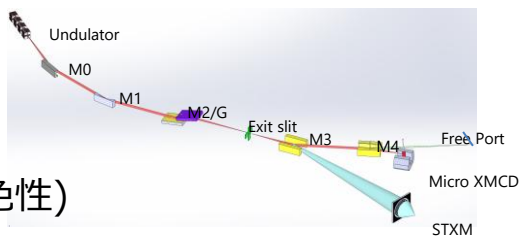
BL06U

ARPES
(角度分解光電子分光)

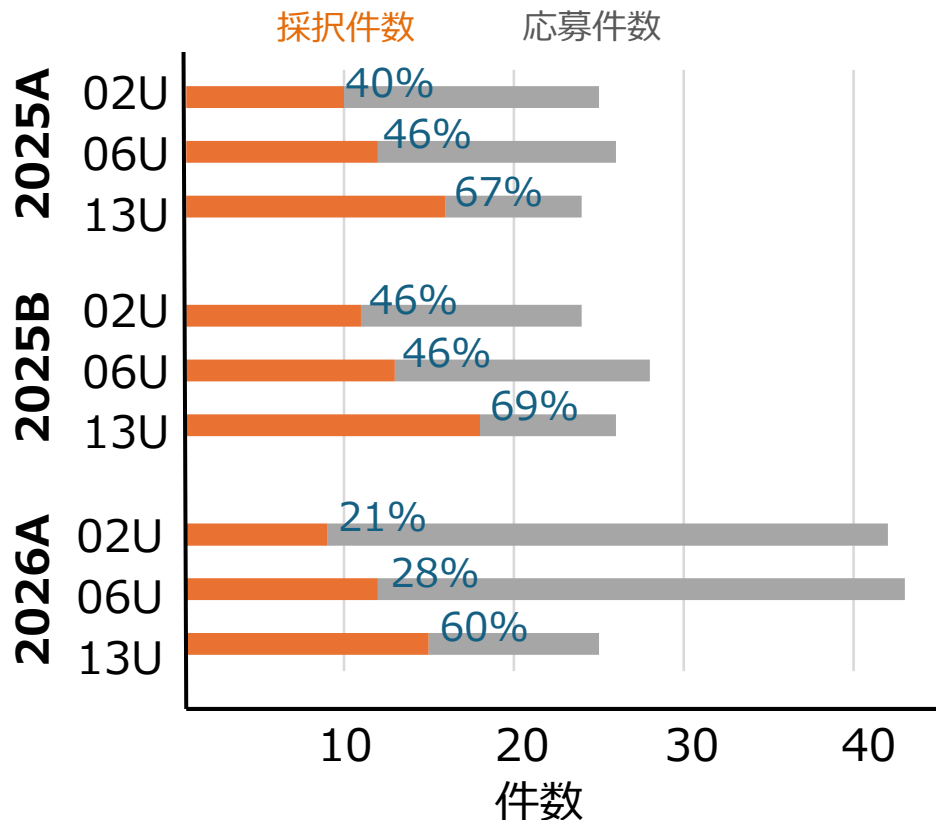


BL13U

XMCD
(X線磁気円二色性)



一般課題 応募・採択状況



- 高輝度軟X線に対する非常に高いニーズ
 - 研究基盤施設として低すぎる採択率
- 【参考】 SPring-8 (2024B期) の一般課題採択率 71.6%

ニーズの非常に高い測定手法については、役割分担を持たせつつ、複数のビームラインを整備することも考えるべきではないか

2024年4月以降の状況の変化（光源戦略）

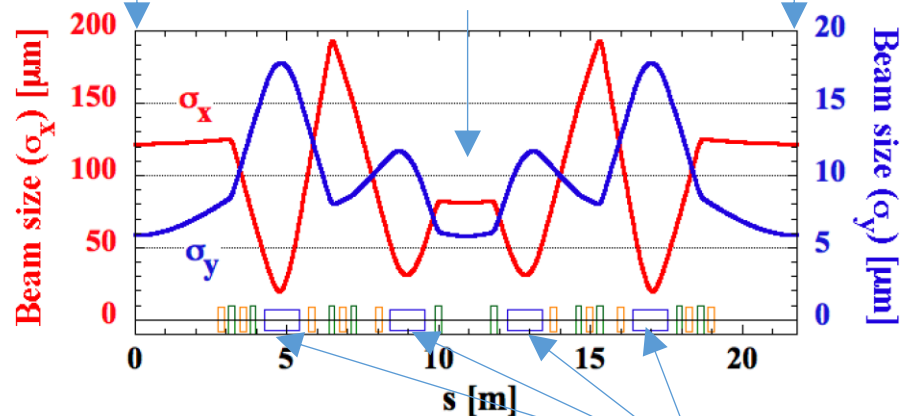
ラティスユニットセル × 16



長直線部
5.44 m

短直線部
1.64 m

長直線部
5.44 m



偏向磁石

長直線部 有効長4.2m×14か所
アンジュレーター

- IVU（X線高輝度光源）
- APPLE-II（軟X線偏光可変光源）
- 4分割APPLE-II（軟X線偏光可変光源）
- ツインヘリカル（円偏光光源）

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

【開発中】

アンジュレーター

- 小型APPLE-II（軟X線偏光可変光源）
- 極短周期アンジュレーター（X線高輝度光源）

NanoTerasuで光源を設置可能な直線部のうち半数を占める短直線部は、多極ウィグラーによる白色光源以外に、特色ある光源を設置できる可能性が生まれている。増設ビームラインのラインナップにも、これらの光源の採用を前提にした検討が必要。

2024年4月以降の状況の変化（設置者ビームライン）

NanoTerasuの光源性能を十全に発揮するビームラインを整備し、挑戦的な先端計測手法を開発することで、我が国の主要政策重点分野のうち4分野(AI・半導体、量子技術、バイオエコノミー、水素燃料)の課題解決を推進するために、NanoTerasuに設置者ビームラインを新設する。

現状・課題

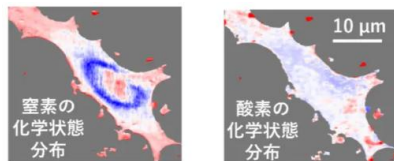
- ◆我が国の主要政策重点分野のうち4分野(AI・半導体、量子技術、バイオエコノミー、水素燃料)の着実な研究開発の推進が求められている。
- ◆テンダーX線の新活用や加速器技術の開発等を通して新しい放射光科学の開拓が待たれている。
- ◆QSTが放射光科学に先導的役割を果たすためにも、また量子材料研究拠点としてのイノベーション創出のためにも、挑戦的な先端計測手法の開発とその適用などシーズプッシュ型の研究開発が必要不可欠。

予算措置効果：先端計測手法の開発、それによる主要政策重点分野への貢献

NanoTerasu設置者ビームライン

- 真空封止アンジュレータによりSpring-8の100倍の輝度を持つテンダーX線を発生
- 未踏のテンダーX線領域の利用計測を開拓

ライブセル・ラベルフリー・ナノイメージング



生きたままの細胞で化学状態イメージング

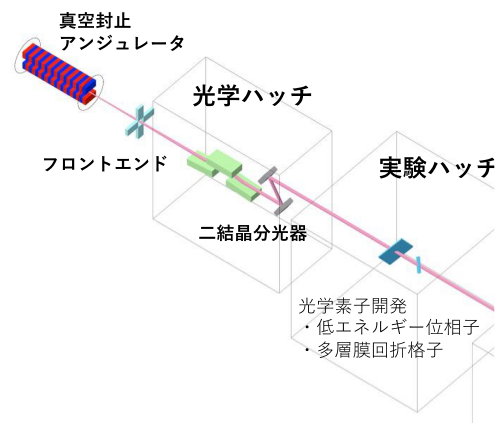
代謝物の動態、投与した薬剤の動態解析

テンダーX線利用発展のためのR&D

低エネルギーで利用可能な位相子（偏光可変システム）
低エネルギー領域の分光結晶に変わる多層膜回折格子

テンダーX線利用計測エンドステーション

軽元素選択、高位相コントラストイメージング
オペランド計測、生体試料への適用も



設置者ビームライン（R&Dビームライン）の整備が決まったことにより、テンダーX線利用技術等、先端的な光学技術の実用化が加速され、共用ビームラインへの早期実装の見通しが出てきた。

増設計画の最適化の工程（予定）

- 2026年 7月 NanoTerasu共用ビームライン整備検討委員会設置・第1回委員会
9月 SpRUC研究会からの要望・意見調査
12月 第2回NanoTerasu共用ビームライン整備検討委員会
2027年 2月 第3回NanoTerasu共用ビームライン整備検討委員会・新增設計画とりまとめ
4月 量子ビーム施設利用推進委員会

最適化の方向性

現Phase III：応用拡大共用BL

新Phase III：世界に先駆けて最高水準の軟X線向け放射光施設の恩恵を享受するため、既存技術を活用しつつ、光源性能を十二分に活用できるビームラインの整備に注力する

<想定されるビームラインのイメージ>

- 多極ウィグラーは、白色光源であること、ビームサイズが大きいことなど本来のメリットが生きる用途に用いる。
- 極めて高いニーズへの喫緊の対応が必要なもの
- 3GeV第4世代光源の性能が生きるもの

現Phase IV：先端利用共用BL

新Phase IV：新型光源や先端的光学技術など、NanoTerasu独自技術を投入しつつ、放射光利用の地平を拓くビームラインを整備する

<想定されるビームラインのイメージ>

- 高輝度テングダー（1-5keV）ビームライン
- 新光源利用
など

国の戦略17分野への貢献

AI・半導体



次世代半導体の開発

創薬・先端医療



創薬

量子



量子センサの開発

資源・エネルギー
安全保障・GX



燃料電池電極・部材・
触媒の高性能化

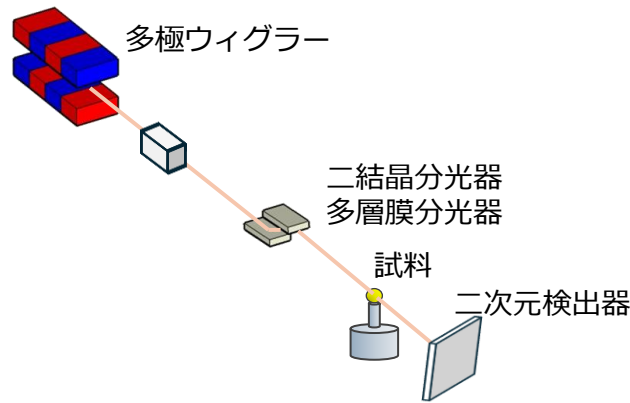
Phase IIについては、最適化される増設計画の方向性をふまえつつ、計画をアップデートする。

Phase IIのアップデート

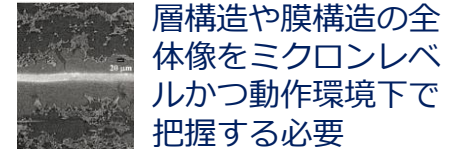
オペランドイメージング

多極ウイグラー(10倍強度の白色光源)
動作中の化学状態を高速イメージング

- 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
- 準単色分光器を利用した大強度X線による高速化で、動作中のオペランド測定を実現



燃料電池部材の高性能化



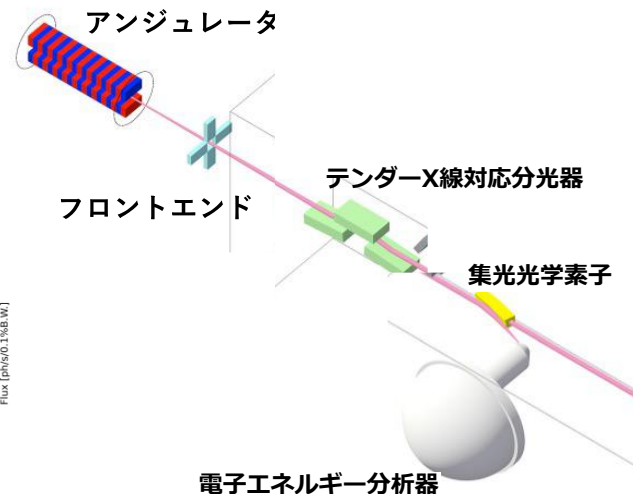
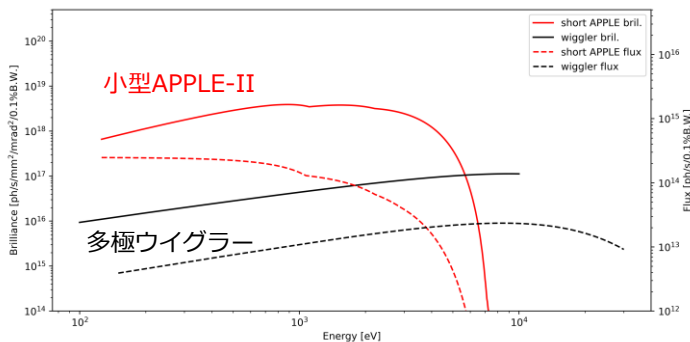
層構造や膜構造の全体像をミクロンレベルかつ動作環境下で把握する必要

- 発電効率の向上
- 劣化機構の解明

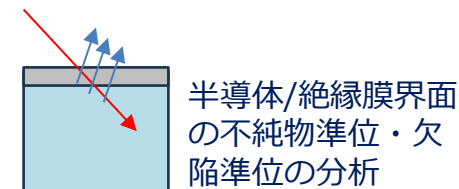
TXPES

小型APPLE-II(短直線部用アンジュレーター光源)
SX-TX領域の高輝度光を利用した電子状態解析

- 高輝度アンジュレーター光源の利用により高速・ハイスループット解析が可能
- 集光X線により微小領域の分析が可能



次世代半導体の開発



半導体/絶縁膜界面の不純物準位・欠陥準位の分析

- 電子デバイスの歩留・信頼性の向上
- プロセス技術の高度化