

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

令和6年5月17日
量子ビーム利用推進小委員会

1. はじめに

- 3GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu（以下「NanoTerasu」という。）は、令和元年度に開始された施設の整備が完了し、令和6年4月1日に施設の運用を開始。運用開始時点では、計10本のビームラインが整備されており、その内訳は、量子科学技術研究開発機構（以下「QST」という。）が整備する共用ビームライン3本、光科学イノベーションセンター（以下「PhoSIC」という。）のビームライン7本となっている。
- 一方、NanoTerasuには計28本のビームラインが整備可能であるが、運用開始時点において残り18本のポートは埋まっていない。また、どのような性能のビームラインをどの機関が整備するかについては決まっておらず、「官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設の推進 中間評価報告書」²や「NanoTerasu の利活用の在り方に関する報告」³等においても、今後の検討課題として指摘されていたところである。
- 以上を踏まえ、NanoTerasu における今後のビームラインの増設計画について、特に国側が設置するビームラインの増設に関する計画を中心に聴取し、調査検討を行った結果を取りまとめるものである。

2. 共用ビームラインの増設

- QST に設置された外部有識者からなる「NanoTerasu 共用ビームライン整備検討委員会」において、今後追加すべき共用ビームラインに求められる諸元等を検討。共用ビームラインの増設において考慮すべき事項は以下のとおり。
- NanoTerasu の強みは、長直線部のアンジュレーターから取り出すことのできる軟 X 線～テンダー X 線領域での世界最高水準の高輝度光源と、短直線部の多極ウイグラーから取り出すことのできる3～10keV 領域の白色 X 線光源である。また、ユーザーニーズ、分野多様性、新規開拓性等の要素も勘案し、QST が整備する共用ビームラインの諸元設定において考慮する。
- 施設から生み出される成果を最大化するためには、共用ビームラインを計画的に整備する必要がある。2019～2023 年度に既に整備された3本を「フェーズⅠ」とし、以降「フェーズⅡ」、「フェーズⅢ」、「フェーズⅣ」の3段階で増設することが望ましい。
- フェーズⅠにて整備された現行の共用ビームライン3本については、軟 X 線分野におい

¹ 「新たな軟 X 線向け高輝度 3GeV 級放射光源の整備等について（報告）」（平成30年1月18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）による

² 「官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設の推進 中間評価報告書」（2022年6月14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）

³ 「NanoTerasu の利活用の在り方に関する報告」（令和5年2月14日 NanoTerasu（次世代放射光施設）の利活用の在り方に関する有識者会議）

て、「世界トップクラスの性能」、「科学技術の最先端領域の開拓」、「高度な計測技術の探求」といった観点から、いずれもアンジュレータを光源としつつも、ビームのエネルギー領域および目的にバリエーションを持たせて先鋭的な計測を可能としているが、それは3手法⁴に限定されたものとなっている。

- このため、フェーズⅡにおいては、「高ユーザーニーズ」という観点から、主にウイグラーを光源としつつ、X線吸収微細構造（XAFS）、X線回折、X線イメージングといった、いわば放射光施設の基本的かつ汎用的なビームラインと言える用途をもったビームライン5本⁵の建設・整備を行うことが望ましい。なお、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ェ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以降においては、施設の整備・共用の状況や、科学技術・イノベーションを取り巻く内外の情勢変化等を踏まえて計画を最適化していくことを前提とする。フェーズⅡの候補であるXAFSやX線回折に対応したビームラインでは、ガス雰囲気下や高温・高圧下、溶液中といった実際の使用環境・動作環境・製造環境下での計測ニーズが多いものの、実験実施にはガス除害装置等の特殊設備を要する場合がある。それらのビームラインにおいて特殊設備を度々入れ替えて対応することは、当該ビームラインの高い利用ニーズを踏まえると困難であるため、フェーズⅢにおいて、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⁶を整備することが望ましい。
- 放射光のコヒーレンスを活用した最先端イメージング技術といった先端計測技術はNanoTerasuの強みを活かしたサイエンスピークを創出する計測技術と言える。これらの計測が可能なビームラインを整備することができれば、未開拓だが産業においてインパクトの大きい広範な分野⁷への貢献が期待される。他方で、これらの実現にはエンドステーションにおけるマルチモーダル測定技術の開発や、NanoTerasuの強みでもあるテンドーX線領域における高効率光学系及び光学素子による偏光制御技術の開発が必要であり、これらを克服しなければ、共用ビームラインとしてユーザーへの共用に供することはできない。このため、エンドステーションの研究開発を主として行うもの⁸は、フェーズⅢを目途に技術課題を解決し、フェーズⅣにて整備を行うことが望ましい。また、エンドステーションの範囲にとどまらないビームライン光学系等の研究開発を要するもの⁹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。

3. パートナー側ビームラインの増設

- PhoSICのコアリジョンに加入している企業群からは、企業間競争に直結するよう競争領域の機微技術については、セキュアな環境で施設利用研究を実施したいというニーズが寄せられている。また、こうしたセキュアな環境は、法科学分野におけるプライバシー配慮や両義性といった研究課題の要請にも応えることができる。

⁴ 共鳴非弾性X線散乱（RIXS）、角度分解光電子分光（ARPES）、X線磁気円二色性（XMCD）

⁵ 別紙1 グループ2参照

⁶ 別紙1 グループ3参照

⁷ 人工光合成のための光触媒や磁気デバイス、二次電池、溶液電池セル等

⁸ 別紙1 グループ4参照

⁹ 別紙1 グループ5参照

- NanoTerasu の東側の拡張エリアには光源からのラインまで十分な距離があり、長尺・ハイコヒーレンスを活かしたビームラインを設置可能である。パートナー側では、当該拡張エリアに機微技術を扱うことのできるセキュアな環境（セキュアゾーン（仮称））の整備と、セキュアゾーンで利用可能なビームライン（セキュアビームライン（仮称））の整備を検討している。
- 具体的な使用方法や整備に必要な財源、時期についても、共用ビームラインの整備と合わせて、PhoSICにおいて具体化していくこととしている。

4. 小委員会からの留意事項

- 科学技術の進展は目覚ましく、不断のアップデートを行わなければ NanoTerasu も陳腐化は避けられない。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計画的に埋めることが重要であり、2. 及び3. のビームライン増設計画は妥当である。
- また、NanoTerasu は先端を常に目指すべきであり、R&D 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く、道筋を早期に立てるべきである。また、硬 X 線領域で我が国のフラッグシップである SPring-8 との棲み分けについては、両施設間で十分な調整を行う必要がある。
- ビームラインを増設する際には、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必要がある。特に、既存の SPring-8 のビームラインと NanoTerasu に新設するビームラインの比較及びその整備意図についてはユーザーに丁寧に説明すべきである。
- NanoTerasu のパフォーマンスを最大化するためには、既存のビームラインの高度化も必要である。測定装置や試料条件のハンドリングの複雑化に対応できるようにするほか、自動化・遠隔化、迅速な解析等を可能とする研究環境の整備や、最新の整備状況のユーザーへの情報発信が必要である。加えて、ビームラインの運営・高度化を担う人材の確保・育成にも取り組む必要があり、その計画について対外的に発信することが望ましい。

以 上

国が整備するビームラインのラインナップ案

(第 53 回 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 資料 1-2 をもとに文部科学省作成)

	ポート (例)	分類	光源	エンドステーション	特色・目的
グループ 2 高ニース共用BL					
1	12W	XAFS	多極ウイグラー	(quick) XAFS	テングーX線領域 全自動DX 自動試料交換
2	13W	X線回折	多極ウイグラー	X線回折・散乱	テングー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	11W	イメージング	多極ウイグラー	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 テングーX線領域における吸収端コントラスト利用
4	12U	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	05W	X線分光	多極ウイグラー	HAXPES	テングーX線領域 全自動DX

	分類	光源	エンドステーション	特色・目的
グループ3 応用拡大共用BL				
6	XAFS	多極ウイグラ	(quick) XAFS	テンダー-X線領域 特殊環境
7	X線回折	多極ウイグラ	X線回折・散乱	テンダー-X線領域 特殊環境
グループ4 先端利用共用BL				
8	X線回折	多極ウイグラ	X線回折・散乱	タンパク結晶構造解析 テンダー-X線領域
9	X線回折 X線散乱	真空封止 アンジュレータ	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
10	イメージング	APPLE-II アンジュレータ	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
11	X線分光	Helical8 アンジュレータ	ARPES	高エネルギー分解能ARPES
R&D BL				
1	研究開発	真空封止 アンジュレータ	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
2	研究開発	多極ウイグラ	XAFS ウイグラ利用開発	低エネルギーテンダー-XAFS等

パートナー側のビームライン増設計画案

(第 52 回 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 資料 3 より)

セキュアゾーン構想

- 重要な機微技術の研究開発は、よりセキュアな環境で、という企業の要望
 - 犯罪捜査、安全保障など公的機関による機密性の高い計測、研究開発の必要性
- 東側の拡張エリアにセキュアゾーンを設定し、セキュアな実験が可能なビームラインを新設
 - 拡張エリアには、光源からのライン長さを活かした光学系のビームラインも設置（アンジュレータービームライン）
 - セキュアゾーンは、共用制度、コアリション制度双方にニーズがあり、ビームラインの整備、運用等について、課題が存在するため、引き続き検討を進める

セキュアゾーンに設置される
ビームラインの例