

エネルギーミックスを支える現場から

技術者たちの思い



3GeV 高輝度放射光施設
NanoTerasu (ナノテラス)
(宮城県仙台市)



今回の取材先は
3GeV 高輝度放射光施設
NanoTerasu (ナノテラス)

そもそも放射光って？
「巨大な顕微鏡」とは

宮城県仙台市に建設された3GeV 高輝度放射光施設「NanoTerasu (ナノテラス)」。特徴的なリング状の建物と、ナノ(10億分の1)レベルを見ることが出来る「巨大な顕微鏡」というキャッチフレーズは大きな注目を集めました。そもそも放射光とはどんなもので、巨大な顕微鏡とは、どういうことなのでしょう。国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(QST) NanoTerasu 総括事務局長 川上伸昭さんから概要の説明を受けました。

「ナノテラスの特長は、軟X線領域で世界最高レベルの高輝度放射

脱炭素を目指したいろいろな動きの中で、「エネルギーミックス」の考え方があらためて注目されています。

今年度のeレポートは、エネルギーミックスの一翼を担う現場とそこで働く技術者に焦点を当てレポートします。



ナノテラスの巨大なリング状施設の内部(実験ホール)。取材にうかがった日に世界最高のエネルギー分解能を達成したとプレスリリースされた共用ビームラインBL02Uにて。



電子が周回する円周349mの蓄積リングを取り囲むようにビームライン、その他装置、打ち合わせスペースなどが設けられています。



加速器を管理する中央制御室では、各装置の状態や計器の数値を大型モニターで看視しています。

取材先概要 3GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu (ナノテラス)

所在地 / 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉
施設設置者 / 国立研究開発法人
量子科学技術研究開発機構
地域パートナー代表機関 / 一般財団法人 光科学イノベーションセンター
運用開始 / 2024年4月
電子ビームエネルギー / 3GeV
線型加速器長 / 110m
蓄積リング周長 / 349m
ビームラインポート / 最大28ポート



ナノテラスの世界的な役割について説明いただいた国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 NanoTerasu 総括事務局長の川上伸昭さん。

NanoTerasu は「十の世界を照らす」や日本神話の「天照大御神」からつけられた愛称で、正式名称は「3GeV 高輝度放射光施設」なんだよ!



光を実現したことです。電子を加速器によりほぼ光の速さまで加速し、太陽光の約10億倍にも及ぶとても明るい放射光というX線を発生させ、これを物質にあてることにより観察を行います。

つまり試料に高輝度放射光を照射し、例えば試料内部の微小なエネルギーの変化を検出・計測することで、物質内の電子の状態を明らかにし、物質の構造や性質を観察探究することができるというわけです。放射光の輝度が高いほど、より精密に詳細に調べることができますが、ナノテラスは軟X線領域では国内既存施設の約100倍の性能を誇ります。

この世界トップクラスの性能については「これまで長年にわたって各機関・企業・研究者・技術者たちが積み重ねてきた日本の技術力を結集して実現したことも大きな特長です」と川上さんは話します。

このようなナノレベルの観察を通じて、基礎科学はもちろんのこと、

エネルギー・材料・デバイス・バイオ・食品などさまざまな産業領域において幅広く利用され、科学とイノベーションの両面を支えていくとともに、日本の科学技術力・産業競争力を今後もリードしていくことが期待されています。また、世界の社会課題のひとつであるカーボンニュートラルにおいてもナノテラスは重要な役割を果たしています。

「例えば、太陽電池やバッテリーの性能向上に寄与する新素材の研究、化石燃料の利用効率向上に寄与する触媒の研究、エネルギー消費を抑える新しい技術や材料の開発に寄与する研究など、エネルギーミックスやカーボンニュートラル実現に直接寄与するものはもちろんのこと、私たちの生活を大きく変える発見につながる可能性を有しています」。

エネルギーミックスの多様化と効率化に貢献し、持続可能なエネルギー社会の実現に向けた重要なツールとなっていると言うことができます。

ナノテラスは、大きく分けて線型

**世界最高の性能で
最先端の研究開発を先導**

運用開始にあたり、最大28本設置可能なビームラインのうち、まず10本を整備しました。うち3本は共用ビームラインとしてQSTが運用し、国内外の研究者・技術者が課題申請し、最先端の研究開発を行うために利用されることになっています。

その3本のうち軟X線でのナノ角度分解光電子分光を行うBL06Uのを担当しているのが、QSTナノテラスセンター・高輝度放射光研究開発部ビームライングループの主任研究員である北村未歩さん。

ビームラインで導かれた放射光を光学素子で整えたり、対象に合わせて分析装置そのものの調整を行ったりする役割を担っています。

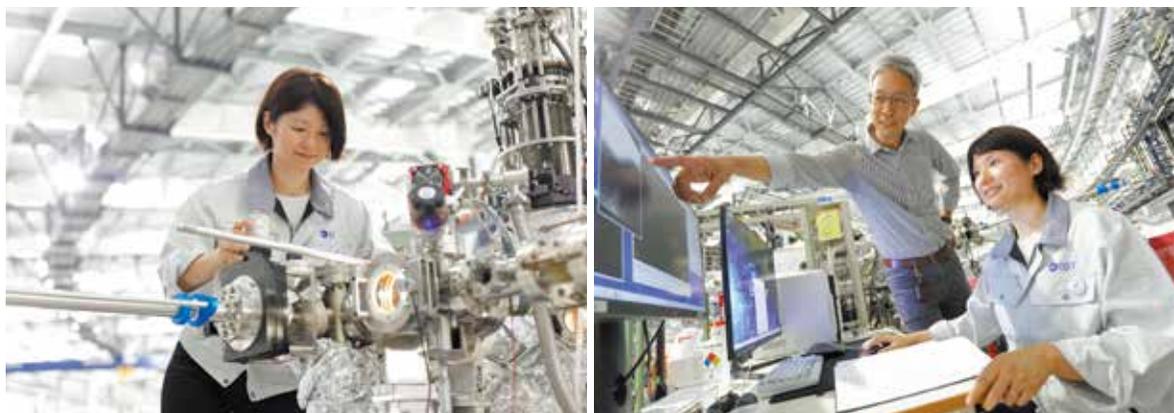
「放射光施設の建設は国内では30〜40年に一度の貴重なチャンスです。なので新規建設に立ち会えるのは今しかない、立ち上げから経験したいと思います、昨年既存放射光施設からナノ

加速器、蓄積リング、挿入光源、ビームラインという4つの装置によって構成されています【図】。

まず電子銃によって電子ビームを生させ、線型加速器によりほぼ光速まで加速し、蓄積リングに入射します。蓄積リングの中には、電子ビームから放射光を発生させる挿入光源が配置されています。ビームラインは、挿入光源で発生した放射光をエンドステーションと呼ばれる実験装置へと導きます。各ビームラインごとに測定手法に応じたさまざまなエンドステーションが準備され、この中で放射光を照射して測定・観察を行います。

「ちょうどプレスリリースしたばかりですが、共用ビームラインBL02Uに設置された放射光照射装置において世界最高のエネルギー分解能[※]を達成しました。今後調整を続けることでさらに性能向上のポテンシャルが期待できます」。

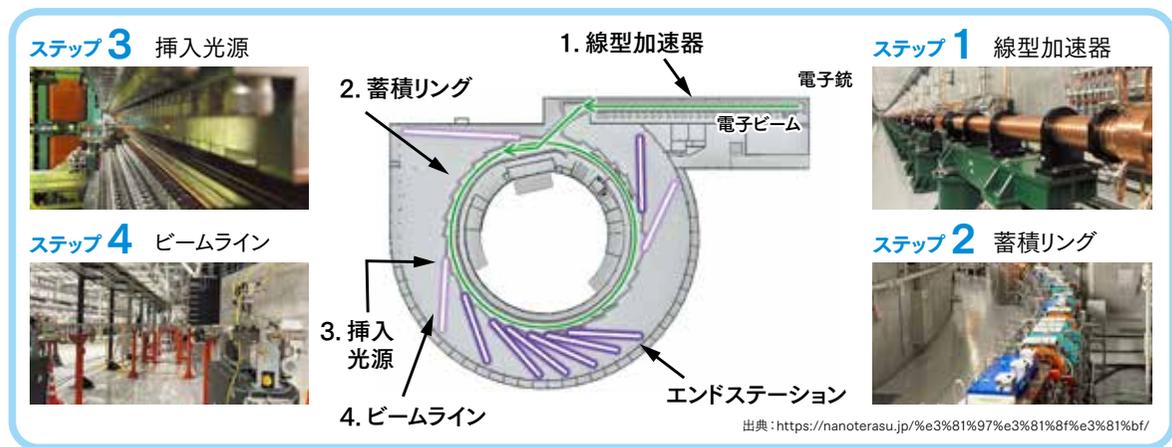
※物質内部をどれだけ精密に見分けることができるかを示す性能
<https://www.qst.go.jp/site/press/20240918.html>



ビームラインBL06Uの分析装置を調整する北村さん。装置の外から操作棒で内部の試料のセッティングを行います。

共用ビームラインはそれぞれに担当者がつきますが、BL02Uを担当する宮脇さんとは、同じ放射光分野の研究者として意見交換を行うことも。

ナノテラスの装置構成



テラスに移ってきました」。

ビームラインの建設では、放射光を取り出し整形するところから測定装置の設置・調整までのすべてを行う必要があり、既存施設の運用よりも広範囲で多岐にわたる業務に苦労したといいます。「それでも調整をやり抜いて想定していた分析精度を実現できたときはうれしかったですね」。

北村さん自身も研究者として放射光を用いた新しい技術の研究開発を行っています。立ち上げから関わってビームライン全体の仕組みを知っていることが、自身の研究に大きなプラスになっているといいます。けれども、今北村さんが見据えているのは、

「BL06U」や「BL08W」のBLはビームラインのこと。06や08の数字はどの挿入光源か。UやWは挿入光源の種類を表しているよ!



光科学イノベーションセンターの
コアリションビームラインの
「コアリション」とは、
「企業と学術をつなぐ仕組み」
という意味なんだよ！



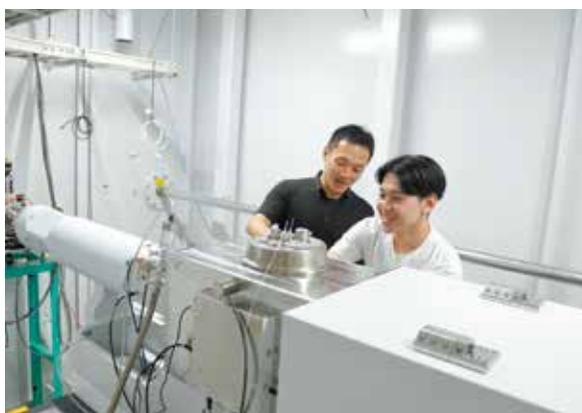
3本の共用ビームライン以外の7本のビームラインは、光科学イノベーションセンター（PhoSIC / 地域パートナー代表機関）や宮城県・仙台市や東北大学・東北経済連合会によるコアリションビームラインとして利用されています。

これはコアリションメンバーとして加入金を拠出することで、大学や研究機関だけでなく民間企業も、課題審査不要で最短2日前の予約で実験を行うことができますという、放射光を産官学で広く活用するための新しい取り組みです。

必要に応じて迅速に イノベーションを加速



試料を手に分析装置へ向かう目黒さん。BL08Wは硬X線のため、装置の周りは放射線管理区域として壁で遮蔽されています。



左手奥のラインから入ってくる放射光に対して、分光から検出まで一体化された汎用のX線用分析装置を自分たちで改造して使っています。

その取り組みを担っているのが、PhoSICビームライン部の目黒晴輝さん。2024年4月に入職してからBL08Wビームラインの技術員として、ビームラインの日常的なメンテナンスや改良、ユーザーから持ち込まれた試料の分析サポートを行っています。入社前は大学院で放射光を利用した研究をしていたという目黒さん。放射光に興味を持ったのは、高校生の頃だったそうです。

「宮城県丸森町の出身なんですけど、高校生の頃に丸森町がナノテラスの建設候補地となったことがありました。そのとき『地元にそんな巨大施設が!』と思い、放射光というものに興味を持ちました」。

それを機に物理学を学ぶために理学部へ進学、研究室を選ぶ際には「放射光」というキーワードに惹かれ、そして現在の職場へと進むに至ったといいます。未経験の測定手法のビームラインに配属されたときは驚いたそうです。「正直『マジか』と

極小範囲の電子の挙動を 圧倒的な明るさで可視化



QSTビームライングループ
主幹研究員
宮脇 淳さん

ビームラインBL06Uで行われている角度分解光電子分光（ARPES）とは、物質に光を照射した際に物質中から電子が放出される光電効果という現象を利用したもので、この放出された電子のエネルギーや放出角度を調べることで、物質中の電子の量や動きを可視化することができます。

BL06Uでは、エネルギーが比較的弱い軟X線をミラーを用いて集光することで、100ナノメートル以下という極小範囲の電子の挙動を、圧倒的な明るさで可視化することができます。ナノの空間分解能を持つ唯一無二の世界最高性能の装

置を目指している一方で、比較的汎用的なマイクロARPESを来年3月からユーザーへ供用できるように立ち上げ調整が行われています。

北村さんへ期待すること

私はBL02Uの担当、北村さんはBL06Uの担当者であり、同じ立場の先輩としてのコメントです。ナノARPESの開発と並行して、ビームラインとエンドステーションを立ち上げ・調整して、その後の維持・管理、高度化を行うといったユーザー対応を行うことは容易なことではありません。サイエンスだけでなく、光学や真空機械、ソフトウェアなど多岐にわたる知識が求められますが、周りからどんどん吸収して能力を発揮しているの、この点は全然心配していません。世界最高の装置の開発に関われる貴重なチャンスを楽しみつつ、無理のない範囲で自分のペースで頑張ってください。実現させることを期待していますし、できると信じています。

2025年3月の共用開始後、ビームラインを利用するであろう多くの研究者・技術者のことです。

「たくさんのユーザーに使ってもらう共用装置として、最先端の性能だけでなく使いやすさや安定性も考えた整備を行うことが、これから重要になると思っています」。

今回のナノテラスでの立ち上げも含めたビームライン技術を学び、経験を積んで、次の世代へと引き継ぐことで放射光業界に貢献していきたいと語っています。



量子科学技術研究開発機構のBL06Uビームライン担当者、北村さん(右)と主幹研究員宮脇さん(左)。



PhoSICビームライン部
主席研究員／部長

山根 宏之さん

最短2日前の予約で実験できる コアリションビームライン

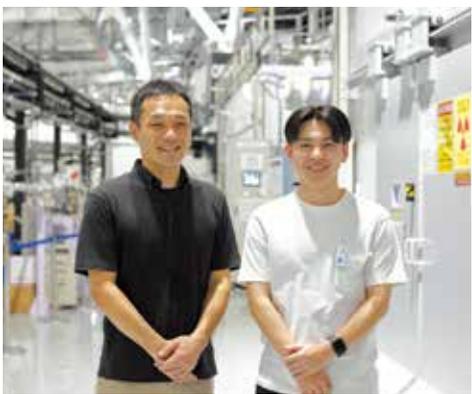
従来の放射光施設の運用形態では、利用応募から実際の利用までに半年程度かかっていました。応募したからといって必ず実験ができるとも限りません。これは課題審査があるためで、機会損失のリスクにもつながります。官民地域パートナーシップのもと建設されたコアリションビームラインでは課題審査不要・最短2日前の予約で実験実施、7本のビームラインの横断利用による多角的な研究展開、こちらからユーザーへの放射光利用方法の提案などを通じて、研究開発への専念や、研究展開への柔軟かつ迅速な対応ができることになり、いろいろな分野でイノベーションが

起きて、国際競争でも優位に立つことにつながるものと期待されます。

目黒さんへ期待すること

目黒さんには、これまで習得してきた大学院修士課程の研究内容(放射光利用研究)とは少し異なる実験手法でのユーザーサポートをお願いすることにしました。慣れない環境に置いて苦労させているとも思いますが、彼はすぐに期待以上の成長を見せてくれ、すでなくてはならない人になってくれています。

ユーザーの方々からも信頼されるようになってきて「ユーザー対応は目黒さんでお願いします」という指名まで来るようになってきました(実際は指名制度はありません)。今はユーザーの実験サポートで精いっぱいだと思いますが、将来的には実験データの解釈から社会実装への展開までをサポートできる人材に育ってくればと期待しています。



光科学イノベーションセンターのコアリションビームラインの担当者、目黒さん(右)と主席研究員山根さん(左)。

思いましたが、挑戦してみたら世界が変わって、視野が広がりました”。新しい知識と経験を身につけながらユーザーとのコミュニケーションを大切にし、ユーザーが望む結果が得られた際には、自分自身の技術や知識が最先端研究の進展に寄与しているとやりがいを感じると思います。

「放射光の驚異的な能力をもっと多くの人に知ってもらいたい、そのためにはユーザーフレンドリーなビームラインの構築と、私自身も放射光の能力を世間に発信する研究をしていきます」。

まとめ

取材を終えて



東北・仙台から 世界に広がるキャリアを

共用ビームラインによる世界最先端の研究開発遂行と、コアリションビームラインによる産業界へのイノベーション推進、これらを両輪として運用が開始されたナノテラスですが、それによっていったいどんなことが期待されるのでしょうか。施設の概要を説明していただいたQST NanoTerasu 総括事務局長の川上伸昭さんに、その質問をぶつけました。

「このナノテラスは、屋外に出る



街に間近で、街の人にも身近な施設でありながら、その視線やビジョンは大きく世界を向いている。それがナノテラスです、と語る川上さん。

と眼下に仙台の街が見えます。これは実は放射光施設としては画期的なことなのです。また、官民地域パートナーシップによる建設・運営も初めての取り組みです。これらを活かして、ほかにはない『リサーチコンプレックス』を構築し、研究所や企業が研究開発機能を集約するという、仙台の発展の新しい姿が期待できます」。

これまでと違って街中からすぐにアクセスできる都市型の研究施設となるのは、利便性はもちろん研究者にとってもいいことだと川上さんは指摘します。そうした新しい環境の研究施設であるナノテラスは、どんなふうに着いていくのでしょうか。

「世界最先端の共用ビームラインは、全世界の研究者に開かれているものです。世界から多くの優秀な研究者がこの地に集うことでしょう。それにより施設や街が活気づくのはもちろんのこと、ここで知識と経験を身につけた若い研究者・技術者には、どんどん世界へと羽ば

たいってほしい。そのためには自分の専門が社会にどう関わっていくのかを常に念頭に置くことを心がけてほしいですね」。

「巨大な顕微鏡」として利用するだけではなく、その結果をどう社会に適用していくのかというビジョンを描き、顕在化している課題のみならず未知の課題の発見・掘り起こしとその問題解決を行う「場」として、ナノテラスが青葉山から世界の将来を照らしていくことが期待されています。



サイエンスライター
瀬戸 文美

2008年東北大学大学院工学研究科バイオロボティクス専攻博士後期課程修了、博士(工学)。人間協調型ロボットの研究をしていた学生時代からロボット技術を中心とした解説やレポート記事を執筆。千葉工業大学未来ロボット技術研究センター(fuRo)主任研究員や東北大学男女共同参画推進センター特任助教(運営)などを経て、現在は「物書きエンジニア」として科学技術の魅力を伝える活動を行うかたわら、東北大学工学研究科で学術研究員として勤務。2024年3月より日本ロボット学会・理事(兼任)。著書に「絵でわかるロボットのしくみ(講談社/2014)」などがある。