

NanoTerasu (ナノテラス)

産学共創を革新する先端放射光実験施設

東北大学 国際放射光イノベーション・スマート研究センター (SRIS) 教授

(一財) 光科学イノベーションセンター 理事長 高田昌樹

1. はじめに

3GeV高輝度放射光施設NanoTerasu (ナノテラス) が、東北大学青葉山新キャンパス (仙台市) に建設され、2024年4月1日より運用開始された。そして、4月9日から企業、学術による本格的な利用が7本のビームライン (回折、散乱、イメージング、分光) で始まっている¹⁾。図1の写真の円形の建物がナノテラスである。放射光施設では、加速器を使って実験室X線装置の10億倍もの明るさを有するX線を発生させることができる。直径170mのドーナツ型の屋根をもつこの施設は、SPRING-8/SACLA (スプリングエイト/サクラ) での研究開発の成果に基づく最先端の加速器技術で建設された。

スプリングエイトは1997年に兵庫県で運用開始した世界トップクラスの現世代型の放射光施設



図1 東北大学青葉山新キャンパスに建つNanoTerasu (ナノテラス) とSRIS[※]棟 (前景左側の建物) と青葉山ユニバース (前景右側の建物)。左背景は、東北大学青葉山東キャンパスと仙台市街。

※ SRIS : 国際放射光イノベーション・スマート研究センター

である。これまで、学術から産業まで幅広い分野で利用されてきた。“はやぶさ”の持ち帰った試料の分析、携帯電話のディスプレイ、省エネタイヤの開発、次世代磁石、燃料電池、Liイオン電池、航空機・自動車に用いる炭素繊維材料、軽量コンクリートの開発などに貢献した。それから約四半世紀を経て、国が整備・運営する新たな放射光施設ナノテラスが“ナノを照らす”施設として登場したのである。ハード面では、低エミッタンス電子ビームにより高輝度光を生み出す加速器技術を、スプリングエイトで磨かれてきた数々の独自技術を結集して、導入し実現した。その結果、スプリングエイトでカバーできなかったLi, C, O, Sなどの化学状態や、Fe, Co, Niなどのスピン状態を見るための軟X線領域では、スプリングエイトの約100倍にのぼる。ソフトマテリアル、ゴム、CFRPなどの高分子複合材料の構造と機能の相関を探索する強力なツールとなることが期待されている。そして、硬X線領域も30keVまでカバーし、その光の先端性・卓越性で、脱炭素社会を実現する再生可能エネルギー、EV化、量子技術イノベーションへの対応、情報通信、自動車、医療、エネルギー、工業など、あらゆる分野の研究開発のDX化の支援に産学官で取り組む。

放射光に馴染みの薄い企業や非専門家は、どうやって施設にアプローチし活用していくのか？そのことに対するソリューションとして、ナノテラスでは産業界のコア技術の開発に利用しやすい“コアリション有志連合”という新しい利用システムを創出した。このハード、ソフト両面で産学共

創を促進する強みを活かし、さらに、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第3期のプロジェクト「サーキュラーエコノミーシステムの構築」が、昨年より開始されている²⁾。コアリションメンバーの企業とともにナノテラスを「再生材データバンクの構築」の拠点として、プロジェクト活用の最初の例となる。データバンクの構築で、再生材のグレーディングや破壊挙動の解明で貢献する。ナノテラスの概要と産業界における活用についての展望について詳解する。

2. “ナノの見え方”が研究開発を変える

高輝度放射光の特徴は、従来の放射光X線を用いた分析法に加え、不均一な構造と機能の相関をイメージングできるようになることである。図2は、リチウム硫黄電池正極材として開発された含硫黄高分子粒子の硫黄の化学状態を可視化することに成功した産学共創の一例である³⁾。内部における不均一状態が非破壊で可視化されている。レーザー光のように光の波の山と谷が揃う干渉性(コヒーレンス)の強い放射光を用いた、スペクトロタイコグラフィー⁴⁾という方法で可視化したものである。分解能はナノメートルスケールに

達している。従来のミクロンを切るX線顕微鏡の分解能を超える強力なイメージング手法である。参考文献3)では、さらに正極での充放電後の粒子の隙間に当たる領域にLiSの分布が明瞭に可視化されている。これらの計測は、スプリングエイトで行われた。詳細は参考文献3)を参照されたい。ナノテラスではさらなる高分解能化の挑戦も進められていく。この計測を行ったテNDER X線領域では、ナノテラスの放射光はスプリングエイトよりも輝度が5倍~40倍高くなる。スプリングエイトよりも高い干渉性と輝度をもつナノテラスであれば、その変化をさらに高精細に高速で観察できるのである。充放電過程における硫黄の反応経路や流出経路などの知見が得られるようになるであろう。

しかし、それだけでは“見ただけ”の計測でしかない。可視化された不均一な構造・機能情報を電池の高性能化へ、材料設計の具体的な指針につなげなければならない。近年、著しく急速に進化を遂げている計算科学、AI、データ科学⁵⁾との協働が“見ただけ”で終わらせないことへの一つのソリューションとなる。この課題解決への道筋が、ナノテラスで目指す“計測・計算融合”である。

3. 計測・計算融合，“見ただけ”で終わらせないために

図3はその計測・計算融合の概念図である。企業での10数年前のタイヤの製品開発がどう変わるかを例に示している。左上の図は、高い耐久性と強度をもつタイヤの材料の開発成果である。当時は、こういった研究開発をサポートする放射光計測は右上に示した小角散乱を用いていた。変形の際のゴム中のフィラー、ボイドの分布の構造情報をモデルで推測するためである。しかし、コヒーレント光によるナノスケールのイメージングにより、図2と同様に不均一な構造をダイレクトに可視化できる。右下の図はシリカ粒子を観察した最近の事例である。ゴム中のフィラーと同程度のサイズの30nmのシリカの粒子の分布の様子が明瞭に可視化されているのがわかる。左下の図は、

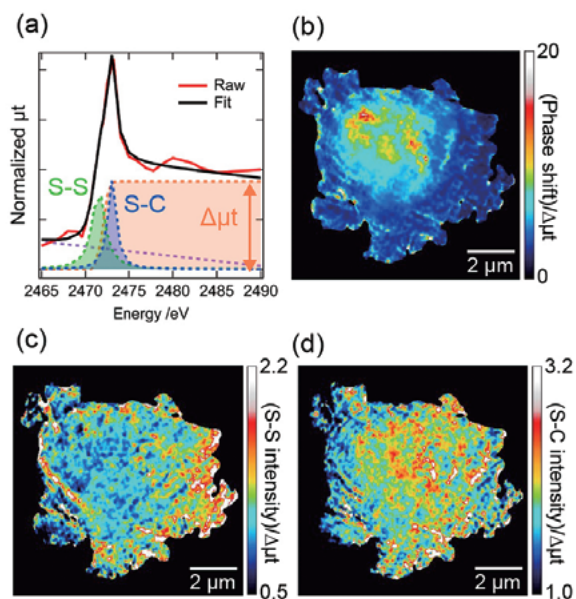


図2 Li-S電池の電極の活物質の充放電によるLiの挙動に対応した硫黄の化学状態 (c) (d) (SPRING-8/SACLA利用者情報 Volume 27, No.4 p 336-341より転載)

計算科学でゴムの変形によるフィラー周りからはじまる破壊の進展をシミュレーションで予測した結果である。フィジカル空間に対応するコヒーレント放射光による可視化とデジタル空間に対応する計算科学で、デジタルツインをナノテラスの活用で形成されることを示している。このことは、課題解決を加速し研究開発力をDX化で強化する。2023年の1月、東北大学の未来創造機構にグリーンクロステック研究センター（岡部朋永センター長）が発足した。そして、ナノテラスから得られたデータを製品開発に直結させるデジタル化の取り組みが、青葉山東キャンパスで始まっている。左下の図で示したシミュレーションは、グリーンクロステック研究センターが有するCoSMIC[®]によるものである。データ科学を活用して、計算機上でプロセス・組織・特性・性能をつないで材料開発を加速する統合型材料開発システムである。現在31社にのぼる企業が参画し、活動を開始している。

図3の可視化も、コアリシヨンの形成が生み出した成果である。ナノテラスの活用を検討するためのフィージビリティスタディとして、スプリングエイトで行われた計測を基に得られている。数

年前は、200nmのシリカ粒子の凝集しているイメージの可視化に成功していた。しかし、高度化されたX線集光技術と新しい検出器の登場で、30nmのシリカの粒子が可視化できることが確認できるようになった。ナノテラスでは、さらに高輝度の光で高い分解能での、その場観察、オペランド計測への挑戦が始まる。放射光源だけでなく計測の高度化も、計測・計算融合の好循環と加速を生み出すのである。すでに、いくつかの企業・学術のマッチングがナノテラスの計測を基に取り組みを始めた。ナノテラスに対する、コアな課題解決のための産学共創のプラットフォーマーとしての期待が高まっている。

4. コアな課題に誰もが活用できるように

ナノテラスは、スプリングエイト（1997年運用開始）に続いて、わが国が整備・運営し広く研究者に開放して共用に供する施設である¹⁾。施設建設の段階から産業界を巻き込み、研究力、国際競争力の強化に貢献すること、そして、リサーチコンプレックスの形成加速を具体化することがミッションとして与えられている。そのため、「官民

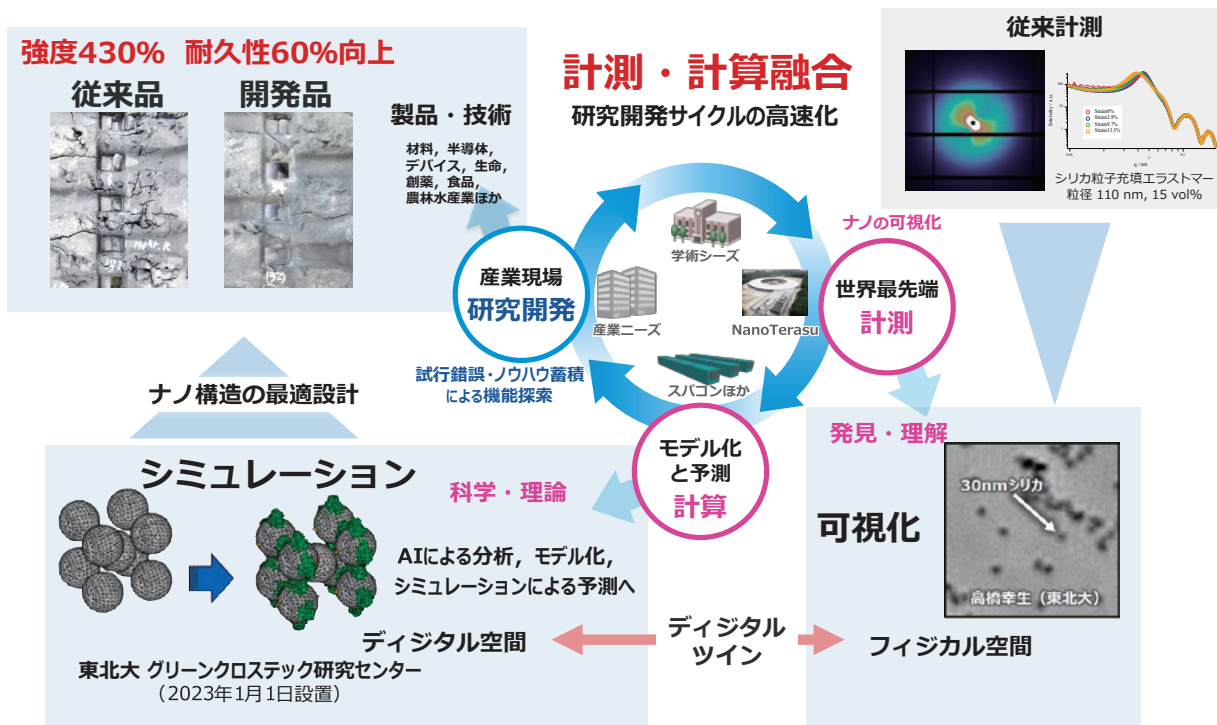


図3 タイヤの高耐久性、高強度化への計測・計算融合の活用

地域パートナーシップ」という新しい施設整備の方法が導入された。国側の主体である量子科学技術研究開発機構 (QST) とともに、光科学イノベーションセンター (PhoSIC) を代表とする地域パートナー (宮城県, 仙台市, 東北大学, 東北経済連合会) が役割を分けて施設の整備を行っている。図4にその役割を整理した。国側は加速器と3本の共用ビームラインの建設費を負担する。一方、地域パートナー側は基本建屋と7本のビームラインを建設する。財源は、自治体およびコアリションに参加する企業や大学の機関による拠出された資金を活用する。施設にコミットする多彩なプレーヤーからの資金源を活用する建設手法は、民間資金を活用した施設・整備・運用の今後のロールモデルとなるといわれている。

ナノテラスによる可視化を多彩なプレーヤーのさまざまな分野で活用するためには、これまで高いといわれて来た放射光活用の敷居を低くする利用スキームが必要となる。それが、図4に示した“コアリション (有志連合)”コンセプトである。放射光の非専門家 (企業・学術) が、放射光およびサイエンスの専門家 (学術) と競争領域と協調領域を分けて、それぞれの役割に専念するための“コアリション (有志連合)”を形成する考え方である。

このコアリションには、利用を予定している企業・学術機関が建設費の拠出によりメンバーと

なっている。この建設費を拠出することで、企業・学術機関は、利用課題の審査免除、原則一カ月前まで可能な利用予約、全て成果専有で利用できることに加え、さまざまな利用支援、産学マッチングの機会拡大 (コアリション形成) のインセンティブを享受できる。すでに、多くの企業が参画に手を挙げ契約を進めている。コアリションの形成は、研究開発の情報管理を徹底して行う。メンバーの企業名も原則、非公表である (一部の企業は、プレス発表で戦略的に公表)。従来の産学連携と大きく異なる点は、学術も、大学や研究開発法人が機関としてコアリションに資金を拠出・参画していることである。機関はさまざまな考えで、企業との産学共創にナノテラスをイノベーション創出の場として戦略的な活用を検討している。よって、産学共創の本丸は、現場での実験支援、測定代行・データ解析ではない。利用を計画する段階から、成果にまで結びつける専門家との課題解決に向けた共創である。その機会および成果創出のために、課題を共有できる学術とのマッチングを図5のように取り組んでいる。放射光の非専門家に寄り添う活用支援の創成である。放射光に疎遠であった産学のコミュニティに、コアリションによる新たな利用機会を創出するためコアリション・マッチングの活動を始めたのである。

以上のように、共用・成果公開をベースとした

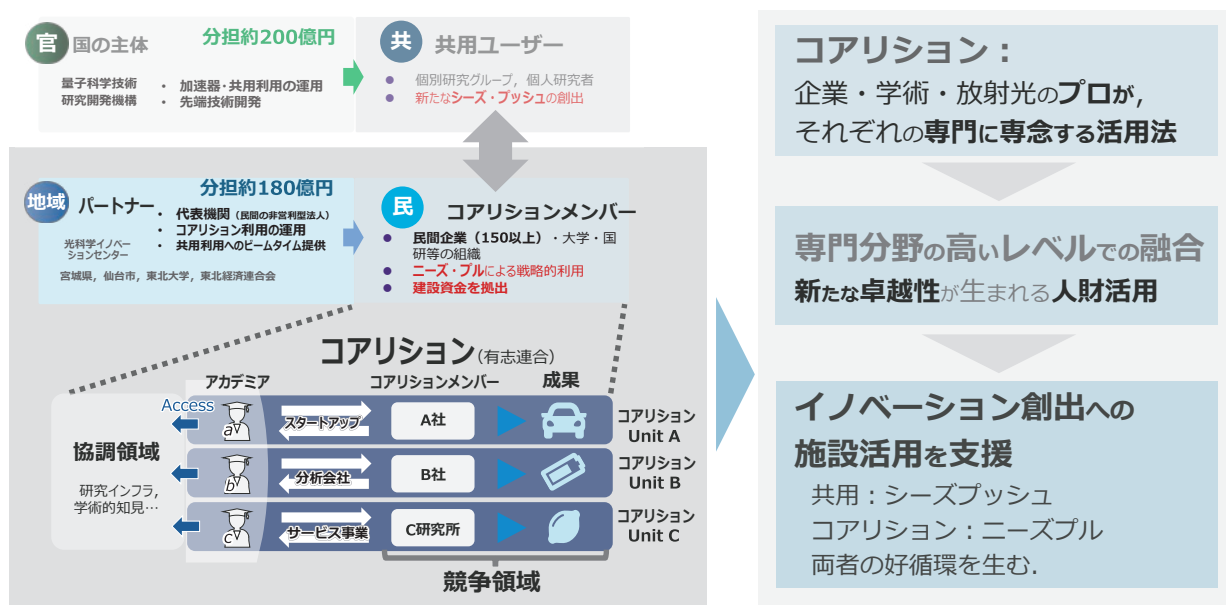


図4 官民地域パートナーシップとコアリション (有志連合) のコンセプト



図5 コアリション・マッチングシステム

既存の産業利用の垣根を越え、「計測（見る）施設」から、データ科学・AI・モノづくりなどの異分野融合を展開する「課題を解決する施設」への革新が見えてきた。ナノテラスのコアリションは、放射光計測の専門的知識や経験のない研究者、企業に対し、先端基盤施設の利用を民主化する第一歩となる。

5. ナノテラスの光源性能

ナノテラスは、MAX IV（スウェーデン；3GeV）、ESRF-EBS（EU；6GeV）、SIRIUS（ブラジル；3GeV）に続く、世界で4番目の低エミッタンス電子ビーム蓄積リングによる次世代放射光施設となる。施設は、国の主体であるQSTによって整備された直線の線型加速器とリング形の蓄積リングから構成される（図6）。線型加速器は、110mの長さで、3GeVで6GHz高周波加速により電子集団を光速近くまで加速する。加速された電子集団は周長349mの蓄積リングに蓄積される。光速近くまで加速した電子の集団を磁石で進行方向を曲げることで、制動を加え放射光を発生させる。光源となる電子集団を、低エミッタンスの（発散を小さくする）電子ビームとして蓄積することで、



図6 ナノテラスの線型加速器、蓄積リング、ビームライン、エンドステーションの配置

発生する放射光ビームの輝度を高めることができる。

図7に、蓄積リングを構成するユニット（ラティス）を拡大して示した。このユニットが16個連結されてリングが構成されている。スプリングエイトでのR&Dを基に、偏向電磁石（64個）、四極、六極電磁石（それぞれ160個）からなるリングが

設計され設置された。それぞれ、電子ビームを曲げ、電子ビームの発散を防ぎ、安定な周回を確保するレンズのような役割を担う。ナノテラスの蓄積リングの特徴は、スプリングエイトがラティスに2個の偏向電磁石を有するのに対して、4個の偏向電磁石を配置していることである。スプリングエイトの電子ビームのエミッタンスは $2.4\text{nm} \cdot \text{rad}$ であるのに対して、ナノテラスは、半分以下の $1.1\text{nm} \cdot \text{rad}$ を実現する⁷⁾。図中の電子ビームの大きさが小さくなっているのがわかる。世界の多くの放射光施設は現世代型で、まだ、ラティスに有する偏向電磁石の数は2つである。しかし、APS (米国; 7GeV), SLS (スイス; 3GeV), SPring-8-II (日本; 6GeV) など、次世代型への改修および検討が世界中で急ピッチに進んでいる。電子ビームの低エミッタンス化が、第2章、第3章で示した「ナノの見え方」を変えるからである。

6. 多彩なビームラインのラインアップ

発生した放射光は、図6に示したビームライン、エンドステーションに導かれてさまざまな計測が行われる。ビームラインは最大28本まで建設が可能である。初期整備として、10本のビームラインを整備する⁸⁾。国側が3本の共用ビームライン(軟

X線), 地域パートナー側が7本のコアリションビームライン(軟X線3本, 硬X線4本)である。図8にその配置を、表1に、産学が活用するコアリションビームラインの特徴を整理した。

表1では、どのコアリションビームラインでどのエネルギー範囲の光が利用可能であることを示した。特定の元素の情報を得るためには、その吸収端のエネルギーの放射光を選択して計測をする。第2章で示した可視化はコアリションビームラインにあるBL10Uが選択できる。高いコヒーレンスと硫黄の情報を可視化するための 2.7keV の波長の光が利用できるからである。BL14Uでは、Fe, Co, Niのスピンの磁気構造を可視化することができる。図9にBL14Uの概要と市販のネオジム磁石の磁区の可視化の事例を示した。白黒像は軟X線吸収コントラスト像でFeがよく見えるエネルギーの軟X線を用いて走査イメージを観測したものである。鉄の含有量の多いところほど明るくなっている。カラー図は、放射光の円偏光の向きを変えた走査イメージから、磁極の分布を、青(N極), 赤(S極)で着色し、磁区の分布を 100nm の画素の分解能で観測(計測時間10分)したものである。現在、空間・時間分解能の向上が検討されている。ネオジム磁石の性能向上, サマリウム鉄系磁石, ボンド磁石などの次世代の永久磁石

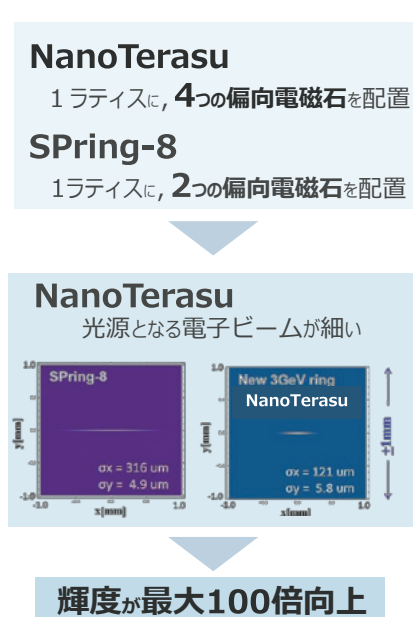
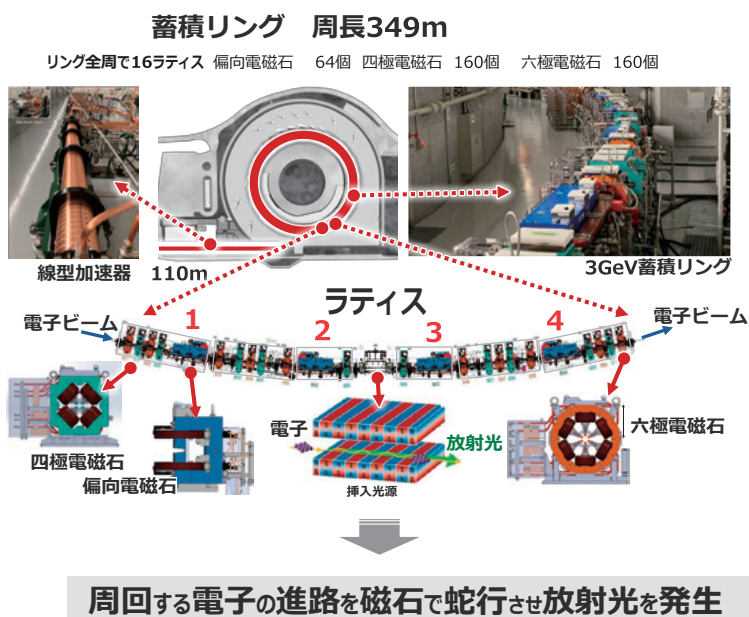


図7 加速器の概要。Cバンド線型加速器と蓄積リングの様子。

※写真・図は量研機構の西森信行加速器グループリーダーより提供 (Proceedings of 13th Int. Particle Acc. Conf. (2022) pp2402-2406)

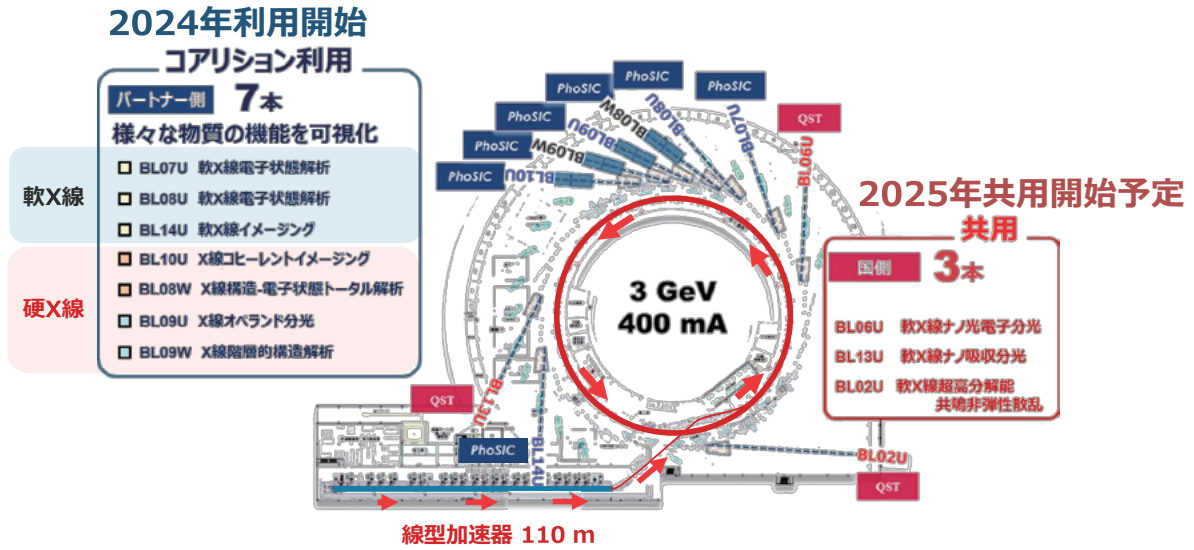


図8 初期整備の10本のビームライン

表1 コアリジョンビームラインの概要

7本のビームラインで、化学状態、電子状態、磁性、配向・凝集、歪み、分子構造、の可視化をカバー

BL No.	BL名称	挿入光源 エネルギー	主要装置	特徴
07U	軟X線電子状態解析	APPLE-EUV型 0.05~1.0 keV	軟X線発光分光 NanoESCA	デバイスや溶液を含む複雑系の電子状態や化学状態の分析
08U	軟X線オペランド分光	APPLE-SX型 0.18~2.0 keV	雰囲気光電子分光 軟X線吸収測定	固体の電子状態・化学状態のオペランド時空間マッピング, リアルタイム観察
08W	局所構造解析	MPW型 2.1~13 keV	メイン: X線吸収分光 ブランチ1(17.5keV): X線回折 ブランチ2(8keV): X線小角・広角散乱	原子配列・配位数(メインビームライン)の解析, 結晶構造~メソ構造の可視化(自動・リモート測定, ブランチビームライン)
09U	X線オペランド分光	IVU型 5~15 keV	硬X線光電子分光	バルク内部や埋もれた界面の化学状態
09W	階層構造	MPW型 約4.4~30 keV	白色X線CT 4D高速X線CT	X線CTによる内部構造の可視化
10U	X線コヒーレントイメージング	IVU型 2.1~15 keV	ハッチ1: マイクロ蛍光X線分析 ハッチ2: コヒーレント回折イメージング	10μmレベルの高感度元素分布解析 10nmレベルの高分解能可視化
14U	軟X線イメージング	Twin-Helical型 0.20~1.4 keV	走査型軟X線顕微鏡	ナノ構造の元素分布, 磁性, ダイナミクスを含む高分解能分光イメージング

EUV (~50eV) ~ 軟X線
 軟X線
 テンダーX線 ~ 硬X線
 硬X線

7本のコアリジョンBLの横断利用で、EUV (50eV) ~ 硬X線 (約15keV) の単色光と、約5~30 keVの白色X線の利用が可能

の開発だけでなく、磁気情報デバイス、スピントロニクスの研究開発への応用も期待されており、4月9日の利用開始初日から企業・学術の活用が始まっている。

Fe, Co, NiだけでなくPdなどメタネーションのコア技術の開発に重要な元素が、軟X線, テンダーX線, 双方でカバーできることもナノテラス

の可能性を高めている。BL07Uでは、Liを見るための光のエネルギーが選択できる。このBL07Uでは、軟X線による発光分光による、H₂OやOHの酸素の電子状態から水素結合の実体を観測し、界面水などの構造の問題に直接的な答えを与えることもできる。具体的には、水分子の酸素の電子構造を観測するために525eV付近の光を計測する。

詳細は他⁹⁾に譲るが、コアリションのメンバーとなった企業のフィージビリティスタディでの成果がきっかけとなり、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の患者を救うECMOの輸血チューブの血栓形成を阻害するという課題の解決に結実したという成果も挙げている。すでに、コアリションに参画を予定している多くの企業・学術から注目を集めている。BL08Uでは、雰囲気X線光電子分光法(AP-XPS)によるオペランド計測が可能となる。特に、測定可能な最大ガス圧を現状の1/10気圧から1気圧まで向上させ、これまで不可能であった触媒活性が低い反応などを計測可能にすることを目指している。触媒の化学状態やその表面に存在する反応中間体を特定し、工業的に重要なメタノール合成反応などの反応機構を解明することが期待されている。以上のように、コアリションBLの新しい活用が始まっている。詳細

については、PhoSIC窓口にお問い合わせいただきたい。

7. おわりに

図10の右図は、Web上にあるナノテラスの運転状況(4月17日14時)である¹⁰⁾。MBS Openとあるのは、Main Beam Shutter Openの略である。図では10本すべてのビームラインがMBS Openとなっている。4月9日より運転が行われ、3本の共用ビームライン、7本のビームラインすべてに光が供給されている。“ナノの見え方”を変えるには、低エミッタンス電子ビームによる高輝度化だけでは成し遂げられない。蓄積電流がほとんど変動しない、強度の変動がほとんどない安定な光源が必須である。そのことを、工期に遅れることなく、QSTは、SPring-8で磨き上げられた、電子ビー

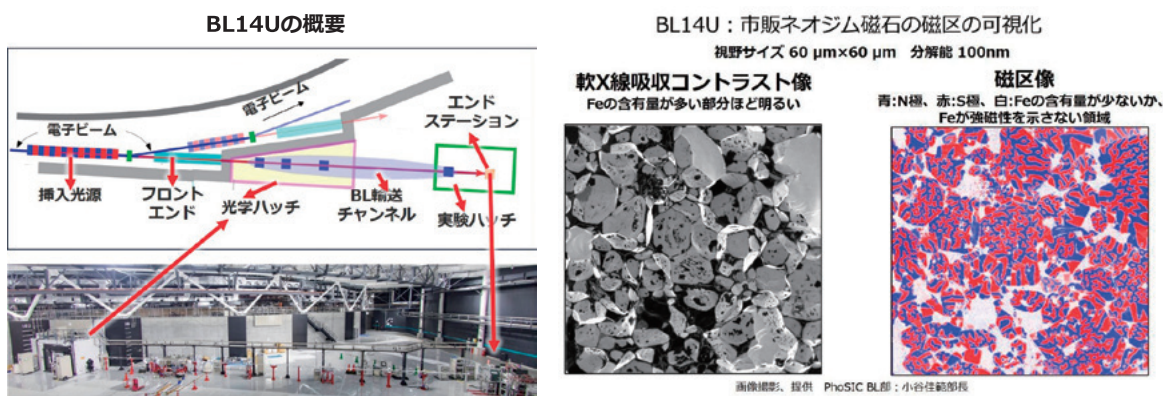


図9 BL14Uの概要と市販ネオジム磁石のナノスケール可視化の事例

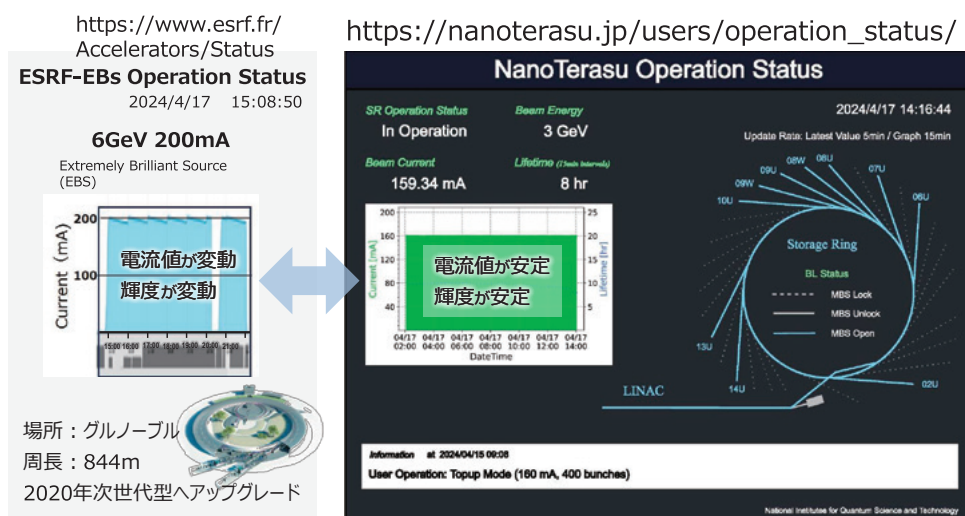
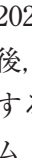


図10 ナノテラスの運転状況(4月17日14:16)と蓄積電流の安定性のESRF(EU)との比較

ムを蓄積リングに逐次入射する「トップアップ」運転で実現した。左図のESRFのほぼ同時刻の鋸の歯状の電流値の変動の状況と比較で、光源の安定性の秀逸さは明白である。ナノテラスが、世界的に信頼性の高い放射光計測で実現する次世代放射光施設であることの証左の一つであるといえる。PhoSICは予定通り2024年4月9日に、産学のコアリションメンバーの7本のBLでの実験開始を実現した。

以上述べてきたように、ナノテラスは、光源や計測のハード面だけでなく、産学共創による利用機会を拡大するコアリションや課題解決へ伴走する計測・計算融合などソフト面でもさまざまな仕組みを揃えている。これまで放射光施設を使ったことのない応用物理分野の学術、産業界の皆さま方にも、是非ご活用いただきたい。ニチアス(株)にも2024年3月からコアリションに参画いただいた。今後、同社の研究開発の成果につながることを期待する。第3期戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の課題「サーキュラーエコノミーシステムの構築」(担当研究推進法人ERCA)での活用も、1の青葉山ユニバースに拠点を置き、東北大学グリーンクロステック研究センターによるBL08Wの活用で本格的な活動が始まった¹¹⁾。再生プラスチックの循環性向上のための品質分析データバンクの構築である。その他の産学のプロジェクトによる活用の検討も始まっている。ご興味のある方は、筆者ならびにPhoSIC窓口まで是非ご連絡をお願いしたい。

謝 辞

本技術レポートを纏めるにあたり、ナノテラスの建設、運用開始に御尽力いただいた、QST、PhoSIC、宮城県、仙台市、東北大学、東北経済連合会、理化学研究所放射光科学研究センター、(公財)高輝度光科学研究センター(JASRI)の関

係者の皆さまおよび、東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター(SRIS)¹²⁾、東北地域の経済界をはじめとする関係者の皆さま、コアリションメンバーの企業、学術の皆さまに心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) <https://www.nanoterasu.jp/>, 応用物理第93巻第1号p5-11(2024), 放射光Vol.37, No.2, p60-68(2024)
- 2) <https://www.erca.go.jp/erca/sip/ce.html>
- 3) M.Abe, F.Kaneko, N.Ishiguro, T.Kubo, F.Chujo, Y.Tamenori, H.Kishimoto, Y. Takahashi, J. Phys. Chem. C 126, p14047(2022), SPring-8/SACLA 利用者情報 Volume 27, No.4 p336-341
- 4) M.Hirose, N.Ishiguro, K.Shimomura, H.Matsui, M.Tada, Y.Takahashi, Microscopy and Microanalysis, 24, p12(2018)
- 5) M.Hirose, N.Ishiguro, K.Shimomura, D.-N.Nguyen, H.Matsui, H.C.Dam, M.Tada, Y.Takahashi COMMUNICATIONS CHEMISTRY, 2, p1(2019)
- 6) <http://www.cosmic.plum.mech.tohoku.ac.jp/>
- 7) 西森信行, 渡部貴宏, 田中均, 表面と真空, 65, p560(2022), N.Nishimori, Proc. 13th Int. Particle Acc. Conf. IPAC2022, Bangkok, p2402(JACoW Publishing), 放射光Vol.37, p69-84(2024)
- 8) 放射光 Vol.37, p85-111(2024)
- 9) 放射光 Vol.36, p92(2023)
- 10) https://nanoterasu.jp/users/operation_status/
- 11) <https://www.ggi.tohoku.ac.jp/greenxtech/>
- 12) <https://sris.tohoku.ac.jp/>

筆者紹介



高田 昌樹

1959年広島県呉市出身。広島大学大学院理学研究科博士後期課程修了。理学博士。

専門分野は、放射光構造科学。1995年に世界で初めて金属内包フラーレンの構造決定に成功した。

名古屋大学助手、島根大学助教授、名古屋大学助教授、高輝度光科学研究センター(JASRI/SPring-8)のグループリーダー、部門長、理化学研究所・放射光科学総合研究センター主任研究員、副センター長を経て、2015年より現職。産学連携スキーム「コアリション・コンセプト」を基に、東北大学青葉山新キャンパスでNanoTerasuの計画推進を行っている。