3 GeV 高輝度放射光施設ナノテラス訪問記

松﨑　浩之
Matsuzaki Hiroyuki

1. ドーナツと長方形

ナノテラスの建物の形状は，円形のドーナツに長方形の棒をつけ合わせたような形をしている（**写真 1**）。ドーナツ部分には蓄積リング（ストレージリング）を，長方形部分はライナックを内包しており，とてもシンプルだ。施設は，東北大学青葉山メインキャンパスの南側に開発が進んでいる青葉山新キャンパスにある。アクセスはあまり良いとは言えず，メインキャンパスから循環バスを使うか，タクシーで行くことになる。雪も降り出しそうな曇天の冬の日に，ナノテラスを訪ねた。ドーナツの一角，長方形を右手に見るところにエントランスがある。エントランスホールの先，ドーナツと長方形が接合するあたりに，見学者用の部屋があり，窓を隔てて実験ホール（ストレージリング側）と，クライストロンの並ぶ部屋（ライナック側）の両方が見えるようになっている。さすがに新しい施設である。整然と並んだ放射光引き出しポート，クライストロンの列は，ここが先端科学実験施設であることを強く印象付ける。一般の見学者はここで全体の説明を受けるとのことであるが，それで十分なインパクトはあるだろう。今回，筆者らは実際に中に案内してもらった。

まずは，放射線安全管理室で大きな荷物を預け，実験ホールへ。ここは，ドーナツの外側部分で，放射光を引き出し，様々な実験を行うポートが並ぶ（**写真 2**）。合計で 28 ポート用意されているが，訪問した 2025 年 1 月ではそのうちの 10 ポートが使われていた。各ポートには，番号と U か W のアルファベットを組み合わせた識別子が振られており，大きく表示されている。この U と W には意味があり，電子線から放射光を発生させる仕組み（挿入光源）

写真 1　ナノテラスを上空から見る（Google Map より）

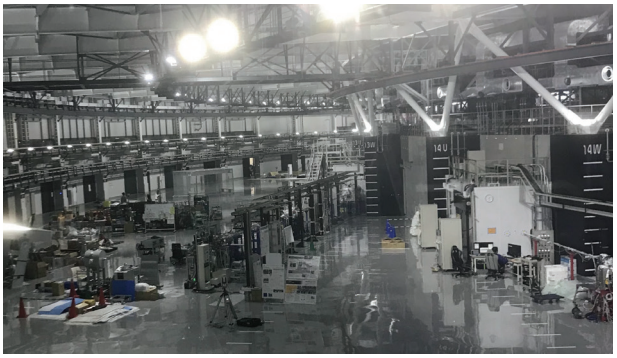

写真 2　ナノテラス実験ホール

写真 3　ライナック用クライストロン群

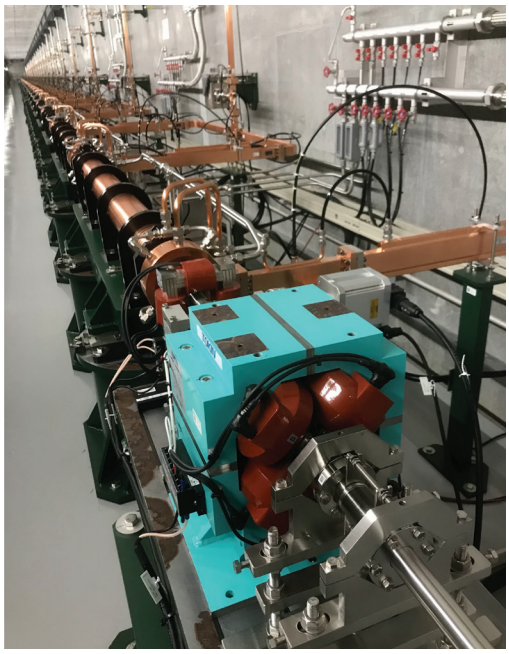

写真 4　ライナック

の 2 種，アンジュレーター（Undulator）及びウィグラー（Wiggler）の頭文字となっている。さて，この実験ホールの内側に，遮蔽で囲われたドーナツ構造があり，そこに電子線の走るストレージリングがある。ナノテラスの特徴の 1 つは，多くのユーザーが実験作業を行う実験ホール自体は，放射性同位元素等規制法上の「管理区域」にはなっていないことである。多くの放射光施設（SPring-8 等）では，実験ホール自体が管理区域となっているため，そこで実験をするためには，放射線業務従事者になる必要がある。しかしナノテラスでは，実験ホール自体は管理区域ではないため，研究者からすると，利用のハードルは下がる。もちろん，遮蔽を越えた加速器トンネルは管理区域である。

2. ライナック

さて，筆者らはまず長方形の建物の方へ案内してもらった。実験ホールの外側に面している 1 つの扉をくぐると，ずらっとクライストロンが並んだ部屋（クライストロンギャラリー）に入った（**写真 3**）。クライストロンとは，マイクロ波を発生させる装置であり，このマイクロ波は，いわゆる高周波型加速器（ライナックやシンクロトロン）で電子を加速するための高周波を供給する。ナノテラスでは，C バンドと呼ばれる周波数帯（ナノテラスでは約 6 GHz）を用いている。クライストロンギャラリーから迷路構造の出入口を通り遮蔽をくぐり抜けると，ライナックが設置してあった。全長 110 m のライナックにより，電子線を加速する。入口は，建物のドーナツと長方形の接合部に近い方，つまり，電子線加速後（ストレージリングに入射する直前）の部分にある。ここから電子銃に向けて一直線に加速電極が並んでいる様は圧巻である（**写真 4**）。加速電極は幅 2 cm の銅のリングであった。ライナックの教科書的知識では，電極の電位は高周波で振動しており，隣り合う電極の位相がちょうど真逆になるように設置されている。その振動数（周波数）を一定に保ったまま，電極間の電位差が荷電粒子にとって加速する位相関係となるタイミングで通過する。そのため，粒子が加速するに従って，電極の長さは長くしなければならない。こう理解していたのだが，眼の前のライナックの電極幅はどう見ても等長・等間隔に見えた。それはなぜかというと，加速されている電子線が既に光速に近いからなのだ。光速に近づくと，粒子は加速しても速度はほとんど変化せず，運動エネルギーだけが増加する状態になる。このため，電極の幅は一定となる。では，ここから電子銃の方に遡っていけば，どこかで電極長が変化する部分に到達するはずだ，と思って見ていったが，ほとんどの部分で電極幅は等長・等間隔を保っているよ

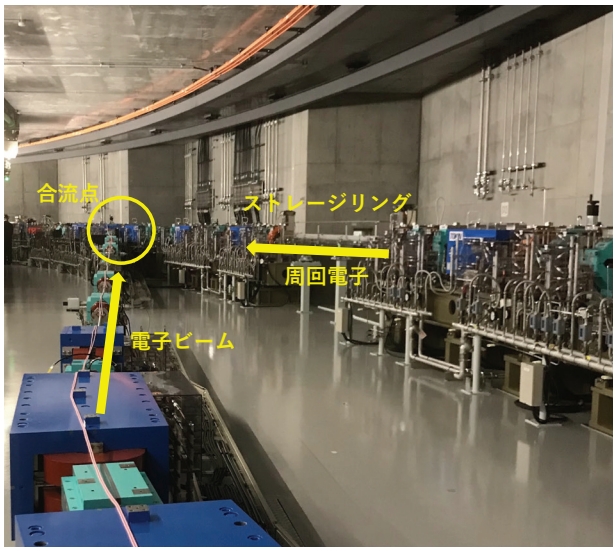

写真 5　ライナックで加速された電子ビームがストレージリングに入射する部分

うに見えた。実は電子線は，タングステンカソード熱電子銃から出てすぐ光速に近くなってしまうようである。

3. ストレージリング

ライナックで 3 GeV まで加速された電子ビームはシンクロトロン蓄積リングに導入される（**写真 5**）。筆者らは再び実験ホールに戻り，遮蔽扉を越えてドーナツの内側部分，すなわちストレージリングの周回空間に案内された。ナノテラスのストレージリングは，周長 349 mのシンクロトロンであるが，その構造には，SPring-8 での開発実験のノウハウが生かされているという。偏向磁石 4 個，四重極電磁石 10 個，六重極電磁石 10 個よりなるユニットを 16 連ねた構造（これを MBA＝Multi Bend Achromat 構造と言う）になっている。このようなユニット構造を取ることにより，製造における合理化が見込めるほか，メンテナンスもしやすくなる。また，各ユニット内の偏向電磁石や四重極・六重極レンズの数を増やすことにより，エミッタンス（電子ビーム束の広がり）の小さい電子ビームの蓄積を可能としている。ユニット間には，ライナックからのビームを入射する装置，X 線を発生する複数の挿入光源，及び加速空洞が設置されている。

アンジュレーター（Undulator）と呼ばれる挿入光源では，多数の強力な永久磁石が極性を互い違いに並べられており，その磁場中を電子が通過すると，

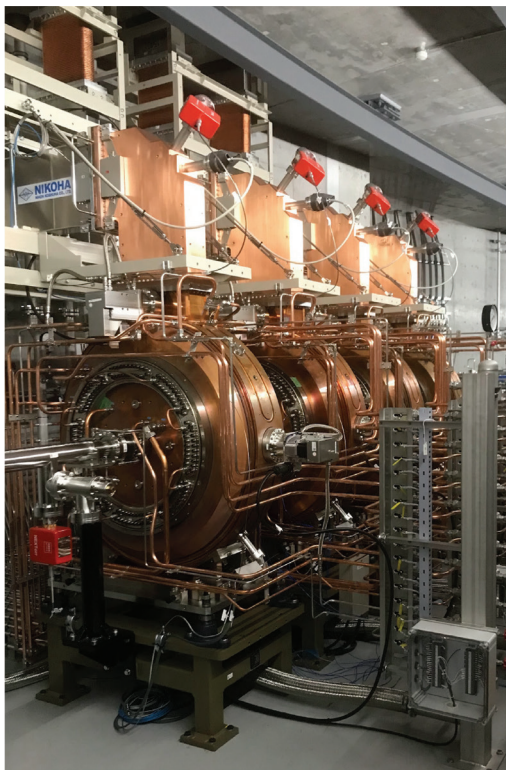

写真 6　ストレージリング（シンクロトロン）の加速空洞部

くねくねと蛇行することになる。荷電粒子が磁場等で曲げられる時，すなわち加速を受ける時，電磁波を発生する。アンジュレーターは比較的エネルギーは低いが高強度の軟 X 線が発生する。一方，電子を少数の磁石列等により強力な磁場でより強く曲げ，輝度は低いがエネルギーの高い X 線を発生させる光源をウィグラー（Wiggler）と呼んでいる。ナノテラスでは，用途に応じて使い分けている。

1 つの挿入光源に対して 1 つの X 線引き出しポート（ビームライン）が用意される。各ビームラインは遮蔽を突き抜けて実験ホールへと腕を伸ばし，ポートエンドにそれぞれの検出器や実験装置が設置される。

さて，ストレージリングに蓄積されている電子ビームは，挿入光源で X 線を発生させる際，その分の運動エネルギーを失っていくこととなる。もちろん，電子ビームを周回させるための偏向電磁石によって軌道を曲げられる際にもわずかな加速によってエネルギーを失う（わずかな制動輻射線を出している）。この失った運動エネルギーを補填し，電子ビームをストレージし続けるために，加速空洞が設置されている（**写真 6**）。加速空洞に高周波を供給

写真 7　ストレージリングのクライストロン

するためのクライストロンは，ストレージリングの内側のスペースに設置されていた（**写真 7**）。

なお，ストレージリングの周回空間から，実験ホールへは，地下空間を通って戻った。地下には，大型車両が入ってこられそうな搬入路が設置されていた。

以上が，おおまかな見学ツアーコースであった。総じて印象的であったのは，極めて合理的にシンプルに設計されている，ということだ。冒頭に述べたように，建物の構造がシンプルに，内部の加速器の構成をなぞっていることもあって，実験者が，今自分がどこにいるかについてとても分かりやすい。このことは，安全な実験遂行には重要なことであると感じた。

4.「共用」と「コアリション」

施設を一通り見てきたところで，ナノテラスでどのような研究が行われようとしているのか見てみよう。筆者は，ナノテラスの英語表記は，Nano-Terrace であるとばかり思っていたのだが，実は，Nano-Terasu であった。ナノの世界を照らす，という意味だそうだ。ナノは，ナノメートルつまり，10^{-9} m スケールの世界のことだ。このあたりのスケール（0.1～100 nm）の波長を持つ X 線は軟 X 線と呼ばれ，ナノテラスでは，高輝度の軟 X 線を利用できるのが大きな特徴となっている。この領域は，固体中の原子の配列から，原子集団の化学状態を調べるのに適している。人間生活に関わるマクロな性質を表出させる根本の部分であり，この領域を詳細に観察・理解・制御することによって，ものづくりの高度化が期待される。

JASRI（高輝度光科学研究センター）が発行している，NanoTerasu 共用ビームライン紹介資料によれば，2024 年度は 3 本のビームラインが利用可能であった。BL02U（ビームライン 02U）では，軟 X 線による共鳴非弾性散乱を超高エネルギー分解能で観測できる。固体中の集団励起の測定や分子中の励起の対称性の観測ができる。BL06U では，軟 X 線を使った角度分解光電子分光（ARPES＝Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy）を行うことができる。X 線の偏光制御が可能で，電子軌道や磁性情報を抽出することができる。BL13U は，軟 X 線を使った吸収分光を行うラインで，多様な偏光を用いることによって，様々な物質の磁気特性や化学状態を調べることができる。以上は，「共用」という利用形態で使用できるビームラインである。「共用」は大学の研究者等，個別の研究者・グループが利用申請できるカテゴリである。

ナノテラスでは，もう 1 つ「コアリション」という利用形態のカテゴリがある。こちらは，放射光に関する技術的・学術的専門家であるアカデミアと，放射光に不慣れだがイノベーション創出につながる開発を行いたい企業とが協業して専用のビームラインを使える仕組みである。コアリション用のビームラインは実は，現状でも 7 本あり，うち 1 本はウィグラー光源を利用した硬 X 線利用ラインである。コアリションで利用する場合には，共用での利用のような，研究課題の審査や成果公開の義務は無く，しかも占有できる。なぜ，このように優遇されるかといえば，現在コアリションに参画している企業は，ナノテラス建設時に建設資金を提供しているからである。口の悪い言い方をすれば，ビームラインの占有と，技術的・学術的サポートを条件に建設資金のサポートをしたということだ。ただ，コアリションは単なる産学連携とは違い，大学等アカデミア側も資金を拠出して参画し，実学との共創により研究を

キックアップするという。

5. 大型研究施設の新しい形

ナノテラスはどこに所属している施設なのか。これが見学中に抱いていた率直な疑問であった。案内をしていただいたのは，量子科学技術研究開発機構（量研機構，QST）の方であった。施設自体は東北大学のキャンパスにある。一方，施設利用促進は，高輝度光科学研究センター（JASRI）が担っているようだ。率直に質問してみたところ，ざっくり言うと，加速器等設備の設置は QST，東北大学は土地提供，施設共用を JASRI，建物の設置及びコアリション利用を光科学イノベーションセンター（PhoSIC）という分担とのこと。これは，ナノテラスが特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律に規定されている施設であることと無関係ではない。また，建設にあたっての資金調達も，量研機構を通じた国からの予算と，先に述べたコアリション利用を前提とした企業からの拠出を組み合わせたものとなっている。そして，成果は，アカデミアにも産業界にももたらされることが期待される。もちろん，東北の地に設置されている意味は，地域の企業にも恩恵があり，自治体も挙げて協力体制を取っている，ということになる。

このような大型施設のあり方は，極めて現代的であり，今後のわが国の科学技術の発展の 1 つの方向性を示すものといえる。すなわち，多くの人・多くの組織が協業し，それぞれに恩恵を得るような精緻な仕組みとなっている。

感心すると同時に，複雑な気持ちになったのも事実である。予算が厳しい中でどうにかこうにか仕組みを作って設立にこぎつけた関係者の努力には頭が下がる。しかし，どうも理念にしても利用形態にしても，分かりにくい。施設が極めてシンプルな構造をしているのと，好対照である。

とはいえ，ナノテラスは，日本らしい精巧な造りと素晴らしい性能を誇る放射光施設である。研究推進，ものつくりのイノベーション，また地域活性化に大きく貢献することを期待したい。

写真 8　左から，二ツ川章二氏，QST Nano Terasu センター萩原雅之氏，筆者

謝辞

今回の訪問・見学にあたっては，お忙しい中，終始丁寧なご案内をしていただきました，QST Nano Terasu センターの萩原雅之先生に感謝いたします。また，同道してくださった，編集委員の二ツ川章二先生，訪問・見学の準備，取材のサポートをしてくださった，本誌事務局にお礼を申し上げます（**写真 8**）。

参 考 文 献

・高田昌樹，ニチアス技術時報，**3**（2024）
・JASRI（（公財）高輝度光科学研究センター），NanoTerasu 共用ビームライン紹介資料 2024（2024）
・原博史，他，三菱重工技報，**61**, 2（2024）
・西森信行，他，加速器 **21**, 1, 20-28（2024）
・西森信行，放射光，**37**, 2, 77-84（2024）
・萩原雅之，放射光，**37**, 2, 117-123（2024）
・満田史織，加速器，**16**, 4, 320-328（2019）

（東京大学　総合研究博物館）