

放射線教育フォーラム令和6年度第2回勉強会

「国内初の第4世代放射光施設NanoTerasuの概要」

3GeV高輝度放射光施設

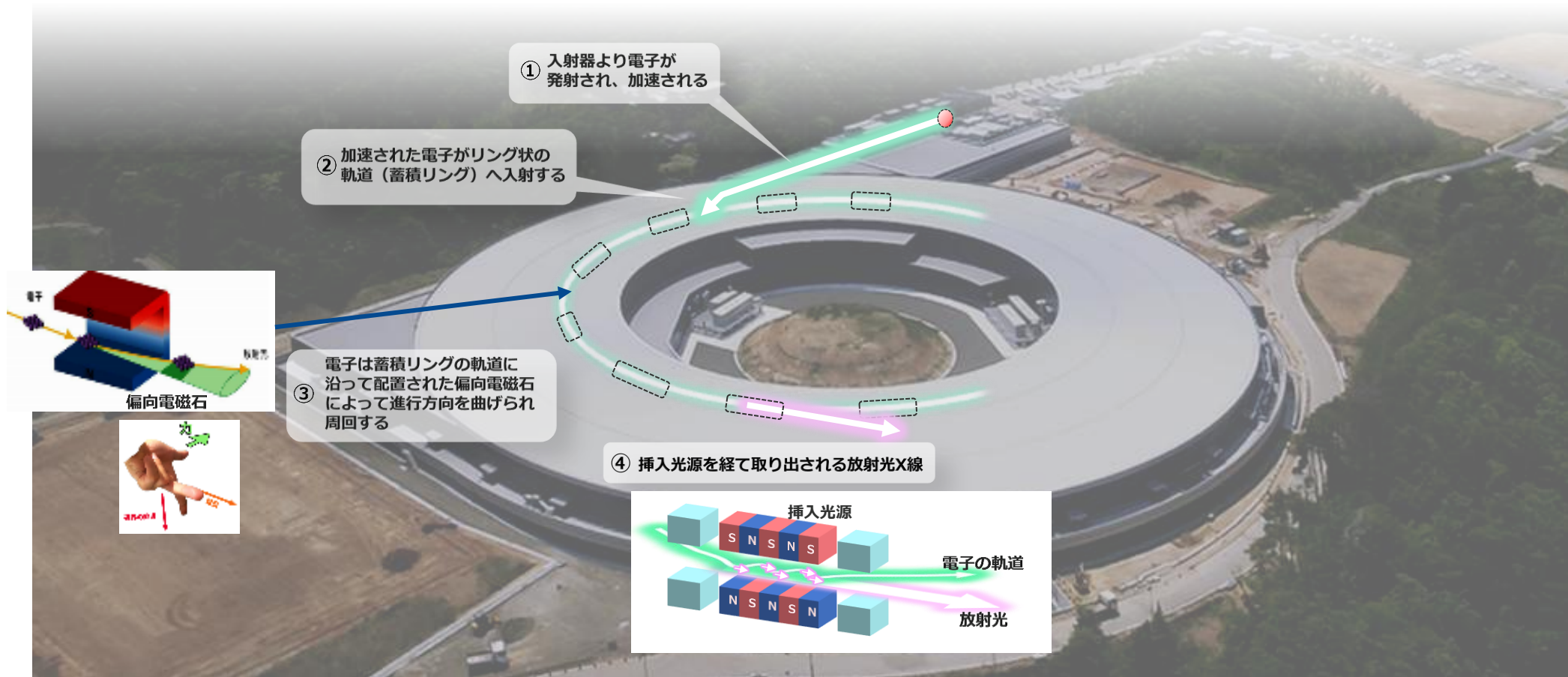


加道 雅孝

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 広報グループ グループリーダー



- ◆ 電子をほぼ光速まで加速（①）し、偏向電磁石により電子の進路を曲げる（②）
- ◆ 蓄積リングに並べられた64台の偏向電磁石により蓄積リング中で電子を周回させる（③）
- ◆ 蓄積リングを周回する電子は、直線部に置かれた挿入光源の磁石によって蛇行運動する（④）
- ◆ 蛇行運動により放射光が発生し、実験ホールに配置された多数のビームラインに導かれ、試料に照射する

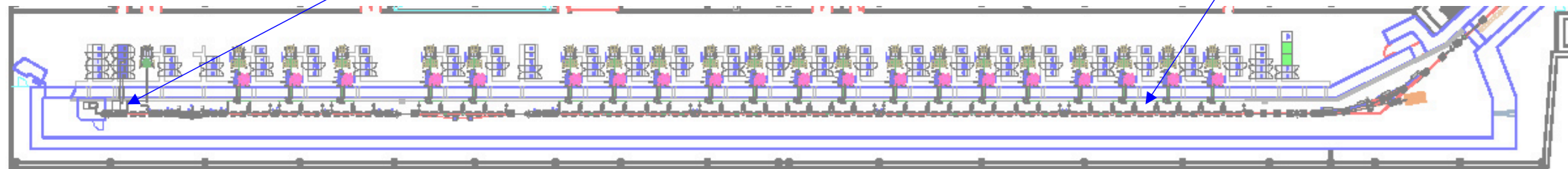
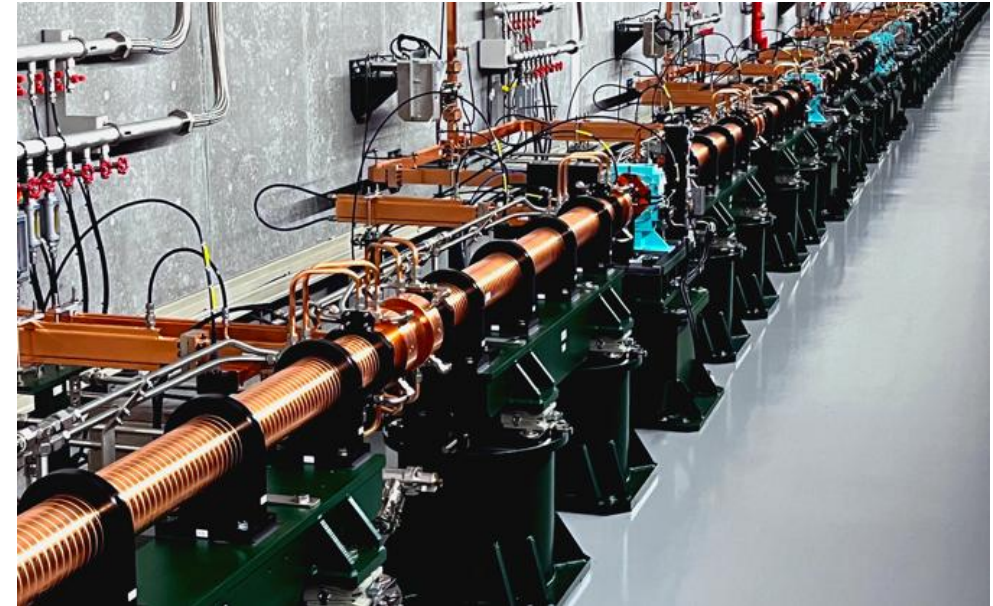
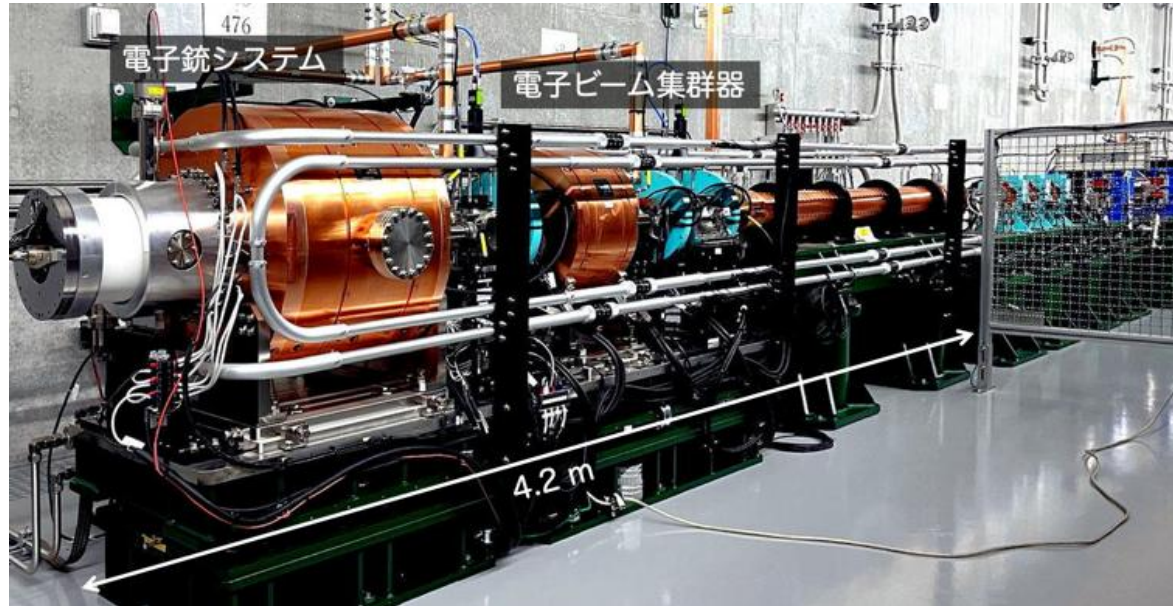


Cバンド加速管によるコンパクトな線型加速器

3

独自の透明グリッド熱カソード電子源
将来の軟XFELも視野

25年来の日本加速器技術の結晶
Cバンド加速管40本×2m×40MV/mで3GeV加速



110m

(従来のSバンドを使用したスウェーデンのMAXIVは300m)

国内初MBA (Multi Bend Achromat) 蓄積リング

4

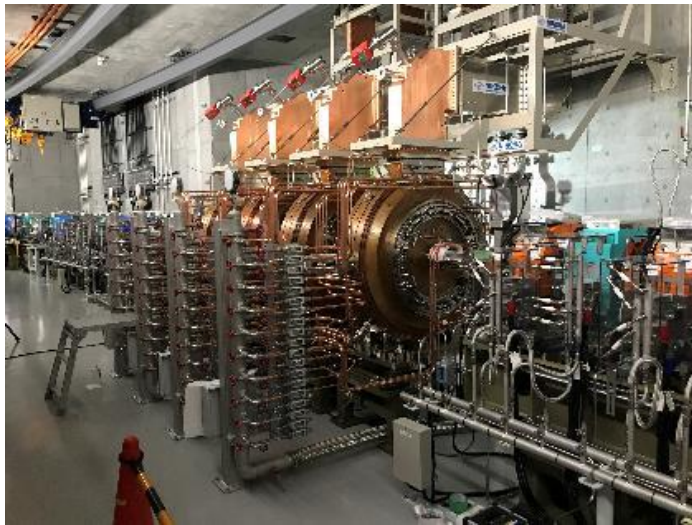
特徴

- ① 小振幅かつ透明入射
- ② MBAラティス
- ③ 蓄積用HOM減衰型加速空洞

周長：349m

(スウェーデンのMAXIVは528m)

②MBA ラティス



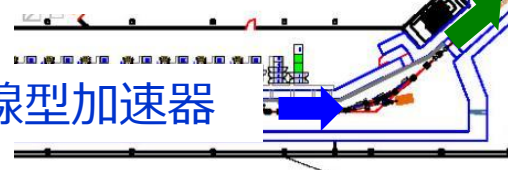
③蓄積用加速空洞



①電子ビーム入射

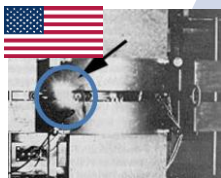
3GeV線型加速器

ビーム輸送路



我が国がリードしてきた放射光,
X線レーザー技術から
ナノテラスが誕生

放射光の発見



1947

INS-SOR



1974

世界初の放射光（真空紫外）用円形加速器

フォトンファクトリー



1983

X線用放射光施設

カオス光

放射光



コヒーレント光

X線レーザー



SACLA



2011

X線自由電子レーザー

SPring-8



1997

X線用高輝度放射光施設

SPring-8/SACLAでのR&Dの成果を結集

ナノテラス



2024

さらにNanoTerasuの技術が、SPring8-IIに引継がれる

世界の主な放射光関連施設

約50施設



放射光施設は、エネルギー、環境、食品、医療、等
様々な分野で最先端の**X線分析**を行う施設です。
世界中で、50カ所を超える放射光施設が、
学術・産業界で、使われています。
日本は、硬X線向きのSPring-8が、
1997年から、その役割を担ってきました。

日本の放射光関連施設

放射光施設10施設



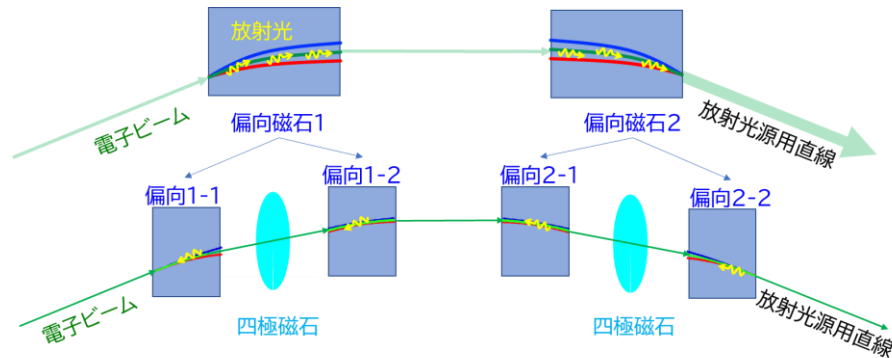
- ◆ 共用促進法に基づく、**国の特定放射光施設**
- ◆ 国際競争力の弱かった**軟X線領域の光の性能を100倍向上**



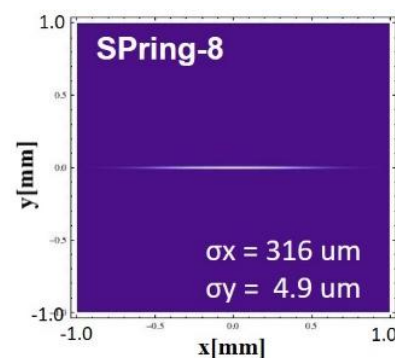
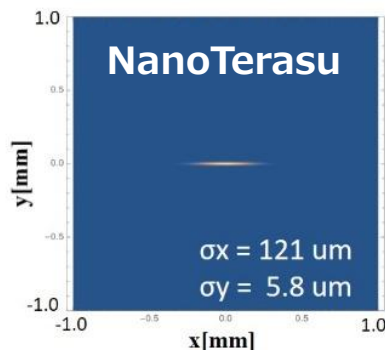
国内初の第4世代放射光源

8

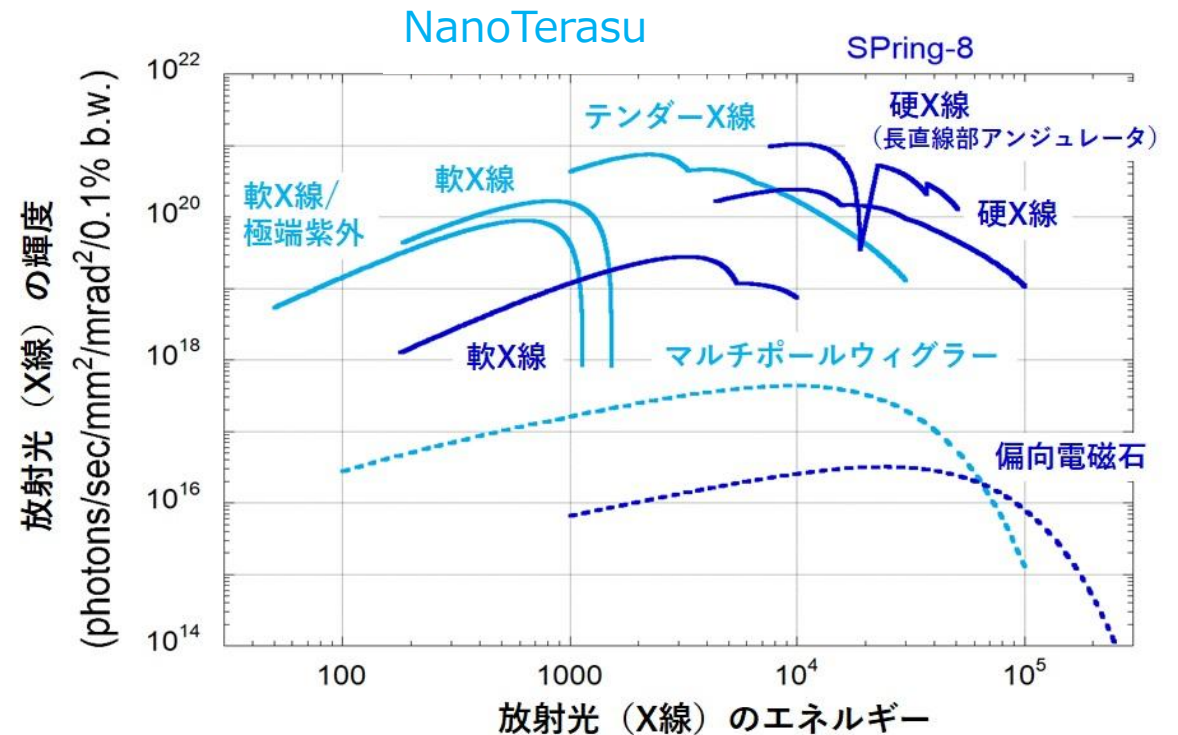
電磁石の高密度配列等の最新の加速器技術により**極小電子ビームサイズ**を実現
第3世代光源に比べて**100倍の高輝度化**と**高コヒーレント化**を実現



高密度な電磁石配置により電子ビームの広がりを抑制



電子ビームサイズの比較



NanoTerasuを用いた初の学術論文

実験日2024年4月9日 → 論文発表 5月7日

1 NanoTerasu 先端計測の優位 性を証明



2 産学共創での 研究開発



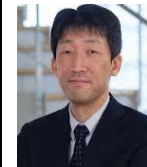
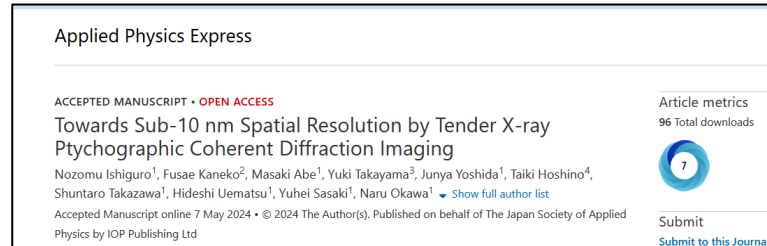
3 研究DX

ナノテラスとスパコンAOBAを
専用回線で直結し、計測
データのその場解析を実現



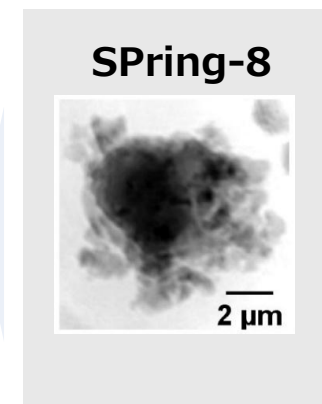
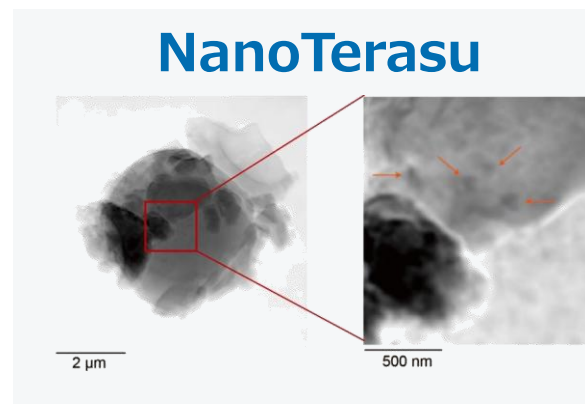
2024年5月7日（英国時間）付で、応用物理学
会の学術誌Applied Physics Expressに
Accepted Manuscriptとして掲載

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2024/05/press20240509-01-tender.html>



高橋幸生
(東北大)

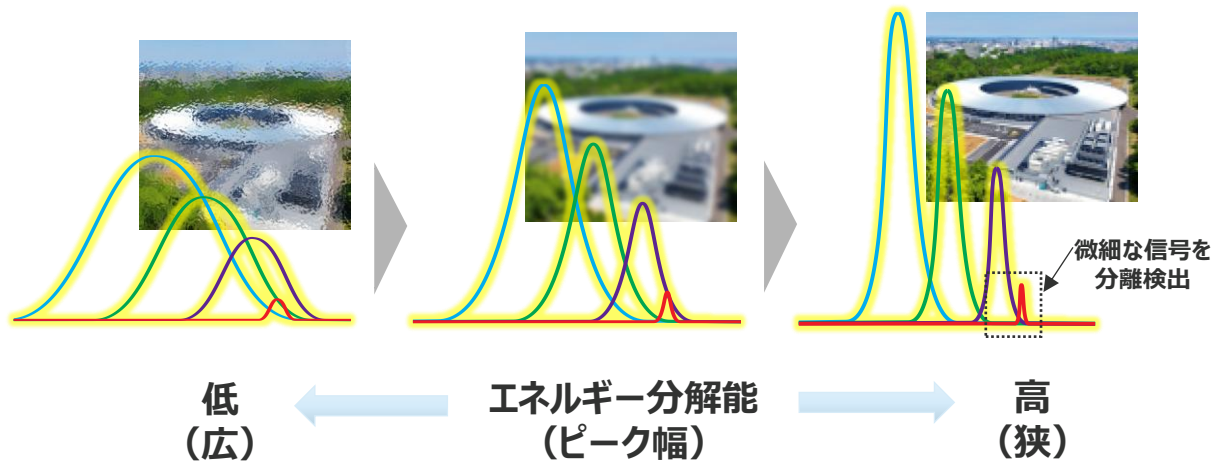
3.5 keVテンダーX線 タイコグラフィ 分解能比較	タンタルテストパター ン	リチウム硫黄電池用 含硫黄高分子粒子
SPring-8	50 nm 程度	100 nm 程度
NanoTerasu	20 nm 程度	50 nm 程度



リチウム硫黄電池用含硫黄高分子粒子画像

- NanoTerasuにおいて、新世代の分析技術を取り入れた放射光X線実験装置を整備、**世界最高の性能（エネルギー分解能※ 16.1meV）を達成**。従来の記録（22meV）を大きく更新し、測定的高速化にも成功。

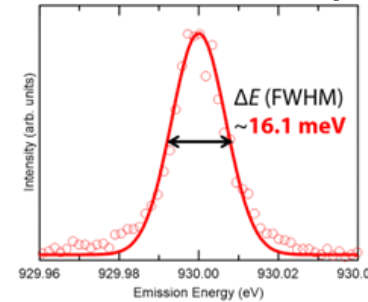
※画像や映像でいう解像度に相当するもので、スペクトル中のピークの幅が狭いほど、エネルギー分解能が高く、高解像度でくっきりと見える（近接するピークがはっきり区別できる）



エネルギー分解能の相違によるスペクトルの変化

- 本装置を当初予定より早く、**2025年3月から国内外の研究者に共用開始**。次世代デバイス開発をはじめ、材料科学やライフサイエンスなど幅広い分野において革新的な研究の成果を期待。
- 2025年3月からの共用に向け、本年9月より公募中

取得に成功した最新データ
(エネルギー分解能 16.1meV)



仙台 ナノテラス 世界最高の性能達成

09月19日 21時22分

NHK ニュースウェブ



仙台市にある世界最先端の放射光の研究施設ナノテラスで、新たに開発したエックス線の実験の技術により、世界最高の測定性能を達成したと運営機関の研究員が発表しました。

仙台市青葉区にあるナノテラスは、放射光と呼ばれる非常に明るく強い光で、ナノメートル=100万分の1ミリというレベルで物質を見ることができます。

2024年4月に運転を始め、電子機器や化粧品、食品などさまざまな分野における新たな製品開発に生かそうと実験が行われています。

こうしたなか、ナノテラスを運営する機関の1つ、量子科学技術研究開発機構の宮脇淳主幹研究員が、このほど、「軟エックス線」と呼ばれる放射光を使った実験の技術で世界最高の測定性能を達成したと発表しました。

物質の特性や機能を詳しく知るには物質内部の電子や「スピン」と呼ばれる電子が持つ磁石の性質などをどれだけ詳しく見ることができるかが重要です。宮脇主幹研究員はナノテラスの非常に明るく強い光を生かし、独自に開発した世界最先端の分析装置でより短時間に、鮮明に物質の特性や機能を測定できるようになったとしています。

宮脇主幹研究員は「ナノテラスはできたばかりで、なかなか世界一になったとアピールできなかったが、海外からの反響も非常に大きく、性能をアピールできた」と話していました。

国内外初 官民地域パートナーシップによる大型研究基盤整備

建設費概算総額：約380億円程度

(整備用地の確保・造成の経費を含む)

- 利用予定者が支払う加入金を含む

多様な資金源を活用して施設を整備

- 民間資金を活用した、今後の施設整備・運用のモデルとなり得る

財務省 歳出改革部会
(令和3年11月1日開催)

特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律に基づく施設の運用

官

国の主体

分担
約200億円

量子科学技術研究開発機構



- 共用利用の運用
- 加速器とビームライン3本の建設
- 先端技術開発 (加速器、ビームライン)

共

共用利用

担当機関



- すべての者が課題申請可能
- 課題審査あり，年数回程度の課題募集
- 個人探求型・イノベーションシーズを涵養
- 原則成果公開※，ビーム利用料免除（消耗品の実費負担のみ）
※ビーム利用料負担にて成果占有可能

運用開始

R6.4.1

地域

パートナー

分担
約180億円

自治体 宮城県、仙台市
学術 東北大
産業界 東北経済連合会

光科学イノベーションセンター
(代表機関・民間の非営利型法人)



- 戦略的利用の促進
- コアリション利用のマネジメント
- 基本建屋とビームライン7本の建設、資金調達
- 共用利用へのビームタイム提供

民

コアリション利用

担当機関



- 加入金を拠出した会員による利用
- 課題審査なし，原則1か月前まで利用予約が可能
- 組織ニーズプル型・イノベーションを加速
- ビーム利用料負担，すべて成果専有利用可能

国主導

共用BL

3本



広く産学官に開かれ最先端科学から
産業利用まで誰でも利用可能

BL02U 軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱
BL06U 軟X線ナノ光電子分光
BL13U 軟X線ナノ吸収分光

民間主導

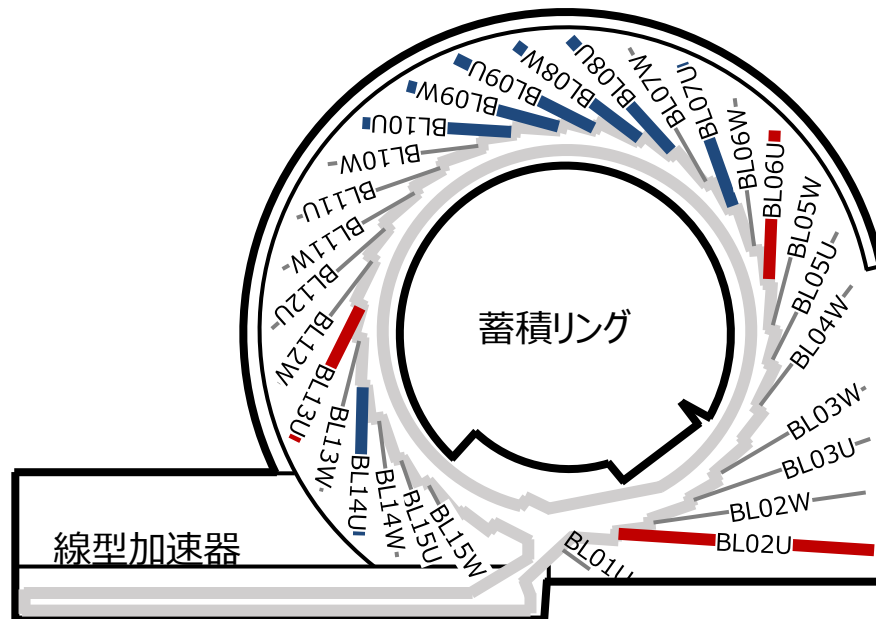
コアリションBL

7本



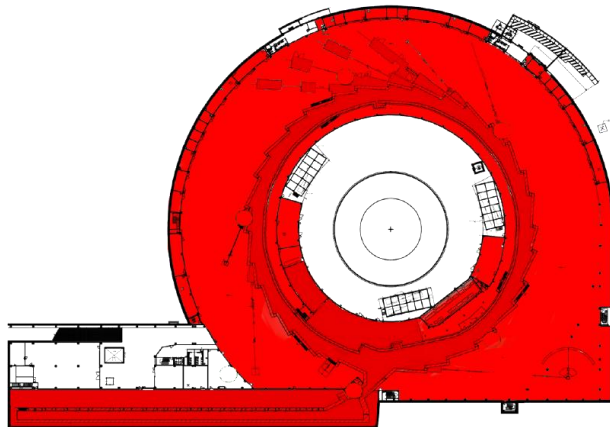
コアリション加入メンバーが
組織的に利用

- BL07U 軟X線電子状態解析
- BL08U 軟X線オペランド分光
- BL14U 軟X線イメージング
- BL10U X線コヒーレントイメージング
- BL08W X線構造-電子状態トータル解析
- BL09U X線オペランド分光
- BL09W X線階層的構造解析



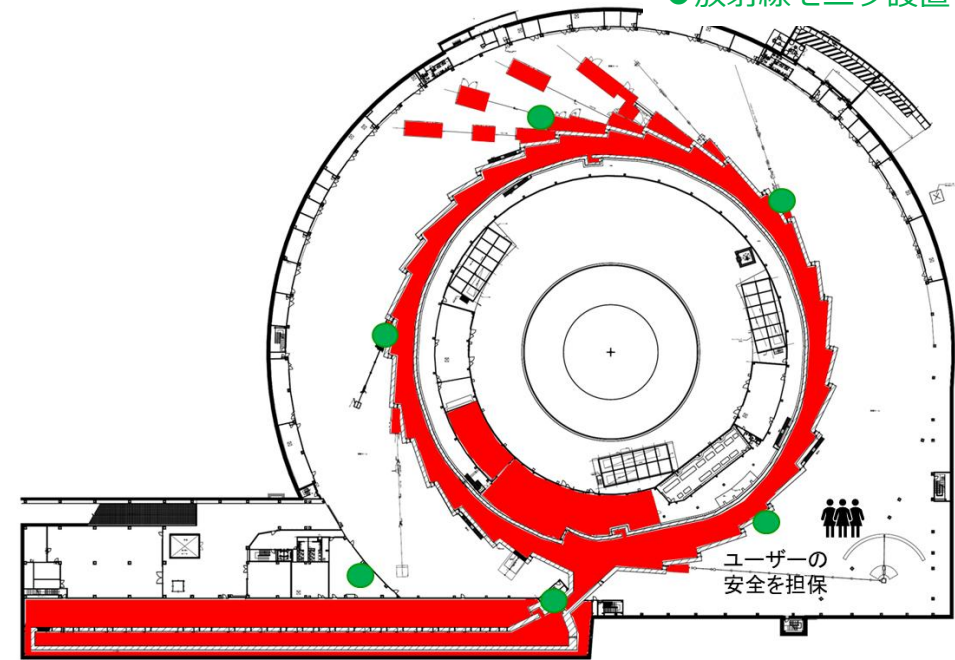
- ◆国内の放射光施設として初、**実験ホールが放射線管理区域ではない**
- ◆利用者の負担を軽減し、多様な利用者を受け入れることを可能に

従来の放射線管理区域設定を
踏襲した場合



ナノテラスでの管理区域設定

- 管理区域設定範囲
- 放射線モニタ設置位置



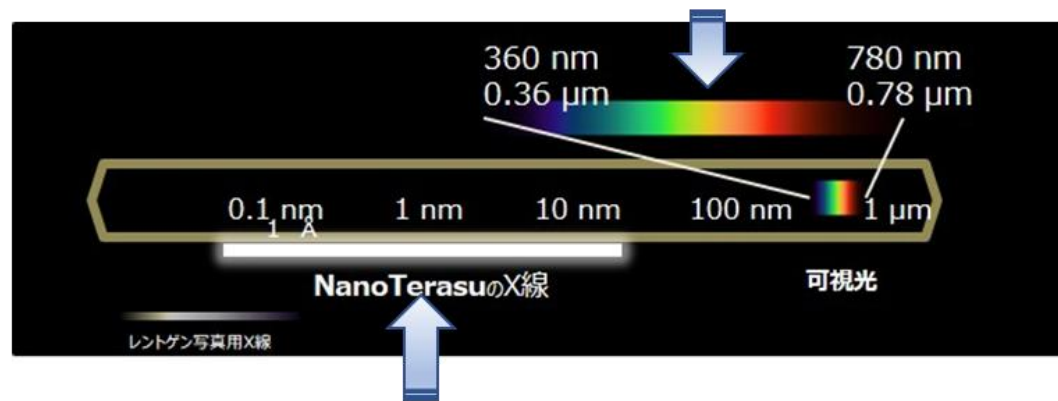
● 一般公衆の安全を担保

色の違い：物質の成分や状態の違い

吸収する光の波長が変化するため



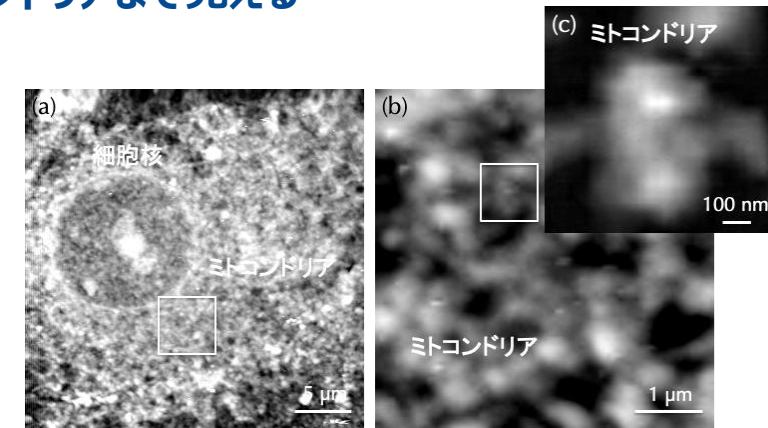
肉眼で見分けられる可視光の波長範囲は狭い



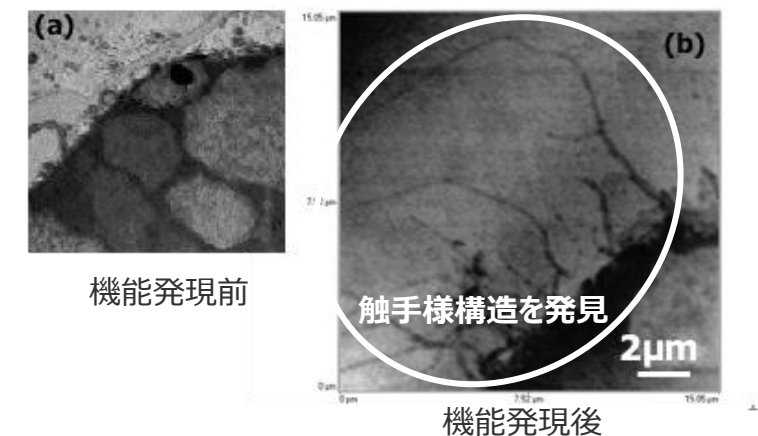
NanoTerasuの光（X線）を使えば、多くの元素や化学状態を鮮明に見分けることができる。

生きている細胞の機能を可視化

明るい軟X線を使うと生きている細胞の中の一つのミトコンドリアまで見える



免疫細胞の機能発現の瞬間をとらえることに成功した例



免疫機能や遺伝情報の転写などの生命機能をDNAレベルでの可視化も可能に！！

これまで

SPring-8（明るい硬X線）

・物質の構造

は見えるが、物質表面の反応・重要元素機能の可視化は不得意

これから

NanoTerasu（明るい軟X線）が加わると

学術・産業において

重要な元素や分子の働き（機能）を可視化

- ・高精細な画像データ
- ・高時間分解能データ

エネルギー

再生可能エネルギーの利用促進

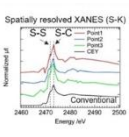
電池の小型化・高出力化・長寿命化

- ✓ 燃料電池・リチウムイオン電池・リチウム硫黄電池等の内部の化学反応や電極材料の劣化要因をリアルタイムに可視化。
- ✓ 風力発電，EV用等の性能向上の研究開発を加速

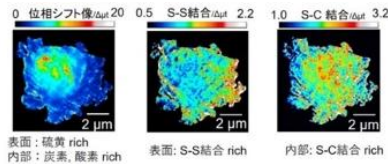


これまで

リチウム硫黄電池



これから



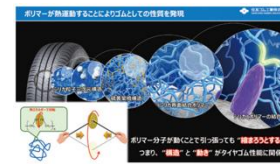
出典：東北大SRIS

材料

循環型社会の構築（サーキュラーエコノミーへ）

ポリマー材料のリサイクル・アップサイクル，バイオ材料の利用可能性拡大，低燃費タイヤの長寿命化など

- ✓ ポリマーの合成・分解・再生の過程を可視化。
- ✓ 原材料に戻せるプラスチック，高性能なバイオマス材料の開発等を加速，高性能エコタイヤの実現



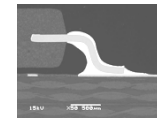
出典：住友ゴム

デバイス

次世代エレクトロニクス，スピントロニクス

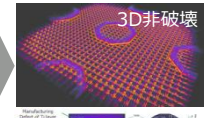
- ✓ ナノレベルの回路構造，半導体材料の欠陥等を可視化。
- ✓ 半導体の高度微細化・三次元集積，脳型AIの実現，歩留まりの向上など

これまで



1つの断面を切り出して撮影

これから



出典：SLS

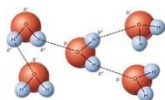
ウェルビーイング

健康と医療を支える新技術の創出

- ✓ 細胞内の薬物動態の可視化，生体適合材料と水の相互作用を可視化
- ✓ 的確に患部に届く薬の開発，身体と長時間安全に接続が可能な人工心肺や，人の行動を制限しないインプラント/ウェアラブル医療センサーの開発



出典：東北大SRIS



食品

日本の食品のブランディング・高付加価値化，食品規格の世界標準化

- ✓ 植物の栄養素の流路や組織，食品の製造過程や輸送過程の変化を可視化
- ✓ 食感，旨味の優れた，安全・安心の食品の効率的生産，輸出も促進

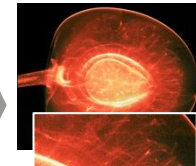


出典：東北大SRIS

これまで



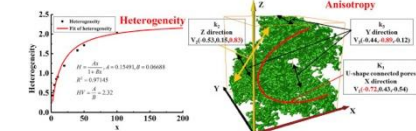
これから



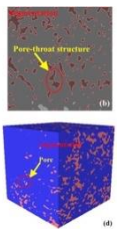
資源

鉱山資源の評価

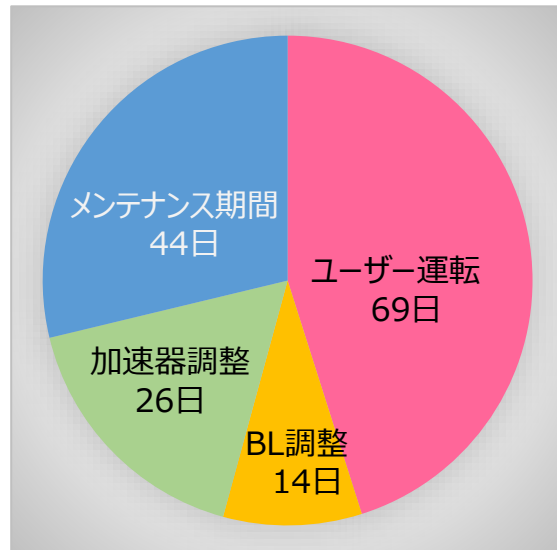
ガスシェールのナノ細孔不均一性と異方性の定量化 → ガス貯留層容量の正確な評価とガス井レイアウトの最適化



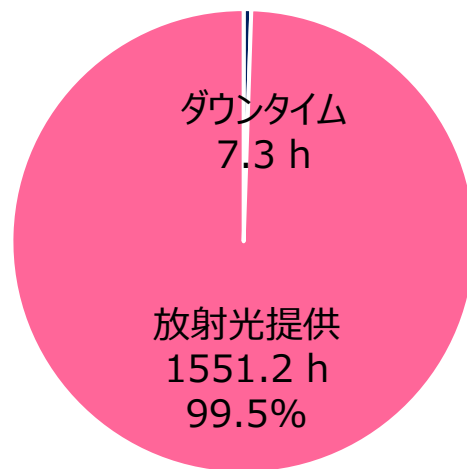
Microporous and Mesoporous Materials
Volume 258, 1 March 2018, Pages 8-16



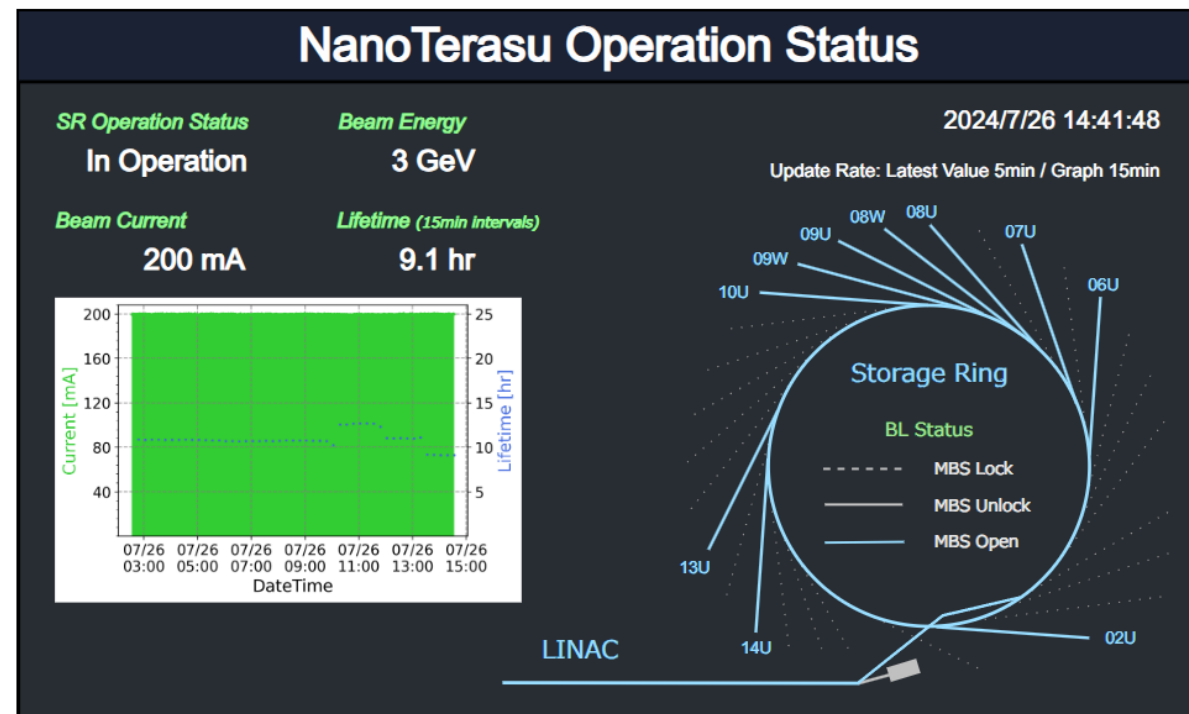
加速器運転状況
(2024.4.1 - 8.31)



ユーザー運転稼働状況



https://nanoterasu.jp/users/operation_status/



- 蓄積電流 : 200mA
- エミッタンス : 1.1 nmrad
- 軟X線輝度 : 従来比50倍
- トップアップ : $< \pm 0.5\%$

3 つのコア・コンピタンス

学術や産業に豊かな実りをもたらす光で
我が国の科学技術力・産業競争力をリード

世界トップクラス の性能

- 軟X線領域で世界最高レベルの高輝度放射光X線を実現
- コンパクトな加速器・光源装置
- 新たなナノの世界の探求が可能に

官民地域 パートナーシップ

- 官・民・地域がともに全体設計
- 民間投資を誘発
- 世界最先端のサイエンスから産業利用、地方創生まで幅広い利用を視野に入れた放射光施設が誕生

NanoTerasu エコシステム

- 共用とコアリション（有志連合）のサイクル
- 放射光による可視化技術＋情報・計算科学
- 利活用開拓、人材育成
- 「見た」だけで終わらせないイノベーションエコシステム形成