

NanoTerasuが拓くFC・水素技術の未来： オペランド計測と計算科学の融合による課題解決戦略



国際放射光イノベーション・
スマート研究センター

SRIS, QST,
東京大学 他
文科省予算

青葉山ユニバース

PhoSIC, 企業,
SIPプロジェクト
グリーンクロステック
研究センター
経産省予算

高田昌樹

東北大学 副理事

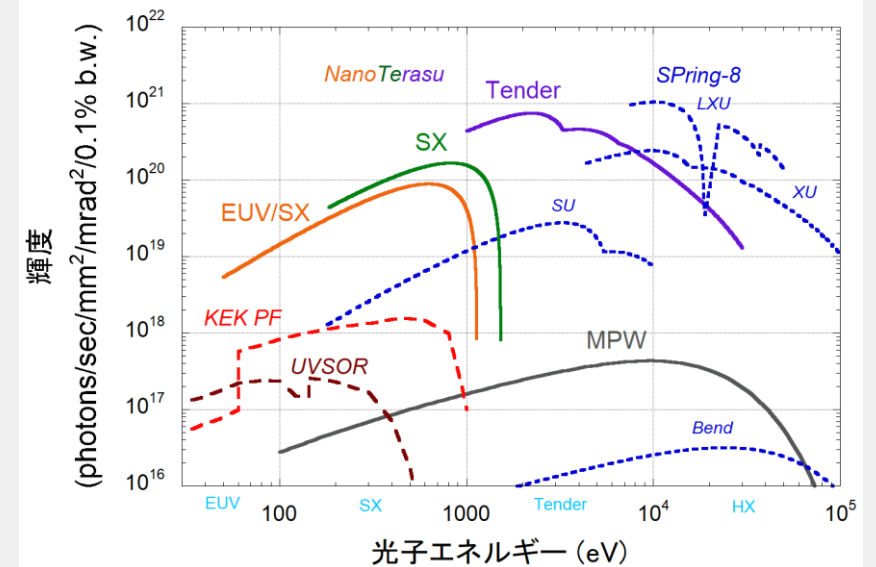
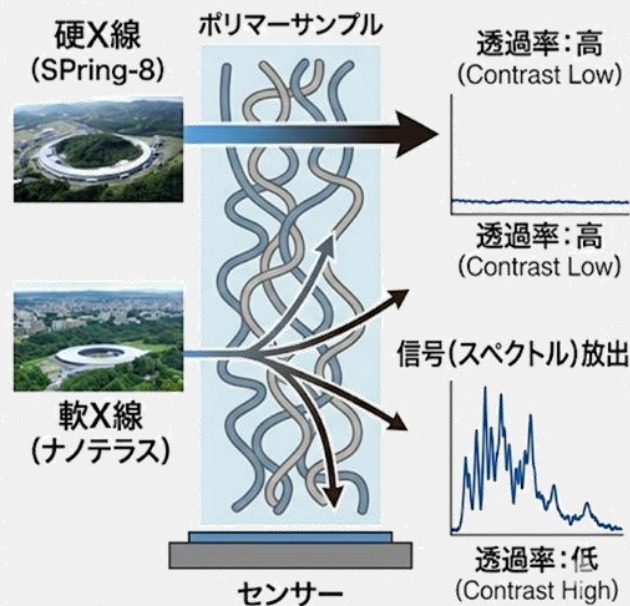
光科学イノベーションセンター・理事長

軽元素(C, N, O)の機能を解き放つ「軟X線」の衝撃

- SPring-8（硬X線）は金属が得意だが、有機物は突き抜ける。
- NanoTerasu（軟X線）は、燃料電池・電池の主役である軽元素（C, N, O）を、従来比100倍の明るさで可視化します。

これにより、触媒反応や膜劣化の「真の姿」が見えてきます。

					2 He Helium
5 B Borium	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon
13 Al Aluminium	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon
30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine
48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine
70 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine
112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Uup Ununpentium	116 Lv Livermorium	117 Uus Ununseptium
					118 Uuo Ununoctium



課題解決のための「7本の槍」 — コアリションビームライン

- 産業界のニーズに特化した7本のビームラインをラインナップ。
- 軟X線（電子状態・表面）から硬X線（構造・実部材）まで、シームレスに利用可能です。

BL07U: 表面・電子状態（触媒、半導体表面の"顔"を見る）

BL08U: 軟X線オペランド（電池が"動いている"姿を見る）

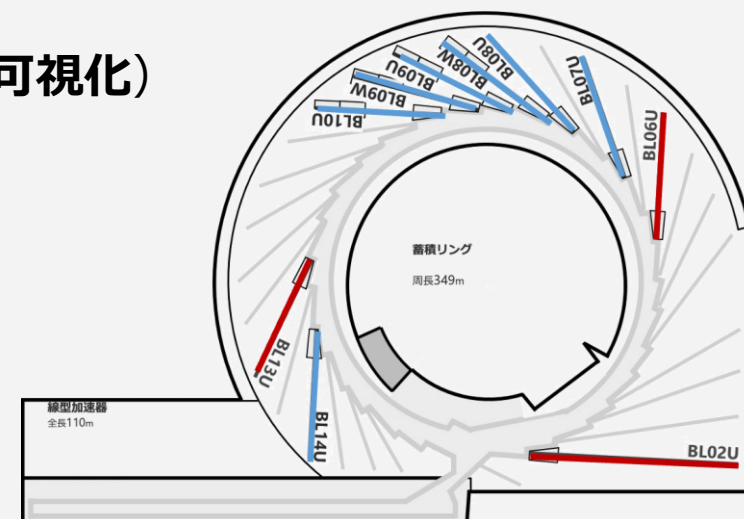
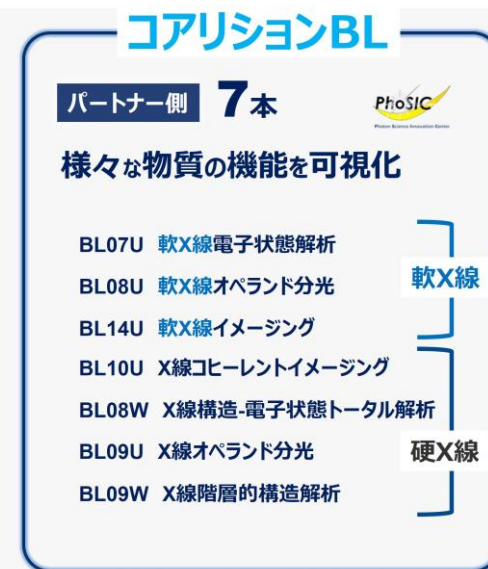
BL09U: 硬X線オペランド（実環境下での反応を見る）

BL10U: コヒーレントイメージング（ナノレベルのCT・"破壊"の可視化）

BL08W: 構造解析（XAFS/SAXS・トータル解析）

BL09W: 階層構造（マクロからミクロへ・食品、生体）

BL14U: 高速イメージング（磁性、微細加工の"地図"を描く）



進化し続ける実験環境：2025-26年の高度化ロードマップ

4

運用開始から止まることなく進化しています。

BL07U: スピン分解NanoARPES（SCORPIUS）導入。

BL09U: 大気圧HAXPES（AP-HAXPES）の開発。

BL14U: 高スループットSTXMの開発。

BL07U 軟X線電子状態解析

XAS	RIXS (A)
NanoESCA (A)	
NanoARPES (A)	

NanoARPESの導入により
価電子構造の分析機能を追加

BL08U 軟X線オペランド分光

XAS	XPS
APXPS (A)	
長焦点STXM & RSoXS (A)	

化学状態可視化機能を追加
(2026年度よりコミショニング)

BL14U 軟X線イメージング

XAS	XMCD
SXM/STXM (A)	
高速 STXM (A)	
自動QXAS	

化学状態分析と可視化機能を
高スループット化

BL08W 構造解析

XAFS	QXAFS+試料チェンジャ
SAXS	
XRD	2D-XRF

XAFSのクイックスキャンを導入
試料環境制御や自動化を実装中

BL09W 階層構造

白色CT	準単色CT
4D-CT (A)	
マルチビームイメージング (A)	

広視野CTと高分解能CTの
切替機構を実装

BL09U X線オペランド分光

HAXPES	AP-HAXPES
大気圧タイコグラフィ (A)	
単色CT	MX (A)

HAXPESを準大気圧対応化
生体物質構造解析(MX)の導入

BL10U コヒーレントイメージング

単色CT	USAXS (標準化)	XPCS (A)
高分解能タイコグラフィ (A)		
クライオタイコグラフィ (A)		

USAXSの標準測定化
クライオタイコグラフィの導入

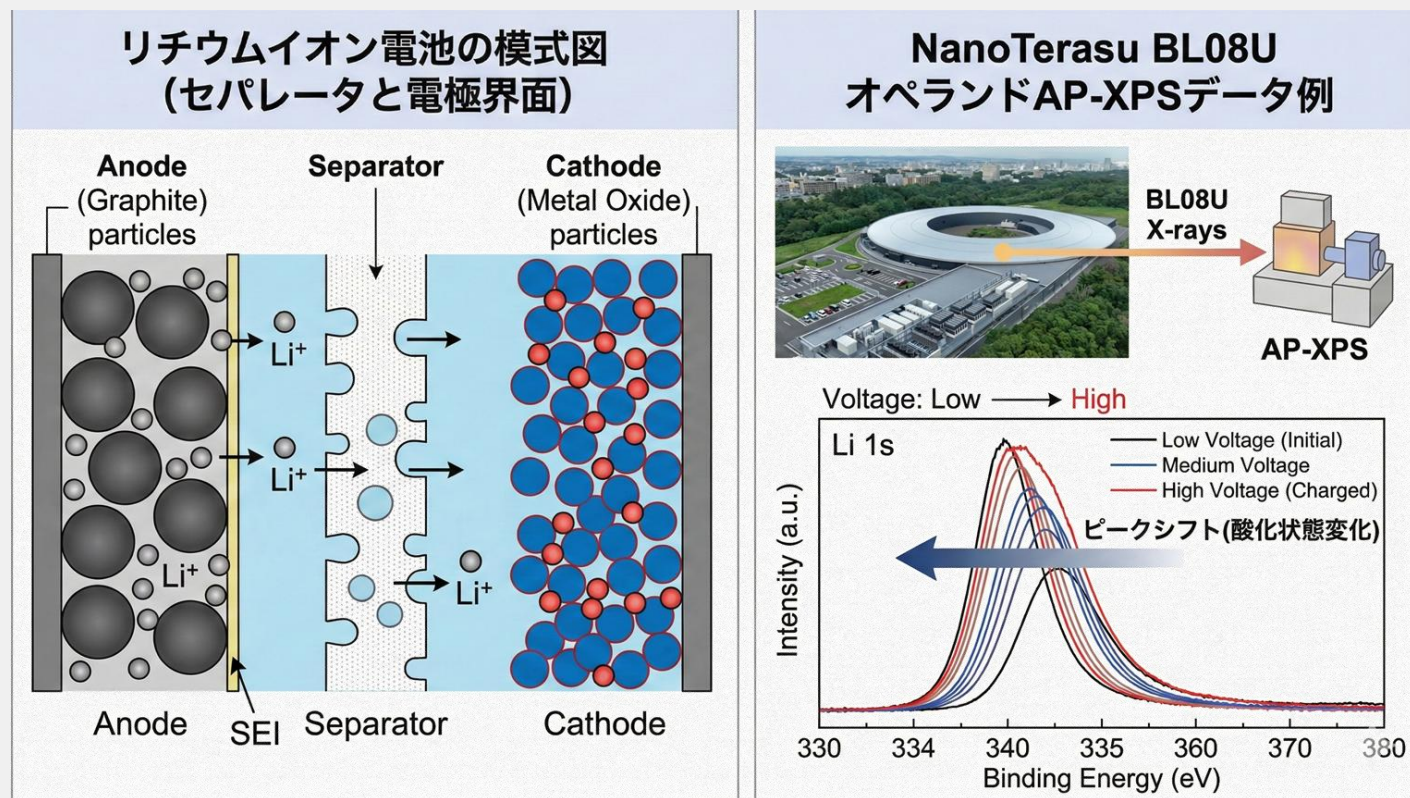
既存装置

高度化・新設装置 (開発中)

高度化・新設装置 (試験運用開始)

「静止画」から「動画」へ：オペランド計測の衝撃

- 東北大学グリーンクロステック研究センターと連携し、実動作環境下（オペランド）での計測を実現。
- 電池が充放電する瞬間、触媒が反応する瞬間を捉え、ブラックボックスを解消します。



FC-Cubicのコア課題に挑む：活用戦略マトリックス

- 「見えない」を可視化: 触媒の劣化、電解質界面の抵抗、水素の吸蔵状態など、従来ブラックボックスだった領域に、軟X線から硬X線まで最適な光を当てて解明します。
- 最新高度化の活用: SCORPIUS（オペランド電子状態計測）や大気圧光電子分光など、2025-26年の最新環境を即座に投入可能です。

領域 (チーム例)	コア技術・R&D課題	NanoTerasu ソリューション (活用BL・手法)	期待される成果 (Value)
燃料電池 (FC) (高鍋チーム、 稲葉チーム等)	① 変動電源対応・触媒劣化 起動停止・負荷変動時の触媒表面の酸化/還元挙動の解明。 ② 物質移動抵抗の低減 触媒層内のアイオノマー被覆率と空隙分布の最適化。	BL08U (AP-XPS/オペランド) 水蒸気・電圧印加下(実環境)で、触媒表面の反応をリアルタイム計測。 BL14U (STXM) / BL10U (Ptychography) 触媒層内のC, F, S元素分布をナノレベルでマッピングし、拡散パスを特定。	耐久性・効率の飛躍的向上 劣化メカニズムに基づいた長寿命触媒の設計。 反応ガスとプロトン伝導の最適パスの構築。
蓄電池 (LIB/全固体) (金村チーム、 中西チーム、 林チーム等)	③ 高電圧作動・界面制御 高電位正極と電解質の界面劣化(SEI生成)、埋もれた界面の解析。 ④ 酸素レドックス (高容量化) 酸素のホール生成の直接観測。 ⑤ 全固体界面の構築	BL09U (HAXPES / AP-HAXPES) 高電圧下、埋もれた界面の電子状態を非破壊で深度分析。 BL07U (High-Res RIXS) 世界最高分解能で酸素のレドックス状態を直接捉え、ヒステリシスを解明。 BL08W (Tender XAFS) 硫化物(S, P)の化学状態変化を追跡。	エネルギー密度の限界突破 高電圧耐性界面の設計指針獲得。 アニオンレドックス活用の制御。 全固体電池の界面抵抗低減。
水素貯蔵 (折茂チーム等)	⑥ 水素結合状態の解明 錯体水素化物等の吸蔵放出反応メカニズム。	BL07U (Soft XES/XAS) 水素(H)と結合する軽元素(B, C, N)の価電子帯観測を通じ、水素の状態を可視化。	革新的貯蔵材料の創出 データ駆動型材料探索の加速。

燃料電池の「劣化」と「反応」を可視化する

課題: 変動電源対応の水電解、触媒劣化、アイオノマー被覆率。

解1 (BL08U AP-XPS): 水蒸気・電圧印加下で、触媒表面の酸化被膜形成や溶解をリアルタイム計測。

解2 (BL14U STXM): 触媒層内のカーボン、アイオノマー、空隙の分布をナノレベルでマッピングし、反応ガスの拡散パスを特定。

チーム名 (TL)	研究課題・ボトルネック	NanoTerasu 活用ソリューション	期待されるブレイクスルー
高鍋 和広 (東大)	課題： 再エネ変動対応型水電解（アルカリ/PEM）。起動停止・負荷変動時の触媒劣化。 ニーズ： オペランド条件下での触媒表面の酸化状態変化。	BL08U (AP-XPS) BL07U (SCORPIUS)	・ AP-XPSを用い、水蒸気存在下・電圧印加中で、触媒表面の酸化被膜形成や溶解挙動をリアルタイム計測。 ・ 変動電源を模したプロトコルでの劣化メカニズムを解明。
稲葉 稔 (同志社大)	課題： 燃料電池（PEFC）のコアシェル触媒、高耐久化。 ニーズ： 触媒層内の物質移動抵抗（アイオノマー被覆率）。	BL14U (STXM) BL10U (Ptychography)	・ STXMにより、触媒層内のカーボン（C）、アイオノマー（F, S）、空隙の分布をナノレベルで可視化。反応ガスの拡散パスとプロトン伝導パスの不均一性を特定。
折茂 慎一 (東北大)	課題： 革新水素貯蔵（錯体水素化物、マグネシウム系）。水素吸蔵放出反応の精密解析。 ニーズ： 水素結合状態の可視化、データ駆動型材料探索。	BL07U (Soft XES/XAS) BL08W (Tender XAFS)	・ 水素（H）と結合するB, C, N, Al等の軽元素の電子状態（価電子帯）を軟X線発光分光（XES）で観測することで、水素の結合状態や局所環境を解析。 ・ MgやAlのXAFSで母相の構造変化を追跡。

電池開発のブレークスルー：界面と反応の制御

課題：高電圧正極の界面劣化(SEI)、全固体電池の界面抵抗。

解1 (BL09U HAXPES)：埋もれた界面の電子状態を非破壊で解析。

解2 (BL07U RIXS)：世界最高分解能で酸素のレドックス（ホール生成）を捉え、電圧ヒステリシスの原因を解明。

チーム名 (TL)	研究課題・ボトルネック	NanoTerasu 活用ソリューション	期待されるブレイクスルー
金村 聖志 (都立大)	課題： 高電圧作動・長寿命リチウム系電池。高電位正極と電解質の界面劣化（SEI生成、酸化分解）の抑制。 ニーズ： 埋もれた界面の電子状態解析。	BL09U (HAXPES) BL07U (NanoESCA)	<ul style="list-style-type: none">・高電圧印加状態での正極/電解質界面の化学状態をHAXPESで非破壊測定。・NanoESCAで界面反応の空間的不均一性を特定し、劣化起点を可視化。
林 晃敏 (大阪公立大)	課題： 硫化物ガラスベースの全固体電池。固体電解質/電極界面の抵抗低減、界面構築。 ニーズ： 硫黄 (S) やリン (P) の構造・電子状態解析。	BL08W (Tender XAFS) BL14U (STXM)	<ul style="list-style-type: none">・S K-edge XAFS (BL08W)により、充放電中の硫化物の分解・変質挙動を解析。・STXMで複合電極内の電解質分布と反応分布をマッピング。
入山 恭寿 (名古屋大)	課題： 全固体電池の界面抵抗、機械的接触の維持。 ニーズ： 界面の応力分布、亀裂進展の可視化。	BL10U (Nano-CT) BL09W (4D-CT)	<ul style="list-style-type: none">・充放電に伴う活物質の膨張収縮と、それに伴う固体電解質との剥離（コンタクトロス）を4D-CTで動的に可視化。
駒場 慎一 (東京理科大)	課題： 資源制約フリー（K, Naイオン電池）。新規正極材料の開発。 ニーズ： K, Naイオンの拡散挙動、新規材料の電子状態。	BL07U (RIXS) BL08W (XRD/PDF)	<ul style="list-style-type: none">・高分解能RIXSを用いて、K/Na脱挿入時の遷移金属および酸素のレドックス状態を精密分離。・PDF解析でアモルファス成分や局所構造歪みを評価。
市坪 哲 (東北大)	課題： マグネシウム (Mg) 蓄電池。多価イオンの拡散律速、酸化物正極の構造変化。 ニーズ： Mg近傍の配位環境変化。	BL08W (Mg K-edge XAFS) BL07U (Soft XAS)	<ul style="list-style-type: none">・Mg K-edgeおよびO K-edgeの測定により、カチオン (Mg) とアニオン (O) 両面の電子状態変化を追跡。多価イオン特有の強い相互作用を解明。
石川 正司 (関西大)	課題： イオン液体電解液、低温特性。 ニーズ： イオン液体の微視的溶媒和構造、低温での界面挙動。	BL07U (Liquid Cell RIXS) BL08U (AP-XPS)	<ul style="list-style-type: none">・液体セルを用いた軟X線分光により、イオン液体中の分子配向や相互作用を直接観測。・低温下での界面電気二重層の構造解析。
中西 周次 (大阪大)	課題： アニオンレドックス（酸素の酸化還元）を利用した高容量化。 ニーズ： 酸素のホール生成の直接証拠。	BL07U (High-Res RIXS)	<ul style="list-style-type: none">・世界最高分解能のO K-edge RIXSは、酸素上のホールの生成・消滅を直接捉えることができる唯一無二の手法。電圧ヒステリシスの原因解明に直結。

「平均値」から「個体差」の解析へ：単一粒子診断

電極全体の平均ではなく、活物質粒子一つひとつの反応ムラをナノレベルで可視化。

結晶面（ファセット）ごとの反応性の違いを明らかにし、粒子設計へフィードバックします。

- **世界最高レベルの分解能（100 nm）：**

放射光軟X線分光顕微鏡（3DnanoESCA）を用い、アナターゼ型酸化チタン単一粒子内の電子状態を可視化。

- **結晶面ごとの電子状態：**

(001)面と(101)面では電子のエネルギー準位が異なり、反応のしやすさに明確な差があることを実証。

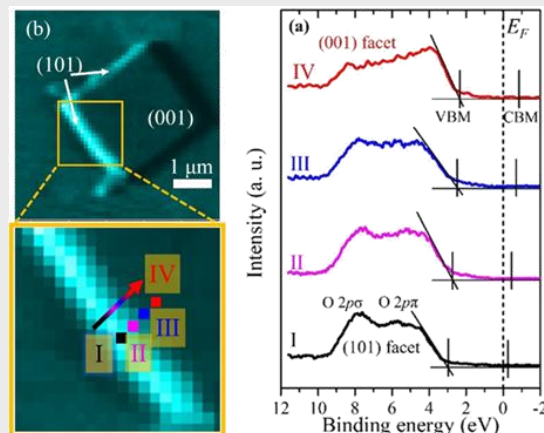
- **界面での電荷分離メカニズム：**

2つの結晶面の境界（インターフェース）に、約180 nmにわたる連続的な「バンド湾曲」を発見。このエネルギー勾配が、電子とホールを自動的に分離・移動させる「高速道路」となり、触媒性能を飛躍的に高めていることを解明。

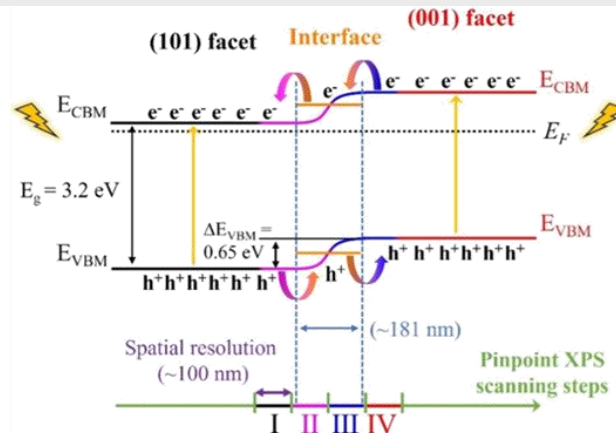
Zhang et al., J. Mater. Chem. C 13, 61 (2025)

単一粒子ナノ解析が解明した「結晶面」と「界面」の役割

単一粒子3DnanoESCA
O1s光電子マッピングと電子状態



バンドダイアグラム
電子が(101)へ、正孔が(001)へ移動



「見る」から「予知する」へ：Image-based FEM

10

- 従来の理想モデル（きれいな円筒等）での計算ではなく、ナノテラスで撮像した「実物（繊維の乱れやボイド含む）」のデータをそのままメッシュ変換し、シミュレーション。
- これにより、破壊の起点や応力集中を驚異的な精度で予測可能にします。

実物に即した超高精度シミュレーションにより、試作回数を激減。

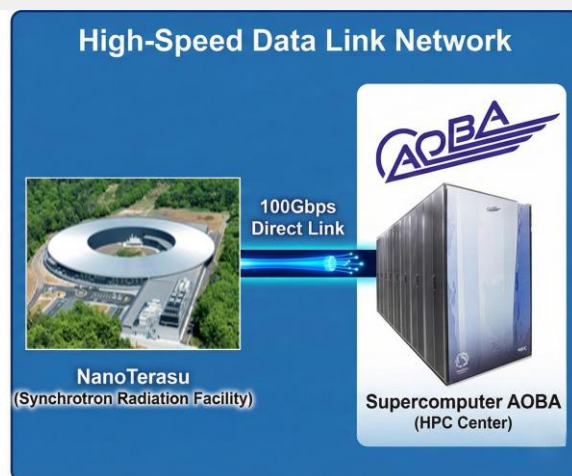
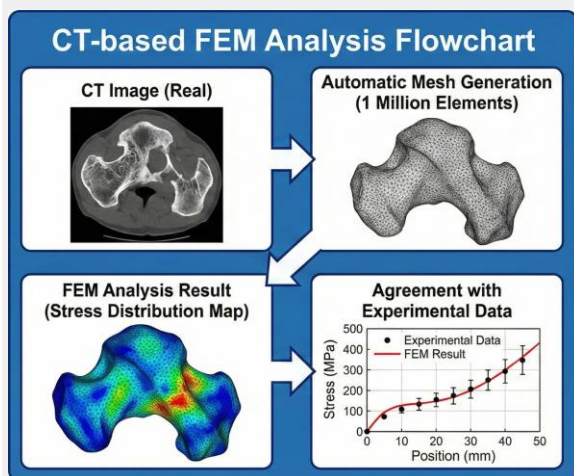
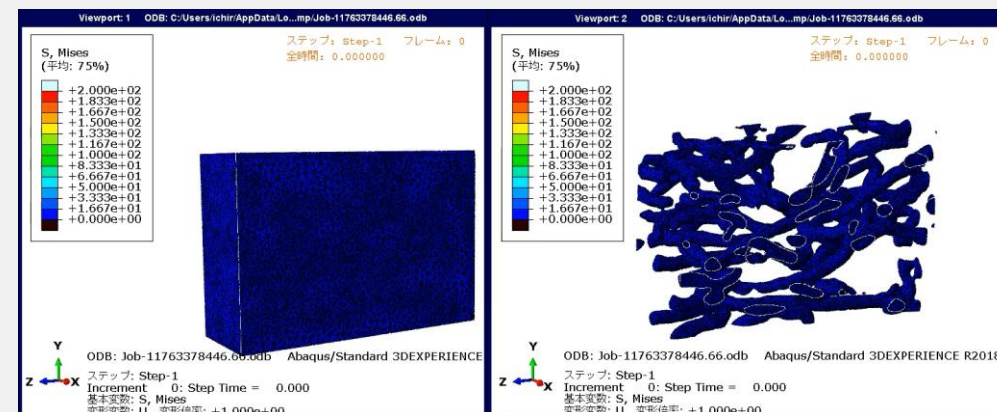


Image based FEM 東北大Green_XTech



計測 × 計算 × AI で加速する材料開発

ナノテラスの「見る力」と、スパコンAOBAの「解く力」を100Gbps回線で直結。

NECと共同開発した「COSMICアプライアンスサーバー」により、計測データを即座に解析・シミュレーションへ活用。

100Gbps×2本でネットワーク接続

ナノテラスからの大容量データを東北大学サイバーサイエンスセンターのストレージに伝送・保存。スパコンAOBAで解析。

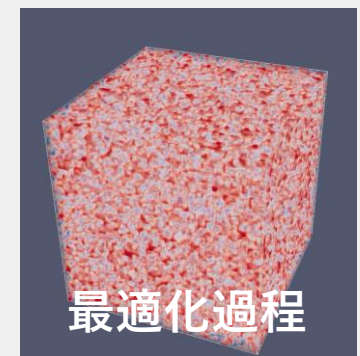
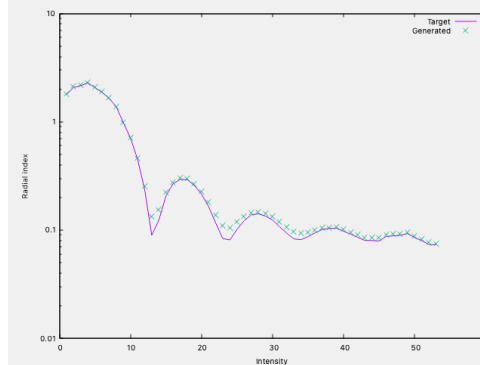
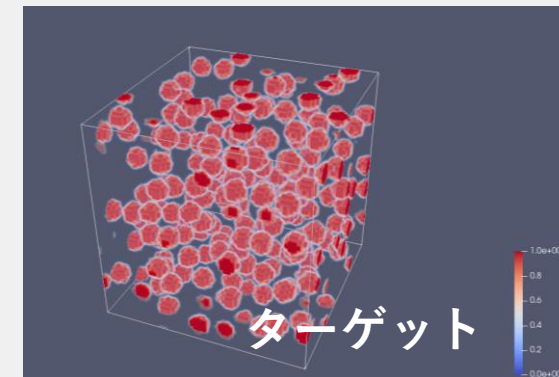


COSMICアプライアンスサーバー



①反応硬化分子 動力学(MD)シミュレーション	②反応硬化粒子 動力学(DPD)シミュレーション	③化学反応経路 自動探索GRPM
④架橋性を有する メソ有限差分法(密度汎関数理論)シミュレーション	⑤マルチスケール残留変形シミュレーション	⑥自己組織化マップ(SOM)
⑦テーリング設計 支援のための有孔 破壊シミュレーション	⑧AFP時のギャップ 成型を考慮に入れた複合材積層板の有限要素解析ツール	⑨ばね要素モデル
⑩マルチスケール破壊シミュレーション	⑪等価剛性モデル	⑫複合材主翼の多目的最適設計シミュレーター

データ駆動型開発で、試行錯誤の回数を劇的に減らします。



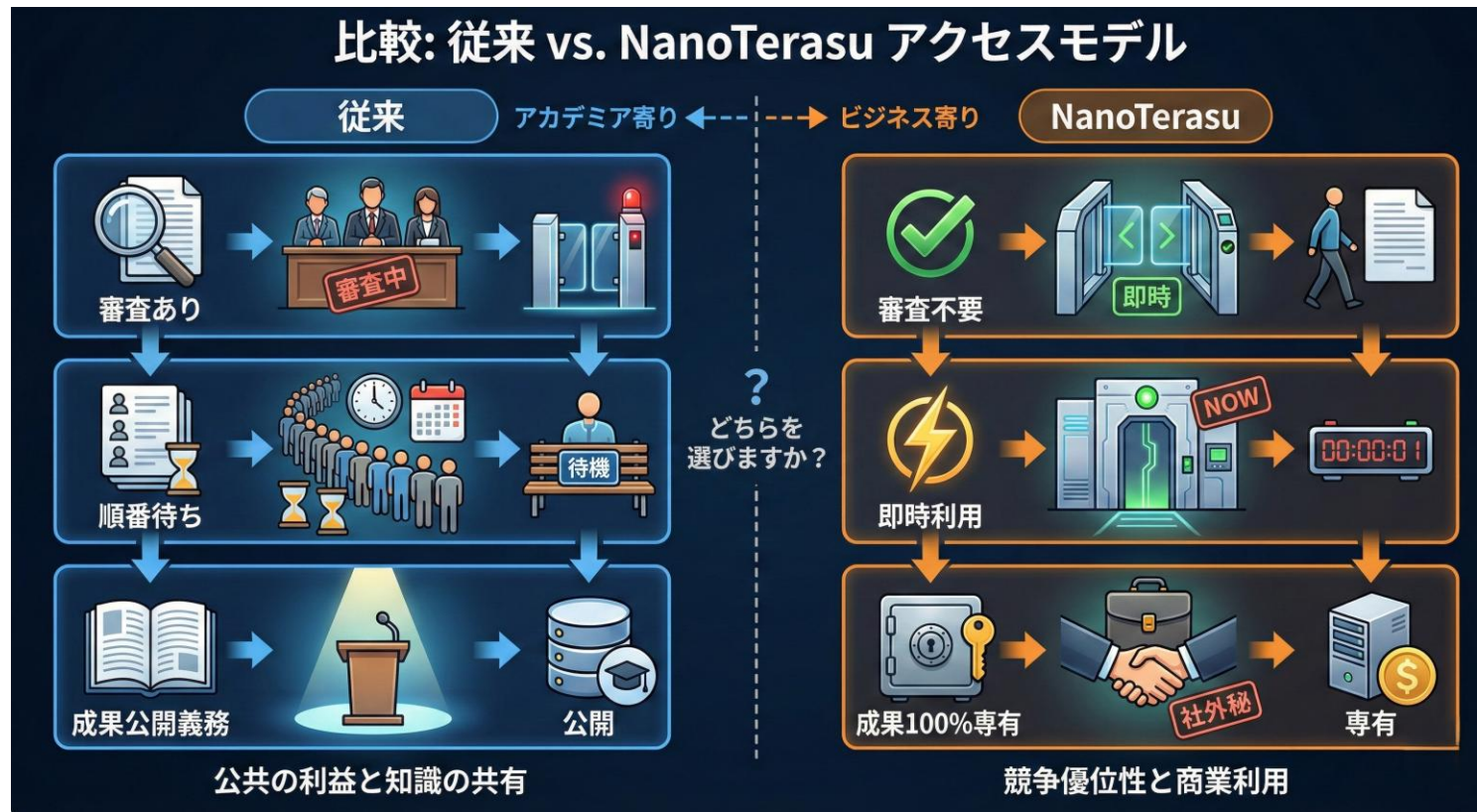
ターゲットと生成スペクトル

競争優位を築く「3つのS」

Speed: 審査不要で即時利用。開発サイクルを劇的に短縮。

Secrecy: 成果は100%貴社に帰属。ブラックボックス技術の開発が可能。

Scale: 東北大および150社以上の参画企業との共創エコシステム。



SPring-8改修を見据えた戦略的BCP

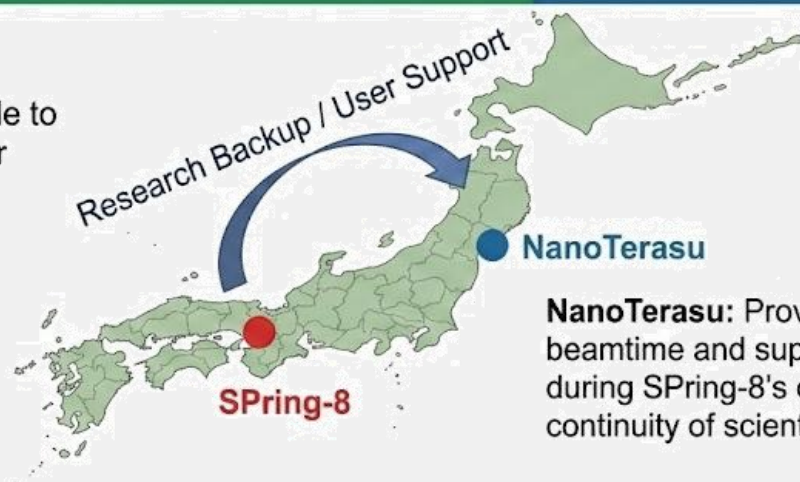
13

- 2027年からのSPring-8大規模改修（停止期間）に向け、R&Dを止めないためのバックアップ機能としてもナノテラスは不可欠です。
- 今からナノテラスの「軟X線」とSPring-8の「硬X線」を使いこなす体制構築を推奨します。

SPring-8 Shutdown & NanoTerasu Backup Timeline (2027)



SPring-8: Large-scale upgrade to SPring-8-II, requiring one-year shutdown in 2027.



NanoTerasu: Provides critical backup beamtime and support for researchers during SPring-8's downtime, ensuring continuity of scientific research.

NanoTerasuを皆様の「戦略的パートナー」に

NanoTerasuは単なる分析装置ではありません。

FC-Cubicの皆様の技術課題を解決し、
日本のエネルギー産業の競争力を高めるための
「共創の場」です。

**ぜひ、このプラットフォームを
使い倒してください。**

