

# 解説 記事

## 次世代放射光施設の概要と狙い

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  
一般財団法人光科学イノベーションセンター  
高田 昌樹 Masaki TAKATA

### 1. 次世代放射光施設とは？

次世代放射光施設の建設具体化は、2011年の東日本大震災を契機に、東北大学を中心とする7大学の有志による東北放射光計画が嚆矢となり始まりました。奇しくも、米国エネルギー省（DOE）は、福島第一原子力発電所の事故後、耐事故性クラディングの研究開発に、東海岸のブルックヘヴン国立研究所にある放射光施設 NSLS を評価分析ツールとして活用し、原発事故下での Alloy33 の事故時に形成される腐食生成物と酸化物層の詳細な構造解析を行っています [1]。その成果である Alloy33 の酸化物界面の基本的な構造情報を、軽水炉（LWR）の用途に資する耐事故性クラディングとしての可能性評価に役立てているのです。

東日本大震災から7年を経た2018年、“次世代放射光施設”は「官民地域パートナーシップ」という新しい仕組みで、次世代放射光施設の整備・運営を推進することを決定しました。これは、国（主体：量子科学技術研究開発機構；QST）と地域パートナー（一般財団法人光科学イノベーションセンター；PhoSIC、宮城県、仙台市、東北経済連合会、東北大学）が資金と役割を分担し施設を整備するものです。2022年2月現在、パートナー側が建設する基本建屋の建設工事は、新型コロナウイルス感染症の蔓延が繰り返される中、予定通りに進み、進捗率は99.2%に達しています（図1）。2021年暮れから、QSTによる加速器の搬入、調整が始まり、2024年からの本格的な運用開始を目指しています。

放射光は、実験室のX線装置の10億倍の明るさを持つ高輝度X線で、巨大な加速器を使って発生させます。インフルエンザの治療薬をはじめ、リチウムイオン電池、スマートフォンのパネルディスプレイ、タフ・ポリマーやエコタイヤの開発など様々な社会課題の解決に、分子・原子、ナノスケールの構造解析で、貢献してきました。2020年には、コロナウイルスのスパイクたんぱく

質の構造をクライオ電子顕微鏡と協働で解明し、ワクチンや治療薬の開発に多大な貢献をしています。この様に、医学、生物学、化学、物理学、物質科学など広範な科学技術分野で活用され、放射光は、ナノの世界を見て、原子・分子の組み合わせが発揮する機能を探る必要不可欠なツールとなっています。



図1 次世代放射光施設の外観 2022年1月

建設中の次世代放射光施設は、さらに明るい（超高輝度の）放射光を供給し、ナノの世界をよりはっきりと見せ、速い動きの最中も止めて観察することを可能とします。完成後、本施設は、日本で空白領域となっている軟X線領域の最先端光源として、硬X線光源のSPring-8（8GeV）と連携し、産学の研究開発を支援するツールとなります。より軽い元素や表面・界面の分析に強みを持つ軟X線高輝度放射光は、さらに科学技術分野を拡大し、より広い産業展開を可能とすることが期待されています。

国際的にも、2000年以降海外で3GeV放射光施設が次々と建設される中、我が国は最先端の軟X線領域の放射光施設を持たないことから、発展途上国を含む諸外国に後れを取り始めていました。次世代放射光施設は、この状況を一気に挽回しSPring-8と連携し、産学の国際的な研究力の強化を支援します（図2）。

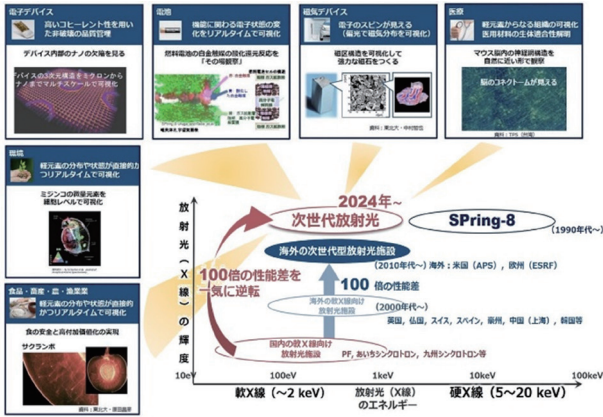


図2 次世代放射光施設とSPring-8の連携

この次世代放射光は、従来の革新的材料の開発や創薬に加えて、社会インフラの安全安心を支える構造材の研究開発にも活用が期待されています。近年、海外では、非破壊の3次元先端計測の事例も報告されるようになりました。この次世代放射光施設の概要と、保全学における利活用の可能性について、海外の活用事例を例に解説します。

## 2. 施設の特長

### 2. 1 光の特長とビームライン

次世代放射光施設は、110 mの長さの線形加速器と、それにつながる周長349 mのリング型加速器の電子ビーム蓄積リングから構成されます。線形加速器は、X線自由電子レーザー施設SACLAの技術を基に、電子ビーム蓄積リングはSPring-8でのR&Dの成果を基に設計されています。直線加速器で光速近くまで加速された電子は、蓄積リングの中に設置された“挿入光源”とよばれる磁石列(アンジュレータ、ウィグラー)の中を通る際に、電子が進行方向を揺さぶられることで、高輝度の放射光を発生します(図3)。

詳細は省きますが、この光源となる電子ビームは、SPring-8の2.4 nmradよりも低いエミッタンス(1.1 nmrad)で、電子ビームを蓄積できるように設計されています。

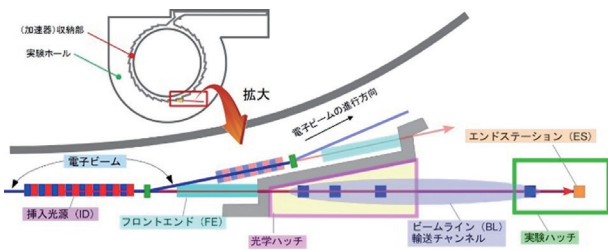


図3 次世代放射光施設の線形加速器と蓄積リング

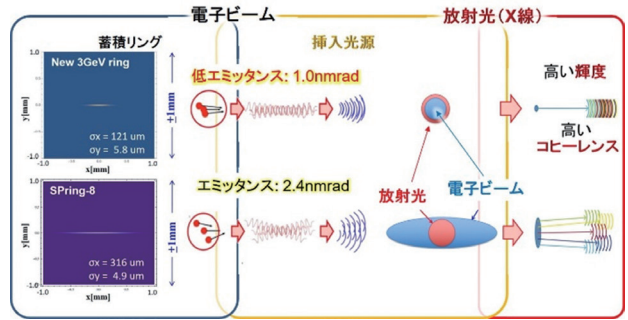


図4 低エミッタンス光源の概略

SPring-8で開発された、この低エミッタンス加速器技術を基に、QSTが、理化学研究所放射光科学研究センターの協力を得て加速器の建設を進めています。

電子ビームの低エミッタンス化は、光源を小さく絞ることで放射光の高輝度性を高める鍵となるものです(図4)。現世代型の放射光施設と比較すると、例えばフランスのパリ・サクレーにある3GeV放射光施設SOLEIL(2006年運用開始)の10倍の輝度の放射光の発生を、同じ周長で実現しています。また、前述のNSLSのアップグレード施設で2015年に完成したNSLS-IIとは同じ低エミッタンスですが、次世代放射光施設は半分の周長で実現しています。

### 2. 2 次世代放射光の強み

この施設の強みの一つに、利用できる光の波長領域が広いことがあります。軟X線向き放射光施設とよばれていますが、低エネルギー側ではLiの吸収端までカバー(50 eV)し、高エネルギー側には、30 keVという硬X線までSPring-8の同程度の輝度で利用できます。特に、Li、炭素、酸素、鉄、Coなどの化学状態を可視化するのに必要とされる軟X線領域を、SPring-8の100倍とも言われる高輝度でカバーし、硬X線領域ではSPring-8の同程度の輝度で利用できます。

その光は、図3に示したビームラインと呼ばれる光の取り出し口からエンドステーションに導入され、そこで、回折・散乱・分光・イメージングの計測実験が行われます。

次世代放射光施設では合計28本のビームラインの建設が可能です。しかし、最初に整備するのは、国側が3本(軟X線)、パートナー側が7本(軟X線3本、テnderX線~硬X線4本)の10本です。その10本のラインナップと計測手法を図5に示します。

ビームラインでは、それぞれ、構造解析や、軟X線の強みを活かした、物質中の元素分布、化学結合状態、微細構造、磁気特性など様々な計測を行うことができます。

**国側 3本**

**世界最高性能で自然科学を先導**

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

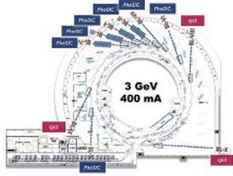


図5 初期整備のビームライン

**パートナー側 7本**

**様々な物質の機能を可視化**

- BL07U (VI) 軟X線電子状態解析
- BL08U (VII) 軟X線電子状態解析
- BL14U (V) 軟X線イメージング
- BL10U (IV) X線コヒーレントイメージング
- BL08W (II) X線構造-電子状態トータル解析
- BL09U (I) X線オパランド分光
- BL09W (III) X線階層的構造解析

**3. 劣化を可視化する**

**3.1 表面界面評価への応用**

放射光の先端材料の研究開発への活用については、様々な紙面で紹介されています。ここでは、保全学と関連のあると思われる、劣化・破壊の可視化への活用事例を中心に紹介します。

硬 X 線光電子分光;HAXPES は、X 線光電子分光(PES)の励起光に硬 X 線を用いた分析手法です。高エネルギーな X 線励起により通常の XPS よりも数〜約 10 倍深い、50 nm 程度までのバルク状態評価、界面の結合状態の評価を、パートナー側のビームラインで行うことができます。

図6は前述の Alloy33 の蛍光 X 線イメージ;XRF (上)と共に HAXPES スペクトル (下) の 800°C 及び 1000°C の高温水蒸気暴露後の時間変化を示したものです。米国放射光施設 NSLS で実施された HAXPES 実験で用いられた放射光のエネルギーは 4keV です。これは、次世代放射光施設では、最も輝度の高い光を得られるエネルギー領域です。また XRF イメージは 14 keV の放射光を米国コーネル大学の放射光施設 CHESS を用いて測定されたもので、同じくパートナー側のビームラインで利用できます。

XRF イメージ(分解能 20 μm)では、酸化物表面形態は、800°Cでの蒸気暴露後に形成された不規則なファセット粒子が酸化温度によって変化していることが明らかにされています。一方で、1000°Cの暴露では、繊維/針状細長い酸化物粒の形成を示唆したイメージになっています。HAXPES のスペクトル (分解能 1 nm) では、温度と露光時間が酸化物厚さの変化を与えています。これらの結果と X 線構造解析の結果から、合金酸化物界面で支配的な相としてのクロム酸化物と、酸化物表面に近いより FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> スピネル相の 2 つの層が形成され、温度が 800°Cから 1000°Cに上昇すると、表面酸化が増加し、Ni の拡散が増加することを明らかにしています。また、暴

露時間の増加に伴い、表面酸化物厚みの増加や混合酸化物の形成の増加があることも見出しました。

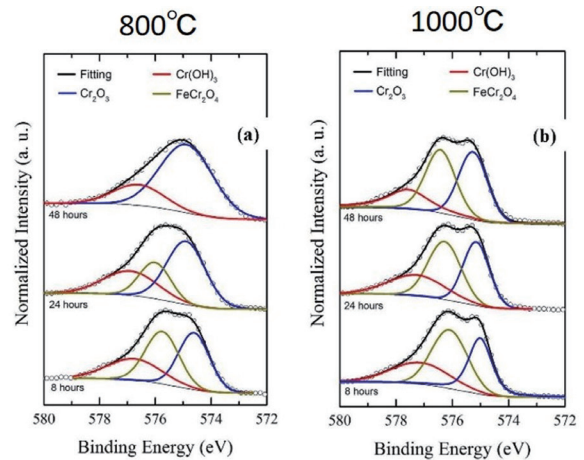
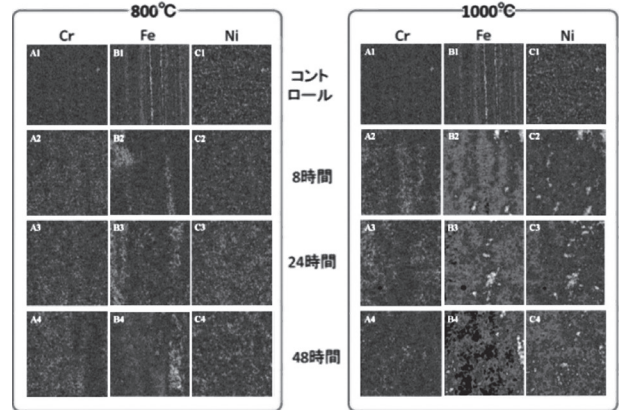


図6 Alloy33 の高温蒸気暴露による表面構造の時間変化

この研究は、過熱蒸気環境における Alloy33 における表面酸化物のこのような詳細な構造的特徴を初めて明らかにしたものです。次世代放射光では、より高い分解能(〜サブミクロン)で数倍速く変化を追いかけることが可能となることでしょう。そして、高度な原子カシステムにおける過酷な事故状況に対する代替クラディング材料の開発や評価を支援する強力なツールとなることが期待されます。

**3.2 溶射技術の非破壊評価**

放射光は、表面界面の評価技術として、溶射技術の開発にも活用されています。図7は、英国のオックスフォードにある 3 GeV の放射光施設 Diamond Light Source で行われた、熱遮蔽コーティング (TBC) システムに使用される空気プラズマ噴霧されたジルコニアトップコート of の X 線回折による構造評価の事例です [2]。放射光 X 線の表面への入射角度を変えて、表面への侵入深さを変えることで、深さ方向の構造変化を X 線回折実験により明らかにできます (深さ方向構造解析)。また、深さの関

数としての平均残留応力分布の情報も同時に得ることができます。

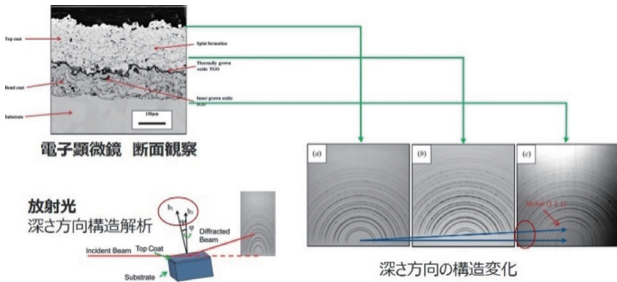


図7 溶射膜の深さ方向の構造可視化

この実験では、応力はTBCの厚みを通して圧縮であることが解明され、その変動は、表面からコーティングの間まで増加し、わずかに減少した後、界面に向かって再び増加することも明らかにされました。界面領域の応力が約300MPaであることも見出され、残留応力が、コーティングの途中から伝播する大きな亀裂分布と相関を持つことも発見しました。より高輝度な次世代放射光は、さらに表面付近の詳細な構造変化を高い分解能で分析できる非破壊試験に活用されることでしょう。

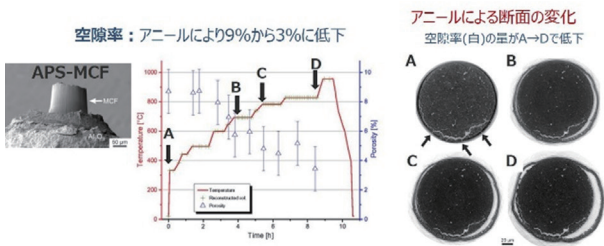


図8 溶射膜の深さ方向の構造可視化

図8は、放射光イメージングの活用事例です。固体酸化燃料電池の劣化を抑えるための大気圧溶射プラズマによるMn-Co-Fe-Oコーティング(APS-MCO)における、マイクロクラックの自己治癒、細孔の形成と凝集等を、放射光X線によるナノトモグラフィーを用いた3次元イメージングで追跡しています[3]。この分析評価は、フランスのグルノーブルにあるヨーロッパ共同体放射光施設(6GeV) ESRFで行われたものです。アニール温度を上げていくことにより3次元イメージから、アニールのプロセスと空隙率の減少の相関について明らかにしています。これらのプロセス実験も次世代放射光では、次節の特殊ベンチを用いて、その場観察が可能となります。

### 3.3 特殊ベンチによる観察

次世代放射光のビームラインでは、材料や試験片の分

析だけでなく、製造プロセスや劣化・破壊のプロセスを分析するための特殊実験ベンチをプラグ・アンド・プレイで導入できる大型の実験ハッチを用意します(図9)。昨年、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(International Center for Synchrotron Radiation Innovation Smart; SRIS)の矢代航教授は、住友ゴムとの共同研究で、従来の4D-X線CT法の約1,000倍速での高速撮影が可能な超高速4D-CTの開発に成功しました。これまで数秒かかっていた3次元CT画像を0.01秒で撮影できるようにしたものです[4]。実際にタイヤが摩耗する時に近い状態(走行時)で、ゴムが破壊する様子を連続的かつ様々な速度で3D観察することを可能にしています。次世代放射光では、大型実験ハッチの中に、このような特殊な実験ベンチを設置し、高輝度性を活かして、早い時間分解能で、より鮮明に破壊の過程を観察することが可能になることでしょう。

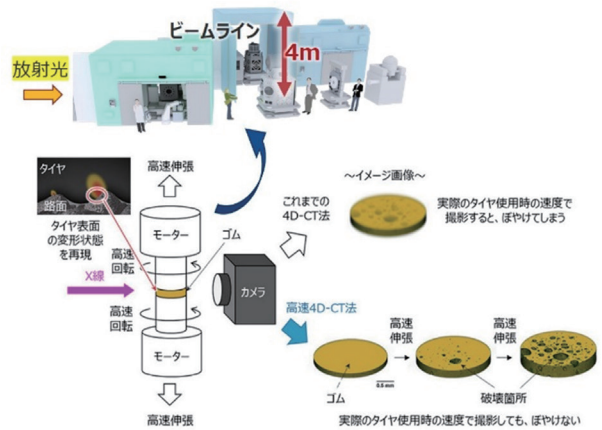


図9 ゴムの破壊プロセスの観察イメージ

### 3.4 コヒーレント・イメージング

次世代放射光は、レーザーのように、光の山と谷が揃うコヒーレント光の部分がこれまでの放射光の100倍近くとも言われています。そのコヒーレント光を用いると不均一な構造の情報を回折データとして得ることができます。そして、情報理論の力を借りて回折データから不均一な構造をナノレベルで再構成することが可能になります。この実験手法は、コヒーレント回折イメージングとよばれ、我が国でもX線自由電子レーザー施設SACLAでは、たんぱく質分子を始め、様々な材料の可視化が行われています。このコヒーレントな部分は、SPring-8の放射光では約0.1%しか含まれておりませんが、その部分を取り出してコヒーレント回折イメージングの実験が行われています。電子ビームが低エミッタンスとなる次世代放射光では、コヒーレンスが最大100倍

になると言われ、より情報量が増大し計測時間が短縮されると期待されています。

図 10 は、東北大学 SRIS の高橋幸生教授が開発したコヒーレント放射光を活用した回折イメージングの手法、スペクトロ・タイコグラフィーの実験の概念図です。

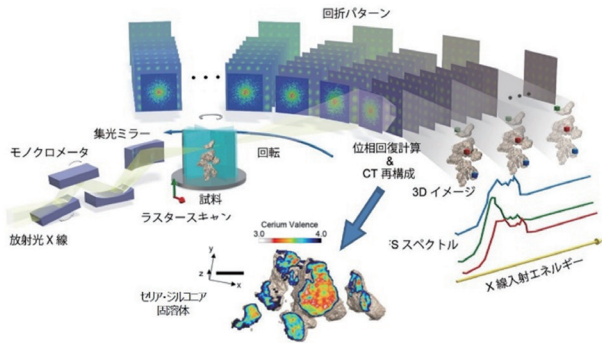


図 10 スペクトロ・タイコグラフィーと触媒材料の化学状態イメージング

この手法により、触媒材料の化学状態（セリウム金属の酸化状態）を 13 nm の分解能で色付けされた画像を可視化することに成功しました [5]。

次世代放射光施設では、コヒーレントイメージングが本格的に行われる放射光施設となります。そして、高輝度性を活かして、シングル・ナノメートルの分解能に到達する再構成イメージを得ることができると期待されています。

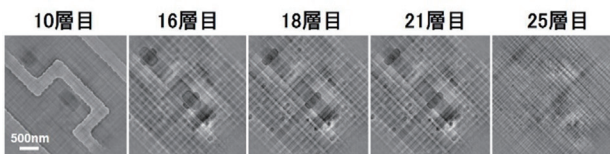


図 11 マルチスライス法によるデバイス各層のイメージ

さらに、高橋教授のグループは、デバイスなどの薄膜の 3 次元構造を、深さ方向に一枚ずつ切片をはぎ取るかのように、非破壊で 3 次元画像を再構成できるマルチスライス法 [6] という新しい手法の開発に成功しました(図 11)。メッキや溶射膜の表面界面のナノレベルの構造分析にも応用できるかもしれません。

今後、コヒーレンスを活用したイメージングが、様々な分野の研究開発に応用される機会が増えていくものと思います。この次世代放射光の可視化は、放射光の専門分野と、モノづくりやデータ科学などの分野との距離を縮め、データ科学や AI によるインフォマティクスとの連携により、産学のモノづくりの DX 化を強力に加速支援するツールとなるものと思われます。次世代放射光施設

は、優れたイノベーション・インフラとしての中心的役割を担うことが期待されています。

#### 4. 新しい利用の仕組み；コアリション

これまでは、放射光施設の様な高い専門性を有する大型研究開発基盤施設は、放射光に精通した研究者個人がユーザーでした。そして他分野や企業と共同研究を展開してきました。イノベーションインフラとしての役割を次世代放射光施設が担うためには、紹介したような先端活用を、より広い分野、産業界に役立てるための裾野を広げるシステムが必要となります。そのためには、まずは、施設へのアプローチが、放射光の非専門家にとって、様々な点で敷居の低いものであることが求められます。

そこで、地域パートナーは、新しいユニークな利用スキームであるコアリション（有志連合）コンセプトを創成しました。利用予定者が支払うコアリションへの加入金を施設整備に活用する代わりに、資金を出した利用予定者に、毎年一定の利用時間を提供し、放射光の専門家・利用経験者との共同研究のマッチングを支援するものです。その際に、資金を出した加入者は、毎月利用時間の申請の機会が与えられ、成果専有で課題解決に専念できる制度のもとで利用できます（図 12）。

##### 利用経験や知識のない企業の利用を支援

出資した企業と学術機関(コアリション・メンバー)が、開発課題毎に協働します。

1. 放射光の勉強は不要。多彩な分野のアカデミアとマッチング可能
2. ユニット内で開発情報を管理
3. 競争領域では、ユニット間で健全な競争
4. 協調領域では、論文や広報で情報発信

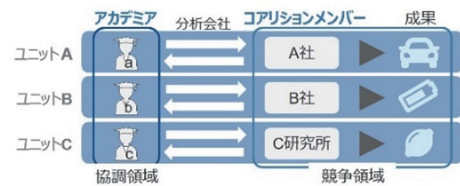


図 12 コアリション（有志連合）コンセプト

このことは、その多くが放射光の非専門家である企業だけでなく、加入した大学・国研の学術機関の放射光の非専門家にも、この施設利用の敷居を下げるだけでなく、新しい放射光活用の発想を取り込む機会を拡げることになります。それを裏付けるように、これまで放射光を活用した経験のない企業を多数含む 100 社を超える企業と、東北大学を始めとする国立大学・私立大学、国立研究開発法人が加入の手続きを始めています。

すでに、放射光の専門家とマッチングして課題解決へ

の取り組みを既存の施設を利用して始めた企業は 60 社を超えています。

このコアリションは、学術機関が参画することで、次世代放射光施設を単なる放射光利用実験施設から、産学の様々なプレイヤーが課題を持ち込み、競争と協調を止揚し課題解決のためのイノベーション（新結合）を起こすオープンイノベーションの場へと変革するエンジンとするものです。

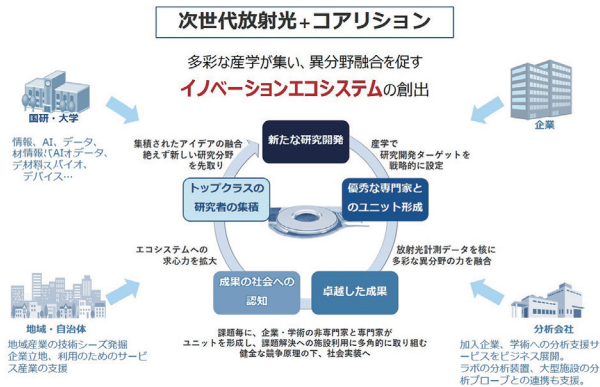


図 13 コアリションによるイノベーションエコシステム

課題の中には、革新的な材料開発の様な華々しい成果を目指すものだけではありません。コアリション制度は、緊急の事故やクレーム処理にも最先端計測で取り組み、解決する手立てとなります。やむを得ないリスク対応が持ち込まれ、新たなサイエンス成果に結びつくケースも出てくることでしょう。東京の都心から 2 時間の大学キャンパス内という恵まれた立地も施設へのアプローチを容易にします。次世代放射光施設は、産学の様々な課題・ニーズを集め、産学で解決し、成果の認知が、新たな課題と優れた研究者・技術者を集める求心力を生むイノベーション・エコシステムの中核となることを目指しています。次世代放射光の活用にご興味のある方は、筆者まで是非ご連絡ください。

## 謝 辞

東北放射光施設建設計画のころより、東日本大震災からの復興を超えて、次世代放射光施設の実現にむけて、ご尽力、ご支援、ご協力いただいた東北地域の多くの方々へ心より感謝いたします。

次世代放射光施設整備にあたり、文部科学省、量研機構次世代放射光施設整備開発センター、宮城県、仙台市、東北大学、東北経済連合会、及び、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の皆様から、多大なるご支援をいただきました。また、理化学研究所放射光科学研究センター、高輝度光科学研究センターからは、ビームライン、エンドステーションの科学的なご指導をいただきました。利用制度については、あいちシンクロトロン光センターからも御助言をいただきました。皆様に感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] M.S.Elbahshwana et al., “High-temperature oxidation of advanced FeCrNi alloy in steam environments”, Applied Surface Science, Vol. 426, 562-571(2017).
- [2] C,Li et al. “A synchrotron X-ray diffraction deconvolution method for the measurement of residual stress in thermal barrier coatings as a function of depth”, J. Appl. Cryst., Vol.49, 1904-1911 (2016).
- [3] N. Grünwald, “In situ investigation of atmospheric plasma-sprayed Mn–Co–Fe–O by synchrotron X-ray nano-tomography”, J. Mater Sci., Vol. 55, 12725–12736, (2020)
- [4] W. Yashiro et al., “Exploring frontiers of 4D x-ray tomography”, Appl. Sci. 11, 8868 (2021).
- [5] M.Hirose et al., “Oxygen-diffusion-driven oxidation behavior and tracking areas visualized by X-ray spectro-ptychography with unsupervised learning”, Communications Chemistry 2, 50 (2019).
- [6] K. Shimomura et al., “Three-dimensional iterative multislice reconstruction for ptychographic X-ray computed tomography”, Opt. Express Vol. 26, 31199-31208 (2018).

(2022 年 2 月 24 日)

## 著 者 紹 介



著 者：高田 昌樹  
 所 属：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  
 一般財団法人光科学イノベーションセンター  
 専門分野：放射光科学