

SPring-8-II 計画によって拓かれる豊かで持続可能な社会

SPring-8 ユーザー協同体

会長 藤原明比古

要 旨

放射光利用研究は学術研究から我々の日常生活を豊かにする産業振興に欠かせない分析ツールとして産学官で幅広く利用されている。第3世代の放射光施設である SPring-8 は30年近く特定先端大型研究施設として放射光利用研究をけん引してきた。しかし、世界的には第4世代放射光施設が主流になり、国内においても軟 X 線領域において第4世代放射光施設の利用が開始された。SPring-8 ユーザー協同体は、SPring-8 の硬 X 線領域における第4世代化、すなわち、SPring-8-II 計画実現によって期待される学術研究の推進と産業振興を提案する。さらに、これらの放射光研究が我々の将来の生活に如何に貢献するかを示し、SPring-8-II 計画実現を要望する。

背景

我が国では、1963年に東京大学原子核研究所の加速器科学用電子シンクロトロンに放射光取り出し口が設置され、放射光利用研究が開始された(第1世代)。その後、1974年に世界初の放射光専用蓄積リングとして SOR リング(第2世代)が建設されて以来、我が国は世界の放射光利用研究をけん引してきた。大型放射光施設 SPring-8 は、専用の加速器にアンジュレータ主体の挿入光源を多数設置できるように設計された第3世代放射光施設であり、1997年より高輝度放射光を提供することによって放射光利用研究に革新をもたらした。現在では、我が国の日本の総論文の約1.2%を担う重要な学術研究拠点としてのみならず、利用研究の約20%が産業界によって利用されており、我が国の科学技術全般を大きくけん引している。

第3世代放射光施設の利用開始から実に30年近く経た2024年、蓄積リングにマルチベンドアクロマー磁石配置を採用した第4世代放射光施設 -3GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu- が利用を開始した。第4世代放射光施設では、電子ビームのエミッタンスを桁違いに低下させることで、利用する放射光の輝度、空間コヒーレンスが格段に向上し、放射光分析の質的変革をもたらすと期待されている。しかしながら、NanoTerasu は軟 X 線領域に強みをもつ放射光施設であり、SPring-8 が強みをもつ硬 X 線領域においては第4世代放射光源の恩恵を受けられずにいる。国内で保有する放射光源として軟 X 線から硬 X 線までの幅広いエネルギー領域(波長領域)を第4世代放射光源でカバーできなければ、世界をけん引する放射光利用研究として NanoTerasu の先端光源の特性を十分には生かしきれない。以上の背景を鑑みれば、利用開始から30年近く経過する SPring-8 の安定運転の継続と第4世代光源へのアップグレードに向けた SPring-8-II 計画は、SPring-8 の利用研究のみなら

ず、NanoTerasu を含む放射光利用研究全般の発展、さらには、SPring-8 が貢献してきた学術研究の発展と産業振興には必要不可欠である。

SPring-8-II の利用提案

SPring-8 の全利用者が会員である SPring-8 ユーザー協同体 (SPRUC) は、現状を鑑み、SPring-8-II 計画の必要性、および、SPring-8-II を利用することでどのような科学技術に貢献できるかについて明示するために、SPring-8-II の利用提案を広く会員から募集した。提案は基礎科学から産業応用まで多岐にわたるものであり、改めて、SPring-8 の科学技術全般への貢献が確認できるものである。これらの提案はいずれも既存の SPring-8 の光源特性に対して、高エネルギーX線領域における輝度の約 100 倍の向上 (ピンクビーム利用でさらに高強度化)、安定した短パルス特性、微小ビーム・低エミッタンス化、コヒーレンス向上などの光源特性の進化を活用するものである。これらの計測・分析技術の質的革新は、科学技術の発展はもちろん、その先にある我々の豊かで持続的な生活の実現へ貢献するものである。以下に、提案書¹を資料 1 に添付し、分野²ごとの提案概要を示す。

ライフサイエンス、保健・医療・福祉分野では、食品の組織イメージングから食の官能を明らかにするものや神経ネットワーク等のバイオシステム可視化によって疾病の早期発見・治療を実現するもの、タンパク質の精密構造解析による創薬や機能性生体分子の創出に貢献するものなどが示された。

宇宙、素粒子、原子核、地球・海洋・フロンティア、環境分野では、物質の起源、ひいては宇宙の創成にかかわる科学的知見の深化への貢献から、高温高圧極限環境下の放射光分析で地震・火山による自然災害への備えに情報提供するものや精密化学分析による物質循環などの環境評価をするものなど、安心安全社会を具現化する提案が示された。また、SPring-8 で実績のある惑星試料の化学分析による宇宙や生命の成り立ちに対する知見の深化も期待される。

インフラ・都市・建築・交通分野では、イメージング、精密構造解析、化学分析により構造材料の組織理解や破壊過程の理解、材料の脆化・疲労・損傷の理解をすることで、強靱な材料開発に資するものが示された。

材料・ナノテクノロジー・製造・プロセス分野では、低温・量子現象、物質の外場 (光、電場、磁場) に対する応答やダイナミクスなどの物質科学の基盤構築を通して、量子コンピ

¹ 提案の一部の非公開情報は資料 1 から除外している。このため、資料 1 に示されていない非公開の提案内容が本文中の概要に示されているものもある。

² 科学技術の分野分類方法は文部科学省 科学技術・学術政策研究所 (NISTEP) の科学技術予測調査における分野を参考にした。<https://www.nistep.go.jp/research/scisip/delphisearch/start/year/> また、各提案は様々な分野にまたがるものも多く、単純に分野分類ができないため、整理の段階でいずれかの分野に分類した。このため、分類は一例であることを付記する。

ューターなどの次世代エレクトロニクス・次世代情報技術や電池、ゴム、ガラス、プラスチック、生体適合材料などの日常生活に直結する材料開発が提案されている。さらには、高温高圧極限環境下の物性評価により、極限材料で利用可能な材料の評価、極限環境で創出される新規材料の探索など未来材料創出への役割も示された。

エネルギー・資源、電子・通信・情報分野では、直近の未来における生活の質（QOL）と持続可能性の両立を目指した半導体材料、磁性体材料・磁石、熱電材料、誘電体材料、電池材料とそれらの材料を用いたデバイス開発への貢献が提案された。究極の微細化・集積化が行われている電子デバイスに対しては、nm 領域の空間分解能を持つデバイスの評価なども提起された。

社会技術（文化）分野では、これまで文化財の産地・年代の推定や保存修復に有用な情報を提供してきた放射光分析において、対象とする文化財の多様化、得られる情報の深化による文化財科学・考古学の新展開への寄与が提案された。

本利用提案の中には、硬 X 線領域に強みをもつ SPring-8-II と軟 X 線領域に強みをもつ NanoTerasu の双方の第 4 世代放射光源を用いた相乗効果による成果創出の提案もあり、注目に値する。更に、SPring-8-II による飛躍的なコヒーレンスの向上を視野に入れ、X 線自由電子レーザー施設 SACLA との連携も提案された。極限コヒーレント X 線光源でありながら、SACLA は原理的な理由により実験ステーションが多数整備できない。SPring-8-II へのアップグレードに伴う新たな利用方法として、実験機会が極端に限られている SACLA の利用実験につながる展開実験の提案もなされた。これらの提案は、SPring-8-II 単独ではなく、既に整備されている先端光源を更に生かすものでもあり、放射光利用研究で世界をリードしてきた我が国だからこそ強みを発揮できる提案である。

本利用提案では、期待される今後の科学技術への貢献はもちろん、これらの研究成果創出の基盤となる放射光利用研究計測技術、計測基盤において、優れた光源特性を十分に活用するために、多数の提案・要望がなされた。具体的には、計測基盤・ユーティリティ施設の充実、測定の新なる精密化、これまで活用例が少なかった分光器フリー光源（ピンクビーム）の整備と利便性向上、高いエネルギー分解能を有する 2 次元検出器の開発・整備、マルチモード測定のための基盤整備などが挙げられた。

SPring-8-II 利用研究が拓く未来予想

今回提出された SPring-8-II の利用提案をベースに、SPring-8-II の実現が我々の将来の生活にどの様に貢献できるかについて、**知の貢献**、**モノの貢献**、**技術・デバイスの貢献**の視点で貢献例を下図に示す。³

³ 令和 2 年版 科学技術白書に示された 2040 年社会のイメージ「人間性の再興・再考による柔軟な社会」への貢献という形で例を挙げた。https://www.mext.go.jp/content/1421221_001.pdf



まとめ

これまで我が国の放射光利用研究をけん引してきた第3世代放射光施設として硬X線領域に強みをもつSPring-8がその利用開始から30年近く経過し、当時最先端であった光源特性は、諸外国の第4世代放射光源に比べ後塵を拝している。一方、軟X線領域に強みをもつ第4世代放射光施設NanoTerasuの利用が開始された状況で、硬X線領域の第4世代光源の整備は喫緊の課題である。硬X線領域の第4世代光源SPring-8-IIを用いた放射光利用研究は、NanoTerasu、SACLAの利用との相乗効果も期待でき、我が国の科学技術への大きな貢献が期待できる。SPring-8ユーザー協同体は、これまでSPring-8を利活用し、我が国の科学技術をけん引してきた経験から、SPring-8-IIによって拓かれる明るい社会に大きく貢献できると確信する。このため、早期のSPring-8-II計画実現は、我が国の豊かで持続可能な社会に必要不可欠である。

謝辞

本稿は、SPring-8-IIの実現に向け、SPRUCからその必要性を発信しようとする会員からの提案をベースにしたものです。また、本稿を作成するにあたり、所掌である文部科学省科学技術・学術政策局研究環境課、施設者である理化学研究所、登録施設利用促進機関である公益財団法人高輝度光科学研究センターに公式情報の提供等のご協力いただきました。心より感謝を申し上げます。

SPring-8-II の利用提案

| 分野 | 提案 | 研究会 | 提案者・提案代表者 | スライド番号 | |
|--------------------------------|---------------------------------------|---|--|---------------------------------|----|
| ライフ 保健 医療 福祉 | 食品に対する官能を科学する | | | 2 | |
| | 生体分子作用原理の解明と人工分子設計 | 放射光構造生物学研究会 | | 3 | |
| | 生物システムの見える化 | 高分解能 X 線イメージング研究会 | 水谷隆太(東海大) | 4 | |
| | 生体内での対象細胞の挙動分析 | | 武石俊作(光エンジニアリングサービス) | 5 | |
| 宇宙 地球 海洋 フロンティア 環境 | レーザー電子光による物質の起源と進化の解明 | レーザー電子光を用いた素粒子・原子核科学研究会 | 石川貴嗣(大阪大学) 新山雅之(京都産業大学) | 7 | |
| | 超高压力実験と放射光測定から地球・惑星の進化をひもとく | 地球惑星科学研究会 | 新名良介(明治大学) 太田健二、東真太郎(東京工業大学) 河口沙織(JASRI) 廣瀬敬、鍵裕之、小松一生(東京大学) 寺崎英紀(岡山大学) 中島陽一(熊本大学) 坂巻竜也(東北大学) 西真之(大阪大学) 境綾(愛媛大学) 飯塚理子(早稲田大学) | 8 | |
| | 地震・火山の物質科学的理解 | 地球惑星科学研究会 高圧物質科学研究会 | 河野義生(関西学院大学) | 9 | |
| | 硬軟 X 線を縦断的に活用した多角的・シームレスな分析による新展開 | 環境物質科学研究会 | | 10 | |
| インフラ 都市 建築 交通 | 更なる高強度・高延性実現のための新たな組織制御戦略 | 構造物性研究会 | 朴明駿(京都大学) | 12 | |
| | 優れた強度と延性を有する究極の構造材料の実現へ | 残留応力と強度評価研究会 | 吉田周平(京都大学) | 13 | |
| | 相変態・変形・破壊現象の 4D イメージング | 高分解能 X 線イメージング研究会 | 高桑脩(九州大学) | 14 | |
| 材料 ナノテク 製造 プロセス | X 線分光による材料開発の国際競争力維持 | X 線分光利用研究会 | 朝倉博行(近畿大学) 内山智貴(東北大学) | 16 | |
| | 構造柔軟な多孔性材料の科学 | 構造物性研究会 | 北川進、大竹研一(京都大学) | 17 | |
| | 原子レベルの運動性から物質特性・生命現象を理解 | 核共鳴散乱研究会 | 齋藤真器名(東北大学) | 18 | |
| | 世界最高分解能で電子の動きを観る | 構造物性研究会 | 鬼頭俊介(東京大学) | 19 | |
| | 多次元電子分光イメージングで開拓する物質科学のフロンティア | 固体分光研究会 | 関山明(大阪大学) | 20 | |
| | 究極の 3D 顕微計測が解き明かす先進材料の機能 | コヒーレント構造科学研究会 データ駆動科学研究会 高圧物質科学研究会 不規則系機能性材料研究会 理論研究会 | 綿貫徹(量子科学技術研究開発機構) | 21 | |
| | コンプトン散乱による新機能物質の電子軌道状態の可視化 | コンプトン散乱研究会 | 小林義彦(東京医科大学) | 22 | |
| | コンプトン散乱による基礎科学と産業利用の両立 | コンプトン散乱研究会 | 小泉昭久(兵庫県立大学) | 23 | |
| | 社会を支え世界を変える半導体デバイス | X 線トポグラフィ研究会 | 志村考功(早稲田大学) | 25 | |
| エネルギー 資源 電子 通信 情報 | 半導体のキャリアドーピングを原子レベルで可視化 | 原子分解能ホログラフィー研究会 | 松下智裕(奈良先端科学技術大学院大学) | 26 | |
| | 半導体-絶縁界面欠陥を原子レベルで可視化 | 原子分解能ホログラフィー研究会 | 松下智裕(奈良先端科学技術大学院大学) | 27 | |
| | 革新的な熱電材料の開発 | 原子分解能ホログラフィー研究会 | 木村耕治(名古屋工業大学) | 28 | |
| | 鉛フリー誘電体の開発 | 原子分解能ホログラフィー研究会 | 林好一(名古屋工業大学) | 29 | |
| | 実電池内部のイオン分布の非破壊解析 | コンプトン散乱研究会 | 鈴木宏輔(群馬大学) | 30 | |
| | 定量分析可能な非破壊断面画像計測 | コンプトン散乱研究会 | 鈴木宏輔(群馬大学) | 31 | |
| | 高輝度放射光 X 線と高強度低速負ミュオンの両方を用いた非破壊深さ分解技術 | 放射光・ミュオン連携科学研究会 | | 32 | |
| | 社会技術 (文化) | 放射光 X 線によって歴史や文化を読み解く | 文化財研究会 | 田中 真奈子(東京藝術大学) 阿部 善也(東京電機大学) | 34 |
| | 計測基盤 | 全方位イメージング | 高分解能 X 線イメージング研究会 | 水谷隆太(東海大学) 百生敦(東北大学) | 36 |
| 一期一会の物質・生命現象の 4D 可視化 | | | 矢代航(東北大学) | 37 | |
| 「極」高圧科学 | | 高圧物質科学研究会 | 石松直樹(愛媛大学) 町田晃彦(量子科学技術研究開発機構) | 38 | |
| バイオマテリアルの解析の計測システム整備 | | | 武石俊作(光エンジニアリングサービス) | 39-40 | |
| 真のマルチモーダル計測実現 | | | 戸田裕之(九州大学) | 41 | |
| 顕微鏡・高速測定による物質機能の解明・高度化 | | X 線発光・非弾性 X 線散乱 スベクトロスコープ研究会 | 石井賢司(量子科学技術研究開発機構) | 42 | |
| 精密から極精密分光へ | | 角度分解非弾性散乱研究会 | 福井宏之(高輝度光科学研究センター) 乾 雅祝(広島大学) | 43 | |
| 計測基盤整備 | | 薄膜ナノ構造研究会 | 山口明(兵庫県立大学) 田尻寛男(高輝度光科学研究センター) | 44-49 | |

ライフサイエンス、保健・医療・福祉分野

| 分野 | 提案 | 研究会 | 提案者・提案代表者 | スライド番号 |
|-----------------------|--------------------|-----------------|---------------------|--------|
| ライフ 保健 医療 福祉 | 食品に対する官能を科学する | | | 2 |
| | 生体分子作動原理の解明と人工分子設計 | 放射光構造生物学研究会 | | 3 |
| | 生物システムの見える化 | 高分解能X線イメージング研究会 | 水谷隆太(東海大) | 4 |
| | 生体内での対象細胞の挙動分析 | | 武石俊作(光エンジニアリングサービス) | 5 |

SPring-8-II実現による食品分野の未来像 ～食品に対する官能を科学する～

食品イメージング分野の現状と課題

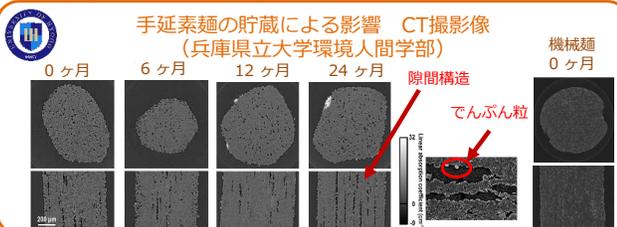
- 食品、特に麺類の食感を科学的に分析し、商品価値の客観的評価と新商品開発への道筋を示す。
- 食糧危機・食品ロス問題**に対する解決策、および**地元産業価値**の再認識・評価に繋がる。
- 手延素麺で、長期保存したものが「ひねもの」として、人気があり、価値が上がる理由を、SPring-8の**3次元マイクロCT分析(右写真)**により、構造・化学分析を行い、その原因究明を推進している。
- 乾麺**の分析については大きな成果が得られたが、実際の食感分析に必要な**茹で麺**の分析は、計測中での試料の安定性などが課題で計測できていないのが現状。**桁違いに高輝度なSPring-8-II**の光源性能により、**短時間で3D再構成に必要なCTデータ取得**に期待。



BL24XUにおける3DマイクロCT装置

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

- 兵庫県立大学が手延素麺協同組合と共同で手延素麺の貯蔵による影響について、SPring-8のマイクロCTを用いて、**手延素麺の貯蔵による構造変化**を明らかにした(下図)。手延素麺と機械素麺についても、**構造変化とおいしさの関連性**を明らかにした。
- 手延素麺に麺線方向の隙間があることを初めて観測。**不均一性が良い食感に繋がる**ことが構造観察から示された。



SPring-8-II実現による未来像

問題点:

- ✓ 水分の少ない乾麺は、長時間のX線測定に耐えられたが、食感に直結する**茹で麺の測定は、高い水分含有率のために安定した形状計測が困難**。

SPring-8-IIによる解決策:

- ✓ 放射光X線3DマイクロCTは、SPring-8-IIの高輝度(低エミッタンス)性により、特に屈折コントラストによる構造の界面をより強調した像を取得できるため、**短時間での鮮明像取得に威力を発揮**する。SPring-8-IIでの**短時間計測**(例:計測時間:1時間→1分)で解決策を図る。

未来像

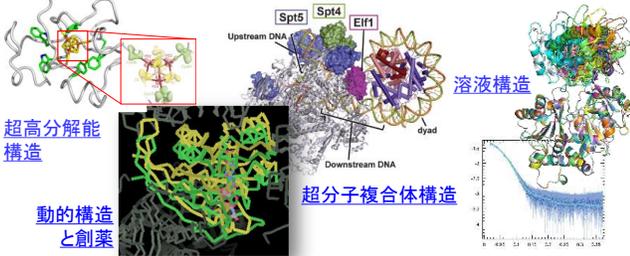
- ✓ **食品は、一般に水分の含有率が高いため、麺類に限らず、拡張**できる。
- ✓ **地元食品価値再認識(地域創成)、代替食品開発(食料問題)**へ貢献。

構造生物学分野の現状と課題

1. 当該分野にかかわる科学技術分野、産業分野、社会における現状と将来展望: 放射光等が培ってきた生体分子の自動結晶測定技術等で生み出される構造情報を基に、AI技術による分子設計が進化しつつある。一方、クライオ電子顕微鏡や計算科学の進歩も進み、生命現象の基盤となる分子の離合集散・細胞情報伝達に関する知見が深まっている。
2. 現状から将来展望に向けて進歩するために必要な知見、技術などの課題: AIによるバーチャル空間での構造予測・構造設計の現実空間での実証に必要な構造解析技術の進歩および時間発展を含む動的構造や分子構造とエネルギー地平の関係を繋ぐ必要。
3. 課題解決に対するSPring-8利用研究の貢献の概要: SPring-8における結晶構造解析や溶液散乱法による分析が、高分解能原子座標ないし動的構造情報を明らかにし、さらにこれらをクライオ電子顕微鏡と計算科学と融合し、上記の研究を推進している。

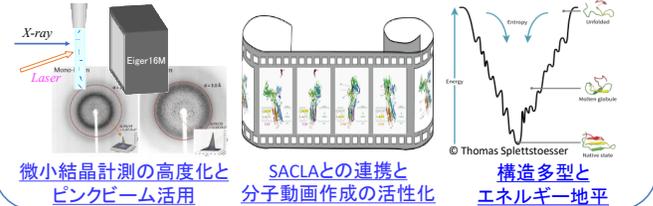
SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

1. **迅速自動測定に基づく生体分子網羅的構造解析**
 創薬スクリーニングへの貢献/構造予測AIへの教師データ創出。
 高輝度ビームで数μmサイズの微小な結晶へも対応。
2. **生体分子結晶の超高分解能解析・動的構造解析**
 高エネルギー光で金属イオンの電子状態可視化・
 高精度室温測定の実現で分子運動性の構造基盤解明。
3. **生体分子の溶液構造解析の迅速化・高精度化**
 結晶解析では困難な天然変性蛋白質・多量体平衡現象の解明。
4. **クライオ電子顕微鏡等と連携した相関構造解析**
 高機能超分子複合体の解析。結晶化困難試料の解析で補完。



SPring-8-II実現による未来像

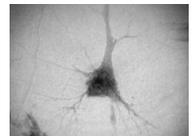
1. **蛋白質構造機能相関研究のさらなる深化**
 構造基盤から機能理解への発展・生命現象理解の基盤となる
 分子間相互作用(蛋白質-蛋白質, 蛋白質-薬剤)の理解
 ・自動測定の実現: より高輝度な光で微小結晶・高難度試料からの計測。
 ・XPCS測定の実現: コヒーレント性を生かした分子集合の時間発展解析。
 ・相関構造解析のさらなる飛躍: クライオ電子顕微鏡・計算科学との連携で
 超分子複合体や構造多形の解析と計算による動的構造の補完・外挿。
2. **創薬・蛋白質工学における生体分子設計の新展開**
 生体分子デザインと合成生物学の融合で新たな分子機能創出
 ・AIによる人工酵素・阻害薬設計の効率化: 予測の実験的実証の意義。
 ・ハイスループット解析パイプラインの実現: 総合的解析支援環境の整備拡充。
 ・多次元動的構造解析 (時空間・温度等): ピンクビーム活用でSACLAと相補的な動的構造解析。エネルギー地平導出で酵素効率化の設計指針を提供。



SPring-8-II実現による生物イメージングの未来
 ~ 生物システムの見える化 ~

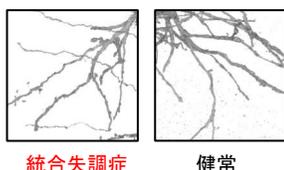
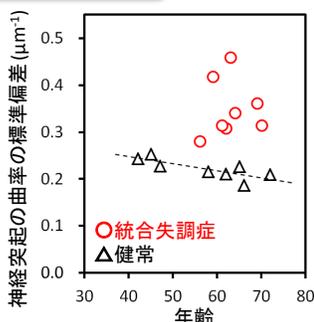
生物イメージングの現状と課題

生体の可視化は、細胞レベルでは光学顕微鏡、臓器レベルではCTスキャンなど、医療で幅広い応用
 ○SPring-8でも、統合失調症例のヒト脳組織の研究により、精神疾患での構造変化が明らかに
 しかし、臓器の大きさでナノメーター構造を見たり、形の変化を高速で見るとは、現状では不可能
 ○X線の明るさやエネルギーがボトルネック
 光源の明るさは微細構造や高速観察で必須。高エネルギー＝大きな対象をそのまま透過観察するのに必須
 SPring-8-IIIにより、高輝度で高エネルギーの光源が実現すれば、これまで見れなかったものを見る化
 ○治療できなかった病気が治せるようになり、国民の健康に寄与できるだけでなく、それによる経済的効果も。



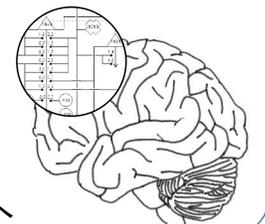
SPring-8を活用した生物イメージングの例

SPring-8のナノCT法で
 ヒト脳組織を三次元解析
 ★神経突起の曲がり方が
 年齢で変化
 ★統合失調症では
 神経突起が細く蛇行
 これらナノメーターの変化は
 SPring-8の高輝度X線で
 初めて明らかに
 ↓
 それをAIに組み込んで
 シミュレーションしたところ
 機能への影響が判明
 ↓
 診断や新規治療法の開発



SPring-8-II実現による生物イメージングの未来

生物全体の微細構造を、動的に観察すれば
 システムとしての機能メカニズムを明らかにできる
 →病気の新規治療法の開発や、生物模倣での応用
 SPring-8-IIIにより、全体を精細かつ高速にイメージング
 ★従来のナノCT法では、1 mm程度の脳組織
 →SPring-8-IIIによる高エネルギー高輝度X線
 →150 mm程度のヒト脳全体が観察対象に
 ……NanoTerasuなどの他施設では不可能
 ★従来は、静的な構造を解析
 →SPring-8-IIIによる
 高エネルギー高輝度X線
 →1秒に100,000枚の画像で、
 動的な解析
 生物システムの見える化で
 どんな病気も治せる日本へ



生物内細胞の挙動解析の期待

生体内での対象細胞の挙動のin vivo分析

1. 分析ターゲット

- ① 疾患特異的な細胞(疾患特異的マクロファージ等)
- ② 細胞治療における細胞(CART細胞等)
- ③ 遺伝子治療ターゲットとなっている細胞、等

2. 使用サンプル

中型実験動物、大型実験動物、実験用サル等

3. 評価・測定対象例

例えば疾患特異的なマクロファージの挙動(集積等)や変質をリアルタイムで追いかける。

- ① 一例として、
 - ① 慢性炎症性疾患におけるCrown Like Structureの形成や、薬剤等による消滅過程と病態との関係
 - ② アルツハイマー病におけるマクロファージの挙動
- ② このような研究はマウスを使った研究で病理切片などによる評価は行われていますが(もしかしたらマウスレベルだと蛍光分析等でin vivo研究が進んでいるかもしれません)、将来的にヒトを念頭に置いた中型・大型実験動物を用いたin vivoでのreal time分析はできていないように思います。
- ③ label freeであればそれに越したことはありませんが、label有でも可です。
- ④ これが可能になると疾患メカニズムの解明、ヒトでの診断、新たな治療戦略・戦略の開発、創薬へも応用が広がるのではないかと考えています。

4. 分析手法

おそらくCTとその他の分析手法を同時複合的に行うようなことになるのではないかと推測致しますが、具体案としては現状持ち合わせておりません。申し訳ございません。ただこういったことができれば、実験を行いたいとおっしゃるだろうと思われる先生とは個人的にコンタクトを取っております。

遺伝子治療における薬剤とターゲット分子との反応過程やそれに伴う細胞及び臓器の変化の評価

宇宙・地球・海洋・フロンティア、環境分野

| 分野 | 提案 | 研究会 | 提案者・提案代表者 | スライド番号 |
|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--|--------|
| 宇宙 地球 海洋 フロンティア 環境 | レーザー電子光による物質の起源と進化の解明 | レーザー電子光を用いた素粒子・原子核科学研究会 | 石川貴嗣(大阪大学) 新山雅之(京都産業大学) | 7 |
| | 超高圧力実験と放射光測定から地球・惑星の進化をひもとく | 地球惑星科学研究会 | 新名良介(明治大学) 太田健二、東真太郎(東京工業大学) 河口沙織(JASRI) 廣瀬敬、鍵裕之、小松一生(東京大学) 寺崎英紀(岡山大学) 中島陽一(熊本大学) 坂巻竜也(東北大学) 西真之(大阪大学) 境毅(愛媛大学) 飯塚理子(早稲田大学) | 8 |
| | 地震・火山の物質科学的理解 | 地球惑星科学研究会 高圧物質科学研究会 | 河野義生(関西学院大学) | 9 |
| | 硬軟X線を縦断的に活用した多角的・シームレスな分析による新展開 | 環境物質科学研究会 | | 10 |

素粒子・原子核科学分野の現状と課題

我々の身の回りに存在する物質がどのように構成されているのか、どのように生まれたのか、そしてどのように進化していくのか？この根源的な宇宙の謎に迫るため、物質を分解し、最小構成要素「素粒子」を追い求めるのが素粒子物理学である。物質の質量の99%以上を担う核子が、クォークとグルーオンと呼ばれる素粒子で形作られることがわかっている。クォークやグルーオンに働く力はとてつもなく強いため、これらの素粒子はハドロンと呼ばれる複合粒子を形成する。そしてクォークとグルーオンはハドロンの中に閉じ込められて単体としては観測できない。そのためハドロン現象を通じてクォークとグルーオンのダイナミクスを調べ、物質誕生の最初のステップを解明するのがクォーク核物理である。

クォーク核物理では、大きく分けてハドロン構造、ハドロン間相互作用、ハドロンの質量変化の三つの切り口で物質の起源の進化の第一段階となるハドロン現象に取り組んでいる(右図)。



SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

SPring-8の蓄積リング内8 GeV電子と外部より入射されるレーザー光との逆コンプトン散乱によって得られるGeV領域の偏光高エネルギーガンマ線ビーム(レーザー電子光ビーム)を用いたハドロン現象の観測では

1. 荷電粒子を除去したビーム利用が可能
2. 多様なエネルギーのガンマ線を同時に利用可能
3. 偏光ビームを用いることで中間状態のハドロンを制限可能(最大エネルギーで最大偏光度を達成)
4. 原子核深部の情報(質量変化)の観測に有利
5. クォークの種類に依らない反応で様々なハドロンを生成可能といったユニークな特徴を生かすことで、他の手法では得られない観測を実施してきた。SPring-8では、紫外(深紫外)レーザーを使って最大2.4(2.9) GeVのレーザー電子光による ϕ メソンや η メソンの光生成などを通じて、ハドロン現象を調べてきた。

SPring-8-II実現による未来像

SPring-8-II 電子ビームエネルギーの8 GeVから6 GeVへの低下に伴い、レーザー電子光ビームの最大エネルギーは1.5 GeVないし1.8 GeVとなる。このエネルギー変化に伴い、SPring-8-IIでは、閾値近傍での ϕ メソンや η メソンの光生成でのこれらのメソンと核子の再散乱、より質量の小さい η メソンや ω メソンの光生成反応によるハドロン現象の観測が期待される。具体的な研究対象は以下のとおりである。

1. η メソン原子核[ハドロンの質量]
2. 6つのクォークからなるハドロン「ダイバリオン」[ハドロンの構造]
3. 原子核中での二核子短距離相関[ハドロンの構造]
4. 閾値近傍の ϕ メソン光生成反応での ϕ メソンのスピン構造[ハドロン間相互作用]
5. 原子核中での ρ メソンの質量変化[ハドロンの質量]

超高圧力地球惑星研究分野の現状と課題

1. ダイヤモンドアンビルセルによる超高圧力実験技術が発展し、地球・惑星内部の構造と物質進化の理解が大きく進展した。今後、重要でありながら研究が難しい、**地球惑星内部液体、水・水素、系外惑星内部、小天体物質進化、ナノスケール極微小領域反応**を対象とした研究が発展すると考えられる。
2. 測定の難しい液体、水・水素、微小単結晶、ナノ領域を対象として、超高圧力下の構造や物性、化学反応を測定することが求められる。そのため、高輝度光源による極微小領域測定、液体測定、高速測定、複合的測定が必要となる。
3. SPring-8の放射光測定は、超高圧力地球惑星研究に欠かせない役割を果たしている。今後、**SPring-8-IIの光源性能で、地球・惑星内部の液体や水素、極微小物質を中心とした研究が飛躍的に進展**すると期待される。



SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

1. 火山、地震、物質循環といった**地球内部活動は、生命の活動する表層環境に大きな影響**を与える。そのため、人類の持続可能性を考える上でも欠かせない根源的な研究である。
2. 地球・惑星内部は超高圧力の世界であり、その研究は超高圧力実験を用いて推進されている。SPring-8は、輝度、光の広がり、光子エネルギー範囲が優れているため、超高圧力地球惑星研究に欠かせない。
3. SPring-8での超高圧力下放射光測定により、地球核・マントル物質の相関係、結晶構造、伝導度等の物性、水のマントル内循環、レオロジー的性質が解明された。実験結果から、**地球核・マントルの組成、地磁気の進化、マントルの熱的・物質的構造、水の大循環**等に関して新しい知見が得られている。

SPring-8-II実現による未来像

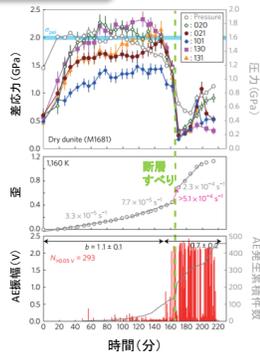
1. 高輝度化①: 100倍の輝度でマグマや地球惑星核液体鉄の構造、密度、音速が容易に測定可能に*1。水や水素、高圧レオロジーも研究対象に
 2. 高輝度化②: 100 nm級の超微小ビームにより、テラパスカル実験やグレイン毎測定が可能に*2
 3. 高輝度化③: 小天体衝突など短時間反応が重要な現象の再現実験が進展*1
 4. 光子エネルギー範囲: 100 keVクラスの高波数空間散乱測定により、液体核の組成が明らかに
 5. 高コヒーレンス化: 位相コントラスト測定により水素拡散現象、ナノ相分離のその場観察が可能に
- *1 検出系の高性能化(Lambda 2M/Eiger 9M級検出器、ソーラースリット等)も併せて必要
*2 高輝度・高エネルギー対応集光系(<1 μ m級、長作動距離、光軸安定集光系)も併せて必要

高圧地球科学分野の現状と課題

1. 地震発生・火山噴火のプロセスの解明は災害に強い日本社会の形成を目指す上で重要な課題である。これまでの稠密観測網等の整備により、それらの現象論(経験)的な理解は進んできた一方で、なぜ・どのようにそれらの現象が起きるのかを明らかにする、物質科学的観点からの理解は不足している。
2. 地震を引き起こす岩石破壊過程や、火山下のマグマの状態・挙動は、地球内部の高圧高温下で時々刻々と進行するため、それら現象の理解には高圧高温下その場における観察実験が必要不可欠である。
3. この課題に対して、SPring-8の高エネルギーX線を活用した、高圧高温下その場観察実験が行われてきた。しかし現在のSPring-8では、X線強度の不足により、高圧装置内部で起こるそれらの現象を高速度(ミリ~マイクロ秒)で観察できない等の課題がある。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

1. SPring-8の高エネルギーX線と高圧実験装置を併用することにより、地球内部の地震発生場の環境にて変形・破壊が進行する岩石の応力・歪、微小地震(AE)の複合測定が可能になった。地下50km以深で発生する深部地震の再現実験を通して、それらの発生要因及びプロセスの解明に成功した(Ohuchi et al., 2017 Nat. Geo.; 2022 Nat. Commun.)。
2. SPring-8の高強度の高エネルギーX線を用いることにより、結晶だけでなく、マグマなどの液体やその急冷物質であるガラスの構造測定を高圧下その場で行うことが可能になった。そして、マグマのアナログ物質であるSiO₂ガラスについて、高圧下で異常な弾性軟化を引き起こす構造的要因の実験的解明に成功した(Kono et al., 2022, Nat. Commun.)。



SPring-8-II実現による未来像

1. 高圧実験装置内部の岩石やマグマをその場で観察するためには、中規模光源NanoTerasuではなく、大型放射光源SPring-8-IIからの高エネルギーX線の利用が必要不可欠である。そのため、SPring-8-IIの実現により、地震・火山研究のみでなく、全ての高圧地球科学研究に大きな発展が期待できる。
2. これまでの高圧その場測定では、応力・歪の測定に数分の時間を要しており、ミリ秒スケールの短時間で起こる破壊のプロセスを捉えることはできなかった。SPring-8-IIの実現により輝度が約100倍になることで、測定時間のミリ秒オーダーへの短縮が期待され、断層がすべる一瞬のその場観察を通じた地震発生プロセスや前兆現象に関する理解が大きく飛躍すると期待される。
3. さらに、マグマのような液体からのX線散乱強度は、結晶と比べて数桁低く、高圧高温下でマグマの構造を測定することは非常に困難である。SPring-8-IIでの輝度の大幅向上により、マグマのような液体やガラスなどの非晶質物質の構造研究が大きく飛躍すると期待され、地球内部環境におけるマグマの状態の理解が進むと期待される。

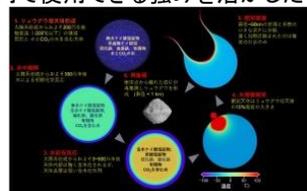
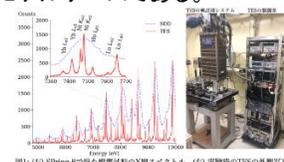


環境物質科学分野の現状と課題

- [1]当該分野にかかわる科学技術分野、産業分野、社会における現状と将来展望:** 既成概念に捕らわれずに科学研究を遂行し、地球環境を守るのは人類の使命である。地球表層から宙(そら=太陽系)に至るまでの物質循環の全容を解明し、さらには人間社会への還元を視野に入れた分野横断型、循環型の新しい物質科学の展開は現在の急務である。
- [2]現状から将来展望に向けて進歩するために必要な知見、技術などの課題:** 我々の命題は環境物質の解明である。対象はこれまで精密測定が困難であった試料、多元素からなり複雑な3次元構造を持つ機能性物質、絶縁体、粘土鉱物、生態親和性のあるソフトマター材料等の“ウェット”な試料である。そのためには高エネルギー分解能で元素ごとに化学状態を解析し、ナノレベルで3次元的な詳細構造を調べることが必要で、試料ごとに最適なX線のエネルギー・サイズ・強度を選択することが不可欠である。
- [3]課題解決に対するSPring-8利用研究の貢献の概要:** 環境物質の研究では、同一施設内で硬X線と軟X線の両方を使って分析する必要があるため、両ビームラインにおいて高エネルギー分解能蛍光検出(HERFD)-XANESの提案を積極的に行ってきた。硬X線ビームラインでは宇宙用のTESで検証実験を行い、リュウグウの粘土鉱物の新物性と新機能を発見した。一方、軟X線ビームラインでは、走査型および結像型の顕微鏡利用の有用性と、絶縁体及びウェットな試料に対するの差動排気システムの有効性を示した。また、ビーム強度やエネルギー分解能、時間プロファイルなどのビーム特性の刷新と併せて検出器の高度化も実現できれば、測定の対象を大幅に拡大できること、照射ダメージを避けるためには高速スタック法と多次元高速解析の同時可視化が必須である事も明示した。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

先端X線計測XAFSを軟X線と硬X線の両光源を用いて行い、はやぶさ2計画の対象となったリュウグウの母天体の形成環境や水質変成に関する世界初の成果を得た。これは、SPring-8ならではの優れた光源強度、エネルギー分解能、ビームサイズとビーム安定性、さらには軟X線・硬X線の両光源を同一施設内で使用できる強みを活かした一つのモデルケースである。



(C) Univ. of Tokyo

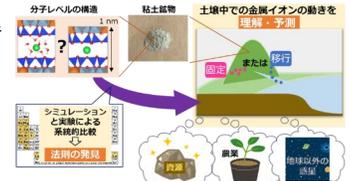
環境物質科学の次なる新境地を開くためには、ビームサイズ、強度、エネルギー分解能等の刷新と、検出器の高性能化、測定環境や手法の高度化と多様化が不可欠である。

SPring-8-II実現による未来像

SPring-8-IIの1桁程度細かいサイズのX線、100倍の高強度、高エネルギー分解能、200 keV迄の高いエネルギーが左欄の課題を解決する。

本手法は全ての環境物質を対象として適用・応用可能な汎用性が期待され、波及効果も大きい。マサ土や石灰炭などの未利用の資源や産廃を用いた循環型の物質・材料創生の構想も本研究から編み出された。

多様性の高い多数のビームラインにおいて、硬・軟両方の強力X線光源を備える
 SPring-8-IIが実現されれば、環境科学をベースとした科学と産業基盤の相補的な技術・知識の融合と新展開が期待される。



(C) Univ. of Tokyo

インフラ・都市・建築・交通分野

| 分野 | 提案 | 研究会 | 提案者・提案代表者 | スライド番号 |
|------------------------|---------------------------|-----------------|------------|--------|
| インフラ 都市 建築 交通 | 更なる高強度・高延性実現のための新たな組織制御戦略 | 構造物性研究会 | 朴明験(京都大学) | 12 |
| | 優れた強度と延性を有する究極の構造材料の実現へ | 残留応力と強度評価研究会 | 吉田周平(京都大学) | 13 |
| | 相変態・変形・破壊現象の4Dイメージング | 高分解能X線イメージング研究会 | 高桑脩(九州大学) | 14 |

SPring-8-II実現による構造用金属材料分野の未来像

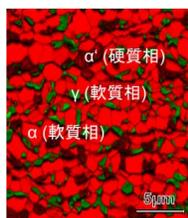
～更なる高強度・高延性実現のための新たな組織制御戦略～

構造用金属材料分野の現状と課題

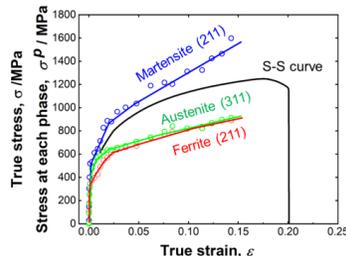
乗り物や建物といった構造物に用いられる構造用金属材料は、社会インフラを物理的に支え、事故や災害から人々の生活の安全を守る重要な材料である。構造用金属材料では、大きな荷重にも耐えうる高い強度と、加工性や、事故等の衝撃吸収性を担保する高い延性の2つが要求される。しかし一般的に材料には強度が上昇すると延性が低下するトレードオフ関係があり、それらを両立することは非常に困難である。これまでに強度と延性を両立した特異な合金等がいくつか見出されているが、そのような材料の設計は未だ試行錯誤に依存しているのが現状である。我々は強度と延性を両立した究極の金属材料を効率的に設計するための基礎的な理論・指針を得るため、種々の金属材料の変形中における時間分解その場放射光X線回折測定を行い、その変形メカニズムを解明してきた。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

軟質相と硬質相からなる複相組織を有する高強度鋼において各相の力学的役割を定量的に評価することで強度向上機構を解明しつつある。SPring-8 BL13XUにおいて、板型のバルク試料に引張変形を施しながら、試料を透過した回折X線を検出し、回折プロファイルの時間変化(時間分解能:1s)を測定した。これは従来の低輝度のX線では実現不能な時間分解能である。得られた回折プロファイルに対し、物理モデルによるフィッティング計算を行うことで、材料内で変形に伴い生じた格子欠陥の分布をを推定することが可能である。これにより、硬質相と軟質相の相間の応力が大きくことなり、それが材料の加工硬化能力に大きく影響を与えることが明らかになった。



■ Ferrite (α) ■ Martensite (α')
 ■ Retained austenite (γ)



SPring-8-II実現による未来像

(1) 透過可能な試料厚みの増大による回折プロファイルの統計的信頼性の向上

これまでに我々が行ってきた実験では、X線を透過させるために試料の厚みを0.5mm(鉄鋼材料の場合)に制限する必要があった。しかしながら、X線が貫通する体積内に存在する回折条件を満たした結晶粒の数は非常に限られているため、得られる結果の統計的信頼性が低いという問題があった。SPring-8-IIでは、X線の輝度が向上するため透過可能な試料の厚みが増大すると考えられる。これにより、より多くの結晶粒から回折シグナルを得ることができ、得られる回折プロファイルの統計的信頼性を大幅に向上させることが可能となると考えられる。

(2) 透過能の向上により重元素試料の取り扱いが可能に

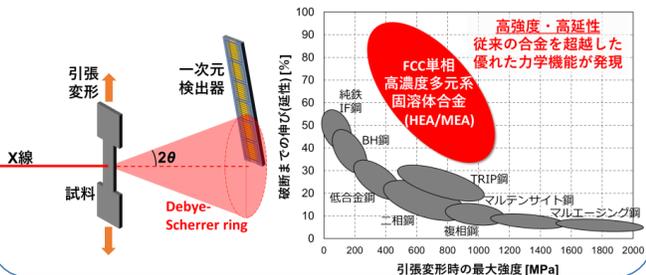
SPring-8では原子量の大きな元素を含む物質から透過X線を得るためには、試料の厚みを非常に薄くする必要があった。SPring-8-IIではX線の輝度の増大や使用可能なエネルギー範囲が広がることで、重元素を含む試料も容易に透過させることが可能となることが期待される。これにより、例えば重元素を含むものが多いチタン合金の変形機構を同様な変形中の時間分解その場放射光X線回折測定により解明することが可能となると考えられる。

構造用金属材料分野の現状と課題

乗り物や建物といった構造物に用いられる構造用金属材料は、社会インフラを物理的に支え、事故や災害から人々の生活の安全を守る重要な材料である。構造用金属材料では、大きな荷重にも耐えうる高い強度と、加工性や、事故等の衝撃吸収性を担保する高い延性の2つが要求される。しかし一般的に材料には強度が上昇すると延性が低下するトレードオフ関係があり、それらを両立することは非常に困難である。これまでに強度と延性を両立した特異な合金等がいくつか見出されているが、そのような材料の設計は未だ試行錯誤に依存しているのが現状である。我々は強度と延性を両立した究極の金属材料を効率的に設計するための基礎的な理論・指針を得るため、種々の金属材料の変形中における時間分解その場放射光X線回折測定を行い、その変形メカニズムを解明してきた。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

代表的な成果の例として、種々の合金元素を高濃度で固溶した高濃度多元系固溶体合金・ハイエントロピー合金の結果を紹介する。SPring-8 BL13XUにおいて、板型のバルク試料に引張変形を施しながら、試料を透過した回折X線を検出し、回折プロファイルの時間変化(時間分解能:1s)を測定した。これは従来の低輝度のX線では実現不能な時間分解能である。得られた回折プロファイルに対し、物理モデルによるフィッティング計算を行うことで、材料内で変形に伴い生じた格子欠陥の分布を推定することが可能である。これにより、ハイエントロピー合金では変形中に多量の格子欠陥を蓄積することで従来の材料に比べて非常に優れた強度・延性が実現することが判明した。



SPring-8-II実現による未来像

(1) 透過可能な試料厚みの増大による回折プロファイルの統計的信頼性の向上

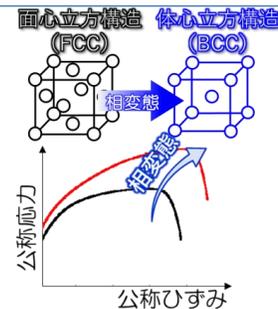
これまでに我々がやってきた実験では、X線を透過させるために試料の厚みを0.5mm(鉄鋼材料の場合)に制限する必要があった。しかしながら、X線が貫通する体積内に存在する回折条件を満たした結晶粒の数は非常に限られているため、得られる結果の統計的信頼性が低いという問題があった。SPring-8-IIでは、X線の輝度が向上するため透過可能な試料の厚みが増大すると考えられる。これにより、より多くの結晶粒から回折信号を得ることができ、得られる回折プロファイルの統計的信頼性を大幅に向上させることが可能となると考えられる。

(2) 透過能の向上により重元素試料の取り扱いが可能に

SPring-8では原子量の大きな元素を含む物質から透過X線を得るためには、試料の厚みを非常に薄くする必要があった。SPring-8-IIではX線の輝度の増大や使用可能なエネルギー範囲が広がることで、重元素を含む試料も容易に透過させることが可能となることが期待される。これにより、例えば重元素を含むものが多いチタン合金の変形機構を同様な変形中の時間分解その場放射光X線回折測定により解明することが可能となると考えられる。

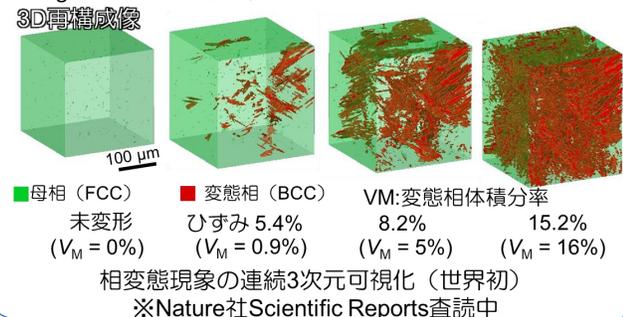
鉄鋼研究分野の現状と課題

我々の社会を支えるFe(鉄)基合金は変形荷重により“相変態(右図)”を起こす。この相変態により強度-延性バランスが向上する(Positive効果)一方で、水素が内部に存在するとそれが極端に低下する(Negative効果)。この両効果の発現メカニズムを理解して、Positive、Negative効果を最大化・最小化し革新的な鉄鋼材料を創製するためには、現状のアプローチのような“事後”の断続的な2次元観察ではなく、各ステージ(相変態→変形→破壊)を“その場”で追跡・解析し「いつ」「どこで」「どのように」起こるか、を把握する必要がある。SPring-8(BL20XU)では高分解能な4D(3D+時間軸)イメージングが可能であり、最新の研究成果では、母相(FCC構造)から新たに生成する変態相(BCC構造)の連続検出に世界で初めて成功した。本技術をさらに高めることで、上記課題の解決につながる。



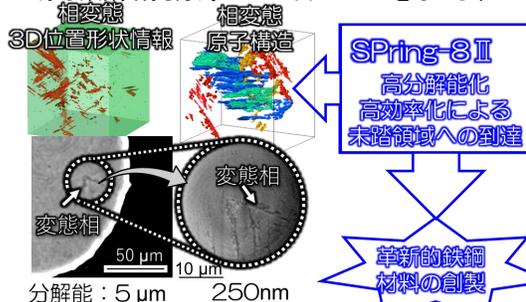
SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

鉄鋼はX線を透過させづらいため、高分解能での内部観察のためには、非常に高輝度なX線を利用する必要があり、SPring-8でしか不可能である。下図にFe-Cr-Ni合金の変形による相変態の連続3次元像を示す。各ひずみ段階にて母相(FCC構造)と変態相(BCC構造)にコントラストが生じており、これらを識別できることがわかる。さらにBL20XUは長尺ビームラインを備えており、超高空間分解能(≈200nm)で撮像が可能である。この成果は、SPring-8のBL20XUでしか得られない唯一無二のものである。



SPring-8-II実現による未来像

鉄鋼の内部情報を取得するには、高輝度X線であることが大前提であり、NanoTerasuは対象外である。これまでのSPring-8では高空間分解能でのCT撮像が可能であるものの、撮像効率の面で課題が残る。また、局所領域の原子構造を得るには、細く絞った高輝度X線による効率化、高分解能化が必須である。これらが実現できれば、より詳細な相変態→変形→破壊現象を捉えることができ、社会インフラを支える最重要研究分野の一つである鉄鋼研究分野にブレイクスルーをもたらすといえる。



材料・ナノテクノロジー・製造・プロセス分野

| 分野 | 提案 | 研究会 | 提案者・提案代表者 | スライド番号 |
|--------------------------|-------------------------------|---|--------------------------|--------|
| 材料 ナノテク 製造 プロセス | X線分光による材料開発の国際競争力維持 | X線分光利用研究会 | 朝倉博行(近畿大学) 内山智貴(東北大学) | 16 |
| | 構造柔軟な多孔性材料の科学 | 構造物性研究会 | 北川進、大竹研一(京都大学) | 17 |
| | 原子レベルの運動性から物質特性・生命現象を理解 | 核共鳴散乱研究会 | 齋藤真器名(東北大学) | 18 |
| | 世界最高分解能で電子の動きを観る | 構造物性研究会 | 鬼頭俊介(東京大学) | 19 |
| | 多次元電子分光イメージングで開拓する物質科学のフロンティア | 固体分光研究会 | 関山明(大阪大学) | 20 |
| | 究極の3D顕微計測が解き明かす先進材料の機能 | コヒーレント構造科学研究会 データ駆動科学研究会 高圧物質科学研究会 不規則系機能性材料研究会 理論研究会 | 綿貫徹(量子科学技術研究開発機構) | 21 |
| | コンプトン散乱による新機能物質の電子軌道状態の可視化 | コンプトン散乱研究会 | 小林義彦(東京医科大学) | 22 |
| | コンプトン散乱による基礎科学と産業利用の両立 | コンプトン散乱研究会 | 小泉昭久(兵庫県立大学) | 23 |

スライド16

SPring-8-II実現によるX線分光の未来像 ~X線分光による材料開発の国際競争力維持~

X線分光分野の現状と課題

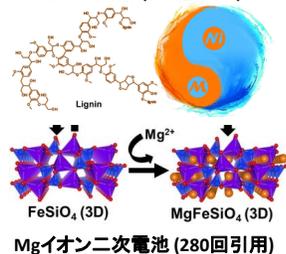
1. SPring-8におけるX線分光を用いた研究開発により、二次電池、パワー半導体、環境触媒など様々な実用材料が実現されてきた。X線分光に関連する論文は年間平均250報におよび、今後も学術と産業の両方の成果創出が期待される。
2. 先端材料はわずかな条件の違いで性能が大きく変化するため、原子レベルからデバイスレベルまで様々なスケールでの分析が不可欠である。しかし、SPring-8で微小な違いを明らかにする測定には1日以上を要したり、必要な空間分解能を実現できない。
3. 米国および欧州の主要な放射光施設NSLS-IIやESRF-EBSでは高度化により、X線分光とイメージングを組み合わせた電子構造の微小な違いやナノスケールの不均一性を得る手法が実現されている。SPring-8-IIでは材料が実質的に機能するデバイスの実物を長時間で追跡できるようになり、諸外国を追従、追い抜くことで国際競争力の維持を目指す。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

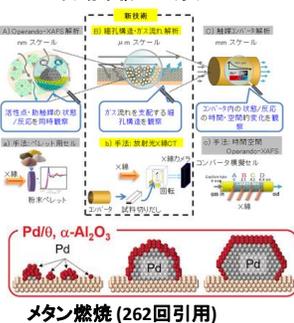
放射光によるX線分光を用いた研究・開発が豊かな暮らしを実現してきた。

1. バイオマス分解に有効な合金触媒の構造解析
2. マグネシウムイオン次世代二次電池
3. リチウムイオン電池充放電のリアルタイム追跡
4. メタン燃焼触媒の材料分析
5. 排ガス浄化触媒の開発

バイオマス分解 (396回引用)

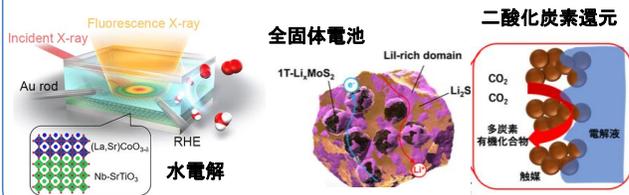


自動車排ガス浄化



SPring-8-II実現による未来像

SPring-8-IIの高輝度化は測定時間を1/10, 1/100に短縮し、空間分解能を10倍、100倍に向上させる。X線分光とイメージングを組み合わせることで、水電解による水素製造、全固体電池、先端半導体材料、二酸化炭素還元触媒などの開発における素材レベルからデバイスまで、様々な段階での分析を可能にし、持続可能で豊かな暮らしを実現する。基盤技術であるX線分光測定が国際競争力を取り戻すことで、わが国の科学技術が世界トップレベルに返り咲く。



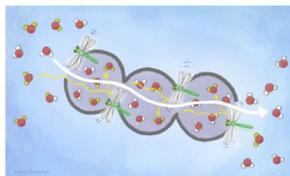
SPring-8-II実現による吸着材料分野の未来像 ～構造柔軟な多孔性材料の科学～

吸着材料分野の現状と課題

1. 化学工業における分離プロセスは、化学工業における全エネルギー使用量の約40%を占め、大きなエネルギー消費を伴っている。産業全体（100%）で例えば12-14%を使用しており、今後も増えると考えられている。
2. 分子サイズや化学的な性質の似た物質同士を分離する技術の一つとして、多孔性材料を用いた分離技術に注目が集まっている。そこで狙った化学物質をエネルギー効率良く選択的に吸着分離をする多孔性材料の開発が待ち望まれている。中でも、多彩な設計性と構造柔軟性をもった多孔性材料として、フレキシブル多孔性配位高分子(PCP/MOF)に注目が集まっている。フレキシブルPCP/MOFは、高い物質認識能を示すが、そうした性質の制御方法が未だに確立されていない。
3. この課題に対して、SPring-8を利用した高精度なその場測定により、フレキシブルPCP/MOFが選択的に物質を吸着・脱着する過程や、その際の機構を明らかにすることが出来るため、より優れた多孔性材料開発へと推進することが可能となる。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

1. 分子の拡散を制御する構造デザインにより、 H_2O と D_2O を分離するMOFを史上初めて開発。SPring-8を用いて細孔中での水分子の吸着構造を特定し、その機構解明に役立てた。
2. 様々なガス分子のうち二酸化炭素分子のみに対し吸着挙動を示す多孔性材料の開発に成功。SPring-8を用いてその吸着機構を解明した。



Nature 611, 289 (2022)



Nature Commun. 14, 4245 (2023)

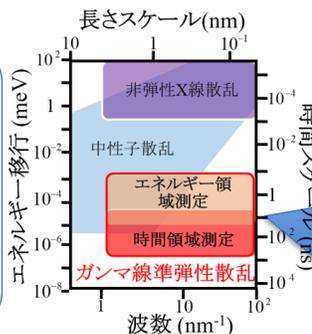
SPring-8-II実現による未来像

1. これまで結晶サイズの小さな試料を用いた単結晶回折のその場測定では、測定に大きな時間を費やしていたが、SPring-8-IIの高輝度化により短時間測定が可能となる。そのため、温度や圧力などの条件を振った測定が可能となり、吸着の機構解明に向けてより詳細な情報が得られるようになる。
2. また高輝度化により、高時間分解能が得られることとなるため、より高精度に吸着の過程を追うことが可能になり、より優れた多孔性材料開発にむけた知見を得ることが容易になる。
3. 上記の実現により、より高機能なPCP/MOFの開発を促進でき、持続可能な社会の実現に資する物質開発を加速することが出来る。
4. 物質の動的状態、過渡的状态、動的機能の構造と機能が追求できて新たなサイエンスと技術が創造できる。

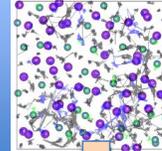
SPring-8-II実現によるナノ秒原子・分子ダイナミクス分野の未来像 ～原子レベルの運動性から物質特性・生命現象を理解～

ナノ秒構造ダイナミクス研究分野の現状と課題

1. ナノ秒近辺の原子・分子運動は、多くの産業材料の特性や生体機能の起源である。故に**原子・分子運動を測定し、原子レベルで物質特性を理解できれば、材料開発・生命現象理解が飛躍的に進歩する。**
2. しかし、ナノ秒近辺では、放射光を用いた原子・分子ダイナミクス測定に大きな技術的な制限があり、長い間実現していなかった。
3. **我々は、右図に示すナノ秒を含む4桁の時間域をカバーする2つの先進的放射光ガンマ線準弾性散乱法(エネルギー、時間領域測定法)を開発し、応用することで基礎・産業研究を推進している。1-3)**



例:ガラス中のナノ秒ダイナミクス研究(原子ダイナミクス実験で妥当化された原子運動の計算結果)



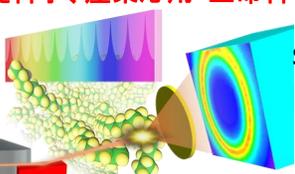
ガラスの耐衝撃性の原子レベルの起源の理解ができた

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

1. ゴム、電池、金属ガラス、液晶、脂質膜など**多様な産業材料や生体モデル系**で、原子・分子運動を100ps～数100nsの広い時間領域で内部まで非破壊で調べることで、右上図のガラスの耐衝撃性の例の様に、物質特性の起源が理解できている。
2. SPring-8の硬X線領域における高いフラックス、バンチ構造と高輝度、安定性を用いた開発により現在世界でSPring-8のみで本研究が実現している。
3. 中性子源を用いると試料に大きな制約がある(同位体置換が必要)など、**他の施設や手法では実現できない、幅広い基礎科学、産業応用・生命科学的研究が可能。**

2次元検出器CITIUSを用いた先端エネルギー領域測定法のイメージ図

- 1)M.Saito, et al, PRL (2012),
- 2)M.Nagao et al, PRL (2021),
- 3)M.Saito, et al, accepted in PRL



SPring-8-II実現による未来像

1. SPring-8IIの**安定した放射光**により、タイヤ等の材料特性の発現機構を原子・分子レベルから理解し、材料開発を加速する。また、100ns以上のバンチ間隔を持つバンチモードの活用で、100psから数100nsの非常に広帯域な観測が可能となる。
2. SPring-8では10 μ mの集光により、ダイナミクスのイメージングがなされている。SPring-8IIにより**ナノ空間分解能**が実現することで、産業・生体系の**超高分解能の動的なイメージング**が可能となる。
3. 中規模光源NanoTerasuでは、硬X線領域でのフラックスが相対的に低く、本研究は実現できない。

ナノ集光



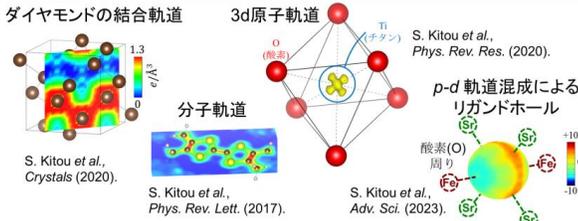
ガラスや生体系のダイナミクスのナノ分解能の動的なイメージングが初めて可能に!
⇒物質特性を原子ダイナミクス実験から理解。

高エネルギーX線回折分野の現状と課題

1. X線回折は物質の結晶構造を調べる最も強力な分析ツールとして世界で広く活用されている。さらに、SPring-8の高エネルギーX線を用いることで、結晶構造を超えて、原子を構成する電子の空間分布である軌道を、sub-Å(サブオングストローム: 10億分の1センチ)オーダーの空間分解能で可視化する実験手法を確立した。
2. 物質設計や材料開発には、物質中の電子が外場(電場、磁場、光など)にどのように応答するかを理解することが重要であるが、現状、可視化できる電子軌道の情報は“静的”な平衡状態かつ時間・空間平均に限られる。
3. SPring-8-IIの高輝度・高エネルギーX線を最大限に活かすことで、外場下における“動的”な非平衡状態の電子軌道観測及び、その時分割測定を実現する。さらに、物質の実空間観測における世界最高空間分解能(約0.15 Å)を目指す。

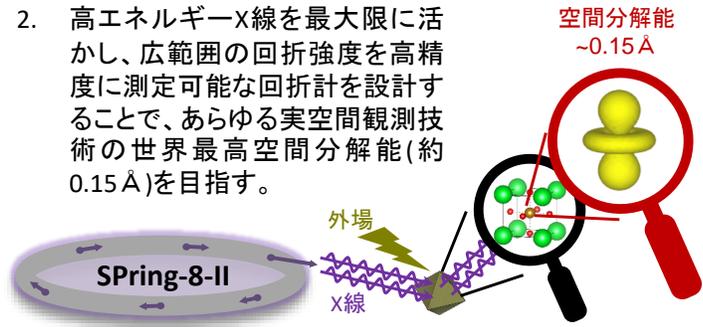
SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

1. SPring-8の高品質・高輝度・高エネルギーX線を最大限に活かすことで、原子位置やその周期を特定する結晶構造決定手法として広く認識され利用されてきたX線回折法を、物性を支配する電子の軌道を実空間で可視化する手法に発展させた。
2. あらゆる結晶性物質に適用でき、材料開発や計算科学への情報提供が可能となった。



SPring-8-II実現による未来像

1. SPring-8-IIへのアップグレードによって、光の輝度が約100倍に向上する。さらに、高エネルギー領域のX線が非常に安定して利用可能となる。これによって、電子の静的な空間分布だけでなく、外場(電場、磁場、光など)に対する電子の動的な応答や変化をオペランド観測できるようにする。
2. 高エネルギーX線を最大限に活かし、広範囲の回折強度を高精度に測定可能な回折計を設計することで、あらゆる実空間観測技術の世界最高空間分解能(約0.15 Å)を目指す。



固体分光分野の現状と課題

サステナブル情報化社会を実現するために、これまでの半導体テクノロジーの限界を打ち破る省エネルギー一次世代機能性材料の開発が必要不可欠です。この社会的課題を解決するためには、物質中の電子が持つ電荷以外の磁氣的性質や軌道運動の活用が鍵となります。これらの性質を精密に測定するため、SPring-8が生み出す高輝度X線の光エネルギーと偏光を自在に制御する技術を用いた分光技術が開発されましたが、全ての性質を一度に調べることは困難であり、さらなる研究の加速化が必要不可欠でした。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

SPring-8の円偏光とエネルギー可変特性を利用して、電子の磁氣的性質を利用したスピントロニクス材料の磁気・電子状態を明らかにしました。更に、直線偏光を自在に制御することにより、超伝導になる電子のカチを視ることに成功しました。

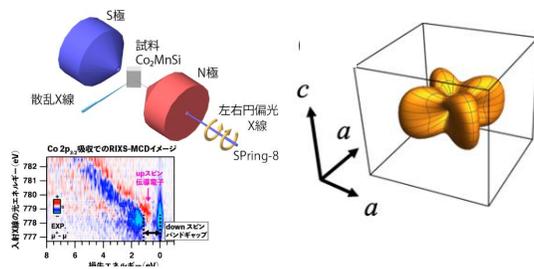
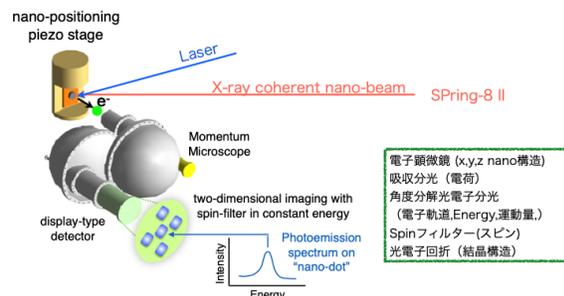


図1 スピントロニクス材料Co₂MnSiのスピンの電子状態

図2 希土類超伝導体CeNi₂Ge₂のCe 4f電荷分布

SPring-8-II実現による未来像

究極のコヒーレンスと高エミッタンスの活用により、磁氣的特性を担う電子のspin成分、軌道運動、電荷の性質に加え、物質の構造情報まで一挙に可視化できます。また、大型リング光源の特徴であるパルス特性を利用すれば、レーザー光や電圧に対する物質応答のダイナミクスも観測できます。このような多次元電子分光イメージングにより、これまで数年を必要とした実験が数日で完了するため、新しい材料開発研究を大幅に加速することができます。



顕微計測分野の現状と課題

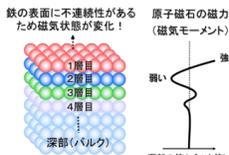
1. 電子デバイスの開発ではナノレベルの微細化や3次元集積化の世界的な競争が続いている。さらに、今後のスマート社会の実現に向け画期的な性能を持つスピントロニクスデバイスや量子センサの開発が進められている。
2. その進捗には、デバイスのスケールに対応した顕微計測技術の整備が強く求められている。特に、電子顕微鏡では不可能な非破壊でのデバイス内部の顕微計測技術、さらには局所磁性や局所歪みを分析できる技術は大きなメリットをもたらす。
3. SPring-8においては、透過力の強い硬X線を活用して、一原子層単位の深さ分解能を持つ局所磁性探査を非破壊で可能とする放射光メスbauer分光技術や、微結晶粒子内部の歪みを非破壊で3次元的に可視化できるブラッグコヒーレント回折イメージング技術といった、先端的非破壊顕微計測技術の開発がされている。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

非破壊 局所磁性・ナノ構造分析

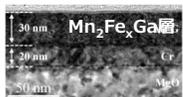
原子1層毎の磁性探査 (放射光メスbauer分光)

- SPring-8の高輝度X線から超単色γ線ビームを生成し活用
- 鉄の磁石の「表面の謎」を解明



鉄の磁力は、表面から原子1層ごとに波打つように変化する。

QST三井他、PRL 2020 Editors' Suggestion
令和5年度文部科学大臣表彰

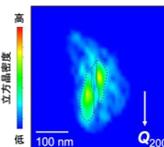


QST Bentley他、Phys. Rev. Materials 2023

- 高速メモリー候補の磁性薄膜開発にも活用

微結晶内部組織の3D可視化 (ブラッグコヒーレント回折イメージング)

- SPring-8放射光のコヒーレント性を活用
- 負熱膨張材料開発に貢献



東工大西久保他、Chem. Mater. 2023
日経新聞電子版2023.1.27

最大の体積減少を示す負熱膨張物質を開発 - 材料組織観察の結果を用いた物質設計 -

SPring-8-II実現による未来像

局所磁性分析

ナノレベル3次元可視化が実現

- SPring-8-IIによって、超単色γ線ナノビームが使用可能に (現状の10ミクロンから数百nm径へ)
- 3次元可視化で、3次元微細集積デバイスの局所磁性分析が可能に
- 量子ワイヤーや量子ドット、メゾスコピック磁性体など、量子効果が顕在化する先進材料の解析にも適用可能

ナノ構造分析

超高速化が実現

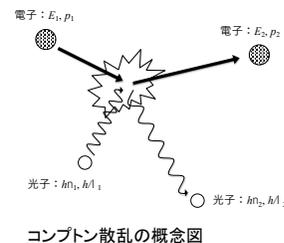
- SPring-8-IIによって、微結晶一粒子の3D可視化計測時間が数分から数秒に短縮
- 機能性材料を構成する微結晶の内部組織 (歪み分布等) の分析に革新、実使用環境下での時分割分析も格段に進展

非破壊性

- 高エネルギーX線利用に特色のあるSPring-8-IIが有利

材料科学分野の現状と課題

1. **再生可能エネルギー開発やエネルギー消費低減**などを実現するには、燃料電池触媒・熱電物質・超伝導体・高性能磁石など、**新しい機能材料物質の開発が急務**である。これらの材料物質は主に、**希土類や遷移金属の化合物**である。物質の諸性質・機能は「物質中の**電子軌道状態**」がそのすべてを決定するので、**新しい機能物質開発には、物質中の電子軌道状態を詳細に観測し、その特性を解明**することが不可欠である。
2. 我々は**コンプトン散乱**による**電子運動量密度分布イメージング**を用いた、物質中の**電子軌道状態の研究**を行っている。コンプトン散乱とは、物質にX線を入射し、入射X線の光子が物質中電子と衝突して跳ね返ってくるX線光子を観測することで物質中**電子軌道状態を可視化**する手法である。また、磁場中での測定を行うことで、磁石の性質 (磁性) を担う電子軌道状態のみを取り出すことができる (**磁気コンプトン散乱**)。
3. これまでに、新しい燃料電池触媒材料として期待されるペロブスカイトコバルト酸化物において、**コンプトン散乱を用いた、温度変化にともなうコバルト電子軌道状態の可視化**に成功している。



コンプトン散乱の概念図

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

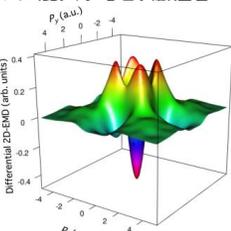
1. (1) 新しい燃料電池触媒材料として期待されるペロブスカイトコバルト酸化物LaCoO3は、-170℃以下の低温では磁性を持たないが、温度上昇とともに磁性を発生する。我々は磁性の原因となる**コバルト電子軌道状態の温度変化をコンプトン散乱を用いて可視化**することに成功した。さらに電子軌道状態の解析から、**コバルト電子軌道は酸素の電子軌道と混成し、分子軌道を形成している**ことを明らかにした [1, 2]。

[1] "Spin-Crossover Phenomena in Perovskite Cobaltites: Their History and Current Status of the Research", Y. Kobayashi他, in "Spin-Crossover Cobaltite - Review and Outlook" (2021), Springer.
 [2] Y. Kobayashi他: JPSJ **84**, 114706 (2015), and PRB **98**, 115154 (2018).

- (2) LaCoO3に磁性を持たないSrやBaをわずかに混入すると、磁性を発生する。我々は**磁気コンプトン散乱**を用いて、コバルト電子の**軌道運動が磁性発生に大きく寄与している**ことを明らかにした [3]。

[3] Y. Kobayashi他: Crystals **11** 577-1-7 (2021).

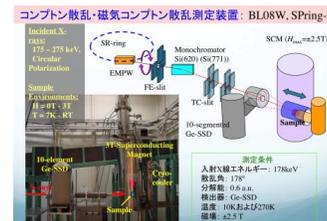
2. 以上の成果はSpring-8 BL08Wによるものである。コンプトン散乱には高エネルギー (約100keV)のX線が必要のため、**Spring-8の利用が絶対不可欠**である。



コバルト電子軌道状態の変化

SPring-8-II実現による未来像

1. コンプトン散乱から得られる**電子運動量密度分布イメージング**からは、**電子軌道状態の空間分布の特徴** (電子軌道の広がり・周囲の原子との化学結合) を**視覚的・直感的**に理解できる。また、高エネルギーX線を使用することから試料の表面状態に神経質に気を使わなくても良く、試料の扱いが比較的容易で、他分野からも参入し易い。低温/高温・高磁場・高圧力下など極限状態での実験も可能である。以上のようにコンプトン散乱は光電子分光/X線吸収発光スペクトルなどの電子軌道状態測定手法と異なる**優位性**をもつ。SPring-8の放射光による**コンプトン散乱測定を推進**していくことで**新機能物質開発**に大きく貢献していけることが期待できる。
2. 従来のコンプトン散乱測定は他の分光手法より分解能が悪いこと・長時間の積算が必要なが問題であった。**SPring-8-IIの高輝度・高集光性・安定性の強化**により、**コンプトン散乱測定を従来より短時間で高精度かつ安定して行うことが可能になる**。これにより、様々な**希土類・遷移金属化合物**において、**コンプトン散乱による電子軌道状態の可視化**を用いた**新機能物質開発**をこれまで以上に推進していくことが期待できる。



コンプトン散乱測定装置 (Spring-8 BL08W)

コンプトン散乱分野の現状と課題

1. 科学技術分野：他の測定手法では観測が難しい測定条件下で、電子構造や軌道状態の測定を行っており、SPring-8IIでは、更なる高度化を目指す。
産業分野：(磁気)コンプトン散乱を用いたイメージング測定の開発を行っている。
2. 「より高エネルギー・高強度の放射光X線の利用」、「高エネルギー円偏光X線の生成」、「高エネルギー分解能を有する2次元検出器の開発」が必要であり、その実現により、(磁気)コンプトン散乱測定を用いた研究の発展が期待できる
3. SPring-8の100 keVを越える高強度X線や円偏光X線を利用した(磁気)コンプトン散乱測定により、他の実験手法では観測できなかった電子構造や軌道状態を明らかにしている。また、応用実験として、高エネルギー放射光X線を利用した、大容量物質の非破壊イメージング測定を推進している。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

高分解能コンプトン散乱を用いた研究では、100keV以上の高エネルギー・高強度X線を利用して、隠れた秩序転移というウラン化合物が示す物性について、他の実験手法では観測できていない電子構造の変化を観測している。

174keVの高エネルギー円偏光X線による磁気コンプトン散乱を用いた研究では、巨大磁気抵抗効果を示すマンガン酸化物において、その性質を決める要素として、マンガンの各電子軌道が電子によりどの程度占有されているかを、実験的に決定している。

CT測定とは異なる実験手法として、コンプトン散乱を利用したイメージング測定の開発を行っている。100keV以上の高エネルギー・高強度X線を利用することにより、試料を細かく加工することなく、大容量試料の内部構造を観測することが可能になる。

SPring-8-II実現による未来像

物性物理学では、金属的な性質を示す物質における基礎的な情報として電子構造(フェルミ面)を測定したいという要望が高い。SPring-8IIの高エネルギー・高輝度のX線を利用し、高分解能コンプトン散乱測定における運動量分解能を向上させることができれば、より詳細なフェルミ面構造を測定可能となるであろう。他の測定手法に比べ、この測定では、温度や磁場、圧力などの測定環境に制約がなく、電子構造の全体像を観測できることから、今後の活用が期待される。

また、高エネルギー円偏光X線を生成できれば、磁気コンプトン散乱を利用した磁気イメージング測定による内部磁区構造の観測が可能になる。

このような実験には、高エネルギー・高強度のX線が必要となるため、中規模光源の施設ではなく、大型放射光光源の利用が必要不可欠である。

エネルギー・資源、電子・通信・情報分野

| 分野 | 提案 | 研究会 | 提案者・提案代表者 | スライド番号 |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------|--------|
| エネルギー・資源 電子 通信 情報 | 社会を支え世界を変える半導体デバイス | X線トポグラフィ研究会 | 志村考功(早稲田大学) | 25 |
| | 半導体のキャリアドーピングを原子レベルで可視化 | 原子分解能ホログラフィー研究会 | 松下智裕(奈良先端科学技術大学院大学) | 26 |
| | 半導体-絶縁膜界面欠陥を原子レベルで可視化 | 原子分解能ホログラフィー研究会 | 松下智裕(奈良先端科学技術大学院大学) | 27 |
| | 革新的な熱電材料の開発 | 原子分解能ホログラフィー研究会 | 木村耕治(名古屋工業大学) | 28 |
| | 鉛フリー誘電体の開発 | 原子分解能ホログラフィー研究会 | 林好一(名古屋工業大学) | 29 |
| | 実電池内部のイオン分布の非破壊解析 | コンプトン散乱研究会 | 鈴木宏輔(群馬大学) | 30 |
| | 定量分析可能な非破壊断面画像計測 | コンプトン散乱研究会 | 鈴木宏輔(群馬大学) | 31 |
| | 高輝度放射光X線と高強度低速負ミュオンの両方を用いた非破壊深さ分解技術 | 放射光・ミュオン連携科学研究会 | | 32 |

日本の半導体分野の現状と課題

進化し続ける半導体デバイスは、人々の社会生活を変革してきた。環境、エネルギー、人工知能をはじめ、将来にわたって社会を支え、世界の進化を促す重要な技術であることは疑いようがない。しかしながら、日本の半導体産業は1988年には世界シェアの50%を占め、トップ10に6社が入るほどだったが、現在ではシェアは10%を切り、トップ10にはかろうじて1社が入るかという状況である。米中の貿易摩擦の激化やコロナ禍によるサプライチェーンの寸断により、半導体デバイスの入手が困難となり、新車の納入に半年から1年かかるという状況は記憶に新しい。現在、日本政府はこのような状況を変えるため、既存の半導体産業の支援に加え、先端半導体の日本での復活を目指している。しかし、先端半導体産業を将来にわたって日本に根付かせることは容易ではない。日本の産官学の総力を挙げて取り組む必要がある。SPring-8の材料評価技術は、半導体デバイスの課題の原因を明らかにし、その開発を加速することに貢献することは明白である。

放射光を活用したこれまでの成果と貢献

日本の半導体デバイスの世界シェアは10%を切るまで低下したが、シリコンウェーハの世界シェアは依然として50%を超えている。日本のウェーハがなければ、世界の半導体産業は成り立たない。これに大きく貢献したのが、放射光を用いた結晶評価技術(放射光X線トポグラフィ)である。より大きなシリコンウェーハが求められ、大きなシリコン結晶の成長技術の開発競争が進む中で、この評価技術により日本のシリコンウェーハメーカーが先行開発を進めることができた。半導体デバイスの性能は、わずかな結晶品質に左右される。実験室の装置に比べて3桁以上(当時)明るい高輝度の放射光による高感度計測を利用することで、高品質のウェーハを実現した。技術的に先行した企業がさらに新しい技術を形成することにより、現在でも他国の追随を許していない。

SPring-8-II実現による未来像

カーボンニュートラルを目指して機器の省電力化や電気自動車の普及が求められる中、これらの電力の変換と制御を担う半導体デバイスには、シリコンに替わりSiC、GaN、Ga₂O₃などの新しい半導体ウェーハが必要とされている。これらの材料に関する研究開発は、日本が先駆的に進めてきた。現在、これらの半導体ウェーハやデバイスの開発や量産化競争が世界規模で激化している。また、シリコンを用いた先端半導体技術にも、チップレットという新しい技術が導入され始めている。これは、デバイスを形成したウェーハを薄層化し貼り合わせることで性能向上を図る手法である。積層化後の結晶品質はデバイス特性を大きく左右する。SPring-8-IIの高エネルギー高輝度光を用いた高感度・高空間分解能かつ高スループットなX線トポグラフィ測定システムを提供することにより、日本の半導体産業の持続的な発展に貢献できる。

SPring-8-II実現による半導体分野の未来像

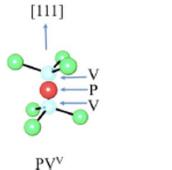
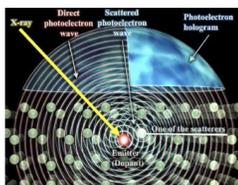
～半導体のキャリアドーピングを原子レベルで可視化～

半導体分野の現状と課題

1. 半導体開発にとって、電荷キャリアのドーピング技術の向上が不可欠である。不活性なドーパントを減らし、活性なドーパントを増やすことで、高伝導率化し、半導体からの発熱量を抑えることが重要となっている。
2. 活性なドーパントを増やすには、不活性なドーパントや活性なドーパントの立体的な原子配列を明らかにする必要がある。
3. SPring-8の光電子ホログラフィーが、半導体のドーパントの立体的な原子配列を明らかにし、不活性、活性なドーパントの比率を評価できる方法となっている。
4. 課題として、集光サイズが大きいので、実デバイスの測定ができない。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

1. 高濃度キャリアのn型ダイヤモンドの作成は今まで困難。光電子ホログラフィーにより、不活性な燐(P)原子のドーパントの原子配列を決定し、結晶成長時の原因を突き止めた。Siや、GaN、Ga₂O₃のドーパントについても原子配列を決定した。
2. 上記を達成するには、SPring-8の軟X線領域の高輝度と、偏光制御によって達成されている。



Si: Nano Lett., 17, 7533 (2017).
 Diamond: Nano Lett., 19, 5915 (2019).
 GaN: Appl. Electron. Mater. 4, 4719(2022)
 Ga₂O₃: Nano Lett. 24, 3978(2024)

ダイヤモンド中のPドーパントの原子配列

SPring-8-II実現による未来像

EV車・新幹線のパワーデバイス開発

パワー半導体
 SiC、GaN、Ga₂O₃、ダイヤモンド

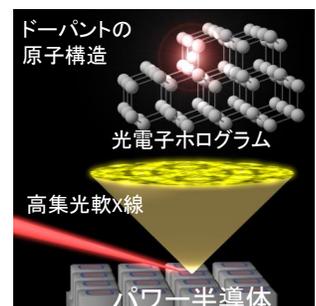
ドーパントの原子配列が性能の鍵

SPring-8-IIの低エミッタンスによる高輝度高集光軟X線

パワーデバイス半導体のドーパントの原子配列を可視化

パワーデバイス半導体の高性能化による高効率・軽量化

CO₂削減へ

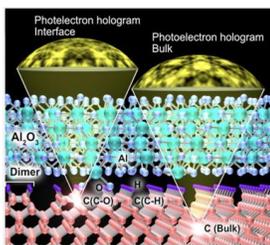


半導体分野の現状と課題

1. 半導体開発にとって、絶縁膜の欠陥を低減することが不可欠である。欠陥を減らすことで、半導体の移動度が向上する。
2. 欠陥の原子配列を明らかにすることで、欠陥低減の対策ができる。
3. 軟X線の光電子ホログラフィーにより、半導体絶縁膜の欠陥が解析できるようになったが、絶縁膜が2nmより厚いと測定できないため、厚い酸化膜を光電子が貫通できる**硬X線**光電子ホログラフィーが望まれる。さらに実デバイスの測定には高輝度ナノ集光が必要となっている。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

1. 軟X線を利用して、ダイヤモンドデバイスの**絶縁膜の界面欠陥**の立体原子配列を解明
これにより、界面欠陥による電子状態への影響が評価できるようになった。
2. 硬X線ホログラフィーにより、7nmの膜厚下の光電子ホログラムが得られることを証明した。
Applied Physics Express 3 (2010) 056701



Nano Lett., 23, 1189 (2023).

SPring-8-II実現による未来像

EV車・新幹線のパワーデバイス開発

パワー半導体
SiC, GaN, Ga₂O₃, ダイヤモンド

SPring-8-IIの**低エミッタンスによる高輝度ナノ集光硬X線** +
SPring-8の**硬X線**光電子ホログラフィー (HAXPEH)

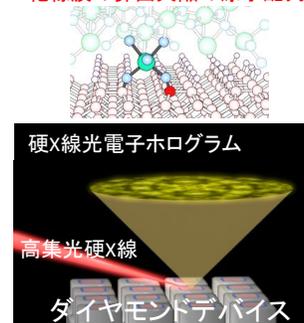
絶縁膜下の界面欠陥の立体的な原子配列を明らかに。

パワーデバイス半導体製品のドーパントの原子配列を可視化

パワーデバイス半導体の高性能化による高効率・軽量化

CO₂削減へ

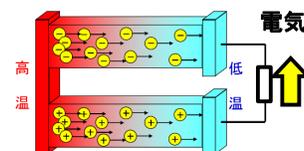
絶縁膜の界面欠陥の原子配列



熱電分野の現状と課題

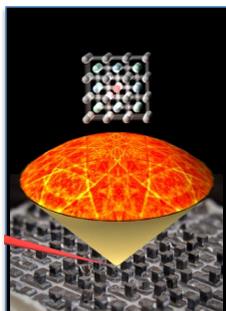
1. 製鉄所、火力発電所、自動車のエンジンなどから出る大量の排熱を電気エネルギーに変換できる環境調和型のキーテクノロジー。熱を伝えにくく電気が流れやすい材料が必要だが、この相反する要求を十分に満たす材料は見つかっていない。
2. 高性能材料の開発に向けて元素ドーピングは有望なアプローチ。SPring-8の蛍光X線ホログラフィーにより、添加元素が熱伝導をブロックする機構が原子レベルで明らかになり、新しい材料の創製を加速させている。

熱電発電

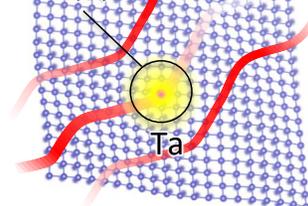


SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

1. 蛍光X線ホログラフィーによりTaを添加したFe₂VAl熱電材料を解析。
2. Ta添加により熱伝導が低下することが知られており、本材料系では最高の熱電特性を示す。
3. 添加したTaが新たな振動状態を作り、熱伝導をブロックしている様子が明らかになった。



熱伝導を
ブロック!



SPring-8-II実現による未来像

1. 分光器フリーの高強度計測により、ハイスループット化や微弱なシグナルの測定が可能に。⇒革新的な低熱伝導・高電気伝導材料創成へ。
2. 微小ビームの利用により、結晶粒やデバイスの微小部の測定が可能に。⇒産業分野と連携強化。
3. 蛍光X線ホログラフィーには硬X線までの幅広いエネルギーをカバーしているSPring-8-IIが必須。



革新的な熱電材料

高度かつ迅速な計測による的確なフィードバック
⇒熱電発電の本格実装へ

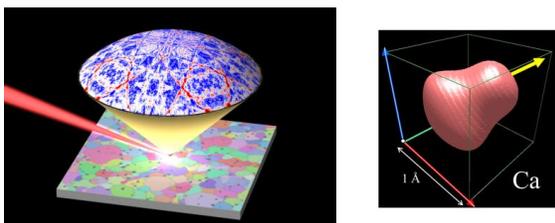


誘電体材料の現状と課題

1. 誘電体材料は半導体などと同様に、産業の米と呼ばれるエレクトロニクスには欠かせない材料である。デバイスにおける全ての素子には誘電体がかかっているとんでも過言ではない。熱的な安定性や誘電率など、素子の微細化に伴い常に性能向上が求められている。
2. 現在、産業界において主流で用いられているのはチタン酸ジルコン酸鉛($PbZr_{1-x}Ti_xO_3$)と呼ばれているものであるが、有害元素とされる鉛を含んでいる点が問題とされている。鉛フリー化が進む、今の情勢において鉛フリー誘電体の開発は急務とされている。
3. 鉛フリー誘電体の材料開発には、ベースとなる物質に何らかの元素を添加して性能を向上させることが多い。この添加元素の詳細な役割を、蛍光X線ホログラフィーを用いた三次元原子像解析で解明する必要がある。

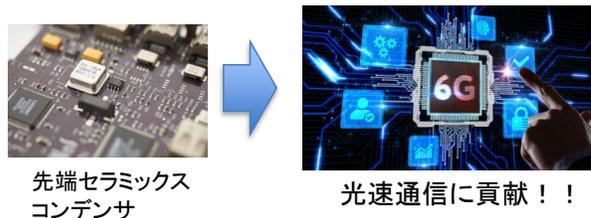
SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

1. チタン酸ジルコン酸バリウム・カルシウムは有望とされている鉛フリー誘電体である。セラミックス状試料のひとつの結晶粒(~50 μ m)から添加元素の一つであるカルシウムやジルコンのホログラムに成功した。ここでは、SPring-8の集光ビームが重要な役割を果たした。
2. 原子像から添加元素の明瞭な位置シフトが観測され、添加元素の役割が解明された。添加元素の候補に関して有用な情報を得ることができた。



SPring-8-II実現による未来像

1. 蛍光X線ホログラフィーは、数mmサイズの単結晶にしか適用できなかったが、集光ビームの適用によりセラミックス一粒子の測定を達成した。
2. 高い集光性が期待できるSPring-8-IIのビームを用いることにより、基本的にセラミックスとして合成される様々な誘電体材料に適用できる。
3. 鉛フリー誘電体は、広い温度領域で使用できないという課題があるが、添加元素の役割解明により、理想的な材料の開発が期待される。



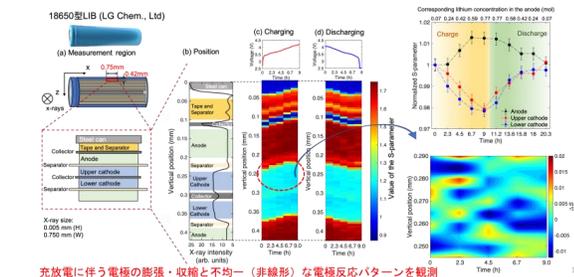
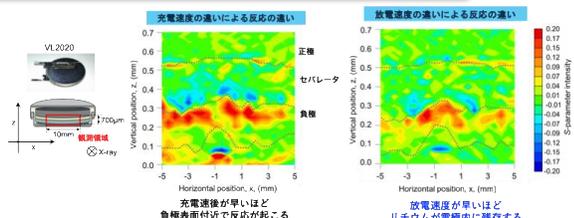
製品開発分野の現状と課題

持続可能な社会の実現のため、再生可能エネルギーを貯蔵する**蓄電池の高性能化は必須**

高性能化のためには、**実際に使用される電池を使用される条件下**で測定し、
電池内部で起こる反応を観察することが重要

高エネルギーX線を使ったコンプトン散乱法により、実電池の反応分布を非破壊で可視化可能

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献



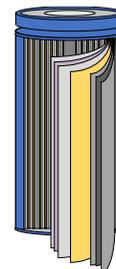
SPring-8の高エネルギーX線の利用により実現

SPring-8-II実現による未来像

SPring-8-IIの実現により

- ✓ より大型なデバイス・構造物の非破壊測定が可能
→ 200 keV以上のX線の利用でcmオーダーのステンレス材を透過可能
- ✓ 測定対象のわずかな変化を観測可能
→ 安定した光源設計により真に観測したい変化を捉えられる

巻回型電池の1層毎の変化を観測でき
高性能な蓄電池開発を加速させる

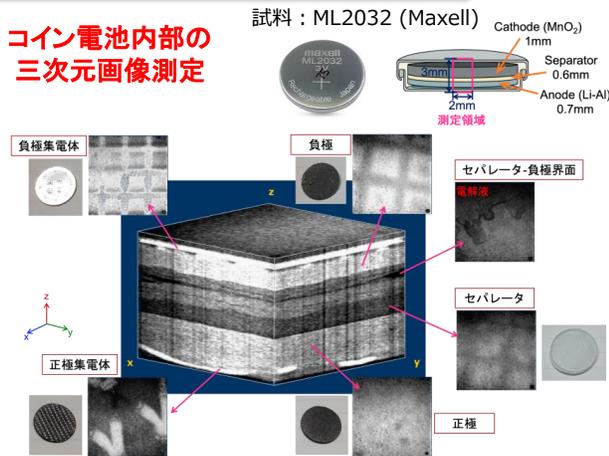


計測分野の現状と課題

X線は高い物質透過能を持つため、非破壊でデバイス内部を可視化可能
 ↓
 しかし、多くの場合、軽元素のイメージングや定量的な分析は難しい
 ↓
 高エネルギーX線コンプトン散乱法により、電池内部の電解液の可視化や

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

コイン電池内部の
三次元画像測定



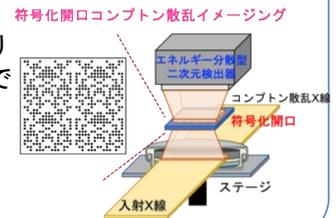
SPring-8の高エネルギーX線の利用により
 非破壊で軽元素(電解液)のイメージングが可能

SPring-8-II実現による未来像

SPring-8-IIの実現により

- ✓ より大型なデバイス・構造物の非破壊測定が可能
 → 200 keV以上のX線の利用でcmオーダーのステンレス材を透過可能
- ✓ 測定対象のわずかな変化を観測可能
 → 安定した光源設計により真に観測したい変化を捉えられる

新たな光学デバイス
 (符号化開口)の利用により
 物質内部の軽元素を高速で
 可視化できる計測法



スライド32 SPRing-8-IIIによる複雑系・全元素対応の三次元オペランド深さ分解CT

 SPRUC ~ 高輝度放射光X線と高強度低速負ミュオンの両方を用いた非破壊深さ分解技術 ~

放射光X線と負ミュオンの連携研究分野の現状と課題

SPring-8-IIの高性能化は既存ユーザーが想像もしなかった未踏の科学的探求の機会を拡大する。

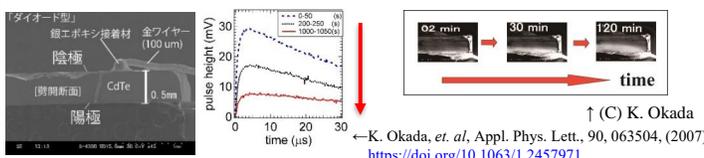
当該分野にかかわる科学技術分野、産業分野、社会における現状と将来展望: ミクロからマクロスケールにわたる物体内部の元素分布および空隙・形状分布を非破壊で深さ分解でオペランド同時可視化する手法の開発は緊急の課題である。本手法は、機器の高性能化や物体の新機能創出に寄与すると期待されており、学术界だけでなく産業界においても高いニーズがある。最先端科学施設の多様な量子ビームを複合的に活用することで、本手法の実現が可能である。

現状から将来展望に向けて進歩するために必要な知見、技術などの課題: これまで、量子ビームの特性や測定装置の技術的な課題等により、上記手法の実現は困難であった。本研究では、高輝度放射光X線および高強度低速負ミュオンを用い、蛍光X線分析と散乱X線分析とミュオン特性X線分析を三次元でシームレスに行うことで本手法の確立を目指す。

課題解決に対するSPring-8利用研究の貢献の概要: SPRing-8のX線およびJ-PARCの負ミュオンの二つの量子プローブを相補的に用いることで目的を達成する。X線ビームの特性の課題、蛍光X線分析における軽元素の深さ方向の精度の課題、および散乱X線分析の解像度の課題は、SPring-8-IIで解決することが可能である。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

本手法の初期ターゲットとして、化合物半導体の電極界面近傍の三次元元素分布と形状分布を調査している。これらの時間変化を多角的に追跡する手法をSPring-8のX線とJ-PARCの負ミュオンを用いて開発し、分極問題の解決を目指す。低速負ミュオンにより電極表面から内部へのミュオン特性X線分析を行い、SPring-8の50ナノメートルX線を用いて電極断面の蛍光X線分析を実施した。SPring-8のビーム特性に関しては、サイズ、強度、分解能等の課題が明らかになった。



 **大型放射光源で多様性のある多数のビームライン群を硬X線と軟X線の両方に持つSPring-8-IIならではの可能な【量子ビーム連携】: 国内→海外とも**

SPring-8-II実現による未来像

SPring-8-IIで実現する一桁小さいナノメートルのX線、100倍の高強度、高エネルギー分解能、および200 keVまでの高エネルギーが、左欄の課題を解決する。

⇒ミクロからマクロの複雑系の物体で非破壊に水素からウランの全元素での元素分析と空隙・形状分析をシームレスに行う三次元オペランド深さ分解ドCTの実現
観測予定例

- * 半導体等の電極界面近傍とその時間変化
- * 水素関連機器の水素脆化の進展
- * 放射能による機器内部損傷の時間変化

社会技術(文化)

| 分野 | 提案 | 研究会 | 提案者・提案代表者 | スライド番号 |
|--------------|---------------------|--------|---------------------------------|--------|
| 社会技術 (文化) | 放射光X線によって歴史や文化を読み解く | 文化財研究会 | 田中 真奈子(東京藝術大学) 阿部 善也(東京電機大学) | 34 |

スライド34

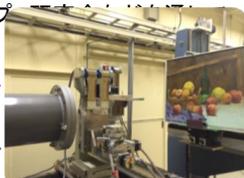
SPring-8-II実現による文化財分野の未来像 ~放射光X線によって歴史や文化を読み解く~

文化財分野の現状と課題

文化財科学・考古学分野の研究における放射光利用は、世界に先駆け1987年に日本のPFで行われた。その後SPring-8に場を移し、1997年の供用開始直後から現在に至るまで第三世代のSPring-8の高輝度・高エネルギー放射光を用いて、陶磁器、ガラス、木製仏像、金属文化財、絹、漆、石製品、絵画などの広範な研究が行われている。材質・技法の特定や産地・年代の推定のほか、保存修復にも役立つ数々の特色ある研究成果が得られている。放射光を用いた分析・計測技術が活発に文化財分野で導入されている一方で、分野特有の「制約(課題)」も存在している。貴重な文化財の研究においては、非破壊・非侵襲的な手法が大原則であり、資料の輸送・保管時に配慮が必要であること、人文系や芸術系の研究者が多いため新規利用者が放射光施設の利用申請をする際のハードルが非常に高いことなどが挙げられる。それらの課題は、SPRUC文化財研究会によるユーザー同士の情報交換・施設担当者との交流、BL担当者との橋渡し役としてのコーディネーターの存在、「人文・社会科学」審査分野の新設などによって前向きに対処されてきた。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

- 近年の成果例を以下に挙げる。
 - 200 keVの高エネルギーX線を用いたマイクロCTにより、**金属工芸品(自在置物^[1]、パイメタル、日本刀等)**の材質や制作技術に関する新しい知見を得た。
 - 116 keVに単色化したX線を用いた蛍光X線分析によって**古代ガラス**の重元素組成を明らかにし、産地を解明した^[2]。
 - 大面積の単色X線を用いて、吸収差を利用した迅速な元素イメージング法を開発し、**油彩画**の非破壊分析に応用した^[3]。
 その他、**出土絹織物**解析(顕微赤外分光)、**陶磁器**の着色技法解析(XAFS)、**仏像**の木材樹種鑑定(X線CT)等多くの成果がある。
- 文化財は一般市民の関心が高いため、放射光を用いた研究成果について報告会やワークショップ、**広く社会に情報発信**を行ってきた。
- 近年、中性子、ミュオンなど**他の量子ビームとの連携**にも努めている。



[1] L. Szentmiklósi et al. (2021) **油彩画の分析の様子**
 [2] Y. Abe et al. (2018) (2021)
 [3] 中井 泉ほか(2019)

SPring-8-II実現による未来像

(1) 新たな文化財科学・考古学分野の研究の創出

文化財の研究では、ブローブ(X線)の性能が成果を大きく左右する。SPring-8 IIで実現する飛躍的な高輝度化による**200keVの高エネルギー、ナノレベルの空間分解能や可干渉性に優れたX線**を利用することでより多様な文化財の詳細にわたる研究が可能となり、これまでの研究の深化が期待できる。材質や構造、物性についてこれまでにない観点からアプローチすることで、新たな文化財研究の創出につなげられる可能性もある。

(2) 分析対象およびユーザー層の拡大

博物館等から文化財を借用する場合、借用期間について時間的な制限を伴う。SPring-8-IIでは輝度の向上に伴う測定時間の短縮が期待できるため、資料を施設に輸送する必要はあるが、文化財を借用する際のハードルは下がる可能性がある。これと同時に、ユーザーが利用可能な運転時間が増加すれば人文系・芸術系のユーザー層の拡大も期待される。



さらなる成果が期待される文化財の例

計測基盤

| 分野 | 提案 | 研究会 | 提案者・提案代表者 | スライド番号 |
|------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------|
| 計測基盤 | 全方位イメージング | 高分解能X線イメージング研究会 | 水谷隆太(東海大学) 百生敦(東北大学) | 36 |
| | 一期一会の物質・生命現象の4D可視化 | | 矢代航(東北大学) | 37 |
| | 「極」高圧科学 | 高圧物質科学研究会 | 石松直樹(愛媛大学) 町田晃彦(量子科学技術研究開発機構) | 38 |
| | バイオマテリアルの解析の計測システム整備 | | 武石俊作(光エンジニアリングサービス) | 39-40 |
| | 真のマルチモーダル計測実現 | | 戸田裕之(九州大学) | 41 |
| | 顕微観察・高速測定による物質機能の解明・高度化 | X線発光・非弾性X線散乱 スペクトロスコーピー研究会 | 石井賢司(量子科学技術研究開発機構) | 42 |
| | 精密から極精密分光へ | 角度分解非弾性散乱研究会 | 福井宏之(高輝度光科学研究センター) 乾 雅祝(広島大学) | 43 |
| | 計測基盤整備 | 薄膜ナノ構造研究会 | 山口明(兵庫県立大学) 田尻寛男(高輝度光科学研究センター) | 44-49 |

スライド36

SPring-8-II実現によるイメージング分野の未来像 ~全方位イメージング~

イメージング分野の目標1

- ★100kHz 以上の速度での高速動画撮影
 - ・材料破断、溶融など
 - ・1ミクロンの分解能を達成するため、分光器を通さない準単色光の利用が必須

イメージング分野の目標2

- ★50-100keV での μ CT計測
 - ・MEMSなど先端デバイス計測のため
 - ・企業利用に特化したビームラインを期待

イメージング分野の目標3

- ★CTとXRDの複合計測環境
 - ・金属やセラミックスの変形・破壊を解明
 - ・30-70 keV での利用が主体

イメージング分野の夢1

- ★階層的イメージング
 - ・マクロな視野(例えば脳全体)で、ナノメートルスケールの構造(シナプスなど)を見る
 - ・ビームを絞るだけでなく、広げて使う技術=フォーカシングしてから広げる?など

イメージング分野の夢2

- ★多様なイメージングモード
 - ・蛍光X線やコンプトン散乱による三次元計測技術の高度化
 - ・磁区などのベクトル場を三次元再構成するテンソルトモグラフィなど

高速X線イメージング分野の現状と課題

第三世代放射光源をフル活用することで、最近までに時間分解能ミリ秒オーダーの4D(三次元+時間)X線CTが実現できており、すでに実材料の非平衡状態(実使用条件下に相当)での破壊挙動の4D可視化による機能性材料の開発などが始まっている。将来的に、マテリアル工学、機械工学、流体工学など様々な学術・産業分野への応用展開が進められており、様々な社会課題の解決に資すると期待される。

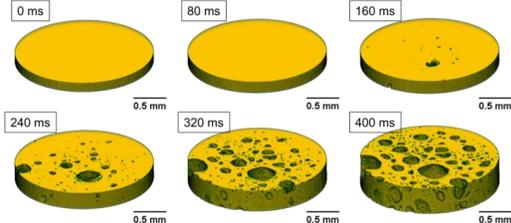
しかしながら、一般に空間分解能と時間分解能の間にはトレードオフの関係があり、小さいものほど高速で撮影したいという社会ニーズに応えるためには、マイクロ秒オーダーの4DX線CTの実現が不可欠である。

マイクロ秒オーダー時間分解能4DX線CTが実現できると、機械加工、無機材料破壊・摩耗、溶接、燃焼、爆発、キャビテーション、マイクロ流体、マイクロマシン、生きた生物など応用対象が格段に広がり、これまで4D可視化が不可能と考えられていた多くの現象の可視化が可能になる。これにより、産業界のイノベーション創出が加速されるだけでなく、新たな学術領域の創生につながると期待される。

SPRing-8を活用したこれまでの成果と貢献

これまで、SPRing-8の偏向電磁石光源からの大強度、高空間コヒーレンス、大面積の白色放射光ビームをフル活用した独自の光学系を開発することで、サブミリ秒時間分解能4DX線CTの原理実証に成功しており、10ミリ秒時間分解能については、産業応用(製品開発に向けた研究)が進められている(下図)。

タイガゴムの引張破壊の瞬間(住友ゴム工業(株)との共同研究)



多孔性複合材料の圧縮破壊の瞬間((株)日東分析センターとの共同研究)

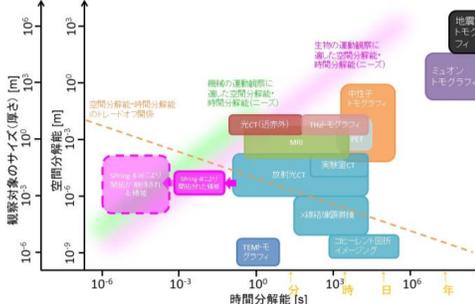


SPRing-8-II実現による未来像

SPRing-8-IIのアンジュレータからの良質なスペクトルの準単色放射光を4DX線CTに活用することで、マイクロ秒オーダーの時間分解能の実現が可能になるだけでなく、最先端データサイエンスの活用により、同じ時間分解能でXFAS CT(原子価数CT)も実現できると期待される。

NanoTerasuは軟X線に最適化されているため、硬X線を要する4DX線CTの時間分解能はサブミリ秒が限界であるが、マイクロ秒時間分解能が実現できると、これまで他の方法でカバーできなかった時空間領域が新たに開拓され(下図)、産業界のイノベーション創出が加速されるだけでなく、新たな学術領域の創生にもつながると期待される。

試料内部の非線り返し現象を4D非破壊可視化する方法



高压物質科学・地球惑星科学分野の現状と課題

現状:これまでの放射光測定技術と高压発生技術の発展により超高压発生は500 GPaに迫り、これに低温・高温を組み合わせた多重極端条件も進んでいる。またXRDを主要な測定法としつつ、散乱、分光、イメージングの多様な高压下測定も状態観測に活用されており、高压物質科学研究の裾野が広がっている。また、固体電池電解質や電極材料、水素貯蔵材料、負熱膨張材料などカーボンニュートラルにつながる研究開発が高压合成分野でも進められてきた。

課題:①さらに高い圧力の発生と、そこで得られる金属水素など新奇物質の状態決定技術の確立、②複合測定を活用した状態観測の精密化、およびそのハイスループット化。高压技術は自動化・自律化実験との相性に課題があるが、圧力を限定するなどした自動化実験の実現を目指す材料開発のイノベーションに繋げる必要性。③試料の高压下状態の3次元解析:状態の不均一性や応力分布の精密決定法の確立。

SPRing-8を活用したこれまでの成果と貢献

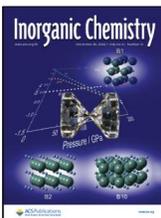
超高压発生とその状態観測

- 地球中心圧力(~365 GPa)までの鉄とニッケルの状態方程式の精密決定 (JASRI 平尾直久 他, Matter. Radiat. Extremes. 7, 038403 (2022)).
- 2段式アンビルによる超高压発生技術開発(~400 GPa) (愛媛大 境毅 他, High Pressure Res. 40, 12 (2020))
- コバルト酸鉛のスピン状態転移と電荷移動転移を発見 (東工大 酒井雄樹 他, J. Am. Chem. Soc., 142, 5731 (2020))



高压下でのみ得られる新物質の発見

- 窒化イットリウム(YN)高压相の探索:計算と実験の協奏研究 (NIMS 遊佐 斉, AIST 藤久裕司, Inorg. Chem., 61, 20906 (2022))
- 高温高压下その場X線回折測定を活用した新規 Al₃FeH₄の合成 (QST 齋藤寛之 他, Mater. Des. 208, 109953 (2021))
- 高温超伝導体H₃Sの構造決定 (阪大 榮永栄利 他, Nat. Phys. 3760 (2016))

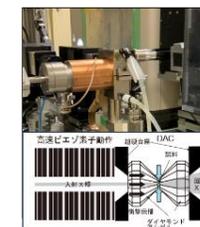
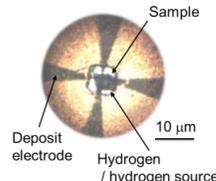


※それぞれ最近の成果の一例

SPRing-8-II実現による未来像

最先端の高压発生技術とSPRing-8-IIの放射光測定技術の粋を「極」めた高压科学を展開。

- 500 GPaから1 TPa領域の高压発生の実現。その時の状態観測がSPRing-8-IIの高輝度光を用いれば精密に可能。金属水素の生成、内殻電子が混成する高密度状態の状態観測、系外惑星の内部構造観測がターゲットの一例。
- 高輝度光+瞬時加压DACによる高速時間分解観察の実現。また高輝度光+複合測定による測定のハイスループット化。XRD+XAS@BL39XUなどのビームラインアップグレードとSPRing-8-IIならば可能。高压下測定の完全自動化の実現。
- SPRing-8-IIのコヒーレント光を用いることにより、高压セル内の相分離や歪分布の組織観察が高压下でも可能。



生物内細胞の挙動解析の計測

1. CTの空間分解能及び時間分解の更なる向上

① 空間分解能を極限的にはどこまで上げられるか

既出「生体内での対象細胞の挙動分析」とも関連しますが、実験動物に対して空間分解能が格段に上がれば、観察対象が更に微視的なものが増えると思われ、実験動物による様々な評価の対象が拡大すると思われ。

② 時間分解能を極限的にはどこまで上げられるか

上記①とある意味トレードオフ関係にあるのかもしれませんが。

2. 実験動物に対するPET-CTによる評価

動物実験におけるPET-CTによる研究は広く行われておりますが、

① CTそのものの空間分解能

② PETの原理的な分解能の限界

等により、素晴らしい画像診断技術であるにもかかわらず、臨床上の診断、研究上の病態メカニズムや薬効評価の観点から、分解能が問題となるケースがあります。この点において、少なくともCTの分解能に関しては放射光施設のCTは臨床現場や実験装置を凌駕する性能があるので、PET-CTによる評価に何らかのfeedbackやbreakthroughをもたらすことはできないものでしょうか？また放射光を利用したPETそのものの実効的な分解能（解析的にでも）向上に向けたアプローチは難しいでしょうか（従来の放射光利用の観点からするとちょっとズレた質問ですが...）？

3. 同時複合的な評価方法

この点に関しましては、ユーザー側が実験ハッチに必要な装置を持ち込んで行いなさいとお叱りを受けるのだと思いますが、高価な装置や設備を購入・持ち込みというのはなかなかハードルが高いので、放射光利用の観点から複合評価方法として有効でオリジナリティが高いと判断できるようなものがあれば、御検討頂けずと幸いです。

前述のPET-CT等は、もしかしたらその一例になるのかもしれませんが、他にも（放射光との複合設備としてどれ程価値があるかは別途議論が必要だとして...）CT+多光子励起顕微鏡やCT+ラマン分光・FTIR分光などといったもの等は有り得るのではないかと思います。

生物内細胞の挙動解析の計測

1. タンパク質の動的解析

タンパク質の動的評価として、東北大学の南後恵理子先生がSACLAを利用して素晴らしい成果を発表されています。

現在タンパク質の動的評価を分子レベルで画像解析的に評価できる方法としては、（語弊がございますことを承知の上で申し上げさせていただきます）南後先生の研究例と高速AFMを使った評価しかありません。従いまして南後先生の御研究のような評価方法をもっと広くかつもっと色々なタンパク質について行えるようにして頂けると、大変嬉しく存じます。難しい点が多々ありそうだということはおぼろげに理解致しております。

2. 糖鎖に関する評価

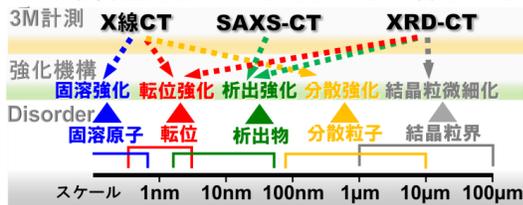
糖鎖の構造解析はTOF-MSでスクリーニングはレクチンアレイでかなりのレベルで行うことが可能になってきましたが、画像解析的に評価するという点になるとまだまだ難しい点が多々ございます。具体的手法という点では全くno ideaの状態なのですが、放射光を利用した分析で画像解析的に何かできることがあれば、画期的な評価方法になるのですが、何かideaをお持ちの方がいらっしゃったら是非お話を聞き致たく存じます。

構造用金属材料分野の現状と課題

1. 金属の延性破壊は最弱点では規定されず、マイクロ～ナノ構造の3D揺らぎが重要である。しかし、金属分野でその3D揺らぎとマクロ強度特性とを結び付ける理論はない。それどころか、それを把握する計測手法もない。
2. 鉄鋼やアルミニウムの高強度化は、これまでナノ化、微細分散、合金探索等、種々アプローチされてきた。しかし、利用元素の希少性、複雑なプロセス、延性・靱性の低下など、様々な理由で普及していないものが多い。
3. 上記3D揺らぎを精密に計測してマクロ強度特性の発現機構を明らかにすれば、構造用金属の強度を極大化できる可能性がある。
4. この課題に対し、SPring-8ではマルチモーダル計測の開発適用を推進している。上記の3D揺らぎを計測できる真のマルチモーダル計測は計測時間等の問題で困難だが、SPring-8-IIでこれが実現すれば、学術的進歩だけでなく産業的な波及効果も大きい。

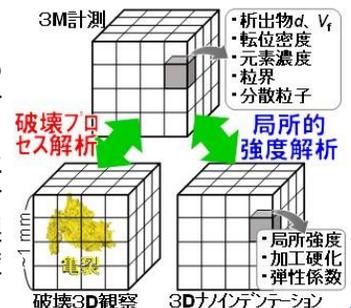
SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

1. 構造用金属材料の5大強化機構とそれらに対応する5つのナノ～マイクロ組織因子については、SPring-8のX線CT、XRD、SAXS-CTなどを一部組み合わせ、計測する試みがある(下図)。
2. これらは、大学施設では精度や計測時間などの問題で到底実施できず、SPring-8の高エネルギー単色光を集光し、その高輝度を活用した。
3. 成果として、アルミニウムや鉄鋼材料の力学挙動の学術的理解が深まると同時に、その特性向上や破壊防止などの工業的な手法が得られてい



SPring-8-II実現による未来像

1. SPring-8-IIの飛躍的な高輝度化、集光特性向上により、金属を強化する全ナノ～マイクロ構造(左図の固溶原子など)を数日という実験時間の範囲で同時計測可能となる(真のマルチモーダル計測)。
2. 下図の様に局所領域の3D計測技術を組み合わせることで、ナノ～マイクロの強化因子-強度の関係の大規模データが取得できる。



3. データ科学による解析等を通じ、希少元素や分散材、特殊な製造法等に頼らず、現行の材料・組織制御法・製造装置で金属強度等を極大化できる。

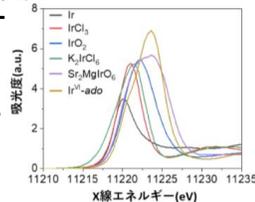
X線発光分光・非弾性散乱分野の現状と課題

1. 我々は、物質中の電子が担う電氣的、磁氣的、光学的性質や電子が原子間を移動することによって生じる化学反応を物質の「機能」として利用している。機能発現の鍵となる元素の周りに存在する電子の状態を知ることが機能の発現機構解明や高度化には不可欠である。
2. 特に、物質の機能が発現している状態その場で電子の状態を調べることが重要であり、そのためには顕微観察や高速計測の技術が必要である。
3. SPring-8の強力なX線の利用により、元素を選択して電子の状態を分析するためのX線発光分光・非弾性散乱法(XES・IXS)が実現し、物質科学、生命科学、地球・環境科学等における物質の機能の理解、高度化に貢献している。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

水電解のための新規イリジウム触媒を開発
 -グリーン水素の大規模導入に貢献-

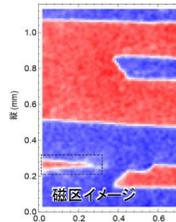
水電解による水素製造において、貴金属であるイリジウムの使用量を大幅に低減できる触媒(Ir^{VI}-ado)を開発。イリジウムのX線吸収を高分解能で計測し、イリジウムが+6価の状態触媒として機能していることを解明。



http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2024/240510/

放射光を使った磁石の奥まで透ける顕微鏡
 -X線発光の新原理を用い開発に成功-

鉄からのX線発光を利用し、磁性体深部にある磁区の大きさ、向きの詳細な分布の観察できる、磁気顕微鏡を構築。電磁鋼板におけるエネルギー損失に関わる深さの磁区構造観察が可能に。



http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2022/220125/

SPring-8-II実現による未来像

高透過能を有する大型放射光源の硬X線は、機能発現状態をその場で調べるのに最適



SPring-8
 高強度X線によるXES・IXSの実現、利用研究の萌芽

SPring-8-II
 高いレベルでのXES・IXS、その場計測で機能の解明・高度化へ
 ・顕微観察
 高輝度ビームにより、µmからnmスケールへ。
 ・高速計測
 入射分光器フリーX線発光分光で強度・計測速度が数桁向上。
 ・顕微観察+高速計測
 XES・IXSでは稀だった走査型イメージングが日常計測に。

触媒、磁性体をはじめ、多くの分野での物質・材料の高性能化
 → 豊かで安心・安全な社会の実現に貢献

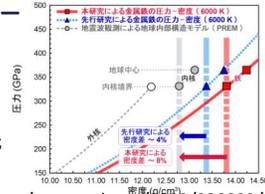
非弾性X線散乱分野の現状と課題

1. X線を使ったmeV分解能の非弾性散乱実験(meV-IXS)により、微小試料の原子ダイナミクス測定が可能となった。
2. より困難な測定条件を極めるためには、より高輝度・高強度で発散の小さいX線が不可欠である。
3. 地球科学の重要課題の一つである内殻の組成を決定するため、内殻候補物質に対して内核条件でmeV-IXSによる音速測定が行われた。この過程で超高压下の圧力目盛の絶対値をより精密に決定するという成果が得られている。地球内部の音速に関する知見は地震波の伝播とも密接に関係し、地震学の発展にも貢献できる。
4. 入射角の精密制御や照射面積の縮小化により、合成が困難な薄膜新奇材料の物性機序解明につながる。

SPring-8を活用したこれまでの成果と貢献

放射光X線が地球核の化学組成を変える
—新しい絶対圧カスケールを決定—

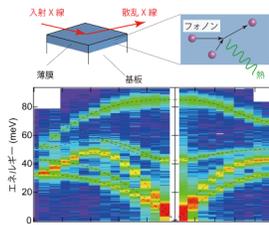
新しい圧カスケールによって再評価された、地球内核における金属鉄の密度(赤四角)と地震波観測によって得られた内核の密度(灰色丸)を比べると、以前の見積もり(青三角)よりも2倍の軽元素が含まれている可能性が示された。



http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2023/230922/

薄膜中の熱の伝わり方の起源を知る

(上) 薄膜に対するmeV-IXS測定(左)と薄膜内部のフォノンのモード図(右)。(下) 窒化スカンジウム薄膜のフォノン分散。明るい色の箇所はフォノン(図中点線)が存在していることを示し、その幅(フォノン線幅)からフォノン寿命を求めることができる。



http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2018/180611/

これらの研究はSPring-8なしには実現不可

SPring-8-II実現による未来像

1. 高輝度、高強度が進展することにより、より高い超高压下のデータが取得でき、地球内殻のより深部の理解が深められる。これらの知見は、地球や太陽系の誕生から現在までの歴史を科学的知見に基づいて解明する手掛かりを与える。
2. 上で紹介した薄膜は厚さが40マイクロメートルであるが、より高強度で平行なマイクロビームが実現されれば、更に薄い薄膜試料に対しても同様の測定が可能となる。
3. 高压研究を更に進めるにあたりエネルギーの高いX線が是非とも必要である。高輝度化が促進してマイクロビームによるmeV非弾性散乱が実現すれば、サブマイクロメーター領域ごとの原子ダイナミクスの揺らぎが検出でき、超伝導を利用した量子コンピューターデバイスや高性能熱電素子の開発に貴重な情報を提供できる。

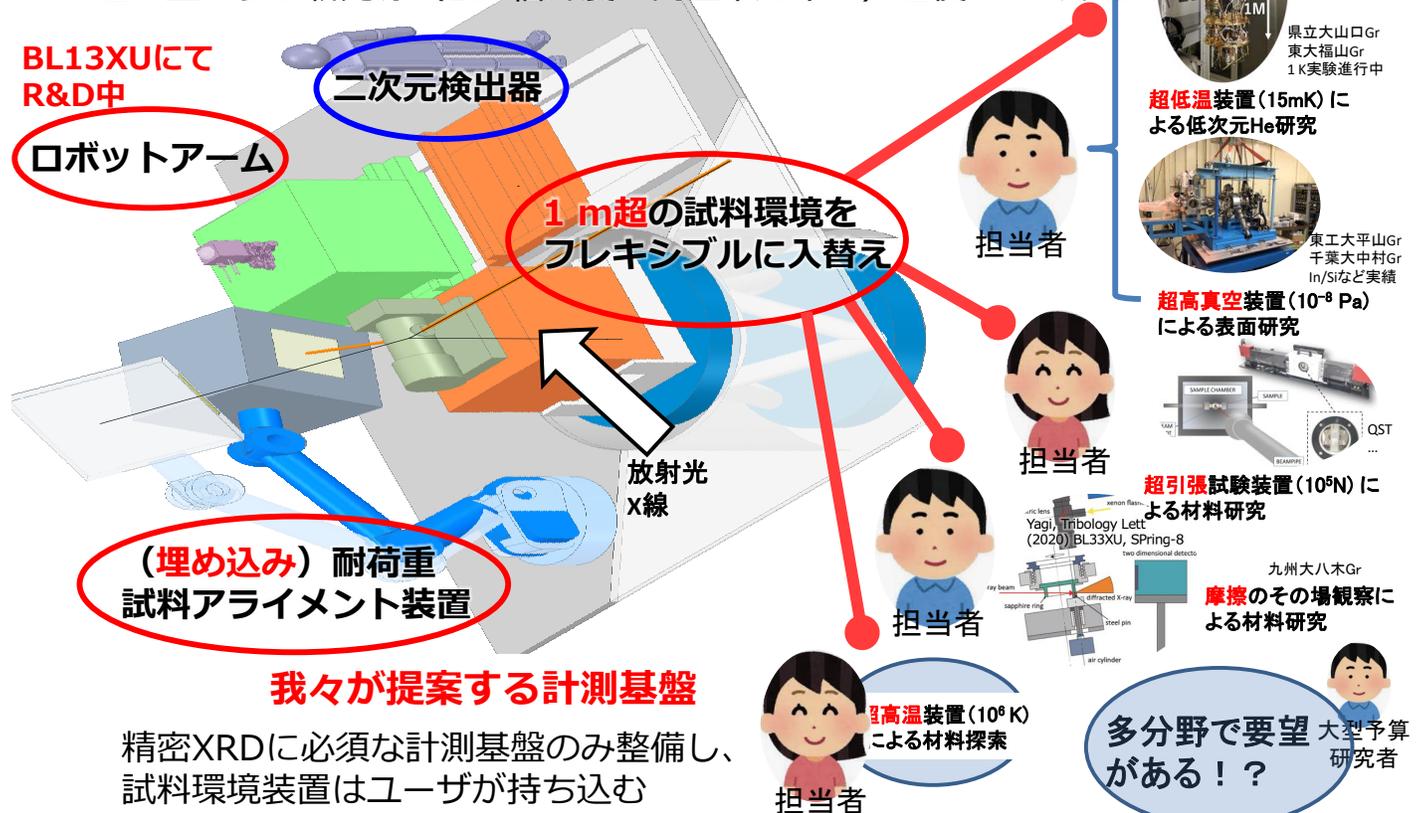
SPring-8-II実現による計測の未来像

①大型ラボ装置を持ち込んだ放射光XRD

これまでになく特殊装置・環境が新しい発見につながる

→一方で、放射光施設が用意できる試料環境には限りがある

→ヘビーユーザが新光源(100倍輝度・高エネルギー)を使いつくす

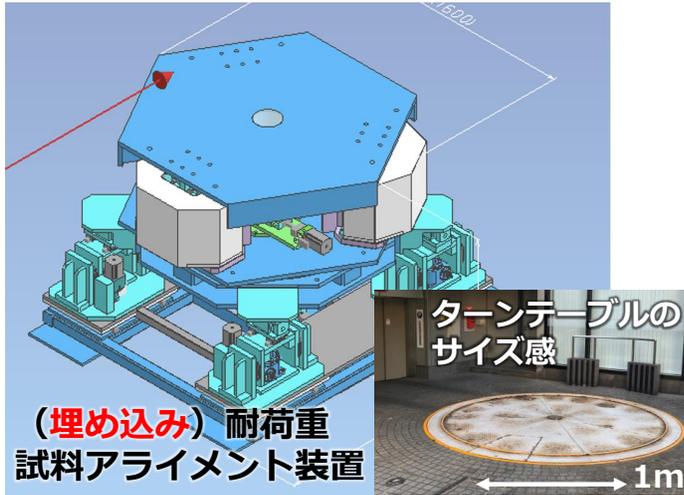


我々が提案する計測基盤

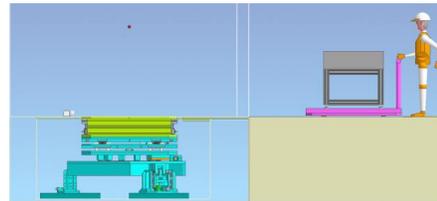
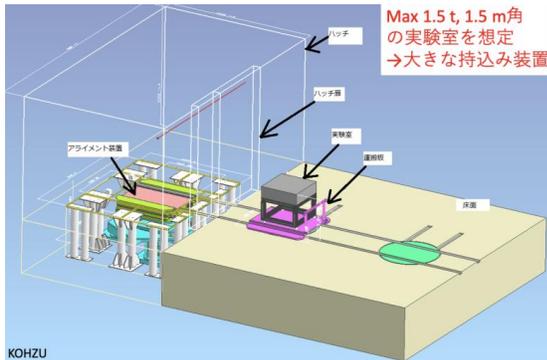
精密XRDに必須な計測基盤のみ整備し、試料環境装置はユーザが持ち込む

多分野で要望がある!? 大型予算研究者

SPring-8-II実現による計測の未来像 ②1m, 1t超持ち込み装置アライメント提案

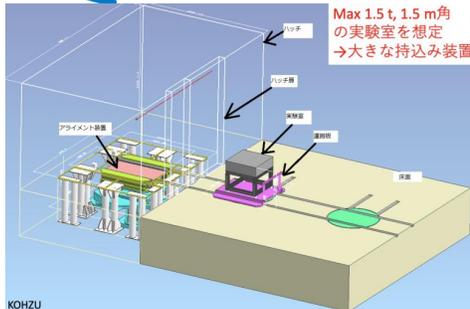


BL床に埋め込んでフラットに



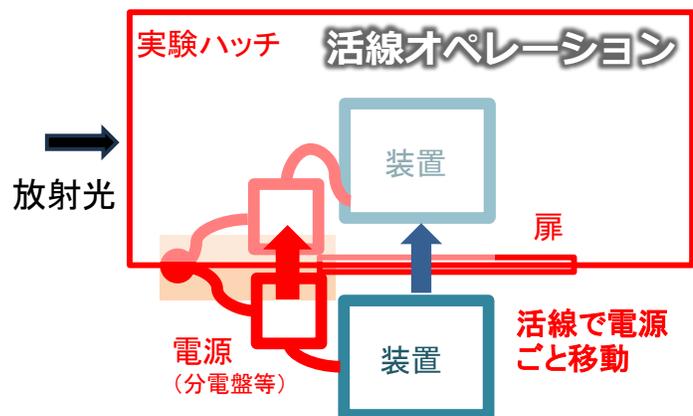
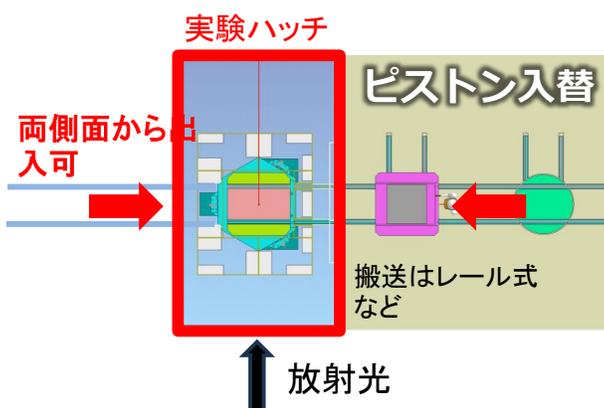
- ・床埋めバリアフリーで高速入替え
- ユーザの自由な発想装置による放射光計測を実現

SPring-8-II実現による計測の未来像 ③真にin-situな持ち込み測定の実現



- ・床埋めバリアフリーで高速入替え
- ・SACLAのようにハッチ両側面に扉:ピストン入替え
→ 複数装置がお互い干渉しない
→ 究極的にはビームタイムのアジュアルなシェア (測りたい時にすぐに測れる)

さらに、、、
準備→測定をin-situで行うには活線状態で装置移動



持ち込み測定を質的に変えるアイデアで未踏分野を開拓できる

超低温環境=絶対温度1K以下

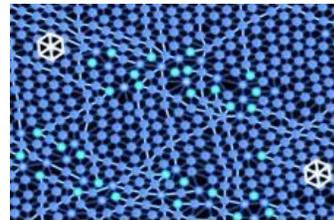
研究対象

He on graphite : model system at ultra-low temp.

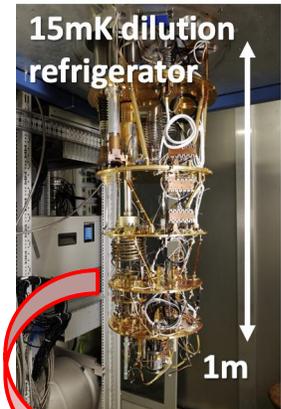
超低温環境のヘリウム原子吸着系：2次元超流動をはじめとした低次元量子液体・固体物性研究の主要舞台。様々な量子現象が発見・提唱

提案されている量子現象

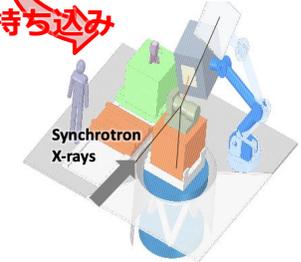
- ✓ 2次元超流動 (Kosterlitz-Thouless転移)
- ✓ 自然界で最も低密度の液体
- ✓ 量子液晶相
- ✓ 吸着ヘリウム層の量子摩擦
- ✓ ナノ細孔中の1次元超流動



グラファイト表面上の量子液晶相



持ち込み



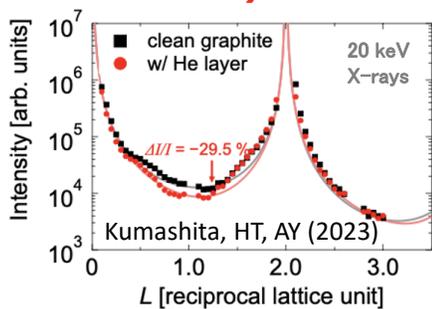
課題

低次元吸着構造と量子現象を対応づける明確な実験がない

No obvious exp. report discussing relation betw. low-dimensional structure and quantum phenomena

超低温構造解析(1 K以下)のための放射光XRDの活用

超低温 (1.37K) He原子層がみえた!



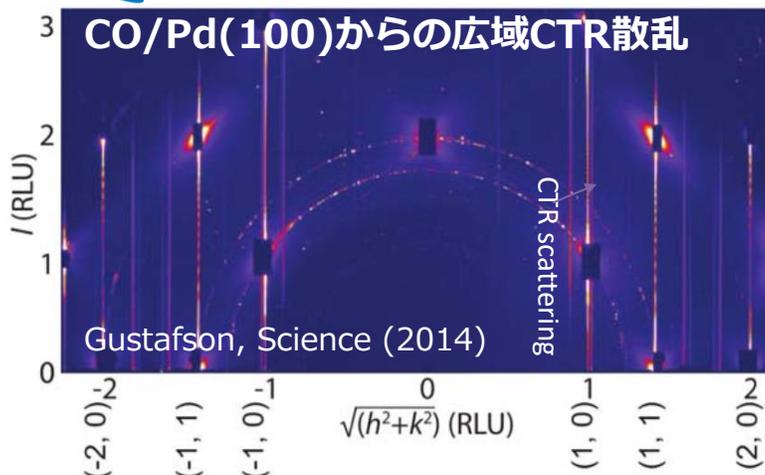
- ✓ヘリウム原子層の解析(CTR散乱)
→ 30 keV以上高輝度・高エネルギーX線利用
- ✓量子液晶相の空間回転対称性の破れの直接観測
- ✓量子固相のドメイン形成メカニズムの解明
→ 干渉光でヘリウムの量子性を検出

1m超装置を持ち込み量子現象の発現下
構造研究を可能に (using high energy X-rays)

ヘリウム層がグラファイトの2.85 Å上に存在

Structural science using huge lab. Instrum. reaching below 1 K

スライド48

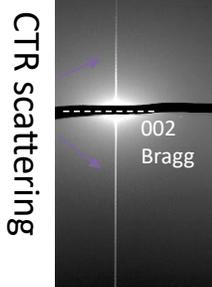


- ・広い逆空間にひろがる
- ・広いダイナミックレンジ (反射率1~10⁻¹³)
→ 10¹³~10⁰ ph/s) のシグナルを一度に検出

表面回折実験データが質的に激変
現状：各画素測定に対応

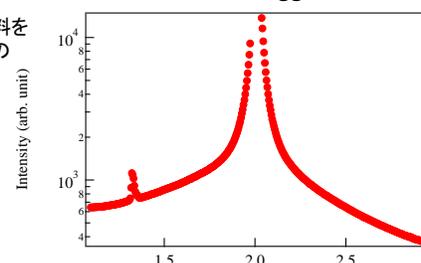
提案：画素数に比例した大情報データ
→ 数時間測定で表面構造が明らかに

BL13XUロボットアームでのfeasibility測定は良好



グラファイトからのCTR散乱
(θ: 5.3 ± 2.4 degで試料を回転し測定した96枚の画像を合成)

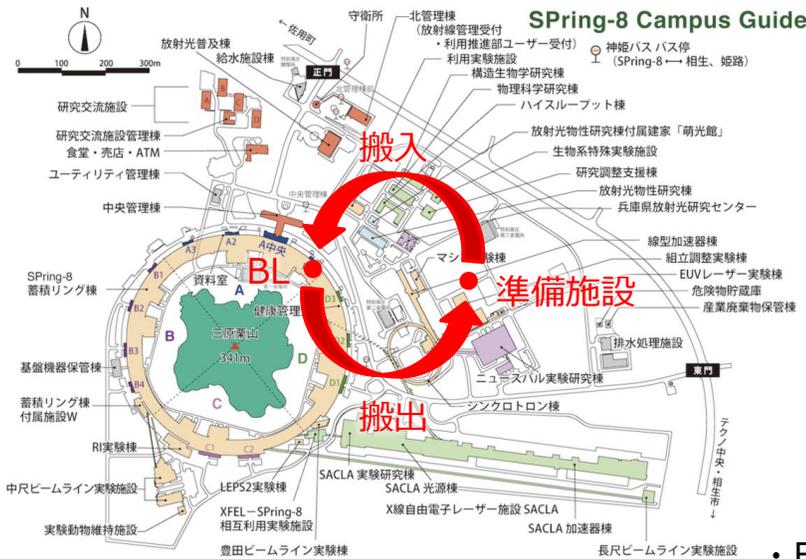
表面構造に起因する表面垂直方向の強度分布
002 Bragg



30 keV以上の100倍高輝度・高エネルギーX線で超高速計測が可能に

利用開始から整備が継続され様々な実験装置がSPring-8に組み込まれている
 = 蓄積リング棟に新たな装置を配置することが年々難しくなっている
 → ユーザが試料準備や装置持ち込みできる**準備施設**を提供
 → より多様な分野・ニーズの実験が可能に

ユーザが自由に
 準備施設からビームラインに
 自前装置を搬入・搬出



・ ESRFではSupport Labsがある

<https://www.esrf.fr/home/UsersAndScience/support-and-infrastructure/support-labs.html>

ユーザが自前装置を使ってSPring-8キャンパス内で一連の閉じた実験
 (試料作製・オフライン評価・放射光実験) が行えるよう希望したい