

ビームライン提案、意見・要望のまとめ

ビームライン提案

1. ナノ集光スピンの分解 ARPES 実験ステーション
2. 先端材料開発のためのナノスピン電子状態解析ビームライン
3. 磁性・スピントロニクス材料科学ビームライン
4. 超高エネルギー分解・運動量分解共鳴非弾性軟 X 線散乱ビームライン
5. ガンマ量子の基礎・応用研究ビームライン

意見・要望のまとめ

ナノ集光スピン分解 ARPES 実験ステーション

概要	<p>物質の電子構造を直接観測可能な角度分解光電子分光 (ARPES) を機軸として、電子のスピン状態を分解し、更にはナノ集光した励起光源を用いることで実空間分解をも可能とする「ナノ集光スピン分解 ARPES」を開発し、電子相分離、ドメイン、エッジ状態など、未開発分野の物性研究を可能とする実験ステーションを提案する。物性科学に革新をもたらす極限技術が、「ナノ集光スピン分解 ARPES」であり、現在世界各地の放射光施設で開発が競って行われており、日本でも一刻も早く独自開発が求められる次世代技術である。</p> <p>世界初となる「ナノ集光スピン分解 ARPES」を成功させるためには、それぞれが得意とする極限技術を集結させる必要がある。必須と成る各要素技術で実績のある主要メンバーを結集し、オールジャパン体制で未踏極限装置の開発を成功させ、日本の物性物理学コミュニティに大きく貢献する。</p>
----	---

	項目	提案内容		
光源	挿入光源	EUV 用 APPLE 型		
	エネルギー帯域	50~1000 eV		
	輝度	10 ¹⁹ ~10 ²⁰ (photons/s/mm ² /mrad ² /0.1%b.w.)		
	偏光	状態	直線(鉛直、水平)、左右円偏光	
		高速切り替え	不要	
	分光器の種類	可変偏角不等間隔平面回折格子分光器		
	フラックス(@試料)	>10 ¹² (photons/s) / >10 ¹¹ (photons/s)		
	エネルギー分解能(E/ΔE)	10,000 / 30,000		
エンドステーション	ブランチ	ブランチ A	ブランチ B	
	主要装置	ナノ集光スピン分解 ARPES 装置	汎用的なマイクロ集光 ARPES 装置、PEEM 装置等	
	集光光学系	超精密加工ミラー		
	ビームサイズ@試料	< φ 100 nm		
	測定対象(試料)の形態	銅酸化物高温超伝導体、トポロジカル絶縁体など		
	試料サイズ	-		
	試料環境	極低温冷却(液体 He)		
	付帯設備等	<ul style="list-style-type: none"> ● オフラインでレーザー実験が可能な実験装置 ● ナノスケール試料の調製用装置、ナノスケールの状態をオフラインで観察(評価)する装置等 ● オフライン評価装置を利用可能な実験室の整備 ● 寒剤の供給体制の整備 		
その他・特記事項	ブランチ B は、ブランチ A のデッドタイム時に他のユーザーが利用することを想定			

先端材料開発のためのナノスピン電子状態解析ビームライン

概要	<p>スピントロニクス分野では、スピンを電気制御するための基礎学理の構築とそれに基づくデバイスの作製の高度な融合が課題となっている。トポロジカル絶縁体分野では、スピン分解角度分解光電子分光(スピン ARPES)を用いて、物性の鍵を握る表面ディラック電子を直接見ることで新型トポロジカル物質の実証と新機能開拓が大きく進展している。革新的な先端材料や電子デバイスの開発には、電子構造に立脚した戦略的な材料機能探索とデバイスデザインが不可欠となるが、従来の放射光光源では、電子状態解析と材料開発の連携が十分確立できていないのが現状である。材料科学及び先端分光研究者の賛同のもと、「先端材料開発のためのナノスピン電子状態解析(ARPES)ビームライン」を提案する。ナノ集光した VUV 及び SX による極限性能ナノスピン ARPES を用いて、電子の基本物理量(エネルギー、運動量、スピン)を高空間分解能で測定し、物質機能にかかわる基盤電子状態を明らかにするものである。これまで測定が困難だった超微小試料、デバイス構造等のオペランド分析、不均一な試料のドメイン分割測定等が可能となる。</p>
----	---

	項目	提案内容	
光源	挿入光源	ヘリカルアンジュレータ、または、APPLE-II	
	エネルギー帯域	30~1100 eV	
	輝度	$10^{19} \sim 10^{20}$ (photons/s/mm ² /mrad ² /0.1%b.w.)	
	偏光	状態	直線(鉛直、水平)、左右円偏光
		高速切り替え	-
	分光器の種類	可変偏角不等間隔平面回折格子分光器(Monk-Gillieson 型) * 高次光カットミラーの導入が望ましい	
	フラックス(@試料)	10^{15} (photons/s/0.1%b.w.)	
	エネルギー分解能(E/ΔE)	> 30,000	
エンドステーション	ブランチ	-	
	主要装置	ナノスピン ARPES エンドステーション	
	測定手法		
	集光光学系	高 NA 集光ミラー/フレネルゾーンプレート	
	ビームサイズ@試料	φ 30 nm	
	測定対象(試料)の形態	スピントロニクス材料、トポロジカル材料、超伝導材料、原子層材料(グラフェンなどの炭素系ナノ材料)、強相関電子材料、熱電材料	
	試料環境	極低温(4 K)、電流・電場印加	
	付帯設備等	<ul style="list-style-type: none"> ● 試料作成準備システムとプラグイン型機器(MBE 成膜装置、半導体成膜、スパッタ・アニール装置、嫌気性試料準備装置) ● 時間分解スピン ARPES 測定用偏光可変レーザー(放射光と同期) 	
その他・特記事項	大量のデータを短時間に高信頼度で分析するため、ベイズ推定やスパースモデリングなどの情報科学的手法を用いた高速データ解析アルゴリズムを開発する		

磁性・スピントロニクス材料科学ビームライン

概要	磁性・スピントロニクス材料科学研究を主眼とした軟 X 線ビームラインを提案する。今後の磁性・スピントロニクス材料やデバイスの多元素化や多積層化に応じて、それらを分離して計測できる元素選択的な軟 X 線分光の重要性はますます高まる。本提案では、当該研究の将来の発展を見据え、高精度・ハイスループット軟 X 線磁気分光(スピン・軌道分極分光)を基盤技術としつつ、最先端のダイナミクス計測、ナノイメージング、in situ 計測、オペランド計測技術を組み合わせることで、基礎・応用研究から産業利用まで幅広い磁性・スピントロニクス研究のニーズに応える。
----	--

	項目	提案内容		
光源	挿入光源	分割型クロスアンジュレータ		
	エネルギー帯域	150~2000 eV		
	輝度	10 ¹⁹ ~10 ²⁰ (photons/s/mm ² /mrad ² /0.1%b.w.)		
	偏光	状態	直線(鉛直、水平)、左右円偏光	
		高速切り替え	100 Hz	
	分光器の種類	可変偏角不等間隔平面回折格子分光器		
	フラックス(@試料)			
エネルギー分解能(E/ΔE)	3,000~10,000			
エンドステーション	ブランチ	ブランチ A	ブランチ B	
	主要装置	<ul style="list-style-type: none"> ダイナミクス&ハイスループット計測ステーション ナノイメージングステーション 	In-situ(超高真空その場)計測ステーション	
	測定手法	XAS、XMCD、XMLD、XLD、RXMR、RMOKE、XRMR、STXM 等		
	集光光学系	KB	FZP	
	ビームサイズ@試料	10×10 nm ² 、1×1 μm ²	10×10 nm ²	
	測定対象(試料)の形態	磁性スピントロニクス材料、強磁性・反強磁性体(バルク、薄膜、多層膜)、二次元量子物質等		
	試料サイズ	-		
	試料環境	超高真空 10 ⁻⁸ Pa 以下、温度数 K~500 K、外部磁場 5 T 以上		
	付帯設備等	<ul style="list-style-type: none"> オンライン試料作成システム(MBE、スパッタ蒸着、電子線回折装置等)をプラグインとして設置 磁気特性評価装置(VSM、SQUID、Kerr 効果顕微鏡等) オペランド測定用試料の調整装置 各種試料加工装置(イオンミリング、FIB 等) 試料評価装置(AFM、XRD 等) 		
	その他・特記事項	<ul style="list-style-type: none"> 先端計測のためのインフラ整備(ノイズ対策など)をビームライン建設段階で実施 ブランチ A と B に性格の異なるエンドステーションを配置することで運用を効率化する 		

超高エネルギー分解・運動量分解共鳴非弾性軟 X 線散乱ビームライン

概要	<p>超高エネルギー分解かつ運動量分解が可能な共鳴非弾性軟 X 線散乱(軟 X 線 RIXS)を開発し、最先端の学術・産業研究を追求するビームラインを提案する。軟 X 線 RIXS は、元素選択性に加えて高い化学状態・サイト選択性という特長を持っており、低エネルギーの励起を直接観測できる最も強力な分光手法の一つと言える。さらに、エネルギー分解と運動量分解を組み合わせることによって、「共鳴非弾性 X 線回折」という新たな分光手法が誕生する。回折による構造と非弾性散乱による低エネルギー励起の2次元情報からは、不均一系における特定の構造の電子状態計測すら可能になる。また、界面や内部などの特定の部位ごとの電子状態の識別にまで到達し、最先端の学術・産業研究を推進するためだけでなく、「共鳴非弾性 X 線回折」という究極の分光手法の実現のためにも超高エネルギー分解能は非常に重要である。</p> <p>エネルギー分解能は、ビームライン・RIXS 分光器ともに $250\sim 1000\text{ eV}$ で $E/\Delta E > 150,000$ を追求し、全エネルギー分解能 $E/\Delta E > 100,000$ を最終目標とする。運動量分解は、回転範囲 $30\sim 150^\circ$ (運動量空間で $16\sim 96\%$) という広い領域を迅速かつ簡便に測定できる統合システムを開発する。</p>
----	--

	項目	提案内容	
光源	挿入光源	APPLE-SX	
	エネルギー帯域	250~1000 eV	
	輝度	$10^{19}\sim 10^{20}$ (photons/s/mm ² /mrad ² /0.1%b.w.)	
	偏光	状態	直線(鉛直、水平)、左右円偏光 *RIXS 分光器に備え付ける偏光子によって散乱 X 線の偏光解析を行うため σ 、 π (水平・垂直直線偏光) の両偏光を必要とし、RIXS の磁気円二色性の実験等に円偏光も必要
		高速切り替え	-
	分光器の種類	不等間隔平面回折格子分光器と SX-700 型駆動機構	
	フラックス(@試料)	-	
	エネルギー分解能($E/\Delta E$)	$> 150,000$ *発光点からエンドステーション最下流まで 80 m 近い距離が必要のため、RIXS 分光器回転のためにも可能な限りスペースを希望	
エンドステーション	ブランチ	-	
	主要装置	RIXS 分光器(不等刻線間隔球面回折格子分光器) *全長 12 m 程度	
	測定手法	軟 X 線 RIXS	
	集光光学系	あり	
	ビームサイズ@試料	0.5 μm 以下	
	測定対象(試料)の形態	固体(微小結晶、薄膜)、分子系(液体や気体)	
	試料サイズ	-	
	試料環境	液体、アンビエント、電場下など 実動作環境(高温、高圧ガス、電圧印加)下	
	付帯設備等	-	
その他・特記事項	“dRIXS”の d は、「共鳴非弾性 X 線回折」diffractive RIXS の d である。dynamite(あつと驚くほどすばらしいもの)という意味も含む。		

ガンマ量子の基礎・応用研究ビームライン

概要	<p>量子電磁力学(QED)では光子と光子が散乱等の相互作用することを予言しているが、ほとんど未解明である。光子の研究には、エネルギーの高いガンマ線の方が適している。そこで、ガンマ線領域の光子「ガンマ量子」の本質及び物質との相互作用を研究し、ガンマ線のあらたな産業利用を切り開くことを目的とし、大強度レーザーコンプトン散乱ガンマ線(LCS-γ)ビームラインを設置することを提案する。LCS-γビームラインは、蓄積リング中で外部から入射したレーザーと電子ビームを散乱させることでγ線を生成する。波長が約 100 μm のアルコールレーザーを新規に導入することでガンマ線の 1MeV まで低エネルギー化を図る。MeV 領域の LCS-γ でわが国はこの分野を先導している。低エミッタンス電子ビームにより、これまでの LCS-γ 施設を超える輝度のガンマ線を発生でき、世界トップレベルの研究拠点とすることが可能である。</p> <p>挿入光源等の大型装置は必要とせず、レーザー収納、およびガンマ線測定のためのハッチが主たる設備であるため、一般的な X 線ビームラインに比べれば、全体のコストは小さい。</p>
----	--

	項目	提案内容	
光源	挿入光源	不要	
	エネルギー帯域	-	
	輝度	-	
	偏光	状態	-
		高速切り替え	-
	分光器の種類	-	
	フラックス(@試料)	-	
	エネルギー分解能(E/ Δ E)	-	
エンドステーション	ブランチ	-	
	主要装置	大強度レーザー、レーザー導入チャンバー、ガンマ線用鉛コリメータ、アブゾーバー等	
	測定手法	レーザーコンプトン散乱ガンマ線(LCS- γ)	
	集光光学系	-	
	ビームサイズ@試料	-	
	測定対象(試料)の形態	-	
	試料環境	-	
	付帯設備等	-	
その他・特記事項		<ul style="list-style-type: none"> ● 蓄積リング短直線部への設置を想定。加速空洞のある直線部への設置も原理的には可能。 ● ガンマ線ビームを単色化するとき、コリメータをガンマ線発生点から遠ざける方がアラインメントが容易なので、長いビームラインがとれる位置が望ましい。 ● レーザー波長=1-100 μm で、ガンマ線エネルギー=1.7-170 MeV ● ガンマ線フラックス= 7×10^7 ph/s/100%BW (レーザー波長=1 μm、出力=10 W の場合) ● 直線偏光、円偏光、無偏光を可変。 ● レーザー設置に 1 m x 2 m 程度の光学台、ガンマ線測定実験に 2 m x 5 m 程度のスペースが必要。 	

意見・要望のまとめ

- [1] 各ビームラインに対しての具体的意見では有りませんが、医療関連のビームラインでの希望意見を申し上げたく思います。過って高エネ研や SPring-8 のビームラインの 1 ユーザーとしての、放射線医学的見地で申します。生体内水分子吸収から逃れた電離作用を極力避けた、エネルギーの放射線に対する増感剤の検索が、今後の新しい放射線治療を目指すべきではないでしょうか？勿論、高画質イメージングには生体内水分子が対象になると思います。その診断と治療の振り分けを十分使い分けるビームラインの併用が理想的と思います。つまり、異なる 2 ビームラインの同時照射による診断と治療の同時対応ができる組み合わせを希望致したく思います。それは、従来の放射線医学の革新的展開が期待できると思います。
- [2] 様々な放射光施設において、X 線吸収分光などのその場観察技術では、ピコ秒オーダーでの時間分解測定が可能になってきています。ピコ秒、マイクロ秒、ミリ秒領域での化学反応は、分子の拡散、分子どうしの衝突、それに引き続いておきる分子内結合の切断や組み替えが起こる重要な時間領域であり、この時間領域の反応を XAFS のような元素を選択して観測できる手法により追跡することは、大きな科学的にも産業的にも需要があるものと思われます。そこで、今回建設される次世代放射光施設でも、その路線を継承して、オーソドックスな観測手法（X 線吸収分光や X 線解説）による、少なくともマイクロ秒オーダーでの時間分解測定ができるビームラインが整備されることを希望します。また時間分解測定は、プローブ（パルスレーザー、パルス電子線など）で誘起した化学反応をパルス X 線でプローブすることにより行いますが、そのためのパルスレーザー、パルス電子線（小型のもの）が設置できるようなスペースがハッチ内にできることを希望します。
- [3] 私どもの研究グループは、地球外物質（隕石や惑星間塵、および探査機「はやぶさ」などの太陽系探査機リターンサンプル）の放射光を利用した X 線回折分析を行いたいと考えております。この分析により、太陽系の初期進化のプロセスに関する重要な知見が得られます。主にケイ酸塩鉱物からなる微小粒子（10~200 ミクロンサイズ）の惑星試料を、ガンドルフィカメラ内部に設置し、試料に放射光を照射することでその試料粒子の X 線回折パターンを取得する実験です。回折パターンはイメージングプレート（IP）上に記録され、IP 読み取り装置でデータを読み取ります。同種の実験を KEK で定期的に行っており、実験手法は確立しており、今回建設される東北放射光でも同種の実験を行いたいと思っております。

使用希望の X 線ビームは

X 線のエネルギー：アンジュレーターで発生した約 6 KeV の単色 X 線

ビーム径：1 mm 程度

実験に必要な機器：カメラ（既設）、カメラ架台、IP 読み取り装置、真空ラインなどになります。カメラは小型（20 x 20 x 10 cm 程度）で架台も小型で済みます。東北放射光で考案されているドッキング型の一つに提案させていただく予定でいます。私とともに、当研究室の助教の松本恵博士や大学院生と協力して実験装置を整える予定でおります。どうぞよろしくお願

ます。

[4] (背景・提案の趣旨)

次世代放射光施設では、放射光の産業利用、産学共創が重要なターゲットであり、実用への放射光計測の応用を通じた社会還元が期待されている。

SPring-8 ユーザー協同体分野融合型研究「実用」グループでは、地球環境問題、資源エネルギー問題を解決するために、すでに利活用されている種々のデバイス・材料において、測定の高難しさのために分析・解析が進んでいない現象を、最先端の放射光科学で研究することを目指している。目標が実現すれば、経験に基づいていた多くの既存技術がサイエンスのメスにより解明され、デバイス・材料の開発指針のマイルストーンとなる。

本グループが着目している対象は、これまでの放射光計測では困難であった固液界面、特に、固液界面近傍の時間的、空間的に複雑な構造である。現在、SPring-8 の新分野創成課題において、その計測手法の確立と分野融合による新しい学術・産業領域の創出を目指している。この中で、固液界面の放射光計測は技術的進歩が現在進行形で、近い将来、標準的な測定手法へと基盤化されることを確信している。本要望では、SPring-8 で技術開発が進み基盤化されるであろう固液界面を対象とした放射光分析技術を次世代放射光施設でも標準化することを要望するものである。

固液界面を対象とする研究者、技術者は多分野にまたがり、要望も多岐にわたる。このため、対象によって異なるニーズに関しては、敢えてまとめることはせず、多様性を担保するために要望を列記することとする。

(要望)

次世代放射光施設において、回折・散乱、分光、イメージングのすべての手法において、固液界面を対象とした計測基盤を整備することを要望する。パートナーが整備するビームラインの設計を参考にすれば、それぞれの計測手法に設置可能な固液界面試料用プラグインを整備することが第一の要望となる。プラグインにおける試料周りの技術は、SPring-8 で確立しつつあるものを技術移転することも可能であると考えます。

固液界面科学の学術の深化に今後必要となる技術ニーズを以下に列記する。

1. 固液界面の理学を深堀するためには、電子状態変化と原子分子イオン等の物質移動に関する輸送現象をマルチスケールで相関交差計測することが必要である。そのためにはマルチ量子ビーム・マルチプローブによるポンプアンドプローブや *in-situ/operando* 計測が必須のアイテムである。
2. 上記項目の更なる展開として、X 線の同時多波長化、パルスの時間差化のほか可視・近赤外・赤外領域の同期化された（フェムト秒、ピコ秒）光ビームの同時利用などの新たな計測手法は、これまで得られなかった情報を取得でき、関連設備の整備を要望する。
3. ビームタイムの需要に関して、本グループが実施中の SPring-8 新分野創成利用課題では、固液界面を基点にした多様なテーマがあり、利用可能上限で制限された年間 60 日でも十分ではなかった。固液界面は、本グループのテーマにとどまらず、関連分野の研究者数が多い事、産業界からの潜在的な需要がある。このため、固液界面分野で年

間 120~180 日程度のビームタイム需要を見込まれており、それに対応できる環境整備を期待する。

4. 固液界面の原子分解能観察手法としても急速に発展している AFM、STM などの走査プローブ顕微鏡との組み合わせにより、固体表面側のモフォロジー変化や液体側の界面ごく近傍の層構造を観察しつつ、分光手法により液体の水素結合構造や電位制御された固体表面の電位勾配、表面官能基の化学状態などを観察する同時計測が新しい分析手法の組み合わせとして考えられる。
5. マイクロ・ナノビーム透過型（あるいは反射型）軟 X 線小角・広角散乱と軟 X 線吸収・発光分光の同時測定によって物質の階層構造情報と電子状態情報を同時取得することで、各階層構造と関連する電子状態を捉えられる。これにより従来の「構造・機能」関連の議論から一歩進み、「構造・電子状態・機能」関連の議論が可能となる。
6. 条件によっては（一例を示せば上記走査プローブ顕微鏡などとの複合測定において）、固液界面试料を水平静置する可能性も考えられる。これらの展開として、計測装置全体において試料位置固定で、設置試料に合わせた計測システムの設計も期待される。

[5] 短直線部硬 X 線 RtU 光源（多極ウイグラーテンダー硬 X 線）を活用して、後方散乱 X 線（コンプトン散乱）を用いた測定設備の設置を望む。

タイプ#1 あるいはタイプ#6 が適当と考える。想定するエネルギーは 30 keV である。想定するビームラインは BL02-MPW-A&B あるいは BL03-MPW-A&B である。当面の検出器は SSD 蛍光 X 線検出器を想定する。

提案する測定は以下のとおりである。

○後方散乱 X 線を用いた軽元素イメージング

後方散乱 X 線イメージングはセキュリティーなどの分野で実用化されている。しかし、現時点では強度情報のみを利用している。後方散乱 X 線のエネルギースペクトル（コンプトン散乱 X 線スペクトル）を解析すれば、Li などの軽元素のイメージングが可能である。cm 程度の製品の非破壊検査を想定する。例えばナノビームを利用した電子部品のエレクトロマイグレーションの非破壊検査などが可能と考えられる。

○後方散乱 X 線を用いた化学反応のイメージング

コンプトン散乱 X 線のエネルギースペクトルから求められる電子運動量分布は運動量空間の波動関数すなわち「化学結合の様子」を反映している。さらに、電子運動量から電子の運動エネルギーを求めることができるが、ビリアル定理から、電子の全エネルギーを求めることができる。これは、「化学結合のイメージング」+「反応場の全エネルギーイメージング」すなわち「化学反応のイメージング」のその場測定が可能と考えられる。

[6] 意見募集の際に併せて再掲されたビームライン構想委員会報告書(参考資料 3)では、いくつかのビームラインで回折・散乱の測定が実施できるように書かれている。

メールイン主体のビームラインでは

- ・BL01-TU-A&B メールイン全エネルギー X 線分光
- ・BL02-MPW-A&B メールイン構造・電子状態トータル解析

メールイン対応の装置以外では

- ・BL03-MPW-A&B 階層的構造解析

基本計測：RtU タイプ1 ステーションをベースに(ステーション A)走査型散乱イメージング、(ステーション B)広角から超小角までの X 線散乱 (WAXS、SAXS、USAXS)

- ・BL08-U リアルタイム計測ビームライン

ビームラインの特徴：X線分光・散乱の高速計測による動的現象(化学反応など)のミリ秒からマイクロ秒領域でのリアルタイム追跡

プラグイン計測：ラウエ X 線顕微鏡、時間分解 CTR 散乱

が対応している。

メールインで使えるような標準的な構造解析装置だけでは放射光施設の性能は発揮しきれない。本意見書では、学術・産業の高度な要求に応える先端ステーションで用意される回折・散乱測定用の装置がどのようなものであるべきかについて、回折・散乱手法の専門家の視点で意見を述べる。

標準的な操作では得られない構造情報を得るために必要なのは、実は特殊な装置ではなく、回折理論の前提となる要求---平行な単色入射 X 線が回転中心を通る---を満たし、かつユーザーの望む調整幅を持った回折計である。近年の技術動向として、ナノ顕微構造解析や界面・表面あるいは二次元物質の構造解析の実用性が高まっている。これらを普及段階まで発達させるため、またさらに新しい構造解析手法を生み出すために、以下のような回折計の整備を強く望む。

1. マイクロ・ナノビームを利用した走査型回折・ピンポイント回折実験に向けた装置
次世代放射光施設の利点であるナノビームを生かした、走査型回折イメージングのための装置の要件は、

- A) 50 nm 以下の公差精度を担保するため、横振り型であること
- B) 試料マウントが高い剛性を持ち、50 nm 以下の位置決め精度を持つ事
- C) 集光光学系と回折計の間に振動などが入らない事
- D) ハッチ内の温度を可能な限り安定させる事

である。

高分解能回折イメージングのためには試料の狙った場所に X 線を照射する必要があり、そのために SEM・EDS あるいは可視光の高倍率顕微鏡を回折計に組み込む事が要求される。これらの重さによる機械的なたわみが問題になるため、従来の放射光施設で主流である縦振りの回折計ではなく、横振り型の装置である必要がある。これに付随して、2-30 keV の広範囲における移相子による縦偏光生成がビームライン光学系側に要求される。

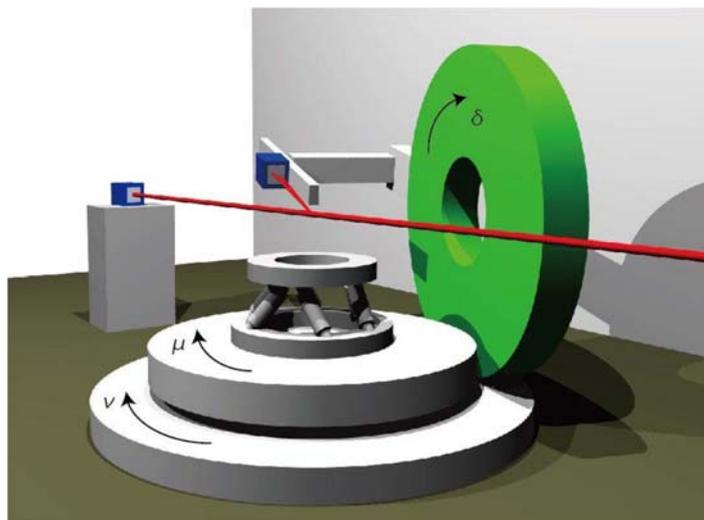
横振り型の回折計のメリットは、多様な試料環境を実現するための拡張性にも現れる。超伝導マグネットや、電気化学・触媒化学などの応用に向けた試料環境制御も十分に可能になる。更には鉛直方向の引張応力に対する水平方向の歪みなど、偏光を縦横自由自在に操作する事で実材料の三次元応力解析等、これまでに無い知見が得られるはずである。

2. 界面・表面あるいは二次元物質の構造解析に向けた装置

グラフェンに代表される二次元物質や、不均一触媒のような界面由来の機能性に対する理解の重要性が高まっている。実用の視点での固液界面の研究を SPRUC で企画するなど、産学両面で界面の理解が求められている。構造の観点でこのような界面構造研究を行う装置には、次のような性能が要求される：

- E) 試料位置・角度を高い精度で制御し、たわみなど無いこと
- F) 回折計の動きが迅速であること
- G) 光子計数型の二次元検出器を備え、低バックグラウンド測定ができることである。

E)は B)と実質的に同じであり、F)、G)は 1)の装置でも有用である。そのため、この 2 つの目的を持った装置は一つの装置で同時に実現できる。色々な実現法があるだろうが、一例として下図のような装置が考えられる。かなりの部分をヘキサポッドの自由度によって実現し、機械的な歪みを排除する。PI 社製 H850 型のヘキサポッドのスペックは以下の通りであり、我々の要求をほぼそのまま満たすものである。



図：試料台を大型のヘキサポッドで支持する回折計。検出器を ν 、 δ の二軸回転、試料角度をヘキサポッドの回転自由度と水平面内回転(μ)で回す。照射位置の制御はヘキサポッドの並進自由度で行う。小角散乱や反射率の測定は下流側に設置した二次元検出器で行う。

利点・国際的な技術動向との比較

ここで提案する局所構造解析は、大きなゆらぎを内包する非平衡な物理や化学反応の物理の研究で重要である他、企業からの要求も非常に強い分野である。金属材料の腐食、積層セラミックキャパシタのような微細構造をもつコンデンサ、圧電セラミックスのダイナミクス、リチウムイオン電池を始めとする電池内の局所構造、三次元構造をもつ LSI の局所オペランド解析、物質合成時の核形成生成のその場観察、多孔性物質の吸着や触媒反応時の構造計測などのように、極めて狭い領域で、何が起きているかを知りたいという産業的な需要は広い分野で存在している。このような需要に答えるための装置が新放射光源に整備されていることは、日本に

とって大きなメリットとなる。

国際的には、前ページの図に類似した回折計が DIAMOND (I07 Surface and Interface Diffraction)にあるようである。PLS-II のコヒーレント回折ステーションも幾分かの類似性がある。ヘキサポッドは並進ステージの積層ではないため全体として剛性が出やすい構造であり、たわみが問題になる装置で徐々に普及しているが、国内の回折計ではまだ使われていないようである。

ビームライン需要予測

SPRUC の実用グループで進めている固液界面の研究では、SPring-8 で分光・回折併せて年間 60 日のビームタイムを使っている。これは分担責任者 5 名での使用時間であるため、関連分野の研究者の数を考えると、優にこの数倍を見込むことができる。回折に関しては、SPring-8 BL13XU で各期ルール上認められる上限までビームタイムを使っている状況である。顕微回折は、SPring-8 BL13XU で、表面回折と別ハッチを使って実施されている。現状、この 2 つが共存する BL13XU は SPring-8 でも有数の「混んだ」ビームラインであり、大きな需要が現に存在する。

- [7] 東北大学理学研究科化学専攻（及び多元研関連研究室）では、有機化合物、生体分子（タンパク質）から酸化物を含む無機化合物までの多様な新規化合物を幅広く合成、開発しています。これまで多くの教員が放射光施設（Spring-8、KEK）を利用し、各自が開発したサンプルを単結晶、薄膜状態など様々な形態で測定を行い、構造決定や評価を行ってきた経験を持っています。一方で、化学分野の特徴として、新規化合物・材料の合成、開発に主眼を置いて研究を進めているので、放射光の利用はほとんどの場合ライトユーザーとしてのものであり、測定やデータ解析における専門家のサポートを前提としています。また、必要とするビームタイムは必ずしも多くないと予想される一方で、試料が特殊（大気中や室温で不安定など）であったり、測定環境の依存性も考えられるため、各測定やビームラインに適した試料の形態などの試料調製に関する情報や測定時、さらには測定後のデータ解析に関する手厚いサポート体制の有無が非常に重要となると考えられます。特に測定にあたっての助言および測定後の解析まで含めて支援していただける体制を強く望みます。

- これまで、作製した無機材料薄膜（酸化物を中心とした電子材料、超伝導材料、磁気材料等）を、共同研究により、放射光で評価してきた。主な測定は、X線回折、X線光電子分光、X線吸収微細構造、蛍光X線ホログラフィー、X線磁気円二色性分光、であり、今後は（スピン）角度分解光電子分光等も検討している。主に必要としている情報は、結晶構造、結晶欠陥構造、化学組成（H、N、Oといった軽元素も）、化学状態、電子状態、バンド構造、磁気構造で、場合によっては極低温、高温や、強磁場の環境が必要になる場合がある。

おおよそ年数回、共同研究者に依頼測定をお願いするか、年一回あるかないかで SPring-8 で測定する、というライトユーザーであった。今回は場所も近くなるので、ビームタイムの空き状況（と予約のしやすさ）、測定のサポートの手厚さによっては、ヘビーユーザーになる可能性がある。

- 科研費新学術領域研究において、放射光測定のグループと共同研究を行っていたが、放射

光測定ของกลุ่มの扱う試料が多くデータ解析に時間を割けないため、われわれ試料作製グループでデータ解析をすることになった。すると、データ解析ソフトの習得やデータ解析に時間がとられ、研究全体としての効率は芳しくなかった。試料作製グループ側も試料作りに大きな労力を割いているので、生データを渡されても困ってしまう。放射光測定の人材に加え、放射光測定で得られたデータを試料作製グループが無事扱えるようにするためデータ解析・解釈をする人材が必要である。試料作製グループはオリジナルな試料を提供できるため、放射光測定の専門家、データ解析・解釈の専門家、がすべてそろえば、高効率で研究を進めることができると強く感じる。

- ・ 作製した試料を清浄に保って放射光測定を行うために、超高真空薄膜作製装置から放射光のビームラインに試料を搬送するためのバキュームスーツケースの整備、反応性の高い試料を経時劣化から守るグローブボックス等の試料保管設備、試料表面をビームライン中でクリーニングするスパッタ装置、等が常備されると、クオリティーの高いデータが取得できるように思う。
- ・ 物質系と測定手法は、有機分子および典型元素分子 (Bi までの重原子も含む、分子量～1500 程度) であり、主として微小結晶の X 線単結晶構造解析および電子密度解析を行っている。これまでの実績から、年間必要なビームタイムは 12 時間×4 程度。また、扱っている資料がきわめて空気中で不安定な分子、熱的に不安定な分子であるので、それらを容易に取り扱える (マウントできる) ような装置ないし仕組みを希望します。
- ・ これまで、Spring-8 や KEK を利用し、有機化合物の微小単結晶構造解析、及び基板上に作製した有機薄膜の構造解析 (2D-GIWAX、SAX) を行ってきた。サンプルは比較的安定であるが、有機薄膜の構造解析では結晶性の低いものも多いうえに、作製条件により結晶性や配向の変化があり、これらを体系的に評価出来れば研究の進捗に大いに寄与すると思われる。従って、これらのサンプル数の多いこれらの測定については、ルーチン測定が可能な運用形態で、かつフレキシブルにビームタイムを予約できる運営体制を希望する。
- ・ 「物質系と測定手法」
生体分子、特にタンパク質 (膜タンパク質を含む) を対象とした X 線結晶構造解析および X 線小角散乱法による溶液中の構造解析を主たる手法として用いている。生体高分子の結晶構造を決定する上で位相決定は不可欠のプロセスであるが、タンパク質中に含まれる硫黄原子や人工的に導入した重金属原子の異常散乱シグナルを利用した位相回復法が主流となりつつある。そのためには、これら重原子の吸収端をカバーする軟 X 線領域で高輝度を有する次世代放射光は極めて利用価値が高いと考えられる。またタンパク質の中には金属錯体を活性中心に含むものが多く存在し、酵素反応触媒中のそれら金属錯体の電子状態や局所微細構造を解析する上でも、軟 X 線領域で高輝度を有する次世代放射光は極めて有効である。
- ・ 「年間必要なビームタイム」
1 回あたりのビームタイムが 12 時間として、2 か月に 2 回、使用頻度の多い時で月 1 回のビームタイムを使用できることが望ましい。年間 計 80～120 時間のビームタイムが必要と考えている。

- ・ 「これまでの放射光を用いた実績」

これまでに放射光を 15 年間継続して使用している。その間、多くの膜タンパク質や水溶性タンパク質の結晶構造および溶液構造を決定し、26 個のタンパク質構造の座標データを Protein Data Bank に登録した。

- ・ 「装置のサポート体制に関する要望」

限られた使用ビームタイムの中で、できるだけ効率よくハイスループットで X 線回折データおよび X 線散乱データの収集を行うため、自動結晶マウントロボットや自動データ収集プログラムが搭載されていることが望ましい。またタンパク質結晶の性質や大きさ、さらには位相決定などの用途に応じてビーム径や波長が自在に調整できるビーム仕様が必要である。

もう一つ重要な観点として、SPring-8 および高エネルギー研究所などの既存の放射光施設との住み分けが重要と思われる。すなわち、上述の軟 X 線領域に高輝度を有することに加え、既存の放射光施設が運休期間に入った際にも、次世代放射光が代替の放射光施設としてフル稼働する状況が理想である。

[8] 東北大学大学院理学研究科は北青葉山キャンパスに位置しており、計画されている次世代放射光施設から徒歩圏内にあります。理学研究科では研究・教育の一環として施設を有効に活用させて頂きたいと考えております。ここでは特に物理学専攻に所属する教員（協力講座教員を含む）が、施設に何を要望しているかに関して記します。なお、エンドステーションの建設により深く関わることを希望する研究者から別途様式 1・様式 2 の意見・要望書を提出する予定であり、ここに記述するものは比較的ライトなユーザーからの意見・要望です。

物理学専攻のミッションは、基礎的な観点から自然界の階層性を理解することであり、したがって次世代放射光施設には基礎科学の振興に格別のご理解を頂きたいと考えます。学術分野の研究者の自由な発想に基づいた探求が、長期的に産業へ展開された例が多いのは周知の事実であり、基礎科学の振興は次世代放射光施設の理念と整合すると考えています。具体的には、学術研究へのビームタイムの確保と課題選定基準への配慮を要望します。

物理学専攻では、半導体・強相関電子物質・金属間化合物・有機物質を含む多彩な物質を扱っています。物質研究の基礎的な手法である構造解析を行うビームラインの整備へ大きな期待を持っています。具体的には、室温・低温の多結晶・単結晶構造解析および EXAFS が随時行える体制が整えられることが望ましいと考えます。初期ビームラインポートフォリオにある BL01、BL02 のビームラインが該当します。これらのラインはメールインであり、非専門家でも活用可能であると理解しています。従って教育に活用することも可能であり、月に数時間程度のマシンタイムを得て学部生あるいは院生の実験教育のために活用することも検討しています。こうしたことが可能となるのは理学研究科が施設の徒歩圏内に位置しているためであり、ぜひ検討をお願いします。基盤的研究や教育に関する活用で問題になり得るのは費用の点であり、企業向けではないアカデミア対応の価格設定を要望します。

物理学専攻では、放射光を活用して物性発現の微視的機構を解明しています。そのために有用な先端的なスペクトロスコープを実施するビームラインの整備を期待しています。強相関量

子物質における電荷・スピン・軌道の秩序および励起を解明するためには共鳴X線散乱（弾性・非弾性）が有効です（BL03、BL10）。物質（元素）に応じてエネルギー域が異なることから硬・テンダー・軟X線のエネルギー域における装置が必要であり、またスピン・軌道による散乱は特徴的な偏光依存性を示すことから円偏光を含む偏光制御が可能であることが必要です。また、超高分解能ナノスピン ARPES による機能性物質の電子状態の解明を計画しています（BL06、BL09）。ナノ集光された極端紫外線・軟X線を用いて、原子層物質・高温超伝導体・トポロジカル絶縁体などの機能性物質のフェルミ準位近傍の電子状態を明らかにします。エッジ状態などの局所電子状態を可視化するための世界最高レベルの空間分解能（30 nm）、スピン状態を高精度で可視化するための多チャンネル3次元スピン検出器、電子軌道選択のための直線偏光および左右円偏光切り替え、エネルギーギャップ・バンド分裂微細構造観測のための超高エネルギー分解能（ $E/\Delta E > 30,000$ ）などの性能を期待します。さらに、スピントロニクス基盤材料である磁性体の物性評価に関して、磁気円二色性分光（MCD）の整備を期待しています（BL05）。東北大学の有する強磁場・超伝導技術を活かして、世界最高レベルの強磁場環境での測定を可能とすることで、基礎科学と材料応用の両面で革新的な知見を得ることができると考えます。磁気ドメインの可視化のためには、ミクロンオーダーの分解能があるイメージングができることが望ましいと考えます。こうした観点から、放射光と走査プローブ顕微鏡（SPM）を組み合わせた新しい分析手法の開発を計画しています。放射光のエネルギー可変性・偏光制御性と、SPM の高い空間分解能・局所分析能力を融合させることで、原子スケールでの実空間像と直接対応付けて、元素分析や磁気構造分析ができるようになることを期待されます。独創性の高い手法を生み出すには、基礎技術の蓄積と試行錯誤が不可欠ですので、長期的視野での配慮をお願い致します。

上記のような高度な計測を可能とする装置群の多くは、プラグイン機構を活用して導入されると理解しています。ユーザーとしての観点から申し上げますと、装置の出し入れは多大な労力と時間を必要とするものであり、実験成功の障害となりうるものです。したがって、プラグイン機構の導入にあたっては、ユーザーフレンドリーな設備となることと矛盾しないよう、格別の配慮を頂きたく存じます。

末尾に施設の運営体制に関して意見を申し上げます。ユーザーが気軽に施設を利用し有意な成果を挙げるためには、開かれた運営体制が敷かれることが必須だと考えます。大学側の研究者（若手教員・学生を含む）が気軽にビームラインに顔を出し、施設側の研究者とフランクな交流を温めることが施設の有効利用につながると考えています。また、学部学生が最先端の放射光施設に足を運ぶことは、将来的に放射光分野への人材供給の入り口として効果的ではないかと考えられます。さらに、東北大学のオープンキャンパスには多数の高校生が訪れてくれます。こうした機会を通して放射光施設を社会に宣伝することは、放射光科学の長期的な発展に資すると考えます。次世代放射光施設が、近視眼的な成果を追求することではなく、長期的な人材育成に活用されることを祈念しております。

- [9] 地球内部の地殻とマントルにおいて、鉄は4番目に多い元素である。また鉄は酸素、ケイ素、マグネシウムといった、他の主要構成元素と比べて「重い」元素であり、地球内部で重要な役割を担っている。地球中心部の内核において鉄は固体金属として存在し、外核では液体となっ

ている。この液体鉄の対流が地球磁場を作っている。また、地殻とマントルでは Fe^{2+} 、 Fe^{3+} が一般的だが、最近の研究で下部マントルには Fe^{4+} を含む物質があるとの予測がなされている。さらに、価数の変化に加えて、高圧力下で鉄は高スピンから低スピン状態に転移することが知られている。我々の研究により、地表の含鉄物質が変質してできる水酸化鉄は、高圧力下で高密度の構造に相転移し、中心核までマントル対流で沈み込んで核に水素を供給することが分かり、地球深部における鉄の挙動に関する研究は近年活発に行われている。しかしながら、鉄が高圧下の鉱物やマグマ中で、どこにどの様に入っているかは、今なお充分理解されていない。このような研究には、高圧力下での XAFS が有効である。

高圧力実験にはダイヤモンドアンビルセルが広く用いられている。この中で、試料はダイヤモンドに挟まれているため、実験には高エネルギーの X 線が不可欠であると、一般には考えられている。しかしながら、近年ではダイヤモンドの中央部を削り込んで薄くしたものが開発されておりこれを用いることで低エネルギーでの実験も可能である。硫黄の K 吸収端 (約 2.47 keV) の測定例もある。そこで我々は、3 GeV の高輝度光源の特性を生かして、鉄に着目した XAFS 研究に取り組みたいと考えている。鉄を含む物質で特に地球深部において重要な、かんらん石構造、スピネル構造、ペロブスカイト構造、 CaIrO_3 構造、 InOOH 構造、Pyrite 構造などの結晶、さらにマグマやそれを急冷して作ったガラスの研究を推進したい。

このため、次世代放射光施設で整備される XAFS ビームラインでは、ダイヤモンドアンビルセルを載せて $1\ \mu\text{m}$ ステップで動かせる微動ステージを設置して頂くよう、強く要望したい。高圧 XAFS の実験が可能になれば、国内外の地球科学研究者に加えて、物質科学の研究者の利用が見込まれ、多くのユーザーの利用が予想される。

エネルギー：7 keV (Fe の K 吸収端) 付近

ビームサイズ：5 μm × 5 μm

持ち込む装置：特殊加工のダイヤモンド (右図) を使用した高圧セル

必要な測定器：入射・透過 X 線測定用イオンチェンバ

[10] マグマは地球内部の高温高圧環境で発生し、地表に噴出します。我々はこれまで、SPring-8 の BL22XU において、単色 X 線とマルチアンビル型高圧発生装置を使用して、X 線吸収法でマグマの密度を高温高圧下で測定する実験を行ってきました (例えば Sakamaki, Suzuki et al., 2013 Nature Geoscience)。この種の実験は国内の他の施設ではできず、我々がこの分野の研究の先端を進んできました。しかしながら、ビームラインを管理する JAEA/QST の方針により、2013 年頃から高圧地球科学の実験は事実上不可能になっています。

一方、近年では ESRF や APS といった海外の放射光施設において、日本出身の研究者などが主導してマグマの研究に力を入れるようになっていきます (例えば Kono, Y. and Sanloup, C. editors, *Magmas Under Pressure*, Elsevier, 2018)。このままでは火山国である日本がマグマの研究で世界から大きく水をあけられることとなり、我々は危機感を募らせています。

さて、我々が SPring-8 の BL22XU でマグマの密度測定に使用していた X 線のエネルギーは 23 keV です。これは、ケイ素 (Si) や酸素 (O) といった「軽い」元素がマグマの主要構成元素だからです。このエネルギーは、次世代放射光施設で計画されている「テンダー領域」のビームラインで発生されるビームに属します。

ところで、マルチアンビル装置というと、一般には総重量 10~20 トンもある大型のものをイメージされる方が多いと思いますが、近年の圧力発生技術の進歩により、300 mm 四方の大ききで 50 kg 程度のマルチアンビル装置が実用化されています。この装置ですと、東北大学北青葉山キャンパスにある我々の実験室から、次世代放射光施設へ持ち運ぶことも可能です。

そこで是非要望したいのですが、上記のような装置を取り付けてマグマの密度測定ができるように、X, Y, Z, θ Z の微動ステージを備えた架台を用意していただけますでしょうか。次期光源の高輝度マイクロビームを活用することで、SPring-8 での測定を 1 桁上回る精度で X 線吸収データを取得でき、加えて実験圧力（地球内部の深さに相当）を従来の倍に伸ばすことができると考えております。高圧力下でのマグマの研究には、我々と研究交流協定を結んでいるドイツのバイエルン地球科学研究所などでも関心を示しております。次世代放射光施設での実験が可能となれば、我々を通じて多くのユーザーが利用に来所すると思われま

ご検討いただきますよう、宜しくお願い申し上げます。

エネルギー：23 keV 付近（テンダー領域 X 線）

ビームサイズ：5 μ m \times 5 μ m

持ち込む装置：小型高圧発生装置

必要な測定器：入射・透過 X 線測定用イオンチェンバ

[11]地球惑星科学において、放射光を始めとする量子ビームの利用は近年活発になっている。東北大学大学院理学研究科地学専攻の各研究室では、至近距離にある地の利を生かして次世代放射光施設を積極的に活用し、最先端の研究を推進したいと考えている。

これまで地学専攻で放射光を利用してきた研究室は、量子ビーム地球科学、初期太陽進化学、鉍物学、火山学・地質流体、断層・地殻力学などがあり、多くの成果を挙げてきた。加えて国際共同大学院プログラムで海外の研究機関から教員と大学院生を積極的に受け入れているので、次世代放射光施設に多くのユーザーを呼び込むことが出来る。

以下に、我々の実績をもとに発展させた、次世代放射光施設利用例の一部を挙げる。我々が希望する実験が可能になるよう、ビーム・計測器・周辺機器の整備を是非お願いしたい。

(1) 太陽系物質

探査機のはやぶさ 2 が持ち帰る試料などは、太陽系形成初期の情報を持つ極めて重要な物質である。また、南極表層雪から回収された宇宙塵もまた重要な試料だが、直径 100 μ m に満たないため、その分析には次世代放射光のマイクロビームが適している。我々は衝突の痕跡を残す隕石の解析で数多くの成果を挙げてきた。このような隕石から、惑星の形成過程を解明することが出来る。これまでは X 線回折実験による鉍物同定が主だったが、我々は次世代放射光を活用して蛍光 X 線による化学組成分析や、X 線 CT を用いた内部組織の観察などを組み合わせることで、惑星の形成進化過程に関する理解を飛躍的に進めたいと考えている。

(2) マグマ

一つの火山でも、火砕流を出すような爆発的活動になったり、溶岩流を出すような非爆発的活動になることがある。この違いは火山ガスがマグマの上昇中にマグマから抜けるか否かの違いによる。このメカニズムを解明できれば、噴火予知に貢献できる。そこで、我々

はマグマの通り道（火道）を模擬した小型の実験装置をビームラインに持ち込み、吸収イメージング、位相差 CT、4DCT で火山ガスの挙動を「その場」観察したいと考えている。また、マグマの密度は噴火における上昇速度に直結するため極めて重要な物性である。地球内部の高温高压状態で、火山ガスを溶かし込んだマグマの密度を測定したい。測定には小型の高圧発生装置を用いた X 線吸収法で行う。エネルギーは 23 keV 付近が適しており、3 GeV 光源でも全く問題ない。これらの研究では、従来よりもエミッタンスの小さい次世代光源が極めて有効であり、これまでよりも時間・空間分解能の高いデータを得ることができる。

(3) 地震発生メカニズム

地震は地球内部で岩石の破壊によって発生する。しかしながら、破壊のメカニズムは十分解明されていない。これを解明できれば、地震予知や防災に役立つことが出来る。我々は、新型の D111 型装置をビームラインに持ち込み、4DCT で岩石が内部から破壊する様子を「その場」観察する。これには次世代光源の高輝度ビームが不可欠である。"

(4) 鉱物中の弾性波（地震波）速度

鉱物中の弾性波速度を測定し、地震波トモグラフィーと合わせて地球深部の不均質構造を解明する。これにより、マントル対流を詳細に知ることができ、地震や火山活動の原因を探ることが出来る。弾性波速度は X 線非弾性散乱法を用いる。現状では 10 keV までの X 線を出すアンジュレータービームラインが計画されているが、我々の研究を推進するために、20 keV までの「テンダー領域」まで発生できるようにして頂くことを強く希望する。

[12] 【ビームライン】 BL09-U-A 極限性能軟 X 線分光ビームライン

【エンドステーション】 超高分解能 nano-spin-角度分解光電子分光

【意見】

角度分解光電子分光 (ARPES) は、高温超伝導体における超伝導ギャップ異方性の確定に代表される強相関電子系機能性材料における機能特性を決定づける電子状態 (バンド構造、フェルミ面) を実験的に決定することができる強力な実験手法として知られている。特に、放射光を用いた ARPES は、3 次元的な構造をもつ機能性材料の電子状態を、励起エネルギー走査により面間方向の波数 (運動量) にまで分解して得ることができることから、材料における特異な機能特性が発現するメカニズムを 3 次元運動量空間における電子状態のピンポイント解析により明らかにする上での重要性が非常に高い。

さらに、近年の機能性材料の研究において欠かすことのできない要素として、空間 (もしくは時間) 反転対称性の破れとスピン軌道相互作用の協奏により発現する特異な量子スピン構造をもつ、いわゆる「トポロジカル物質」の創出が挙げられる。この系における材料特性は、材料表面一界面において形成される特異なスピン偏極した構造 (例えば、トポロジカル絶縁体におけるバルクギャップ中のスピン偏極ディラック分散など) により特徴づけられることが知られている。特に、最近では超伝導ギャップ中に形成されるスピン偏極構造の観測例も報告されており、高輝度超高分解能なスピン分解 ARPES 測定の実現は、多様化する機能性材料の機能性発現メカニズムを明らかにする上で、世界的な競争力を持

続する上でも非常に意義深い。

一方で、トポロジカル物質系と類似したディラックコーンと呼ばれる特徴的な電子状態により材料の機能特性が支配される系としてグラフェンに代表される原子層系物質もまた放射光施設における材料開発研究を推進する上で欠かせないターゲットとなっている。このような原子層系物質において特に重要視されているのは、単原子層を積み重ねたいわゆるヘテロ構造物質を作成した際の、機能性の変化をナノメートルサイズの実空間ドメイン単位で、電子状態レベルで明らかにすることにある。しかしながら、現状で nano-ARPES 測定可能な放射光施設は世界においてもほとんど存在せず (Schwarzschild 型多層膜光学系@Elettra、建設中@ALS)ユーザー利用可能なナノフォーカス放射光を利用可能な放射光施設に至っては、世界的に全くないといえる現状にある。

以上の背景から、超高分解能 nano-spin-ARPES 装置を備えたビームラインは、建設が予定されている日本における次世代放射光施設において最重要の緊急性を備えた、近代の機能性材料の分析のみならず、次世代の機能性材料を創出する上でも必要不可欠なビームラインとなることは確実であり、その実現を強く要望する。"

「ビームライン構想委員会」報告書に関する総合的な意見

財団諮問委員会「ビームライン構想委員会」報告書（初期ビームライン答申）には、ユーザーファーストの考えでビームライン構想がなされており、産業界のニーズにも配慮されたポートフォリオ案が示されている。また、施設が、ビームラインポートフォリオに基づいてビームライン群を一元的に管理運営すること、それを実現するための方策として、RtU コンセプトによる共通化と効率化、ハイスループット計測を実現する自動化などの設計指針が提案されている。われわれは、本報告書のビームライン構想を高く評価し賛同するものであり、確実な実行を望む。

[13] 軟X線、テnderビームラインのシームレスな活用

材料によっては、2 keV 付近をまたいだ測定を行いたい。同じビームラインで 2 keV の上下での測定が望ましいが、複数のビームラインに測定が分かれる場合も、装置パフォーマンスが大きく 変化することなく使えるようにしていただきたい。

[14] わかりやすい名前、説明

ビームライン名、ビームラインで可能な測定法などを、初めて使うユーザーにも分かりやすい表現で示していただきたい。

[15] 試料、ホルダーの仕様

以下を要望する。

- 各国の放射光施設で標準的に使用されている試料ホルダーの採用。
- Operando 測定に対応できる十分な電極端子の標準装備。
- 多数のサンプルを連続的に測定可能な多数サンプル対応。
- 全ラインに共通して、試料のサイズと形状に関する仕様の明示。

[16] 試料のビームダメージ対策

高輝度ビームによるダメージを受けやすい試料に対応するために、エンドステーションによってはビームアッテネーターの採用、試料冷却機構などの対策を望む。

[17]様々な環境に対応する計測

大気非暴露や、温度変化、雰囲気制御など、製品や製造プロセスの様々な環境に則した計測を可能としていただきたい。

[18]operando 測定の充実

XAFS、XPS、RIXS などについて謳われている operando 測定の充実していただきたい。特に、蓄電池などのエネルギーデバイスにおける充放電状態での測定のみならず、半導体デバイスなどの電子デバイスにおいても電圧印加・電流駆動状態での測定を容易にできるような計測機器、試料周りの十分な電極端子の標準装備を望む。

[19]自動化コンビナトリアル測定への対応

作製条件を系統的に多数変えながら材料の特徴量を抽出するコンビナトリアル測定に対応できるように、特定の試料箇所を予め座標指定しておいて、サブマイクロビームを用いて自動的に複数の指定箇所を連続的に測定できる自動化機能の実現をお願いする。特に、X線回折による逆格子マップ測定で対応していただきたい。

[20]補助測定機器の充実

放射光を利用する主測定装置だけではなく、質量分析計、熱分析、動的粘弾性測定など補助測定機器も装備することで、マルチスケールの物理特性、試料状態把握も可能なビームラインにしていきたい。

[21]計測自動化フレームワーク

答申の資料8では「ハイスループット自動計測・解析」として自動化の概念が示されているが、多岐にわたる計測手法の自動化のための測定作業項目をより具体的に抽出し、統一された自動化制御フレームワークを速やかに準備すべきである。

[22]調整機構付きの架台などによる切り替え時間短縮

RtU コンセプトによるコンポーネントの切り替え、プラグイン装置の入れ替えや調整の時間をできるだけ短くなるように工夫いただきたい。例えば、スムーズで迅速に移動可能なプラグイン架台、短時間での（自動）光軸合わせを可能にする調整機構付きのエンドステーション架台、プラグイン架台などを要望する。

[23]可変ビームサイズ

ナノ、マイクロビームの利用に加えて、ラージビームによる広い領域のイメージングや平均的な情報の要求にも対応できるように、ビームサイズ可変の光学系も検討していただきたい。

[24]BL03-MPW-B 階層的構造解析ビームライン

SAXS/USAXS 測定では実験中のカメラ長のスムーズな変更を可能にし、切り替え時間を短縮していただきたい。

[25]BL03-MPW-B 階層的構造解析ビームライン

USAXS に関して、より大きな構造、波数 q で 10^{-3} nm^{-1} 以下の領域まで観察できるビームラインの設置を希望する。

[26]BL06-U-A 軟X線電子状態解析ビームライン

このビームラインにはイメージング機能が設定されていないので、ナノイメージング分光

分析が可能になる光電子顕微鏡をプラグインとして準備することを要望する。"

- [27] ビームライン、またはエンドステーションごとの試料準備室、仮眠可能な居室の設置の検討。
- [28] 実験準備のための保管場所（試料の真空保管、非暴露保管などが可能な設備）の整備と、工作室（非暴露での工作が可能な設備）の整備の検討。
- [29] 有料のシャワー室の整備の検討。
- [30] 国のビームラインの利用推進の体制や方針を知りたい。
- [31] 各エンドステーションにおけるコンポーネントの切り替えに係る調整時間の概算と公開の機会の検討。