

東北放射光施設

3GeV蓄積リング・光源性能 先行ビームライン計画(案)

本計画(案)はたたき台です。できる限り多くの皆様方からご意見を頂戴して、より良い案にまとめたいと思います。ご協力をお願いします

世話幹事:早稲田
(as 2012.12.18.)

高圧力科学、ホログラフィー、XAFS等の研究グループからコメント・要望を頂戴しています。今後の計画立案に反映させたいと考えています。

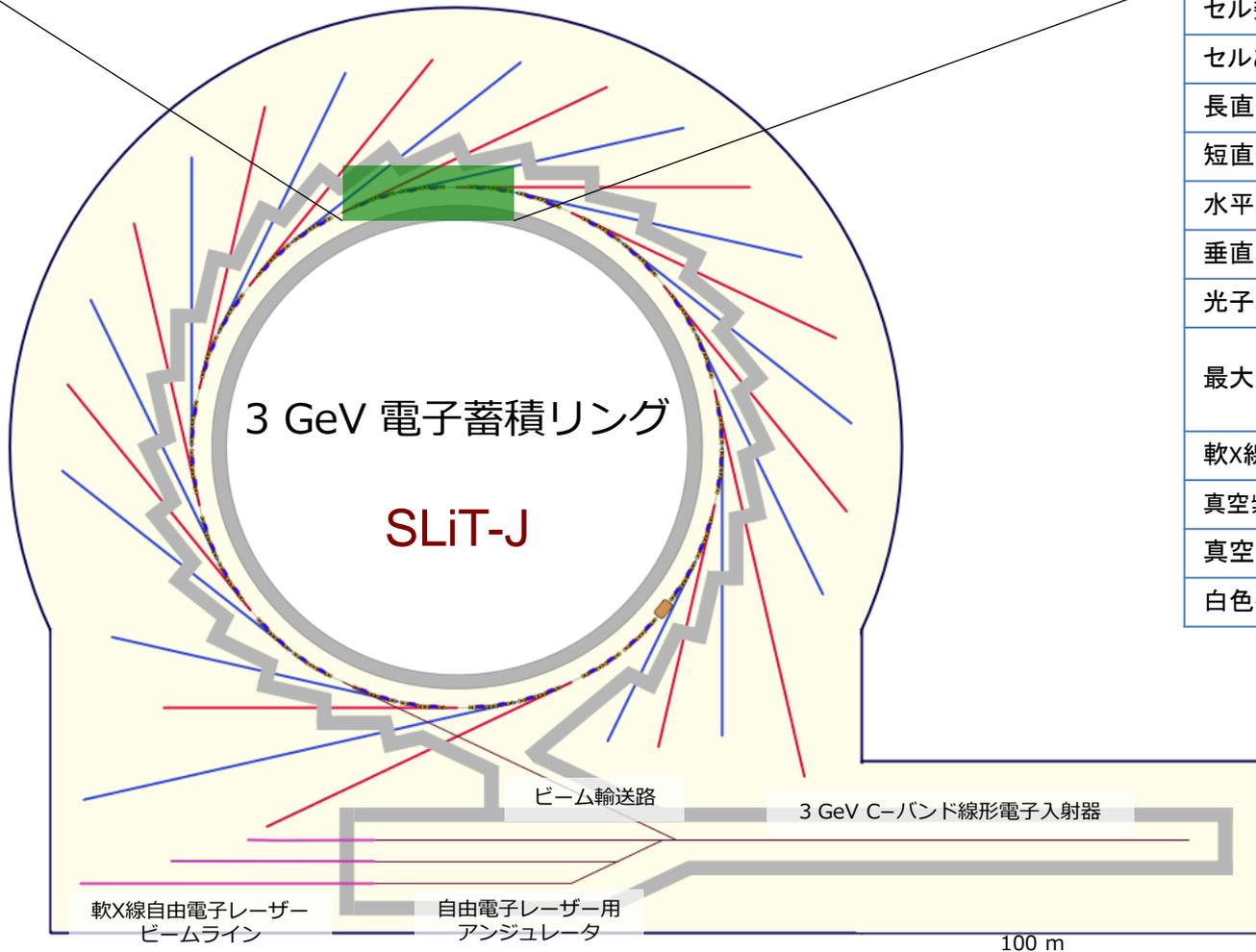
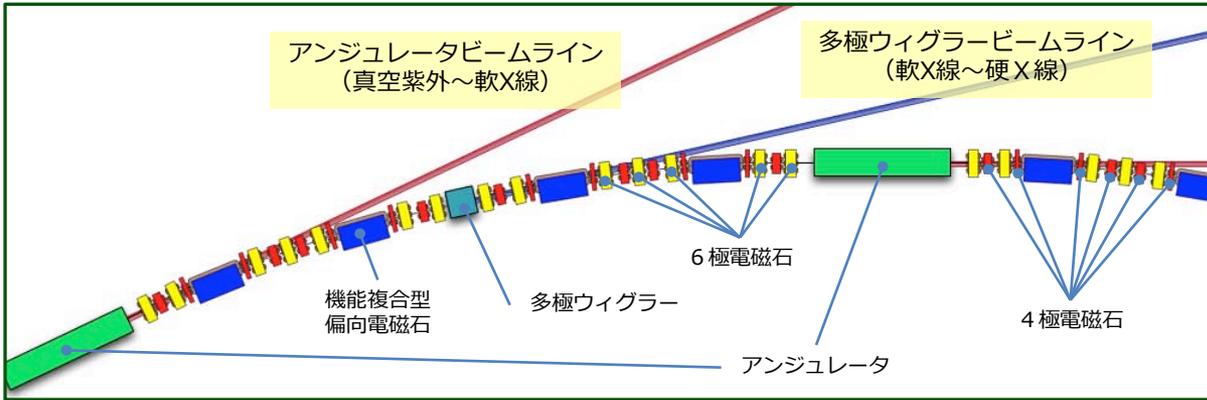
STIR 3GeV高輝度放射光源リング SLiT-J (Synchrotron Light in Tohoku, Japan)

3GeV蓄積リング・光源性能

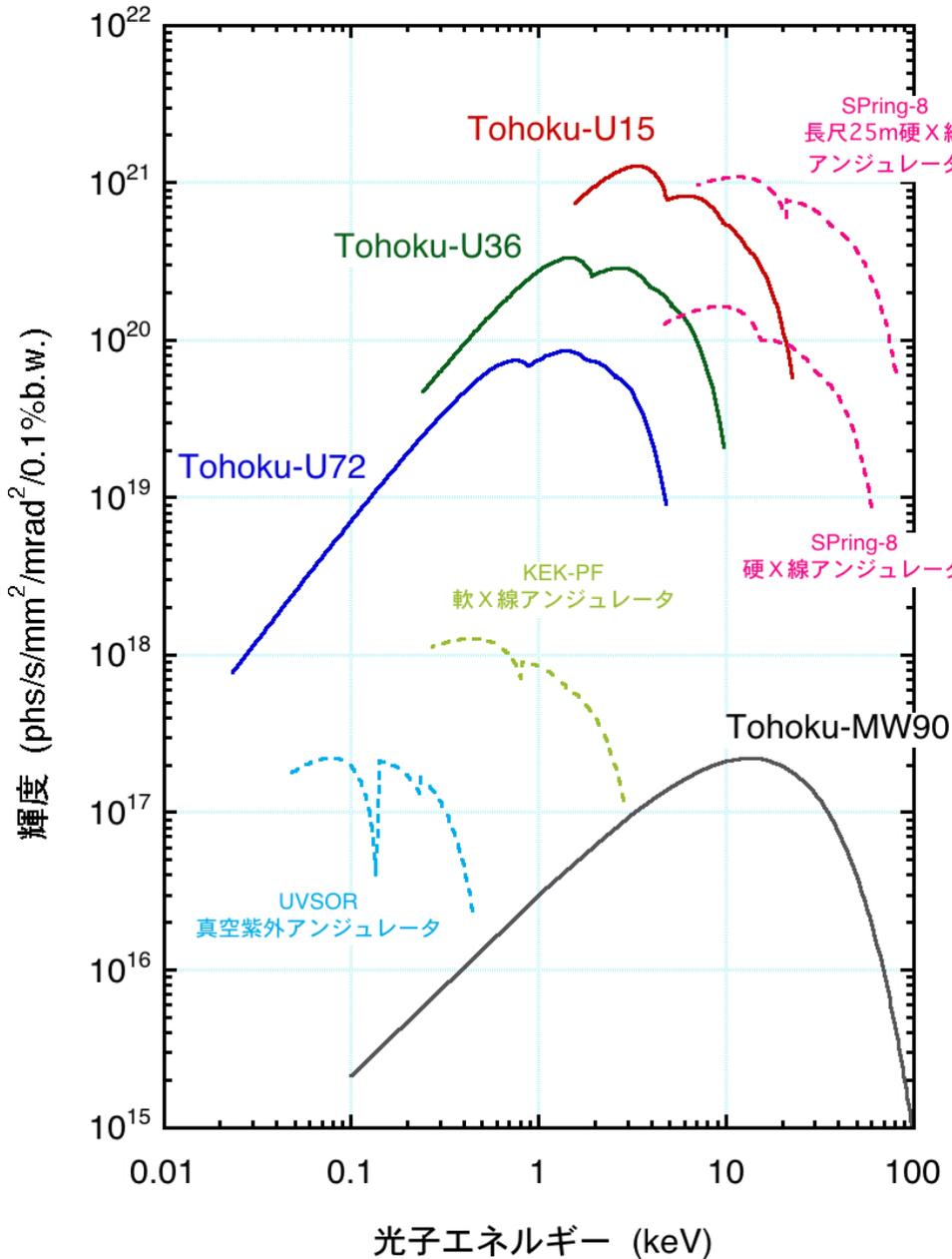
周長	339.9 m
ビーム電流(トップアップ入射)	400 mA
セル数	14
セルあたり偏向磁石数	4
長直線部	5.0 m × 14
短直線部	1.1 m × 14
水平エミッタンス	1.16 nmrاد
垂直エミッタンス	~ 8 pmrad
光子エネルギー領域	0.02 – 70 keV
最大輝度(1 – 10 keV)	10^{21} photons/s/mm ² /mrad ² /0.1%b.w.
軟X線アンジュレータ	2 – 30 keV
真空紫外 – 軟X線アンジュレータ	0.2 – 10 keV
真空紫外アンジュレータ	0.02 – 6 keV
白色硬X線用多極ウィグラー	0.1 – 100 keV

3GeV Cバンド入射器・オプション

最大エネルギー	3.2 GeV
全長	~ 120 m
バンチ電荷	200 pC
セルあたり偏向磁石数	4
軟X線領域のSASE-FELおよびSeed-FEL	



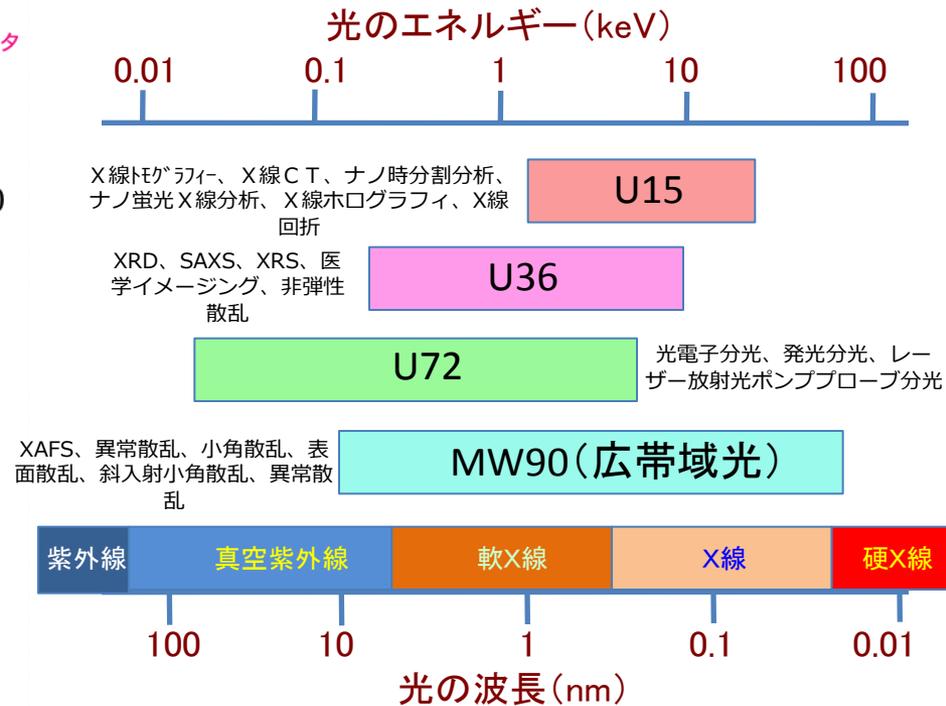
東北放射光の明るさ（輝度）



東北3GeV高輝度放射光リングの代表的な挿入光源 (汎用MW光源を産業応用計測に積極活用！)

名称	周期長	周期数	全長	最大K値
U15	1.5 cm	200	3 m	2.3
U36	3.6 cm	110	4 m	4.2
U72	7.2 cm	56	4 m	10
MW90	9 cm	9	0.8 m	15

光源が覆うエネルギー領域



SLiT-J施設ビームライン建設案

SLiT-J

先行6ビームライン

物質構造解析

BL01: X線回折

X線CT, ラミノグラフィ

物質機能解析

BL02: 吸収・電子分光分析

硬X線光電子分光

局所構造解析

BL03: ナノ分光分析

ナノ蛍光X線分析

局所機能解析

BL04: SXナノ分光分析

ナノARPES、ナノESCA、PEEM

物質階層解析

BL05: 小角散乱

ナノXAFS、ナノ蛍光X線分析

反応解析

BL06: *in-situ* 時分割分析

軽元素 *In-situ*分析

第一期開発光学系

硬X線 標準 ID-BL
ID: U15
光学系: 標準二結晶
3~30keV

軟X線 標準 ID-BL
ID: U36
光学系: 標準回折格子
0.1~3 keV

第二期開発光学系

硬X線 MW-BL
ID: MW90
光学系: 広域二結晶
2~50 keV
or
標準二結晶
3~30 keV

真空紫外 標準 ID-BL
ID: U72
光学系: 標準回折格子
0.02~1 keV

先行ビームライン(案)一覧表

BL No	BL Name	主たる測定法	光学系	ビームラインスペック	研究課題例
BL-01	物質構造解析 ～回折法～	・XRD	・二結晶分光器 ・ミラー集光(μm)	・エネルギー範囲:3~30keV ・エネルギー分解能: $\sim 10^{-4}$ ・ビームサイズ: $\sim 1\mu\text{m}$ ・集光位置での光子数: $\sim 10^{12}$	・超精密結晶構造解析 ・単結晶材料の評価 ・有機EL膜の構造解析 ・機能性無機薄膜材料の原子配列評価 ・メソポーラス膜の構造解析
BL-02	物質機能解析 ～吸収分光・ 電子分光分析～	・XAFS ・電子分光 ・発光分光	・回折格子分光器 ・ミラー集光(μm)	・エネルギー範囲:0.1~3keV ・エネルギー分解能: $\sim 10^{-4}$ ・ビームサイズ: $\sim 1\mu\text{m}$ ・集光位置での光子数: $\sim 10^{13}$	・有機エレクトロニクス分野の膜質評価と制御 ・縦型多層デバイスの界面構造と特性評価 ・バルク敏感硬X線光電子分光による界面評価 ・Liイオン電池用非晶質炭素材料 ・電子相関物性
BL-03	局所構造解析 ～ナノ分光 分析～	・ナノXAFS ・ナノXRF ・ナノMCD ・ナノESCA	・二結晶分光器 ・ミラー集光(nm) ・ダイヤモンド 偏光素子	・エネルギー範囲:3~30keV ・エネルギー分解能: $\sim 10^{-4}$ ・ビームサイズ: $<100\text{nm}$ ・集光位置での光子数: $\sim 10^{10}$	・次世代磁気・光デバイス創成 ・ランダム系物質の局所構造解析 ・構造用セラミックス組織形成メカニズム ・電子デバイス材料の局所構造解析 ・植物、鉱石、土壌中への有害・有価元素濃縮
BL-04	局所機能解析 ～SXナノ分光 分析～	・ナノXAFS ・ナノXRF ・ナノMCD	・回折格子分光器 ・ミラー集光(nm) ・偏光可変ID	・エネルギー範囲:0.1~3keV ・エネルギー分解能: $\sim 10^{-4}$ ・ビームサイズ: $<100\text{nm}$ ・集光位置での光子数: $\sim 10^{10}$	・次世代高性能磁石材料の磁区構造解析 ・次世代磁気・光デバイス創成 ・植物、鉱石、土壌中への有害・有価元素濃縮 ・炭素材料の局所構造解析 ・有機EL膜の構造解析
BL-05	物質階層解析 ～小角散乱～	・小角散乱	・二結晶分光器 ・ミラー集光(μm)	・エネルギー範囲:3~30keV ・エネルギー分解能: $\sim 10^{-4}$ ・ビームサイズ: $\sim 1\mu\text{m}$ ・集光位置での光子数: $\sim 10^{12}$	・高分子コンプレックスのせん断流動時の組織形成 ・ポリマー材料の感温性に基づく材料開発 ・コロイド含有ポリマーにおけるコロイド構造精密解析 ・高強度ゲルの変形組織構造とそれに基づく物づくり ・高分子無機ハイブリッドの光学・強度特性の評価 ・ポリマー分子配向とキャリア移動度の相関解明
BL-06	反応解析 ～ <i>in-situ</i> 時分割分析～	・時分割-XRD /PES/XAFS ・ <i>in-situ</i> XRD /XAFS/PES	・二結晶分光器 ・ミラー集光(nm)	・エネルギー範囲:3~30keV ・エネルギー分解能: $\sim 10^{-4}$ ・ビームサイズ: $<100\text{nm}$ ・集光位置での光子数: $\sim 10^{10}$	・電池反応その場解析 ・触媒動的解析 ・マルチフェーズ金属組織における界面構造 ・高温融体中における介在物形成反応の追跡 ・構造材料の内部応力、転位解析に基づく破壊予測

BL-01:物質構造解析 ～回折～

光学系:

- 二結晶分光器
- ミラー集光(マイクロメートル集光)

ビームラインスペック:

- エネルギー範囲:3~30keV
- エネルギー分解能:~ 10^{-4}
- ビームサイズ:~ $1\mu\text{m}$
- 集光位置での光子数:~ 10^{12} photons/s

主たる測定法: XRD

主要設置装置:

- 高エネルギーX線回折装置
- 共鳴X線構造解析装置
- 高分解能単結晶構造解析装置
- 大型デバイセラーカメラ

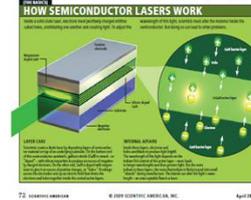
測定対象例: 結晶素材、ランダム構造系素材、半導体結晶、シンチレータ結晶

研究課題例:

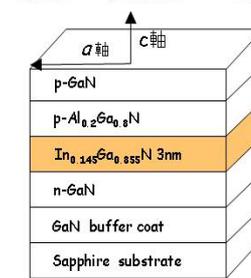
- 超精密結晶構造解析
- 単結晶材料の評価
- 有機EL膜の構造解析
- 機能性無機薄膜材料の原子配列評価
- メソポーラス膜の構造解析

InGaN LEDの局所構造と発光効率

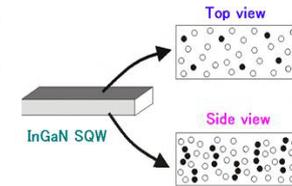
(弘前大学、東北大、岩手大、アイリスオーヤマ、旭化成)



偏光XAFSによる局所構造解析
→ 3nmという量子井戸内のIn原子の局在度の解明

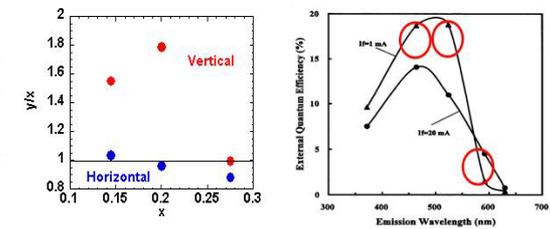


c-InGaN SQW



• In
○ Ga
c軸方向にIn原子が局在している

In原子の局在度が発光効率と関係が見つかる



地震によるインフラ構造へのストレスと寿命予測、その材料開発

(東北鉄骨橋梁(株)、JFE条鋼、新日鉄住金)

産業界の要望: 地震により橋梁の被害が発生し、その後の頻発する地震で橋梁材へのストレスが加わり続けている。その状況確認と、それに対応する材料開発を目指したい。

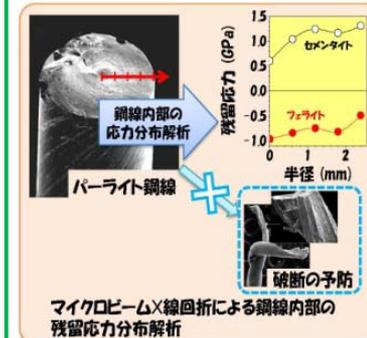
★放射光利用バンク: 橋梁の鉄鋼部材の残留応力とその応力形成過程を解析することを提案。

★分析法: マイクロビームX線回折法

★サポート体制: 東北大学鈴木研究室 (X線残留応力解析法)



宮城県鳴瀬町 小野崎
落橋防止ケーブル(パーライト鋼)が機能した例
フェライト相の残留応力
↓
材料の損傷状態を評価



マイクロビームX線回折による鋼線内部の残留応力分布解析

放射光実験の結果:

- 鋼線外周部では残留応力の低下傾向を確認
- フェライト相の圧縮応力は、セメンタイト相の引張応力による相応力が働く新材料開発に着手

研究進展:

- パーライト鋼線の損傷解析法の開発
- フェライト-セメンタイトの相応力制御による新しい鉄鋼材料開発への展開

BL-02:物質機能解析 ～吸収・電子分光～

光学系:

- 回折格子分光器
- ミラー集光(マイクロメートル集光)

ビームラインスペック:

- エネルギー範囲:0.1～3keV
- エネルギー分解能:～ 10^{-4}
- ビームサイズ:～ $1\mu\text{m}$
- 集光位置での光子数:～ 10^{13} photons/s

主たる測定法: XAFS、光電子分光、発光分光

主要設置装置:

- 軟X線吸収分光装置
- 高分解能光電子分析装置
- 発光分光装置

測定対象例: 液晶材料、有機EL、電子材料、太陽電池、薄膜材料、強相関係物質材料

研究課題例:

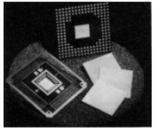
- 有機エレクトロニクス分野の膜質評価と制御
- 縦型多層デバイスの界面構造と特性評価
- バルク敏感硬X線光電子分光による界面評価
- Liイオン電池用非晶質炭素材料
- 電子相関物性

軟X線プローブ計測技術によるナノ炭素材料開発

炭素原子のみで構成されるナノ炭素材料とは?

- 実は低炭素社会の持続的発展を支える基幹材料 -

- ❖ ダイヤモンド: 地上で最も硬く、最も熱を伝え易い
- ❖ 黒鉛: 3000℃までの耐熱材料、高い潤滑性、化学的安定性
- ❖ グラフェン: 最高の移動度
- ❖ ダイヤモンドライク・カーボン: 低摩擦係数、電気絶縁膜



LSI用ダイヤモンド膜
放熱・廃熱技術

- テラヘルツ帯利用デバイス
高速・大容量通信技術
環境汚染計測
- 超潤滑ナノ界面
自動車の燃費向上
駆動装置の低損失化
- 過酷環境での電極・摺動部材
日常生活から産業利用まで
ナノ構造化による新機能発現

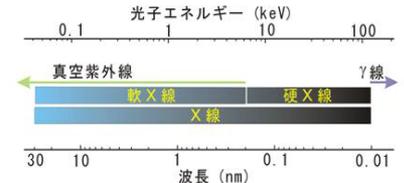
ナノ炭素材料の合成と機能発現のために化学結合状態の解析が不可欠

- 軟X線光電子分光 ⇐ 炭素結合状態と電子状態の高速・精密解析を可能に
- 軟X線吸収分光 ⇐ グラフェン配向構造解析を可能に
- 軟X線発光分光 ⇐ 表面処理なしでの実用炭素材料評価を可能に

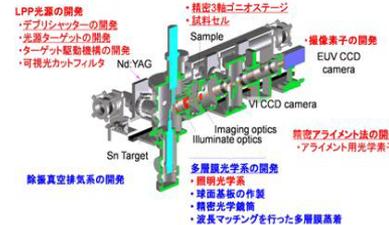
ナノ炭素材料合成装置との複合化 > 低エミッタンス・高輝度軟X線光源 (LSEJ)

軟X線顕微鏡の開発と生体試料への応用

光学顕微鏡の限界を超える顕微鏡の実現に向けて、波長の短い軟X線を用いた顕微鏡の開発が急務である。しかし、光源から撮像素子までの全てが可視光とは異なるため、顕微鏡として機能させるには、各種の開発項目をクリアする必要がある。



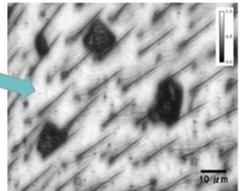
Transmission X-ray Multilayer Mirror Microscope (TXM) の開発



生体試料の観察



試料: 1 mm
ショウジョウバエの羽



軟X線顕微鏡は、水中での生体物質の観察を可能とする夢の顕微鏡。CT法とドッキングすることによって、数十マイクロメートルの試料の3次元内部構造も観察できる。生物を構成する軽元素の吸収端近傍のX線を利用することによって、生体細胞内構造を観察できる。

BL-03:局所構造解析 ～ナノ分光分析～

光学系:

- 二結晶分光器
- ミラー集光(ナノメートル集光)
- ダイヤモンド偏光素子

ビームラインスペック:

- エネルギー範囲:3~30keV
- エネルギー分解能:~ 10^{-4}
- ビームサイズ:<100nm
- 集光位置での光子数:~ 10^{10} photons/s

主たる測定法:ナノXAFS/XRF、ナノMCD、ナノESCA/HAXPES

主要設置装置:

- X線吸収分光装置
- 多素子型SDD検出器

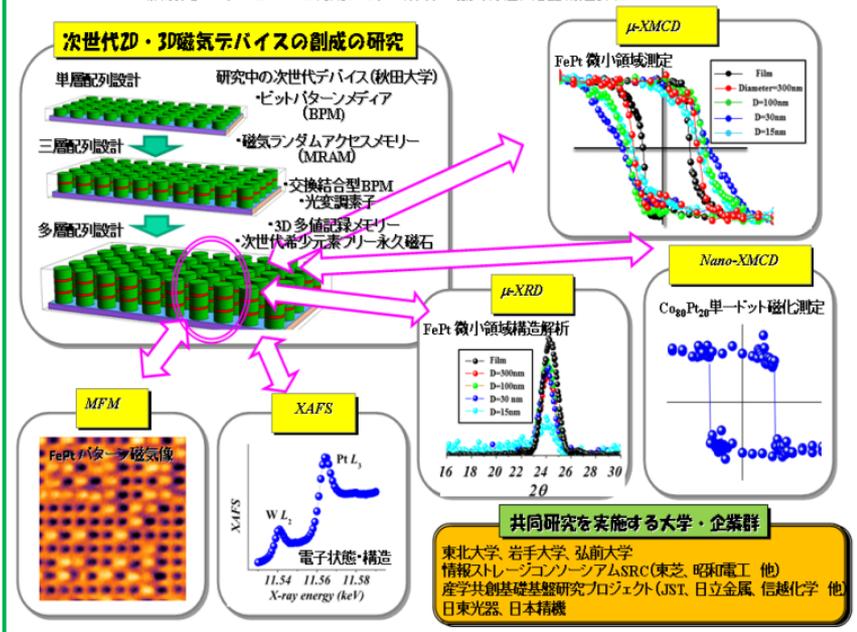
測定対象例:電池材料、触媒材料、土壌・環境物質

研究課題例:

- 次世代磁気・光デバイス創成のためのナノ構造解析
- ランダム系物質の局所構造解析
- 構造用セラミックス組織形成メカニズム
- 電子デバイス材料の局所構造解析
- 植物、鉱石、土壌中への有害・有価元素濃縮の解析

次世代磁気デバイス創成とナノ計測 (秋田大学・秋田産業技術センター)

—放射光マイクロビームを利用したナノ領域の磁気特性、結晶構造評価—



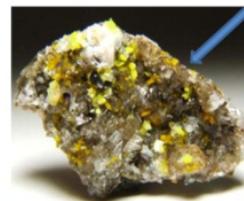
東北地方レアメタル資源の開発 (同和鉱業、小坂精練)

産業界の要望:東北地域の黒鉱地域では、局所的に希土類資源鉱物が発見されている。これまで着目されていなかった、このレアメタル資源を開発したい。

★放射光利用バンク:

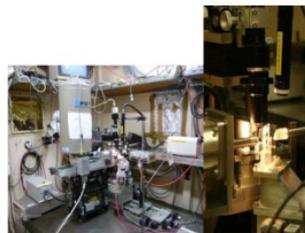
微量な金属元素が硫化物として存在するのかわ酸化物として存在するのかを決定するため状態分析を実施する必要がある。ppmレベルの状態分析が可能な放射光XAFS法およびXRF法の利用をアドバイス。

★鉱物に含有される有価金属の状態分析がキーポイント



★研究協力サポートの依頼:

東北大学篠田研究室(マイクロXAFS法+XRF法)



放射光を用いたmicro-XAFS実験

放射光実験結果:希土類元素は、硫酸バリウムに濃集していることが判明。企業は、結果を持ち帰り、新しい素材精製プロセスの開発に応用

研究進展:放射光実験で得られた微量分析の結果に基づき、環境保全のため黒鉱鉱石に含まれるヒ素およびアンチモンの回収法を産学連携事業として開始

BL-04:局所機能解析 ～SXナノ分光分析～

光学系:

- 回折格子型分光器
- ミラー集光(ナノメートル集光))
- 偏光可変アンジュレータ

ビームラインスペック:

- エネルギー範囲:0.1～3keV
- エネルギー分解能:～ 10^{-4}
- ビームサイズ:<100nm
- 集光位置での光子数:～ 10^{10} photons/s

主たる測定法:ナノXAFS/XRF、ナノMCD

主要設置装置:

- 軟X線吸収分光装置
- 多素子型シリコンドリフト検出器

測定対象例:電池材料、触媒材料、土壌・環境物質

研究課題例:

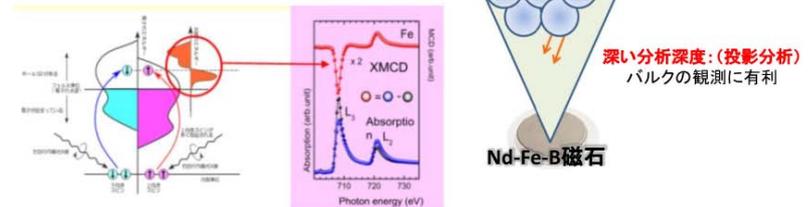
- 次世代高性能磁石材料の磁区構造解析
- 次世代磁気・光デバイス創成のためのナノ構造解析
- 植物、鉱石、土壌中への有害・有価元素濃縮の解析
- 炭素材料の局所構造解析
- 有機EL膜の構造解析

次世代高性能磁石創成の鍵となる、保磁力発現機構の解明

STIR
軟X線ナノアプリケーション
エネルギー:0.7 keV
分析深さ:～0.1 μ m

軟X線ナノビーム:
ナノスケールの薄い結晶粒界を精密に分析。構造・蛍光・化学状態・電子状態
深さ分解能の向上:(断面分析)
表面近傍を選択的に高分解能観測

硬X線ナノビーム:
バルクとしての積情報をもナノスケールで精密に観測。単一結晶粒の分析は困難。



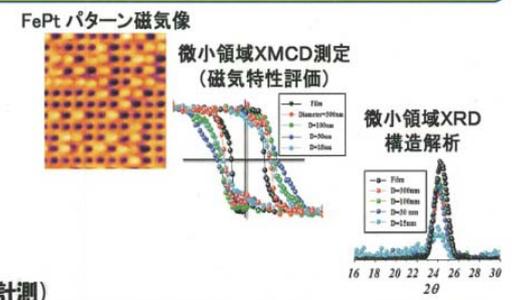
焼結磁石表面・界面近傍の磁気物性の電子論的理解
結晶粒の粒径と磁区のサイズの相関関係の解明 \rightarrow 次世代高保磁力磁石の設計指針の確立へ

次世代磁気・光デバイス創成のためのナノ計測 (TDK、昭和電工、日東光器)

産業の要望: 秋田県・東北地方には先端磁性材料研究の伝統があり、超高密度磁気記録媒体や磁気ヘッドをはじめとする磁性材料開発が行われてきた。次世代磁気デバイス開発や光学素子の開発によって秋田地域経済を活性化したい。

★放射光利用バンク: 先端磁性材料開発や光学素子開発には、ナノ領域の構造解析や磁気特性評価が必要不可欠である。放射光利用バンクからナノ領域磁気物性評価技術をアドバイズする。

★研究協力:
秋田大学石尾研究室
(ナノ磁性材料デザイン、精密磁気計測)
秋田県産業技術センター
(ナノ微細加工、薄膜作製)



実験: X線ナノビームによる直径10nmのFePt粒子のL10規則構造の観察、0.8Gdot/inch²のドットパターンの磁化特性を10Tの磁場で測定
研究進展: L10FePtを用いたピット・パターン媒体の設計指針が明らかになった。

BL-05:物質階層解析 ～小角散乱～

光学系:

- 二結晶分光装置
- ミラー集光(マイクロメートル集光)

ビームラインスペック:

- エネルギー範囲:3~30keV
- エネルギー分解能:~ 10^{-4}
- ビームサイズ:~ $1\mu\text{m}$
- 集光位置での光子数:~ 10^{12} photons/s

主たる測定法:小角散乱

主要設置装置:

- X線回折装置
- 小角X線散乱装置

測定対象例: ソフトマテリアル、有機デバイス・高分子材料・有機無機ハイブリッド

研究課題例:

- 高分子コンプレックスのせん断流動時の組織形成
- ポリマー材料の感温性に基づく材料開発
- コロイド含有ポリマーにおけるコロイド構造精密解析
- 高強度ゲルの変形組織構造とそれに基づくものづくり
- 高分子無機ハイブリッドの光学・強度特性の評価
- ポリマー分子配向とキャリア移動度との相関の解明

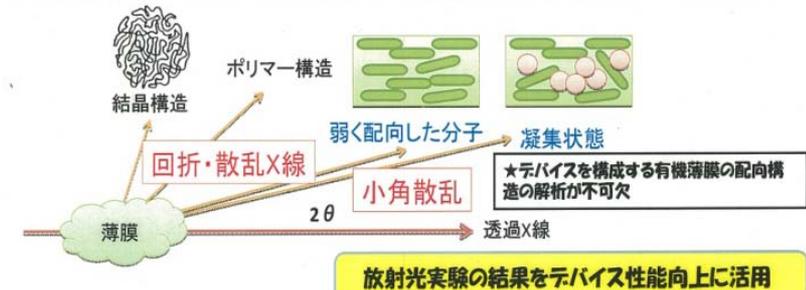
有機エレクトロニクス分野(有機EL/太陽電池/メモリー/Liイオンバッテリー)における高輝度放射光の利用 (LUMIOTEC、東北パイオニア、パナソニック、NECライティングDNP 等)

産業界の要望: ティバイス性能を向上させるために、膜質を把握・定量化したい。そのために、放射光X線を用いて、原子レベルの配列規則性から粒子の凝集状態まで、さまざまなサイズの視点で材料状態を明らかにする。

★放射光利用バンク: 調査対象とするサイズによって使用するX線の波長や測定法が異なるので、状態を調べるのに効果的な手法を提案する。

★研究協力:

山形大学有機エレクトロニクス研究センター、有機エレクトロニクスイノベーションセンター



放射光を使ったゲル研究 (三菱レイヨン、昭和電工など)

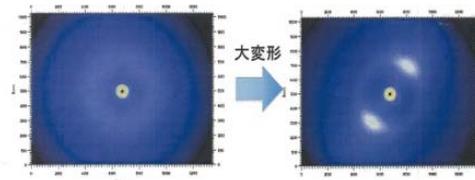
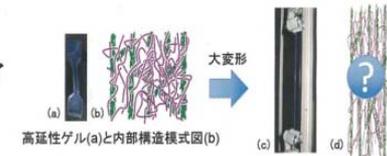
産業界の要望: ゴムに匹敵する高強度ゲルが誕生し、新しいものづくりへの展開が待望されている

★放射光利用バンク: 高次構造ゲルの構造変化の短時間リアルタイム観測が有効照り、放射光利用バンクからの解析アドバイス

★構造変化をリアルタイムで知ることが非常に有効

★研究協力:

山形大学古川英光研究室(短時間リアルタイム計測)



SPring-8 観測例

実験: 放射光実験の結果、ゴムに匹敵する高強度ゲルが誕生し、新しいものづくりへの展開が待望されている。

BL-06:反応解析 ~in-situ・時分割分析~

光学系:

- 二結晶分光器
- ミラー集光素子(ナノメートル集光)

ビームラインスペック:

- エネルギー範囲:3~30keV
- エネルギー分解能:~10⁻⁴
- ビームサイズ:<100nm
- 集光位置での光子数:~10¹⁰ photons/s

主たる測定法:時分割・in-situ XAFS/XRD/PES

主要設置装置:

- 微小部X線構造解析
- X線吸収分光装置
- 高分解能光電子分析装置

測定対象例:

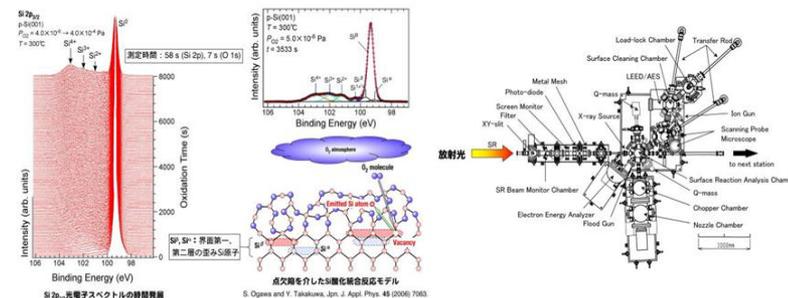
電池材料、触媒材料、磁気デバイス、電子材料、構造材料

研究課題例:

- 電池反応その場解析
- 触媒動的解析
- マルチフェーズ金属組織における界面構造
- 高温融体中における介在物形成反応の追跡
- 構造材料の内部応力、転位解析に基づく破壊予測

高輝度放射光を用いた 光電子分光によるリアルタイム観察

- (A) Si熱酸化ダイナミクスの統合反応モデルの構築と自己組織化プロセスの開発
- (B) ダイヤモンド気相成長機構の解明と気相合成プロセスの技術革新
- (C) 遷移金属表面の酸化反応機構の解明と表面機能制御
- (D) 固体表面エッチング機構の解明と原子スケール制御エッチングプロセスの開発
- (E) 急昇過渡的現象の表面反応ダイナミクスの解明と温度可変制御プロセスの開発



アンジュレータ挿入光源からの高輝度放射光を利用し、表面場で生ずる反応ダイナミクスの解明を通じて、固体表面の機能の完全制御を目指す。

有機薄膜形成素過程の解明 (岩手大学・岩手工業技術センター)

有機半導体デバイス

有機半導体材料の応用用途

- ・有機EL発光素子(ディスプレイ、照明)
- ・有機トランジスタ
- ・有機薄膜太陽電池

用途

- ・ICタグ、ディスプレイ、メモリー、センサー

特徴

- ・フレキシブル(曲げられる)、軽い
- ・印刷で作製する電子素子、大面積、低価格、低温プロセス、環境低負荷
- ・自己組織化、生物模倣、分子素子(高集積化)

放射光X線を使ったリアルタイム構造評価

有機デバイスの特性向上のために

- ・界面の問題(電極/有機半導体、絶縁層/有機半導体、p/n界面)
- ・有機半導体層の結晶性の向上
 - 多形制御(単相化)
 - 配向制御(膜厚方向)
 - 面内配向の制御(単結晶化)

薄膜形成初期過程の解明が重要!

共同研究体制

岩手大学、岩手県工業技術センター、東北大学、山形大学、東北圏内電子材料、エレクトロニクス関連企業など

その他に計画予定のビームライン(案)

✓ X線CT、ラミ/グラフィ

実用材料の素材製造プロセス反応のイメージング、非破壊で素材の内部構造解析を目的としたビームライン

✓ 硬X線光電子分光

材料の表面下層、多層構造界面における状態分析を高感度・高分解能で実現するビームライン

✓ 広域XAFS分析

3~50keVの広いエネルギー領域をカバーし、Ca以上の元素から、重元素のK吸収端をカバー

✓ +/蛍光X線分析

電子顕微鏡領域における微小エリアの高感度蛍光X線分析を目指す

✓ +/MCD

磁気円二色性 (MCD) 分光、X線共鳴磁気散乱や偏光X線分光を+/領域で実現を目指す

✓ +/ARPES、+/ESCA、PEEM

真空紫外~軟X線領域について高分解能+/ビームを利用した電子分光ビームライン

✓ +/XAFS、+/蛍光X線分析

高輝度軟X線+/ビームを利用したXAFS、蛍光X線分析を目的としたビームライン

✓ 軽元素 In-situ分析

触媒、蓄電池、光触媒反応に対するin-situ分析を軽元素に対して行うための軟X線分光ビームライン