

文部科学省受託事業(東北大学)

「次世代放射光施設に関するニーズ調査」の概要について

上田 潔

東北大学多元物質科学研究所 教授

契約権者 河村 純一 教授 (多元研所長)	業務責任者 河村 純一 教授 (光・量子ビーム科学 連携推進室 調査委員会 - 18名 - 委員長)	業務主任		実施者
		ヒアリング調査	高桑 雄二 教授(多元研)	
		レビュー調査	上田 潔 教授(多元研)	12名
				16名

目次

- ニーズ調査の実施体制
- ニーズ調査の目的・対象・調査項目と調査方法
- 放射光施設のビーム性能のグループ分け(クラスター化)
- 各調査対象分野の課題、研究内容、放射光の貢献、要求されるビーム性能
- 電顕・レーザ・中性子・NMR等、放射光以外の専門家からのコメント
- 普遍的な課題、分野横断型研究内容と次世代放射光施設の果たす役割
- 次世代放射光施設に求められるビーム性能
- 日本の放射光施設の現状
- 世界の動向
- 次世代放射光が整備された時のメリットとされない時のデメリット
- 次世代放射光の運用に関する要望
- まとめ

「次世代放射光施設に関するニーズ調査」の目的・対象・調査項目

目的:

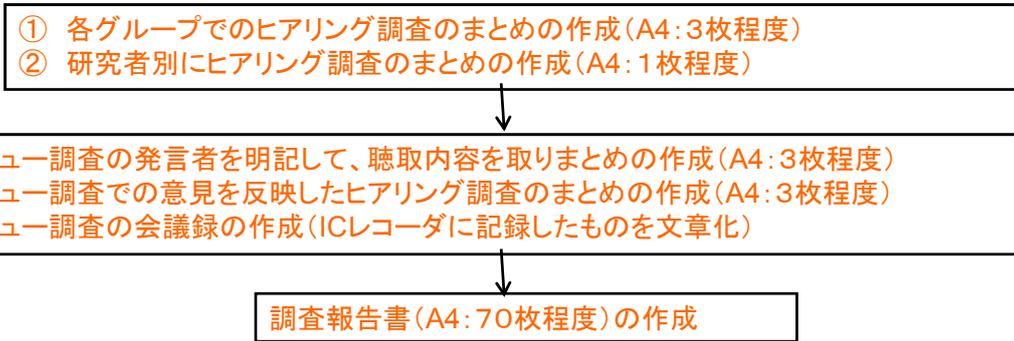
本委託業務では、次世代放射光施設の整備方針の検討に向け、放射光施設に対する研究者のニーズの調査を行い、有益な資料を得ることを目的とする。

調査対象分野:

- ◎ ヒアリング: 環境・エネルギー、健康・医療、材料、情報通信、基礎科学、産業利用(60名)
- ◎ レビュー: 環境・エネルギー、健康・医療、材料、情報通信、基礎科学、産業利用、放射光以外(53名)

調査項目:

- (1) 今後5-10年間にわたって想定される社会的・科学的課題
- (2) 各課題解決のために取り組むべき研究内容
- (3) 当該研究内容を進めるに当り、放射光がどのように貢献するか
- (4) 各課題に対応するために要求される放射光施設のビーム性能
- (5) (4)で要求される放射光施設が整備・共用された場合のメリット、されない場合のデメリット
- (6) その他、運用などについて



調査項目(3)放射光の貢献、(4)要求されるビーム性能、のまとめの例

(例) 環境・エネルギーのニーズ調査結果: (3)放射光の役割と(4)ビーム性能 クラスタ化			
分野	評価内容	評価手法等	ビーム性能 <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 現行施設 新施設への要望 </div>
資源リサイクル	<ul style="list-style-type: none"> in situ 測定による反応機構・過渡特性解析 溶液中のイオン種の構造解析 微小領域での高精度の元素分析、形態分析 固液界面および固気界面の反応・状態解析 	<ul style="list-style-type: none"> EXAFS/XANES SXAS/SXES XPS 	<ul style="list-style-type: none"> ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100$ nm 時間分解能 $\Delta t = 100$ ps 輝度 $B \approx 10^{17-10^{18}}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%BW
環境・除染	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉構造材と核分裂生成物の吸着状態の構造解析と電子状態分析 燃料デブリや選択的吸着剤中の元素組成・化学状態分析 上記の空間分布、反応の時間変化 放射線照射効果の各種状態分析 放射性核種の測定 (U, Pu, Np, Am, Cm, Cs 等) 	<ul style="list-style-type: none"> STXM SXAS/SXES XPS XRD XMCD EXAFS/XANES コヒーレントイメージング マイクロビーム分析 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー $E = 0.1-100$ keV ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100$ nm 時間分解能 $\Delta t = 100$ ps エネルギー分解能 $E/\Delta E \approx 10^4$ 輝度 $B \approx 10^{17-10^{18}}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%BW ビーム発散角: 水平≈ 17 μrad, 垂直≈ 6 μrad
蓄電池・触媒	<ul style="list-style-type: none"> operando 測定による触媒・反応機構解析 回折/吸収による反応分布評価 デバイスの多次元分布測定、時間分解測定 軽元素 (Li, O, F, S 等), 3d 遷移金属等の測定による特性向上要因・活性サイトの評価 	<ul style="list-style-type: none"> EXAFS/XANES XRD, DAFS SXAS/SXES XPS イメージング 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー $E = 0.1-100$ keV ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100$ nm 時間分解能 $\Delta t = 100$ ps 輝度 $B \approx 10^{17-10^{18}}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%BW
燃料電池・触媒	<ul style="list-style-type: none"> 運転時の結晶構造・化学状態変化の実使用環境下 operando 測定 異種接合界面の組成・副反応・反応分布解析 劣化前後の材料分析 デバイス内の応力測定 軽元素 (O), 3d 遷移金属, 4f 金属等の測定 	<ul style="list-style-type: none"> EXAFS/XANES XRD HXPES 硬 X 線, 軟 X 線の併用 雰囲気環境下測定 イメージング 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー $E = 0.1-100$ keV ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100$ nm 時間分解能 $\Delta t = 100$ ps 輝度 $B \approx 10^{17-10^{18}}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%BW
太陽電池	<ul style="list-style-type: none"> 高い空間分解能での構造・電子状態評価 非晶質材料の分析 in situ 測定による反応分布解析 Si を含む軽元素の測定 	<ul style="list-style-type: none"> EXAFS/XANES XPS・HXPES ナノイメージング 	<ul style="list-style-type: none"> SPring-8 でカバーできないビーム性能 SPring-8 等の既存施設にはない実験環境 (プラズマ処理、膜堆積装置等) サブミクロンビーム $B \geq 10^{17-10^{18}}$
人工光合成	<ul style="list-style-type: none"> 半導体・金属錯体の原子価、配位構造の時間分解測定 自然界由来材料の結晶構造解析 表面・界面の評価 軽元素, 3d 遷移金属等の測定 	<ul style="list-style-type: none"> 超高速時間分解 EXAFS/XANES XRD 可視光/IR 分光との同時測定 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー $E = 0.1-100$ keV ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100$ nm 時間分解能 $\Delta t = 100$ ps Top-up 運転

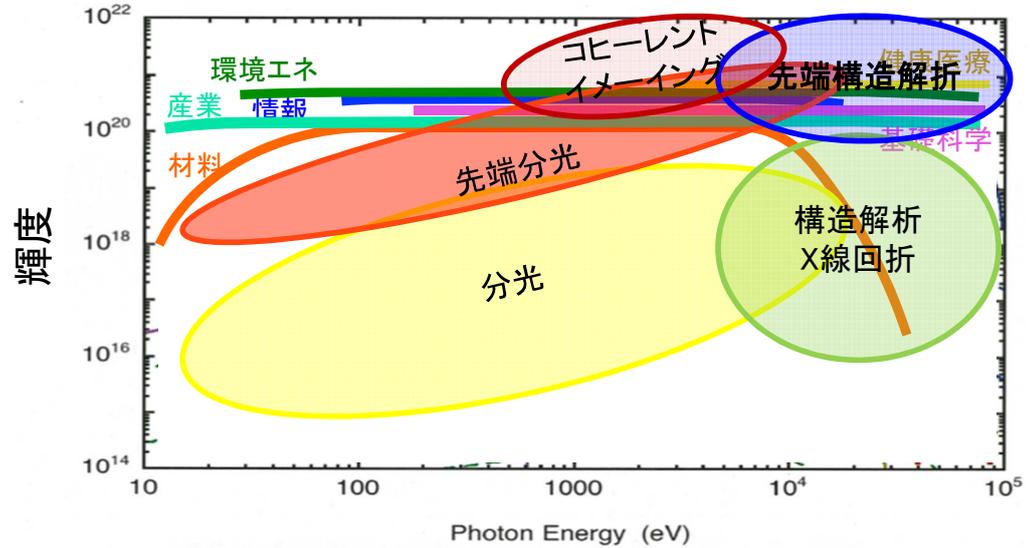
放射光ビーム性能の輝度、エネルギー、コヒーレンス度による分類

- (1) ●: 構造解析(X線回折)
(輝度 <math>< 10^{16}</math>-- (2) ●: 分光
(輝度 <math>< 10^{15}</math>-- (3) ●: 先端分光
(輝度 > - (4) ●: 先端構造解析(回折)
(輝度: - (5) ●: 高コヒーレントX線
(輝度: - (6) ●: X線自由電子レーザー
(200 eV ~ 20 keV)

輝度 (photons/s/mrad²/mm²/0.1%bw)
輝度 ∝ フラックス / エミッタンス

フェムト秒
イメージング

XFEL: ピーク輝度では1億倍
(平均輝度ではSR並)



環境・エネルギー分野 (ヒアリング調査 + レビュー調査)

- 課題: (1) クリーンで安全な持続可能エネルギー: 省エネ・省資源 / リサイクル
(2) 環境調和・環境保全 / 回復: 環境破壊・気候変動の抑制

分野	研究内容	放射光の貢献	ビーム性能
資源リサイクル	<ul style="list-style-type: none"> □ 低環境負荷・環境保全・回復技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・ in situ測定による反応機構解析 ・ 溶液中のイオン種の構造解析 ・ 微小領域での高精度の元素分析、形態分析 	● ●
地圏環境・除染	<ul style="list-style-type: none"> □ 汚染の除去、廃炉技術 □ 低環境負荷・環境保全 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造解析と電子状態解析と化学状態 ・ 上記2つの空間分布、反応の時間変化 	● ● ● ●
蓄電池・触媒	<ul style="list-style-type: none"> □ 高エネルギー密度電池 □ 高寿命・安価な定置電池 	<ul style="list-style-type: none"> ・ operando測定による触媒・反応機構解析 ・ デバイスの二次元分布測定、時間分解測定 	● ● ●
燃料電池	<ul style="list-style-type: none"> □ 充放電サイクルと構造変化 □ 電極 / 電解質界面の解析 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運転時の結晶構造の変化 ・ 劣化前後の電極分析 	● ● ●
太陽電池	<ul style="list-style-type: none"> □ 太陽電池の高効率化 □ 二次電池の大容量化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高い空間分解能での構造、電子状態評価 ・ in situ測定 	● ●
人工光合成 (海外動向含)	<ul style="list-style-type: none"> □ エネルギー蓄積型反応系の開発および実現 □ 自然界の光合成の理解 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子価、配位構造の時間分解測定 ・ 結晶構造解析 ・ 表面・界面の評価 	● ●
エネルギー安全	<ul style="list-style-type: none"> □ エネルギープラントの信頼性・安全性 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 微量成分の同定とその空間分布の確定 ・ 材料内深部の界面などの局所的選択的な測定 ・ ミクロンサイズの分解能での2D/3Dイメージング技術 	● ●

● 構造解析、● 分光、● 先端分光、● 先端構造解析、● コヒーレントイメージング

健康・医療分野（ヒアリング調査＋レビュー調査）

課題：(1) 高齢化社会問題、希少疾患・個別医療・新ウイルスへの対応
 (2) 食料問題、創薬・再生医療分野などでの国際競争の激化

分野	研究内容	放射光の貢献	ビーム性能
バイオメディカルイメージング	<input type="checkbox"/> 生きた細胞の可視化 <input type="checkbox"/> 幹細胞の動態解析 <input type="checkbox"/> 疾患の早期発見	・ X線顕微鏡、X線CTによる生きた細胞オルガネラなどの三次元可視化	● ●
放射線生物学・バイオメディカルイメージング	<input type="checkbox"/> 農業を支える薬剤開発 <input type="checkbox"/> 放射性元素の動態分布	・ X線蛍光分析による植物などの元素動態観察	● ● ● ●
放射線生物学	<input type="checkbox"/> 放射線の生体への影響の確定的理解	・ 低線量被曝研究、放射線治療	● ●
創薬・農学・基礎細胞生物学を視野に 入れた構造生物学	<input type="checkbox"/> タンパク質、糖、脂質の構造解析、創薬	・ 大面積検出器を用いたX線回折による生体分子・タンパク質の結晶構造解析	● ● ● ●
	<input type="checkbox"/> タンパク質複合体の高次構造解析	・ X線小角散乱による生体分子の溶液構造解析	● ●
	<input type="checkbox"/> 膜タンパク質の構造解析にもとづく創薬 <input type="checkbox"/> 農業を支える薬剤開発 <input type="checkbox"/> 幹細胞の再生医療への応用	・ 微小結晶を用いた生体分子(主としてタンパク質)の高分解能構造解析 ・ 巨大粒子(ウイルスなど)の全体構造解析 ・ 細胞内部の非侵襲的構造解析 ・ 時間分解分光法による生体分子の作用機構解明	● ● ●(SX,HX)

● 構造解析、● 分光、● 先端分光、● 先端構造解析、● XFEL

材料分野（ヒアリング調査＋レビュー調査）

課題：(1) エネルギー問題・低環境負荷対応の材料創製／機能発現
 (2) 元素戦略にもとづく代替材料、食料・医療向けのソフト・バイオマテリアル材料

分野	研究内容	放射光の貢献	ビーム性能
半導体	<input type="checkbox"/> 半導体・絶縁膜材料開発 <input type="checkbox"/> 積層ヘテロ界面の解析	・ 表面界面の構造・電子状態分析 ・ オペランド計測	● ● ● ●
炭素材料	<input type="checkbox"/> 原子・分子・電子レベルの分析技術の高度化	・ 薄膜の反射率測定 ・ 低真空中での測定	● ● ●
ソフトマター	<input type="checkbox"/> プラズモニクスデバイスなどの機能発現の制御	・ 各種分光測定が可能な波長域の軟X線	● ●
金属	<input type="checkbox"/> 革新的電池・発電材料の開発	・ 軟X線と硬X線を用いたX線吸収測定	● ● ● ●
アモルファス・液体	<input type="checkbox"/> 金属ナノ材料・機能性ガラス材料の合成と評価	・ 超高温、超高压など極端条件での実験	● ● ●
有機EL	<input type="checkbox"/> 有機分子結晶粒界の評価・制御	・ 有機材料の微小構造	● ● ●
金属錯体	<input type="checkbox"/> 選択的・効率的な気体分離・貯蔵材料の開発	・ ガス雰囲気中での測定	● ● ● ●
磁性材料	<input type="checkbox"/> バルク材料の粒界構造の観察	・ ナノ顕微分光による磁区観察 ・ 磁気円二色性線、二色性分光による磁性評価	● ● ● ●

● 構造解析、● 分光、● 先端分光、● 先端構造解析

情報通信分野（ヒアリング調査 + レビュー調査）

課題: (1) 超高速・大容量データ処理技術／伝送技術
(2) 軽量・小型・低消費エネルギーデバイス

分野	研究内容	放射光の貢献	ビーム性能
スピンドバイス、ストレージ	<ul style="list-style-type: none"> 新規スピン駆動技術の開発 ナノサイズ・ピコ秒領域でのスピン動作の実時間解析 	<ul style="list-style-type: none"> ナノ領域の表界面組成・構造・磁性評価 高速時間分解スピン動特性評価 	● ● ●
半導体デバイス	<ul style="list-style-type: none"> ナノメートルまでのダウンサイジング 	<ul style="list-style-type: none"> 表面・界面の構造・化学分析、新材料の分析 微量不純物元素分析 	● ●
相変化RAM	<ul style="list-style-type: none"> 高信頼性の新規材料開発 ヘテロ界面の組成・構造解析 	<ul style="list-style-type: none"> 界面の構造・化学分析 ナノ領域の構造・化学状態の動的評価 	● ●
有機デバイス	<ul style="list-style-type: none"> 新機能的有機材料の合成 電子機能デバイスの開発 	<ul style="list-style-type: none"> サブミクロン領域の構造解析と電子状態分析 分子ダイナミクス計測 	●
酸化物・プロセス	<ul style="list-style-type: none"> プロセスの極限制御 	<ul style="list-style-type: none"> 表界面における化学反応の評価・解析 表面反応実時間計測 	● ●
光通信・光デバイス	<ul style="list-style-type: none"> 波長多重通信に対応する分波・合波などの素子開発 	<ul style="list-style-type: none"> 微量不純物元素分析 光集積回路用短時間大面積露光技術 	● ●
微細加工	<ul style="list-style-type: none"> EUVリソグラフィの開発 原子・分子ビームによる加工 	<ul style="list-style-type: none"> EUVリソグラフィ用マスク検査 3次元デバイス構造の非破壊可視化 	● ●

● 構造解析、● 分光、● 先端分光、● 先端構造解析

基礎科学分野（ヒアリング調査 + レビュー調査）

課題: (1) 社会ニーズを見据えながら先導的サイエンスの構築
(2) 素粒子から生命、そして地球・宇宙への時間・空間スケールの階層構造の理解

分野	研究内容	放射光の貢献	ビーム性能
物性物理学	<ul style="list-style-type: none"> 凝縮系における電荷・スピン・軌道・格子状態の時空間階層構造と相転移・緩和メカニズムの解明 	<ul style="list-style-type: none"> 均質～不均質系、バルク～表面界面系、周期系～非周期系における電荷・スピン・軌道・格子状態の時空間階層構造・ダイナミクス解明 	● ● ● ●(SX)
化学	<ul style="list-style-type: none"> 分子内・分子間相互作用が作る電子状態・結晶構造の時空間階層構造と化学反応メカニズムの解明 	<ul style="list-style-type: none"> 溶液中の溶質構造や分子間相互作用解析 触媒反応などのオペランド局所電子状態観測 元素・化学状態分析におけるナノスケール顕微観測 表面・界面の不均一構造解析、深さ階層構造解析 	● ● ●(SX)
生物・生命科学	<ul style="list-style-type: none"> 複合体としてのタンパク質に働く多体相互作用の時空間階層構造と生体反応メカニズムの解明 	<ul style="list-style-type: none"> 原子レベルのタンパク質・タンパク複合体構造～細胞小器官・細胞の内部構造とダイナミクスと対象とした時間空間階層的構造解析とイメージング 	● ● ● ●
地球物質科学・高圧物質科学	<ul style="list-style-type: none"> 超高压・超高温等の複合極限環境下における固体・液体の静的・動的挙動と恒星・惑星の構造解明 	<ul style="list-style-type: none"> 複合極限環境（超高压・超高温・超強磁場・超臨界）の実現と、その環境下における固体・液体の静的・動的挙動 巨大惑星のコア構造と地球表層元素の静的・動的挙動 	● ● ● ●

● 構造解析、● 先端分光、● 先端構造解析、● コヒーレントイメージング、● XFEL

産業利用分野（ヒアリング調査 + レビュー調査）

課題：(1) 産業政策(科学技術イノベーション戦略2014)に沿った課題に連携・集中
 (2) 産業技術の高度化・先端化による国際競争力の強化

分野	研究内容	放射光の貢献	ビーム性能
化学工業	□ 触媒反応、電池の酸化還元反応の解明・制御	・ 新奇レアメタルフリー非金属触媒の機能解明と実デバイス開発 ・ 重元素ドーブ軽元素触媒の化学分析による材料設計	
電子デバイス・情報通信等	□ 新規半導体材料や配線材料の開発	・ デバイス内部のナノレベル空間不均一性・拡散・伝導・反応速度の評価	
金属工業	□ 軽量化に向けた高強度材料の開発	・ 極限環境での耐久性・歩留まり評価 ・ 不均一組成における結晶構造・化学状態評価	
機械工業	□ 各種構造体の残留応力・歪みの解析・制御	・ 結晶構造解析による構造・残留応力評価 ・ 製品の最適化された条件の検証	
プラスチック・ゴム等	□ 材料劣化の解析・制御	・ 複雑系としてのタイヤゴムの階層的構造経時変化・外場応答・化学反応ダイナミクス ・ サブミクロン領域の電子状態分析	
薬品・医療・食品等	□ 微小部の構造や組成の解析技術高度化	・ 細胞の直接観察によるシグナル伝達システム解明 ・ 農作物製品中の元素分析・組成空間分布評価 ・ 医用工学素材(人口臓器・バイオセンサ)の特性評価	

● 構造解析、● 先端分光、● 先端構造解析、● コヒーレントイメージング

放射光以外の分野（レビュー調査）

レビュー調査(7名)		ヒアリング調査へのコメント
電子顕微鏡(ハード)	田中信夫 (名古屋大学)	放射性物質が取り扱い可能なX線分析施設は除染で重要、微量分析(ppt, ppb)は毒物分析などで貢献、使い易い施設は装置よりも組織が重要
電子顕微鏡(ソフト)	難波啓一 (大阪大学)	構造生物学でのビーム不足を解消するため複数の中型放射光施設が必要、結晶化が難しいタンパク質の構造解析法の開発も必要
NMR	竹腰清乃理 (京都大学)	次世代放射光施設の建設は研究者と技術者の育成のためにも必要、放射光で見え難い対象についてNMRなどを相補的に利用することが重要
レーザー	緑川克美 (理化学研究所)	既存放射光施設の運営方式の検討が必要、次世代放射光施設はユニークさで世界を目指すべき、ダイナミクスの計測が重要
ミュオン	杉山 純 (豊田中央研究所)	海外の放射光施設(ISIS, PSI)のように他の量子ビームとの複合・連携利用ができる施設も考えられる
中性子	吉沢秀樹 (東京大学)	中性子による分析ではできないオペランド計測や顕微観察は重要、中性子・レーザー・放射光の特徴を有効利用した相補的解析法の開発が必要
総合手法	黒田孝二 (京都工芸繊維大学)	目的を明確にして大型施設の社会的受容性を高めることが必要、産業利用の促進のためのコーディネートの仕組が重要

◎ 放射光の代替・競合としてのNMRや電子顕微鏡などの利用ではなく、相補的な役割(組み合わせが重要)