

## 東京大学物質科学ビームライン計画 (東大放射光アウトステーション)

東京大学 放射光連携研究機構(工学系研究科) 尾嶋 正治  
東京大学 放射光連携研究機構(物性研究所) 柿崎 明人

### 1. はじめに

平成18年5月1日、東京大学は総括室直轄の時限プロジェクトとして放射光連携研究機構を開設し、物質科学部門と生命科学部門を両輪として放射光利用研究を推進することとなった<sup>[1]</sup>。具体的には、物質科学部門では最高輝度の軟X線ビームラインを新しく建設し、物質科学、ナノテクノロジーの分野で卓越した成果を出し、技術の発展、若手の育成をはかるとともに、ナノビーム、時間構造、コヒーレンスなどを利用する次世代研究の芽を育てることをねらいとしている。一方、生命科学部門においてはビームラインを建設するのではなく、構造生物学研究室を設置して迅速なタンパク質構造解析を可能にすることで、生命科学における突出した成果を世界に向けて発信することを目的としている。

放射光連携研究機構の設立理念は、「世界最高の高輝度放射光を用いて生命科学、物質科学における最先端サイエンスを展開し、卓越した研究成果を出し続けて世界をリードする。また、これらを体系的に行うことによって生命科学と物質科学の融合、シナジー効果によって新しい研究分野を創出する。」であり、基本方針として、

- (1) 世界最高輝度の特色ある「東大ビームライン」を作ってこれを機構の中核とし、既存施設ビームラインを活用する「連携ビームライン」と併せて「東大放射光アウトステーション」として上記ミッションを達成する。
- (2) 原則として、アンジュレータなどの基幹的インフラは東大の概算要求、あるいは東大資金で建設し、実験装置については外部資金を戦略的に獲得して設置する。
- (3) 物性研が担ってきた「VUV/SX全国共同利用」は、PF、SPring-8の共同利用制度のもとにこれを継続する。

とうたっている。これに基づき、SPring-8にビームライン建設趣意書、計画書を提出し、その承認を待

ってビームライン建設を開始した。完成は2009年度中の予定である。

### 2. 物質科学用ビームラインの建設・特性

東京大学放射光アウトステーション物質科学ビームライン計画では、SPring-8の27m長直線部(BL07IS部)に軟X線領域の高輝度放射光を発生するアンジュレータと高輝度軟X線に対応したビームラインと高分解能分光光学系を建設・整備し、高いエネルギーおよび空間分解能で先端放射光利用実験を行う実験装置を設置して物質科学研究の飛躍的な進展を目指している(Fig. 1)。特に、マイクロビーム、時間構造、コヒーレンス、偏光特性など、SPring-8のアンジュレータで利用可能となる高輝度放射光の特徴を活かして、物質の電子状態解析、磁性体の磁化過程、化学反応や触媒反応過程の解析、ナノスケールの局所構造解析、生体物質の構造や機能解明などを行って、物質の構造や機能の理解の精度を上げ、新しい学問分野の創成に寄与することを目標としている。物質科学部門は、このビームラインの建設・整備、放射光利用研究の推進と共同利用実験のサポートの中核を担う予定である。

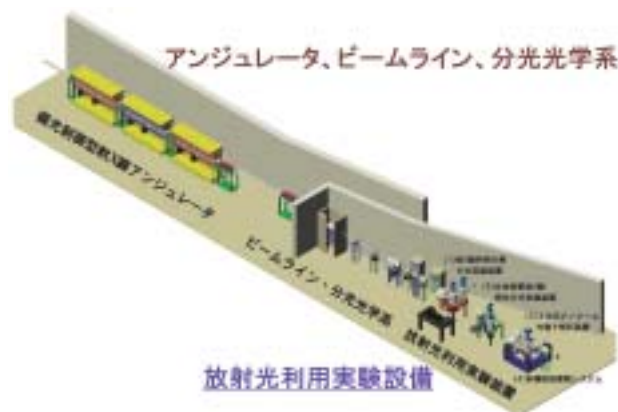


Fig. 1 Schematic of University-of-Tokyo Materials Science Outstation at SPring-8.

建設中のアンジュレータは、水平および垂直偏光を発生する8の字アンジュレータを8セグメント交互に配置し、基本波が250eV～2keVをカバーし、各セグメント間に設置するバンブ磁石で位相を制御して偏光切り替えを行うものである。アンジュレータの概略をFig. 2に示す。特に、このアンジュレータには光源の位置を変えずに偏光の切り替えを行うことができるという優れた特徴がある<sup>[2]</sup>。アンジュレータの建設は、SPring-8の挿入光源グループの協力を得て平成19年度に水平偏光部4セグメント部分がスタートし、平成21年度以降に垂直偏光部4セグメントを増設する予定である。全体が完成すると、水平および垂直偏光のほか左右切り替え可能な円偏光が高輝度軟X線を利用する様々な研究に利用できるようになる。現在予定されている建設計画のスケジュールをFig. 3に示す。

フロントエンドを含むビームラインと分光光学系の設計・建設準備作業も進行中で、SPring-8のこれまでの実績を基礎に、前置鏡とダイアフラムからなる前置光学システム、斜入射平面回折格子分光器、それぞれの実験装置に最適化した放射光を照射する後置光学システムで構成する分光システムについてJASRIと協力して検討している。Fig. 4にビームラインの概要を示す。このビームラインの実験設備で、10 $\mu$ m × 10 $\mu$ m以下に集光された250eV～2keVの軟X線領域の10<sup>12</sup> photons/sec以上の強度の高輝度放射光がエネルギー分解能10,000以上で利用できることを目指している。

物質科学部門では、最先端の放射光利用実験装置を整備して軟X線領域の放射光を利用して行われてきた物質科学研究を、これまで以上に高い空間、時間分解能で行って進展させるとともに、SPring-8の長尺アンジュレータによって初めて実現できる高輝度放射光の特徴を活用して、ナノ磁性体のスピンドイナミクスの実時間観察、光励起中間状態の

型式： 偏光制御軟X線アンジュレータ  
 基本波： 250eV～2keV  
 輝度： 10<sup>19</sup> photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>以上  
 偏光： 垂直、水平直線偏光および左右円偏光



Fig. 2 Schematic of Polarization control soft X-ray undulator at the SPring-8 long straight section.

高速緩和現象の解明、表面化学反応中間体の同定など、これまで空間平均、時間平均的な描像でしか理解することができなかった物質のダイナミクスの原因を解き明かす新しい研究領域の発展にも力を注いでいく予定である。このビームラインの整備と高輝度放射光を利用する物質科学研究は、次世代放射光源（ERLおよびXFEL）の超高輝度、短パルス放射光を利用する物質科学研究にもつながると期待している。

このビームラインでの研究計画と実験設備の具体的な仕様策定については、若手研究者を中心に議論されており、VUV・SV利用者懇談会（辛会長）の中に下記5つのサブグループが作られ、各世話人のもとで実験計画の議論が行われてきた。

- (1) ナノビーム高分解能光電子分光
- (2) 生体物質軟X線発光分光
- (3) 時間分解軟X線分光
- (4) 軟X線光電子顕微鏡によるナノ構造物質の構造と機能解析
- (5) 軟X線イメージング

これらの提案に加えて回折スペクトロスコピーについても新しく提案された。そこで限られた予算を使ってどのテーマを優先して建設すべきかについて



Fig. 3 Construction schedule for University-of-Tokyo Materials Science Outstation .

光学系の構成: 前置光学システム、斜入射平面回折分光器、後置光学システム  
 エネルギー範囲: 250eV~2keV  
 分解能:  $E/\Delta E \sim 10,000$  以上  
 ビームサイズ:  $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  以下

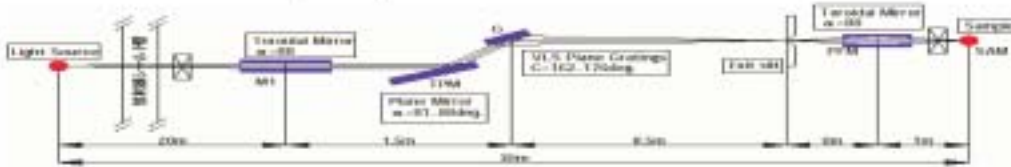


Fig. 4 Schematic drawing of soft X-ray beamline.

議論するため、平成19年12月8日にISSPミニシンポジウム「東京大学アウトステーション計画の実験設備について」を開催し、テーマの優先度を審議した。以下の6名によるプレゼンが行われ、ぎりぎりの議論が行われた。

- (1) 組頭広志(東京大学工学系研究科)「走査型ナノ光電子分光による機能性界面のピンポイント計測」
- (2) 原田慈久(東京大学工学系研究科)「超高分解能軟X線発光分光による固体・固液・液液界面の電子状態分析」
- (3) 松田巖(東京大学物性研究所)「時間分解高輝度軟X線分光で展開する物性科学」
- (4) 奥田太一(東京大学物性研究所)「光電子顕微鏡による物性研究の現状と展望」
- (5) 小野寛太(高エネルギー加速器研究機構)「軟X線分光ホログラフィによるナノ材料・生体のイメージング」
- (6) 松井文彦(奈良先端科学技術大学院大学)「回折スペクトロスコープ：原子サイト選択的な電子状態・原子軌道の分光研究」

一方、東京大学放射光連携研究機構が文部科学省に提案していた概算要求について、平成19年12月に内示額の提示があり、全国共同利用の位置づけが正式に認められたが、予定した実験装置を全て準備することはできない状況になった。そこで、平成20年1月13日の日本放射光学会第21回年会・合同シンポジウム中に開催したVSX高輝度光源利用者懇談会で議論した結果、Fig. 1に示すように、3つの実験装置を準備するとともに、1つのフリーポートを準備してユーザーの装置持ち込み実験を可能にすることで合意が得られた。

具体的には、2006年度からナノ領域高分解能光電

子分光実験装置の整備が戦略的創造研究推進事業(JST-CREST)によって進められており、ビームラインの建設・整備後に利用可能となる予定であるので、これを優先的に設置することとした。また、放射光とレーザーとの同期照射による時間分解分光実験の要素技術開発が、今年度から科研費を利用して始まっており、新しい実験に向けたR&Dが行われている。

近年、高輝度放射光源の利用を重点的に推進する動きが世界各地に広がっていて、既存の放射光施設にはそれぞれ軟X線領域のアンジュレータが設置されている。しかし、光子エネルギー250eV~2keVの領域で本計画のアンジュレータほど高い性能を示すものはない。本計画で建設・整備するアンジュレータとそれを最大限利用可能にするビームライン、分光光学系および先端の実験設備が、多様な物質群を研究対象とする物質科学研究の分野で国際的研究拠点の一つになることを期待している。

### 3. ビームラインにおける研究計画

#### 3-1. ナノビーム高分解能光電子分光

SPring-8の超高輝度性という特徴を活かして軟X線ナノビームを作り、ナノ領域の新物質の電子構造、物性を解析する研究を展開する。具体的には、Fig. 5に示すように軟X線放射光をZone plateによって50~30nmにまで絞り、試料をピエゾ駆動機構でx-y面内で走査することで2次元の電子構造の情報を得る。角度分解型電子アナライザーを用いて一挙に光電子を取り込むことによって、ナノ領域(ナノ結晶)の深さ方向(z)解析が可能になる。エネルギー分解能は50meVをめざす。ZPを用いたビーム集光はピンホールサイズとZPまでの距離、エネルギー分解能、およびZP最外殻spacingの3項が効いてくる

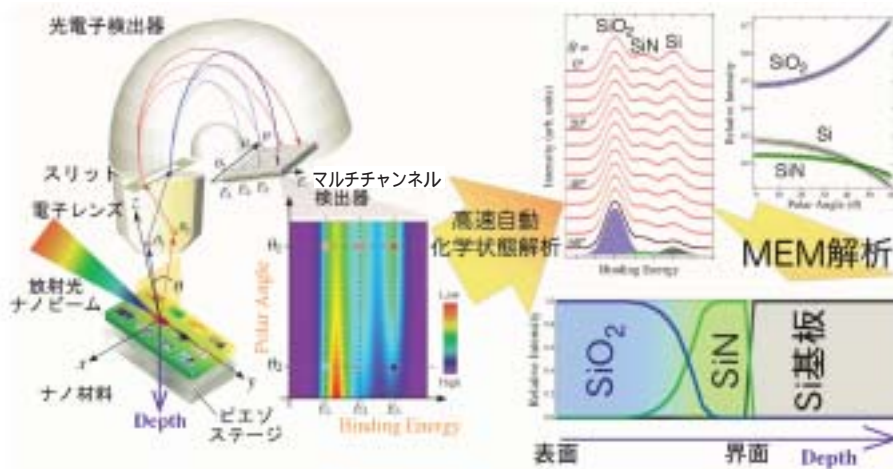


Fig. 5 Outline of Nano-beam 3-dimensional analysis project.

ので、高輝度ビームラインの特徴が十分に発揮される。これによって、例えばFig. 5 に示す次世代LSI用ゲート絶縁膜のx - y - z 3次元分布解析（化学結合状態識別）が可能になる。すなわち、検出角度依存光電子スペクトルを我々が開発した最大エントロピー法MEMで解析することによって深さ方向元素分布（3次元分布）を得ることが出来、素子プロセスの開発に貢献出来る。また、InGaNなどの半導体量子ドットや強相関係酸化物薄膜パターンにおいては相分離現象の制御（あるいは活用）が大きな課題となっており、ナノ領域における組成、電子（化学）状態の解明、処理時間依存性の解析によって、相分離メカニズムの解明に大きな威力を発揮するものと期待している。

### 3-2．生体物質軟X線発光分光

軟X線発光分光法はphoton-in/photon-outの手法であるため、深く埋もれた界面（特にデバイス構造の界面）絶縁物薄膜や固液界面における電子状態を検出することが出来る。ここでは、エネルギー領域：0.25～1.2keVに対して従来の検出効率を維持しつつ、エネルギー分解能： $E/\Delta E \sim 10000$ という軟X線光電子分光に匹敵する高性能な軟X線発光分光装置を開発し、一方で光源の十分なphoton fluxを活かして秒単位の高速度・高分解能測定を目指す（Fig. 6）。放射光をKBミラー方式でサブマイクロビームにして試料に照射することで、デバイス界面構造において最も重要な部分（例えばゲート電極直下のチャンネル領域）に焦点を絞った電子状態解析が可能になる。次世代LSI用high-kゲート絶縁膜では界面のシリケ

ート化が不均一に起きるため、サブマイクロビーム発光分光の電子状態マッピングは極めて有益な界面情報を与える。

一方、発光の元素選択性と絶縁物でも測れる特徴を活かせば溶液、生体物質の物性と機能性の根源に迫ることが可能になる。特に固液界面の解析ではタンパク質・DNAの機能性に及ぼす水の影響を解明することをめざしている。また、ナノ空間の溶液＝細胞水モデルの構築によって生体内の水の働きを解明していく。さらに、金属タンパク質の反応中心における多機能性の電子論的解明をめざす。

### 3-3．時間分解測定

長尺アンジュレータの放射光パルス（パルス幅30～40ps）と同期したフェムト秒レーザーパルス（10～100fs）を発振するレーザーステーションをビームラインに設置する（Fig. 7）。そして原子構造、電子状態、スピンの向きを直接プローブできる軟X線分光の特性を活かし、多種多様なピコ秒時間分解軟X線分光実験を行う。レーザーステーションから時間分解測定専用実験装置とその他の実験ステーションへポンプレーザーを導くことで、ピコ秒時間分解のX線吸収（NEXAFS、MCD）、X線光電子分光（XPS）、X線回折（XRD）、光電子顕微鏡観察（PEEM）、X線発光（XES）などの実験が可能になる。その結果、化学の分野では、TiO<sub>2</sub>表面の光触媒を中心とした光化学反応のリアルタイム測定や氷結晶/金属界面の水分子の動的観察などが実現し、また物理の分野ではナノスケール物質のコヒーレント格子波の伝播や、光誘起相転移、スピンドYNAMICSなどの研究が行われ

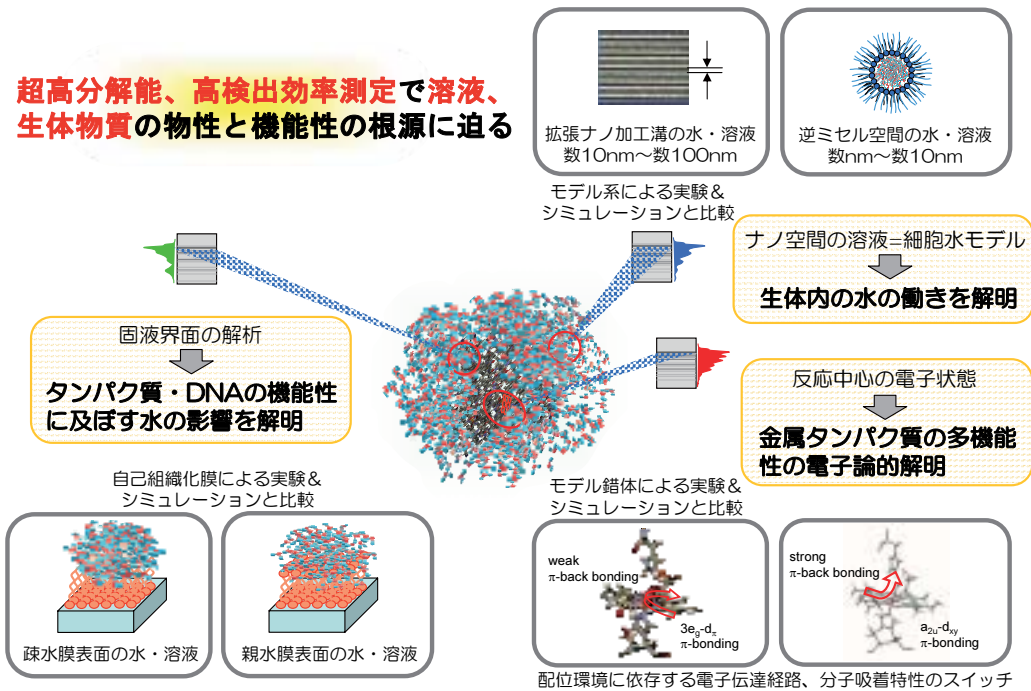


Fig. 6 Outline of Soft X-ray emission spectroscopy project

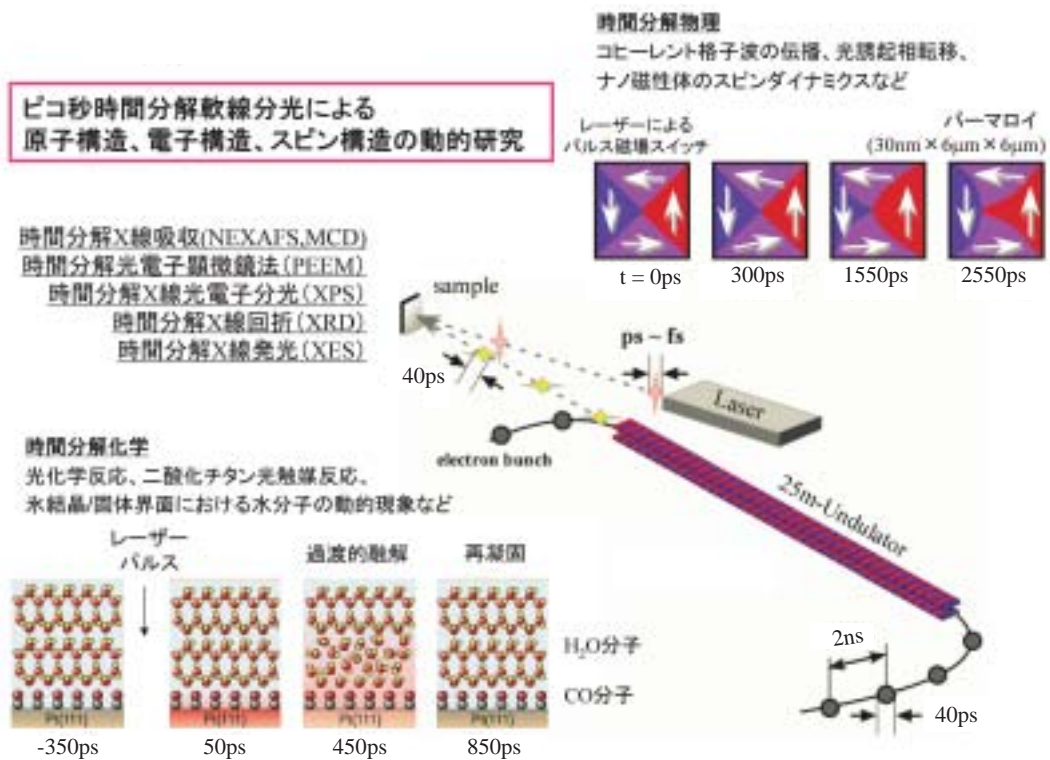


Fig. 7 Outline of Time-resolved soft X-ray spectroscopy project.

る。さらに、X線分光におけるケミカルシフトとピコ秒の時間分解能を利用すれば、現在技術開発が進められている高速(原子)スイッチング研究への応用も可能である。一方、本光源は高輝度軟X線であるため非線形光学現象の発現も期待され、新しい時間分解軟X線分光技術も開発されるであろう<sup>[2,3]</sup>。

### 3-4 . 軟X線光電子顕微鏡によるナノ構造物質の構造と機能解析

結像(投影)型の放射光光電子顕微鏡は実時間で0.5eV以下の分解能で光電子イメージを撮影することが可能であるため、ナノ構造の表面・界面における反応や、磁性体の磁区ドメインの動的観察、デバイス駆動中の界面電子状態変化などを解析することができるという優れた特徴を持つ。ここでは、エネルギー範囲: 250~2000eVで、空間分解能: 30nm以下、エネルギー分解能: 200meV以下を達成し、SPring-8の短いパルス幅(~40ps)をプローブとして用いることにより

ナノ磁性体の磁区ドメインの高速観察 ( $t < 100ps$ )  
 ナノ領域の高エネルギー分解能光電子分光: ケミカルシフトの観測 ( $E < 200meV$ )  
 触媒反応のその場観測などを行う。

### 3-5 . 軟X線イメージング

軟X線イメージング法では、X線に比べて物質との相互作用が強いため、高感度、高速、生体構成元素(C、Nなど)が可能になる。また、ナノデバイスの界面観察(デバイス応用)、ナノ磁性体の磁気構造(物性物理、磁気工学)、生体物質のイメージング(細胞生物学)、単一分子イメージング(環境科学、生物学)、ポリマー・ソフトマター(材料科学)、ナノスケール3次元CT(ナノ科学)、など幅広い分野への応用が可能になる。

一例を挙げると、遷移金属元素が希薄に含まれているポルフィリン系試料(クロロフィル、ヘモグロビンなど)の超薄膜を堆積し、金属原子(Mn、Feなど)のイメージングを可能にし、電荷移動、酸化還元反応の高速追跡を試みて機能と界面電子状態の関係を明らかにすることも夢ではないと考えている。

### 3-6 . 回折スペクトロスコピー

光照射された試料からあらゆる方向に放出される信号を余すところなく拾い集める検出器を用い、先端分光を展開する研究提案。これまで光電子・Auger電子回折とX線光電子分光・X線吸収分光法を組合せ、磁性薄膜や超伝導体表面のサイト選択

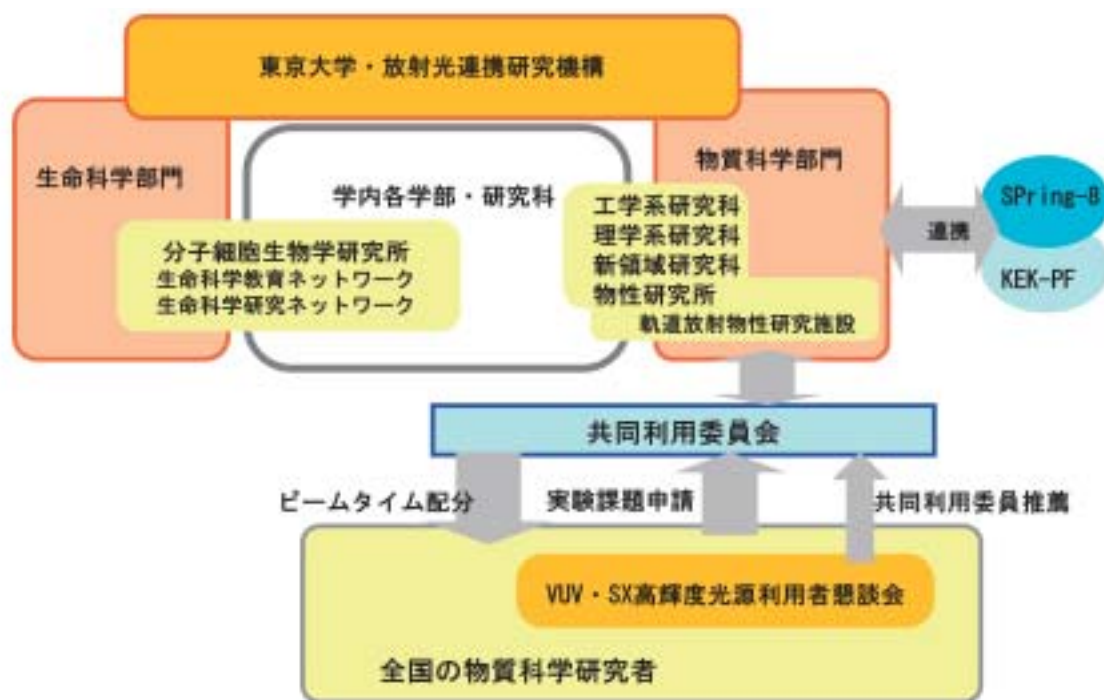


Fig. 8 Relationship among University-of-Tokyo Synchrotron Radiation Research Organization, synchrotron radiation facilities and users community.

的・原子層分解の電子状態や磁気構造を解析してきた。また単一エネルギー電子ホログラフィの解析アルゴリズムの開発も進んでいる。一度に回折"snap"パターンが測定できる特徴を活かし、新光源では2D focused beam scanによる微結晶・不均一系構造解析や時間・温度依存性測定による反応・相転移ダイナミクス追跡が研究の柱となる。電子状態や磁気構造の原子サイト選択的・立体的解析という点に独自性を求めていく。力を最大限発揮できる対象は結晶・配向性試料。「原子軌道」の情報に直接アクセスできるメリットは大きい。

#### 4. まとめ

東大放射光アウトステーション軟X線ビームラインは限られた予算で世界最先端の軟X線利用物質科学研究を展開しようとするもので、SPring-8物質科学用軟X線ビームラインに設置する実験装置について、文部科学省大型設備費用に加えて、各種外部資金で建設する予定である。このビームラインの運営は全国共同利用を原則としており、Fig. 8 に示す共同利用体制を考えている。限られたリソースを最大限に利用するためには、全国の軟X線利用研究者との密接な連携、研究計画のさらなる練り上げが不可欠である。東大柏キャンパスで予定していた高輝度光源計画で提案されていた研究テーマのいくつかは時代遅れになっており、この分野の研究競争の激しさを痛感している。このSPring-8軟X線ビームラインだけでは多くの利用者の要求を満たすことは到底不可能であるが、真に最先端をねらう研究を展開して大きな成果を挙げることで次の展望が開けてくるものと確信している。引き続き、温かいご支援をお願いしたい。

#### 謝辞

本計画を進めるに当たって放射光連携研究機構設立にご尽力頂いた方々にこの紙面を借りて厚くお礼申し上げます。特に、東大放射光アウトステーションWGのメンバー（五神真氏、寿榮松宏仁氏、野村昌治氏、山本雅治氏、若槻壮市氏、雨宮慶幸氏、上田和夫氏、桐野前副学長、岡村副学長、藤森淳氏、近藤寛氏、豊島近氏、高田昌樹氏、吉信淳氏、辛埴氏）、VUV/SX利用者懇談会、およびその利用WG世話人（組頭広志氏、松田巖氏、奥田太一氏、原田慈久氏、小野寛太氏、松井文彦氏）の方々に感謝いたします。

#### 参考文献

- [ 1 ] <http://www.chem.t.u-tokyo.ac.jp/appchem/labs/oshima/SRRI/index.html>
- [ 2 ] 田中隆次：放射光 **16 (2)** (2003) 35.
- [ 3 ] [http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/sor/srl\\_short.html](http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/sor/srl_short.html)

#### 尾嶋 正治 OSHIMA Masaharu

東京大学 放射光連携研究機構 機構長（工学系研究科）  
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1  
TEL : 03-5841-7191 FAX : 03-5841-8744  
e-mail : oshima@sr.t.u-tokyo.ac.jp

#### 柿崎 明人 KAKIZAKI Akito

東京大学 放射光連携研究機構 物質科学部門長（物性研究所）  
〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5-1-5  
TEL : 04-7136-3400 FAX : 04-7134-6083  
e-mail : kakizaki@issp.u-tokyo.ac.jp