

次世代光源計画ワークショップ ～未来光源が開くサイエンス～報告

ワークショップ実行委員会，日本放射光学会幹事会

要旨 2005年8月8, 9日に，愛知県岡崎市の自然科学研究機構・岡崎コンファレンスセンター小会議室において，第2回日本放射光学会行事委員会企画「次世代光源計画ワークショップ～未来光源が開くサイエンス～」が開催された(図1)。本稿は，ワークショップに至る経緯および展開された議論をまとめたものである。

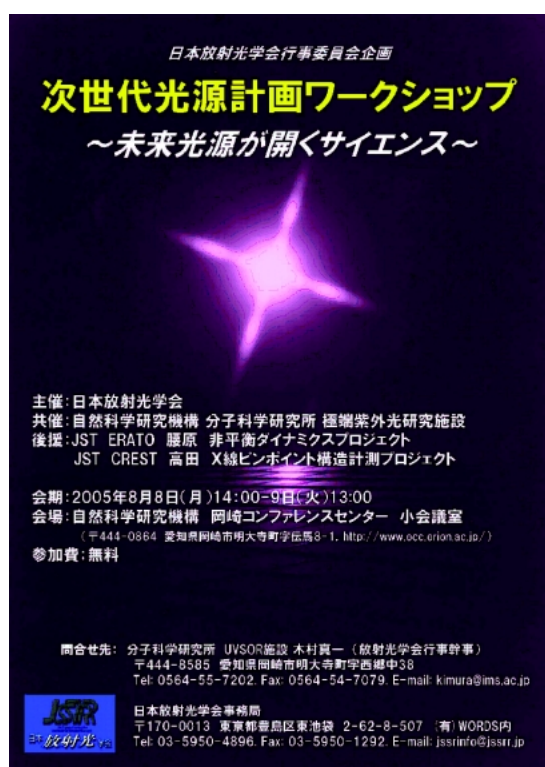


図1 ワークショップのポスター

1. はじめに

1.1 ワークショップの意義と目的

最近，第3期科学技術基本計画に盛り込まれる予定の「今後10年以内に重点的に開発に取り組む国家基幹技術10項目」が明らかにされ，その中に次世代放射光源が挙げられている。放射光学会としては，これまで年会の企画講演や昨年夏の「若手を中心としたワークショップ 今後30年の未来像—放射光の役割—」で議論を進めてきた。さらに，今年度設置した「次世代光源検討特別委員会」において，従来検討されてきた将来計画に新たに次世代光源を加えて検討を行ってきたところである。

そういった状況を踏まえ，このワークショップでは，次世代光源として建設されるであろう究極の光源であるX線自由電子レーザー(XFEL)と，これまで培ってきたリング型光源技術をさらに発展させたエネルギー回収型ライナック(ERL)や既存のリング型光源の性能を飛躍的に高めたスーパーストレージリングで10年後に可能となるサイエンスについて，それらを切り拓いていく若手研究者を中心としたメンバーが一堂に会して議論することを目的として開催された。

1.2 プログラムの選定

ワークショップを実施するにあたって，最初に2005年1月の第18回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウムで開催された行事委員会で，行事委員会が主体となってワークショップを実施することを確認した。このワークショップは，前年度開催された若手ワークショップのような30年後という遠い将来の夢を語るものではなく，より現実的な未来として10年後に可能となる次世代光源を使った放射光科学について議論することにした。ワークショップのタイトルは，この趣旨を示すため，学会幹事会と協議し，「次世代光源計画ワークショップ～未来光源が開くサイエンス～」に決定された。4月からメール会議を開始し，開催日時および会場を4月末までに決定した。ワークショップ開催の案内は，学会誌「放射光」の第3号(6月初旬に発刊)に掲載された。

その後，行事委員の中からワークショップ実行委員(別表1)を指名し，実質の議論を開始した。当初，広く一般の会員に次世代光源の基礎知識をつけてもらうことを目的として，次世代光源に関するレクチャーをプログラムの最初に設定し，その後はサイエンティフィックな観点から次世代光源の必要性を議論することに決定した。しかしながら，その後，科学技術・学術審議会研究計画・評価部会研究評価部会次世代放射光源計画評価作業部会の設置，それに対応した放射光学会の次世代光源検討特別委員会の設置，および理研/SPring-8のXFEL(SCSS)の実現の可能性が出てきたことなど，周りの状況の急激な変化に対応

別表1 ワークショップ実行委員会

木村 真一	自然科学研究機構	分子科学研究所	UVSOR 施設
木村 洋昭	高輝度光科学研究センター	放射光研究所	
田中 均	高輝度光科学研究センター	放射光研究所	
羽島 良一	日本原子力研究所	FEL グループ	
原 徹	理化学研究所	播磨研究所	
原田健太郎	高エネルギー加速器研究機構	物質構造科学研究所	
平野 馨一	高エネルギー加速器研究機構	物質構造科学研究所	

した形で、このワークショップを若手の学会員からの意見を聞く機会にする必要が出てきた。そのため、急きょ6月半ばになって、次世代光源検討特別委員会委員長の雨宮慶幸氏に特別委員会での答申内容についての説明とSCSSの概要についての講演を石川哲也氏にお願いすることになった。

以上の経緯によって決定したプログラムの構成および内容は、以下のとおりである。

別表2 プログラム

8月8日		
14:00-14:10	はじめに	木村真一 (学会行事幹事)
Chair: 木村真一		
Session 1 次世代光源特別委員会について		
14:10-14:40	次世代光源検討特別委員会について	雨宮慶幸 (東大)
Session 2 FELが目指すべきサイエンス		
14:40-15:15	光源の可能性とSCSS実現に向けて	石川哲也 (理研播磨研)
15:15-15:50	ARC-EN-CIEL, the present FEL activity and the scientific case	Marie Emmanuelle Couprie (France CEA)
15:50-16:10	Coffee break	
Chair: 間瀬一彦		
16:10-16:45	プラズマ X 線レーザーの現状と X 線 FEL への期待	永島圭介 (原研関西研)
16:45-17:15	既存 SR から見た利用の可能性	矢橋牧名 (JASRI)
17:15-17:45	FEL 利用研究の例 (LCLS)	平野馨一 (KEK-PF)
17:45-18:10	FEL が開くサイエンスの未来 (国内のプロジェクトの紹介)	司会: 木村真一 (分子研) パネラー: 石川哲也 (理研)
18:30-	懇親会 (職員会館 2 階)	
8月9日		
Chair: 原田健太郎		
Session 3 次世代リング型放射光源が目指すべきサイエンス		
8:30- 8:55	既存リング型光源の限界と次世代光源に求めるもの	田中 均 (JASRI)
8:55- 9:20	リング型光源としての ERL の可能性	羽島良一 (原研)
9:20- 9:45	次世代リング型および ERL 光源の可能性	坂中章悟 (KEK-PF)
9:45-10:00	Coffee break	
Chair: 雨宮健太		
10:00-10:25	固体光電子分光の現状と将来展望	島田賢也 (広島大 HiSOR)
10:25-10:50	構造物性の現状と将来展望	澤 博 (KEK-PF)
10:50-11:15	放射光を利用した構造生物学研究の将来	若槻壮市 (KEK-PF)
11:15-11:40	原子分子分光の現状と将来展望	繁政英治 (分子研 UVSOR)
11:40-12:05	X 線イメージングの現状と将来展望	籠島 靖 (兵庫県立大)
12:05-13:00	総合討論: 次世代光源として要求すべき性能 1. 次世代光源の役割, 位置づけ既存光源および XFEL に対して 2. 次世代光源に求める性能 3. 次世代光源が拓くサイエンス	司会: 高田昌樹 (JASRI) パネラー: 木下豊彦 (JASRI) 河田 洋 (KEK-PF)

Session 1 で次世代光源検討特別委員会の中間報告の内容についての説明を行い、Session 2 では FEL が目指すべきサイエンス、Session 3 では次世代リング型放射光源が目指すべきサイエンスという次世代光源として提案されている XFEL とリング型光源の ERL やスーパーストレージリングで展開できるサイエンスについて、光源研究者による性能や特徴についての話と各放射光分野を先導する研究者による利用の可能性についての議論、またセッション 2, 3 の各最後にパネルディスカッション形式の総合討論の形を取り、参加者の理解を深めた。パネルディスカッションのパネリストは、学会行事幹事と庶務幹事によって選出された。最終的に、別表 2 に掲載したプログラムに決定した。

2. ワークショップ報告

本ワークショップは、2005年 8 月 8, 9 日に愛知県岡崎市の自然科学研究機構・岡崎コンファレンスセンター小会議室において開催された。実行委員会によって決定されたプログラム(別表 1)によって、初日に次世代光源検討特別委員会の中間報告と XFEL が目指すべきサイエンスについて議論された。当日は、最高気温35度を超える猛暑であったにもかかわらず、65名の参加者のほとんどが最後まで熱心に議論に参加した(図 2)。

2.1 次世代光源検討特別委員会報告

最初に、Session 1 次世代光源検討特別委員会の委員長である雨宮慶幸氏(東大新領域、図 3)が 5 月23日付で放射光学会会長宛に提出された「次世代光源検討特別委員会中間報告」について説明した。そこでは、全放射光ユーザーのおそらく 5%程度が利用することが予想される究極を目指す光源である XFEL の推進と、大多数が必要としている先端的基盤設備としてのリング型光源の 2 つを柱にして答申していることが示された。今後、本ワークショップで出た意見を取り入れた形で最終報告がまとめられる。

2.2 FEL が目指すべきサイエンス

次に、Session 2 FEL が目指すべきサイエンスという主題で講演が行われた。最初に、理研播磨研が提案している SPring-8 Compact SASE Source (SCSS) 推進の中心的役割をしている石川哲也氏(理研播磨研、図 4)が、「光源の可能性と SCSS 実現に向けて」というタイトルで SCSS の概要と現在までの経緯について議論した。SCSS は、欧米で計画・建設されている XFEL に比べて発振波長はほぼ同じであるにもかかわらず、加速器やアンジュレータの工夫によって長さが 1/4 の 400 m であること、最初は SASE による発振を行うが、将来的には安定性がきわめて重要であるため、seeding や super seeding の華やかで原理的な部分と電磁石電源や高周波加速管の安定性、施設建設地の地盤の強固さ等、地味なインフラの部分との両方が必要であることを強調した。後者は、リニアコライダー建設のサイトを選択する場合の例を引き合いに出して説明した。現在は 250 MeV のテスト機を建設中であり、2005 年 11 月に波長 60 nm の SASE 発振の予定である。現在の予定では、XFEL である 8 GeV 機を来年度から 4~5 年で建設することになっている。また、この SCSS は X 線レーザー開発の最初のものであり、将来は mountain top から



図 3 雨宮慶幸氏(東大新領域)



図 2 参加者の集合写真



図4 石川哲也氏 (理研播磨研)



図6 永島圭介氏 (原研関西研)



図5 Marie Emmanuelle Couprie 氏 (フランス CEA-SPAM)



図7 矢橋牧名氏 (JASRI)

小型化・低コスト化による table top への展開が図られるべきという意見が出された。

引き続き、フランス ARC-EN-CIEL 計画を推進している Marie Emmanuelle Couprie 氏 (フランス CEA-SPAM, 図5) が「ARC-EN-CIEL, the present FEL activity and the scientific case」という題目で講演した。ARC-EN-CIEL とは, Accelerator-Radiation for Enhanced Coherent Intense Extended Light の略であり, 紫外から X 線までのコヒーレントなフェムト秒パルスを提供する第4世代光源である。この光源の加速エネルギーは 1 GeV であるにもかかわらず, SASE, High Gain Harmonic Generation (HGHG), 希ガスを使った High Harmonic など多くの発振法を使うことで UV から HX までの光を提供することが計画されている。現在プロトタイプである 220 MeV 機が計画されており, 400~10 nm の光を発生させる予定である。その後の第2フェーズで 1 GeV 機を建設し, HGHG を使って 1 nm までの発振を行う計画である。また, ユーザーからの要求を聞いたアンケート結果について紹介された。それによると, 安定度10%以下, 繰り返し周波数0.1~10 kHz, パルス幅100 fsec, 分解能 10^3

が意見の中心とのことであった。

休憩をはさんで, プラズマ X 線レーザーの分野から永島圭介氏 (原研関西研, 図6) が「プラズマ X 線レーザーの現状と X 線 FEL への期待」という題目でプラズマ X 線レーザーの現状について紹介した。現在のプラズマ X 線レーザーは, 波長13.9 nm で2つの X 線レーザー媒質を使って0.2 mrad の指向性を達成し, 空間的にフルコヒーレントを達成している。また, フェムト秒レーザーの高調波をシード光として用いて時間的にフルコヒーレントも達成していると説明された。しかしながら, 現在は15分に1発 (現在10秒に1発に改良中) の発振しか得られないため, 利用がスペックル分光などに限られているのが現状であり, XFEL によるコヒーレント X 線利用が重要であることが示された。

続いて矢橋牧名氏 (JASRI, 図7) が「既存 SR から見た利用の可能性」という題目でリング型光源と SASE-FEL の違いについて解説した。SASE-FEL の特徴は, 高輝度・短パルス・コヒーレンスであり, このうち, コヒーレンス性がリング型光源・SASE-FEL および seeded FEL で大きく違っていることをシミュレーションによ



図8 平野馨一氏 (KEK-PF)



図9 田中均氏 (JASRI)

てわかりやすく示した。一方で、平均のフォトンフラックスは既存のアンジュレータ光源に比べてあまり変わらないこと、また、安定性は約5%であり、安定性を利用する実験にはあまり向かないことを指摘した。この「不安定性」は、線形加速器の技術的な問題とSASEの発振プロセスによる2つがあり、後者は原理的な問題であり最後まで残ることが指摘された。この問題は、seedingによって解決することも紹介された。

次に平野馨一氏 (KEK-PF, 図8) が、アメリカのスタンフォードで計画されているLCLS (Linac Coherent Light Source) のFEL利用研究の例を紹介した。特にピーク輝度に注目すると、LCLSで得られる光は従来のX線源より約10桁強力である。このように短パルスでコヒーレントな光を生成する超高輝度光源が実現すれば、様々な物質における機能発現メカニズムを原子レベルで解明することが可能になり、環境問題、エネルギー問題、食糧問題、健康問題などの諸問題の解決や、人類の生活の質 (quality of life) の向上に大いに貢献するであろうと考えられる。LCLSでは最初に行う研究として、以下の5つの分野が挙げられている。原子物理 (Atomic Physics)、フェムト秒化学 (Femtochemistry)、ナノ領域におけるダイナミクス研究 (Nanoscale Dynamics in Condensed Matter Physics)、単粒子及び生体分子の構造研究 (Structural Studies on Single Particles and Biomolecules)、プラズマ及びウォームデンスマター (Plasma and Warm Dense Matter)。これらについて、計画されている研究の例が示された。

FELセッションの最後に、FELが開くサイエンスの未来について、ディスカッションが行われた。パネリストとして、石川哲也氏が現在SCSSを使った研究計画を紹介した。XFELのキーワードは「ナノ (メートル) の世界をフェムト (秒) で見る」ということであり、超高輝度、コヒーレント性、短パルス性を兼ね備えたXFELを使った新しい利用研究の提案について説明し、出席者の意見を求めた。現在の利用研究として考えられている例は、ライ

フサイエンス分野では一分子構造解析や分子動態解析、ナノテクノロジー・材料分野では超短パルスX線による機能を担う電子の動きの直接観測、超強光子場による分子解離の実時間観測、およびX線天文学分野の光電離プラズマや放射圧による重イオン加速の実証などが紹介された。参加者からのコメントとしては、基本繰り返し周波数が60 Hz というのは使いづらいため、ARC-EN-CIELのように最大10 kHz程度まで変化させることができるようにすべきという意見や、強度の安定性の向上を求める意見が出された。

2.3 次世代リング型放射光源が目指すべきサイエンス

2日目 (8月9日) は、Session 3として、将来XFELと二極化になるであろう次世代リング型放射光源が目指すべきサイエンスについて議論を行った。最初に、田中均氏 (JASRI, 図9) によって「既存リング型光源の限界と次世代光源に求めるもの」というタイトルで既存第3世代光源の特徴のおさらいと今後の第3世代光源の限界を考慮した次世代リング型光源の性能の目標値を以下のように設定した。

第3世代光源の特徴：

高輝度、広帯域、準単色から白色のスペクトル、パルス特性、偏光特性の選択性と可変性、安定性

次世代光源に求められる性能：

平均輝度： $10^{22} \sim 10^{23}$ ph/sec/0.1%b.w./mm²/mrad²
 二次元回折限界X線の実現→横エミッタンスが数10 pm rad

ビームパンチ長：～100 fsec

ビーム周回安定性： $\leq 1 \mu\text{m}$

周回ビームエネルギー安定性： 10^{-5}

これらの性能は、既存光源の延長線上に位置するものであり、XFELのように既存のリング型光源からかけ離れたものではないことが強調された (図10)。

次に、エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery

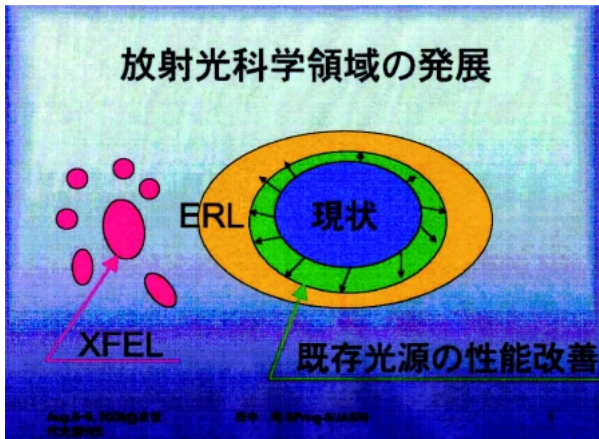


図10 既存光源から見たXFELとERLの位置づけ。(この図はワークショップで出されたもの(吉田啓晃氏の寄稿文参照)から、田中均氏と小杉信博氏との議論によってマイナーチェンジされたものである。)



図11 羽島良一氏(原研 FEL)

Linac; ERL) を研究している羽島良一氏(原研, 図11)が「リング型光源としての ERL の可能性」について議論した。ERL 光源の特徴は、

- フェムト秒 X 線パルスを自在の繰り返し周波数で生成
- 硬 X 線領域で回折限界の低エミッタンス, その結果として, 高いコヒーレンス, ナノメートルサイズへの集光
- 高いフラックス
- 超伝導加速器技術を最大限に利用した高い安定性(極めて良好な空間, 時間精度)

であり, 現在では, これらの特徴を生かした利用の展開が議論されている。また, ERL 光源が実現した後のアップグレードの方向性は, 電子源の更新による低エミッタンス化, 大電流化, SASE-FEL の併設, アト秒 X 線パルスの生成などである。また, ERL は第 3 世代光源で培われた経験と実績を発展できるだけでなく, 新しい展開が望め



図12 坂中章悟氏(KEK-PF)

ることが示された。

光源側の最後として坂中章悟氏(KEK-PF, 図12)が「次世代リング型および ERL 光源の可能性」というタイトルでスーパーストレージリング(SSR)と ERL の違いについて議論した。SSR でもある程度は低エミッタンス化でき, またクラブ空洞やレーザースライスなどを用いることで 1 psec を切るような超短パルスも可能になることを示した。また, KEK-PF で計画している ERL 光源についても言及した。そこでは, 超伝導リニアックを用いてビームの加速およびエネルギー回収を行い, ビーム周回部に多数(20~30本)のアンジュレータが設置可能であることを示した。現在考えられている ERL では, 10 keV 程度の X 線領域ではほぼ回折限界に近いビームエミッタンスを実現することが目標であり, 発生する放射光は高い平均輝度および高い空間コヒーレンスを持つ。また, パンチ圧縮を行うことで 100~数百 fsec の超短パルス光の発生が可能である。また, ベースとなる超伝導リニアックは FEL 用リニアックと共通性の高い加速器であり, オプションとして FEL 光を発生できる可能性もあることが説明された。

休憩を挟んで, 利用側からの次世代光源への要望が議論された。

まず, 島田賢也氏(広島大, 図13)が「固体光電子分光の現状と将来展望」を議論した。現在の固体光電子分光は 10 年前に比べて 1 桁以上エネルギー分解能が向上したが, それでもまだ超伝導ギャップなどの詳細な物性を議論するのは難しい状態にある。そのためには, 現在より 1 桁程度よい分解能が実現できることが目標である。また, スピン分解光電子分光でも高いエネルギー分解能でかつ高いフラックスが必要であることが示された。

次に, 澤博氏(KEK-PF, 図14)が「構造物性の現状と将来展望」を議論した。放射光を使った構造解析では, 軽い元素など電子顕微鏡では見えない構造が観測されるため, 重要であることを示した上で, 今後は, 可干渉性・時



図13 島田賢也氏 (HiSOR)



図15 若槻壮市氏 (KEK-PF)



図14 澤博氏 (KEK-PF)



図16 繁政英治氏 (UVSOR)

間領域・マイクロビームの複数の分野を組み合わせることが重要であることをコメントした。その上で、以下の分野の今後の重要性を示した。

1. 放射光を用いた精密構造解析と電荷密度解析
2. 共鳴散乱を含む散乱実験による物性研究
3. 共鳴散乱を利用した軌道秩序の研究
4. 共鳴散乱を利用したポンプ・プローブ実験
5. 多重極限下での構造物性
6. 外場による相転移と電子状態のその場観察
7. 表面・界面および制限された空間での電子自由度秩序の研究
8. Smart Materials の機能と構造
9. ナノ構造を有する磁性体の磁気構造や励起状態の研究
10. スペックルを用いた表面・界面磁性の状態と外場応答の研究

これらの研究を進める上で、従来の手法をさらに発展させたリング型光源と XFEL が重要であることを示した。

若槻壮市氏 (KEK-PF, 図15) は、「放射光を利用した構造生物学研究の将来」について議論を行った。この分野は、現在でも平行性が高くエネルギー可変の高輝度ビーム

の実現だけでなく、回折計、検出器、計算機、解析ソフト、それらを統合するソフトウェア、ならびに試料調製の全てにわたって高度化を推し進めた結果、生命の仕組みを理解する上で高分解能のタンパク質構造が必須であるという生命科学研究のパラダイムシフトを引き起こしている。また、膜タンパク質、ウイルスタンパク質等、困難な対象に特化した放射光を用いた構造プロテオミクスプロジェクトが複数スタートしている。このような研究の将来として、ビームサイズを現在の $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ から $0.1 \times 0.1 \mu\text{m}^2$ へ、輝度を 10^{20} ph/sec/mm²/mrad² から $10^{22} \sim 10^{23}$ ph/sec/mm²/mrad² へあげることにより、より詳細な構造解析が実現でき、生命科学・医学研究へのインパクトが高いことが示された。

繁政英治氏 (UVSOR, 図16) は、「原子分子分光の現状と将来展望」について論じた。原子分子分光では高エネルギー分解能分光が必須であるが、短パルス化と高エネルギー分解能化は相反する要請であり(不確定性原理により、1 fsec ではエネルギー分解能 0.658 eV 以下にはならない)、軟 X 線分子分光の観点からは極短パルスは不要である。強度と分解能の高いレベルでの両立を求める原子分子



図17 籠島靖氏 (兵庫県立大)



図18 高田昌樹氏 (JASRI)

の分光実験には、むしろ数100 psec 程度のパルス幅、0.5 usec 以上の時間間隔の単色光が高いフラックスで得られた方が都合がよいことが議論された。この性能は、次世代リング型光源で十分に達成可能であることが示された。

利用研究の最後に、籠島靖氏 (兵庫県立大, 図17) が「X線イメージングの現状と将来展望」を議論した。現在の軟X線・硬X線顕微鏡の最高空間分解能はそれぞれ15 nm, 25 nm に達しており、特に硬X線顕微鏡の空間分解能の進歩は著しい。この空間分解能を決めているのは光学素子の精度であり、近い将来、電子ビーム描画法における加工限界と言われている10 nm まで達すると考えられる。しかしながら、コヒーレンスに関しては SPring-8 のアンジュレータでさえも10 keV のX線でのコヒーレントフラックスの割合は0.1%に満たない程度であり、将来発展するであろうサブナノメートルレベルの三次元観察でも、ERL や XFEL 光源の将来計画は重要であることが示された。

2.4 総合討論一次世代光源として要求すべき性能—

最後に全体をまとめる上で、高田昌樹氏 (JASRI, 図18) の司会により、「次世代光源として要求すべき性能」という表題で総合討論を行った。まずは、未来における放射光科学の領域ということで、昨年の若手ワークショップで示された、サイエンス全体に対する放射光科学の広がりや端的に示す放射光科学の未来像の概念図 (図19) が再度示された。また、放射光の特性 (時間、コヒーレンス、エミッタンス、エネルギー) の現状と将来についてのまとめが示された。

次世代光源の役割、位置づけとして、既存光源、XFEL および次世代リング型光源の性能と位置づけが以下のように示された。

既存光源：高輝度、高エネルギー、時間分解 (ピコ秒) の限界に迫る利用を推進すべき。光源性能は、かなりの部分まで到達。レンズ、検出器等の要素技術開発により、そ

未来像における放射光科学の領域

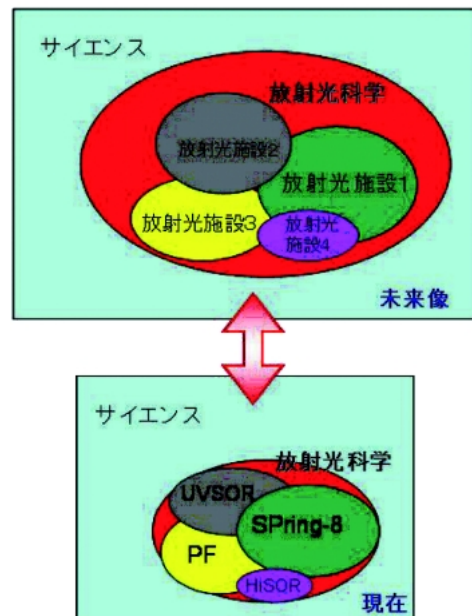


図19 放射光科学の未来像

の性能を使い尽くす必要あり。基盤的利用の拡大の余地があり、XFEL、次世代光源の利用の展開にも必須。

XFEL：既存光源から性能飛躍した光源。コヒーレンス・時間分解 (フェムト秒)・強光子場により、先端的利用というよりも、**新規放射光科学の展開**。例えば、ワンショットで全てのデータを取得する必要がある非可逆課程の現象、完全コヒーレント光を必要とする研究、励起光としての特徴ある物理現象の解明など。よって、ユーザー層の大半は従来の放射光利用者とは異なり、レーザー科学の分野も巻き込んだ先端的利用者層となる。

次世代光源：既存光源 SPring-8, PF と XFEL のカバーできないサイエンスをプローブ光源として目指す。XFEL の開く新規科学技術分野につながる研究分野へ基



図20 河田洋氏 (KEK-PF)



図22 加藤政博氏 (UVSOR)



図21 木下豊彦氏 (JASRI)

盤性を持たせて展開していくのも一つの役割となる。よって、SPring-8, PF等の高度化計画の様なものではなく、**ERL**の様な新しいコンセプトを持ち、**XFEL**に準ずる品質の飛躍的向上(短光パルス性, コヒーレンス性)と**XFEL**にはない基盤性を兼ね備えた光源性能が必要不可欠。XFELの開拓したユーザー層を飛躍的にサイエンス全般に広げる可能性を持っている。これらの性能が端的に示された概念図が田中均氏により示された(図10)。

利用側から見た次世代光源の必要性について、HXとSXの分野から河田洋氏(KEK-PF, 図20)と木下豊彦氏(JASRI, 図21)がそれぞれの分野から見た次世代光源像、加藤政博氏(UVSOR, 図22)が次世代光源に向けてUVSORが取り組んでいる現状について議論した。

まず、河田氏は、世界の次世代光源の状況として、Cornell ERLとSCLS XFELの光源性能を紹介し、ERLの平均輝度はXFELと同じ $10^{22} \sim 10^{24}$ ph/s/0.1% b.w./mm²/mrad²であり、エミッタンスが約10 pmrad、パンチ幅が0.1~1 psec、コヒーレントフラックスも既存放射光源に比べ $10^2 \sim 10^3$ 倍高い。この性能によって、これまで観測が難しかった高速現象や非平衡状態の解明に役立ること

ができることを示した。このような先端的放射光利用研究をデイリーツールとして使うことで、光誘起相転移現象の解明などにつながることを示した。このようなERL光源は、SPring-8の高度化では実現が不可能であり、かつ、XFELの完全コヒーレンス性や高いピーク輝度を利用した先端研究の中間に位置するものであり、現時点での先端的と考えられている時間領域研究、空間コヒーレンス性、ナノビームの可能性を有するERL光源が物質科学研究を担っていくためには必要不可欠であると結論付けた。

木下氏は、まず、SX光源の国内の現状を紹介し、国内には高輝度VUV-SX光源の本格的なものは存在しないことを示した。第3世代並みのビームラインとしては、SX領域としてはSPring-8に4本、PFに2本(1本は建設予定)、VUV領域では第3世代より一桁以上輝度が落ちるものの、高い性能のビームラインはHISORに1本、UVSORでは現在建設中であることを示した。また、エネルギー軸、空間軸、時間軸のうち、国内ではエネルギー軸のみ発展してきたが、諸外国の第3世代光源では、顕微鏡を使って高い空間分解能や時間分解能を備えた研究が発展してきており、国内の研究の発展が遅れている。また、現時点でビームラインの絶対数が不足しているため、競争率が4倍を越えている実態があり、次世代の研究者を育てることが難しく深刻な状況になっていることを紹介した。そういった状況で、現在の光源で可能な研究および次世代光源で実現可能な研究についてふれ、VUV-SX計画の早期実現が図られないのであれば、現在使用されていないSPring-8の10本程度のビームラインの有効利用が図られるべきであることを示した。また、VUV-SX領域では、分解能10,000と1 psec(あるいは、1 meVと1 psec)がトレードオフになることを考慮しつつ計画を立てる必要があることを示した。その上で、次世代光源としてはSPring-8のスペックとオーバーラップが大きければ、放射光コミュニティ以外からのサポートは受けにくいので、VUV-SXに重点をおいた計画や、feasibilityでの勝算があれば、ERLをSX領域の次世代光源と位置づける必要

があるとした。

加藤氏は、UVSOR の取り組んでいる次世代光源化について示した。UVSOR は2003年に高度化され1 GeV以下のリングとしては世界最高のエミッタンスが実現した。現在は更なる次世代化としてアンジュレタラインの強化、フルエネルギー入射とトップアップ運転、新しい光源開発を実施している。特に光源開発では、次世代光源の性能の1つである短パルス化の1つの方法として、レーザーバンチスライス法による極短放射光パルスの生成およびコヒーレント高調波、コヒーレントテラヘルツ光の発生に取り組んでいることを紹介した。これらの要素技術開発の基本は、UVSORのような小さい施設が実施するものではなく、大きなマシングループを抱えるPFやSPring-8で実施するものであることを強調した。

以上のような光源の位置づけの基づき、既存性能に比較した次世代光源に求める性能が以下のようにまとめられた。

平均輝度： 10^{22} – 10^{24} ph/s/0.1%b.w./mm²/mrad²@1~

10 keV (微小試料, 局所電子構造, 状態解明)

コヒーレントフラクシオン：10~20以上@10 keV (スペckル, 非結晶物質構造解析)

(現在のSPring-8では~0.2%程度)

エミッタンス：~10 pmrad~ $\lambda/4\pi$ @10 keV (X線領域でコヒーレント光)

~100 pmrad~ $\lambda/4\pi$ @1 keV (SX線領域でコヒーレント光)

短光パルス：~100 fsを実現, 全てのポートで数ピコ秒以下 (時間領域測定)

繰り返し周波数：通常運転1 MHz以上 (DC的な光現としても近似できる)

また、XFELとの住み分けの観点から見た場合、次世代光源特性は以下のように明確化された。

X-FEL：非常に高いピーク輝度→ワンショットで微小試料, 微小領域, 短時間領域の測定終了。(繰り返し実験の場合には試料のクーロン爆発への対応が必要)。非可逆課程の解明。励起光としての利用研究。

時間コヒーレンスまでのレーザー光→新しい非線型現象の解明

次世代光源：従来の試料環境技術を容易に利用できる。(クーロン爆発を起すようなピーク輝度はない。しかし平均輝度は高い)

→繰り返し測定を基本とした従来の放射光実験の中に、コヒーレント性, 短パルス性という先端性をも兼ね備えた実験環境を多くのNeedsに同時に答える。

UVSX：High brilliance+ α の特性

また、次世代光源が開くサイエンスについて、次のようなものがあることが示された。

生命科学>

○生体高分子超複合体や膜タンパク質のナノ結晶構造解

析による構造生物学の新展開 (真の医学応用へ)

○高分解能小角・中角散乱によるポリマー高分子の階層構造の形成・消滅のダイナミクスを含めた完全理解。

物質科学>

○光誘起現象の徹底解明 (高速通信素子開発へ)

○相転移現象のダイナミクス, 揺らぎ (スペckル測定をベースにしたX線光子相関分光)

○表面・界面における軌道・電荷秩序の害場応答 (新しい機能物質創生)

○高分解能RIXSによる電子励起のバンド分散

○微量試料 [ナノマテリアル] の電子密度分布測定による機能解明

○コヒーレント軟X線共鳴散乱スペckルによる磁気秩序の形成過程の解明

時間領域測定による新たな展開>

○強光子場中の分子ダイナミクス

○ナノ磁性体のスピンドイナミクス (スピントロニクスへの応用)

○光誘起水分解触媒反応のダイナミクス (環境触媒, 電池材料開発)

○溶液中反応ダイナミクス

○光反応性タンパク質の構造ダイナミクス→電子移動の観測へ (タンパク質の機能の直接的解明)

○非晶質物質の高時空分解能動画イメージング

○……・•• etc.

その他, 全ての現在行われている放射光利用研究において微小領域化・高エネルギー分解能化が進行するであろうと考えられる。

以上の議論を踏まえて, 最終的に次世代リング型光源は必要か? という問いに, 参加者全員一致でYesであるという結論に達した。それに加えて, XFELが建設され利用が始まった場合, 放射光科学に生じる空白を埋めるリング型光源の要請がサイエンスコミュニティから出てくるのは自明である。そのために, 放射光科学分野の研究者や学会の責任は重大であることが確認された。

3. まとめ

以上をまとめると, 本ワークショップの結論は以下のようになる。

放射光学会として, XFELおよびERLを次世代光源に位置づける。

XFELは, ピーク輝度・コヒーレンス等の特性において既存光源から性能飛躍した光源として新領域を開拓する可能性を持っており, 本ワークショップではその推進を支持する。XFELは, 現在提案されているSASEからseed-ing, さらにsuper-seedingやミニポールアンジュレータ等の先進的なアイディアの導入により, コヒーレンスがー

層高かつ安定な光源へと発展していく可能性があり、その開発研究は重要である。

他方、次世代リング型光源である ERL は、高い平均輝度、サブピコ秒パルスが可能な回折限界光源として、XFEL ではカバーできない大部分の放射光分野を一層発展させ、多くのユーザーが同時に利用可能な光源として重要な位置づけである。

上記 2 つの次世代光源の役割は相補的である。なお、既存光源でも要素開発が進むことにより実現可能な研究もあり、まず既存光源を有効利用することは必要である。しかしながら、10年後の放射光科学を考えた場合、次世代光源である XFEL と ERL は必須であり、放射光コミュニ

ティが中心となってこれらの光源の実現を要求していきたい。

謝辞

本ワークショップを開催するにあたり、自然科学研究機構 分子科学研究所 極端紫外光研究施設の共催および JST ERATO 腰原 非平衡ダイナミクスプロジェクトと JST CREST 高田 X線ピンポイント構造計測プロジェクトからの後援をうけたことに感謝します。また、会の運営にあたり放射光学会事務局および極端紫外光研究施設スタッフには、多大なご協力をいただき感謝いたします。

参加者の寄稿文

次世代光源計画ワークショップに参加して

齋藤 彰 (大阪大学大学院, 理研播磨研究所, ICORP (JST))

会の趣旨は、革命期にある次世代光源によって行われる10年後のサイエンスについて、若手を主とした研究者が集まり議論することであった。内容は、異なるタイプの次世代光源の現状、米欧の動向にはじまり、各利用分野(光電子分光, 構造物性, 構造生物, 原子分子分光, イメージング)の総括がおこなわれ、活発な討論がなされた。4, 5月に東大で行われたシンポジウムも含め、毎回違った角度で議論が展開され、この話題の熱さを感じる。ここでは筆者の視点に限られてはしまうが利用側の立場から記させていただきます。

大切な前提は、光源のスペックである。特に実現をひかえた SASE-FEL の「フェムト秒パルス, 桁違いのピーク輝度, 空間のフルコヒーレンスとボース縮重度」は、言うはやさしいが正確なイメージを体得するのは従来の光源に慣れた身には意外と難しい。ナノ領域がフェムト秒で観察できる世界への期待は当然ながら大きく、「フェムト秒化学」や「ナノ領域ダイナミクス」は国内外を問わず謳われている。この点は、今はさまざまな期待の段階からより具体的な提案へのフェーズ移行期と感じられた。

他方、筆者の関わる分野(構造物性とイメージング)を含めて高い関心を引く議論は、結晶性のないナノ構造の決定である。そこで鍵になるのは近年のコヒーレント X 線散乱ナノスコープであり、将来、成果のかなりの部分がこの仕事に依拠すると見える。実際、長年にわたる周期性の拘束から離陸し、しかも1分子構造決定となればインパクトは大きい。決して過大な喩えではなく、考えやすいノーベル賞の例でいえば、位相情報を獲得する J. Miao 氏の仕事は D. Gabor (物理学) のそれかといえ、位相の記録ではなく回復だからむしろ Karle 夫妻, H. A. Hauptman (化学) の系譜であろう。しかし、見方を変えて構造モデルへの X 線による貢献という点では、M. Wilkins (生理・医学) 以後という考え方もできる(かように全分野にわたるほど、意義は大きい)。ならば、次なる Watson & Crick や、前夜の E. Chargaff 等も歴史は準備していよう。生物分野に限らず、彼らは今すでに、近くにいるはずである。もっとも科学の事例は個々に異なるし、そもそも昨今のプロジェクト研究や学際研究に代表されるように、昔の科学とは体制がちがう、という人もある。しかし最高峰の評価基準は100年以上変わっていないし、変わるそぶりもない。モノサシが不変である以上、そのまま考えると、ここで利用者として自戒し避けねばならないのは、せっかくの光源も Collaboration に長けた米欧のグループが押しよせ、歴史的な仕事は外国ユーザー、という結末である。お前が偉そうに大きなお世話で、偉い先生にまかせておけ、と言われるかもしれない。が、本会の目的に銘打たれた若手(どこまでがそう定義されるのだろうか)の責任は大きい。

1つの方向として、「やるべきこと」のビジョンが比較的鮮明な対象はまだよいかもしれない。プロジェクト型の

進行で問題点を洗い出し、グループ、分担、責任を決められるからである。たとえば最有力の期待を担う1分子構造決定ならば、今回話題に上ったように、ビーム上に Drip された分子のオリエンテーション任意性の問題があり、ハンドリングや検出器の問題もある。それらに早々に対処する必要があるかもしれない。

他方、まだ見えていないテーマの開拓は、予測不能だけに一見、やりようがない。しかし今の状況は、X 線管の時代に放射光が出現したころのギャップに匹敵するとなると、手をこまねくことはできない。こちらは全く異なるアプローチであろう。現ユーザーによる新規提案はもちろんだが、外へ目を向けると、筆者のつたない経験から見てさえ、放射光に接していない人々は意外なほどに多い。放射光を知る個々のユーザーから外への働きかけ、強いコンタクト、瞬発力を伴った Collaboration も有益と思う。若手にとって、動き方によってはいろいろ危険も伴うが、新しいテーマについては自然発生説や漸進進化説には首肯できない。

ところで、筆者は SCSS を用いたいくつかの漠たる腹案もあって本会に臨んだが、一部は結果的に難しいことがわかった。条件が、ある特性に適さなかったからである。それもある意味で筆者にとっては今回の成果であった。たしかに高スペックへの幻想は禁物で、性能が高いほどそれを生かすには慎重な検討が必要と感じた。

考えてみると、表面科学の世界では「周期性のない」系が「Å オーダー」で「実空間で」20年以上前から見られている(SPMの出現による)。最近では「原子分解能のリアルタイム動画」も報告され(たとえば低温での相転移)、AFMでは「Living Cell」も見える。「なぞるだけ」の道具立てが、限られた世界とはいえ知見を一変させてしまった。それらのインパクトを考えれば、X 線 FEL の背負うものは大きい。他方、上記の表面プローブならば、細胞膜や核膜孔を介した蛋白輸送などを見るには向いていそうだが、原子分解能をもつ SPM でも、細胞の多様な機能となると簡単にはわからない。これは「多様な機能がわかるほどの構造をちゃんと見るには、いろいろ困難なステップがある」ということであろう。そしてそれは、おそらく X 線 FEL でも共通であろう。

SASE-FEL の利用開始は今日明日ではないが、すぐに月日は経つ。そもそもプロトタイプの実験はもう目前である。波長の関係で化学反応の分野が先行する由、とはいえ波長は違えど光と物質の相互作用の知見から、いわゆる Henderson Limit に関するヒントなども得られるかもしれないし、目が離せない。しかもこの光源には、Seeding の工夫とミニポールアンジュレータによる、さらに先の流れがある。小型化と低価格化による普及型 X 線 FEL につながる未来への準備を、1ユーザーとしても肝に銘じてゆきたい。

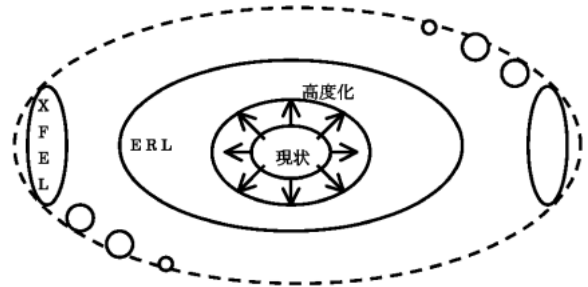
「次世代」って？

吉田啓晃（広島大学）

8月8日～9日に岡崎コンファレンスセンターで開催された「次世代光源計画ワークショップ」に参加したので、その際に感じたことを率直に述べる。

次世代光源と言えばもちろん「次」の「世代」の光源であるが、では「世代」とは一体どれくらいの期間を指すのだろうか？ 手近な辞典で調べてみる。「こどもが成長して、親の仕事を引き継ぐまでの期間。30年を1世代または1代と数える。」（新世紀ビジュアル大辞典（学習研究社））英語の「generation」の和訳でも「1世代の出生から次の世代の出生までの期間；約30年」（新コンサイス英和辞典（三省堂））とある。だいたい30年と考えれば良さそうである。研究者の「世代」というものが定義出来るならば、30歳前後で学位を取って一人前になってから60歳で定年退官を迎えるまでのやはり30年である。昨年のはほぼ同時期に開催された若手を中心としたワークショップ「今後30年の科学の未来像—放射光の役割—」では30～40歳代の研究者を中心に活発な討論が行われた。（詳細は「放射光 Vol. 17(5) 257 (2004).」を参照）「人」に関しては世代は30年でいいようだが「装置」はさすがに30年は持たない…。今回は30年後といった長期スパンのことではなく、今後10年以内の近未来についての放射光施設及び放射光科学の具体的な方向性を位置付ける意味合いを持って開催された。最近明らかになった「今後10年以内に重点的に開発に取り組む国家基幹技術10項目」に「次世代放射光源」が挙げられたことに端を発して放射光学会内に設置された「次世代光源検討特別委員会」で検討された事項について、学会全体でのコンセンサスを得る最初の段階として位置付けられると思われる。その特別委員会の中間報告書には「放射光学会としての基本的な考え方」として以下のように記されている。「放射光コミュニティが望む次世代光源は、従来から検討を行ってきた先端的基盤整備としての光源計画と、未踏技術としての究極を目指す光源計画という二つの相補的なコンセプトを矛盾なく実現するものでなければならない。」今回のワークショップもこの趣旨に基づいて、初日はXFEL、2日目は次世代リング型光源についての現状とそれらを用いて目指すべきサイエンスについての講演と議論が行われた。講師の先生方の講演はいずれも明快で論点や問題点を分かり易く整理して説明して下さったので、加速器に関しては素人同然の筆者にも容易に理解することができた。その詳細は報告書本体の方にまとめられていると思われるのでここでは触れない。「初めに結論ありき」で、端的に言うところ「次世代放射光源としてXFELだけでなく相補的な次世代リング型光源（ERL）も学会として推します」という並列型のものである。ここでは「次世代」という言葉を2度使っている。たしかに放射光の知識を持っている研究者から

すればERLは既存の蓄積リングとは異なる次世代リングであることは容易に理解出来るが、文部科学省の「次世代光源として一体どちらが必要なのだ？」という問いかけの答えにはならないような気がする。第3世代の「次」世代を第4世代とするならば、X線領域での非カオス光源であるXFELの方が妥当であり、ERLは既存の第3世代光源と第4世代光源との橋渡しとなる3.5世代光源として明確に位置付けた方がERL計画の早期実現の必要性を主張する上でも得策のような気がするのは筆者だけだろうか？ 総合討論の最後の方に「まとめ」として示された下記のような図がそれを実にうまく表現していると思う。



話しは変わるが、今回のワークショップで最も印象に残ったのは、佐々木泰三先生がドイツのFEL計画の啓蒙活動について話されたことである。こういった大規模計画を実現していくためにはそれに携わる研究者だけでなく資金（税金！）の担い手である一般市民の理解も必要であるし、また装置が完成した後（数年後？）の実際のユーザーとなるはずの現在の大学院生や、そのときに大学生として実験を行うであろう現在の中学生や高校生への啓蒙活動の重要性も忘れてはならない。振り返ってみると放射光学会は設立以来15年を過ぎて、冒頭の「世代」の定義からするとその半分を終えたことになる。学会設立当時は比較的若い人が多かったが、現在ではその当時のメンバーがみな15歳老けてしまっているような状況に近い気がする。物理学会や化学会のような大きな学会とは違って分野を特定した比較的小規模の学会では「若手の会」などを作って大学の枠を超えた大学院生同士の横の連携を作るとともに、学会の講演よりもっと分かり易く長時間に渡る講義を通して主に大学院生への啓蒙活動に力を入れている。近年ではSPring-8が独自に「夏の学校」を開催してそのような取り組みを行っているが、特定の施設に依存せずに放射光学会としても「次の世代」の放射光科学の研究者を育成していく方策を早急に立てないと、15年後には立派な装置があってもそこには人がいない……な～んてことにならないように！